

お詫びと訂正

2020年12月21日に発行いたしました本誌「Vol.70, No.2 特集：素形材」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

9ページ 右段 図9：

誤： 図9 160℃×5hで予備時効し、DSCのピーク2で焼入れした試料のTEM写真
(析出物の個数密度： 5.2×10^{22} 個/m³，析出物サイズ：6.7 nm)

Fig.9 TEM image of specimen pre-aged at 160℃×5 h and quenched at temperature of DSC peak 2
(Number density of precipitates: 5.2×10^{22} /m³, size of precipitates: 6.7 nm)

正： 図9 160℃×5hで予備時効し、DSCのピーク1で焼入れした試料のTEM写真
(析出物の個数密度： 5.2×10^{22} 個/m³，析出物サイズ：6.7 nm)

Fig.9 TEM image of specimen pre-aged at 160℃×5 h and quenched at temperature of DSC peak 1
(Number density of precipitates: 5.2×10^{22} /m³, size of precipitates: 6.7 nm)

(論文)

自動車用サスペンション向けアルミニウム合金鍛造材の二段時効による高強度化

堀 雅是*・蛭川謙一・中野雅司・田中雅和・岡藤洋平

Strengthening of Aluminum Alloy Forgings for Automotive Suspension by Two-step Aging

Masayuki HORI・Kenichi HIRUKAWA・Masashi NAKANO・Masakazu TANAKA・Yohei OKAFUJI

要旨

自動車の燃費を改善するには車体を軽量化することが重要であり、サスペンションに対してもAl-Mg-Si系アルミニウム合金鍛造材を適用した軽量化が進められている。サスペンションのさらなる軽量化には材料の高強度化が必要なことから、当社は二段時効による材料の高強度化を検討した。その結果、160℃の予備時効と190℃の高温時効を組み合わせた二段時効により、160℃×56h一段時効の場合と同じピーク耐力390MPaを8hという短時間で得ることができた。これは、予備時効で約3~4nmの復元しない臨界サイズ以上となるβ''相を高密度に析出させ、高温時効で成長させることで高強度化することによる。本技術の適用によって従来技術と比べて3%の軽量化が可能となり、自動車の燃費向上や二酸化炭素排出量の削減に貢献することが期待される。

Abstract

In order to improve the fuel efficiency of automobiles, it is important to reduce the weight of vehicle bodies. The weight of suspensions is also being reduced, by applying Al-Mg-Si aluminum alloy forgings, for example. Further reducing the weight of suspensions will require additional strengthening of the material, and Kobe Steel has conducted a study to increase the strength by two-step aging. As a result, a two-step aging process combining pre-aging at 160℃ and high-temperature aging at 190℃ has achieved a peak proof stress of 390 MPa in a short time period of only 8 hours. Obtaining the same peak proof stress by single-step aging at 160℃ requires 56 hours. This is attributed to the fact that β'' phase, having a size of 3 to 4 nm, which is greater than the critical size for non-reversion, precipitates with a high number density during the pre-aging and grows at the high temperature to increase the strength. This technology has enabled a weight reduction of 3% over that of the conventional technology and is expected to contribute to improving fuel efficiency and reducing the carbon dioxide emissions of automobiles.

キーワード

アルミニウム鍛造材, Al-Mg-Si系合金, 二段時効, 予備時効, 復元

まえがき = 近年、地球環境問題の高まりに伴って排出ガスに対する規制が厳しくなり、自動車業界においても排出ガス、とくに二酸化炭素の削減が重要な課題となっている。車体軽量化による燃費の向上は、地球温暖化の原因である二酸化炭素の排出量削減に直結する有望な手段である¹⁾。また、安全対策、環境対策、装備の充実などによる重量の増加を軽減するためにも車体の軽量化が必要となっている。こうした軽量化ニーズを満たすために、サスペンションに対しては材料面からの検討がなされ、6000系アルミニウム鍛造材の適用が拡大している²⁾。さらなる軽量化には材料の高強度化が有効であり、当社においてもCuを添加した6000系アルミニウム合金鍛造材(KD610)が使われている³⁾。

より一層の軽量化にはさらなる高強度化が必要となっており、プロセス面からのアプローチも検討されている。一つの方法として、人工時効の低温長時間化により高強度化することが一般的に知られており、析出物の微細高密度化によることが分かっている。しかしながら、時効時間が長くなるため、生産性の低下および環境への負荷が高くなるという問題がある。また金子の研究⁴⁾

