

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24226018

研究課題名(和文) マイクロアロイングの科学と材料組織ベースの凝固ダイナミックスの構築

研究課題名(英文) Development of microalloying science and solidification dynamics on the basis of microstructure evolution

研究代表者

安田 秀幸 (Yasuda, Hideyuki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60239762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 104,400,000円

研究成果の概要(和文)：放射光を利用したその場観察や蛍光X線分析を用いて、凝固組織の形成ダイナミックスの実証、マイクロアロイングによる組織制御指針の獲得、ミクロとマクロを統合したモデルの構築を本研究の目的とした。本課題では、1) Sn, Al, Fe合金などの凝固形態の選択、核生成や形態に及ぼす微量元素の寄与を解明した、2) 微量元素分析からマイクロアロイングの指針を獲得した、3) 固液共存体の力学特性が固相粒子間の相互作用に起因することを実証した、4) 計算科学により凝固組織の微細化や凝固モードの選択機構に新しい知見を与えた。さらに、観察に基づいて構築したミクロ/マクロ統合モデルが変形や偏析形成の再現に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This project has the objective of determining the fundamental principles of microstructural modification during solidification and building a macro-micro-coupled model of microstructure evolution supported by time-resolved & in-situ observations and X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation X-rays. Specific outcomes include 1) selecting solidification sequences and morphologies in Sn, Al and Fe alloys through the addition of trace elements such as Sr/Eu in Al-Si 2) understanding the role of trace elements and micro-alloying in modification, 3) understanding the interactions between solid grains during deformation and the resultant characteristics of the semisolid microstructure and 4) development of computational materials science approaches describing the refinement of eutectic Si in Al-Si alloys and the morphology selection in Fe alloys. The macro-micro-coupled model for microstructure evolution, deformation and segregation was developed by using the combined results.

研究分野：凝固工学

キーワード：凝固 鋳造 放射光 その場観察 X線イメージング 組織形成 鋳造欠陥 マイクロアロイング

## 1. 研究開発当初の背景

金属材料の凝固・ castingプロセスにおいて高度な凝固組織制御や欠陥抑制の実現は、材料生来の特性を発揮させるために必要不可欠である。しかし、融点が高く、可視光に対して不透明である金属材料では、凝固過程の動的な組織形成(凝固ダイナミクス)には不明な点が多く、また、既知とされてきた凝固ダイナミクスでも実証されていない場合もある。凝固ダイナミクスを把握する手法の欠如が学術の発展を阻害してきた。その場観察を用いて凝固過程のマイクロ/マクロダイナミクスやマイクロアロイングの基盤が確立できれば、凝固現象の理解から凝固・ castingプロセスの高度化に貢献する革新的な学術基盤となる。

■マイクロ/マクロダイナミクス：凝固プロセスでは、ミクロスケールでの dendrite の成長ダイナミクスとマクロスケールでの流動・変形のダイナミクスが相互に作用し、多様な物理現象を引き起こす。例えば、液相と固相が共存した固液共存体の変形による偏析形成や脆性発現、凝固過程・直後に固相変態も起こる合金系の多相凝固における組織形成・欠陥形成などが挙げられる。

■マイクロアロイング：特定元素の微量添加により凝固組織の微細化など凝固組織制御を実現することをマイクロアロイングと本研究では定義している。この手法は組織や偏析の制御に有効であるが、経験に基づいた手法が実現しているのみで、凝固ダイナミクスへの寄与の機構などの科学的な基盤が不足している。例えば、Sr 添加による Al-Si 合金の共晶 Si の微細化、Mg を添加した鋳鉄におけるグラファイトの球状化は現象としてはよく知られているが、その機構には不明な点が多い。そのため、組織制御に有効な添加元素を見いだす指針がなく、適用できる合金は限られている。

