

抵抗スポット溶接の現状 と将来展望

ソノヤラボ(株) 代表
園家 啓嗣

1. 抵抗溶接の歴史

- ・ 1840年：英国の物理学者ジュールが導線の電気抵抗による発熱の法則（ジュールの法則）を発見した。
- ・ 1856年：ジュールが電気抵抗発熱した導線同士を圧着して接合部を作った（抵抗溶接の始まり）。抵抗溶接は実用化できなかった。
- ・ 1885年：アメリカのトムソンが電源を作り、同じ断面積の棒を突き合わせて抵抗溶接するバット溶接機を製作した。アメリカのコフィンが丸棒間で火花を飛ばした後加圧接合するフラッシュ溶接機を、トムソンが板をローラ電極で重ね抵抗溶接するシーム溶接機を発明した。
- ・ 1897年：アメリカのロビンソンが一方の板に突起を付けて通電加圧するプロジェクション溶接を考案した。
- ・ 1890年：ハーマッタが抵抗スポット溶接を発明した。
- ・ その後、1台の溶接変圧器で2点同時に溶接を行うシリーズ・抵抗スポット溶接が発明された。
- ・ また、何台かの溶接変圧器を直列につないだ溶接変圧器で2点から4点の溶接ができるマルチ・抵抗スポット溶接機が作られた。

- ・ **第2次世界大戦中**：航空機の軽量化と大量生産を行うためにアルミニウム合金を使用し、鋸に変えて精密な抵抗スポット溶接が行われるようになった。

現在は、機体は機械的接合(リベット、ボルト)がメインで、燃料タンクやエンジンには抵抗スポット溶接が適用されている。

- ・ **第2次世界大戦後**：アルミニウム合金の溶接に必要な大電流を得るため、電源方式の改良が行われ、コンデンサ式、三相整流式および三相低周波式などの溶接機が開発された。

- ・ また、抵抗溶接技術が飛躍的に発達し、自動車、鉄道車両、家電製品などの多くの産業分野で使用され、**ロボット**などの普及により自動化も進んでいる。

- ・ **現在**：ロボットと一体化した抵抗溶接が使用されている。
また、板厚についても**数 μ mの薄い金属部品から数10mmの厚鋼板**まで抵抗溶接が適用されるようになってきている。

2 抵抗スポット溶接(Resistance Spot Welding) の概要

2.1 抵抗スポット溶接の原理

図1に抵抗スポット溶接の原理を示す。

チップと呼ばれる主に銅合金でできたプラスとマイナスの電極間に通電したとき、部材はジュール発熱する。

この時、電極から板へ流入した電流は、電極先端面積のまま真っすぐに流れるのではなく、図2に示すように、板の中である程度広がって流れる（フリンジング現象）。

二枚重ねの場合は、接合面で電流が絞られ、この部分で通電面積が小さくなるので発熱量が多くなって接合部は熔融しやすくなる。その結果、接合面の熔融して凝固した箇所はナゲットと呼ばれ、その周囲の熔融はしていないが、熱の影響を受けて組織変化した部分を熱影響部（HAZ : Heat Affected Zone）と呼ぶ。

抵抗スポット溶接は非常に単純な原理で効率よく大量の接合が可能のため、大量生産の現場に向いている。

多種多様な金属板を同じ溶接機および電極チップを使用して簡単に溶接できる。

抵抗スポット溶接機は、金属板厚：数 μm の非常に薄く小さな部品を溶接することができる精密溶接機から、板厚：数10mmの厚板を溶接できる溶接機もあるので、用途に合わせて様々な分野で用いられている。

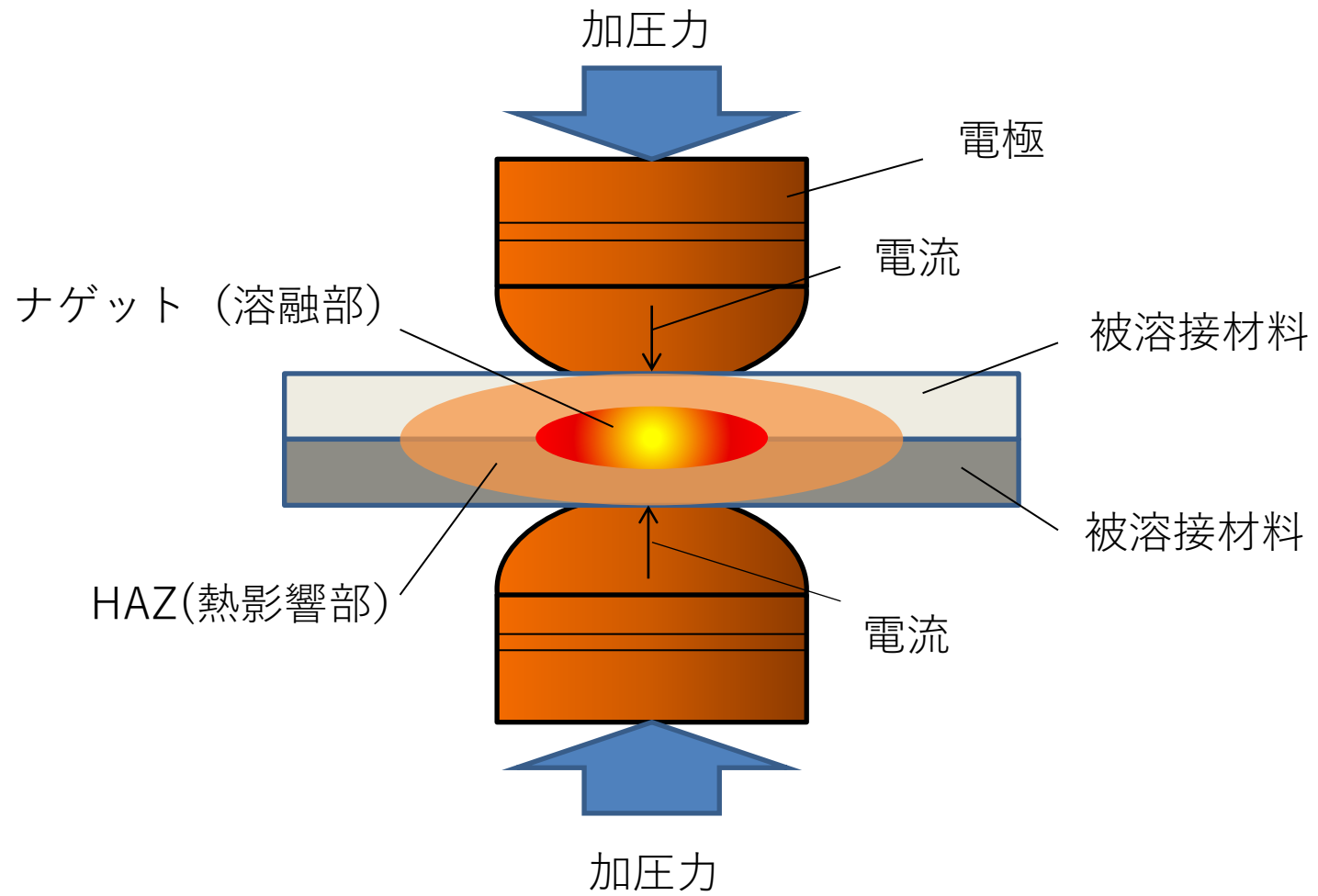


図1 抵抗スポット溶接の接合原理図

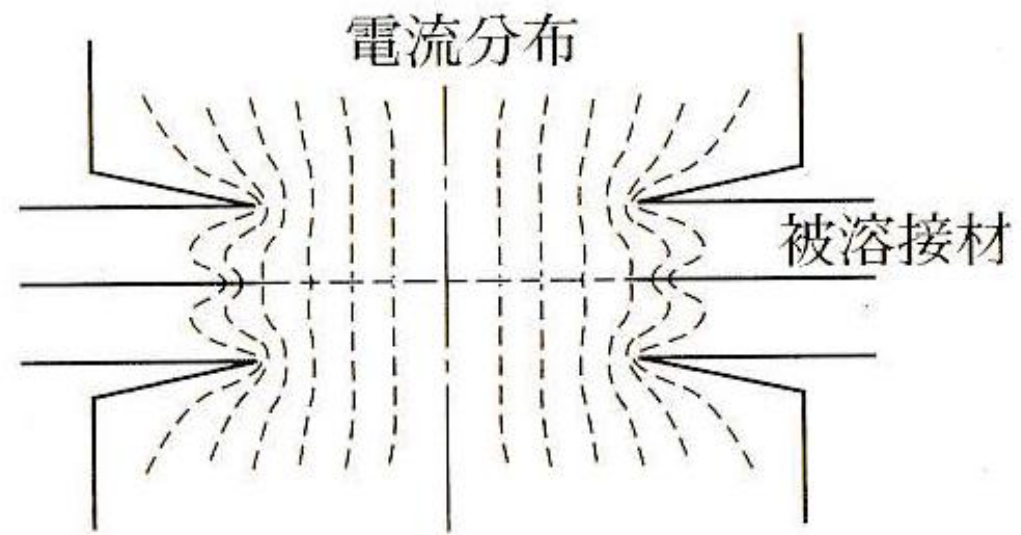


図2 電流のフリッジング現象（被溶接材料中での電流の拡がり）

2.2 溶接部の電流密度

電極と板や板同士が接触して接触界面で電流通路が制限されると、**接触界面周辺部に電流密度の高い部分が発生する。**

この電流の集中状態を有限差分法 (FDM: 偏微分方程式を差分近似することによって連立1次方程式 (代数方程式) を得る方法で、構造格子を用いる必要がある) で数値計算して求められた例を図1に示す。

電流密度は、電極面と板との**接触面のエッジ**と、板と板の接触面の通電領域のエッジのところ
高くなる分布となる。

この接触面周辺部での発熱量の増加は、短時間通電した場合に、この電流集中部だけが溶融する
リング状ナゲット (図2) の生成に結び付く。

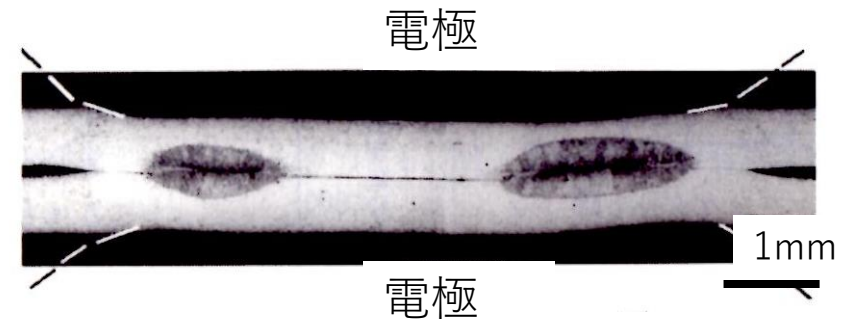
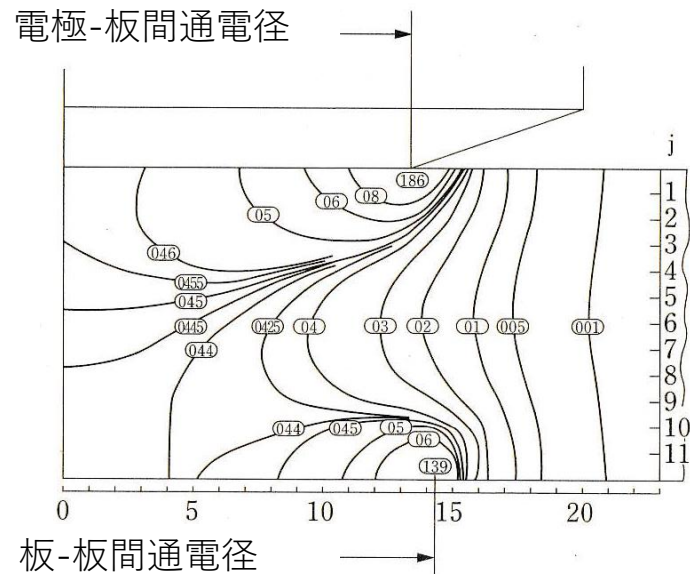


図2 リング状ナゲットの一例

図1 溶接部での電流密度分布 (等電流密度線) の計算例 (板厚12mm)

2.3 接触抵抗

板同士の接触表面は、ある程度凹凸であり、また酸化膜その他の不良導体が存在する。

接触面があることによって現れる抵抗を**接触抵抗**と呼ぶ。

接触抵抗には**集中抵抗**と**皮膜抵抗**がある。

集中抵抗は板の表面の凹凸のため電流は金属同士が接触したところに制限されて流れるため、電流通路の面積が小さくなることによって増加する抵抗である。

皮膜抵抗は、板表面に存在する**抵抗の高い酸化皮膜**によって、電流が流れにくくなることによって生じる抵抗である。

アルミニウムの酸化皮膜は、固有抵抗が非常に高いため、皮膜を通して流れる電流はほとんどないと考えられる。

加圧力と加熱によって、表面凹凸（集中抵抗）や酸化皮膜（皮膜抵抗）などは溶接を行うための通電時間に比べてかなり**短い時間内（千分の数秒）に消滅する**。

表面に凹凸や酸化皮膜があるということは、通電初期の実際の通電面積は見かけの表面積に比べて小さいことを意味する。

導体の電気抵抗は断面積に逆比例するから、接触面での最初の発熱は部材の内部に比べて大きいことになり温度上昇も大きい。

発熱を支配する電気抵抗係数は+（プラス）なので、温度が高い接触面付近では部材内部に比べて温度上昇が大きいことになる。

コンデンサ式溶接機のように短時間に大電流を流す方式の特殊な溶接機では、接触抵抗を積極的に温度上昇に利用しようとするものもある。

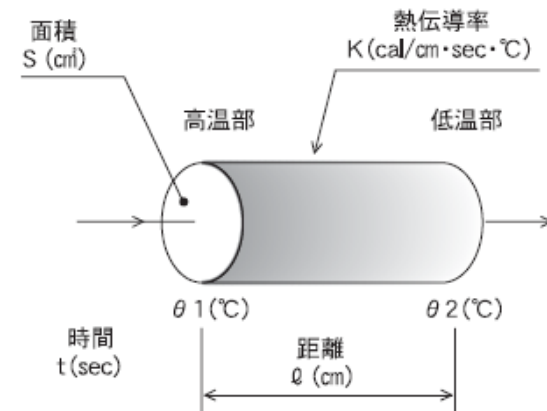
一般的に抵抗スポット溶接では**接触抵抗による温度上昇は加圧力による塑性変形の効果もあり、無視してもよい程度である**。

2.4 溶接部の冷却

熱伝導は、熱が温度の高いところから低いところへ物体内を伝わっていく現象である。

断面積 S (cm²)、長さ l (cm)、熱伝導率 K (cal/cm·sec·°C)の物体の一端の高温側の温度を θ_1 (°C)、他端の低温側の温度を θ_2 (°C)にした時、 t (sec)間に高温部から低温部に流れる熱量 Q (cal)は次式になる。

$$Q = \left((\theta_1 - \theta_2) / l \right) \cdot K \cdot S \cdot t$$



$$\text{伝導熱量 } Q = \frac{\theta_1 - \theta_2}{l} \cdot k \cdot s \cdot t \text{ (cal)}$$

図 熱伝導現象の概要

溶接部の温度分布

金属材料内を伝導する熱量は、温度勾配、熱伝導率、断面積および時間に比例して大きくなる。抵抗スポット溶接において、接合部のジュール熱で発熱した熱量は、熱伝導によって部材から電極へ90%以上が逃げるため、例えば接触抵抗利用型のコンデンサ式溶接機を用いた場合は、接合部付近の温度が最も上昇する。

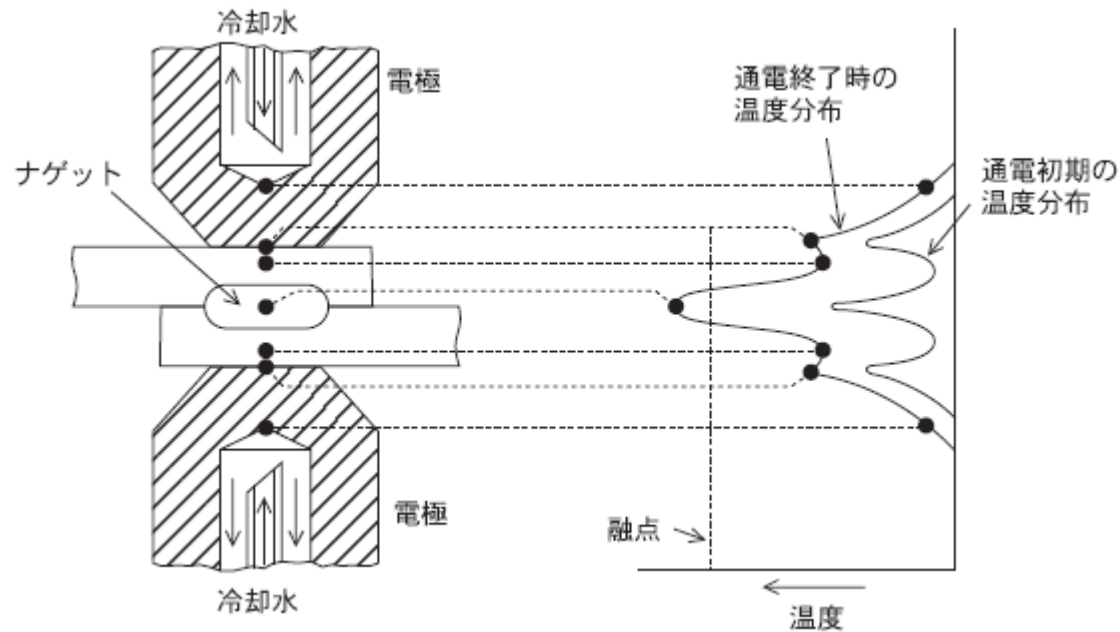


図 抵抗スポット溶接部の温度分布
(コンデンサ式溶接機使用)

