

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04546

研究課題名(和文) 鋳造欠陥制御の技術構築に向けたダイラタンシーを発現する固液共存体の変形挙動の解明

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism for semi-solid deformation causing dilatancy

研究代表者

柳楽 知也(Nagira, Tomoya)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：00379124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金属材料の鋳造欠陥の技術構築を行うために、放射光X線イメージングを利用して、ダイラタンシーを発現する固液共存体の変形挙動の解明を行った。Al合金およびFe合金を対象として、一般的な鋳造プロセスで発生しやすい固液共存体の引張・圧縮変形過程で生じる欠陥に着目した。引張・圧縮変形では、いずれも不均一変形を示す。ただし、引張変形では固相間隙の液相圧力の低下に伴う圧力勾配による力と液相流動による粘性による力が支配的である。圧縮変形では、引張変形で生じる力に加えて物理的に接触した固相粒子間に作用する力が支配的になる。その結果、引張と圧縮変形では、割れの変形機構が全く異なることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射光の高輝度X線を利用して、ダイラタンシー(みかけの体制膨張)が発現する金属合金の固液共存体の特異な変形挙動をミクロンスケールでその場観察することに成功した。圧縮、引張、せん断による変形挙動をそれぞれ調査し、変形モードによって起こる組織変化、欠陥形成機構が大きく異なることを示した。本研究成果は、鋳造欠陥の形成機構の解明だけでなく、固体力学、流体力学とも異なる固液共存体の力学体系の構築にとって学術的な意義がある。また、実際の製造プロセスである連続鋳造法などで発生する鋳造欠陥の抑制にとって有用な知見を与えると期待される。

研究成果の概要(英文)：Synchrotron X-ray radiography was used to study tensile and compressive deformations of semi solid Al-Cu and Fe-C alloys. In the case of tensile deformation of Al-Cu sample, tensile deformation was localized in the high strain region, resulting in the formation of internal cracking in the plane normal to the tensile axis. On the other hand, in the case of compressive deformations of Al-Cu and Fe-C samples, rearrangement of solid particles including translation and rotation caused the shear induced dilatation at the shear domains. Shear fracture finally occurred due to inadequate liquid flow into the expanding spaces between solid particles caused by shear-induced dilation. The solid/solid interaction including impingement between solid particles and rearrangement has significant role in the compressive deformation. These observations demonstrated that the mechanism of cracking formations induced by compressive deformation was totally different from that in the tensile deformation.

研究分野：凝固・結晶成長、溶接・接合

キーワード：鋳造欠陥 その場観察 せん断変形 ダイラタンシー 放射光 固液共存体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

双ロールキャスト、連続鋳造法、ダイカスト法などの製造プロセスでは、固液共存状態で圧縮、引張、せん断などの様々な変形が起こることが知られている。この製造プロセスで起こる外的要因や凝固収縮などの内的要因により、割れや偏析などの鋳造欠陥が発生する。固液共存状態での変形過程では、固相-固相間、固相-液相間の相互作用の結果、固相粒子同士の衝突、固相粒子の移動・変形、固相粒子の凝集/非凝集化、液相流動など、複雑な組織変化が起こり、固相と液相の運動は一致していない。またその変形挙動は、固相率、固相粒子径、形態などの初期組織、ひずみ速度、液相の粘性や固相粒子間の液相の形態などに影響される。そのため、従来の凝固後の組織観察では多様な相互作用で起こる変形現象を正確に把握することは困難である。近年、X線トモグラフィーを利用して、三次元空間で固液共存体の引張および圧縮変形をその場観察する研究も行われている。ただし、引張応力、圧縮応力が作用する法線面において、変形中での固相間の液膜の変化やポロシティの発生・成長などのミクロな組織変化の観察や三次元空間での内部割れの形態の評価が中心である。これまで内部割れとの関係が実証されてきたせん断応力が生じるせん断面における、固相粒子の運動や液相流動などの変形挙動については議論されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、時間分解 X 線イメージングを利用して、粒子スケールで固液共存体の引張、圧縮変形過程のその場観察により、固相粒子の運動や固相粒子間の液相の状態の変化などのミクロスケールでの変形挙動や内部割れの形成機構を明らかにする。またこれまで報告例のない、固液共存体の引張、圧縮変形過程におけるせん断面での変形挙動にも着目し、内部割れとの関係について調べる。そこで、Al-Cu 合金もしくは Fe-C 合金において、固液共存体の引張変形および圧縮変形挙動を粒子スケールでその場観察可能な装置の開発を行った。Al-Cu 合金の引張および圧縮変形挙動や割れの形成機構および変形モードによるそれらの違いについて調査する。

