画像解析法の材料分析への応用

田 口 勇*

1. ま え が き

筆者は一昨年9月まで新日本製鉄株式会社第一技術研究所において、鉄鋼分析、特に鉄鋼中の介在物や析出物を対象とする状態分析法の開発を担当してきた。その後、国立歴史民俗博物館に移り、主として古代鉄器の物性、製法、産地、年代などを分析化学的立場から研究している。

最近、材料分析において2つの大きな進歩があったと言われる。1つは「キャラクターゼーション」⁽¹⁾に象徴される分析に関する考え方の進歩であり、他はコンピューターにバックアップされた分析技術の長足の進歩である。従来の分析についての考え方などを刷新し、今日の基礎を築いた「キャラクターゼーション」についてはすでに本会報⁽²⁾に紹介した。本文においては後者についての進歩を「画像解析法の材料分析への応用」を中心としてまとめた。

2. 画像解析法の現状

新材料や新製造工程の開発に関連して、材料分野から分析に対する要求は最新とくに高度化している。一方、最近長足の進歩を遂げたコンピューターが分析分野に大幅に導入され、まず従来の分析機器の感度や精度を向上させるために使用された。さらに分析分野でのコンピューターの使用は広がり、従来は困難であった「分析の夢」を実現するに至った。その「分析の夢」の一つが本文の対象である画像解析である。画像解析是一群の分析データから、従来よりもはるかに多くの分析情報を引き出し、また分析を2次元(面)、3次元(立体)と多次元化した。

しかし、こうした研究が個々に実施され、共通の場がなかったことから、科学技術庁金属材料技術研究所 中川龍一所長の提案で、昭和59年2月から同所に「画像処理の金属研究への応用に関する研究会」が設けられた(委員長:内山 郁, 昭和59年7月から武内朋之, 委員:大学, 研究機関, 金属関係各社の約25名)。同研究会は昭和61年3月まで8回の会合をもち、画像解析技術の現状を把握し、今後の発展を探索し、報告書「画像処理による材料組織解析の現状」⁽³⁾をとりまとめ、つぎに述べる日本鉄鋼協会の研究会に受け継がれた。

日本鉄鋼協会においては、昭和61年1月から特定基礎共同研究会に「画像解析による材料評価部会」(部会長:武内朋之)を設置し、画像解析による材料評価の共同研究を開始した。この部会はすでに活動の第3年度(最終)に至っており、本年4月、中間報告会を開催した。同部会は結晶粒度分科会、破面分科会と偏析介在物分科会の3つに分かれ、活動している。各分科会においては、まず結晶粒度、破面と偏析介在物に対する画像解析技術の現状を調査し、委員の要望をまとめ、新規で実用的な評価法とそのコンピューターソフトウェアを確立することを目標として、共同実験を重ねている。結果が期待される。

画像解析を応用して大きな効果が期待される分析機器の主なものはつぎのとおりである。光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、発光分光分析装置、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析装置、X線マイクロアナライザー、X線回折分析装置、オージェ電子分光分析装置、2次イオン質量分析装置、X線断層測定装置、X線光電子分光分析装置およびメスバウアー分光分析装置。

また、画像解析の主な対象は上記の結晶粒度、破面、元素偏析や介在物以外につぎのとおりである。金属相などの同定・定量、凝固組織、集合組織や溶接組織の解析、ボイド、転位、析出物などの観察・計測、表面や内部欠陥の分析および複合材料の評価。なお、市販の画像解析装置も使用されるが、目的に合わせて自作した画像解析装置が多い。

* 国立歴史民俗博物館 教授

Application of Image Analysis to Materials ; Isamu Taguchi (National Museum of Japanese History, Sakura)

Keywords : image analysis, X-ray computed tomography, computer aided X-ray microanalyzer, iron and steel analysis

1988年6月21日受理

以下、画像解析法の詳細として、筆者らが開発した 2 つの分析装置、すなわち、コンピューター X 線マイクロアナライザー (CMA, Computer aided X-ray Micro Analyzer) と X 線断層測定装置 (X 線 CT, X-ray Computed Tomographic Scanner) について述べる。

