興奮性膜の容量とその測定

京都大学工学部 電気工学教室 松本修文[※]

はじめに

興奮性膜の電気的性質に関する研究は、1928年頃 K.S.Cole によってはじめられた。彼は膜のインピーダンスに注目し、静止時および興奮時において多くの測定を行なった。^{1)~4)}その後1950年代はじめには、voltage-clamp 法による、Hodgkin-Huxley の一連の仕事が発表された。これは、興奮現象の数学的表現という点で画期的な意味をもつものであった。現在では、この理論に対していくつかの疑問が出されているが、依然として興奮性膜研究の上で、ひとつの体系を形づくっている。また Tasaki は細胞内灌流法を用いて、興奮現象を物理化学的に解明しようとしている。¹⁰⁾

これまで、膜に関する研究は数多く行なわれてきたが、全般的にはまだ現象論的段階にとどまっており、測定量を直接膜の構造に結びつけるまでには至っていない。膜構造を解明するための手段としては、電子顕微鏡による観察、化学的方法、物理的あるいは電気的測定等が考えられる。ここでは、膜の物性、特に膜容量に注目して考察を進める。

§ 1 膜の構造とその容量

これまで発表されている、細胞膜の分子構造についてのモデルを分析してみると、大体2つに分類することができる。第1は、Davson, Danielli¹¹⁾によって1935年に出されたもの、そして Mitchison¹²⁾によって1952年に出されたもので代表され、細胞表面は脂質の親水性基と、その表面に吸着した球状蛋白質より成るものである。それに対して第2のものは、Davson, Danielli¹³⁾によって1952年に出されたもので、これは Finean, Robertson¹⁴⁾によっても受けつがれているが、細胞表面は脂質の外側を、さらにほとんど完全にその炭化水素鎖を伸展した形の蛋白質によって、おおわれ

ていると考えたものである。これら2つのモデルに共通した点は、脂質の2分子層が膜の骨格をなし、その両側に蛋白質が吸着していると見ることである。このような見方に対して、Ponder¹⁷⁾は1955年にモザイク状の構造を推定し、Benson¹⁸⁾は1966年、蛋白質の骨格の中に脂質が組みこまれた構造を考えた。

つぎに、現在までに測定された、細胞膜の容量の値の主なものを表1にかかげる。Frich¹⁸⁾は1925年、人赤

表 1

膜の種類	膜の容量 ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)
人赤血球膜	1.1
Nitella	0.9
ウニの卵	0.73
ヒトデの卵	1.1
カエルの筋肉	4~6
神経	1.1

血球膜の容量を測定し、 $0.8\mu\text{F}/\text{cm}^2$ の値を得、比誘電率を3とおいて、膜の厚さを $33\text{\AA}$ と推定している。そして、これが20~30個の炭素原子鎖に相当することから、細胞表面が脂質単分子層ではなからうかとしている。これは、膜の容量は脂質層のみに基因するという考え方であるが、実際には膜の容量は、脂質の物理的性質のみならず、他の構成部分にも支配されると考えるべきである。

膜をひとつの誘電体と考えるとき、生体膜の複雑な構造からみても、均質な誘電体の理論をそのまま適用することはできない。しかし、上で述べたように、ある程度規則正しい分子の配列があるならば、容量と膜構造の関係を知らる上で有利な条件となる。文献12)~16)にみられる脂質の2分子層について、もう少しくわしくたいてみよう。膜を構成している代表的な脂質には、フォスファチジルエタノールアミン、フォスファチジルコリン (レシチン)、フォスファチジルセリン等のリン脂質や糖脂質、コレステロールなどがある。これらの分子は、疎水性の強い長い炭化水素鎖と、親水性の極性グループ、たとえば水素結合を形成することができるグループとを含んでいる。リン脂質の一例として、フォスファチジルエタノールアミンの

Capacitance of Excitable Membranes and its Measurements;

※ Nobuyoshi MATSUMOTO : Department of Electronic Engineering Institute, Faculty of Technology, Kyoto University.