### 3. 研究の方法

固液共存体の引張変形のその場観察を行うために開発した実験装置を図 1(a)に示す。赤外線イメージ炉と炉内で上下に駆動する試料用ステージから主に構成される。赤外線イメージ炉には、X 線ビームを透過させるために上流側と下流側には 10mm の観察窓を設置している。固液共存状態まで昇温後、所望の固相率となるようにある一定の温度で保持し、試料ステージを一定の速度(10  $\mu\text{m/s}$ )で引き下げて、 $\text{N}_2$  フロー中で引張試験を行った。

圧縮変形のその場観察用の実験装置は、過去の固液共存体のせん断変形のその場観察用の装置と同一である<sup>1-7)</sup>。固液共存状態まで昇温後、所望の固相率となるようにある一定の温度で保持し、試料下部からアルミナ板を一定の移動速度(10 または 100  $\mu\text{m/s}$ )で上昇させ、圧縮試験を行った。

引張試験と圧縮試験のその場観察は、それぞれ大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL20B2 と BL20XU で行った。X 線エネルギーは、透過像における固相と液相のコントラストが最良となるように設定し、20B2、20XU では、それぞれ 18.0、21.0 keV とした。ビームライン 20B2 では、CMOS 型カメラを用いた可視光変換型ビームモニタにより、露光時間およそ 1 s で X 線透過像を撮影した。観察視野は、およそ 5 mm 角であり、ピクセルサイズは、5  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。一方、ビームライン 20XU では、フレームレートの高い CMOS 型カメラを用いた可視光変換型ビームモニタにより、1-100 fps の速度で X 線透過像を撮影した。観察視野は、およそ 5 mm 角であり、ピクセルサイズは、6.4  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。

