

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01328

研究課題名(和文) 超高倍率X線顕微鏡が拓く3D/4Dメソスケール材料科学

研究課題名(英文) 3D/4D mesoscopic materials science led by ultra-high resolution X-ray microscopy

研究代表者

戸田 裕之(Toda, Hiroyuki)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70293751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：大規模X線顕微鏡と位相コントラストを組み合わせ、まずアルミニウムを対象に20keVで、その後鉄鋼等を対象に30keV以上の高X線エネルギーでイメージング実験を実施した。試料全体を観察できる投影型CTとX線顕微鏡、細束X線を用いるXRD実験セットアップを併設し、超高倍率観察でありながら、全体積、全時間、最弱点の現象の評価を可能にする。また、3D画像内部に写る膨大な数のマイクロ組織を取り扱う粗視化技術を研究した。我々が開発した3D塑性歪み計測から転位等を、またX線回折援用結晶粒界追跡法により多結晶組織をそれぞれ高密度に3D計測できるようにし、ナノからマクロに至るマルチスケールイメージングを完成する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルミニウム、チタン、鉄鋼等の構造材料内部にある複雑なマイクロ構造とマクロ挙動とを結びつける研究手段が確立した。1本の試験片の1回の力学試験とその「その場観察」を実施することで、結晶学的情報、転位、原子空孔の3D分布やそれらの粗密をマクロな力学挙動と対応付けできる。このため、金属の各種力学挙動の理解と深い解析が解析などを必要としない高い確度で実施できる。今後のマルチモーダル・マルチスケール3D/4Dアプローチの発展を促すと期待できる。一方、アルミニウムの水素脆化、チタンの亀裂伝播速度ばらつき、鉄鋼の歪み誘起相変態等の応用研究が平行して行われ、いずれも産業的に大きな成果を挙げつつある。

研究成果の概要(英文)：Imaging experiments have been performed at first for aluminum using the X-ray energy of 20 keV and subsequently for steels et al. using 30 keV or more, which was realized by combining a large-scale X-ray microscope and a phase contrast technique. The projection CT, by which the whole sample is visualized and the X-ray microscope were combined with an adjoining XRD setup with a collimated X-ray beam, thereby the evaluation of the-whole-sample and full-time observation of the weakest point is realized in spite of the high-resolution observation. In addition, the coarsening techniques, which analyzes a huge number of microstructural features in a 3D image, was studied. Dislocations and vacancies, and polycrystalline structures were measured in 3D in high density by employing our original 3D plastic strain mapping and diffraction-amalgamated grain boundary tracking technique, respectively. This enables us to conduct the real multi-scale imaging ranging between nanoscale and macroscale.

研究分野：構造・機能材料の力学強度

キーワード：シンクロトロン トモグラフィー X線顕微鏡 高エネルギー 構造用金属材料 転位 原子空孔 3D/4D

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

SPring-8のBL20XUでは、2016年4月にレンズとカメラの距離が160mという、これまでにない大規模な超高倍率X線顕微鏡の予備実験を行った。その後、20keV、30keVないしそれ以上と順次高エネルギー化が進み、金属材料の3D高分解能可視化が実現可能と判断し、本提案に至った。このような大規模X線顕微鏡は、世界でも、高輝度X線と長大なビームラインが利用可能なSPring-8でのみ実現可能である。

SPring-8は、これまで国内に3GeVクラス放射光施設がなかったため、赤外～高エネルギーX線まで幅広くカバーする必要があった。しかし、SPring-8-IIは東北放射光施設(3GeV)と棲み分け、より高エネルギーに特化する予定である。さらなる高輝度化とも相まって、高エネルギー・高分解能イメージングが有望な利用分野として想定されている(図1)。

### 2. 研究の目的

世界最大の高分解能・高コントラストX線顕微鏡を利用する。これまでのX線4D観察(4Dは3D+時間軸)の限界を、空間分解能で1桁向上させた上で、この技術をアルミニウムやチタン、鉄鋼などの構造材料が観察できる高X線エネルギーで実現する。これまで3D/4Dイメージング技術は、概ね1μm以上のマイクロ組織がマクロ特性を支配する様な、ごく限られた数と種類の現象にしか有効ではなかった。本提案では、オンリーワンの先端分析・計測技術により、その適用範囲を飛躍的に拡大する。また、研究代表者のオリジナルな3D/4Dイメージベース解析技術の活用により、転位や空孔など空間分解能以下の構造も3D/4Dイメージベース解析でカバーする。これにより、膨大な数のマイクロ組織を観察視野内で全て観察・計測する。その上で、マクロ特性に直接影響する、時として極めて限定された種類、性状、サイズ of ミクロ組織を特定することで、サンプリング、平均化、抽象化、単純化といった従来の材料研究の傾向を排し、確度の高い実証性をもって各種現象とその機構を解明できる様な環境を整える。これにより、真の3D/4D材料科学を実現する道筋を提供することを目的とする。