3. C M A

従来の分析装置は分析試料につき、一つの分析値を提供するものであった。一部の分析装置、X 線マイクロアナライザー (EPMA) などでは線分析まで可能であったが、2 次元 (面) の元素偏析などを定量的に求めることはできず、不十分であった。最近、連続鋳造鋼スラブなどを評価する方法として、従来の分析試料よりも大きな試料 (約 100 mm×100 mm) 中の 2 次元元素偏析状態を正確に分析することが必要となったので、画像解析法を用い、新規な分析装置を開発した。

(1) 装 置

CMA は、真空中で試料面に電子線を照射し、発生する特性 X 線を分光後に測定し、標準試料の X 線強度と比較して、元素定量値を得る。以上を試料面上の多数点 (100,000 以上) につき、順次に繰り返す、得られた多数の元素定量値をコンピューターに入れて解析し、元素や化合物の 2 次元分布状態をカラーディスプレイなどに表示するとともに、さらに表示された像について画像解析し、目的とする分析情報を得る総合状態分析装置である⁽²⁾⁻⁽⁸⁾。

CMA の外観を図 1 に、全体の説明を図 2 に、また機能を従来の EPMA と比較して表 1 に、それぞれ示す。CMA はデータ収集部とデータ解析部の二つから成る。データ収集部は主として電子線照射機構、特性 X 線分光測定機構、試料駆動機構、真空機構およびコンピューターに分けられる。データ解析部はコンピューター、カラーディスプレイ、ラインプリンターおよびカラープロッターに分けられる。

CMA では、照射電流値を安定化させるために新しい電子線照射機構を開発した。この機構によれば、5 μ A で 14.4 ks (4 h) 照射しても、変動は 1% 以下に押さえられた (従来は約 10%)。試料駆動機構は 100 mm×100 mm×10 mm という大型の分析試料を導入し、2 次元スキャンニングをする。この機構により、試料を予備排気後、分析室に導入し、最大 90 mm×90 mm の面積が分析できる。また X, Y, Z 軸方向の駆動ができ、X 軸の駆動速度は最大 10 mm/s で、X, Y 各軸の駆動精度は $\pm 0.1 \mu$ m と高い。連続測定時に分析面を一定の高さに保つためにはつぎのようにした。すなわち、測定に先立ち、試

図 1 CMA.

(a) データ収集部, (b) データ解析部。

図 2 CMA の説明。

料面上の四隅の高さを測定し、コンピューターにインプットし、測定時には Z 軸をコンピューター制御することにより、分析面高さを $\pm 5 \mu$ m の精度で保持した。

本装置においては、コンピューターとして、本体制御とデータ収集に DEC 社 PDP11 を、データ解析用に FACOM 社 S-3300 を使用した。カラーイメージディスプレイとしては池上-Ramtek 社製 RM9465 (RGB 方式, 1024×1280) を使用した。CMA のデータ収集部で収集したデータは、データ解析部の FACOM 社 S-3300 (32 ビットスーパーミニコンピューター) に送信され、磁気ディスク装置のデータファイルに蓄積される。

(2) 画像解析法

CMA におけるデータ収集法を図 3 に説明した。CMA の分析スポットは四角で、図 3 の (a) のように試料面を

表 1 CMA の主な機能.

