

377.5

K-11

1-203

真空圧延接合法により製造した Al/SUS クラッド材の
接合部特性と LNG 船タンクスカート部への適用に関する研究



2002年 10月

九州工業大学附属図書館



0010516243

河野 隆之

目 次

ページ

第1章 緒論

1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本研究の技術課題	5
1.2.1 大型真空圧延接合装置の概要と接合プロセス	5
1.2.2 Al/SUS クラッド材の接合部強さ	9
1.2.3 Al/SUS クラッド材の接合メカニズムの解明	9
1.2.4 熱処理による Al/SUS クラッド材の材質変化	9
1.2.5 Al/SUS クラッド材の構造強度	10
1.2.6 Al/SUS クラッド材の STJ の実船適用	10
1.3 本研究の狙いと取組みの流れ	11

第2章 試作した大型真空圧延接合装置による Al/SUS クラッド材の接合部強さ

2.1 緒言	14
2.2 供試材及び実験方法	14
2.3 実験結果	17
2.3.1 接合界面の観察	17
2.3.2 接合断面の硬さ分布	19
2.3.3 接合条件と接合部強さの関係	19
2.4 考察	25
2.4.1 Al/SUS クラッド材の接合部強さの検討	25
2.4.2 信頼性の高い Al/SUS クラッド材の接合条件	32
2.5 結言	32

第3章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合メカニズムの検討	
3.1 緒言	34
3.2 供試材料及び実験方法	34
3.3 実験結果	35
3.3.1 接合界面の透過電子顕微鏡観察	35
3.3.2 接合界面の詳細分析	38
3.4 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合メカニズムの検討	45
3.5 結言	48
第4章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の熱処理の影響	
4.1 緒言	49
4.2 供試材料及び実験方法	50
4.3 実験結果	51
4.3.1 熱処理材の接合部強さ	51
4.3.2 切欠き引張試験片の破面の観察	53
4.3.3 熱処理材の接合界面の微細観察	58
4.4 Al/SUS クラッド材の接合界面の熱処理による組織変化	64
4.5 結言	67
第5章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ としての構造強度	
5.1 緒言	68
5.2 供試材料及び実験方法	68
5.3 実験結果及び考察	72
5.3.1 丸棒引張試験	72
5.3.2 十字すみ肉溶接継手の引張試験	72
5.3.3 十字すみ肉溶接継手の疲労試験	76

5.4 結言	79
第6章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の LNG 船タンクスカート部への適用	
6.1 緒言	80
6.2 アルミ球形タンクスカート部の製作方法	80
6.3 タンクスカート組立時における十字すみ肉溶接の接合界面への影響 ...	82
6.3.1 すみ肉溶接入熱の接合界面への影響	82
6.3.2 すみ肉溶接時の STJ 接合界面端部に生じる熱応力の低減	85
6.4 Al/SUS クラッド材の STJ の製作とそれを適用した タンクスカート部の信頼性	89
6.4.1 Al/SUS クラッド材の STJ の製作	89
6.4.2 タンクスカート部への適用位置とタンクスカート構造の信頼性 ...	95
6.5 LNG 船への試験的適用状況	100
6.5.1 Al/SUS クラッド材の STJ の製造法承認	100
6.5.2 適用 LNG 船に対する Al/SUS クラッド材の STJ の材料承認 ...	106
6.5.3 LNG 船への実機適用状況	110
6.6 結言	114
第7章 総括	116
謝辞	121
参考文献	122
本研究に関連する著者の発表論文	124

本研究に関連する工業所有権	125
---------------------	-----

第1章 緒論

1.1 本研究の背景と目的

世界の火力発電用エネルギー源は、石炭から石油さらには天然ガスへと移りつつあり、特に天然ガスは、メタンを主成分とし燃焼後の排ガス中のCO₂濃度が低いことから、地球環境問題がクローズアップされた1990年以降、クリーンなエネルギー源として急速に需要が増加している。天然ガスの輸送手段は、内陸国ではパイプラインが主流であるが、ガス田と消費国の間が遠く海を隔てている場合には、天然ガスを-163℃の液体天然ガス(以下、LNGと記す)にして、大型のLNG船による輸送が行われている。

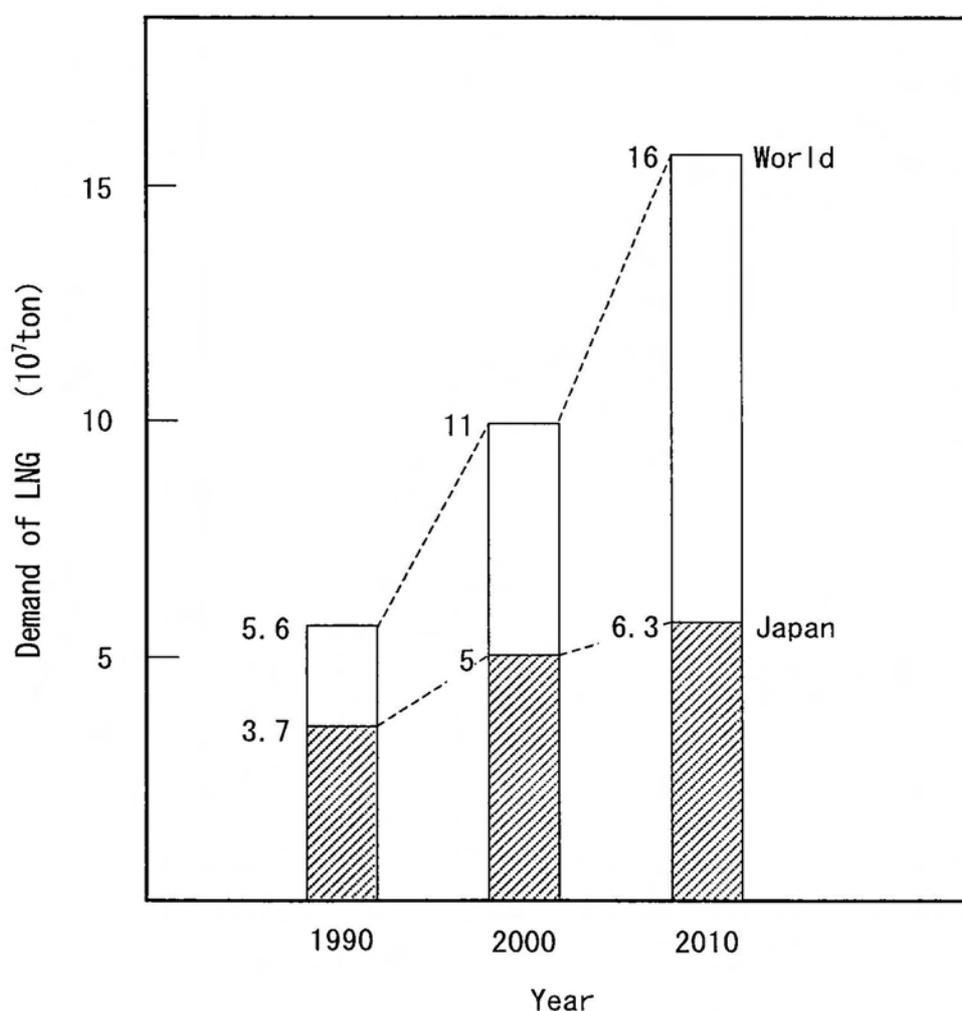


図 1.1 LNG の需要予測

図 1.1 は、1990 年から 2010 年における世界と日本の LNG 需要を予測¹⁾したものである。これによれば 1990 年から 2010 年にかけて、世界の LNG 需要は 1990 年の約 3 倍の増加が見込まれ、また、日本のそれは約 2 倍の伸びを示すと予測されている。この需要予測に従って、現在大量の LNG 船の建造が韓国及び我が国において行われ、LNG

船の熾烈な価格競争が行われている。

LNG 船は -163°C の LNG を輸送するため、方形タンクを搭載した LNG 船と、球形タンクを搭載した LNG 船とに2分され、両者の LNG の積載量はほぼ同じである。球形タンク方式 LNG 船は、直径約 40m のアルミニウム合金製の球形タンクを4個又は5個搭載し、それぞれ $127,000\text{m}^3$ 又は $135,000\text{m}^3$ の LNG を輸送する。

この球形タンクは、スカートと称される円筒殻によって支持されている。図 1.2 に、球形タンク方式 LNG 船の球形タンクスカート部の模式図と構造用継手 (Structural Transition Joint, 以下, STJ と記す)を示す。このスカートの上部には、タンク材料と同じアルミニウム合金 A5083 が使用されているが、下部は熱伝導率の小さいステンレス鋼 SUS304 を介して、低温用鋼で船体に固定されている。アルミニウム合金とステンレス鋼は溶融溶接ができないため、A5083 と SUS304 の間に A3003/SUS304L クラッドタイプの STJ が使用されている。開発の当初、この STJ は爆着法による A3003/Ti/鋼の3層クラッド材が使用²され、スカート上部の A5083 と下部の低温用鋼を接続していた。その後スカート構造に、より効果的な断熱性能を持たせることが検討され、低温用鋼の上部に SUS304 を採用することが決定され、それに伴い STJ は A3003/Ti/SUS304、さらには A3003/Ti/Ni/SUS304L の爆着法による4層クラッド材が開発され、採用されるに至った。この間、我が国の爆着法による STJ 製造技術は世界一となり、現在では我が国の一社で、世界の LNG 船用4層クラッド材の STJ すべてを製作し、世界の造船所に納入するに至っている。

このことは、造船会社は STJ の購入価格及び購入納期の二つの面で自由度を失ったことを示しており、熾烈な国際競争に勝ちぬくために爆着法に代わる低価格で信頼性の高い A3003/SUS304L タイプの STJ 製造技術を長年にわたって開発するとともに新技術の出現を待ち続けてきた。

真空圧延接合法による Al/SUS2層クラッド材の STJ は、以上のような背景において開発されたもので、接合が容易で低コスト化が可能であり、接合部強さは LNG タンクスカート部の設計応力に対して、 -165°C で約 3.8 倍の安全率を持つ。

新しい STJ の開発に当り、まず接合法を選定した。接合法の選定基準を以下に示す。

①接合部強さは、爆着法による STJ の規格を満足すること。

ア) 引張強さ： $98\text{N}/\text{mm}^2$ 以上

イ) せん断強さ： $78\text{N}/\text{mm}^2$ 以上

ウ) 側曲げ試験：割れなし

②現状寸法と同じレベルの STJ (37t×135W×2420L) の製造が可能なこと。

③製造が容易で、製造コストが爆着材 STJ の購入コストの 1/2 以下となる可能性がある

ること。

これらの選定基準の内、②及び③を満足する接合法としては拡散接合法がある。

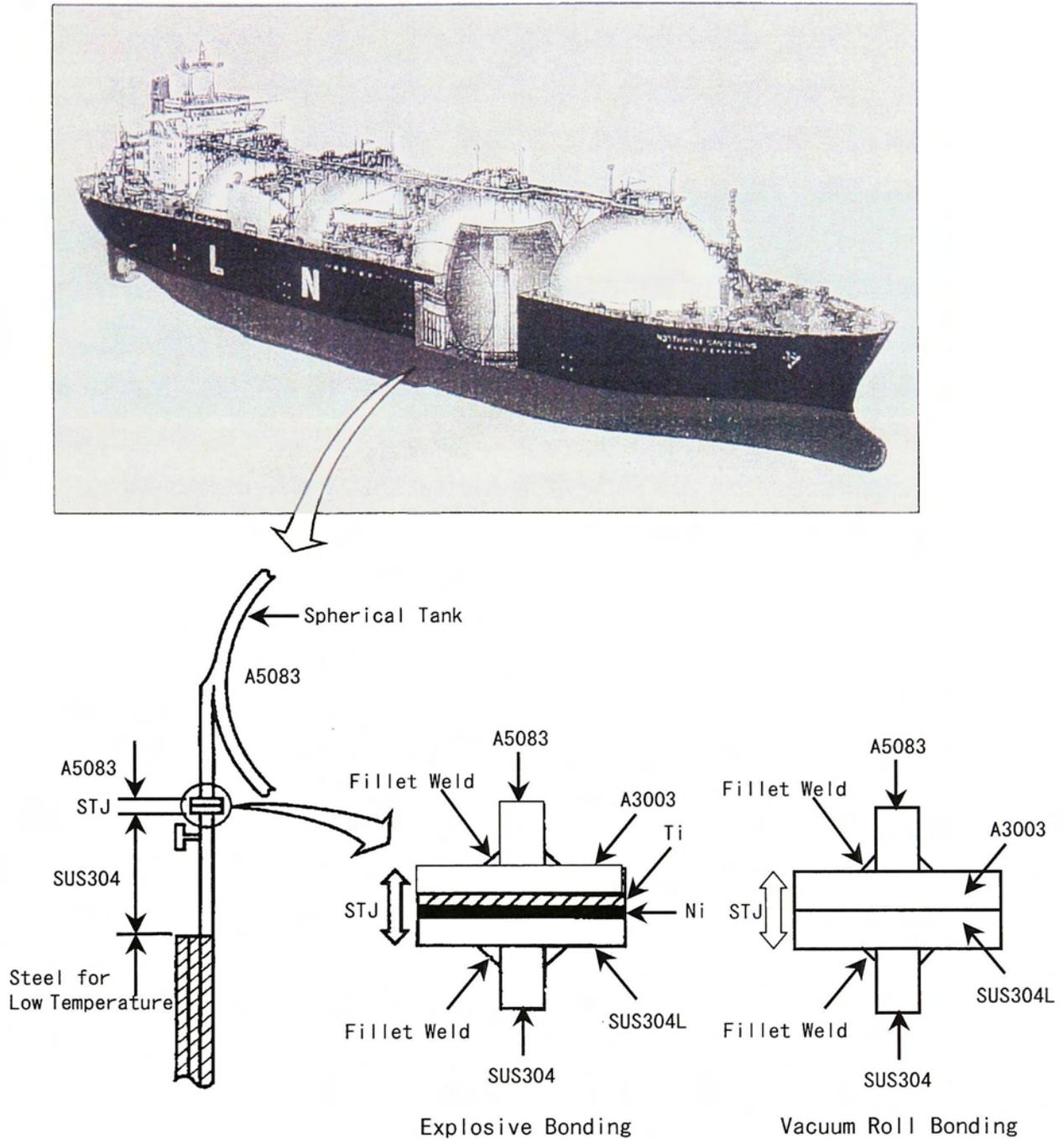


図 1.2 LNG 船タンクスカート部の構造用異材継手 (STJ)

この場合、アルミニウム合金表面の酸化皮膜の存在と拡散接合中に生成する金属間化合物の生成により、目標の接合部強さを得ることは困難と考えられた^{3,4,5)}。また、①及び②を満足する接合法としては熱間圧延法があるが、この場合、高い接合部強さを得るために

は接合界面が酸化されないように、重ね合せた被接合材の外周を予めシール溶接したり、重ね合わせた被接合材を真空箱の中に入れて、排気した後に真空箱ともに圧延接合する方法がある。このような方法によって製作された A3003/SUS304L の2層クラッド材の接合部強さは①を満足する⁶⁾が、接合前の前処理加工及び製品とするための接合後の後処理加工に多大のコストがかかり、③を満足することは困難と考えられた。

すなわち、開発目標すべてを満たす接合法は、接合中において接合面の酸化を防止するとともに、接合面への金属間化合物の生成を抑制することができ、接合前後の機械加工処理が容易な接合法であると考えられる。

これらの条件を満たす接合法として、迎、西尾等は真空圧延接合法を提案している⁷⁾。本法は、圧延機と高周波加熱コイルを真空容器内に入れ、接合面の酸化を防止するとともに、重ね合わせた被接合材を高周波加熱で急速加熱を行い、直ちに圧延することで接合面の金属間化合物の生成を抑制することができる。本法による Al/鋼の2層クラッド材の接合部のせん断強さは、アルミニウムのせん断強さと同等以上となると報告している⁷⁾。

図 1.3 は、爆着法、大気中での熱間圧延法及び真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の接合部のせん断強さを比較したものである。爆着法と熱間圧延法はインサート材料を使用し、真空圧延接合法は九州工業大学の装置で A3003 と SUS304L を直接接合したものである。この図から真空圧延接合法による A3003/SUS304L の2

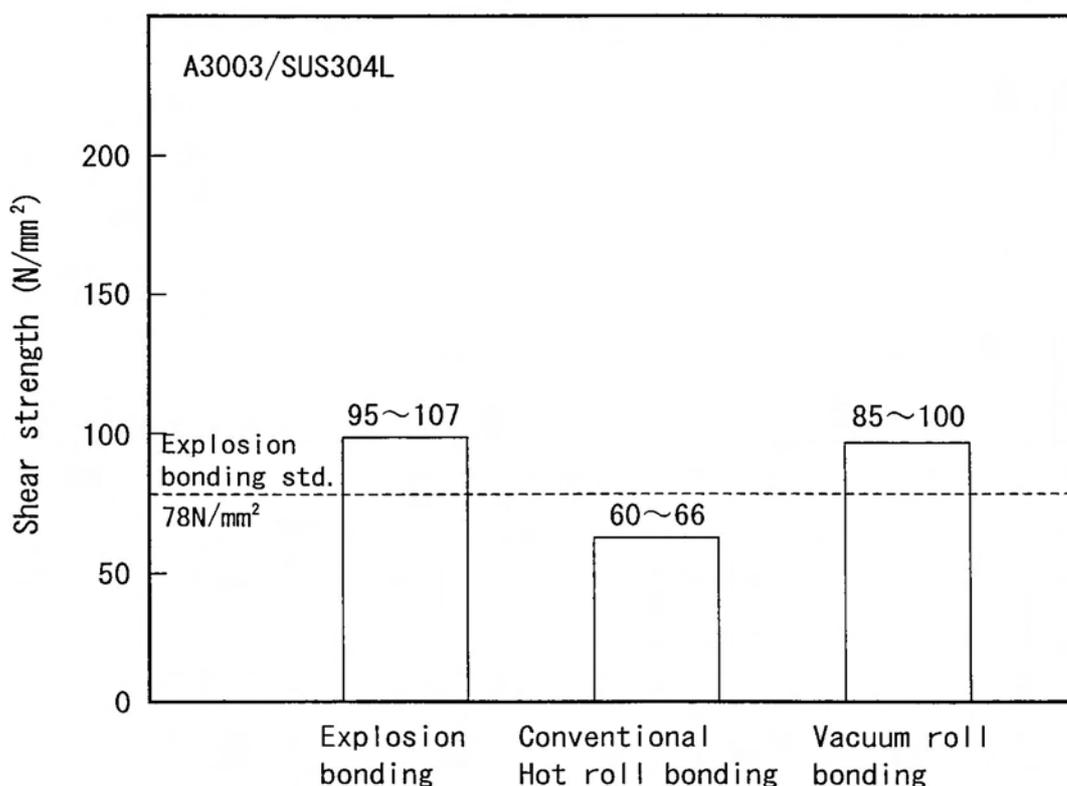


図 1.3 接合法が異なる A3003/SUS304L クラッド材のせん断強さ

層クラッド材は、爆着法の規格を満足するとともに爆着法とほぼ同等のせん断強さを持つことが明らかとなった。

一方、STJ用の4層爆着材の購入価格は、A3003、Ti、Ni及びSUS304Lの合計した材料費の20倍強であり、真空圧延接合法による2層クラッド材の接合作業の容易さ及び接合前後の材料に対する機械加工の容易さから、開発目標の③は容易に達成できると考えられた。

本研究では、LNG船の球形タンクスカート部に使用されるSTJを真空圧延接合法で製作し、実機LNG船に適用する技術を開発することを目的とする。

その目的達成の過程において、真空圧延接合法によるA3003/SUS304Lの2層クラッド材(以下、Al/SUSクラッド材と記す)の高品質接合条件の選定、接合メカニズムの検討及び接合部の強さと組織に及ぼす熱処理の影響を把握するとともに、STJとしての構造強度を評価し、最後に得られた成果を総合して球形タンク方式LNG船への実機適用技術を開発した。

1.2 本研究の技術課題

本節では、真空圧延接合法によるAl/SUSクラッド材を実機LNG船のSTJに適用するに当り、まず試作した大型の真空圧延接合装置の概要を述べるとともに、実機適用に当りAl/SUSクラッド材に求められる諸性能を概括し、本研究が対象とする技術課題についてまとめる。

1.2.1 大型真空圧延接合装置の概要と接合プロセス

図1.4及び図1.5に、試作した大型の真空圧延接合装置の構成とその外観を示す。大型の装置を試作するに当っては、世界で唯一の九州工業大学の真空圧延接合装置の構成及び仕様を参考にした。すなわち、西尾等⁷⁾によればアルミニウムクラッド鋼の場合、圧延接合温度500℃でアルミニウムの圧下率が5%以上になれば、そのせん断強さはアルミニウム母材のせん断強さと同等以上になることを示しており、この場合の接合条件が実機のSTJ製作時に再現できることを最低の仕様要求とした。

表1.1に、大型の真空圧延接合装置の仕様を示す。本装置の圧延接合可能寸法は、実機のSTJ(37t×135W×2420L)の製作が実証できたと認められることに主眼をおき、ロール間距離：0～38mm 可変、ロール径：165mm 及びロール幅：200mm とし、1000mm 長さのクラッド材が圧延接合できる寸法の真空容器とした。これにより、37t×135W×1000Lのクラッド材を製作することができる。本装置は、圧延機の能力が圧延荷重最大：30t、ロール間隔：0～38mm 及び圧延速度：1.5～15mm/s であり、

真空度： 10^{-3} Pa 及び圧延温度：600℃で真空圧延接合を行うことができる。

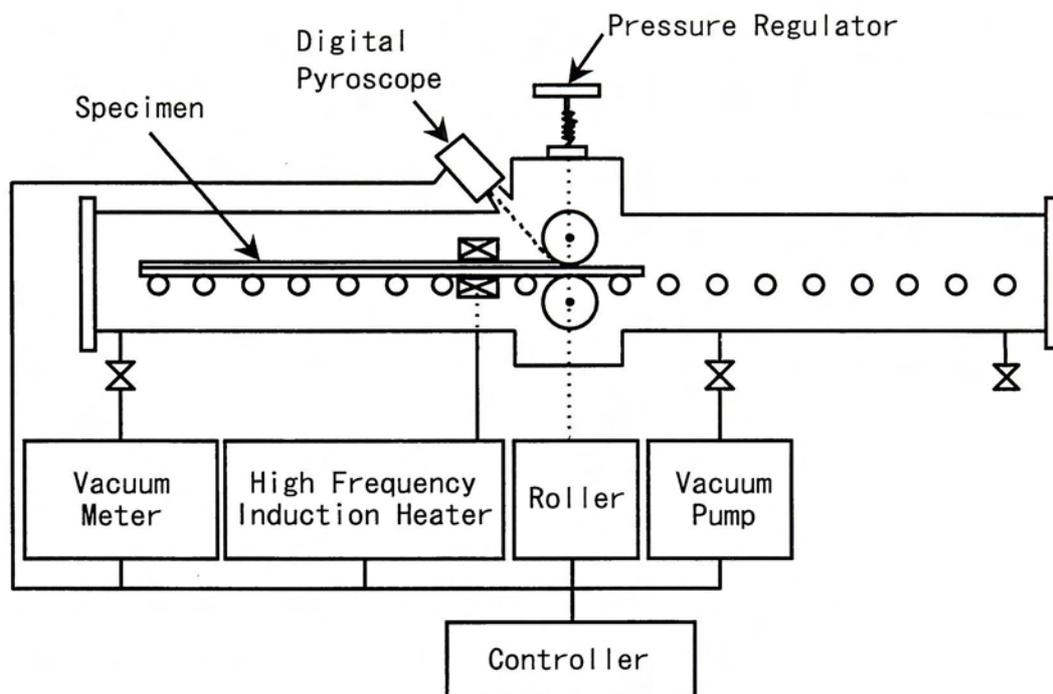


図 1.4 真空圧延接合装置の構成

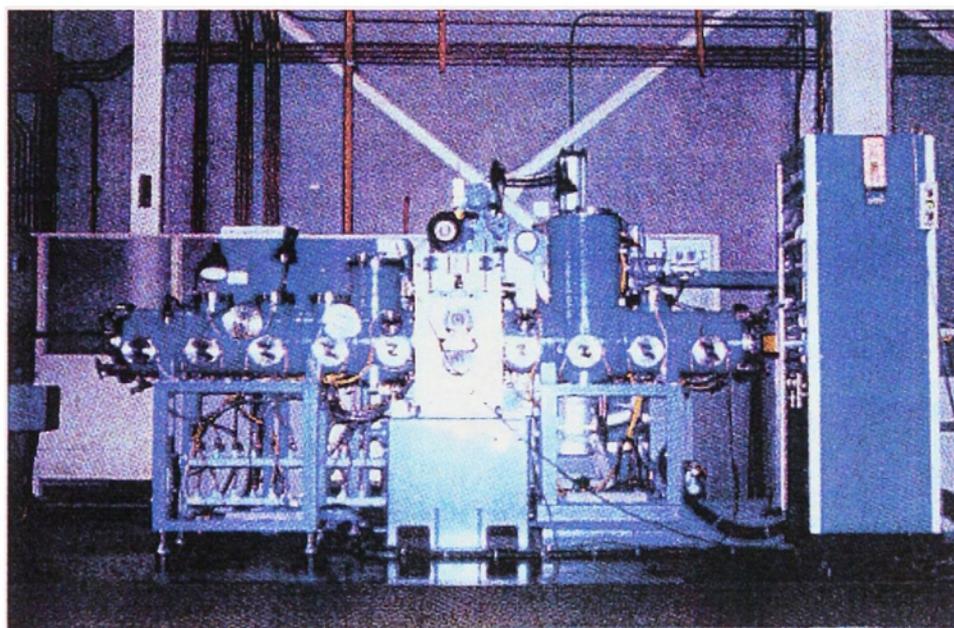


図 1.5 真空圧延接合装置の外観

本装置を用いたクラッド材の製作工程は以下のとおりである。

- ①材料の調達と切断
- ②被接合面の仕上げ機械加工
- ③アセトン中での洗浄と乾燥

- ④材料の片側端部固定による重ね合わせ
- ⑤真空容器への装入と真空引き
- ⑥高周波加熱
- ⑦圧延接合
- ⑧冷却
- ⑨真空容器からの取り出し
- ⑩製品仕上げ加工

表 1.1 真空圧延接合装置の仕様

Rolling	Rolling load depression	Max. Load 30t Max. 2mm
Roller	Roll size Roll gap Load resistance Roll torque Rolling speed	$\phi 165 \times 200L$ Adjustable range 0-38mm Max. 30t Max. 400kgf-m Adjustable range 1.5~15mm/sec
Heating	Heating temperature	Max. 600°C
High-frequency power supply source	High-frequency output Output frequency	100kW at max. 8kHz 10%
Atmosphere	Vacuum	$10^{-3}Pa$
Max. specimen size	Plate thickness Plate width Plate length	40mm 135mm 1000mm

図 1.6 に、本装置で製作した A3003 と SUS304L の Al/SUS クラッド材を示す。真空圧延接合前後で SUS304L の寸法に変化はなかったが、A3003 は厚さが減少し、幅及び長さが増加していた。また、A3003 側に湾曲する傾向にあった。

これらの工程すべてにかかった Al/SUS クラッド材 1 本当りの費用と所要時間を算出し、この実績をもとに 5 タンク方式の LNG 船 1 隻分の STJ240 本を製作するために必要な製作費用と製作時間を試算した。この場合の真空圧延接合装置は実寸法の STJ(37t×135W×2420L) を製作できる大型の装置とした。その結果、真空圧延接合装置の減価償却費その他を入れ、製作費用は爆着材購入価格の約 1/3 程度、製作時間は約 35 日と試算された。これらの結果は、真空圧延接合法による STJ 製作事業が十分商業ベースで成り立つことを示している。

試作した大型装置で A3003 と SUS304 の 2 層クラッド材を製作し、接合部強さを評

価した結果⁸⁾によると、接合部強さは A3003 の圧下率の上昇とともに上昇することが明らかとなった。また、A3003 の圧下率 10%のものに対して側曲げ試験を行った結果では、接合界面からの割れの発生もなく試験片が曲がることを確認した。

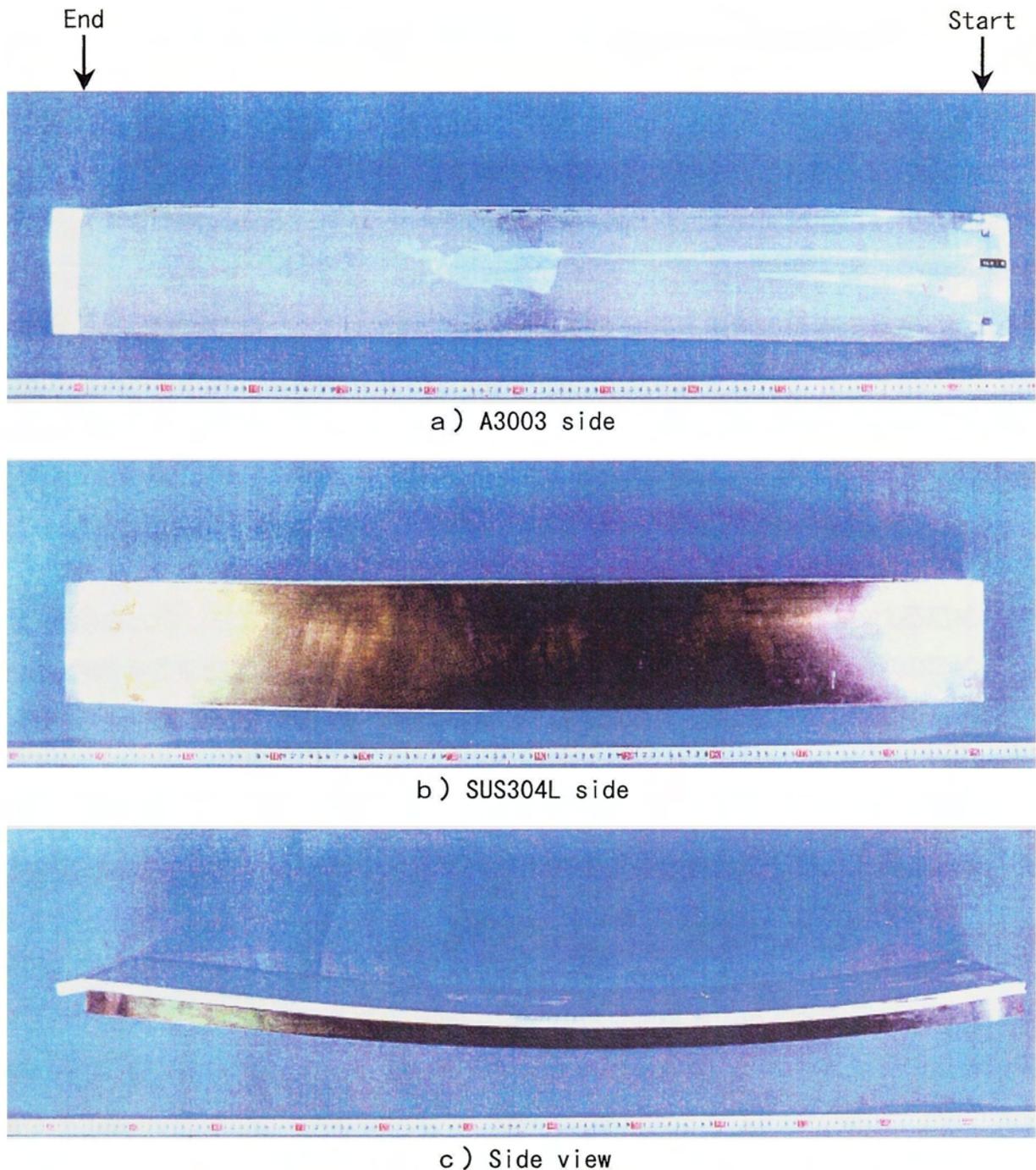


図 1.6 真空圧延接合装置で製作した Al/SUS クラッド材

ちなみに、爆着法では接合が困難とされている A5083⁹⁾も、本装置を用いることにより SUS304 と容易に接合でき⁸⁾、その接合部強さは4層爆着材の規格を大幅に越えることが明らかとなった。また、A3003 と Ti 及び A3003 と Zr の2層クラッド材も容易に

製作でき、その接合部強さは A3003 の母材強さと同等であった。これらの結果は西尾等の報告⁷⁾と良く一致していた。

1.2.2 AI/SUS クラッド材の接合部強さ

真空圧延接合法で製作した AI/SUS クラッド材の STJ を実機の LNG 船に適用するためには、本装置で製作した AI/SUS クラッド材が、LNG 船の構造材料の STJ として使用できる十分な強さ及び健全性を有することを実証し認めてもらうため、次のような手続きを経る必要がある。まず、船級協会(例えば(財)日本海事協会等)に真空圧延接合法が信頼性の高い接合法であることを示し、真空圧延接合装置による AI/SUS クラッド材の製造法承認を取得する必要がある。次に、製造法承認を取得した真空圧延接合装置で、AI/SUS クラッド材を製作することを、船級協会を介して客先(LNG 船製造業者及び船会社)に示し、承認してもらう必要がある。その後、LNG 船製造業者は、納入された AI/SUS クラッド材を STJ に加工し、LNG 船に使用する STJ が、船会社と交した諸性能を満たすことを示し、LNG 船に使用する STJ の材料承認を取得する必要がある。

真空圧延接合法による AI/SUS クラッド材の STJ が、これらの承認試験に合格し、LNG 船に適用されタンクスカート部の構造物として供用期間中健全に使用されるためには、まず、接合条件と接合部強さの関係を把握し、健全な信頼性の高い STJ 製作のための適正な接合条件を決める必要がある。

1.2.3 AI/SUS クラッド材の接合メカニズムの解明

溶融溶接のできない金属同士、例えばアルミニウム合金とステンレス鋼を直接接合するには固相接合法による。この場合、両金属表面の酸化を防止しながら金属表面に存在する酸化膜を破壊し、新生界面同士を密着させると同時に加熱することで、両金属の構成元素を互いに拡散させ、さらには接合界面に FeAl_3 等の金属間化合物を生成させないことが望ましいとされている^{10,11,12)}。これらの諸条件を実現する接合法として真空圧延接合法が提案され、接合界面のミクロンオーダーの観察と分析が行われている⁷⁾。

真空圧延接合法による AI/SUS クラッド材を LNG 船用の STJ として実機に適用するためには、さらに接合界面のナノメートルオーダーの観察と分析を行い、接合メカニズムを解明し客先等へ説明することが望まれる。

1.2.4 熱処理による AI/SUS クラッド材の材質変化

溶融溶接のできない金属同士、例えばアルミニウム合金とステンレス鋼を直接接合したクラッド材は、熱処理条件によっては接合界面に FeAl_3 等の金属間化合物が生成・成長し

接合部強さが著しく低下する場合がある^{11,12)}。

一方、LNG 船用の STJ は、タンクスカート部のブロックを組立てる時点でブロックにすみ肉溶接で固定される。このため接合界面は溶接入熱による熱影響を受けることが予想され、また、溶接熱応力が STJ 端部の接合界面に作用する。さらには、LNG 船の供用期間中には不慮の災害等により STJ が加熱処理を受けることが想定される。

以上のことから、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船用の STJ として実機に適用するためには、熱処理による Al/SUS クラッド材の材質変化を接合部強さ及び接合界面の組織変化と合わせて調査・検討しておくことが必要である。

1.2.5 Al/SUS クラッド材の構造強度

真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船のタンクスカート部の STJ に適用するためには、タンクスカート部の十字すみ肉溶接継手を破壊強度の観点から評価することが求められる。すなわち、Al/SUS クラッド材の STJ の接合界面に種々の深さのノッチを入れ、十字すみ肉溶接継手の引張試験及び疲労試験を行い、破壊特性を評価することで、Al/SUS クラッド材の STJ が LNG 船に実用可能であることを示す必要がある。

1.2.6 Al/SUS クラッド材の STJ の実船適用

Al/SUS クラッド材の STJ を爆着材の STJ に替えて採用していくためには、信頼性の高い STJ 製作法を確立するとともに、実機 LNG 船のタンクスカート部の一部、すなわち、設計応力的に最も厳しい位置に試験的に適用し、LNG 船の運行中健全であることを示し、Al/SUS クラッド材の STJ が爆着材の STJ と同等の健全性を持つことを実績として示すことが必要である。

LNG 船のタンクスカートは造船工場内で、まず、STJ と SUS304 の厚板をすみ肉溶接で接合し、タンクスカート下部構造を製作し、次にそれを反転させて STJ と A5083 の厚板をすみ肉溶接で接合することにより、図 1.2 に示すような十字すみ肉溶接構造物として組立られる。この内、後者の溶接で過去に爆着材の STJ がはく離した時例がある。このため、真空圧延接合法による STJ と A5083 のすみ肉溶接における健全性を評価・検討し、実用可能であることを示す必要がある。また、本 STJ をタンクスカート構造の一部に試験的に採用するためには、信頼性の高い STJ 製作法を確立するとともに、LNG 船の運行中に万が一、本 STJ の接合界面がはく離したとしてもタンクスカート構造の信頼性は低下しないことを示す必要がある。

以上の検討を踏まえ、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の製造法承認、STJ としての材料承認等を取得し、実機に試験的に適用する Al/SUS クラッド材の STJ を実

際に製作し、造船工場内で実機のタンクスカート構造を組み立て、その状況を観察・調査することで本 STJ が実用可能であることを確認する必要がある。

1.3 本研究の狙いと取組みの流れ

本研究を開始するに当たり、LNG 船のタンクスカート材が A5083 と SUS304 であること、及び、真空圧延接合法は A5083 と SUS304 の組合せも接合可能であることから、A5083/SUS304 の STJ も検討の対象とした。しかしながら、STJ の諸規格が爆着法による STJ(A3003/Ti/Ni/SUS304L) を対象に決められているため、本研究では、A3003 と SUS304L を組合せた Al/SUS クラッド材を研究対象とした。

本研究は、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を、LNG 船の STJ に適用するための技術を開発することを目的としており、前節で述べた諸技術を開発し、実船適用を実現した。

本研究では、試作した大型真空圧延接合装置で、Al/SUS クラッド材の接合条件を明らかにし、接合メカニズムを検討するとともに、熱処理が接合部に及ぼす影響を明らかにした。次に、Al/SUS クラッド材の STJ としての構造強度を評価し、最後には本研究の成果を統合し、試作した大型真空圧延接合装置で製作した Al/SUS クラッド材の STJ を実機 LNG 船に適用しており、主に次の手順で研究を進めた。

まず、試作した大型真空圧延接合装置で接合条件、すなわち A3003 の圧下率(以下、圧下率と記す)と接合温度を変化させて Al/SUS クラッド材を製作し、接合条件毎に接合部の硬さ、接合部強さ及び切欠き接合部強さを調査し、接合条件と接合部強さの関係を把握するとともに、切欠き引張試験片の破断面を調査した。これらの結果から、信頼性の高い Al/SUS クラッド材を得るための接合条件を明らかにした。

また、Al/SUS クラッド材の A3003 と SUS304L が直接接合している接合界面を透過電子顕微鏡で観察するとともに、エネルギー分散型 X 線分光器(以下、EDS と記す)で元素分析を行い、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合メカニズムを検討した。

さらに、Al/SUS クラッド材に熱処理を行い、熱処理条件と接合部強さの関係を把握するとともに、熱処理による接合界面の組織変化を調査した。その結果、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材は熱処理に対して安定性の高い材料であることを明らかにした。

次に、Al/SUS クラッド材の STJ としての構造強度を評価するために、実機のすみ肉溶接条件で十字すみ肉溶接継手を製作し、接合界面の A3003 側に種々の深さのスリットを入れて引張試験及び疲労試験を行い、十字すみ肉溶接継手の破壊強度特性を評価した。その結果、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ は、LNG 船のタンクスカート部に実用可能であることを確認した。

最後に, Al/SUS クラッド材による STJ を LNG 船に適用するための工作技術を検討するとともに, 実際に適用される信頼性の高い STJ 製法を示し, 本 STJ が適用されるタンクスカート構造の信頼性を評価した。そして, 得られた成果を総合して, 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を, LNG 船の STJ に世界で初めて適用したことを示す。

本研究では, 以上に示した真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船に適用する研究を通して, 真空圧延接合法が新しい異材接合技術として有効なプロセスであることを総括している。

本論文の構成を図 1.7 に示す。

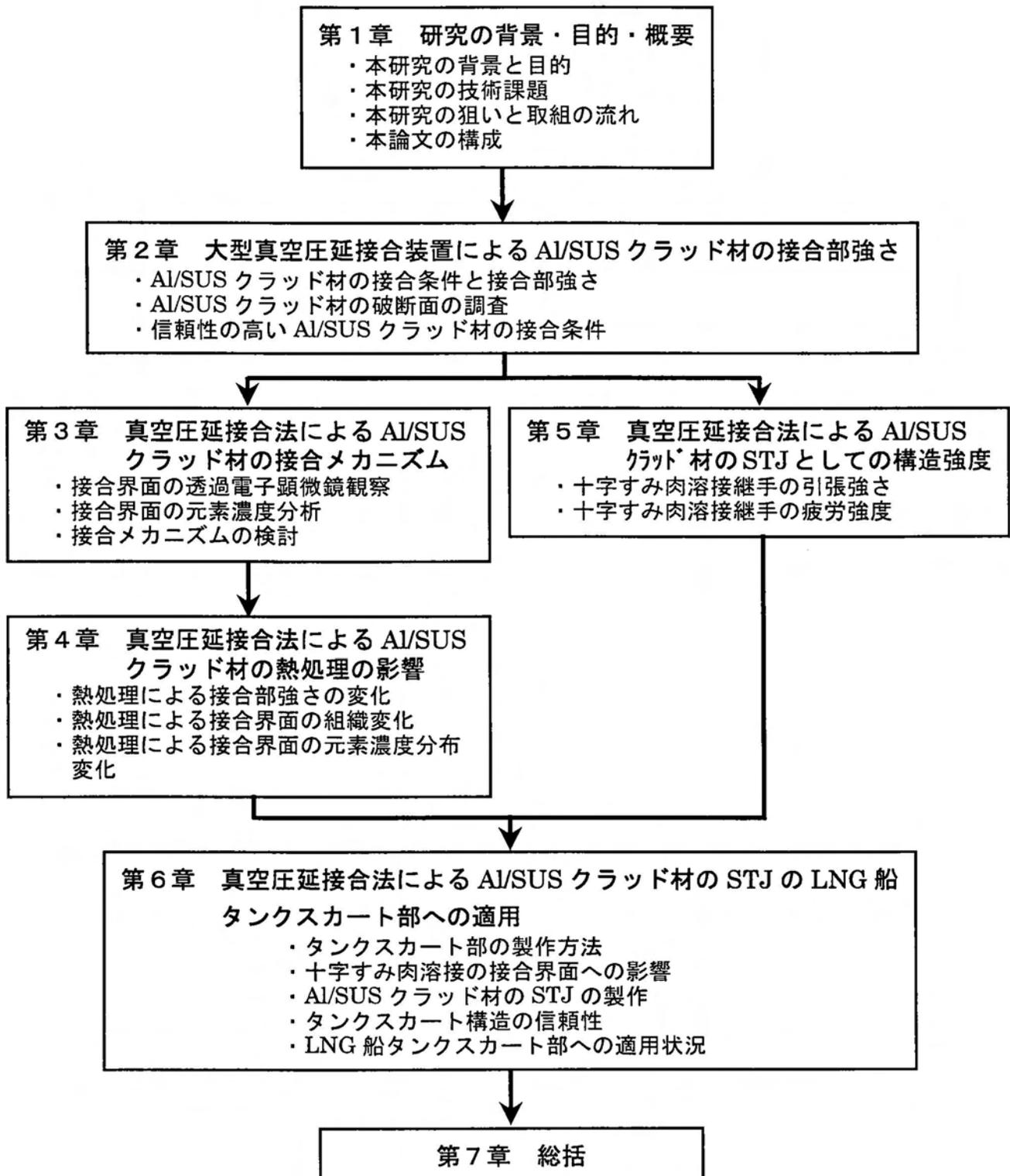


図 1.7 本論文の構成

第2章 試作した大型真空圧延接合装置による Al/SUS クラッド材の接合部強さ

2.1 緒言

LNG 船のタンクスカート部に真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を適用するためには、船級協会から真空圧延接合装置による Al/SUS クラッド材の製造法承認を取得する必要がある。そして、本装置で製作された Al/SUS クラッド材を STJ に加工し、その STJ が LNG 船の要求する諸性能を満たすことを示し、LNG 船製造業者及び船会社から STJ の材料承認を取得する必要がある。これらの手続きを踏むための各種試験及び検査に合格した後、Al/SUS クラッド材の STJ を使ってタンクスカート部を製作し、さらには、アルミ球形タンク構造物の構成要素として LNG 船の供用期間中に健全な材料として使用していくためには、まず、試作した大型の真空圧延接合装置を用い、接合条件と接合部強さの関係を把握し、適正な接合条件を明らかにしておく必要がある。

真空圧延接合法による異材継手の接合部強さは、アルミニウム/鋼の場合、圧延接合温度 500℃ でアルミニウムの圧下率を 5% 以上にすると、接合部のせん断強さはアルミニウム母材のせん断強さと同等になるとの西尾ら⁷⁾の報告がある。また、本研究のために試作した大型真空圧延装置で製作した A3003/SUS304 クラッド材の接合部強さは、圧延接合温度 480℃ で A3003 の圧下率が上昇するにつれて増加する傾向があった⁸⁾。

本章では、試作した大型の真空圧延接合装置を用い、接合条件を変化させて Al/SUS クラッド材を製作し、接合部の硬さ測定及び引張試験を行うとともに、切欠き引張試験片の破断面の観察を行い、接合条件と接合部強さの関係を把握し、健全な接合部強さを得るための接合条件を明らかにする。

2.2 供試材及び実験方法

供試材は、アルミニウム合金 A3003P-H14 及びステンレス鋼の SUS304L で、それぞれの材料の化学成分と機械的性質を表 2.1 に示す。この表には、A3003P-O 材も参考のため示した。真空圧延接合前の供試材料の寸法は、A3003P-H14 が板厚 11mm、板幅 80mm 及び長さ 1000mm であり、SUS304L が板厚 25mm、板幅 80mm 及び長さ 1000mm である。

真空圧延接合の前処理として、これらの材料の被接合面を機械加工で鏡面に仕上げた後、アセトン中で洗浄した。その後乾燥させ、両材料の被接合面同士を重ね合わせて、長手方向の片側をボルトで密着固定し、その固定端から試作した大型の真空圧延接合装置内において圧延接合を行った。

表 2.1 供試材料の化学成分と機械的性質

a) A3003

	Chemical compositions (mass%)										Mechanical properties		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)	
A3003P-H14	0.26	0.65	0.15	1.05	Tr.	Tr.	0.01	0.02	Bal.	150	139	36	
A3003P-0 (Reference)	0.25	0.64	0.15	1.05	Tr.	Tr.	0.01	0.02	Bal.	109	—	51	

b) SUS304L

	Chemical compositions (mass%)								Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)	
SUS304L	0.013	0.50	1.01	0.025	0.001	18.47	9.66	569	252	57	

接合条件は、真空度 $5.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 、圧延速度 10mm/s と一定にし、圧延接合温度(以下、接合温度と記す) 500°C の場合には、A3003 の圧下率(以下、圧下率と記す)を 7, 14 及び 20% とした。また、接合温度 400 及び 300°C の場合には、圧下率を 14% とした。重ね合せた材料の中央 500mm の位置の被接合面近傍の SUS304L 側面に熱電対を取り付けて、接合温度を計測した。

真空圧延接合の後、Al/SUS クラッド材の接合界面のミクロ観察を行うとともに、接合部のマイクロビッカース硬さ分布の測定と引張試験を行った。マイクロビッカース硬さの測定荷重は、A3003 が 10g 、SUS304L が 50g である。引張試験は、二種類の試験を行った。すなわち、Al/SUS クラッド材の板厚方向の引張試験と、圧延方向の A3003 及び SUS304L 母材の引張試験を行った。前者では、接合条件と接合部強さの関係を、後者では接合条件による母材の強度変化を調べた。Al/SUS クラッド材の板厚方向の引張試験片の形状と寸法を図 2.1 に示す。平滑引張試験片では平行部の直径を 4mm とし、切欠き引張試験片では接合界面に切欠きを入れ、切欠き底部の直径を 4mm とした。Al/SUS クラッド材の圧延接合方向の A3003 と SUS304L の単独の引張試験片は、平行部の直径を 6mm 、そしてゲージ長さを 30mm とした。いずれの引張試験においても引張速度を 0.5mm/min とした。

