

解説

光学変換画像処理におけるステレオロジー

石坂 昭三

筑波大学生物科学系 〒305 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1

(1985年8月15日受理)

Stereology on Image Processing by Optical Transformation

Shozo ISHIZAKA

Institute of Biological Sciences, Tsukuba University,
1-1-1, Tennodai, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

1. ステレオロジー

形態計測において、対象の形態に関する諸量を、それより低次元の情報から、幾何学的確率論の助けを借りて推論する手法が、ステレオロジー (stereology) と呼ばれている¹⁻³⁾。ステレオロジーについては、すでに多くの成書があり⁴⁻⁶⁾、応用もひらけている⁷⁻¹⁵⁾。ここでは、この解説の導入として、いくつかの例について述べる。

たとえば、組織の粘弾性の違いを検討する場合に、任意の平面における組織の切口を観測し、その切口に大小の円孔があったとしよう。そこで、組織中に球状の空孔が分布していると判断した。単位面積あたり切口に半径 r の円孔が現われる確率密度 $f(r)$ は観測できる。それから、組織の単位体積中に半径 R の空孔が存在する確率密度 $F(R)$ が推定され、組織の粘弾性を論じる資料になった。

ここで、切口が大小の円孔だったので、組織の機能の違いは、この組織中に大小の空孔があるため、と判断することは自然である。図1の半径 R の球が単位面積 ($1^2 \gg \pi R^2$) に切口を現わす確率密度は、 R に比例する。半径 r の切口を現わす確率密度は $r/R\sqrt{R^2-r^2}$ に比例する。したがって、半径 R が $F(R)$ の確率密度で出現する球が分布しているとき、切口に半径 r の円として観測される場合は、

$$f(r) = \int_r^\infty dRF(R)r/\sqrt{R^2-r^2}$$

になる。

原因が、球状の空孔と想定できれば、関数型がわかる

ので、さらに簡単な調べ方も思いつく。たとえば、単位長さの直線と球とが交わる弦の長さ $2l$ の出現確率密度 $f_1(l)$ が観測できる。それは次の式になることがわかる。

$$f_1(l) = \pi l \int_l^\infty dRF(R)$$

すでに、ステレオロジーでは、さまざまな形状について、簡明な関係式が得られている。ある物体の性質を知る上に、その物体の（閉じた曲面 $f(x, y, z)=0$ の）体積を知りたいことがある。しかし、観測できるのは、任意の方向 z に、垂直にランダムな対象の切断面 $f(x, y, z_i) \leq 0$ であることがしばしば起こる。各断面積 $S(z_i)$ は測定できる。

$$S(z_i) = \iint_{f(x, y, z_i) \leq 0} dx dy$$

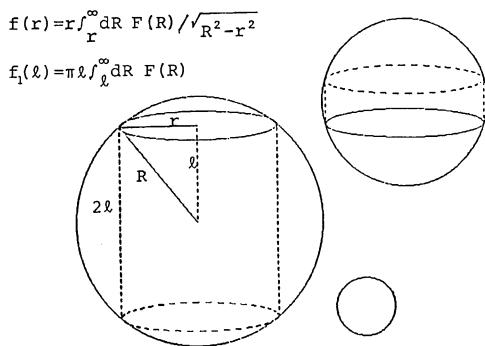
体積 V は

$$V = \int_{z_0}^{z_0+h} S(z) dz = h \int_{z_0}^{z_0+h} S(z) \frac{dz}{h} = h \bar{S}$$

dz/h は、 z を切る確率密度であり、 $S(z)$ は z における面積をあらわす標識であるから、この積分は面積の平均値 \bar{S} をあらわす。平均値は、観測した $i=1, 2, 3, \dots, N$ の断面積 $S(z_i)$ から、

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^N S(z_i) \cdot \frac{1}{N}$$

その物体が単位長さに占める体積が、曲面の関数型を知らないても、幾何確率をもちいて推定できる。同様に断面積についても任意の方向 x に垂直にランダムに引いた直線と輪郭線との切片の長さを測定し、その平均値がその断面の単位長に占める面積をあらわしている。したが

