

【公開版】

令和2年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「輸送機器の軽量化に資する高強度新難燃性マグネシウム合金溶加材を用いたAI制御溶接技術による高速鉄道車両用腰掛フレームの開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 一般財団法人 大阪科学技術センター

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	…	1
1-2	研究体制	…	3
1-3	成果概要	…	3
1-4	当該研究開発の連絡窓口	…	4

第2章 本論

2-1	研究開発実施内容		
	【1】新難燃性 Mg 合金溶接材（溶加材および部材）の開発	…	5
	【2】AI 制御溶接技術の開発	…	15
	【3】溶接の実用検査技術の研究開発	…	22

第3章 全体総括

3-1	研究開発成果	…	28
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	…	29

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

2015年に採択されたパリ協定で、地球温暖化の対策として、日本は2030年までに温室効果ガスの排出量を26%削減する目標が定められた。温室効果ガス排出量の9割はエネルギー起源のCO<sub>2</sub>であり、その削減が急務となっている。輸送機器業界はその一翼を担っており、各車両メーカーはCO<sub>2</sub>排出量の削減に取り組んでいる。なかでも高速鉄道は最も環境に優しい輸送手段であり、CO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく寄与できる。それには高速鉄道の更なる高速化が必要で、車両の軽量化が求められている。

一方、実用金属の中で最も軽量であるマグネシウム合金（以下、Mg合金）は、弱点である難燃性と溶接性を同時に解決した実用化が未だに図られておらず、構造物として市場に普及するまでには至っていない。本共同体では、Mg合金の将来性を見込んで、その加工技術の開発に取り組んできた。そのひとつとして、ものづくり中小企業・小規模事業者連携推進事業の支援を受け、3年間におよびアルミニウム合金（以下、アルミ合金）に替わるMg合金製高速鉄道車両用腰掛フレームの開発を行った。この活動の結果、事業化には腰掛けフレームの更なる高強度化と信頼性確保の必要性を明らかにした。本研究開発により、これらの問題を解決し、新難燃性Mg合金製腰掛フレームの実用化を図り、日本の鉄道事業者のニーズに答えていく。今まで取り組んできた研究開発の背景と課題の概要を図1-1に示す。

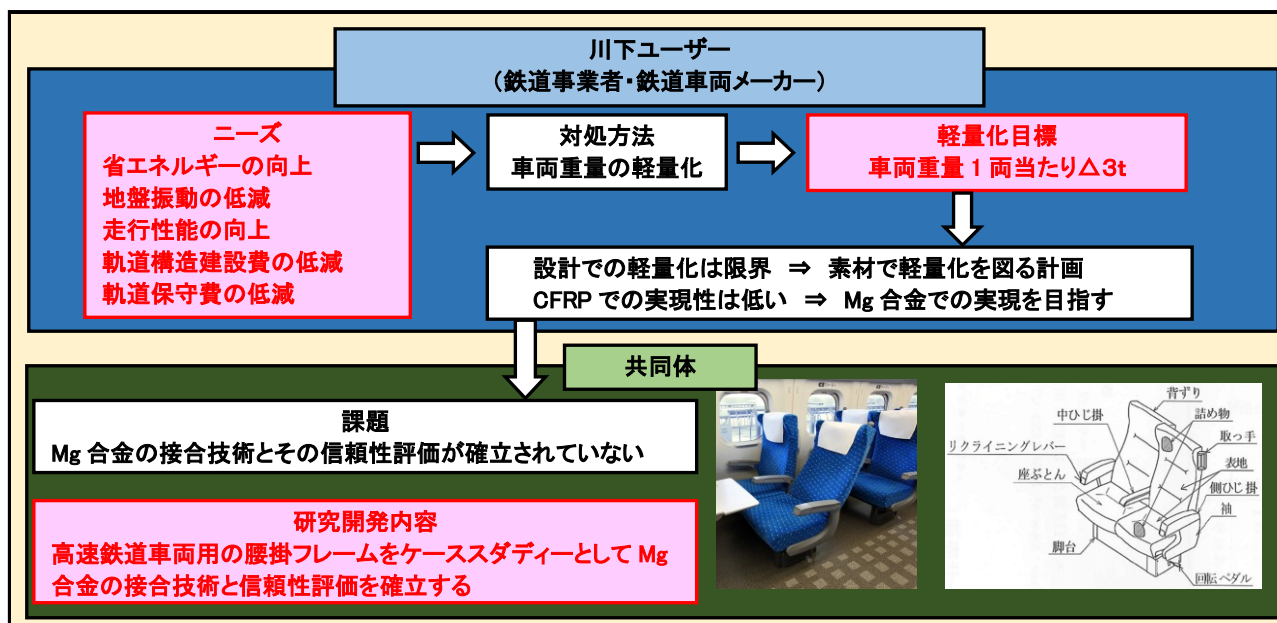


図 1-1 研究開発の背景

(2) 研究目標

高速鉄道車両用腰掛フレームをケーススタディーにして、新難燃性Mg合金の溶接技術の確立を図る。ケーススタディーの研究目標を表1-1に示す。

表 1-1 研究目標

高度化目標項目	従来技術	新技術(実証)	新技術(本開発)	
車両用腰掛フレーム重量の軽量化	7.9kg/人	6.0kg/人	6.0kg/人	24%軽量化
車両用腰掛フレームの疲労強度	65MPa	55MPa	65MPa 以上	アルミ同等
高速鉄道車両運行 CO <sub>2</sub> 排出量	---	---	年間 4,958t	削減

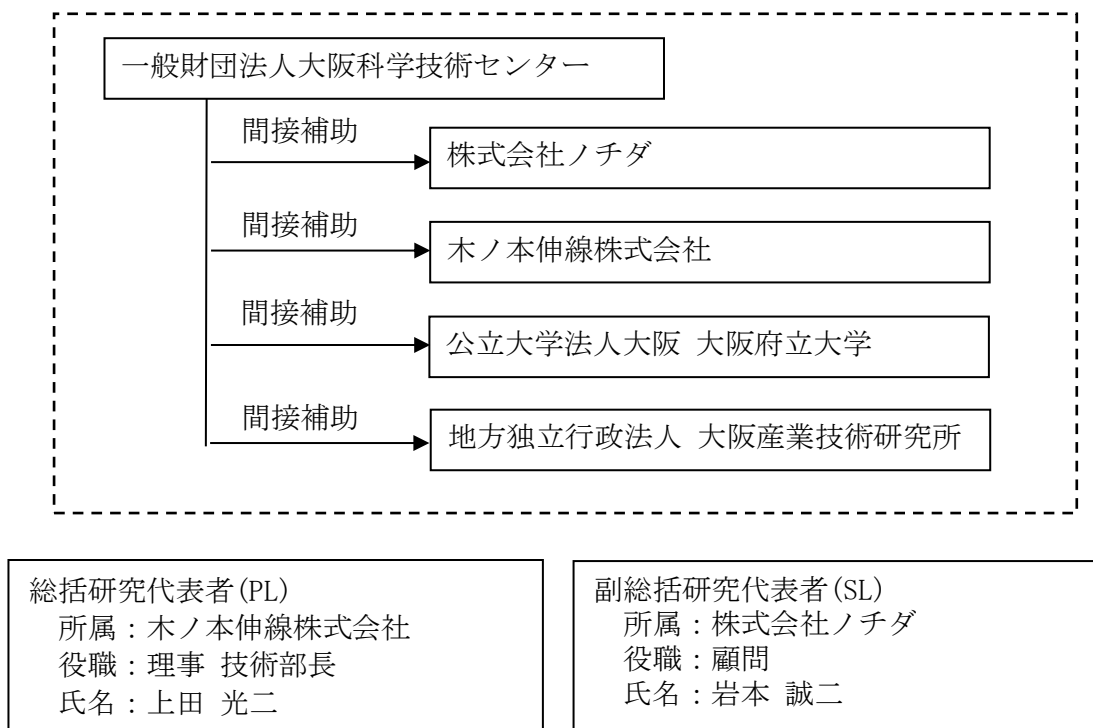
また、研究目標を達成するために解決しなければならない課題ごとに対応させたサブテーマを設定し、それぞれの研究目標を表 1-2 に示す。

表 1-2 サブテーマごとの研究目標

テーマ	サブテーマ	目標値
【1】 新難燃性Mg合金溶接材（溶接材および部材）の開発	【1-1】 世界初 Ga 入り新難燃性 Mg 合金溶接材の開発	溶接継手部強度が部材強度の90%以上 [部材は JIS13B 号試験片、溶接継手は JIS1A 号試験片を用いて引張試験にて評価。引張速度は 5mm/min]
	【1-2】 高速押出型新難燃性 Mg 合金部材の開発	外形の許容差±0.50 mm以内、肉厚の許容差±15%以内 [JISH4202 に基づく部材寸法の測定]
	【1-3】 新難燃性 Mg 合金溶接材の基本溶接技術の開発	40,000 回試験時の応力振幅（疲労強度）が 65MPa 以上 [JIS1A 号試験片を用いて軸引張疲労試験にて評価]
	【1-4】 新難燃性 Mg 合金溶接材の耐衝撃値とじん性値の取得	耐衝撃値及びじん性値を取得し、構造設計にフィードバック [V もしくは U ノッチ試験片を用いて耐衝撃試験、曲げ試験片とコンパクト試験片を用いて破壊じん性試験で評価]
【2】 AI 制御溶接技術の開発	【2-1】 新難燃性 Mg 合金製腰掛フレーム構造最適化の設計	腰掛フレーム重量 6.0 kg 以下 各部材の剛性をアルミ合金部材と同等 [3次元シミュレーションによる評価]
	【2-2】 新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームの溶接技術の開発	溶接実証システムの導入と溶接条件適正範囲の一覧表構築 [すみ肉溶接試験片および腰掛フレームによる評価]
	【2-3】 溶接実証システムで AI 制御溶接技術を研究開発	溶接近傍部温度 600±20°C(想定値) [すみ肉溶接試験片および腰掛フレームによる評価]
【3】 溶接の実用検査技術の研究開発	【3-1】 溶接画像のリアルタイム撮影と溶接欠陥の計測技術開発	溶接欠陥の相関の構築 JISZ3040 による溶接確認試験の評価
	【3-2】 溶接状態が強度に与える影響の AI 解析技術の構築	溶接の内部欠陥 φ0.3mm 以上の発見ならびに溶け落ちの検知
	【3-3】 新難燃性 Mg 合金製腰掛フレーム強度及び耐久性の評価	一席当たりの座面荷重 100 kg 以上 座席回転繰り返し試験 40,000 回以上 [JISE7104 による評価]

## 1-2 研究体制

(研究組織)



## 1-3 成果概要

## 【1】新難燃性 Mg 合金溶接材（溶加材および部材）の開発

- ・ Ga 量の異なる新難燃性 Mg 合金溶加材を試作し、MIG 溶接した溶接継手を作り、引張試験等を行い溶接継手の評価を実施した。この評価で、より高強度になる最適な Ga 入り新難燃性 Mg 合金溶加材の成分量を決定した。引張試験は余盛りを除去した試料において実施し、最大継手強度は、目標値である母材の強度の 90%である 240.3MPa を超える非常に高い強度を示した。
- ・ 高速押出型新難燃性 Mg 合金製腰掛フレーム部材を押し出し加工し、中実形材、中空形材の試作を行い、形材外形の許容差±0.50mm 以内、形材肉厚の許容差±15%以内を実現した。
- ・ Ga 入り新難燃性 Mg 合金溶加材を用いて難燃性マグネシウム合金押出および圧延板材を MIG 溶接した溶接継手を作り、引張試験等を行い評価することにより、適正な溶接条件範囲を決定した。また、4 万回程度の低サイクル数領域での疲労特性向上因子を明らかにし、小型試験片においては疲労試験の目標値を達成し、大型試験片においても目標値とほぼ同等の疲労特性を達成した。
- ・ Ga 入り新難燃性 Mg 合金溶加材を用いて MIG 溶接した溶接継手の耐衝撃性とじん性値を取得した。