凝固現象の時間分解・その場観察や微量元素のマッピングは、上記の課題を解決するための有力な手段と考えられ、手法の開発から現象の観察への展開は意義がある。これまで、基盤研究(A) (2008-2011年) などの一連の研究により、凝固組織形成機構の解明を行うとともに、硬 X 線単色光イメージングによる凝固その場観察手法の開発とそれを利用した凝固組織形成の把握、さらに放射光を用いた蛍光 X 線マッピングによる凝固組織中の微量元素の存在位置の同定を試みてきた。

## 2. 研究の目的

硬 X 線単色光イメージングによる凝固その場観察手法、放射光を用いた蛍光 X 線マッピングをさらに発展させて、従来手法では獲得できなかったマイクロ/マクロダイナミクス

やマイクロアロイングに関する実証的データを獲得し、マイクロダイナミクス(組織形成)とマクロダイナミクス(変形・偏析)を実証的に統合したモデルの構築、マイクロアロイングによる組織制御の機構解明を本研究の目的とした。図 1 に示すように、その場観察による凝固素過程の実証的解明(項目 A)、計算科学を用いた観察結果の補完と検証による理解の深化(項目 B)、観察・計算データに基づいたマイクロ/マクロ統合モデルの構築(項目 C)、その場観察や蛍光 X 線分析を用いた凝固組織制御のためのマイクロアロイングの原理の解明(項目 D)の研究項目を設定して研究を実施した。

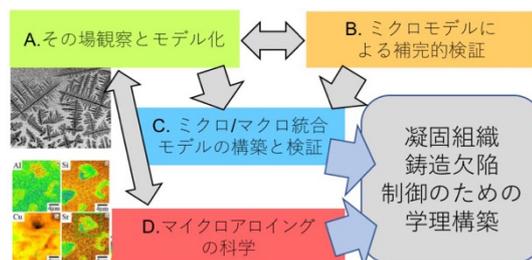


図 1 研究の全体図と研究項目

## 3. 研究の方法

### (1) 項目 A：凝固素過程の実証

凝固過程および固液共存体の変形を時間分解・その場観察する手法を確立する。その上で、凝固現象の素過程(核生成・ dendrite 成長、アームの溶断など)、包晶系合金の凝固・変態、固液共存体の変形をその場観察により明らかにする。さらに、観察データに基づいて項目 C と連携する固液共存体の変形機構や変形・変態による応力・ひずみ発生の解明を行う。

### (2) 項目 B：マイクロモデルによる検証

項目 A で観察された現象とその機構を理解するため、格子静力学計算など計算手法を用いて、原子スケールのアプローチにより補完的に観察結果を検証する。

### (3) 項目 C：マイクロ/マクロ統合モデル

項目 A, B の結果に基づいて、固液共存体の脆化やそれに関係する割れ、マクロ偏析、変態に伴う変形の解析を目指して、固液共存体における変形の素過程の抽象化、定式化からマクロモデルを構築する。

### (4) 項目 D：マイクロアロイングの科学

放射光を用いた蛍光 X 線マッピングにより、凝固組織中の微量元素の存在位置の同定を行い、マイクロアロイングにおける微量元素の役割の解明を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 項目 A：凝固素過程の実証

本項目は、項目 B, C の基礎データにもな

る時間分解・その場観察の開発と応用を担い、本研究により観察対象、観察条件を大きく拡大させることが可能になった(図2)。例えば、実用上重要であるが、固相と液相のコントラストが小さいため観察例がなかった Al-Si 合金の観察を実現し、TiB<sub>2</sub>を添加した Al-Si 合金中では初晶 Al の核生成は等温面の移動に沿って wave-like に起こることを実証し[主な発表論文等の文献番号 33]、核生成頻度の定量化や従来モデルの妥当性を検証できた[12]。さらに、Si 濃度が数%になると核生成頻度を低下させることを観察で確認し、マイクロアロングの凝固ダイナミクスへの影響を明らかにした。また、Fe-C 系合金 (>2mass%C) における微量 Mg 添加は、初晶グラファイトの成長温度範囲を低下させるとともに核生成頻度を増加させ、球状グラファイトが形成することを明らかにした[10,25,32]。従来の組織観察では把握できなかった核生成や形態変化を直接知ることができ、他の研究にも波及する成果である。