構造を図1に掲げておく。このような性質をもった分子が、水中において極性基を外に、疎水性の部分を中心に、規則正しい2分子層を作ることは容易に想像できる。このとき、極性基の部分は一定の双極子能率をもち、膜の内外に電界がかかれば配向分極が現われる。

単位面積あたりのインピーダンスが Z_m であるとすれば、その懸濁液の比インピーダンス Z は

$$Z = \frac{(1-p)r_0 + (2+p)\left(r_i + \frac{Z_m}{a}\right)}{(1+2p)r_0 + 2(1-p)\left(r_i + \frac{Z_m}{a}\right)} r_0 \quad (1)$$

つぎに、断面が半径 a の円形をなす線維が、外遊中に浮遊するとき、線維に直角方向の比インピーダンス Z は、上と同じ記号を使用して

$$Z = \frac{(1-p)r_0 + (1+p)\left(r_i + \frac{Z_m}{a}\right)}{(1+p)r_0 + (1-p)\left(r_i + \frac{Z_m}{a}\right)} r_0 \quad (2)$$

膜のインピーダンスを直接測定することは、その形状大きさ等から考えて、一般にかなり困難である。そこで、Cole³⁾ および Botzler and Cole¹⁹⁾ は、つぎのような式を誘導して、間接的に膜のインピーダンスを測定することを考えた。いま、球形の細胞が外液中に懸濁液のように浮遊し、その容量濃度が p 、細胞の半径が a 、外液の比抵抗が r_o 、内液の比抵抗が r_i 、細胞膜の

Cole は上に述べたような系のインピーダンスを数多く測定しているが、ここではその中で特に興味ある *Nitella* およびイカ巨大神経膜のような、興奮性膜に関するものについて述べてみる。図2のような装置の溝の中に、*Nitella* または神経線維を横たえ、電極 b, b' の間のインピーダンス Z を測定することを考える

図 2. 神経膜の測定装置 (文献4) より)
 a は刺激用電極, b, b' はインピーダンス測定用の電極。活動電位は b, c, c' のうち、適当な2つの電極で測定する。

方法を適用するための条件としては、細胞は円筒状であることとその直径が太いことがまずあげられる。イカ巨大神経線維や *Nitella* は、ふつう直径が 500μ 程度もあり、十分上の条件をみたしている。このほかザリガニ、ゴキブリ、ミミズ等の神経線維も太いが、イカにくらべれば数分の一の太さであり、電極をさしこむことがひじょうに困難となる。ここでは主として、イカ、*Nitella* に関する測定について述べるが、その他針金電極をさしこめる細胞に対しても同様に適用できる。

図5に電極の部分を示す。内部電極はエナメル被覆

図5. 神経と内部および外部電極と刺激用電極の配置図

された銀線または白金線を用い、先端の部分の被覆をはがしておく。銀線を用いる場合は、測定結果に電極の分極の効果がはいらないよう、chlorizationを行なう。白金線の場合は白金黒として、電極のインピーダンスを低くする。

さて、これから測定法にはいるわけであるが、まず直流測定について述べよう。図6において、 r_0 は

図6. 神経膜の直流抵抗および容量の測定回路
膜に矩形波定電流を流し、そのとき膜の両端に生ずる電圧を観測する。

膜抵抗にくらべて十分大きな抵抗で、膜に定電流 i を流すためのものである。測定の前に AB 間に既知の小さい抵抗 r_1 をつなぎ、矩形波を加えたときその両端に表われる電圧 V_1 を読み、 $i = V_1/r_1$ によりあらかじめ回路の定電流値 i を求めておく。つぎに AB 間に神経膜をつなぎ、同じ値の定電流パルス进行をかける。AB 間の電位差をシンクロスコープで観測すれば、図7のような波形が得られる。定常値に達したときの電圧を V とすれば、膜抵抗 R_p は

図7. 膜の両端に生ずる電圧波形

$$R_p = \frac{V}{i} \quad (6)$$

で与えられる。つぎに、膜の等価回路を図3(a)で表わせば、時定数 τ は

$$\tau = R_p C_p \quad (7)$$

で与えられる。一方図7において時定数 τ は、電圧が定常値からその $1/e$ まで減少する時間であり、図形から求めることができる。したがって、 R_p と τ から膜容量 C_p は

$$C_p = \frac{\tau}{R_p} \quad (8)$$

によって求めることができる。このとき、あらかじめ電極の抵抗を測定しておき、これが膜抵抗にくらべて無視できないときは、図3(a)に直列に電極の抵抗が接続された形で測定値が求まるから、実際の膜の容量と抵抗は電極による抵抗部分をとりぞいて計算しなければならない。測定の際、AB 間の電位差はできるだけ小さくすることが望ましい。この測定法は、静止状態に対しては、ひじょうに簡単でしかも有用な方法であるが、興奮状態の測定には一般に適用できない。なお、この測定で定電圧法を採用することも考えられるが、この方法をとると、パルス発生器が膜の内外を短絡し、静止電位による電流が回路内を流れ、神経を殺すことになるため、定電流法を採用しなければならない。

