

摩擦アンカー接合で作製した合金化溶融亜鉛めっき鋼 2枚重ね継手の機械的性質

坂村 勝, 松葉 朗, 山本 健, 竹保 義博, 池田 功^{*1}, 船木 開^{*2}, 阿部 豊^{*2}, 藤井 英俊^{*3}

Mechanical Properties of Friction Anchor Welded Lap Joints of Galvannealed Steel

SAKAMURA Masaru, MATSUBA Akira, YAMAMOTO Ken, TAKEYASU Yoshihiro, IKEDA Isao^{*1},
FUNAKI Kai^{*2}, ABE Yutaka^{*2} and FUJII Hidetoshi^{*3}

筆者らが開発した摩擦アンカー接合を板厚 1.2mm の合金化溶融亜鉛めっき鋼 (GA 鋼) の 2 枚重ね継手及び同じ板厚の冷間圧延鋼 (SPCC) の 2 枚重ね継手に適用し, その機械的性質を評価した。その結果, GA 鋼の接合材は, 上板の鋼と下板の鋼の隙間に Zn を主成分とする層が残存しており, SPCC の接合材に比し上板の鋼と下板の鋼の接合部の長さが短くなるのが分かった。そのため, GA 鋼の接合材は SPCC の接合材に比し, 引張せん断強度, 十字引張強度が低位となった。特に, 十字引張強度は SPCC の接合材が約 8 kN/点であるのに対し GA 鋼の接合材は約 1.5 kN/点と非常に低位となった。これは, 接合時の最高到達温度が約 900°C であるため, GA 鋼接合材では接合ツール押込部近傍の GA めっき層が完全に亜鉛液相化せず, 一部が上板の鋼と下板の鋼の間に固相として残存し, そのため, 上板の鋼と下板の鋼の接合部長さが SPCC 接合材に比し短くなると推定した。

キーワード: 摩擦アンカー接合, 亜鉛めっき鋼 (GA 鋼), 摩擦攪拌接合, 引張せん断強度, 十字引張強度

1. 緒 言

現在, 自動車に利用されている鉄鋼材料は, 防食のために亜鉛めっきが施されているものが数多く見受けられ, その中でも日本では合金化溶融亜鉛めっき鋼 (GA 鋼)¹⁾ が多用されている。

一方, 筆者らは軟質金属と硬質金属の重ね点接合の手法として, 先端が球面の接合ツールを用いる接合方法を考案し (以下, 摩擦アンカー接合²⁾ と称す), これまでアルミニウム合金と鋼の接合³⁻⁷⁾ 及びマグネシウム合金と鋼の接合⁸⁾ に適用して, 特に本接合法で得られた継手の十字引張強度 (引き剥がし強度) が高いことを報告してきた。また, 摩擦アンカー接合をめっきなし鋼 (SPCC) の 2 枚重ね継手に適用した結果についても報告を行ってきた^{9,10)}。しかし, 本手法を前述の GA 鋼に適用した際の継手の特性評価についてはこれまで行ってない。

そこで, 本技術報文では, 摩擦アンカー接合を GA 鋼 2 枚重ね継手に適用して得られた継手の接合強度評価を行うとともに, その接合メカニズムについて考察を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料及び接合方法

供試材料としては, 板厚 1.2mm の合金化溶融亜鉛めっき鋼 (GA 鋼: めっき厚さ約 8 μm) と比較用として厚さ 1.2mm の冷間圧延鋼 (SPCC) を用いた。両材料の引張強度はともに約 330MPa である。なお, GA 鋼は溶融亜鉛めっき鋼 (GI 鋼: いわゆる, どぶ付け亜鉛めっき鋼) を熱処理して得られた鋼であり, 表面のめっき層は Zn-Fe 化合物から構成されており, 本実験で用いた GA 鋼のめっき層は FeZn_{6.67} (δ 相) が主化合物であることを確認している。接合前の処理として, SPCC については供試体の接合される表面を 500 番の耐水研磨紙で研磨した後, アセトンで脱脂し, GA 鋼については, アセトン脱脂のみとした。