具体的な研究内容と目標を表1にまとめておく

### 3. 研究の方法

#### ①イメージング技術:

中核となる超高倍率X線顕微鏡の構成を図2に示す。SPring-8の高分解能イメージングビームラインBL20XUは、真空封止アンジュレータを光源(図左端)とし、イメージング用ビームラインとしては、X線源と実験ステーションの間の距離が世界で最も長い。蓄積リング棟にある実験ハッチ1と蓄積リングの外にある実験ハッチ2は、光源からそれぞれ80m、240mの距離に位置する。実験ハッチ1にコンデンサーレンズとフレネルゾーンプレート(FZP)、位相コントラスト用の位相板からなるX線顕微鏡の光学系を設置し、そこから160m離れた実験ハッチ2にX線カメラを設置し、カメラ長(試料-カメラ間距離)が160mと世界最大の超高倍率X線顕微鏡を構築する。この場合の拡大倍率は220倍(X線エネルギー30keV)～330倍(同20keV)で研究代表者等の過去のトライアル(Appl. Phys. Lett., 89(2006), 143112)の時の倍率はたかだか49倍と比べてもX線顕微鏡としては超高倍率と言える。

#### ②周辺技術:

いわゆるマルチスケールイメージングは、図3に模式的に示す様に、高倍率となるほど観察視野は狭まり、極めて狭い領域をサンプリングすることになる。これでは、組織の階層的な把握は可能でも、全体積・全時間を見渡し、どこで何が起こるかは把握できない。まして、最弱点や複雑な3D組織形態の効果などは知る由もない。単なる階層別画像の取得に陥らないためには、分解能は低いが試料全体を撮像できる投影型X線CTと図2のX線顕微鏡(結像型CT)を併用

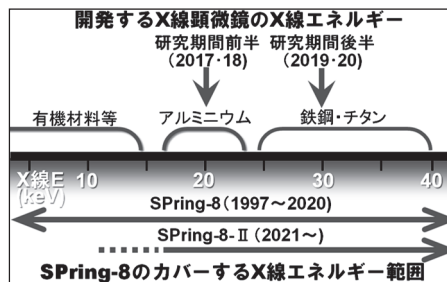


図1 X線顕微鏡エネルギー範囲

表1 研究内容と目標の項目別まとめ

開発項目	達成目標	課題	摘要
イメージング技術	20keV高分解能高コントラスト撮像	超高倍率顕微鏡構築	アルミニウム可視化
	30keV高分解能高コントラスト撮像	30keV用高精細素子	鉄鋼・チタン可視化
周辺技術	関心領域再構成	再構成アルゴリズム	ズームイン技術
	倍率の高低切替技術	ビームライン技術	
関連学術	歪-転位対応	材料学的検討	格子欠陥間接可視化
	大情報量ナノ構造粗視化	3D画像定量化技術	ミクロ組織数増加対策
	細束X線回折の援用	実験技法高度化	結晶塑性への展開

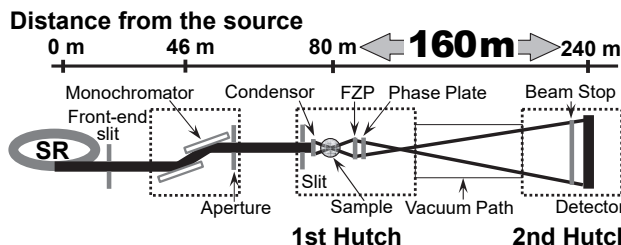


図2 超高倍率X線顕微鏡の詳細

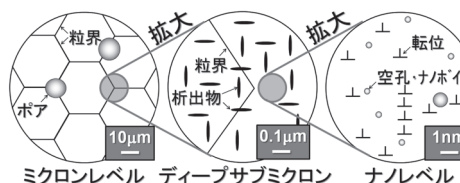


図3 従来のマルチスケール観察

し、適宜切り替えて必要な部分のみ高倍率で 3D 観察することが肝要である。学術的には、試料内の小さな関心領域(ROI: Region of Interest)だけに X 線を入射し、ROI のみ 3D 画像再構成する手法（関心領域再構成法）が必要となる。その他、投影型 CT 用のカメラを別に用意し、X 線顕微鏡の光学系を 2 つのハッチで一斉に退避させることで、高・低倍率の切り替えが可能な機構とする。

