

リバーズ4D材料エンジニアリング：その構想と最近の展開

戸田，裕之
九州大学大学院工学研究院機械工学部門

パトレス，ラファエル
豊橋技術科学大学機械工学系

桑水流，理
福井大学工学研究科原子力・エネルギー工学安全工学専攻

小林，正和
豊橋技術科学大学

他

<https://hdl.handle.net/2324/1811268>

出版情報：軽金属．64（11），pp.518-524，2014-11-01．軽金属協会
バージョン：
権利関係：



リバース4D材料エンジニアリング：その構想と最近の展開

戸田 裕之*・バトレス ラファエル**・桑水流 理***
小林 正和**・細川 明秀*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 64, No. 11 (2014), 518-524
© 2014 The Japan Institute of Light Metals

Reverse 4D Materials Engineering: Its framework and recent evolution

Hiroyuki TODA*, Rafael BATRES**, Osamu KUWAZURU***
Masakazu KOBAYASHI** and Akihide HOSOKAWA*

Keywords: *synchrotron radiation computed tomography, image-based finite element analysis, metamodel*

1. はじめに

材料工学は、主として表面・断面や薄膜等の二次元 (2D) 観察により発展してきた。一般に、2D情報は幾何学的に不完全であり、現実の3D (三次元) 構造を見誤りかねない。また、往々にして観察対象のごく一部のみをサンプリングするため、統計学的にも不完全な情報となる。サンプリングにより得られたサイズなどの特徴量のデータは、平均化されてマクロ特性と関係づけられる。しかし、物体内の単一、ないしはごく少数の特徴点がマクロ特性を規定する疲労破壊のような場合、サンプリングも平均化もまったく用をなさない。また、得られた知見を普遍化したり、特性の予測を行うような場合、複雑な組織を主に2Dで抽象化・単純化するのが学術研究の常套であった。

近年、中性子やX線、電子線などを用いた3D/4D (4Dは、3Dに時間軸を加えたもの) イメージングの活用が始まっている^{1)~4)}。これにより、手法ごとに観察視野のサイズは大きく異なるものの、複雑な形態を有する膨大な数のマイクロ組織を観察視野内ですべて観察、計測できるようになった。その上、関心のある特性に直接大きく影響する、時として極めて限定された種類、性状、領域のマイクロ組織を特定し、マクロ特性との関係を解析・評価することが可能となった。また、材料のナノ~マクロ組織を3Dイメージングし、それをそのまま忠実に再現した3Dイメージベースモデルを用いた計算機実験も試みられている。つまり、サンプリング、平均化、抽象化、単純化といった従来研究の傾向を極力排除し、材料の全体積、全時間にわたる観察により、局所的な事象を確実に把握することができる。また、複雑で不均一な組織がもたらす、一見確率的に見える挙動と整合するイメージベース解析により、確度の高い実証性を担保できる。

上記の各種3D/4Dイメージング手法の中で、シンクロ

トロン放射光を用いたX線マイクロトモグラフィ (X-ray Microtomography, 以下, XMTと略する) は、バルクと呼べるほどの比較的大きな試験片サイズとマイクロ組織が可視化できる程度の高分解を兼ね備え、4Dもカバーできる唯一の研究技法である^{1)~4)}。また、高輝度単色X線の吸収、位相、回折などの性質から、弾性および塑性歪み、き裂進展駆動力、化学成分、結晶組織と結晶方位などの情報を材料内部で3D/4Dマッピングできる^{1), 3), 4)}。このように、単なる「見る道具」のレベルを越えた「わかる道具」としての側面も、近年、精力的に開拓されつつある。本報では、XMTを用いた例を紹介する。図1に示すように、XMTでは、ナノ構造はサブミクロンから1 μ m前後の大きさのvoxel (3D画素) 内部で均質化し、他方マクロ側では、構造物と歪み分布を介して対応させることができる⁵⁾。つまり、疑似的にナノからマクロに至る8桁以上のサイズ範囲をカバーすることになる。そして、その中間4桁 (サブミクロン~数mm) のメゾ構造がマクロ特性をおおむね規定するような現象を対象に、マイクロ組織を最適化することができる。

それら技術の昨今の発展と内容とを鑑みると、これを学術研究だけではなく、産業的にも有効に活用することが期待

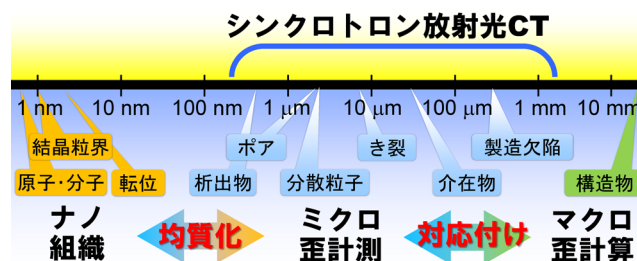


図1 ナノからマクロに至るサイズレンジとシンクロトロン放射光がカバーするサイズ範囲

*九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)。Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kyushu University (744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395). E-mail: toda.hiroyuki.964@m.kyushu-u.ac.jp

**豊橋技術科学大学 機械工学系 (豊橋市)。Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology (Toyohashi-shi, Aichi).

***福井大学 工学研究科 原子力・エネルギー工学安全工学専攻 (福井市)。Graduate School of Engineering, University of Fukui (Fukui-shi, Fukui).

受付日：平成26年6月5日 受理日：平成26年7月9日

される。ここでは、「見る道具」としての活用はさておき、産業に役立つ新しい技術体系の可能性を紹介する。

2. リバース4D材料エンジニアリング

機械工学には、リバースエンジニアリングという概念がある。これは、図2に示すように、クレイモデルや、すでにある機械や機械部品の形状を計測し、作成したCADデータをCAE解析することで製品の設計・開発の飛躍的効率化、高精度化を図るものである⁶⁾。現物から設計という、従来とは逆方向の流れのプロセスが「リバース」と称する所以である。

