

# 独自ステンレス製品の開発

## Development of Stainless Steel Oriented Functional Products

奥井利行\*  
Toshiyuki OKUI

松本実菜美  
Minami hanai MATSUMOTO

阿部賢  
Masaru ABE

長崎健一  
Kenichi NAGASAKI

### 抄 録

ステンレス鋼の製造技術を基盤として開発し製品化を進めてきた独自ステンレス製品の中から、リーニ二相ステンレス形鋼と Al/SUS クラッド薄板を取り上げ、その製造技術と製品特性について紹介する。リーニ二相ステンレス形鋼では、製造プロセス中の大気加熱によるスケール成長挙動について実験結果を示すとともに、材料が持つ特徴ならびに、これを活用した構造物製品の例を示した。Al/SUS クラッド薄板では、接合強度におよぼす熱処理の影響に注目して、その接合機構ならびに破壊機構を考察した結果を示す。

### Abstract

We have been developing various functional products based on stainless steel manufacturing technology. In this paper, we have taken up two products, shaped stainless steel and Al/SUS clad sheets, and introduce their manufacturing technology and product characteristics. For the lean-type duplex stainless shaped steel, experimental results were shown on the scale growth behavior due to atmospheric heating during the manufacturing process, and the characteristics of the material and examples of structural products were shown. For Al/SUS clad sheet, the bonding mechanism and fracture mechanism were clarified in consideration of the effect of heat treatment on the bonding strength.

## 1. 緒 言

東日本製鉄所直江津地区は、従来からステンレス鋼の製造技術を基盤とした高機能材料の生産拠点として、ステンレス鋼のみならずチタン材やニッケル材を含む種々の製品を開発し製造してきた<sup>1,2)</sup>。例えば純ニッケル薄板は苛性ソーダ製造プラントなどアルカリ環境中での使用に欠かせない材料として古くからの採用実績がある。またリチウムイオン電池の負極リードタブとして用いる純ニッケル箔や、優れた磁気特性を持つ Fe-Ni 合金薄板は、近年の IT 社会を支える重要な製品となっている。ステンレス鋼をベースとした独自製品としては、主に湖沼や河川の水処理施設に用いられ、社会インフラ強靱化に不可欠の製品であるステンレス形鋼や、ステンレス薄板の圧延技術を発展させて異種金属積層材の量産接合技術を実現したクラッド薄板を挙げることができる。これら製品の開発には、個々の材料の溶解・鍛造工程から、圧延・熱処理の加工プロセス、精整工程と製品品質までを一貫で管理する強みが活かされている。

本稿ではこれら独自ステンレス製品の中から、ステンレス形鋼と、ステンレス鋼とアルミニウムとを接合した金属クラッド (以下 Al/SUS クラッド) 薄板を取り上げ、その製造技術と製品特性を例示して紹介する。

## 2. ステンレス形鋼

ステンレス形鋼は、先に述べた湖沼や河川の水処理施設の他、厨房用作業台などの構造材に用いられ、主に水環境での優れた耐食性能を利用したメンテナンスフリー性や清潔性維持の性能が求められる。材質としては、優れた耐食性能と強度特性を併せ持つ代表的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 や SUS316 が用いられることが多い。製品形状としては山形鋼 (アングル) や溝形鋼 (チャンネル) の長尺材が主に市中販売される。

ステンレス形鋼の分野でも高機能材料に対する市場要求は高く、特に東日本大震災以降はインフラ施設の大型化傾向に伴って、耐用年数 (耐食性能) は維持しながら高強度化による薄肉軽量化が望まれている。このような要求に応える製品として、リーニ二相ステンレス形鋼が注目され

\* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 チタン・ステンレス研究室 主席研究員 工博 新潟県上越市港町 2-12-1 〒942-8510