接合は, 図 1 に示すように, 汎用フライス盤の加工テーブル上にエアシリンダを配置し, その上に GA 鋼あるいは SPCC を 2 枚重ね, 治具によって固定することで行った。使用したエアシリンダは, 0.6MPa の圧縮空気を入れた際に最大 12kN の垂直荷重を発生させることができる。実験に用いた接合ツールは, 図 2 に示すように, φ 12.7mm の窒化ケイ素製の球体を炭素鋼 S45C 製の円柱端部の凹部に焼き嵌めすることによって作製した。また, 球体の円柱端部からの突出量は 5mm とした。そして, 接合ツールの供試体への押し込み操作は, エアシリンダ

2017. 6. 30 受理 加工技術研究部

*1 三和マテリアル(株) (元: 東芝マテリアル株式会社)

*2 東芝マテリアル株式会社

*3 大阪大学接合科学研究所

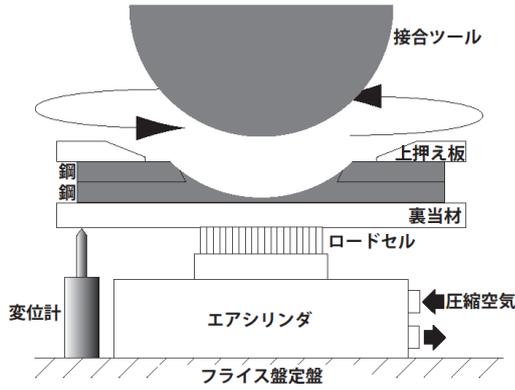


図1 接合装置間略図

へ圧縮空気を出し入れすることによって供試体を取り付けた裏当て治具ごと上下させ、回転する接合ツールに供試体を所定の位置まで押し当てる機構を採用した。本報文中で記す接合時間とは、エ



図2 窒化珪素球と摩擦アンカー
接合用ツール外観

アシリンダへの圧縮空気の供給時間を示しており、“供試体が上昇する時間”と“回転する接合ツールが供試体に押し込まれている時間”を合わせた時間である。なお、エアシリンダによる供試体の上下移動距離が 12mm と一定であるため、土台となるフライス盤の加工テーブルを上下させて押込量を変化させた。そのため、厳密には供試体と接合ツールとの距離は設定する押込量によって変化し、接合ツールを供試体に押し込み攪拌する時間は変わってくる。しかし、その時間の最大値と最小値の差が、本実験では 0.002 秒とわずかであるため考慮しないこととした。

接合条件については、ツール回転数 1800rpm、接合時

間 5.0 秒、設定押込量を 0.6~2.1mm とし、シールドガスは用いなかった。

2.2 接合材の断面評価及び接合強度測定

接合材の断面評価については、切断及び研磨後、日本電子(株)製走査型電子顕微鏡 JSM-6010LA (エネルギー分散型 X 線分析 (EDS) 装置付属) を用いて行った。強度試験として、JIS Z 3136 にしたがって引張せん断試験を、JIS Z 3137 にしたがって十字引張試験を(株)島津製作所製オートグラフ AG-10TB で引っ張って実施した。引張速度は 0.08mm/s とした。

2.3 接合時の温度変化、荷重及びツール押し込み挙動測定

接合時の供試体の温度変化を把握するため、図3に示すように所定の位置に 2 本の熱電対を設置した。また、供試体に作用する垂直荷重及びツールの押し込み挙動を調べるために、図1に示したように、裏当て治具の下面に接触式変位計を、裏当材とエアシリンダの間に荷重測定用ロードセルを設置した。

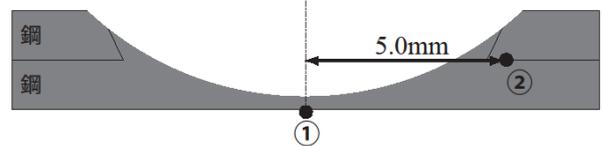


図3 温度測定位置

3. 結果及び考察

3.1 接合部の断面

図4にツール押込量(Plunge depth; Pd)を 0.6~2.1mm とした場合の被接合材の断面 SEM 反射電子像を示す。上段が GA 鋼の重ね継手、下段が SPCC の重ね継手を示している。ツール押込量 0.6mm の断面写真より、SPCC の重ね継手(以下、SPCC/SPCC とする)では接合ツールを下板まで押し込まなくても接合が可能であるのに対し、GA 鋼の重ね継手(以下、GA/GA とする)では接合ができないことが分かる。また、ツール押込量 1.3~2.1mm の断面写真よ