材料の開発過程では、図3の上側に示すように、トライ&エラーを繰り返すことが常である。上記のリバースエンジニアリングでは、限られた数の形状急変部、流体の隘路等を考慮すればよい。一方、実用材料では、ミクロンオーダーに限っても数～数十万個/mm³の粒子や欠陥、10³～10⁹個/mm³の結晶粒など、膨大な数のミクロ構造が存在する⁷⁾。従来の表面・断面観察(2D)では、それらの把握さえ不可能である。そこで、極々少数のミクロ組織のサンプリングと特徴量の平均化でマクロ特性(例えば、強度などの力学的性質)との関連が議論され、ミクロ組織の制御が試みられてきた。加えて、工業材料では膨大な材種、用途、対象特性が存在し、それらに個別の新技术・新材料開発で対応している。しかしこれでは、研究費や時間、研究者数を考えても、諸外国に対し産業的に明確な優位性を得ることは、今後ますます困難になると思われる。

我々は、3D/4Dイメージングと「わかる道具」を構成する各種4D画像解析技術にイメージベースシミュレーションを高い次元で組合せ、新しい概念の材料開発手法：リバース4D材料エンジニアリング(図3下側。Reverse 4D Materials Engineeringを略し、以下にはR4MEと記す)を構想した⁸⁾。R4MEでは、まず既存材料のナノ～マクロ組織を3D/4Dイメージングする。そして、その複雑さ故、現在の科学技術

では理論的取扱いはおろか、そのパターン化さえ困難な現実の材料のマルチスケール3D構造を忠実に取込む高精度イメージベースシミュレーションを実施する^{9),10)}。3D/4D画像を用いたイメージベースシミュレーションでは、同一のテストピースをその場観察により実験的に評価するとともに、シミュレーションのモデル作成にも用いる^{9),10)}。そのため、両者の比較によりイメージベースシミュレーションの検証はほぼ完全となり、ミクロ組織の不均一性、不規則性などに起因する確率的な因子を排除できる。これは、従来の単純化を目指すモデリングや数値解析とは隔絶したものである。次に、計算機実験により仮想的にミクロ構造を最適化する。その後、提示される最適ミクロ組織に含まれる膨大な数のミクロ組織特徴点のうち、所望する特性に直接大きく影響する、極めて限定された種類、性状、領域のミクロ組織(疲労破壊等、極端な場合には1～数個)を特定する。最後に、超大情報量となる3D/4Dミクロ組織情報を「粗視化」により徹底して取捨選択する。これにより、複雑な3D/4D最適組織形態を限られた数の簡単なパラメータで表現でき、産業界で用いられる慣用の材料製造パラメータと結びつけることができる。我々は、3D/4D画像で必要な情報のみを特定、限定して単純なパラメータで表現することを「粗視化」と呼称している。実材料から組織設計への遡りが、機械工学のリバースエンジニアリング同様、リバースを標榜する所以である。

R4MEの活用により、2D観察を基礎として発展してきたこれまでの産業技術から飛躍し、迅速、高精度な高性能材料の開発が実現できる。これは、実在する物質の複雑な形態、局所的な時間発展挙動をこれまでの評価やものづくり技術に取込むインターフェース作りとも言え、材料開発のパラダイムチェンジが期待される。特に、わが国が得意な先進計測・解析法を発展・活用することで、他国の模倣・追従を許さず、我が国の産業に幅広く、強力、かつ継続的に貢献できると期待する。R4MEは、図4に示すように、各種構造・機能材料に共通の基盤的な組織制御技術となり得る。これは、材料開発の新概念としてセラミックスやポリマー、複合材等の幅広い材料に、また素材だけではなく、電子分野のハンダ接合部のようなミクロ・ナノ構造体やインフラの劣化挙動な

