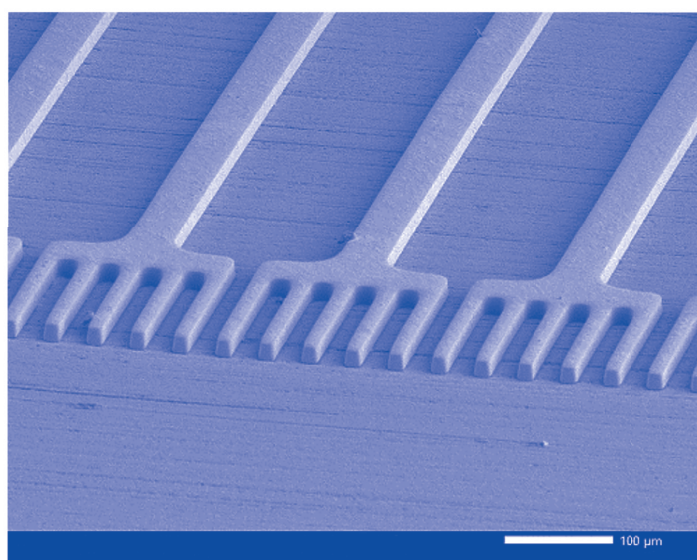
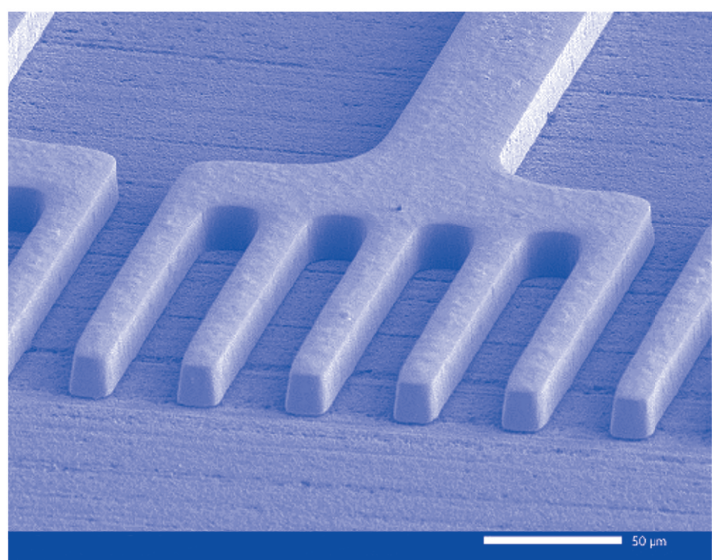
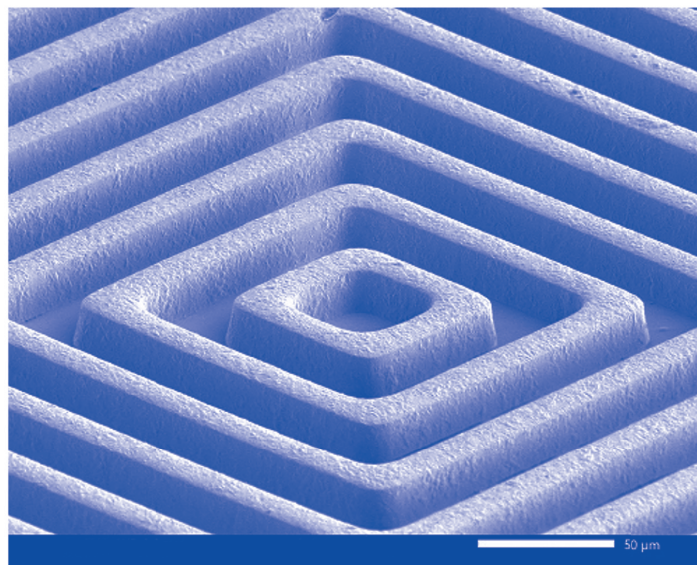
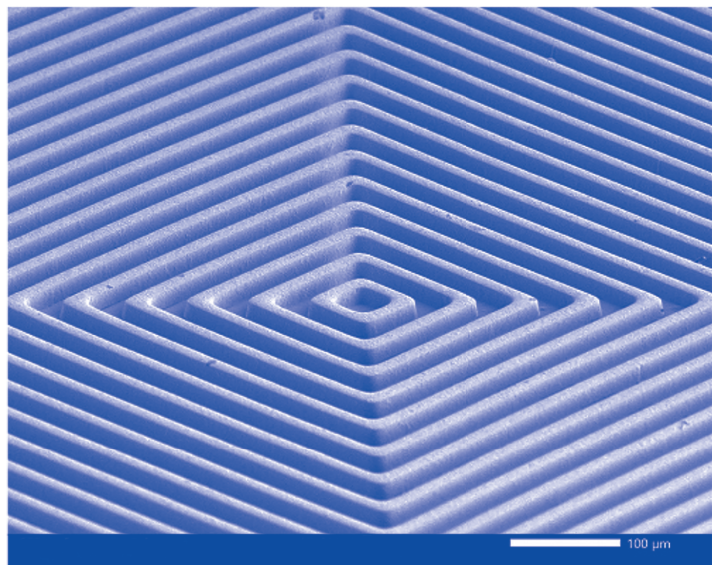
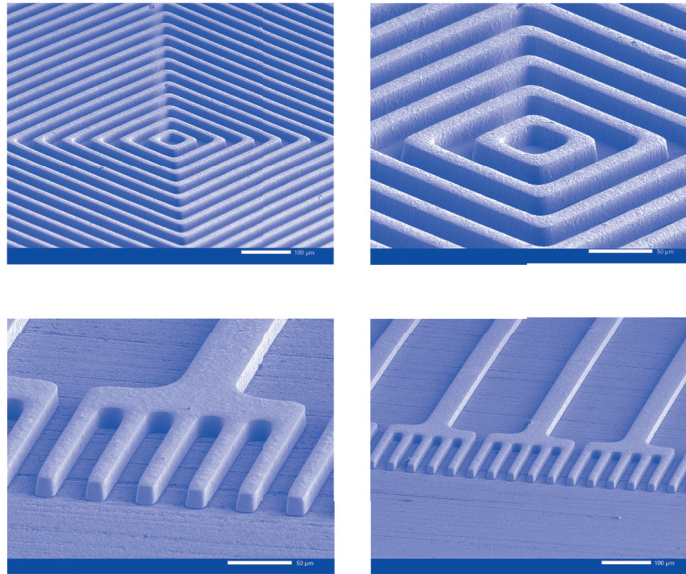


東洋鋼鋳





表紙の説明

表紙の上の画像は難めっき材であるモディファイドポリイミド（MPI）フィルムに当社で無電解銅めっきを施して、セミアディティブプロセス（SAP）によって得られたコイル回路のSEM写真です。（ $L/S^*=20/20\mu\text{m}$ ）

下の画像は同じく難めっき材である液晶ポリマー（LCP）フィルムに無電解銅めっきを施し、SAPによって得られたベアチップ実装用回路のSEM写真です。（ $L/S^*=20/20\mu\text{m}$ ）

このような超微細配線は5Gなど高速通信機器で精密化が進む実装基板のFCCL（Flexible Copper Clad Laminate）に用いられ、今後の市場拡大が期待されています。

*L/SはLine and Spaceの略

The upper SEM images on the cover are coil circuit of obtained by electroless copper plating on a modified polyimide (MPI) film, which is a difficult to plating material, and semi-additive process (SAP). ($L/S^*=20/20\mu\text{m}$)

The below SEM images are circuit for bare chip mounting obtained by electroless copper plating to a liquid crystal polymer (LCP) film, which is also a difficult to plating material, by applying SAP. ($L/S^*=20/20\mu\text{m}$)

Such ultra-fine wiring is used for FCCL (Flexible Copper Clad Laminate), which is a mounting board that is sophisticated in high-speed communication equipment such as 5G, and is expected to expand the market in the future.

*L/S is an abbreviation for Line and Space

目 次

1. 1 8L 缶向けラミネート鋼板用 PE フィルムの開発	逸 見 勇 介… 1 末 永 昌 巳 佐々木 康 介 織 田 将 史
2. 高強度冷延鋼板のプレス成形性およびプレス成形性に及ぼす 変形モードの影響	岩 元 暢 宏… 7 桂 啓 志 竹 松 伸 一
3. SUS/Al クラッド材の接合メカニズムと諸特性	畠 田 貴 文… 15 南 部 光 司 黒 川 哲 平 丸 橋 由 和
4. ピンホール検出器における斜め孔検出方法の開発	馬場崎 陵… 23 三 宅 勝 也 今 重 薫

TOYO KOHAN

Technical Reports of Toyo Kohan Company Ltd.

Vol.41

Contents

1. Development of PE Film Laminated Steel for 18-Liter Can *Yusuke* HEMMI··· 1
Masami SUENAGA
Kosuke SASAKI
Masaki ODA

2. Press Formability of High Strength Cold-rolled Steel *Nobuhiro* IWAMOTO··· 7
and Effect of Deformation Mode on Press Formability
Keishi KATSURA
Shinichi TAKEMATSU

3. Bonding Mechanism and Characteristics of..... *Takafumi* HATAKEDA··· 15
SUS/Al Clad Material
Kouji NANBU
Teppei KUROKAWA
Yoshikazu MARUHASHI

4. Development of Diagonal Hole Detection Method *Ryo* BABASAKI··· 23
in Pinhole Detector
Katsunari MIYAKE
Kaoru IMASHIGE

18L缶向けラミネート鋼板用PEフィルムの開発

逸見勇介^{*1}・末永昌巳^{*2}・佐々木康介^{*3}・織田将史^{*1}

Development of PE Film Laminated Steel for 18-Liter Can
Yusuke HEMMI, Masami SUENAGA, Kosuke SASAKI, Masashi ODA

Synopsis : PET film laminated steel sheets are applied to 18 L can, but cannot correspond to contents of strong acid and strong alkali aqueous solutions. On the other hand, PE resin shows excellent corrosion resistance against strong acid and alkali. So we developed new PE film for steel strip laminating application.

New PE film consist of two layers to achieve both adhesive performance with steel strip and corrosion resistance with contents. The main layer was selected LLDPE resin, because of the processing aptitude and the appearance after heat laminating. The adhesion layer was blended two resins, those are high adhesive resin with steel strip and thermally stable resin against heat shrinkage.

Key Words : 18L can ; PE film ; LLDPE ; adhesive resin ; thermally stable resin

1. 緒言

18L缶は様々な内容物に広く使用され、ぶりき、塗装材、ラミネート材が適用されている。当社ではPETフィルムラミネート鋼板を開発しており¹⁾、18L缶にも適用されている²⁾。PETフィルムラミネート鋼板は食品用途など弱酸性から弱アルカリ性の内容物には優れた内容物適性を示すが、強酸や強アルカリ水溶液などには耐性がなく不適である。そのような強酸、強アルカリの内容物に対しては、ポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)などのポリオレフィン樹脂がラミネート鋼板用フィルムとして適用されている³⁾。PEラミネート材については厚膜のPEフィルムを枚葉でラミネートした物などが実用化されている⁴⁾。しかしながら、フィルム歩留まりが低く、また生産効率が悪いとため、製缶数量の増加などへの対応が困難な状況である。当社のユーザーである製缶メーカー各社より、PEラミネート材の強い開発要請があり、当社の連続ラミネートライン⁵⁾でラミネート可能なPEフィルムの開発を行った。

2. 実験

2.1 検討樹脂

検討に用いた樹脂と、それぞれの樹脂で開示されている物性値についてTable1に示す。なお、樹脂の供給先から物性が非開示のものがあり、表においては空欄(ー)とした。これらの樹脂を用いて、樹脂メーカーや製膜メーカーにて製膜したフィルムサンプルを試験に供した。

2.2 ラミネートサンプル作製

ラミネートサンプルはFig.1に示すラミネート装置により作製した。所定の金属板を設定温度まで加熱した後、一對のゴム製ラミネートロールによりフィルムを熱圧着し、熱圧着後には直ちに水冷してラミネートサンプルを作製した。金属板としては電解クロム酸処理鋼板(以下ECCSと略す)を用いた。フィルムにはTable1に示した樹脂を用いて製膜した各種フィルムを使用した。

*1 技術研究所 機能化技術研究部 樹脂材料グループ

*2 生産技術部 ラミネート技術グループ グループリーダー

*3 冷間圧延工場 ラミネート課 ラミネート係 係長

Table1 Characteristics of test resin

Resin	Density [g/cm ³]	Melt flow rate (MFR) [g/10min]	Melting point [°C]	Remarks
HDPE	0.956	1.1	133	Main Layer
LDPE	0.924	0.7	114	Main Layer
LLDPE	0.919	1.5	124	Main Layer
A	—	2	122	Adhesive Layer
B1	—	—	—	Adhesive Layer
B2	0.912	2.3	117/124	Adhesive Layer
B3	0.94	6.5	93/128	Adhesive Layer
B4	—	—	—	Adhesive Layer
C	—	2.0	102	Adhesive Layer
D	0.919	2	114	Adhesive Layer

2.3 フィルムと鋼板の密着強度

鋼板に対するフィルムの密着性は 180°ピール試験により鋼板に対するフィルムの剥離強度を測定することで評価した⁶⁾。180°ピールには Fig.2 に示す試験片を用いて、引張試験機（島津製作所製 AGS-5kNX）により試験速度 20mm/min にて室温（25℃）でフィルムのみを剥離させたときの荷重を 180°ピール値としてフィルムと鋼板との密着性の指標とした。

2.4 井桁エリクセン張り出し

JIS K 6744 に準拠し、ラミネートサンプルのフィルムにカッターナイフで鋼板に達するように井桁型の切れ込みを入れ、JIS B 7729 記載のエリクセン試験機で 6mm のエリクセン張り出しを行った。張り出し加工した部分の、フィルムの浮きの有無とフィルムの白色の変色（白化という）の有無を目視で確認し、加工の追従性を評価した。

2.5 熱機械特性

フィルムの熱変形挙動を評価するため Fig.3 に示す方法で、熱機械特性測定装置（リガク製 Thermo plus

TMA8310）を用いて測定を行った。フィルム片表面に 1.0mm φ の石英製針を 0.5 N の荷重で設置し、雰囲気温度を 5.0℃/min の昇温速度で加熱し、加熱に伴うフィルムの軟化による針の針入度で熱変形挙動を測定した。

2.6 動摩擦係数測定

製膜したフィルムを巻き取る際のブロッキングの程度を確認するため、フィルム表裏面での動摩擦係数を Fig.4 に示す表面性測定機（新東科学製 TRIBOGEAR）で測定した。フィルム 1 枚をステージにセットし、もう 1 枚のフィルムを先のフィルムと異なる面で接するように上部治具にセットした後、200g の重りを載せた。その後、移動速度 100mm/min でステージを動かし、2 枚のフィルムを擦り合せ、動摩擦係数を測定した。