観察可能な合金系  
 ・ ほとんどの実用材料  
 Sn, Al, Zn, Cu, Ni, Fe 合金

観察可能な環境・条件  
 ・ 変形過程  
 ・ 超音波印加

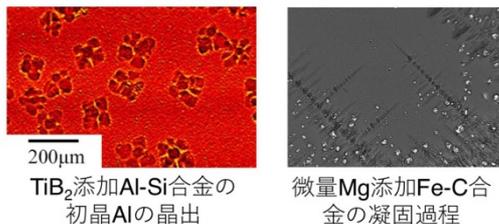


図2 時間分解・その場観察の範囲と観察例

超音波振動の1次効果(振動)と2次効果(音響流)に分けて凝固現象を観察することを実現し、超音波の印加が dendrite arm の溶断を促進し、結晶粒の微細化に寄与することを明らかにした[4,16]。核生成だけでなく、dendrite の溶断が結晶粒の微細化に寄与する実験事実は、凝固組織の微細化に新たな戦略を与える。

従来、包晶反応により凝固が進行すると考えられてきた Fe-C 系 (<0.5mass%C)、Cu-Fe 系包晶合金の凝固過程では、固相変態により初晶が低温相に変態するモード(マッシュプ的変態)や初晶の再溶解・低温相の凝固が同時に起こるモードが存在することが明らかになった[8,14,15,18]。この発見は、従来考えられてきた凝固モード以外にも多様な凝固モードが存在し、現実を選択されることを実証しており、多相凝固における組織の形成機構の再構築を迫る波及効果の高い成果になった。

固液共存体の変形では、Fe 系合金と Al 系合金の変形挙動を結晶粒スケールでその場観察を行い、固相間の間隙拡大(図3下の赤

の領域)などの固液共存体特有の力学現象を明らかにした[23,24,29,31,34]。また、その場観察に基づいて実施した水モデル実験により固相粒子間の相互作用を定量的に測定し、固相粒子間の相互作用が固液共存体の力学特性の発現に寄与していることが分かった[30]

(図3左上)。さらに、観察に基づいたせん断による割れのモデル化[13]、高ひずみ速度での変形[23]を実施し、固液共存体の変形機構の解明から casting defect prediction のためのモデル化へ展開した。

本研究課題の開始前に比べて観察対象・条件は拡大し、金属材料の凝固の素過程を把握する実験手法として認知・確立しつつある。今後も当該分野での先導的な研究手法となると考える。

