

# ホットプレス用アルミニウムめっき鋼板の諸特性

## Properties of Aluminum Coated Steels for Hot-forming

末 広 正 芳<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 真 木 純<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 楠 見 和 久<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 大 神 正 浩<sup>\*<sup>(2)</sup></sup>  
 Masayoshi SUEHIRO Jun MAKI Kazuhisa KUSUMI Masahiro OHGAMI  
 宮 腰 寿 拓<sup>\*<sup>(3)</sup></sup>  
 Toshihiro MIYAKOSHI

### 抄 録

オーステナイト域の温度に加熱した鋼板をプレス成形すると同時に焼入れを行い高強度の部品を作製するホットプレスが注目を集めている。このホットプレスには加熱時の表面酸化とその後の耐食性確保にアルミニウムめっき鋼板が適していると考えられる\*。焼入れ性に優れた母材にアルミニウムめっきを施した鋼板をこのホットプレスに適用した際の材質特性、表面特性、スポット溶接性等に関し検討した。金型での焼入れ後に1500MPa以上の強度となること、また、表面のめっき層は加熱によりFe-Al合金相となり、JASO法CCT試験による耐食性試験結果では合金化溶融亜鉛めっき鋼板と同等の耐食性を示すこと、スポット溶接性にも優れること等が明らかとなった。(\*Arcelor社とのグローバル戦略提携契約に基づくライセンス契約商品(USIBOR1500))

### Abstract

Production of parts with high strength by means of hot-forming process has been receiving considerable attention lately. Application of aluminized steel with good hardenability for this process has been investigated\*. Tensile strength over than 1500MPa was obtained with steel containing around 0.2mass% C. Surface coated layer changed from Al-10% Si to Fe-Al(-Si) phases through the hot-forming process. The steel with Fe-Al(-Si) surface layer showed good paintability even without phosphatized treatment. After painting, they showed good corrosion resistance in JASO-CCT as galvanized steel did. The steel showed good spot weldability due to the stable surface layer at high temperature. (\*license product within the frame of global strategic alliance with Arcelor (USIBOR1500))

## 1. 緒 言

近年、環境問題に端を発する自動車の軽量化や衝突時の安全性向上といった観点から高強度鋼板の使用が積極的に行われている。部材によってはより高強度の鋼板を用いることで鋼板厚みをより低減でき大きな軽量化を可能とできることから、用いられる鋼板強度も440MPaや590MPa級にとどまらず780MPa級以上へと上昇している。鋼板強度が増加するにつれ一般的には成形性が劣化する。これを克服するため各種組織制御を行った高強度鋼板が開発されてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、鋼板強度が1500MPa程度になると複雑な形状へのプレス成形は困難になると思われる。

1500MPa程度の強度を持つ部材を得るため欧州ではダイクエンチ、ホットフォーム、ホットスタンプあるいはホットプレスと呼ばれる成形法が実用化されている<sup>2)</sup>。この成形法では鋼板は900℃程度のオーステナイト域の温度に加熱され常温の金型で成形することにより焼入れ鋼板強度を高める。また、このような工法は国内においても検討されており、めっきを施していない鋼板を用い検討あるいは実用化されている<sup>3,4)</sup>。また欧州においてはArcelor社がホットプレス特性と優れた耐食性を有するアルミニウムめっき(以下アルミ

めっき 製品USIBOR1500をすでに開発実用化している<sup>2,5,6)</sup>。新日本製鐵は、Arcelor社とのグローバル戦略提携契約に基づき、USIBOR1500のライセンス契約を結び、商品の製造技術および製品特性の検討を進めてきた。本論文ではホットプレス用のアルミめっき鋼板の各種特性に関し検討した結果を報告する。

