



特集記事・4

材料の明日を拓く表面・界面の制御・評価技術

位相幾何学、微分幾何学に基づく 定量3D/4D組織学への挑戦

A Challenge to 3D/4D Stereology Based on Topology and Differential Geometry

足立 吉隆
Yoshitaka Adachi

(独)物質・材料研究機構 主幹研究員
九州大学 連係准教授

1 はじめに

金属材料組織の特徴付けは、これまで主に長さや、面積、体積といった「量」を定量化することによって行われてきたが、最近では入り組み度や、連結度といった組織の複雑性を示す特徴値を位相幾何学や微分幾何学に基づいて解析することが可能になってきている。位相幾何学や微分幾何学の情報を得るためには組織の三次元 (3D) 構造を知る必要がある。3D グラフィックス技術の発達は近年著しく、医療・材料・建設など各分野へ適用が進められている。本稿では、位相幾何学、微分幾何学に基づいて3D組織像を定量化する試みについて述べる。この知見をパーライト組織に適用した結果についても触れる。

2 医療分野などの3D研究例と材料分野におけるその有用性

他分野における組織評価の取り組みを見ると、参考になることが多い。例えば、骨粗鬆症は、加齢などにより骨密度が減少する疾患で、我が国では1,000万人程度の患者が存在し、

高齢者が寝たきりになる原因の上位を占める大腿骨頸部骨折の素因と言われ、この克服は国民的課題である¹⁾。医療材料研究者はこの予見のために、従来の骨密度評価から一步解析法を進め、臨床X線CT画像やマイクロX線CT画像を再構築した3D像を使って骨梁幅、骨梁数、骨梁間隙の評価を行い、計測結果から骨粗鬆症やリュウマチの進行、投薬効果の定量化を可能としている^{2,3)}。さらに3D-CT画像をもとに有限要素法解析を行い、骨の強度評価が行われている⁴⁾。胎児の検査のために、胎児を3Dで観察し、さらに経時的要素を加えて、四次元 (4D) 観察することにより、胎児の立体的な動きを可視化する4D超音波装置もすでに実際の医療現場に配備されている。

このほかにも、ポリマー材料の3D評価は歴史も長く⁵⁾、タイヤのゴムの複相組織を3D評価している例⁶⁾がある。鋳型を作る際に用いられる油砂の連結性の評価にも3D評価が用いられている。

それでは金属材料組織の形態評価の現状についてみてみたい。二次元 (2D) の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、定量組織学に基づいて、粒径、面積、体積率などの組織特徴値が求まる^{7)*}。こ

* (i) 等方的な組織における線分率、面積率、体積率間の関係と粒径の算出法

等方的な複相組織に於いて、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。

$$\bar{A}_A = V_V$$

また観察面において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)、体積率(V_V)の間には次の関係式が成立する。 $\bar{A}_A$ からも、 $\bar{L}_L$ からも体積率を求めることができるが、精度は $\bar{A}_A$ から求めた方が高い。

$$\bar{L}_L = \bar{A}_A = V_V \quad \bar{L}_L = V_V, \bar{A}_A = V_V$$

体積率(V_V)を平均面積率($\bar{A}_A$)から求める際に、観察面の配向をランダムにする必要はない。一方、平均線分率($\bar{L}_L$)から求める際には試験線はランダムに描く必要がある。

単位体積あたりの表面積(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。

$$S_V = 2\bar{N}_L$$

単位面積あ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。

$$L_A = \pi/2 \cdot \bar{N}_L$$

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。

$$\pi \langle r'^2 \rangle = \int_0^r \pi (r^2 - h^2) \frac{dh}{r} = \frac{2}{3} \pi r^2$$

