

電子科学研究

第 4 卷
平成 8 年

北海道大学電子科学研究所

Research Institute for
Electronic Science
Hokkaido University

1996 (Vol.4)

研究所の発展

朝倉利光

電子科学研究所研究発表会は、応用電気研究所時代に46回実行されており、平成8年11月に行われた電子科学研究所発表会は第4回目にあたり、したがって通算50回目の記念すべき節目を迎えた。正に研究発表会は、本研究所の発展と共にあり、かつ研究所における伝統ある学術発表の行事として確立されてきた。

この50回目の研究発表会を記念して、本研究所の発展を社会環境の変遷の中で振り返ってみよう。本研究所は、太平洋戦争の真っ最中の昭和18年に「超短波に関する学理及びその応用」を研究することを目的とした超短波研究所として誕生した。太平洋戦争は科学技術の重要性が役目を担っただけに、戦争中は科学技術が特権的に優遇された。したがって、科学技術の大幅な発展が期待された優遇措置の世界の中で本研究所は発足した。しかし、発足から2年余で日本敗戦となり、戦争中に重要な任務を背負ってきた科学技術は大きな方向転換を余儀なくされた。占領下の科学政策により、多くの大学附置研究所が改組させられ、本研究所も戦後の昭和21年に民生安定、産業復興の社会的要請のもとに、電気工学、理化学及び生物・医学の境界領域での「電気の応用に関する総合研究」を行うことを目的とする応用電気研究所に転換した。

占領政策の影響下にあった日本の科学技術は、昭和25年に勃発した朝鮮戦争、昭和26年に結ばれた講和条約などを契機にして戦後時代を脱出した。占領下の科学技術政策から始まり、日本は将来の行く道として科学技術の振興によりどころを見つけ始めていた。そして昭和30年から45年頃にかけて、日本は産業の発展を基礎として社会全体が高度成長をなしとげた。この期間に、大学における理工系ブームや産業の中央研究所ブームが起きると共に、社会では家庭電化を中心に生活革命が生じた。さらに、昭和45年から55年にかけては大学紛争、公害問題、オイルショックなどがあり、科学技術優先主義が曲がり角にきたが、総体的には科学技術は緩やかな発展を続けた。上記の期間に、本研究所は大発展期を迎え、新しい部門が増設され、最終的には15研究部門と1研究施設を有するまでに拡充整備された。それに加えレーザーなどの先端技術を積極的に導入し、研究分野も電気・電子工学、理化学のみならず生体工学、光科学などの先端的・学際的分野に拡大し、特に境界領域の研究に力が注がれてきた。正に本研究所の大きな発展は高度成長期の遺産として生まれてきた。

上記期間の日本の科学技術の発展は目覚ましく、その結果として日本の科学技術は世界の最先端に立つようになり、正に科学技術立国となった。しかし、この期間の発展の基幹はアメリカやヨーロッパの先進諸国からの技術導入によって行われたもので、我が国独自の科学技術ではなかった。また、この技術導入に対して、米ソ冷戦などが防波堤となり、日本に対する先進国の風当たりがなかったことも、日本の発展に幸いしたと言える。しかし、昭和55年以降になると、日本の科学技術をめぐる国際情勢が大幅に変化してきた。そして、日本の技術導入に対する厳しい監視の目や日本の基礎科学のただ乗り論などの弱点が大きくクローズアップされてきた。その結果、今までの科学技術に対する日本の姿勢に大幅な変革が要求されるようになった。このような時代を迎え、学術研究の動向や社会的要請を踏まえ、21世紀へ向けての研究所のあり方に抜本的な検討の結果、本研究所は平成4年に「電子科学に関する学理及びその応用の研究」を目的とする電子科学研究所に改組転換した。そして、本研究所は独自の研究の展開を模索しながら今日に至っている。

以上のように、本研究所は我が国の科学技術が置かれてきた社会環境の変遷に大きく影響されながら発展してきた。現在、我が国の科学技術は今までに経験したことないほどに厳しい状況にある。特に、我が国では基礎研究と社会対応の研究開発の振興が最重要課題となっている。今後の本研究所の発展は、正にこのような重要課題に対しどこまで独自の研究が展開されるかにかかっているように思われる。

目 次

巻頭言

部門研究紹介（電子計測制御部門）

光システム計測研究分野	3
量子計測研究分野	13
自律調節研究分野	22
適応制御研究分野	33

特定研究報告	43
--------	----

プロジェクト研究報告	55
------------	----

研 究

電子材料物性部門	65
電子機能素子部門	87
電子計測制御部門	102
電子情報処理部門	115
附属電子計測開発施設	128

電子科学研究所公開シンポジウム報告	137
-------------------	-----

レーザースペckル研究の展開

部門研究紹介 (電子計測制御部門)

レーザースペckル研究の展開

光システム計測研究分野 朝倉利光, 魚住純 3

脳は文字をどこで読むのか?

量子計測研究分野 栗城真也, 平田恵啓 13

血管病の局在化におよぼす物理的・流体力学的因子の影響

自律調節研究分野 狩野猛, 和田成生
内貴 猛 22

生体におけるリズム現象の制御とゆらぎに関する研究

適応制御研究分野 河原剛一 33

レーザースペックル研究の展開

光システム計測研究分野 朝倉利光, 魚住純

粗面などのランダムな媒質によってレーザー光が散乱されると、その散乱光中にスペックルと呼ばれるきらきら輝く明暗の斑点模様が観察される。スペックルに関する研究は、スペックルがレーザーを使った結像などにおけるノイズとなることから当初はその除去を目的として始められた。その後、次第にスペックルが物体や光学系に関する情報を運ぶ担い手であることが明らかになるにつれて、レーザーによる光計測や光情報処理を目的とする研究へと展開し、状況に応じて様々な様相を呈するスペックルの性質が明らかにされてきた。ここでは、スペックルの基礎的性質に関する研究の展開を光システム計測研究分野における研究を中心に概説する。

1. はじめに

1.1 スペックル研究の発展

レーザー光のようなコヒーレントな光で、紙や壁などの粗面を照射し、その反射光や透過光を観察した場合、図1(a)に示すようなきらきら輝く明暗の斑点模様を見ることができる。このような斑点模様はスペックルパターンあるいは単にスペックルと呼ばれ、またこのような模様を作る現象はスペックル現象と呼ばれ、レーザーの出現直後からその性質に関する研究が本格的に始められた。

上記の現象はレーザー光が粗物体でランダムに散乱され、各点からの散乱波が観察面の各点で重なり合わさって生じるランダムな干渉現象である。このような光の散乱現象は特に新しいものではなく、古くはNewton^[1]の時代から虹や夕焼けなどの日常生活に見られるいろいろな現象として物理学の領域で観察され研究されてきた。この現象に対する最初の注目すべき研究はExner^[2]によって行われた。彼は水滴や曇った窓ガラスや霜がついた窓ガラス越しに遠くの光源を眺めたとき、図1(b)のような中心部分から外側に延びる放射状繊維構造を観察した。彼はこの観察において、中間に赤色フィルターを入れた場合には、この放射状繊維構造が図1(a)のごとき細かい明暗模様の粒状構造になることを確かめた。von Laue^[2-5]はランダム位相に関するRayleighの理論を使って、最初にこの放射

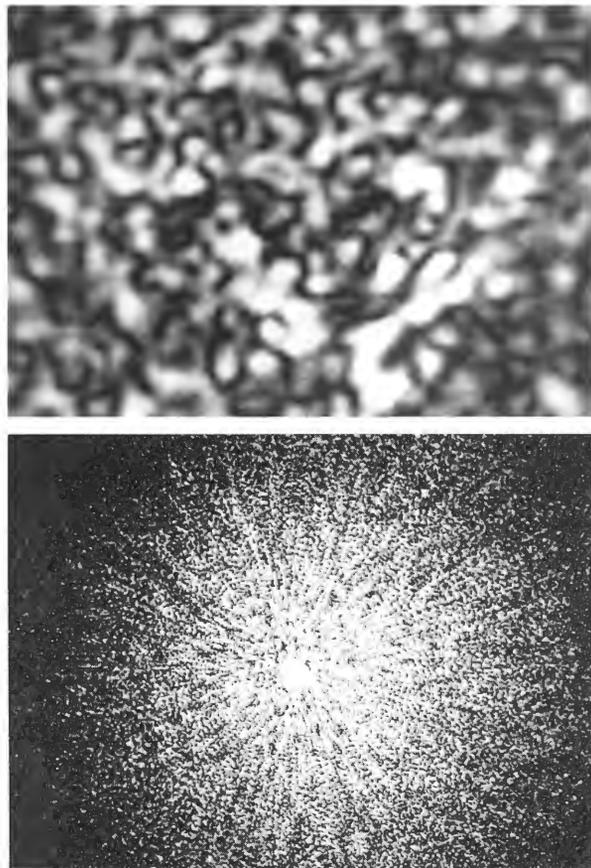


図1 (a)コヒーレント光(単色光)による回折界に生じるスペックルパターン。(b)回折界に生じる多色光スペックルパターン(この放射状繊維構造は実際には色づいて見える)。

状及び粒状構造の理論的考察を行った。彼はアークランプとプリズムを用いた実験を行い、このような現象は古典的な波動光学では説明できないと考えた。しかし、de Haas^[6] はナトリウムランプを、Buchwald^[7] はスペクトル幅を制御した光源と水銀の線スペクトルを用いた実験を行い、単色に近い光源では粒状構造（図1(a)）を、十分に単色でない光源では放射状構造（図1(b)）をとることを確かめた。Raman^[8] も十分に単色な光を用いて明暗の斑点模様を観察すると共に、この現象をランダムに配置された粒子からの回折波の干渉として解釈した。上記の研究からかなり遅れて、Raman^[9] は明暗の斑点模様の強度分布に関する理論的考察を行い、近年のスペックル理論研究の基礎となる部分の研究を行った。

以上のような過去の研究はあったものの、スペックル現象に関する本格的な研究は1960年のレーザーの開発によってもたらされた。すなわち、レーザーの開発によるコヒーレント光の出現によって、スペックル現象は容易に観察され、かつレーザーを使った実験において種々の問題を起した。特に当初は、レーザー光を用いて物体を観察するとき、その像に重畳する明暗模様は観察像において大きな障害となった。そこで、

この明暗の雑音を除去するという目的から、スペックルの性質とその除去法に関する研究が行われた。しかし、1970年頃からようやくスペックル現象そのものの本質的な物理的特性が研究の対象となり、Goodman^[10]、Dainty^[11]、朝倉^[12] らを中心として基礎研究が多く進展し、現在ではスペックルに関する研究は統計光学の中で一大分野を形成するまでになっている。

1.2 スペックルとコヒーレンス

統計光学の中で、スペックル以外の一大分野として光のコヒーレンスに関する研究がある。スペックル現象は光波のランダムな干渉現象であることから、その研究はコヒーレンス理論が基礎になっている。したがって、スペックルとコヒーレンスの間にはさまざまな類似点や相違点があり、特に両者の本質的な違いに注意しなければならない。

まず、光のコヒーレンスを考えてみよう。図2に示すように、自然放射の過程にしたがう熱的光源に対してコヒーレンスを考える。ここで光源を形成する原子や分子は、個々にエネルギー遷移を行い各遷移エネルギーに対応する波長をもって独立に光を放出する。放出された光はそれぞれ非常に短い波連で伝播し、それ

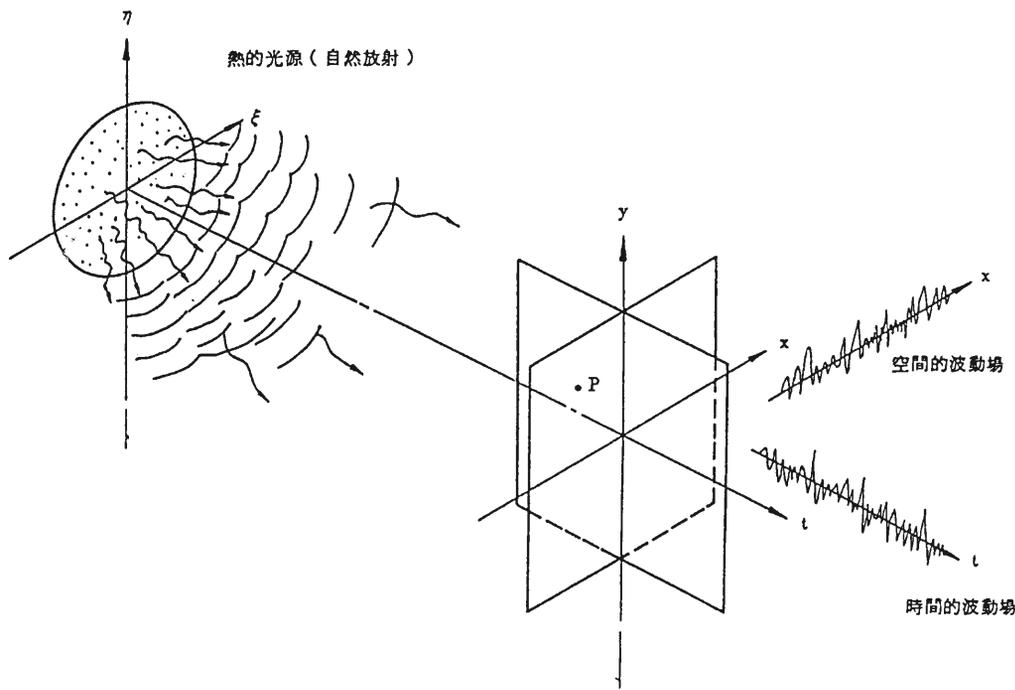


図2 コヒーレンス現象.

らの重ね合わせとして観測場の空間（例えばP点）に光の波動場が形成される。ある時間における空間の各点における光の波動場は、各点での重ね合わせの条件が異なるために各点で異なる空間的にランダムな波動場を形成する。また、各点での波動場は、光源の放射過程から時間と共にランダムに変動する。すなわち、実際に観測される光の波動場は、時空間で変動するランダム現象、すなわちゆらぎ現象となる。この時空間のゆらぎ現象は、光の高い周波数で変動するため、それに追従できる光検出器が存在せず、観測は不可能である。この時空間で変動する光の波動場の統計的特性を、光源との関係で論じるのがコヒーレンスである。

一方スペックル場の場合は、図3に示すように、ある粗物体にコヒーレントな光を照射し、物体から得られる散乱光によって形成される波動場を考える。粗物体上の微小な各凹凸（あるいは散乱体）は、個々独自に光を散乱する。散乱された光は球面波状に伝播し、あらゆる光が観測場の各点（例えばP点）で重なり合う。このとき、粗物体の凹凸に従って散乱される光の位相が異なるため、各点での重ね合わせの状態により波動は強め合ったり弱め合ったりする。この結果として、

明暗の斑点模様が生じスペックルと呼ばれる。このスペックルは、物体が静止していれば静止状態（静的スペックル）となるが、物体が運動すれば運動状態（動的スペックル）をとる。この静的及び動的スペックルは、散乱物体との関係で生じるため観測可能である。このように、スペックル現象に関する研究は、照射される物体との関係で生じる散乱場のランダムな波動場の統計的特性を論じるものである。表1に、スペックルとコヒーレンスの相違点を記す。

以下では、スペックルの基本的特性について述べたのち、近年積極的に行われてきたスペックルに関する基礎的な研究分野について紹介する。

表1 スペックルとコヒーレンスの相違点.

	スペックル現象	コヒーレンス現象
ゆらぎの原因	散乱物体	光源
ゆらぎ	空間的ゆらぎ 時空間的ゆらぎ	時空間的ゆらぎ
観測	可	不可

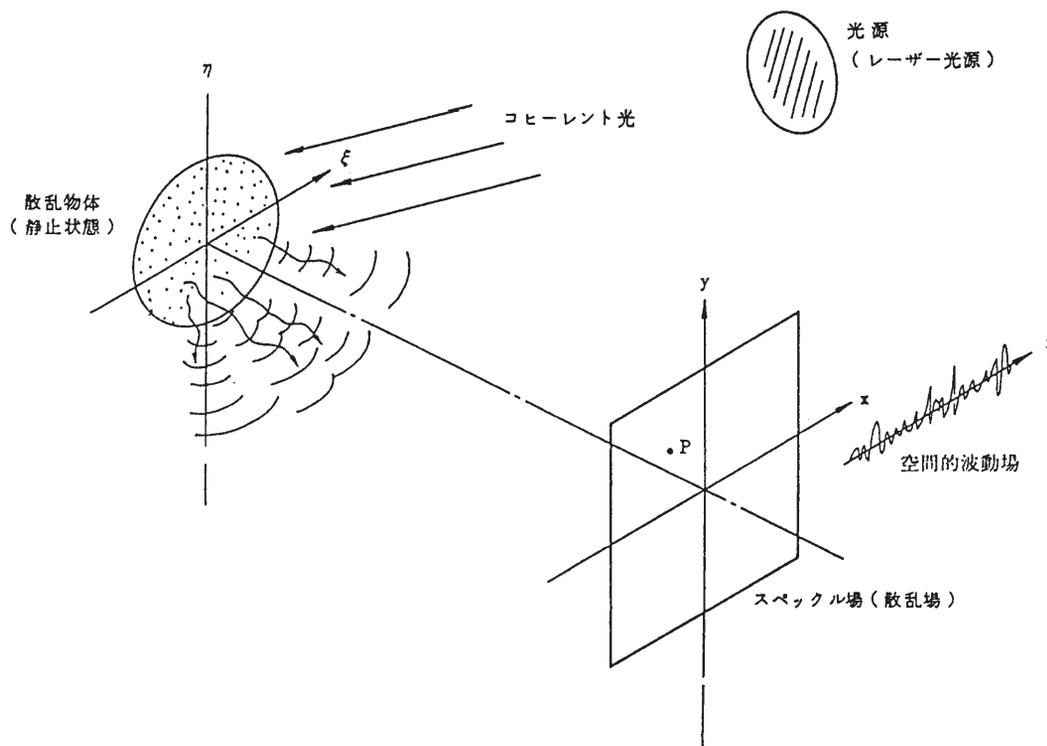


図3 スペックル現象.

2. スペックルの基本的性質

2.1 スペックルの形成

スペックル形成の仕組みを模式的に図4に示す。多くの物体表面は光の波長(約 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$)に比べて十分大きな凹凸をもっている。この粗面にレーザー光を照射すると、観測面上の任意の1点で観測される光の場は、粗面の異なる場所から反射されてきた、たくさんの光波が互いに干渉しあうことによって生じる(図4(a))。これらの光波がもつ位相は、粗面の凹凸の不規則性を反映してランダムであるため、干渉の結果できる光の空間的な強度分布もランダムになる。こうして図1(a)のようなスペックルパターンが形成される。

スペックルは自由空間だけではなく、粗面をレンズで結像した像面にも現れる(図4(b))。多くの場合、結像レンズは粗面の微細な凹凸を解像することができないため、粗面の隣りあった微小散乱領域が像面につくる点像の広がり関数は、ランダムな位相をもって重なりあう。この結果、自由空間と同様、像面にもスペックルが生じる。以上の議論は結像面に限らず、焦点をはずれた面においてもなりたつ。

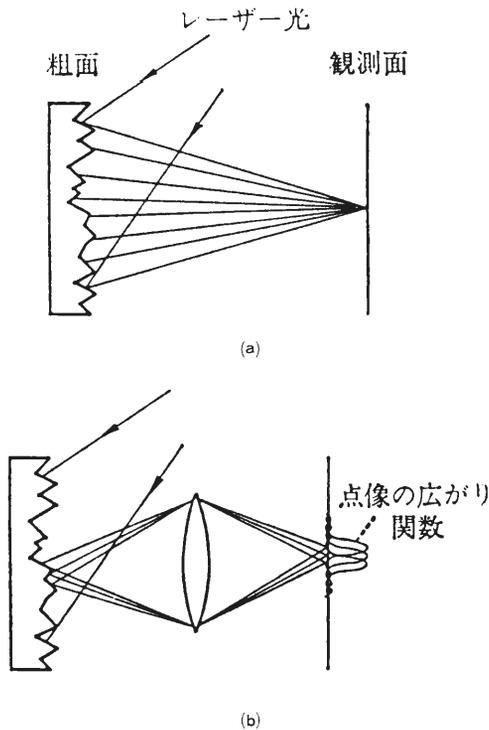


図4 スペックル形成の仕組み。

2.2 スペックルの1次統計

スペックルパターンの強度変動において、ある強度の光がどのくらいの割合で存在するかを調べることは、レーザーを用いた光学システムに現われるスペックルノイズの影響を知るうえで非常に大切である。また、スペックル場の位相分布は、スペックル干渉計において重要な意味をもつ。ここでは、もっとも典型的な場合について、スペックル強度および位相の確率密度関数を求める。

照明光として単色光を用い、ひとつの偏光成分のみを考えると、観測面上の1点 $\mathbf{x}=(x,y)$ における光の複素振幅 A は

$$A(\mathbf{x})=|A(\mathbf{x})|\exp[i\theta(\mathbf{x})] \quad (1)$$

と表わされる。先ほど述べたように、この複素振幅はたくさんの微小散乱領域からの光波が干渉しあった結果として与えられる。すなわち、

$$A(\mathbf{x})=\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(\mathbf{x})=\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \exp(i\phi_k) \quad (2)$$

である。ここで、 $(1/\sqrt{N})a_k(\mathbf{x})$ は各光波の複素振幅、また N は観測点の光に寄与する散乱領域の数である。こうして得られる複素振幅 A の確率密度関数を求めるために、次の3つの条件を仮定する。(i)各光波の振幅と位相、さらには異なる光波どうしの振幅および位相は統計的に独立であること、(ii)各光波の位相は $(-\pi,\pi)$ で一様な確率分布をもつこと、および(iii) $N \gg 1$ であることである。以上の仮定は多くの場合、粗面が波長に比べて十分に粗ければ満たされる。このとき、複素振幅 A の実部 A_r と虚部 A_i の結合確率密度関数には中心極限定理が適用でき、

$$P_{r,i}(A_r, A_i)=\frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{A_r^2+A_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

となる。ただし、 σ は A_r および A_i の標準偏差である。(3)式は、足しあわされる光波の数が多いとき、スペックル場は平均値ゼロの円形複素ガウス統計に従うことを示している。

スペックル強度 I および位相 θ は、 A_r および A_i と

$$I=A_r^2+A_i^2, \quad \theta=\tan^{-1}(A_i/A_r) \quad (4)$$

の関係がある。ランダム変数の変換法則を用いると、最終的に強度の確率密度関数は、

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), \quad (I \geq 0) \quad (5)$$

となり、位相の確率密度関数は、

$$P_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad (-\pi \leq \theta \leq \pi) \quad (6)$$

となる。(5)式より、スペックル強度は負指数分布に従うことがわかる。このことは、スペックルパターンは全体的に暗い部分が多いが、非常に明るい部分も存在していることを示している。さらに、(6)式はスペックルの位相がまったくランダムであることを示している。

スペックル強度の平均 $\langle I \rangle$ および標準偏差 σ_I は、

$$\langle I \rangle = 2\sigma^2, \quad \sigma_I = \langle I \rangle \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 $\langle \dots \rangle$ は同様な統計的性質をもつ粗面の集合平均を表わす。今、スペックルのコントラストを $C = \sigma_I / \langle I \rangle$ で定義すると、(7)式よりこれは1になる。このコントラスト1のスペックルは十分発達したスペックルと呼ばれる。すなわち、このような発達したスペックルの1次統計は粗面に問わず常に同じであるため、粗面の微細構造に関する情報は得られない。このことは逆に、測定物体の微視的構造の違いを無視できることを示しており、計測を行ううえで非常に都合の良い性質であるといえる。

2.3 スペックルの2次統計

スペックルパターンの空間的構造の細かさを調べるためには、スペックル強度分布の自己相関関数を知る必要がある。観測面上の強度分布 $I(\mathbf{x})$ の自己相関関数は、スペックル場に円形複素ガウス統計を仮定すると、

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{x}_1)I(\mathbf{x}_2) \rangle &= \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &+ |\langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_2) \rangle|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。ここで、 $\langle I(\mathbf{x}_1) \rangle = \langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_1) \rangle$ 、 $\langle I(\mathbf{x}_2) \rangle = \langle A^*(\mathbf{x}_2)A(\mathbf{x}_2) \rangle$ である。すなわち、強度の自己相関関数は複素振幅の自己相関関数で完全に記述される。いま、粗面の微小構造が照明領域に比べて十分小さいと仮定すると、

$$\begin{aligned} \langle A^*(\mathbf{x}_1)A(\mathbf{x}_2) \rangle &= \\ &\int \int_{-\infty}^{\infty} E(\mathbf{u})|^2 T^*(\mathbf{u}, \mathbf{x}_1) T(\mathbf{u}, \mathbf{x}_2) d^2\mathbf{u} \end{aligned} \quad (9)$$

がなりたつ。ただし、 $E(\mathbf{u})$ は粗面における照明光の複素振幅分布、 $T(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ は粗面から観測面までの伝播関数あるいはインパルスレスポンス関数、 x は比例係数である。(9)式を(8)式に代入することにより、任意の光学系で生じるスペックルパターンの自己相関関数が計算できる。

具体例として、自由伝播系および結像光学系で観察されるスペックルを考える。伝播関数にフレネル回折近似を適用すると、自由空間におけるスペックルパターンの自己相関関数は、

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{x})I(\mathbf{x}+\mathbf{X}) \rangle &= \langle I \rangle + \left| \iint_{-\infty}^{\infty} E(\mathbf{u})|^2 \right. \\ &\quad \times \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda R} \mathbf{u} \cdot \mathbf{X}\right) d^2\mathbf{u} \left. \right|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、 λ は光の波長、 R は粗面から観測面までの距離、 $\mathbf{X} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ 、 $\langle I \rangle = \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle = \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle$ である。(10)式は、平均強度に対応する第1項と、強度のゆらぎ成分 $\Delta I = I - \langle I \rangle$ の相関に対応する第2項よりなっている。スペックル粒子の平均径は、第2項の空間的な広がり、すなわち照明光の強度分布をフーリエ変換したときの広がり幅で決まる。このことから、照明領域を広げるほど、細かいスペックルパターンが得られることがわかる。ひとつのレンズよりなる結像光学系におけるスペックルパターンの自己相関関数は、照明光の強度分布が一様であるとする ($E(\mathbf{u})|^2 = 1$)、

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{x})I(\mathbf{x}+\mathbf{X}) \rangle &= \langle I \rangle + \left| \iint_{-\infty}^{\infty} P(\mathbf{x})|^2 \right. \\ &\quad \times \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda d_i} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right) d^2\mathbf{x} \left. \right|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 $P(\mathbf{x})$ はレンズの瞳関数、 d_i はレンズから観測面までの距離である。(11)式より、像領域における平均スペックル径は、レンズ瞳の強度透過率分布をフーリエ変換したときの広がり幅で与えられることがわかる。また、このスペックル径はレンズから観測面までの距離にのみ依存し、粗面に焦点が合っているかどうかには無関係である。このことは、スペックル径が観測面における点像の広がりには必ずしも対応しないことを示しており興味深い。どちらの光学系においても、スペックルパターンの細かさは、そのパターン上の1点に到達する光線の広がり角で決定される。

3. 種々のスペックルとその性質

3.1 未発達なスペックル

2.2節で述べた十分に発達したスペックルが発生するための3つの条件(i)~(iii)のいずれかが満たされないとき、スペックルはもはやゼロ平均円形複素ガウス統計には従わなくなる。

まずはじめに、観測点において干渉する光波の位相が $(-\pi, \pi)$ の一様分布に従わない場合を考える。このような状況は、波長に比べて粗さの小さな粗面からの散乱などにおいて生じる。このとき、スペックル場の平均値はゼロではなくなり、図5のようなコントラストの低いスペックルが観察される。このようなスペックルは未発達なスペックルと呼ばれ、コントラストが粗面の粗さに依存することから、粗面の粗さの測定への応用を目的にその統計的特性について精力的な研究が行われている^[13-18]。

結像光学系に生じる未発達なスペックルでは、焦点面におけるコントラスト C が焦点面の前後に比べて小さくなる現象が生じる^[19]。この現象の発見により、 A_r と A_i の標準偏差 σ_r, σ_i が等しくない状態、すなわち非円形複素ガウス統計の存在が明らかとなった^[20]。図6に示すように、スペックルの非円形統計は像面近傍以外にも自由伝播系の光軸付近などにも現れる。

さて、(i)および(iii)の条件が満たされる限りは、(2)式において中心極限定理が適用でき、 A_r と A_i は最も一般的な結合ガウス確率密度関数

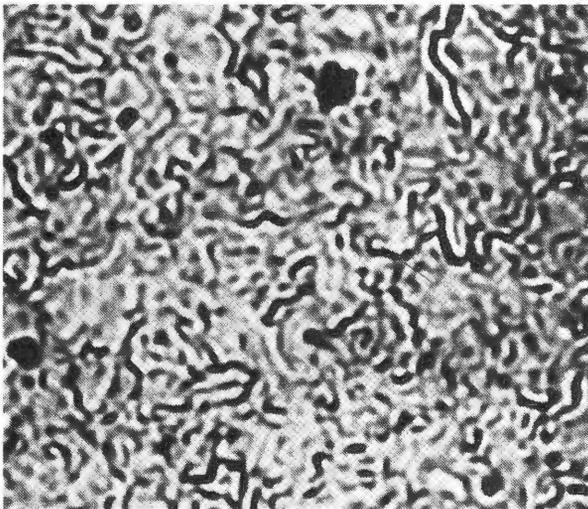


図5 粗さの小さな粗面の像面に生じた未発達なスペックルパターン。

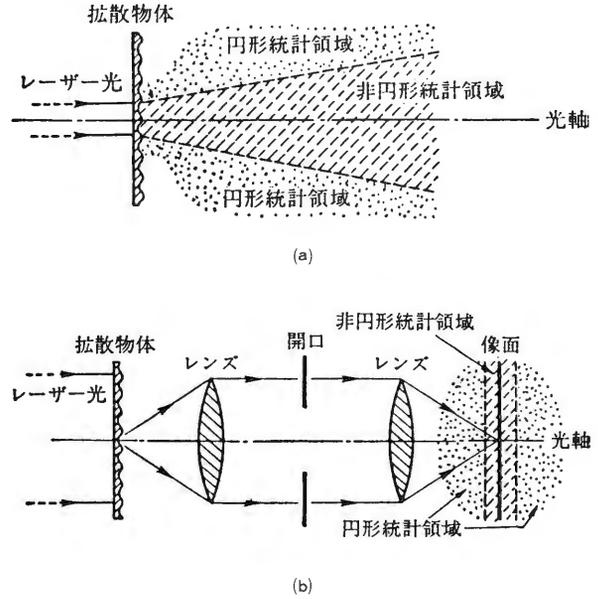


図6 (a)結像系、および(b)回折場においてガウスのスペックル場の円形統計と非円形統計が現れる領域。

$$P_{r,i}(A_r, A_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_i(1-\rho^2)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{(1-\rho^2)} \times \left(\frac{A_r^2}{\sigma_r^2} - \frac{2\rho\Delta A_r\Delta A_i}{\sigma_r\sigma_i} + \frac{\Delta A_i^2}{\sigma_i^2}\right)\right] \quad (12)$$

に従う。ただし $\Delta A_r = A_r - \langle A_r \rangle, \Delta A_i = A_i - \langle A_i \rangle$ であり、また ρ は A_r と A_i の相関係数である。(12)式に従うスペックルはガウスのスペックルと呼ばれる。ここで、さらに(ii)の条件が成り立つときには、 $\langle A \rangle = 0, \sigma_r = \sigma_i = \sigma, \rho = 0$ (ゼロ平均円形統計)となり、(12)式は(3)式になる。(12)式で表される一般的なガウスのスペックルの統計的振舞いは、結合確率密度関数の等密度線として定義される等確率密度楕円を導入することにより、明確かつ簡便に表示することができる^[21]。一例として、像面スペックルの等確率密度楕円が粗面の粗さによって変化するように図7に示す。粗さの増加に伴い、非ゼロ平均非円形統計からゼロ平均円形統計へと変化する様子がよくわかる。

ガウスのスペックルの統計的特性については、位相の確率密度^[21,22]や偏光特性^[23]などについても詳しい解析と実験が行われている。

3.2 非ガウスのスペックル

観測面に寄与する統計的に独立な散乱領域の数 N が

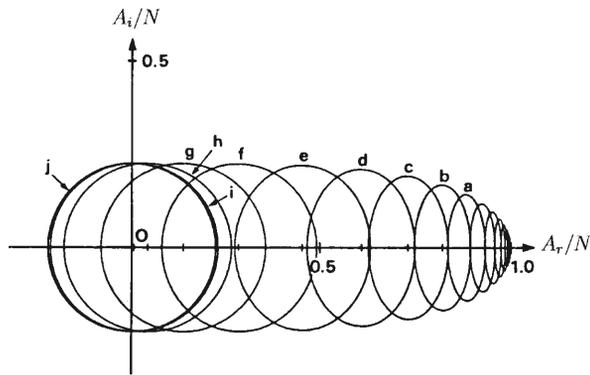


図7 像面スペックルの複素振幅の等確率密度楕円の粗面の粗さに対する変化. a から j まで粗さが増加するに従い、楕円の円形性が増すとともに平均値が零に近づく. これは、スペックル場が非ゼロ平均非円形統計からゼロ平均円形統計へ遷移することを表している.

少ない場合、光波の重ね合わせにおいて中心極限定理が適用できず、スペックル場の A_r と A_i はもはや結合ガウス統計には従わない。このようなスペックルは非ガウスのスペックルと呼ばれ、粗面の相関長と同程度の大きさのレーザービームで粗面を照射した場合の自由伝播系、または粗面の相関長と同程度の解像力を持つ結像光学系の結像面などにおいて見ることができる。非ガウスのスペックルの際だった特徴は、粗面の粗さが増加するに従って C が 1 を越えて増大する現象である (図 8) [24, 25]。これは、ガウスのスペックルでは C が 1 に飽和することと対照的である。この大きな強度ゆらぎは、場がガウス統計に収束しない状態では観測点ごとの N の値や散乱波の振幅の違いがスペックル

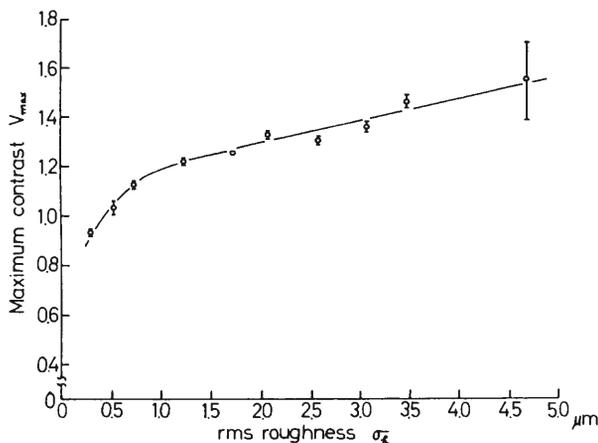


図8 粗面の粗さ σ_r に対する最大コントラスト V_{\max} の変化. ここで、最大コントラストは、 N の変化に対するコントラストの最大値を意味する.

場のゆらぎも反映することに起因している。

粗面の粗さが小さい場合には、非ガウスのスペックルも $C < 1$ の未発達なスペックルとなるが、そのスペックル強度の確率密度には未発達なガウスのスペックルと逆の非対称性が現れる [26]。

3.3 部分的コヒーレント照射

散乱面を照射する光が空間的に部分的コヒーレントになると、生じるスペックルのコントラストは低下する [27, 28]。このようなスペックルを利用して照射光の空間的コヒーレンスを測定することができる [29-31]。すなわち、粗面のフラウンホーファー回折場に生じるスペックルを写真フィルムに記録し、それをフーリエ変換光学系により周波数解析することにより、照射光の空間的コヒーレンス関数がスペックルのパワースペクトルとして直接観測することができる。この方法は、大気のゆらぎによってスペックル化した天体像から真の天体像の自己相関像を回復する方法である天体スペックル干渉法 [32, 33] と同様の原理に基づくものであって、スペックルの応用の中でも最も成功を収めているものの一つである。

一方、照射光が時間的コヒーレンスの低い光、すなわち白色光や多色光であっても、空間的コヒーレンスが良好ならば、やはりスペックルが生じる。この場合、自由伝播系では図 1 (b) に示す放射状繊維構造が現れることは 1.1 節で述べたとおりである [31, 34]。また、結像面に生じるスペックルでは、波長によって光が「感じる」粗さが異なるためにスペックルの色分離が生じ、コントラストが低下する [35]。この効果は粗面の粗さに依存するため、多色光・白色光スペックルのコントラストは波長より大きな表面粗さ測定に有効である [16-18, 36, 37]。

3.4 スペックル強度和

スペックルどうしのコヒーレントな干渉は、複素平面での複素振幅の加算のステップ数 N が増加することに相当する。それゆえ、ガウスのスペックルどうしの干渉はやはりガウスのスペックルになる。これに対し、スペックルどうしのインコヒーレントな重ね合わせすなわち強度和 (あるいは強度の積分) は、新たな統計を生ずる。スペックルの強度和は、3.3 節で述べた部分的コヒーレント光によるスペックルや、互いに直交す

る偏光成分の重ね合わせ、有限な大きさの開口による検出、時間変動するスペックルの時間平均検出などにおいて生ずる。最も簡単な場合は、平均強度 $\langle I \rangle$ の等しい互いに統計的に独立な m 個の十分に発達したスペックルの強度 I_k の和 $I_t = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m I_k$ であって、これはガンマ分布

$$P_t(I_t) = \frac{(m/\langle I \rangle)^m I_t^{m-1} e^{-mI_t/\langle I \rangle}}{\Gamma(m)} \quad (13)$$

に従う^[10]。ただし、 $\Gamma(m)$ はガンマ関数である。 I_k が互いに統計的に独立ではない場合や、未発達なガウスのスペックルである場合についてもその強度和の統計が調べられている^[38,39]。スペックルの強度和は、一般にコントラストを低下させる。したがって、上に述べたようなスペックル強度和を生ずる状況は、いずれもスペックルの低減法として利用されている^[40,41]。

3.5 スペックルの動的特性

散乱物体が運動したり、光学系の特性が時間的に変動すると、スペックルも時間的に変動する。このような動的スペックルの特性は検出する領域に大きく依存する^[42-45]。最も簡単な場合として散乱物体が光軸に垂直に動く場合を考えよう。このとき、結像面におけるスペックルは、容易に想像されるように物体の像と同じ向きに並進運動をする。一方、自由伝播系では、並進運動に加えてスペックル粒が沸き立つように発生消滅を繰り返すポイリング運動が現れ、この2種類の運動の相対的大きさは、粗面の照射条件と検出位置に依存して変化する^[42-43]。

動的スペックルの解析には、強度の時空間相関関数 $\langle I(\mathbf{x}, t)I(\mathbf{x} + \mathbf{X}, t + \tau) \rangle$ を用いる。粗面を単色のガウスビームで照射する場合には、

$$\langle I(\mathbf{x}, t)I(\mathbf{x} + \mathbf{X}, t + \tau) \rangle / \langle I \rangle^2 = 1 + \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_d)^2}{\tau_c^2}\right] \exp\left(-\frac{|\mathbf{X}|^2}{X_c^2}\right) \quad (14)$$

を得る。ここで、 τ_c は $\mathbf{X} = 0$ における強度変動の相関時間、 τ_d は $\mathbf{X} \neq 0$ なる2つのスペックル強度の相互相関ピークの時間遅れ、 X_c はスペックルが相関を失うまでの移動距離を表す相関距離である。いま、平均スペックル径を ξ とすると、 $X_c \gg \xi$ ならば並進運動、また $X_c \approx \xi$ ならばポイリング運動が観測され、その他の場合にはこれら2つ成分を合わせ持つ運動が現れることになる。このほか、粗面の軸方向の動きや、微粒子懸濁

溶液の並進運動に対するスペックルの動的特性についても解析が行われている。このような動的スペックルの特性は、運動物体の速度測定や振動解析^[44,45]の他、物体の変位や変形の測定にも応用される^[46,47]。

生体にレーザー光を照射すると、組織内に浸透した光の一部は吸収されるが、残りは多重散乱を経て外部に放射され、スペックルパターンを形成する。生体によるスペックル（バイオスペックル）は、主として組織内の血流のために動的特性を示すことから、その時間変動特性から生体内の血流に関する情報を引き出すことができる。バイオスペックルによる血流計測は、イメージセンサーを使って皮膚血流を2次元的に求める皮膚血流画像化装置や眼底カメラに血流計を組み込んだ眼底血流測定装置として実用化されている^[48-50]。

3.6 その他のスペックル現象

これまで、粗面における単散乱によって生ずるスペックルを中心に述べてきたが、物体が多重散乱媒質である場合にもスペックルは生ずる。一般に、散乱回数が多いほど、発生するスペックルは散乱媒質の動きに対して敏感に変化する。しかし、通常多重散乱媒質においては散乱回数を制御することは困難であるため、スペックルの動的特性の解析は複雑となる。これに対し、粗面から生じたスペックルが再び粗面によって散乱されて生じるスペックルドスペックル（speckled speckle）は、制御された多重散乱であるため解析が比較的容易であり、速度や粗さなどの計測への応用を目的として研究が行われている^[51,52]。さらに、より多くの散乱面による多重散乱についても、バルクの多重散乱媒質のモデルとしてその動的特性が調べられている^[53,54]。

多モード光ファイバーにレーザー光を入射すると、その出射光中にスペックル（ファイバースペックル）が観察される。これは、ファイバー中に励起された多くのモードが、互いに一定の位相関係を持たないことによるもので、ファイバー内での散乱などによるモード変換やファイバー間の接合における軸ずれなど、高次モードの発生する状況において顕著に見られる^[55,56]。ファイバースペックルは、光ファイバーセンサーにも応用されている^[57]。

最近、これまで議論されたことのない特異な特性を持つスペックル現象がいくつか報告されている。2節

で述べたように、ガウスのスペックルでは常に $C \leq 1$ であって、それゆえ $C > 1$ は非ガウスの統計の証であると考えられていた。ところが、ガウスのスペックルであっても、平均値の小さい非円形統計に従う場合には $1 < C \leq \sqrt{2}$ となることが最近明らかとなった^[58]。このようなスペックルは、例えば光軸に対して中心対称な透過率分布を持つ物体の遠方場に実際に現れる^[59]。

平均スペックル径よりも大きな空間相関を持つスペックルが見いだされている。そのようなスペックルは、たとえば円環スリットを通して照射した粗面の遠方場に現れる (図9)^[60]。

フラクタル媒質からの散乱によるスペックルも興味のある問題である。ランダムフラクタルからの散乱によって遠方場に生じるスペックルは、その平均強度が媒質のフラクタル次元によって決まるべき関数の形をとる。そのようなスペックル場がさらに非フラクタル的粗面によって散乱されると、べき的空間相関を持つフラクタル的スペックル場が生じることが理論的に示されている^[61]。

4. おわりに

以上、様々な状況において生じる多様なスペックル現象について述べた。このようなスペックルの基礎的性質に基づいて、これまで表面粗さ測定、天体スペックル干渉法、スペックル干渉法、スペックル血流計などの多くの光技術が生み出されてきた^[62,63]。このように、スペックルは光計測・光情報処理などの光工学における重要な要素技術となっている。

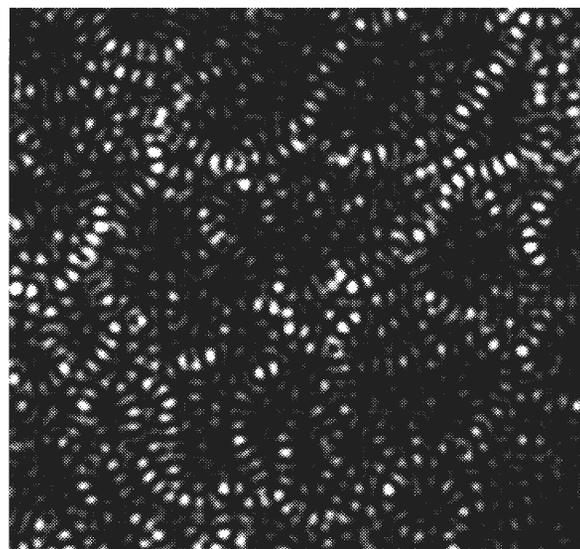


図9 円環スリットを使って粗面を照射したときに生じるスペックルクラスタ現象。

一方、スペックルの統計的特性の研究は、近年さらに複雑な多重散乱系における光散乱現象の解明へと大きな展開を見せており、コヒーレント後方散乱、光学的メモリー効果、非レーリー統計などの興味深い現象が次々と明らかとなりつつある^[64,65]。これらの現象は、単にランダムさの度合いが増すだけであると思われていた多重散乱過程の中にも光学的に検出可能なある種の秩序が存在すること示すものであって、複雑な系の内部探索にも光学的手法が有効であることを示唆している。したがって、生体やフラクタルなどの内部構造を有する多重散乱系におけるスペックル・光散乱の研究の重要性は今後さらに増していくであろう。

【参考文献】

- [1] I. Newton: *Optics* (Dover Press, New York, 1952).
- [2] K. Exner: *Sitzunsber. Kaiserl. Akad. Wiss. (Wien)* **76**, 522 (1877).
- [3] M. von Laue: *Sitzunsber. Akad. Wiss. (Berlin)* **44**, 1144 (1914).
- [4] M. von Laue: *Mitt. Physik. Ges. (Zurich)* **18**, 90 (1916).
- [5] M. von Laue: *Ber. Deut. Phys. Ges.* **19**, 19 (1917).
- [6] W.J. de Haas: *Koninklighe. Acad. van Wetenschager (Amsterdam)* **20**, 1278 (1918).
- [7] E. Buchwald: *Ber. Deut. Phys. Ges.* **21**, 492 (1919).
- [8] C.V. Raman: *Phil. Mag.* **38**, 568 (1919).
- [9] G.N. Ramachandran: *Proc. Indian Acad. Sci. A* **18**, 190 (1943).
- [10] J.W. Goodman: *Laser Speckle and Related Phenomena*, ed. J.C. Dainty (Springer, Heidelberg, 1975) pp. 9-76.
- [11] J.C. Dainty: *Progress in Optics, Vol. 14*, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1976) pp. 1-46.
- [12] T. Okamoto and T. Asakura: *Progress in Optics, Vol.*

- 34, ed. E. Wolf (Elsevier Science, Amsterdam, 1995) pp. 183-248.
- [13] H. Fujii and T. Asakura: *Opt. Commun.* **11**, 35 (1974).
- [14] H. Fujii, T. Asakura and Y. Shindo: *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 1217 (1976).
- [15] H. Fujii, J. Uozumi and T. Asakura: *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 1222 (1976).
- [16] T. Asakura: *Speckle Metrology*, ed. R. K. Erf (Academic, London, 1978) pp. 11-49.
- [17] 魚住・朝倉: 潤滑 **26**, 73 (1981).
- [18] 岡本・朝倉: *O plus E* **124**, 122 (1990).
- [19] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Opt. Commun.* **14**, 30 (1975).
- [20] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Optik* **45**, 65 (1976).
- [21] J. Uozumi and T. Asakura: *Opt. Quant. Electr.* **12**, 477 (1980).
- [22] H. Kadono and T. Asakura: *J. Opt. Soc. Am.* **A2**, 1787 (1985).
- [23] P.F. Steeger, T. Asakura, K. Zocha and A.F. Fercher: *J. Opt. Soc. Am.* **A1**, 677 (1984).
- [24] E. Jakeman and P.N. Pusey: *J. Phys.* **A8**, 369 (1975).
- [25] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Opt. Commun.* **25**, 315 (1978).
- [26] J. Uozumi and T. Asakura: *J. Opt. (Paris)* **12**, 177 (1981).
- [27] H. Fujii and T. Asakura: *Opt. Commun.* **12**, 32 (1974).
- [28] H. Fujii and T. Asakura: *J. Opt. (Paris)* **6**, 5 (1975).
- [29] T. Asakura, H. Fujii and K. Murata: *Opt. Acta* **19**, 273 (1972).
- [30] H. Fujii and T. Asakura: *Optik* **39**, 99 (1974).
- [31] H. Fujii and T. Asakura: *Optik* **39**, 284 (1974).
- [32] A. Labeyrie: *Astron. Astrophys.* **6**, 85 (1970).
- [33] J.C. Dainty: *Laser Speckles and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 255-320.
- [34] 中川・朝倉: 光学 **8**, 120 (1979).
- [35] K. Nakagawa and T. Asakura: *Opt. Commun.* **27**, 207 (1978).
- [36] G. Tribillon: *Opt. Commun.* **11**, 172 (1974).
- [37] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Optik* **49**, 445 (1978).
- [38] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Appl. Phys.* **14**, 183 (1977).
- [39] J. Ohtsubo and T. Asakura: *Appl. Phys.* **17**, 159 (1978).
- [40] T.S. MacKechnie: *Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 123-170.
- [41] T. Iwai and T. Asakura: *Proc. IEEE* **84**, 765 (1996).
- [42] 高井・朝倉: レーザー研究 **8**, 476 (1980).
- [43] T. Asakura and N. Takai: *Appl. Phys.* **25**, 179 (1981).
- [44] 高井・朝倉: 日本物理教育学会誌 **26**, 146 (1978).
- [45] N. Takai and T. Asakura: *Appl. Opt.* **17**, 3785 (1978).
- [46] A.E. Ennos: *Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd edition*, ed. J.C. Dainty (Springer, Berlin, 1984) pp. 203-253.
- [47] N. Takai and T. Asakura: *Appl. Opt.* **24**, 660 (1985).
- [48] H. Fujii, T. Asakura, K. Nohira, Y. Shintomi and T. Ohura: *J. Japan. Soc. Laser Medicine* **4**, 41 (1984).
- [49] T. Asakura: *Anritsu News* **8**, 4 (1988).
- [50] 相津・朝倉: レーザー研究 **18**, 321 (1990).
- [51] D.L. Fried: *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 914 (1981).
- [52] T. Okamoto and T. Asakura: *J. Mod. Opt.* **37**, 389 (1990).
- [53] T. Okamoto and T. Asakura: *Waves in Random Media* **1**, 391 (1991).
- [54] T. Okamoto and T. Asakura: *Waves in Random Media* **2**, 29 (1992).
- [55] M. Imai and T. Asakura: *Optik* **48**, 335 (1977).
- [56] T. Tsuji, T. Asakura and H. Fujii: *Opt. Quant. Electr.* **16**, 9 (1984).
- [57] H. Fujii, T. Asakura and T. Okamoto: *Opt. Commun.* **55**, 393 (1985).
- [58] J. Uozumi, K. Uno and T. Asakura: *Opt. Rev.* **2**, 174 (1995).
- [59] K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: *J. Mod. Opt.* **42**, 2017 (1995).
- [60] K. Uno, J. Uozumi and T. Asakura: *Opt. Commun.* **114**, 203 (1995).
- [61] J. Uozumi and T. Asakura: *Optical Storage and Retrieval — Memory, Neural Network, and Fractals*, ed. F.T.S. Yu and S. Jutamulia (Marcel Dekker, New York, 1996) pp. 283-320.
- [62] R.K. Erf (ed.): *Speckle Metrology* (Academic, London, 1978).
- [63] 岡本・朝倉: 計測と制御 **32**, 667 (1993).
- [64] 岩井・岡本・朝倉: 応用物理 **63**, 14 (1994).
- [65] 岡本・朝倉: レーザー研究 **23**, 657 (1995).

脳は文字をどこで読むのか？

量子計測研究分野 栗城真也, 平田恵啓

ヒトの脳神経の活動によって生じる磁場を計測して高い時間分解能で無侵襲的に活動位置を推定することができる。この手法 (MEG: Magnetoencephalography) を用いて、日本語のかな文字を見た時の脳の活動を観察した。その結果、文字呈示後の 150~250 ms の間に、後頭葉から側頭葉へと視覚情報が移動することが分かった。文字や単語の理解は、その形態や学習に応じた固有の経路に沿って、情報の形態を変えながら後頭から前頭へと流れる一連の活動プロセスであると推察される。

1. はじめに

ヒトの脳の働きを無侵襲的に観察する方法は極めて限られており、1990 年以前には PET (Positron Emission Tomography) による脳血流量の計測が主であったが、1993 年には脳血液の灌流量や酸素化状態を検出する fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging) が出現した。fMRI は PET と同様に代謝情報を計測するが、放射線による身体への影響なしに脳活動が観察できるという利点がある。

MEG (Magnetoencephalography) は脳神経が活動するときに流れる細胞内電流が作る磁場を計測するもので、PET や fMRI に比べるとより直接的に脳神経の活動を観察できる。MEG は 1980 年代の初期にはすでに一部の研究者によって、聴覚や視覚、体性感覚などの感覚刺激に反応する脳内部位を推定する研究が行われていた。1990 年頃より、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) に関する超伝導エレクトロニクス技術が急速に発展し、現在では多チャンネルの大型 SQUID 磁束計により脳のかなりの部分、あるいは脳全体から MEG 信号を一度に計測できるようになった。

MEG は PET や fMRI より時間分解能が高く、脳神経活動のリアルタイム観察が可能である。通常脳神経活動では 1 秒以内で要素的反応が完了するので、MEG のもつミリ秒の時間分解能は極めて有益である。近年では感覚神経の活動だけではなく、言語や記憶、

認識などの高次脳機能の解明を目指した新しい MEG 研究が芽生えつつある。

2. 言語機能に関するモデル

言語はヒトが他の動物と一線を画す固有の機能である。言語は多くの構成要素からなる総合的な機能であり、例えば聴覚性と視覚性言語に分けることができよう。聴覚性言語は、音声の音響的な性質の分析、音声としての認識 (母音や子音の識別、音素のつながりの分析など)、単語理解、意味理解、分脈の把握といった階層的な機能から成り立つ。視覚性言語は文字を視覚的に捉えることから始まるが、意味や分脈の理解に至るところは聴覚性言語と同じである。いずれの場合も言語の出力は、発話ないし書字によりなされる。

「単語を声を出して読む」プロセスについてみると、脳の障害部位と欠損機能の関連を調べた臨床研究に基づいて提案された古典モデル (Wernicke-Geschwind model^{[1])} がある。図 1 に示すように、このモデルでは、まず、後頭葉の視覚野が活動して文字に関する初期の視覚処理を行う。その視覚情報は後頭葉と側頭葉の境界にある角回という場所で音韻変換を受け、すなわち文字情報から音情報へと変換され、左側頭葉・後部に位置する Wernicke 領野で意味理解がなされる。つぎに意味情報は左前頭葉に運ばれ、Broca 領野で音声を構築するための調音処理を受けたのち、その上部にある運動野から発話のための命令を出力する。

Wernicke-Geschwind モデルは要素的プロセスが

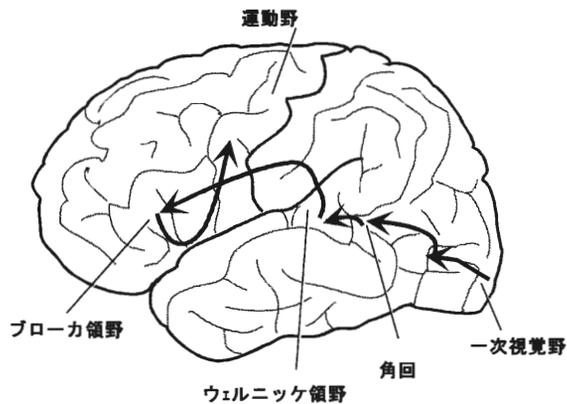


図1 単語を声を出して読むときの脳内プロセスに対する Wernicke-Geschwind モデル。

直列に連結したものである。これに対して PET 測定と結びついた心理学的研究からは、内的活動の状態により異なるプロセスが介在し得ること、直列だけではなく並列的に結合したいろいろな処理ネットワークが存在し得ることが指摘されている^[2,3]。また、視覚文字が音に変換されることなしに、シンボリックな方法で一度に意味理解に至る可能性も考えられる。我々日本人には、漢字を見た瞬間に意味が分かることがある。このような場合における脳活動はシンボリック・プロセスによるのかもしれない。さらに、PET による研究からは、文字だけではなく視覚単語認知に相当する要素プロセスがあり、脳内にはそれに対応する活動領域があるとする考えがある^[4]。この考えでは、文字の視覚情報処理よりも一歩進んだ、単語としての形態やつづり (orthographic form あるいは lexicon) を認知する活動があるとしている。

これらはいずれも確定的なモデルではない。今後、PET だけではなく、fMRI や MEG を含めて多方面からのアプローチで明らかにする必要がある。

3. 文字認知・認識プロセス

これから述べる研究は、視覚性言語機能の最小単位として (単一) 文字の認知・認識を取り上げ、その時の脳内神経の活動を MEG で調べたものである^[5,6]。このような文字処理が基本となって単語や文の処理や理解が行われるので、文字処理の神経活動の理解が視覚性言語研究の出発点と考えた次第である。

文字の認知・認識には、文字のもつ傾きをもった線

分や点、角などのいくつかの視覚的な特徴が複数の視覚領域で分析され、さらに視覚連合野や他の高次皮質で文字として認識される複数の直並列的な神経活動が対応すると思われる。表意、表音文字である日本語の漢字と仮名では全く異なる認知・認識が行われる可能性があるため、ここでは仮名を扱うこととし、さらに前述したように視覚文字が音に変換されることを前提とする。そのために、被験者 (被測定者) には音韻変換が不可避的に行われるような課題を遂行させることとした。また、音韻に変換されずに認識されるものを対照とするため、同様な実験様式に基づいた読めない記号的文字を使った実験も行うこととした。

これらの実験の目的は、音韻変換を伴う仮名文字の処理に関わる神経活動は後頭葉、側頭葉のどこで、どのような時間経緯でなされるのか? また、読めない記号のような疑似文字は仮名文字とは違う過程で処理されるのか? を明らかにすることにある。

4. 実験方法

刺激文字と実験課題

図2には仮名文字と疑似文字を使った遅延照合課題を模式的に示してある。この課題では、sample とよばれる3つの平仮名 (単語にならないような組み合わせ) を一瞬 (0.2秒間) 呈示し、それから1.8~2.8秒のランダムな時間後に1つのカタカナ (probe) を同じく0.2秒間呈示する。被験者は probe のカナの読みが sample のいずれかの仮名の読みと一致するかどうかを照合し、なるべく早く判断する。ここで、読みが一致する確率は約50%である。仮名とカナの形態が異なっており (類似した形態の文字、例えば“キ”や“リ”などは除外してある)、この課題の遂行時には音韻変換が行われると仮定できる。probe 呈示の2秒あとは丸印が呈示されるので、被験者は照合結果 (合あるいは否) を左右いずれかのマウスのボタン押しで回答する。このボタン押しは MEG 記録期間のあとに行われるので、運動にともなう脳活動の反応は含まれない。また、回答結果を解析することにより、被験者が正しく課題を行ったかどうかをチェックできる。

一度の測定ではこのような試行を100回繰り返して行ったが、測定に先立ち被験者は高い正当率で、かつ一定のリズムで照合判断ができるように練習を行っている。これは、MEG 反応の同期性を高めて信号強度を

HIRAGANA				
KATAKANA				
	[a]	[ka]	[ha]	[na]
PSEUDO-CHAR.				

