

7. 品質等に関する検証

試作材について、自動車用鋼板として要求される品質を確認した。

検証試験は、外部委託および社内で実施した。(表 7.1)また、また、一部の試験は現行高炉比較材として 590MPaDP(1.8t×500×500), 980MPa(1.6t, 1.8t×500×500), および 270MPa(JSH270E)(2.0t×500×500)から試験片を切り出し、今回の試作材と同様の試験を行った。ただし、現行高炉比較材は限られた量のため、一部の試験項目のみ実施し、また、n数、試験片サイズも異なるものがある。

表 7.1 品質等に関する検証の評価項目

評価項目	実施場所
金属組織	社内・社外
溶接性	社内・社外
成形性	社内・社外
耐食性	社内
ハット部材の衝撃特性	社外

7.1 品質の検証方法

7.1.1 金属組織評価

試作した鋼板について、引張破断の状態確認、破断形態の確認のために外観観察と顕微鏡観察を行った。(図 7.1)

また、マイクロ組織について既に述べたように、通常のナイトールエッチングの光学顕微鏡とSEMでは明確な組織判定ができなかったため、エッチング手法についても再検討した。

エッチング手法は、(独)物質・材料研究機構の保有する技術を応用し、組織創製を推定するためにより最適な手法として、電解研磨方法を用いた試料作製とその組織観察を行った。なお、SEMによる組織観察のほかに、原子間力顕微鏡(AFM)を用いた組織観察も行った。



(a) マイクロスコープ

(b) 電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)

図 7.1 金属組織観察の分析装置

7.1.2 溶接性評価

スポット溶接継ぎ手は、設計通りに車体が構造強度を発揮するための重要な構造要素であり、工法である。自動車用鋼板の高張力化は、強度と延性のバランスを良好に保つことが求められるため、材料としては炭素量を増やし基地組織強度を高めた状態で組織制御を行うことが適していること、あるいは、合金元素を利用して緻密な組織制御を行う傾向にあり、その結果、スポット溶接部の溶融ナゲット部の硬度は硬くなると同時に、靱性が低下してしまうという課題が生じている。更には、母材が高降伏強度となるため、負荷時に接合点周辺の拘束力が高くなることから溶接部端の応力集中が上昇することに起因し、溶接欠陥感受性が増加する為、接合強度が安定しなくなるという問題がある。これらの問題は特に、材料強度が 590MPa を超えたあたりから顕著になることが知られている。このことから、高強度－高延性が求められる自動車用高張力鋼板の開発は、スポット溶接性向上の技術開発とも言え、材料開発と併せ、その溶接工法（条件）自体も重要な開発課題となっている。

このような一連の高張力鋼板のスポット溶接性に係る課題は、特に、材料強度 590MPa 級で顕著な現象となって現れ、780MPa、980MPa と材料強度が上がるにつれて、課題の難易度は難しさを増す。本試作材では、材料強度 590MPa 以上、実際の試作目標は材料強度 980MPa を目標としているため、スポット溶接性は特に重要な品質特性であり開発課題と言える。

本試作材では、溶接部靱性を考慮した組成設計がなされているが、スポット溶接条件を見出すにあたっては、熱処理のプロセスに沿って良好な靱性が得られるような加熱・冷却制御を行うべく通電条件の検討を行った。尚、しばしば、自動車会社では、接合部強度の信頼性確保の観点から、十字継ぎ手の強度試験において、ボタン抜け破断、あるいは母材破断が求められる。理由は、十字継ぎ手が応力集中の点から最も厳しい継ぎ手分類に入ること、重ね合わせ継ぎ手のせん断型破壊モードでは接合強度（TSS）が溶接欠陥に鈍感なのに対して、十字継ぎ手の剥離型破壊モードでは、剥離強度（CTS）が材料や溶接部欠陥に敏感であることから、十字継ぎ手破壊モードが安定的モードとなることにより、継ぎ手そのものの信頼性が得られると考えられる為である。具体的には、十字継ぎ手が溶接部の溶融凝固部以外の個所で安定的破断モード（ボタン抜け等）を呈することは、強度安定性の点から重要な評価指標のひとつとなっている。

本試作材、及びその適正な溶接条件を見出すにあたっては、上記の安定的破断モードを呈することを目標とした。

具体的には、スポット溶接を施工した試験片を作製し、せん断引張・十字引張(図 7.2)を実施して、スポット溶接部の強さを評価する。

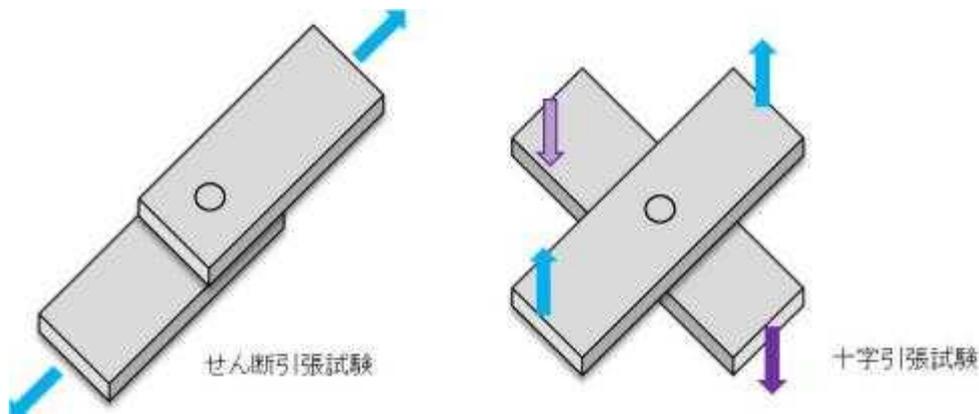


図 7.2 溶接部に対する引張試験イメージ

(1) 試験片

引張試験片は、図 7.3 および図 7.4 に示す。スポット溶接機(例 図 7.5)を使用し、2枚重ねた鋼板を電極で加圧してはさみ、通电して点溶接(スポット溶接)する。

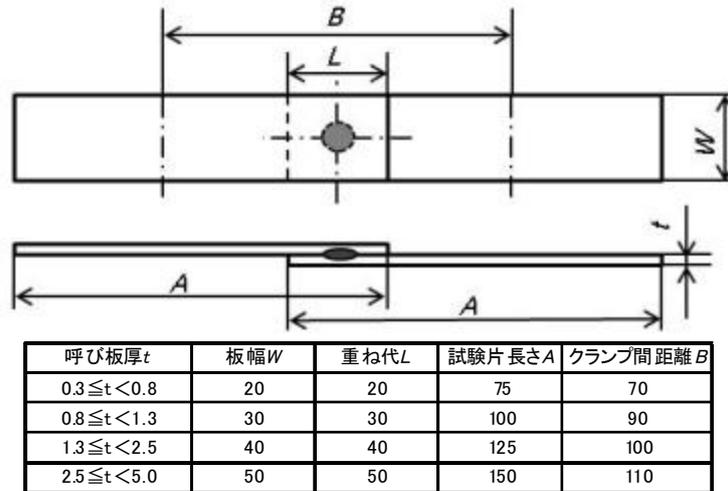


図 7.3 せん断引張試験片(TSS)

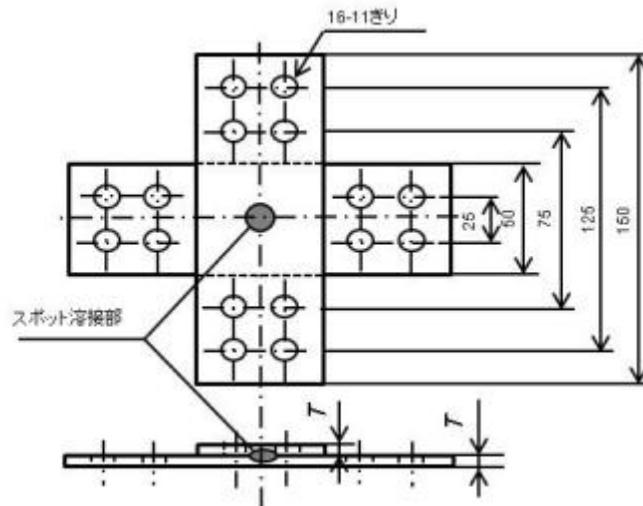


図 7.4 十字引張試験片(CTS)

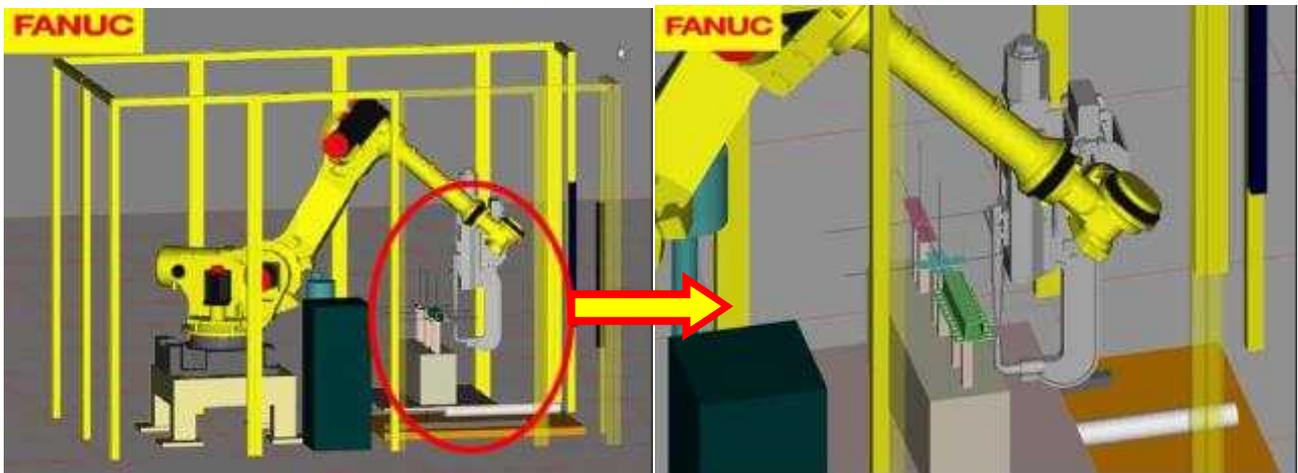


図 7.5 スポット溶接機 (例)

(2)溶接条件の選定方法

基本的な通電条件設計の考え方は、溶接に係るタクト時間の制約（車体の量産性）を考慮し、2段通電とし、その中で適正条件を見出すこととした。先ず1段通電で溶融凝固径を形成するとともに、その蓄熱量を制御した上で、不足する加熱・冷却状態を補う手段として2段目の通電を設定することとした。スポット溶接においては、電極は、通電し発熱（加熱）する手段であると同時に、電極自体が抜熱する冷却手段でもある。発熱を抑制すると抜熱が勝り、冷却が優ると総合して溶接部は徐冷～急冷の状態を作ることが出来るなど、発熱と冷却のバランスをどのようにとるかが溶接部の金属組織形成との関係で重要である。また、通電により溶融部（ナゲット）が形成されることは高温の熱源が板の合せ面に形成されることでもあり、その後の電極による抜熱で、その熱量の大きさを制御出来ると共に、その熱拡散を利用して組織制御も可能である。

本試作材の溶接性の検討にあたっては、Step1, Step2, Step3 と3つの段階に分けて溶接条件の適正化を行っていった。

Step1；先ず、第一通電のみでナゲット径と溶接電流の関係を求め、目標基準ナゲット径 $5\sqrt{t}$ （ t ：板厚）を得る溶接電流値 I_1 を決めた。

Step2：次に、Step1 で求めた溶接電流値 I_1 による第一通電とその直後の（通電停止し+加圧する）ホールド時間 $hold\#2$ を変えて組み合わせて、破断モードと接合部が最も安定する傾向を示す条件を絞り込んだ。

Step3：Step2 で破断モードが不足する部分を、Step2 の第一通電後に第二通電を行うことで改善した。第二通電では、その溶接電流 I_2 と通電サイクル数（時間） N_2 を組み合わせて変えた。この組み合わせを変えることで、第一通電後の溶接部は、再加熱が卓越するのか冷却が卓越するのか状態を制御することが可能である。

このようにして作製した溶接継ぎ手の引張り試験を行い、破断モード及び溶接部強度を求め、安定破断モードが得られるか否かを確認した。溶接部強度は、破断モードに応じた強度が得られるという考え方である。

尚、評価の基準ナゲット径は、 $5\sqrt{t}$ （ t ：板厚（mm））としたが、母材強度が980MPaクラスと高く、それとバランスする径として通常より大きいナゲット径とした。一般に準ハイテン系の鋼板で用いられる基準ナゲット径は、 $4.25\sqrt{t}$ である。

下記(1)～(3)の予備試験を行い、最適スポット溶接条件を選定後、選定した条件でTSSおよびCTSを行った。

(1) 溶接条件選定 Step1

Weld lobe を作成し、ナゲット径 $ND=5\sqrt{t}$ を満足する溶接電流(I_1)を決める。

電極：ドームラジラス型、先端φ8mm、材質Cr-Cu

加圧力：600kgf

スクイズ時間：50 サイクル/50Hz

通電時間：17 サイクル/50Hz

保持時間：10 サイクル/50Hz

スロープ：なし

ナゲット観察：JIS Z3139 に準ずる

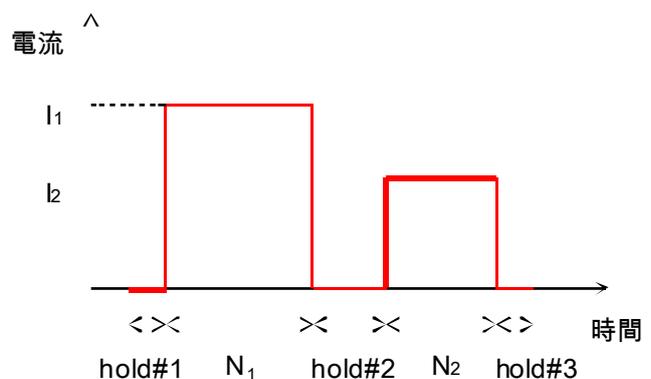


図 7.6 通電サイクル

(2) 溶接条件選定 Step2

通电後の保持時間(hold#2)を各種設定して溶接した TSS 試験片で引張試験を実施し、破断モードと同条件の試験片にて、硬度プロファイルを把握する。

(3) 溶接条件選定 Step3

Step2 の結果から hold#2 を決定し、続く第二通电条件($N_2 I_2$)を各種設定して溶接した CTS 試験片で引張試験を実施し、破断モードと同条件の試験片にて、硬度プロファイルを把握する。また、破断モードが母材破断となるものがあることを確認する。

7.1.3 成形性評価

基本的な成形加工の特性値を確認するため、具体的には、すでに示した曲げ性以外である伸びフランジ性、張り出し性、および縮みフランジ性について、それぞれ、穴広げ、エリクセン、丸・角筒深絞り試験を実施した。

(1) 穴広げ試験

伸びフランジ性を評価するため、図 7.7 に例示する穴広げ試験を実施した。

試験方法： JIS Z 2256 に準ずる。

n 数：3

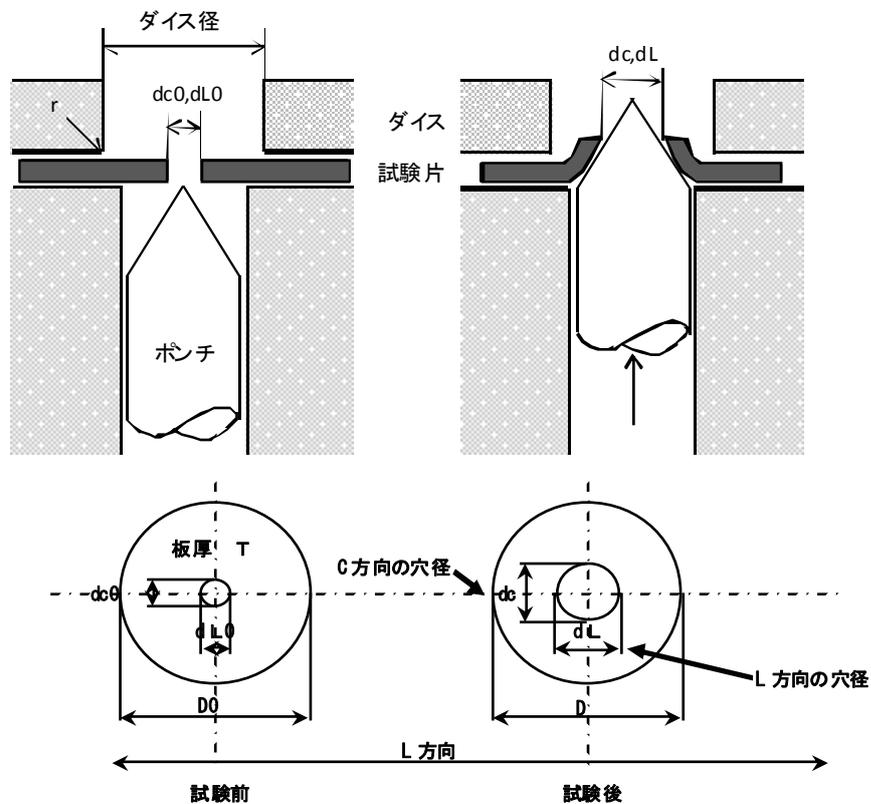


図 7.7 穴広げ試験

(2) エリクセン試験

張り出し性を評価するため、図 7.8 に例示するエリクセン試験を実施した。

試験方法： JIS Z 2247 に準ずる。

n 数： 3

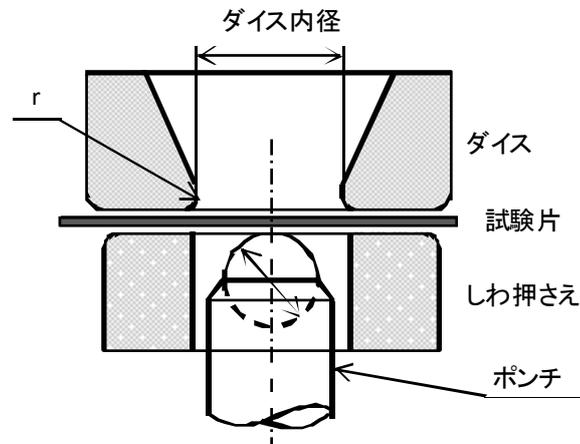


図 7.8 エリクセン試験

(3) 深絞り試験

絞り込みの成形性を評価するため、図 7.8 に例示する深絞り試験を実施した。

試験方法： 円板を打ち抜き、これをポンチ及びダイスを用いて円筒に絞り加工する。

n 数： 2

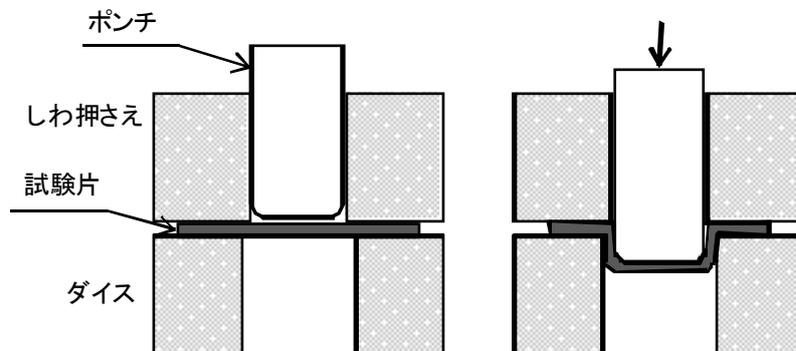


図 7.9 深絞り試験

(4) FLD

実際のプレス加工に対応した変形経路、変形状態による変形限界を測定し、複雑な形状のプレス成形性を予測するための試験として、等二軸～一軸引張変形を行い FLD(成形限界曲線：Forming Limit Diagram) を求めた。

具体的に FLD とは、図 7.10 に示すような種々の形状の試験片を用い、破断寸前・直後のくびれを生じた部位のひずみ(ϵ)をスクライブドサークル法で測定する。測定結果の例図(図 7.11)に示す、 ϵ 座標上にプロットして線を結んだものである。縦軸・横軸ひずみ(ϵ)の位置により、どのような変形状態でどの程度の変形まで耐えられるのかを推定できる。一般に、平面ひずみ状態(横軸ひずみ=0)近傍で成形限界が最小となる。

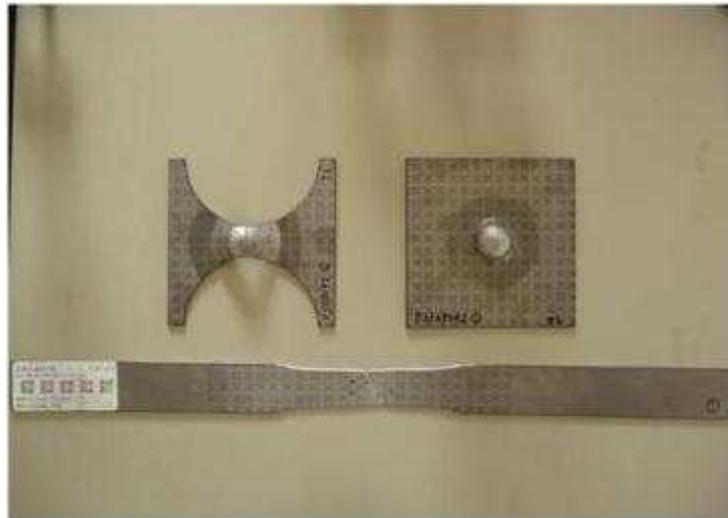


図 7.10 FLD 試験片例

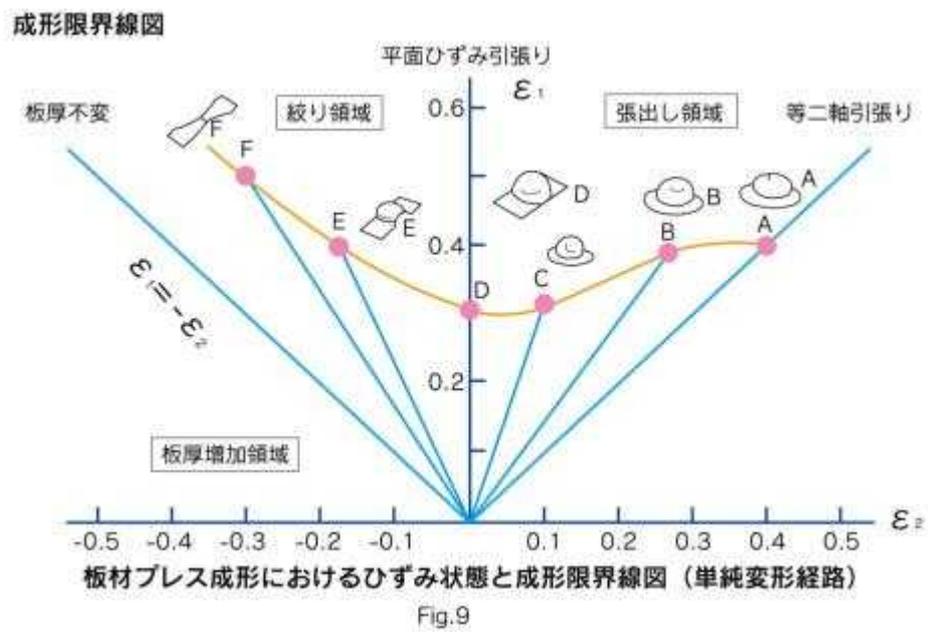


図 7.11 FLD 試験の解説図

(出所：科学技術振興機構 <http://weblearningplaza.jst.go.jp>)

7.1.4 耐食性評価

湿潤・塩水噴霧・浸漬・乾燥を組み合わせた繰り返しにより腐食環境を再現し、母材および化成処理・電着塗装の耐食性を評価した。

(1) 試験方法

塩水噴霧試験(SST)、複合サイクル試験(CCT)および塩温水試験(SDT)を実施した。

a) SSTによる腐食減量測定

試験法：JIS Z2371(塩水噴霧試験法)規定の中性塩水噴霧試験法に準ずる。

試験片：150×70mm，切断面をセロハンテープで保護

温度条件：試験槽内 35±2℃，空気飽和器内 47℃

噴霧時間：24，48，96Hr

噴霧圧力：0.098±0.01MPa

塩水：JIS K8150 特級塩化ナトリウム又は同等品+脱イオン水，50±5g/L，pH6.5～7.2

測定項目：試験片の評価面積および試験前後の質量

b) CCTによるクロスカット評価および腐食減量測定

試験法：JIS K5600-7-9(サイクル腐食試験方法)に準ずる。

試験片：150×70mm

化成処理および電着塗装を行い，図 7.12 のように切り込み傷をつける(クロスカット)。ただし，腐食減量測定用サンプルは，母材のままとする。

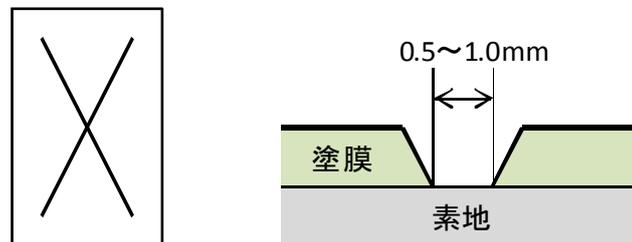


図 7.12 耐食性評価用試験片へのクロスカット

運転条件：表 7.2 に示すパターンを 16 サイクル(96 時間)繰り返す。

塩水噴霧条件は，上記 SST 同様。湿潤時の湿度は，95%RH とする。

表 7.2 CCT 運転パターン

段階	時間[h]	温度[℃]	条件
1	0.5	30±2	塩水噴霧
2	1.5	30±2	湿潤
3	2	50±2	熱風乾燥
4	2	30±2	温風乾燥

測定項目：(クロスカット)目視によるさび・はがれ，テープ剥離幅
(腐食減量)試験片の評価面積および試験前後の質量

- c) SDT によるクロスカット評価および腐食減量測定
試験法：JIS に準ずる。
試験条件：5%NaCl 水溶液 55℃に 96 時間浸漬。
試験片：CCT 試験と同様。

