



T. Itoi

電磁圧接による超ハイテン鋼板とアルミニウム合金板との高速接合

糸井 貴臣*

1. まえがき

近年、地球温暖化防止の対策として、自動車、鉄道車両や航空機などの輸送機器の軽量化が注目されている。自動車の走行で排出される CO₂ の排出量は駆動方法によらず車体の重量に比例する。従って、車体軽量化は CO₂ 排出量削減には重点事項の一つであり、車体軽量化に対する取り組みが積極的に行われている。車体軽量化で最も積極的に行われてきたのは、図 1 に示す予測のように、自動車部品への高張力鋼板 (590~1490MPa) の適用である¹⁾。車体への高張力鋼板の適用により、衝突安全性が向上するとともに、板厚低減による軽量化も達成されている。今後も高張力鋼板を十分に使いこなし軽量化が進められていくと考えられるものの、部材の剛性を考慮すると、板厚低減にも限界がある。現行と比較して 30%以上の軽量化が必要となった場合、部分的にアルミニウム合金 (以下 Al 合金) を用いたマルチマテリアル化を視野に入れる必要がある。その場合、鋼と Al 合金の異種金属接合技術が不可欠となる²⁾。

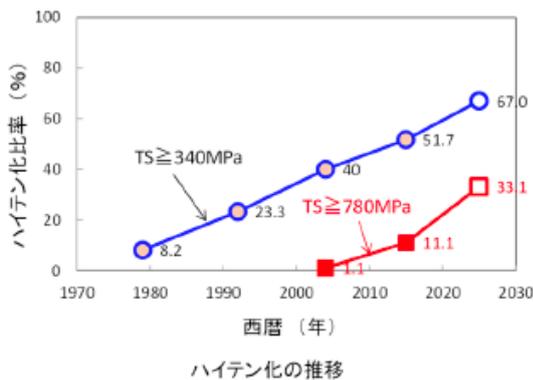


図 1 ハイテン化の推移

電磁圧接は電磁力により生じる衝撃力を利用した固相接合法であり、同種または異種金属同士の強固な接合が可能である^{3,4)}。

そこで本研究は、電磁圧接による DP780 鋼板と 6061-T6 板の接合について、適切な接合条件を明らかにした後に、DP980 鋼板と 6061-T6 板の接合を行い、その接合条件を検討した。作製した試験片について引張せん断試験により接合特性を評価した。

また、作製した接合板の接合界面について電子顕微鏡を用いて組織観察を行い、その界面組織形成について考察した。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

図 2 に電磁圧接装置の断面模式図を示す。本実験では E 字形平板状ワンターンコイルを用いた。間隙を設けてコイルの上面に試料を配置する。電磁圧接ではコイルに大電流を流すことで可動板 (下側) に上向きに電磁力が発生し、高速度で変形し、固定板 (上側) に衝突してシーム状に接合される。コンデンサに充電した電気エネルギーは接合条件の 1 つであり放電エネルギー W と表記する。コイルにはクロム銅製の平板状 E 形ワンターンコイルを用いた。コンデンサ容量は 400 μ F、周波数は 33kHz とした。

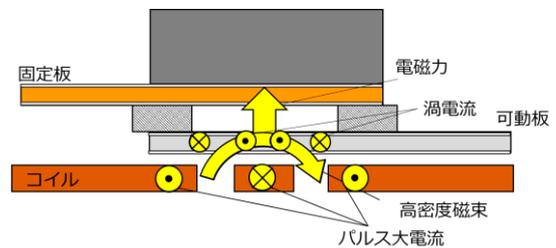


図 2 電磁圧接装置の断面模式図

コイルにパルス大電流が流れると、コイル中央部の周囲には高密度磁束が発生する。この磁束が可動板に交差すると、磁束の侵入を妨げるように可動板内に渦電流が誘導される。ここで誘導された渦電流と高密度の磁束が交差して可動板内部に上向きの電磁力が発生する。電磁力を受けた可動板は高速度で変形、衝突して固定板にシーム状に接合される。従って、導電率の高い金属ほど渦電流の電流値が大きいことから、鋼板と Al 合金板の接合においては、導電率の高い Al 合金を可動板とした。

2.2 供試材と組織観察

供試材として可動板に 6061-O 板または 6061-T6 板を用いた。一方、固定板には DP780 鋼 (JSC780Y) 板または DP980 鋼 (JSC980Y) 板を用いた。JSC 鋼はフェライト相とマルテンサイト相の 2 相組織であり、それぞれ引張強さ