## 2. ホットプレス工程

ホットプレス工程は既に実用化されている。図1にその工程を簡単に示す。この製法では鋼板をオーステナイト域の温度( $A_{c3}$ 以上)で

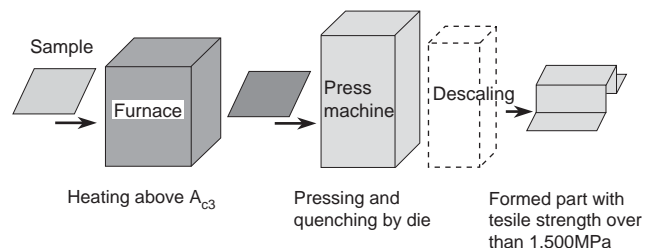


図1 ホットプレス工程の模式図

\*<sup>(1)</sup> 八幡技術研究部 主幹研究員 工博 現 鉄鋼研究所 マネジャー)  
 北九州市戸畑区飛畑町1-1 〒804-8501 TEL:(093)872-6812

\*<sup>(2)</sup> 八幡技術研究部 主任研究員

\*<sup>(3)</sup> 八幡製鉄所 薄板部 マネジャー

で加熱することが必要である。例えば0.2mass%程度のC量を含有する鋼では850以上の温度に加熱することが必要となる。加熱後、炉から取り出された鋼板はプレス機まで搬送され常温の金型で成形し同時に焼入れが行われる。成形後鋼板全体が充分焼入れされるまで下死点で保持する。

このような成形工程をとるが、めっきを施していない鋼板を使用する場合には加熱時のスケール生成や表面炭素を抑制するため非酸化雰囲気とする必要がある。また、非酸化雰囲気加熱した場合でも炉からプレス機までの間は大気雰囲気となるため短時間でも表面にスケールが生成する。プレス成形品は使用時には塗装が付与されるが表面にスケールが存在すると問題となる。したがって、めっきを施していない鋼板を使用した場合にはスケールを除去するプロセスが必要となる。スケール層の除去はショットブラストや酸洗で可能であるがこれらはコスト上昇を招く。また、ショットブラストを用いた場合には形状変化を生じる懸念がある。耐熱性に優れためっき鋼板を用いるとこの工程が不要となる。

### 3. 素 材

前述したようにホットプレス工程では鋼板を急速に冷却することで強度を高めるため焼入れ性に優れることが必要となる。表面に関しては耐熱性に優れためっきを施しておくことで前述した加熱炉の雰囲気制御やスケール除去のためのプロセスが不要となり、製造を容易にすることができる。以上のような条件を満足する鋼板として、表1に示すような成分系のアルミニウムめっき鋼板があげられる。なおめっき付着量は120~160g/m<sup>2</sup>のものを用いた。この鋼板の各種特性を以下に概説する。

### 4. 母材特性

#### 4.1 焼入れ前後の引張特性

本鋼板の焼入れ前後の特性を表2に示す。引張試験は1.4mmの厚みの素材からJIS5号引張試験片を作製し行った。出荷時の強度は490~590MPa級であり、金型での焼入れ後は1500MPa以上となる。なお強度は図2に示すようにC量で調整することが可能である。図2は実験室的にC量を変化させた素材を真空溶解で溶製し焼入れ後の機械的特性を調査した結果である。これまでに知られているように焼入れ後の機械的特性はC量とともに増加することがわかる。焼入れ後の強度、つまり成形部品の強度はC量を調整することで制御可能である。なお、焼入れ時の強度に対するMn、Cr等の置換型固溶元素の影響は小さいことが知られている。これら置換型固溶元素は焼入れ性に影響するため、次章で述べる焼入れ性を確保するためには重要となる。ただし、これら元素を過剰に添加すると製品板の強度が高くなることを考慮しておく必要がある。

表1 検討に用いた鋼板の成分(mass%)

C	Mn	Cr	B
0.22	1.2	0.15	0.002

表2 焼入れ前後の引張特性

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
As coated	394	615	26
As formed	1,280	1,530	8