2.5 抵抗スポット溶接部の特徴

抵抗スポット溶接部の断面模式図を図 1に示す。

ナゲットとは接合部に生じた溶融部が凝固した部分で、一般的には接合面を中心として**基石状**の形状をしている。

このナゲットの接合界面の長さを**ナゲット径**、ナゲットの厚さを**溶込み深さ**といい、抵抗スポット溶接部の各種の強度を支配する最も大きな因子である。

次に**コロナ・ボンド**はナゲットの周辺で圧着された部分のことをいう。

熱影響部（Heat affected zone , HAZと略記される）は、ナゲットの周辺の高温になった領域で、金属組織的に変態、変質した部分のことをいう。

抵抗スポット溶接の接合部には、溶接条件が不適切な場合には表 1に示したように、次のような各種の欠陥が発生する。

(1) 過大なくぼみ（インデンテーション）、(2) 表散りによるバリ、(3) ブロー・ホール、(4) シート・セパレーション（板の浮き上がり）、(5) 中散り、(6) 焼け、(7) 割れ、(8) ピット、(9) 溶着

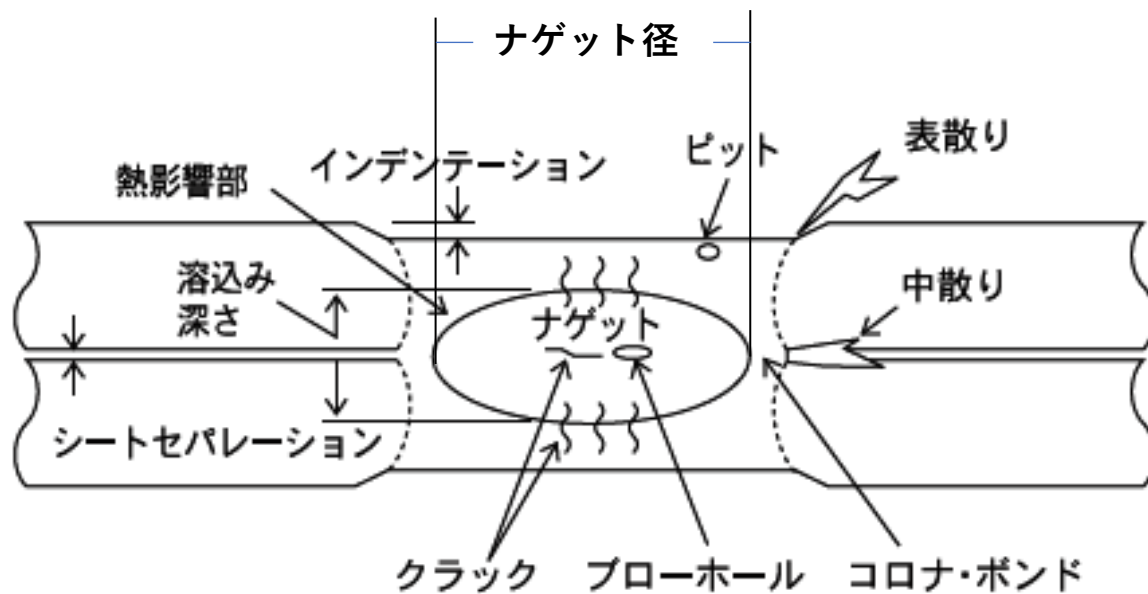


図1 抵抗スポット溶接部の断面の模式図

表1 各種の溶接欠陥

| 用語 | 用語の意味 |
|------------|---------------------------|
| ナゲット | 接合部分に生じる溶融・凝固した部分。 |
| コロナボンド | ナゲットの周囲に生じたリング状の圧接部分。 |
| 熱影響部 | 熱で組織や冶金的・機械的性質に変化が生じた部分。 |
| インデンテーション | 電極によって生じる母材表面のへこみ。打痕ともいう。 |
| 中散り | 溶融金属がコロナボンドを破って飛び出してくること。 |
| 爆飛 | 過大条件で爆発的に飛散し、溶接部に穴があく現象。 |
| 表面散り | 電極と板の接触面で板が溶融して飛び出してくること。 |
| ピット | 打痕部分に生じる表面に口を開いた穴。 |
| ブローホール | ナゲットの内部に生じる気孔。 |
| クラック | ナゲットが凝固収縮する時に生じるひげ巣等の割れ。 |
| シートセパレーション | 熱膨張と塑性変形で生じる板間の隙間。 |

溶接欠陥とその対策

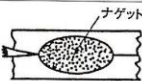
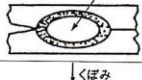
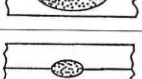
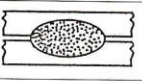
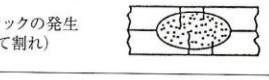

表散りは、電極と板の接触面で板が溶融して飛び出す現象で加圧力不足や電極の問題が考えられるので、**加圧力を上げる・電極の先端修正が必要**である。

中散りの場合は、過電流か加圧力不足が考えられるので、**通電時間または電流値を下げるか加圧力を高くする必要**がある。

溶着の原因は、板と電極間に溶融層ができるために発生する現象で、対策として発熱密度を下げてナゲット厚さを薄くし、**板と電極界面温度を下げる**ことが有効である。

その他の溶接欠陥の発生とその対策は次表に示す。

表 溶接欠陥の発生とその対応策

| スポット溶接に伴う諸現象 | | 対応策 (番号は対応策の優先順位) | | | | |
|-----------------------|--|-------------------|------|----------------------|------------------------------|---|
| 項目 | | 電極加圧力 | 溶接電流 | 時間 | 電極 | その他 |
| 中散りによるバリ |  | ③上げる | ②下げる | — | ①上下電極の芯合せをする ④電極先端径を大きくする | 正しい位置に打点する ホーン、ホルダの剛性を増す 接合面の異物混入を避ける |
| 表散りによるバリ |  | — | ①下げる | — | ②電極先端径を大きくする | 表面に異物付着をなくする |
| 爆飛 |  | ②上げる | ①下げる | — | — | 被溶接物のなじみを良くする |
| 過大なくぼみ |  | ③下げる | ②下げる | — | ① R 形電極を用いる | — |
| ブローホール |  | ②上げる | ①下げる | ③保持時間増やす ④通電時間増やす | — | — |
| ナゲットの寸法不足 |  | ④下げる | ③上げる | ②通電時間増やす | ①ドレッシング又は電極交換する | ホーン、ホルダの剛性を増す 偏心加圧を避ける |
| 溶込みのアンバランス |  | — | — | — | ①上下電極先端形状の確認・修正 | — |
| 過大な板の浮上り (シートセパレーション) |  | ④下げる | ③下げる | — | ①電極先端径を大きくする ②上下電極の芯合せをする | 被溶接物のなじみを良くする |
| ナゲット径のバラツキ大 |  | — | — | — | ①ドレッシング又は電極交換する | 電源電圧の変動 被溶接物のなじみを良くする |
| クラックの発生 (たて割れ) |  | — | ①下げる | ②通電時間減らす | — | 被溶接物のなじみを良くする |
| クラックの発生 (ほし割れ) |  | ③上げる | — | ①保持時間増す | ②電極先端半径値を大きくする | 加熱、加圧パターンの検討 |
| クラックの発生 (分流による円周割れ) |  | — | — | — | — | 分流抑制のためダイレクト通電に変更する |

3. 抵抗溶接機の種類

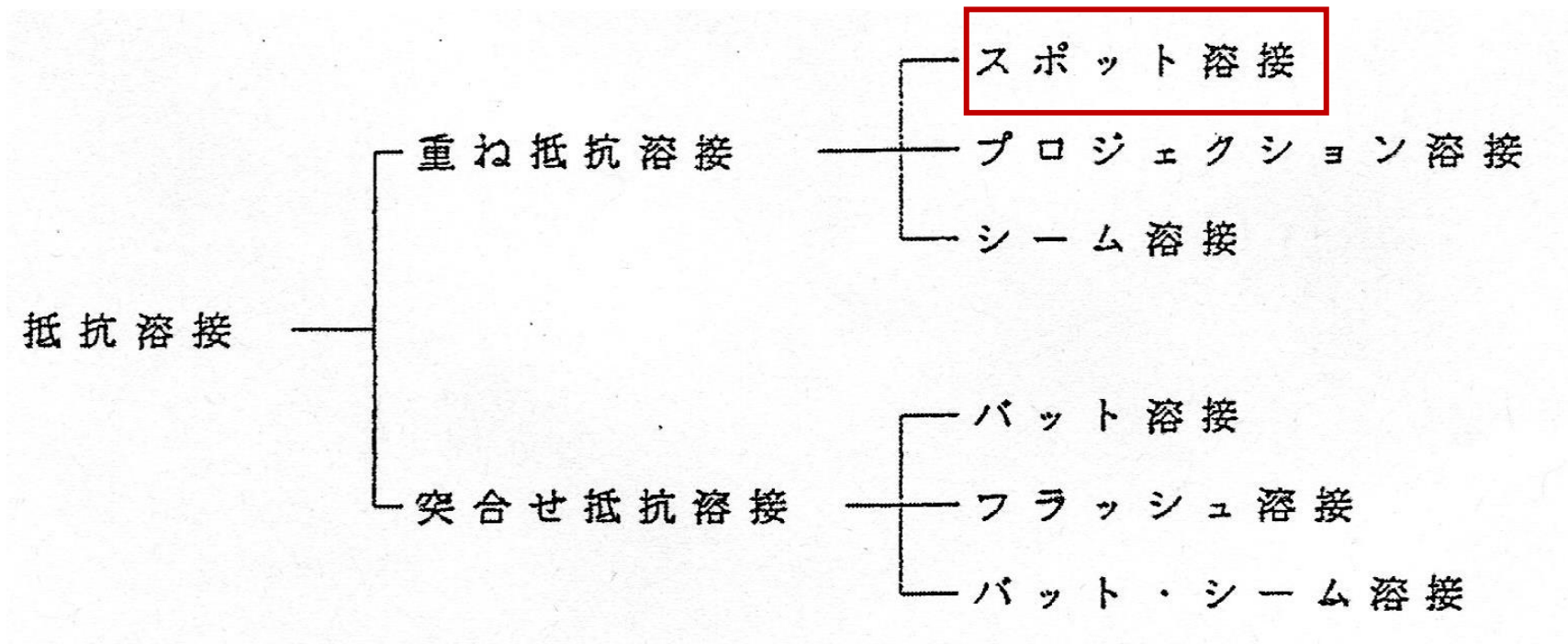
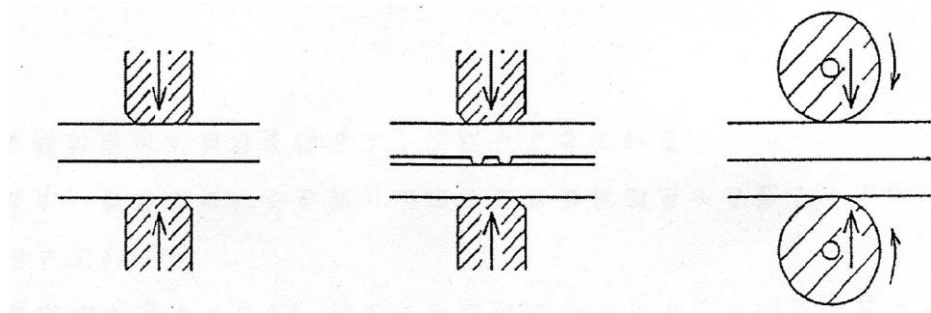


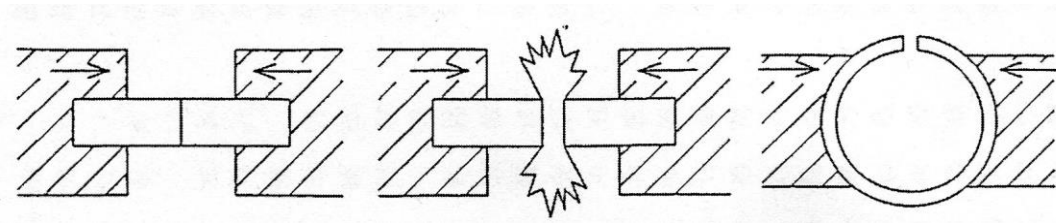
図 抵抗溶接の種類



スポット溶接

プロジェクション溶接

シーム溶接



バット溶接

フラッシュ溶接

バット・シーム溶接

図 各種抵抗溶接法の部材と電極の位置関係

3.1 重ね抵抗溶接機

抵抗スポット溶接、プロジェクション溶接、シーム溶接

3.1.1 溶接装置の機械的形態から分類

表 重ね抵抗溶接機の機械的形態からの分類

| 呼び方 | 溶接機 | 特性 |
|--------|----------------------------------|---|
| 定置式 | スポット プロジェクション シーム | <ul style="list-style-type: none">・溶接機据え置き形・溶接機能ユニット一体化・被溶接物を移動し溶接・汎用機として幅広い用途 |
| ポータブル式 | スポット(ガン) シーム | <ul style="list-style-type: none">・ガン可搬式(作業者による)・溶接機能ユニット分離形・被溶接物を固定して溶接 |
| ロボット式 | スポット(ガン) シーム | <ul style="list-style-type: none">・ガン可搬式(ロボットによる)・溶接機能ユニット分離形・被溶接物を固定して溶接 |
| 特殊機 | マルチ・スポット 多連シーム溶接機 その他各種溶接機 | <ul style="list-style-type: none">・特定の被溶接物を対象・製作依頼者の仕様で製作・小品種多量生産設備向き |

(1) 定置式

溶接機の構成機器を本体フレームにすべて組み込み、一体化して据え置きタイプにしたもので、溶接機は固定され、被溶接物を移動させて次々と溶接していく方式の溶接機である。

(2) ポータブル式

被溶接物が大きくて移動が困難な場合は、被溶接物を固定し、溶接機を移動させて溶接するタイプで、加圧装置と電極まわりのユニットをフレキシブルな二次導体で溶接変圧器とつなぎ、人間による可搬を容易にした溶接機である。

特に、この抵抗スポット溶接用の加圧・電極まわりのユニットを溶接ガンと呼んでいる。

(3) ロボット式

広い意味ではポータブル式であるが、人間が溶接ガンを持つ代わりに、ロボットに溶接ガンを持たせて作業する方式をロボット式と呼んでいる。

(4) 特殊機

標準的な溶接装置の他に、目的とする溶接機に合わせ、専用に設計されるものを特殊機と呼んでおり、多種多様な溶接装置が製作され使われている。

これらの装置は、セット用ジグ・搬入・搬出装置などを備えて自動化されたものが多い。例えば、マルチ・スポット溶接機では、溶接位置にスタッドガン（電極と加圧装置のユニット）などの溶接ガンを数本以上配置し、短時間で多点溶接できるようにした方式がとられている。

3.1.2 溶接装置の電源方式からの分類

溶接変圧器の二次側溶接機電極側に流れる電流が交流か直流かによって大きく分けられる。

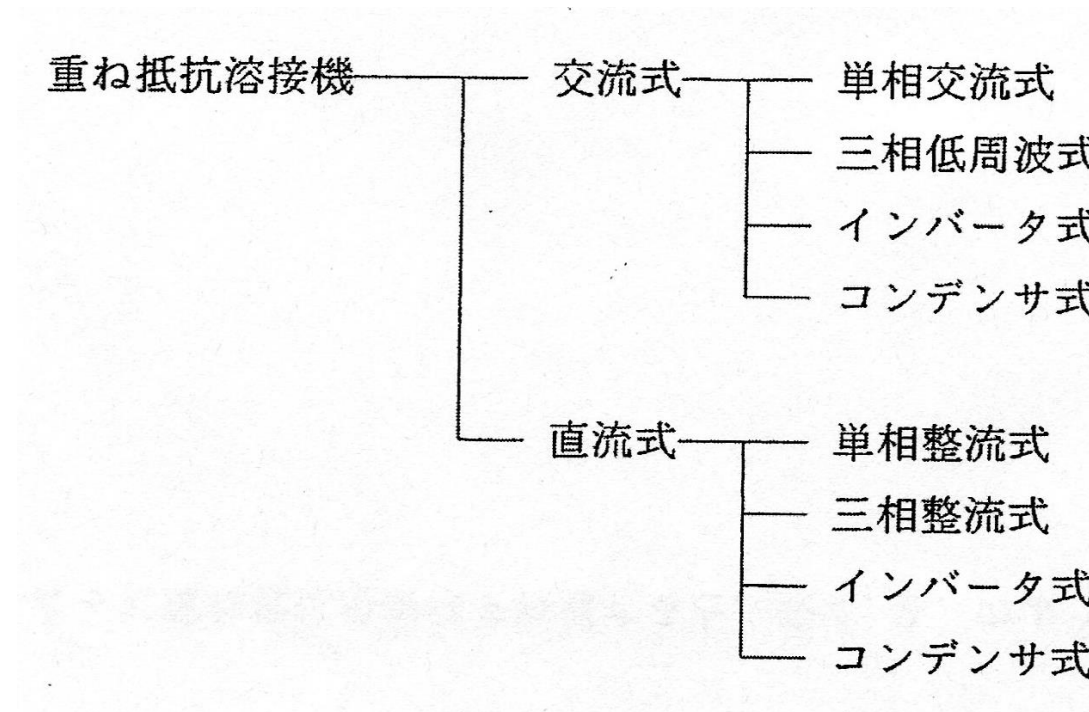
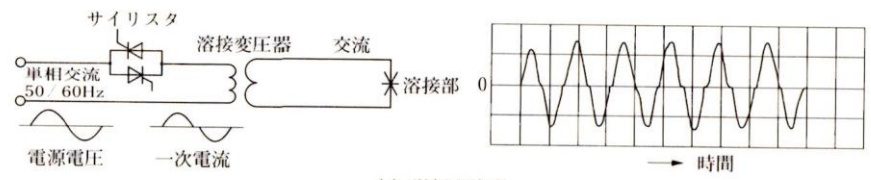
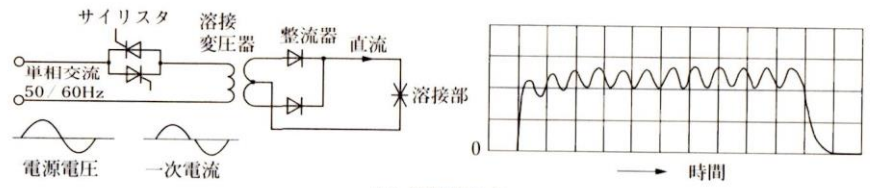


