

## 防振部材への火気を伴わない接合方法の 利用に関する研究

岩田 知明\*, 村上 瞳尚\*, 高見 朋希\*\*, 安藤 孝弘\*  
林原 仁志\*, 笛木隆太郎\*, 菅澤 忍\*

### Evaluation of Joining Method without Welding for Vibration Absorption Member

by

IWATA Toshiaki\*, MURAKAMI Chikahisa\*, TAKAMI Tomoki\*\*, ANDO Takahiro\*  
HAYASHIBARA Hitoshi\*, FUEKI Ryutaro\* and SUGASAWA Shinobu\*

#### Abstract

In shipbuilding, additional tasks are required at welding and thermal bending caused by paint discoloration on the back side of the joint section and deformation of the thin plate. Therefore, the application of a structural adhesive is being investigated for repairing parts where welding is undesirable. In this study, the application of the structure adhesive to a vibration absorption member was researched and developed. Firstly, an adhesive and a composite, which are viscoelastic bodies, were applied to the vibration source side, and the vibration suppression was investigated by frequency response analysis. The results indicated that the vibration was not sufficiently reduced in the living area, although the vibration is expected to be reduced at a peak frequency near the main engine. Next, the obtaining the certification acquisition that the structural adhesive is adapted to the low flame-spread characteristics was assisted. In addition, construction guidelines, such as the construction procedure and method, and the jig for temporarily fixing, were defined for the application of the structural adhesive. Finally, specimens were investigated for actual application, and the preprocessing requirements for the adhesive surface were evaluated and determined. Test specimens of the vibration absorption carling (vertical girder) were designed and fabricated using an adhesive joint, and the response to the natural frequency was experimentally investigated. The results showed that the joining strength of the resonance prevention carling is sufficient even if structural adhesive is used as the joining method instead of welding.

---

\*構造・産業システム系, \*\* 神戸大学 (研究当時は構造・産業システム系)

原稿受付 令和6年10月8日

審査日 令和6年11月27日

## 目 次

1. まえがき .....	76
2. 起振力側に複合材を用いた場合の振動減衰効果 .....	77
2.1 はじめに .....	77
2.2 予備的検討 .....	77
2.3 解析方法 .....	78
2.4 解析結果及び考察 .....	79
2.5 まとめ .....	80
3. 防振部材への火気を伴わない接合方法の実用化に向けた対策 .....	81
3.1 はじめに .....	81
3.2 構造用接着剤と船舶防火構造規則 .....	81
3.3 構造接着と真空含成型 .....	81
3.4 仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領 .....	82
3.5 評価対象防振部材の選定 .....	83
3.6 まとめ .....	85
4. 構造接着を用いた共振防止カーリングの効果を検証するための振動試験 .....	86
4.1 はじめに .....	86
4.2 実験方法 .....	86
4.3 試験対象 .....	87
4.4 実験結果 .....	88
4.5 考察 .....	90
4.6 まとめ .....	91
5. あとがき .....	91
謝 辞 .....	91
References .....	91

## 記 号

$E$  : ヤング率 [GPa]

$t$  : 板厚 [mm]

## 1. まえがき

海洋基本計画（平成 25 年 4 月）において、産学官連携の下、高付加価値船の技術開発を推進し、我が国造船業・舶用工業・海洋資源関連産業の国際競争力の強化に寄与することがうたわれている。また、科学技術イノベーション総合戦略 2014（平成 26 年 6 月）において、産業競争力を強化し政策課題を解決するためのコア技術の一つとして革新的構造材料の実機適用に向けた異種材料接合技術等プロセス技術の高度化があげられている。近年では、異種材接合部の強度向上とともに、新材料の用途が他産業において拡大しており、造船においても新接合法の一般商船への利用を推進することが必要である。

粘弾性である接着剤を接合部に使用することで、減衰能を持たせることができることが接着剤の利点の一つとして報告されている<sup>1)</sup>。低弾性接着剤は、動的荷重による振動振幅を効果的に減じるため、硬い接着剤よりも柔らかい接着剤の方が減衰特性に優れていると報告されている<sup>2)</sup>。複合材も樹脂が粘弾性体で、金属よりも高

い減衰能を有すると報告されている<sup>3)</sup>。鋼被着材と比べて炭素繊維複合材（Carbon Fiber Reinforced Plastics：以下 CFRP）は、特に短い接着長で、高い減衰特性を示すと報告されている<sup>4)</sup>。

造船分野では、設計自由度向上や建造工程効率化の観点から、溶接可能な鋼やアルミニウム合金から構成される艤装品であっても、機械的締結やスポット溶接などを併用しない構造接着（構造用接着剤を用いた高強度接合）が適用され始めている。また、火気工事による接合部裏面の塗装の焼けや薄板の接合時に生じる溶接変形等に起因する追加工事を回避する必要から、火気工事が望ましくない部位の補修などに、構造接着が検討されている。

接着プロセスに関する研究において、接着界面の化学状態観察・モデル化・分子シミュレーション・ミクロスケール接着強度評価により、接着メカニズムの解明は進んでいる。一方、実構造の構造接着継手では、接着強度を低下させる様々な要因が作用するが、マクロスケールである実構造の現象をミクロスケールで検証可能な段階には至っておらず、信頼性が十分でないことが構造接着継手の実用化の妨げになっている。このため、異種材接合用に構造接着が進んでいる自動車・航空機分野であっても、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おり<sup>5)</sup>、現状ではボルト又は溶接の併用で用いられている。

本研究では、振動対策、燃費向上のための船舶の軽量化対策、高機能材料利用による設計自由度の向上や造船行程の効率化の観点から、これまで船舶ではあまり用いられてこなかった溶接の代替手法となる火気を伴わない異種材接合技術を造船で利用するため、防火規則への対応や施工要領の明確化など火気を伴わない接合方法の実用化に向けた対策に関する研究を実施する。振動対策・軽量化・設計自由度の向上などを通じて船内労働環境の改善に資するとともに、造船産業の国際競争力の強化を図り造船業の活性化（地方創生）や、造船設計・生産性向上が期待される。

## 2. 起振力側に複合材を用いた場合の振動減衰効果

### 2.1 はじめに

先行研究事例や他産業の新材料の動向を調査した結果、適切な材料がないためこれまで課題であった震動源側の対策として、減衰特性を変えられる材料を活用した制振特性制御が可能なマルチマテリアル構造が有望であることを確認した。

船舶に搭載される機器と甲板の間は、大型の搭載機器ほど溶接歪により隙間が生じるため、振動によるき裂発生を抑制するには、隙間を無くして固定する必要がある。船舶の主要な振動源である主機の固定には、1960年代までは、隙間形状に合わせた鋼材を削り出し、隙間へはめ込む鋼製ライナーが用いられていた。この工法は、削り出す鋼材の形状を隙間形状に合わせるため、大変工数のかかる作業であった。一方、1980年代以降現在では、硬化する樹脂を隙間へ流し込んで固定する樹脂ライナーによる工法が用いられている。樹脂ライナーによる工法は、鋼製ライナーによる工法より、大幅な工数削減が可能となるが、1970年代に登場した当初は、主に実績が無いことから新造船では船級証書が取得できず、一部の修繕船での採用に限られていた。修繕船での採用実績が増加するに至り、新造船でも船級の承認が得られることとなった。

震動源側の制振対策に新材料を適用するに際して、必要な性能要件の目安を得るために、21団体の船級について主機固定用樹脂材料の承認要件をとりまとめた。その結果、多くの船級での承認要件は、最大温度（80 °C）と最大ショック応力（45 kgf/cm<sup>2</sup>）であることを確認した。

構造用接着剤や複合材は、現在は機関区域では使用できない。しかしながら、3.2で後述するとおり、鋼船規則R編<sup>6)</sup>の規定による防火構造材料の認定を取得する構造用接着剤も登場している。ここでは、構造用接着剤や複合材が船舶防火構造規則等に適合し、機関区域に使用可能となった場合、これらを振動源側に用いた場合、どの程度の振動抑制効果が得られるかについて検討を行う。

### 2.2 予備的検討

所内の先導研究などで開発中の振動予測システム及び振動解析用全船FEモデルを用いて、金属以外の材料（CFRPを想定）を対象とした試験を行い、解析モデルの改良要件を明らかにし、材料による固有振動数や減衰比の違いが振動値に与える影響を検証可能な解析モデルを検討した。（図2.1参照）