図 1 球半径 R , 切口半径 r と弦 $2l$ との関係

って、閉じた曲面の閾数型がわからなくても、閉曲面の弦の長さの平均値が測定できれば、その弦を含むその曲面の断面積を、さらに、断面積の平均値が測定できれば、曲面の体積を、幾何確率をもちいて推定することができる。

しかし、前提に問題がある。対象を観測するために、設定した、恣意的に選択した低次元の、空間がはたしてランダムに対象との切口をもつだろうか。対象が切断に際し配向しないだろうか。また、観点によっては、対象は必ずしも連続な閉曲面とは限らない。距離は定義できたとしても、対象になめらかな曲線に沿った長さが期待できないことさえある。

2. 光回折による観測

ステレオロジーは自然現象に関する対象を图形処理する1段階である。これまで、ステレオロジーでは対象の形態についての諸量 R を、より低次元に設定した、面とか線の、領域 r に対象が出現する頻度・密度を観測した。その出現確率 $f(r)$ から、幾何学的関係 $\varphi(R, r)$ をもちいて、対象の形態的特徴 R の出現確率 $F(R)$ が图形上関係づけられてきた。

$$f(r) = \int dR F(R) \varphi(R, r)$$

图形処理に限れば、電算機の導入もあって、異方性の高い图形にもさらに発展が見られている¹⁶⁻²¹⁾。しかし、生物現象や不均一な物性等の対象は連続でなめらかな輪郭图形に留まるものではない。形態と機能の結びつきを見いだすことに、形態計測の意義がある。手段としても対象が設定した領域に出現する頻度・密度を観測する場合に、観測手段と対象との相互作用と、形態と機能との間の法則性とを考慮すべきである。

たとえば、ステレオロジーによって推算した体積や断

面積は、電子顕微鏡像の観測値から得ることが多い。ステレオロジーによる推定の努力にまつまでもなく、電子線 (convective ray) の吸収線量が測定できれば、対象の体積 (質量) が測定できる。また、照射線量 (単位面積あたり通過するエネルギー) の減衰が測定できれば、断面積も測定できる。サイズについても、音波 (conductive wave) を用いれば、対象固有の定在波が得られる等、観測手段と対象の相互作用を考慮すると、ステレオロジーで推定しようとした対象の形態的特徴が直接観測できることがある。直接観測できないまでも、光 (radiative wave) を用いれば、光の場と対象と共に鳴・干渉して、対象の形態的特徴に関する情報を、光が搬び出すばかりか、光自身の演算性によって^{22,23)}、対象の形態と機能の対応した画像処理が可能になる。

対象となる物体に単色で可干渉性の高いレーザーを照射したとしよう。すでに光学的に知られているように^{24,25)}、照射を受けた物体の各部の電気感受率のゆらぎは、電磁波である光を散乱する。いいかえれば、この電気感受率のゆらぎ分布 $\Delta\epsilon(\vec{x})$ が、見えている対象の物像をあらわしている。この対象から、同一の方向 \vec{k} に散乱した平行光束は干渉して回折点になる。立体的な対象の光学的情報が、散乱方向ごとに、回折面に積算される。この光学的演算はフーリエ変換に相当している。回折光を $\hat{\Delta\epsilon}(\vec{k})$ であらわすと、

$$\hat{\Delta\epsilon}(\vec{k}) = \int_Q d\vec{x} \Delta\epsilon(\vec{x}) \exp(-i\vec{k}\cdot\vec{x})$$

回折光は波数ベクトル、すなわち光伝播方向のみならず、単位長さあたりの波数、の閾数である。回折光の強度分布を示す回折像は、縞状であって、対象の構造が微細に密であるほど、縞の幅は広く、構造が粗であるほど、縞の幅は狭い。対象をあらわす、位置の閾数である物像は、光演算によって、密度の閾数である回折像に変換されている。