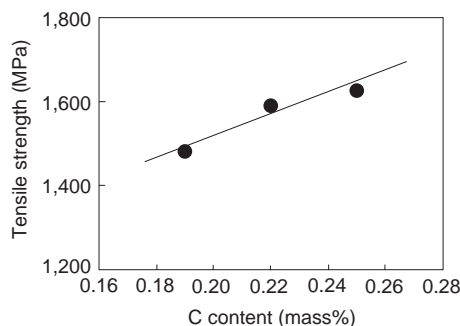


図2 C量と引張特性の関係

#### 4.2 焼入れ性

図3にこの鋼のCCT曲線(950からの連続冷却曲線)を、図4に冷却速度と硬さの関係を示す。この鋼板は焼入れ性を高めるためMnやBが添加されており、加熱温度が950の場合約20/s以上の冷却速度で硬度をHV450~500の範囲とすることができる。この焼入れ速度は冷却中でのフェライト、パーライトおよびベイナイトへの変態を避ける条件で決まる。これらの変態はオーステナイト粒径が小さいと、つまり加熱温度が低いと速くなるため、焼入れに必要な冷却速度が速くなる。この点については加熱温度を900~1000として検討を行ったが、この範囲ではあまり大きな差はなくどの加熱温度においても20~30/s程度に臨界冷却速度があった。

図3および図4および前述した他の加熱温度での実験結果からホットプレス時の鋼板の冷却速度が30/s以上であればどのような冷却速度をとっても十分な硬さが得られることがわかる。しかしながら、実際のプレス工程では加熱炉からプレス機への搬送とプレス開始までの間は空冷に近い冷却速度となる。

1.4mm程度の厚みの鋼板では大気雰囲気冷却すると10~15/s

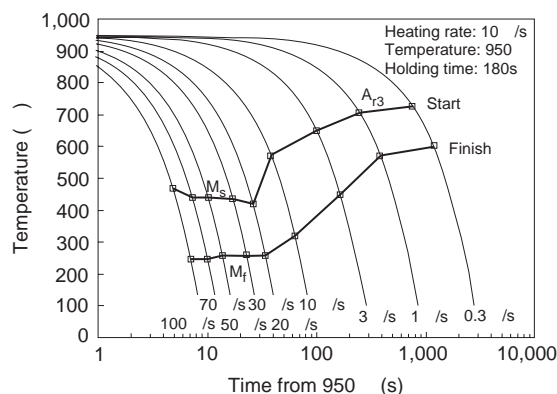


図3 CCT曲線

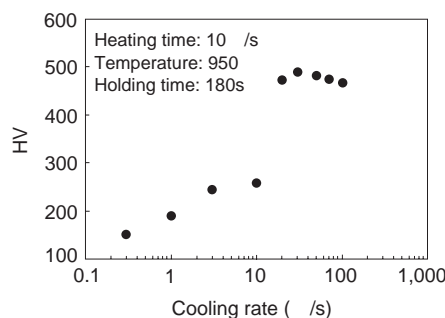


図4 硬さにおよぼす冷却速度の影響

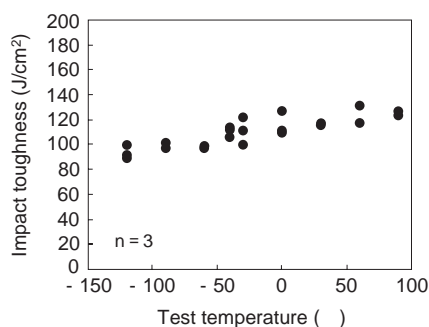


図5 シャルピー試験時の衝撃値と温度の関係

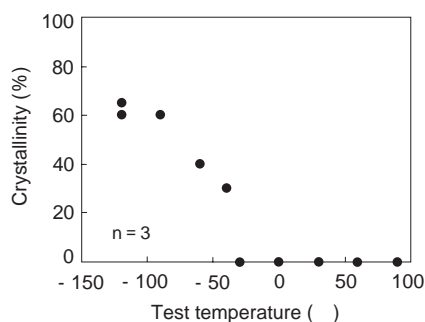


図6 シャルピー試験時の脆性破面率と温度の関係

の冷却速度となるが、この冷却速度で600 以下まで冷却されると鋼板の強度が低下することが図3および図4からわかる。950 から600 までの時間は23~35秒となり素材を炉から取り出してから23秒以内に金型での冷却を開始すれば素材を焼入れることが可能となる。なお、この関係は加熱条件、冷却中の雰囲気や周りの環境により変化するため、実際のホットプレス作業環境に応じ決定する必要がある。