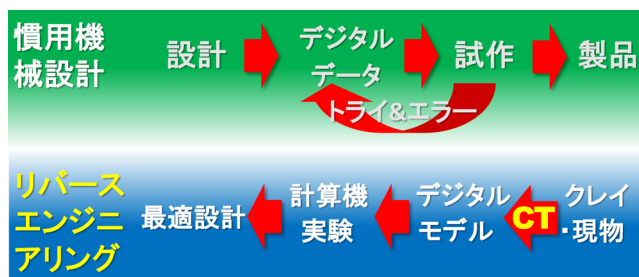


図2 機械工学におけるリバースエンジニアリング

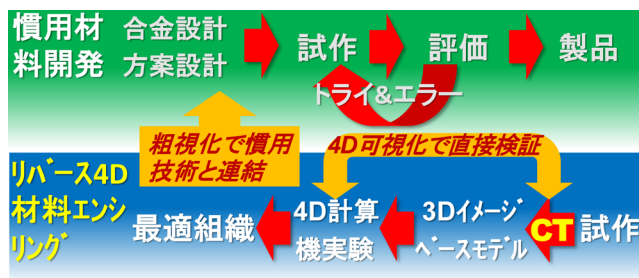


図3 慣用の材料開発プロセスとリバース4D材料エンジニアリング

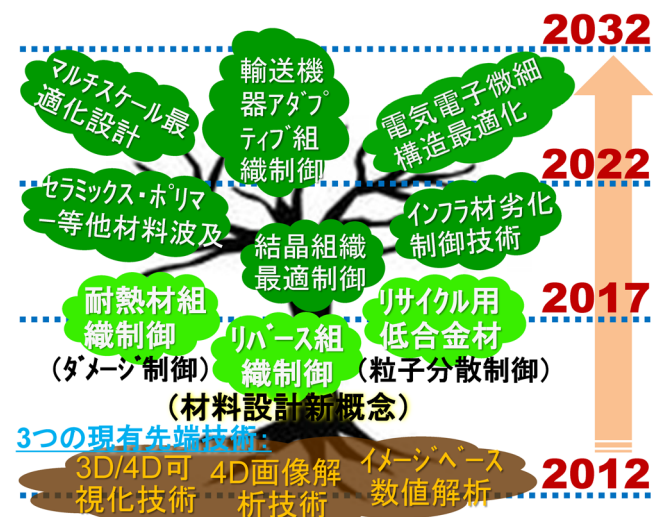


図4 リバース4D材料エンジニアリングの発展と展開

ど、材料以外の分野にも幅広く活用できると期待される。

3. リバース4D材料エンジニアリングを構成する要素技術

3.1 3D/4Dイメージング

XMTの空間分解能は、投影型XMTでは $1\mu\text{m}$ 弱、結像型XMTでは使用するデバイスによるものの、最高で数十nmレベルが可能である^{11)~13)}。現在利用できる可視光検出器の画素数(水平、垂直方向、それぞれ2000~4000画素)を考慮すると、撮影可能な試料サイズは前者で直径最大2mm程度、後者では直径100~数百 μm 程度となる¹¹⁾。したがって、構造材料の力学特性を最適化の対象とし、強度試験や疲労試験、破壊靱性試験などをその場観察する場合、投影型XMTの利用が一般的と言える。近年では、鉄鋼材料のような比較的小線吸収の大きな材料に対しても、理論空間分解能に近い高分解能が得られると報告されている^{14), 15)}。

一方、撮像速度は、2003年頃の2.5時間/枚程度から、10年間ほどで5分/枚程度まで高速化されている¹⁶⁾。また、さらに高速撮像を志向する場合には、50~500ms/枚程度までの高速化が可能である¹⁷⁾。この高速化は、白色光など、X線の単色性を犠牲にした高輝度X線の利用¹⁷⁾、科学計測用CMOSイメージセンサを用いた検出器の登場¹⁸⁾、撮像シーケンスの工夫¹⁶⁾などによってもたらされている。この他の3D/4Dイメージング技術の動向については、既報を参照されたい^{2)~4), 11)}。

3.2 4D画像解析技術

連続撮像された複数の3D画像で粒子やポアなどのマイクロ組織特徴点を対応させるマイクロ組織追跡技術が開発され、数千~数万個以上のマイクロ組織特徴点の物理的な変位を計測することができるようになった^{1), 3), 4), 19)}。さらに、追跡したマイクロ組織特徴点を頂点とする四面体で3D空間を分割するDelaunay分割²⁰⁾を適用すれば、四面体各頂点の変位から、材料内部の任意の位置における塑性歪みを計算できる^{1), 3), 4), 19)}。また、き裂材のき裂先端特異場におけるマイクロ組織特徴点の変位から、き裂進展駆動力の分布をき裂前縁に添って高密度に3D/4Dマッピングする技術も報告されている^{21), 22)}。これらは、金属材料などの不透明な材料の内部で、歪みやき裂進展駆動力などの力学量を高密度に、4Dで、そして直接計測できる唯一の実験手法と言える。現在までに、マッチングパラメータ法の提案¹⁹⁾、ばねモデル法の適用¹⁹⁾、軌道予測法の援用²³⁾などにより、高い確度の追跡による高密度3D/4Dマッピングが可能となっている。

我々は、マイクロ組織追跡法の応用として、結晶粒界追跡法(Grain Boundary Tracking法: 以下、GBTと省略する)を提案している²⁴⁾。これは、マイクロ組織追跡技術に低融点元素を粒界拡散させて粒界を3D観察する手法²⁵⁾を援用し、多結晶材の結晶組織を4D観察するものである。最近では、試料を回転させながら細束X線を走査することで試料各位置のX線回折パターンをあらゆる方向から計測し、これをGBT法で得られた粒界像と重ね合わせることで、多結晶材料内部の結晶方位分布を計測している^{26), 27)}。これは、X線回折援用結晶粒界追跡法(Diffraction-Amalgamated Grain boundary Tracking法: DAGT法)と呼称している。

このほか、特定元素の吸収端の直上と直下で得た3D画

像を画素差分する元素濃度3D/4Dマッピングも行われている²⁸⁾。また、二相組織可視化に有効な位相コントラストイメージングを用い、合金元素や不純物元素の偏析など、元素濃度の空間的な不均一性評価も可能である²⁹⁾。

以上の4D画像解析技術の詳細については、ここでは割愛する。我々の既報を参照されたい^{1), 3), 4)}。

3.3 ミクロ組織最適化

3.3.1 最適化手法

従来の数値解析は、代表的シナリオの抽象化した標本によるものがほとんどである。一方、イメージベースシミュレーションでは、可視化された形態を忠実に取込み、現実の不規則で複雑な現象をそのまま記述する。しかし、モデル規模が非常に大きいため、モデルを逐次更新しながら数値計画法等によりマイクロ組織を最適化するのは、現在の計算機環境では不可能である。そこで、設計変数を変化させた解析を限られた回数だけ実施して応答局面を作成し、その近似関数により最適化を行うのが現実的である³⁰⁾。

まず、材料設計変数として、粒子、結晶粒界、材料欠陥、損傷等の空間的分布を含む形態、結晶方位、元素濃度分布など、XMTおよびその応用技法で可視化できるマイクロ構造を対象とする。次に、目的関数のクラス化を行う。ここでは、単一の目的関数を対象とする単目的最適化と強度-疲労特性等、複数の目的関数を一度に扱う多目的最適化にクラス分けする³¹⁾。多目的最適化は、R4MEでは今後活用が進むベタフロップスコンピューティングの発展などを待つ必要があると思われる。そこで、以下では単目的最適化を想定する。一般に、単目的最適化の場合、図5の手法選択のマインドマップに示すように、候補となるヒューリスティックな手法には、焼なまし法³²⁾、遺伝的アルゴリズム等³³⁾がある。

