

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709002

研究課題名(和文) 高強度鋼の特性向上をもたらすミクロ組織形態の最適設計法の開発

研究課題名(英文) Development of microstructure optimization method for improving properties of high strength steels

研究代表者

山中 晃徳 (Yamanaka, Akinori)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50542198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、材料中のミクロ組織を制御することによって、軽量かつ強度に優れた高強度鋼を開発することが求められている。特に、新しい高強度鋼を効率的に開発することを目的として、高強度鋼中のミクロ組織に依存した力学特性を予測するための数値シミュレーション技術の開発が活発である。本研究では、マルチフェーズフィールド法に基づく鉄鋼材料のみならずアルミニウム合金におけるミクロ組織形成予測法の開発、ミクロ組織の形態評価を構築した。また、結晶塑性有限要素法による数値材料試験法や金属板材のプレス成形のシミュレーション方法を開発し、上記のシミュレーション方法を組み合わせた、ミクロ組織形態の最適設計法を検討した。

研究成果の概要(英文)：Recently, development of lightweight and high-strength steel by controlling its underlying microstructures is desired. In particular, in order to develop new high strength steels efficiently, numerical simulation techniques based on computational materials science which enables us to predict the mechanical properties of the steels from their microstructure have been actively studied. In this study, we have developed the numerical simulation methods to predict the microstructure evolutions in steels and aluminum alloys by the multi-phase-field method, and to evaluate the morphology of the predicted microstructures. Furthermore, the numerical material test and the sheet metal forming simulation techniques based on the crystal plasticity finite element method were established. We have discussed the possibility of numerical microstructure optimization for improving the mechanical properties and formability of steels and aluminum alloys by combining above-mentioned simulation methods.

研究分野：機械工学、計算固体力学、計算材料科学

キーワード：フェーズフィールド法 結晶塑性有限要素法 均質化法 数値材料試験 ミクロ組織

1. 研究開始当初の背景

昨今の地球環境問題やレアメタル問題を背景に、従来の合金設計に依らずマイクロ組織制御によって、軽量かつ強度に優れた高強度鋼を開発することが要請されている。しかし、実験的手法のみで高強度鋼のマイクロ組織形態と力学特性の関係を理解し、特性向上を実現することは膨大な時間と労力を要し、材料開発の国際競争の中では望ましくない。そのため、次世代の高強度鋼を低コストかつ短時間に開発することを目的として、計算材料科学に基づき、高強度鋼中のマイクロ組織形成とマイクロ組織形態に依存した力学特性の両方を予測するための数値シミュレーション技術の開発が希求されている。

2. 研究の目的

上記1を背景に、本研究では代表的な実用高強度鋼である Dual-Phase(DP)鋼を対象材料と想定し、フェーズフィールド法に基づくマイクロ組織形成シミュレーション、マイクロ組織の計量形態評価、均質化法に基づく結晶塑性マルチスケール有限要素解析および最適化法を融合し、DP鋼をはじめとする高強度鋼の強度や成形性を向上させるマイクロ組織形態の最適設計法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

上記2の目的を達成するために、以下の4つの研究項目を設定し、これらを逐次または並行して研究した。

研究項目(1)：高強度鋼の基本化学組成である Fe-C-Mn 鋼または Fe-C-Mn-Si 鋼におけるオーステナイト フェライト()変態を定量的に予測するために、これまで研究代表者が構築してきたマルチフェーズフィールド(MPF)モデルを基礎に、Thermo-Calc.などの熱力学データベースと連携した組織形成シミュレーション手法を構築する。

研究項目(2)：DP鋼の機械的特性は、材料中のマイクロ組織形態に強く依存する。そこで、DP鋼中のマイクロ組織形態を数学的に定量的評価するための計量形態評価方法を構築する。

研究項目(3)：MPF法または実験的組織観察で得られるマイクロ組織情報に基づき DP鋼の弾塑性変形挙動や成形加工特性を評価・予測するために、均質化結晶塑性有限要素法による数値材料試験方法及び成形シミュレーション方法を構築する。

