コンピュータ支援 3D 計量形態学

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 61, No. 2 (2011), pp. 78-84

Computer-aided quantitative 3D stereology

足立 吉隆*
Yoshitaka ADACHI***Keywords:** 3D, topology, differential geometry, genus, Euler characteristics, Gaussian curvature, Mean curvature

1. はじめに

計量形態学 (Quantitative stereology) とは、ある断面における二次元 (2D) 組織写真上に描いた試験線と粒界や第二相との交点数を数えることによって、粒径、面積、体積率などの三次元 (3D) の組織特徴値を求める学問である^{1,2)}。例えば、均一な直径 ($2r$) を持つ結晶粒 (球形状と仮定) の二次元断面における粒半径 (r') を測定することによって、 r が求められる (後述する (6) 式)。本手法は簡便であり、広く材料組織の定量化に適用されているが、適用限界を理解しないまま適用すると大きな誤差を生じることになる。計量形態学は組織がマクロ的に均一であることを前提とするが、第二相の形態を画一に考える場合と、多様に考える場合がある。ただし、その多様性をあらかじめ想定して表面積などを算出するので、実際に複雑な材料組織の特徴値を算出する場合には第二相形態の分布を単純化して考えることになり、精度に問題が残る。複相組織を評価する場合、粒径、表面積、体積などの“量”に関する特徴値 (metric 特性と呼ばれる) に加えて、連結性、入組み度 (topology 特性と呼ばれる) を評価することが必要なことがある。2D 観察結果に基づく計量形態学はある断面での観察結果に基づいて行われるので、その観察面でたとえ不連続に観察される第二相組織が内部でも不連続であるかどうかについては保証できない。複相組織が入組んでいる場合も、それを捉えられる観察方向が限られているので任意断面での観察ではそれを評価することは容易ではない。

ありのままの組織形態 (連結性、入組み度を含む) を定量評価するにあたって、位相幾何学および微分幾何学に基づいた三次元 (3D) 評価が有用である^{1~4)}。その対象サイズは、ナノスケールオーダーからキロメートルオーダーまで広い。材料組織の解析では対象サイズに応じて種々の 3D 可視化法が開発されており、対象サイズが大きいほうから、中性子線・X 線トモグラフィ法⁵⁾、シリアルセクション SEM/EBSD 像の 3D 再構築法⁶⁾、TEM トモグラフィ法⁷⁾ がある。本報で取上げるシリアルセクション法では、研磨と観察を繰返すことによって得たシリアルセクション像を、コ

ンピュータ上で位置補正 (アライメント) をした後、ネットを掛けて連続化 (レンダリング) することによって三次元像が得られる。得られた三次元像は位相幾何学あるいは微分幾何学に基づいて定量評価される⁸⁾。位相幾何学は、種数 (genus: g) やオイラー標数 (Euler characteristics: χ) を使って、連結性を評価する場合にとくに有用である^{1,2)}。微分幾何学は、ガウス曲率 (Gauss curvature: K) と平均曲率 (Mean curvature: H) を使って、形態 (板、帯、棒、球、板を貫通する穴や第二相、板に内在する空孔) を評価することを得意とする^{1,2)}。評価する体積内で局所的に組織が不均一であっても 3D 評価は表面積や体積を求めることが可能である。

本報では、はじめに 2D 計量形態学に基づいた線分率、面積率、体積率の関係、結晶粒径、完全面配向組織における真の間隔の算出方法の要点を振返った後、ラメラ組織の表面積、体積について、2D 計量形態学と 3D 計量形態学評価で得た結果を比較する。ついで、3D 像を位相幾何学、微分幾何学に基づいて評価し、寸法分布や、より複雑な組織形態 (連結性や入組み度) を定量化する手法について述べる^{9,10)}。