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。

$$r = 1.22r'$$

これらの2D組織特徴値を機械的特性予測モデルに入力しても予測された機械的特性と実測値間の差が大きくなることがあり、入力する組織データの精度の向上が永遠の課題とされている。鉄鋼材料におけるフェライトや、ラスマルテンサイトの韌性は平均粒径や、ブロック径で整理されるが、必ずしも等軸でない粒径、ブロック径と韌性との関係をより拡張して議論できるパラメーター（例えば、単位体積あたりの表面積）が望まれる。結晶粒は多面体である（面も必ずしも平坦とは限らない）が、その特徴は粒界面（二つの隣接粒の境界面）、エッジ（三つの隣接粒の境界線）、コーナー（四つの隣接粒の接点）の数で表現できる。再結晶や、粒界からの相変態・析出を考える場合、母相形態をこれらの数でより精緻に評価することが必要となる。粒界を伝播する亀裂は観察面直下ではどのようなになっているのか想像するしかない。いずれも、ナノ析出物から結晶粒径オーダー（数百マイクロメートル）まで実際の形態を3D観察して、そして評価することが必要である。

材料研究の分野においても、ありのままの組織形態を理解することを目的として、様々な3D/4D観察法が開発されている。その対象サイズは、ナノメートルオーダーからキロメートルオーダーまで広い。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線トモグラフィー法⁸⁾、シリアルセクショニングSEM/EBSD像の3D再構築法⁹⁻¹¹⁾、TEMトモグラフィー法¹²⁾がある。本稿では主に数十nmオーダーから数百マイクロメートルオーダーまでの3D組織評価が可能なシリアルセクショニング法について詳述する。X線トモグラフィー法⁸⁾、TEMトモグラフィー法¹²⁾については優れた解説があるのでそちらを参照していただきたい。

3 3D SEM/EBSD法

3.1 三次元可視化手法

3.1.1 三次元化事例

研磨と、観察を繰り返すことによって得たシリアルセクショニング像を、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¹¹⁾。得られた三次元像は、任意の方向から観察することができ、任意の断面像を見ることが可能である。一例として、シリアルセクショニング像を模した図1のような連続像をレンダリングソフトウェアで三次元再構築した結果を図2に示す。図2はtunnelと空洞をそれぞれ一つずつ含む直方体である。

実際のシリアルセクショニング像を三次元再構築した例を図3に示す。パーライト中（図3a）のセメントイトには複数の穴があいていること^{13,14)}、ラスマルテンサイト（図3b）のパケット組織が入り組んでいること^{15,16)}、bcc相が粒界面よりも、

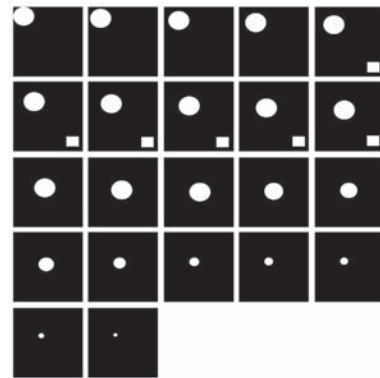


図1 画像処理ソフトで作成した複数の断面図

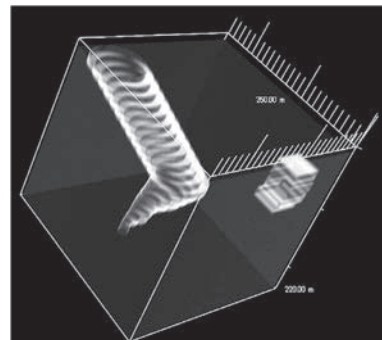


図2 図1のシリアルセクショニング像の再構築3D像（Tunnel、ボイドを含む直方体）

(ii) 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トイトの真の間隔(σ_0)を取り上げると、観察面上で長さLの試験線と交差するセメントイトの数(n) から平均切片間隔($\bar{l}$) が求まる。

$$\bar{l} = L/n$$

n個のセメントイト板が長さ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(N_L) は次式で与えられる。

