

造船における構造用接着剤の適用に関する研究

岩田 知明*, 林原 仁志**, 菅澤 忍*, 安藤 孝弘**,
村上 睦尚**, 秋山 繁*, 山根 健次*

Research on application of the structural adhesive in shipbuilding

by

Toshiaki IWATA, Hitoshi HAYASHIBARA, Shinobu SUGASAWA, Takahiro ANDO,
Chikahisa MURAKAMI, Shigeru AKIYAMA and Kenji YAMANE

Abstract

In shipbuilding, there is the following advantage in outfitting work by replacing the weld joint with the structural adhesive joint; Man-hour reduction of supplementary work with the fire work and straightening work after the welding and so on. However, it is demanded that the dimensional accuracy management of the members is at the same level as current welding, namely structural adhesive can fill the gap of the millimeter order. The lack of the knowledge for the long-term reliability of thick adhesive layer is obstacle to the practical use. Therefore, environmental deterioration tests were carried out for evaluation using the deterioration estimate curve about the acceptable design adhesive strength in shipbuilding. The durability evaluation was carried out about SGA (Second generation of acrylic adhesives) structural adhesives. In this study, the adherend of structural adhesives joint was A5052. It is assumed that the aluminum adherend shear joints are used for the installation of the aluminum equipment of a ship product. According to the test result of this study, it was revealed that the design strength in the guidelines on Class NK is appropriate where coefficient of dispersion is more than 0.4 and strength retention rate is more than 0.5. Additionally, surface flammability evaluation was carried out in accordance with International Maritime Organization Resolution MSC.307 (88), ANNEX 2010 FTP CODE. According to the test results of a surface material of the structure that an aluminum surfacing adhered to an aluminum substrate, the specimens satisfied the requirements for low flame-spread characteristics. Furthermore, the safe inspection of structural adhesive was carried out by the deterioration test in the real environment on a training ship. As the result, the deterioration condition of the structure adhesive joint in the real environment in service was clarified and the real environment data such as deck temperature or the ultraviolet rays were obtained.

* 構造基盤技術系, ** 構造安全評価系

原稿受付 2019年2月28日

審査日 2019年6月26日

目 次

1. まえがき	3
2. 造船用の厚い接着層からなる SGA 構造接着継手の耐久性と燃焼性の評価	3
2.1 はじめに	3
2.2 実験方法	4
2.2.1 供試材	4
2.2.2 環境劣化試験の試験片	5
2.2.3 環境劣化試験の試験条件	6
2.2.4 表面燃焼性試験	7
2.3 実験結果および考察	8
2.3.1 環境劣化試験結果	8
2.3.2 設計基準強度	13
2.3.3 表面燃焼性試験結果	15
2.4 まとめ	15
3. 構造用接着剤の組織構造分析並びに引張せん断継手に関する解析	16
3.1 はじめに	16
3.2 構造及び物性	16
3.3 機械的性質	17
3.3.1 超音波計測	17
3.3.2 引張試験（その1）	19
3.3.3 超音波計測と引張試験の試験結果の比較	19
3.3.4 引張試験（その2）	20
3.4 引張せん断重合せ継手試験および FEM による解析	20
3.4.1 引張せん断重合せ継手試験	20
3.4.2 引張せん断重合せ継手試験結果の FEM による解析	22
3.5 まとめ	25
4. 実船の暴露部における接着継手の耐久性及び劣化要因	26
4.1 はじめに	26
4.2 実験方法	26
4.2.1 接着継手の実船暴露試験	26
4.2.2 外航船上の甲板における表面温度計測	27
4.3 実験結果	28
4.3.1 接着継手の実船暴露試験	28
4.3.2 外航船上の甲板における表面温度計測	31
4.4 まとめ	32
5. あとがき	32
謝辞	32
参考文献	32

記 号

D_y : 劣化後のばらつき係数 [-]
 E : ヤング率 [GPa]
 $F(x)$: 強度 p 以下の領域の面積の割合 [-]
 G : ずり弾性率 [GPa]

h : 内部破壊係数 [-]
 K : 体積弾性率 [GPa]
 M : 縦波弾性率 [GPa]
 p : 必要とされる接着強度の下限 [MPa]
 Q_i : 着火のための熱量 [MJ/m²]
 Q_p : 燃焼熱放出速度 [kW]
 Q_{sb} : 燃焼持続に必要な熱量 [MJ/m²]
 Q_t : 総放出熱量 [MJ]
 R : 応力比 [-]
 S : 設計基準強度 [MPa]
 ΔS : 応力振幅 [MPa]
 v_l : 縦波音速 [mm/ μ s]
 v_t : 横波音速 [mm/ μ s]
 η_d : 劣化後の強度保持率 [-]
 η_{d1} : 耐塩水噴霧試験における劣化後の強度保持率 [-]
 η_{d2} : 高温高湿劣化促進試験における劣化後の強度保持率 [-]
 η_{d3} : Xe 暴露耐候性試験における劣化後の強度保持率 [-]
 η_T : 温度依存係数 [-]
 μ : 接着強度の平均値 [MPa]
 μ_0 : 室温における初期平均破断強度 [MPa]
 ν : ポアソン比 [-]
 σ : 接着強度の標準偏差 [-]
 ρ : 接着剤の密度 [kg/m³]

1. まえがき

我が国造船業では、更なる生産性の向上による国際的な競争力の強化が継続的に必要とされており、新たな手法のうちの一つとして、他産業で実用化が進んでいる構造接着が考えられる。しかしながら、自動車・航空機分野で異種材接合用に最も実用化されているエポキシ系接着剤であっても、長期信頼性に対する知見は不十分で耐久性評価は課題となっている。一方、造船分野では、工作精度が溶接と同程度となる数 mm 程度の隙間への充填可能性が求められており、このような厚い接着層厚にアクリル系接着剤は有用であるが、耐久性に関するデータはエポキシ系接着剤以上に限られている。

これまで造船における接着剤の利用は居住区の内装などに限られ、構造接着は船舶建造において適用されていなかった。本研究では、就航中の環境下での環境劣化等の影響を考慮した極厚接着層からなる接着継手設計強度の予測方法・評価方法を明らかにする。これにより、構造接着継手の信頼性を向上させ、艤装分野など建造工程における構造用接着剤の適用技術を確立し、溶接後の歪取り・火気付帯工事の工数削減、工程自由度の向上、樹脂系支持部材の適用による軽量化などを図る。

2. 造船用の厚い接着層からなる SGA 構造接着継手の耐久性と燃焼性の評価

2.1 はじめに

造船では艤装工事において、溶接継手を構造接着継手で置き換えることにより、溶接後の歪取り・火気付帯工事の工数削減、工程自由度の向上、樹脂系支持部材の適用による軽量化などの利点がある。このため、FRP 船の

みならず、鋼船や軽合金船においても構造接着は注目され始めている。しかしながら、現行の溶接部材と同等の寸法精度管理が許容される数ミリの隙間への充填可能性が要求され、このような極厚接着層厚における長期信頼性に対する知見の欠如が実用化の妨げとなっている。2017年のレビューにおいても、接着継手の長期挙動に及ぼす環境の影響に関する研究は未だ不十分であると報告されている¹⁾。メタクリル酸メチル接着剤(MMA)及びアクリル接着剤の耐久性評価に関する研究は行われてはいるが、対象としている接着層厚は薄く0.05~0.8mmであり^{2,4)}、ミリオーダーの接着層厚に関する研究はない。

一方、日本海事協会内に設置された主著者が座長を務めた検討会において、文献5)を参照して設計基準強度が決定された⁶⁾。この設計基準強度の式において、劣化後のばらつき係数(必要とされる接着強度の下限/劣化後の平均強度) D_d と劣化後の強度保持率(劣化後の平均強度/初期の平均強度) η_d は、実験的に決定する必要があるが、造船に適したミリオーダー接着層厚の実験データはないため、厚い接着層厚の場合におけるこれらの数値の妥当性の実験的な検証と評価が必要である。そこで本研究では、各環境劣化試験における劣化曲線から得られる劣化後の強度保持率や変動係数(標準偏差/平均強度)などの劣化係数を用いて、造船において許容可能な設計接着強度に関する統計的な評価を行った。

また、難燃性の規則による制約も造船所の重要な関心事項となっている。そこで、設計自由度の向上と適用対象部材の拡張に資するため、表面燃焼性試験により、構造用接着剤の耐火性能に関する評価を行った。

2.2 実験方法

2.2.1 供試材

著者らの過去の調査研究⁷⁾によれば、ミリオーダーの接着層厚では、SGA(Second generation of acrylic adhesives: 第二世代アクリル樹脂系接着剤)はエポキシ系接着剤より10%以上強度が高い。そこで本研究では、極厚接着層厚に適していると考えられるSGAを評価対象接着剤とした。本研究の評価対象接着剤の選定要件は、常温における可使時間(硬化剤混合後に粘度などの状態が接着作業に耐えられなくなるまでの時間)が数分以上、3mm以上の接着層厚でも常温における引張せん断応力が10MPa以上、前処理はプライマー無し(サンディングのみ可)である。これらの要件は造船所のヒアリング調査を元に決定した。これらの要件を満たす、デンカ株式会社のHARDLOC™ C-355-20(主剤:C-355-20A, 硬化剤:C-355SL20B)、及び、ITW(Illinois Tool Works) Polymers Adhesives Inc.(日本法人は株式会社パフォーマンスポリマーズ&フルイズジャパン)のPLEXUS™ MA830GBを本研究の評価対象SGAとして選定した。表2.1にC-355-20とMA830GBの機械的特性を示す。接着面の前処理は不要であることが最も望ましいが、いくつかの造船所ではサンディングは許容している。そこで、無処理でよいかサンディングが必要かについて、アメリカ船級協会の疲労強度要件⁸⁾(応力比 $R=0.1$ かつ応力振幅 $\Delta S=3.5\text{MPa}$ において破断寿命が 10^6 回以上)を引用し、疲労試験による評価を行った。その結果、前処理無しのC-355-20の場合、いくつかの疲労試験結果において、この疲労強度要件を満たさなかった。そこで、被着体の接着面の前処理は、C-355-20ではサンドブラスト、MA830GBでは無処理とした。なお、本研究の評価対象SGAは、どちらも混合比感受性が鈍感で、最適混合率から20%外れた場合であっても、引張せん断強度の低下率は10%程度にとどまる優れた特性を示す。ただし、最適混合率に近づけるための混合ノズルが市販され利用可能であるため、混合比感受性は重要な問題ではないと見なせる。

本研究では、アルミニウム合金被着体について評価を行った。アルミニウム合金せん断継手は、壁面が薄板のために歪みが発生しやすいアルミニウム合金船へのアルミニウム合金艀装品の搭載を想定したものである。アルミニウム合金艀装品用として主要な合金の一つであるJIS-H-4000(ISO209-1~2&ISO6361-1~4:MOD)⁹⁾A5052を被着体とした。

表 2.1 評価対象構造用接着剤の機械的特性 (カタログ値)

	単位	C-355-20	MA830GB
粘度 (24~25°C)	Pa-s	20	90-120
比重	-	0.90-1.01	0.99
可使用時間 (23~24°C)	min	約 3	4-6
固着時間 (23~24°C)	min	約 12	15-25
充填可能厚み	mm	-	0.8-13.0
被着体接着面前処理	-	サンドブラスト	無
引張せん断強度 (SPCC; CR1)	MPa	22.3	15.9-19.3
引張せん断強度 (A5025)	MPa	19.7	-
引張せん断強度 (エポキシFRP)	MPa	6.1	-
剥離強度 (SPCC; CR1)	kN/m	5.4	5.44
衝撃強度 (SPCC; CR1)	kJ/m ²	22.7	42
硬度	Shore D	58	75

2.2.2 環境劣化試験の試験片

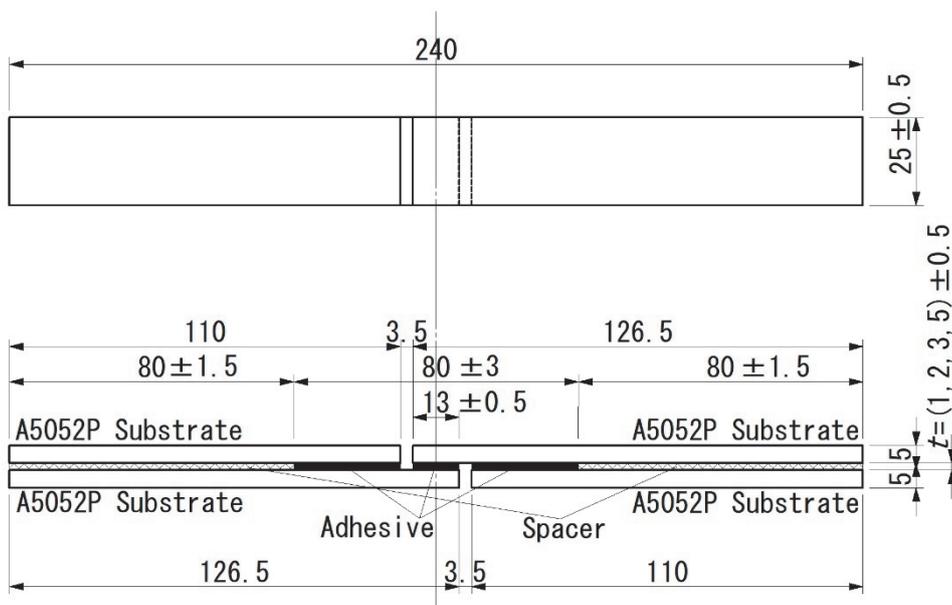
接着層厚を考慮した接着剤の引張せん断試験規格がないため、試験片形状は JIS-K-6851(ISO6237)¹⁰⁾に基づく形状とし (図 2.1 参照)、試験片形状以外は JIS-K-6850(ISO4587)¹¹⁾に基づいて試験を実施した。

研究の進展と共に、要件と試験条件を見直して進めたため、評価対象接着層厚、試験片接着部の保護塗膜によるコーティングの有無、同一試験条件の試験片の本数は、接着剤により異なっている。環境劣化試験の試験片の条件の違いを表 2.2¹²⁾に示す。なお、接着部とは、図 2.1 において被着体も含む 80mm 長の黒色の区間に相当する。

現行の溶接部材と同等の 0.2%の製作誤差の場合、10m を超える構造部材では、要求される隙間は約 20mm となる。一方で、接着剤メーカーにより公表されている充填可能厚みは、施工可能な上限厚さであり、接着層厚 1mm で得られた引張せん断強度のカタログ値が維持される最大厚さを示しているわけではない。接着層厚 1mm の引張せん断強度に近い強度が維持される最大厚さを接着剤メーカーと協議した結果、接着層厚 5mm 程度が上限ということになった。よって、MA830GB では、評価対象接着層厚を、基準厚さ 1mm、構造部材も含む造船用途の 5mm、それらの中間厚さ 2mm とした。しかしながら、構造部材は関係規則により多くの制約が課せられるため、長期信頼性に関する強度データが不足している現状では、規則上の制約が構造部材よりは少ない艀装品の実用例を増やすところから始めるのが現実的である。そこで、艀装品の製作誤差は 2mm 程度であるため、評価対象の最大接着層厚を見直して 3mm とし、C-355-20 では、接着層厚を、基準厚さ 1mm、艀装品用の 3mm とした。

MA830GB では、試験片の接着部は保護塗膜によるコーティングを行わなかった。しかしながら、実際には、暴露部の艀装品は、腐食から保護するため、溶接部も含めて保護塗膜によりコーティングされており、接着継手が保護塗膜でコーティングされていなければ、接着強度は被着体の劣化の影響を受ける。そこで、溶接後に溶接部が保護塗膜でコーティングされている実態に類似させた C-355-20 では、接着剤と反応しない塗料が選定され、接着部も含めて被着体を保護塗膜でコーティングを行った。Xe 暴露耐候性試験の試験片は紫外線保護塗膜で、耐塩水噴霧試験の試験片及び吸水後乾燥回復試験の試験片は防蝕塗膜でコーティングを行った。保護コーティングの無い場合の接着継手における吸水の影響を評価するため、高温高湿劣化促進試験の試験片のみ保護塗膜でコーティングを行わなかった。

試験槽の容量の制約のため、同一条件の試験は主に 4 本 (C-355-20 の耐塩水噴霧試験のみ 5 本、当初は計画しておらず追加で試験を行った MA830GB の吸水後乾燥回復試験のみ 3 本) の試験片で行った。

図 2.1 環境劣化試験の引張せん断試験片形状¹⁰⁾表 2.2 環境劣化試験の試験片の条件の違い¹²⁾

最初に評価を実施	-	MA830GB
要件を見直し後に評価を実施	C-355-20	-
評価対象接着層厚		
基準厚さ	1 mm	1 mm
1mmと5mmの中間厚さ	-	2 mm
艦装品用途を想定した厚さ	3 mm	-
構造部材も含む造船用途を想定した厚さ	-	5 mm
試験片接着部の保護塗膜によるコーティング		
-	-	無
溶接後に溶接部が保護塗膜でコーティングされている実態に類似	有	-
同一試験条件の試験片の本数		
高温高湿劣化促進試験	4	4
吸水後乾燥回復試験	4	3
Xe暴露耐候性試験	4	4
耐塩水噴霧試験	5	4

