

# 連携記事

## 鉄道車両用構体の材料の変遷と 難燃性マグネシウム合金の適用に向けた取り組み

Evolution of Vehicle Body Material in Railway and Approach to Application of  
Flame-resistant Magnesium Alloys to Vehicle Body

鉄道総合技術研究所  
車両構造技術研究部  
車両強度 研究員 (出向中)

佐藤裕之  
Hiroyuki Sato

鉄道総合技術研究所  
材料技術研究部  
研究員 (出向中)

上東直孝  
Naotaka Uehigashi

前鉄道総合技術研究所

森 久史  
Hisashi Mori

鉄道総合技術研究所  
材料技術研究部  
摩擦材料 主任研究員

森本文子  
Fumiko Morimoto

### 1 はじめに

鉄道車両の車体は大きく分けて「構体」、「内装」、「ぎ装 (電気機器など)」から成り、「構体」は車体全体の強度を担う基本構造部分です。

日本で鉄道が開業してから140年余りが経ちましたが、軽量化、部品点数の低減、溶接の単純化と信頼性向上などの要求とも相まって、構体の材料が時代とともに進化を遂げました。

ここでは構体の材料の変遷について概説するとともに、構体への適用が検討されている難燃性マグネシウムについての取り組みを紹介します。

### 2 材料の変遷<sup>1,2)</sup>

日本における鉄道は1872年10月14日、新橋—横浜間で開業しました。開業当時の客車は車体長が約5mであり、現在の一般的な在来線車両 (約20m) と比較するとかなり小型でした。さらに、車体のほとんどが木製であり、現在とは大きさや使用される材料が大きく異なっていました。

開業後、輸送力増強の要求が高まり、列車編成長の増大や客車の大型化、速度向上が図られました。しかし、1926年に発生した山陽本線特急列車脱線事故で、木製車体が大破し、死者34名の甚大な被害が発生しました。この事故をきっかけに、木製車体の強度や衝突安全性が見直されることになり、車体の鋼製化が促進されました。当時の製造技術では全てを鋼製に置き換えることは難しく、主要部材や外板などが鋼製となりましたが、屋根や内装は木製のままでした。この

ような構造は後に登場する全鋼製車体と区別するため、半鋼製車体と呼ばれ、広く普及するようになりました。この頃、車体強度を担う鋼製の基本構造は「鋼体」と呼ばれており、「構体」という言葉が使われるようになったのはアルミニウム合金が車体の材料に採用されてからだと言われています。1950年代頃から、屋根も鋼製化し、内装に金属品や樹脂材を使用した全鋼製車体が製作されることとなりました。しかし、基本的な構造は変わらなかったため、木製部分を鋼製に置き換えたことによる質量増加が問題となりました。そこで、航空機で採用されていた張殻構造の考え方を取り入れて軽量化を図りました。この構造は台枠だけでなく、側面や屋根が一体となって曲げ剛性を担う構造となっており、車体の質量を低減することができました。

アルミニウム合金の構体への適用として、1946年に航空機用材料を外板に使用した、ジュラルミン製車両が製造され、本格的な適用は、1962年に登場した山陽電鉄2000系電車が始まりました。軽量かつリサイクル性に優れているため、私鉄や新幹線電車で広く普及し、現在では新幹線構体の主要材料となりました。

また、ステンレス鋼は普通鋼に比べ腐食しにくいことから、腐食防止の塗装が省略でき、メンテナンス性に優れています。そこで、ステンレス鋼を使用した構体の開発が進められ、1958年には外板にこれを適用した東急電鉄5200系電車が登場しました。その後、高抗張力ステンレス鋼 (SUS301) と溶接技術の開発により、構体のほとんどをステンレス鋼に置き換えた車両が東急電鉄7000系として1962年に完成しました。

図1に2014年度における鉄道車両の生産実績を構体の材

料別に分類した結果を示します。普通鋼製構体は全体の16%となっており、車体に用いられる主要材料がアルミニウム合金やステンレス鋼へ移り変わっていることがわかります。

また、複合材料の車体への適用もなされています。現在、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）が一部のステンレス鋼製車両の前面部に、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）が一部の新幹線電車の先頭部に使われており、複合材料が使われる部分が広がってきています。製造コストやメンテナンス、耐火性などの課題はありますが、今後の車両へのさらなる適用が検討されているところです。

