

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

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：23109008

研究課題名(和文) 観察・計測によるシンクロ/非シンクロ型LPSO構造の変形機構と強化原理の比較解明

研究課題名(英文) Comparison and elucidation of the synchronous/non-synchronous type LPSO structures in the deformation mechanism and the principle of strengthening by observation and measurement

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 72,700,000円

研究成果の概要(和文)：塑性変形を用いたキンク帯導入によりLPSO相の強度は最大2倍以上もの上昇を示した。キンク帯密度と強度との関係は常温から573Kに渡る温度域で実験的に定量化され、キンク帯強化の定量的指針の導出につながる大きな成果を得た。キンク帯の方位や形態といったメソスケール構造解析が進み、その幾何学的特徴と共に、その場観察によるレンズ状のキンク境界対の高速進展の様相が捉えられた。ナノスケールマーカでキンク近傍のせん断ひずみを定量化し底面すべりの大きな寄与が示された。これらはキンクの回位モデルによる解釈を強く示唆する。加えて、LPSO構造の高温変形機構の同定も進展し、大きな変形抵抗の起源が明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：The strength of LPSO phase with kink bands introduced by plastic deformation showed twice as high as initial state. The relationship between the kink band density and strength is experimentally quantified in a temperature range from room temperature to 573K, obtaining significant results leading to the derivation of quantitative guidelines for the strengthening by kink bands. Meso-scale structural analysis such as orientation and morphology of kink bands advances, also with its geometric features, aspects of the high-speed development of the lens-shaped kink boundary by in-situ observations were captured. The large contribution of basal sliding was showed by measurement of shear strain of kink vicinity quantified by nanoscale marker. These strongly suggest the interpretation by the disclination model of kink. In addition, the origin of large flow stress of LPSO structure was clarified by the establishment of identification of high-temperature deformation mechanism.

研究分野：材料物性学

キーワード：力学特性 塑性変形機構 キンク 変形帯 高温強度

1. 研究開始当初の背景

シンクロ型 LPSO 構造の力学特性の研究においては、その特徴的な結晶構造に由来する特異な塑性変形機構であり且つ強化機構である「キンク帯」の形成かが注目されている。図 2 の右図に示すように、キンク変形は従来、異方性の強い層状物質等にみられる挫屈現象の一つと看做されていたが、当グループメンバーの研究 (Hagihara et al. *Intermetallics*, 18(2010),267)により、LPSO 構造の底面すべりが抑制される方位において顕在的に現れる 1 つの変形機構として認識された。またこれと併せて、キンク帯の形成・増殖は、強度の著しい増加に寄与する。これらの研究成果を契機とし、変形モードそして強化機構としてのキンク帯の有効性が急速に注目され始めた。

そこでシンクロ型 LPSO 構造の特異な力学特性と塑性変形挙動を理解するには、まずキンク帯の構造、並びにキンク変形に代表される変形ダイナミクスとその制御因子を、観察や計測を基本とする実験的立場から解明する必要がある。

2. 研究の目的

キンク変形に代表されるシンクロ型 LPSO 構造の特異な力学特性や塑性変形挙動を、観察や計測を基本とする実験的立場から階層的に解明する。それに際しシンクロ型 LPSO 構造の挙動を、非シンクロ型や非 LPSO 構造のそれと比較し、その特徴を明確化する。キンク帯の構造の特徴を階層的に解析し、キンクによる塑性変形過程を明らかにすると共に、強化機構に関する新指導原理の確立に寄与する。また特に Mg 基 LPSO 合金で重要な高温変形機構、強化機構についても明らかにする。これにより、シンクロ型 Mg 基 LPSO 合金のさらなる特性向上、さらには新たな長周期構造新材料の開発、力学特性向上策の確立へと繋げる。

これを実現するため、具体的に以下の項目に注目した研究を実施する。

(1) シンクロ型 LPSO 構造で発現する特異な変形挙動の解明

シンクロ型 LPSO 相の示す特異な塑性変形挙動(キンク変形)の起源を明確化することを目標として、濃度変調を有しない Ni 基 LPSO 構造等の非シンクロ型 LPSO および 2H 構造で Zn 等の非 LPSO が示す変形挙動とシンクロ型のそれとを、マクロとミクロのマルチスケール観察により比較解析する。