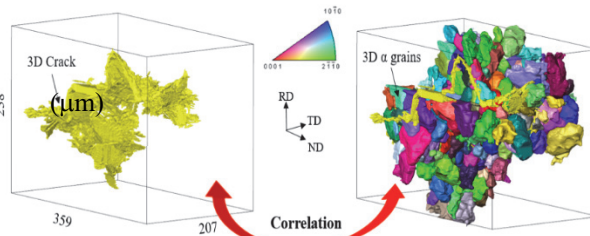


図 4 チタン合金の疲労亀裂高分解能像

③関連技術：

これまで、外部負荷等の外乱下で構造材料を 3D 連続観察し、得られる 4D 画像に写る膨大な数の粒子の軌跡を追跡する手法を提案している。粒子を材料内部でマーカー一点と見なすことで、歪や亀裂進展の駆動力の 3D/4D マッピングができる(Acta Mater., 56(2008), 2167)。この手法は、不透明な材料内部で塑性歪みを直接計測できる唯一の実験方法である一方、歪みの分解能が 1% 程度と低いのが問題である。本研究では、超高倍率 X 線顕微鏡の構築に合わせ、歪分布の空間分解能および歪み分解能向上のための研究を行う。またこれまで、この手法をさらに発展させ、多結晶材料内の 3D/4D 結晶粒イメージングができる X 線回折援用結晶粒界追跡法を開発し、結晶粒の変形や回転挙動の可視化に成功している(Acta Mater., 107(2016), 310)。本研究では、超高倍率 X 線顕微鏡の構築に合わせ、この手法で可視化できる結晶粒径の 1 桁向上を図る研究も実施する。具体的には、これまでの 10 $\mu$ m 幅の細束 X 線に代わり、1 $\mu$ m まで細径化した X 線ビームを用いた X 線回折計測技術を開発する。また、これらと合わせ、高分解能化時に飛躍的に多くのマイクロ構造が可視化できることを想定し、膨大なマイクロ組織の 3D 情報を粗視化（定量化および低次元化）する研究手段の構築を行う。

4. 研究成果

表 1 の実施項目全てに関して研究を実施し、当所目的とする成果が得られている。ここでは、紙面の都合で個々の技術の詳細を列記するのは避け、これらの研究開発の結果として得られた各種構造材料の研究成果を記載してその効果を示したい。特に、最も原子番号が高く、これまで X 線イメージングの適用が進んでいない鉄鋼材料での成果を中心に示すことにする。

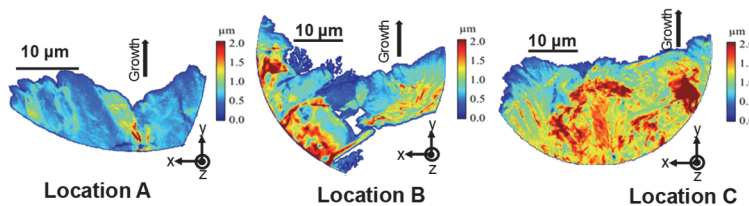


図 5 高分解能観察例：亀裂開口量マップ

①チタン合金の微小疲労亀裂進展挙動

Ti-6Al-4V 合金で投影型 CT と結像型 CT を適用し、微小疲労亀裂の進展挙動を解析した結果を図 4 と図 5 の 2 枚の図面で示す。まず、図 4 は亀裂の 3D 像である。この材料はその高強度に起因して亀裂先端の塑性変形が限定的で、そのため亀裂の開き量が小さい。これを従来の投影型 CT で可視化すると、亀裂先端の位置の特定が困難で、また亀裂の開き量の計測や亀裂開口部の特定もできない。この適用例では、空間分解能 120nm で $\alpha$ 、 $\beta$  二相組織を明瞭に可視化できている。位相コントラストイメージングのコントラストも充分と言える。

図 5 は、微小疲労亀裂の開口量や亀裂閉口部の 3D 分布を計測した結果の一例である。亀裂先端付近で生じる塑性誘起亀裂閉口、および少し離れた破面のリッジ（圧延などによって生じたマイクロ組織に起因）および混合モード負荷による破面粗さ誘起亀裂閉口を分離することができた。また、塑性歪み 3D マッピングによりそれを引き起こすモード II、モード III 負荷の計測も可能であった。これらの情報を元に、 $\alpha$ 相に起因するファセット状破壊、 $\alpha+\beta$  二相領域に起因するジグザグ状の亀裂進展、および局所的な亀裂閉口挙動による亀裂伝播速度の違いやそのばらつき、そしてそれらの亀裂伸長に伴う変化（収束：長い亀裂への遷移）を明らかにすることができた。