ている。

## 2.1 リーン二相ステンレス形鋼

一般的な二相ステンレス鋼は、常温でオーステナイト相とフェライト相からなる二相組織を持ち、優れた強度特性(耐力)と高い耐食性を併せ持つ材料である。しかしながら従来の二相ステンレス鋼は、化学成分としての合金比率が高いうえに高価な Mo を含むなど配合コストが高くなる傾向にあった。リーン二相ステンレス鋼は二相ステンレス鋼が持つ優れた強度特性を維持しつつ、化学成分中の Ni や Mo の一部を Cr や Mn, N に置き換えることで SUS304 並みの耐食性能に調整し、配合コストを抑えた材料である。日本製鉄(株)では日鉄ステンレス(株)が開発したリーン二相ステンレス鋼である NSSC 2120<sup>®3)</sup> の素材供給を受け、高強度のリーン二相ステンレス形鋼を製造している。また、さらに優れた耐食性を有する UNS S32304 (23%Cr-4%Ni-1.5%Mn-Mo-N) を素材とした高強度高耐食のリーン二相ステンレス形鋼へも製品範囲を拡大している。

## 2.2 リーン二相ステンレス鋼の熱間スケール生成挙動<sup>4)</sup>

リーン二相ステンレス形鋼は、素材ビレットを熱間で孔型圧延した後に焼鈍酸洗することにより製造される。この際、従来の SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼とリーン二相ステンレス鋼とでは、熱間スケールの生成挙動が異なるため、SUS304 と同等の加熱・熱処理条件ではスケールの組成や形態が異なる。また、スケール生成に伴ってリーン二相ステンレス鋼素地表面の金属組織が部分的に変化する場合があった。このように熱間圧延材の表面状態が変化すると、熱延疵など欠陥の原因となる懸念があるため、熱間スケールの生成挙動ならびに金属素地表面の組織変化について正確な理解が必要となる。二相ステンレス鋼は、常温においてほぼ等量のオーステナイト相 ( $\gamma$  相) とフェラ

イト相 ( $\alpha$  相) を含む金属組織を有し、各々が金属表面に露出している。これら  $\gamma$  相と  $\alpha$  相では酸化挙動が異なる<sup>5)</sup>ため、スケール生成挙動が複雑であるうえに、高温状態および加熱冷却後の金属表面の状態変化についても未だ十分には理解されていない。そこで代表的なリーン二相ステンレス鋼である UNS S32101 (21.5%Cr-1.5%Ni-5%Mn-Mo-N) を例にとって、大気中での高温加熱によるスケール生成挙動ならびに、スケール下部の素地表面における金属組織変化を調査した。

実験には大気加熱炉を使用し、熱間圧延前の加熱を想定した 1200℃ に試験片を加熱して、時間を変えてスケール成長挙動を観察した。また 1h および 10h 加熱後に冷却した素地表面については EBSD (電子線後方散乱回析法) を用いて相分布を測定した。

図 1 には、1200℃ で 1h 大気加熱した UNS S32101 の表層におけるスケール断面を SEM/EDX (エネルギー分散型 X 線分光法) で測定した組成分布を示す。外層スケールには  $(\text{Mn, Cr})_3\text{O}_4$  が、内層には  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  が観察され、金属とスケールの境界部には部分的に  $\text{SiO}_2$  の存在が確認された。

図 2 には、1200℃ 大気加熱後に冷却した金属素地表層断面における金属相分布を示す。金属素地表面には  $\alpha$  単相領域が確認され、その厚さは加熱時間の延長に伴って厚くなった。さらに別の測定から、この  $\alpha$  単相領域では Mn と N の濃度が減少していることが確認された。このうち Mn 量の減少は、スケール形成により金属表面の固溶 Mn が外方拡散することによって生じたと考えられた。また熱力学計算による解析結果から、Mn 濃度が減少すると金属中の N 固溶度が減少することが予測された。酸化による Mn と N の減少が原因となり、金属素地表面の  $\alpha$  単相化が生じると考えられた。

