

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23109001

研究課題名（和文）シンクロ型 LPSO 構造の材料科学 - 次世代軽量構造材料への革新的展開 -

研究課題名（英文）Materials Science on Synchronized LPSO Structure - Innovative Development to Next-generation Lightweight-structural Materials -

研究代表者

河村 能人 (KAWAMURA, Yoshihito)

熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授

研究者番号：30250814

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 327,300,000 円

研究成果の概要（和文）：総括班の役割は、各計画研究と公募研究が緊密に連携して十分な研究成果が出せるように、本領域の組織的かつ効果的な運営と研究支援活動ならびに若手人材育成を図り、本領域の目的達成と次への展開に資することである。運営面での特徴は、6つの部会と4つの事務局による効率的な運営、量子線共同利用施設や共通試料提供等による研究支援、若手人材育成への注力、国際交流、異分野交流、産学官交流の推進である。

総括班としての主な成果は、各種領域内会議による効果的な運営、研究支援による効率的な研究推進、領域内交流による連携推進、国内外シンポジウム等の開催による本領域のプレゼンス向上、若手研究者の活躍等である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this group is the management of the project for significant research outcomes by promoting collaborations between the project members, providing common samples and/or research facilities, and assisting the development of young researchers. The distinguishing features are (i) the organization consisting of six sections and four secretariats with specific purposes, (ii) the assistance of research activities by providing research facilities and common samples, (iii) the special programs for young researchers and (iv) the promotion of various events to get attention to this project.

The main achievements of this group are the effective management of this project due to various meetings with specific purposes, the efficient researches by provided common samples and/or research facilities, the active collaborations between the project members, the growing attention to this project through the various events, and enough research outcomes from young researchers.

研究分野：金属工学

キーワード：環境材料 構造・機能材料 機械材料・材料科学 格子欠陥 マグネシウム 長周期積層構造

1. 研究開始当初の背景

従来のマグネシウム合金と比較して遥かに高い強度を示す新規マグネシウム合金が日本で開発され、研究開始以前より世界的に注目を集めていた。この合金の強度発現因子は、濃度変調と構造変調が同期した新奇なシンクロー型長周期積層構造(シンクロー型 LPSO 構造)を有する強化相であることが示唆されていた。しかしながら、この新奇な構造の原子構造の詳細、形成メカニズムおよび強化メカニズムといった基礎的知見の詳細については、研究開始当初はほとんど明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、各計画研究が緊密に連携して十分な研究成果が出せるように、総括班として領域の組織的かつ効果的な運営と研究支援活動を行い、シンクロー型 LPSO 構造の学理構築という本領域の目的達成に資することを目的としている。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するため、総括班事務全般のみならず、領域企画・運営、研究支援活動、領域内交流促進、広報・領域外交流推進、若手人材育成、図書出版・知財確保の観点から領域運営を組織的に実施した。これによって、材料科学の新分野を開拓することができ、軽量高強度材料の開発に飛躍的な発展をもたらすことができ、日本の科学技術と産業の発展にも貢献することができると考えた。

具体的な研究体制として以下に示す6つの部会と事務局を設置して、領域運営と研究支援活動を組織的かつ円滑に行った。

【領域企画・運営部会】本領域の効果的な運営を目的に、「研究企画委員会」、「研究評価委員会」、「研究推進委員会」、「総括班会議」、「班会議」、「連携会議」を開催し、領域の研究計画の企画・調整・立案、審議、連絡・周知徹底ならびに研究評価を行った。

【研究支援活動部会】研究者の負担低減と研究支援活動を効率的かつ効果的に図ることを目的に、サテライト事務局を複数設置すると共に「共通試料の領域内への配布」、「SPRING-8・J-PARC・九大超高压電顕室等の

大型施設使用の支援」、「研究成果データベースシステムの構築運用」により研究支援を行った。

【領域内交流推進部会】領域内での異分野交流を推進することによって研究目的、役割分担、研究成果、研究課題等を共有化することを目的に、「全体合宿研究会」、「班研究会」、「連携研究会」、「領域キックオフシンポジウム」、「公募キックオフシンポジウム」、「大型量子線施設見学会」等の開催により、領域における研究成果の共有化と有機的連携の推進を図った。