②アルミニウム合金の水素脆化挙動

高強度 Al-Zn-Mg 合金にやはり投影型 CT と結像

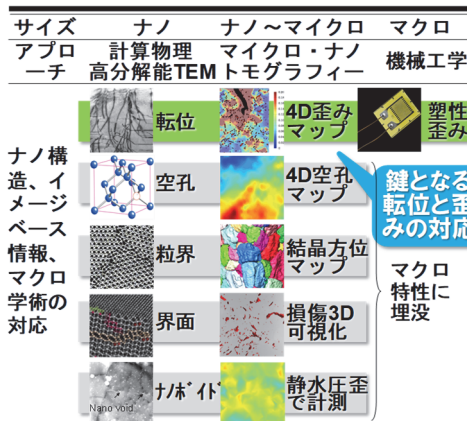


図 6 ナノ～マクロの橋渡し

型 CT を適用し、その水素脆化挙動とその防止策を検討した。結像型 CT を用い、空間分解能の約 1 桁向上が達成されても、結晶粒界や転位、原子空孔、ナノボイド、時効析出物などの主要な水素トラップサイトは可視化できない。そこで、結晶粒界は X 線回折を援用した手法で、転位や原子空孔は塑性歪みの 3D/4D マッピングで、ナノボイドはその空間分解能を超える範囲を HAADF-STEM などで補完し、そして時効析出物や原子空孔、固溶原子等は均一分布を仮定することで、全ての水素トラップサイトの密度と分布を知ることができた。

図 6 には、本研究で実現したナノからマクロを結ぶマイクロ・ナノトモグラフィーとイメージベース解析の融合を示す。3D 歪みマッピングを用いて実施した転位と原子空孔の 3D マッピング、およびそれを利用して予測した局所水素分布を図 7 に示す。基本的に、空孔は転位のジョグの非保存運動に関する Militzer らのモデルを、統計的に必要な転位(SSD)と幾何学的に必要な転位(GND)は、相当塑性歪みおよび塑性歪み勾配からそれぞれ求めた。GND、SSD とも、らせん・刃状転位が同密度と大胆な仮定は置いてはいるが、実験的に、また引張試験片レベルの広範囲にわたって転位や空孔の 3D 分布が計測できるのは、我々の手法ならではの。

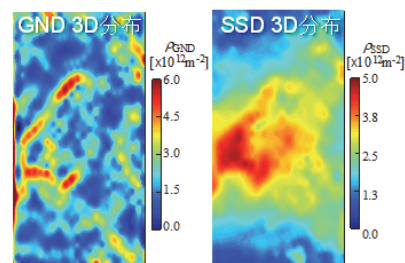
結晶粒界や転位など、水素と強く相互作用し、粒界破壊や粒内の擬へき開破壊をもたらすと思われる格子欠陥は、小さな結合エネルギーを呈する。解析の結果、刃状転位は約 10Å の間隔で部分転位に分裂し、転位が拡張した側に水素がトラップされる。その 0.17 eV/atom という結合エネルギーは、 $\eta'$  析出物の整合界面の半分以下、 $\eta_2$  析出物の半整合界面の 1/3 以下に過ぎない。アルミニウムでは、その表面に水素原子が吸着した状態、および水素分子がアルミニウムから分離した状態がエネルギー的に最も安定である。 $\eta_2$  析出物の半整合界面や数  $\mu\text{m}$  オーダーと粗大な平衡相の金属間化合物粒子である  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  は、それらに次ぐ高い結合エネルギーを有している。この様な解析により、アルミニウム合金中のどこに水素があるかを推測でき、水素が濃化し水素脆化をもたらすと思われる部分の水素を他のミクロ・ナノ構造に移動させることで水素脆化を防止できる方法が提案されている。この手法は、九州大学などから国内・国際特許申請されている。

③TRIP 鋼の歪み誘起相変態挙動  
鉄鋼材料の超高分解能観察例を図 8 に示す。これは、2018 年 6・7 月に Fe-0.1C-5Mn-1Si 材の残留オーステナイトの変態挙動を見たものである。この時には材料試験機を使って試料を引張りながら、結像型 X 線 CT で 4D 観察した。参考までに、同図(f)には、同じ実験中に投影型 X 線 CT で撮影した試料の全体像を示す。これらは、比較的初期のトライアルのため、X 線エネルギーを 20keV として直径 100 $\mu\text{m}$  の細径試験片を用いている。しかし、X 線エネルギーを 30keV ないし 37.7keV に上げることで、シンクロトロン放射光を用いた投影型 X 線 CT で通常用いられる程度の直径 500  $\mu\text{m}$  の試験片でも、十分な画質、空間分解能が得られている。