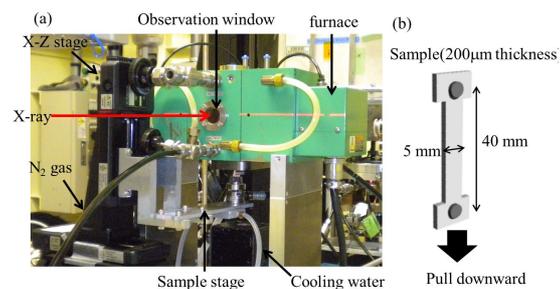


図 1 固液共存体の引張変形のその場観察装置<sup>8)</sup>

### 4. 研究成果

#### 4. 1 Al-Cu 合金における固液共存体の引張変形のその場観察

引張変形前は、球形に近い固相粒子が均一に分散しており、平均粒子径は約 90  $\mu\text{m}$ 、三次元固相率は、約 60% である。図 2 は Al-10mass% Cu 合金の引張変形過程の X 線透過像と局所ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{22}$  の二次元分布である。また、全体の変形量を表すために平均ひずみ  $\epsilon$  も示しており、引張変形開始時の平均ひずみ速度は  $3.45 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  である。平均ひずみが 0.005 の時、観察領域の上部から 1.1 mm 付近にひずみ速度が高い不均一変形帯が二つある。透過像によると、この不均一変形帯では 20  $\mu\text{m}$  程度、つまり、0.2 粒子径程度の固相粒子間の間隙が形成されている。つまり、固相粒子の配置のわずかな差である粒子スケールでの不均一が不均一変形帯の形成に結びついている。図 2(c)に示す平均ひずみが 0.011 においても、 $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  程度の局所ひずみ速度の高い二つの不均一変形帯(図 2(g))が観察されるが、平均ひずみ 0.04 の時に比べて大きく下部に移動している。つまり、平均ひずみが 0.04 から 0.05 までの間(時間間隔は 1.8 s)に、不均一変形帯が遷移したことを示している。平均ひずみが 0.026 になると、上側の不均一変形帯の活動は停止し、

下側の不均一変形のみが活動しており、不均一変形帯の集約が進んでいる。平均ひずみが 0.040 になると、一つの変形帯のみが活動して固相粒子間の間隙も 100  $\mu\text{m}$  程度となり、内部割れが形成された(図 2(e), (i))。この時、局所ひずみ速度は、平均ひずみ速度の約 10 倍である  $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  まで増加し、不均一変形が進行している。

引張試験では引張方向に対してほぼ垂直面内で固相粒子の間隙が拡大した割れが発生し、過去の固液共存体の引張試験において観察される割れと類似していた<sup>1-7)</sup>。単純な引張変形では引張方向に垂直な面で固相粒子間の間隙が拡大し、割れが形成される現象は、合金や引張条件によらず、一般性がある。

固液共存体のせん断変形では、固相粒子が回転・並進運動する再配列により、せん断ひずみの局在化が起こり、割れや偏析の形成に繋がることが分かっている。本観察の引張変形でも鉛直方向から 45° の面にせん断応力が作用している。しかしながら、せん断応力が最大となる面においても、固相粒子の再配列などの固相間の相互作用はなく、せん断面での不均一変形は観察されなかった。以上の観察から、引張変形では次のような変形過程を経て、割れが発生した。

Stage 1: 試料下部の引き下げにより変形を開始した直後から平均ひずみが 0.026 までの間、長手方向の長さ 40 mm の試料において、z 方向に 2.9 mm (32 個の固相粒子径に相当) の領域で複数の不均一変形帯が活動して、試料の変形が起こる。不均一変形帯は引張方向に垂直な面内で生じた。また、複数の変形帯は引き下げた試料下部から離れた領域に形成された。

