

令和元年6月10日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04536

研究課題名(和文)インパクトメタラジーによる革新的高強度・高靱性ライトメタルの創成

研究課題名(英文) Development of new light metals with high strength and ductility by means of impact metallurgy

研究代表者

堀川 敬太郎 (Horikawa, Keitaro)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50314836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：6061アルミニウム合金(Al-1.0Mg-0.68Si-0.28Cu)の板材(1mm厚)試料に対して溶体化処理、水冷後に1段式火薬銃を用いてひずみ速度10000(1/s)で予備的な塑性変形を与えた(ひずみ量：0.5)。その後、室温で1週間の自然時効を行なった場合と行わない場合での175Cにおける時効硬化挙動を調査した。その結果、初期の衝撃圧縮処理によって硬さが約50Hv増加し、その後の175C人工時効において析出現象による硬化を生じることが明らかになった。衝撃圧縮を与えた場合では、自然時効によって、その後175C時効における到達最高硬さが低下する傾向が抑制された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

6061アルミニウム合金は軽量かつ成形性が良好であるため、自動車ボディパネルとしての利用が工業的に進められている。この合金の機械的特性を高めるために一般に時効硬化熱処理が施されるが、溶体化処理後の室温保持を長くすると、その後の強度上昇量が低下するといった課題が従来より指摘されてきた。この課題に対して、本研究で提案するインパクトメタラジーの手法を用いることによって、室温保持の有無にかかわらず、その後の時効硬化特性を良好に保つことが提案された。この提案によって、自動車材料の特性改善に対する新しいプロセスの提案を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Aluminum alloy (Al-1.0Mg-0.68Si-0.28Cu) plates were impact compressed after solution heat treatment and then naturally aged for 1 week and artificially aged at 175C. The alloy with impact compression showed higher age hardening rather than the alloy without impact compression. The higher performance was caused by the suppression of the clustering of solute due to impact compression.

研究分野：金属材料学、衝撃工学、水素脆性

キーワード：衝撃圧縮 時効硬化 アルミニウム合金 強度 積層欠陥四面体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

代表的な軽量構造金属の1つであるアルミニウム材料では、塑性加工を取り入れたプロセス (SPD) で力学特性の向上を図る研究が近年展開されている。しかしながら、これまで提案されている SPD は、適用材料サイズが小さい物に限定される (数 cm) ため、実用材料に応用された例はない。これらの状況に関連して、申請者らは塑性加工プロセスにおける速度効果に注目して近年調査を進めている。申請者が実施した予備実験の結果によれば、6061 アルミニウム合金に高ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon}=10^5\text{s}^{-1}$ ) で圧縮変形を与えると、転位とは異なる数 nm 程度の積層欠陥四面体 (SFT) が結晶粒内に多量かつ均一に分布することが見出されている。点状の SFT と時効析出相とを共存させることで時効硬化の重畳が生じていることも示されている。アルミニウムは積層欠陥エネルギーが銅などと比べて高く、塑性変形で SFT が生じる可能性はないというのが従来 の定説とされてきた。塑性変形時の SFT の形成について、転位反応によって生じるという考え方と、空孔が局所的に凝集して生じるという考え方が提案されているが、どちらが支配的であるかについては未だ結論が出されていない。

### 2. 研究の目的

各種アルミニウム合金の高ひずみ速度塑性変形で生じる SFT の形状や分布、時効析出、引張特性を明らかにする。高ひずみ速度の塑性変形は既存設備である 1 段式火薬銃あるいはスプリットホプキンソン棒 (SHPB) 装置を用いて行い、圧縮の塑性ひずみを高速で作用させる。この 2 種類の高ひずみ速度変形装置を利用して、塑性ひずみ速度を変化させることによって、準静的変形から高ひずみ速度変形の間で SFT の形成が顕著となるひずみ速度の範囲を明確にする。本提案で得られる組織では点状の SFT と時効析出相の高密度分散によって SFT による硬化と析出硬化を並列で機能できる。また転位密度を低く抑えながら SFT を大量分散させることにより延性の向上も期待できる。高ひずみ速度塑性変形を利用した新しい塑性加工プロセス (インパクトメタラジー) を実用アルミニウム材料に適用することで、従来材料の特性を遥かに凌駕する高強度・高靱性ライトメタルの創成に繋げることを目的とする。