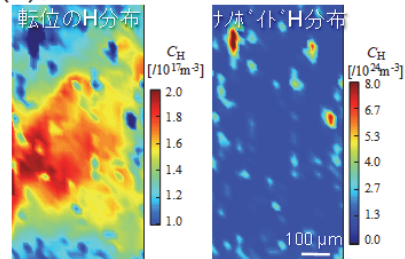
### ③TRIP 鋼の歪み誘起相変態挙動

鉄鋼材料の超高分解能観察例を図 8 に示す。これは、2018 年 6・7 月に Fe-0.1C-5Mn-1Si 材の残留オーステナイトの変態挙動を見たものである。この時には材料試験機を使って試料を引張りながら、結像型 X 線 CT で 4D 観察した。参考までに、同図(f)には、同じ実験中に投影型 X 線 CT で撮影した試料の全体像を示す。これらは、比較的初期のトライアルのため、X 線エネルギーを 20keV として直径 100 $\mu\text{m}$  の細径試験片を用いている。しかし、X 線エネルギーを 30keV ないし 37.7keV に上げることで、シンクロトロン放射光を用いた投影型 X 線 CT で通常用いられる程度の直径 500  $\mu\text{m}$  の試験片でも、十分な画質、空間分解能が得られている。

図 8 では、残留オーステナイト粒とその外部負荷による変態（消滅）が明瞭に観察できる。負荷をかけた場合には若干のアーティファクトが見られるものの、セグメンテーションや画像解析で問題となる様なレベルではなかった。



(a) 格子欠陥の 3D マッピング



(b) 水素濃度(H) 3D マッピング

図 7 歪み 3D マッピング

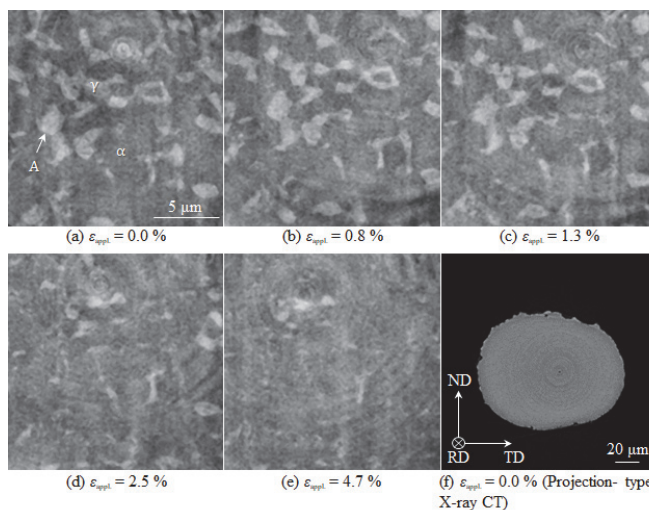


図 8 (a)-(e) 結像型、(f) 投影型 CT による TRIP 鋼中のオーステナイト変態挙動

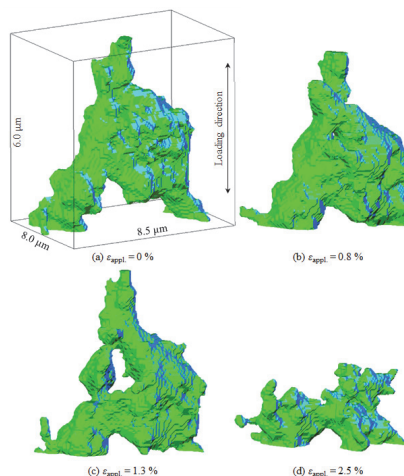


図 9 図 8(a) のオーステナイト A の 3D 描画

図9は、図8に見える多数のオーステナイト粒のうちの一つを3D/4D描画したものである。まず、オーステナイト粒の複雑な3D形状が見て取れる。また、外部負荷に伴い、一つのオーステナイト粒でも局所的に先行して変態する部分と変態がかなり遅れて生じる部分がある。これは、炭素濃度分布などオーステナイト安定性のオーステナイト粒内での局所的な不均一性、および周囲のフェライトやオーステナイト粒との干渉効果によるものと明らかにされている。