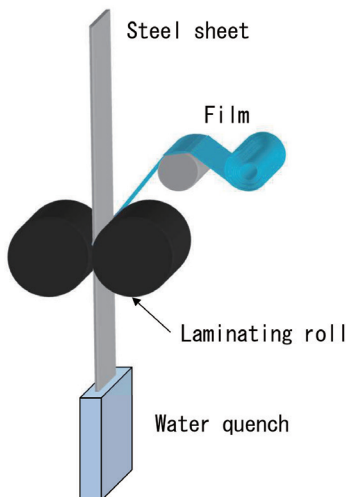


Fig.1 Schematic diagram of laminating process

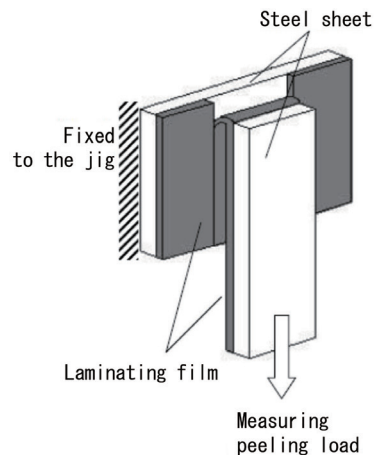


Fig.2 Model of 180° peeling test

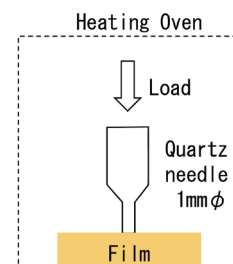


Fig.3 Model of Penetration method using thermomechanical analysis

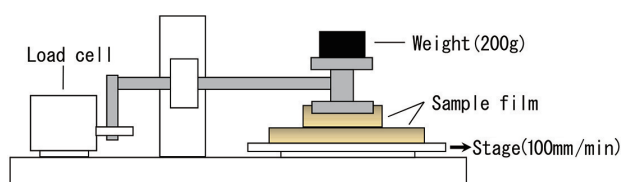


Fig.4 Model of dynamic friction coefficient measurement

3. 結果と考察

3.1 フィルム構成

鋼板とフィルムとの貼り合せは、接着剤塗工工程が不要となる熱融着で行うことが望ましい。このため、フィルムは内容物と接する主たる層（支持層）と鋼板と接する側に熱融着性の接着性樹脂を用いた接着層を設けた複層構成のフィルムである必要がある。そこで、支持層に適用する PE 樹脂と接着層に適用する接着性樹脂を選定するため、検討を行った。

3.2 支持層 PE 樹脂の選定

支持層樹脂の選定のため、接着層樹脂に A を使用し支持層に HDPE, LDPE, LLDPE を同じ厚みで複層製膜したフィルムサンプルを作製した。これらフィルムは、実験用切り板ラミネート装置を用いて、厚み 0.32mm の ECCS と貼り合せてラミネートサンプルを作製し、ラミネート材としての特性評価を行った。

評価結果を Table2 に示す。接着層樹脂が同じであるにもかかわらず、支持層樹脂の違いにより 180°ピール値に違いが見られた。いずれのフィルムでもラミネート温度が高い程 180°ピール値が大きくなる傾向を示したが、特にラミネート温度 220℃では 180°ピール値の差が大きくなった。実験に用いた各樹脂の曲げ弾性率がそれぞれ HDPE : 900 MPa, LDPE : 310 MPa, LLDPE : 210 MPa であり、HDPE は他の 2 種と比べて曲げ弾性率が大きい。180°ピール試験では一定以上の密着力があると、フィルムの引張強度が加算されるため、HDPE では 180°ピール値が大きくなったと考えられる。

井桁カットエリクセン張り出し加工においては、フィ

ルムの浮きに関して支持層樹脂の違いによる差異が認められた。LDPE, LLDPE においてはともにフィルム浮きは発生せず、HDPE ではフィルム浮きが発生した。これは先に述べた通り、HDPE は他の 2 種と比べて曲げ弾性率が大きく剛直なフィルムであることが原因と考えられる。このため、HDPE では張り出し加工においてフィルムが加工に追従できずフィルム浮きが発生したと考えられる。

一方、LDPE については基材との貼り合せ後に、表面の荒れやシワが発生し表面外観が悪かった。これは LDPE の融点が低いため、鋼板との接着が可能な温度域では支持層樹脂まで軟化し、ラミネート時のロールとの接触で、シワや押え跡、ロール目の転写などが発生していた。また、いずれの PE 樹脂でも、井桁エリクセン張り出しの結果、加工白化による外観の変化は認められなかった。

これら密着性、加工性、ラミネート後の表面外観を考慮すると、ラミネート材の特性として LLDPE が LDPE, HDPE よりも適していると考えられ、支持層樹脂として LLDPE を選定した。

3.3 接着層樹脂の選定

次に、接着層樹脂を選定するため、支持層樹脂を LLDPE に固定し、接着層樹脂を変更したフィルムサンプルを作製した。フィルムサンプルの製膜時には複層製膜性と巻取り時のブロッキングを確認した。作製したフィルムサンプルは実験用切り板ラミネート装置で厚さ 0.32mm の ECCS と貼り合せたラミネートサンプルを作製した後、鋼板との密着強度を測定し、井桁カットエリクセン張り出し加工で加工密着性を確認した。

接着層樹脂として異なるメーカーの接着性ポリオレフィン樹脂 A と樹脂 B を使用して確認を行った。樹脂 A は無水マレイン酸が導入された変性ポリオレフィンであり、樹脂 B はカルボキシル基が導入された変性ポリオレフィンである。樹脂 B は酸変性度の異なる 4 種類の樹脂を使用した。樹脂 B1 が酸変性度の最も低い樹脂であ

Table2 Result of evaluated laminating samples

Film	Lamination temperature [°C]	Peel strength [N/15mm]	Laminated appearance	Erichsen test	Whitening
HDPE	180	6.5	good	bad	good
	200	11.9	good	poor	good
	220	18.4	good	poor	good
LDPE	180	5.3	good	poor	good
	200	10.0	poor	good	good
	220	11.2	bad	good	good
LLDPE	180	7.8	good	poor	good
	200	12.1	good	good	good
	220	13.5	good	good	good

Table3 Result of evaluated adhesion of each adhesive resin

Adhesive layer resin	Peel strength [N/15mm]	Erichsen test
A	11.4	good
B1	4.7	bad
B2	8.3	poor
B3	10.1	good
B2+B4 50:50	9.8	good

り、樹脂 B4 が酸変性度の最も高い樹脂である。樹脂 B4 は熔融粘度が小さく単体での製膜が困難なため、基本となる樹脂系が同系統である樹脂 B2 と重量比で 1 : 1 となるように混合して使用した。

評価結果を Table3 に示す。鋼板ラミネートサンプルでの鋼板との密着強度の結果では、樹脂 A と樹脂 B3 が良好な密着性を示した。樹脂 B については、密着強度に樹脂 B1 < 樹脂 B2 < 樹脂 B3 の序列が認められた。また、樹脂 B2 に樹脂 B4 を混合した系では密着力の向上が認められた。これは、樹脂 B の中で酸変性度の高い物ほど密着性が増加すると考えられる。井桁カットエリクセン張り出し加工においてはフィルムと鋼板との密着強度が小さい物ほどフィルム剥離が大きくなる傾向が見られ、樹脂 A と樹脂 B3 では良好な加工密着性を示した。

製膜試験の状況では、樹脂 A、樹脂 B1、樹脂 B2 では支持層の LLDPE 側の吐出が安定しない傾向が見られた。また、巻き取られたフィルムサンプルで若干ブロッキングが見られ、樹脂 A は樹脂 B よりフィッシュアイが多い傾向が見られた。樹脂 B3 の製膜状態は良好であり、巻取りフィルムのブロッキングも良好であった。樹脂 B2 と樹脂 B4 を混合した系では製膜時に搬送系のロール上での滑りが悪くシワが発生しやすい傾向が見られた。また、巻取りフィルムはブロッキングが顕著で巻きほじけない状況であり、適用は困難であると判断した。

これらの試験結果より、フィルムと鋼板との密着力が良好であり LLDPE との複層製膜も可能である、樹脂 A

と樹脂 B3 を接着層樹脂として選定した。

3.4 実機ラミネート試験 1

LLDPE を支持層として、樹脂 A と樹脂 B3 を接着層に使用した実機製膜試験を行い、続けて実機ラミネート試験を行った。

実機製膜試験において、いずれのフィルムも複層製膜は問題なく実施できたが、樹脂 A はフィッシュアイを製膜時に制御することが出来ず、外観的に適用が困難であることが明らかとなった。

実機ラミネート試験においては、樹脂 A を使用したフィルムは問題なく鋼板ラミネートが可能であった。しかしながら、樹脂 B3 を使用したフィルムは鋼板ラミネート時に鋼板端部でラミネートロールに付着物が堆積し、長時間の作業が困難な状況となった。付着物発生の原因を調査するため、付着物の発生しなかった樹脂 A 使用フィルムのラミネート材と樹脂 B3 使用フィルムのラミネート材の鋼板端部の断面を観察した。(Fig.5) 樹脂 B3 使用フィルムラミネート鋼板では接着層が支持層よりも外側にはみ出していることが分かった。一方、樹脂 A 使用フィルムラミネート鋼板ではそのような形態は認められなかった。(黄色矢印)

次に樹脂 A と樹脂 B3 の熱機械特性を TMA ペネトレーション法で測定した結果を Fig.6 に示す。樹脂 A は融点近傍まで軟化は見られず、融点近傍で急激に変形しているのに対し、樹脂 B3 は加熱とともに徐々に変形し、

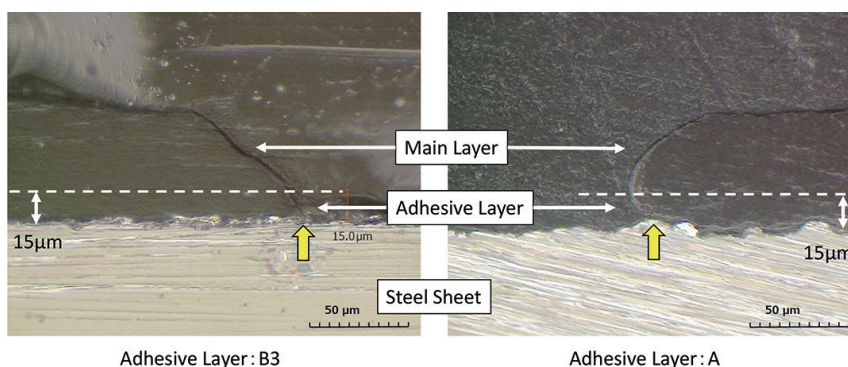


Fig.5 Cross Section view of the laminated film edge

Table4 Composition ratio and evaluation result

Composition of adhesive layer			Fish eye	Peel strength [N/15mm]	Dynamic friction coefficient vs. LLDPE	
Base resin	Mixed resin	Composition ratio (Base/mixed)				
B3	-	100/0	good	26.5	0.359	
		80/20	good	23.5	0.368	
	B2	60/40	good	15.7	0.381	
		40/60	good	12.7	0.345	
	C	80/20	good	23.5	0.344	
		60/40	good	10.8	0.434	
		40/60	good	3.9	0.483	
		80/20	good	29.4	0.382	
		D	60/40	good	18.6	0.327
			40/60	good	10.8	0.410
	A	100/0	bad	29.4	0.444	

95℃付近から変形が大きくなる挙動を示した。ラミネート時のラミネートロール表面温度は105～130℃であり、樹脂 B3 は十分変形する温度域にあると考えられる。断面観察と熱機械特性の測定結果より、樹脂 B3 は加熱による軟化の度合いが大きく、ラミネート時の熱により軟化し、ロール圧力により接着層が押し潰されて外にはみ出し、ラミネートロールに付着・堆積したと推測される。樹脂 B3 は MFR が 6.5 と大きく、熔融時の粘度が低い樹脂であることが原因と考えられる。

いずれの樹脂にも改善が必要な点が見られたが、樹脂 A のフィッシュアイの改善は樹脂特性として困難なため、樹脂 B3 で発生したラミネートロール付着性の改善について検討を行った。

3.5 接着層改良検討

3.4 の実機試験の結果より、改良材の検討をラボ製膜および切り板ラミネートによって行った。樹脂 A と樹脂 B3 の熱変形挙動の比較より、接着層樹脂は樹脂 A の熱変形挙動に近づけることでラミネート時の接着層樹脂のはみ出しが改善できると推測した。これまでに検討を行った接着性樹脂で考えると MFR が小さい樹脂では密着性が十分でないため、そのまま適用することは困難であると推察できる。そこで、樹脂 B3 を基準として、

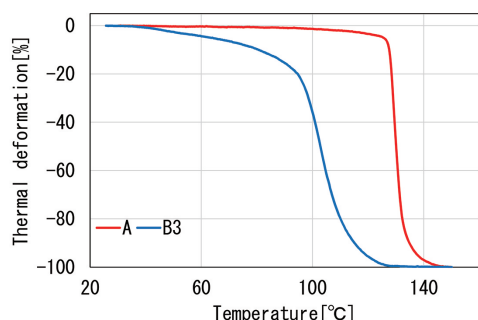


Fig.6 Thermal deformation profile of A and B3

MFR の小さい樹脂を混合することで接着層の熱変形挙動の抑制と密着性を両立できる組成を見出すことを検討した。また、2種の樹脂を混合するため、製膜時における混練性や、フィルムのブロッキングも確認を行う必要がある。

樹脂 B3 に混合する樹脂として、単純に MFR の小さい樹脂である樹脂 C を選定した。また、樹脂 B3 と同系統の接着性樹脂の中で MFR の小さい物として樹脂 B2 を選定した。さらに、樹脂 B3 と基本の構造が同じ系統であり、密着性の低下が小さいであろうとの予測から樹脂 D を選定した。

Table4 に検討サンプルの混合比率と評価結果を示す。樹脂 B3 を基準として、3種類の選定樹脂をそれぞれ 20%、40%、60% 混合して単層膜を製膜した。そして、製膜性（フィッシュアイ）、鋼板との密着強度の変化、支持層（LLDPE）との滑り性の変化（ブロッキング性）、熱変形挙動の変化を確認した。

製膜性（フィッシュアイ）と ECCS とラミネートした時の密着強度、支持層である LLDPE との接触時の動摩擦係数を測定した結果を Table4 に示す。製膜性については、いずれの樹脂の混合でもフィッシュアイの発生は見られず、良好であった。鋼板との密着強度については、いずれの樹脂の混合でも 20% 添加までは大きな差異は見られなかった。樹脂 C については 40%、60% と添加量の増加に伴う密着力の低下が顕著に認められた。LLDPE との滑り性を確認した動摩擦係数の測定では、ピール強度の測定結果と同様に、20% 添加まではいずれの樹脂でも大きな変化は見られなかった。樹脂 C については 40% 以上の添加で添加量の増加に伴う動摩擦係数の上昇が顕著になる傾向が見られた。ピール強度と動摩擦係数の変化からは、樹脂 C の混合は不適であると考えられる結果が得られた。

各樹脂を接着層に添加した時の熱変形挙動の変化を Fig.7 に示す。樹脂 B2 の添加では添加量の増加に伴い

Table5 Composition ratio and result of laminated steel sheet

Base resin	Composition of adhesive layer		Laminate roll adhesion	Peel strength [N/15mm]
	Mixed resin	Composition ratio (Base/mixed)		
B3	—	100/0	bad	10.2
	B2	80/20	bad	—
		60/40	good	10.3

熱変形する温度の高温側への移動が顕著に見られた。樹脂 C の添加でも添加量の増加に伴い熱変形する温度の高温側への移動は認められるが、樹脂 B2 よりもその度合いが小さかった。これらに対し、樹脂 D の添加では熱変形する温度に大きな変化が見られなかった。

樹脂 B3 への MFR の小さい樹脂の添加について、密着性、滑り性、熱変形挙動の変化の傾向を考慮すると、添加する樹脂は樹脂 B2 が最適であることが示唆された。

3.6 実機ラミネート試験 2 (接着層改良試験結果)

