

講演 F R P 廃船の再利用方法を開発

- 放置 F R P 船対策への決め手に -

輸送高度化研究領域	* 秋山 繁
環境・エネルギー研究領域	* 田中 義照、安藤 孝弘、勝又 健一、 松岡 一祥、林 慎也
(社) 日本舟艇工業会	山内 信彦
ヤマハ発動機販売 (株)	仲西 修司

1 . はじめに

近年増加傾向にある F R P (fiber reinforced plastics : 繊維強化プラスチック) 船の海洋不法投棄、放置艇の沈廃船化等の社会的問題に対処するとともに、循環型社会の構築や資源の有効活用の社会的要請に応えることが必要となっている。そのため、F R P 廃船を解体、破碎して、その F R P 破砕片をセメントの原燃料として利用するリサイクルシステムを確立した。また、F R P 船のメインハル自体を分割可能なパーツに分けて作成し、接合部をブロック継手という新しい方法で接合するリユース可能な「F R P ブロック接合船」、及び超音波を利用して F R P 船体の劣化状態 (層間剥離) を検査する「携帯型劣化診断装置」を開発した。

2 . F R P 廃船のセメント焼成によるリサイクルシステムの開発

2.1 背景と目的

小型船舶・舟艇の構造材料として使用されている F R P は、耐食性、難吸水性、防虫性、水密性、軽量等、優れた特性を有している。そのため、F R P は、昭和 30 年代後半から小型船舶・舟艇の構造材料として一般化し、船大工の老齢化と後継者の養成難、木材の枯渇等の条件が重なり、昭和 40 年代中頃から急速に船舶用材としての使用が広がった。現在、プレジャーボート及び漁船のほとんどが F R P 材により建造されている。

F R P 船が実用化されてから約 45 年以上経過し、初期に建造された F R P 船の廃船が発生している。F R P 船の耐用年数は、30 ~ 50 年と考えられており、建造隻数から単純に推定した廃船数は、年間 1 万隻に及ぶ。F R P 船は、ガラス繊維で強化されているので解体が難しく、処理経費がかさむため、海洋、港湾、及び河川等への放置や不法投棄が多発し、沈廃船化等の社会的な問題になってきている。F R P 船は、不燃性のガラス繊維が層状に入っており、その分離が困難であることや、既存の廃棄物処理ルート (埋め立て、焼却、再利用) に乗せるためには、運搬及び処理可能な大きさに前処理しなければならない等、一般のプラスチック以上に処理が困難である。また、埋め立て処分場の枯渇化が大きな問題となっている^{1), 2)}。

そのため、本研究では、F R P 廃船の収集、運搬、解体、中間処理のプロセスを経て、

最終的に、F R P 破砕片をセメントの原燃料として利用するセメント焼成リサイクルシステムを構築した。また、セメント焼成可能な製品を製造するため、中間処理でF R P と廃油の混合物を製造するF R P 船リサイクルプラント(写真 2.1)を開発した。



写真 2.1 F R P 船リサイクルプラント

2.2 セメント焼成法の選定理由

船舶用F R P は、不飽和ポリエステル樹脂 60%とガラス繊維 40%から構成された積層複合材料である。無機物質のガラス繊維は燃焼しないが、不飽和ポリエステル樹脂は 8,000kcal/kg と高い発熱量を有しており³⁾、F R P としては、4,000kcal/kg 程度の発熱量を有しているため、セメント焼成の燃料として使用可能であると考えた。

ガラス繊維の主成分である Si、Ca 及び Al は、セメントの主成分である 5 元素 (Si、Ca、Al、Fe 及び Mg) の内の 3 元素であることから、F R P は、セメントの原料として使用可能である。

また、セメント焼成に利用する場合は、樹脂は燃料として、ガラス繊維は原料として使用され、残渣のない再利用処理ができるため、F R P 廃船のリサイクル方法として極めて優れている。

2.3 セメント会社の受入条件

一般的に、セメント会社がプラスチック廃棄物を受け入れる条件の目安は、以下のとおりである^{4),5)}。

破砕寸法が、20mm 角以下であること。

塩素及び重金属等有害成分 (Na₂O, SO₂, Zn, Pb, Cr) 濃度が、制限値以下であること。

異物 (金属、石等) の混入が無いこと。

燃料として利用するためには発熱量が 5,000kcal/kg 以上であること。

粉塵、特にガラス繊維の飛散がないこと。

ハンドリングが良好であること。

F R P に混合する物は、高カロリーの方が必要であるが、F R P 破材が固形化しない程度の適度な粘性も有し、粉塵防止に優れたものが必要である。また、ダイオキシン^{6),7)}発生を防止するため、塩素濃度はできるだけ低い物を選定する必要がある。調査検討した結果、発熱量 6,000kcal/kg 以上で塩素濃度が低く、入手も容易で、F R P 破砕物と混合可能な廃油 (再生油) を代替物に選択した。

