

(技術資料)

高周波焼入れ用合金化溶融亜鉛めっき鋼板

Galvannealed Steel Sheets for Induction Hardening



濱本紗江*1
Sae HAMAMOTO



内海幸博*1
Yukihiko UTSUMI



浅井達也*1
Tatsuya ASAI

In recent years, ultra-high-strength steel sheets have been increasingly applied in automotive body parts to improve crashworthiness and decrease body weight. Induction-hardening and die-quenching are technologies which enable the production of ultra-high-strength parts having complex shapes. Kobe Steel has developed several types of steel sheets for induction hardening. This article describes the features of 1,470MPa grade after-quenched galvannealed steel sheets for induction hardening.

ま え が き＝近年地球規模で問題となっている温暖化効果ガスのCO₂は、運輸部門からの排出が産業部門に次いで多く、自動車業界におけるCO₂排出量削減が期待されている¹⁾。自動車から排出されるCO₂の削減には、ハイブリッド車や電気自動車などの駆動面からの改善はもちろん、軽量化による燃費の向上も有効な手法の一つである。一方、自動車の衝突安全性に関する法規制は年々厳しくなっており²⁾、軽量化との両立が課題となっている。このような背景から、自動車メーカ各社では高強度鋼板の多用化が進められており、とくにボデー骨格部材に対して引張強度980MPa以上の超高強度鋼板が採用される事例も増えている。また、プレス成形と同時に熱処理(焼入れ)を行うダイクエンチ技術(熱間プレス)^{3)~6)}、あるいは加工後に高周波やレーザーで部分的に強度を付与する部分焼入れ技術^{5)~8)}も、部材を容易に高強度化できる技術として採用されている。本稿では、これまで部分焼入れ用に開発してきた焼入れ後引張強度1,470MPa級の高周波焼入れ用合金化溶融亜鉛めっき(Galvannealed, 以下GAという)鋼板について紹介する。

1. 高周波焼入れ技術

高周波焼入れ技術は、鋼板を冷間成形後、必要な部分を焼入れ強化することによって高強度部材を得る技術であり、ダイクエンチ技術とともに高強度鋼板の成形性や寸法精度における課題を解決する手法の一つである。例えば、リンフォースを用いて補強しているセンタピラーなどの部材に高周波焼入れを施したとき、部分的に強化することができるためリンフォースが不要となり、軽量化と衝突安全性の両立が可能となる⁷⁾。また、スポット溶接する部分を軟質のままにしておくことにより、超高強度鋼板やダイクエンチ技術よりもスポット溶接が容易に行えるという利点もある。

2. 開発鋼の成分設計

本開発鋼は、原板強度を440MPaもしくは590MPa級に抑えて汎用鋼並みの成形性を確保しつつ、焼入れ後の強度を1,470MPaにする必要がある。ここでは、高周波焼入れ用鋼板の成分設計の考え方について述べる。

溶製した供試材の化学成分を表1に示す。この供試材を熱間圧延し、酸洗によるスケール除去後にさらに1.4mm厚まで冷間圧延し、再結晶焼鈍を行った。こうして得られた冷延焼鈍鋼板を950℃で高周波焼入れを行い、JIS 5号引張試験片を作成して引張試験を行った。図1に高周波焼入れ装置を示す。温度は放射温度計で測定し、高周波の出力を調整することで焼入れ温度を調整した。得られた結果をC当量($C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$)⁹⁾および鋼中のC量と焼入れ後の引張強度との関係で整理した。それぞれの結果を図2および図3に示す。高周波焼入れ後の強度は鋼中C量との相関が強く、焼入れ後強度は鋼中C量でほぼ決定する。C当量に依存性が認められないのは、図1に示した高周波焼入れ装置を用いた場合は焼入れ後にマルテンサイト単一組織となり、フェライトが生成しないためと考えられる。この結果より、開発鋼のC量は、引張強度1,470MPaを得るために、製造時の鋼中Cの変動も考慮してC = 0.23%とした。