しかも、回折してきた光が、光学的に、対象のそれぞれの部分から散乱された光ごとに集まると、実像になる。いいかえれば、回折光の情報は実像をつくる情報と等価である。とくに、光の強度と位置とを、ともに記録したホログラムは回折光と参照光とを干渉させて記録したものである。

密度の閾数として、光学的形態情報を完備した回折光やホログラムは、形態計測のデータである。

3. フーリエ変換を用いた画像処理

フーリエ変換を用いた画像処理は、細胞動態の形態と

機能との結びつきを簡明にする²⁶⁾。例として、細胞行動の解析を示そう。

細胞に、時間空間の関数として刺激 $S(t', \vec{x}')$ を与えると、細胞は運動 $M(t, \vec{x})$ を起こす。この細胞の応答は、刺激と運動について、細胞特有の間 $t-t'$ と隔り $\vec{x}-\vec{x}'$ をもった機構 $\varphi(t-t', \vec{x}-\vec{x}')$ である。これが細胞の行動である。その行動は

$$M(t, \vec{x}) = \int_{-\infty}^t \int_Q dt' d\vec{x}' S(t', \vec{x}') \varphi(t-t', \vec{x}-\vec{x}')$$

とあらわせる。応答関数をこの積分式から解くことがこの機構を解明する緒口である。

刺激関数はいろいろ工夫して与えるとして、まず、細胞運動を観測しなければならない。この運動では、移動 \vec{x}_d と回転 \tilde{R} とが容易に観測できる。しかし、細胞の移動や回転を起こしているのは、その細胞自身の形態変化である。そこで、形態変化 $M(t, \tilde{R}(\vec{x}-\vec{x}_d))$ を移動と回転から分離して観測したい。

この形態変化はフーリエ変換によって、

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_Q dt d\vec{x} M(t, \tilde{R}(\vec{x}-\vec{x}_d)) \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x}) \\ &= \hat{M}(\omega, \vec{k} \tilde{R}^*) \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{x}_d) \end{aligned}$$

この変換関数の絶対値の2乗は $|\hat{M}(\omega, \vec{k} \tilde{R}^*)|^2$ となり移動を含まない。逆回転 \tilde{R}^{-1} を施せば、形態変化だけの $|\hat{M}(\omega, \vec{k})|^2$ が得られる。フーリエ変換によって、形態変化は移動と回転から分離して扱える。

さらに、応答関数と刺激関数とのたたみ込みの積分はフーリエ変換によって、

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_Q dt d\vec{x} \int_{-\infty}^t \int_Q dt' d\vec{x}' S(t', \vec{x}') \varphi(t-t', \vec{x}-\vec{x}') \\ & \times \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x}) \\ &= \hat{S}(\omega, \vec{k}) \cdot \hat{\varphi}(\omega, \vec{k}) \end{aligned}$$

フーリエ変換された応答関数 $\hat{\varphi}(\omega, \vec{k})$ と刺激関数 $\hat{S}(\omega, \vec{k})$ と単純な積になる。

したがって、形態変化のパワースペクトル $|\hat{M}(\omega, \vec{k})|^2$ が観測でき、刺激関数はフーリエ成分を実験的に計画して与えるから、応答関数のパワースペクトル $|\hat{\varphi}(\omega, \vec{k})|^2$ は容易に求められる²⁷⁾。

$$|\hat{\varphi}(\omega, \vec{k})|^2 = |\hat{M}(\omega, \vec{k})|^2 / |\hat{S}(\omega, \vec{k})|^2$$