このように製造プロセス内における二相ステンレス鋼に特有の現象を把握しながら製造条件を調整することによ

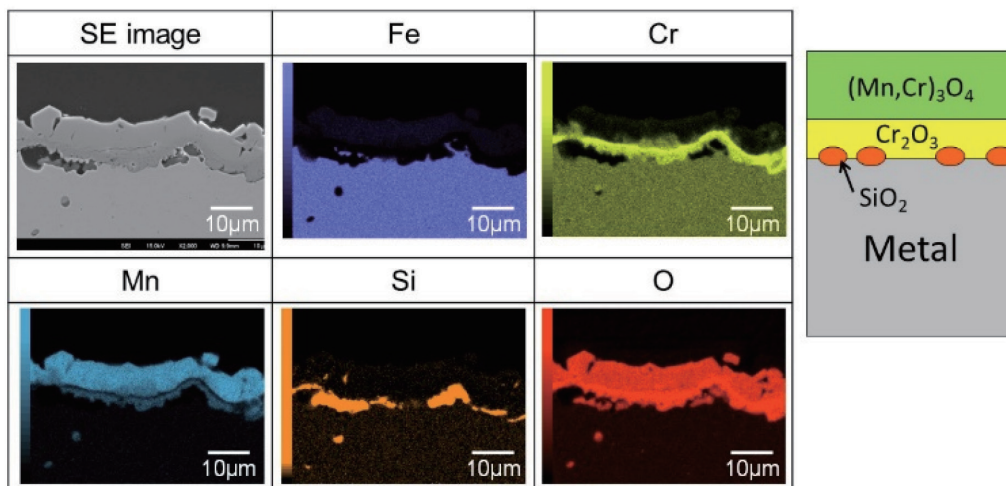


図 1 大気加熱した UNS S32101 の表層におけるスケール断面の SEM/EDX 組成分布 (1200℃, 1h)<sup>4)</sup>  
Surface compositions of UNS S32101 heated in atmosphere (1200℃, 1h)<sup>4)</sup>

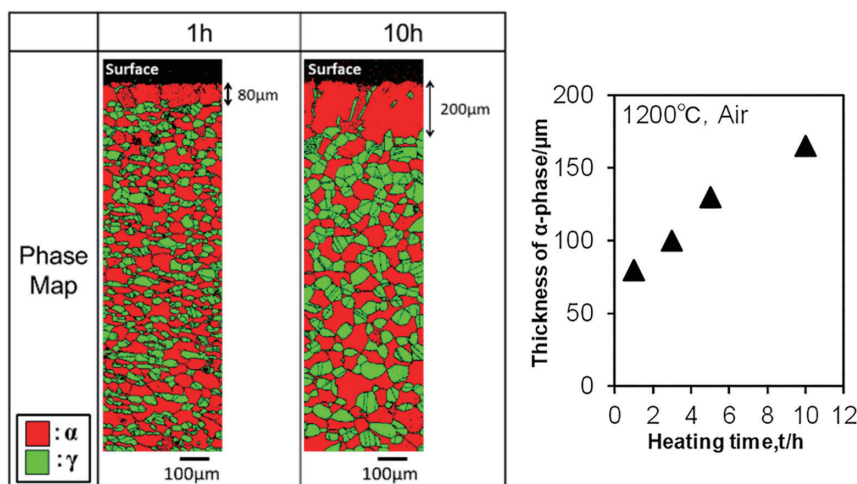


図2 1200°C大気加熱後に冷却した UNS S32101 金属素地表面における金属相分布と  $\alpha$  単相領域の厚さ変化<sup>4)</sup>  
Phase distribution of UNS S32101 1200°C heated in atmosphere and change in surface thickness of  $\alpha$  phase<sup>4)</sup>

表1 NAR-2120 形鋼の代表的な化学成分  
Typical chemical composition of NAR-2120 (mass%, Equivalent to NSSC 2120<sup>®</sup>)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N
NAR-2120	≤0.030	≤0.75	2.00-4.00	20.50-21.50	1.50-2.50	≤0.60	0.50-1.50	0.15-0.20
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18.00-20.00	8.00-10.50	-	-	-

表2 NAR-2120 形鋼の代表的な強度仕様  
Typical specifications of strength for NAR-2120 shaped steel

	Proof stress /N·mm <sup>-2</sup>	Tensile strength /N·mm <sup>-2</sup>	Elongation (%)	Hardness HV
NAR-2120	≥400	≥600	≥25	≤310
SUS304	≥205	≥540	≥45	≤200

り、安定した製品品質を実現している。

### 2.3 リーン二相ステンレス形鋼の製品例・用途例

代表的な製品例として、NAR-2120 形鋼の化学成分を表1に、強度仕様を表2に、また図3には製品のマイクロ組織の例を示す。NAR-2120 形鋼は SUS304 形鋼に比べて特に耐力が高く、構造物の薄肉軽量化が可能な材料である。現時点では厚さが5~9mmで、辺の長さが40mmの小型アングルから、高さ150mm 辺75mmの大型チャンネルまで製品ラインナップを備えている。