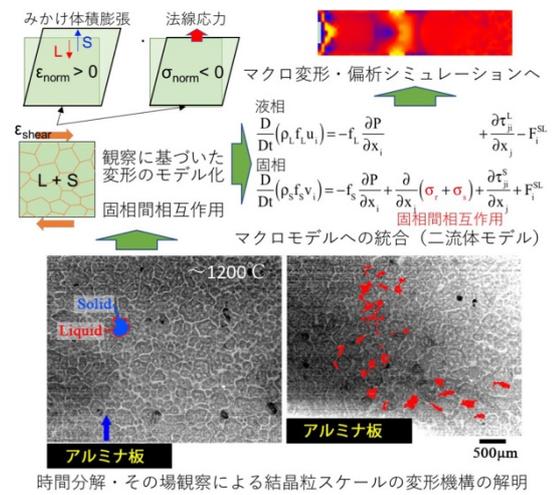


図3 固液共存体の変形解析からマイクロ/マクロ統合モデルへの展開

## (2) 項目 B: ミクロモデルによる検証

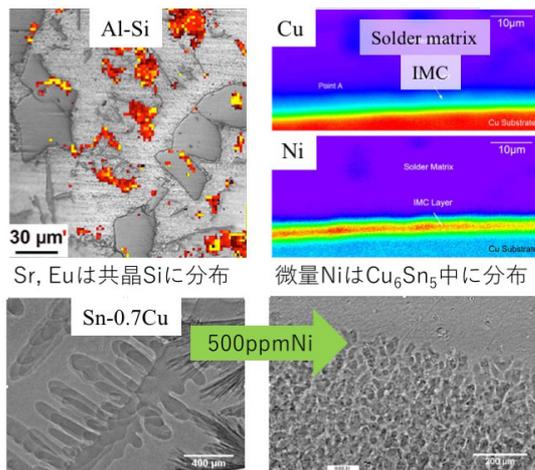
項目 A のマッシュプ的な変態では、平衡状態では包晶反応により生成する低温相であるガンマ相(FCC構造)のデルタ相(BCC構造)中での連続的な核生成が示唆された。格子静力学計算を用いた原子スケールからの結晶方位依存性を含めた界面エネルギーの評価などから、連続的な核生成が選択されることを示し、観察された現象の機構解明がなされた[8,14,15]。また、マッシュプ的な変態は Fe-C 系に特異な現象ではなく、他の合金でも選択される可能性も示され、包晶系などの凝固現象・組織形成を再構築する研究となった。

Al-Si 合金では微量 Sr の添加により共晶 Si が微細化することが従来知られていた。研究代表者のグループは微量 Sr が共晶 Si 中に存在することを示したが、その原因は不明であった。そこで、第一原理計算により化学量論組成 Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>X(X=Ca, Sr, Ba, Eu, Y, Yb)の化合物の安定性を議論し、ダイヤモンド構造である Si と整合性の良い高温安定構造を有する元素が共晶 Si の微細化に寄与し得ることを示し

た[11]. 高温での凝固現象について, 格子静力学や第一原理計算を用いた解析の有効性を示す成果であり, その場観察と計算科学を融合した研究の更なる発展が期待される.

### (3) 項目 C : ミクロ/マクロ統合モデル

項目 A のその場観察と解析により結晶粒スケールでの固液共存体の変形機構が明らかになった (図 3 下). せん断変形時に固相粒子間の力の伝播 (固相粒子間の相互作用) が, みかけ体積の膨張やせん断面の法線応力を生じさせ, 不均一変形や偏析形成の原因であった. 本項目では, 結晶粒サイズのミクロな現象を鋳物サイズのマクロな現象に取り入れたモデルの構築を目指した (図 3 上). 液相と固相が圧力を共有する二流体モデルに, 観察結果と整合する形で抽象化した固相粒子間の相互作用 (せん断ひずみ速度に比例する  $\sigma_s$ , ひずみ速度に依存しない  $\sigma_f$ ) を導入したモデルを提案するに至った[13,17,30,34]. 基礎式は, 従来の偏析計算モデルを内包しており, 汎用性も高いマクロモデルである. この基礎式は単純せん断に対する不安定性を表現でき, 凝固組織の力学特性への影響も反映させることが可能である. このモデルを用いて遠心鋳造プロセスなどで生じるバンド状偏析が再現できるようになり, 固液共存体特有の力学を陽に含んだ初めてのマクロモデルとなった. さらに, 柱状晶や等軸晶などの凝固組織の影響を導入できるため, ミクロ・メゾスケールの組織予測モデルとの連成も可能であり, 多様な凝固プロセスの鋳造欠陥予測への適用が期待できる段階となった.



微量Ni添加により凝固パスが変化し、微細化  
 図 4 微量元素の影響 上:放射光を用いた蛍光 X 線分析, 下:その場観察

### (4) 項目 D : マイクロアロイングの科学

項目 A と連携した Mg 添加の Fe-C 融液中のグラファイト形態への影響,  $TiB_2$  添加による Al-Si 合金中の核生成への影響については項目 A で述べた (図 2). Sr, Eu の添加により

Al-Si 合金の凝固パスが二元系から三元系共晶に遷移することにより共晶 Si が微細化するという当グループの仮説を検証するため放射光を用いた蛍光 X 線分析を実施し, 仮説と一致する Sr, Eu の分布が確認され [22,27] (図 4 上), さらに項目 B の第一原理計算と整合する結果であった.