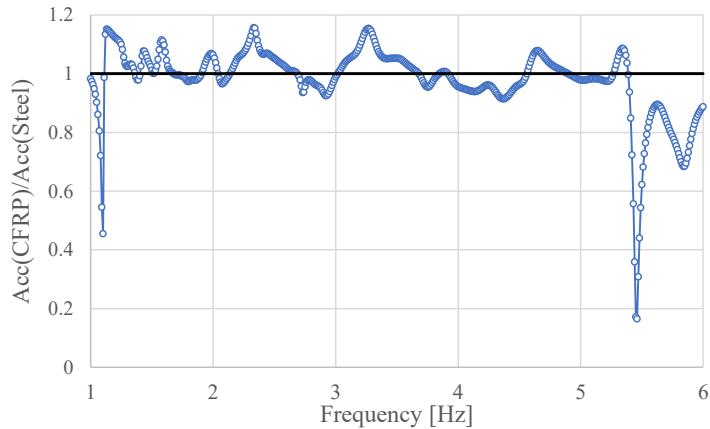


図 2.1 構造部材への CFRP 減衰係数の適用前後の加速度応答値の比の分布

国内外における、全船 FE 解析の振動伝播評価に対する適用に関する技術・文献調査<sup>7),8)</sup>を行った。振動評価法に関する技術調査を行い、既存の評価法（RMS 値ベース）の有する問題点を整理した。ポストパナマックス型コンテナ船の全船 FE モデル及び上部構造+船尾構造モデル（部分モデル）に対して、起振力に主機軸力、ガイドモーメント（X 型、H 型）及びアンバランスモーメントを想定し、周波数応答解析を実施した。結果、全船 FE モデルと部分モデルで周波数特性に遜色がないことを確認した。（図 2.2 参照）

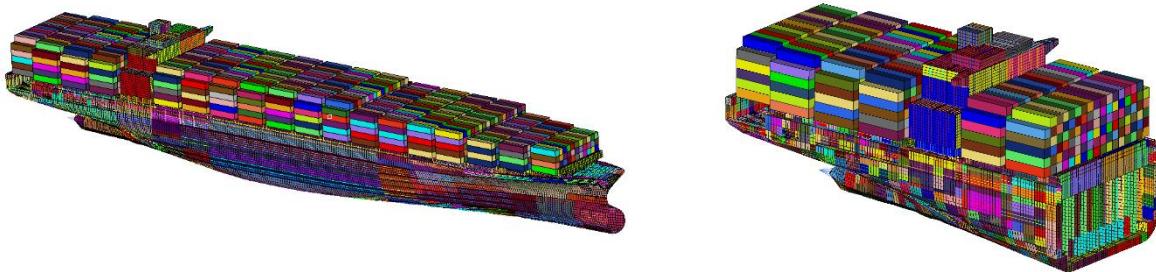


図 2.2 検証に使用した全船 FE モデル（左）と部分モデル（右）

### 2.3 解析方法

船体の振動評価としては従来から実効値としての Root-Mean-Square(RMS) 値を用いた評価が一般的であるが、局所的な振動特性の把握のためには有限要素法（Finite Element Method, FEM）が有効である。ここでは起振力を主機軸力、ガイドモーメント（X 型、H 型）及びアンバランスモーメントの 4 ケース（図 2.3 参照）とした場合について、全船 FE モデル及び簡易モデル（図 2.4 参照）を用いた周波数応答解析を行い、CFRP 板設置による居住区及び主機付近の振動特性の変化を調べた。起振力の与え方は文献<sup>9)</sup>による。CFRP 板は板厚 50mm、ヤング率 40GPa である。一連の周波数応答解析には MSC.Nastran を用いた。

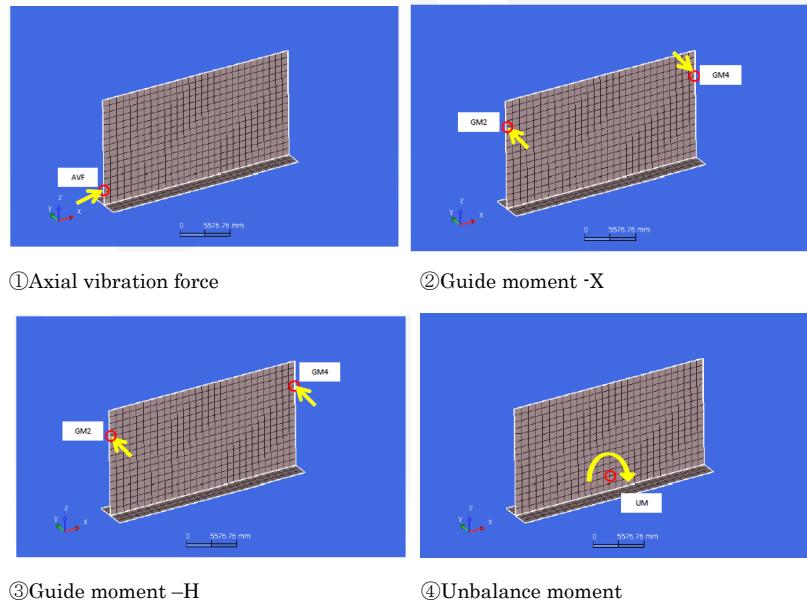


図 2.3 主機起振力

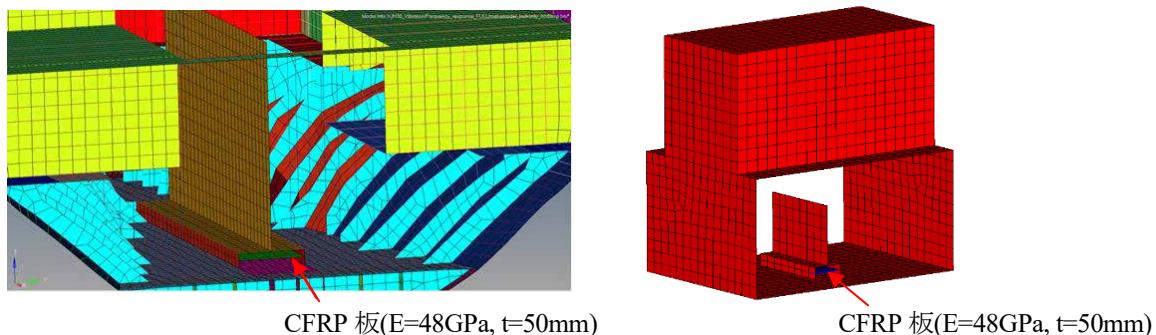


図 2.4 CFRP 板を設置した FE モデル（左：全船モデル、右：簡易モデル）

## 2.4 解析結果及び考察

全船モデルによる船長方向（X 方向）振動の周波数応答解析結果を図 2.5 に示す。全ての起振力ケースにおいて、主機台への CFRP 板導入による居住区の振動軽減の効果は小さいことが見受けられた。これは、製作可能な最大厚 50mm 程度の CFRP 板では、主機の質量と比較して小さすぎるため、十分な振動減衰効果が得られなかつたと考えられる。簡易モデルを用いて、起振力を Axial force とした場合の主機付近の X 方向及び Z（上下）方向の振動特性を図 2.6 に示す。図から、簡易モデルを用いた計算結果によれば、CFRP 板設置による軽減効果が周波数帯によって現れることが確認でき、主機付近であればピークの周波数では 20～30% ほどの振動軽減効果が期待できることが確認された。