(2)試験装置

腐食環境の再現のため、図 7.13 および図 7.14 に示す複合サイクル試験機を用いた。本試験機は、試験槽、噴霧装置、塩水タンク(噴霧・浸漬)、空気供給器、空気飽和器、温湿度調整装置、排気装置等で構成され、噴霧・乾燥・湿潤・浸漬の4つの環境を再現する。タッチパネルコントローラで試験条件を設定し、任意の順序・組み合わせで自動運転する。



図 7.13 CCT 試験機外観写真

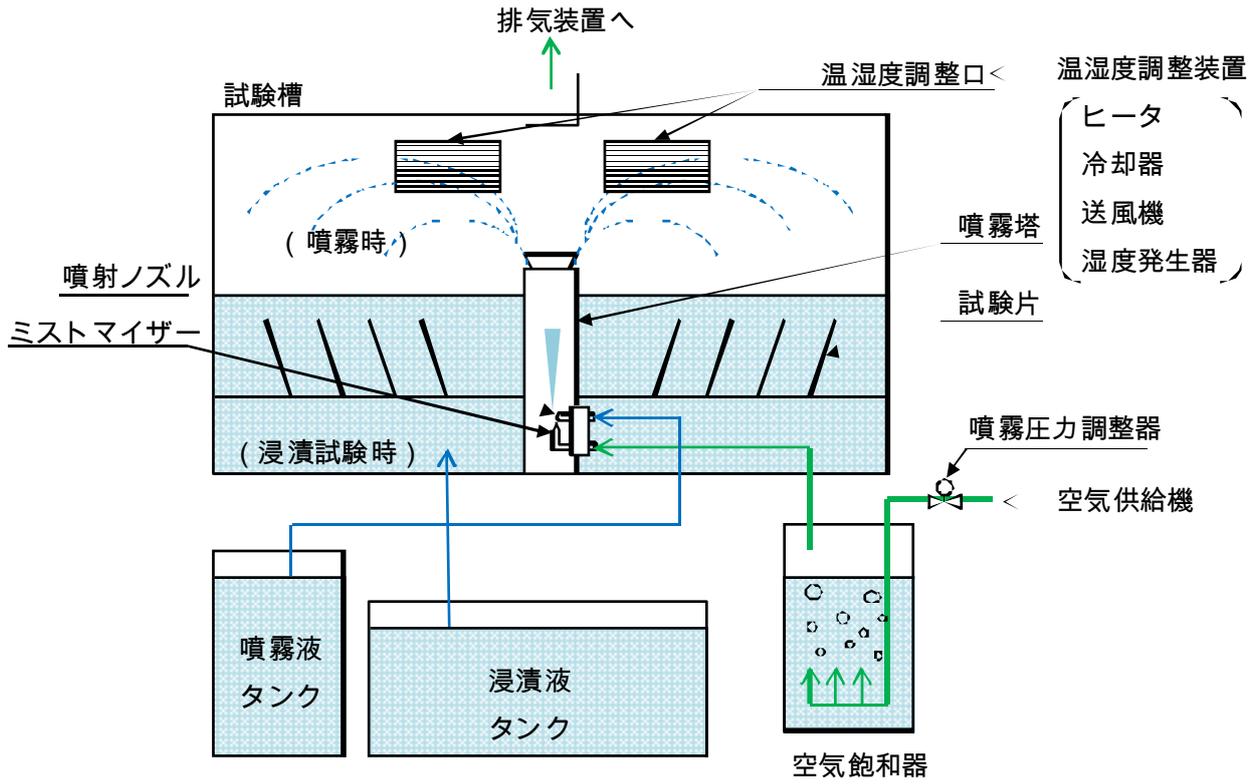


図 7.14 CCT 試験機概略図

7.1.5 ハット部材の衝撃特性

車体性能の最も重要な性能の一つが衝突事故時の衝突性能である。車体としては大入力時に安定的に変形すること、予測制御しにくい破壊現象を伴わないことが重要である。部材レベルで破壊現象を考えると、接合部の破断、材料破断が相当する。ハット型部材試験片は車体実構造と大きく異なるが、衝撃試験での部材挙動は、過大入力・大変形下で安定変形を成し得るものかどうかの参考資料になる。

今回、図 7.16 に示すハット部材を曲げ成形で試作し、そのスポット溶接は、表 7.3 の条件にて試作し、落重式衝撃試験に供した。

ハット形の部材に錘を衝突させ、部材にかかった力や変形・破壊の状況を調べ、衝撃特性を確認した。

(1) 試験方法

図 7.15 に示す試験装置を用いて落重式衝突試験を実施する。錘を落下させ、部材に衝突したときの荷重をロードセルで測定し、非接触変位計を用いて落錘底面の移動量を測定する。

- 落錘重量：390kg
- 落下高さ：10m
- 衝突速度：50km/h
- 押し込み量：100mm(ストップ作動)
- 試験 n 数：3

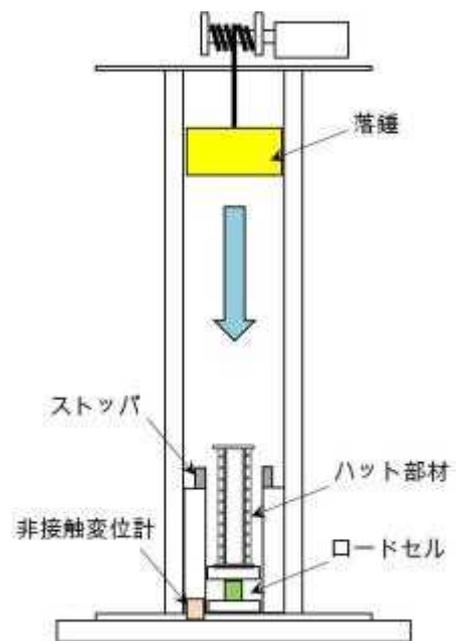


図 7.15 落重式衝突試験装置概略図

(2) ハット部材

試験部材は図 7.16 に示す形状に成形する。スポット溶接は、表 7.3 に示す条件で行い、図 7.17 に示す天地板を取り付ける。スポット溶接電流は、図 7.18 に示す Weld lobe から、チリ発生以下で $ND=5\sqrt{t}$ に近い、8.5kA とした。

表 7.3 ハット部材溶接条件

電極	ドームラジラス型 外径16φ, 先端径6φ (材質Cu-Cr)
加圧力	550 kgf
初期加圧時間	60サイクル/60Hz
アップスローブ	1サイクル
通電時間	20サイクル/60Hz
ダウンスローブ	無し
ホールド時間	1サイクル/60Hz
溶接電流	8.5kA
予打点実施条件	電極交換後, 上記条件(電流のみ8.0kAに変更)で10打点実施する。

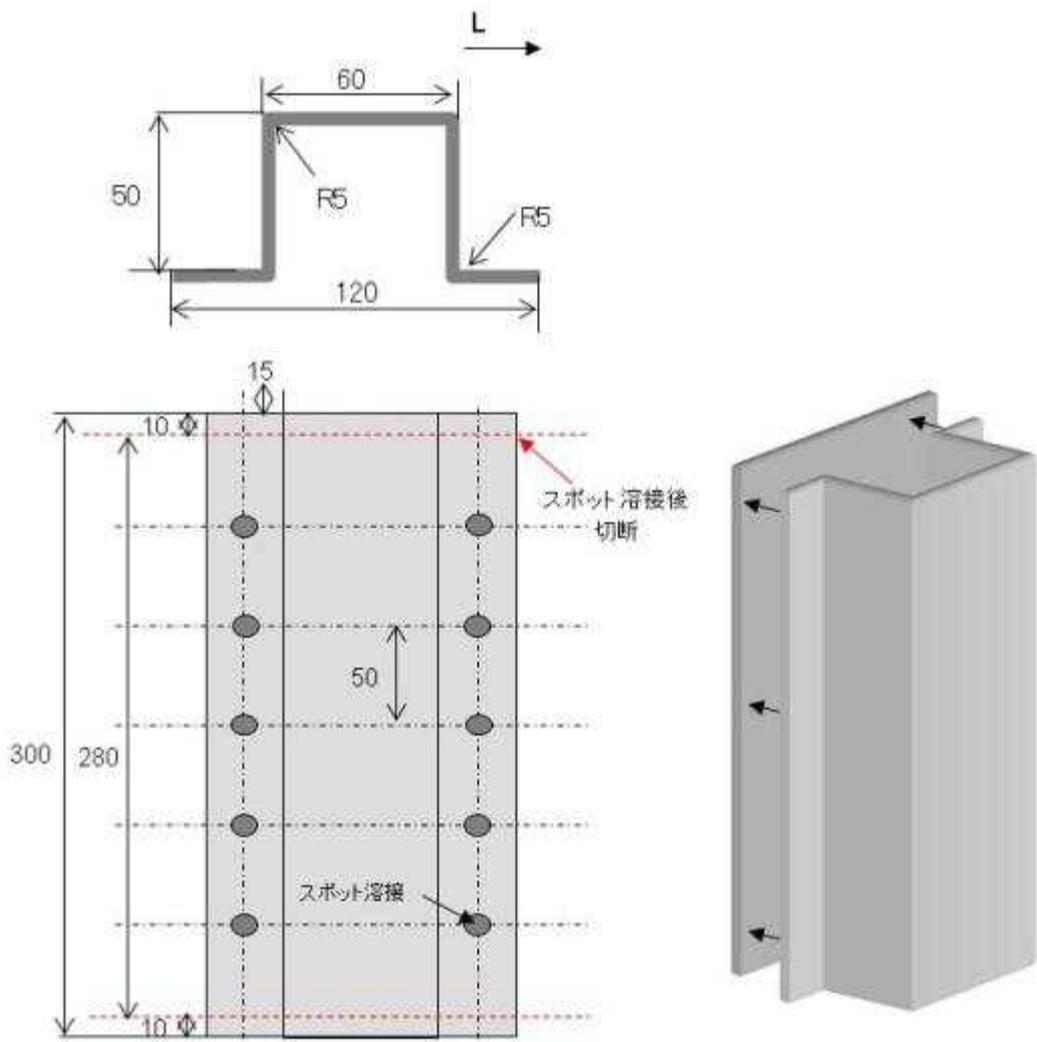


図 7.16 ハット部材形状

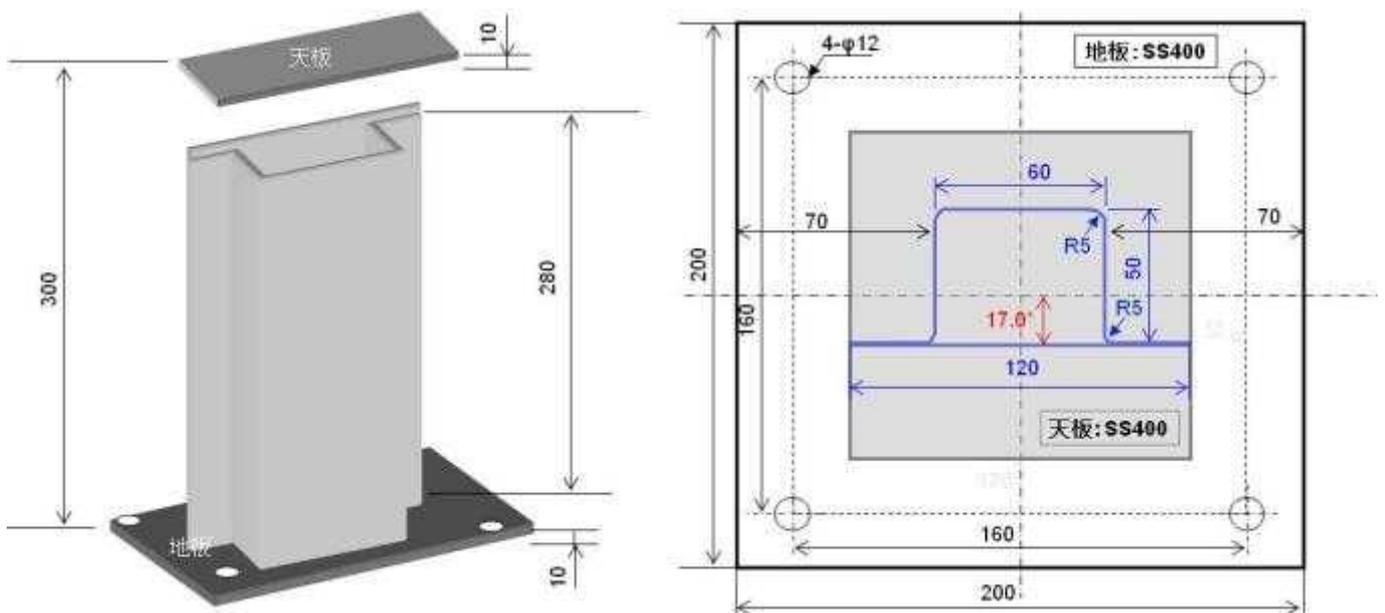
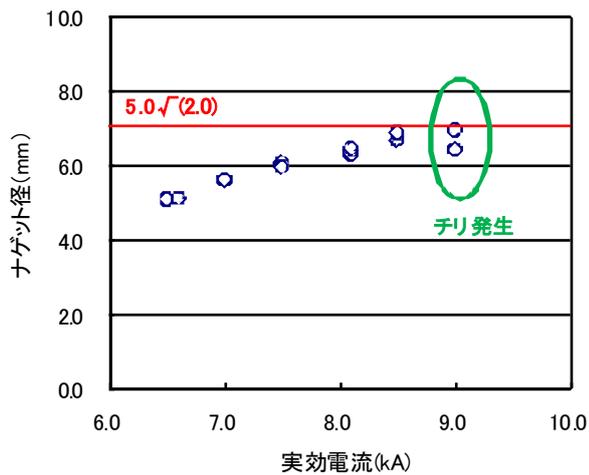
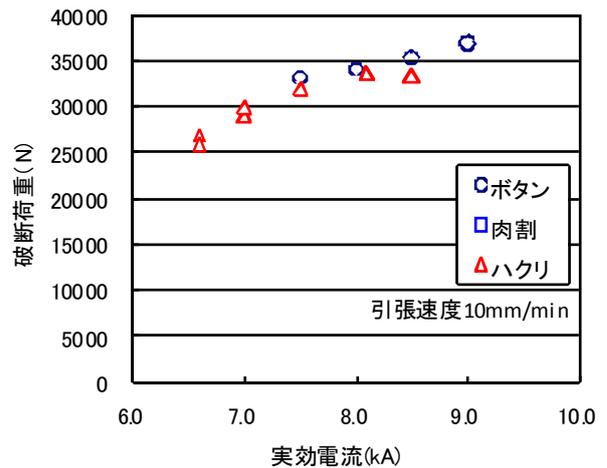


図 7.17 ハット部材天地板取付図



(a) ナゲット径測定結果



(b) せん断引張試験結果

図 7.18 ハット部材溶接条件選定結果

7.2 品質検証試験結果

7.2.1 金属組織評価

(1) 引張破断面

図 7.19 に、A2B18020④のうち、伸びの低かった DS-L 方向の引張破断面の SEM 観察結果を示す。強度が高いためディンプルは浅いが、ほぼ全面延性破面である。また、一部介在物もあるが、 $10\mu\text{m}$ 以下の小さなもので、破壊に影響を与えるものではなかった。

これより、破断面について明らかな問題は無かった。前章で既に述べたように、断面組織にスジ状の様子が認められているが、破断に影響を与えたような状態は認められなかった。

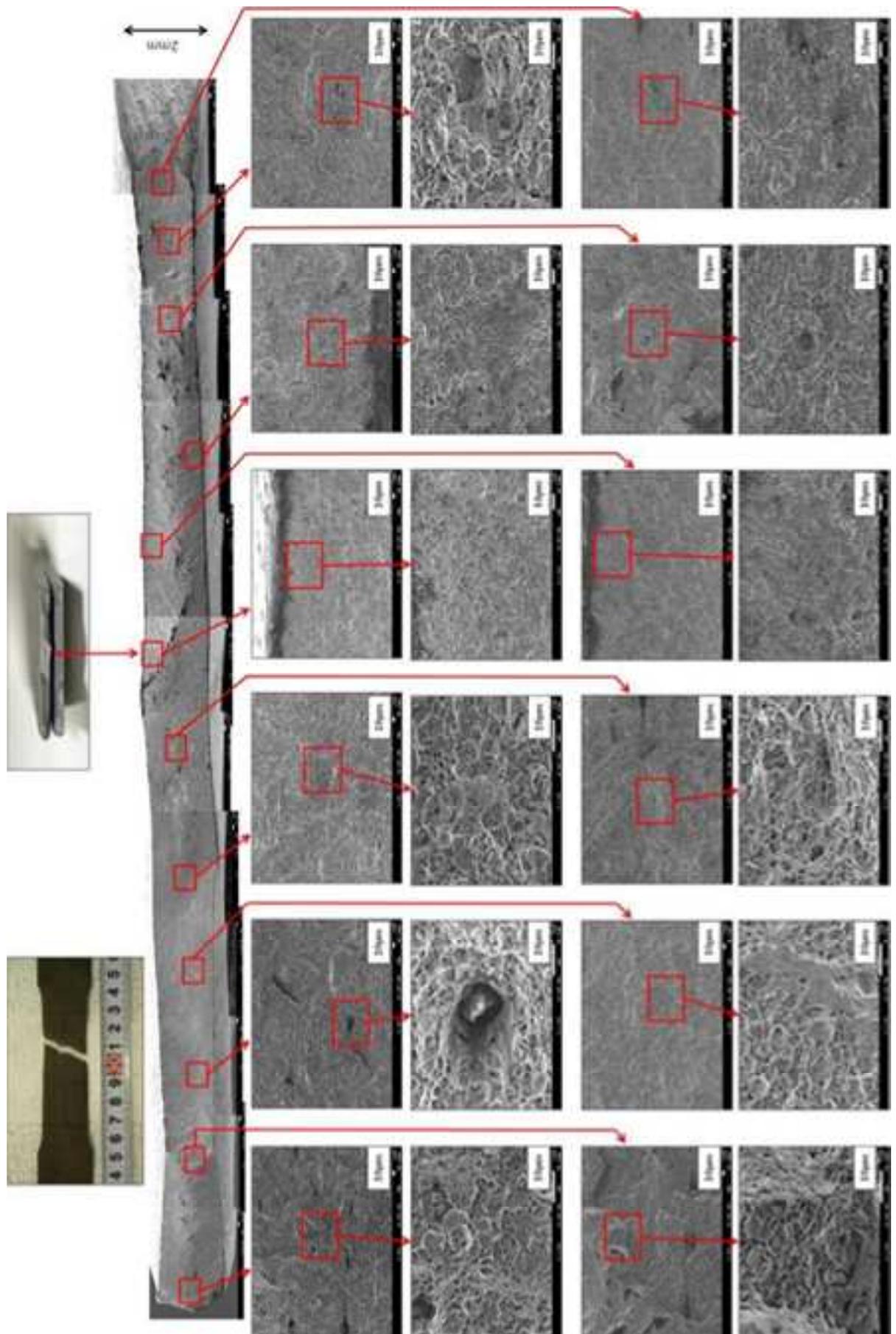


圖 7.19 引張破断面 SEM 觀察結果

(2)断面組織

図 7.20 に、ピクリン酸、塩化第二鉄を用いたエッチング組織を示す。

旧 γ 粒界は、粒径 $10\mu\text{m}$ で、異方性はあまり見られなかった。ほぼ狙い通りの結果を達成できた。

ただし、旧 γ 粒界が判別しにくいので、今後、さらに明瞭となるエッチング手法の検討が必要である。

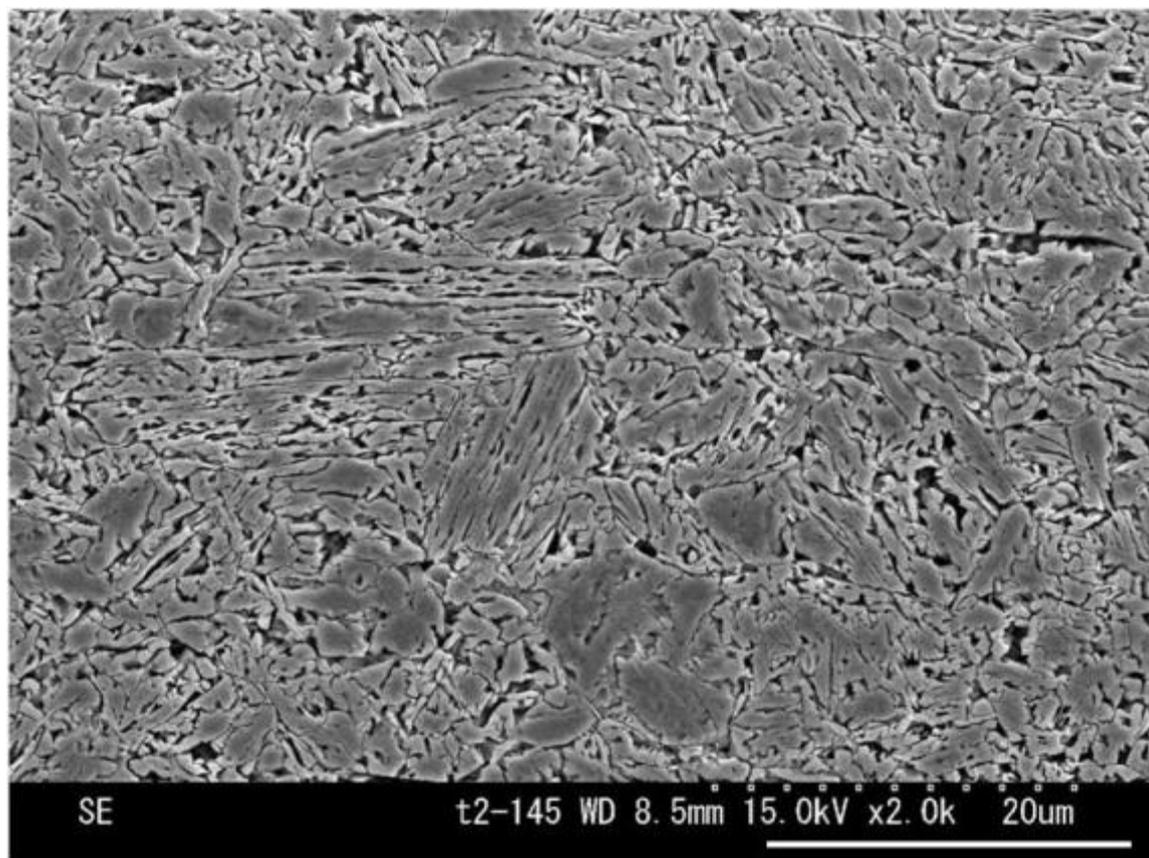


図 7.20 旧オーステナイト粒様相(表層)

図 7.21 および図 7.22 に、電解研磨した試料の原子間力顕微鏡(AFM)および SEM 観察結果を示す。

極表層の炭化物の析出状態を観ることは、その組織形成(例えば、 γ 粒からの変態過程の推定)を知ることに繋がり、組織形成の違いは強度特性の変化に繋がる。従って、製品の強度特性を制御するためには、組織が見える必要があるといえる。つまり、材料の強度特性を検討する場合に、そのマイクロ組織を理解しておくことが必要不可欠である。

しかし、ナイタールエッチングでは、彫刻される深さが深いため、表層の本来の素性を確認することができない。

この問題を解決するために、極表層部の状態を観察するエッチング手法について検討した結果、電解研磨エッチングを行うことになった。電解エッチングは、表面ナノオーダーの極浅いエッチングが可能である。これにより、通常ナイタールエッチングでは見えない極表層の炭化物の析出が確認できた。