【広報・交流推進部会】領域外との交流推進と広報を目的に、「ニュースレター発行」、「ホームページ運営」、「学会等でのシンポジウム開催」、「産学官交流会開催」、「国際会議開催」等を行った。

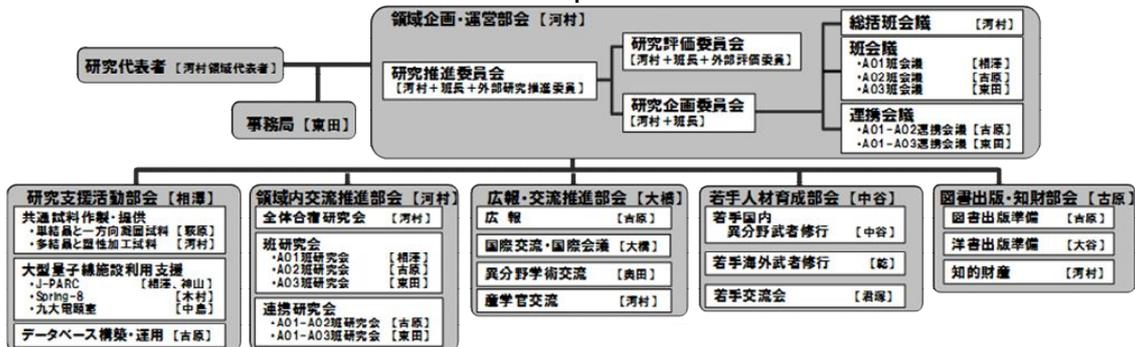
【若手人材育成部会】領域内の若手研究者(45歳以下の研究者と大学院生)の育成と異分野交流による世代交代の基盤構築を目的に、「若手研究会の開催」、「若手国内異分野武者修行制度の運営」、「若手海外武者修行制度の運営」等を行った。

【図書出版・知財部会】研究成果の公表と知的財産の確保を目的に、「図書出版準備」、「洋書出版準備」、「知的財産」に関わる活動を行った。

【事務局】領域運営を効率的かつ効果的に進めることを目的に、総括班ならびに計画研究・公募研究間の連絡・調整等の事務を行った。年度成果報告書の作成と発行、中間評価・事後評価の準備・対応を行った。

4. 研究成果

【領域企画・運営部会】「研究推進委員会」(幹事と外部研究推進委員で構成、11回開催)、「研究評価委員会」(幹事と外部研究評価委員で構成、11回開催)、「研究企画委員会」(幹事で構成、9回開催)、「全体会議」(12回開催)、「総括班会議」(13回開催)、「班会議」(5回開催)、「連携会議」(5回開催)を開催して、領域全体の研究計画の策定・企画・調整、審議、連絡・周知徹底ならびに研究評価を行った。特に、「ガイドブック」を作成・配布して、本領域の背景と目的、ビジョン、基本方針、運営法、ミッションの周知徹底を図った。さらに、毎年、成果の取りまとめと



成果報告書の作成・配布を行った。また、中間評価報告書の作成と中間ヒアリング対応を行い、最高位の「A+」評価を獲得した。

【研究支援活動部会】サテライト事務局を熊大、JAEA、東北大に設置して、「共通試料の作製と配布(熊大/阪大)」、「大型量子線施設の利用支援(J-PARC/Spring-8/九大)」、「DB構築・運用(東北大)」を行った。「共通試料の作製と配布」では、熊大と阪大に各1名の技術員を配置して「単結晶と一方向凝固試料」と「多結晶試料」の作製と配布を行った。共通試料配布は、21種類525本にのぼる。「大型量子線施設の利用支援」では、JAEAと九大に各1名の研究員や技術員を配置して、「J-PARCの利用支援」、「Spring-8の利用支援」、「九州大学超高压電顕室利用支援」を行った。特に、構造解析用変形ステージをJ-PARCとSpring-8に導入して、「その場観察実験」をコアにした連携研究を推進した。「データベース構築・運用」では、研究員を1名配置して、データベースの構築・運用を行った。