項 目	CMA	参考, EPMA
試 料 サ イ ズ	最大 100 mm×100 mm	最大 ϕ 25 mm
分析可能面積	最大 90 mm×90 mm	最大 0.25 mm×0.25 mm
分析スポット(画素)	最大 200 μ m×200 μ m, 最小 1 μ m×1 μ m	最大 ϕ 10 μ m, 最小 ϕ 1 μ m
チャ ン ネ ル	最大 5	最大 5
分光方式と分光結晶	WDX, 広面積湾曲型分光結晶	WDX, 狭面積旧分光結晶
照射電流値と加速電圧	最大 1×10^{-4} A, 最小 1×10^{-12} A, 最大 50 kV	最大 1×10^{-6} A, 最小 1×10^{-12} A, 最大 50 kV
照射電流値安定度	5 μ A 照射, 14.4 ks(4 h)で, 1 %以下	左の条件で, 10%以下
試料駆動方式と速度	電算機制御高精度 X, Y, Z 広域駆動, 最大 10 mm/s	通常は電子線走査, 線分析のみ低速駆動, 最大 0.1 mm/s
Z 軸 調 整	電算機制御調整, $\pm 5 \mu$ m	なし
データ採取方式	指定幅で横振りしながら前進, 指定長さまでのカウント数を指定面積のカウントとする	なし
測 定 時 間	50 mm×50 mm の試料を 100 μ m 角の分析スポットで 5 チャンネル, 10 mm/s で分析するとき, 2.46 Ms(41 min)	左のような広面積は不可
2 次電子, 反射電子像	デジタルマッピング可	マッピング不可, 観察のみ
定性, 定量分析	可(迅速半定量も可)	可
元素相関表示	可	不可

図 3 CMA におけるデータ採取法。
(a) 分析スポットの順序, (b) データ採取法(100 μ m×100 μ m スポットの場合)。

順次に埋め尽くすように, スキャンする。小幅の電子線を図 3 の (b) のように, 進行方向に対して直角方向に振り, 振りを目的とする分析スポット幅とし, 進行距離もその幅として四角の分析スポットを作り出す。一つの分析スポットを形成している間に得られた特性 X 線のカウントを積算し, その分析スポットのカウント数とする。実際には電子線は一定位置において振られ, 試料が駆動される。なお, 分析面積が狭い場合, 電子線のみを振ってマッピングする場合もあり, 両モードは選択できる。データ収集に要する所要時間は目的とする元素とその元素の含有率などによって異なる。例えば, 試料中に 1% 以上存在するマンガンをも, 100 μ m×100 μ m の分析スポットで, スポット総数 500×500 で測定する場合で, データ収集時間は約 2.4 ks(40 min) (1 スポット

あたり 10 ms) であった。

CMA のデータ解析部の画像解析ソフトウェアの構成を図 4 に示した。ソフトウェアの主なものは, 2 元素の

図 4 CMA データ解析部のソフトウェアの説明。

比計算, 含有率計算, 線型結合計算, 2 値化処理, 2 値化画像の膨張, 2 値化画像の縮小, ラベリング処理, 2 値化画像の統計計算, 平均化フィルタリング処理, 面積, 円相当径の計算, ピーク値, 平均値の計算, 微小部分の棄却などである。CMA においては試料中の元素の分布状態が定量的に表示できることが大きな特徴である。特に 3 元素それぞれに 3 色(R, G, B)を配し, 分布状態を同時に表示すると, 化合物が中間色として表示されるので, 化合物の存在状態解析に役立つ。なお, CMA は表 1 に示したように, 従来の EPMA の観察機能なども併せてもち, また 2 次電子像と反射電子像のマッピングも可能である。

(3) 応 用 例

CMA の材料分析への応用としては前報⁽²⁾においてすでに 6 例を挙げている。本文ではつぎの 3 例を述べる。

(i) 連铸鋼スラブ中心偏析部の主要元素などの分析⁽⁴⁾⁽⁵⁾

連铸鋼スラブの中心部における元素偏析は, 後工程または製品における割れなどの欠陥の原因となる場合があるので, 定量的な評価・分析が要求された。連铸鋼スラブ (C 0.15, Si 0.22, Mn 0.73, P 0.015, S 0.015, %) の中心偏析部 (C 断面) から採取した試料 (10 mm×30 mm) について, 主な偏析元素である C, P, S, Mn の偏析を CMA で分析するとともに, CMA の特徴を生かし,

炭素等量 C_{eq} (C+Mn/20) の分布状態を分析した。分析結果を図 5 に示した。図 5 の結果によれば, この試料の元素偏析は大であった。P, S と Mn の偏析はほぼ同様であったが, C の偏析は上記の 3 元素に比較してブロードであった。なお, C_{eq} の分析結果は別に実施した同試料のマイクロ硬度マップ測定結果 (測定点: 500) とよく一致した。また, 分析結果を従来の EPMA と比較する目的で, この試料の中央線部の上記 4 元素につき, EPMA で線分析して, 図 6 に結果を示した。図 6 は, 図 5 に比較すればはるかに分析情報が少なく, CMA による 2 次元元素分布測定 の優位性が示された。

