

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「鉄とアルミの異材溶接技術を用いた自動車部品軽量化の実用化研究開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 中国経済産業局

委託先 公益財団法人岡山県産業振興財団

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
- 1－2 研究体制
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2－1 溶接技術及び材料の選定
 - 2－1－1 市場・研究実績調査、各溶接法の原理・特許調査研究
 - 2－1－2 新規異材溶接の検証
 - 2－1－3 溶接方法・材料の選定
- 2－2 テストピースによる評価・検証
 - 2－2－1 形状・構造検討 (CAD)
 - 2－2－2 強度解析による効力確認 (CAE)
 - 2－2－3 テストピースの製作
 - 2－2－4 溶接面の分析
 - 2－2－5 強度・耐久性評価
 - 2－2－6 溶接形状の改良
 - 2－2－7 溶接条件の確立
- 2－4 バッテリークロスメンバへの反映
 - 2－4－3 型・治具製作
 - 2－4－4 試作品製作
 - 2－4－5 試験評価・検証
 - 2－4－6 形状・構造の改良
- 2－5 その他部品への反映
 - 2－5－1 反映部品選定
 - 2－5－2 形状・構造検討
 - 2－5－3 設計・強度解析

最終章 全体総括

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

自動車においては近年、環境保護、地球温暖化防止の為、排出ガス（黒煙、CO₂、硫化硫黄等々）の削減が要求されている。また、化石燃料の枯渇もあり、限られた資源を有効に利用する必要がある。これらの課題を解決する手段としては部品軽量化による燃費向上及び軽量化により電気自動車の走行距離増大に伴う電気自動車の普及がきわめて有効である。軽量化手法としては高強度材採用による鉄鋼板の薄肉化と軽量材料（軽金属、樹脂）の採用が一般的であるが、軽量化効果として大きいのは軽量材料の採用である。それ故、各自動車メーカーも部品の軽量化を目指してアルミ材を採用しているが、鉄+アルミ構造の異種材接合の場合はボルト・ナットまたはリベットを使用しての結合となり作業性が悪く、時間もかかる為、結果としてコストが高くなってしまう。しかし、この課題は各自動車メーカーからも要望が高い。

そこで本研究開発ではこれらの問題を解決する為、成形難易度の高い部位、あるいは強度が必要な部位については鉄鋼板を使用し、それ以外の部位についてはアルミ材を適用したアルミと鉄の接合、あるいはアルミ同士の接合法として、ボルト、ナット、リベットを使用せずに軽量安価で高強度の信頼性の高い自動車部品の開発を目指している。アルミと鉄の異材溶接は現状では実用化には至っておらず、実用化すれば自動車産業だけでなく他産業部品へも展開が見込める新しい技術である。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

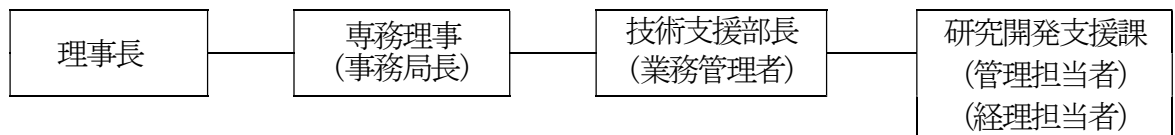
【研究組織】



【管理体制】

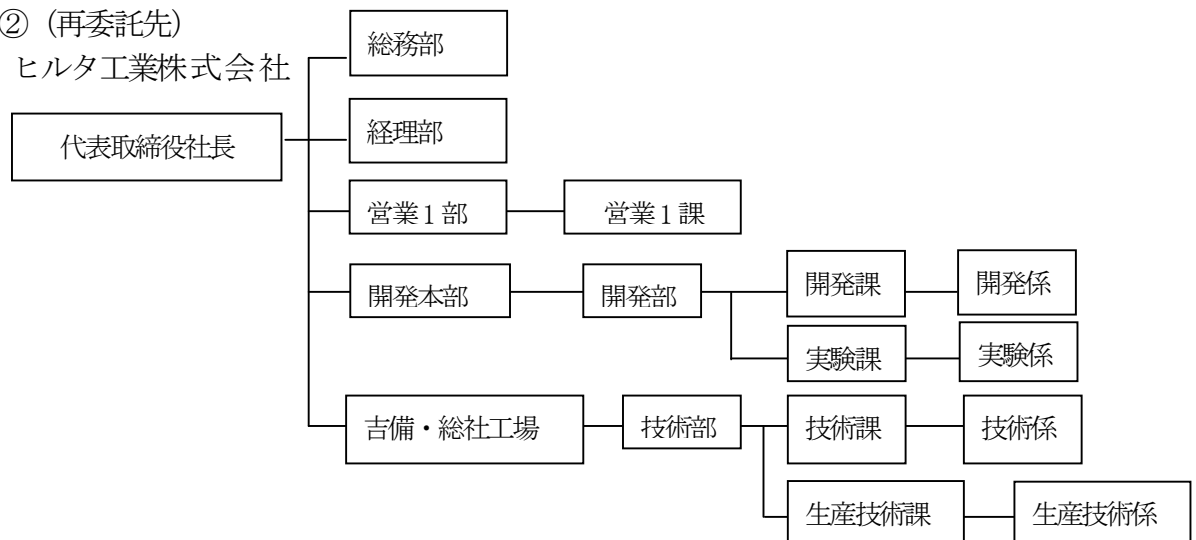
①事業管理機関

公益財団法人岡山県産業振興財団

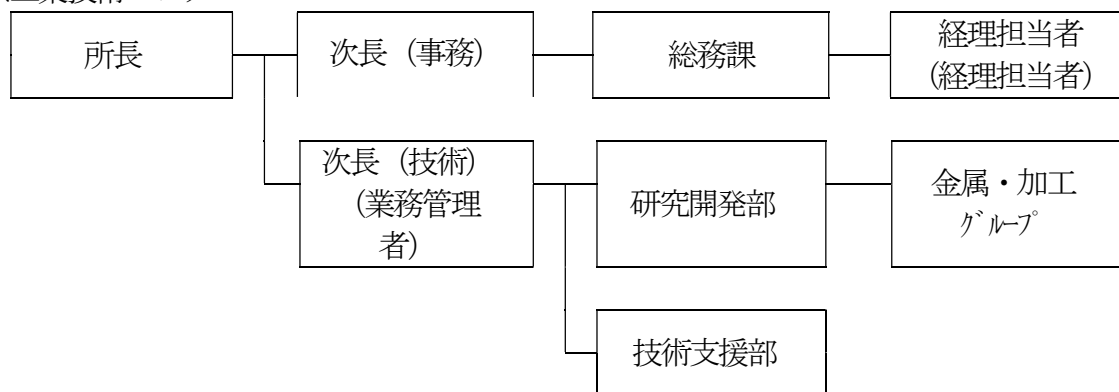


②（再委託先）

ヒルタ工業株式会社



岡山県工業技術センター



【管理員及び研究員】

管理員：【事業管理機関】 公益財団法人岡山県産業振興財団

氏 名	所属・役職
深井 康光	技術支援部 部長
横田 尚之	技術支援部 研究開発支援課長
赤木 佑衣	技術支援部 研究開発支援課 主事
田辺 健太郎	技術支援部 研究開発支援課 主事

研究員：【再委託先】 ヒルタ工業株式会社

氏 名	所属・役職
仲本 忍	吉備・総社工場 技術部 生産技術課 課長
佐々木 毅	吉備・総社工場 技術部 技術課 課長
西野 修	吉備・総社工場 技術部 技術課 試作係
加藤 佳久	吉備・総社工場 技術部 技術課 技術係
荒木 功二	開発本部 開発部 開発課 課長
藤岡 憲二	開発本部 開発部 開発課 課長付
田林 稔弘	開発本部 開発部 開発課 開発係
横田 登志行	開発本部 開発部 開発課 開発係
吉田 政弘	開発本部 開発部 実験課 実験係
藤井 崇弘	開発本部 開発部 実験課 実験係

研究員：【再委託先】岡山県工業技術センター

氏 名	所属・役職
日野 実	技術支援部長
村上 浩二	研究開発部金属・加工グループ・研究員
水戸岡 豊	研究開発部金属・加工グループ・研究員
余田 裕之	研究開発部金属・加工グループ・研究員
中西 亮太	研究開発部金属・加工グループ・技師

【協力者】

氏名	所属・役職
福原 靖英	三菱自動車工業(株) 開発本部 材料技術部 金属材料技術 エキスパート
片山 聖二	国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所 教授
篠崎 賢二	国立大学法人 広島大学 工学研究科機械システム工学専攻 教授

1-3 成果概要

鉄とアルミの異材接合の研究を進めるに当たり、市場・研究実績調査及び各溶接法の原理・特許調査研究を行い、本研究に相応しい溶接法としてファイバーレーザーによる新レーザー溶接を選択し、平成22年度～平成24年度の3年間に研究開発をしてきた新規異材溶接法について概要を記す。

3年間のレーザー接合による強度確保の研究で、まず鉄板 t3.2 及びアルミ板 t2.0 のテストピースにより、引張強度実験値優先の溶接条件設定から大阪大学の片山教授が示された原理を参考にアルミへの溶接溶け込み深さ 0.2mm 以下及び金属間化合物膜 $3\mu\text{m}$ 以下の溶接条件設定までの重ね溶接条件設定を行った。

結果、引張強度実験値優先の溶接条件設定ではアルミへの溶け込みが深くなり、鉄とアルミの接合界面の接合強度が低く、目標のアルミの母材強度以上の引張強度を得ることは出来なかったが、アルミへの溶接溶け込み深さ 0.2mm 以下及び金属間化合物膜 $3\mu\text{m}$ 以下の溶接条件設定では、金属間化合物は $3\mu\text{m}$ レベルの境界層となり溶接単位面積当たりの引張強度は安定し、必要強度に対する溶接本数の設定の目安を立てることが出来た。

鉄板 $w60 \times l150 \times t3.2$ とアルミ $w60 \times l150 \times t2.0$ のテストピースによる引張強度目標はアルミの母材破壊（アルミ断面より引張強度 TS 目標 27,120N）とし、必要溶接本数を9本以上とた。溶接本数16本での確認では引張強度試験（23,500N アルミ母材破壊）、引張り耐久試験ともアルミ熱影響部（HAZ 部）の破断となり目論見通りの結果を得ることが出来た。

製品化においてはバッテリークロスメンバには今回知り得た溶接ノウハウを生かし、異材溶接部の溶接面積拡大を想定し、アルミへの溶け込み深さ 0.2mm 狙いの溶接条件で溶接ビードを8本設定したことにより、BRKT 部の切り出し品による引張強度試験はアルミフレームの変形から最終的に BRKT の剥離となるが、アルミフレームが大変形するまでに強度UPを見込むことが出来た。但し、アルミへの溶接溶け込み深さ及び溶け込み長さは不安定でアルミの母材破壊までには至らなかった。原因としては電食防止用にポリエステル系エラストマーシートを異材間に挿入しており、これによりメッキ鋼板の亜鉛蒸気の抜けの悪化及びシート材厚 $200\mu\text{m}$ のギャップバラツキの影響が考えられ、電食対策構造については課題を残した。

実用化に向けてはバッテリークロスメンバは、シート材を挿入した電食回避と剥離力をキャンセル出来る接合構造に改良設計し、引続き継続して研究を進める。

その他の部品については、バッテリークロスメンバの弱点であった電食防止対策構造の難点を回避するため、車の室外部品から水分の付着しにくい室内部品へ変更しブレーキペダル及びコラム Assy を選定し、電食防止構造の廃止と剥離に強い構造を狙ったクリンチ構造等、新構造製品の設計をし実用化を推進中である。今後は成果物として両部品のコスト詰めを実施しメーカーへのプレゼンテーション等で軽量・安価な新技術製品として実用化を図る。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

管理法人：公益財団法人岡山県産業振興財団

〒701-1221 岡山県岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山 3F

連絡担当者名：技術支援部 研究開発支援課 課長 横田尚之

TEL：086-286-9651 FAX：086-286-9676

E-mail: nyokota@optic.or.jp

第2章

2-1 溶接技術及び材料の選定

2-1-1

鉄とアルミの異材接合の過去の市場・研究実績及び現在の状況について調査を行った。大阪大学接合科学研究所 片山教授は重ね溶接法でレーザーを鉄側から照射し、アルミに楔の様に0.2mm程度食込ませることで高強度の接合を実現している。

また、原理としては0.2mm程度の溶け込みにより熱影響が少なく、金属間化合物の生成を少なくすることである。接合速度は速い方が良いとのことであった。

広島大学 篠崎教授はレーザーブレイジング（ろう付け）溶接法を推奨しており、異材接合に適したフィラワイヤー及びレーザー溶接機の選定が必要とのことであった。

神戸製鋼所では溶融アルミメッキ鋼板を使用することでアルミ側に鉄が攪拌しないようにし、金属間化合物の未形成域を作ることで十分な接合強度を得ている。

広島県立東部工業技術センターでは摩擦攪拌溶接でアルミと鉄の異材接合を実施しておりマツダ車で市場実績があり、摩擦攪拌溶接及び摩擦攪拌装置に関する特許は多数ある。

2-2-2/3 新規異材溶接の検証、溶接方法・材料の選定

新規異材溶接の研究開発を進めるため、各種レーザー仕様について情報収集し、新規異材溶接技術の可能性についてレーザーメーカーのデータを基に検証した。

結果、異材接合の研究開発には精度の高いビーム品質が必要であり、ファイバーレーザーが最適で、ファイバーレーザーであれば溶け込み深さ0.2mm程度の溶け込みが狙えることが検証出来た。