イメージベースシミュレーションはモデル規模が非常に大きいため、粒子群最適化のような高精度化という近年の最適化のトレンドに逆行する、「寡試行最適化」(数回の試行で求解したい)という特異なニーズがある。応答曲面法の近似関数の精度は、多くのサンプリング点数を用いることで改善できるが、それはR4MEでは非現実的である。図6には、我々が現在試行している寡試行最適化のアルゴリズムを示す。骨子は、代理モデル(メタモデル)^{34)~37)}を作成し、最適化を実行することにある。また、図7に示すように³⁸⁾、インフィル・サンプリング基準(図6のISC)^{37), 39)}により、データに新たに追加する点の選定を行い、代理モデルを逐次更新する。現在のところ、この最適化手法には人工ニューラルネットワーク(ANN)⁴⁰⁾を用いている。今後は、地球統計学で用いられるクリギング(Kriging)⁴¹⁾やサポートベクターマシン(SVM)⁴²⁾を活用し、より少ないサンプリング点で、高精度な応答曲面を生成できる手法を研究する。このうち、クリギング法は内挿法の一つで、関心のあるデータ点の周囲にある計測データの重み付き平均を取り、未知のデータを推定するものである⁴⁰⁾。一方、SVMは、ロバストな2クラス分類識別器として知られている⁴²⁾。SVMでは、ラグランジュの未定乗数を用いることにより、その学習の過程が2次関数の目的関数および線形の制約条件からなる2次計画問題となる。そして、ANNとは異なり、局所解に陥らず、かつ必要とされる学習パターン数が特徴量の増加とともに指数関数的に増加するという欠点もない⁴²⁾。そのため、SVMは、学習

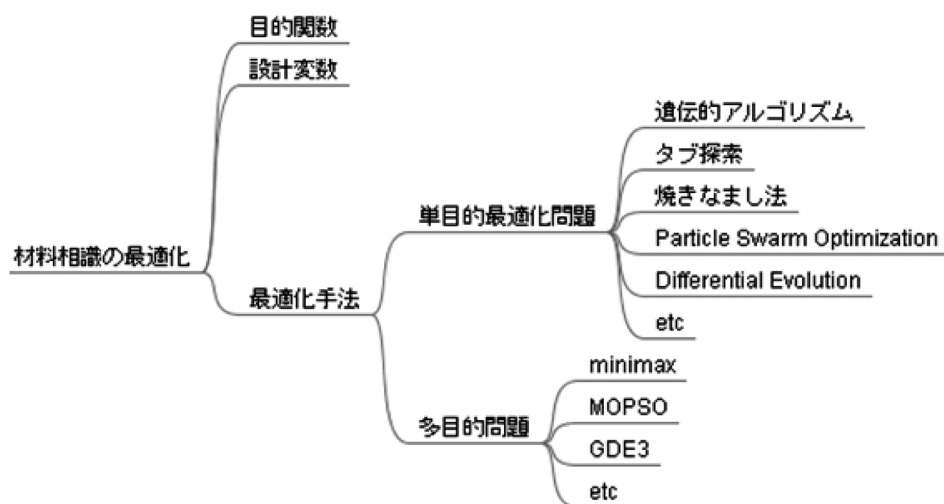


図5 最適化のマインドマップ

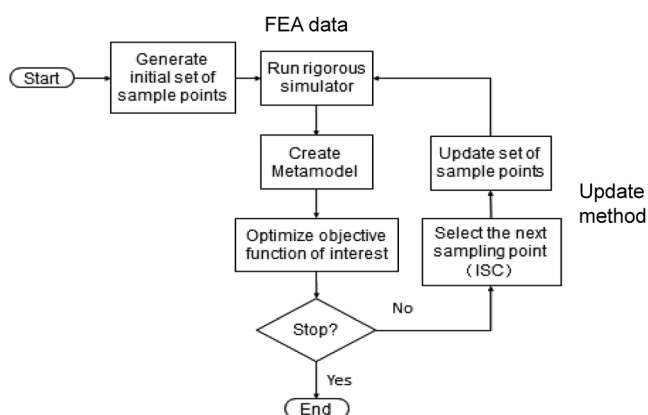


図6 R4MEの最適化プロセス

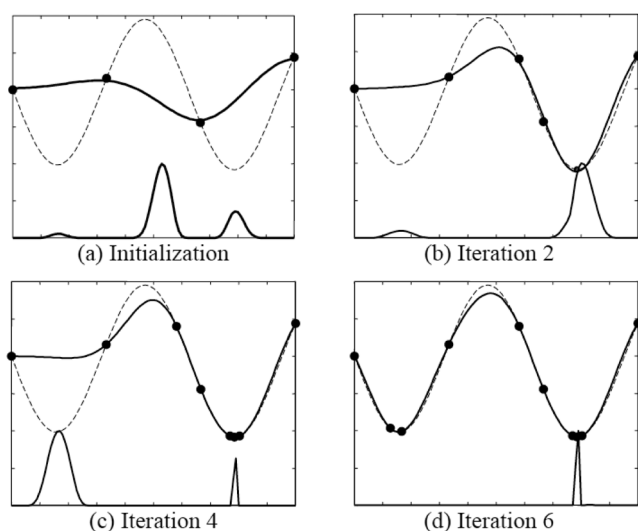


図7 インフィル・サンプリング基準の模式図。破線は、データ。黒丸付き実線は、代理モデル。下の実線は不確かさ、ないしは局所的な改善箇所を与える関数

データが少ない場合に特に有効と期待される。

3.3.2 最適化適用例

上記の最適化手法をナノインデンテーションの解析に用

い、限られた数の実験点から高精度に物性値を求める成果をすでに挙げている。本特集でも関連する論文が収録されており⁴⁸⁾、ここでは文献を例示するに留める^{35)~37)}。