図 6 従来の EPMA による図 5 の試料の線分析結果 (C, P, S, Mn, 中央線, 原図: カラー表示)。

図 5 連铸鋼スラブの中心偏析部における主要元素など (C, P, S, Mn, C_{eq}) の存在状態。

(分析面積: 10 mm×30 mm, 分析スポット: 50 μm×50 μm, 原写真はカラーで, 赤, 緑, 青, 黒の 4 段階カラープロッター表示, 下の数値は各濃度に相当する面積率と試料内平均含有率)。

(ii) 連铸鋼スラブ中心偏析部の介在物と元素の分析⁽⁵⁾

連铸鋼スラブ(C 0.16, Si 0.37, Mn 1.43, P 0.020, S 0.005, %)中の中心偏析部における介在物(硫化マン

図7 連铸鋼スラブの中心偏析部における介在物(MnS)と元素の存在状態。

(白: MnS, 青 Mn, 分析面積: 1.7 mm×1.7 mm, 分析スポット: 10 μm×10 μm)。

図8 南極隕鉄((a) Yamato 790724)とCMA分析結果。(b) 緑: Ni, 黄: リン化合物, 分析面積: 3.6 mm×3.7 mm, 分析スポット: 10 μm×10 μm)。

ガン)および Mn の偏析を CMA で分析した結果を図7に示した。図7では Mn は青, S は緑で, それぞれ濃度に応じて16段階の明暗度で示した。従って, 介在物である硫化マンガンは青と緑の中間色である空色で示される。周知のように, 連铸鋼スラブで Mn の偏析が高いところは, 凝固時に液体が最終段階まで存在していたところを示す。図7の青と空色の関係から, 硫化マンガンは凝固の最終段階で晶出したことがわかる。

(iii) 南極隕鉄の分析^{(6)~(8)}

南極の昭和基地の近くにあるやまと山脈のふもとに多数の隕鉄・隕石が発見された。筆者は国立極地研究所からの依頼で, 南極隕鉄を CMA で分析した。すなわち, 図8の(a)に示すやまと隕鉄(Yamato 790724, 横幅約8 cm, 質量2166 g, Ni 7.47, Co 0.45, P 0.12, %)の一部(試料片 No.62, 14.0 g)の提供を受け, 切断面を研磨し, 元素および化合物の存在状態を分析した。結果を図8の(b)に示す。図8の(b)では緑で Ni を, 赤で P を, 青で S を, それぞれ示す。Ni が高い部分はターナイト(γ鉄)で, 隕鉄の特徴である線状のウィドマンステッテン組織を形成している。緑(Ni)と赤(P)の中間色である黄は, 隕鉄特有のりん化合物(シュライバーサイト, $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$)を示す。図8の(b)から, この隕鉄内のりん化合物の一部は非常に大きく成長していることがわかる。ターナイト中にもりん化合物は存在するが微細である。最近, このりん化合物に似た鉄マンガンりん化合物($(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$)が鉄鋼に見いだされた⁽²⁾。しかし, 鉄鋼中のりん化合物は10 μm以下で, 共晶状のものが多く, 隕鉄中のりん化合物とは大きく相異なる。なお, 青(S)は硫化物(FeS , トロイライト)の存在を示すが, これも大きく成長しているものが多い。

4. X線CT

CMAによる2次元分析はこれまでの分析装置では得られなかった, 数多くの新しい分析情報を材料分析にもたらし, 材料開発を推進した。そこで, 筆者はさらに進んで, 新しい3次元分析法を開発することを企画した。1980年に米国のGE社において, 理工用X線CTの開発状況を見学し, X線CTの有効性に着目したので, その後この装置によって, 材料の3次元分析法を主として鉄鋼と歴史の試料を対象として開発した。1982年, 鉄鋼用X線CT(CTS821)を製作し, 新日本製鉄株式会社第一技術研究所に設置した。また1987年, 歴史試料用X線CT(CTH871, 第1世代, 1チャンネル, データ採取時間: 7.2 ks(120 min), 再構成所要時間: 3.6 ks(60 min))を製作し, 国立歴史民俗博物館に設置した。さらに, 本年6月, 歴史試料用の高速X線CT(CTH881)を製作し, 同博物館に設置した。