また、材料については本溶接方法に適した材料として、鋼板（メッキ鋼板含む）は440材、アルミはA5052に選定し研究開発を進めることとした。

2-2 テストピースによる評価・検証

2-1-1/2 溶接形状・構造検討・強度解析

大学、材料メーカー、レーザーメーカーからの情報収集を基に、レーザー溶接部の強度評価としてアルミの母材破壊（引張強さ TS 値以上）を目標に、強度計算及びFEM解析により JIS 5 号試験片相当の形状を選定した。

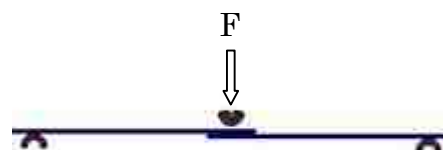
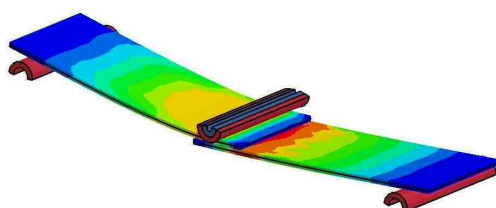
1) 引張強度は JIS 5 号試験片の断面より破断強度を算出し、実測値の相関検証を実施する。

①アルミの母材強度=226N/mm² ②テストピース断面形状：W60×t2

③必要破断荷重=226×60×2=27,120N

上記より引張強度目標はアルミの母材破壊（27,120N 以上）とする。

2) 曲げ強度については解析により解析により破断モード及び応力分布を確認し、実測値との相関検証を実施する。



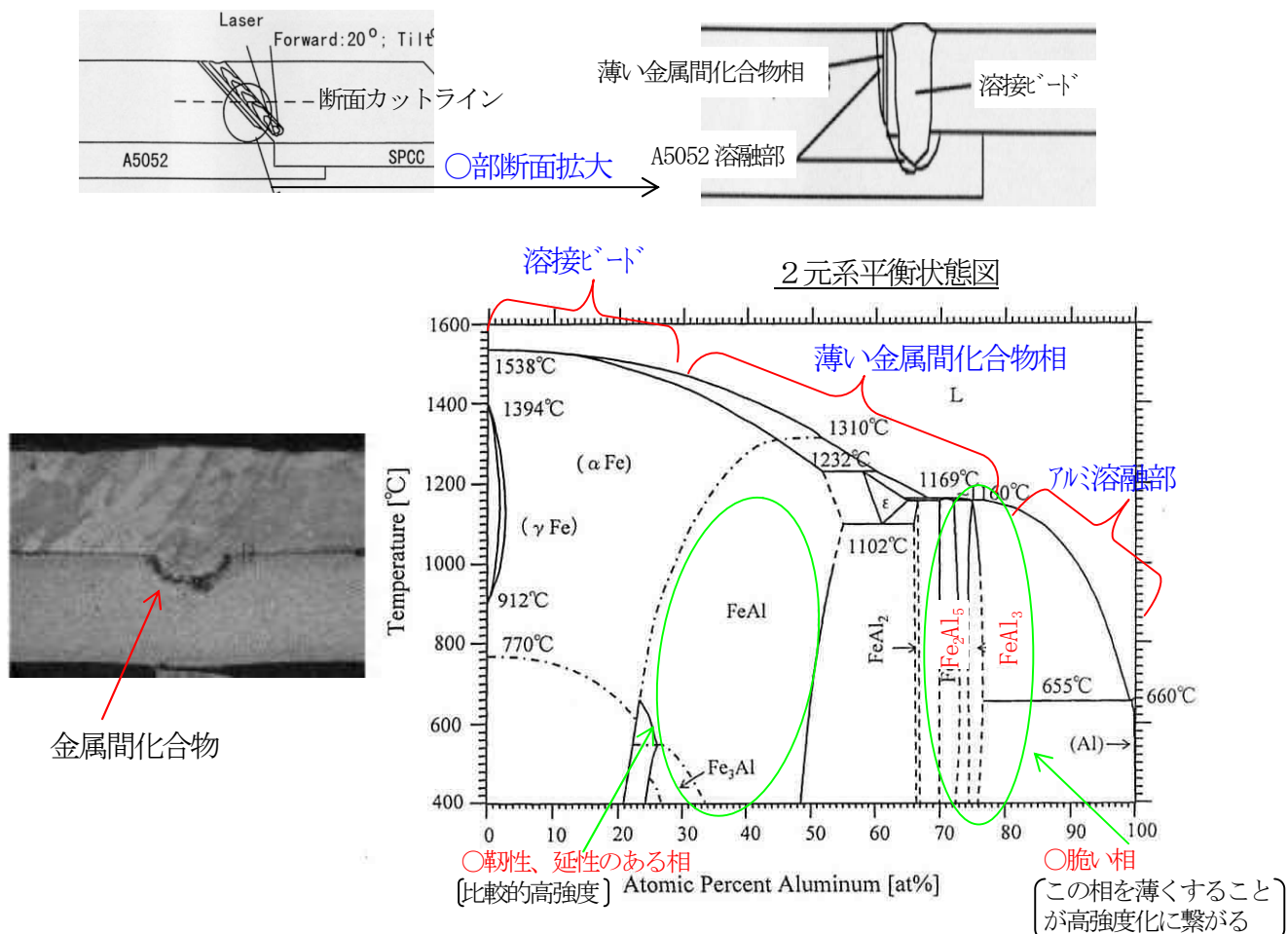
・曲げ強度試験時における破断応力分布

2-2-3 テストピースの製作

室内部品を想定し普通鋼板とアルミ材料の組合せのテストピースによりアルミへの溶接溶け込み深さ 0.2mm 以下及び金属間化合物 $3\mu\text{m}$ 以下狙いのレーザー溶接条件を過去のデータより再検証し、量産溶接を見据えベースとなる溶接条件設定を実施した。

1) レーザー溶接の原理

- 鉄とアルミの溶接の場合、金属間化合物の生成により溶接強度が低下する。

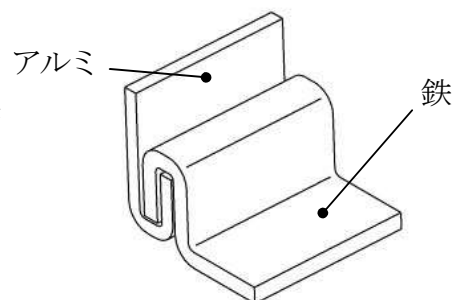


(1) 高強度化継ぎ手法-1...レーザー溶接による高強度化【大阪大学 片山教授】

- ①レーザー制御技術により金属間化合物の生成を抑えることにより溶接強度を確保
- ②アルミへの溶け込み：0.2mm 以下、金属間化合物膜厚： $3\mu\text{m}$ 以下狙いにより脆い相を制御

(2) 高強度化継ぎ手法-2...溶接継ぎ手部の構造により溶接強度を確保

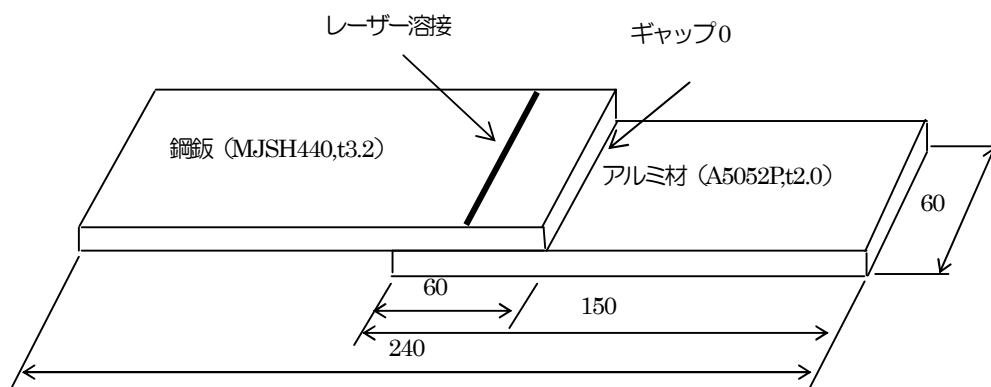
- ①クリンチ形状+レーザー溶接による強度確保
- ②電食防止+強度向上狙いで異材間にシート材を挿入しシート材と共に溶融することによる接着強度確保



○結論：上記2点を基本に高強度化検討を進める。

2) レーザー出力 4kW によるテストピースの製作

- (1) W60×L150×t3.2 の鉄と W60×L150×t2.0 アルミの板材を 60mm ラップし接合
 - (2) 鋼板 : MJSH440 【TS : 440N/mm² 以上】
 - (3) アルミ材 : A5052P 【YP:155N/mm²、TS:215N/mm² (ミルシート : 226N/mm²)】
 - (4) 異材間スキマ : ギャップ 0
 - (5) 溶接の狙い : アルミへの溶接溶け込み深さ 0.2mm 以下、金属間化合物 3μm 以下
- 注) 強度目標 : アルミの母材破壊 (アルミ母材の引張り強度 : 226×60×2=27, 120N)

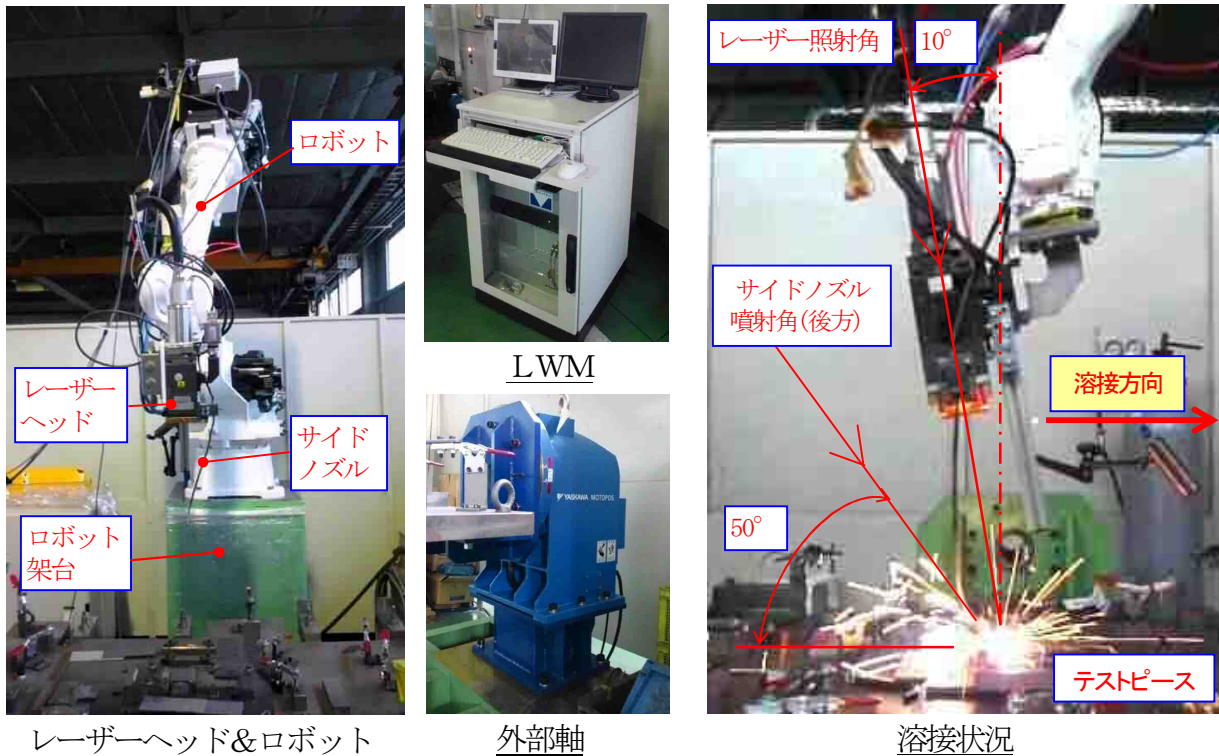


3) レーザー設備の最終仕様設定

項目	仕様
①レーザー出力 (W)	0～4kW
②ファイバー径 (d0)	φ 0.2mm
③コリメーションレンズ (F1)	150mm
④焦点レンズ (F2)	400mm
⑤集光径 (d1)	φ 0.53 注) d0×F2/F1
⑥レーザー照射角度	前進角 10° 左右角 0°
⑦溶接速度	3.7m/min
⑧シールドガス	アルゴンガス 流量 50l/min
⑨ノズル仕様	
(ア) 仕様	(ア) サイドノズル
(イ) ノズル設置位置	(イ) 溶接方向に対し後方設置
(ウ) 溶接位置～ノズル先端距離	(ウ) 10mm
(エ) ノズル角度	(エ) 50°
(オ) ノズル径	(オ) φ 5mm