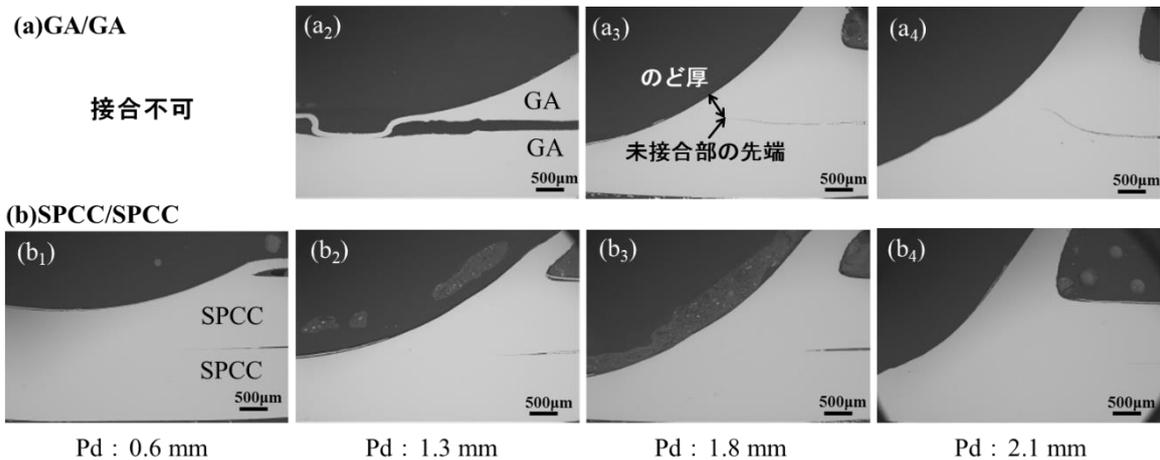


図4 被接合材断面の接合ツール押込量による変化

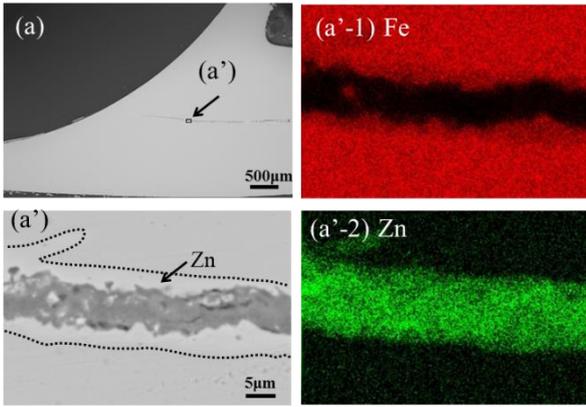


図5 GA/GA 接合材断面の SEM 反射電子像及び面分析結果

り、SPCC/SPCC に比し GA/GA は鋼/鋼接合部ののど厚が非常に小さいことが分かる。なお、図4の Pd : 1.8mm 中に示すように、SPCC 同士、あるいは GA 鋼同士の接合が行われていない部分の先端部（鋼/鋼未接合部）と接合ツール球面による鋼の加工面の最短距離を“鋼/鋼接合部ののど厚”と定義する。

次に、図5に、GA/GA の鋼/鋼未接合部（ツール押込量 1.8mm）を拡大した SEM 反射電子像及び EDS 面分析結果を示す。図より、鋼と鋼の間に Zn を主成分とする層が残存しており、鋼/鋼接合を妨げていることが分かる。また、面分析結果より Zn の一部は鋼中に拡散していることも

わかる。残存している層を EDS で定量分析したところ、Fe : 23~32at%、Zn : 77~68at% であることが分かった。GA 鋼のめっき層は、概ね Fe : 15at%、Zn : 85at% であることから、GA 鋼同士が加圧、加熱状態で接触し、GA めっき層中の Zn が鋼中に拡散していることが示唆される。