3.5 のラボ評価の結果から、再度実機での製膜、ラミネート試験を行った。熱変形温度の変化の度合いと

ピール強度の低下の程度を考慮し、樹脂 B3 を基本とした接着層に樹脂 B2 を 20% と 40% 添加した 2 水準で、支持層(LLDPE)との 2 層フィルムを製膜した。これを実機ラミネートに供し、ラミネートロールへの付着・堆積とラミネート強度の比較を行った。

実機ラミネート試験の結果を Table5 に示す。樹脂 B2 20% 添加ではラミネートロールへの付着が発生し、40% 添加ではラミネートロールへの付着が改善された。樹脂 B2 40% 添加品のラミネートサンプルで密着力を測定した結果、樹脂 B3 100% 時の試作材と密着力に差は見られず良好であった。以上の結果より、接着層の組成は樹脂 B3 60% / 樹脂 B2 40% が最適であると判断した。

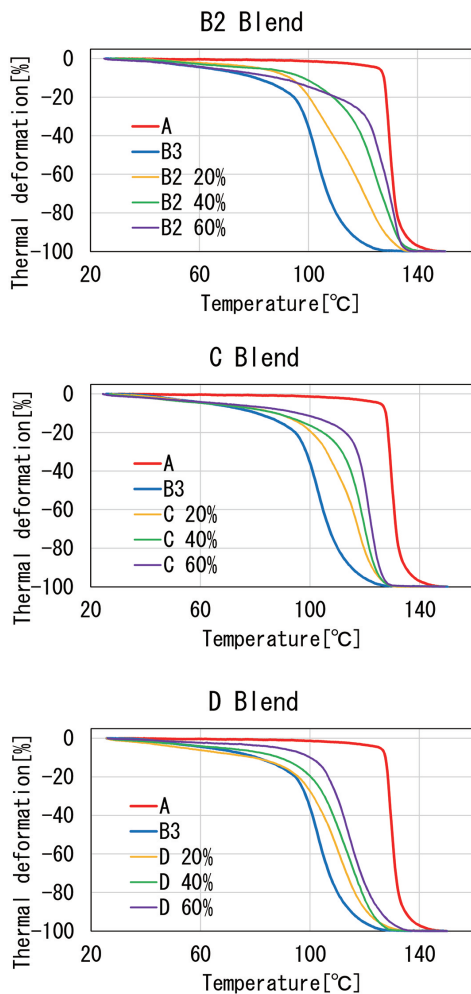


Fig.7 Thermal deformation profile of mixed each adhesive resin with B3

4. 結 言

当社の連続ラミネートラインで鋼板とのラミネートが可能となる 18L 缶向け PE フィルムを開発した。フィルムは 2 層構成であり、支持層は LLDPE を使用し、接着層は密着性を担保する MFR の大きい樹脂と、ラミネート時の熱変形を抑制する MFR の小さい樹脂を混合した構成とした。今後、ラミネート材を客先に提出し、客先での製缶試験等の実用試験を進める予定である。

引用文献

- 1) 今津勝宏, 佐藤信行: 材料とプロセス, 6(1993), 540-543.
- 2) 古高武士, 三宅勝也, 中村琢司: 東洋鋼鈑, 37(2013), 21-26.
- 3) 吉原良一, 和気亮介, 溝口良平, 三好宏二, 奈須野孝洋: 新日鉄技報, 371(1999), 58-62.
- 4) 前田龍典: 特開 2003-025450
- 5) 中村琢司, 伊藤昌祐, 野村勝則, 安仲健二: 材料とプロセス, 10(1997), 1224.
- 6) 森田俊一, 吉本隆司, 坂本宣樹, 石田正説, 毎田知正, 岩下寛之: 東洋鋼鈑, 33(2002), 1-15.

高強度冷延鋼板のプレス成形性およびプレス成形性に 及ぼす変形モードの影響

岩元暢宏*¹・桂 啓志*²・竹松伸一*³

Press Formability of High Strength Cold-rolled Steel and Effect of
Deformation Mode on Press Formability

Nobuhiro IWAMOTO, Keishi KATSURA, Shinichi TAKEMATSU

Synopsis : Lightweight materials have been applied to electric and electron parts under requirements for saving energy. For the weight reduction, it is necessary to reduce thickness and use high tensile strength (T.S.) sheets, however high tensile strength sheets have generally poor press formability. Therefore, we have developed cold-rolled steel sheet at range under 0.6mm thickness which has high tensile strength of 850~900MPa grade and high total elongation (T.EL.) to improve press formability. This paper introduces the mechanical properties and press formability of the developed steel sheet compared with current high tensile steel sheet and low carbon steel sheet. Developed steel sheet has complex microstructure (ferrite+retained austenite+bainite), which has high tensile strength and high elongation (T.S.:850~900MPa, T.EL.:25~30%). Deep drawing and stretch formability of the developed steel sheet which has small planar anisotropy and low earing rate have better formability than that of current high strength steel sheet. Analysis of forming limit curves (F.L.C.) ,developed steel sheet has higher deformation limit in all deformation modes than that of current high strength steel sheet.

Key Words : high tensile strength ; cold-rolled steel sheet ; retained austenite ; forming limit curve

1. 緒言

近年, スマートフォン, タブレット等に代表される電気・電子分野での小型化, 軽量化が進んでおり, 自動車分野においては温室効果ガスの削減のため, ハイテンの適用拡大による車体軽量化さらにはアルミニウム合金と鋼板あるいはCFRPを用いたマルチマテリアル化の流れが始まっている¹⁾.

部材軽量化のためには材料を高強度化させ, 薄肉化させることが必要となる. このような部材軽量化ニーズが高まる中, 当社においてはNiあるいはCrを含まない炭素鋼をベースとし, 板厚 0.6mm 以下で引張強さが550~1000MPa級の冷延鋼板に特殊な電気亜鉛めっきを施

した高強度電気亜鉛めっき鋼板(商品名:高強度シルバートップ)を製品化しており²⁾, CD, DVDドライブ部品, 液晶ディスプレイ部品等の電気・電子部材および一部の自動車用エンジンガスケットに採用されている.

部材軽量化を図るには鋼板を高強度化させ, 薄肉化する必要があるが, 一般に強度と延性はトレードオフの関係にあるため, 強度が上昇すると延性が悪化し, 所定の形状に成形できない. また, 部材によっては, 薄肉化することにより低下する部材剛性を補うための補剛形状を形成する必要があることから, 強度-延性バランスに優れた鋼板の開発が必要となる³⁾.

高強度化の手法としては固溶強化, 析出強化, 結晶粒微細化強化, 組織強化が挙げられるが, 高い強度レベルで延性を改善させる方法としては残留オーステナイト

*1 技術研究所 金属機能材研究部 プロセス開発グループ グループリーダー

*2 技術研究所 金属機能材研究部 薄板材料グループ 先端技術チーム

*3 下松事業所 生産技術部 材料焼鈍技術グループ 焼鈍材料チーム チームリーダー

(残留 γ)を導入し、変形中に硬質なマルテンサイトへ加工誘起変態させる変態誘起塑性を活用し、加工硬化特性を向上させることが有効であるとされている^{4) 5)}。

一方で、このような組織を有する板厚0.6mm以下の極めて薄い冷延鋼板における成形性に及ぼす変形モードの影響について報告された例は少なく、実際のプレス成形においては二軸変形により成形されるため、一軸引張での性能評価では不十分であると考えられる。

そこで本稿では、更なる形状自由度向上のため、現行材の大幅な延性向上を目的とし、添加元素の主成分がC-Si-Mnである加工誘起変態を発現するT.S.850~900MPa級の薄鋼板を開発し、成形性および成形性に及ぼす変形モードの影響について検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材作製方法

開発材は添加元素C-Si-Mnを主成分とし、所定の化学成分となるように調整した鋼を連続鋳造機にてスラブとし、板厚2.0mmまで熱間圧延を施した。熱延条件については、次工程である冷間圧延での圧延荷重が高くなり過ぎないように700℃以上の温度で巻き取りを行い軟質化させた。得られた熱延鋼板の組織はフェライト+パーライトであった。その後、硫酸酸洗にて表層スケールを除去した後、トータル圧延率90%の冷間圧延を施し、連続焼鈍による組織制御後スキンプラスを行うことにより厚さ0.2mmの冷間圧延鋼板を作製した。

2.2 材料特性評価方法

2.2.1 組織観察および残留 γ 量測定

断面組織観察は、ナイトール(5%硝酸+エタノール)でエッチングした後、デジタルマイクロスコープ(HIROX製)を用いて実施した。相の同定はSEMを用いた後方散乱電子線回折(EBSD法)にて行った。印加電圧は20kV、電流は20 μ Aとした。測定面は圧延平行方向断面とし、測定範囲は50 \times 50 μ m、測定ステップは0.2 μ mとした。測定後、CI値0.05以上、結晶粒界を15°以上で定義し、Clean UP処理(Grain Dilation, Grain Standardization)を施しPhaseマップを作成した。残留 γ 量測定は試料を表面から1/4の厚みまで湿式研磨した後、化学研磨により仕上げ、X線回折法にて測定した。X線回折装置はリガク製を用い、X線源はCu管球、管電圧および電流は45kV、200mAとし、2 θ :40~140°の条件にて測定した。残留 γ 量は、 α (200)、 α (211)、 α (200)、 γ (211)、 γ (311)の主要5方位の積分強度から残留 γ の体積率を算出した。

2.2.2 機械的特性評価

機械的特性は引張試験により評価した。引張試験は島津製作所製50kNオートグラフを用い、JIS Z2241 5号試験片により引張速度10mm/minで行った。

2.2.3 成形性評価

成形性評価は張出成形、円筒絞り成形とした。張出成形、円筒絞り成形はエリクセン試験機(東京試験機製あるいはエリクセン社製)を用いた。Fig.1(a)、(b)およびTable1に成形金型の模式図および成形条件を示す。円筒絞り成形性はブランク径およびパンチ径の組合せにより絞り比(ブランク径/パンチ径)を1.8から2.0まで変化させ、成形可否を目視で判断した。また、絞り比1.8における成形体の端部の周方向高さを測定し耳率を算出した。

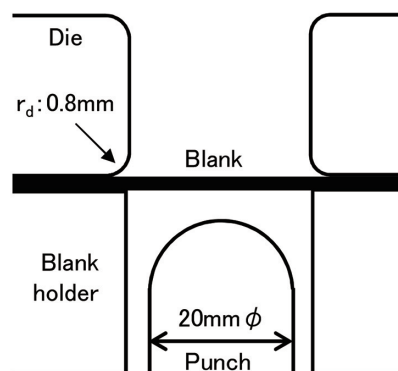


Fig.1(a) Schematic illustration of stretch formability test

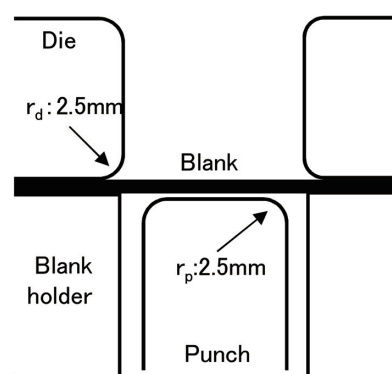


Fig.1(b) Schematic illustration of deep drawing test

Table1 Formability test condition

Formability test items	Test condition					
	Punch	Die	Blank holding force	Lubricant	Blank size	Test speed
Stretch formability test (JIS:Z2247)	φ:20mm	r _d :0.8mm	10kN	—	100×100mm	5~20mm/min
Deep drawing test	φ:31mm r _p :2.5mm	r _d :2.5mm	5~50kN	Press oil	φ:57mm (Drawing ratio:1.8)	3.5mm/s
	φ:73mm r _p :2.5mm				φ:138mm (Drawing ratio:1.9)	
	φ:87mm r _p :2.5mm				φ:176mm (Drawing ratio:2.0)	

2.2.4 成形限界線 (FLC) および成形限界線図 (FLD) 測定

材料の成形限界線 (FLC, Forming Limit Curve) および張出成形体の成形限界線図 (FLD, Forming Limit Diagram) の作成は非接触式三次元ひずみ・変位測定システム (GOM 社製 ARGUS および ARAMIS) を用いた。

FLC は板材の成形において、一軸変形、平面ひずみ変形あるいは等二軸変形等の様々なひずみモードでの材料の破断直前のひずみ量を測定し、最大主ひずみおよび最小主ひずみとして二次元座標にプロットし結んだ線である。この成形限界線に近い箇所は破断の危険性を示しており、破断限界を予測することが可能である。一方、FLD は成形体のひずみを最大主ひずみと最小主ひずみとして二次元表示したものである⁶⁾。

FLC は一軸変形、平面ひずみ変形あるいは等二軸変形における破断直前の最大主ひずみおよび最小主ひずみを ARAMIS で解析することにより作成した。予め水性スプレーによりランダムパターンを塗布したサンプルを用い、Fig.2(a), (b) に示すように変形の様子を2台のカメラで連続的に撮影することによる三角測量を行い、ランダム模様の変化の過程を三次元位置情報として取得することにより、破断直前の板面内の最大主ひずみ (ε₁) とこれに直交する最小主ひずみ (ε₂) を測定した。一軸変形は引張試験を行い、等二軸変形および平面ひずみ変形にはエリクセン試験機を用いた球頭パンチによる張出成形を行った。張出成形において、ブランクは板面内のひずみ比 β (β = ε₂ / ε₁) が異なる状態を作る必要があるため、Fig.3(a), (b) に示すような形状のブランクを用い、パンチとブランクの摩擦の影響を減らすため、パンチと接触するブランク側に粘着層付フィルム (ダイワプロタック 大和化成(株)製) を貼付し、さらにパンチ先端部にワセリンを塗布し成形した。試験条件を Table2 に示す。

張出成形体の板厚減少率の算出および FLD の作成には Fig.4 に示すようにブランク上に予め 0.5mm φ、中心間距離 1.0mm のドットパターンを油性インクにより塗布したサンプルを用い成形した。成形体は Fig.5 に示すように成形体を様々な角度からデジタルカメラにより撮影し、

変形後のドットおよびドット間の変化の状態を ARGUS にて計測することにより、成形体の各箇所最大主ひずみおよび最小主ひずみを解析し、FLD を作成した。

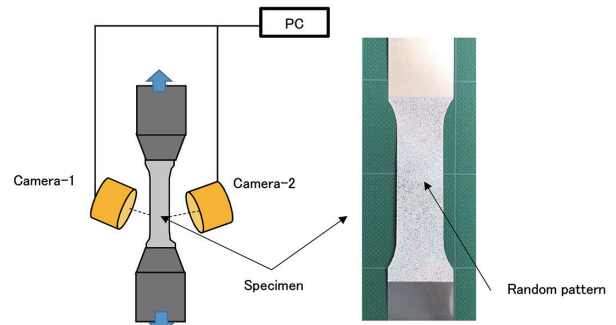


Fig.2(a) Schematic illustration of uniaxial deformation test with digital camera

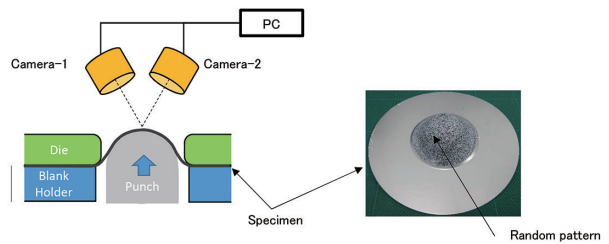


Fig.2(b) Schematic illustration of plane strain deformation and biaxial deformation test with digital camera