* 千葉大学 大学院 工学研究院 教授

が780MPaまたは980MPa級のDP鋼である。板の寸法は、Al合金板および鋼板を80×100×1.0mmとし、それぞれの板を圧延方向と垂直に電磁圧接を行った。放電エネルギー W は0.5~3.0kJとし、間隙長 d を0.38~5.22mmに調整して実験を行った。図3(a)に6061-T6板とDP780鋼板の接合板(以後、接合板は6061-T6/DP780鋼接合板のように略記する。)の外観を、図3(b)にその断面写真をそれぞれ示す。接合界面の組織観察は接合部のシーム方向に垂直の断面に対して行った。組織観察は、走査型電子顕微鏡(SEM:JSM6510)を用いた。電子線後方散乱回折(EBSD:Electron Backscatter Diffraction)法による結晶方位解析については、走査型電子顕微鏡(SEM:JSM7800)を用い、OXFORD社製のAZtecHKL EBSD解析ソフトウェアにより行った。また、SEMに付設のエネルギー分散型X線分光器(EDS:Energy Dispersive Spectrometer)により元素分析を行った。SEMで観測できる亀裂の先端をそれぞれ接合開始点、接合終了点とし、その距離を接合長さとして測定を行った。接合強度の評価は接合板をJIS13B号(1/2縮小)形状に切り出し、引張せん断試験により行った。



図3 (a)接合板の外観写真と(b)断面写真

3. 実験結果

図4(a)に6061-T6/DP780鋼接合板の破断荷重と間隙長の関係を示す。 W は3.0kJ一定とした。接合部剥離した試料については白抜きで、母材破断した試料は黒塗りでその最大荷重を示す。また、図には6061-T6板の破断荷重を実線で示す。接合は間隙長 d が1.00mmから1.59mmまで可能であり、 d が1.59mmを超えると未接合で不可能であった。 $d=1.00$ mm~1.59mmで作製した試験片について引張せん断試験を行った。 $d=1.00$ mmでは0.8kNで接合部剥離したが、 $d=1.17$ mm~1.42mmでは6061-T6板で母材破断した。さらに d を1.59mmに広げた接合条件の場合は0.4kNで接合部剥離を生じた。以上の結果から、 $d=1.17$ mm~1.42mmが適切な接合条件であり、6061-T6/DP780鋼接合板について母材破断となる強固な接合板の採取が可能だとわかった。

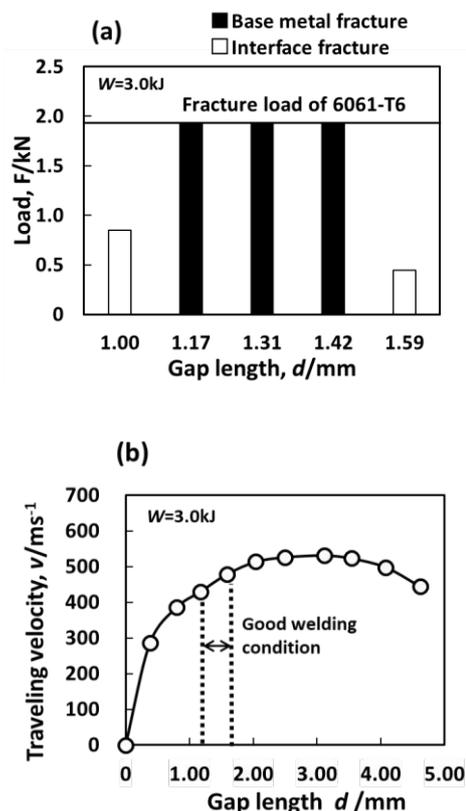


図4 (a)6061-T6/DP780鋼接合板の破断荷重と間隙長の関係と(b)6061-T6板における衝突速度と間隙長の関係¹⁰⁾

図4(b)に6061-T6板における衝突速度と間隙長の関係を示す。 W は接合条件と同じ3.0kJである。図中には母材破断した接合板作製における衝突速度の範囲を破線で示す。間隙長 $d=1.17$ mm~1.42mmの適切な接合条件での衝突速度は430m/s~459m/sの範囲である。 $d=1.59$ mmで衝突速度は479m/s、 $d=3.11$ mmで531m/sへと速くなるが、接合板は接合部剥離および未接合である。つまり接合板の接合強度および接合可否を衝突速度のみで判断できない。これまでに引張強度が高い2024-T3板と7075-T6板の接合および6061-T6板とDP590鋼板の接合において、母材破断する強固な接合板を得るには、速い衝突速度が望ましいことが知られている。衝突速度の増加は衝突圧力の増加を意味する。しかし、Fig.4(a)と(b)からは、6061-T6/DP780鋼接合板の場合、衝突速度が増加しても接合部剥離や未接合となることから、接合条件において他の要因を検討する必要がある。そこで、この原因を調べるために、接合部の組織観察を行った⁵⁾。