#### 4.3 韌性

焼入れによりマルテンサイト相で強度を確保した場合には韌性、特に低温での韌性が劣化する懸念がある。この点に関しシャルピー衝撃試験にて検討した結果を図5および図6に示す。図5は衝撃値と温度の関係、図6は脆性破面率を示す。この試験は4mmの熱間圧延板を水焼入れ後に2mmUノッチ2.5mmサブサイズ衝撃試験片を作製して行った。吸収エネルギーは室温から-60 まであまり大きな変化を示さない。一方、脆性破面率は-40 以下で増加し、-80 では約80%となり、遷移温度( $T_{r_{50}}$ )は-60 程度である。脆性破面率は板厚が薄くなると低減する傾向にあり、2.5mmより薄い板厚の場合には遷移温度はより低下するものと考えられる。以上の結果から、この鋼板は焼入れのままのマルテンサイト相を主体とする組織で使用されるが、通常的环境下で低温になって急激に吸収エネルギーが変化したり破壊形態が変化することはないものと推定されることがわかる。

#### 5. スポット溶接性

めっき付着量を120g/m<sup>2</sup>とする板厚1.2mmのアルミめっき鋼板を950 で5分加熱し、金型で両側から挟み込むことで焼入れを行いスポット溶接用サンプルとした。表層のめっき層の変化に関しては次章で説明するが、Fe-Al合金めっきとなっている。相手材としては板厚1.8mmの440MPa級の冷間圧延薄鋼板を用いた。スポット溶接は、DR6 型のアルミナ分散銅を電極とし、通電を17サイクル

(60Hz)、加圧を400kgfとして行った。図7にナゲット径と電流密度の関係を示すがナゲット径が板厚を $t$ として $4\sqrt{t}$ となる電流値とちりが発生する電流値の範囲は約3kA存在することがわかる。図8はせん断引張強度と電流値の関係を、図9は十字引張強度と電流値の関係を示す。図10にナゲット近傍の硬さ分布を示すが、ナゲット内および母材部は約480のビッカース硬さを持ち溶接熱影響部(HAZ)にて300程度に軟化する。このような硬さ分布を持つため、ナゲット径が充分な大きさを持つ場合破断部はこのHAZとなることが多い。