注) ⑥レーザー照射角、⑦溶接速度、⑧シールドガス、⑨ノズル仕様については溶接条件設定トライにより最適条件として固定した。

4) レーザー設備最終仕様外觀



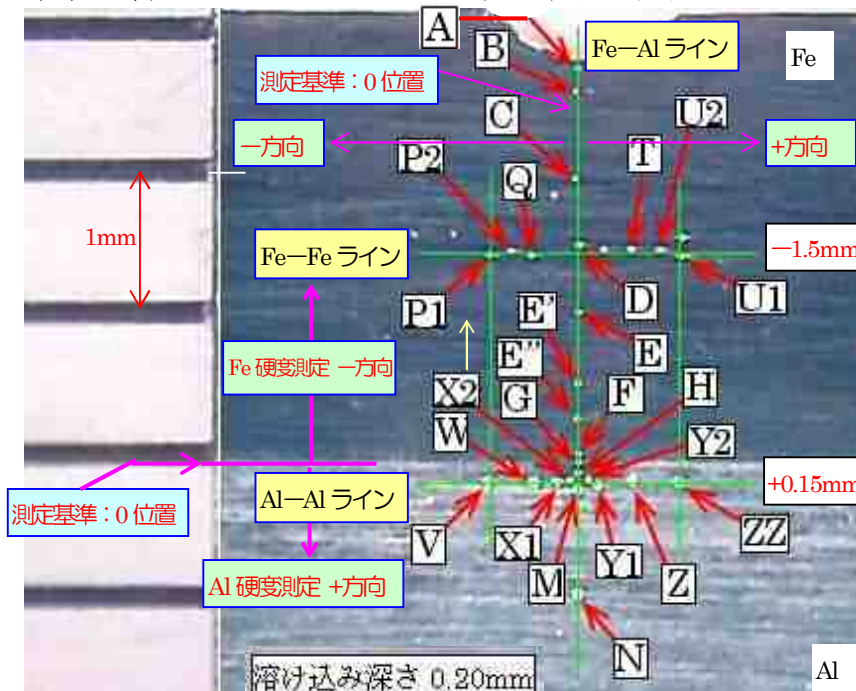
2-2-4 溶接面の分析

溶接溶け込み深さ 0.2mm 以下狙いの溶接条件で金属間化合物膜厚及び溶接面の硬度分布との相関より溶け込み深さ 0.2mm 以下の有効性を過去のデータと比較し確認する。

参考) 評価については大阪大学「異種金属材料のレーザー溶接・接合技術とそのメカニズム」、三重大学「鉄-アルミニウムレーザ溶接部の継手性能の検討」及び「溶接学会論文集 第14巻 第2号 P314-320(1996)」の文献を参考にした。

1) 硬度測定結果

(1) 試料No. H14-11...アルミへの溶接溶け込み深さ 0.2mm



1) 材料

- ・鋼材 : MJSH440 t3.2
- ・アルミ : A5052P

2) 溶接条件

- ・出力 : 4kW
- ・異材間スキ : 0
- ・焦点外し : 0
- ・レーザー照射角 : 10°
- ・溶接速度 : 3.7m/min
- ・Ar ガス : 50L/min

3) サイドノズル

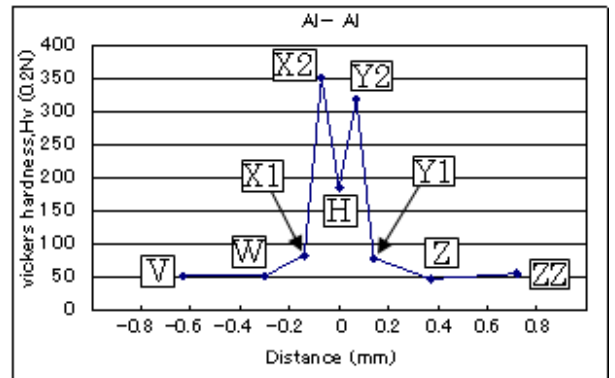
- ・内径 $\phi 5$
- ・溶接面からのノズル距離 : 10mm
- ・溶接進行方向に対し後方ノズル設定

※A~ZZ は硬度測定箇所を示す

①Al-A1 ライン硬度分布

- ・ Al 母材硬度 : HV53~HV56...V, ZZ
- ・ 熱影響部 : HV48~HV352...W~X2, Z~Y2
- ・ 溶接中央部 : HV186...H

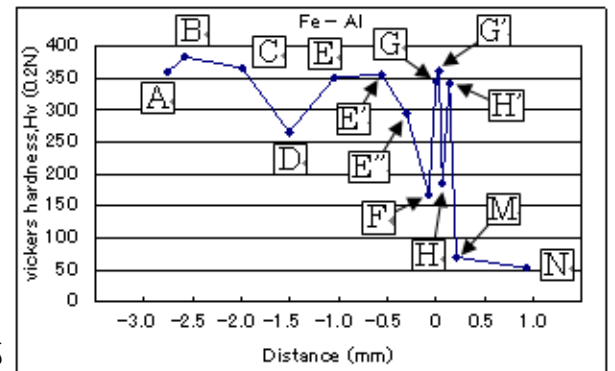
○溶接金属中央部は溶接金属に Fe 成分が多く溶解している状況を示している。但し、硬度はまだ HV350 程度で異常なレベルではない。



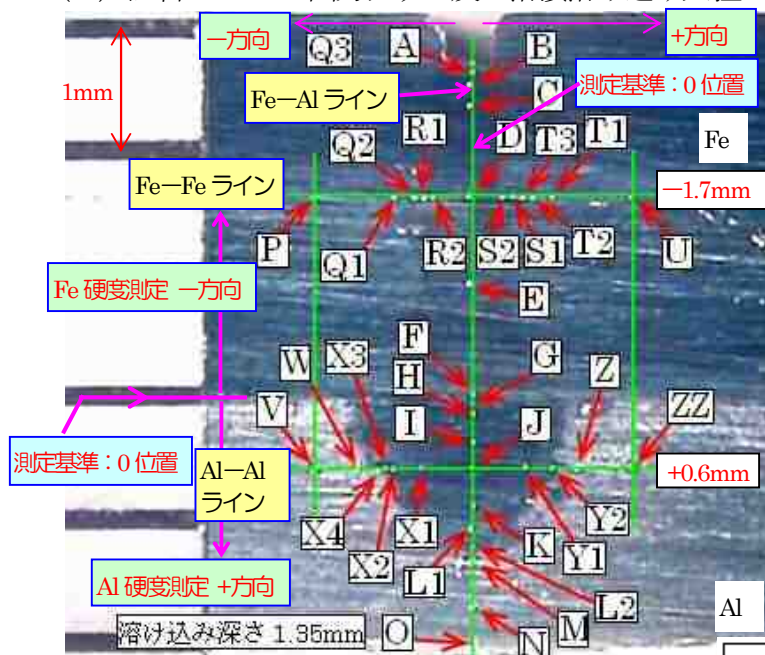
②Fe-Al ライン硬度分布

- ・ Al 母材硬度 : HV53...N
- ・ 熱影響部 : HV70~HV345...M~G
- ・ 溶接中央線上 : HV168~HV383
...A, B, C, D, E, E', E'', F

○溶接金属の中央線上はバラツキはあるが HV350 レベルにあり、また界面内壁部 G~H' 部も HV350 であり異常レベルではない。(Al-A1 ラインの界面内壁部と同等)



(2) 試料 No. 420 <出力ダウン及び溶接溶け込み大狙い>...アルミへの溶接溶け込み深さ 1.35mm



1) 材料

- ・ メッキ鋼材 : MJAH270C 45/45
- ・ アルミ : A5052P

2) 溶接条件

- ・ 出力 : 2kW
- ・ 異材間スキ : 100 μ m
- ・ 焦点外し : 0
- ・ レーザー照射角 : 10°
- ・ 溶接速度 : 1.25m/min
- ・ Ar ガス : 40L/min

3) 同軸ノズル

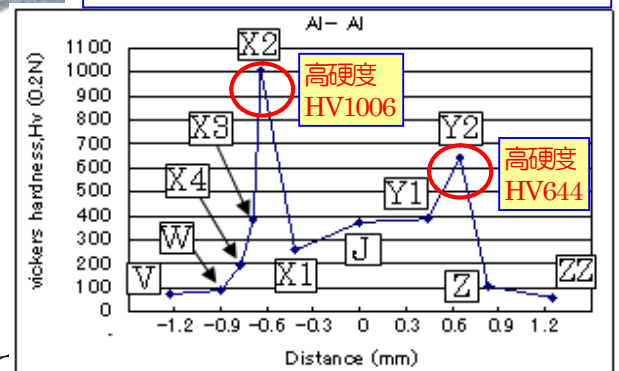
- ・ 内径 ϕ 9.5 外径 ϕ 11.5
- ・ 溶接面からのノズル距離 : 30.1mm

※A~ZZ は硬度測定箇所を示す

②Al-A1 ライン硬度分布

- ・ Al 母材硬度 : HV59~HV59...V, ZZ
- ・ 熱影響部 : HV90~HV1006...W X4 X3 X2 Z Y2
- ・ 溶接内部 : HV257~HV386...J, X1, Y1

○熱影響部の界面内壁では X2 が HV1006、Y2 が HV644 と入熱により明らかに Fe 焼入れ部以上に硬度上昇している。この部は硬度からみて硬くて脆い脆化層になっていると判断できるので、Al リッチな金属間化合物 FeAl_3 が出来ていると推定。

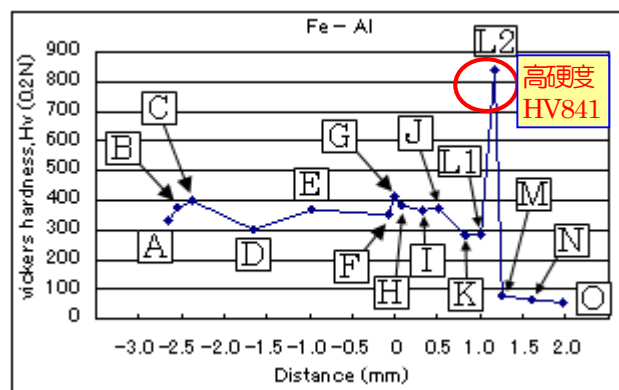


③Fe-Al ライン硬度分布

- ・Al 母材硬度 : HV55・・・0
- ・熱影響部 : HV66～HV841・・・N、M、L2
- ・溶接中央線上 : HV282～HV412
・・・A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、L1

○(2) 項同様熱影響部の界面内壁 L2 は HV841 と硬度上昇し、脆い金属間化合物 FeAl₃ が出来ていると推定する。

注) アルミ材内部の界面は X2、Y2、L2 にみるように脆い金属間化合物膜を生成している。



(4) 考察

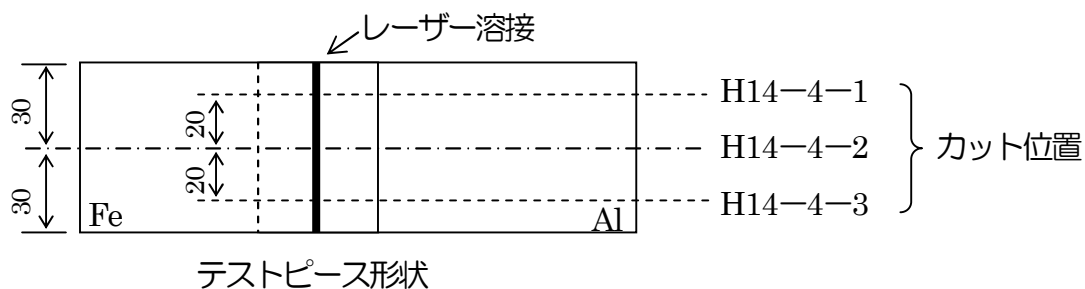
アルミへの溶接溶け込み深さから分るように、試料 H14-11 の 0.2mm、No. 420 の 1.35mm の比較よりアルミへの溶け込みが深い方が溶接金属及び界面内壁の硬度は高い。No. 420 の 1.35mm になると界面内壁は顕著に硬度上昇し HV1000 レベルに上がっている。

文献よりこの生成相は硬くて脆い Al リッチな Fe₂Al₅、FeAl₃ の金属間化合物と想定でき、入熱増加に伴い膜層 UP 及び高硬度化する。入熱が少ないと金属間化合物の硬度は HV400 レベルで、この相は同様に文献より金属間化合物としては比較的高強度な延性、靱性のある Fe リッチとなる FeAl、Fe₃Al 相当の成分層と言える。