によると、A6061合金板材に120℃で24hの予備時効を施す二段時効でピーク耐力が向上するとの報告がある。ただし、予備時効時間が長時間である問題がある。さらに、このような研究はBH処理^{注1)}される板材で積極的に探索が進められている⁵⁾が、構造部材での報告はほとんどない。そこで当社は、6000系アルミニウム鍛造材に短時間の予備時効を適用した二段時効による高強度化への効果を調査し、この高強度のメカニズムについてミクロ組織観察を通して考察した。本稿ではその概要を紹介する。

1. 試験方法

供試材の製作にあたっては表1に示す化学成分を有

表1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical composition of specimen (mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.97	0.22	0.43	0.45	0.97	0.17	<0.01	0.03	Rem.

脚注1) BH処理とは、塗装焼付け時の熱を利用して強度(耐力)を上げる処理のことである。

* アルミ・銅事業部門 大安製造所(現 素形材事業部門 アルミ鋳鍛ユニット アルミ鋳鍛工場)

する材料を用いた。まず横型連続鋳造機にてφ90 mmのビレットを鋳造し、φ84 mmまで面削を行った。500°Cの均質化熱処理を施して空冷した後、520°Cに加熱し、圧下率70% (φ84 mm→t25.2 mm) まで鍛造した。溶体化処理の後水冷して120~180°C×5 hの予備時効を行い、190°Cで二段目の時効処理を実施して供試材とした。以降、予備時効と二段目の時効を実施したものを二段時効材とする。上記の熱処理の手順を図1にまとめた。また、比較用の一段時効材として160°Cと190°Cでの時効曲線を作成した。なお、熱処理はすべて大気中で実施した。

時効硬化挙動の評価として引張試験を行った。引張試験片はJIS4号引張試験片サブサイズ(標点間距離25 mm)を用い、鍛造L方向(鍛伸方向)に平行に採取した。また、予備時効材および二段時効材に対して電解研磨法にて薄膜を作成し、透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope, 以下TEMという)観察を行った。さらに予備時効後の析出相の評価は、示差走査熱量計(Differential Scanning Calorimetry, 以下DSCという)測定により行った。これら試験片は図2に示す位置より採取した。

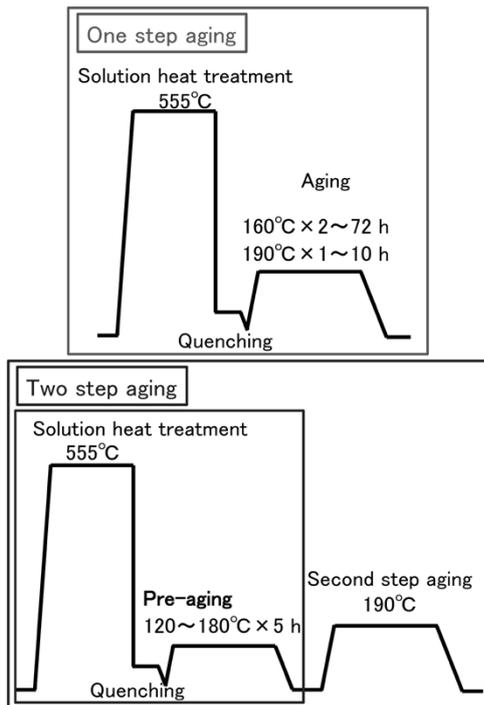


図1 供試材の熱処理工程
Fig.1 Heat treatment processes of specimens

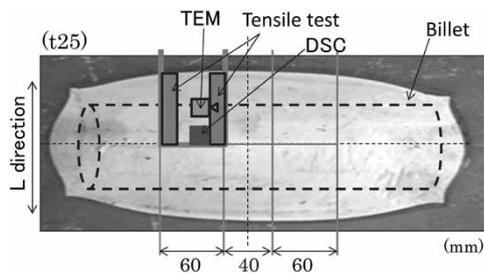


図2 試験片採取位置
Fig.2 Collection positions of test pieces

2. 試験結果および考察

2.1 時効曲線

一段時効の時効曲線、および160°C×5 hで予備時効後に190°Cで二段目の時効した時の時効曲線を図3に示す。ピーク耐力は、時効温度が160°Cの場合は390 MPa、時効温度が190°Cの場合は375 MPaとなり、160°Cの方が高強度となった。また、ピークとなる時効時間はそれぞれ56 hおよび3 hとなった。いっぽう、160°C×5 hで予備時効したのに対し、190°Cで時効した場合は160°Cのピーク耐力を低下させることなくトータルの時効時間を56 hから8 hに短縮できることが分かった。