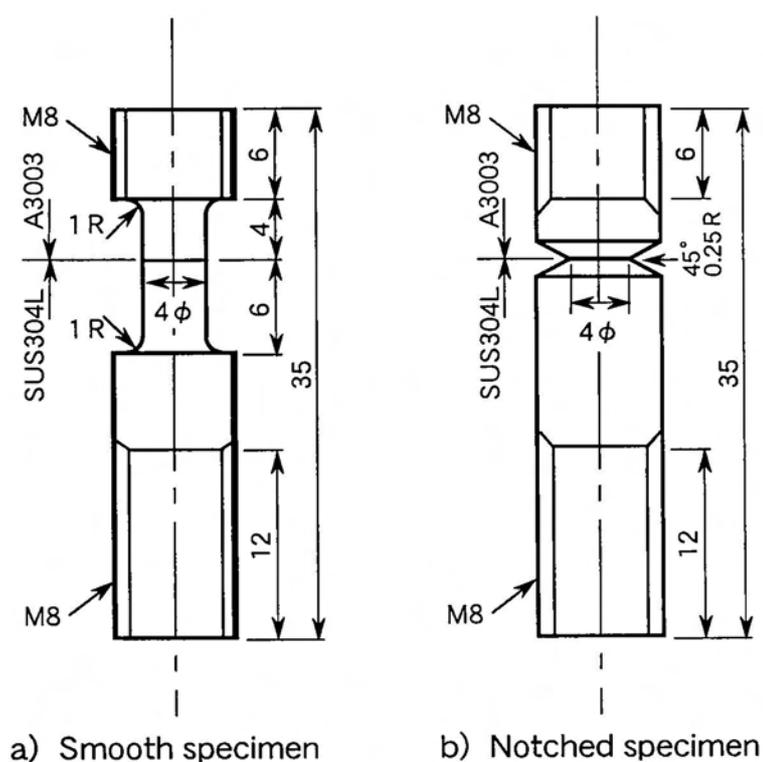
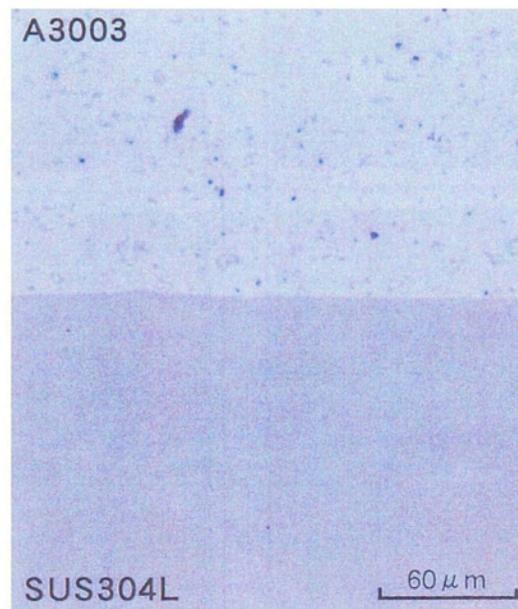


図2.1 引張試験片の形状と寸法

2.3 実験結果

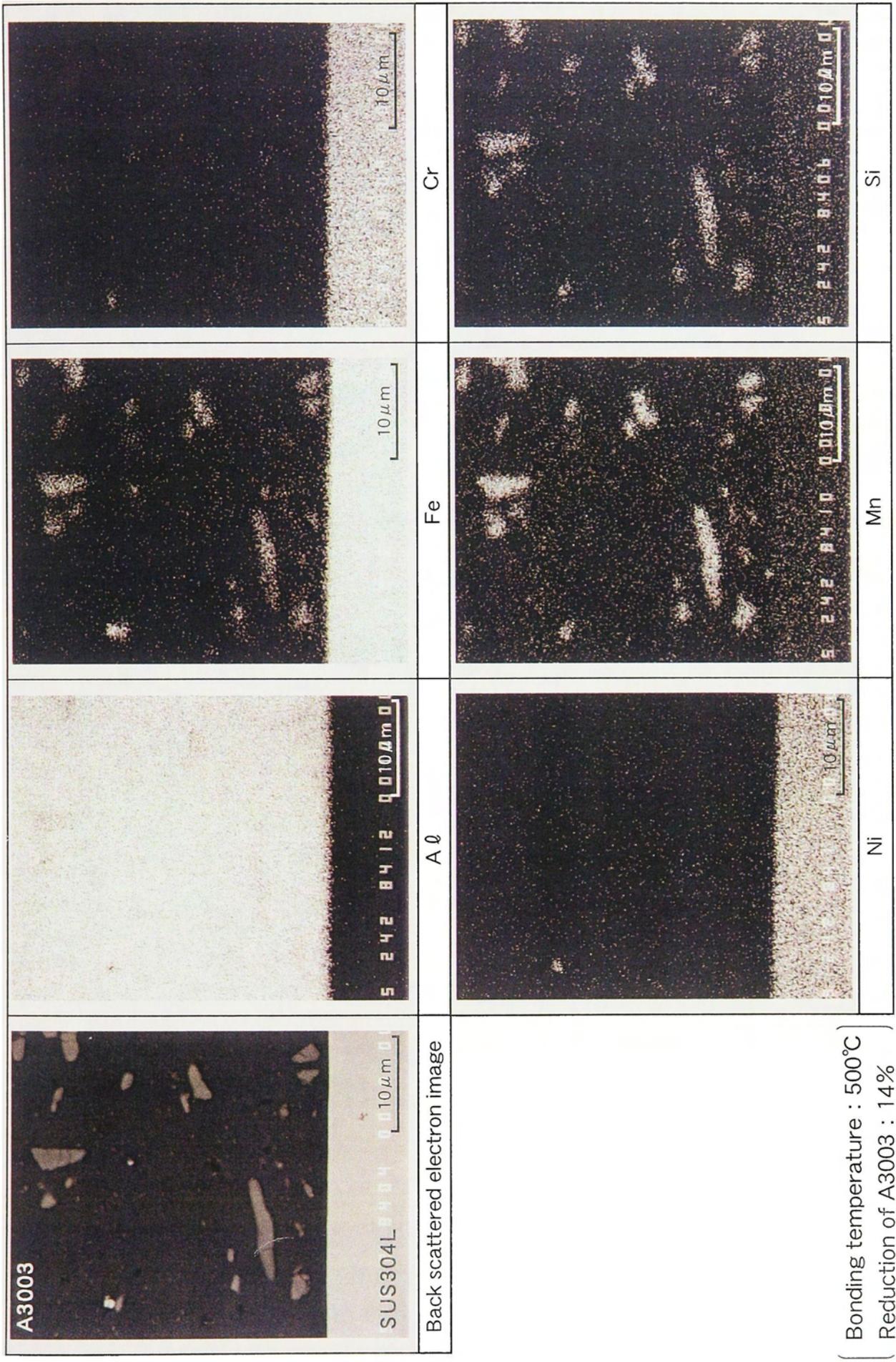
2.3.1 接合界面の観察

A3003 と SUS304L の接合状況を観察するために、Al/SUS クラッド材の接合断面を鏡面研磨し、エッチングなしの状態で見合界面を光学顕微鏡で観察した。図 2.2 に、接合温度 500℃、そして圧下率 14%の接合条件における、Al/SUS クラッド材の接合部の光学顕微鏡写真を示す。A3003 と SUS304L が直接接合しているのが観察される。A3003 内には、多くの析出物が認められた。図 2.3 に示す SEM による接合界面の元素濃度分析結果によれば、これらの析出物は Fe、Mn 及び Si を含有していた。SEM 観察結果からも、A3003 と SUS304L は直接接合しており、接合界面には金属間化合物等は認められない。これらの結果は、他の接合条件の接合界面も全く同じ傾向にあった。



(Bonding temperature : 500℃)
(Reduction of A3003 : 14%)

図2.2 Al/SUSクラッド材の接合界面の顕微鏡写真



{ Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14% }

図2.3 Al/SUSクラッド材の接合界面近傍の元素濃度分布

2.3.2 接合断面の硬さ分布

図 2.4 に、接合温度 500°C、そして圧下率 14%の Al/SUS クラッド材の板厚方向の硬さ分布を示す。SUS304L 側では、板厚中央部で 180~200Hv のものが、接合界面近傍で約 250Hv に、また SUS304L 表面近傍で 280Hv に硬さが上昇していた。これは、圧延接合時に SUS304L 表面が加工硬化を受けた結果と考えられる。一方、A3003 側では接合界面近傍、板厚中央部及び A3003 表面近傍でほぼ一定の硬さ約 50Hv を示した。この値は、爆着法の A3003/Ti/鋼クラッド材^{6,13,14)}における A3003 の硬さよりも約 20Hv も低い値であった。これは、本接合法の場合、接合温度が 500°C であるため、供試材の A3003P-H14 材が焼なましの効果を受け、さらに熱間での圧延接合であるため加工硬化が生じなかったものと思われる。他の接合条件における Al/SUS クラッド材も、これとほぼ同じ硬さ分布を示した。

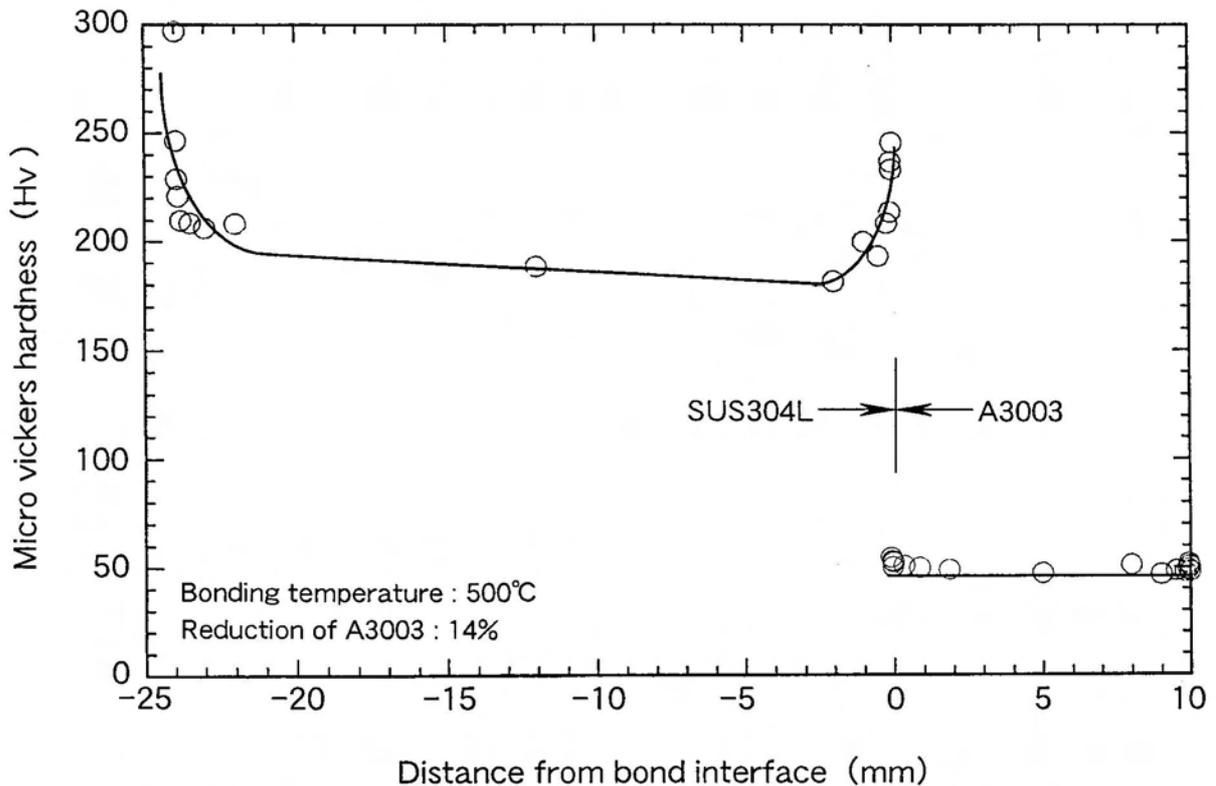


図2.4 Al/SUSクラッド材の板厚方向の硬さ分布の1例

2.3.3 接合条件と接合部強さの関係

図 2.5 は、接合温度が 500°C の場合の、Al/SUS クラッド材の接合部の強さと圧下率の関係を示したものである。切欠き引張試験片では平滑引張試験片に比べて変形が拘束されるため、接合部の破断強度(以下、切欠き接合部強さと記す)は高い値を示す。また、切

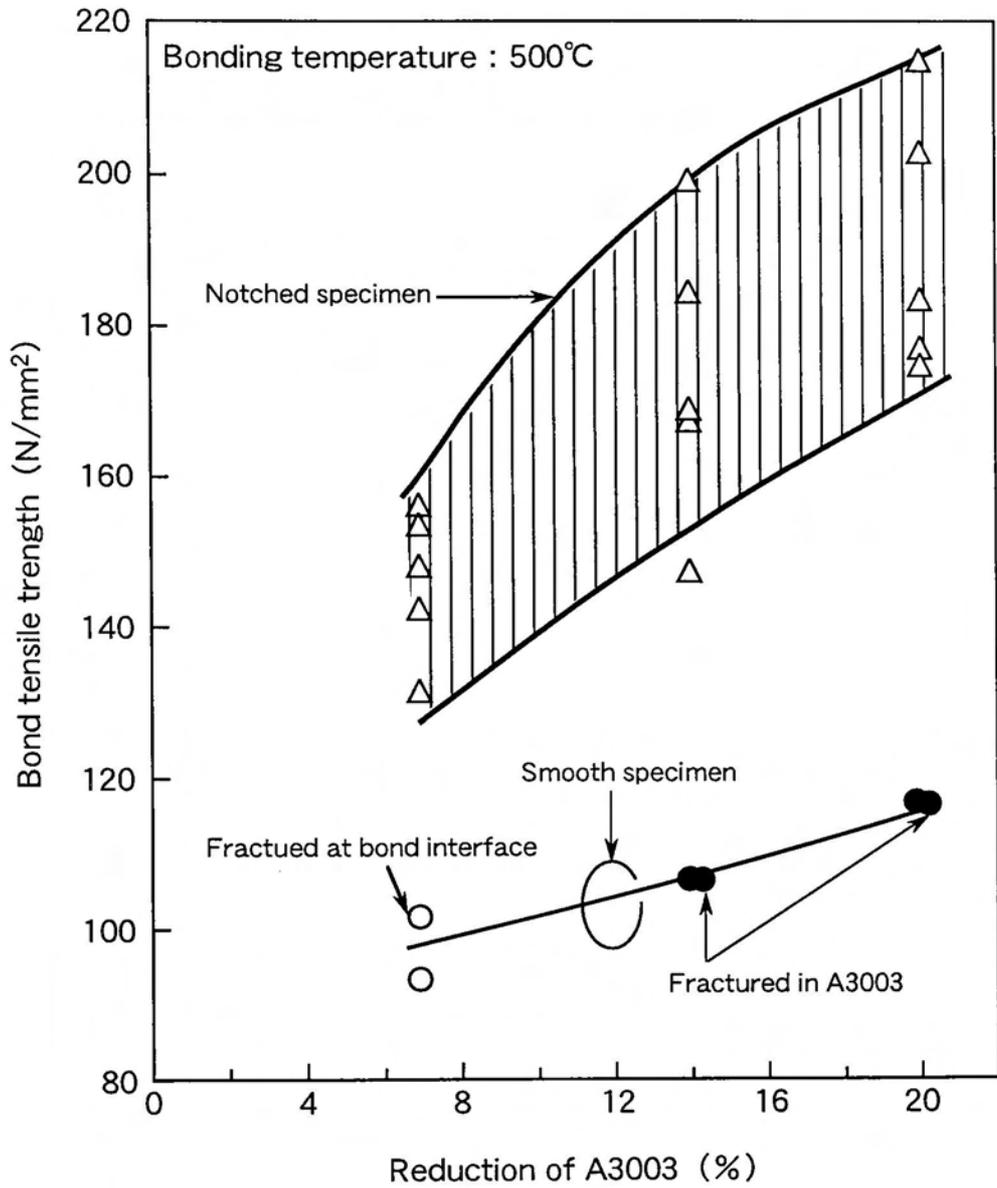


図2.5 Al/SUSクラッド材の接合部強さとA3003圧下率の関係

欠き引張試験片の切欠き接合部強さが大きく変動するのは、Al/SUS クラッド材の接合界面に対して切欠き先端の位置が試験片毎に若干ずれているためと考えられる。試験片の破断形態は、切欠き引張試験片ではすべて接合部破断であり、平滑引張試験片では圧下率が7%で接合部破断を示し、圧下率が14%以上になるとA3003の母材破断を示した。図2.5によれば、切欠き引張試験片では圧下率が上昇するにつれて切欠き接合部強さは増加することを示している。平滑引張試験片では、圧下率が上昇するにつれて接合部強さは増加するが、圧下率が14及び20%ではA3003の母材破断を示した。

図2.6は、圧下率が14%の場合におけるAl/SUS クラッド材の接合部強さと接合温度の関係を示したものである。切欠き引張試験片の場合、接合温度の上昇につれて切欠き接合部強さは上昇し、その上昇傾向は300から400℃にかけて大きく、400から500℃にかけて飽和する傾向にある。一方、平滑引張試験片では、接合温度の上昇とともに接合部強さは低下し、接合温度400℃以上でA3003の母材破断を示す。

図2.7に、接合温度500℃の場合におけるAl/SUS クラッド材の母材強さに及ぼす圧下率の影響を示す。A3003側にはAl/SUS クラッド材の平滑引張試験片の接合部強さを参考のため示した。図2.7によれば、圧下率の上昇につれてSUS304Lの母材強さは上昇している。特に、0.2%耐力の圧下率20%における上昇が著しい。これは、圧下率の上昇によりSUS304L母材が加工硬化の影響を受けたためと考えられる。

図2.8に、圧下率14%の場合における、Al/SUS クラッド材の母材強さに及ぼす接合温度の影響を示す。A3003側には、Al/SUS クラッド材の平滑引張試験片の接合部強さを参考のため示した。図2.8によれば接合温度の上昇につれてA3003及びSUS304Lの母材強さは低下している。特にA3003の場合、300から400℃にかけての0.2%耐力の低下が著しい。これは、接合温度の上昇につれてA3003の強度が低下し、SUS304Lの加工硬化が緩和した結果と考えられる。A3003の母材の引張強さと、Al/SUS クラッド材の平滑引張試験片の接合部強さを比べると、接合温度400及び500℃で両者は比較的近い値を示しており、Al/SUS クラッド材はA3003の母材破断を示している。接合温度300℃では、Al/SUS クラッド材は接合部破断を示し、A3003母材の引張強さから大きく低下し、むしろA3003母材の0.2%耐力に近い接合部強さを示している。接合温度400及び500℃に比べ、接合温度300℃のAl/SUS クラッド材は、接合状態が良好でないものと考えられる。

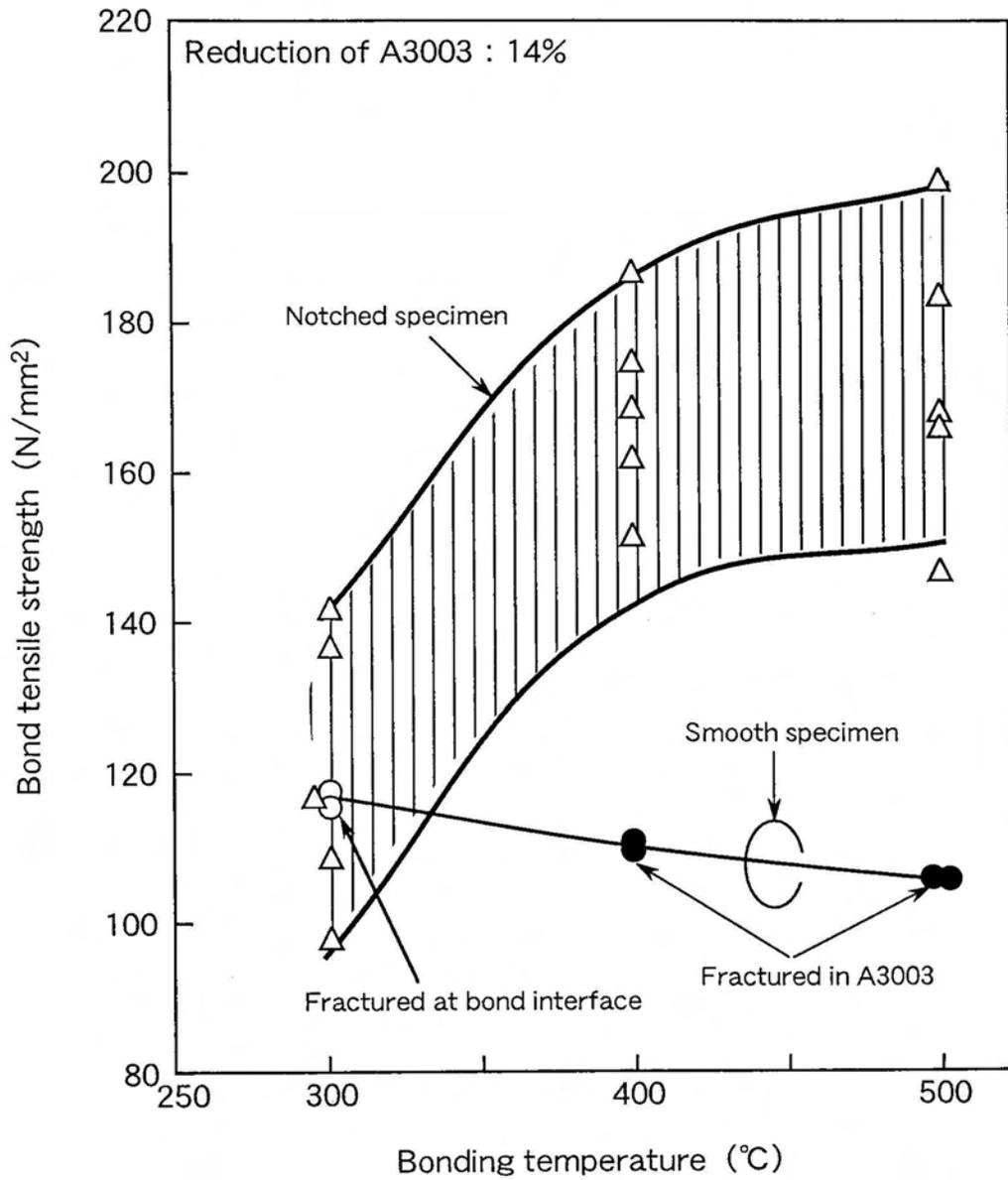


図2.6 Al/SUSクラッド材の接合部強さと接合温度の関係

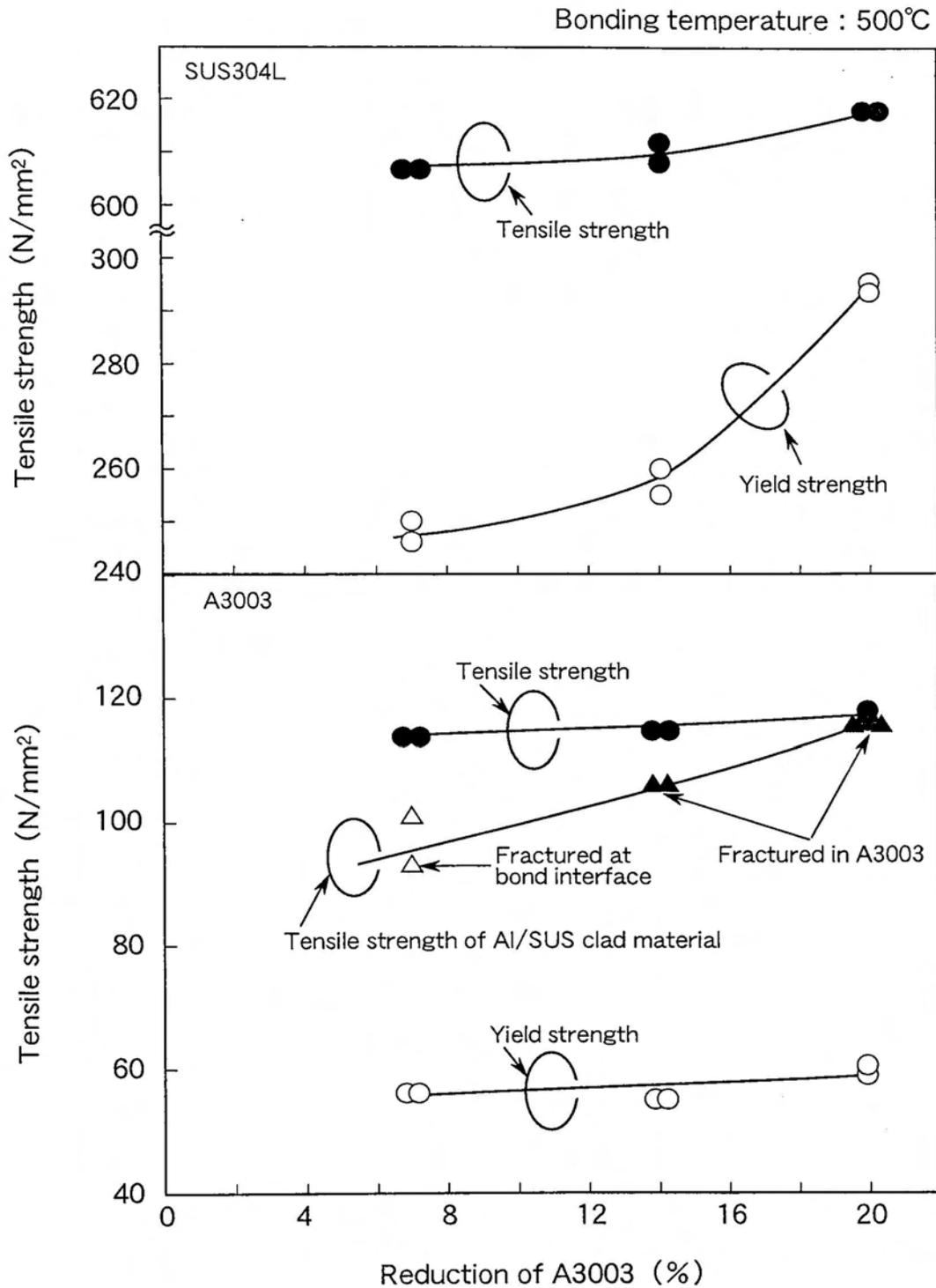


図2.7 Al/SUSクラッド材におけるSUS304LとA3003母材の圧下率と引張強さの関係

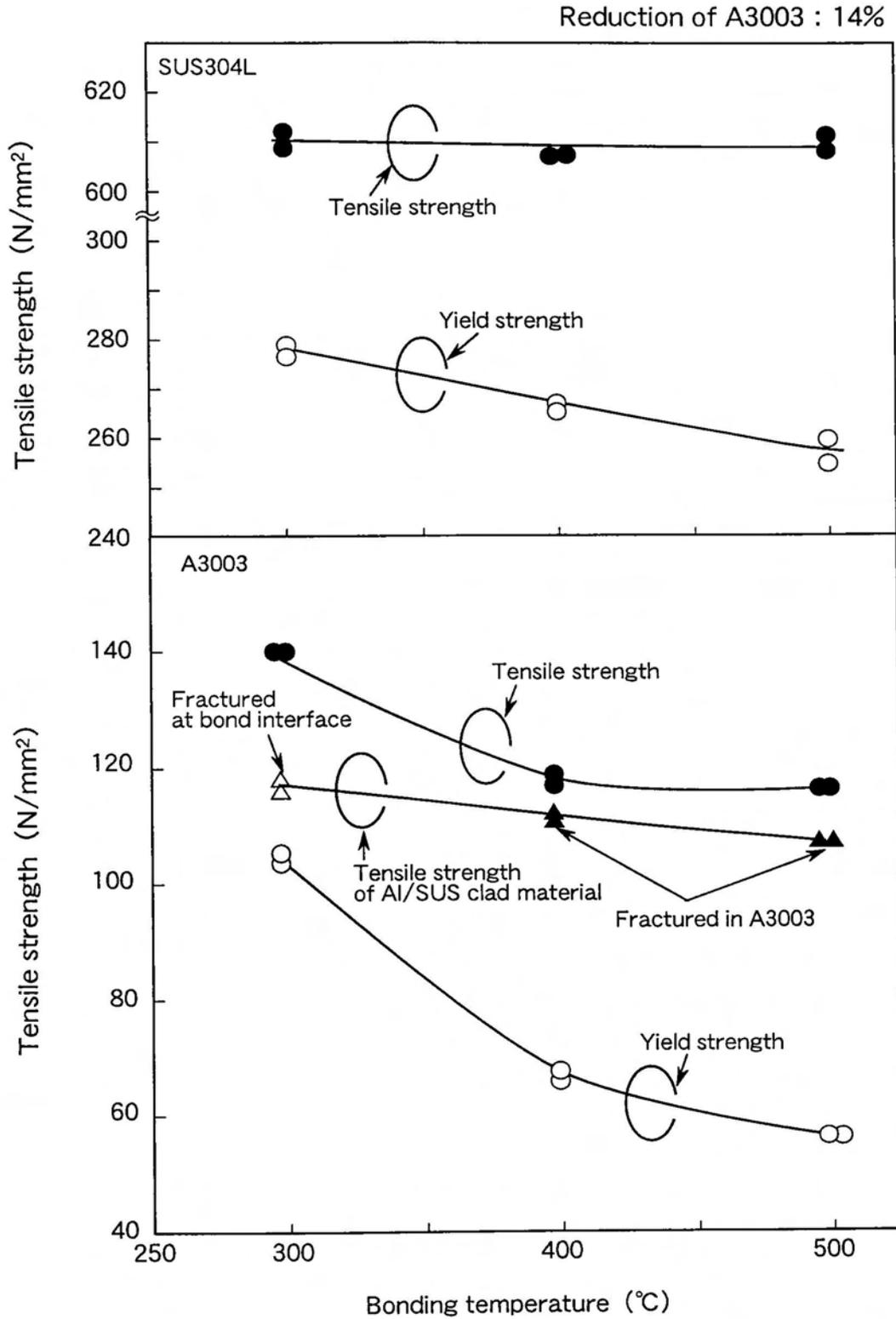


図2.8 AI/SUSクラッド材におけるSUS304LとA3003母材の接合温度と引張強さの関係

2.4 考察

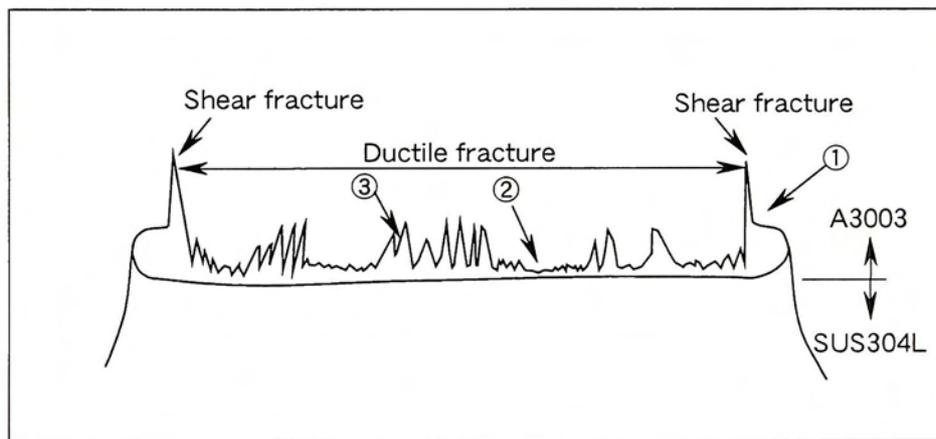
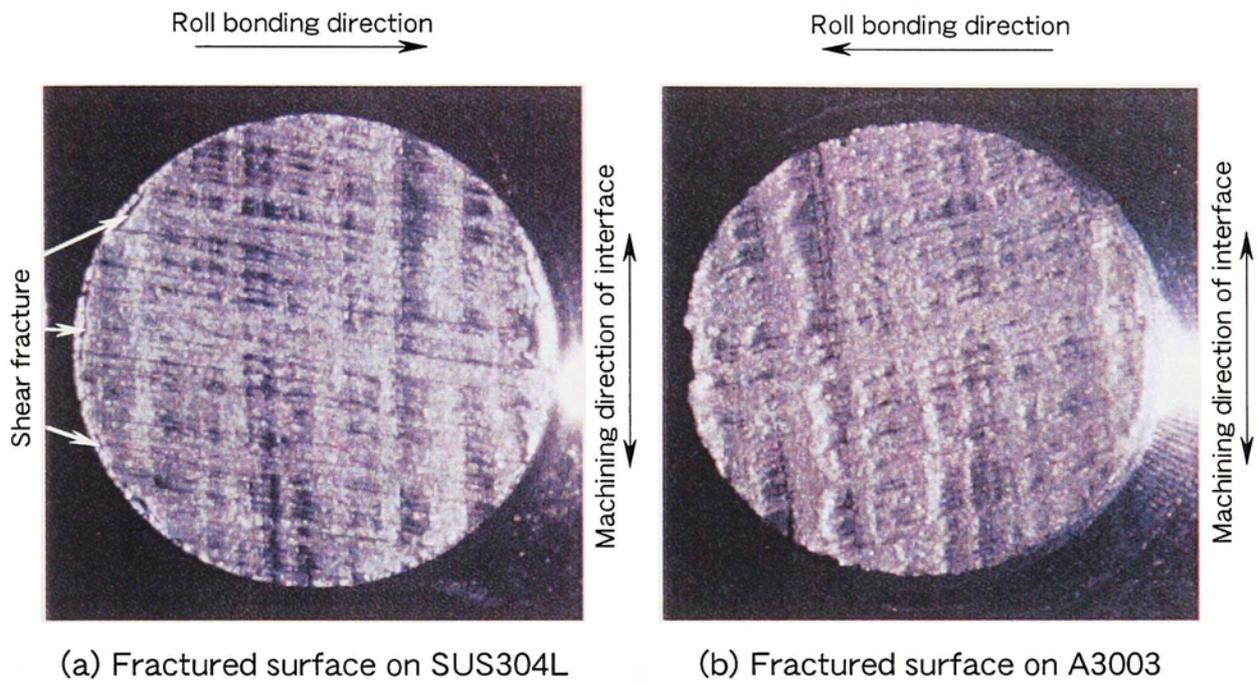
2.4.1 Al/SUS クラッド材の接合部強さの検討

Al/SUS クラッド材の接合部強さは、アルミニウム合金側の強度に支配される。供試材に A3003P-H14 を使用したため、接合温度が 500, 400 そして 300℃と低下するにつれて、A3003P-H14 の焼なまし効果は小さくなり、平滑引張試験片の接合部強さは上昇したものと考えられる。接合温度を 500℃と一定にし、圧下率を 7, 14 そして 20% と上昇させた場合、焼なまし効果は同一であるが、圧下率の上昇により接合性が向上し平滑引張試験片の接合部強さが上昇したものと考えられる。一方、切欠き引張試験片では、切欠き底部で A3003 の変形が大きく拘束されるため、界面の接合状態がそのまま切欠き接合部強さとして現れ、接合状態が不十分な接合温度 300℃の場合、急激に切欠き接合部強さが低下したものと考えられる。

図 2.9 は、接合温度 500℃、そして圧下率 14%の切欠き引張試験片の破面の状況を示したものである。この図には、SUS304L 側破断面の模式図も合わせて示した。図 2.9 の写真(a)に示す SUS304L 側の破面及び(b)に示す A3003 側の破面において、写真の上下方向に若干弧を描いて縞状に観察されるものは、SUS304L 表面のフライス加工の跡を示している。また、圧延接合方向は、SUS304L 側の破面では左から右、A3003 側の破面では右から左である。SUS304L 側破面の断面模式図(c)に示すように、SUS304L 側の破面には、全面に A3003 が付着しており、破壊の進展は A3003 と SUS304L の接合界面の近傍の A3003 側を進んでいるのが認められた。SUS304L 側の破面には、断面模式図(c)に示すように、破面の外周部のほぼ全周に A3003 が絞られて変形した部分が認められ、その内側に A3003 のせん断破面が認められ、さらにその内側に延性破面が認められた。これらの状況から、Al/SUS クラッド材の切欠き引張試験片の破壊様式は延性破壊であり、破壊はまず、切欠き引張試験片中央部の Al/SUS 接合界面近傍の A3003 側にポイド状に発生し、次に外側に向かって進展し、最後に外周部がせん断破壊して破壊が終了したと推定される。

図 2.10 に、切欠き引張試験片の SUS304L 側破面の断面ミクロ写真を示す。写真中の番号は、図 2.9 の断面模式図(c)に示した番号に対応する。写真①は、破面の外周部に当たる所で、A3003 が絞られている様子が観察される。写真②は、破面中央部の A3003 が薄く付着している部分で、A3003 の付着厚さは 0.2 から 1 μm 程度であった。写真③は、破面中央部の A3003 が厚く付着している部分で A3003 の付着厚さは数 μm から 10 数 μm 程度であった。

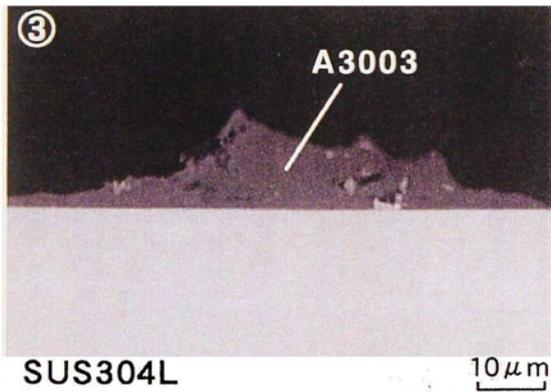
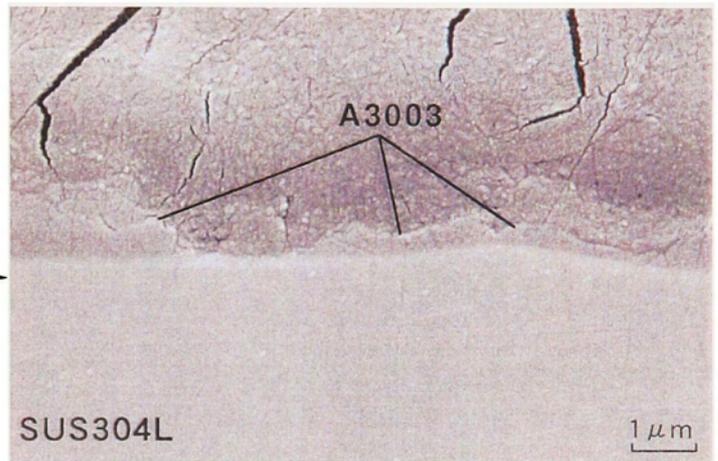
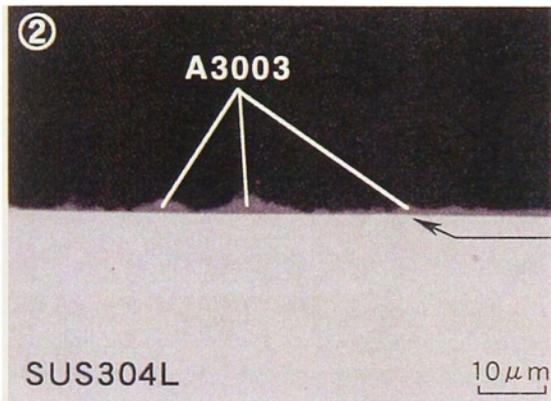
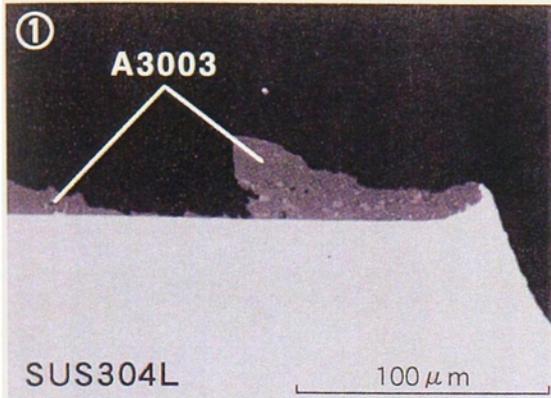
図 2.11 に、切欠き引張試験片の SUS304L 側破面の SEM 写真を示す。写真 b)は、図 2.9 の写真②に相当し、写真(d)は図 2.9 の写真③に相当する。図 2.11 によれば、



(c) Illustration of fracture surface on SUS304L

(Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14%)

図2.9 Al/SUSクラッド材の切欠試験片の破面観察



(Bonding temperature : 500°C)
(Reduction of A3003 : 14%)

図2.10 切欠試験片の破断面の微細観察

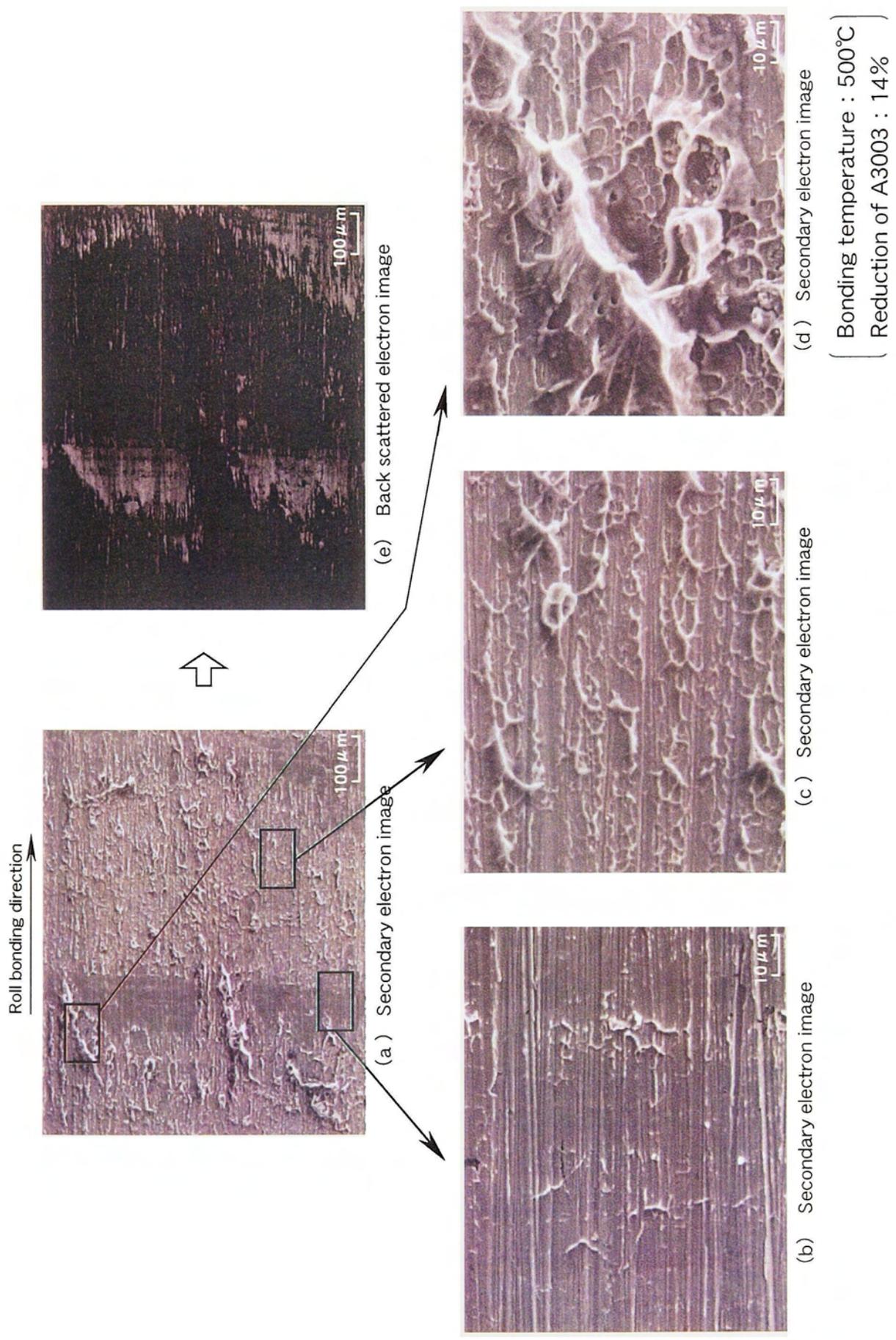


図2.11 切欠試験片のSUS304L側破面のSEM写真

SUS304L 側の破面には A3003 が全面に付着しており、その状態は写真(b)に示すように A3003 が圧延接合方向に薄く伸ばされたように存在する部分と、写真(c)及び(d)に示すように圧延接合方法に長く伸びた A3003 のディンプル破面が観察される部分とが認められた。すなわち、切欠き引張試験片の SUS304L 側破面の延性破壊領域には、接合界面から約 $1\ \mu\text{m}$ 以下の位置の A3003 側で破断した部分と、接合界面から数 μm から 10 数 μm の位置の A3003 側で明瞭なディンプル破面を呈して破断した部分とがある。延性破壊領域でディンプル破面を呈した部分の占める面積率は、接合条件により異なる傾向が認められ、切欠き引張試験片の切欠き接合部強さも接合条件に影響される。そこで、上記面積率と接合条件の関係を調査した。(e)に示す反射電子像を撮影し、A3003 の薄い付着領域と厚い領域を分離し、両者の面積率を計測した。両者の分離には以下の手法を用いた。

反射電子像は表面から $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 深さまでの情報を持つといわれており、反射電子の発生量は、原子番号依存性がある。このため、反射電子像は表面から $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 深さの領域の平均原子番号が大きいほど明るく、小さいほど暗く観察される。すなわち、A3003 が $1\ \mu\text{m}$ 以下の薄い付着領域では、SUS304L の構成成分の Fe, Cr 及び Ni の影響で明るく撮影され、A3003 が厚い付着領域では暗く撮影される。図 2.11 の写真(e)は、A3003 の付着厚さが $1\ \mu\text{m}$ 以下の薄い領域が明瞭に区別できる撮影条件による反射電子像を示したものである。この撮影条件のもとで、切欠き引張試験片の SUS304L 側破面を $700\ \mu\text{m}\times 900\ \mu\text{m}$ の視野で 9 枚の写真を撮影し、A3003 が厚く付着している領域の面積率を計測した。この面積率をここでは便宜的に接合率と定義して、各接合条件毎に接合率を求め、接合率と接合条件との関係及び接合率と切欠き接合部強さとの関係を求めた。9 枚の反射電子像の撮影領域は、延性破壊領域の約 45%に相当した。

図 2.12 に、接合温度 500°C の場合の切欠き接合部強さ及び接合率に及ぼす圧下率の影響を示す。切欠き接合部強さは圧下率の上昇とともにほぼ直線的に増大し、圧下率 7%で約 $140\text{N}/\text{mm}^2$ 、そして圧下率 20%では約 $190\text{N}/\text{mm}^2$ となる。また接合率も圧下率の増大に伴って上昇し、91%から 97%の接合率を示している。

図 2.13 に、圧下率 14%の場合の切欠き接合部強さ及び接合率に及ぼす接合温度の影響を示す。切欠き接合部強さと接合率は接合温度の上昇とともに大きく増大し、接合温度 300°C で切欠き接合部強さは約 $120\text{N}/\text{mm}^2$ 、接合率は約 86%の値が得られ、接合温度 400 及び 500°C で切欠き接合部強さは約 $180\text{N}/\text{mm}^2$ 、接合率は 95%となり、接合温度が 400 から 500°C の間で切欠き接合部強さと接合率は飽和する傾向にあった。