2. 2D 計量形態学

2.1 線分率、面積率、体積率間の関係と粒径の算出法^{1,2)}

複相組織において、複数の観察面上から求めた平均面積率 ($\bar{A}_A$) と体積率 (V_V) の間には以下の関係式が成立する。

$$\bar{A}_A = V_V \quad (1)$$

またある観察面上に複数の試験線を引いたときに、第二相を横切る平均線分率 ($\bar{L}_L$) と面積率 (A_A) の間には次の関係式が成立する。ただし、通常は一つの観察面上に複数の試験線を引くので、 $\bar{A}_A$ を求めるには誤差が大きくなり、 $\bar{L}_L$ から求めた体積率の精度は $\bar{A}_A$ から求めた場合よりも劣る。

$$\bar{L}_L = A_A \quad (2)$$

組織に配向がある場合はさらに以下の注意が必要である。体積率 (V_V) を平均面積率 ($\bar{A}_A$) から求める際には複数の (平行な) 観察面での評価が必要である。なおここで観察面をランダムにする必要はない。一方、平均線分率 ($\bar{L}_L$) から

* 物質・材料研究機構 材料信頼性萌芽ラボ (〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)。Exploratory Materials Research Laboratories for Reliability and Safety, National Institute for Materials Science (1-2-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0047). E-mail: ADACHI.Yoshitaka@nims.go.jp
受付日: 平成 22 年 6 月 30 日 受理日: 平成 22 年 9 月 30 日

表1 単位面積あたりの粒子数，単位体積あたりの粒子数から単位体積あたりの表面積への換算式¹⁾

N_L	N_A	N_V
$S_V=6/3N_L$	$S_V=7/3N_A^{1/2}$	$S_V=8/3N_V^{1/3}$

図1 層状組織の様々な間隔

求める際には，ランダムに選択した複数の観察面上にランダムにかつ複数の試験線を描く必要がある。

単位体積当たりの表面積 (S_V) は，単位長さあたりで切られた界面の数 ($\bar{N}_L$) を用いて求めることができる。

$$S_V=2\bar{N}_L \quad (3)$$

単位面積当たりの粒子数 ($N_A=1/\bar{A}$: $\bar{A}$ は1粒子あたりの平均表面積) や単位体積当たりの粒子数 ($N_V=1/\bar{V}$: $\bar{V}$ は1粒子あたりの平均体積) から単位体積当たりの表面積を求めた場合は表1の式から求めることができる¹⁾。

単位面積当たりの線状図形の全長 (L_A) と $\bar{N}_L$ の間には次式の関係がある。

$$L_A=\pi/2 \cdot \bar{N}_L \quad (4)$$

均一な直径 ($2r$) を持つ粒の二次元断面における粒半径を r' とすると，切断面の面積 $\pi r'^2$ の平均値は次式で与えられる。

$$\overline{(\pi r')^2} = \int_0^r \pi(r^2 - h^2) \frac{dh}{r} = \frac{2}{3} \pi r^2 \quad (5)$$

したがって，二次元断面における粒半径の測定値 r' と，真の半径 r との関係は次のようになる。

$$r=1.22r' \quad (6)$$

粒径に分布がある場合，断面組織の半径分布からその粒径分布を求める手法は極端に複雑になる¹⁾。

2.2 完全面配向組織における真の間隔の算出方法

完全面配向する組織例として，パーライト組織のセメンタイトの真の間隔 (σ_0) を取上げると，観察面上で長さ L の試験線と交差するセメンタイトの数 (n) から平均切片間隔 ($\bar{l}$) が求まる (図1)。

図2 試験線と交差するパーライトラメラ数

$$\bar{l}=L/n \quad (7)$$

n 個のセメンタイト板が長さ L の試験線と交わったとすると，単位長さあたりで切られた界面の数 ($\bar{N}_L$) は次式で与えられる。

$$\bar{N}_L=2n=2L/\bar{l} \quad (8)$$

単位体積当たりの表面積 ($S_V=S_V^{\text{cementite}}=S_V^{\text{ferrite}}$) は上述したように，

$$S_V=2\bar{N}_L \quad (9)$$

で与えられるので，

$$S_V=4L/\bar{l}=4n \quad (10)$$

を得る。また，セメンタイト板の真の平均間隔を $\bar{\sigma}_0$ (観察面上でのみかけの間隔 σ とは異なるので注意を要する) とすると，

$$S_V=2/\bar{\sigma}_0 \quad (11)$$

であるので，

$$\bar{l}=L/n=2\bar{\sigma}_0 \quad (12)$$

となる。

なお，面がある方向に配向している場合は配向度を考慮する必要がある¹⁾。

3. ラメラ間隔，表面積の2D/3D評価結果の比較 (ラメラ組織を対象に)