$$N_L = 2n = 2L/\bar{l}$$

単位体積あたりの表面積($S_V = S_V(\text{cementite}) = S_V(\text{ferrite})$) は上述したように、

$$S_V = 2N_L$$

で与えられるので、

$$S_V = 4L/\bar{l}$$

を得る。また、セメント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、

$$S_V = 2/\bar{\sigma}_0$$

であるので、

$$\bar{l} = L/n = 2\bar{\sigma}_0$$

となる。

粒界エッジやコーナーに優先析出していること(図3c)¹⁷⁾など、これまでの二次元観察ではわからなかった新しい知見が見出されるようになってきている。

3.1.2 三次元再構築

得たシリアルセクションング像を三次元再構築するには様々なステップを踏むことになる。その一連のプロセスを図4に示す。それらの過程は、reading、stacking、alignment、binarization、filtering、complement、crop、labeling、3D化、smoothing、quantificationである。ここでlabelingとはある断面では分断しているように見えても三次元的にはつながっている物体を同色で表示するプロセスである。この色の数を数えることによって、対象物の数が分かる。

3.2 3D像の定量化手法

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¹⁸⁾。組織形態を評価する際に通常用いられるパラメーターは結晶粒径、体積率である。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、入り組み度(しわしわ率)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。ここでは、組織の連結度や入り組み度を種数(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¹⁹⁻²¹⁾。

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(1)式のオイラー・ポアンカレの公式である。

$$\chi(X) = \sum [k=0 \text{ to } \dim X] (-1)^k \cdot b_k(X) \dots\dots\dots (1)$$

ここでdimXは今対象とする物体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。(1)式を2次元、3次元に対して書き下して見ると、

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

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

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

- b₀(X) = Xのvertexの数v
- b₁(X) = Xのedgeの数e
- b₂(X) = Xのfaceの数f
- b₃(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たという立場ならば、2次元の話であり、

$$\chi(2) = v - e + f \dots\dots\dots (4)$$

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

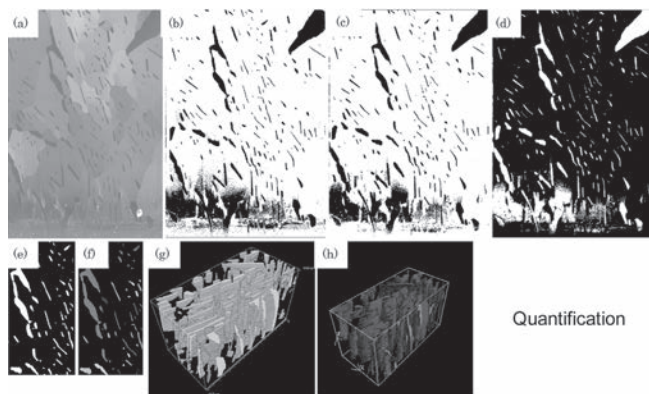


図4 シリアルセクションング像の3D再構築プロセス
(a)stack ファイルのreading、alignment、(b)binarize、(c)filtering、(d)complement、(e)crop、(f)labeling、(g)3D、(h)smoothing

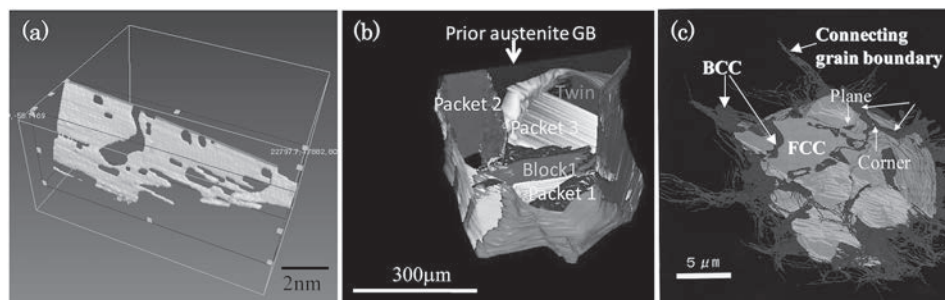


図3 金属組織の3D像
(a) パーライト中セメンタイト、(b) ラスマルテンサイトのブロックとパケット、(c) fcc母相の粒界に生成したbcc相

学では多様体という)として考えるということであれば、

$$\chi(3) = v - e + f - c \dots\dots\dots (5)$$

となる。

例えば、立方体のオイラー標数は、 $v=8$ 、 $e=12$ 、 $f=6$ 、 $c=1$ 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評数も $\chi(2)=2$ 、 $\chi(3)=1$ 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。

