高速鉄道車両への難燃性マグネシウム合金の適用

森　久史*　藤野謙司1)**　栗田　健2)**　千野靖正1)***
齋藤尚文2)***　野田雅史****　駒井　浩*****　小原　久*****

1. はじめに

鉄道は，安全性，経済性，利便性，社会性にバランスの取れた輸送機関であり，1 kg 当たりの重量に対するエネルギー消費量は最も低い．また，鉄道は航空機や自動車と比較して，CO_2 排出量の最も少ない輸送手段であり，環境にも優しい輸送機関である(1)．

鉄道の今後の発展課題として，長距離輸送の担い手である新幹線電車(以降，新幹線とする)のさらなる高速化や省エネ化が挙げられており，その解決のために車体構体のさらなる軽量化が求められている．

現在の新幹線の車両構体にはアルミニウム合金が適用されているが，さらなる軽量化を考えるにあたり，マグネシウム合金の適用が考えられる．

本報では，新幹線の変遷とさらなる軽量化について説明し，その後，現在の難燃性マグネシウム合金の車両への適用に向けた基本的な技術開発について説明する．その後，車両へのマグネシウム合金の適用の期待と検討項目および取り組みについて紹介し，適用に関する課題を示す．

2. 新幹線の変遷とさらなる軽量化

(1) 新幹線の変遷

長距離輸送を担う新幹線は，高いレベルの安全性，快適性と高速性が重視される．国鉄は，開発当初の 0 系新幹線において，安全性を重視するために，車体構体へ冷間圧延鋼板(SPCC)を適用していた．さらなる輸送力の強化や東北・上越新幹線向けへの新幹線の改良に際し，車両構体の軽量化が検討され，アルミニウム合金の適用が考えられた．この当時，国鉄301系通勤車両や山陽電鉄2000系においてアルミニウム合金の車両構体への適用が行われており，アルミニウム合金への置換についてある程度の基礎的な知見があったものと考えられる．その置き換えの検討に際し，車体全体の剛性の低下が重要な課題となった．そこで，車体構造を従来の張殻構造からボディーマウント構造に変更することで，アルミニウム合金への置き換えに際する剛性の低下を構造上でカバーする方針が検討された．この時代は，アルミニウム合金を鋼製の一部に置き換える程度であったが，車両構体全体にアルミニウム合金を適用する計画が検討された．その検討では，剛性を確保する方法とコスト削減について主に議論された(2)．そこで，剛性の確保には断面二次モーメントを工夫し

* (公財)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(〒185–8540 東京都国分寺市光町 2–8–38)
** 東日本旅客鉄道㈱研究開発センター；1)主幹研究員，2)上席研究員
*** ㈱産業技術総合研究所・サステナブルマテリアル研究部門；1)研究グループ長，2)上級主任研究員
**** 千葉工業大学工学部機械サイエンス学科；研究員
***** (一社)日本マグネシウム協会
Application of the Flame–Retardant Magnesium Alloy to High Speed Rail Vehicles; Hisashi Mori*, Kenji Fujino**, Ken Kurita**, Yasumasa Chino***, Naobumi Saito***, Masafumi Noda****, Hiroshi Komai***** and Hisashi Obara*****(*Friction of Materials, Materials Technology Division, Railway Technical Research Institute, Tokyo. **R & D Center of JR East Group, East Japan Railway Company, Saitama. ***Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya. ****Department of Mechanical Science and Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Chiba. *****The Japan Magunesium Association, Tokyo)
Keywords: *rail vehicles, flame–retardant magnesium alloy, weight saving, speed up*
2013年 7 月 1 日受理[doi:10.2320/materia.52.484]

た形材の適用(**図1**)を検討し，材質，材料加工法や加工精度などについて入念に検討された．また，コストについては，25 m 長の図1のような大型素形材を適用し，それらをアーク溶接で自動溶接(**図2**)することにより，部品点数，工作点数や作業工程の削減で検討された．

それらの技術開発に基づいて，Star21(東日本旅客鉄道株式会社)や300X(東海旅客鉄道株式会社)のようなオールアルミニウム合金製車両を試作し，走行試験を行って，アルミニウム合金製車両のあり方が検討され，これらの成果が現在のアルミニウム合金製車両に生かされている．このように，アルミニウム合金製の車両構体の開発では，材料メーカー，車両メーカー，旅客鉄道会社が総合的に議論をすることで開発されてきている．