3.4 粗視化

3.4.1 粗視化手法

R4MEで提示する最適化した組織は、非常に多くの複雑な形態を呈するミクロ構造特徴点からなる。各特徴点は、サイズ、形状、空間分布などの幾何学的特徴において、まったく同じものは恐らく存在しない。現実の材料の不均一性、不規則性、確率的挙動をそのまま有する最適組織の情報から、従来のサンプリング、平均化、抽象化、単純化などのプロセスを経ることなく粗視化情報と製造現場のプロセス変数の関係を求めれば、R4MEを工業的手法として慣用のものづくり技術に展開できる。

そもそも、3D/4Dイメージング自体、非常に情報量が豊富な半面、膨大な情報からの射た知見を得るのが困難という問題点がある。特に近年では、上述のように高分解能画像が高速で得られるようになり、得られる情報量、データ量は、年々加速度的に増加している。3D/4Dイメージングで得られる画像には、材料内部のミクロ組織の変化や損傷破壊などの挙動が試験片の隅々に至るまで克明に記録されている。反面、膨大なデータに埋もれた現象の本質の理解がますます困難になっている。かといって、平均化、サンプリングなど従来のやり方に頼れば、3D/4Dイメージングの意義は大きく損なわれる。一般に、超大容量となる3D/4Dデータや複雑なシミュレーション結果を評価する場合、往々にして相関のありそうなパラメータを恣意的に抽出して何らかの解釈が加えられる(図8上側)。これは、人間が容易に理解できるのは、2パラメータ程度の単純な相関に限られるためである。図8下側に模式的に示すように、粗視化により徹底的に情報を取捨選択し、組織と特性の強い相関のみ、漏れなく、かつ人が理解できる程度の簡単な表現で提示することで、現象の確実な理解へと繋げることが肝要である。

粗視化の第一のステップとして、材料設計変数のクラス化を検討する。設計変数は、物理構造を表すもの(CONSTITUENTSと呼ぶ)とその時間発展挙動を表すもの(STEPPERと表現する)にクラス化することができる。

STEPPERは、より高次の粗視化情報であり、ここではCONSTITUENTSについて記述する。CONSTITUENTSは、空間的分布を含む第二相などの内部マイクロ構造の形態、結晶学的情報、化学成分情報等からなる。まず、これらすべてを網羅的にパラメータ化する。次に、材料のマクロ特性との関係の評価し、統計学的解析により低次元化（ごく少数のパラメータで記述）する。この具体的な手法は、データマイニングと呼ばれるものである。粗視化のマインドマップを図9に示す。そのモデル化には、統計解析、パターン認識、人工知能等の技法を網羅的に適用する。その具体的な手法としては、RBFネットワークモデル⁴³⁾、ANNモデル⁴⁰⁾、主成分分析⁴⁴⁾、重回帰分析⁴⁵⁾などが考えられる。

3.4.2 粗視化の例

一例として、アルミニウム合金ダイカスト材の3D/4D疲労破壊挙動に粗視化を適用した例を紹介する⁴⁶⁾。この研究は、3D/4Dイメージングにより、これまで知られていなかった表面直下の高密度なポア凝集体が可視化され、さらにこれが疲労き裂を発生させるという発見に基づいて構想された。我々は、疲労き裂発生過程を繰返し4D観察し、4Dデータの粗視化により、疲労き裂の発生をもたらすポアの配列パターンを簡単な6つの幾何学パラメータ： $x_1 \sim x_6$ で明示した。ここでは、図10に示すように、まず多重共線性の影響を避けるため、正規化したパラメータの独立性を確認した。次に、重回帰分析、およびCART (Classification And Regression Trees)

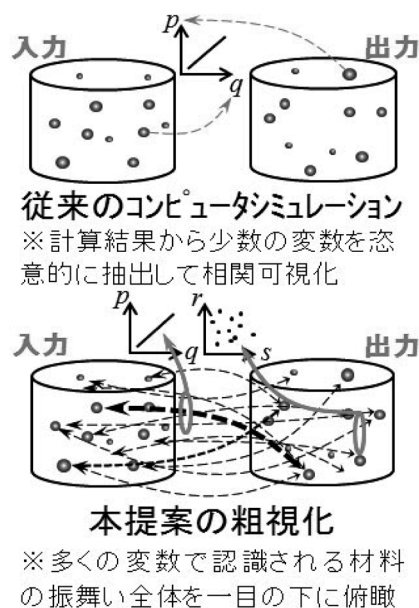


図8 従来の特性-性質の関係理解（上段），および粗視化による網羅的な評価（下段）を表す模式図

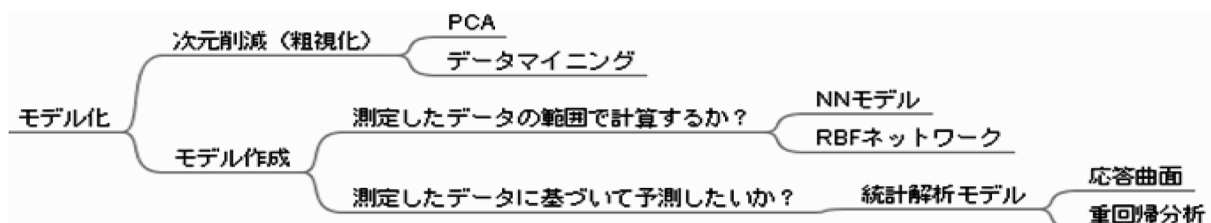


図9 粗視化のマインドマップ

に基づく樹木モデル⁴⁷⁾による疲労き裂発生判定を行った。図11に示す単一のパラメータを用いた評価では、疲労き裂発生との関係は認められない。一方、図12のCARTによる3つの幾何学パラメータの組合せにより、疲労き裂発生をうまく記述できる。関連づけられたパラメータは図中の x_4, x_2, x_5 であり、それらはそれぞれ、隣接するポアペアの铸肌までの距離の平均、隣接するポアペアの直径の平均、隣接するポアペア間の距離を意味する。 x_4, x_2, x_5 が図中の不等式をすべて満たすとき、マイクロ組織と疲労き裂発生は、確率99.7%で相関づけることができる。用いたダイカスト材は、水素濃度が低い高品位なものであった。また、液相-固相間の大きな水素溶解度差という物理的な原因に基づいて発生するポアは、いかなる工夫をしても完全には取り除けない。しかし、ここで得られた知見を利用すれば、製造条件の調整などにより、製品の疲労特性や信頼性を向上できるものと期待される。