### 3. 研究の方法

1 段式火薬銃および SHPB 圧縮試験装置を使用して、アルミニウムおよび各種アルミニウム合金に対して溶体化処理後に高ひずみ速度 ( $10^3\text{s}^{-1}\sim 10^5\text{s}^{-1}$ ) で圧縮変形を作用させる。この処理により合金内部に積層欠陥四面体 (SFT) と溶質元素が混在する状況を作る。高ひずみ速度で圧縮を作用させたアルミニウム合金組織を透過電子顕微鏡 (TEM) 観察により、その SFT の分布や形態を明らかにする。高ひずみ速度変形後、人工時効処理を行うことで、最大到達硬さ、時効硬化速度に及ぼす影響を調査し、溶質元素と SFT との相互作用を TEM で調査する。未変形材料や通常速度で塑性加工を与えた場合と引張特性を比較することで、強度や延性などの機械的特性の向上に対する SFT の作用を明らかにする。

### 4. 研究成果

6061 アルミニウム合金 (Al-1.0Mg-0.68Si-0.28Cu) の板材 (1mm 厚) を試料として用いた。この試料に対して溶体化処理、水冷後に 1 段式火薬銃を用いてひずみ速度  $10^5\text{s}^{-1}$  で予備的な塑性加工を与えた (ひずみ量 0.5)。その後、室温で 1 週間の自然時効を行なった場合と行わない場合での  $175^\circ\text{C}$  における時効硬化挙動を調査した。その結果、初期の衝撃圧縮処理によって硬さが約 50HV

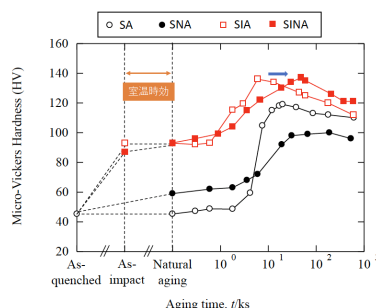


図1 6061合金の時効硬化に及ぼす衝撃圧縮の影響(SIA, 衝撃あり; SINA, 衝撃、自然時効あり)

増加し、その後の 175°C 時効においても時効析出現象による硬化を生じることが明らかになった(図1)。衝撃圧縮を与えない場合では、自然時効によって、その後の 175°C 時効における到達最高硬さが低下する傾向が認められている(2 段時効における負の作用)のに対して、衝撃圧縮を与えた場合では、その低下が抑制されている。衝撃圧縮後の TEM 観察組織と熱分析結果(DSC)より、衝撃圧縮の作用によって、時効硬化に直結しない溶質元素の集積(クラスター1)が大幅に抑制されていると結論された。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 19 件)

北原 学, 辻 彩, 浅田崇史, 鈴木智博, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 水素チャージ下における高張力鋼板の破壊および拡散性水素に及ぼすひずみ速度の影響 材料と環境, 第 68 巻 2 号, pp.46-52, 2019.

Gaku Kitahara, Aya Tsuji, Takashi Asada, Tomohiro Suzuki, Keitaro Horikawa, and Hidetoshi Kobayashi: Assessment of hydrogen absorption into steel during sacrificial dissolution of Zn and Zn coatings, Materials Transactions, Vol. 60, No.2, pp.306-315, 2019.

沖野友洋, 永田恵輔, 佐藤裕之, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故時の各因子が列車乗員の被害度に及ぼす影響評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vo.84, No.869, p. 18-00270, 2019.

日野実, 今井田至世, 今村勇斗, 石井颯, 浅下秀昭, 安井治之, 鷹合滋樹, 堀川敬太郎: 硫酸塩浴からの亜鉛系めっきによる高強度鋼の水素脆性とめっき膜の水素透過性, 表面技術, Vol. 70, No.2, pp.110-114, 2019.

Teruto Kanadani, Norihito Nagata, Keitaro Horikawa, Keiyu Nakagawa and Makoto Hino: Effects of Surface Structure and Hydrogen on the Fatigue Strength of Electroless Nickel-Phosphorus Plated Al-2%Cu Alloy, Materials Science Forum, Vol. 941, pp.1821-1826, 2018.

Gaku Kitahara, Aya Tsuji, Takashi Asada, Tomohiro Suzuki, Keitaro Horikawa, and Hidetoshi Kobayashi: Evaluation of the Corrosion Rate and Diffusible Hydrogen Content of High Tensile Steel under Loading with a Corrosion Environment, Corrosion Engineering, Vol. 67, pp. 159-166, 2018.

堀川敬太郎, 針木優太, 小林秀敏: 高 Zn 組成 Al-Zn-Mg 系合金の水素脆化感受性に及ぼす水素侵入源の影響, 軽金属, 第 68 巻, 11 号, pp.603-609, 2018.

小林秀敏, 沼直樹, 小川欽也, 堀川敬太郎, 谷垣健一: 接続された段付き丸棒を伝播する弾性波の長時間化の試み, 材料, 第 67 巻, 11 号, pp.957-963, 2018.