原板強度が440MPaあるいは590MPaの鋼で汎用鋼並みの成形性を確保する観点から、組織はフェライト・バ

表1 ラボ溶製材の化学成分
Table 1 Chemical composition of steels (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.13	0.01	0.2	0.006	0.003	0.01	0.01
~	~	~	~	~	~	~
0.23	0.19	1.61	0.015	0.012	0.5	0.3

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部

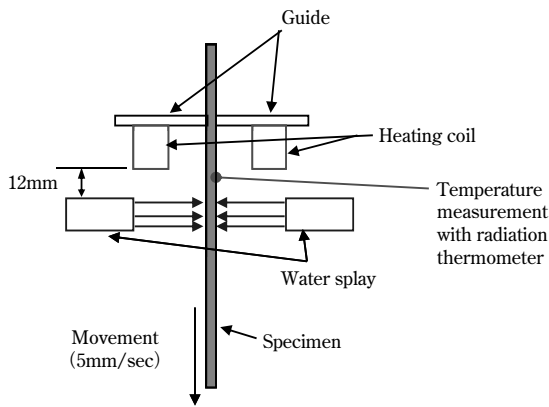


図1 高周波焼入れ装置

Fig. 1 Schematic diagram of high-frequency quenching equipment

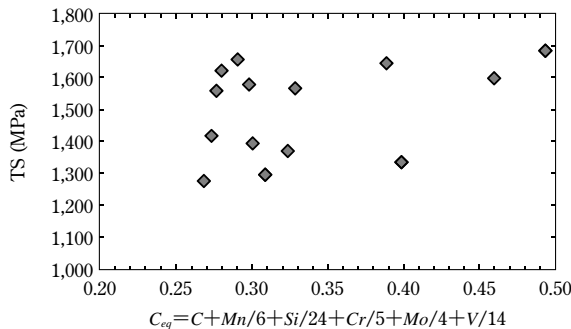


図2 C当量と焼入れ後引張強度の関係

Fig. 2 Effect of Ceq on tensile strength of quenched material

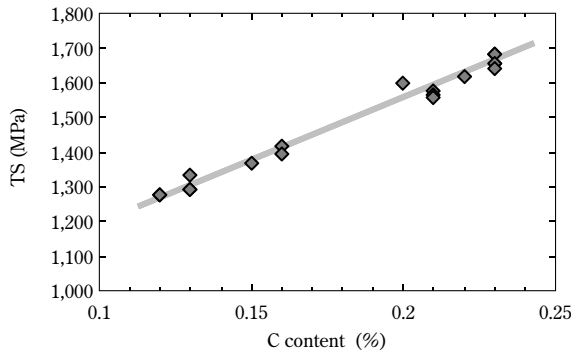


図3 鋼中C量と焼入れ後引張強度の関係

Fig. 3 Effect of C content on tensile strength of quenched material

ーライト組織とした。また、十分な焼入れ性を確保するためCr、Bを添加し、B添加効果を確保すると同時に超高強度鋼板で問題となる耐遅れ破壊特性向上のためにTiを添加した。さらに、原板強度が590MPaの鋼に対しては原板強度確保のためにSiを添加した。

3. 開発鋼の特性

3.1 原板の特性

実験室的な検討結果に基づき、GA鋼板を実機で製造した。本鋼の機械的性質を表2に示す。440MPa級、590MPa級いずれも汎用鋼と比較して同等以上の良好な伸び特性を示している。

スポット溶接性は、板厚1.8mmの供試材に対し、先端径φ8mmのDR形電極を用い、加圧力4.41kN、溶接時間30サイクル/60Hz、溶接電流5~14kAによる溶接を行って評価した。図4に引張せん断強度および十字引