## 【2】AI 制御溶接技術の開発

- ・ Al 合金製腰掛フレーム一人当たりの座席重量を新難燃性 Mg 合金製に置換することにより Al 合

## 【公開版】

金と同等の剛性を備えて 6.0 kg以下、24%以上軽量化の当初（申請時）目標に対して、6.7 kg、23%軽量化を達成した。

- ・新難燃性 Mg 合金の溶接条件適正範囲を明確化した。
- ・赤外線サーモグラフィ（高機能熱画像カメラ）が計測可能な溶接近傍部位置において、溶接の適正条件下で  $500 \pm 20^{\circ}\text{C}$  となることを確認した。

### 【3】溶接の実用検査技術の研究開発

- ・新難燃性 Mg 合金溶接時の電流、電圧、ガス流量、画像、温度、音の各データと溶接内部欠陥には相関関係の無いことを確認した。画像データが溶け落ちの検知に有効であること、レーザ 3 次元形状測定器により、Al 合金外観試験の合否判定基準に記載されている欠陥の種類のうち、人による溶接外観検査の一部をレーザ 3 次元形状測定器に置き換えることができる可能性を見出した。
- ・溶け落ちを検知する AI 解析技術を構築した。アーク音によりビードの乱れを検知する AI 解析技術の構築が可能であることを見出した。
- ・信頼性試験において、座席回転繰り返し試験で、背ずりを除き、脚台、台枠、座面は 40,000 回以上の耐久要求をクリア、座面荷重試験では、脚台、台枠、背ずり、座面すべての構成部品が、一席当たり 100 kg 以上の耐久要求をクリアした。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒581-0092 大阪府八尾市老原 9 丁目 30 番地

株式会社ノチダ

取締役 部長 三輪 容照

Email : ncd12000@nochida.co.jp TEL : 072-994-1921 Fax : 072-990-2007

## 第2章 本論

## 2-1 研究開発実施内容

## 【1】新難燃性 Mg 合金溶接材（溶加材および部材）の開発

## 【1-1】世界初 Ga 入り新難燃性 Mg 合金溶加材の開発

これまでの研究により、難燃性 Mg 合金 MIG 溶接体の継手強度を向上するためには、溶融部の固溶強化による強化が有効であることが明らかになっている。例えば、母材よりも Al 含有量の多い組成の溶加材を用いることにより、継手強度は向上する。しかしながら、Al 含有量が多すぎる場合、 $Mg_{17}Al_{12}$  相の形成により延性が低下し、その結果、強度が低下してしまうことが明らかになっている。このような場合、第 2 の固溶強化元素として Ga の添加が有効であることも明らかになっている。そこで、母材 AXM4102 に対して、Al 含有量を変化させ、Ga を添加した溶加材を用いて MIG 溶接継手を作製し、継手強度に及ぼす溶加材組成の影響を検討した。用いた溶加材は Al を 6 ~ 9wt%、Ca を 1wt% 含む AZX611、AZX711、AZX811、AZX911 の各合金に Ga を添加した合金 (AZX611Ga、AZX711Ga、AZX811Ga、AZX911Ga) である。溶加材の試作工程は、鋳造、押出、伸線からなり、それらの加工風景の一例を写真 2-1-1 および写真 2-1-2 に示す。Ga を添加することにより各工程共に汎用的な難燃性 Mg 合金とは試作条件が異なることが把握でき、実行することにより試作に成功した。

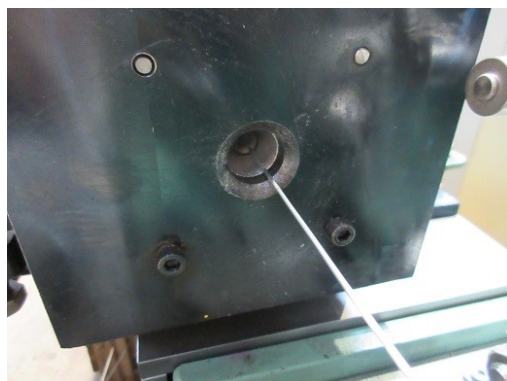


写真 2-1-1 押出風景



写真 2-1-2 伸線風景

次に、図 2-1-1 に引張試験の結果を示す。引張試験は余盛りを除去した試料において実施している。いずれの溶加材を用いた場合も、最大継手強度は母材の強度の 90% である 240.3MPa を超える非常に高い強度を示した。また、強度の平均値についても大きな差はみられなかった。しかしながら、611、611Ga、711Ga 継手の表面には数百  $\mu\text{m}$  のブローホールが観察された。疲労強度は欠陥サイズに依存するため、これら大きなブローホールが形成する溶加材は望ましくないと考えられる。

図 2-1-2 に各種溶加材組成を用いた MIG 溶接継手の強度と伸びの関係を示す。Al 含有量が 9% になると伸びが低下していることがわかる。これは、前述した  $Mg_{17}Al_{12}$  相の形成によるものと推察される。これまでの結果から、延性の乏しい溶接体においては疲労強度が低下する傾向が得られている。これらの結果から、AZX811Ga を溶加材として選択した。

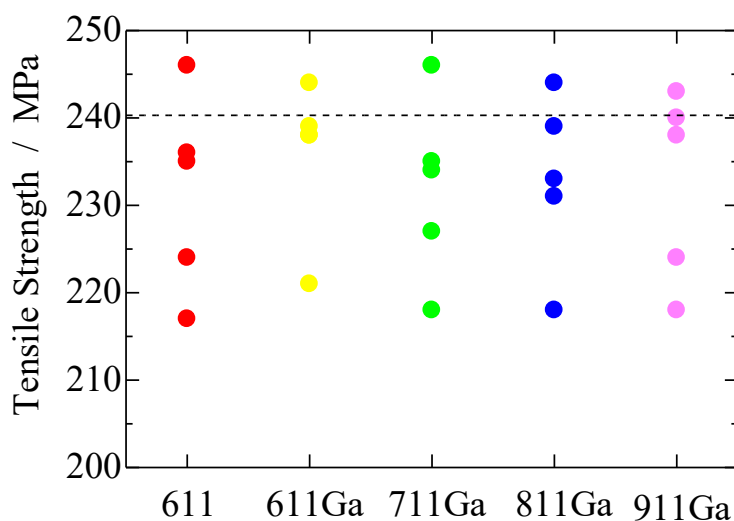


図 2-1-1 難燃性 Mg 合金 MIG 溶接体の継手強度に及ぼす溶加材組成の影響

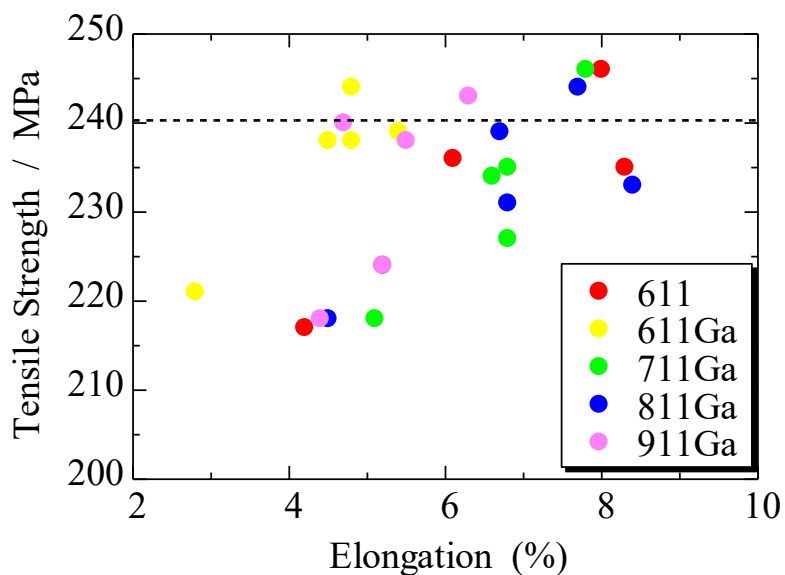


図 2-1-2 各種溶加材組成を用いた難燃性 Mg 合金 MIG 溶接体の継手強度と伸びの関係

ベース合金を AZX811 として固定し、適正 Ga 量を検討した。図 2-1-3 に 4 種類の Ga 添加量の溶加材を用い、様々な溶接条件で引張試験を行った際の溶接入熱量と引張強度の関係を示す。0.8%Ga 添加した溶加材を用いた場合に最高強度を示すとともに、いずれの溶接条件においても高い値を示すことがわかる。以上の引張試験結果より、適正溶加材組成は AZX811+0.8wt%を選定した。

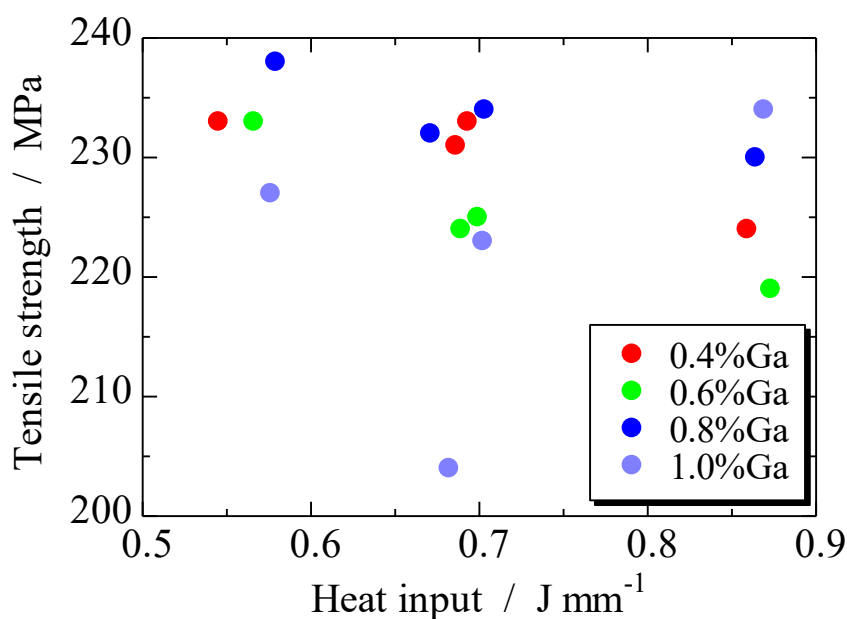


図 2-1-3 Ga 量を変化させた溶加材を用いた AZX811MIG 溶接体の継手強度

溶融部の結晶粒微細化等の手段を用いて、継手溶融部の強度が上がるよう、目標値の達成に向けて検討をした結果、ベース合金を AZX912 とし、溶加材は AZX912+0.8wt%を選定し、従来方法で試作し、適正溶接条件を探索した。

### 【1-2】高速押出型新難燃性 Mg 合金部材の開発

押出板材および腰掛フレーム部材用として試作した高速押出型新難燃性 Mg 合金の形材 15 型の精度アップに成功した。試作内訳は、中実形材が 3 型で中空形材が 12 型である。その試作品の一例を写真 2-1-3、写真 2-1-4 に示す。腰掛フレーム形材形状の基本的な考え方は、Mg 合金製形材それぞれが Al 合金製の形材と等価曲げ剛性になるようにした。

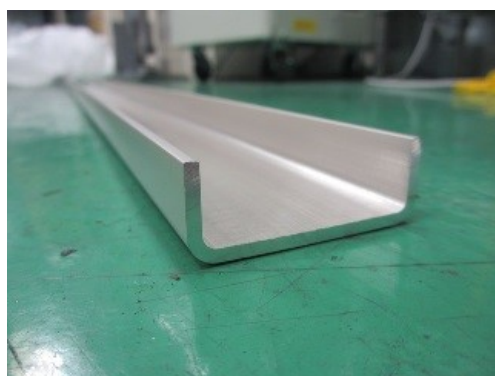


写真 2-1-3 試作した中実形材例

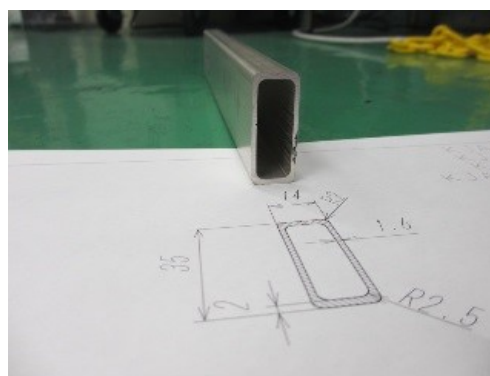


写真 2-1-4 試作した中空形材例

試作では、新難燃性 Mg 合金形材 15 型のうち、中空形材 1 型の肉厚のみが JISH4204 「マグネシ

ウム合金押出型材」で規定する肉厚許容差から外れた。また、中空型材 1 型の外寸法が腰掛フレームを構成するうえで問題があったため、この 2 型の型材のダイスを狙い寸法を変えた新規ダイスを起型することで解決し、外形許容差±0.50mm 以内、肉厚許容差±15%以内を実現した。