2.2.3 環境劣化試験の試験条件

本研究では、高温高湿劣化促進試験、吸水後乾燥回復試験、Xe 暴露耐候性試験、耐塩水噴霧試験を実施し、暴露時間と劣化後の強度保持率及び変動係数の関係を求めた。JIS-K-6877 (ISO-9142MOD)¹³⁾の一部を参照した。

高温高湿劣化促進試験は、50°C90%RH (相対湿度)、85°C90%RH、95°C95%RH の 3 温湿度条件にて 90 日間 (2,160 時間) 行った。高温高湿槽から試験片を取り出し後、23°Cの実験室で 2 時間の調節を行った。

吸水後乾燥回復試験は、50°C90%RH にて 90 日間 (2,160 時間) の吸水後、23°C50%RH にて 90 日間 (2,160 時間) の乾燥回復を行った。高温高湿槽から試験片を取り出し後、23°Cの実験室で 2 時間の調節を行った。

Xe 暴露耐候性試験は、JIS-K-7350-2(ISO4892-2MOD)¹⁴⁾の一部を参照し、石英管封止のキセノンアークランプ光源を用い、赤外線除去コーティングされたデイライトフィルタを通して、放射照度 500W/m² (300nm~800nm 帯域) ±10W/m²、ブラックスタンダード温度 30°C±3°Cにて、90 日間 (2,160 時間) の暴露を行った。試験片側面の接着部を上向きにして、片面ずつ 1,000 時間及び 2,160 時間の暴露を行った。一方、実船計測により外航船の暴露環境の鋼板の温度計測を行った結果、鋼板表面の最高温度は 70°C以上に達することが確認されている¹⁵⁾。そこで、ブラックスタンダード温度 75°C±3°Cの追加試験を行った。

耐塩水噴霧試験は、JIS-Z-2371(ISO9227MOD)¹⁶⁾の一部を参照し、噴霧液の塩濃度 50g/L±5g/L、噴霧液の pH 6.5~7.2 とし、噴霧槽内温度 35°C±2°Cにて 84 日間 (2,000 時間) 行った。噴霧槽から試験片を取り出し後、試験片

表面に付着した塩化ナトリウムを除くために、試験片を水道水で洗い流し、ペーパータオルで水分を拭き取り、23°C50%RHにて24時間の状態調節を行った。

2.2.4 表面燃焼性試験

C-355-20 に対して表面燃焼性試験を行った。本試験は、国際海事機関 (IMO) 海上委員会安全決議 MSC.307 (88) の付属書 2010 FTP CODE¹⁷⁾ の Annex 1 「火災試験方法」のパート 5 「表面燃焼性試験 (表面材と一次甲板床張り材の試験)」に従って実施した。この 2010 FTP CODE¹⁷⁾ の Annex 1 のパート 5 の関係規則は、ISO 5658-2¹⁸⁾ である。

断熱仕切りに使われる接着剤のみ、材料単独で低火炎伝播性特性を持つことが要求される。よって、断熱仕切りに使われる接着剤は、露出した表面としての接着剤に、表面燃焼性の試験方法及び内張り・天井張りの判断基準が適用される。しかしながら、断熱仕切り以外に使われる接着剤には要件は無い。まず始めに、断熱仕切りの要件 (試験方法・判断基準) を C-355-20 が満たせるかどうか調査することとした。これらの断熱仕切りの要件では、接着剤の標準基板として、ダミー試験体として規定されている珪酸カルシウム板を用いなければならない。珪酸カルシウムを基板として用いた場合の接着剤の状態の結果を図 2.2¹²⁾ に示す。しかしながら、接着剤を塗布すると図中の赤い丸で示されるように気泡が発生し、接着剤は基板から容易に剥がれてしまった。珪酸カルシウム板の表面が多孔質なため、接着剤が浸透し、接着剤の硬化が不十分であったと考えられる。ダミー試験体を製作することができず、断熱仕切りとしての表面燃焼性評価はできなかった。

そこで、ISO/IEC 17025¹⁹⁾ に基づく試験所認定を受けている「一般社団法人 日本船舶品質管理協会 製品安全評価センター」と共に、次善の試験方法についての検討を行った。その結果、アルミニウム基板にアルミニウム表面材が接着されている構造の「表面材」に分類される試験片を用いて表面燃焼性の評価を行うこととした。これは、断熱仕切り以外のアルミニウム艀装品を想定したものである。試験片形状を図 2.3 に示す。

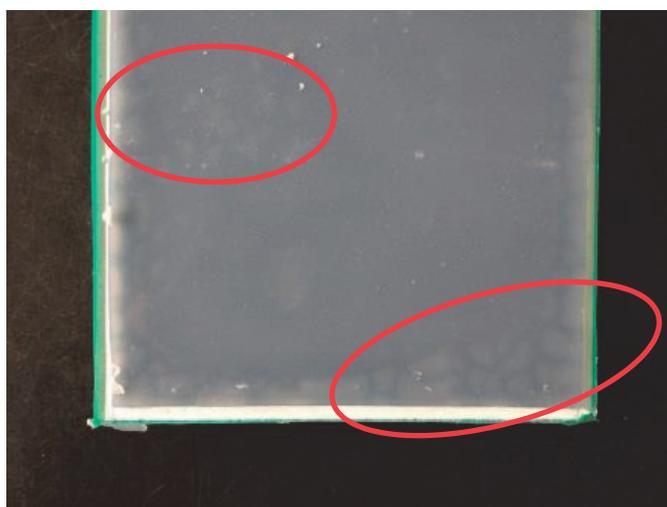


図 2.2 珪酸カルシウムを被着体に用いた場合の接着剤の状態¹²⁾

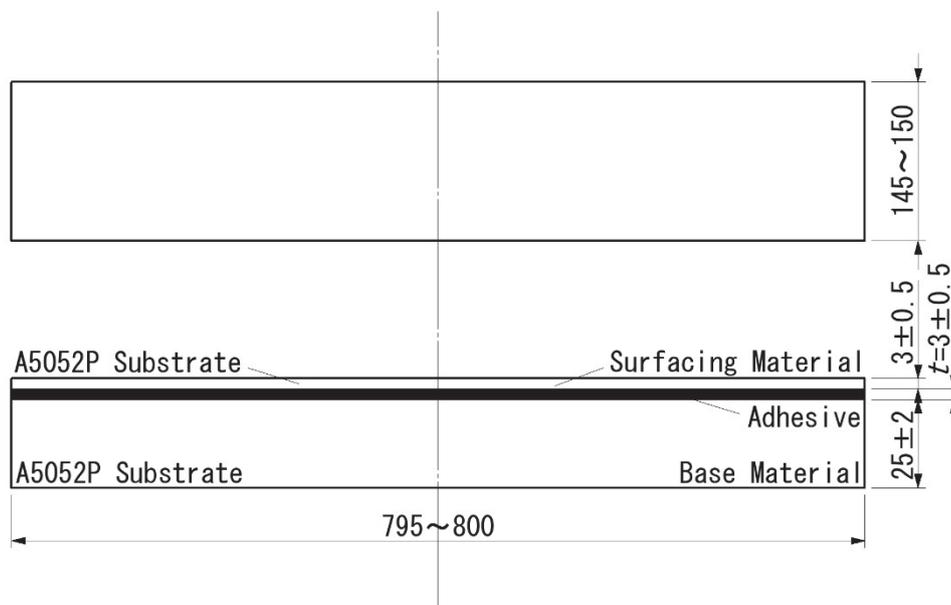


図 2.3 表面燃焼性試験の試験片形状¹⁷⁾

2.3 実験結果および考察

2.3.1 環境劣化試験結果

高温高湿劣化促進試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図 2.4²⁰⁾と図 2.5¹²⁾に、変動係数と暴露時間の関係を図 2.6²⁰⁾と図 2.7¹²⁾に示す。各点は実験結果の平均値である。傾向を分かりやすくするため、これらの図中には移動平均が合わせて示されている。

吸水後乾燥回復試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図 2.8¹²⁾に、変動係数と暴露時間の関係を図 2.9¹²⁾に示す。Xe 暴露耐候性試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図 2.10¹²⁾に、変動係数と暴露時間の関係を図 2.11¹²⁾に示す。耐塩水噴霧試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図 2.12¹²⁾に、変動係数と暴露時間の関係を図 2.13¹²⁾に示す。各点は実験結果の平均値である。

高温高湿劣化促進試験の試験片を除いて試験片の接着部が保護塗膜でコーティングされている C-355-20 の場合、高温高湿劣化促進試験も含めた全ての環境劣化試験の結果は、劣化後の強度保持率 η_d は 0.5 以上で、劣化後の変動係数はほぼ 0.14 以下であった。加えて、暴露時間 2,000 時間超の η_d の値は暴露時間 1,000 時間の η_d の値からほとんど低下していなかった。更に、吸水後乾燥回復試験では、1,000 時間の乾燥により、劣化前の初期値に近い値まで強度が回復した。また、Xe 暴露耐候性試験では、紫外線保護塗膜が効果的で、強度低下は確認されず、約 20%強度が向上した。この理由は熱処理による効果と考えられる。保護塗膜が効果的であったため、接着部は紫外線の影響を受けず、熱処理の影響のみを受ける状態であった。よって、熱処理により歪が再配分され、接着剤硬化時の不均一な硬化収縮反応により発生した初期歪に起因する接着剤内部の応力集中が解放されたため、公称応力ベースで強度が向上したと考えられる。この現象は、溶接継手において、熱処理による溶接残留応力の解放で、局所応力が減少し、公称応力ベースの疲労強度が改善するのと類似している。

これに対して、試験片の接着部が保護塗膜でコーティングされていない MA830GB の場合、全ての環境劣化試験の結果で、暴露時間 2,000 時間超の η_d の値は暴露時間 1,000 時間の η_d の値から低下した。加えて、95°C95%RH の高温高湿劣化促進試験と耐塩水噴霧試験では、暴露時間 2,000 時間超の η_d の値は 0.4 以下で、劣化後の変動係数は 0.3 以上であった。

よって、母材である被着体を保護するための保護コーティングが、適切な状態であれば、接着部は被着体と共に保護されるが、保護コーティングが無い場合は、特に塩水噴霧と高温高湿環境において接着強度は不十分であった。

なお、同一試験条件における試験片本数は、本研究では不十分で、劣化後の変動係数の定量評価の精度を上げるためには、追加試験により同一試験条件における試験片本数を増やす必要がある。

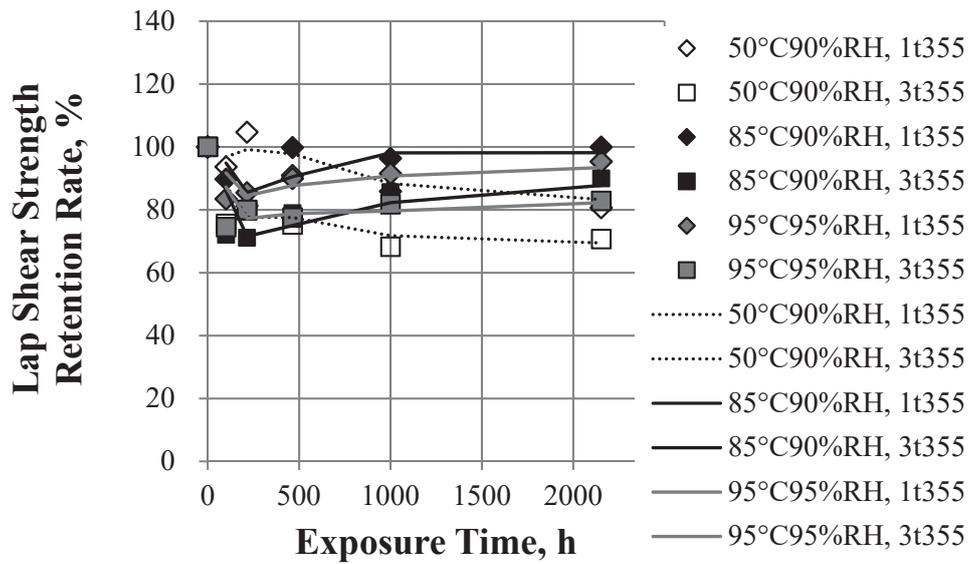


図 2.4 高温高湿劣化促進試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係 (C-355-20) ²⁰⁾

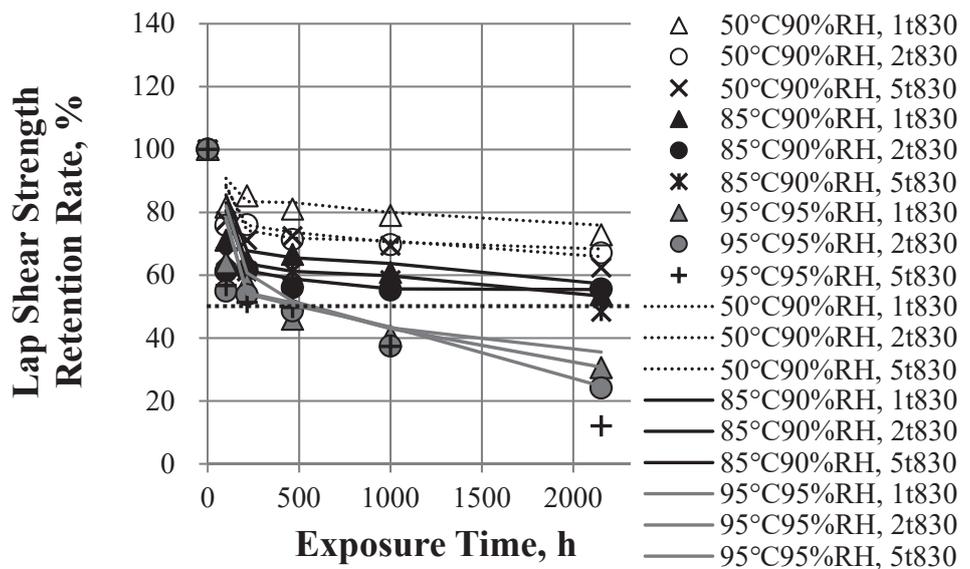


図 2.5 高温高湿劣化促進試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係 (MA830GB) ¹²⁾