3.2 引張せん断強度

図6にツール押込量と引張せん断強度の関係を示す。SPCC/SPCC、GA/GA ともにツール押込量の増加とともに引張せん断強度が上昇していることが分かる。また、引張せん断強度は GA/GA の方が SPCC/SPCC に比し低位であり、最大で、SPCC/SPCC は約 10kN/点に達しているのに対し、GA/GA は約 6 kN/点にとどまっていることが分かる。

図7には引張せん断試験後の試験片の断面 SEM 反射電子

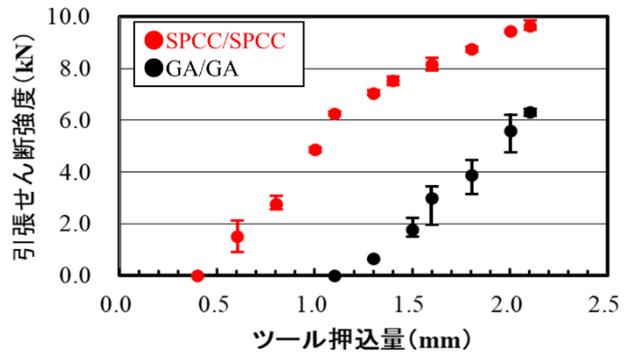


図6 ツール押込量と引張せん断強度の関係

	GA/GA		SPCC/SPCC	
	下材引張側	上材引張側	下材引張側	上材引張側
Pd:0.8mm	接合不可			
Pd:1.3mm				
Pd:1.8mm				
Pd:2.1mm				

図7 引張せん断試験後の試料の断面 SEM 反射電子像

像を示す。SPCC/SPCC のツール押込量 0.8mm の条件では界面破断し、ツール押込量 1.3mm 以上では SPCC/SPCC, GA/GA とともに 3.1 (接合部の断面) で示した鋼/鋼接合部近傍の上材引張側で破断が起こっている。この結果から、鋼/鋼接合部の厚が引張せん断強度に大きく影響しており、そのため、SPCC/SPCC の方が GA/GA に比し引張せん断強度が大きくなったものと思われる。

3.3 十字引張強度

図 8 にツール押込量と十字引張強度の関係を示す。3.2 (引張せん断強度) と同様に、SPCC/SPCC, GA/GA とともにツール押込量の増加にともなって十字引張強度が上昇している。また、十字引張強度は GA/GA の方が SPCC/SPCC に比しかなり低位であり、その最大値は SPCC/SPCC で約 8kN/点に達しているものの、GA/GA で約 1.5kN/点にとど

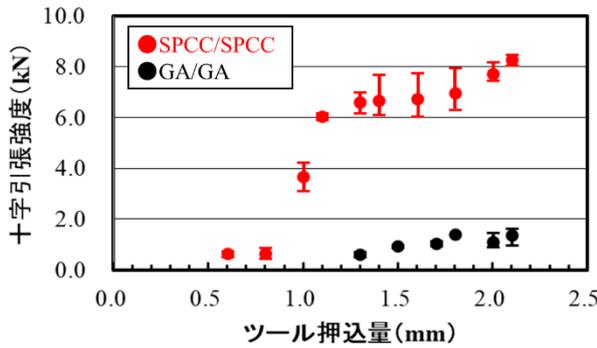


図 8 ツール押込量と十字引張強度の関係

まっている。図 9 には十字引張試験後の試験片の断面 SEM 反射電子像 (下板のみ) を示す。SPCC/SPCC のツール押込量 0.8mm の条件では界面破断し、ツール押込量 1.3mm 以上では SPCC/SPCC, GA/GA とともに鋼/鋼接合部近傍で破断が起こっている。この結果から、鋼/鋼接合部の厚が十字引張強度に大きく影響しており、そのため、SPCC/SPCC の方が GA/GA に比し引張せん断強度が大きくなったものと思われる。また、その影響度は引張せん断強度に対してよりも、十字引張強度に対して非常に大きいことが分かった。

3.4 接合時の温度、垂直荷重及び押込量変化

SPCC/SPCC 及び GA/GA の接合過程における温度、垂直荷重及び押込量の変化の一例 (設定ツール押込量 2.0mm) を図 10 に示す。これらの物理量の経時的な挙動については以下のように考察できる。