図5(a)に6061-T6/DP780鋼接合板の断面BE(Backscattered Electron)像を示す。上側が固定板(DP780鋼板)で下側が可動板(6061-T6板)である。電磁圧接では、可動板が固定板に衝突後、図中に示したコイルの中心線から接合端部側に向かって衝突点が移動し、ある位置から接合が始まる。従って、中心線に対してほぼ対称に、図中に白線で示

した部分の左右の2箇所では接合される。以後、この左右2か所を接合部と呼び、これらの幅の合計を接合幅とする。作製した接合板の接合部のBE像を図5(b) $d=1.05\text{mm}$, (c) $d=1.17\text{mm}$ および(d) $d=1.59\text{mm}$ にそれぞれ示す。図の左側がコイルの中心線側であり、右側が接合端部側である。爆発圧着と同様に衝突点の移動速度、固定板と可動板との衝突角度が波状界面接合の条件を満たすようになる部分で接合が行われる。図5(b)~(d)の接合界面には波状模様が観察される。電磁圧接では、固定板と可動板の角度が連続的に増加するために、中心線側から接合端部に向けて波長が長くなる傾向を示す。図5(b)の場合、矢印で示すようにコイル側近傍では約 $10\mu\text{m}$ 程度、接合端部近傍では約 $50\mu\text{m}$ 程度である。また、いずれの接合界面からも波頭部分の内側に部分的に中間層の形成が認められる。接合板の接合幅は図5(b), (c)および(d)で 1.05mm , 1.34mm , および 0.91mm であり、(c)が最も広く、引張せん断試験の結果においても母材破断していることから、接合幅が広くなるに従い、より良好な接合状態となる事を意味している。

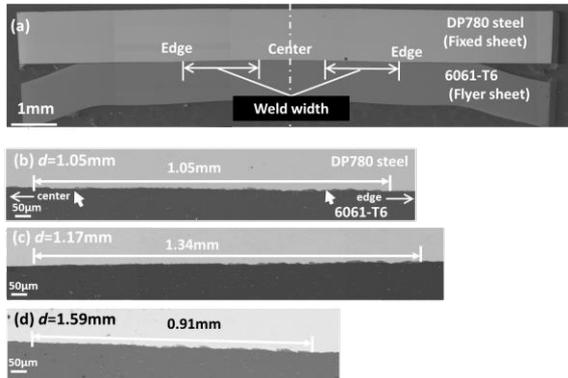


図5 (a)6061-T6/DP780 鋼接合板の断面BE像、(b) $d=1.05\text{mm}$, (c) $d=1.17\text{mm}$ および(d) $d=1.59\text{mm}$ に調整した接合板の断面BE像から測定した接合幅¹⁰⁾

図6に各間隙長で得られた接合板の接合幅を測定した結果を示す。◇が中心部より左側、△が右側の接合幅を示し、●が左右の接合幅の合計を示す。この図から、いずれの間隙長 d においても左右の接合幅がほぼ同じであることがわかる。また、接合幅が $d=1.31\text{mm}$ で最大の 2.92mm となり、その後狭くなる事がわかる。図中に、母材破断した接合板作製における間隙長の範囲を破線で示す。この事から母材破断には 2.38mm 以上の接合幅が必要である事がわかるが、図5(d)の結果からわかるように、間隙長 d を 1.59mm に広げると接合幅は狭くなる。つまり、より速い衝突速度で接合しているにもかかわらず、接合幅が狭くなる事がわかる。