研究項目(4)：DP鋼の力学特性や成形特性の向上をもたらすマイクロ組織形態を決定するための、応答曲面法に基づく最適設計法を開発する。

4. 研究成果

上記3の研究項目に対して、本研究で実施した研究開発による成果を以下に概説する。なお、成果の詳細は、文中に引用する下記5

の学術論文や学会発表要旨等を参照されたい。

研究成果(1)：MPF法による組織形成シミュレーション方法の開発

鉄鋼材料の機械的特性は、マイクロ組織の3次元的な形態や分布に大きく左右される。これに対して、MPF法による組織シミュレーションの3次元計算は計算コストが大きい。そこで、複数の Graphics Processing Unit(GPU)を用いた MPFシミュレーションの並列計算手法を開発し、従来よりも効率的にマイクロ組織の3次元形態形成過程を解析することが可能となった[雑誌論文9,12]。また、この並列計算手法を東京工業大学のGPUスーパーコンピュータ-TSUBAME2.5に実装し、Fe-C合金における変態の超大規模計算を可能とした[学会発表15]。これにより、実験で観察されるマイクロ組織形態と計算結果の直接比較が可能となった。

また、Fe-C-Mn合金及びFe-C-Mn-Si合金における変態による組織形成過程を予測するための新しいMPFモデル(非平衡MPFモデル)を構築することで、合金熱力学データベースである Thermo-Calc.より得られる化学的自由エネルギーを取得しながら高精度な組織形成シミュレーションを行うことが可能となった[雑誌論文11][学会発表5,6,7]。さらに、非平衡MPFモデルを用いて、DP鋼やTRIP鋼の代表的な熱処理工程である二相域焼鈍で生じる繰返し変態挙動の解析を行うことで、実験でも観察される繰返し変態時の特異な現象である停留ステージの発現メカニズムを明らかにした[雑誌論文1]。以上の研究成果により、研究項目(1)は達成された。

研究成果(2)：鉄鋼材料中のマイクロ組織の計量形態評価法の構築

上記の研究成果(1)で構築したMPF法を用いた組織形成シミュレーションにより、鉄鋼材料中の3次元的な組織形態、組織分布情報が得られるが、その情報から機械的特性を向上させるような組織制御指針を得るには、計算された組織形態を評価する指標が必要である。そこで、微分幾何学や位相幾何学による組織形態の定量評価を可能とした。図1は、MPF法による変態シミュレーションで得られたDP鋼中のマルテンサイト相形態をガウス曲率Hと平均曲率Kで評価した結果である。組織表面の曲率を算出し、図2のようなH-Kプロットで整理することにより、そのマイクロ組織の凹凸度や入り組み度合いを定量評価が可能となることを示した[学会発表11]。これにより研究項目(2)は達成された。