よって、硬度から見た成分推定の検証をするために、SEM により界面の成分分析を実施し相関を調べた。次項に SEM 測定結果を記載する。

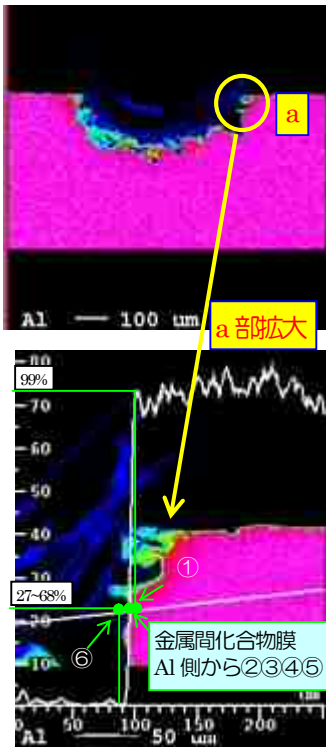
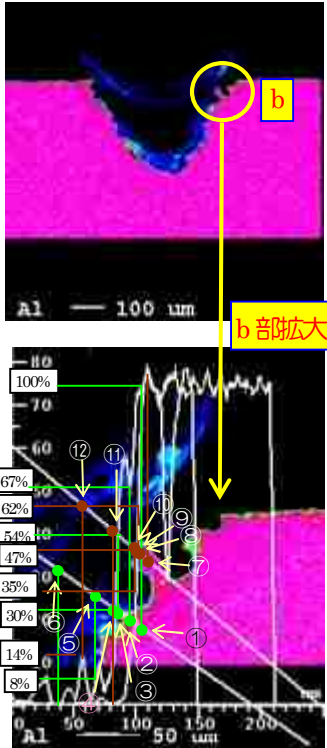
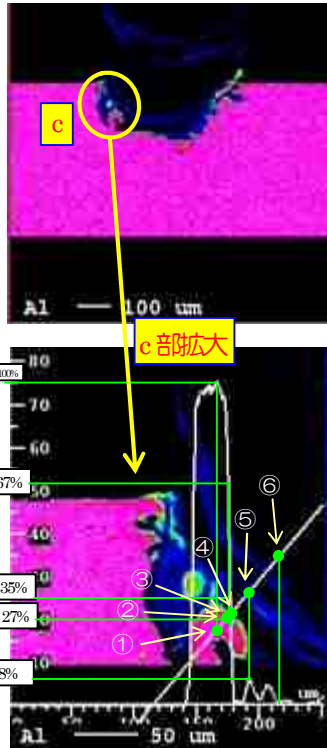
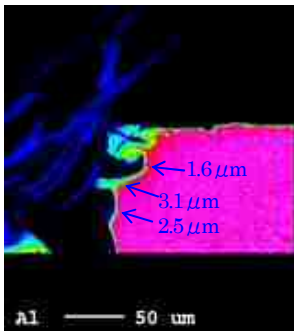
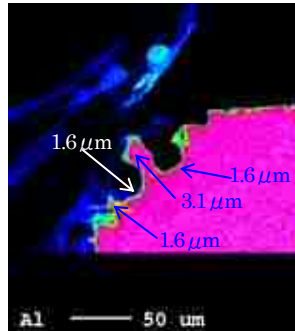
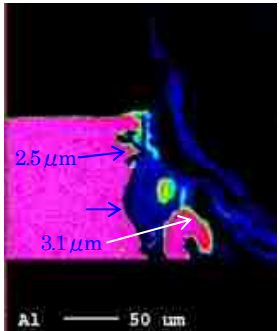
2) SEM による成分分析結果

(1) 試料 No. H14-4・・・アルミへの溶け込み 0.2mm 狙い品を分析 (H14-11 と同一溶接条件試料群)



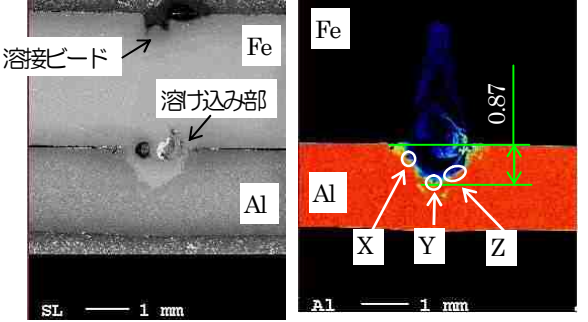
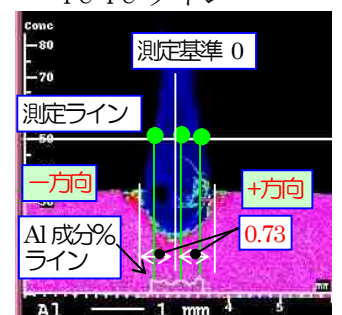
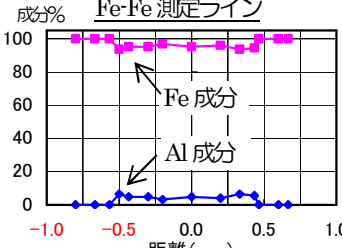
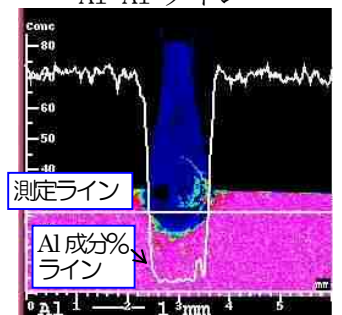
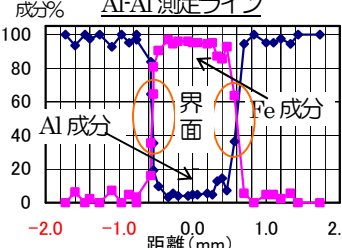
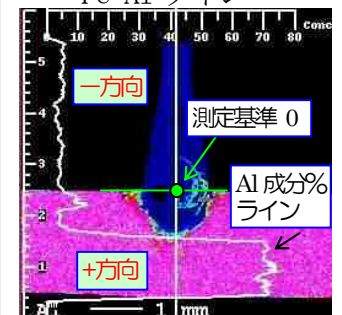
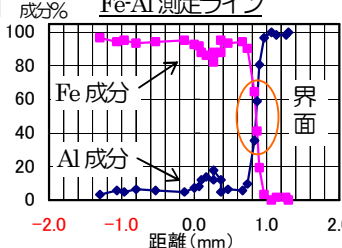
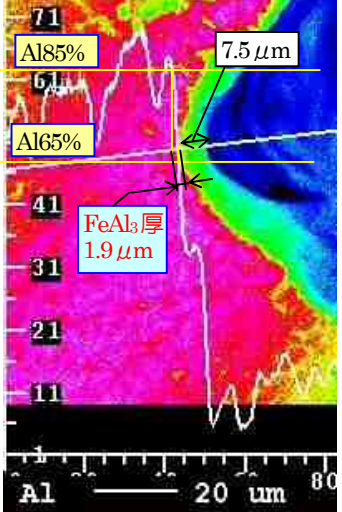
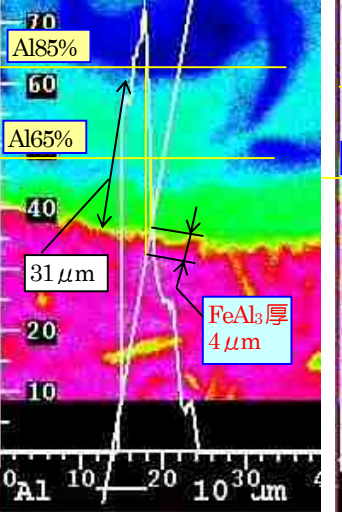
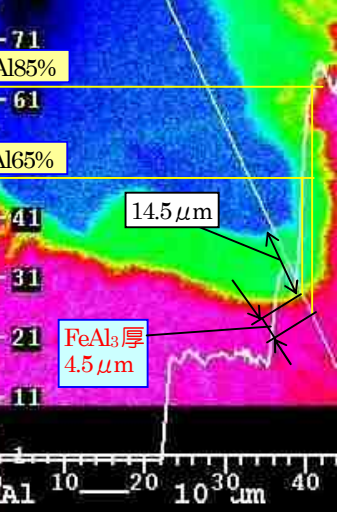
項目	H14-4-1	H14-4-2	H14-4-3
カット断面写真			
アルミへの溶接溶け込み部拡大			

項目	H14-4-1	H14-4-2	H14-4-3
Fe-Fe ライン成分分析 ・測定ライン追加 アルミとの重ね面より 20 μm 位置とした (板厚の板端狙い：アルミ成分の進入確認)			
20 μ m まで測定位置を下げて溶接金属は Fe 成分が主で Al の溶け込みはなし			
Al-Al ライン成分分析 ・測定ラインは溶接溶け込み深さの 1/2 狙い位置とした 注) 成分%はグラフ目盛りのアルミ 75%を 100%に補正し換算する			
Fe-Al ラインの成分分析			
溶接金属中心は Fe 成分のみで、Al は界面に金属間化合物として出現する			

項目	H14-4-1	H14-4-2	H14-4-3																																																																																																																		
界面の成分分析 1	 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">箇所</th><th colspan="2">成分%</th><th rowspan="2">生成物</th></tr> <tr> <th>Fe</th><th>Al</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>①</td><td>1</td><td>99</td><td>Al</td></tr> <tr><td>②</td><td>32</td><td>68</td><td>FeAl₃</td></tr> <tr><td>③</td><td>46</td><td>54</td><td>FeAl</td></tr> <tr><td>④</td><td>69</td><td>31</td><td>FeAl</td></tr> <tr><td>⑤</td><td>73</td><td>27</td><td>Fe₃Al</td></tr> <tr><td>⑥</td><td>100</td><td>0</td><td>Fe</td></tr> </tbody> </table>	箇所	成分%		生成物	Fe	Al	①	1	99	Al	②	32	68	FeAl ₃	③	46	54	FeAl	④	69	31	FeAl	⑤	73	27	Fe ₃ Al	⑥	100	0	Fe	 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">箇所</th><th colspan="2">成分%</th><th rowspan="2">生成物</th></tr> <tr> <th>Fe</th><th>Al</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>①</td><td>0</td><td>100</td><td>Al</td></tr> <tr><td>②</td><td>33</td><td>67</td><td>FeAl₃</td></tr> <tr><td>③</td><td>46</td><td>54</td><td>FeAl</td></tr> <tr><td>④</td><td>70</td><td>30</td><td>Fe₃Al</td></tr> <tr><td>⑤</td><td>92</td><td>8</td><td>Fe</td></tr> <tr><td>⑥</td><td>100</td><td>0</td><td>Fe</td></tr> <tr><td>⑦</td><td>0</td><td>100</td><td>Al</td></tr> <tr><td>⑧</td><td>33</td><td>67</td><td>FeAl₃</td></tr> <tr><td>⑨</td><td>53</td><td>47</td><td>FeAl</td></tr> <tr><td>⑩</td><td>65</td><td>35</td><td>Fe₃Al</td></tr> <tr><td>⑪</td><td>100</td><td>0</td><td>Fe</td></tr> <tr><td>⑫</td><td>86</td><td>14</td><td>Fe</td></tr> </tbody> </table>	箇所	成分%		生成物	Fe	Al	①	0	100	Al	②	33	67	FeAl ₃	③	46	54	FeAl	④	70	30	Fe ₃ Al	⑤	92	8	Fe	⑥	100	0	Fe	⑦	0	100	Al	⑧	33	67	FeAl ₃	⑨	53	47	FeAl	⑩	65	35	Fe ₃ Al	⑪	100	0	Fe	⑫	86	14	Fe	 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">箇所</th><th colspan="2">成分%</th><th rowspan="2">生成物</th></tr> <tr> <th>Fe</th><th>Al</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>①</td><td>0</td><td>100</td><td>Al</td></tr> <tr><td>②</td><td>33</td><td>67</td><td>FeAl₃</td></tr> <tr><td>③</td><td>67</td><td>33</td><td>Fe₃Al</td></tr> <tr><td>④</td><td>73</td><td>27</td><td>Fe₃Al</td></tr> <tr><td>⑤</td><td>92</td><td>8</td><td>Fe</td></tr> <tr><td>⑥</td><td>100</td><td>0</td><td>Fe</td></tr> </tbody> </table>	箇所	成分%		生成物	Fe	Al	①	0	100	Al	②	33	67	FeAl ₃	③	67	33	Fe ₃ Al	④	73	27	Fe ₃ Al	⑤	92	8	Fe	⑥	100	0	Fe
箇所	成分%		生成物																																																																																																																		
	Fe	Al																																																																																																																			
①	1	99	Al																																																																																																																		
②	32	68	FeAl ₃																																																																																																																		
③	46	54	FeAl																																																																																																																		
④	69	31	FeAl																																																																																																																		
⑤	73	27	Fe ₃ Al																																																																																																																		
⑥	100	0	Fe																																																																																																																		
箇所	成分%		生成物																																																																																																																		
	Fe	Al																																																																																																																			
①	0	100	Al																																																																																																																		
②	33	67	FeAl ₃																																																																																																																		
③	46	54	FeAl																																																																																																																		
④	70	30	Fe ₃ Al																																																																																																																		
⑤	92	8	Fe																																																																																																																		
⑥	100	0	Fe																																																																																																																		
⑦	0	100	Al																																																																																																																		
⑧	33	67	FeAl ₃																																																																																																																		
⑨	53	47	FeAl																																																																																																																		
⑩	65	35	Fe ₃ Al																																																																																																																		
⑪	100	0	Fe																																																																																																																		
⑫	86	14	Fe																																																																																																																		
箇所	成分%		生成物																																																																																																																		
	Fe	Al																																																																																																																			
①	0	100	Al																																																																																																																		
②	33	67	FeAl ₃																																																																																																																		
③	67	33	Fe ₃ Al																																																																																																																		
④	73	27	Fe ₃ Al																																																																																																																		
⑤	92	8	Fe																																																																																																																		
⑥	100	0	Fe																																																																																																																		
金属間化合物膜厚 1																																																																																																																					
界面は Fe リッチから Al リッチへ成分移行するため、上記のように膜厚が薄くても Al リッチな脆い金属間化合物は必ず生成される。次に一部ポイントを拡大し脆い成分層の膜厚を評価する。																																																																																																																					