Stage 2: 複数の不均一変形帯が一つの不均一変形帯に集約されるが、この過程で不均一変形帯の移動も起こる。

Stage 3: 平均ひずみが 0.040 において、集約された不均一変形帯で変形が局在化し、引張応力に対して法線面に割れが発生する。

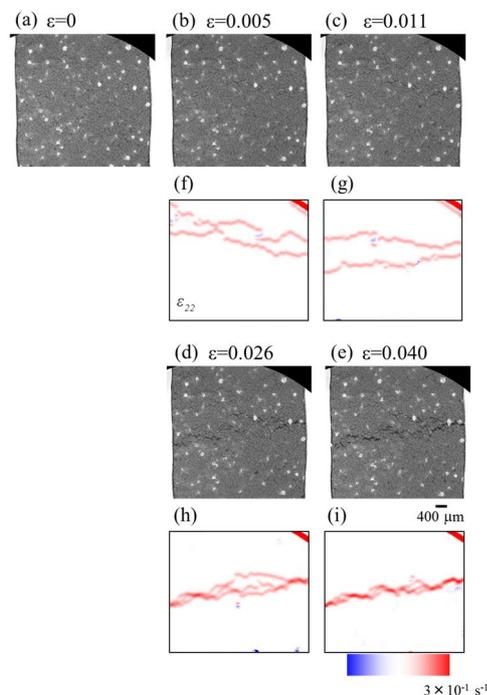


図 2 固液共存体の引張変形中の透過像およびひずみ速度の分布<sup>8)</sup>

#### 4.2 Al-Cu 合金における固液共存体の圧縮変形のその場観察

圧縮変形前は、平均粒子径( $d$ )が約 90  $\mu\text{m}$  の球形に近い固相粒子がほぼ均一に分散しており、約 55% である。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  板が 0.6 $d$ 、1.7 $d$ 、5.6 $d$  の移動時の固相粒子の速度ベクトル、局所的な圧縮を示す局所ひずみ速度  $\mathcal{E}_{22}$ 、局所的なせん断を示す局所ひずみ速度  $\mathcal{E}_{12}$ 、固相率の変化を表す固相速度の発散  $\text{Div}$  を図 3(a-c)、(d-f)、(g-i)、(j-l) にそれぞれ示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  板が 0.6 $d$  変位の時の固相粒子の運動(図 3(a))は、下部から 1.4 mm の領域に限られる。変形を開始すると、圧縮力が作用する領域から内部に向けて圧縮変形が開始するが、図 3(d)に示すように圧縮方向に垂直な面に、局所的な圧縮を示す局所ひずみ速度の高い 3 本の不均一変形帯が生じていた。一方、局所的なせん断を示す局所ひずみ速度は、図 3(g)に示すように左側の下部を除いて正值と負値が混在した帯が 3 本存在し、変形は特定の領域で局所的に起こっている。また、せん断ひずみ速度の高い領域はわずかに上に凸の形状になっている。初期から不均一変形を起こす現象は、引張変形の観察結果と一致している。

局所的なせん断を示す局所ひずみ速度の分布(図 3(g-i))では、固相粒子 1 粒子分以下の 0.6 $d$  の変形の極初期において、局所的な変形を示す不均一変形帯は水平方向に広がる傾向があるが、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  板の変位が大きくなるにつれて、試料の左側と右側では、せん断ひずみ速度  $\mathcal{E}_{12}$  はそれぞれ正と負になっており、その大きさは中央部に比べて大きい。左右それぞれの領域において、試料下部の左右の角から斜めに中心に向かって、せん断ひずみ速度の高い領域が局在化していた。0.6 $d$ 、5.6 $d$  の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  板の変位での赤色の領域と青色の領域における平均のせん断ひずみ速度は、 $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $-5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  および  $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $-6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  であった。また、固相速度の発散(図 3(j-l))は、せん断ひずみ速度が局在化した領域で、固相率が低下(赤色)していた。ひずみ速度が局在化した領域と固相率が低下した領域が一致した領域をせん断帯と定義すると、6-8 粒子分の範囲で圧縮面に対して 30~60 度の角度でせん断帯が形成された(図 3(k-l))。つまり、固液共存体の圧縮変形では、せん断応力が大きくなる領域において、せん断応力に対する不安定性により局所的に固相粒子の再配列が起こり、せん断ひずみの局在化によって、周囲より固相率が低いせん断帯が形成されることが明らかとなった。固相粒子の並進、回転運動によって、せん断ひずみ速度の局在化やせん断帯の形成は、中程度の固相率(三次元固相率: 約 40-60%)、試料全体のひずみ速度が比較的小さい( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )条件下での固液共存体のせん断変形のその場観察における結果と同一である<sup>1-7)</sup>。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 板の変位が大きくなると、図 3(l)の点線で示すように、圧縮面に対して 30° ~ 45° の角度で周囲よりも低固相率のせん断帯が形成されるだけでなく、試料が左右に広がる側面近傍の領域においても固相率が低下した領域が形成され、図 3(b)の点線の枠内で示すように、透過像においても固相間隙の拡大が観察された。一般的に圧縮変形の場合、試料と接触している上下のパンチと試料との摩擦の影響のために試料は樽状となる。本条件の場合、上述したように固相間相互作用による力の伝播が試料上端まで伝わらなかったため、試料下部のみ樽状に近い変形となったが、固相の再配列によるみかけ体積の膨張により樽状の膨らみは、完全固相の連続体よりも大きく、試料の左右側面の周辺部には鉛直・水平方向のいずれも固相粒子間の間隙が拡大する。