この NAR-2120 形鋼が採用された製品例として、橋梁や高架道路、工場などで用いる高強度ステンレス製検査路(図4, NS スマート検査路: NETIS 登録番号 HK-200018-A)<sup>6)</sup>が開発されている。本製品ではリーニ二相ステンレス鋼の特徴である高強度・高耐食を活かして、作業空間に制限がある場所での設置性や作業性を薄肉軽量化によって改善している他、長寿命化による環境負荷軽減にも寄与が期待されている。

### 3. クラッド薄板

金属クラッド材料は、材料特性の異なる異種金属を積層

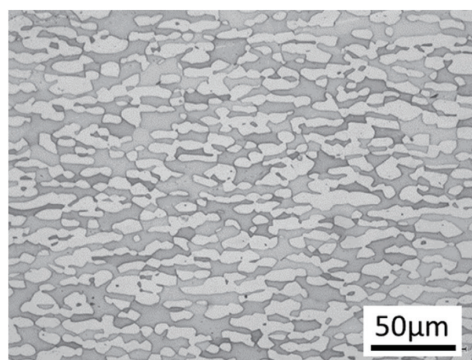


図3 NAR-2120 形鋼の代表的なマイクロ組織  
Typical microstructure of NAR-2120 shaped steel (cross section perpendicular to R.D.)



図4 NAR-2120 形鋼を採用した高強度ステンレス製検査路 (NS スマート検査路: NETIS 登録番号 HK-200018-A, <http://www.netis.mlit.go.jp/>)<sup>6)</sup>  
Scaffolding passage used for building inspections to which NAR-2120 shaped steels are applied<sup>6)</sup>



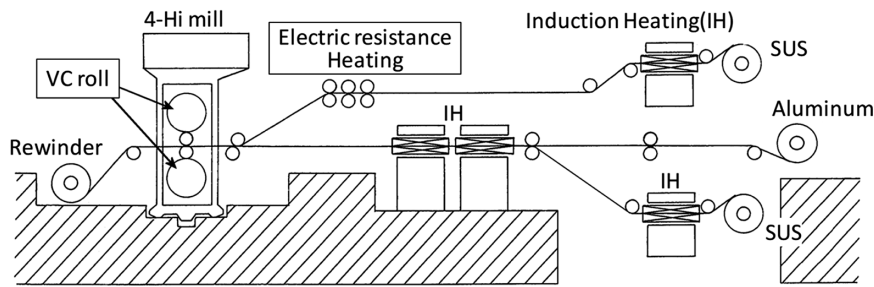


図5 広幅クラッドコイル製造ラインの概略<sup>7)</sup>  
Outline of the clad coil production line<sup>7)</sup>

し一体化することによって、一方の金属の欠点を他方が補うとともに、各構成金属の特長を同時に利用することを可能とし、単一金属材料に比べて高機能化や新機能付与を実現した機能材料である。このうち Al/SUS クラッド薄板は、1990 年台以降に IH 炊飯器など電磁調理器の普及とともに調理用器物としての利用が拡大した。また近年では競技用マウンテンバイクのディスクブレーキローターに用いられ、摺動発熱部材の過剰発熱によるトラブル防止のために活用されている<sup>7)</sup>。

Al/SUS クラッド板は、温間圧延接合法を利用して広幅コイルとして量産する技術が確立されている。しかしながら、その接合機構ならびに接合圧延後に行なう熱処理の影響について、未だ統一された理解が得られているとは言い難い。そこで 16Cr ステンレス鋼とアルミニウムとの二層クラッド板を対象とし、圧延接合の後に熱処理を行なった際の接合界面の微細構造変化に焦点を当てて調査した。

### 3.1 Al/SUS クラッド板の接合法<sup>7,8)</sup>

温間圧延接合法は、各構成素材の板またはコイルをあらかじめ加熱し、重ね合わせて圧延する方法である。本接合法においては、素材の温度を高めることによってアルミニウムが容易に軟化するために、簡便に接合性を高めることが可能となる。素材の加熱温度の上限は、アルミニウムの融点（純アルミニウムで 660℃）によって制限される他、接合圧延後の界面に生成する金属間化合物を抑制する観点からも制限を受ける。その結果、接合直前の実用的な材料温度は、およそ 200～400℃の範囲である。このような温度域ではステンレス鋼はほとんど軟化しない。またこのような温度域においては、ステンレス鋼とアルミニウムの両方がともに十分な耐酸化性を有する。したがって、本手法は特別な真空設備や雰囲気加熱炉を必要とせず、大気中での圧延接合が可能である点で、工業的な生産性に優れている。