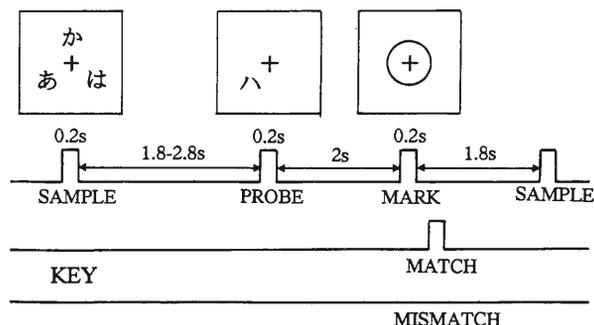


図2 仮名文字と疑似文字を使った遅延照合課題。仮名文字(平かなとカタカナ)と疑似文字の例を上示し、文字呈示をボタン押し回答にタイムチャートを下示す。

高めるためである。MEG 信号は単一カナ文字である probe に対する反応を計測することとし、probe の立ち上がりトリガとしてその前後 -400~1,200 ms の期間の信号を取り込み、100 試行にわたって加算平均した。そのうち、さらに雑音低減のために帯域フィルタにより 1~40 Hz の周波数制限を行った。

カナ文字の構成要素である線分を任意の方向に平行移動する操作により疑似文字を合成し(図2参照)、これらの疑似文字を使って先の音韻照合と同様な実験パラダイムを構成した。ここで sample は3文字の疑似文字であるが、反応時間測定の実験からカナ文字課題との難易度を同じくするために3疑似文字はすべて同一としてある。probe は同じ種類の単一疑似文字であり、照合による一致・不一致の確率は50%である。また、MEG の記録期間や加算平均などはカナ文字と同じ条件である。文字の大きさはカナ、疑似文字とも視角にして1.3度、固視点から1.1度左下方に変位した位置(左1/4視野刺激)に呈示している。

疑似文字はカナと同じ線分要素からなるため、物理的にはカナと等価な刺激である。しかし、読むことができない(音韻変換しない)のでその照合は図形的な

特徴によってのみ可能である。この図形的照合は、先の音韻的照合に対する対照である。しかし、二つの実験は数カ月の期間を隔てて行った別個のもので、被験者も音韻的照合実験の5人に対し、図形的照合では6人(うち3人は二つの実験に共通)である。また、異なる視覚刺激発生装置(CRTとプロジェクタ)を使用したため、刺激文字の明るさは音韻照合実験では0.2 cd/m²であるのに対し、図形照合では4.3 cd/m²であった。これは主観的な明るさにして約2~3倍の違いがある。

MEG 計測と活動源解析

MEG の計測は37チャンネル SQUID 磁束計(岡崎生理学研究所・統合生理研究施設)を2基用いて行った。測定部位は主に後頭部と側頭部である。後者の場合、被験者はベッドに横臥して上下2基の SQUID のデュワー間に頭部を挟み、後方から前方に至る数個所で記録範囲を変化させて測定を行った。結果的には後頭葉から側頭葉までの活動を観測したことになる。

加算平均と帯域フィルタリングを行った MEG 信号は波形や磁場分布を解析し、高振幅値の波形が正負の双極子性磁場分布をもつ時間帯では、連続的に一定(3.5 ms)の間隔で単一の等価電流双極子(ECD: Equivalent Current Dipole)の推定計算を行った。得られた双極子は、双極子磁場と測定磁場との一致の指標である GOF (Goodness of Fit) 値が90%以上のものを選択し、かつ同一の時間区分にある連続した双極子は平均してそのパラメータである座標、電流モーメントなどの値をもつ一個の MEG 活動源とした。

MEG 測定を行ったすべての被験者に対して MRI の撮像を行った。その際、頭部上の基準となる鼻根点、左右の耳孔前点、頭部中心点(Cz)の位置にビタミンEカプセルを置くことによりマーカを断層像中に記録した。その後、MR 座標はこれらのマーカの位置を基準として MEG 座標へ変換し、つぎに MEG 座標中で推定した ECD の位置を MR 断層像に重ねて解剖学的な部位との検討を行った。

図3には MEG 信号解析の実際を説明するために、左右脳半球の MEG 反応の解析例を示す。上から順に、37チャンネルの MEG 波形から高振幅の反応波形(正と負)を選択したもの、90%以上の GOF 値で ECD が計算された潜時(波形中のカーソル)の磁場分布、そ

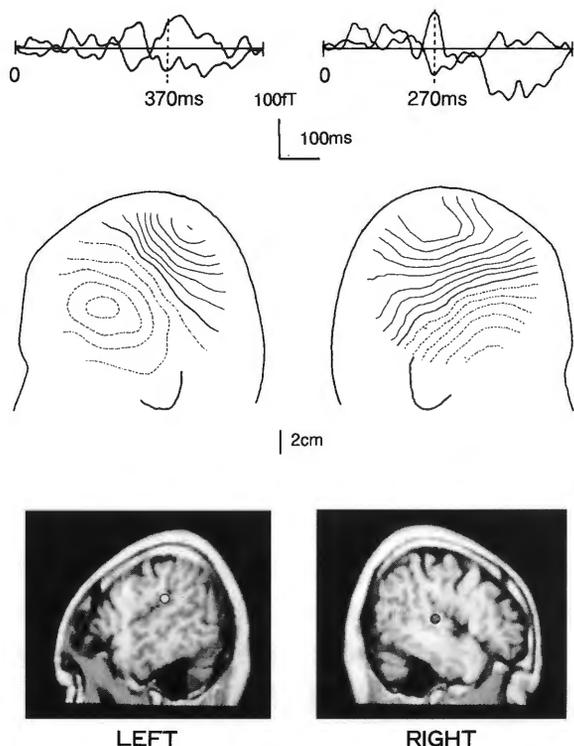


図3 MEG信号解析の説明のための図。MEG反応波形とECD(等価電流双極子)が計算された潜時をカーソルで示す(上)。カーソルの潜時における双極子性磁場分布を表す等磁場線図(中)とECDの位置をMRI断層像に重畳させたもの(下)。

のECD位置をMR画像中へ重ねたものである。MEG波形のピーク振幅は約100fTのオーダーであるが、数100fTの振幅をもつ通常の感覚刺激誘発MEG反応と比べると低振幅である。したがって、波形の輪郭がスムーズでないのは雑音の影響と思われる。また、主要なピーク潜時は約150ms以上あり、2次以降の反応に属する。

カーソルで示した潜時では、正(頭部から湧き出し)と負(頭部への吸い込み)の磁場は同程度の振幅があり、磁場分布も双極子性を示している。その結果得られたECDは、左脳半球では側頭葉の脳溝であるシルビウス裂の後端にあり、右脳半球では側頭葉側面上の側頭回近傍にある。なお、カーソル以外の潜時でも反応ピークが存在するが、それらのECD位置は必ずしも同じではなく、あるいは図3の記録範囲外にある場合もある。そのような場合、磁場分布は正または負の一方に偏ったものになる。前述したように、側頭部のいろいろな位置で繰り返し測定を行ったのは、いろ

いろな部位にあるECDの反応を適当な測定位置で捉えるためである。

5. 実験結果

反応波形と磁場分布

MEG計測中の遅延照合課題の遂行率はいずれの被験者も90%以上、典型的には95%以上あり、被験者は正確に課題を行ったと推定される。また、別個に行った反応時間測定の結果からは、カナと疑似文字の課題の反応時間の被験者間平均値は、それぞれ669,606msであった。2つの課題は、ほぼ同じ難易度であると推定される。

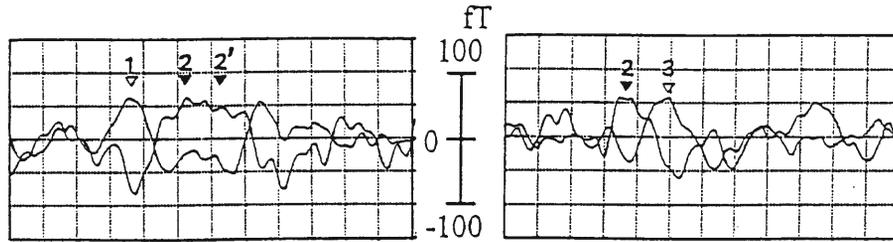
カナ文字課題と疑似文字課題のMEG反応は、主要なピークを選択することにより潜時の順にM1, M2, M3の3つの分けることができた。カナ文字反応(M1:155-210, M2:210-280, M3:270-410ms)、疑似文字反応(M1:125-180, M2:180-250, M3:250-460ms)である。図4には、ある被験者について左右脳半球のカナ文字、疑似文字反応波形を示す。M1~M3反応を矢印で示したが、黒三角は基準を満たさずECDが計算されたピーク、白三角はピークはあるがECDが求められなかったものである。通常、3つのピークは、順次、磁場の符号を潜時とともに交替するが、左脳のカナ文字反応M2のように、ひとつの反応が100ms以上にわたって持続する場合もある。被験者による個別の内的プロセスを窺わせて興味深い。

図5は違う被験者の例であるが、M2反応のECDピーク潜時で描いた磁場分布を示している。推定されるECDの位置が潜時や刺激文字により異なるため最適なMEGの計測位置は少しずつ異なっているが、いずれも正負の磁場を含む双極子性分布であることが分かる。ここで、実線は湧き出し、破線は吸い込み磁場であり、カナ文字反応では20fT、疑似文字反応では10fT間隔で等高線を描いてある。

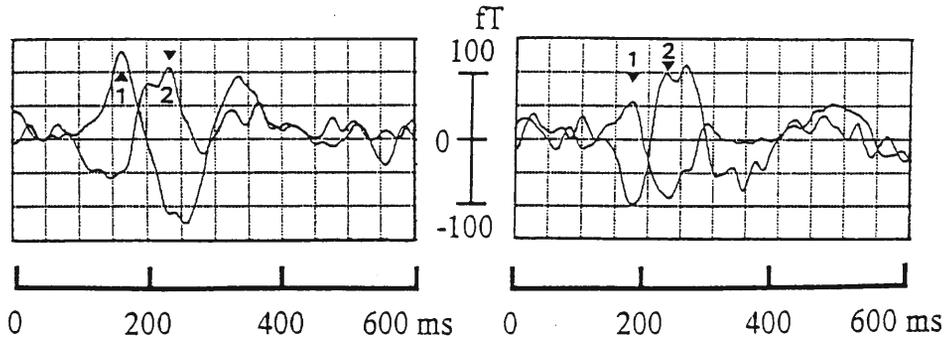
ECDの解剖学的位置

カナ文字反応と疑似文字反応で見られたECDの典型的な解剖学的位置を図6、図7に示す。カナ文字反応(図6)では、数字で示した潜時で分かるように、早期成分であるM1(190ms)は後頭葉と頭頂葉の境界に位置する頭頂後頭溝(POS:parietooccipital sulcus)にあり、第2成分M2(270ms)は左の側頭葉中

LETTER TASK



PSEUDO-LETTER TASK

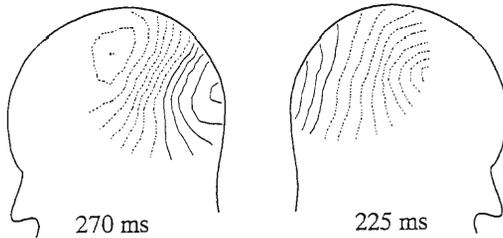


LEFT HEMISPHERE

RIGHT HEMISPHERE

図4 カナ文字刺激(上)と疑似文字刺激(下)のMEG反応波形。正と負の大きな振幅を持つ波形を選択し、M1~M3反応ピークをマークしてある。

LETTER TASK



PSEUDO-LETTER TASK

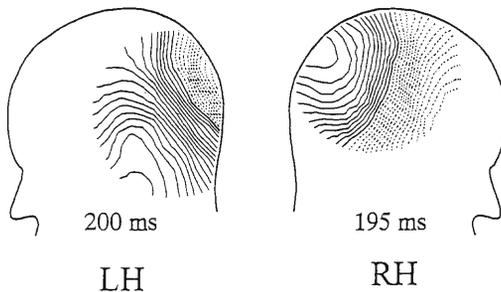


図5 カナ文字刺激(上)と疑似文字刺激(下)のM2反応における等磁場線図。実線が湧き出し、破線が吸い込み磁場を表す。

程にある上側頭溝(STS: superior temporal sulcus), 第3成分M3 (370 ms) はシルビウス裂(外側溝: LaS: lateral sulcus)にある。ここで、線分はECD電流の向きを表したものであるが、ECDが存在する脳溝にほぼ垂直であることが分かる。MEGの活動源は大脳皮質の錐体細胞に流れるシナプス電流(EPSP電流)であるとされているが、脳溝に垂直な電流は脳溝内の皮質に活動源があることを示唆している。

疑似文字反応(図7)では、M1成分(150, 160 ms), M2成分(215, 235 ms)は後頭葉から側頭葉にかけて脳底部(小脳の上)にある紡錘状回(FG: fujiform gyrus)に位置している。脳溝では側副溝(CoS: collateral sulcus)あるいはその外側にある後頭側頭溝(OTS: occipito temporal sulcus)が対応する。また、M2成分(200 ms)はM3成分(310 ms)とともに右側頭葉にあるものもある。それぞれ、STS後部、LaS後端に位置している。

図8はカナ文字課題(A)と疑似文字課題(B)で得られたMEG反応の脳内位置をまとめたものであ

LETTER TASK

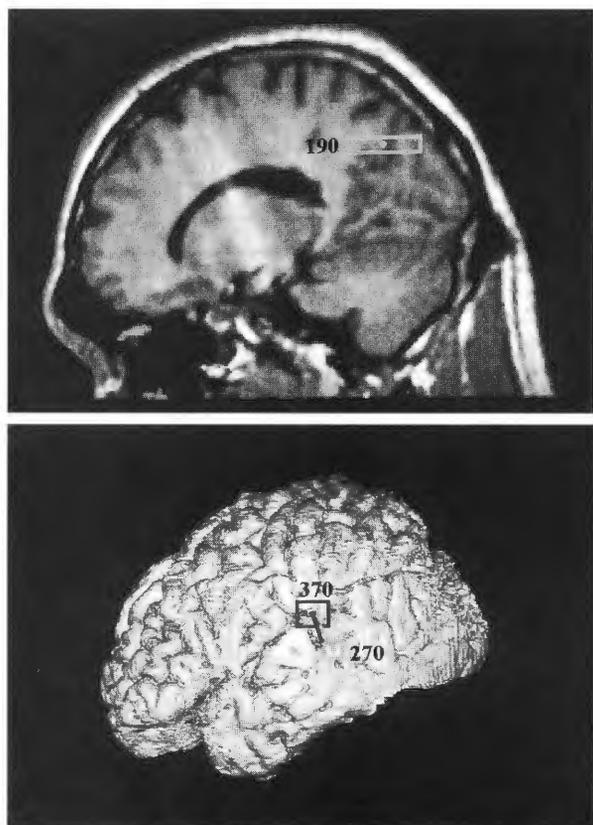


図6 カナ文字刺激に対する主なMEG反応の活動源位置。

PSEUDO-LETTER TASK

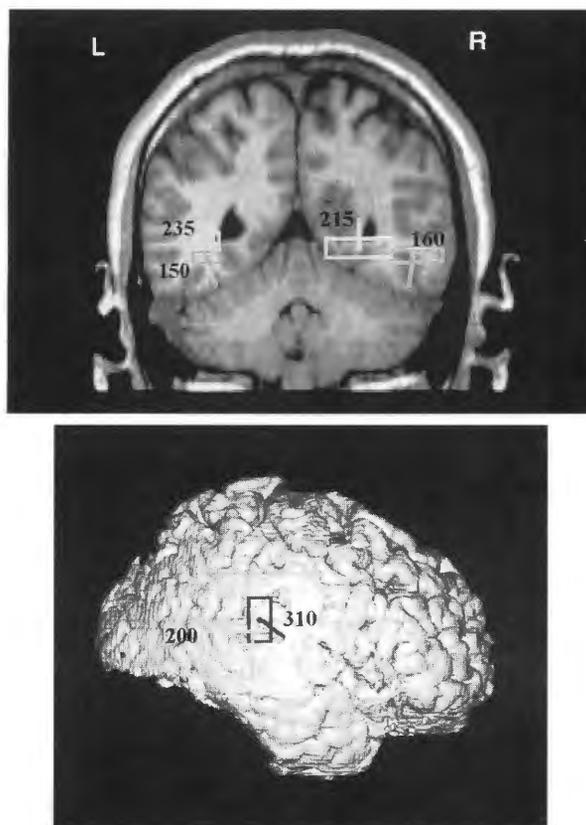


図7 疑似文字刺激に対する主なMEG反応の活動源位置。

り、MR画像中のECDの位置をもとに脳溝などの構造に対応させて模式的な脳地図に転写してある。文字反応(A)の上図は大脳縦裂から15-25mm離れた内側矢状面であり、下図は外側面である。疑似文字反応(B)の上図は左下の外側図に縦縞で示した位置での冠状面である。活動源に付けた番号は被験者を表し、M1-M3反応をシンボルで区別してある。

図8の活動源地図から特徴的な点をまとめると以下のようなになる。

- ・後頭葉内側のカナ文字反応の初期, 中期(M1, M2)成分は上下に(POSからFGまで)散逸していて, 被験者による位置の相違がある。
- ・カナ文字反応の中期, 後期(M3)成分は左右の側頭葉後部に集中しており, 左脳半球の活動が右半球よりも活発である。
- ・疑似文字反応の早期, 中期成分の多くは後頭・側頭接合部底面(FG)に集中しており, 左側の活動が活発である。

・疑似文字反応の中期, 後期成分は右脳半球の側頭葉後部にほとんど局在している。

6. 考 察

この研究で行った二つの実験から, 後頭葉を中心とした視覚領野における早期活動(約200ms以前)からすでに読める文字と読めない記号文字で解剖学的な位置に違いがあること, また, その後の潜時(約250ms以降)ではともに側頭葉の後部と側頭・頭頂境界が活動の中心となるが, 文字の違いにより半球間に活動の偏りがあることが分かった。

視覚呈示された単語処理に関わる脳活動についてはPetersenら^[2-4]による先駆的な研究がある。読める単語, 疑似単語(単語のようなつづり), 読めない単語(発音出来ないアルファベット列), 読めない疑似文字列を被験者に見せた時のPET測定の結果から, 後頭葉左内側の高次視覚領野(図8Aの左上図にある内側面の活動が下方へも広がった領域)が視覚単語認知(形態

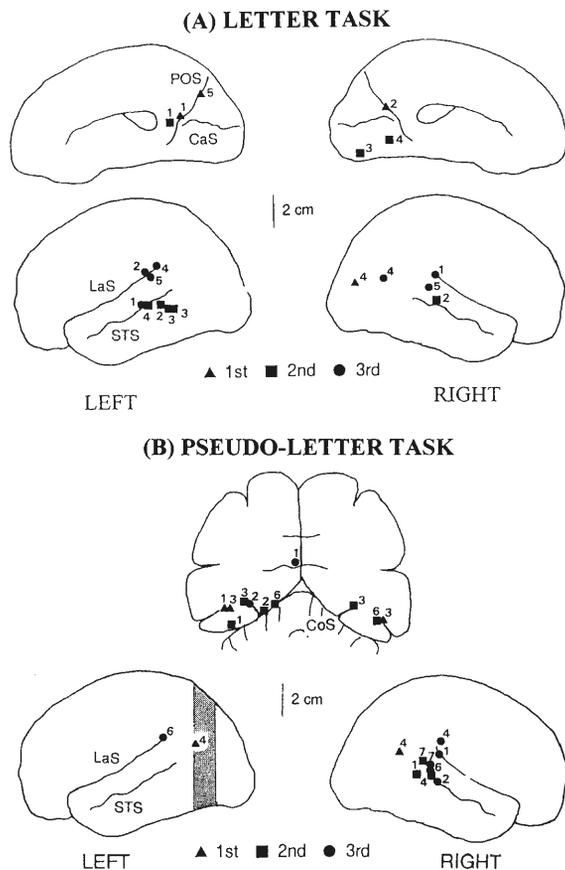


図8 カナ文字刺激(A)と疑似文字刺激(B)のMEG反応(M1 = 1st, M2 = 2nd, M3 = 3rd)の位置を模式的な脳地図のプロットしたもの。(A)の上図は内側面、下図は外側面を表し、(B)の上図は下図外側面に記入した縞の位置での冠状断面である。主要な脳溝を線で示し、被験者を番号で識別してある。

やつづりにより単語(orthographic form)として認知する活動)に特異的に関わっている場所であり、これに対して単語の意味理解に関わる場所は左前頭葉にあるとされた^[4]。また、単語の韻を検出する課題を用いた実験からは、左側頭・頭頂境界付近が音韻処理に関する場所であると推定された^[3]。

この研究のあと、単語や意味処理の脳内プロセスを調べる多くのPET測定が行われたが、視覚単語の認識(word recognition)の活動は左側頭葉後部(図6下のような活動位置)にあり、後頭葉内側にはとくに単語処理に関連した活動はないとする結果^[7]、一方、左側頭葉後部は音韻処理に関連し、補足運動野と左の前頭葉中下部が内的なスピーチを介して単語認識(lexical decision)を担う^[8]、とする報告などがあり、統一

的な結果は得られてない。また、最近のFMRI測定の実験では、後頭葉内側の視覚高次領野は疑似単語や読めない単語よりも真の単語刺激により強く活動するので単語認知に関連している、また、前頭葉(前頭前野)の外側部は音韻的処理に最も強く関わる、単語の意味処理はむしろ側頭葉の中・上部に関連するとしている^[9]。ただし、この研究では左と右脳の区別はされていない。

PETやFMRI測定では代謝活動を計測するので、対象とする機能に直接関連しない脳活動も検出され、また、信号のSN比は数%以下と低い。このために、測定したい機能を含む課題とそれを含まない課題間で信号の差分を取って統計処理を行う。その結果、対照とする基準状態の選択により測定結果が変化する可能性がある。また、とくにPETでは多くの被験者間において加算平均を行うので、個体による活動の違いは観測できない。現在のFMRIの技術では脳全体を観測することができず、限られた枚数のスライス(断層)画像しか得られないので、測定断層以外の場所で起きていることは分からない。PETやFMRIの測定結果に時として見られる不一致の誘因にはこのような背景があると思われる。

これに対しMEGはSN比が高く、差分法によらずに個人ごとに活動源を計算してその場所を特定できる。さらに、広い体積の領域、あるいは脳全体が観測できる。したがって高い時間分解能とあわせて、PETやFMRIとは違った基準で脳の活動を定量化することができる。

この研究で用いたのは単一の文字であるが、文字が読める・読めないに依存した後頭部の活動が見られたことは、Petersenら^[4]の単語認知スポットの考え方には矛盾しない。しかし刺激が文字列からなる単語ではないこと、文字活動の個人差が大きいこと、実験条件の差異(カナと疑似文字の実験間で刺激の明るさが異なる)が疑問点として挙げられる。これらを明らかにするためには、文字単語を用いたMEG実験が必要と思われる。

カナ文字に見られた左側頭後部とその上の側頭・頭頂境界の活動は、意味を持たない単一の文字刺激であることとPetersenら^[3]やPriceら^[8]の結果とを考えると、音韻変換の機能が第一に考えられる。最近、国内では日本語の文字や漢字を用いたMEG研究

が盛んであるが、そこでも側頭葉の活動が報告されており^[10,11]、なんらかの音韻的なプロセスが関連していると考えられる。

また、実験で用いた遅延照合課題は、その遂行には短期記憶の再生 (retrieval) がともなっている。ここで、韻の検出課題を使った Paulesu ら^[12] の PET 測定では、左の側頭・頭頂境界 (縁状回付近: 図 6 の 370 msECD のある位置) が音韻の短期記憶に関わっているため、記憶との関連が推察される。一方、前頭葉の Broca 野とその近傍は内的スピーチを介して音韻的記憶の保持と関わっていると推察されており^[12-14]、側頭・頭頂境界の記憶スポットがあるとする両者の機能的関連に興味が持たれる。

カナ文字の場合、左側頭の大きな活動のほかに右側頭の対応する位置にも活動が見られた。また、疑似文字では右側頭のみが活動した。実験課題からは右脳の機能として、カナや疑似文字の図形的処理が考えられるが、それらは後頭葉の視覚高次領野 (例えば図 7 上の後頭・側頭底面の紡錘状回など) が第一に可能性がある。ここで、紡錘状回やその内側の舌状回は、少しずつ違った位置で単語認知 (単語認識の前処理) や、色あるいは顔の認知に関わる、とする電極記録の結果がある^[15,16]。日本語の平仮名单語を音読する課題を用いた PET 測定の実験では、後頭葉の内側・外側部に加え、左側頭後方の下部領域で活動が観測されている^[17]。ここで、後者の側頭後下部は紡錘状回を含んでいる。他方、単語黙読時には、左側頭部のほかに右側頭にも活動が見られている^[18]。現在のところ、後頭・側

頭下部領域の活動との関連のなかで、右側頭部が文字や単語の認識にどのような役割を果たしているのかは不明である。

6. おわりに

自然科学のアプローチでは現象を分解可能な最小の要素にまで還元して理解し、しかるのちに複雑な現象を合成 (再構成) する方法が一般的である。自然科学はこれまで再現可能な現象をもつばら研究対象としてきたが、脳活動のような生体の現象は複雑で個体間の差異が激しく、観察結果の意義を統計的な分析で評価する側面をもっている。MEG による言語機能の研究の端緒として、われわれは文字を視覚性言語機能の最小単位として仮定し、文字の認知・認識プロセスの脳内活動を観察しようとした。これは従来の自然科学的なアプローチに乗っ取ったものであるが、このように、ヒトの脳機能を要素的なコンポーネントに分解して解析する方法が常に正しいかどうかは、研究の節目ごとに反復自問する必要がある。

この研究の MEG 測定は、著者の一人 (栗城) が併任している生理学研究所・統合研究施設で行ったものである。同施設の永田治、竹島康行両技官の実験協力に感謝する。また、課題に用いた疑似文字の作成は富士通研究所の藤巻則男主任研究員によっている。MRI 撮像にあたっては、札幌柏葉脳神経外科 (柏葉武院長、ほかの方々) のご協力を得た。ここに、感謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] Geschwind, N., *Sci. Am.*, 241, 158 (1979).
- [2] Posner, M. I., Petersen, S. E., Fox, P. T. and Raichle, M. E., *Science*, 240, 1627 (1988).
- [3] Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M. and Raichle, M. E., *J. Cogn. Neurosci.*, 1, 153 (1989).
- [4] Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. and Raichle, M. E., *Science*, 249, 1041 (1990).
- [5] Kuriki, S., Hirata, Y., Fujimaki, N. and Kobayashi, T., In: *Visualization of Information Processing in the Human Brain: Recent Advances in MEG and Functional MRI (EEG Suppl. 47)* (eds. Hashimoto, I., Okada, Y. C. & Ogawa, S.), Elsevier Science B. V., 209 (1996).
- [6] Kuriki, S., Hirata, Y., Fujimaki, N. and Kobayashi, T., *Cogn. Brain Res.*, 4, 185 (1996).
- [7] Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W.D., Friston, K., Weiller, C. and Frackowiak, R., *Brain*, 115, 1769 (1992).
- [8] Price, C. J., Wise, R. J. S., Watson, J. D. G., Patterson, K., Howard, D. and Frackowiak, R. S. J., *Brain*, 117, 1255 (1994).
- [9] Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A.,

- Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M. and Gore, J. C., *Brain*, 119, 1221 (1996).
- [10] 川勝真喜, 今田俊明, 益子拓徳, 小谷誠, *医用電子と生体工学*, 33, 18 (1995).
- [11] 小山幸子, 柿木隆介, 宝珠山稔, *日本生体磁気学会誌*, 9, 28 (1996).
- [12] Paulesu, E., Frith, C. D. and Frackowiak, R. S. J., *Nature*, 362, 342 (1993).
- [13] McCarthy, G., Blamire, A. M., Rothman, D., Gruetter, R. and Shulman, R. G., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 90, 4952 (1996).
- [14] Fiez, J. A., Raife, E. A., Balota, D. A., Schwarz, J. P., Raichle, M. E. and Petersen E., *J. Neurosci.* 16, 808 (1996).
- [15] Nobre, A. C., Allison, T. and McCarthy, G., *Nature*, 372, 260 (1994).
- [16] Allison, T., Begleiter, A., McCarthy, G., Roessler, E., Nobre, A. and Spencer, D. D., *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 88, 343 (1993).
- [17] Sakurai, R., Momose, T., Iwata, M., Watanabe, T., Ishikawa, T. and Kanazawa, I., *Neuro. Rep.*, 4, 327 (1993).

血管病の局在化におよぼす 物理的・流体力学的因子の影響

自律調節研究分野 狩野 猛, 和田 成生, 内 貴 猛

近年、日本人の食生活の欧米化が進み、動物性蛋白質の摂取量が多くなるにつれて、動脈硬化が原因となって起こる心臓・血管病が増え、大きな問題になりつつある。本稿では、この動脈硬化症の第一の危険因子であるところのコレステロールの血管壁への取込の局所的な過不足によって引き起こされると考えられる動脈硬化症、吻合部内膜肥厚および脳動脈瘤形成について、それぞれがどのような疾患で、どのようなところに起こるのか、そして、その局在化のメカニズムはどうなっているのかに関して、我々がこれまで行ってきた研究の結果をもとにして紹介させていただくことにする。

はじめに

血栓症、動脈硬化症および動脈瘤形成など、ヒトの循環系に発生する血管病のほとんどが、比較的大きな血管の分岐部や湾曲部および狭窄部下流域など、流体力学的観点よりみて血流の乱れやすい場所に局所的に発生することが臨床研究及び剖検の結果示され、これらの血管病の発症に血流が深く関与していることが示唆された。そのため、このトピックは、1960年代より医学、工学、物理学などの分野の多くの研究者の関心を集めるようになり、今日まで、30年以上もの長きに渡って色々な角度から研究が行われてきた。特に動脈硬化症に関しては、血流と動脈硬化の好発部位との関係を検討する目的で、さまざまな血管のモデルを用いた流れの実験が行われ、その結果、この血管病の局在化に最も深く関与している流体力学的因子として壁剪断応力が挙げられるようになった。また、分子生物学的観点からの研究の結果、血管内皮細胞によるリポ蛋白（コレステロールの担体）の取込や代謝の機構が明らかにされた。しかしながら、肝心の局在化の機構に関しては、剪断応力の関与が指摘されているだけで、それが具体的にどのような役割を果たしているのかは未だ不明であり、現在、世界中の研究者がその機構の解明を目指して研究を続けているといった状況である。我々も早くからこの問題に関心をいだき、主に流

体力学的観点から理論的・実験的研究を行って来た。本稿では、まず、狩野が開発した方法^[1]によりヒトおよび犬の血管を透明化し、トレーサー粒子による流れの可視化および16 mm 高速度シネカメラによる撮影・フィルム解析により得られた動脈硬化症、吻合部内膜肥厚、および脳動脈瘤の好発部位と、そこにおける流れの特徴についての知見を要約し、続いて、この一連の実験的研究の結果に基づいて導き出されたこれらの血管病の局在化に関する我々の仮説、およびそれを実証するために現在行っている理論的・実験的検討によりこれまで得られた結果を紹介させていただくことにする。

血管病の好発部位と流れとの関係

(1) 動脈硬化症

動脈硬化症は、肝臓で製造されるかあるいは腸壁によって食物から摂取されたコレステロール（細胞膜やホルモンの原料となる重要な物質で、血液中では、主に低密度リポ蛋白の成分として存在する）が、動脈壁の一番内側にある単一層より成る内皮細胞とその下にある内弾性板との間に多量に蓄積することによって始まる病変であり、その後、白血球の一種である単核細胞がそのコレステロールを回収しようとして内皮細胞の接合部を壊して内腔より血管壁内へ入り込んでくるが、コレステロールを食べ過ぎて肥大し、血中に戻れ

なくなり、気泡をたくさん含んだ泡沫細胞となってそのままそこに滞ってしまったり、血管の中膜より内弾性板の網目をくぐり抜けて遊走して来た平滑筋細胞が異常に増殖したり、コラーゲンやエラスチン等の結合組織が産生されたりして体積が増大することにより、血管内面が内腔側に隆起する。この隆起した部分は、初めは粥状で柔らかいが、病変が進行するに連れて細胞の壊死、結晶状コレステロールの析出、およびカルシウムの沈着などが起こり、最終的には硬化してしまうので動脈硬化症と呼ばれている。これは、血圧の高い動脈だけに発生する血管壁の病気であり、血中コレステロール濃度および血圧の高い人、そして喫煙者に発生しやすいことが知られている。

動脈硬化症は、脳および心臓を含む血管系の比較的大きな動脈（直径1 mm以上）の分岐部や湾曲部に集中して起こり、これらの部位では、流れの剝離、跳ね返り、および流量の不斉合などにより血流が局所的に乱れていることが分かっている。以下にその代表的な例をいくつか示すことにする。図1は、ヒトの左冠状動脈回旋枝より鈍縁枝が枝分かれする部分におけるフローパターンを示したものである。側枝のつけ根の部分（分岐頂の真向い）のS点で管壁に沿った流れが剝離し、その下流に分岐頂付近で跳ね返された流体素子が流れ込み、ゆっくりと逆流した後、突然流れの方向を変え、流れの速い主流に引き込まれるようにしてこの領域から出て行くといった流れをしている。このようなゆっくりとした逆流に隣接した部分で動脈硬化の

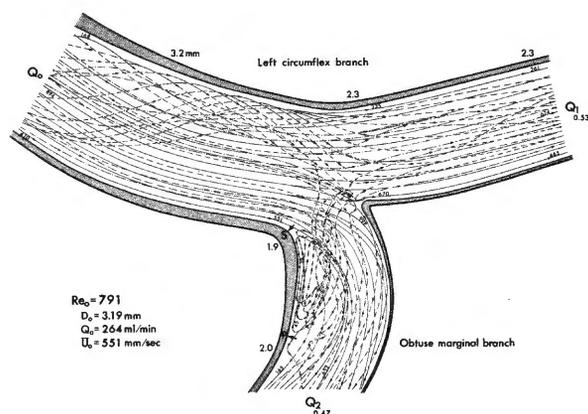


図1 ヒト心臓の左冠状動脈回旋枝より鈍縁枝が枝分かれしている部分におけるフローパターン^[2]。鈍縁枝のつけ根のゆっくりとした逆流の起こっている部分で動脈硬化が進行している。

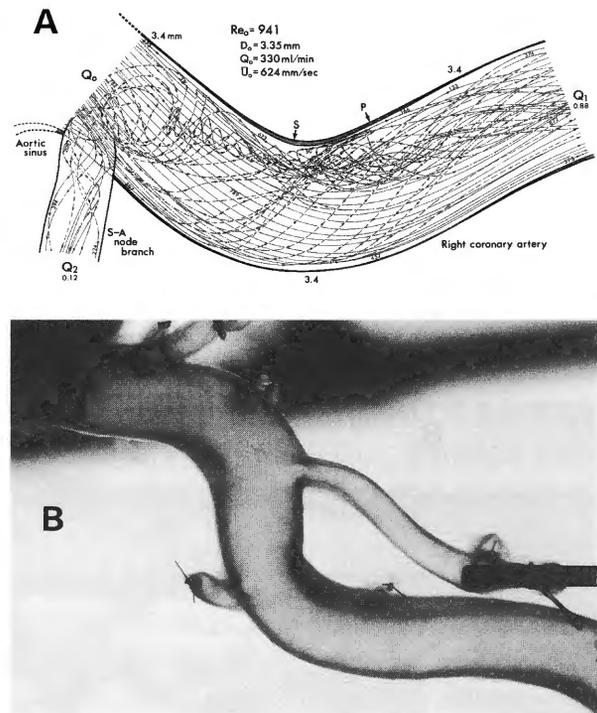


図2 ヒト心臓の右冠状動脈の湾曲部におけるフローパターンと動脈硬化の好発部位^[2]。
A：湾曲部内側壁に沿ってゆっくりとした逆流が起こっている。
B：湾曲部内側壁に沿って動脈硬化が進行している。

病変が進行するのである^[2]。図2Aは、右冠状動脈によくみられる湾曲部における典型的なフローパターンを示したものである。湾曲部内側壁のS点で流れの剝離が起こり、その下流の剝離流域に外側壁の管壁近くにあった流体素子が管壁に沿って流れ込み、ゆっくりと逆流し、S点付近で突然方向を変え、直径面より流れの速い主流に引きずり込まれるようにして出て行くといった流れをしている。このようなゆっくりとした逆流の起こっている部分に、加齢とともに動脈硬化が進行し、ついには図2Bに示したような顕著な内膜肥厚が形成されるものと思われる^[2]。最後に図3Aは、透明化した若い人より採取した病変のない腹部大動脈内で、定常流の条件下でみられたフローパターンである^[3]。動脈硬化が全く起こっていない健全な血管でも、上腸間膜動脈分岐部から左右の腎動脈分岐部下流にかけての腹部大動脈の後壁（背中側）に沿って、かなり広範囲の領域にわたってゆっくりとした逆流が生じており、そのために壁剪断応力が非常に小さい値になっている。高齢者の血管では、多くの例において図

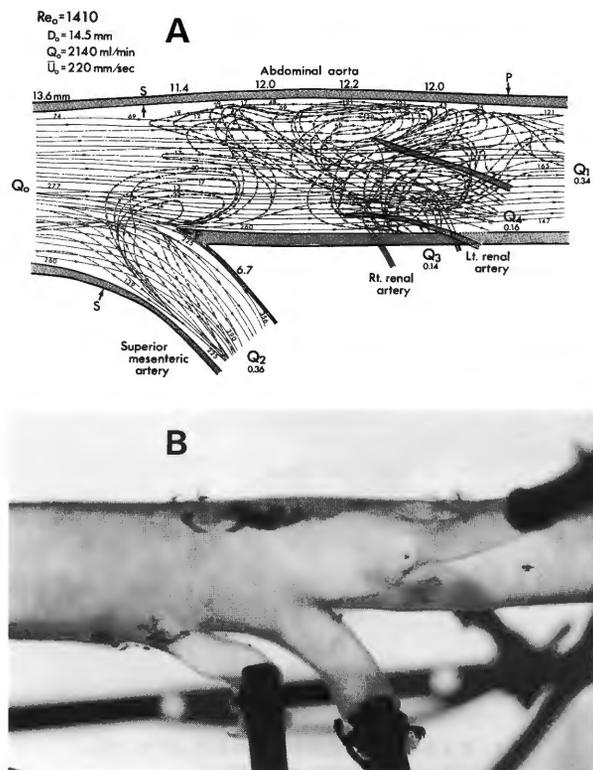


図3 ヒト腹部大動脈におけるフローパターンと動脈硬化の好発部位^[3]。
 A：上腸間膜動脈分岐部から左右の腎動脈分岐部下流にかけての腹部大動脈の後壁（背中側）に沿ってゆっくりとした逆流が起こっている。
 B：図3Aでゆっくりとした逆流が起こっていた部分に年齢とともに動脈硬化が進行する。

3Bに示したように、この部分に局所的に動脈硬化が発生し^[3]、紡錘状の大動脈瘤の形成へと進行するケースも珍しくない。

(2) 吻合部内膜肥厚

これは、天然血管どうし、または人工血管と天然血管を縫合手術した際に、平滑筋細胞や線維芽細胞の病的な異常増殖およびコラーゲンやエラスチンなどの結合組織の増大により、吻合部の内膜（血管壁の一番内側の層）が異常に厚くなる現象である。この人為的に誘発された血管病は、動脈硬化症と同様に、病変が進行するにつれて血管の内腔を狭め、最終的には血管を閉塞に導く。特に、小口径（直径3mm以下）の人工血管では、縫合手術後の遠隔期における血管閉塞の最大の原因となっている。末期の病変は、動脈硬化症と非常に良く似ており、実際に動脈硬化へ移行するケー

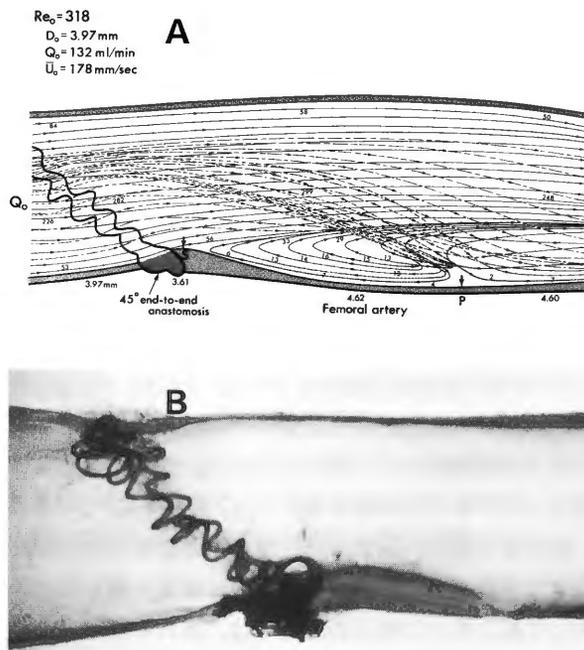


図4 犬総頸動脈を45°の角度で切断し、そのまま端端吻合した部分におけるフローパターンと内膜肥厚の好発部位^[4]。
 A：端端吻合尾部にゆっくりとした逆流が起こっている。
 B：図4Aの逆流の起こっている領域で内膜肥厚が進行している。

スもある。また、動脈硬化症と同様に、喫煙や血中コレステロール濃度の増大により病変の進行が促進されることが示されている。狩野らは、雑種成犬の大腿動脈に90°および45°の角度の端端吻合、大伏在静脈の間置移植手術、および総頸動脈によるバイパス手術を行い、3カ月後にその血管を摘出・透明化し、内膜肥厚の好発部位とそこにおける流れとの関係について検討を行った。その結果、縫合した血管の接合部における内壁が連続的で滑らかな場合には、流れが乱れず、内膜肥厚もほとんど起こらないが、段差ができたり、縫合糸の過度の引き締めにより狭窄が形成されたりした場合には、図4Aに示したように流れの剥離が起こり、局所的にゆっくりとした流れの渦が形成され、その流れの極端に遅い逆流部の壁剪断応力の小さい領域に、選択的に内膜肥厚が起こることが分かった。その位置は、90°吻合の場合には円環状の切断線に沿って1～数个所に（内膜の不連続点の数によると思われる）、また、45°吻合の場合には、図4Bに示したように常に切断線の尾部に発生することが分かった^[4]。

③ 脳動脈瘤

動脈瘤は、その形成過程の違いにより2種類に分けることができる。一つは、動脈硬化性のもので、これは、動脈硬化の進行により脆弱化したり炎症を起こしている部分の血管壁の組織が、高い動脈圧の下で部分的に断裂を起こし、局所的に内腔が大きくなったものであり、大動脈に形成される動脈瘤のほとんどがこれに属する。もう一つは、真性動脈瘤とでも言うべきもので、動脈硬化とは全く無関係で、動脈壁の中膜が局所的に薄く、弱くなり、嚢状又は紡錘状に外側に突出したものであり、頭蓋内動脈に形成される動脈瘤のほとんどがこれに属する。それで、特に後者を脳動脈瘤と呼んで前者と区別している。脳動脈は、手足や心臓の血管のように組織によって保護されておらず、血管がそのままむき出しになっているために動脈瘤が形成されやすい。しかしながら、脳動脈瘤は、脳血管のどこにでも形成されるというのではなく、ある特定の部位に選択的に形成されることが知られている。脳には、左右の内頸動脈および脳底動脈の3つの大きな動脈が血液を供給しているが、これらは脳底部分において交通動脈によって結ばれ、ウィリス環 (circle of Willis) と呼ばれる動脈の輪を形成している。嚢状脳動脈瘤は、そのほとんどがこの部分の特定の分岐部および中大脳動脈の分岐部に集中的に形成されることが統

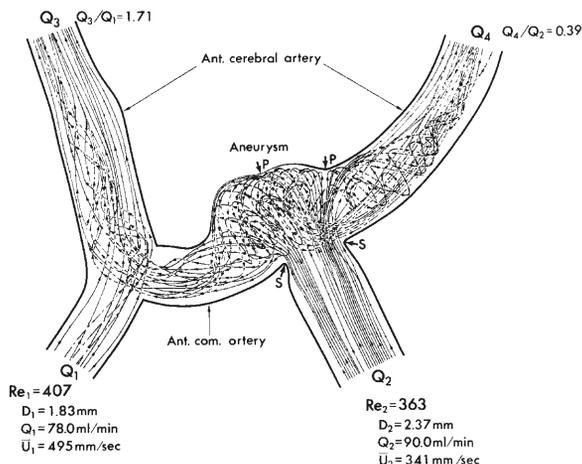


図5 ヒト前大脳動脈と前交通動脈の接合部に形成された初期的な嚢状動脈瘤近傍におけるフローパターン^[5]。速い流れが血管壁を直撃し、大きな力(圧力、張力および壁剪断応力)を課している部分に動脈瘤が形成されている。

計的データにより示されている。これら、脳動脈瘤の好発部位では、いずれの場合にも、流入血管の管軸付近の速度の大きい流体素子が管壁を直撃する形になっている。図5は、その一例であり、前大脳動脈と前交通動脈の接合部に形成された初期的な嚢状動脈瘤近傍におけるフローパターンを示したものである。近位前大脳動脈の管軸近傍に位置し、最も大きな速度を持った流体素子が、ほぼ直角に管壁に当たり、分流部で真横に跳ね返された流れが螺旋状の強い二次流となり、動脈瘤の両側にある前交通動脈および前大脳動脈へと分かれて行っている。嚢状動脈瘤は、大きな速度を持った流体素子が血管壁を直撃し、局所的に大きな力(圧力、張力および壁剪断応力)を課している部分に形成されている^[5]。

血管病の局在化に関する我々の仮説

— 血管内壁表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象 —

前節では、ヒトの循環系に起こる動脈硬化症、吻合部内膜肥厚、および脳動脈瘤の好発部位と流れとの関係について述べ、これらの血管病の局在化に流体力学的因子が重要な役割を果たしている可能性があることを示した。上記の血管壁の病的な変化とは別に、ヒトにおいても動物においても、動脈や静脈は、血流の変化に対して適応的にその内腔の直径や管壁の組織構造が変化し、大きな流速に晒された血管は内腔が拡大し、あるいは瘤状になり、反対に、小さな流速に晒された血管は内腔が縮小することが知られている。後者の場合には内腔の縮小が内膜の肥厚によって達成されることもある。この血管径の流速に対する適応的变化に関して、神谷・戸川^[6]、Zarinsら^[7]は、それぞれ犬および猿を用いて詳細に検討し、血流量の増減に伴って管径が変化することを確認するとともに、その変化が、壁剪断応力の値が約15 dynes/cm²に達した時点で完了することを示した。このような結果とMurray^[8]によって提唱された最適モデル (minimum work load model) との関係から、彼らは、動脈系の全ての血管に対して共通な、最適レベルの壁剪断応力が存在し、流速変化に対する動脈硬化や内膜肥厚などの病変を含むあらゆる適応的变化がこの最適値 (15 dynes/cm²) に達した時点で終了するという仮説(一定壁剪断応力説)を提唱している。しかしながら、なぜ循環系における壁剪断応力に最適レベルがあるのか、また、どのよう

にして血管壁が壁剪断応力を感知してその管径を自己調節するのにかんする説明はなされていない。

我々は、冠状動脈にバイパスグラフトとして移植された自家静脈が、それがもともと置かれていた静脈系におけるよりも流速の大きい（従って壁剪断応力の大きい）動脈系の環境に置かれても内膜肥厚を起こすこと、および人工血管を下肢に移植した場合に、宿主動脈と同じ内径で、同じレベルの壁剪断応力に晒されているにもかかわらず、疑似内膜が形成され肥厚することなどから、動脈系に移植された静脈や人工血管に対しては、上記の仮説による説明が不可能であること、さらには、壁剪断応力は、単なる物理量（エネルギー）であり物質ではないので、それ自体がこの流速に依存した血管現象を直接支配する因子としては考えにくいことから、この現象には何らかの化学物質が関与しているものと考えた。そして、先に述べた一連の実験的検討の結論として、肥厚性血管病（動脈硬化症および吻合部内膜肥厚）と中膜欠損による延伸性血管病（嚢状脳動脈瘤の形成）の病変発生および局在化は、いずれも血流速度およびそれによって生じる壁剪断応力と直接関係があり、血流速度の大小両極端の条件下で起こる相反する血管現象であること、また、臨床的事実として、動脈硬化症および吻合部内膜肥厚は、血中におけるコレステロールの濃度の高い人に発生しやすく、脳動脈瘤は、一般に動脈硬化性内膜肥厚の少ない血管に見られ、血中コレステロール濃度の低い人に発生しやすい傾向にあることから、これらの血管病のいずれにも血流速度と作動物質としてのコレステロールの両方が関与しており、従って、コレステロールの血中における濃度および血管壁への物質移動がこれらの血管病の病変発生ならびに進展に直接影響を及ぼしているものと考えた。そこで我々は、微視的な観点から血中におけるコレステロールの挙動について考えてみた。

コレステロールは、細胞膜の重要成分であり、従って細胞分裂および増殖に不可欠な物質である。血中におけるコレステロールは、全てリポ蛋白の形で存在し、そのほとんどが直径 210~250 Å の球形をした低密度リポ蛋白（LDL）の主成分として存在する。その血管壁への輸送は血流に依存しており、従って、それは血管壁近傍における局所血流速度によって直接影響されることになる。

図 6 は、水透過性を有する血管壁に沿って、流れに乗って移動するリポ蛋白粒子の挙動を模式的に示したものである。血管壁近傍にあるリポ蛋白粒子は、血流によって血管壁にほぼ平行に下流へ運ばれると同時に血管壁が血漿に対して透過性を有することにより生じる管壁方向への流れにより管壁方向へも運ばれる。ここで、もしも流れが遅い場合には、管壁に密着した流体層における流体の管壁に向かう速度が管軸方向の速度と同等あるいはそれ以上に大きな値になり、このことにより血管内壁表面上でリポ蛋白粒子の停滞、付着、さらには濃縮が起こることになる。これと同時に、これらの粒子のうちのあるものは分子拡散により壁表面より流れの本流へと移動する。その結果、血液—血管内壁境界面に存在するリポ蛋白粒子に、流れの状態に応じた、ある一定の平衡濃度が達成されることになる。その平衡濃度は、粒子を運ぶ血液の局所速度および血管壁における血漿の透過速度を変えるところの血圧の影響を受けるものと考えられる。それで、血液—血管内壁境界面におけるリポ蛋白粒子の濃度は、血管壁近傍における血流速度が遅いほど、また、血圧が高い（血管壁における血漿の透過速度を増大させる）ほど、高くなり、反対に、流れの速いところでは全く濃縮が起こらない、すなわち枯渇状態になるものと予想される。このことからさらに推論すると、血管系の全体を通じて、血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度は、流れの状態、特に壁近傍における流速の大小によって局所

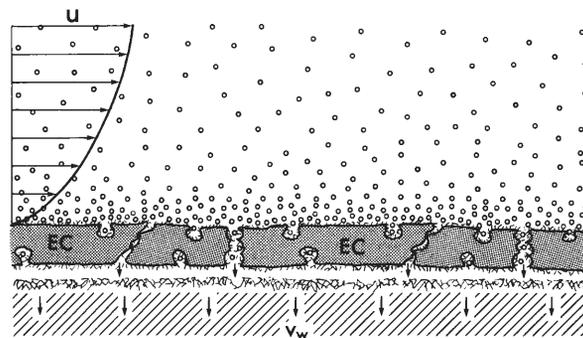


図 6 水透過性を有する血管壁に沿って、流れに乗って移動するリポ蛋白粒子の挙動を模式的に示した図。管壁による一種の濾過作用により、血液—血管内壁境界面でリポ蛋白粒子の濃縮が起こることが予想される。EC：血管内皮細胞， V_w ：管壁における水透過速度。

的に異なった値になっており、従って、そのことによりコレステロールの血管壁への取込も局所的に異なっている可能性がある。この血管内壁表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象が原因となって、動脈分岐部の外側壁、湾曲部の内側壁、および血管吻合部下流域など、二次流や渦の形成により血流に乱れが生じ、流れが局所的に遅く、壁剪断応力が小さくなっているところでコレステロールの過剰蓄積が起これり動脈硬化や内膜肥厚が発生し、そして、分岐部の分流点近傍や湾曲部の外側壁など、速い流れが管壁を直撃し、局所的に高い応力（圧力、張力、剪断応力）を負荷しているところでコレステロールの供給不足のために血管壁構成細胞の痩せ細りや壊死が起これり、嚢状脳動脈瘤が形成されるのではないかというのがこれらの血管病の局在化に関する我々の仮説である。

リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象に関する理論的検討

(1) 解析方法

前節で提唱した血管病の局在化機構に関する我々の仮説を実証するための一つの試みとして、図7に示したように内径6mmのまっすぐな血管内を、粘度 $\mu=0.035\text{ g/cm sec}$ 、密度 $\rho=1.05\text{ g/cm}^3$ を持った血液が放物線状の速度分布を持った定常流で流れている場合を想定し、コンピュータを用いたシミュレーションにより血管内壁近傍におけるリポ蛋白（コレステロールの担体）の濃度を計算し、それにおよぼすさまざまな因子の影響について検討を行った。以下にその解析の方法を簡単に述べることにする。

血流に伴うリポ蛋白分子の移動は、流れと拡散による物質移動を表す輸送方程式により規程され、円筒状の血管の場合、輸送方程式は次式で表される。

$$u \frac{\partial C}{\partial z} + v \frac{\partial C}{\partial r} = D \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right\} \quad (1)$$

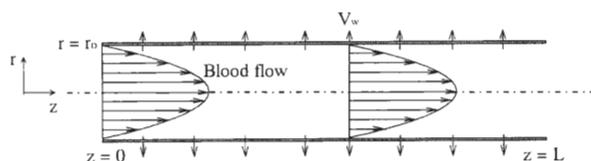


図7 リポ蛋白の物質移動の計算に用いられた円筒状のまっすぐな血管の模式図。

ここで、 r および z は、それぞれ血管の半径方向および軸方向の座標、 u および v は、それぞれ軸方向および半径方向の血液の流速、 C はリポ蛋白の濃度、 D はリポ蛋白の血中における拡散係数である。なお、管軸方向の物質移動は、対流による輸送が支配的となるので拡散による物質輸送は無視できるものと考えた。

血液を均質なニュートン流体と仮定すると、円筒状の血管内の定常流における速度分布は、壁面での水透過性を考慮に入れてポアズイユの式を修正した次式で表される。

$$u = 2u_0 \left\{ 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{2zV_w}{r_0u_0} \right) \quad (2)$$

$$v = 2V_w \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \frac{r}{r_0} \quad (3)$$

ここで、 r_0 は血管の半径、 u_0 は軸方向の平均流速、 V_w は血管壁における水の透過速度である。境界条件は、流れが軸対称であるので、濃度分布も軸対称になるという条件

$$\frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (4)$$

および、流入部では一様な濃度 C_0 になっているという条件

$$C|_{z=0} = C_0 \quad (5)$$

を与えた。血管壁面における境界条件としては、リポ蛋白のような巨大分子は血管壁を容易に透過できないことを考慮し、水の透過によって管壁へ運ばれてくるリポ蛋白分子の量と拡散によって管壁から主流へと移動する量の差が管壁内に取り込まれたり透過して行く量に等しいという物質収支を表す式

$$V_w C_w - D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = n V_w C_w \quad (6)$$

を与えた。ここで、 C_w はリポ蛋白の壁面濃度、 n は血管壁に取り込まれるリポ蛋白の割合である。

コンピュータによるシミュレーションでは、管半径 $r_0=0.3\text{ cm}$ 、長さ $L=20\text{ cm}$ の血管内を血液が定常流で流れているものとして計算を行った。なお、管壁における水透過速度 V_w は、生理的条件下で得られた実測値 $4.0 \times 10^{-6}\text{ cm/sec}$ を用いた。

計算に際しては、半径方向を500要素、軸方向を300要素にとり、解析領域を分割し、輸送方程式(1)を上流型の有限要素法に基づいて離散化して得られた連立一

次方程式を共役自乗勾配法により反復法を用いて解いた。

(2) 解析結果

図8は、レイノルズ数 ($Re = 2 r_0 u_0 \rho / \mu$ で定義された流れの状態を表す無次元量) $Re = 100$ (流量 $Q = 1.57$

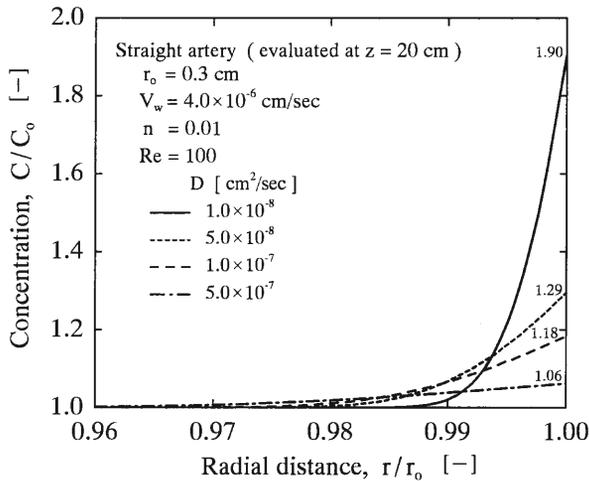


図8 分子の大きさに応じて異なる拡散係数を持った種々のリポ蛋白分子の流出部における半径方向の濃度分布。拡散速度の小さい、サイズの大きなリポ蛋白分子ほど壁面濃度が高くなることを示している。

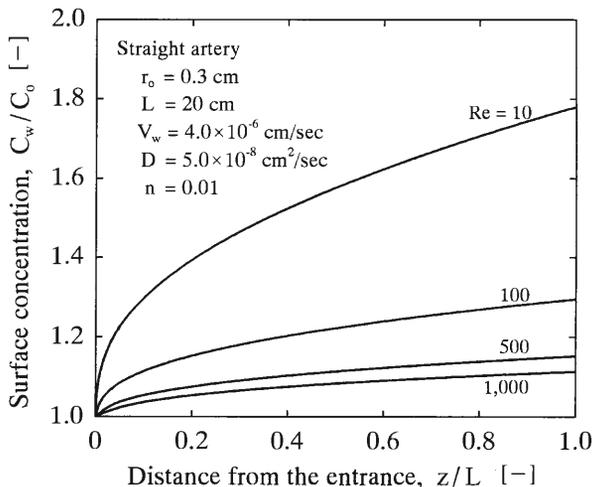


図9 異なる流量 (レイノルズ数, Re) で血液が流れている場合の血管内壁表面上におけるリポ蛋白濃度の管軸方向の変化。リポ蛋白の壁面濃度は、流れが遅いほど、そして下流に行くほど高くなることを示している。

cm^3/sec , 壁剪断速度 $\gamma = 37.0 sec^{-1}$), 血管壁における水透過速度を動脈に対する実測値 $V_w = 4.0 \times 10^{-6} cm/sec$ とし, 分子の大きさに応じて異なる拡散係数を持った種々のリポ蛋白分子の輸送を考えた場合の流出部 ($Z = 20 cm$) における半径方向の濃度分布を示したものである。これより, 拡散係数が小さいほど, すなわち分子サイズが大きいほど, 血管内壁近傍でのリポ蛋白の濃度が高くなることが分かった。例として直径 200 \AA 程度の低密度リポ蛋白 (LDL) を考えると, 血中における拡散係数が約 $5 \times 10^{-8} cm^2/sec$ 程度になるので, この図から見ると血管内壁表面上では管中心部に比べて3割程度濃度が高くなることが予想される。

図9は, 上記の直径 200 \AA 程度のリポ蛋白について異なる流量 (レイノルズ数) で血液が流れている場合に血管内壁表面上における濃度が血管の下流に行くにつれてどのように変化するかを示したものである。これより, いずれの流速 (Re) においても, リポ蛋白の濃度は, 血管の入口から下流に行くほど高くなり, しかも, 流れが遅いほど, すなわち壁剪断速度が小さいほど, 壁面濃度の増加率が大きく, 流入部から同じ距離の場所で比較すると, 流れが遅いほど壁面での濃度が高くなることが分かった。

図10は, 血管壁における水透過速度が流出部におけるリポ蛋白の壁面濃度にどのような影響を及ぼすかを

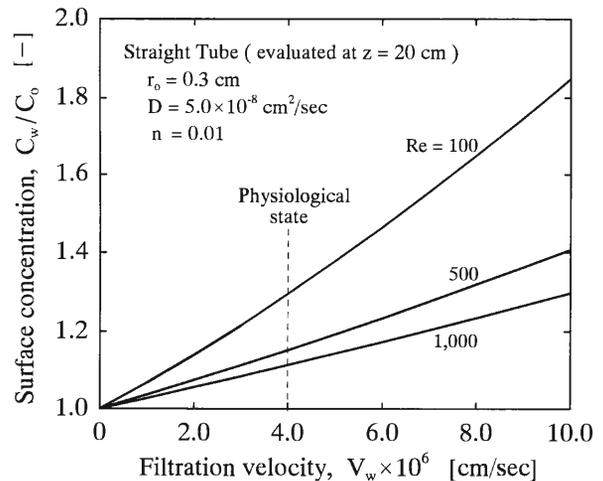


図10 リポ蛋白の壁面濃度と血管壁における水透過速度との関係。リポ蛋白の壁面濃度は, 水透過速度が大きいほど, 従って血圧が高いほど, そして流れが遅いほど高くなることを示している。

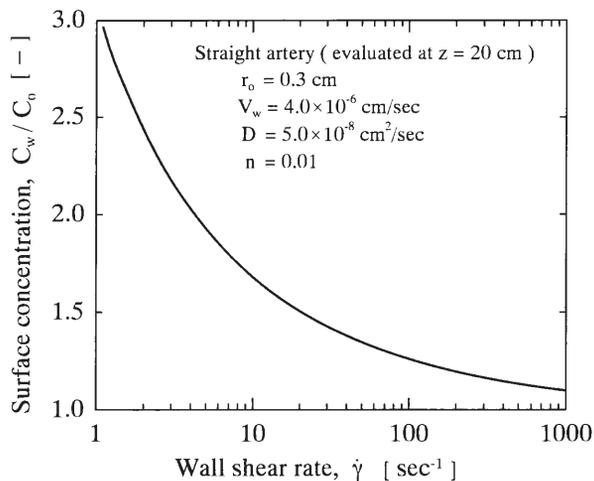


図 11 リポ蛋白の壁面濃度と壁剪断速度との関係。
 リポ蛋白の濃縮現象は、流れが極端に遅い(壁剪断速度がゼロに近い)所で起こり、反対に、流れの極端に速いところでは全く濃縮が起こらない、即ち枯渇状態になりうることを示している。

示したものである。図より明らかなように、リポ蛋白濃度は血管壁における水透過速度が大きいくほど高くなる事が分かった。血管壁における水透過速度が血圧の上昇とともに増大することを考慮に入れると、図 10 に示された結果は、血圧が高い人ほど血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度が高くなっており、従って血管壁へ取り込まれるコレステロールの量も多くなる可能性があることを示唆していると見ることができる。

最後に、図 11 は、20 cm の長さの血管の流出口でのリポ蛋白の壁面濃度と壁剪断速度 ($\gamma = 4u_0/r_0$ で求められる壁面における速度勾配である) との関係を示したものである。これより、壁剪断速度が小さいほど、すなわち流れが遅いほど、リポ蛋白の壁面濃度が高くなる事が分かった。

以上がコンピュータシミュレーションにより得られた結果であるが、これをまとめると、リポ蛋白の壁面濃度は、流れが遅いほど、血圧が高いほど、リポ蛋白(コレステロールを多く含む)のサイズが大きいくほど、そして血管の下流に行くほど高くなることになる。この事から推察すると血管分岐部や湾曲部などのように流れの剥離やゆっくりとした二次流の形成などにより壁剪断速度が極端に小さな値になっている領域においては、局所的にリポ蛋白の壁面濃度が高くなっている

ことが考えられ、これが動脈硬化の局在化の直接の原因になっている可能性が高い。今後、血管分岐部や湾曲部、さらには種々の血行再建術を施した血管についても同様の解析を行い、リポ蛋白の壁面濃度と動脈硬化、吻合部内膜肥厚および脳動脈瘤形成の好発部位との関係を明らかにして行きたいと考えている。

リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象に関する実験的検討

(1) 実験方法

血管壁が水に対して透過性を有することにより、血管内壁表面上でリポ蛋白の濃縮が起こり、その壁面における濃度が血圧(血管壁における水透過速度を変える)および血流速度(従って壁剪断速度)によって変化することが、コンピュータシミュレーションによる理論的解析の結果示された。しかしながら、不透明な血管内の、しかも、ごく壁近傍の流れの場で、動的平衡状態において起こっているこの流速に依存したリポ蛋白の濃縮・枯渇現象を、血管断面における半径方向のリポ蛋白の濃度分布を直接測定して実証することは現時点では全く不可能であり、間接的な方法に頼らざるを得ない。そこで、我々は、管壁における水透過速度がリポ蛋白の壁面濃度に依りて変化することを利用し、それが流速によっても影響を受けることを示すことにより、この現象が血管内壁表面上で起こることを実験的に証明することを試みている。実験は、血管壁のモデルとして、多孔質フィルター上に播種培養したウシ大動脈由来内皮細胞単層を用い、これを図 12 に示

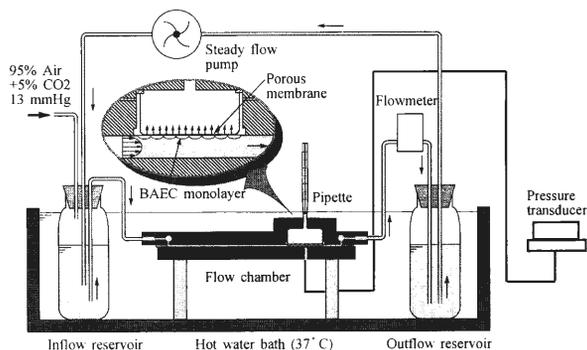


図 12 血管内壁表面上において、流速に依存したリポ蛋白の濃縮・枯渇現象が起こることを実験的に証明するために用いられた装置の概略図。

したような平行平板型フローチャンバー（幅 40 mm，高さ 0.5 mm）の流路の一部になるように装着し，循環システムを用いてウシ胎児血清，又はリポ蛋白を含む細胞培養液を定常流の条件下で流し，その時の内皮細胞単層よりの液体の透過量をフローチャンバーに取付けた毛細管流量計で測定し，それにおよぼすリポ蛋白濃度および流量（従って壁剪断速度）の影響について検討を行った。なお，上流側の灌流液の貯槽を CO₂ と空気の混合ガスで満たし，灌流液の pH を生理的範囲内の値に保つとともに，わずかに加圧して内皮細胞単層における水透過速度が生理的条件下の生体血管におけるとほぼ同じ値（ 4×10^{-6} cm/sec）になるようにした。実験は全てヒトの体温と同じ 37°C で行った。

上記の実験とは別に，同様の装置を用い，フローチャンバー内にウシ胎児血清およびリポ蛋白とほぼ同サイズの蛍光ポリスチレン粒子（直径 0.02 μ m，最終濃度 4×10^{13} 個/ml）をリポ蛋白のモデルとして混入した細胞培養液を流し，内皮細胞単層近傍のポリスチレン粒子の蛍光強度を顕微測光装置を用いて測定し，内皮細胞単層表面近傍のリポ蛋白濃度におよぼす流れの影響についても検討を行った。

(2) 実験結果

図 13 は，種々の異なった血清濃度の灌流液をフローチャンバー内に満たし，流れのない状態で実験を行った場合の灌流液中の血清（リポ蛋白）濃度と内皮細胞単層における水透過速度との関係を示したものである。これより，灌流液中の血清濃度（正確に言うと内皮細胞単層表面上におけるリポ蛋白の濃度）と内皮細胞単層における水透過速度との間には，図に示したような一対一の関数関係が存在し，したがって水透過速度を測定することにより内皮細胞単層表面のリポ蛋白濃度を推定できることが分かった。そこで，以後の実験では，血清（リポ蛋白）濃度の異なった灌流液について，灌流液の流量を段階的に変化させ，その時の内皮細胞単層よりの透過液量を測定することにより，内皮細胞単層上におけるリポ蛋白濃度におよぼす流れの影響について検討を行った。図 14 は，その一例として体積濃度で 20% の血清を含む細胞培養液を用いて行った実験の結果を示したものである。図より明らかかなように，灌流液の流量を縦の各点線の所で段階的に変えた場合，流量の増減に伴ってほぼ可逆的に水透

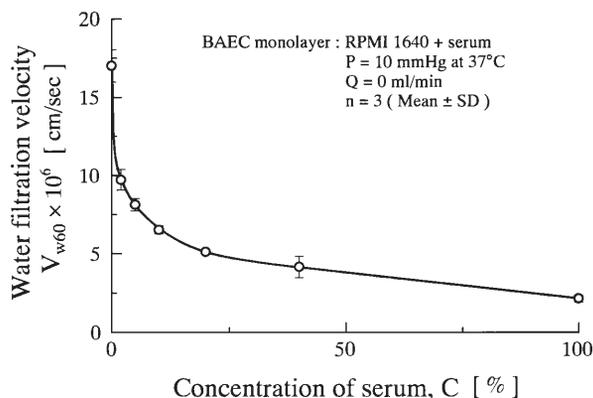


図 13 灌流液中の血清（リポ蛋白）濃度と培養血管内皮細胞単層における水透過速度との関係。

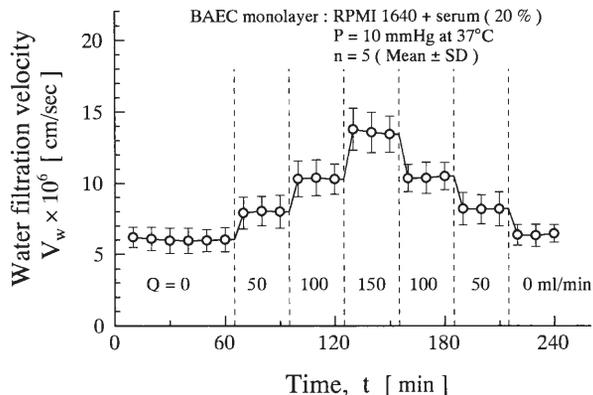


図 14 培養血管内皮細胞単層における水透過速度におよぼす流れの影響。流量（壁剪断速度）の変化に応じて，ほぼ可逆的に水透過速度が変化することと，図 13 に示した関係より，壁面におけるリポ蛋白の濃度が流れによって変化していることがわかる。

過速度が変化し，流量が大きいほど水透過速度も大きな値を示すことが分かった。この結果と図 14 に示した関係を合わせて考えると，内皮細胞単層表面上におけるリポ蛋白の濃度は，流量の増大とともに低下し，流れが極度に速い場合には全く濃縮が起こらず，即ち枯渇状態になり，反対に，流量が小さい場合，即ち流れが遅い場合には高くなり，濃縮が起こることが分かった。なお，血清濃度 40 および 100% の灌流液を用いて行った場合にも，濃度が高くなるにつれて水透過速度における変化は小さくなるが，同様の結果が得られている。最後に，図 15 は，リポ蛋白のモデルとしての蛍

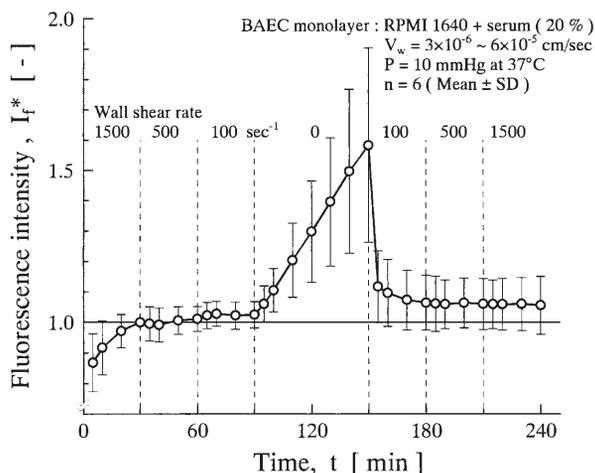


図15 培養血管内皮細胞単層の壁面近傍におけるリポ蛋白のモデルとしての蛍光ポリスタイレン粒子の濃度におよぼす流れ(壁剪断速度)の影響。

光ポリスタイレン粒子の壁面近傍における濃度(リポ蛋白濃度に比例するものと考えられる)におよぼす流れの影響を示したものである。この図からも、流れが極端に遅い(剪断速度がゼロに近い)ほど蛍光強度が高くなり、蛍光粒子の濃縮が起こることが分かる。

以上、血管内壁と血液のモデルとして、それぞれ、培養血管内皮細胞単層と血清を含む細胞培養液を用い、流れの実験を行うことにより、前述の理論的解析により示唆された流速に依存したリポ蛋白の濃縮・枯渇現象の起こることを確認することができた。しかしながら、これは、あくまでもモデル実験の結果であり、100%信頼できるものではない。今後は、実験用動物より採取した血管を用いた実験や、水透過性の異なる人工血管の移植実験などにより、この現象が確実に生体内で起こっていることを立証したいと考えている。

おわりに

動脈硬化症、内膜肥厚などの病変を含む血管系の流速依存性再構築に関する過去20数年間の研究は、そのほとんどが高剪断応力によるものか、あるいは低剪断応力によるものかの判定に関するものであり、血管内皮細胞の形態および生理的・生化学的機能に及ぼす剪断応力の影響に関してはかなり新しい知見が得られたが、病変の局在化の機構の解明に関しては全く進展が見られなかった。我々は、この流速の変化によって

引き起こされる血管系の再構築が剪断応力によるのではなく、血管壁の栄養素としてのコレステロールの物質移動によって支配されるものであり、血管内壁上におけるリポ蛋白(コレステロールの担体)の濃度が、これまでほとんど無視されて来た血管壁の水透過性および管壁近傍の血流速度によって変化するために起こる、即ち、リポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象によるものであるとの全く新しい考えに基づいて理論および実験の両面より研究を進めて来た。その結果、未だ100パーセント確信できるまでには至っていないが、我々が提唱した仮説の通りに、血管壁が血漿に対して透過性を有することによる一種の濾過作用により、確かに血管内壁上でリポ蛋白の濃縮が起こり、そのリポ蛋白の濃度が血圧(血管壁における血漿の透過速度を変える)に比例し、流速(従って壁剪断速度)にはほぼ反比例して変化し、流れの非常に遅い(壁剪断速度がゼロに近い)所では管中心部における値よりも数十パーセント高くなり、流れの速い所では濃縮が起こらず、ほとんど管中心部におけると同じ値になることが分かった。このことは、血管系の全体を通じて血管内壁上におけるリポ蛋白の濃度が流れの状態、特に壁剪断速度の大小によって局所的に異なった値になっており、従って、その事によりコレステロールの血管壁への取込みも局所的に異なることを示唆するものであり、動脈硬化症を始めとする血管病の局在化の直接の原因になっていることが考えられる。もしも、今後、解剖により得られたヒトの血管の組織標本作製による観察や動物を用いた慢性実験により、内膜肥厚や動脈瘤形成の好発部位と、コンピュータシミュレーションにより予測された血管内壁上におけるリポ蛋白の局所濃度との間の相関関係について検討することにより、この流速に依存した血管内壁上におけるリポ蛋白の濃縮・枯渇現象が生体の血管内で起こっていることを実証することができれば、これは、血管現象に関する重大な発見となり、動脈硬化症はもちろんのこと、嚢状脳動脈瘤の形成、狭窄後拡張、吻合部内膜肥厚、および流量変化に伴って起こる血管径の適応的变化など、ほとんどの血管現象に対して理論的説明が可能になり、今後、これらの血管病の予防および治療、さらには、内膜肥厚を阻止するような人工血管の開発や最適血行再建術の確立にも大いに役立つものと期待される。我々の努力が、近い将来において

重大な発見につながることを夢見て、研究室の総力を
挙げてこの現象の更なる解明に取り組んでいるところ
である。

【参考文献】

- [1] Karino, T., Motomiya, M.: *Biorheology* 20, 119-127 (1983).
- [2] Asakura, T., Karino, T.: *Circ. Res.* 66, 1,045-1,066 (1990).
- [3] 狩野 猛: *診療と新薬* 29(10), 20-23 (1992).
- [4] Ishibashi, H., Sunamura, M., Karino, T.: *Surgery* 117, 409-420 (1995).
- [5] Karino, T.: *Inter. Angio.* 5, 297-313 (1986).
- [6] Kamiya, A., Togawa, T.: *Am. J. Physiol.* 239, H14-H21 (1980).
- [7] Zarins, C.K., et al.: *J. Vasc. Surg.* 5, 413-420 (1987).
- [8] Murray, C. D.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 12, 207-214 (1926).