4. 顕微干渉回折装置

可干渉性の高いレーザーの出現に伴い、上記の解析に対応した観測方法が確立している²⁶⁾。

動態細胞の形態とその変化を、移動と回転から分離し

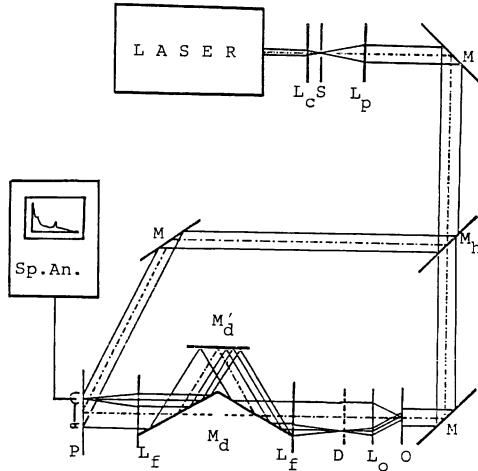


図 2 顕微干渉回折装置
ドープ鏡 (M_d, M_d') を光路に挿入し回転を打ち消し、回折強度スペクトルが測定できる。

た回折像またはホログラムを観測する装置が図2である。20 mW He-Ne レーザーを光源とし、5 μm のピンホールをもつ拡大器 (L_c, S, L_p) を用いて可干渉性を高めた上で、光路をスプリッター (M_h) で二方に分け一方を参照光に用い、他方で動態細胞を照射した。試料 (O) 中の細胞が培養液中で運動していても、対物レンズ (L_o) の後方焦点面の回折像 (D) は光軸中心の像になり、移動はあらわれない。細胞が回転すると、回折像も回転するので、ドープ鏡 (K 鏡 M_d, M_d') を挿入して逆回転し、像の光軸中心の回転を打ち消すことができる。

5. 光学変換画像処理した動態細胞

動態細胞の例として、ゾウリムシ *Paramecium bursaria* の遊泳を示そう。このゾウリムシは、体長約 $2 \times 10^3 \mu\text{m}$ 、体幅 $4 \times 10 \mu\text{m}$ で、表層に配列している纖毛の波状運動によって遊泳運動する。

遊泳中のゾウリムシとそのゾウリムシを5% アルコール溶液で脱纖毛して泳げなくなったムシ、および比較のためのマイクロメータをそれぞれホログラムにとって、実像と回折像を比較した写真が図3である。図3には、さらに、脱纖毛した懸濁液の回折像も示してある。ゾウリムシの回折縞の密度と実像の長さが対応するから、縞が最も密な方向は体長軸である。それに直交する縞との密度比は体長と体幅の比を示している。これらの光軸に近い回折縞は細胞の形状を示している。

一方、光軸から離れた一連の回折縞は、脱纖毛した細胞には見られないものが多い。細胞から脱纖毛してアルコール懸濁している纖毛の回折縞は光軸中心に円帯をつ

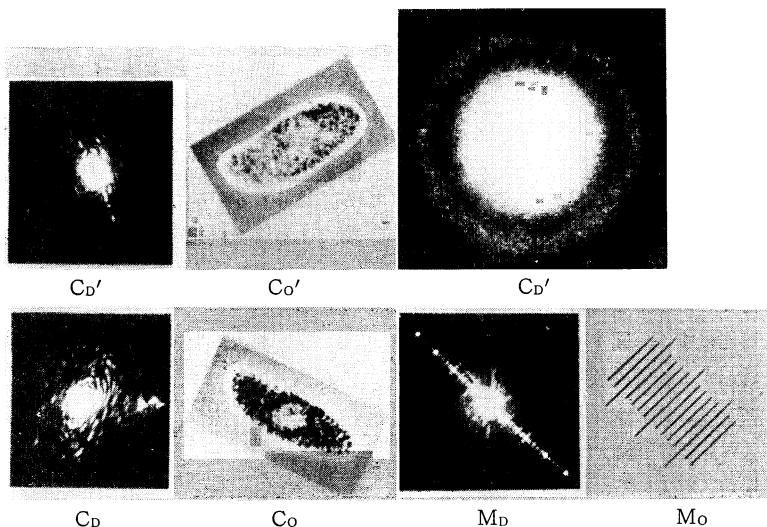


図 3 ホログラムから再生した実像と回折像
10 μm 標準格子 Mo と M_D, 運動しているゾウリムシ
C_O と C_D, 脱繊毛したムシ C_{O'} と C_{D'}, 繊毛懸濁液