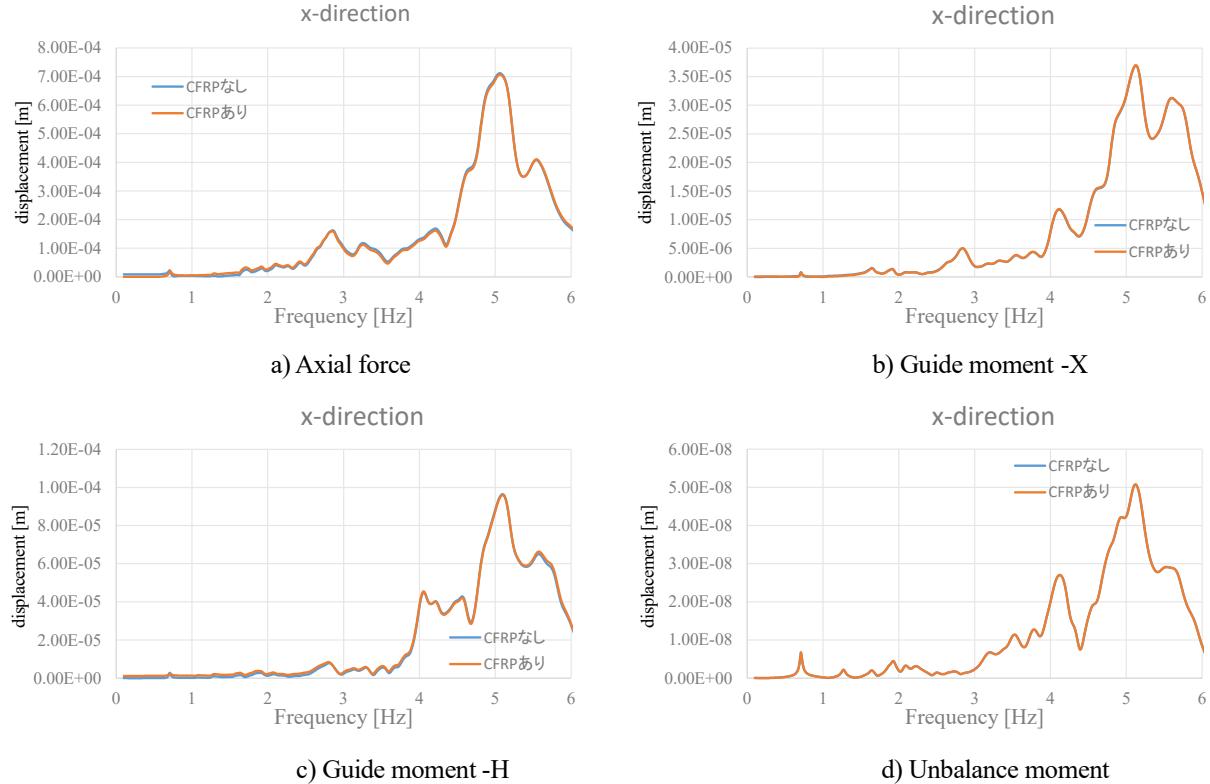


図 2.5 周波数応答解析結果（評価箇所；居住区，全船モデル）

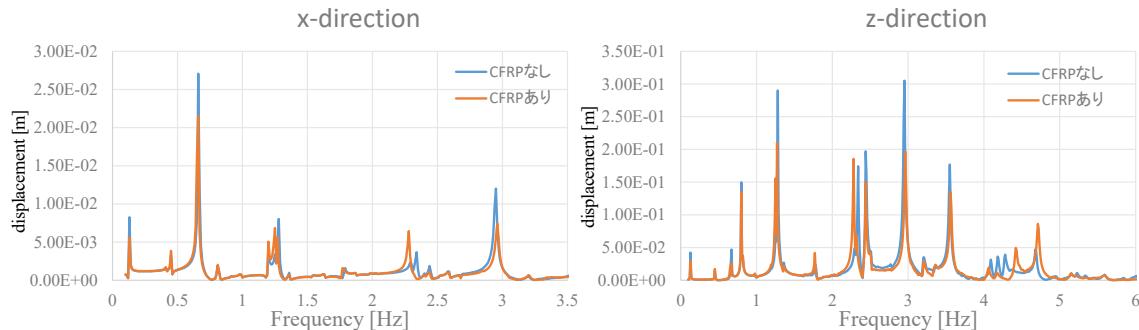


図 2.6 周波数応答解析結果（評価箇所；主機付近，簡易モデル）

## 2.5まとめ

粘弾性体である接着剤と複合材が減衰能を有することに着目し、これらを振動源側に用いた場合、どの程度の振動抑制効果が得られるかについて、起振力を主機軸力、ガイドモーメント(X型, H型)及びアンバランスモーメントの4ケースとし、振動予測システム及び振動解析用全船FEモデルを用いて、周波数応答解析により検討を行った。その結果、周波数帯によっては振動軽減効果が確認され、主機付近であればピークの周波数では20～30%ほどの振動軽減効果が期待できるものの、居住区では十分な振動軽減効果が得られないことを確認した。

振動減側での効果的な振動軽減対策は困難であるため、続く章では、現状、溶接により接合されている防振部材のうち、溶接では課題が生じている防振部材を調査し、火気を伴わない接合方法への代替ニーズのある部材を選定し、防振部材への火気を伴わない接合方法の実用化に向けた対策を行う。

### 3. 防振部材への火気を伴わない接合方法の実用化に向けた対策

#### 3.1 はじめに

建造量上位五社を対象とした聞き取り調査または紙面アンケート調査の結果、後付で施工可能な振動防止材や歪み防止材のニーズがあることが確認されている。これら後付けの振動防止材や歪み防止材の施工のうち、火気工事が望ましくない部位の補修などにおいては、火気工事による接合部裏面の塗装の焼けや薄板の接合時に生じる溶接変形等に起因する追加工事を回避する必要から、構造接着が検討されている。しかしながら、本研究を開始した平成28年（2016年）の時点では、船舶防火構造規則の適合認定を取得した構造用接着剤は存在しなかつた。また、構造用接着剤製造者のインストラクション（技術関係説明書）だけでは、造船分野における接合箇所毎の具体的な施工要領（仮固定治具・施工手順・施工方法など）について明確ではなかつた。そこで本研究では、現状、溶接で施工されている防振部材のうち、火気を伴わない接合方法のニーズのある部材を調査し、火気を伴わない接合方法の実用化に向けた対策を行つた。

#### 3.2 構造用接着剤と船舶防火構造規則

（一財）日本海事協会において、「構造用接着剤使用のためのガイドライン」<sup>10)</sup>が平成27年（2015年）12月に策定された。船級ガイドライン策定後、平成28年（2016年）～平成30年（2018年）にかけて、接着剤製造者6社の19製品が認定を取得したが、利用は進まなかつた。構造接着の適用の妨げの最大の理由は船舶防火構造規則であった。船級ガイドラインでは、当面、関係規則で規定される材料“以外”的材料、艤装品等の接合箇所に使用される構造用接着剤への適用に限るとしているものの、多くの造船所及び艤装工事事業者からは、国際海事機関（IMO）の規則で規定される低火炎伝播特性に構造用接着剤が適合していることが、船級ガイドライン策定以前から強く求められていた。

低火炎伝播特性は、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 CODE<sup>11)</sup>のAnnex1「火災試験方法」のPart5「表面燃焼性試験（表面材と一次甲板床張り材の試験）」で規定される。この2010 FTP CODEのAnnex1のPart5の関係規則は、ISO 5658-2<sup>12)</sup>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。一方、断熱仕切り以外に使われる接着剤には要件は無い。しかしながら、船舶の様々な部位（甲板、隔壁、防火戸、天井張、内張り、防火窓、防火ダンパー、パイプ貫通部及びケーブル貫通部等）で、A級、B級又はF級の仕切りであることが求められる。例えばA-60級仕切りは、FTP CODE Part5の表面燃焼性試験で、60分間の加熱中、非加熱面のいずれの部位においても、180°Cを超えないことが要求される。特に居住区では、多くの部位でいずれかの断熱仕切り要件が要求されるため、構造接着が、船舶防火構造規則で規定される材料“以外”的材料、艤装品等の接合箇所への適用に限られる場合、利用することができなかつた。

このような造船業界からの要求に答え、ScottBader社のCRESTABOND®のM7-05とM7-15が令和2年（2020年）までに、FTP CODE Part2（煙・毒性試験）、FTP CODE Part5（表面燃焼性試験）、ISO1716<sup>13)</sup>（発熱量試験）、並びに、鋼船規則R編<sup>6)</sup>の規定による防火構造材料（難燃性上張り材（不燃性・難燃性基材用、不燃性基材用、難燃性基材用）、難燃性表面床張り材、一次甲板床張り材）の認定を取得した。現在も認定を維持している。本研究の一環として、ScottBader社のFTP CODE認定取得に際し、受験方法や試験片製作仕様等の情報提供、認定試験機関である一般社団法人 日本船舶品質管理協会 製品安全評価センターとの調整などの支援を行つた。

ScottBader社が主催する造船所・艤装品の設計・調達担当者などを対象とした鋼船対応構造用接着剤セミナーにおいて、環境劣化を考慮した長期信頼性の評価手法について劣化係数などの解説を行い、造船分野での構造接着手法の普及促進を図つた。