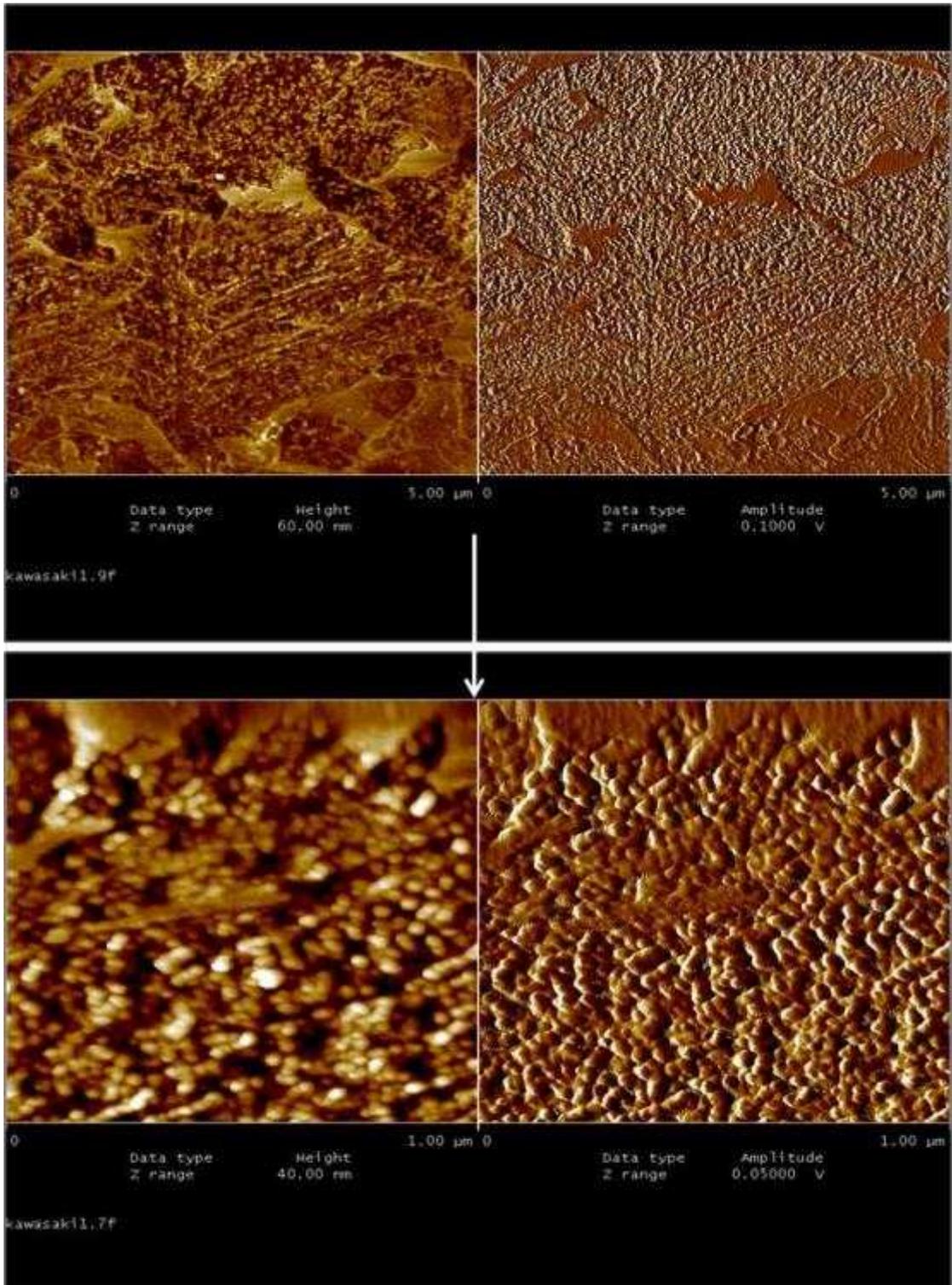


図 7.21 電解研磨後の AFM 観察結果(A2B18020)
 (※スケールは各画像の幅)

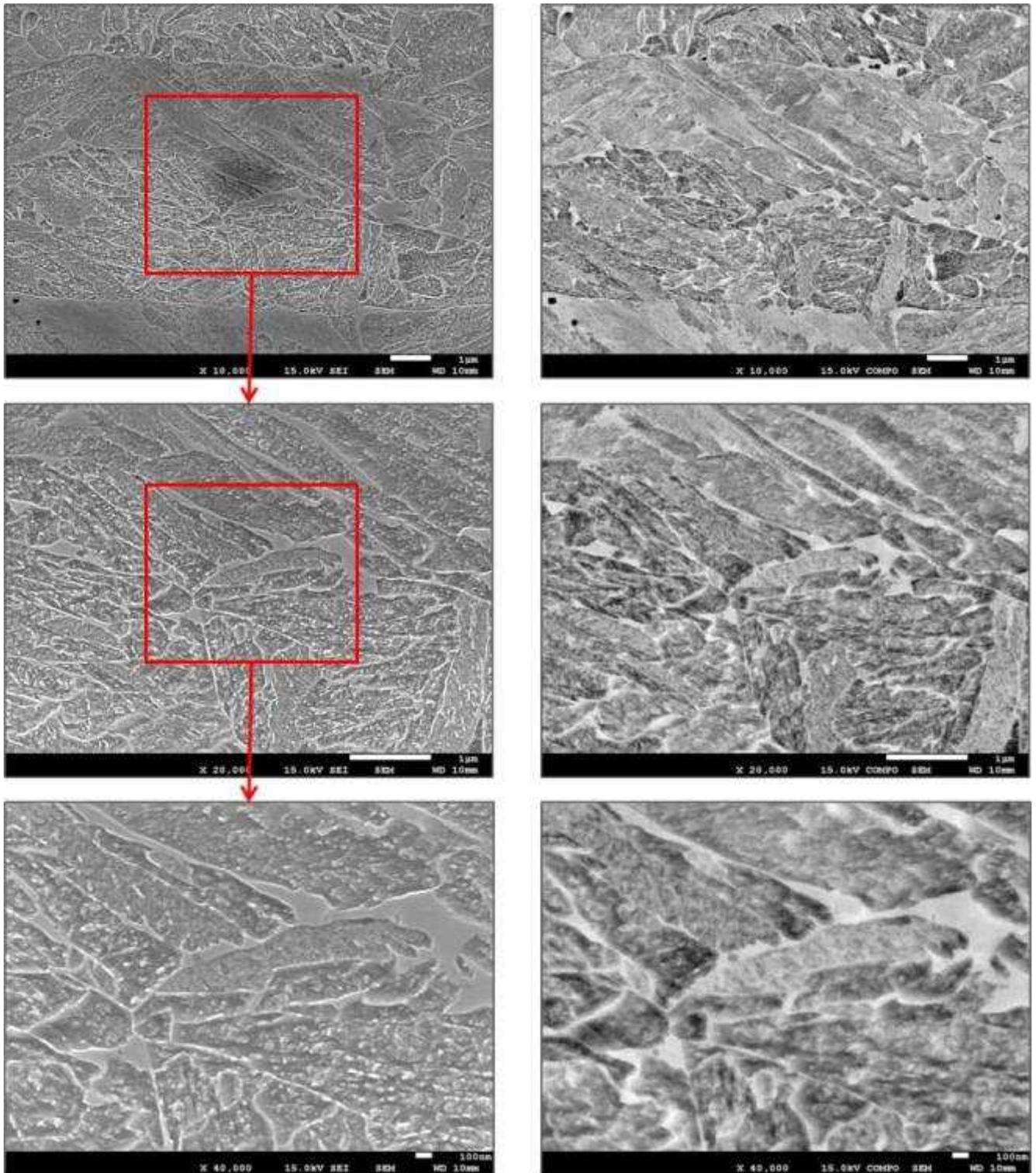


図 7.22 電解研磨後の SEM 観察結果(左 : SE 象, 右 : BSE 象)

なお, 写真に認められるブツブツが FeC炭化物か他の炭化物かは, SEMで判別できていない。(図 7.23) また, 微細な γ 粒の粒界から飽和フェライト共析変態しているか, 過飽和フェライトから炭化物が析出しているかといった点は, 今後の調査課題である。

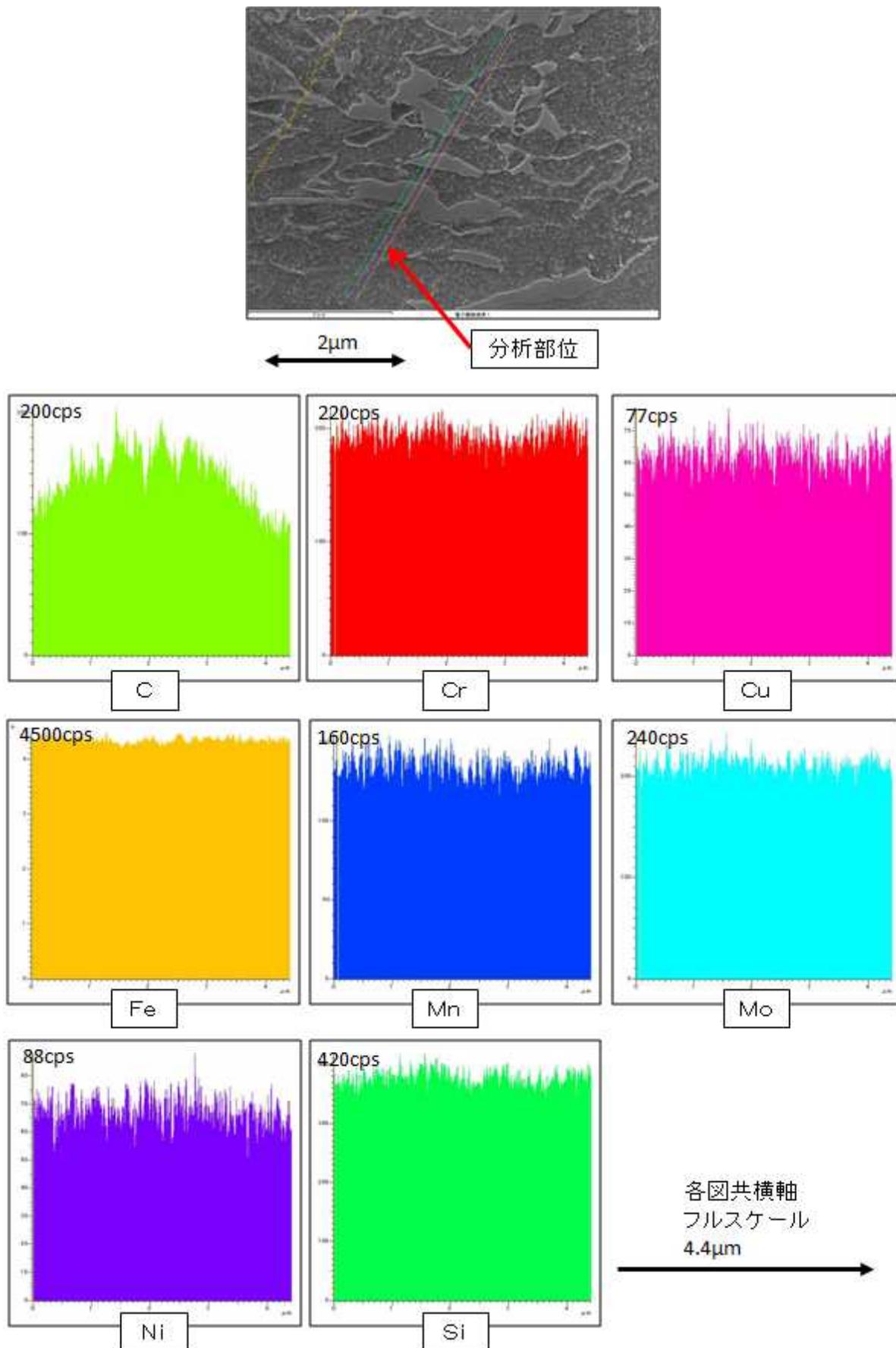


図 7.23 EDX によるマッピング分析

図 7.24 および図 7.25 に，組織断面にて確認される縞状のスジの SEM-EDS と EPMA の分析結果を示す。

スジ部に析出物は無く Si, Cr, Mo, C が濃化しており，中心偏析を反映した組織を有している。ただし，MnS の析出といったものではない上記元素が濃化している状態である。

また，マイクロ偏析の組織は，既に破面観察の項に述べたように，引張破断面にその影響が現れていない。ただし，不均一伸びの向上といった面で，今後改善の余地があると考えている。

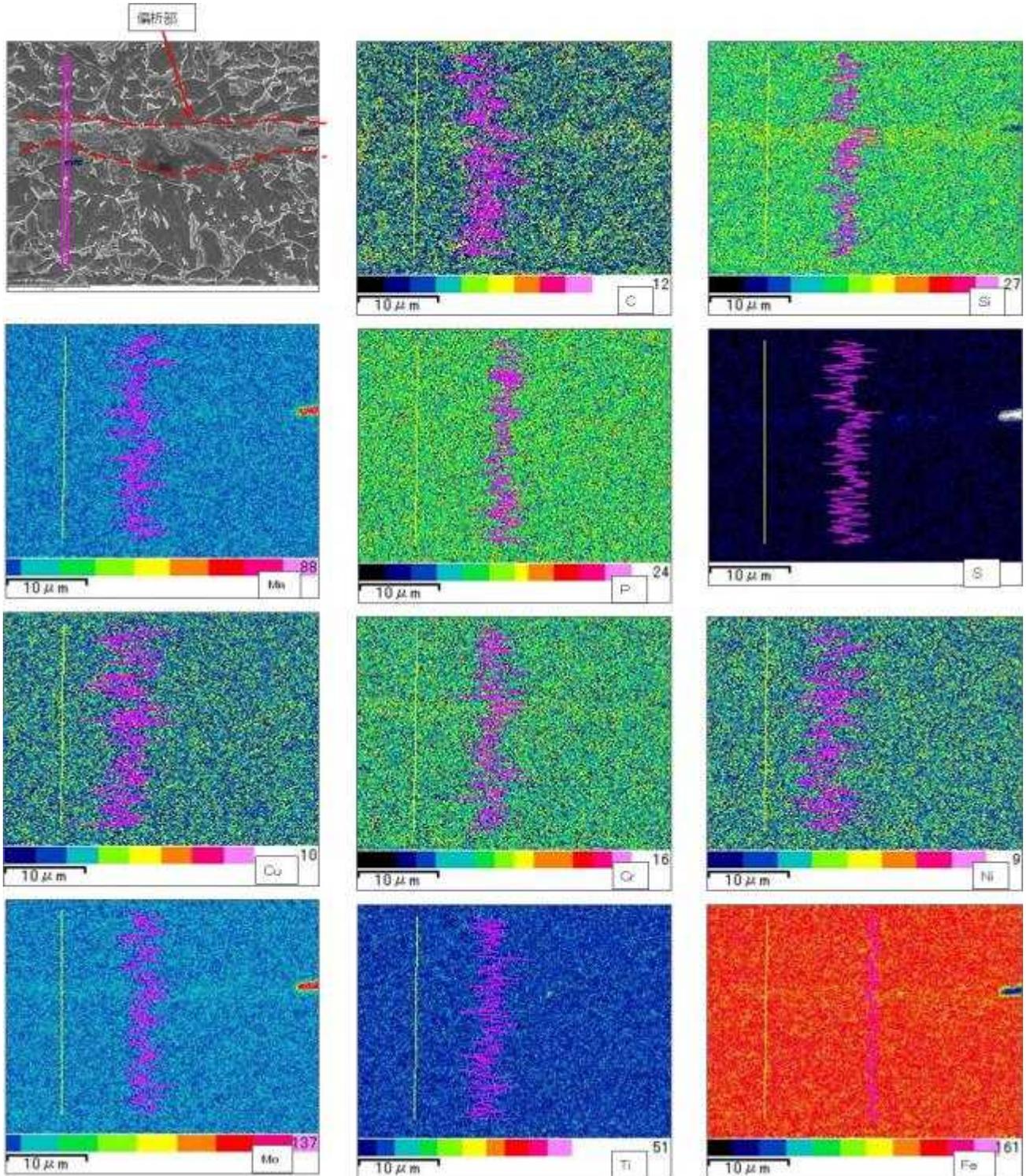


図 7.24 EDX による線分析(15KV)

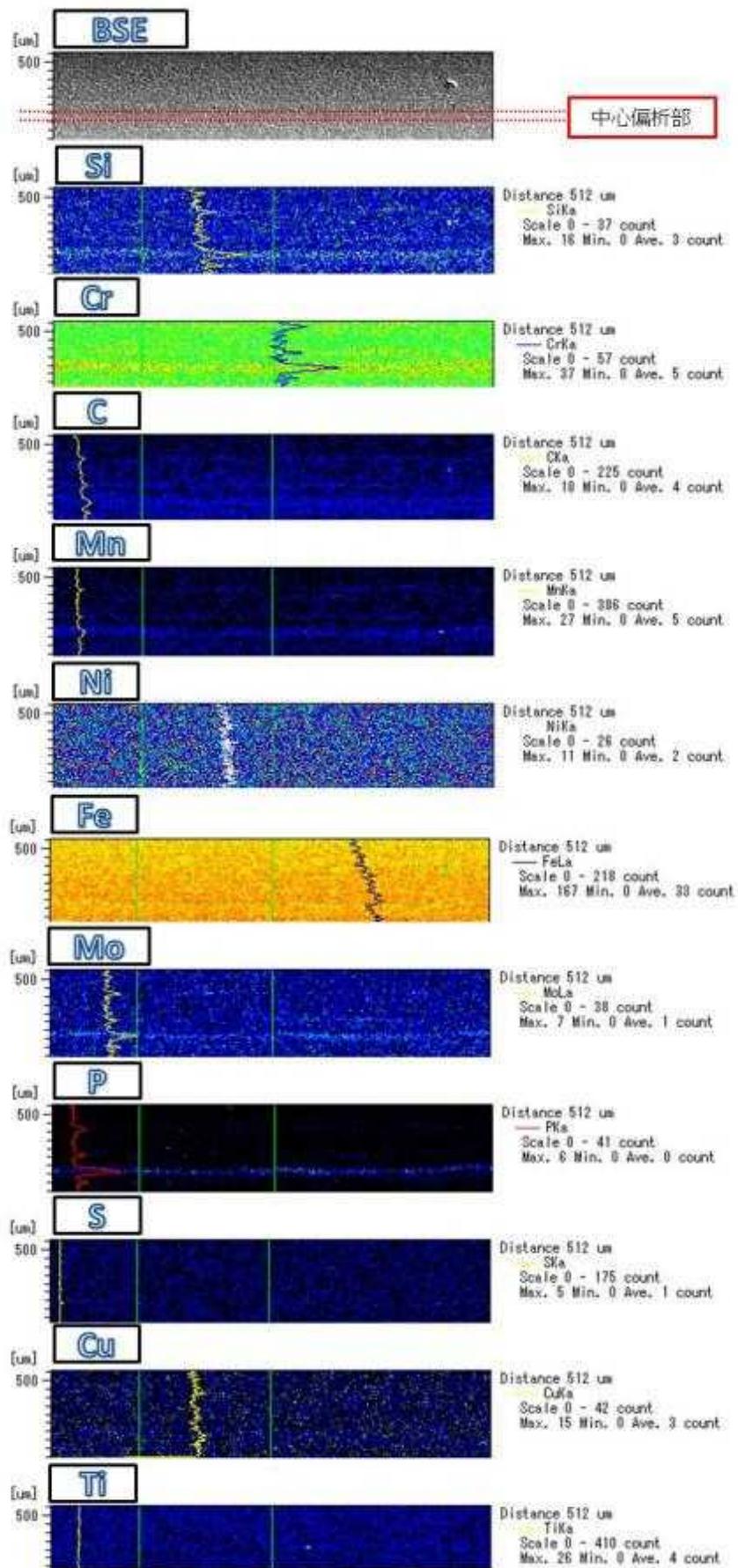


図 7.25 EPMA 分析結果 (StageScan)

7.2.2 溶接性評価

(1) 溶接条件選定 Step1

I_1 を可変してナゲット径を調査した結果、 $ND=7.07\text{mm}(5\sqrt{t}, t: \text{板厚})$ を満足する I_1 は 8.25kA であった. 図 7.26 に Weld lobe 作成結果を, 表 7.4 に断面マクロの観察結果を示す.

断面マクロ写真では、ナゲット内に凝固収縮ポイドが観察されるが、凝固時の冷却速度を制御すること等により改善出来る範囲のものである。

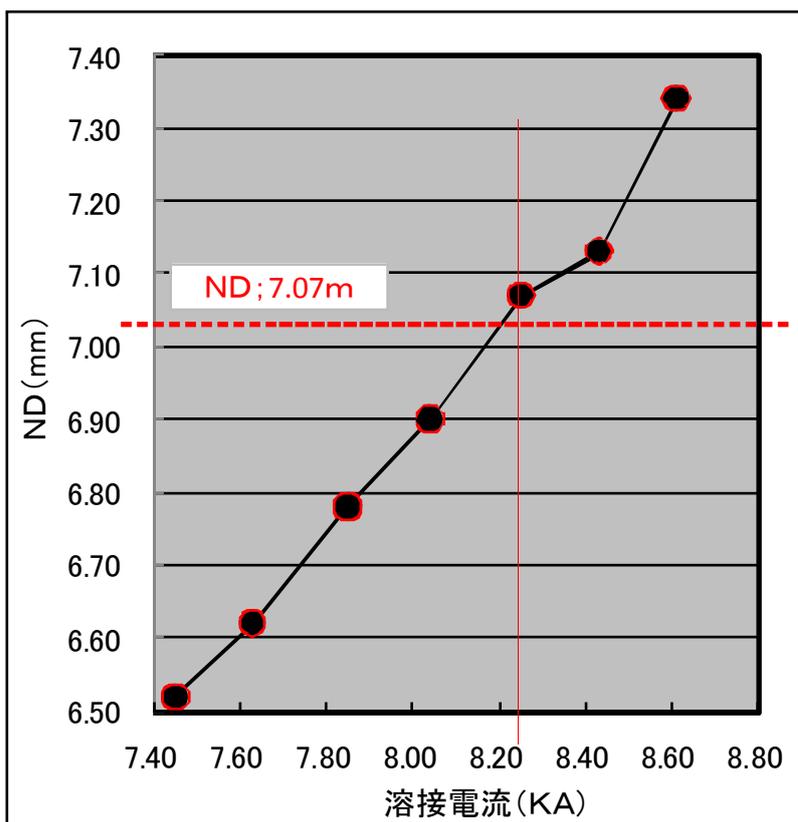
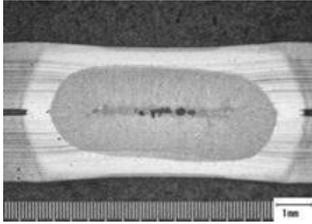
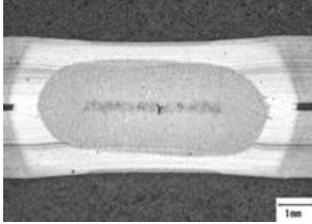
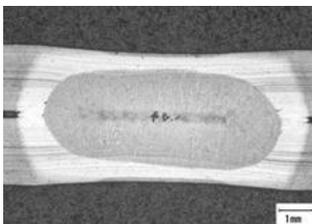
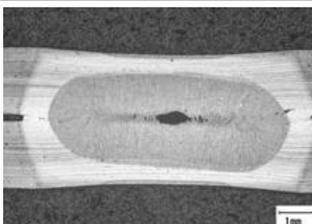
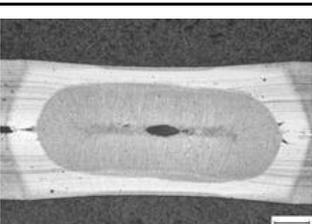
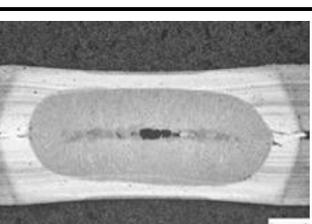


図 7.26 Weld lobe

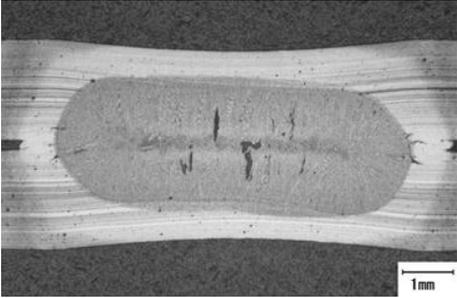
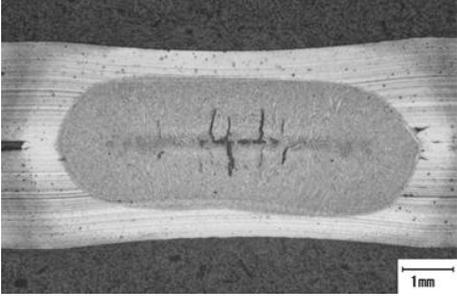
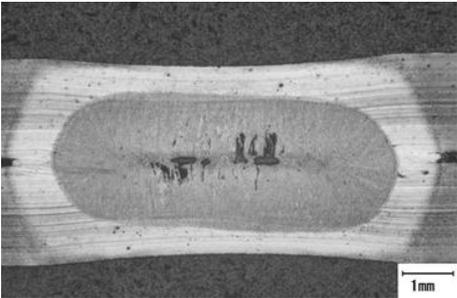
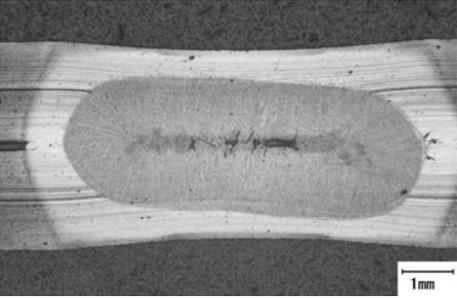
表 7.4 ナゲット径調査結果および断面マクロ