(2) 新幹線のさらなる軽量化の必要性

今後の新幹線車両に求められる主な課題を**表1**に示す．主な課題としては，サービスの改善，省エネ化，省力化，低コスト化，環境保全があげられる．特に鉄道は旅客運輸業であることから，旅客に対するサービスの改善は重要である．サービスの改善としては，到達時間の短縮化，客室設備，たとえば腰掛けや荷棚等のアコモデーションの改善，快適性の向上が挙げられる．

たとえば，到達時間の短縮化は，新幹線が長距離輸送の時間短縮が使命であることや航空機との競争もあることから，重要な課題である．時間短縮の最も効率のよい手法として，営業車両の速度向上が必要になる．

一般に鉄道車両はレールの上に車輪が転動し，その摩擦力で走行する．ここで走行速度の限界は，**図3**に示すように，レール/車輪間の粘着力(粘着係数)と走行抵抗から検討され，粘着係数と走行抵抗とが交わる点である．このことから，走行速度の限界を引き上げるには，車体形状や断面積などを一定とした場合，車両重量の軽量化が必要である．

開発当初の0系新幹線と現状の新幹線を比較すると，構体への軽量材料の適用，搭載機器の小型化，台車の軽量化などにより，1両当たり10 t 近くの軽量化が行われている[1]．今後のさらなる軽量化の検討においても，同様の技術検討が

表1　新幹線に求められる課題．

課　題	項　　目
サービスの改善	到達時間の短縮，アコモデーションの改善，快適性の向上
省エネルギー化	力行エネルギーの節電 ブレーキエネルギーの回収
省力化	補修，取り扱いの省力化
低コスト化	車両構造の簡素化，車両の価格低減
環境保全	振動騒音対策

