

*4 [訳注]ここでの議論はおもに、エネルギーの比較的大きな ^8B ニュートリノのことをいっている。エネルギーの低いppニュートリノなどの場合は、事情が異なると考えられる。

*5 [訳注]このMSW効果の発見により太陽ニュートリノの研究が非常に活発になったが、その研究の行き着いた先は、混合角は大きかったという皮肉な結末に終わった。

リノのエネルギーに依存する。ニュートリノが最終的に太陽から出るとき、フレーバー状態のコヒーレントな重ね合わせは、よい近似で1つの質量固有状態になっていて、地球への旅の途中の真空中では振動を起こさない*4。 Δm^2 の重さの2乗差がある2つの質量固有状態のうち重い方は、大ざっぱに言って3つのすべてのフレーバーが同程度に重ね合わさった状態だということがわかっている。このMSW効果はもともと、どうやって小さな混合角が太陽ニュートリノの大きな欠損を引き起こすかを説明するために導入された*5。「私は、われわれカムランドの最初の観測結果は発見なのか、あるいはみんなが正しいと信じていたことの確認にすぎないのかとよく聞かれる。」米国グループのもう1人のスポークスマンであるグラッタ(Giorgio Gratta, スタンフォード大学)はいう。「私は、この状況を19世紀に初めて実験室で線スペクトルがつくられたときと対比したい。ブラウンホーファー(J. von Fraunhofer)は、太陽のスペクトルの中に線があることをすでに発見していた。しかし、それを地上で再現するまでは、それは星の世界だけで生じている何かであるという以上のことはわからなかった。」

参考文献

- 1) K. Eguchi *et al.* (Kamland collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003).
- 2) J. Bahcall, M. Gonzalez-Garcia, C. Peña-Garay: *J. High Energy Phys.* **02**, 009 (2003).

† 「今月のキーワード」(p.82)参照。

細胞膜が破れない理由

チャールズ・デイ

好村滋行 訳

Experiments Investigate the Behavior of Pores in Artificial Vesicles

Charles Day

Physics Today Vol. 56 No. 5 © 2003 American Institute of Physics

21世紀の実験技術が19世紀の理論と結び付き、細胞膜が破られたときにどのようにふるまうかが研究されている。

ある意味で、単純なバクテリアはシャボン玉に似ている。どちらも流体から成り、別の流体の薄膜に包まれている。しかし、それぞれの構造に穴をあけてみると、違いが現れる。すなわち、シャボン玉は破裂するが、バクテリアの単細胞の穴はふさがる。この違いの起源は、表面張力と線張力[†]の競合にある。後者は前者の1次元版であるが、まだあまりよく知られていない。

線張力は、穴の縁で分子が再配列する必要があるときに生じる。この再配列でエネルギー的には損をするが、分子は縁を強制的に短縮させることによって、これを実現している。エネルギーの損を担っている分子の割合はごくわずかなので、ほとんどの場合で線張力は微弱である。シャボン玉では、線張力より表面張力の方が勝っている。しかし、細胞膜は内側と外側から等しい圧力を感じているため、線張力の方がより大きな力となる。

細胞膜がどのように機能するかという観点でも、線張力が実際に役割を果たしていると考えられる理由がある。たとえばニューロンは、膜に包まれた神経伝達物質のバケット(“シナプティックベシクル”とよばれる)を交換することによって交信する。ベシクルはシナプスを通して移動した後、どのようにして標的のニューロンと融合し、ベシクルの中身を伝達する。膜どうしが融合するには、そのメカニズムがどうであるにせよ、ベシクルとニューロンの両方の膜に穴が形成されなければならない。

しかし、細胞融合や膜で起こるほかの過程に対して、線張力がどのような影響を及ぼすかを見る前に、まず線張力を測定しなければいけない。そして、それは難しいのだ。線張力は微弱であるだけではなく、瞬間的かつ小さなスケールでしか働かない。水中において、数マイクロメートルの大きさの穴は、数ミリ秒で閉じてしまう。