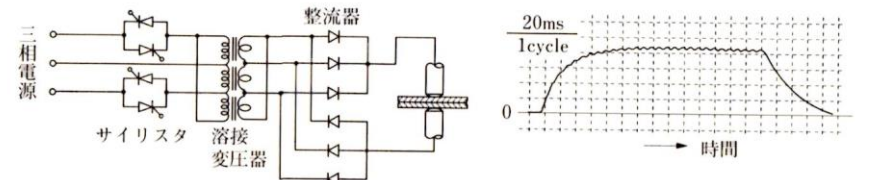
図 重ね抵抗溶接機の電源方式による分類



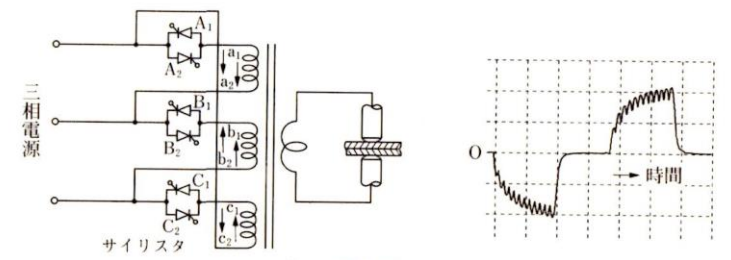
(a) 単相交流式



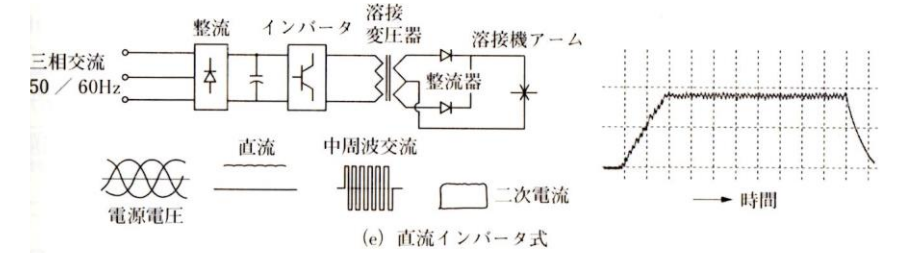
(b) 単相整流式



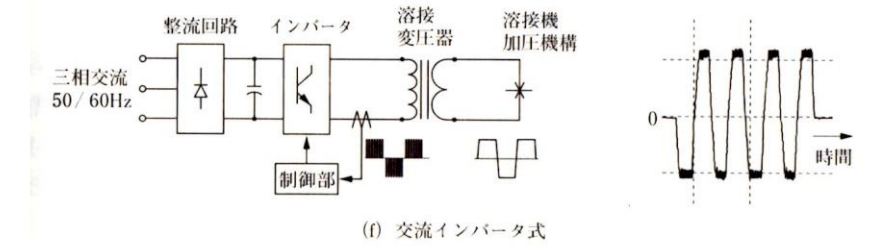
(c) 三相整流式



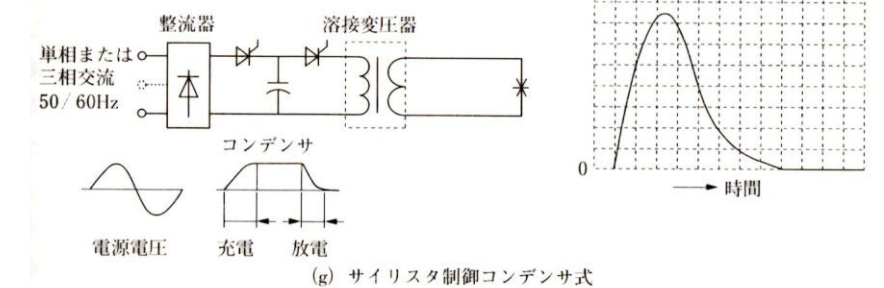
(d) 三相低周波式



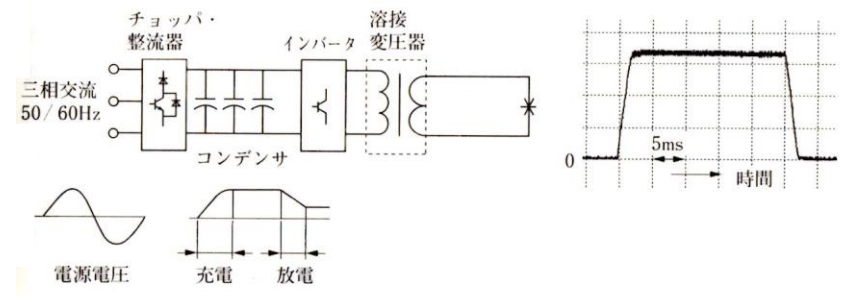
(e) 直流インバータ式



(f) 交流インバータ式



(g) サイリスタ制御コンデンサ式



(h) インバータ制御コンデンサ式

図 各電源方式の回路構成と二次電流波形

(1) 交流式

① 単相交流式

この方式は最も古く、現在ある抵抗スポット溶接機の90%以上はこの方式である。単相交流電源によって溶接変圧器の二次側に大電流を発生させ溶接用電源として使うシンプルな方式である。

② 三相低周波式

3個の1次コイルと1個の2次側コイルから構成された溶接変圧器を三相電源に接続し、二次側に3~15Hzの低周波電流を発生させる方式である。

三相平衡負荷であり、力率が良い(85%以上)、溶接トランスが小型であるという長所がある。三相電源を一次側で低周波に周波数変換し、ふところ深さによるリアクタンスの影響を少なくすることを目的としている。

アルミニウム製車輛の溶接などの大容量溶接機として使われている。

③ 交流インバータ式

単相交流用溶接変圧器にインバータ装置を接続して動作させる方式である。溶接変圧器の二次側には整流器の挿入はなく、インバータの動作を制御することによって、溶接変圧器の二次側に流れる溶接電流を自由に設定できる。

(2) 直流式

直流方式は二次側のふところ寸法を大きくしても溶接入力(kVA)がそれ程増えない利点がある。

① 単相整流式

単相交流式の溶接変圧器二次側に**整流器**を入れて二次電流を直流化したもので、比較的**安価**である。単相交流式に比べて溶接機の**入力kVAを2/3程度**に低減できる。

$$VI=I^2R\cos\theta \quad \cos\theta=R\sqrt{R^2+x^2}$$

② 三相整流式

三相入力に対応して3回路の変圧器を1台の溶接機のために組み入れたものである。溶接変圧器二次側には6個の大電流整流素子が組み込まれており、**溶接変圧器が大きくなる**だけでなく、高価である。ただ、**10万A以上の大電流**が必要な場合は現在も使用されている。

③ 直流インバータ式

インバータ制御で**周波数を600~10kHz程度上げた電源**を作ることにより溶接変圧器の鉄心(コア)寸法を大幅に小さくでき、**変圧器の小型が可能**となった。

周波数が高く、交流回路のインピーダンスが高くなるので、溶接変圧器の**二次側に整流素子**を取り付け整流して脈動の少ない直流電源が得られる。周波数を高くすることにより変圧器の大きさを小さくすることが出来、**溶接機の軽量化が可能**となった。

ふところの大きな溶接機(腕の長い溶接ガン)と組み合わせても**溶接電流の低下は少ない**。

この方法は、ロボットに溶接機を搭載したいいわゆる変圧器付きガン(通称**ガントラ**)として1980年代に開発されてその後実用化されるようになった。

$$\Delta B=V/(\sqrt{2}\pi fAeN)\doteq V/(4.44fAeN) \quad B:\text{磁束密度、}V:\text{電圧、}Ae:\text{鉄心の断面積、}N:\text{巻き数、}f:\text{周波数}$$

ΔB と V を一定にすると、 $fAeN$ が一定、つまり周波数が高くなれば Ae と N を小さくできる。 Ae と N で鉄芯の大きさが決まるから、 f が高くなれば、トランスは小さくできる。

④コンデンサ式

大容量の電解コンデンサに低いレベルで時間をかけて電気エネルギーを蓄積させ、溶接するとき数ms～数10msの短時間で放出して溶接電流として使う方式である。

通電開始だけをサイリスタで制御する旧来のタイプ（サイリスタ制御コンデンサ式）と、トランジスタを利用して通電のオン／オフ時間を高速で制御して一定の溶接電流を流すことが出来るインバータ制御コンデンサがある。

コンデンサ方式では電流は直流なので、設備電源容量を大幅に低減できるが、打点速度に制約がある。また、価格が高い。

皮相電力(電源から供給する電力)： $VI=I^2R/\cos\phi$ $i_2=v_2/Z_2$

4. 抵抗スポット溶接機の適用分野

4.1 自動車関連

自動車関連で使われている溶接機は、大きく分けて**ボディの組立てライン**での溶接および車体の各パーツの溶接の2つに分けられる。

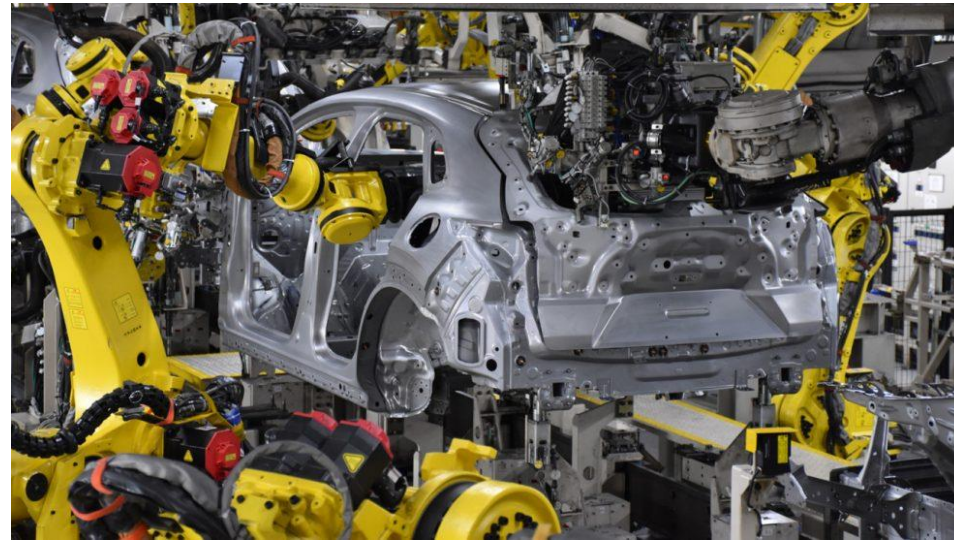


図 自動車生産ラインでのボディ組立て溶接
(マツダのHP)

4.2 土木、建築関連

土木、建築関連では大きな部品から小型のものの溶接まで、抵抗スポット溶接は至る所で使用されている。

大型のものは道路舗装用鉄筋や建築用の金網を溶接する多電極のマルチ・抵抗スポット溶接機や大容量の抵抗スポット溶接機がある。

鉄筋柱の溶接や**プレハブ建築部材**の溶接などにも抵抗スポット溶接が多用されている。

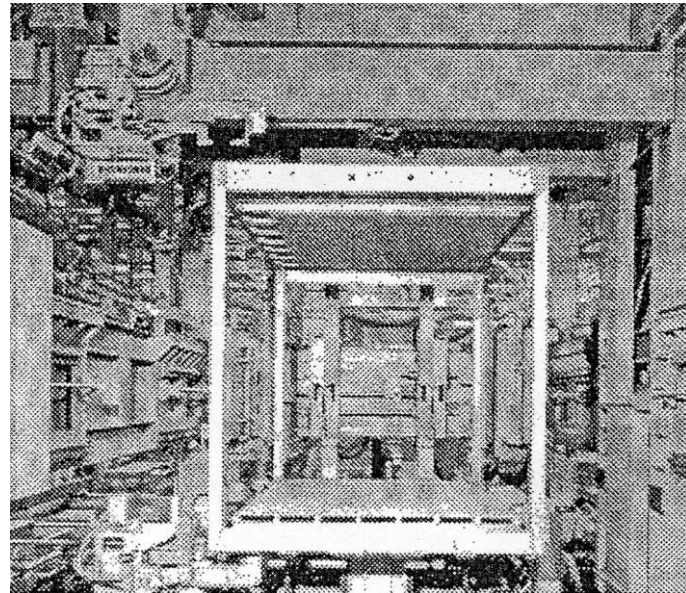


図 プレハブ住宅への抵抗スポット溶接適用

4.3 家電製品、エレクトロニクス関連

家電製品関連で使用されている抵抗スポット溶接機は多種多様で、機械部品を溶接するための大型抵抗スポット溶接機や、本体の薄板や部品を取り付けるために小容量の抵抗スポット溶接機が使われている。