### 3 アルミニウム合金製車両構体<sup>2,3)</sup>

普通鋼と比較した場合、アルミニウム合金は重さ（密度）が1/3程度であり非常に軽い材料です。さらに、比強度（強度を密度で割った値）が大きく、軽量化に適しています。しかし、型材の加工や接合は普通鋼に比べて容易ではなく、製造加工費が高いという問題がありました。そのため、部品点数の削減や接合作業の効率化が重要な課題でした。そこで、押出性と溶接性の良好な合金と大型押出プレス機の開発が推進され、骨材と外板を一体化した押出成形が可能となり、部品点数や溶接箇所の削減が実現しました。押出成形とは図2

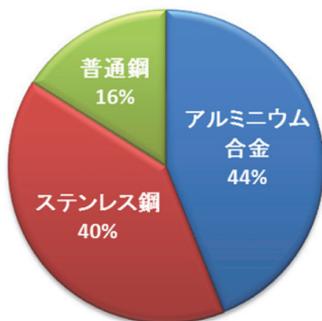


図1 鉄道車両の構体材料別の生産実績 (2014年度)  
データ提供：日本鉄道車輛工業会

(a) に示すようにところてんのように材料を押し出し、所定の断面形状に成形する方法です。この構造は、後にシングルスキン構造と呼ばれるようになりました (図2 (b))。

1985年頃になると押出技術の進歩により、大型の中空型材の押し出しが可能となり、ダブルスキン構造と呼ばれるトラス状の型材が成形されるようになりました (図2 (c))。この構造は、剛性の高い二層パネル形状であるため、はりや骨組みが省略でき、構造を簡素化できます。そのため、溶接の工数を削減できるほか、室内空間を広く確保できるなどのメリットがあり、新幹線電車や特急車両を中心に採用されています (図3)。

また、アルミニウム合金の溶接は容易ではなく、溶接時の入熱で強度が低下するなどさまざまな問題があります。そこで近年、FSW (Friction Stir Welding) と呼ばれる、摩擦熱で接合する方法が開発されました。FSWでは接合部分の組織が微細となり、従来溶接と比べ接合部分の強度低下が小さい特徴があり、一部の車両製造ですでに適用されています。

### 4 ステンレス鋼製車両構体<sup>1,4)</sup>

鉄は時間とともに酸化して腐食するため、普通鋼製構体ではあらかじめ腐食による強度低下を考慮して厚めに各部材

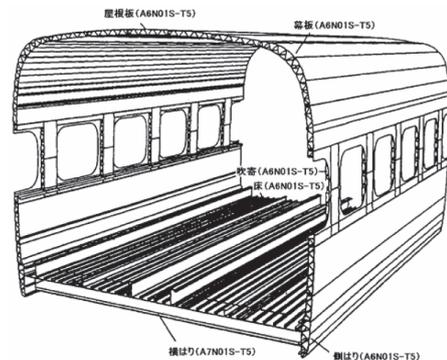


図3 ダブルスキン構造を適用したアルミニウム合金製構体の例

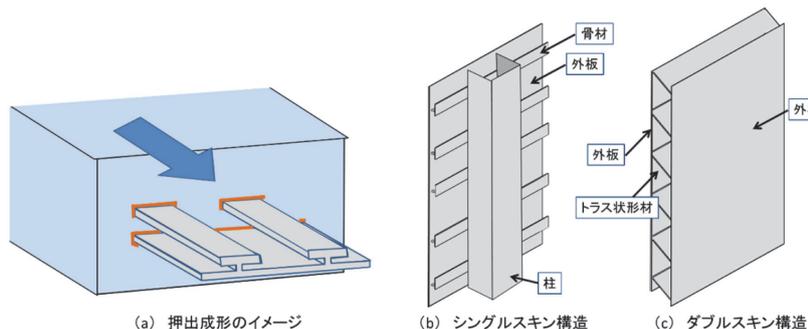


図2 アルミ押出型材の構体構造

の板厚を選定しなければなりません。しかし、ステンレス鋼は、普通鋼製構体と比較して腐食しにくいことから、強度上必要最小限まで板厚を薄くすることが可能です。さらに、1970年代半ばから、数値解析を活用した各部の設計が積極的に行われ、より薄い材料による構体構成を可能にしました。このような車両は「軽量ステンレス車両」と呼ばれるようになりました。

