

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月13日現在

機関番号：14501  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21360347  
 研究課題名（和文） 高精度衝撃変形応答解析に基づくマグネシウム合金のマイクロクラック形成機構解明  
 研究課題名（英文） Experimental study of micro-cracking in Mg alloys based on the deformation response under dynamic loading  
 研究代表者  
 向井 敏司 (MUKAI TOSHIJI)  
 神戸大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：40254429

## 研究成果の概要（和文）：

結晶方向が揃いやすいマグネシウム押出材について、一軸高速圧縮および引張試験を行い、FEMによりせん断試験片形状を設計した。押出方向に対して異なる角度からせん断試験片を採取し、高ひずみ速度にて2面せん断試験を実施した。その結果、せん断応力ならびに破壊が生じるせん断ひずみは採取方向に依存して大きく変化したことから、マグネシウムのマイクロクラック形成頻度は底面の配向度に強く依存していることが明らかとなった。この傾向は底面配向度を低減した高強度合金が比較的高い靱性値を示すことに対応している。

## 研究成果の概要（英文）：

A double-shear specimen was designed by FEM simulation based on experimental data of uniaxial tension and compression under dynamic loading. The double-shear specimen was machined from pure magnesium and Mg-Y alloy extrusions having four kinds of shear plane against the extruded direction. As a result, shear stress and shear displacement at crack initiation strongly depended on the sampling direction. The enhanced ductility and toughness was attributed to weakened anisotropy by adding the yttrium solute. It was found that the frequency of micro-crack initiation depended on the basal plane distribution. The trend in the toughness enhancement was similar to the fact that weakened basal texture led to toughness enhancement in high strength Mg alloys having fine-grained structure.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 構造・機能材料

キーワード：マグネシウム合金, 高速変形, せん断変形, 変形双晶, 溶質原子

## 1. 研究開始当初の背景

昨今の地球温暖化問題では、CO<sub>2</sub>等の温暖化効果ガスの排出削減が急務の社会的要請

としてクローズアップされてきている。なかでも、CO<sub>2</sub>総排出量の約20%を占める自動車など輸送機器からの排出削減として、燃焼効

率の向上とともに車両の軽量化に期待されるところが大きいことから、リサイクル性にも優れた軽量金属材料であるマグネシウム合金が注目され、世界各国で実用化に向けた研究開発が活発になっている。また、実用上の信頼性を高くするために、高速変形に対する延性ならびに靱性を高くして、プレス成形性や衝突安全性の保証につなげることは重要な課題である。自動車の衝突時に局所変形部で発生するひずみ速度は、 $10^3 \text{ sec}^{-1}$  オーダーであることが国内自動車メーカー技術者により報告されている。すなわち、一般的に試験される静的ひずみ速度の10万倍以上高速度で変形が進むため、転位すべりによる原子の移動より、短時間で多数個原子の集団移動に対応することが可能な変形双晶により塑性変形を担う方がエネルギー的に有利となる。しかしながら、変形双晶はある程度の塑性変形を担うことが可能となるが、母相との界面に変形が集中しやすいため、クラック（き裂）の進展経路となりやすく、靱性や延性の限界を引き下げることが懸念される。ところが、 $10^3 \text{ sec}^{-1}$  オーダーの高ひずみ速度域における変形応答は、ほとんど研究されておらず、1 オーダー遅い速度域でのシャルピー衝撃値が定性的に調べられている程度である。そのため、衝撃荷重下における変形双晶形成メカニズムなど基礎的な変形応答は、ほとんど知られていないのが現状である。他方、研究分担者の染川らは SEM/EBSD を用いて、静的な破壊靱性試験の過程で形成される双晶の界面付近を、き裂が伝播すると指摘している。また、連携研究者の小池らは FIB マイクロサンプリングを用いた変形組織観察により、マグネシウムの静的引張変形時に形成される表面き裂付近では、 $\{10\bar{1}1\}$  双晶の内部に  $\{10\bar{1}2\}$  双晶が形成され、双晶内部で局所変形が起こり、破壊に進展する可能性を指摘している。