$$g = 1 - K_{total} / 4\pi = 1 - \chi(3) \dots\dots\dots (6)$$

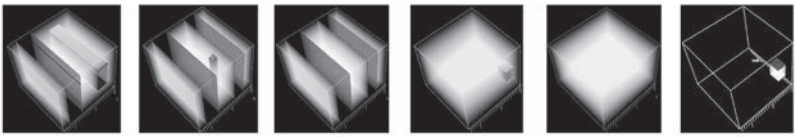
g は規定の空間を貫通した領域(トンネルあるいはハンドルと呼ばれる)の数 h と、独立した閉じた空間(ボイド)の数 v 、独立した対象物の数 b を使って、次式でも与えられる*。

$$g = h - (v + b) + 1 \dots\dots\dots (7)$$

いま、(5)式よりオイラー標数が求められれば、(6)式よりガウス曲率、種数が得られる。この(6)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)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、その積分値が分かれば、種数やオイラー標数が算出できる。さらに、(7)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、(6)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。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5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6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)のように入り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7の模式図に示すように、卵パックのような入り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わされる。平均曲率は湾曲度を表しており、Gibbs-Thompson 効果を通して濃度勾配と密接に関係している重要な因子の一つである。(8)式は平均曲率(H)と溶質濃度(C)の関係を示す Gibbs-Thomson の式²²⁾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



b	2	3	3	1	1	1
g	0	-1	-2	-1	0	0
$\chi(3)$	1	2	3	2	1	1
K_{total}	4π	8π	12π	8π	4π	4π

図5 仮想形状の位相幾何学および微分幾何学解析結果

* (6)(7)式より、 $\chi(3)$ と h 、 v 、 b の間に次の関係が成立する。

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

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。連結性(connectivity: C)とは、物体を二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。球の場合、一回の切断で物体が分割されるので $C=0$ である。トーラス形状の場合では $C=1$ となり、二人用の浮き輪形状の場合では $C=2$ となる。ここで $C=h$ であることが分かる。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 $\chi(3)$ (の負の値)が大きいほど連結性が大きい組織といえる。分散性は物体の数(b)で評価できる。

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。

$$C = C_0 \left[1 + \frac{2\gamma_s \Omega K}{kT} \right] = C_0 + \alpha H \dots\dots\dots (8)$$

平均曲率 (H) とガウス曲率 (K) を求める方法として、陣内ら²³⁾ は以下の方法を提案している (図8)。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、(9) 式からHとKを求めることができる。

$$A(d, p) = A(0, p) (1 + 2H(p)d + K(p)d^2) \dots\dots\dots (9)$$

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、(6) 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穴 (ハンドルあるいはトンネル) の数 (h) が (7) 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9) 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 $K=0$ 線の間、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) へのプロットであらわされる。 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 相が棒状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。

3.3 3Dパーライト組織の定量解析^{14,24)}

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) があいていることを図3aに示した。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10aは部分球状化処理した共析鋼のパー