Ni を 500 ppm 添加した Sn-0.7mass%Cu (Pbフリーはんだ) のその場観察により, 微量 Ni による凝固パスの変化が化合物の微細化に寄与すること[28,29]や蛍光 X 線分析により微量 Ni は化合物  $Cu_6Sn_5$  中に均一に存在することを明らかにした[20,26] (図 4 上). さらに, 200 時間アニール後の Sn-Cu 合金中の微量 Ni, Zn の分布を明らかにした[5]. 微量元素の化合物への固溶による相平衡の変化[9]や介在物の存在[6,7]が, 結果として微細化や粗大化の抑制に結びついていた. さらに, 金属間化合物  $Cu_6Sn_5$  の成長機構の解明[2,3,21]やはんだ付け工程の凝固その場観察の実現[1,19]に至った.

本研究で実施した Al 合金, Fe 合金, Sn 合金におけるマイクロアロイングの効果は, 微量元素が微量な化合物を含めた相平衡関係に及ぼす影響を考えることで統一的に理解でき, マイクロアロイングの科学的基盤になる結果を得た. 今後, 微量元素による組織制御の学理として活用していく.

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 53 件)

1. “In situ imaging of microstructure formation in electronic interconnections”, M.A.A. Mohd Salleh, C. M. Gourlay, J. W. Xian, S. Belyakov, H. Yasuda, S. McDonald, K. Nogita, *Sci Rep*, **7** (2017) 40010. doi:10.1038/srep40010 査読有
2. “ $Cu_6Sn_5$  crystal growth mechanisms during solidification of electronic interconnections”, J.W. Xian, S.A. Belyakov, M. Ollivier, K. Nogita, H. Yasuda, C.M. Gourlay, *Acta Mater*, **127** (2017) 540-551. doi:10.1016/j.actamat.2016.12.043 査読有
3. “Effect of Ni on the Formation and Growth of Primary  $Cu_6Sn_5$  Intermetallics in Sn-0.7 wt.%Cu Solder Pastes on Cu Substrates During the Soldering Process”, M.A.A. Mohd Salleh, S.D. McDonald, C.M. Gourlay, S.A. Belyakov, H. Yasuda, K. Nogita, *J Electron Mater*, **45** (2016) 154-163. doi:10.1007/s11664-015-4121-x 査読有
4. “時間分解 X 線イメージングを利用した超音波振動下での Sn-Bi 合金のデンドライト成長のその場観察”, 柳楽知也, 中塚憲章, 安田秀幸, 上杉健太郎, 竹内晃久, 鉄と鋼, **102** (2016) 66-74. DOI :10.2355/tetsutohagane.TETSU-2015-080 査読有
5. “The influence of ageing on the stabilisation of interfacial  $(Cu,Ni)_6(Sn,Zn)_5$  and  $(Cu,Au,Ni)_6Sn_5$  intermetallics in Pb-free Ball Grid Array (BGA) solder joints”, G. Zeng, S.D.