4.4 鉄道車両関連

鉄道車両関連では、大型のものから小型の物までいろいろな抵抗スポット溶接機が使われている。

図1は、ダイレクト通電方式の側構体（鉄道車両の側面パネル）組み立て用自動抵抗スポット溶接機である。

図2は、シリーズ通電方式の屋根構体（鉄道車両の屋根部分のパネル）組み立て用抵抗スポット自動溶接機である。

図3は、位置決めを手動としたポータブル抵抗スポット溶接機で、各面体の自動機では難しい部位の溶接と、鉄道車両の6面体に結合する溶接作業に用いる装置である。

ステンレス車輻やアルミニウム製車輻の製作には大電流の抵抗スポット溶接機が使用されている。

軽量化のため、今までボルトやナット締めを行っていた部分を抵抗スポット溶接している。

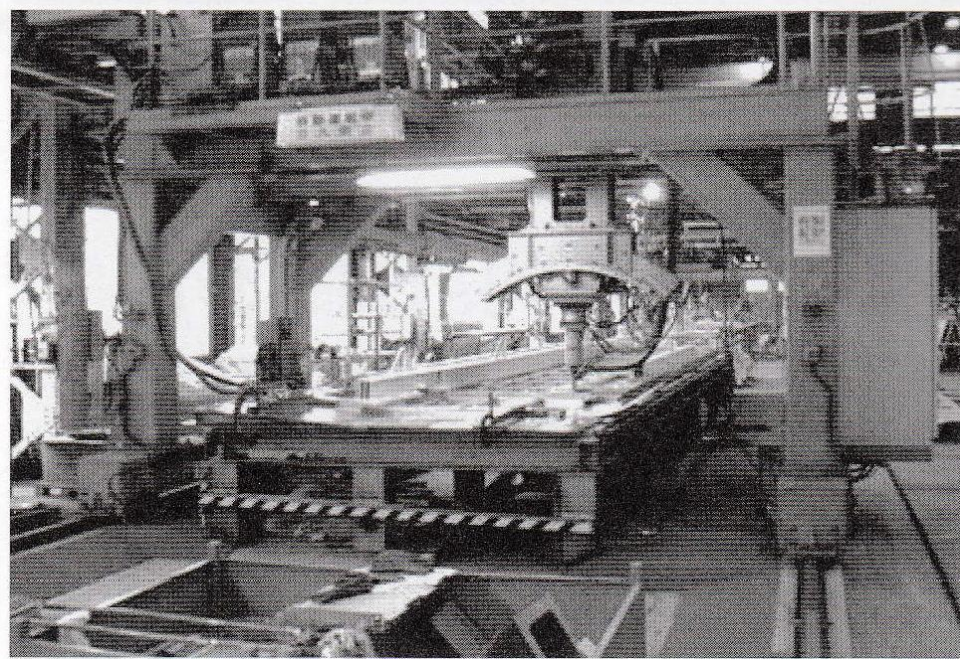


図1 側構体組み立て用抵抗スポット自動溶接機

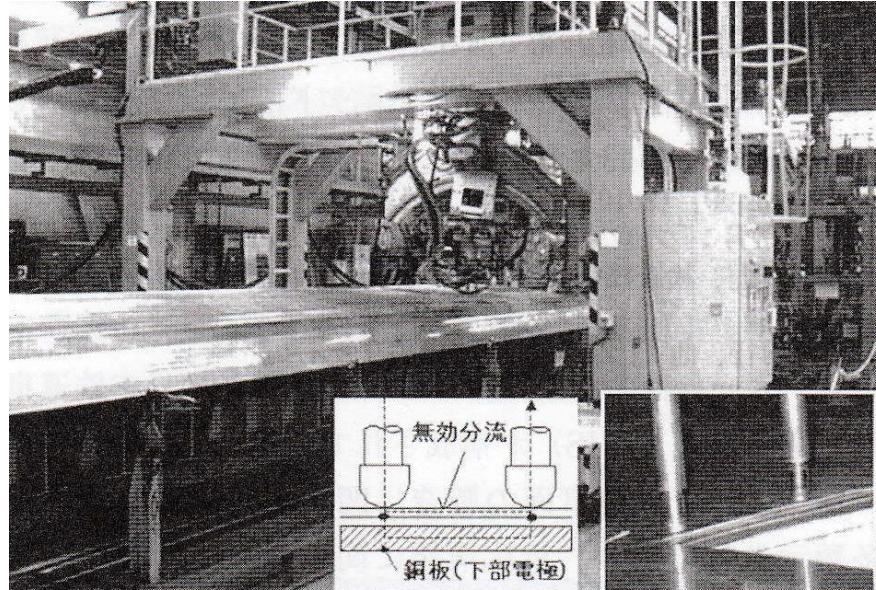


図2 屋根構体組み立て用抵抗スポット自動溶接機

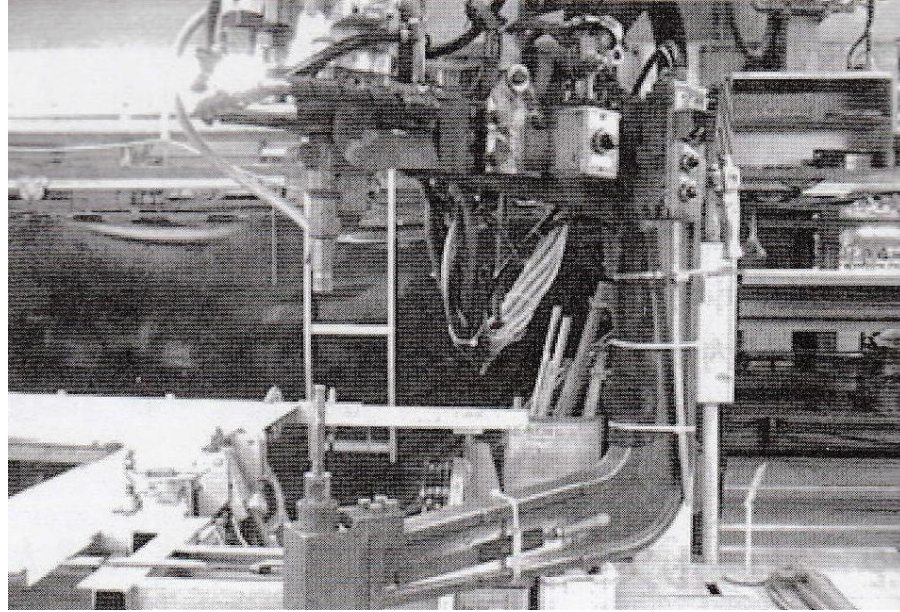


図3 ポータブル抵抗スポット溶接機

5. 抵抗スポット溶接技術の動向

抵抗スポット溶接のトピックスを紹介する。

5.1 ウェルドボンディング

最近、接着が自動車などに良く適用されるようになった。

抵抗スポット溶接と接着のお互いの短所をカバーし、長所を生かす方法として**複合接着接合法**が採用されている。

接着とスポット溶接の併用は**ウェルドボンディング**と呼ばれ(図1)、自動車の**ヘミング部**やプレス板金部品の接合に多用されている(図2)。

点での接合であるリベットや抵抗スポット溶接、線での接合であるアーク溶接に比べ、**面での接合である接着・抵抗スポット溶接併用は、優れた疲労特性を示している。**

これは、**点や線の接合では、接合部に応力が集中するのに対して、面の接合では応力が分散される**ためである。

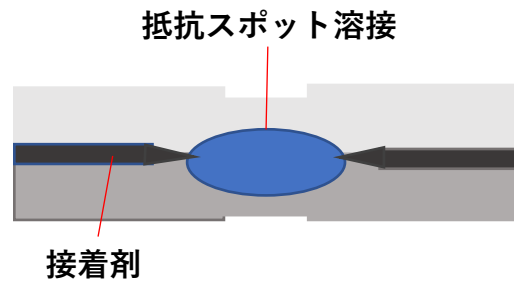


図1 ウェルドボンディング

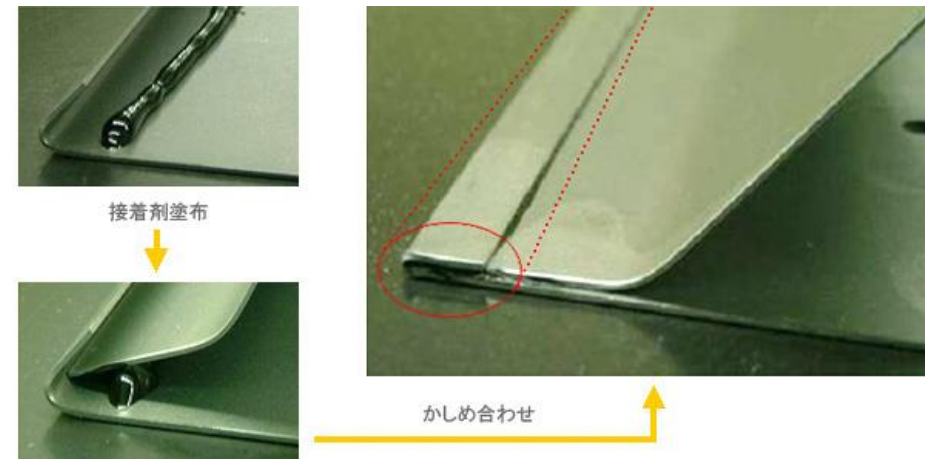


図2 ヘミング部

5.2 低電流でのアルミ合金スポット溶接

鉄道車両や自動車などの輸送機器の軽量化のため、車体のアルミニウム化が検討されている。

アルミニウム合金は小さい電気抵抗と大きい熱伝導率・融解熱(一定の量の物質が固体から液体に相転移する時に必要な熱量、Al:397kcal/kg、Fe:271、Cu:210)に加えて表面を強固な酸化皮膜で覆われているため、鋼板に比較して数倍大きい溶接電流をより短時間に負荷する条件で行われている。

大電流の使用はピックアップ(電極と母材間の接触過熱部において、両者が相互に付着したりすることによって発生する汚れ)を生じやすく、ドレッシング寿命が短いため、連続打点時のアルミニウムの抵抗スポット溶接の能率は鋼板の場合に比較して著しく低い。

このため、アルミニウム車両を対象とした抵抗スポット溶接技術の改善が試みられている。

この問題を解決するため、接合する板と板の間に中間材(Ti粉末とAl粉末を混合したもの)をインサートすることで接触抵抗を増やし、化学反応による発熱で、低電流(板厚2mmで7kA程度)でも溶接可能となる試みもされている¹⁾。

TiとAlが反応してチタンアルミナイド(TiAl、TiAl₃)が生成する際、74.9、146.3kJ/molの生成熱が短時間で放出される。

参考文献

1) 多田 吉宏, 佐藤 悌介, 江藤 孝治, 筒井 功: 反応性インサート材を用いた低電流でのアルミニウム板の抵抗スポット溶接法—引張せん断試験による検討—, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 62, No. 597 (1996) pp. 396-401

溶接電流の影響

供試材：A5052-H34板厚2mm。 反応性インサート材：表1のように配合したチタン粉(-325メッシュ)とアルミニウム粉(-350メッシュ)の配合粉末、溶接点1点当たり0.1~0.2g程度。

溶接条件：表2に示す。試験片形状：図1に示すように短冊状素材の重なり部中央に一点のスポット溶接部を有する。

表1 反応性インサート材

| Powder | Symbol | | | |
|--------------|--------|------|------|------|
| | Ti100 | Ti75 | Ti50 | Ti25 |
| Titanium at% | 100 | 75 | 50 | 25 |
| Aluminum at% | 0 | 25 | 50 | 75 |

表2 スポット溶接条件

| | |
|-------------------------|---|
| Welding current | 2 ~ 7 kA |
| Welding time | 1 ~ 14 s |
| Welding force | 980 N |
| Electrode configuration | F - type φ 6(t=1), φ 8(t=2), φ 10(t=3) |
| Electrode material | Ck-2 |

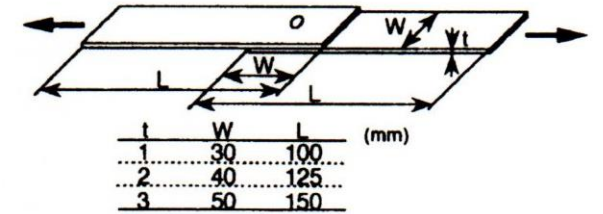


図1 試験片形状

図2は、引張せん断強さと溶接電流の関係である。

従来法(□)はインサート材を用いずに溶接した場合であり、実験した電流範囲では従来法では溶接できなかった。

一方、インサート材を用いた場合は溶接電流の増加とともに比例的に引張せん断強さが向上している。

反応性インサートを用いると通電による発熱に生成熱も加わるので、被溶接材の加熱に有利となる。

特に、良好な引張せん断強さはTi100%、Ti75%のようなチタン量が多いインサートを用いた場合に得られた。

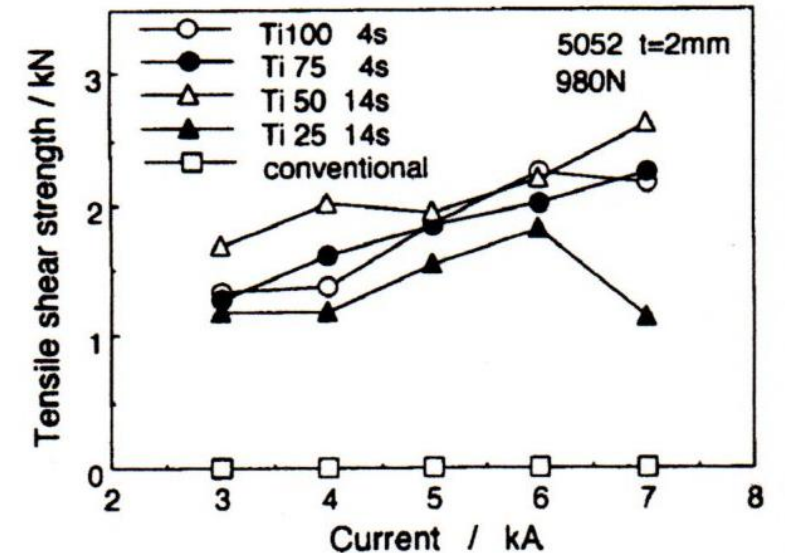


図2 引張せん断強さと溶接電流の関係

H34：加工硬化(1/2硬質:焼きなまし材と硬質材 (断面積減少率約75%) の中間の硬さ)の後に安定化处理(150°Cに加熱)を行なったもの。

6. スポット溶接の将来技術

6.1 抵抗スポット溶接によるアルミ合金／鉄鋼異種金属接合

地球温暖化の影響でCO₂の排出削減などが大きな課題となっており、環境負荷軽減のためには**自動車の軽量化が必須項目である**。

運動性能向上の面からも、自動車の軽量化は重要なことである。

自動車を軽量化する方法はいくつかある。生産工程を見直して部品数を少なくすることや、高張力鋼を使用すること、また従来の自動車のボディに多く使われている鋼板の代替新素材として、高強度かつ軽量化が可能な**CFRP** (Carbon Fiber Reinforced Plastic) に代表される複合材料の使用などが挙げられる。

前者は以前から検討され、もはや大幅に軽量化することは不可能になってきており、後者はコストが膨大になり、実用に至るまでには長い年月が必要である。

軽量化に向けた取り組みの1つとして、アルミニウム合金板の適用が検討され一部実用化されている。

アルミニウム合金は他の金属と比べると強度が低いため、ボディをすべてアルミニウム合金にすると衝突時の安全性確保が保障されなくなる。

従って、アルミニウム合金を適用する場合、従来使われている**鋼板との異種金属接合が必要**になる。

自動車部品及び車体の組立には抵抗スポット溶接が多用されているので異材接合への適用性を調べた。それは、抵抗スポット溶接は作業に要する時間が短く、熟練の技術を必要としない溶接方法であり、**溶接原理が単純で生産ラインの自動化も容易なためである**。

溶接材料を使わず一体化できるメリットもある。

異種金属接合の課題

抵抗スポット溶接は、鉄鋼等の電気抵抗の大きい材質には適しているが、電気抵抗の小さいアルミニウムでは、鉄鋼と比較して数倍高い溶接電流値が必要となる。

鉄鋼と比べると溶接部の品質が安定しないという課題もある。

他の接合法として、**摩擦攪拌接合**や**セルフピアシングリベット**を用いる方法もあるが、このような手法の導入は生産ラインの大幅な変更を要し、多額の設備投資も必要となると考えられる。

従って、自動車部品製造に広く使われる抵抗スポット溶接法で鉄鋼とアルミニウム合金を適切に接合することが重要になってくる。

鋼板とアルミニウム合金板の異種金属接合での課題は、継手強度が同種金属接合よりも低下することである。その原因の一つとして接合界面に発生する脆弱な**金属間化合物**（IMC：Intermetallic Compound）が挙げられる。

アルミニウム合金板と鋼板を溶融溶接すると、接合界面にFeとAlの金属間化合物層が生じ、この界面反応層が継手強度に悪い影響を与える。

また、異種金属接合部の継手強度低下の要因としては、ナゲット部周囲の熱影響部（以下ではHAZと呼ぶ）に発生する**ミクロ割れ**や、**HAZの軟化**の影響も考えられる。

異種金属抵抗スポット溶接部の引張強度に及ぼす溶接組織の影響

抵抗スポット溶接は、被溶接材の**固有抵抗**を利用して発熱させ溶融させる溶接法であるため、**固有抵抗**が小さい材料では溶接が難しい。

その代表的な材料としてアルミニウムが挙げられる。

アルミニウムは固有抵抗が小さく、大電流を流さなければ溶融させることは困難である。

すぐに周りに熱が拡散してしまうため、大電流の通電で溶接することが必要である。

この問題を解決するため、**接合する板と板の間に中間材(アルミクラッド鋼：厚さ1mm、アルミ側0.7mm)**をインサートすることで**接触抵抗を増やし、低電流でも溶接可能となる試みもされている¹⁾**。

この方法により、実際にアルミニウムの低電流抵抗スポット溶接が可能となったが、生産ラインにおいては中間材をインサートする工程が増えて、**生産性が低下してしまう恐れがある**。

自動車ボディの一部にアルミニウム合金を適用するためには、自動車の既存の生産形態である抵抗スポット溶接法で高い継手強度を維持しつつ接合することが課題となる。

この課題を解決するには、ナゲット形成などの、溶接品質に影響する組織的因子を明らかにする必要がある。

今回、鋼板とアルミニウム合金板の異種金属抵抗スポット溶接部の強度に影響を与える要因を調べることを目的として、**抵抗スポット溶接条件(溶接電流、通電時間、加圧力)とナゲット形態などの溶接組織との関係**を明らかにし、**抵抗スポット溶接部の引張強度に及ぼす溶接組織の影響**を調査したので紹介する。

参考文献

1)泰山、小川、高：アルミクラッド鋼インサート抵抗溶接法の検討、溶接学会論文集、Vol.14,No.2 (1996),pp.314-320

(1) 供試材料

アルミニウム合金板としてはAl-Mg-Si系のA6061-T4合金板を用いた。

鋼板としては一般的に広く使用されている冷間圧延鋼板 (SPCC) を用いた。

化学成分を各々表1および表2に示す。

試験板はアルミニウム合金板及び鋼板とも板厚 1 mmで同じ形状のものを用いた。

表1 アルミニウム合金 (A6061) の化学組成 (質量%)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | V | Ti | Al |
|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-----|
| 1.08 | 0.15 | 0.65 | 0.058 | 0.43 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | Rem |

表2 冷間圧延鋼板 (SPCC) の化学組成 (質量%)

| C | Mn | P | S | Fe |
|------|------|------|------|-----|
| 0.04 | 0.16 | 0.11 | 0.04 | Rem |

T4：溶体化処理後自然時効させたもの。

(2) 接合方法及び評価法

各種溶接条件によるナゲット形状、IMCなどの溶接組織の観察、十字引張試験による抵抗スポット溶接部の十字引張力の測定を行った。

鋼板／アルミニウム合金板の異材抵抗スポット溶接は、直流インバータートランス内臓サーボガン(SRTC-10569KAI)抵抗スポット溶接機を用いた。

ガンは型式SRTC-10569KAI (C型サーボロボットガン) で最大加圧力5.88 kNのものを使用した。

トランスは型式ITSG85R-600-180C (直流インバータ) で定格容量85 kVA、一次電圧単相600 V、二次電圧13.6 Vである。

電極はR型 (呼び径D16 mm, 先端曲率半径R40 mm) のアルミナ分散強化銅(Al_2O_3Cu)を使用した。

電極チップ内部は冷却水によって水冷されており、電極の加熱を防止するための構造になっている。

抵抗スポット溶接を実施する前に新しい電極について20回試し打ちを行ってから、本実験を開始した。

十字引張試験板形状を次図に示す。

上側がアルミニウム合金板、下側が鋼板になるようにして抵抗スポット溶接を行った。

十字引張試験は電気油圧式サーボ引張試験機(RTC-2430A)を用いて、引張速度10 mm/min.で行った。

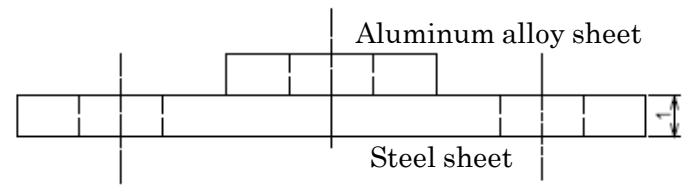
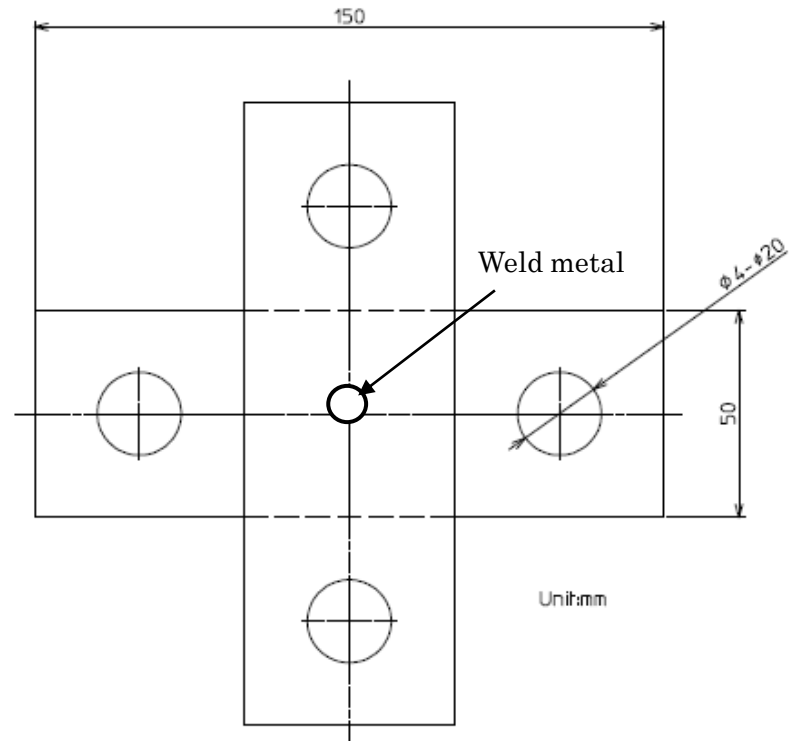


