

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

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：23109004

研究課題名（和文）第一原理に基づく計算科学によるLPSO構造の電子論と構造科学の構築

研究課題名（英文）Exploring the electronic and structural properties of LPSO structures through first-principles-based computational science

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 61,600,000円

研究成果の概要（和文）：シンクロ型LPSO構造の形成・強化メカニズム等の詳細を理解するためには、その原子配列構造を明らかにしその構造科学を構築することが不可欠である。本研究では、第一原理に基づく計算科学手法によって、LPSO構造における溶質原子・クラスターの規則配列化をもたらす主因子をエネルギー論的に原子・電子レベルから特定することに成功した。これにより実験的手法により得られた原子配列モデルの妥当性を理論的側面から支持し、LPSO構造に関する連携研究を支援した。更に、LPSO構造のキンク変形時における底面転位の活動機構ならびにMgの非底面すべり系の活性化に関する機構を第一原理計算に基づいて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：To understand the details of the formation and strengthening mechanisms of the synchronized LPSO structures, it is required to elucidate their atomic structures and establish the science of their electronic and structural properties. In this study, we successfully characterized the main factors that dominate the solute-atom and/or solute-cluster ordering in the Mg-based LPSO structures at the electronic and atomic levels through first-principles-based computational science. This supported the validity of models of atomic structures obtained from the experiments, and also promoted the collaborations between experimental and computational researches. In addition, we clarified the activation mechanisms of basal slip systems in the LPSO phases and those of some non-basal slip systems in the Mg matrix on the basis of first-principles calculations.

研究分野：機械材料・材料力学，金属物性

キーワード：LPSO構造 軽量構造材料 積層欠陥 添加元素 第一原理電子状態計算

1. 研究開始当初の背景

実用金属材料の中で最も軽量である Mg 合金は、次世代の軽量構造材料として電子情報機器や自動車部品への適用が精力的に進められているが、既存の Mg 合金は Al 合金に比べて機械的性質の点で優位性が少ないためにその応用範囲は制約されている。このような状況において近年、従来の Mg 合金はもとより高強度 Al 合金を超越する強度と耐熱性を兼ね備えた LPSO 構造型 Mg 合金が見出された。当該合金は、Mg 母相に添加した遷移金属 (TM) 元素と希土類 (RE) 元素が一定周期で濃化した長周期構造を持つことを特徴とする。このように、合金組織を原子レベルで制御することで合金の強度を顕著に高められることが確認されたものの、その特異な構造特性・機械的特性の起源は明らかにされていない。そのため、当該合金の実用化のための研究開発には絨毯爆撃的な試行錯誤プロセスが欠かせず、円滑な研究遂行を妨げる一要因となっている。

LPSO 構造の研究においては、これまで電子顕微鏡による直接構造解析を中心として、その原子配列構造の周期性に関する解明が進んできた。この LPSO 構造は、Mg の六方最密充填構造の AB 積層に周期的な積層欠陥を導入したものとして解釈されており、更に時効処理、RE 元素の種類、合金組成により多様な積層構造 (18R, 14H, 10H, 24R 等) が形成することが報告されている。例えば LPSO 構造の代表例である $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 急速凝固粉末冶金合金においては、原子配列は 18 周期にも及び、更に 6 周期ごとに Zn と Y が濃化した層が 2 原子層存在することが示唆されている。このように濃度変調と積層変調が同期 (シンクロ) した原子配列構造は金属材料でも極めて珍しいものであるが、構造的・化学的に長周期性を持つ原子配列についての詳細な結晶学的情報 (空間対称性、格子位置、規則性、占有率等) は未だ得られていない。

当該材料の実用化技術を確立するための研究開発を推進する上で、シンクロ型 LPSO 構造の詳細な結晶学的情報を獲得し、高強度化、高延性化等の優れた特性を発現するメカニズムを解明することは喫緊の課題である。特に形成メカニズム、強化メカニズム等の解明を進める上で、その土台となる原子配列の同定・解明は不可欠である。LPSO 構造の特異な構造特性の起源を明らかにし、構造設計指針を確立するためには、物性予測が可能である第一原理計算に基づいて特異な構造特性発現を引き起こす主因子を特定することが有効である。これまで我々は、第一原理計算手法等の原子レベル解析により、金属、セラミックス、カーボンナノチューブ、高分子等の各種材料における構造特性、機械的特性、変形特性を予測的に評価し、その特性発現に対する原理的説明を獲得するための手法を確立してきた。この手法に立脚して、種々の