- McDonald, D. Mu, Y. Terada, H. Yasuda, O. Gu, M.A.A. Salleh, K. Nogita, *J. Alloys Comp*, **685** (2016) 471-482.  
doi:10.1016/j.jallcom.2016.05.263 査読有
6. "Suppression of  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  in  $\text{TiO}_2$  reinforced solder joints after multiple reflow cycles", M.A.A. Mohd Salleh, S.D. McDonald, C.M. Gourlay, H. Yasuda, K. Nogita, *Mater Design*, **108** (2016) 418-428.  
doi:10.1016/j.matdes.2016.06.121 査読有
7. "Effect of  $\text{TiO}_2$  on the formation of primary and interfacial  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  in Sn-0.7wt%Cu and Sn-0.7wt%Cu-0.05wt%Ni solder paste during soldering", M.A.A. Mohd Salleh, R.M. Said, N. Saud, H. Yasuda, S.D. McDonald, K. Nogita, *Key Eng Mater*, **700** (2016) 161-169.  
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.700.161 査読有
8. "Secondary  $\gamma$ -Phase Nucleation in Massive-like Phase Transformation of Carbon Steel by Phase-Field Modeling with Energy Fluctuations", H. Fujiwara, M. Yoshiya, T. Nagira, H. Yasuda, *AMTC Lett*, **5**, (2016) 144-145. 査読有
9. "Solidification of Sn-3Ag-0.5Cu and sn-0.7Cu-0.05Ni solders", C. M. Gourlay, Z.L. Ma, J.W. Xian, S.A. Belyakov, M.A.A. Mohd Salleh, G. Zeng, H. Yasuda, K. Nogita, *Mater Sci Forum*, **857** (2016) 44-48. doi:  
10.4028/www.scientific.net/MSF.857.44 査読有
10. "Influence of Mg on solidification of hypereutectic cast iron: X-ray radiography study", K. Yamane, H. Yasuda, A. Sugiyama, T. Nagira, M. Yoshiya, K. Morishita, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, *Metal. Mater Trans A*, **46A** (2015) 4937-4946. doi:10.1007/s11661-015-3077-z 査読有
11. "Yet Another Marked Difference among Impurities as Modifier Elements for Refinement of Eutectic Si in Al-Si Alloys", Y. Suzuki-Yamamoto, R. Ozaki, M. Yoshiya, T. Nagira, H. Yasuda, *Mater Trans*, **56** (2015) 1475-1483.  
doi:10.2320/matertrans.MA201576 査読有
12. "A real-time synchrotron X-ray study of primary phase nucleation and formation in hypoeutectic Al-Si alloys", A. Prasad, S. D. McDonald, H. Yasuda, K. Nogita, D. H. StJohn, *J Cryst Growth*, **430** (2015) 122-137.  
doi:10.1016/j.jcrysgro.2015.06.024 査読有
13. "Al-Cu 合金の固液共存体の変形による凝固割れその場観察", 柳楽知也, 安田秀幸, 森田周吾, 柳井森吾, 杉山明, 上杉健太郎, 铸造工学, **87** (2015) 552-560. doi:10.11279/jfes.87.552 査読有 (論文賞)
14. "Interface Energies of Hetero- and Homo-Phase Boundaries and Their Impact on  $\delta$ - $\gamma$  Massive-Like Phase Transformations in Carbon Steel", M. Yoshiya, K. Nakajima, M. Watanabe, N. Ueshima, T. Nagira, H. Yasuda, *Mater Trans*, **56** (2015) 1461-1466.  
doi:10.2320/matertrans.MA201568 査読有
15. "Concurrent  $\gamma$ -Phase Nucleation as a Possible Mechanism of  $\delta$ - $\gamma$  Massive-like Phase Transformation in Carbon Steel: Numerical Analysis Based on Effective Interface Energy", M. Yoshiya, M. Watanabe, K. Nakajima, N. Ueshima, K. Hashimoto, T. Nagira, H. Yasuda, *Mater Trans*, **56** (2015) 1467-1474.  
doi:10.2320/matertrans.MA201569 査読有
16. "Impact of melt convection induced by imposition of ultrasonic wave on dendrite growth in Sn-Bi alloy", T. Nagira, N. Nakatsuka, H. Yasuda, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, *Mater Lett*, **150** (2015) 135-138.  
doi:10.1016/j.matlet.2015.02.069 査読有
17. "Application of a macroscopic model to predict the band segregation induced by shear deformation of semisolid", S. Morita, H. Yasuda, T. Nagira, C. Gourlay, K. Morishita, M. Yoshiya, A. Sugiyama, *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, **84** (2015) 012011 doi:10.1088/1757-899X/84/1/012011 査読有
18. "Kinetic of the  $\delta/\gamma$  interface in the massive-like transformation in Fe-0.3C-0.6Mn-0.3Si alloys", T. Nishimura, K. Morishita, T. Nagira, M. Yoshiya, H. Yasuda, *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, **84** (2015) 012062 doi:10.1088/1757-899X/84/1/012062 査読有
19. "In-situ Soldering Process Technique by Synchrotron X-ray Imaging", M. A. A. Mohd Salleh, A. Sugiyama, H. Yasuda, S. D. McDonald, K. Nogita, *Applied Mechanics & Materials*, **754-755** (2015) 508-512.  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.508 査読有
20. "The influence of Ni and Zn additions on microstructure and phase transformations in Sn-0.7Cu/Cu solder joints", G. Zeng, S. D. McDonald, Q. Gu, Y. Terada, K. Uesugi, H. Yasuda, K. Nogita, *Acta Mater*, **83** (2015) 357-371. doi:10.1016/j.actamat.2014.10.003 査読有
21. "Rapid  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  growth at liquid Sn/solid Cu interfaces", M.A.A. Mohd Salleh, S.D. McDonald, H. Yasuda, A. Sugiyama, K. Nogita, *Scr Mater*, **100** (2015) 17-20.  
doi:10.1016/j.scriptamat.2014.11.039 査読有
22. "Eutectic Morphology of Al-7Si-0.3Mg Alloys with Scandium Additions", P. Pandee, C.M. Gourlay, S.A. Belyakov, R. Ozaki, H. Yasuda, C. Limmaneevichir, *Metall Mater Trans A*, **45A** (2014) 4549-4560. doi:10.1007/s11661-014-2395-x 査読有
23. "In-situ observation of deformation in semi-solid Fe-C alloys at high shear rate", T. Nagira, S. Morita, H. Yokota, H. Yasuda, C. M. Gourlay, M. Yoshiya, A. Sugiyama, K. Uesugi, Y. Takeuchi, Y. Suzuki, *Metall Mater Trans A*, **45A** (2014) 1415-1424. doi:10.1007/s11661-014-2489-5 査読有
24. "Synchrotron Radiography Studies of Shear-Induced Dilation in Semisolid Al Alloys and Steels", C.M. Gourlay, C. O'Sullivan, J. Fonseca, L. Yuan, K.M. Kareh, T. Nagira, H. Yasuda, *JOM* **66** (2014) 1415-1424. doi:10.1007/s11837-014-1029-5 査読有