図 2.14 は、これらの切欠き接合部強さと接合率の関係を示したもので、両者の関係は直線関係が認められる。

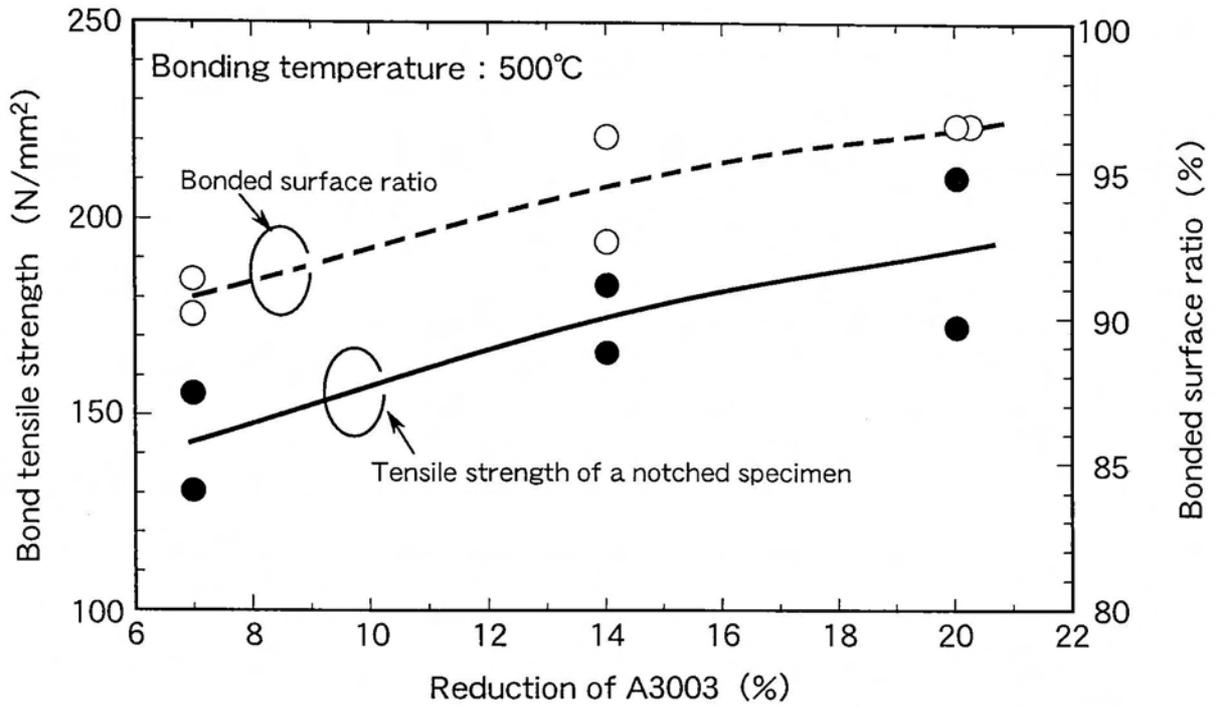


図2.12 切欠試験片の切欠接合部強さ及び接合率と圧下率の関係

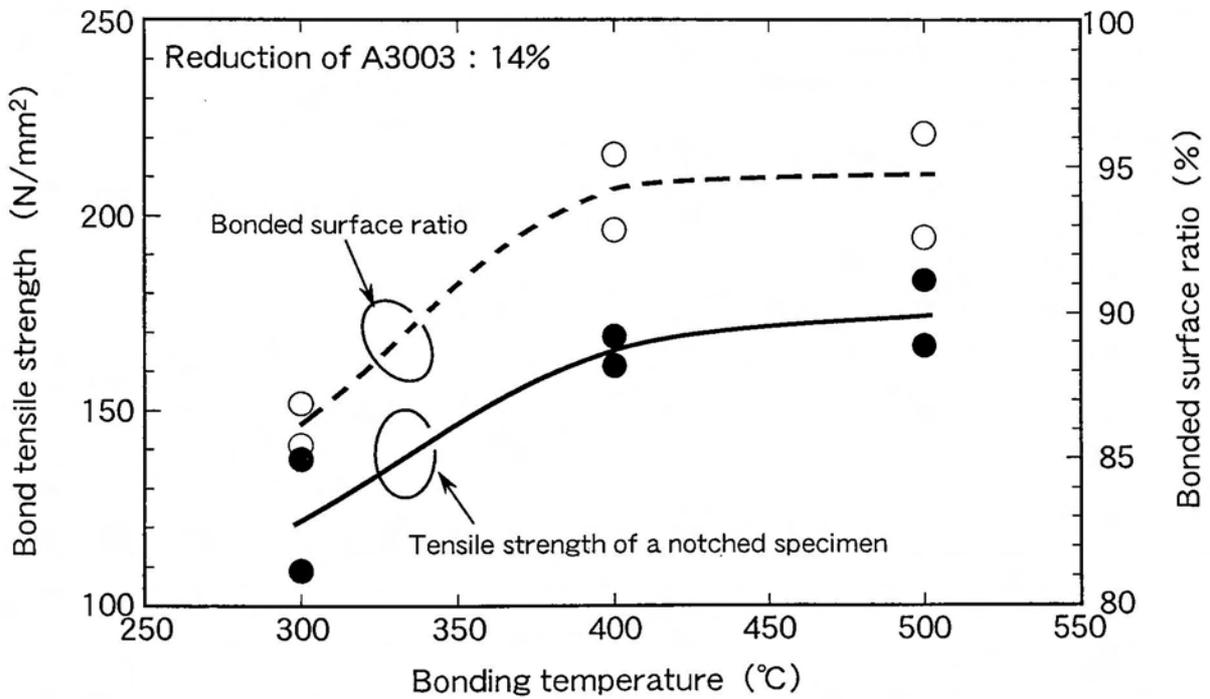


図2.13 切欠試験片の切欠接合部強さ及び接合率と接合温度の関係

ここで定義した接合率は、SUS304L 側破面において A3003 のディンプルが明瞭に認められる領域の面積率で、その領域の強さは接合界面から A3003 側に数 μm から 10 数 μm 入った位置の A3003 母材の切欠き引張強さを表している。図 2.7 に示したように、Al/SUS クラッド材の A3003 の母材強さは接合温度における焼なまし効果の影響を受ける。すなわち、切欠き接合部強さは Al/SUS クラッド材の A3003 母材側の切欠き強さを表しており、しかもそれは接合条件に影響される。接合部の強さが一様な場合、接合率と接合部強さの関係は原点と通る直線で表わせるが、今回のように Al/SUS クラッド材の母材強さが接合条件に影響される場合には、接合率と接合部強さの関係は原点を通らないものと考えられる。

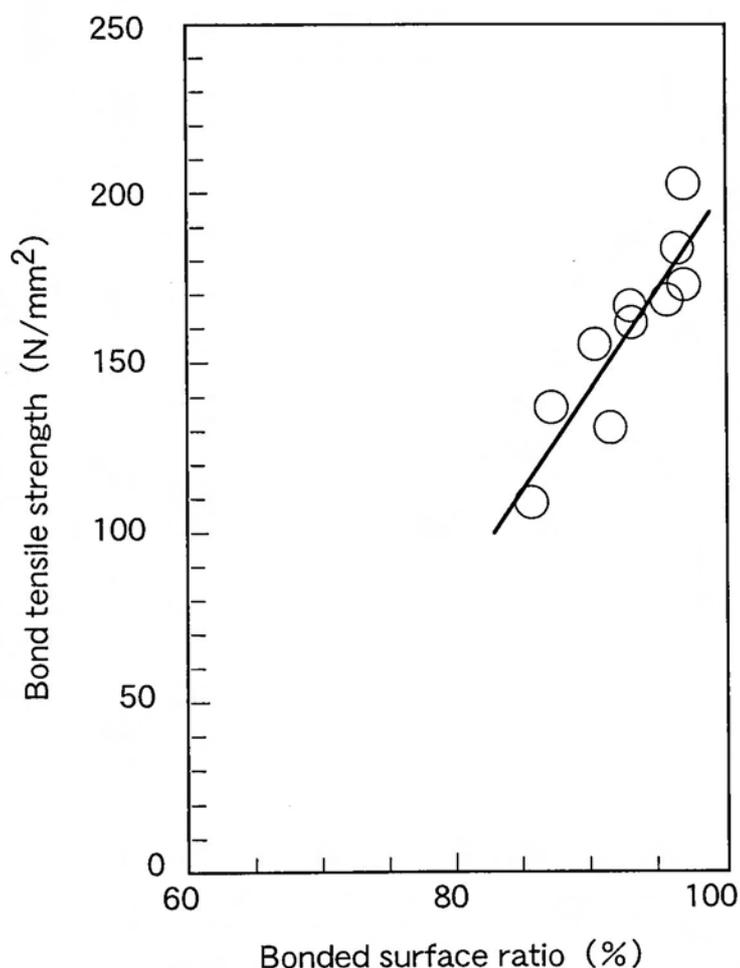


図2.14 切欠試験片の接合率と切欠接合部強さの関係

2.4.2 信頼性の高い Al/SUS クラッド材の接合条件

次に、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船のタンクスカート部の STJ として実用する場合の、信頼性の高い Al/SUS クラッド材の接合条件について検討する。

これまでの結果によれば、図 2.5 に示したように接合温度 500℃の場合は、圧下率の上昇により平滑引張試験片及び切欠き引張試験片ともに接合部強さは上昇し、平滑引張試験片では圧下率 14%以上で A3003 の母材破断を示した。また、図 2.6 に示したように、圧下率 14%の平滑引張試験片の場合は、接合温度が上昇するにつれて A3003 の焼なまし効果により接合部強さは低下し、接合温度が 400℃以上では A3003 の母材破断を示した。一方、切欠き引張試験片では逆に接合温度の上昇により切欠き接合強さは上昇し、特に接合温度が 300 から 400℃の間で大きく上昇する。これらのことから、信頼性の高い接合部強さを持つ接合条件を選定するには、平滑引張試験片から得られる接合部強さのみで評価すべきでなく、切欠き引張試験片で得られる切欠き接合部強さによる評価も加えることが必要となる。これは、今回定義した接合率とも関連しており、接合率が低下すると切欠き接合部強さは低下し、平滑引張試験片が接合部破断を示すことから推察される。

本技術を実機の LNG 船に適用する場合、切欠き引張試験片における切欠き接合部強さと接合率が高くなる接合条件を選定すべきで、今回の試験結果から信頼性の高い Al/SUS クラッド材の得られる接合条件は、平滑引張試験片が A3003 の母材破断を示し、切欠き引張試験片の切欠き接合部強さが高く接合率が 93~97%となる、すなわち、接合温度 400℃以上かつ圧下率 14%以上である。この接合条件で接合すれば、信頼性の高い Al/SUS クラッド材を製作することができる。

2.5 結言

本章では、試作した大型の真空圧延接合装置を用いて、種々の接合条件で Al/SUS クラッド材を製作し、接合部のミクロ観察及び硬さ分布の測定を行うとともに、接合条件と接合部強さの関係を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) A3003 と SUS304L の接合界面には金属間化合物等はなく、両金属が直接接合している状況が観察された。
- (2) Al/SUS クラッド材の板厚方向の硬さ分布によると、SUS304L 側では接合界面近傍と表面近傍で硬さが急激に上昇していた。これは、圧延接合中に生じる加工硬化が原因と考えられる。一方、A3003 側では、硬さ分布は板厚方向でほぼ一定であった。また、その値は A3003P-O 材並みの値を示した。これは、接合温度が 500℃であるため、A3003P-H14 が焼なましされたためであると考えられる。
- (3) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の A3003 母材及び SUS304L 母材の

引張強さは、接合条件の影響を受け、圧下率が上昇すれば上昇し、接合温度が上昇すれば低下する。

- (4) 接合温度 500℃において、圧下率を変化させて製作した Al/SUS クラッド材の接合部強さは、平滑引張試験片及び切欠き引張試験片ともに圧下率の上昇とともに上昇し、平滑引張試験片では圧下率が 14%以上で A3003 での母材破断を示した。
- (5) 圧下率 14%において、接合温度を変化させて製作した Al/SUS クラッド材の接合部強さは、平滑引張試験片では接合温度の上昇とともに低下し、接合温度 400℃以上で A3003 での母材破断を示した。切欠き引張試験片では切欠き接合部強さは接合温度の上昇とともに上昇し、特に 300 から 400℃にかけての上昇が著しく、400 から 500℃にかけて飽和する傾向が認められた。
- (6) 切欠き引張試験片の SUS304L 側の破面には、A3003 が全面に付着しており、A3003 のディンプルが多量に厚く観察される領域と、A3003 が約 1 μm 以下に薄く伸ばされ線状の痕跡として観察される領域とが認められた。前者の領域の占める割合を接合率として定義すると、切欠き接合部強さと接合率には直線関係が得られた。
- (7) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を球形タンク方式 LNG 船に適用する場合に必要な接合部強さを確保するための接合条件として、接合温度 400℃以上、圧下率 14%以上を得た。

第3章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合メカニズムの検討

3.1 緒言

熔融溶接が不可能な金属同士を接合するには、固相接合が用いられている。この場合、接合中に両金属の被接合面が酸化されるのを防止するとともに、すでに存在する被接合面の酸化皮膜を破壊し新生界面同士を密着させ、両材料の構成元素の相互拡散を、金属間化合物が形成されない範囲で生じさせる必要がある。西尾等は、これらの諸条件を満足させるための接合法を検討し、真空圧延接合法及び装置^{15,16)}を開発した。

本研究では、本接合法によるA3003とSUS304Lを直接接合したAl/SUSクラッド材をLNG船のSTJに適用する技術を開発することを目的とし、西尾等の協力を得て大型の真空圧延接合装置を試作した。第2章では、本装置を用いてA3003とSUS304Lを接合し、接合部強さがA3003の母材強さと同等以上になる信頼性の高いクラッド材を得るための接合条件を見出した。また、接合界面のミクロ観察によれば、A3003とSUS304Lは直接接合している状況が観察され、接合界面には酸化物及び金属間化合物は認められなかった。

一方、西尾等は真空圧延接合法で製作したアルミニウムクラッド鋼の接合界面をEPMAで分析すると、AlとFeの相互拡散はほとんど認められず、4nmのビーム径を持つ分析電子顕微鏡で分析すると、軟鋼側へ約50nmにわたってAlが拡散しており、かつ接合界面には金属間化合物は認められなかったと報告している¹¹⁾。以上のことは、真空圧延接合法によるAl/SUSクラッド材の直接接合メカニズムを検討するには、接合界面をナノレベルで観察する必要があることを示している。近年、透過電子顕微鏡での観察技術の要求が高まり、異材接合部の透過電子顕微鏡観察用の薄膜作成技術が確立され¹⁷⁾、接合界面をナノレベルで観察することが可能である。

本章では、試作した大型真空圧延接合装置を用い、A3003とSUS304Lを種々の接合条件で接合し、Al/SUSクラッド材の接合界面を透過電子顕微鏡で観察するとともに、エネルギー分散型X線分光器(以下、EDSと記す)で元素分析を行い、それらの結果を基にして真空圧延接合法によるAl/SUSクラッド材の接合メカニズムについて検討した。

3.2 供試材料及び実験方法

Al/SUSクラッド材の接合部を、透過電子顕微鏡にて観察を行うための薄膜を作製した。供試材料は、第2章で供したものと材料及び接合条件が同じA3003とSUS304LのAl/SUSクラッド材である。

まず、Al/SUSクラッド材の接合部から、圧延接合方向に対して垂直な面が観察対象と

なるように、厚さ1 mm×2 mm×2 mm の薄膜作成用の小試験片を切り出し、ダイヤモンドフィルムで約 20 μm 厚さになるまで接合断面を研磨し、両面を鏡面に仕上げた。さらに、この小試験片の接合界面が単孔 Mo メッシュの中心に位置するように、エポキシ系樹脂で接着固定し、A3003 側から SUS304L 側に向けてイオン照射角度5° の条件で、アルゴンイオンの加速電圧を4から 1.5kV に変化させながら、アルゴンイオン研磨を行い、透過電子顕微鏡観察用の薄膜を作成した。

この薄膜を用いて、エネルギー分散型 X 線分光器を備えた透過電子顕微鏡(型式：JEM-2010F(200 kV))で接合界面の観察と分析を行った。

3.3 実験結果

3.3.1 接合界面の透過電子顕微鏡観察

図 3.1 に、Al/SUS クラッド材の接合界面の透過電子顕微鏡像(以下、TEM 像と記す)の代表例を示す。接合条件は圧下率が 14%で、接合温度は 300 と 500℃である。他の接合条件においてもいずれも図 3.1 と同様の TEM 像が得られた。各接合条件において A3003 と SUS304L は、接合界面で直接接合していた。

図 3.1 の低倍率 TEM 像によれば、SUS304L 側では接合界面に近いほど結晶粒は微細化しており、これは圧延接合時に SUS304L の被接合面が加工硬化を起こし、再結晶したことに起因していると考えられる。第2章で示した Al/SUS クラッド材の断面硬さ分布によれば、SUS304L の板厚中央部から接合面に向かってビッカース硬さが Hv 180 から 250 に上昇していた。このことから、SUS304L の接合面近傍の結晶粒の微細化は、圧延接合時に加工硬化を起こし再結晶した結果であると考えられる。一方、A3003 側では SUS304L の結晶粒に比べてサイズは大きくほぼ均質である。これは、接合温度が 300℃及び 500℃であるため、加熱及び圧延接合中に A3003 が焼なましを受けたものと考えられる。また、接合界面から A3003 側に向けて点々とマダラ組織(Patch structure, 写真中に矢印で示す)が認められる。このマダラ組織は A3003 の結晶内に生成しており、その大きさは最大で 100nm 程度であった。

図 3.1 の高倍率 TEM 像によれば、SUS304L 側では、大きさが数 nm の結晶格子縞を持つ領域が集合した組織として観察され、A3003 側では、明瞭な一方向に並んだ結晶格子縞と、結晶格子縞が不明瞭なマダラ組織が認められる。さらに、A3003 と SUS304L の接合界面には、結晶格子縞が認められない2～5nm のほぼ均一な厚さの中間層が存在する。接合界面に認められるこれらの組織は、他の接合条件の Al/SUS クラッド材の接合界面のすべてに同様に認められた。

図 3.2 に、マダラ組織の高倍率 TEM 像を示す。この組織は、しばしばマダラ模様を示

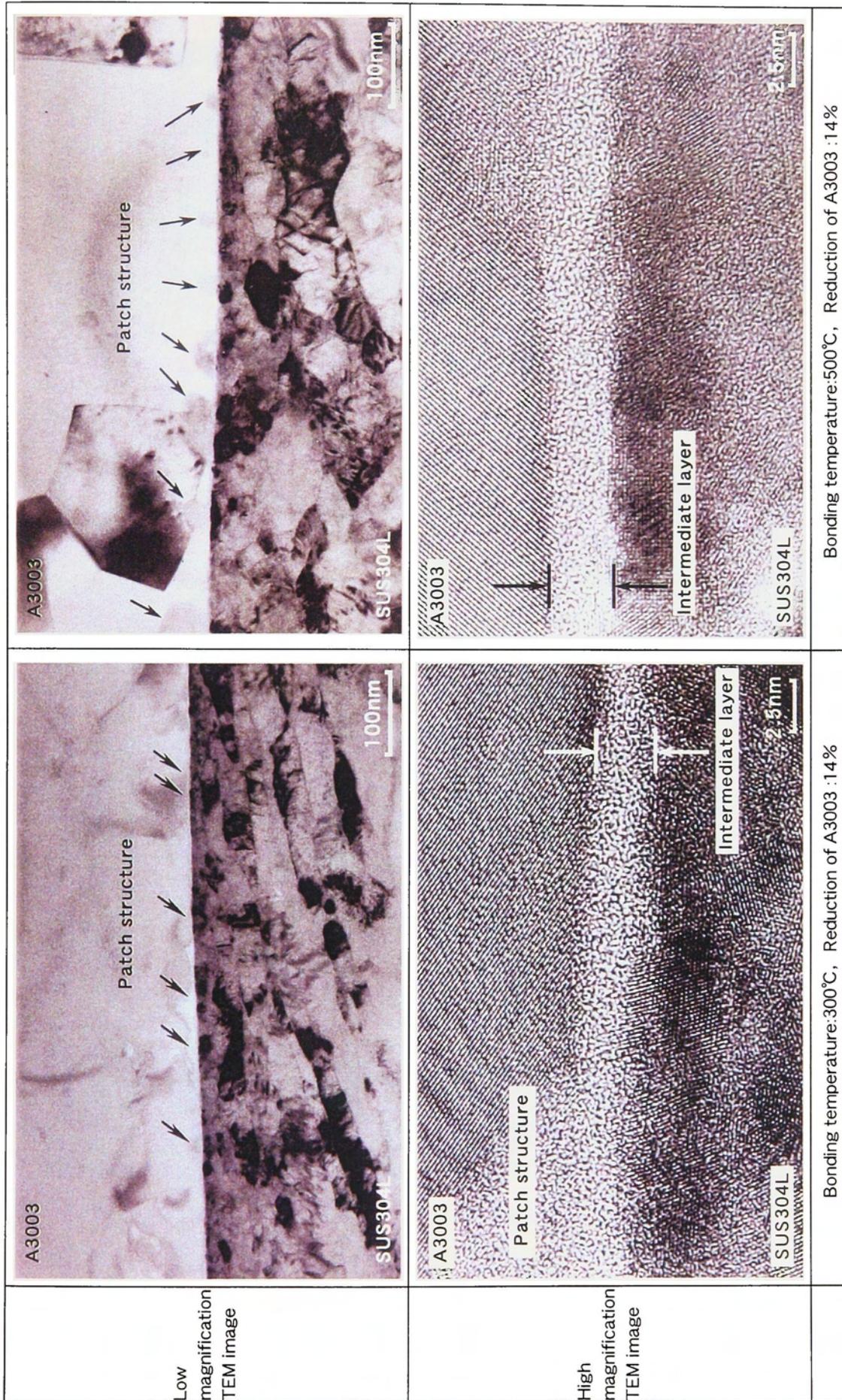
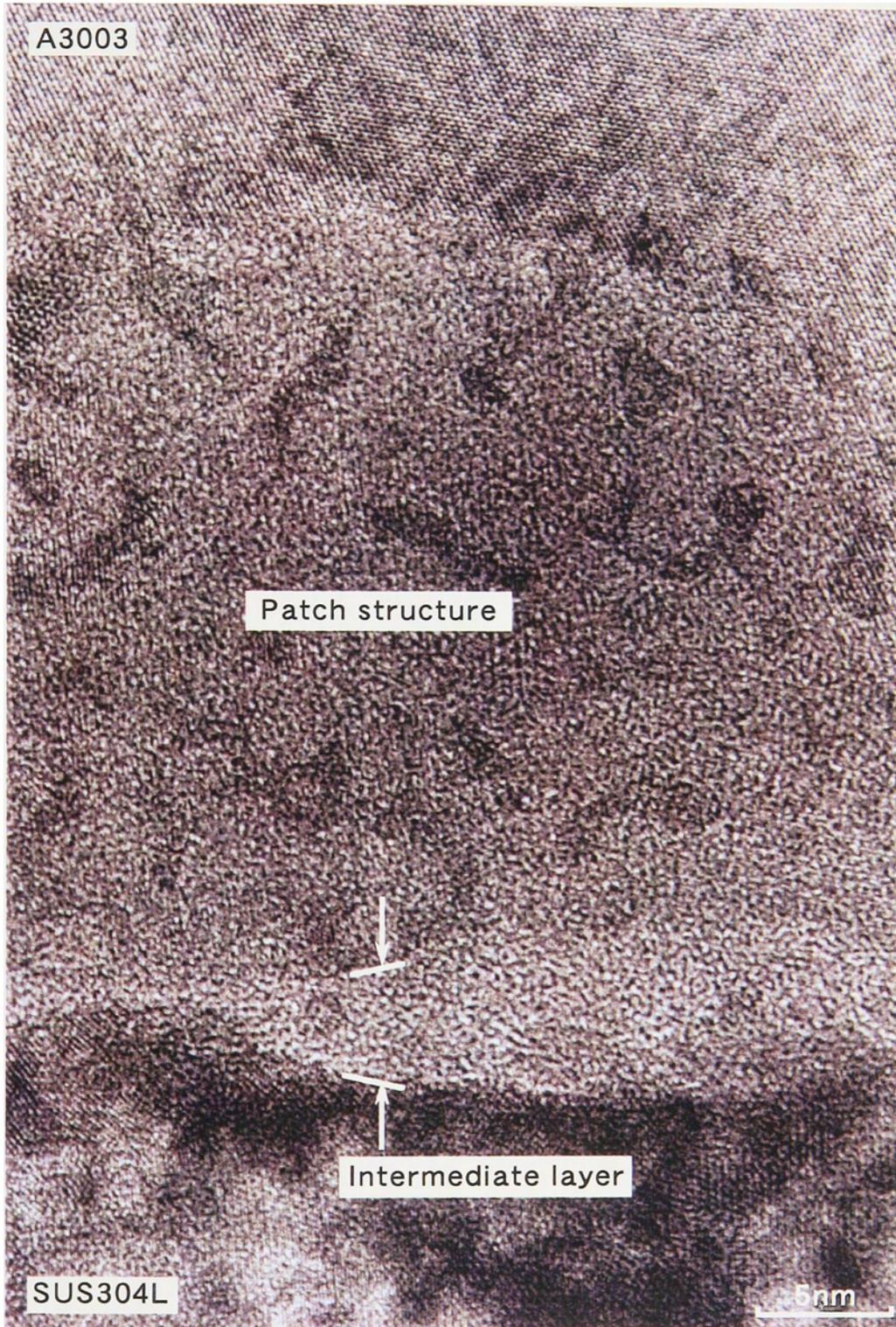


図3.1 Al/SUSクラッド材の接合界面のTEM像



(Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14%)

図3.2 接合界面のマダラ組織のTEM像

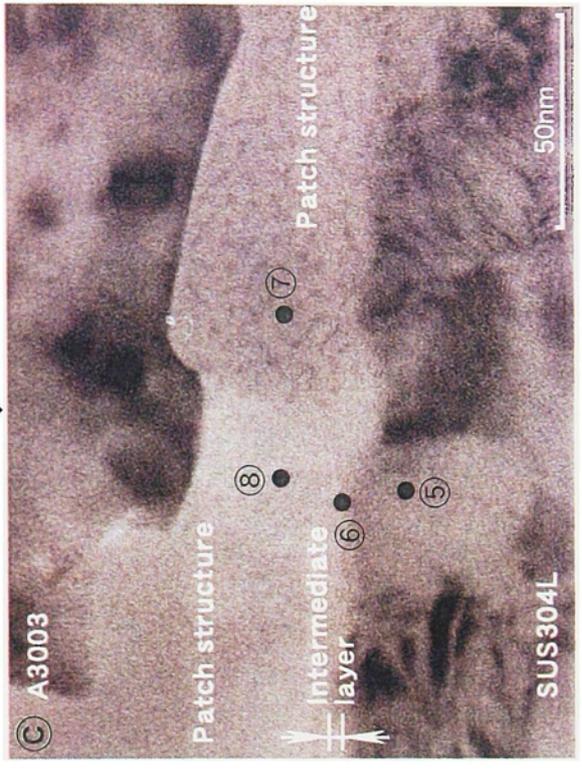
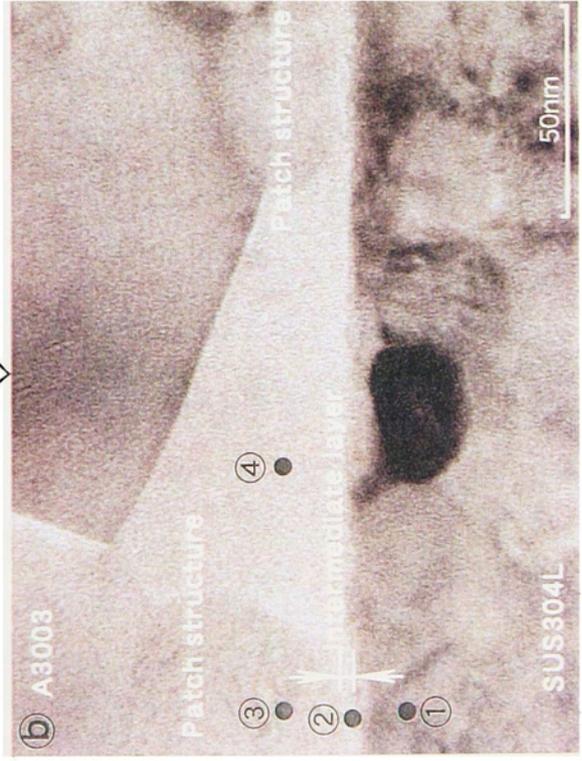
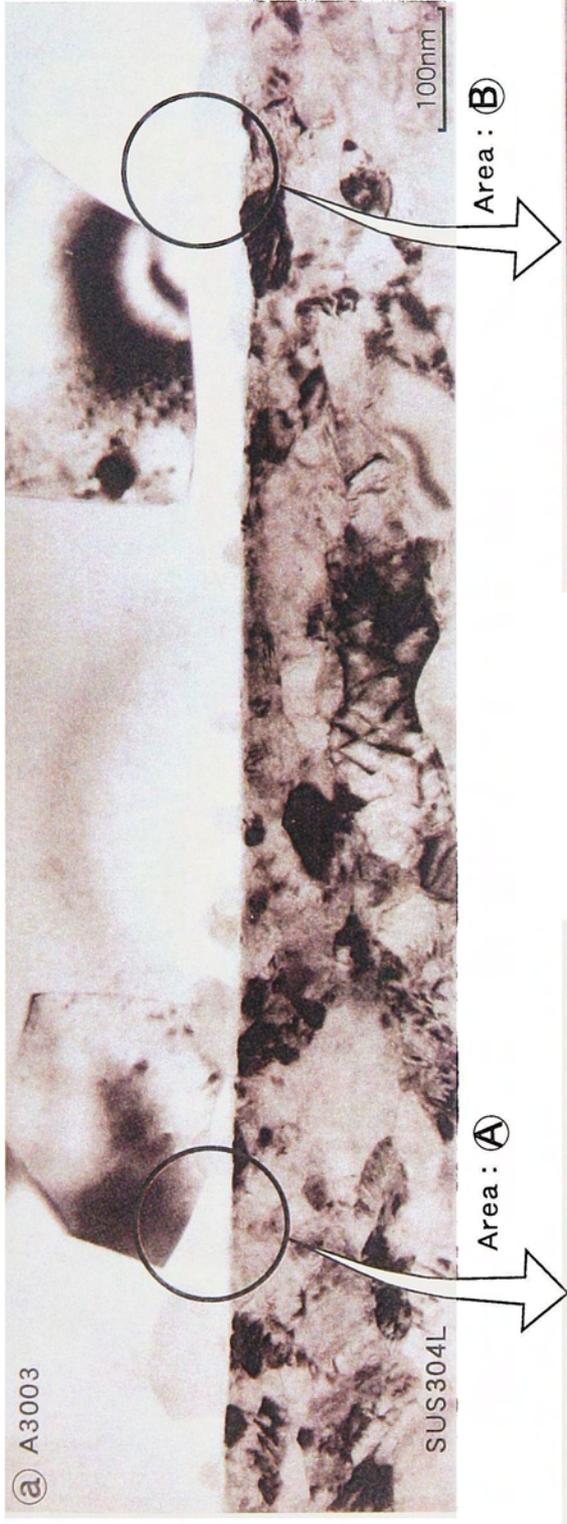
すため、ここでは便宜上マダラ組織と呼ぶことにする。このマダラ組織は、接合界面の2～5nm厚さの中間層を介してA3003側に発生し成長しており、薄膜に入射する電子線の角度により、この組織内に種々の形状のマダラ模様が観察された。図3.2に示したマダラ組織は、中間層からA3003側に向かって30nm奥まで広がっており、幅も30nm程度であった。このマダラ組織をよく観察すると、その内部には2～3nmサイズの結晶格子縞が認められる小領域が存在する。これらの小領域内の結晶格子縞の方向は異なっていることから、マダラ組織は2～3nmサイズのナノ結晶の集合体と考えられる。

3.3.2 接合界面の詳細分析

これまでのTEM像の観察結果から、いずれの接合条件においてもAl/SUS接合界面には2～5nm厚さの中間層が存在し、中間層からA3003側にマダラ組織がA3003の結晶内に生成していることが明らかとなった。そこで、接合温度500℃、そして圧下率14%のAl/SUSクラッド材の接合界面の詳細分析を行った。

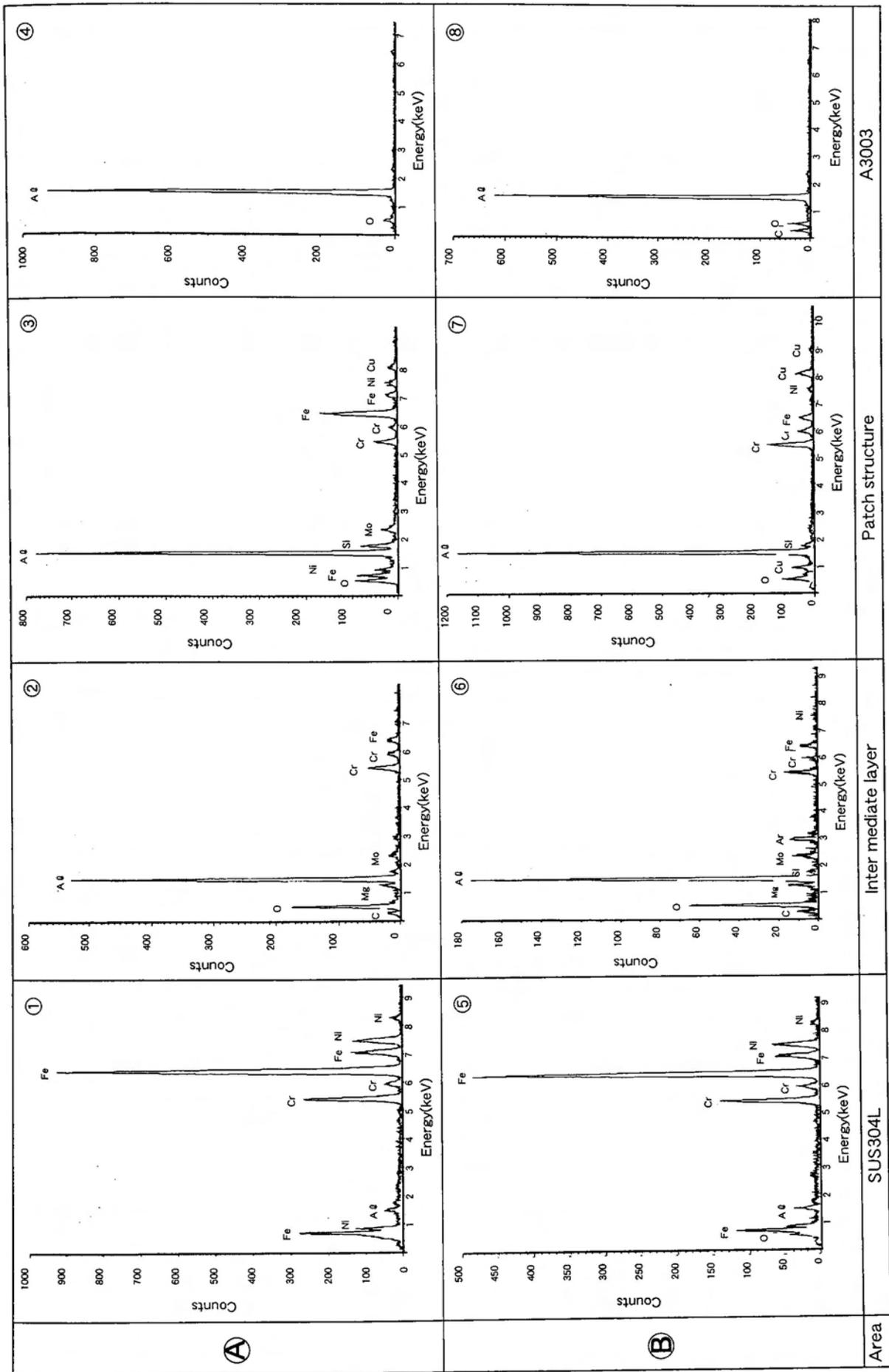
図3.3に、接合界面のTEM像におけるEDS分析位置を示す。この図からもマダラ組織がA3003の結晶内に生成している様子が観察される。分析位置はⒶ及びⒷの2か所とし、分析点はマダラ組織に囲まれたA3003とその近傍のSUS304L、中間層及びマダラ組織の計8点である。

図3.4に、図3.3に示した分析点のEDS分析結果を示す。これらの分析結果においてMoは試料固定用のMoメッシュから持ち込まれたものであり、Cは試料観察時の汚染と考えられ、Mgについてはその持込みを特定することができなかった。接合界面近傍のSUS304LのEDS分析結果(①と⑤)では、SUS304Lの構成成分Fe、Cr及びNiとともに若干のAlが認められる。このAlは、圧延接合時にA3003の中のAlが拡散して来たものと考えられる。接合界面の中間層のEDS分析結果(②と⑥)では、中間層はAlが主成分でO、Cr、Fe及びNiを含有しており、これらの元素はAl、O、Cr、Fe、Niの順序で濃度が低下している。また、中間層をはさんだ両側の組織に比べてO濃度は高い。マダラ組織のEDS分析結果(③と⑦)では、A3003の構成成分であるAl、Cu及びSiが認められ、かつSUS304Lの構成成分であるFe、Cr及びNiが認められ、Fe及びCrの含有量がマダラ組織によって異なっていた。また、Oも認められた。接合界面近傍のA3003のEDS分析結果(④と⑧)では、Al以外には微量のOが認められるのみで、純Alの様相を示していた。中間層とマダラ組織のEDS分析結果を比較すると、中間層にはOが多く含まれており、また、A3003の構成成分のCu及びSiがほとんど含まれておらず、SUS304Lの構成成分であるFe及びCrは、マダラ組織に比べて少ない傾向にあった。また、マダラ組織にはA3003の構成成分のCu及びSiとともに、SUS304Lの構成成分のFe、Cr



(Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14%)

図3.3 Al/SUSクラッド材の接合界面におけるEDS分析位置



Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14%

図3.4 Al/SUS304L材の接合界面におけるEDS分析結果

及びNiを含有し、中間層と比べて少量のOが認められた。

図 3.5 に、マダラ組織を含む接合界面の高倍率 TEM 像と、ビーム径 0.5nm の電子線による電子線回折像を示す。SUS304L 側には明瞭な結晶格子縞が認められ、電子線回折像も結晶構造を示している。また中間層では結晶格子縞は認められず、電子線回折像はリング状のハローパターンを呈している。またマダラ組織の中には不明瞭ながら 2~3nm サイズの領域で結晶格子縞が認められ、電子線回折像はリング状のハローパターンを呈している。

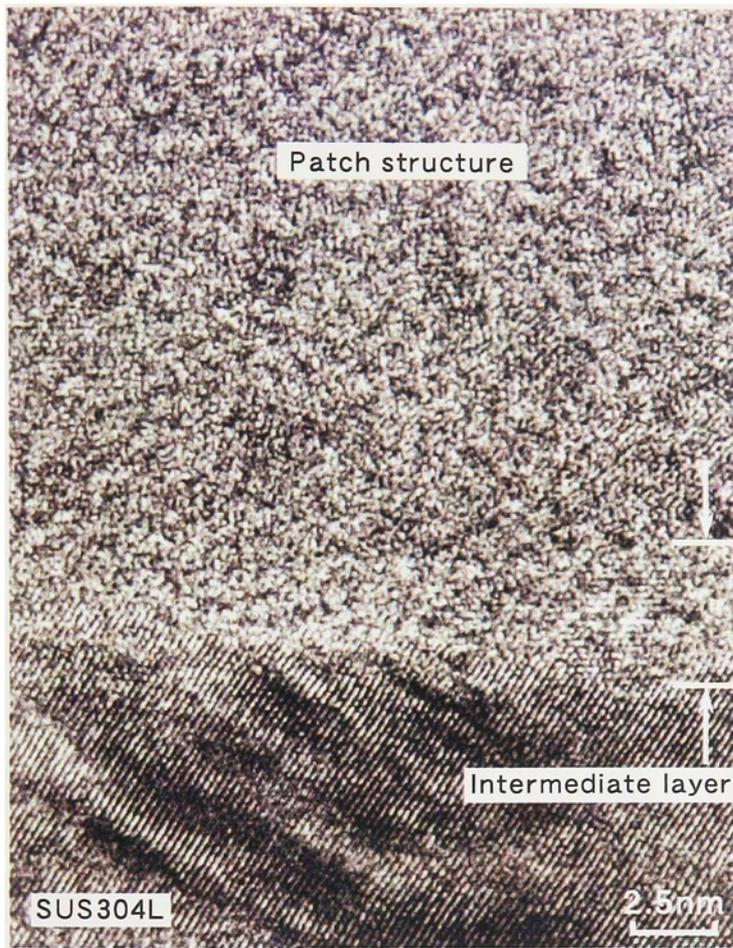
図 3.6 に、マダラ組織のない位置の接合界面の高倍率 TEM 像と電子線回折像を示す。SUS304L 側及び A3003 側の TEM 像及び電子線回折像ともに結晶構造を示すものであるが、中間層は図 3.5 と同様にハローパターンを示した。

これらのことから、中間層は非結晶質のアモルファス相と判断される。またマダラ組織は、その中に不明瞭ながら 2~3nm サイズの領域で結晶格子縞が認められ、電子線回折像はハローパターンを呈することからナノレベルの微細結晶が集合した組織と考えられる。

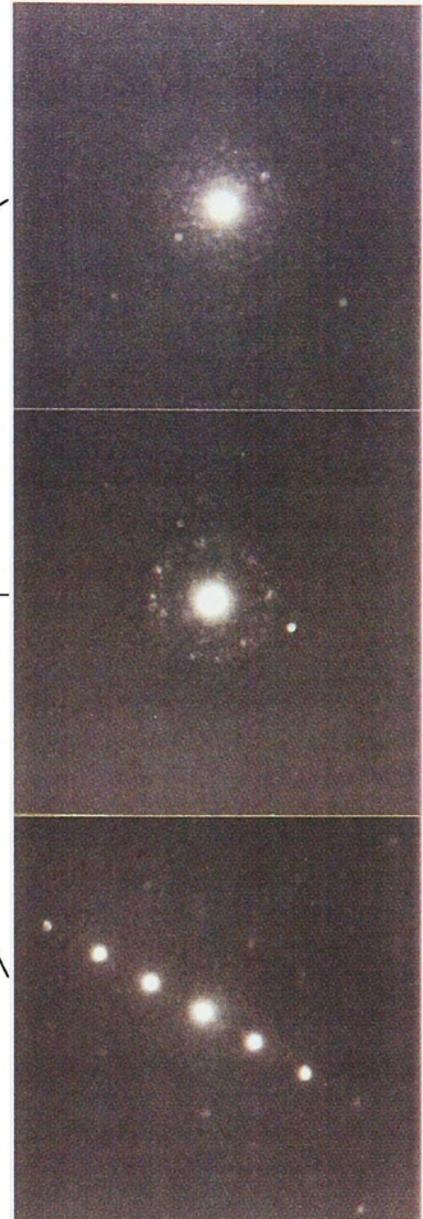
図 3.7 は、図 3.2 のマダラ組織を含む領域の Al/SUS 接合界面の元素濃度分布の点分析結果を示したものである。元素濃度分布は、Al/SUS 接合界面の中間層の中心を 0nm として 10nm までは約 2nm 毎に、10nm 以降は 5nm 毎に、30nm 以降は 10nm 毎に両側 70nm の距離まで EDS 分析を行って求めた。図 3.7 の元素濃度分布から、図 3.2 に示すマダラ組織は、Al が主成分で A3003 の構成成分である Cu と、SUS304L の構成成分である Cr が高濃度に含まれており、さらに両元素ともにマダラ組織内に均一に分布していることが分かる。また、SUS304L の構成成分である Fe 及び Ni も中間層を通してマダラ組織内に拡散しているが、A3003 の構成成分である Al を除いて Cu 及び Si は中間層から SUS304L 側にはほとんど拡散していない。これらの傾向は、他のマダラ組織もほぼ同様であり、ただマダラ組織内の元素濃度がマダラ組織毎に若干異なっていた。すなわち、A3003 の構成成分の Si を Cu と同等に含むものや、SUS304L の構成成分の Fe を Cr より多く含むもの等が認められた。

以上に示した高倍率 TEM 像のマダラ組織の点分析結果から、マダラ組織は、A3003 の構成成分である Al を主成分とし Cu 及び Si を含有するとともに、SUS304L の構成成分である Fe, Cr 及び Ni を含有しており、マダラ組織毎にこれらの元素の含有量が異なることが明らかとなった。

図 3.8 は、Al/SUS 接合界面にマダラ組織が生成している場合の、低倍率 TEM 像と元素濃度の面分析結果を示したものである。これによれば、接合界面近傍の A3003 側一面に Cu が濃縮しており、また大きく成長したマダラ組織には A3003 の構成成分の Cu の濃縮が認められ、また Cr が SUS304L 側から A3003 側のマダラ組織内に拡散している



a) Intermediate layer and patch structure



b) Micro beam diffraction patterns

(Bonding temperature : 500°C
 Reduction of A3003 : 14%)

図3.5 接合界面のTEM像と電子線回折像 (1)



a) Intermediate layer



b) Micro beam diffraction patterns

(Bonding temperature : 500°C
 Reduction of A3003 : 14%)

図3.6 接合界面のTEM像と電子線回折像 (2)

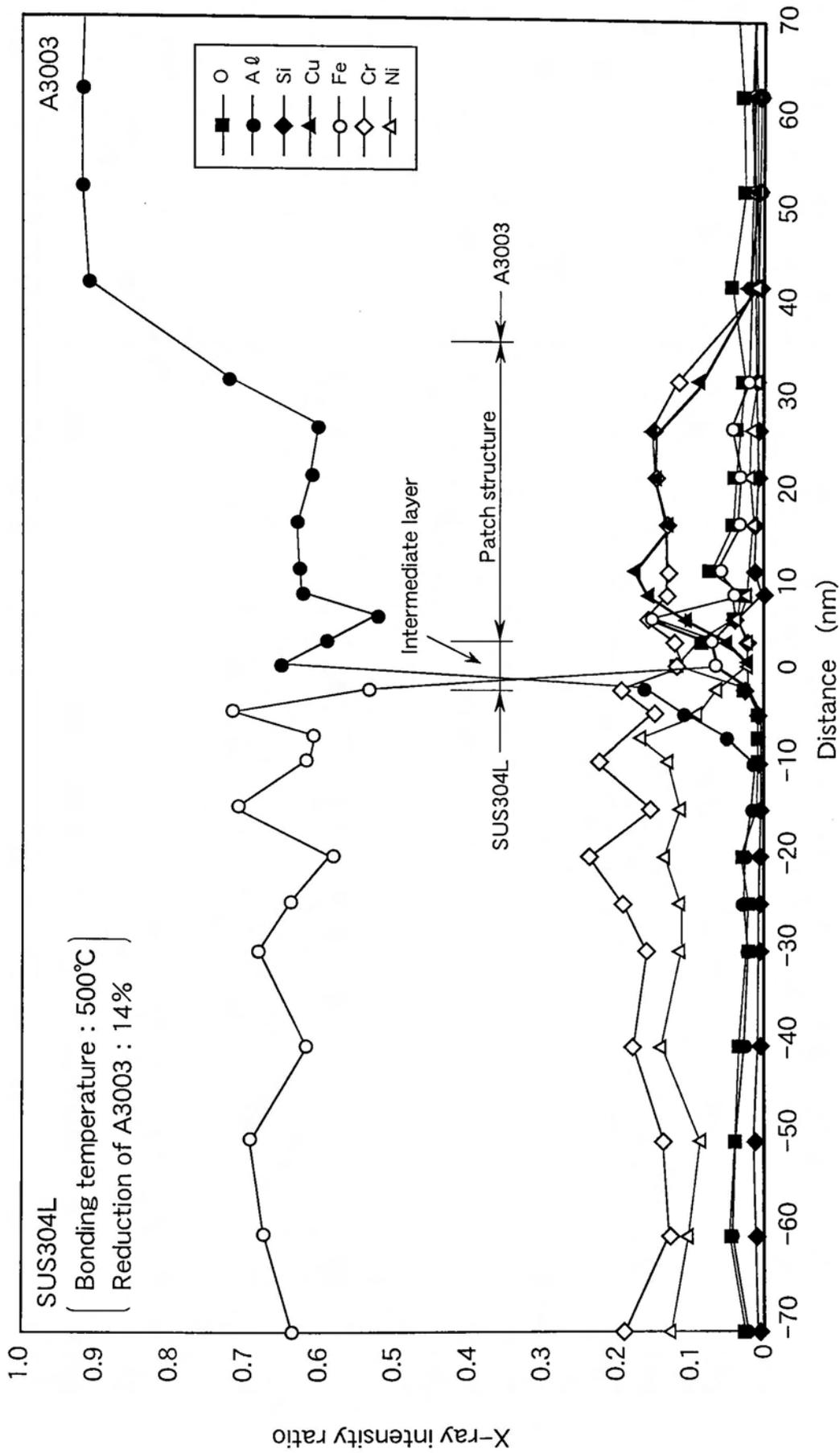


図3.7 Al/SUSクラッド材の接合界面におけるマダラ組織内の元素濃度分布

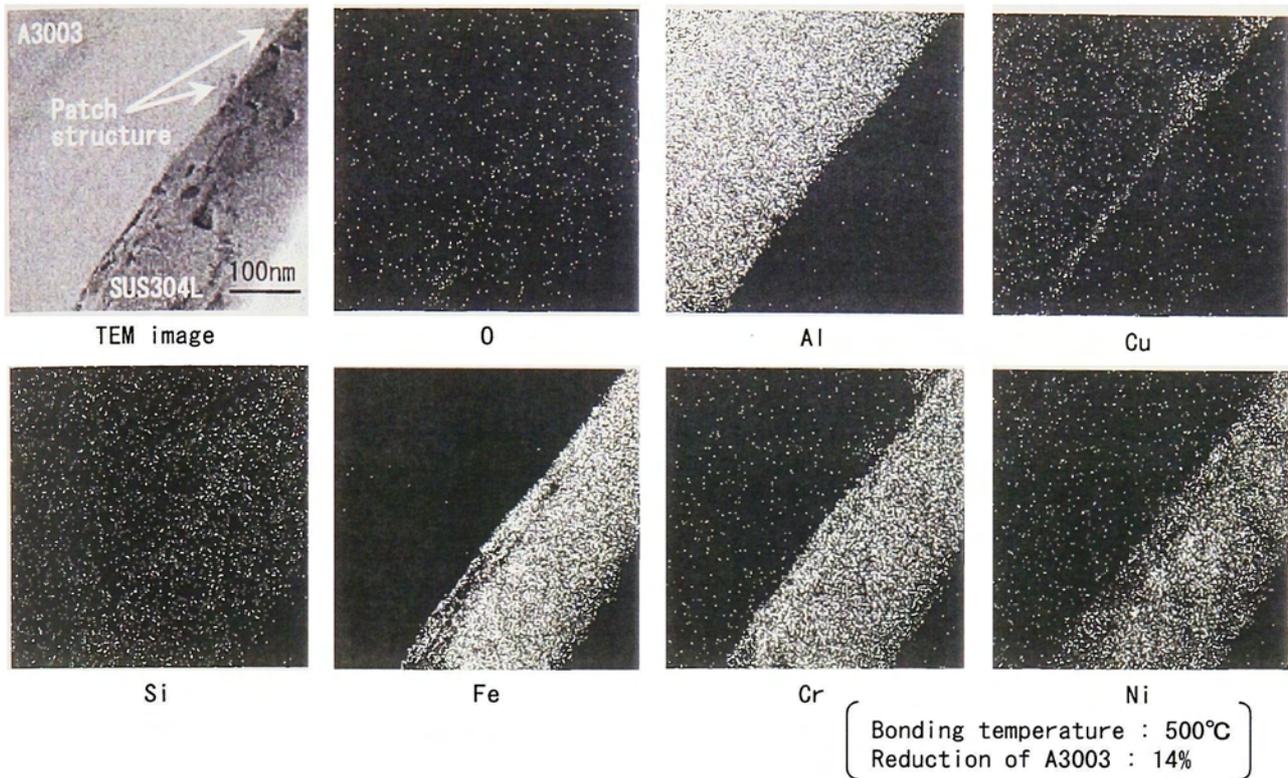


図 3.8 Al/SUS クラッド材の接合界面における元素濃度分布（1）

様子が認められる。図 3.8 に示すマダラ組織には、Si の濃縮及び SUS304L 側からの Fe 及び Ni の拡散は明確ではない。これは倍率が低いため、Cu 及び Cr に比べて低濃度であるこれらの元素を明確にとらえることができなかつたためと考えられる。いずれにしても、接合界面近傍の A3003 側には Cu が濃縮しマダラ組織を生成し、そのマダラ組織は Cr を高濃度に含有していることが明らかになった。