くり、繊毛が不規則に懸濁していることを示している。この帯域は、ちょうど、脱繊毛したゾウリムシには見られず繊毛をもつゾウリムシに見られる一連の回折縞の帯域と一致している。そこで、この回折縞は繊毛群の回折と見られる²⁸⁾。

繊毛群の回折縞を光電変換して周波数スペクトルをとりゾウリムシが遊泳しているときの繊毛波周波数が得られた。標準として、 $2 \times 10^3/\text{cm}$ プラスチック格子を 10 cycle で緊縮運動させ、この第1次回折縞を光電変換した電気信号を用いた。細胞体の形状を示す回折縞を周波数分析した結果は、繊毛をもつものと、脱繊毛したものと強度に違いはあったが、指数分布様であった。

光学変換して得られた動態細胞のホログラム、周波数スペクトル、および回折像は、必ずしもホログラムを逆変換した再生像を得なくても、ただちに機能に関する特徴をとり出すことに用いられることがわかる。しかも、細胞の外形よりも、微細な繊毛等の細胞器官さえも、規則的に配向・配列していると、明瞭な回折縞を生じる。これは、生体の形態と機能を結びあわせて観測することを容易にする手掛になる。

6. 生体反応場の画像処理

生体反応は、複雑な微細構造をもつ細胞の特定な部位で起きる。これまで、その反応物質またはその標識が、特異的光吸収するか、蛍光放射する場合には、細胞の局所構造における生体反応は顕微分光測光されてきた。し

かし、測光する局所内の問題の分子数は極端に少なく、しばしば、 10^3 個以下である。測定の SN 比が低いことは避けられない。そこで、同調している細胞について、問題の反応を多回測定して、それを積算することが生体反応を知るには必要である。

この積算に光学変換画像処理が用いられないであろうか。この処理では、散乱光が観測されている。電気感受率のゆらぎが散乱をひきおこしている。反応による、分子組成の変化、熱運動、濃度拡散、はいずれもそれぞれ、特異な応答時間で、かつ特異な分布で、電気感受率のゆらぎをひきおこしている。分子の散乱断面積はその特異吸収断面積よりは小さい欠点がある。しかし同じ配向の同じ反応は、同じ形態をとるので、観測視野のどこに起こっていても、同じ回折像を示す。多数の対象を周期的に格子状に同時に反応させることができれば、多数の細胞からの信号を光の性質にもとづき積分できるので、形態に応じて生体反応が積算されて高い SN 比で観測される²⁹⁾。

それは、細胞内で他の反応が平行していても、問題の反応 $f(t, \vec{x})$ と形態の異なるいくつかの他の反応 $g_i(t, \vec{x})$ とは、それぞれ相関をもたないフーリエ成分があるので

$|f(\omega_i, k_i) + g_i(\omega', k')|^2 = |\hat{f}(\omega_i, k_i)|^2 + |\hat{g}_i(\omega', k')|^2$

それぞれの成分について、一致協調させて観測することができる。また、同じ反応は、適当な周期 T と距離 \vec{d} を置けば、個数 N 以上の SN 比の向上が望めるからであ

る。

$$\left| \sum_k^N f(\omega, k) \exp i(\omega m_h T - \vec{k} n_h \vec{d}) \right|^2 \\ = |f(\omega, k)|^2 \left\{ N + \sum_{h>k} 2 \cos [\omega(m_h - m_k)T - \vec{k}(n_h - n_k) \vec{d}] \right\}$$

7. 格子状に周期的に誘発した反応の測定

格子状に周期的に反応を誘発させる技術が反応場の光学変換画像処理に必要である。定在音場または光による励起がこの技術を可能にする。図4は後者を示す。励起光源には、反応を誘発する物質に吸収される単色光源(Ar^+)が用いられている。回転シャッター(Ch)は光を断続し、光くさび(W)で格子縞状に薄手の試料槽(C)中の試料溶液に照射がされている。照射の進行に伴い、反応時定数に従って反応が進み、分子の組換えと反応熱により電気感受率のゆらぎが立ち上る。一方、熱拡散と濃度拡散によって増加が抑えられ、だいに飽和する。光照射をやめると、分子の光励起はただちに停止するが反応や拡散は一時継続するがやがて平衡になる。こうした周期的な反応場が格子状に試料中に格子状光励起によってできる。