## 2. 研究の目的

マグネシウムは結晶構造に由来する変形双晶や結晶粒界が破壊の起点ならびに進展経路となりやすく、衝撃荷重の作用に対して、脆弱であることが懸念されている。そこで本研究課題では、主変形機構が異なることが予測されるサンプルについて変形方向を限定した高速せん断試験を実施し、変形応答を調べることにした。なお、溶質元素としてイットリウム添加の有無、ならびに結晶粒径の影響を調べるにより、マグネシウム合金の靱性改善に向けた基礎的知見を得ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、せん断変形の進行方向が衝撃負荷方向に対して平行となるような試験片

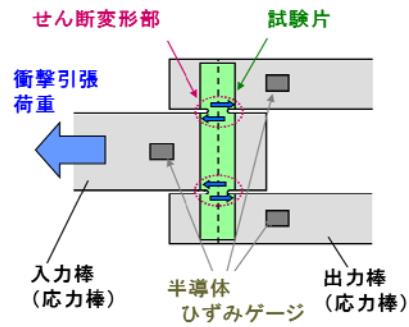


図1 2面せん断試験片および荷重負荷方法の概略図

の形状を有限要素法による数値解析により決定し、併せて試作した衝撃せん断治具を用いて、高ひずみ速度下におけるマグネシウムのせん断変形応答を評価した。

はじめに数値解析の基礎データとなる一軸圧縮・引張変形応答について、高ひずみ速度における真応力-真ひずみの関係としてホプキンソン棒法による衝撃試験から導出した。ここでは材料として AZ31 合金を選択し、ひずみ速度  $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  にて試験を実施した。

試験中の変形応答を高速度ビデオカメラを用いて、サンプリングタイム  $1 \sim 4 \mu \text{ sec}$  で撮影し、試験片の外寸変化を計測した。次に公称応力-公称ひずみ関係との相関から、一軸衝撃変形における真応力-真ひずみ関係を導出した。得られた応力-ひずみ関係を基にして、衝撃せん断試験に用いる試験片形状を設計した。具体的には、上述の圧縮・引張変形の真応力-真ひずみ関係を基礎データとして、異方性降伏・塑性モデルを汎用陽解法・動解析プログラムである ABAQUS/Explicit を用いて、三次元・大変形問題として計算することにより、マグネシウム押出材のせん断試験に最適なオフセット量を決定した。なお、試験片は一辺が 4mm の正方形断面を有する角柱形状とし、二つの平行なせん断面が形成されるように深さ 1mm のスリットを設けた。

計算結果を基にして、純マグネシウムならびに Mg-Y 合金について、せん断試験片を機械加工および放電加工により作製し、衝撃せん断試験を実施した。ここでは、マグネシウムの押出材において押出方向と平行に底面が揃いやすいことを利用して、サンプルを採取した。なお、押出材の中心軸は試験片の中心を通るようにサンプルを採取した。その採取方向は、強制的に導入されるせん断面が六方晶の c 軸に対して 4 通りの試験片、すなわち、(a) 柱面と平行 ( $\phi: 0^\circ$ ) になり易いせん断面を有するもの、(b) 第 1 錐面と平行になりやすいもの ( $\phi: 28^\circ$ )、(c) 第 2 錐面と平行になりやすいもの ( $\phi: 47^\circ$ )、および、(d)

底面に平行となり易い( $\phi: 90^\circ$ )とした。

得られた試験片について、せん断試験治具を引張型ホプキンソン棒法に適用することにより、衝撃せん断試験を実施した。せん断変形部は図1に概略として示す方式とした。なお、せん断荷重は、試験片近傍の治具表面に貼り付けた半導体ひずみゲージにより測定し、せん断変位は高速度ビデオカメラを用いて計測した。

衝撃圧縮および引張試験の変形途中で荷重を除荷し、所定の塑性ひずみを付与したサンプルを作製した上で、SEM/EBSDを用いて変形双晶の有無を確認した。また、変形双晶形成およびマイクロクラック形成に対する溶質元素添加の効果について検討した。

他方、静的試験により、ひずみを付与したサンプルを採取し、クラック近傍の結晶粒内部をTEMを用いて観察した。その結果からマイクロクラック近傍における変形双晶と転位との相互作用の有無を明確にした。さらに、得られた知見をもとにして、マグネシウム合金の強度と靱性を改善するための材料組織について検討した。