3.4 真空圧延接合による Al/SUS クラッド材の接合メカニズムの検討

以上の分析結果から、真空圧延接合時に Al/SUS クラッド材の接合界面にアモルファス相及びマダラ組織が生成する過程を考察し、Al/SUS の直接接合メカニズムを検討する。

アルミニウム合金と鋼及びステンレス鋼の温間圧延接合では、アルミニウム合金表面の酸化膜が破壊されて新生面が露出し、その新生面と鋼及びステンレス鋼表面が密着し、金属学的に接合されると考えられてきた¹⁸⁾。

今回の真空圧延接合においては、いずれの接合条件においても Al/SUS 接合界面の A3003 側に 2～5nm 厚さの連続したアモルファス相と、アモルファス相から A3003 側に向かって、図 3.1 に示したように接合界面に沿って点々とマダラ組織が観察された。EDS 分析によれば、このアモルファス相は Al が主成分で O, Fe, Cr 及び Ni を含有していた。また、アモルファス相に接し、マダラ組織に囲まれた A3003 の結晶は、微量の O

が認められるものの、ほぼ純Alの組成を示していた。さらには、接合界面近傍のSUS304L側のEDS分析により、SUS304L内にAlが拡散(図3.4の①と⑤を参照)しているのが認められた。

図3.9は、Al/SUS接合界面に認められたAl酸化物の介在物を示した低倍率TEM像と元素濃度の面分析結果である。このTEM撮影試料は、真空圧延接合後に500°C×30分の熱処理を行ったものであり、このためA3003側へのFeの拡散が認められる。図3.9では、10~100nmサイズのAl酸化物がSUS304L側に食い込んでいる状況と、一旦、食い込んだAl酸化物が脱落した状況を観察することができる。今回のAl/SUS接合界面のTEM観察において、Al酸化物が認められたのはこの1例だけで極めて稀であった。このことは、真空圧延接合中にA3003の酸化膜は破壊され、一部は介在物となってSUS304L側に食い込む形で接合界面に存在することが明らかとなった。

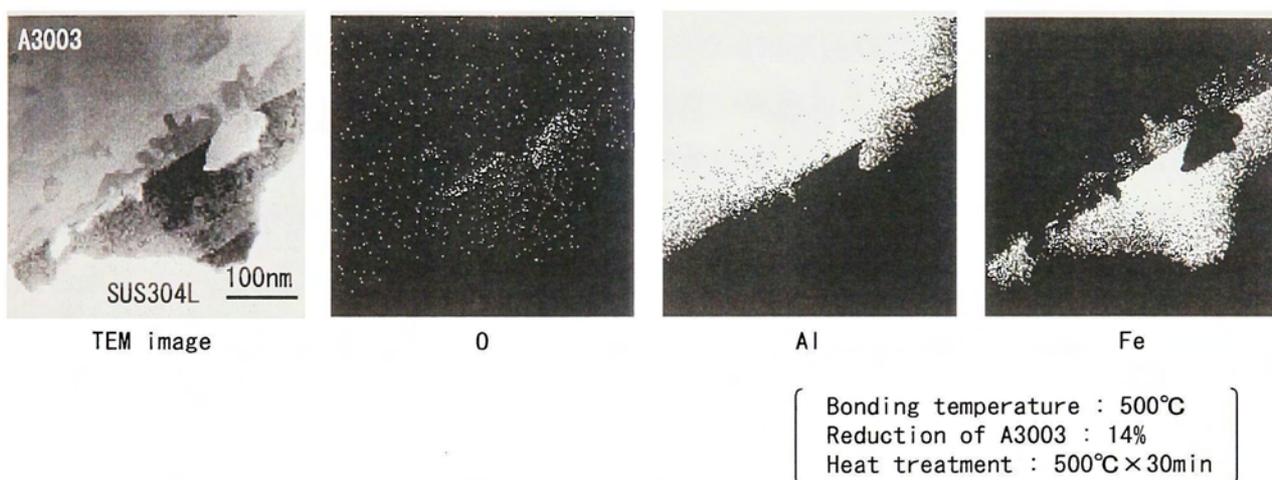


図3.9 Al/SUSクラッド材の接合界面における元素濃度分布(2)

以上のことから、Al/SUSクラッド材の接合界面には、連続した2~5nm厚さのAlを主成分としたO, Fe, Cr及びNiを含有するアモルファス相と、Alを主成分としたCu, Si, Fe, Cr及びNiを含有するマダラ組織が接合界面に沿って点々と存在し、そして極めて稀にA3003の酸化膜であったと考えられるAl酸化物が介在物として存在することが明らかとなった。

接合界面にアモルファス相が存在することは、圧延接合中に接合界面が一旦熔融し、急速に凝固したことを示唆している。今回の接合試験では、接合温度が300, 400及び500°Cであることから、Al/SUS接合界面を少なくともAlの熔融温度660°C以上に上昇させるための熱源が必要となる。これは、圧延接合時にA3003の板がSUS304Lの板の上を圧延接合方向とは逆向きにすべり運動を行う時に発生する摩擦熱と考えられる。

及川等は、アルミニウムとステンレス鋼の大気中での熱間圧延接合において、アルミニウムとステンレス鋼の接合界面には、Al の非晶質酸化膜と Cr の結晶酸化膜が存在することを示し、これらの酸化膜を介してこれら二つの材料が接合していると報告している¹⁹⁾。今回の真空圧延接合では、接合界面の EDS 分析において、SUS304L 側には Cr の結晶酸化膜は認められず、A3003 側には Al を主成分とし O, Fe, Cr 及び Ni を含有したアモルファス相が認められた。このアモルファス相の Al と O の比は、約 3 : 1 でありアルミニウム酸化物に比べ O の量が非常に少ない。すなわち、真空圧延接合法によって製作された Al/SUS クラッド材の接合界面に存在するアモルファス相は、A3003 表面に存在した酸化膜が接合過程で破壊され、この破壊された酸化物微粒子と一旦溶融した Al と混合して急速に冷却されてできたものと考えられる。又、このアモルファス相の中に存在する Fe, Cr 及び Ni は、接合界面の A3003 が溶融した時に SUS304L の表面から拡散して来たものと考えられる。

次にマダラ組織の生成過程を検討する。マダラ組織を観察すると、これはアモルファス相に接して存在し、2~3nm サイズの微細結晶の集合体として観察され、その中には Cu 及び Si が高濃度に存在する。この Cu 及び Si は Al と低融点共晶合金 (Al/Cu の共晶温度 : 548°C, Al/Si の共晶温度 : 577°C)²⁰⁾ を作る元素であり、マダラ組織の融点は純 Al の融点 660°C よりも低いことが予想される。さらに、Cu 及び Cr はマダラ組織内にほぼ均一に分布していた。以上のことから、マダラ組織は Al/SUS 接合界面近傍の A3003 組織の中の Cu 及び Si 濃度の高い領域が、Al の α 固溶体と Al-Cu-Si 組成の液体とが共存する 660°C 以下の固液共存域に加熱され、急速に冷却され凝固して生成したものと考えられる。すなわち、A3003 組織の Cu 及び Si 濃度の高い領域が固液共存温度に加熱されると、Al の α 固溶体の微細結晶 (2~3nm サイズ) の粒界が Al-Cu-Si 組成の液体に溶融し、この液体の中を SUS304L 構成成分の Fe, Cr 及び Ni がアモルファス相を通して液体拡散し A3003 内に浸入する。この時、2~3nm サイズの Al の α 固溶体の結晶が移動あるいは回転し、直ちに急速冷却されて凝固しマダラ組織が生成したものと考えられる。図 3.7 において Cu 及び Cr がマダラ組織内に均一濃度で分布していることは、この仮説を裏付けるものと考えられる。

以上のことから、真空圧延接合法による A3003 と SUS304L の接合メカニズムを次のように考えることができる。すなわち、真空圧延接合では圧延接合前の被接合材料同士の加熱に際し、A3003 及び SUS304L 表面の酸化膜の成長は抑えられ、機械加工面の薄い酸化膜同士が接触し、圧延接合過程で A3003 表面の酸化膜は破壊される。この時、摩擦熱が発生し、A3003 の被接合面の極薄層 (2~5nm) と Cu 及び Si の高濃度域が溶融し、SUS304L の構成成分である Fe, Cr 及び Ni が溶融域に拡散・流入する。その後、

急速に冷却・凝固が生じることによりアモルファス相とマダラ組織が形成される。その結果、A3003とSUS304Lは強固に接合するものと考えられる。この熔融域の幅は、観察した限りではAl/SUS接合境界から最大100nm以内の範囲であった。

3.5 結言

本章では、真空圧延接合法で製作したAl/SUSクラッド材の接合界面を、EDSを備えた透過電子顕微鏡を用い微細観察を行うとともに元素濃度分析を行い、A3003とSUS304Lの接合メカニズムを検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 接合界面のA3003側には、2～5nm厚さのアモルファス相とアモルファス相に沿って点々とマダラ組織が存在する。このアモルファス相は、Alが主成分でO、Fe、Cr及びNiを含有していた。マダラ組織は、Alが主成分でCu、SiさらにはFe、Cr及びNiを含有し、Cu及びCr濃度はマダラ組織内でほぼ均一であった。
- (2) アモルファス相とマダラ組織は、圧延接合過程で接合界面が一旦熔融し、急速に冷却され凝固することで形成されたものと考えられる。これらの組織に存在するFe、Cr及びNiは、SUS304Lの構成成分が拡散して来たものと考えられる。
- (3) マダラ組織は、周辺のA3003組織より高濃度のCu及びSiを含有していた。これらの元素はAlと低融点共晶合金を作ることから、A3003組織内のCu及びSi濃度の高い領域が選択的に熔融し凝固することでマダラ組織が形成されたものと考えられる。
- (4) 真空圧延接合法によるA3003とSUS304Lの直接接合メカニズムは、以下のよう考えることができる。すなわち、圧延接合過程で発生する摩擦熱により、A3003の被接合面の極薄層(2～5nm)とそれに接した100nm以内のA3003内のCu及びSiの高濃度領域が熔融する。この時、SUS304Lの構成成分が熔融層に拡散・流入し、急速に冷却・凝固が生じることによりアモルファス相及びマダラ組織が形成される。その結果、A3003とSUS304Lは強固に接合する。

第4章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の熱処理の影響

4.1 緒言

溶融溶接ができないアルミニウム合金と鋼及びステンレス鋼との接合は、異種金属の接合に有効とされる拡散接合を適用しても高い接合部強さは得られない。この原因は、主として高温での拡散接合中に Fe-Al 系の金属間化合物が接合界面に生成するためであり、これを防止するためにインサート材の使用等、種々の対策が検討されている^{21,22)}。

第2章及び第3章で述べたように、真空圧延接合法で製作した A3003 と SUS304L の Al/SUS クラッド材の接合部強さは、A3003 の母材強さより高い値が得られ、接合界面の微細観察によれば、接合界面には2～5nm 厚さのアモルファス相とアモルファス相に沿って点々とマダラ組織が存在した。これらの組織は一旦溶融し、急速に凝固した組織と考えられ、SUS304L の構成成分である Fe, Cr 及び Ni がその中に拡散していることが確認された。

以上に述べたように、A3003 と SUS304L の真空圧延接合では、接合界面の A3003 側の極薄層とそれに接した 100nm 以内の A3003 内の Cu 及び Si 高濃度領域が溶融する。そして SUS304L の構成成分が溶融部に拡散・流入し、急速に凝固することでアモルファス相及びマダラ組織を形成し、接合部強さの高い Al/SUS クラッド材が得られたものと考えられる。このように真空圧延接合法は、拡散接合(接合時間は非常に短い)の一種と考えられ、本法による Al/SUS クラッド材を造船現場で取扱う場合、溶接入熱あるいはガス加熱等の熱加工を受け、これらの後熱処理条件によっては、接合界面に金属間化合物が生成し、接合部強さが低下することが懸念される^{14, 23, 24, 25)}。

この Al/SUS クラッド材を、LNG 船の STJ として適用する場合、図 1.2 に示したように中間継手として利用され、タンクスカート部にすみ肉溶接で接合される。このように中間継手として利用される場合、すみ肉溶接によるアーク溶接入熱により Al/SUS クラッド材の接合界面は加熱され、Fe-Al 系の金属間化合物が生成し接合部強さが低下し、さらには、溶接後の冷却過程で発生する溶接残留応力により接合界面が破壊することも懸念される。

そこで、本章では真空圧延接合法で製作した Al/SUS クラッド材に種々の条件の熱処理を施し、接合部強さの変化を調査するとともに、接合界面を EDS を備えた透過電子顕微鏡で観察し、接合界面の組織変化及び金属間化合物の生成・成長挙動を明らかにし、これらを基に Al/SUS クラッド材の熱処理による接合部特性の変化について述べる。

4.2 供試材料及び実験方法

供試材料は、第2章で供したものと材料及び接合条件が同じ A3003 と SUS304L の Al/SUS クラッド材である。小型の熱処理用試験片を作製し、高周波加熱装置で熱処理を施した。熱処理試験片の形状と寸法及びその熱サイクル曲線を図 4.1 に示す。約 35mm × 10mm × 10mm の熱処理試験片の接合界面近傍の SUS304L 側に熱電対を取り付け、熱サイクルを記録した。熱処理条件は、500°C × 10min、500°C × 30min 及び 500°C × 60min の3条件とし、加熱速度及び冷却速度はそれぞれ 10°C/s と一定とした。この内、500°C × 60min のものは、平滑引張試験のみに供した。

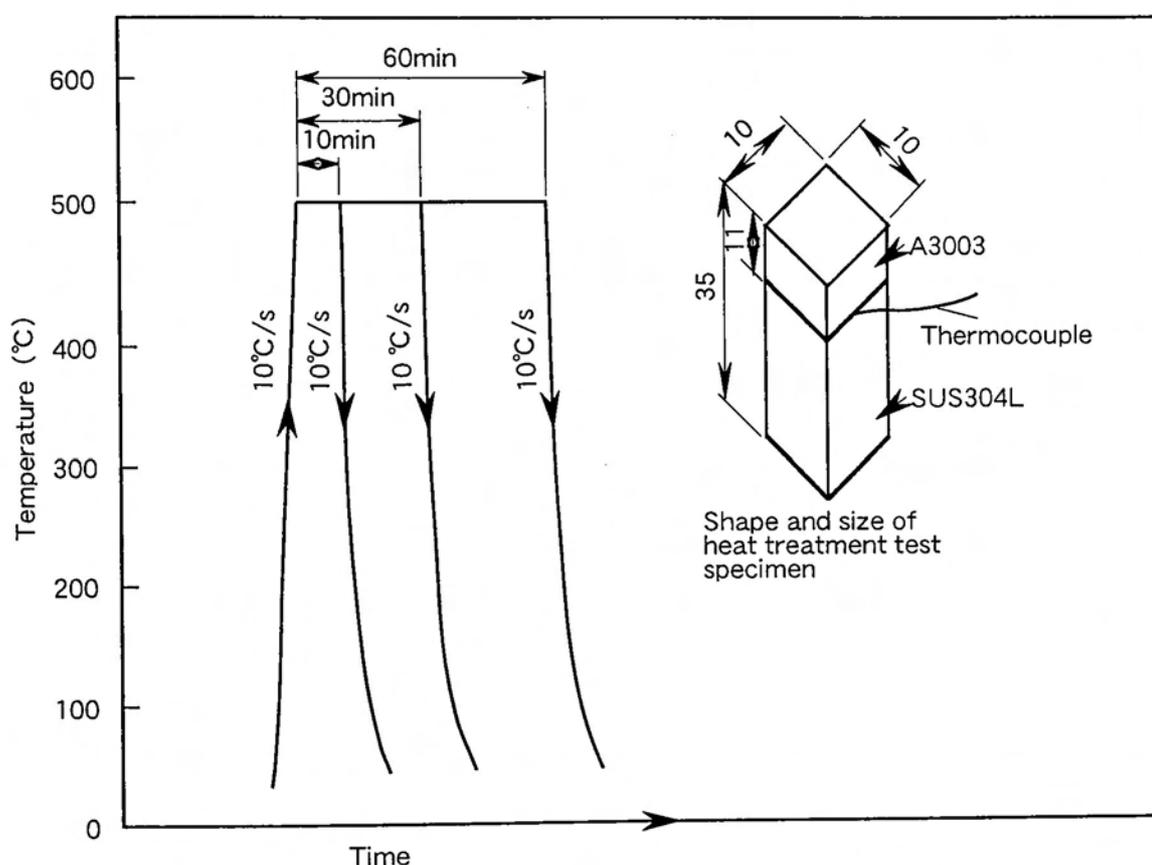


図4.1 熱処理試験片の形状・寸法及びその熱サイクル曲線

熱処理後、第2章の図 2.1 に示した形状の平滑引張試験片及び切欠き引張試験片を作製し、熱処理後の接合部強さを調査し、接合まま材の接合部強さと比較した。引張試験条件は第2章と同様とした。切欠き引張試験片は、引張試験の後、破断面の観察に供した。

一方、熱処理後の接合界面の組織変化を調べるため、EDS を備えた透過電子顕微鏡で接合界面の微細観察を行い、接合まま材と比較した。透過電子顕微鏡の観察用薄膜は、第3章と同じ方法で製作した。

4.3 実験結果

4.3.1 熱処理材の接合部強さ

図 4.2 に、平滑引張試験片における Al/SUS クラッド材の接合部強さに及ぼす熱処理の影響を示す。圧下率 7 及び 14% の接合材は、500°C の熱処理を行うことで接合まま材に比べ 10~20N/mm² 程度接合部強さが上昇し、105 及び 115N/mm² とほぼ一定になった。圧下率 20% の接合材は、接合まま材と熱処理材とで接合部強さに差はなく、110~120N/mm² とほぼ一定であった。図 4.2 から、500°C の熱処理を行うことで接合部強さは接合まま材に比べて増加することがわかる。

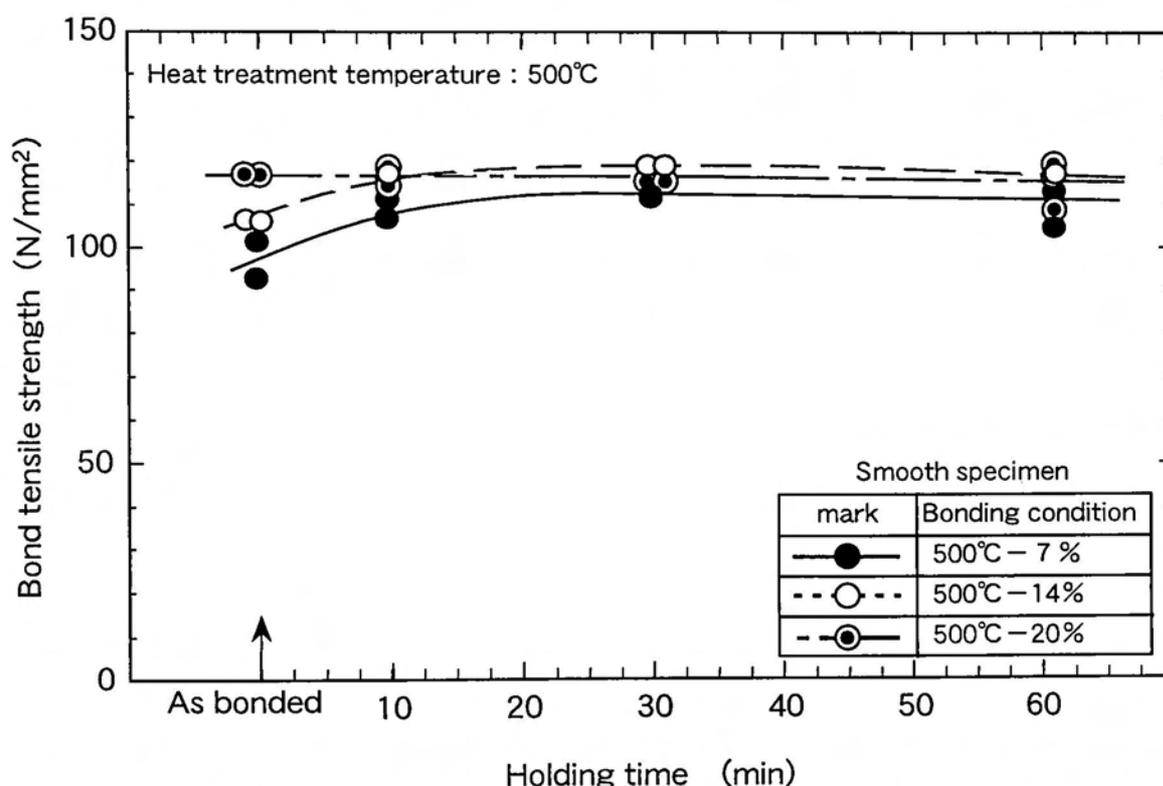


図4.2 Al/SUSクラッド材に対する熱処理時間と接合部強さの関係

図 4.3 は、接合温度 500°C で圧下率を変化させて接合した Al/SUS クラッド材について、接合まま材と 500°C×30min の熱処理材の切欠き接合部強さを比較したものである。両材料ともに圧下率の上昇により切欠き接合部強さは上昇した。圧下率 14 及び 20% では、両材料ともにほぼ同じ切欠き接合部強さ(180~190N/mm²)を有していたが、圧下率 7% では 500°C×30min の熱処理により、切欠き接合部強さは約 20N/mm² 上昇し、約 160N/mm² となった。

図 4.4 は、圧下率 14% で接合温度を変化させて接合した Al/SUS クラッド材について、接合まま材と 500°C×30min の熱処理材の切欠き接合部強さを比較したものである。両材料ともに接合温度の上昇につれて切欠き接合部強さは上昇した。接合温度 400 及び

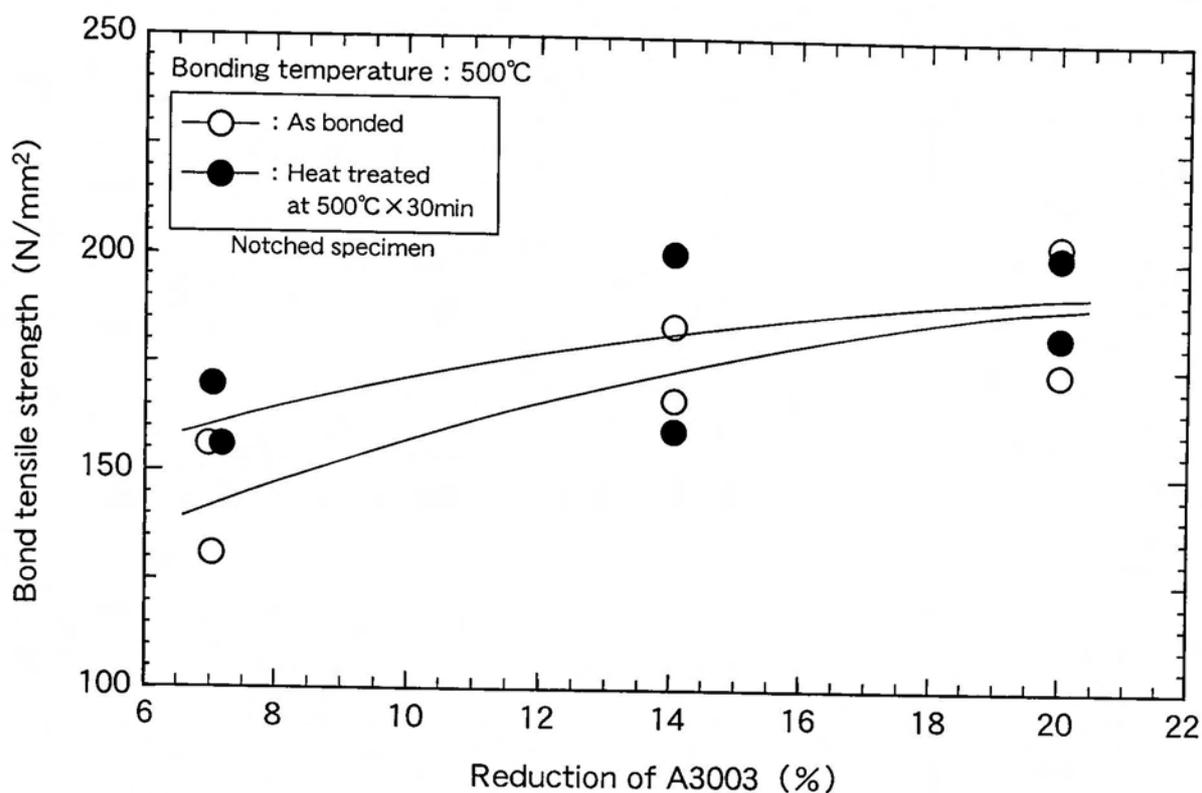


図4.3 Al/SUSクラッド材における接合まま材及び熱処理材の
 圧下率と接合部強さの関係

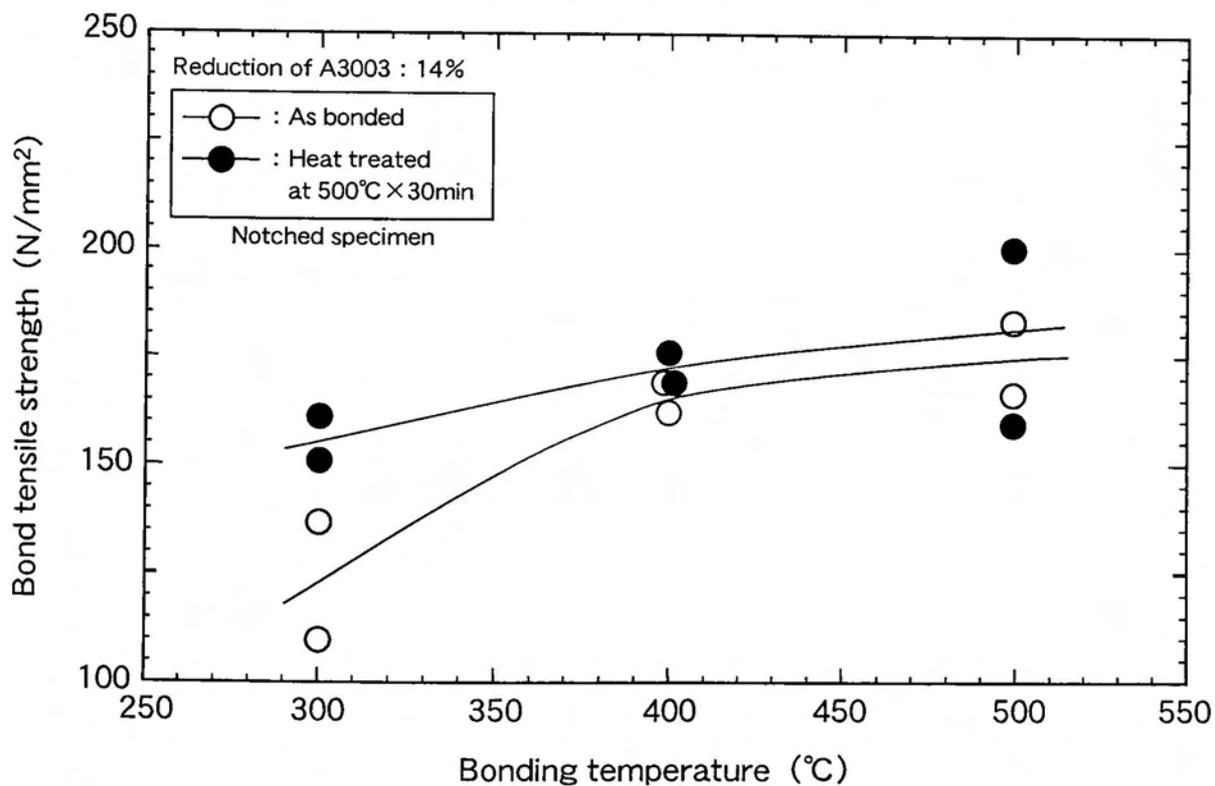


図4.4 Al/SUSクラッド材における接合まま材及び熱処理材の
 接合温度と接合部強さの関係

500℃では両材料ともにほぼ同じ切欠き接合部強さ(170~180N/mm²)を有していたが、接合温度 300℃では 500℃×30min の熱処理により、切欠き接合部強さは約 30N/mm² 上昇し約 150N/mm² となった。

以上に示したように、接合温度及び圧下率の低い接合条件が不十分(第2章で述べたように、十分な接合条件としては、接合温度 400℃以上で、圧下率 14%以上である。)な場合、熱処理により接合部強さは上昇する傾向にあった。

4.3.2 切欠き引張試験片の破面の観察

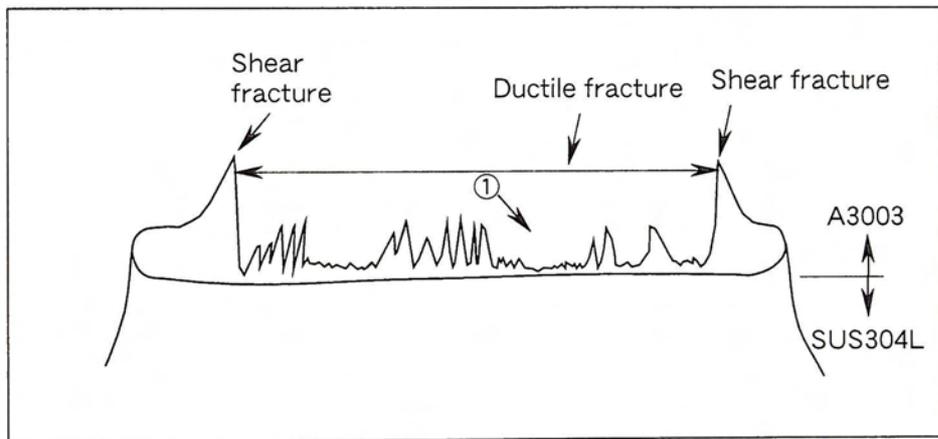
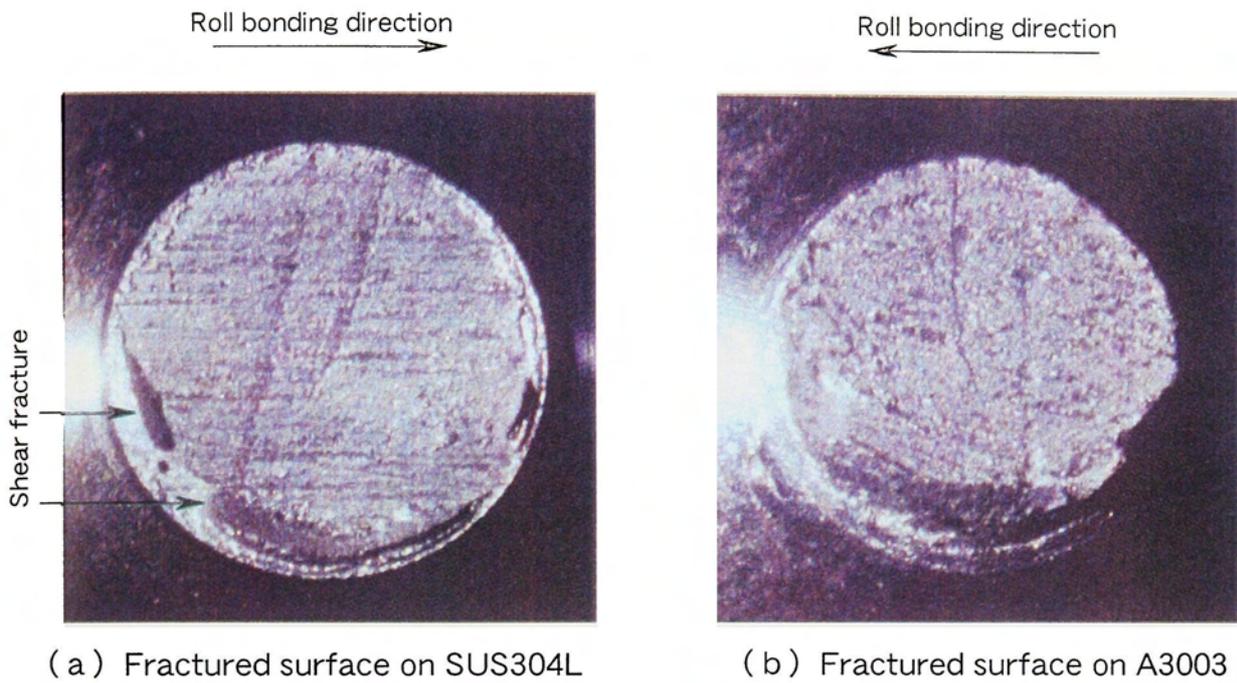
接合温度 500℃、圧下率 14%の接合条件で 500℃×30min の熱処理を行った切欠き引張試験片について、引張試験後、第2章と同様に SUS304L 側の破面観察とその断面ミクロ観察を行った。図 4.5 に、その状況を SUS304L 側破断面の模式図とともに示す。圧延接合方向は、SUS304L 側では左から右、A3003 側では右から左である。破面の状況は模式図に示すように、第2章で示した接合まま材と類似しており、破壊の進展も接合まま材と同様と予想された。ただ、A3003 の付着厚さが接合まま材に比べて厚い傾向にあった。

図 4.6 に、図 4.5 の模式図中の①に相当する位置の SUS304L 側の破断面を示す。SUS304L の被接合面のほぼ全域に A3003 が付着しているのが観察される。しかしながら、図 4.6 の①では SUS304L が欠損している状況、②では SUS304L に A3003 が塊状に付着している状況、③では SUS304L が皿型に侵食され、その表面に 1 μm 程度の厚さの A3003 が付着している状況が観察された。これらの状況は第2章で示した接合まま材では認められなかったものであり、熱処理によって接合界面に何らかの組織変化が生じたことが考えられる。

図 4.7 に、切欠き引張試験片の SUS304L 側破面の SEM 写真を示す。SUS304L 側の破面には、A3003 が圧延接合方向に伸びた形で付着している。また、A3003 付着状況は、(b)に示す薄い領域と(d)に示す厚い領域があり、A3003 は明瞭なディンプル破面を呈している。以上の状況は、第2章の4節で示した接合まま材の破面と類似していた。そこで、SUS304L 側の破面に A3003 が 1 μm 以下の厚さで付着している領域と、1 μm を超える厚さで付着している領域に分け、後者の面積率を計測し接合率とした。接合率の計測方法は第2章の4節に示したとおりである。

図 4.8 に、接合まま材と 500℃×30min の熱処理材の圧下率と接合率の関係を示す。接合率は、圧下率が 14%以上では接合まま材と熱処理材との間に差は認められず、92~95%であった。圧下率 7%では接合率にバラツキが認められた。

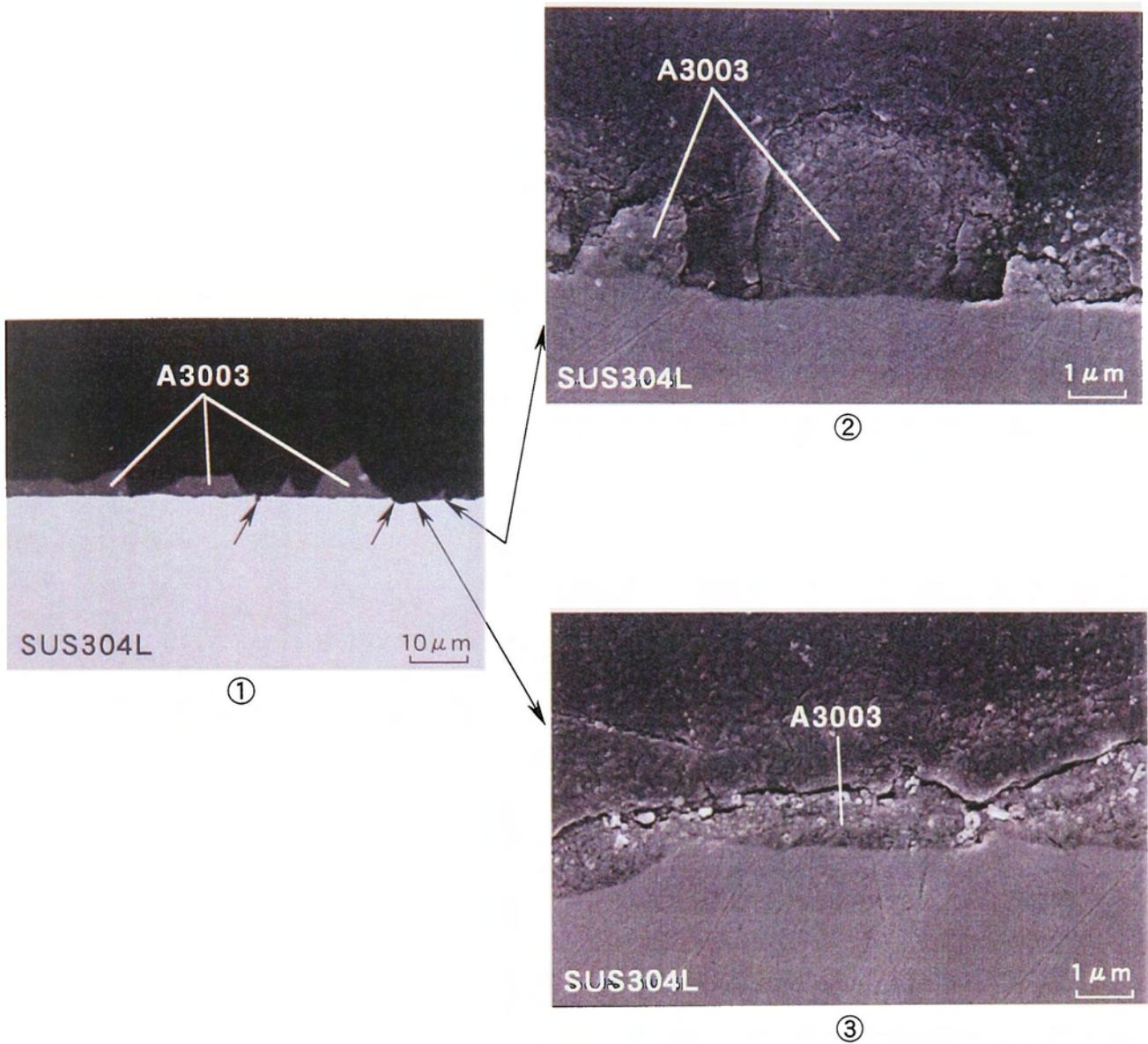
図 4.9 に、接合まま材と 500℃×30min の熱処理材の接合温度と接合率の関係を示す。



(c) Illustration of fractured surface on SUS304L

(Bonding temperature : 500°C
 Reduction of A3003 : 14%
 Heat treatment : 500°C × 30min)

図4.5 熱処理されたAl/SUSクラッド材の切欠き試験片の破面観察



(Bonding temperature : 500°C
 Reduction of A3003 : 14%
 Heat treatment : 500°C × 30min)

図4.6 熱処理されたAl/SUSクラッド材の切欠き試験片の破断面の微細観察

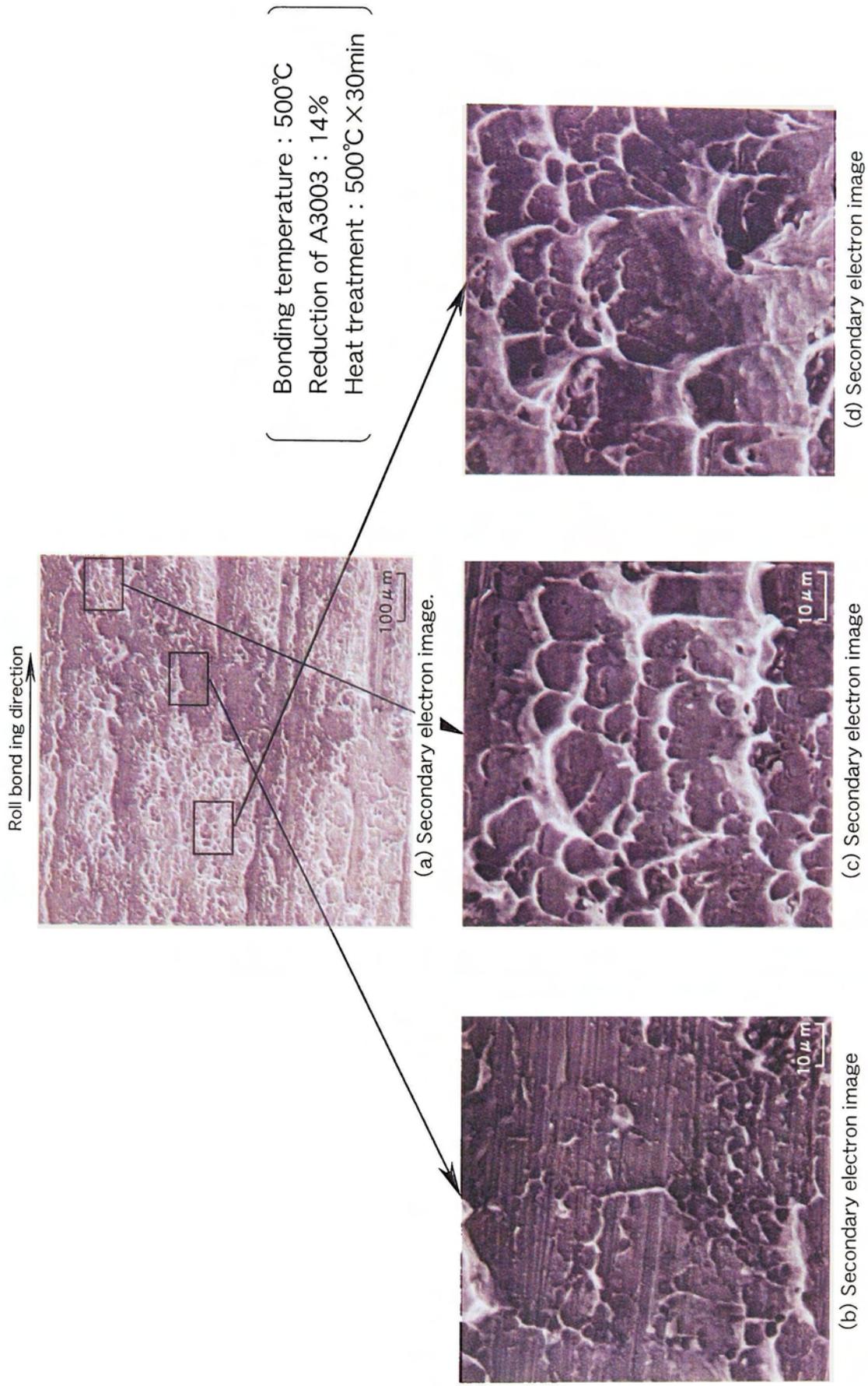


図4.7 熱処理されたAl/SUSクラッド材の切欠き試験片のSUS304L側破面のSEM写真

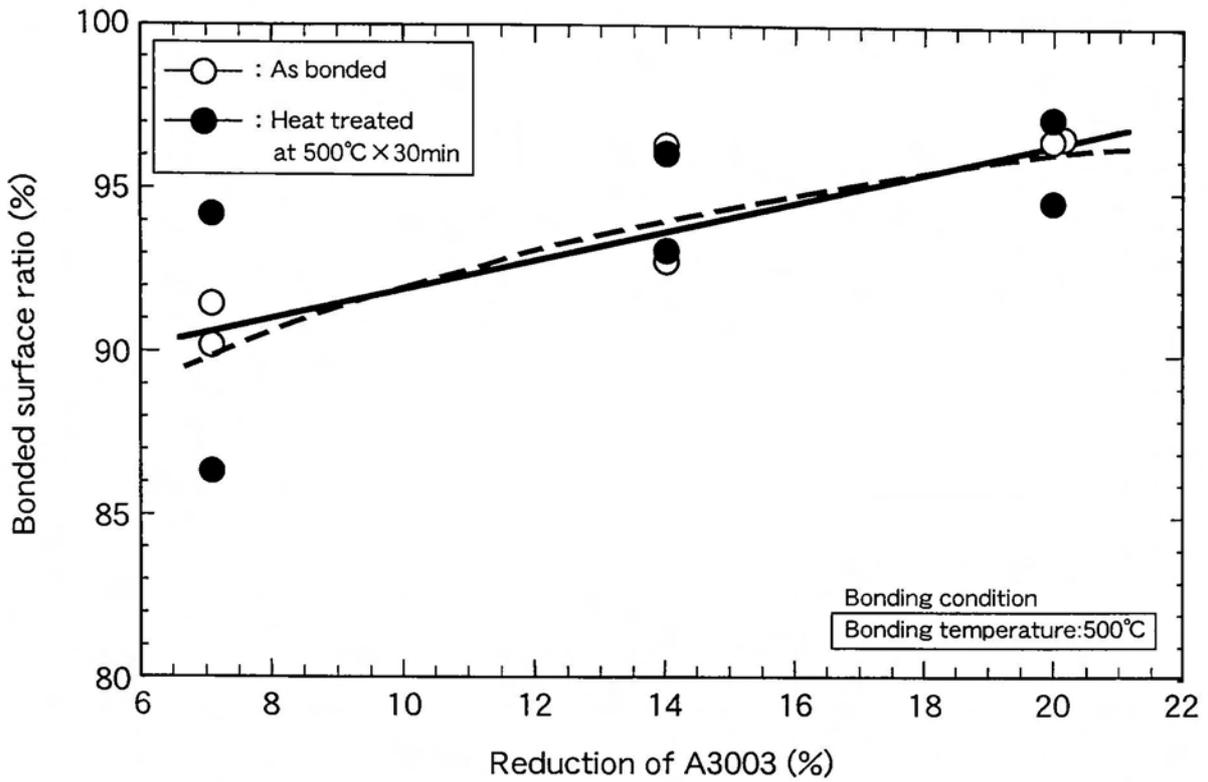


図4.8 Al/SUSクラッド材の接合まま材及び熱処理材の接合率と圧下率の関係

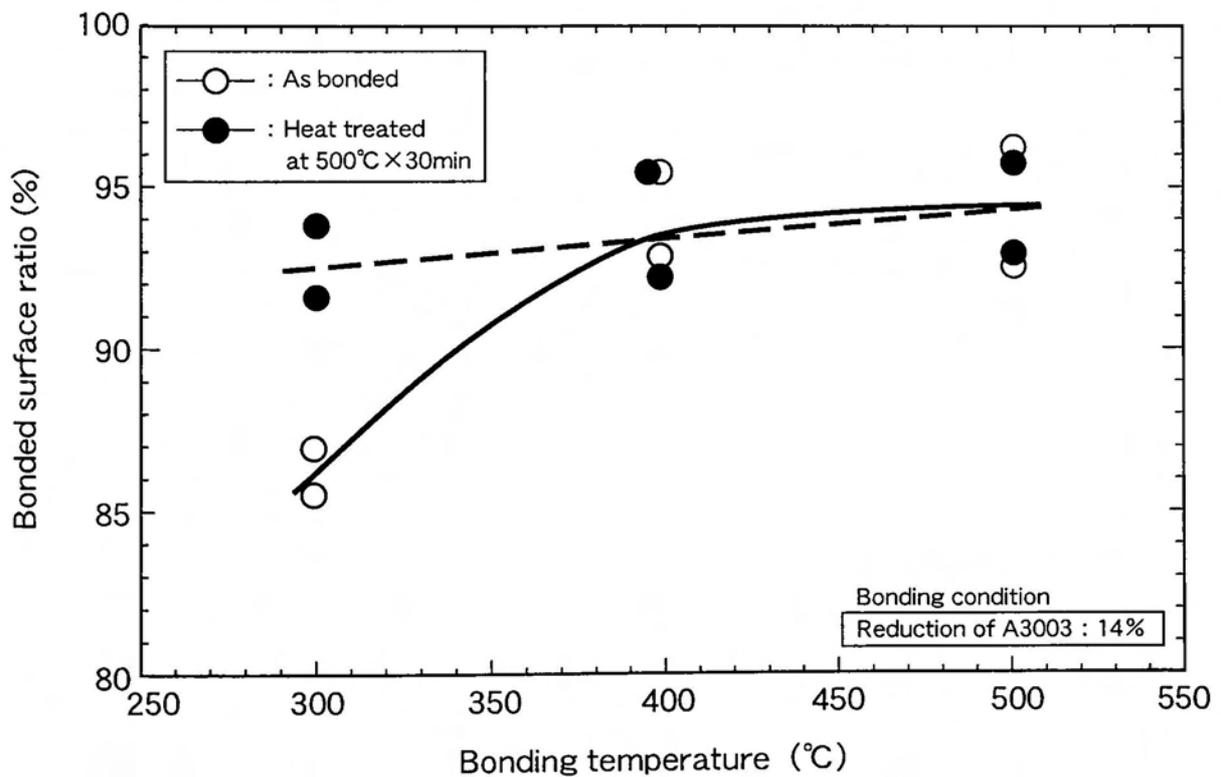


図4.9 Al/SUSクラッド材の接合まま材及び熱処理材の接合率と接合温度の関係

接合温度 300℃の場合、500℃×30min の熱処理で接合率は接合まま材に比べ 7%上昇し、約 93%となっており、接合温度 400 及び 500℃とほぼ同じ接合率を示した。また、接合温度 400 及び 500℃では接合まま材と熱処理材との間で接合率に差は認められず、接合率は 93~96%であった。