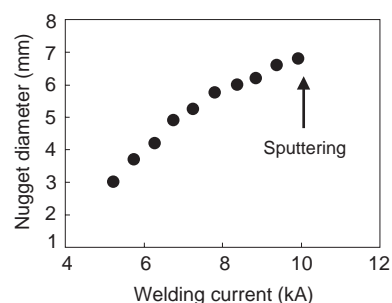


図7 スポット溶接部のナゲット径と電流値の関係

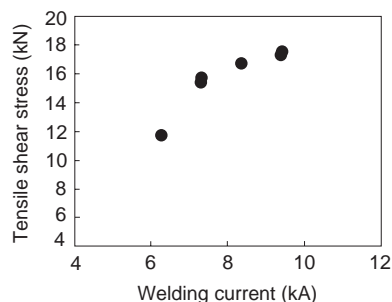


図8 スポット溶接部のせん断引張強度と電流値の関係

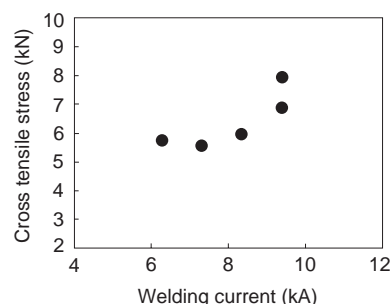


図9 スポット溶接部の十字引張強度と電流値の関係

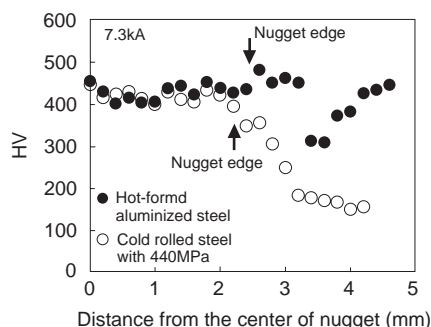


図10 ナゲット近傍の硬さ分布

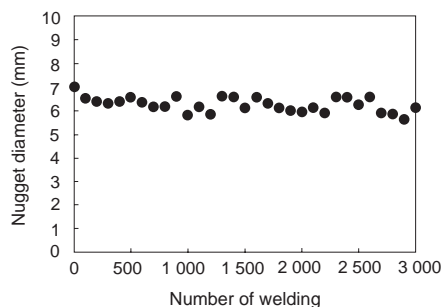


図11 連続打点によるナゲット径の変化

図11は連続打点性を評価した結果である。試験は3000点まで行ったが、この範囲ではナゲット径の変化はあまりなく3000点以上の連続打点も可能であると推定される。この鋼板の表層のめっき層は融点が1000以上のFe-Al合金相となっているが、このことがこのような連続打点性を持つ理由と考えられる。

ここではアーク溶接性に関しては示していないが、Fe-Al合金相は沸点が2000以上であり、亜鉛系のめっき鋼板で問題となるアーク溶接時のブローホールの発生は無い。

## 6. めっき特性

### 6.1 加熱時のめっき層の合金化

本鋼板の表層めっきはSiを10%含有するアルミめっきであり、Type 1と呼ばれているものである。このめっき層の熔融温度は約600であるため急速に加熱するとめっき層は一旦溶解するが、電気炉で得られる加熱速度では加熱中に融点の高いFe-Al合金層が生成し、速やかに表層まで達するため溶解物が炉材等に付着することはない。大気雰囲気中の電気炉で板厚1.6mmの素材を加熱した場合、保定温度に達するまでの時間は約2分であった。

図12に950で0.5分間保定した際の合金化の状況を、図13は表層のめっき層のFe、AlおよびSi濃度を板厚方向にSEM-EDSで測定した結果を示す。合金化が進行すると図に示すようなAlおよびFe濃度を持つ層状の合金相が形成される。この加熱条件下では合金相は5層からなり、Al濃度は最表層から順に約50%、30%、50%、30%、10%と変化している。4層目から母層にかけては元素濃度が連続的に変化している。

図14にThermo-calc<sup>7)</sup>により計算したFe-Al-Si系の950での状態図を示す。この図に図13で示した各点の組成を重ねた。なおこの計算のFe-Al-Si系熱力学データベースはZ. Liuら<sup>8)</sup>によるものを使用した。図14から合金層は表層からFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、BCC規則相、FeAl<sub>2</sub>、BCC規