0.8mass% C 鋼のパーライト組織はラメラ間隔に逆比例して強度が上昇するので，その間隔を精度よく評価することが重要である。2.2節で述べたように，2D計量形態学では長さ L の試験線と交差するパーライト中セメンタイトの数 (n) を測定して，セメンタイトの表面積や真の平均間隔を求める。一例として，パーライト組織に縦・横それぞれ3本ずつの試験線を描き，それと交差するセメンタイトの数を評価した結果を図2に示す。その数を(10)式に代入して単位体積当たりの表面積 (S_V) を，また(11)式より真の平均間隔 ($\bar{\sigma}_0$) を求めた結果を表2に示す。これによると真の平均セメンタ

イトラメラ間隔は $0.44\ \mu\text{m}$ という値になる¹¹⁾。

一方、本試料をシリアルセクションし、三次元再構築した結果を図3 (a) に示す。この像より2つの解析ソフト (AVIZO, MAVI) を使って S_V および $\bar{\sigma}_0$ を求めた結果を表2 に示す。真の平均セメントイトラメラ間隔はいずれの場合も $1.1\ \mu\text{m}$ という結果になった。これは2D法で求めた値の2.5倍である。図3 (b) に示すようにセメント間隔が最小になるように3D像を傾斜して間隔を測定すると、場所によって間隔が大きく異なり、最狭部では $0.35\sim 0.45\ \mu\text{m}$ 程度、最広部では $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ であった。セメント中には穴があいて

表2 パーライト組織の体積率 (f_V)、単位体積当たりの表面積 (S_V)、真の平均間距離 ($\bar{\sigma}_0$) の2D、3D解析結果の比較

	2D	3D by AVIZO	3D by MAVI
f_V	—	0.14	0.15
$S_V\ (\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3)$	4.6	1.84	1.85
$\bar{\sigma}_0\ (\mu\text{m})^*$	0.44	1.1	1.1

図3 3D像上におけるパーライトラメラ間隔の測定例

図4 3D像に基づいた様々なサイズの粒の粒径分布測定例

いたり⁹⁾、裂けていたりする場所が散見され、そのような場所ではラメラ間隔が広がる。

2D法と3D法で評価したラメラ間隔の値が2.5倍も異なることの理由としては、2D法では試験線の本数が限られているとともにランダムではないこと、3D法では観察視野が限られており真の平均値が出せていないこと、などが考えられるが詳細はいまのところ不明である。ラメラ間隔が評価手法や、部位によって数倍も異なるということは、強度予測の精度に深刻な影響をもたらすので、今後さらなる検討が必要である。特に、破壊は組織特徴値の平均値よりも分散状態 (粗大粒や、ラメラ間隔が粗な部位) が影響すると思われるので、ラメラ間隔の分散状態を理解することが重要と思われる。

4. 3D像に基づいた寸法分布、連結性・入組み度の評価

得られた3D像を定量化し、材料特性と関連付けることが重要な課題の一つになっている¹²⁾。組織形態を評価する際に通常用いられるパラメータは結晶粒径、体積率である (metric 特性²⁾)。しかしながら、たとえ同じ結晶粒径・同じ体積率の組織であっても、第二相の連結度、入組み度 (しわしわ率) (topology 特性²⁾) が異なる場合があり、それが材料の信頼性や機械的特性に影響していることも考えられる。一例として、フェライト-マルテンサイト二相組織鋼 (DP鋼) の強度-延性バランスは、マルテンサイトの体積率や硬さに加えて、連結性にも依存することが経験的に知られている。ここでは、組織の寸法分布を評価した一例を示した後、連結度や入組み度を種数 (g)、ガウス曲率 (K)、オイラー標数 (χ) を使って表現する手法について述べる^{1),2),12)~17)}。なお、三次元可視化手法については他報¹⁰⁾で述べたので、本稿では省略する。

4.1 3D像から求めた結晶粒径分布

粒径に分布がある場合、断面組織の半径分布からその粒径分布を求める手法は極端に複雑になる¹⁾が、3D像に基づけば比較的容易に粒径分布が求まる。一例として図4 (a) のような不均一な寸法の粒の粒径のヒストグラムを (b) に示す。複雑な形状であっても3D像からその体積が求まるので、球換算した直径を算出でき、形態の不均一性を寸法分布から評価することが可能である。