そこで、最適な予備時効温度を得るため、二段時効材の引張特性に及ぼす予備時効温度の影響を調査した。その結果を図4に示す。なお、二段目の時効条件は190°C×3 hとした。一段目の予備時効時間を5 hに固定して時効温度を変えたところ、160°Cで最も高強度になることが分かった。このメカニズムを組織観察にて詳細に調べることにした。

2.2 組織観察

150°C、160°Cおよび170°Cで5 hの予備時効後のTEM観察写真を図5に示す。どの時効条件においてもTEMで観察可能な析出物が確認でき、これら析出物はβ''相

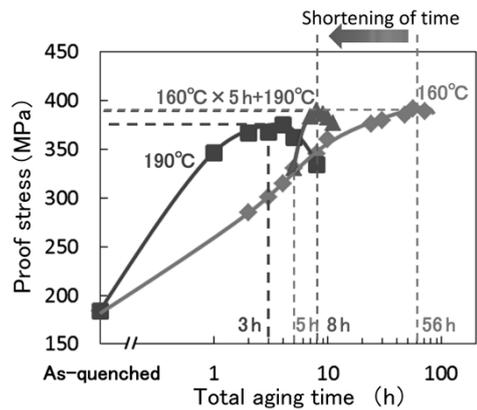


図3 160°Cおよび190°Cでの一段時効曲線、および160°C×5 hの予備時効後の190°Cでの二段時効曲線
Fig.3 One-step aging curve at 160°C and 190°C, and two-step aging curve at 190°C after pre-aging at 160°C×5 h

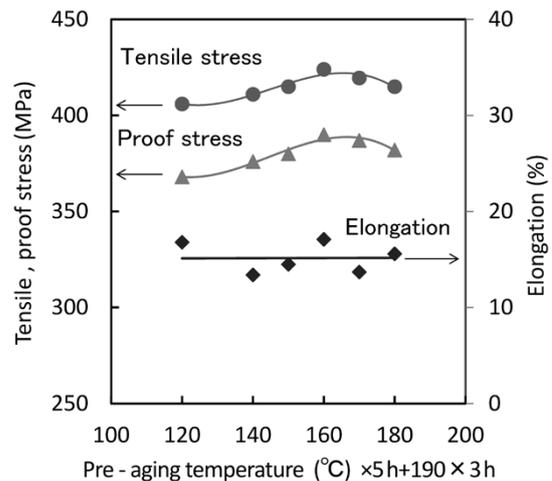


図4 予備時効温度が引張特性に与える影響
Fig.4 Effect of pre-aging temperature on tensile properties

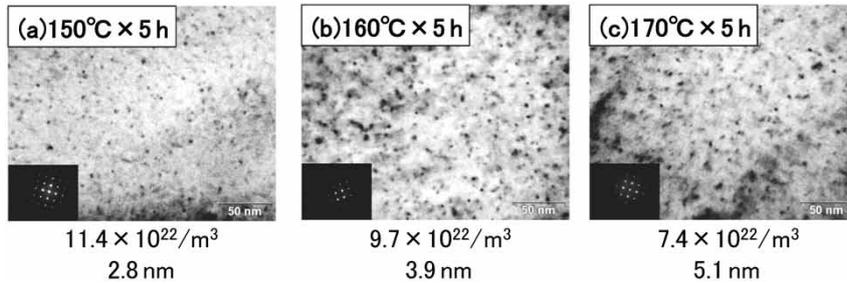


図5 予備時効後のTEM観察写真（上段の数値：析出物個数密度，下段の数値：析出物サイズ）
Fig.5 TEM images after pre-aging (upper number: number density of precipitates, lower number: size of precipitates)

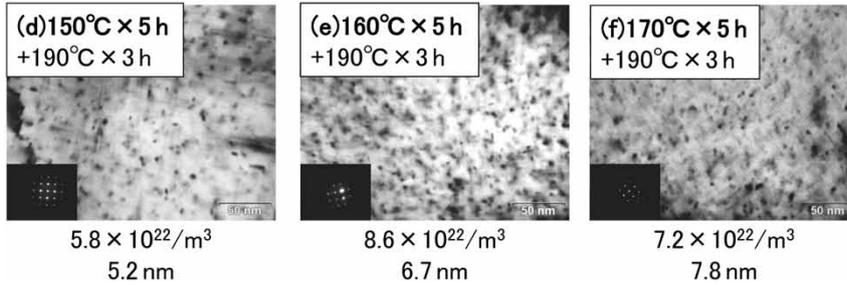


図6 二段時効後のTEM観察写真（上段の数値：析出物個数密度，下段の数値：析出物サイズ）
Fig.6 TEM images after two step aging (upper number: number density of precipitates, lower number: size of precipitates)