張強度をそれぞれ溶接電流値で整理した結果を示す。引張せん断強度は従来の知見と同様に原板強度に対応して高くなる傾向にあり、440MPa級、590MPa級ともにJIS Z 3140のA級規格の最小ナゲット径：5.7mm ($4.25\sqrt{t}$) が得られる電流値以上でJIS Z 3140のA級規格の引張せん断強度（440MPa級：11,800N、590MPa級：16,200N）を上回っている。また、ナゲット径：5.7mm ($4.25\sqrt{t}$) が得られる電流からチリ発生までの適正溶接電流範囲は440MPa級で3.0kA、590MPa級では2.5kA程度で実用上十分な範囲を確保できる。十字引張強度は従来、母材強度の影響をあまり受けないと報告されている¹⁰⁾が、チリが発生しない範囲において、本開発鋼の590MPa級が440MPa級より高い継手強度を示す。これはSi添加の影響と推察している。

図5に(a) 440MPa級および(b) 590MPa級それぞれの原板めっき層断面のSEM写真を示す。図にはそれぞれのめっき付着量およびめっき組成を併せて示した。鋼板とめっき界面に生成するΓ相は薄い。表層部にはと相はみられず、ほぼδ1単相で構成されている。パウダリング性などの結果も良好であった。

3.2 高周波焼入れ後の特性

図1に示した高周波焼入れ装置を用い、焼入れ温度を変化させたときの強度変化を調査した。また1,000℃で

表2 開発鋼の機械的性質
Table 2 Mechanical properties of developed steels

as TS grade	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	n-value
440MPa	327	484	34.6	0.20
590MPa	542	640	30.2	0.23

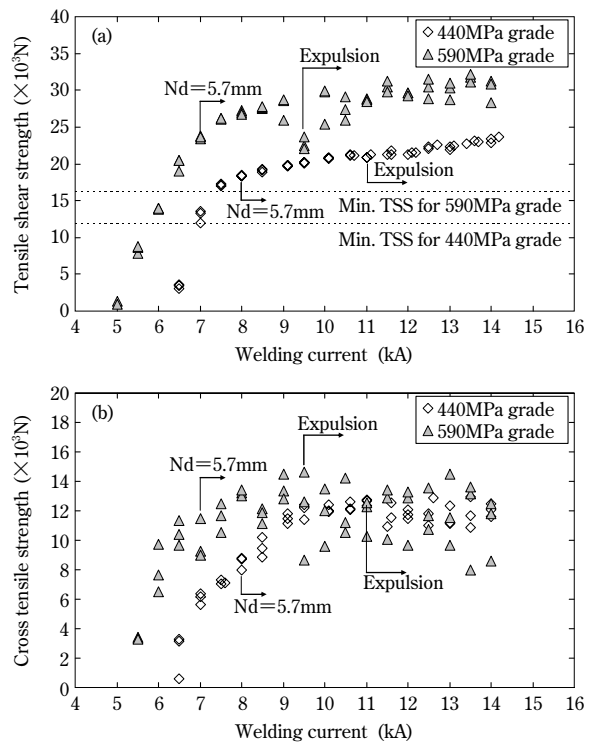


図4 引張せん断強度 (a) と十字引張強度 (b) に及ぼす溶接電流値の影響

Fig. 4 Effect of welding current on tensile shear strength (a) and cross tension strength (b) in the developed steels

焼入れした鋼板のシャルピー試験を行い、焼入れ後の低温靱性を評価した。図6に焼入れ後強度に及ぼす高周波焼入れ温度の影響を示す。440MPa級、590MPa級いずれも焼入れ温度を900℃以上とすることによって1,470MPa以上に強化できることが分った。JIS 4号衝撃試験片に準拠した2mm-Vノッチ試験片を作製し、シャルピー試験を行った結果を図7に示す。いずれの鋼板も、吸収エネルギーは室温から-40℃まではほとんど変化がなく、実用上の問題はないといえる。