(2) キンク帯形成に着目した LPSO 相の塑性変形挙動の階層的観察と強化への寄与の解明

キンク帯形成による特異な塑性変形挙動と材料強化機構を明らかにするため、結晶塑性挙動を観察、解析する。キンク帯導入による強化を実証するため、予めキンク帯を導入した試料を別方位から圧縮することで、キンク界面を横切る底面転位運動を生じさせ、その

挙動を予変形のない試料と比較し、キンク界面が転位運動に与える寄与の詳細を明らかにする。またキンク帯領域の構造解析をマルチスケールに進める。すなわち EBSD や TEM 観察による構造解析を実施することで、そのキンク帯の幾何学的特徴を解明する。このようにして得られた成果を計算力学班と共有することにより、「キンクによる材料強化、塑性挙動制御」に関する新たな学理構築を進める。

(3) LPSO 相の高温変形律速過程の解明、並びにキンク帯を利用した高温高強度化の実現

LPSO 相の高温変形機構支配因子を解明することにより、室温にて見られる高強度化原理を高温強化へと拡張する。具体的に、マイクロインデント等高温試験装置を使って一定押し込み歪み速度試験や荷重急変試験を実施し、微視的観点からの硬さ値、降伏強度、及びクリープ特性値などを調べ、その支配因子を解明することで、キンク帯を積極利用した LPSO 構造の高温高強度化を実現する。

(4) 中性子回折による LPSO のキンク強化の実証

LPSO 多結晶合金について荷重下での中性子回折実験を行い、ピークシフトより結晶方位や相に依存した各結晶粒の応力分配を実測し、異方的な LPSO 相多結晶における、キンク変形とその強化への寄与を具体的に検証する。

以上、シンクロ型 LPSO 合金における「キンク帯」の形成過程、構造、強度への寄与を実験的に明確化すると共にその成果を計算 Gr. と共有し、連携してこの構造の塑性変形機構の特異性の解明し、それを基に新たな普遍的強化原理の確立することを最大の目的とする。

3. 研究の方法

圧縮試験や押し込み試験等の力学特性評価試験を室温から高温に至る広範な温度範囲で行うとともに、塑性変形に伴い材料内部に発達する組織を光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡により観察・計測した。加えて電子線散乱反射法による結晶方位測定、電子線リソグラフィによるマーカー法を用いたひずみ測定等の材料特性評価法を活用した。

4. 研究成果

(H23)

Mg-1at.%Zn-2at.%Y 合金 (二相合金), Mg-0.2at.%Zn-0.6at.%Y 合金 (α -Mg 単相合金), Mg-5at.%Zn-7at.%Y (LPSO 単相合金) 各押出材について、600~673K の高温域で押し込みクリープを行った。これより、LPSO 相が二相合金のクリープ強度に寄与していることを明らかにすると共に、673K における各合金の変形時の押し込み圧力と押し込みひずみ速度

の構成方程式を実験的に求め、それぞれの材料の応力指数を見積もった。α-Mg 単相合金の応力指数は 2.5 でありこの温度域では粒界すべりが変形を担うことがわかった。また、LPSO 単相合金の応力指数は 5.1 と回復クリープの発現を示唆する数値を示した。一方、二相合金の応力指数は各相で得られた値の中間の 3.1 となり、これは二相等ひずみ速度変形モデルにより説明できることが明らかとなった。

一方、Mg-6at.%Ni-9at.%Y 合金もほぼ LPSO 相単相合金 (10H 構造) であり、これについていろいろな温度で定速圧縮試験およびクリープ試験を行ったところ、室温では底面すべりとキンク変形、高温ではそれらに加えて a 転位の非底面すべりの活動が顕著になったと共にポイドやクラックの形成が見られた。また、クリープ変形時にはキンク形成の抑制される傾向が明らかとなった。