#### 3.3 構造接着と真空含浸成型

海洋構造物では、鋼一繊維強化複合材を用いた補修のニーズがあることが明らかとなつた。そこで、海洋構造物も含めた造船要件として適切な鋼一繊維強化複合材の接合方法について、先行している橋梁等の事例に関する調査により、評価・選定を行つた。構造接着に加え、VaRTM（the vacuum-assisted resin transfer molding：真空含浸）工法も有望であることが明らかとなり、要件や強度評価手法に関する検討を行つた。可搬性や作業性が溶接に及ばないレーザーなどの可搬に適さない装置を必要とする手法、可搬式でない装置による薬品処理を必要とする手

法、重量や工数が増加するボルトなどの機械的締結による手法を対象外とすると、鋼と複合材などの異種材接合において、VaRTM 工法は、構造接着と共に、有力な接合方法の候補の 1 つである。

構造接着と VaRTM 成型における、被着材の特性や切削方法・接合表面の前処理方法など異種材接合の施工条件に関する評価・選定を行った。被着面の前処理の有無など施工性も含めた接合条件パラメータの組合せが接合強度に及ぼす影響を評価し、造船部材要件として適切な接合条件を明らかにした（表 3.1）。

しかしながら、ScottBader 社の CRESTABOND® の M7-05 と M7-15 が令和 2 年（2020 年）までに、3 章 2 節で前述したとおり、船舶防火構造規則関連の認定を取得したため、鋼材同士の同種材接合から、複合材を含む異種材接合まで広範囲に対応可能な最も有望な接合方法となった。そこで、本研究では、評価対象の接合方法を構造接着に絞り込み、VaRTM 成型などのその他の接合方法については取り扱わないとした。

表 3.1 造船部材要件として適切な異種材接合条件

		構造用接着剤	VaRTM 成型
接着部	第二世代アクリル樹脂系接着剤(SGA)	鋼材接触面は複合材樹脂リッヂ層(接着接合)	
消防法危険物 (製品で異なる)	第2類引火性固体、第4類第1石油類	硬化剤: 第5類自己反応性物質有機過酸化物	
被着体接合面前処理	プライマー不要 サンディング要	プライマー不要 サンディング不要	
充填可能被着材間隔	3mm程度	制約無(複合材被着材を後工程で積層)	
作業可能時間	冬季 標準	速乾型硬化剤(23°Cで5分) 標準硬化剤(23°Cで15分)	ヒーターでの樹脂加温により標準と同程度 (23±5)°Cで30分
	夏季	遅硬化型硬化剤(35°Cで15分)	35°Cで15分
	固着時間	作業可能時間の4倍程度の圧縮時間が必要	3時間で脱型(包材撤去)可能
硬化剤混合比感受性	鈍感(±20%許容)	鈍感(±20%許容)	
副資材	不要(混合ガンの使用で施工速度向上)	要(真空脱気用包材、真空ポンプなど)	
異材接合部劣化前 引張せん断強度 (複合材樹脂により異なる)	9~12 MPa (接着層厚3mmの場合)		10~15 MPa

### 3.4 仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領

船級ガイドラインでは、施工は、構造用接着剤製造者のインストラクション（技術関係説明書）に従うとしており、その他は、必要に応じてボルトでの補強、形状・配置に起因する応力集中部のスチフナ等での補強、必要に応じてアースの設置について記載されているのみである。また、施工要領としても、作業場の温湿度管理、ごみ・ほこり等の除去、火気使用の回避、主剤と硬化剤の配合、被着面前処理、結露・スプリングバック・硬化発熱への注意、仮固定の必要性など、一般的な内容に留まっている。造船分野における接合箇所毎の具体的な施工要領（仮固定治具・施工手順・施工方法など）については記載されておらず、このことも、多くの造船所及び艤装工事事業者にとって、構造接着の使用妨げの理由の 1 つとなっている。

本研究の一環として、令和 2 年度（2020 年度）に（一社）日本船舶電装協会からの請負研究「接着剤を用いた電装工事要領に関する調査研究における実物大模型を使った施工実験」を実施し、仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領を作成した<sup>14)</sup>。仮止め方法についての検討が不十分であったので、本請負研究の枠組みの中での海技研独自の追加試験として、構造用接着剤を用いた電装用部材の接着施工について、構造用接着剤が完全に硬化するまでの間、接着位置に被着部材を固定しておくための各種仮止め方法の試行を実施し、原則 1 名での作業が可能な有効な仮止め方法を明らかにするとともに、各種仮止め方法に適した施工手順についての検討を行った。1m 未満の艤装品サイズでは、作業者 1 名で 1 分未満の位置合わせ・加圧時間で接着可能であることを確認した。（図 3.1 参照）

十分な接着強度を有する瞬間接着剤または接合用両面粘着テープによる方法を主な仮止め方法とし、磁性材料壁面でマグネットが利用可能な場合は、比較的重量物のある被着部材に対して、ゴムバンドを併用したマグネットによる仮止め方法が有効である。



図3.1 マグネット、瞬間接着剤、両面テープによる仮止め方法

### 3.5 評価対象防振部材の選定

船殻構造の起振応答量解析は難しく、設計時に推定していた固有振動数とは異なり、実際には、損傷報告後に判明した振動モードの固有振動数が起振周波数域に存在し、共振を起こしていた事例が確認されている。現状、課題が生じている部位は、燃料タンク壁や清水タンク壁で、エンジンやプロペラを起振源として、壁が共振した場合は10Hz程度の振動が発生することがあり、試運転後や就航後に振動が確認され対策が必要な事例が生じている。試運転後や就航後は、接合部裏面（飲料水である清水タンク内面には特別な塗装がされている）も含む塗装の焼けが発生すると更なる追加工事が発生するため、溶接などの火気工事を伴う補強部材の追加は可能な限り回避することが望ましい。そこで、評価対象部材として共振防止カーリング（板材補強小型骨材）を選定した。現状では、亜鉛ショッッププライマー船級鋼板（KA）による幅200mm×厚さ12mmのフラットバーが溶接により接合されている。単位長さ1m当たりの重量は18.84kg/mである。

造船分野での使用に適した構造用接着剤の材料としての認定要件であるClassNK「構造用接着剤使用のためのガイドライン」では、「安全率については当面40倍とする。ただし詳細設計により減じることができる。」とされている。現在、NKガイドラインに基づく認定を継続している構造用接着剤は、すべて接着層厚が厚い場合に適した第二世代アクリル樹脂(SGA)系接着剤である。SGAの引張剪断強度は引張強度の6割程度であり、強度の低い引張剪断強度を用いて強度評価が行われる。200×12FBの自重が剪断力として作用する場合の引張剪断強度は0.016MPaである。40倍の安全率で必要な引張剪断強度は0.64MPa以上である。

本研究で評価対象として選定したSGAの引張剪断強度のカタログ値は、接着剤メーカーが推奨する#120ペー  
パーで完全研磨（24往復）した場合の冷間圧延鋼板では21-25MPaである。また、自動車分野の主要材料の一つである溶融亜鉛メッキ鋼板に対応した接着剤であり、引張剪断強度のカタログ値は、「脱脂処理のみで研磨無しの場合」の溶融亜鉛メッキ鋼板では13-18MPaである。上述の通り、評価対象SGAの引張剪断強度は200×12FBの自重に対して40倍の強度安全率を踏まえた場合に対してもなお数倍以上の余裕があり、必要接着面積など要件は十分確保されている。また、溶融亜鉛メッキ鋼板では、脱脂処理のみの研磨無しで接着可能とされていることから、まずは、評価対象部材であるフラットバー（300mm長による予備試験）接着部被着面の前処理として、研磨せずに接着したところ自重によるずれは確認されなかった。

火気を伴わない接合方法として、構造接着は適しているものの、1m超部材で実用化するためには、造船所からは、被着面前処理の要件緩和による作業工数削減が期待されている。そこで、本研究終了後は民間資金のみで、引き続き、火気を伴わない接合方法の一つである構造接着の実用化を促進させるため、より多くの造船所が新たなアプリケーションとして構造接着を利用する際の障害を低減させる狙いで、作業が簡便となるよう被着面前処