【1-3】新難燃性 Mg 合金溶接材の基本溶接技術の開発

目標値である 65MPa において 4 万回以上の疲労寿命を達成するための因子について検討した。図 2-1-4 に得られた疲労試験結果をまとめたものを示す。母材を AXM4102 からより高強度な AZX811 に変更することにより、4 万回における疲労強度が上昇することがわかる。また、母材が AXM4102 であっても試験片寸法を小さくすることにより 4 万回での疲労強度が向上することがわかる。これは、破壊が欠陥を起点に生じていることに起因しており、試験片寸法が小さくなることにより大きな欠陥の存在確率が下がることによるものであると考えられる。さらに、ショットピーニング処理を施すことにより、65MPa における疲労寿命は大幅に向上する。これは圧縮残留応力の影響であると考えられる。以上の結果から、母材としては高強度な AZX811 を用いる方針が得られた。

他の因子を明らかにするために、過去に得られた疲労試験結果をまとめ、4 万回での疲労特性向上指針を検討した。その結果、母材を高強度化したうえで、Ca 添加量を 2% にすることにより 4 万回での疲労特性向上の可能性が見いだされた。そこで、溶加材組成を AZX912+0.6Ga として実験を行った。引張試験により溶接条件の最適化を行い、最適条件で溶接した試料について疲労試験を行った。図 2-1-5 に疲労試験結果を示す。比較のため、昨年度得られた溶加材 AZX811+0.8Ga の結果も示す。63MPa において 41,132 回、65.25MPa において 39,312 回の疲労特性を示し、目標である Al 合金と同等の疲労特性が得られた。

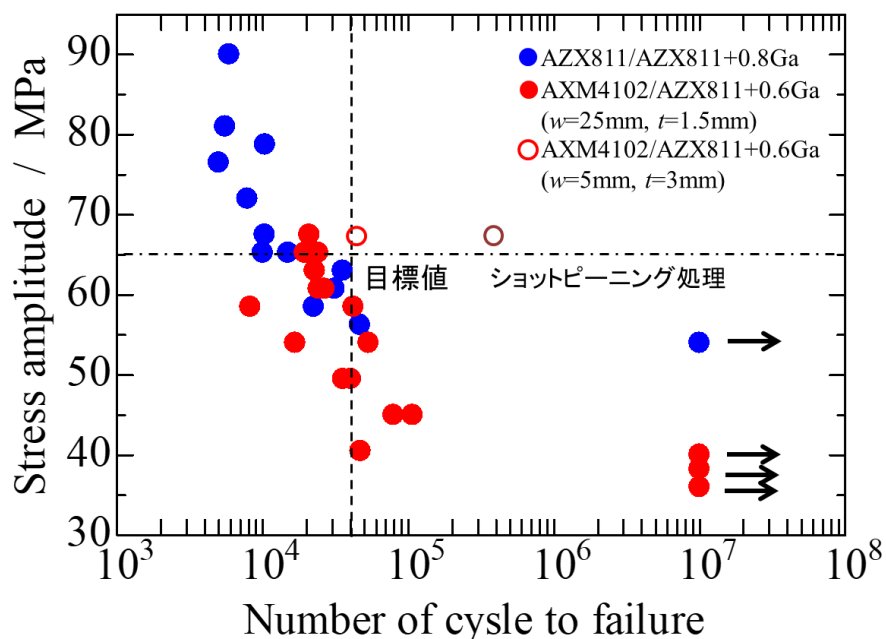


図 2-1-4 得られた疲労試験結果のまとめ

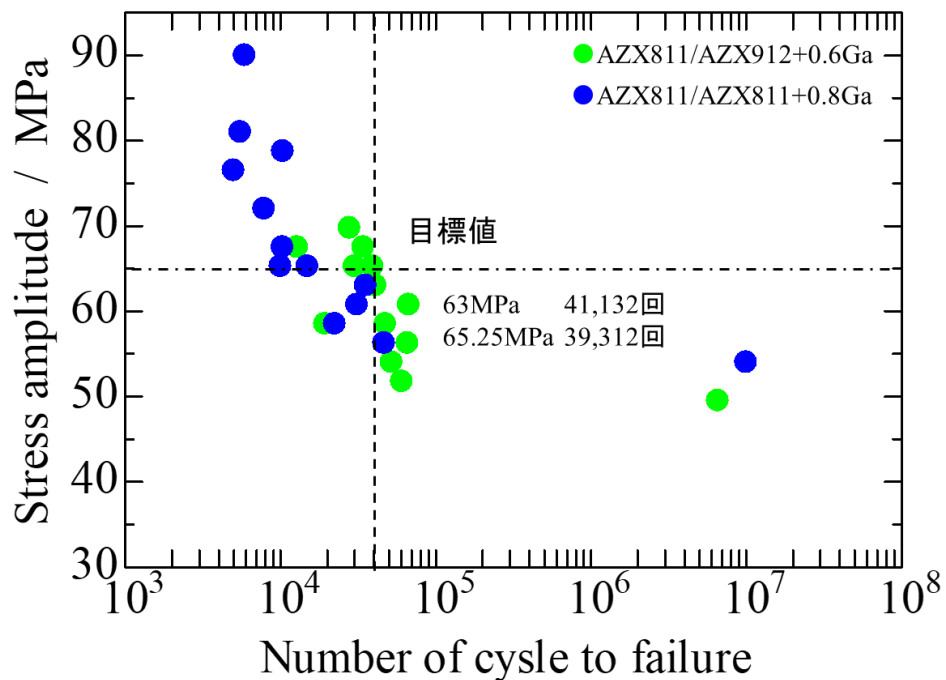


図 2-1-5 AZX811/AZX912+0.6Ga の疲労試験結果

溶加材を AZX811+0.8Ga から AZX912+0.6Ga にすることにより、4 万回程度の疲労特性は向上したものの、 $10^7$  回程度の高サイクル数領域での疲労特性は低下した。これは高サイクル数領域の疲労特性は固溶強化によるき裂進展速度の低下が重要であることが明らかになっており、これを反映した結果であると考えられる。逆に、4 万回程度の低サイクル数領域での疲労特性は他の因子の影響が大きいことが明らかになった。その因子について検討を行った。

図 2-1-6 に X 線回折により得られた溶加材組成と第 2 相の関係を示す。溶加材に AZX912+0.6Ga を用いることにより  $\text{Al}_2\text{Ca}$  と  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  の第 2 相量が増加していることがわかる。このような第 2 相は延性を阻害し高サイクル領域での疲労特性を低下させることが知られているが、低サイクル数領域では逆の結果になっている。このような第 2 相量増加のメリットとして、結晶粒微細化が考えられる。組織観察により結晶粒径を算出したところ、溶加材に AZX912+0.6Ga を用いることにより約 13% 結晶粒径が微細化していることが明らかになった。低サイクル数領域の疲労特性においては、このような結晶粒微細化が固溶量減少および延性低下を上回る効果があったのではないかと推察される。

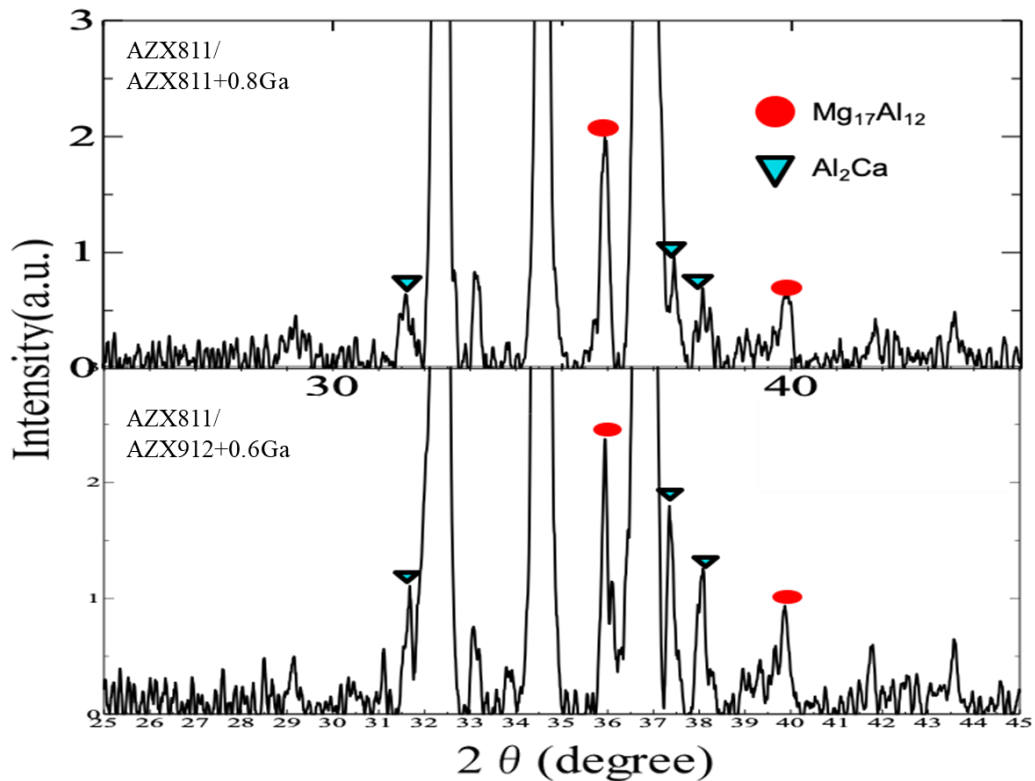


図 2-1-6 X線回折により得られた溶加材組成と第2相の関係

以上の結果から、4万回程度の低サイクル数領域での疲労特性を向上する因子として、以下の因子が明らかになった。

①母材の高強度化、②Ca量を2%に増加、③圧縮残留応力の付与、④試験片サイズ効果  
これらの因子を制御することにより、信頼性の高い難燃性マグネシウム合金溶接継手を得ることが可能となる。

#### 【1-4】新難燃性Mg合金溶接材の耐衝撃値とじん性値の取得

板厚1.5mmのAXM4102およびAZX811を母材としてAZX912-0.6Gaの溶加材で溶接した溶接継手材に対して、シャルピー衝撃試験、破壊じん性試験および疲労試験を行った。疲労試験については、比較として板厚3mmのAXM4102母材にAZX811-0.6Gaの溶加材で溶接した溶接継手材を用いている。また、溶接継手の表面処理、具体的には精密ショットピーニング(WPC: Wide Peening and Cleaning)が諸特性及ぼす効果を明らかにするために、表面処理材に対してもシャルピー衝撃試験、破壊じん性試験および疲労試験を行った。

##### 1.4.1 表面処理材の作製

一般的に、ショットピーニングなどの表面処理を施すことによって、材料表面に圧縮の残留応力が付与され、疲労特性が向上することが知られている。そこで、2種類の母材AXM4102およびAZX811(板厚はともに1.5mm)をAZX912-0.6Gaの溶加材で溶接した溶接継手材(それぞれ4102-912、811-912と称する)に対して、機械研磨後、WPC処理を行った。なお、諸特性に

及ぼす処理条件の影響を調査するために、2つの条件で処理した。1つ目は、粒径 50  $\mu\text{m}$  のホウケイ酸ガラスを使用し、噴射距離 100 mm、噴射圧力 0.4 MPa で処理を行った (Shot 強と称する)。2つ目は、粒径 20  $\mu\text{m}$  のホウケイ酸ガラスを使用し、噴射距離 100 mm、噴射圧力 0.2 MPa で処理を行った (Shot 弱と称する)。