加えて、一方向凝固させた LPSO 単相合金擬単結晶は 18R 構造を持つが、これを熱処理して 14H とし、両者の力学特性を比較することで、構造変調の相違が力学特性に及ぼす影響を調べた。二種の構造を持つそれぞれの LPSO 単相合金の降伏応力の温度依存性はほぼ同等となり、構造変調はマクロな力学特性に大きな影響を齎さないことが明らかとなった。但し、573K 以上の高温における非底面すべりの活動は 14H 材においてやや頻度が大きくなる傾向が見られた。

また、Mg-1at.%Zn-2at.%Y 二相合金について、各相の不均一な塑性変形状態を捉えるため電子線リソグラフィを用いて微細マーカー法を導入し、サブミクロンオーダーで局所変形の様相を観察した。これにより、LPSO 相では特徴的なせん断変形が変形モードの一つであることが明らかとなった。

(H24)

材料局所の塑性変形状態を捉えることのできる微細マーカー法を用い、Mg-5at.%Zn-7at.%Y (LPSO 単相合金) 押出材の不均一変形解析を行った。室温圧縮ひずみ 4、7%においてそれぞれマーカーは回転を伴い大きく変位し、圧縮ひずみの増大と共にマーカーの変位は増大している様子が把握できた。これらのマーカーの変位を元に相当塑性ひずみ分布を見積もったところ、局所ひずみ量は最大 0.7 程度に達していた。この領域では試験片表面に垂直な軸を主たる回転成分とするキンク変形が起こり、圧縮変形を担っているものと考えられる。

一方、高温では前述のキンク変形は抑制され、非底面通りの活性化の様子が観察された。LPSO 単相合金の一方向凝固材を 400°C で圧縮した試料の TEM 観察による転位像では、いずれの積層の試料においても、[11-20]のバーガースベクトルを持つ転位が多く観察された。これらの試料では表面に柱面通りと同定された通り帯が現れており、活動通り系

は {1-100} <1-120> と考えられる。このような積層に依らず同様の非底面通りが活動するという特徴は、Ni 基の非シンクロ系 LPSO 構造合金における変形挙動とは異なっており、濃度変調を伴う周期構造に特有の変形モード発現の可能性がある。また、クリープ試験では、323 度 C において巨視的降伏応力以下ではキンクの形成は見られなかったが、それ以上の応力を付与すると顕著にキンク形成が起こった。これに対応して、キンクの出現し始める応力以上とそれ以下で、最小クリープ速度の応力依存性に大きな相違が現れ、LPSO 構造合金のキンク形成はクリープ変形挙動に大きく影響することが示された。

さらに、広範囲の温度範囲における押し込みクリープ試験を、Mg-1at.%Zn-2at.%Y 合金 (二相合金)、Mg-0.2at.%Zn-0.6at.%Y 合金 (α-Mg 単相合金)、Mg-5at.%Zn-7at.%Y (LPSO 単相合金) 各押出材について行い、クリープ変形の活性化エネルギー Q を見積もった。その結果、各 Q 値は α-Mg 単相合金で 127kJ/mol、LPSO 単相合金で 314kJ/mol となり、二相合金では変形速度によって 165~206kJ/mol と変化した。変形速度が大きいと二相合金のクリープ変形の活性化エネルギーは α-Mg 単相合金の値に近づく傾向があり、二相合金のクリープ変形挙動は変形速度によって主たる変形を担う相の変化していることが示された。

(H25)

微細マーカー法を用い、Mg-Zn-Y 押出材の不均一変形解析を行った。4%の圧縮ひずみを与えた試験片より得た SEM 像では図中央に表面凹凸が発生しそれに伴いマーカーが歪んでいる様子が観察された。圧縮ひずみを 7%と増加させると表面凹凸はさらに顕著となり、圧縮方向(図垂直方向)を横断して楔形を呈している様子が観察され楔形状の凸部の数も増加していることもわかった。この楔形状の組織の先端部分より FIB を用いてマイクロサンプリングした薄膜試料を TEM 観察したところ、表面の凹凸に対応して底面の向きが変化していた。そこで、これらの表面性状は、底面通りのみでは賄えない圧縮変位を担うため発生したキンク変形に伴って形成された凹凸と考えられる。このように、キンクは一旦形成したものの近傍に優先的に発生する傾向があった。