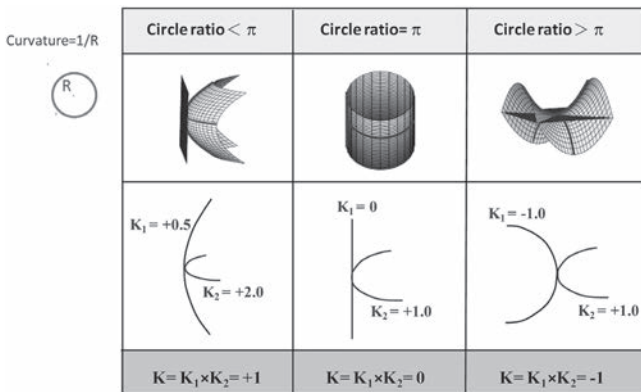


図6 主曲率(K1, K2)、ガウス曲率(K)、平均曲率(H)の説明

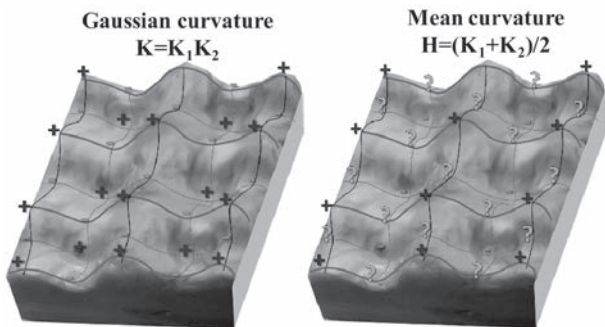
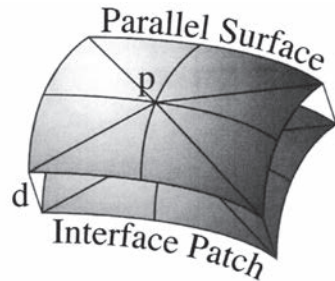


図7 卵パック形状を用いたガウス曲率(K)と平均曲率(H)の説明



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

図8 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²³⁾

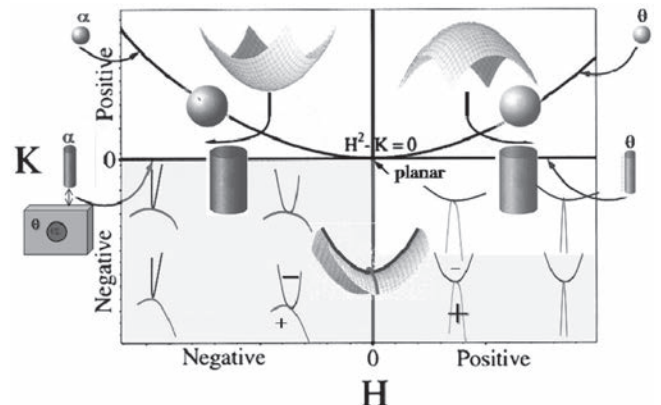


図9 H-Kプロットによる α 、 θ 二相組織形態の成分評価

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分かる。この形態の平均曲率 (H) 分布とガウス曲率 (K) 分布を図10aに上書きした結果が図10b、cである。この形態のH-Kプロットを図11に示す。熱処理に伴うH-Kプロットの変化を評価すれば、形態成分の増減が分かる。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-Thompson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10の形態はポリゴンで構成されており、v、e、f、cをコンピューターで算出すれば、(5) 式からオイラー標数 χ (3) が求められ、更には (6) 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タイト中のボイド (v) が零ということになるので、セメンタイト中の穴の数 (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。

3.4 埋もれた界面の結晶方位解析^{25,26)}

EBSD法と組み合わせることによって、埋もれた界面の結晶方位を同定することができる。埋もれた界面の結晶方位を、セクショニング前後の観察面上での線の移動量 (dx, dy) を使って (10) 式に従って試料座標系 (P_s) でまず示し、EBSD測定で得られるRD、TD、NDの方位 (u, v, w)、(l, m, n)、(h, k, l) を用いて (11) 式に従って結晶座標系 (P_c) で表す方法がある¹⁷⁾。本手法は比較的簡便に埋もれた界面の結晶方位を求めることができる手法である。

$$P_s = \frac{\left(\frac{1}{dx}, \frac{1}{dy}, \frac{1}{dz}\right)}{\sqrt{\left(\frac{1}{dx}\right)^2 + \left(\frac{1}{dy}\right)^2 + \left(\frac{1}{dz}\right)^2}} = (a, b, c) \dots\dots\dots (10)$$

$$P_c = \begin{pmatrix} u & l & h \\ v & m & k \\ w & n & l \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