#### 4. 研究成果

(1) マグネシウム casting 材 (純度: 99.95%) について押出試験を実施し、結晶粒径の異なる等軸結晶粒材を作製した。得られた押出材より、圧縮および引張試験片を作製し、ホプキンソン棒法衝撃試験機を用いて、一軸衝撃圧縮および引張試験を実施した。応力棒にて検出される応力波形 (入力波、出力波、反射波の3種類) を積算することにより、公称応力-公称ひずみ-公称ひずみ速度関係を算出した。引張降伏応力は圧縮降伏応力の2倍近い値となり、AZ31 など実用押出合金と比較して、降伏非対称性が顕著なることを確認した。衝撃試験時の変形挙動を高速度撮影した結果から、破断前までは一様変形することを確認した。

衝撃圧縮および引張試験の変形途中で荷重を除荷し、塑性ひずみを付与した試験片の縦断面をSEM/EBSDにより観察した。その結果、圧縮試験片では塑性ひずみ0.05で既に高体積率のc軸引張変形双晶が形成されており、顕著な降伏非対称性が現れる要因であることを確認した。

AZ31合金における圧縮・引張変形の真応力-真ひずみ関係を基礎データとし、ABAQUS/Explicitを用いて、せん断試験に最適なオフセット量を三次元で解析した。その結果、せん断方向に対して平行にせん断面が形成されるためには、0.3mmのスリット幅に対して、スリット中心のオフセット量を0.18mmとする結果が得られた。この計算結果を基に、衝撃せん断試験サンプルならびに衝撃せん断試験に用いる治具を作製した。

(2) 平均結晶粒径が $170\mu\text{m}$ である純マグネシウムの丸棒 (直径42mm) からせん断試験片を採取し、衝撃せん断試験を実施した。なお、シュルツの反射法により、集合組織を確認した結果、柱面は押出垂直方向と平行に配向していることを確認した。せん断試験の結果、せん断応力は押出軸に対して $0^\circ$ 方向: 72 MPa,  $47^\circ$ 方向: 16 MPa,  $90^\circ$ 方向: 12 MPaの値を示した。これまでに報告されている実験結果から、マグネシウム単結晶について静的試験を行った際の臨界分解せん断応力は、底面すべりが起こる場合には約0.5 MPa, 柱面すべりが起こる場合には約50 MPaと100倍近い差異があることが示されている。今回の試験に用いた純マグネシウムは、せん断面が多数の結晶粒界を横切るため、単結晶のせん断応力と比較して変形抵抗が高くなったものと考えられる。特に底面すべりが多く発生する $90^\circ$ 方向の値は底面すべりの臨界分解せん断応力に対して高い値を示している。しかしながら、同材を引張/圧縮変形させた場合の降伏応力比が2程度であることから、底面の配向度が高い押出方向に対して、せん断方向を垂直/平行と選択することにより、せん断応力比は6以上となり、より大きな値を示すことから、底面すべりの起こりやすさがマグネシウム多結晶のせん断応力に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

また、せん断応力が最大値を示すせん断変位量は、 $0^\circ$ 方向と比較して、 $90^\circ$ 方向で約50%大きな値を示すことから、高速変形によりき裂が形成されるせん断ひずみは、底面すべりが起こりにくい方向で顕著に小さくなることがわかった。

(3) マグネシウムに固溶元素としてアルミニウムならびにイットリウムを添加した二元合金を casting により試作した。溶体化した合金について押出しを実施した。得られた押出材より、圧縮および引張試験片を作製し、ホプキンソン棒法衝撃試験機を用いて、一軸衝撃圧縮および引張試験を実施した。応力棒から検出された応力波形から、純マグネシウムの場合と同様に公称応力-公称ひずみ-公称ひずみ速度関係を算出した。Mg-Al二元合金の粗大結晶粒材では、その引張降伏応力は圧縮降伏応力の2倍近い値となり、降伏非対称性が顕著であることを確認した。また、降伏応力比は結晶粒の微細化にともなって、差異が縮小する傾向を示した。他方、Mg-Y二元合金では粗大結晶粒材であっても、圧縮/引張の降伏応力比が1に近い値となり、降伏非対称性が低減されることがわかった。なお、衝撃試験時の変形挙動を高速度撮影した結果、破断前までは一様変形することを確認した。