研究成果(3)：DP鋼の組織イメージベース変形挙動予測手法の構築

研究項目(3)を達成するために、MPF法で予測されたフェライト+マルテンサイト2相組織形態のイメージ(画像)を用いて、DP鋼の

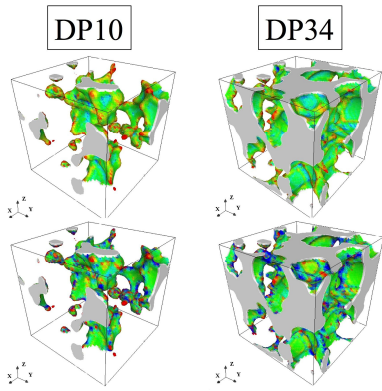


図1 平均曲率 H(上)とガウス曲率 K(下)による DP 鋼中のマルテンサイト相の形態評価

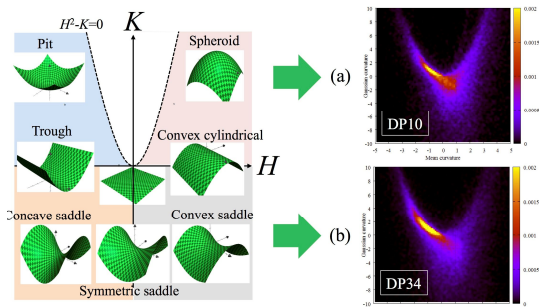


図2 ミクロ組織形態を評価するためのH-Kプロットの説明図(左)と図1で示したマルテンサイト相のH-Kプロット

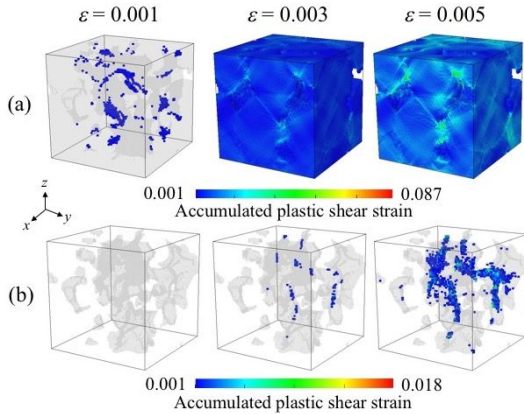


図3 MPF 法で予測された組織形態を考慮した CPFFT 法による DP 鋼の単軸引張変形挙動解析。(a)と(b)は、フェライト相およびマルテンサイト相中の蓄積塑性せん断ひずみ分布

引張変形挙動を結晶塑性有限要素法を用いて解析した[学会発表 17,20]。しかしながら、実際の DP 鋼の変形挙動を予測するためには、ミクロ組織の3次元形態を考慮したシミュレーションを行うべきであるが、上記の方法では計算コストが大きいことが問題となった。そこで、高速フーリエ変換をソルバーとする結晶塑性解析法(CPFFT 法)を採用し、計算コストを大幅に低減することに成功した。これにより、図3に示すように、MPF 法で予測したフェライト相の3次元形態をユニットセル

とする DP 鋼の3次元弾塑性変形挙動解析が可能となった[雑誌論文 7][学会発表 9,10]。なお、本研究成果は PF 法に特化した国際会議 PFM2014 において、ポスター賞(Silver)を受賞した[学会発表 11]。

研究成果(4): 結晶塑性有限要素法による数値材料試験及び成形シミュレーション方法の開発

本研究では、MPF 法による組織形成シミュレーションで予測される組織形態情報に基づき、材料の機械的特性のみならず成形加工性も予測可能とすることを目的とした。特に、金属板材のプレス成形加工時に生じる二軸応力状態での塑性変形挙動を高精度に予測することを目指し、結晶塑性有限要素法(CPFEM)による数値二軸引張試験およびその結果に基づく材料モデリング(成形シミュレーションに使用する降伏関数の同定)方法を開発した。

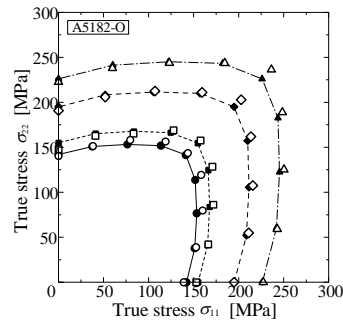


図4 CPFEM による数値材料試験で予測されたアルミニウム合金(A5182-0)の二軸引張変形挙動(等塑性仕事面)

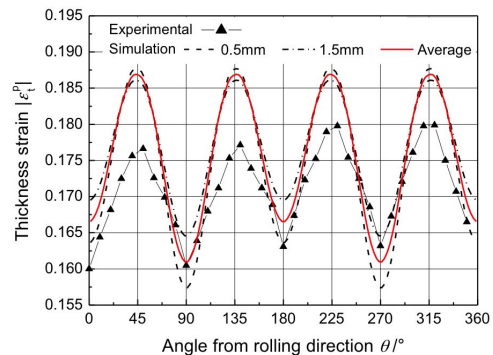
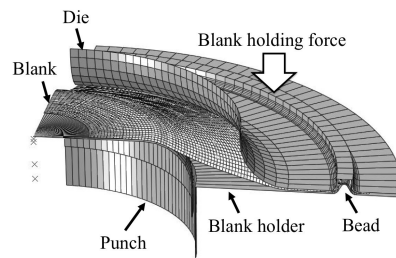