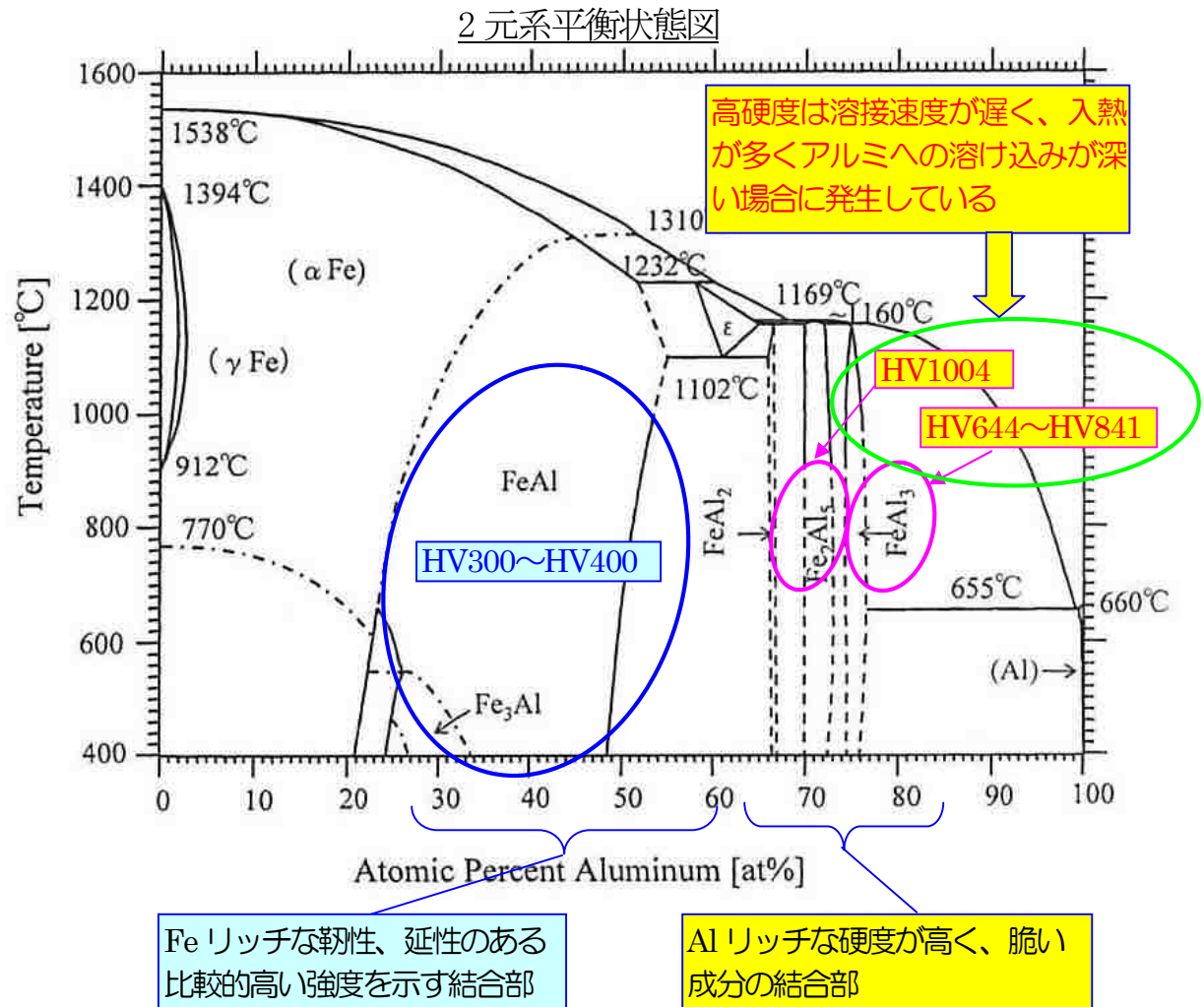
項目	H14-4-1	H14-4-2	H14-4-3
界面の成分分析2 注) 硬くて脆い金属間化合物Fe_2Al_5及びFe_3Al層を測定するため、該当するAlリッチとなるAl成分が65~85%間の膜厚を推測する			
評価	金属間化合物膜厚と脆い成分層（ここではFeAl_3とする）は比例関係にあることが伺える。 本試料 H14-4 は Al 板への溶接溶け込み深さを 0.2mm 狙いの浅い溶け込みのため、カット断面 H14-4-1、H14-4-2、H14-4-3 の3箇所いずれも金属間化合物の膜厚は 1.3~6.7μm 程度で非常に薄く膜厚との相関が顕著に出ないため、平成23年度に実施した Al 板への溶け込みの深い溶接試料で金属間化合物膜厚とFeAl_3厚を測定し、今回得られた傾向を立証する。		

(2) 試料No. 421・・・アルミへの溶け込みが0.87mm を分析・・・溶け込み0.2mm 狙いとの比較

項目	No.421 (No.420 と同溶接条件品)		
カット断面写真			アルミ板への溶接溶け込みが深い 試料の金属間化合物の膜厚測定 ・No.421 の溶け込み量：0.87mm 注) 溶け込み0.2mm 狙いの H14-4 との金属間化合物の 膜厚比較をする
Fe-Fe ライン Al-Al ライン Fe-Al ライン の成分分析	Fe-Fe ライン  測定基準 0 測定ライン 一方方向 +方向 Al 成分% ライン 0.73 成分% Fe-Fe 測定ライン 	Al-Al ライン  測定ライン Al 成分% ライン 成分% Al-Al 測定ライン 	Fe-Al ライン  測定基準 0 Al 成分% ライン 一方方向 +方向 成分% Fe-Al 測定ライン 
溶接金属は0.2mm 狙いの浅い溶け込みと同様の成分比率傾向である。 次に界面の金属間化合物の分析より相違点を確認する。			
界面の成分分析 注) 拡大箇所は上記「カット断面写真」に X、Y、Z で指示	 Al85% Al65% FeAl₃ 厚 1.9 μm 7.5 μm X 部	 Al85% Al65% FeAl₃ 厚 4 μm 31 μm Y 部	 Al85% Al65% FeAl₃ 厚 4.5 μm 14.5 μm Z 部
評価	アルミ板への溶接溶け込みが深くなると金属間化合物の膜厚が厚くなり、それに伴い脆い FeAl₃ 厚も厚くなる傾向が伺える。また、No. 420 では硬度測定結果より界面内壁の硬度が HV800～HV1000 に上昇しており、No.421 での FeAl₃ 相には硬度の高い部位は Fe₂Al₅ の成分相が出現し、更に脆い金属間化合物の生成層となっていると推定できる。		

3) 溶接断面の硬度測定及びSEMによる成分分析結果の総括

- (1) 溶接金属の成分分析より Fe-Al 界面を除き溶接金属成分は全て Fe で Al の融合はない。
- (2) 溶接金属の Fe 部は入熱により HV400 程度に硬度上昇しているが、Fe 母材硬度 HV200 レベルに対し高硬度化している訳ではなく、熱影響による Fe 側 HAZ 部の強度低下はないと推定できる。
- (3) Al 側も界面の HAZ 部が熱影響で若干硬度低下の兆候が見受けられるが、母材硬度の HV50 レベルと大差なく、溶接による Al 側 HAZ 部の強度低下はないと推定できる。
- (4) よって Fe-Al の接合は界面の金属間化合物のみの結合力に起因することになる。
- (5) 上述より文献を参考に下表 2 元系平衡状態図に今回測定の硬度を割り当て金属間化合物の生成層を評価し、レーザー溶接条件設定の妥当性を確認する。



- (6) 上表より Fe-Al の結合力を上げるためには FeAl 及び Fe₃Al 相を極力厚く、Fe₂Al₅、FeAl₃相を出来得る限り無くす溶接方法を見出せばこの異材接合は可能となると思料するが、現状ではこの相反する溶接は難しく、本研究より Fe₂Al₅、FeAl₃相の薄肉化及び溶接硬度上昇抑制を基盤条件に、一定の引張強度保持可能な溶接技術の開発を進めて行くのが実用化への近道である。

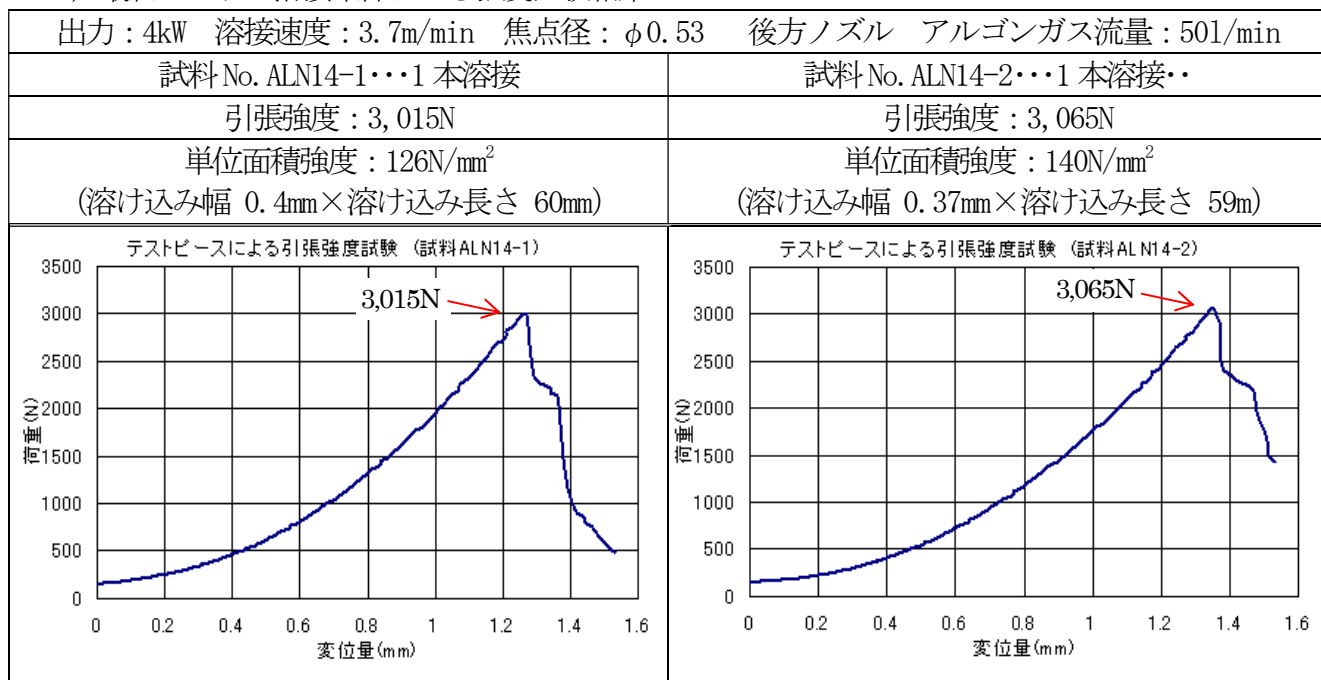
(7) 結論

テストピース H14-4 のレーザー溶接条件によるアルミへの溶接溶け込み 0.2mm 以下、金属間化合物膜 3 μm 以下狙いは上表状態図から妥当な設定レベルになっていると判断する。