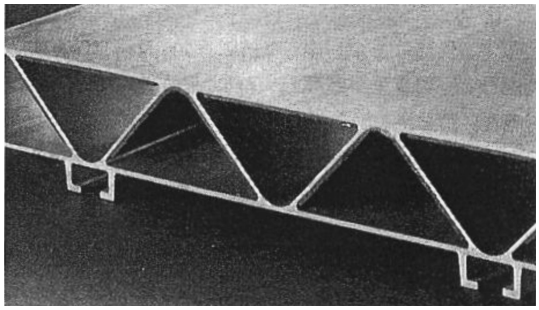

図1　アルミニウム合金製中空形材の外観．

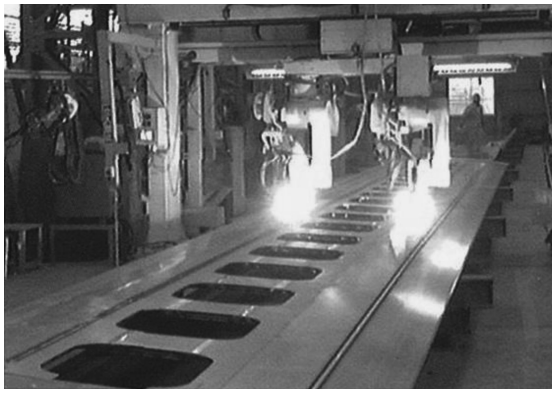

図2　車両製造のための自動 MIG 溶接過程．

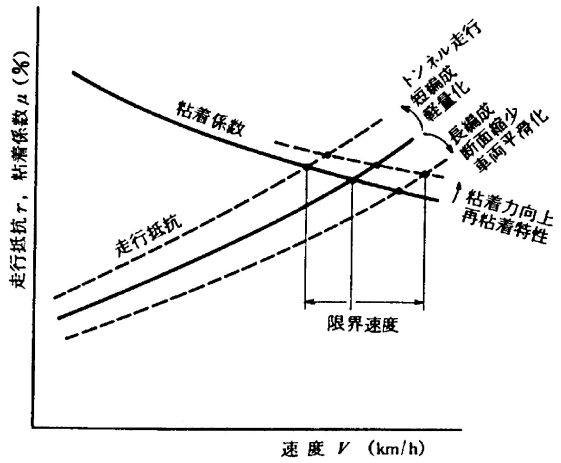

図3　速度と粘着および走行抵抗との関係．

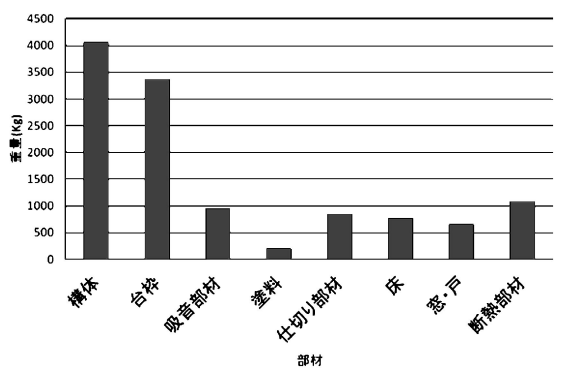

図4　車両構造部品とその重量．

望まれるが，高速化に伴う電動機に対する高出力の要求，輪軸の高速安定性などを考えると，動力を発生および伝達する機器や台車の軽量化は難しい．また，快適性の向上において(表1)，高速走行に伴い悪化する乗り心地を，良好な状態に維持するために新しいシステムを搭載するなど，機器や台車での軽量化はほぼ限界にある．したがって，軽量化の余地として車両構体が考えられる．**図4**に新幹線の車両構造部品とその重量の例を示す．軽量化としては，構体，台枠，吸音部材に余地が認められる．そのため，これら部材に適用する軽量金属の候補材の探索が必要になる．

3. 車両へのマグネシウム合金の適用の期待と課題

(1) 車両へのマグネシウム合金の適用の期待

車両構体の軽量化には軽量材料の適用が最も効果がある．このことから，現状の新幹線の車両構体の軽量化には，アルミニウム合金よりも軽い金属材料であるマグネシウム合金の適用に期待が寄せられる．また，マグネシウム合金はリサイクル性や振動吸収性能にも優れており，さらには，地球に多く存在し比較的容易に入手ができる．このようなことから，マグネシウム合金の適用が期待されるが，マグネシウム合金は化学的に活性であることから，難燃性および不燃性の確保の問題や，加工しにくい材料であることなど，課題は多い．しかし，最近では不燃あるいは難燃性マグネシウム合金が開発されていることや，高温や温間でマグネシウム合金が加工できることなどが示されていることからも，マグネシウム合金への期待が大きいと考えられる[3]．

(2) マグネシウム合金の車両への適用の検討項目

マグネシウム合金の車両構体への適用のために必要となる，基礎的な検討項目を**表2**に示した．一般的に，マグネシウム合金だけでなく，車両構体の部材へ適用する材料については，不燃性および難燃性が必須である．また，耐力，引張強さ，疲労強度，衝撃強さ，じん性，加工性(圧延，押出)，溶接・接合性(手法，継手強さ，継手形状等)，耐食性(溶接材を含む)など，材料に関する基本的な性質や入手しやすさについて調べておく必要がある．また，材料プロセス技術(鋳造，圧延，押出)の確立，車両製造のための溶接・接合技術の検討，表面処理技術，剛性の確保手法，信頼性など幅広い展開が必要になる．

特に材料コストの大きいマグネシウム合金を車両に実用化するには，アルミニウム合金と同様に大型幅広材を自動溶接する手法が考えられるため，それらの技術を確立することが必須となる．

表2　難燃性マグネシウム合金を車体構体に適用する際の車両製造上から見た検討項目と内容．

検討項目	内　　容
材料および材料特性の明確化	金属組織の状態，難燃性，強度，衝撃強度等の性質評価
材料プロセス法の検討	鋳造，圧延，押出の加工プロセス技術の検討
溶接の検討	最適な溶接方法の選定，自動溶接の導入
剛性確保	形材の積極的な適用，車体構造の変更
信頼性の確保	材料および構造の信頼性評価

4. 難燃性マグネシウム合金の適用に関する基礎検討

(1) 金属組織

車両用材料としては難燃・不燃性が必須である．マグネシウム合金を適用する場合にも同様であり，材料は不燃性あるいは難燃性でなくてはならない．最近，カルシウムをマグネシウム合金に添加することにより，難燃性を示すようなマグネシウム合金(以降，難燃性マグネシウム合金とする)が開発されてきた[3]．その難燃性マグネシウム合金の金属組織を調べた結果を**図5**に示す．図5には，AZ61合金に1 mass%のカルシウムを添加した難燃性マグネシウム合金の金属組織を示す．