つぎに、焼入れ後の耐遅れ破壊特性の評価をU曲げ—塩酸浸漬法により実施した。図8に示すように、曲げ半径15mmでU曲げを行った供試材を電気炉で1,000℃まで加熱し、水焼入れした。この供試材を、曲げ部に1,500MPaの応力を負荷した状態で0.1Nの塩酸に336時間(14日間)浸漬し、割れ発生の有無を調べた。440MPa級、590MPa級ともに割れは発生せず、焼入れ後の遅れ破壊特性は良好であることが確認できた。

また、部分焼入れ温度影響部の塗装性能を評価する目的から、以下のような模擬試験を実施した。図9に示した高周波焼入れ装置を用い、図9に示すように、コイル位置X1からX4まで10mm間隔で熱電対による温度測定を行いながら供試材を加熱した。コイル位置X1における温度が約1,000℃となった状態で20秒保持した後、

水焼入れを行った。こうした熱処理を施した供試材を対象に、めっき層の残存状態、りん酸塩処理性、および塩温水試験による耐食性を調査した。めっき層の残存状況は、断面のSEM観察およびEPMAによるZnの分析を行って調べた。塩温水試験では通常、りん酸塩処理後に電着塗装を行い、クロスカットで塗膜にキズを付けて評価する。本試験では、温度測定位置X1~X4を通るよう

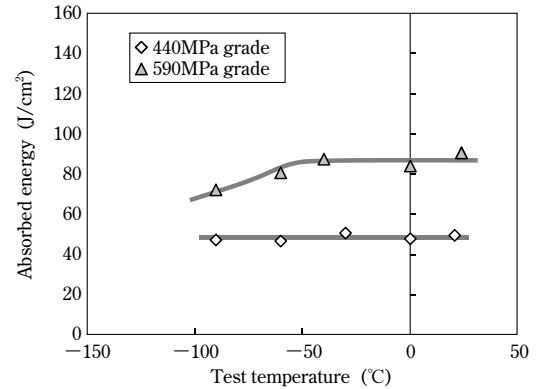


図7 焼入れ後のシャルピー衝撃試験結果
Fig. 7 Relationship between testing temperature and absorbed energy in Charpy Impact test

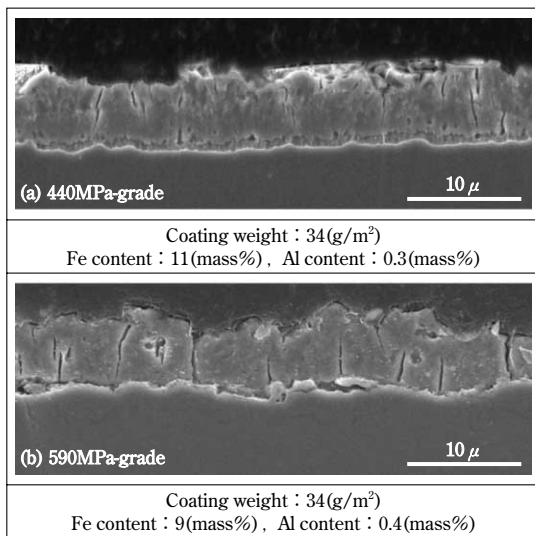


図5 開発鋼めっき層断面SEM写真
Fig. 5 SEM images of cross section of galvanized layer

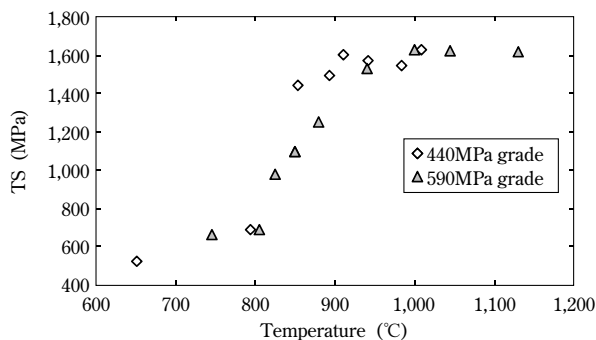


図6 焼入れ温度と強度
Fig. 6 Relationship between tensile strength and quenching temperature