注) 金属間化合物膜を薄くすると、接合力に影響する FeAl 層も薄くなるため、この FeAl 層 UP の代替を多本溶接による溶接面積確保の方向で対応する。

2-2-5 強度・耐久評価

1) 最終レーザー溶接条件による強度試験結果



(1) テストピースによる目標引張強度確保の溶接本数設定

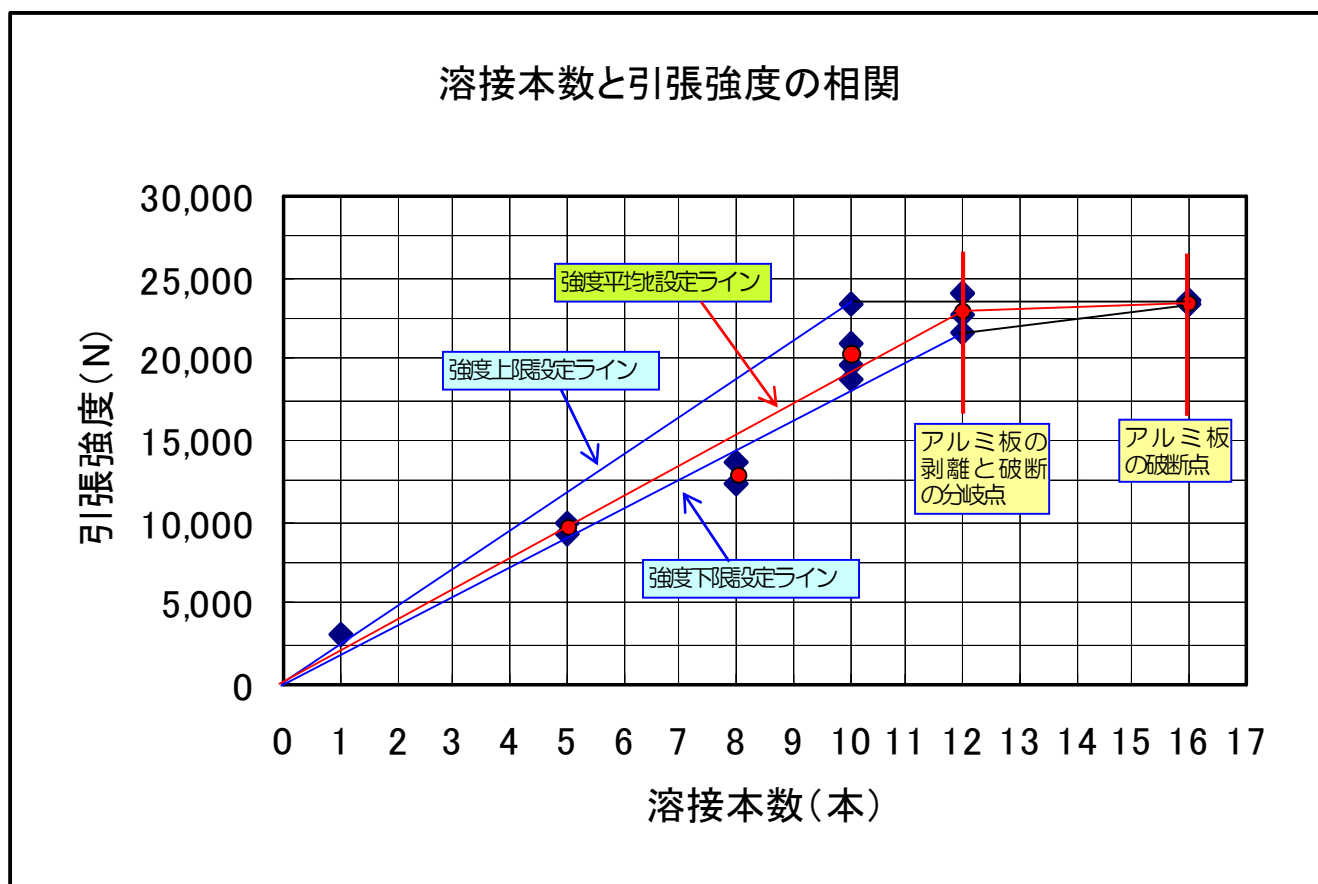
注) 試料No. ALN14-1 と No. ALN14-2 の平均値で算出

引張強度	$T : (3,015 + 3,065) / 2 = 3,040$	3,040N
溶接溶け込み幅	$W : (0.4 + 0.37) / 2 = 0.385$	0.39mm
溶接溶け込み長さ	$L : (60 + 59) / 2 = 59.5$	60mm
溶接単位面積当たりの引張強度	$F : T / (W \times L) = 129.9$	130N/mm ²
必要溶接面積	$S : 27,120N / F = 208.6$	209mm ²
必要溶接本数	$N : S / (W \times L) = 209 / (0.39 \times 60) = 8.9$	9本

(2) 溶接本数増加による引張強度の検証・・・多本による強度UP 効果の確認

試料No.	溶接本数 (本)	溶接ピッチ (mm)	引張強度 (N)		破損箇所	備考
				平均		
ALN14-1	1	—	3,015	3,040	剥離	
ALN14-2	1	—	3,065		剥離	
IF14-6	5	11	9,980	9,633	剥離	
IF14-7	5	11	9,285		剥離	
IE14-6	8	6	13,735	13,030	剥離	
IE14-7	8	6	12,325		剥離	
TC14-1	10	2	19,550	20,683	剥離	溶接ピッチ 2mm と 5mm で は差なく同等
TC14-2	10	2	21,000		剥離	
TD14-1	10	5	23,400		剥離	
TD14-2	10	5	18,780		剥離	
TTC14-1	12	4	23,980	23,038	アルミ熱影響部破断	アルミ熱影響 部の破断と剥 離の境界本数 分岐点
TTC14-2	12	4	21,600		剥離	
TTD14-1	12	4	23,950		アルミ熱影響部破断	
TTD14-2	12	4	22,620		剥離	

試料 No.	溶接本数 (本)	溶接ピッチ (mm)	引張強度 (N)		破損箇所	備考
				平均		
TSC14-1	16	3	23,480	23,505	アルミ熱影響部破断	23,500N 以上 でアルミの破 断領域に入る
TSC14-2	16	3	23,610		アルミ熱影響部破断	
TSD14-1	16	3	23,330		アルミ熱影響部破断	
TSD14-2	16	3	23,600		アルミ熱影響部破断	

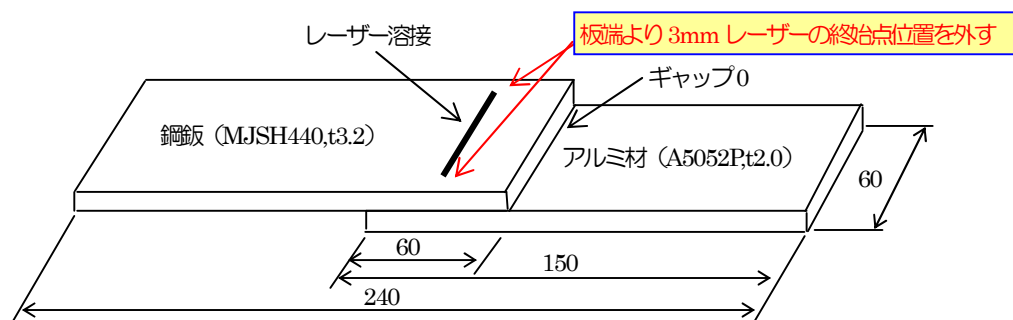


○結果：溶接本数 10 本頃より現状溶接の限界強度に近づくが、強度バラツキが発生する領域である。アルミ板の熱影響部が確実に破断する安定した強度を保持するためには 16 本以上が必要となる。但し、目標の引張強度 27,120N に対しては強度未達となるが、熱影響部 (HAZ 部) の強度低下を考慮すると本溶接条件が最適と判断する。

2-2-6 溶接形状の改良

1) 溶接形状の改良

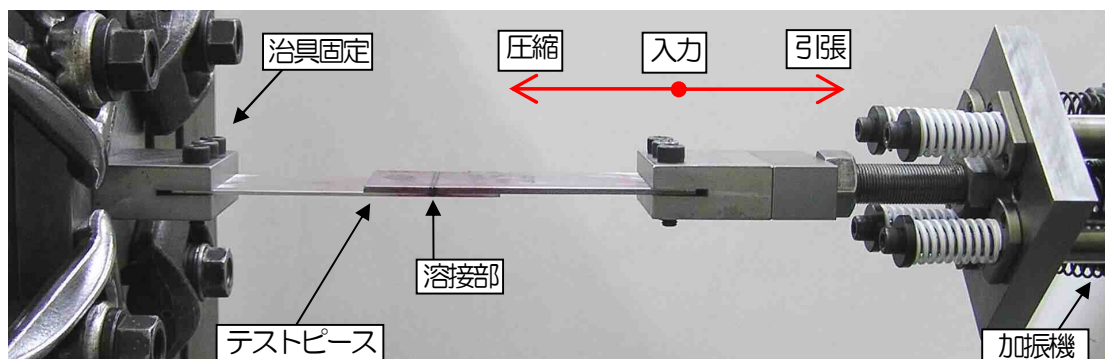
(1) テストピースによる最終溶接形状の設定



2) 最終レーザー溶接条件による耐久試験結果

(1) 引張入力を同一溶接条件群の引張強度の 1/4 狙いで設定し、まず耐久による破断モードを確認する。今回は破断確認のため圧縮方向へ 1,000N を負荷した。

(2) 耐久試験状況



(3) 引張耐久試験

注) レーザー溶接条件は 1) - 2 項の引張強度試験と同条件である。

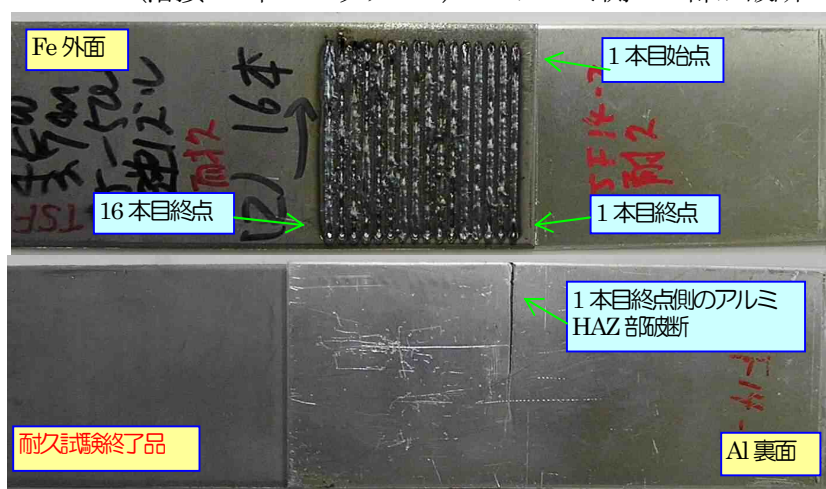
(3) - ① 引張耐久試験①・・・引張強度の 1/4 狙いに設定。10 本以上は 10 本の 1/4 に設定し、同一入力による本数増加の効果の有無（強度 UP）を評価する。

溶接数	ピッチ	試料 No.	溶接速度 (m/min)	ノズル位置	入力 (N)		引張耐久試験① 結果	
					圧縮	引張	破損回数 (回)	破損箇所
1	—	F14-3	3.7	後方設置	0	550	100 万 OK	—
10	5	TF14-2	3.7	後方設置	0	2,500	100 万 OK	—
12	4	TTF14-2	3.7	後方設置	0	2,500	100 万 OK	—
16	3	TSF14-2	3.7	後方設置	0	2,500	100 万 OK	—

(3) - ② 引張り耐久試験②・・・引張強度試験①で破損なき場合は入力を 2 倍に UP し継続する。

溶接数	ピッチ	試料 No.	溶接速度 (m/min)	ノズル位置	入力 (N)		引張耐久試験② 結果	
					圧縮	引張	破損回数 (回)	破損箇所
1	—	F14-3	3.7	後方設置	0	1,100	915	剥離
10	5	TF14-2	3.7	後方設置	0	5,000	10.7 万	剥離
12	4	TTF14-2	3.7	後方設置	0	5,000	1,200	剥離
16	3	TSF14-2	3.7	後方設置	0	5,000	21 万	アルミ側 HAZ 部

・TF14-2（溶接 16 本 ピッチ 3mm）・・・アルミ側 HAS 部が破断



○結果

- ①引張り耐久試験は溶け込み 0.2mm 狙いの溶接条件にすることにより、引張強度の 1/4 入力レベルには作動 100 万回以上に対応できるので、十分設計仕様に対応する可能性が出て来る。また、今回の溶接終始点をテストピースの端面より 3mm 内側に設定したことで、多本溶接による入力 UP にも疲労亀裂はアルミの HAS 部に出現し、先の溶接端面の切り欠きに亀裂が発生するという外乱の影響がなくなり効果が出た。
- ②但し、多本溶接するとアルミへの溶け込みが深くなる傾向にあり、また、溶け込みのバラツキも大きくなって来る。溶接本数 10 本では 10 本の溶け込み量の平均 $\mu=0.19\text{mm}$ 、バラツキ $R=0.19\text{mm}$ 、同様に 12 本は平均 $\mu=0.21\text{mm}$ 、ばらつき $R=0.49\text{mm}$ 、16 本は平均 $\mu=0.28\text{mm}$ 、バラツキ $R=0.59\text{mm}$ である。この点については課題を残した結果となり、この多本溶接の安定性について引き続き溶接条件詰を継続する。

(4) 剥離試験

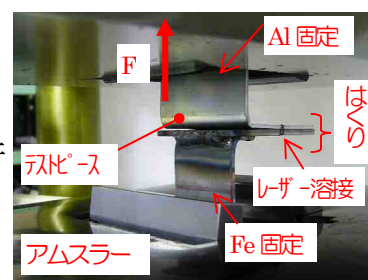
注) ノズル設置位置は旧設置の溶接方向に対し前方設置データで評価した。

剥離強度試料		TA14-3	TA14-4	TTA14-3	TTA14-4	TSA14-3	TSA14-4
異材 組合せ	アルミ	A5052P	A5052P	A5052P	A5052P	A5052P	A5052P
	鋼材	MJSH440	MJSH440	MJSH440	MJSH440	MJSH440	MJSH440
出力 (kW)		4	4	4	4	4	4
レーザー照射角 (°)		10	10	10	10	10	10
焦点外し (mm)		0	0	0	0	0	0
溶接速度 (m/min)		3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
溶接進行方向		前進	前進	前進	前進	前進	前進
シールドガス Ar (l/min)		50	50	50	50	50	50
ノズル径 (mm)		φ5	φ5	φ5	φ5	φ5	φ5
溶接面からのノズル距離 (mm)		10	10	10	10	10	10
ノズル角 (°)		50	50	50	50	50	50
溶接方向に対するノズル位置		前方設置	前方設置	前方設置	前方設置	前方設置	前方設置
溶接本数 (本)		10	10	12	12	16	16
溶接ピッチ (mm)		2	2	4	4	3	3
剥離強度 (N)		455	505	365	325	465	340
破損箇所		剥離	剥離	剥離	剥離	剥離	剥離