X線CTは、周知のように1972年、英国のEMI社のHounsfield⁽⁹⁾によって考案された。対象物に多方向からX線を透過させ、吸収されたX線量を測定し、コンピュータで解析し、対象物の断面像を得る装置である。この装置は非接触で、人体の内部を断面像として映し出すことができたので、必須の医療装置として全世界に普及した。特にわが国での普及は著しく現在、病院などで約4000台が使用されている。

X線CTの材料分野への応用としては、早くから米国において石炭の乾留過程の研究やタービンブレードの欠陥の検出などが行われたが、結果的には大きく進展しなかった。最近、米国では宇宙開発用ロケットなどを対象として、径2m以上の大型のX線(または γ 線)CTが開発され、実用されている。国内でも最近、非医療用X線(または γ 線)CTの応用が急に盛んになり、立木や電柱腐食の測定、原子炉配管欠陥の検出、自動車用タイヤ欠陥の検査などに応用されている。また、ごく最近ではシンクロトン放射光(SOR)が線源として検討されている⁽¹⁰⁾。SORでは単色化した、平行度が高いX線が得られるので、検出能を0.01mmまで向上させる可能性があり、またエネルギー差分法によれば、元素での断面像測定の可能性もある。また最近の医療分野では、核磁気共鳴吸収CT(NMR・CT)が普及しはじめているが、この装置もファインセラミックスなどの材料分析に活用されている。

(1) 装 置

材料用X線CTでは医療用X線CTより、X線透過

性が悪い試料を対象とする場合が多く、また分析を行う目的も異なるので、医療用とは別に専用装置を開発する必要があった。開発した鉄鋼試料用X線CT(CTS821)^{(11)~(13)}を図9に、歴史試料用X線CT(CTH871)⁽¹⁴⁾を図10にそれぞれ示し、さらにそれらの機能を表2に

図9 X線CT(CTS821).
a: 高圧発生器, b: 本体, c: コンソール, d: コンピュータ。

図10 X線CT(CTH871)。

表2 材料用X線CTの主な機能。

CT	X線CT(CTH881)	X線CT(CTS821)	参考, 医療用X線CT
CT方式	第2世代, 88チャンネル, S-R-S*	第2世代, 8チャンネル, S-R-S*	第3世代, 512チャンネル, R-S-R**
線 源	X線(最大300kV, 4mA)	X線管(最大420kV, 3mA)	X線管(最大120kV, 300mA)
検 知 器	タングステン酸カドミウム(CdWO ₄)	酸化ベリリウム-酸化ゲルマニウム(BGO)	Xeガス
主な対象試料	土器, 青銅器, 鉄器など	鉄鋼, 鉄鉱石など	人体
最大測定範囲	径60cm	径62mm	径60cm
最小ビームサイズ	0.6mm×0.6mm	0.3mm×0.3mm	2mm×2mm
実 測 検 出 能	0.3mm×0.3mm	0.3mm×0.3mm	1mm×1mm
スキャンニング法	回転(15°)-直線運動, 12回	回転(6°)-直線運動, 30回	回転(360°)
CRTマトリックス	1024×1024	240×240	320×320
データ採取時間	120s	600s(鉄鋼), 300s(焼結鉱)	9s
再構成所要時間	60s	60s	6s
画像解析ソフト	粒子解析, プロフィール, 寸法計測	粒子解析, プロフィール	プロフィール