図5 数値材料試験の結果に基づき同定された降伏関数を用いた穴広げ試験のシミュレーションモデル(上段)と板厚ひずみ分布の実験値との比較(下段)

開発した数値二軸引張試験により、図4に示すように、実験的に測定されるアルミニウム合金の二軸引張変形挙動(等塑性仕事面)を非常に高精度に予測できることを示した[雑誌論文 2,6,8][学会発表 8,13]。さらには、数値材料試験法で予測された等塑性仕事面に基づき同定した降伏関数を用いて、図5に示すような穴広げ試験の数値シミュレーションを行うことで、実験で測定される金属板材の厚さ変化を精度よく予測可能であることも示した[雑誌論文4]。なお、以上の研究では、基礎的研究としてアルミニウム合金を研究対象としたが、全く同様のシミュレーション方法で鉄鋼材料の数値材料試験も成形性評価も可能である。

研究成果(5):ミクロ組織の最適設計手法の構築

本研究の最終目標である、高強度鋼の強度や成形性を向上させるミクロ組織形態の最適設計法を開発するにあたり、基礎的研究として、アルミニウム合金板材の成形性を向上させる再結晶集合組織の最適設計法の構築を検討した。上記の研究成果(1)と(4)を応用して、CPFFT法によるアルミニウム合金板の圧延加工時の変形集合組織予測と焼鈍時の再結晶集合組織予測手法を構築した[雑誌論文5]。また、これで予測される集合組織データに基づき、板材の成形性をCPFEMにより予測するシミュレーション方法を構築した[雑誌論文3][学会発表4]。アルミニウム合金板材を対象とした点で、今後の課題が残っているが、上記2つのシミュレーション手法(再結晶集合組織予測と成形性予測)により、圧延加工条件、焼鈍条件、ミクロ組織情報から板材の成形性を統一的に予測可能となるため、その予測結果を応答曲面の基礎データとすることで、本研究で目指すミクロ組織の最適設計法の構築の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

Masahito Segawa, Akinori Yamanaka, Sukeharu Nomoto, Multi-phase-field Simulation of Cyclic Phase Transformation in Fe-C-Mn and Fe-C-Mn-Si Alloys, Computational Materials Science, 査読有, Vol. 136, (2017), pp. 67-75. (<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.04.014>)

Shohei Ochiai, Akinori Yamanaka, Toshihiko Kuwabara, Numerical Biaxial Tensile Test of Aluminum Alloy Sheets using Crystal Plasticity Model Implemented in Commercial FEM software, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 725 (2016), pp. 255-260.

(<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.725.255>)

Akinori Yamanaka, Yoshiaki Ishii, Tomoyuki Hakoyama, Philip Eyckens, Toshihiko Kuwabara, Numerical Biaxial Tensile Test for Sheet Metal Forming Simulation of Aluminum Alloy Sheets based on the Homogenized Crystal Plasticity Finite Element Method, Journal of Physics: Conference Series (Proceedings of NUMISHEET2016), 査読有, Vol. 734 (2016), p. 032005. (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032005>)

山中晃徳, 橋本圭右, 川口順平, 櫻井健夫, 桑原利彦, 均質化結晶塑性有限要素法に基づく数値二軸引張試験を用いたアルミニウム合金板の材料モデリングおよび成形シミュレーション, 軽金属, 査読有, Vol. 65, No. 11, (2015), pp. 561-567. (<http://doi.org/10.2464/jilm.65.561>)

山中晃徳, 結晶塑性解析とマルチフェーズフィールド法を用いた軽金属材料の変形および再結晶集合組織予測, 軽金属, 査読有, 第65巻, 第11号, (2015), pp. 542-548. (<http://doi.org/10.2464/jilm.65.542>)

橋本圭右, 山中晃徳, 川口順平, 櫻井健夫, 桑原利彦, 均質化法に基づく結晶塑性有限要素法による5000系アルミニウム合金板の二軸引張変形解析と実験検証, 軽金属, 査読有, Vol. 65, No. 5, (2015), pp. 196-203. (<http://doi.org/10.2464/jilm.65.196>)