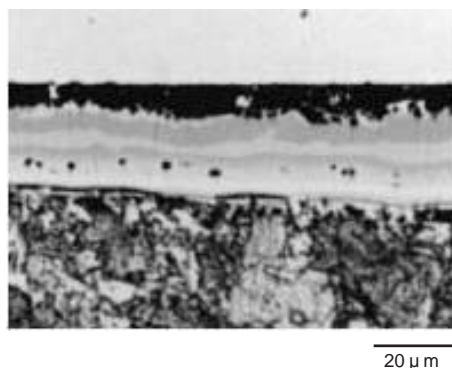


図12 950で30秒保定した試料のめっき層構造を示す断面光学顕微鏡写真

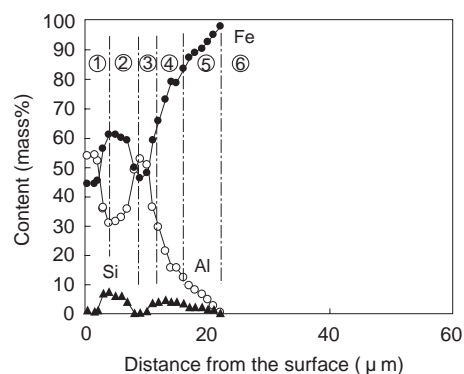


図13 図12に対応したサンプルの板厚方向のFe Al Si元素濃度変化

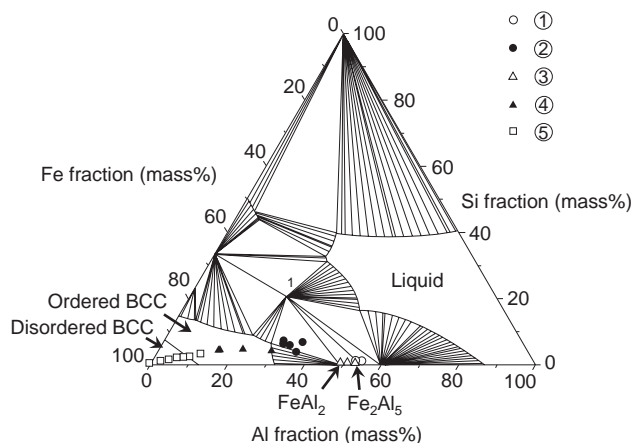


図14 Fe-Al-Si平衡状態図の950での等温断面図

則相、BCC不規則相と推定される。表層の合金層は保定時間が長くなるとAlが母層へと拡散していくため最表層から消滅していく。図15は保定時間を5分としたときのめっき層を示す。断面組織からは1相しか識別できなくなっているが、SEM-EDSで分析すると2相が存在していることがわかった。このときの相はBCC規則相と不規則相と考えられる。

### 6.2 塗装性および塗装後耐食性

鋼板は自動車への適用に際して電着塗装されて使用されるが、通常、塗装性を確保するため塗装前に化成処理が施される。化成処理は一般にりん酸亜鉛系の溶液で行われ、表面にりん酸塩の皮膜を形成させる。この皮膜により塗装性、塗料密着性が確保されるが、Fe-Al合金相は化成処理液に浸漬してもこの化成皮膜が形成されない。これはFe-Al合金相が酸に対して非常に安定な相であるためである。しかしながら図16でわかるように加熱処理後の表面は凹凸が

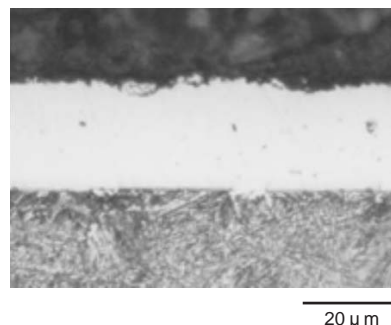


図15 950で5分保定後のめっき層構造を示す断面光学顕微鏡写真

ありこれによるアンカー効果で塗装性が確保される。表3は化成処理を施した試料及び施さない試料に約20μm厚みの電着塗装を行ない、塗装後の密着性を検討した結果であるが、十分な特性を確保していることがわかる。このように塗料密着性は化成処理の有無にかかわらず確保可能である。

めっき付着量を160g/m<sup>2</sup>とするアルミめっき鋼板を900℃で2分加熱することで表層をFe-Al合金めっきとした鋼板を化成処理液に浸漬し、約25μmの電着塗装後、表面の塗膜にクロス状の疵(クロスカット)を入れJASOM610に定めた複合腐食試験(CCT)を150サイクル(50日間)行った後の外観を図17に示す。JASO法CCTの試験条件を以下に示す。

塩水噴霧(5%NaCl, 35℃, 2h) 乾燥(60℃, 4h) 湿潤(50℃, 2h)