過去数年間に、フランスのパリにあるキュリー研究所のプロシヤール=ヴィアール(Françoise Brochard-Wyart)と彼女の共同研究者らは、人工ベシク

ルにおける穴の形成を観察して理解する方法を開発してきた。彼女たちの最新の研究では、穴の縁に分子が加えられたときに、線張力がどのように変化するか調べられた¹⁾。

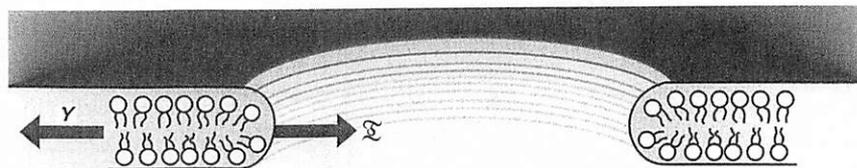
彼女らの結果は、1世紀以上も前にギブス(J. Willard Gibbs)によって導かれた熱力学公式と一致する。プロシヤール=ヴィアールが指摘しているように、このような法則は普遍的であるため、特定の構造の原子レベルのモデルはそれに従うべきなのだ。

■ 人工ベシクル

細胞膜の力学的性質は、その主成分である脂質分子によって決まっている。脂質は親水性の頭部と疎水性の尾部から成る。疎水性尾部を細胞内外の水から遠ざけるために、脂質は2重膜を形成し、その表面は親水性の頭部で覆われている(図1)。

実際の細胞膜は特異的なタンパク質やその他の分子を含んでいる。しかし簡単のために、プロシヤール=ヴィアールと彼女の共同研究者らは、DOPCとよばれる純粋な人工脂質から成るベシクルを扱った。ベシクルをつくるために、この研究グループは“エレクトロフォーメーション”とよばれる技術を用いた。まず溶媒に溶かした脂質を、2枚の導電性の表面に厚く塗りつける。脂質が乾燥した後、2枚の表面を1 mm以内に接近させ、水が主成分の混合液でその隙間を満たす。

すると2枚の脂質のコーティングは膨潤し、小さな膨らみになる。膨らみは隙間で成長し、やがて互いに接触する。膨らみが合体すると、脂質分子が表面からはがれ、溶液を内側に取り込んだ状態で自発的にベシクルを形成す



〈図1〉細胞膜の穴の模式図

穴の縁において、脂質分子の親水性頭部は、膜面のそれ以外の部分と比較して、むりやり引き離されている。このような分子の配置にはエネルギーがともなうため、線張力 σ が生じる。線張力は表面張力 γ に逆らって、穴を閉じようとする。(Adapted from ref. 4.)

る。何も手を加えなければ、この過程には数日かかり、幅広いサイズ分布をもつ多層膜ベシクルができる。しかし、隙間に10 Hz程度の交流電場を加えると、このような問題が防げる。誰もなぜかわからないが、結果として、実験に適切なサイズ(直径10~100 μm)の2重膜ベシクルが形成される。

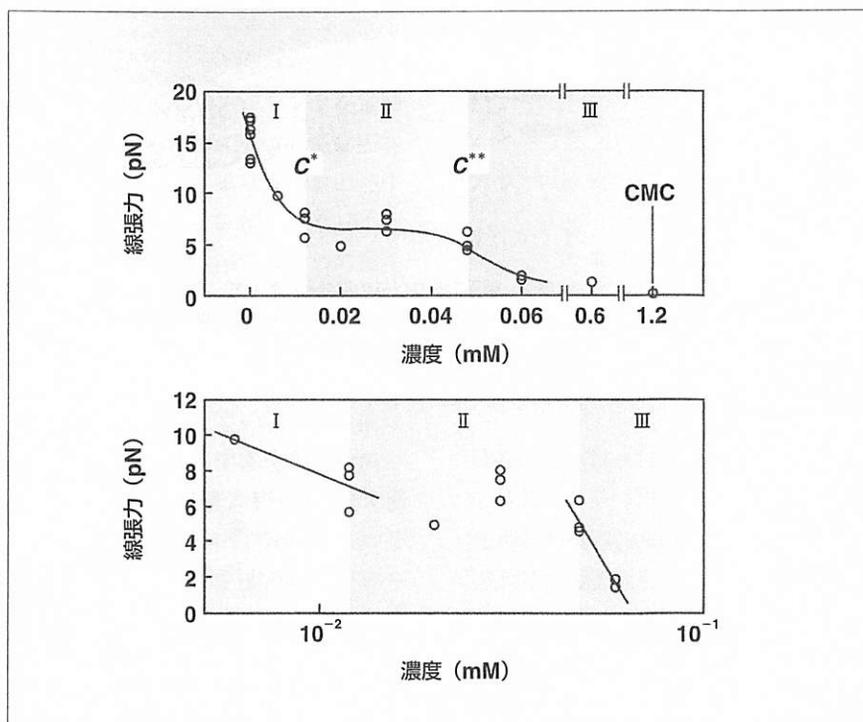
できたばかりのベシクルは、海水中のクラゲのように溶液中を漂っている。単にその1つに穴をあけるだけでは、穴のダイナミクスについて多くを知ることはできない。ベシクルをびんと張った状態にするため、実験家は光を用いる。なぜ光が表面張力を生み出すのか明らかではないが、その結果は明瞭に観察できる。光を強く照射するとベシクルの膜は膨らむ。やがて膜の波打ちが止まり、ベシクルは最終的に球形になる。