4. 応用研究の現状と将来

概念的なR4MEに具体性を与えるため、実用材料の材料組織最適化のデモンストレータ研究により、概念の核心を検討している。また、各要素技術の問題点をフィードバックし、要素技術を現実的な方向に誘導することも重要である。その上で、R4MEの効果を目に見えやすい材料特性改善効果の形で明示すれば、技術の普及へとつなげることができる。そこで、R4MEの要素技術の研究と平行し、水素マイクロポアの分散状態の制御による強度の向上⁴⁸⁾、多結晶組織の制御による変形特性の改善⁴⁹⁾、铸巣からの疲労き裂発生⁵⁰⁾の3課題のデモンストレータ研究を展開している。その一部の成果は、この特集号の他の研究論文、解説論文に掲載されている^{48)~50)}。

水素マイクロポアの分散状態制御では、図13に模式的に示すように、慣用の分散粒子の制御は、真の最適組織とは逆方向に位置するローカル・マキシマに過ぎないことが報告されている⁵¹⁾。つまり、分散粒子の微細化を考慮して高温で長時間の熱処理を施すと、水素ポアが成長して逆に変形・破壊を助長する。3D/4Dイメージングによる真の破壊機構の発見と相まって、これまで意識されなかった別象限にある、より高い力学特性を有する最適組織を見出し、これを産業的に利用できることが期待される。

5. おわりに

近年、3D/4Dイメージング法の発展により、複雑かつ動的な現象にダイナミックにアプローチできるようになってきた。本報では、材料工学、X線光学、計算力学、情報工学の知見を結集した新しい技術体系：リバース4D材料エンジニアリング (R4ME) を紹介した。現在の材料開発は、「材料

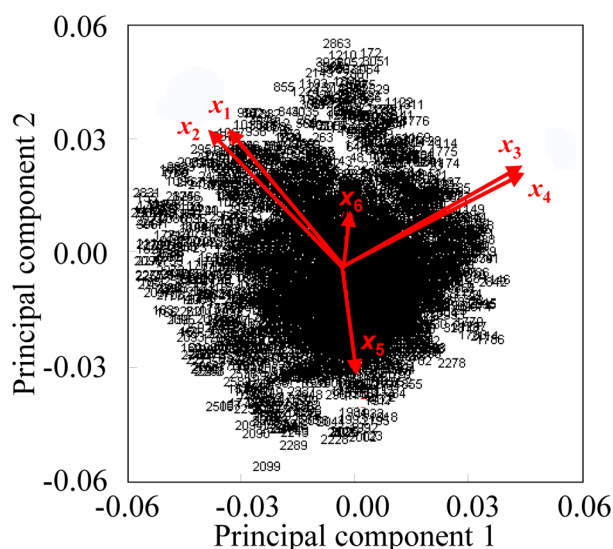


図10 ダイカスト用アルミニウム合金における疲労き裂発生とミクロポアの幾何学パラメータ ($x_1 \sim x_6$) の関係の主成分分析

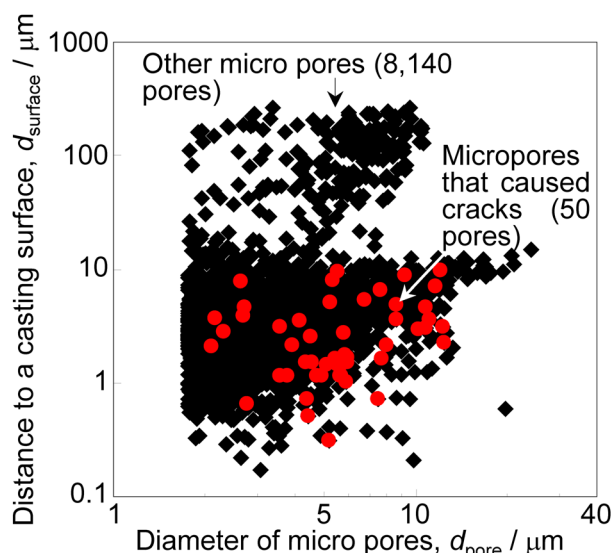


図11 ダイカスト用アルミニウム合金におけるミクロポアの直径および表面からの距離と疲労き裂発生の有無の関係

設計→解析・評価→実材料創出」という時系列で進められている。R4MEでは、これと逆方向のアプローチにより、迅速かつ高精度に高性能材料を開発するパラダイムチェンジを期待する。現実の材料のマルチスケール3D構造は、その複雑さ故、現在の科学では理論的取扱いはおろか、そのパターン化さえ困難である。R4MEでは、微視形態を忠実に取込む高精度4Dイメージベースシミュレーションにより、仮想的にミクロ構造を最適化する。さらに、複雑な3D/4D微視形態を従来の材料設計技術に反映できる程度に粗視化表現することで、ものづくりに展開可能な実用組織制御技術確立する。

R4MEの各要素技術には、いくつかの問題点もある。例えば、現実の不均一、不規則な3D/4D構造を厳密に反映させるには、モデル規模が大きく計算量過多になると懸念される。この根本的な解決は、ベタフロップスコンピューティングな