ステンレス鋼は普通鋼に比べて熱伝導率が低いため、連続的に溶接を行うと、熱が溜まって変形を起こしやすいという難点があります。したがって、構体の組み立てには入熱が少ない抵抗スポット溶接がよく用いられています。抵抗スポット溶接とは溶接したい金属に力を加えながら電流を流して、ジュール熱で金属を溶かし接合する方法で、ステンレス鋼のような電気抵抗が比較的高い金属の接合に適しています(図4)。また、熱変形が接合部付近に限定されるため、構体の組み立て時に、ゆがみが生じにくいのが特徴です。しかし、溶接箇所は非常に多いため、外板のゆがみを完全に無くすることはできません。そのため、外板の断面が波型(コルゲートまたはビード)になるように加工し、外板の剛性を増す工夫をしました(図5)。その後、外板補強の形状と配置を改良することで、側外板のビードが廃止され、平滑な外観となりました。

近年では、レーザービームを熱源にしたレーザー溶接が登場しました。加熱範囲を微小なエリアに抑えることができるのでゆがみが小さく、溶接速度が速いのが特徴です。さらに、車体表面に溶接痕が残らないため美観の向上にも貢献しており、今後、さらなる適用が予想されます。

## 5 車両構体へのマグネシウム合金適用に向けた取組み<sup>5,6)</sup>

### 5.1 マグネシウム合金による軽量化の可能性

これまでの鉄道車両を振り返ると、車両の軽量化が進んだ主要な要因として、(1) 構体材料の変更(鉄鋼→ステンレス鋼

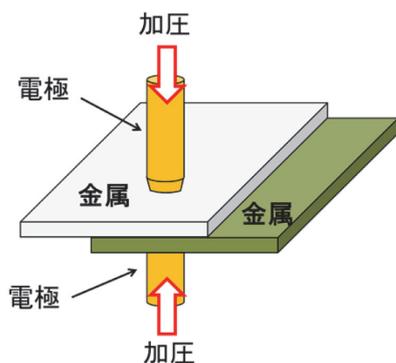


図4 抵抗スポット溶接

またはアルミニウム合金)、(2) 制御方式の変更(抵抗制御→VVVF制御)、(3) 搭載機器の小型化・集約化、(4) 台車構造の変更などがあげられます。しかし、車両高速化に伴う出力の増加に対応する動力機器の軽量化は難しいこと、良好な乗り心地を維持するためのシステムの搭載により重量が増加することなどから、現状では、車両のさらなる軽量化は難しい状況にあると考えられます。抜本的な軽量化を図るためには、以下の特性を有する金属系新素材の適用が有効です。

- 1) 現用の車両構体材料のうち最も軽いアルミニウム合金よりもさらに軽いこと。
- 2) リサイクル性や振動吸収特性が良いこと。
- 3) 地球に多く存在し比較的容易に入手ができること。
- 4) 強度および疲労強度がアルミニウム合金と同等以上であり、溶接できること。

このような特性を持つ材料として、マグネシウムがあげられます。マグネシウムの密度は約1.7g/cm<sup>3</sup>であり、鉄の約7.8g/cm<sup>3</sup>、アルミニウムの約2.7g/cm<sup>3</sup>と比べて構造用金属材料の中で最も軽い材料といえます。現用の車両構体は、ステンレス鋼やアルミニウム合金を用いて作製されているものが主ですが、より軽いマグネシウム合金で車両構体を作製することができれば、さらなる車両の軽量化が期待できます。また、マグネシウムはアルミニウムの倍程度の減衰能を持ち、振動吸収特性にも優れています。しかし、マグネシウムは活性金属であり、条件次第ではありますが燃える可能性があるため、構体に適用するためには難燃化が必要です。

### 5.2 マグネシウム合金の難燃化

マグネシウム合金の難燃化は、カルシウムや希土類元素を添加することによって可能です<sup>7)</sup>。希土類元素は比較的高価であるため、コストの観点からカルシウムの添加が一般的です。

難燃性マグネシウム合金(Mg-6Al-Zn-Ca合金)、汎用マグネシウム合金(Mg-6Al-Zn合金)およびアルミニウム合金(Al(6N01)合金)の3種類の試験片をガスバーナーにより直火加熱