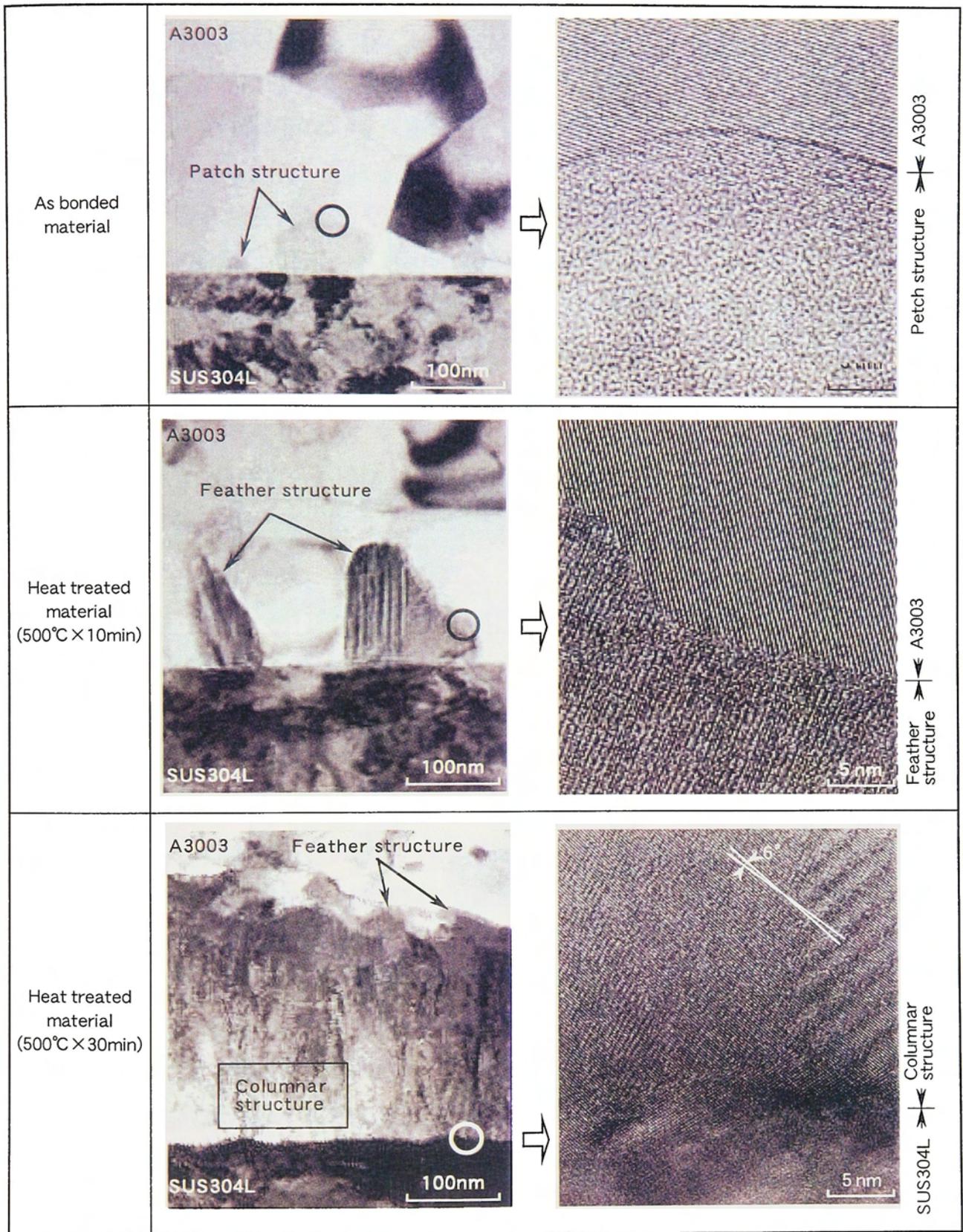
これら接合まま材と熱処理材の接合率に対する圧下率と接合温度の関係は、図 4.3 及び図 4.4 に示した切欠き接合部強さに対する圧下率と接合温度の関係と類似していた。すなわち、接合条件が不十分な圧下率 7%及び接合温度 300℃の場合、500℃×30min の熱処理で接合率と切欠き接合部強さは上昇する。一方、適正接合条件と考えられる圧下率 14%以上で、かつ、接合温度 400℃以上の接合条件では接合まま材と 500℃×30min の熱処理材とで接合率及び切欠き接合部強さに差はないことが明らかとなった。

4.3.3 熱処理材の接合界面の微細観察

接合温度 500℃、圧下率 14%の接合条件において、接合まま材、500℃×10min の熱処理材及び 500℃×30min の熱処理材の 3 種類の接合界面を透過電子顕微鏡で観察し、接合界面の組織変化を調査した。

図 4.10 に、熱処理条件による接合界面の組織変化を示す。図 4.10 によれば、接合まま材の接合界面に生成したマダラ組織は、500℃×10min の熱処理で、結晶格子縞を持つ羽毛状の組織(以下、羽毛組織と記す)に変化し、さらに 500℃×30min の熱処理で SUS304L の表面から直接微細柱状組織が成長している状況が観察された。500℃×10min の熱処理材の接合界面に生成した羽毛組織を観察すると、SUS304L との境界には、アモルファス組織を示す中間層が認められた。また、羽毛組織は A3003 に比べ縞間隔がやや広い結晶格子縞を持ち、A3003 との境界では羽毛組織側から A3003 内に向かって A3003 の結晶格子縞がくさび型にひずんでいる状況が観察された。これらの状況は、接合まま材の接合界面に生成したマダラ組織が 500℃×10min の熱処理により、一方向の格子縞を持つ結晶構造、すなわち、羽毛組織に変化しつつ A3003 結晶を侵食して成長している様子を示していると考えられる。

500℃×30min の熱処理材の接合界面に生成した微細柱状組織を観察すると、微細柱状組織は SUS304L から直接成長しており、その中の柱状晶の直径は約 30nm、高さは 0.3 μ m から最大 2 μ m であり、柱状晶同士の結晶格子の傾きは 3~6° であった。また、微細柱状組織の先端には羽毛組織が認められ、微細柱状組織と羽毛組織の境界には接合まま材で認められた中間層のような結晶格子縞の不明瞭な層が認められた。接合界面の微細柱状組織の生成していない領域では、羽毛組織が中間層を介して A3003 側に成長していた。



(Bonding temperature : 500°C
Reduction of A3003 : 14%)

図4.10 熱処理条件によるAl/SUSクラッド材の接合界面の組織変化

図 4.11 に、微細柱状組織の先端領域の TEM 像と、各組織の EDS 分析結果を示す。これによれば、微細柱状組織の先端には直径 20nm 程度の微細結晶粒が観察され、かつ、羽毛組織との間には結晶格子縞の認められない層が存在する。これらの組織の EDS 分析結果によれば、いずれの組織も Al を主成分としており、かつ、SUS304L の構成成分である Fe, Cr 及び Ni を含有しているが、結晶格子縞の不明瞭な層には微細柱状組織及び羽毛組織に比べて O の含有量が多い。この傾向は、接合まま材の接合界面に存在する中間層(第3章図 3.4 参照)及び 500°C×10min の熱処理材の接合界面に存在する中間層と同様であった。このことと、微細柱状組織が直接 SUS304L 表面から成長していることと考え合わせると、微細柱状組織は、アモルファス相と SUS304L の間で生成し成長したものと考えられる。

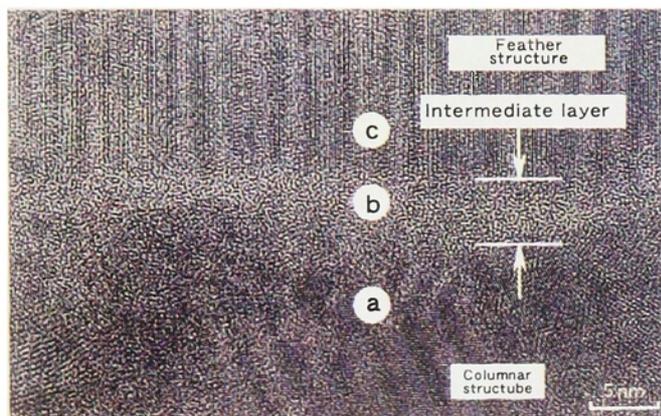
図 4.12 は、各熱処理によって生成した接合界面の代表的組織の EDS 分析結果と、電子線回折像を示す。電子ビーム径は 0.5nm と制限視野の 250nm である。EDS 分析結果から各組織毎に Al : (Fe+Cr+Ni) : O の原子濃度比を概算すると以下のとおりであった。

	Al	(Fe+Cr+Ni)	O
マダラ組織	4.6	1	1.5
羽毛組織	3.5	1	0.6
微細柱状組織	3.0	1	—

各組織とも Al が主成分であるが、マダラ組織、羽毛組織及び微細柱状組織と変化するに従って(Fe+Cr+Ni)に対する Al 及び O の割合が小さくなっている。また、微細柱状組織は、(Fe, Cr, Ni)Al₃ 系の析出物であることが分かる。この現象は、アルミニウムとステンレス鋼の真空圧延接合では、熱処理により接合界面に(Fe, Cr, Ni)Al₃ 系の金属間化合物が析出することを示した西尾等の報告とも一致する^{23,24)}。

マダラ組織の電子線回折像はハローパターンを示しており、第3章で示したようにナノサイズの微細結晶集合体と考えられるが、羽毛組織の電子線回折像は、明瞭な配向性が認められ、羽毛組織は、マダラ組織から規則的な原子配列を持つ結晶組織へ変化する途中の組織と考えられる。また、微細柱状組織の電子線回折像は制限視野(φ250nm)で撮影するとデバイシェラー環が認められ、多結晶構造であることを示しており、図 4.10 で示した TEM 像と一致した。

図 4.13 は、各熱処理条件ごとに接合界面の低倍率透過電子顕微鏡像と EDS 分析による元素濃度分布を示したものである。接合まま材の場合、接合界面の A3003 側に Cu が



TEM image of columnar tip structure

Bonding temperature : 500°C
 Reduction of A3003 : 14%
 Heat treatment : 500°C × 30min

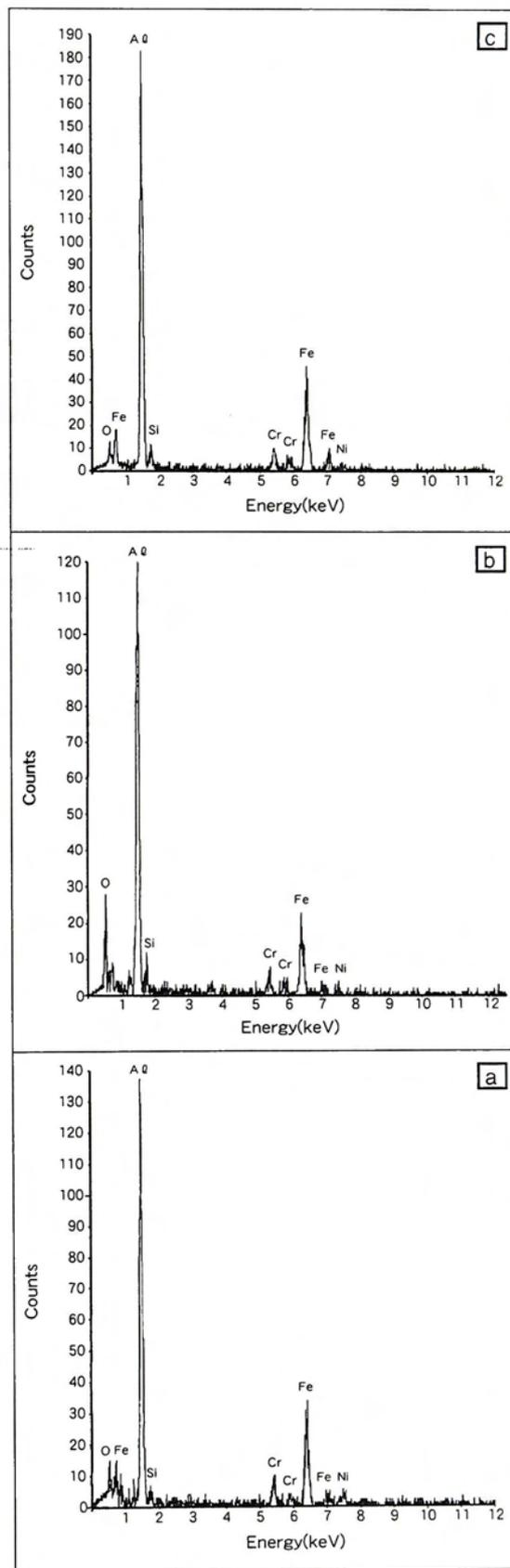


図4.11 熱処理されたAl/SUSクラッド材の接合界面に生成した微細柱状組織先端のTEM像とEDS分析結果

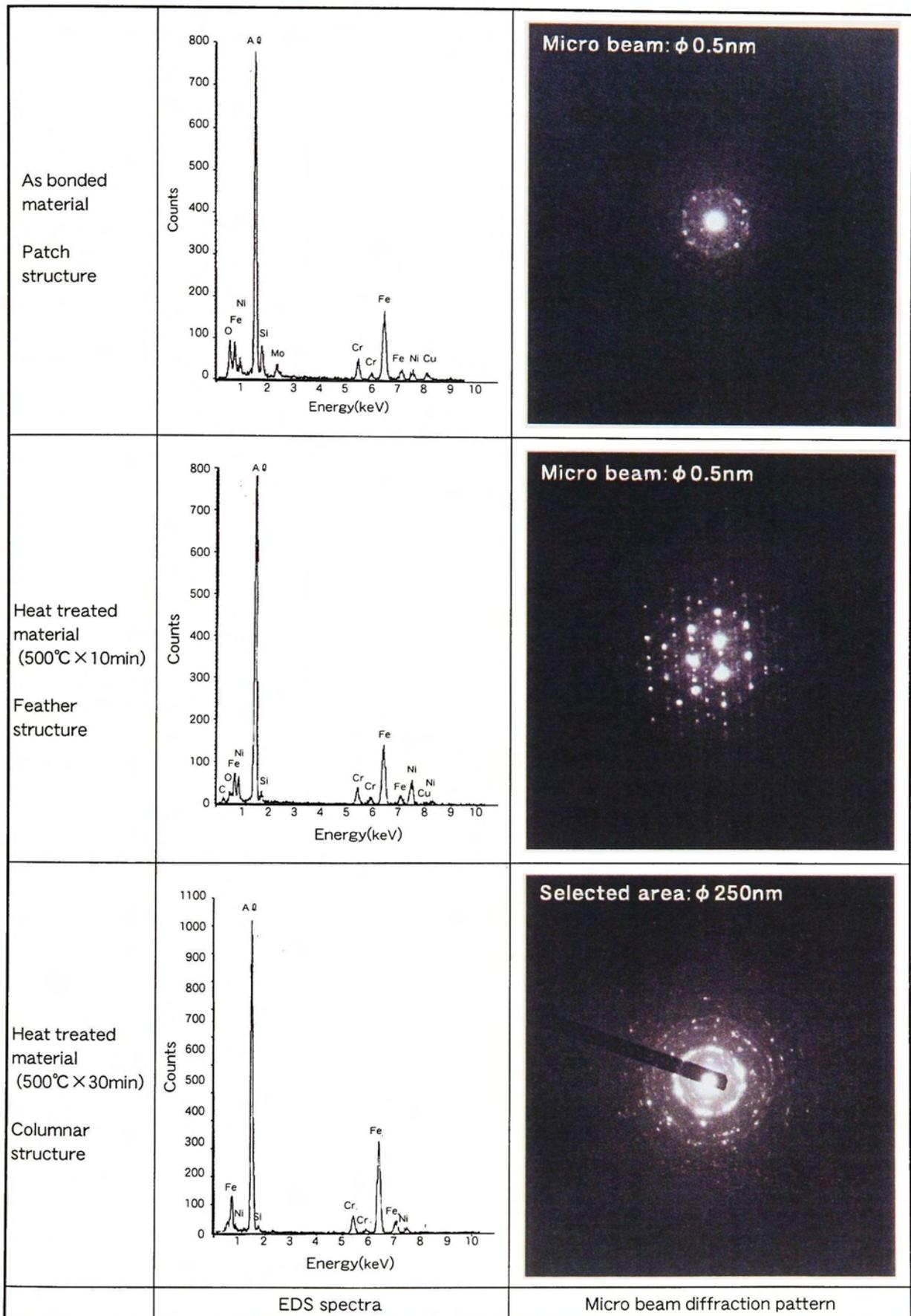


図4.12 マダラ組織，羽毛組織及び微細柱状組織のEDS分析結果と電子線回折像

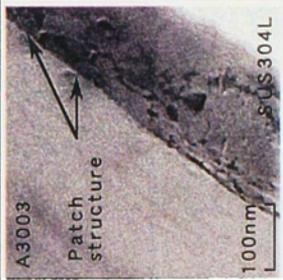
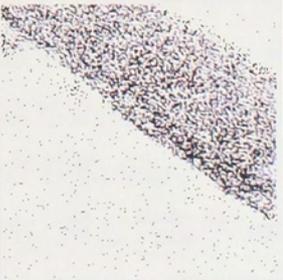
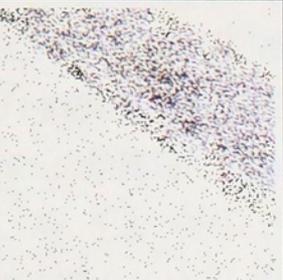
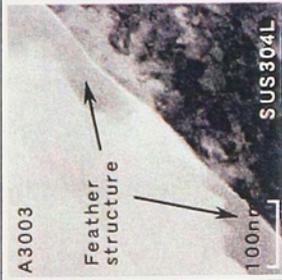
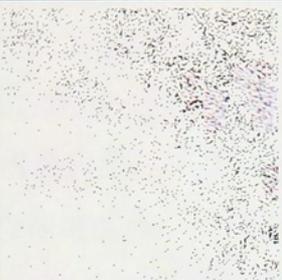
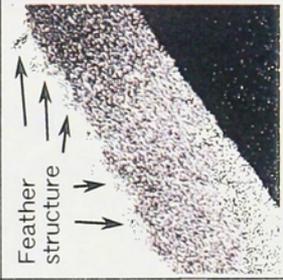
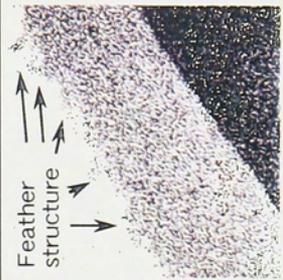
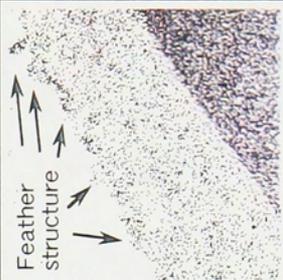
As bonded material		Al			
	TEM image	Al	Fe	Cr	Ni
		Al			
Heat treated material (500°C X 10min)	TEM image	Al	Fe	Cr	Ni
Heat treated material (500°C X 30min)		Al			
	TEM image	Al	Fe	Cr	Ni
		Al	Fe	Cr	Ni
Heat treated material (500°C X 30min)	TEM image	Al	Fe	Cr	Ni

図4.13 熱処理条件の変化によるAl/SUSクラッド材の接合界面近傍の元素濃度変化

濃縮しており、マダラ組織内には Cr 及び Cu 濃度が高くなっている。マダラ組織内への Fe 及び Ni の拡散が明確でないのは、像の倍率が低く視野が広いためと考えられる。500°C × 10min の熱処理材の場合、接合界面の A3003 側に羽毛組織が観察される。この羽毛組織は、Al, Fe, Cr 及び Ni を含有する。この内 Fe 及び Cr の濃度分布形状と羽毛組織の形状が対応している。また Ni は、接合界面全面から A3003 内部に深く拡散している様子が観察される。接合まま材の接合界面に濃縮していた Cu は、500°C × 10min の熱処理により拡散したと考えられ、接合界面には認められない。また Al は、接合界面の任意の場所から SUS304L 側に向かって拡散する様子が観察される。500°C × 30min の熱処理材の場合、接合界面から微細柱状組織が A3003 側に成長しており、その先端には羽毛組織も認められる。この微細柱状組織は、Al, Fe, Cr 及び Ni を含有している。

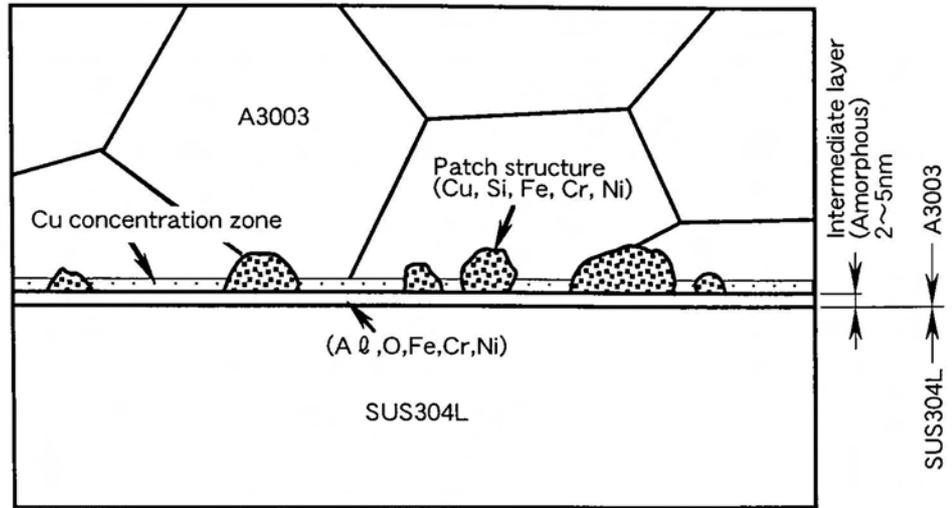
4.4 Al/SUS クラッド材の接合界面の熱処理による組織変化

以上の実験結果から Al/SUS クラッド材の接合界面の熱処理による組織変化の概念図を図 4.14 に示す。以下、この概念図に従って各熱処理ごとの接合界面の組織変化を考察する。

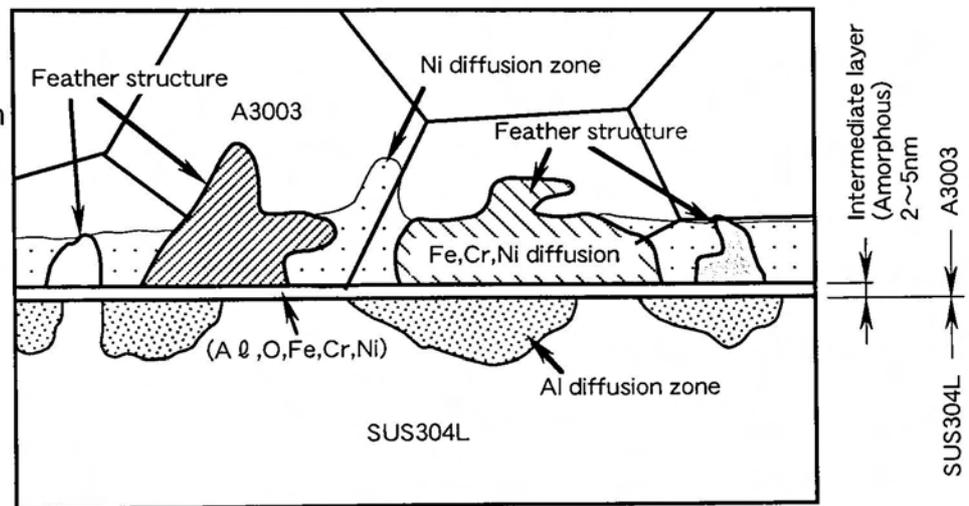
(a)に示した接合まま材では、Al/SUS 接合界面の全面にわたって 2~5nm 厚さの中間層が認められ、さらに中間層から A3003 側に向かって A3003 の結晶の一部が熔融凝固したと考えられるマダラ組織が点々と認められた。この内、中間層は Al を主成分とし O と Fe, Cr 及び Ni を含むアモルファス相である。また、マダラ組織は Al を主成分とし、Cu, Si, Fe, Cr 及び Ni を含むナノ結晶の集合体と考えられ、これらの組織は真空圧延接合時に一旦熔融し、急冷され凝固した組織と考えられる。今回、調査した接合界面の元素濃度分布(図 4.13 参照)では、接合界面の A3003 側に Cu 濃縮層が認められた。この Cu は、Al と低融点共晶合金を作ることから、Cu の濃縮により接合界面が熔融しやすくなることは考えられるが、真空圧延接合時に Cu が Al/SUS 接合界面に濃縮するメカニズムは明らかでない。いずれにしても、A3003 と SUS304L の真空圧延接合では、A3003 被接合面の極薄層とそれに接した A3003 側の Cu 及び Si の高濃度領域が一旦熔融し、この時、SUS304L の構成成分である Fe, Cr 及び Ni が液相拡散により熔融域内に急速に拡散し、その後、急速に冷却・凝固することで A3003 と SUS304L は強固に接合したものと考えられる。

(b)に示した 500°C × 10min の熱処理材では、接合界面のアモルファス相は変化しなかったが、マダラ組織は結晶格子縞を持つ羽毛組織に変化し、A3003 の結晶を侵食する形で成長していた。図 4.12 に示す電子線回折像からこの羽毛組織は、マダラ組織から規則的な原子配列を持つ結晶組織へ変化する途中の組織と考えられる。A3003 及び

(a) As bonded material



(b) Heat treated material at 500°C × 10min



(c) Heat treated material at 500°C × 30min

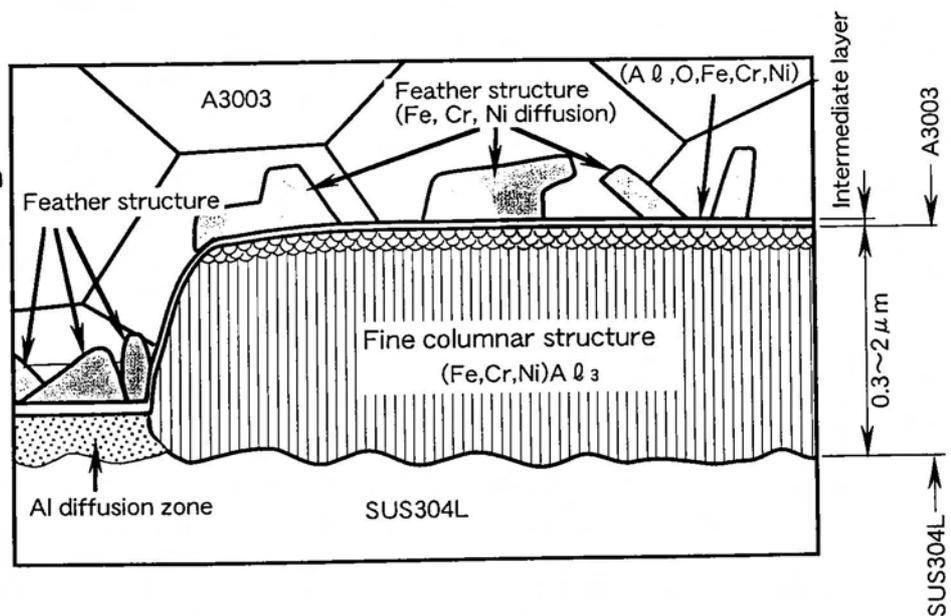


図4.14 熱処理によるAl/SUSクラッド材の接合界面の組織変化(概念図)

SUS304L の構成成分は、各元素毎に拡散の仕方に特徴が認められた。Al は、アモルファス相の任意の場所から SUS304L 内に広がる形で拡散し、Fe 及び Cr はアモルファス相を通してマダラ組織内を拡散し、Ni はアモルファス相全面から A3003 内に拡散する傾向にあった。このように、500℃×10min の熱処理により A3003 と SUS304L の構成成分は、アモルファス相を通して相互拡散するが、この段階では金属間化合物の析出は認められなかった。

(c)の 500℃×30min の熱処理材では、Al が主成分で Fe、Cr 及び Ni を含有した微細柱状組織が、SUS304L の表面から直接生成し成長していた。この微細柱状組織は、直径約 30nm、長さ 0.3~2 μm で、EDS 分析結果から (Fe, Cr, Ni)Al₃ 系の金属間化合物と考えられる。この微細柱状組織の先端には 8~15nm サイズの微細結晶の集合領域が、さらにその先端にはアモルファス相が認められ、この層から羽毛組織が A3003 側に生成している状況が観察された。切欠き引張試験片の破断面の写真(図 4.6 参照)は、以上に示した状況とよく一致しているように思われる。すなわち、写真①の欠損部は微細柱状組織の付け根が欠けた状況を示し、写真②の A3003 付着塊は微細柱状組織を示し、写真③に示した A3003 と SUS304L の界面の形状(SUS304L 側に凹になった形状)は、SUS304L 内への Al 拡散域の先端形状を示していると考えられる。この微細柱状組織は、500℃×30min の熱処理で認められ、その厚さは 0.3~2 μm であり、接合界面に点々と析出していた。

ところで、Al/Fe 接合界面において金属間化合物の析出層の厚さが 1.5~2 μm 以上になると、接合部強さが低下するとの報告がある^{23,25)}。今回の熱処理では、接合界面上に連続した金属間化合物の析出は認められず、このため、切欠き接合部強さの低下が見られなかったものと思われる。すなわち、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材は、500℃×30min の熱処理を施しても、接合界面の組織変化による接合部強さの低下は生じないことが明らかとなった。

一方、現状の STJ に使用されている 4 層爆着材は、400℃以上に加熱されると A3003 が焼なまされて接合部強さが低下する^{13,14)}。このため、37mm 厚さの STJ に対して A3003 の厚さを 13mm にするとともに、LNG 船のタンクスカート部にすみ肉溶接で固定する場合、すみ肉溶接入熱で接合界面の温度が 350℃以上に上昇しないように溶接層間温度を 50℃以下に規定して施工管理を実施している。以上のことから、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船用の STJ として適用する場合、現状の爆着材の STJ と同等の施工管理を行えば接合部強さ及び接合界面の組織に及ぼすすみ肉溶接の影響は生じないと考えられる。

4.5 結言

本章では、真空圧延接合法による A3003 と SUS304L の 2 層クラッド材に、500℃ で保持時間を変化させて熱処理を施し、接合部強さの変化及び接合界面の組織変化を調査し、接合まま材と比較した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 500℃×60min までの熱処理条件範囲では、熱処理材の接合部強さは接合まま材と同等以上であった。
- (2) 熱処理により、Al/SUS クラッド材の接合界面では、アモルファス相を通して、A3003 及び SUS304L の構成成分が相互に拡散し、新たな組織を形成する。すなわち、接合まま材の接合界面に生成したマダラ組織は、500℃×10min の熱処理で結晶格子縞を持つ羽毛組織に変化し、A3003 の結晶を侵食して成長する。また、500℃×30min の熱処理で、アモルファス相と SUS304L の間から微細柱状組織が析出する。
- (3) 電子線回折像から判断すると、羽毛組織はマダラ組織から規則的な原子配列を持つ結晶組織へ変化する途中の組織と考えられる。また、EDS 分析の結果から、微細柱状組織は (Fe, Cr, Ni)Al₃ 系の金属間化合物であることが明らかとなった。
- (4) アモルファス相を通じた A3003 と SUS304L の構成成分の拡散形態に、特徴が認められた。すなわち、Al はアモルファス相の任意の領域から SUS304L 内に広がる形で拡散し、Fe 及び Cr は羽毛組織内に拡散し羽毛組織を成長させ、Ni はアモルファス相全面から A3003 結晶内に拡散する状況が観察された。
- (5) 以上に示した熱処理試験結果から、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を LNG 船のタンクスカート部にすみ肉溶接で固定する場合、現在行われている爆着材の STJ と同等の溶接施工管理を行えば、すみ肉溶接入熱で接合界面に組織変化は発生せず、接合部強さも何ら影響を受けないことが明らかとなった。

第5章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ としての構造強度

5.1 緒言

これまでの章で、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合部強さに与える接合条件の影響を明らかにするとともに、接合界面の TEM 観察及び EDS 分析から A3003 と SUS304L の接合メカニズムを検討し、接合部強さ及び接合部の微細組織に与える熱処理の影響を明らかにした。

Al/SUS クラッド材を球形タンク方式 LNG 船のタンクスカート部に STJ として使用するためには、実構造物として使用される Al/SUS クラッド材の十字すみ肉溶接継手が LNG 船の使用環境において健全であることを確認しておく必要がある。

著者らはすでに、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の十字すみ肉溶接継手を製作し、接合界面に種々の深さの切欠きスリットを入れて引張試験を行い、破壊強度及び破断形態について検討・考察している^{27,28)}。

本章では、これらの検討に十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果を加え、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を球形タンク方式 LNG 船のタンクスカート部に STJ として適用する場合の実用可能性について検討した。

5.2 供試材料及び実験方法

強度評価試験には、大型の真空圧延接合装置で接合した4種類の Al/SUS クラッド材を供試した。すなわち、厚さ 14mm、幅 135mm、長さ 1000mm の A3003P-H14 と、厚さ 24mm、幅 135mm、長さ 1000mm の SUS304L を用い、両材料の被接合面を機械加工▽▽▽仕上げとし、圧下率 22%(記号 VA)及び圧下率 14%(記号 VB)と、被接合面を機械加工の鏡面仕上げで圧下率 22%(記号 VC)及び圧下率 14%(記号 VD)の4種類の Al/SUS クラッド材を製作した。なお、接合温度はいずれも 500°Cとした。真空圧延接合後の Al/SUS クラッド材の A3003 の厚さは、圧下率 22%の場合約 11mm に、圧下率 14%の場合約 12mm になっており、SUS304L の厚さはほとんど変化していなかった。

真空圧延接合後の4種類の Al/SUS クラッド材は、幅方向の両端部を切除し、丸棒引張試験と十字すみ肉溶接継手の引張試験の場合、板幅 80mm に仕上げ、十字すみ肉溶接継手の疲労試験の場合、板幅 120mm に仕上げて供試した。このうち、VA、VB 及び VC は丸棒引張試験と十字すみ肉溶接継手の引張試験に、VD は十字すみ肉溶接継手の疲労試験に供した。

Al/SUS クラッド材に用いた A3003P-H14 と SUS304L の化学成分と機械的性質は

第2章の表 2.1 に示したとおりである。

図 5.1 に、丸棒引張試験片を示す。平行部 8mm (A3003 : 3mm, SUS304L : 5mm), 平行部の直径 10mm の平滑試験片である。図 5.2 に、丸棒引張試験片の採取位置を示す。VA, VB 及び VC とともに板幅 80mm の Al/SUS クラッド材の幅方向中央部と両端部から採取した。

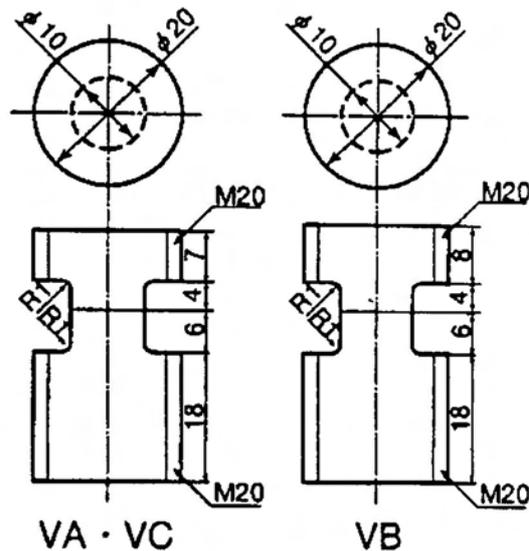


図 5.1 丸棒引張試験片の形状と寸法

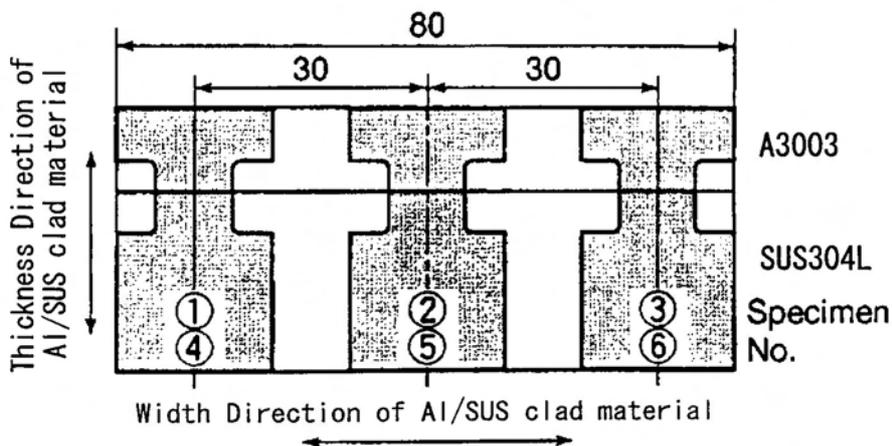


図 5.2 丸棒引張試験片の採取位置

十字すみ肉溶接継手の引張試験では、Al/SUS クラッド材 VA, VB 及び VC の A3003 側表面に板厚 36mm の A5083 を、また SUS304L 側表面に板厚 24mm の SUS304 をすみ肉溶接して十字すみ肉溶接継手を製作した。なお、溶接条件は球形タンク方式 LNG 船のタンクスカートの組立に採用している条件と同一にした。

図 5.3 に、十字すみ肉溶接継手の開先形状とすみ肉溶接順序を示す。また、表 5.1 に、溶接条件を示す。製作した十字すみ肉溶接継手から厚さ 40mm の試験片を切り出して供試した。試験片の形状・寸法を図 5.4 に示す。Al/SUS クラッド材の端面の A3003 側に

種々の深さのスリットを入れ、室温と-165℃で引張試験を実施した。なお、スリット先端は0.1mm厚さの金鋸で加工した。

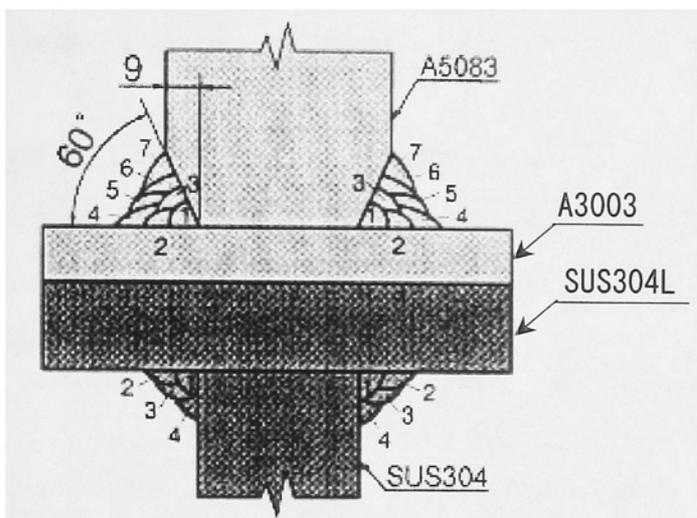


図 5.3 十字すみ肉溶接の開先形状と溶接順序

表 5.1 十字すみ肉溶接条件

Material	Welding Method (Welding Material)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)	Heat Input (kJ/cm)	Interlayer Temp. (°C)
Al	Semi-automatic MIG Welding (A5183WYN*)	1	280	29	52~55	8.86~10.04	24~25
		2~6	~	~	65~80	6.09~8.03	38~49
		7	290	30	115~119	4.09~4.54	37~47
SUS	Semi-automatic CO ₂ Arc Welding (DW-308L**)	1	180	29	40	7.83	30~33
		2~4	200	30	39~41	7.64~9.23	38~49

* Nippon Light Metal

**Kobe Steel

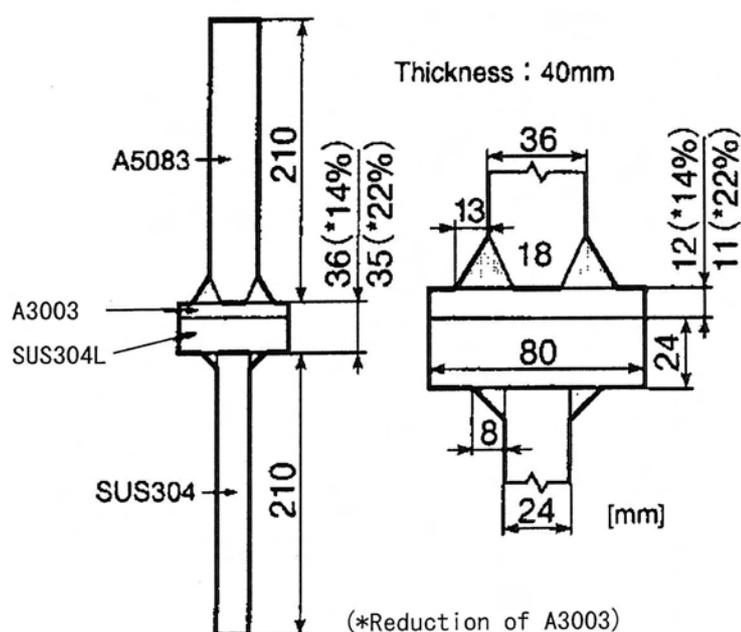


図 5.4 十字すみ肉溶接継手の引張試験片

十字すみ肉溶接継手の疲労試験では, Al/SUS クラッド材 VD の A3003 側表面に板厚 60mm の A5083 を, また SUS304L 側表面に板厚 43mm の SUS304L をすみ肉溶接して十字すみ肉溶接継手を製作した。十字すみ肉溶接の開先形状及び溶接条件は, 図 5.3 及び表 5.1 と同様である。

製作した十字すみ肉溶接継手から厚さ 50mm の試験片を切り出して供試した。図 5.5 に, 試験片の形状・寸法を示す。切欠き試験片は接合界面に 2mm 幅の機械ノッチを入れた後, A3003 側に 0.1mm 幅の鋸刀を用いて, 深さ 15, 20 及び 30mm のスリットを両側に入れ, 両側切欠き試験片を製作した。

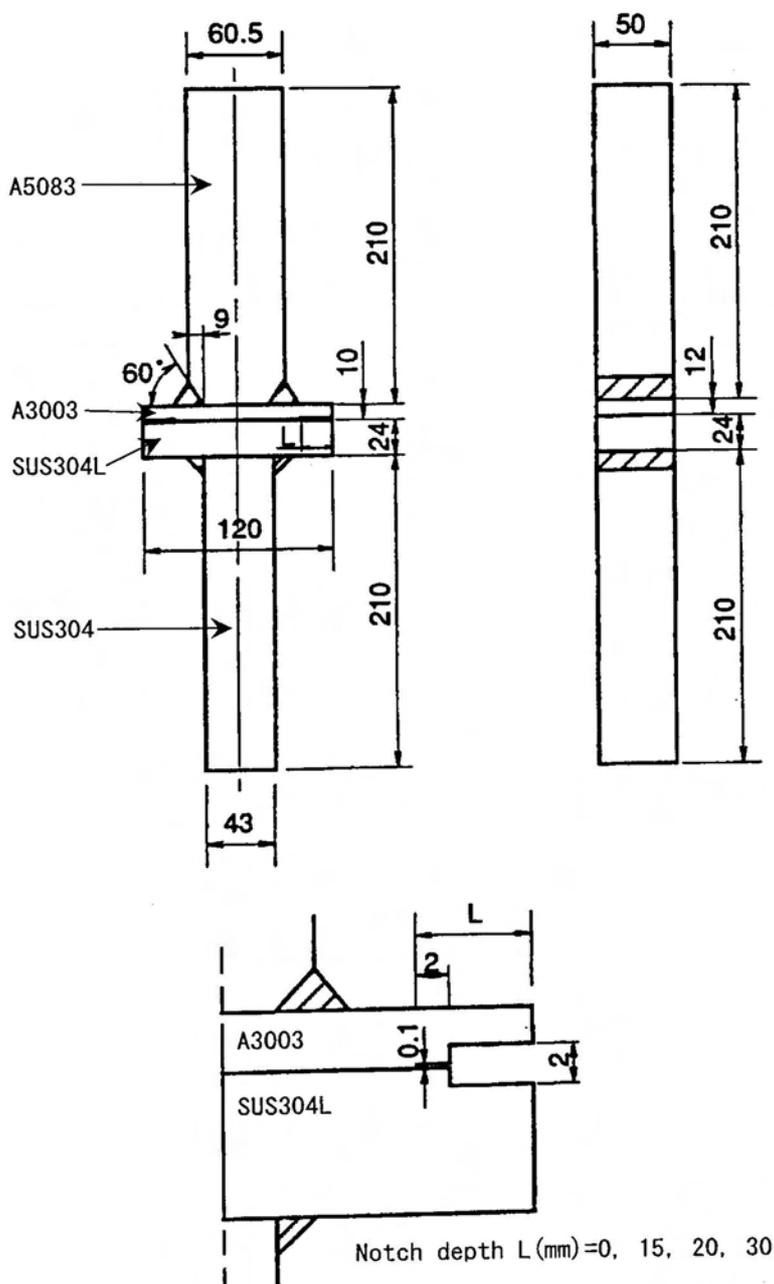


図 5.5 十字すみ肉溶接継手の疲労試験片

疲労試験に際しては 100 ト万能縦型疲労試験機を用い、一定荷重制御により応力比 $R=0$ の片振り引張荷重で $\sigma-N_f$ 線図が求められる荷重範囲を選定し疲労試験を行った。

5.3 実験結果及び考察

5.3.1 丸棒引張試験

表 5.2 に、丸棒引張試験結果を示す。表 5.2 から明らかなように、接合部の A3003 側で破断した場合も、接合部で破断した場合も、接合部強さはほぼ同程度であった。さらに A3003 側で破断した試験片の接合部強さの平均値は、VA が 135N/mm^2 、VB が 129N/mm^2 、VC が 133N/mm^2 となっていた。先に表 2.1 に示した A3003P-0 の引張強さ、すなわち 109N/mm^2 に比べ約 20%強くなっていた。これは SUS304L の拘束によるものと考えられる。