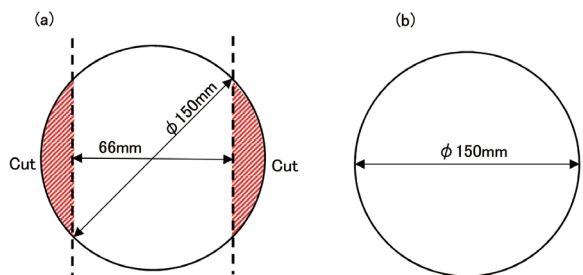


Fig.3 Blank shape of FLC test specimen (a)Plane strain deformation (b)Biaxial deformation

Table2 FLC test condition

Deformation condition	Test condition						
	Test equipment	Specimen	Punch	Die	Blank holding force	Lubricant	Test speed
Uniaxial deformation	Tensile test	JIS No.5	—	—	—	—	10mm/min
Plane deformation	Erichsen test	φ 150mm-66mm	φ :59mm	φ :66mm	200kN	film+press oil	3mm/s
Biaxial deformation		φ 150mm					

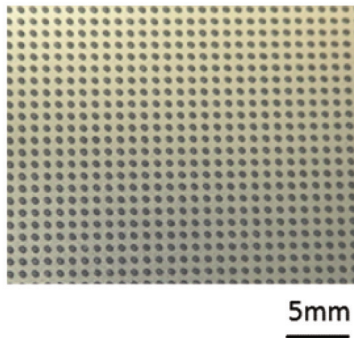


Fig.4 Grid pitch and grid size for FLD test

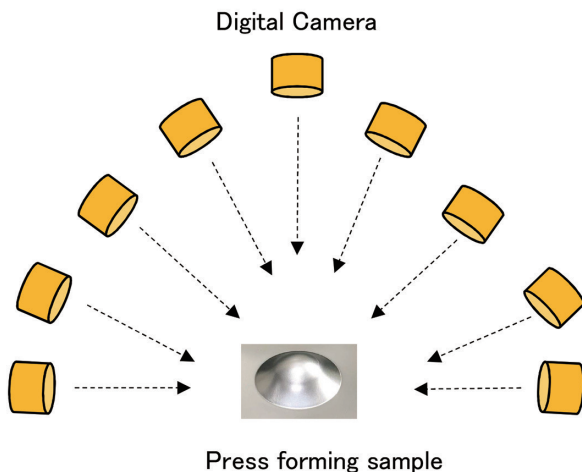


Fig.5 Schematic illustration of measuring method with digital camera

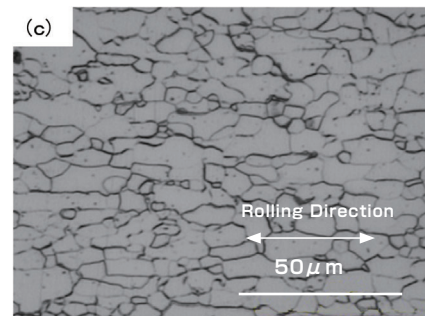
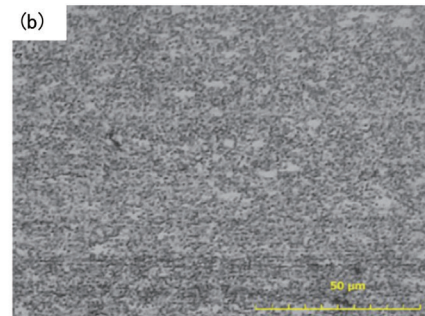
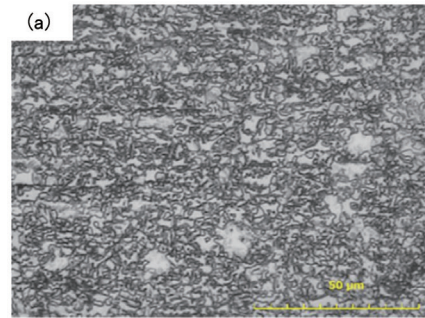


Fig.6 Optical micrographs of each steels: (a)Developed steel (b)Current steel (c)Low carbon steel

3. 実験結果および考察

3.1 組織および残留オーステナイト量

Fig.6に各サンプルの圧延平行方向断面における組織写真を示す。比較材として、微細粒組織を特徴とする引張強さ (T.S.) が800MPa級の高強度鋼板である現行材を用いた。開発材 (a)は5 μm以下の非常に微細な結晶粒を主体とし、10 μm程度の結晶粒を含む混粒組織であった。一方、現行材 (b)の組織は1 μm以下の微細結晶粒を主体とし、5 μm程度の結晶粒を含む混粒組織であり、開発材 (a)に比べてさらに微細な組織であった。また、低炭素鋼板 (c)は結晶粒径が5~30 μm程度の混粒組織であり、フェライト単層であった。

Fig.7に開発材および現行材のEBSD像を示す。

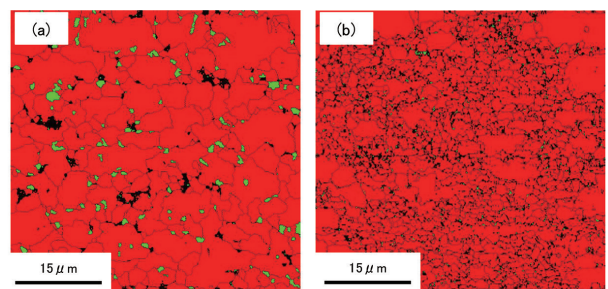


Fig.7 EBSD map of each steels: (a)Developed steel (b)Current steel

EBSD 像のカラーマップで示す赤色は BCC 構造であるフェライトあるいはベイナイトを示し、緑色は FCC 構造である残留 γ を示す。開発材 (a) はフェライトあるいはベイナイトを主相とし、結晶粒界に 1~3 μm の微細な残留 γ が存在する組織であった。一方、現行材 (b) はフェライトあるいはベイナイトを主相とする組織中に残留 γ が存在する複合組織であった。また、X 線回折の結果より開発材の残留 γ 量は 10~13% であり、現行材の 1~2% に比べて約 10 倍の残留 γ を有していた。

3.2 機械的特性

Table3 に引張試験によって得られた供試材の機械的特性の平均値を示す。また、Fig.8 に開発材および現行材および低炭素鋼板の代表的な公称応力-公称ひずみ曲線を示す。開発材の 0.2% 降伏応力 (Y.P.) は約 650MPa、引張強さ (T.S.) は 950MPa、破断伸び (T.EL.) は約 30% であり、現行材の引張強さと比較し、Y.P. は約 50MPa 低く、T.S. は約 100MPa 高く、T.EL. は約 2 倍高い値を示した。また、開発材の均一伸びは低炭素鋼板と同等の約 24% であり、現行材に比べて約 1.8 倍高い値を示し、加工硬化指数 n 値も高い値を示した。

一般に残留 γ を含む鋼板の引張試験においては、変形中の加工誘起変態により残留 γ がマルテンサイトに相変態することで、ひずみの局部集中が抑制されるため n 値が高く、均一伸びが向上することが知られており、これは変態誘起塑性型複合鋼板の特徴である⁷⁾。また、開発材は低降伏比 (Y.P./T.S.) であることから、現行材に比べてプレス成形性に優れる素材であることが言える。以上より、開発材は高い強度レベルで高延性を示す材料であり、優れた強度-延性バランスを有することが分かった。

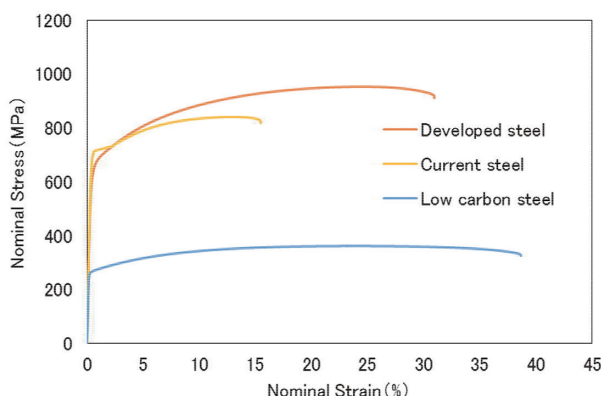


Fig.8 Nominal stress-strain curves of each steels

3.3 円筒絞り成形性

円筒絞り成形性は絞り比を変化させ、成形可否を目視評価した。現行材は絞り比 1.9 で破断したが、開発材および低炭素鋼板は絞り比 2.0 まで成形可能であった。深絞り成形性は鋼板の塑性異方性 (r 値) と良い相関があることが知られている。開発材の平均 r 値は Table3 に示すように 0.99 であり、現行材の 0.98 と同等であったが、高い絞り比まで絞ることが可能であった。これは、残留 γ を多く含む組織は加工誘起変態を生じるが、体積膨張を伴うため、成形時の縮みフランジ部では変態が抑制され、二軸変形モードのパンチ肩部付近では変態が起り破断抵抗が高くなるため深絞り性が向上するとされており^{4) 8)}、本開発材も残留 γ を多く含むことから、高い円筒絞り成形性を示したと考えられる。

Fig.9 に絞り比 1.8 における成形体の外観写真、円筒端部に生じた凹凸の量を円筒の平均高さで規格化した耳率および r 値の面内異方性の度合を示す Δr 値を示す。 Δr は圧延方向に対して 0, 90, 45 度方向の r 値を用いて次式で示される。

$$\Delta r = (r_0 + r_{90}) / 2 - r_{45}$$

Δr は深絞り容器の耳の発生と密接な関係があり、 Δr がゼロに近いほど山谷の発生はなく、円筒端部が平坦

Table3 Mechanical properties of each steels

Specimen	Y.P.(MPa)	T.S.(MPa)	T.EL.(%)	Y.P./T.S.	n -value	r -value
Developed steel	645	950	29.2	0.68	0.22	0.99
Current steel	703	836	14.7	0.84	0.15	0.98
Low carbon steel	261	361	39.0	0.72	0.20	1.54

	Developed steel	Current steel	Low carbon steel
Appearance photo			
Earing rate(%)	4.0	19.4	4.1
Δr	-0.06	-1.09	-0.20

Fig.9 Deep drawing test specimen of each steels

となることが知られている⁹⁾。現行材の耳率 19.4% に対して開発材の耳率は 4.0% と非常に低く、低炭素鋼板相当の値を示し、開発材の Δr は -0.06 と現行材の -1.09 に比べて非常に低い値を示した。その結果、開発材は円筒端部が平坦であり現行材に比べて凹凸が非常に小さい形状を示したと考えられる。これは、開発材は延性を向上させるための残留 γ が結晶粒界に均一に分散していたため、面内異方性が小さくなったと考えられる。以上のように低耳率を示す本開発材は製品のトリム代が少なく製品歩留り向上に繋がるため、プレス成形用の素材として良好な素材と言える。

3.4 張出し成形性および張出し成形体のひずみ分布

張出成形性は限界張出高さにより評価した。Fig.10 に各供試材の限界張出高さを示す。開発材の限界張出高さは低炭素鋼板と同等の 8.1mm であり、現行材と比較し約 23% 向上した。Fig.11 にひずみ解析により得られた各張出高さにおける張出成形体の板厚減少率のカラーマップを示す。図中のカラーマップは張出成形体上部か

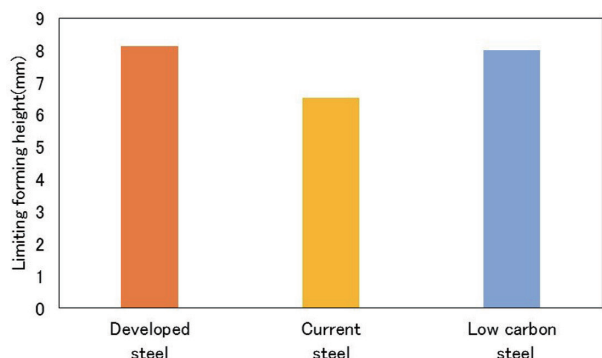


Fig.10 Limiting forming height of each steels

らの視野である。図より張出高さ 6mm において、開発材はパンチ頭頂部から肩部にかけてほぼ均一な板厚減少を示し、現行材はパンチ肩部で局所的に板厚減少率が高い箇所が確認された。一方、低炭素鋼板は開発材および現行材に比べてダイス r 部近傍での板厚減少範囲がやや広く、頭頂部からパンチ肩部においては開発材と同様にほぼ均一な板厚減少を示した。変形が進行した張出高さ 7mm において、開発材はパンチ肩部の周方向で板厚減少率が高くなったが、板厚減少率はほぼ均一であった。一方、低炭素鋼板はダイス r 部近傍での板厚減少に加えパンチ肩部の周方向で板厚減少率が高くなり、パンチ肩部で局所的に板厚減少率が高い箇所が確認された。また、パンチ肩部の板厚減少範囲は開発材に比べ小さかった。破断時において、開発材はパンチ肩部の周方向での板厚減少が進行したが、周方向の板厚減少率はほぼ均一であった。現行材はパンチ肩部の板厚減少は開発材ほど均一ではなく、張出高さ 6.5mm で破断した。一方、低炭素鋼板はダイス r 部近傍の板厚減少範囲がさらに拡大し、パンチ肩部の局所的なひずみ集中により破断した。Fig.12 に成形体側面部からの視野における破断時の板厚減少率のカラーマップを示す。開発材と低炭素鋼板は同等の限界張出高さであるが、開発材は成形体で最も荷重が掛かるパンチ肩部での板厚減少率が高く、低炭素鋼はパンチ肩部での板厚減少率は開発材ほど高くなく、ダイス r 部近傍での低板厚減少率の領域が広いことが分かった。

Fig.13 に各張出高さにおける張出成形体の成形限界線図 (FLD) を示す。図中のカラープロットは Fig.11 のカラーマップに対応している。図より、いずれも等二軸