一方、Mg-6at.%Zn-9at.%Y (LPSO 単相合金) 一方向凝固結晶の 0001 界面に平行に圧縮試験し、圧縮ひずみの増大に伴う変形組織の発達のその場観察を行った。試料中のある部分にくちばし状の変形帯が生じると、それに近接して連続的に複数の変形帯が形成された。変形帯は多くの場合結晶粒界にてその成長が止まったが、一部では界面を突き抜け発達する様子も観察された。これらの変形帯の幾つかは極めて高速で発達したが、界面移動速度が界面垂直方向に 1.7 μm/s 程度と低速を呈するものもあった。この変形帯の形成および

結晶粒への衝突に伴い結晶粒の大きな曲がり頻りに観察され、変形帯形成により大きなひずみの生じていることが示唆された。また、底面迂り線の変化より変形帯の発達に伴い結晶回転角の増大が確認され、この傾向はZn単結晶を底面に平行に圧縮したときに形成した変形帯と同様であった。

さらに、Mg-5at.%Zn-7at.%Y 押出材より直方棒材を切り出し、圧延によって予めキンク帯を導入した試料についてビッカース硬さの温度依存性を調べた。相当塑性ひずみが増すとキンク帯の面積率および面密度はそれぞれ0.33, $10.0 \times 10^9/m^2$ まで増大していた。室温付近では予ひずみ最大の試料の硬度はキンク帯を導入していない試料に比べて硬度が20%程度高まったが、温度を上昇させると、予ひずみに対する硬度増大率は低下していき、673Kではキンク帯の有無に関わらず硬度は同様となった。これらは、キンク帯の導入は強化に寄与するが高温域ではその効果が低下することを示している。加えて、様々な温度における押し込みクリープ試験より、キンク帯はクリープ変形抵抗の増大にも寄与することが明らかとなった。

(H26)

微細マーカ法を用いてLPSO単相合金押出材の圧縮変形に伴い形成されたくさび型キンク周辺のひずみ分布解析を行いひずみの局在化を捉え、マクロな圧縮ひずみが増大すると、キンク境界が移動すると共にキンク内部のひずみが増加する傾向のあることを明らかにした。圧縮量が増大するとキンクはくさび先端の方向へ移動し、キンク境界におけるマーカの屈曲量が増したことから、キンクの数の増加に加えてキンクの成長も圧縮変位を担っているものと考えられる。

また、これらのキンク変形挙動を含む不均一変形の様相について、Zn, Yの濃度が異なるいろいろな多形構造を有する合金系の一方向凝固材を用いてそれぞれ検討を行った。キンク変形についてはいずれの合金でも、キンク形成に伴う方位差の発現が多様であること、結晶回転軸がほぼ底面上にあり底面の屈曲を示唆していること、といった共通の特徴を有していた。一方、合金組成変化に伴い、溶質元素濃化層内でのZn, Yの原子配列の規則度は変化することが透過電子顕微鏡観察より明らかにされ、比較的高濃度の合金では、濃化層においてL12型のクラスターを形成し各原子が規則的に配列する傾向のあることが見出された。さらに、それらの規則度の高い合金と比較的低濃度の合金との変形挙動の比較を行い、特に高温では、キンク形成に伴う非底面迂りの活動が規則度が高いと抑制される傾向が明らかとなった。これは、LPSO構造材料において、濃化層の配列は変化せずとも内部の原子配列の規則度が変形挙動に影響を及ぼすことを示している。

一方、LPSO相の高温変形機構の解明につい

ても意欲的に研究が進められた。専用試験機により高温押し込みクリープ条件を発現させ、その条件下で精密な応力急減試験を行った。これにより、高温変形時の変形応力の内部応力と有効応力の分離に成功し、高温では内部応力の割合が0.87という結果を得た。これにより、高温クリープ変形中には無視出来ない有効応力(13%程度)が変形応力中に存在することが明らかにされた。これは、LPSO相の定常クリープ律速機構には何らかの熱活性化過程が関与していることを示唆する。また、LPSO相の高温クリープにおける活性化エネルギーは各元素の拡散の活性化エネルギーに比べて高いことから、変形を律速している熱活性化過程は転位の交差迂りに起因するものであることが示唆された。