【領域内交流推進部会】本部会では、領域内での異分野交流を推進することによって研究目的、役割分担、研究成果、研究課題等を共有化することを目的に、「全体合宿研究会」(研究成果報告会5回開催、中間成果報告会2回開催)、「班研究会」(17回開催)、「連携研究会」(6回開催)、「領域キックオフシンポジウム」(1回開催)、「公募キックオフシンポジウム」(2回開催)を開催して領域内の有機的連携を図った。その他、大型量子線施設見学会(3回開催)や「LPSO型マグネシウム合金・溶解鋳造および塑性加工施設見学会」(1回開催)を開催して、大型量子線利用の促進やマグネシウム取扱法の研修を行った。

【若手人材育成部会】「若手交流会WG」での議論を踏まえて、「若手国内異分野武者修行」(5名派遣)、「若手海外武者修行」(5名派遣)、「若手交流会・特別講演会」(6回開催)、「学生勉強会」(1回開催)、「サマースクール」(4回開催)を開催した。

【図書出版・知財部会】「図書出版準備」では、日本金属学会会報「まてりあ」のミニ特集「シンクロナ型 LPSO 構造の材料科学」を企画し発行した。また、H29 年度出版を目指して本領域の研究成果をとりまとめた学術図書の企画を行った。「洋書出版準備」では、日本金属学会欧文誌「Mater. Trans.」の特集「Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials」を企画・発行した。また、Materials Science and Engineering R (Review 特集号)の企画を行った。「知的財産」では、「知財に関する講演会」(1回開催)と「知財相談会」(7回開催)を開催するとともに、全体合宿研究会を利用して国際特許事務所弁理士による「特許の掘り起こし」(7回開催)を行った。

【広報・交流推進部会】「広報」では、LPSO ニュースレター (No.1~No.4) の発行とホー

ムページの運用を行った。「国際交流・国際会議」では、国際会議 LPSO2012、LPSO2014 を主催するとともに、国際会議のオーガナイズドセッション・テーマセッション等を企画・開催(16回開催)した。特に、H27年6月15~21日には、ロシアの Togliatti と St. Petersburg においてロシアと日本との国際セミナーを共同で開催した。また、韓国の済州島で開催された国際会議 Mg2015 では、「シンクロナ型 LPSO 構造に関するセッション」が開催され、本領域のプレゼンスを国際的に向上させることができた。国内学協会との「異分野学術交流」では、日本金属学会、日本機械学会、応用物理学会、日本学術会議材料工学連合講演会、軽金属学会、日本学術振興会などで、セミナー・シンポジウム・オーガナイズドセッション・テーマセッション等を企画・開催(27回開催)した。特に、日本金属学会に「キンク勉強会」を新たに立ち上げた。「産学官交流」では、熊本大学が主催している産学官交流会「高性能 Mg 合金創成加工研究会」(20回開催)を共催して、産学官交流を図った。

【事務局】「本部事務局」では、総括班ならびに計画研究・公募研究間の連絡・調整、「領域内ガイドブック」と毎年の「研究成果報告書」の取りまとめと発行、各種委員会・会議・研究会の開催支援、中間評価報告書および最終評価書の取りまとめ等を行った。「共通試料サテライト事務局」では、共通試料の受付、熊大と阪大での試料作製管理、試料データ管理、試料発送等に係わる事務的支援を行った。「大型量子線施設利用サテライト事務局」では、大型量子線施設利用の受付、実験設備管理、実験スケジュール管理等に係わる事務的支援を行った。「広報・DBサテライト事務局」では、ニュースレターの企画・発行、DBの管理・運営に係わる事務的支援を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計162件)

X.-W. Lei, A. Nakatani, Analysis of kink deformation and delamination behavior in layered ceramics, Journal of the European Ceramic Society, 査読有, 36(9), 2016, pp.2311-2317, DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.12.054