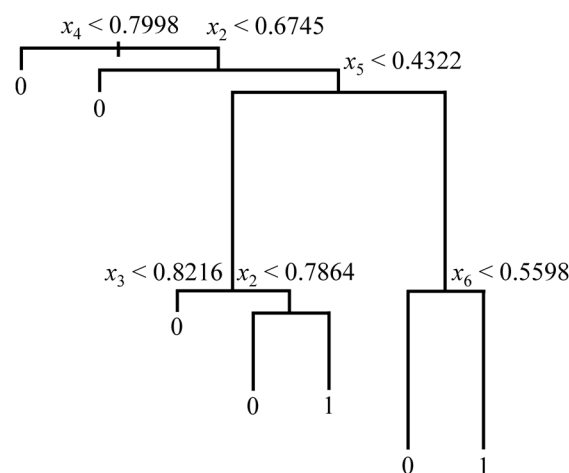


図12 図11のデータにCARTを用いた樹木モデルの解析を適用した結果を表す模式図

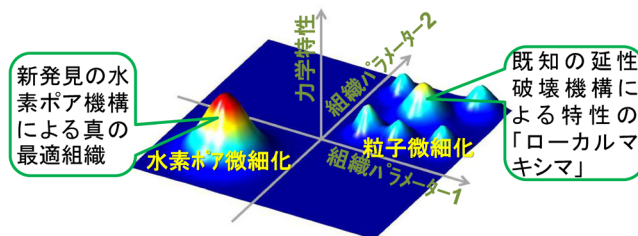


図13 リバース4D材料エンジニアリングに期待する、真の最適組織の発見：水素ミクロポア制御の例

どの計算工学の発展を待たねばならない。現状では、階層化を利用し関心領域を高精細で、そしてそれ以外を粗く解析したり、または高精細部だけを最適化の対象にすることが現実的である。また、現在のR4MEは、大型放射光施設の威力を享受した実験を基礎とし、特殊で汎用性がないと思われる。つまり、大型放射光施設は特殊であり、放射光施設ではなかなか実験課題が採択されず実験できない、産業技術の開発がタイムリーに行えないなどの懸念である。しかし、ラボスケールのXMT装置は、近年高分解能化が進行している⁵²⁾。したがって、現在の放射光実験の多くは、近い将来、一般の研究レベルでも実施でき、R4MEの各要素技術の汎用化が進むものと期待される。

本報では、R4MEのアルミニウムへの応用例を紹介した。二相組織、大量の脆性相をもつチタン合金や鉄鋼材料などの材料では、変形・損傷破壊がアルミニウムより時として複雑となる。R4MEの適用により、3D加工条件に合せた加工性の向上や強度-延性バランスを向上させる効率的な材料組織設計技術の創成など、特殊で高価なプロセスや素材に頼ることなく、大幅な特性向上を実現できる研究開発がそれら分野でも期待できる。

謝 辞

リバース4D材料エンジニアリングの研究は、文部科学省・科学研究費補助金・基盤研究 (S) (課題番号 24226015) の助成による。また、その実験は、すべて SPring-8 での放射光実験 (課題番号: 2013B1027, 2013A1181, 2012B1013, 2012A1205) による。これらに著者一同、心より感謝する。