* X線源固定-試料回転-検出器固定方式, ** X線源回転-人体固定-検出器回転方式

照射 X 線量の経時変化を補正することである。フィルター補正は偽像を除くための補正で、前処理されたデータと特定されたフィルター関数との積和をとる。逆投影法は図 14 に説明した。試料 (a)、同断面 (b)) について収集される透過 X 線の投影データは (c) のようである。この投影データを単純にコンピュータのメモリー上に逆投影すると、放射線状の偽像が多く現れるので、上記のようにフィルター補正後に図 14 の (d) のように逆投影し、断面像を再構成する。逆投影法によって断面像が再構成される様子をコンピュータ・シミュレーションによって調べ、図 15 に示した。図 15 によれば、図 14 の (a) のような単純な円形の孔は 16 回ぐらいの逆投影

で、像の再構成がほぼできるが、複雑な形状の像の再構成はさらに多くの逆投影回数を必要とする。

再構成され、CRT 上にディスプレイされた断面像について、さらに粒子解析、プロファイル測定、寸法計測、縦断面像測定などの画像解析が可能である。

(3) 応 用 例

本文では X 線 CT の材料分析への応用として、つぎの 3 例を述べる。

(i) ステンレス鋼中のポロシティの測定⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

ステンレス鋼 (SUS304) の試験溶解ブルームから円柱状試料 (径 50 mm, 長さ 100 mm) を採取し、その長手方向の中央部から球状試料 (径 46 mm) を調製して試料とした。試料採取にあたっては、ブルームの中心線が、円柱状試料、さらには球状試料の中心線になるようにした。この球状試料中のポロシティの存在状態を X 線 CT (CTS821) によって測定した。図 16 に球状試料とその X 線スライス断面 (A~E) を示した。スライス断面 A~D は順次に互いに 45° ずつ異なる縦断面であり、スライス断面 E は横断面である。この試料を試料台にのせ、X 線スライス位置を合わせたのち、5 つの断面の測定を行い、結果を図 17 に示した。図 17 では試料中のポロシティは黒で示され、A~D ではポロシティの全体像は V 字状であった。V 字の方向 (図 17 では下方) がブルームの引き抜き方向である。図 17 から球状試料の上端にポロシティが多いことがわかるが、この部分は図 16 の球状試料の上端と対応している。ポロシティの各スライス面内の面積率 (%) を求めた。縦断面 A では 1.0, 同 B では 0.8, 同 C では 1.1, 同 D では 2.2, 横断面 E

図 14 X 線 CT の再構成の説明。

図 15 逆投影法による画像再構成の説明。
回：逆投影回数

図 16 ステンレス連铸ブルーム試料から作製した球状試料(上下方向にポロシティ)。

図 18 クラックがある連铸鋼スラブ試料。

図 17 X線 CTによるステンレス連铸ブルーム試料中のポロシティの測定(A~Eの各面は図 16に対応)。

では 0.5 であった。縦断面間で比較すると A~C では大差がないが、D では約 2 倍であり、この試料中のポロシティは偏在していることがわかった。

(ii) 鋼の腐食進行状況の測定⁽¹²⁾

炭素鋼連铸スラブから、クラックがある円盤試料(径 46 mm、厚さ 8 mm)を採取して試料とした。採取した試料を図 18 に示す。この試料のクラックを X 線 CT (CTS821) で測定したのち、ガラス製ピーカー(外径 50 mm)に入れ、6 規定塩酸 50 cm³ を加え、86.4 ks(1 d)、室温で放置したのち、再び X 線 CT で試料をピーカーに入れたまま、クラックを測定した。以上を 1.5 Ms(17 d) 続けて得られた結果から、6 規定塩酸に浸漬する直後、0.4 Ms(5 d) 後、1.5 Ms 後の結果を選び、図 19 に示した。図 19 からクラックの腐食進行速度はこの条件下では遅いこと、またクラックが試料内側に延びるように進行するのではなく、クラックの幅を広げるように進行することなどがわかった。