シンクロトロン放射光を用いたX線CTのさらなる高機能化のためには、X線CTでは計測できない元素濃度や結晶学的情報等を得られる先端3D/4D分析計測技法とX線CTとを組み合わせることが有効である。これをX線CTのマルチモーダル化と呼ぶ。そのうち、多結晶組織を可視化できるトモグラフィ法として、X線回折援用結晶粒界追跡法（以下、DAGT法）などが挙げられる。具体的には、スリットやX線集光素子で細く絞ったX線のペンシルビームを用い、試料を回転させながら必要に応じてビームを走査させることで、試料内の全ての局所領域に全ての方向からX線を照射する。この様にして得られた回折斑点を解析することで、局所的な結晶方位の3D分布が得られる。以下では、2019年7月に行った、投影型X線CTとペンシルビームによるX線回折を組み合わせた例を紹介する。

図10は、実験セットアップを示す。従来のFZPとA-FZPにより集光したビームを前出のFe-0.1C-5Mn-1Si材に照射した時の回折斑点を比較すると、X線集光素子の改良により、より明るく明瞭な回折斑点が得られている。実験例では、DAGT法を活用し、

DAGT法で利用する液体金属修飾法の代わりに結像型X線CTで得られたオーステナイト粒の3D画像を用いることで、結晶粒と回折斑点の対応付けをした。試料を回転すると、特定の結晶粒は、ブラッグ条件を満たしたいくつかの試料回転角でX線を回折する。そのうちの一つの試料回転角に注目すれば、ペンシルビームをラスタースキャンすることで、図11に示す様に同一結晶粒から得られる同一結晶面からの回折斑点の集合体は、結晶粒の投影形状を与える。同一結晶粒について、X線回折が生じたいくつかの試料回転角の結晶粒投影形状が得られ、その結晶粒の3D形状を再構成できた。通常のX線CTでは、試料を回転させながら、典型的には1800

～3600枚の投影データを取得し、高精細な3D再構成像を構築する。一方、この実験の場合には、ブラッグ条件を満たしたX線回折斑点の集合体が数枚得られるだけなので、それを用いてごく粗く結晶粒像を再構成することができた。

XRDの援用は、マイクロ構造の3D/4D形態、結晶方位分布、塑性歪み分布に加え、第4の情報をもたらしてくれる。図12は、図10の様なペンシルビームで得た回折斑点データから修正Williamson-Hall法に基づき各結晶粒の転位密度を計算し、その外部負荷に伴う変化を求めたものである。これにより、オーステナイト粒の変態機構や粒毎の変態開始条件を解明した。