Mg-Y合金の衝撃せん断試験には、平均粒径 $150\mu\text{m}$ の押出材を用いた。シュルツの反射法

により、集合組織を確認した結果から、純マグネシウムと同様に、柱面は押出垂直方向と平行に配向していることを確認した。衝撃せん断試験を実施した結果、せん断応力は、押出軸に対して0° 方向：28 MPa, 47° 方向：26 MPa, 90° 方向：22 MPaとなった。なお、変形後の破面はせん断方向と平行に形成されていたことから、有限要素シミュレーションにより設定したスリット・ギャップの妥当性を確認した。

同程度の結晶粒径からなる純マグネシウムの場合と比較して、Mg-Y合金における押出平行方向のせん断応力は約2倍に増大し、押出垂直方向のせん断応力は約40%まで低下した。すなわち、押出方向に対して、垂直/平行におけるせん断応力比は1.3程度と比較的1に近い値を示したことから、イットリウムを添加することにより、変形が等方的なものへと変化することが明らかとなった。また、せん断応力が最大値を示すせん断変位量は、0° 方向と比較して、その他の3方向でほとんど差異を示さないことから、高速変形によりき裂が形成されるせん断ひずみは、イットリウム添加によりせん断方向に対する依存性が低くなることがわかった。

(4)高ひずみ速度の圧縮試験について、変形途中で荷重を除荷し、塑性ひずみを付与した試験片縦断面をSEM/EBSDにより観察した。所定のひずみを付与した変形組織を比較した結果、Mg-Y合金では変形双晶の体積率が低いことが確認された。また、TEMによる組織観察の結果、非底面a転位の存在が確認され、降伏非対称性の解消要因であることがわかった。

本研究における二面せん断試験では、高速変形の途中で応力除荷が実施できなかったため、ハット型試験片を用いて、せん断試験を実施した。Mg-Y合金のせん断ひずみは純マグネシウムの場合と比較して大きくなる結果が得られた。変形途中の試験片について組織観察したところ、結晶粒が微細化され、クラックが鈍化していることがわかった。

また、Mg-Y合金について、室温付近の温度(298~348K)で圧縮試験を行った結果、ひずみの増加と共に結晶粒が微細化されることを確認した。応力と温度の逆数の関係から活性化エネルギーを算出したところ、約250 kJ/molの値を示したことから、非底面aすべりの活性化により、動的回復が発現していることが示唆された。

高速変形時にクラックが伝播しにくくなる要因として、イットリウム原子が結晶粒内に偏在すること、あるいは、押出材の底面集合組織が低減されたことにより、非底面すべりが活性化したことが挙げられる。

以上のような、底面集合組織の低減により延性および靱性が改善される傾向は、微細結

晶粒からなる高強度マグネシウム合金においても同様に確認された。例えば、AZ31合金に溝ロール圧延を施すことにより、マグネシウム合金の底面集合組織を低減しつつ、結晶粒を微細化した材料を準備した。試験の結果、従来の押出材と比較して、二倍の降伏強度とともに靱性値の同時改善が可能であることを確認した。また、微細結晶粒からなるMg-Zn合金の三点曲げ試験サンプルについて、き裂近傍におけるマイクロ組織を観察したところ、100 nm以下のサブグレインが形成されており、方位差の関係から、ナノツインが形成されていることが明らかになった。マイクロクラックの伝ば経路を特定するためには、変形途中の組織変化を明確にする必要があるため、本研究にて実施した2面せん断試験の途中で荷重を除荷し、生成したき裂近傍の高分解能TEM観察を行うこと、ならびに、単結晶を用いたせん断試験を行うことが今後の課題として挙げられる。

## 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12件)

- ①Bin Li, Shailendra P. Joshi, O. Almagri, Q. Ma, K.T. Ramesh, 向井敏司, Rate-dependent hardening due to twinning in an ultrafine-grained magnesium alloy Original Research Article, Acta Materialia, 60巻, 2012, pp. 1818-1826 (査読有)
- ②染川英俊, Alok SINGH, 井上忠信, 向井敏司, Development of High Strength and Toughness Magnesium Alloy by Grain Boundary Control, Magnesium Technology 2012, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012, pp. 345-347 (査読有)
- ③Alok Singh, 染川英俊, 向井敏司, FORMATION OF NANO-SCALE TWINS AND LOW ANGLE GRAIN BOUNDARIES DURING FRACTURE OF A FINE GRAINED MAGNESIUM ALLOYS, Magnesium Technology 2012, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012, pp. 93-97 (査読有)
- ④Singh Alok, 大澤嘉昭, 染川英俊, 向井敏司, Ultra-fine grain size and isotropic very high strength by direct extrusion of chill-cast Mg-Zn-Y alloys containing quasicrystal phase, SCRIPTA MATERIALIA, 64巻, 2011, pp. 661-664, DOI:10.1016/j.scriptamat.2010.12.016 (査読有)
- ⑤向井敏司, 染川英俊, 丸山典夫, 構造用途