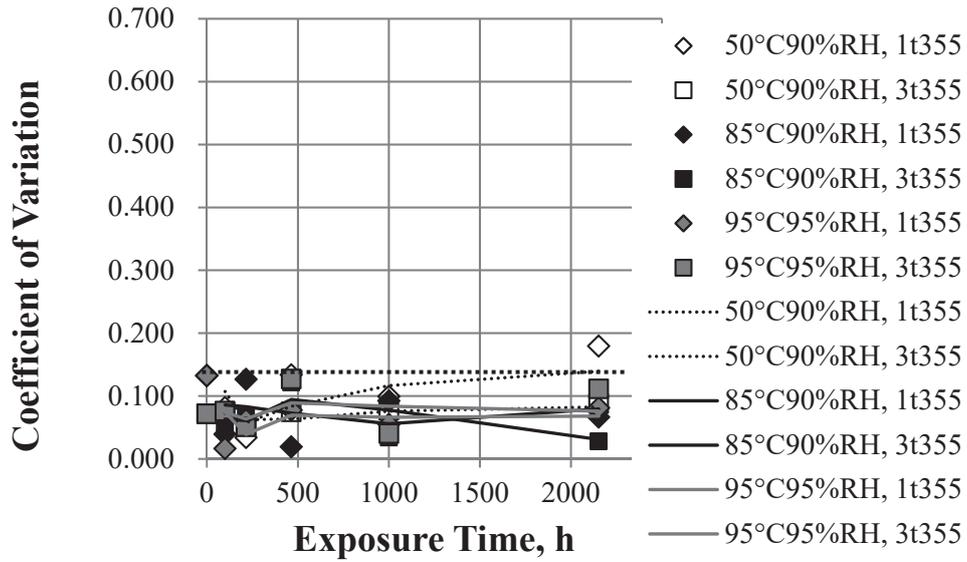


図 2.6 高温高湿劣化促進試験における変動係数と暴露時間の関係 (C-355-20) ²⁰⁾

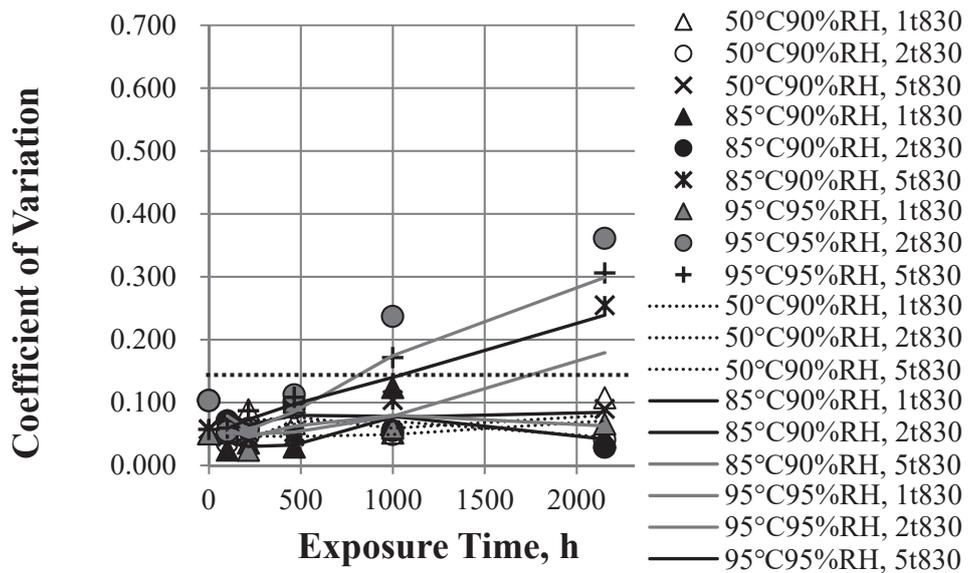


図 2.7 高温高湿劣化促進試験における変動係数と暴露時間の関係 (MA830GB) ¹²⁾

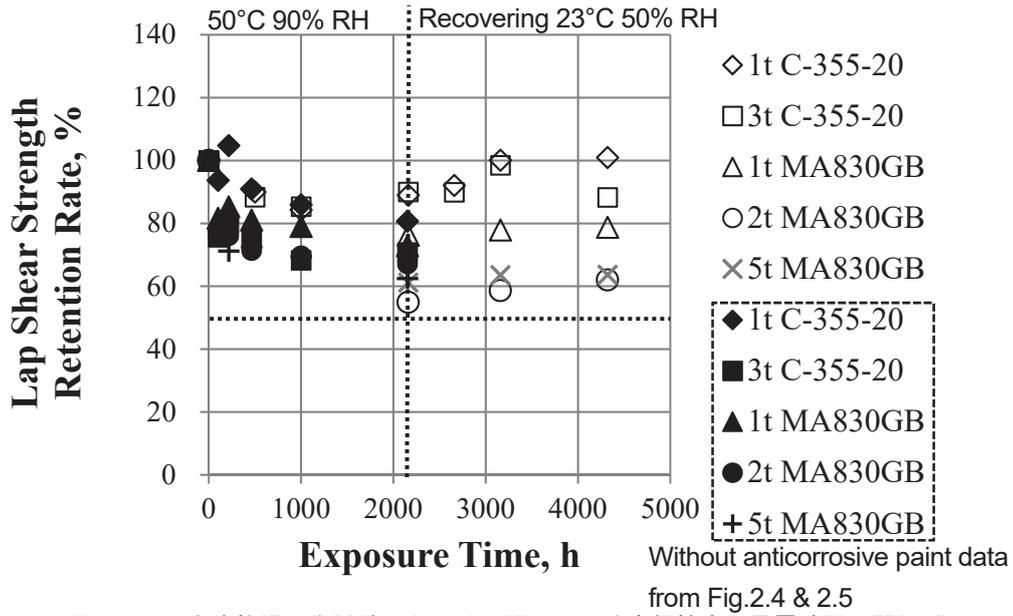


図 2.8 吸水後乾燥回復試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係¹²⁾

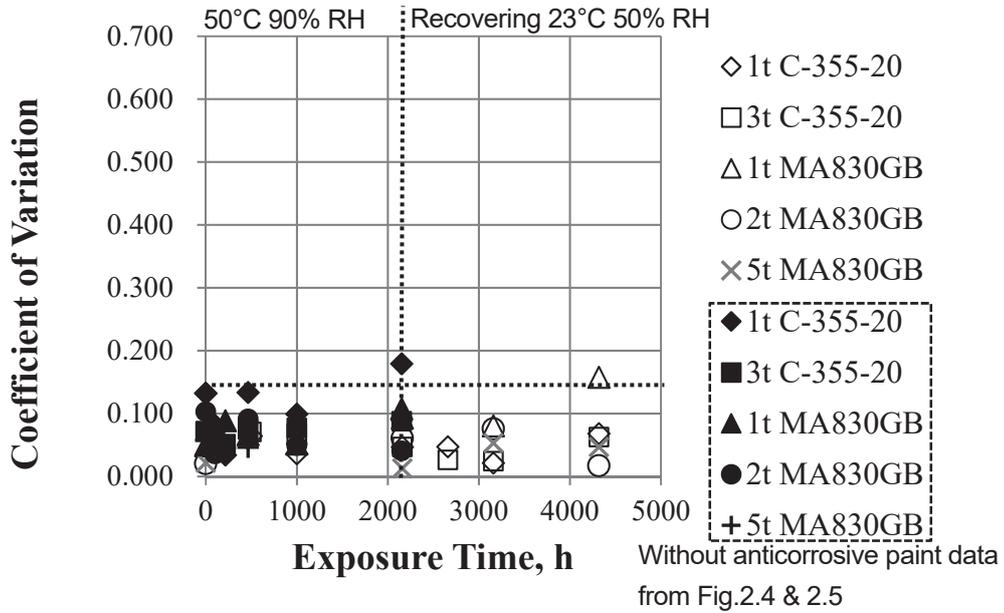


図 2.9 吸水後乾燥回復試験における変動係数と暴露時間の関係¹²⁾

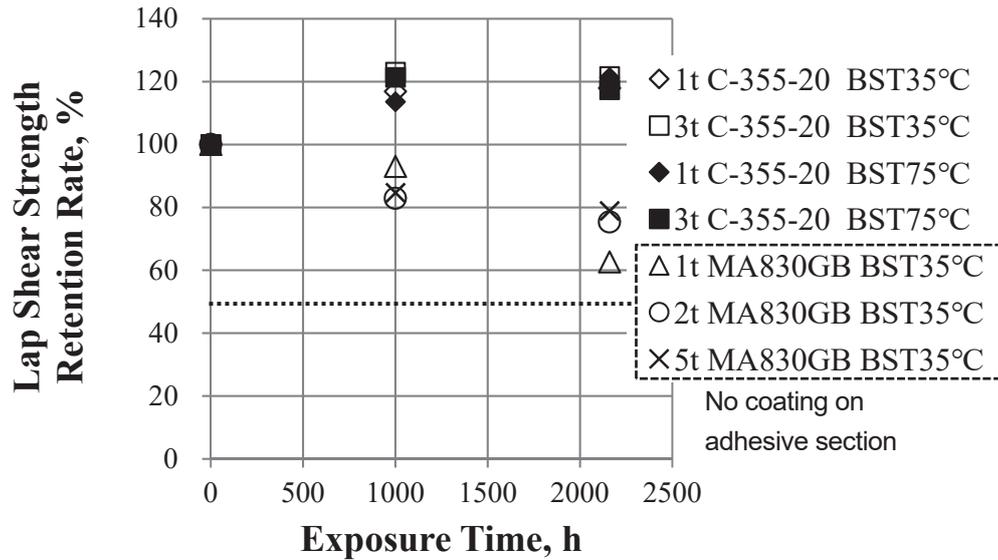


図 2.10 Xe 暴露耐候性試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係¹²⁾

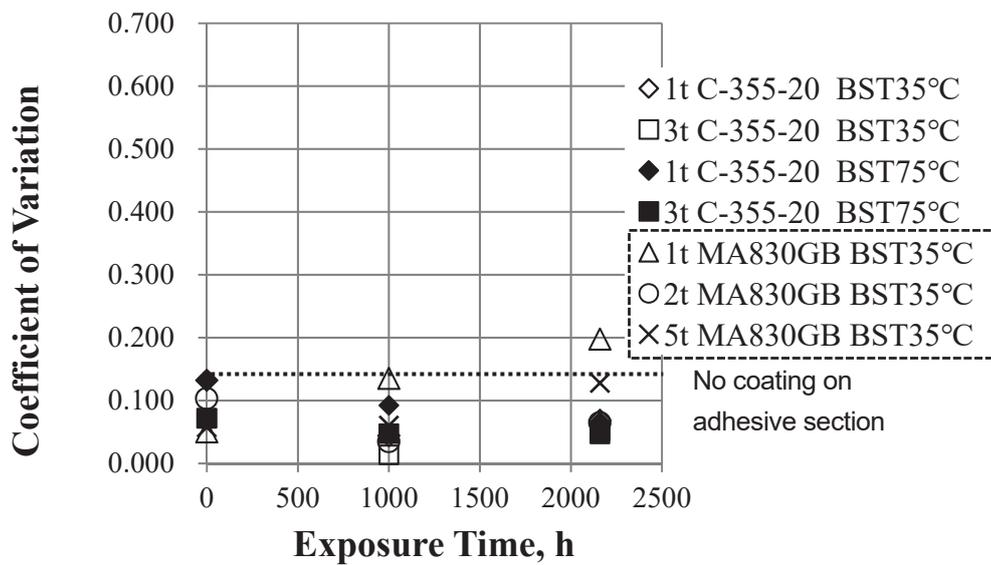


図 2.11 Xe 暴露耐候性試験における変動係数と暴露時間の関係¹²⁾

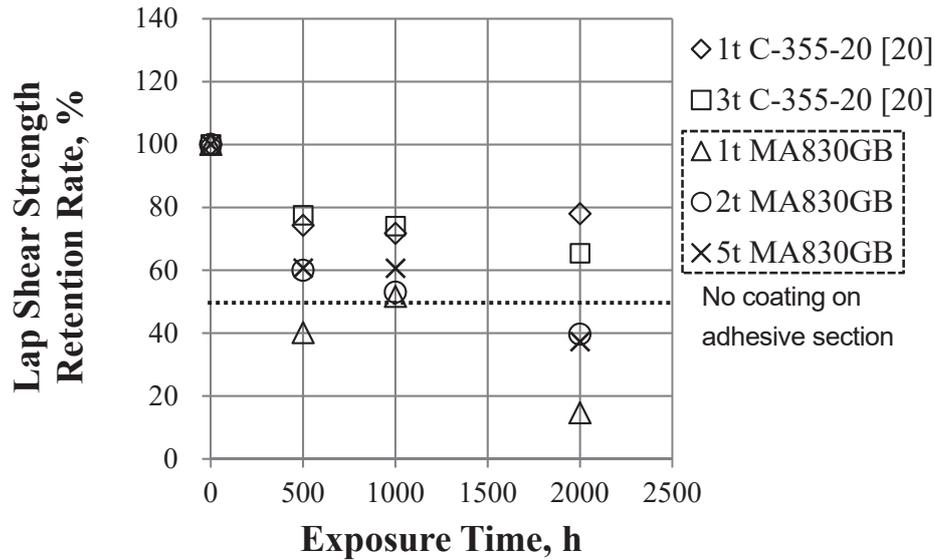


図 2.12 耐塩水噴霧試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係¹²⁾

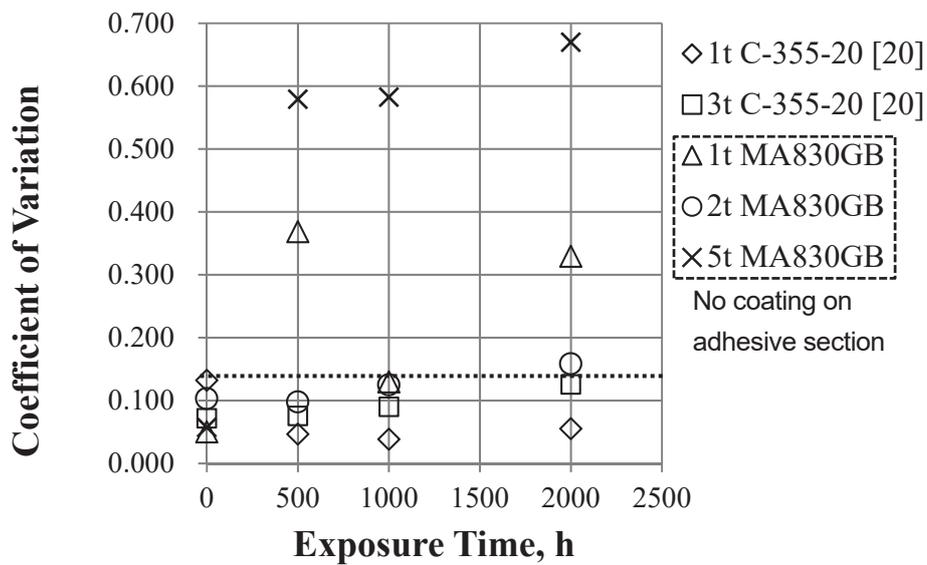


図 2.13 耐塩水噴霧試験における変動係数と暴露時間の関係¹²⁾

2.3.2 設計基準強度

設計基準強度は以下の式で表される⁵⁾。

$$S = \mu_0 \times \eta_T \times h \times D_y \times \eta_d \tag{2.1}$$

ここで、 S は設計基準強度、 μ_0 は室温における初期平均破断強度、 η_T は温度依存係数、 h は内部破壊係数、 D_y は劣化後のばらつき係数、 η_d は劣化後の強度保持率である。

接着強度のばらつきが小さな二液室温硬化型変性アクリル系接着剤の接着強度の分布は正規分布と見なせると報告されている⁵⁾。正規分布の全体の面積を1としたときに、強度 p 以下の領域の面積の割合 $F(x)$ は、以下の式で表される²⁾。

$$F(x) = \int_0^p \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx \quad (2.2)$$

ここで、 μ は接着強度の平均値、 σ は接着強度の標準偏差、 p は必要とされる接着強度の下限である。これらを用いると、劣化後の変動係数 CV は σ/μ 、劣化後のばらつき係数 D_y は p/μ と表される。CV と D_y は以下の式で表される⁵⁾。

$$D_y = 1 - \alpha(x) \times CV \quad (2.3)$$

ここで、 α は、信頼区間 (Confidence interval) を表す係数で、 $F(x)$ に応じて決まる値である。 $F(x)$ は許容不良率 (PDA : Percent Defective Allowable) に相当し、例えば、PDA=1/100,000 の場合は $\alpha=4.2672$ 、PDA=1/1,000,000 の場合は $\alpha=4.7605$ である⁵⁾。ここで、PDA は設計段階で仮定される不良率の上限である。造船における PDA として適切な値は、船級と造船所により決定されるべきであるが、本研究では接着に関する文献⁵⁾を参照し、電子部品の製造分野で用いられているのと同じ値 PDA=1/100,000 と仮定した。参考までに、溶接継手の疲労設計強度においては、 $\mu-2\sigma$ が用いられており²²⁾、この強度を満たさない確率は約 1/20 である。

日本海事協会のガイドラインでは、 μ_0 と η_T は接着剤製造者によりデータシートとして製品に添付されることとされ、 h, D_y, η_d はそれぞれ下限値として 0.25, 0.4, 0.5 が設定されている⁶⁾。このうち h については、安全側の値として高サイクル疲労時の値 0.25 が、すべての場合の h に採用された。本研究では、実験的に決定する必要がある D_y と η_d の数値の妥当性について評価を行った。実験結果から D_y を直接評価できないため、(2.3)式より許容不良率 PDA=1/100,000 とする場合の劣化後の変動係数 $CV \leq 0.14$ が $D_y \geq 0.40$ に相当する⁵⁾ことから、 $CV \leq 0.14$ として評価を行った。その結果、高温高湿劣化促進試験の試験片を除いて試験片の接着部が保護塗膜でコーティングされている C-355-20 の場合、高温高湿劣化促進試験も含む全ての環境劣化試験の結果において、劣化後の強度保持率 η_d は 0.5 以上で、劣化後の変動係数はほぼ 0.14 以下であった。すなわち、本研究で得られた実験結果のばらつきでは、劣化後の平均強度の 40%以上で許容不良率 1/100,000 を満たしており、許容不良率を更に大きく設定することにより、更なるばらつきが許容される。

劣化係数が複合される場合、 η_d は個々の劣化後の強度保持率の積となる⁵⁾。

$$\eta_d = \eta_{d1} \times \eta_{d2} \times \dots \times \eta_{dn} \quad (2.4)$$

まず C-355-20 の結果について評価を行う。強度が改善した吸水後乾燥回復試験と Xe 暴露耐候性試験の結果は除外する。接着層が厚い 3mm 厚の場合、最も低い値は、耐塩水噴霧試験の η_{d1} は 0.65、50°C90%RH の高温高湿劣化促進試験の η_{d2} は 0.70 であった。よって、両方の劣化が複合される場合、 η_d は 0.45 となる。しかしながら、日本海事協会のガイドラインでは追加の安全率 0.5 が加えられている⁶⁾ため、PDA=1/100,000 とする場合の劣化後の変動係数が 0.14 以下であれば、 η_d の下限値として 0.25 が許容可能である。このように、保護塗膜が効果的であれば、暴露環境であっても、設計基準強度の式において、劣化後のばらつき係数 D_y は 0.4 以上、劣化後の強度保持率 η_d は 0.5 以上、追加の安全率 0.5 とする日本海事協会のガイドライン⁶⁾は、PDA=1/100,000 とする場合ほぼ妥当であると考えられる。

これに対して、試験片の接着部が保護塗膜でコーティングされていない MA830GB の場合、例えば接着層厚 2mm では、最も低い値は、耐塩水噴霧試験の η_{d1} は 0.45、50°C90%RH の高温高湿劣化促進試験の η_{d2} は 0.67、Xe 暴露耐候性試験の η_{d3} は 0.75 であった。よって、50°C 以下でもすべての劣化が複合される場合、 η_d は 0.20 となる。更に、暴露時間が 2,000 時間に達しても暴露時間の増加と共に強度は低下している。よって、接着部が保護塗膜無しで暴露される場合、暴露環境では使用できない。