4.2 3D 像に基づいた組織の連結度, 入組み度の評価

組織の 3D 幾何学を議論する際に基本となるのは位相幾何学の分野で有名な (13) 式のオイラー・ポアンカレの公式である。

$$\chi(X) = \sum_{k=0}^{\dim X} (-1)^k \cdot b_k(X) \quad (13)$$

ここで $\dim X$ は対象とする物体 X の次元である。 $b_k(X)$ は X の k 次元ベッチ数と呼ばれるもので、物体 X の k 次元の位相的な特徴を表す数である。(13) 式を 2 次元, 3 次元に対して書き下して見ると,

$$\begin{aligned} \chi(2) &= (-1)^0 \cdot b_0(X) + (-1)^1 \cdot b_1(X) + (-1)^2 \cdot b_2(X) \\ &= b_0(X) - b_1(X) + b_2(X) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \chi(3) &= (-1)^0 \cdot b_0(X) + (-1)^1 \cdot b_1(X) + (-1)^2 \cdot b_2(X) \\ &\quad + (-1)^3 \cdot b_3(X) \\ &= b_0(X) - b_1(X) + b_2(X) - b_3(X) \end{aligned} \quad (15)$$

がそれぞれ得られる。ここで、 X の 0 次元～3 次元ベッチ数は

$b_0(X)$ = X の vertex の数 v

$b_1(X)$ = X の edge の数 e

$b_2(X)$ = X の face の数 f

$b_3(X)$ = X の cell の数 c

で与えられる。したがって、物体 X の表面の話だけを考えようという立場ならば、2 次元の話であり、

$$\chi(2) = v - e + f \quad (16)$$

を使うことになり、一方 X を中身のつまった 3 次元の物体 (数学では多様体という) として考えるということであれば、

$$\chi(3) = v - e + f - c \quad (17)$$

となる。

例えば、立方体のオイラー標数は、2 次元 (表面だけを対象とする) では $v=8, e=18, f=12$ であり、3 次元では $v=8, e=18, f=16, c=5$ であることから、サイズによらず常に、 $\chi(2)=2, \chi(3)=1$ となる。三角柱や、四角錐など、膨らませれば球に近付くと閉じた立体のオイラー標数も $\chi(2)=2, \chi(3)=1$ となる。このオイラー・ポアンカレの公式は、立体を構成する面を多角形 (通常、三角形) でどれだけ細分しても成立し、オイラー標数は長さや、面積に依存しない不変量である。

オイラー標数, ガウス曲率の全積分値 (K_{total}), 種数 (g) の関係は以下で与えられる。

$$g = 1 - K_{\text{total}} / 4\pi = 1 - \chi(3) \quad (18)$$

g は規定の空間を貫通した領域 (トンネルあるいはハンドルと呼ばれる) の数 h と、独立した閉じた空間 (ボイド) の数 v , 独立した対象物の数 b を使って、次式でも与えられる。

$$g = h - (v + b) + 1 \quad (19)$$

いま、(17) 式よりオイラー標数が求められれば、(18) 式よりガウス曲率, 種数が得られる。この (18) 式はガウス曲率といった「微分幾何学」(硬い幾何学と呼ばれることがある)

図5 様々な形状の連結性 (C)²⁾

で得られる特徴値と、オイラー標数, 種数といった「位相幾何学」(軟らかい幾何学と呼ばれることがある) の特徴値を結び付ける Gauss-Bonnet の定理と呼ばれる。逆に、局所的なガウス曲率を求めて、その積分値がわかれば、種数やオイラー標数が算出できる。さらに、(19) 式により、現在調べている空間すべてについてボイドあるいは球状の析出物の数, 対象物の数を求めれば、(18) 式で得た種数の値を用いてハンドルあるいは棒状の析出物が求められるのである。(18), (19) 式より、 $\chi(3)$ と h, v, b の間に次の関係が成立する。