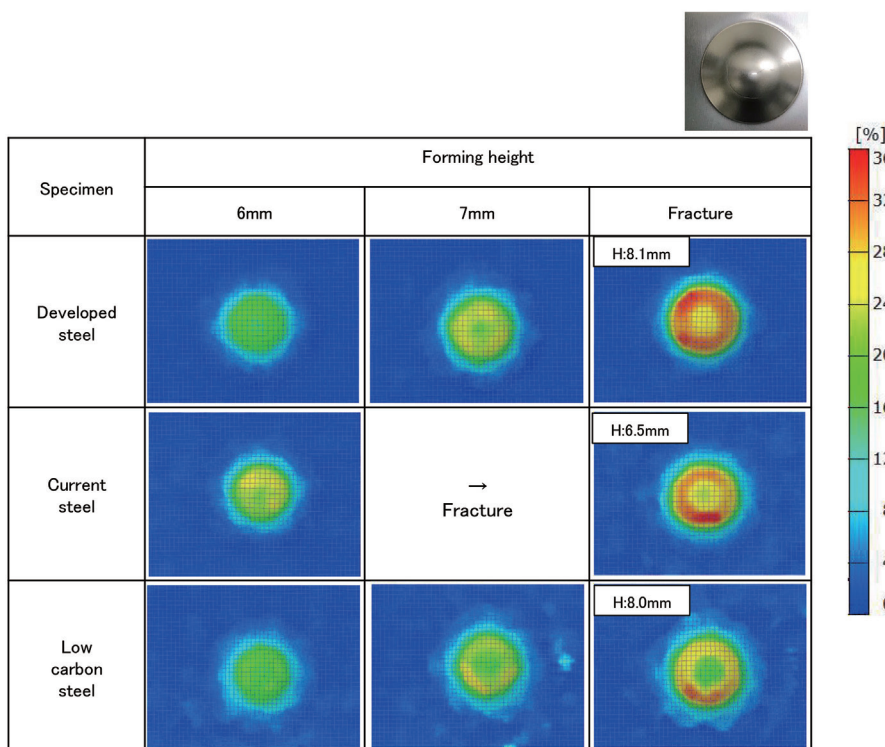


Fig.11 Thickness reduction rate after stretch formability test

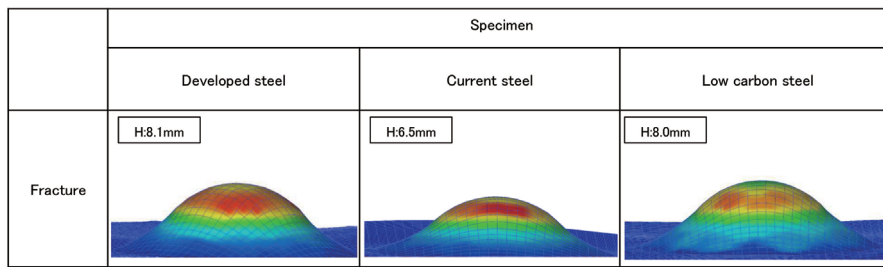


Fig.12 Thickness reduction rate after stretch formability test

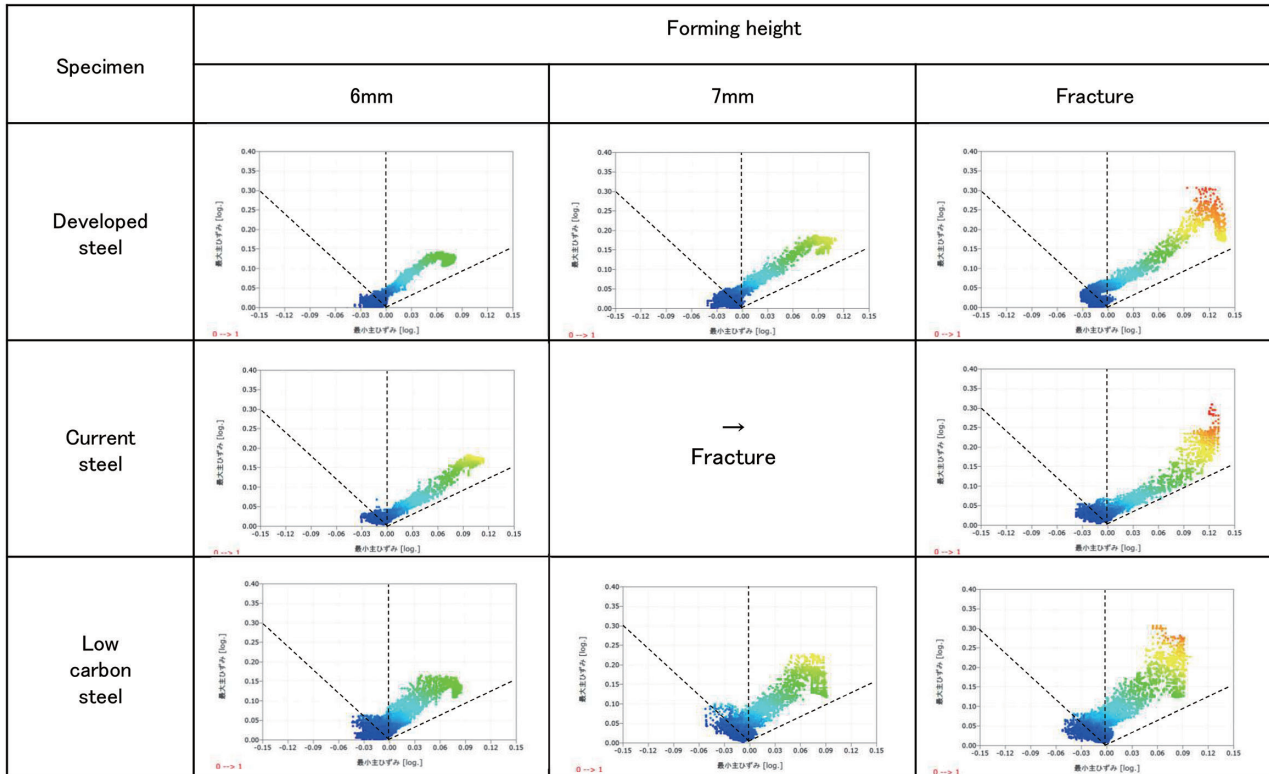


Fig.13 Forming Limit Diagram after stretch formability test

～平面ひずみ変形領域で変形が進行していることが分かる。板厚減少率が低い青～水色は平面ひずみ変形～二軸変形に相当する領域であり、低炭素鋼板は開発材および現行材に比べて平面ひずみ変形箇所が多いことが分かった。この領域は Fig.11 に示したカラーマップにおけるダイス r 部近傍箇所に相当する。また、破断時における最大主ひずみはいずれも同等の 0.3 であるが、開発材の最小主ひずみは 0.12 であり低炭素鋼板の 0.09 に比べてやや大きい値であった。以上のように開発材と低炭素鋼板は同等の張出成形性を有するが、その変形様式は異なっていることが分かった。開発材は低炭素鋼板と比較し、パンチ肩部での変形量が多い結果であったが、これは成形負荷が大きいパンチ肩部で生じる加工誘起変態により加工硬化するため、ひずみの集中が抑制され均一に変形したためであると考えられる。

3.5 成形限界

Fig.14 に各材料の成形限界線を示す。β = 1 は等二軸変形、β = 0 は平面ひずみ変形、β = -0.5 は一軸変形を示す。開発材は現行材に比べ、等二軸変形領域および一軸変形領域が拡大しており、さらに 0 < β ≤ 1 の二軸変形領域においても変形領域が上部に位置していること

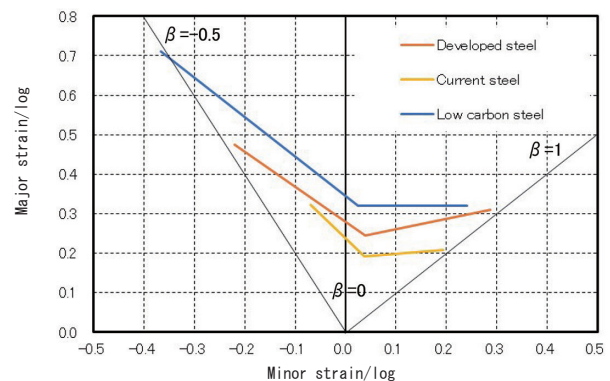


Fig.14 Forming Limit Curves of each steels

から全ての変形モードについて成形性が向上していることが分かった。張出成形では、平面ひずみ～等二軸変形モードで変形が進行し、円筒絞り成形では、フランジ部での縮みフランジ変形～側壁では軸方向の引張応力が優勢の変形モードで変形が進行し、パンチ肩部～パンチ底部では二軸引張モード、すなわち張出変形となる¹⁰⁾。以上のことから、現行材に比べて開発材は全ての変形モードにおいて成形限界が向上したため、優れた成形性を示したと考えられる。

4. 結 言

更なる形状自由度向上のため、現行材の延性改善を目的とし、添加元素 C-Si-Mn を主成分とする T.S.850 ～ 900MPa 級の 0.6mm 以下の薄鋼板を開発し、成形性および成形性に及ぼす変形モードの影響について検討した結果、下記の結論を得た。

- (1) 開発材はフェライト＋ベイナイトを主相とし、結晶粒界に均一に分散する残留 γ を含有する組織であり、良好な強度-延性バランスを示した (T.S.: 850～950MPa, T.EL.: 25～30%)。
- (2) 開発材の円筒絞り成形性は低炭素鋼相当であり、面内異方性が小さく低耳率であった。また、張出成形性についても低炭素鋼同等の良好な成形性であった。
- (3) 張出成形体のひずみ解析の結果、開発材はパンチ接触部の周方向のひずみが均一であり、かつ高 n 値であるため、現行材に比べて優れた張出し性を示したと考えられる。
- (4) 成形限界線より、いずれの成形モードにおいても現行材に比べて成形限界が向上したため、成形性が向上したと考えられる。

引用文献

- 1) 内藤純也, 鈴木励一: R & D 神戸製鋼技報, 69-1 (2019), 60-64.
- 2) 伊藤博康, 大井聡史, 青木晋一, 上田利行: 東洋鋼鋅, 35 (2006), 11-17.
- 3) 吉岡典恭, 橘 美枝: R&D 神戸製鋼所技報, 66-2 (2017), 21-25.
- 4) 中屋道治, 向井陽一: R&D 神戸製鋼所技報, 57-2 (2007), 19-22.
- 5) 杉本公一, 臼井 登, 小林光征, 橋本俊一: 1992, 鉄と鋼, 78 (1992), 1480-1487.
- 6) 林 央: 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌), 50 (2009), 392-397.
- 7) 川田裕之: 鋼材・しなやかで強い鉄鋼材料, (2016), 211-237, NTS.
- 8) 高橋 学: 新日鉄技報, 378 (2003), 2-6.
- 9) 日本塑性加工学会編: わかりやすいプレス加工, (2000), 56, 日本工業新聞社.
- 10) 葉山益次郎: 塑性学と塑性加工 (第 2 版), (1982), 215-216, オーム社.

SUS/Alクラッド材の接合メカニズムと諸特性

梶田貴文*¹・南部光司*¹・黒川哲平*²・丸橋由和*³

Bonding Mechanism and Characteristics of SUS / Al Clad Material

Takafumi HATAKEDA, Kouji NANBU, Teppei KUROKAWA, Yoshikazu MARUHASHI

Synopsis : In recent years, the amount of heat generated by mobile devices have increased along with higher performance and functionality, and heat dissipation measures in the housing have become an issue. SUS/Al clad is expected as a material that satisfies the requirements as a structural material for mobile devices because it has high strength, light weight, and excellent heat dissipation. In this paper, we investigated the manufacturing conditions of SUS/Al clad material by the surface activated bonding. Only the surface adsorbed molecular layers of SUS and Al were removed by RF plasma etching treatment, and after bonding, heat treatment was performed to obtain peel strength comparable to that surface oxide layer removal. From the TEM / EDS analysis, it is considered that the diffusion of the SUS component is progressing in the Al oxide layer. As a result, the productivity could be greatly improved by shortening the RF plasma etching time.

Key Words : surface activated bonding ; stainless steel ; aluminum ; clad ; thermal diffusion ; mobile device

1. 緒言

スマートフォン等のモバイル機器は、CPUの高性能化や5G通信等の高機能化に伴い、各部品の発熱量が増加しており、筐体の放熱対策が課題となっている。放熱性の向上には、熱源から効率良く熱拡散させる必要があり、内部部材には熱伝導性の良い材料が求められている。一方で、携帯性向上のため、各部品の小型化、軽量化といった機能も求められており、単一材ではこのような多様なニーズを満たすことは難しい。そこで著者らは、モバイル機器用の放熱用部材として、ステンレスとアルミニウムのクラッド材（SUS/Alクラッド材）を開発している。クラッド材は2種以上の金属を直接接合することで、単一の金属では得られない機能を有する積層材料である。SUS箔とAl板を貼り合わせることで、高強度で軽量かつ放熱性に優れた材料が得られ、モバイル機器の放

熱用部材としての利用が期待される。

クラッド材の製造方法は種々あるが、モバイル機器用途の板厚1mm以下の薄板クラッド材には、圧延法による接合が適している¹⁾。しかし、一般的な圧延法である熱間圧延法や冷間圧延法では、接合時の圧下率が高く、SUS/Alクラッド材のような硬質材と軟質材の組み合わせでは、接合時の変形が大きくなるため、形状不良となる。そのため、接合後に形状矯正を行うことが一般的であるが、形状矯正を行っても平坦性の改善が難しく、寸法精度が要求されるモバイル機器用途での適用は困難であった。この課題解決のために低圧下率での接合を可能とする方法としては、真空中での常温圧延による異種金属法である表面活性化接合法が報告されている²⁾。表面活性化接合法によるクラッド材の作製プロセスは、まず真空中でプラズマ化したArイオンにより材料表面をエッチングすることで、表面を覆っている吸着物や酸化物を

*1 技術研究所 機能化技術研究部 電子材料グループ クラッド技術チーム

*2 技術研究所 機能化技術研究部 電子材料グループ クラッド技術チーム チームリーダー

*3 技術研究所 機能化技術研究部 電子材料グループ グループリーダー

物理的に除去し、接合面に活性な金属表面を露出させる。その後材料同士を真空中でロール圧接することにより接合が行われる。お互いの材料の活性な表面同士を接合することで、低圧下率での接合が可能となる。それにより、接合時の変形が少なく、形状矯正を行うことで平坦性に優れたクラッド材が得られるため、SUS/Alクラッド材の製造に適している。しかし、プラズマにより表面の酸化膜を完全に除去し、活性な表面を得るには約20nm以上のエッチングが必要である。そのため、エッチング処理時間が長くなり、生産性が悪い課題を有していた。そこで、表面活性化接合法での接合界面状態を分析し、接合メカニズムを調査することで、エッチング時間短縮による生産性向上が可能か検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

SUS/Alクラッド材の素材には、厚み0.05mm～0.1mmのSUS箔（JIS SUS304）および厚み0.17mm～0.4mmのAl板（JIS A1050）を用いた。

2.2 SUS/Alクラッド材の作製方法

Fig.1に本実験で用いた接合装置を示す。本装置は高周波プラズマエッチングチャンバーと圧延チャンバーで構成されている。エッチングチャンバーには上下電極間に開閉可能なシャッターが設置されており、上部と下部で別々に高周波プラズマエッチングが可能である。サンプル作製は、SUS箔とAl板をカセットに取り付け、エッチングチャンバー内の上下電極に設置し、 1.0×10^3 Pa以下まで真空引きを行った後、 3.0×10^1 Pa分圧のArガスをエッチングチャンバーに導入し、SUS箔とAl板にそれぞれ高周波プラズマエッチングを行った。プラズマ処理後にArガス導入を停止し、シャッターを開放後、両材料を重ね合わせて圧延機に送り、圧延荷重0.4MNにてロール圧接することでクラッド接合した。

その後チャンバーからサンプルを取り出し、熱処理を行い、SUS/Alクラッド材を作製した。

2.3 評価方法

2.3.1 オージェ電子分光装置による深さ方向の元素分析

SUS箔およびAl板表面の吸着層や酸化皮膜厚みの分析およびSUS/Alクラッド材の界面分析には、オージェ電子分光装置（AES：Auger Electron Spectroscopy, 日本電子㈱製JUMP-7000）を用い、深さ方向の元素分析を行った。

2.3.2 ピール強度測定

SUS/Alクラッド材の密着力評価として、JIS C6471に準拠して、180°ピール試験を行った。ピール試験は幅

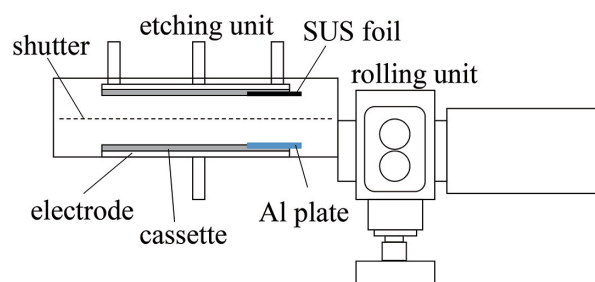


Fig.1 Schematic of SUS/Al bonding equipment

20mmに切り出した試験片を引張試験機（Orientec製Tensilon万能材料試験機）により、室温（25℃）で試験速度50 mm/minにて皮膜のみを180°に剥離させたときの荷重を測定した。