2.3.3 表面燃焼性試験結果

アルミニウム基板にアルミニウム表面材が接着されている構造の表面材の結果を表 2.3¹²⁾に示す。試験方法並びにこれらの試験結果より、当試験片は「2010 火災試験方法コード¹⁷⁾の付録 1『火災試験方法』のパート 5「表面燃焼性試験（表面材と一次甲板床張り材の試験）」に規定されている「隔壁，天井または同様の暴露する表面の表面材」としての低火炎伝播性特性の要求基準を満たしていると判定される。また，2010 火災試験方法コード¹⁷⁾の Annex2 の第 2.2 節で規定される煙・毒性試験の免除規定も，当試験片は満たすものとみなされる。ここで，2010 火災試験方法コード¹⁷⁾の Annex2 の第 2.2 節で規定される要件は，「総放出熱量 (Q_t) が 0.2MJ を超えず，かつ，ピーク熱放出速度(Q_p)が 1kW を超えない (Q_t 及び Q_p は付録 1 のパート 5 に従って決定された値とする。) 表面材及び一次甲板床張り材は，追加の試験なしに付録 1 のパート 2 の要求事項に一般に適合するとみなす。」である。

ただし，図 2.2 で示される構造の表面材として要求基準を満たしているのであり，露出した表面としての接着剤ではないため，断熱仕切りに使われる接着剤としては要求基準を満たしているわけではない点に注意を要する。

表 2.3 表面燃焼性試験結果¹²⁾

試験片番号	単位	1	2	3	平均	隔壁、壁及び天井張りに関する基準
パイロット炎	-	プロパン接触炎	プロパン接触炎	プロパン接触炎	-	-
着火の有無	-	不着火	不着火	不着火	-	-
着火時間	min:s	-	-	-	-	-
消火時間	min:s	-	-	-	-	-
試験時間	min:s	10:00	10:00	10:00	-	-
燃焼距離	mm	0	0	0	0	-
着火のための熱量 Q_i	MJ/m ²	-	-	-	-	-
消火時の臨界熱流束 CFE	kW/m ²	50.70	50.70	50.70	50.7	≥ 20.0
燃焼持続に必要な熱量 Q_{sb}	MJ/m ²	-	-	-	- *	≥ 1.5
総放出熱量 Q_t	MJ	0.01	0.00	0.00	0.00	≤ 0.7
燃焼熱放出速度 Q_p	kW	0.13	0.09	0.12	0.11	≤ 4.0
燃焼する炎滴	-	なし	なし	なし	-	生じないこと

* 燃焼距離が175mmに達した試験体が一つもないため、 Q_{sb} は定義されない。基準を満足したものとみなされる。

2.4 まとめ

被着体として A5052/A5052 を用いて造船用の厚い接着層からなる SGA 構造接着継手の耐久性と燃焼性の評価を行った。結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 母材である被着体を保護するための保護コーティングが，適切な状態であれば，接着部は被着体と共に保護される。保護塗膜が効果的であれば，暴露環境であっても，設計基準強度の式において，劣化後のばらつき係数 D_y は 0.4 以上，劣化後の強度保持率 η_d は 0.5 以上，追加の安全率 0.5 とする日本海事協会のガイドライン⁶⁾は， $PDA=1/100,000$ とする場合ほぼ妥当であると考えられる。

(2) 保護コーティングが無い場合は，特に塩水噴霧と高温高湿環境において接着強度は不十分となる。接着部が保護塗膜無しで暴露される場合，暴露環境では使用できない。

(3) アルミニウム基板にアルミニウム表面材が接着されている構造の表面材の試験結果によれば，試験片は「2010 火災試験方法コード¹⁷⁾の付録 1『火災試験方法』のパート 5「表面燃焼性試験（表面材と一次甲板床張り材の試験）」に規定されている「隔壁，天井または同様の暴露する表面の表面材」としての低火炎伝播性特性の要求基準を満たしていた。

3. 構造用接着剤の組織構造分析並びに引張せん断継手に関する解析

3.1 はじめに

構造用接着剤の組織構造の特徴、弾性率等の機械的性質について分析を行なった。さらに造船工程で使うことを想定して 1mm を超える厚さを持つ接着剤に対して引張せん断重合せ継手試験による強度評価試験を行い試験温度と引張速度が継手の伸び特性および強度に与える影響を求めた。このような極厚接着剤に対して FEM による応力解析は行われておらず、応力解析の可能性を検討するために、継手試験の結果と FEM による弾塑性解析を行った結果とを比較した。

3.2 構造及び物性

構造用接着剤とは、JIS では「長時間大きな荷重に耐える信頼できる接着剤」という機能に基づいた規定がされている²³⁾が、このような特徴を持たせるためにアクリルやエポキシといった高分子の樹脂の中にゴムのような粒子を分散させた組織を持っているのが一般的である (図 3.1)。ゴム粒子を分散させた場合では、ゴム粒子は破壊に際しての亀裂の進展を止める働きがあり、ゴム粒子が存在しない場合と較べて耐衝撃性や破壊靱性が向上する。ただし、強度が弱いゴムを含んでいるため機械的な強度は母材の高分子に較べて劣る。

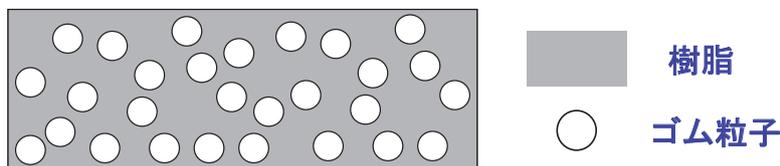


図 3.1 構造用接着剤の代表的な組織

図 3.2 は、造船用に可使時間を延長するため、海上技術安全研究所の委託を受けて、株式会社パフォーマンスポリマーズ&フルイズジャパンが ITW (Illinois Tool Works) Polymers Adhesives Inc. の PLEXUS™ MA830GB の遅硬型である MA832GB をベースに更に遅硬型に改良開発した X-12 (MA835GB 相当) の微細組織である。なお試料は電子顕微鏡で観察した。左図の暗い部分は母材のアクリル樹脂であり、明るい部分はゴム粒子が存在する領域を示している。更に透過型電子顕微鏡で観察したところ (右図)、左図のゴム粒子は A 成分のような形状をしていた。また、母材の部分にもサブミクロンオーダーのゴム粒子 (B 成分) 存在していることがわかった。ゴム粒子は体積で半分以上を占めていた。ゴム粒子の成分は熱分解 GC/MS による分析ではスチレン-ブタジエン型のゴムであることを示唆していた。

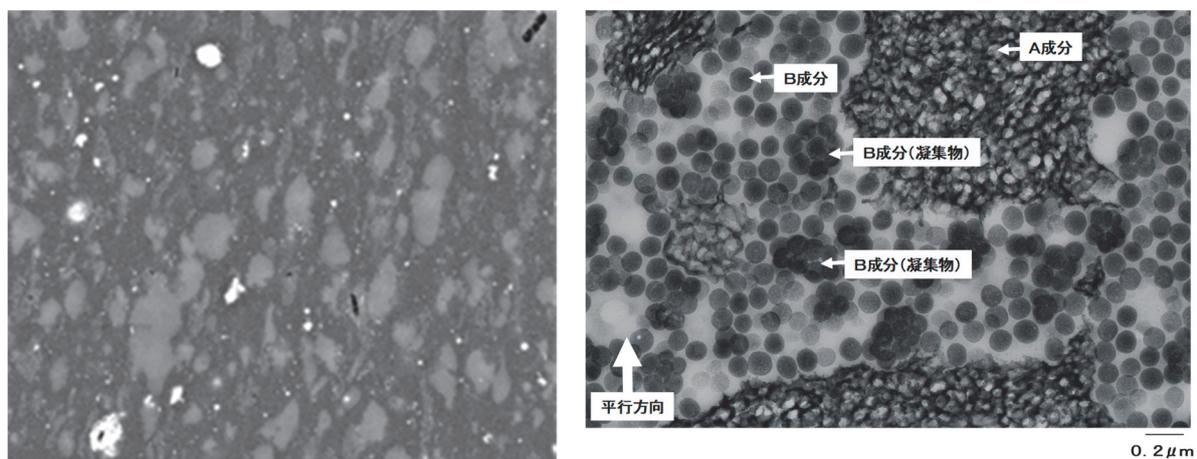


図 3.2 構造用接着剤の微細組織 (左図は電子顕微鏡, 右図は透過型電子顕微鏡で観察したもの)

3.3 機械的性質

測定に用いた試料は 3.1 で述べた接着剤で、被着材に塗布するときは主剤と硬化剤を混ぜて使用する二液混合型である。基礎的物性値であるヤング率 E とポアソン比 ν を求めるために、超音波計測および静的な引張試験を行った。また、接着剤にゴム粒子が含まれない場合と比較するためにアクリル樹脂にも同じ計測を行った。特にポアソン比は引張試験では精度上計測することが難しいが超音波計測では容易に求められるという特徴がある。

3.3.1 超音波計測

超音波計測は当初 FEM 解析に必要な材料定数を迅速に求める目的でおこなった。超音波計測の特徴として、測定に必要な試験片はセンサーの直径程度の大きさがあれば十分であり、計測時間が短くてすむといったことが挙げられる。一方、引張試験では試験片は規格に従って作製する必要があり、大きさも数十 cm 程度必要である。さらに、測定時間も超音波計測に較べてかなりかかる。最も大きな問題は引張試験ではポアソン比を精度的に求めることが難しいことが挙げられる。実際試験データを解析するとポアソン比の値はバラツキ大きく、0.5 以上というありえない値を示すこともあった。

超音波測定用試料は以下のように作製した。厚さ 10mm のアルミ合金の板の上に型を用いて接着剤を厚さ 5mm 程度の平板状に塗布し固化させた。接着面に平行になるように接着剤側を研磨し、図 3.3 に示すパルスエコー法に基づく超音波測定を行った。使用したセンサーの中心周波数は 5MHz である。最初は、接着剤中の超音波の減衰が大きくオシロスコープに波形が現れなかったが、研磨を行い接着剤の厚さを小さくしていき、厚さ 0.520mm になったところで縦波・横波ともはっきり現れるようになった (図 3.4)。また、弾性率の比較用として接着剤にゴム粒子がない場合を模擬した厚さ 3.990mm のアクリル樹脂の板を用意し同様な超音波計測を行った。アクリル樹脂の測定では超音波センサーを直接接触させて計測した。接着剤のヤング率 E とポアソン比 ν は、エコーの時間差と接着剤の厚さから縦波と横波の音速 v_l と v_t を求め、これらとは別に求めた接着剤の密度 ρ から次式²⁴⁾により決定した。アクリル樹脂の弾性率も接着剤と同様な方法で求めた。

$$M = \rho v_l^2, G = \rho v_t^2, K = M - \frac{4}{3}G, E = \frac{9KG}{3K + G}, \nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (3.1)$$

ただし、 M は縦波弾性率、 G はずり弾性率、 K は体積弾性率である。なお、ヤング率とポアソン比がわかっている場合には音速は上式を逆に解くことによって、

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}}, \quad v_t = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (3.2)$$

と表すことができる。

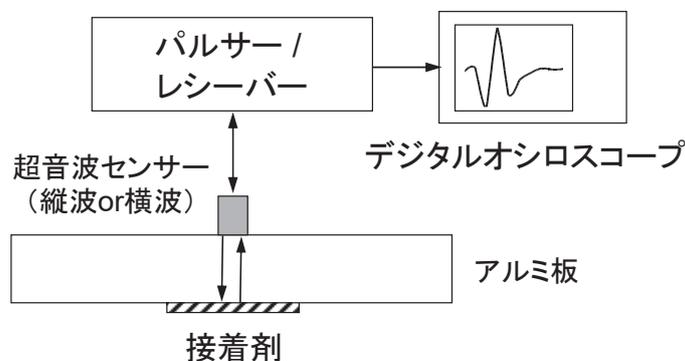


図 3.3 超音波測定系

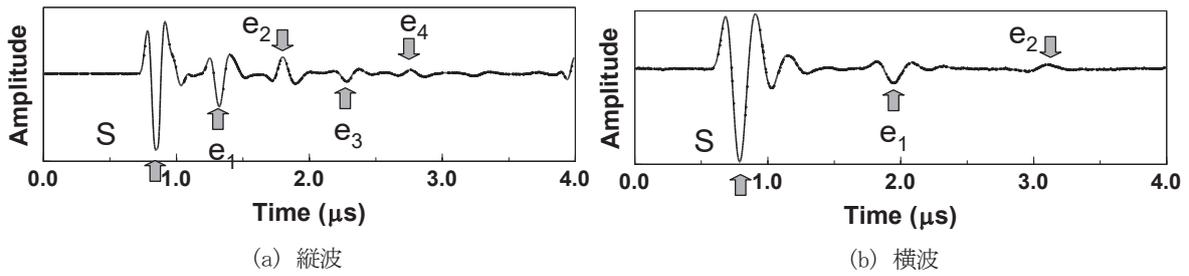


図 3.4 超音波波形 (S:接着剤と母材との境界面での反射, e₁, e₂, e₃, e₄: 接着層内の多重反射)

図 3.4 の波形をスペクトル解析により減衰係数と位相速度を求めた結果を図 3.5 に示す. 青線の接着剤を赤線のアクリル樹脂と較べると, 減衰率は高周波数になるに従って大きく増大するとともに位相速度はアクリル樹脂より小さいことがわかる. 接着剤はゴム粒子を多量に含むためこのような結果になったと考えられる. その理由としては, ゴム粒子は一般的にエネルギー減衰率が大きく, ヤング率も 1~3MPa²⁵)と小さいことである. すなわち, 接着剤はアクリル樹脂とゴム粒子の複合材料と見なせるため, 複合則より弾性率はアクリル樹脂より小さくなり, その結果, (3.1)式より音速が小さくなったと考えられる.

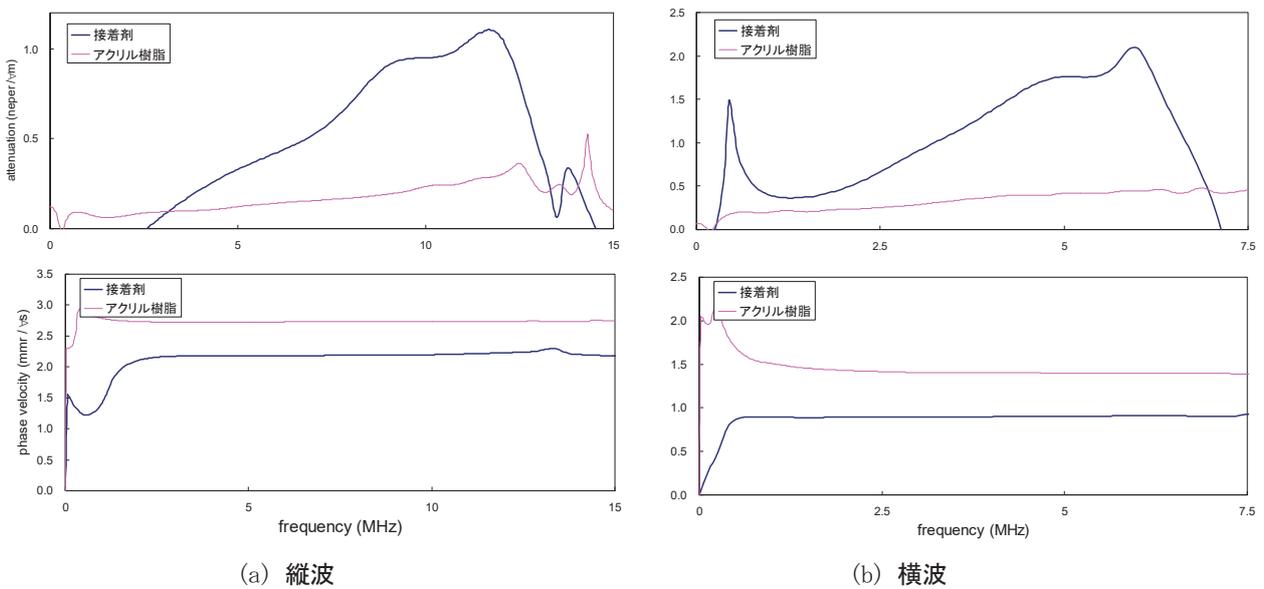


図 3.5 接着剤中を伝搬する波動のスペクトル解析結果 (赤線は比較としてのアクリル樹脂の結果):
上段の図より, 減衰係数 (neper/mm), 位相速度 (mm/μs)

超音波計測の結果を表 3.1 に示す.