金属・添加元素の組合せによる合金の原子配列・電子構造を解析することで LPSO 構造の安定性を評価し、構造特性設計における指導原理を獲得できるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本計画研究班の当該課題は、定量的な物性予測が可能である第一原理解析とそれに基づく計算科学手法により、シンクロ型 LPSO 構造の特異な構造特性発現を引き起こす主因子を原子・電子レベルから特定し、LPSO 構造の原子配列構造を解明、更には LPSO 構造型物質の構造特性設計における指針・基準等を獲得することを目的とする。具体的には、種々のシンクロ型 LPSO 構造に対して、(1) 構成する母相結晶自体の構造・力学物性、(2) 構成する母相結晶内に存在する各種格子欠陥 (溶質原子・クラスター、積層欠陥、空孔等) 間の相互作用、(3) これらの温度、外部応力依存性、(4) 種々の母相元素・溶質元素の組合せによる LPSO 構造の原子配列・電子構造およびその安定性、(5) これらの物性の電子論的起源、を第一原理計算に基づく解析により電子論・原子論的な立場から定量的に明らかにする。そして、それに基づき LPSO 構造型物質の微視的積層変調・濃度変調の存在メカニズムを理解、更には添加元素の種類に依存する LPSO 構造モデルを提案する。

3. 研究の方法

(1) 電子・原子構造に基づく基礎物性評価

シンクロ型 LPSO 構造のエネルギー論および結合・変形特性の基礎物性を第一原理計算に基づいて評価し、合金種固有のパラメータとして獲得する。具体的には、種々の LPSO 構造を構成する母相結晶、ならびに種々の母相元素・溶質元素の組合せによる格子構造に対して、以下の諸特性を電子論・原子論的な立場から定量的に明らかにする。

- ① 母相結晶・格子欠陥のエネルギー論 [電子構造に基づく凝集エネルギー、積層欠陥エネルギー、溶質元素の固溶・偏析エネルギー等] の獲得
- ② 結合特性 [溶質間相互作用、局所ひずみ、弾性、格子振動等の諸特性] の獲得
- ③ 変形特性 [結晶すべり、原子・空孔拡散、転位、双晶等の諸特性] の獲得

(2) 構造安定性評価と原子配列構造の解明

研究の遂行に当たっては LPSO 構造のモデル化が重要となるが、膨大な数に及ぶ原子配列構造の候補を適切に絞り込むためには実験グループとの緊密な連携が不可欠である。本研究では A01 班により実施される TEM、放射光 X 線回折、中性子回折等を駆使した解析

により得られる実験的知見を取り入れ、実験と計算科学を相互補完的に活用した上で LPSO 原子構造モデルを構築する。また同時に、第一原理計算に基づく電子構造からの検証を実施することで、本モデルに対する理論的支持を与える。

4. 研究成果

LPSO 構造の特異な構造特性発現を引き起こす主因子を原子・電子レベルから特定すること、ならびに LPSO 構造における変形基礎特性（結晶すべり、転位芯構造等）を明らかにすることを目的に、主に Mg-M-RE 系 (M = Zn, Al, Ni; RE = Y, Gd) を対象にして、基軸となる手法の構築・検証および計算コードの整備を実施した。更に、実験班から供与された Mg 基 LPSO 構造の基礎的モデルを適宜活用して、LPSO 構造中の溶質原子の規則化の主因子を解明するとともに、これまで不明確であった結合特性、弾性特性、結晶すべり特性等を定量的に明らかにした。得られた成果を以下にまとめる。