3.5 分岐現象の解析

亀裂が伝播し、破壊に至るには亀裂が連続的につながる必要がある。粒界破壊を考えると、ネットワーク状の粒界の中からある特定の粒界が連続しているとき、亀裂はそこを伝播して破壊に至る。この時、ある特定の粒界が全粒界の何割を占めてれば、統計学的に連続しうのかを議論する上で、つながりの科学 (パーコレーション) が有用である。パーコレーションは種々の現象解析に用いられている²⁷⁾。例えば、上層部に水が入ったタンクにおいて、正方格子状に張り巡らされた管のつなぎ部あるいは管の中央に設けたバルブを無造作に随時開けていったときに、何割のバルブを開けると水が下方に流れ出るかを議論する場合に用いられている (p=0はバルブをすべて閉じた場合、p=1は全部開けた場合である)。詳しい解説は他書²⁷⁾に譲って結論だけ書くと、バルブを管のつなぎ部に設けた場合 (サイト過程という) p=0.5927で、管の中央に設けた場合 (ボンド過程という) p=0.5で下から水が流れ出るようになる。この臨界値のことを浸透閾値と呼ぶ。表1にはいろいろな格子形状 (図12) に対する浸透閾値をまと

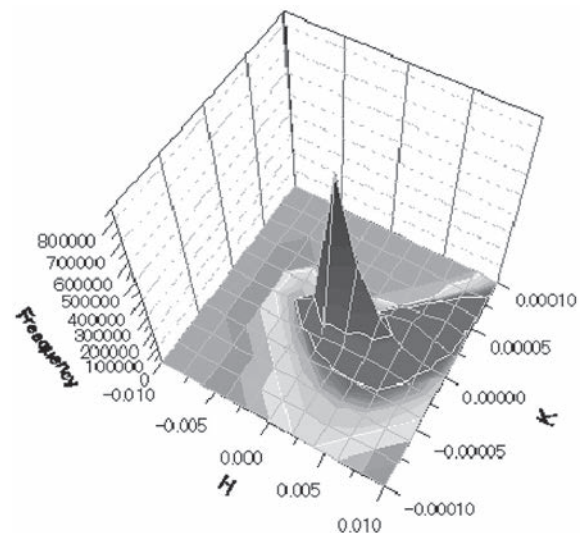


図11 部分球状化パーライト組織 (973K1hr) のセメンタイトの形態成分を示すH-Kプロット

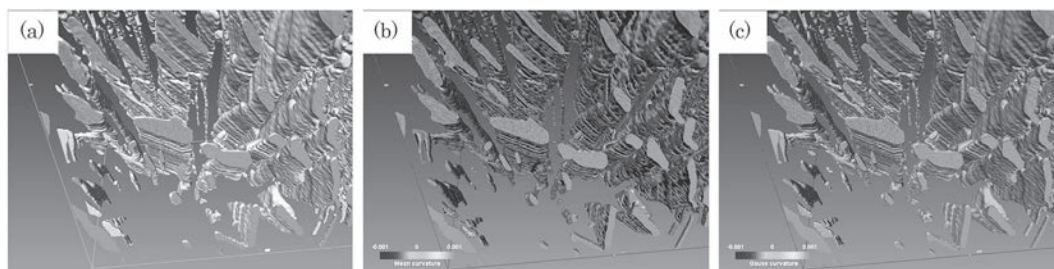


図10 パーライト部分球状化処理材の(a) 3D形態、(b) 平均曲率分布(H)、(c) ガウス曲率分布(K)

めて示す。管の格子形状が変わると浸透閾値は変わる。また格子が三次元形状になった場合の浸透閾値も求められている。

このパーコレーションの科学は、箱の上下に電極を付けて、その中に充填するようにガラス玉とパチンコ玉を詰めていったときに、何割のパチンコ玉の配合にした場合に電流が流れるかといったことにも適用されている。

3.6 4D解析への展開

3.6.1 モデリング・シミュレーションとの連携

3D像はノードを線（エッジ）で結んだ小さなポリゴンで構成されている。一つ一つのノードの座標やガウス曲率をアスキーファイルで保存することができる。連結度はオイラー標数や種数（genus）で表現することも可能となった。これらの位相幾何学的特徴値は、例えばDual phase鋼中のマルテンサイトの形態を表すのに有効であり、マルテンサイトの体積率や硬度とともに、これらの位相幾何学的特徴値（連結性、