交流の測定では、Bridge による測定がもっとも簡単で精度も高い。Bridge 回路の実例を図8に示す。図において、 C_0 は膜の静止電位によって Bridge 内に直流電流が流れるのを防ぐための容量で、測定値に影響を与えないために大きな値のものを入れる。Bridge の平衡は r と c によって行ない、このとき膜の抵抗、容量と r, c の比をきめるのが r_1 と r_2 の値であり、 $r_1:r_2$ は適当に 1:1, 1:5, 1:10 等に変べばよい。各周波数で測定を行なうことによって、膜抵抗と膜容量の周波数特性を求めることができる。交流測定するときには、白金黒電極を使用することが望ましい。この

図 8. 膜の抵抗および容量を測定する Bridge と平衡検出回路

図 9. イカ巨大神経膜の抵抗と容量の周波数特性 神経の直径は約 400μ

図 10. 興奮時における Bridge の出力

(a)は静止時に平衡をとっているため、興奮時には膜のインピーダンス変化によって、Bridge は不平衡となる。(b)は活動電位のピークの位置で平衡をとったときの様子。横軸は 1 m sec/div.

ときも、各周波数において、測定値から電極のインピーダンスの影響をさしひいておく必要がある。この方法で、イカ巨大神経膜について筆者の測定した結果を図 9 に示しておく。

興奮時における測定はかなりむずかしくなるが、原理としては静止状態の測定と変わらない。刺激用電極にパルスを加えることによって、興奮は伝達して電極部分に達し、この部分は同時に興奮すると考える。静止状態で平衡をとっておけば、興奮によって膜のインピーダンスが変化し、Bridge の平衡はくずれる。この様子を図 10(a)に示す。興奮時の膜容量と膜抵抗を求めるには、くりかえし興奮（たとえば 1 秒に 1 回）を行ない、 r と c を調節して、活動電位のピークの点で平衡が成り立つようにすればよい。このとき、交流は興奮による活動電位に重畳されるから、フィルターによって活動電位をとりぞいて、印加した交流のみをとり出して平衡を検出しなければならない。(b)は活動電位のピークの位置で Bridge が平衡したときの様子を示す。活動電位を同時に記録するためには、もう 1 本電極をさしこめばよい。実際には、2 本の電極をねじって、先端の被覆をはいた部分が互いにふれないようにしたもの、を、神経内にさしこむ。Cole による *Nitella* およびイカ神経膜の静止時と興奮時におけるインピーダンスも、上と全く同じ原理によって測定したものである。

Bridge による測定の欠点は、手で平衡をとらなければならない、くりかえしのきかない早い変化には適用できないことである。これを解決するためには、インピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相角 θ を求め、これから膜の容量と抵抗を求めればよい。この方法を図 11 に示す。 $|Z|$ は A の電位の包絡線として得られ、この電

図 11. 膜のインピーダンスの絶対値 $|Z|$ と位相角 θ を求める回路

位は膜にかかる電圧 V を示す。B の電位は膜を流れる電流 I の波形を与えるから、A と B の電位を位相計に入れることにより、電流と電圧の位相差 θ が求まる。 $|Z|$ と θ を同時にシンクロスコープで読めば、

$$R_s = |Z| \cos \theta \quad (9)$$

$$X_s = |Z| \sin \theta \quad (10)$$

により、 R_s 、 X_s が求まる。これらを(3)、(4)に代入して整理すれば、膜抵抗 R および膜容量 C はつぎの式によって得られる。

$$R = \frac{|Z|}{\cos \theta} \quad (11)$$

$$C = \frac{\sin \theta}{\omega |Z|} \quad (12)$$

この方法を用いれば、Bridge ほどの精度は得られないが、連続的な測定ができる点で便利である。なお、市販品としてブラウン管上に、 R_s と X_s を直接直交座標上の点として示し、周波数を変えることによって、自動的に impedance locus を求めることができる装置があるが、そのまま生体の膜に使用できるかどうかは疑問である。

このほか、ケーブル理論により膜のインピーダンス

を測定する方法があり、細い神経線維や筋線維に応用できるが、くわしくは Taylor (1963)²²⁾等を参照していただきたい。

§ 4 膜の複素容量

前節のような方法で測定した結果を、複素容量の表示におおすことを考えよう。等価的な膜の容量 C と抵抗 R を用いると、膜のインピーダンスは

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} \quad (13)$$

で表わされる。一方、このインピーダンスに対する等価容量を C^* とおくと

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{1}{j\omega C^*} \quad (14)$$