表 3.1 超音波測定結果

	音速		密度 (kg/m ³)	体積弾性 率 (GPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン 比
	縦波 (m/s)	横波 (m/s)				
接着剤	2,165	897	1,097	3.96	2.47	0.40
アクリル樹脂	2,717	1,362	1,180	5.79	5.83	0.33

3.3.2 引張試験 (その1)

静的な弾性率を求めるために JIS K7162 1B²⁶⁾に基づくアクリル樹脂および接着剤の試験片を作製し引張試験により求めた。接着剤に関しては、短冊状の型に接着剤を流し込み一定の厚さで固化させた後、JIS の規格に従った形状に打ち抜くことで試験片を作製した。試験結果を図 3.6 に示す。これより、歪みが小さいため、ヤング率は σ - ϵ 曲線が直線と見なせる領域における直線の傾きから決定した。また引張強さは、アクリル樹脂と較べると接着剤は7分の1程度となっているが、破断までの伸びは接着剤の方が6倍程度大きい。この原因は、ゴムは引張強さが小さく伸びが大きいことから説明できる。なお、ここで試験した接着剤以外では後に述べるような伸びが小さくなくても引張強さが大きいものも存在している。

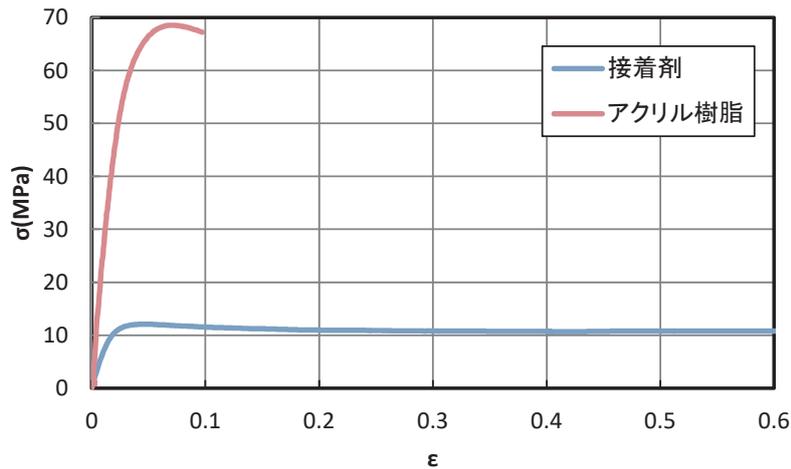


図 3.6 接着剤 (実線) とアクリル樹脂 (点線) の応力と歪みの関係の比較

3.3.3 超音波計測と引張試験の試験結果の比較

ヤング率を超音波計測と静的な引張試験のそれぞれの方法で求めた結果を比較したものを図 3.7 に示す。なお引張試験でのポアソン比は精度上有為なデータが得られなかったので比較はしていない。

図を見るとわかるように接着剤、アクリル樹脂ともヤング率は超音波計測の場合の方が倍以上大きくなっている。すなわち、周波数が大きくなるとヤング率は増大する。この原因として考えられることはアクリル樹脂やゴムのような高分子は粘弾性的な性質をもつことである。このような場合は引張試験でも引張速度 (正確に言えば歪み速度) によって弾性率が変わってくることが考えられる。特に接着剤の方はヤング率がアクリル樹脂に較べて3分の1以下なので引張速度の効果は大きいと予想される。また粘弾性体に対しては、ヤング率の温度依存性も考慮する必要が出てくる。そのため試験時の温度は一定にする必要がある。

また、超音波計測と引張試験ではヤング率が大きく違うので、超音波計測では比較的容易にヤング率が求められるものの、現実で使用されている部材のように超音波に較べて材料の変形速度が小さい部材の解析には使用できない。というのも実際に用いられている部材の変形は引張試験の試験片と同程度の時間変化であるので、引張試験で得られたヤング率を解析に使用するのが適切と考えられるからである。ポアソン比は今後の検討課題である。現時点では、ヤング率は引張試験結果をポアソン比は超音波計測結果得られた値を用いることが現実的な対応と思われる。というのも(3.1)式からわかるようにポアソン比は弾性率の比であり、周波数の変化に伴う縦弾性率係数と横弾性係数の変化が共に同じオーダーと仮定すると、ポアソン比は周波数が変化しても一定と考えられるからである。

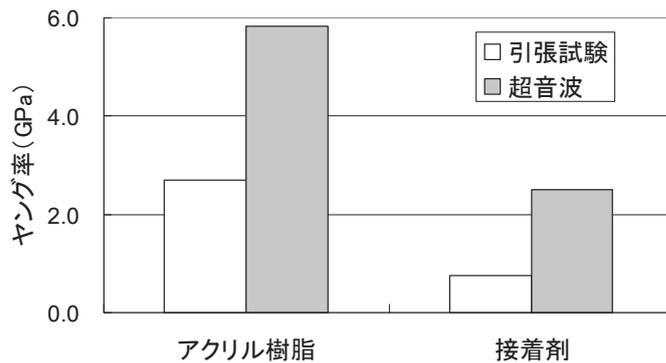


図 3.7 超音波計測試験および引張試験から求めたヤング率の比較

3.3.4 引張試験（その2）

3.3.3 で述べたように接着剤の正確な挙動を把握するには試験時の温度を一定に保ち、また記録することと、引張試験のような試験では歪速度依存性も考慮することが必要になる。そこで、MA830GB に対して引張速度および温度を変えて測定した結果について述べる。試験方法は 3.3.2 と同じで各引張速度で温度を変えて行った。試験結果を図 3.8 に示す。温度は 5°C と 50°C で、各温度で 5mm/min と 0.2mm/min で試験を行った。

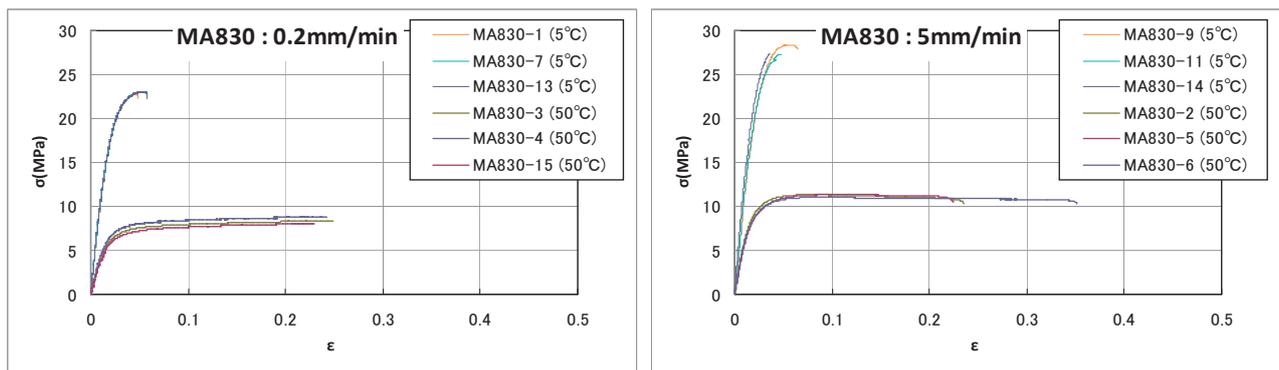


図 3.8 引張速度と試験温度を制御して行った引張試験結果
(MA830-XX の XX は試験片の番号)

図からわかるように、引張速度が大きくなるとヤング率および引張強さはともに上昇している。また試験温度の上昇によって引張速度に関係なくヤング率および引張強さは減少している。なお、ここで、引張速度とは試験片端部で試験片をつかむチャックの移動速度を指しており、歪み速度を求めるには試験片の標線間の長さの時間変化を求める必要がある。

3.4 引張せん断重合せ継手試験および FEM による解析

実際に接着剤を現実の船舶に応用することを想定して接着剤の厚さをいくつか変えて引張せん断重合せ継手試験による強度評価を行った結果について述べる。次に 3.3.4 で得られた応力歪み曲線を用いて FEM による解析を行った結果について述べる。

3.4.1 引張せん断重合せ継手試験

使用した接着剤は 3.3.4 と同じ MA830GB で、基材の金属はアルミニウム合金 5052-H34 を用いた。試験片は JIS-K-6851¹⁰⁾に基づいて製作した。接着層の厚さは 2mm と 5mm である。引張速度は 0.2mm/min、試験温度は 5°C と 50°C である。また、解析に用いた弾性率は 3.3.4 で得られたものを使用した。

試験に使用した試験片の変位と試験荷重の関係を図 3.9 に、試験結果を整理した表を表 3.2 に示す。

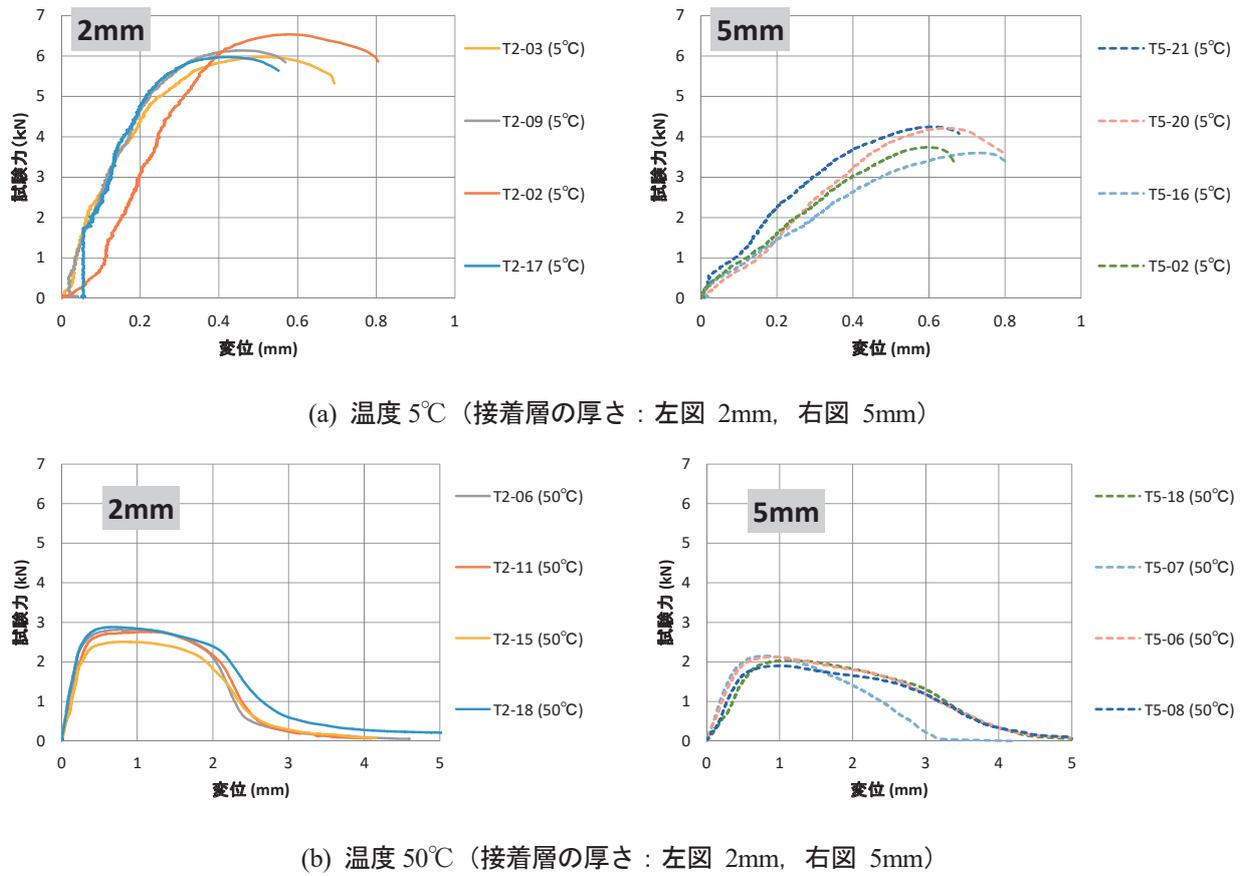


図 3.9 引張せん断重合せ継手引張試験結果 (試験温度：上図 5°C, 下図 50°C, 凡例の TA-BB で A は接着層の mm 単位の厚さ, BB は試験片番号)

表 3.2 重合せ継手引張試験結果のまとめ

試験 No.	接着層厚さ (mm)	試験温度 (°C)	最大引張荷重 ≐(kN)	破断状態	試験 No.	接着層厚さ (mm)	試験温度 (°C)	最大引張荷重 ≐(kN)	破断状態
T2-17	2	5	5.97	凝集	T2-06	2	50	2.81	界面
T2-02	2	5	6.53	界面	T2-11	2	50	2.75	界面
T2-09	2	5	6.14	界面	T2-15	2	50	2.51	界面
T2-03	2	5	5.98	凝集	T2-18	2	50	2.87	界面
平均(kN)			6.15		平均(kN)			2.74	
T5-02	5	5	3.74	界面	T5-08	5	50	1.85	界面
T5-16	5	5	3.60	界面	T5-06	5	50	2.12	界面
T5-20	5	5	4.21	界面	T5-07	5	50	2.20	界面
T5-21	5	5	4.25	界面	T5-18	5	50	2.00	界面
平均(kN)			3.95		平均(kN)			2.04	

変位が小さい間は試験力が線形に増大するが、変位が大きくなると増加がゆるやかになり線形から外れてくる。これは接着剤の一部が塑性域に入ったからと考えられる。すなわち弾性状態と塑性状態が混合して存在している。板厚が小さい方が最大引張荷重は大きくなる。同じ板厚では温度が低い方が引張荷重は大きくなった。また同じ仕様で作製したにも関わらず試験片毎のばらつきが見られた。平均した最大引張荷重で比較すると、接着層の厚さが 2mm から 5mm に増えると、荷重は 5°C の場合は 36%、50°C の場合は 25% に減少した。

破壊の形態は厚さ 2mm の一部を除き界面破壊であった。

3.4.2 引張せん断重合せ継手試験結果の FEM による解析

重合せ継手の FEM による解析として接着剤が弾性状態と仮定した解析が行われたが、接着層が厚くなるに従って強度が低下するという試験結果を説明できない問題があった⁽²⁷⁾。しかし、接着剤は金属に比べ降伏応力が小さく、応力集中が起きる接着剤端部などは塑性状態に移行していると考えられる。よって接着剤を弾塑性体と仮定することによって試験結果を説明できる可能性がある。さらに高分子の降伏応力は歪み速度依存性があるためその効果も考慮することが必要となる。そこで、重合せ継手の試験結果を再現することを目的に FEM による解析を行った。使用したソルバーは Marc2015、プリポストは Mentat2015 である。解析は試験温度 5°C で接着層の厚さが 2mm と 5mm のものに対して行った。

継手は図 2.1 の形状から接着層の部分は平面歪みと見なした。また接着剤の一部が降伏状態になった後も解析できるように弾塑性解析を行い、図 3.8 の試験温度 5°C のグラフのうち、引張速度が 5mm/min の場合としては試験片番号 MA830-9、0.2mm/min の場合としては MA830-7 を選び、相当塑性歪みと真応力の関係をそれぞれ求めた (図 3.10)。降伏条件として相当ミーゼス応力を選択した。ヤング率は歪みが小さいときの歪みと応力の比より求めた。

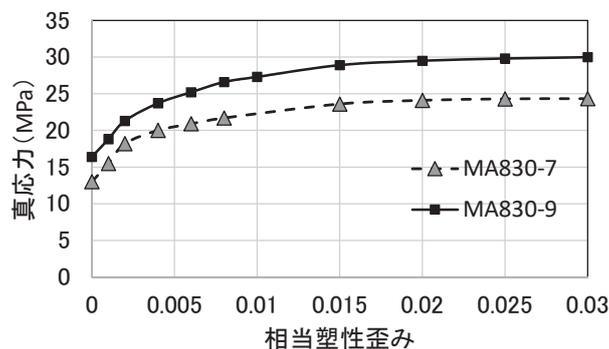


図 3.10 弾塑性解析に用いた相当塑性歪みと真応力の関係
(MA830-7 : 引張速度 0.2mm/min, MA830-9 : 引張速度 5mm/min)

また異種材料の境界面の応力は、異種材料の応力が平均化されるため正確な応力が求められない。例えば界面での剥離が発生する場合は、剥離する材料の正確な応力を知る必要がある。そこで、材料ごとに界面の応力を正しく求めるために Marc の「接触」の機能を用いた。接触の機能を用いると境界面の節点が接着層とアルミニウムで別々に定義できるため、界面での応力が材料ごとに求めることが可能となる。

図 2.1 のすべてを解析するのではなく必要な部分だけを取り出した。解析に用いた形状、境界条件および要素の例を図 3.11 に示す。試料を縦の断面方向から見たものに相当する。図は接着層の厚さが 2mm の場合である。上部のアルミニウム合金の右端の中央の節点で X 方向の強制変位を与え、その他の右端の節点に関しては X 方向の変位が強制変位に等しくなるようにした。境界面で節点の連続していないところがあるが、「接触」の機能を用いているので問題は生じない。弾性率がアルミニウム合金に比べて小さい接着層の方の要素の大きさを小さく設定した。また「リメッシュ」の機能を用いて要素の変形が大きいところでは自動的に要素の分割が起きるようにした。例えば、接着層の端部では大きな応力集中が発生し要素も大きく歪むため、端部の応力を正しく求めるためには歪みの少ない要素に再分割するリメッシュの機能は有効と考えられる。