さらに、高温クリープ条件下でのキンク変形に伴う結晶方位変化を詳細に観察し、高温でも室温変形と同様に底面迂りがキンク形成と大きく関係することを明らかにした。また、高温変形の活性化エネルギーは藤原らと同様に比較的大きな値を示す結果を得て、これが溶質原子の固有拡散では説明困難であること、加えて、TEM観察により通常のマグネシウム合金で見られる転位拡張が捉えられなかったことから、通常のマグネシウム合金と同様の交差迂り律速であるとも結論し難く、議論の余地のあることが示された。一方、Mg系LPSO単相合金を摩擦攪拌法により結晶粒微細化出来る可能性を示した。

(H27)

LPSO単相合金押出材は押し出方向に底面が配向し、この底面に平行に圧縮変形を加えるとリッジ型(くさび型)キンクが多数発生する。このキンクの形成に伴う局所ひずみの増加を、局所領域の塑性ひずみを定量評価できる微細マーカ法を用いて評価した。キンク変形では結晶方位の変化を担うキンク境界が発生し、キンク形成に伴いキンク境界内部の方位は大きく変化する。キンク境界内部と外側の底面に平行なせん断ひずみを見積もったところ、キンク外部に対してキンク内部は数倍大きな塑性ひずみが生じていた。A03-3班との連携により、キンク変形を底面迂りに基づく単純化したモデルに基づいて見積もられるキンク内外のせん断ひずみと実測値を比較したところ、いずれも、圧縮ひずみの増加に伴いキンク内部と外側のせん断ひずみの両方が一定の関係を以ってどちらも増加する傾向を示すことが明らかとなった。これは、キンク形成のプロセスに底面迂りが大きく寄与していることを示す。

一方、このようなMg基LPSO合金で見られる不均一変形は、底面転位の配列によるキンク変形に加え変形双晶が関与する可能性も示唆されているが、双晶変形に比べキンク変形の結晶学的特徴や塑性変形への寄与については研究例が少ない。そこで、キンク変形の生じることが広く認知されているZnを用

いて、キンクの特徴を詳細に調べた。ブリッジマン法により育成させた Zn 単結晶を様々な方位より圧縮試験を行ってキンクを導入しその結晶学的特徴を検討した。その結果、キンクの形態は各試料で大きな差異は認められなかったものの、キンクの形成頻度は圧縮軸方位に大きく依存することがわかった。また、キンク内部の結晶方位の回転軸も圧縮軸方位によって変化する傾向があった。これは、A03-2 班との連携で行った計算機実験の結果より、異なるバーガースベクトルを有する底面転位が集团的に増殖することに起源を持つことが示唆された。さらに、そのような異種底面転位が集積することによって生じたキンクでは、それらの転位の活動割合に応じたキンク境界の湾曲の生じることが計算と実験の両面から示された。

また、LPSO 相の高温変形律速機構の検討も詳細に進められた。専用試験機により高温押し込みクリープ条件を発現させ、その条件下で荷重急増試験を行い瞬間塑性ひずみ増分の精密な測定を行った。これにより、LPSO 単相の高温における定常クリープ中の加工硬化率を求めるのに成功した。加工硬化率の見積には、まず、クリープ変形中に荷重を急激に増加させたときに不連続な瞬間塑性変形を起こす条件を求める必要がある。変形応力と荷重増加をいろいろに変化させた実験により、クリープ荷重が大きいほど荷重急増分が小さい値で瞬間塑性変形を起こす傾向を見出した。さらに、定常クリープ中の変形応力が大きいほど加工硬化率は小さいという知見も得られた。これらは、高温における加工硬化理論の 1 つである転位網成長モデルから予測される傾向と一致している。