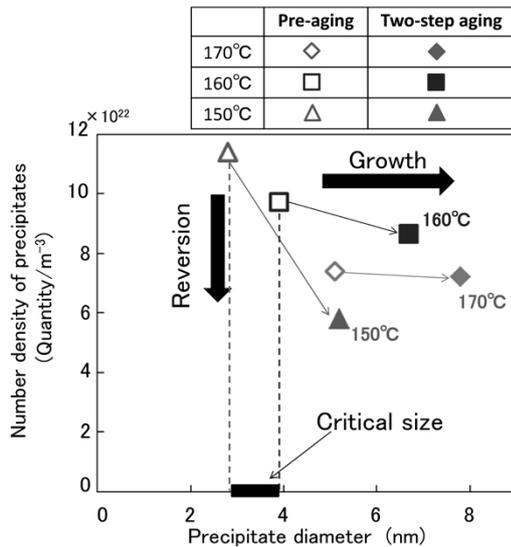


図7 予備時効後と二段時効後の析出物サイズおよび析出物数密度の関係
Fig.7 Relationship between size and the number density of precipitates after pre-aging and two-step aging

と考えられる⁶⁾。また析出物の密度は低温で時効するほど微細かつ高密度になっていた。

図5の予備時効材に190°C × 3 hの二段目の時効をした時のTEM観察写真を図6に示す。どの予備時効条件においても二段目の時効により析出物のサイズが粗大化していることが分かった。また、150°Cで予備時効したものは二段目の時効をすることで析出物の数密度が大きく低下していることが分かった。析出物サイズと個数密度の関係を図7にまとめた。なお、析出物の数密度は写真垂直方向に析出している黒い点を測定し、3倍して算出している。低温で予備時効することによって析出物は微細高密度になり、二段目の時効を施すことで析出サイズは大きくなる。しかしながら、150°Cで予備時効したものは一部が復元することが分かった。このことから

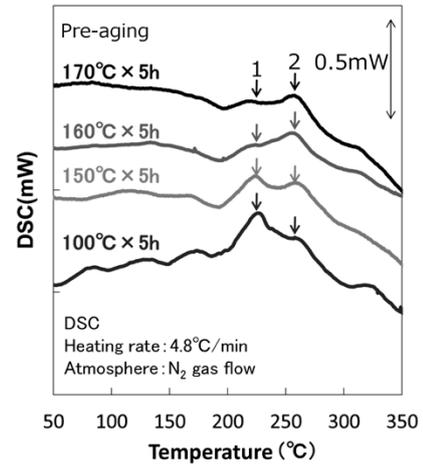


図8 予備時効後のDSC結果
Fig.8 DSC results after pre-aging

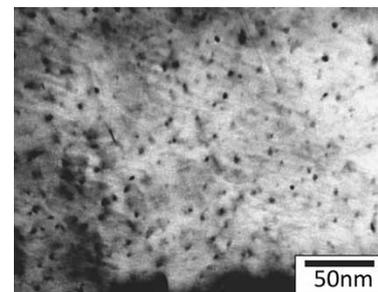


図9 160°C × 5 hで予備時効し、DSCのピーク2で焼入れした試料のTEM写真（析出物の個数密度： 5.2×10^{22} 個/ m^3 ，析出物サイズ：6.7 nm）
Fig.9 TEM image of specimen pre-aged at 160°C × 5 h and quenched at temperature of DSC peak 2 (Number density of precipitates: $5.2 \times 10^{22}/m^3$, size of precipitates: 6.7 nm)