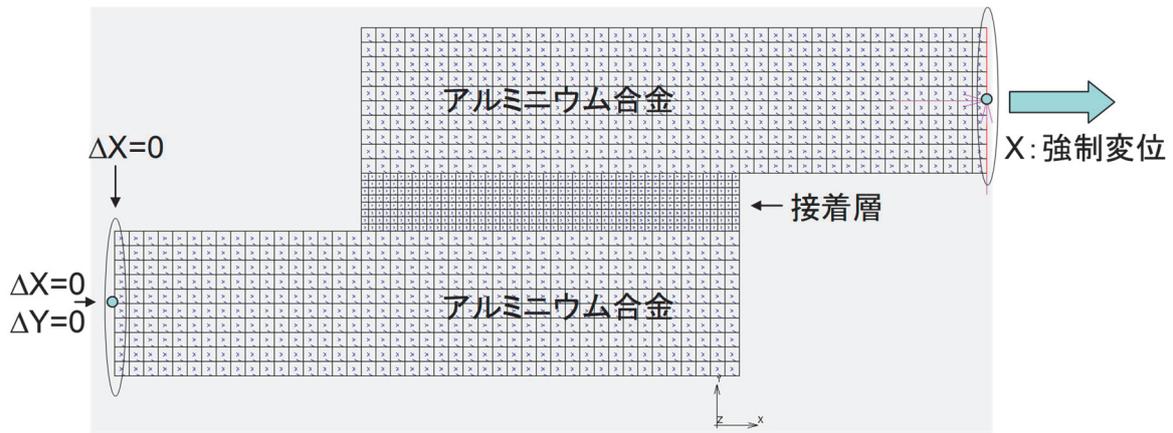


図 3.11 解析に用いた形状、境界条件および要素の例 (接着層の厚さ 2mm)

解析結果を図 3.12 に示す。試験力は右端の節点の応力 σ_{xx} を平均したものに板部分の断面積をかけて求めた。その理由は、 σ_{11} は一定ではなく、しかも中央の節点に対して対称ではないからである。また、図中の MA830-7 および MA830-9 は引張試験で相当応力歪みと真応力の関係を求めるときに選択した試料の名前であり、MA830-7 が引張速度 0.2mm/min の $s-s$ 曲線を用いて計算した結果、MA830-9 が引張速度 5mm/min の $s-s$ 曲線を用いて計算した結果に対応している。

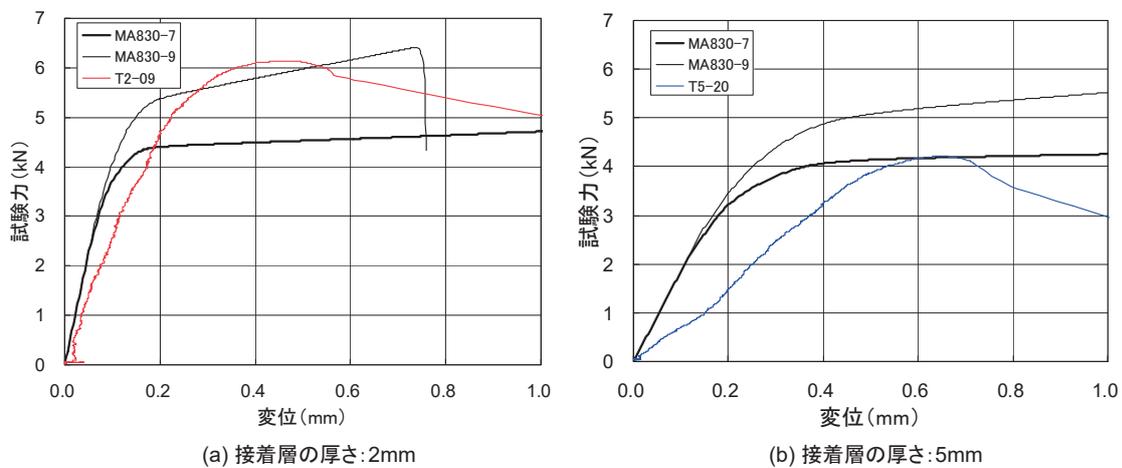


図 3.12 解析結果と試験結果の比較 (MA830-7 : 引張速度 0.2mm/min の $s-s$ 曲線を用いて計算, MA830-9 : 引張速度 5mm/min の $s-s$ 曲線を用いて計算, T2-09 および T5-20 は図 3.9(a)参照)

接着層の厚さが 2mm の場合では、MA830-9 の方が試験結果との一致がよい。一方、厚さ 5mm の場合では MA830-7 の方が一致がよい。この理由としては、厚さ 2mm の場合は接着層が薄いため層内の歪みの時間変化が大きいので、相当塑性歪み速度が大きくなり MA830-9 との一致がよくなったと考えられる。一方接着層が厚いと層内の歪みの時間変化が小さくなるため、相当塑性歪み速度も小さくなり MA830-7 との一致がよくなったと考えられる。すなわち接着剤を弾塑性体と仮定しさらに歪み速度依存性を考慮することによって従来の弾性解析では説明できなかった接着剤の膜厚の増大とともに接着剤強度が低下する現象が説明可能となる。なお、今回適当な破壊条件を組み込んでいないので実験のように試験力は最大値を示した後減少するという挙動を示していない。界面の密着力の設定や破断歪みに達した要素は計算しない等の改良を加えれば試験結果に近くなると考えられる。

また、リメッシュの設定をした効果だが、リメッシュが発生する変位は試験で破断した変位より大きな値だったので有効性について確認できなかった。しかし、解析前は要素の歪みの度合いが未知なのでリメッシュの設定をするのは意味があると思われる。

次に試験において最大の試験力を示す変位付近での相当塑性歪み速度（EPSR）について考察する。図 3.13 が厚さ 2mm で変位 0.3mm、図 3.14 が厚さ 5mm で変位 0.6mm の場合である。青色の領域は値がゼロに近く、赤色、黄色と変化するにつれて値が大きくなる。

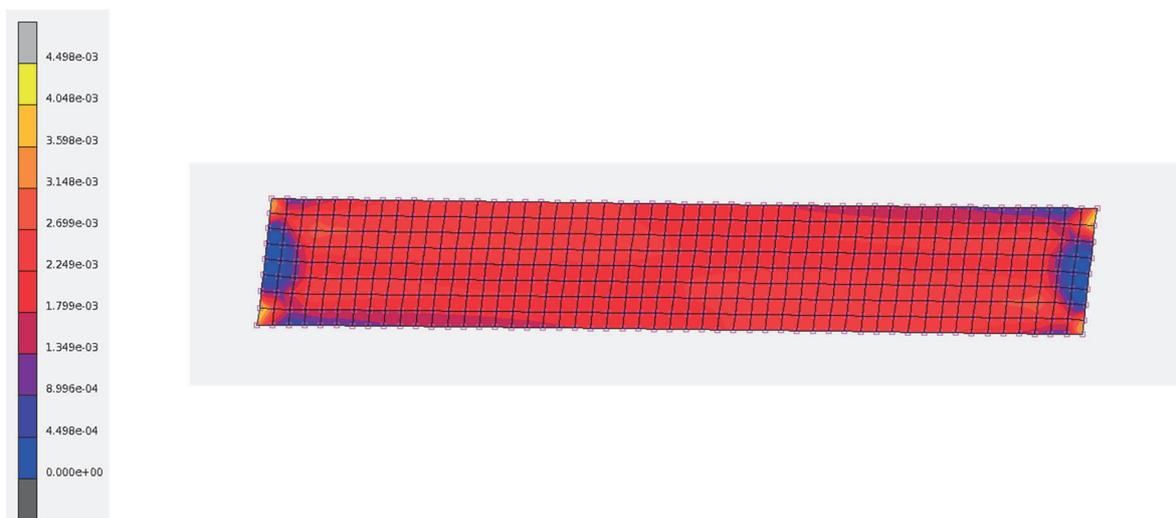


図 3.13 接着層の厚さ 2mm, 変位 0.3mm における相当塑性歪み速度 (s^{-1})

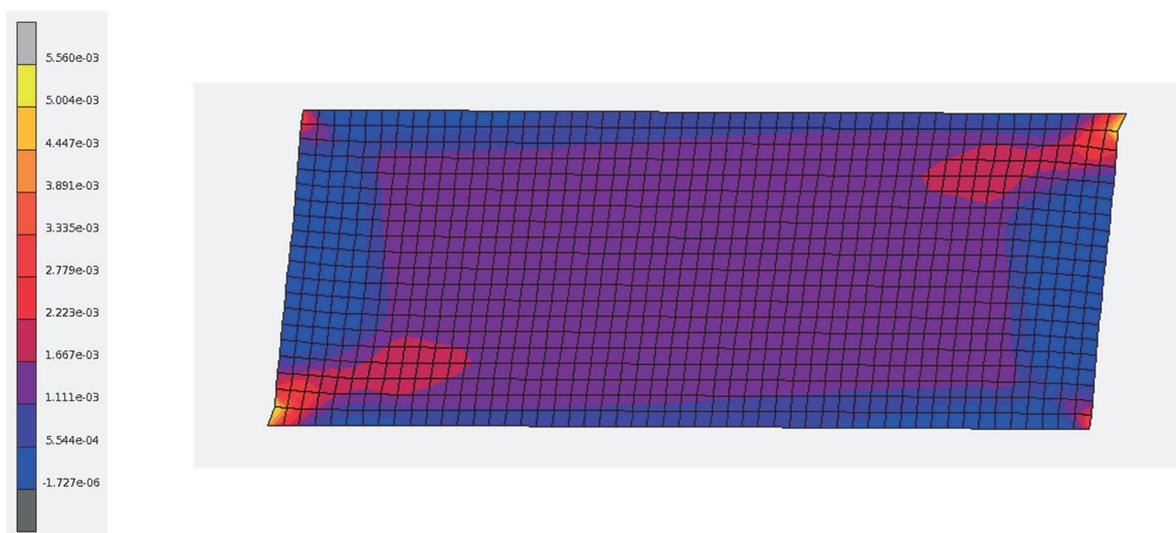


図 3.14 接着層の厚さ 5mm, 変位 0.6mm における相当塑性歪み速度 (s^{-1})

厚さ 2mm, 5mm の両方とも隅で EPSR が大きくなる。また厚さ 2mm ではほとんどの領域で EPSR が高い。厚さ 5mm では EPSR が大きい領域が少ないが存在はしている。3.3.4 で述べたように接着剤の応力と歪みの関係は歪み速度によって変わってくるので、より正確な変位と荷重力を解析するためには歪み速度依存性を考慮する必要がある。今回はデータが少なく実行できなかったが今後の課題としたい。

3.5 まとめ

構造用接着剤の組織と機械的性質について分析を行った。また、接着層の厚さが 1mm 以上の接着剤に対して引張せん断重合せ継手による接着材の強度評価試験を行った。試験温度が 50℃の場合の接着剤の強度は 5℃の場合に較べて 50%程度に低下することがわかった。これは船体暴露部等温度変化が大きい構造物に適用する場合に注意を要することを示している。さらに引張せん断重合せ継手試験で使用了試験片の接着剤厚塗り接合部を模擬した FEM モデルによる弾塑性解析を行い試験結果との比較を実施した。その結果、FEM から得られた試験力は試験結果の最大引張荷重と同程度の値となり、また従来の弾性解析では説明できなかった接着剤の膜厚の増大とともに接着剤強度が低下する現象を FEM の解析結果からも確認したことから、接着剤の厚塗り接合部の強度評価について FEM 適用の可能性を示した。また、加えて試験結果と解析の正確な比較を行うためには、接着剤の動的性質について考慮する必要があることを指摘した。

4. 実船の暴露部における接着継手の耐久性及び劣化要因

4.1 はじめに

接着接合は、溶接接合と比較して、強度に対する温度影響が大きいという特徴がある。船舶の暴露部は、日射等により継手が高温となる可能性があり、更に風雨や海水に曝される環境でもある。暴露部への接着接合の適用に対しては、日本海事協会のガイドライン⁶⁾（以下、ガイドライン）においても、接着剤の性能が十分に適合していなければ、適用を除外するとしており、特に注意深く扱われている。

船舶への接着接合適用に関するこれまでの検討²⁸⁻³⁰⁾においては、接着剤の種類、初期強度、作業性といった点について知見が得られている。一方で、継手を実環境で使用した場合の耐久性については、船内に施工し1年経過後も良好な状態であったという事例はあるものの、暴露部については施工結果が報告されているのみである²⁾。

本章の研究では、船舶の暴露部における接着継手の長期耐久性に関する知見を得るべく、国内を航行する船舶の甲板に接着継手試験片を設置し、その劣化過程を周囲環境と関連づけて検討した³¹⁻³³⁾。また、国際航路では、温度の面で接着継手にとって更に過酷な環境となる可能性があることから、外航船上において、甲板の表面温度の計測、評価を行った^{32,33)}。

4.2 実験方法

4.2.1 接着継手の実船暴露試験

1) 試験片

荷重を制御した接着継手を実船環境に暴露し、同時に暴露環境を計測した。荷重を制御し、かつ船上で安全に試験を行う目的で、船体に直接、接着を行うのではなく、試験片を用いることとした。図4.1に試験片の外形を示す。アルミニウム合金（A5052）板の短冊試験片2枚を用い、接着部をサンドブラスト処理した上で、接着剤層の寸法が $10\text{mm} \times 20\text{mm} \times 3 \pm 0.5\text{mm}$ となるように、引張剪断試験片を製作した。接着剤として、デンカ製構造用アクリル接着剤 C-355-20A/C-355SL-20Bを用いた。

試験片を図4.2に示す荷重治具に取り付け、接着部に引張剪断荷重を負荷した。本治具は、図中のナットを締め込むことで、ばねが圧縮され、試験片に荷重を与えることが出来る構造となっている。ばねの長さ（変形量）を計測し、ばね定数（ 39N/mm ）を乗じることで、荷重の値を算出した。

本試験片3本の引張試験を行い、平均引張剪断強度として 11.9MPa （室温 24°C における値）を得た。ガイドラインにおける安全係数40を考慮すると、設計許容応力は 0.3MPa （室温で供用する場合）となる。一方で、本章で行った暴露試験は、試験としては長期間であるものの、実船の供用期間（10年以上）を考慮すると短い。そこで劣化を促進するために、暴露試験での負荷応力を 0.3MPa より高く採ることとした。同じくガイドラインにおける劣化促進試験後の要求強度が 3.5MPa であることを参考に、 3.6MPa （高荷重条件）、 2.9MPa （定荷重条件）の二水準の荷重をそれぞれ試験片に負荷した。

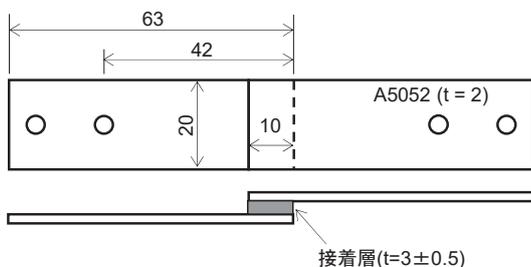


図 4.1 接着継手の引張剪断試験片外形及び寸法³³⁾

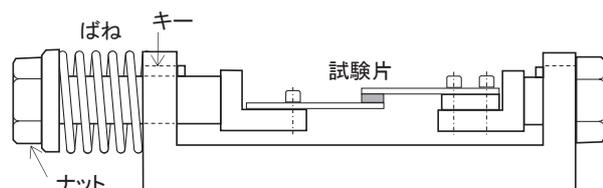


図 4.2 引張剪断試験片の荷重治具外形³³⁾

2) 暴露試験

弓削商船高等専門学校の練習船「弓削丸」(総トン数 240GT) 船上の、図 4.3 に示す 3 箇所、高荷重条件及び低荷重条件試験体を 1 個ずつ、それぞれ設置した。羅針甲板 (記号: CO) 及びファンネル右舷側面 (記号: FN) は囲いがなく、外部環境に直面する暴露部であり、比較環境として機関室内 (記号: ER) にも試験片を設置した。

暴露試験は平成 27 年 10 月から、平成 28 年 12 月までの 426 日間実施した。試験中数ヶ月毎に、接着継手の状態を確認すると共に、接着継手の環境劣化によって試験治具のばねの伸び (荷重の低下) が生じている場合はナットを締め込んで、再負荷を行った。

試験開始から、CO 及び FN について平成 28 年 6 月まで、ER については同 3 月まで、試験片治具上又は試験体近くの船体構造の表面温度を、表面温度計により手作業で計測した。その後、より詳細に環境の情報を得るために、記録装置による自動計測に切り替えた。CO 及び FN では、試験体近くの船体又は治具上に表面温度センサ及び紫外線強度計を設置し、15 分毎に値を記録した。ER では、温湿度ロガーを取り付け、同じく 15 分毎に記録を行った。