図 十字引張試験片形状

ナゲット形態やIMCなどの溶接組織を観察するための抵抗スポット溶接条件を表に示す。

試験の基準となる抵抗スポット溶接条件は、予備実験の結果から電流値20 kA、通電時間3 cycle、加圧力2 kNと設定した。

電流値を8 kA～23 kA、加圧力を1 kN～5 kN、通電時間を2 cycle～10 cycle (1 cycle=0.02 s) の間でそれぞれ変えて、各条件で10 回ずつ抵抗スポット溶接を行った。

抵抗スポット溶接後に断面ミクロ観察を行い、ナゲット径の測定、IMCおよびミクロ割れを含めた組織観察をデジタルマイクロスコープ（株）キーエンス製VHK-600）および走査型電子顕微鏡（SEM：日本電子製JSM-6500F）を用いて行った。

溶接組織の組成を分析するためにエネルギー分散型X線分析（EDX：日本電子製JSM-6500F）も行った。

アルミニウム合金のエッチングには、水酸化ナトリウム10 %溶液を使用した。ナゲット径については、10 回分の平均値をその溶接条件でのナゲット径とした。

表 抵抗スポット溶接部のミクロ組織観察用溶接条件

| No. | Welding current[kA] | Electrode force[kN] | Welding Time[cycle] | |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|----|
| 1 | 8 | 2 | 3 | |
| 2 | 11 | | | |
| 3 | 14 | | | |
| 4 | 17 | | | |
| 5 | 20 | | | |
| 6 | 22 | | | |
| 7 | 23 | | | |
| 8 | 20 | 1 | 2 | |
| 9 | | 4 | | |
| 10 | | 5 | | |
| 11 | | 2 | | 5 |
| 12 | | | | 7 |
| 13 | | | | 10 |

表に十字引張試験用試験板の抵抗スポット溶接条件を示す。

十字引張試験では引張試験を10 回行い、この試験で得られた最大試験力の平均値を抵抗スポット溶接部の十字引張力とした。

引張試験後の試験片については、抵抗スポット溶接部での破断経路などの破断形態を調査した。外観観察、ミクロ観察及びSEM観察によって、溶接条件の変化によるナゲットの成長、IMCの挙動、溶接欠陥の発生状況、および抵抗スポット溶接部の十字引張力に及ぼすミクロ組織形態の影響について調べた。

表 十字引張試験片用溶接条件

| No. | Welding current[kA] | Electrode force[kN] | Welding time[cycle] |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 8 | 2 | 3 |
| 2 | 11 | | |
| 3 | 14 | | |
| 4 | 17 | | |
| 5 | 20 | | |
| 6 | 22 | | |
| 7 | 23 | | |

(3) 溶接条件とナゲット径の関係

溶接電流とナゲット径の相関性

鋼板とアルミニウム合金板の異材抵抗スポット溶接部について、抵抗スポット溶接電流とナゲット径の相関性を次図に示す。

溶接電流の増加に伴い、ナゲット径も増加する。

電流値が増加すると発熱量が増えることになり、鋼板とアルミニウム合金板の溶融量も増加して、ナゲット径が大きくなる。

溶接電流が8 kAの時はスポット溶接が不可能であったので、溶接電流が8 kA については図に記載していない。

図に示したマクロ組織からも明らかのように、アルミニウム合金側ナゲット内部には、ブローホールや高温割れといった欠陥が発生するケースが多い。

A6061材は、半溶融状態となる固液共存温度域が広くて凝固収縮が大きいために高温割れが発生しやすく、割れ感受性が比較的高いと考えられる。

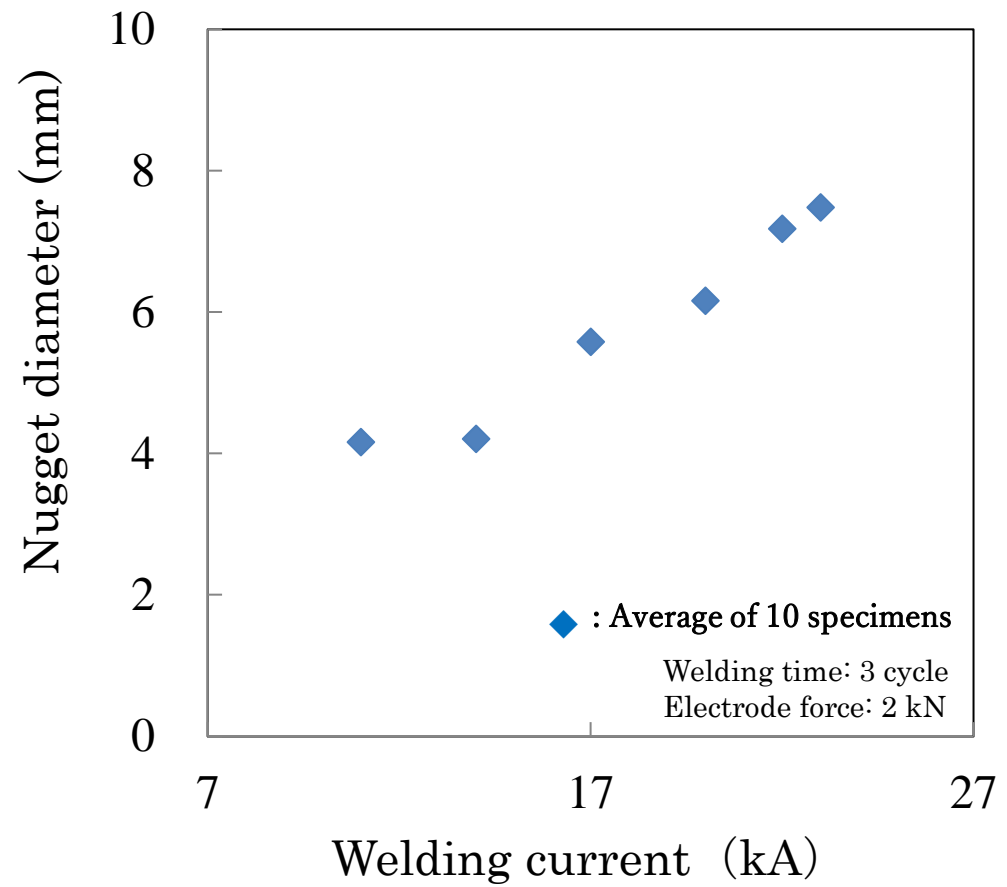
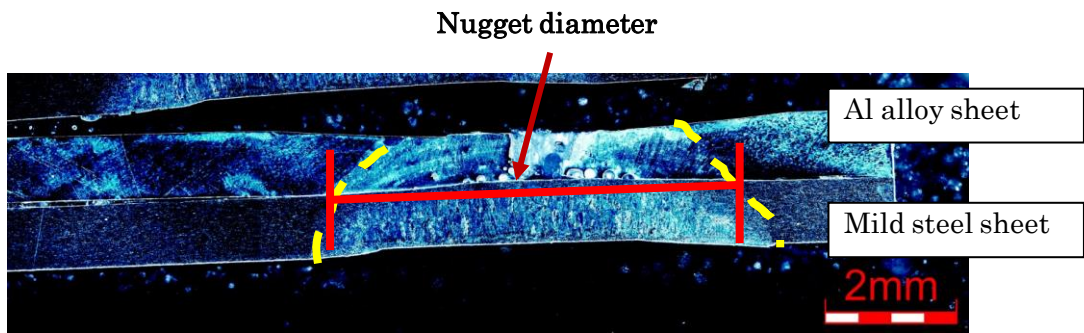


図 溶接電流とナゲット径の相関性

通電時間とナゲット径の相関性

抵抗スポット溶接通電時間とナゲット径の相関性を図に示す。

ナゲット径の変化はあまり認められない。

鋼板やアルミニウム合金板のナゲットは短時間の通電で形成され、それ以上通電してもナゲットの成長はほとんどない。

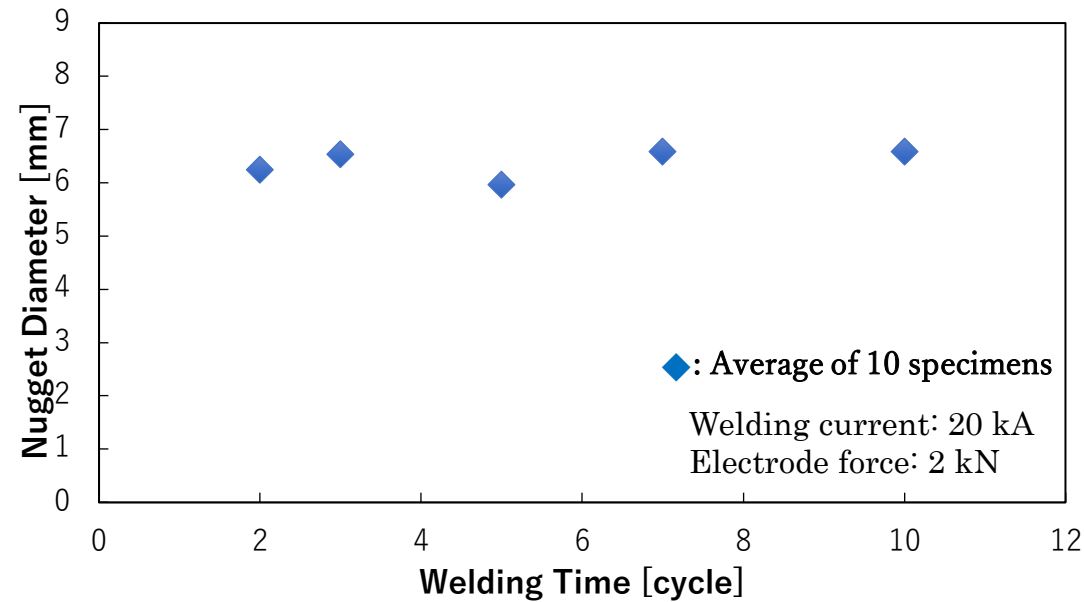


図 溶接時間とナゲット径の相関性

加圧力とナゲット径の相関性

抵抗スポット溶接の加圧力とナゲット径の相関性を図に示す。

加圧力を変化させた場合は、**加圧力の増加とともにナゲット径は減少する。**

これは、電極／アルミニウム合金板、アルミニウム合金板／鋼板、鋼板／電極の接触抵抗と絶縁破壊により発熱するため、加圧力が低い場合は接触抵抗発熱が大きく、加圧力が高い場合は接触抵抗発熱が小さくなるためだと考えられる。

加圧力が1 kNの時はスポット溶接が不可能であったので、加圧力が1 kNについては図に記載していない。

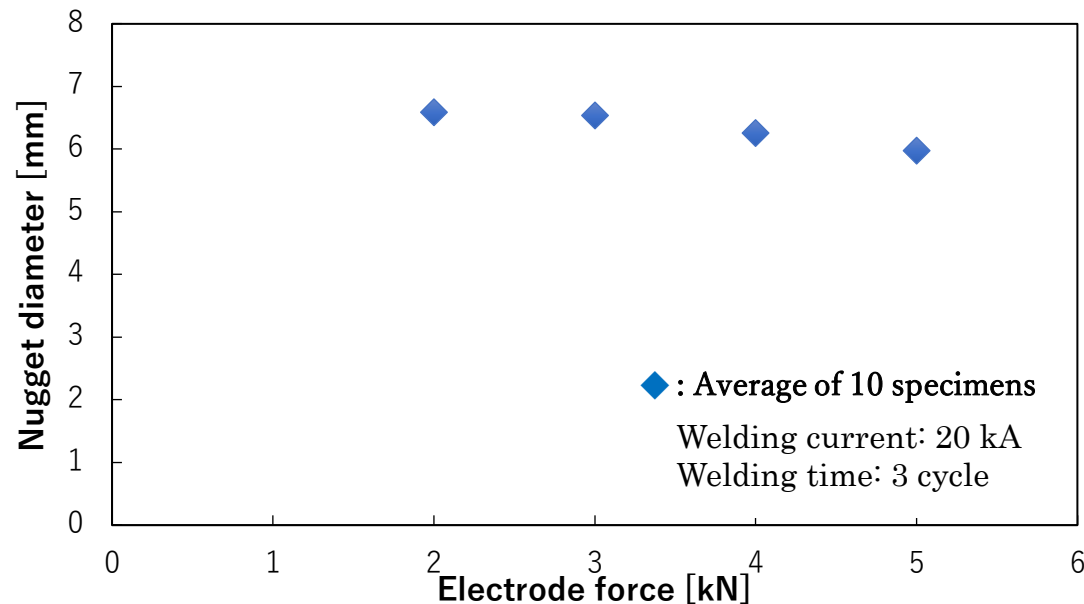


図 加圧力とナゲット径の相関性

(4) ナゲット部のSEM観察結果

鋼板／アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接部のSEM観察結果を図1に示す。

抵抗スポット溶接部の鋼板／アルミニウム合金板界面に数 μm 程度の幅の母材とは異なる領域が認められる。

鋼板／アルミニウム合金板の異種金属を溶融接合した場合はIMCが生成されると言われている。

図1(c)においてこの層内をEDX分析した結果、図2に示すようにAlとFeが認められたことから、この層はIMCであると考えられる。

IMCは2層に分かれ、構造はアルミニウム側が FeAl_3 、鉄鋼側が Fe_2Al_5 であると推定される。

生成したIMCは硬くて脆いことから、これらのIMCの生成は異種金属接合部の引張強度に影響を与えるとされている。

Fe-Al状態図では、金属間化合物として、 FeAl 、 Fe_3Al 、 FeAl_3 、 Fe_2Al_5 がある。

このうち FeAl と Fe_3Al は、比較的高い靱性、延性を有し、硬さも各々470、330である。

一方、 FeAl_3 と Fe_2Al_5 は靱性が低く(脆く)、硬さも各々890HV、1010HVと高い。

表 IMCの硬さと破壊靱性

| | Vickers hardness | K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) |
|--------------------------|------------------|--|
| FeAl_3 | 892 | 2.15 |
| Fe_2Al_5 | 1013 | 2.30 |
| FeAl | 470 | |
| Fe_3Al | 330 | |

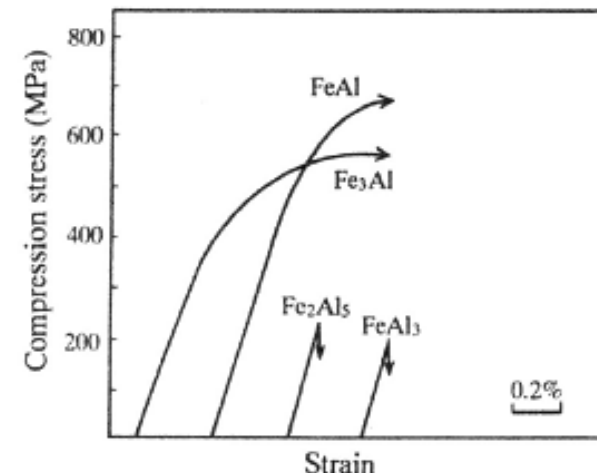
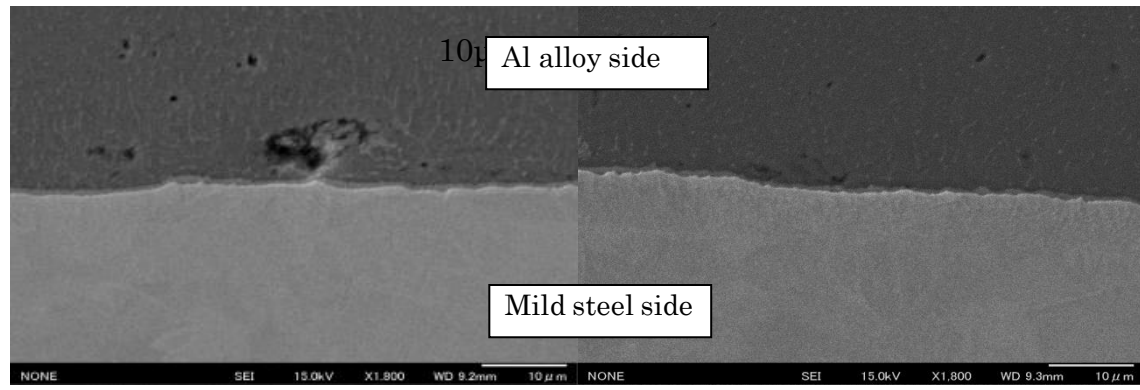
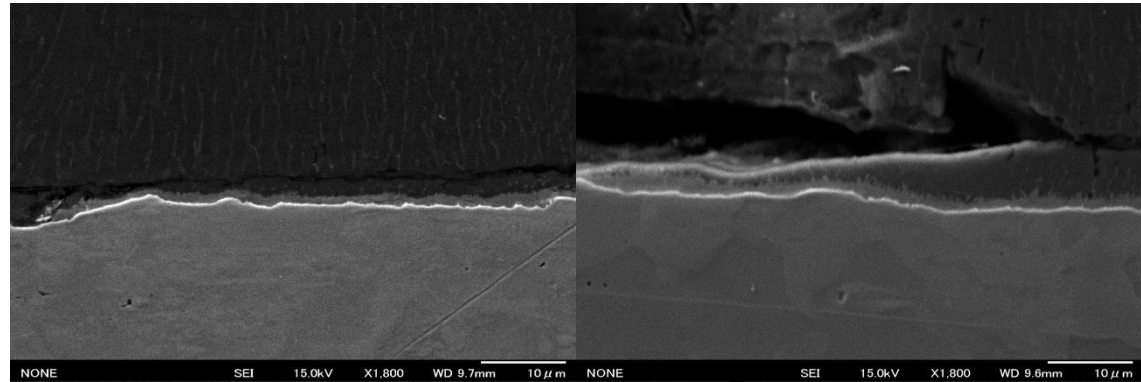