3~4 nmの間に190°Cで復元する析出物の臨界サイズがあることが推定された。

2.3 DSC

熱処理時の組織変化を確認するため、二段目の時効と

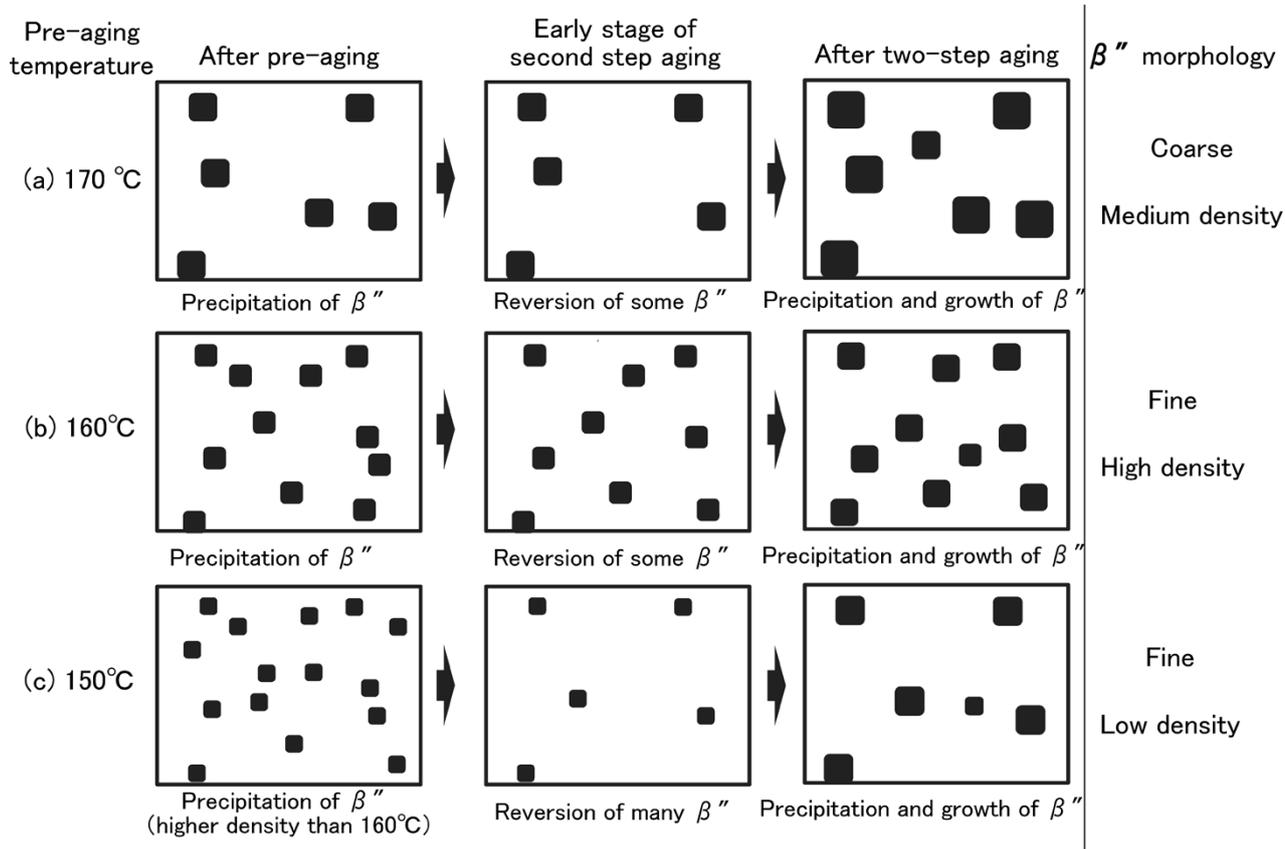


図10 二段時効の析出過程のモデル概略図
 Fig.10 Schematic models of precipitation processes for two-step agings

昇温速度を合わせて示差熱分析を実施した(図8)。その結果、 β'' と考えられる1の発熱ピークおよび β' と考えられる2の発熱ピーク⁷⁾が認められた。150°C以下では β'' のピークが高く、160°C以上ではピークが小さくなっていった。このことから160°C以上では β'' の析出がほぼ完了していると考えられた。

また、160°C × 5 hで予備時効した材料を1の発熱ピークである220°Cで焼入れし、TEM観察を実施した結果を図9に示す。予備時効後(図5(b))と比較して、析出物の密度が低下していることが分かった。このことから析出物の β'' が一部復元し、残ったものが粗大化したと推定される。

2.4 適正二段時効条件のメカニズム

析出過程のモデルを図10に示す。まず予備時効で β'' が析出し、その後の二段目の時効で β'' が成長して強度に寄与するモデルを考えた。160°Cで予備時効を施した時(図10(b))と比較して、予備時効170°C以上では(図10(a))予備時効で低密度に β'' が析出する。その後の二段目の時効で β'' が成長し、強度に寄与する。いっぽう、予備時効を150°C以下にした時(図10(c))は、予備時効で β'' が160°Cより微細高密度に析出する。しかしながら、析出物サイズが小さいため二段目の時効でその多くが復元する。そのため、二段目の時効後の析出物密度が予備時効160°Cの時より低くなると考えられた。すなわち、5時間の予備時効で析出する β'' が二段目の時効で最も高密度で復元しない温度は160°Cになったと考えられた。