こうして同じ反応場が多数観測視野に形成されるので、吸収を伴わないレーザー光(He-Ne)を照射し、それぞれの回折光が重ね合わせり干涉積算した画像が得られる。回折縞を光電検知(P)し、雑音の少ない周波数分析が行なわれる。その結果、格子定数から定まった回折方向 \vec{k} で、周期条件から定めた周波数 ω について、応答変化する反応の濃度分布および温度分布が、回折光の

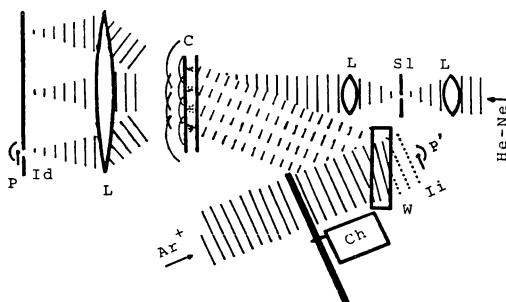


図4 化学反応の光学変換観測装置
 Ar^+ : アルゴンイオンレーザー,
Ch: 回転シャッター, W: くさび,
 I_i : 入射光強度,
He-Ne: ヘリウム-ネオンレーザー,
L: レンズ, S1: スリット,
C: 試料槽, I_d : 回折光強度,
P, P': 光電検出器

刺激光に対する強度比または位相差から測定できる³⁰⁾。

8. 画像処理にもとづく反応場の特徴の観測

反応場を光学変換画像処理して、反応動態の特徴、反応物、生成物の拡散係数、熱拡散定数、反応の時定数等が求められる。それらの特徴は反応動態の基本になる定数であり、光励起による熱発生 αI を含む熱拡散方程式

$$\frac{d}{dt} T = D_T \nabla^2 T + \alpha I$$

および、拡散係数 D_N 、反応の時定数 τ を含む反応速度方程式

$$\frac{d}{dt} N = D_N \nabla^2 N - \frac{1}{\tau} N + \beta I$$

に係わっている。ここで、 T は温度、 N は反応物の濃度、 βI は光強度 I による反応物の供給である。

上の2式をフーリエ変換すると、温度と濃度の分布は

$$\hat{T}(\omega, \vec{k}) = \alpha I(\omega) / (i\omega + D_T \vec{k}^2) \\ = \alpha I(\omega) / \sqrt{\omega^2 + D_T \vec{k}^2} \\ \times \exp i \tan^{-1} \omega / D_T \vec{k}^2$$

$$\hat{N}(\omega, \vec{k}) = \beta I(\omega) / \sqrt{\omega^2 + (D_N \vec{k}^2 + 1/\tau)^2} \\ \times \exp i \tan^{-1} \omega / (D_N \vec{k}^2 + 1/\tau)$$

になる。これらは電気感受率のゆらぎを起こして、光散乱に寄与するので、光学変換画像処理される。

これらの寄与が確かめられている。熱拡散について、化学組成の変化を伴わず光-熱変換するエオシンYを用いて、溶媒の熱拡散定数 D_T が求められている。熱拡散と濃度拡散について、光励起によりシストラ ns 変換するトランスアゾベンゼンを用いて、熱拡散率と拡散係数が求められている。 D_T , D_N のいずれを求めるにも回折光強度よりも位相差が測定しやすい。 D_T は低分子の D_N よりも2桁は大きい。それらの位相差の分散域はまったくこととなっている。