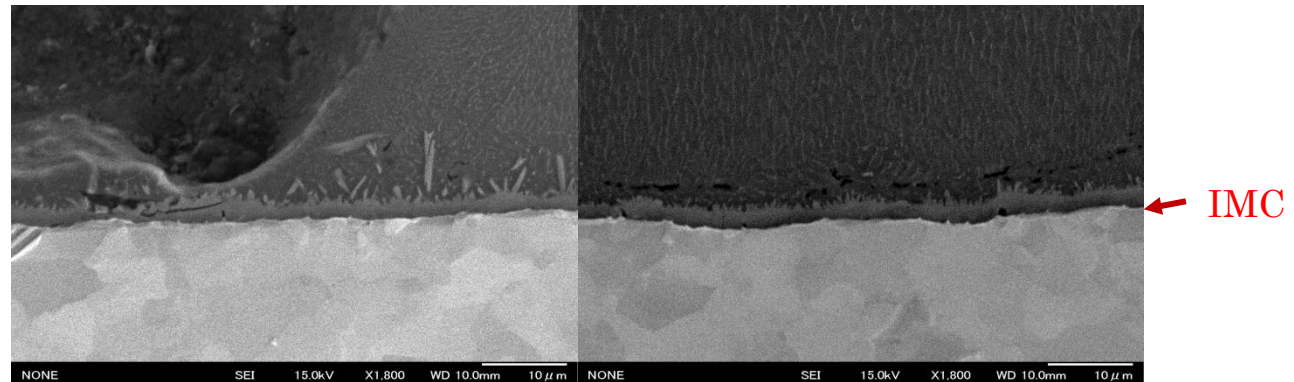
図 IMCの応力-ひずみ曲線



(a) 11 kA



(b) 17 kA



(c) 23 kA

図 溶接電流の変化によるスポット溶接部のSEM組織

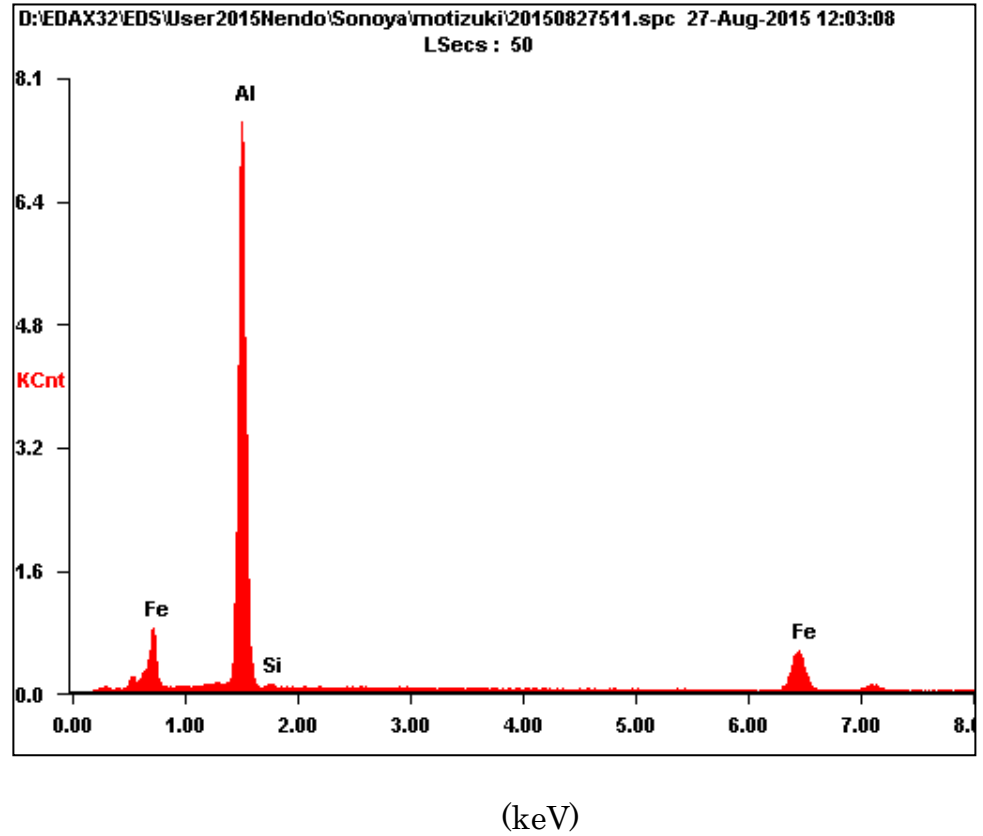
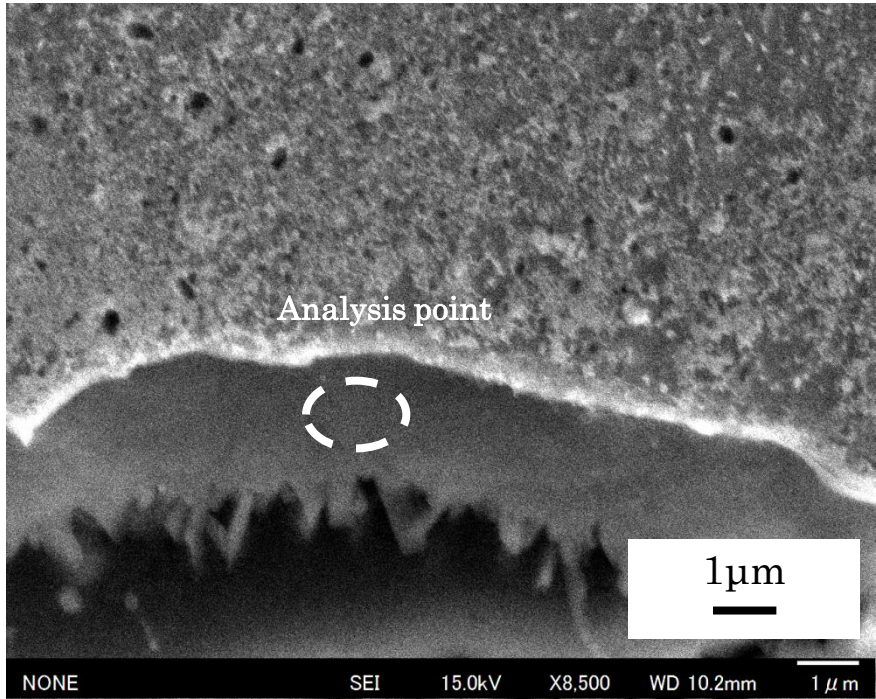


図2 図1(c)のアルミニウム合金／軟鋼の異材スポット溶接部の境界部におけるEDX分析結果

SEM観察結果からIMCの厚さを5点測定してその平均値をIMC厚さとして求め、図にまとめた。
溶接電流値の増加に伴ってIMCの厚さも増加する傾向にある。

なお、溶接電流が8 kAの時はスポット溶接が不可能であったので、溶接電流が8 kA については図に記載していない。

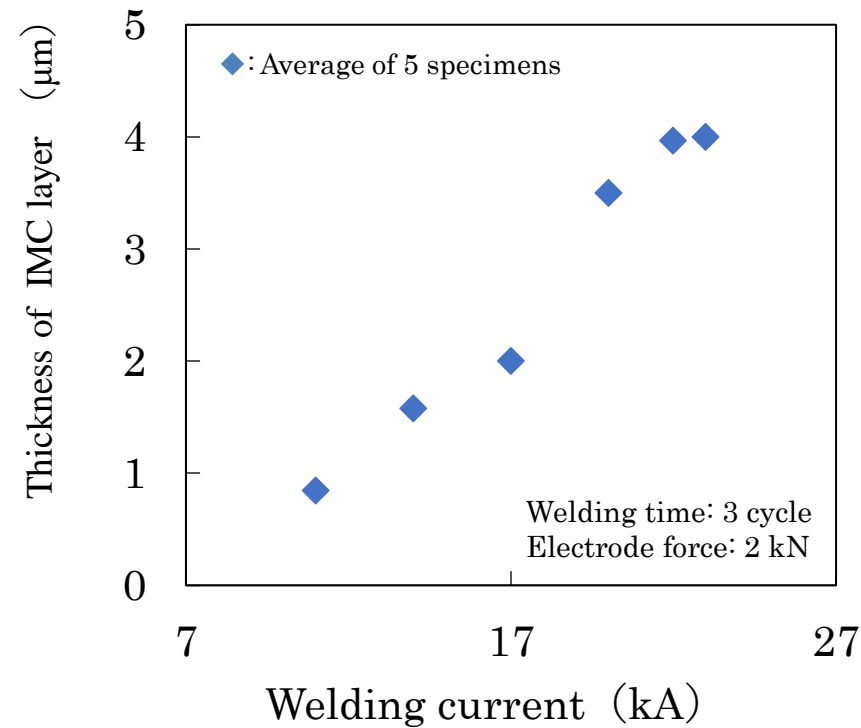


図 溶接電流とIMCの厚みの相関性

(5) 十字引張試験結果

十字引張試験を行って得られた鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の十字引張力と溶接電流値の関係を次図に示す。

溶接電流が8 kAの時はスポット溶接が不可能であったので、溶接電流が8 kA については図に記載していない。

抵抗スポット溶接部の十字引張力は、溶接電流値が20 kAまでは増加するが、それ以上の溶接電流値ではほぼ一定の値になる。

溶接電流値が増加するとジュール熱により発熱量が増えナゲット径も増大するため抵抗スポット溶接部の引張強さは大きくなり、溶接電流値が20 kAまでは十字引張力が増加する。

溶接電流値が20 kA以上になると十字引張力の増加が認められなくなったのはナゲット形成以外の要因が影響していると考えられる。

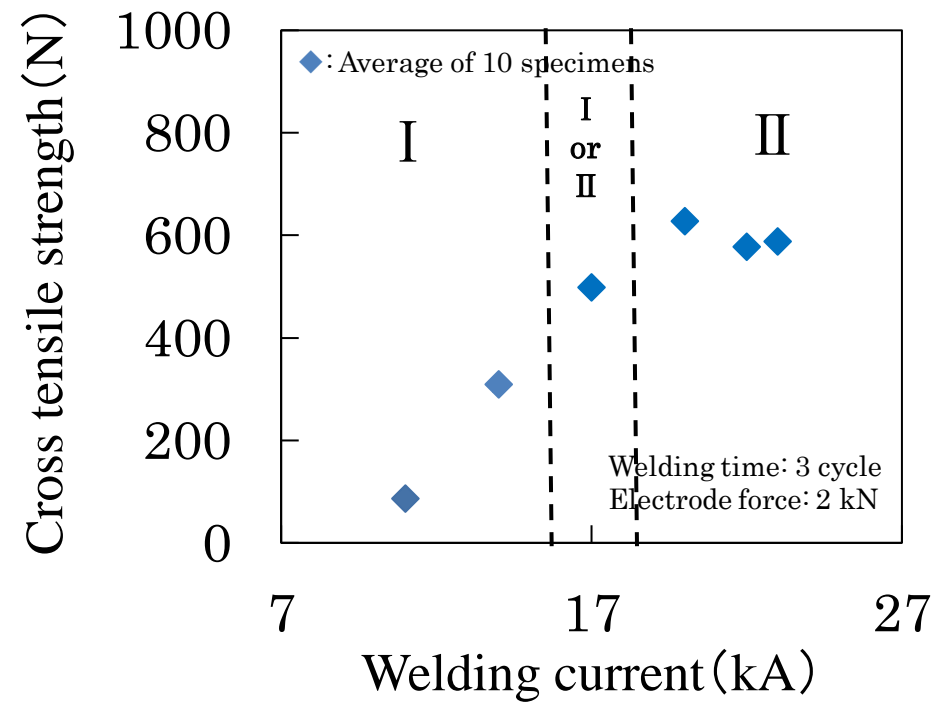


図 溶接電流と十字引張強さの相関性

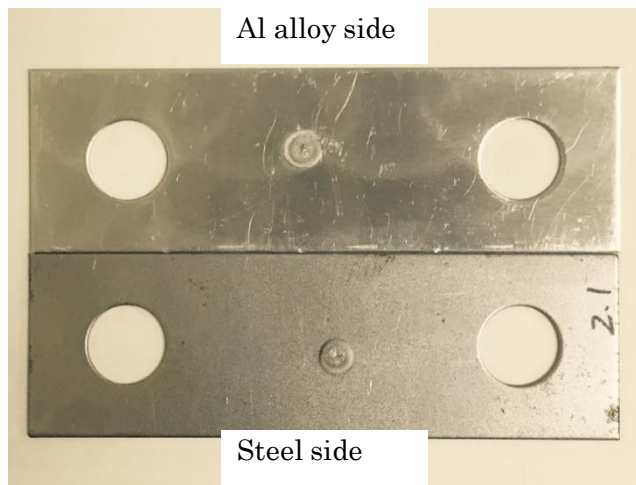
(6) 十字引張試験での溶接部の破断形態

溶接電流値が11 kAと23 kAの場合の鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の十字引張試験後の試験片の外観を次図に示す。

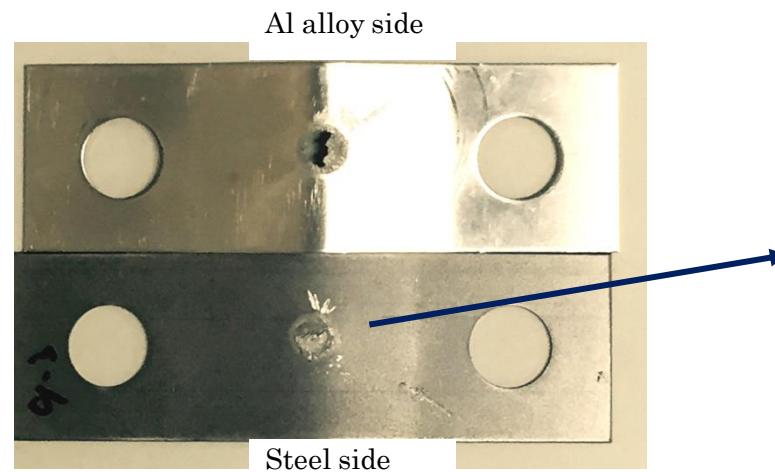
破断形態は溶接電流値によって異なる。溶接電流値が11 kAでは、ほぼナゲット内部の鋼板／アルミニウム合金板界面に沿って破断している。

溶接電流値が23 kAになると、アルミニウム合金側のナゲット部が欠落してそのナゲットが鋼板側に付着している。

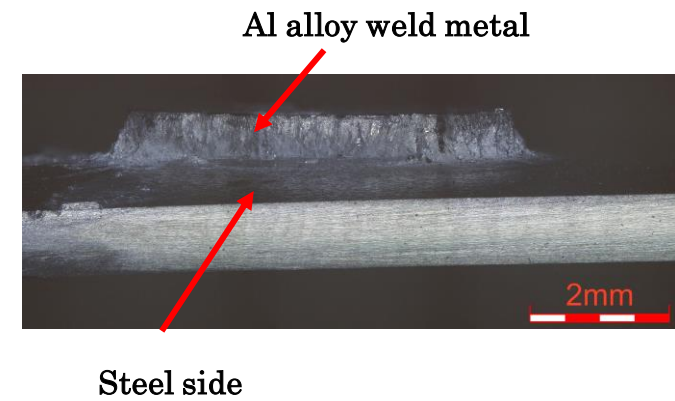
破断形態は、アルミニウム合金側ナゲットの境界に沿った破断、またはアルミニウム合金側溶接部のHAZでの破断である。



Welding current: 11 kA



Welding current: 23 kA



Welding time: 3 cycle, Electrode force: 2 kN

図 十字引張試験後の抵抗スポット溶接試験片の外観

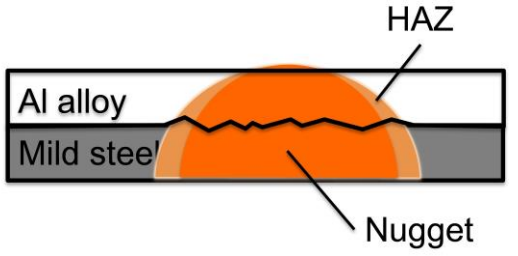
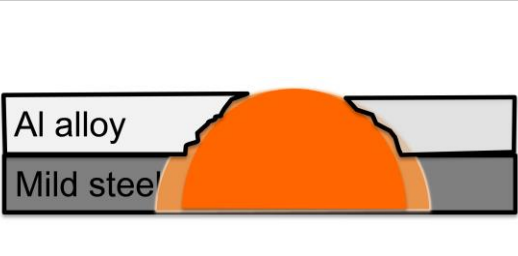
(7) 溶接電流と引張破断形態の関係

鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の十字引張試験後の試験片を観察した結果、破断形態は表に示すように2つのパターンに分類できる。

I型はナゲットが十分形成されていないため、またはナゲット内に大きな欠陥が存在したためにナゲット内部を伝播して破断した形態である。

II型はナゲットの境界に沿った破断形態、または溶接熱影響部で破断した形態である。

表 スポット溶接部の十字引張試験後の破壊モードの分類

| Type | Fracture mode | Schematic of fracture |
|------|--|---|
| I | Fracture at the interface of Al alloy and mild steel |  |
| II | Fracture at the boundary of the HAZ and the nugget. |  |