2.4 F R P、混合物及び廃油の分析

セメント会社の受入条件を満足しているかどうか確認するため、F R P、混合物及び廃油等の成分分析を行った。

分析の結果、F R P の発熱量は 3,000 ~ 4,280kcal/kg であった。発熱量の条件

5,000kcal/kg 以上を達成させるため、FRPと廃油を混合することを考えた。廃油の混合比を7%～20%まで変化させて分析した結果、かなりのばらつきがあったが、混合比約12%以上ではほぼ発熱量の受入条件を満足していることが分かった。

塩素濃度に関しては、かなり分析結果にばらつきが見られ、1,000ppmを超える結果も得られた。しかし、セメント焼成では、FRP単一の焼成は考えられず、他の燃焼物と一緒に燃焼されることと、FRPの処理量が少ないことを考慮すると問題ないとする。

2.5 FRP廃材の発火特性

船舶用FRPはガラス繊維と不飽和ポリエステル樹脂の複合材料である。成形の際、樹脂の硬化を促進する硬化剤の含有成分である有機過酸化物は、成形後のFRPに少量残留する。その残留有機過酸化物は、時間の経過とともに分解し、その際、酸化反応が生じると酸化熱が発生する。その酸化熱が温度上昇を生じて、自然発火の原因となることが危惧される。そこで、FRP破砕物等の有機過酸化物の残留特性を確認する実験を行った。

実験の結果、硬化剤に含有している有機過酸化物は、成形後1週間で含有量のほぼ半分以上が分解し、有機過酸化物の分解速度は温度上昇に伴い加速することが分かった。また、船齢20年のFRP廃船から取得したFRPの残留有機過酸化物量は、FRPと廃油(15%)の混合物500kg(フレコン1袋分)につき400g(0.08%)となる。また、FRPの工場内で発生したFRP廃材の残留有機化合物量は、硬化剤1%、25℃の条件で、成形1週間後にFRP500kgにつき1,300g(0.26%)となり、船齢20年のFRP廃船と比較して約5倍となる。よって、工場内で発生したFRPを破砕する場合は、成形からできるだけ長い期間経過後、破砕することが望ましい。また、温度上昇を加速する要因として考えられる直射日光や鉄錆の混入は、極力避ける必要がある。なお、廃油の影響については、廃油の成分に大きく作用されるので十分注意する必要があるが、ほとんど影響はないと推察する。

2.6 FRP廃船のリサイクルシステム総合実証試験

2.6.1 概要

国土交通省で実施してきた「FRP廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト」における「FRP廃船リサイクルシステム総合実証試験」は、FRP廃船の収集、保管、解体、輸送、中間処理を経て、最終的にセメント焼成を行うシステムの有効性を確認するものであり、その概要を図2.1に示す。

平成14年度は、全国4箇所にFRP廃船の解体場所を選定し、開発したリサイクルプラントをセメント会社に設置してFRPと廃油の混合物を製造し、セメント焼成試験を行った。平成15年度は、FRP廃船の収集・解体場所を全国7箇所に増やし、中間処理場に改良したリサイクルプラントを設置して混合物を製造し、セメント会社へ混合物あるいはFRP破砕物を搬送してセメント焼成試験を行った。

2.6.2 中間処理プラントの設置場所及びセメント会社

平成14年度に、中間処理プラント(FRP船リサイクルプラント)を製作した。FRP船リサイクルプラントは、建設機械を用いて1m角以下に解体したFRP破材を、破砕機によって約20mm以下に破砕し、廃油(再生油)を混合して、セメント焼成可能な混合物を