に向けたマグネシウム合金の適用課題 ～  
ねばり強くするために～、工業材料、59 巻、  
2011、pp. 62-66

- ⑥ 染川英俊、井上忠信、Singh, A.、向井敏司、  
Deformation Mechanism in the Crack-Tip  
Region of Fine-Grained Magnesium Alloy、  
METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS  
A-PHYSICAL METALLURGY AND MATERIALS  
SCIENCE、42A 巻、2011、pp. 2475-2480  
DOI: 10.1007/s11661-011-0642-y、(査読有)
- ⑦ 染川英俊、向井敏司、Nanoindentation  
creep behavior of grain boundary in pure  
magnesium、PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
LETTERS、90 巻、2010、pp. 883-890 (査読有)
- ⑧ 渡邊博行、福角雅男、染川英俊、向井敏  
司、Texture and mechanical properties of  
superplastically deformed magnesium  
alloy rod、MATERIALS SCIENCE AND  
ENGINEERING A、527 巻、2010、pp. 6350-6358  
(査読有)
- ⑨ 染川英俊、A. Singh、井上忠信、向井敏司、  
Enhancing Fracture Toughness of  
Magnesium Alloy by Formation of  
Low-Angle Grain Boundary Structure、  
ADVANCED ENGINEERING MATERIALS、12 巻、  
2010、pp. 837-842 (査読有)
- ⑩ 染川英俊、中島清美、A. Singh、向井敏  
司、Ductile fracture mechanism in  
fine-grained magnesium alloy、  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE LETTERS、90 巻、  
2010、pp. 831-839 (査読有)
- ⑪ 染川英俊、井上忠信、向井敏司、  
Deformation mechanism near crack-tip by  
finite element analysis and  
microstructure observation in magnesium  
alloys、Materials Science and  
Engineering A-Structural Mater.  
Properties Microstructure and  
Processing、527 巻、2010、pp. 1761-1768  
(査読有)
- ⑫ 向井敏司、染川英俊、井上忠信、A. Singh、  
Strengthening Mg-Al-Zn alloy by  
repetitive oblique shear strain with  
caliber roll、Scripta Materialia、62 巻、  
2010、pp. 113-116、(査読有)

[学会発表] (計 19 件)

- ① 寺田知史、向井敏司、純マグネシウムのホ  
ール・ペッチ則に及ぼすひずみ速度の影響、  
日本金属学会 2012 年春期大会 (横浜、2012  
/3 /29 )
- ② 長尾昌樹、染川英俊、向井敏司、Mg-Y 二元  
合金の高速変形応答、日本金属学会 2012 年  
春期大会、(横浜、2012 /3 /29 )
- ③ 向井敏司、添加元素の有効活用によるマグ  
ネシウム合金の高性能化、第 21 回 けいは  
んな新産業創出交流センター シーズフォ

ーラム (大阪、2012 /2 /2 ) (招待講演)