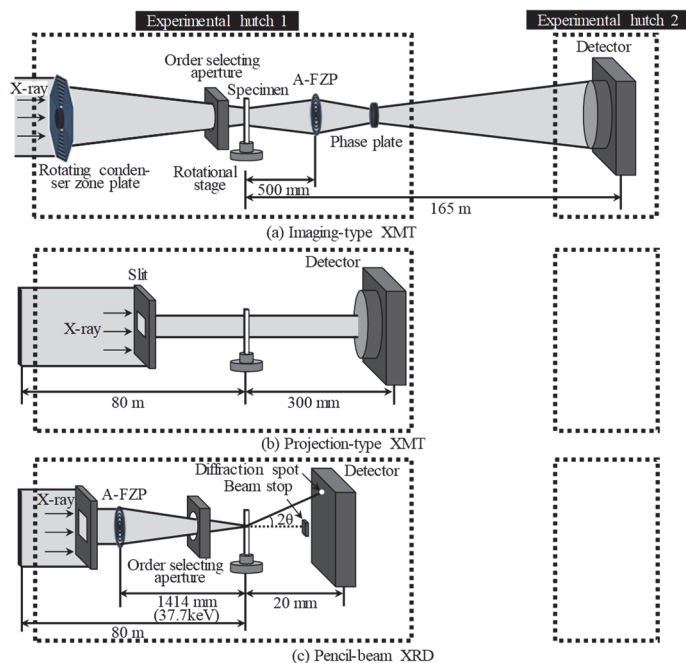


図10 マルチモーダル実験用セットアップ例

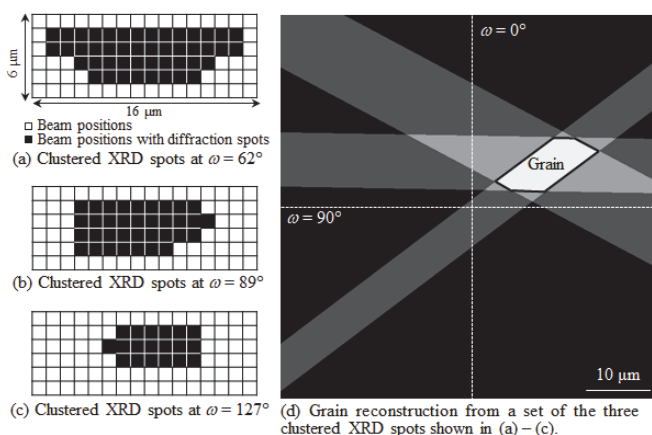


図11 XRD斑点クラスタリングと3D再構成

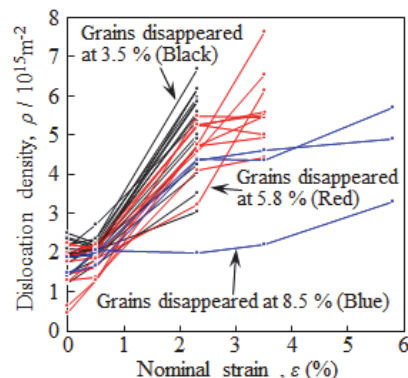


図12 オーステナイト粒転位密度

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hirayama Kyosuke	4. 巻 69
2. 論文標題 3D imaging of polycrystalline structure using diffraction contrast tomography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 587 ~ 590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.69.587	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shimizu Kazuyuki, Toda Hiroyuki, Fujihara Hiro, Hirayama Kyosuke, Uesugi Kentaro, Takeuchi Akihisa	4. 巻 216
2. 論文標題 Hydrogen partitioning behavior and related hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 106503 ~ 106503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2019.106503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Su Hang, Toda Hiroyuki, Shimizu Kazuyuki, Uesugi Kentaro, Takeuchi Akihisa, Watanabe Yoshio	4. 巻 176
2. 論文標題 Assessment of hydrogen embrittlement via image-based techniques in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 96 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.06.056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujihara Hiro, Toda Hiroyuki, Shimizu Kazuyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Kentaro	4. 巻 69
2. 論文標題 Hydrogen desorption behavior in Al-8%Zn-1%Mg alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 186 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.69.186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 戸田 裕之、山口 正剛、松田 健二、清水 一行、平山 恭介、蘇 航、藤原 比呂、海老原 健、板倉 充洋、都留 智仁、西村 克彦、布村 紀男、李 昇原、土屋 大樹、竹内 晃久、上杉 健太郎	4. 巻 105
2. 論文標題 水素分配制御によるアルミニウム合金の力学特性最適化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鉄 と 鋼	6. 最初と最後の頁 240-253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hang Su, Hiroyuki Toda, Ryohei Masunaga, Kazuyuki Shimizu, Hongye Gao, Katsuro Sasaki, Md Shahnewaz Bhuiyan, Kentaro Uesugi, Akihisa Takeuchi, Yoshio Watanabe	4. 巻 159
2. 論文標題 Influence of hydrogen on strain localization and fracture behavior in AlZnMgCu aluminum alloys	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 332-343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.08.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Fu, D., Toda, H., Su, H., Hirayama, K., Uesugi, K., Takeuchi, A.
2. 発表標題 4D characterization of the stress corrosion cracking behavior in Al-10Mg aluminium alloy via synchrotron X-ray tomography
3. 学会等名 The International Offshore and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山 恭介, 泉田 恭輔, 戸田 裕之, 竹田 健吾, 林 邦夫, 上杉 健太郎, 竹内 明久
2. 発表標題 3D/4Dイメージングによるフェライト/オーステナイト鋼の加工誘起変態・損傷挙動の直接可視化
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 尚史, 平山 恭介, 戸田 裕之, 竹田 健悟, 林 邦夫, 上杉 健太郎, 竹内 晃久
2. 発表標題 極細束X線回折によるフェライト/オーステナイト鋼の加工誘起変態挙動の評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 蘇航, 竹内晃久
2. 発表標題 高Zn Al-Zn-Mg-Cu合金における水素分配挙動と擬へき開破壊
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 V. Tubei, M. Hassanipour, S. Watanabe, K. Hirayama, H. Toda, A. Takeuchi, K. Uesugi
2. 発表標題 Assessment of 3D short crack closure in Ti-6Al-4V alloy utilizing synchrotron X-ray microtomography
3. 学会等名 金属学会・鉄鋼協会・軽金属学会九州支部合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日高純真, 戸田裕之, 清水一行, 藤原比呂, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の水素分配挙動と擬へき開破壊
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋期大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 平山恭介, 藤原比呂, 門川千宙, 上杉健太朗, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-Zn-Mg-Cu合金における水素誘起ナノポイドの発生・成長挙動
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki TODA
2. 発表標題 Recent Progress in High Resolution X-ray Tomography at High X-ray Energies