3.4.1 SPCC 重ね継手の接合

エアシリンダへ圧縮空気を供給後、供試体を固定した治具が上昇し、約 0.3 秒後に供試体と接合ツールが接触する。そして、垂直荷重は 0.3~0.5 秒の短時間で急激に 12kN まで上昇し、垂直荷重一定の状態ですぐにツール押込量が増加して、それに伴って供試体の温度が上昇する。その後、約 1.8 秒で測定点①の温度が約 800℃に達し、供試体の軟化に起因して垂直荷重が低下し始める。そして、設定ツール押込量に到達し、測定点①の温度は約 900℃に達する。なお、既報³⁾に示したとおり、アルミニウム合金と鋼の摩擦アンカー接合では垂直荷重が 12kN に達

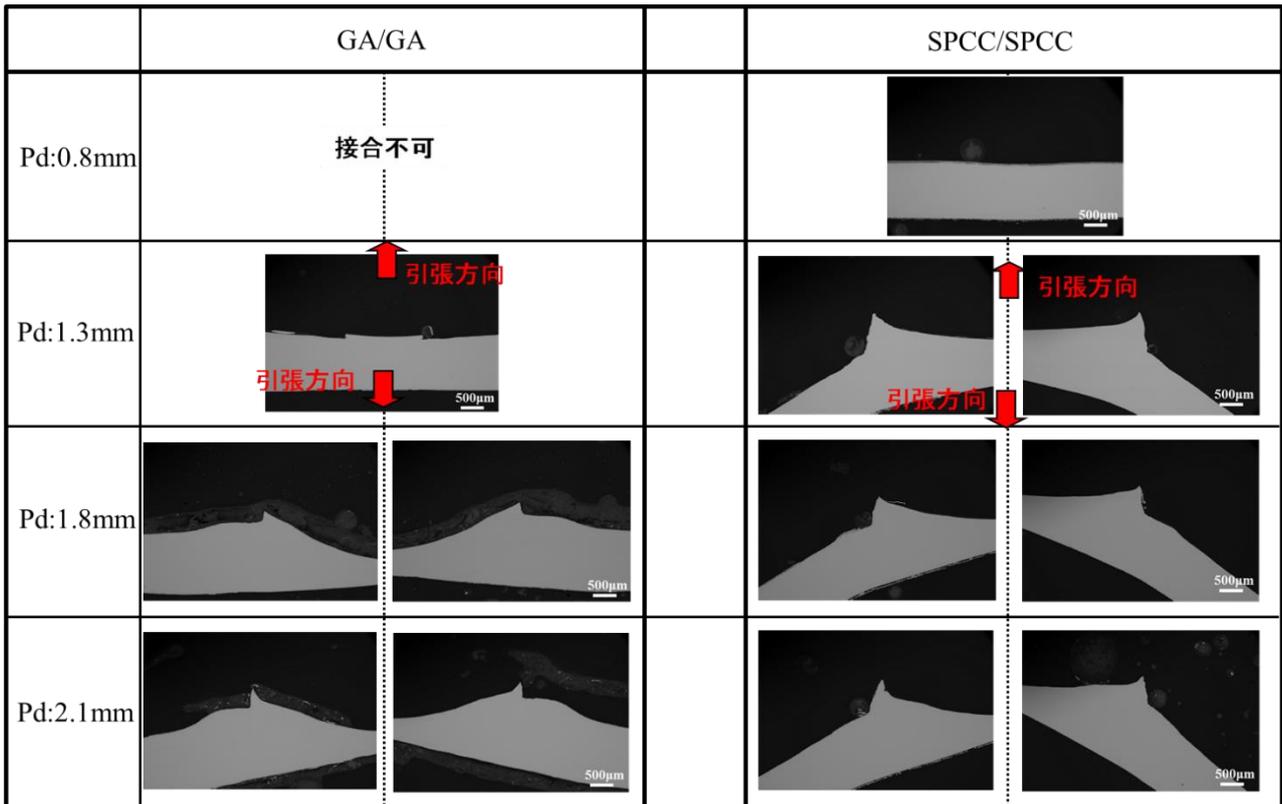


図 9 十字引張試験後の試料の断面 SEM 反射電子像

した際にツール押込量の増加速度が極端に遅くなった。これは、接合ツールが上板であるアルミニウム合金中に押し込まれても十分な発熱が得られず、下板である鋼の温度が鋼の軟化温度である約 400℃に達していないためであると考察した。一方、図 10(a)に示したとおり、SPCC/SPCC では、上板の SPCC 中に接合ツールが押し込まれた際に十分な発熱があり、その熱伝導によって下板の SPCC の温度も上昇したため、ツール押込量の増加速度の極端な低下は認められなかったものと思われる。