難燃性マグネシウム合金の金属組織は，結晶粒と析出物からなり，析出物としては，β相($Mg_{17}Al_{12}$)とアルミニウムとカルシウムとの金属間化合物(Al_2Ca)が認められる．旧国鉄規格(JRS)の車両用材料の規格によると化学成分と金属組織の標準化が定められている．難燃性マグネシウム合金については，金属組織の標準化において，結晶粒度とともにβ相や金属間化合物の量，析出形態，体積率や介在物についても，材料プロセス手法と関連して整理しておくことが必要であると考えられる．

(2) 諸性質の評価

車両に適用する材料には難燃・不燃性の判定が必須である．難燃性マグネシウム合金においても，カルシウムを添加することにより難燃性であるかどうかの判定が必要になる．現在，難燃性・不燃性の判定には，旧運輸省方式の試験で評価されている．この評価試験によると，難燃性マグネシウム

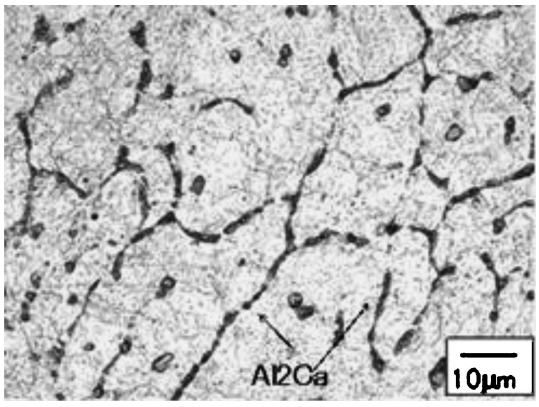

図5　Mg-6Al-Zn-Ca(AZX611)合金(圧延材)の金属組織．

合金はもちろんのこと，一般のマグネシウム合金でも不燃・難燃性を示すことが分かってきた．そこで，大容量の熱を受けたときの難燃・不燃性について調べておくことが必要となると考えられる．**図6**にマグネシウム合金(AM60合金)の難燃性に対するカルシウム添加の影響について調べた結果を示す．直接加熱を行って難燃性を調べた結果，カルシウム未添加材では発火が生じたが，カルシウム添加(2 mass%)の場合には難燃性を示すことが分かった．このことから，マグネシウム合金にカルシウムを添加することによって難燃性を確保できることを確認している．しかし，カルシウムの添加量とともに発火温度は飽和傾向にあることが示されており，カルシウムは機械的特性とのバランスを考慮して添加量を決めることが必要になる[4]．現在，このような難燃性に関する評価方法についても検討しているところである．

車両用の材料としては，機械的性質について調べることが必須である．そこでアルミニウム量を変えた難燃性マグネシウム合金を試作して耐力，引張強さおよび伸びを調べた結果を**表3**に示す．難燃性マグネシウム合金の耐力および引張強さはA6N01合金程度(耐力：220 MPa，引張強さ：240 MPa)あるいはそれ以上であることが確認できた．一般の合金と同様に高強度化すると伸びが低下する傾向にあることがわかった．現在，さらなる強度向上手法について検討しているところである．

(3) 材料加工プロセス法の検討

難燃性マグネシウム合金を車両に適用する際には，材料の加工性について調べる必要がある．一般にマグネシウム合金は稠密六方構造を有することから，すべり系が少ないために室温における加工は難しいとされる．さらにカルシウムを添加した難燃性マグネシウム合金では，金属間化合物などが晶出するために，強度は増加するものの，加工性が一般材よりも悪くなると考えられる．

一例として**図7**に難燃性マグネシウム合金に冷間曲げ試験を行った後の試験材の外観を示す．曲げ曲率6 mmの治具を用いて曲げ試験を行ったところ，曲がりの変形が生じずに破断が生じた．このことから難燃性マグネシウム合金は一般のマグネシウム合金よりも，室温における加工は難しいことが分かり，その加工には温間や熱間条件が必要になると考えられる．

図8に難燃性マグネシウム合金に573 Kで熱間圧延を行った後の金属組織を示す．このような高温における熱間圧延では1 mmの薄板程度を容易に作製できることが確認できた．また，圧延材では，圧延方向に結晶粒が伸長し，アルミニウム・カルシウム化合物の析出物は圧延方向に整列することを確認している．そのため，加工材では，結晶粒や析出物の金属組織の異方性が高いため，部材作製時には，あらかじめ車体の応力負荷方向等を定め，その方向と材料の異方性を検討せねばならないと考えられる．