S. Kimura, K. Kajiwara, T. Shimura, Development of a compact compression test stage for synchrotron radiation micro-Laue diffraction measurements of long-period stacking-ordered phases in Mg-Zn-Y alloys, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 55(3), 2016, Article no.038002, DOI:10.7567/JJAP.55.038002

- K. Matsubara, H. Kimizuka, S. Ogata, Long-range intercluster interactions of solute nanoprecipitates in Mg-Y alloys: A first-principles study, *Journal of Alloys and Compounds*, 査読有, 657, 2016, pp.662-670, DOI:10.1016/j.jallcom.2015.10.102
- N. Yasuda, S. Kimura, Measurement of Thermal Expansion Coefficient of 18R-Synchronized Long-Period Stacking Ordered Magnesium Alloy, *Materials Transactions*, 査読有, 57(6), 2016, pp.1010-1013, DOI:10.2320/matertrans.M2016078
- K. Hagihara, T. Mayama, M. Honnami, M. Yamasaki, H. Izuno, T. Okamoto, T. Ohashi, T. Nakano, Y. Kawamura, Orientation dependence of the deformation kink band formation behavior in Zn single crystal, *International Journal of Plasticity*, 査読有, 77, 2016, pp.174-191, DOI:10.1016/j.ijplas.2015.10.005
- H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida, H. Nakashima, Analysis of Kink Boundaries in Deformed Synchronized Long-Period Stacking Ordered Magnesium Alloys, *Materials Letters*, 査読有, 149, 2015, pp.30-33, DOI:10.1016/j.matlet.2015.01.136
- T. Mayama, T. Ohashi, Y. Tadano, K. Hagihara, Crystal Plasticity Analysis of Development of Intragranular Misorientations due to Kinking in HCP Single Crystals Subjected to Uniaxial Compressive Loading, *Materials Transactions*, 査読有, 56(7), 2015, pp.963-972, DOI:10.2320/matertrans.MH201403
- Xinfu Gu, T. Furuhashi, Effect of Pre-Strain and Ageing on the LPSO structure in Mg97Zn1Y2, *Materials Transactions*, 査読有, 56(7), 2015, pp.917-922, DOI:10.2320/matertrans.MH201416
- H. Okuda, T. Horiuchi, H. Tanaka, M. Yamasaki, Y. Kawamura, S. Kimura, Stability of long-period stacking ordered structures at elevated temperatures examined by multicolor synchrotron radiation X-ray scattering/diffraction measurements, *Materials Transactions*, 査読有, 56(7), 2015, pp.906-909, DOI:10.2320/matertrans.MH201402
- 萩原幸司, 東田賢二, シンクロ型 LPSO 構造相の塑性変形挙動, までりあ, 査読有, 54, 2015, pp.60-64, DOI:10.2320/materia.54.60
- K. Kishida, A. Inoue, H. Yokobayashi, H. Inui, Deformation twinning in a Mg-Al-Gd ternary alloy containing precipitates with a long-period stacking-ordered (LPSO) structure, *Scripta Materialia*, 査読有, 89, 2014, pp.25-28, DOI:10.1016/j.scriptamat.2014.06.019
- H. Okuda, T. Horiuchi, S. Hifumi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, S. Kimura, Microstructural Evolution of Long-Period Stacking Ordered Structures in Mg97Y2Zn1 Alloys Examined by In-Situ Small-Angle X-ray Scattering, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 査読有, 45(11), 2014, pp.4780-4785, DOI:10.1007/s11661-014-2410-2
- T. Furuhashi, Xinfu Gu, Discussion on strain accommodation associated with formation of LPSO structure, *Materials Transactions*, 査読有, 54, 2013, pp.675-679, DOI:10.2320/matertrans.MPR2013902
- H. Kimizuka, M. Fronzi, S. Ogata, Effect of alloying elements on in-plane ordering/disordering of solute clusters in Mg-based long-period stacking ordered structures: A first-principles analysis, *Scripta Materialia*, 査読有, 69(8), 2013, pp.594-597, DOI:10.1016/j.scriptamat.2013.07.003
- T. Ohashi, R. Kondou, Evolution of Dislocation Patterns in a Tricrystal Model Subjected to Cyclic Loading, *Philosophical Magazine*, 査読有, 93, 2013, pp.366-387, DOI:10.1080/14786435.2012.721017
- H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida, H. Nakashima, Microstructures of Long-Period Stacking Ordered Phase of MgZnY Alloy, *Materials Transactions*, 査読有, 54(5), 2013, pp.632-635, DOI:10.2320/matertrans.MI201219
- W. Gong, K. Aizawa, S. Harjo, J. Abe, T. Iwahashi, T. Kamiyama, Neutron Diffraction on LPSO Structure in Mg-Zn-Y Alloys, *Materials Transactions*, 査読有, 54(6), 2013, pp.974-976, DOI:10.2320/matertrans.MI201215
- K. Hagihara, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, T. Nakano, Y. Kawamura, Non-basal slip systems operative in Mg12ZnY long-period stacking ordered (LPSO) phase with 18R and 14H structures, *Materials Transactions*, 査読有, 54(5),