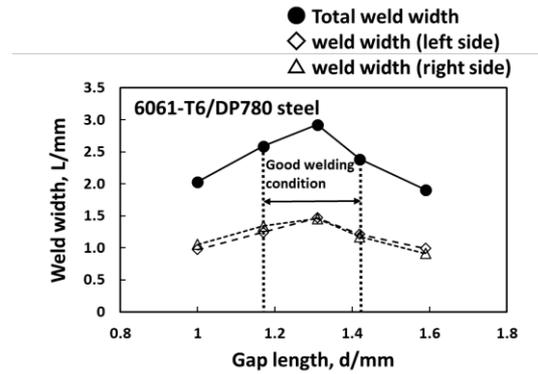


図6 各間隙長で得られた接合板の接合幅¹⁰⁾

図6に放電電流と衝突時間信号の関係について (a) $d=1.17\text{mm}$ と (b) $d=1.59\text{mm}$ の測定結果を示す。これらの図から最大電流値に到達する時間 t_m がそれぞれ $6.28\mu\text{s}$ および $6.20\mu\text{s}$ であることがわかる。また、可動板が固定板に最初に衝突する時間 (衝突時間 t_c) はそれぞれ $5.32\mu\text{s}$ および $6.36\mu\text{s}$ であり、間隙長が広がると長くなる。可動板が固定板に達する衝突時間 t_c は図7(a)と(b)中の矢印で示される衝突時間 t_c は連続衝突の開始時間を意味する。また、両衝突の開始時間は $1\mu\text{s}$ 程度の違いであり、この違いは、接合開始時間が最大電流値に達する時間 t_m の前後 ($t_c < t_m$ か $t_c > t_m$) にそれぞれ衝突している。この事が接合性に与える影響について電磁力に関する考察を行なった。図7(c)に可動板に生じる電磁力の時間推移の模式図を示す。図には実線で $t_c \approx t_m$ を示し、連続衝突の開始時間 t_c が t_m の前後の場合を矢印で示した。この図から $t_c > t_m$ では $t_c < t_m$ と比較すると、2枚の板が接触している圧接時間は短く、濃い灰色で示される部分の力積を受ける事になるが、 $t_c < t_m$ では、この黒灰色の力積に加えて薄い灰色で示される部分の力積も受ける事になる。つまり、 $t_c < t_m$ の接合条件の場合、衝突速度は僅かに遅くなるが、コイルからより大きな電磁力の作用を受ける事になる $W=3.0\text{kJ}$ の場合は放電電流の最大値は 280kA である。可動板に及ぼす電磁力の影響を定量的に示す事は難しいものの、電磁力が放電電流の2乗に比例することからも、 $t_c < t_m$ の場合、可動板が薄い灰色で示される力積分の電磁力 (最大電磁力を含む領域) の作用を受ける事が接合性に影響したと考察される。図6の結果から、衝突速度に起因する衝撃圧力に加え、最初の衝突直後から可動板に連続的に生じる電磁力の作用が大きい場合、接合幅が広くなると考えられる。従って、衝突時間は衝突速度に加え、接合条件に影響を及ぼす因子の一つであると考えられる。

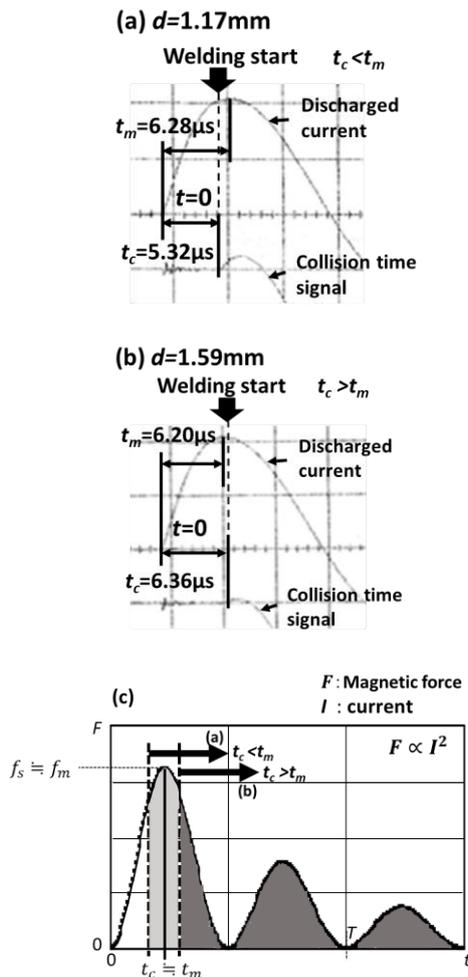


図 7 放電電流と衝突時間信号の関係(a) $d=1.17\text{mm}$ と(b) $d=1.59\text{mm}$. (c)可動板に生じる電磁力の時間推移の模式図¹⁰⁾