比較材としてめっきを施していない冷間圧延鋼板および合金化溶融亜鉛めっき鋼板(付着量片面45g/m<sup>2</sup>)を使用した。これらの材料は化成処理を施し、化成皮膜が生成していることを確認した後に試験に供した。腐食試験の途中でクロスカット部からの塗膜膨れ幅を片側最大膨れ幅として評価した結果を図18に、また150サイクル後の板厚方向への腐食深さを表面からレーザー光により1試料当たり各

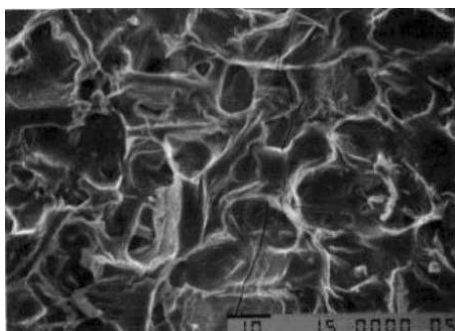


図16 950℃で5分保定後のめっき層表面形態を示すSEM写真

表3 塗料密着性評価結果

	Surface preparation	Primary adhesion*	Secondary adhesion**
Hot-formed aluminized steel	Phosphated	100/100	100/100
Hot-formed aluminized steel	Degreased	100/100	100/100
Galvannealed steel	Phosphated	100/100	100/100
Steel	Phosphated	100/100	100/100

\*Primary adhesion test: 100 grid cross-cutting by 2mm and taping after painting

\*\*Secondary test: dipping at 40℃ water for 10 days and cross-cutting and taping

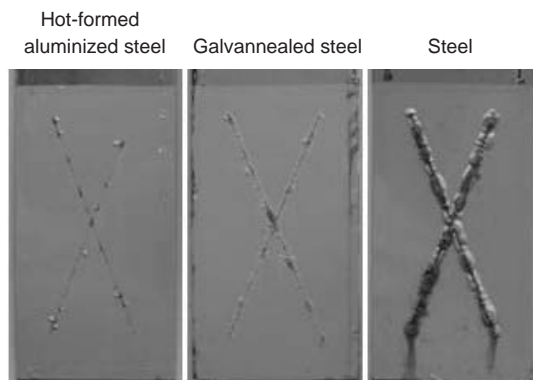


図17 JASO法CCT試験50日後の試料外観

5点づつ測定して平均値並びに標準偏差を算出した結果を図19に示す。これらの結果から、Fe-Al合金相をめっき層とする鋼板の耐食性は剥離幅、腐食深さとも冷間圧延鋼板より優れ、合金化溶融亜鉛めっき鋼板と同等の特性を持つ事がわかる。塗装後耐食性を重視する場合にはめっき付着量を150g/m<sup>2</sup>程度とすることが望ましい。

### 6.3 スポット溶接部の耐食性

図20はスポット溶接時に電極と接していた部分および電極と接触していなかった部分の断面組織を示す。この図から、電極と接していた部分のめっき層はスポット溶接時に温度が上昇してもほとんど変化せずスポット溶接前と同様の厚みを有していることがわかる。そのためこの部分の塗装後耐食性は平板部と全く変わらず、図21に示すように塩水噴霧試験(SST)にて2000時間経過後においても全く