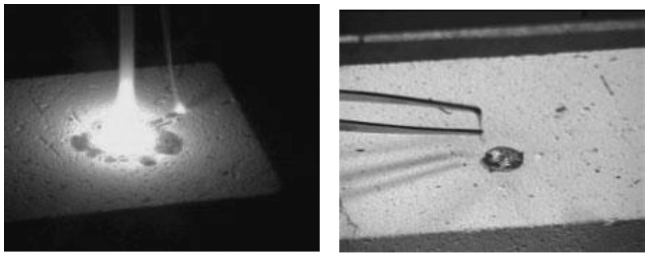

図6　マグネシウム合金(AM60合金)の難燃性に対するカルシウム添加の影響．

表3　難燃性マグネシウム合金の引張試験結果．

合金記号	Al (%)	Zn (%)	Ca (%)	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
AZX311	3.1	1.1	1.3	230	255	16
AZX611	6.2	1.1	1.2	270	285	15
AZX911	9.1	1.4	1.1	260	270	7

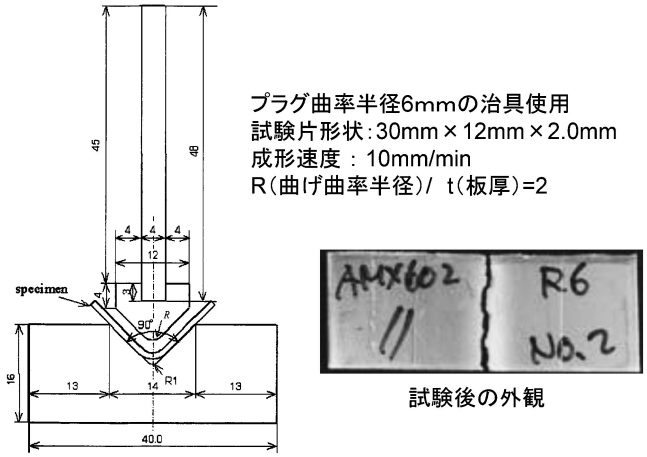

図7　Mg-6Al-Mn-2Ca(AMX602)合金のV曲げ試験の概要と試験後の外観．

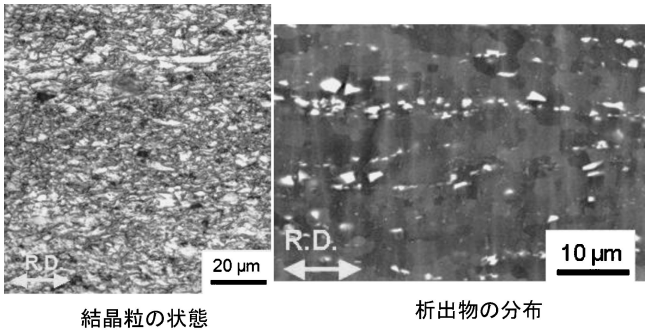

図8　Mg-6Al-Zn-Ca(AZX611)合金の圧延材の金属組織．

⑷ 溶接・接合手法の検討

現在の新幹線の構体は，全溶接組立により作製されており，また修繕もアーク溶接により行われている．難燃性マグネシウム合金の適用を考える上でも，溶接性や接合性についてあらかじめ調べておくことが必要になる．車両の製作過程には，アーク溶接(MIG 法)および摩擦攪拌接合(FSW 法)，修繕には TIG 法が用いられる．そこで，難燃性マグネシウム合金を車両に適用する際には，これらの手法の適用可能性やアーク溶接用の溶接棒の技術開発が必要になる．**図 9** に AMX602 合金の TIG 溶接材の溶接部の断面，ビード部，熱影響部および母材の金属組織を示す．ビード部では，凝固組織が認められる．また，熱影響部では，結晶粒が母材よりも粗大化していることが認められている．

TIG 溶接材を引張試験した結果，熱影響部での破断が多く認められ，継手効率は余盛有りおよび削除の状態でも80％程度あることがわかったが，電流不整などが認められる場合には，**図10**に示すような溶接割れが発生するようになることがわかった．