図 8(a)に 6061-T6/DP980 鋼接合板 ($W=3.0\text{kJ}$, $d=1.17\text{mm}$)の断面 BE 像 (右側) を示す. 接合幅は $d=1.17\text{mm}$ では 1.38mm , また $d=1.31\text{mm}$ では 1.29mm であり, 6061-T6/DP780 鋼接合板と同程度の長さの接合幅であった. また同様に接合界面からは波頭部分の内側に部分的に中間層の形成が認められた. 図 8(b)に 6061-T6/DP980 鋼接合板 ($W=3.0\text{kJ}$, $d=1.17\text{mm}$) の引張せん断試験後の試験片の外観写真を示す. 6061-T6/DP980 鋼接合板において $W=3.0\text{kJ}$ とした場合, 写真に示される $d=1.17\text{mm}$ に加えて $d=1.31\text{mm}$ でも 6061-T6 板で母材破断する強固な接合が可能であった. つまり, 6061-T6 板と DP780 鋼板との接合の場合と同様に, 衝突時間が $t_c < t_m$ の場合に良好な接合が可能であり, 上記の考察と一致する. しかし, $d=1.42\text{mm}$ では未接合であることから, 6061-T6 板と DP780 鋼板との接合条件と比べると, より接合条件が狭くなることが分かった. 図 9(c) と (d) に 6061-T6/DP780 鋼接合板と

6061-T6/DP980 鋼接合板の接合界面の拡大図を示す. いずれの接合界面からも, 波状模様が観察され, 6061-T6 母材に接合時の塑性流動により渦のように巻き込まれた母材同士が, アンカー効果を生じていると考えられる. 図 9(e) と (f)にそれぞれのアンカー部分の拡大像を示す. いずれの SEM 像からも波頭部分の形状に沿って結晶粒が引き伸ばされている様子が観察され, DP780 鋼板では母材内部の組織と比較して結晶粒が微細化している様子が分かる. 一方, DP980 鋼板では, 母材の粒径が微細なために判断しづらい.



図 8 (a) 6061-T6/DP980 鋼接合板 ($W=3.0\text{kJ}$, $d=1.17\text{mm}$)の断面 BE 像.(b) 6061-T6/DP980 鋼接合板 ($W=3.0\text{kJ}$, $d=1.17\text{mm}$) の引張せん断試験後の試験片の外観写真¹⁰⁾

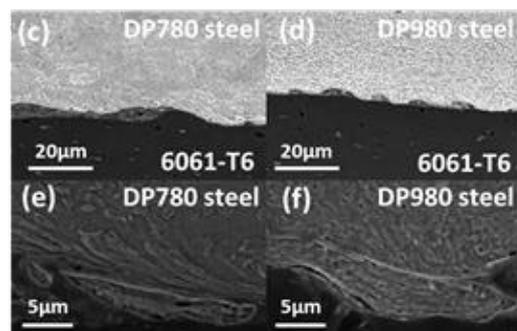


図 9 (c) 6061-T6/DP780 鋼接合板, (d) 6061-T6/DP980 鋼接合板の接合界面 BE 像. (e)と(f)は, それぞれのアンカー部分の拡大 BE 像¹⁰⁾

そこで, 作製した 6061-T6/DP980 鋼接合板 ($W=3.0\text{kJ}$, $d=1.17\text{mm}$) について接合界面の SEM 観察および EBSD による結晶方位解析を行った. 図 10 に 6061-T6/DP980 鋼接合板の(a)SEM 像, (b)Fe マップ, (c) Al マップ, (d) IQ (Image Quality) マップ, (e)IPF (Inverse Pole Figure) マップ, および(f)KAM (Kernel Average Misorientation) マップを示す. SEM 像から接合界面には固定板と可動板の衝突時の塑性流動により生じた波状模様が観察される. 図 10 (b)Fe および(c)Al の元素マップからは, DP980 鋼板と 6061-T6