- ④ 向井敏司、用途拡大に向けた軽金属材料の  
結晶組織設計、第 246 回材料力学談話会「材  
料力学分野のこれから」(大阪、2011 /12  
/16 ) (招待講演)
- ⑤ 染川英俊、向井敏司、Possibility for  
development of high strength and  
toughness magnesium alloys、The 4<sup>th</sup> Asian  
Symposium on Magnesium Alloys、(Busan,  
Korea、2011 /10 /3 ) (招待講演)
- ⑥ 向井敏司、染川英俊、Alok Singh、井上忠  
信、Strengthening Mg-Al-Zn Alloys by  
Severe Plastic Rolling、ATEM' 11、OS19、  
JEME-MMD (神戸、2011 /9 /19 )
- ⑦ 染川英俊、向井敏司、Development of High  
Strength and Toughness Magnesium Alloys  
by Microstructural Controls、ATEM' 11、  
OS19、JEME-MMD (神戸、2011 /9 /19 )
- ⑧ 向井敏司、構造用途に向けたマグネシウム  
合金の結晶粒微細化、第 146 回超塑性研究  
「先進マグネシウム合金の展開」(習志野、  
2011 /6 /11) (招待講演)
- ⑨ 向井敏司、結晶粒組織改良による Mg 合金  
の強度-延性-靱性バランス改善、第 19 回素  
材工学研究懇談会 (仙台、2010/11/17) (招  
待講演)
- ⑩ 向井敏司、染川英俊、Alok Singh、井上忠  
信、Grain Refinement of Mg-Al-Zn Alloy by  
Repetitive Oblique Shear Strain、KIM-JIM  
JOINT SYMPOSIUM (Changwon, S. Korea、  
2010/11/4) (招待講演)
- ⑪ 向井敏司、Grain refinement of magnesium  
alloys for improving mechanical  
performance、IUMRS-ICA 2010、SYMPOSIUM  
E、4th International Conference on  
Magnesium ( Qingdao, P.R. China、  
2010/9/27) (招待講演)
- ⑫ 向井敏司、希土類添加によるマグネシウム  
展伸材の組織制御と機械的性質改善、日本  
金属学会 2010 年秋期大会 (札幌、  
2010/9/25) (招待講演)
- ⑬ 向井敏司、染川英俊、Alok Singh、  
Strengthening Mg alloys with enhancing  
their ductility and toughness、Fourth  
International Conference on Science and  
Technology of Advanced Ceramics(横浜、  
2010/6/22) (招待講演)
- ⑭ 向井敏司、マルチスケール組織改良による  
マグネシウム合金の機械的性質改善、日本  
鉄鋼協会・日本金属学会中国四国支部 第  
39 回材質制御研究会 (岡山、2010/6/18) (招  
待講演)
- ⑮ 染川英俊、シン アロック、井上忠信、向  
井敏司、マグネシウム合金の破壊メカニズ  
ムに及ぼす結晶粒径の影響/マグネシウム  
合金の破壊メカニズムに及ぼす結晶粒径の  
影響、日本金属学会 2010 年春期大会、(つ

くば、2010/3/28)

- ⑩向井敏司、Grain refinement of magnesium alloys for improving mechanical performance、International symposium on superplasticity and its related areas (日立、2010/3/5) (招待講演)
- ⑪向井敏司、染川英俊、A. Singh、Microstructure Design of High-strength Mg Alloy with Ductility and Toughness、Processing and Fabrication of Advanced Materials (仙台、2009/12/12-2009/12/14) (招待講演)
- ⑫向井敏司、染川英俊、井上忠信、シン アロック、強ひずみ圧延加工による Mg-Al-Zn 合金の結晶粒微細化、日本金属学会 2009 年秋期大会 (京都、2009/9/16)
- ⑬染川英俊、シン アロック、井上忠信、向井敏司、希土類元素フリーによる高靱性マグネシウム合金の創製、日本金属学会 2009 年秋期大会 (京都、2009/9/16)

[図書] (計 2 件)

- ①丸山典夫、向井敏司、株式会社エヌ・ティー・エス、破壊力学大系一壊れない製品設計へ向けて—【4-1-5】先端金属材料、2012、pp. 454-462
- ②向井敏司、丸山典夫、テクノシステム、最新 フラクトグラフィ 第 2 編各材料のフラクトグラフィ 2 節マグネシウム合金のフラクトグラフィ、2010、pp. 200-221

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

向井 敏司 (MUKAI TOSHIJI)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40254429

### (2) 研究分担者

染川 英俊 (SOMEKAWA HIDETOSHI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・  
元素戦略材料センター・主任研究員  
研究者番号：50391222

### (3) 連携研究者

小池 淳一 (KOIKE JYUNICHI)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10261588

### (4) 研究協力者

シン アロック (SINGH ALOK)  
独立行政法人物質・材料研究機構・  
元素戦略材料センター・主席研究員  
研究者番号：60354213

渡辺 博行 (WATANABE HIROYUKI)  
地方独立行政法人 大阪市立工業研究所

加工技術研究部・研究主任  
研究者番号：90416339