○結果：剥離強度は溶接本数を増加しても強度 UP は見込めない。

2-2-7 溶接条件の確立

以上より溶接終始点を製品の端面より 3mm 内側に設定し、溶接条件はアルミへの溶け込み 0.2mm 以下を狙った P22 の「1）-3 最終レーザー溶接条件の設定」表で固定し、この基礎試験による溶接条件にて製品への溶接を実施する。また、製品化については計画のバッテリークロスメンバーへ改良溶接を施し、その他部品へは剥離強度をキャンセルし引張強度のみ有効となる強度保持構造を採用し実用化を図る。



剥離試験状況

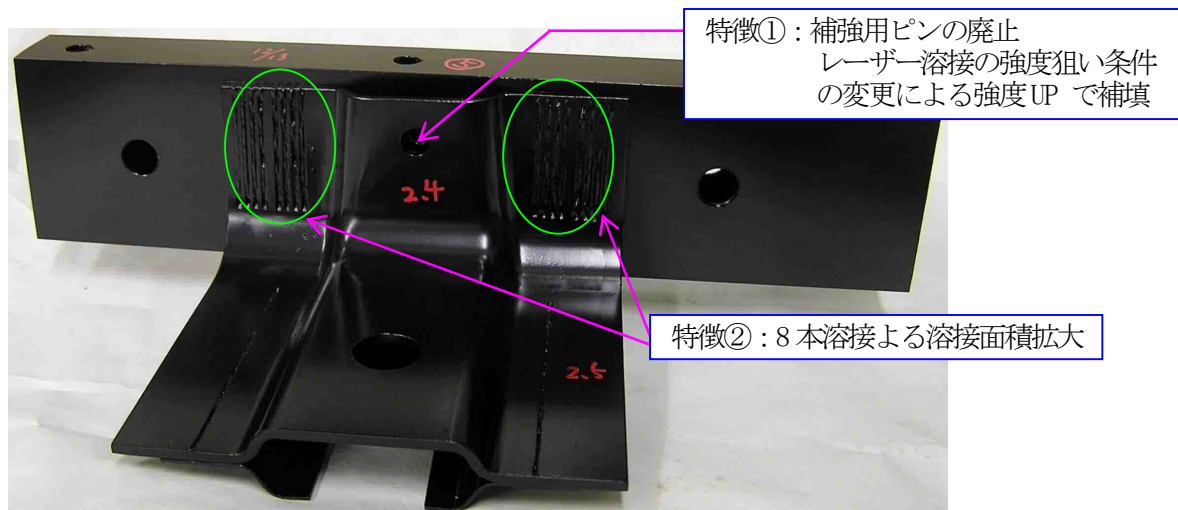
2-4 バッテリークロスメンバーへの反映

2-4-3 型・治具の製作

○治具は平成23年度のものをキャリーオーバーする。

2-4-4 試作品製作

○対象部品のBRKTの溶接本数を平成23年度に設定した2本から8本に増加し、アルミへの溶接溶け込みを0.2mm以下狙いのレーザー溶接条件にて接合及び補強用ピンを廃止し製作。



BRKT 異材レーザー溶接部 切り出し品

○結果

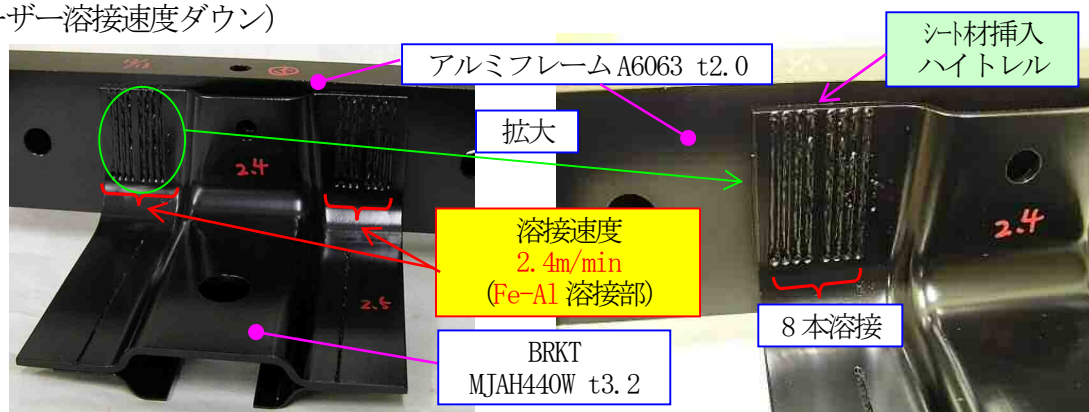
平成23年度に続き製品製作は異材溶接対象部のみとし、アルミフレームとBRKTの異材溶接部の切り出し品として製作。設計改良としてはBRKT端面を終始点位置に設定し溶接本数を2本から8本へ増加し、溶け込み0.2mm狙い（金属間化合物膜厚減少狙い）で溶接面積UPによる強度UPを図った。

注) 溶接終始点位置はテストピースからのトライは端面より3mm位置であるが、バッテリークロスメンバーの場合、異材間にシート材（ハイトレル）を挿入するため、亜鉛メッキのガス抜き用にシート材をレーザー切断する必要あり、BRKTの端面狙いとした。

2-4-5 試験評価・検証

○テストピースによる出力4kW、レーザー溶接速度3.7m/minをベースに供試品製作。

但し、バッテリークロスは異材間にシート材を挿入し200 μ mの隙が空くため、この隙間を考慮しアルミへの溶け込み深さが0.2mm以下となるように溶接速度を落とし微調整した。（レーザー溶接速度ダウン）



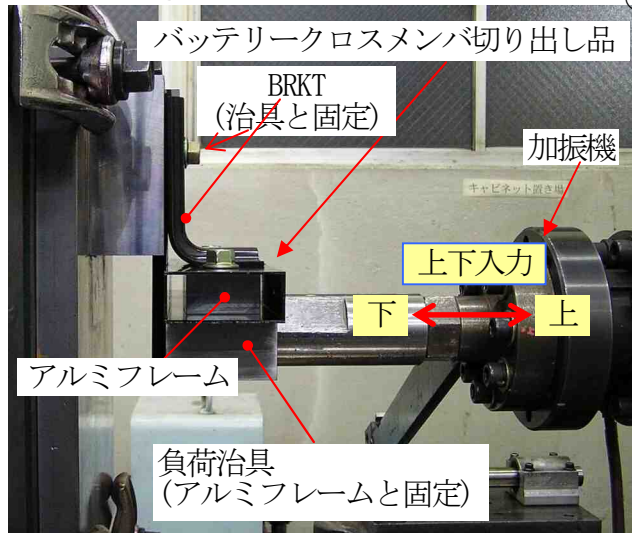
BRKT(t3.2)とアルミフレーム(t2.0)接合部

1) バッテリークロスメンバの切り出し品による強度評価

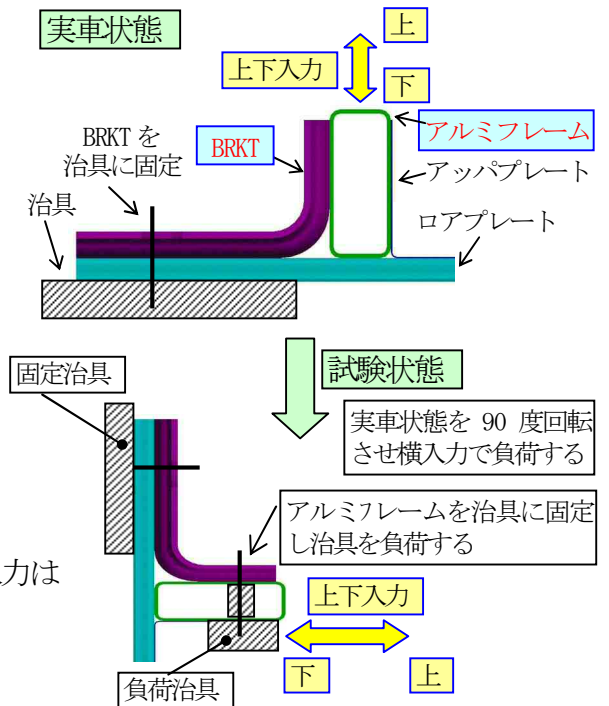
(1) 供試品素性及び引張強度結果

	異材溶接部①			引張強度 (kN)	シート材有無 (ハイトレ)	強度試験入力方向 (下図参照)	備考
	BRKT	アルミ	溶接速度 (m/min)				
試料1	t3.2	t2.0	2.5	19.5 (剥離)	有 (200μm)	下方向	正規入力
試料2	↑	↑	2.7	18.3 (剥離)	↑	↑	
試料3	↑	↑	2.4	38.8 (アルミ破損～剥離)	↑	↑	
試料4	↑	↑	↑	37.3 (アルミ破損～剥離)	↑	↑	
試料5	↑	↑	↑	5.9 (剥離)	↑	上方向	逆入力参考
試料6	↑	↑	↑	36.9 (アルミ破損)	無	下方向	シートなし参考

(2) 試験状況



○バッテリークロスメンバ切り出し品取付け状態

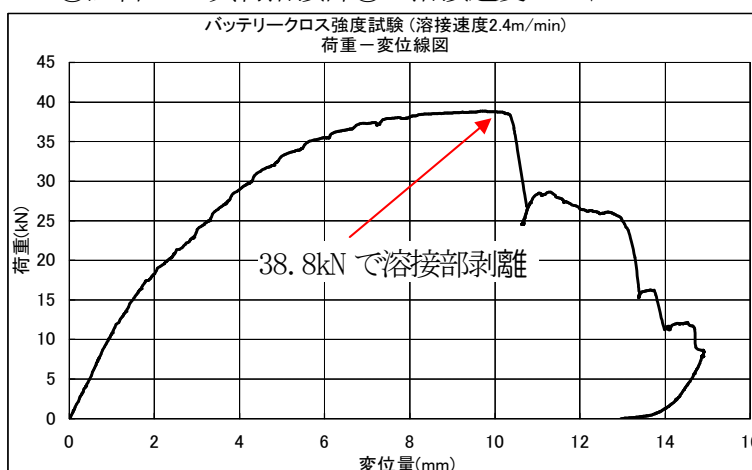


注1) 試験状態は右略図参照

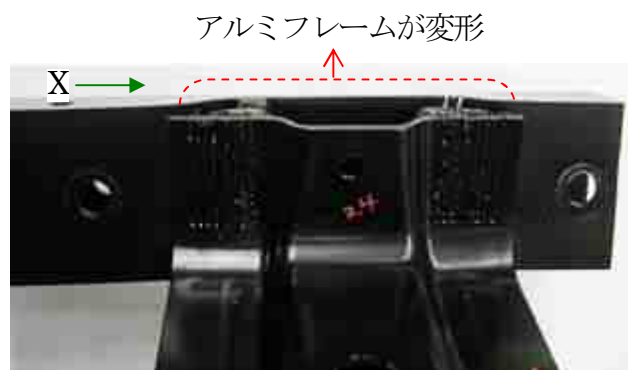
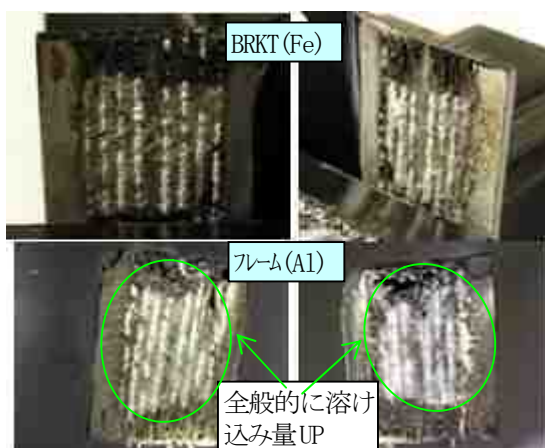
注2) 主に下方向入力は引張強度となり、上方向入力は剥離強度の変形モードを示す。

(3) 強度試験結果

③試料3…異材溶接部①：溶接速度2.4m/min



※ 試料3 の引張強度試験終了後の確認状況



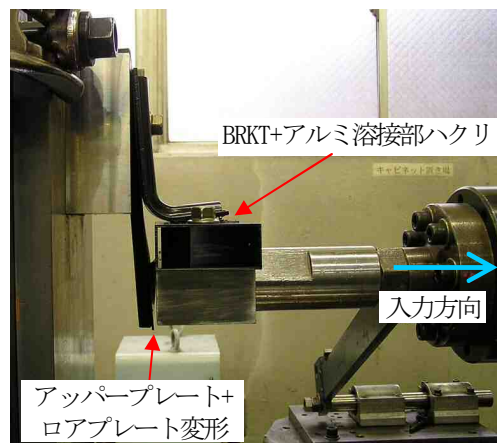
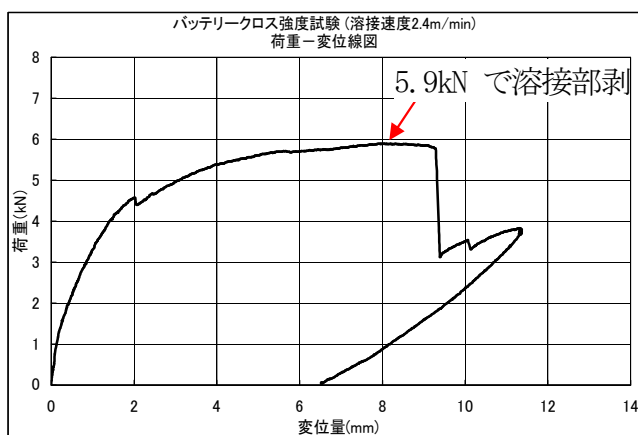
○結果：試料3、試料4 より引張強度は溶接速度を 2.4m/min の設定でアルミフレームが変形に至る強度まで確保できた。しかし、溶接の溶け込み状態はテストピースのような確実な溶け込み状態ではなく、溶け込みの浅い、溶け込み幅がぼやけた状態である。この状態は防食及び亜鉛メッキガス抜き用のシート材の影響も考えられるため、シート材なしでの引張強度を参考として試料6 で実施する。