電流 (kA)	ND (mm)	チリ	断面マクロ
7.45	6.52	無し	
7.63	6.62	無し	
7.85	6.78	無し	
8.04	6.90	無し	
8.25	7.07	無し	
8.43	7.13	無し	
8.61	7.34	有り	

(2) 溶接条件選定 Step2

第一通電直後の hold#2（通電停止且つ加圧時間）を可変してナゲット径を調査し、TSS および CTS 試験を行った結果を表 7.5 に示す。チリ発生のため $I_1=8.0\text{kA}$ とし、加圧力は 6.0kN で実施した。

表 7.5 Step2 試験結果

Hold#2 [cyc]	ND [mm]	観察断面	TSS		CTS	
			剪断強度	破断形態	剪断強度	破断形態
1	7.06		30.84	A	11.07	B
			30.15	D	12.31	B
			31.00	B	11.39	B
			Ave.30.66		Ave.11.59	
2	7.16		30.89	B	10.90	A
			30.48	B	8.45	C
			29.78	B	12.57	A
			Ave.30.38		Ave.10.64	
3	6.90		30.72	D	10.80	B
			30.99	D	7.79	D
			30.74	B	8.63	B
			Ave.30.82		Ave.9.07	
5	7.13		30.99	A	10.88	A
			29.97	D	11.25	B
			29.45	D	9.61	B
			Ave.30.14		Ave.10.58	

記号:A 母材破断(HAZ部残り)	記号:B HAZ部破断	記号:C ND内破断	記号:D ND内剥離(シャード破断)
			

(3) 接条件選定 Step3

最適化した溶接条件で、目的とする安定破壊モードが得られ、その結果として溶接部強度も安定した値が得られた。以下、溶接条件の検討内容を報告する。

ここでは、Step2 に引き続き、第二通電条件の検討を行った。表 7.6 は、各条件で試作した十字継ぎ手試験片の破断モードとその強度が示してある。第二通電の溶接電流値 I2 が、I1 に対して 75% の 6k A の場合、通電サイクル数は、10 サイクルで安定破断モードとなり、それより短いサイクル数、あるいは長いサイクル数でも破断モードは好ましくないモードが現れることがわかる。また、I2 を I1 に対して 50% の 4k A のとした場合、N2 は、10 と 15 サイクルで安定破断モードを示すことがわかる。更に I2 を I1 の 30% に下げた場合、いずれのサイクル数でも破断モードは悪化することがわかる。(I2=6.0, N2=10), (I2=4.0, N2=10), (I2=4.0, N2=15) で安定破断モードが得られ、熱的には比較的広い状態で目的の破断モードが得られるものと考えられる。安定破壊モードと共に接合強度も安定している。

尚、I2=4.0, N2=10 の場合のスポット溶接に要する時間は 35 サイクルであり、0.7sec となる。現行の車体量産条件とほぼ変わらないものと考えられる。

表 7.6 Step3 試験表

溶接条件		CTS		
L2(KA)	N2(cyc)	強度 (KN)	破断形態	WD (mm)
6.0	5	12.23	A	8.29
		12.11	B	6.96
		10.00	C	6.77
	10	11.83	B	7.83
		10.30	A	8.08
		11.27	A	7.95
	15	11.96	A	8.14
		13.23	C	7.03
		11.76	C	7.55
4.0	5	7.33	D	—
		12.17	A	7.57
		11.28	A	7.92
	10	9.99	B	7.18
		9.42	B	6.51
		10.10	A	7.33
	15	10.17	B	7.49
		11.85	A	7.99
		12.65	A	7.93
2.9	5	7.95	C	5.43
		11.38	B	7.53
		11.24	A	7.81
	10	8.55	B	7.50
		12.93	B	6.43
		10.93	C	6.26
	15	9.51	B	7.34
		8.42	B	5.56
		6.67	C	4.91

7.2.3 成形性評価

(1) 穴広げ試験

試作材および現行高炉比較材 980MPa で穴広げ試験を実施した結果を、表 7.7 および図 7.27 に示す。

今回の現行高炉比較材 980MPa は低いものであったが、一般的な現行高炉材は $\lambda=25\%$ 程度であり、本試作材はそれと同等の特性値を有しているものと考えられる。

表 7.7 穴広げ試験結果

			穴広げ率			
			%	最大	最小	平均
試作材 (酸洗鋼板)	外注	1	28.3	30.4	23.8	27.9
		2	27.7			
		3	23.8			
		4	30.4			
	社内 (岡山)	1	23.8	24.5	21.4	23.3
		2	21.4			
3		24.5				
試作材 (熱延鋼板)	社内 (岡山)	1	31.2	31.2	25.6	27.9
		2	25.6			
		3	27.0			
現行高炉比較材 980MPa材		1	9.9	18.4	9.9	14.2
		2	18.4			

(2) エリクセン試験

試作材および現行高炉比較材 980MPa で実施したエリクセン試験の結果を、表 7.8 および図 7.28 に示す。

試作材は現行高炉比較材 980MPa に比べやや低いエリクセン値であるが、圧延圧下条件と温度条件の適正化により、TS・EL バランスや n 値が向上すれば問題無いレベルと考えられる。

表 7.8 エリクセン試験結果

			ストローク			
			mm	最大	最小	平均
試作材	外注	1	20.6	20.7	20.6	20.65
		2	20.7			
	社内 (岡山)	1	9.63	9.63	9.50	9.56
		2	9.56			
		3	9.50			
現行高炉比較材 980MPa材		1	11.57	11.57	11.27	11.42
		2	11.27			

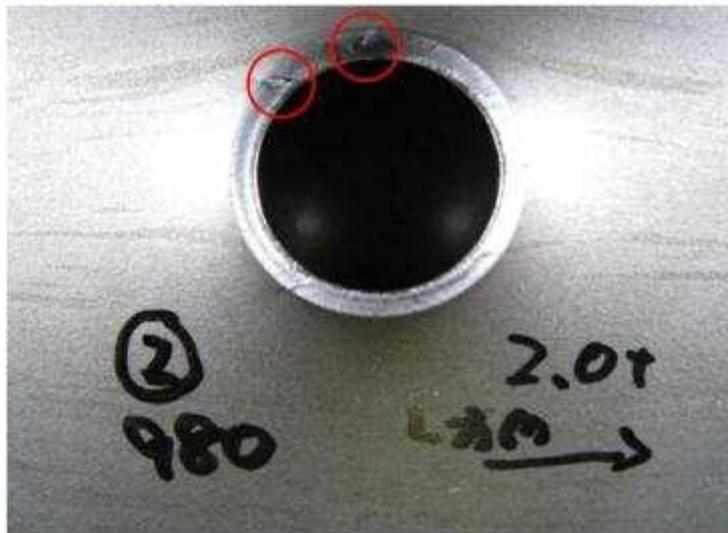


図 7.27 穴広げ試験後の試験片外観写真(試作材 酸洗鋼板)



(a) ①上面



(b) ①側面



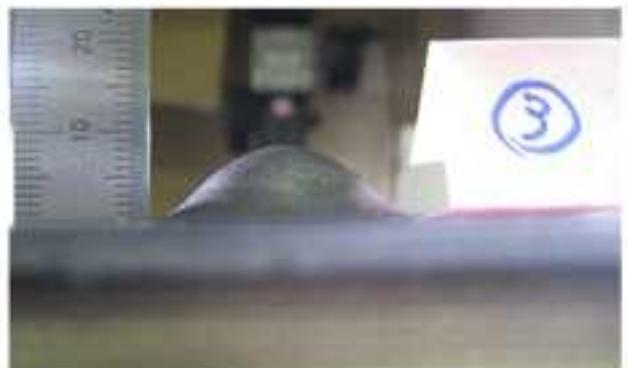
(c) ②上面



(d) ②側面



(e) ③上面



(f) ③側面

図 7.28 エリクセン試験後の試験片外観写真(試作材)

(3) 深絞り試験

深絞りの結果を、図 7.29 および図 7.30 に示す。

円筒絞りは、LDR=2.02 であった。現行高炉比較材 980MPa と同等の数値である。
 なお、角筒絞りは、拘束が厳しく変形途中で破損するため中止した。

※LDR(限界絞り比：Limiting Drawing Ratio) ， BHF(しわ抑え力：Blank Holder Force)

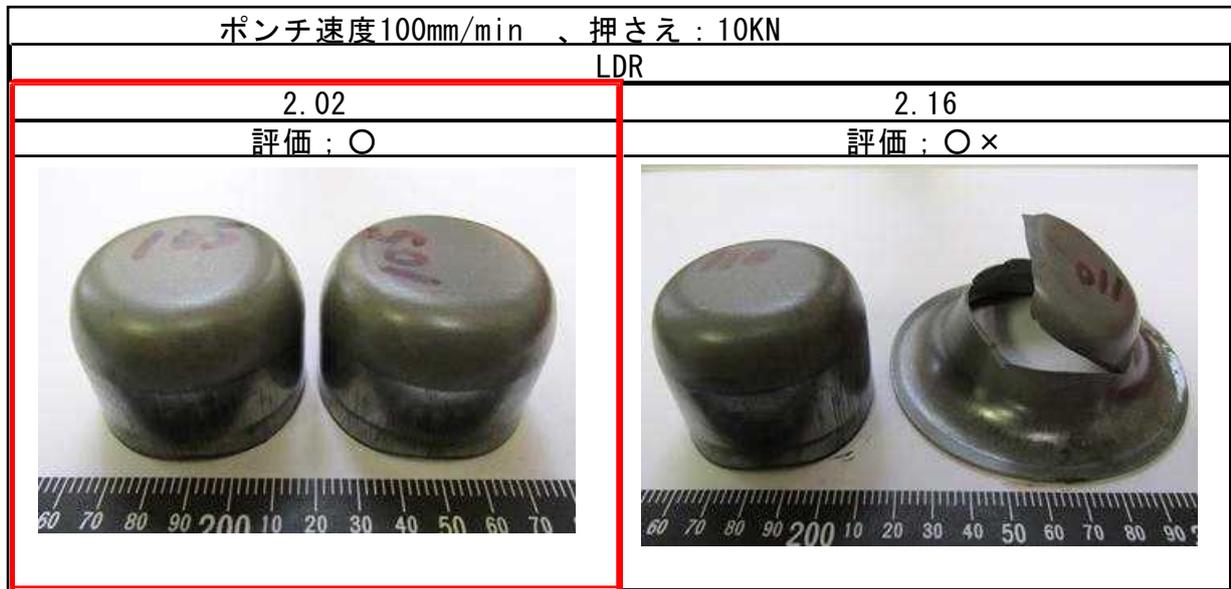


図 7.29 深絞り試験結果 (LDR)



図 7.30 深絞り試験結果 (BHF)

(4) FLD (成形限界曲線：Forming Limit Diagram)

FLD の測定結果を、図 7.31 に示す。図中の赤線が本試作材の、波線が現行高炉比較材の実測点から推定される成形限界曲線である。

板厚の違いがあるため、試作材のほうが有利という面はあるが、現行高炉比較材 980MPa より高いひずみ加工が可能であると推定できる。

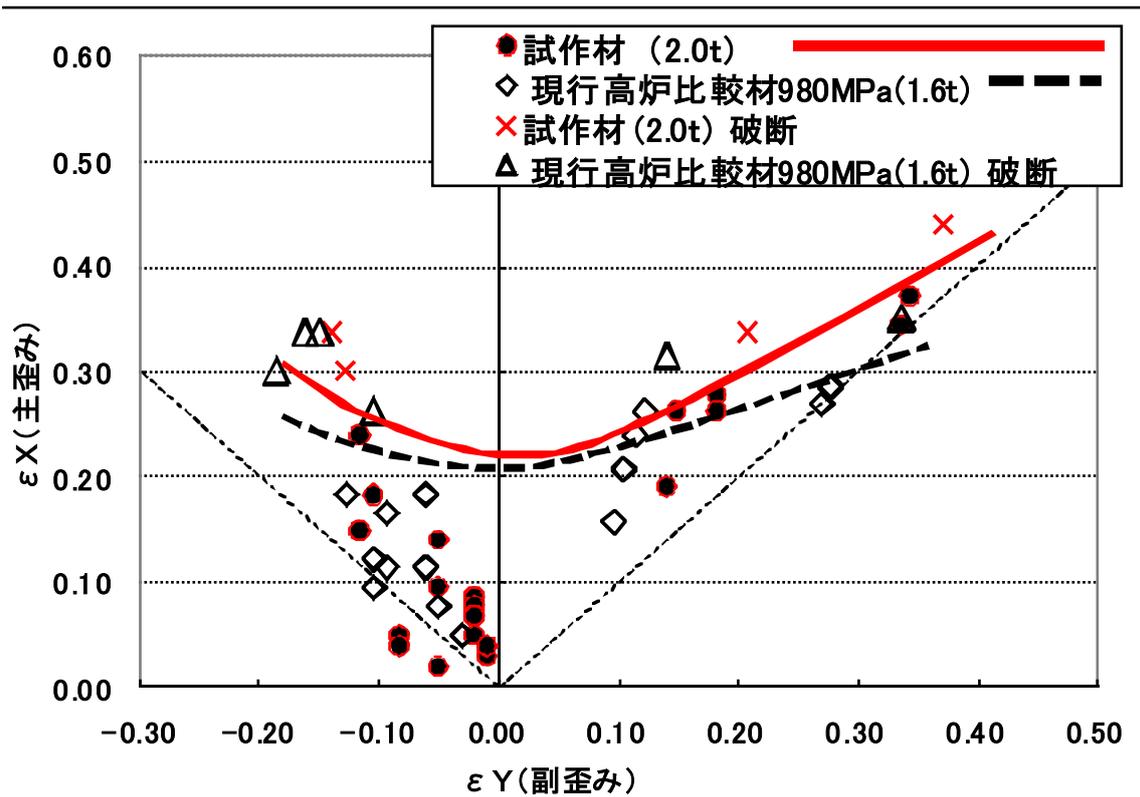


図 7.31 FLD 測定結果

(5) 成形性のまとめ

(1)~(4)の結果から、試作材は、現行高炉比較材 980MPa と同等の加工性を有しており、自動車用鋼板として車体用部品の成形が可能な品質であることが確認できた。

7.2.4 耐食性評価

(1) SSTによる腐食減量試験

試作材と、現行高炉比較材の 590MPaDP・270MPa 材(JSH270E)で実施した腐食減量試験結果を、図 7.32 および表 7.9 に示す。試験前後の試験片外観写真は、図 7.33～図 7.39 に示す。

試作材は、現行高炉比較材に比べて少し減量が多い程度であり、減量の時間変化の傾きは同じである。

表 7.9 SST 腐食減量試験結果

供試材	噴霧時間 (Hr)	n数	評価面積 (cm ²)	試験片質量(g)		減量		
				試験前	試験後	(g)	(g/m ²)	
試作材	24	Test1	1	64.66	161.15	160.86	0.29	44.85
			2	65.27	158.94	158.66	0.28	42.90
	48	Test1	1	66.11	162.58	162.06	0.52	78.66
			2	64.26	161.60	161.05	0.55	85.59
	96	Test1	1	67.23	162.53	161.53	1.00	148.74
			2	63.72	160.00	159.04	0.96	150.66
	96	Test2	1	68.88	163.44	162.43	1.01	146.64
			2	65.97	163.91	162.94	0.97	147.05
3			66.83	160.28	159.28	1.00	149.63	
現行高炉比較材 590MPaDP	24	Test1	1	52.22	119.14	118.96	0.18	35.04
			2	52.74	107.80	107.65	0.15	28.44
	48	Test1	1	63.60	148.03	147.61	0.42	66.04
	96		1	59.26	146.03	145.26	0.77	129.93
現行高炉比較材 270MPa	96	Test2	1	67.68	166.04	165.09	0.95	140.37
			2	70.08	166.55	165.62	0.93	132.70
			3	68.44	164.76	163.80	0.96	140.27

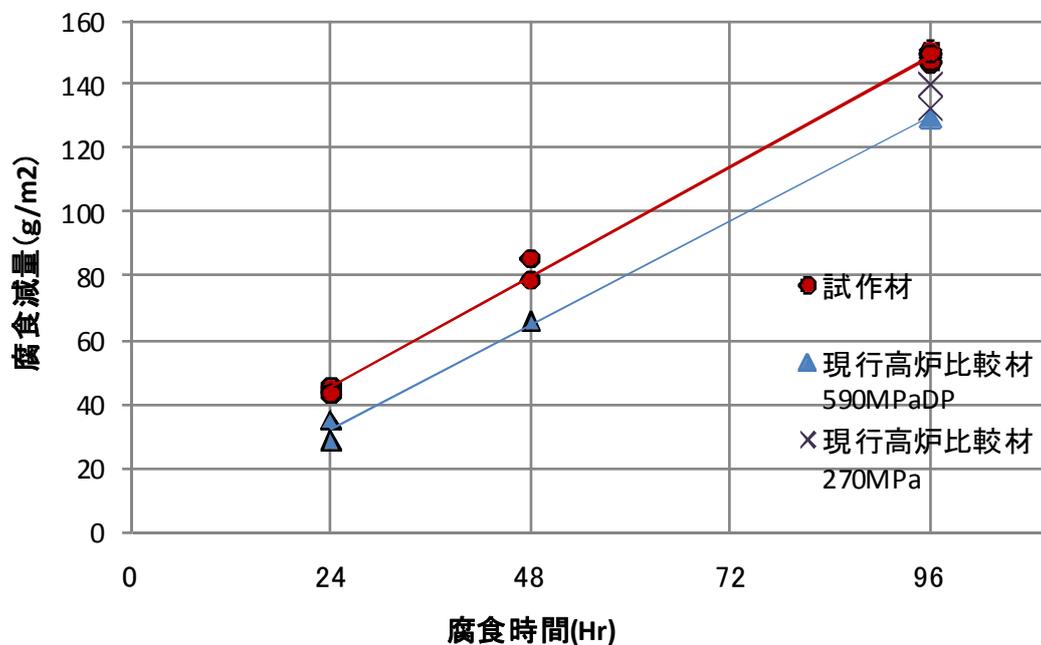
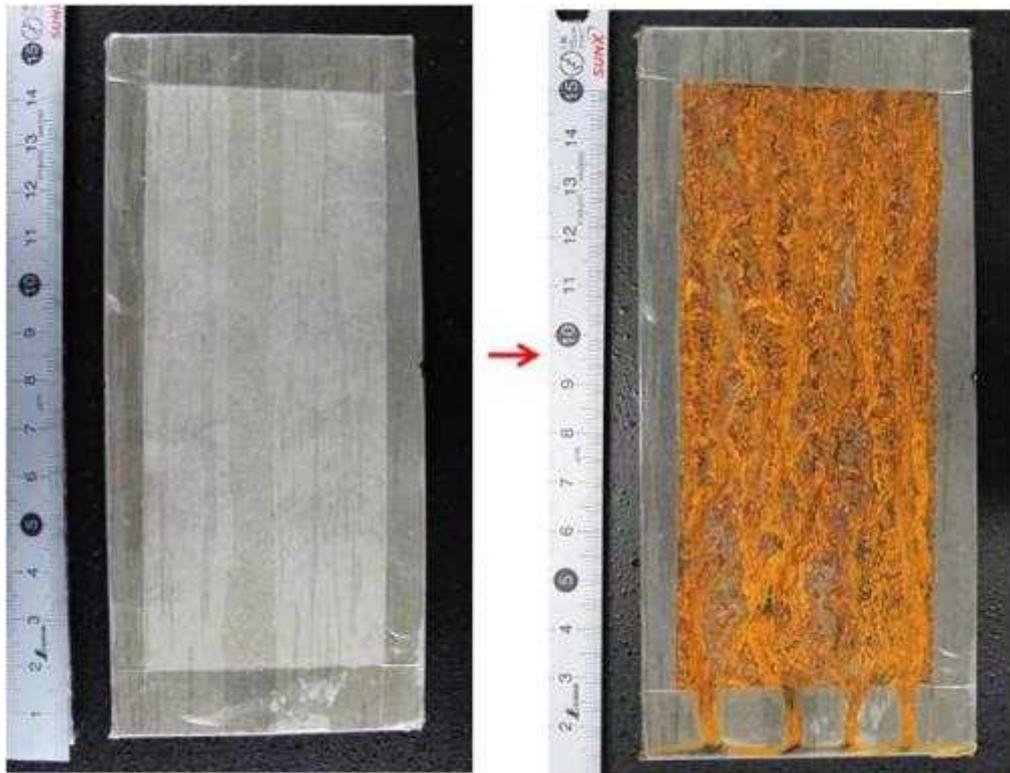
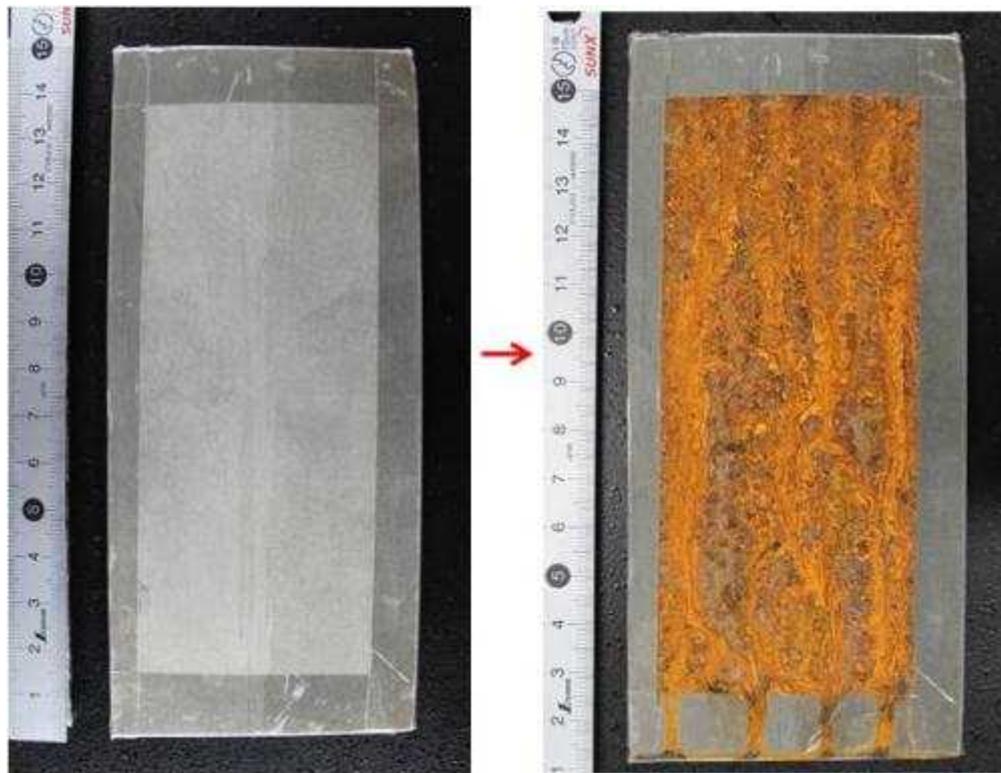