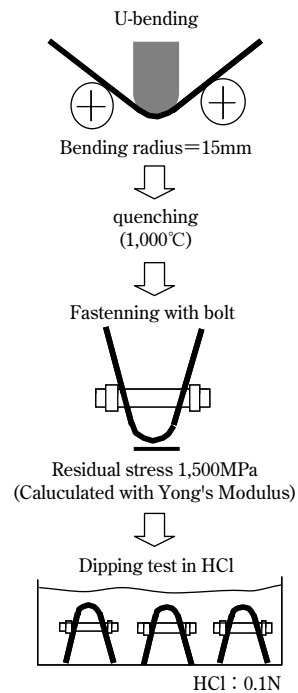


図8 遅れ破壊試験 (U曲げ—塩酸浸漬) 方法
Fig. 8 Experimental procedure for delayed fracture resistance test

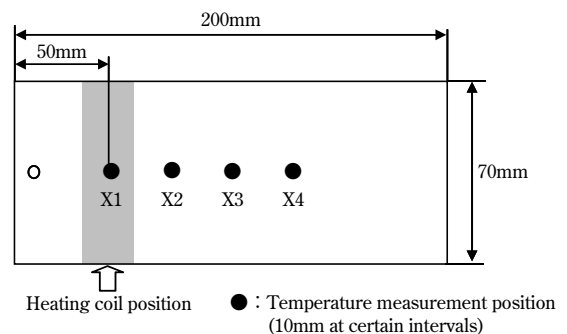


図9 塗装性能評価用サンプル
Fig. 9 Sample for painting performance evaluation

にカットを行い、55℃の5%食塩水に240時間浸漬してX1~X4の膨れ幅と最大膨れ幅を測定した。また、熱処理しない供試材についても塩温水試験を実施し、最大膨れ幅を測定した。

焼入れ後にX1~X4位置から採取した供試材のめっき層残存状態を図10に示す。りん酸塩皮膜表層部のSEM写真を図11に示す。なお図中に示した温度は加熱時のX1~X4位置での実測温度である。加熱温度が1,000℃程度までめっき層が残存しており、りん酸塩処理性も良好である。図12、図13に塩温水試験の結果を示す。塩温水試験後の膨れ幅も焼入れを施さない鋼板と同等レベルで良好である。

本開発鋼を用いることにより、加熱温度900~1,000℃の焼入れ処理を行った場合でも、塗装性能を損なうことなく1,470MPaに部分強化した部品を製造することが可能である。

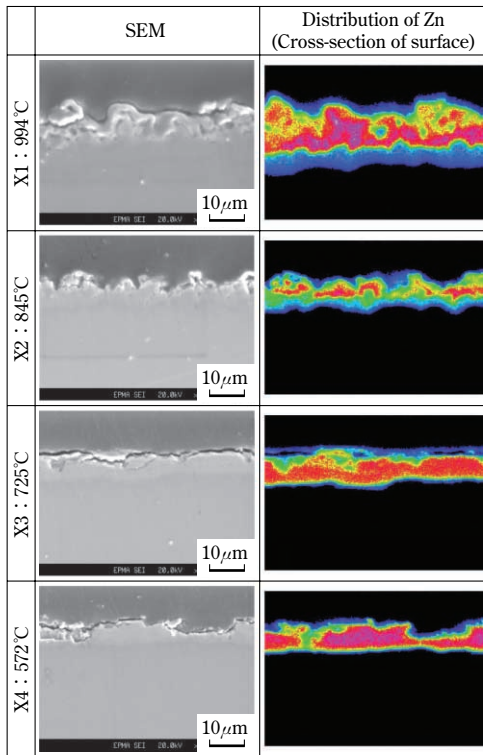


図10 焼入れ後のめっき層残存状態 (440MPa 級)

Fig.10 Cross section of galvanized layer after quenching (440MPa grade)