理の要件を見直すこととした。まず初めに亜鉛ショッププライマーの密着力を、JIS K 5600-5-7 : 2014<sup>15)</sup>「塗料一般試験方法—第5部：塗膜の機械的性質—第7節：付着性（プルオフ法）」(ISO 4624:2002(MOD))に準拠して計測した。被着面前処理は、JIS K 5600-1-4<sup>16)</sup> : 2004「塗料一般試験方法—第1部」(ISO/DIS 1514:2002(MOD))に規定する前処理として、粒度#80のアルミナ質研削材による研磨紙を用いて10往復研磨した。その結果、亜鉛ショッププライマーの密着力は15-21MPaで十分であり（図3.2参照），被着面前処理としての研磨の度合いの方が構造用接着剤の強度に及ぼす影響が大きいことを確認した。

溶融亜鉛メッキ鋼板とは異なり、亜鉛ショッププライマーに対しては接着剤メーカーがデータを有していないことから、連携造船所と協議の上、本研究では、研磨無しは除外し、#120ペーパーで完全研磨（24往復）した場合と、その半分の研磨工数となる#120ペーパーで12往復研磨した削りむらの残る不完全研磨状態の場合（図3.3参照）とで、引張剪断試験・圧縮剪断試験により剪断強度にどの程度違いが生じるか評価した。その結果、不完全研磨では、特にメートル長以上の接着線長では、使用環境温度や接着施工品質によっては、接着部の剪断応力の実効値が接着部の設計剪断応力下限値2.5MPaを下回る可能性があることが確認された。よって、実用に適するか効果を検証するための実証部材を用いた振動試験においては（4章で後述），被着面前処理として完全研磨とした。



亜鉛ショッププライマーの密着力:15-21MPa  
JIS K 5600-5-7:2014(試験法)  
JIS K 5600-1-4:2004(被着面前処理)  
#80ペーパーによる10往復研磨

図3.2 亜鉛ショッププライマーの密着力



SM490A : 21-25MPa  
CFRP:8-12MPa  
#120 ペーパーによる 24 往復研磨



亜鉛ショッププライマーKA  
#120 ペーパーによる 12 往復研磨

図 3.3 被着面前処理状態

### 3.6まとめ

本研究では、火気を伴わない接合方法の実用化に向けた以下の対策を行った。

- ①ScottBader 社の FTP CODE 認定取得に際し、受験方法や試験片製作仕様等の情報提供、認定試験機関との調整などの支援を行った。 ScottBader 社の CRESTABOND® の M7-05 と M7-15 などが構造用接着剤としては初めて FTP CODE Part2 (煙・毒性試験)、FTP CODE Part5 (表面燃焼性試験) の適合認定を取得した。
- ②構造接着と VaRTM 成型における、被着材の特性や切削方法・接合表面の前処理方法など異種材接合の施工条件に関する評価・選定を行い、被着面の前処理の有無など施工性も含めた接合条件パラメータの組合せが接合強度に及ぼす影響を評価し、造船部材要件として適切な接合条件を明らかにした。
- ③構造用接着剤を用いる場合の仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領を作成した。各種仮止め方法の試行を実施し、原則 1 名での作業が可能な有効な仮止め方法を明らかにするとともに、各種仮止め方法に適した施工手順についての検討を行った。 1m 未満の艤装品サイズでは、作業者 1 名で 1 分未満の位置合わせ・加圧時間で接着可能であることを確認した。
- ④防振部材への火気を伴わない接合方法の利用に関する評価対象部材として共振防止カーリング（板材補強小型骨材）を選定した。より多くの造船所が新たなアプリケーションとして構造接着を利用する際の障害を低減させる狙いで、作業が簡便となるよう被着面前処理の要件の評価を行った。しかしながら、接着剤メーカーが推奨する要件の半分の研磨工数では、特にメートル長以上の接着線長では、使用環境温度や接着施工品質によっては、接着部の剪断応力の実効値が接着部の設計剪断応力下限値 2.5MPa を下回る可能性があることが確認された。よって、被着面前処理として接着剤メーカーが推奨する要件に従うこととした。

#### 4. 構造接着を用いた共振防止カーリングの効果を検証するための振動試験

##### 4.1 はじめに

昨今の造船業は、作業者不足が常態化しており、国際的な競争力を保つために生産性の向上とコストダウンの継続的な両立が必要とされる環境にある。船舶の構造継手は溶接継手が大半を占め、建造に占められる溶接作業の割合も極めて高いため、構造継手の施工効率化は生産性の向上に直結する。

他産業において、特に自動車・航空機分野では異種材料の接合に構造用接着剤が活用され、車体の軽量化にも貢献している。造船業においても、日本海事協会より構造用接着剤関連ガイドラインが発行され<sup>6)</sup>、今後、構造用接着剤の活用が期待されるが、現状で接着剤の使用が認められるのは、船体主要構造部を除く部材と艤装品の接合部に限られ、その適用は限定的な範囲に留まっている。構造部材への適用が制限されている要因として、接着剤の耐久性および強度の不透明さが挙げられる。耐久性については研究が進んでいる<sup>17)</sup>ものの、船体構造への使用を前提とした接着継手強度に関する研究はほとんど報告されていない<sup>18)</sup>。

接着剤と溶接の違いの一つに入熱に起因する施工のタイミングの制約の差が挙げられる。溶接では被着材を溶融させるための入熱が原因で被着材近傍の塗装が焼けるという、いわゆる「溶接焼け」が発生する。船体構造の防振を目的としたカーリング（防振カーリング）は、建造終盤の塗装が完了したタイミングで追設されることも少なくないことから、溶接による塗装焼けのために取り付け工事が困難になることが多い。一方、接着剤は塗装を焼くことなく施工可能なため、防振カーリングを接着剤で取り付けることが出来れば、施工裕度を拡張できる。

接着剤施工による防振カーリングの実現には、接着剤の強度を明らかにし、シミュレーションでその剛性および固有振動数を推定できることが必要である。著者らは接着剤継手の弾性範囲の剛性を精度良くシミュレーションする簡易的なモデル化方法について検討している<sup>19)</sup>。

本章では、接着継手を持つ試験体の設計及び固有振動数の実験調査を行った結果を報告する。

##### 4.2 実験方法

試験は動電式振動試験機 CV-1000 (IMV 株式会社製) を使用し、起振周波数を変化させながら、各周波数における振動加速度を計測する正弦波掃引試験（スイープ試験）を実施した。図 4.1<sup>20)</sup>に試験装置の写真を示す。

シリーズ実験を行うに先立ち、実船相当の加振条件を設定するために、鋼材に接着剤（接着層厚 0.5mm）で補剛材を取り付けた試験体を対象に、スイープ試験を加速度  $\pm 4.9 \text{m/s}^2 (0.5G)$  で実施したところ、試験体の固有値は 58Hz、応答倍率は約 27 倍であった。ここで、実船で想定される振動応答の範囲としては、振動評価に用いられる Lloyd's Register 「Ship Vibration and Noise」 の上限とすると、試験体の固有値に近い起震周波数 60Hz の場合の基準上限加速度は  $\pm 27 \text{m/s}^2$  であり、応答倍率が約 27 倍であることを考慮すると、加速度  $\pm 1 \text{m/s}^2$  が実船で想定される振動応答の範囲となる。よって、掃引周波数は 5.0 Hz～85.0 Hz、振動台の加振方向は上下方向、起振加速度は  $1.0 \text{ m/s}^2$  でシリーズ実験を実施することとした。

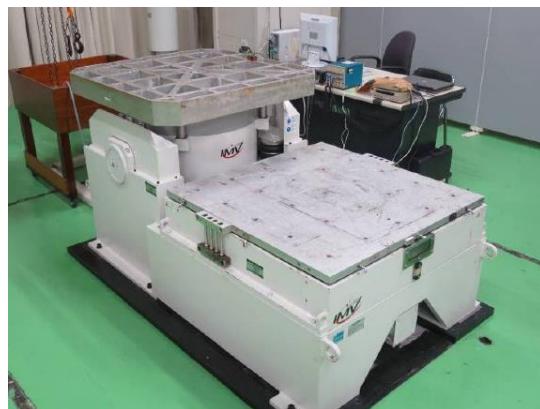


図 4.1 振動試験装置<sup>20)</sup>

### 4.3 試験対象

鋼材は一般構造用圧延鋼材 SS400、接着剤は Scott Bader 社の Crestabond M7-15<sup>21)</sup>を使用した。それぞれのヤング率、ポアソン比および密度を表 4.1<sup>20)</sup>に示す。本接着剤は日本海事協会の認証を有する接着剤用プライマー不要のアクリル系接着剤であり、表 4.1<sup>20)</sup>に示す数値は硬化完了後のものである。