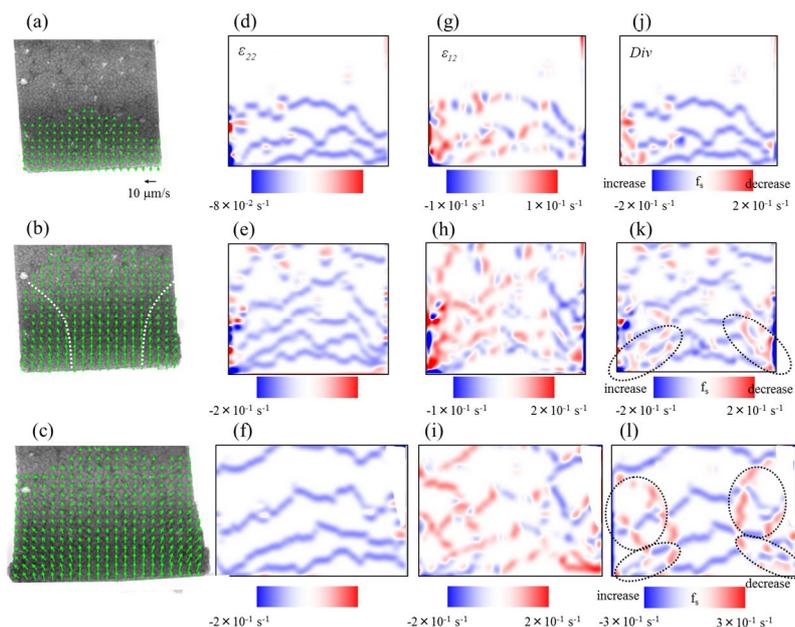


図 3 固液共存体の圧縮変形中の透過像、固相粒子の速度ベクトル、ひずみ速度、固相率の変化<sup>8)</sup>

#### 4.3 固液共存体の引張および圧縮変形の特徴と違い

三次元固相率 60%、球形に近い固相粒子が分散した Al-Cu 合金の固液共存体の引張変形(変形開始時の平均ひずみ速度  $3.45 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )では、せん断応力が最大となる 45 度方向には、割れは形成せず、引張応力に対して垂直面内でのみ割れが形成された。一方、三次元固相率 55%、球形に近い固相粒子が分散した Al-Cu 合金の固液共存体の圧縮変形(試料全体のひずみ速度  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )では、せん断応力が最大となる鉛直方向から約 45 度に近い方向で割れが形成された。両者の初期組織およびひずみ速度は、ほぼ同一であるため、割れの形成機構の違いの原因として、引張変形と圧縮変形における固相粒子間の力の伝播モードの違いが挙げられる。図 4(a), (b)に固液共存体の引張および圧縮変形の際の固相粒子の運動と液相流動の模式図をそれぞれ示す。二つの固相粒子が重心を結んだ線上で引っ張られる場合、固相粒子間には直接力が伝播することはない。拡大する固相間隙に液相が流入するため、間隙の圧力が低下する。また、液相が間隙に流入する場合には液相の粘性により固相粒子には間隙を拡大させない方向に力は作用する。複雑な形状をした固相粒子では間隙が拡大するときにも固相粒子間に直接的に力が働くが、固相粒子に作用する力は、間隙の液相圧力の低下に伴う圧力勾配による力と液相の流動による粘性