次に、WPC 処理材に対して X 線応力測定法により、残留応力を調査した。図 2-1-7 に溶接部中央を 0 mm として、溶接部中央からの距離と残留応力値の関係を示す。なお、溶接のビード幅は約 8mm であったので、図の 0 mm はビード中央部、 $\pm 4$  mm はビード端部、 $\pm 8$  mm および  $\pm 12$  mm は母材部である。また、正の残留応力値は引張応力を表し、負の残留応力値は圧縮応力を表している。図より、研磨材、Shot 弱、Shot 強の順で圧縮応力が高くなるのがわかる。4102-912 ではビード中央部のほうがビード端部よりも高い圧縮応力を示したが、811-912 ではビード端部のほうがビード中央部よりも高い圧縮応力を示した。これは、溶接状態による違いが現れていると考えられる。

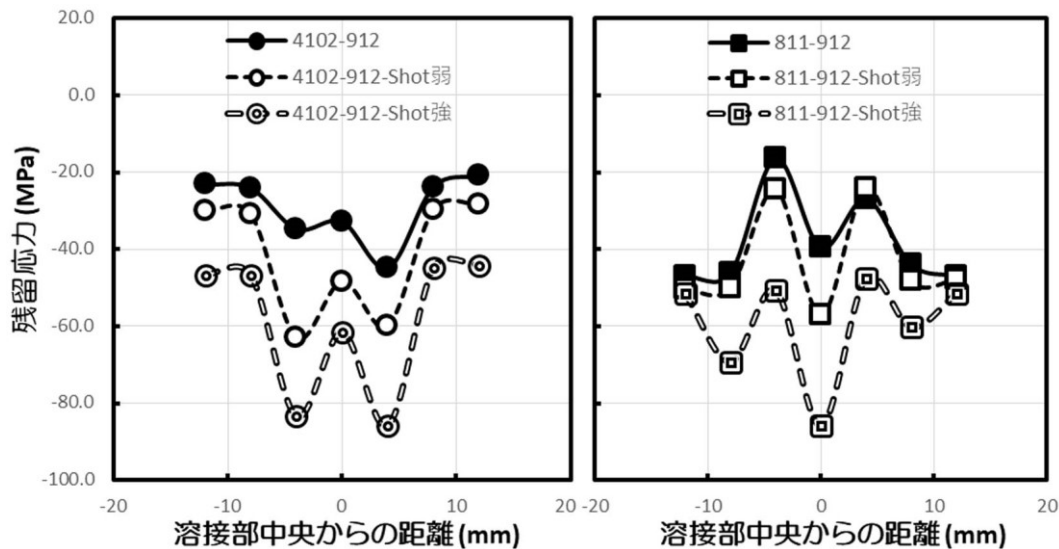


図 2-1-7 各溶接継手 (板厚 1.5 mm) の溶接部中央からの距離と残留応力

#### 1.4.2 シャルピー衝撃試験および破壊じん性試験

板厚 1.5 mm の 4102-912 および 811-912 の表面研磨材と Shot 強材に対してシャルピー衝撃試験および破壊じん性試験を行った。シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2242 における V ノッチ試験片を用いて実施した。破壊じん性試験は、米国試験材料協会の ASTM (American Society for Testing and Materials) E 1820 の弾塑性破壊じん性試験法に従って実施した。試験片の形状はコンパクトテンション試験片であり、き裂が溶接部中央を溶接方向に沿って進展するよう試験片を作製した。図 2-1-8 にシャルピー衝撃試験結果と破壊じん性試験結果 (応力拡大係数) の関係を示す。今年度の結果に加え、昨年度の結果も中実シンボルで示している。図より、4102-912 および 811-912 は、昨年度の結果よりも衝撃値および破壊じん性値ともに低下した。これは、溶加材が AZX811 から AZX912 に変更したことにより、溶接部の A0 濃度が高くなったことが原因と考えられる。また、衝撃値と応力拡大係数との関係は、昨年度と同様に直線関係で表すことができ、その直線は昨年度の結果と一致した。これにより、簡易的な衝撃試験結果か

ら応力拡大係数を予測することが可能である。

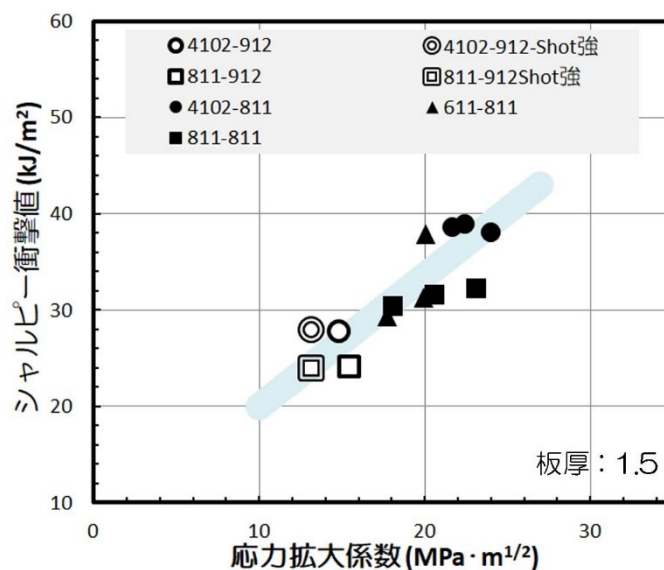


図 2-1-8 板厚 1.5 mm 溶接継手材におけるシャルピー衝撃値と応力拡大係数の関係

#### 1.4.3 疲労試験

板厚 1.5 mm の 4102-912 および 811-912 の表面研磨材、Shot 弱材および Shot 強材に対して疲労試験を行った。試験片形状は、平行部幅 25 mm、長さ 75 mm である。疲労試験は、油圧サーボ試験機を用い、室温、大気圧の状態で応力比  $R=0.1$ 、周波数 20 Hz の正弦波形による繰返し引張荷重で行った。図 2-1-9 に、S-N 線図を示す。図より、WPC の有無、WPC の強弱による疲労特性への明確な効果は観察されなかった。WPC の効果が現れなかった原因を調査するために、疲労試験後の試験片表面の EBSD 解析と破面観察を行った。図 2-1-10 は疲労試験後の試験片表面に観察されたき裂近傍の EBSD 測定結果である。荷重負荷方向は図の上下方向である。図より、き裂は欠陥から生じており、き裂の進展は結晶の粒内を主応力方向に対して垂直方向に進展していることがわかる。写真 2-1-5 は疲労試験後の破面である。この写真においてもき裂が欠陥から発生しており、応力の繰返しでき裂が進展し、あるき裂長さに達した後、不安定破壊に至ることがわかる。つぎに、応力振幅 65 および 70 MPa で試験を行った試験片に対し、破壊の起点となった欠陥の面積を算出し、その平方根と破断回数の関係を図 2-1-11 に示す。図より、欠陥面積の平方根と破断回数は曲線の関係を示すことがわかる。図には本研究の目標値である 40000 回（応力振幅 65 MPa 時）の線も示している。これにより、目標値を達成するためには欠陥の面積の平方根を約 100  $\mu\text{m}$  以下に抑制する必要があることが示された。以上の結果より、本研究において WPC の効果が現れなかった原因は、WPC よりも溶接継手材に内在する欠陥が疲労破壊に大きな影響を与えるためであると考えられる。一方、板厚 3 mm の AXM4102 を母材とし、AZX811-0.6Ga の溶加材で溶接した溶接継手材の表面研磨材と Shot 強材を用いて疲労試験を行った。この疲労試験では、試験片平行部を溶接ビードのみで構成させるため、試験片平行部幅を 5 mm、長さを 5 mm とした。図 2-1-12 に疲労試験結果を示す。比較として、板厚 1.5 mm の溶接継手材の試験結果も示している。図より、板厚 3 mm の試験片については、

## 【公開版】

WPC により疲労寿命が延びており、目標破断回数を大きく上回ることがわかった。目標破断回数を上回るような疲労寿命が得られたのは、試験片寸法による影響も考えられるため、今後詳細な検討が必要であるが、この実験によって WPC の疲労特性改善効果が明らかとなった。この結果は、今後の更なる溶接継手材の高品質化を実現するための一助となり得る。

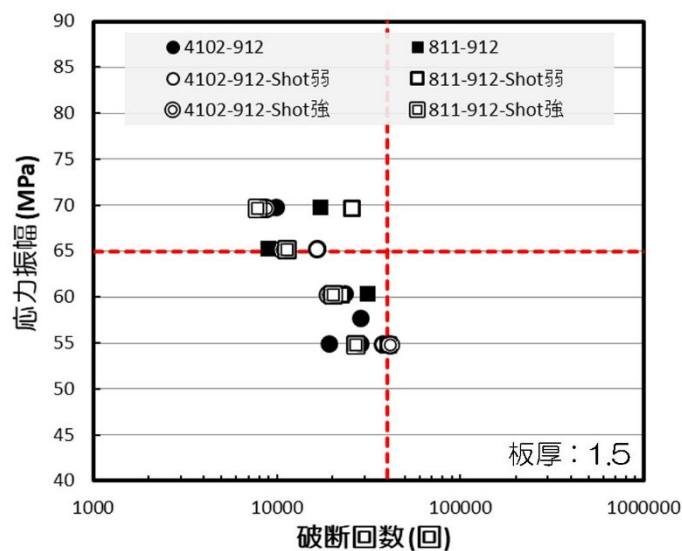


図 2-1-9 板厚 1.5 mm 溶接継手材の疲労試験結果

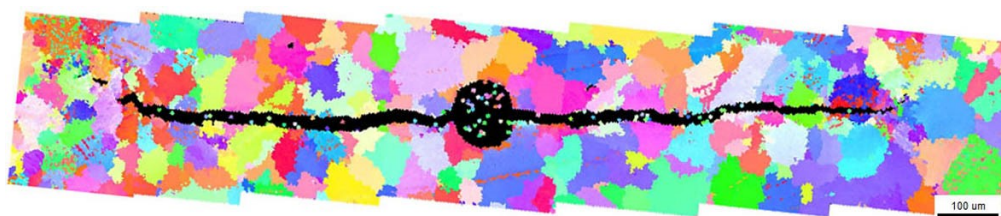


図 2-1-10 板厚 1.5 mm 溶接継手材における疲労試験後試料表面の EBSD 解析

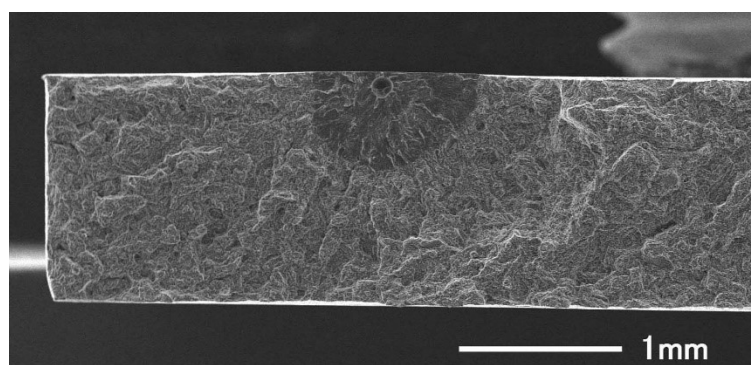


写真 2-1-5 板厚 1.5 mm 溶接継手材における疲労試験後の破面

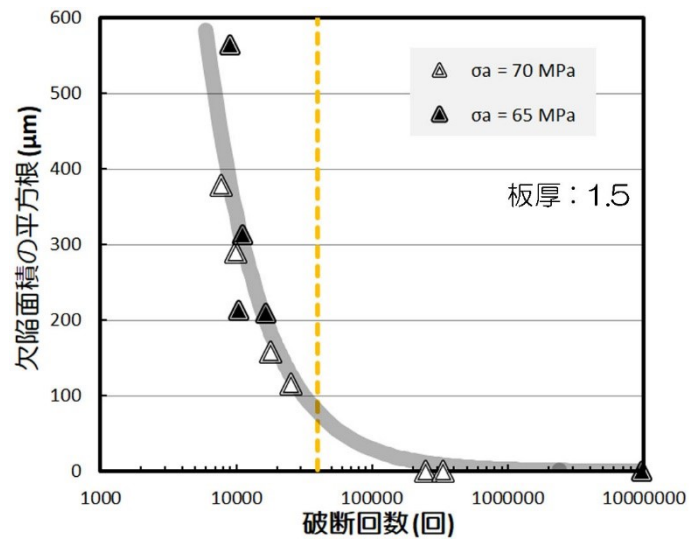


図 2-1-11 板厚 1.5 mm 溶接継手材における欠陥面積と破断回数の関係

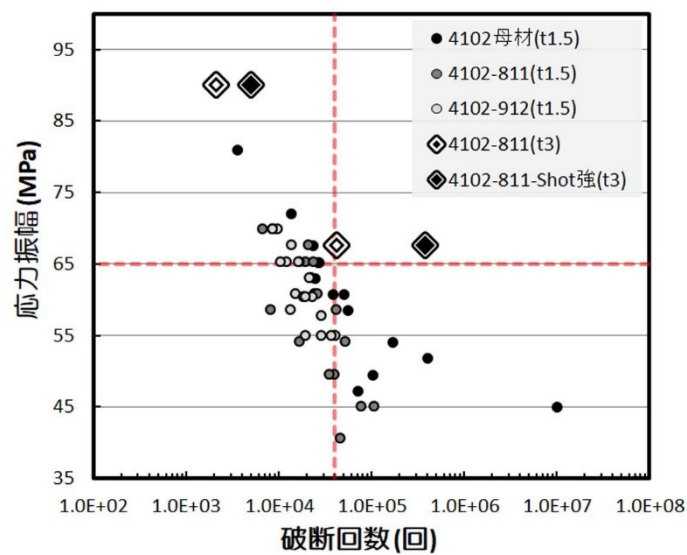


図 2-1-12 板厚 3 mm 溶接継手材を用いた疲労試験結果 (比較として板厚 1.5 mm の結果も表示)