板との接合界面が明瞭にわかる。図中には、波頭部分の内側にFeとAlの両元素が共に分布している領域が確認され、板厚方向に10 μm 程度の間層を形成している事が分かった。図10(d)IQマップではIQ値の低い領域が中間層に対応しており、微細な結晶粒が形成されたことが示唆される。図10(e)IPFマップには、結晶粒の方位差を15度以上とした境界線(結晶粒界)を合わせて示す。白枠で囲った接合界面近傍は波状模様形成時の塑性流動が生じた領域であり、母材の粒径と比較すると、微細化している様子が分かり、接合界面に沿って1 μm 以下の結晶粒が観察された。結晶方位はランダムである。この組織形成は、局部溶解の際に急冷凝固したか、もしくは衝撃変形によって界面近傍でひずみの蓄積と加熱が生じ、再結晶化したことに起因すると考えられる。図10(f)のKAMマップは個々の測定点における隣接ピクセル間の結晶方位差の平均値を示しており、5度までのミスオリエンテーション値の分布を示している。KAMマップに示されるひずみの蓄積度から、接合時に鋼板側(固定板側)に10 μm 程度まで比較的多くのひずみが導入されたと考えられ、(e)と比較すると、結晶粒が微細な領域と一致している。

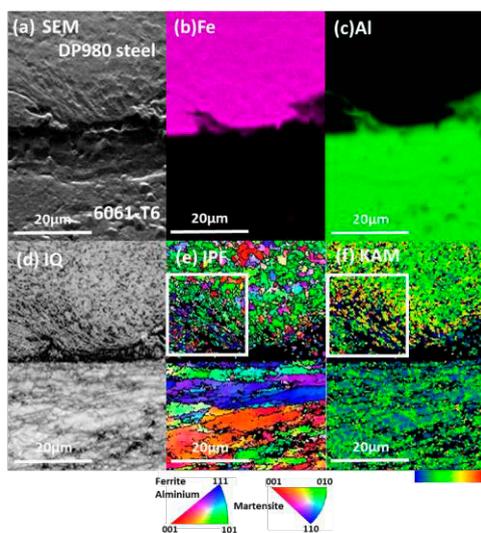


図10 6061-T6/DP980 鋼接合板の(a)SEM像、(b)Feマップ、(c)Alマップ、(d)IQ (Image Quality)マップ、(e)IPF (Inverse Pole Figure)マップ、および(f)KAM (Kernel Average Misorientation)マップ¹⁰⁾

電磁圧接や爆発圧着における異種金属接合界には、しばしば両元素からなる中間層が観察される。図11(a)に中間層近傍のHAADF-STEM像を示す。像のコントラストは原子番号Zの2乗に比例するため、この像から観察されるコントラストは、白い場合はFeであり、暗い場合はAlを意味する。また、中間層は、灰色を呈しており、両元素をともに含んでいると考えられるが、中間層には、コントラストの濃淡があり、内部では白と黒のコントラストが不規則に入り混じった組織が観察された。図11(a)中に白枠

で囲った領域で調べた(b)Feマップ、(c)Mnマップ、(d)Alマップ、および(e)Oマップをそれぞれ示す。元素マップから、中間層はFe、MnおよびAlで構成されていることから合金化していると考えられる。元素マップからは、HAADF-STEM像において、より白いコントラストで示された領域において比較的Feが多く分布していることがわかり、Fe濃度はDP590鋼側が高く、6061-T6側では低くなる。つまり、中間層内に組成分布が生じていると考えられる。また、Oマップからは、接合界面や中間層内に濃縮は認められず、観察結果からは酸化物の存在は確認できなかった。中間層内に矢印で示した部分では、元素マップよりFeとMnが多く、かつAlが少ない部分であり、このことから、1 μm 以下のFeが中間層に存在していることもわかった。この中間層において、比較的Fe濃度の高いAおよび低いBの領域から得られた電子線回折(ED: Electron Diffraction)パターンをそれぞれ示す。得られたEDパターンからは、AではFeAl、BではFe₂Al₃およびFeAl₃の回折波が観察され、中間層は主に金属間化合物で構成されており、部分的にFe粒子が混在していることがわかった。このことから、中間層は両金属板の成分を含んで合金化しており、部分的には組成が偏っていることから急冷却が生じていると考えられる⁶⁾。