が成り立つ。ここで、複素容量 C^* は

$$C^* = C' - jC'' \quad (15)$$

とおけるから、(15)を(14)に代入して

$$C' = C \quad (16)$$

$$C'' = \frac{1}{\omega R} \quad (17)$$

を得る。また、複素比誘電率 ϵ_r^* は

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (18)$$

であり、 C' は ϵ_r' 、 C'' は ϵ_r'' と対応する。これらの間には

$$\epsilon_r' = \frac{d}{\epsilon_0 A} C' = \frac{d}{\epsilon_0 A} C \quad (19)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{d}{\epsilon_0 A} C'' = \frac{d}{\epsilon_0 A} \frac{1}{\omega R} \quad (20)$$

なる関係がある。ここで ϵ_0 は真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)、 A はコンデンサの極板面積、 d はその間の距離である。生体膜の場合には、その厚さ d を測定することができないから、 C' および C'' を単位面積あたりの容量 ($\mu \text{ F/cm}^2$) で表現する。

ここで注意しなければならないことは、図9のように、 $\omega \rightarrow 0$ で R が有限の値におちつくときの、 C'' の周波数特性である。 $\omega \rightarrow 0$ で R が一定の値におちつければ、 C'' は ω に逆比例して、 ω の減少とともに急速に増大する。 $\omega \rightarrow 0$ で R が有限の値をとることは、直流抵抗

図 12. イカ巨大神経膜容量の実部 C' および虚部 C'' の周波数特性
神経の直径は約 400μ , Debye の分散と様子がことなることに注意

図 13. イカ巨大神経膜の複素容量
図12を書きかえたもので、Cole-Cole の円弧則にしたがい、位相角は77°である。

分が存在することを示す。このような場合には、ふつう ω に逆比例する項を C'' からさしひいて補正を行ない、直流抵抗分の影響をとりのぞく。

イカ巨大神経膜について、筆者が測定した結果を図12に示す。これを見ると、Debye の分散とはかなりことになっている。図13は、複素平面上に $C^* = C' - jC''$ を表わしたものである。これは半円とならず、位相角が77°の Cole-Cole の円弧則にしたがっている。

Taylor は 10 KHz~70 KHz の周波数範囲で、内部電極法によってイカの神経膜の容量を測定し、その温度の効果を調べている。そして、温度による複素容量の変化は、実数部 C' のみにおこっており、温度は容量の非損失分に対してのみ影響を与えるものと考えている。また、彼は容量の測定値から、膜は少量の高い誘電率の部分と、損失をもつ物質とのモザイク構造ではないかと推定している。

§ 5 興奮性膜容量の問題点

これまで、興奮性膜のインピーダンス、容量およびその測定法などについて神経膜を中心にして述べてきた。興奮性膜に関する研究は、現在ではまだ膜の構造や興奮現象を、分子論的に説明できる段階にはなっていない。そこで、今後どのような物性的な研究を進めて行くべきかを考えることも、ひとつの重要な課題と

なろう。膜の容量に注目した場合、どのようなことが考えられるかについて、若干ふれてみたいと思う。

まず、静止状態の膜の構造に関するものをあげてみよう。膜容量の周波数特性についてはすでに述べてきたが、脂質2分子層のような再構成膜に関する同様の測定がかなり行われており、両者を比較することはきわめて重要である。たとえば、Hanai 等は *lecithine + n-decane* の膜で $0.38 \mu F/cm^2$ の値を得ている。一方、細胞膜は一般に $0.5 \mu F/cm^2$ 以上であり、平均値としては $1 \mu F/cm^2$ がよく引用される。Hanai 等は、この両者の容量の差を、分子的な膜構造の差としてとらえている。Falk and Fatt は、筋線維の電氣的等価回路を求め、これと、電子顕微鏡による構造とを結びつけている。また Tasaki and Hagiwara も筋線維の容量の解析を行なっている。再構成膜の容量や抵抗を、生体膜における値に近づけるためには、いかにすべきかという問題もひとつの方向である。たとえば、脂質の2分子層に蛋白質を吸着させたり、脂質の一部を他の物質でおきかえて測定することも考えられる。しかし一方では、構造の簡単な脂質2分子層そのものについて、できるだけくわしい知識を得ることも重要である。また、膜容量の温度依存性、強誘電性、圧電性の有無を確かめることも重要であろう。骨や腱、皮、毛そして筋肉を構成する蛋白質に、圧電性があることはす