## 【2】AI制御溶接技術の開発

## 【2-1】新難燃性Mg合金製腰掛フレーム構造最適化の設計

写真2-2-1に新難燃性Mg合金製腰掛フレームの構成部品を示す。



写真2-2-1 新難燃性Mg合金製腰掛フレームの構成部品

新難燃性Mg合金製腰掛フレームの座席回転繰り返し試験では、脚台と台枠で想定外の割れや亀裂が度々発生したが、その都度、他の研究開発員やアドバイザーと協議を行い、原因の追究と適切な対策を施し、軽量化と要求強度を兼ね備えた新難燃性Mg合金製腰掛フレームを設計した。他の研究開発員やアドバイザーとの協議風景を写真2-2-2と写真2-2-3に示す。



写真2-2-2 研究開発員やアドバイザーとの協議 写真2-2-3 研究開発員やアドバイザーとの協議

新難燃性Mg合金製腰掛フレームの製作では、フレームを構成する4部品のうち、最も強度が求められる脚台を製作し、まず、脚台の座席回転繰り返し試験をクリアした後、他の部品製作を行い、最終的にオール新難燃性Mg合金製腰掛フレームとして、信頼性試験（座席回転繰り返し試験、座面荷重試験）を実施することにした。

1回目の新難燃性Mg合金製脚台4号機の座席回転繰り返し試験では、既存のAl合金製の台枠、背ずり、座面を組み付け、試験を実施した。結果、40,000回以上の耐久要求に対して、25,000回実施後の確認時に、脚台裏側の回転盤取付けボス4箇所、すべての溶接部に亀裂が発見された。これはCAE解析により最も応力集中する脚部の剛性を上げたため脚部の剛性は強化されたが、従来伝わらなかった力のしわ寄せがボス部に伝わったと推測され、ボス部の溶接箇所を増やすことで剛性向上の対策を図った。写真2-2-4と写真2-2-5に亀裂状況、図2-2-1にCAE解析結果、図2-2-2に対策内容を示す。

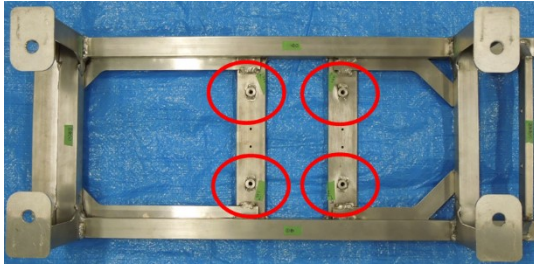


写真 2-2-4 ホス部 4 箇所での亀裂

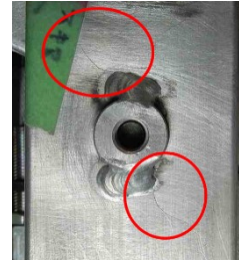


写真 2-2-5 ホス部亀裂の拡大

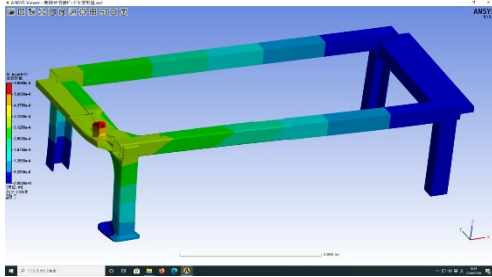


図 2-2-1 CAE 解析の結果

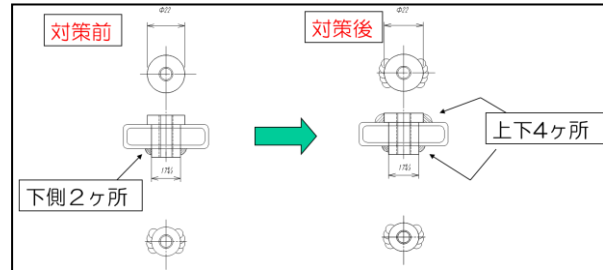


図 2-2-2 対策内容

また、脚部プレート裏に微小な亀裂も発見された。これは溶接時の入熱が大きすぎたことによりひずみが発生したと推測され、溶接方法の変更による入熱低減で対策を図った。写真 2-2-6 と写真 2-2-7 に亀裂状況、図 2-2-3 に対策内容を示す。

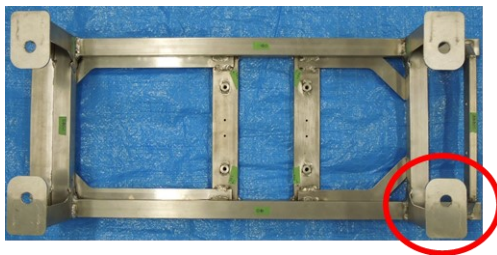


写真 2-2-6 プレート裏の亀裂



写真 2-2-7 プレート裏亀裂の拡大

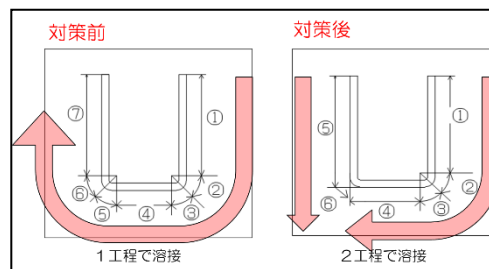


図 2-2-3 対策内容

以上の対策を脚台 5 号機で実施し、再び既存の A0 合金製の台枠、背ずり、座面を組み付け、2 回目の座席回転繰り返し試験を実施した。結果、15,000 回実施後の確認時に、1 回目と同様にボス 2 箇所の溶接部に亀裂が発見されたため、ボス部を全周溶接で修正し、15,001 回から試験を継続した。しかし、30,000 回実施後の確認時に、再びボスの溶接部に亀裂が発見されたため、亀裂部の修正溶接後に 30,001 回から試験を継続したところ、40,000 回実施後の

## 【公開版】

確認時に、母材（ボスを溶接している角パイプ）そのものの割れ（破断）が発見された。母材の割れ（破断）した現象を考察した結果、脚部の剛性が強化されたしわ寄せで、ボスに想定以上の応力が集中し、母材そのものの剛性が耐え切れなかったためと考えられ、①母材の肉厚とサイズを大きくする、②ボスサイズを大きくし溶接長を長くすることで剛性向上の対策を図った。写真 2-2-8 に割れ（破断）状況、図 2-2-4 に対策内容①と図 2-2-5 に対策内容②を示す。

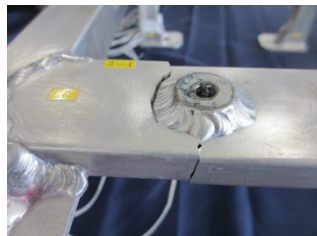


写真 2-2-8 割れ（破断）状況

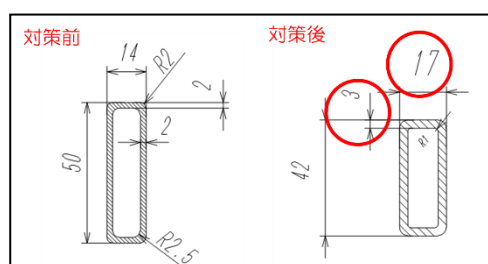


図 2-2-4 対策内容①

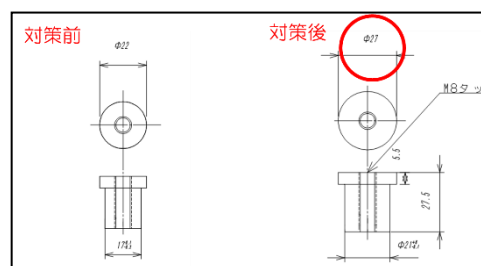


図 2-2-5 対策内容②

以上の対策を脚台 6 号機で実施し、再度、座席回転繰り返し試験を実施した結果、40,000 回をクリアすることができた。この結果を受けて、腰掛フレームを構成する脚台、台枠、背ずり、座面のすべてを新難燃性 Mg 合金で製作した。写真 2-2-9 と写真 2-2-10 に製作状況、写真 2-2-11 にオール新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームを示す。



写真 2-2-9 脚台製作状況

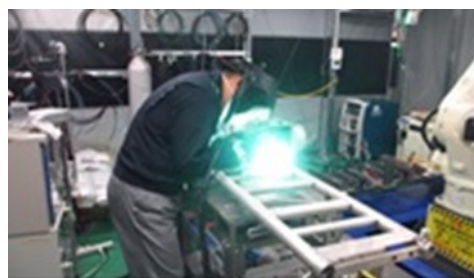


写真 2-2-10 台枠製作状況



写真 2-2-11 オール新難燃性 Mg 合金製腰掛フレーム

オール新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームによる座席回転繰り返し試験を実施したが、18,934 回目で台枠前方丸パイプの母材に割れ（破断）が発生した。母材の割れ（破断）した現象を考察した結果、回転が停止する衝撃で背ずりが前後に振動し、その力がリクライニング用シリンダーを通じて割れ（破断）部に集中したためと考えられ、①母材の肉厚を大きくする、②補強プレート追加による剛性向上の対策と、③リクライニング用シリンダー取付けブラケットの形状変更による応力分散の対策を図った。写真 2-2-12 と写真 2-2-13 に割れ（破断）状況、図 2-2-6 に対策内容①、図 2-2-7 に対策内容②、図 2-2-8 に対策内容③を示す。



写真 2-2-12 母材の割れ（破断）



写真 2-2-13 母材の割れ（破断）の拡大

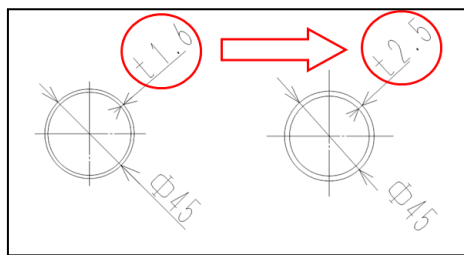


図 2-2-6 対策内容①

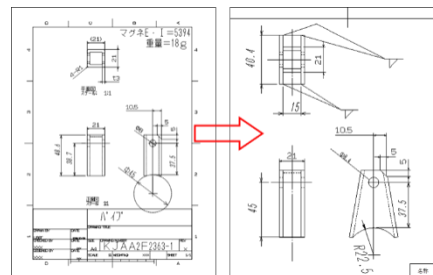


図 2-2-7 対策内容②

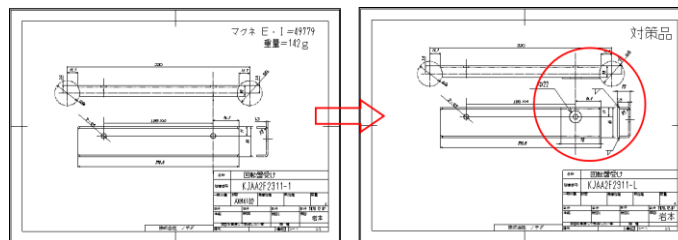


図 2-2-8 対策内容③

## 【公開版】

以上の対策を施し、再度、座席回転繰り返し試験を実施した結果、脚台、台枠、座面は40,000回以上の耐久要求をクリアした。ただし、背ずりは両方のサイド角パイプに母材の割れ（破断）と亀裂が発見されたが、検査確認のミスにより合否判定が不可能な状況となった。写真 2-2-14 に割れ（破断）状況と写真 2-2-15 に亀裂状況を示す。