生体におけるリズム現象の制御とゆらぎに関する研究

適応制御研究分野 河原 剛 一

生体には多種・多様なリズム現象が存在しており、それぞれのリズムは個体の生命の維持と密接に関連している。生体に対する外環境からの周期性外力、もしくは生体のリズム活動の結果として生ずる様々な周期性外力を除去しても基本的なリズムは存続することから、ほとんどの生体リズムは生体内部で内因性に形成されていると考えられている。そしてそれらの基本的リズムは、神経系や内分泌系の複雑な制御を受けており、それが生体システムの持つ柔らかな性質、例えば外環境および内環境の変化に対するシステムの適応性発現の基盤となっている。またそのことは、通常我々が観察している複雑な生体リズムゆらぎの起源ともなっている。電子科学研究所へ赴任してから間もないこともあり、ここでは生体リズムの制御とゆらぎに関する私のこれまでの研究を紹介すると共に、本研究分野の今後の研究展開について述べる。

1. はじめに

生体には比較的短周期の呼吸や心拍のリズムから、ほぼ1日を周期とする体温や睡眠・覚醒リズム、さらには一月、一年を単位とする長周期のリズムまで多くのリズム現象が存在しており、それらは生体機能の発現と密接に関連している。例えば、ほぼ1日を周期とするサーカディアンリズムは、地球の自転に基づいた生体外環境の変化に対して、生体が悠久なる進化の過程で適応的に獲得し、そして遺伝子記憶として蓄えられてきたものと考えられる。また、呼吸や循環などの比較的短周期のリズムは、生体やそれを構成している器官の物理的な大きさ・容量の制限条件下において、生体がある機能の発現に定型的な繰り返し動作を生存戦略として採用したことの必然であると考えられる。

ほとんどの生体リズムは、生体に対する外界からの周期的な感覚入力、もしくは周期的運動の結果として生じる、中枢への周期性を持った感覚入力を排除しても存続することから、少なくとも基本的なリズムは生体内部の中枢神経系内で形成されていると推定される。そしてそれらの基本的なリズムが、神経性および体液性の制御を受けて修飾され、ゆらぎを持った生体

リズムとして観察されることになる。古来、生理科学の基本原理解は「ホメオスタシス（生体恒常性）」の概念であり、生体内環境は外環境の変動に対して一定に保たれるように生体制御系が機能しており、もしある生理パラメータがゆらいでいけばそれは単なる雑音に過ぎない無意味な変動と考えられてきた。しかし、最近ではそのような常識的な概念が覆されつつあり、「ゆらぎ」とくに生体リズムのゆらぎ現象に関し、非線形力学などその解析手法の発展と相まって、ゆらぎことの生理学的・病理学的意味が着目されるようになってきた。

以上のように、生体における種々のリズム現象は個体の生命の維持にとって基本的かつ重要な機能発現であり、これまで私は学生をはじめとする多くの方々の協力のもとに、生体リズムの制御とゆらぎについて研究を行ってきた。本稿では多種・多彩な生体リズムのなかから呼吸・心拍そして歩行のリズムを取り上げ、これまで私が行ってきた研究の概要を解説する。

2. 呼吸運動と姿勢の神経制御機構

呼吸は血液・ガスホメオスタシス達成のための、ガス交換を目的とする周期的な運動である。生命の維持にとって極めて重要なガス交換のための呼吸は、それ

故に強い自律性を有する運動であり、意識の低下した状態、例えば睡眠時においても持続するのは必然である。それにもかかわらず、呼吸運動は随意意志によっても制御が可能であるという特徴を有している。循環系とは異なる呼吸運動のこのような性質は、生物が進化のある段階で呼吸に使用すると同一の器官を他の機能、すなわち高い随意性が要求される生物間コミュニケーションの手段としての発声・言語機能発現に共用した生物の戦略に基づいているのではないかと推測している。実際、哺乳動物の主要な呼吸筋である横隔膜は、随意意志によって制御可能な骨格筋である。私は、生物が採用したこの戦略が睡眠時における呼吸障害と密接に関連していると考え、その神経機構の解明を試みた。

2.1 呼吸運動と抗重力筋活動の同時抑制

哺乳動物の脳幹内呼吸リズム形成機構をマクロ的・非線形自励振動子として捉え、無麻酔・除脳ネコを実験動物として用いて、呼吸リズムの外力に対する引き込み現象の解析を行ってきた^[1]。呼吸振動子に対する外力として歩行振動子からの周期性外力を想定し、歩行運動時における呼吸リズムのゆらぎに着目して、歩行リズムに対する呼吸リズムの引き込み現象の存在とそのパラメータ条件とを明らかにした^[2]。この実験過程において、動物が除脳固縮に依って歩行が不可能であった場合、脳幹の橋中心被蓋野 (Dorsal Tegmental Field, DTF) に微小電気刺激を加えることによって固縮の除去を試みた。DTF 部位は森、河原らの研究によって、抗重力筋活動の強力な抑制効果を持つことが分かっていた^[3]。ところが DTF 刺激は抗重力筋活動ばかりではなく、呼吸運動も強く抑制することを見つけた^[4]。図 1 に、DTF 刺激によって誘発された後肢抗重力筋活動と呼吸運動の同時抑制現象の例を示した。DTF 刺激効果は次の 3 点に纏められる。(i) 刺激により後肢・抗重力筋であるヒラメ筋活動は著しく減弱し、そして消失した筋活動は刺激停止後においても長時間回復しない。刺激強度を上げることによって、ほぼ全身の筋緊張が失われ、*atonia* となる。(ii) 横隔膜筋活動も刺激により強く抑制されるが、刺激中にもその活動は徐々に回復する。(iii) 刺激停止後においては rebound 的な横隔膜筋活動の増強が生ずるが、ヒラメ筋活動は抑制されたままである。

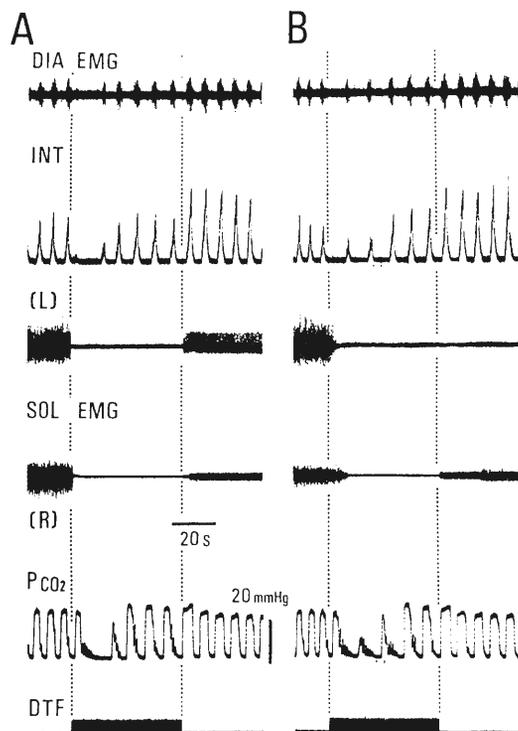


図 1 除脳ネコの脳幹刺激による呼吸と筋緊張の同時抑制。A, B は同一ネコにおける同一部位の刺激効果であるが、刺激強度がそれぞれで異なり、A では 50 μ A, B では 40 μ A である。DIA. EMG, 横隔膜筋電図; INT, 積分筋電図; SOL. EMG, ヒラメ筋電図; P_{CO₂}, 呼吸ガス中の CO₂ 分圧; DTF, 橋中心被蓋野

以上の刺激効果をもたらす脳幹内部位は、背腹側方向には極めて限局しており、しかも筋緊張の抑制と呼吸運動の抑制とは常に link していた。従来この同時抑制現象が見過ごされてきたのは、DTF 刺激による筋緊張の抑制効果は刺激中のみならず刺激停止後にも長時間持続するのに対し、呼吸運動は刺激によりいったんは強く抑制されるが刺激中にも回復し、見かけ上は呼吸抑制効果が存在していないように見えるためと思える。

DTF 刺激は上述したように横隔膜筋活動を強く抑制するが、横隔膜と同様に哺乳動物における吸気筋である外肋間筋活動も抑制し、とくに刺激によって消失した外肋間筋の tonic な成分は刺激の停止後にも回復しない^[5]。また DTF 刺激は、舌の patency を保持するためのおとがい舌筋を支配している舌下神経活動も強く抑制する^[6]。舌下神経には通常、その tonic な活動に呼吸リズムと同期したリズム性の活動が重畳してい

る。DTF 刺激は舌下神経活動の中でもとくにその tonic な活動を抑制し、その抑制効果は刺激停止後にも長時間持続した。このことはヒラメ筋や外肋間筋の tonic な活動に対する効果と極似していた。このように DTF 刺激は、呼吸運動に関連した多くの骨格筋活動を抑制する。

DTF 刺激は全身の筋緊張の喪失現象、すなわち atonia を誘発するが、そのような骨格筋の強力な抑制下にあっても呼吸リズムは刺激中にも回復してくる。図 2 は DTF 刺激による呼吸運動の変化を示している。DTF 刺激で横隔膜筋活動は強く抑制され、30 秒以上におよぶ apnea となっていることが PCO_2 の記録から推定できる。しかし、刺激中にも呼吸運動は徐々に回復し、刺激の後半部においては安定した呼吸となっている。ここで注目すべきことは、この期間での呼気終末 CO_2 分圧が刺激開始以前とほぼ同一のレベルに維持されていたことである。すなわち、刺激前と刺激中のこの期間内では、呼吸周波数などの呼吸パターンはそれぞれで大きく異なっているが、分時換気量はほぼ一定に維持されていたことになり、chemical regulation mechanism は刺激中にも正常に動作をしていたと考えられることである。

DTF 刺激の停止後には、呼吸活動の一過性の rebound 的な増強が見られ、hyperventilation となってその結果 hypocapnia となった。この rebound 現象は、一般的には強い抑制からの解放現象として知られてお

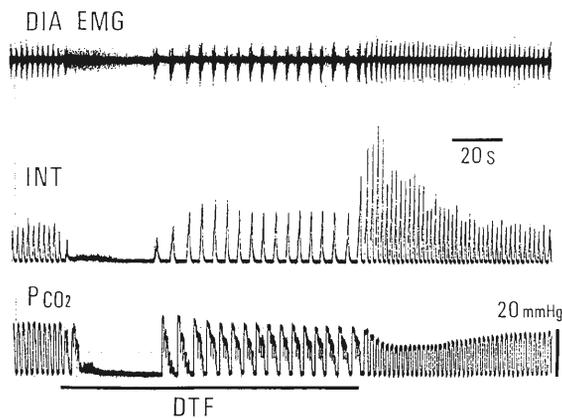


図 2 脳幹の微小電気刺激による呼吸運動の抑制とその回復過程。刺激によって呼吸は強く抑制され、無呼吸 (apnea) となるが、刺激中にも呼吸は回復する。刺激停止後には呼吸の rebound 的増強が起こる。

り、このことは呼吸は回復してはいるが、DTF 刺激による抑制が刺激中 adapt することなく持続していたことを示唆している。すなわち、刺激中における呼吸の回復は、DTF 刺激による抑制効果に拮抗した、強い respiratory drive が生じたためと考えられる。そして、この respiratory drive は呼吸抑制の結果としての動脈血 CO_2 , O_2 分圧の変化、とくに CO_2 分圧の上昇が起源であると推定される。

2.2 呼吸・筋緊張同時抑制の神経機構と睡眠時における呼吸制御

呼吸運動や筋緊張の抑制に関与する DTF 部位には、ほとんど細胞体が存在していない。よって、DTF の刺激効果はその部位を通過している神経線維を活性化したことに基づくと推定できる。そこで、DTF の神経起源を、電気生理学のおよび解剖学的に同定した。その結果、DTF の電気刺激によって逆行性応答をするニューロンがほぼ吻側橋網様核 (nucleus reticularis pontis oralis, PoO) に限局して認められ、しかも記録部位の連続微小電気刺激によって DTF 刺激効果を再現できることが分かった^[7]。PoO ニューロンはコリン受容性ニューロンといわれていることから、次にこの部位に choline agonist である carbachol の微量注入を行った。DTF 刺激とは時間経過は異なるものの、呼吸運動と抗重力筋活動が同時に抑制された^[8]。

次に、DTF 部位からの下行性投射を解析した。DTF 刺激によって単シナプス性に応答するニューロンは、尾側橋および延髄の巨大細胞性網様核 (nucleus reticularis gigantocellularis, NRGc) のやや背側部にほぼ限局して認められた。そして、それら NRGc ニューロンのほとんど全てが、脊髄 L1 の刺激によって逆行性応答を示した^[9]。以上の結果に基づき、DTF 部位を中心とする呼吸運動および筋緊張の同時抑制に関与している橋より尾側の中枢神経機構をほぼ明らかに出来た^[9]。

これまで述べてきた PoO に起源を持つ下行抑制系の activation は、atonia など REM 睡眠時に生ずる生理現象と類似の効果を誘発する。また、除脳されていない動物においては、REM 睡眠時に PoO ニューロンの活動が昂進すること、および PoO への carbachol の微量注入によって REM 睡眠を誘発できることが報告されている。以上のことは、REM 睡眠時に PoO を

起源とし、DTF を介する下行抑制系が activation されている可能性を示唆している。以上の実験事実および DTF 刺激によって誘発される apnea と atonia 現象に基づき、睡眠時無呼吸に関する以下のような仮説を提唱した^[10]。

呼吸運動は極めて強い自律性を有すると共に、随意制御も可能であるという特徴を有する。生物が、生命の維持に直結したガス交換機能の達成を骨格筋で行うという戦略を採用したことが睡眠時無呼吸の神経基盤であると考えた。REM 睡眠時においては、ほとんど全ての骨格筋活動が抑制されて atonia となる。当然骨格筋である外肋間筋や横隔膜などの呼吸関連筋活動も抑制される。しかし、睡眠時において呼吸が停止すれば直ちに生命の危険に直面することになる。それ故、哺乳動物における主要な呼吸筋である横隔膜は、他の骨格筋が抑制されたままであるにもかかわらずその活動を回復しなければならない。よって、見かけ上は REM 睡眠時に横隔膜筋活動は抑制されていないように見えることになる。そしてこの呼吸回復は、呼吸抑制の結果動脈血 CO_2 分圧が上昇し、それが中枢化学受容器で検出されることによる respiratory drive に基づくと推定される。このことは、もし中枢化学受容メカニズムに機能不全があれば、睡眠時において呼吸が抑制されたときにそれに拮抗する respiratory drive が生じないことになり、睡眠時における重篤な呼吸不全に陥る。中枢性の睡眠時無呼吸は、小児突然死症候群 (sudden infant death syndrome, SIDS) の主因と考えられており、最近 SIDS において延髄腹外側部の cholinergic なニューロン群に障害が認められること、およびそれらのニューロン群は中枢性の CO_2 受容器である可能性が高いことが報告された^[11]。これらの事実は、上述した仮説の妥当性を支持しているものと考えられる。

3. 生体リズムのゆらぎとその機能的意義

規則的に見えるほとんど全ての生体リズムにもゆらぎが存在している。我々はこれまで、生体に普遍的に認められるこのリズムゆらぎの機能的な意義を明らかにするために、呼吸・心拍および歩行リズムを対象とした実験的、数理科学的解析を行ってきた。ここではこれまでに行ってきたリズムゆらぎに関する 2 つの研究について述べる。

3.1 無麻酔・除脳動物における呼吸・心拍・歩行リズムゆらぎ

実験には中脳ネコを用い、トレッドミル上での歩行運動時における呼吸リズムゆらぎの解析を行った。その結果、呼吸リズムは歩行リズムによって変調されていること、および呼吸・歩行リズム間の結合強度が動物の歩容に依存して変化し、gallop 時に著しく強化されることなどを明らかに出来た^[2]。しかしこの動物標本においては、リズムゆらぎの起源が中枢性か末梢の feedback afferents に基づいているのかを決めることが出来ない。そこで、両側の迷走神経を切断し、気胸を行い、不動化した除脳ネコを実験動物として用いたリズムゆらぎの解析を行った。この標本では脳幹の呼吸中枢に対する mechanical & chemical feedback loop がほぼ開放されており、さらに歩行に伴ったリズム性の feedback afferents も存在していないため、生体リズムゆらぎの中枢機構を解析することが可能である。図 3 にはこのような動物標本における、心拍および横膈神経の遠心性発射活動で評価した呼吸リズム、人工呼吸器による換気リズムの例を示した。この標本では、心拍は極めて安定なリズムを刻んでおり、さらに呼吸中枢に対する feedback loop が開放されているために、中枢性の呼吸リズムと換気のリズムとは独立に振動しているように見える。しかし、我々の行ったリズムゆらぎのスペクトル解析によって、心拍は人工呼吸の換気リズムばかりではなく、中枢性呼吸リズムによっても迷走神経を介さない変調を受けていることが分かった^[12]。また、横膈神経の発射活動で評価した呼吸リズムのゆらぎ解析によって、normocapnia ではゆらぎスペクトル密度が周波数に逆比例する $1/f$ 特性を示すが、hypercapnia ではスペクトルが低周波帯域

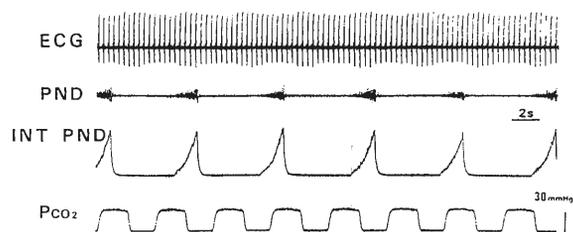


図 3 不動化した除脳ネコの心拍および呼吸リズム。ECG, 心電図; PND, 横膈神経の発射活動; INT PND, 横膈神経発射の積分; PCO_2 , 呼吸ガス中の CO_2 分圧

で平坦化し、白色様の特性に変化することが分かった^[13]。これらの実験結果は、呼吸リズムゆらぎが動脈血 CO₂ 分圧のような動物の内部状態を反映しているパラメータに依存して変化していることを示し、リズムゆらぎが動物の状態を推定するための無侵襲的なパラメータとなり得ることを示唆している。

次に、このような動物標本の中脳歩行誘発野 (mesencephalic locomotor region, MLR) へ連続微小電気刺激を加えることで歩行リズムを誘発した。動物は不動化されているため、運動神経から遠心性の歩行リズムに対応した発射活動は記録されるが、実際の歩行運動は誘発されない。このような状態は fictive locomotion と呼ばれている。図 4 には fictive locomotion 時における心拍および呼吸リズムゆらぎのスペクトル解析結果を示した。A は心拍と中枢性呼吸リズムとの、B は心拍と Lateral Gastrocnemius Nerve (LGN) の発射活動で評価した歩行リズムとの、C は呼吸リズムと歩行リズム間のコヒーレンスを示している。この時の人工呼吸器の換気周波数は 0.25 Hz、中枢性の平均呼吸周波数は約 0.5 Hz、中枢性の平均歩行周波数は約 1.5 Hz であった。この結果は心拍が換気リズムばかりではなく、中枢性の呼吸リズムおよび歩行リズムによっても変調され、ゆらいでいることを示している。そして、それらの生体リズム間の結合は動脈血 CO₂ 分圧のような内部パラメータに依存して変化し、複数の生体内振動子が可変結合型の階層構造を持っている可能性を明らかに出来た^[14-16]。

3.2 鶏胚における心拍リズムゆらぎの個体発生

生物の個体発生過程においては、中枢性リズム発生器 (振動子) の形成、それら振動子への神経支配の形成、そして振動子間結合神経回路の形成と生体リズムゆらぎとの関連を解析できる。我々は鶏胚を実験対象として、以上の観点から生体リズムゆらぎの個体発生過程での変化を解析した。

鶏胚の心電図が計測可能となった孵卵 10 日頃から孵化するまでの心拍周期を計測し、周期ゆらぎのスペクトル解析を行った。孵卵 12 日頃までの心拍は極めて規則正しく、顕著なゆらぎは認められなかったが、その後孵卵日数の増加と共にゆらぎが増大し、孵卵 17 日頃からはゆらぎスペクトル密度が周波数に逆比例する 1/f ゆらぎを示した^[17]。心拍時系列ゆらぎの 0.1 Hz 以

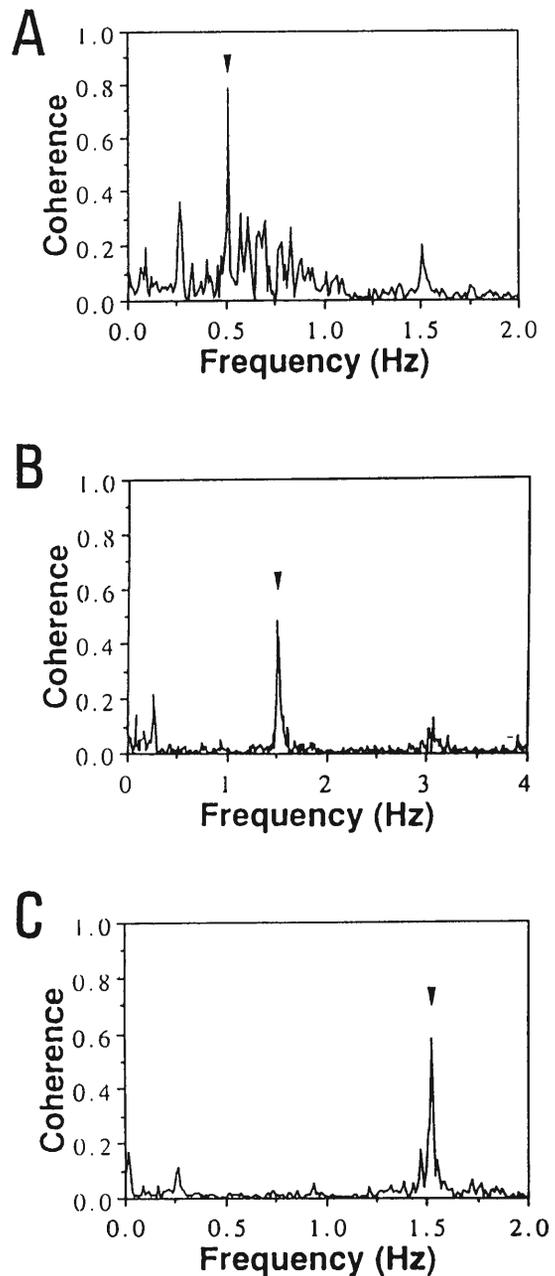


図 4 不動化した除脳ネコの中脳歩行誘発野連続微小電気刺激により誘発した fictive locomotion 時における心拍、呼吸および歩行リズム間のコヒーレンス

下の周波数帯域のスペクトル密度に対して最小 2 乗法によって両対数軸上での回帰直線を求め、その傾きの発生過程における変化を解析した結果を図 5 に示す。図は異なる 3 つの鶏胚での結果をまとめたものである。3 卵共に、孵卵日数の浅い時期には傾きがゼロ近傍に分布しており、ほぼ白色様のゆらぎを示していた。

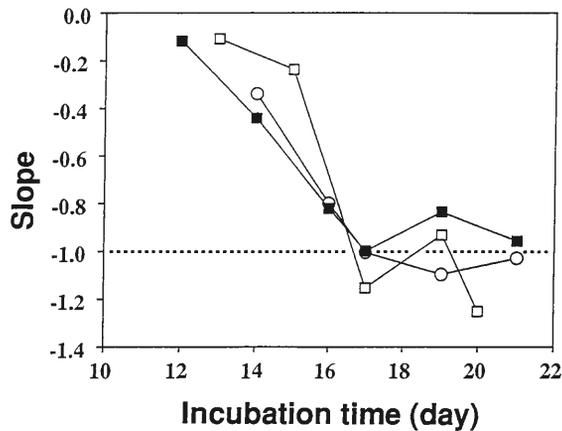


図5 鶏胚における心拍ゆらぎスペクトル周波数特性の個体発生過程における変化

孵卵日数の増加と共に傾き（絶対値）が増加し、孵卵17日頃になるとそれが（-1）、すなわち1/f様のスペクトル特性に変化した。

これらの実験結果は、鶏胚の心拍リズムゆらぎスペクトル特性が個体発生過程で大きく変化することを初めて示したものであり、この変化には胚における神経回路の発達過程が密接に関連していると考えられる。とくに心拍ゆらぎの場合には、心臓の自律神経支配（交感および副交感神経系）の発生過程での変化が心拍ゆらぎ特性の変化の起源である可能性が高い。

以上、除脳ネコの呼吸・心拍・歩行リズムや鶏胚の心拍リズムを対象とし、それら生体リズムのゆらぎに関する解析を行い、少なくともゆらぎのいくつかの成分の起源、生理学的機構については明らかとなった。しかしそのことは、生体リズムがゆらぐことの意味を必ずしも理解したことには繋がらない。すなわち、例えば心拍が中枢性に呼吸や歩行リズムによってゆらが

されていること、あるいは心拍ゆらぎスペクトルが1/f特性を持つことが、生物の生存にとってどの様な意義があるのかということである。この疑問に対して答えることが出来ない限りにおいては、これまで述べてきた生体リズムのゆらぎが単なる雑音に過ぎないということを否定したことにはならない。ゆらぎは個体の生存戦略においてどの様な役割を果たしているのだろうか？

4. おわりに

本稿では、生体におけるリズム現象の制御とゆらぎについて、私がこれまで行ってきた研究の概要について述べた。生命現象に対する基本的な研究姿勢は、まず現象を把握・理解し、そしてそれが合目的的生体システムという枠組みの中でどの様な機能的意味を持っているのかを解明するというものであった。神経科学も含む最近の生命科学においては、分子生物学的手法による遺伝子レベル・分子レベルでのミクロ的研究が隆盛を極めている。しかし、そのようなミクロ的アプローチは本質的に要素還元的であり、「樹を見て森を見ず」との諺があるように、全体としての生体機能とはかけ離れた場での議論に陥りやすい。一方システムのアプローチは、生体全体を見通せる利点があるものの本質的に演繹的手法であり、論理展開の基となる「仮説」の信憑性が問題となって、論理的正しさ故に誤謬を冒す危険を常に伴っている。

いうまでもなく神経系の単位機能素子は神経細胞・ニューロンである。今後は神経細胞の機能発現と、神経細胞から構成されるマクロ的神経システムの機能発現との橋渡しとなり得る研究を展開し、生命現象の本質に少しでも近づくことが出来ればと考えている。

【参考文献】

- [1] Kawahara, K. et al., *Biol. Cybern.*, 58, 235 (1988)
- [2] Kawahara, K. et al., *J. Appl. Physiol.*, 67, 110 (1989)
- [3] Mori, S. et al., *J. Neurophysiol.*, 48, 737 (1982)
- [4] Kawahara, K. et al., *Brain Res.*, 473, 81 (1988)
- [5] Kawahara, K. et al., *Brain Res.*, 481, 180 (1989)
- [6] Kawahara, K. et al., *Brain Res.*, 479, 185 (1989)
- [7] Kawahara, K. et al., *Brain Res.*, 474, 403 (1988)
- [8] Kawahara, K. et al., *Control of Breathing & Its Modeling Perspective*, Plenum, 315 (1992)
- [9] Kawahara, K. et al., *Brain Res.*, 538, 303 (1991)
- [10] Kawahara, K. et al., *Cardioresp. Motor Coordination*, Springer, 200 (1991)
- [11] Hannah, C. et al., *Science*, 269, 1446 (1995)
- [12] Kawahara, K. et al., *Biol. Cybern.*, 63, 251 (1990)

- [13] Kawahara, K. et al., *Biol. Cybern.*, 61, 265 (1989)
- [14] Kawahara, K. et al., *Neurosci. Lett.*, 103, 326 (1989)
- [15] Kawahara, K. et al., *Neurosci. Lett.*, 150, 200 (1993)

- [16] Kawahara, K. et al., *Meth. Inform. Med.*, 33, 129 (1994)
- [17] 河原剛一, *BME*, 8, 22 (1994)

特定研究「機能性複合組織の高感度・精密計測に関する総合的研究」の研究成果報告

特定研究報告

研究代表者 下村 政嗣

「機能性複合組織の高感度・精密計測に関する総合的研究」の研究成果報告

研究代表者 下村 政嗣 43

を開発することにある。二年間の研究成果である。二次元分子組織の作製と構造評価、ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製、量子干渉素子による神経細胞感測器の高感度計測、血管内臓表面とリボ蛋白の相互作用の高感度光学測定、神経情報処理の数値モデルによる高感度計測の検証、神経細胞の非線形相互作用の高感度計測、元干渉素子を用いた包絡計測法の開発。によって得られた素子・分子から生体にいる様々なスケールレベルにおける複合組織の計測に関する多岐にわたる知見は、高感度・高精度計測へ大いに活用されるものと期待する。

1. ナノメータ量子・分子スケール複合組織の高感度・高精度計測の研究

(I) ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製に関する研究

末享 煥夫、若井 真穂、下村 政嗣
ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製の研究では、新たに作製したII-VI族化合物半導体超格子のエキシトン吸収を反射分光法により測定し、量子閉じ込め効果を見いだした。II-VI族半導体超格子におけるエキシトンとフォノン、フォトンとの相互作用を実験的に明らかにすることを目的として、まず有機金属気相成長法で ZnSe/ZnSe 超格子についてそのヘテロ界面の構造を定量的に評価した。さらに、反射スペクトル測定などからヘテロ界面の構造を定量的に評価することからヘテロ界面が形成されていることが確認された。また、分子レベルでヘテロ界面構造が評価されたこと、量子効果の検証によるヘテロ界面構造の定量的評価から、ZnSe/ZnSSe 超格子を用いた量子干渉素子の開発、ならびにフォノンとの相互作用の検証、量子効果

閉じ込め効果について検討した。(平成6年度)
青色半導体レーザーを実現するためには、ヘテロ構造のバンドオフセットを大きくとり、キャリア効率よく閉じ込める必要がある。そこで、ワイドギャップ超格子の形成と評価を目的として、II-VI族化合物半導体の新しい材料系としての ZnSe/MgS 超格子を開発し、その作製を試みた。超格子は 3.0nm 周期で超格子まで格子緩和なく GaAs 基板上にエピタキシャル成長することが可能であった。ZnSe 界面の構造を高分解能原子力顕微鏡による原子レベルでの評価が実施され、作製した ZnSe/MgS 超格子は量子閉じ込め効果が生じていることを確認した。ZnSe 超格子を用いて青色レーザーを作製する場合は、ZnSe 超格子の構造を合わせ、バンドオフセットを大きくとることから評価が必要である。本報告では、ZnSe 超格子を用いた ZnSe/MgS 超格子の作製、ヘテロ界面の構造を高分解能原子力顕微鏡による原子レベルでの評価が実施されたこと、量子効果の検証によるヘテロ界面構造の定量的評価から、ZnSe/ZnSSe 超格子を用いた量子干渉素子の開発、ならびにフォノンとの相互作用の検証、量子効果

特定研究「機能性複合組織の高感度・精密計測に関する総合的研究」の研究成果報告

研究代表者 下村政嗣

本研究は平成6年度、7年度の二年間に実施された特定研究「機能性複合組織の高感度・精密計測に関する総合的研究」に関するものである。本特定研究は、材料科学、生体工学、数理理論の研究者が有機的な連携のもとに電子科学に関する研究を行っている本研究の特徴を十二分に活かし、半導体や分子超薄膜などのナノメータ分子スケール、神経組織などのマイクロメータ細胞スケール、及び器官などミリメータ生体スケールにいたる幅広い階層にまたがった複合組織の構造と機能を高感度かつ精密に計測する新しい光学的、電子的手法を開発することにある。二年間の研究成果である、二次元分子組織の作製と構造評価、ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製、量子干渉素子による脳神経細胞磁場の高感度計測、血管内膜表面とリポ蛋白の相互作用の高感度光学測定、神経情報処理の数理モデルによる高感度計測の解析、神経細胞の非線形相互作用の高精度計測、光干渉法を用いた位相計測法の開発、によって得られた原子・分子から生体にいたる様々なスケールレベルにおける複合組織の計測に関する多岐にわたる知見は、高精度・高感度計測へ大いに活用されるものと確信する。

1. ナノメータ原子・分子スケール複合組織の高感度・高精度計測の研究

(1) ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製に関する研究

末宗幾夫，沼井貴陽

ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製の研究では、新たに作製したII-VI族化合物半導体超格子のエキシトン吸収を反射分光法により測定し、量子閉じ込め効果を見いだした。II-VI族半導体超格子におけるエキシトンとフォノン、光子との相互作用を実験的に明らかにすることを目的として、まず有機金属気相成長したZnSe/ZnSSe超格子についてそのヘテロ界面を光学的に評価した。励起PL、反射スペクトル測定などから、一原子層の平坦なテラスからなるヘテロ界面が形成されていることを確認した。また原子レベルでヘテロ界面を直接評価するために、原子間力顕微鏡によるヘテロ界面評価の研究も進めた。このようなZnSe/ZnSSe超格子におけるエキシトン束縛エネルギー、ならびにフォノンとの結合定数に対する量子

閉じこめ効果について検討した。(平成6年度)

青緑色半導体レーザーを実用化するためには、ヘテロ構造のバンドオフセットを大きくとり、キャリアを効率よく閉じ込める必要がある。そこで、ワイドギャップ超格子の形成と評価を目的として、II-VI族化合物半導体の新しい材料系としてのZnSe/MgS超格子を提案し、その作製を試みた。超格子は3,000Å程度の膜厚まで格子緩和なくGaAs基板にコヒーレント成長することが可能であった。ZnSe井戸幅の減少と共にフォトルミネッセンスピークのブルーシフトが観察され、作製したZnSe/MgS超格子において量子閉じ込めが生じていることを確認した。ZnSeを活性層として青色レーザーを作製する場合、GaAs基板に格子整合し、バンドオフセットが十分大きくとれる材料の開発が必要である。本研究では、新しい材料系としてZnSe/MgS超格子を提案し、その作製を試みた。MgSは格子定数が基板のGaAsに近く、エネルギーギャップが約4.5 eVとII-VI族化合物半導体中で最も大きい。また、この系では伝導帯と価電子帯のバンドオフセットがそれぞれ0.67 eV, 1.01 eVと大きく理想的

なバンド構造をとることができ、十分なエキシトンの量子閉じ込めが可能となる。しかしバルク結晶の MgS は岩塩構造をとり、閃亜鉛構造の MgS の形成はこれまで報告されていなかった。本研究において、有機金属気相エピタキシー (MOVPE) 法を用い、S.I. GaAs (001) 基板に ZnSe/MgS 超格子を作製することで、閃亜鉛構造の MgS ならびに ZnSe/MgS 超格子の形成に初めて成功した。ZnSe/MgS 超格子の X 線回折パターンには、GaAs (004) ピークの周りに超格子構造に特徴的なサテライトピークが観察される。これは MgS が閃亜鉛構造をとり、良質な超格子構造が作製されていることを示唆するものである。また、超格子は 3,000 Å 程度の膜厚まで格子緩和なく GaAs 基板にコヒーレント成長することが可能であることがわかった。さらに PL 測定の結果、ZnSe 井戸幅の減少と共に理論に一致した PL ピークのブルーシフトが観察された。これより、作製した ZnSe/MgS 超格子において量子閉じ込めが生じていることが明らかにされた。(平成 7 年度)

(2) 二次元分子組織の作製と構造評価に関する研究

下村政嗣, 居城邦治

超高感度顕微鏡カメラと画像処理装置を組み合わせた蛍光顕微鏡観察システムを新たに試作し、分子レベルの超薄膜である気液界面単分子膜からの極微弱発光を二次元画像として高感度で計測できることを明らかにした。従来、両親媒性化合物から形成される気液界面単分子膜の流動相から結晶相への相転移は、二次元の相図である表面圧-分子占有面積曲線の測定を基にした熱力学的な推定によって議論されていた。本研究では、蛍光発光現象を利用した高感度計測に着目し、気液界面における単分子膜の相転移挙動を直接的に観察できるシステムを構築した。具体的には、少量の蛍光性分子を含む分子レベルの超薄膜からの発光を実時間でかつダイナミックに追跡するために、市販の蛍光顕微鏡の光学系を明るくするとともに超高感度 SIT カメラからの画像入力を実時間画像処理装置に導入し S/N 比を高めることにした。その結果、従来のシステムに比べてきわめて鮮明でかつコントラストの明瞭な単分子膜の画像を得ることに成功した。さらに明るい光学系を適用することで高倍率の対物レンズが使用できるようになり、測定の高精度化も達成できた。(平成

6 年度)

気液界面における核酸塩基対の形成、DNA や RNA などの核酸高分子の組織化過程の解明と生体機能を模倣した分子認識素子の設計を目的として、本研究で作製した超高感度顕微鏡カメラと画像処理装置を組み合わせた蛍光顕微鏡観察システムを用いて、分子超薄膜の高感度計測を行った。その結果、シトシン塩基を有する単分子膜がグアノシンと特異的な水素結合を形成し、分子のキラリティを反映したスパイラル状の二次元結晶を形成することを明らかにした。本研究では、蛍光発光現象を利用した高感度計測に着目し、気液界面における単分子膜の動的挙動を直接的に観察できるシステムを用いて、生体機能を模倣した分子認識素子としての分子超薄膜の作製と構造評価を行おうとするものである。具体的には、少量の蛍光性分子を含む分子レベルの超薄膜からの発光を実時間でかつダイナミックに追跡するための超高感度蛍光顕微鏡システムを作製し、核酸塩基を有する単分子膜や核酸高分子と蛍光性単分子膜との複合体の形態観察を行った。その結果、オクタデシルシトシンからなる単分子膜は、ゲスト分子として相補的塩基対を形成するグアノシンを添加したときのみ安定化され、さらに、グアノシンの有する分子不斉性を反映したスパイラル状の二次元結晶を形成することが、蛍光顕微鏡による形態観察より明らかにされた。また、インターカレーターであるオクタデシルアクリジンオレンジを添加すると、スパイラル状結晶中に於いてアクリジンに基づく緑色の発光が観察されたことから、オクタデシルシトシンとグアノシンからなる複合単分子膜の二次元結晶中に於いては、DNA 中と同様にシトシン塩基とグアニン塩基が選択的に水素結合対を形成することで二次元にスタックした塩基対が形成されているものと考えられる。(平成 7 年度)

2. マイクロメータ細胞スケール複合組織の高感度・高精度計測の研究

(3) 量子干渉素子による脳神経細胞磁場の高感度計測に関する研究

栗城真也, 小林哲生

量子干渉素子による脳神経細胞磁場の高感度計測に関する研究については、超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いた磁気センサーによる脳・神経系の無侵襲、高

感度計測システムの開発をおこなった。脳機能の研究用として、中規模の SQUID システムの研究開発を行い、そのハードウェアがほぼ完成した。簡易型磁気シールドルームと二次微分型グラジオメータの組み合わせで、磁界感度はホワイトノイズレベルで 10 fT/Hz 以下と脳磁界の測定に十分な性能である。またシステムの維持も容易で経済的である。計測システムの使いやすさは表示、記録方法、信号処理などのソフトウェアの機能とマンマシンインターフェイスが大きく関与することが明らかになった。(平成 6 年度)

ヒトの脳の神経活動を無侵襲、高感度に計測するシステムとして、超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いた磁気センサーの開発をおこなった。本研究ではまず頭部の約 4 分の 1 の面積を記録範囲とする 19 チャンネルシステムの開発を行い、簡易型磁気シールドルーム内で 2 次微分グラジオメータを用いて 10~15 フェムトテスラー以下の感度を達成した。さらに脳磁界発生源の高精度な推定法に関して、2 電流双極子推定法の開発とともに信号源推定時における背景脳磁界の影響低減に関するシミュレーション研究を行った。脳機能の研究用として、中規模の SQUID システムの研究開発を行った。まず頭部の約 4 分の 1 の面積を記録範囲とする 19 チャンネルシステムの開発を行い、簡易型磁気シールドルーム内で 2 次微分グラジオメータを用いて 10-15 フェムトテスラー以下の感度を達成した。さらに脳磁界発生源の高精度な推定法に関して、2 電流双極子推定法の開発とともに信号源推定時における背景脳磁界の影響低減に関するシミュレーション研究を行った。脳・神経活動の研究としては聴覚誘発且脳磁界の研究、とくに日本語の純音や子音、母音音声により生じる長潜時 (約 100 ms) 脳磁界反応の測定と活動源解析を行った。その結果、子音と母音に反応する神経活動の位置が聴覚野内で異なること、さらに、調音の異なる子音に反応する神経活動が聴覚野内で時間的に変化し、その移動方向が子音のタイプに特異的であることを明らかとした。ここで、空間的変化の程度は、数 10 ms の時間内で 5-10 mm の移動である。また、音刺激後 30 ms 以内に生じる早い反応を調べ、その結果、音の神経情報は 10 ms で皮質聴覚野に到達すること、側頭葉上面の聴覚野内で反応中心は潜時とともに内側から外側へと移動することを示した。これらの実験的成果は、脳磁界計測の高い時空間分解能に

依っており、ヒト脳内でのダイナミックプロセスが解析可能であることを示唆している。さらに高次脳機能に関する研究として、自発性脳磁界アルファリズムの時空間的変動に基づき、仮名の記憶・照合課題遂行時に後頭部のアルファリズムの減衰時間と照合に要する時間との間に高い相関があることを見いだした。また、両眼に独立に呈示された視覚刺激が交互に知覚される両眼視野闘争過程に関連すると思われる脳磁界アルファリズムの局所の変動を頭頂部と後頭部の境界近傍において観測した。(平成 7 年度)

(4) 血管内膜表面とリポ蛋白の相互作用の高感度光学測定の研究

狩野 猛, 和田成生, 山越憲一

動脈硬化症などの血管疾患の発症機序として、理論解析の結果示唆された血管内膜表面上でのリポ蛋白の濃縮現象に関して、培養血管内皮細胞単層を用いた流れの実験により、実際にこの現象が起こることを実験的に証明することが出来た。動脈硬化症及び吻合部内皮膜厚の局所的発症の機構として提唱した、血管内皮表面上におけるリポ蛋白の流速依存性濃縮現象を培養血管内皮細胞単層及び透析用半透膜チューブにおいて確認し、理論的仮説を実験的に証明することが出来た。さらに、培養血管内皮細胞単層近傍ならびに透明化した実際の血管におけるリポ蛋白の濃度分布の測定を行う蛍光顕微鏡システムを考案した。(平成 6 年度)

動脈硬化や内膜肥厚などの血管病は、血流の遅い領域でコレステロールの担体であるリポ蛋白の濃度が局所的に変化し発症進展することが示唆されている。そこで本研究では、不透明な血管内のしかもごく壁近傍の流れ場で動的平衡状態において起こっているリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象を実証するために、血管内膜のモデルとして、ウシ大動脈由来内皮細胞単層を培養した透明アクリル樹脂製平行平坂型流路を作製し、光学的な計測を行った。灌流液中におけるリポ蛋白分子のトレーサーとしてリポ蛋白分子とほぼ同じ大きさの蛍光性ポリスチレン粒子を微量混入し、リポ蛋白の濃度の指標としてトレーサー粒子の蛍光強度を測定し濃縮・枯渇現象が起こることを証明した。これまで行ってきた理論的解析の結果、血管壁か血シヨウに対して半透性を有することに起因する一種の濾過作用により、血管内膜表面上におけるコレステロールの

担体であるリポ蛋白の濃度が流速の大小によって変化することがわかり、これが原因となって動脈硬化や内膜炎厚などの血管病が流れの遅い（壁ずり応力の小さい）領域で局所的に発症進展することが示唆された。しかしながら、不透明な血管内のしかもごく壁近傍の流れ場で動的平衡状態において起こっているこのリポ蛋白の流速依存性濃縮・枯渇現象を直接血管内における濃度を測定して実証することは現時点では不可能である。そこで本研究では、血管内膜表面上でリポ蛋白の濃縮が起こった際に管壁より染み出す液体の透過速度が濃度に応じて変化することを利用して間接的に証明することを試みた。実験は、血管内膜のモデルとして、ミリポアフィルタ上に播種培養したウシ大動脈由来内皮細胞単層を透明アクリル樹脂製平行平板型流路に細胞単層が0.5 mmの間隔を保った流路の一部を形成するように装着したものをを用いて37度で流れの実験を行い、細胞単層における灌流液（細胞培養液）の透過速度に及ぼす灌流液中の血清（リポ蛋白を含む）濃度および流れ（従って壁ずり応力）の影響について検討を行った。その結果、培養血管内皮細胞単層における水透過速度が灌流液中の血清（リポ蛋白）濃度に応じて異なった値を示し、その値は、濃度が高いほど低くなることがわかった。また、水透過速度は流速（従って壁ずり応力）の変化に応じて可逆的に変化し、流れが遅いほど小さな値（従って内皮細胞単層表面におけるリポ蛋白濃度は大きい値）を示すことがわかり、壁面上で流速（従って壁ずり応力）に依存してリポ蛋白分子の濃縮・枯渇現象が起こるといふ我々の仮説を実験的に証明することができた。また、灌流液（20%ウシ胎児血清を含む）中にリポ蛋白分子のトレーサーとしてリポ蛋白分子とほぼ同じ大きさの蛍光性ポリスチレン粒子を微量混入して実験を行い、実際に内皮細胞単層表面におけるリポ蛋白の濃度の指標としてトレーサー粒子の蛍光強度を測定してこの現象の起こることを証明した。その結果、灌流量を段階的に変化させた場合に流れに応じて蛍光強度が変化し、流速が遅いほどその値が大きくなることから、血管内膜のモデルとしての培養血管内皮細胞単層上で確かに流速に依存したリポ蛋白の濃縮・枯渇現象が起こっていることがわかった。（平成7年度）

(5) 神経細胞の非線形相互作用の高精度計測の研究

下澤 楯夫, 水波 誠

神経系を非線形な信号処理装置と見立て、Wienerの非線形解析法で同定を行い、神経パルス発生におけるゆらぎを定量化できた。コオロギの気流感覚神経細胞を、Wienerの白色雑音法を用いて解析すると、線形フィルタと非線形なパルス密度変調器との縦列接続モデルで表現できる。このモデルの動的な振る舞いを確かめるため、感覚器に同一の刺激波形を繰り返し与えて、活動電位の発火確率の変化を時間領域で実測し、モデルの出力と比較した。その結果、神経細胞のパルス密度変調特性は、変調器への入力振幅健時値だけでなく、その変化率にも依存することが明らかになった。このことを考慮に入れてモデルを修正し出力を推定すると、実際の系の振る舞いをより良く表現できた。（平成6年度）

動物の行動を支配している神経系が信号処理装置としてどのように作動するのかを理解するためには、神経細胞の活動を記録する技術を確認するとともに非線形性を含めた解析が不可欠となる。そこで本研究では、埋め込みワイヤ電極を用いて自由行動中の昆虫の中枢ニューロンの活動を記録する高感度計測法を確認し、歩行運動時のゴキブリのキノコ体のニューロンの活動について解析した。その結果、キノコ体が記憶に関するだけでなく、感覚情報の統合や運動の高次制御に関与していることが示唆された。キノコ体における場所記憶形成の神経機構を解明するためには、行動中の昆虫のキノコ体ニューロンの活動を調べることが不可欠である。そこで、ポリウレタン被覆銅線を束ねたワイヤ電極をゴキブリの脳のキノコ体に挿入固定し、任意の二本を差動増幅器に接続してニューロンの活動電位を記録した。キノコ体の出力部位で記録されたニューロンは感覚刺激時および歩行運動中の応答様式から4つのタイプに分けることが出来た。第一のタイプは視覚、嗅覚、または機械覚刺激、またはその組み合わせに反応する感覚性ニューロンであった。第二のタイプは歩行時に活動する運動性のニューロンで、第3は感覚刺激時にも歩行時にも活動する感覚-運動統合型のニューロンであった。第4のタイプは歩行中および歩行の開始に先行して発火するニューロンであった。本研究の結果は、キノコ体が多種の感覚情報の統合や行動の高次制御など、複数の機能に関与する事を示唆す

るものである。(平成7年度)

3. 機能的複合組織の高感度・精密計測に関する理論解析

(6) 神経情報処理の数理モデルによる高感度計測の解析に関する研究

安藤 毅, 西浦康政

情報システムの同定のための作用素解析を目的とした数学理論を構築した。情報を観測する立場からは情報の流れ・変換は入力を出力に変換するブラックボックスと考えられるが、システムの内部状態は数学的には作用素として捉えられる。システムの安定性の保証にはそれを表わす作用素に関しての種々の不等式の確立および作用素不等式の解の存在の保証が問題になる。本研究では、2つの作用素の間の関わりの度合を示す量としての相対エントロピーの評価を与えるために、Golden-Thompsonの不等式の一般化をはかった。(平成6年度)

パルス的に結合された非線形振動子系のモデルは、ホテルの同時発火現象から神経回路網に至るまで、広汎な応用がある。本研究では特に、抑制的な相互作用をもつ場合について、その漸近挙動の完全分類を行った。相互作用のタイプが発火する振動子が決定するのではなく、その影響を受ける振動子によって決まる場合についても、考察を行った。この場合は振動子の位相の順序保存が一般に成り立たないのでダイナミクスはより複雑になることが明らかになった。また、複合組織の高次元空間におけるメゾスコピックパターンとの存在と安定性非線形・非平衡系に現れる様々な界面パターンの形状とダイナミクス、とりわけ高次元空間における界面形状の決定及びその安定性に焦点を絞って研究を行い、二次元分子組織の作製と構造評価に関する研究で見いだされたスパイラル状の二次元結晶がDLAとしてシュミレートできることを明らかにした。非線形・非平衡系に現れる様々な界面パターンの形状とダイナミクス、とりわけ高次元空間における界面形状の決定及びその安定性に焦点を絞って研究を行った。相分離とそれに伴う形態理論は材料科学における古典の問題であるが、近年、高分子系や生体系における、メゾスコピックパターンが注目を集めており、その数理モデルの開発と解析に対し具体的に応用し、成果を挙げた。空間1次元においては任意に多くの(極

限においては無限個の)安定な定常解が存在することが本研究により厳密に証明されたが、高次元空間に対しては、方程式のもつダイナミクス、定常解の構造等についての厳密な数学的結果はplanarの場合を除いて殆ど得られていない。最近、高分子系や液晶系のメゾスコピックレベルの相転移パターンのモデリングとその解析を通じて1次元と高次元とは本質的な違いがあることが数学的にも次第に明かにされつつある。その一つは“極限まで滑らかな安定極限解の非存在”である。これは元のスケールで見ていると解が極限では無限に細かくなって行くことを示しており、意味のある見方をするには、適当なりスケーリングの必要性を示唆している。実際そのような方向で意味のある極限系を見つけることが可能であり、それによりメゾスコピックな相転移パターンの数学的解析への第一歩が作られた。(平成7年度)

(7) 光干渉法を用いた位相計測法の開発研究

岩井俊昭

レーザー多重散乱現象の時空間特性の解析が複合組織のキャラクタリゼーションに有用であることを示した。高濃度ラテックス粒子溶液にレーザー光線を照射したときに、その後方散乱で生じる光強度分布と時間相関関数の関係について、実験的に調べた。その結果、溶液濃度が1%以上では、多重散乱の影響が顕著になり、光強度分布と時間相関関数の相関時間とが散乱角依存性を持つようになることを明らかにした。さらに、この散乱角依存性が、ランダム媒質内を伝播する光波の時間反転対のコヒーレント干渉で生じることを明らかにし、光路長と逆反射現象とを対比させることで物理的説明が可能であることを示した。0.1%以下の低濃度では、時間相関関数が単指数関数で表せることができることを示し、この濃度では単散乱が支配的であることを見いだした。(平成6年度)

研究の目的は、レーザー多重散乱現象の時空間特性の解析が複合組織のキャラクタリゼーションに有用であることを示すことにある。本年度は、多重散乱光の動的特性を拡散理論近似における理論的解析と実験で検討した。その結果、濃厚散乱媒質において多重散乱されているにも関わらず、逆反射方向における時間相関関数の緩和時間は単散乱のそれと比例関係になることを示した。さらに、拡散近似の適用限界を理論と実験

との比較で明らかにした。後方多重散乱光の生成過程をコンピュータ上で忠実に再現するシュミレーションプログラムの開発を行い、多重散乱現象としてもっとも特徴的な後方散乱光の強度エンハンスメント現象の数値的解析を行った。シュミレーションでは、レイリー・デバイ散乱理論を仮定しているため、粒子のサイズと形状の依存性について解析を行える特徴を有する。数値解析は、後方散乱光のエンハンスメント強度分布の散乱粒子径依存性については、その広がり角の変化がピーク強度のそれに比べ大きく、サブミクロンのサイズを対象としたレイリー散乱領域では散乱粒子径と逆比例関係にあることを確認した。また、同時多点計測法の開発を目的としてアレイ状光源の発生をガウス状 Shell モデルを光源として適用した理論解析を行い、発生するアレイ光源を構成する要素光源の空間コヒーレンスを最大化する条件を明らかにした。さらに、多重散乱光の動的特性を拡散理論近似における理論的解析と実験で検討した。その結果、濃厚散乱媒質において多重散乱されているにも関わらず、逆反射方

向における時間相関関数の緩和時間は単散乱のそれと比例関係になることを示した。さらに、拡散近似の適用限界を理論と実験との比較で明らかにした。多重散乱光には、コヒーレント、インコヒーレントおよびスペckル散乱光成分が存在し、スペckル成分は雑音と考えられるので、その低減化法を光源条件、空間的フィルター条件および検出開口条件について理論的解析を行い詳細に検討し、光子相関関数の測定には検出開口積分法が有効である確認を得た。(平成7年度)

これらの研究において、ナノメートルからミリメートルスケールにいたる幅広い階層にまたがった複合組織の構造と機能を高感度かつ精密に計測する新しい光学的、電子的手法の開発に対する知見が得られたので、一応の区切りをつけた。ここで得られた成果は、原子・分子から生体にいたる様々なスケールレベルにおける複合組織の計測に関する様々な領域においてこれからの活用が期待される。

【参考文献】

- [1] ナノサイズ量子効果を示す半導体超構造の作製に関する研究
N. Noguchi and I. Suemune: Selective Formation of Luminescent Porous Silicon by Photosynthesis. *J. Appl. Phys.*, 75(9): 4765-4767 (1994)
K. Miyakoshi, K. Fujii, T. Hidaka, I. Suemune, M. Nakagawa and T. Ogawa: Comparison of Triethylgalium and Its Amine-adduct on Gas-Phase Reaction With Trimethylaminealane. *J. Cryst. Growth.*, 136: 152-156 (1994)
K. Miyakoshi and I. Suemune: Study of Mechanism to Control Electrical Properties of AlAs Grown Using Amine-alane with Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 64(12): 1549-1551 (1994)
N. Noguchi and I. Suemune: High Resolution Patterning of Luminescent Porous Silicon with Photoirradiation. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33(1B): 590-593 (1994)
Y. Fujii, I. Suemune and M. Fujimoto: Comparison of Electrical and Optical Properties of n-i-i and p-i-n ZnSSe Heterostructure Diodes. *Jpn. J. Appl. Phys.*,

- 33(1B): 840-843 (1994)
I. Suemune, Y. Fujii and M. Fujimoto: Improvement of Electrical and Optical Properties of ZnSSe p-n Heterostructure Diodes with Optimization in MOVPE. *J. Cryst. Growth.*, 138: 750-754 (1994)
I. Suemune: Quantitative Study of Mechanism Responsible for High Operating Voltage in II-VI Laser Diodes. *J. Cryst. Growth.*, 138: 714-718 (1994)
R. Cingolani, M. Lomascolo, N. Lovergine, M. Dabbicco, M. Ferrara and I. Suemune: Excitonic Properties of ZnSe/ZnSeS Superlattices. *Appl. Phys. Lett.*, 64(18): 2439-2441 (1994)
H. Ishikawa and I. Suemune: Analysis of Temperature Dependent Optical Gain of Strained Quantum Well Taking Account of Carriers in The SCH Layer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(3): 344-347 (1994)
R. Tommasi, M. Lepore, M. C. Netti, I. M. Catalano and I. Suemune: Excitonic Properties in ZnSe-ZnSSe Strained-layer Superlattices by One- and Two-photon Spectroscopy. *Phys. Rev. B*, 49(20): 14367-14371 (1994)

- T. Hidaka and I. Suemune: Low-Temperature Selective Epitaxial Growth of GaAs Using Triethylgallium and Amino-As in Metalorganic Molecular-Beam Epitaxy. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33(6A): 3500-3504 (1994)
- I. Suemune and M. Hoshiyama: Discrimination of Compound Semiconductor Heterointerfaces by Simultaneous Observations of AFM and LFM. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33(6B): 3748-3751 (1994)
- G. Scamarcio, V. Spagnolo, C. Corvasce, M. Lugara and I. Suemune: One and Two Phonon Scattering Processes in ZnSe/ZnSSe Superlattices Studied by Micro-Raman Spectroscopy. *Phys. Rev. B.*, 50(7): 4988-4991 (1994)
- H. Ishikawa and I. Suemune: Large Estimated Frequency Response Increase From Deep Potential Well Strained Quantum Well Lasers. *IEEE Photonic Technology Letters*, 6(11): 1315-1317 (1994)
- I. Suemune: Role of a Metalorganic As Source in Atomic Layer Epitaxy of GaAs and AlAs. *Applied Surface Science*, 82/83: 149-157 (1994)
- M. Lepore, M. C. Nett, R. Tommasi, I. M. Catalano and I. Suemune: Polarization Dependence of Two-photon Absorption in ZnSe-ZnSSe Strained-layer Superlattices. *Solid State Communications*, 88: 795 (1994)
- S. Shogen, Z. Song, M. Kawasaki, and I. Suemune: XPS and AFM Analysis of GaAs (100) Cleaning Procedures. *J. Vac. Sci. Technol. B* Vol.13, No.1: pp.77-82 (1995)
- G. Satoh, T. Numai, M. Hoshiyama, I. Suemune, H. Machida, and N. Shimoyama: MOMBE Growth of ZnSe with New Zn and Se Precursors Without Precracking. *J. Cryst. Growth* Vol.150: pp.734-737 (1995)
- T. Obinata, K. Uesugi, G. Satoh, I. Suemune, H. Machida, and N. Shimoyama: Temperature Dependence of ZnS Growth with Atmospheric Pressure Metalorganic Vapor Phase Epitaxy Using Ditertiarybutyl Sulfide. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.34: pp.4143-4147 (1995)
- K. Uesugi, T. Obinata, I. Suemune, H. Kumano, and J. Nakahara: Epitaxial Growth of Zincblende ZnSe/MgS Superlattices on (001) GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, Vol.68: pp.844-846 (1996)
- G. Sato, T. Numai, M. Hoshiyama, I. Suemune, H. Machida, and N. Shimoyama: Metalorganic MBE Growth of Nitrogen-doped ZnSe - TAN Doping and Nitrogen Plasma Doping. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35: pp. 1436-1439 (1996)
- [2] 二次元分子組織の作製と構造評価に関する研究
M. Shimomura, M. Oguchi, K. Kasuga, K. Fujii, E. Shinohara, S. Kondo, N. Tajima, K. Koshiishi, Effect of Thermal Treatment on surface Monolayer and LB Film Prepared by Polyion Complex Technique. *Thin Solid Films*, 243: 358-360 (1994)
- T. Kondo, T. Kakiuchi and M. Shimomura: Fluorescence Microscopic Imaging of Hydrolysis of Phospholipid Monolayers by Phospholipase D at Air-Water Interface. *Thin Solid Films*, 244: 887-889 (1994)
- M. Shimomura, S. Oguma, M. Oguchi, M. Matsute, H. Shimada, R. Kajiwara, H. Emori, K. Yoshiwara, K. Okuyama, T. Miyashita, A. Watanabe and M. Matsuda: Tailored Charge Transfer Complex based on Two-dimensional Molecular Assemblies. *Supramol. Sci.*, 1: 33-38 (1994)
- Y. Okahata, Y. Fujimoto and K. Ijoro: A Lipid-coated Lipase as an Enantioselective Ester Synthesis Catalyst in Homogeneous Organic Solvents. *J. Org. Chem.*, 60: 2244-2250 (1995)
- Y. Okahata, K. Niikura and K. Ijoro: A Facile Transphosphatidylolation of Phospholipids catalyzed by a Lipid-coated Phospholipase D in Organic Solvents. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*: 919-925 (1995)
- M. Shimomura, S. Aiba, N. Tajima, N. Inoue, K. Okuyama: Crystal Engineering Based on Two-Dimensional Molecular Assemblies. Relation between Chemical Structure and Molecular Orientation in Cast Bilayer Films. *Langmuir*, 11: 969-976 (1995).
- O. Karthaus, K. Ueda, A. Yamagishi, M. Shimomura: Stilbene Containing Amphiphiles in Supramolecular Assemblies. *J. Photochem. Photobiol.*, 92: 117-120 (1995).
- K. Ijoro, M. Shimomura, M. Tanaka, H. Nakamura, K. Hasebe: DNA Monolayers Complexed with Amphiphilic Intercalator at the Air-Water Interface. *Thin Solid Films*, 284/285: 780-783 (1996)
- M. Shimomura, F. Nakamura, K. Ijoro, H. Taketsuna, M. Tanaka, H. Nakamura, K. Hasebe: Chiral Crystal Formation of Octadecylcytosine Monolayer by Complementary Base-pairing. *Thin Solid Films*, 284/285: 691-693 (1996)
- M. Shimomura, O. Karthaus, and K. Ijoro: Tailoring of Stacked π -Electron Arrays from Electron- and/or Energy Donor-Acceptor Molecules Based on Two-Dimensional Supramolecular Assemblies. *Synthetic Metals*, 81: 251-257 (1996)
- K. Okuyama, M. Shimomura: Crystal Engineering of Synthetic Bilayer Membranes in "New Developments in

- Construction and Functions of Organic Thin Films”, Ed. by T. Kajiyama and M. Aizawa, Elsevier Science B. V. (Amsterdam), 39-70 (1996).
- 下村政嗣：LB膜の構造と機能，触媒，37：549-555(1995)。
- 居城邦治，下村政嗣：機能性高分子としての二重らせんDNAの固体素子化，固体物理，30：1042-1048 (1995)。
- 下村政嗣，居城邦治：単分子膜による分子認識とオプティカルセンシング，蛋白質核酸酵素，41：83-88 (1996)。
- [3] 量子干渉素子による脳神経細胞磁場の高感度計測に関する研究
- N. Fujimaki, F. Takeuchi, T. Kobayashi, S. Kuriki and S. Hasuo: Event-related potentials in silent speech. *Brain Topography*, 6: 259-267 (1994)
- K. Sekihara, F. Takeuchi, S. Kuriki and H. Koizumi: Reduction of brain noise influence in evoked neuromagnetic source localization using spatial correlation. *Physics in Medicine and Biology*, 39: 937-946 (1994)
- D. Suzuki, S. Kuriki and M. Matsuda: Operation of high-Tc dc-SQUIDs in dc and ac bias flux-locked loop. *Proc. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 325-327 (1994)
- Y. Hirata, S. Kuriki, S. Nakayama, K. Chinone, T. Ataka, K. Ikeda and Y. Kamioka: Design and development of a 19 channel SQUID magnetometer system. *Proc. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1369-1371 (1994)
- S. Kuriki, D. Suzuki and M. Matsuda: Degradation of modulation voltage in high Tc dc-SQUIDs. *Ext. Abst. Int. Workshop High-Temperature Superconducting Electron Devices*, 178-179 (1994)
- K. Yokosawa and S. Kuriki: Design and fabrication of direct-feedback gradiometer: axial gradiometer made of superconductive films and SQUIDs. *Review of Scientific Instruments*, 65: 3814-3819 (1994)
- 小林哲生，土屋憲晃，栗城真也，L. Kaufman：視覚的呈示による仮名短期記憶走査に関連する自発脳磁界の抑制。第9回生体・生理工学シンポジウム論文集，9：43-46 (1994)
- 白井直仁，小林哲生，栗城真也：脳磁界信号源の2ダイポール推定—シミュレーションと音声誘発応答への適用—。第9回生体・生理工学シンポジウム論文集，9：51-54 (1994)
- 加藤和夫，大和田徹，小林哲生，栗城真也：格子刺激の運動・静止で生じる視野闘争・融合間の脳波変化—頭皮上自発脳波のパワー差分布解析—。電子情報通信学会技術研究報告，MBE 94-24：1-8 (1994)
- 土屋憲晃，小林哲生，栗城真也，L. Kaufman：記憶走査課題遂行時に関連する自発及び誘発脳磁界の特性。電子情報通信学会技術研究報告，MBE 94-25：9-16 (1994)
- 鈴木大介，松田瑞史，栗城真也：粒界接合型 SQUID の磁束変調電圧と雑音特性。電子情報通信学会技術研究報告，SCE 94-27：91-96 (1994)
- 栗城真也：多チャンネル SQUID 磁束計による脳磁界計測技術の現状。日本応用磁気学会研究会資料，86-3：17-20 (1994)
- 野界武史，平田恵啓，栗城真也：聴覚誘発中潜時応答の脳磁界解析。電気学会マグネティックス研究会資料，MAG 94-168：25-30 (1994)
- 平田恵啓，栗城真也：19チャンネル SQUID システムの開発。電気学会マグネティックス研究会資料，MAG 94-172：45-52 (1994)
- 小林哲生，加藤和夫，栗城真也：両眼視野闘争過程に関連する皮質神経活動領域の EEG トポグラフィによる検討。日本 ME 学会生体情報の可視化技術研究会資料，2：1-6 (1994)
- S. Kuriki, Y. Okita, T. Kobayashi, F. Takeuchi: Localization of auditory cortical sources from multichannel-recorded magnetic fields elicited by monosyllable speech sounds. In: C. Baumgartner, L. Deecke, G. Stroink and S. J. Williamson (eds) *Biomagnetism: Functional Research and Clinical Applications*. Elsevier, pp. 174-178 (1995)
- S. Kuriki, Y. Okita, Y. Hirata: Source analysis of magnetic field responses from the human auditory cortex elicited by short speech sounds. *Exp. Brain. Res.*, 104: 144-152. (1995)
- T. Kobayashi, K. Kato, T. Owada, S. Kuriki: Difference of EEG spectral powers observed between binocular rivalry and binocular fusion. *Front. Med. Biol. Eng.*, 7: 11-19 (1995)
- 栗城真也，平田恵啓，野界武史：脳磁界によるヒト聴覚皮層の活動解析。日本生理学会雑誌，57 増刊号：31-41 (1995)
- 藤巻則男，栗城真也，中島啓幾：カタカナ文字黙読時の事象関連電位。医用電子と生体工学，33：93-100 (1995)
- 小林哲生，土屋憲晃，栗城真也：仮名短期記憶走査に関連する脳磁界 α リズムの時空間的変動。電気学会論文誌電子情報システム部門誌，116-C：217-222 (1996)
- 平田恵啓，栗城真也：脳磁界計測用 19 チャンネル SQUID システム。電気学会論文誌電子情報システム部門誌，116-C：181-186 (1996)
- [4] 血管内膜表面とリポ蛋白の相互作用の高感度光学測定の研究
- 狩野 猛，登 小燕：動脈硬化の発症機構に関する一仮説