表 4.1 供試材の機械的特性<sup>20)</sup>

	鋼板材	接着剤
Material	SS400	Crestabond M7-15
Young's modulus [MPa]	206,000	1,200~1,700
Poisson's ratio [-]	0.30	0.29
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	7.85	0.98~1.02

本研究では、これまで全ての試験片製作時は、評価対象接着剤メーカー製品の製作を取り扱っている複合成形材料・繊維メーカーのグループ会社にて精密に接着接合を行ってきた。しかしながら、被着面前処理の度合いや接着層厚などが構造接着の接合強度のばらつきに影響を及ぼすため、実機への適用に先立ち、連携造船所自身が接着接合した試験体を用いて、構造接着を用いた共振防止カーリングの効果を検証するための振動試験を実施した。振動試験用の試験体製作により、共振防止カーリングのように接着線長が 1m を超える場合であっても、3 章 4 節で前述した艤装品サイズ用の仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領<sup>14)</sup>で、接着可能であることを確認した。

試験体形状は実際に防振カーリングが取り付けられる船体構造を想定し、図 4.2<sup>20)</sup>に示す形状とした。接着剤の厚さによる強度への影響を考慮するため、接着剤の厚みは 0.5, 3.0, 6.0, 9.0 mm の 4 条件とした。溶接の試験体は脚長 5.0 mm の 1 条件とし、両面すみ肉溶接で接合した。接着剤の厚みが 0.5, 3.0, 6.0 mm の試験体は 3 体ずつ、厚みが 9.0 mm および溶接の試験体は 1 体製作した。接着剤メーカーが推奨する接着剤の厚みは 0.5 mm であるが、防振カーリングが取り付けられる船体構造の製作精度を考慮すると 0.5 mm 以上の取り付けギャップが発生する可能性が高いため、3.0 mm, 6.0 mm, 9.0 mm の厚みでも試験を実施した。試験条件の一覧を表 4.2<sup>20)</sup>に示す。

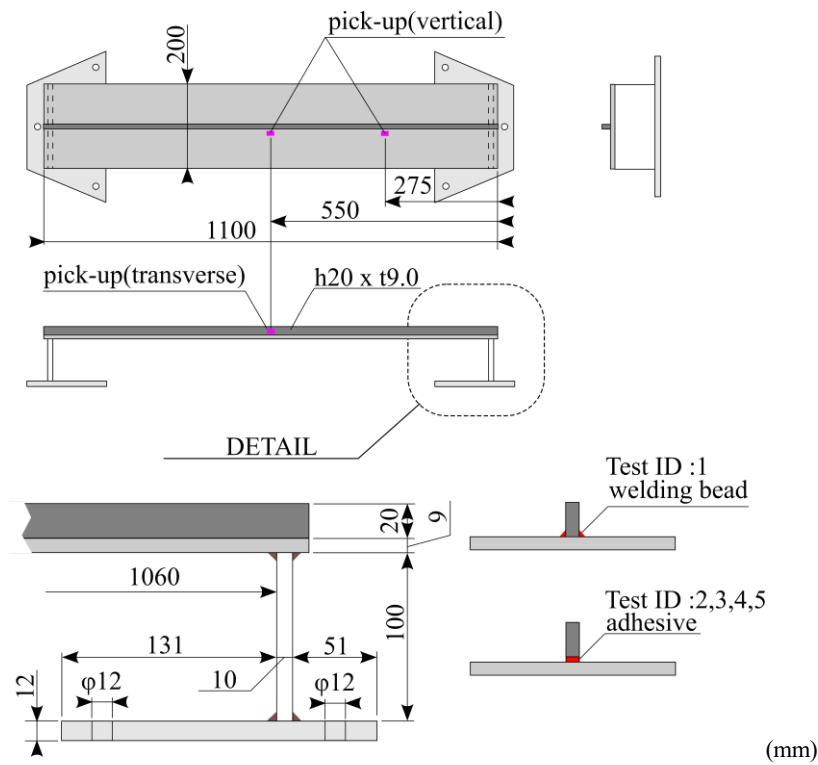
図 4.2 試験体形状<sup>20)</sup>

表 4.2 試験条件<sup>20)</sup>

Test ID	Joining method	Gap[mm]	Number of specimens
1	Welding	-	1
2	Adhesive	0.5	3
3	Adhesive	3.0	3
4	Adhesive	6.0	3
5	Adhesive	9.0	1

試験体を試験機に取り付けるための治具は鋼材で作成し、脚長 5 mm の両面すみ肉溶接で試験体に接合した。試験機には 25 Nm の締め付けトルクを与えた計 6 本のボルトで取り付けを実施した。図 4.3, 4.4<sup>20)</sup>に示すように試験機に取り付けた。振動計測には 1 軸の加速度ピックアップを用い、試験体中央の上下、左右方向および試験体の 1/4 位置での上下方向を計測した(図 4.5 参照)。

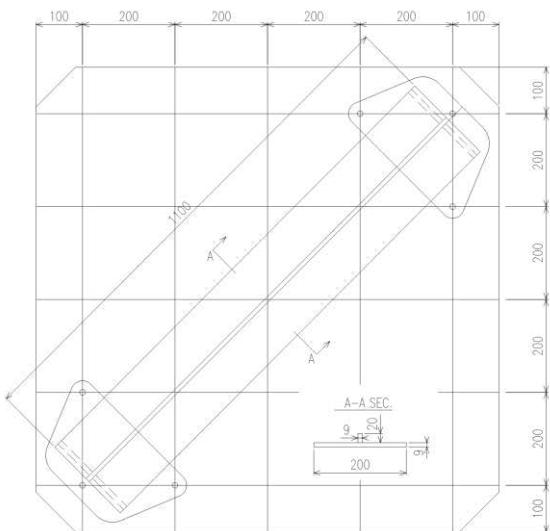


図 4.3 振動試験体配置図

図 4.4 試験体を振動試験装置に取り付けた状態<sup>20)</sup>

図 4.5 振動ピックアップ(加速度計)取付状態

#### 4.4 実験結果

計測された各ピックアップの周波数と振動加速度の関係を図 4.6 に示す。試験体の固有振動数は 56~60Hz, 応答倍率は 32.1~36.7 倍であった。比較試験で実施した同形状の溶接試験体の固有振動数は 58Hz, 応答倍率は 38.3 倍であった。構造接着の場合も溶接とほぼ同程度の剛性であった。接着継手の方が僅かではあるが応答加速度が低いことが分かる、即ち、減衰効果は溶接継手に比べ、接着継手の方が向上している。各試験体の固有振動数を