2.3.3 SUS/Alクラッド材の界面観察および元素分析

SUS/Alクラッド材の界面分析には、電界放射型透過電子顕微鏡（FE-TEM: Field-Emission Transmission Electron Microscope, 日本電子㈱製JEM-2010F型）を用いて観察を行い、エネルギー分散型X線分光器（EDS: Energy Dispersive X-ray Spectrometer ノーラン製UTW型Si(Li)半導体検出器）を用いて元素分析を行った。

3. 結果および考察

3.1 クラッド素材の表面状態

一般的に金属表面には有機物や水分、ガス等の吸着分子による表面汚染や酸化膜が存在しており、これらは金属同士の接合を阻害することが報告されている³⁾。そこで、クラッド素材の表面状態をAES分析により調査した。Fig.2にSUS箔とAl板のAES深さ方向の炭素元素の分析結果を示す。吸着分子による表面汚染由来の成分であるCは、両素材とも表面から1nm程度で消滅していることから、表面吸着分子層は1nm程度の厚みであった。Fig.3にSUS箔とAl板のAES深さ方向の元素の分析結果を示す。酸化膜由来のOは、SUS304では表面から10nm程度、Al板では20nm程度で完全に消滅した。よって、今回使用したSUS箔とAl板は、2nm程度のエッチング量で表面吸着分子層が除去でき、20nm以上のエッチング量で酸化膜が完全に除去された清浄な表面を得られることがわかった。

3.2 エッチング量の接合強度への影響

Table1に示すように、厚さ0.05mmのSUS箔と厚さ0.17mmのAl板を用いて、プラズマエッチング時間を変化させ、エッチングなしのもの（Sample 1）、表面吸着分子層を除去したもの（Sample 2）、酸化膜まで完全に除去したもの（Sample 3）の3種のSUS/Alクラッド材を作製した。クラッド接合後（熱処理前）の状態では、Sample 1は全く接合しなかったが、Sample 2

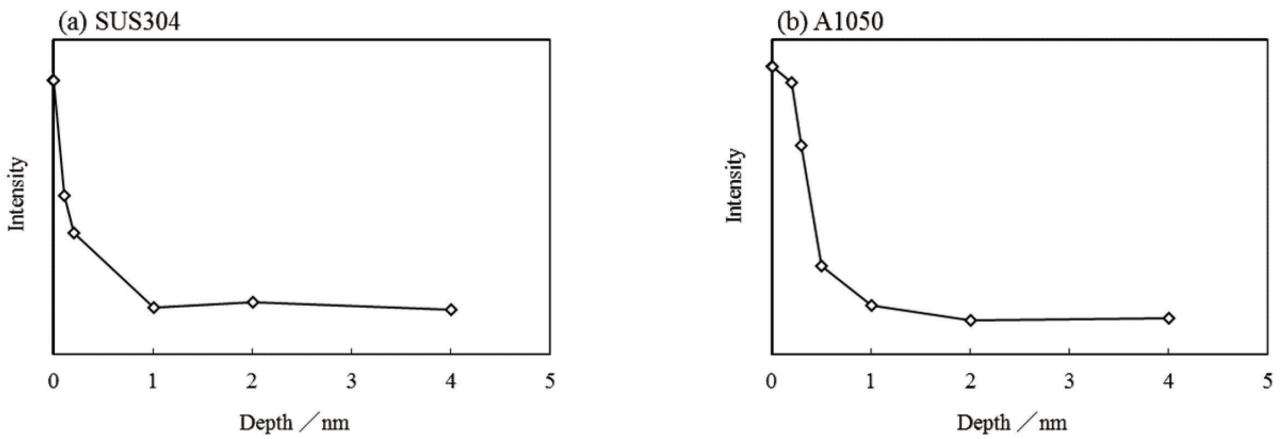


Fig.2 AES depth analysis of carbon atoms of raw material: (a) SUS304 (b) A1050

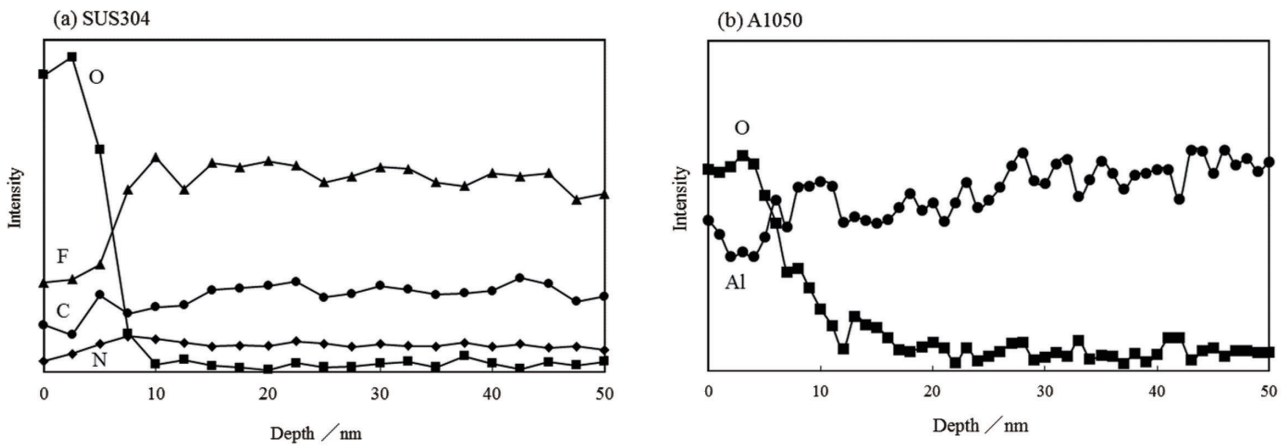


Fig.3 AES depth analysis of raw material: (a) SUS304 (b) A1050

Table1 Manufacturing conditions for SUS / Al clad

Sample No	Material	RF plasma power (W)	RF treatment time (min)	Etching depth (nm)		Heat treatment	Bonding strength
				Al material	SUS material		
1	0.05mm SUS304	-	-	0	0	240°C 30min	Poor
2	0.17mm A1050	700	1.5	5	4		Good
3		700	180	600	460		Good

と Sample 3 は接合可能であった。したがって、接合には表面吸着分子層の除去が必要であることがわかった。Fig.4 にクラッド接合後の SUS/Al クラッド界面の AES 分析結果を示す。Sample 2 は SUS/Al クラッド界面に O ピークが見られることから、酸化膜が残存した状態で接合している。一方で Sample 3 は O ピークが見られないことから、清浄な金属同士で接合している。Fig.5 に Sample 2 と Sample 3 のクラッド接合後と 230°C 30min 熱処理後のピール強度を示す。クラッド接合後のピール強度を比較すると、Sample 2 が 5.2N/cm であるのに対し、Sample 3 が 9.4N/cm であり、酸化膜が残存する場合、ピール強度は酸化膜が残存しない場合の半分程度まで低下した。しかし、熱処理後は両サンプルともピール強度が向上し、Sample 2 が 17.2N/cm であるのに対し、Sample 3 が 17.9N/cm と同程度の値となった。よって、表面吸着分子層が除去できていれば、酸化膜は完全に除去せずとも接合は可能であり、さらに熱処理を

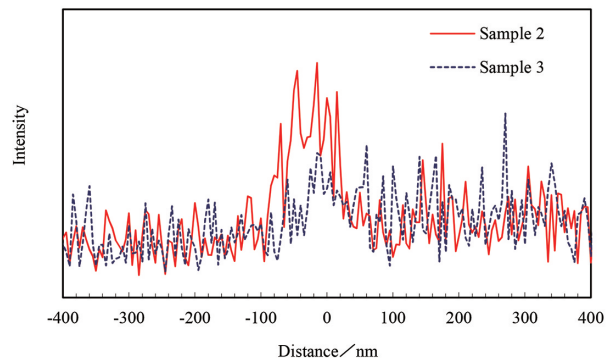


Fig.4 AES depth analysis of oxygen atoms of SUS/Al clad material after bonding

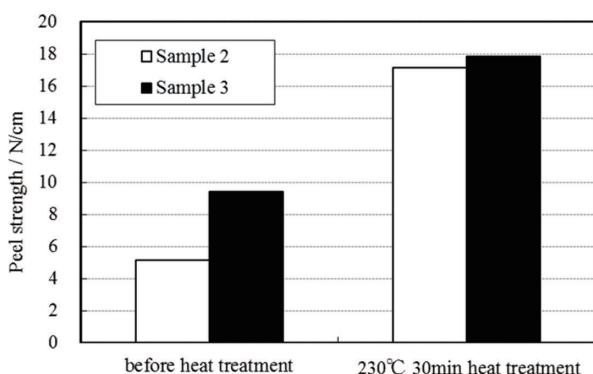


Fig.5 Peel strength of SUS / Al clad material before and after heat treatment

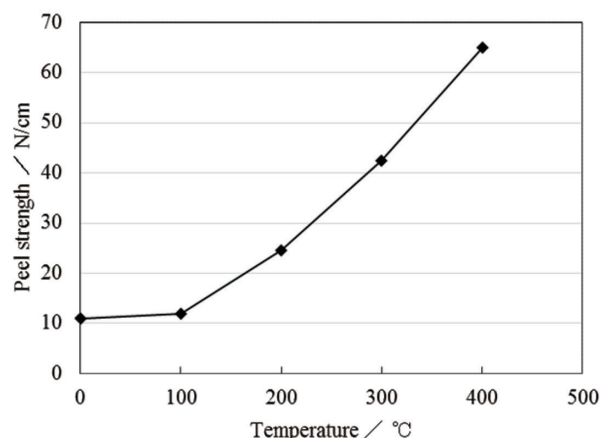


Fig.6 Effect of temperature on peel strength of SUS / Al clad material

行うことで清浄な金属同士の接合同程度のピール強度が得られることがわかった。SUS/Al 冷間圧延クラッド材において、熱処理によりピール強度向上する要因として、接合時の金属原子の熱拡散が報告されている⁴⁾。本実験において酸化膜が残存していても、熱処理を行うことで酸化膜を完全に除去した場合と同程度ピール強度が得られたのは、熱拡散が影響している推測された。そこで酸化膜が残存している状態での熱処理の影響について詳細な調査を行った。

3.3 熱処理による接合強度への影響

Table2 にクラッド材の作製条件を示す。厚さ 0.1mm の SUS 箔と厚さ 0.4mm の Al 板を用いて、酸化膜が残存した状態でクラッド接合した SUS/Al クラッド材を作製し、熱処理温度 100°C から 400°C、保持時間 240min にて熱処理を行った。Fig.6 に各熱処理温度でのピール

強度を示す。ピール強度は 200°C 以上で増加し、400°C ではクラッド接合時の約 6 倍までピール強度が向上した。一般的に SUS と Al との接合においては、熱処理により相互の原子拡散が起こると接合界面に脆弱な Fe-Al 系金属間化合物層が生成され、接合強度の低下が生じることが知られている²⁾。今回の実験において、熱処理によってピール強度が向上した要因を明らかにするため、熱処理による界面状態の変化について調査した。Fig.7 に熱処理温度 100°C、200°C および 400°C での SUS/Al 界面の TEM 像を示す。SUS/Al 界面にはいずれの熱処理温度においても金属間化合物層の生成が確認されなかった。より微細な領域での金属原子の拡散状態を調査するため、SUS/Al 界面を中心に 5nm 間隔で EDS スポット分析を行い、各金属原子の拡散状態を調べた。Fig.8 に SUS/Al クラッド界面の EDS 元素分析結果を示す。熱

Table2 Manufacturing conditions and heat treatment conditions for SUS / Al clad material

Sample No	Material	RF plasma power (W)	RF treatment time (min)	Etching depth (nm)		Heat treatment
				Al material	SUS material	
4						-
5	0.1mm SUS304 0.4mm A1050	700	1.5	5	3	100°C 240min
6						200°C 240min
7						300°C 240min
8						400°C 240min

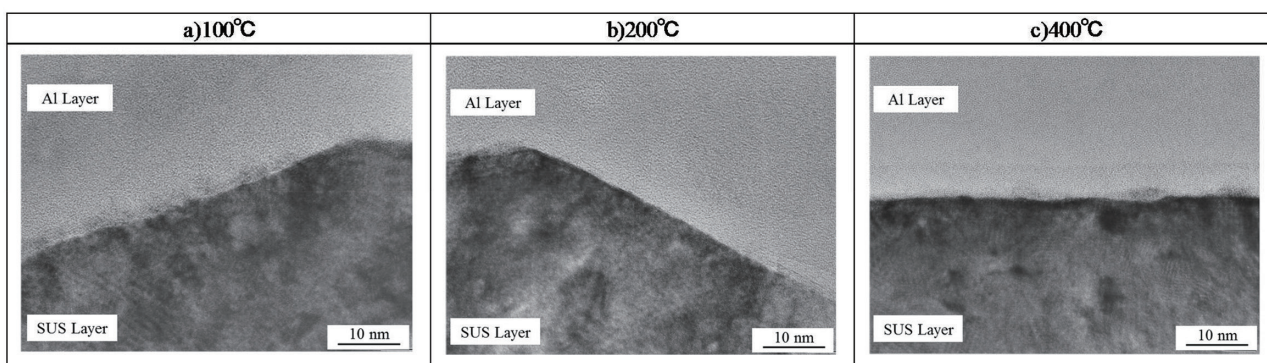


Fig.7 TEM image of SUS / Al clad material bonding interface after heat treatment at a) 100 °C, b) 200 °C, c) 400°C

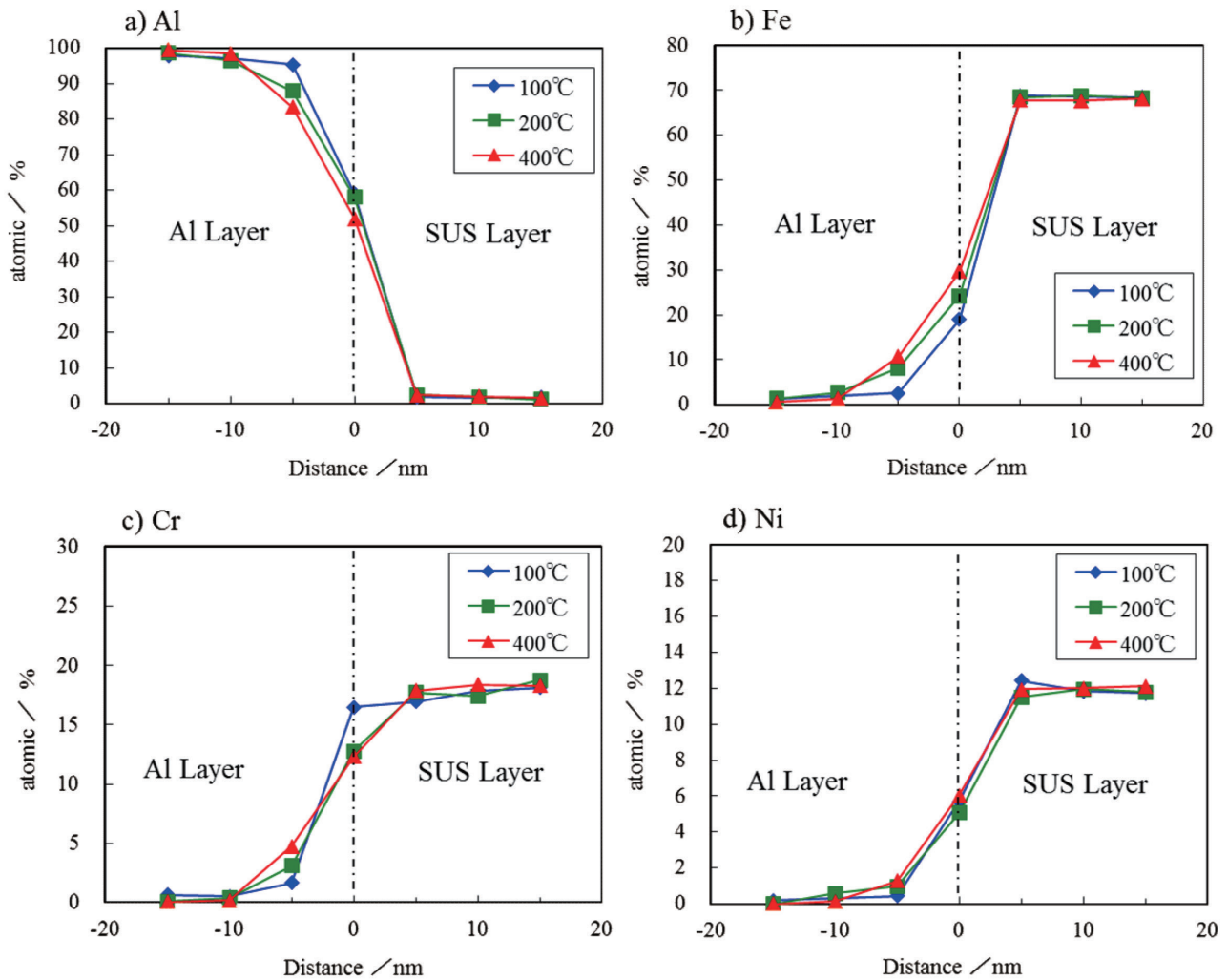


Fig.8 EDS analysis result of diffusion state of metal atoms a) Al, b) Fe, C) Cr, d) Ni at the bonding interface of SUS / Al clad material after heat treatment