Akinori Yamanaka, Prediction of 3D Microstructure and Plastic Deformation Behavior in Dual-phase Steel Using Multi-phase-field and Crystal Plasticity FFT Methods, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 651-653, (2015), pp. 570-574. (<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.570>)

Akinori Yamanaka, Keisuke Hashimoto, Jyunpei Kawaguchi, Takeo Sakurai, Toshihiko Kuwabara, Identification of Yield Function for 5000 Series Aluminum Alloy Sheet by Numerical Biaxial Tensile Testing using Homogenized Crystal Plasticity Finite Element Method, Proceedings of Materials Science and Technology 2015, 査読有, (2015), CD-ROM, pp. 603-609. Masashi Okamoto, Akinori Yamanaka, Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Large-scale Multi-phase-field Simulation of Polycrystalline Grain

Growth with Finely Dispersed Particles, Proceedings of Materials Science and Technology 2015, 査読有, (2015), CD-ROM, pp. 553-560.

Akinori Yamanaka, 3D Modeling of Ferrite Transformation in Deformed-austenite using Multi-Phase-Field Method and Crystal Plasticity Fast Fourier Transformation Method, Proceedings of International Conference on Solid-Solid Phase Transformations in Inorganic Materials 2015, 査読有, (2015), pp. 857-864.

Masahito Segawa, Akinori Yamanaka, Sukeharu Nomoto, Simulation of Austenite-to-Ferrite Transformation in Fe-C-Mn Alloy using Non-equilibrium Multi-Phase-Field Model Coupled with CALPHAD Database, Proceedings of International Conference on Solid-Solid Phase Transformations in Inorganic Materials 2015, 査読有, (2015), pp. 935-941.

岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之, マルチフェーズフィールド法による多結晶粒成長シミュレーションの複数 GPU 計算, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol. 2013, (2013), p. 20130018. (<http://dx.doi.org/10.1142/1/jscs.2013.20130018>)

[学会発表](計 20 件)

Akinori Yamanaka, Sukeharu Nomoto, Multiscale Modelling of Dual-phase Steel using Multi-phase-field and Crystal Plasticity Fast Fourier Transformation Methods, 12th World Congress on Computational Mechanics, July 24 - 29, 2016, Seoul (Korea).

Shohei Ochiai, Akinori Yamanaka, Toshihiko Kuwabara, Numerical Biaxial Tensile Test of Aluminum Alloy Sheets based on Crystal Plasticity Finite Element Method, 12th World Congress on Computational Mechanics, July 24 - 29, 2016, Seoul (Korea).

Masahito Segawa, Akinori Yamanaka, Sukeharu Nomoto, Multi-Phase-Field Simulation of Cyclic Phase Transformation in Fe-C-Mn-Si Quaternary Alloy, 12th World Congress on Computational Mechanics, July 24 - 29, 2016, Seoul (Korea).

山中晃徳, 石井嘉明, 箱山智之, 桑原利彦, 均質化結晶塑性有限要素法による 5000 系アルミニウム合金板材の球頭張出し成形シミュレーション, 第 66 回

塑性加工連合講演会, 2015 年 10 月 29-31 日, いわき市文化センター(福島県いわき市).

瀬川正仁, 山中晃徳, 野本祐春, 非平衡マルチフェーズフィールドモデルを用いた Fe-C-Mn 合金における変態の 2 次元シミュレーション, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 2015 年 10 月 10-12 日, 横浜国立大学(神奈川県横浜市).

瀬川正仁, 山中晃徳, 野本祐春, Fe-C-Mn-X 4 元系合金における変態の非平衡マルチフェーズフィールドシミュレーション, 日本鉄鋼協会 第 170 回秋季講演大会, 2015 年 9 月 16-18 日, 九州大学(福岡県福岡市).