で知られている。神経には、力学的な刺激を電気的な刺激に変換する機構が存在するはずであるから、神経膜にも圧電性があることは十分想像できる。

静止時と興奮時における膜構造の変化は、膜容量の変化によって推論することができる。容量の変化については、すでに述べたように Cole が測定している。しかし、この測定は、外部電極によるものであり、まだ検討の余地があると考えられる。容量の変化をみると、測定の周波数が問題となる。すなわち、膜が単一の leaky-condenser で表わせないとするならば、測定された膜容量をどのように解釈するかという問題が生ずる。また、測定周波数が活動電位に相当する周波数にくらべてきわめて高ければ、興奮現象と膜容量あるいはその変化をどのように結びつけるかということも問題となろう。興奮時の膜容量を測定するためには、測定周波数は活動電位の周波数にくらべて、少なくとも10倍は高くなければならない。したがって、活動電位ふきんの周波数で、興奮時の膜容量を測定することは、原理上不可能である。そうすると、静止状態における、活動電位ふきんの周波数での容量が重要な意味をもつ。なぜなら、このとき興奮による膜電位の変化と同じ早さの電位変化を、外から与えることになるから。そして、もし活動電位ふきんの周波数で容量が異常を示せば、これは興奮現象と膜容量が密接な関係をもつものと考えてよい。

最後に、薬物を作用させたときの膜容量と抵抗の変化について考えてみよう。膜に対する薬物の作用のさせ方には、細胞の内液からと、外液からとの2通りがある。細胞外から tetrobotoxin²⁶⁾、細胞内から TEA²⁸⁾ 等を作用させたときの測定例がいくつかあるが、いずれも活動電位の形の変化、電流電圧特性あるいはインピーダンスの絶対値の変化しか検出しておらず、膜の容量と抵抗の値の変化を直接求めたものは発表されていない。Tasaki は Two-Stable States Hypothesis によって興奮を説明し、興奮の物理化学的モデルを提唱している。この説によれば、膜の外側の層は、かなり高い負の電荷密度をもっており、内側の層は低い負の電荷密度をもっている。そして静止状態では、外側の負の電荷は Ca^{++} , Mg^{++} のような2価の陽イオンと結合しており、内側の正の電荷は K^{+} のような1価の陽イオンと結合している。膜の外側の2価の陽イオンが膜からはなれた状態が興奮状態を意味する。この説を検討するために、EDTA や GEDTA を膜の外から作用させるか、外液の K^{+} 濃度を上げることによって膜から Ca^{++} , Mg^{++} をうばい自発的興奮状態を作り

だし、そのときの膜容量と膜抵抗を、本来の興奮状態の値と比較することが考えられる。また、tetrodotoxin や種々の麻酔薬を作用させて測定を行なうこともひとつの方法であろう。これらはいずれも、細胞外から薬物を作用させる方法であるが、細胞内灌流法によって、細胞内液の組成を変えることもできる。膜構造の解明に特に有力と思われるのは、細胞内外のイオン組成や、pH をかえるだけでなく、酵素によって膜の特定の成分をとり去ったときの膜容量や膜抵抗の変化を調べることである。

おわりに

興奮性膜のうちで特に神経膜をとりあげ、その容量、インピーダンス等に注目してきた。これから興奮性膜の物性的研究をはじめようとする人に、少しでも役立てば幸いである。

【追記】

この原稿執筆後、イカ巨大神経膜に関する筆者の実験により、つぎのようなことが確かめられた。すなわち、細胞外液の Ca^{++} 濃度を一定にして、 K^{+} 濃度を変化させたとき、膜容量はある K^{+} 濃度以下では一定値をとり、それ以上の濃度では減少し、約25~30%減少したところでまた一定の値におちつく。このことは、膜容量が K^{+} 濃度に対して2つの安定なレベルをとることを意味しており、Tasaki の Two-Stable States Hypothesis と関連して興味深く、目下実験を進めつつある。