図11に難燃性マグネシウム合金を FSW により接合した時の接合材断面と攪拌部と熱影響部の境界の金属組織を示す．攪拌部には，FSW 特有の組織変化として認められる，塑性流動が円状に生じた状態(オニオンリング)が認められた．攪拌部の結晶粒は微細であり，主に微細な析出物で形成されていることを確認している[5]．引張試験を行った結果では，破断は攪拌部で生じず，主に熱影響部と母材の境界で認められた．FSW による接合での継手効率は90％以上を示しており，FSW が難燃性マグネシウム合金の接合に有効であると考えられる．

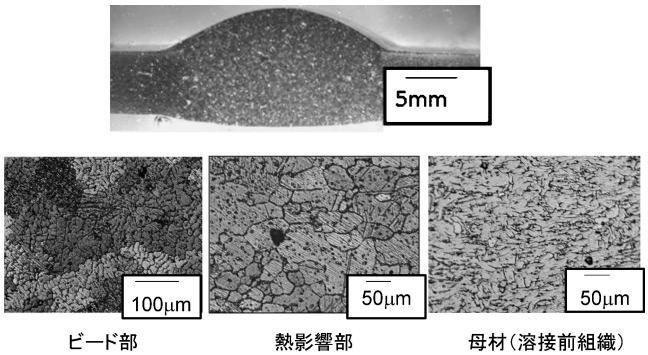

図 9　Mg−6Al−Mn−2Ca(AMX602)合金の TIG 溶接材のビード部，熱影響部および母材の金属組織観察．

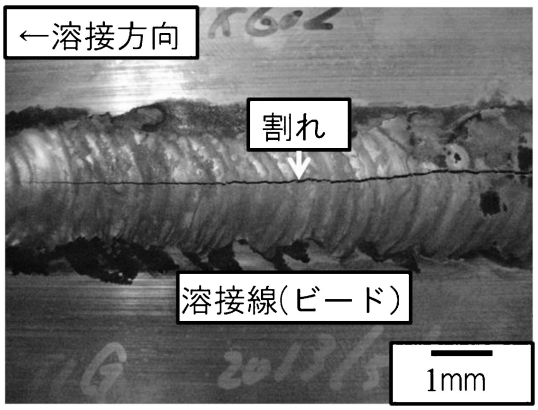

図10　Mg−6Al−Zn−Ca(AZX611)合金の TIG 溶接で認められた溶接割れ．

⑸ 剛性の検討

軽量金属材料は，鉄鋼材料と比較すると，弾性率が低い．そのため，剛性を確保する手法について検討せねばならない．剛性を確保する手段として，図１に示すような，素形材の適用が考えられ，素形材の断面２次モーメントを増加して剛性を上げる工夫が考えられる．

鉄道車両の構体の素形材では，三角トラス状の中空ホロー形材が主に用いられる．その中空ホロー形材の設計パラメータとそれらを変えた際の断面２次モーメントの計算結果を**図12**に示す．中空ホロー形材の設計パラメータとしては，高さの他，表裏面の板厚，リブ厚や構成する三角トラスの数(ピッチ)があり，これらを増加させると断面２次モーメントは増加するが，形材自体の重量も増加するようになる．そのため，断面２次モーメントと重量とを比較しながら，最適な設計を行うことが必要になる．

また重要なことは，設計解で得られる断面形状の形材が実際の押出法により出来るかどうかの検討である．そのため，設計と実製造との入念な相互の検討が必要になる．

A6N01 合金と同一剛性を有する難燃性マグネシウム合金(AMX602 合金)の中空ホロー形材を試作して曲げ試験を行った結果を**図13**に示す．図13は曲げ荷重と変位との関係を示した．剛性をあわせているために，初期の弾性挙動は6N01 合金および AMX602 合金で同一傾向にあった．またリブの座屈開始荷重も同じであった．