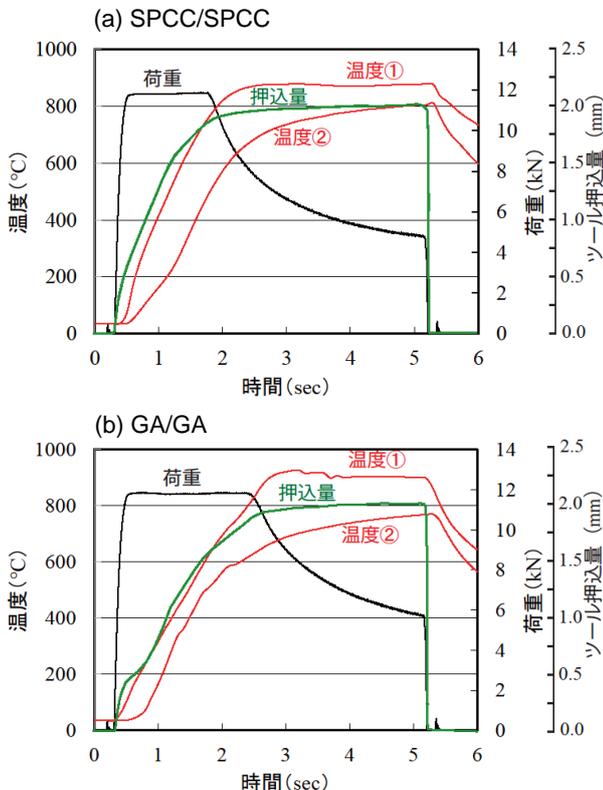


図 10 接合時の温度、垂直荷重及び押込量変化

3.4.2 GA 鋼重ね継手の接合

SPCC/SPCC の場合と同様に、垂直荷重は 0.3~0.5 秒の短時間で急激に 12kN まで上昇し、垂直荷重一定の状態ですツール押込量が増加する。しかし、ツール押込量の増加速度は、垂直荷重が 12kN に達する 0.5 秒から 0.7 秒の間において低減している。これは SPCC/SPCC の場合と異なり、GA 鋼表面にはめっき層 (δ 相) が存在していることに起因すると推定している。町田ら¹¹⁾は GA めっき層 (δ 相) の室温でのビッカース硬さは Hv300~350 と報告している。一方、今回実験で用いた SPCC の室温硬さを実測したところ約 Hv130 であり、GA 鋼のめっき層に比し硬度が低いことを確認している。その後、測定点①の温度が約 800℃に達するのに約 2.5 秒 (SPCC/SPCC に比し約 0.7 秒長い) を要しているが、これも GA 鋼のめっき層の硬さが一要因であると推定している。そして、設定ツール押込量に到達した際の測定点①の到達温度約 900℃は SPCC/SPCC とほぼ同等である。

3.4.3 SPCC 重ね継手と GA 鋼重ね継手の接合の差異

GA/GA は SPCC/SPCC と異なり、上材の鋼と下材の鋼の間に GA めっき層が存在し、この層は主として δ 層からなることが分かっている。図 11 には Fe-Zn 系の 2 元系平衡状態図¹²⁾を示す。平衡状態図より δ 層が約 1000℃以上に加熱保持されると Zn 液相単体となることが分かる。しかし、前述のとおり、本接合プロセスでは測定点①の最高到達温度が約 900℃、測定点②の最高到達温度が約 800℃であるため、接合ツール押込部近傍の GA めっき層全体が亜鉛液相化せず、一部が固相として残存したものと推察される。そのために、GA/GA では SPCC/SPCC に比し上材の鋼と下材の鋼の間に Zn を含む固相が残存し、鋼/鋼接合部ののど厚が小さくなったものと思われる。