文 献

- 1) Cole, K. S., Electric impedance of suspensions of spheres. J. Gen. Physiol. 12, 29-36, (1928)
- 2) Cole, K. S., Electric phase angle of cell membranes. J. Gen. Physiol., 15, 641-649, (1932)
- 3) Cole, K. S. and Curtis, H. J., Electric impedance of *Nitella* during activity. J. Gen. Physiol., 22, 37-64, (1938)
- 4) Cole, K. S. and Curtis, H. J., Electric impedance of the squid giant axon during activity. J. Gen. Physiol., 22, 649-670, (1938)
- 5) Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F. and Katz, B., Measurement of current-voltage relations in the membrane of the giant axon of *Loligo*. J. Physiol., 116, 424-448, (1952)
- 6) Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F., Current carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of *Loligo*. J. Physiol., 116, 449-472, (1952)
- 7) Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F., The components of membrane conductance in the giant axon of

- Loligo*. J. Physiol., 116, 473-496, (1952)
- 8) Hodgkin, A. L. and Huxley A. F., The dual effect of membrane potential on sodium conductance in the giant axon of *Loligo*. J. Physiol., 116, 497-506, (1952)
 - 9) Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F., A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. J. Physiol., 117, 500-544, (1952)
 - 10) Tasaki, I. and Singer, I., A macromolecular approach to the excitable membrane. J. Cell. and Comp. Physiol., 66, 137-146, (1966)
 - 11) 小倉, 品川, 膜の構造と機能, 膜の生物物理 p.176 吉岡書店 (1966)
 - 12) Danielli, H. F. and Davson, H. A., A contribution to the theory of permeability of thin films. J. Cell. Comp. Physiol., 5, 495-508, (1935)
 - 13) Mitchison, H. M., Cell membranes and cell division. Soc. Exp. Biol. Symp. No. 6, pp. 105-127, Cambridge Univ. Press., (1952)
 - 14) Davson, H. and Danielli, J. F., The permeability of natural membranes. Cambridge Univ. Press., (1952)
 - 15) Finean, J. B. and Robertson J. D., Lipids and the structure of myelin. Brit. Med. Bull., 14, 267-273, (1958)
 - 16) Robertson, J. D., The molecular structure and contact relationships of cell membranes. Progress in Biophysics, 10, 343-418, (1960)
 - 17) Benson, A. A., On the orientation of lipids in chloroplast and cell membranes. J. A. O. C. S., 43, 265-270, (1966)
 - 18) Frick, H., The electric capacity of suspensions with special reference to blood. J. Gen. Physiol., 9, 137-152, (1925)
 - 19) Bozler, E. and Cole, K. S., Electric impedance and phase angle of muscle in rigor. J. Cell. Comp. Physiol., 6, 229-241, (1935)
 - 20) Talyor, R. E., Impedance of the squid axon membrane. J. Cell. and Comp. Physiol., 66, 21-26, (1966)
 - 21) Taylor, R. E., Cable theory, in physical techniques in biological research. Vol. 6, Nastuk, W., editor, Academic Press, New York., (1963)
 - 22) Hanai, T., Haydon, D. A. and Taylor, J., The influence of lipid composition and of some adsorbed proteins on the capacitance of black hydrocarbon membranes. J. Theoret. Biol., 9, 422-432, (1965)
 - 23) Falk, G. and Fatt, P., Linear electrical properties of striated muscle fibres observed with intracellular electrodes. Proc. Roy. Soc., B, 160, 69-123, (1964)
 - 24) Tasaki, I. and Hagiwara, S., Capacity of muscle fiber membrane. Am. J. Physiol., 188, 423-429, (1957)
 - 25) 深田栄一: 骨の圧電気, 固体物理 Vol. 1 No. 10, p. 50 (1966)
 - 26) Watanabe, A., Tasaki, I., Singer, I., and Lerman, L., Effects of tetrodotoxin of excitability of squid giant axons in sodium-free media. Science., 155, 95-97, (1967)
 - 27) Tasaki, I. and Hagiwara, S., Demonstration of two stable potential states in the squid giant axon under tetraethylammonium chloride., J. Gen. Physiol., 40, 859-885, (1957)
 - 28) Tasaki, I. and Singer, I., and Singer I., Membrane macromolecules and nerve excitability: A physicochemical interpretation of excitation in squid giant axons. Annals New York Academy of Sciences., 792~806 (1967)

寄 書 欄

寄書・書評依頼として、編集実行委員会宛に下記の図書が寄贈されてまいりました。

【朝倉書店】近代工業化学 (2)

2. 量 子 化 学

福井謙一著 < A 5 判・価2,300円 >

【化学同人】

近 代 の 生 化 学

上代昭三編 < B 5 判・価1,800円 >

【共立出版】現代遺伝学シリーズ(2)

2. 遺 伝 の し く み

F. W. スタール著 / 吉川秀男監訳

脇黒純子 訳

< A 5 判・価780円 >