$$\chi(3) = (b + v) - h \quad (20)$$

ここで簡便化のため、 $v=0$ とする。この場合、 $\chi(3)$ は孤立した物体の数 (b) とその個々の物体を貫通する穴の数 (h) の差で与えられる。図5の例を考えてみよう。連結性 (connectivity: C) とは、物体を2つに分けることなく物体を切断できる回数と定義できる²⁾。図5上段の場合、1回の切断で物体が分割されるので $C=0$ である。トーラス形状の中段では $C=1$ となり、2人用の浮き輪形状の下段左端では $C=2$ となる。さらに複雑な形状の下段中、右端の図では $C=3$ となる。ここで $C=h$ であることがわかる。我々が扱う組織の大半では $h \gg b$ であるので、 $\chi(3)$ の絶対値は連結性を簡便に表す値ということになる。すなわち、 h や $\chi(3)$ (の絶対値) が大きいほど連結性が大きい組織といえる。

以上の式を使って、実際に仮想形状の特徴値評価を行った結果を図6に示す。

ここでガウス曲率 (K) とは、ある点における主曲率 (最大曲率 K_1 と最小曲率 K_2) の積である。サッカーボールやフットボールはどの点においても最大曲率, 最小曲率ともに正の値となるので、ガウス曲率は正となる (図7左例)。棒状の物体 (中列) の最大曲率は正であるが、最小曲率は零となるのでガウス曲率はゼロである。馬の鞍状 (右列) のように入組んだ物体では最大曲率は正で、最小曲率は負のためガウス曲率は負の値をとる。図8の模式図に示すように、卵パックのような入組んだ物体はガウス曲率は正, 負の値を交互に取ることになる。またその“でこぼこ度”はガウス曲率の絶対値が大きいほど大きくなる。このほか、物体の形態を

b	2	3	3	1	1	1
g	0	-1	-2	-1	0	0
χ_3	1	2	3	2	1	1
K_{total}	4π	8π	12π	8π	4π	4π

図6 仮想形状の位相幾何学および微分幾何学解析結果

Curvature=1/R

Circle ratio < π	Circle ratio = π	Circle ratio > π

$K_1 = +0.5$ $K_2 = +2.0$	$K_1 = 0$ $K_2 = +1.0$	$K_1 = -1.0$ $K_2 = +1.0$
$K = K_1 \times K_2 = +1$	$K = K_1 \times K_2 = 0$	$K = K_1 \times K_2 = -1$

図7 主曲率 (K_1, K_2), ガウス曲率 (K), 平均曲率 (H) の説明 図8 卵パック形状を用いたガウス曲率 (K) と平均曲率 (H) の説明

表す曲率として、平均曲率 (H) があり、これは主曲率の平均値で表される。平均曲率は湾曲度を表しており、Gibbs-Thomson 効果を通して濃度勾配と密接に関連している重要な因子の一つである。(21) 式は平均曲率 (H) と溶質濃度 (C) の関係を示す Gibbs-Thomson の式¹⁵⁾ である。 C_0 は平衡溶質濃度、 γ_s は表面エネルギー、 Ω は原子体積、 k はボルツマン定数である。平均曲率が高いと、平坦な部位に比べて溶質濃度が高くなり濃度勾配ができる。よって拡散が促進され、組織変化が速くなることが予想される。

$$C = C_0 \left[1 + \frac{2\gamma_s \Omega H}{kT} \right] = C_0 + \alpha H \quad (21)$$

$$A(d, p) = A(0, p)(1 + 2H(p)d + K(p)d^2)$$

図9 二枚の平行面を使ったガウス曲率 (K) と平均曲率 (H) の求め方の説明¹⁵⁾ 図10 H - K プロットによる α , θ 二相組織形態の成分評価

平均曲率 (H) とガウス曲率 (K) を求める方法として、陣内ら¹⁶⁾ は以下の方法を提案している (図9)。同じパッチで構成される距離 d だけ離れた二枚の平行な面の面積 (A) を求めることにより、(22) 式から H と K を求めることができる。

$$A(d, p) = A(0, p)(1 + 2H(p)d + K(p)d^2) \quad (22)$$

いま個々の場所でのガウス曲率が求まったとする。その積算値 K_{total} から、(18) 式を通してオイラー標数 (χ) や、種数 (g) が求まる。また、対象物のラベリング数から物体の数 (b) が求まり、一方母相 (バックグラウンド) のラベリング数からボイドの数 (v) が求まる。したがって貫通した