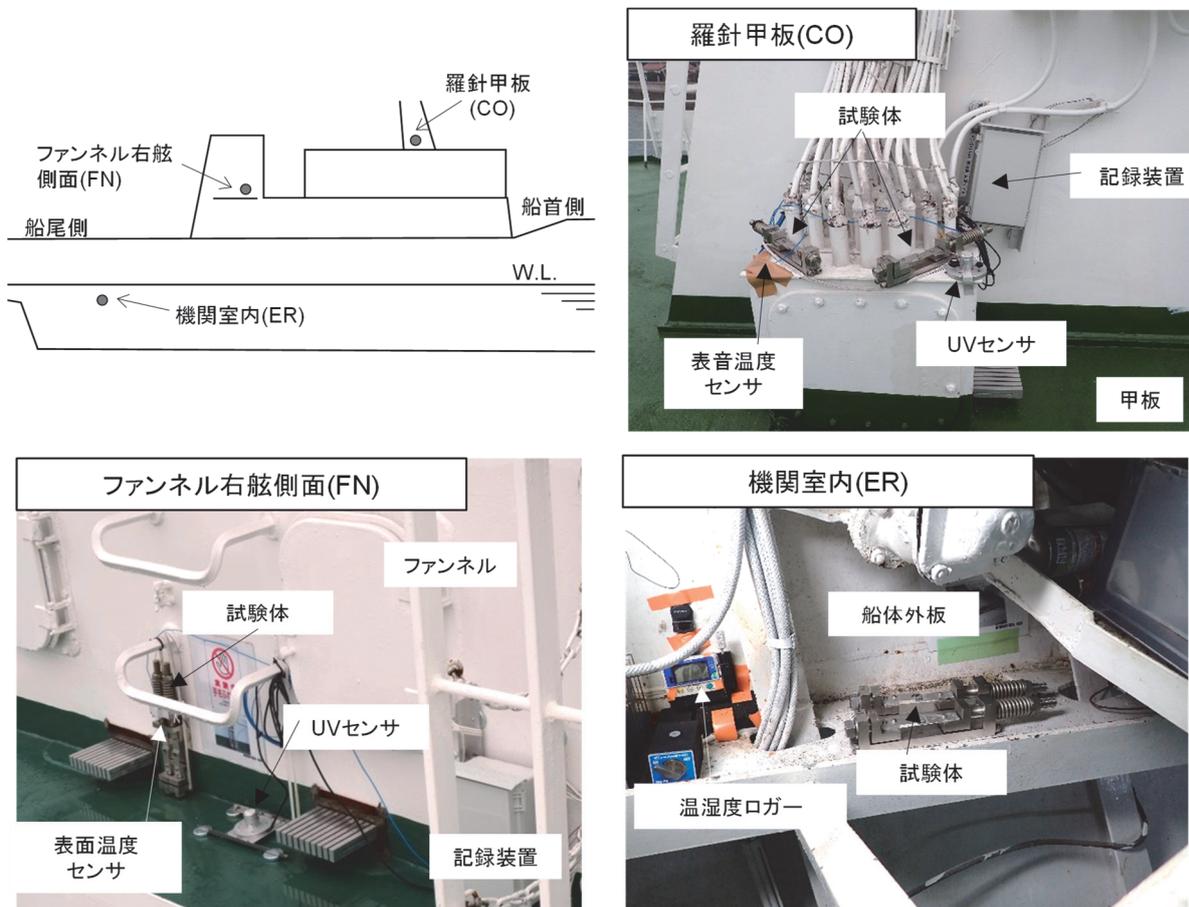


図 4.3 弓削丸における接着継手暴露試験 試験体及び自動計測機器設置位置³³⁾

4.2.2 外航船上の甲板における表面温度計測

海上での鋼構造物の表面温度計測例として、安藤らは山形県沖の海洋構造物を計測し、50~60°Cという最大温度を報告している³⁴⁾。一方で国際航海に従事する船上では、ハッチカバー上で65°Cまで温度が上昇する事例がある³⁵⁾等、構造表面がより高い温度にまで達する可能性がある。暴露部への接着継手において、想定すべき最高温度について知見を得るため、外航商船を対象として、甲板表面の温度計測を行った。

船尾機関室，船尾居住区型商船一隻の居住区最上部の甲板（羅針甲板）の船首尾（Fore, Aft）及び左右（P, S）に表面温度計を取り付け，P,Sには紫外線強度計も設置した．平成29年8月から平成30年1月までの166日間，弓削丸での計測と同様に，15分毎に表面温度及び紫外線強度を自動計測した．

4.3 実験結果

4.3.1 接着継手の実船暴露試験

1) 接着継手の劣化状況

暴露試験中の各継手の引張剪断応力の変化を，図4.4に示す．試験開始から平成28年6月までは，各試験片共に応力の大きな変化がなく，接着継手は劣化（強度低下）していない．その後，6月から9月の間にかけて，特にCO及びFNの高荷重試験片で，荷重の大きな低下がみられた．試験片の接着剤層は，部分的に剥離し，変形が生じていた．この結果，試験片の伸びが生じ負荷荷重が低下したと考えられる．試験片の伸びが，冶具の再負荷可能な範囲を超えていたため，9月時点で荷重を初期値まで再負荷することはできなくなった．同様の変化は，低荷重試験片でも確認されたが，その程度は高荷重試験片よりも小さい．また，ERの試験片でも，継手の変形による応力の低下が生じており，かつ高荷重試験片の方が低荷重試験片よりも変形が大きいが，その程度は，CO及びFNの試験片よりも小さかった．平成28年9月以降，試験終了までは，6月以前と同じように継手の応力低下は殆ど生じていなかった．継手の劣化は，CO及びFNにおいて，特に平成28年6月から9月の間に顕著に進行したと結論付けられる．

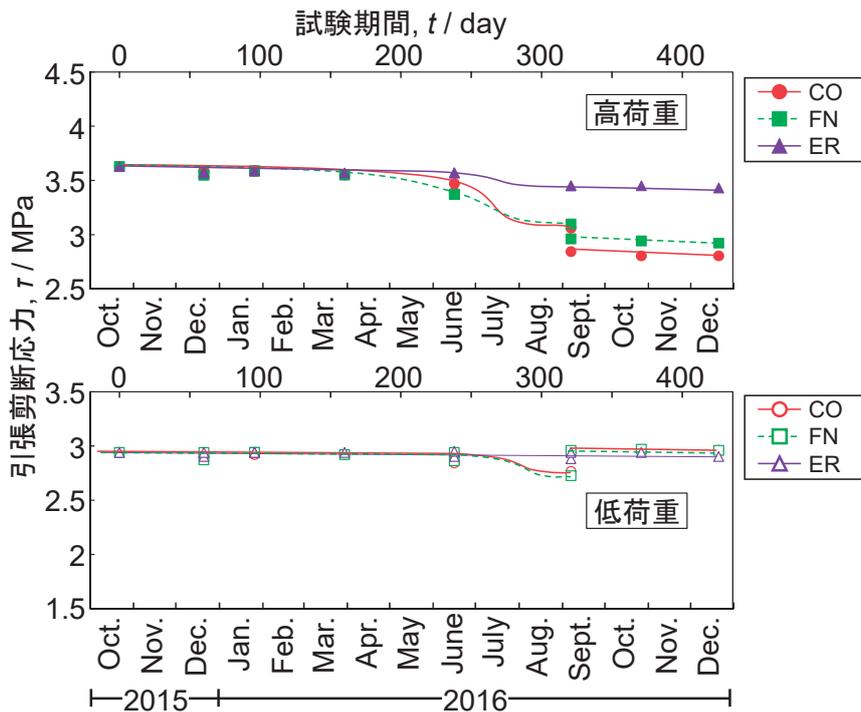


図 4.4 暴露試験における接着継手の引張剪断応力変化³³⁾

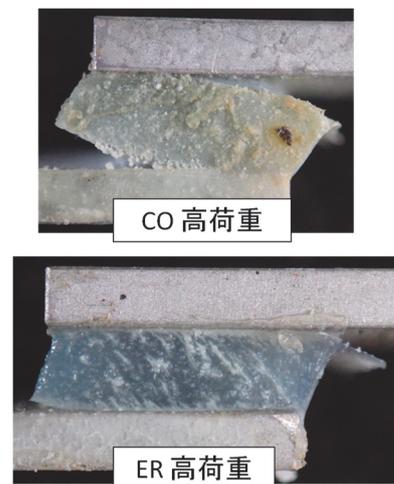


図 4.5 暴露試験後の接着部外観写真³³⁾

試験後の接着継手の状態を図4.5に例示する．暴露部であるCO及びFNにおいて，継手の変形及び接着部の剥離が大きい．剥離は接着部の片端から発生している．暴露試験中，接着継手の劣化により本部位から剥離が発生し，残存部位が高応力状態となった結果，継手全体の変形に至ったと考えられる．

回収した試験片を乾燥させた後，室温（24℃）で引張試験を行い，その残存強度を未暴露の試験片と比較した．引張試験における試験片の破断時，接着剤層はアルミニウム合金基材との界面近くにおいて剥離した．破断面は，図4.6に示すように，3つの領域から構成されていた．領域Aは，接着層が基材から完全に剥離している領域で

あり、アルミニウム合金の腐食性生物が確認できることから、暴露試験中に剥離した領域に対応する。領域Bも接着層と基材は完全に剥離しているが、基材に腐食が見られない(サンドブラスト処理状態を保っている)ことから、接着力が低下したが、暴露中には剥離しなかった部位であると言える。領域Cは、基材上に接着剤が残留しており(凝集破壊)、比較的接着力を保っている面と判断できる。初期の接着面に対する領域Cの割合に対して、継手の残存強度をプロットした結果を図4.7に示す。残存強度と領域Cの割合は、未暴露試験片も含め、全ての暴露条件において1つの曲線上にプロットできる。これは、接着部の領域Cが、他の領域より接着力を保持しているだけでなく、その接着力が暴露前と大きく変わらないことを示している。つまり、接着継手は、全体として、暴露環境において温湿度変化や雨、海塩等に曝されたが、その劣化は端部からのみ進行していると言える。残存強度は、全ての条件で、6MPa以上を保持していた。また、強度低下の程度は、継手の外観と同じく、CO及びFNにおいて大きく、同じ環境では高荷重の方が大きい。

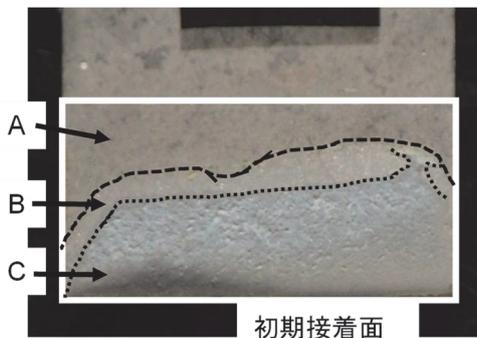


図4.6 引張試験後の接着継手破断面及び分類³³⁾

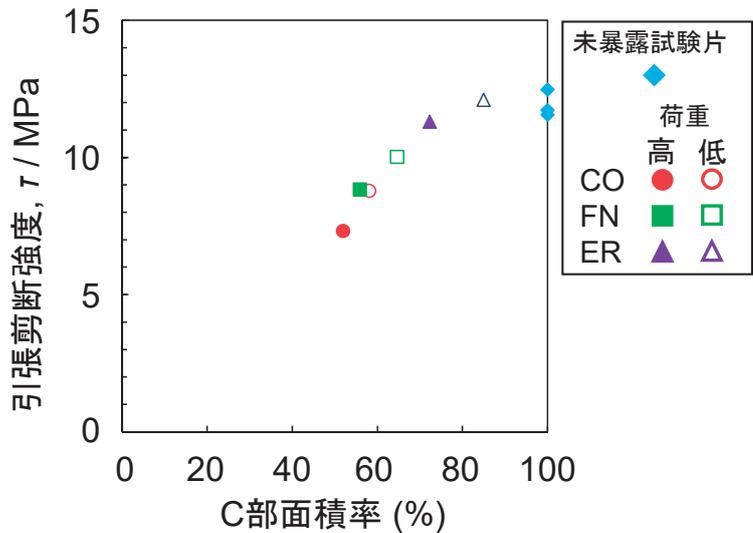


図4.7 接着継手の暴露後残存強度と破断面C面積割合の関係³³⁾

2) 継手の暴露環境

図4.8に、暴露試験中の温度及び紫外線強度の計測結果を示す。自動計測の結果は各日の最高温度及び平均温度に分けてプロットした。手動計測は、殆ど12時から14時の間に行われたので、最高温度の方に合わせて示している。また、紫外線強度は、各月の積算値として示している。本計器で得たのは紫外線のみだが、太陽スペクトルにおいて、紫外部と、可視光部及び赤外部のエネルギーとの間には一定の割合がある³⁶⁾ので、紫外線強度の大小は、日射強度の大小に対応する。

試験開始より平成28年6月までと、同10月以降は各場所とも、大きな差は見られない。6月から9月の間は、ERと比較して、暴露部であるCO及びFNにおいて最高温度が大きく上昇し、50℃近くに達する日も複数あった。この期間の紫外線強度も他の月の1.6倍以上あり、1日の中でのCO、FNの表面温度と日照の変化にも相関がみられた。各部で記録された温度の最高値は、CO:52℃(平成28年7月31日)、FN:51℃(平成28年8月24日)、ER:35℃(平成28年8月23日)であった。CO及びFNでは、平成28年の夏季に、日照が強くなり、気温が高いことも相まって、大きな表面温度となったと言える。

各日の平均温度は、最高温度と比較して、場所による差異は小さかった。CO及びFNでは、表面温度は日中に上昇するが、夜間にかけて、ERの温度と同程度まで低下した。また、ERは、外板付近のため、海水温度からの影響が大きいとみられ、機関の運転状況により温度が大きく上昇することは無かった。また、夏季以外は、ERの方がCO、FNよりも最高温度が大きい結果となった。

環境計測により、継手の劣化が進行したのとほぼ同じ平成28年6月から9月の間に、CO及びFNにおいて1日内の最高表面が顕著に高くなっていったという結果を得た。

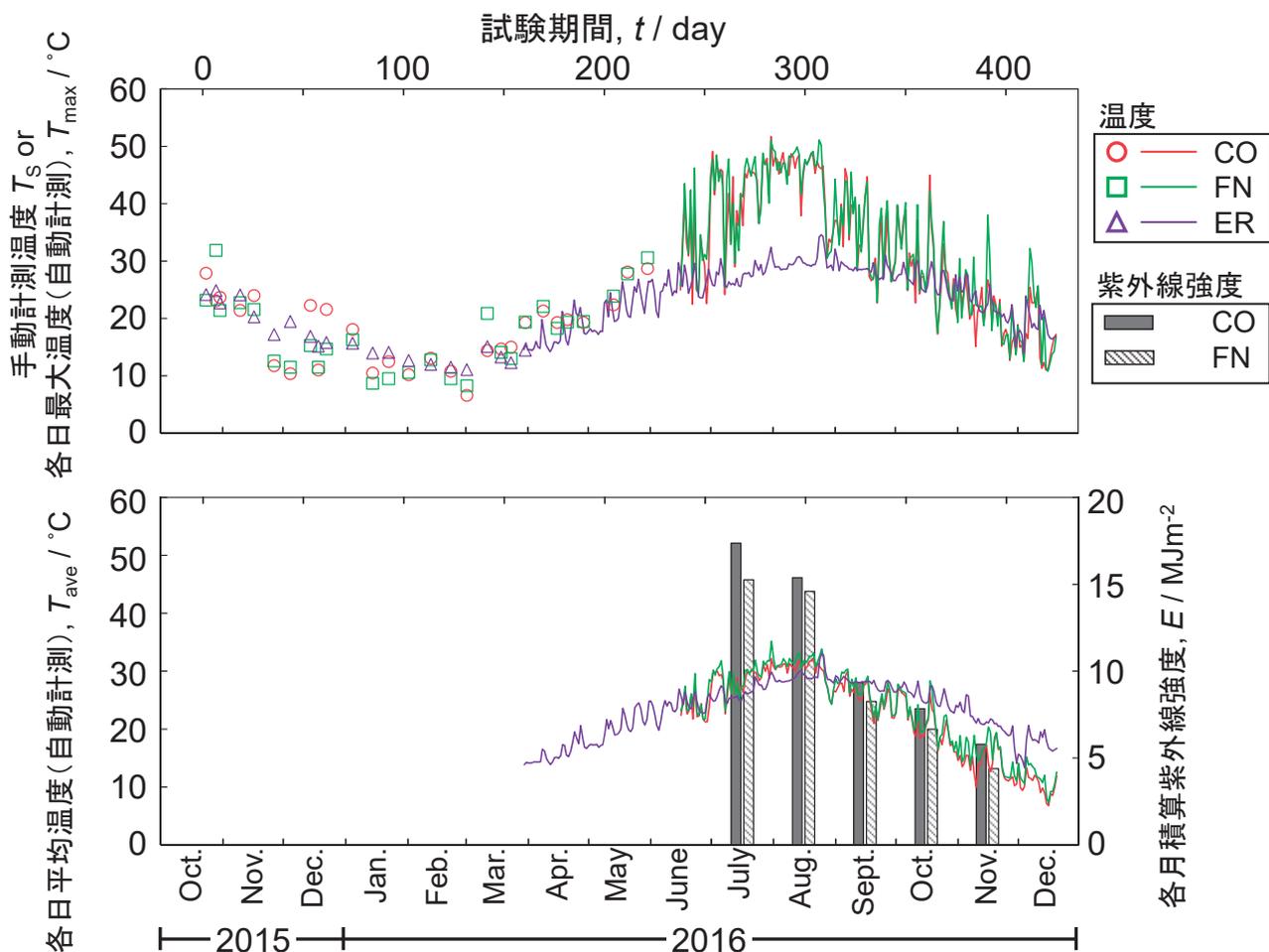


図 4.8 暴露試験における表面温度（手動計測），各日最大表面温度（自動計測：CO, FN），各日最大温度（自動計測：ER），各日平均表面温度（自動計測：CO, FN），各日平均温度（自動計測：ER）及び各月積算紫外線強度（自動計測：CO, FN）³³⁾