表 5.2 丸棒引張試験の結果

Specimen Mark		Diameter (mm)	Tensile Strength (N/mm ²)	Fractured Location
VA	A2	10.01	133	AI Part
	A5	10.01	136	AI Part
	A1	10.01	131	Faying Part
	A3	10.01	127	Faying Part
	A4	10.01	129	Faying Part
	A6	10.01	126	Faying Part
VB	B2	10.01	128	AI Part
	B5	10.01	130	AI Part
	B1	10.01	127	Faying Part
	B3	10.01	125	Faying Part
	B4	10.01	126	Faying Part
	B6	10.01	129	Faying Part
VC	C2	10.01	128	AI Part
	C5	10.00	135	AI Part
	C6	10.00	135	AI Part
	C1	10.00	130	Faying Part
	C3	10.01	130	Faying Part
	C4	10.01	134	Faying Part

5.3.2 十字すみ肉溶接継手の引張試験

表 5.3 及び図 5.6 に、十字すみ肉溶接継手の引張試験結果を示す。引張最大荷重は、切欠き深さが同じであれば VA、VB 及び VC でほぼ同じ値になっている。すなわち、被接合面の機械加工面粗さ▽▽▽仕上げと鏡面仕上げ及び圧下率 14%と 22%との間で引張最大荷重はほぼ同等と言える。これは第 2 章で示した接合温度 400°C 以上、圧下率 14% 以上で信頼性の高い接合部強さが得られたことと一致する。また、被接合面粗さが機械加

表 5.3 十字すみ肉溶接継手の引張試験結果

Specimen No.	Faying Surface Length between Notch Tips (A-2a) (mm)	Temperature (°C)	Max. Tensile Load (kN)	Fractured Type	
				L	R
VA	VA-2	29.0	R. T.	108	② ②
	VA-1	49.3	R. T.	183	② ②
	VA-4	59.1	R. T.	219	② ①
	VA-6	39.9	-165	196	③ ②
	VA-3	49.8	-165	248	② ②+③
	VA-7	58.8	-165	253	③ ③
	VA-5	59.6	-165	284	① ③
VB	VB-2	29.9	R. T.	110	② ②
	VB-1	49.6	R. T.	177	② ③→②
	VB-4	60.6	R. T.	199	③→② ③→②
	VB-6	39.7	-165	204	② ②
	VB-3	50.1	-165	245	② ②
	VB-7	59.1	-165	277	③→② ①
	VB-5	59.6	-165	258	③→② ③→②
VC	VC-2	29.0	R. T.	110	② ②
	VC-1	50.2	R. T.	181	② ②
	VC-4	59.0	R. T.	206	① ②
	VC-6	39.9	-165	201	② ②
	VC-3	49.6	-165	248	② ③→②
	VC-7	58.9	-165	253	① ②
	VC-5	59.7	-165	263	③→② ①

→: Fractured type shifted to other fractured type

+ : Two fractured type occurred at same time

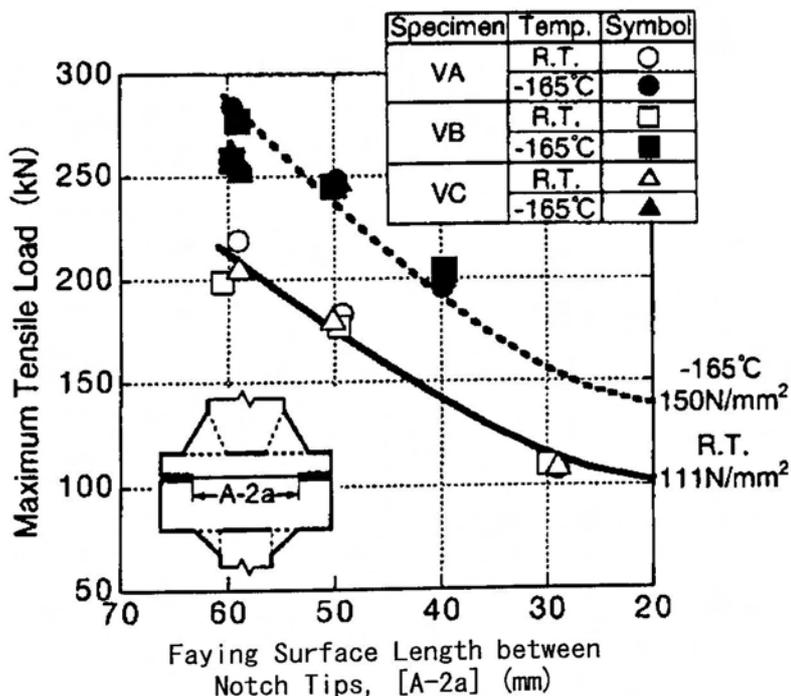


図 5.6 十字すみ肉溶接継手の引張試験結果

工による▽▽▽仕上げと、鏡面仕上げとで引張最大荷重に差がなかったことは、Al/SUSクラッド材を工業的に製作する上で大きなメリットになると考えられる。

試験片の破断形態は、図 5.7 に示すように概略3種類に分類できた。図 5.7 に示した破断形態②と③の場合の荷重—変位線図の代表例を図 5.8 に示す。接合界面近傍で不安定破壊した破断形態③の場合でも図 5.8 の (b) から明らかなように、最大荷重点に到達するまでにかなり塑性変形していることが分かる。破断面を SEM で観察した結果では、接合界面近傍の A3003 が延性破壊したことが確認された²⁶⁾。

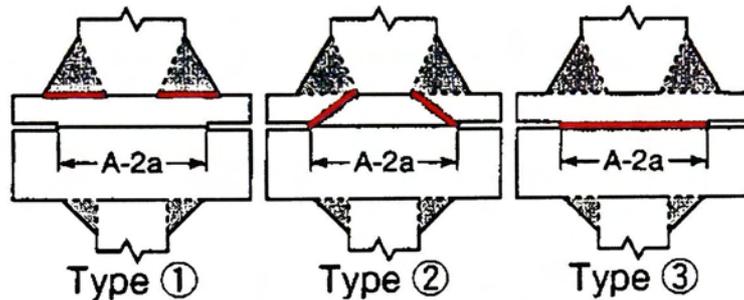
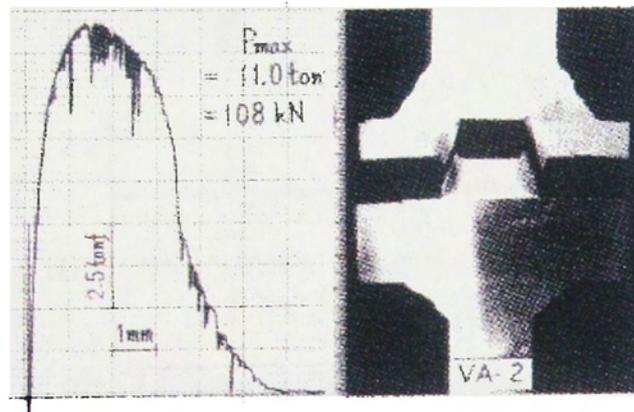
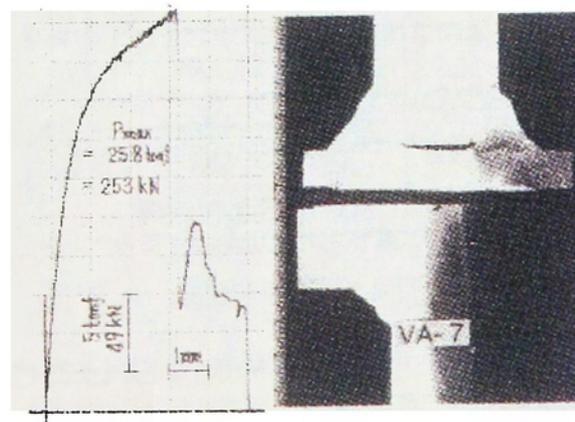


図 5.7 十字すみ肉溶接継手の破断形態



(a) type② (VA-2, R.T., A-2a:29.0mm)



(b) type③ (VA-7, -165°C, A-2a:58.8mm)

図 5.8 荷重—変位線図

先に図 5.6 に示したように、破断形態①、②及び③ともに、室温及び-165℃でも、引張最大荷重に大きな差が認められなかったのは、A3003 の引張強さ程度まで耐えて破壊したためと考えられる。

図 5.7 に示した破断形態②に該当する破壊経路の面積を各試験片に対して求め、この面積に対する破壊応力を求めて図示したものが図 5.9 である。破壊応力の平均値は、室温で約 110N/mm²、-165℃で約 150N/mm²であった。先に示した図 5.6 中の実線と点線は、上述の破壊応力の平均値から推定した値であり、試験結果と良く一致している。すなわち、供試した3種類の Al/SUS クラッド材の十字すみ肉溶接継手としての接合部強さは、A3003 の引張強さ程度(室温で約 110N/mm²、-165℃で約 150N/mm²)の強度を有していることが確認できた。

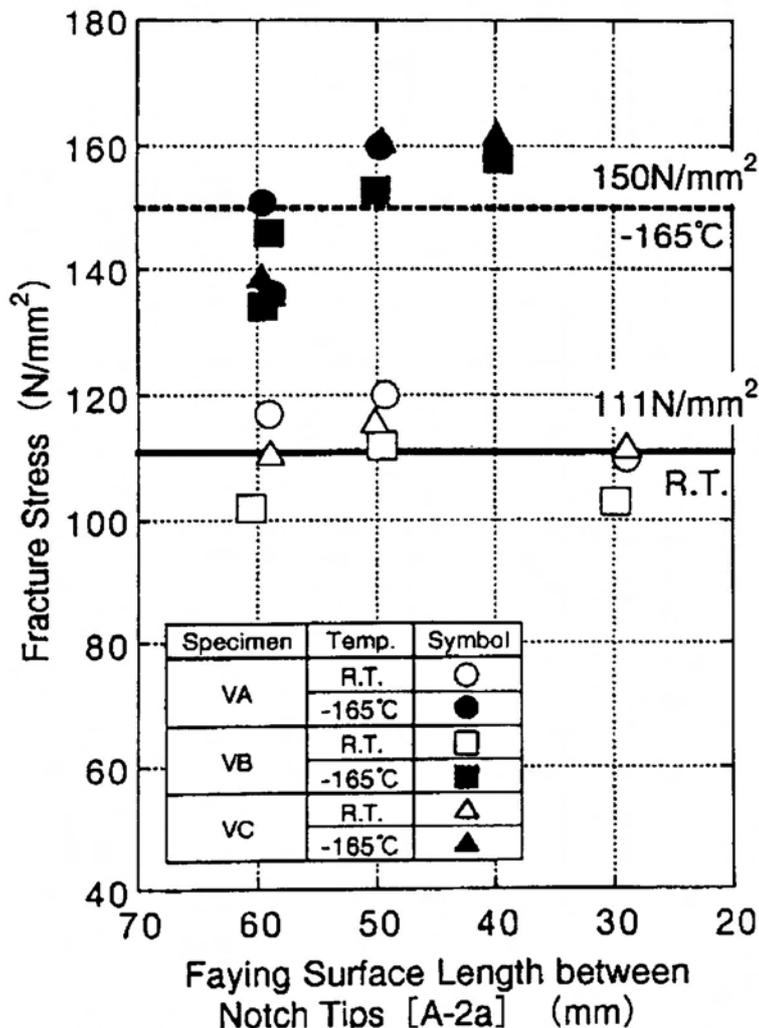


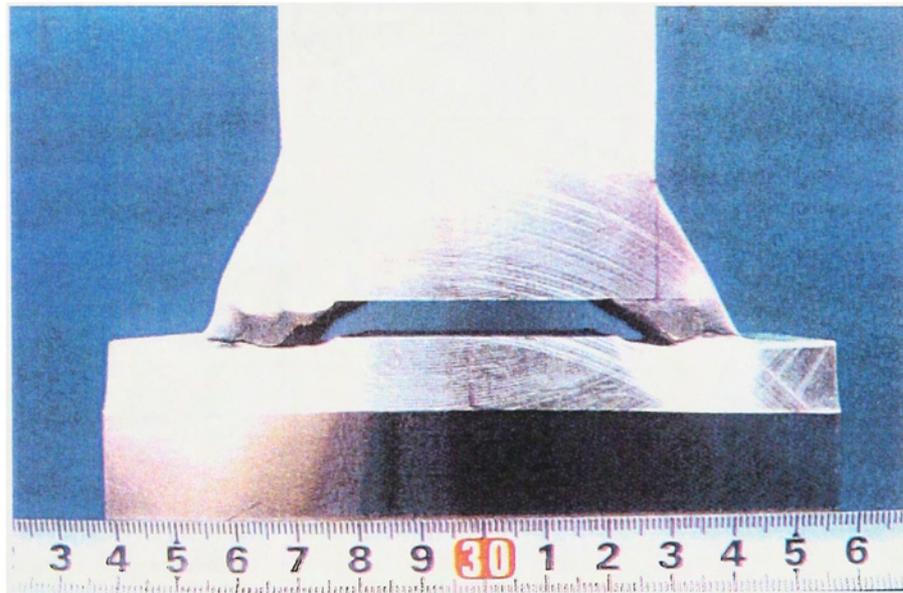
図 5.9 破壊経路における破壊応力

一般に、球形タンク方式 LNG 船のタンクスカートの設計応力は、最大に見積っても静的引張応力 23N/mm²、引張変動応力振幅 17N/mm²程度であり、最大応力は 40N/mm²程度である。したがって、供試した接合条件の異なる3種類の Al/SUS クラッド材の十字

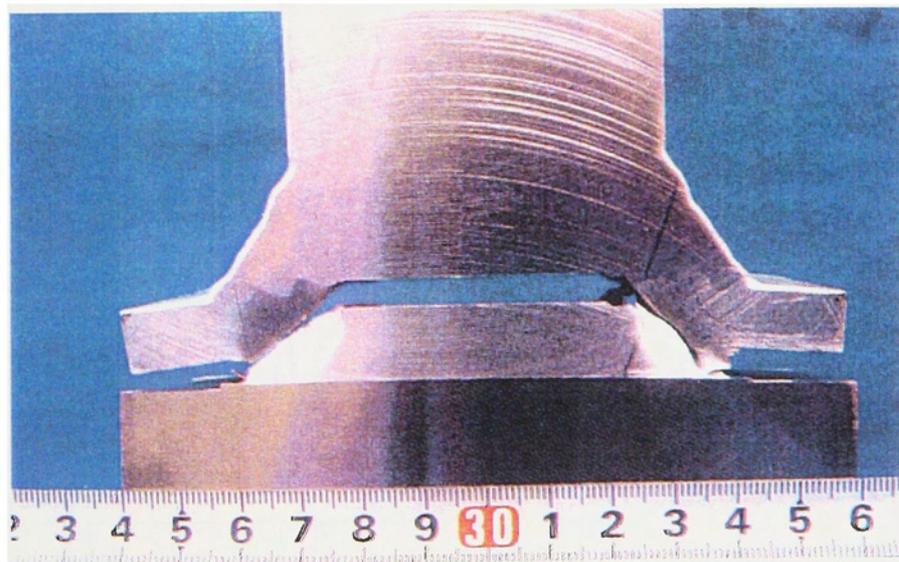
すみ肉溶接継手としての接合部強さは、最大応力に対して室温で約 2.8 倍、 -165°C で約 3.8 倍の安全率を有しており、LNG 船に実用可能であると判断できる。

5.3.3 十字すみ肉溶接継手の疲労試験

疲労試験後の試験片の代表的な破断状況を図 5.10 に示す。切欠きのない試験片の疲労き裂は、図 5.10(a)に見られるように A3003 側のすみ肉溶接部のルート部先端からき裂が発生し、すみ肉溶接金属の熱影響部に沿って進展している。切欠きのある試験片の疲労



(a) Smooth specimen

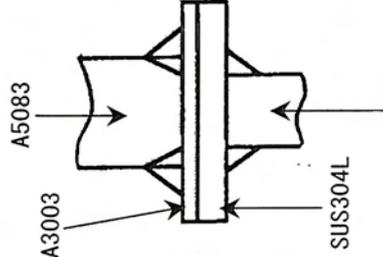
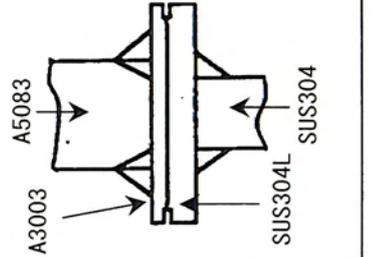


(b) Notched specimen

(VD-1: $\sigma_R=78.4\text{N/mm}^2$, $N_f=930$)

図 5.10 疲労試験後の十字すみ肉溶接継手

表 5.4 十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果

Specimen No.	Shape of Specimen	Notch length (mm)	Axial range (N/mm ²)	Fracture of cycles × 10 ⁴ (cycles)	Fractured Location
VD-1	Smooth specimen 	0	78.4	0.093	
VD-2		0	39.2	97.16	
VD-3		0	49.0	14.30	
VD-8		0	58.8	4.85	
VD-4	Notched specimen 	15.3	49.0	2.31	
VD-5		19.9	49.0	2.35	
VD-6		29.6	49.0	0.0383	

き裂は、図 5.10(b)に見られるように A3003 側のすみ肉溶接部のルート部先端と、切欠きスリットの先端の両方からき裂が発生し、A3003 母材を進展した後、両き裂が合体して破断している。これらのことは、接合界面における欠陥の有無にかかわらず接合界面の疲労強度が構造要素部において最弱部ではないことを示している。

疲労試験結果を表 5.4 に示す。いずれの試験片においても、疲労き裂は接合界面を進展しておらず、疲労荷重に対して接合界面は最弱部とはならないことがわかる。

図 5.11 に、真空圧延接合による Al/SUS クラッド材と爆着材との十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果を比較して示す。真空圧延接合による Al/SUS クラッド材の切欠き試験片では、切欠き深さにより疲労強度が低下しているが、上述したように疲労き裂は接合界面を進展しておらず、疲労荷重に対して接合界面は健全であることを示している。

切欠きのない試験片では、真空圧延接合による Al/SUS クラッド材と爆着材とでは同等の疲労強度を示している。これは両者共、破断経路が A3003 すみ肉溶接の溶接熱影響部であることによる。すなわち、真空圧延接合による Al/SUS クラッド材と爆着材の十字すみ肉溶接継手は同等の疲労強度を有していると言え、疲労強度の観点から LNG 船に実用可能であると判断できる。

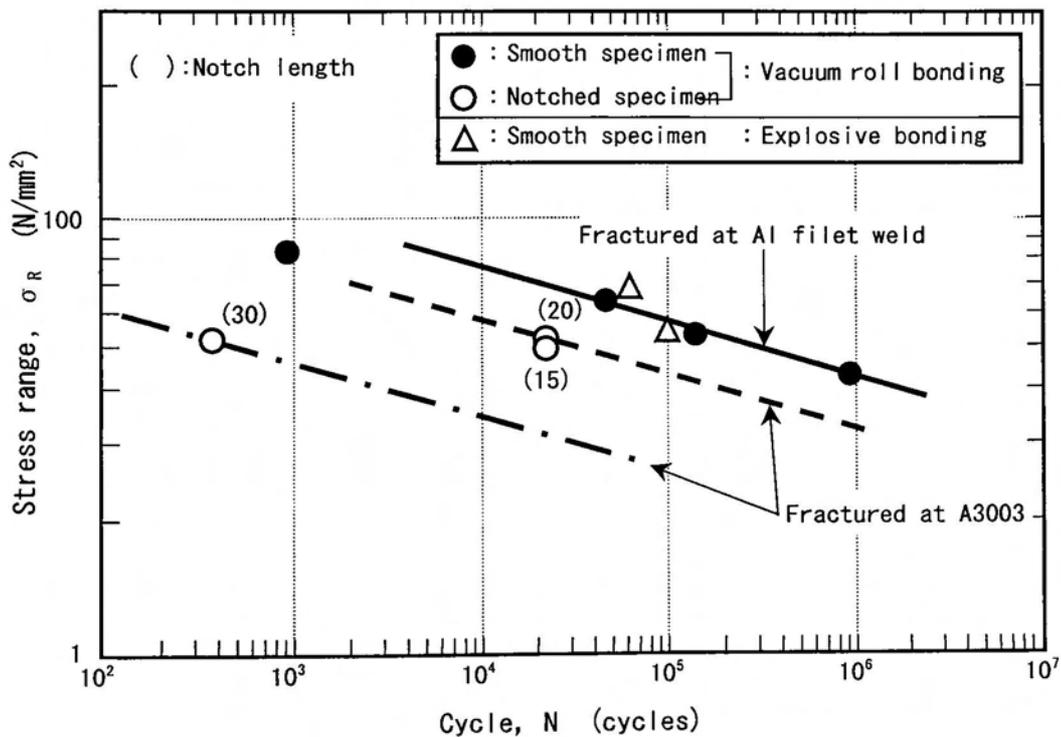


図 5.11 十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果

5.4 結言

本章では、球形タンク方式 LNG 船のタンクスカート部へ、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を STJ として適用するために、A3003 と SUS304L の被接合面の粗さ及び圧下率を変えて Al/SUS クラッド材を製作し、それらを用いて実機溶接条件で十字すみ肉溶接継手を製作し、その破壊強度及び破断形態について検討・考察した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 被接合面を▽▽▽仕上げで圧下率 22 及び 14%と、被接合面を鏡面仕上げで圧下率 22%の条件で製造した Al/SUS クラッド材の STJ は、A3003 母材の引張強さ程度、すなわち、室温で約 110N/mm^2 及び -165°C で約 150N/mm^2 の接合部強さを有していることが確認できた。
- 2) 上記3種類の Al/SUS クラッド材の STJ の接合部強さは、球形タンク方式 LNG 船のタンクスカートの過大に見積った設計応力に対して、室温で約 2.8 倍、 -165°C で約 3.8 倍の安全率を有していた。
- 3) 被接合面を鏡面仕上げで圧下率 14%の条件で製造した Al/SUS クラッド材の STJ の疲労き裂は、接合界面を進展せず、十字すみ肉溶接継手では疲労荷重に対して接合界面が溶接継手の最弱部とならないことが明らかとなった。Al/SUS クラッド材と爆着材の STJ の十字すみ肉溶接継手は、同等の疲労強度を有することが確認できた。
- 4) 以上により、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ は、球形タンク方式 LNG 船のタンクスカート部に破壊強度の観点から実用可能であると判断できる。

第6章 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の LNG 船 タンクスカート部への適用

6.1 緒言

従来にない新しい材料を大型構造物の構造用材料として適用するためには、大型構造物の供用期間中及び組立作業中の健全性及び信頼性の観点から、新材料には次に示す三つの課題を満たすことが要求される。

第一の課題は、新材料の製造法が常に健全な材料を製造できる信頼性の高い製造法であること

第二の課題は、新材料の諸特性を調査検討し、その諸特性を把握するとともに、新材料が構造用材料としての設計要求強度を満たす健全な材料であること

第三の課題は、新材料が大型構造物の組立現場において、新材料に加えられる各種加工法に対して十分な健全性を有すること

これらの課題に対し本研究では、まず、第一の課題を解決するために、大型の真空圧延接合装置を試作し、LNG 船の適用材料である A3003 と SUS304L を用い、接合部強さが高く信頼性の高い Al/SUS クラッド材が得られる接合条件を明らかにした。次に第二の課題を解決するために、Al/SUS クラッド材の接合界面の微細観察を行い、接合メカニズムを明らかにするとともに、Al/SUS クラッド材の熱処理特性と熱処理による接合界面の組織変化を明らかにした。また、Al/SUS クラッド材が LNG 船のタンクスカート部の STJ として適用されることを想定し、実機モデルの十字すみ肉溶接継手の破壊試験を行い、破壊強度の観点から Al/SUS クラッド材は、LNG 船のタンクスカート部に実用可能であることを示した。

そこで、本章では残された第三の課題である大型構造物の組立現場における各種加工法に対する健全性、すなわち、LNG 船タンクスカート部の組立工程の中で、Al/SUS クラッド材の STJ に対し最も厳しい加工と考えられる十字すみ肉溶接時における健全性について検討を進め、さらに、Al/SUS クラッド材を始めて大型構造物に適用する場合の信頼性の高い STJ の製作方法について述べるとともに、タンクスカート部への適用位置とタンクスカート構造の信頼性について述べ、最後に、Al/SUS クラッド材の STJ の実機適用状況について述べる。

6.2 アルミニウム球形タンクスカート部の製作方法

図 6.1 に、アルミニウム球形タンクの概要とそれを構成する部材の造船現場で用いられている製作手順書を示す。アルミニウム球形タンクは、直径 39460mm、重量 820 t で、

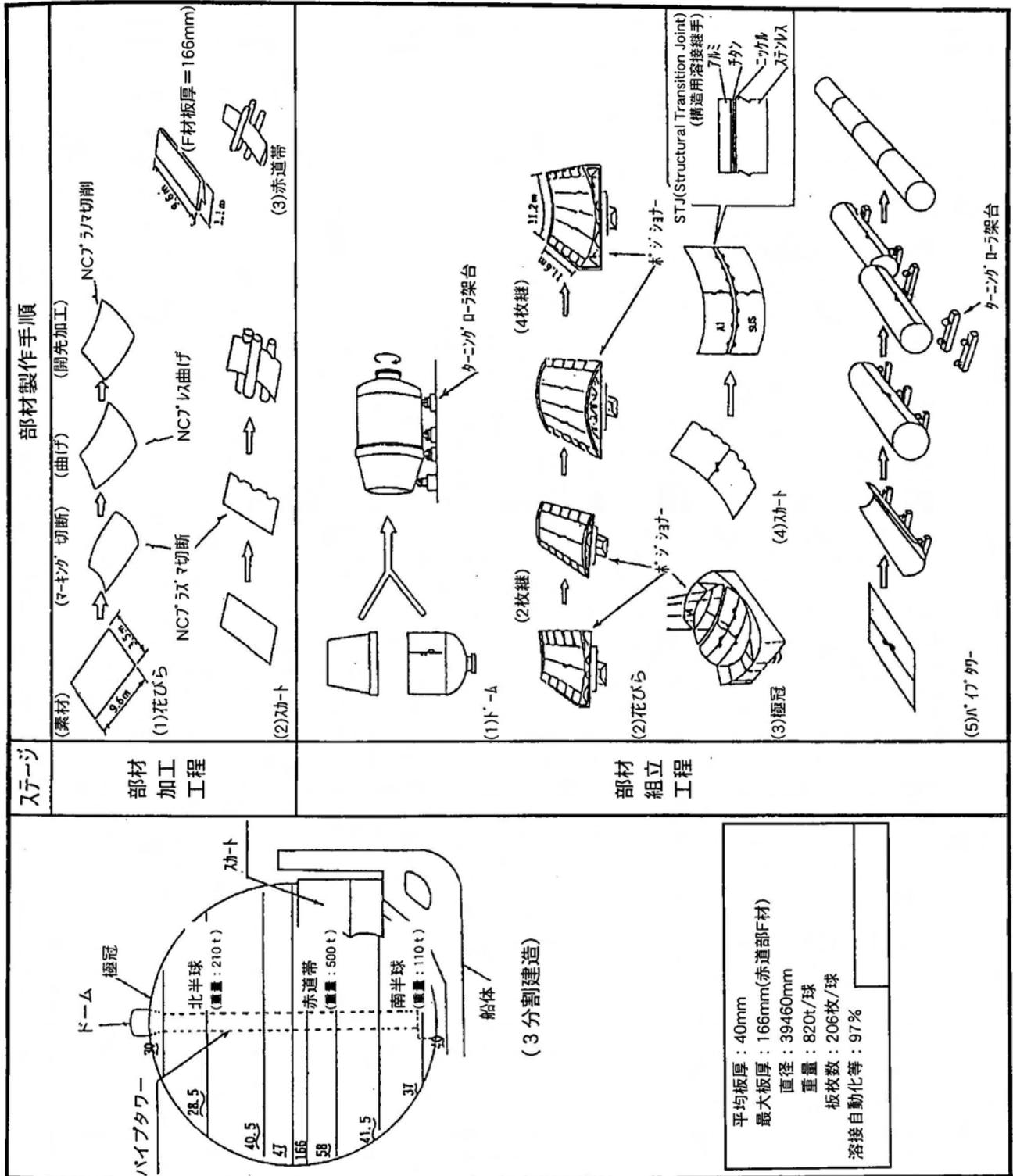


図6.1 アルミニウム球形タンク部材の組立工程 (製作手順書)

アルミニウム合金 A5083 で作られており、平均板厚は 40mm、最大板厚は赤道部のスカート付根に当る位置で 166mm である。重量 210t の北半球、500t の赤道体、110t の南半球の 3 個の大型ブロックを地上で製作し、これらをドック内の LNG 船の船体に搭載する 3 分割建造方式が採用されている。LNG 船には 4 又は 5 個のアルミニウム球形タンクが搭載される。

アルミニウム球形タンクの部材製作は、部材加工工程と部材組立工程があり、前者では、各部材を構成する A5083 板のマーキング、切断、曲げ加工及び板端部の溶接開先加工が行われ、後者では、溶接開先加工された各部材の板を組合せ、ドーム、花びら、極冠、スカート及びパイプタワーの各部材の溶接組立が行われる。

図 6.2 に、造船現場で用いられているタンクスカート部の製作手順書を示す。タンクスカート部は、長さ 10170mm、幅 1943mm、厚さ 60.5mm の A5083 厚板と、長さ 10170mm、幅 2600mm、厚さ 43mm の SUS3304 厚板及び長さ 2420mm、幅 135mm、厚さ 37mm の STJ で構成されている。材料搬入後、A5083 と SUS304 の厚板の端面をプラズマ切断で寸法を整えるとともにスカラップ切断し、ローラ曲げ加工装置で所定の曲げ半径に加工した後、2 枚継の板継溶接を行う。板継溶接された SUS304 板材を垂直に立て、幅方向曲げ加工が施された STJ と組合せ、下向すみ肉溶接でスカート下部部材を製作する。次にスカート下部部材を反転させ、板継溶接後の A5083 厚板と STJ を下向すみ肉溶接で接合しタンクスカート部材を製作する。このタンクスカート部材同士を総組工程で溶接組立を行うとともに、アルミニウム球形タンクの赤道帯と溶接接合し、タンクスカート部を製作する。

6.3 タンクスカート組立時における十字すみ肉溶接の接合界面への影響

6.2 節で述べたように、STJ はタンクスカート部材と十字すみ肉溶接で接合される。この時、溶接入熱及び溶接時に発生する熱応力によって接合界面とその端部が影響を受けると予想される。ここでは、その影響の程度及びその対策について検討する。

6.3.1 すみ肉溶接入熱の接合界面への影響

図 6.3 に、十字すみ肉溶接時の STJ の接合界面の温度計測における試験片形状と温度計測位置及びその結果を示す。温度計測に用いた Al/SUS クラッド材の STJ は、長さ 350mm、幅 130mm、厚さ 36mm (A3003 の厚さ 11mm、SUS304L の厚さ 25mm) で、A3003 側の長手方向を斜めに研削し、片側の A3003 の厚さを 0mm、もう一方の側の厚さを 11mm とした。十字すみ肉溶接時の接合界面の温度を推定するために、STJ の SUS304L 側に直径 2mm、深さ 24 及び 20mm の穴を明け、その中に熱電対をさし

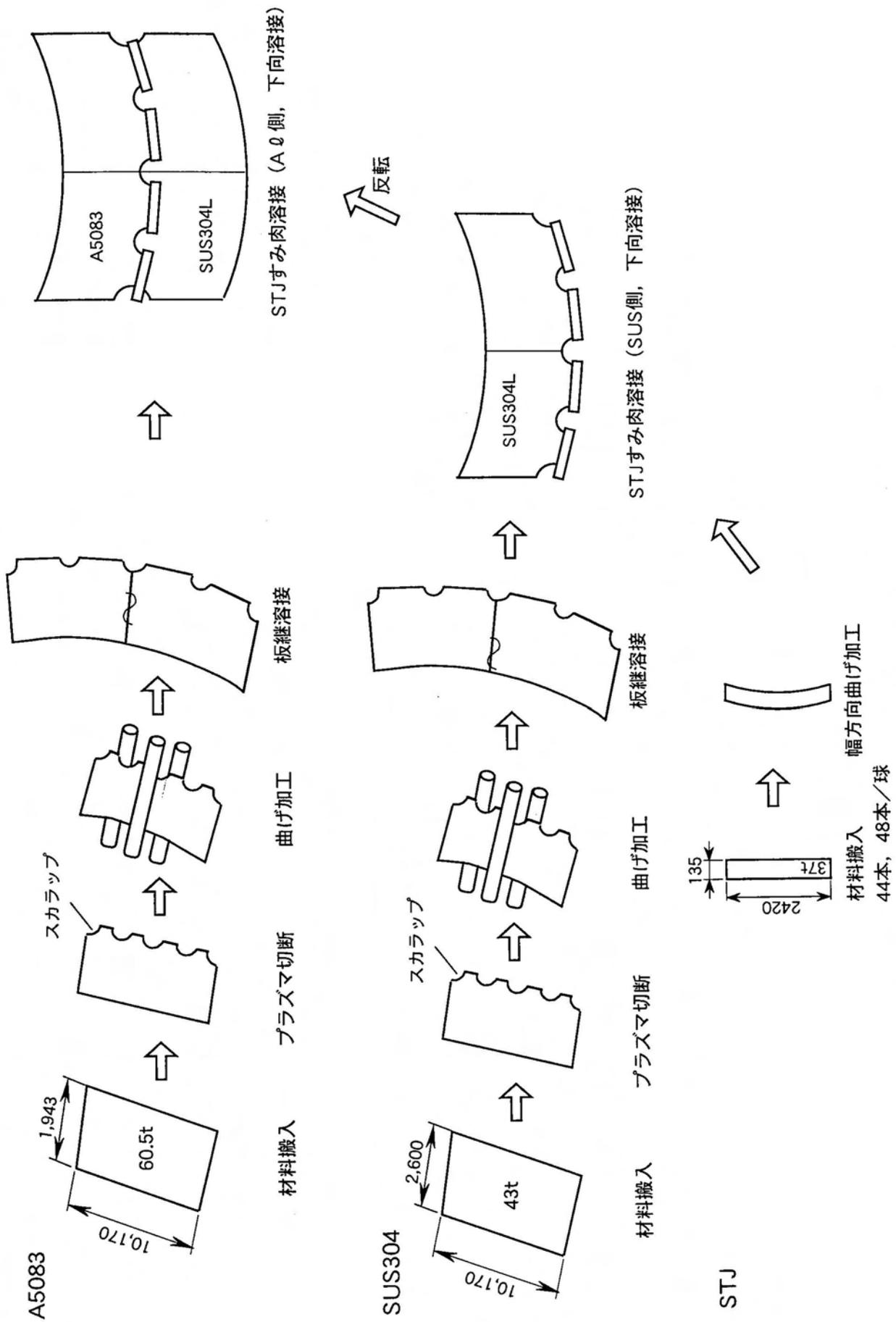
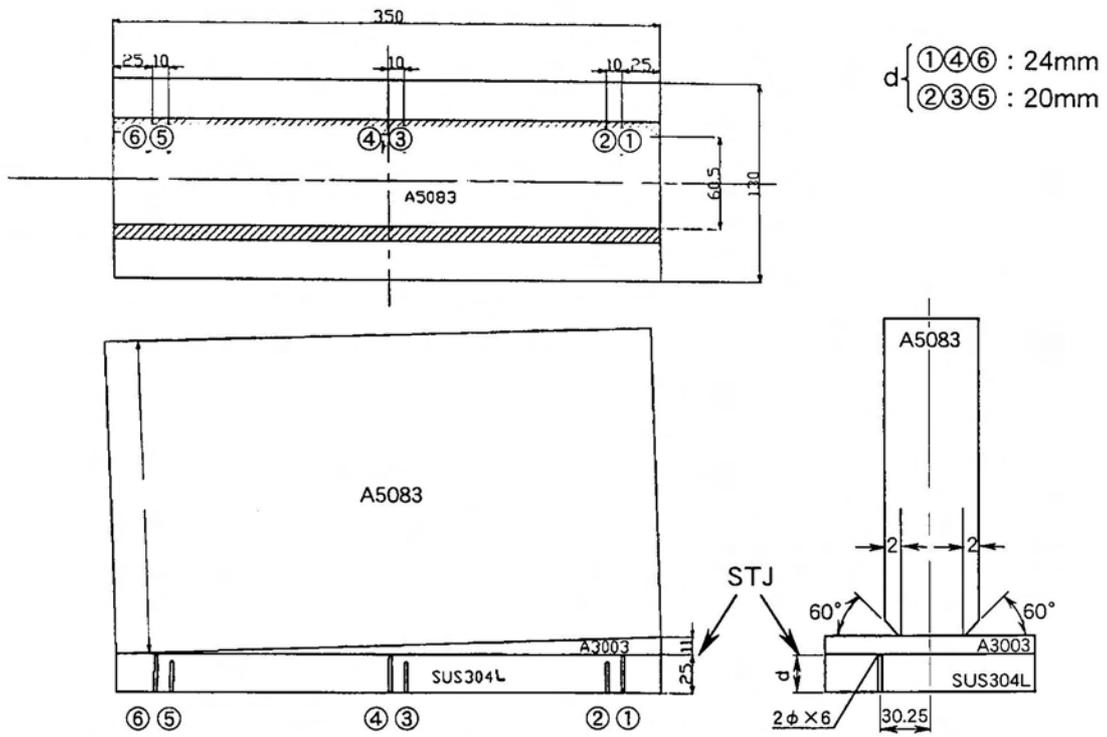
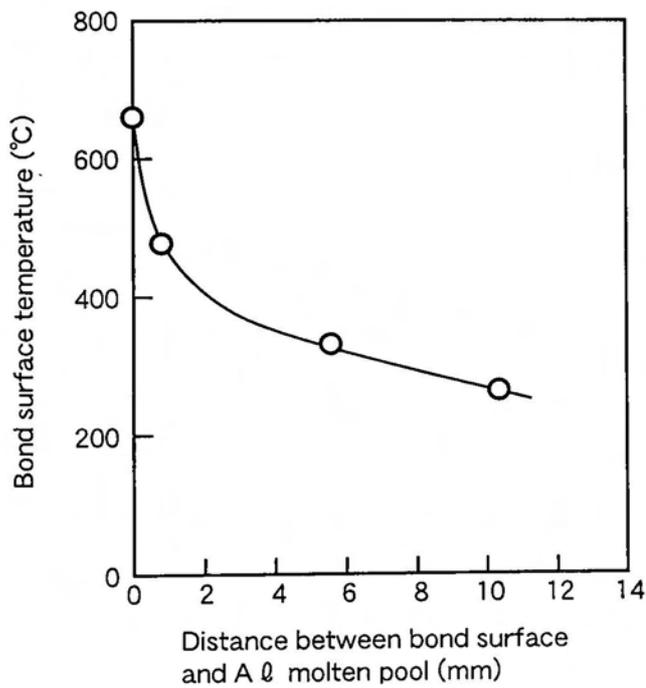


図6.2 タンクスカート部材の組立工程 (製作手順書)



(a) Test specimen for temperature measurement of STJ bond boundary



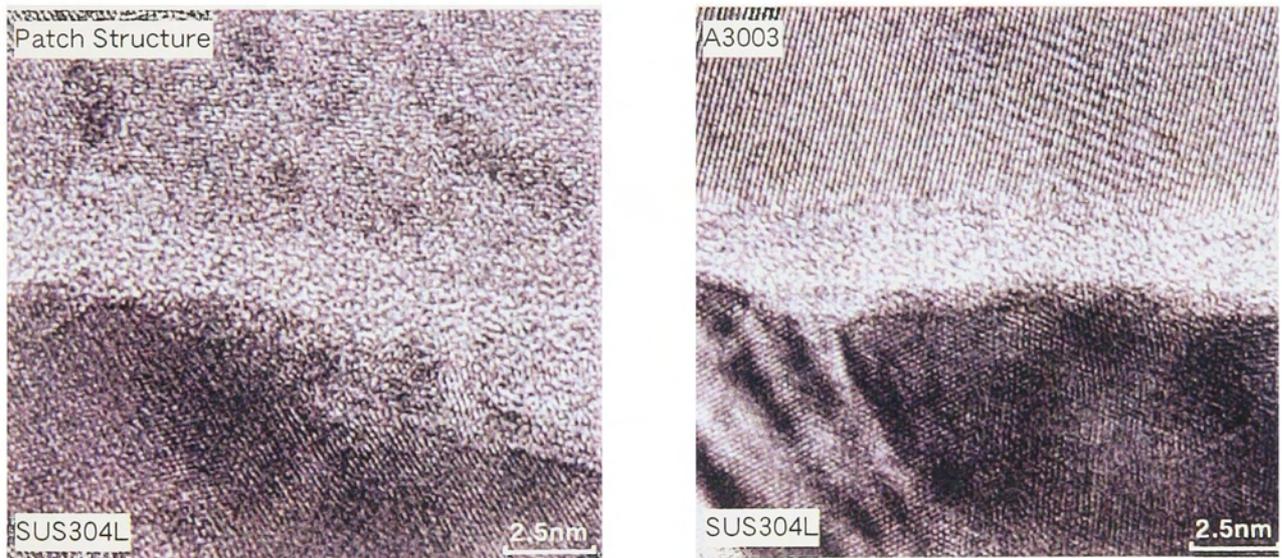
(b) Test result

図6.3 STJの接合界面の温度計測試験方法とその結果

込み、接合界面から1及び5mmの位置の温度を計測した。このSTJと、長さ350mm、幅200mm、厚さ60.5mmのA5083を用いて十字すみ肉溶接のアルミニウム側すみ肉溶接を行った。溶接条件は実機の十字すみ肉溶接に用いられている、溶接電流290A、溶接電圧30V、溶接速度52cm/min、溶接入熱10.04kJ/cmを採用した。

溶接後、温度計測点を切り出し、接合界面と温度計測点の距離及びすみ肉溶接の溶融境界と接合界面の距離を計測し、温度計測点の最高到達温度との関係を調査した。図6.3(b)に示すテスト結果によれば、接合界面とすみ肉溶接の溶融境界との距離が大きくなれば、急激に接合界面の最高到達温度は低下し、2mmで約400℃、6mmで約320℃、10mmで約260℃となることがわかる。

図6.4に、接合境界とすみ肉溶接の溶融境界との距離が2mmの位置の接合界面のTEM像を示す。接合界面の最高到達温度は約400℃であり、接合界面の組織は第3章で示した接合まま材と同じであり、溶接入熱による影響は認められない。



[Bonded surface temperature : about 400℃]

図6.4 すみ肉溶接の溶融境界から2mmの位置の接合界面のTEM像

Al/SUSクラッド材のSTJを実機LNG船に適用する場合、A3003の厚さは10mmを想定しており、タンクスカート部の十字すみ肉溶接施工時の溶接入熱により、接合界面の組織は影響を受けることはないと考えられる。

6.3.2 すみ肉溶接時のSTJ接合界面端部に生じる熱応力の低減

十字すみ肉溶接施工時には、すみ肉溶接金属の収縮によってSTJの接合界面をはく離

させる方向に溶接熱応力が発生し、場合によってはSTJ端部の接合界面にはく離が生じ、浸透探傷検査でき裂として検出されることがある。このSTJ端部の接合界面に作用する溶接熱応力は、STJ端部とすみ肉溶接ビードとの距離が短いほど大きくなる傾向にあり、従来からSTJの適正な幅が検討されてきた。

ここでは、この界面端部に作用する溶接熱応力を低減させるSTJの新しい形状を提案し、その有効性をFEM解析で検証した結果について述べる。

図6.5に、従来型と新型のSTJの形状を示す。新型のSTJでは、界面端部に生じる溶接熱応力の低減を目的として、STJ端部のA3003側に厚さ3mmの平行部(幅 Δl)を設け、半径7mmのアール加工を施した。次にこの平行部の幅 Δl をパラメータ($\Delta l = 3, 10$ 及び 15.25mm)としてFEM解析を実施した。図6.6に、FEMモデルを示す。溶接部の収縮挙動モデルとして、図中A3003側すみ肉溶接止端部のA点の中心側1mmの位置に強制変位を与えた。異材接合界面の端部近傍では応力特異場が生じる²⁹⁾ため、界面端部近傍のFEMメッシュ分割の最小寸法は0.1mmとした。計算コードはNASTRANを用い、FEM弾性解析を行った。