図 11 パーライト部分球状化処理材の (a) 3D 形態, (b) 平均曲率分布 (H), (c) ガウス曲率分布 (K)

穴 (ハンドルあるいはトンネル) の数 (h) が (19) 式から求められる。

物体の個々の場所における H と K を求め, H - K プロット (散布図, 図 10) を作成することにより形態の成分を定量評価することが可能である。 α 相 (母相) と θ 相 (第二相) の二相組織を考えると, θ 相が球状である場合, その形態は H , K とともに正の空間内の $H^2-K=0$ の曲線に沿ってプロットされる。 θ 相が棒状の場合, その形態は H が正の空間内の $K=0$ となる X 軸に沿ってプロットされる。 θ 相が球状と棒状の間の場合 (凸形状), 形態は $H^2-K=0$ 曲線と $K=0$ 線との間の H , K 正空間にプロットされる。 θ 相が粗大化すると, H , K とともに小さくなり, 原点に近づく。そして, 板状, 直方体形状になるとその形態は原点 ($H=0$, $K=0$) へのプロットで表される。 α 相の形態については, $H<0$ の空間にプロットされ, それ以外は θ 相の場合と同様である。例えば, θ 相が棒像であるということは, θ 相の形態で表現すると $K=0$ 上のある正の H の値を持つことになる。これは α 相の形態で表現すると, α 相の中に貫通した穴があり, $K=0$ 上の負の H の値を持つということになる。 H - K プロットの密度を確率密度プロット表示すれば, より定量的に形態成分の評価が可能となる。

4.3 微分幾何学因子と成長速度

体積の増加速度 (dV/dt) は, 母相/第二相界面の移動速度 (v) を第二相の界面積 (S) 前面にわたって積分することにより求められる ((23) 式)²⁾。また v は平均曲率 (H) と比例関係 ((24) 式) がある。(23), (24) 式から (25) 式が得られ, 体積の増加速度は第二相粒の全表面にわたって積分した平均曲率 (M_s) と比例する。ここで k は時間に依存しない速度定数である。

$$\frac{dV}{dt} = \int_S v dS \quad (23)$$

$$v = -kH \quad (24)$$

$$\frac{dV}{dt} = \int_S v dS = \int_S -kH dS = -kM_s \quad (25)$$

4.4 3D パーライト組織の定量解析^{9),17)}

パーライト組織のセメンタイトには複数の穴 (フェライトで埋まっている) があいている。熱処理過程でこのセメンタイトがどのように球状化するかについて興味を持たれる。図 11 (a) は部分球状化処理した共析鋼のパーライト組織である。セメンタイトの形態は板状から帯状に変化していることがわかる。この形態の平均曲率 (H) 分布とガウス曲率 (K)

図 12 パーライト部分球状化処理材の H - K プロット例

分布を図 11 (a) に上書きした結果が図 11 (b), (c) である。この形態の H - K 確率密度プロットを図 12 に示す。熱処理に伴う H - K プロットの変化を評価すれば, 形態成分の増減がわかる。球状化処理を進めると, 形態が板状, 帯状, 棒状, 球状へと変化すること, 初期に存在しセメンタイト中の穴の数が減少すること, などが判明しており, 穴の周囲と平坦部間の平均曲率の差に起因した Gibbs-Thomson 効果による濃度勾配と板状から帯状への変化との関係が考えられる。図 11 の形態はポリゴンで構成されており, v, e, f, c をコンピュータで算出すれば, (17) 式からオイラー標数 (χ_3) が求められる, さらには (18) 式から g が求まる。独立したセメンタイトの

数 (b) を測定し、孤立したフェライトがなければセメント中のボイド (v) が零ということになるので、セメント中の穴の数 (h) を算出できる。このようにして、微分幾何学、位相幾何学の両観点からパーライト組織の球状化に伴う形態 (成分) 変化を評価できる。