Shinnosuke Takeda, Kinya Ogawa, Kenichi Tanigaki, Keitaro Horikawa, and Hidetoshi Kobayashi: DEM/FEM simulation for impact response of binary granular target and projectile, Eur. Phys. J. Special Topics (EPJ ST), Vol.227, pp.73-83, 2018.

日野実, 今村勇斗, 今井田至世, 石井颯, 浅下秀昭, 安井治之, 鷹合滋樹, 堀川敬太郎: Zn-Ni 合金めっきされた高強度鋼の耐水素脆性に関する新規提案, 表面技術, 第 69 巻, 8 号, pp.356-359, 2018.

北原 学, 辻 彩, 浅田崇史, 鈴木智博, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 腐食環境下で応力付与した高張力鋼板の腐食速度と拡散性水素の評価, 材料と環境, 第 67 巻, 4 号, pp. 172-178, 2018.

Teruto Kanadani, Norihito Nagata, Makoto Hino, Koji Murakami, Keitaro Horikawa, Keiyu Nakagawa and Minoru Fukuhara: Effect of Electroless Ni-P Plating on Mechanical Properties of Al-4%Ge Alloy, Materials Science Forum, Vol. 879, pp.897-902, 2017.

Shinnosuke Takeda, Kinya Ogawa, Kenichi Tanigaki, Keitaro Horikawa and Hidetoshi Kobayashi: DEM/FEM Simulations of Dynamic Response of Projectile Penetrating into Granular Medium, Key Engineering Materials, Vol.715, pp. 167-173, 2016.

Hidetoshi Kobayashi, Keitaro Horikawa, Kenichi Tanigaki and Kinya Ogawa: Impact Compressive Fracture of Synthetic Quartz Accompanied by Electro-Magnetic Phenomenon, Key Engineering Materials, Vol.715, pp.13-20, 2016.

Kenichi Tanigaki, Akihiro Nakahara, Keitaro Horikawa and Hidetoshi Kobayashi: Synthesis of Hexagonal Diamond under Shock Loading Using Single Stage Powder Gun, Key Engineering Materials, Vol.715, pp. 249-253, 2016.

Akifumi Yosimoto, Hidetoshi Kobayashi, Keitaro Horikawa and Kenichi Tanigaki: Compressive Deformation of Expanded Polylactic Acid Resin subjected to Quasi-static and Dynamic Loadings at Wide Temperatures, Mechanical Engineering Journal, Vol.3, No.6, pp. 1-8, 2016.

Akifumi Yosimoto, Kenichi Tanigaki, Keitaro Horikawa, Hidetoshi Kobayashi: Effects of Strain-Rate and Temperature on Mechanical Behavior of Polyimide Foam in Compression, Mechanical Engineering Journal, Vol.3, No.5, pp. 1-11, 2016.

藤原祐樹, 谷垣健一, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 5083 アルミニウム合金の高温延性に及ぼす微量ナトリウムの影響, 軽金属, 第 66 巻, 8 号, pp.426-431, 2016.

Tomo Ogura, Keitaro Horikawa, Yuki Kitani, Mami Mihara, SeongNyeong Kim, Equo Kobayashi, Tatsuo Sato and Hidetoshi Kobayashi: Effect of high-speed impact compression on natural aging and subsequent artificial aging of a 6061 aluminum alloy, Materials Transactions, Vol.57, No.8, pp.1282-1286, 2016.

〔学会発表〕(計 20 件)

H. Mameda, K. Horikawa, K. Tanigaki, H. Kobayashi: Hydrogen Charging in Austenitic Stainless Steels by Means of Friction in Water, 第 177 回日本鉄鋼協会春期大会, 東京, 平成 31 年 3 月 20 日-22 日

堀川敬太郎, 松原拓哉, 小林秀敏: 水中での連続表面摩擦により水素を吸蔵した 6061-T6 アルミニウム合金の耐水素脆性, 第 164 回日本金属学会春期大会, 東京, 平成 31 年 3 月 20 日-22 日

沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故における乗客安全性の解析的検討, 日本機械学会 材料力学講演会 (M&M2018), 福井, 平成 30 年 12 月 23-24 日

豊田剛生, 小林秀敏, 堀川敬太郎, 谷垣健一: MPS 法を用いたハスの葉とバラの花弁の微細突起構造がもたらす超撥水性に関する数値解析, 日本機械学会 第 31 回バイオエンジニアリング講演会, 福島, 平成 30 年 12 月 14-15 日

吉次宗一郎, 谷垣健一, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 植物の葉の弾性率の非破壊的計測手法の開発と応用, 日本機械学会 第 31 回バイオエンジニアリング講演会, 福島, 平成 30 年 12 月 14-15 日