注) データは (1) 項の「供試品素性及び引張試験結果」参照

X 視

⑤試料5・・・異材溶接部①：溶接速度 2.4m/min

注) 参考に逆入力を確認・・・剥離強度を想定



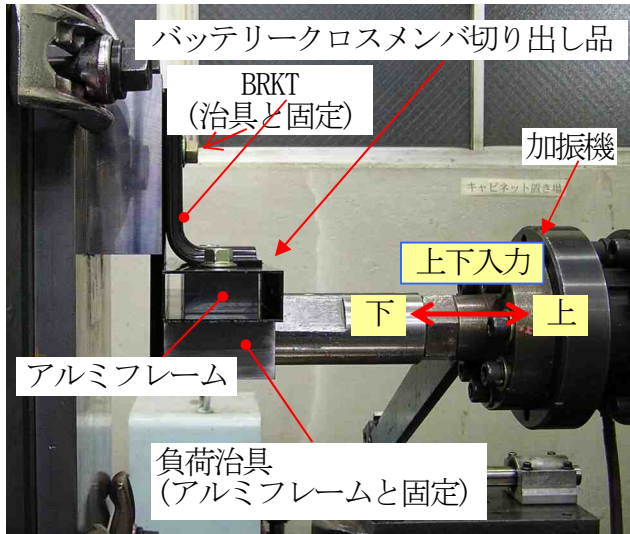
○結果：テストピース同様、剥離に対しては保持強度が低く実用性がない。

○考察：試料3、4 よりアルミフレームの破壊強度が 37kN レベルにあり、シート材有無に係わらずアルミフレームの引張保持強度程度は本溶接条件で確保出来ている。しかし、BRKT の剥離有無よりシート材がない方が異材間の接合力は良いと推定する。(剥離していないため溶け込み状態がみえない)

但し、剥離強度はテストピース同様、溶接本数を増加しても強度 UP は見込めない。

2) バッテリークロスメンバの切り出し品による上下入力耐久評価

(1) 上下入力耐久状況



○上下耐久入力テストはテストピースの耐久試験で設定したのと同様に、バッテリークロスメンバ切り出し品による強度試験結果より下方向入力の1/4狙いに設定した。

○上下耐久入力の設定値

- ・下方向：10kN
- ・上方向：0kN

○評価対象部：BRKT t3.2 とアルミフレーム t2.0 の異材接合部

- ・溶接速度は2.4m/min とする

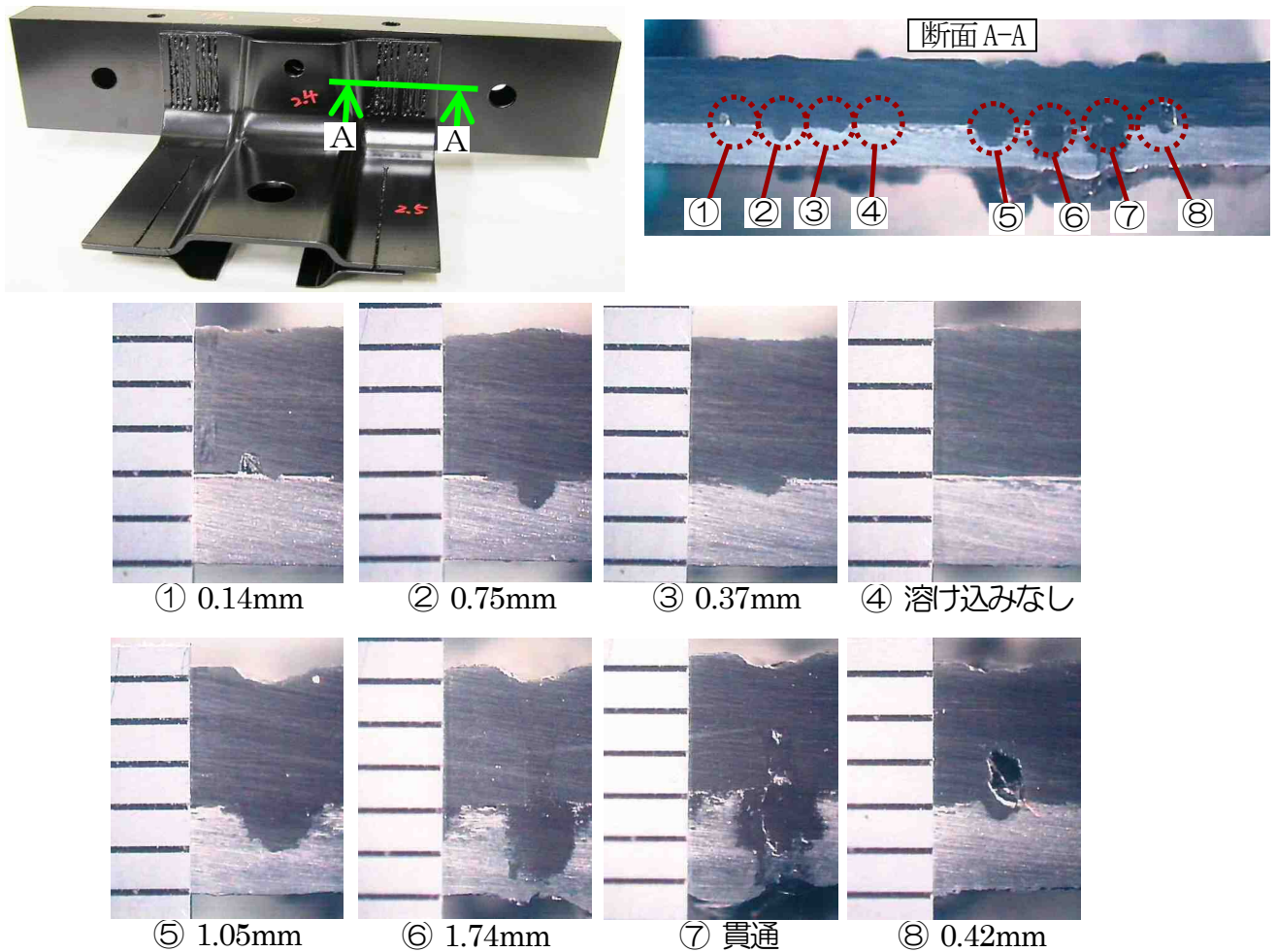
(2) 上下入力耐久試験結果

試料	対象部位		溶接速度 (m/min)	耐久入力 (kN)		シート材の有無	耐久試験結果	クラック部位
	BRKT	アルミ		下方向	上方向			
試料7	t3.2	t2.0	2.4	10	0	有 (200 μ m)	27万回クラック 40.8万回中止	アルミフレーム ・溶接の外れなし

(2) ー① クラック発生状況の確認



(2) -② 溶接溶け込み状態の確認・・・試料7の耐久終了後にカット確認



○考察

強度試験後の剥離状態から溶接速度 2.4m/min がアルミへの溶け込み深さ 0.2mm 相当と判断したが、耐久試験後の剥離されていない状態を断面カットすると、上断面写真のように溶け込みが不安定で、溶け込み 0～貫通まで出現している。これはシート材の影響で亜鉛メッキガス抜けの不均一、シート材の成分の悪影響(シート材上は溶け込みが悪い)が考えられるので、バッテリークロスメンバの溶接については別途メッキ鋼板での条件出しを並行検討していくこととする。

耐久強度的には下方向強度の 1/4 程度の入力には十分対応出来る実力は確保出来そうである。

なお、本年度はロボットの導入により可搬重量に余裕ができ、溶接速度に対する位置精度が向上し、溶接ビードの直線性及び溶接の溶け込みは安定した。

○総括

本バッテリークロスメンバの溶接性の研究ではシート材による溶接不安定の問題と剥離強度 UP の方策が見出せず課題が残った。

本年の「その他の部品の選定」ではバッテリークロスメンバで知り得たノウハウを生かし、この 2 点の問題を解消出来る部品選定を進めることとした。

よって、防食対応については室外部品からを比較的水分のかからない室内部品に変更し、また、構造的には剥離入力をキャンセル出来る構造を検討することとした。

また、同様にバッテリークロスメンバについても剥離入力キャンセル構造となる構想案を進め、引き続き継続検討をしていくこととした。

2-5 その他部品への反映

2-5-1 反映部品選定

バッテリークロスメンバの基礎研究の結果を基に剥離方向の荷重に対して弱い為、剥離荷重が入らない構造を検討し選定を行った。また電食対策としては水分の付着がない、車室内部品とし、ブレーキペダルとステアリングコラムを選定した。

2-5-2 形状・構造の検討

1) ブレーキペダル A s s y



2) ステアリングコラム A s s y



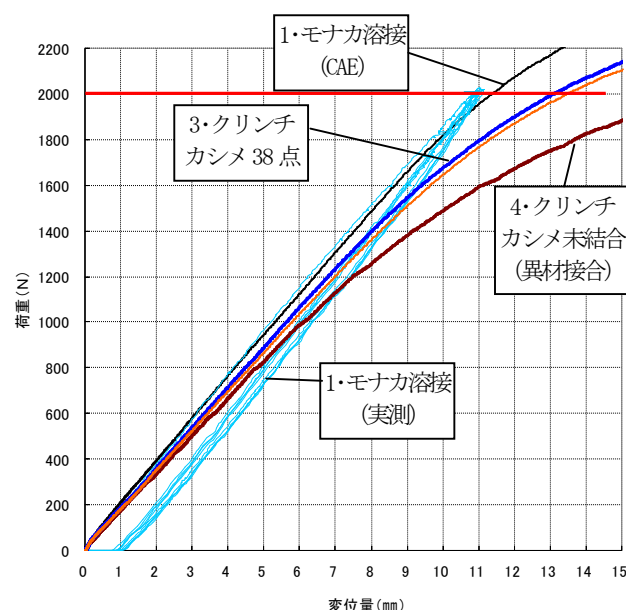
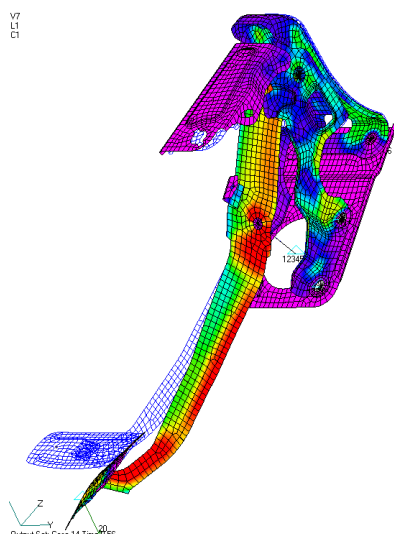
○狙い

- ・剥離方向の荷重に対して弱い為、剥離方向の荷重が入らない構造にする。
- ・異材溶接で従来の部品より軽量の部品の提案。
- ・ブレーキアームとアームBの異材接合とする。・・・Al と Fe のレーザー溶接とする。
- ・サポートブラケットとアウタージャケットの異材溶合とする。
・・・Al と Fe のレーザー溶接とする。

2-5-3 設計・強度分析

○ブレーキペダル

1. 2000N負荷時、応力分布図



○結果

クリンチのみであれば剛性が低い結果になっているが、溶接を行うことによりカシメと同等の剛性となる。

注) レーザー溶接の固定荷重は実機にて確認のこと

最終章 全体総括

3 年間による異材溶接の研究及び各アドバイザー様のご指導等により、レーザーによる異材接合についてはアルミへの溶接溶け込み 0.2mm 狙いにより金属間化合物の生成を抑えることが出来ることは立証できた。また、導入したロボットにより多本溶接等が精度よく出来、引張強度は目標(アルミ母材破壊)を達成できた。

しかし、溶接強度の要求性能では剥離強度が確保できない結果となった。また、管理面では溶接溶け込み 0.2mm 以下の管理及びシート材挿入時の製品の密着性管理等課題が残った。

溶接溶け込み 0.2mm での引張強度を有効に利用するため、剥離が負荷されない溶接継ぎ手構造としたペダルアームとステアリングコラムを設計し製品化を目指した。

ペダルアームについてはペダル Assy として性能評価を行い剥離荷重が入らないことを検証した。

また、ステアリングコラムについてはレーザー溶接により剥離荷重をキャンセルし、コラム Assy としての性能を確保することができた。

これらの構造・技術については特許申請予定で、申請完了次第ステアリングコラム等の造り込みが出来た製品については量産化を目指し自動車メーカー等へ展示会等を通じて売込みを図る。

今後、溶接溶け込み 0.2mm 以下の管理、ペダルの改良及びエンボス化継ぎ手構造等については、補完研究により技術の高度化と製品化を目指す。

以上