参考文献

- 1) 戸田裕之, 小林正和, 鈴木芳生, 竹内晃久, 上杉健太郎: 3D・4Dマテリアルサイエンス: その現状と展望, 非破壊検査, **58** (2009), 433-438.
- 2) J. Banhart: Advanced tomographic methods in materials research and engineering, Oxford University Press, Oxford, (2008).
- 3) 戸田裕之, 佐藤真直, 奥田浩司, 小林正和: 軽金属, **61** (2011), 38-48.
- 4) 戸田裕之, 鈴木芳生, 竹内晃久, 上杉健太郎, 小林正和: シンクロトロン放射光を用いた3D/4Dイメージングとその鉄鋼材料への展開, ふえらむ, **16** (2012), 212-219.
- 5) H. Toda, E. Maire, Y. Aoki and M. Kobayashi: J. Strain Anal. Eng., **46** (2011), 549-561.
- 6) 藤井正司: 非破壊検査, **50** (2001), 698-703.
- 7) 増田翔太郎, 戸田裕之, 青山俊三, 折井 晋, 植田将志, 小林正和: 鋳造工学, **81** (2009), 475-481.
- 8) http://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/12_kiban/ichiran_24/j-data/h24_j3404_toda.pdf
- 9) L. Qian, H. Toda, K. Uesugi, M. Kobayashi and T. Kobayashi: Phys. Rev. Lett., **100** (2008), 115505.
- 10) H. Toda, M. Takata, T. Ohgaki, M. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Uesugi, K. Makii and Y. Aruga: Adv. Eng. Mater., **8** (2006), 459-467.
- 11) 戸田裕之, 小林正和, 鈴木芳生, 竹内晃久, 上杉健太郎: X線マイクロトモグラフィー, 顕微鏡, **44** (2009), 199-205.
- 12) H. Toda, K. Uesugi, A. Takeuchi, K. Minami, M. Kobayashi and T. Kobayashi: Appl. Phys. Lett., **89** (2006), 143112.
- 13) Y. Suzuki, H. Toda and C. Schroer: Adv. Tomographic Methods. Mater. Res. Eng., (2008), 181-210.
- 14) H. Toda, F. Tomizato, F. Zeismann, Y. Motoyashiki-Besel, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, M. Kobayashi and A. Brueckner-Foit: ISIJ Int., **52** (2012), 517-522.
- 15) D. Seo, F. Tomizato, H. Toda, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki and M. Kobayashi: Appl. Phys. Lett., **101** (2012), 261901.
- 16) H. Toda, E. Maire, S. Yamauchi, H. Tsuruta, T. Hiramatsu and M. Kobayashi: Acta Mater., **59** (2011), 1995-2008.
- 17) R. Mokso, F. Marone and M. Stampanonia: AIP Conf. Proc., **1234** (2010), 87-90.
- 18) K. Uesugi, M. Hoshino, A. Takeuchi, Y. Suzuki and N. Yagi: Proc. SPIE 8506, Developments in X-Ray Tomography, VIII, 85060I (17 October 2012). DOI: 10.1117/12.929575
- 19) M. Kobayashi, H. Toda, Y. Kawai, T. Ohgaki, K. Uesugi, D. S. Wilkinson, T. Kobayashi, Y. Aoki and M. Nakazawa: Acta Mater., **56** (2008), 2167-2181.
- 20) S. W. Sloan: Adv. Eng. Software, **9** (1987), 34-55.
- 21) H. Toda, I. Sinclair, J. Y. Buffiere, E. Maire, K. H. Khor, P. Gregson and T. Kobayashi: Acta Mater., **52** (2004), 1305-1317.
- 22) H. Toda, S. Yamamoto, M. Kobayashi, K. Uesugi and H. Zhang: Acta Mater., **56** (2008), 6027-6039.
- 23) H. Toda, A. Miyawaki, K. Uesugi, Y. Suzuki and M. Kobayashi: Procedia Engineering, **10** (2011), 2598-2603.
- 24) H. Toda, Y. Ohkawa, T. Kamiko, T. Naganuma, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki and M. Kobayashi: Acta Mater., **61** (2013), 5535-5548.
- 25) M. Kobayashi, H. Toda, K. Uesugi, T. Ohgaki, T. Kobayashi, Y. Takayama and B.-G. Ahn: Philos. Mag., **86** (2006), 4351-4366.
- 26) H. Toda, Y. Ohkawa, T. Kamiko, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki and M. Kobayashi: Acta Mater., **62** (2014), submitted.
- 27) D. J. LeClere, T. Kamiko, Y. Mizuseki, Y. Suzuki, A. Takeuchi, K. Uesugi, M. Kobayashi and H. Toda: Proc. ICAA13, (2012), 9-14.
- 28) H. Toda, T. Nishimura, K. Uesugi, Y. Suzuki and M. Kobayashi: Acta Mater., **58** (2010), 2014-2025.
- 29) S. C. Mayo, T. J. Davis, T. E. Gureyev, P. R. Miller, D. Paganin, A. Pogany, A. W. Stevenson and S. W. Wilkins: Opt. Express, **11** (2003), 2289-2302.
- 30) 北山哲士, 荒川雅生, 山崎光悦: 日本機械学会論文集C編, **76** (2010), 3476-3485.
- 31) K. Deb: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Chichester, UK, Wiley, (2001).
- 32) 竹沢 恵, 長谷山美紀: 映像情報メディア学会誌, **58** (2004), 937-943.
- 33) C. Runwei: 日本ファジィ学会誌, **10** (1998), 485.
- 34) Y. Yun: システム制御情報学会誌, **55** (2011), 367-373.
- 35) L. Gutierrez, H. Li, H. Toda, M. Kobayashi, O. Kuwazuru and R. Batres: IJCTE 2014 Vol. 6(3): 234-239, ISSN: 1793-8201, DOI: 10.7763/IJCTE.2014.V6.868.
- 36) H. Li, L. Gutierrez, M. Kobayashi, O. Kuwazuru, H. Toda and R. Batres: IJCTE, 2014 Vol. 6(3): 272-277, ISSN: 1793-8201, DOI: 10.7763/IJCTE.2014.V6.874.
- 37) H. Li, L. Gutierrez, H. Toda, O. Kuwazuru, M. Kobayashi and R. Batres: Mater. Trans., submitted.
- 38) M. Sasena, M. B. Parkinson, P. Goovaerts, P. Y. Papalambros and M. P. Reed: Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences, (2002), DETC2002/DAC-34091.
- 39) A. G. Watson and R. J. Barnes: Math. Geol., **27** (1995), 589-608.
- 40) 餘語佐斗志, 小橋昌司, 近藤克哉, 畑 豊: Medical Imaging Technology, **23** (2005), 333.
- 41) 正路徹也, 小池克明: 日本地熱学会誌, **29** (2007), 183-194.
- 42) 津田宏治: 電子情報通信学会誌, **83** (2000), 460-466.
- 43) 北山哲士, 安田恵一郎, 山崎光悦: 電気学会論文誌, C, 電子・情報・システム部門誌, **128** (2008), 636-645.
- 44) 田中喜代次, 松浦義行, 中塘二三生, 中村栄太郎: 体育学研究, **35** (1990), 121-131.
- 45) 君山由良: 重回帰分析の利用法, データ分析研究所, (2004).
- 46) H. Toda, S. Masuda, R. Batres, M. Kobayashi, S. Aoyama, M. Onodera, R. Furusawa, K. Uesugi, A. Takeuchi and Y. Suzuki: Acta Mater., **59** (2011), 4990-4998.
- 47) W. Y. Loh: Classification and Regression Trees, Wiley Interdisciplinary, (2011).
- 48) 細川明秀, 戸田裕之, 松山智彦, 栗野貴輝, 上杉健太郎, 竹内晃久, 鈴木芳生: 軽金属, **64** (2014), 611-612.
- 49) 河野亜耶, 小林正和, 戸田裕之, 三浦博己: 軽金属, **64** (2014), 557-563.
- 50) 桑水流理, 松村圭悟, アギアルデソウザヴィニシウス, 小林正和, 戸田裕之: 軽金属, **64** (2014), 570-575.
- 51) H. Toda, H. Oogo, K. Horikawa, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, M. Nakazawa, Y. Aoki and M. Kobayashi: Metall. Mater. Trans. A, **45** (2014), 765-776.
- 52) 戸田裕之, 小林正和, 久保貴司, 茂泉 健, 杉山大吾, 山本裕介, 原田俊宏, 林 憲司, 半谷禎彦, 村上雄一朗: 軽金属, **63** (2013), 343-349.