しかし，AMX602 合金ではリブの変形抵抗が小さく，また

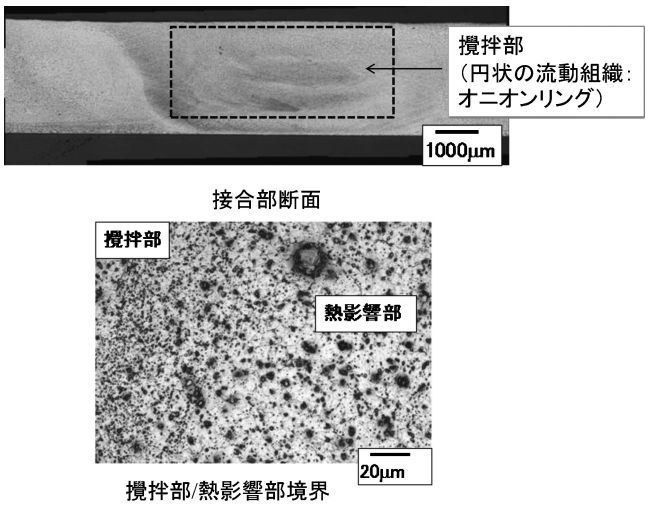

図11　Mg−6Al−Zn−Ca(AZX611)合金を FSW により接合した時の接合部断面の金属組織．

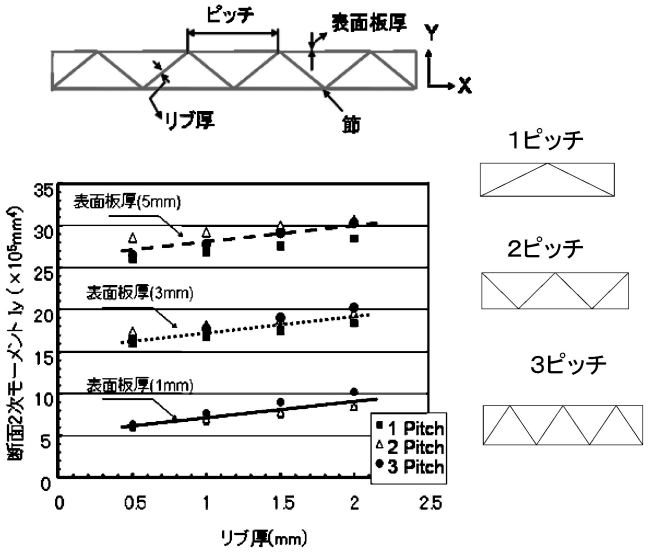

図12　ホロー形材の断面設計の一例.

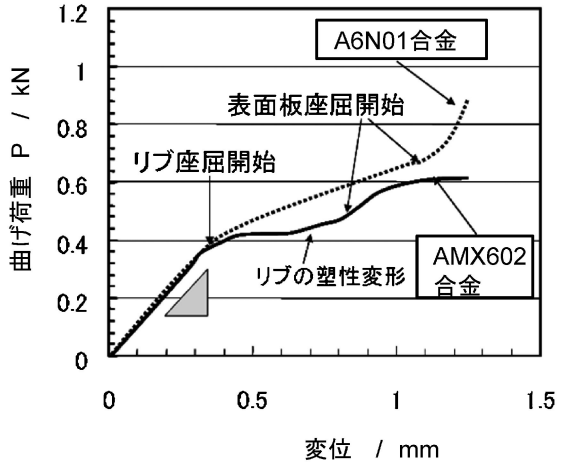

図13　A6N01 合金および Mg−6Al−Mn−2Ca（AMX602）合金製中空ホロー形材の　曲げ荷重と変位との関係.

表面板の座屈開始荷重が低かった．今後，リブ厚の設計を見直すとともに，表面板部の強度についても検討していく必要があると考えられる．また，たとえ最適な断面形状の中空ホロー形材が提示できたとしても，実車体への適用では 24.5 m 長の形材が要求されるため，中空ホロー形材の断面設計とともに長尺化の検討が必要になると考えられる．

(6)　信頼性に関する検討

車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用では，図 1 のような中空ホロー形材を FSW で接合する方法が考えられる．**図14**に示すように，中空形材を嵌合して FSW を行う場合，継手部分の幾何形状にもよるが，未接合部が継手箇所に形成される可能性がある．実用に当たり，このような未接合部が信頼性に及ぼす影響について検討しておくことが必要になる[6]．大まかな概略であるが，このような未接合部の信頼

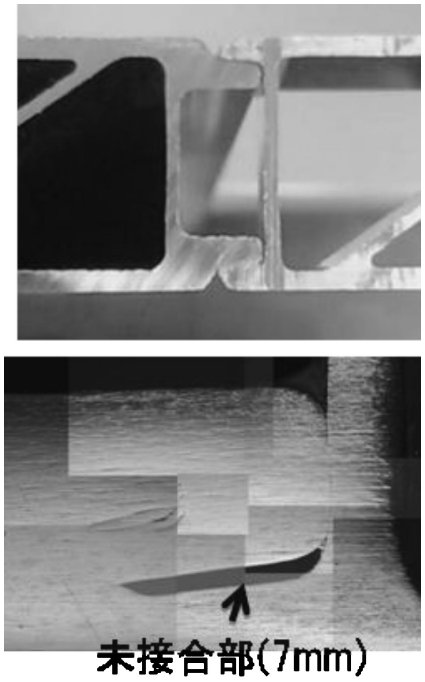

図14　Mg−6Al−Mn−2Ca（AMX602）合金製中空ホロー形材 FSW 継手に認められた未接合部.