図 7.32 SST 腐食減量試験結果

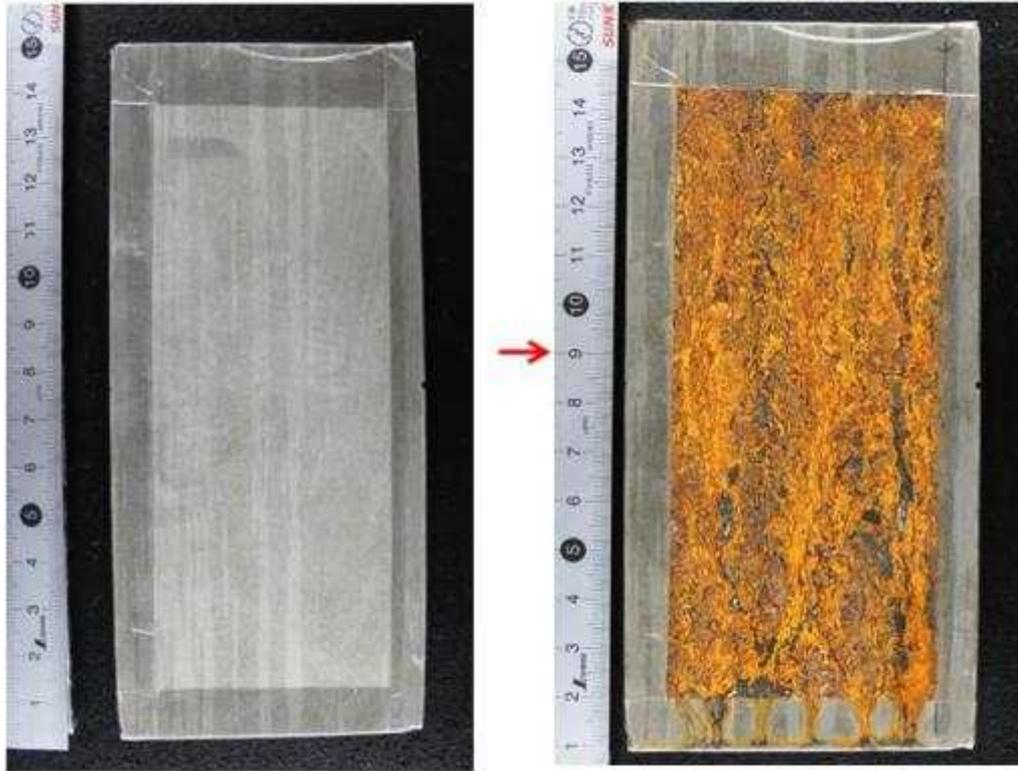


(a)n=1

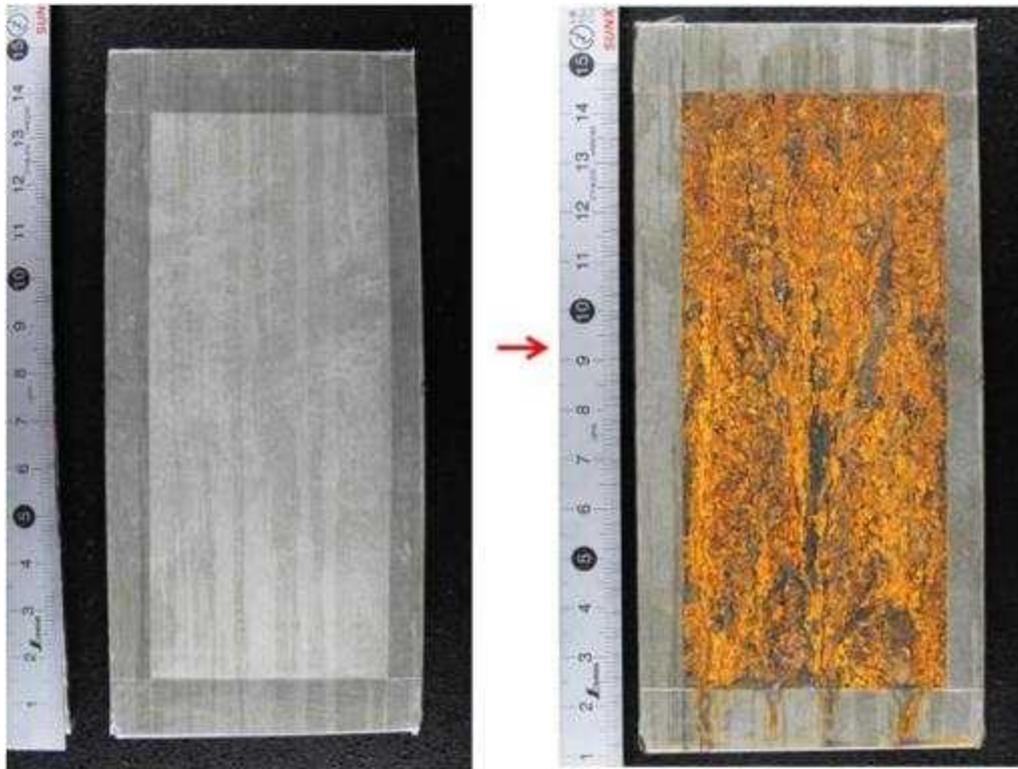


(b)n=2

図 7.33 SST 腐食減量試験片外観写真 試作材 Test1(試験前, 噴霧 24Hr 後)

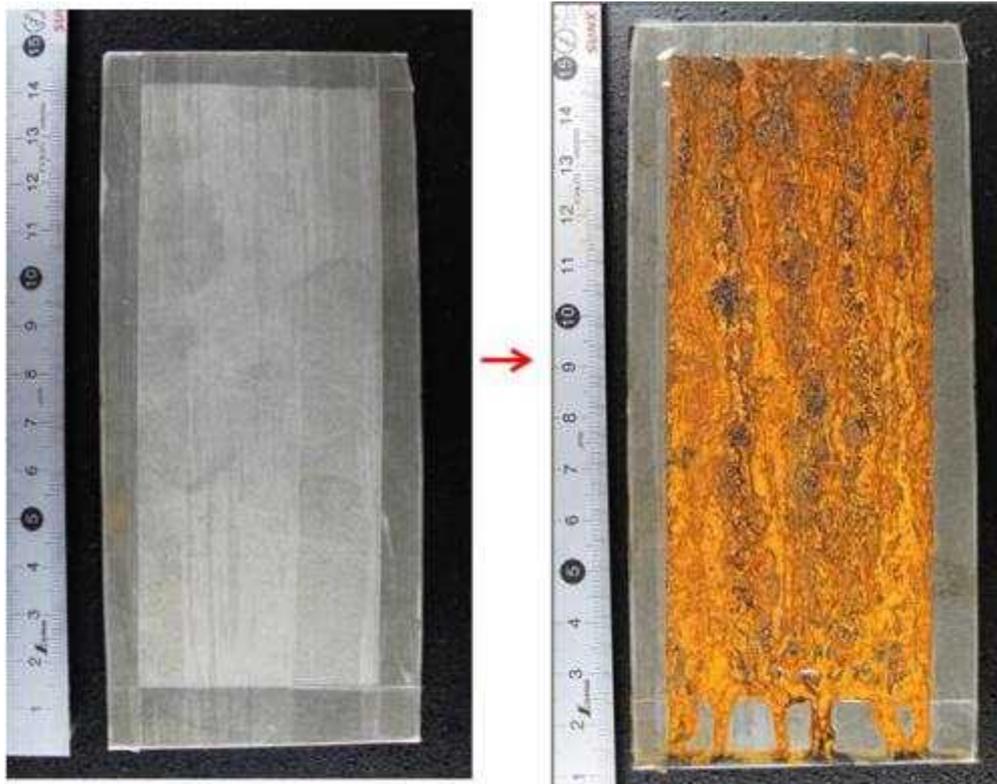


(a)n=1

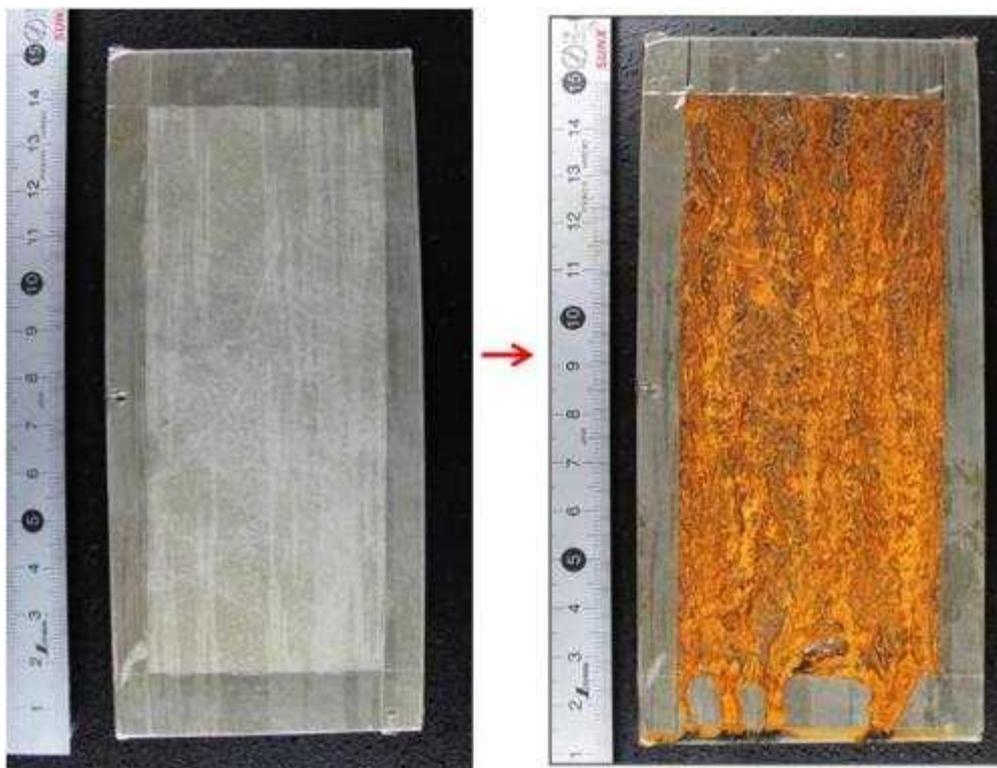


(b)n=2

図 7.34 SST腐食減量試験片外観写真 試作材 Test1 (試験前, 噴霧 48Hr 後)



(a)n=1



(b)n=2

図 7.35 SST腐食減量試験片外観写真 試作材 Test1 (試験前, 噴霧 96Hr 後)

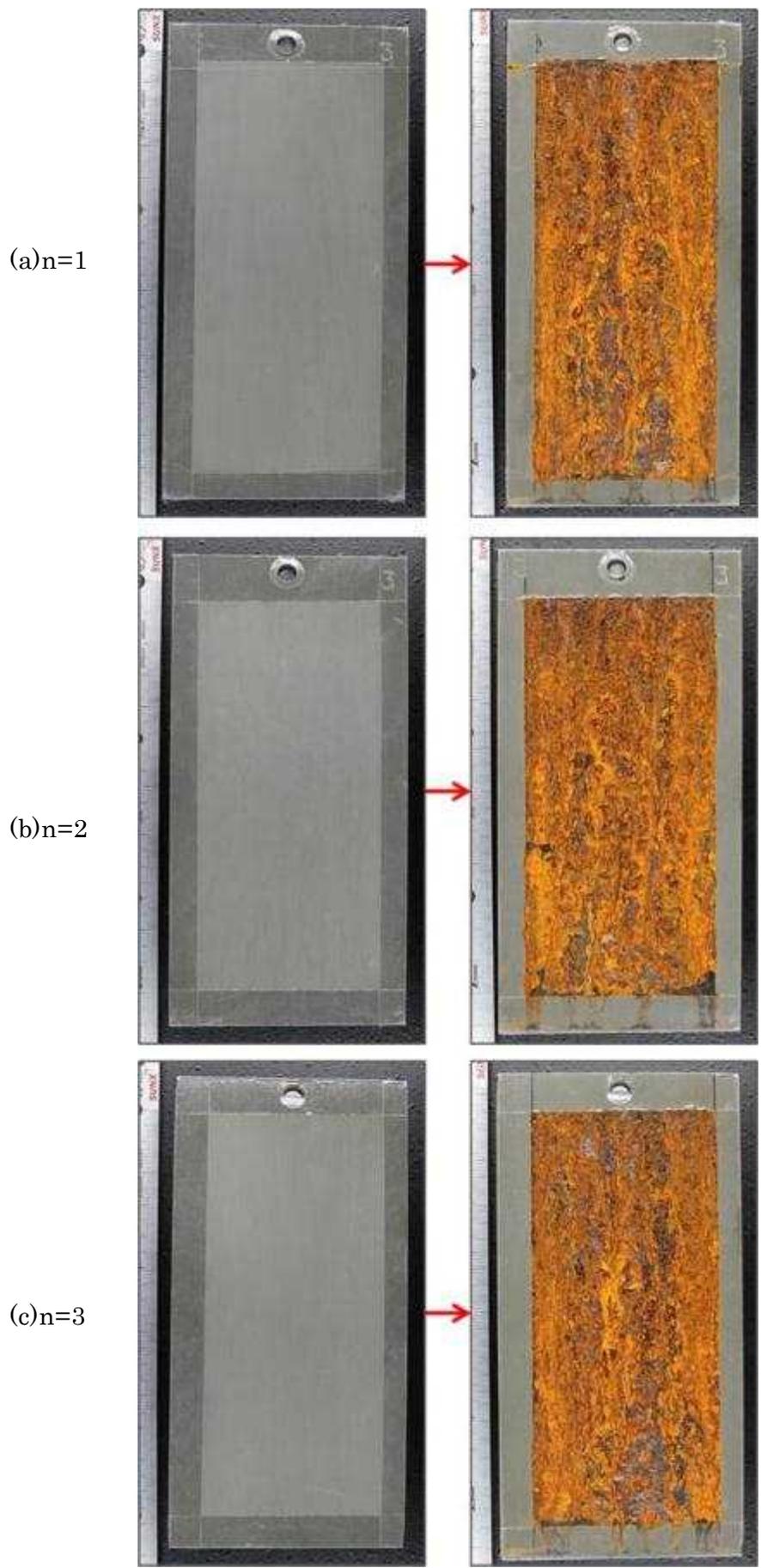
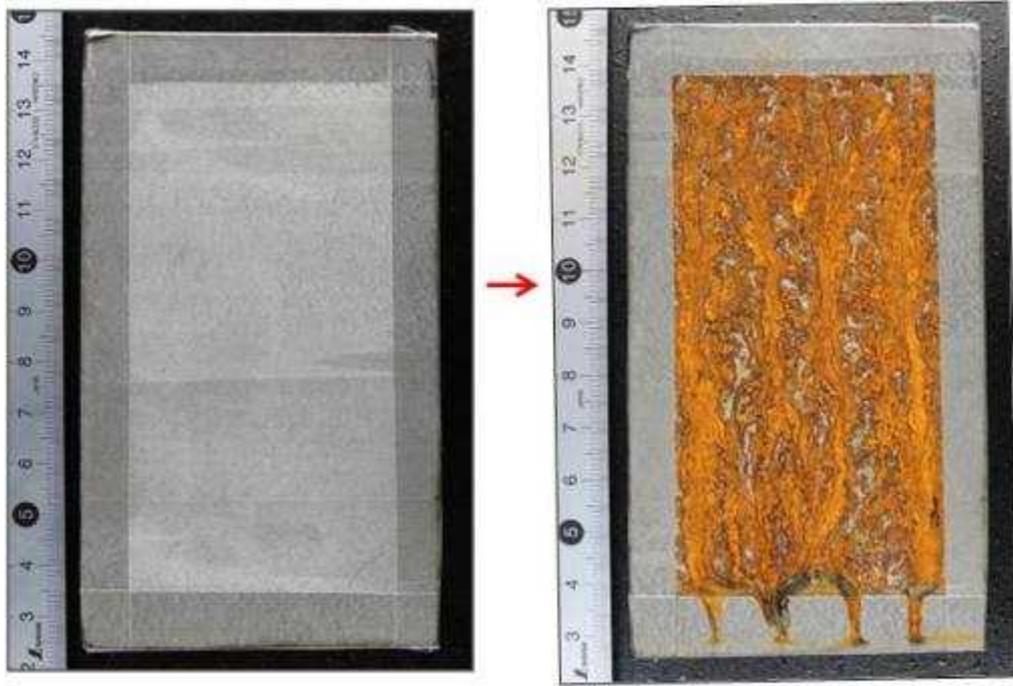
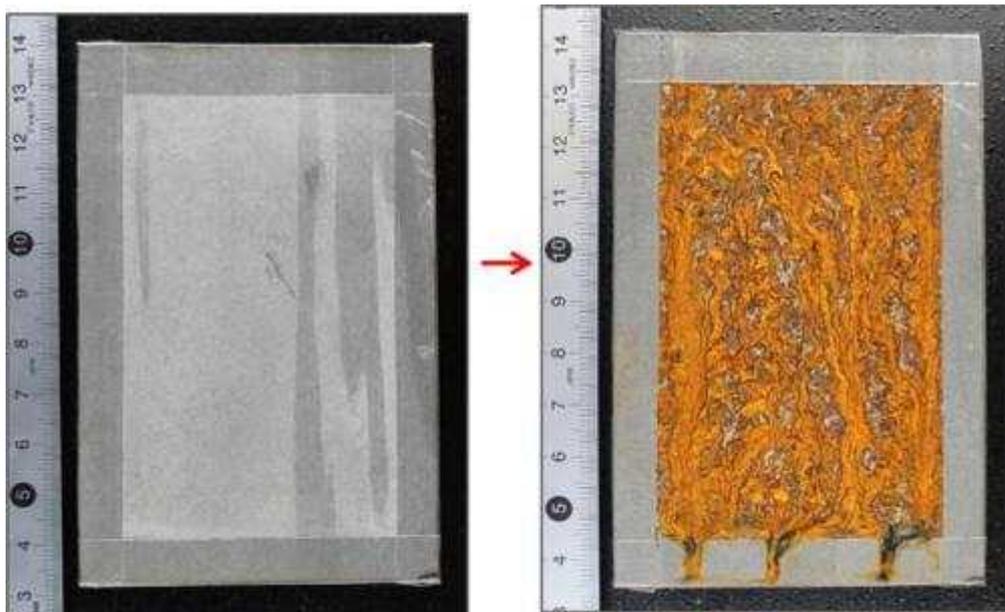


圖 7.36 SST 腐食減量試驗片外觀写真 試作材 Test2 (試驗前, 噴霧 96Hr 後)



(a)n=1



(b)n=2

图 7.37 SST 腐食減量試驗片外觀写真 現行高炉比較材 590MPaDP(試驗前, 噴霧 24Hr 後)

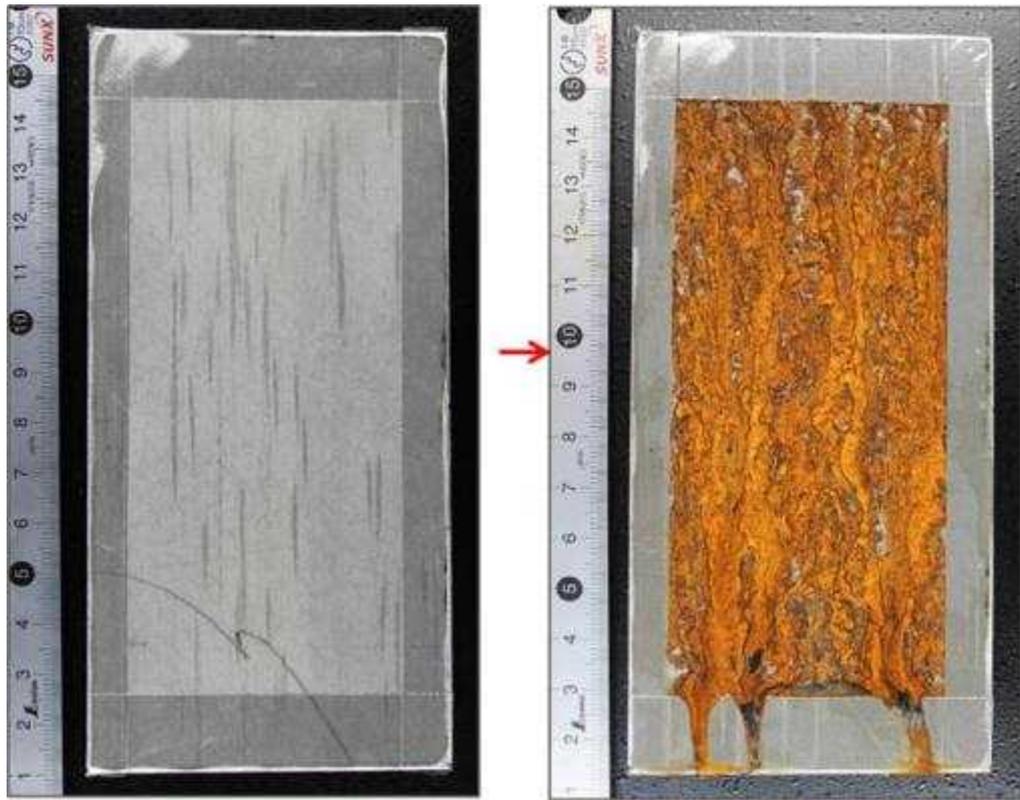


图 7.38 SST 腐食減量試験片外觀写真 現行高炉比較材 590MPaDP(試験前, 噴霧 48Hr 後)

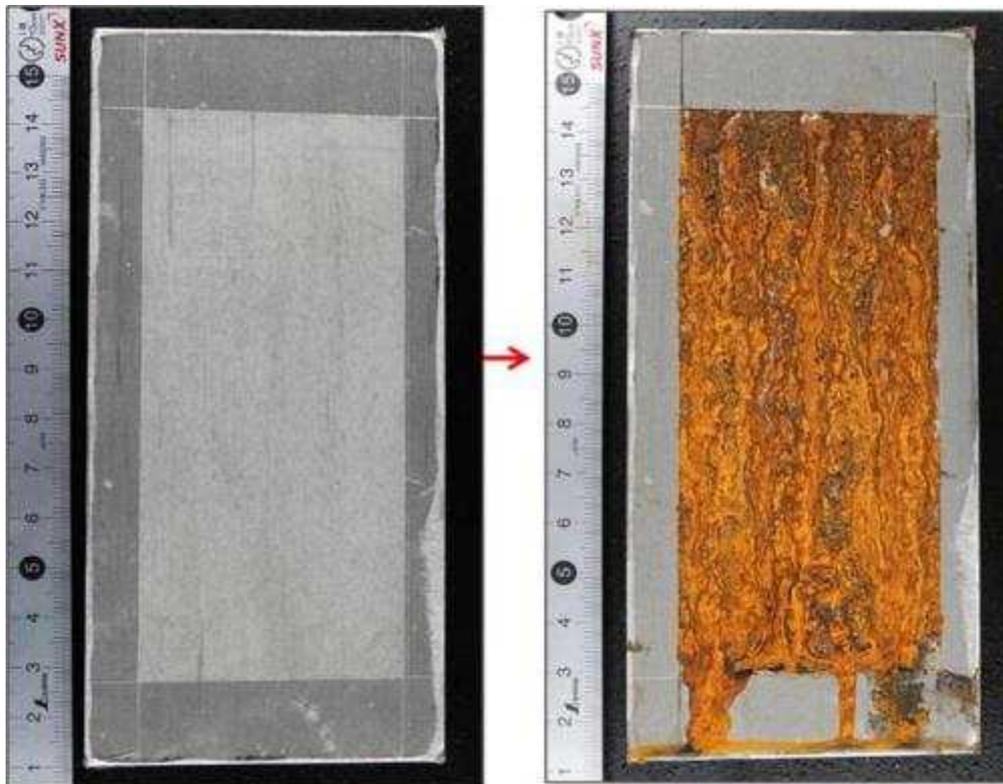


图 7.39 SST 腐食減量試験片外觀写真 現行高炉比較材 590MPaDP(試験前, 噴霧 96Hr 後)

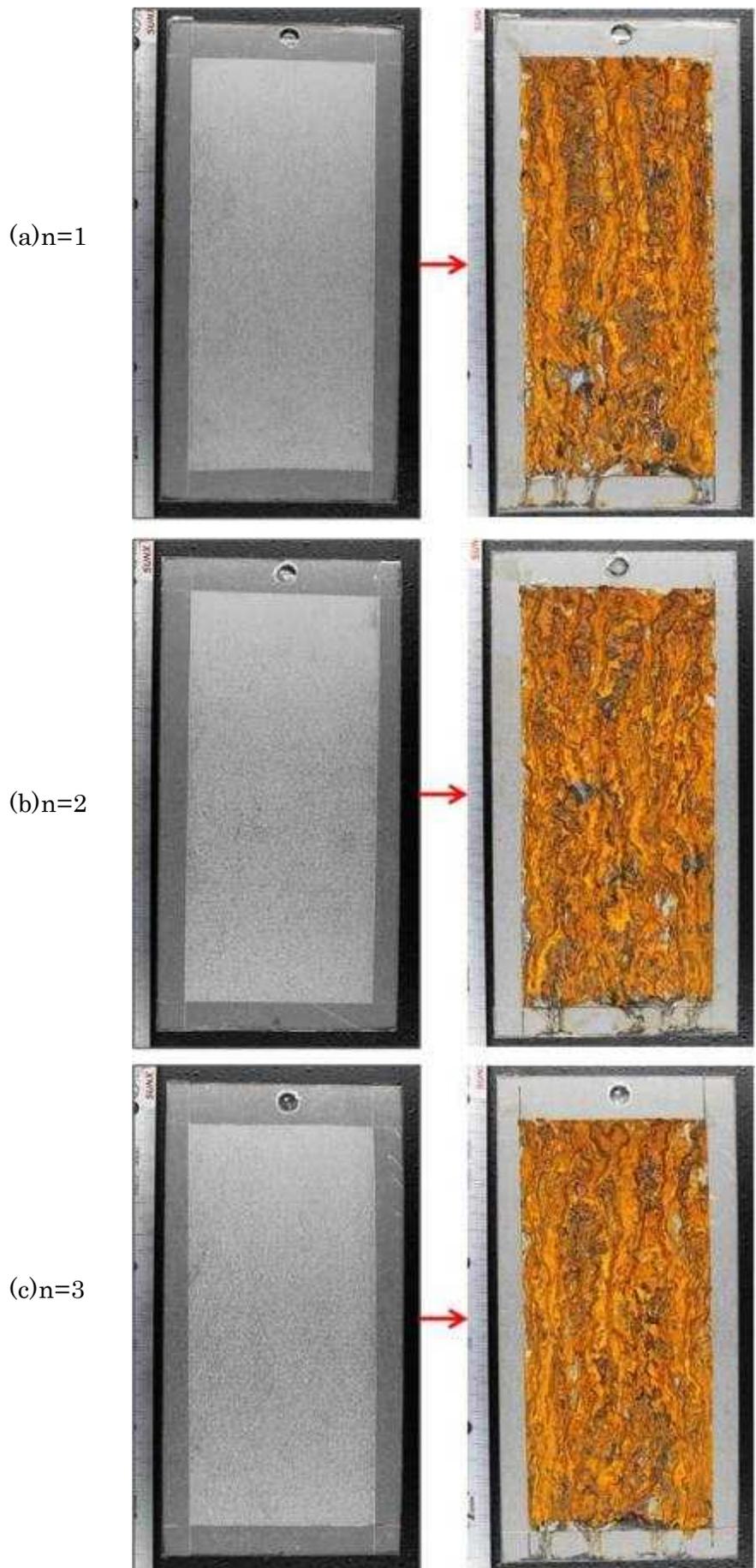


图 7.40 SST 腐食減量試験片外觀写真 現行高炉比較材 270MPa(試験前, 噴霧 96Hr 後)