分散性）を考慮した機械的特性の有限要素法モデリングが期待される。また熱処理時には、局所的な平均曲率の差に起因した濃度勾配が生じることをフェーズフィールド法などの組織モデリングへ展開することが期待される。

3.6.2 動的測定との連携

加熱中や変形中の組織変化を同一視野で観察し続ける動的その場測定²⁸⁾（高温変形中その場EBSD測定ステージを図13に示す）と3D解析を同時に進めて4D解析することは組織解析の一つの理想である。X線トモグラフィーでは4D解析が行われており、3D組織の変形挙動が調べられている。セクションング法では試料を破壊（研磨）するため、4D解析はできない。一つの工夫として、変形初期あるいは短時間加熱時の組織の3D解析をすることによって、3D組織と変形組織あるいは析出物との対応関係が理解できるものと思われる。もう一つの方法として、一つの試料を二分割し、一つは3D

表1 いろいろな格子の浸透閾値²⁷⁾

格子	サイト過程の閾値	ボンド過程の閾値
二次元格子		
正方格子	0.5927	0.5
三角格子	0.5	0.3473
蜂の巣格子	0.6962	0.6527
かごめ格子	0.6527	0.449
三次元格子		
単純立方格子	0.3117	0.2492
体心立方格子	0.2460	0.1785
面心立方格子	0.198	0.119
ダイヤモンド格子	0.428	0.388

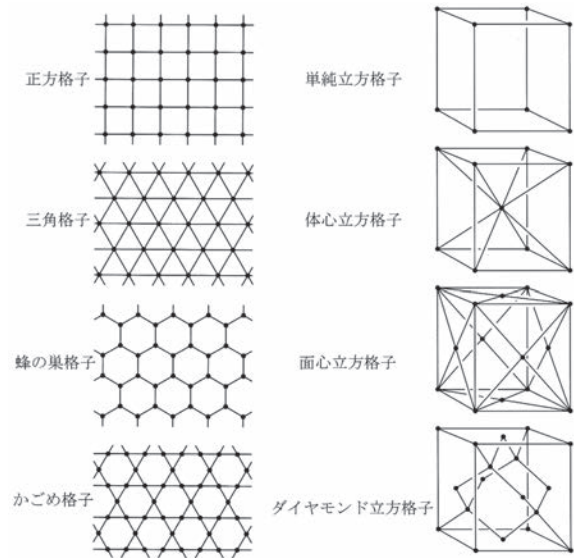


図12 二次元格子と三次元格子²⁷⁾

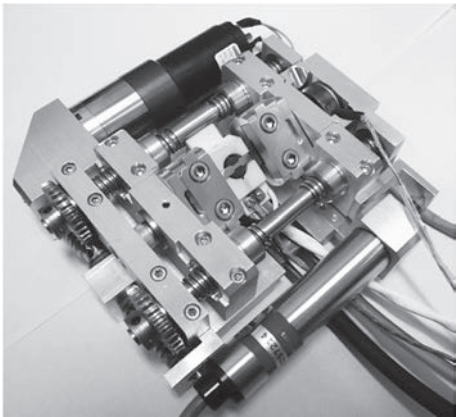


図13 高温変形中その場EBSD測定用ステージ

解析、もう一つは対応部位の組織変化をその場観察し、最後に照合するという手法である。

4 まとめ

材料組織の複雑性(入り組み度や、連結性)を評価するために、3D像の位相幾何学および微分幾何学に基づく解析手法の妥当性を検討した。組織の入り組み度(でこぼこ度)はガウス曲率で、連結性はオイラー標数や種数で評価することが可能である。また平均曲率からは、Gibbs-Thompson効果を通じて、拡散場の議論と関係づけることが可能である。3D像からは単位体積あたりの表面積を求めることも可能である。形態評価に加えて、埋もれた界面の結晶学に関する情報取得も可能である。亀裂の伝播が破壊に至る過程にはパーコレーションを取り入れた解析が今後期待される。