- 2013 , pp.693-697 , DOI:10.2320/matertrans.MI201208
K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui , The most stable crystal structure and the formation processes of an order-disorder (OD) intermetallic phase in the Mg-Al-Gd ternary system , Philosophical Magazine , 査読有 , 93 , 2013 , pp.2826-2846 , DOI:10.1080/14786435.2013.790566
Y. Doi, A. Nakatani , Modulational Instability of Zone Boundary Mode and Band Edge Modes in Two-Dimensional Nonlinear Lattices , Journal of the Physical Society of Japan , 査読有 , 81 , 2012 , pp.124402-124402-9 , DOI:10.1143/JPSJ.81.124402
- 21 M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara, Y. Kawamura , Effect of multimodal microstructure evolution on mechanical properties of Mg-Zn-Y extruded alloy , Acta Materialia , 査読有 , 59(9) , 2011 , pp.3646-3658 , DOI:10.1016/j.actamat.2011.02.038
〔学会発表〕(計 652 件)
Y. Kawamura , LPSO Structure and LPSO-type High Strength Magnesium Alloys , The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015) , 2015.10.13 , Jeju, Korea.
H. Inui , Crystal structure and deformation of long period stacking ordered (LPSO) intermetallic phases in the Mg-TM-RE systems , Symposium on Recent Progress in Plasticity and Phase Transformations ,2015.8.19-21 , Nordrhein-Westfalen, Germany.
K. Aizawa , Investigation for Deformation Mechanism via In-situ Neutron Diffraction Combined with AE Measurement under Stress of Mg-Based LPSO Alloy , The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015) , 2015.10.11-16 , Jeju, Korea.
H. Okuda , Microstructure Evolution of Thin Films Examined by GISAXS With Tender X-rays , The 2015 Annual Meeting of the American Crystallographic Association (ACA2015) , 2015.7.28 , Philadelphia, USA.
K. Hagihara , Characteristic features of the deformation band formed in the synchronized LPSO phase , The International Conference "Advanced Materials Week - 2015" (AMW 2015) , 2015.6.15 , Togliatti, Russia.
A. Nakatani , Lattice defect model of kink deformation and configurational

force , The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014) ,2014.7.28-30 ,Cambridge, England.

T. Furuha , Comparison between the Microstructures with Different Heat Treatment in Mg₉₇Zn₁Y₂ Alloy , The 2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2014) , 2014.10.5-8 , Kumamoto, Japan.

H. Kimizuka , Role of Intercluster Interactions in Chemical Ordering in Mg-Based Nanolamellar Phases with a Long-Period Stacking Order: A First-Principles Study , Materials Research Society (MRS) 2014 Fall Meeting ,2014.11.30-12.5 ,Boston, USA.
S. Kimura , Structure Investigation of Long-Period Stacking Ordered Phase of Magnesium Alloys using Synchrotron Radiation Diffractometry , International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2012(LPSO2012) ,2012.10.1-3 ,Sapporo, Japan.

T. Ohashi ,Elasto-plastic Deformation in Pearlite Lamellar Structure-An Approach from Finite Element Analysis - , 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM8) , 2013.8.4-9 , Hawaii, USA.