写真 2-2-14 割れ（破断）状況



写真 2-2-15 亀裂状況

新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームの製作と並行して、溶接による発生熱を逃がし、温度を安定させるための水冷放熱溶接治具の有効性を調査した。材質 AZX611、板厚  $t = 1.5 \text{ mm}$  と  $t = 3.0 \text{ mm}$  の試験片にて、溶接治具を冷却しない場合と、治具冷却用サーモチラーで溶接治具を  $10^\circ\text{C}$  と  $40^\circ\text{C}$  で冷却した場合の溶接結果を確認した。写真 2-2-16 に水冷放熱溶接治具、写真 2-2-17 に治具冷却用サーモチラーを示す。



写真 2-2-16 水冷放熱溶接治具



写真 2-2-17 治具冷却用サーモチラー

溶接結果は目視によるビードの外観、X線撮影による内部欠陥、引張試験を確認したが、結果はすべて合格範囲であり、新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームに使用されるような薄板では、治具の冷却による溶接への影響は少ないことが判明した。図 2-2-9 に  $t = 1.5 \text{ mm}$  の引張試験結果、図 2-2-10 に  $t = 3.0 \text{ mm}$  の引張試験結果を示す。

母材	材質	AZX611	
	板厚	$t = 1.5 \text{ mm}$	
溶加材	材質	AZX811 + 0.8Ga	
	線径	$\phi 1.2 \text{ mm}$	
試験片仕様		JIS 1A号	
治具冷却温度	冷却無し	$10^\circ\text{C}$	$40^\circ\text{C}$
最大応力(Mpa)	250.4	234.0	245.3
継手効率(%)	86.0	80.4	84.3

図 2-2-9  $t = 1.5 \text{ mm}$  の引張試験結果

母材	材質	AZX611	
	板厚	$t = 3.0 \text{ mm}$	
溶加材	材質	AZX811 + 0.8Ga	
	線径	$\phi 1.2 \text{ mm}$	
試験片仕様		JIS 1A号	
治具冷却温度	冷却無し	$10^\circ\text{C}$	$40^\circ\text{C}$
最大応力(Mpa)	247.4	249.4	248.5
継手効率(%)	82.4	83.1	82.8

図 2-2-10  $t = 3.0 \text{ mm}$  の引張試験結果

【2-2】新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームの溶接技術の開発

溶接電圧を固定し、溶接電流と溶接速度を変化させた材質 AZX611、板厚  $t=1.5\text{ mm}$  と  $t=3.0\text{ mm}$  の突き合わせ溶接試験片を JIS Z 3811:2000 に準拠した目視による溶接ビードの外観、マクロ検査による溶け込み、X線撮影による内部欠陥で評価し、適正条件の範囲を抽出した。図 2-2-11 と図 2-2-12 に抽出範囲を示す。

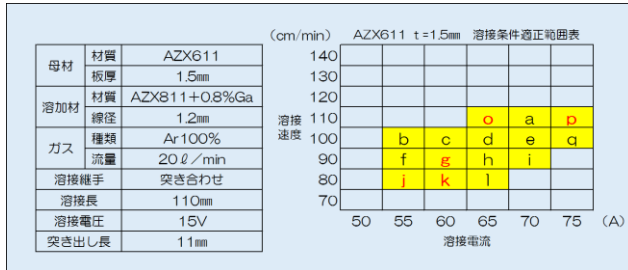


図 2-2-11 板厚 1.5 mm の溶接条件抽出範囲

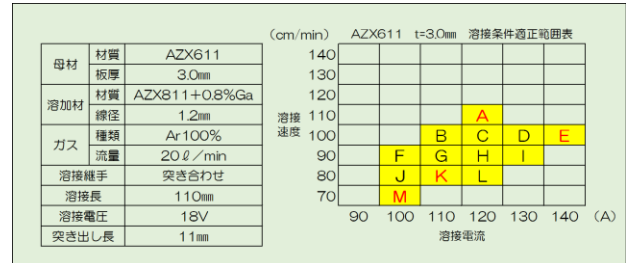


図 2-2-12 板厚 3.0 mm の溶接条件抽出範囲

次に抽出した範囲の上限と下限で JIS 1A 試験片による引張試験、JIS 3 号試験片による溶接金属曲げ試験、JIS Z 2242 V ノッチ試験片によるシャルピー衝撃試験を評価し、溶接条件の適正範囲を明確にした。図 2-2-13 と図 2-2-14 に引張試験の結果、図 2-2-15 と図 2-2-16 に溶接金属曲げ試験の結果、図 2-2-17 と図 2-2-18 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。

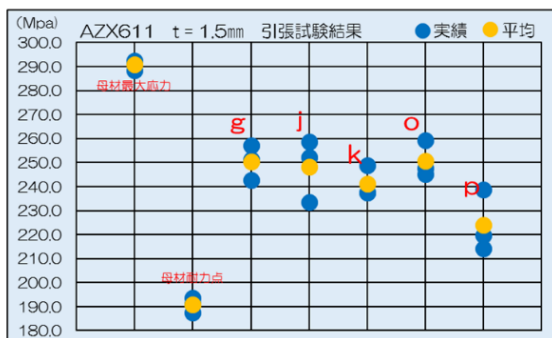


図 2-2-13 板厚  $t=1.5\text{ mm}$  引張試験の結果

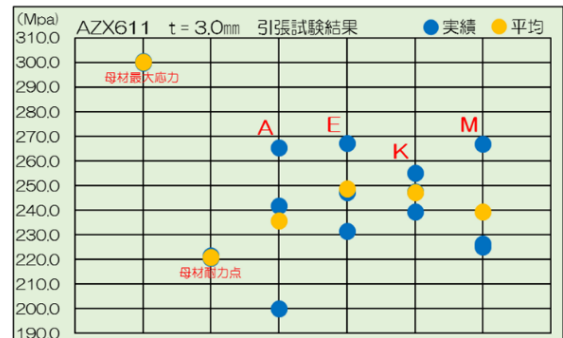


図 2-2-14 板厚  $t=3.0\text{ mm}$  引張試験の結果

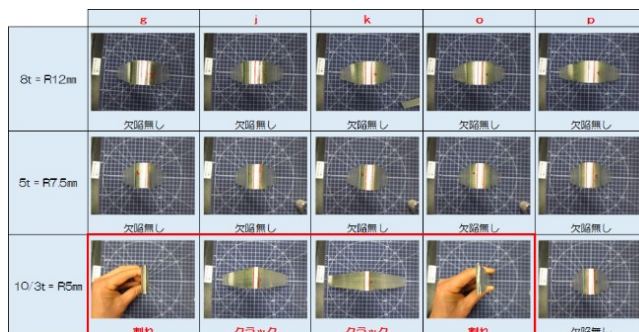


図 2-2-15 板厚  $t=1.5\text{ mm}$  溶接金属曲げ試験の結果

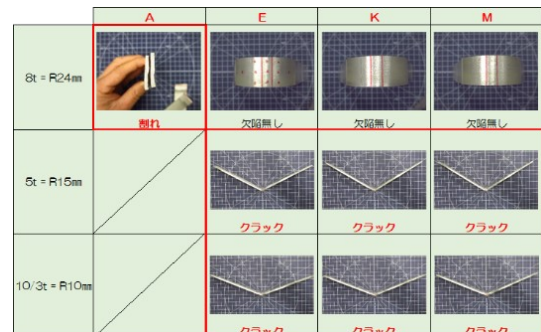


図 2-2-16 板厚  $t=3.0\text{ mm}$  溶接金属曲げ試験の結果

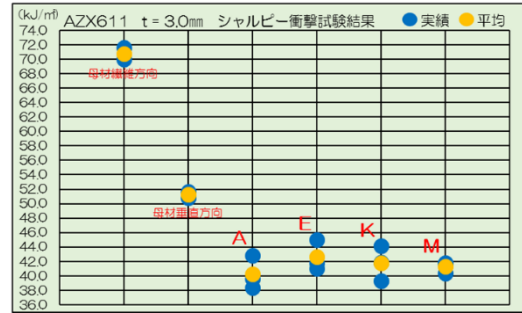
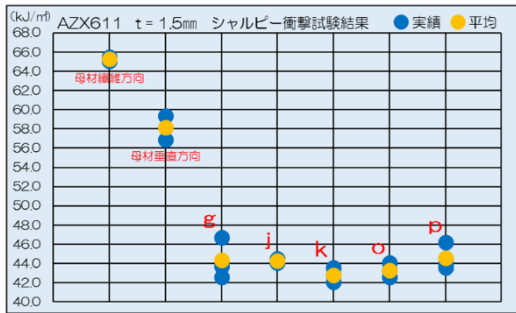


図 2-2-17 板厚 t = 1.5 mm シャルピー衝撃試験の結果

図 2-2-18 板厚 t = 3.0 mm シャルピー衝撃試験の結果

以上の評価により、新難燃性 Mg 合金溶の溶接条件適正範囲は比較的広い範囲となることが判明した。図 2-2-19 と図 2-2-20 に溶接条件の適正範囲を示す。

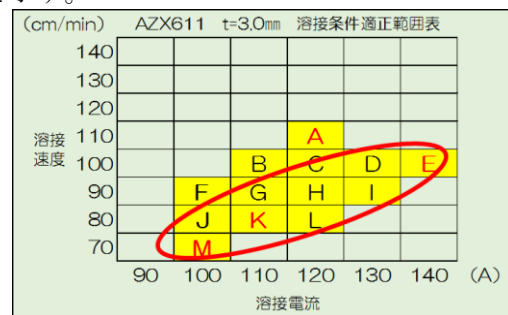
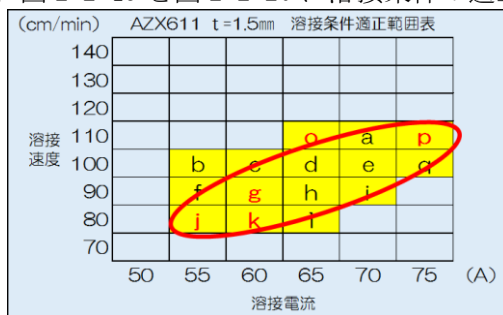


図 2-2-19 板厚 t = 1.5 mm 溶接条件適正範囲

図 2-2-20 板厚 t = 3.0 mm 溶接条件適正範囲

この適正範囲を基に溶接継手や溶接姿勢の変化による溶接条件の変化を調整したところ、適正範囲を基準として溶接箇所（継手種類）、溶接姿勢、要求品質などに応じて最適条件を選定する必要性が判明し、新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームの製作に反映した。図 2-2-21 に継手と姿勢による適正条件を示す。












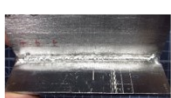
	横向	立向 下進	立向 上進
 突合せ	 電流 : 80 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min	 電流 : 80 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min	 電流 : 70 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min
 重ね	 電流 : 80 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min	 電流 : 80 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min	 電流 : 80 A 電圧 : 18V 速度 : 70cm/min
 T字隅肉	 電流 : 100 A 電圧 : 18 V 速度 : 80cm/min	 電流 : 110 A 電圧 : 18 V 速度 : 80cm/min	 電流 : 110 A 電圧 : 18 V 速度 : 80cm/min