(2) CCTによるクロスカット評価および腐食減量測定

CCTによる腐食減量試験結果を表 7.10 に、クロスカット試験結果を表 7.11 に示す。図 7.41～図 7.43 に試験片の外観写真を示す。また、図 7.44 にテープ剥離結果の外観を示す。

電着塗装の塗膜耐食性は、試作材と現行高炉比較材に差異は認められなかった。

表 7.10 CCT 腐食減量試験結果

供試材	n数	面積(cm ²)	重量(g)		減量	
			試験前	96Hr後	(g)	(g/m ²)
試作材	1	65.46	163.29	162.08	1.21	184.86
	2	64.31	162.61	161.77	0.84	130.61
	3	64.84	161.93	160.96	0.97	149.60
				平均	1.01	155.03

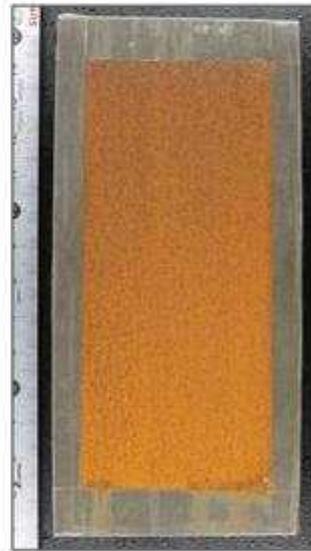
表 7.11 CCT クロスカット試験結果

供試材	n数	剥離幅	プリスタ有無
試作材	1	<0.5mm	無
	2	<0.5mm	無
	3	<0.5mm	無
現行高炉比較材 270MPa (JSH270E)	1	<0.5mm	無
	2	<0.5mm	無
	3	<0.5mm	無

(a)n=1



(b)n=2



(c)n=3



图 7.41 CCT 腐食減量試験片外觀写真 試作材(試験前, 噴霧 96Hr 後)

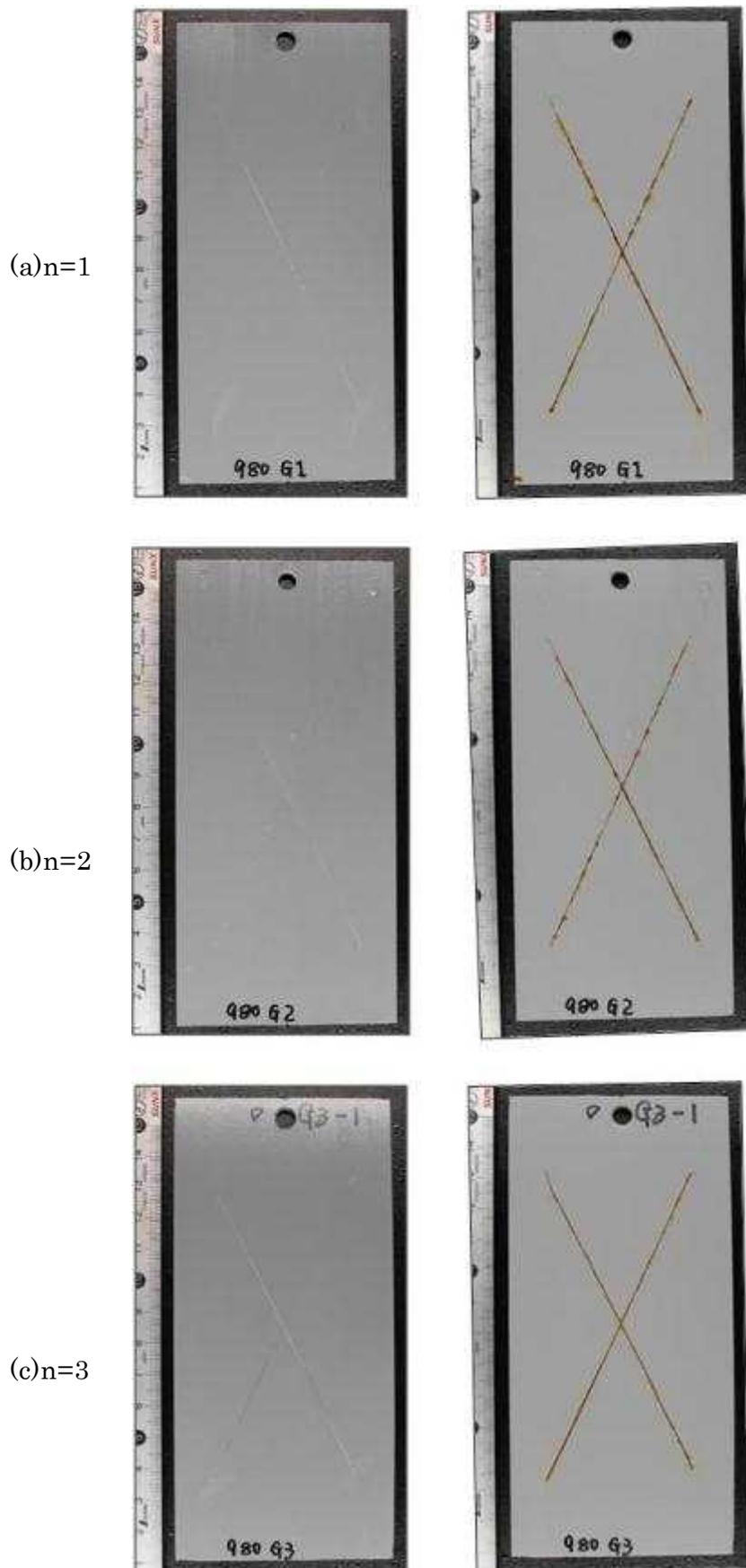


図 7.42 CCT クロスカット試験片外観写真 試作材(試験前, 噴霧 96Hr 後)

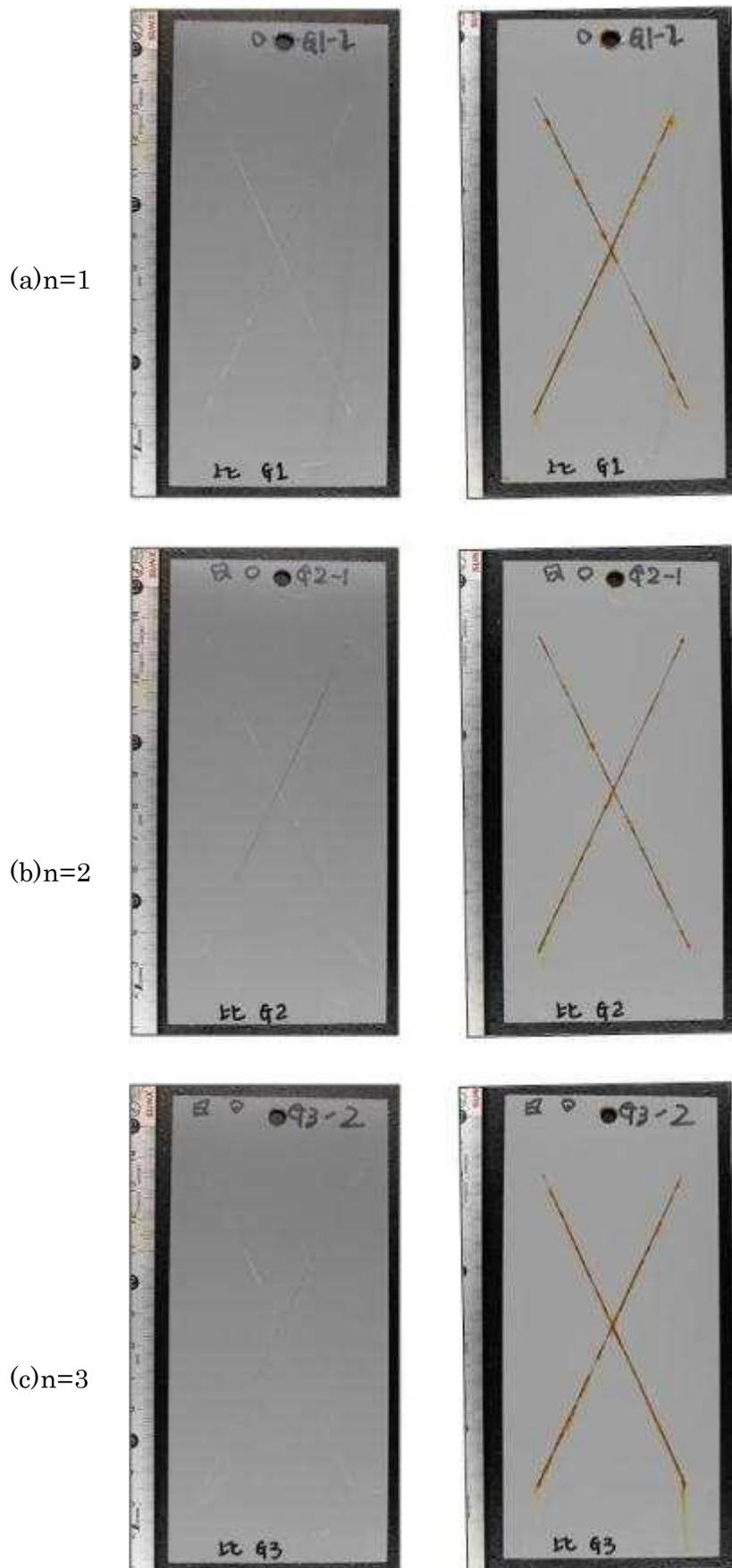


図 7.43 CCT クロスカット試験片外観写真 現行高炉比較材 270MPa(試験前, 噴霧 96Hr 後)

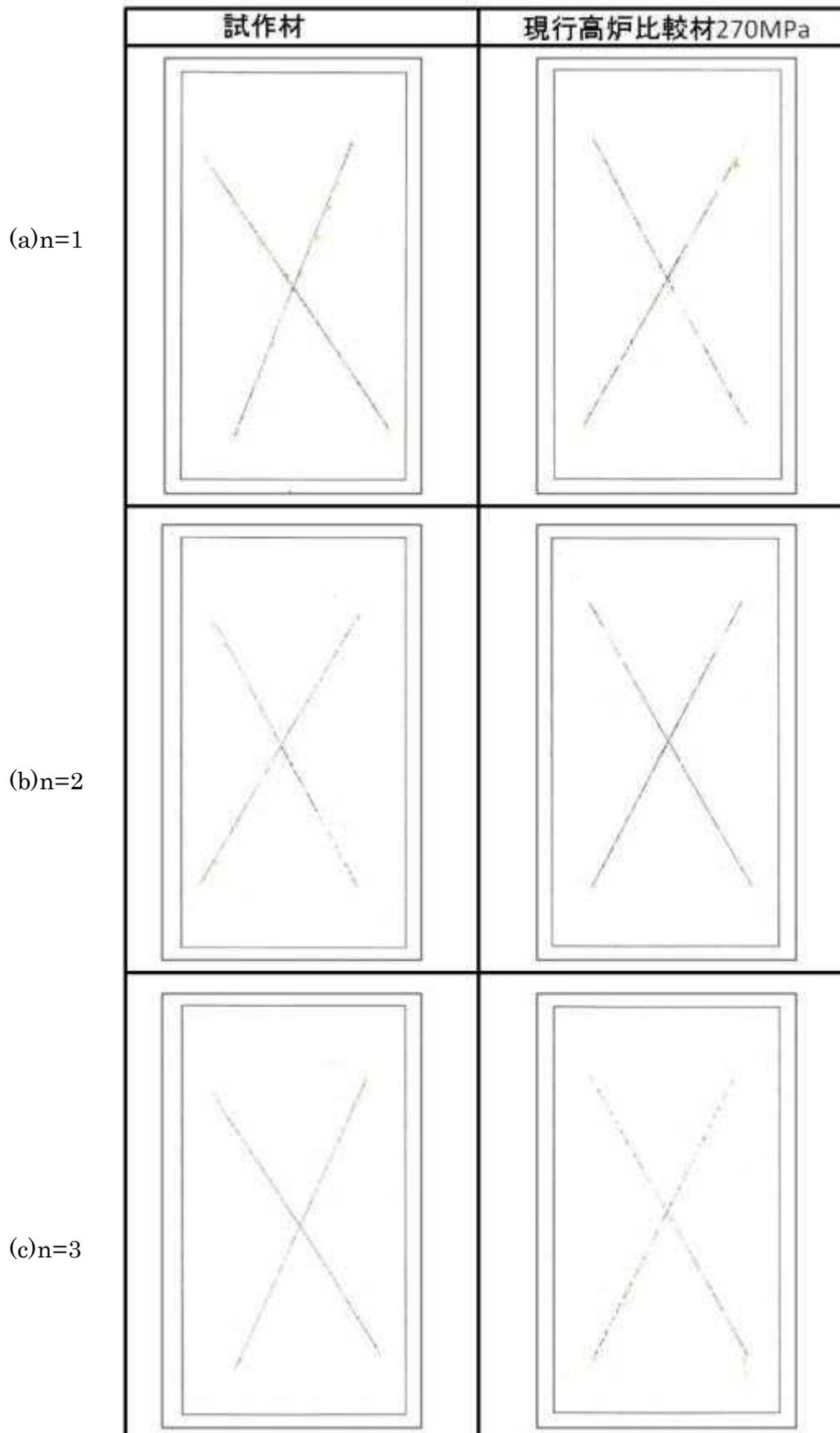


図 7.44 CCT テープ剥離結果外観

(3) SDT によるクロスカット評価および腐食減量測定

SDT による腐食減量試験結果を表 7.12 に、クロスカット試験結果を表 7.13 に示す。図 7.45～図 7.47 試験片の外観写真を示す。また、にテープ剥離結果の外観を示す。

電着塗装の塗膜耐食性は、ブリスタが数カ所認められたが、クロスカットは CCT の結果と同様で 96 時間は問題が無かった。

裸材の耐食性について、表面は赤錆ではなくパウダー状の黒色皮膜がついたような状態であった。溶存酸素しかない水中のような酸素の少ない雰囲気中では、SST とは異なる腐食状態を示す。

表 7.12 SDT 腐食減量試験結果

供試材	n数	面積(cm ²)	重量(g)		減量		
			試験前	96Hr後	(g)	(g/m ²)	
試作材	1	63.00	160.81	160.47	0.34	53.97	
	2	64.93	162.90	162.55	0.35	53.90	
	3	64.47	162.10	161.98	0.12	18.61	
				平均		0.27	42.16

表 7.13 SDT クロスカット試験結果

供試材	n数	剥離幅	ブリスタ有無
試作材	1	<1.0mm	無
	2	<1.0mm	有
	3	<1.0mm	有
現行高炉比較材 270MPa (JSH270E)	1	<1.0mm	無
	2	<1.0mm	無
	3	<1.0mm	無

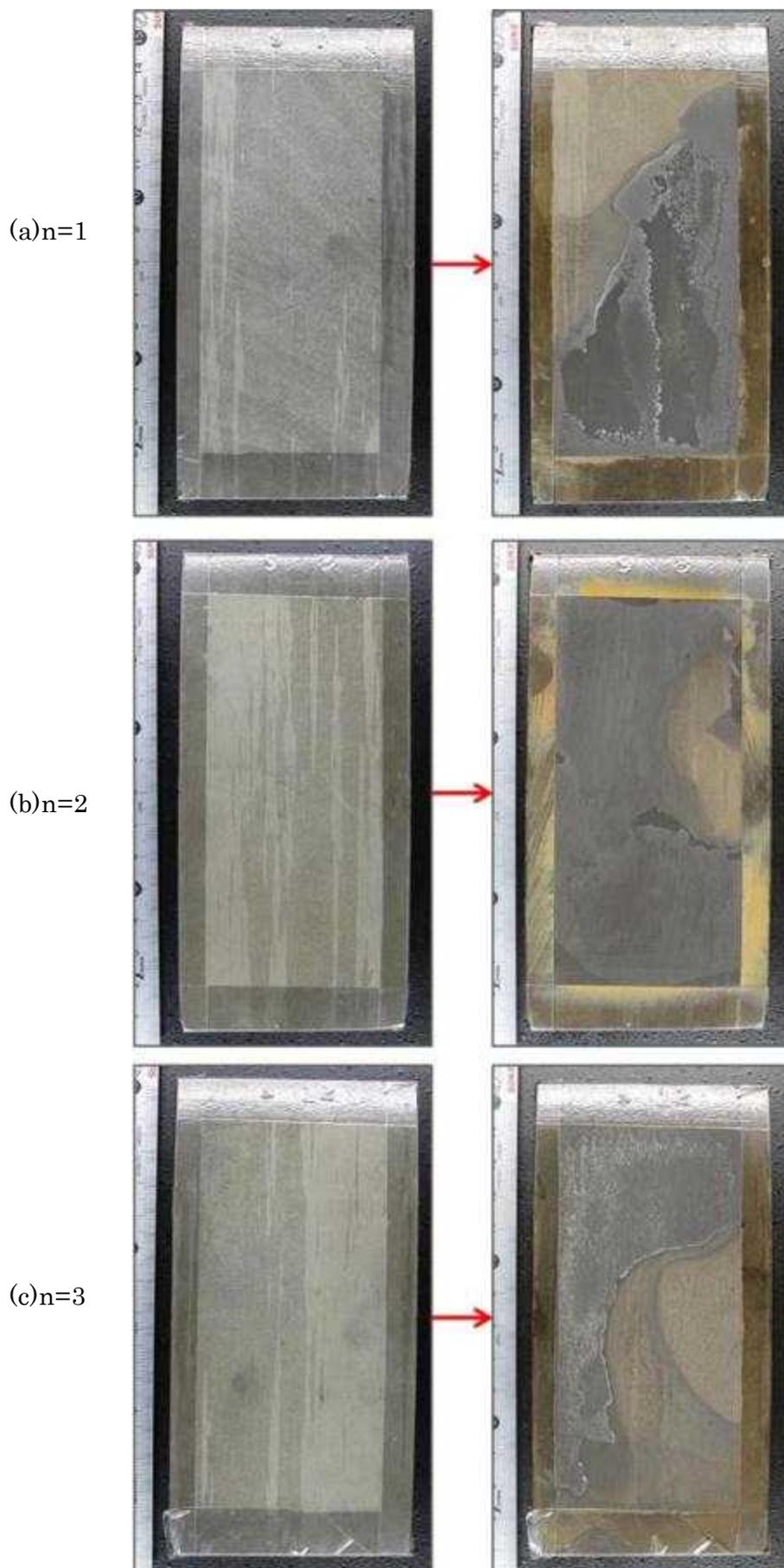


図 7.45 SDT 腐食減量試験片外観写真 試作材(試験前, 噴霧 96Hr 後)

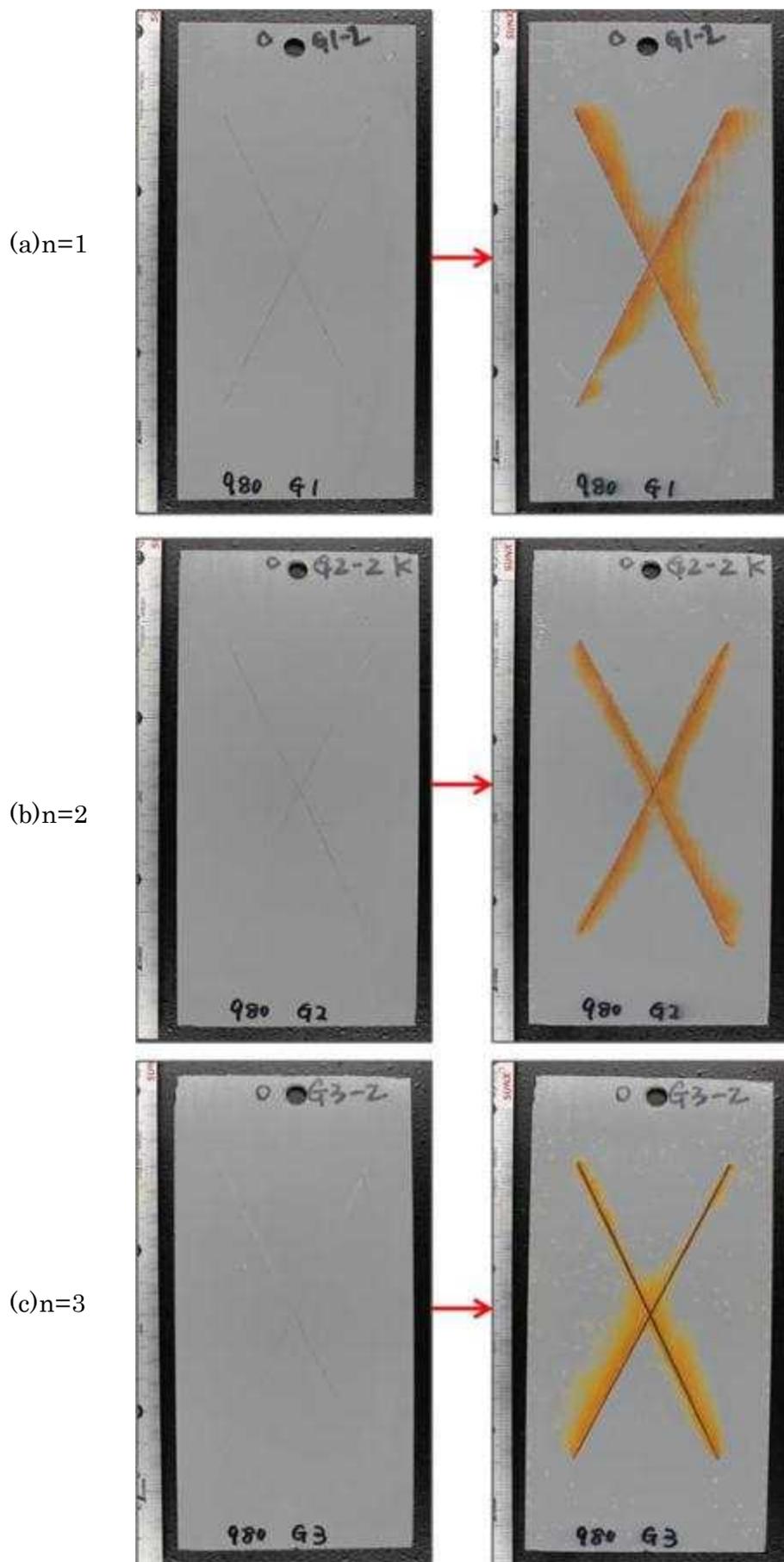


図 7.46 SDT クロスカット試験片外観写真 試作材(試験前, 噴霧 96Hr 後)