(1) LPSO 相の短範囲規則性の評価

- ① Mg 母相中の溶質原子の微視的な振る舞いを明確にするため、第一原理計算により Mg 中の積層欠陥ならびに溶質原子・空孔間の相互作用エネルギーを定量的に評価した。具体的には、Mg 母相の積層配列の違い (I_1 , I_2 , E 等の積層欠陥) による溶質原子のサイト選択性を明らかにするとともに、Mg 中において安定化する溶質原子対の種類と配置を特定した。また、溶質原子置換による局所ひずみの影響を評価した。
- ② 得られた第一原理データに基づいて Mg-M-RE 三元系を対象とする有効多体ポテンシャルモデルを構築し、一例として Mg-Al-Gd 系に対するパラメータ化を実施した。更に、本ポテンシャルを活用したマルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく熱平衡状態計算により、当該系における溶質原子クラスター構造 (短範囲規則構造) を予測できることを確かめた。
- ③ A01-1 班との連携のもと、Mg-Co-Y 系 LPSO 構造 (15R) における短範囲規則構造に関して第一原理計算に基づく溶質原子間相互作用エネルギーの観点から検討を加えた。また、A02 班との連携のもと、種々の Zn-Y クラスターの慣性半径を第一原理計算から評価し、Mg-Zn-Y 系急速凝固材における LPSO 構造形成の描像を検討した。

(2) LPSO 相の面内規則性の評価

- ① Mg 基 LPSO 相中の溶質原子クラスターの面内規則性を明確にするため、Mg 中の I_2

積層欠陥面内における $L1_2$ 型クラスター、ならびにその中心に格子間原子が侵入したクラスター間の相互作用エネルギーを第一原理計算により定量的に評価した。

- ② 得られた第一原理データに基づいて、Mg 基 LPSO 構造中の種々の $L1_2$ 型溶質原子クラスターを対象とする粗視化粒子モデルを提案し、モンテカルロ法に基づく熱平衡状態計算により当該系における溶質クラスターの規則配列化およびドメイン化 (中範囲規則構造) を評価した。更に、Mg 基 LPSO 構造における種々の溶質原子クラスターの面内規則性とエネルギー安定性の関係を定量的に評価し、LPSO 構造が安定となるクラスター密度の範囲および各濃度条件における面内配列規則性に関する情報を獲得した。また、領域内連携を通じて STM 実験結果との比較を行い、予測される規則度の整合性に関して検証を実施した。
- ③ Mg 基 LPSO 相中の溶質原子クラスターの振る舞いに着想を得て、他の合金系 (Mg-Y 系, Al-Cu 系等) において確認されている溶質偏析および中範囲規則化の主因子を同定するための第一原理解析を実施した。具体的には、母相内の面状溶質ナノクラスターの配列安定性を第一原理計算により解析し、クラスター内およびクラスター間の相互作用エネルギーを定量評価するとともに、クラスターにより誘起される局所変位と相互作用範囲を評価した。その結果、クラスター間に働く引力的な化学的相互作用と斥力的な緩和相互作用の間の競合によって生じる長距離の引力的相互作用の存在が明らかとなり、これが系内において特徴的なクラスター配列をもたらす支配因子になっていることを示した。

(3) LPSO 相の積層秩序構造の安定性の評価

- ① Mg 基 LPSO 相における種々の積層構造 (10H, 18R, 14H) 間の安定性を調べるため、第一原理計算を用いて Mg-Al-Gd / Mg-Zn-Y 系 LPSO 構造における溶質濃化層間の相互作用を評価した。その結果、電子状態に起因する濃化層間相互作用は斥力的であり、隣接する濃化層を束縛するものではないことを明らかにした。
- ② LPSO 構造において濃化層が周期的に配列する物理的起源を明らかにするため、簡易な一次元ばねモデルを用いて質量変化が周期的に配列した場合とランダムな場合のフォノンの状態密度を計算し、その自由エネルギーの差を調べることで、濃化層の周期秩序におけるフォノンの効果を検討した。その結果、LPSO 構造の形成には、溶質原子間の相互作用のために積層欠陥上でクラスター化して濃化することに加えて、積層方向にはフォノンの効