- 一血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃縮現象について。慈恵医大シンポジウム論文集「微小循環障害と血管内皮細胞機能異常に関する血液レオロジー的研究」メディカルレビュー社（東京），40-47（1994）
- T. Karino: Flow patterns and preferred sites of vascular diseases observed in transparent natural blood vessels. *J. Vasc. Surg.*, 20(1): 143-144 (1994)
- X. Deng, Y. Marois, T. How, Y. Merhi, M. King, R. Guidoin and T. Karino: Luminal surface concentration of lipoprotein (LDL) and its effect on the wall uptake of cholesterol by canine carotid arteries. *J. Vasc. Surg.*, 21: 135-145 and 22: 9A and 648 (1995)
- H. Ishibashi, M. Sunamura and T. Karino: Flow patterns and preferred sites of intimal thickening in end-to-end anastomosed vessels. *Surgery*, 117: 409-420 (1995)
- 狩野 猛：血栓形成に及ぼす流れの影響。日本バイオレオロジー学会誌，9(4)：8-17（1995）
- H. L. Goldsmith and T. Karino: Flow patterns and localization of vascular disease in the circulation. In: *Endovascular Interventional Nueroradiology*. (eds. R. N. N. Holzman and B. N. Stein), Springer-Berlag, New York, 25-67 (1995)
- 狩野 猛：血管モデルの血流パターン。現代医療，27(12)：9(3455)-17(3463)（1995）
- 和田成生，田中正夫，堀川 武，中村 宏，田中和嗣，戸刈 創：肺循環の力学モデルと人工呼吸における血流動態。日本機会学会論文集，A編 61-586：1445-1452（1995）
- S. Wada and M. Tanaka: Coupled behavior of lung respiration (computational respiratory mechanics approach). *Bio-fluid mechanics* (ed. H. Power), *Computational Mechanics Publications*, Southampton, 219-264 (1995)
- [5] 神経細胞の非線形相互作用の高精度計測の研究
清水利伸，馬場欣哉，増田 宏，熊谷恒子，赤沢年一，太田利彦，下澤橋夫：神経細胞のパルス密度変調特性の Gauss 白色雑音を用いた推定。電子情報通信学会技術研究報告，MBE 93-140：55-60（1994）
赤沢年一，清水利伸，馬場欣哉，下澤橋夫：コオロギ気流感覚神経細胞のパルス密度変調におけるヒステリシス特性の推定。電子情報通信学会技術研究報告，MBE 94-26：17-24（1994）
太田利彦，清水利伸，馬場欣哉，下澤橋夫：Wiener の方法に基づくある非線形系の動特性推定における精度評価。電子情報通信学会技術研究報告，MBE 94-27：25-32（1994）
太田利彦，清水利伸，馬場欣哉，下澤橋夫：Sandwich 構造をもつ非線形系の動特性推定における精度評価。電子情報通信学会技術研究報告，NLP 94-35：17-24（1994）
W. Kobayashi, Y. Baba, T. Shimozawa and T. S. Yamamoto: The Fertilization Potential Provides a Fast Block to Polyspermy in Lamprey Eggs. *Developmental Biology*, 161: 552-562 (1994)
- J. Ikeda, M. Mizunami and Nicholas J. Strausfeld: Activity of higher center neurons of the cockroach during walking. *Neuroscience Research*, 19: S230 (1994)
- M. Mizunami: Processing of contrast signals in the insect ocellar system. *Zoological Science*, 11: 175-190 (1994)
- M. Mizunami: Information processing in the insect ocellar system. *Advances in Insect Physiology*, 25: 151-265 (1994)
- Y. Baba, K. Hirota, T. Shimozawa, T. Yamaguchi: Differing afferent connections of spiking and nonspiking wind-sensitive local interneurons in the terminal abdominal ganglion of the cricket *Gryllus bimaculatus*. *J. Comp. Physiol. A*, 176: 17-30 (1995)
- T. Kikukawa, T. Arais, K. Mukasa, T. Shimozawa, N. Kamo: The molecular motion of bacteriorhodopsin mutant D96N in the purple membrane. *Fed. Eurp. Biochem. Soc. Letters* 377: 502-504 (1995)
- M. Mizunami: Neural organization of ocellar pathways in the cockroach brain. *J. Comp. Neurol.*, 352: 458-468 (1995)
- M. Mizunami: Morphology of higher ocellar neurons in the cockroach brain. *J. Comp. Neurol.*, 362: 293-304 (1995)
- 赤沢年一，下澤橋夫，清水利伸，馬場欣哉：コオロギ感覚神経細胞のパルス密度変調に見られるヒステリシスについて。電子情報通信学会技術報告，NC 94-73：105-112（1995）
太田利彦，清水利伸，馬場欣哉，下澤橋夫：Laguerre 函数を用いた Sandwich System の同定法。電子情報通信学会技術報告，NLP 95-31：41-46（1995）
三谷光照，大堀隆文，渡辺一央，下澤橋夫：神経回路網内ゆらぎによって駆動される学習法に関する理論的探求。電子情報通信学会技術報告，NC 94-65：41-48（1995）
塚田 稔，馬場欣哉，赤沢年一，清水利伸，下澤橋夫：昆虫介在神経細胞のスパイクエンコーディングの解析。電子情報通信学会技術報告，MBE 95-29：pp.41-46（1995）
下澤橋夫，加納正道，J.S. カンワル，管乃武男：皮質ニューロン同士の活動相関からみたヒゲコウモリ FM-FM 野の機能。計測自動制御学会 第 10 回生体・生理工学シンポジウム論文集，BPES'95：201-204（1995）
平澤宏祐，清水利伸，馬場欣哉，下澤橋夫：2つの周期成

- 分をもつ入力に対する Hodgkin-Huxley ニューロンの Stochastic resonance. 計測自動制御学会 第 10 回生体・生理工学シンポジウム論文集, BPES'95: 457-460 (1995)
- 水波 誠, 岡田龍一: 歩行運動時のゴキブリのキノコ体ニューロンの活動生理。生体工学シンポジウム論文集 pp. 273-276 (1995)
- 下澤橋夫, 大原昌弘, 浦野 知: スケーリング: 動物設計論—動物の大きさは何で決まるのか—(K.Schmidt-Nielsen 著 Scaling 訳) コロナ社, 東京 p 302 (1995)
- 水波 誠: キノコ体は記憶の座である(分担執筆). 富永佳也編, 昆虫の脳を探る。共立出版, pp.218-233 (1995)
- 水波 誠: 昆虫の単眼系の働きと進化(分担執筆). 宮下保司・下條信輔編, 脳から心へ—高次機能の解明に挑む。岩波書店, pp.292-299 (1995)
- 水波 誠: 明暗視の神経機構: 昆虫単眼系の研究から。比較生理生化学, 11: 63-73 (1994)
- 水波 誠: 昆虫の単眼系の働きと進化。科学, 64: 582-589 (1994)
- 下澤橋夫: 鳴く虫の物理と感覚。昆虫と自然, 30(11): 17-22 (1995)
- 下澤橋夫: コウモリのソナー系と運動制御系 システム/制御/情報, 39(8): 387-392 (1995)
- 下澤橋夫: 昆虫の脳と我々の脳はどう違うの? 文部時報, 1422: 74-75 (1995)
- 下澤橋夫: 書評(昆虫の脳を探る, 共立) 比較生理生化学 12(2): 212 (1995)
- M. Mizunami: Functional diversity of neural organization in insect ocellar systems. Vision Res., 35: 443-452(1995)
- 水波 誠, 岡田龍一, 池田潤治: 歩行運動時の昆虫のキノコ体ニューロンの活動。電子科学研究, 3: 104-106(1995)
- [6] 神経情報処理の数理モデルによる高感度計測の解析に関する研究
- Y. Nishiura and I. Ohnishi: Some mathematical aspects of micro-phase separation in diblock copolymers. Physica., D. 84: 31-39 (1995)
- Y. Nishiura and I. Ohnishi: Spectral comparison result and morphology for diblock copolymer problems. Lecture Notes in Num. APPL. Anal., 14: 253-256 (1995)
- T. Takaishi, M. Mimura, and Y Nishiura: Pattern formation in coupled reaction-diffusion systems. Japan J. of Industrial and Applied Math., 12(3): 385-424 (1995)
- Y. Nishiura, J. Shidawara, and T. Takaishi: Dynamics of inhibitory pulse-coupled oscillators, Applicable Analysis vol.4 dynamical Systems and Applications. 549-562 (1995) World Scientific.
- Y. Nishiura and H. Suzuki: Instability of stationary interfacial patterns for reaction diffusion systems in higher dimensional spaces, Proceedings of International Conference on Nonlinear Evolution PDE, Beijing, PR China, June 21-25, (1993) (印刷中)
- M. Taniguchi and Y. Nishiura: Stability and characteristic wavelength of planar interfaces in the large diffusion limit of the inhibitor. Proc. Roy. Soc. Edingburgh. 126A: 117-145, (1996)
- Y. Nishiura and D. Ueyama: The dynamics of self-replicating patterns and spiral patterns in an oscillatory field. to appear in the Proc. of NOLTA'95, Las Vegas, (1995)
- [7] 光干渉法を用いた位相計測法の開発研究
- 岩井俊昭, 岡本 卓, 朝倉利光: 光散乱現象研究の展開—単一散乱から多重散乱まで—。応用物理, 63: 14-22 (1994)
- T. Iwai, H. Furukawa and T. Asakura: Monte Carlo simulations for weak localization of light based on Rayleigh-Debye scattering., Proc. of 7th International Workshop on Multiple Scattering Lidar/Light Experiments (MUSCLE7), 94-95 (1994)
- H. Yoshimura and T. Iwai: Array generators for Gaussian Schell-model beams. Coherence and Quantum Optics VII J. Eberly, L. Mandel, and E. Wolf ed. (Plenum, 1996) 697-698.
- T. Iwai, H. Yoshimura, T. Asakura and T. Kubo: Refractive-index profiling of optical fiber preform using an auto-Wigner distribution function. Proc. 6th Topical Meeting of the European Optical Society "Optics and Information," Topical meeting digests series Vol.6: 10. 3 (1995).
- H. Yoshimura and T. Iwai: Coherence properties of a source array derived from a Gaussian Schell-model beam. Appl. Opt., 34: 7581-7587 (1995).
- T. Iwai, H. Furukawa, and T. Asakura: Numerical analysis on enhanced backscatterings of light based on Rayleigh- Debye scattering theory. Opt. Rev., 2: 413-419 (1995).
- T. Iwai and T. Asakura: Speckle reduction in coherent information processing. Proc. of IEEE 84: 765-781 (1996).
- K. Ishii, T. Iwai and T. Asakura: Investigation of the angular dependence of enhanced backscattering light due to Brownian dynamics by means of the diffusive transport theory of photons. J. Opt. Soc. Am., A14 (January, 1997) (印刷中)

ヒト手指の温度感覚に伴う脳磁界

プロジェクト研究

ヒト手指の温度感覚に伴う脳磁界

量子計測研究分野	平田 恵 啓	
感覚情報研究分野	井野 秀 一 55

電荷移動錯体の非線形光学特性の評価

有機電子材料研究分野	芥川 智 行	
量子機能素子研究分野	川 俣 純 59

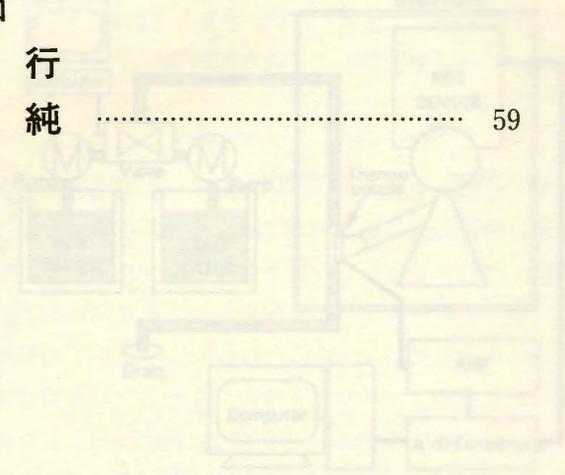


図1 ヒトへの脳磁界測定の実験システム

2. 実験方法

被験者として実験に参加する成人4名（男子3名、女子1名、24~36歳）を被験者として、実験時の記録には量子計測研究分野内に設置されたスクウェア SQUID 磁束計を用いた。ヒトへの脳磁界測定には電気的に温度を制御するペルチェ素子を用いた熱移送で、赤外光やレーザー光を用いた加熱が考えられる。しかし、本実験では超高感度な磁気センサーである SQUID への誘起磁界による電気・磁気的なアーティファクトの混入をさけるために蒸水と氷を用いた。図1に示すように、36℃又は37℃の蒸水と氷を入れて0℃保った冷水をそれぞれタンクに用意し、マグネットポンプに

より加熱した。コンピュータで制御された電磁石により常にどちらか一方の水が流れるようにし、流経5mmのポリメチレンチューブの上をタンクからタンク内に導かれた水は、被験者の右手が浸した右手指と掌全体に薄い膜を通して温度刺激を与え、その後アンカールーム外の排水式の排水槽に流れていった。温度感覚は単位時間当たりの温度変化が同じでも、変化前の皮膚表面の温度が違えば異なる温度に感じられるため、温度刺激の基準となる温度の保持時間（20-30秒）は冷水（10-15℃）よりも長くした。電磁石から超感度の磁束計まで磁気センサーまであり、弁が切り替わってから磁束計に到達するまで温度

ヒト手指の温度感覚に伴う脳磁界

量子計測研究分野 平 田 恵 啓
感覚情報研究分野 井 野 秀 一

ヒトが手を使って作業するには接触覚や圧覚・振動覚に加えて、温度感覚が重要な役割を担っている。しかし温度感覚に関する研究は主に心理物理実験でのみ調べられていて、脳活動と関連づけられたものはない。本報告ではヒトの右手に温度刺激を与えて、そのときの脳磁界を 19 チャンネル SQUID 磁束計を用いて計測した結果について述べ、温度刺激誘発脳磁界を記録するためにはどうしたらよいかを検討する。

1. はじめに

我々は手で物に触れたり、握ったり、動かしたりするが、これらは日常生活において不可欠な動作である。これらの作業を行うためには、体性感覚の接触覚・圧覚・振動覚が活用されている。人が手を使って安全かつ正確な作業するには、物体の材質感も重要な情報になっていると考えられるが、このときには触覚とともに温度感覚が重要な役割を担っている^[1]。ヒト手指の温度に対する基本特性はこれまで主に心理物理実験により調べられてきているが^[2]、手指の温度と脳活動との関連づけを行った生理学的な知見はほとんどない。そこで本報告では被験者の手に水を用いて温度刺激を与え、そのときに記録された脳磁界について述べる。

2. 実験方法

被験者は正常な温度感覚を有する成人 4 名（男 3，女 1, 24-26 歳）である。脳磁界の記録には量子計測研究分野内に設置された 19 チャンネル SQUID 磁束計を用いた^[3]。ヒト手への温度刺激呈示法には電氣的に温度を制御するペルチェ素子を用いた熱移送や、赤外光やレーザー光を用いた加熱等が考えられる。しかし、本実験では超高感度な磁気センサである SQUID への刺激呈示装置による電気・磁氣的なアーティファクトの混入をさけるために温水と冷水を用いた。図 1 に示すように、36 又は 39°C の温水と水を入れて 0°C に保った冷水をそれぞれタンクに用意し、マグネットポンプに

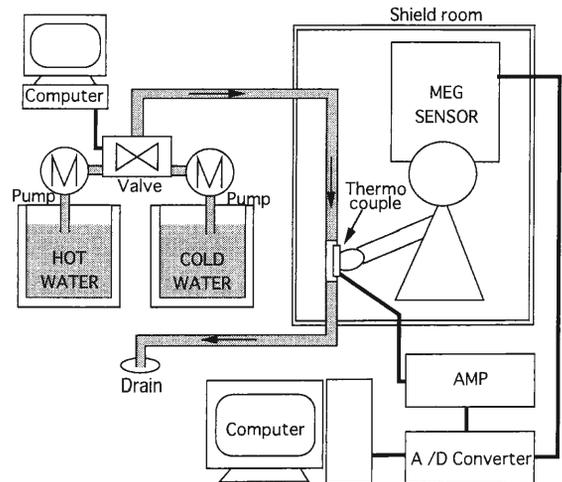


図 1 ヒト手への温度刺激の実験システム

より加圧した。コンピュータで制御された 3 方電磁弁により常にどちらか一方の水が流れるようにした。内径 8 mm のポリエチレンチューブによりシールドルーム内に導かれた水は、被験者の右手示指または右手指と掌全体に薄い膜を通して温度刺激を与え、その後シールドルーム外の排水穴へ排出される構成とした。温度感覚は単位時間当たりの温度変化量が同じでも、変化前の皮膚表面の温度が違うと異なった温度に感じられるため^[2]、温度刺激の基準となる温水の呈示時間（20-30 秒）は冷水（3-5 秒）に比べ十分に長くした。電磁弁から温度呈示部位までは約 6 メートル長であり、弁が切り替わってから約 7 秒後に呈示部で温度

の変化が観測された。温度呈示部での温度変化をモニタするために、熱電対を膜表面に接着した。被験者の指が常に熱電対を覆って温度呈示部に密着するようにし、熱電対の示す温度が指表面の温度であるとした。

右手に与えた温度刺激の求心性経路は痛覚と同様に脊髄で左側へと交叉し、延髄、中脳を経て左脳の中心後回(体性感覚野)に投射されるので^[4]、SQUID センサの中心は脳波記録で用いられる国際電極配置法(10-20法)のC3の部位(左頭)とした^[5]。本実験では温水から冷水に切り替わって右手の温度が変わったと感じたときの脳磁界を記録することを目標としたので、実験前に被験者が水温が変わったと感じた温度(閾値)を記録し、熱電対の表示温度が閾値に達した時にトリガをかけた。また、実験終了直後に再び閾値を求めて実験の前後で変化のないことを確認した。記録時間はトリガの前後5秒間とした。磁界データは、100試行を加算平均し、40 HzのデジタルLPFを通し、全区間にわたってオフセット処理を行った。

3. 結果

36°Cの温水刺激を基準(定常温)とした場合、全被験者で閾値となった温度は20-24°Cであり、このとき冷たく感じると報告した。これは電磁弁から温度呈示部位までの経路途中での放熱効果により実際に右手に呈示された温度が35-20°Cであること、32-35°Cの温度域は定常状態では暖かくも冷たくも感じない無関感覚であることに符合する。一方39°Cの温水刺激とした場合、2名の被験者で温度閾値が31-33°Cとなった。これらの被験者は暖かい状態から暖かくなる温度変化をはっきりと知覚した。しかし、その後続く冷たく感じる温度で合図するよう教示したが、温度が徐々に下がる感覚があるためか、その値は大きくばらついた。

被験者2より得られた脳磁界データを重ね書きした結果の一例を図2上に示す。この結果から明らかなように、視覚刺激・聴覚刺激で観測されるような振幅が数百fTppの応答は観測されなかった。被験者1,3でも同様の結果であった。一方、温水の温度によらず22-24°Cで冷たくなると答えた被験者4では3回の計測を通じて、データの記録区間全体に約0.25 Hz, 振幅100 fTppのゆっくりとした変動が観測されたが、温度閾値と磁界データの明確な対応関係は見られなかった。

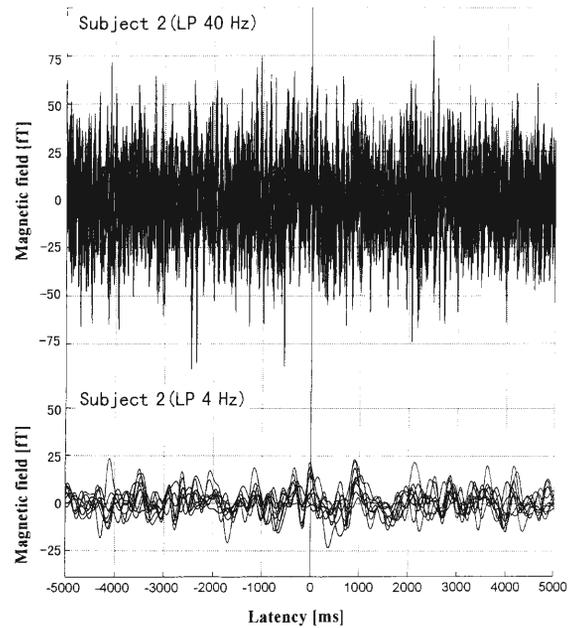


図2 上図は被験者1から得られた100試行分のデータを各チャンネルごとに加算平均し40 HzのLPFをかけて、すべてのチャンネルのデータを重ね書きしたもの。
下図は上図のデータに4 HzのLPFで処理して、再度オフセットを取り直した結果。

そこで図2下のように脳磁界データを4 HzのデジタルLPFで処理した結果について検討を行った。図3は被験者1より同一の部位で2回連続して記録した脳磁界データである。明確な変化ではないが、温度が変わったと感じた潜時(0 ms)の前後で脳磁界の振幅が若干減衰している。この被験者は他の測定でも同様の傾向を示していた。図4には同様に同一の部位で2回連続して測定した被験者2の結果をセンサ配置状にならべて示す。この被験者の場合、測定ごとの磁界データの変動が非常に大きく、温度の知覚に関連すると思われる反応は見られなかった。一方、図には示していないが被験者3では温度閾値が常に1秒程度の時間幅(約4°Cに相当)でふらついており、測定ごとの磁界のRMSのばらつきは大きくなかったが、温度刺激に対する反応も観測されなかった。

4. 考察

今回の実験では、1名の被験者で温度変化の知覚時に脳磁界の振幅が若干減衰した。しかし温水と冷水を用いた温度刺激によりはっきりとした誘発脳磁界を観

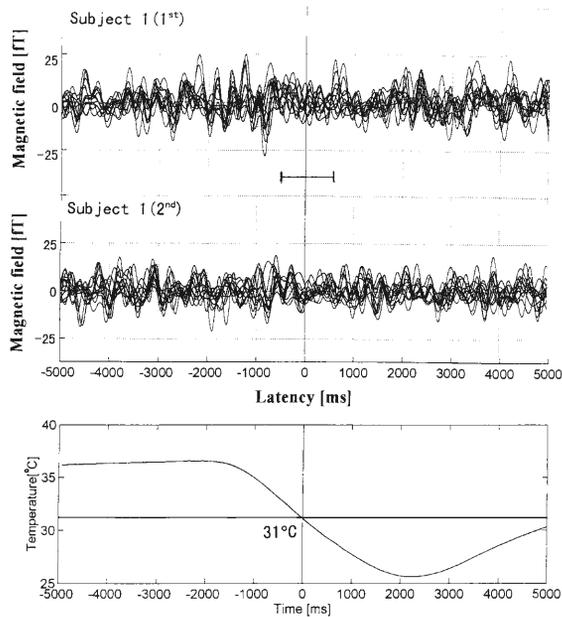


図3 被験者1の左頭から2回連続して記録された脳磁界データとそのときに呈示した水温の変化パターン。上図は1回目の結果, 中図は2回目の結果を示す。横軸の時間0 msは被験者1が温度が変わったと感じた温度になった時刻であり, このときは33°Cであった。

測できなかった。この原因として以下のことを考察した。まず、脳磁界の計測では刺激に対する応答脳磁界だけでなく、アルファ波に代表される自発性のリズムが大きな振幅で観測される。そのため、刺激に同期させて脳磁界データを加算平均し、誘発脳磁界のS/Nを改善することが通常行われる。本実験でも熱電対の示した温度をモニタし、被験者の閾値でトリガをかけ同期加算を行うように設定した。しかし熱電対は水温を示しているのであって温覚や冷覚の受容器がある真皮自身の温度を直接計測しているのではない。今回の測定では皮膚と温度呈示部が常に接触するように工夫したが、常に一定の圧力で接触していたかどうかは定かでない。そのため、温度の知覚とデータ記録の同期性が十分に保たれなかった可能性もある。

今回用いた温度刺激が大きな誘発反応を引き起こすに十分な刺激であったかどうかについても検討する必要がある。これまでにCO₂レーザを腕に照射して加温する温度刺激により、C3部位からの脳磁界計測で400 fTppの痛覚応答が得られることが報告されている^[6]。この方法では、刺激を与えてから短時間で刺激部の温

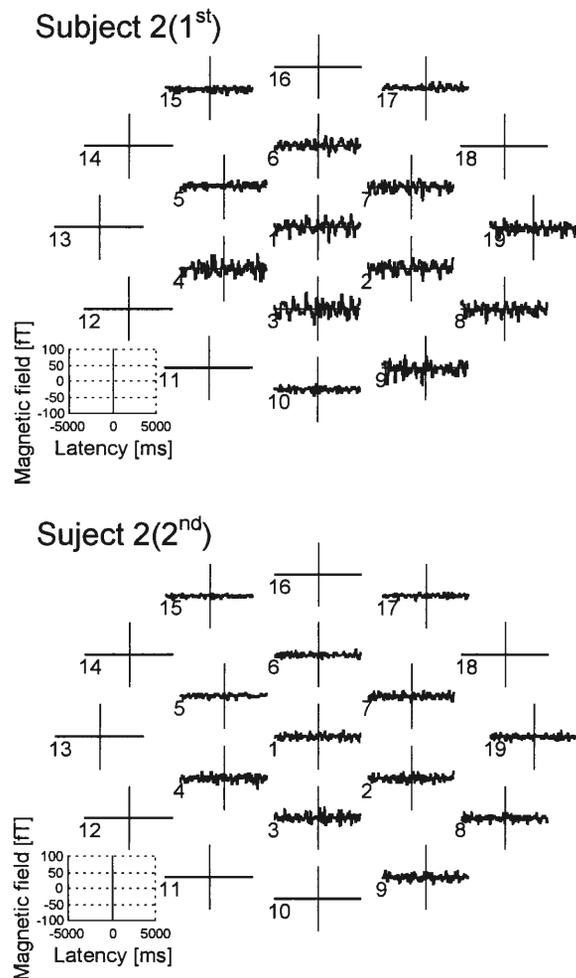


図4 被験者2の左頭から2回連続して記録された脳磁界データをそれぞれSQUIDセンサの配置に沿って表示した。1番がC3の真上で、13番が顔方向、16番が頭頂方向である。11-14、16、18番のセンサは調整中のため動作していない。

度が上昇することが予想される。本報告の温度刺激では温度勾配は最大6.6°C/秒であったが、この温度勾配をさらに大きくして同様の実験を行う必要があると考えている。また、先に述べたように、温度変化を与える直前までの定常温度の違いが、知覚される温度感覚に大きな影響を与えることから、定常温度の決め方を工夫することも重要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、被験者として協力してくださった、量子計測研究分野の大学院生に記して感謝する。

【参考文献】

- [1] 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達, 計測自動制御学会論文集, 30, 345 (1994).
- [2] Kenshalo, D. R., In Human perception and performance (eds. Boff, K.R. and Lincoln, J.E.), AAMRL, Wright-Patterson AFB, 1, 758 (1988).
- [3] 平田恵啓, 栗城真也, 中山哲, 山崎慶太, 池田顕蔵, 電気学会論文誌, 116 C, 181 (1996).
- [4] Martin, J. H. and Jessell, T. M., In Principles of neural science (eds. Kandel, E. R., Schwartz, J. H. and Jessell, T.M.), Elsevir, 363 (1991).
- [5] 大熊輝雄, 臨床脳波学, 35, 医学書院 (1991).
- [6] Kakigi, R., Koyama, S., Hoshiyama, M., Kitamura, Y., Shimojo, M. and Watanabe S., Neurosci Letters, 192, 45 (1995).

電荷移動錯体の非線形光学特性の評価

有機電子材料研究分野 芥川 智行
量子機能素子研究分野 川俣 純

電荷移動錯体の光学的非線形性と電荷移動量との関係を調べるために、電荷移動量の異なる種々の錯体を設計・合成した。この試料に関する3次非線形光学定数の評価を確立した手法を用いて試みた。その結果、電荷移動錯体の正確な非線形光学定数評価は、従前の評価法を用いては不十分であるとの結論に至った。そこで、電荷移動錯体のための非線形光学定数測定方法を新たにいくつか開発し、その有効性を検討した。これらの手法の中で、単分散ポリマー薄膜を用いたメーカーフリンジ測定が有効な評価方法として期待できることが明らかとなった。

1. はじめに

従来、絶縁体の代表とされていた有機物が、(perylene) (Br)_x の組成を持つ電荷移動 (CT) 錯体で半導体になる事が 1952 年に示され、今日では有機金属・有機超伝導体が出現するに至っている。CT 錯体の伝導性・磁性の制御は、結晶構造と物性測定の対比から、分子及び結晶の設計指針が導出され、望みの物性を引き出す事がある程度可能になっている。一方で、CT 錯体の光物性、特に2次及び3次の非線形光学特性に着目した研究はほとんど例が無く、立ち後れている研究領域である。その原因として、主に以下の4点が挙げられる。I) 光物性の測定に使える良質でサイズの大きな単結晶試料を作るのが難しい。II) CT 錯体は、紫外から近赤外に及ぶ広いエネルギー領域で電荷移動に起因するブロードな吸収帯をもつ為に、共鳴効果を考慮した定量的な解釈が難しい。III) 大部分の CT 錯体の結晶構造は反転対称性を持つ為に、2次の光学的非線形性を示さない。IV) レーザー光に対する物理的・化学的な安定性が低い。

以上の様な多くの制約の下での数少ない研究例として、金属伝導を示す α -(bisethylenedithiolo-tetrathiafulvalene (BEDT-TTF))₂I₃⁻ 錯体の3次の非線形光学特性が調べられ、その x_3 値が 5×10^{-8} esu にも達するという報告がある^[1]。この値は、代表的な有機3次非

線形光学材料である PTS-PDA ($x_3 = 8.5 \times 10^{-10}$ esu) よりも60倍も大きな値である。また、電子供与体(D)と電子受容体(A)分子が交互に積み重なった結晶構造(交互積層構造)を持つ(perylene) (tetracyanoethylene) 錯体では、 10×10^{-10} esu の x_3 値が報告されている^[2]。この2つのCT錯体の非線形光学特性に関する研究例から、CT錯体が潜在的に大きな非線形光学特性を有する事が示唆されている。

2. 2準位モデルによる予測

DとAからなる交互積層型のCT錯体(DA型)の基底状態と励起状態のエネルギーを図1に示す。DA型錯体の波動関数は、中性のD⁰A⁰状態とイオン化したD⁻¹A⁻¹状態のたし合わせとなり、 ρ をDからAへ

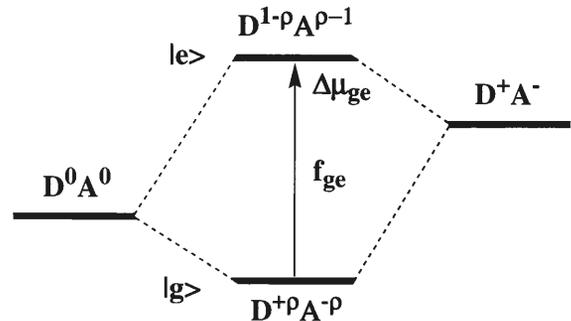


図1 DAダイマーの状態図

の電荷移動量とすると、式(1)と(2)の様に表わされる。

$$|g\rangle = -\sqrt{1-\rho}|D^0A^0\rangle + \sqrt{\rho}|D^+A^-\rangle \quad (1)$$

$$|e\rangle = -\sqrt{\rho}|D^0A^0\rangle + \sqrt{1-\rho}|D^+A^-\rangle \quad (2)$$

DとA分子間の波動関数の重なりを無視する近似では、 d をDA対間の距離として基底状態と励起状態の双極子モーメントの差 ($\Delta\mu_{ge}$) と遷移双極子モーメント (μ_{ge}) は式(3)及び(4)の様に表される。

$$|\Delta\mu_{ge}| = ed|2\rho-1| \quad (3)$$

$$f_{ge} \propto \mu_{ge}^2 = e^2d^2\rho(1-\rho) \quad (4)$$

χ_3 に対しては2準位モデルはあまりよい近似ではないが、 $\chi_2 \propto \Delta\mu_{ge}f_{ge}$ 及び $\chi_3 \propto f_{ge}|f_{ge}-\Delta\mu_{ge}^2|$ から、 ρ に対する χ_2 と χ_3 の依存性を導出できる。

ρ に対する f_{ge} , $|\Delta\mu_{ge}|$, $\Delta\mu_{ge}^2$ の変化を図2にプロットした。 χ_2 に関しては、 $\rho = 0.25$ と 0.75 で関数 $\Delta\mu_{ge}\mu_{ge}^2$ が最大となる事から χ_2 の極大値を取り、 $\rho = 0, 0.5, 1.0$ で χ_2 が最小となると予測される。さらに χ_3 の値は $\rho = 0.5$ で最大となり、 $\rho = 0, 0.5, 0.28, 0.72, 1.0$ で χ_3 が最小になると予測される。以上の事から、 ρ の値をCT錯体作製のパラメーターとし、その光学的非線形性を調べる事で、CT錯体を用いた非線形光学材料設計の為に ρ をパラメータとした物質設計が有効であるか否かを実験的に検証する事が可能であると

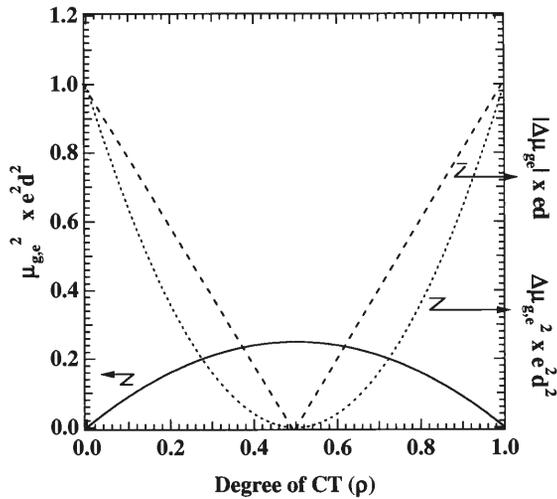


図2 電荷移動量 (ρ) と $\Delta\mu_{ge}$, $|\mu_{ge}|$, μ_{ge}^2 の関係

考えた。

3. 電荷移動錯体の作製と選択

DA型CT錯体の基底状態における電子状態を、Torranceが提唱したV型状態図から考察する事が可能である(図3)^[3]。DとA分子のイオン化ポテンシャル (I_D) と電子親和力 (E_A) の差 ($I_D - E_A$)、結晶中の D^+A^- 対が作るクーロン力 (αV , α はマーデルング定数) の大小関係により、得られるCT錯体は中性 ($\rho < 0.5$) からイオン性 ($\rho > 0.5$) に不連続に変化する(図3の実線)。D分子の酸化電位とA分子の還元電位の差を ΔE として、 $I_D - E_A = \Delta E + \Delta G$ (ΔG は溶媒和エネルギーの項) の関係を使い、横軸に ΔE 、縦軸に電荷移動吸収体のエネルギー ($h\nu_{CT}$) を分子パラメーターとしたCT錯体の設計が可能である。今回、peryleneをD分子として固定し、A分子に F_4 -TCNQ, DDQ, TCNQ, Me_2 -TCNQを用いた組み合わせのCT錯体の作製を行った(図4)。A分子の第一還元電位 ($E_{1/2}(1)$) をサイクリックボルタモメトリー (CV) 法で見積もったところ、その電子受容能力は F_4 -TCNQ > DDQ > TCNQ > Me_2 -TCNQ の順で低下していた(表1)。さらに、peryleneの第一酸化電位 ($E_{1/2}(1) = 1.05V$) との差から ΔE を求め表1にまとめた。

CT錯体の作製は、アセトニトリル溶液中で混合法を用いて作製し、錯体の組成は元素分析により1:1と決定された。CT錯体の $h\nu_{CT}$ の値は、UV-VIS-NIR

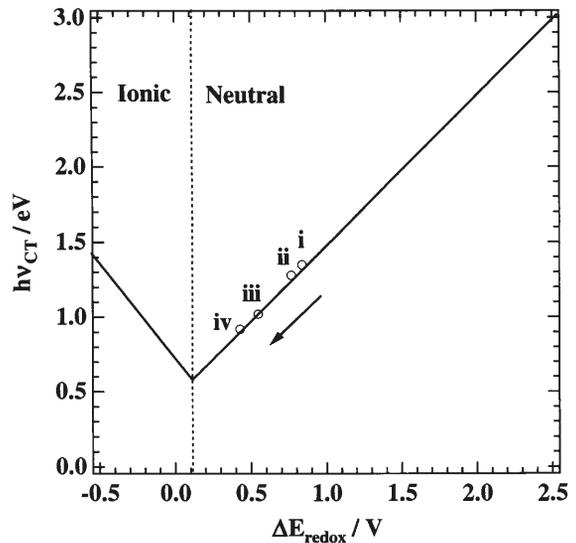


図3 $h\nu_{CT}$ と ΔE の関係

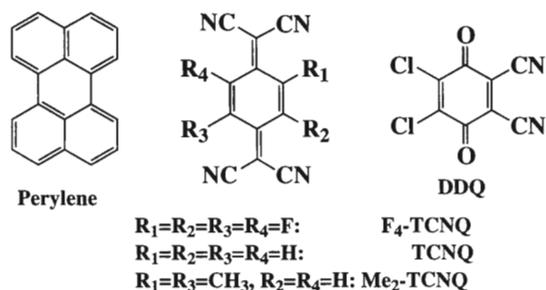


図4 CT 錯体作製に用いた D 分子と A 分子

分光光度計を用い測定し(表1), 先ほど求めた ΔE に対してプロットを行うと(図3), 中性の基底状態に特徴的な直線上に位置する CT 錯体が得られた事が示された。直線の右側に位置する錯体 (i) の方が左に位置するもの (iv) より弱い CT 相互作用を有する錯体と考えられる事から, CT 相互作用の異なる 4 種類の組み合わせが得られた事になる。

さらにこれら CT 錯体の ρ を定量的に見積る事を試みた。A 分子の分子内振動モードの中には, 分子の価数に依存してそのエネルギーがシフトするものがある。TCNQ 錯体ではニトリル伸縮振動(b_{1u}), DDQ 錯体ではカルボニル伸縮振動のエネルギーを, 中性の成分分子と完全にイオン化した分子(Na⁺·F₄-TCNQ⁻, Na⁺·DDQ⁻, K⁺·TCNQ⁻, K⁺·Me₂-TCNQ⁻) と比較する事で, ρ の決定を行った。その結果, 図3中の i~iv の位置関係に対応して ρ の値が, 0.1(i) > 0.2(ii) > 0.4(iii) > 0.5(iv) と変化している事が明らかとなり, ρ のチューニングが施された 4 種類の CT 錯体が得られた。

4. 3 次非線形光学特性の評価

1 節で述べた制約のために, CT 錯体に適用可能な 3 次非線形光学定数評価法は, 種々の評価法^[4] の中

もごく一部に限られる。これまでに報告されている数少ない例^[1,2] が, 多くの仮定の下で従前の評価法を無理に使用していることは否めず, 他の測定と数値を比較するのはかなり危険である。CT 錯体結晶の 3 次非線形光学定数の正確な評価に適用可能な手法は, 原理的に全反射法 (THEW 法)^[5] のみであるが, この手法は開発されて日も浅く, CT 錯体への応用例はない。本研究ではまず, この手法により合成した粉末結晶の定数評価を試みた。その結果を表 2 に示す。残念ながら ρ と χ_3 の間には明確な関係は見い出せなかった。また, その非線形光学定数は標準試料として用いた銅-フタロシアニン錯体の値と大差なかった。

5. 新しい 3 次非線形光学定数測定法の開発

全反射法による評価に際して, レーザー光照射による試料の損傷や多光子過程による発光等, 正確な評価を妨げる現象が多々認められた。また, 解析に必要な吸収係数や屈折率などが測定できなかったため, それらの値には有機化合物に一般的に観測される値を仮定せざるを得なかった。原理的には最善である THEW 法を用いたにもかかわらず, これらの要因により, 表 2 に示した χ_3 の値にも多くの誤差が含まれると考えられる。そこで, CT 錯体の特質を考慮した新しい 3 次非線形光学定数測定法の開発に着手した。

5.1 液体メーカーフリッジ法

CT 錯体の溶液を楔型のセルに入れて, メーカーフリッジ測定を行った。Kaizar らにより開発された手法^[6] を, CT 錯体の定数評価に適用できるように改良したものである。しかし, レーザー光照射による溶媒分子や錯体の運動等により歯切れの良い結果は得られなかった。

表1 Perylene をドナーとする DA 型電荷移動錯体

Donor	Acceptor	$E_{1/2}$ (1), V ^a	$E_{1/2}$ (2), V ^a	ΔE , V	$h\nu_{1,eV}^b$	ρ^c
i)Perylene	Me ₂ -TCNQ	0.21	-0.34	0.84	1.35	0.1
ii)Perylene	TCNQ	0.28	-0.33	0.77	1.28	0.2
iii)Perylene	DDQ	0.50	-0.34	0.55	1.02	0.4
iv)Perylene	F ₄ -TCNQ	0.62	0.07	0.43	0.92	0.5

a)Cyclic Voltammetry; Ag/AgCl, Pt, TBA·BF₄, 100mVsec⁻¹ in DMF. b)UV-VIS-NIR measurement with KBr pellet. c)IR measurement with KBr pellet.

表2 THEW 法による電荷移動錯体の3次非線形光学定数(1.06 μm)

Donor	Acceptor	ρ	$\chi_3(\times 10^{-12}\text{esu})$
i)Perylene	Me ₂ -TCNQ	0.1	1.4
ii)Perylene	TCNQ	0.2	2.0
iii)Perylene	DDQ	0.4	1.3
iv)Perylene	F ₄ -TCNQ	0.5	1.2
銅-フタロシアニン錯体			1.2

5.2 単分散ポリマー薄膜によるメーカーフリンジ測定

液体メーカーフリンジ法での問題点を解決するために、錯体を単分散させたポリマー薄膜を作製し、通常メーカーフリンジ測定を行うことを考えた。CT錯体の単分散ポリマーは作製例が殆どなく、作製条件の選択に苦労したが、現在は良質な薄膜が得られ、図5に示したようなフリンジパターンを測定できるようになった。今後はこの手法を駆使して系統的評価を行っていく予定である。

5.3 FWMEW 法

詳細は紙数の関係で省略するが、全反射配置で粉末試料の位相共役光発生を観測する手法である。分散系からは得られない結晶状態特有の情報を得る手法とし

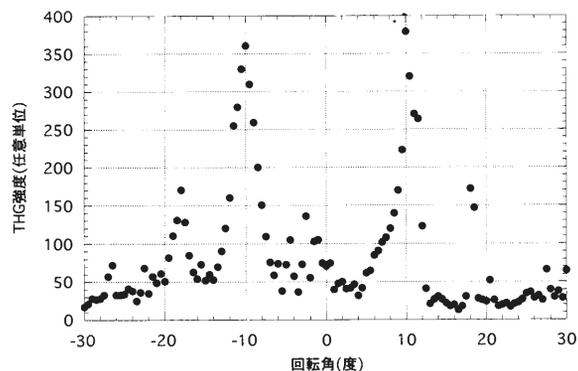


図5 電荷移動錯体をドーブしたPMMA 薄膜のメーカーフリンジパターンの一例

て期待しており、現在鋭意装置の開発を進めている。

6. 謝 辞

THEW 法による3次非線形光学定数測定、FWMEW 法の開発は、木口雅史博士(株式会社日立製作所・基礎研究所)との共同研究である。また、液体メーカーフリンジ法の改良に際してはF. Kajzar 博士(フランス)から、またそのための特殊なセルの設計に当たっては黒田紀夫氏(本研究所ガラス工作室)から数々の有益な助言をいただいた。この場を借りてこれら諸氏に厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] P. G. Huggard, W. Blau and D. Schweitzer, Appl. Phys. Lett., 51, 2183 (1987).
- [2] T. Gotoh, T. Kondoh, K. Egawa and K. Kubodera, J. Opt. Soc. Am. B., 6, 703 (1989).
- [3] J.B. Torrance, J. E. Vazquez, J. J. Mayerle and V. Y. Lee, Phys. Rev. Lett., 46, 253 (1981).
- [4] (a)久保寺憲一, 小林秀紀, 日本物理学会誌, 46, 465 (1991). ; (b)井上久遠, 光測定ハンドブック, 朝倉書店, 558 (1994).
- [5] M. Kiguchi, M. Kato and Y. Taniguchi, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 267, 101 (1995).
- [6] F. Kajzar and J. Messier, Res. Sci. Instrum., 58, 2081 (1987).

研 究

電子材料物性部門

- 基板表面に吸着した有機金属化合物の光化学反応
光電子物性研究分野 川崎 昌博 65
- レーザーレーダーによる成層圏微粒子の観測
光電子物性研究分野 橋本 訓 67
- フェムト秒モードロックレーザーシステムによる相転移の研究
相転移物性研究分野 八木 駿郎 70
- レーザーラマン散乱による水素結合中のプロトンダイナミクス
相転移物性研究分野 笠原 勝 73
- 18-crown-6 イオン包接体-導電性 Ni(dmit)₂ 錯体ハイブリッドシステム
有機電子材料研究分野 芥川 智行, 中村 貴義 75
- 光増感によるルミノールの化学発光
有機電子材料研究分野 安田 紀彦, 高橋 伸次郎, 中里 勝彦
竹中 信夫, 竹村 健 77
- CdSe 自己組織化量子ドットの作製
光材料研究分野 有田 宗貴, A. Avramescu, 植杉 克弘
末宗 幾夫 80
- ZnSe/MgS 超格子の励起子発光特性
光材料研究分野 梨木 裕之, 鈴木 秀樹, 植杉 克弘
末宗 幾夫 83

電子機能素子部門

- 酸化物高温超伝導体の超伝導状態の対称性
— 電子ラマン分光による最近の研究から —
量子機能素子研究分野 山中 明生 87
- ナノ構造高分子集合体によるメソスコピックパターン形成
分子認識素子研究分野 丸山 則彦, Olaf Karthaus, 下村 政嗣 90
- 拡散波分光の応用
超分子分光研究分野 西村 吾朗 93
- 遺伝子の動きを見る
細胞機能素子研究分野 金城 政孝 96
- 人工イオンチャネルをめざして
細胞機能素子研究分野 神 隆 99

電子計測制御部門

- 光波干渉による微粒子の3次元結晶性配列
光システム計測研究分野 原田 康 浩 102
- 平仮名文字の特徴抽出における脳内プロセスの検討
量子計測研究分野 竹内 文 也, 平田 恵 啓, 栗城 真 也 105
- 血管内壁表面上におけるリポ蛋白濃度に及ぼす流れの影響
— コンピュータ・シミュレーションによる理論的検討 —
自律調節研究分野 和田 成 生, 狩野 猛 108
- 培養心筋細胞による非線形振動子相互作用系のゆらぎとダイナミクスの解析
適応制御研究分野 山内 芳 子, 原田 明 彦, 中村 孝 夫
河原 剛 一 112

電子情報処理部門

- 反応拡散系における遷移ダイナミクスについて
情報数理研究分野 西浦 廉 政, 上山 大 信 115
- 高分子混合系における秩序形成
情報数理研究分野 伊藤 綾, 西浦 廉 政 117
- コオロギ気流感覚毛の機械特性の測定
神経情報研究分野 熊谷 恒 子, 馬場 欣 哉, 下澤 楯 夫 119
- 量子力学への分布定数回路理論の応用(確率密度は波動関数の絶対値の二乗でよいか?)
信号処理研究分野 永井 信 夫, 真田 博 文, 鈴木 正 清 122
- タクトイルポコーダにおける触感の利用方法の研究
感覚情報研究分野 和田 親 宗 126

附属電子計測開発施設

- 後方多重散乱光の空間的偏光異方性
附属電子計測開発施設 岩井 俊 昭 128
- ガウス型シェルモデル光源場の非整数次フーリエ面における諸特性
附属電子計測開発施設 吉村 博 幸 131

基板表面に吸着した有機金属化合物の光化学反応

光電子物性研究分野 川崎 昌博

ジメチルカドミウム、 $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ が単分子吸着した石英基板に 193 nm パルスエキシマーレーザー光を照射した。光解離生成物として基板表面から Cd 原子が脱離する際速度分布を求めたところ、マクスウェル-ボルツマン分布として 3,000 K と 5,000 K の 2 つの成分が観測された。これから光励起表面プロセスにおける Cd デポジションの機構を議論した。

1. 序

有機金属化合物は、電子材料の MOCVD の原料として用いられている。最近では、その表面光化学反応が光 CVD による微細加工技術として注目され、表面光反応機構の解明が必要となっている。表面に吸着した分子の反応を調べる方法として、XPS, UPS, HREELS が用いられてきた。これらの方法は装置の時定数の制限から秒程度の時間分解能しかなく、さらに、表面光反応前後のスペクトルの変化から表面光反応機構の解析を行うのが通常である。本研究では、表面から脱離した光解離生成物のパルスレーザー分光法を用いた測定によって、マイクロ秒の時間分解能で表面上における光解離ダイナミクスを解明することを目的として、有機金属化合物の光化学反応を研究した。

2. 実験

実験装置を図 1 に示す。石英基板 ($15 \times 15 \text{ mm}^2$) を塩酸と純水で洗浄処理し、超高真空チャンバー内で 770 K に加熱した。その後これを 170 K に冷却し、 $1 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ の圧力でこの基板の上に $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ をノズルを用いて連続的に吸着させた。この $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ が吸着した石英基板に 193 nm のパルスレーザー光を照射した。 $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ から光解離脱離した Cd 原子の 228.8 nm における $\text{Cd}(5p^1P_0 \leftarrow 5s^1S)$ 励起の LIF スペクトルを測定した。

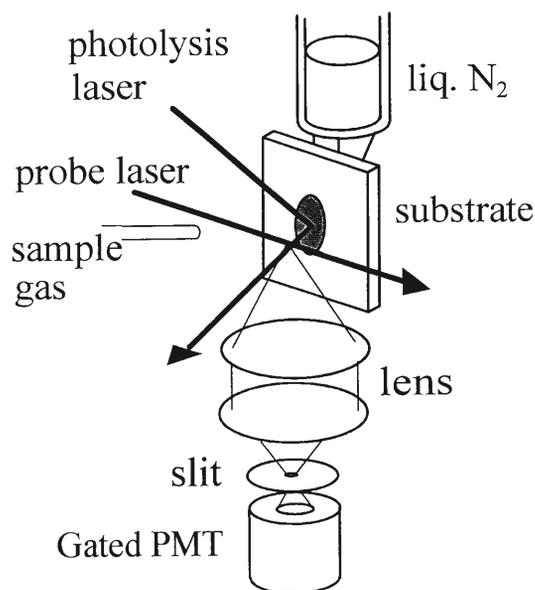


図 1 実験装置

3. 結果および考察

1) $\text{Cd}(5p^1P_0 \leftarrow 5s^1S)$ の LIF スペクトル

石英基板とプローブレーザー光との距離を 5 mm としたときのドップラースペクトルを測定した。その測定結果を図 2 に示す。Cd 原子の脱離方向は一様の空間角度分布を持ち、速度分布はマクスウェル-ボルツマン型であるとして、Cd 原子の速度分布をシミュレーションした結果、温度は 3,000 K と 5,000 K となった。さらに分解光とプローブレーザー光のパルス遅延を 5 μs から 40 μs に変えたところ 5,000 K の速度成分が

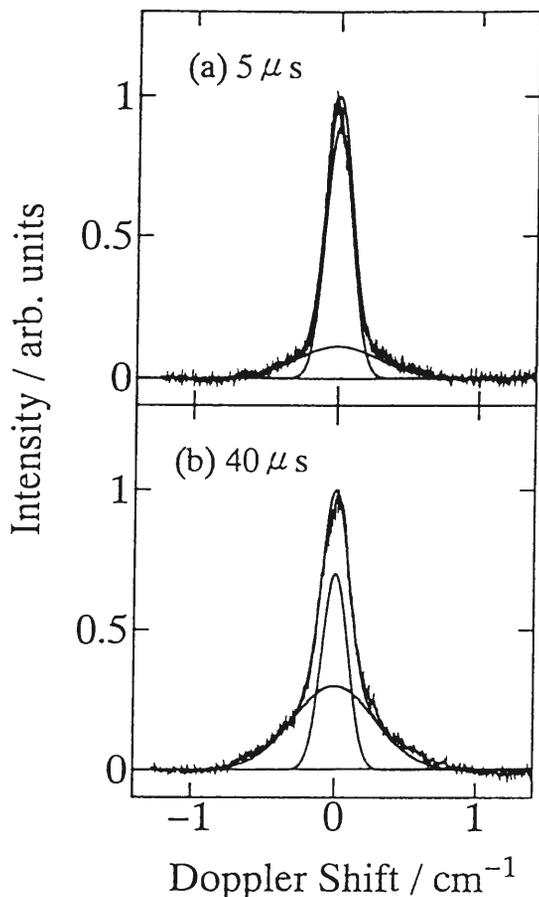


図2 カドミウム原子のドップラー分光スペクトル
(a) delay 5 μ s, (b) delay 40 μ s.

増大した。

3,000 Kの速度成分は193 nmのレーザー光による $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ の直接解離によって生じたCd原子によるものと考えられる。一方、5,000 Kの成分は遅れて現れることから、表面上での光化学二次反応によって脱離してきたCd原子であると考えられる。

アルキル基を持つ有機金属化合物の炭素-金属結合は弱いため、気相における紫外光分解では、この結合が2つ以上切れるか、または電子励起したモノメチル金属が生成する^[1]。表面上に吸着した $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ においても193 nmでは $2\text{CH}_3 + \text{Cd}$ または $\text{CH}_3\text{Cd}^* + \text{CH}_3$ の分解過程が表面上で起こっており、これらの種の表面反応により高温のCd原子が生成してくると考えられる^[2]。

2) CdCH_3 のLIFスペクトル

基板上と気相中での $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ の光分解反応を比較するために、気相での $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ の193 nm光分解によって生じた CdCH_3 のLIFスペクトルを測定した。結果を図3に示す。この振動分布を測定した結果、気相で $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ が光分解して生じた CdCH_3 の振動分布は $v''=0/v''=1$ の比が1/0.3であることが分かった。今後、基板から脱離する CdCH_3 の検出を行うことにより、表面反応を詳しく検討する。

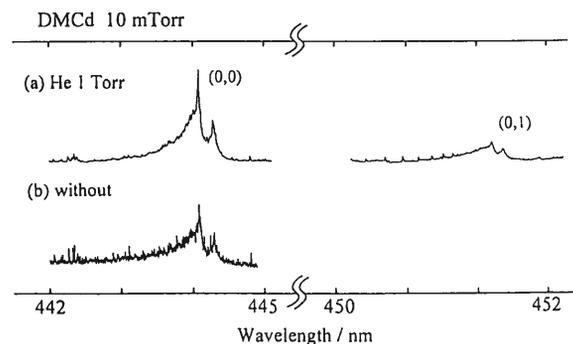


図3 モノメチルカドミウム (CdCH_3) のLIFスペクトル
(a) バッファガスとしてヘリウム1 Torrあり,
(b) バッファガスなし。

【参考文献】

[1] P. J. Young et al., J. Chem. Phys., 58, 5280 (1973); C. F. Yu et al., J. Chem. Phys., 85, 1782 (1986); M. Kawasaki et al., Laser Chem., 7, 109 (1987).

[2] M. Ohashi, R. Wada, Y. Matsumi, M. Kawasaki, Jpn. J. Appl. phys. 35, 5879 (1996)

レーザーレーダーによる成層圏微粒子の観測

光電子物性研究分野 橋本 訓

沃素分子セルを狭帯域光学フィルターとして用いた高スペクトル分解型レーザーレーダー (HSRL) を制作し、これを用いて大気化学的に重要な成層圏エアロゾルの観測を試みた。HSRL の原理と、観測例を紹介する。

1. はじめに

極域では冬期に極渦と呼ばれる極を中心とした大気の巨大な渦が発生する。この極渦が発達したとき成層圏極渦内部の -80°C 以下の領域には硝酸性微粒子を主とするエアロゾルの堆積が出現することがある。これは極域成層圏雲 (PSC: Polar Stratospheric Cloud) と呼ばれる。この PSC 微粒子表面上の反応がオゾンホールの生成にかかわっているとされている。成層圏で Cl 原子のリザーバーとなり、その生成によって結果的にオゾン破壊反応を減速している ClONO_2 が PSC 微粒子表面で HCl と反応し、 $\text{ClONO}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{Cl}_2$ によって塩素を解放する。極域が春になったとき、これが一気に光分解をはじめ、オゾンの極端な減少を招きオゾンホールを生ずる、とされる^[1]。今のところ明確なホールを作るに至っていない北極圏でも同じことは起こっているはずであり、PSC の観測が望まれている。

この様な高空に存在する微粒子を比較的簡単に計る方法としてレーザーレーダーによる観測がある。レーザーレーダーはライダー (LIDAR: Light Detection and Ranging) と呼ばれ、その名の示すように一般のレーダー (RADAR) の電波の代わりにレーザー光を用いたりモートセンシング法である^[2]。ライダーでは用いる電磁波の波長が短いため、レーダーでは不可能な大気中エアロゾル (このうちの半径 $0.1 \sim$ 数十 μm 程度) を検出できる。

2. ライダーシステム

大気観測用ライダーシステムは、パルスレーザーを

光源とする送信系と、望遠鏡-フォトンカウンタによる受信系から構成される。測定はパルス光を送出し、戻ってくる散乱光強度の時間変化を記録するだけである。散乱体までの距離は散乱光が受信されるまでの遅延時間から直接的に求められる。さらに各距離での信号強度から散乱体の密度を見積もることが出来るのだが、これには、かなり複雑な操作を要する。ここで、ある距離 R からの散乱光受信信号強度を $I(R)$ とすると、

$$I(R) = \left[E_0 \xi R^{-2} \beta_a(R) \frac{\mathbf{P}_a(\pi, R)}{4\pi} + \beta_m(R) \frac{\mathbf{P}_m(\pi)}{4\pi} \right] e^{-2 \int_0^R a(r) dr} + M(R) \quad (1)$$

の様に書け、これをライダー方程式と呼ぶ。(1)式中、 E_0 はレーザー光強度(出力)、 ξ はシステム定数、 β は後方散乱係数、 \mathbf{P} は後方散乱 Phase Function、 α は消散係数、 M は多重散乱成分である。添字 a, m は、それぞれのエアロゾルによる寄与 (ミー散乱成分) と空気分子による寄与 (レイリー散乱成分) を表す。観測データから $\beta_a(R)$ を決定できれば、比例関係にあるエアロゾル数密度を見積もることが出来る。

(1)式には未知数が多すぎ、解くには幾つかの仮定おこなねばならない。多重散乱の項は成層圏のライダー観測が可能な気象条件では無視出来るので除外し、さらに何らかの方法で空気分子の寄与だけを単独に知ることが出来たとすると、その信号強度 $I_m(R)$ は次の様に書ける。

$$I_m(R) R^2 = E_0 \xi \beta_m(R) \frac{3}{8\pi} e^{-2 \int_0^R a(r) dr} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{P}_m(\pi)$ はレーリー後方散乱の値に置き換えた。

ここで(1)と(2)の比をとれば、

$$\frac{I(R)}{I_m(R)} = \frac{2P_a(\pi, R)}{3} \frac{\beta_a(R)}{\beta_m(R)} + 1 \quad (3)$$

の関係が導かれる。(3)式の左辺は散乱比と呼ばれる。 $\beta_m(R)$ と $P_a(\pi, R)$ を見積もる方法はあるので、これらを使えば散乱比から $\beta_a(R)$ を決定できる。しかしながら、相対的なエアロゾル密度の変動を知るには散乱比のまま比較するだけでも十分であり、ライダーの測定結果は散乱比で描かれる場合が多い。

結果を散乱比で表すにせよ、 $I_m(R)$ は求めねばならない。通常、成層圏上部ではエアロゾルが非常に少ないことが知られており、30 km 程度以上では散乱比を1と仮定出来る。これから $\beta_m(R)$ と比例関係にある $I_m(R)$ を見積もる事が可能であり、散乱比も計算できる。以上はマッチング法と呼ばれ、一般のミー散乱ライダー観測データ解析に常用されてきた。マッチング法は簡便であるが多くの仮定が入るため定量性は悪くなってしまふ。

最近、より正確に散乱比を求めるために幾つかの研究グループでHSRL型が開発され、使われ始めている。質量の小さい空気分子は熱運動が速くこれによるレイリー散乱光は、質量の大きいエアロゾルからのミー散乱より、ずっと大きなドップラー広がり(数GHz程度)を持っている。非常に狭帯域の光学フィルターを使えば、全散乱からエアロゾル成分を取り除くことが出来るので、 $I_m(R)$ に直接換算できる信号の測定が可能となる。本研究で用いたライダーは、Nd:YAGレーザーをシーダーを使って単一縦モード発信させ(送信光はフィルター以上に狭帯域でなければならない)、その第二高調波(532 nm)を送信光とし、フィルターとして沃素分子セルを使ったHSRLである(図1)。

3. 観測結果

図2に1996年9月6日に行った石狩湾上空のライダー観測結果を散乱比として示した。12 km 付近の圏界面から30 km 程度にかけて成層圏に恒常的に存在するユング層による散乱が見える。8 km 付近のピークは対流圏中の絹雲によるものである。HSRLによって求めたもの(a)に比べ、従来から使われているマッチング法(b)では、特に低高度領域でオフセットが大きく、誤差が含まれることが分かる。なお、他の測定でも

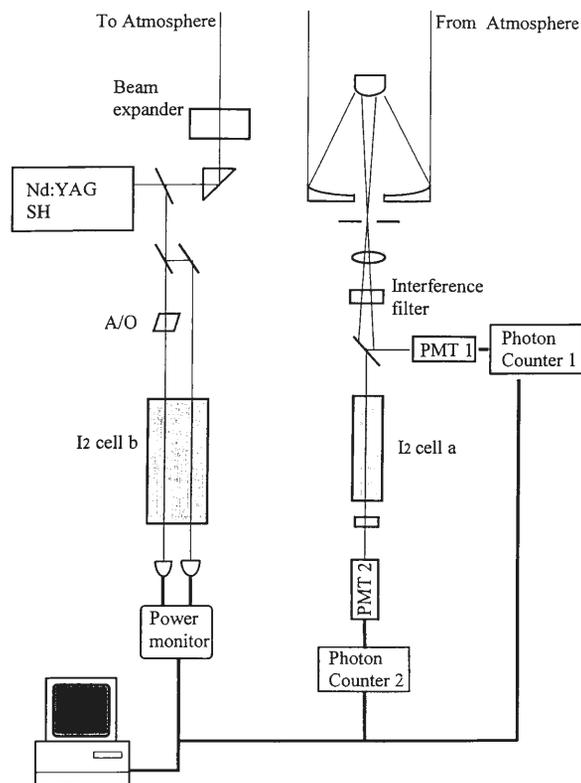


図1 HSRL (High Spectral Resolution Lidar) の構成図。沃素分子の回転線に合わせて単一縦モード発信させたNd:YAGレーザーの出力の2倍波(532 nm)を拡大して上空に送信し、戻ってくる散乱光を望遠鏡で受光する。これをビームスプリッターで二分し、一方はそのまま、もう一方は沃素セルを通して光電子増倍管に導く。送信光の一部は沃素セルローパワーモニタに導き、常に波長ドリフトを監視している。

1996年秋の成層圏にはユング層以外のエアロゾルは観測されなかった。これは、つくば市をはじめ他の地点のライダー観測などでも同様であり、1996年秋現在成層圏はクリーンな状態にあると言える。

4. 展 望

本研究はレーザー計測法の環境科学への貢献のひとつと言える。直接的には国立環境研究所、松井一郎、杉本伸夫、中根秀昭3氏との共同研究であり、最終的な目的は極渦内の成層圏エアロゾルの変動を知ることである。北半球の極渦はもちろん北極を中心に発生するが、場合によってはその一部が北海道まで達することが実際に起こっている。このため札幌程度の緯度でも極渦内のエアロゾル観測を狙うことが出来る。国立環境研究所のメンバーが北海道にライダーの設置を望ん

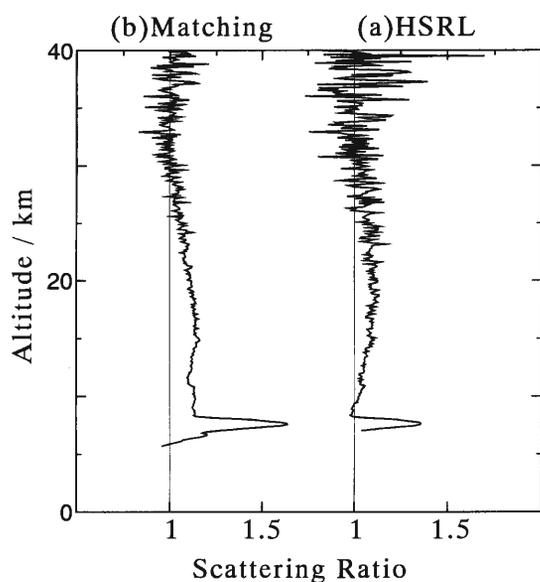


図2 石狩湾上空のライダー観測(1996年9月6日)によって得られた散乱比。成層圏には12 km付近の圏界面から30 km程度にかけてユング層による散乱が見える。8 km付近のピークは対流圏中の縞雲によるものである。HSRLによって求めたもの(a)に比べ、従来から使われているマッチング法(b)では、特に低高度領域でオフセットが大きい。

だ理由もそこにある。変動を知るには先ず通常の成層圏の状態を観測しておかなければならないので、当面札幌での観測は続けるが、実際に極渦内のエアロゾルが測定できるかどうかは、それこそ運を天に任すほか無い。一方、HSRL自体ライダーとして新しいタイプのものであり、測定法、データ処理法とも改良すべき点が残されている。

【参考文献】

- [1] R. L. Jones, S. Solomon, D. S. McKenna, L. R. Poole, W. H. Brune, D. W. Toohey, J. G. Anderson, D. W. Fahey, Geophys. Res. Lett., 17, 541 (1990); C. R. Webster, R. D. May, D. W. Toohey, L. M. Avallone, J. G. Anderson, S. Solomon, *ibid*, 20, 2523 (1993).
- [2] ここで紹介したライダーは、ミー散乱型 [G. Ficco, L. P. Smullin, Nature, 1275 (1963)] および HSRL 型 [H. Shimizu, S. A. Lee, C. Y. She, Appl. Optics, 22, 1373 (1983); S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta, J. T. Trauger, J. T. Sroga, F. L. Roesler, J. W. Weinman, Appl. Optics, 22, 3716 (1983)] である。この他にラマン散乱型 [H. Inaba, T. Kobayashi, Opto-Electronics, 4, 101 (1972)], 差分吸収型 [R. M. Shotland, J. Appl. Meteor., 13, 71 (1974)] などがある。

フェムト秒モードロックレーザーシステム による相転移の研究

相転移物性研究分野 八木 駿 郎

水素結合をもつ強誘電体 KDP の相転移機構が変位型であるのかあるいは緩和型であるのかをめぐって 30 数年来の論争があった。フェムト秒モードロックレーザーシステムを用いたパルス誘導ラマン散乱システムにより、当研究分野で初めて KDP の B_2 ソフトモードがコヒーレントに励起され、その時間依存性が相転移点直上まで観測された。その結果 KDP の相転移機構は緩和型であることが直接明らかになり永年の論争に決着が付いた。

1. はじめに、相転移物性とは何か。

相転移とは安定に存在している物質が、その環境を記述する温度、圧力、電場、磁場などのパラメータの変化に対して、それらのある特定の値で急激な物性の変化を示し、別の安定な存在形態へ移行する現象である。身近な例では常温 1 気圧で安定な液体である水 (H_2O) は $0^\circ C$ で凝固して安定な固体である氷になる。このとき凝固直前の液体中には密度揺らぎのスローイングを反映して多数の分子が結合して固相出現の前駆現象としてのクラスターを形成し、凝固直後の固体においても激しい分子振動が液体の構造を反映して残存している。このように相転移における揺らぎの増大は様々な物性上の異常を発現し、安定な状態では予想もつかない物性が相転移現象に現れる。当研究分野ではこのような相転移現象の転移機構の解明から、物性異常発現のミクロな機構を明らかにし新しい電子材料設計に原子論的基礎を与えることを目指している。特に常誘電体が強誘電体に相転移するいわゆる強誘電性相転移では、相転移の秩序変数である電気分極の揺らぎの増大を反映して、誘電率が 3 桁から 4 桁もの増大を示す例が多い。したがって強誘電性相転移の転移機構の解明は電子材料物性上極めて重要である。

2. 強誘電体 KDP の相転移機構にどのような問題があったか。

2.1 KDP の相転移

KDP (KH_2PO_4) は可視光域の光に対して無色透明の結晶で非線形光学定数が大きく SHG 素子などの光学素子として有用である。その強誘電性は半世紀も以前に発見されており、水素結合をもつ強誘電体の代表的な物質として永い研究の歴史をもつ。とくに興味をもたれているのは、その水素結合中の水素 (H) を原子量が 2 倍で電気的には等価な重水素 (D) で置換した場合に、相転移温度 (T_c) が約 100 K も上昇するいわゆる同位元素効果として知られている現象である。

相転移温度は結晶内の誘起双極子モーメントの相互作用の結果生じる結晶場と熱揺らぎの均衡で与えられるので、この効果は相転移機構に水素結合が本質的な役割を果たしていることを示唆している。まず最初にプロトンの運動がソフトモードと結合し強誘電性を引き起こすとする変位型モデルが KDP の相転移機構として提案された^[1]。

2.2 ラマン散乱スペクトル波形の解析に基づく 2 つの相転移機構をめぐる論争

1969 年 Kaminow と Damen により、初めてラマン散乱で B_2 モードのスペクトルが観測された^[2]。しかしながらそのスペクトルは相転移温度に向かって顕著

な温度依存を示すが、室温ですでに過減衰の傾向を示すもので、格子振動としての特性を明瞭に示すものではなかったために議論を呼んだ。その後 1975 年 Peercy が高压下ラマン散乱により、印可圧力の増大と共に過減衰スペクトルが常減衰スペクトルへ変化し、振動型スペクトルの特徴であるピークが出現することを報告した^[3]。この結果は KDP の変位型相転移機構の実験的証拠と考えられ、その後 30 年近く変位型モデルの拠り所となっていた。

これに対して、主に日本を中心とした研究グループが理論、実験両面から異議を唱えた。ラマン散乱スペクトルの精密な測定から Tominaga らは、 PO_4 イオンが正 4 面体ではなく僅かに歪んでおり、それにより固有の電気永久双極子モーメントをもち、相転移機構はその整列・不整列による緩和型（秩序無秩序型）であるとした^[4]。しかしスペクトル波形の解釈は任意性が大きく、明確な相転移機構の根拠をもつとする変位型説に対して強力な反論とはならなかった。Arima らは前述の Peercy の結果に対してその圧力依存性の再現と測定圧力範囲の拡大を行い、さらに散乱角を変えた高压下ラマン散乱を観測し、前方散乱の結果から求めたソフトモードの分散関係は強誘電性相転移から期待されるソフトモードのもの、つまりブリルアン帯の Γ 点に極小値をもつものではないことを報告した^[5]。これは KDP のソフトモードの存在の根拠とされている Peercy のラマンスペクトルに本質的な疑問を投げかけたものであるが、やはりスペクトル波形解析に基づいているので決定的な反論までには至らなかった。

3. フェムト秒の時間幅をもつ光パルスによるコヒーレントフォノンの励起

近年のパルスレーザーの発達でパルス誘導ラマン散乱 (Impulsive Stimulated Raman Scattering) 法で、コヒーレントな光学フォノンを励起することが可能になってきた^[6]。今の場合オーダパラメータとしての素励起は、強誘電性ソフトモードである B_2 フォノンである。当研究分野においてフェムト秒モードロックレーザーシステムを中心とするパルス誘導ラマン散乱実験システムが完成し、温度可変型光学セルを用いて KDP の B_2 フォノンが励起されその時間依存性が観測された^[7] (図 1)。その結果励起されたフォノンには T_c 直上まで明確に指数関数的時間依存性が観測され

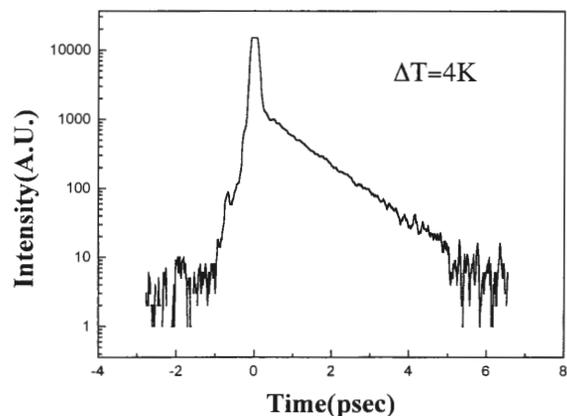


図 1 KDP の相転移点 (T_c) の上 4 K における B_2 フォノンによるプローブ光の回折光強度の遅延時間依存性。 B_2 フォノンが緩和型モデルの特徴である指数関数的時間依存性をもつことを示している。

た。これは相転移をになう素励起が緩和型の時間依存性をもつことであり、KDP の相転移機構が緩和型であることを直接示している。さらにこの時間依存性から直接求められる緩和時間の温度依存性を測定したところ T_c の上 30 K の温度領域から T_c 直上に至る臨界緩和が観測された (図 2)。

4. 結 論

KDP の相転移機構は緩和型であることが明らかになり、30 年近く続いた論争に終止符が打たれた。

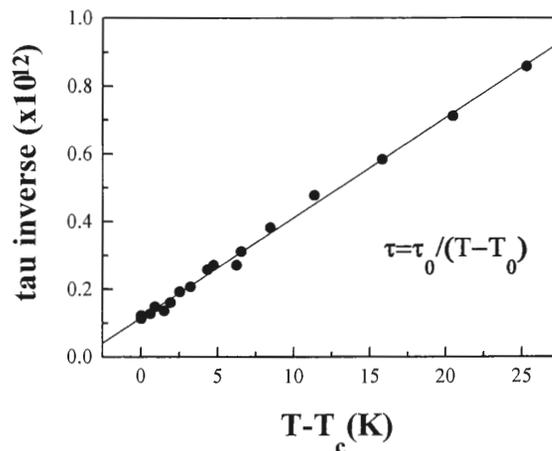


図 2 B_2 ソフトフォノンの時間依存性から直接求められた緩和時間 τ の逆数。 T_c へ向かって τ が臨界緩和を示している。

【参考文献】

- [1] W. Cochran, Adv. Phys. 10, 401 (1961).
- [2] I. P. Kaminow and T. C. Damen, Phys. Rev. Lett. 20, 1103 (1968).
- [3] P. S. Peercy, Phys. Rev. B12, 2725 (1975).
- [4] Tominaga et al., Ferroelectrics Lett., 44, 265 (1983).
- [5] T. Yagi, M. Arima and A. Sakai, J. Phys. Soc. Jpn., 59, 1430 (1990).
- [6] K. A. Nelson, R. J. D. Miller and M. D. Fayer, J. Appl. Phys., 53, 1144 (1982).
- [7] S. Yoshioka, private communication.