図5には広幅クラッドコイル製造ラインの概略を示す。本製造ラインでは素材コイルをインラインで加熱し、その直後の4段圧延機で接合圧延して巻き取る設備構成となっている。表3には本製造ラインで製造実績のあるクラッド薄板の製品寸法を示す。コイルの幅は常用最大で 914mm

表3 クラッド薄板の製品寸法例<sup>7)</sup>  
Product dimensions of Al/SUS and Al/Ti clad<sup>7)</sup>

Combination	Thickness (mm)		Width (mm)
	Total	SUS, Ti	
SUS-Aluminum (SUS/Al, SUS/Al/SUS)	0.6-3.3	0.3-0.8	≤ 914 (Max. 1000)
Titanium-Aluminum (Ti/Al, Ti/Al/Ti)	0.6-2.5	0.3-0.7	≤ 914 (Max. 1000)

表4 16Cr ステンレス鋼とアルミニウムの化学組成  
Typical chemical compositions of 16Cr-stainless steel and A1100 aluminum

16Cr-stainless steel (mass%)					
C	N	Si	Mn	Cr	Fe
0.008	0.011	0.55	0.45	16.4	bal.
A1100 aluminum (mass%)					
Si	Fe	Cu	Mn	Al	
0.10	0.58	0.13	0.01	bal.	

と広幅クラッドコイルの製造が可能である。広幅クラッドコイルを安定して製造するためには、幅方向での素材温度の均一性および圧延率の均一性を確保する必要がある。このため直接通電方式の加熱装置を用いて素材を均一加熱する技術や、圧延機のバックアップロールへ VC ロール (Variable Crown Roll) を適用するなどの設備対応を講じている。

同製造ラインで製造している金属クラッド薄板は、アルミニウムを母材とした二層あるいは三層の構成を基本としているが、合わせ材にはステンレス鋼以外の材料を選択することも可能であり、使用目的に応じた適切な設計により、従来の単一金属材料には無い新機能の創生や高機能化が可能となっている。

### 3.2 Al/SUS クラッド板の接合界面微細構造<sup>9)</sup>

試験材には約 250℃の温度で圧延接合した 16Cr ステンレス鋼とアルミニウムとの二層クラッド板を用いた。各金属層の化学組成は表4に示すとおりである。ここで肉厚の薄いクラッド板においては、接合界面の垂直引っ張りによる破壊荷重や界面せん断荷重を直接測定することが困難なため、JIS K6854-3 (接着剤-はく離接着強さ試験方法-第

3部:T形はく離)に類似したピール強度によって評価した。試験片の概要を図6に示す。

図7には、圧延接合ままのクラッド板を200~600℃で熱処理した場合のピール強度変化を示す。圧延接合したままの状態と200℃熱処理材とはピール強度に変化が無いが、これは圧延接合のプロセスにおいて、クラッド板が200℃以上の熱履歴を既に経験しているためである。300℃の熱処理によってピール強度は明瞭に増大し始め、熱処理温度の上昇に伴ってピール強度はさらに増大し、450~500℃

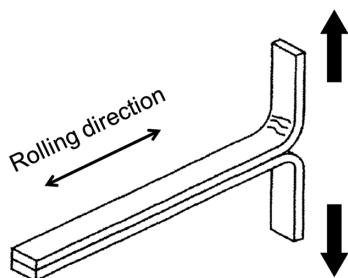


図6 ピール強度試験に用いた試験片の概略  
Shape of specimen used for peel strength test

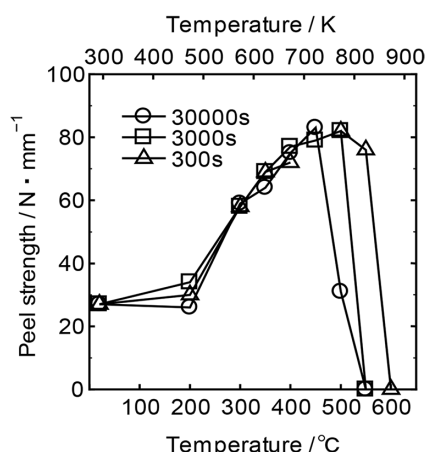


図7 AI/SUS クラッド板の熱処理によるピール強度変化<sup>9)</sup>  
Effect of heat treatment conditions on peel strength<sup>9)</sup>