処理を行わない場合とピール強度に変化がなかった熱処理温度 100°C の条件では、接合界面の金属原子拡散は見られなかった。対して、ピール強度が増加した熱処理温度 200°C および 400°C では、界面から Al 側に 5nm の箇所まで SUS 成分である Fe, Cr, Ni がそれぞれ増加しており、Al 層中への SUS 成分の拡散が認められた。Al 側に 5nm の箇所での SUS 成分の濃度は 100°C < 200°C < 400°C の順に増加しており、SUS 成分の拡散量の増加とピール強度増加には相関が見られた。また、Al 層への SUS 成分の拡散距離は、400°C 以下の温度範囲においては 10nm 以下であった。SUS/Al 界面は SUS 酸化膜と Al 酸化膜を介して接合しており、SUS と Al の酸化膜層が 10nm 以上残存していることから、拡散は母材までは進行しておらず、酸化膜間で生じていると考えられる。さらなる詳細なメカニズムの解明には、より微細な構造解析が必要であり、今後も調査を進める。

4. SUS/Al クラッドの製品例と諸特性

本実験により、表面活性化法による SUS/Al クラッドでは、クラッド接合後に 200°C から 400°C での熱処理を行うことで、クラッド工程でのエッチング処理時間の短縮が可能であることを見出した。これによりクラッド生産ラインにてライン速度を従来の約 3 倍以上増速でき、生産能力の大幅な向上が達成できた。Fig.9 に SUS/Al クラッド材の製品例を示す。本製品はスマー

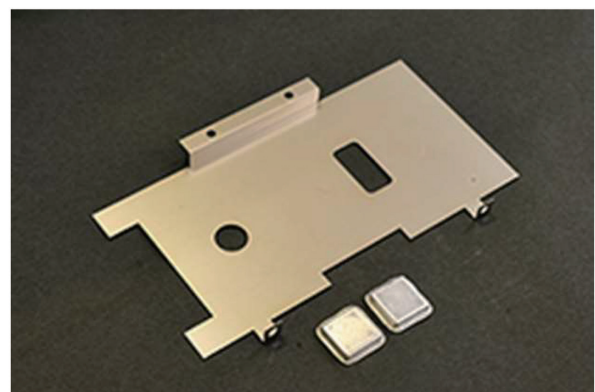


Fig.9 Product example of SUS / Al clad material: 0.05mmSUS304 / 0.2mmA1050 / 0.05mmSUS304

Table3 Characteristic value of SUS / Al clad material

	Clad material		Single material	
	Measured value	Calculated value	A1050	SUS304
Thickness / mm	SUS304	0.05	0.3	0.3
	A1050	0.2		
	SUS304	0.05		
Hardness / HV	320	320	69	315
Density / g/cm ³	4.4	4.4	2.7	7.9
Thermal conductivity / W/mK	163	163	236	16.3
Tensile strength / MPa	401	433	229	841
Yield strength / MPa	360	330	191	608
Elongation / %	14	12	4	28
Peel strength / N/cm	15	-	-	-

トフォンの放熱用プレート材であり、クラッド材の構成は0.05mm SUS304/0.2mm A1050/0.05mm SUS304である。パイメタル効果による温度変化での変形を抑制するため、表裏対称の3層クラッド材としている。Table3に SUS/Al クラッドの諸特性を示す。0.05mm SUS304/0.2mm A1050/0.05mm SUS304 の構成では、A1050 単一材と比較し、引張強度および耐力が約1.8倍向上した。また、SUS304 単一材と比較し、比重は約45%減少、熱伝導率は10倍まで向上しており、強度と軽量性および放熱性のバランスが優れている。また、SUS/Al クラッド材はSUSとAlの比率を変更することで、特性を自在にカスタマイズ可能である。SUS/Al クラッドの特性値(χ)は素材の特性値(χ_{SUS} , χ_{Al})と体積分率(ϕ_{SUS} , ϕ_{Al})より、次のように複合則で簡易的に予測できる。

$$\chi = \chi_{SUS} \phi_{SUS} + \chi_{Al} \phi_{Al} \quad (1)$$

実際に SUS/Al クラッドの比重、引張強度、耐力、伸びの測定値は、いずれも複合則に近い値であった。従って、複合則による予測を用いることで顧客のニーズに合わせた材料設計も容易である。

次にモバイル機器への実装を想定した放熱特性の評価を行った。Fig.10にサーモグラフィーを用いた SUS/Al クラッドの放熱性試験の概要を示す。比較対象としては、厚み0.3mmの SUS304 と放熱性改善によく用いられる厚み0.05mmのグラファイトシート(GS)を片面に貼った厚み0.25mmの SUS304 を用意した。サンプルサイズは56mm×90mmとし、サンプル端部にヒーター出力1W、接触面積12mm×12mmのヒーターを取り付けた。ヒーターの電源を入れ、10min後に温度が安定した時点での熱拡散状態をサーモグラフィーにて評価した。Fig.11に放熱性試験の結果を示す。熱拡散状態を比較すると、SUS < GS+SUS < SUS/Al クラッドの順に

- 【Test conditions】**

 - Heater power: 1W
 - Heater size: 12mm × 12mm × 2.5mm
 - Sample size: 56mm × 90mm × 0.3mm
 - Ambient temperature: 22°C
 - Thermally conductive interface tapes
: Thermal resistance 1.7 cm²·K/W
 - Thermography: FLIR C3-X

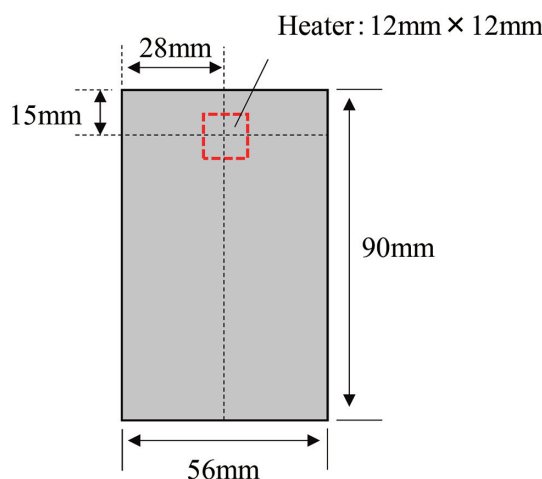
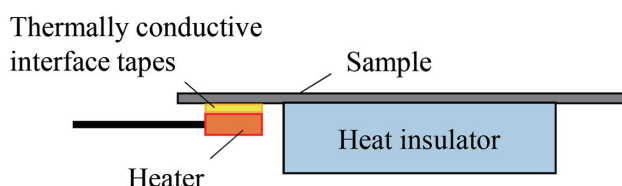


Fig.10 Heat dissipation evaluation test method

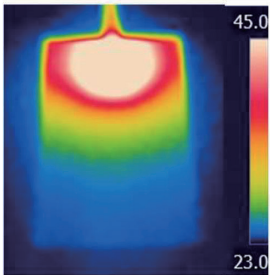
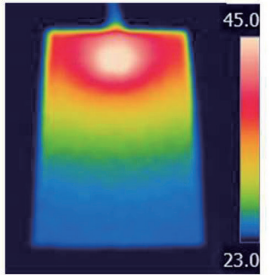
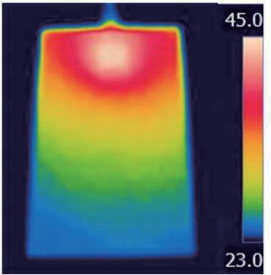
Sample	0.3mm SUS304	0.05mm GS /0.25mm SUS304	0.05mm SUS304 /0.2mm A1050 /0.05mm SUS305
Thermography image			
Heater temperature / °C	73.2	48.2	44.7

Fig.11 Results of heat dissipation test

熱源から熱が遠くまで拡散しており、熱拡散性は SUS/AI クラッド材が最も優れていることが分かった。ヒーター温度も SUS が 73.2°C、GS+SUS が 48.2°C に対し、SUS/AI クラッドが 44.7°C と最も低く、温度上昇を抑制できることがわかった。したがって CPU 等の放熱対策として SUS/AI クラッドは有用であると考えられる。加えて、従来のグラファイトシートを SUS/AI クラッド材に置き換えることで、貼り付け工程の省略も可能となる。さらに SUS/AI クラッドの利点として、グラファイトシートが貼れない複雑形状にも加工できるため、熱拡散面積を拡大でき、より効果的に放熱性を向上させることが可能である。以上の結果から SUS/AI クラッド材は放熱用プレート材等の放熱部材に適した材料である。

5. 結 言

SUS304 と A1050 の表面活性化接合において、接合前の素材の表面状態を AES 分析した結果、SUS304 および A1050 の最表面には 1nm 程度の表面吸着分子層が存在し、その下に酸化膜が SUS304 は 10nm 程度、A1050 は 20nm 程度存在することがわかった。そこで、エッチング量を変化させ、表面吸着層と酸化膜の接合性への影響を調査し、エッチング時間短縮による生産性向上が可能か検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 表面吸着層のみを除去することでクラッド接合が可能であり、クラッド接合に必要なエッチング量は 2nm 以上である。
- (2) クラッド接合後に熱処理を行うことで、SUS/AI 界面に酸化膜が残存している場合でも完全に酸化膜を除去したものと同程度の高いピール強度を得ることができる。
- (3) クラッド接合後の熱処理は 200°C 以上でピール強度が向上し、400°C のときピール強度が最も高かった。熱処理でのピール強度増加は SUS/AI 界面での酸化膜間の原子拡散が寄与していると考えられる。

以上の知見より、SUS/AI クラッド材の製造において、

クラッド接合後に熱処理を行うことで、エッチング処理時間が短縮でき、生産性が大幅に向上した。SUS/AI クラッド材は強度と放熱性に優れ、軽量であるため、今後スマートフォン等のモバイル機器の放熱用部材への適応が期待される。

引用文献

- 1) 奥井利行, 米満善久, 吉田健太郎: 新日鉄住金技報, 396 (2013), 106-110.
- 2) 西條謹二, 吉田一雄, 平松裕更: 東洋鋼鉄, 29 (1991), 55-64.
- 3) 西條謹二, 吉田一雄, 磯部剛彦, 宮地昭夫, 小池一幸: まてりあ, 39 (2000), 172-174.
- 4) 奥井利行, 潮田浩作: 鉄と鋼, 105 (2019), No.1, 38-47.

ピンホール検出器における斜め孔検出方法の開発

馬場崎陵^{*1}・三宅勝也^{*2}・今重 薫^{*3}

Development of Diagonal Hole Detection Method in Pinhole Detector

Ryo BABASAKI, Katsunari MIYAKE, Kaoru IMASHIGE

Synopsis : Pinhole detector is a device that detects minute holes that penetrate in the thickness direction of the target. The causes of pinholes are falling off of non-metallic inclusion and cracking during cold-rolling. As a general inspection method, the target is irradiated with light to detect the transmitted light from the hole, but in the case of a diagonal hole, the transmitted light is less than that of a vertical hole, and it may not be detected. Therefore, we have developed a detector that can detect diagonal hole and improved the detection capability. The developed pinhole detector uses two linear Fresnel lenses to focus the LED light in one place. By making the light at the same angle as the diagonal hole, the amount of transmitted light can be increased. In addition to this, by using an optical fiber that can propagate only the light incident from a predetermined angle, it is possible to reduce the influence of light other than transmitted light that reduces the S/N ratio.

Key Words : pinhole detector; pinhole; diagonal hole; lens; optical fiber; minute non-metallic inclusion

1. 緒言

ピンホール検出器とは、被検査対象（以下、本報では冷間圧延鋼板を例にとる）の厚み方向に貫通した直径数十マイクロメートル程の微小な欠陥（以下、ピンホールと称する）を検出することを目的とした装置である。鋼板にピンホールが発生する原因としては、材料中の介在物の冷間圧延による脱落やひび割れ等があり、ピンホールの直径も板厚や介在物の大きさで様々である¹⁾。ピンホールを検出するための手法として、鋼板に光を照射し、孔からの透過光を受光器でとらえて、ピンホールを検出する方法を用いているが、ピンホールは、必ずしも鋼板表面から垂直に貫通しているとは限らず、傾斜して貫通しているもの（以下、斜め孔ピンホールと称する）が稀に発生する。これらは、垂直に貫通しているピンホールに比べて透過光量が弱く、角度が大きい場合には光が透過できず、検出できない可能性がある。

本報では、ピンホール検出器の概要および、開発したピンホール検出器における斜め孔の検出方法について報告する。

2. 従来型ピンホール検出器の検出原理と課題

1) ピンホール検出器の検出原理

ピンホール検出器は、鋼板に光を照射する投光器と、光検出素子を有する受光器から構成されている。ピンホールが存在する場合、投光器から照射した光は受光器側に透過する。この透過した光量に応じて検出素子からの出力が変化し²⁾、出力が判定しきい値を超えた時にピンホールと判定している。ピンホールからの非常に微弱な光を検出しているため、設備近傍に設置された照明や、鋼板端部より回り込む投光器の光の影響（以下、外乱光と称する）は可能な限り小さくすることが求められる。透過光(Signal)と外乱光(Noise)の比を高くとることが

*1 下松事業所 エンジニアリング部 計装グループ 計装第1チーム

*2 下松事業所 エンジニアリング部 部長

*3 元 下松事業所 エンジニアリング部 計装グループ

できれば、受光器の光に対する感度を高くし、より小さなピンホールを検出することが可能となる。

2) 検出方法における課題

ピンホールは必ずしも鋼板表面から垂直に貫通するとは限らず、傾斜して貫通するものも存在する。同じ光束の照射光が、垂直および角度 θ で斜めからピンホールに入射した場合、受光器上では、斜行入射光量は垂直入射光量の $\cos \theta$ 倍となる。つまり、斜め孔ピンホールを透過する光はピンホールの傾斜角が大きいほど小さくなり、検出が困難になる。また、投光器 (LED) は通常、鋼板に対して垂直に設置されるため、照射された垂直光または拡散光は斜め孔ピンホールからは反射ないし拡散した光が透過するため、さらに微弱な光となり、検出が難しい。