異材抵抗スポット溶接部について、溶接電流値の変化と破断形態の関係を表にまとめた。

溶接電流が8 kAの時はスポット溶接が不可能であったので、溶接電流が8 kA については表に記載していない。

溶接電流値が17 kAまでの低電流域ではI型の破断形態となり、溶接電流値が17 kAではI型とII型が混在している。

溶接電流値が20 kA以上ではII型の破断形態である。

高電流になるとナゲット部の厚さが大きくなることから、HAZが板厚を貫通する場合も生じることもII型の破断形態を呈する一要因になっていると考えられる。

II型の破壊形態では、HAZで破断していることから、ナゲット部は溶接部の引張強さには影響を与えていないと考えられる。

十字引張試験において、鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の十字引張力が電流値20 kA以上でほぼ一定となったのは、この破断形態II型による影響が大きいと考えられる。

表 スポット溶接部における溶接電流と十字引張試験後の破壊モードの相関性

| Welding current(kA) | 11 | 14 | 17 | 20 | 22 | 23 |
|---------------------|----|----|-------|----|----|----|
| Fracture mode | I | I | I, II | II | II | II |

(8) 溶接電流増加に伴うHAZのミクロ割れの変化

断面ミクロ観察から、図1に示すように、鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部のアルミニウム合金板側のHAZには**共晶融解**と**ミクロ割れ**が混在している。

溶接電流値の増加に伴い、破断経路がナゲット部からHAZへと移行することも明らかである。
この2点から、破断形態が変化するのは共晶融解とミクロ割れが影響しているためと考えられる。

溶接電流値増加に伴うHAZの共晶融解とミクロ割れの変化について調査した。

測定方法は断面ミクロ写真から一部分(0.0133mm²)を抽出し、抽出した画像から共晶融解とミクロ割れの長さを求め合計することで行った。

抽出する場所を変え、各条件につき10回行いその平均値を求めた。

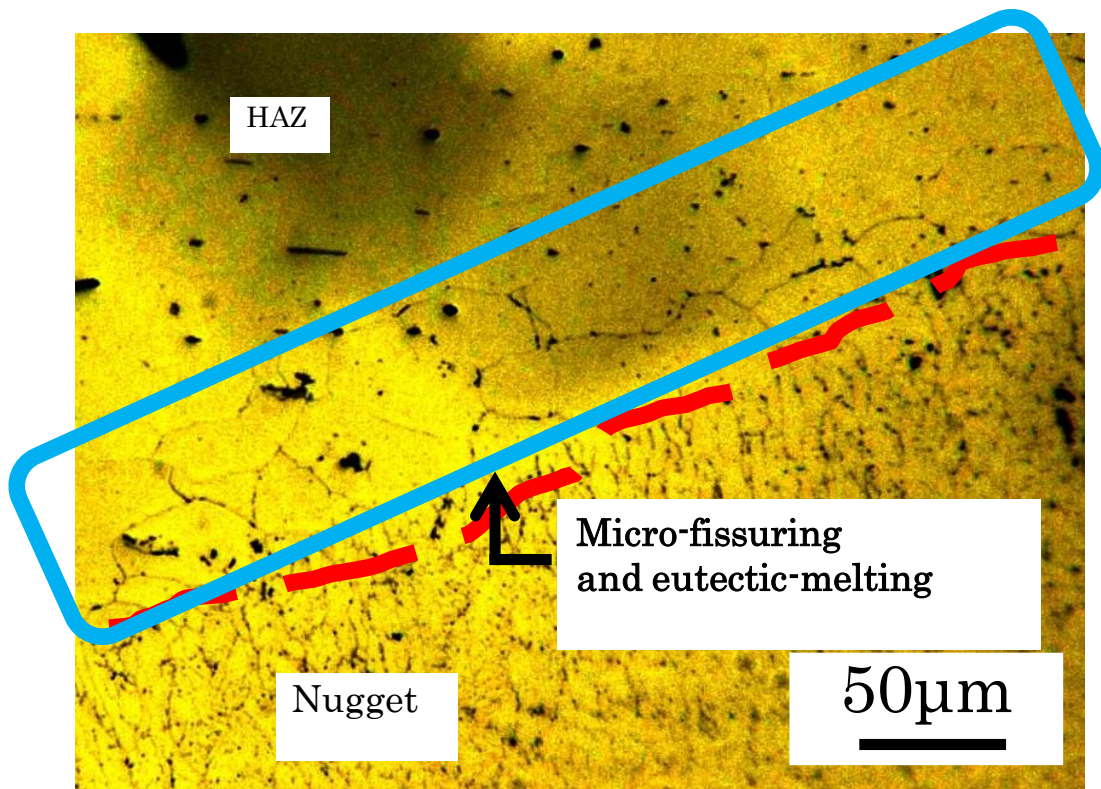
測定には画像処理ソフトウェア(ImageJ)を使用した。

HAZの共晶融解とミクロ割れの総長を測定した結果をまとめると、図2に示すように**溶接電流値の増加に伴って共晶融解とミクロ割れ長さも増加すること**が分かる。

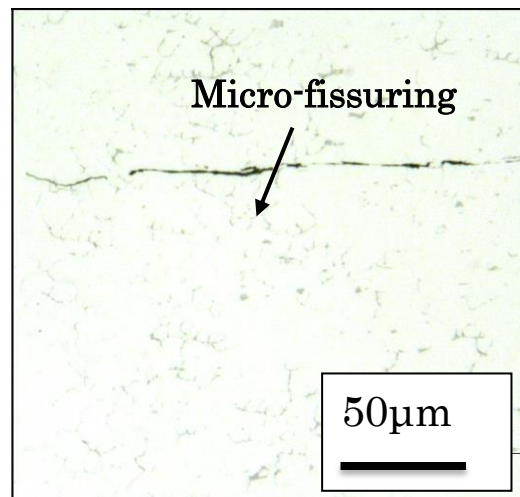
溶接電流値の増加に伴って共晶融解とミクロ割れの数量も増加する。

共晶融解とミクロ割れ：共晶融解は単なる共晶組成の粒界や亜粒界への偏析でcavityは存在せず、溶体化処理によって健全でかつほぼ均一な組織となる。

ミクロ割れは共晶組成の偏析した粒界で小さなcavityになったもので、溶体化処理によって共晶組成の偏析を消滅させるとcavityのみ残存する。共晶融解はミクロ割れ発生の一過程である。

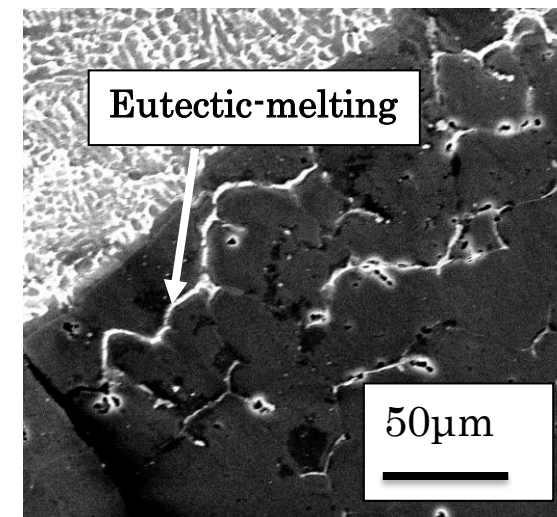


Etching (10% NaCl)



Micro-structure : Unetching

Welding current : 22 kA, Welding time: 10 cycle, Electrode force: 4 kN



SEM image : Etching (10 % NaCl)

図1 異材スポット溶接部のアルミニウム側HAZ部に認められるマイクロ割れと共晶融解

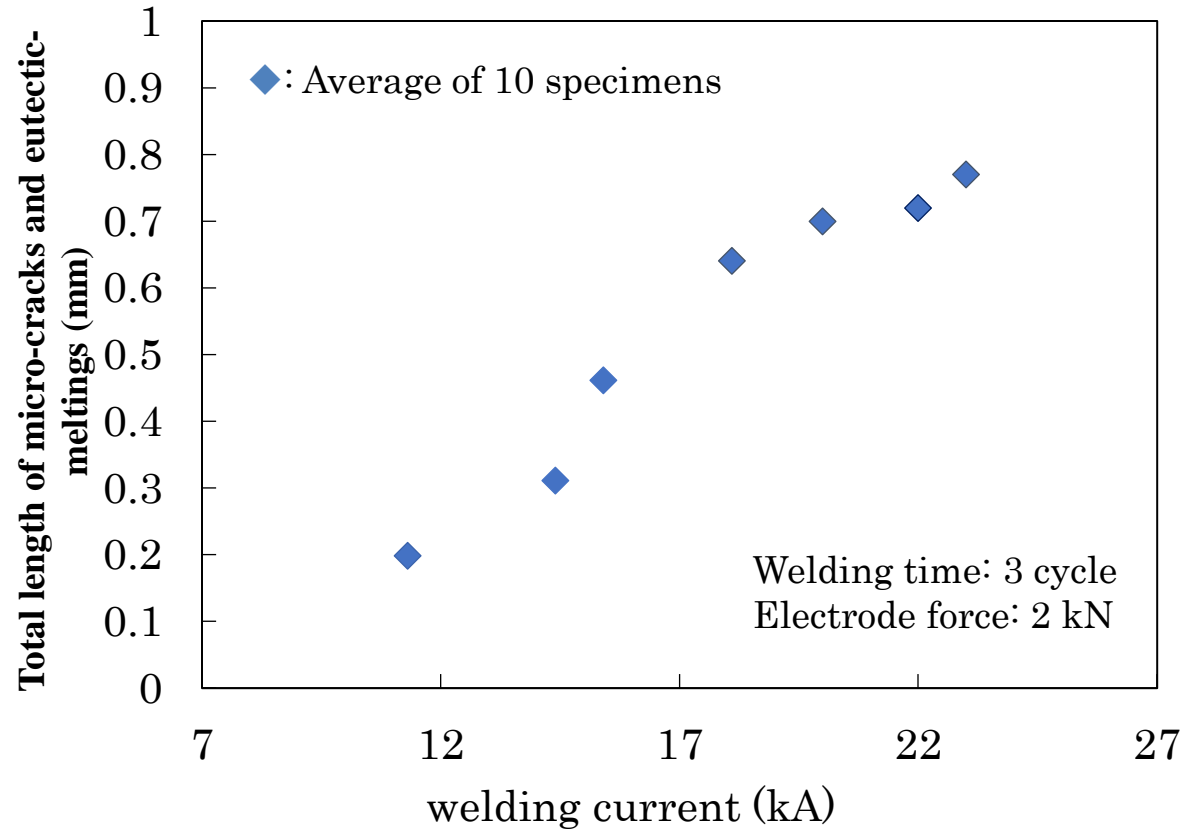
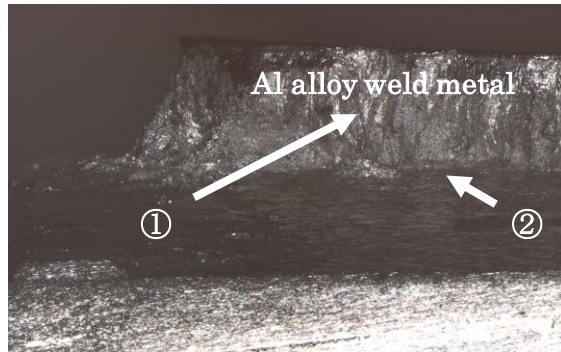


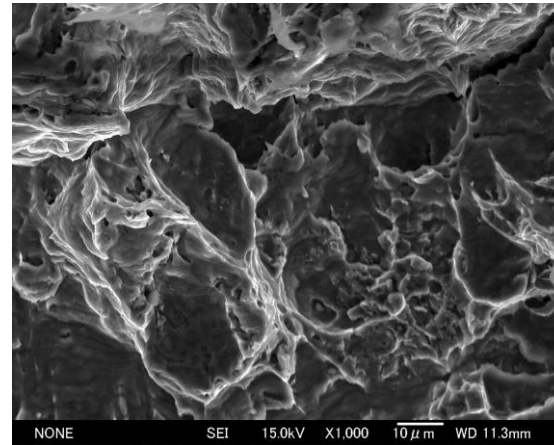
図2 異材スポット溶接部における溶接電流とアルミニウム側HAZに認められるマイクロ割れと共晶融解の総長の相関性

溶接電流20kAで抵抗スポット溶接した溶接部の十字引張試験後の破断部のSEM観察結果を図に示す。
熱影響部のき裂伝搬部の破断面はフラットな脆性的な破面を呈している。
引張試験時のき裂が共晶融解部及びミクロ割れを伝播していることを示している。
その他の破面（コロナボンド部）は、ディンプルを伴った延性破面である。

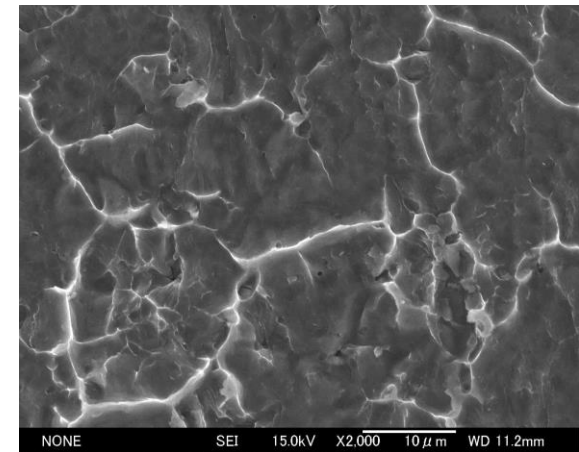
- ① Corona bond
- ② Heat affected zone



(a) Appearance of welded zone



(b) Position ①



(c) Position ②

Welding current: 20 kA, Welding time: 3 cycle, Electrode force: 2 kN

図 十字引張試験後の異材抵抗スポット溶接部のアルミニウム側破断面のSEM観察結果

(9) 異材抵抗スポット溶接部の引張破断メカニズム

鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の破断形態は、**溶接電流値が低電流域ではⅠ型で、高電流域ではⅡ型である。**

異材抵抗スポット溶接部の十字引張力は、溶接電流値が20 kAまでの電流域では溶接電流値の増加とともに十字引張力は増加する。

溶接電流値が20 kA以上の高電流領域では、ナゲット径が大きくなっても十字引張力はほぼ一定値となっている。

低電流域の挙動

溶接電流値が17 kAまでの低電流域では、十字引張試験時にき裂がナゲット内部を伝播して破断（Ⅰ型）している。

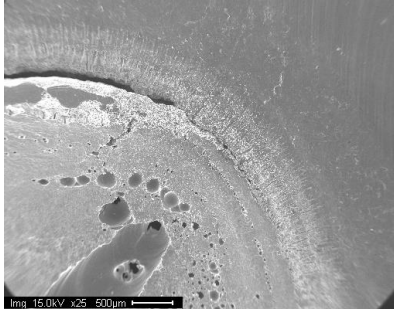
Ⅰ型の破断をした試験板（溶接電流が14kA）の十字引張試験後の破断面上でのEDX面分析結果（次図）からAlとFeが認められ、**IMC**が存在していることが明らかである。

溶接電流値の増加に伴うIMCの生成、IMC膜厚の増加は抵抗スポット溶接部の強度に影響を与えると考えられる。

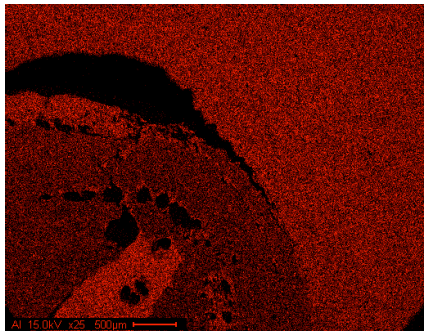
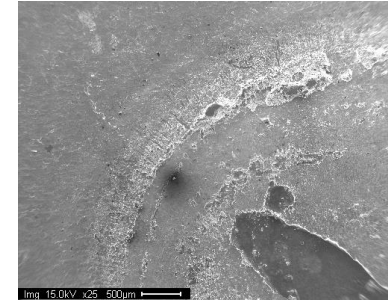
著者らの行ったアルミニウム合金のみの抵抗スポット溶接試験結果から、異材抵抗スポット溶接部の十字引張力はアルミニウム合金のみの抵抗スポット溶接部の引張強度の**1/2程度**まで低下しているのが明らかである。