さらに複雑な光化学ラジカル重合反応が、光学変換画像処理して解析されている。フェニルアゾトリフェニルメタンは光励起すると、フェニルラジカルを生じ、これが引金になって、 n -ビニルカルバゾルが連鎖的にラジカル重合し拡散する。それらのラジカル(高分子)が会合すると、安定な高分子をつくり反応は終わる。重合度が離れていても、それらの吸収スペクトルには違いが見られないで、分光測定では反応の動態はつかめなかつた。ところが、図5は、この反応場の特徴が回折光の周波数-位相差曲線に示されている³¹⁾。

この図の、周波数 ω_0 には位相転が見られ、0.1 cycle 以下と 20 cycle 以上の帯域に原点を通る漸近線が見ら

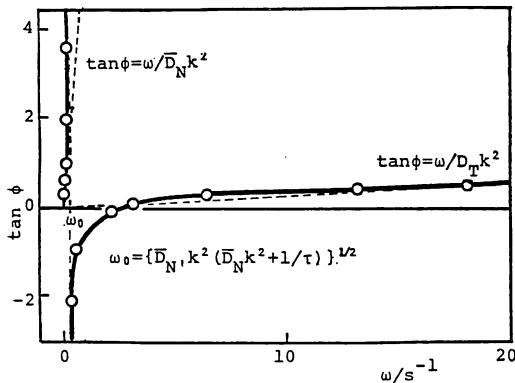


図 5 濃度拡散、熱拡散を伴う光重合反応場による、回折光と励起光との位相差の励起周波数依存性

れる。後者の漸近線は勾配がゆるやかで、熱拡散 $\tan \phi = \omega/D_T k^2$ に相当している。前者は桁違いに急で、濃度拡散 $\tan \phi = \omega/\bar{D}_N k^2$ に対応している。高分子の数平均拡散係数 \bar{D}_N を算出すると、単分子の拡散係数の數十分の 1 しかなく、重合度が数 10^2 倍に達していることを示している。反転点の周波数 ω_0 と平均拡散係数 \bar{D}_N から、数平均反応時定数 τ が、

$$\omega_0 = \{\bar{D}_N k^2 (\bar{D}_N k^2 + 1/\tau)\}^{1/2}$$

から算出でき、ラジカルの寿命をあらわしている。

9. 結 言

これまでのステレオロジーでは、恣意的に選んだ低次元の空間における、対象の出現率が観測されてきた。この出現率から対象の形態上の諸量が推定された。推定には、対象の対称性、輪郭の連続性やなめらかさが用いられたことも多い。これらの条件にかかわらず、光学変換画像処理では、動態細胞であっても、時空間の関数である実像から、形態情報を保って変換された、頻度・密度の関数である回折像が観測できる。細胞行動においても光学的に演算して、細胞形態変化のフーリエ成分は刺激と応答関数のフーリエ成分との単純な積になる。個々には SN 比が悪くて測定に掛からない形態を伴う反応場についても、この光学変換画像処理によって、一つの視野に多数の反応を同じ配向で進行させれば、熱拡散定数、濃度拡散係数、反応時定数などが求められる。光学変換画像処理は、これまでのステレオロジーには見られない、形態と機能との関係に見通しを与える。