果によって周期秩序を持つことが関係していることを示した。

(4) LPSO 相における結晶すべり特性の評価

- ① LPSO 構造のキンク変形時における底面転位の活動機構について検討するため、14H 型 Mg-Al-Gd 系および 10H 型 Mg-Ni-Y 系 LPSO 構造を対象として一般化積層欠陥エネルギーを第一原理から計算し、各種底面における転位移動のエネルギー障壁およびパイエルス応力を解析した。その結果、溶質元素クラスターを分断するような底面では、すべりのエネルギー障壁が非常に高くなることが分かった。また、変形時における局所的な応力集中を想定して、底面に平行に一軸圧縮応力が負荷された状態における底面すべりの一般化積層欠陥エネルギーを評価した。その結果、一軸圧縮方向にはパイエルス応力が大きく低下し、圧縮に垂直な方向には大きく上昇することを明らかにした。
- ② 第一原理計算を用いて転位の移動障壁を測定するために必要となる転位配置・境界条件等に関する新しい数値的手法を開発した。また、本手法を活用することで、Mg 中の底面上の $\langle a \rangle$ らせん転位が柱面、錐面上へ交差すべりを起こす過程のエネルギー障壁マップを予測した。
- ③ Mg の非底面すべり系の活性化に関する機構を検討するため、錐面 $\langle c+a \rangle$ 転位の芯構造およびすべり面を第一原理計算により直接的に評価した。その結果、錐面 II と錐面 I における拡張転位芯はほぼ同じエネルギーを持ち、更にひずみ印加によって錐面 II 上の積層欠陥は局所的な原子のシャッフリングを伴いながら錐面 I に移動し得ることを見出した。
- ④ Mg 合金の非底面塑性変形を転位レベルから理解するため、分子動力学法を用いて Mg 中の底面上の $\langle a \rangle$ らせん転位の柱面への交差すべり過程、ならびに錐面 I, II 上のミクロき裂からのらせん転位の発生の様態とその運動特性を調べた。

(5) LPSO 相の基礎物性の評価

- ① 溶質クラスターの種類と密度が異なる種々の Mg-Zn-Y 系 LPSO 単結晶モデル (10H, 18R, 14H) に対して第一原理計算により弾性定数の全独立成分および形成エネルギーを評価し、両者の関係性を検討した。これにより、実験結果に対する理論的支持を与えるとともに、当該構造の結晶対称性に関する直接的な考察を可能にした (領域内連携研究)。
- ② 第一原理計算により、Mg の非線形領域に渡る弾性特性 (2 次および 3 次弾性) を定量的に予測評価した。また、このアプローチを一般化し、任意の対称性を持つ

結晶について 3 次以上の高次弾性定数を評価することを可能にした。更に、この関係を構成式として表現する枠組みを構築した。

- ③ Mg 中の溶質原子対・空孔クラスターの安定構造および空孔助長の拡散機構を解析するため、第一原理計算を活用して種々の溶質原子対・空孔間の相互作用エネルギーならびに空孔が介在する拡散過程の活性化障壁を評価し、考えられる溶質・空孔クラスターの拡散過程を検討した。
- ④ 構造異方性を考慮した Mg 合金の有限温度物性を第一原理的に評価することを目的として、複数の構造定数を導入した準調和近似と密度汎関数摂動論とを組み合わせたフォノン特性 (および自由エネルギー) 評価手法の枠組みを整備した。

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 14 件)

(1) M. Itakura, H. Kaburaki, M. Yamaguchi, T. Tsuru, Novel Cross-Slip Mechanism of Pyramidal Screw Dislocations in Magnesium, *Physical Review Letters*, 査読有, (2016), 印刷中

DOI: 採番中

(2) K. Matsubara, H. Kimizuka, S. Ogata, Formation of $\{11-21\}$ twins from II-type stacking faults in Mg: A molecular dynamics study, *Computational Materials Science*, 査読有, (2016), 印刷中

DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.05.033

(3) 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, Vol. 657, (2016), 662-670

DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.10.102

(4) 松中 大介, 渋谷 陽二, 大西 恭彰, 分子動力学法を用いたマグネシウムの破壊じん性に関する原子論的解析, *材料*, 査読有, Vol. 65, (2016), 141-147

DOI: 10.2472/jsms.65.141

(5) H. Okuda, M. Yamasaki, Y. Kawamura, M. Tabuchi, H. Kimizuka, Nanoclusters first: a hierarchical phase transformation in a novel Mg alloy, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 5, (2015), 14186-1-6