今後の課題として、弾・塑性ひずみの3D可視化が望まれるが、2Dで測定した弾・塑性ひずみをただ階層化しただけでは不十分である。装置面の課題としては、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、FESEM/EBSD観察でも、光学顕微鏡観察でも望まれる。

謝辞

本研究は、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。

参考文献

- 1) 筑波大学数理工学物質科学研究科電子・物理工学専攻 巨瀬勝美氏のWebサイトによる。例えば, <http://mrlab.frsc.tsukuba.ac.jp/newpage/osteoporosisj.html>
- 2) M.Ito : Advanced bioimaging technologies in assessment of the quality of bone and scaffold materials, ed.by Ling Q, et al., Springer, (2007) , 417.
- 3) 伊東昌子 : 医学のあゆみ, 221 (2007) , 83.
- 4) 伊東昌子 : Osteoporosis Japan, 15 (2007) , 564.
- 5) 陣内浩司, 森田裕史, 新原健一 : 高分子論文集, 65 (2008) 9, 547.
- 6) K.Akutagawa, K.Yamaguchi, A.Yamamoto, H.Heguri, H.Jinnai and Y.Shinbori : Rubber Chem.Tech., 81 (2008) 2, 182.
- 7) R.T.Dehoff, F.n.Rhines : 計量形態学, 牧島邦夫監訳, 内田老鶴圃新社.
- 8) H.Toda, I.Sinclair, J.Y.Buffière, E.Maire, K.H.Khor, P.Gregson and T.Kobayashi : Acta Materialia, 52 (2004) 5, 1305.
- 9) S.Zaefferer : Mater Science Forum, 495-497 (2005) , 3.
- 10) M.D.Nave, J.J.L.Mulders, A.Gholinia : Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 10 (2005) 4, 199.
- 11) 足立吉隆 : ふえらむ, 13 (2008) 10, 676.
- 12) 波多聰, 光原昌寿, 田中將己, 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) 6, 274.
- 13) Y.Adachi, S.Morooka, K.Nakajima and Y.Sugimoto : Acta Materialia, 56 (2008) , 5995.
- 14) Y.T.Wang, Y.Adachi, K.Nakajima and Y.Sugimoto : Quantitative three-dimensional characterization of pearlite spheroidization, Acta Materialia, in press.
- 15) Y.Edamatsu, S.Morito, T.Ohba and Y.Adachi : Netsu-syori, 49 (2009) , 632.
- 16) S.Morito, Y.Adachi and T.Ohba : Materials Transactions, 50 (2009) 8, 1919.
- 17) T.Takeuchi, Y.Adachi, D.Dorner and M.Enomoto : Materials Science Forum, 561-565 (2007) , 69.
- 18) R.Mendoza, K.Thornton, I.Savin and P.W.Voorhees : Acta Materialia, 54 (2006) , 743.
- 19) Adrian L.MELOTT : PHYSICS REPORTS (Review Section of Physics Letters) 193 (1990) 1, 1.
- 20) Joachim Ohser and Frank : Statistical analysis of microstructures in material Science, Mucklich, John Wiley & Sons, Ltd., (2000)
- 21) 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)
- 22) Stability of Microstructure in Metallic Systems, J.W.Martin, R.D.Doherty, Cambridge University Press, (1976) , 179.
- 23) H.Jinnai, T.Koga, Y.Nishikawa, T.Hashimoto and S.T.Hyde : Phys.Rev.Lett., 78 (1997) 11, 2248.
- 24) Y.T.Wang, Y.Adachi, K.Nakajima and Y.Sugimoto : To be published.
- 25) 足立吉隆, 小島真由美 : 熱処理, 49 (2009) 3, 99.
- 26) 足立吉隆, 小島真由美 : 検査技術, 15 (2010) , 23.
- 27) 小田垣孝 : つながりの科学, 裳華房, (2000)
- 28) M.Ojima, Y.Adachi, Y.Tomota, K.Ikeda, T.Kamiyama and Y.Katada : Materials Science and Engineering, A 527 (2009) , 16.

(2010年6月10日受付)