瀬川正仁, 山中晃徳, 野本祐春, Fe-C-Mn 合金の + 2 相域における繰返し変態挙動のマルチフェーズフィールドシミュレーション, 日本計算工学会第 20 回計算工学講演会, 2015 年 6 月 8-10 日, つくば国際会議場(茨城県つくば市).

橋本圭右, 山中晃徳, 川口順平, 櫻井健夫, 桑原利彦, アルミニウム合金板の二軸引張変形の均質化結晶塑性有限要素解析と実験検証, 日本機械学会第 27 回計算力学講演, 2014 年 11 月 22 日 ~ 2014 年 11 月 24 日, 岩手大学(岩手県岩手市).

山中晃徳, 結晶塑性 FFT 法を用いた DP 鋼の 3 次元イメージベース変形挙動解析, 日本塑性加工学会第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 11 日 ~ 2014 年 10 月 13 日, 岡山大学(岡山県岡山市).

山中晃徳, DP 鋼の単軸引張変形における応力・ひずみ分配挙動の結晶塑性 FFT シミュレーション, 日本鉄鋼協会 第 168 回秋季講演大会, 2014 年 9 月 24 日 ~ 2014 年 9 月 26 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).

Akinori Yamanaka, 3D Microstructure-based Simulation of Plastic Deformation in Dual-phase Steel using Multi-Phase-Field and Crystal Plasticity Fast Fourier Transformation Methods, 3rd International Conference on Phase-field Method (PFM2014), 2014 年 8 月 26 日 ~ 2014 年 8 月 29 日, Pennsylvania (USA).

Masashi Okamoto, Akinori Yamanaka, Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Extreme Large-scale Multi-Phase-Field Simulation of Polycrystalline Grain Growth using TSUBAME2.5 GPU-Supercomputer, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI),

2014年7月20日～2014年7月25日,
Barcelona (Spain).

Akinori Yamanaka and Keisuke Hashimoto, Modelling of Biaxial Deformation Behavior in an Aluminium Alloy Sheet using Homogenized Crystal Plasticity Finite Element Method, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014年7月20日～2014年7月25日, Barcelona (Spain).

Akinori Yamanaka and Sukeharu Nomoto, Simulation of Stress and Strain Partitioning in Dual-phase Steel using Multi-Phase-Field and Crystal Plasticity FFT Methods, 1st International Workshop on Software Solutions for ICME, 2014年6月24日～2014年6月27日, Aachen (Germany).
岡本成史, 山中晃徳, TSUBAME 2.5 スーパーコンピュータを用いたFe-C合金中で生じるオーステナイト-フェライト変態挙動の大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション, 日本鉄鋼協会 第167回春季講演大会, 2014年03月21日～2014年03月23日, 東京工業大学 (東京都目黒区).

Akinori Yamanaka, Three-dimensional Multi-Phase-Field Simulation of Orientation-dependent Ferrite Grain Growth in Steel, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013年12月11日～2013年12月14日, Singapore (Singapore).

Keisuke Hashimoto, Akinori Yamanaka, Image-based Numerical Tensile Test of Dual-Phase Steel using Homogenized Crystal Plasticity Finite Element and Multi-Phase-Field Methods, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013年12月11日～2013年12月14日, Singapore (Singapore).

Masashi Okamoto, Akinori Yamanaka, Large-scale Multi-Phase-Field Simulation of Austenite-to-Ferrite Transformation in Fe-C Alloy using GPU-cluster Computer, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013年12月11日～2013年12月14日, Singapore (Singapore).

岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之 多結晶粒成長の大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション ～GPUスパコン TSUBAME 2.0 への実装～, 日本機械学会 第26回計算力学講演会, 2013年11月01日～2013年11月03日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市).

橋本圭右, 山中晃徳, 結晶塑性有限要素法とマルチフェーズフィールド法による Dual-Phase 鋼の塑性変形挙動の

組織形態依存性評価, 日本機械学会 第26回計算力学講演会, 2013年11月01日～2013年11月03日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等
東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻 山中研究室
<http://web.tuat.ac.jp/~yamanaka>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 晃徳 (YAMANAKA, Akinori)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50542198