で最大を迎える。500℃で長時間の熱処理を行なうと、界面近傍に脆い Fe-Al 金属間化合物が生成することに伴ってピール強度の急激な低下が見られるようになる。

図8には、接合界面のTEM明視野像を示す。図8a)に示す圧延接合まま材ならびに図8b)に示す400℃、300s熱処理材のいずれにおいても、アルミニウムと16Crステンレス鋼との界面に、複数の内部構造を持つ中間層の存在が確認される。この中間層は、観察した全界面領域において均一に形成されており、中間層の欠損や厚さの大きな変化は認められなかった。図8a)の圧延接合まま材における中間層は、全体が20nm前後の厚さを持ち、その内部構造は不均一に波打つ複数の層から構成されている。また図8b)の熱処理材における中間層については、圧延接合まま材と同様に、全体が20nm前後の厚さを持つ一方で、その内部構造はより均一化しており、波打ちの少ない平坦な層構造の中に、島状の異相と思われる領域が点在する構造となっている。

これら接合界面の構造について高分解能TEMによる解析を行なった結果、接合まま材と400℃熱処理材のいずれにおいても中間層の厚さは約20nmであり、それを超える範囲への原子拡散が生じていないことが確認された。圧延接合まま材の中間層には主にFeとAlおよび微量のCrと酸素とが混合した様々な形態の酸化物が存在し、その混在によって複雑に波打つ形態で複数の構造を持つ中間層が構成されていたと思われる。圧延接合の後に400℃、300sの熱処理を施すと、熱処理前に存在した混合酸化物のうち、Alが酸素と強く結びついてAlのアモルファス酸化物が支配的となり、複数の均一な層構造を持つ中間層として再構成される。Feを含む酸化物は一部Alにより還元されてα-Feとして中間層中に島状に残存したと推察する。またこれらの中間層は両金属のバインダーとしての役割を持つと同時に、500℃以下での熱処理における異種金属元素の相互拡散障壁としてFe-Al金属間化合物の形成を抑制する役

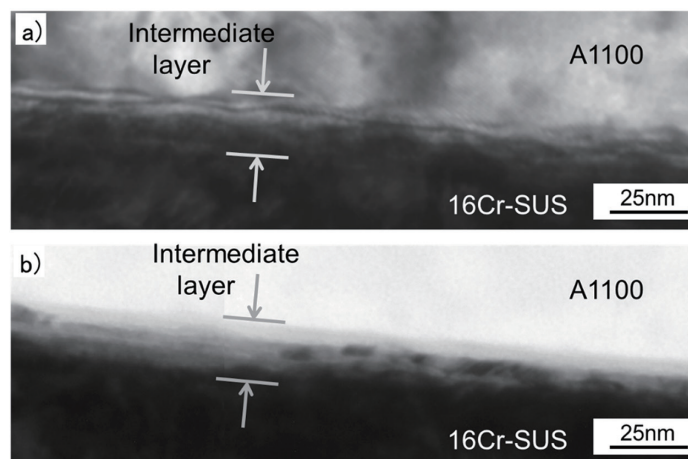


図8 AI/SUS クラッド板の接合界面のTEM明視野像<sup>9)</sup>  
Enlarged TEM images of bonding interface between 16Cr-stainless steel and aluminum  
a) As rolled, b) 400℃, 300s heat treated<sup>9)</sup>

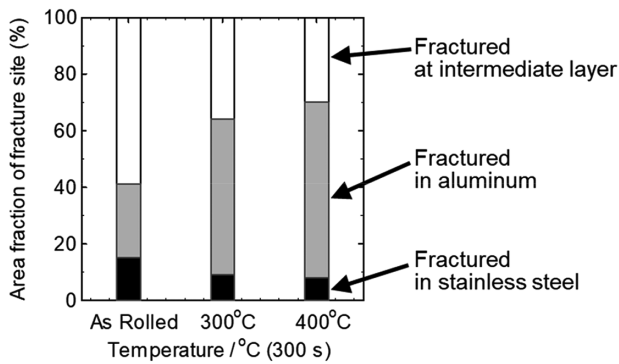


図9 強制はく離したAI/SUSクラッド界面における破壊形態の発生面積率推定結果<sup>10)</sup>

Estimated area fraction in terms of fracture site category by the peel test as a function of annealing temperature<sup>10)</sup>