性について検討した．今，FSW の継手効率を98％，継手効率を考慮した強度を 245 MPa，安全率を考慮して計算した許容応力を 163 MPa とし，材料の破壊じん性を 25 MPam$^{1/2}$ とする．未溶接部を欠陥とみなし，急速破壊を引き起こす臨界き裂長さは約 6 mm と計算され，このオーダの未接合部は信頼性に影響を及ぼすものと考えられる．ただし，応力のモードにもよるため，本検討の定量的な数値については，詳細な評価が必要であり，現在検討を進めているところである．また，車両製造時の非破壊検査において，5 mm 程度のき裂は検出可能であるために，このような未接合部の存在を事前に検出できる可能性があるが，FSW 部では金属組織が微細化していることや板厚が薄いことから，材質や超音波の反射モードなどの影響を受けて，評価が難しいことが想定される．そのため，FSW 継手部の非破壊検査手法の検討もまた必要になると考えられる．

5.　難燃性マグネシウム合金の適用に向けた課題

これまで，難燃性マグネシウム合金の車両への適用に対する検討項目を取り上げていくつかの技術について調査を進めているところである．しかし，金属組織，特性，加工，接合については，基本的な調査を含めて課題は多い．さらにマグネシウム合金は活性材料であるために，耐食性についても検討することが必須である．まとめてみると

- 適用候補合金とその機械的特性，加工，接合，表面処理に関するデータベースの蓄積
- 大型素形材（長さ 25 m 長）の製造技術

• 溶接・接合の周辺技術の確立および自動化の検討
• 簡便で長寿命の耐食性付与手法の開発
• 材料コストの削減

などが課題として挙げられる．

6. 終 わ り に

難燃性マグネシウム合金は近年開発された合金であり，車体構造に適用するまでには，基礎から応用に至るまでの技術開発と適用の実績が必要になる．

新幹線へのアルミニウム合金の適用の検討においても，数十年の月日を要している．適用実績のあったアルミニウム合金でさえも，長期にわたる検討が行われてきており，難燃性マグネシウム合金の適用においても，長時間を要する可能性は高い．しかし，基礎から応用までの研究を積み重ねることが実用化において大切なことである．今後も展開を重ねていく上で，皆様の協力を得ながら検討を進めて行きたいと考えている．

本研究をまとめる上で，ご助言等をいただきました，長岡技術科学大学 鎌土教授，千葉工業大学 船見教授に心より感謝申し上げます．また，接合に関しては，茨城県工業技術センター行武栄太郎博士，㈱総合車両製作所 石川武博士にご協力をいただきました．心よりお礼申し上げます．さらに，マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会の各位にもご意見等をいただき，心より厚くお礼申しあげます．

文　　献

（1）鈴木康文：軽金属，**60**(2010), 565–570.
（2）水田明能，木村敏宣：まてりあ，**43**(2004), 392–395.
（3）秋山　茂，上野英俊，坂本　満，平井寿敏，北原　晃：まてりあ，**39**(2000), 72–74.
（4）坂本　満，上野英俊：Synthesiology, **2**(2009) 127–136.
（5）柴柳敏哉：軽金属，**57**(2007), 416–423.
（6）川崎　健，山田敏久，稲　佳彦，江角昌邦，中村英之：日本機械学会論文集 A 編，**71**(2005), 170–176.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
森　久史
1996年　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
1996年～1998年　英国バーミンガム大学金属工学科/材料応用学際研究センター　博士研究員
1998年～1999年　東京大学先端科学技術研究センター助手
1999年 4 月―現職
専門分野：金属材料工学，破壊力学，溶接・接合
◎新幹線電車の軽量化に対する材料開発に従事，アルミニウム合金やマグネシウム合金の車両への適用に関する研究を中心に活動．
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

森　久史

藤野謙司

栗田　健

千野靖正

齋藤尚文

野田雅史

駒井　浩

小原　久