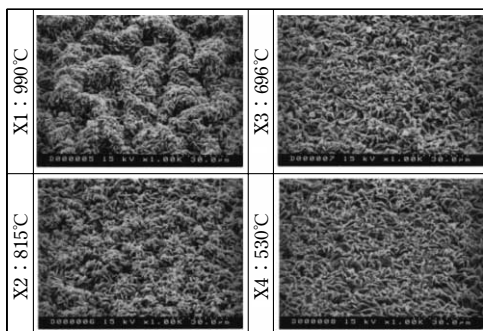


図11 焼入れ後のりん酸塩結晶 (440MPa 級)

Fig.11 Micrograph of phosphate crystal after quenching (440MPa grade)

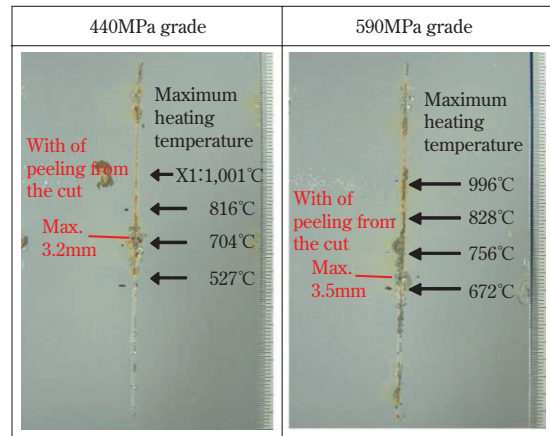


図12 焼入れ材の塩温水試験 (SDT) 後外観

Fig.12 Surface after hot salt water resistance test

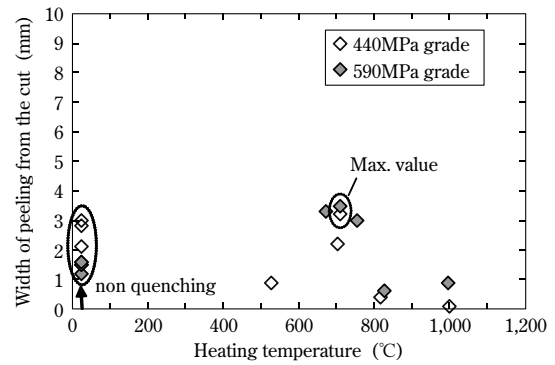


図13 塩温水試験 (SDT) 結果

Fig.13 Result of hot salt water resistance test

むすび＝当社は既に、焼入れ後の強度が1,180MPa級となる高周波焼入れ用440MPa級GA鋼板を商品化しており、部分強化センタピラー部品向け素材としての採用実績もある。本稿では、さらなる高強度化に対応して開発した、焼入れ後引張強度が1,470MPa級の高周波焼入れ用GA鋼板について紹介した。

自動車車体においては、衝突安全性向上と軽量化の両立が今後とも重要な課題であり、980MPa級以上の超高強度鋼板の適用部位が拡大する傾向にあると考えられる。今後、超高強度鋼板のさらなる加工性、実用特性の向上のみならず、本稿にて紹介したような後熱処理技術の活用なども含め、車体軽量化と衝突安全性向上に多方面から寄与し得る材料開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 環境省：環境白書 循環型社会白書/生物多様性白書 平成21年版, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h21/index.html>, (参照 2011-03-31).
- 2) 高木 潔：塑性加工シンポジウム, 237th (2005), p.9.
- 3) 中嶋勝司ほか：素形材, 2002.12, p.31.
- 4) 広瀬洋三ほか：自動車用材料技術, 2009年春季大会フォーラム, p.12.
- 5) 小嶋啓達：Journal of the JSTP, Vol.46, No.534, p.595.
- 6) 小嶋啓達：材料フォーラム, 2004, p.13.
- 7) 柴田真志ほか：まてりあ, Vol.37, No.6 (1998), p.525.
- 8) 佐藤章仁：自動車技術会, 1995-5, p.93.
- 9) JIS G 3106.
- 10) 田中福輝ほか：鉄と鋼, Vol.68, No.9 (1982), p.1437.