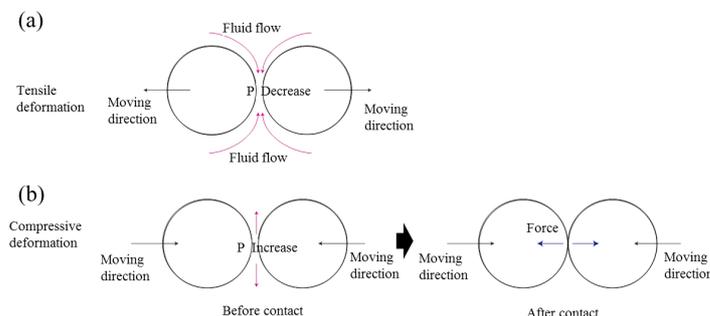


図 4 固液共存体の引張および圧縮変形の固相粒子の運動と液相流動の模式図<sup>8)</sup>

による力が支配的である。一方、二つの固相粒子が重心を結んだ線上で圧縮される場合、固相粒子は物理的に接触し、力が伝播する。固相粒子の移動にともなう液相流動により、圧力勾配による力と粘性による力も作用するが、物理的に接触した固相粒子間に作用する力が支配的になる。そのため、固液共存体では、引張変形と圧縮変形では、力が伝播する因子が異なり、変形の形態にも違いが起こったと考えられる。その結果、固液共存体の変形において、いずれも変形に対する不安定性が存在し、前者では、最大法線応力となる垂直面で間隙が拡大し、後者では、最大せん断応力となる鉛直から 45 度傾いた面において間隙が拡大し、割れが形成された。引張変形と圧縮変形のいずれにおいても、固液共存体の変形は不均一であるが、割れの変形機構が異なることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) T. Nagira, C.M. Gourlay, A. Sugiyama, M. Uesugi, Y. Kanazawa, M. Yoshiya, K. Uesugi, K. Umetani and H. Yasuda: *Scripta Mater.*, **64** (2011) 1129.
- 2) C.M. Gourlay, A.K. Dahle, T. Nagira, N. Nakatsuka, K. Nogita, K. Uesugi and H. Yasuda: *Acta Mater.*, **59** (2011) 4933.
- 3) T. Nagira, H. Yokota, S. Morita, H. Yasuda, M. Yoshiya, C.M. Gourlay, A. Sugiyama, K. Uesugi and K. Umetani: *ISIJ Int.*, **53** (2013) 1195.
- 4) J. Fonseca, C. O'Sullivan, T. Nagira, H. Yasuda and C.M. Gourlay: *Acta Mater.*, **61** (2013) 4169.
- 5) T. Nagira, S. Morita, H. Yokota, H. Yasuda, C.M. Gourlay, M. Yoshiya, A. Sugiyama, K. Uesugi, A. Takeuchi and Y. Suzuki: *Metall. Mater. Trans. A*, **45A** (2014) 5613.
- 6) T. Nagira, H. Yasuda, S. Morita, S. Yanai, A. Sugiyama, M. Yoshiya and K. Uesugi: *J. JFS*, **87** (2015) 552.
- 7) K.M. Kareh, C. O'Sullivan, T. Nagira, H. Yasuda and C.M. Gourlay: *Acta Mater.*, **125** (2017) 187.
- 8) 柳樂知也、安田秀幸、宇野木諒、森下浩平、杉山明、吉矢真人、上杉健太郎、”時間分解 X 線イメージングを利用した金属合金における固液共存体の引張および圧縮変形挙動のその場観察“、鉄と鋼、103(2007)668-677.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T.C. Su, C. O'Sullivan, T. Nagira, H. Yasuda, C.M. Gourlay	4. 巻 163
2. 論文標題 Semi-solid deformation of Al-Cu alloys: A quantitative comparison between real-time imaging and coupled LBM-DEM simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 208-225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actamat.2018.10.006	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 該当する