表4.3<sup>20)</sup>に示す。試験体の減衰は十分小さいと考えられるため、応答が最大となる周波数がその試験体の最低次の固有振動数であるとした。

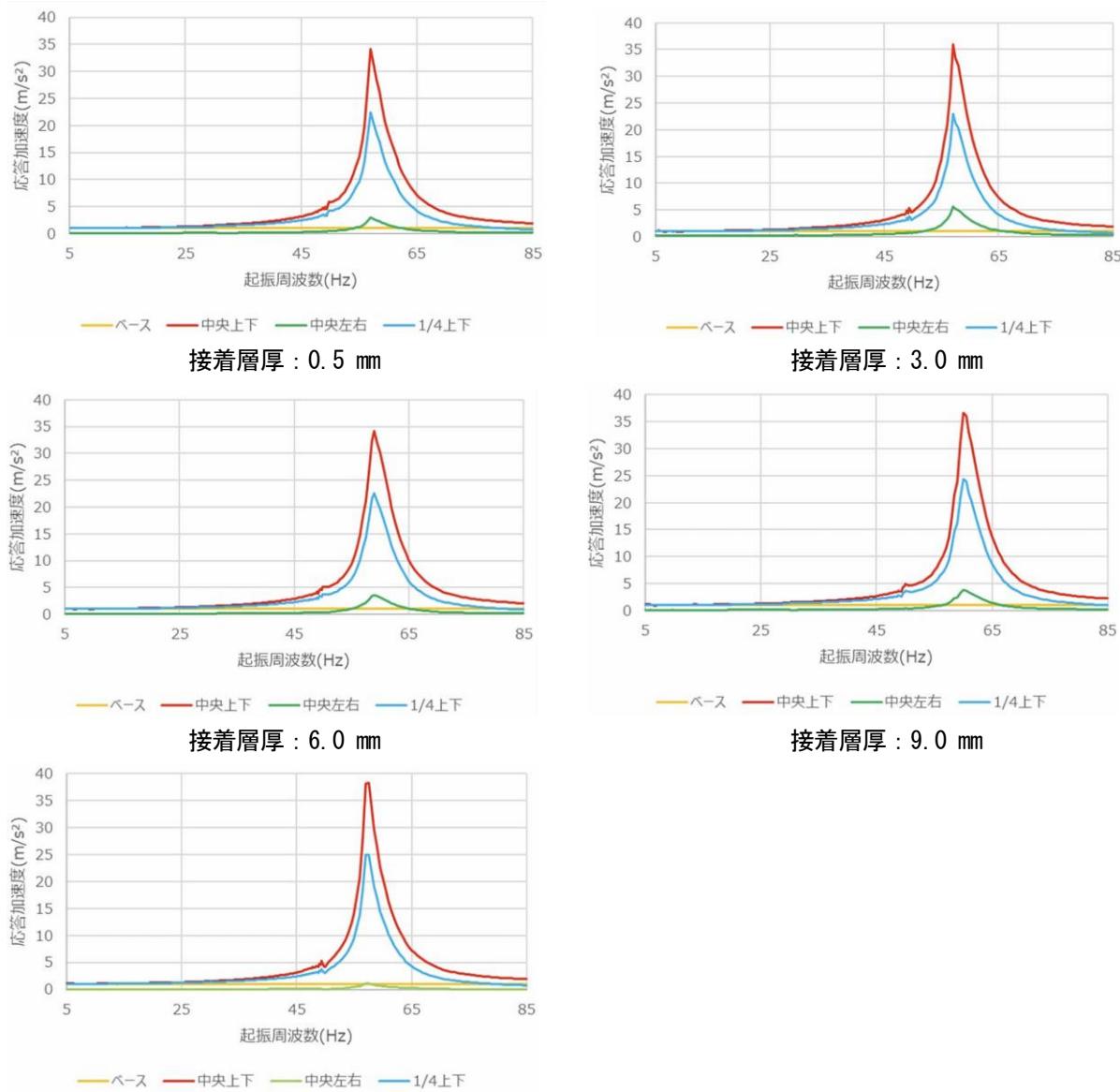


図4.6 試験体の位置および方向の周波数と加振動加速度の関係  
溶接接続

表4.3 試験体の固有振動数<sup>20)</sup>

Test ID	Natural Frequency [Hz]	
	Measured	Average
1	57.5	57.5
2-1	57.5	
2-2	56.0	56.8
2-3	57.0	
3-1	57.5	
3-2	59.0	57.8
3-3	57.0	
4-1	59.0	
4-2	58.5	58.8
4-3	59.0	
5	60.0	60.0

中央のピックアップの振動応答が最大であり、1/4位置のピックアップの応答が中央よりも小さいことから、共振時の振動モードは両端が節となり振動する1半波モードであると考えられる。接着層の厚みが同じ試験体でも、計測された固有振動数には多少のばらつきがあるが、接着層が厚くなるほどに僅かに固有振動数が高くなる傾向が確認された（図4.7参照）。この理由としては、接着層厚の増加に伴い、補剛材高さが大きくなり、断面係数が増加（剛性が増加）していると考えられる。

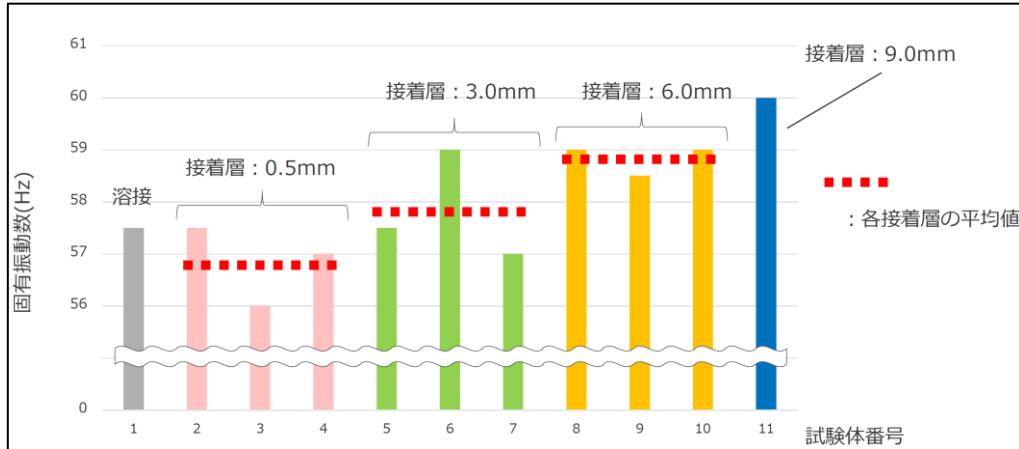


図4.7 スイープ試験による固有振動数の一覧

続いて、試験体の耐久性を確認するためのスポット試験を行った。「Lloyds Ship Vibration and Noise Guidance Notes」<sup>22)</sup>では、20Hz以下の基準上限変位は0.5mmであり、実船で想定される起信周波数は10Hz程度では、基準上限加速度は±2m/s<sup>2</sup>である。接着部の剥離が生じる変位を得るために、実船で想定される振動応答を超える加速度で、5分間ずつ段階的に加速度を±1m/s<sup>2</sup>→±3m/s<sup>2</sup>→±6m/s<sup>2</sup>→±9m/s<sup>2</sup>→±12m/s<sup>2</sup>と上げる計画で試験を実施した。接着層厚0.5mm、3.0mm、6.0mmでは、加速度±6m/s<sup>2</sup>で剥離が発生し、応答倍率の平均は、36～49倍（±219～±294m/s<sup>2</sup>）であった。接着層厚9.0mmでは、加速度±9m/s<sup>2</sup>で剥離が発生し、応答倍率の平均は、35倍（±319m/s<sup>2</sup>）であった。

更に、接着継手を持つ試験体の実験による振動特性とFEMでのシミュレーション結果の比較を行い、溶接と比較した場合の接着剤の剛性およびモデル化手法について考察した結果については別途報告<sup>20)</sup>された。

#### 4.5 考察

多くの文献では、接着層厚の増加と共に、試験体の剛性が低下し、固有振動数は低下すると報告されている。一方で、接着層厚の増加と共に、試験体の剛性は向上するという逆の結果も報告されている。Dammらは、接着層厚が増加すると、減衰振動の散逸関数も増加すると報告している<sup>1)</sup>。Dammらは、別の文献でも、損失係数が0.1増加すると、一般的な鋼構造では、振動振幅が50%低減し、損失係数が同じ場合、接着層厚の増加と共に振動振幅は減少するため、接着層厚の増加は、接着継手の減衰特性にプラスの影響を及ぼすと報告している<sup>2)</sup>。Guoらは、動的な剛性を向上させるために接着層厚を減じると、それに伴い減衰能が減少するので、接着層厚の増加は、減衰特性を向上させるが、動的剛性は低下すると報告している<sup>23)</sup>。Zeaiterらは、接着層厚の増加と共に、接着部の剛性は低下し質量は増加するが、元の接着層厚が薄い場合は、この接着層厚の増加に伴う剛性低下はわずかで、代わりに高次モードでの固有振動数の僅かな低下が確認されたと報告している<sup>24)</sup>。一方で、Yildizらは、接着層厚の増加と共に曲げ剛性は増加し、変形しにくくなると報告している<sup>25)</sup>。

本研究で実施した振動試験から得られた結果では、表4.3<sup>20)</sup>で示されるとおり、接着層厚の増加と共に、固有振動数の僅かな増加が確認された。固有振動数の僅かな増加は、試験体の剛性が僅かに増加したことを表している。この理由としては、本研究で実施した振動試験の試験体形状においては、接着層厚の増加に伴う影響は、補剛材高さに及ぼす影響が大きく、接着層厚の増加と共に補剛材高さが大きくなり、断面係数が増加（剛性が増加）していると考えられる。

#### 4.6まとめ

船体構造の防振を目的としたカーリング（防振カーリング）の接着剤施工による実現に向けて、接着継手を持つ試験体の設計及び固有振動数の実験調査を行った。その結果、接着層厚0.5mm, 3.0mm, 6.0mmでは、「Lloyds Ship Vibration and Noise Guidance Notes」で規定される基準上限加速度は±2m/s<sup>2</sup>の3倍となる加速度±6m/s<sup>2</sup>まで剥離は発生しなかった。接着層厚9.0mmでは、基準上限加速度の4.5倍となる加速度±9m/s<sup>2</sup>まで剥離は発生しなかった。また、構造接着による試験体から得られた固有振動数と応答倍率は、比較試験で実施した同形状の溶接試験体から得られた固有振動数と応答倍率にほぼ等しく、構造接着の場合も溶接とほぼ同程度の剛性であった。以上より、現状溶接により施工されている共振防止カーリングを構造接着による施工に変更しても、十分な接着強度を有することを確認した。