さらに強く光を照射すると、膜は穴が開くまで引っ張られる。ベシクルの内側に閉じ込められていた水が、広がった穴を通過して外側に出ていくにしたがって、膜の内側の圧力は低下する。それにとまって、表面張力も低下する。表面張力がゼロに近づくと、今度は線張力の作用によって穴が閉じる。この過程を(図1)に示す。

穴の開閉が水中で起こる場合には、速すぎてビデオで観察することができない。4年前にプロシヤール=ヴィアールと彼女の共同研究者は、ベシクル内外の溶液の粘性を高くすれば、ダイナミクスが遅くなることに気づいた。水にシロップ状のグリセロールを加えると、数ミリ秒の過程が数秒の過程に変化し、顕微鏡下で映像化できるようになった。プロシヤール=ヴィアールのグループは、ビデオデータをデジタル化して解析することによって、穴の半径が小さくなる速度と穴の半径が比例することを発見した。簡単な物理的考察から比例係数を求めることができ、その中の唯一の未知数は線張力である。したがって、穴の半径の対数を時間に対してプロットすれば、その傾きから線張力が求まる。DOPCベシクルに対して、研究グループは15 pNという値を導出した²⁾。

■ J. ウィラード・ギブス

線張力は、自発曲率とよばれる量を用いて考えることができる。この用語は、たとえば脂質のような、親水性の末端と疎水性の末端を兼ね備えた分子、すなわち両親媒性分子に対して用いられる。正の自発曲率をもつ分子は、水溶



〈図2〉 穴の縁における線張力

Tween 20 洗剤分子の濃度が、3つの臨界値 C^* 、 C^{**} 、CMC (臨界ミセル濃度) を通って上昇するにしたがい、穴の縁における線張力は3つの領域に分かれて減少する。上のグラフにおいて、2つの軸は線形である。下のグラフにおいて、濃度軸は対数的にとっている。(Adapted from ref. 1.)

液中で親水性の末端を外側に向けた曲面を形成する。負の自発曲率をもつ分子は、逆向きの曲面を形成する。

脂質はほとんど自発曲率をもたない。異なる自発曲率の値をもつ分子を加えて、線張力を変化させることは可能だろうか？ パリのグループはこの疑問に答えようとした。この問題は少なくとも2つの理由で興味深い。まず第1に、分子を添加して線張力を低下させることは、生物学的なプロセスにとって重要であるかもしれないからだ。たとえば遺伝子治療において、健全なDNAを細胞膜の中へ送り込むことが容易になるかもしれない。

第2の理由は、穴の縁に分子を加え

ることの効果が、ギブスの吸着式を連想させる点にある。この式は、溶液の表面張力 γ と溶質のバルク濃度 C を、表面過剰量 Γ_s と結びつけるものである。すなわち、ギブスの吸着式は

$$\Gamma_s = -(kT)^{-1} \frac{d\gamma}{d \ln C}$$

で与えられる。ここで k はボルツマン定数、 T は周囲の温度である。一定温度における Γ_s と γ の関係は“等温線”とよばれる。

プロシャル=ヴィアールは、膜の縁における吸着が、上の公式の1次元版で支配される可能性に気づいた。これは、 γ を線張力 γ で、また Γ_s を線過剰量 Γ_L でそれぞれ置き換えたもの

である。このような普遍的公式は、もしも適用可能であれば、同様な系全般のふるまいをモデル化または予測するのにたいへん有用であるに違いない。

1次元のギブスの吸着式を試すために、プロシャル=ヴィアールとカラテキン (Erdem Karatekin)、大学院生のピュエッシュ (Pierre-Henri Puech)、ボルギ (Nicolas Borghi) らは、“Tween 20” とよばれる工業用の合成洗剤の濃度を変えて、DOPC ベシクルの線張力を測定した。現在のところ、実験装置の温度を変化させることができないので、彼らは等温線を1本だけ測定した。