DOI: 10.1038/srep14186

(6) M. Tane, H. Kimizuka, K. Hagihara,

S. Suzuki, T. Mayama, T. Sekino, Y. Nagai, Effects of stacking sequence and short-range ordering of solute atoms on elastic properties of Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered structures, Acta Materialia, 査読有, Vol. 96, (2015), 170-188

DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.005

(7) M. Itakura, H. Kaburaki, M. Yamaguchi, T. Tsuru, Atomistic study on the cross-slip process of a screw dislocation in magnesium, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 査読有, Vol. 23, (2015), 065002-1-19

DOI: 10.1088/0965-0393/23/6/065002

(8) M. Fronzi, H. Kimizuka, S. Ogata, Atomistic investigation of the vacancy-assisted diffusion mechanism in Mg ternary (Mg-RE-M) alloys, Computational Materials Science, 査読有, Vol. 98, (2015), 76-82

DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.10.053

(9) H. Kimizuka, S. Kurokawa, A. Yamaguchi, A. Sakai, S. Ogata, Two-Dimensional Ordering of Solute Nanoclusters at a Close-Packed Stacking Fault: Modeling and Experimental Analysis, Scientific Reports, 査読有, Vol. 4, (2014), 7318-1-9

DOI: 10.1038/srep07318

(10) 松原和輝, 君塚肇, 尾方成信, 構造異方性を考慮した準調和近似に基づく Mg の熱膨張挙動の第一原理解析, 材料, 査読有, Vol. 63, (2014), 188-193

DOI: 10.2472/jmsms.63.188

(11) H. Kimizuka, S. Ogata, Predicting Atomic Arrangement of Solute Clusters in Dilute Mg Alloys, Materials Research Letters, 査読有, Vol. 1, (2013), 213-219

DOI: 10.1080/21663831.2013.838705

(12) H. Kimizuka, M. Fronzi, S. Ogata, Effect of alloying elements on in-plane ordering and disordering of solute clusters in Mg-based long-period stacking ordered structures: A first-principles analysis, Scripta Materialia, 査読有, Vol. 69, (2013), 594-597

DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.07.003

(13) M. Tane, Y. Nagai, H. Kimizuka, K. Hagihara, Y. Kawamura, Elastic properties of a Mg-Zn-Y alloy single crystal with a long-period stacking ordered structure, Acta Materialia, 査読有, Vol. 61, (2013), 6338-6351

DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.07.003

(14) A. Ishii, H. Kimizuka, S. Ogata, Multi-replica molecular dynamics modeling, Computational Materials Science, 査読有, Vol. 54, (2012), 240-248

DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.10.013

[学会発表] (計 9 6 件)

(1) D. Matsunaka, Y. Shibutani, A Theoretical Study on the Origin of Mg-based LPSO Structures, TMS 2016 Annual Meeting & Exhibition, 2016. 2. 14-18, Nashville, USA

(2) H. Kimizuka, S. Ogata, First-Principles Study of Solute Segregation and Ordering at a Close-Packed Stacking-Fault-Type Interface in Mg-Zn-Y Alloys, Materials Research Society (MRS) 2015 Fall Meeting, 2015. 11. 29-12. 4, Boston, USA

(3) H. Kaburaki, M. Itakura, M. Yamaguchi, T. Tsuru, A molecular dynamics study on the generation and gliding of a non-basal dislocation and its interaction with a twin boundary in magnesium, Materials Research Society (MRS) 2015 Fall Meeting, 2015. 11. 29-12. 4, Boston, USA

(4) M. Itakura, H. Kaburaki, M. Yamaguchi, T. Tsuru, Novel cross-slip behavior of the pyramidal screw dislocations in Mg, Materials Research Society (MRS) 2015 Fall Meeting, 2015. 11. 29-12. 4, Boston, USA

(5) 君塚肇, 尾方成信, 多根正和, 第一原理計算から見た Mg-LPSO 相の構造と力学特性, 日本金属学会 2015 年秋期講演大会(基調講演), 2015. 9. 16-18, 九州大学