レーザーラマン散乱による水素結合中の プロトンダイナミクス

相転移物性研究分野 笠原 勝

$K_3H(SO_4)_2$ とその重水素化塩の混晶系において HSO_4^- と DSO_4^- のラマン線を分離して観測した。その線幅の異常から H(D) の運動の特性時間を求め、H と D 各々の関係している水素結合の混晶濃度に対する振る舞いが異なることを見いだした。

1. 研究の背景

水素結合中の水素を重水素に置換すると相転移温度が大きく上昇する同位元素効果は、強誘電体相転移における興味ある問題である。この問題に対し Blinc^[1] によるトンネルモデル、市川による幾何学的同位元素効果モデル^[2] などが提案されているが、未だ完全な解決にいたっていない。これらのモデルでは、重水素置換は質量が倍になる(トンネルモデル)、質量及び水素結合距離の増大(幾何学的同位元素効果)のみを考え、それ以外結晶に何ら変化を与えないことを暗黙に仮定している。

ゼロ次元水素結合系と称される $M_3H(RO_4)_2$ ($M=K, Rb, Cs, R=S, Se$) 及びその重水素化塩は、水素結合と相転移の関連を研究するのに適した物質である。何故なら水素結合がダイマー内に存在するのみで結晶全体にネットワークを形成していない。^[3,4] 従って、相転移は水素結合の局所的な性質を反映していると考えられ、問題が大幅に単純になる。我々は、水素結合が孤立している特長を生かし、硫酸イオンの内部振動モードのラマンスペクトルをプローブとして、 $K_3H(SO_4)_2$ (TKHS) 及びその重水素化塩 (TKDS) における重水素の動的性質を調べた。さらに研究を TKHS-TKDS 混晶系へと拡張した。混晶において水素と結合する硫酸イオンと重水素と結合する硫酸イオンの信号を別々に観測することができ、それらの関係する水素結合が混晶中において異なった振る舞いをするを見いだした。

2. 実験及び結果

2.1 実験

蒸発法で育成した混晶単結晶を、光学配置 $a(c^*a)b$ で測定した。分光器は Jovin Yvon 社 HG-2 S 及び T 64000 を用いた。データ収録時間の大幅な短縮が T 64000 による多チャンネル検出器で可能になった。

混晶の反強誘電相においては DSO_4^- 、 HSO_4^- 及び SO_4^{2-} からの 3 本のラマン線が観測される。ピーク強度の x 依存性から、各々の信号を同定した。これは水素、及び重水素に関連した硫酸イオンのモードを分離して観測できることを意味し、ラマン散乱による研究法の大きな利点である。

2.2 結果

室温から温度を降下するにしたがい通常見られる線幅の減少が観測されるが、 T_c より約 50 K 高温から線幅が増大し始める。もし相転移が起こらない場合、線幅の温度変化が直線であると仮定すれば、相転移による線幅の増大 Δ はこの直線と実験値との差と定義される。この系は特性時間 τ_c で SO_4^{2-} と DSO_4^- (又は HSO_4^-) の振動数間を時間揺動する 2 周波数系と考えられる。よって、motional narrowing theory^[5] を適用し、運動が早い場合 ($\tau_c \delta < 1$) スペクトル幅から特性時間を

$$\tau_c = 2\Delta / \delta^2 \quad (1)$$

と求めることができる。 $2\delta = \omega(SO_4^{2-}) - \omega(DSO_4^-)$ は 0

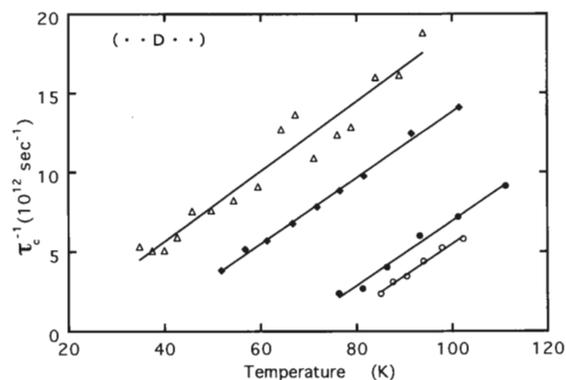
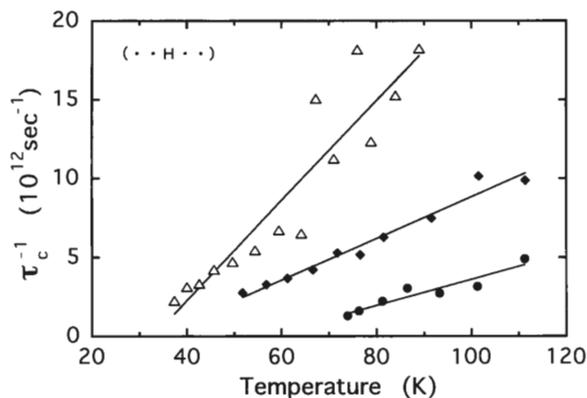


図1 τ_c^{-1} の温度依存性, a) 水素 及び b) 重水素

K へ外挿した値を使った。このようにして求めた τ_c^{-1} を図 1(a), (b) に示す。

3. 考 察

前節で得られた τ_c^{-1} は

$$\tau_c^{-1} = A \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)(T - T_0) \quad (2)$$

と表される。A は定数, U は二極小ポテンシャルの障壁高さ, T_0 は仮想的に τ_c が発散する温度である。 τ_c^{-1} の傾斜は U の大きさに関係し, 例えば $(\tau_c^H)^{-1}$ を 80 K で比較すると x が小さくなるに従い U が小さくなることを示している。一方, D にかんする U は x に関わらず一定である。これらのことは, 水素が結合している

水素結合は x が増えるに従い短くなり, 重水素の水素結合は長さが一定であることを意味する。

我々は, これまで水素結合中の水素と重水素の違いは, (質量の違いは当然であるが) 水素結合長さにあり, 結果としてそのダイナミクスに単に量的違いが存在するのみである, と考えてきていた。従って, 混晶における物理量は両者の平均量を示すものとしていた。しかし, この研究が示すように(少なくとも混晶中では), 両者に質的違いが存在するように思える。このことがゼロ次元系のみならず一般性を持つならば, 水素結合誘電体相転移研究に対する新しい手段となりうると思われる。

【参考文献】

- [1] R. Blinc: J. Phys. Chem. Solid, 13, 204, 1960.
- [2] M. Ichikawa: Chem. Phys. Lett. 79, 583, 1981.
- [3] Y. Noda, S. Uchiyama, K. Kafuku, H. Kasatani and H. Terauchi: J. Phys. Soc. Jpn. 59, 2804, 1990.
- [4] Y. Noda, H. Kasatani, Y. Watanabe, H. Terauchi and K. Gesi: J. Phys. Soc. Jpn. 59, 3249, 1990.
- [5] A. Abragam: The Principles of Nuclear Magnetism (Oxford, Clarendon, 1961) Chap. X.

18-crown-6 イオン包接体—導電性 Ni(dmit)₂ 錯体ハイブリッドシステム

有機電子材料研究分野 芥川 智行, 中村 貴義

電気伝導性を示すアクセプター性の錯体, Ni(dmit)₂ のカウンターカチオンとして超分子カチオンを導入した。超分子カチオンはクラウンエーテルとアルカリ金属イオンからなり, その構造はテンプレートとなるアルカリ金属イオンの種類により異なる。超分子イオンの構造は固体内の Ni(dmit)₂ の配列に大きく影響し, 結果として固体の電子構造が変化する。本系は超分子イオン中のアルカリ金属の挙動が伝導電子を制御するという興味深い現象を示す。

1. はじめに

分子あるいは分子集合体を動作単位とした新奇なデバイス—Chemionics Device—の実現には未だ長い道程が必要であり, そのために多様な基礎研究からのアプローチが不可欠である。デバイス構築の方法論は Chemionics を既存のエレクトロニクスから明瞭に区別する。既存の電子デバイスが微細化 (top-down) の方法論を用いているのに対し, Chemionics においては分子の self-assembly による bottom-up の方法によりデバイスが構築される。機能性分子が分子認識能を利用し自己組織化する様にプログラムされ, 光・電子・イオン等のプロセッシングが可能な, 明確な構造・パターン・ネットワークを形成することで “Chemionics” デバイスが実現する^[1]。機能性分子に複雑な高次構造の設計図をあらかじめプログラムすることは現段階では非常に困難であるが, 分子認識過程が比較的確立した分子を用いることにより分子システムの構築が可能である。

我々はこれまでに伝導バンドを与えるカラム構造を容易に与える Ni(dmit)₂ 錯体と, アルカリ金属イオンを選択的に認識する大環状エーテルを用いて, イオン包接体—分子性導体ハイブリッドシステムを構築できることを明らかにしてきた^[2-4]。本稿では大環状エーテルとして 18-crown-6 を用いた場合について紹介する^[5]。

2. 結晶構造

結晶は 18-crown-6 とアルカリ金属あるいはアンモニウムの過塩素酸塩存在下, tetrabutylammonium-Ni(dmit)₂ を電解酸化することにより得た。すべての場合に結晶が得られたが, このうち, Li⁺, Rb⁺, Cs⁺, NH₄⁺ を含む塩について結晶構造解析が可能であった。得られた結晶は M-(18-crown-6)[Ni(dmit)₂]₃ (Type I) および M_x-(18-crown-6)[Ni(dmit)₂]₂ (x<1) (Type II) の 2 種類に大別される。両者の構造は大きく異なり, Rb⁺ および NH₄⁺ イオンが前者の構造を与え, Li⁺, Cs⁺ および NH₄⁺ (NH₄⁺ イオンは 2 種類の結晶を与える) が後者の構造を与える。Type I の結晶では, Ni(dmit)₂ は 3 量体構造をとり, その 3 量体がスタックしてカラム構造を形成する。アルカリ金属イオンは 18-crown-6 の中に完全に包接され, いわば巨大な超分子カチオンを形成する。それぞれの超分子カチオンは互いに孤立している。一方, Type II の結晶では Ni(dmit)₂ は等間隔にスタックし導電カラムを形成する。同時に 18-crown-6 も一次元スタックを形成し, 結晶内にイオンチャンネル構造が生成する。イオンチャンネル内のアルカリ金属イオンはクラウンエーテルの分子数よりも少なく, アルカリ金属イオンが存在しない空のサイトがある。Type I の結晶を形成するアルカリ金属イオンの直径は 18-crown-6 の空孔の大きさにほぼ一致しており, type II を与えるもの

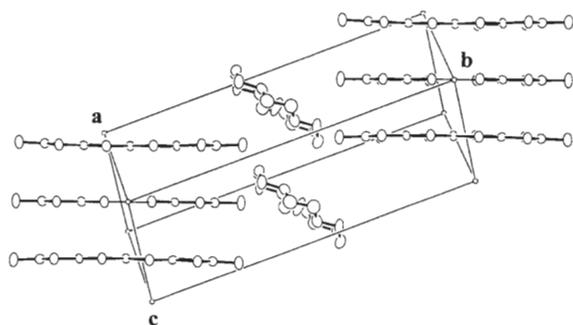


図1 Rb(18-crown-6)[Ni(dmit)₂]₃の結晶構造

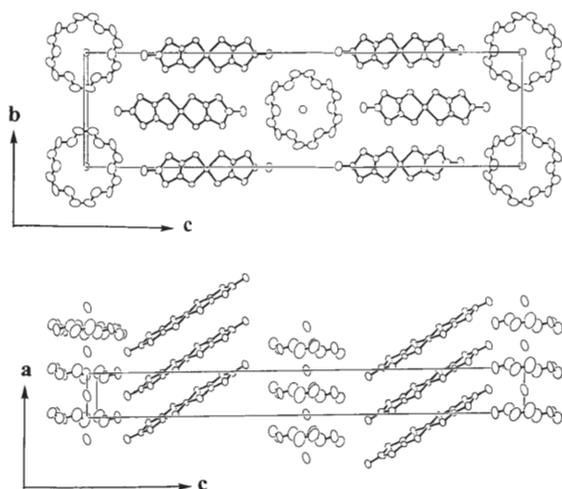


図2 Cs₄(18-crown-6)[Ni(dmit)₂]₂の結晶構造

の直径はそれよりもかなり小さいかあるいは大きい(NH₄⁺は空孔の大きさよりもわずかに大きく、丁度ボーダーラインに存在している。)したがって、アルカリ金属イオンがいわばテンプレートの役割を果たし、異なる結晶形が得られたものと考えられる。

3. 電気物性

Type I の結晶は Ni(dmit)₂ カラムが 3 量体構造をとることから容易に推察できるように、半導体的な挙動を示す。室温での電気伝導度は 0.3 S/cm 程度である。これに対して、Type II の結晶は室温伝導度が 10 S/cm 程度あり、Ni(dmit)₂ の regular stack から予想されるように室温付近で金属的な挙動を示す。しかしながら、100 K 以下で半導体的な挙動に徐々に転移する。これはアルカリ金属イオンの数が非化学量論的であるため、ランダムポテンシャルを形成し低温で伝導電子をピンングするためと予想している。さらにこの絶縁化はイオンチャンネル内のイオン伝導に関連している可能性がある^[3]。高温でイオンのイオンチャンネル内での並進運動が可能であれば、電子を局在化させることはない。低温でイオンの動きが止まってくると、ランダムポテンシャルを形成するようになり、結果として伝導電子のピンングが起こることになる。すなわちこの系はイオンチャンネル内のイオン伝導が分子性導体内の伝導電子の挙動を制御している興味深い例である。

イオンチャンネル構造をもつ錯体ではアルカリ金属イオンの数が非化学量論的のみならず、その数を変えることが可能である。アルカリ金属イオンの数は伝導電子の数に一致するから、結局バンドフィリング制御を行えることになる。伝導バンドのフィリング制御は酸化物超伝導体では当たり前のことであるが、分子性導体においては困難であり、これまで殆ど行うことができなかった。分子性導体のバンドフィリング制御の可能性を持つ本系は電子構造の制御と電子物性の関連という点からも興味深い。

【参考文献】

- [1] J.-M. Lehn, Supramolecular Chemistry, VCH, Weinheim (1995).
- [2] 芥川智行, 中村貴義, 電子科学研究, 2, 55 (1995).
- [3] T. Nakamura, T. Akutagawa, K. Honda, A. E. Underhill, A. T. Coomber and R. H. Friend, Nature, submitted
- [4] T. Akutagawa, T. Nakamura, T. Inabe and A. E. Underhill, J. Mat. Chem., in press.
- [5] T. Akutagawa, T. Nakamura, T. Inabe and A. E. Underhill, Synthetic Metals, in press

光増感によるルミノールの化学発光

有機電子材料研究分野 安田 紀彦, 高橋 伸次郎, 中里 勝彦, 竹中 信夫
竹村 健

光増感によるルミノールの化学発光は多くの研究者によって一重項酸素に起因するとする説が有力であるが、一部には一重項酸素では起こらないという説もある。これまでに多くの光増感化学発光の報告があるがそれが何に起因するのかを検討した例は未だ無いように思われる。今回この様な観点から光増感化学発光を検討した。その結果光増感による発光は一重項酸素機構の他に、ルミノールと増感剤三重項励起状態間での電子移動反応に起因する電子移動機構があり、また発光量子収率的にも電子移動機構が圧倒的に大きいことが明らかになった。

1. 序 論

ルミノールの化学発光は血痕、微量金属、一重項酸素、またはその他の活性酸素の検出などに利用されている。このルミノールは適当な酸化剤や触媒や活性酸素と反応することによって発光するが^[1-4]、今回述べる光増感によるルミノールの化学発光は今日まで一重項酸素との反応に起因する化学発光であるという説が有力である^[1](図1a)。簡単に説明すると光増感剤を光励起することによって増感剤は三重項励起状態になり、この三重項励起状態が酸素と反応し、生成する一重項酸素がルミノールと反応し励起状態の3-アミノフタル酸の励起状態が生成し、これが基底状態に失活するときに発光すると考えられている。しかし詳細な機構についてはほとんど不明であり、また光増感剤の種類によって発光挙動、発光収率が大きく変化することなど一重項酸素機構のみでは説明できない不可解な点が多く完全な結論はでていない。この点を解決するために光増感反応によるルミノールの化学発光に関する研究を行った。

その結果ルミノールの光増感化学発光は一重項酸素機構の他に、ルミノールと増感剤三重項励起状態が直接電子移動反応を起こし、これによって生成するルミノールの中間体が酸素と反応し3-アミノフタル酸になり発光する電子移動機構(図1b)があることが明らかとなった。また発光量子収率的にも圧倒的に電子移

動機構が有利であることが明らかになったので実験結果をもとに説明することにする。

2. 実 験

光増感剤はEosin-Y(Eo), Rose Bengal(RB), Fluorescein(Flu), ATX-S 10(ポルフィリン, S 10)を使用した。実験系はルミノールと増感剤のアルカリ混合溶液(pH=13付近)を増感剤の最長吸収増感剤の最長吸収帯である500 nm付近を色素レーザーで励起し光増感に由来する励起一重項状態の3-アミノフタル酸からの化学発光を420 nmで観測した。その際バンドパスフィルターとモノクロメーターを用いた。検出は浜松ホトニクス(R928)光電子増倍管を使用した。

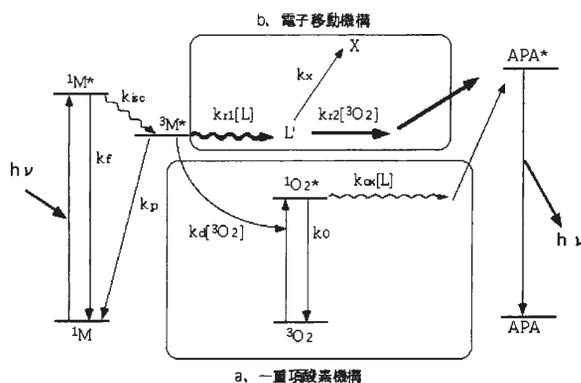


図1 ルミノールの光増感化学発光機構

3. 結果・考察

3.1 化学発光経時変化

図2はEoおよびRBを使用した場合の光増感化学発光の経時変化を示したものである。これから特にdecay部分で大きく異なっていることが分かる。即ちEoにおいては早い立ち上がりとそれに続くゆっくりしたriseがルミノールが高濃度の時に見られる。またルミノールの低濃度においては速いriseとゆっくりしたdecayが見られる。一方RBでは速い立ち上がりとそれに続くやや速いdecayが見られる。この様に光増感化学発光の動的挙動は速い立ち上がり(1 μ s)と速いdecay(10 μ s)からなる速い発光成分と比較的遅い立ち上がり(10 μ s)と遅いdecay(1-100 ms)からなる遅い発光成分の2つの重ね合わせから成っていることが明らかになった(図3)。またこれらの発光のrise & decayが何を表しているかという問題になるが、これは各rise, decay速度のルミノール濃度依存性などから確認することができた。速い成分についてrise, decay速度ともにルミノール濃度依存性があり、また遅い成分についてrise速度はルミノール濃度依存性があるがdecay速度はルミノール濃度依存性がなく、また増感剤の種類によらずdecay速度がほぼ一定であった。以上の結果と図2の機構から速い発光成分においてriseは一重項酸素, decayは増感剤三重項の寿命を表し、また遅い成分のriseは増感剤三重項, decayはルミノール中間体L'の寿命を表していることが明らかになった。

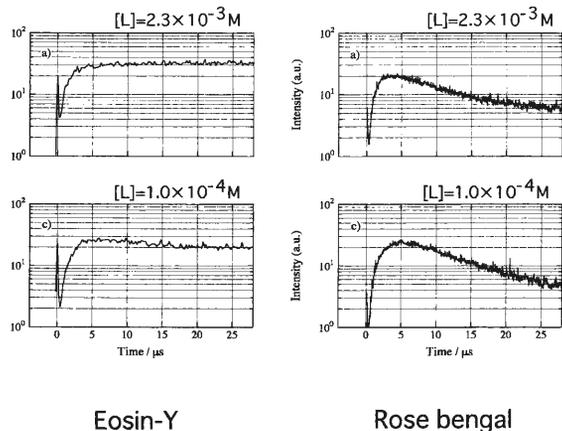


図2 ルミノールの化学発光の経時変化(1)

3.2 発光量子収率

この2つの発光収率はtime scaleを長くして発光を観測した場合顕著にあらわれた。図2のtime scaleをさらに大きくしたのが図4であるが、このように速い発光成分は遅い発光成分よりピーク強度に関しては大きい、遅い発光成分はms以上にわたって発光することから、発光量子収率的には圧倒的に遅い発光成分が大きい。つまりほとんどの発光は電子移動機構によるもので、一重項酸素機構による発光はほとんど無視できる程度であることが明らかとなった。

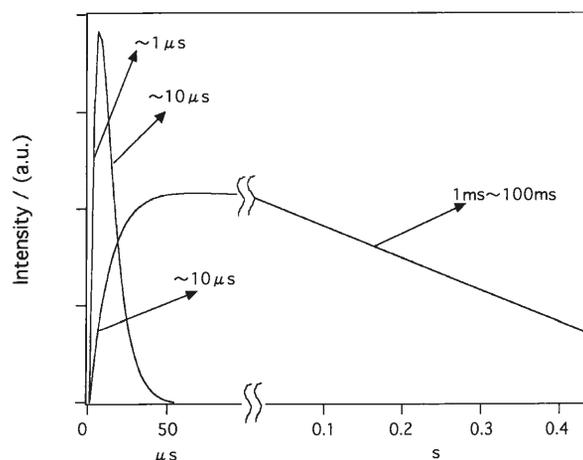


図3 2つの化学発光の模式図

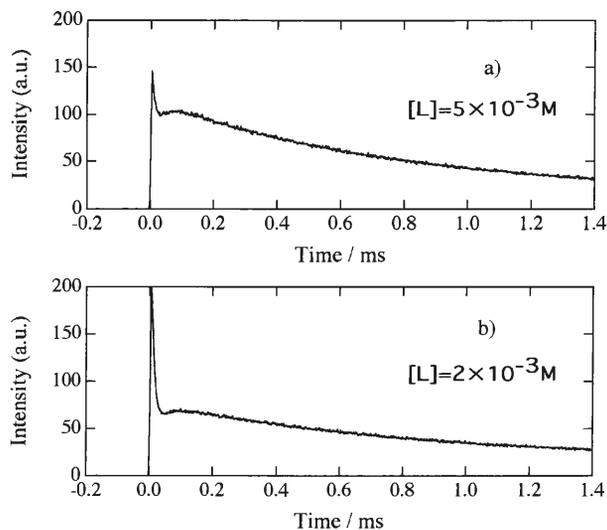


図4 ルミノールの化学発光の経時変化(2)

3.3 増感剤りん光寿命

図1の電子移動機構がある場合は増感剤の三重項寿命がルミノールと反応するのでルミノール濃度変化によって増感剤のりん光寿命が変化するものと考えられる。図5は増感剤のりん光寿命のルミノール濃度依存性を示したもので、このようにルミノール濃度増加と共にりん光寿命が短くなっている。これからもルミノールと増感剤三重項状態間で電子移動反応が起きていることが明らかである。

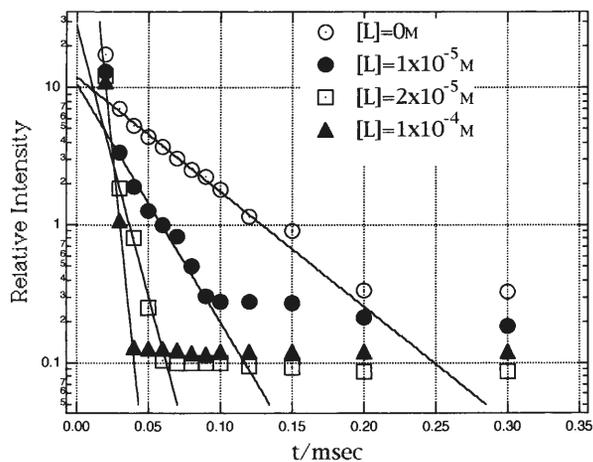


図5 E_oりん光寿命のルミノール濃度依存性

【参考文献】

- [1] E. H. White and D. F. Roswell, *Acc. Chem. Res.*, 3, 54 (1970).
- [2] M. M. Rauhut, A. M. Semsel and B. G. Roberts, *J. Org. Chem. Soc.*, 31, 2431 (1966).
- [3] P. B. Shevlin and H. A. Neufeld, *J. Org. Chem. Soc.*, 35, 2178 (1970).
- [4] E. K. Hogson and I. Fridovich, *Photochem. Photobiol.*, 18, 451 (1973).
- [5] I. B. C. Matheson and J. Lee, *Photochem. Photobiol.*, 12, 9 (1970).
- [6] I. B. C. Matheson and J. Lee, *Photochem. Photobiol.*, 24, 605 (1976).

CdSe 自己組織化量子ドットの作製

光材料研究分野 有田 宗貴, A. Avramescu, 植杉 克弘, 末宗 幾夫

II-VI族半導体量子ドット構造を, MOMBE 法を用いて作製した。GaAs 基板上的II-VIヘテロエピタキシャル成長に先立ち, トリスジメチルアミノヒ素供給によって原子レベルで平坦な As 安定化面を得た。(100) ZnSe/GaAs 上に成長した CdSe 極薄膜は, Stranski-Krastanov モードでの自己組織化三次元成長により, 均一なサイズの量子ドットを形成する。また, そのサイズと密度は CdSe 堆積量に依存し, 現時点で直径 68.1 ± 8.3 nm のドットが $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ の密度で形成することを確認した。

1. はじめに

量子細線や量子箱(量子ドット)のような半導体低次元ナノ構造においては, 状態密度が離散的になり電子は量子力学的振る舞いを示す。光の場との相互作用まで制御した新たな光電子デバイスへの応用など^[1], これら低次元構造に対する関心は高く, さまざまな作製方法が提案されている。なかでも自己組織化三次元成長はプロセスによるダメージを避けた量子ドット形成が可能であり, 既にIII-V族系を中心に活発に研究が進められつつある^[2,3]。一方II-VI族半導体はIII-V族に比べて大きなバンドギャップと高い励起子束縛エネルギーを持ち, 短波長光デバイスへの応用に適した材料として注目されている。従来ほとんどIII-V族に限られた形で進んできた低次元量子構造の研究も, 今後はII-VI族半導体などの新たな材料系へと発展していくであろう。現在いくつかのII-VI族半導体量子井戸構造において主に光学特性についての議論から, 量子ドット構造のような高次にキャリアを閉じ込める構造が一部実現されているであろうとの解釈がなされつつあるが^[4-7], ヘテロエピタキシャルII-VI族量子ドット構造の形成を結晶成長の観点から確認した例はまだない。本研究では大きな歪を有するII-VI族半導体ヘテロ構造において, 自己組織化による島成長を利用した量子ドットの作製を試みた^[8]。

2. 実験

2.1 GaAs 表面処理

GaAs 基板上的II-VIヘテロエピタキシャル成長膜の高品質化を考えた場合, II-VI/III-Vヘテロ界面における欠陥密度の低減が大きな課題のひとつであり, 転位の発生を防ぐために原子レベルで平坦な基板表面が要求される。本研究では半絶縁性(100) GaAs 基板の表面処理として, 通常の化学エッチ後トリスジメチルアミノヒ素(TDMAAs)を 550°C で 1.0×10^{-5} Torr 照射しており, その結果原子レベルで平坦な As 安定化面を得ている。図1は原子間力顕微鏡(AFM)で観察した As 処理後の GaAs 表面であるが, 1分子層に相

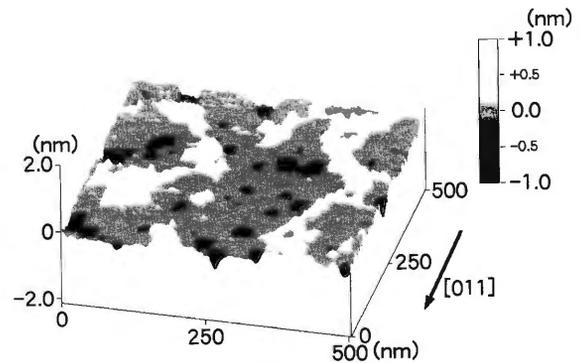


図1 As 処理後の GaAs 表面の AFM 像。1 分子層に相当するステップが観測され, 高い平坦性が実現されていることがわかる。

当するステップが観測され、高い平坦性が実現されていることがわかる。

2.2 界面制御

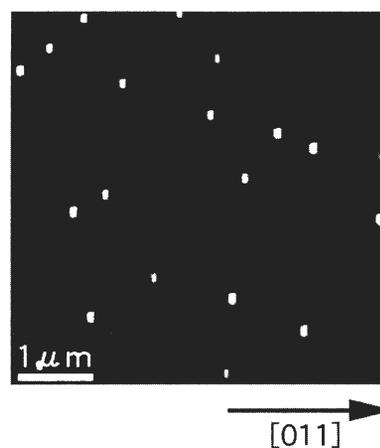
ZnSe/GaAs 界面に関しては、Zn を照射した GaAs 基板の上に ZnSe を MBE 成長した場合、ZnSe 膜中の欠陥密度が低減するとの報告もあり^[9]、一般に As-Zn 結合したほうが界面での charge neutrality を適度な置換によって維持しやすく結晶品質向上に有利であると考えられる。そこで本研究では成長に先立ち、350°C において Zn 材料 (ジイソプロピルジンク, DiPZn) で基板表面をパージし、As-Zn 結合に由来する表面再構成の変化が起きていることを、RHEED 観察 ([011] 方向のストリークパターン×2 から×1 への変化) によって確認している。

2.3 結晶成長

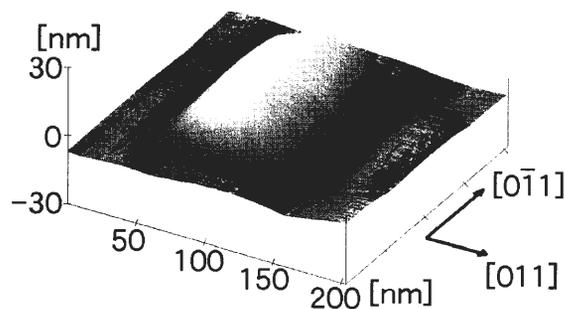
成長には DiPZn, ジメチルカドミウム (DMCd), ジターシャリブチルセレン (DtBSe) を材料とし、有機金属分子線エピタキシー (MOMBE) 法を用いた。成長膜の表面平坦性に関する最適な条件である VI/II 比 0.5 で ZnSe を約 500 Å 成長した後、CdSe を数分子層相当成長した。CdSe/ZnSe 界面では成長の中断を 40 秒間行い混晶化を避けている。また全ての MO 材料はあらかじめ加熱分解することなく供給し、不純物炭素の膜中への取り込みを防いでいる^[10]。成長温度は 350°C で、CdSe 成長終了後そのまま 18 分間アニールを行ってから室温まで冷却し、大気中にて AFM 観察を行った。

3. 結果と考察

図 2 は 5 ML に相当する量の CdSe を成長した場合の AFM 像である。かなり均一なサイズの、形状に方向性のある島の形成が観測された。島の密度は $6 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ で、長方形 ([0 $\bar{1}$ 1] 方向に $216 \pm 18 \text{ nm}$, [011] 方向に $169 \pm 17 \text{ nm}$) の底面を持った、高さ $27 \pm 4 \text{ nm}$ の屋根形の構造である (図 2(b))。これらの島は (311) A 面ファセットを作って成長しやすいことがわかる。GaAs (にコヒーレント成長した ZnSe) と CdSe の間には約 7% の格子不整合があり、この大きな歪によって Stranski-Krastanov モードでの 3 次元成長が起こっていると予想される。



(a)



(b)

図 2 (a)CdSe 5 ML 相当を成長した場合の AFM 像。均一なサイズの、形状に方向性のある島が見受けられる。(b)CdSe ドットの拡大 AFM 像。屋根形の構造を検討すると、これらの島は (311) A 面ファセットを作って成長しやすいことがわかる。

また、CdSe の堆積量を減らした場合ドットのサイズと密度が変化することがわかった。図 3 (a), (b) は CdSe をそれぞれ 2 ML, 4 ML 相当成長したサンプルの AFM 像である。5 ML の場合と異なり、球形の小さなドットが観測された。CdSe 4 ML の場合、直径 $68.1 \pm 8.3 \text{ nm}$, 高さが $16.6 \pm 4.5 \text{ nm}$ のドットが密度 $1.2 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ で形成されている。詳細については現在研究を進めているところであるが、成長条件 (温度, 成長・中断・アニール時間, 成長膜厚など) を最適化することにより、より小さなドットを高い密度で作製

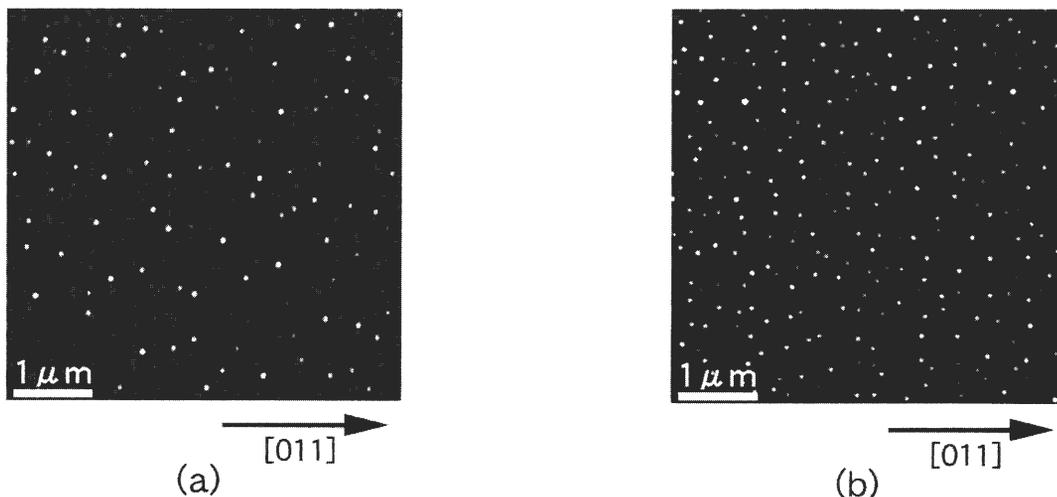


図3 (a)CdSe 2 ML 相当を成長したサンプルの AFM 像。ドットの直径は 96.9 ± 11.4 nm, 高さは 17.0 ± 3.4 nm で密度は $3.2 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ である。(b)CdSe 4 ML の場合の AFM 像。直径 88.1 ± 8.3 nm, 高さ 16.6 ± 4.5 nm の球形のドットが密度 $1.2 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ で形成されている。

することは十分可能であると言える。

4. まとめ

(100)ZnSe/GaAs 上に成長した CdSe は、均一なサイズの量子ドットを形成することを確認した。膜厚を

はじめとする成長条件の最適化を進めればサイズと密度の両方を改善できるが、これらの結果は II-VI 族半導体もまた低次元ナノ構造実現の有望な材料系の一つであることを示唆している点で、大きな意義がある。

【参考文献】

- [1] 荒川泰彦：電子情報通信学会誌 77 (1994) 1117.
- [2] D. Leonard, K. Pond and P. M. Petroff: Phys. Rev. B50 (1994) 11687.
- [3] N. Carlsson, K. Georgsson, L. Montelius, L. Samuelson, W. Seifert and R. Wallenberg: J. Cryst. Growth 156 (1995) 23.
- [4] T. Yao, M. Fujimoto, S. K. Chang and H. Tanino: J. Cryst. Growth 111 (1991) 823.
- [5] Y. Kuroda, I. Suemune, Y. Fujii and M. Fujimoto: Appl. Phys. Lett. 61 (1992) 1182.
- [6] S. Yamaguchi, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita, Y. Yamada, T. Mishina and Y. Masumoto: Phys. Rev. B54 (1996) 2629.
- [7] N. N. Ledentsov, I. L. Krestnikov, M. V. Maximov, S. V. Ivanov, S. L. Sorokin, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, D. Bimberg and C. M. Sotomayor Torres: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1343.
- [8] M. Arita, A. Avramescu, K. Uesugi, I. Suemune, T. Numai, H. Machida and N. Shimoyama: Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) to be published.
- [9] S. Saito, P. J. Parbrook, S. Nakamura, Y. Nishikawa and G. Hatakoshi: Abstract of the Int. Symp. on Blue Laser and Light Emitting Diodes, Chiba, 1996, p. 66.
- [10] G. Sato, T. Numai, M. Hoshiyama, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: J. Cryst. Growth 150 (1995) 734.

ZnSe/MgS 超格子の励起子発光特性

光材料研究分野 梨木 裕之, 鈴木 秀樹, 植杉 克弘, 末宗 幾夫

ZnSe/MgS 超格子の光学特性を反射測定, フォトルミネッセンス (PL) 測定により評価した。反射スペクトルにおいて室温まで励起子構造が観測され, 励起子吸収ピークと励起子吸収線幅が, PL ピークと PL 線幅に室温までよく一致する。発光の起源が室温まで C1-HH1, C1-LH1 励起子によるものであることが確かめられた。線幅の温度依存性から, LO フォノン散乱による C1-HH1 励起子の線幅の広がりバルク ZnSe での広がり比べて低減している。C1-LH1 励起子の線幅の広がりファノ効果により C1-HH1 励起子に比べて大きくなっている。

1. はじめに

現在, 短波長半導体レーザーの研究開発が活発に進められている。その要因として, マルチメディアの進展に伴う情報量の増加に対処するため, 光ディスクなどの情報処理機器の記録密度向上があげられる。半導体結晶中の電子と正孔はクーロン相互作用により, 励起子という準安定状態を形成する。II-VI 族半導体では III-V 族半導体よりも励起子結合エネルギーが大きく, 超格子による量子閉じ込め効果を導入すると, 2次元系における励起子結合エネルギーと振動子強度の増大によって室温でも励起子がレーザー発振に関与すると期待されている。このことは励起子の持つ大きな振動子強度を考慮すると, 発振しきい電流密度の低減化につながり, 室温安定動作という点から, 青色半導体レーザーの長寿命化にプラスの因子としてはたらく可能性がある。室温での励起子効果を増大させるには, 伝導帯ならびに価電子帯双方に大きなバンド不連続を持ったヘテロ構造が必要である。こうした観点から, II-VI 族半導体の中でバンドギャップ差が大きく GaAs 基板の格子定数に近い, 閃亜鉛鉱構造の ZnSe/MgS 超格子を提案し, その作製に成功した^[1]。ここでは, 反射測定とフォトルミネッセンス (PL) 測定を用いて ZnSe/MgS 超格子の光学的評価を行い, この超格子における励起子特性を調べたので報告する。

2. 実験

ZnSe/MgS 超格子を半絶縁性 (001) GaAs 基板上に有機金属気相成長 (MOVPE) 法を用いて成長した^[1]。ZnSe/MgS 超格子が閃亜鉛鉱構造であることは X 線回折測定により確かめられた。X 線回折測定のサテライトピーク, ならびに成長中の He-Ne レーザーによるその場観察から ZnSe と MgS それぞれの膜厚が得られる。

反射測定の光源にはハロゲンランプを, PL 測定の励起光には 325 nm の He-Cd レーザーを用いた。サンプルは, 冷却媒体に He ガスを使用したクライオスタット中で約 13 K まで冷却した。サンプル温度は温度コントローラにより制御され, 測定は 13.5 K から 300 K の温度範囲で行った。

3. 結果と考察

図 1 に ZnSe (56 Å)/MgS (25 Å) を 18 周期成長した超格子の 13.5 K における PL スペクトル (実線) と反射スペクトル (破線) を示す。反射スペクトルにおいて, 緩やかに変化する多重反射スペクトルの上に明瞭な励起子による寄与が 430 nm 付近に観測された。2つの矢印は, 量子井戸に閉じ込められた粒子のシュレディンガー方程式を計算することにより得られた C1-HH1, C1-LH1 励起子の遷移波長を表わす^[2]。PL ピーク, 反射スペクトルの励起子構造とも 2つの

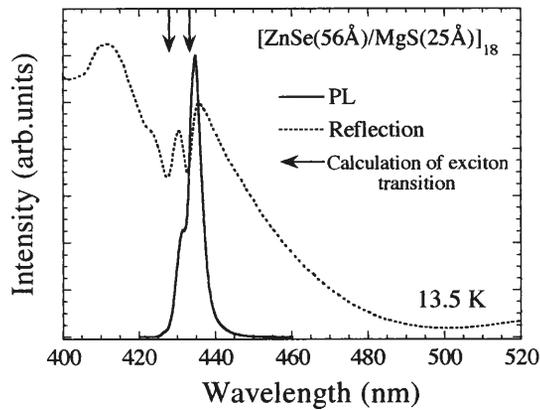


図1 [ZnSe(56Å)/MgS(25Å)]₁₈ の13.5 KにおけるPLスペクトル(実線)と反射スペクトル(破線)。2つの矢印はC1-HH1, C1-LH1励起子の理論的な遷移波長。

矢印に非常に近いことがわかる。

図2に測定された反射スペクトル(実線)の温度依存性を示す。後に議論する線幅の広がりにより、励起子構造の急峻性が高温で減少しているが、室温においても励起子による寄与が明瞭に観測された。このことから、ZnSe/MgS超格子において励起子効果が増大していることがわかる。13.5 Kと300 Kでの3点鎖線は、励起子吸収をローレンツ関数と仮定し、成長膜の多重反射を考慮した理論的な反射スペクトルであ

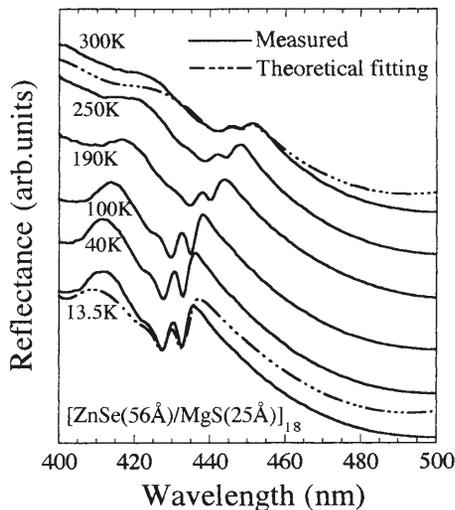


図2 [ZnSe(56Å)/MgS(25Å)]₁₈ の測定された反射スペクトル(実線)の温度依存性と、13.5 Kと300 Kでの理論的なフィッティング(3点鎖線)。反射スペクトルの計算では励起子吸収にローレンツ関数を仮定した。

る^[2]。このフィッティングにより励起子吸収ピーク波長と半値全幅(FWHM)が得られる。

13.5 Kでの反射スペクトルのフィッティングにより得られた主な2つの励起子吸収ピークは、433.5 nm, 428.5 nmである。また、シュレディンガー方程式の計算から得られた遷移波長は、433.28 nm (C1-HH1), 427.92 nm (C1-LH1)である。これらの比較から2つの主な吸収ピークはC1-HH1, C1-LH1励起子によるものであり、図1でこの2つの励起子吸収ピークに近いPLピークもC1-HH1, C1-LH1励起子によるものである。

図3に100 Kで測定したPLスペクトル(実線)を示す。3本の1点鎖線は、測定されたPLスペクトルのフィッティングならびにC1-HH1とC1-LH1発光の寄与を表す。C1-HH1とC1-LH1スペクトルの計算にはローレンツ関数を仮定した。ローレンツ関数を用いて実験値をよく再現できることから、発光の起源は励起子によるものである。このフィッティングにより発光ピーク波長とFWHMが得られる。

図4にPLピークエネルギーと励起子吸収ピークエネルギーの温度依存性を示す。低温を除きPLピークと励起子吸収ピークはほぼ一致し、ZnSeエネルギーギャップと平行である。50 K以上での各々のピークの低エネルギー側へのシフトはZnSeエネルギーギャップの温度依存性によるものである。PLピークと励起子吸収ピークが平行にシフトしていることから、それ

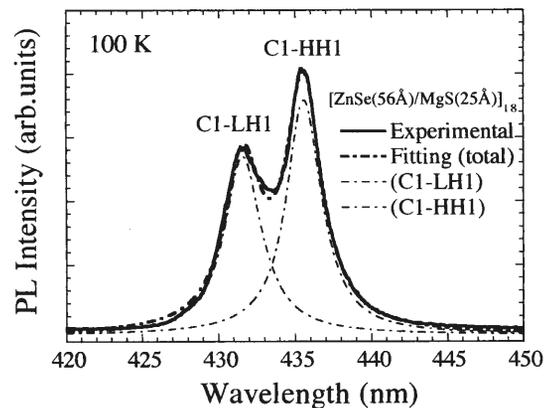


図3 [ZnSe(56Å)/MgS(25Å)]₁₈ の100 KにおけるPLスペクトル(実線)とそのフィッティング(1点鎖線)。フィッティングにおけるC1-HH1, C1-LH1発光スペクトルにはローレンツ関数を仮定した。

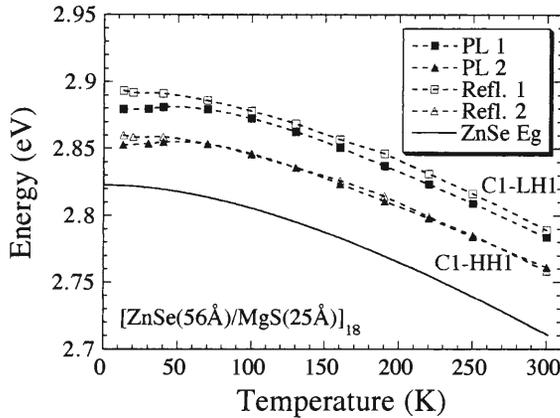


図4 PLピークエネルギーと励起子吸収ピークエネルギーの温度依存性。PLピークと励起子吸収ピークは室温までほぼ一致し、ZnSeエネルギーギャップと平行にシフトしている。

らの起源が室温まで同じ励起子であることがわかる。50 K以下の低温では、PL ピークは励起子吸収ピークよりレッドシフトしており、温度が上がるにつれブルーシフトする。同じ現象が $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 量子井戸でも観測され、局在励起子に起因している^[3]。これは低温において界面揺らぎにより局在化していた励起子が、温度の上昇とともに自由励起子に活性化されるためと考えられる^[4,5]。

図5(a)にC1-HH1励起子による励起子吸収線幅とPL線幅の温度依存性を示す。励起子吸収線幅は丸で、PL線幅は三角で表されており、破線はPL線幅の温

度変化をわかりやすくするためのものである。実線は図中に示した式で励起子吸収線幅を理論的にフィッティングしたものである。ここで Γ_0 は量子井戸層の厚さの不均一に由来する不均一広がり、 Γ_{LO} はLOフォノン散乱による均一広がり、 $\hbar\omega_{\text{LO}}$ はLOフォノンエネルギーを表す。フィッティングから得た Γ_{LO} は37.8 meVでありバルクZnSeでの値60 meVよりも小さいことから、ZnSe/MgS超格子での量子閉じ込め効果により励起子がLOフォノンによって散乱されにくくなっていることがわかる。PLで局在励起子による寄与が支配的な100 K以下の温度範囲を除き、PL線幅と励起子吸収線幅が室温までほぼ等しくなっている。低温を除きPLと励起子吸収のピークエネルギー、線幅ともに室温まで一致していることから、ZnSe/MgS超格子からの発光は励起子によるものである。これは大きなバンド不連続を有する量子閉じ込め効果が有効にはたっている結果である^[1]。

図5(b)にC1-LH1励起子による励起子吸収線幅とPL線幅の温度依存性を示す。先程のC1-HH1励起子の線幅の広がり比べて、C1-LH1励起子の線幅の広がりの方が大きい。これはLOフォノン散乱のほかに、分離したC1-LH1励起子状態が、C1-HH1連続状態により共鳴的に散乱されるためと考えられる。これはファノ効果と呼ばれている^[6]。

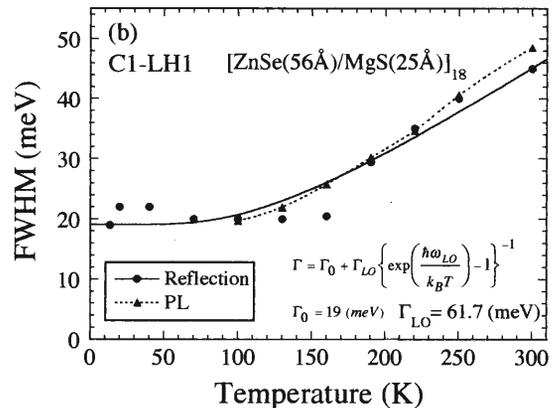
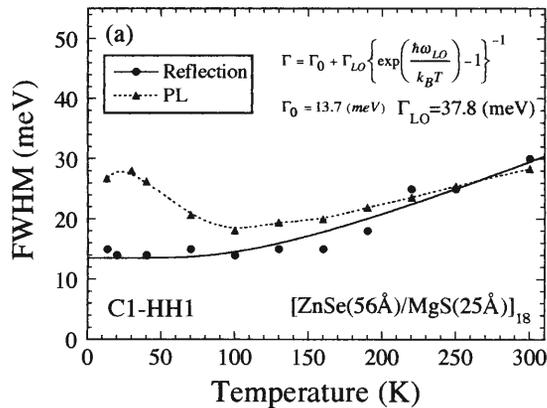


図5 励起子吸収線幅とPL線幅の温度依存性。実線は、LOフォノンによる励起子の散乱を考えた励起子吸収線幅のフィッティング。(a)C1-HH1励起子の場合。 Γ_{LO} は37.8 meVとなりバルクZnSeでの値60 meVよりも低減している。(b) C1-LH1励起子の場合。100 K以下では、PL線幅の正確な値を見積もるのは、C1-HH1励起子との重なりと局在効果により難しくなっている。

4. まとめ

ZnSe/MgS 超格子の励起子特性を評価した。反射スペクトルにおいて室温まで励起子構造が明瞭に観測された。励起子吸収のピークエネルギーと線幅が、PL のそれらと室温までよく一致し、PL がローレンツ関数

でフィットできることから、発光の起源は室温まで励起子によるものである。励起子-LO フォノン散乱は C 1-HH 1 励起子の場合、バルク ZnSe に比べて低減している。C 1-LH 1 励起子の場合にはファノタイプ散乱により C 1-HH 1 励起子に比べて線幅の広がりが大きくなっている。

【参考文献】

- [1] K. Uesugi, T. Obinata, H. Kumano, J. Nakahara and I. Suemune: Appl. Phys. Lett. 68 844 (1996).
- [2] H. Kumano, H. Nashiki, I. Suemune, M. Arita, T. Obinata, H. Suzuki, K. Uesugi and J. Nakahara: Phys. Rev. B. (印刷中)
- [3] M. Sugawara: Phys. Rev. B51 10743 (1995).
- [4] Y. Kuroda, I. Suemune, Y. Fujii and M. Fujimoto: Appl. Phys. Lett. 61 1182 (1992).
- [5] K. Brunner, G. Abstreiter, G. Bohm, G. Trankle and G. Weimann: Appl. Phys. Lett. 64 3320 (1994).
- [6] D. A. Broido, Emil S. Koteles, C. Jagannath and J. Y. Chi: Phys. Rev. B37 2725 (1988).

酸化物高温超伝導体の超伝導状態の対称性

— 電子ラマン分光による最近の研究から —

量子機能素子研究分野 山中 明 生

銅酸化物高温超伝導体の超伝導状態の対称性を明らかにするために、電子ラマン散乱分光実験を行った。低エネルギー領域の電子ラマン散乱強度の温度変化が、著しい入射光・散乱光偏光ベクトル依存性を示すことを見出した。この温度依存性・偏光依存性から、銅酸化物の超伝導状態の対称性は d 波であると考えられる。

1. はじめに

超伝導発現機構解明のために最も重要な情報は、超伝導状態（超伝導ギャップ）の対称性である。例えば、超伝導電子対（クーパー対）形成が格子振動を媒介として生じる場合、超伝導対の状態は s 波対称性を持つ。一方、反強磁性揺らぎが超伝導対を形成する場合は、 d 波対称性が予想される。従って、超伝導対の対称性（超伝導ギャップの波数ベクトル依存性）を明らかにする事により、高温超伝導の起源が明らかになる。ここでは電子ラマン分光による超伝導状態の対称性に関する研究の現状を紹介する。

2. 電子ラマン分光とは

電子ラマン分光では、フェルミ準位より低いエネルギーの状態からフェルミ準位より高エネルギー状態への電子励起過程を直接観測できる^[1]。この場合、その強度散乱は伝導電子の有効質量の逆数 $\gamma(\mathbf{k})$ の 2 乗に比例し、バンド分散 $\epsilon(\mathbf{k})$ により以下のように与えられる、

$$\gamma(\mathbf{k}) = \frac{m}{\hbar^2} \sum_{i,j} e_i^l \cdot \frac{\partial \epsilon(\mathbf{k})}{\partial k_i \partial k_j} \cdot e_j^s,$$

e^l , e^s は入射光・散乱光の偏光ベクトルである。 e^l , e^s の組が、点群 D_{4h} の B_{1g} 表現に属するとき、2次元フェルミ面上で斜線を付けた領域の電子応答が、主に観測できる（図1）。一方、 B_{2g} 表現に属する組では、斜線のない領域が観測できる。従って電子ラマン分光では、入射光・散乱光の偏光方向を実験的に選択することにより、フェルミ面の異なる領域の電子応答を選

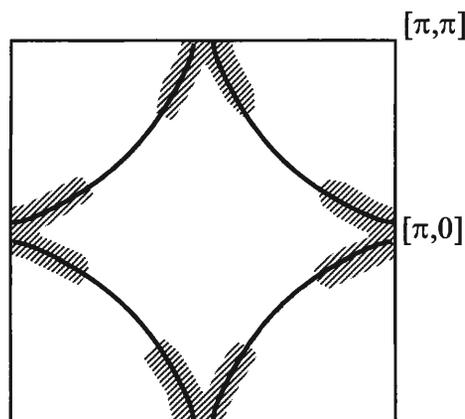


図1 タイトバインドモデルで予想される2次元フェルミ面。斜線をつけた領域が B_{1g} 偏光配置で観測される。一方斜線のない領域は B_{2g} 散乱配置で観測できる。

択的に観測することが可能である^[2]。

3. 低エネルギー電子ラマン応答

酸化物高温超伝導体で観測された電子ラマンスペクトルは、等方的 s 波で期待されるスペクトルとは明らかに異なる。しかし以前報告したように、ピーク位置は奇妙なホール濃度依存性・温度依存性を示し^[3]、電子ラマン散乱が他の相互作用（クーロン相互作用、準粒子間の相互作用、不純物散乱等）の影響を受けている可能性がある。この場合、スペクトル形状からは異方的 s 波の可能性も否定できない。そのため、他の相互作用の影響が比較的小さい低エネルギー領域の電子ラ

マン応答に注目した。高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶（超伝導転移温度 84 K）で観測された、低エネルギー電子ラマン散乱強度の温度変化を図 2 に示す。超伝導相での散乱強度の減少は、著しい偏光依存性を示す。これらの温度変化は、 d 波超伝導で予想される温度変化（実線）とよく一致する。なお挿入図は d 波超伝導の場合の超伝導ギャップ Δ の角度依存性である。一方図 3 に示すように、異方的 s 波（角度依存性を図 3 の挿入図に示す）では、観測された温度依存性・偏光依存性を再現する事はできない。

4. まとめと今後の課題

電子ラマン散乱の偏光依存性は、 d 波超伝導状態とよく一致することがわかった。本稿では紙面の都合上割愛したが、 $T=0$ K での残留電子ラマン強度の存在も d 波超伝導状態を支持している。従って、高温超伝導は反強磁性揺らぎにより生じていると考えるのが妥当であろう。

最後に高温超伝導体の電子ラマン分光には、重要で未解決の問題が多数存在することを指摘しておく。本研究で用いた理論解析はフェルミ流体論を基礎としたものであるが、常伝導相の電子ラマンスペクトルは

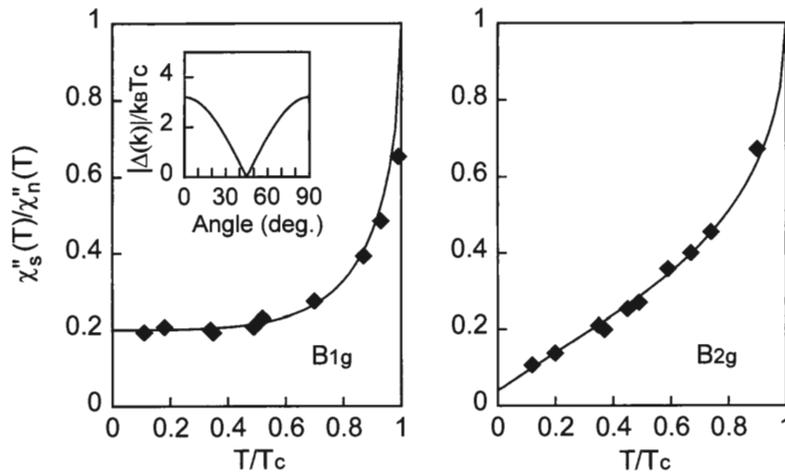


図 2 低エネルギー電子ラマン強度の温度依存性。実線は d 波超伝導で予想される温度変化。挿入図は d 波超伝導の場合の超伝導ギャップ Δ の角度依存性。

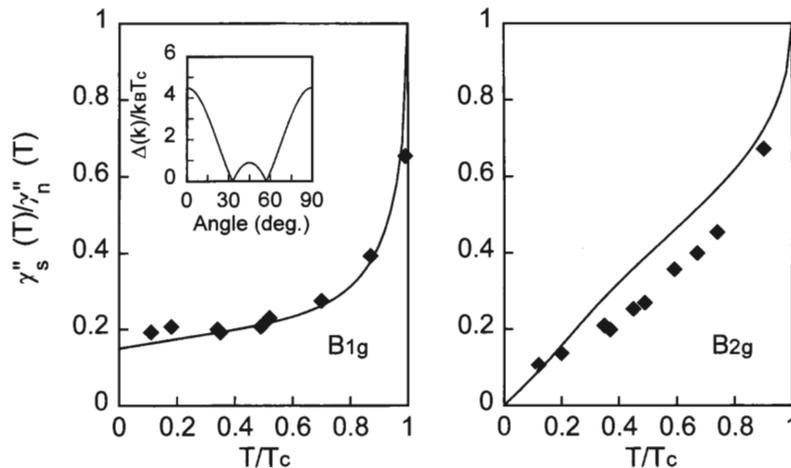


図 3 低エネルギー電子ラマン強度の温度依存性。実線は異方的 s 波超伝導で予想される温度変化。挿入図は異方的 s 波超伝導の場合の超伝導ギャップ Δ の角度依存性。

フェルミ流体論で説明できず，これは銅酸化物の異常金属相の物性と密接に関係した特異な現象である。高温超伝導も異常金属相を背景としているので，当然

ギャップ励起電子ラマン散乱もこの異常金属相との関連で詳しい吟味が必要であろう。

【参考文献】

- [1] 山中明生, 南不二雄, 井上久遠, 固体物理 25 (1990) 111. 56 (1996) 10.
[2] 山中明生, 新超電導材料研究会刊「NSMF NEWS」No. [3] 山中明生, 電子科学研究 1 (1993) 67.