1. 著者名 柳楽 知也、安田 秀幸、宇野木 諒、森下 浩平、杉山 明、吉矢 真人、上杉 健太郎	4. 巻 103
2. 論文標題 時間分解X線イメージングを利用した金属合金における固液共存体の引張および圧縮変形挙動のその場観察	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 668～677
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-064">https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-064</a>	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 K. M. Kareh, C. O'Sullivan, T. Nagira, H. Yasuda, C.M. Gourlay	4. 巻 125
2. 論文標題 Dilatancy in semi-solid steels at high solid fraction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Acta Mater.	6. 最初と最後の頁 187-195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.066">doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.066</a>	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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 5件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 柳楽知也、山下大輔、釜井正善、藤井英俊
2. 発表標題 放射光を利用したTIG溶接中の凝固割れの進展過程のその場観察
3. 学会等名 2020年金属学会春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nagira, D. Yamashita, M. Kamai, H. Fujii
2. 発表標題 In situ observation of solidification cracking for stainless steel during TIG welding using synchrotron X-ray imaging
3. 学会等名 Visual-JW 2019 and WSE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳樂知也、藤井英俊
2. 発表標題 高輝度X線(接合研～SPRING-8)を利用した溶接・接合研究
3. 学会等名 第16回産学連携シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 大輔、柳樂 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 X線イメージングを利用したAl-Cu合金のTIG溶接時に発生する凝固割れのその場観察
3. 学会等名 溶接学会平成30年度春季全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳樂 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 高輝度X線を利用したその場観察によるAl-Cu合金のTIG溶接で生じる凝固割れの形成機構の解明
3. 学会等名 軽金属溶接協会2018年度年次講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 ステンレス鋼のTIG溶接時の凝固割れ
3. 学会等名 溶接学会平成30年度秋季全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 TIG溶接時におけるステンレス鋼の凝固割れのその場観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、森下浩平、東森稜、杉山明、吉矢真人、上杉健太郎
2. 発表標題 Al-Cu合金における固液共存体のせん断変形時の力学特性と組織の関係
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、森下浩平、杉山明、吉矢真人、上杉健太郎
2. 発表標題 金属合金の固液共存体の変形による高温割れのその場観察
3. 学会等名 日本学術振興会鑄物第24委員会 鑄造プロセス分科会第18回会議（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、中塚憲章、上杉健太郎
2. 発表標題 Al-Cu合金における音響流が凝固組織に及ぼす影響
3. 学会等名 軽金属学会第133回秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳楽知也
2. 発表標題 金属合金の固液共存体の変形による凝固割れのその場観察
3. 学会等名 第13回SPring-8金属材料評価研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、森下浩平、吉矢真人、
2. 発表標題 放射光を利用した金属合金の固液共存体の変形による凝固割れのその場観察
3. 学会等名 第229回溶接冶金研究委員会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳楽知也、宇野木諒、安田秀幸、森下浩平、杉山明、吉矢真人
2. 発表標題 炭素鋼における固液共存体の圧縮変形挙動のその場観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第173回春季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳楽知也
2. 発表標題 放射光を利用した固液共存体の変形による凝固割れのその場観察
3. 学会等名 日本鑄造工学会 東海支部 鑄造先端プロセス研究部会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、森田周吾、柳井森吾、杉山明、吉矢真人、上杉健太郎
2. 発表標題 Al-Cu合金の固液共存体の変形による凝固割れのその場観察
3. 学会等名 日本鑄造工学会第168回全国講演大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳楽知也、宇野木諒、安田秀幸、森下浩平、杉山明、吉矢真人、上杉健太郎
2. 発表標題 Al-Cu合金における固液共存体の引張および圧縮変形挙動のその場観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第172回秋季講演大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Nagira, T. Ito, H. Yasuda, A. Sugiyama, C. Gourlay, M. Yoshiya, K. Uesugi
2. 発表標題 Impact of grain morphology on semi-solid deformation behaviors
3. 学会等名 9 th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳楽知也、安田秀幸、森下浩平、吉矢真人
2. 発表標題 放射光を利用したAl合金における固液共存体の引張変形による凝固割れのその場観察
3. 学会等名 製鋼19委員会凝固プロセス研究会第70回会議
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔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