異材抵抗スポット溶接部の十字引張力の低下は、主にIMCの生成によると考えられる。
変形拘束などの影響も受けると考えられる。

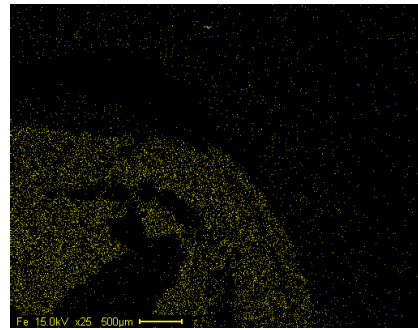
① Al alloy side



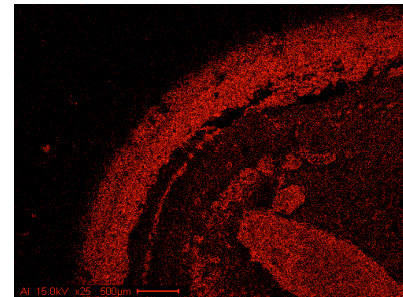
② Steel side



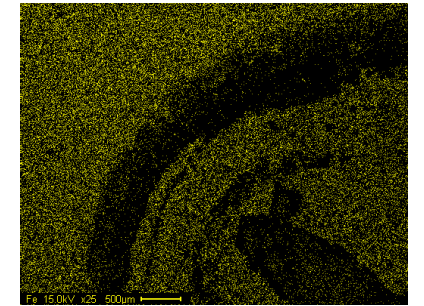
Al



Fe



Al



Fe

Welding current:14 kA, Electrode force: 2 kN, Welding time: 3 cycle

図 十字引張試験後の破断面のEDX面分析結果

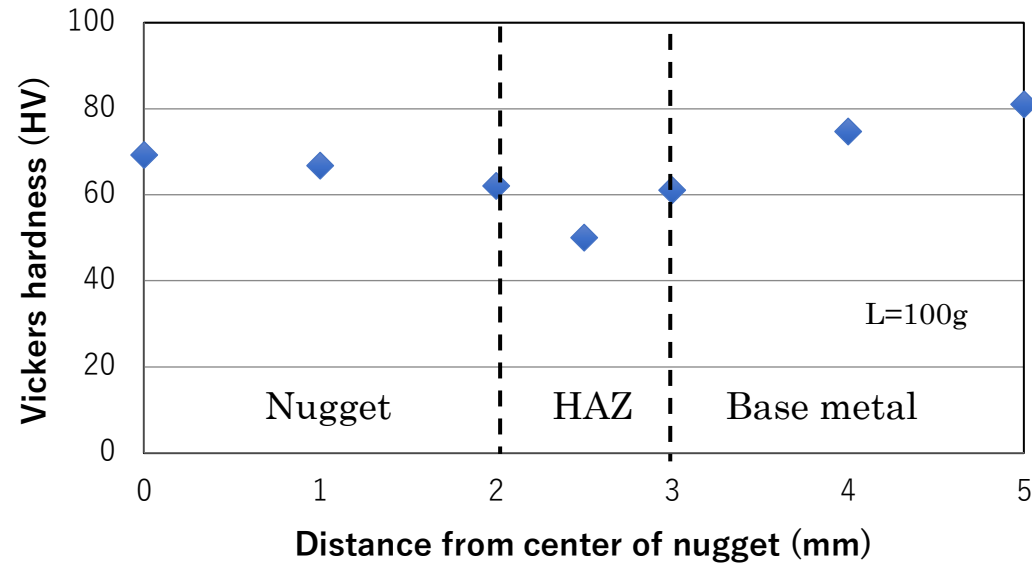
高電流域の挙動

溶接電流値が20 kA以上の高電流域では、十字引張試験時のき裂はナゲットの境界に沿って伝播して破断、またはHAZで破断（Ⅱ型）している。

溶接電流値の増加に伴ってHAZに発生する共晶融解とミクロ割れが多くなることから、溶接電流値20 kA以上で十字引張力がほぼ一定となるのは、HAZに発生する共晶融解とミクロ割れの増加が大きく影響していると考えられる。

鋼板／アルミニウム合金板異材抵抗スポット溶接部の強度が、溶接電流値20 kA以上の高電流域で、ナゲット径が大きくなっても、増加しない主な要因は、アルミニウム合金板側のHAZで共晶融解とミクロ割れが増加し、引張試験時のき裂がHAZの共晶融解とミクロ割れを伝播するためと考えられる。

十字引張試験でき裂がアルミニウム合金板側のHAZを伝播して破断する要因の一つとして、A6061アルミニウム合金は熱処理合金であるため、抵抗スポット溶接時の加熱により図に示すようにHAZが軟化することも挙げられる。



Welding current : 17 kA, Welding time: 3 cycle, Electrode force: 2 kN

図 異材スポット溶接部のアルミニウム側のビッカース硬さ分布

溶接電流値が17 kAまでの低電流域では、十字引張試験時にき裂がナゲット内部を伝播して破断（I型）している。

IMCの影響を大きく受けると考えられるため、この電流値以上でスポット溶接する必要がある。

電流値が高くなる程、HAZでの共晶融解とマイクロ割れの長さおよび数量も増加し、アルミニウム合金抵抗スポット溶接部の十字引張力が電流値20kA以上でほぼ一定となる。

実際の溶接現場ではなるべくコストの削減が要求されるため、できるだけ電流値を低くし、ある程度の強度を得ることが求められている。

十字引張力がほぼ一定値を示す時点の電流値を最適溶接電流値として選定することが適切であると考えられる。

(10) まとめ

鋼板とアルミニウム合金板の異材抵抗スポット溶接部の強度に影響を与える要因を調べることを目的として、抵抗スポット溶接条件とナゲット形態などの溶接組織との関係を明らかにした。

得られた主な結果を以下に示す。

① 溶接条件とナゲット形態の相関性

異材抵抗スポット溶接部のナゲット径は溶接電流値の増加とともに大きくなる。

加圧力が増加するとナゲット径は減少する。

通電時間が変化してもナゲット径の変化はあまり認められない。

② 溶接電流値の増加に伴う抵抗スポット溶接部の引張破断形態の推移

異材抵抗スポット溶接部の引張破断形態は、溶接電流値が低いときはナゲット内から破断する。

溶接電流値が20 kA以上ではHAZで破断する形態へと推移する。

③ 抵抗スポット溶接部界面に生じるIMC

異材抵抗スポット溶接部の鋼板／アルミニウム合金板界面に生じるIMCは、溶接電流値の増加とともにIMC膜厚は増加する傾向にある。

④HAZの共晶融解及びミクロ割れ

異材抵抗スポット溶接部のアルミニウム合金側のHAZには、共晶融解及びミクロ割れが確認できる。

共晶融解及びミクロ割れは、溶接電流が高くなるとともに数も増加する。

⑤異材抵抗スポット溶接部の引張破断メカニズム

異材抵抗スポット溶接部は、溶接電流値が17 kA以下の低電流域では引張試験時にナゲット内部で破断し、主にIMC生成が十字引張力に影響を与えている。

20 kA以上の高電流域では、溶接電流値の増加と共にHAZに生じる共晶融解及びミクロ割れが増大していく。

引張試験時のき裂が主にHAZの共晶融解およびミクロ割れを伝播して破断に至ると考えられる。

そのため、溶接電流値の増加とともにナゲット径が増加しても、溶接電流値が20 kA以上では十字引張力はほぼ一定となる。

HAZの軟化も引張強度低下の一因である。

6.2 LSW(Laser Screw Welding)

自動車には、図1に示すように、各種のレーザ加工技術が適用されている。

LSWは、自動車ボディ鋼板の接合向けに従来の**抵抗スポット溶接の代替技術**となる新しい点タイプのレーザ溶接技術である(図2)。

レーザ光を回転させながら溶接する。

現状の抵抗スポット溶接では、**分流**による溶接不良を避けるため溶接打点間のピッチを一定以上確保する必要があり、**短ピッチでの多打点溶接が困難**である。

レーザ溶接は、光のエネルギーにより直接溶接部を熔融するため打点ピッチに関係なく溶接が可能であり、**溶接打点数の増加により車体剛性の飛躍的な向上**が期待されている。



図1 レーザ加工適用例



図2 LSW概要

リモートレーザー溶接

リモートレーザー溶接工法を図1に示す。

レーザー溶接は一方向溶接や剛性向上といったメリットがあるが、板間の隙間の管理やコスト等の大きな課題が存在する。

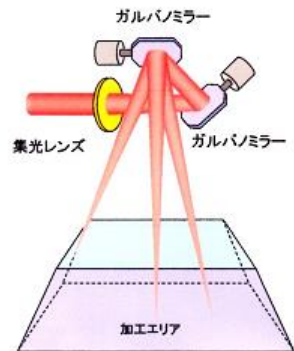
そこで、レーザー溶接採用によってコストメリットを増大できる可能性があるリモートレーザー技術が開発された。

リモートレーザーは集光性能の良いレーザー発振器を用いて、図1に示すように焦点距離を従来の200mm程度を数倍大きくし、500~1000mm程度の集光光学系を用いてレーザー溶接する。

焦点距離が大きくなると光路中に可変ミラー(ガルバノミラー)を置くことが可能となり、ミラーの角度変更により瞬時に照射位置を移動することが出来る。

これによって、レーザー溶接時間は変わらないが、次の溶接点までの空走時間がこれまでのロボット全体が移動していたのに比べてけた違いに小さくできる。

図2は、リモートレーザー溶接の適用例である。



ロボットによるリモートレーザー

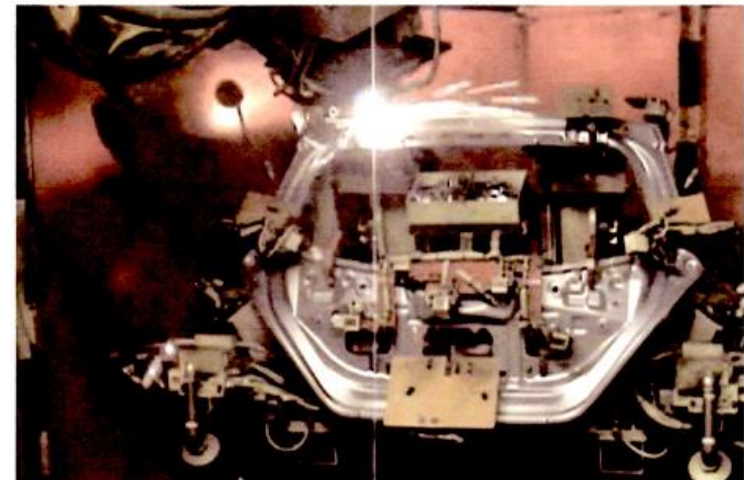


図1 リモート溶接工法

図2 リモート溶接の事例

4kWダイレクトダイオードレーザーによる溶接技術 (LAPRISS: Laser Processing Robot Integrated System Solution)

現在普及しているリモートレーザー溶接システムは、大半がガルバノスキャナヘッドを用いたレーザー溶接システムであり、高速溶接によりサイクルタイムを大幅に低減できる反面、イニシャルコスト、ランニングコストが非常に高くなる。ガルバノモータは一般的なサーボモータと比べると高価で、高速かつ高精度の制御が必要となるため制御装置もサーボアンプと比べると高価である。大口径の保護ガラスをヒュームやスパッタから保護するためのエアナイフも大型になる。スキャニングヘッドは、質量が30kg程度あり、ヘッドを搭載するロボットも中可搬のロボットが必要となる。

上記課題を解決するため、ACサーボモータで平行平板を駆動し、ビームの出射位置自体をシフトすることによって、ロボットに搭載できる軽量(6kg)、小型のトレパニングヘッドが開発された(図1)。

パナソニック溶接システム株式会社は、高出力ダイレクトダイオードレーザーの開発で世界的に注目を集めているTERADIO Inc. (本社: 米国マサチューセッツ州ウイルミントン、社長: Parviz Tayebati) と共同で、レーザー溶接ロボットシステム「LAPRISS」を2014年に開発した。トレパニング: 切断、穴明け

レーザー溶接施工における最大の課題は「ギャップ、狙いずれ許容範囲の狭さ」であるので、レーザーサーキュラ工法(図2, 3)が開発された。

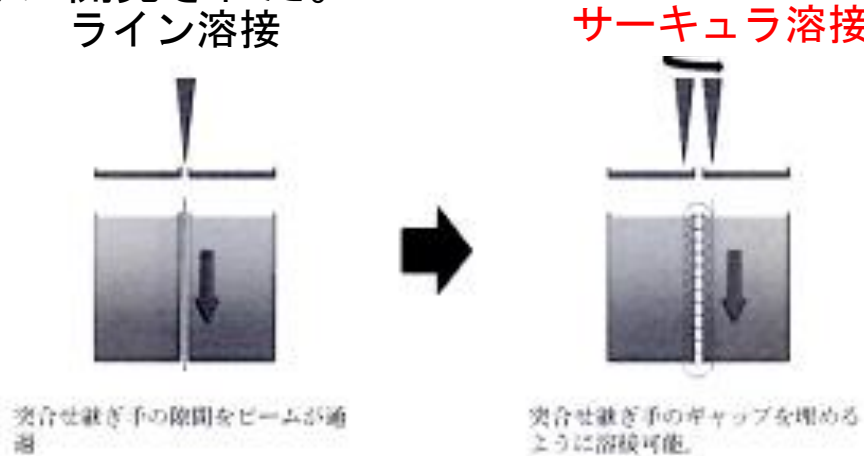


図2 突合せ継ぎ手のサーキュラスキャン溶接模式図



Fig. 12 ラインスキャンのビードトップ写真

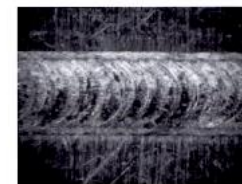


Fig. 13 サーキュラスキャンのビードトップ写真

図3 ラインスキャンとサーキュラスキャンのビード外観 (アルミニウム(A1050) 3mmtのプレート)



図1 LAPRISSシステム

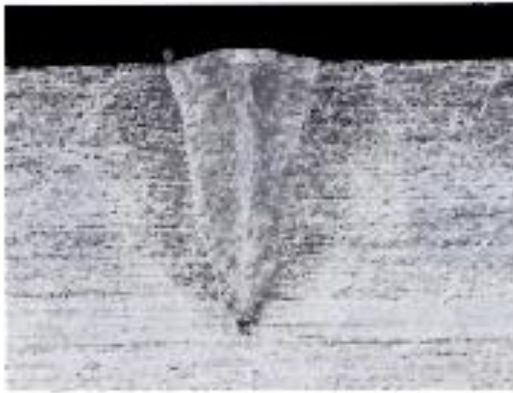
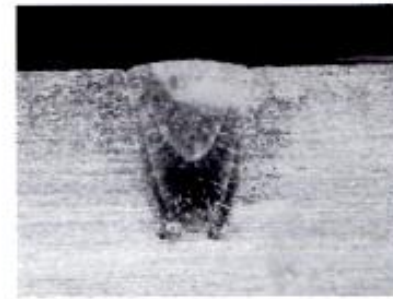
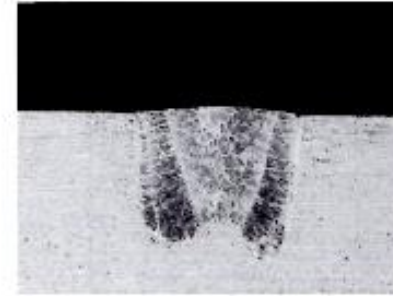


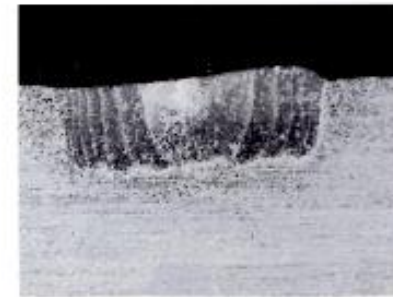
図 ラインスキャンビードの断面マクロ



サーキュラキャンビード断面写真
($\phi 500 \mu\text{m}$)

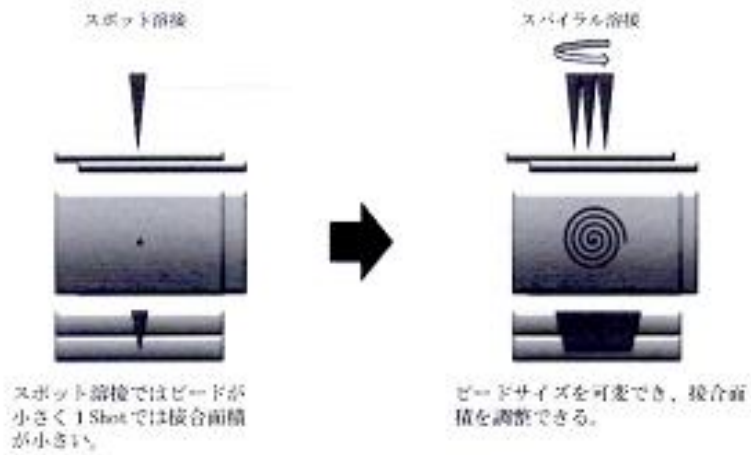


サーキュラキャンビード断面写真
($\phi 1000 \mu\text{m}$)

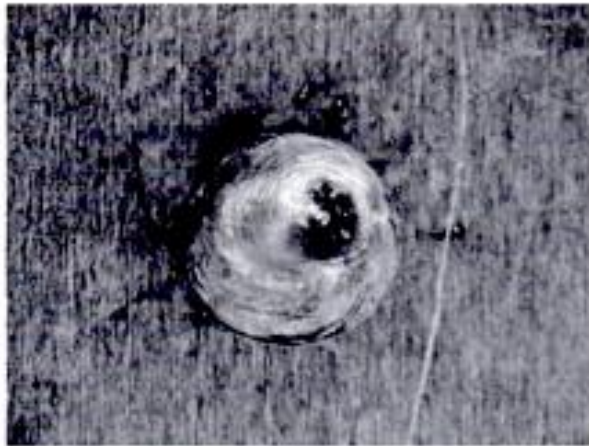


サーキュラキャンビード断面写真
($\phi 2000 \mu\text{m}$)

図 サーキュラスキャンビードの断面マクロ
(アルミニウム (A1050) 3mmtのプレート)



重ね継ぎ手のスパイラルスキャン模式図



スパイラルスキャンのビードトップ写真 (A5052)

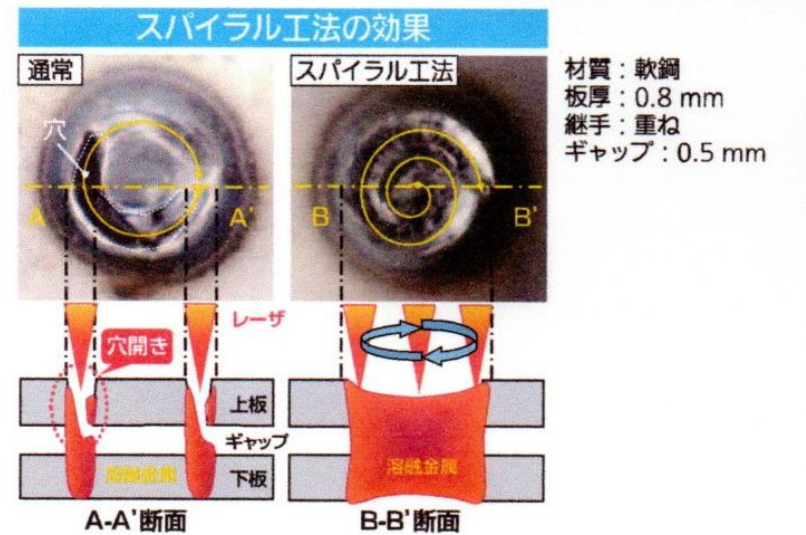


図 重ね継ぎ手のスパイラル模式図、ビード外観 (アルミニウム合金A5052)

ご清聴ありがとうございました