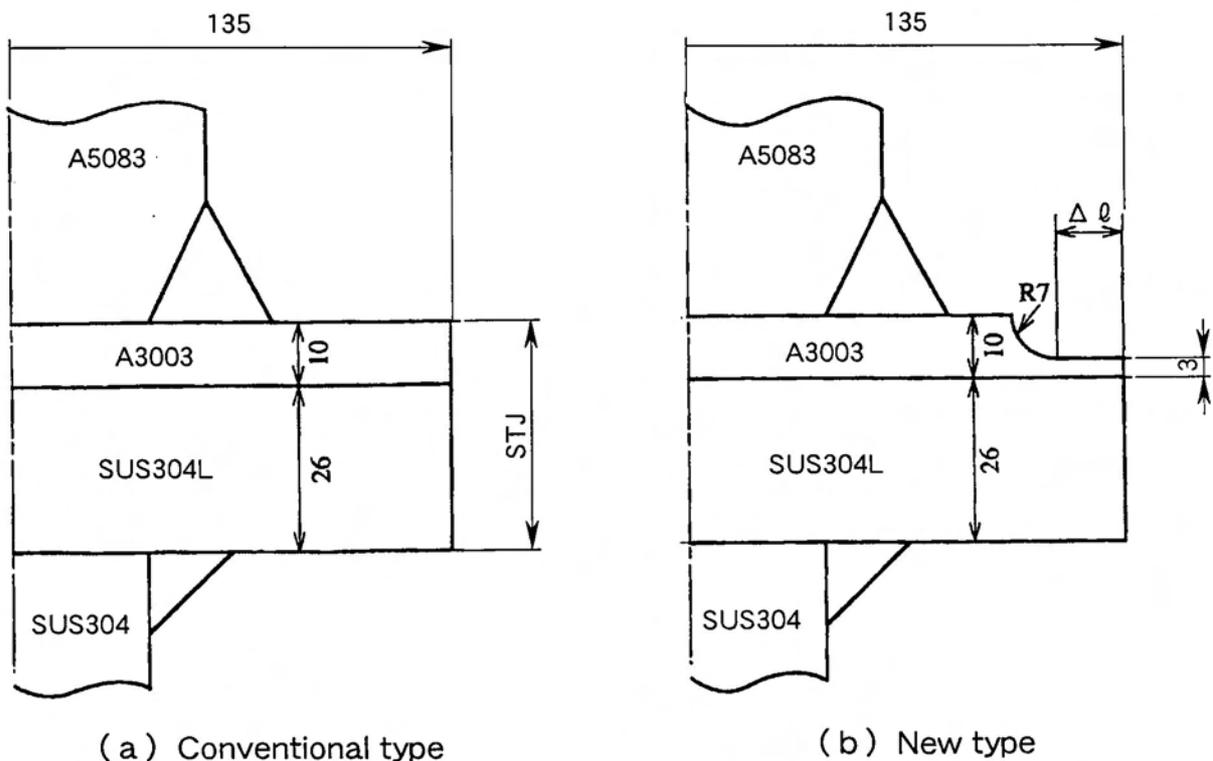


図6.5 すみ肉溶接の熱応力を低減した新しいSTJの形状

図6.7に、FEM解析結果を示す。アール加工を行わない場合には、界面端部に近づくにつれて軸方向応力は大きくなる。異材接合界面の弾性解析では、この軸方向応力は界面

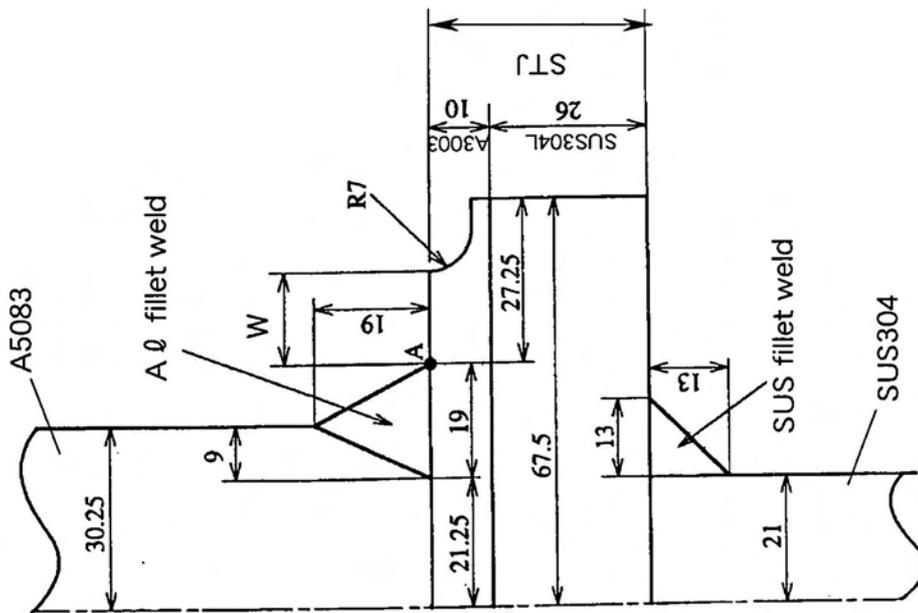
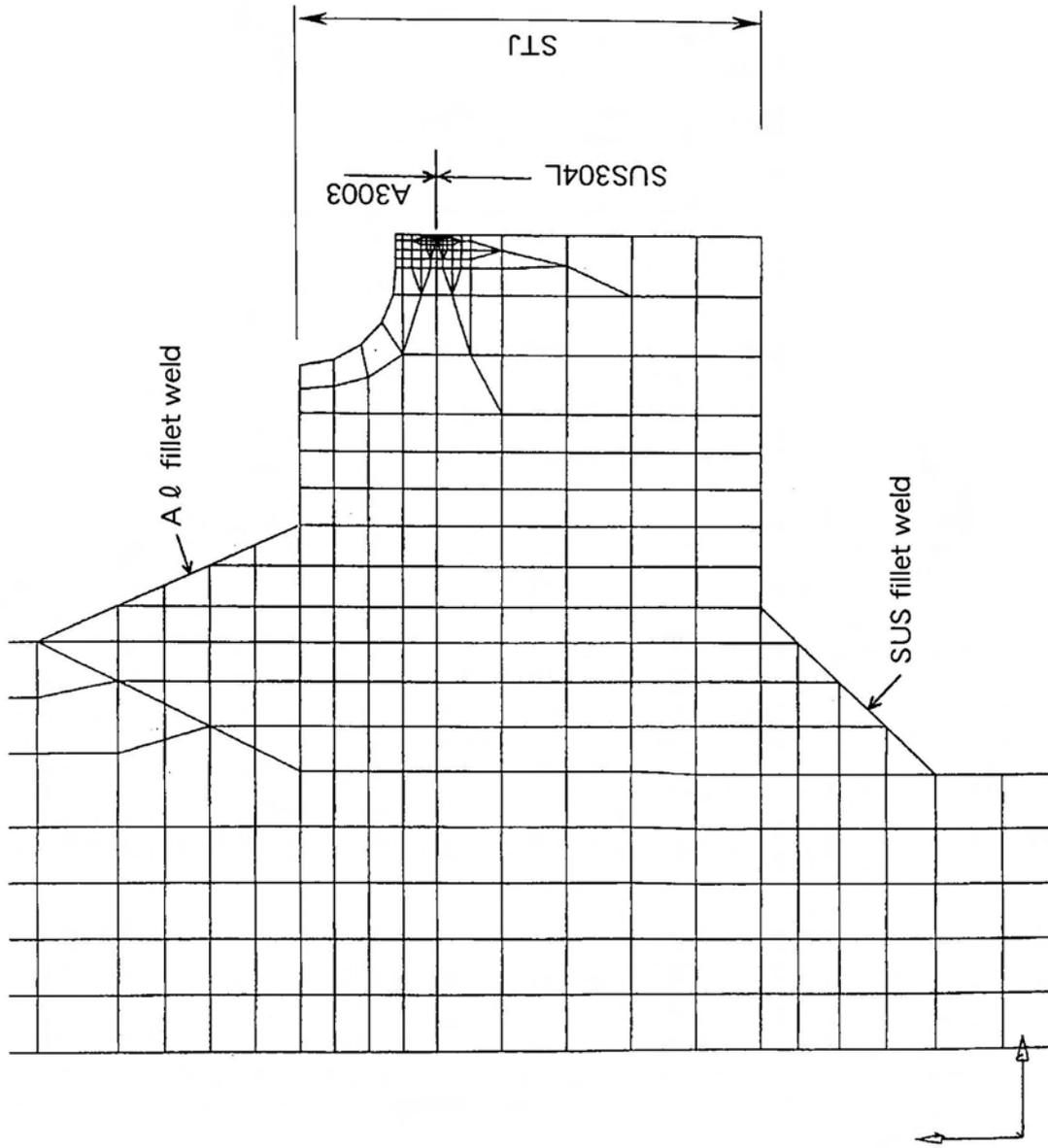
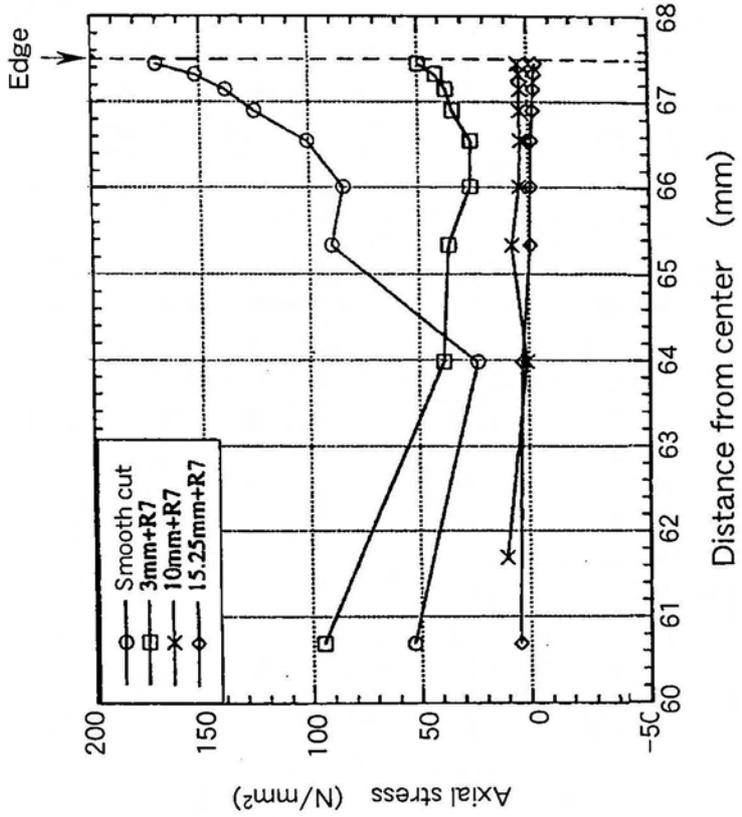
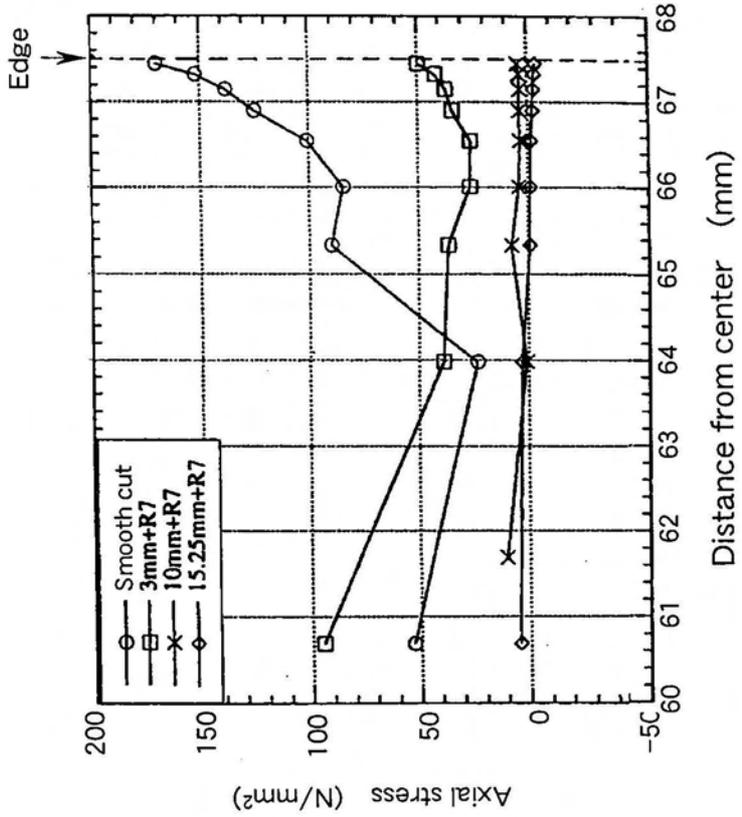


図6.6 FEM解析モデル



(a) Distance from center : 0~67.5mm



(b) Distance from center : 60~67.5mm

図6.7 すみ肉溶接後の接合界面の熱応力分布

端部に近づくとつれて無限大に発散する応力特異性を有する。一方、アール加工の平行部の幅が大きくなるにつれて軸方向応力は小さくなり、アール加工の幅が 10 及び 15.25mm では界面端部に作用する軸方向応力はほとんどゼロになる。

以上の結果より、実機の STJ では平行部の幅 10mm で 7mm のアール加工を施すことで、十字すみ肉溶接時の界面端部に作用する熱応力を大幅に低減することができた³⁰⁾。

6.4 AI/SUS クラッド材の STJ の製作とそれを適用したタンクスカート部の信頼性

真空圧延接合法による AI/SUS クラッド材は、これまで高い信頼性が要求される大型構造物の一部材として使用された実績はない。このため本材料を今後 LNG 船のタンクスカート部の STJ として多くの船に適用して行くためには、まず本材料が従来の爆着材による STJ と同等の高い信頼性を持つ製品であることを証明するとともに、実機でそれを検証し、世界に認めてもらう必要がある。それにはまず、実機 LNG 船のタンクスカート部の一部に真空圧延接合法による AI/SUS クラッド材の STJ を試験的に適用し、LNG 船を運行することで信頼性の高い材料であることを証明するとともに、本 STJ の適用実績を積むことが必要である。

ここではまず、試作した大型の真空圧延接合装置で製作した AI/SUS クラッド材から、試験的に適用する STJ の信頼性の高い製法について述べ、次に、タンクスカート部への適用位置とタンクスカート構造の信頼性について述べる。

6.4.1 AI/SUS クラッド材の STJ の製作

試作した大型の真空圧延接合装置で製作した AI/SUS クラッド材を、信頼性の高い STJ に加工し製品とするためには、高い接合部強さが得られる接合条件を選定するとともに、その条件で得られた AI/SUS クラッド材の接合部強さ分布を把握し、規格値以上の接合部強さが得られる範囲を確実に選定し、切り出し加工を行う必要がある。そこで、長さ 1000mm、幅 155mm、厚さ 11mm の A3003 と、長さ 1000mm、幅 155mm、厚さ 25.5mm の SUS304L を用いて、接合温度 500℃、圧下率 14% の接合条件で AI/SUS クラッド材を製作し、接合まま材の接合部強さ部分を調査した。

図 6.8 に、長手方向の接合部強さ分布を示す。接合部強さは、圧延接合開始側から 150mm の間と圧延接合終了側から 100mm の間で低く、中央部ではほぼ一定の高い値を示すことが分かる。このため、STJ は、圧延接合まま材の AI/SUS クラッド材の中央部分から 725mm 及び 735mm 長さを採用することとした。

図 6.9 に、幅方向の接合部強さ分布を示す。この図から、接合まま材の幅方向端部は接合していないこと及び両側から中央にかけて接合部強さが増加し、中央約 138mm 幅が

STJの規格 $98\text{N}/\text{mm}^2$ を越えることが分かる。また、このSTJの規格を越える幅は、各接合まま材ごとに異なり、その幅は長手方向に変化する傾向にあった。爆着材のSTJと同じ 135mm 幅を安定的に得るためには、さらに圧延荷重を増加し板幅を広くするか圧下率を増加することが必要であるが、本装置では、この接合条件が限界であった。

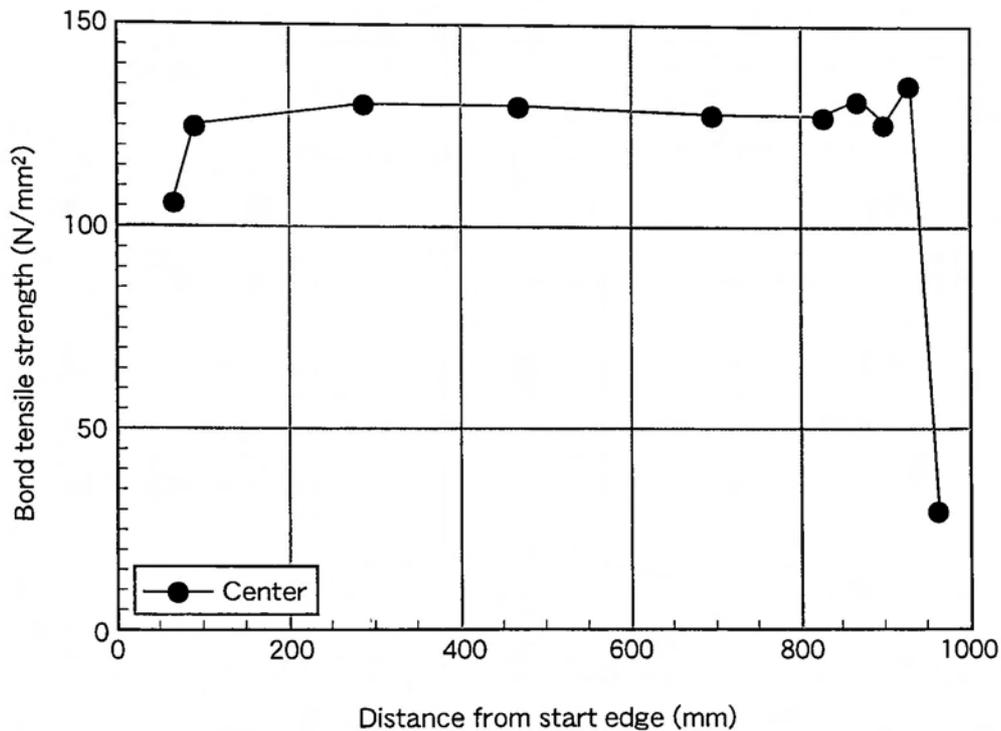


図6.8 Al/SUSクラッド材の長手方向における接合部強さ分布

このため、接合条件をそのままにして、幅 135mm に近い寸法で信頼性の高いSTJを製作する手法を検討した。図 6.9 において、接合まま材の接合部強さが中央に向って増大する左及び右側部分の引張試験片の破断面観察を行った結果、この部分はいずれも接合界面破断で、A3003 と SUS304L の接合領域と密着領域が複雑に混合して観察され、さらに中央になるほど接合領域が増大していた。これは、中央に向って接合部強さが増大することと対応していた。一方、中央約 138mm 幅の高強度域では、基本的に A3003 母材破断となっていた。すなわち、接合まま材の幅方向には外側から中心に向って、密着領域、(密着+接合)領域及び接合領域の3つの領域が存在することが明らかとなった。これらの領域を区別するため超音波探傷検査及び浸透探傷検査を試みたが、いずれも単独ではこれらの領域を明確に区別することはできなかった。

図 6.10 に、欠陥先端部への応力負荷試験方法を示す。この手法は、欠陥先端部に応力を負荷し欠陥を人工的に開口させ、その後、浸透探傷検査(以下、PT 検査と記す)で欠陥を検出する方法である。まず、接合まま材を圧延接合開始側から 250mm 及び 700mm の

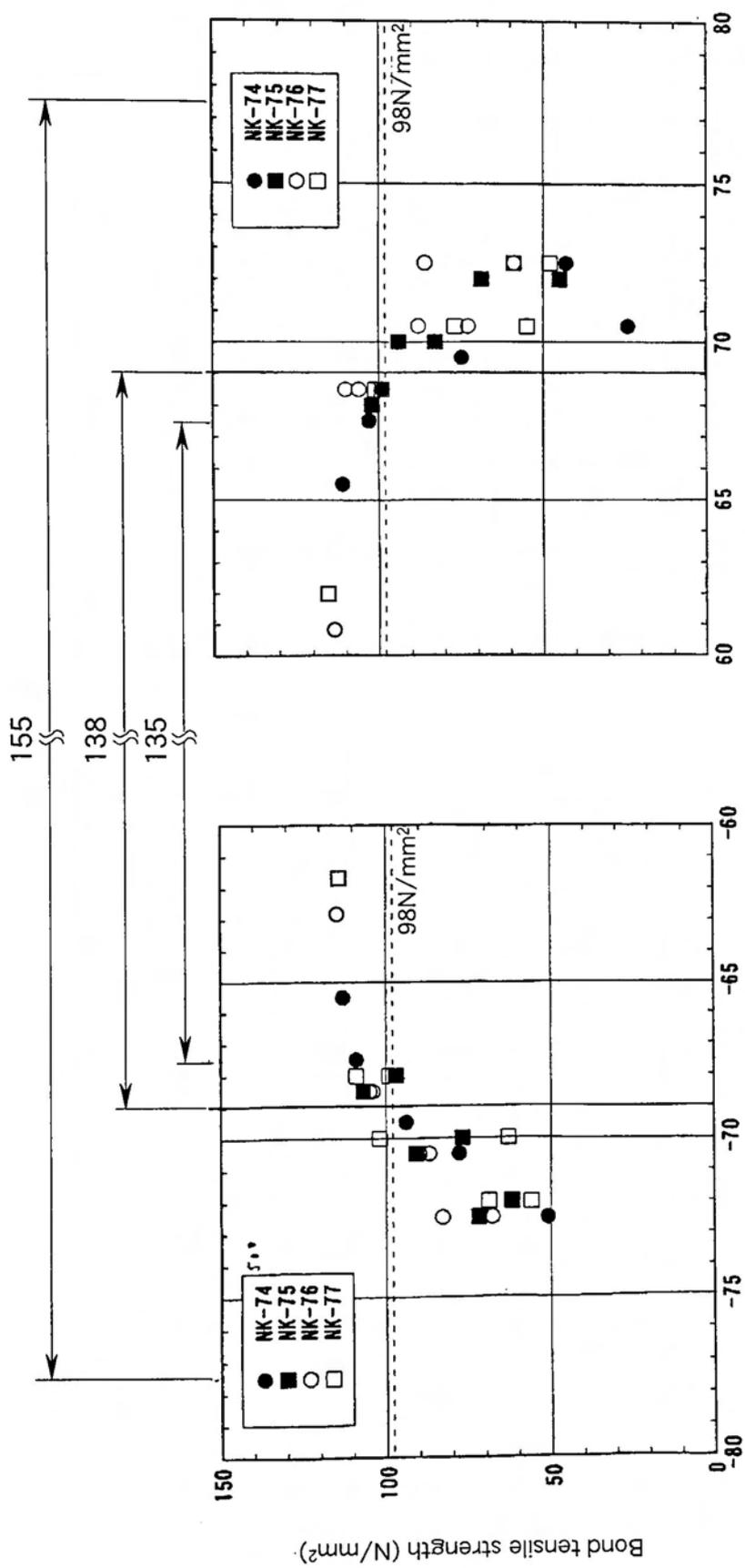
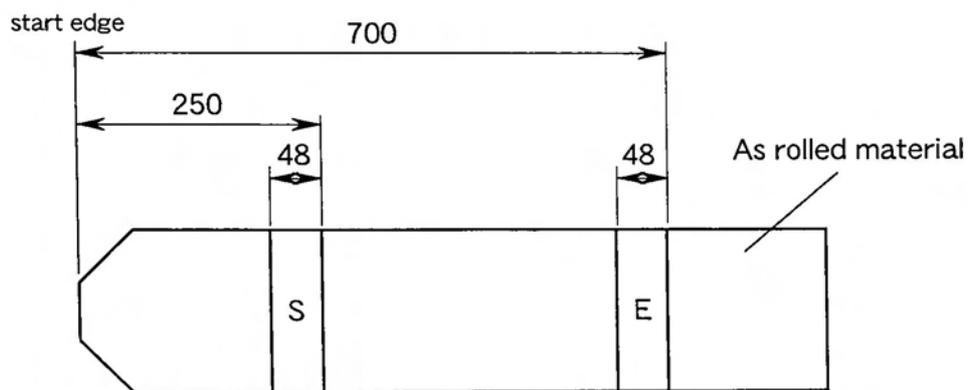
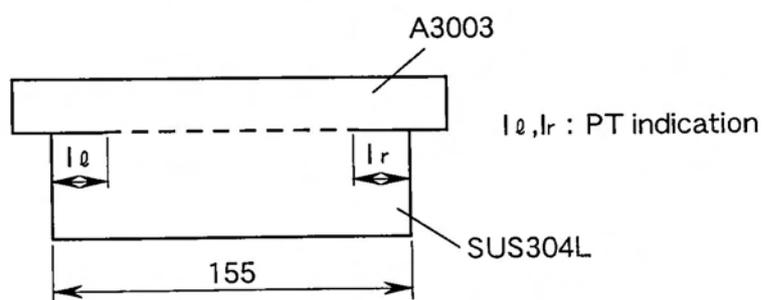


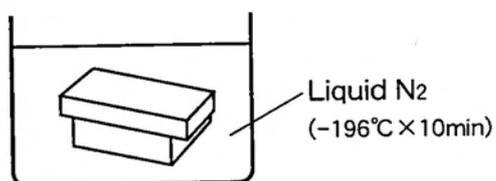
図6.9 Al/SUSクラッド材の幅方向における接合部強さ分布



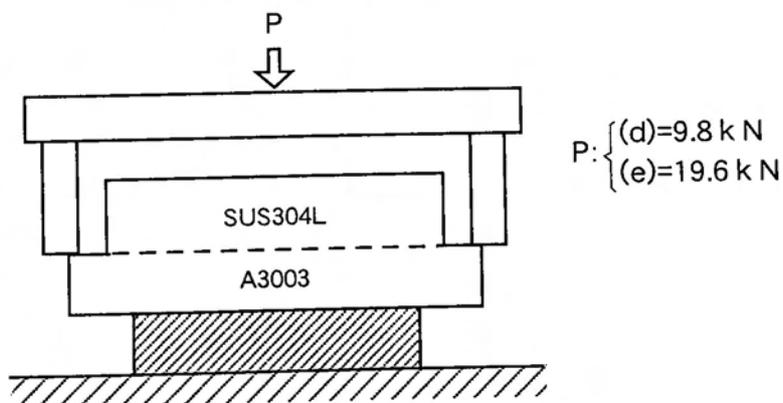
(a) Cutting



(b) Micro grinding and PT



(c) Dipping in liquid N₂ and PT



$P: \begin{cases} (d)=9.8 \text{ kN} \\ (e)=19.6 \text{ kN} \end{cases}$

(d), (e) Loading and PT

図6.10 応力負荷試験方法

の位置で幅 48mm の試験片を切り出し、片面をエメリー紙で 600 番まで精密研磨し、PT 検査を行った。次に、液体窒素(-196℃)の中に 10 分間浸漬し、A3003 と SUS304L の熱膨張差を利用して、欠陥を開口させ PT 検査を行った。さらに、その試験片を欠陥が開口する向きに荷重 9.8kN を負荷し PT 検査を行い、その後、さらに荷重 19.6kN を負荷し PT 検査を行った。

表 6.1 に、応力負荷試験後の PT 検査結果を示す。この表から、応力負荷前の指示模様長さは、-196℃の熱応力負荷により大きく進展し、その後の荷重 9.8kN 及び 19.6kN の負荷では指示模様長さは増加しないことが確認された。これらのデータから、接合健全部の界面破壊靱性値(Kc)を推定した結果、9.8kN 負荷時で Kc 値は 1.6~2.2MPa√m、19.6kN 負荷時で Kc 値は 3.1~4.3MPa√mであり、19.6kN 負荷によって割れが進展しないことから、接合健全部の界面破壊靱性値は 3.1MPa√mより高い値を持つことが明らかになった。

表 6.1 応力負荷試験後の PT 指示模様長さ

Specimen No.			PT indication length (mm)			
			(b) Load=0	(c) Load=-196℃	(d) Load=9.8kN	(e) Load=19.6kN
1	1-S	I _L	2.0	7.0	7.0	7.0
		T _R	6.0	7.5	7.5	7.5
	1-E	I _L	1.0	8.0	8.0	8.0
		T _R	0.0	8.0	8.0	8.0
2	2-S	I _L	0.0	7.0	7.0	7.0
		T _R	1.5	7.5	7.5	7.5
	2-E	I _L	3.0	7.5	7.5	7.5
		T _R	0.0	8.0	8.0	8.0
3	3-S	I _L	3.0	6.5	6.5	6.5
		T _R	3.0	7.5	7.5	7.5
	3-E	I _L	4.0	7.5	7.5	7.5
		T _R	4.0	8.0	8.0	8.0

以上の検討結果をもとに、試作した大型真空圧延接合装置による Al/SUS クラッド材からの健全な STJ 製作要領を以下に示す。

- ①圧延接合後，長手方向の“そり”を矯正する。
- ②前後部を切り落した後，長さ 725mm 及び 735mm，幅 155mm の状態で液体窒素の中に浸漬し， -196°C ×10 分の熱サイクル負荷を行う。
- ③熱サイクル負荷後，幅 135mm まで機械加工し，側端部を精密研磨し PT 検査を行う。PT 指示模様が発生したものは不合格とする（ -196°C の熱サイクル負荷により，板幅 135mm まで割れが進展した場合）。
- ④幅 132mm まで最終機械加工を行い，再度精密研磨し PT 検査を行う。PT 指示模様が発生したものは不合格とする。その後，7mm のアール加工を行い健全な STJ として造船工場に納入する。
以上の製作工程により，長さ 725mm 及び 735mm，幅 132mm，厚さ 35.5mm の Al/SUS クラッド材の STJ を製作することとした。

6.4.2 タンクスカート部への適用位置とタンクスカート構造の信頼性

真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を適用するアルミニウム球形タンクは、LNG 船の5つのアルミニウム球形タンクの内、運航中最も大きな加速度がかかる最も使用環境の厳しい No.1 タンクと、それに次ぐ No.2 タンクとした。図 6.11 に、No.1 及び No.2 タンクにおける Al/SUS クラッド材の STJ の適用位置を示す。適用本数は、No.1 及び No.2 タンクともに、タンクの0度の位置に6本、90度の位置に6本の合計24本である。この内0度の位置は、タンク内で垂直の加速度が最も大きくなる位置であり、90度の位置はタンク内で横方向の加速度が最も大きくなる位置である。なお、No.1 タンクには長さ725mm、No.2 タンクには長さ735mmの Al/SUS クラッド材の STJ を適用した。

次に、使用実績のない真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を適用したタンクスカート部の信頼性を評価した。これは、新たに適用した STJ が万一破損した場合のタンクスカートのタンク支持強度について検討したものである。

1) 検討条件

(a) 損傷条件

Al/SUS クラッド材の STJ の損傷は、最も厳しい場合として全数が全面はく離した状態を想定する。Al/SUS クラッド材の STJ 適用位置は図 6.11 に示すとおりである。

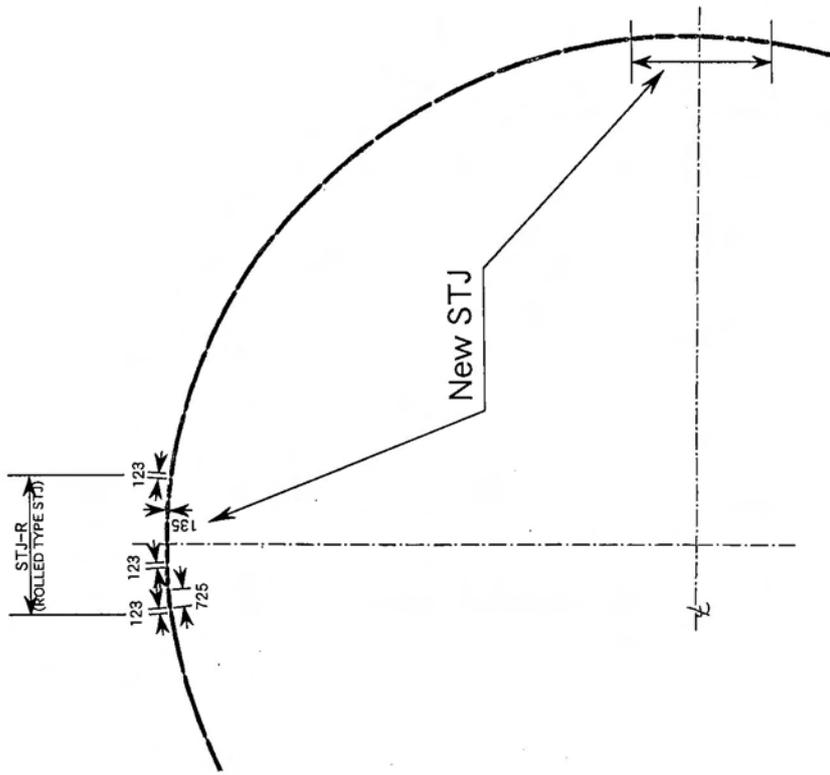
(b) 荷重条件

アルミニウム球形タンクの設計に用いた最も厳しい荷重、すなわち船の一生に一度レベルの荷重を想定する。検討に用いた加速度を表 6.2 に示す。

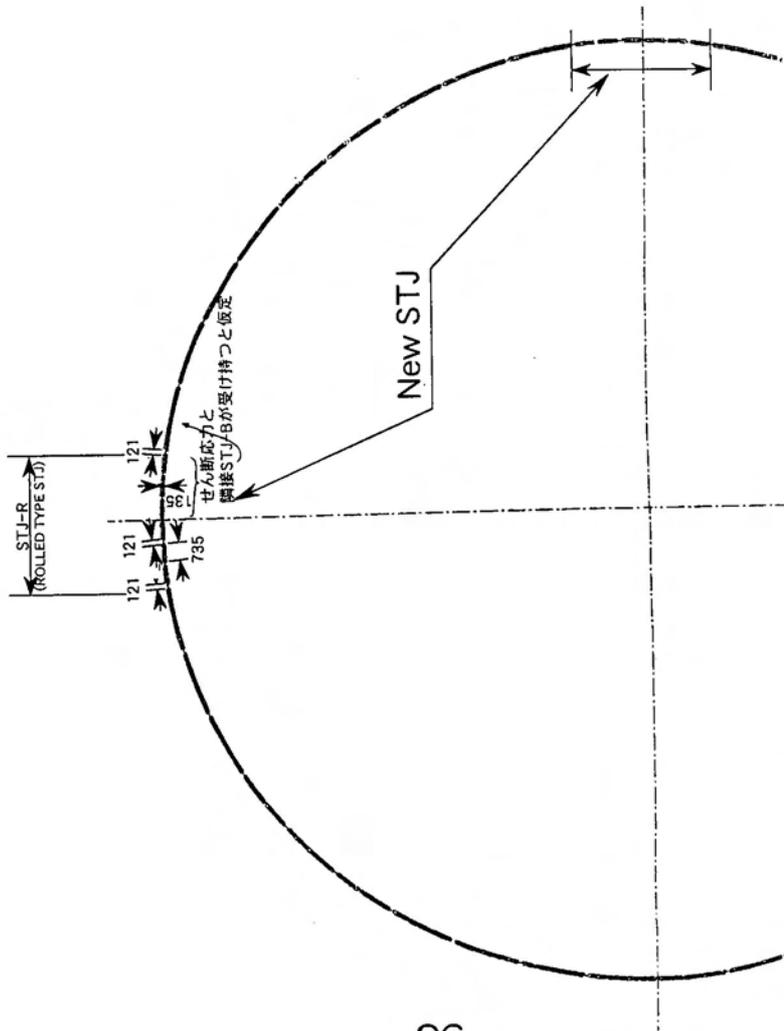
表 6.2 設計加速度

	No. 1 TK	No. 2 TK	No. 5 TK
Vertical Accelerations : a_t/g	0.746	0.540	0.510
Transveres Accelerations : a_v/g	0.589	0.554	0.558
Longitudinal Accelerations : a_x/g	0.192	0.184	0.192

(any one tank empty condition)



b) No.2 Tank



a) No.1 Tank

図6.11 Al/SUSクラッド材のSTJの実タンクへの適用位置

(c) STJの強度

爆着法によるSTJの保証強さを表6.3に示す。

表 6.3 爆着法のSTJの保証強さ

	Guarantee
Tensile Strength (N/mm ²)	98
Shear Strength (N/mm ²)	78.4

2) 応力評価

Al/SUS クラッド材のSTJの非損傷時におけるSTJ近傍の応力を表6.4及び表6.5に示す。

(a) 軸応力

上下方向の軸応力は積荷自重が支配的であり、あらゆる荷重条件において引張応力が生ずることはない。ただし、空タンク時に限り船体とタンクとの相互作用により引張応力を生ずる。しかし、その場合でも応力は高々6.9N/mm²であり、強度上問題とはならない²⁷⁾。

すなわち、真空圧延接合法によるAl/SUSクラッド材のSTJの損傷により、他の爆着材のSTJをはく離させるレベルの軸応力増加は発生しない。

(b) せん断応力

せん断応力は、周方向及び半径方向の2種類が考えられるが、半径方向の応力は十分低いと本検討では無視する。また、せん断が最も厳しいNo.2タンクについて検討する。

Al/SUSクラッド材のSTJの破損に伴い、せん断応力の再配分が発生するが、安全側の仮定として、Al/SUSクラッド材のSTJの隣に配置された爆着材のSTJ1個が、Al/SUSクラッド材のSTJ3個のせん断応力を負担すると想定する。

Al/SUSクラッド材のSTJ破損後のせん断応力： τ

$$\tau = 23.03 \times 2 = 46.06 \text{ N/mm}^2$$

ただし、 $\theta = 0 \text{ deg}$

$$\text{安全率} = 78.4 / 46.06 = 1.7$$

ただし爆着材STJのガス長さ

$$\div \text{Al/SUSクラッド材のSTJのガス長さ} \times 3$$

したがって、Al/SUSクラッド材のSTJの損傷後も、隣接爆着材のSTJに作用するせん断応力は十分に低い。

以上のことから、Al/SUSクラッド材のSTJが全数損傷を生じて、アルミニウム球形タンク支持構造は十分な強度を有すると判断できる。

表 6.4 No. 1 タンクの STJ にかかる応力

(a) No. 1 Tank ($\theta = 0 \text{ deg}$)

Mode		Axial	Bending	Shear 1	Shear 2
		1 Full Cargo Weight	-19.01	-	-
Static Stress (N/mm ²)	2 Still Water Bending	-1.76	-	-	-
	3 Stationary TEMP.	-	33.22	2.25	-
Dynamic Stress (N/mm ²)	4 Vertical Acc.	±14.21	-	-	-
	5 Transverse Acc.	-	-	-	±2.29
	6 Longitudinal Acc.	±1.08	-	-	±22.44
	7 Dynamic Bending	±7.06	-	-	-
Stress in STJ (N/mm ²)		-20.84 ±15.88	33.22	Nil	±22.44

(b) No. 1 Tank ($\theta = 90 \text{ deg}$)

Mode		Axial	Bending	Shear 1	Shear 2
		1 Full Cargo Weight	-19.01	-	-
Static Stress (N/mm ²)	2 Still Water Bending	-1.76	-	-	-
	3 Stationary TEMP.	-	33.22	2.25	-
Dynamic Stress (N/mm ²)	4 Vertical Acc.	±14.21	-	-	-
	5 Transverse Acc.	±3.23	-	-	-
	6 Longitudinal Acc.	-	-	-	±7.35
	7 Dynamic Bending	±7.06	-	-	-
Stress in STJ (N/mm ²)		-17.25 ±16.17	33.22	Nil	±7.35

表 6.5 No.2 タンクの STJ にかかる応力

(a) No.2 Tank ($\theta = 0 \text{ deg}$)

Mode		Axial	Bending	Shear 1	Shear 2	
Static Stress (N/mm ²)	1 Full Cargo Weight	-20.78	-	-	-	
	2 Still Water Bending	-1.57	-	-	-	
	3 Stationary TEMP.	-	29.50	2.16	-	
	Dynamic Stress (N/mm ²)	4 Vertical Acc.	± 11.17	-	-	-
		5 Transverse Acc.	-	-	-	± 23.03
		6 Longitudinal Acc.	± 0.98	-	-	-
	7 Dynamic Bending	± 6.86	-	-	-	
Stress in STJ (N/mm ²)		-22.34 ± 13.23	29.50	Nil	± 23.03	

(b) No.2 Tank ($\theta = 90 \text{ deg}$)

Mode		Axial	Bending	Shear 1	Shear 2
Static Stress (N/mm ²)	1 Full Cargo Weight	-20.78	-	-	-
	2 Still Water Bending	1.57	-	-	-
	3 Stationary TEMP.	-	29.50	2.16	-
Dynamic Stress (N/mm ²)	4 Vertical Acc.	± 11.17	-	-	-
	5 Transverse Acc.	± 3.04	-	-	-
	6 Longitudinal Acc.	-	-	-	± 7.64
	7 Dynamic Bending	± 6.86	-	-	-
Stress in STJ (N/mm ²)		-19.21 ± 13.52	33.22	Nil	± 7.64

6.5 LNG 船への試験的適用状況

これまで、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船タンクスカート部の STJ として適用するに当り、造船現場で受ける加工法に対する STJ の健全性について検討を進め、信頼性の高い STJ の製作方法について述べ、さらには実機適用に当たってのタンクスカート構造の信頼性を検討してきた。これらを受け、ここでは試作した大型の真空圧延接合装置を使って Al/SUS クラッド材を製作し STJ に加工した後、実機適用までの状況を各種承認手続きも含め順を追って説明する。

6.5.1 Al/SUS クラッド材の STJ の製造法承認

真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を LNG 船のタンクスカート部の STJ として適用するためには、まず真空圧延接合法の概要及び本法で製造される Al/SUS クラッド材の特性等を船級協会に説明し、船級協会の立会のもとで実際に使われる装置、すなわち、試作した大型真空圧延接合装置で Al/SUS クラッド材を製作し、その接合部強さが規格値を満足することを証明し、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の製造法承認を船級協会から取得する必要がある。この場合、材料製造業者が船級協会に対して製造法案を申請し、承認を取得する形を取る。実機に適用する Al/SUS クラッド材の製作には、試作した大型の真空圧延接合装置を使うため、材料製造業者は三菱重工業株式会社・長崎研究所(以下、長崎研究所と記す。)となる。

表 6.6 は、(財)日本海事協会の船体用 2 層クラッド鋼板の製造法承認書である。2 層クラッド材の組合せは、A3003P と KSUS304L 及び 5083P と KSUS304L である。

表 6.7 は、上記製造法承認を取得するための A3003P と SUS304L を組合せた Al/SUS クラッド材の試験成績書である。接合部強さの評価は、引張試験、せん断試験及び側曲げ試験で行い、いずれの試験も規格値を満足し合格した。

表 6.8 は、ロイド船級協会の真空圧延接合法による 2 層クラッド材(VACCLAD)の製造法承認書を示す。2 層クラッド材の組合せは、LR304L と A3003P である。

表 6.9.1 及び表 6.9.2 は、上記製造法承認を取得するための Al/SUS クラッド材の試験成績書である。接合部の評価は、引張試験(室温及び-196℃)、せん断試験(室温及び-196℃)、側曲げ試験、マクロ試験及び衝撃試験(-196℃のアイゾット衝撃試験)で行い、いずれの試験も規格値を満足し合格した。

表6.6 (財)日本海事協会の船体用2層クラッド鋼板の製造法承認書



財団法人日本海事協会
東京都千代田区記数井町4番7号 千102



財団法人日本海事協会



三菱重工業株式会社
長崎研究所 御中

98EW320ROL

平成10年7月14日

98EW320ROL

平成10年7月14日



財団法人日本海事協会
材料構築部長 井野 幸

表2. 標準寸法

クラッド鋼板のタイプ	A	B
合わせ材の板厚	13 mm	13 mm
母材の板厚	24 mm	24 mm
幅	150 mm	150 mm
長さ	1000 mm	1000 mm

船体用2層クラッド鋼板の製造法承認の件

拝啓 時下益々御清栄のこととお慶び申し上げます。
さて、先に平成10年5月12日付貴簡にてお申し込みのありました標記の件につきまして、貴社御提出の承認試験成績簿書及びその他を審査致しました結果、鋼船規則K編 1.1.1-2の規定に適合するものと認めましたので、下記のとおりその製造法を承認致します。

5. 機械的性質 : 下表による。

クラッド鋼板のタイプ	A	B
板厚方向の引張強さ (N/mm ²)	98	137
せん断強さ (N/mm ²)	59	98

敬 具

記

- 製造所 : 三菱重工業株式会社 長崎研究所
- 種別 : 2層クラッド鋼板 (アルミニウム合金/ステンレス鋼)
- 製造法 : 高周波加熱真空圧延法
- 素材の組合せ及び標準寸法 : 下表1. 及び2. による。

表1. 素材の組合せ

クラッド鋼板のタイプ	A	B
合 合 合 材	A3003P	5083P
母 材	KSUS304L	KSUS304L

6. 試験・検査

- クラッド鋼板に使用する母材及び合わせ材は、本会検査員による立会検査を受けたものであるいは同等材を使用すること。
- 製品検査において本会検査員が立会する検査項目は、板厚方向引張試験及びせん断強さ試験とし、試験片は1ロット (クラッド鋼板10枚) につき各1個とする。
- 超音波探傷試験については、当該クラッド鋼板全般につき、社内試験結果を提出すること。

以 上

表6.7 (財)日本海事協会向けのAI/SUSクラッド材の接合部強さ試験成績書

接合材料試験成績表

三菱重工株式会社技術本部
長崎研究所第一実験課
海ノ輝久

検査者	立会員	品名 用途	高周波加熱真空圧延法によるクラッド鋼板 ステンレス鋼/耐食7ミクロムの製造法承認試験		注文番号		主号	工事番号	図面番号	接合施工課	試験年月日		
			降伏点 0.2%耐力 N/mm ² kgf/mm ²	引張強さ N kgf	引張強さ N/mm ² kgf/mm ²	伸び %						伸び %	破断位置
		試験項目	試験片寸法 mm	規格	自由曲げ 計測線の距離 mm	自由曲げ 伸び mm	自由曲げ 伸び %	自由曲げ 表面 mm	自由曲げ 裏面 mm	自由曲げ(角度90°) 側面 mm	脆性 破面率 %	採否	
		試験片号											
		19-1 (引張)	φ 10.00									合格	
		19-2 (引張)	φ 10.00									合格	
		せん断試験											
		19-1(せん断)	t4.45×w25.02									合格	
		19-2(せん断)	t4.47×w25.04									合格	
		19-1 (側曲)	t9.0×w37.3×1255									合格	
		19-2 (側曲)	t9.0×w37.0×1255									合格	
		母材	SUS304L (板厚24mm)										
		溶接棒	A3003P (板厚24mm)										
		接合方法	高周波加熱真空圧延法										
		焼鈍											
		予熱											
		試験機番号	T-94M34										
			Sheet No. 98-T-0070									試験担当者	北島

表6.8 ロイド船級協会のAl/SUSクラッド材の製造法承認書



Certificate No : MD00/2659/0001/6b

Appendix 1

Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
Nagasaki Research & Development Center
Nagasaki
Japan

Product	Grade	mm thickness Maximum
Transition Joint	VAC CLAD	34.00
1st. Layer	Stainless steel LR304L	up to 24.0 mm thickness
2nd. Layer	Aluminium alloy A3003P	up to 10.0 mm thickness
Maximum bond temperature	400 Degrees Celcius	
Minimum shear strength	78 N/mm ²	
Minimum tensile strength	98 N/mm ²	
Maximum strip width	80 mm	

Valid Until : 06 April 2003
Date of Issue : 07 April 2000

Lloyd's Register

Lloyd's Register of Shipping
71 Fenchurch Street, London EC3M 4BS



NOTICE - This certificate is subject to the terms and conditions overleaf

表6.9.1 ロイド船級協会向けのAl/SUSクラッド材の接合部強さ試験成績書(1)

Class LRS
 Order No. 75K07
 Customer _____
 Ship No. _____
 Drawing data _____

TEST RECORD OF MATERIAL

(For Joint)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
 Nagasaki Research & Development Center

Sheet No. 99L079
 Date of Test 22-Oct.-99

Requirements Mark of Test Piece	Tensile Test								Bending Test					Impact Test		Macro Test	Results
	Size	Area	Gauge Length	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Position of Fracture	Free Bend		Guided Bend			Charpy (-Notch °C)	Cleavage Fracture %		
	mm	mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%	mm	mm	Gauge Length mm	Elongation %	Face (dia) mm	Root (dia) mm				
(Tensile Test)	φ			min.	98 min.	min.	min.										
S21	9.99	78.38			129			R.T.									Pass
S22	9.99	78.38			128			R.T.									Pass
F21	9.99	78.38			129			R.T.									Pass
F22	9.99	78.38			129			R.T.									Pass
S31*	9.99	78.38			128			R.T.									Pass
F32*	9.99	78.38			127			R.T.									Pass
S41	9.99	78.38			241			-196°C									Pass
F42	9.99	78.38			231			-196°C									Pass
Description								Manufacture		Material Cladding Material: Aluminum alloy...t=12mm							
Structural Transition Joint of 2-layers type (by vacuum roll bonding process with high frequency induction heating) Works Approval for Vacuum Roll Bonded STJ * after heating to 400°C, kept for 10minutes constantly, then cooled								Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki Research & Development Center		Electrode (JIS H4000 A3003P-0) Base Plate : Stainless steel...t=24mm JIS G4304 SUS304L (LR Grade 304L)							
Testing Machine No. T-94M34								Tester H.Kitajima		Preheating							

H. Kitajima
 Chief of First Experiment Section
 Nagasaki Research & Development Center



Class LRS
 Order No. 75K07
 Customer _____
 Ship No. _____
 Drawing data _____

TEST RECORD OF MATERIAL

(For Joint)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
 Nagasaki Research & Development Center

Sheet No. 99L080
 Date of Test 22-Oct.-99

Requirements Mark of Test Piece	Tensile Test								Bending Test					Impact Test		Macro Test	Results
	Size	Area	Gauge Length	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Position of Fracture	Free Bend		Guided Bend			Charpy (-Notch °C)	Cleavage Fracture %		
	t x w	mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%	mm	mm	Gauge Length mm	Elongation %	Face (dia) mm	Root (dia) mm				
(Shear Test)				Shear Strength													
SS21	4.55×26.14	114.4			98			R.T.									Pass
SS22	4.56×26.10	114.6			92			R.T.									Pass
FS21	4.55×25.12	114.3			102			R.T.									Pass
FS22	4.53×25.12	113.8			109			R.T.									Pass
SS31*	4.53×24.98	113.2			102			R.T.									Pass
FS32*	4.55×25.00	113.8			103			R.T.									Pass
SS41	4.52×25.02	113.1			178			-196°C									Pass
FS42	4.56×24.96	113.8			174			-196°C									Pass
Description								Manufacture		Material Cladding Material: Aluminum alloy...t=12mm							
Structural Transition Joint of 2-layers type (by vacuum roll bonding process with high frequency induction heating) Works Approval for Vacuum Roll Bonded STJ * after heating to 400°C, kept for 10minutes constantly, then cooled								Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki Research & Development Center		Electrode (JIS H4000 A3003P-0) Base Plate : Stainless steel...t=24mm JIS G4304 SUS304L (LR Grade 304L)							
Testing Machine No. T-94M34								Tester H.Kitajima		Preheating							

H. Kitajima
 Chief of First Experiment Section
 Nagasaki Research & Development Center



表6.9.2 ロイド船級協会向けAl/SUSクラッド材の接合部強さ試験成績書(2)

Class LRS
 Order No. 75K07
 Customer _____
 Ship No. _____
 Drawing data _____

TEST RECORD OF MATERIAL

(For Joint)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
 Nagasaki Research & Development Center

Sheet No. 9L081
 Date of Test 22-Oct.-'99

Requirements Mark of Test Piece	Tensile Test								Bending Test					Impact Test		Macro Test	Results
	Size	Area	Gauge Length	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Position of Fracture	Free Bend	Guided Bend	Angle 90°	Charpy	Cleavage Fracture %				
	mm	mm ²	mm	min	min	min	min		Gauge Length mm	Elongation %	Face (dia) mm	Root (dia) mm	Side (dia) mm	(-Notch °C)			
(Bending Test)	t × w	× l									Face	Rev.	Side				
FBS	34.1 × 20.0	× 380									Good				Pass		
FBF	34.0 × 20.0	× 380									Good				Pass		
RBS	34.2 × 19.9	× 380										Good			Pass		
RBF	34.1 × 19.9	× 380										Good			Pass		
SBS	9.2 × 34.1	× 250											Good		Pass		
SBF	9.1 × 34.0	× 250											Good		Pass		
(Macro Test)																	
M2														Good	Pass		
Description								Manufacture		Material Cladding Material: Aluminum alloy...t=12mm							
Structural Transition Joint of 2-layers type (by vacuum roll bonding process with high frequency induction heating) Works Approval for Vacuum Roll Bonded STJ								Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki Research & Development Center		-Electrode-		(JIS H4000 A3003P-0)					
										-Flux-		Base Plate : Stainless steel...t=24mm					
										-Parent-		JIS G4304 SUS304L (LR Grade 304L)					
										-Preheating-							
Testing Machine No. T- 4168				Tester R. Kitajima													

[Signature]
 Chief of First Experiment Section
 Nagasaki Research & Development Center



Class LRS
 Order No. 75K07
 Customer _____
 Ship No. _____
 Drawing data _____

TEST RECORD OF MATERIAL

(For Joint)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
 Nagasaki Research & Development Center

Sheet No. 9L082
 Date of Test 22-Oct.-'99

Requirements Mark of Test Piece	Tensile Test								Bending Test					Impact Test		Macro Test	Results
	Size	Area	Gauge Length	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Position of Fracture	Free Bend	Guided Bend	Angle 90°	Charpy	Cleavage Fracture %				
	mm	mm ²	mm	min	min	min	min		Gauge Length mm	Elongation %	Face (dia) mm	Root (dia) mm	Side (dia) mm	27°-Notch (-196°C)			
(Impact test)	t × w												(Isot)				
I21	10.03 ×	10.04											15.7Jmin		Pass		
I22	10.06 ×	10.01											22.6		Pass		
I23	10.03 ×	10.00											16.5		Pass		
													28.4		Pass		
Description								Manufacture		Material Cladding Material: Aluminum alloy...t=12mm							
Structural Transition Joint of 2-layers type (by vacuum roll bonding process with high frequency induction heating) Works Approval for Vacuum Roll Bonded STJ								Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki Research & Development Center		-Electrode-		(JIS H4000 A3003P-0)					
										-Flux-		Base Plate : Stainless steel...t=24mm					
										-Parent-		JIS G4304 SUS304L (LR Grade 304L)					
										-Preheating-							
Testing Machine No. T-				Tester N. Satoh													

[Signature]
 Chief of First Experiment Section
 Nagasaki Research & Development Center



6.5.2 適用 LNG 船に対する Al/SUS クラッド材の STJ の材料承認

真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ が適用される LNG 船が決った場合、材料製造業者である長崎研究所は、製造法が承認された真空圧延接合装置で製作された Al/SUS クラッド材の STJ の成績証明書を、船級協会を介して客先(LNG 船製造業者及び船会社)に提出し、客先から製造法を承認してもらう必要がある。その後、長崎研究所は、LNG 船製造業者である三菱重工業株式会社長崎造船所(以下、長崎造船所と記す)に対し、STJ を製造し納入する。

次に、LNG 船製造業者である長崎造船所は、使用する STJ が船会社と交わした要求性能及び寸法形状を満たすことを船会社に認めてもらう必要がある。これらの手続が終了した後、長崎造船所は Al/SUS クラッド材の STJ を使用して、実機 LNG 船のタンクスカート部の組立作業に入ることができる。

表 6.10 は、長崎研究所が(財)日本海事協会を通して、客先(長崎造船所及び船会社)に提出した Al/SUS クラッド材製造のための STJ の成績証明書である。評価項目は、寸法検査、UT 検査、PT 検査、引張試験、せん断試験及び外観検査である。これらの検査項目に合格した後、長崎研究所は試作した大型真空圧延接合装置で LNG 船向け Al/SUS クラッド材の STJ の製作を開始した。

表 6.11 は、Al/SUS クラッド材の STJ を LNG 船のタンクスカート部に使用するための材料承認用の試験成績書である。接合部の評価項目は、引張試験、せん断試験、側曲げ試験及びアイゾット衝撃試験である。接合部強さは、すべての項目を満足した。

表 6.12 は、LNG 船タンクスカート部に使用する Al/SUS クラッド材の STJ の寸法検査記録である。STJ は、長さ 735mm、幅 132mm、厚さ 35.5mm で STJ の A3003 側の端部には、7mm のアール加工が施されている。

これらの検査結果に合格した後、長崎造船所は Al/SUS クラッド材の STJ を使用して、LNG 船のタンクスカート部の組立作業を開始した。

表6.10 (財)日本海事協会が承認したSTJの検査成績書

Shipyard Name : 三菱重工業 (株) 長崎造船所 Shipper : 大阪ガスインダストリアルズ株式会社 (株) Ship No. : 日本郵船 (株) : 2157		Issue No. : 1999-001 Issue Date : 14 MAY, 1999 Control No. : 1999-NK001										
S. T. J. 検査成績書 INSPECTION CERTIFICATE OF S.T.J												
圧延番号 Cont.No.	製品番号 Plate Control No (連続番号) Serial No.	寸法 Dimension T:37±3mm W:135+4, -0mm L:725+3, -0mm	数量 Qty.	重量 Table Weight (kgf)	超音波探傷 UT BI ≥ 75%	透過探傷 PT	引張試験 Tension Test		剪断強さ試験 Shear Strength Test		外観検査 Visual Test	結果 Result
							室温	-80℃	室温	-80℃		
NK 48-57	NK-57-2-STJ-16A	T:35.7~35.8	10	235	good	good	128	148	101	99	good	合格
	NK-57-2-STJ-16B	W:135.0~135.1					131	152	89	90		
	NK-57-2-STJ-16C	L:725										
NK 58-67	NK-57-2-STJ-17A	T:35.7~35.8	10	235	good	good	129	156	92	96	good	合格
	NK-57-2-STJ-17B	W:135.0~135.1					129	154	88	89		
	NK-57-2-STJ-17C	L:725										

NO. MA99NS-03057 DATE 14 MAY 1999

We hereby certify that the item(s) herein described has been tested and examined in accordance with the Rule requirements of Lloyd's Register of Quality Assurance (specifications) and found to be satisfactory.