ナノ構造高分子集合体によるメソスコピックパターン形成

分子認識素子研究分野 丸山 則彦, Olaf Karthaus, 下村 政嗣

ポリイオンコンプレックスのキャストフィルム中において規則的な二次元ハニカム構造が形成されることを発見した。フィルム形成過程を蛍光観察することにより水が構造形成に大きく関わっていることがわかった。様々な機能性分子によっても同様な構造ができることから、メソスコピックパターンに特徴的な機能を持つ新規材料が期待できる。

1. 導 入

現在、リソグラフィーにかわる新しいデバイスの作製方法として、原子や分子が自らの力で秩序ある構造を作り出す、自己組織化現象を利用した微細構造の形成が注目されている。

我々は既に、機能性分子からなる単分子膜や二分子膜などの分子集合体中で、電子移動やエネルギー移動が効率よく行えることを発見しているが、これらは水中または気水界面などにおける現象であり、デバイスとして用いるには集合体の安定化及び固定化が必要となる。分子集合体の安定化にあたっては様々な手段が考えられるが、今回は使用する両親媒性物質が電荷を持つという事を利用して、それと反対電荷を持つイオン性ポリマーと混合して高分子性のイオン対即ちポリイオンコンプレックス^[1]を作ることによって安定化を図った。また、フィルムの固定化にあたっては、二分子膜、単分子膜の性質が保持される必要があり、この条件をクリアできる方法の一つであるキャスト法を採用した。キャスト法は、溶液を基板上に塗布または滴下して乾燥しフィルムを得るという非常に簡便な方法であるが、出来上がったフィルムは高度に配向された分子集合体を形成しているという特徴をもっている^[2]。

また一方で我々は、ポリスチレンや dendrimer など種々の高分子の溶液が固体表面上ではじかれていく過程 (dewetting) で、規則配列した高分子集合体が形

成されることを既に見いだしている^[3]。ここで、膜形成能を持つ高分子を用いれば、その二次元層構造を繰り返しの基本構造とする規則配列したナノサイズの高分子超構造を形成することが予測される。さらには、エネルギー移動、電子移動機能などを持った分子を導入することによって、様々な機能性フィルムの実現が期待される。以上の動機より、固体基板上に様々なポリイオンコンプレックスによるキャストフィルムを作製し、メソスコピックレベルの形態観察を試みた。

2. 実 験

両親媒性化合物である臭化ジメチルビスヘキサデシルアンモニウム (Fig.1, 以下 2C16 と略す) とイオン性ポリマーであるポリスチレンサルフォネイト (Fig.1, 以下 PSS と略す) とからなるポリイオンコンプレックスを作製した。2C16 の水溶液に 1 mol% 量の蛍光物質オクタデシルローダミン B (Fig.1) を加えたものと PSS の水溶液を混合してポリイオンコンプレックスの沈殿を得た。これをクロロフォルムで抽出し、減圧乾燥してポリイオンコンプレックスの固体を得た後クロロフォルムで溶液を調製した。湿度を調整したグローブボックス中で水平に置いたガラス基板上に溶液を滴下、溶媒を蒸発させキャストフィルムを得た。これを蛍光顕微鏡および原子間力顕微鏡 (AFM) で観察した。また、基板上におけるフィルムの形成過程を蛍光顕微鏡で観察した。

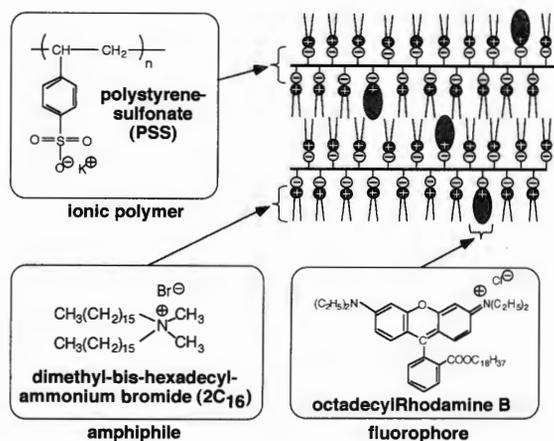


Fig. 1 使用した化合物とポリイオンコンプレックスキャストフィルムの模式図

3. 結果

キャストフィルムを蛍光観察並びに AFM 観察したところネットワーク構造が見いだされた (Fig.2)。写真中の高い部分の高さは約 300 nm、幅は約 1 μm、穴の直径は約 5 μm である。さらに、ネットワーク構造の形成機構を解明するため、蛍光顕微鏡に取り付けた CCD カメラを使用し、ポリイオンコンプレックスの溶液が基板上に滴下されてからフィルムが形成されるまで過程を観察した。その結果得られたパターン形成のモデルを Fig.3 に示す。まず、溶媒の蒸発に伴う蒸発熱によって雰囲気中の水蒸気が冷却され溶液表面にマイク

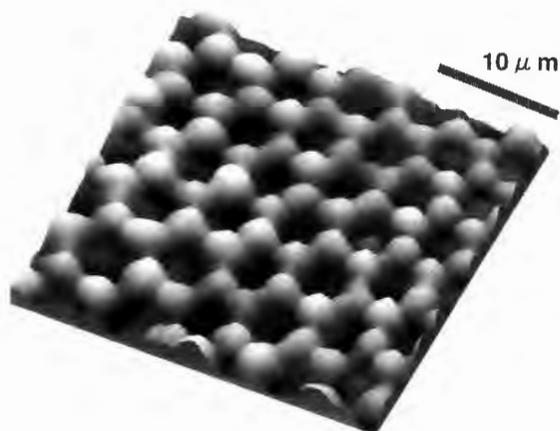


Fig.2 ポリイオンコンプレックスキャストフィルムの AFM イメージ

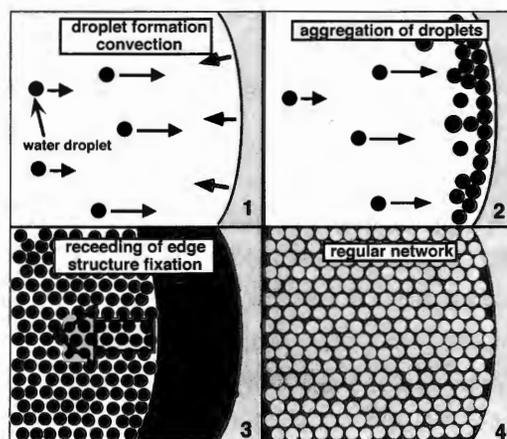
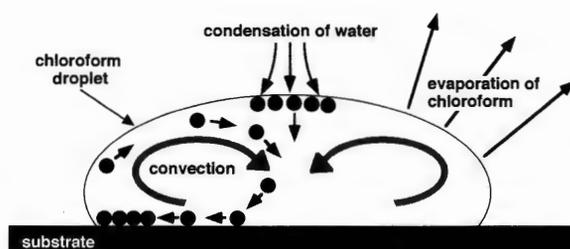


Fig.3 ネットワーク構造を持ったキャストフィルムの形成モデル

ロサイズの水滴が形成される。また、同じく蒸発熱によって液滴の上部も冷却され対流が起こる。これにより、水滴がクロロフォルムの中にも移動する。溶液内に入った多数の水滴は、溶液の縁部に溜まっていく過程の中でヘキサゴナルな配列を取るようパッキングされる。配列した水滴は、フィルム形成が完了するまで蒸発せず鑄型の役目を果し、結果的にネットワーク構造が形成されると考えられる。

4. まとめ

さらに、ポリマーとして導電性高分子ポリチオフェンや DNA、両親媒性物質として光照射によるスイッチング機能を持つアゾベンゼン化合物、電子移動やエネルギー移動機能を持つスチルベン化合物をそれぞれ用いたポリイオンコンプレックスによっても同様にネットワーク構造を持ったキャストフィルムが得られることがわかった。また、湿度、溶液の濃度によってネットワーク構造を自由にコントロールできることを見いだしており、今後、メソスコピックパターンを利用した新規な機能性フィルムの作製を目指している。

【参考文献】

- [1] M. Shimomura, T. Kunitake, *Thin Solid Films*, 132, 243 (1985)
- [2] 田口, 矢野, 平谷, 箕浦, *日本化学会誌*, 12, 1373(1990)
- [3] O. Karthaus, K. Ijio, M. Shimomura, *Chem. Lett.*, 1996, 821 (1996)

拡散波分光の応用

超分子分光研究分野 西村 吾朗

多重散乱媒質の中での電場相関関数および強度の吸収係数依存性の間とのスケーリングの関係を確かめ、吸収測定への応用可能性を確かめた。さらに、これらの基礎となる光の拡散係数の吸収依存性に関し議論する。

はじめに

生体組織の分光学は、生体の非破壊的測定という意味で極めて生物学および医学的に応用の広い分野である。特に光を用いる事により、生体の酸素代謝を反映する生体分子（Heme タンパク）の定量を行う事が出来、その情報は細胞の活動をj知る上で極めて重要である。しかしながら、良く知られる通り、生体組織は光の強い散乱体であり、その中での光伝搬を理解する事は生体分光の基礎として必須である。また、これらの理解は、生体に限らず広く工業的な応用においても極めて重要である。ここでは、簡単にその光の伝搬に関し述べ、吸収の定量に関する基礎的な方法論についてまず述べる。ここでは、幾何学的な配置などを除いた吸収の定量法を提案する。さらにそれらのベースとなる光拡散定数に関し、強い吸収条件下での振舞を簡単に議論する。

光拡散

非常に強い散乱体では、その中での光の伝搬を光のエネルギーの拡散のみを考慮し、輸送方程式を用いても良いと考えられる^[1]。

$$\left\{ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{\Omega} \cdot \nabla + (\mu_s + \mu_a) \right\} I(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}, t) = \mu_s \int_{\Omega'} p(\mathbf{\Omega}, \mathbf{\Omega}') I(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}', t) d\mathbf{\Omega}' + q(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}, t) \quad (1)$$

この方程式において吸収係数に関する項は、ある場所での光エネルギーの損失のみに関与するため変数分離され時間応答は、 $I(\mathbf{r}, t) = I_0(\mathbf{r}, t) \exp(-ct\mu_a)$ と書けることが示される^[2]。時間応答は、光路長の分布関数を反

映する。吸収の無い時の時間応答関数 I_0 は、試料の幾何学的な配置などに依存し、一般的には輸送方程式を解く必要がある。さらに、いわゆる P1 近似を用いる事により、拡散方程式を導出する事ができ、数値計算あるいは解析的なアプローチが可能となる。しかしながら、生体組織の分光を考えた場合、組織の形などを考慮してそれを解くというのは現実的にはかなり難しい問題である。

少し話題を変え、光のコヒーレンスの decay に関して考えてみる。散乱粒子が、ブラウン運動でゆらぐ場合、その動きによりコヒーレンスが失われる。単散乱では良く知られるようにその decay は単一指数関数で表され、decay time から散乱粒子の拡散定数を与える。多重散乱系においては、散乱が積み重なることにより、コヒーレンスはより速く decay し、また散乱回数分布すなわち光路長の分布の存在により単一指数関数からずれる。これらを考慮し光電場の相関関数を計算すると

$$g^{(1)}(\tau) = \langle E^*(t)E(t+\tau) \rangle / \langle E^*(t)E(t) \rangle = \int_0^\infty ds P(s) \exp\left(-\frac{2\tau}{\tau_0} \frac{s}{l^*}\right) \quad (2)$$

となる^[3]。ここで時間応答が先に述べた形であると考ええると、吸収は相関関数の時間軸のシフトを与える事を意味する。もし吸収係数が μ_a であるとする、そのシフトは $\mu_a l^* \tau_0 / 2$ である^[4]。一方、散乱光の強度は、時間応答の積分で表され、

$$I(\mu_a) = \int_0^\infty dt I(t) = \alpha \int_0^\infty ds P_0(s) \exp(-\mu_a s)$$

となり、吸収 μ_a に対する依存性は相関関数 $g^{(1)}(\tau)$ と

スケーリングの関係にあり、そのスケールは $l^* \tau_0/2$ であり、この関係を用いることにより吸収を評価することが出来るはずである^[5]。

光強度と相関関数

光強度と相関関数のスケーリング関係を確認するために、懸濁液に吸収体を加えて求めた強度変化および相関関数を測定した。測定では、単一モードアルゴンレーザを用い、光子計数法により強度を測定すると同時にデジタル相関器により相関関数を計測した。散乱体には Intralipid、吸収体には、Rhodamine 6 G を用い発光の影響を取り除くため干渉フィルタにより波長選択した。図1は、強度相関関数と強度の吸収依存性を示したものである。図の中で白丸(○)は、強度相関関数、黒四角(■)は強度依存性を示している。スケーリングは、強度をスプライン関数で表し、それを相関関数に合うように非線形最小2乗法でフィットした。図から明らかなように、強度の変化は、相関関数の形を良く再現していることがわかる。さらにこのスケーリングから、吸光係数と相関関数の時間軸の比すなわちスケーリングファクタは、 $0.037 \pm 0.001 \text{ ms} \cdot \text{cm}$ となり、 $\tau_0 = 2.0 \text{ ms}$ を用い輸送平均自由行程 l^* が 0.037 cm と求められ、これは文献の値と良い一致を示

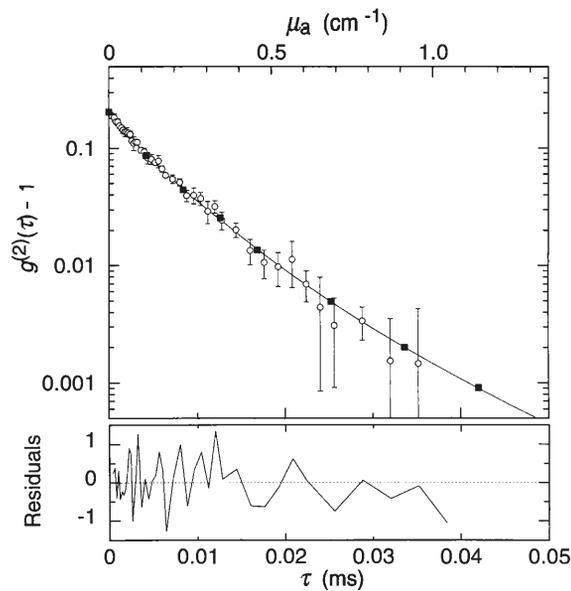


図1 Intralipid 5%溶液の強度相関関数 $g^{(2)}(\tau) - 1$ と、強度の吸光度依存性をスケーリングにより重ね比較したもの

す。この結果は、最初に相関関数の形と平均自由行程、相関時間が知られていれば、吸収を強度から評価できる事を意味している。さらにこれは系の幾何学的状況を計算する事無く評価出来る方法である。

光拡散定数

一方、これらの基礎になっているのは、P1近似から求められる光拡散方程式である。この際、光の拡散定数を計算する事ができるが、石丸らの行った方法に従うと $D = 1/3(\mu'_s + \mu_a)$ となり拡散定数が吸収係数に依存すると共に拡散近似自体が吸収が強い時成り立たなくなる^[1]。ところが最初述べた通り、吸収に関する項は輸送方程式のレベルで分離可能であり、その結果光拡散定数に対し吸光度は関与せず $D = 1/3\mu'_s$ となる。そこで、吸収が非常に強い条件下でそれを確かめた^[6]。実験には十分大きな水槽を用い境界などの影響がないようにした。光源は 809 nm のレーザダイオードで検出にはデジタルオシロスコープを用いた。図2は、光強度と光源検出器間の距離との関係を示す。実線は、拡散方程式の解 $I(r) = A/r \exp(-\sqrt{D\mu_a r})$ によりフィットしたものである。データは、拡散方程式の解で良く再現されている事がわかる。さらに、ここから求めた拡散定数と吸収係数との関係をプロットしたものが図3である。図において実線は新しい拡散定数 $D = 1/3\mu'_s$ をプロットしたものであり、破線は従来からの拡散定数である。実験結果は明らかに新しい拡散

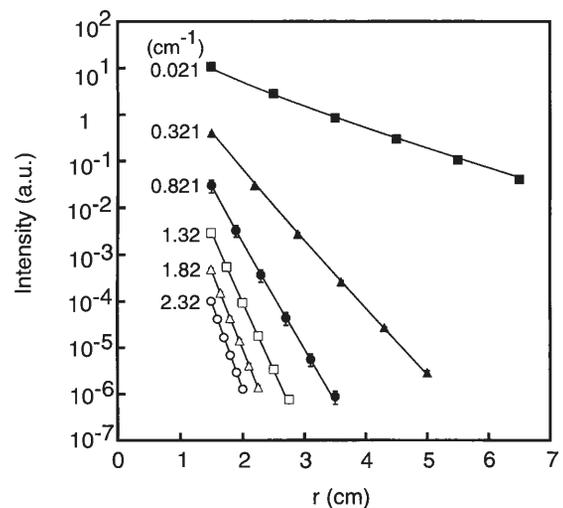


図2 Intralipid 1%溶液での強度と光源検出器との距離との依存性

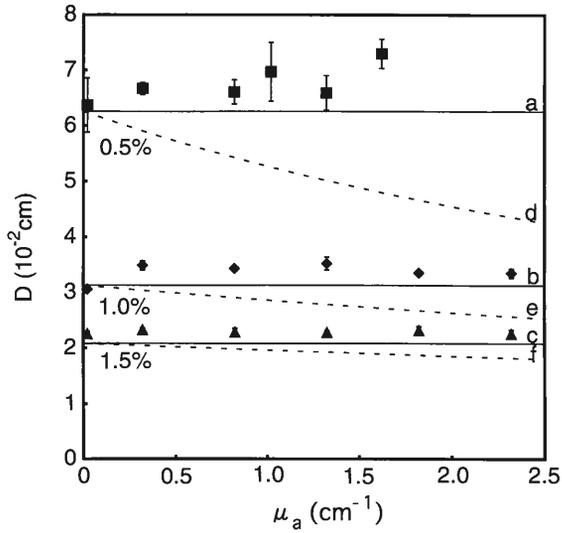


図3 光拡散定数の吸収係数依存性

定数の形を支持する。

結 論

強度と相関関数の等価性を確かめた。その結果から、両者の比較により吸収係数の定量を幾何学的な条件と無関係に測定することが可能であると考えられる。一方それらの基礎にある光拡散定数に関し吸収係数との関係を調べたところ、吸収には依存していないことが確かめられた。

【参考文献】

- [1] A. Ishimaru, Wave Propagation and Scattering in Random Media, (Academic, New York, 1978).
- [2] K. Furutsu and Y. Yamada, Phys. Rev. E 50 (1994) 3634.
- [3] D. A. Weitz and D. J. Pine, in Dynamic Light Scattering, edited by W. Brown, (Oxford, New York, 1993).
- [4] K. Katayama, G. Nishimura, M. Kinjo and M. Tamura, Appl. Opt. 34 (1995) 7419.
- [5] G. Nishimura, K. Katayama, M. Kinjo and M. Tamura, Opt. Commun. 128 (1996) 99.
- [6] T. Nakai, G. Nishimura, K. Yamamoto and M. Tamura, Opt. Commun. (submitted)

遺伝子の動きを見る

細胞機能素子研究分野 金城 政孝

蛍光相関分光法は蛍光のゆらぎから分子数と分子量を知る方法である。遺伝子は DNA モノマーがつながってできた長いポリマー分子である。その中の特異的な配列を認識し切断する制限酵素を用い、切り出される DNA フラグメントの分子数の定量化を行ない、その方法を応用して遺伝子の変異を調べる方法を確立した。また、今後の発展として遺伝子一分子マニピュレーションについて考えてみた。

はじめに

細胞の基本的な情報は遺伝子にすべて記載されている。この遺伝子は DNA の配列から成り立ちその配列順序が直接情報を含んでいる。そのため我々自身の遺伝子をはじめ、線虫、酵母などのモデル生物や我々の生活に関係の深いイネなどの重要な作物の全遺伝子配列を決めることは世界的なプロジェクトであり、かつ各国がしのぎを削っている^[1]。

このような中で我々は蛍光相関分光法 (Fluorescence Correlation Spectroscopy) と制限酵素を組み合わせ、遺伝子配列の差違を簡便に決定する方法を開発してきた。FCS は溶液中のフェムト (10^{-15}) リットルオーダーと言う極微小容量における分子の「数ゆらぎ」が引き起こす蛍光の「強度ゆらぎ」の解析をもとに分子数の変化と分子の大きさを検出する方法である。そこで、遺伝子上の認識部位が変異を起し、それにより長い DNA 分子が切断されるかされないかを、分子数の変化として捕らえようと試みた。次にその方法を簡単に述べる。

分子カウント

遺伝子は先にも述べたように、DNA モノマーが連続的につながった非常に長いポリマー分子である。この切れ目なく作られた DNA ポリマーは基本的に 1 分子である。しかも単純な繰り返しのポリマーではなく、ひらがなだけで書かれた句読点のない長い伝記物語にたとえられるかもしれない。さて、遺伝子 (DNA ポリ

マー) を 1 分子とすると、遺伝子中の特定の配列 (認識サイト) を認識して切断する制限酵素の活性は、このような 1 分子を切断して複数の分子にする過程として考えることができる。認識サイトと切断サイトをここで便宜的に同一と考えると、遺伝子上の認識サイトの数に従い制限酵素で切り分けられる遺伝子フラグメントの数が決まることになる。幾つかある認識サイトの一つが突然変異で変化すると、それに従い切り離されるフラグメントの数に変化が起きる。この方法による遺伝子変異の検出法は制限酵素断片長多型 (RFLP) と呼ばれ、現在ゲル電気泳動法がその検出法の主流となっている。この方法は比較的簡単な装置で行える反面、煩雑な操作と検出するまでにある程度時間が必要なこと、さらに定量化が困難なことが欠点と言える。

これに対して我々は制限酵素により切り離される遺伝子フラグメントの数の変化を直接 FCS を用い、いわゆる「分子カウント」をおこなうことで遺伝子配列の相違を見つけだす方法を提唱した^[2]。さらに M13 DNA と pUC19 DNA を用いた実験を行い^[3]、実際に切断されてくる DNA フラグメントの数の解析を通して、この方法の現実的な利用方法、特に大規模遺伝子集団への応用等に向けての可能性を示した (図 1)。

単一分子トラッピング

FCS はブラウン運動が引き起こす数ゆらぎと、それが引き起こす蛍光の強度のゆらぎを測定していることはすでに述べた。ゆらぎの評価のためにはある測定時間が必要であり、このとき、ここで言うゆらぎはその

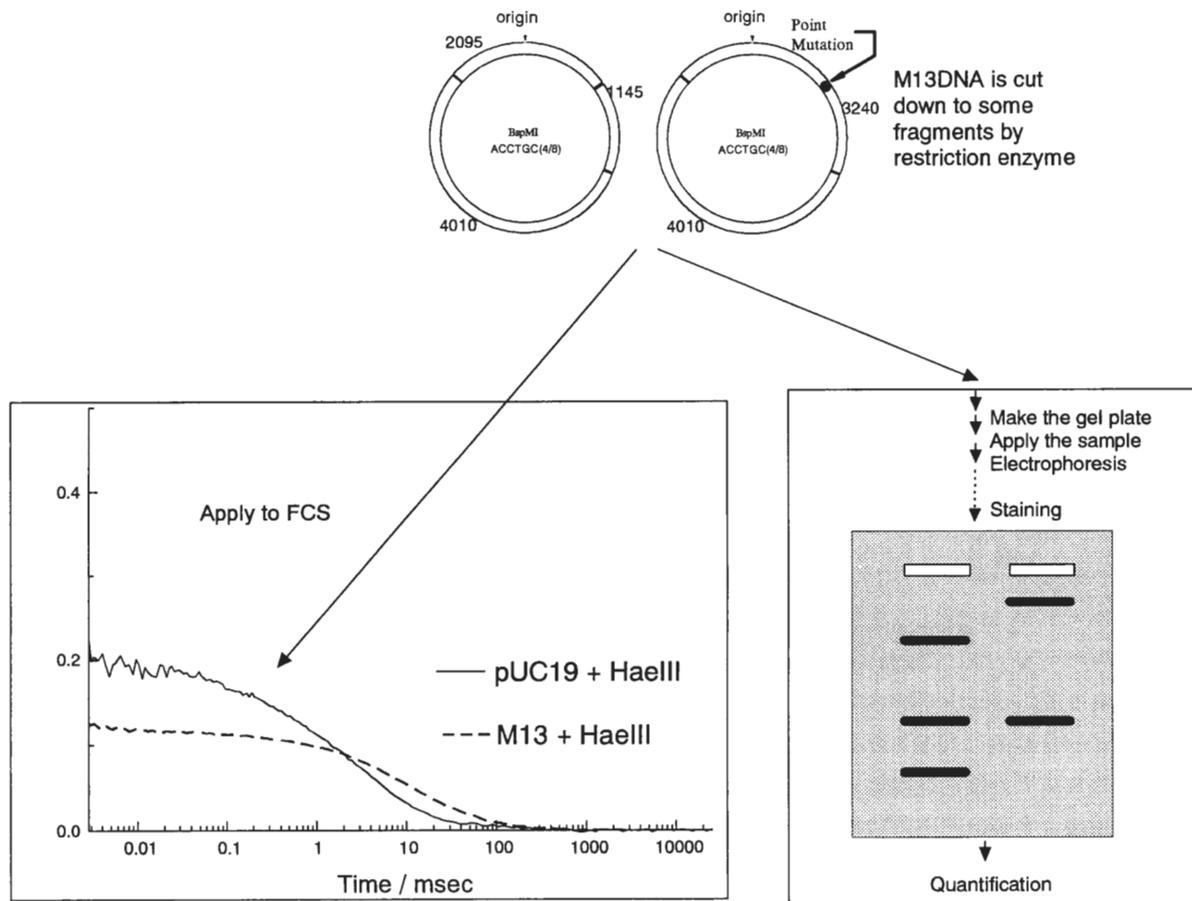


図1 FCSを用いた制限酵素断片長多型の検出方法とゲル電気泳動法による比較

時間における統計的な性質を示していることになる。従って FCS で観測される分子の数もその領域における平均的な分子数を実は示している。

細胞の中には通常 1 つの核がありその中に遺伝情報を含むいくつかの遺伝子 (DNA ポリマー) が存在している。つまり、核の中には各種 1 分子の DNA ポリマーが存在していると言える。生体の最小単位である細胞一個を研究対象としようとする、遺伝子研究の究極は分子一個のマニピレーションが必要とされるだろう。

FCS の持つ光学系は 1 分子蛍光を検出することが可能である。そこで我々は単一分子マニピレーションと分子カウント法を組み合わせた方法を検討した。これは現在まだ計画中のものであるが、ここにそのアウトラインを示し、批判を仰ぎたい。

DNA の荷電はリン酸基と塩基に由来するが分子全体としてはリン酸基が主となる。そのため全体として

は棒状の形状を持ち、マイナスチャージがその長さに比例する粒子とみなせる。その動きを電氣的にコントロールすることはそれ程困難ではない。正負二つの電極間を蛍光修飾を施した M 13 DNA が移動する様子をビデオに捕らえることは可能である (本研究会にてビデオ発表)。単一遺伝子をさらに効率良くコントロールするために 8 個の電極を用意し、これを数ミクロン幅の交差するマイクロチャンネルの中心にセットする (図 2)。DNA ポリマーは最初チャンネルの両端にかけられた電圧に従い、中心の広場まで運ばれ、ここで、8 個の電極によりトラップされる。次に図の上下にあるチャンネルからは例えば、制限酵素や DNAase などの核酸修飾蛋白質が溶液の流れによって運ばれてくる。DNA は既に電氣的にトラップされているので溶液の流れで洗い流されることはない。ここで示した広場に FCS の焦点をあわせておくことで、一個の遺伝子が酵素により修飾を受け、分子の大きさや数が増減

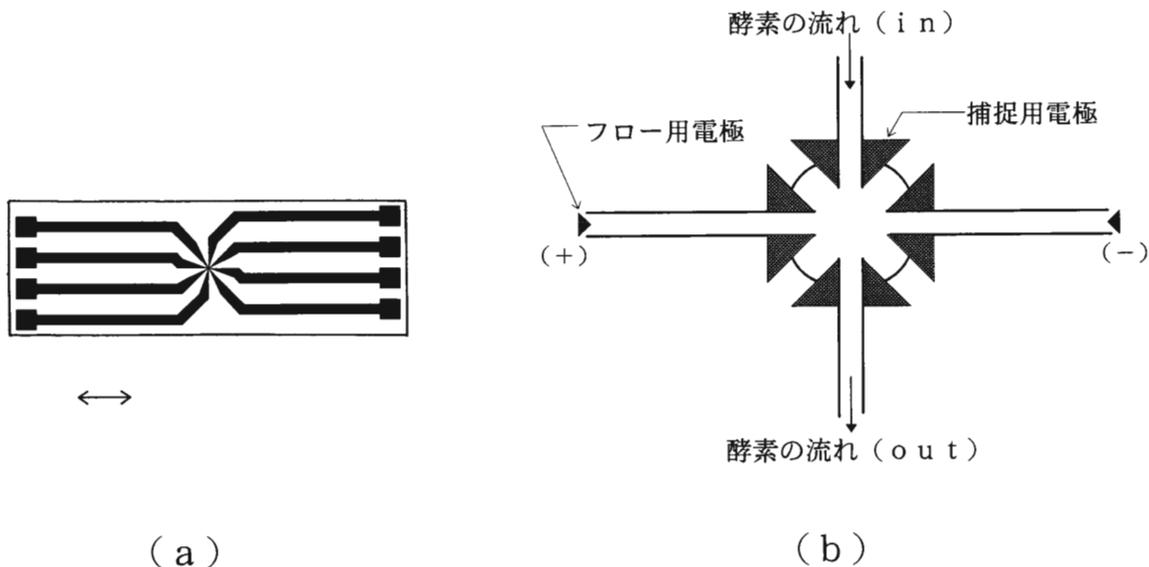


図2 DNA分子電場トラッピング装置の模式図。(a)電極を付けたスライドガラス。矢印は10 mmを示す。(b)トラッピング部の拡大。

していく様子が定量的に観察されるであろう。さらに分子の大きさに応じた拡散速度に電場をかけるタイミングをあわせて、必要な長さだけのDNAを集めたりする、分子ソーティングが可能になるものと考えられる。

終わりに

細胞の機能を研究するために、単一分子検出法を用いることは数年前には夢のような話だった。それが既に細胞を構築する幾つかの分子で単一分子レベルの

研究がなされつつある^[4]。今日の基本的な光学と電子技術を用いれば様々な生体分子の単一分子操作が可能であろう。残りは何を知りたいかである。

謝 辞

pUC 19 DNA は医学部中央検査部西平順博士より頂きました。また、電極作成には安川電機つくば研究所工藤成史博士に協力を頂きました。両博士に深謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] 服部正平 細胞工学 14, 675-681 (1995)
- [2] 金城政孝 電子科学研究 3 75-77 (1995)
- [3] Kinjo M. & Nishimura G. Prog. Biophys, molec Biol. 65, 197 (1996)
- [4] Experimental Techniqu of Physics 41(2), Special Issue: Single Molecule Detection (1995), <http://www.chem.ethz.ch/sms/>, <http://smd-server.lanl.gov/>

人工イオンチャネルをめざして

細胞機能素子研究分野 神 隆

生体系におけるイオン輸送機構は、おもにキャリアー輸送とチャネル輸送に分類される。近年では、イオンチャネルによるイオン輸送を、人工的に構築しようとする試みが進められてきている。本研究では、膜界面におけるイオン結合部位および膜中におけるイオンフィルターとして、クラウンエーテルとカリックス[4]アレーンをそれぞれ用いた人工イオンチャネルの分子設計を行った。

1. はじめに

生体系におけるイオン輸送の機構は、おもにキャリアー輸送とチャネル輸送に分類される^[1]。キャリアー輸送では、イオンが輸送担体であるキャリアー分子と膜界面で複合体を形成し、その複合体が膜中を拡散する事によってイオンが輸送される。天然にあるキャリアー分子としては、抗生物質であるモネンシン、ナイジェリシン、バリノマイシンなどの各種のポリエーテルやペプチド系の化合物が知られている。人工的なキャリアー輸送に関しては、古くからクラウンエーテルやクリプタンドなどの機能性ホスト化合物を用いた液膜系での研究が数多く行われてきている。

一方、それに比べると、人工的にチャネル輸送系を構築しようとする研究は非常に少なく、モデル化合物の合成研究が本格的に始まったのは90年代になってからである^[2-7]。チャネル輸送では、キャリアー輸送と異なり、チャネル分子自体はイオンと複合体を作ることなく、イオンはチャネル分子が形成する親水的な空孔を通過して2分子膜の反対側に輸送される。そのため、チャネル分子は2分子膜を貫通する程度の長さをもっていなければならない。分子設計上は、さらに、その中にイオン結合部位、選択部位、透過孔を配置する必要がある。

2. Na⁺イオンに選択的な人工イオンチャネル分子の設計

ここで、2分子膜で機能するチャネル分子の構造的

な特徴を図1(a)に示す。まず第一に重要なのは膜を貫通する親水的空孔である。長さは30オングストローム程度で、空孔の直径は水和したイオンが通過するのに十分な大きさでなければならない。第2は、膜界面におけるイオン結合部位である。これは、水-脂質界面に存在し、イオンを静電的な相互作用によって捕捉する部位である。第3は選択的なイオン輸送を可能とするためのイオン認識部位(フィルター)である。以上の機能は、チャネル分子において最低限求められる条件であり、生体でのチャネル輸送を考えれば、さらにゲート機構が必要となる。

本研究では、チャネル分子のモデル化合物として、膜界面におけるイオン結合部位にクラウンエーテルを、イオンフィルターとしてカリックス[4]アレーンを用いた設計を行った。図1(b)にはその構造式を示した。ここで、クラウンエーテルを膜界面におけるイオン結合部位に設定した理由は、クラウンエーテルの親水性による。カリックス[4]アレーンもイオン結合能を持っているが、カリックス[4]アレーンでは疎水性が高いため、水-脂質界面に局在できない。そのため、膜中でのイオンフィルターとしてカリックス[4]アレーンを配置した。また、カリックス[4]アレーンは、チャネル分子全体を膜の中へ導入するための疎水性アンカーとしても用いている。

カリックス[4]アレーンのエステル誘導体はナトリウムイオンに選択的なイオノフォアであり、図2には、2分子膜中でのイオン選択性^[8]を透過率を指標にして示してある。Na⁺/K⁺選択性は約20倍あり、カ

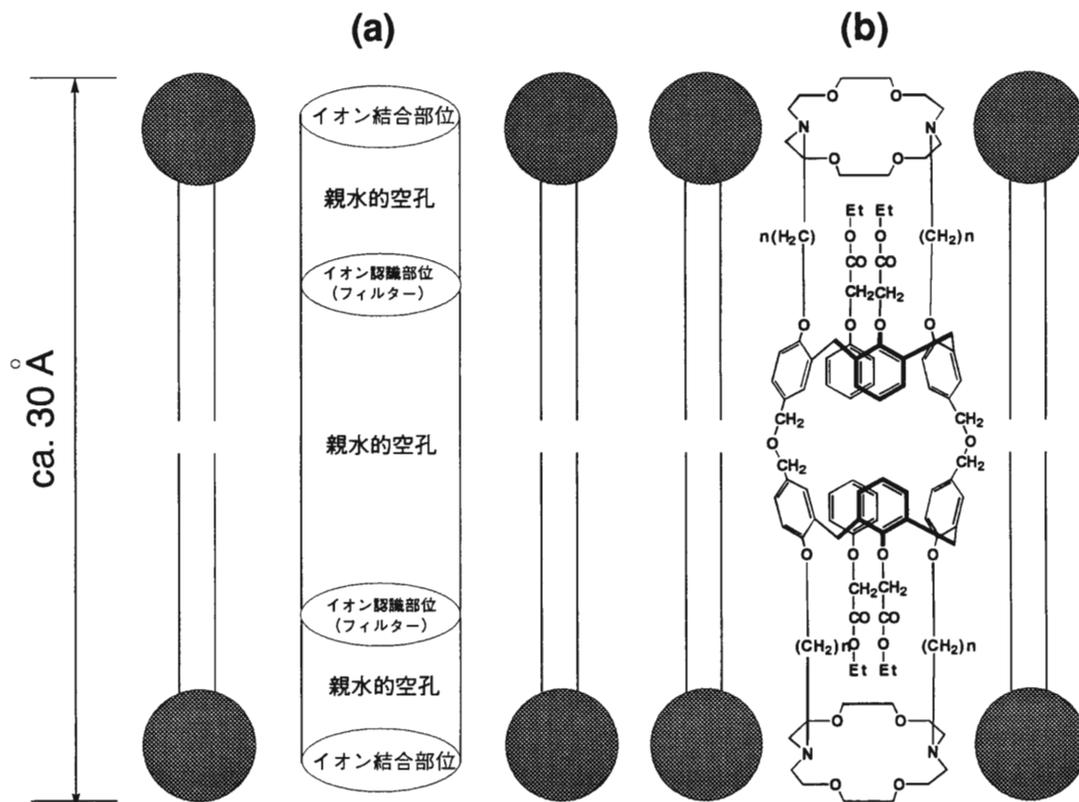


図1 人工イオンチャネルの分子設計

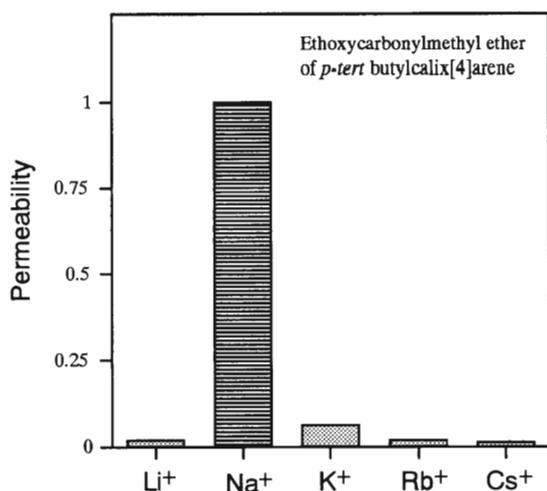


図2 カリックス[4]アレーン誘導体を含む大豆レシチン2分子膜におけるイオンの透過率^[4]

リックス[4]アレーンはナトリウムイオンのフィルターとして十分な選択性をもっているといえる。

3. 人工イオンチャネル分子の合成法

合成は、アザクラウンエーテルとカリックス[4]アレーンを出発物質として4段階で目的物質を得よう組み立てた。図3には合成スキームを示した。目的物質の分子長(末端クラウンエーテル間の距離)はCPKモデルによると約30オングストロームとなる。ただし、分子長は反応の第1ステップで用いるジプロモアルキルの鎖長を変えることにより可変できる。

4. おわりに

生体におけるチャネル蛋白を模倣した人工イオンチャネルの合成は、化学者の興味をそそる非常に魅力的なテーマである。人工イオンチャネルの合成をめざす研究が世界の数グループにより進められているが、現在までのところ、1分子で機能を発揮するような人工イオンチャネルが実現できたという確定的な結果は

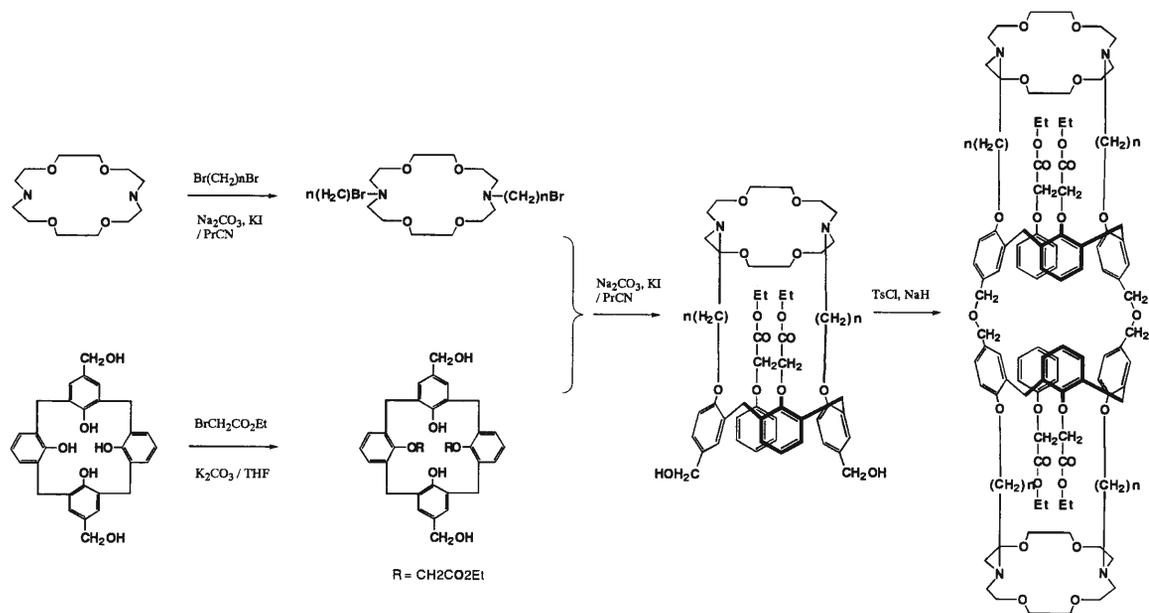


図3 人工イオンチャネルの合成スキーム

まだ得られていない。今後、チャネル蛋白の機能を人工的な系で再構築するため、人工イオンチャネルの合

成研究がますます進展するものと予想される。

【参考文献】

- [1] J. E. Hall, Membrane Transport, Elsevier, New York, 1981, p.107.
- [2] F. M. Menger, D. S. Davis, R. A. Persichetti, J. -J. Lee, J. Am. Chem. Soc. 1990, 112, 2451-2452.
- [3] Y. Kobuke, K. Ueda, M. Sokabe, J. Am. Chem. Soc. 1992, 114, 7618-7722.
- [4] M. J. Pregel, L. Jullien, J. -M. Lehn, Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1992, 31, 1637-1640.
- [5] T. M. Fyles, T. D. James, T. C. Kaye, J. Am. Chem. Soc. 1993, 115, 12315-12321.
- [6] M. R. Ghadiri, M. R. Granja, L. K. Buehler, Nature, 1994, 369, 301-304.
- [7] O. Murillo, S. Watanabe, A. Nakano, G. W. Gokel, J. Am. Chem. Soc. 1995, 117, 7665.
- [8] T. Jin, M. Kinjo, T. Koyama, Y. Kobayashi, and H. Hirata, Langmuir, 1996, 12, 2684-2689.

光波干渉による微粒子の3次元結晶性配列

光システム計測研究分野 原田 康 浩

3次元フォトニック結晶を実現する一方法として、多光束の干渉によって形成される3次元の干渉光強度分布と光放射圧を用いて誘電体微小球を規則的に配列するというアイデアを提案し、特に面心立方格子を得るための四光束照明の条件を明らかにした。また四光束照明を簡単に実現する素子としてコーナーキューブプリズムを利用することを提案した。さらに完全なバンドギャップをもつフォトニック結晶を生成する手段として、提案した方法が有利であることが明らかとなった。

1. はじめに

周囲媒質に比較して大きな屈折率をもつ誘電体微小球を光強度分布を有する光で照射すると、微小球には光強度の空間勾配に比例した勾配力が作用し、光強度が極大となる位置に捕捉することができる^[1]。本研究は、この光トラッピング現象と多光束干渉による3次元的光強度の規則構造生成を結び付け、微粒子を光の波長程度の格子定数をもつ3次元結晶状に配列する方法を提案するものである。

このような誘電体媒質は光波に対してバンド構造をもつことからフォトニック結晶^[2]と呼ばれ、新たなオプトエレクトロニクス素子としての応用が期待されている。フォトニック結晶の作成法として誘電体微小球を用いた試み^[3,4]があるが、実現された構造は未だ2次元系の域を出ていない。ここでは、フォトニックバンドの形成に有効と考えられる面心立方格子を実現するための照明条件を光波干渉の理論に基づき明らかにするとともに、この照明配置を簡単に実現する光学素子を提案する。またこの方法によって生成される媒質の光学的特性に期待される効果について検討する。

2. 光束数と周期構造の数および次元の関係

強度が1、波数ベクトルが \mathbf{k}_i ($i=1,2,\dots,N$)の可干渉な N 本の平面波の合成光強度分布は、

$$I(\mathbf{r}) = N + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N \exp[i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{r}]$$

$$= N + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ (j > i)}}^N 2\cos[(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{r}] \quad (1)$$

で与えられ、右辺第2項目の干渉項により光強度の周期構造(向きと周期)が決まる。干渉項の数は、二つの総和記号を評価して、

$$n = N(N-1)/2 \quad (2)$$

で与えられる。もっとも単純な二光束照明($N=2$)の場合、生成される周期構造は1次元系となる。三光束($N=3$)では干渉項の数は $n=3$ であるが三つの干渉項の波数ベクトル($\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3$, $\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1$)は必ず一つの平面上に存在するため、周期構造は2次元系となる。以上より、3次元の周期構造をもつ光強度分布を達成するには少なくとも四光束の照明が必要であることがわかる。

3. 四光束照明と干渉光強度の3次元周期構造

三光束照明において、球座標系で表示した各光束の波数ベクトルを

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 = (k, 0, \theta) \\ \mathbf{k}_2 = (k, 2\pi/3, \theta) \\ \mathbf{k}_3 = (k, 4\pi/3, \theta) \end{cases} \quad (3)$$

のように選ぶと、 z 軸に垂直な平面内に光波長で規格化した格子定数が $2/(3 \sin \theta)$ の六方格子を形成できる^[3]。ここではこの配置に

$$\mathbf{k}_4 = (k, 0, 0) \quad (4)$$

の波数ベクトルをもつ第4番目の平面波を追加し、 z 軸方向に周期構造を導入することを考えた。

図1は、六つの干渉項の波数ベクトルをそれぞれ(a) $z/k=0$ および(b) $y/k=0$ の平面に投影して、波数ベクトルで規格化した大きさを添えて表示したものである。 y/k 軸方向には、各波数ベクトルの投影成分の寄与により、規格化逆格子ベクトル $(\sqrt{3}/2)\sin\theta$ の周期構造が形成される(図1(a))。この位置関係は z/k 軸に関して $\pm 2\pi/3$ 回転した場合にも成立するため、結局 $z=0$ の平面では波長で規格化した格子定数が $2/(\sqrt{3}\sin\theta)$ の六方格子構造が形成される。一方 $y/k=0$ の面では、図1(b)に示すように、 x 軸に対して角度 $\beta, \gamma, \pi/2$ の向きに規格化逆格子ベクトルがそれぞれ $(3/2)$

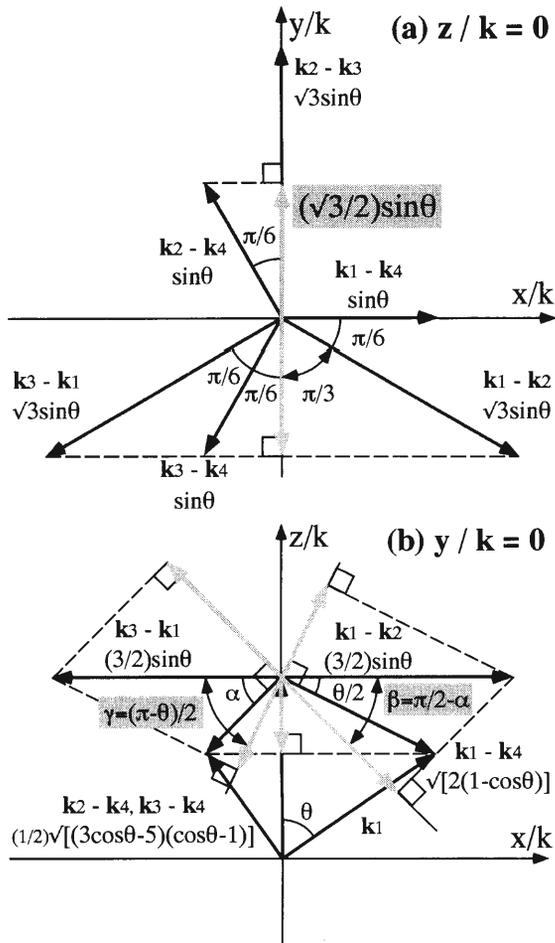


図1 六つの干渉項の波数ベクトルの位置関係：(a) $z/k=0$ 面内、(b) $y/k=0$ 面内。

$\sin\theta \cos\beta, (3/2)\sin\theta \cos\gamma, 1-\cos\theta$ の周期構造が形成される。これら逆格子ベクトルの位置関係は z 軸に関して $\pm 2\pi/3$ だけ回転した面でも成立するため、 β および γ の方向に生成される光強度極大点は、 $z=0$ の平面に形成される六方格子に対してそれぞれ最密構造を形成する点に位置する。すなわち、光強度が極大値となる点群は面心構造を形成する。

四本もの光束を式(3)、(4)に従って正確に交差させ、照明することは一般に困難である。図2はコーナーキューブプリズムを用いて交差四光束照明を簡単に実現する方法を示す。図2(a)の様に、直交する三面に対して通常とは逆向きに平面波を照射すると、上面からの出射光は、各面での屈折により自動的に式(3)を満足する三本の光束となる。さらに図2(b)の様に頂角部を上面と平行にカットすれば、式(4)を満足する光束を導入することができる。交差角 θ は出射四光束をレンズを用いて収束することにより調節可能である。

4. 面心立方格子の生成条件

面心立方格子はそのブリアンゾーンが球形に近いため、良好なバンドギャップを形成すると考えられる^[2]。前述の四光束干渉によって形成される光強度の周期構造は、逆格子定数の一致条件より、

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta = \frac{3}{2}\sin\theta\cos\beta \quad (5)$$

が成立するときには面心立方格子となる。ここで、 $\cos\beta = \sin\alpha = 2(1-\cos\theta)/\sqrt{(3\cos\theta-5)(\cos\theta-1)}$ なので、照明条件として次式を得る。

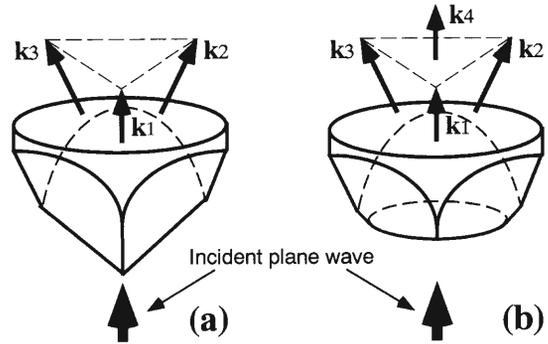


図2 交差四光束照明を実現する光学素子とその使用法の模式図：(a)コーナーキューブプリズム、(b)頂角をカットしたコーナーキューブプリズム。

$$\theta = \cos^{-1}(7/9) \approx 38.94^\circ \quad (6)$$

この場合、波長で規格化した格子定数は

$$\frac{a}{\lambda} = \left(\frac{3}{2}\right)^{3/2} \approx 1.837 \quad (7)$$

となり、ほぼ照射光波長の約2倍の値となる。

図3(a)および(b)は、それぞれ式(6)の条件における $z/\lambda=0$ および $y/\lambda=0$ の平面での干渉光強度分布を示す。光強度が極大となる点が、波長で規格化した格子定数 $(3/2)^{3/2}$ の面心立方格子を形成していることがわかる。また、 z 軸方向とそれと直交する方向とで光強度の空間分布に違いがあることは興味深い。これは微粒子に作用する勾配力に異方性があることを示しており、各格子点に捕捉される微粒子数の密度も空間的に異方性が生ずることを意味する。面心立方格子で完全なバンドギャップを実現する場合、「格子点に置く“原子”の対称性を低下させる」^[2] 必要があることが理論的に導出されているが、光強度分布の空間異方性は形成される誘電体周期構造が自動的にこの要求を満足することを意味しており、この点で本方法は有利である。

5. おわりに

交差四光束の干渉によって光強度が極大値となる点を光の波長程度の格子定数をもつ3次元の結晶構造に、特に面心立方格子とする条件を明かにするとともに、照明条件を簡単に実現する具体的な光学素子を提案した。この場合、光の勾配力によって形成される誘電体微粒子の結晶構造媒質は、完全なバンドギャップを実現するための条件を自動的に満足することが明らかとなった。

光波干渉と光トラッピングを組み合わせる誘電体微粒子の3次元結晶構造を生成する方法は、凝集によるコロイド単結晶の作成法^[4,5]に比較して非常に柔軟性が高く、面心立方格子以外にも様々な結晶構造を簡単

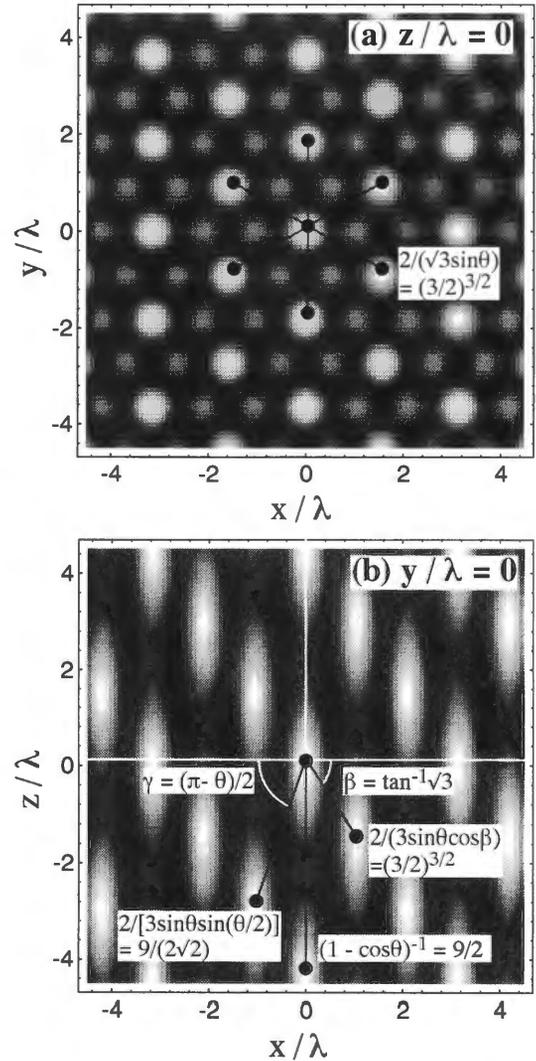


図3 $\cos\theta=7/9$ における四光束干渉光強度分布：(a) $z/\lambda=0$ 面内、(b) $y/\lambda=0$ 面内。

に作成することが可能である。今後は、ダイヤモンド構造など興味ある結晶構造を生成するための多光束照明の条件を探索するとともに、実験による実証を進める予定である。

【参考文献】

[1] A. Ashkin, *et al.*, *Opt. Lett.* **11**, 288 (1986).

[2] 解説記事として、たとえば、花村栄一：応用物理 **63**, 604 (1994)；井上久遠：応用物理 **64**, 19 (1995)。

[3] W. Hu, *et al.*, *Opt. Lett.* **20**, 964 (1995).

[4] 国府田隆夫：光学連合シンポジウム東京'95 講演予稿集, 22 aA 02 (1995), p.265.

[5] 大久保恒夫：日本結晶成長学会誌 **19**, 263 (1992)。

平仮名文字の特徴抽出における脳内プロセスの検討

量子計測研究分野 竹内文也, 平田恵啓, 栗城真也

平仮名文字を用いて母音照合課題と形態照合課題を構成し, それらの課題遂行時に後頭および側頭後部において脳磁界応答を計測して, 単一電流双極子による信号源の推定を行った。その結果, 被験者により後頭葉の上方のみに信号源が推定される場合と, 後頭葉の下方のみに推定される場合, どちらにも推定される場合があることがわかった。しかし, 課題間の差異は明確ではなかった。

1. はじめに

文字を照合する際の情報処理経路を調べた研究によると, 読める文字の照合には左側頭葉が, 読めない文字の照合には右側頭葉が関わっている^[1]。我々は, 刺激形状の違いによる影響を排除しつつ, 特徴抽出過程における脳神経活動を調べるために, 読める文字のみを用いて, 文字の音韻的な特徴を抽出する課題(母音照合課題)と文字の形態的な特徴を抽出する課題(形態照合課題)を構成した。これらの課題を用いて, 後頭葉および側頭葉後部における脳磁界を計測・解析した結果について報告する。

2. 実験方法

刺激文字として「ん」を除く45文字のひらがなを用いた。1回の課題試行の中では, まず, 左右に並んだ2個の文字(sample)が1.0s間呈示され, 続いて1文字(probe)の刺激が0.2s間呈示される。sampleが消えてから, probeが呈示されるまでの間隔は1.0~1.5sの間でランダムとした。被験者は, sampleとprobeとの照合を行い, probeが消えてから2s後に呈示される白丸を合図に, 左右に並んだボタンの一方を押すことで照合結果を回答する。母音照合課題では, 2文字のsampleのうちprobeと同じ母音を含む文字を照合し, 形態照合課題では, 予め文字の形を特徴づける19個の形態的要素を設定し, 2文字のsam-

pleのうちprobeと同じ要素を持つ文字を照合する。被験者は6名の男性(24~31才)である。

脳磁界応答の計測には37chSQUID磁束計(生理学研究所・統合生理研究施設)を2基用いた。計測位置は, 後頭および左右側頭後部の3カ所である。このうち, 後頭の計測ではSQUIDを1基使用し, 計測領域の中心がInionの上5cm付近となるように配置した。側頭後部の計測では, 左右側頭にそれぞれ1基ずつ使用し, 後頭の計測位置から頭表に沿って約10cm前方に配置した。1回の測定で約100回の課題試行を行い, probeに誘発される応答を記録し, 照合結果が正しかった試行の応答のみを加算平均した。一人の被験者につき2~4回の測定を行った。

3. 結果と検討

1名の被験者において1回の測定で得られた脳磁界応答波形を図1に示す。潜時170,200,250ms付近に大きなピーク成分がみられる。また, 図2は, 1名の被験者において左右側頭の後部で観測された潜時200msの磁界分布である。課題によらず, 右側頭では吸い込みの磁界が, 左側頭では湧き出しの磁界が観測された。他の被験者についても課題間では大きな差異がみられなかった。

より詳細に磁界分布を解析するために, 潜時150~300msにわたって単一電流双極子による磁界信号源の推定を行った。PETなどで用いられる脳形状の

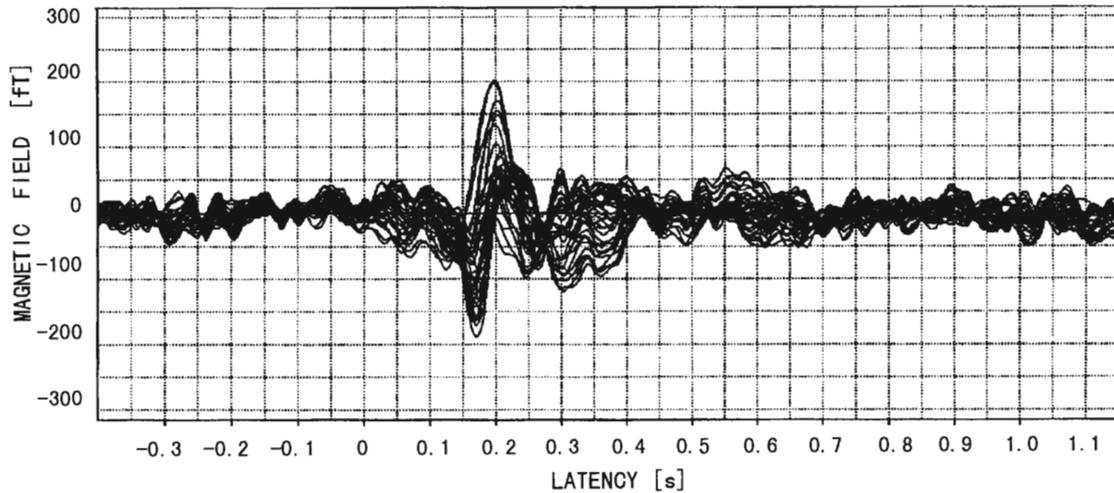


図1 形態照合課題において計測された脳磁界応答波形
1名の被験者において1回の計測で得られた37チャンネル分の波形を重ね書きで示す。

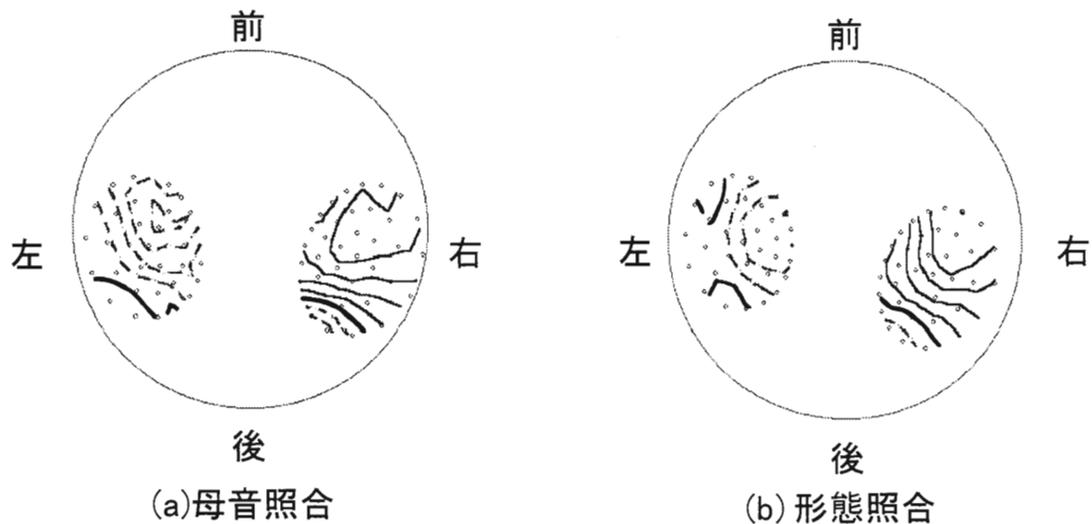


図2 1名の被験者において左右側頭後部で計測された潜時200msの等磁界分布
(a)母音照合課題(等磁界線の間隔19fT), (b)形態照合課題(等磁界線の間隔39fT)
太い実線が0, 細い実線が吸い込み, 破線が湧き出しを示す。

標準形^[2]上に重ね合わせた信号源位置を図3に示す。信号源位置を左右半球間で比較すると、左半球に比べ右半球で多くの信号源が推定された。この原因の一つは左視野に刺激文字を呈示したことである。右半球では、鳥距溝(図中エリア7, 8の境界)より上部にのみ信号源が推定された被験者が2名、鳥距溝より下部にのみ信号源が推定された被験者が2名、どちらにも推定された被験者が2名であった。また、左半球において

も右半球とおおよそ同様な傾向がみられた。

また、被験者ごとに形態照合課題と母音照合課題における信号源位置をそれぞれ平均し、それらの間の距離を左右半球ごとに求めた。右半球では、形態照合課題における信号源位置が母音照合課題における信号源位置に比べ約7mm外側となる傾向($p < 0.05$)があったが、明瞭な差異はみられなかった。

以上のように、被験者間に大きな差異が生じた原因

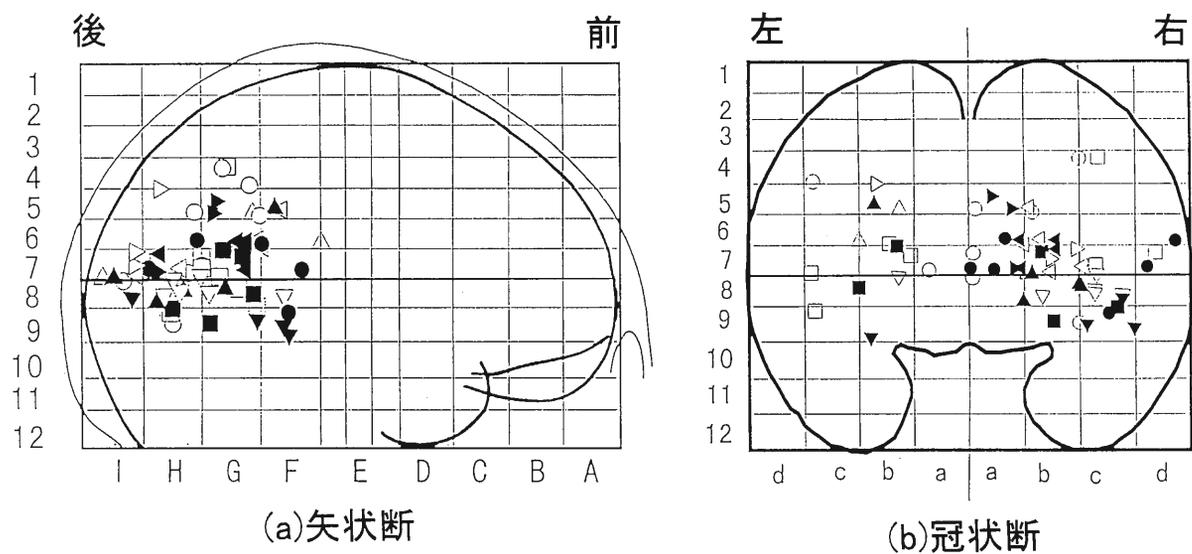


図3 脳の標準形上に重ねた信号源位置
 (a)は矢状断への投影図であり、(b)は冠状断への投影図である。
 信号源位置を示すシンボル形状の違いは被験者の違いを示し、色の違いは課題の違い（白：形態照合、黒：母音照合）を示す。

として、被験者により(1)視覚的な文字が呈示されたときの処理過程が異なることや、(2)課題遂行時の注意の違いが考えられる。

謝 辞

実験にご協力いただいた生理学研究所永田 治、竹島康行両技官に感謝いたします。

【参考文献】

[1] S. Kuriki et al., Cognitive Brain Research, 4: 185-199 (1996).

[2] J. Talairach et al., "Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain", Geoge Thieme Verlag, Germany, (1988).