立花諒平, 小林秀敏, 谷垣健一, 堀川敬太郎: スティリジウムのずい柱の高速運動に関する研究, 日本機械学会 第 31 回バイオエンジニアリング講演会, 福島, 平成 30 年 12 月 14-15 日

桑内彩里, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: Al-5%Mg 合金の粒界脆性に及ぼす微量 Na および Zr の影響, 第 135 回軽金属学会秋期講演大会, 東京, 平成 30 年 11 月 9 日-11 日

松原拓哉, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: 重水素を導入した 6061-T6 アルミニウム合金の引張特性時の水素放出, 第 135 回軽金属学会秋期講演大会, 東京, 平成 30 年 11 月 9 日-11 日

堀川敬太郎, 小林秀敏: 高ひずみ速度変形を付与した 7075-T6 アルミニウム合金の耐水素脆化特性, 第 135 回軽金属学会秋期講演大会, 東京, 平成 30 年 11 月 9 日-11 日

小林秀敏, 小川欽也, 谷垣健一, 堀川敬太郎: 断面積が急変する弾性棒内における応力波の伝播挙動, 日本航空宇宙学会 第 60 回構造強度に関する講演会, 徳島, 平成 30 年 8 月 1 日-3 日

清田拳斗, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: Al-5%Mg 合金の脆化現象に及ぼす不純物 Na および Ti の影響, 第 134 回軽金属学会春期講演大会, 熊本, 平成 30 年 5 月 25 日-27 日

松原拓哉, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: 水中摩擦により多量に水素を導入した 6061 アルミニウム合金の引張特性, 第 134 回軽金属学会春期講演大会, 熊本, 平成 30 年 5 月 25 日-27 日

日野実, 今村悠斗, 今井田至世, 石井颯, 浅下秀昭, 安井治之, 鷹合滋樹, 堀川敬太郎: 硫酸浴からの亜鉛系めっきによる高強度鋼の水素脆性とめっき膜の水素透過性, 第 162 回日本金属学会春期大会, 千葉, 平成 30 年 3 月 20 日-21 日

堀川敬太郎, 小林秀敏: 純アルミニウム表面の水中連続摩擦による水素侵入, 第 162 回日本金属学会春期大会, 千葉, 平成 30 年 3 月 20 日-21 日

北原 学, 辻 彩, 浅田崇史, 鈴木智博, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 腐食環境下で応力付与した高張力鋼板の腐食速度と拡散性水素の評価, 第 64 回材料と環境討論会, 公益社団法人腐食防食学会 2017 年度秋期講演大会, 沖縄, 平成 29 年 11 月 8 日-10 日

松原拓哉, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: 水中連続摩擦で水素導入した 6061 アルミニウム合金の機械的特性に及ぼす Fe 添加の影響, 第 133 回軽金属学会秋期講演大会, 宇都宮, 平成 29 年 11 月 4 日-5 日

桑内彩里, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: Al-5%Mg 合金の室温粒界脆性に及ぼす Na および Zr の影響, 第 133 回軽金属学会秋期講演大会, 宇都宮, 平成 29 年 11 月 4 日-5 日

針木優太, 堀川敬太郎, 谷垣健一, 小林秀敏: 内在水素を含む Al-Zn-Mg 系合金の引張特性および水素放出挙動に及ぼす不純物 Fe の影響, 第 133 回軽金属学会秋期講演大会, 宇都宮, 平成 29 年 11 月 4 日-5 日

小林秀敏, 山田浩之, 小川欽也, 堀川敬太郎, 谷垣健一: 構造用木材の二面せん断試験片を用いた衝撃せん断試験, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 札幌, 2017.10.7 日-9 日

針木優太、堀川敬太郎、谷垣健一、小林秀敏：Al-Zn-Mg 合金の引張特性および水素放出挙動に及ぼす内在水素および熱処理の影響，2017 年 日本金属学会秋期講演大会，札幌，平成 29 年 9 月 5 日-7 日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://fracmec.me.es.osaka-u.ac.jp/days/staff/horikawa.html>

## 6．研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：小林秀敏

ローマ字氏名：KOB AYASHI HIDETOSHI

所属研究機関名：大阪大学大学院

部局名：基礎工学研究科

職名：教授

研究者番号（8 桁）：10205479

研究分担者氏名：山田浩之

ローマ字氏名：YAMADA HIROYUKI

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：システム工学群

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：80582907

研究分担者氏名：小椋智

ローマ字氏名：OGURA TOMO

所属研究機関名：大阪大学大学院

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：90505984