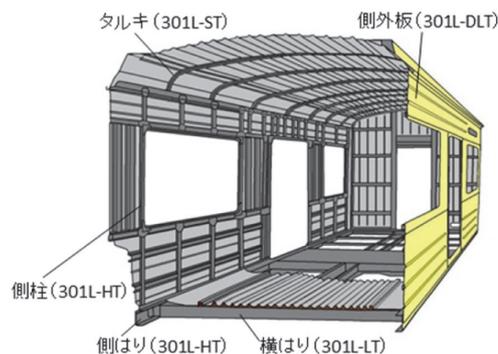


図5 ステンレス鋼製構体の例

して難燃性の効果の確認を行ったところ、雰囲気温度が600℃近くに達した時に汎用マグネシウム合金は発火しましたが、難燃性マグネシウム合金では発火が認められませんでした(図6)。さらに雰囲気温度を上昇させると、アルミニウム合金も難燃性マグネシウム合金も、発火は生じずに溶け落ちました。

また、難燃性マグネシウム合金の板を溶接して四面体構造の試験体を試作し、中に灯油を入れた皿を入れて燃やす燃焼試験を実施しました(図7)。試験体には煤と変形が認められるものの発火は生じず、若干の変形はあるもののほぼ原形をとどめていました。このように、カルシウムを添加することによってマグネシウム合金を難燃化できることを確認しました。さらに、合金の化学成分を調整することにより、複数の種類の難燃性マグネシウム合金を試作しました。

### 5.3 難燃性マグネシウム合金の機械的性質

難燃性マグネシウム合金と汎用マグネシウム合金は、板の状態では同じように見えますが、顕微鏡で見られる金属組織は異なります(図8)。汎用マグネシウム合金では全体に粒状の組織(結晶粒)が認められます。これに対して難燃性マグネシウム合金では、結晶粒が汎用マグネシウム合金に比べて微細であり、さらに析出物が全体的に分散しています。難燃性マグネシウム合金の機械的性質には、このような金属組織が強く影響します。図8に示した合金では、汎用マグネシウム

ム合金の0.2%耐力は180MPa、引張強さは220MPa、伸びは12%であるのに対し、難燃性マグネシウム合金の0.2%耐力は220MPa、引張強さは240MPa、伸びは5%であり、難燃化により強度が増加しますが、伸びが著しく低下します。これは、脆い析出物と結晶粒の微細化により変形抵抗が増加したものの、析出物自体が破壊源となり伸びが低下したためと考えられます。

また、同じ加工方法でも加工条件が異なると、金属組織とともに機械特性が大きく変化します。圧延率の異なる2条件で圧延加工した難燃性マグネシウム合金の金属組織を比べると(図9)、圧延率が約3倍の場合には結晶粒も析出物も一層微細化し、結晶粒が圧延方向に配列します。これら圧延材の0.2%耐力は、圧延率24%で260MPa、圧延率75%で350MPaであり、圧延率が高いほど、すなわち金属組織が微細であるほど強度が増加しました。この傾向は押出加工材についても認められます。

さらに、合金への添加元素や加工後の熱処理によっても、難燃性マグネシウム合金の特性を調整できることが分かりました。

### 5.4 車両構体用形材の試作

鉄道車両部材には圧延板材以外にも、さまざまな断面形状の形材が使われます。このような形材は主に押出法で作製さ



図6 ガスバーナー直火加熱試験による難燃性確認試験の外観

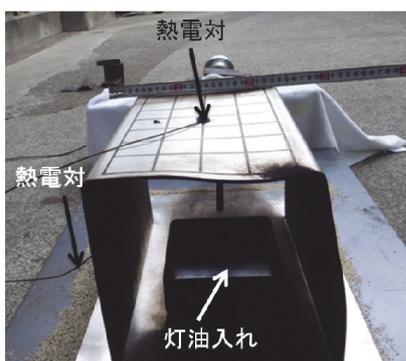
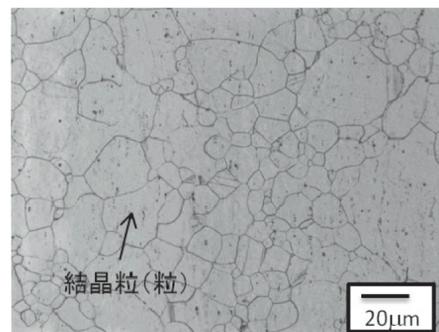
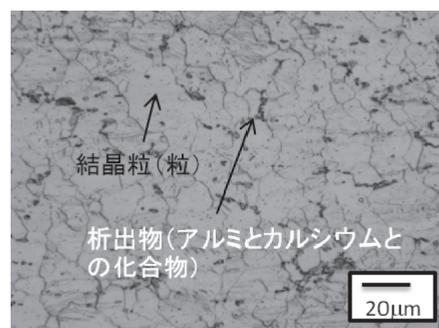