血管内壁表面上における リポ蛋白濃度に及ぼす流れの影響

— コンピュータ・シミュレーションによる理論的検討 —

自律調節研究分野 和田 成 生, 狩 野 猛

血管分岐部における血液の流れと、動脈硬化や内膜肥厚の発症に深く関与する低密度リポ蛋白の輸送をコンピュータ・シミュレーションにより解析し、フローパターンと血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度との関係を調べた。その結果、血管壁が水透過性を有することにより、壁面で濃縮されたリポ蛋白が壁近傍で濃度分布を形成し、壁せん断速度が低く長区間にわたって壁近傍を通過した流体が集まる領域で、血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度が局所的に高くなることがわかった。

1. はじめに

栄養血管が存在しない動脈壁の内膜には、動脈内を流れる血液から血管内皮を介して、血漿成分が浸透することにより栄養が供給される。しかしながら、何らかの理由により、低密度リポ蛋白の主成分として存在する血液中のコレステロールが動脈壁の内皮下に過剰に取り込まれて蓄積すると、細胞の増殖や変性などを誘発して内膜が肥厚し、最終的には粥状動脈硬化症へと進展する。このような肥厚性の血管病は、主要動脈の湾曲部や分岐部、血管を移植した際の吻合部など、血液の流れが乱れる領域に多く見られることから、壁せん断応力がその発症要因の一つとして考えられている^[1]。しかしながら、血中のコレステロール濃度が高い人ほど動脈硬化になりやすいと言う臨床学的事実^[2]から推察すると、血液と血管壁との境界面におけるリポ蛋白の濃度の高低が、動脈硬化やその初期病変である内膜肥厚の発症の要因として重要であり、壁せん断応力そのものによる作用は二次的な要因として考える方が合理的である。

著者らは、血管壁が水透過性を有することにより血管壁面でリポ蛋白が濃縮され、壁面におけるリポ蛋白の濃度が流速に依存して変化する物理的メカニズムを示し、それを実証するための実験や理論的検討を行っている^[3-5]。本研究では、コンピュータ・シミュレ

ーションにより、血管分岐部における血液の流れとリポ蛋白の輸送を解析し、フローパターンが血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度に与える影響について検討を行った。

2. シミュレーションモデル

血液は均質で非圧縮性のニュートン流体とし、その流れ場の解析には連続の式

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

および、ナビアストークスの式

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\operatorname{grad} P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

を用いた。ここで、 \mathbf{v} は速度ベクトル、 P は圧力、 ρ および μ は血液の密度および粘度である。境界条件は、流入部と流出部でそれぞれ速度および圧力を与え、血管壁面ではその法線方向の速度が血管壁の水透過速度となるように設定した。一方、リポ蛋白の輸送モデルには拡散方程式

$$\mathbf{v} \cdot \nabla C - D \nabla^2 C = 0 \quad (3)$$

を用いた。ここで、 C はリポ蛋白の濃度、 D は血中のリポ蛋白の拡散係数である。境界条件は、流入部で濃度分布を、流出部で濃度勾配がゼロとなる条件を与えた。また、低密度リポ蛋白分子のような巨大分子は、血管

内壁面を自由に透過できないことを考慮し、血管内壁面における境界条件を

$$CV_w - D \frac{\partial C}{\partial r} = nCV_w \quad \text{at luminal surface} \quad (4)$$

で与えた^[5]。ここで、 n はリポ蛋白の壁透過率である。

本研究では、図1に示したように、分岐角度 135 度に吻合した直径 6 mm の血管に、粘度 $\mu = 3.5$ cP, 密度 $\rho = 1.05$ g/cm³ の血液が流れる場合について計算を行った。血管壁の水透過速度は $V_w = 4 \times 10^{-6}$ cm/s, リポ蛋白の拡散係数および壁透過率はそれぞれ、 $D = 5 \times 10^{-7}$ cm²/s, $n = 0.5$ とした。流入部のレイノルズ数を $Re = 200$, 左右の血管への流量比は 1 : 1 とし、流入部の濃度分布は、同じ条件で長さ 20 cm の円筒状の血管に対して求めた流出部における濃度分布を設定した。流れ場の計算は、有限要素流体解析ソフト (ANSYS-FLOTRAN) により行った。得られた速度分布を用いて、図1の点線で囲んだ領域の濃度場の計算を上流型の有限要素法により行った。

3. 結果および考察

図2は、半径 $r = 0.05, 0.1, \text{および} 0.29$ cm の円周上の位置から流入した流体のフローパターンを示したものである。図は真横から 30 度傾けて表示しており、黒点は 50 ms 毎の位置を示している。中心軸近傍 ($r = 0.05$ cm) から流入した流体は、分岐と反対側の血管壁を直撃した後、右側の血管の上半分の断面を通して流出し、中心軸から少し離れた位置 ($r = 0.1$ cm) の流体は血管壁面で跳ね返り、壁面に沿って大きく回旋しながら左右の血管に分流した。また、壁面近傍 ($r = 0.29$ cm) の流体は、壁面に沿って回旋してきた流体と合流するため、左右の血管に流れる経路が分岐手前で分離し、左側の血管に向かう流体は分岐の付け根付近に集合する形となった。

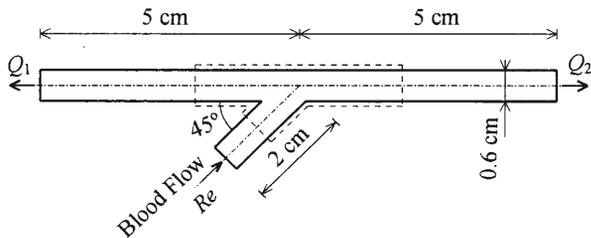


図1 血管分岐モデルの形状

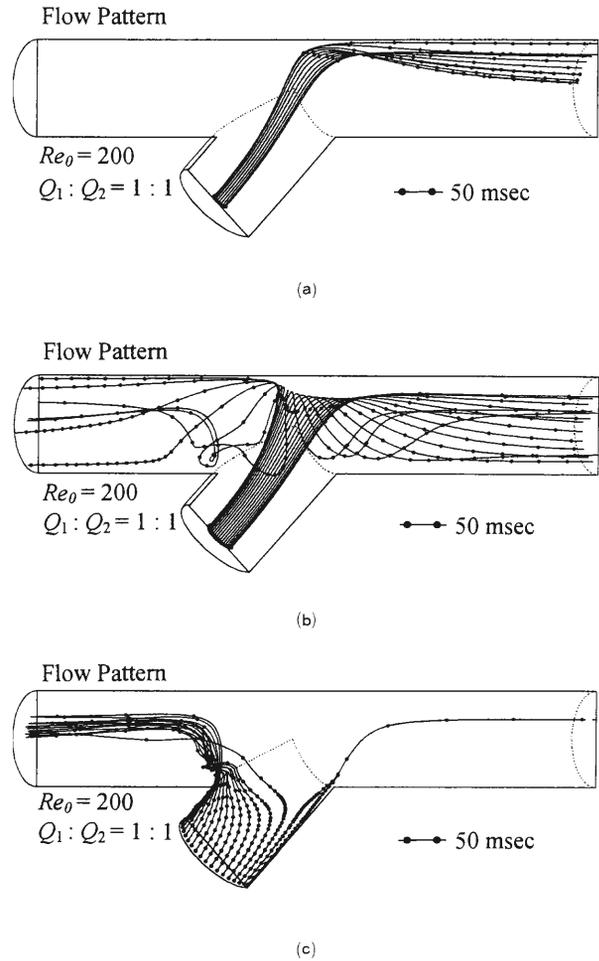
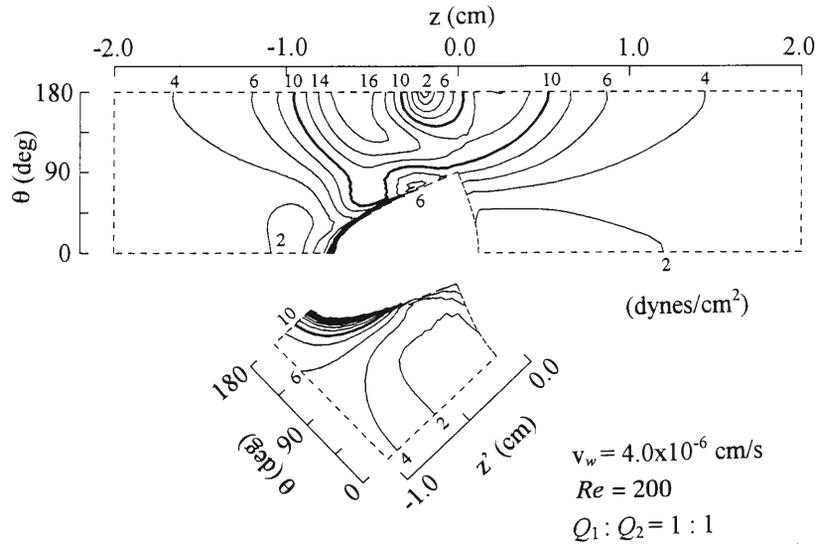
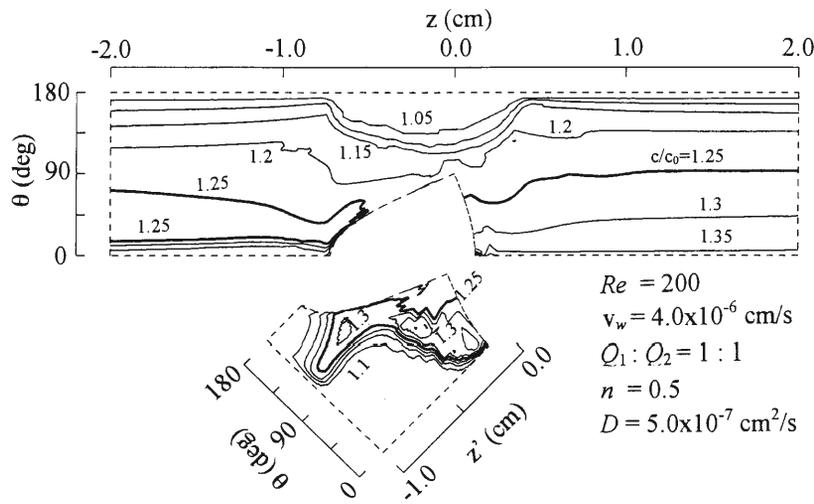


図2 血管分岐部のフローパターン
(a) $r = 0.05$ cm
(b) $r = 0.1$ cm
(c) $r = 0.29$ cm

図3(a), (b)は、それぞれ壁せん断応力分布と血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度分布を表したものである。ここでは、分岐部を共通直径面で半分に切り、壁面を平面上に展開して等高線で表示した。また、濃度は流入部の中心軸上の濃度を基準にして表した。中心軸付近の流体が直撃する血管壁面以外の領域では、リポ蛋白の壁面濃度は管中心部より高くなり、さらに、その濃度が局所的に高くなる部位が形成されることがわかった。局所的にリポ蛋白の壁面濃度が高くなった領域と壁せん断応力が低い領域の位置や範囲は必ずしも一致しなかった。壁面に沿って平行に流れる場合は、壁せん断速度 (応力) が低く、壁面を移動する距離が長いほどリポ蛋白の壁面濃度は高くなる^[5]が、図2に示したように回旋や合流をとまなう血管分岐部の流れ



(a)



(b)

図3 血管内壁表面上における壁せん断応力分布とリポ蛋白の濃度分布
 (a)壁せん断応力分布
 (b)リポ蛋白の濃度分布

場では、長区間にわたって壁近傍を通過した流体が集まる領域でリポ蛋白の濃度が高くなることがわかった。

4. おわりに

血管分岐部における血液の流れとリポ蛋白の輸送の三次元数値シミュレーションを行い、濃度境界層が形

成される壁近傍を通過した流体が集まる領域で、局部的に血管内壁表面上におけるリポ蛋白の濃度が高くなることを示した。壁近傍のみの流れを反映する壁せん断応力や壁せん断速度とは異なり、著者らの提案する流速依存性濃縮現象に基づいて得られるリポ蛋白の壁面濃度は、物質輸送現象を介して流れ場全体のフローパターンに影響されるものである。今後は、シミュ

レーションで得られたリポ蛋白の壁面濃度と動脈硬化
が好発する部位との関係を調べ、動脈硬化が局在化す

るメカニズムを解明していく予定である。

【参考文献】

- [1] Langille, B.L.: Flow-dependent regulation of vascular function (Eds. Bevan, J.A., et al.), Oxford Univ. Press, 277-299 (1995).
- [2] Kannel, W.B.: Am. Heart J. 114, 918-925 (1987).
- [3] Naiki, T. et al.: Biorheology 32, 233 (1995).
- [4] 狩野, Deng, X.: 慈恵医大シンポジウム論文集, 35-42 (1993).
- [5] 和田, 狩野: 信学技報, 96-113, 53-58 (1996).

培養心筋細胞による非線形振動子相互作用系の ゆらぎとダイナミクスの解析

適応制御研究分野 山内 芳子, 原田 明彦, 中村 孝夫, 河原 剛一

非線形自励振動子としての性質を有することが知られている新生ラットの培養心筋細胞を用い, 心筋細胞相互作用系における拍動リズムゆらぎとダイナミクスの解析を行った。その結果, 培養日数が増加するに従って心筋細胞拍動周期の変動が減少し, 拍動のダイナミクスが安定化することがわかった。

1. はじめに

多数の心筋細胞が電氣的, 機械的に結合することによって心臓という器官を構成し, 更に心臓は自律神経系による複雑な制御下にある。従って, 全体としての心臓の拍動リズムゆらぎの起源を明らかにすることは極めて困難である。

新生ラットや鶏胚の単離, 培養した心筋細胞が自発的に拍動することはよく知られている。また, 培養心筋細胞に電気刺激を加えると, 拍動リズムがそのリズムに引き込まれることから, これらは数理的には非線形振動子としての性質を持つ^[1]。心臓それ自体の拍動リズムの特性は, これら多くの非線形振動子の相互作用により生み出されると考えることができる。

そこで, 我々は単離, 培養した心筋細胞を心臓の拍動リズムの静的, 動的ゆらぎ特性の解明のための最も単純化したモデルとしてとらえ, 培養心筋細胞の拍動リズムの静的および動的な特性を解明することを目的として実験を行った。

2. 方 法

2.1 心筋細胞培養^[2]

実験には生後1~3日目の新生ラットを用いた。ラットの頸椎および腰椎を脱臼させた後に胸郭を切開し, 心臓を摘出した。心臓の心室部分のみをハサミで細切して小片とし, 0.1%コラゲナーゼ溶液中, 37°Cで1時間振盪培養することにより結合組織を分解して心筋細胞を単離した。単離した心筋細胞を培地

(MCDB 107)に加えて37°C, air 95%, CO₂5%の条件下のincubator内で約1時間培養した。この培養により接着時間の比較的早い線維芽細胞をdish上に接着させて取り除き, ほぼ心筋細胞のみを取り出すことができる。最後に細胞数を調整し, incubator内で培養を開始した。本研究では細胞密度を 3.5×10^4 cells/cm²とし, 約2週間培養を行った。

2.2 画像解析およびデータ処理

心筋細胞の拍動の様子は, 顕微鏡を通してビデオカメラで6分間撮影した。撮影した画像から拍動している心筋細胞の拍動を最も良く表すような一部分(約20×20 pixels)を選択して, ビデオ信号をパーソナルコンピュータにビデオフレーム単位(30 frames/sec)で取り込んだ。このフレーム列中の任意に選んだ基準フレームと他のフレームとの間で, 画素濃度間の相互相関係数を求めた。

相互相関係数のピーク間隔より心筋細胞の拍動周期を求め, その変動係数を求めることで心筋細胞拍動ゆらぎの静的な特性を評価した。また, 心筋細胞拍動の動的な特性を調べるために, 相関係数とその1次微分の関係からphase plane plotを求めた。さらに相関積分法^[3]によりアトラクタ次元を求め, 培養心筋細胞発振時系列のダイナミクスを解析した。

3. 結 果

画像の記録は, ほとんどの培養心筋細胞が拍動を開始する培養3日目から行った。記録した画像中には,

10 個以上の心筋細胞が含まれていた。培養初期では、培養皿に接着した細胞の中に各々独立したリズムで拍動をするものが多く見られた。培養開始から約1週間後には、多くの心筋細胞が結合し、同期して拍動していた。

Fig.1 は録画した同一画面内の2個の心筋細胞から得られた相互相関係数を示している。相互相関係数の各ピークが心筋細胞の拍動に対応する。相互相関係数のピーク間隔及び振幅には、培養6日目にはゆらぎが認められるが、培養13日目になるとゆらぎが減少していた。

Fig.2 は Fig.1 に示した心筋細胞の拍動周期の変動係数の培養日数に伴う変化を示している。拍動周期の変動係数は、培養日数とともに指数関数的に減少した。すなわち静的な拍動リズムゆらぎが培養日数の増加に

伴って減少した。

相互相関係数の振幅とその1次微分により構成される2次元相空間における軌道については、培養初期ではこの軌道は limit cycle 様のアトラクタを示したが、ばらつきが大きかった。しかし、培養後期にはこの軌道のばらつきが減少する傾向が認められた。

Fig.3 は相互相関係数から求めた相関次元の培養日数による変化を示している。cell 1 の培養3日目の相関次元は、相関指数が発散したために求めることができなかった。相関次元は培養日数とともに減少し、培養11日目以降その値は1.0に近づいた。この結果は、相互相関係数の軌道のアトラクタが limit cycle に近づくことを示している。

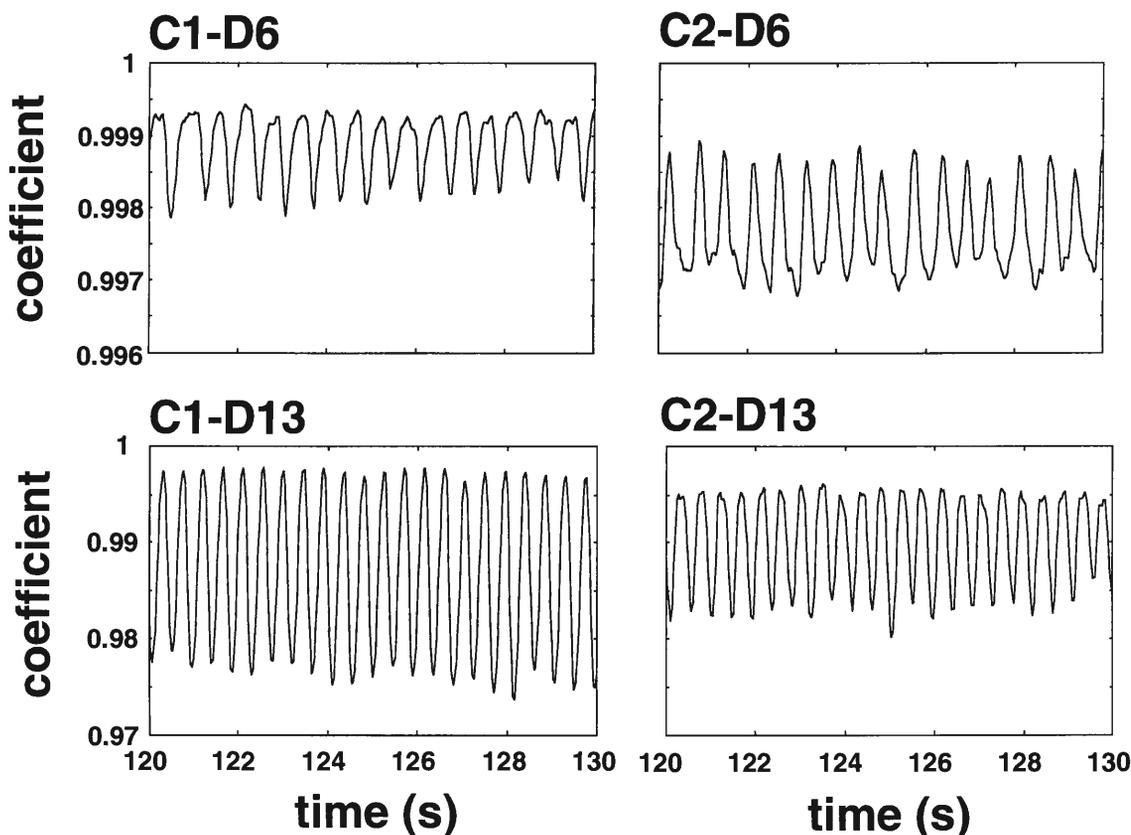


Fig.1 Cross correlograms of myocytes on the 6th (C1-D6 for cell 1 and C2-D6 for cell 2) and the 13th (C1-D13 for cell 1 and C2-D13 for cell 2) days of culture. Each peak (upward in C2-D6 and downward in the others) of correlogram indicates contraction of the myocytes.

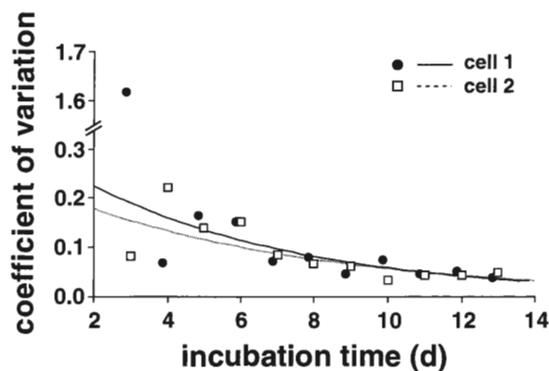


Fig.2 Temporal changes in the coefficient of variation of contraction intervals in cultured myocytes. Closed circles show the data obtained from cell 1 and opened squares from cell 2. Solid and dotted lines show regression curves in the form of exponential function fitted to data obtained from cell 1 and cell 2, respectively.

4. 考 察

接着した心筋細胞同士は gap junction を介して電気的に、あるいはカドヘリンなどの細胞接着分子により機械的に結合し、相互作用を及ぼしあっている。Gap junction は connexon により形成され、脊椎動物の心筋細胞の主な構成要素はそのうちの connexin-43(Cx 43)であることが知られている^[4]。Oyamada らは新生ラットの心筋細胞において、Cx 43 の数と総面積が培養日数の増加に伴って増加することを示しているが^[5]、本研究は Oyamada らと同様の条件で心筋細胞の培養を行っており、同様の経過で Cx 43 の数、総面積ともに増加したと推測される。よって、Fig.2 に示

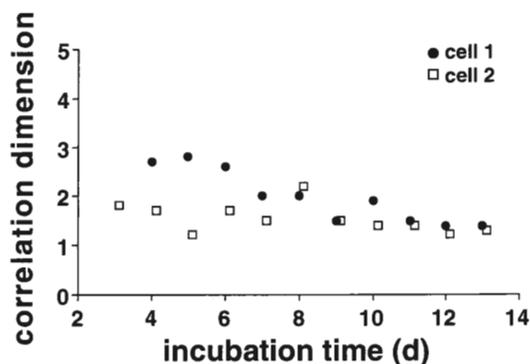


Fig.3 Temporal changes in the correlation dimension of the attractor of cross correlogram. Closed circles show the data obtained from cell 1 and opened squares from cell 2. The correlation dimension of cell 1 on the 3rd day of culture was not shown because correlation exponent did not reach to a plateau.

した変動係数の減少は心筋細胞間の相互作用の強化によるものと考えられる。

一方、機械的な結合による相互作用の寄与については明確にされておらず、今後明らかにしていく必要がある。

相互相関係数より再構成された phase plane plot の軌跡は完全な limit cycle を描かず、ゆらぎが存在し、このゆらぎは培養前期よりも後期で減少した。また、相互相関係数より求めた相関次元の値は、培養日数の増加に伴い減少した(Fig.3)。これらの結果は、培養心筋細胞の拍動が徐々に安定化することを示唆している。その原因は明確ではないが、おそらく拍動周期の変動係数の減少と何らかの関係があると推測される。

【参考文献】

- [1] Glass L, Guevara MR, Shrier A, Perez R., Physica D, 7: 89 (1983).
- [2] Orita H, Fukasawa M, Hirooka S, Fukui K, Kohi M, Washio M., Jpn Circ J, 57: 912 (1993).
- [3] Grassberger P, Procaccia I., Phys Rev Lett, 50: 346 (1983).
- [4] Beyer EC, Kistler J, Paul DL, Goodenough DA., J Cell Biol, 108: 595 (1989).
- [5] Oyamada M, Kimura H, Oyamada Y, Miyamoto A, Ohshika H, Mori M., Exp Cell Res, 212: 351 (1994).

反応拡散系における遷移ダイナミクスについて

情報数理研究分野 西浦 廉政, 上山 大信

本研究ではパターンの遷移過程に注目し、そのメカニズムを分岐論的な観点から明らかにすることを目標とする。ここでは、自己複製パターンを再現する簡単なモデルとそのシミュレーション結果を紹介する。

A. Turing 以来、長らく理論的に予測されていた拡散不安定性による空間非一様定常解 (Turing パターンとよばれる) が 90 年代に入り実験室においても実現可能となり、以来 Turing パターンのみならず、様々な動的パターンが発見され、注目を再び集めている。なかでも自己複製パターン (Self-replication) や波形分裂 (Wave splitting) (例えば^[1-4]) とよばれる現象はこれまでの散逸系のパターン形成においてはあまり見られ

なかったものであり、それらのダイナミクスの解明は、極めて興味ある問題となっている。注目すべきはこれらがすべて遷移ダイナミクスであるということである。実際多くの場合、十分時間を経た後は、ある定常状態や周期状態に落ち着いており、そのときは着目すべき遷移ダイナミクスは消失している。このことは通常の漸近解析や摂動論によっては記述が困難であることを示唆している。本研究においては自己複製パターン

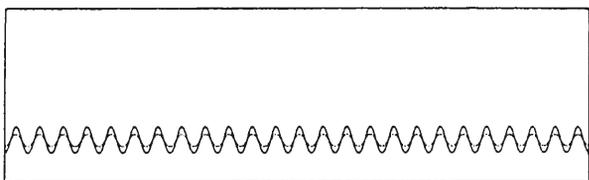
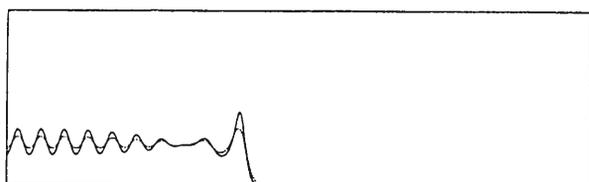
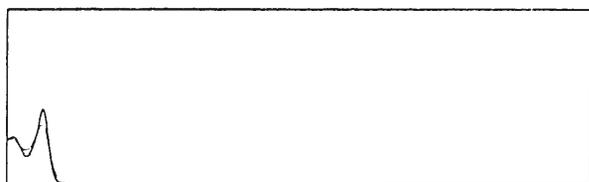


図1 フロント型複製パターン
進行波解 (フロント解) の片側定数分が Turing 不安定性をおこすことによる生じるパターン。先端から Turing パターンが生まれ、最終状態は安定な定常解となる。

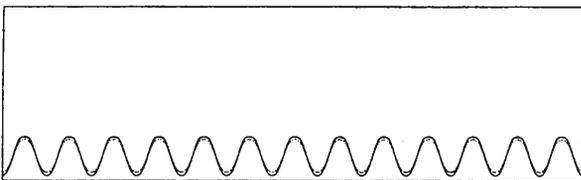
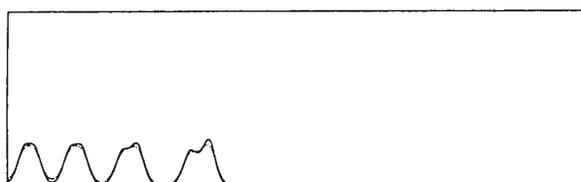
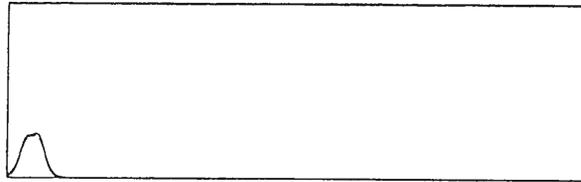


図2 パルス型複製パターン
平衡点が1つ (mono-stable 系) なのでフロント解はなく、その代わりに、パルス型波形が先端で次々に分裂して、最終的にフロント型と同じく定常解へ落ち着く。

の出自を分岐論的観点から明らかにすることを旨とする。
モデル方程式は

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = Du \nabla^2 u + u(u - v^2 - \alpha) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = Du \nabla^2 v + kv - v \end{cases} \quad (1)$$

境界条件は Neumann 条件又は周期条件を課する。
Kinetics に特徴的なことは、コントロールパラメータ
が実 2 次元 (α, k) であり、ある点 (α_0, k_0) で BT
(Bogdanov-Takens) 点という Saddle-node と Hopf
が合体した余次元 2 の特異点をもつことである。パラ

メータ α を変えると saddle-node 分岐が生じ、起こった後は $(0,0)$ 以外に新たに 2 個の定数平衡解が生じる。
この分岐の前後で 2 種類の異なる自己複製パターンが現れる。

- フロント型自己複製解 (3 平衡点) 図 1
- パルス型自己複製解 (1 平衡点) 図 2

粗く言えば、この BT 点と拡散による Turing 不安定性の複合ダイナミクスがこれら自己複製パターンをはじめとする多くの複雑遷移ダイナミクスを生み出す元となっている。

【参考文献】

- [1] Castets, V., Duos, E., Boissonade, J. & De Kepper. P. Phys. Rev. Lett. 64, 2953-2965 (1990).
- [2] Ouyang, Q & Swinney, H. L., Nature 352, 610-612 (1991).
- [3] Pearson, J. E., Science 216, 189-192 (1993).
- [4] Reynolds, W. N., Pearson, J. E. & Ponce-Dawson. S., Phys. Rev. Lett. 72, 1120-1123 (1994).

高分子混合系における秩序形成

情報数理研究分野 伊藤 綾, 西浦 廉政

高分子混合系の秩序形成とそのダイナミクスについての、計算機シミュレーションを中心とした研究の報告を行った。高分子混合系における相分離とそれに伴う秩序形成では、高分子ブレンドのマクロ相分離と高分子共重合体のミクロ相分離の二つが代表的な現象として知られ、調べられている。これらのほか、ホモポリマーと高分子共重合体の混合系などの構造形成とその過程について、研究結果の紹介を行った。

異なる種類の高分子を混ぜ合わせたものは、高温ではよく混ざり合っているが、温度を下げると、各成分は集まり相分離する。一次相転移では、系の温度を変えると、もとの状態は不安定、あるいは準安定となり、新しい相が形成され、それが時間と共に系全体に広がっていく。この新しい相がどのように形成されていくかを調べるのが、相転移のダイナミクスと秩序形成の問題である^[1]。高分子混合系の相分離はこの問題の典型的なものである。

また、最近、複雑液体^[2]という言葉が聞かれるようになった。

複雑液体とは、高分子、液晶、コロイド粒子、ミセルなどを含む液体で、10-1000 nm 程度の長さスケールの空間構造(メゾフェイズ)を形成しうるものを指す。複雑液体における問題としては、まず、どのような空間構造が、どのように形成されるのか、そしてこのメゾ

スケールの空間的な秩序をもつために、外場(流動場、変形、電磁場等)に対して複雑な応答を示すのでこれを調べる、ということがある。高分子系はプラスチック、ゴムや繊維などの材料、動植物などの生体を構成するものとして多くの研究があるが、最近では、複雑液体の仲間という立場からも、その形成される空間構造や物性に興味を持たれている。

このような背景のもと、高分子の混合系の秩序形成

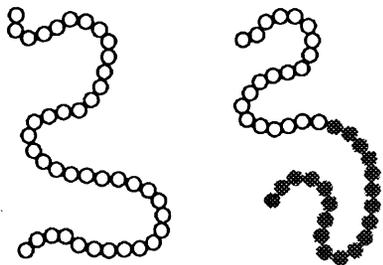


図1 左がホモポリマーで、同種のモノマーが重合してできている。右が高分子共重合体(ブロックコポリマー)。二種類の高分子鎖がつながってできている。

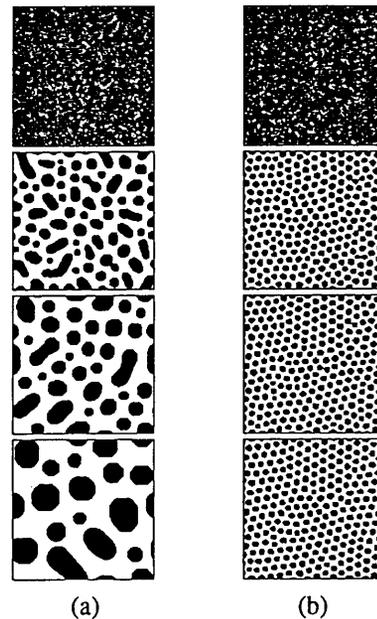


図2 マクロ相分離とミクロ相分離におけるドメイン形成の様子。(a)マクロ相分離、(b)ミクロ相分離。各、上から $t=0, 2000, 8000, 32000$ のときのドメインパターン。黒・白はそれぞれ高分子の各成分が集まったところを表す。

とそのダイナミクス, すなわち, どのような空間構造がどのように形成されるか, について, 計算機シミュレーションを中心とした研究を行った。

高分子系における相分離とそれに伴う秩序形成では, 二種類の非相溶性高分子 (ホモポリマー) の混合系にみられるマクロ相分離と高分子共重合体におけるマイクロ相分離の二つが, 代表的な現象として知られ, 調べられている。

ホモポリマーの混合系では, 急冷後, 各々の種類のホモポリマーが集まったドメインが形成され, これが時間と共に成長する。この様子は巨視的な現象として観察される。これに対し, 高分子共重合体では, 異なる種類の高分子鎖がつながっているため, 高分子鎖の

広がり程度の大きさのドメインが形成される。

これらの現象を数理的な立場で考えていくと, それぞれの相分離過程は, 系の状態を示す秩序変数 ϕ を導入すると, 次のようなモデルで表すことができる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla^2 [-D \nabla^2 \phi + f(\phi)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla^2 [-D \nabla^2 \phi + f(\phi)] - (\phi - \bar{\phi}) \quad (2)$$

(1)式がマクロ相分離, (2)式がマイクロ相分離のモデルである。図2はこれらを数値計算したものである^[3]。

本講演では, これらのほか, ホモポリマーと高分子共重合体の混合系, 高分子共重合体の混合系などの構造形成とその過程について, 研究の結果を報告する。

【参考文献】

[1] D. J. Gunton, M. S. Miguel and P. S. Sahni, "Phase Transition and Critical Phenomena" 8, 267, Academic Press (1983).

[2] 固体物理 29, No.4, "複雑液体の物理" 特集号 (1994).

[3] Y. Oono and S. Puri, Phys. Rev. Lett. A58, 1542 (1988);
M. Bahiana and Y. Oono, Phys. Rev. A41, 6763 (1990).

コオロギ気流感覚毛の機械特性の測定

神経情報研究分野 熊谷恒子, 馬場欣哉, 下澤楯夫

レーザドップラ速度計を用いて、コオロギの気流感覚毛の運動と気流速度の両方を測定し、気流速度から感覚毛の角変位までの機械変換感度を調べた。この測定をもとに感覚毛の運動を特徴づける運動方程式の係数を決定し、一桁以上に渡る広い周波数帯域幅を持った気流感覚を実現させている感覚子アレイの形状と機械的パラメータとの関係など、気流感覚毛の力学設計を明らかにした。

1 はじめに

コオロギをはじめとする直翅目、コキブリ目の昆虫は、腹部末端に尾葉と呼ばれる一対の突起を持っている。尾葉上には数百本の気流感覚毛と呼ばれる糸状の感覚子があり、周囲の空気の動きを検出している。気流感覚毛の根元には感覚細胞があり、感覚毛が気流からの粘性力を受けて傾くと感覚細胞が機械的歪みを受けて、活動電位を発生し中枢へ伝える。これらの動物は気流感覚によって捕食者や配偶相手の接近を視覚に頼らずに検出し、逃避行動などの発現を制御している^[1-2]。

コオロギの気流感覚毛には、長さで2桁(30-1,500 μm)、直径で1桁(1-9 μm)にわたる大小様々なものがある。力学的見地から見ても長さによって大きな違いを持つはずである^[3,4]。

本研究ではこれら長さの異なる気流感覚毛の、1) 気流に対する感覚毛の角変位振幅及び位相の周波数特性、2) 気流感覚毛の動きを支配する運動方程式の中の3つの機械定数、すなわち、慣性モーメント、毛を支えるバネのかたさ、支えるバネの内部摩擦抵抗、を測定・算出し、気流感覚毛の力学設計を明らかにする。

2 実験方法及び手順

(1) 測定：実験動物は成虫クロコオロギ *Gryllus bimaculatus* を用いた。直径3cmのアクリル管の両端にスピーカを取り付け、プッシュプルで駆動して小型風洞とした。風洞中央で感覚毛に気流が垂直にあたる

ようにコオロギ腹部を固定し、感覚毛の揺れの接線速度をレーザドップラ流速計(LDV)で測った(図1)。LDVは直径60 μm 、長さ600 μm の測定領域内に87 m/secで移動する干渉縞を作り、それを横切る散乱体からの散乱光の強度変化の周波数から散乱体の速度を測定する。刺激信号として帯域幅500 Hzの白色ガウス雑音を用い、5分間のLDV出力と刺激波形の相互相関から伝達関数を求めた。実体顕微鏡で感覚毛の長さや測定点の基部からの高さを測り、揺れ接線速度を角速度へ、さらに積分操作により角変位へ換算した。風洞内の気流速度までの伝達関数の較正は、散乱粒子として線香の煙を満たして測定した。気流速度から角変位までの感覚毛の感度特性は、これら2つの伝達関数の差から周波数領域で求めた。

(2) 力学的パラメータの推定：実測された角変位を、慣性モーメント I を持ち基部を硬さ S のバネで支えられた倒立振子の次の運動方程式へ代入する。

$$I\ddot{\theta} + R\dot{\theta} + S\theta = N(t)$$

ここに θ は感覚毛の角変位、 $N(t)$ は感覚毛の各部に働く粘性力による回転トルクである。1-500 Hzの幾つかの周波数について代入した連立方程式から、最小自乗法で I 、 R 、 S を求めた。感覚毛のレイノルズ数はたかだか 10^{-2} と小さいので、トルクの推定には感覚毛各部を微小長さの円柱とみなし、円柱を横切る流れが及ぼす粘性力に関するOseenの近似理論を用いた。感覚毛の各部にあたる気流の相対速度には、尾葉表面へ空気が粘りついて形成される境界層内の流速について

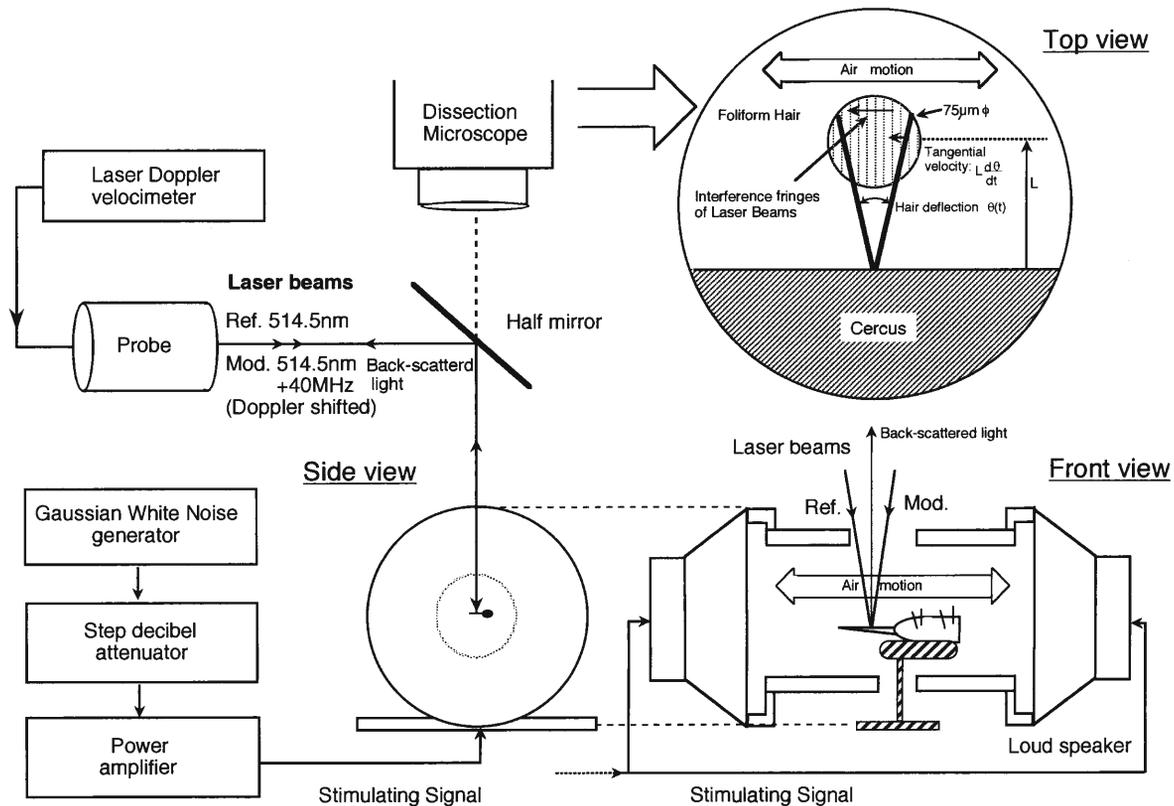


図1 実験装置

の Stokes の第 2 問題の解^[4] を考慮にいたした。

3 結果

測定と解析を 27 本の 160-1,500 μm にわたる様々な長さの感覚毛について行った。気流感覚毛はすべてバンドパスフィルタの特性を示し、気流の周波数と共に、角変位振幅は 10~20 dB/decade で増加し、最適周波数を越えると -20~-10 dB/decade で減少する(図 2 a)。最適周波数は感覚毛が長いほど低く、その感度は長いほど高い。最適周波数は気流速度に対する角変位の位相遅れが 0 になる周波数とほぼ一致した。すべての感覚毛の角変位振幅の周波数特性に鋭いピークはなく、この機械系は強い制動を受けている事を示唆している。また、位相遅れの周波数特性の傾斜は $\pi/2/\text{decade}$ で、これも系が最適制動の 2 倍程度の強い制動を受けている事を示している。

これらの実測値から慣性モーメント I を推定したところ、すべての長さの感覚毛で感覚毛の形状(長さ、太さ、密度)から幾何学的に求めた値とよく一致した

(図 2 b)。また感覚毛を支えるばねの硬さ S も、以前静的な条件下で求めた値ととよく一致した。しかし内部抵抗 R は、系全体の位相遅れの周波数特性の傾斜より予想される値に比べ、かなり小さく推定された。従ってこの系は空気の粘性による自己制動効果が積極的に利用されていることがわかる。

4 考察

長さの異なる感覚毛は、それぞれの長さに対応した機械的な性質を持ち、異なる best frequency を持ったバンドパスフィルタの配列となっており、系全体として 2 桁以上の広い周波数帯域に感度を持つ仕組みを実現している。長さが 1 桁大きい感覚毛の太さは約 1/2 桁大きく、したがって慣性モーメントは 4 桁も大きくなる。しかし、それを支えるばねの硬さを 2 桁大きくしてバンドパスフィルタとしての最適周波数を 1 桁変えている。また、自己制動抵抗を 3 桁大きくして振動系として鋭いピークの現れるのを防いでいる。

動物が外の世界の出来事に適切に対応出来るのは、

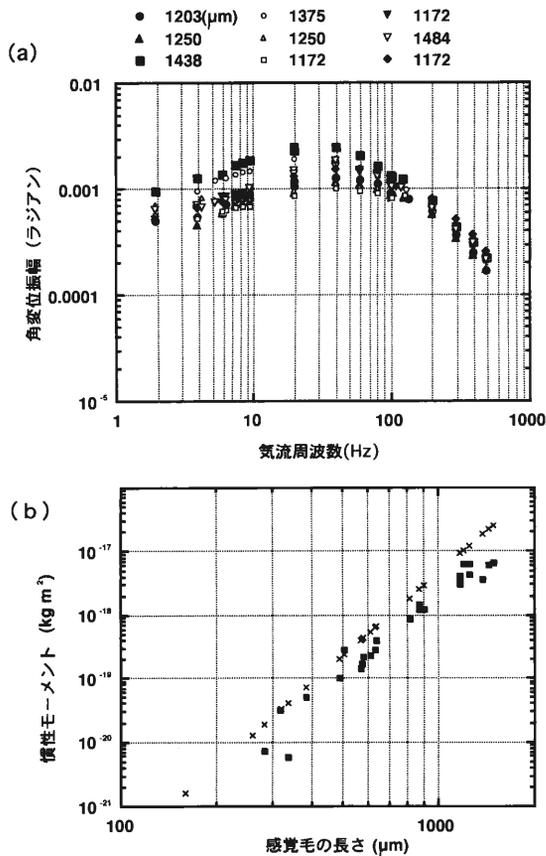


図2 (a)気流 (1 mm/sec peak-to-peak) に対する感覚毛の角変位振幅の実測例。上の数字は毛の長さ (μm)。 (b)感覚毛の慣性モーメント。黒ドット：実測値より求めた値，クロスは感覚毛の形状から幾何学的に算出した値 (詳しくは本文)。

感覚情報を処理して、外の世界に対応した神経活動を中枢内のどこかに作り出すからである。識別されるべき外の世界の出来事は感覚器を通して神経情報に変換され、中枢で信号処理される。つまり神経系は広い意味での Matched Filter となっており、感覚器の性能と中枢における信号処理は互いに裏表の関係になっているはずである。神経系の設計原理を明らかにする作業はこの裏表の関係を示すことでもある。本研究における感覚器の特性の物理的計測は、中枢での信号処理の意味を議論する上で極めて重要な基盤となる。

【参考文献】

- [1] Camhi J. M., Tom W., Volman S. (1978) The escape behaviour of cockroach *Periplaneta americana*. II. Detection of natural predators by air displacement J. Comp. Physiol. 128: 203-212
- [2] Gnatzy W. and Hustert R. (1989) Cricket behaviour and neurobiology. Huber F., Moore TE, Loher W.(eds) Mechanoreceptors in behaviour. Cornell university Press, Ithaca, NY, pp 198-226
- [3] Shimozawa T. and Kanou M. (1984) Varieties of filiform hairs: range fractionation of sensory afferents and cercal interneurons of a cricket. J. Comp. Physiol A 155: 485-493
- [4] Shimozawa T. and Kanou M. (1984) The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*. J. Comp. Physiol A 155: 495-505

量子力学への分布定数回路理論の応用 (確率密度は波動関数の絶対値の二乗でよいか?)

信号処理研究分野 永井信夫, 真田博文, 鈴木正清

21世紀を真近にひかえて現在の技術の限界が予測され、それを乗り越えるテクノロジーとして、電子や光子の量子機能を利用する技術が重要と考えられている。量子力学を工学に応用するにあたっては、古典物理学に立脚した理論では許されない現象の概念や性質を模索する必要がある、との考えもある。本文では、量子力学固有の現象であるトンネル現象を用いた共鳴トンネル現象について考察する。共鳴トンネル現象は、波動方程式の絶対値の二乗と定義される確率密度と関係する。この確率密度を導出する際に、確率の流れの密度が求まる。回路理論を量子力学に応用すると、この確率の流れの密度はエネルギーの伝送に係わる有効電力に一致する。そこで、この確率の流れの密度に基づいたエネルギーの伝送の理論展開をすることにより、共鳴トンネル現象と固有関数との違いを明確にし、また、共鳴トンネル現象を利用した素子の特長について述べている。

1. はじめに

21世紀を真近にひかえて、20世紀に誕生した量子力学の現象を利用する技術の確立が期待されている。本文では量子力学に回路理論を応用して、エネルギーの伝送に基づく理論展開により、共鳴トンネル現象と固有関数との違いなどを明確に示す。

2. 物理学による量子力学の確率の定義

量子力学は物理学の記号で書かれることが多いので、文献(1)に基づいて確率の定義を述べる。

量子力学では、粒子が運動している状態は波動関数 $\Psi(r,t)$ で記述される。波動関数の絶対値の自乗は、時刻 t において位置 r に粒子が見出される確率密度を与えると解釈される。系の状態を表す波動関数の時間変化は次のシュレディンガー方程式で決定される。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r) \right] \Psi(r,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $U(r)$ はポテンシャル、 m は有効質量、 \hbar はプランク定数であり、 ∇ は次式を表す。

$$\nabla = \left(i_x \frac{\partial}{\partial x} + i_y \frac{\partial}{\partial y} + i_z \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

粒子を位置 r に見出す確率の解釈から、確率密度 ρ

を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \rho(r,t) &= |\Psi(r,t)|^2 \\ &= \Psi^*(r,t) \Psi(r,t) \end{aligned} \quad (2)$$

上の定義から、次の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho(r,t)}{\partial t} &= \frac{\hbar}{2mi} \operatorname{div} [\Psi(r,t) \nabla \Psi^*(r,t) \\ &\quad - \Psi^*(r,t) \nabla \Psi(r,t)] \end{aligned} \quad (3)$$

古典的な電荷の保存則は、 ρ を電荷密度、 J を電流密度とすれば次のように表せる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} J = 0 \quad (4)$$

この類推から「確率の流れ」を次のように定義する。

$$\begin{aligned} J &= \frac{\hbar}{2mi} [\Psi(r,t) \nabla \Psi^*(r,t) \\ &\quad - \Psi^*(r,t) \nabla \Psi(r,t)] \end{aligned} \quad (5)$$

自由な粒子が一部反射された状態における空間1次元の定常状態の波動関数は、

$$\begin{aligned} \Psi(x,t) &= A \exp[i(kx - \omega t)] \\ &\quad + B \exp[-i(kx - \omega t)] \end{aligned} \quad (6)$$

と表される。ここに、 k は波数、第1項は+方向に、第2項は-方向に進む波である。

この場合、 ρ および J は式(2)、(5)を用いて次のように求まる。

$$\rho = |A|^2 + |B|^2 + \operatorname{Re}(2AB^* \exp[2i kx]) \quad (7a)$$

$$J = -\frac{\hbar k}{m} (|A|^2 - |B|^2) \quad (7b)$$

ところで、流体の理論によれば、流体がわき出すことがない場合の連続の方程式が式(4)と同じような次式で表される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} f = 0 \quad (8)$$

ここに、 ρ は媒質の密度、 f は流量密度であり、次のように表せる。

$$f = \rho v \quad (9)$$

ここに、 v は流速を表す。

この流体の理論を考慮に入れるなら、式(7)の J が ρ と B が零でないとき異なることに気が付こう。そこで、シュレディンガー方程式に分布定数回路理論を応用して、確率の流れ J の意味付けを明確にしよう。

3. シュレディンガー方程式の回路理論

我々はシュレディンガー方程式を電方程式の一つの拡張と仮定して複素等価回路を導出している^[2,3]。そこで、回路理論で用いる記号でその等価回路について述べる。

3.1 複素等価回路

時間を含む有効質量近似された1次元シュレディンガー方程式は、回路理論では式(1)とは符号を一つ変えて次のように表される。

$$-j\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + U\Psi \quad (10)$$

ここに、 j は虚数単位を表す。

ポテンシャルの高さが異なるヘテロ界面の境界条件は、(1)波動関数が連続、(2)波動関数の一次導関数を有効質量で割ったものが連続である。したがって、波動関数 $\Psi(x,t)$ を用いて、電圧 $v(x,t)$ および電流 $i(x,t)$ を次のように定義する。

$$v(x,t) = \Psi(x,t) \quad (11a)$$

$$i(x,t) = j \frac{\hbar}{m} \frac{\partial}{\partial x} \Psi(x,t) \quad (11b)$$

上に定義した $v(x,t)$ および $i(x,t)$ の二つの関数が共に式(10)を満足するように、次のように表す。

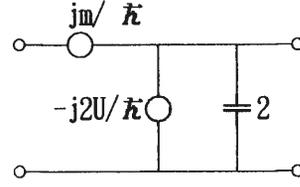


図1 単位長あたりの複素等価回路

$$-\frac{\partial}{\partial x} v(x,t) = j \frac{m}{\hbar} i(x,t) \quad (12a)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = 2 \left(\frac{\partial}{\partial t} - j \frac{U}{\hbar} \right) v(x,t) \quad (12b)$$

したがって、単位長あたりの等価回路は図1のようになり、直列素子にインピーダンス jm/\hbar 、並列素子の一つにアドミタンス $-j2U/\hbar$ なる虚数抵抗を用いている。

物理学では、エネルギー E の波動関数は

$$\Psi(x,t) = \phi(x) \exp(-jt E/\hbar) \quad (13)$$

と表され、次のプランクの関係式を満たす。

$$E = \hbar \omega \quad (14)$$

このプランクの関係式による周波数変数 ω を用いて回路表現を求めよう。すなわち、回路理論では、電圧および電流を次のように表す。

$$v(x,t) = V(x) \exp(j\omega t) \quad (15a)$$

$$i(x,t) = I(x) \exp(j\omega t) \quad (15b)$$

この式を式(12)に代入して整理すると次式を得る。

$$\frac{d^2}{dx^2} V(x) = \gamma^2 V(x) \quad (16a)$$

$$\gamma^2 = -2m(\hbar\omega - U)/\hbar^2 \quad (16b)$$

電流も定義から次式を満足する。

$$\frac{d^2}{dx^2} I(x) = \gamma^2 I(x) \quad (17)$$

量子力学では式(16b)の γ^2 の正負の違いにより、井戸と障壁とに分けられる。一方、無損失線路では、 γ^2 は必ず負になる。そこで、次に負になる場合と正になるときを区別して検討しよう。

3.2 井戸の等価回路

量子力学的に井戸になる場合は次のときである。

$$m(\hbar\omega - U) > 0 \quad (18)$$

このとき、伝搬定数 γ は純虚数となるので、位相定数と呼ばれ次のように表される。

$$\gamma = j\beta \quad (19)$$

電圧 $V(x)$ は次のように表される。

$$V(x) = A \exp[-j\beta x] + B \exp[j\beta x] \quad (20)$$

式(12)に代入して、電流 $I(x)$ は次式を満たす。

$$I(x) = \frac{A}{R_0} \exp[-j\beta x] - \frac{B}{R_0} \exp[j\beta x] \quad (21)$$

ここに、 R_0 は特性抵抗と呼ばれ、次式を満たす。

$$\begin{aligned} R_0 &= [m/2(\hbar\omega - U)]^{1/2} \\ &= \frac{\beta\hbar}{m} \end{aligned} \quad (22)$$

この量子現象としての井戸は、回路的にみれば位相定数と特性抵抗とで表されるから、通常は無損失線路の取扱いができる。ただし、特性抵抗と位相定数がエネルギーの関数となるということは無損失線路と異なるところである。量子現象としてみた場合、有効質量 m は正にも負にもできて、正の場合は電子の井戸を表し、負の場合はホールの井戸に相当するが、回路的扱いは同じである。

この量子井戸の式(5)で与えられる確率の流れとの関係を調べよう。式(11)の定義により、確率の流れ J は次のように表される。

$$J = \text{Re}[v^*(x,t) i(x,t)] \quad (23)$$

これは回路における有効電力を表していて、位置 x におけるエネルギーを表しているといえる。

3.3 障壁の等価回路

量子力学的に障壁になる場合は次のときである。

$$m(\hbar\omega - U) < 0 \quad (24)$$

このとき、伝搬定数 γ は実数となるので、減衰定数と呼ばれ次のように表される。

$$\gamma = \alpha > 0 \quad (25a)$$

このときの特性インピーダンスを求めると、

$$Z_0 = jm/\hbar\alpha = jX_0 \quad (25b)$$

となり純虚数である。したがって、ここにおける複素電力は無効電力のみとなり、有効電力で表されるエネルギーが伝送されないところである。すなわち、量子現象としての禁制帯にあたり、薄い禁制帯によってトンネル現象の生じる極めて重要な所である。

トンネル現象は量子力学特有の現象ではあるが、すでに回路理論で用いられている。すなわち、映像パラメータ法の遮断域あるいはマイクロ波回路のエバネッセントモードの区間であり、窓としてフィルタ構成に

用いられている。

この区間のエネルギーの伝送は縦続行列で扱われる。縦続行列は、 $x=0$, $x=l$ の2点間でポテンシャルおよび有効質量が一定の場合、次のように求まる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \alpha l & Z_0 \sinh \alpha l \\ Z_0^{-1} \sinh \alpha l & \cosh \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

上の縦続行列は減衰定数をもつにも係わらず、無損失回路となることに注意すべきである。また、 l を大きくすれば、 V_1 や I_1 がどのような値であっても、

$$\frac{V_0}{I_0} = Z_0 = jX_0 \quad (27)$$

となり、純虚数となる。この性質を用いて、後に固有関数の特徴を導く。

4. 共鳴トンネル現象

2つの量子障壁を用いて構成される対称2重バリヤ構造を用いると共鳴トンネル現象を作れることが知られている。ここでは、どのようにして共鳴トンネルが生じるかを示し、それを表すには確率の流れを用いるのが適当であることを示す。

図2には左からの入力 I として共鳴トンネルが生じているときの、(a)には確率密度 ρ を、(b)にはその確率の流れ J (すなわち、入射 $|A|^2$ 、および反射 $|B|^2$) を示している。

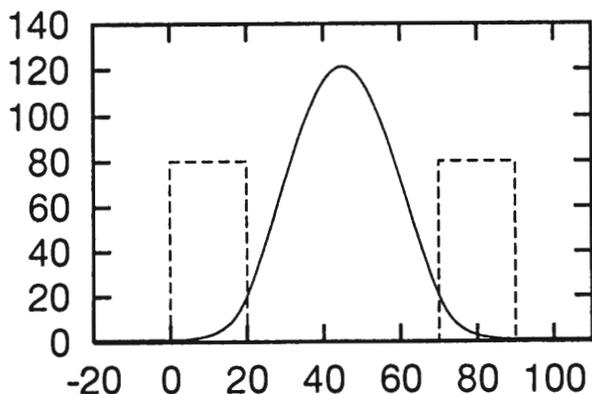
図2(a)の確率密度 ρ に対しては、2つの量子障壁に挟まれた井戸に閉じ込められた電子の存在確率を表しているというのが従来の解釈である。

一方、図2(b)における確率の流れに対する解釈は次のようにできよう。①右側の障壁における入力は、左からの $|A|^2$ であり、その反射は $|B|^2$ 、その透過は障壁の右側に1の出力として現れていて、 $|A|^2 = |B|^2 + 1$ ②左側の障壁における入力は二つあり、一つは左側の入力 I であり、もう一つは右側からの $|B|^2$ である。出力は左側にはなく、右側に $|A|^2$ が現れていて、 $1 + |B|^2 = |A|^2$

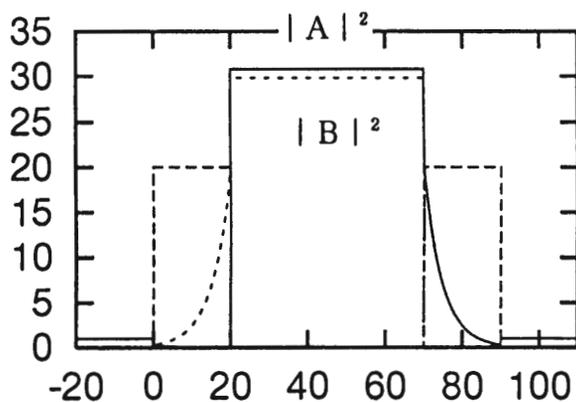
この解釈から、確率の流れがエネルギーの伝送の理論展開に利用でき、次のような特徴を表せる。

(1) 量子井戸においては、(入力および出力も含めて) エネルギー (有効電力) はすべて同じ値である。

これは共鳴トンネルが生じていないに係わらずすべてのエネルギーで成り立つ。共鳴トンネルが生じているときはどのようになっているかという点、



(a)



(b)

図2 共鳴トンネル現象が生じているときの、(a)確率密度、(b)確率の流れ。

(2) 入力には反射が生じないで、入力がすべて透過しているとき共鳴トンネルが生じている。

また、共鳴トンネルの形成については：一つの障壁に対する反射・透過は図2(b)における右の障壁でわか

るように、入力 $|A|^2$ に対して反射は $|B|^2$ 、その透過は障壁の右側に1の出力として現れていて、この対称2重バリヤ構造への入力は1であるから、全体として井戸内に $|A|^2$ をつくるには、少なくとも井戸の往復の長さの $|A|^2$ 倍のコヒーレントな波動が必要となる。

障壁の部分に目を移すと、そこには有効電力が入らず、障壁が一塊となって粒子の反射・透過に関係していて、この現象は障壁の時間的取扱には虚時間^[4]が必要になることを意味している。

5. 固有関数

確率の流れ J を用いると固有関数の定義が次のようになる。すなわち、固有関数を井戸内に作るには、左右を量子障壁で囲まれていなければならない、量子障壁のインピーダンスは純虚数である。したがって、固有関数を作っている井戸内の有効電力は零となる。その上で、波動関数が零でないものが求まるとき、その波動関数が固有関数である。

6. おすび

量子力学に用いられるシュレディンガー方程式を従来の物理学ではヒルベルト空間と結びつけるために、波動関数の絶対値の二乗を確率密度と定義しているが、これを導出する際に確率の流れを求めている。この確率の流れでエネルギーの伝送を考えることにより、(1)すべての井戸におけるエネルギー（有効電力）が同じ値であり、(2)共鳴トンネルは入力に反射が生じていないときであり、(3)共鳴トンネルを形成するにはコヒーレントな波動が必要で、(4)固有関数の定義を明確にできる、ことなどを示した。

【参考文献】

- [1] 桜井捷海：“コンピューターで学ぶ量子力学——数値計算による量子力学——”，裳華房（1992）。
- [2] 大谷，永井，鈴木，三木：“複素等価回路による量子効果現象の定式化”，信学論C-I，J73-C-I，No.11，pp. 683-689（1990）。
- [3] 永井，大谷，真田，任：“量子現象を用いた新しい物質設計への分布定数回路理論の応用”，電子科学研究，1，pp. 14-19（1993）。
- [4] S.W. ホーキング（林一訳）：“ホーキング，宇宙を語る”，早川書房（1989）。

タクタイルボコーダにおける触感の利用方法の研究

感覚情報研究分野 和田 親 宗

我々は聴覚障害者の読話補助を行う装置、タクタイルボコーダの改良研究を行っている。以前に音声スペクトルを振動パターンに変換しそれを電光掲示板のように指腹上を流すというスイープ呈示方式を考案しその評価を行ってきた。その際、触覚の疲労や残像感が生じることを経験した。ここでは、残像感などを避けるために点字のような凸点刺激をスイープさせて呈示する方式を提案し、簡単な評価を行った。その結果、振動に比べ凸点は残像感などが少なくなった。また振動と凸点を組み合わせることによって音声識別が容易になることもわかった。以上より触感を用いることはタクタイルボコーダにとって効果的であると考えた。

1. はじめに

我々の研究室では、以前から重度の聴覚障害者のための触覚を利用する読話補助装置（タクタイルボコーダ）の開発研究を行っている。我々の装置は 200 Hz の振動刺激を用いて、音声の時間・周波数変化パターン（音声スペクトラム）を指腹面上を右から左に移動させることによって呈示している（スイープ呈示方式）^[1]。この方式で単音節音声の識別率が向上したものの、指に痺れるような残像感・疲労感が生じることがわかった^[2]。ところで、点字を読む場合に疲れるという報告はない。このことから、点字のような振動ではない凸点刺激を指腹面上を移動させれば残像感・疲労感はなくなるのではないかと、さらに、振動と凸点をうまく組み合わせれば触感の違いによって音声の識別が容易になるのではないかと考えた^[3]。以下に、振動と凸点との比較について報告する。

2. 実験装置および方法

音声はマイク、8チャンネルのバンドパスフィルタ、A/Dコンバータを介してコンピュータに取り込む。ソフトウェアで子音部および母音のフォルマント部の強調処理を施した後、音声信号はD/Aコンバータ・増幅回路を経て触覚ディスプレイに伝えられる。触覚ディスプレイには4×8のマトリクス状に点字ピンが並んでいる(図1)。この点字ピンはプラスチック製で一つ

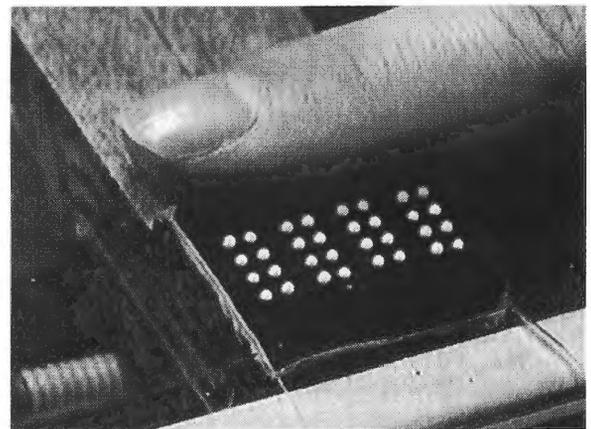


図1 触覚ディスプレイ

のピンが一つのピエゾ素子によって駆動される。右手人差し指の腹を図1の様に当てることにより、音声の高い周波数成分が指の先の方に呈示され、低い成分が指の根元の方に呈示されることになる。スイープ呈示方式を用いているので、横方向の4つのピンが連続して駆動することにより、刺激が指先上を右から左へと移動していく。

〈実験1〉最初に200 Hzの振動刺激と点字のような凸点刺激とで指先に残る残像感・疲労感がどの程度異なるかを調べた。まず、指先を疲れさせるために20 dB (Sensation Level) の刺激を4秒間スイープ呈示する(図2参照)。次にある時間経過後に指先にどの程度、残像感・疲労感が残っているかを数字で答えてもらっ

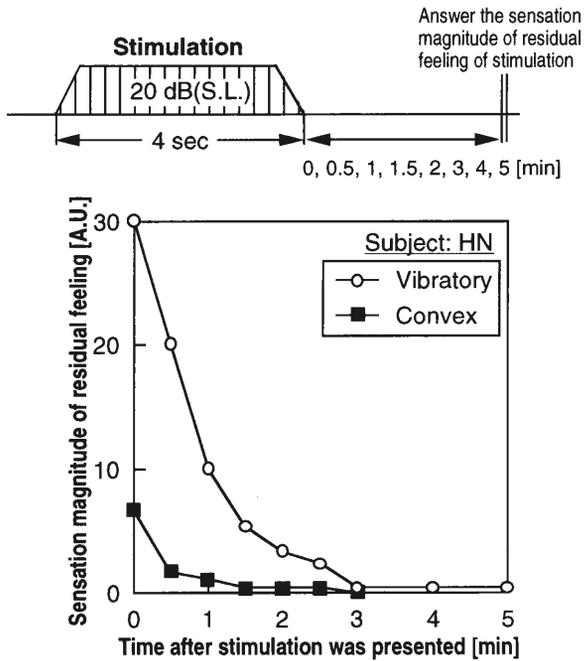


図2 振動刺激と凸点刺激が残像感・疲労感に及ぼす影響の比較

た。このときの条件は、残っている感じが大きいほど数字を大きくし、その感じがなくなったときは零を答えさせた。被験者は擬似的聾状態にした健聴者3名。

〈実験2〉次に、振動刺激と凸点刺激とを組み合わせることによる触感によって音声認識率が向上するかを調べた。組合せ方は〈子音部と母音部を振動で呈示〉、〈共に凸点〉、〈子音部を振動で母音部を凸点〉の三通りである(図3参照)。用いた音声は7つの単音節音声 /ku/, /su/, /tsu/, /nu/, /fu/, /yu/, /ru/ である。約30分練習を行った後に実験を行い、読話などの視覚情報を与えず触覚だけで7つの音声を識別させた。被験者は実験1と同じである。

3. 実験結果と考察

実験1の結果では被験者間で傾向が同じであったため一名の結果を図2に示す。実験2の全ての被験者の

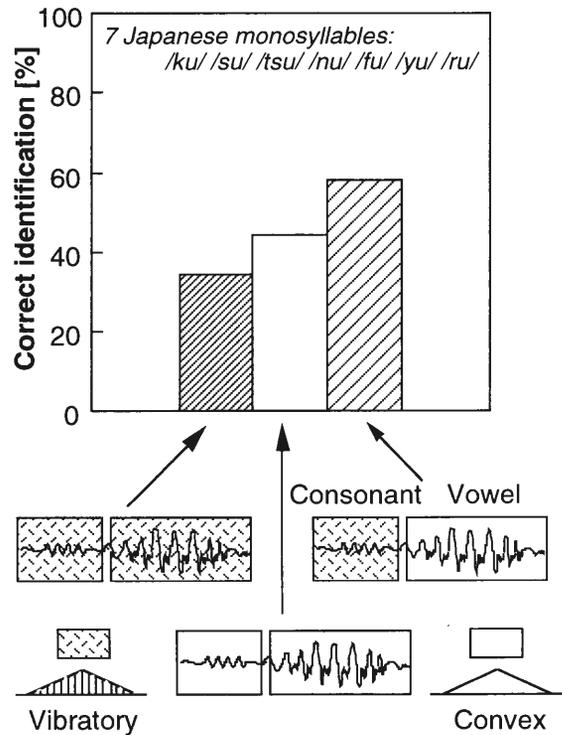


図3 異なる触感を用いた単音節音声識別の結果

識別率の平均を図3に示す。図2より振動の場合、凸点に比べ指に残る感じが大きくまた長い(振動の場合、5分経過後でも何かの感じが残っている)ことがわかる。このことから、タクタイルボコーダを日常で使う際には凸点を用いた方がよいと考えている。

また、図3より子音部を振動で、母音部を凸点でスウィープした場合、識別率が最も高くなった。さらに、子音部と母音部とで触感が異なるため子音部に着目しやすかったという報告もあった。

以上のことから振動刺激だけではなく、凸点刺激を組み合わせた触感で音声情報をスウィープ呈示することは、タクタイルボコーダでの音声識別を容易にし、また残像感・疲労感を減少させる点で効果的であると考えている。

【参考文献】

[1] C. Wada, T. Ifukube, S. Ino, and T. Izumi, 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 95-100 (1994)
 [2] Chikamune Wada, Shuichi Ino and Tohru Ifukube, T.