さらに、予め室温で圧縮加工して内部にキンク帯を導入した試料 (Mg-Zn-Y 系および Mg-Ni-Y 系) のクリープ試験を行い、高温クリープ強度に及ぼすキンク帯の影響を調べた。その結果、キンク帯を導入した試料は初期にキンク帯を有しない試料に比べクリープ速度が一桁程度上昇し、高温クリープ条件下ではキンク帯は変形の障害として作用していないことが示唆された。また、変形後の試料の TEM 観察より、a 転位の非底面通りの活性化している様子が捉えられ、さらに、転位は比較的均一に分布しておりキンク界面へ堆積する傾向は見出されなかった。これらのことより、高温クリープにおいては、底面 a 転位の運動障壁としてのキンク界面の役割が室温変形に比べて小さくなっていることが明らかとなった。高温変形下では非底面通りが活性化することで底面通りによる a 転位の堆積を回復させている可能性がある。一方、Mg-Ni-Y 基単相鋳造材について均質化処理の組織およびクリープ強度へ及ぼす影響の検討を行い、鋳造まま材のクリープ変形で発生していたボイドやクラックの発達均質化処理によって抑制されることを見出した。

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 4 1 件)

[1] Plastic deformation behavior of Mg₁₂ZnY LPSO-phase with 14H-typed structure
K. Hagihara, Y. Sugino, Y. Fukusumi, Y. Umakoshi, T. Nakano
Materials Transactions, Vol. 52, No. 6 (2011), 1096-1103.

[2] Effect of Multimodal Microstructure Evolution on Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Extruded Alloy
M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara, Y. Kawamura
Acta Materialia Vol. 59, No. 9 (2011) 3646-3658.

[3] 押し込み試験とモデリングによるベキ乗則材料の単軸クリープに関する構成式の予測

高木秀有, 道明, 藤原雅美

日本金属学会誌, 76 (2012), 597-606.

[4] High-temperature compressive deformation behavior of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy containing a long-period stacking ordered (LPSO) phase
K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, Y. Kawamura
Materials science and engineering A, 560, pp. 71-79, (2013).

[5] Microstructures of Long-Period Stacking Ordered Phase of Mg-Zn-Y Alloy
H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima
Mater. Trans. Vol. 54, No. 5, (2013), pp. 632-635.

[6] Nonbasal slips in Ni₃(Ti, Nb) and Ni₃(Ti, Al) single crystals with various long-period stacking ordered structures
K. Hagihara, T. Tanaka, H. Izuno, Y. Umakoshi and T. Nakano
Acta Materialia vol. 61 (2013) pp. 4365-4373.

[7] Crystallographic nature of deformation bands shown in Zn and Mg-based longperiod stacking ordered (LPSO) phase
K. Hagihara, M. Yamasaki, M. Honnami, H. Izuno, M. Tane, T. Nakano and Y. Kawamura
Philosophical Magazine, 95 (2015) pp. 132-157.

[8] Set of conversion coefficients for extracting uniaxial creep data from pseudo-steady indentation creep test results

H. Takagi and M. Fujiwara

Materials Science and Engineering, A602 (2014) pp. 98-104.

[9] Orientation dependence of the deformation kink band formation behavior in Zn single crystals

K. Hagihara, T. Mayama, M. Honnami, M. Yamasaki, H. Izuno, T. Okamoto, T. Ohashi, T. Nakano, Y. Kawamura
International Journal of Plasticity, 77, pp. 174-191, (2016).

[10] In-Situ observation on the formation behavior of the deformation kink bands in Zn single crystal and LPSO phase

K. Hagihara, M. Honnami, R. Matsumoto, Y. Fukusumi, H. Izuno, M. Yamasaki, T. Okamoto, T. Nakano, Y. Kawamura
Materials Transactions, 56, pp. 943-951, (2015).

等

〔学会発表〕(計115件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東田賢二(HIGASHIDA, Kenji)

九州大学・大学院工学研究院材料工学部門・教授

研究者番号:70156561

(2) 研究分担者

森川龍哉(MORIKAWA, Tatsuya)

九州大学・大学院工学研究院材料工学部門・助教

研究者番号:00274506

萩原幸司(HAGIHARA, Kohji)

大阪大学・大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻・准教授

研究者番号:10346182

藤原雅美(FUJIWARA, Masami)

日本大学・工学部・教授

研究者番号:40156930

(3) 連携研究者

鈴木真由美(SUZUKI, Mayumi)

富山県立大学・工学部機械システム工学科・准教授

研究者番号:20292245