3. 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advance Materials and Processing (PRICM-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki TODA
2. 発表標題 3D/4D Hydrogen Embrittlrment Behaviour in Al-10Zn-2.4Mg alloys
3. 学会等名 The 9th international light metals technology conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸田裕之、清水一行、平山恭介、山口正剛、海老原健一、板倉充洋、都留智仁、松田健二、西村克彦、布村紀男、李昇原、土屋大樹
2. 発表標題 水素分配制御によるアルミニウム合金の力学特性最適化
3. 学会等名 JST産学共創基礎基盤研究プログラム「ヘテロ構造制御」公開シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki TODA, Hang Su, Kazuyuki Shimizu, Hiro Fujihara, Kyosuke Hirayama, Akihisa Takeuchi, Kentaro Uesugi
2. 発表標題 Assessment of hydrogen embrittlement via in-situ imaging techniques in high Zn Al-Zn-Mg alloys
3. 学会等名 ECF22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Shimizu, H. Toda, H. Gao, K. Uesugi, A. Takeuchi
2. 発表標題 Hydrogen-Induced Strain Localization and Nano-Voids in an Al-Zn-Mg Alloy
3. 学会等名 ICAA16 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸田裕之, 清水一行, Su Hang, 竹内晃久, 上杉健太郎
2. 発表標題 放射光ナノトモグラフィによるAl-Zn-Mg合金中の3D亀裂進展挙動解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tubai Valary, Hassanipour Meysam, Watanabe Shinta, Hirayama kyosuke, Toda Hiroyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Kentaro
2. 発表標題 Assessment of 3DShortCrack Closure in Ti-6Al-4V Alloy Utilizing Synchrotron X-ray Microtomography
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸田裕之, 平山恭介, 蘇航, 付東升, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-10Mg合金における応力腐食割れの3D/4D解析
3. 学会等名 軽金属学会第136回春期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 蘇航, 竹内晃久
2. 発表標題 高Zn Al-Zn-Mg-Cu合金における水素分配挙動と擬へき開破壊
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 付東升, 戸田裕之, 平山恭介, 蘇航, 上杉健太郎, 竹内 晃久
2. 発表標題 4D characterization of stress corrosion cracking behavior in Al-10Mg aluminum alloy
3. 学会等名 日本金属学会第164回春期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蘇航, 戸田裕之, 清水一行, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 水素分配制御に基づくAl-Zn-Mg合金の力学特性最適化
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 高紅葉, 蘇航, 平山恭介, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 水素分配制御に基づくAl-Zn-Mg合金の力学特性向上
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 蘇航, 清水一行, 戸田裕之, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 イメージベース解析による高Zn Al-Zn-Mg-Cu合金における水素分配挙動の評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平山恭介, 岡村海, 泉田恭輔, 戸田裕之, 竹田健悟, 林邦夫, 竹内晃久, 上杉健太郎
2. 発表標題 X線顕微鏡による未変態オーステナイトの3D/4D加工誘起変態挙動の評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡村海, 泉田恭輔, 戸田裕之, 竹田健悟, 林邦夫, 竹内晃久, 上杉健太郎
2. 発表標題 X線顕微鏡による未変態オーステナイトの3D/4D加工誘起変態挙動の評価
3. 学会等名 日本機械学会九州支部九州学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 門川千宙, 戸田裕之, 清水一行, 上杉健太郎, 竹内晃久
2. 発表標題 結像型位相コントラストトモグラフィ法を用いたアルミニウム合金中のナノポイド観察
3. 学会等名 軽金属学会第133回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高紅葉, 門川千宙, 清水一行, 蘇航, 戸田裕之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg-Cu合金の水素誘起ナノポイド
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋期講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蘇航, 戸田裕之, 上杉健太郎, 竹内晃久, 坂口信人, 渡辺良夫
2. 発表標題 Influence of intermetallic particles on the hydrogen partitioning and embrittlement in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys
3. 学会等名 日本金属学会第161回秋期講演大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 戸田 裕之	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 464
3. 書名 X線CT	

1. 著者名 Hiroyuki Toda	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Nature Singapore Pte Ltd	5. 総ページ数 552
3. 書名 X-Ray CT	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小林 正和  (Kobayashi Masakazu)  (20378243)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授   (13904)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------