Stamp: AR 503 (N)
NIPPON KAIJI KYOKAI, NAGASAKI

Surveyor to

We certify that the material described herein has been made in accordance with the maker's specification approved by Nippon Kaiji Kyokai Nagasaki Branch.

Nippon Kaiji Kyokai Nagasaki Branch

Total : 12P
Total Weight : 282kgf
Gross Weight : 282kgf

Result : 合格

三菱重工業株式会社 長崎研究所
Mitsubishi Heavy Industries, LTD
Nagasaki R & D Center

Takayuki Kawano
Plant QS Manager

表6.11 STJの材料承認用の試験成績書

接合材料試験成績表

大阪ガスインターナショナルトランスポート船廠
日本郵船船廠

検査者
NYK 9 Nov 99

三菱重工株式会社技術本部
長崎研究所第一実験課 志口輝久
Sheet No. 99S261

品名 用途	高周波加熱真空圧延法によるクラッド鋼板 ステンレス鋼/耐食アルミニウムの材料承認試験		注 文 書 号	工 事 番 号	図 面 番 号	接 合 施 工 場 位 置 元	試験年月日						
			S.No.2157	12157		三菱重工船廠*	平成11年11月9日						
試験項目	試験片寸法 mm	引張試験 (R.T. 22.5℃)					曲げ試験					引張 破面率 %	採 否
		引張強さ 荷重 N/mm ²	伸び %	絞り %	破断 位置	自由曲げ 計測線 の距離 mm	伸び %	表曲 げ mm	裏曲 げ mm	側曲 げ mm			
引張試験	直径φ	98以上											
90	10.00	134											合格
97	10.00	137											合格
100	9.99	135											合格
せん断試験	厚さt×幅w	せん断 強さ	78以上										
90	4.63×24.93	93											合格
97	4.63×25.01	97											合格
100	4.63×25.02	104											合格

母材 **
母材 : ステンレス鋼 (JIS G4304 SUS304L)
クラッド材 : 耐食アルミニウム (JIS H4000 A3003P-H14) t=11mm
試験担当者 北島秀行

接合材料試験成績表

大阪ガスインターナショナルトランスポート船廠
日本郵船船廠

検査者
NYK 9 Nov 99

三菱重工株式会社技術本部
長崎研究所第一実験課 志口輝久
Sheet No. 99S262

品名 用途	高周波加熱真空圧延法によるクラッド鋼板 ステンレス鋼/耐食アルミニウムの材料承認試験		注 文 書 号	工 事 番 号	図 面 番 号	接 合 施 工 場 位 置 元	試験年月日						
			S.No.2157	12157		三菱重工船廠*	平成11年11月9日						
試験項目	試験片寸法 mm	引張試験 (R.T. 22.5℃)					曲げ試験					引張 破面率 %	採 否
		引張強さ 荷重 N/mm ²	伸び %	絞り %	破断 位置	自由曲げ 計測線 の距離 mm	伸び %	表曲 げ mm	裏曲 げ mm	側曲 げ mm			
曲げ試験	厚さt×幅w ×長さl									R=54	15.7以上		
90	8.8×36.0 ×250									良好	7.4以上		合格
97	9.0×36.0 ×250									良好			合格
100	8.8×36.0 ×250									良好			合格
衝撃試験	厚さt×幅w										-196℃		
90	10.02×10.00										19.8		合格
97	10.05×10.03										18.9		合格
100	10.01×10.03										21.5		合格

母材 **
母材 : ステンレス鋼 (JIS G4304 SUS304L)
クラッド材 : 耐食アルミニウム (JIS H4000 A3003P-H14) t=11mm
試験担当者 北島秀行

表6.12 STJの寸法検査結果記録

計測日；11年11月9日
 圧延番号；NK-98
 製品番号；NK-57-1-STJ-27B

全体長さ

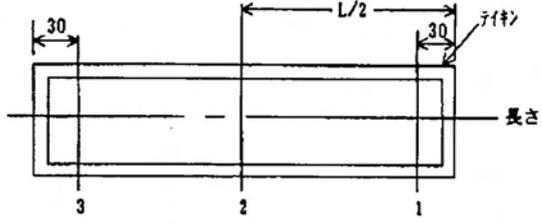
長さ	735.8mm	寸法；735 $\begin{smallmatrix} +1.60 \\ -0 \end{smallmatrix}$
面外たわみ	1.7mm	寸法；MAX2.0



全体板幅およびR部を除く板幅

計測箇所	全体板幅 (mm)	R部を除く板幅 (mm)
1	132.7	102.1
2	132.7	102.1
3	132.7	102.1

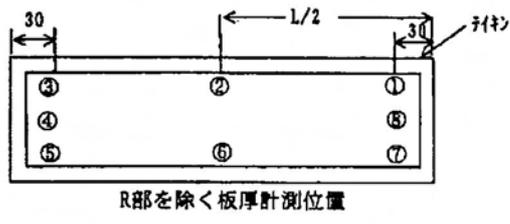
寸法；132 $\begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$



R部を除く板厚

計測箇所	板厚 (mm)
1	35.80
2	35.80
3	35.60
4	35.70
5	35.60
6	35.80
7	35.70
8	35.80
平均	35.73

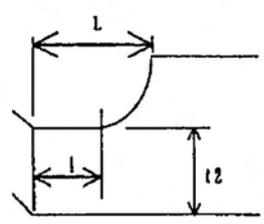
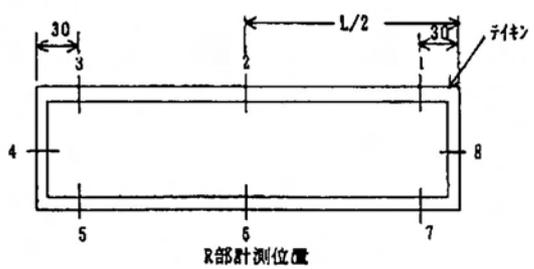
寸法；35.5±1



R部の直線距離および半径チェック

計測箇所	L		R
	L	l	
1	15.3	8.3	4.3
2	15.3	8.3	4.3
3	15.3	8.3	3.3
4	15.2	8.2	4.2
5	15.2	8.2	4.5
6	15.3	8.3	4.3
7	15.3	8.3	3.3
8	15.3	8.3	4.3

寸法；15.5±1 寸法；8.5±1 寸法；3 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -0 \end{smallmatrix}$



*；14φ丸棒にて目視観察



6.5.3 LNG 船への実機適用状況

ここでは、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ が造船工場の作業現場に納入され、タンクスカート部材に組み立てられていく状況を写真を用いて説明する。

図 6.12 に、造船工場の作業現場に納入された Al/SUS クラッド材の STJ と爆着材の STJ を示す。Al/SUS クラッド材の STJ は爆着材の約 1/3 の長さである。爆着材の STJ は、アルミニウム球形タンクの赤道部の曲率に合せた曲げ加工が施されている。Al/SUS クラッド材の STJ には曲げ加工を行わなかった。

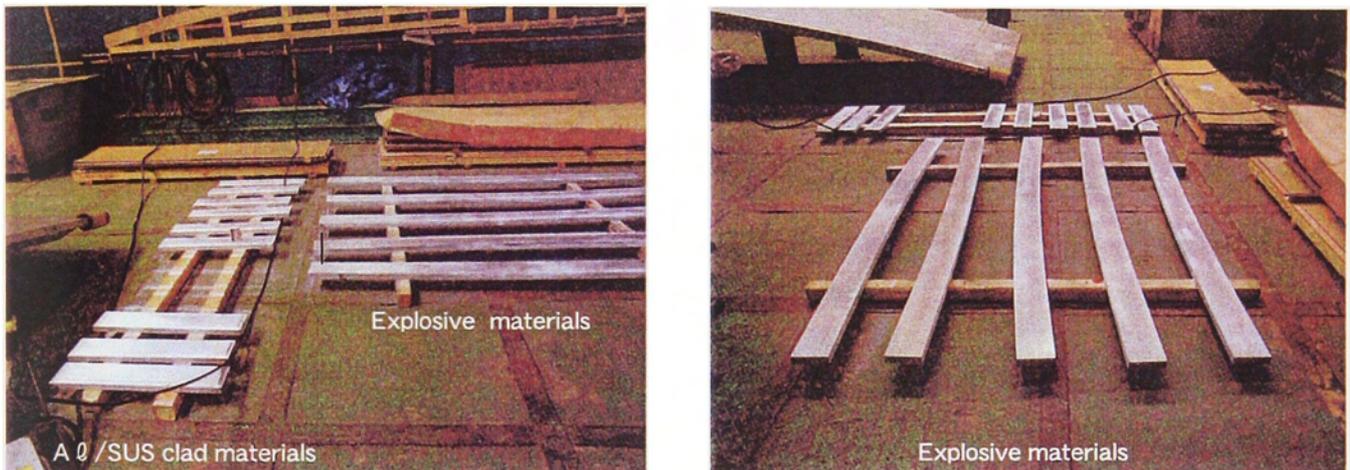


図6.12 造船工場内に納入されたSTJ

図 6.13 に、タンクスカートの下部部材である SUS304 厚板と STJ のすみ肉溶接組立状況を示す。溶接品質を確保するために下部部材を反転させ、すみ肉溶接は下向半自動 MAG 溶接を採用している。また、すみ肉溶接継手の疲労強度の向上を目的に、角部のすみ肉溶接ビード表面はグラインダーで滑らかに仕上げ加工が施されている。

図 6.14 に、タンクスカートの上部部材である A5083 厚板と STJ のすみ肉溶接組立状況を示す。溶接品質を確保するために、すみ肉溶接は下向き半自動 MIG 溶接を採用している。従来より、爆着材のすみ肉溶接の層間温度を 50°C 以下に管理し、STJ の接合界面の過度の温度上昇を防止しており、Al/SUS クラッド材の STJ のすみ肉溶接においても同じ溶接管理基準に従った。すみ肉溶接継手の疲労強度の向上を目的に、角部のすみ肉溶接ビード表面はグラインダーで滑らかに仕上げ加工が施されている。

図 6.15 に、十字すみ肉溶接後の PT 検査の状況を示す。STJ 端面の A3003 と SUS304L 境界には、PT 指示模様は認められず、欠陥のない健全なタンクスカート部の STJ として組み立てられていることがわかる。

なお、Al/SUS クラッド材の STJ 端面にグラインダー加工を施し、PT 検査を行うと接

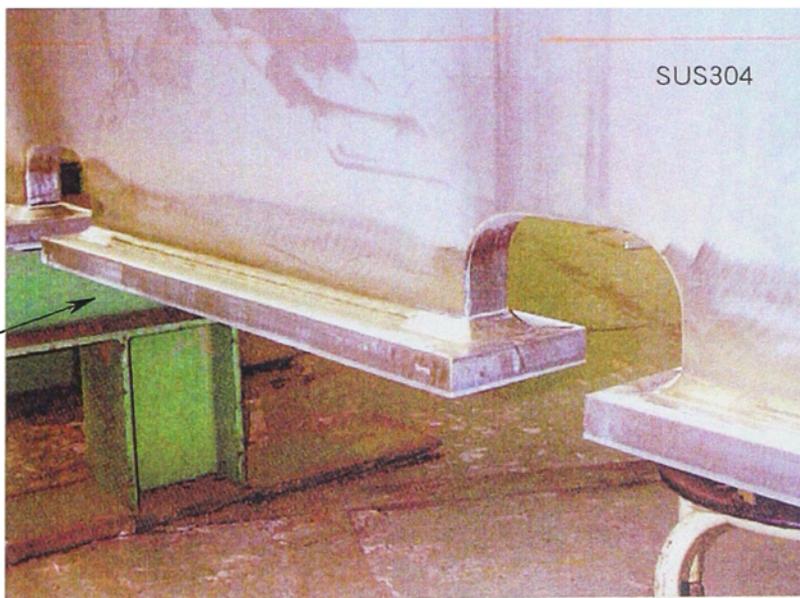
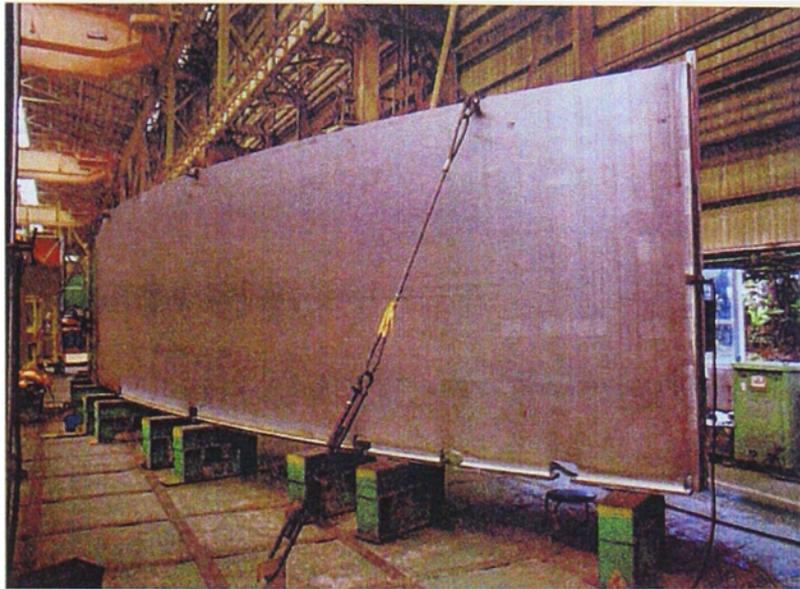


図6.13 SUS304タンクスカート部材とAl/SUSクラッド材のSTJのすみ肉溶接状況

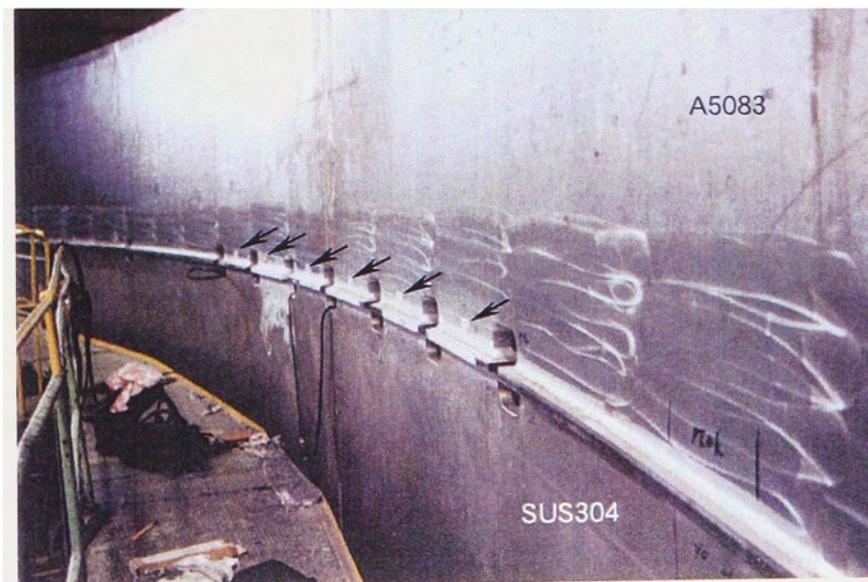
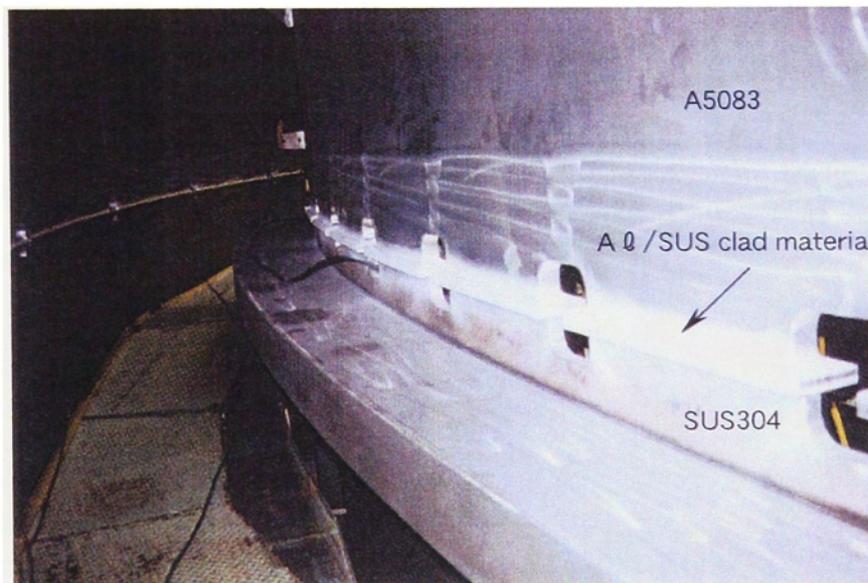
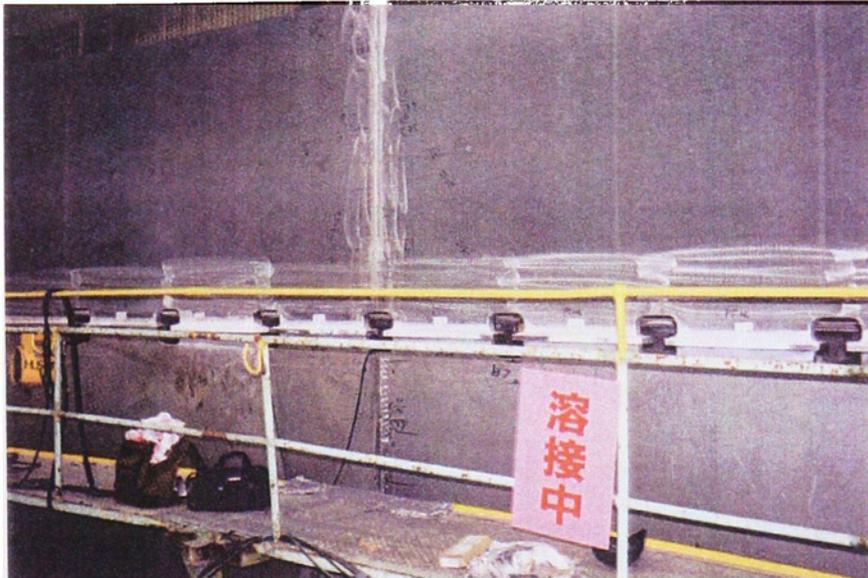


図6.14 A5083タンクスカート部材とAl/SUSクラッド材のSTJのすみ肉溶接状況

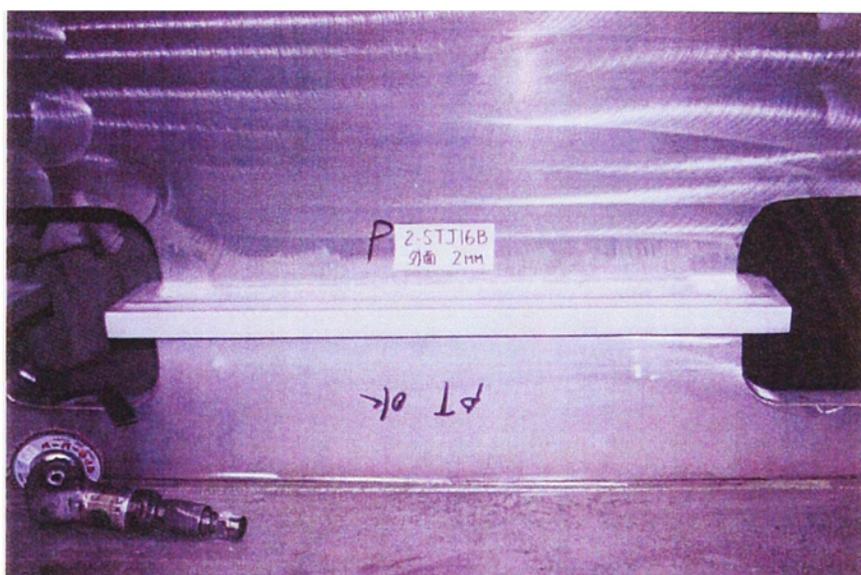
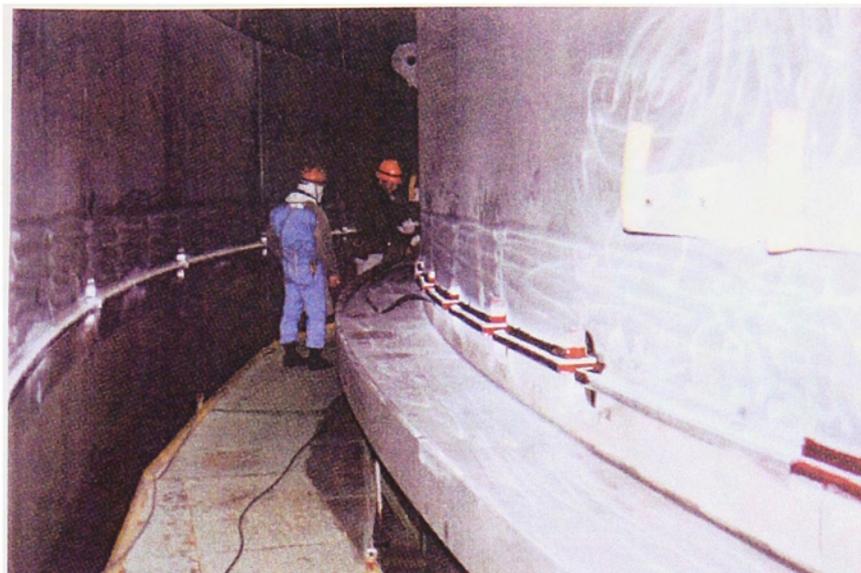


図6.15 十字すみ肉溶接後のAl/SUSクラッド材の浸透探傷検査状況

合界面に PT 指示模様が発生し、接合界面のはく離欠陥として判定される場合がある。これは、A3003 と SUS304L の接合境界において、グラインダー加工によって発生した SUS304L のバリが A3003 側にくい込み、浸透液がしみ込むためである。これを防止するためには、600 番程度のエメリー紙で精密研磨し、ステンレスのバリを取り除く必要がある。図 6.15 に示した写真は、端面精密研磨加工の後の PT 検査の状況である。

今回適用した 24 本すべてに欠陥がないことを確認した後、Al/SUS クラッド材の STJ を適用したタンクスカートブロックは、総組工程に送られアルミニウム球形タンクの赤道帯ブロックと接合された。

6.6 結言

本章では、造船現場のタンクスカート組立工程における十字すみ肉溶接作業中の Al/SUS クラッド材の STJ の健全性を検討し、試作した大型の真空圧延接合装置を用いて Al/SUS クラッド材の STJ の信頼性の高い製作方法を検討するとともに、本 STJ を適用したタンクスカート構造の信頼性を検討し、最後に、本 STJ の造船現場における実機適用状況について説明した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 十字すみ肉溶接時の溶接入熱では、接合界面の温度上昇は高々 260℃程度であり、接合界面の特性に及ぼす溶接入熱による影響はないと考えられる。
- (2) 十字すみ肉溶接時の STJ 端部にかかる溶接熱応力を低減するための新しい端面形状を提案した。すなわち、STJ 端面の A3003 側を厚さ 3mm、幅 10mm で 7mm のアール加工を行うと、界面端部に作用する軸方向応力をほとんどゼロとすることができる。
- (3) Al/SUS クラッド材の接合まま材には、幅方向両側に接合不良部が存在する。これを明確にする方法として、-196℃の液体窒素内で熱応力を負荷する手法を提案した。この手法を用いることで、試作した大型の真空圧延接合装置で健全な STJ を製作することができる。
- (4) 実機 LNG 船の球形タンクの内、運航中に最大の加速度がかかる No.1 とそれに次ぐ No.2 タンクの 0 度及び 90 度の方向のタンクスカート部に Al/SUS クラッド材の STJ を適用した。Al/SUS クラッド材の STJ が全数損傷しても、アルミニウム球形タンク支持構造は十分な強度を有すると判断された。
- (5) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を実機に適用するに当たり、必要な承認手続き、すなわち、Al/SUS クラッド材の製造法承認、適用対象船が決った後の Al/SUS クラッド材の製造承認及び実機適用時の Al/SUS クラッド材の STJ の材

の Al/SUS クラッド材の製造承認及び実機適用時の Al/SUS クラッド材の STJ の材料承認の各手続とその内容を示し、Al/SUS クラッド材の STJ が実機適用可能な材料であることを船級協会、造船会社及び船会社に認められたことを示した。

(6) 試作した大型の真空圧延接合装置で製作した Al/SUS クラッド材の STJ が造船工場の作業現場に納入され、十字すみ肉溶接によりタンクスカート部材として組み立てられ、検査されていく状況を作業工程に従って写真を用いて説明した。

第7章 総 括

本研究では、球形タンク方式 LNG 船のタンクスカート構造に適用されている爆着法による4層クラッド材のSTJの代わりに、低価格で信頼性の高い2層クラッド材のSTJを開発することが目的であり、具体的な手法として真空圧延接合法を提案している。そこで本研究ではまず、大型の真空圧延接合装置を試作し、それを用いてA3003とSUS304Lを接合したAl/SUSクラッド材を製作し、接合部強さに及ぼす接合条件の影響、接合メカニズムの検討、接合部特性に及ぼす熱処理の影響を解明した。そしてAl/SUSクラッド材のSTJを用いた十字すみ肉溶接継手の破壊特性を評価し、本STJがLNG船のタンクスカート部に実用可能であることを示すとともに、これらの成果を総合して本STJを球形タンク方式LNG船のタンクスカートの一部に実用した。

得られた成果は各章ごとにまとめているが、本章ではこれらの内容を総括して述べる。

第1章では、本研究の目的と背景について示し、真空圧延接合法によるAl/SUSクラッド材のSTJの開発動機に至った経緯を述べ、大型の真空圧延接合装置を試作し、本装置によるAl/SUSクラッド材のSTJをLNG船に実用するに当たっての技術課題について述べた。

第2章では、試作した大型の真空圧延接合装置を用いて、A3003とSUS304LのAl/SUSクラッド材を製作し、接合条件と接合部強さの関係を把握し、健全な接合部強さを得るための接合条件を明らかにした。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 接合温度 500°Cにおいて、圧下率を変化させた場合、Al/SUSクラッド材の接合部強さは、平滑引張試験片及び切欠き引張試験片ともに圧下率の上昇とともに増加し、平滑引張試験片では、圧下率が14%以上でA3003母材破断を示した。
- (2) 圧下率 14%において、接合温度を変化させた場合、Al/SUSクラッド材の接合部強さは、平滑引張試験片では接合温度の上昇とともに低下し、接合温度 400°C以上でA3003母材破断を示した。切欠き引張試験片では、切欠き接合部強さは接合温度の上昇とともに増加し、400から500°Cにかけて飽和する傾向にあった。
- (3) 切欠き引張試験片のSUS304L側破面には、A3003が全面に付着しており、A3003のディンプルが多量に厚く観察される領域と、A3003が1 μm 以下に薄く伸ばされた線状の痕跡として観察される領域とが認められた。前者の領域の占める割合を接合率として定義すると、切欠き接合部強さと接合率の間には直線関係が得られた。

- (4) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材を球形タンク方式 LNG 船に適用する場合、接合部強さが高く信頼性の高い製品とするための接合条件として、接合温度 400°C 以上、圧下率 14%以上を得た。

第3章では、真空圧延接合法による A3003 と SUS304L の直接接合メカニズムについて検討した。すなわち、Al/SUS クラッド材の接合部を透過電子顕微鏡で観察し、接合界面の微細観察を行うとともに EDS 分析を行い、接合界面の微細組織及び元素濃度分布を調査した。これらの結果をもとに接合メカニズムを検討した。

得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 接合界面には、2～5nm 厚さのアモルファス相とアモルファス相に沿って点々とマダラ組織が存在する。このアモルファス相は、Al が主成分で O, Fe, Cr 及び Ni を含有していた。マダラ組織は、Al が主成分で Cu, Si さらには Fe, Cr 及び Ni を含有していた。
- (2) アモルファス相とマダラ組織は、圧延接合過程で接合界面が一旦熔融し、急速に冷却・凝固することで形成されたものと考えられる。又、マダラ組織は、周辺の A3003 組織より高濃度の Cu 及び Si を含有していた。これらの元素は、Al と低融点共晶合金を作ることから、A3003 組織内の Cu 及び Si 濃度の高い領域が選択的に熔融し凝固することでマダラ組織が形成されたものと考えられる。
- (3) 真空圧延接合法による A3003 と SUS304L の直接接合メカニズムは、以下のようである。すなわち、圧延接合過程で発生する摩擦熱により、A3003 の被接合面の極薄層(2～5nm)とそれに接した A3003 内の Cu 及び Si の高濃度領域が熔融する。この時、SUS304L の構成成分が熔融層に拡散・流入し、急速に冷却・凝固が生じることによりアモルファス相及びマダラ組織が形成される。その結果、接合界面に Fe-Al 系金属間化合物を形成することにより、A3003 と SUS304L は強固に接合する。

第4章では、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の接合部特性に及ぼす熱処理の影響について検討した。すなわち、熱処理条件と接合部強さの関係を調査するとともに、透過電子顕微鏡及び EDS で接合界面の組織変化を調査した。これらの結果をもとに Al/SUS クラッド材を熱処理した際の組織の安定性を評価した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 500°C×10, 30 及び 60min の熱処理では、熱処理材の接合部は接合まま材と同等以上の接合部強さを持つ。

- (2) 熱処理により接合界面では、アモルファス相を通して A3003 及び SUS304L の構成成分が相互に拡散し、新たな組織を形成する。すなわち、接合まま材の接合界面に生成したマダラ組織は、500℃×10min の熱処理で結晶格子縞を持つ羽毛組織に変化し、A3003 の結晶を侵食して成長する。500℃×30min の熱処理で、アモルファス相と SUS304L の間から微細柱状組織が析出する。
- (3) 電子線回折像から判断すると、羽毛組織はマダラ組織から規則的な原子配列を持つ結晶組織へ変化する途中の組織と考えられる。EDS 分析結果から、微細柱状組織は (Fe, Cr, Ni)Al₃ 系の金属間化合物であることが明らかとなった。
- (4) アモルファス相を通じた A3003 と SUS304L の構成成分の拡散形態に、特徴が認められた。すなわち、Al はアモルファス相の任意の領域から SUS304L 内に広がる形で拡散し、Fe 及び Cr は羽毛組織内に拡散し羽毛組織を成長させ、Ni はアモルファス相全面から A3003 結晶内に拡散する状況が観察された。
- (5) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を LNG 船のタンクスカート部にすみ肉溶接で固定する場合、現在行われている爆着材の STJ と同等の溶接施工管理を行えば、すみ肉溶接入熱で接合界面に組織変化は発生せず、接合部強さも何ら影響を受けないことが明らかとなった。

第5章では、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ は、LNG 船のタンクスカート部に実用可能であることを示した。すなわち、試作した大型の真空圧延接合装置で製作した Al/SUS クラッド材を用い、実機溶接条件で十字すみ肉溶接継手を製作し、破壊特性評価試験を行い STJ としての構造強度評価を行った。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) Al/SUS クラッド材の STJ は A3003 母材の引張強さ程度、室温で約 110N/mm²、-165℃で約 150N/mm² の接合部強さを持つ。すなわち、Al/SUS クラッド材の STJ の接合部強さは、LNG 船のタンクスカートの過大に見積った設計応力に対して、室温で約 2.8 倍、-165℃で約 3.8 倍の安全率を有している。
- (2) Al/SUS クラッド材の STJ の疲労き裂は、接合界面を進展せず、十字すみ肉溶接継手では疲労荷重に対して接合界面が溶接継手の最弱部とならないことが明らかとなった。すなわち、Al/SUS クラッド材と爆着材の STJ の十字すみ肉溶接継手は、同等の疲労強度を有することが明らかとなった。
- (3) 以上の結果より、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ は、LNG 船のタンクスカート部に破壊強度の観点から実用可能であると判断できた。

第6章では、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を LNG 船のタンクスカート部に適用するための工作技術を示し、実際に適用される STJ の信頼性の高い製法を示した。また、本 STJ が適用されるタンクスカート構造の信頼性を評価し、最後に本 STJ を LNG 船のタンクスカート部に実用した状況について述べた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) LNG 船のタンクスカート部の十字すみ肉溶接における溶接入熱では、接合界面の温度上昇は高々260℃程度であり、STJ の接合界面の特性に及ぼす溶接入熱による影響はないと考えられる。また、溶接施工時の STJ の接合界面端部にかかる溶接熱応力を低減する新しい端面形状を提案した。すなわち、STJ 端面の A3003 側を厚さ3mm、幅 10mm で7mm のアール加工を行うことで、接合界面端部に作用する軸方向応力をほとんどゼロにすることができる。
- (2) 実機 LNG 船の球形タンクの内、運航中最大の加速度がかかる No.1 とそれに次 No.2 タンクの0度及び90度方向のタンクスカート部に Al/SUS クラッド材の STJ を適用する。Al/SUS クラッド材の STJ が全数損傷を生じて、アルミニウム球形タンク支持構造は十分な強度を有すると判断された。
- (3) Al/SUS クラッド材の接合まま材には、幅方向の両側に接合不良部が存在する。これを明確にする方法として、液体窒素内で熱応力を負荷する手法を提案した。この手法を用いることで、試作した大型の真空圧延接合装置を用い、健全で信頼性の高い STJ を製作することができる。
- (4) 試作した大型の真空圧延接合装置による Al/SUS クラッド材の STJ を実用するに当り、必要な承認手続、すなわち、Al/SUS クラッド材の製造法承認、STJ を実用する時の材料承認の各手続を行い、Al/SUS クラッド材の STJ が実用可能な材料であることを船級協会、造船会社及び船会社に認められたことを示した。
- (5) 試作した大型の真空圧延接合装置で製作された Al/SUS クラッド材の STJ が、造船工場の作業現場に納入され、十字すみ肉溶接でタンクスカート部材として組立られ、検査されていく状況を作業工程に従って写真を用いて説明した。

第7章では、本研究の結果を総括して、結論とした。

本研究により、真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の STJ を LNG 船のタンクスカート部の一部に実用することができた。本 STJ を搭載した LNG 船を図 7.1 に示す。本技術はすでに Al/鋼クラッド材として高速船2隻にも試験的に実用化されている。



図 7.1 Al/SUS クラッド材の STJ を搭載した LNG 船

本研究で見てきたように、本法による接合界面は金属学的に強固に接合しており、今後、構造物あるいは機械部品に、本法による各種異材接合材が数多く実用化されていくものと期待される。

謝 辞

本研究は、九州工業大学教授 西尾一政博士，同大学教授 加藤光昭博士，同大学教授 長谷部光弘博士，同大学教授 原田昭治博士，同大学名誉教授 迎静雄博士の多大なるご指導とご援助を賜ってまとめたもので，ここに謹んで深甚なる謝意と敬意を表します。

長崎総合科学大学工学部教授 矢島浩博士には，本研究を遂行するにあたり多大なご配慮とご指導を戴きました。ここに厚くお礼申し上げます。

大阪大学大学院教授 豊田政男博士には，本研究を遂行するにあたり有益かつ懇切なご教示をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

東京大学大学院教授，野本敏治博士には，研究開発を行う上での論旨の進め方，考え方についてご教示をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

さらに，本研究を遂行するにあたり，終始ご支援を戴きました三菱重工業(株)長崎研究所 徳田君代所長，同研究所 篠原正朝次長，同研究所前所長 竹田頼正博士，同研究所元次長 湯原哲雄博士，同研究所 技監増山不二光博士，同研究所 材料・溶接研究室 斉藤正洋室長，同室主席 児玉克博士，同室 松井正数主任，同 強度研究室主席 井上好章博士，同 第一実験課 井上克明主任，三菱重工業(株)技術本部技術企画部主幹 納富啓博士，三菱重工業(株)長崎造船所 香焼工作部 岩淵寛主幹，同 造船設計部 川市克己主席，三菱エンジニアリング(株) 材料技術課 平田政博氏に厚くお礼申し上げます。

また，三菱エンジニアリング(株) 技師長 藤村浩史博士には，長年に亘り ご指導をいただくとともに終始激励していただきました。ここに心から，感謝と敬意を表します。

さらには，元動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 部品機器試験室 小堀哲雄室長，北原種道室長，及び元科学技術庁 金属材料技術研究所 腐食防食研究室 清水義彦室長には，開発実証試験における基本的な研究の考え方と進め方，すなわち，命題→仮説→小型試験→仮説→大型試験→仮説→実証試験にわたる思考方法と試験の進め方及びこれらを実施していく上での討論の進め方について，ご指導とご教示をいただきました。ここに心から感謝とお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 雑誌「造船界」日本造船工業会 (1993.7)
- 2) 中山, 矢島, 川野他: LNG 船用のアルミ合金と鋼の爆着継手の材料強度特性について, 西部造船会会報, 第 66 号 (1983.8), 183-189
- 3) 桃野, 圓城: アルミニウムと鋼の拡散溶接, 軽金属, Vol.34, No.7 (1985), 396-404
- 4) 川勝, 北山: 金属の拡散接合に関する研究, 日本金属学会誌, 第 40 巻, 第 1 号 (1976), 96-103
- 5) N.Iwamoto, M.Yoshida, S.Tabata, T.Takeushi, M.Makino: Studies on Practical Diffusion Welding, Proc, 2nd Sympo. Jap. Weld. Soc., Osaka, 1975, 233
- 6) STJ 委員会, アルミニウム合金-鋼複合材の船舶への応用に関する研究, 軽金属溶接, Vol.16, (1978), No.8
- 7) 迎, 西尾, 加藤: 真空圧延接合装置の試作とクラッド材の製造 (第 1 報), 溶接学会論文集, 第 9 巻, 第 1 号 (1991), 17-23
- 8) T.Kawano, Y.Inoue, K.Nishio: Properties of aluminium alloy/stainless steel clad material produced via vacuum roll bonding, Welding in the World 41 (1998), 88-96
- 9) 立川, 石本: Al-Mg 系合金と鋼の爆接における界面現象, 溶接学会論文集, 第 3 巻, 第 2 号 (1985), 99-105
- 10) 圓城, 池内: 展望, 拡散接合, 日本金属学会会報, 第 21 巻, 第 12 号 (1982), 959-964
- 11) 迎, 西尾, 加藤: アルミニウムクラッド鋼の接合界面特性に及ぼす加熱処理の影響, 溶接学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号 (1994), 528-533
- 12) 及川, 齊藤他: 鋼板/アルミニウム板接合体の界面における金属間化合物の生成と成長, 鉄と鋼, Vol.83, No.10 (1997), 37-42
- 13) STJ 委員会, アルミニウム合金-鋼複合材の船舶への応用に関する研究 (その 2) -複合材の工作性研究(1), 軽金属溶接, Vol.17, No.10 (1979)
- 14) STJ 委員会, アルミニウム合金-鋼複合材の船舶への応用に関する研究 (その 2) -複合材の工作性研究(2)-, 軽金属溶接, Vol.17, No.11 (1979)
- 15) 迎, 西尾, 畠中: クラッド材の製造装置, 公開特許公報, 平 1-278979
- 16) 迎, 西尾, 畠中: クラッド材の製造装置, 公開特許公報, 平 1-133689
- 17) 河野, 西尾, 平田: 真空圧延接合による Al/SUS 接合部の電子顕微鏡観察, 電子顕微鏡法の実践と応用写真集, (社)日本鉄鋼協会及び(社)日本金属学会編集, (社)日本金

- 属学会発行, (2002), 95
- 18) A.Yahiro, T.Masui, T.Yoshida and D.Doï : ISIJ Int., 31, (1991), 647
 - 19) 及川, 齊藤, 吉村, 永瀬 : 鋼板とアルミニウム板の固相接合に及ぼす酸化膜の影響, 鉄と鋼, Vol.83, No.10, (1997), 629-634
 - 20) 金属データブック, 改訂2版, 日本金属学会編, 丸善株式会社
 - 21) N.Iwamoto, M.Yoshida, S.Tabata, T.Takeuchi, M.Makino : Studies on Practical Diffusion Welding between Different Materials, Proc. 2nd sympo.. Jap. Weld. Soc., Osaka, 1975, 233-238
 - 22) 桃野, 圓城 : アルミニウムと鋼の拡散溶接, 軽金属, Vol.35, No.7(1985), 396-404
 - 23) 迎, 西尾, 加藤他 : アルミニウムクラッド鋼の接合界面特性に及ぼす加熱処理の影響—真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性(第2報)—, 溶接学会論文集, 第12巻, 第4号(1994), 528-533
 - 24) 西尾, 加藤, 河野 : アルミニウムクラッド鋼の界面反応に及ぼす製造方法と素材成分の影響—真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性(第3報)—, 溶接学会論文集, 第18巻, 第1号(2000), 18-25
 - 25) 及川, 齊藤, 永瀬, 切山 : 鋼板/アルミニウム板接合体の界面における金属間化合物の生成と成長, 鉄と鋼, Vol.83, No.10(1997), 641-646
 - 26) 及川, 齊藤, 永瀬, 切山 : 鋼板/アルミニウム板接合体の界面におけるミクロ構造と金属間化合物の生成, 鉄と鋼, Vol.84, No.1(1998), 73-78
 - 27) 河野, 井上, 矢島他 : 高周波加熱真空圧延接合 Al/SUSSTJ の強度 (その1) —十字隅肉溶接継手の強度—, 西部造船会会報, 第102号(2001), 241-246
 - 28) 川市, 河野, 矢島他 : 高周波加熱真空圧延接合 Al/SUSSTJ の強度 (その2) —十字隅肉溶接継手の破壊強度解析—, 西部造船会会報, 第102号(2001), 247-253
 - 29) 井上好章 : 高温機器における溶射皮膜の強度評価法とその損傷防止対策に関する研究, 大阪大学学位論文(1995)
 - 30) 井上, 河野, 井上他 : 構造用異材継手, 公開特許公報 2000-257766

本研究に関連する著者の発表論文

- 1) Properties of aluminium alloy/stainless steel clad material produced via vacuum roll bonding, *Welding in the World* 41(1998), 88-96
- 2) アルミニウムクラッド鋼の界面反応に及ぼす製造法と素材成分の影響—真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性(第3報)—, *溶接学会論文集*, 第18巻, 第1号(2000), 18-25
- 3) 高周波加熱真空圧延接合 Al/SUS STJ の強度(その1)—十字隅肉溶接継手の強度—, *西部造船会会報*, 第102号(2001), 241-246
- 4) 高周波加熱真空圧延接合 Al/SUS STJ の強度(その2)—十字隅肉溶接継手の破壊強度解析—, *西部造船会会報*, 第102号(2001), 247-253
- 5) 真空圧延接合法による Al/SUS クラッド材の製作とその特性
溶接学会誌, 第71巻(2002), 第6号, 15-19
- 6) 高周波加熱真空圧延接合 Al/SUS STJ の強度(その3)—丸棒引張試験による接合部強度の検討—, *西部造船会会報*, 第105号, 2003年3月掲載予定
- 7) A3003/SUS304L クラッド材接合部の微細観察—真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の接合部特性(第1報)—, *溶接学会論文集* 投稿中
- 8) A3003/SUS304L クラッド材接合部の微細組織に及ぼす熱処理の影響—真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の接合部特性(第2報)—, *溶接学会論文集* 投稿中

本研究に関連する工業所有権

- 1) 出願番号：特願平 07-144377 号
登録番号：特許第 3349296 号
発明の名称：金属の圧延接合方法及び金属の圧延接合装置
- 2) 出願番号：特願平 08-343382 号
発明の名称：異種金属板の圧延接合方法
- 3) 出願番号：特願平 09-092071 号
発明の名称：異種金属部材の圧延接合方法
- 4) 出願番号：特願平 10-269880 号
発明の名称：異種金属の真空圧延接合方法
- 5) 出願番号：特願平 11-060947 号
発明の名称：構造用異材継手
- 6) 出願番号：2001-142383
発明の名称：クラッド構造材及びクラッド構造材の製造方法