図 2-2-21 継手と姿勢による適正条件

【2-3】溶接実証システムでAI制御溶接技術を研究開発

昨年度は放射温度計による溶接近傍部の温度測定に取り組んだが、溶接時のアーク光とヒューム煙による影響があり、放射温度計での温度測定を断念し、新たに赤外線サーモグラフィ（高機能熱画像カメラ）による溶接近傍部の温度測定に取り組んだ。当初は溶接近傍部の温度を  $600 \pm 20^\circ\text{C}$  と想定していたが、赤外線サーモグラフィ（高機能熱画像カメラ）が計測可能な溶接近傍部位置では、溶接の適正条件下で  $500 \pm 20^\circ\text{C}$  となることを確認した。写真 2-2-18 に赤外線サーモグラフィ（高機能熱画像カメラ）による温度測定を示す。

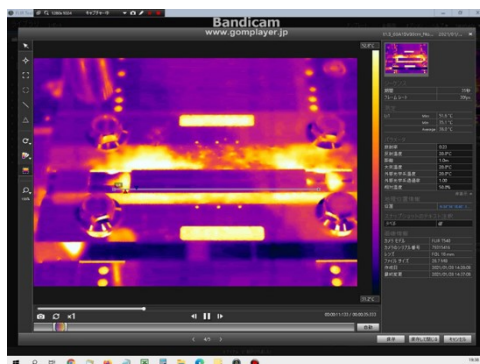


写真 2-2-18 赤外線サーモグラフィ（高機能熱画像カメラ）による温度測定

【3】溶接の実用検査技術の研究開発

【3-1】溶接画像のリアルタイム撮影と溶接欠陥の計測技術開発

マルチ入力データ収集システムにより、新難燃性 Mg 合金溶接時の電流、電圧、ガス流量、画像、温度、音の各データを同期収集し、溶接欠陥との相関を調査したが、これらのデータと溶接内部欠陥（ブローホール）には相関関係の無いことが判明した。ただし、画像データが溶け落ちの検知に有効であることは確認された。また、レーザ 3 次元形状測定器の設定により、Al 合金外観試験の合否判定基準に記載されている欠陥の種類のうち、①ビード幅、②余盛高さ（ビード高さ）、③のど厚不足（開先埋め不足）、④ビード不整（表ビードの凹凸）、⑤ビード不整（ビード幅の不揃い）、⑥アンダカット、⑦オーバラップ（オーバハンク）の 7 項目が検出可能であることを確認し、人による溶接外観検査の一部をレーザ 3 次元形状測定器に置き換えることができる可能性を示した。写真 2-3-1 にレーザ 3 次元形状測定器、写真 2-3-2 に測定画像を示す。



写真 2-3-1 レーザ 3 次元形状測定器

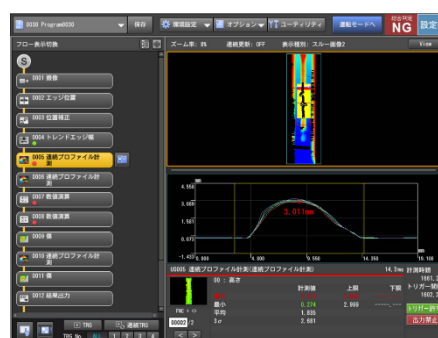


写真 2-3-2 測定画像

## 【3-2】溶接状態が強度に与える影響のAI解析技術の構築

溶接データの一覧を表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 溶接データ一覧

入出力	データ項目	サンプリング周期
入力候補	溶接機データ（電流、電圧）	0.1ms
入力候補	溶接時の高速カメラ	1ms
入力候補	データロガー（溶接アーク音、放射温度計、ガス流量）	0.01ms
出力	X線CT（内部欠陥位置）	
出力	外観写真（溶け落ち位置）	

出力となる X 線 CT で内部欠陥の位置データを解析し、外観写真で溶け落ち位置を解析した。その後、欠陥位置データと入力候補の溶接機データ（電流、電圧）、溶接時の高速カメラ、データロガー（溶接アーク音、放射温度計、ガス流量）のデータとの相関性を調査した。入力候補データである溶接機（電流、電圧）、高速カメラ、データロガー（溶接アーク音、放射温度計、ガス流量）のデータは相互に同期されていないため、ヒューリスティックに同期を行って、X 線 CT 像および外観写真の欠陥位置データとの相関を調査した。溶接電流の波形、高速カメラの輝度値の波形、溶接アーク音の波形が合致するように、溶接機データと溶接時の高速カメラ、データロガーのデータを同期させた。

X 線 CT による内部欠陥の位置データ、外観写真での溶け落ちの位置データは新たに作成した python プログラムにより抽出した。入力候補の溶接機（電流、電圧）、高速カメラ、データロガー（溶接アーク音、放射温度計、ガス流量）のデータは時間軸でのデータであり、欠陥位置は空間軸のデータであるため、両者は溶接機に記録された時間軸上の溶接機位置情報と位置同期用のマーカー穴位置情報を照合することでヒューリスティックに同期を行った。

溶接欠陥と溶接データとの相関を調査した。その結果、溶け落ちを除く内部欠陥位置と溶接機（電流、電圧）、高速カメラ、データロガー（溶接アーク音、放射温度計、ガス流量）のデータとの間に相関は見出すことはできなかった。

図 2-3-1 にガス流量の時間変化を示す。ガス流量はノイズを含む一定値であり、溶接時間もしくは溶接位置に対して情報を含んでいないデータであることが判明した。

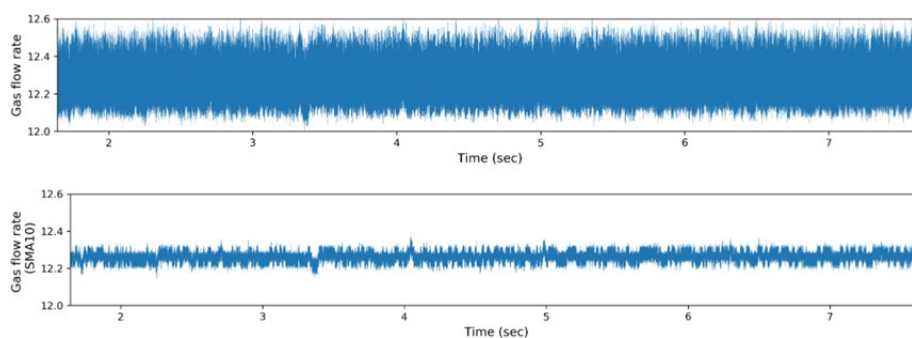


図 2-3-1 ガス流量の時間変化。生データ（上）と 10 点移動平均（下）。

## 【公開版】

また、新たにアーク音とビード状態の相関関係を調査した。溶接アーク音の波形データは溶接パルスの周期に合わせて特徴が見られるが、音の波形データは数百万行におよぶため、新たに作成した python プログラムによりスペクトログラムで可視化を行った。図 2-3-2 に溶接時間と溶接位置の同期を行った溶接ビードの外観写真と溶接アーク音のスペクトログラムを示す。高音・大音量のアーク音が発生している場所ではビードの外観が乱れており、ノチダでの経験則と同じくビードの乱れはアーク音と相関が認められた。溶接 1 試料あたり 2 領域に分けて評価したところ、各領域を正解率 91%、精度 82%でアーク音からビードの乱れを検知できることが判明した。アーク音とビード状態の相関関係が存在し、アーク音によりビードの乱れを検知する AI 解析技術が構築可能であることを見出した。

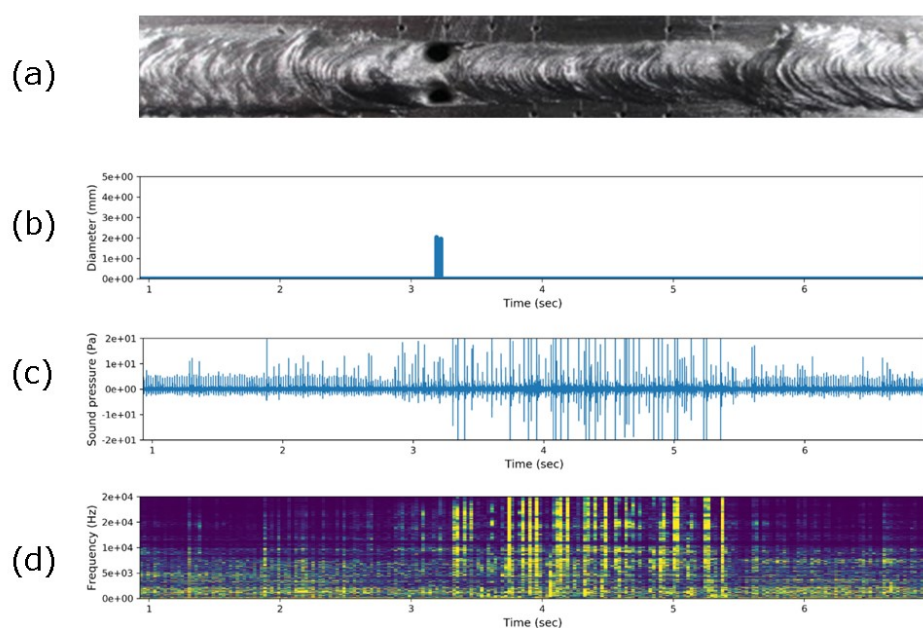


図 2-3-2 (a) 溶接ビードの外観写真、(b)溶け落ちの直径、(c)溶接アーク音の波形、(d)溶接アーク音のスペクトログラム。

溶け落ちは溶接時の高速カメラのデータを用いることで、溶け落ちの検知を行う AI 解析技術の構築を行った。AI の構築には計画通り畳込みニューラルネットワークを用いた。畳込みニューラルネットワークに使用した高速カメラのデータは、17 試料での固定撮影データを用いた。そのため、固定撮影画像から溶融池部を  $300 \times 150$  のサイズで切り出し、輝度値を基準に溶接アークのパルスとベースのフレームを除外するという前処理を行った。前処理後の画像は 9,180 枚であり、正常と溶け落ちの 2 クラスに分類するアノテーションを行った。正常クラスは 7,657 枚であり、溶け落ちクラスは 1,523 枚であった。同一試料の溶け落ち画像は類似しているため、訓練データと検証データに含まれている試料が重ならないようにする必要があった。そこで検証データの分割には以下のようなアルゴリズムを提案し、17 分割交差検証を用いた。

1. データを試料ごとの 17 グループに分割する。
2. 1 試料のグループでホールド・アウト検証を行い、データ拡張を含む全てのハイパーパラメータの最適化を行う。
3. 最適化済みのハイパーパラメータを用いて、17 分割交差検証を実施して、評価データとする。

畳込みニューラルネットワークの実装には TensorFlow と Keras を用い、実行環境の OS は Windows 10 Pro、GPU は NVIDIA GeForce RTX 3090、CUDA は CUDA 10.1、TensorFlow は tensorflow-gpu 2.4.0 である。パソコンに GeForce RTX 3090 を取り付け、OS、CUDA、tensorflow-gpu などをインストールし、実行環境を構築した。学習には、事前に ImageNet で学習済みの VGG16 のパラメータを初期値としたファインチューニングにて行った。図 2-3-3 に用いた畳込みニューラルネットワークのアーキテクチャを示す。conv3-3 までのパラメータを固定し、それ以降の畳み込み層と全結合層においてはパラメータを再学習した。全結合層では、活性化関数は ReLu を使用し、FC-256 には Batch Normalization と確率 0.5 の Dropout を追加した。学習はミニバッチ学習で行い、ミニバッチサイズは 32 とし、最適化アルゴリズムには Adam を用いて、エポック数 5 まで学習を行った。データ拡張はデータの取得状況から考えて flip は使用せず、前処理で切り抜きを行っているので crop は用いずに、shift を用いた。その結果、5 ピクセル範囲での shift、±1%以内での zoom、1° 以内での rotation、1° 以内での shear をランダムに組み合わせてデータ拡張を行った。