直 後 0.4 Ms(5 日)後 1.5 Ms(17 日)後
図 19 X 線 CT による連铸鋼スラブ試料の腐食進行状況測定結果(腐食液: 6 規定塩酸)。

(iii) 焼結鉱の気孔と残留鉄鉱石の測定⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

主要な高炉装入物である焼結鉱の分析にはこれまで良い方法がなかった。すなわち、試料を切断し、光学顕微鏡で観察し、分析していたが、長時間を要し、また分析対象であるマクロ気孔が切断時に潰れてしまうなどの問題点があった。図 20 に示した焼結鉱(42 mm×50 mm×41 mm)を X 線 CT(CTS821)で、測定した結果を図 21 (原写真: カラー)の(a)に示した。測定は鉄フィルター 7 mm 厚を使用し、データ収集時間 0.3 ks(5 min)で行い、CT 画像を得たのち、その画像を CMA の画像解析部でつぎのように解析した。すなわち、CT 値 230 以上を赤として残留鉄鉱石を、230 未満 100 以上を黄として

図 20 焼結鉱と X 線スライス位置(下から 10 mm 上)。

図 21 焼結鉄の X 線 CT 測定結果(a)と CMA 分析結果(b).

カルシウムフェライトを、100 未満 20 以上を青としてスラグを、20 未満を黒として気孔を示すようにした。さらに X 線 CT で測定した後の試料を X 線スライス断面で実際に切断し、研磨して CMA で分析し、鉄を赤、カルシウムを緑、ケイ素を青として、図 21 の(b)に示した。図 21 の(b)では各色は、濃度に応じてそれぞれ 16 段階に明暗度を変え、かつ 3 色を同時に示した。

図 21 の(a)と(b)の比較から、まず主要な分析項目である気孔の形状や分布については両者がよく一致することが分かった。また、(a)で赤で示されている残留鉄鉱石が、(b)で明度が高い赤で示されている部分(残留鉄鉱石と見なされる)とよく一致していることが分かった。以上は、解析した面積率からも明らかであった。すなわ

ち、気孔については X 線 CT で 19%、切断、研磨して測定した CMA で 24% であり、残留鉄鉱石については X 線 CT で 13%、CMA で 16% であった。

5. あとがき

材料分析に画像解析法が導入されるようになった経過、現状および今後を総括し、また画像解析法を取り入れた材料分析法の例として CMA と X 線 CT について詳述した。

最近、新材料や新材料製造工程などの開発に関連して、材料分野から分析に対する依頼は日々高度化している。これらの依頼に対処する有効な方法として、この画像解析法は推奨される。この方法はコンピューターの進歩によって実現した「分析の夢」の一つと言えよう。画像解析法は、従来の分析データからはさらに多くの分析情報を引き出し、また 2 次元や 3 次元の新分析法を創始した。今後の材料分析は画像解析法を抜きにしては考えられず、その役割は益々大きくなると考えられる。

文 献

- (1) 鎌田 仁: 最新の鉄鋼状態分析, 鎌田 仁編, アグネ, (1979), 1.
- (2) 田口 勇: 日本金属学会会報, 25(1986), 160.
- (3) 科学技術庁金属材料技術研究所編: 画像処理による材料組織解析の現状, 金属材料研究所, (1986).
- (4) 田口 勇, 浜田広樹, 谷 誠一郎: 製鉄研究, 313(1984), 93.
- (5) I. Taguchi and H. Hamada: Analytical Sciences, 1 (1985), 119.
- (6) 田口 勇: 鉄の歴史と化学, 裳華房, (1988), 144.
- (7) T. Nagata, A. Masuda and I. Taguchi: Memoirs of National Institute of Polar Research Special Issue No 30, Proceedings of the Eighth Symposium on Antarctic Meteorites (1984), 237.
- (8) 永田 武, 田口 勇: 南極隕石, 国立極地研究所編, 古今書院, (1987), 89.
- (9) G. N. Hounsfield: 英国特許 No. 1283915 (1972).
- (10) Y. Suzuki, K. Usami, K. Sakamoto, H. Kozaka, T. Hirano, H. Shiono and H. Kohno: Japanese J. Appl. Phys., 27(1988), L461.
- (11) I. Taguchi: Analytical Sciences, 1(1985), 93.
- (12) 田口 勇, 中村滋男: 鉄と鋼, 71(1985), 117.
- (13) 田口 勇, 田中幸基: 鉄と鋼, 72(1986), 1629.
- (14) 田口 勇: ぶんせき, (1987), 511.