しかし、斜め孔ピンホールでも、Fig.1 の A に示すとおり、貫通した孔の方向が鋼板の幅方向、すなわち投光器および受光器の長手と平行である場合には、傾斜角にもよるが検出が可能である。これは投光器の発光面が鋼板幅よりも広く、光は放射上に広がることから、ピンホールのある箇所照射される光は発光幅の積分となり、様々な角度の光と光量を有するためである。検出素子も幅方向に並べられるため、光を検出することが可能である。しかし、Fig.1 の B に示すように鋼板の幅方向に対して垂直である場合には、貫通方向と照射された光の向

きが同一直線になりやすく、透過した光が受光器に入らない場合は検出することが出来ない。検出可能な面を大きくすればこの問題は解決するが、同時に外乱光を受ける可能性のあるエリアを増やすことにもなり、一概に検出能力が上がるとは限らない。そこで、斜め孔ピンホールを透過した光を、受光器まで導くことが可能となる仕組みの開発を行った。

3. 斜め孔検出方法の開発および検出能力向上の検討

1) 斜め孔検出可能な光学設計の検討

斜め孔ピンホールが検出困難である要因は第2章で述べたが、主となる要因は投光器から照射した光がピンホールを透過し、受光器に至るまでの光が拡散光のみで同一直線上に少ないためである。そこで、レンズを用いて光を屈折させ、斜め孔ピンホールを透過可能なベクトルの光を鋼板へ照射する方法の検討を行った。

レンズは入射した光を屈折させる性質がある。この性質を利用して斜め孔の角度と同じになるよう光を屈折させることで、斜め孔ピンホールをダイレクトに透過し、検出可能な光量を確保できると考えた。また、透過した光を受光器に入射させるための方法として、光ファイバーを採用した。光ファイバーは開口数により、伝搬可能な入射角の光が限定される。この性質から、検出した

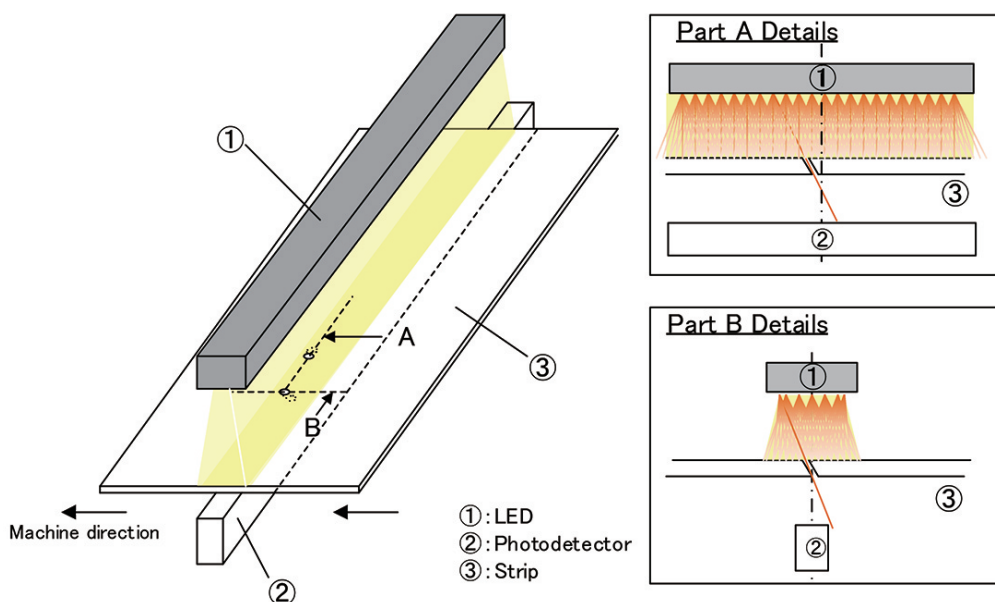
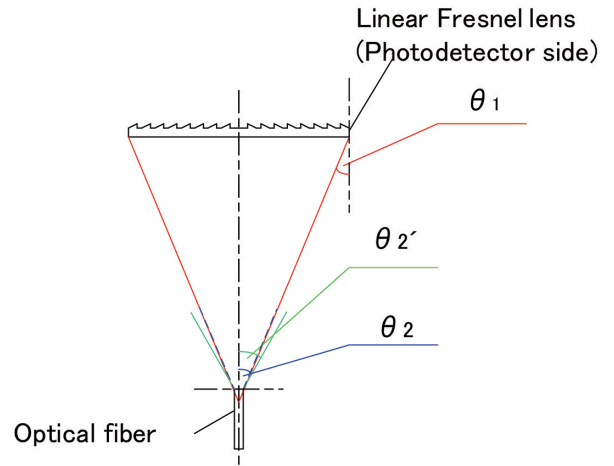


Fig.1 Schematic view of light path through the strip

い斜め孔から透過した光の角度 $+5^\circ$ を伝搬可能な開口数の光ファイバーを使用することで、外乱光は伝搬せず、透過光のみが受光器に届くようになり S/N 比を向上させることが可能となる。

Fig.2 に使用する光ファイバーの開口数と透過光の関係を示す。また Fig.3 にレンズおよび光ファイバーを使用した装置構成を示す。鋼板と光源との間に、光ファイバー端面に焦点を結ぶようレンズを配置している。これにより、光源の光軸から広がる光を再び光軸に接近するように収束させている。光ファイバーにおける入射側は 1 本ずつ 1 列に並べられており、出射側は Fig.4 に示すように端面を揃えて筒状に束ねられている。入射側で受けたピンホールからの透過光は光ファイバー内部を伝搬（全反射）し出射側の端面から受光器に照射される。伝搬可能な範囲外から入射した光は、端面まで伝搬されず、



- θ_1 : Maximum refraction angle refracted by the lens
- θ_2 : Maximum angle at which incident light can propagate
- θ_2' : Add 5° to Maximum angle that can be propagated

Fig.2 Relationship between numerical aperture and transmitted light angle

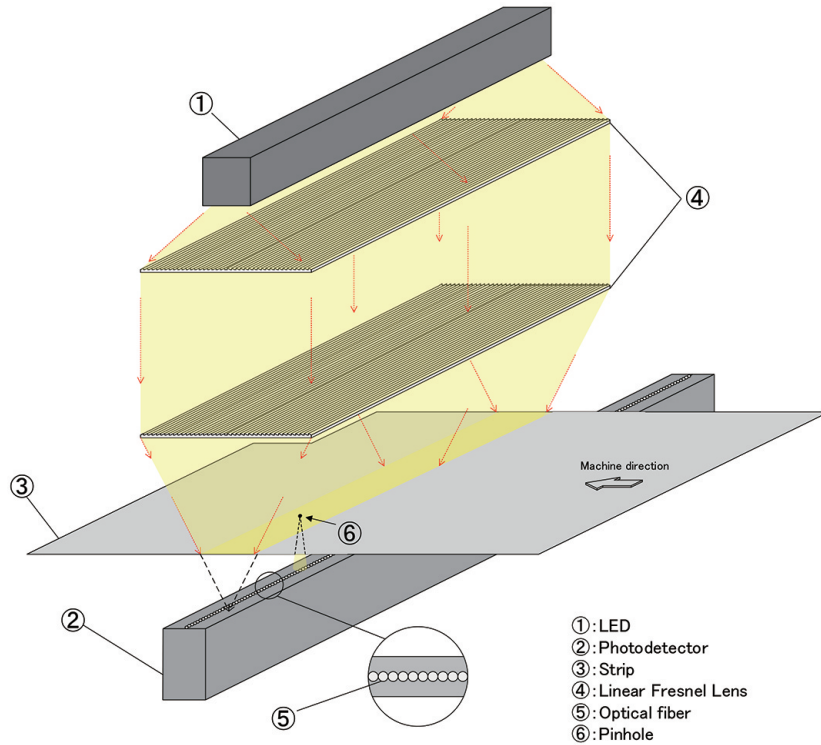


Fig.3 Detector configuration using linear Fresnel lenses and optical fiber

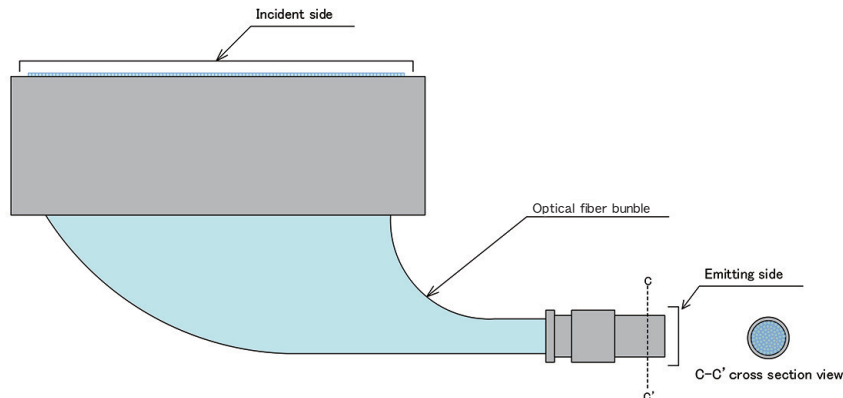


Fig.4 Schematic view of optical fiber unit

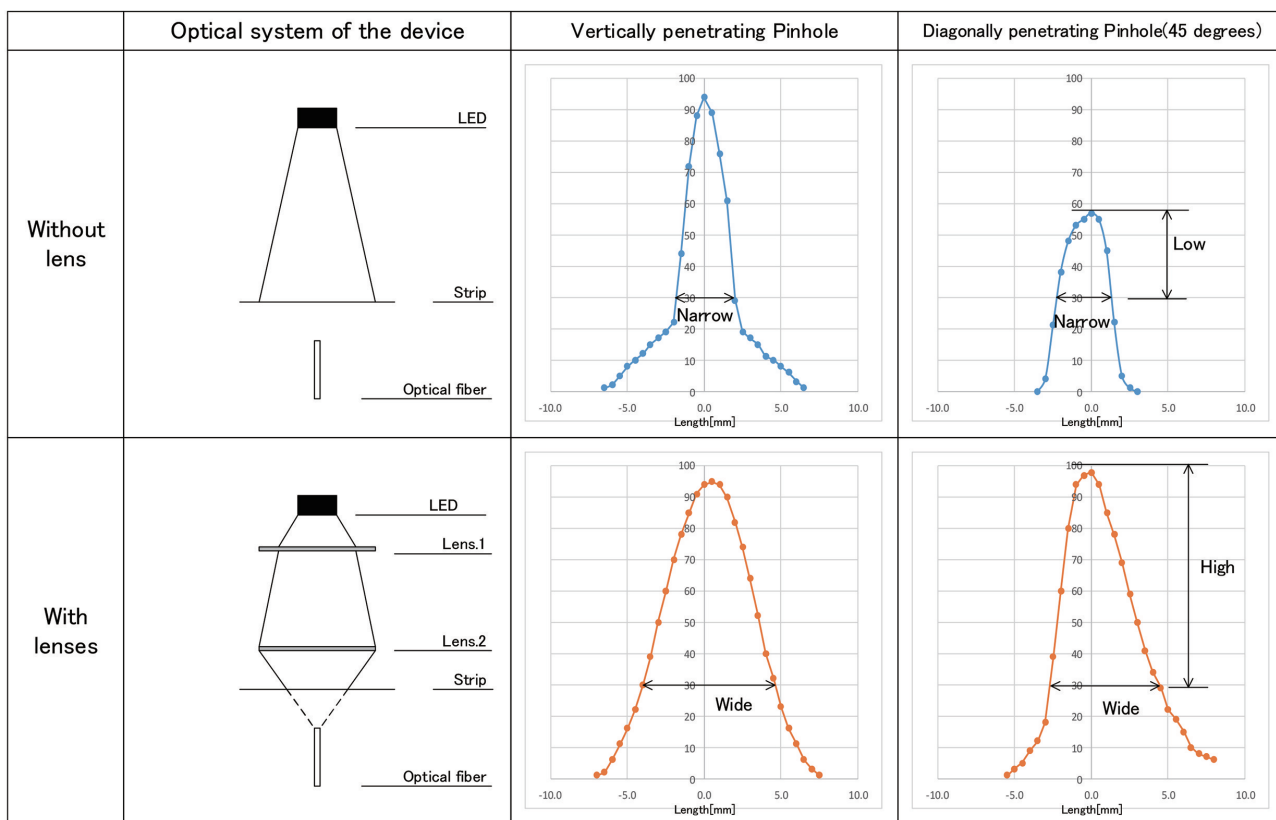
放射光として伝搬経路の途中で光ファイバー外周より放出される。これらの組み合わせにより、従来使用していたピンホール検出器では、特殊な遮光材を用いて受光面周囲を覆わなければならなかったが、開発したピンホール検出器ではそれらを使用せず、さらにより微小な孔に対しても検出感度を得ることが可能となった。

2) 検出レベルの比較

Fig.5 に当社で従来使用していたピンホール検出器と、今回新たに設計した検出器で同一のピンホールサンプル板を用いて測定を行った結果を示す。レンズを使用していない従来のピンホール検出器では、垂直孔ピンホールからの透過光に対して非常にシャープに検出素子の出力が増加しており、ピンホールを検出する時間は短い。また斜め孔ピンホールに対しては、垂直孔ピンホールに比

べて半分程度の出力に留まっている。

一方でレンズを使用して光ファイバーの入射面をレンズの焦点位置に配置すると、検出器が検出するピンホールの透過光による立ち上がりはレンズのない場合よりも緩やかになり、検出時間は長くなる。また斜め孔ピンホールに対しても垂直孔ピンホールと同等の出力を得ることができている。このようにレンズの使用により、従来に比べ斜め孔ピンホールにおける検出素子からの出力を大きくとることが可能であり、垂直孔ピンホールに関しても透過光を検出可能な幅が大きくなることが確認された。検出する時間が長くなったことにより、鋼板の移動速度によって従来では検出できないピンホールでも、新たに開発した検出器を用いることで検出可能となることが期待される。



※ Since the sample used for measurement has a large hole, the detection value is high even without lens.

Fig.5 Comparison of detection levels using optical fiber

4. 結 言

本報では、新規に検討したピンホール検出器の斜め孔ピンホールの検出方法について紹介した。レンズおよび光ファイバーを使用することで、照射光が斜め孔ピンホールを透過出来るようになり、ピンホール透過光以外の外乱光の影響を低減できるため、安定した検出能力を得ることが可能となった。また、外乱光の影響を低減できたことにより、従来では検出できなかった、より小さな径のピンホールを検出可能になるため、さらなる検出能力向上の検討を行う。

引用文献

- 1) 岡本博, 佐々木宗男, 山崎篤, 堂本靖博: 東洋鋼鉄, 33(2002), 17-22.
- 2) 浜松ホトニクス株式会社: 光電子増倍管—その基礎と応用—, 第4版(2017).

東洋鋼鋳

VOL. 41

令和4年5月 印刷
令和4年5月 発行

〔非売品〕〔禁無断転載〕

発行責任者 山口県下松市東豊井1296の1
菊地 淳

発行人 山口県下松市東豊井1296の1
東洋鋼鋳株式会社技術研究所

印刷人 山口県下松市大字東豊井1364番地
睦美マイクロ株式会社