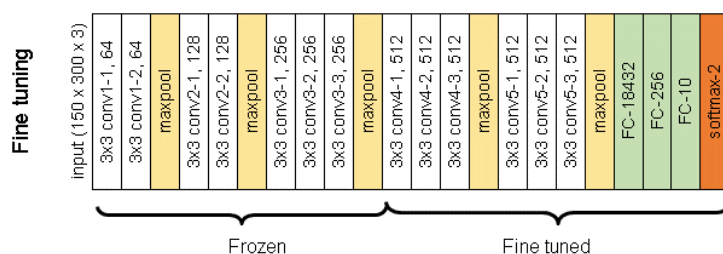


図 2-3-3 畳込みニューラルネットワークのアーキテクチャ。

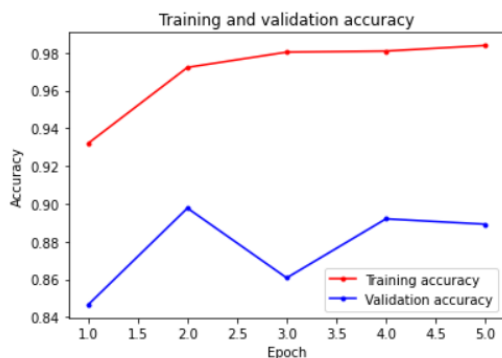


図 2-3-4 ホールド・アウト検証での学習曲線。

フレーム正解率はフレームごとに正常か溶け落ちかを正しく分類できたかの正解率である。

図 2-3-4 にホールド・アウト検証でのフレーム正解率の学習曲線を示すが、検証データのフレーム正解率は 89%であった。17 分割交差検証ではフレーム正解率は 62%から 100%と大きく変動していたが、フレーム正解率が低い試料では、溶け落ちのフレームを見逃している場合があった。フレーム正解率に対して、試料ごとに溶け落ちが検知できたかどうかの正解率は溶け落ち正解率である。溶け落ちを検知し、溶け落ち正解率を評価するために、新たに危険度を提案し、溶け落ちの検知に導入した。危険度はフレームごとの入力画像に対して、畳込みニューラルネットワークの出力が溶け落ちならば 1、正常ならば-1 を返すフレーム予測の積算値を用いる。ただし、フレーム予測ではベースとパルスに相当する一定範囲の輝度のフレームでは画像を畳込みニューラルネットワークに入力せず、0 を返す。ただし例外処理として、フレーム予測の積算値が 0 未満の場合には危険度は 0 を返す。さらに、危険度はしきい値以上であれば、溶け落ちと判定する。危険度のしきい値はハイパーパラメータであるが、10 に設定した。

図 2-3-5 にフレーム正解率 93 %が得られたある試料での溶接位置に対しての溶け落ちの直径と溶接時間に対しての危険度を示す。溶接時間と溶接位置の同期を既に行っており、溶け落ちの発生箇所の後方に危険度の真値(Human)と予測値(Predict)のいずれもが上昇することが分かる。溶接位置はアークの先端を基準にしているため、このケースでは、アークの先端から約 1mm 後方の溶け落ちをリアルタイムに検知できることになる。危険度の予測値が危険度の真値よりも立ち上がりが遅いのは、フレーム正解率が 93 %とフレームごとでは溶け落ちの見逃しがあるためである。

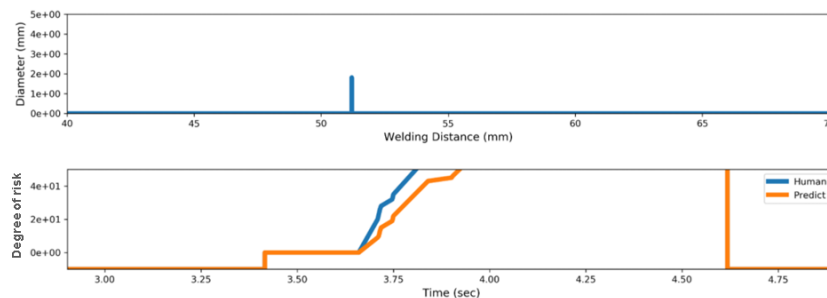


図 2-3-5 溶接位置に対しての溶け落ちの直径（上）と溶接時間に対しての危険度（下）。

17 分割交差検証を行った全ての試料でアークの先端から平均 1mm 後方に誤差 1mm 程度で溶け落ちを検知できており、溶け落ち正解率は 100%であった。そのため、構築した AI 解析技術は溶け落ち欠陥をリアルタイムに検知し、発生箇所の特特定は誤差 1mm 程度で可能である。溶け落ちのための目視確認時間の大幅な短縮と欠陥見落としの撲滅ができ、量産活動において大きな成果が期待できる。ある試料では、溶け落ちが発生していないにもかかわらず、ビードの窪みを溶け落ちと誤判定しているため偽陽性によりフレーム正解率 96 %となっていたケースもあった。しかし、このケースでも危険度 10 以上を溶け落ちとする基準のため、溶け落ち検知について偽陽性は防げていた。また、別のケースでは、約 0.1 秒という瞬間的に溶け落ちが発生し回復する現象があったが、この場合も溶け落ちを正しく検知できた。瞬間的な溶け落ち箇所は、溶接欠陥になる可能性がある。そのため、構築した AI 解析技術は、目視検査で見落とす溶接欠陥を防止する効果も期待できる。

【3-3】新難燃性Mg合金製腰掛フレーム強度及び耐久性の評価

写真 2-3-3 に座席回転繰り返し試験、写真 3-3-4 に座面荷重試験の状況を示す。



写真 2-3-3 座席回転繰り返し試験の状況

写真 2-3-4 座面荷重試験の状況

製作したオール新難燃性 Mg 合金製腰掛フレームの信頼性試験（座席回転繰り返し試験、座面荷重試験）を実施した。座席回転繰り返し試験では、脚台と台枠で想定外の割れや亀裂が度々発生したが、その都度、原因の追究と適切な対策を設計変更によりフィードバックし、再製作を繰り返した結果、座席回転繰り返し試験で脚台、台枠、座面は 40,000 回以上の耐久要求をクリアした。背ずりについては両方のサイド角パイプに亀裂と割れ（破断）が発見されたが、検査確認のミスにより合否判定が不可能な状況となった。座面荷重試験では、脚台、台枠、背ずり、座面、すべての構成部品が、一席当たり 100 kg 以上の耐久要求をクリアした。写真 2-3-5 に座席回転繰り返し試験の結果報告書、写真 2-3-6 に座面荷重試験の結果報告書を示す。

背ずりの亀裂と割れ（破断）の状態を考察した結果、今回の座席回転繰り返し試験では、不必要な穴を起点として発生しているため、起点となった穴を無くした構造の背ずりを製作し、座席回転繰り返し試験を実施する。

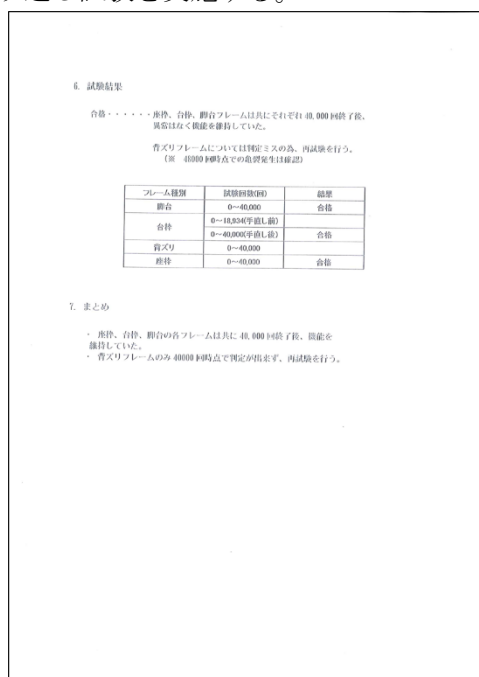


写真 2-3-5 座席回転繰り返し試験結果報告書



写真 2-3-6 座面荷重試験結果報告書

## 第3章 全体総括

## 3-1 研究開発成果

## 【1】新難燃性Mg合金溶接材（溶加材および部材）の開発

## 【1-1】世界初Ga入り新難燃性Mg合金溶加材の開発

より高強度になる最適なGa入り新難燃性Mg合金溶加材の成分量を決定した。引張試験は、最大継手強度が目標値である母材強度の90%である240.3MPaを超える高い強度を示した。

## 【1-2】高速押出型新難燃性Mg合金部材の開発

高速押出型新難燃性Mg合金製腰掛フレーム部材を押出し加工し、中実形材、中空形材を試作。形材外形の許容差 $\pm 0.50\text{mm}$ 以内、形材肉厚の許容差 $\pm 15\%$ 以内を実現した。

## 【1-3】新難燃性Mg合金溶接材の基本溶接技術の開発

開発したGa入り新難燃性Mg合金溶加材を用いて溶接継手を製作、引張試験等の評価により適正な溶接条件範囲を決定した。また、4万回程度の低サイクル数領域での疲労特性向上因子を明らかにし、小型試験片においては疲労試験の目標値を達成、大型試験片においても目標値とほぼ同等の疲労特性を達成した。

## 【1-4】新難燃性Mg合金溶接材の耐衝撃値とじん性値の取得

衝撃値、じん性値に対する表面処理（精密ショットピーニング）の明確な効果は観察されなかったが、疲労特性に対する効果は、試験片の形状による依存性がみられた。効果が現れた試験片については、目標値（応力振幅65 MPaで破断回数4万回）を大きく上回る結果を得た。

## 【2】AI制御溶接技術の開発

## 【2-1】新難燃性Mg合金製腰掛フレーム構造最適化の設計

Al合金製腰掛フレームを新難燃性Mg合金製に置き換えることで、Al合金と同等の剛性を備え、重量6.0kg以下、軽量化24%以上の目標に対し、重量は6.7kg、軽量化は23%を実現した。

## 【2-2】新難燃性Mg合金製腰掛フレームの溶接技術の開発

腰掛フレームの溶接箇所、溶接姿勢、要求品質に応じて、溶接適正条件（電流と速度）を選定する必要性を明らかにし、その結果を新難燃性Mg合金製腰掛フレームの製作に反映した。

## 【2-3】溶接実証システムでAI制御溶接技術を研究開発

赤外線サーモグラフィーを導入、計測可能な溶接近傍部位置において、溶接の適正条件下で $500\pm 20^\circ\text{C}$ となることを確認した。

## 【3】溶接の実用検査技術の研究開発

## 【3-1】溶接画像のリアルタイム撮影と溶接欠陥の計測技術開発

新難燃性Mg合金溶接時の電流、電圧、ガス流量、画像、温度、音の各データと溶接内部欠陥とは相関が無いことが判明した。一方、画像データについては、溶け落ちの検知に有効であることが確認できた。また、人による溶接外観検査の一部は、レーザ3次元形状測定器に置き換えることができる可能性を見出した。

【3-2】溶接状態が強度に与える影響のAI解析技術の構築

高速度カメラの画像データにより正解率100%でリアルタイムに溶け落ちを検知できるAI解析技術を構築した。

【3-3】新難燃性Mg合金製腰掛フレーム強度及び耐久性の評価

座席回転繰り返し試験は、脚台、台枠、座面は4万回をクリアした。背ずりは、検査確認ミスにより合否判定が不可能に終わった。座面荷重試験は、脚台、台枠、背ずり、座面全ての構成部品が一席当たり100kg以上の耐久要求をクリアした。

### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

#### (1) 研究開発後の課題

製作したオール新難燃性Mg合金製腰掛フレームの座席回転繰り返し試験で、脚台、台枠、座面は40,000回以上の耐久要求をクリアしたが、背ずりについては両方のサイド角パイプに亀裂と割れ（破断）が発見された。考察した結果、背ずりに存在する不要な穴を起点として発生しているため、起点となった穴を無くした構造の背ずりを製作し、座席回転繰り返し試験を実施し、40,000回以上の耐久要求のクリアを図る。

#### (2) 事業化展開

Mg合金の溶接技術は、JISでも規定されておらず、知見や情報が公開されていない。基準というものが無い状態であり、まずは、今回の補助事業で得た知見を基にMg合金の溶接技術の確立を図る。

また、研究開発成果に係る製品は、Al合金の従来品より軽量化された高速鉄道車両用腰掛フレームであり、本事業のアドバイザーとしてご参画頂いた川下企業の川重車両コンポ(株)様などと今後も連携し、Mg合金の高速鉄道車両用腰掛フレームの事業化を目指す。