(6) 山口正剛, 板倉充洋, 志賀基之, 蕪木英雄, 阿部英司, LPSO 構造における一般化積層欠陥エネルギー, 日本金属学会 2015 年春期講演大会(基調講演), 2014. 3. 18-20, 東京大学

(7) 松中大介, 渋谷陽二, LPSO 構造における溶質濃化層の周期秩序に関する電子・原子論的検討, 日本金属学会 2015 年春期講演大会(基調講演), 2014. 3. 18-20, 東京大学

(8) H. Kimizuka, K. Matsubara, S. Ogata, Role of intra- and intercluster interactions in solute ordering in dilute Mg alloys: A first-principles study, 2nd International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM2014) (招待講演), 2014. 10. 24-29, Haikou, China

(9) 君塚肇, 尾方成信, Mg 基 LPSO 構造における溶質クラスターの自己組織化と2次元規則化の非経験的モデリング, 日本金属学会2014年秋期講演大会(基調講演), 2014. 9. 24, 名古屋大学

(10) 君塚肇, 原子論的手法に基づくLPSO型Mg合金における化学的秩序構造の予測, 軽金属学会関西支部・関西軽金属サマースクール(招待講演), 2014. 9. 17, 大阪大学

(11) H. Kimizuka, S. Ogata, Monte Carlo modeling of short- and medium-range order in Mg-based long-period stacking ordered structures: From full atomistic to coarse grained models, International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA2014) (招待講演), 2014. 8. 24-30, Hakata, Japan

(12) 君塚肇, 第一原理計算による構造予測—LPSO相の安定性と規則度—, 第42回薄膜・表面物理セミナー「構造物性解明へ向けたミクロ・マクロ計測の最前線」(招待講演), 2014. 7. 25, 東京大学

(13) H. Kimizuka, M. Fronzi, S. Ogata, Prediction of solute-atom clusters segregated in Mg-based ternary alloys from first-principles, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC' 2013) (招待講演), 2013. 12. 2-6, Las Vegas, USA

(14) H. Kimizuka, M. Fronzi, S. Ogata, Atomistic Monte Carlo modeling of concentrated Mg-TM-RE alloys based on first-principles calculations, The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8) (招待講演), 2013. 8. 4-9, Hawaii, USA

(15) 君塚肇, M. Fronzi, 尾方成信, 第一原理計算を活用したMg基合金における溶質濃化の原子論的モンテカルロ解析, 日本金属学会2013年春期大会(基調講演), 2013. 3. 27-29, 東京理科大学

(16) 君塚肇, Mg基LPSO構造における溶質原子の相互作用の第一原理計算, 日本物理学会第68回年次大会・領域10シンポジウム「Mg基長周期積層構造(LPSO)における面欠陥と溶質原子の相互作用」(招待講演), 2013. 3. 26, 広島大学

(17) 君塚肇, Mg-TM-RE合金における溶質原子の秩序化の原子論的モデリング, 日本金

属学会分科会シンポジウム「シンクロ型LPSO構造の材料科学—一次世代軽量構造材料へのイノベーション—」(招待講演), 2013. 1. 28, 京都大学東京オフィス

(18) H. Kimizuka, M. Fronzi, K. Matsubara, S. Ogata, Atomistic Study on Controlling Factors of Local Chemical Order in Mg-Based LPSO Structures, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012) (基調講演), 2012. 11. 5-8, Toyohashi, Japan

他78件

[その他]
ホームページ等
<http://www.mg-lpso.org/>
<http://tsme.me.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

君塚 肇 (KIMIZUKA HAJIME)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 60467511

(2) 研究分担者

山口 正剛 (YAMAGUCHI MASATAKE)
日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹
研究者番号: 50360417

松中 大介 (MATSUNAKA DAISUKE)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号: 60403151

(3) 連携研究者

板倉 充洋 (ITAKURA MITSUHIRO)
日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹
研究者番号: 90370353

蕪木 英雄 (KABURAKI HIDEO)
日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹
研究者番号: 10360413

志賀 基之 (SHIGA MOTUYUKI)
日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究副主幹
研究者番号: 40370407

尾方 成信 (OGATA SHIGENOBU)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 20273584