〔図書〕(計 13 件)

古原 忠 ,朝倉書店,「鉄の事典」9.2.2 鉄鋼の相変態と材料特性 , 2014 , pp.300-306.

古原 忠 ,朝倉書店,「鉄の事典」14.1 全体の性質を変える:熱処理 , 2014 , pp.649-652.

古原 忠 ,エヌ・ティー・エス,「自動車の軽量化テクノロジー」ナノ炭化物による鍛造用鋼高強度化技術 , 2014 , pp.199-205.

河村能人 ,エヌ・ティー・エス,「自動車の軽量化テクノロジー」次世代の高強度・高耐熱性マグネシウム合金 , 2014 , pp.41-51.

河村能人 ,シーエムシー出版,「マグネシウム合金の先端的基盤技術とその応用展開」第 2 章 希土類金属添加合金 , 2012 , pp.13-21.

木村 滋 ,講談社,「放射光が解き明かす驚異のナノの世界」第 3 章キラキラ光る DVD にどうやってデータを記録するの? , 2011 , pp.125-127.

〔産業財産権〕

出願状況（計 18 件）

名称：難燃マグネシウム合金及びその製造方法

発明者：河村能人，金鍾鉉

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2014/061105

出願年月日：2014.04.14

国内外の別：外国

名称：マグネシウム合金ワイヤ及びその製造方法

発明者：河村能人，林洋平，黒木英雄

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-114670

出願年月日：2014.06.03

国内外の別：国内

名称：マグネシウム合金及びその製造方法

発明者：河村能人，山崎倫昭

権利者：同上

種類：特許

番号：PCT/JP2013/061700

出願年月日：2013.04.16

国内外の別：外国

名称：マグネシウム合金材

発明者：河村能人，野田雅史，桜井寛

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2013-0142689

出願年月日：2013.04.12

国内外の別：外国

名称：マグネシウム合金材の製造方法

発明者：河村能人

権利者：熊本大学

種類：特許

番号：特願 2012-034450

出願年月日：2012.02.20

国内外の別：国内

取得状況（計 1 件）

名称：高耐食性を有する高強度マグネシウム合金

発明者：河村能人，山崎倫昭，大河内均，西田元紀，松本誠一

権利者：同上

種類：特許

番号：特許 5618276

取得年月日：2014.09.26

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.mg-lpso.org/index.html>

シンク口型 LPSO 構造の材料科学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 能人 (KAWAMURA Yoshihito)

熊本大学，先進マグネシウム国際研究センター，教授

研究者番号：30250814

(2) 研究分担者

萩原 幸司 (HAGIHARA Koji)

大阪大学，工学（系）研究科（研究院），准教授

研究者番号：10346182

相澤 一也 (AIZAWA Kazuya)

独立行政法人日本原子力研究開発機構，J-PARC センター，研究主幹

研究者番号：40354766

木村 滋 (KIMURA Shigeru)

公益財団法人高輝度光科学研究センター，利用研究促進部門，主席研究員

研究者番号：50360821

古原 忠 (FURUHARA Tadashi)

東北大学，金属材料研究所，教授

研究者番号：50221560

東田 賢二 (HIGASHIDA Kenji)

九州大学，工学（系）研究科（研究院），教授

研究者番号：70156561

乾 晴行 (INUI Haruyuki)

京都大学，工学（系）研究科（研究院），教授

研究者番号：30213135

奥田 浩司 (OKUDA Koji)

京都大学，工学（系）研究科（研究院），准教授

研究者番号：50214060

中谷 彰宏 (NAKATANI Akihiro)

大阪大学，工学（系）研究科（研究院），教授

研究者番号：50252606

君塚 肇 (KIMIZUKA Hajime)

大阪大学，基礎工学研究科，准教授

研究者番号：60467511

中島 英治 (NAKASHIMA Hideharu)

九州大学，総合理工学研究科（研究院），教授

研究者番号：80180280

大橋 鉄也 (OHASHI Tetsuya)

北見工業大学，工学部，教授

研究者番号：80312445