割を有すると推察された。

### 3.3 AI/SUS クラッド板の強制はく離による破壊機構<sup>10)</sup>

圧延接合まま材、ならびに圧延接合の後に300℃と400℃の温度で300sの熱処理を行なった試験材について、強制的にピールはく離する試験を行ない、各々はく離面をSEM観察した結果から、その破壊機構を検討した。はく離面の破壊形態には、アルミニウムの母材破壊、16Crステンレス鋼の母材破壊、中間層からの破壊の3種類が存在すると考えられる。強制はく離面のSEM観察結果に基づき、上述した3種類の破壊形態の発生面積率を整理した結果を図9に示す。

圧延接合したままのクラッド板をピール試験した際の界面破壊は、その59%に相当する面積が、中間層で破壊したと考えられる。一方、同じクラッド板に300℃以上の温度で熱処理を施すと、その界面の破壊形態はアルミニウムの母材破壊が55%と支配的となり、16Crステンレス鋼の母材破壊、ならびに中間層破壊の面積率がともに減少する。熱処理温度を300℃から400℃に上昇させても破壊形態に大きな差異は生じないが、アルミニウム母材破壊が62%とさらに増大し、これに応じて中間層破壊が減少する。前出の図7において300℃以上の熱処理によってピール強度が増大したのは、アルミニウム母材破壊が支配的になると同時に、熱処理によって延性を回復したアルミニウムが界面破壊を生じるまで伸びを伴って変形することで、ピール試験の引き剥がし力によって塑性変形する領域が広がるため、単位幅あたりで評価したピール強度が増大したと考えられる。

## 4. 結 言

ステンレス鋼の製造技術を基盤として開発された独自ステンレス製品の例として、ステンレス形鋼とAI/SUSクラッド薄板を取り上げ、その製造技術と製品特性を例示した。リーニ二相ステンレス形鋼では、特に大気加熱スケールの

成長挙動など材料特有の現象を把握しながらプロセス条件を調整し安定生産を実現している。またリーニ二相ステンレス鋼の特徴である高強度・高耐食を活かして、最終製品である構造物の薄肉軽量化や長寿命化に寄与している。AI/SUSクラッド薄板では、接合強度におよぼす熱処理の影響に注目して、その接合機構ならびに破壊機構を明らかにすることにより、クラッド薄板の実製品適用における利用技術向上に努めている。

### 参照文献

- 1) 山出善章, 黒田篤彦, 渋谷将行, 高梨憲: 新日鉄住金技報. (396), 76 (2013)
- 2) 松本啓, 喜多勇人: 新日鉄住金技報. (396), 117 (2013)
- 3) 及川雄介, 柘植信二, 江目文則, 本村洋, 井上裕滋: までりあ. 55 (2), 70 (2016)
- 4) Hanai, M., Kimura, K., Sugiura, N.: International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC '2021), Vienna, Austria, 2021
- 5) Jepson, M.A.E., Higginson, R.L.: Corros. Sci. 59, 263-269 (2012)
- 6) 国土交通省 新技術情報提供システム (NETIS): <http://www.netis.mlit.go.jp/>
- 7) 奥井利行, 米満善久, 吉田健太郎: 新日鉄住金技報. (396), 106 (2013)
- 8) 土居大治, 鶴田忠, 難波清海, 八尋昭人, 平原一雄: 住友金属. 45 (5), 145 (1993)
- 9) 奥井利行, 潮田浩作: 鉄と鋼. 105 (1), 38 (2019)
- 10) 奥井利行, 潮田浩作: 鉄と鋼. 105 (4), 462 (2019)



奥井利行 Toshiyuki OKUI  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
チタン・ステンレス研究室  
主席研究員 工博  
新潟県上越市港町2-12-1 〒942-8510



松本実菜美 Minami hanai MATSUMOTO  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
チタン・ステンレス研究室



阿部 賢 Masaru ABE  
チタン事業部 チタン技術部  
チタン商品技術室 上席主幹



長崎健一 Kenichi NAGASAKI  
東日本製鉄所 チタン部  
チタン技術室 主査