3) 接着継手の劣化過程

試験における試験片の変化と、環境計測から、暴露部における接着継手の劣化過程は、模式図 4.9 の様に考えることができる。接着継手は、接着剤硬化時の体積変化による残留応力が存在し、接着層厚が大きくなると、その値はより大きくなると考えられている³⁷⁾。暴露開始時の、接着層と基材界面の引張剪断応力（残留応力と負荷応力の合成）及び強度を図 4.9(a)に示している。継手の温度が低い間は、強度が大きく、継手は劣化しない。

夏季に温度が一定以上高くなった時、(b)の様子、物性として低下した接着強度が、継手端部において、局部的に剪断応力を下回ったと考えられる。これにより、接着層端部で剥離が発生し、残存部分の応力が大きくなった結果、接着層の変形が起こったと考えられる。このような強度低下は、継手部の温度による可逆的な変化なので、CO 及び FN において、夜間に温度が低下したときには、継手部の劣化は進行しない。従って、CO 及び FN の試験片で、夏季に確認された継手の劣化は、日中の比較的短時間の温度上昇で進行する早い変化であると考えられる。接着継手の耐久性を考えるうえで、継手の置かれた環境の平均温度よりも、最高温度が重要であると言える。また、高荷重の試験片が、低荷重の試験片よりも劣化の程度が大きかったのは、温度上昇時に強度が負荷応力を下回る範囲がより大きいためであると考えられる。

暴露部では、継手の表面に雨水や海塩が付着し、基材の腐食や接着層の吸水により、持続的かつ不可逆的に進行する劣化も考えられる (Fig.4.9(c))。暴露後の残存強度評価結果より、このような劣化は、接着層の端部から進行すると考えられるので、長期の耐久性を向上させるには、劣化因子の進入を防ぐ継手形状とする事が有効と考え

られる。一方で、暴露試験において、平成28年6月から9月の前後の期間で、試験片の荷重低下が殆ど見られないことから、腐食及び吸水による劣化は、夏季の大きな温度上昇による劣化よりも、遅い変化であると言える。

暴露試験において、荷重の低い条件では劣化の程度がより小さいことから、ガイドライン設計基準強度(0.3MPa)程度の負荷であれば、暴露部においても劣化は抑制されると考えられる。腐食等による劣化の進行を考慮すると、更に長期の耐久性の検証には、低負荷かつ長期間の暴露が有効である。また、負荷された継手を腐食促進環境に置くことで、その期間が短縮できる可能性がある。

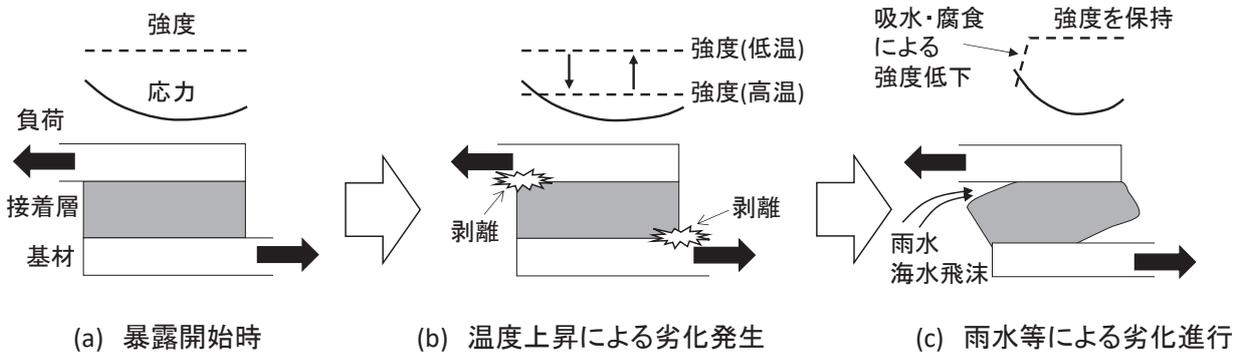


図 4.9 暴露部における接着継手の劣化過程模式図³³⁾

4.3.2 外航船上の甲板における表面温度計測

外航船の甲板上で、各日最高表面温度及び各月の積算紫外線強度を、図4.10に示す。羅針甲板上の4点での温度の違いは小さい。計測された温度は、弓削丸上の夏季の暴露部温度よりも更に高く、70℃を超える日が複数日見られた。各点の最高温度は、Fore : 75℃ (平成29年9月24日), S : 71℃ (平成29年8月21日), P : 70℃ (平成29年9月24日), Aft : 78℃ (平成29年8月28日)であった。高い表面温度を記録したのは、寄港地から推定して低緯度地域を航行中と考えられる期間であり、積算紫外線強度は、弓削丸上の夏季よりも更に高い値であった。前述の様な海域において、高い気温と日本近海よりも強い日照により、暴露部の表面温度が更に高くなったと考えられる。

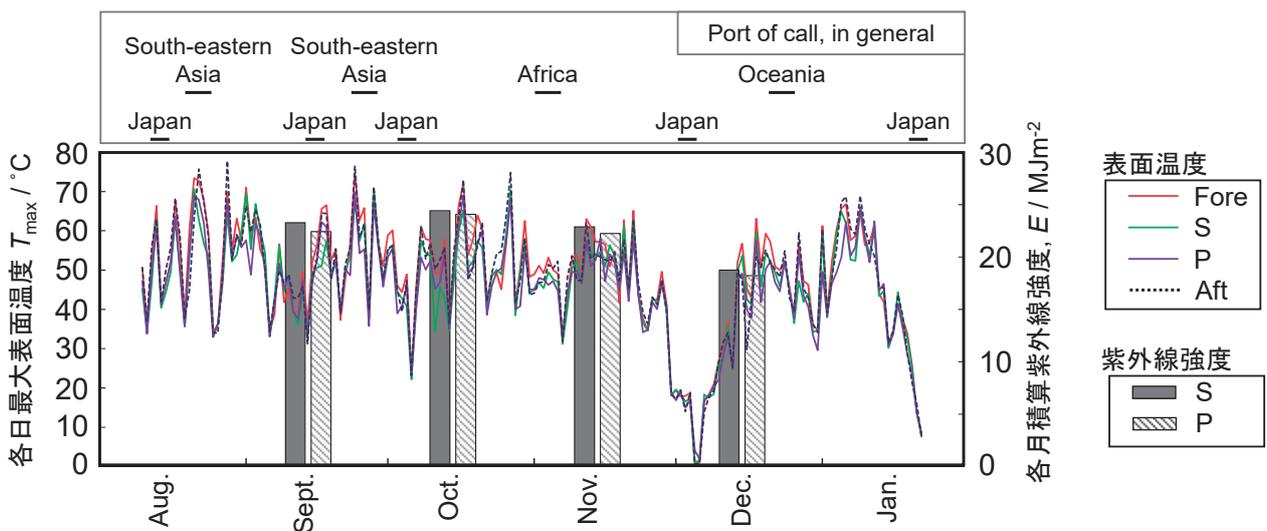


図 4.10 外航船甲板における各日最大表面温度、各月積算紫外線強度及び概略の寄港地³³⁾

4.4 まとめ

本章の研究では、ガイドラインの許容設計応力よりも、かなり大きな荷重を付与した引張剪断試験片を用いて、船舶の暴露部における接着継手の耐久性試験を行うと共に、外航船上での甲板表面温度の計測を行った。弓削丸における426日間の暴露において、継手の劣化が発生した一方、残存強度は、6 MPa以上であり、設計許容応力(0.3 MPa)やガイドラインの定める促進試験後の強度を満足する値(3.5 MPa)を保持していた。暴露部における接着継手の適用に関して得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 接着継手の耐久性に対して、平均温度よりも最高温度が重要な要因である。
- 2) 継手の劣化は端部から進行し、長期的耐久性を高めるためには、雨水等の劣化要因の進入を防ぐ継手形状が有効である。
- 3) 国際航路で暴露部の接着継手が受ける最高温度として、少なくとも70°C以上を想定するべきである。

5. あとがき

本研究では、被着体としてA5052/A5052を用いて造船用の厚い接着層からなるSGA構造接着継手の耐久性と燃焼性の評価を行い、劣化後のばらつき係数 D_y と劣化後の強度保持率 η_d に関して日本海事協会のガイドライン⁶⁾の裏付けを得ると共に、造船所の重要な関心事項となっている構造用接着剤の耐火性能を明らかにした。また、実船試験により、就航中の実環境下での構造接着継手の劣化状態を明らかにすると共に、甲板温度や紫外線照度などの実環境データを得た。これら実用に役立つ重要な成果が得られたことにより、本研究は造船分野において構造用接着剤の実用化に大きく貢献した。

謝 辞

本研究の一部はデンカ株式会社との共同研究により実施した。引張せん断試験に際し、(国研)海上・港湾・航空技術研究所の元非常勤職員の佐久間氏の協力を得た。本研究の一部は、弓削商船高等専門学校との共同研究により実施し、実験に際しては、森瑛太郎氏、小林一平氏、元弓削丸船長の永本和寿氏の協力を得た。外航船における計測では、オーシャントランス株式会社殿、一般財団法人日本海事協会殿の協力を得た。関係各位に深く感謝申し上げます。 This Chapter 2 is derived in part from an article published in The Journal of Adhesion <26 Feb 2019> <copyright Taylor & Francis>, available online: <http://www.tandfonline.com/> <Article DOI: 10.1080/00218464.2019.1581067>.

参考文献

- 1) Costa, M., Viana, G., da Silva, L. F. M., and Campilho, R. D. S. G.: Environmental effect on the fatigue degradation of adhesive joints: A review, The Journal of Adhesion. Vol.93, (2017), pp.127-146.
- 2) Del Real, J. C., De Santayana, M. C., Abenojar, and J., Martinez, M. A.: Adhesive bonding of aluminium with structural acrylic adhesives: Durability in wet environments, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol.20, (2006), pp.1801-1818.
- 3) Price, A., Baldwin, T., and Gregson, P. J.: Effect of simple pretreatments on the durability of adhesive-bonded AlLiCuMg Alloy, International Journal of Adhesion and Adhesives. Vol.11, (1991), pp.11-14.
- 4) Cidlina, J., Henc, P., 2013, Effect of environmental degradation on the adhesive bonds strength and durability, Proc. The 5th International Conference Trends in Agricultural Engineering, Prague, Czech Republic, pp.685-689.
- 5) 原賀康介：高信頼性を引き出す接着設計技術，株式会社日刊工業新聞，初版，(2013)，pp.119-235.

- 6) 一般財団法人日本海事協会：構造用接着剤使用のためのガイドライン，一般財団法人日本海事協会，初版，(2015)，pp.9-11.
- 7) 秋山繁，岩田知明，島田道男，安藤孝弘，村上睦尚，穴井陽祐，林原仁志，田中義照：接着剤を用いた艀装技術に関する調査研究，海上技術安全研究所報告，第12巻第1号，(2010)，pp.17-39.
- 8) American Bureau of Shipping: ABS 0022:2014, Rules For Materials And Welding - Part 2: Aluminum And Fiber Reinforced Plastics (Frp) (Chapters 5-6), American Bureau of Shipping, (2014), pp.74-80.
- 9) 一般財団法人日本規格協会：JIS-H-4000:2006(ISO209-1:1989MOD, ISO209-2:1989MOD, ISO6361-1:1986MOD, ISO6361-2:1990MOD, ISO6361-3:1985MOD, ISO6361-4:1988MOD)，アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条，一般財団法人日本規格協会，(2006).
- 10) 一般財団法人日本規格協会：JIS-K-6851:1994(ISO6237:1987)，接着剤の木材引張せん断強さ試験方法，一般財団法人日本規格協会，(1994).
- 11) 一般財団法人日本規格協会：JIS-K-6850:1999 (ISO-4587:1995MOD)，接着剤－剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法，一般財団法人日本規格協会，(1999).
- 12) Iwata, T., Hayashibara, H.: Durability and flammability evaluation of SGA structural adhesives joint consisting of thick adhesive layer for shipbuilding, The Journal of Adhesion. Vol.95, (2019), pp.614-631, DOI: 10.1080/00218464.2019.1581067.
- 13) 一般財団法人日本規格協会：JIS-K-6877:2010 (ISO-9142:2003MOD)，接着剤－接着接合部を試験するための標準老化条件選定指針，一般財団法人日本規格協会，(2010).
- 14) 一般財団法人日本規格協会：JIS-K-7350-2:2008 (ISO-4892-2:2006MOD)，プラスチック－実験室光源による暴露試験方法－第2部：キセノンアークランプ，一般財団法人日本規格協会，(2008).
- 15) 林原仁志，岩田知明，安藤孝弘，村上睦尚，森瑛太郎，小林一平，2018，船舶の暴露部への構造用接着継手の適用に関する研究，日本船舶海洋工学会講演論文集，大阪，日本，pp.307-308.
- 16) 一般財団法人日本規格協会：JIS-Z-2371:2000 (ISO-9227:1990MOD)，塩水噴霧試験方法，一般財団法人日本規格協会，(2000).
- 17) 国際海事機関：国際海事機関（IMO）海上委員会安全決議 MSC.307(88)（2010年12月3日決議）の付属書「2010年火災試験方法の適用に関する国際コード（2010 FTP CODE）」，国際海事機関，(2010).
- 18) International Organization for Standardization: ISO 5658-2:2006 - Reaction to fire tests -- Spread of flame -- Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration, International Organization for Standardization, (2006).
- 19) International Organization for Standardization: ISO/IEC 17025:2005 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, International Organization for Standardization, (2005)
- 20) Iwata, T., 2018, Durability evaluation of SGA structural adhesive joint consisting of millimeters order thickness of adhesive layer for shipbuilding, Proc. The 6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena, San Diego, California, Non Page.
- 21) Haraga, K.: Processing Quality Control, Handbook of Adhesion Technology, da Silva, L. F. M., Ochsner, A., Adams, R. D., Eds., Springer, 2st ed., (2018), pp.1151-1169.
- 22) Hobbacher, A. F: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, Springer, 2nd ed., (2016), pp.75-78.
- 23) 一般財団法人日本規格協会：K 6800:1985，接着剤・接着用語，一般財団法人日本規格協会，(1985).
- 24) 超音波便覧編集委員会：超音波便覧，丸善，(1999)，p.299
- 25) 久保亮五：ゴム弾性 [初版復刻版]，裳華房，第1版，(1996)，p.8.
- 26) 一般財団法人日本規格協会：JIS K7162:1994 (ISO-527-2:1993)，プラスチック－引張特性の試験方法－第2部：型成形，押出成形及び注型プラスチックの試験条件，一般財団法人日本規格協会，(1994).
- 27) 大窪和也：有限要素法に接着技術，接着技術 第24巻 No.2 (2004)，pp.73-76.
- 28) 日本船舶電装協会：接着剤を用いた新しい電装工事方法に関する調査報告書 (2006) .

- 29) 宮入祐夫：構造用接着剤を用いた舟艇建造技術の開発，舟艇技法平成 21 粘度 第 103 号（2010），pp.2-6 及び第 104 号(2010)，pp.2-11.
- 30) 北海道運輸局函館運輸支局：接着剤を用いた電気艀装工事に関する実施報告書（2013）.
- 31) 林原仁志，岩田知明，安藤孝弘，村上睦尚，森瑛太郎，小林一平：構造接着継手の実船環境における暴露試験，海上技術安全研究所第 17 回研究発表会予稿集（2017），PS-10.
- 32) 林原仁志，岩田知明，安藤孝弘，村上睦尚，森瑛太郎，小林一平：船舶の暴露部への構造用接着継手の適用に関する研究，日本船舶海洋工学会第 26 回講演会論文集（2018），pp.307-308.
- 33) H. Hayashibara, T. Iwata, T. Ando, C. Murakami, E. Mori, I. Kobayashi : Degradation of structural adhesive bonding joints on ship exposure decks, J. Marine Sci. and Tech., Vol.24, (2019), pp.<in press>, DOI:10.1007/s00773-019-00657-w.
- 34) 安藤定雄，星野邦宏，山岸直人：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その 2. 実験構造物の日射による温度文度分布について，日本造船学会論文集，第 167 号（1990），pp.301-311.
- 35) 長野健，坂田寛，吉海研，半田和久：ロングハッチカバーの設計に関する一考察，西部造船会々報，第 71 号（1986），pp.22-231.
- 36) International Commission on Illumination : Technical Report CIE 085-1989 Solar spectral irradiance (1996).
- 37) 大窪和也：有限要素法による接着評価，接着の技術（2004），通巻 75 号，pp.73-76.