3. 二段時効の高強度化による軽量化効果

各種アルミニウム合金の耐力と軽量化率の関係を図11⁸⁾に示す。当社ではすでに、A6061材より高強度となるKS651およびKD610材の量産化を実施している。今回開発した二段時効を用いることによりさらなる高強度材が実現できることが分かった。本開発材を適用することにより、生産性の低下を小さくしつつ、従来のKD610と比べて約3%の軽量化が期待される。

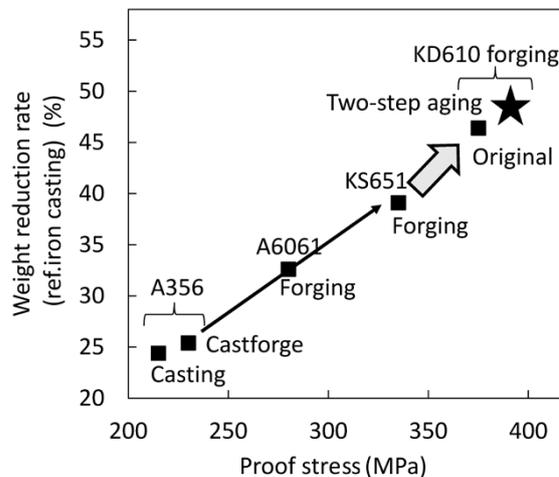


図11 アルミニウム合金の耐力と軽量化率の関係⁸⁾
 Fig.11 Relationship between proof strength and weight reduction rate of aluminum alloy⁸⁾

むすび = Al-Mg-Si-Cu系合金の時効挙動におよぼす予備時効の影響を調査した。その結果、時効条件を190℃から160℃にすることでピーク耐力を高めることができたが、56 hの長時間熱処理が必要であることが分かった。

また、二段時効を活用した短時間・高強度化条件を調査した結果、以下のことが分かった。

- ・二段時効：一段目時効 (160℃ × 5 h) + 二段目時効 (190℃ × 3 h) を適用することにより、低温長時間で得られるピーク耐力を8 hで達成した。

本条件の高強度化メカニズムとして、以下のように考察した。

- ・予備時効で臨界サイズ3~4 nm以上の β'' を高密度に析出させることにより、二段目の時効での復元を抑えつつ成長できることが分かった。
- ・予備時効温度が高いと析出物が疎となり、また予備時効温度が低いと二段目の時効で復元して疎となる。このため高いピーク耐力が得られなかった。

自動車向け材料は、燃費向上のための軽量化がさらに求められている。当社はこうした軽量化ニーズに対応し、アルミニウム鍛造サスペンションのさらなる拡大に向けて材料の高強度化を実現していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 湊 清之. 国際交通安全学会誌. 2004, Vol.29, No.2, p.103-108.
- 2) 渡辺孝広ほか. アルトピア. 2007, Vol.37, No.4, p.9-14.
- 3) 稲垣佳也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, p.22-26.
- 4) 金子純一. 軽金属. 1977, Vol.27, No.2, p.49-56.
- 5) 山田健太郎ほか. 軽金属. 2001, Vol.51, No.4, p.215-221.
- 6) 鈴木 寿ほか. 軽金属. 1980, Vol.30, No.11, p.609-616.
- 7) 菅野幹宏ほか. 軽金属. 1978, Vol.28, No.11, p.553-557.
- 8) 稲垣佳也ほか. R&D神戸製鋼技報. Vol.55, No.3, p.83-86.



堀 雅是

アルミ・銅事業部門 大安製造所
(現 素形材事業部門 アルミ鍛造ユニット アルミ鍛造工場)



蛭川謙一

アルミ・銅事業部門 大安製造所
(現 素形材事業部門 技術総括部)

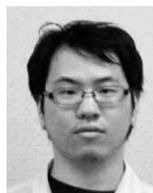


中野雅司

アルミ・銅事業部門 大安製造所 サスペンション部
(現 Kobe Aluminum Automotive Product, LLC) アルミ・銅事業部門 品質保証部
(現 素形材事業部門 サスペンションユニット サスペンション工場)



田中雅和



岡藤洋平

Kobe Aluminum Automotive Product, LLC