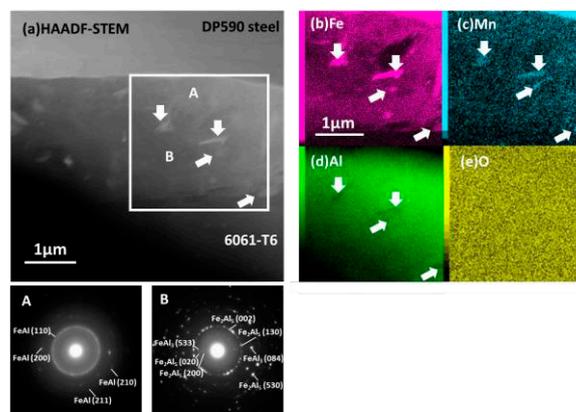


図11 6061-T6/DP590 鋼接合板の(a)HAADF-STEM像と電子線回折像、(b)Feマップ、(c)Mnマップ、(d)Alマップ、(e)Oマップ¹¹⁾

接合界面に観察される波状模様は爆発圧着等の衝撃力を用いた接合界面で観察される波状模様と同様のメカニズムで形成されると考えられる。電磁圧接は爆発圧着と比較すると衝撃力が弱い電磁力を用いた線接合法であるが、せん断力が接合板の接合界面に平行に負荷されるため、互いの板表面が塑性変形して、アンカー効果を生じるため、界面の接合強さの向上において好ましい組織形態である。

接合条件は衝突速度が速い方が望ましい。従って、図6から分かるように、コイルと可動板はある程度の広い間隙長を必要とする。しかし、接合板がコイルから受ける電磁

力の作用を考えると、間隙長は狭い方が望ましい。この相反する接合条件を満たすためには、放電電流が最大電流値に達するまでの時間に可動板が高速度で固定板に衝突することが必要であることが分かった。従って、良好な接合を達成するためには、放電エネルギー W を一定とした場合、間隙長 d の調整により衝突時間を制御する事が必要である。適切な接合条件の検討において、正確な衝突時間の測定は重要となり、本研究で用いた電気的な測定法は効果的である。鋼板の強度が高くなるにつれて、接合可能な間隙長の範囲は狭くなり、接合条件が限られるが、この条件を満たす間隙長で 6061-T6 板と 1GPa 級ハイテン鋼板の接合が達成できた。

4. まとめ

- (1) 6061-T6 板と DP780 鋼板の接合において、放電エネルギー W が 3.0kJ の場合、間隙長 d が 1.17~1.42mm の接合条件で母材破断に至る良好な接合ができた。この時の衝突速度は 430~459m/s であった。
- (2) 衝突速度の増加により接合板の接合幅は広がる傾向を示した。しかし、間隙長 $d=1.59\text{mm}$ 以上（衝突速度 459m/s 以上）の接合では、接合幅は狭くなり、接合部剥離となった。引張強度が高い接合板の接合強度や接合可否を衝突速度のみで判断できない。
- (3) 可動板が固定板に衝突してからも可動板に電磁力が作用し続けることを考慮すると、可動板の衝突時間が最大電流値に到達する時間よりも短い時間になるように間隙長を選択すればよい。従って、衝突時間は衝突速度に加え、接合条件に影響を及ぼす因子の一つであると考えられる。
- (4) 6061-T6 板と DP980 鋼板の接合において、(3)の結果に配慮した結果、放電エネルギー W が 3.0kJ の場合、間隙長 d が 1.17~1.31mm の接合条件で母材破断に至

る良好な接合ができた。この時の衝突速度は 430~446m/s であり、DP780 鋼板との接合の場合と比較して接合の間隙長範囲が狭くなった。

- (5) SEM 観察の結果、いずれの接合板の接合界面にも波状模様が観察され、また、不連続的に Fe と Al から構成される中間層が生成していることが分かった。渦のように巻き込まれた母材同士が、アンカー効果を生じたと考えられる。
- (6) EBSD 分析の結果、6061-T6/DP980 鋼接合板の接合界面には塑性ひずみが蓄積しており、また、母材内部と比較して結晶粒が微細化していた。アンカー部分の結晶粒微細化は、接合界面を強化する因子となると考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成 (AF-2018012-B2) により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 林，薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック第4版（2017）。
- 2) 新倉昭夫：UACJ Technical Reports, 2(2015) 96-106.
- 3) 相沢友勝：塑性と加工, 44-512 (2003), 957-959.
- 4) 日本塑性加工学会編：接合—技術と全容の可能性—, コロナ社 (1990)。
- 5) 糸井貴臣, 橘田駿一, 岡川啓悟：軽金属, 69 (2019), 541-547.
- 6) 糸井貴臣, 井上祥一, 中村晃貴, 橘田駿一, 岡川啓悟：軽金属, 68 (2018), 141-148.