#### 5. あとがき

本研究では、まず初めに、粘弾性体である接着剤と複合材が減衰能を有することに着目し、これらを振動源側に用いた場合、どの程度の振動抑制効果が得られるかについて、周波数応答解析により検討を行った。その結果、周波数帯によっては振動軽減効果が確認され、主機付近であればピークの周波数では20～30%ほどの振動軽減効果が期待できるものの、居住区では十分な振動軽減効果が得られないことを確認した。

続いて、構造用接着剤の低火炎伝播性認定の支援、構造接着とVaRTM成型における造船部材要件として適切な接合条件の評価・選定、構造用接着剤を用いる場合の仮固定治具・施工手順・施工方法などの施工要領の作成、評価対象部材として共振防止カーリング（板材補強小型骨材）の選定、並びに被着面前処理の要件の評価・決定を行った。

最後に、船体構造の防振を目的としたカーリング（防振カーリング）の接着剤施工による実現に向けて、接着継手を持つ試験体の設計及び固有振動数の実験調査を行った。その結果、現状溶接により施工されている共振防止カーリングを構造接着による施工に変更しても、十分な接着強度を有することを確認した。

本研究では、防振部材への火気を伴わない接合方法の利用に向けて様々な研究開発を行い、実用に役立つ重要な成果が得られた。しかしながら、実船試験による効果の検証を目指していたが、研究期間内で実機への適用に至ることができなかった。今後は、連携造船所における実機適用への支援を引き続き行う。

#### 謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人日本財団の助成事業による一般社団法人日本船舶電装協会からの受託研究により実施した。本研究の一部は、名村造船所及び九州大学との連携により実施し、実験に際しては、樋口友磨氏、日本貴秀一博士、伊藤一智氏、鬼塚博之氏、一二三浩史氏、荒巻翔平氏、後藤浩二教授の協力を得た。引張剪断試験・圧縮剪断試験に際し、（国研）海上・港湾・航空技術研究所の専門研究員の秋山繁氏の協力を得た。構造用接着剤に関する物性値データや施工条件等の詳細については、スコットベーダー Co. Ltd., 株式会社ヤマモトの協力を得た。関係各位に深く感謝申し上げます。

#### References

- Damm J, Albiez M, Ummenhofer T, Götdecke J, Meschut G, Kötz F and Matzenmiller A: Experimental and numerical investigation of the damping properties of adhesively bonded tubular steel joints, Journal of Adhesion, Vol.99 No.15(2023), pp.2191-2221 <https://doi.org/10.1080/00218464.2023.2178909>

- 2) Damm J, Ummenhofer T and Albiez M: Influence of Damping Properties of Adhesively Bonded Joints on the Dynamic Behaviour of Steel Structures: Numerical Investigations, *Journal of Adhesion*, Vol.6 No.94(2020), pp.1-29. <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1865161>
- 3) Treviso A, Genechten VBBV, Mundo D, Tournour M: Damping in composite materials: Properties and models, *Compos Part B-Eng* Vol.78(2015), pp.144–152.<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.081>
- 4) Araújo HAM, Machado JJM, Marques EAS, da Silva, LFM: Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry, *Composite Structures*, Vol.171(2017), pp.549-61. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.071>
- 5) Costa M, Viana G, da Silva LFM, Campilho RDG. Environmental effect on the fatigue degradation of adhesive joints: a review. *Journal of Adhesion*, Vol.93(2017), pp.127–46. <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1179117>.
- 6) The Nippon Kaiji Kyokai (Class NK): Rules and guidance for the survey and construction of steel ships(2023), Tokyo: Nippon Kaiji Kyokai (Class NK).
- 7) Yanagi K: The Hull Vibration - The Hull Vibration caused by Main Engine Vibration Force, *Marine Engineering*, Vol.44 No.2(2009), pp.219-224. [In Japanese]
- 8) ISO6954:2000: Mechanical vibration Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships (2000), International Organization for Standardization
- 9) ARAI Makoto, TOYAMA Yasumi, SHIBUE Tadashi, SYURI Hideyuki and FUKASAWA Toichi: Ship ocean engineering series 8; The hull structure (vibration) (2013), Seizando-Shoten Publishing Co. Ltd. [in Japanese]
- 10) The Nippon Kaiji Kyokai (Class NK): Guidelines for use of structural adhesives. First ed(2015), Tokyo: Nippon Kaiji Kyokai (Class NK).
- 11) International Maritime Organization: IMO. Resolution. MSC.307(88) (adopted on 3 december 2010. Annex -International code for application of fire test procedures (2010 FTP CODE)(2010), International Maritime Organization.
- 12) ISO 5658-2:2006: Reaction to fire tests – Spread of flame – Part 2: lateral spread on building and transport products in vertical configuration(2006), International Organization for Standardization.
- 13) ISO 1716:2018: Reaction to fire tests for products – Determination of the gross heat of combustion (calorific value)(2018), International Organization for Standardization.
- 14) The Ship's Electric Installation Contractors' Association of Japan, Investigative research report in 2020 fiscal year about the procedure of ship's electric installation by the adhesive (2021), The Nippon Foundation. [in Japanese]
- 15) JIS K 5600-5-7:2014 (ISO 4624:2002(MOD)): Testing methods for paints-Part 5: Mechanical property of film- Section 7: Adhesion test (Pull-off method)(2014), Japanese Industrial Standards.
- 16) JIS K 5600-1-4:2004 (ISO/DIS 1514:2002(MOD)): Testing methods for paints–Part 1: General rule– Section 4: Standard panels for testing (2004), Japanese Industrial Standards.
- 17) Iwata T, Hayashibara H, Sugasawa S, Ando T, Murakami C, Akiyama S and Yamane K: Research on application of the structural adhesive in shipbuilding, *Papers of National Maritime Research Institute*, Vol.19 No.1(2019), pp.143-176. [in Japanese]
- 18) Matsuno S, Iwata S, Yoneda N, Hattori Y and Saito T: Application of Welded Bond Joint to Aluminum Ship Structures (1<sup>st</sup> Report) Tensile Strength of Cross Lap Welded Bond Joint, Vol.184(1998), pp.473-481. [https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1998.184\\_473](https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1998.184_473) [in Japanese]
- 19) Onizuka H, Yamatoki S, Hifumi K, Ito K, Aramaki S, Gotoh K, Murakami K and Iwata T: Basic Research on the Use of Structural Adhesives in Hull Construction, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.37(2023), pp.719-723. [https://doi.org/10.14856/conf.37.0\\_719](https://doi.org/10.14856/conf.37.0_719) [in Japanese]
- 20) Higuchi Y, Yamatoki S, Ito K, Onizuka H, Hifumi K, Aramaki S, Murakami C, Iwata T, Ando T and Gotoh K: Basic Research on the Use of Structural Adhesives in Hull Construction -Vibration Test and Numerical Simulation, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.38(2024), pp.633-636. [in Japanese]
- 21) Crestabond M7-15 TDS: [http://jp.scottbader.com/uploads/files/13343\\_crestabond-m7-15-jp-tds-may19.pdf](http://jp.scottbader.com/uploads/files/13343_crestabond-m7-15-jp-tds-may19.pdf) (Accessed: October 8, 2024)
- 22) Lloyd's Register: Lloyds Ship Vibration and Noise Guidance Notes(2006), Lloyd's Register

- 23) Guo Q, Wang S: Free vibration analysis and optimal design of adhesively bonded double-strap joints by using artificial neural networks, Latin American Journal of Solids and Structures Vol.17 No.4(2020), pp.1-19
- 24) Zeaiter A, Challita G, Khalil K. Investigation of vibration modes of a double-lap bonded joint, SN Applied Sciences, Vol.1.No.5(2019), p.466 <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0340-8>.
- 25) Yildiz S, Andreopoulos Y, Jensen RE, Shaffren D, Jahnke D and Delale F. Characterization of adhesively bonded aluminum plates subjected to shock-wave loading, International Journal of Impact Engineering Vol.127(2019), pp.86-99 <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.01.007>