25. “過共晶鑄鉄中のグラファイト成長に及ぼす Mg 量の影響とグラファイトの結晶学的特徴”, 山根功士朗, 杉山明, 柳楽知也, 吉矢真人, 安田秀幸, 田中勇太, 佐藤彰洋, 上杉健太郎, 竹内晃久, 鈴木芳生, 本多弘, 佐藤健, 鑄造工学, **86** (2014) 461-470. doi:10.11279/jfes.86.461 査読有 (論文賞)

26. “Ni segregation in the interfacial (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> intermetallic layer of Sn-0.7Cu-0.05Ni/Cu ball grid array (BGA) joints”, G. Zeng, S.D. McDonald, D. Mu, Y. Terada, H. Yasuda, Q. Gue, K. Nogita, *Intermetallics*, **54** (2014) 20-27. doi:10.1016/j.intermet.2014.05.004 査読有

27. “Distribution of modifier elements in hypereutectic Al-Si alloy and a suggestion of the mechanism of modification”, R. Ozaki, H. Yasuda, K. Nogita, T. Nagira, M. Yoshiya, Y. Terada, Proc. Modeling of Casting and Solidification Processes, (2014) 215-217. 査読有

28. “Real time synchrotron X-ray imaging for nucleation and growth of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> in Sn-7Cu-0.05Ni high temperature lead-free solder alloys”, K. Nogita, H. Yasuda, S. D. McDonald, K. Uesugi, *Advanced Materials Research*, **626** (2013) 200-204. doi:10.1007/s11661-013-2008-0 査読有