5. 3D 評価法と小角散乱法との比較

析出物の単位体積あたりの数密度や単位体積あたりの表面積を評価するのに X 線あるいは中性子線小角散乱 (SAXS, SANS) が広く適用されている。また板状や棒状といった形状の平均的評価手法としても SAXS, SANS は広く活用されている。3D 像をもとにした数密度評価や表面積、形状評価は実像を見ながら評価できるところが一つの利点である。それゆえに、形状変化が混沌と進む遷移過程を、場所依存性を考慮に入れて、定量評価することに優れる。一方、小角散乱法はバルク材料に適用され平均情報を得るのに秀でている。マクロとミクロ情報を階層的に評価する (Scale-bridging) ことが今後ますます重要になるなかで、3D 法と小角散乱法による定量形態評価は相補的に活用できると思われる。

6. ま と め

断面での 2D 観察結果より計量形態学によって組織の特徴値を求める場合と、3D 像を基にしてその特徴値やより複雑な形状を定量化する手法を比較して示した。ラメラ間隔については 2.5 倍もの差があることが明らかとなった。3D 評価の特徴は、実際の組織形態を実空間で見ることが可能なこと、寸法分布を評価することが可能なこと、曲率および種数 (あるいはオイラー標数) の評価を通して形態の定量評価が可能なことである。一方で 3D 評価の課題は、観察視野が限られていること、シリアルセクションングに膨大な労力を要することである。対象組織サイズに応じて、最適なセクションング方法を選択するとともに、効率のよい全・半自動シリアルセクションング装置の開発が不可欠である。

謝 辞

本研究の一部は、JFE21 世紀財団技術研究助成、天田金属加工機械技術振興財団助成および科学研究費補助金より助成

を受けて実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。位相幾何学、微分幾何学に基づいた形態の解析に関しては Northwestern University の Peter Voorhees 先生から助言をいただきました。また数学的な妥当性につきましては山口大学の中内伸光先生と議論をさせていただきました。ここに両先生に厚く御礼申し上げます。本研究内容は横浜国立大学 諸岡聡博士、物質・材料研究機構 小島真由美博士、China Steel Yuan-Tsung Wang 博士との共同研究で得た成果です。ここに本研究への貢献に感謝します。

参 考 文 献

- 1) R. T. Dehoff and F. n. Rhines : 計量形態学, 牧島邦夫監訳, 内田老鶴園新社, (1983).
- 2) J. C. Russ and R. T. Dehoff: Practical Stereology (2nd Edition), Plenum Press, New York, (2000).
- 3) 陣内浩司, 森田裕史, 新原健一: 高分子論文集, **65** (2008), 547-561.
- 4) 足立吉隆: ふえらむ, **13** (2008), 676-680.
- 5) H. Toda, I. Sinclair, J. Y. Buffière, E. Maire, K. H. Khor, P. Gregson and T. Kobayashi: Acta Mater., **52** (2004), 5, 1305-1317.
- 6) S. Zaefferer: Mater Science Forum., 495-497 (2005), 3-12.
- 7) 波多 聡, 光原昌寿, 田中将己, 宮崎裕也, 池田賢一, 金子賢治, 中島英治, 東田賢二, 松村 晶: まてりあ, **49** (2010), 274-279.
- 8) A. L. Melott: Physics Reports (Review Section of Physics Letters), 193 (1990), 1-39.
- 9) Y. T. Wang, Y. Adachi, K. Nakajima and Y. Sugimoto: Acta Mater., **58** (2010), 4849-4858.
- 10) 足立吉隆: ふえらむ, **15** (2010), 762-769.
- 11) Y. T. Wang and Y. Adachi: unpublished work.
- 12) R. Mendoza, K. Thornton, I. Savin and P. W. Voorhees: Acta Mater., **54** (2006), 743-750.
- 13) J. Ohser and F. Mücklich: Statistical Analysis of Microstructures in Material Science, John Wiley & Sons, (2000).
- 14) 中内伸光: じっくりと学ぶ曲線と曲面 (微分幾何学初歩), 共立出版, (2005).
- 15) J. W. Martin and R. D. Doherty: Stability of Microstructure in Metallic Systems, Cambridge University Press, (1976), 179.
- 16) H. Jinnai, T. Koga, Y. Nishikawa, T. Hashimoto and S. T. Hyde: Phys. Rev. Lett., **78** (1997), 2248-2251.
- 17) T. Wang, Y. Adachi, K. Nakajima and Y. Sugimoto: Acta Mater., To be submitted.