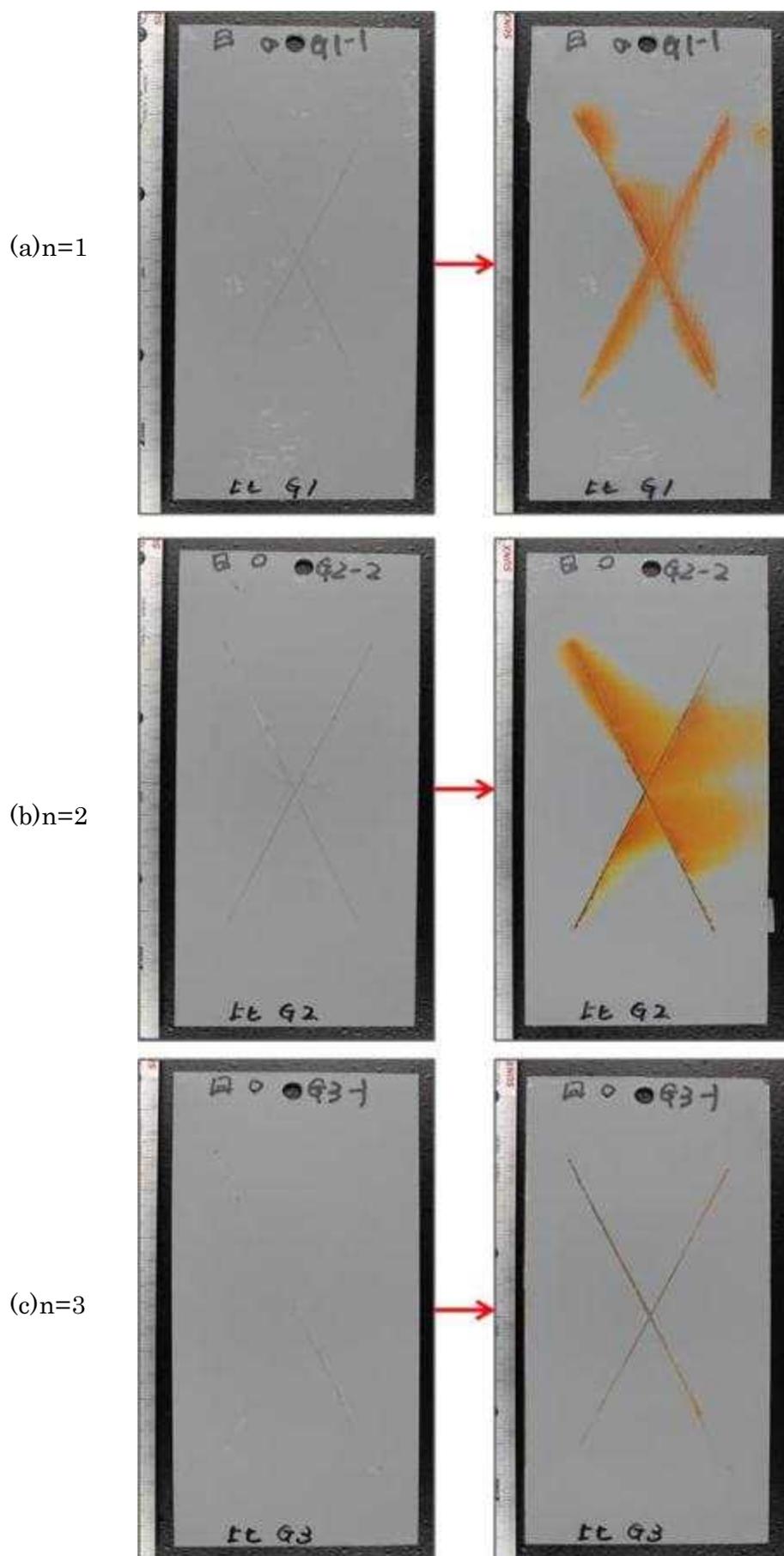


図 7.47 SDT クロスカット試験片外観写真 現行高炉比較材 270MPa(試験前, 噴霧 96Hr 後)

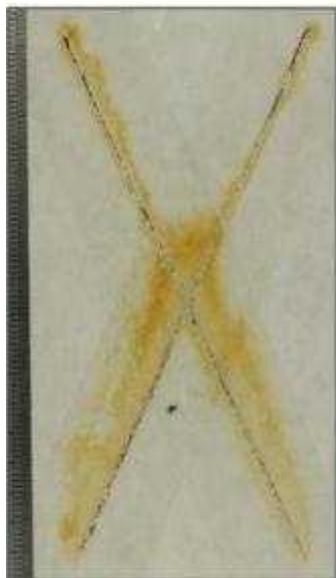
n=1



n=2



n=3



(a)試作材

(b)現行高炉比較材 270MPa

図 7.48 SDT テープ剥離結果

(4) 耐食性のまとめ

(1)~(3)の試験において、本試作材は、電着塗装性に関して現行高炉比較材と同等な皮膜密着性を有していると考えられる。

裸母材の試験結果の比較を、図 7.49 に示す。

試験方法による裸材の減量の差異について、CCT, SST は同等の減量であり、SDT は CCT, SST の 1/4 の減量であった。

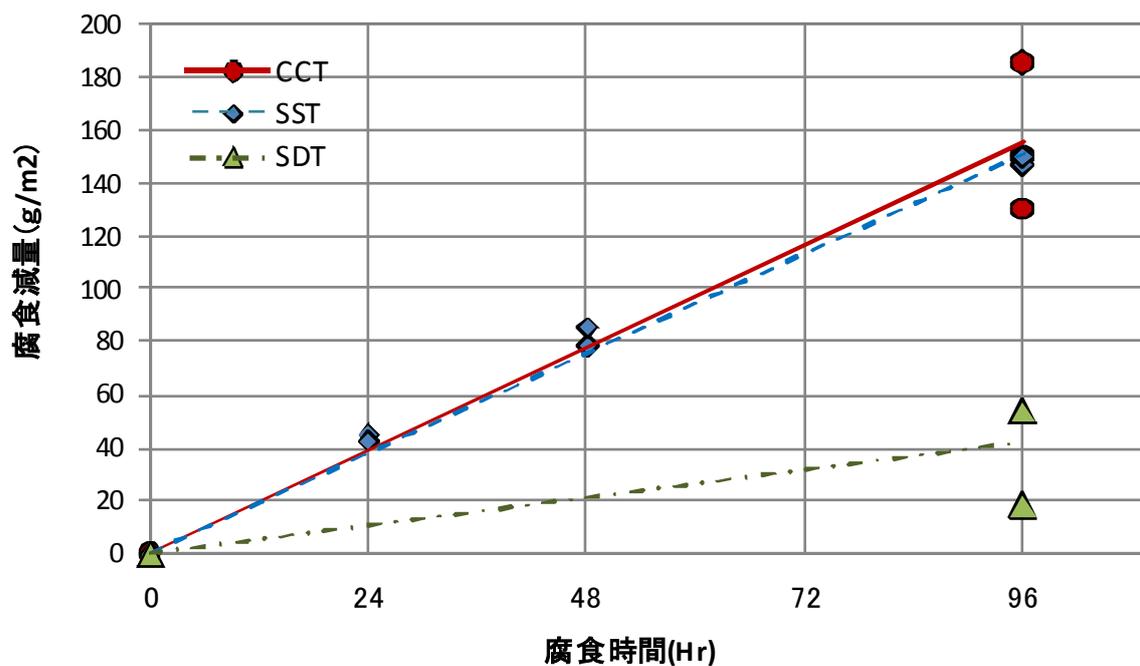


図 7.49 試作材の腐食減量試験結果の比較

7.2.5 ハット部材の衝撃特性

ハット部材のスポット溶接条件を最適化することで、部材の安定的座屈変形が確認された。衝突部材系の材料として、今後の実用化検討のベースに十分なり得るものと考えられる。以下、検討内容を示す。

ハット部材3体で実施した落重式衝突試験の結果を、表 7.14および図 7.50～図 7.53に示す。試験時のノイズ除去のため、遮断周波数 1kHz相当のフィルタ処理(21点移動平均)を行った場合の解析結果も合わせて示す。試験前後の部材外観写真は、図 7.54～図 7.57に示す。

まず、図 7.51～図 7.53の荷重-変位線図をみることにする。変形初期に大きな荷重ピークがでるが、これは部材が座屈開始に伴うピークと考えられる。反力をロードセルで計測しているため、ロードセルの固有振動と反力特性が重なって荷重となっている結果となっている為、正確なことはわからないものの、変位 20mm～35mmにおいて、荷重ピークの乱れがあることから、規則正しい座屈変形を乱すものが発生した可能性が考えられる。

一方、試験前後の部材外観写真(図 7.55～図 7.57)では、スポット溶接部が口開きをしており、また、そこを起点にした亀裂発生がみられる。その拡大を

図 7.58に示す。これらの挙動は反力低下をもたらすものと考えられる。

この現象は少なくとも、車体にとっては好ましいものではなく、一連の現象の原因を絞り込むため、静的な圧潰試験にて変形挙動を観察することとした。尚、ハット部材試作時のスポット溶接条件は2段通電で最適条件を検討したが、その条件を用いた。更に、スポット溶接部の打点ピッチは、衝突系部材の標準的な 25mm と、今回の衝撃試験に供した部材の打点ピッチ：50mm で衝撃試験に供したものと同様のハット部材を試作した。

上記部材の静的圧潰試験における変形外観写真を図 7.59に示す。また、その時の反力-変位線図をエラー! ブックマークが自己参照を行っています。に示す。いずれのスポット溶接打点ピッチの部材においても、スポット溶接部の剥離は見られず部材は座屈変形していた。前述の衝撃試験では部材試作におけるスポット溶接の通電条件が適正化されていなかった為、接合部剥離が発生した可能性が考えられる。スポット溶接条件適正化した部材衝撃試験での安定座屈は、今後確認していく必要がある。前項でのスポット溶接条件最適化が示す通りの好ましい結果になっており、衝突対応部材としても十分実用検討のベースにあると考えられる。

表 7.14 落重式衝突試験結果

試験体No.	初速度 km/h	最大荷重値		吸収エネルギー値(0-100mm間)	
		計測値 kN	21点移動※ 平均値 kN	計測値より 算出 kJ	21点移動 平均値より算出 kJ
1	48.7	874	555	15.6	15.5
2	48.9	863	543	17.6	17.4
3	48.5	747	522	16.0	16.0

※) サンプリング速度50kHzに対して、遮断周波数1kHz相当フィルタ処理を行った値。

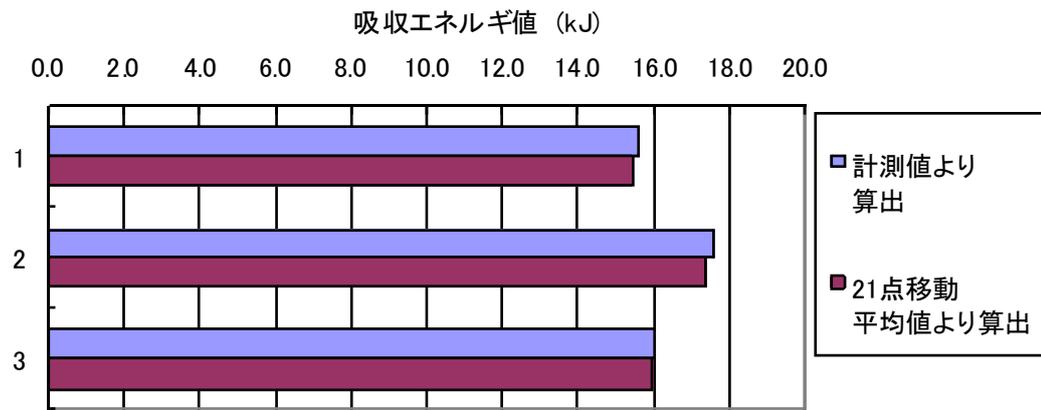
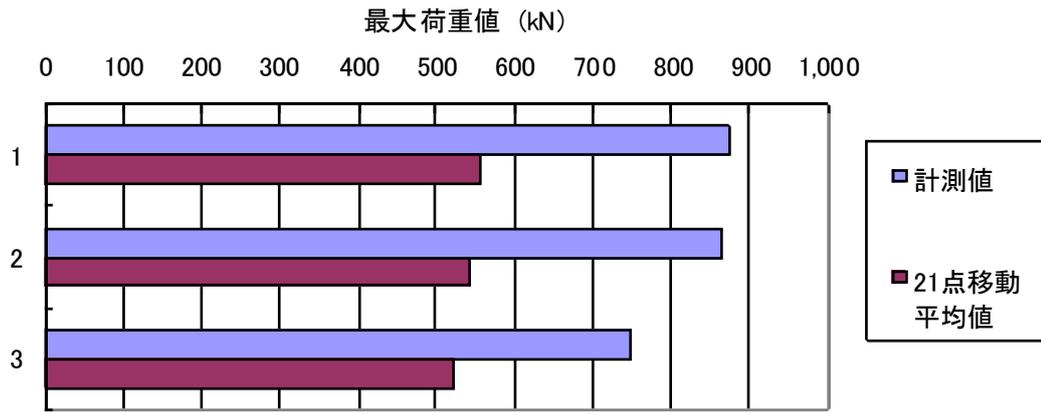
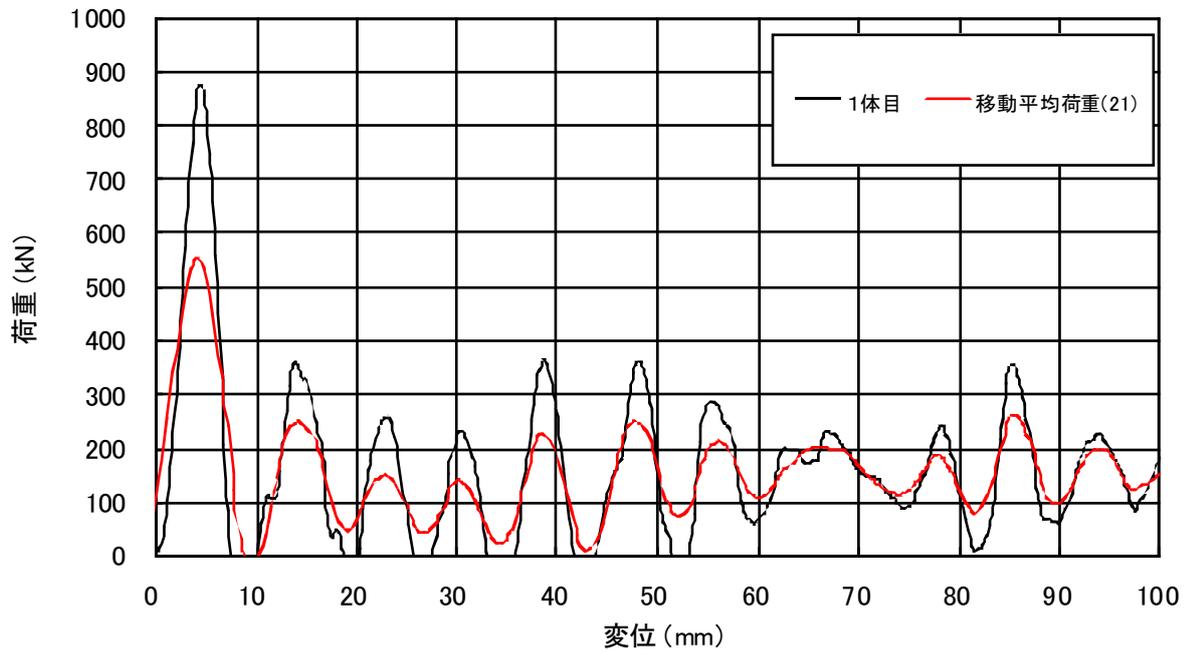
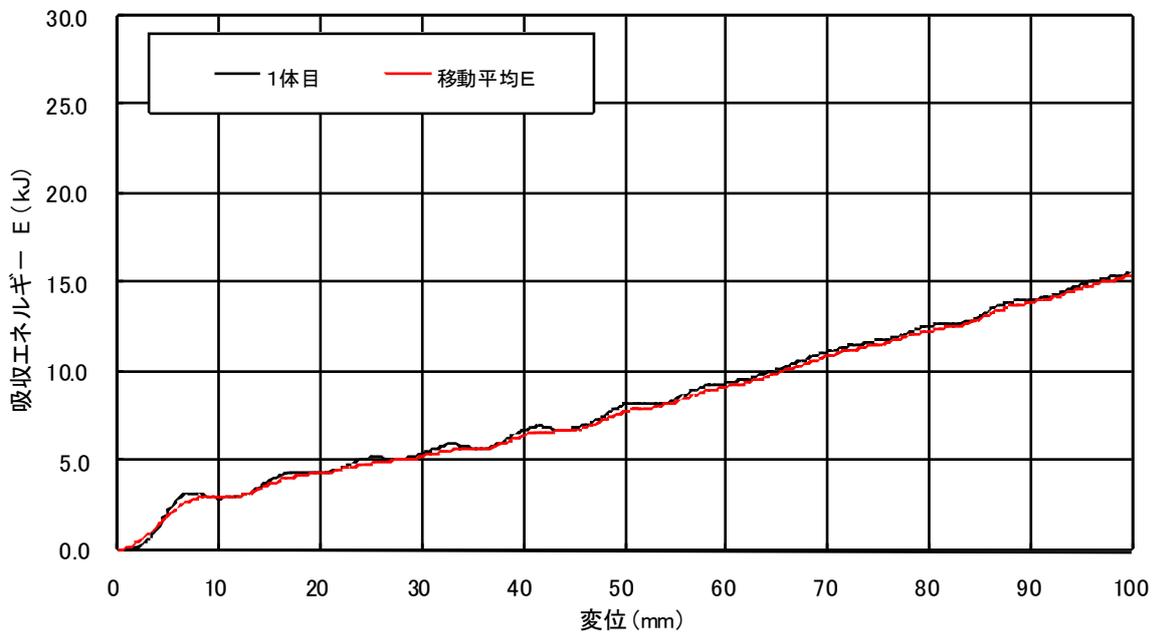


図 7.50 落重式衝突試験結果(最大荷重と吸収エネルギー)

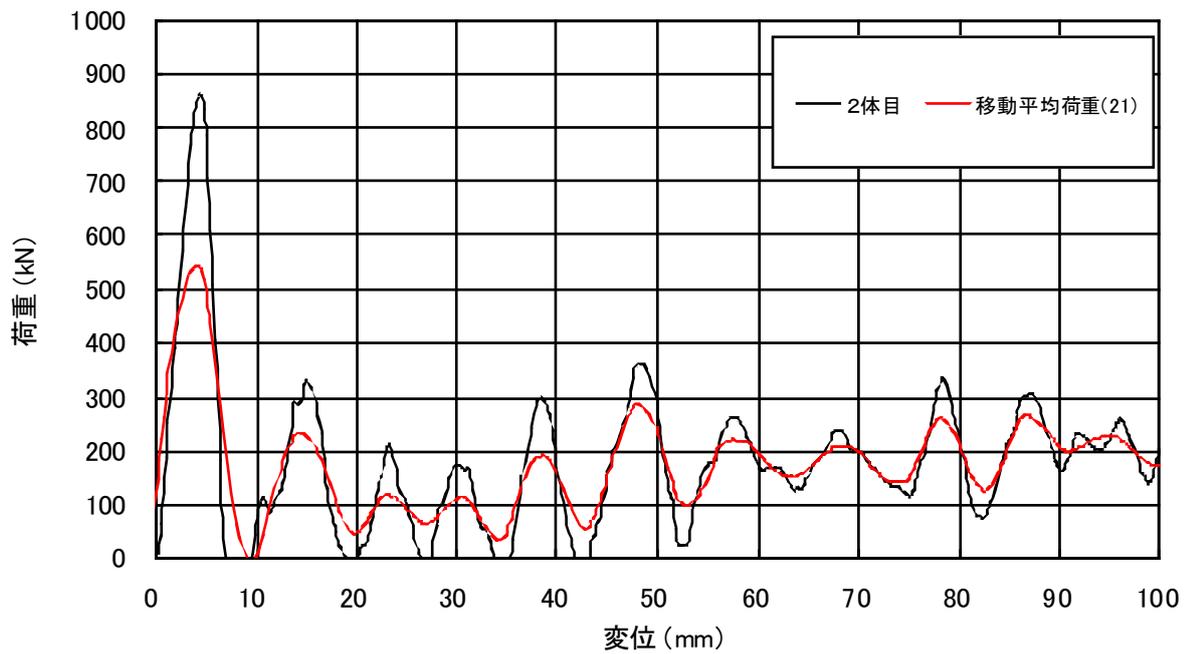


荷重-変位の関係

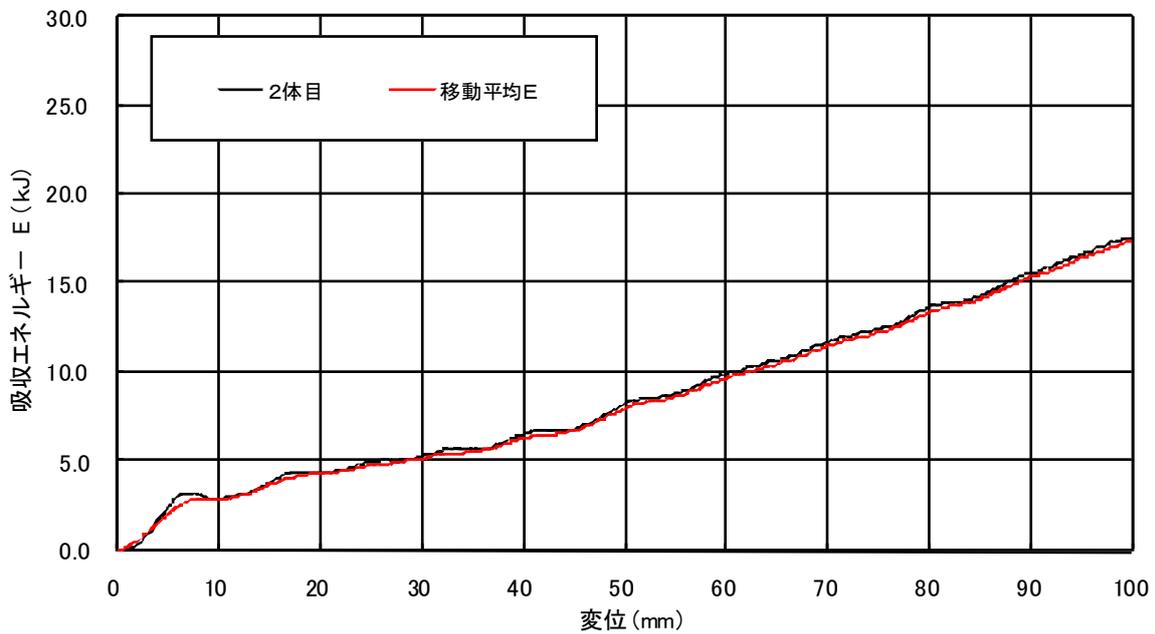


吸収エネルギー-変位の関係

図 7.51 落重式衝突試験結果(No.1)

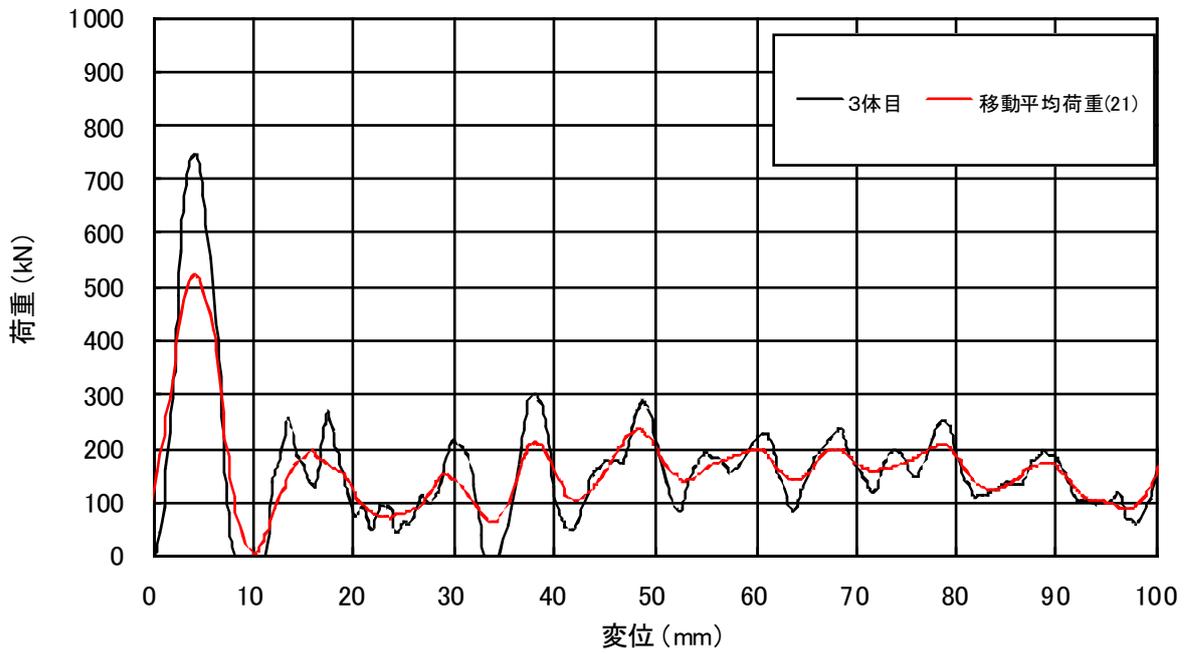


荷重-変位の関係

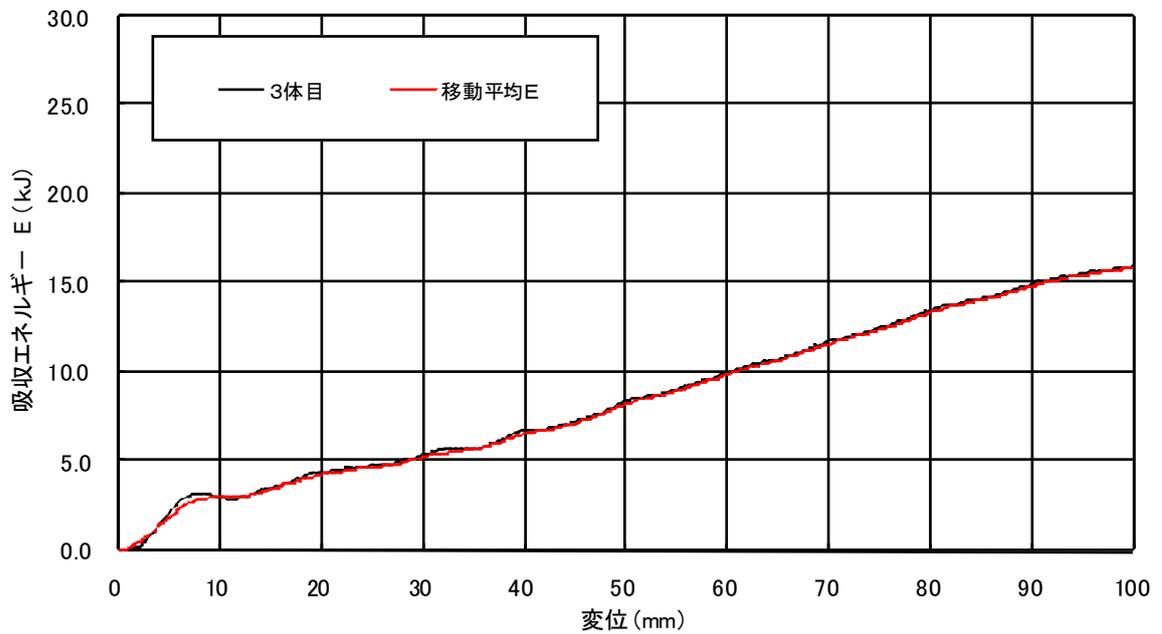


吸収エネルギー-変位の関係

図 7.52 落重式衝突試験結果(No.2)