図7 難燃性マグネシウム合金の四面体の燃焼試験後の外観



(a) 汎用マグネシウム合金(⇨圧延方向)(Mg-6Al-Zn合金)



(b) 難燃性マグネシウム合金(⇨圧延方向)(Mg-6Al-Zn-Ca合金)

図8 汎用マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金の金属組織の比較(どちらも圧延率5%の圧延板材)

れます。押出法では、型材の断面形状の上下左右の非対称性が大きいほど、また材料の変形抵抗が高いほど、作製の難易度が高くなります。難燃性マグネシウム合金製の薄肉トラス断面形状の型材の押し出しは難易度が高いですが、断面形状を工夫することにより、押出成形による中空型材を試作しました(図10)。顕著な反り、曲がりとは認められず、いずれの断面形状の型材も目標に近い寸法で試作できました。



(a) 圧延率24% (⇔圧延方向)

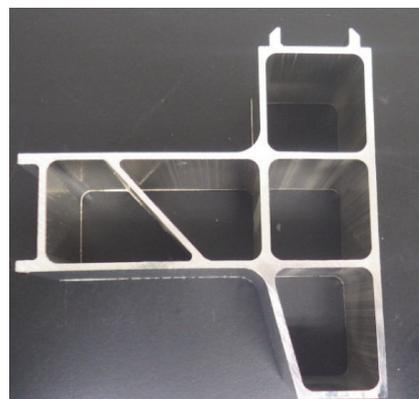


(b) 圧延率75% (⇔圧延方向)

図9 難燃性マグネシウム合金の金属組織の圧延率による違い



(a) 側構体・床用型材



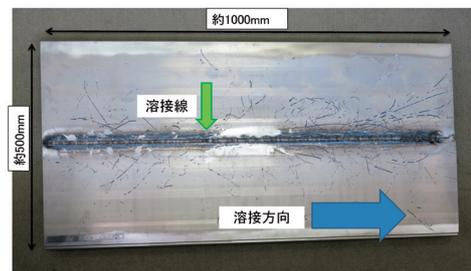
(b) 側ばり(側受け)用型材

図10 難燃性マグネシウム合金製中空型材の外観

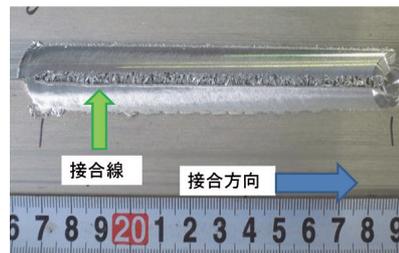
### 5.5 難燃性マグネシウム合金の接合

難燃性マグネシウム合金を車両構体に適用するためには、車両を組み立てるための接合技術が必要です。接合手法として、一般に金属の接合に用いられるアーク溶接と、回転する工具を接合部に押付けて摩擦熱で接合するFSWを検討しました。難燃性マグネシウム合金の中空型材に対し、アーク溶接の一つであるMIG(Metal inert gas)溶接とFSWを行い(図11)、MIG溶接では、溶接部に溶接金属が十分に溶け込んでいることを確認できました(図12(a))。