SICE, 32, 8, 1304-1306 (1996)
 [3] 和田親宗 伊福部達 井野秀一, 信学技報 HCS 96-25, 17-22 (1996)

後方多重散乱光の空間的偏光異方性

附属電子計測開発施設 岩井俊昭

高密度散乱媒質からの後方散乱光は、偏光方向によって「蝶ネクタイ状強度分布」と「クローバー葉状強度分布」を媒質と空気との境界面に形成する。このような空間的偏光異方性を有する強度分布は、低次散乱の寄与が支配的であり、入射光の偏光に対する散乱過程の偏光消散が不十分な状況において発生する。本研究では、この特徴的な強度分布の粒子径依存性をモンテカルロ・シミュレーションを用いて波動光学的に解析する。

1. はじめに

網膜^[1]、雲の水滴^[2]、なめらかな粗面^[3]、および微粒子水溶液^[4]からの多重散乱現象の偏光特性に関しては、単散乱には現れない新しい現象が発見されている。媒質と空気の境界面近傍では、入射光の偏光と平行な成分が「蝶ネクタイ状の強度分布」を形成し、垂直な成分が「クローバ葉状強度分布」を形成する。このような強度分布は、後方散乱光に寄与する散乱光成分のうち、低次散乱の寄与が支配的であり、入射光の偏光に対する散乱過程の偏光消散が不十分な状況において発生する。したがって、この現象を解析する問題は、単散乱理論と多重散乱で一般的に用いられている光子拡散理論の狭間に存在するものであり、現時点で有効な理論がない。

本研究では、このような多重散乱光の偏光特性をRayleigh-Debye散乱理論に基づくモンテカルロ・シミュレーションを用いて波動光学的に解析し、強度分布の散乱粒子径依存性を解析する。

2. モンテカルロ・シミュレーション

図1にシミュレーションで想定する実験系を示す。直線偏光化されたレーザー収束光が空気と散乱媒質の境界面の一点から入射され、媒質内における多重散乱を経て伝播したのち、後方に射出される。検光子の方向を入射光の偏光方向と平行および垂直に選択しながら、結像レンズを通して媒質の境界面上の強度分布を観測する。媒質内のランダムな多重散乱において、個々

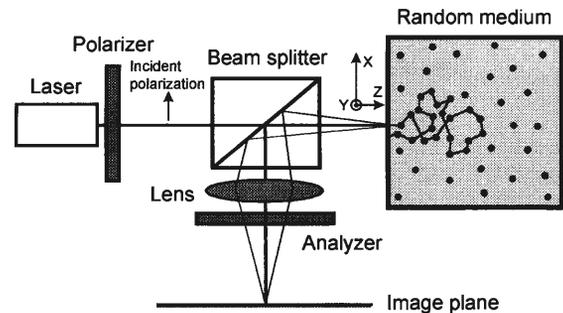


図1 想定する実験系

の散乱過程はRayleigh-Debye散乱を仮定し、偏光を考慮しつつ光線追跡を行う^[5]。最終的に出射面を出る散乱光強度のインコヒーレント和が強度分布になる。モンテカルロ・シミュレーションにおいては、レーザー光の波長は633 nm、散乱媒質は屈折率1.59のラテックス球の10%水溶液を想定した。

3. 空間的偏光異方性と粒子径依存性

図2は、粒子直径100 nmと400 nmのラテックス水溶液からの後方散乱光の平行偏光成分と垂直偏光成分のシミュレーション結果を示す。なお、図においてX軸とY軸は、ともに散乱媒質の平均自由行程 l で規格化されている。入射光の波長に比べて小さな粒子径に対して、 $r < l$ の領域に平行偏光成分と垂直偏光成分はそれぞれ楕円状とクローバー葉状の強度分布を形成している。粒子径が増加し波長に近づくと、平行偏光成分では入射偏光方向と垂直なY軸方向に沿って

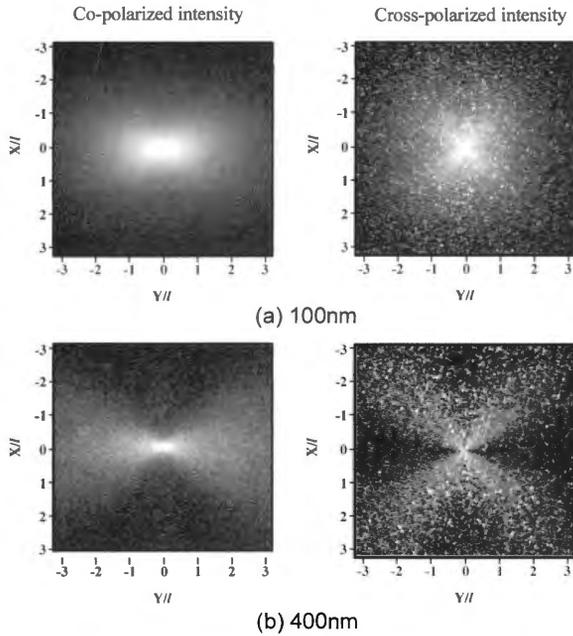


図2 後方多重散乱光の空間的偏光異方性

外側に広がり、蝶ネクタイ状の強度分布になる。一方、垂直偏光成分では、45度傾いた方向に沿って外側に広がり、クローバー葉状の強度分布になる。

図3の(a)と(b)は、蝶ネクタイ状強度分布とクローバー葉状強度分布のコントラスト変化のシミュレーション結果を示す。(a)図から、強度分布の中心からX軸に沿って離れるにしたがって、コントラストは増加し、 $r \cong \ell \sim 1.5\ell$ で最大となり、その後減少する。また、その値は粒子径にしたがって増加する。観測点が中心付近にあるとき、低次散乱による散乱光の平行偏光成分が発生確率は低いもののX軸上にも相当な強度で分布するため、コントラストは低くなる。観測点が中心から離れるにしたがって、X軸方向の強度が減少し、コントラストは最大値まで増加し、その後Y軸方向の強度が減少しコントラストも減少する。粒子径が増加すると、低次散乱の影響が減少し、Y軸上の全域にわたりX軸方向の強度が減少し、コントラスト値が増加する。一方、垂直偏光成分では、コントラストは中心で最大となり、観測点が中心から離れると、コントラストは単調に減少し、ほぼ0.05~0.1の値で一定値に漸近する。このようなコントラストの変化は、粒子径が増加すると一層顕著になる。これは、垂直偏光強度分布は、2次散乱の寄与が最も支配的であり、3次以上の散乱成分は極端にコントラストを減少させ

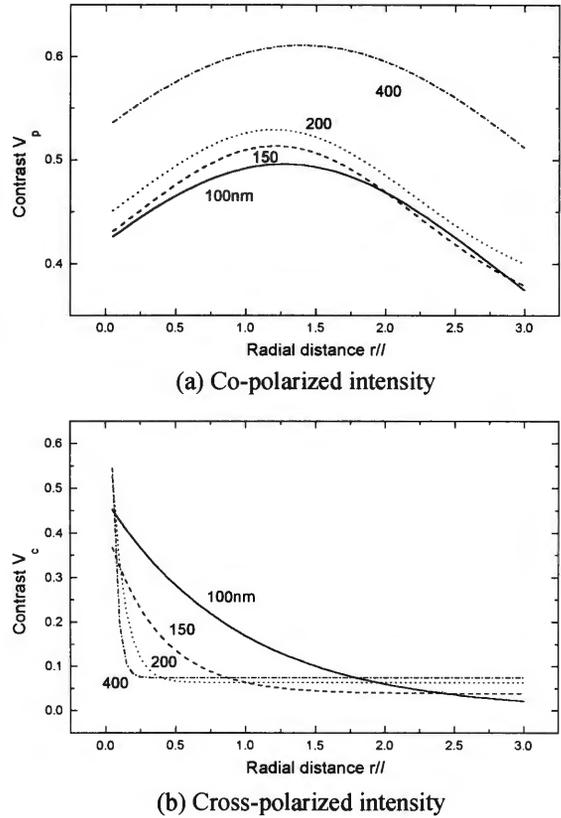


図3 蝶ネクタイ状強度分布とクローバー葉状強度分布のコントラスト特性

ること、および粒子径が増加すると低次散乱の発生確率が低下し高次散乱の発生確率が増加することに起因している。図2に見られるように、粒子径が波長に比べ小さいときは、中心付近には2次散乱から生じるはっきりした構造のクローバー葉状の強度分布が形成され、観測点が離れるにしたがって十分に偏光解消を起こす高次散乱によりコントラストの低い強度分布が形成される。粒子径が増加すると高次散乱が増加するので、中心付近の構造が消失しコントラストは急激に減少し、一定の低コントラストをとる。このように、後方多重散乱光の偏光異方性は、散乱粒子径に依存した散乱次数の発生確率および偏光解消によって決定されることが明らかになった。

4. 結論

本研究では、単散乱理論や光子拡散理論が適用できないような低次散乱で生じる後方多重散乱光の空間的偏光異方性について、モンテカルロ・シミュレーショ

ンを用いて検討した。その結果，平行および垂直偏光強度分布は，それぞれ特徴的な「蝶ネクタイ状強度分布」と「クローバー葉状強度分布」になることが数値シミュレーションによって示された。さらに，後方多

重散乱光の偏光異方性の発生は，散乱粒子径に依存した散乱次数の発生確率および偏光解消によって決定されることが明らかになった。

【参考文献】

- [1] B. F. Hochheimer and H. A. Kues, *Appl. Opt.* 21, 3811 (1982).
- [2] S. R. Pal and A. I. Carswell, *Appl. Opt.* 24, 3464 (1985).
- [3] E. R. Mendez and K. A. O'Donnell, *Opt. Commun.* 61, 91 (1987).
- [4] M. Dogariu and T. Asakura, *J. Opt. (Paris)* 24, 271 (1993).
- [5] T. Iwai, H. Furukawa, and T. Asakura, *Opt. Rev.* 2, 413 (1995).

ガウス型シェルモデル光源場の非整数次フーリエ面における諸特性

附属電子計測開発施設 吉村博幸

近年、フーリエ変換の一般化した概念である非整数次フーリエ変換を光情報処理へ応用する研究が盛んである。本研究では、部分的コヒーレントな光の場であるガウス型シェルモデル光源場の非整数次フーリエ面における特性を解析する。具体的には、非整数次フーリエ場の平均強度の広がり、波面の曲率半径、及びスペクトル偏移について、フーリエ変換次数、光源の規格化空間的コヒーレンス長、及びフレネル数依存性を明らかにする。

1. 非整数次フーリエ変換とは

フーリエ変換を一般化した概念として、1980年、Namiasにより非整数次フーリエ変換が導入された^[1]。近年、これを光情報処理に応用する研究が盛んである。

一般に、波長 λ の光の場 $\mu_0(\xi; \lambda)$ に対する非整数次フーリエ変換は次式にて定義される。

$$\begin{aligned} \mu_p(\chi; \lambda) &= \frac{1}{\sqrt{i\lambda f_1 \sin\phi}} \int \mu_0(\xi; \lambda) \\ &\times \exp\left[\frac{i\pi(\chi^2 + \xi^2)}{\lambda f_1 \tan\phi}\right] \\ &\times \exp\left(-\frac{2\pi i \chi \xi}{\lambda f_1 \sin\phi}\right) d\xi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで f_1 は使用するレンズの任意の焦点距離を、また $\phi = p\pi/2$ であり、 p はフーリエ変換の次数を表わしている。特に $p=4n-3$ (n は正の整数)のとき、式(1)は通常のフーリエ変換となる。

2. 非整数次相互スペクトル密度

非整数次フーリエ面における部分的コヒーレント場を記述するため、非整数次相互スペクトル密度 $W_p(x, \Delta x; \omega)$ を導入し、次式にて定義する。

$$\begin{aligned} W_p(x, \Delta x; \omega) &= \langle \mu_p(x + \Delta x/2; \omega) \\ &\times \mu_p^*(x - \Delta x/2; \omega) \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は統計平均を表す。本研究では、部分的コヒーレントな光の場として、その強度分布及びコヒーレンス度がガウス型の、いわゆるガウス型シェルモデル光源場を考え、その光源場の非整数次フーリエ面における特性について解析する。

3. ガウス型シェルモデル光源場の非整数次フーリエ面における特性

3.1 平均強度の広がり

図1において、非整数次フーリエ場の平均強度の広がり a_p (光源の広がり a にて規格化)のフーリエ変換次数 p 依存性が示されている。図1(a), (b), (c)は、それぞれフレネル数 $N_a (= a^2/\lambda_0 f_1)$ が0.1, 1.0, 10の場合の結果に相当する。また、図の実線、破線、及び点線は、それぞれ光源の規格化空間的コヒーレンス長 σ が0.01, 1.0, 及び100の場合の結果である。結果として、 N_a あるいは σ が1.0より十分に小さいとき、 a_p は p の増加に従い増加する。一方、 N_a 及び σ が1.0より十分に大きいとき、 a_p は p の増加に従い減少する。

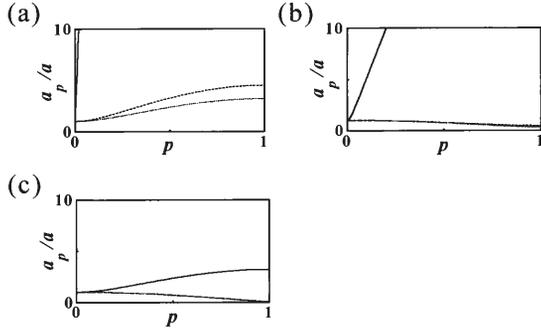


図1 a_p の p 依存性

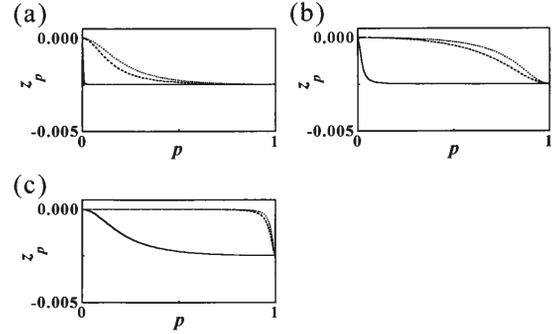


図3 Z_p の p 依存性 ($x=0$)

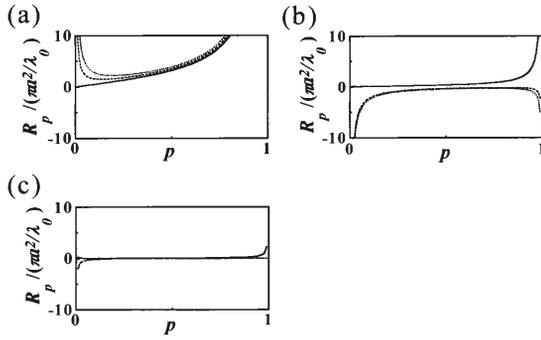


図2 R_p の p 依存性

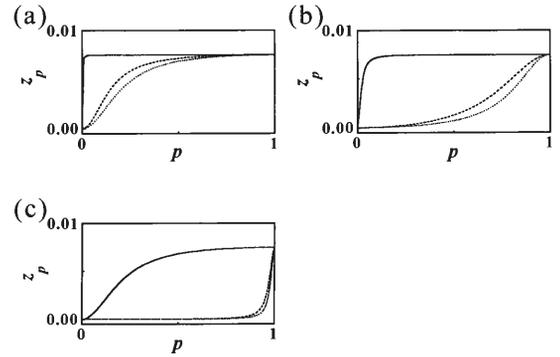


図4 Z_p の p 依存性 ($x=a_p(\omega=\omega_0)$)

3.2 波面の曲率半径

図2において、非整数次フーリエ場の波面の曲率半径 R_p の p 依存性が示されている。図2(a), (b), (c)はそれぞれ $N_a=0.1, 1.0, 10$ の場合の結果に相当し、図の実線、破線、点線はそれぞれ $\sigma=0.01, 1.0, 100$ の場合の結果に相当する。結果として、 N_a あるいは σ が1.0より十分に小さいとき、 p が増加するに従って、 R_p は減少し、極小値をとり、そして増加する。一方、 N_a 及び σ が1.0より十分に大きいとき、 R_p は負の値をとる。また、 p が増加するに従って、 R_p は増加し、極大値をとり、そして減少する。

3.3 スペクトル偏移

非整数次フーリエ場のスペクトル $S_p(x; \omega)$ の光源スペクトル $S_0(\omega)$ からの偏移を、以下に示す相対スペクトル偏移量 Z_p を用いて解析する。

$$Z_p = (\omega_0 - \omega_p) / \omega_p \quad (3)$$

この式において ω_0 及び ω_p は、それぞれ光源及び非整数次フーリエ場のピーク周波数を表す。

光源スペクトル幅 Γ_0 が $0.05\omega_0$ の場合、非整数次フーリエ場の光軸 ($x=0$) におけるスペクトル偏移を解析した結果を図3に示す。これより、スペクトルは、 p が増加するに従って、高周波数側に偏移(ブルーシフト)し、通常フーリエ面 ($p=1$) において偏移量は最大となることがわかった。また、 N_a 及び σ が減少するに従って、スペクトルは急激に偏移する。

一方、図4に、光軸から $x=a_p(\omega=\omega_0)$ だけ離れた点におけるスペクトル偏移を解析した結果を示す。これより、スペクトルは、 p が増加するに従って低周波数側に偏移(レッドシフト)することがわかった。また、 N_a 及び σ が減少するに従って、急激に偏移する。

4. 結論

部分的コヒーレントな光の場であるガウス型シェルモデル光源場の非整数次フーリエ面における諸特性について解析した。今後は、この諸特性を利用した光情報処理システムの構築が課題である。

【参考文献】

- [1] V. Namias, "The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics," J. Inst. Math. Its Appl. 25, 241-265 (1980).

北海道大学電子科学研究所公開シンポジウム報告

題目：脳時計

会場：北海道大学学術交流会館

招待講演会：「神経細胞から脳へ」(午前の部) 平成7年12月14日(木)

脳の計測

公開討論：「脳における物理信号発生メカニズム」

— 心の研究へのアプローチ —

趣旨：

脳世紀と呼ばれる21世紀に向けて、科学技術の進歩は人間の脳の形質のみならず、その高次機能(精神活動)までもを計測可能にしようとしている。本シンポジウムでは、最初に人間の脳の解剖学的形質と高次機能に関し、臨床を通じて深く理解しておられる先生方に、「神経細胞から脳へ」と題して基講演頂く。さらに、科学史における脳研究の発展(け)に関し、高見寛雄から特別講演頂く。

次に、心に立入った機能的な計測法を用いて新しい知見を得つつある先生方を中心に、最先端の「高次脳機能の計測」の実態についてさらに講演頂く。

このようにして、脳の本来と機能計測全体を鳥瞰した後に、本題である「脳における物理信号発生メカニズム」についての議論へと入って行く。現在、高次機能による信号発生メカニズムは不明な点も多く、いくつもの矛盾/対立した議論を生んでいる。これらの問題点の発起を各機能的計測法ごとに行ったあと、学外の先生方と電子科学研究所の教授陣を交えて徹底的に討議する。「心は物理信号を発生するか」という本質的な問いかけをも、広くフロアの方々とご一緒に議論する。

プログラム

12月14日(木) 10:00-12:00

「神経細胞から脳へ」 — 脳の神経ネットワークを代表 —

基講演者：

並列分散処理研究分野 小泉 英明

司会：小泉英明教授

量子計測研究分野 栗城 真也

1. 脳と形質

2. 脳と機能

12月14日(木) 12:30-14:30

特別講演：

司会：高見寛雄

宇宙から脳へ

小 田

純 — 東京大学名誉教授

北海道大学電子科学研究所公開シンポジウム
〈概要とプログラム〉

題目：脳の計測 — 心の研究へのアプローチ —

会場：北海道大学学术交流会館

招待講演会：〈神経細胞から脳へ〉（午前の部）平成7年12月14日（木）

〈高次脳機能の計測〉（午後の部）

公開討議：〈脳における物理信号発生のメカニズム〉 12月15日（金）

趣旨：

脳の世紀と呼ばれる21世紀へ向けて、科学技術の進歩は人間の脳の形態のみならず、その高次機能（精神活動）までも計測可能にしようとしている。本シンポジウムでは、最初に人間の脳の解剖学的形態と高次機能に関し、臨床を通じて深く理解しておられる先生方に、〈神経細胞から脳へ〉と題して基調講演戴く。さらに、科学史における脳研究の位置付けに関し、高い見地から特別講演戴く。

次に、心に立入った画期的な計測法を用いて新しい知見を得つつある先生方を中心に、最先端の〈高次脳機能の計測〉の実際についてさらに講演戴く。

このようにして、脳の本質と機能計測全体を鳥瞰した後に、本題である〈脳における物理信号発生のメカニズム〉についての議論へと入って行く。現在、高次機能による信号発生のメカニズムは不明な点も多く、いくつもの矛盾／対立した議論を生んでいる。これらの問題点の提起を各機能計測法ごとに行ったあと、学外の先生方と電子科学研究所の教授陣を交えて徹底的に討議する。〈心は物理信号を発するか〉という本質的な問いかけをも、広くフロアの方々とご一緒に議論する。

プログラム

12月14日（木） 10：30—12：00

〈神経細胞から脳へ〉 — 脳の神経ネットワークと代謝 —

基調講演：

司会：小泉客員教授

1. 脳と形態
2. 脳と機能

久留 裕 順天堂大学名誉教授

小暮 久也 東京医科大学客員教授

（1件 40分 質問5分 計1時間半）

12月14日（木） 13：30—17：30

特別講演：

司会：朝倉所長

宇宙から脳へ

小田 稔 東京大学名誉教授

〈高次脳機能の計測〉 ― 精神活動を画像で見る ―

講演：

司会：栗城教授

1. 蛍光イメージング

工藤佳久 東京薬科大学教授

2. 脳磁界計測 (MEG)

佐々木和夫 京都大学名誉教授

司会：田村教授

3. ポジトロン断層撮像 (PET)

菅野巖 秋田脳血管研究所研究部長

4. 機能的磁気共鳴描画 (fMRI) と近赤外脳機能マッピング

渡辺英寿 東京警察病院脳神経外科医長
(1件 40分 質問5分 休憩15分 計4時間)

12月15日(金) 10:30-12:15

パネル討議 〈心は本当に計測可能か〉

1. 問題提起：

司会：栗城教授

蛍光イメージング, MEG, PET, 光CT, fMRI

工藤佳久, 栗城真也, 菅野巖, 田村守, 小泉英明

(1件 15分, 計1時間15分)

個別討議

(1件 6分, 計30分)

12月15日(金) 13:30-15:00

2. 総合討議：計1時間半 (招待討論者を含む)

司会：小泉客員教授

討議予定項目

1. 精神活動と神経賦活の連関
2. 空間分解能と時間分解能の限界
3. 物理学的分解能と生理学的分解能の差異
4. 神経活動と微小循環系との相関
5. 微小循環系のマイクロ/マクロ制御機構
6. 脳における解糖系の発動機序

I. 基調講演

冒頭に二題の基調講演が行われた。

最初に、〈脳と形態〉と題し、脳の機能計測の基礎になる神経系ならびに循環系の形態について述べられた。脳の機能計測はこのようなしっかりした基礎に基づいて開発されるべきであること、形態の知見なくして機能が語れないことを誰もが認識させられた優れた講演であった。特に、人の脳は哺乳類の進化の最上段にあり、これまでの進化の過程の知見が、脳の理解に本質的であることが具体例をもって示された。また、大脳皮質の機能を議論する際に、大脳皮質の機能を支える別の場所、あるいは回路があって初めて皮質の機能が成立する事実が実例並びに症例をもって示され

た。これらは、今後の脳精神科学の研究に基本的な指針を与えるものであった。

次に、〈脳と機能〉と題し、〈心〉の成立条件、成立過程を含めて、脳機能に関する基本的事項が述べられた。また、〈心〉を正面から研究するに当たっての基本的な心構えについても述べられた。

奥の深い内容が、異分野の研究者にも理解できる言葉で示され、やはり、類い稀な講演となった。

久留：脳と形態

大脳、あるいは大脳皮質の機能の計測には、さまざまな基本となる形態的な構造の理解が必要。あるものは、既に解明され、あるものは研究途上。

まず、脳の大血管系から見て行く。脳血管の動脈造影したものを、左右の半球について重ねてみる。多くは、左右同様の走行をとるが、一部、全く異なっている部分も存在する。例えば、頭頂葉の一部である。右では最初から太いものが前後を引受け、左では細いものが別々に前後を引き受けている。中心後回付近の活性化時に、血流の変化領域は左右でパターンが異なるかも知れない。

大脳皮質にはいると、ほとんどの動脈は皮質内の6層の範囲内で終わる。典型的には、動脈は榎の木を倒立させた形状の走行 (Inverted Oak)、静脈は榆の木を倒立させた形状の走行 (Inverted Elm) の形状を呈する。したがって、活性化によって血流が増大すると、6層の皮質内の灌流域全体が同時に血流増大を受ける。

大脳皮質の血管分布。G 1 : 10 μm , G 2 : 15–25 μm , G 3 : 15–30 μm , G 4 : 30–40 μm , G 5 : 30–75 μm , G 6 : 50–240 μm , 数の比は次の通り。

G 2, 3 > G 4, 5 >> G 6, (G 6 は髄質内まで到達、しかし、1/5 以下)

デュベルノアは大脳皮質コラム構造と動静脈パターンは相関するとしている。いくつかのパターンがあるが、典型的には、太い血管がコラム中心に配置し、細い血管が放射状に配置されている。このパターンからすれば、最近の fMRI でも、コラム機能にかなりカップルした血流増加を捉えている可能性がある。

髄質の中では、方向性をもって走行する。脳室に向けて走行。これらは 100 ミクロンの小動脈 (アルテリオール) であり、顕微鏡的にも特徴を持った特別のものである。これは、インターナルエラスティックメンブレンが無い。即ち、毛細管の替わりができる。事実、このアルテリオールの周りには毛細血管が無い。

インストランガータイプの痴呆では、髄質が一部消失する。これは、アルテリオールの壁が変成し、毛細管の役目ができなくなると、周りの髄質が壊死することに起因すると考えられる。

髄質には、髄質静脈と呼ばれる沢山の静脈が存在。

髄質の役目は髄鞘化された神経繊維の跳躍伝導による信号伝達である。この伝導には髄鞘の周りのイオン環境が極めて大事。イオン環境を安定させておかないと伝導が速く保てない。高次機能の処理時に信号が領野間を駆け巡るのでこれは極めて重要。

髄膜腫の手術後、一時失明、その後完全に回復した例がある。これは手術によって髄質に静脈うっ滞のようなものが生じ、それが消滅するに従い視覚連合機能が回復したと考えられる。

運動野は中心溝の内側に位置するので、活性化部位が溝の内側に存在することは十分有り得る。中心溝は尾長猿のレベルで出現。溝の存在によって、連合繊維の長さに差が出る。即ち、機能と関係が生じる。進化からみると、手の形が変わり、足との役割、能力が大きく違ったあたりから、中心溝、3a が出現。

視覚第5野で運動視を司るが、成長過程にて、この髄鞘化が早い事実も興味深い。

記憶障害のなかでの道順記憶障害と回復過程は興味深い。記憶のループの繊維の一部の障害と回復過程に対応すると考えられる。瞬時 (直接) 記憶は障害されていなかった。

投射繊維は錐体路で代表され、大脳と其れ以下の神経中枢を結ぶ。交連繊維は脳梁で代表され、左右の大脳半球を結ぶ (約 1 億 5 千万本の有髄繊維)。連合繊維は長短あり、長連合繊維は 5 種類、あるいは 6 種類ある。短連合繊維は無数にあり、例えば脳回を結ぶ。

ピック病の症例では前頭葉、あるいは側頭葉の皮質が犯される。これら皮質からの出力は錐体細胞で、脳梁繊維もそれから出た軸索と髄鞘にほかならない。従って、犯された皮質が痩せるだけでなく、症例の MR 像にみられるように、脳梁も薄くなる。

辺縁脳が進化により相対体積を減少したと考えられる。辺縁脳は、例えばかわうそで大きく、嗅覚に先導される動物の行動様式全般を司る脳と言え。鼠の脳の断面をみると、嗅覚系の最後に記録 (記憶) システ

ムとして、海馬があるように見える。これは、種の保存と個体維持のために、快感、不快感により、行動を再現するために記憶機構があるように見える。嗅覚系は先天的にプログラムされている。それに付随する行動も脳の中に、開発されるべく仕組まれている。実体験の記録が海馬を中心としてなされる。ヘルペス脳炎にて、側頭葉前部が全て破壊された患者では、食物と排泄物の区別がつかない。脳弓の一部に小さな膿腫がある症例では、時々、記憶障害が起きる例がある。

一般の記憶障害では、抽象的な事象の記憶障害が取り上げられるが、そのメカニズムについては、まだ、これからである。言語にアーティキュレーションは重要。文節をはっきり区切って、さらにつなげると、初めて意味へ進展する。音素を形成するには、音の範囲を限定しなくてはならない。

人の脳は、哺乳類の進化の最上段にある。この事実を常に認識する必要がある。

一般に大脳皮質の機能を議論するが、実際にはそれを支える場所、あるいは回路があって、その機能が成立する。

質問：四方（数学）

代替について。

回答：一次投射繊維では、回復が悪いが、連合繊維についてはほとんど代替可能。

質問：四方

先程の失明のケースにおける機能回復順序について、もう少し詳細を知りたい。

回答：手術直後、両眼失明、即、静脈うっ滞の治療、当日夕刻に原色の識別可能に、二日目、近似した色の識別は不安定、動きのあるもの、長いものは認識可能、三日目、文字の認識可能、左右視野ずれており、意識して補正が必要。認識に時間がかかり疲れる。日々に回復し6日目にはほぼ回復、ただし左下1/8程の視野欠損が残ったが、後に完全回復。

質問：諸富（心理学）

ヘルペス脳炎はなぜ側頭葉に多いか。

回答：ヘルペス脳炎では、ウイルスが顔面から静脈を伝って侵入する。頭部静脈には弁が無いので簡単に逆流して脳に侵入する。

小暮：脳と機能

〈心〉とはどこまで分かっているかは疑問である。今日は、〈心〉の発生と成立する過程を、臨床神経学の立場からそのヴィジョンのような形で述べる。脳の重さは1,400g、体重の2%程度。しかし、代謝からみると、血液は約800cc/minで全血液の16-17%が、脳に送られる。脳で消費する酸素は50ml/minで、全身の20%である。エネルギー的には脳は20Wの臓器である。グルコースについては80mg/minで、肝臓が生成するグルコースのほとんど全てを使用。

かつては、脳はグルコースのみ使用とされたが、必ずしもそうではない。例えば、熊は冬眠時に、皮下脂肪をベータ酸化にて使用している。乳児も同様。脳の解糖系では、20%程度が使用されずにラクテートとして残り、この分は脂肪の方から入ってくる。

人間がよりよく生きて行くために、環境が変わる度に対応するのが脳の仕事。そこから、〈心〉が発生する仕組みを述べる。〈心〉は起きている状態から発生する。眠っているときには存在しない。〈心〉が発生するためには、まず、脳幹網様体から全皮質へと覚醒信号が発せられる。その次に感覚の記憶に基づいた判断機能が働く。次に、認識と位置付けが行われる。姿勢制御の小脳が呼び覚まされ、同時に前頭葉の運動の記憶が呼び起こされて反応とその形を決め、行動に至る。従って、〈心〉を議論するには覚醒が前提である。

代償作用が脳の本質、一部の機能を人工的に作っただけでは脳ではない。

環境の変化に対応して、記憶に基づいて近未来の好ましさを予測する。これが情緒であり計測は極めて難しい。心は奥行き、深さをもって語られるべきであろう。ただし、〈心〉の定量化には大賛成、計測できなければやはり科学でない。

質問：小泉（計測科学）

意識と〈心〉という言葉の関係について

回答：〈心〉を成立させる意識の水準，覚醒状態の水準がある。例えば，深昏睡では刺激に対応しない。しかし，強い刺激に対して，何らかの対応が発生したならばそれが意識である。心を囲い込むことのできる水準の意識，心を成立させられる覚醒水準が必要である。言葉は〈心〉に社会性を持たせるために必要。

質問：四方

シミュレーションに自分自身が入っている矛盾についてどのように考えるか。

回答：医学の立場では，シミュレーションに自分自身が入っていなければ都合が悪い。シミュレーションのなかで，汗がでたり身体の反応がでることもある。パーキンソン病の治療薬では幻覚がおきる。

質問：太田（精神科）

脳はコンピュータと同じように感じる。視覚などにより状況を第一次分析し，思考，感情，記憶などと結び付けている。記憶でも特に長期記憶が重要。睡眠のなかでも〈心〉は生きている。特にREM睡眠などでは，完全に脳は生きている。長期記憶と感情反応は生きており，これらをきちんと計測，分析して行くことが〈心〉の研究につながる。

自分を離れる経験。宗教体験がこれに近い。自分を乗り越えることができるのが人間の脳の素晴らしいところである。幼児から老年者への〈心〉の成長も重要である。幻覚，妄想は電解質異常のこともあり，脳の一部が引き起こすこともあれば，全体によって引き起こされることもある。

回答：REM睡眠の件は，胎児にも長く見られるし，それはそれで良いが，宇宙から自分を見るような体験は幻覚であり妄想である。そのような議論は科学ではない。コンピュータについては脳に近いものもあればそうでないものも作れるので一概には言えない。

II. 特別講演

小田：宇宙から脳へ

まず，物理学者の自然観を紹介。18世紀の決定論（ラプラスの手帳，あみだくじ）。量子力学の出現により，あみだくじの途中でさいころを振るような自然観が現われた（ネオディターミニズム）。しかし，この25年来，ローレンツの悪魔が慌てるようなことが起きている。初期条件をきちんと決めてやっても，先に行く結果がとんでもなく異なってくることもある。カオスである。さらに複雑な系の中に本質があると思われるような問題が出てきた。昔は真理は単純明快なものとも誰もが思っていたが，複雑系，非線形系に至ってこの考えを変えざるを得ないようなことになってきた。脳は，複雑系，非線形系の最たるものでないかと思う。

従来，物理学者は脳をコンピュータとして，情報科学の分野から扱ってきた。しかし，脳の物理学的変化を見ることが出来るか。精神活動，すなわち〈心〉が動くのは，論理，数学，言語，芸術，怒りなどに伴っている。あるいは，〈心〉の病に伴っている。このとき何か物理的变化が起きるだろうか，そして，それが物理計測可能であろうか。

特定の顔，あるいは形態素に特異的に反応するコラムが理研チームにより見いだされた（ネイチャーの表紙）。ライクルのPETの仕事によれば脳活動と血流が関連していることが示される。血流，Ca移動，レーザーなど何を使い，何を見れば良いかを検討中である。ミュオニックアトムによる計測法も検討中である。画像再構成法として，すだれコリメータによるフーリエ変換法がある。これが，脳を覗くフーリエ顕微鏡となる可能性がある。ラザフォードアップルトンにて実験準備中。

SPring 8などの単色性の良いSOR光を用いて，よう素の吸収端付近の微分測光により血管の高分解撮影ができる可能性がある。フェーズコントラストによる造影も，可能かも知れない。

質問：四方

先生のすだれコリメータ，つまりフーリエ変換法はレンズの使えない多くの他の分析法にも展開できると思うが，そのあたりはいかがなものか。

回答：それは，四方先生にお考えになって戴きたい。物理学者が数学が得意と思ったら大間違で，やはり数学者にきちっとやって戴くのが最も良いと考えている。

III. 講演

基調講演，特別講演に引き続き，実際に最先端の脳機能計測に携わっている先生方からそれぞれの分野についての現状を講演戴いた。どの先生も，本当の意味での最先端を，自ら開拓されておられる方々であり，いずれの講演も国際会議の基調講演に匹敵した。新たに生まれつつある非侵襲的な高次脳機能計測の最先端については目を見張るものがあった。また，数々の挑戦的な新しい試みも紹介された。いずれもが，猿を用いた長年に渡る地道な研究結果を基礎とした人間への飛躍であり，実験に用いられた心理学的パラダイムも厳密に吟味されたものが多かった。〈心〉については誰にでも議論ができるため，とかく上滑りの議論も多いが，今回は例外的に全て実験事実に基づいた，格調の高い議論が展開された。

佐々木：MEG

まず，神経細胞が観測可能な磁場を発生する機序について述べられた。実際には大脳皮質錐体細胞が磁場を発生すると考えられる。ほかの神経細胞は電流の方向が一方向に並ばなかったり，電流の発生位相が揃わなかったりするために塊状磁場を発生しにくい。錐体細胞にしても，活動電位 (Action Potential) ではなく興奮性後シナプス電位 (EPSP: Excitatory Post Synaptic Potential) により磁場が発生する。錐体細胞についても，限局した空間内に複数あるいは互いに逆向きにダイポールがあると互いに相殺して観測困難となる。従って，MEGで観測できる神経活動は大きく制限されている。(逆に，問題が簡素化されているとも言える。) 脳波と比較して大きく有利な点が

ある。頭蓋骨は電気抵抗が脳組織の数10倍から100倍，そして脳脊髄液は電気抵抗が脳実質の4分の1から5分の1である。頭蓋骨は絶縁効果，脳脊髄液は短絡効果を引き起こす。全てが球状なら補正可能であるが，脳脊髄液は大脳両半球の境と脳溝に入り込んでおり，実際には正確な補正が困難である。従って，磁場による観測が有利となる。

猿で長年研究してきたノンゴーパーポテンシャルはブローカの領野の少し前側に在る。前頭連合野の中心部(中前頭回，37野)付近である。ノンゴーパーポテンシャルは止めるという判断に基づく抑制によって生じる信号である。運動野では運動の前に準備電位が観測されるが，実際の運動は0.2—0.3秒で反応する。ノンゴーパーポテンシャルはそれより早く出る。ノンゴーパーポテンシャルには良い訳語がないが，止事成就狒犬というのが日本の神社にあるので，〈止事電位〉というのが良いかもしれない。

また，事象関連電位に，Frontal Mental Theta Wave (Fm θ) というのがある。暗算，音楽の想起など抽象思考の際(外部入力がないとき)に前頭葉に発生する。37野の前あたりに発生するセータ波である。通常，覚醒時(目を開けている時)はベータ波(13—25 Hz)が観測される。リラックス時はアルファ波(10 Hz)が出現する。居眠り時はセータ波(5—7 Hz)，深く眠る時はデルタ波(数 Hz)が出現する。このセータ波が普段でも観察できることがわかった。5.5 Hzにピークがあり，前頭葉に集中している。

前頭葉から思考の指令を送出していると考えられる。計算(暗算)と，このセータ波も関係している。ローランドによるPETでも，やはり暗算時に前頭葉に血流増大が認められている。暗譜を思い出す時には，特に複旋律の場合に在る。歌曲のような短旋律ではでない。ヨガについても，セータ波とデルタ波のバーストを観測している。

高次機能とは何かについては，別紙のように考えている。精神活動と神経活動とを，丁寧に一対一対応を付けて行くことが，〈心〉の研究のアプローチと考えられる。この，相関をいかにとるかが脳精神科学，

ポッパーのブレイン-マインドプロブレムということであろう。脳死とは、物質とことなつた〈心〉の死を意味する。人間の内省、そして言語によって外部世界と関連付けられる形而上（主観的、観念的）と形而下（物質変化）の二つの事象をどうやってできるだけ正確に相関をとるか。これに、非侵襲的脳機能計測が本質的にかかわってくることになる。

質問：小暮（神経内科）

右脳の障害で、言葉が感情的な韻律を失い非常に平坦になる症候がある。今の話でなる程と思ったが、そう考えて正しいか。

回答：発語はブローカで左脳だが、感情的なものはどうしても優位半球でない右脳からでる。しかし、右脳のどの部分かは特定できていない。俳優を招いて感情についての実験も現在行っている。

質問：久留（神経放射線）

禅の場合、日本には三宗ある。特に臨済宗の場合、公案を考えて座禅を組むので他と違うのではないか。どの宗派か。

回答：大徳寺である。（臨済宗）他の宗派はまだやっていない。

質問：大田

被検者の連想などを、どのようにコントロールしているか。何を考えているかをどうやって知るのか。

回答：確かに、主観的な観念過程をどう確認するかは大変難しい問題だ。言葉を信用するしかない。あるいは、自分が被検者になるのが一番良い。

質問：諸富

ノンボー電位の時に、筋電図はどうなるか。

回答：止めようとするところで少し出ることがある。

菅野：PET

PETのSPECTに対する本質的な違いは、ポジト

ロン消滅の現象により、一対のガンマ線放出を観測できる点であり、より精度が高い。通常の脳機能マッピングに使用する、 H_2O (15)の計測では、半減期2分のもを約5cc静脈に注射する。定量測定の場合のみ動脈血の採血を行う。PETの計測では、2-compartment modelを前提の仮設として採用している。すなわちBlood brain barrier (BBB)を介したPlasmaとBrain tissueの間で、次式が成り立つとする。

$$dCb(t)/dt = K1Ca(t) - K2Cb(t)$$

これは、トレーサモデルが成立する条件である。さらに、次の条件が成り立たねばならない。

- 1 トレーサ量（生体系に無影響の範囲なること）
- 2 生体の定常性（モデル定数が一定）
- 3 測定の定量性（測定誤差の最小化）

実際の観察例では、物語を聞いているときと白色雑音を聞いているときの活性化領域の差、フリッカーによる視覚刺激、発話（ブローカ）、右指の運動による対応機能領域の活性化などである。暗算時にも、左半球の角界の活性化を観察した。

PETにおいては計測の客観化が重要である。まず、脳の形の基準化（規格化）である。これにより、脳の形の違った被検者グループを統計処理できる。スタンダードブレインは特に重要性である。

応用として、アルツハイマーの診断にも使用できる可能性がある。物語を聞いているのにアテンションが効かないケースなどが実際に観察されている。また、全脳の機能相関をとることも重要なテーマである。所謂、ニューロナルコネクティビティースタディである。

機能領域の活性時には、一般に活性化領域の血流量が増す。Hypo-capnia, Normo-capnia, Hyper-capniaの状態にても、活性化領域の血流量は増し、かつ、増加量は基底値に比例する。これは、菅野らによって初めて明確に指摘された。この結果は、血流量増大はエネルギーディペンデントでない可能性を示唆

しており、重大な意味を持つ。従来、PET の分野では、このようには考えてはいなかった。しかし、過呼吸時のデータにおいて、Heper-capnia から Norm-capnia の状態を正規化して差し引くと、肺筋の運動野の活性化が実際に観測された。正規化しないと、運動野は逆に抑制される結果が観測される。

一方、血流についてはグローバルな変動も大きく、10%/10 分程度の自然な変動がある。マイクロにもこの変動は同じである。この点には注意が肝要である。

将来、デュアル PET にて心臓の血流量を同時計測すると、動脈採血は不要となる。病態生理化学と脳神経回路網、即ち、PET によるマイクロとマクロの脳の観察は脳神経科学にとって不可欠であろう。

質問：小暮

代謝と血流が関連しないと言うのは、何とも受け入れ難い。実験はそのとおりに違いないので解釈の問題になると思う。以前、エネルギーデマンド（消費）を調べたことがあるが、hypo-capnia でも hyper-capnia でも下がる。つまり、カーブはドーム型となる。代謝要求量が減っても血流量は増えるというところまでは同じである。その先が異なる。

回答：今、自分自身、脳の血流とは何かが分からなくなってしまっている。しかし、局所的にコントロールされるメカニズムを見て行きたいと考えている。そこが一番アンノウンの点である。

質問：栗城（電子工学）

活性化を見るためには、血流量で正規化した後で引算しないといけないということか。

回答：そうだ。水を使ったアクチベーションスタディで、10 数例について、10 分おきに 6 回計測したことがある。そのときのベースラインの変動は 10% 程度。場所によってもこの変動は変わらない。局所とは別に、全体でコントロールしている機構があるということだ。

質問：田村（生化学）

生化学の立場からは非常に不思議である。その程度の

神経活動で酸素が非常に足りなくなり、予め血流を増やすということが基本的な機序とは思えない。先ほどのデータでは、弱年者でタスク時に血流が大幅に増え、高齢の人で血流がそれほど増えないケースもあった。これからしても血流がエネルギーのために増えているとは思えない。タスク時に、血流が絶対に増える、あるいは増えなければならないというのは考えなおさねばならないのではないか。

回答：酸素が本当に要求されているか見直さなければならぬ。タスク時に血流が 3-4 割増えるのは、事実として受け入れられている。しかし、酸素は 8% 程度。エネルギー要求が数% 程度で、そんな血流の増加がいのかなと感じている。しかし、オプティカルイメージングで、還元型のヘモグロビンによると思われる信号が出ていることから酸素が使われていると考えた方が自然だが。

田村：その辺が、一番面白いところでは。

小暮：酸素飽和度を計ったら良いのでは。

菅野：酸素飽和度は PET では計れない。酸素は Fox が報告したように計れる。

工藤：蛍光イメージング

電気生理学では捉え切れないものがある。NADPH など、呼吸の酸化還元にてでくるような自家蛍光 (auto-fluorescence) を発する。近赤外吸収によるヘモグロビン、チトクロームの計測もある。イントリンジック（内因性）の信号の発生原因として次の事項が考えられる。

1. Ion flow
2. Metabolic changes in redox level, NADH, NADPH, Oxygen saturation level of hemoglobin, Redox level Cytochromes
3. Blood volume change
4. Hemoglobin absorption
5. Water movement
6. Expansion

7. Contraction of extracellular space

現在、計測可能なプローブとして、蛍光によるものは、Ca, Na, Cl, pH, cAMP, CaMKII, Voltage. 細胞内の状態が計れる。細胞外のフリーのCaは2 m mol, 細胞内のフリーのCaは100 n mol以下である。イオングラジエントは、約2万倍(ただし、結合したCaも入れると細胞内外でCa濃度はほぼ同じ)。Caチャンネルが開くと直ちに細胞外のCa濃度は大きく減少する。これは細胞外のスペースが小さいため。このCaの動きが長期増強、長期抑制を通じて過疎性と関係している可能性が高い。シナプスの神経伝達物質の内最もサイトの多いのは興奮性神経伝達物のグルタミン酸。このレセプタに数多くのタイプが発見されている。特にMMDAレセプタは普段はMgにブロックされているが、非常に強い刺激がくると、Mgが外れてCaに反応するようになる。これによりモディフィケーションが起こる。これが長期増強。細胞内のCaを計るには、Quin 2, Fura 2などの蛍光標識を使用する。(ただし、共存物による蛍光強度変化には注意要。Caのみならず他の物質も計れる各種の蛍光試薬が開発されている。)実際に蛍光試薬にて、グルタミン酸レセプタが働いたときにCaが細胞内に流入し、10 μ mの細胞内でも場所が限局されていることを確認した。さらに海馬で確認すると、グリア細胞でCa濃度が上がることを見出した。さらに、Ca1の長期増強時にCaが増大したことを見出した。Ca濃度が早くあがるのは神経細胞で、そのあと長い間上がっているのはグリアらしい。神経細胞1個だけを蛍光標識で見ると(ポストシナプティック)、Ca濃度はそれほど上がらない。すると、大量のCa流入はグリアに起因するのか。シナプス可塑性にCaMKIIが重要。蛍光標識の可能性は大きく、将来も明るい、これで〈心〉が分かるとは、まだ言えそうもない。

質問:

スパインについてCaイメージングをやって見たか。

回答: 現在やっている。極めて難しい。

渡辺: fMRIと光トポグラフィ

fMRIの計測原理は、脳の活性化領域の血流が増大し、一部の静脈中の血液が、動脈血化する現象に基づいている。脳の活性化により局所血流量が数10%増大(酸素消費は5%程度増大)することは、FoxらによるPETの研究で知られていた。(PETでも、この活性化に伴う血流量の増大によって脳の活性化を計測している。)fMRIでは、上記の動脈血化により、血液中の還元型ヘモグロビンが減り、酸化型ヘモグロビンが増えるために信号変化が得られる。還元型ヘモグロビンは常磁性であり、一方の酸化型ヘモグロビンは半磁性であるためである。常磁性の還元型ヘモグロビンは磁場の不均一を生じ、T2* (見かけ上の横緩和時間)を減少させる。一方、反磁性の酸化型ヘモグロビンは周りの組織と同じ磁性のため、T2*を減少させない。従って、安静状態ではT2*が短く、活性化状態ではT2*が長くなる。この差をもって、画像のコントラストを得る方法がBOLD (Blood Oxygenation Level Dependent)法であり、米国AT&TのBell LaboratoriesのS. Ogawaらにより、1992年に提案された。日立中央研究所も、同年の1992年に同様の結果を発表した。以降、東大医学部生理学教室を含めて共同研究を開始したが、本日報告するのは、その結果である。実際の計測データとして体性感覚野、視覚第4野(カラーセンター)の活性化を示す。従来、人間の脳カラーセンターの存在については諸説あったが、今回、mmオーダの高い空間分解能をもってカラーセンターを見出したことになる。さらに、色のついた残像を感じているときに、このカラーセンターが活性化していることも見出した。

さらに、新しい方法である光トポグラフィをやはり日立中央研究所との共同研究の結果として開発した。これは、近赤外光をもちいて頭の外側から内部を画像化するものである。800 nm付近の弱いレーザー光を、頭皮上から照射し、大脳皮質から反射してきた光成分を検知して画像化する。還元型ヘモグロビンと酸化型ヘモグロビンは異なった光吸収特性を持つので、両者を区別して計測できる。散乱成分が大きく絶対値は現在計測できないので、相対値により活性化部位を画像化できる。実際に、人間の運動野の活性化を、還元型ヘモグロビンと酸化型ヘモグロビンの画像によって確認した。

質問：菅野（医用物理）

近赤外の方法は活性化による信号変化はどの程度か。絶対値は何とか出せないか。

回答：定量値は出せないが、およそ5%程度か。むしろ共同研究者（装置）側の範疇だと思うが、医学側からも局所血液量が増えるメカニズムすら良く分かっていない。（血管が実際に開くのかどうか、あるいは毛細血管のヘマトクリット密度が増えるのか。）動物実験も必要。

質問：小暮

機能と関係付ける前に、1960年代の初めのファゼカス、1965頃のライヴィッチのCO₂と血流の関係の仕事を手掛りにしては。これをスタンダードに半定量化の実験ができるのでは。これらのデータベースを作っておいてから、機能に進んだ方が良いのでは。

回答：見ているのが表面からで、深さ方向の情報が不明瞭なので難しいものがある。PETとすり合せてみたい。

コメント：小暮

血流量と血液量は色々な実験条件の下で乖離することが見い出されている。

ポスティシケミックハイポフォレミックハイパーパフュージョンと呼ばれる。

質問：工藤（生理学）

750—850 nmの光だと、ヘモグロビン以外の信号も見れるのではないか。また、入射、検出のペアを沢山並べられないか。

回答：チトクロームなども計測できる可能性はある。また、また、入射、検出のペアを沢山並べらることも装置側で考えている。

IV. 脳活動の計測における問題点の提起

前日の講演では、非侵襲高次脳機能計測法の新展開について目を見張るような内容が提示された。しかし、その一方で、斬新な揺籠期の技術であるが故に、解決すべき課題も山積している。講演者はそれぞれの

分野の先駆者であり、その問題点と課題についても最も精通している。以下に、提示された問題点と課題を記す。

工藤：蛍光イメージング

蛍光イメージングは現在、まだ侵襲的。計測対象は脳の灌流切片である。従って、非侵襲的な新しい蛍光イメージングの可能性を追究しなければならない。可能性として、組織の深部まで到達できる赤外光を利用することが考えられる。このために、赤外波長域の蛍光体の開発が必要である。また、数100ミクロンの深さならば、赤外の顕微鏡がすぐに使用できる。

グリア細胞の研究は重要である。グリア細胞は、普段、顕微鏡で見ていると多くの神経細胞、血管網と連絡している。神経細胞、血管とも何らかの重要な情報のやり取りがあるはず。現在の神経生理学は、神経細胞しか見えていない。脳の本質の半分を見落としている可能性がある。

光散乱についても不明点が多い。例えば、神経が興奮すると散乱光がとたんに増える。細胞の膨潤によることも可能性の一つであるが、原因の解明が必要である。

コメント：田村

蛍光のin vivo計測を、インドシアニンググリーンという肝機能を調べる色素を用いて行うことを検討中である。乳癌の臨床などに用いられぬかと考えている。光造影剤である。

コメント：小暮

軍用の赤外疑似カラーフィルムがあり、直接イメージングできる可能性がある。

質問：菅野

光散乱が変わるのは、体積などの物理的効化か、あるいはヘモグロビンのなどによるものか。また、3次元イメージングは可能か。

回答：両方あると思われる。さらに、それ以外のファ

クタがありそうだ。問題は個別のファクタの寄与率が分からないことだ。3次元イメージングについては、我々の分野では300 μm 見えれば十分だという意識だ。

質問：栗城

電位感受性色素に関連して。

回答：外因性、内因性の両方とも良く使われる。外因性の電位感受性色素を使用する場合にも、msの応答だけでなく、遅い反応だけが捕まえられるケースがある。これは、やはり電位によるが、どうもグリアに起因しているらしい。

質問：四方

近赤外顕微鏡を300 μm より細い多くのファイバで作成し、小田先生のすだれコリメータ方式でイメージングできないか。

回答：非常に面白いと思う。

栗城：MEG

MEGは、前述のEPSPが主、IPSPは小さいとされる。さらに、外部から観測されるには、神経繊維が多く重ならねばならぬし、電流の位相が同期されねばならない。

それでは、活動電位は本当に出ないのか（集塊電位は発生しないか）。この点も、推定に近い。どのような神経集合体から実際の観測可能な磁場が発生しているのか、確とした実験データが無い。

文字、言葉についての実験をいくつか紹介する。平仮名数字を提示し、数秒後に片仮名を提示し、同じであったかを答えさせるパラダイムを使用。片仮名一文字の時、潜伏190 msあたりの信号は視覚の高次野に、200 msあたりで紡錘状回に、270 msあたりで、左右の両側頭葉に、370 msあたりでシルビウス溝の後ろに反応が見える。無意味文字では異なる部位が反応。これらのパラダイムには記憶関連も含まれており、さらに純化したパラダイムの開発が必要である。

MEGでは、活動している神経から形成されるダイ

ポールを仮定している。MEGは空間分解能が高い（数ミリ）といっても、ダイポールの位置を点で仮定している。しかし、実際には、活動領域が点であるはずがない。空間的な広がりを計測可能にせねばならない。そのためには逆問題解法が極めて重要である。

心理実験およびパラダイムの厳密性も重要である。〈心〉という言葉は不用意に使えない。高次機能として扱いたい。

コメント：佐々木（生理学）

活動電位は同期しない。電流が周囲へ拡散するために集塊電位としては弱くなる。

実際の細胞で、細胞内の電流分布の計測はやられていない。これは生理学者の怠慢である。実際の電気生理でも、活性化されている機能領域がかなり広い領域に分布していることがはっきりしている。なんとしても、面でダイポールが解析できるアルゴリズムが必要。

コメント：栗城

実際に集中して考えたり動作しているときには、ダイポールは一カ所に集中しているのではないか。

コメント：佐々木

そのようなことはない。実際に広い領域が一斉に活動している沢山のデータがある。それは電気生理学的にすぐ分かる。データは沢山あるがこれをどう処理して良いかが分からない。例えば、予告刺激があって命令刺激がある場合である。ヨーイドンのケース。走るときに、ドンだけでは、飛び出すまでに0.5秒かかってしまうが、ヨーイがあると瞬時に飛び出せる。このとき前頭葉は全体が広く活動していて、それ以外の刺激を全く受け付けない。また、記憶などもそう。ワーキングメモリなど広い範囲が活動している。MEGでこのデータはとれる。しかし解析しようがない。これが本質的な問題点だ。

質問：四方

ダイポールが移る（動きまわっている）ということはないか。

回答：佐々木

そういう場合もあるが、実際、広い領野が活動している場合がある。数学の力を借りたい。

菅野：PET

PETはトレーサースタディである。実際上の空間分解能は、被爆線量を抑えるために、日頃数mmと言われているものより低い。酸素同位体の水による活性化研究では、最先端装置で約1cmである。血液量の問題が不明である。活性化により血液量は明らかに増大するが血液量はあまり変化しない(約1/5程度)。血液中の炭酸ガス分圧(PCO₂)変化時に、血流(CBF)変化は1%/1mmHgCO₂である。一方、血液量(CBV)変化は4-5%/1mmHgCO₂である。

活性化時の蛍光測定と近赤外反射量計測の比較は良く一致する(UCLA)。

これは、近赤外で血液量(CBV)を計測していることを意味する。それなのに、近赤外にて脳の活性化を高い感度で計れるのが納得いかない。

神経が直接発する信号を一次信号とすれば、代謝変化による信号は二次信号である。PET、fMRIなどは二次信号を計測している。それなのに、神経活動と代謝変化(血液量など)がリンクしている根拠が不明瞭なのは大問題だ。

実際の計測では、S/Nの関係から数秒-数10秒の積算が必要。しかも、カテーテルからボーラスで入れることはボランティアに適用は困難。静脈から入れるために信号はなまる。

質問：渡辺(脳神経外科)

血液量の変化と血流量の変化に程度の差があっても、同じ傾向で変化していれば何も問題はないのではないのか。

答え：気になっているのは、fMRI、NIRSで信号が発生するとされる局所血液量が大きすぎる感じがする点だ。静脈の動脈化が信号発生源とすると20%は大きすぎる。動脈の体積率は約5%、毛細管が約10%、

残りが静脈で約85%。静脈の拡張がそれほど大きいとは思えない。動脈のコントロールだけでは説明できない。

質問：小暮

血流を分離すればもっとすっきりするのは。

回答：今ではボーラスで入れることはしないので、ボーラストラッキングができない。ピークがなまり、また、S/N向上のために時間積分したデータでは実現困難。

質問：四方

なまらせかたを利用できないか。

回答：体循環でなまるので、制御は困難。

コメント：村山(医用物理)

現在、3次元PETをやっている。海外で急進展中、まだまだ発展できる。

田村：光CT

光CTの開発(コリメータファイバによる画像再生)について紹介。検知器と入射ファイバの距離について、欧米では3cm以上必要と主張したが、田村は1.5cmでOKとした。タイムオブフライト法、ピコ秒パルスによる時間分解法、TACシステムについて紹介。像再生はプロジェクション法であり、逆問題を解く必要がある。

現在、世界の最先端は、羊の頭でおよその画像(頭の輪郭程度)が出た段階である。この画像に関する実験では、羊の頭が使われスタンフォード大学のグループが発表した。

本質的な問題点は散乱光の処理である。拡散方程式で吸収と散乱光を分離できることが判明したので、数年後に絶対値も出せる可能性がある。現在は、スーパーコンピュータで計算時間が1時間とか必要であり、このあたりの数学も今後必要である。

質問：工藤

羊の脳の厚みはどのくらいか。また、計算に時間がかかる理由は。

回答：直径は約 10 cm、撮像時間は約 6 時間である。時間がかかる理由は、逐次処理のためであり、現在、並列処理を準備中である。

質問：大田

物体の構造についての知識は必要か。

回答：基本的には、使わずに行きたい。しかし、最初は、MRI による構造情報を使うことも考えている。

小泉：fMRI

fMRI で神経活動を計測することによって〈心〉の物理計測が可能かどうか。

〈心〉の計測に立ち入る前に、神経活動が非侵襲的に計測できるかが、まず問題である。神経活動が正確に計測されるためには、神経活動と局所血流量／血液量がリンクすることが保証されねばならない。fMRI の最先端研究施設が取り組んでいる緊急の課題である。

現在、活性化開始から約 5–6 分程度で、ラクトートの濃度が最大になることが報告されている。グルコースの濃度は、少し遅れて最小となるとの報告がある。従って、神経活動の初期と、その後では異なった代謝系が働いているとも解釈される。しかし、まだ十分なデータが無いのが現状である。

グリア細胞の役割にも着目すべきであろう。アストロサイト上の解糖系がグルタメートによって駆動されることが最近明らかにされた。ミッシングリンクが他にもある可能性が考えられる。

物理的空間分解能と生理的空間分解能は異なることにも注意が必要。生理的空間分解能は、細静脈の灌流域で決まる。高空間分解 fMRI による実験から、我々は 1–2 mm と考えている。最近、視覚野の Ocular Dominance を観測できたようだという報告もあるが、慎重に受け止めたい。

ネズミのホイスキーバレルについての実験の紹介。イントリンシック信号とエクストリンシック信号の差は、二次信号に基づく方法の限界を示唆している。

負の信号の出現の原因も不明確である。負の信号には、初期の還元型ヘモグロビン増大によるイニシャルデップと、長時間にわたり負信号を生じる画素が存在するケースとがある。後者は、PET についても諸説あり、今後慎重に解明すべき課題である。

質問：イニシャルデップの原因に大変興味あるが、膜の透過性に関係するというのはどういうことか。

回答：神経興奮時に膜の透過性が変わり、画素内のミクロな流れや流動性を変化させるため、緩和時間が変わり負信号が生じるという説がある。イニシャルデップを最初に報告した Hennig が、最初の説を最近翻したため現在混乱している。

質問：工藤

イニシャルデップの時間はどのくらいか。

回答：数 100 ms のオーダーである。

コメント：久留

脳の研究においては、マイクロの知識をもってマクロをみることに、即ち、メゾスコピックなアプローチが重要である。投射繊維を別にして、大脳の中で最も長いもので約 15 cm（後頭葉から前頭葉）程度である。潜時によって、ほぼどれだけのシナプスを経たかは検討がつくのではないかと。ただし、連合野は個人差も大きいし、調べるのが難しい。例えば、先程の栗城先生の MEG による文字判読過程の実験についても、読めない字の場合は、被検者は、まず脳内の辞書系に参照させているはずであり、単純なタスクとはなっていない。このように高次機能調べるためのパラダイムのデザインには極めて難しいものがある。今回、色々勉強したが、今後さらに勉強してみたいと考えている。

V. 討議

討議に先立ち、まず、司会の小泉からパネリストに

対し、それぞれのパネリストが描いている〈心〉の定義について被歴するよう要請があった。この種の、Trans-disciplinary な討議には、まず最初に中心になる概念の整合を取って、共通の土俵を作る作業が肝要である。さもないと、基本的な議論のすれ違い、或いは、相手の論旨の重大な誤認を、討議の後半になって気付くことが多い。特に、〈心〉のような抽象的なキーワードには、まず、共通の理解、共通の認識の基盤が必要である。それぞれのパネリストが描いていた〈心〉の定義を以下に記すが、予期した以上にさまざまな見解が被歴されている。ここに見られるように、〈心〉という概念の整合を取ることは極めて困難であるが、少なくとも、議論の相手である他のパネリストが、〈心〉をどのように捉えているかを最初の段階で知ることは必要と思われた。

〈心〉の定義

菅野（神経生理学, 医学, 数学）:

言葉で表現できる心象, 表象, あるいはアテンションとして観測され得ると考えている。

渡辺（脳神経外科, 神経生理学）:

計測で捉えるとすると、記憶、アテンションからか。

佐々木（医学, 神経生理学）:

ポッパーは観念論的立場から、メタフィジカルな事象と、フィジカルな事象との二つに分けて心考えた。神経科学者は、神経活動と精神活動が対応付けられるとの立場を採っているが、当面はなかなか一対一対応が困難。しかしながら、まず、コリレーションを一つひとつ丁寧にとっていくことから始めるべきと考えている。実際には、ラジカルメンタリズム、ラジカルリダクシオニズムの間を揺れ動いているというべきであろう。

小田（物理学, 天文学）:

心の病気、そのなかで心の存在に気付くのか。普段は、精神活動、音楽、絵画など芸術に触れるときに、心を感じるのか。或いは、物理的なもの全てを差し引いた残りが心なのか。

小暮（神経内科, 生理学）:

イニシエーション、インプリンティングなど、まず、抽象的な概念を言葉を使わずに伝達する過程がある。そして、言葉をもって社会的通念が伝承される。ここに、心の発生の過程がある。心は環境に対して自分自信を主張する原点でもある。自分は、心は計測可能と考えている。

工藤（神経生理学, 化学）:

心、心と日頃盛んに言っていたわりには良く考えていなかった。

人間以外に心はあるか。猿や猫にはありそう。しかし、とかげにはあまり有りそうにない。すると、脳の大きさに依存していることになる。特に前頭葉に関係ありそう。

そうすると、計測可能と考えられる。

栗城（電子工学）:

行動により、心が対応付けられる。

諸富（心理学）:

刺激と反応の間に遅延が存在するときに、その遅延の媒介が心の発生と関係する。

自分は行動が統合される機構を明確にしたい。刺激と行動の対応から、内的な過程を客観的に推定できる。新しい計測法により、もう少し科学的な対応付けができるのではないかと期待している。

渥美（精神科, 教育学）:

心は一般的に定義されてはいない。特に日本では、情緒的なものを含めて理解されている。感情、たとえば嬉しいことも心の働きか。感覚から情報を得て、情動を介して行動が起きる。これからの新しい計測により、また別の心の定義が生まれる可能性があり楽しみにしている。計測によって、将来、心の概念形成が出来るのではないか。

神経活動と代謝系のリンク

〈心〉の議論で明らかになったように、少なくとも〈心〉の一部は脳内の神経活動と密接にリンクしており、神経活動と精神活動とについて、丁寧に一対一対

応を付けて行くのが、科学的に心を解明して行く今後のアプローチであろう。そのためには非侵襲的に健康人の脳内神経活動を計測する手段が必須となる。前日の講演で明確にされたように、現在、極めて有望な新しい非侵襲計測方法論が生まれつつあるが、MEGを除き、それらは全て神経活動を一次的に直接計測するものではない。神経活動に伴う代謝変化を捕える手法であり、所謂、二次信号を計測し間接的に神経活動を知るものである。それでは、この二次信号が的確に神経活動を反映しているかが本質的な問題点となる。即ち、神経活動と代謝系がしっかりとリンクされているという明確な根拠が必要である。既に歴史を持つPETでは、神経活動と代謝系のリンクは当然のものとして常識とされている。fMRIでも、神経活動と代謝系のリンクを前提として多くの結果が発表されてきたが、最先端の研究施設では、このリンクにまだ隠されたものがあることを直感し、新たな研究が鋭意進行中である。さらに、NIRSでは神経活動と代謝系のリンク自体の矛盾点についても指摘され始めている。このNIRSにおける実験データの数々の不整合についても、討議の中で報告された。

星（小児科，神経生理学）：

1. fMRI, PETにおいて反応時間は500ms程度である。最初の反応までの時間がかなり短い、最初のイニシャルとなるトリガーは何か。血液中のCO₂分圧による受動的な血流制御だけで、どうして血管系の上流を制御できるのか。神経末端が血管に至っている可能性は強いが、まだ、明確なエビデンスがない。光で見る限り、酸化ヘモグロビンも減っているような、オーバーコンペンセーションでないケースも多くある。

血流調整はもっとラフなものなのかも知れない。

2. 細胞外液でラクテートが増えている所見は多い。ラクテートを別目的に使っている可能性もある。一方で血流増大は、ラクテートの洗い出しとの説もある。

PETはグルコースの取り込みを見ているが、全てが消費されているとは限らない。取り込まれても使われないかも知れず、酸素摂取が増えない事実の

みからミスマッチと決めつけられないかも知れない。

3. 確かに解糖系が動いているとするならば、なぜ、ミトコンドリアが動かないのか。なぜ、みすみす効率の悪い代謝回路の方が働いているのか。

4. 神経活動とともに血液量が減る実験例もある。暗算時に脳全体の血流が下がるという実験例がある。レスティングがどの状態なのか。コントロールをどの状態にとるか。

覚醒時の状態コントロールは極めて難しい。

上記の報告をベースにさらに議論が進められた。

菅野：

確かに、PETでもヘビーなタスクでは脳血流が落ちることが実測されている。

工藤：

神経の実験にて、酸素が不足してもなかなかへたらない。しかし、グルコースがないとすぐに駄目になる。ということは嫌氣的解糖系が動いている。皆、血流調整系に拘泥しているが、問題はどのエネルギー供給系が働いているかだ。

小暮：

逆の意見。脳は酸素供給がなくなって処置できるのは12秒以内。アラキドン酸は10秒にて現われる。数10秒内で起きている内容を、分あるいは10分程度でものを言うのはおかしい。脳の本質的現象は分をこえることはない。

田村：

問題はエネルギーディマンドへの対応だ。解糖系、酸化的磷酸化、あるいはクレアチンホスフェートのようなバッファー系が対応しているかを明らかにすることだ。

さらに、MEGについても、本当に神経活動を的確に捉えているかという議論がなされた。

佐々木：

MEGで、てんかんのフォーカスは動き回る。本当の神経活動をみているのかと思うことがある。

渡辺：

MEGでは焦点のディスチャージそのものを見ているわけではない。しかし、インダイレクトではあるが、実際の焦点として手術して成功している。

佐々木：

動物実験の必要性がある。MEGでは、第一次感覚野についてさえ動物できちんとやられていない。ベータ波はEEGと異なり、多くの涌きだしが観測される。

議論の纏め

白熱した議論を通じ、問題点がかなり見えてきた。最後にフロアの方々のご意見も伺って締めくくるとした。

下沢（神経生理学，認知科学）：

〈心〉は実際に計測されてきた。問題は今後、要素還元できるかという点である。

人間同志はコミュニケーションを実際にはやってきた。人間の〈心〉と〈心〉の途中を物理量でつないでやってきた。その意味で、〈心〉は既に実際に計測できている。非侵襲計測法とは、磁場のように人間には感じられないもので、心を評価しようとしているか。それによって要素還元して、心が計れると考えるのか。

〈心〉は主観的か。それで物理計測したら客観的と言えるのか。それによって、氷山の一角だけしか見えない〈心〉の全体が見えるようになるか。

渥美：

物理計測しないと科学と言えないとするならば、精神医学は科学かということになる。精神医学においても、〈心〉をできるだけ客観的に計測しようと努力している。それに訓練された精神科医なら顔をみただけで脳波など想像がついてしまう。

全体の纏め：小泉

昨日は、まず最初に、〈脳神経系〉と〈微細循環系〉について、その〈形態（構造）〉と〈機能〉についてお話し戴いた。その後、最先端の〈無侵襲高次脳機能計測法〉を中心に、最近の成果を講演戴いた。そして、〈脳〉の〈構造〉と〈機能〉が具体的にどこまで現在計測可能かを把握することによって、〈高次脳機能〉即ち、〈心〉に対して〈科学的〉にアプローチできそうな心証を固めることができたように感じる。しかし、〈心〉の問題は、人文学にとっても自然科学にとっても最大の課題であり、軽はずみに取り組むことはできないと思われる。憶測が憶測を呼び、憶測が一人歩きするようなことは避けねばならない。そのためにも今日は、計測方法論の現状の問題点を洗い出して、それを直視し、さらに〈心〉の概念自体の不明瞭性をも最初に確認し、その共通基盤に立って議論を進めてきた。今回の、シンポジウムは〈心〉の科学的研究への最初の一步を踏み出すためのものであったと感じる。深い内容の議論と数々の有益な示唆を戴いた講演者ならびにフロアの方々から感謝したい。（文中敬称略）

注記：本シンポジウムの概要は、医学誌〈INNER-VISION〉により報道された。

“IVリポート：北海道大学電子科学研究所公開シンポジウム：脳と計測一心の研究へのアプローチ”，INNERVISION, 11-6, 80-82 (1996).

電子科学研究 第4巻

1997年2月28日

編集 電子科学研究所出版委員会
印刷 (株)アイワード

北海道大学電子科学研究所

〒060 札幌市北区北12条西6丁目

TEL (011) 716-2111(代表) FAX (011) 706-4977