荷重-変位の関係



吸収エネルギー-変位の関係

図 7.53 落重式衝突試験結果(No.3)



図 7.54 ハット部材外観写真(試験前)



図 7.55 試験前後の部材外観写真(No.1)



図 7.56 試験前後の部材外観写真(No.2)



図 7.57 試験前後の部材外観写真(No.3)



図 7.58 試験後部材拡大写真(No.1)

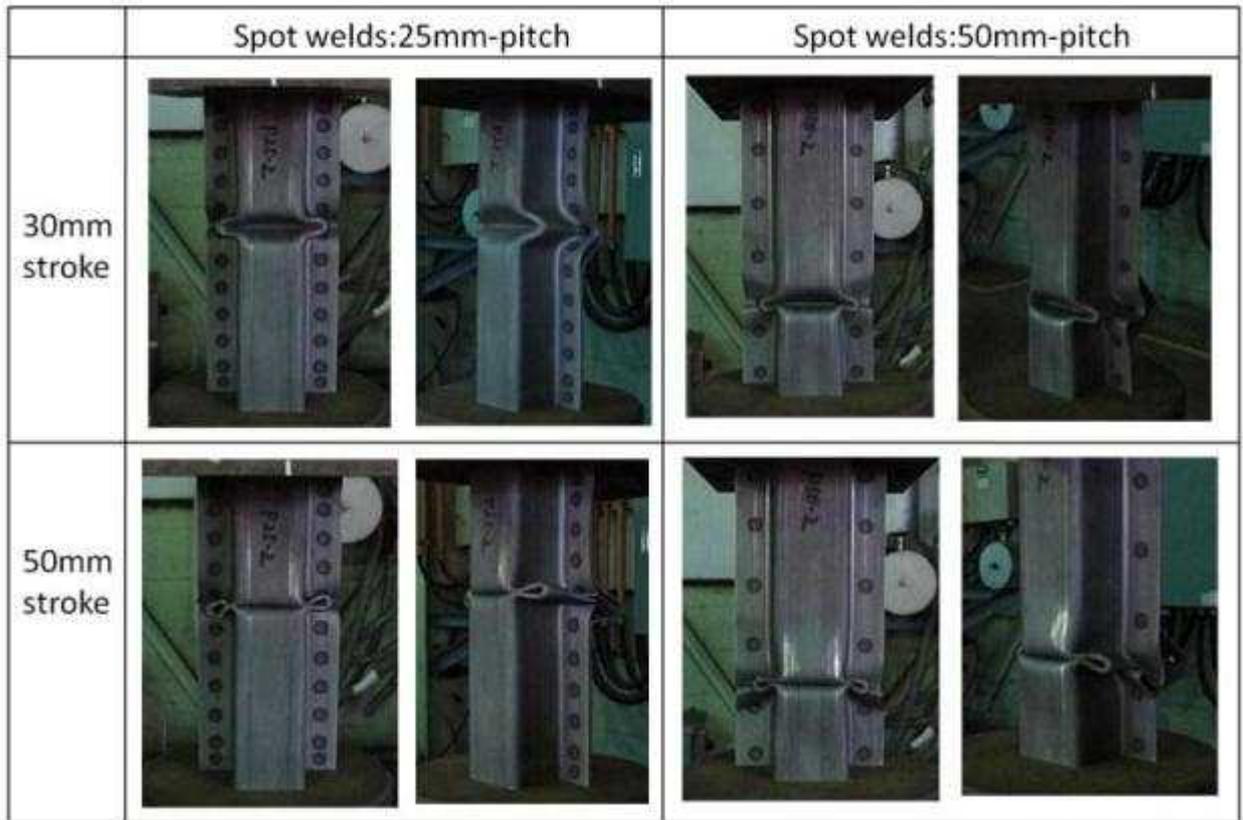


図 7.59 静的圧潰試験における変形外観写真

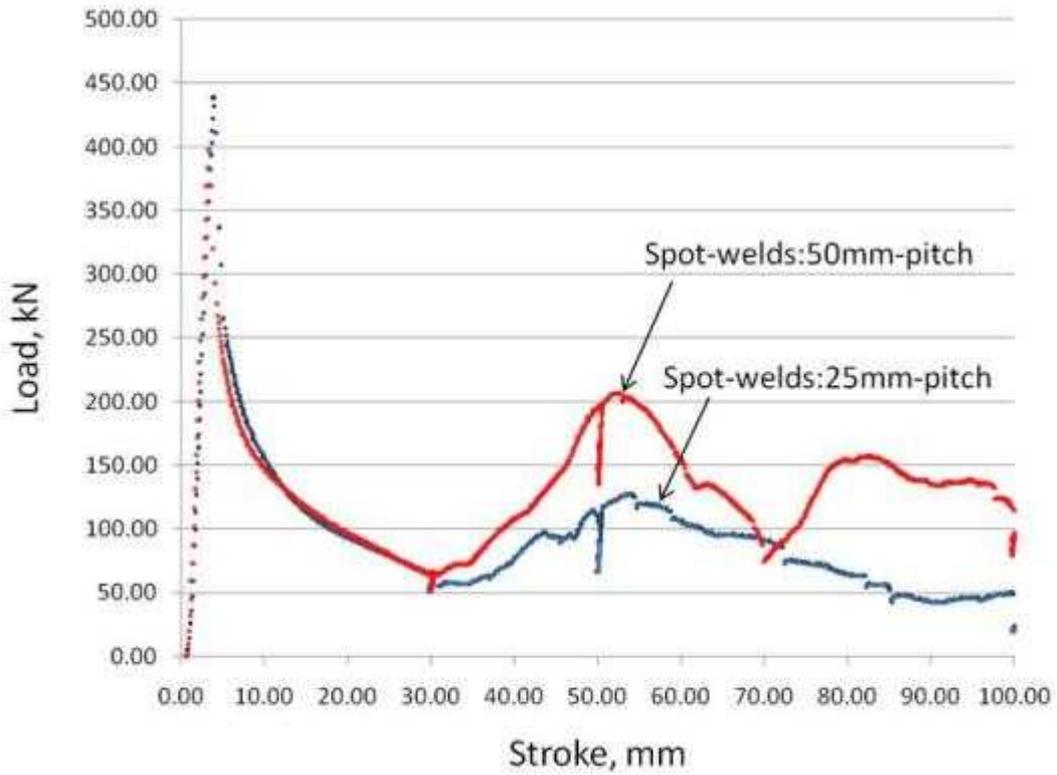


図 7.60 反力—変位線図

8. 評価

本試作における結果をまとめると、

- ・量産ラインでの鋼材の試作ができた。
- ・試作材は、引張強さ TS 590MPa 以上が達成でき、かつ、現行高炉材 980MPa 相当以上の TS×EL が得られた。(図 8.1)
- ・強度特性は、コイル全長の大部分において安定したものが得られた。
- ・車体鋼板の高張力化の要求に応えられる水準(強度レンジ：1000～1200MPa)のものが得られた。
- ・スポット溶接は母材破断であり、安定的破断モードを示した。それは、以下の方策による。

- a)加工熱処理による微細 γ 粒化をベースとした。
- b)微細ベイナイト基地組織とすることで、高強度と伸びを両立させた。

このような組織創製のプロセスにより、590MpaDP 以上 980MPa 相当の高強度高延性の自動車用熱延鋼板をスクラップを主原料とする電気炉鋼板から製造することができた。

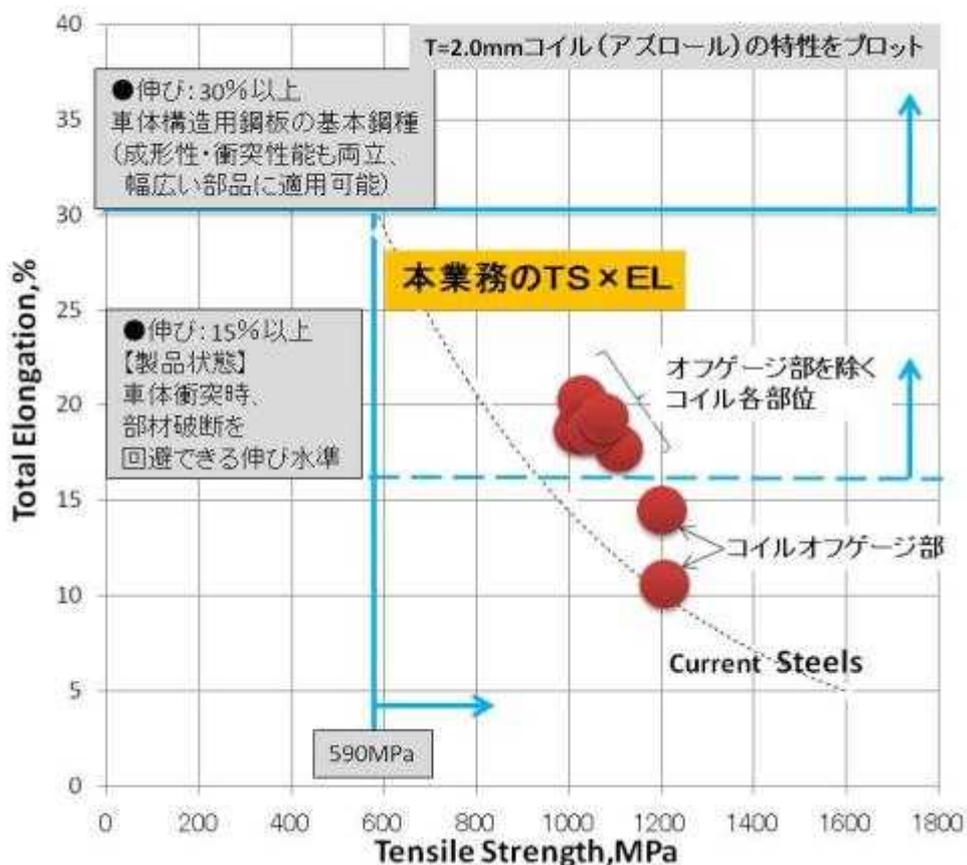
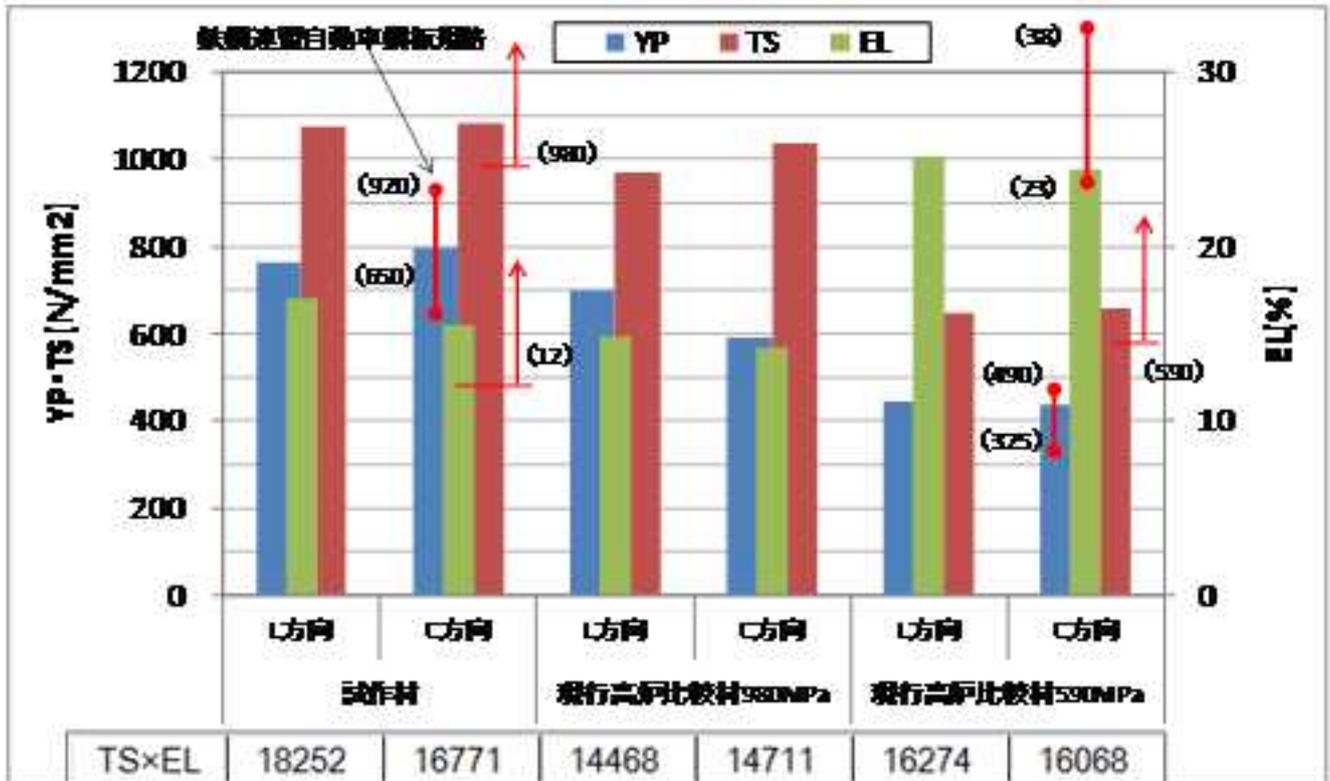


図 8.1 試作材の機械的特性

9. 自動車用鋼板の要求事項と本試作の意義・課題

9.1 引張試験結果の自動車用鋼板規格との比較

本試作材の強度特性と現行高炉材の比較を図 9.1 に示す。試作材は、鉄鋼連盟自動車用鋼板規格に対して、尤度をもっていることがわかる。



※熱延 980 は、鉄連規格が無いいため、冷延 980 の規格レンジを記載した。

※図は、平均値を示す。

図 9.1 試作材と現行高炉材 980MPa 材・590MPa 材の比較

電気炉鋼板において、590MPa 材の性能を十分満足し、さらに 980MPa 材相当の鋼板を製造できることは明らかである。

9.2 本件相当のグレードのスクラップの入手性と競争力

本試作のスクラップは、残湯と装入したスクラップ(国内ヘビー46550kgと新断 43350kg)からなり、ほぼ 50 : 50 の構成である。

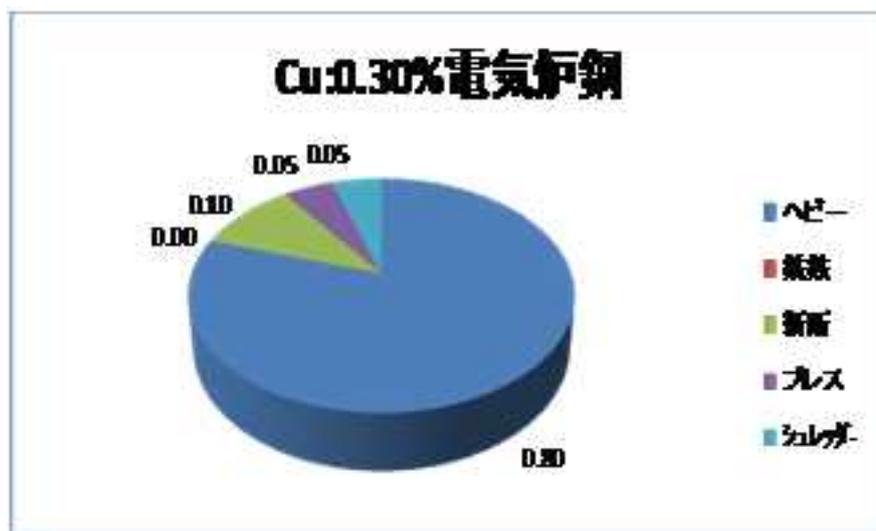


図 9.2 当社の平均的な購入スクラップ品種の構成比

ただし、図 9.2 に示すとおり、弊社は市場スクラップ構成をそのまま受け入れており、ほとんどがヘビーである。試作材においては、

a) 弊社は、今回の様な高合金系の成分の製造実績がない。そのため、精錬工程(化学成分の調整段階)にてスラグ-鉄反応が温度推移により、どの様になるか想定が困難であった。このため、新断屑を通常よりも多く配合することで、初期にはなるべく純鉄に近い成分からスタートして、合金添加量と溶鋼温度を微調整する事とした。従って、実績が積み上がれば、新断の使用構成比率はこの限りではない。

b) 新断は、部品をプレス製造する時に発生する加工スクラップであり、Car to Car を考えるとそのボリュームの大きさから、主要な鉄源になる。加えて、ELV 中には有効元素が多く含まれており、新断屑に併せて有効利用が重要と考えている。今回は、そのような観点から、新断とヘビーの二つを組み合わせる配合とした。

自動車会社とのスクラップ・鉄製品フローは、直接流通のため、量と価格が安定し、高い競争力を生むことが期待される。

スクラップ中に含まれるトランプ元素の平均組成は、Cu0.25~0.3%、Cr0.2%、Ni0.1%、Sn0.02%、Mo0.03%(当社購入)である。

また、車両鋼板のハイテン化のトレンドに伴い、Mn、Cr 含有量は増大の方向であり、駆動系・パワートレーン系の生産くずには、Cr、Mo 等が多く含まれる。

これらのトラップ元素を有効活用し、付加価値の高い自動車用ハイテン鋼供給につなげる。

9.3 実用化に向けた技術課題

9.3.1 材料機能に関する課題

- ・材料機能と合金含有量・コストの最適化
本試作材では、Si, Cr, Moなどが添加元素である。
例えば、
 - ・Crは、スクラップコンバージョンにより、SUSなど元々Crを多量に含有するスクラップを効率的に利用する。
 - ・Si, Mn, Crなどの調整により、Moの必要量を低減する。
など、添加量の最適値や、他の低廉元素での代替を検討する。
- ・強度と延性バランスの展開と向上の検討
TS×ELは16000を超えたが、更に高いTS×ELバランスを目指す。
- ・熱延・薄板コイル化
自動車用鋼板として適用規模を拡大するためには、本試作のt=2.00mmから、さらに薄いt=1.4以下を狙った量産化技術を確立する必要がある。
- ・メッキ鋼板化(防錆鋼板への対応)
今後、電気炉鋼板の適用品種の拡大を考えると、防錆鋼板である亜鉛めっき化の展開は必須と考えている。

9.3.2 スクラップ・含有元素に関する課題

- ・スクラップ品種構成最適化と製鋼技術
資源循環を考えた場合、100%スクラップで循環出来ることが最良と考えられる。当社の場合、銑鉄を必要としないスクラップを用いた電気炉鋼製造でありこの循環に適するものである。
今回は時間と費用の制約から一仕様のみの試作であり、初めての製造ということで比較的溶製しやすく現実的な配合として国内ヘビーと新断ほぼ50:50を選定した。しかし、当社においては、これまでも新断屑を前提としない電炉鋼板製造を行っている。合金元素の有効活用の観点から、合金を多く含有する老廃スクラップを含めた品種の配合については更なる検討が必要であると考えている。そのため、今後は鉄スクラップ(新断屑・ヘビーなど)の配合比率を変えた実機試作を行う予定である。
- ・Car to Carの実現とスクラップ中のトランプエレメント活用
本試作材のスクラップ配合比率の設定は前項の通りであるが、具体的に2つの理由を以下に記す。
 1. 化学成分の的中率を上げる(新断屑を用いた理由)
弊社は、今回の様な高合金系の成分の製造実績がないため、精錬工程(化学成分の調整段階)にてスラグ-鉄反応が温度推移により、どの様になるか想定が困難であった。このため、初期にはなるべく純鉄に近い成分からスタートして合金添加量と溶鋼温度を微調整する事とした。
新断を多く添加したのは純鉄に近い成分とするため、実績が積み上がれば、新断の使用構成比率は変化する場合もあり得る。

2. Car to Car の実現(自動車発生の新断層の利用)

新断は、部品をプレス製造する時に発生する加工スクラップである。Car to Car を考えると、そのボリュームの大きさから、主要な鉄源になると考えられる。加えて、ELV 中には有効元素が多く含まれており、新断層に併せて有効利用が重要と考える。このような観点から、今回は新断とヘビーの二つを組み合わせ合わせた配合を選定した。

ELV の使用は、スクラップに含有するトランプ元素を活用するのに適した方法と考えるが、これ以外にも国内で発生する老廃スクラップの有効な活用を考える必要がある。例えば、国内ヘビー層の使用比率を 100%にすると、溶鋼中の Cu 含有量は 0.35%程度になる。Cu は鋼の強度を上げる・耐食性を向上するなどの利点はあるが、自動車用鋼板として使用される場合の許容限界・有効性については、更に調査・把握することが今後の課題と考える。

9.4 スクラップのリサイクル

9.4.1 電気炉鋼材による CO2 削減

これからの、低炭素社会・循環型社会の構築のためには、日本国内にある天然資源を還元した大量の鉄スクラップを電気炉鋼材として活用する必要があると考えている。

その一つの案として、図 9.3 に自動車産業で発生するスクラップと市中スクラップの事業化を想定した場合のフローを示す。車体用鋼板から発生するスクラップ＝新断層を電炉鋼会社が引き取り、自動車用鋼板にリサイクルして自動車会社に納めるという資源循環を考えると、スクラップ市場価格変動の影響を受けにくい資源と製品の循環が成り立つことになる。

電炉鋼が高炉材を置換することによる鋼板製造時の CO2 排出量削減が評価される場合には、上記のような適用ボリュームに相当する量が評価対象になると考えられる。

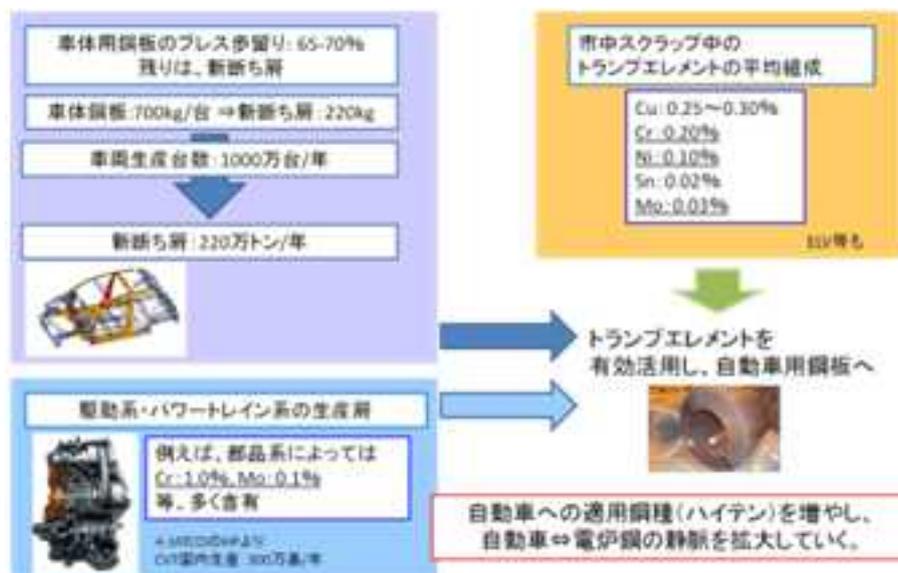


図 9.3 本件相当のグレードのスクラップの入手性と競争力

以上