一方、FSW材では溶接部断面に部分的に欠陥が認められ、

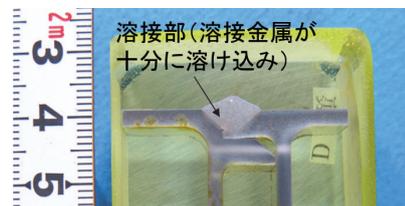


(a) MIG溶接材

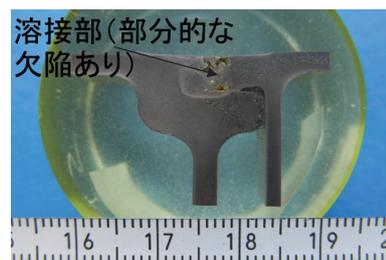


(b) 摩擦攪拌(かくはん)接合(FSW)材

図11 溶接材の外観観察結果



(a) MIG溶接材



(b) FSW材

図12 溶接材の断面マクロ観察結果

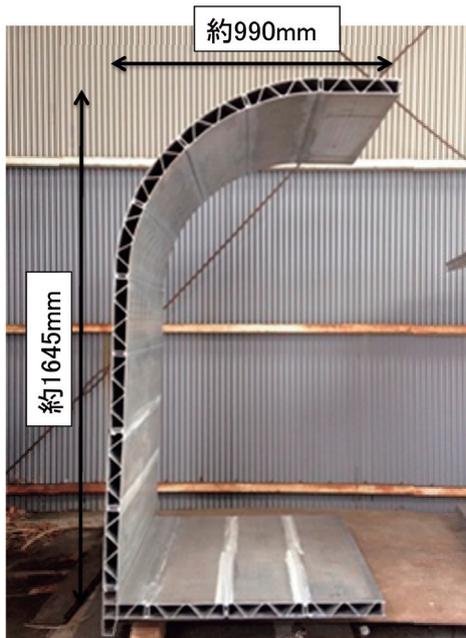


図13 試作した小型半断面構体の外観

内部にまで欠陥が進展していることが確認されました(図12(b))。FSWによるマグネシウム合金の接合については、溶接条件や中空型材の継手部形状の改良が必要であると考えられます。アルミニウム合金ではFSWが有効であることが確認されています<sup>8)</sup>。しかし、変形抵抗の高い難燃性マグネシウム合金の場合には、アルミニウム合金のFSWで用いられる施工条件や継手形状をそのまま使用することができません。難燃性マグネシウム合金はまだ新しい材料であるため、適切な施工条件を決めるための材料特性のデータベースが十分とは言えず、今後の研究が必要であると考えられます。

### 5.6 モデル構体の組み立て検証

これまで基本的な型材の研究などを進めてきましたが、実用化への展開を考え、試作した中空型材にMIG溶接を適用して半断面形状の小型のモデル構体を試作し(図13)、組み立て性について調べました。組み立ての過程で、溶接による熱歪の影響が大きいいため、中空型材同士の溶接、組み立ての

順番に留意する必要があることが分かりました。今後、新たな治具の開発、矯正方法などの検討が必要になると考えられます。

## 6 おわりに

車両用構体は、これまで構造や材料の面から様々な改良が行われ、進化してきました。さらなる軽量化を目指した検討の一つであるマグネシウム合金適用の取り組みでは、合金の作製、加工方法、溶接方法などの基礎的な検討から半断面のモデル構体の試作を通じ、難燃性マグネシウム合金に関する材料技術的な知見を得ることができました。実用化までにはまだ先が長いですが、FSWの検討、表面処理の選定の検討など、メーカーとともに各技術を確実にしながら実績を積み上げ、進めていきたいと考えています。なお、マグネシウム合金の適用検討にあたっては、三協立山株式会社、株式会社総合車両製作所、権田金属工業株式会社より多大なご協力をいただきました。

### 参考文献

- 1) 服部守成：金属, 70 (2000) 2, 51.
- 2) 宇治田寧：材料, 59 (2010) 7, 575.
- 3) 森久史, 辻村太郎：RRR, 67 (2010) 3, 8.
- 4) 平嶋利行：鉄道車両におけるレーザー溶接技術, WE-COMマガジン, 10 (2013)
- 5) 森久史, 上東直孝, 辻村太郎, 石塚弘道, 花木悟, 清水和紀：鉄道総研報告, 28 (2014) 2, 41.
- 6) 森久史, 上東直孝, 宮内瞳苗, 石塚弘道, 辻村太郎：鉄道総研報告, 29 (2015) 4, 35
- 7) 秋山茂, 上野英俊, 坂本満, 平井寿敏, 北原晃：まてりあ, 39 (2000) 1, 72.
- 8) 岡村久宣, 青村欣也, 高井英夫, 江角昌邦：溶接学会誌, 72 (2003) 5, 436.

(2018年6月4日受付)