文 献

1) G. Bach: "Gründung einer internationalen Gesell-

- schaft für Stereologie," Z. Wiss. Mikrosk., 65 (1963) 190-195.
- 2) E. E. Underwood: "A standardized system of notation for stereologists," *Stereologia*, 3 (1964) 5-7.
 - 3) E. E. Underwood: *Quantitative Stereology* (Addison-Wesley Publ. Co., Reading/Menlo Park/London/Don Mills, 1970).
 - 4) R. T. DeHoff and F. N. Rhines: *Quantitative Microscopy* (McGraw-Hill Book Co., New York/St. Louis/San Francisco/Toronto/London/Sydney, 1968).
 - 5) 諏訪紀夫: 定量形態学 (岩波書店, 東京, 1977).
 - 6) E. R. Weibel and H. Elias: *Quantitative Methods in Morphology* (Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1967).
 - 7) M. A. Deslesse: "Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches," C. R. Acad. Sci. (Paris), 25 (1847) 544-545.
 - 8) H. Elias, A. Hennig and D. E. Schwartz: "Stereology: applications to biomedical research," *Physiol. Rev.*, 51 (1971) 158-200.
 - 9) A. Hennig: "Bestimmung der Oberfläche beliebig geformter Körper mit besonderer Anwendung auf Körperhaufen im mikroskopischen Bereich," *Mikroskopie*, 11 (1956) 1-20.
 - 10) G. Matheron: *Éléments pour une Théorie des Milieux Poreux* (Masson, Paris, 1967).
 - 11) G. Matheron: "Random sets theory and its application to stereology," *J. Microsc.*, 95 (1972) 15-23.
 - 12) A. Rosiwal: "Über geometrische Gesteinanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermäßigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandteile gemengter Gesteine," *Verh. k. k. Geol. Reichsamt (Wien)* (1898) 143.
 - 13) E. R. Weibel: "Principles and methods for the morphometric study of the lung and other organs," *Lab. Invest.*, 12 (1963) 131-155.
 - 14) E. R. Weibel: *Morphometry of the Human Lung* (Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1963).
 - 15) E. R. Weibel, G. S. Kistler and W. F. Scherle: "Practical stereologic methods for morphometric cytology," *J. Cell Biol.*, 30 (1966) 23-39.
 - 16) K. Kanatani: "Distribution of directional data and fabric tensors," *Int. J. Eng. Sci.*, 22 (1984) 149-164.
 - 17) K. Kanatani: "Stereological determination of structural anisotropy," *Int. J. Eng. Sci.*, 22 (1984) 531-546.
 - 18) K. Kanatani: "Detection of surface orientation and motion from texture by a stereological technique," *Artif. Intell.*, 23 (1984) 213-237.
 - 19) J. Serra: *Introduction à la Morphologie Mathématique* (Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique Fasc. 3. Ecole des Mines de Paris, 1969).
 - 20) J. Serra: "Stereology and structuring elements," *J. Microsc.*, 95 (1972) 93-103.
 - 21) J. Serra: "Theoretical bases of the Leitz-Texture-Analysing-System," *Sci. Tech. Inf. Suppl.* 1, 4 (1974) 125-136, Leitz-Wetzler.
 - 22) B. J. Thompson: "Coherence requirements," *Optical Transform*, ed. H. Lipson (Academic Press, London/New York, 1972) pp. 27, 68, 313, 319.
 - 23) 辻内順平, 村田和美編: 光学情報処理 (朝倉書店, 東京, 1974).
 - 24) J. C. Lastovka: "Light mixing spectroscopy and the

- spectrum of light scattered by thermal fluctuations in liquids," Ph. D. thesis MIT, Cambridge, Massachusetts (1967).
- 25) B.J. Berne and R. Pecora: *Dynamic Light Scattering* (John Wiley & Sons Inc., New York/London/Sydney/Toronto, 1975).
- 26) S. Ishizaka: "Separation between conformation change of motile organelle and translation and rotation of cell body by interfero-micro-diffractometry," *Stereol. Jugosl.*, **3**, Suppl. 1 (1981) 383-387.
- 27) S. Ishizaka: "Measurement of response function in cell behavior by laser Fourier technique," *Acta Stereol.*, **1** (1982) 199-202.
- 28) 石坂昭三: "生細胞構造のレーザー光 Fourier 解析", 第21回日本医学会総会誌, **1** (1983) pp. 120-122.
- 29) 石坂昭三, 宮本 潔: "形態の同定と類別", *映像情報*, **6**, 3(1974) 55-57; **6**, 5(1974) 39-43; **7**, 1 (1975) 33-36.
- 30) S. Ishizaka, T. Urano and K. Tokumaru: "Laser Fourier imaging of chemical reaction. Observation of the diffusion process of heat emitted from dye molecules by striped laser excitation," *Chem. Lett.* (1984) 1705-1708.
- 31) S. Ishizaka, T. Urano, C.-T. Xu and T. Hayashi: "Laser Fourier imaging of gradient," *Acta Stereol.*, **2**, Suppl. 1 (1983) 295-300.