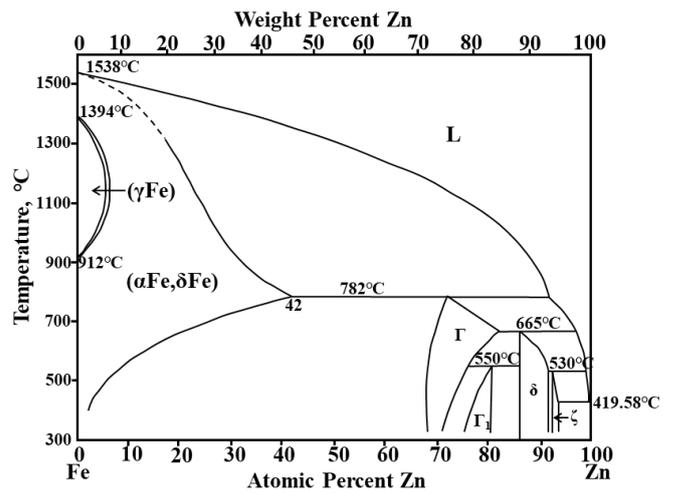


図 11 Fe-Zn 2元系平衡状態図

4. 結 言

本研究では、筆者らが開発した摩擦アンカー接合を板厚 1.2mm の合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA 鋼板) の 2 枚重ね継手及び同じ板厚の冷間圧延鋼板 (SPCC) の 2 枚重ね継手に適用し、その機械的性質を評価した。また、接合時の温度、垂直荷重及びツール押込量の変化を測定することで GA 鋼重ね継手の接合と SPCC 重ね継手の接合の接合挙動の差異について考察を行い、以下の結論を得た。

- 1) GA 鋼の接合材は、鋼と鋼の隙間に Zn を主成分とする層が残存しており、SPCC の接合材に比し、鋼同士の接合部の長さが短い。
- 2) 1) に起因して、GA 鋼の接合材は SPCC の接合材に比し、引張せん断強度、十字引張強度が低位である。特に、十字引張強度は SPCC の接合材が約 8 kN/点であるのに対し GA 鋼の接合材は約 1.5kN/点と非常に低位である。
- 3) SPCC 接合材及び GA 鋼接合材の接合過程における温度、垂直荷重及び押込量を比較すると、GA 鋼接合材は押込量の増加速度が小さく、設定ツール接合押込

量への到達時間が増大する。これはGA鋼板の表面には硬質のGAめっき層が存在するためであると思われる。しかし、最高到達温度はともに約900℃程度で同等である。

- 4) 接合時の最高到達温度が約900℃であるため、GA鋼接合材では接合ツール押込部近傍のGAめっき層が完全に亜鉛液相化せず、一部が上板の鋼と下板の鋼の間に固相として残存する。そのため、上板の鋼と下板の鋼の接合部長さがSPCC接合材に比し短くなるものと推定した。

本研究は大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行った。

文 献

- 1) 松山欽一：溶接学会誌，**83**(8)，602 (2014)。
- 2) 大石郁，坂村勝，竹保義博：日本国特許第5854451号。
- 3) 大石郁ほか3名：溶接学会論文集，**32**(1)，1 (2014)。
- 4) 坂村勝ほか5名：軽金属溶接，**52**(12)，453 (2014)。
- 5) 坂村勝ほか5名：溶接学会論文集，**33**(2)，187 (2015)。
- 6) 坂村勝ほか5名：溶接学会論文集，**34**(1)，8 (2016)。
- 7) 坂村勝ほか4名：溶接学会論文集，**34**(2)，123 (2016)。
- 8) 大石郁ほか4名：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告，**59**，21 (2016)。
- 9) 坂村勝ほか4名：広島県立総合技術研究所東部工業技術センター研究報告，**21**，1 (2008)。
- 10) 坂村勝ほか4名：溶接学会全国大会講演概要集，**83**，86 (2008)。
- 11) 町田隼一，高杉隆幸：鉄と鋼，**93**(1)，33 (2007)。
- 12) Binary Alloy Phase DIAGRAMS Second Edition, Plus Update Ver. 1.0, ASM INTERNATIONAL(1996)。