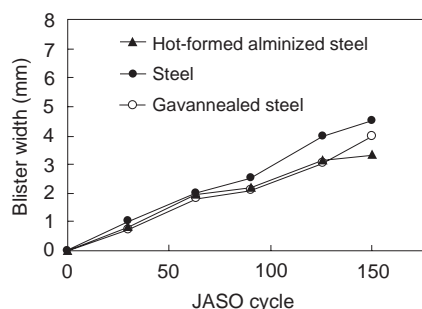


図18 JASO法CCT試験による塗膜膨れ幅の変化

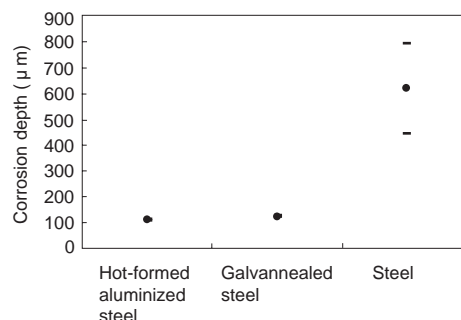


図19 JASO法CCT試験50日後の板厚方向腐食深さの変化

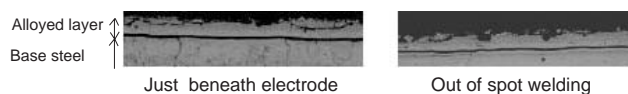


図20 スポット溶接後の電極直下および通常部のめっき層(腐食液:しゅう酸)

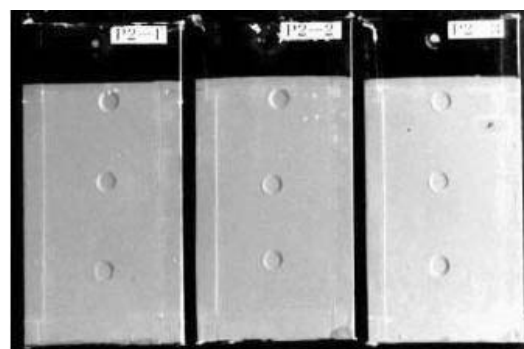


図21 スポット溶接部の塗装後耐食性のSSTによる評価 2000時間後の外観

腐食していないことがわかる。他のめっき鋼板ではスポット溶接を行った際、電極と接していた部分のめっきは溶融し電極と母材の間から押出されめっき金属が盛り上がり突起状になることがあるが、この部分は十分な塗装厚みが確保できず耐食性に問題が生じることがある。

## 7. 結 言

本報告ではホットプレス用アルミめっき鋼板の母材特性および表面特性について述べた。母材特性に関しては、プレス成形時の金型焼入れで冷却速度がばらついても30 /s以上の冷却速度が確保できれば均一な強度を有する部材が得られること、引張特性に関しては降伏強度：1 280MPa，引張強度：1 530MPa，伸び：8%が得られること、耐水素脆性にすぐれること等を述べた。スポット溶接性に関しては、表層のアルミめっきがプレス前の加熱で融点の高いFe-Al合金相となることに起因してめっき層の存在による劣化はないことや連続打点性に優れることを示した。また耐食性に関しては、Fe-Al合金相はめっきを施していない鋼板と合金化溶融亜鉛めっき鋼板

の間に位置することを示した。

以上のような特徴を持つ鋼板をホットプレスに適用することで、比較的複雑な形状を持つ高強度で耐食性に優れた部材の製造が可能となる。

## 参考文献

- 1) Senuma, T.: ISIJ Int .41 ,520(2001)
- 2) Ban, X., Laurent, J. P.: Proc. of 39th Mechanical Working and Steel Processing Conf. Vol. XXXV, Indianapolis, 1998, p.673
- 3) 廣村敏樹 ,内野龍一 ,加藤希人 ,佐藤昌彦 :自動車技術会学術講演会前刷集 .942 , 1994-5 ,p.73
- 4) 例えば ,アイシン高丘 :東京モーターショー .月刊素形材 .43 ,(2002)
- 5) Cornette, D., Hourman, T., Hudin, O., Laurent, J. P., Reynaert, A.: Proc. of SAE. 2001, p.19
- 6) Ronin, F.: Variant-Flexible Steel Forming in Automotive Production. 2nd European Practice Conf. Bad Nauheim, Frankfurt, 2002
- 7) Sundman, B., Jansson, B., Andersson, J.-O.: CALPHAD. 9, 153(1985)
- 8) Zi-kui Liu, Y. Austin Chang: Metall. Mater. Trans. A. 30A, 1081(1999)