29. “In-situ study of the altering globule packing-density during semisolid alloy deformation”, C.M. Gourlay, T. Nagira, K. Uesugi and H. Yasuda, *Solid State Phenomena*, **192-193** (2013) 185-190. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.192-193.185 査読有

30. “Characterization of shear deformation based on in-situ observation of deformation in semi-solid Al-Cu alloys and water-particle mixtures”, T. Nagira, H. Yokota, S. Morita, H. Yasuda, M. Yoshiya, C.M. Gourlay, A. Sugiyama, K. Uesugi, K. Umetani, *ISIJ int.*, **53** (2013) 1195-1201. doi:10.2355/isijinternational.53.1195 査読有

31. "In situ study of granular micromechanics in semi-solid carbon steels", J. Fonseca, C. O'Sullivan, T. Nagira, H. Yasuda, C.M. Gourlay, *Acta Mater*, **61**(2013) 4169-4179. doi:10.1016/j.actamat.2013.03.043 査読有

32. “時間分解 X 線イメージングによる Mg 添加過共晶 Fe-3.8C-3.1Si 合金の凝固形態の観察”, 山根功士朗, 安田秀幸, 杉山明, 柳楽知也, 吉矢真人, 上杉健太郎, 梅谷啓二, 牛込智章, 佐藤彰洋, 鑄造工学, **85** (2013) 760-770. doi:10.11279/jfes.85.760 査読有 (優秀論文賞)

33. “Real time synchrotron X-ray observations of solidification in hypoeutectic Al-Si alloys”, K. Nogita, Yasuda, A. Prasad, S. D. McDonald, T. Nagira, N. Nakatsuka, K. Uesugi, D. H. St John, *Mater Character*, **85** (2013) 136-140. doi:10.1016/j.matchar.2013.08.015 査読有

34. “放射光を利用した金属合金における固液共存体のせん断変形の様子観察”, 柳楽知也, 安田秀幸, C. M. Gourlay, 杉山明, 吉矢真人, 上杉

健太郎, 梅谷啓二, あたりあ **51** (2012) 561-568. doi:10.2320/materia.51.561 (解説, あたりあ論文賞)

[学会発表] (計 138 件)

1. H. Yasuda, “In-situ Observation of Spheroidal Graphite Formation and Measurement of Apparent Volume Expansion in Ductile Cast Iron”, TMS 146th Annual Meeting and Exhibition, 2017/2/27-3/2, San Diego (USA) Invited
2. H. Yasuda, “Processing for three-dimensional alignment of FeSi<sub>2</sub> by magnetic field”, 8th Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials, 2015/10/12-16, Cannes (France) Plenary
3. H. Yasuda, “Applications of in-situ imaging to alloy solidification”, 4th Int. Conf. Advances in Solidification Processes (ICASP-4), 2014/7/7-11, Old Windsor (UK) Plenary

国際会議 61 件, 国内会議 77 件

[図書] (計 2 件)

1. 安田秀幸 (分担執筆), 「鉄鋼の凝固」第 4 章, 日本学術振興会製鋼 1 9 委員会凝固プロセス研究会編, 2015, pp.115-120.
2. T. Nagira, H. Yasuda, “In-situ Studies with Photons, Neutrons and Electrons Scattering II”, Springer Publishing, 2014. pp231-243.

[その他]

ホームページ等

<http://cast.mtl.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

安田秀幸 (YASUDA, Hideyuki)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60239762

### (2)研究分担者

吉矢真人 (YOSHIYA, Masato)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 00399601

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

森下浩平 (MORISHITA, Kohei)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 00511875

### (3)連携研究者

杉山明 SUGIYAMA, Akira)  
大阪産業大学・工学部・教授  
研究者番号: 10335375

### (4)研究協力者

野北和宏 (NOGITA, Kazuhiro)  
クイーンズランド大学・Associate Professor