Tween 20 分子は正の自発曲率をもっている。そのような分子は親水性頭部が疎水性尾部よりも大きく、小さな円錐形に対応させることができる。膜の縁で脂質の親水性頭部はむりやり引き離されているため、くさび型の隙間ができてしまう。そこに活性剤分子がびたりとはまる。隙間を埋めることによって、活性剤分子は分子間のひずみを緩和し、それとともに線張力も低下する。

さまざまな活性剤分子濃度の下で穴の開閉を観察した結果を〈図2〉に示す。そこには、3つの異なる領域が存在する。領域Iにおいて、活性剤分子はむき出しになった穴の縁に選択的に吸着する。より多くの分子が吸着すればするほど、線張力は減少する。そのとき、線張力は1次元のギブスの式に従って対数的に低下する。〈図2〉の下側の片対数プロットの傾きから、 Γ_L は約 2 nm^{-1} であることがわかる。

プロシャル=ヴィアールが C^* と定義した臨界濃度で、線張力の減少が停止する。これより先の2番目の領域

では、どんなに活性剤を加えても、分子は穴の縁ではなく膜面に吸着する。

活性剤濃度が2番目の臨界濃度 C^{**} に達するまで、線張力は一定のままである。2番目の臨界濃度から、線張力は再び対数的減少を示し始めるが、この領域ではより急激に減少する。領域IIIで、 Γ_L は約 9 nm^{-1} である。プロシヤール=ヴィアールは、 C が C^{**} を超えると、活性剤分子が再び縁に吸着し始めると推測した。ただし、それは分子がぎっしりと詰まった新しい凝縮相であると考えた。

濃度がいわゆる臨界ミセル濃度に到達するまで領域IIIは続く。そのしきい

値を境にして、活性剤分子はミセルとよばれる球状構造に集合するようになる。ミセルはベシクルも溶かし込む。

線張力がギブスの吸着式に従うことを示してから、プロシヤール=ヴィアールはその式を用いて、Tween 20分子1個の吸着エネルギーを計算した。得られた値は $12 kT$ で、3年前にスイスのバーゼル大学のヘルクロツ (Heiko Heerklotz) とゼーリヒ (Joachim Seelig) が熱測定で求めた値と同程度であった³⁾。

別の仕事として、プロシヤール=ヴィアールのグループは、Tween 20の代わりにコレステロールを用いて同様の

実験を行った⁴⁾。コレステロールのおもな生物学的役割は膜の硬さを増大させることであり、負の自発曲率をもつ。コレステロールを加えると線張力は逆に増加したが、このことはギブスも予測したに違いない。

参考文献

- 1) P.-H. Puech, N. Borghi, E. Karatekin, F. Brochard-Wyart: Phys. Rev. Lett. **90**, 128304 (2003).
- 2) O. Sandre, L. Moreaux, F. Brochard-Wyart: Proc. Natl. Acad. Sci. USA **96**, 10591 (1999).
- 3) H. Heerklotz, J. Seelig: Biochim. Biophys. Acta **1508**, 69 (2000).
- 4) E. Karatekin *et al.*: Biophys. J. **84**, 1734 (2003).

新理科教育入門

A5判 199ページ 本体2,000円+税 永田 英治/著

学校教育の基本を問い直す

★理科教材研究、科学史研究、授業研究をもとに理科教育の基本的な諸問題に答える。

★教材史研究をもとに科学・理科教育を継承して、過去の成果から新しい発想を生み出し、これからの教材をめざす。

永田 英治

宮城教育大学教育学部教授。科学史、教育学、理科教育が専門。

著書に1665年ロバート・フィック原著『ミクログラフィア』(仮説社:板倉聖宣と共著)

『日本理科教材史』(東京法令出版)

児童書に『にじってなあに』『うずまきは右巻き左巻き』(ともに大日本図書)などがある。

対象:科学教育に携わる全ての人 教師・研究員・大学生他

星の環会

〒162-0056 東京都新宿区若松町33-6菱和パレス2F

TEL:03-5292-0481 FAX:03-5292-0482

HP=<http://hosinowa.mdn.ne.jp> E-mail=hosinowa@pp.ij4u.or.jp

最新刊