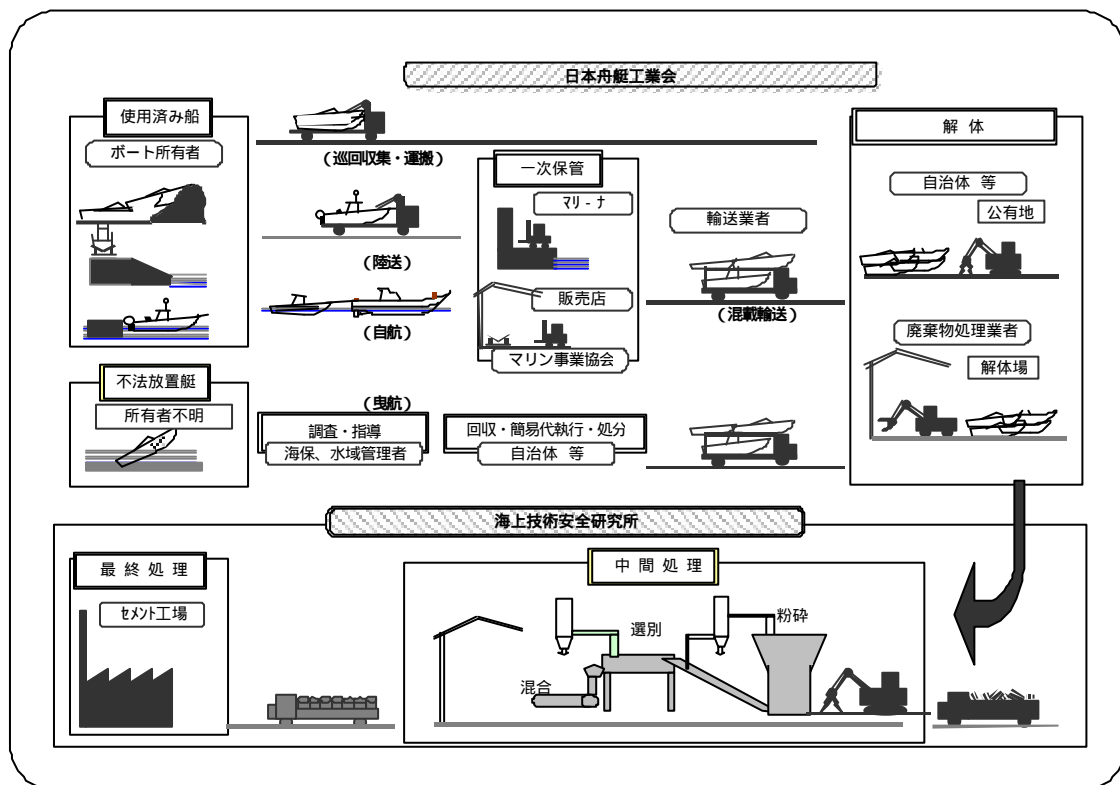


図 2.1 FRP 廃船リサイクルシステム総合実証試験

製造（中間処理）する機械である。

平成 14 年度は、FRP 船リサイクルプラントを麻生セメント(株)田川工場（福岡県田川市）に設置し、62.14 トンの FRP から約 73.5 トンの混合物（廃油の目標混合率：約 15～20%）を製造して、セメント焼成試験を行った⁸⁾。

平成 15 年度は、平成 14 年度開発した FRP 船リサイクルプラントを改造⁹⁾し、山口県下関市の中間処理場へ搬入・設置し、全国から収集した FRP 破材 59.68 トンの破碎・分別・混合の実証試験を行った。製造物は、山口県の(株)トクヤマ南陽工場へ FRP 22.80 トン、福岡県の宇部興産(株)苅田工場へ目標廃油重量比 15% の混合物 18.47 トン、兵庫県の住友大阪セメント(株)赤穂工場へ目標廃油重量比 17% の混合物 16.04 トンをそれぞれ搬出し、セメント焼成実証試験を実施した。図 2.2 にプラント製作会社、セメント会社及び中間処理場の場所を示す。

以降、平成 15 年度の総合実証試験について説明する。

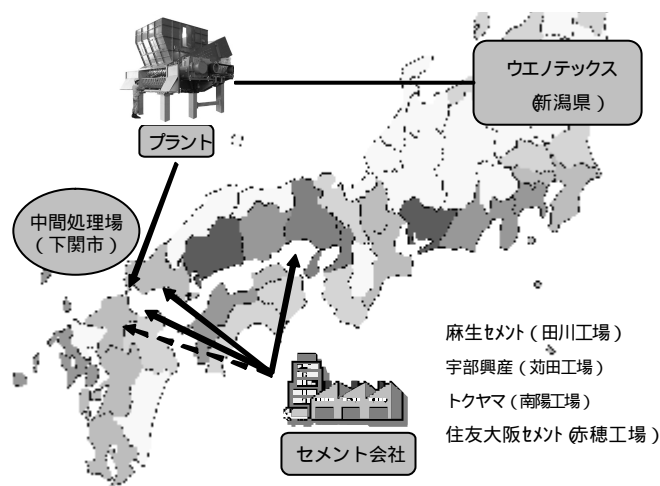


図 2.2 プラント製造会社、セメント会社及び中間処理場の場所

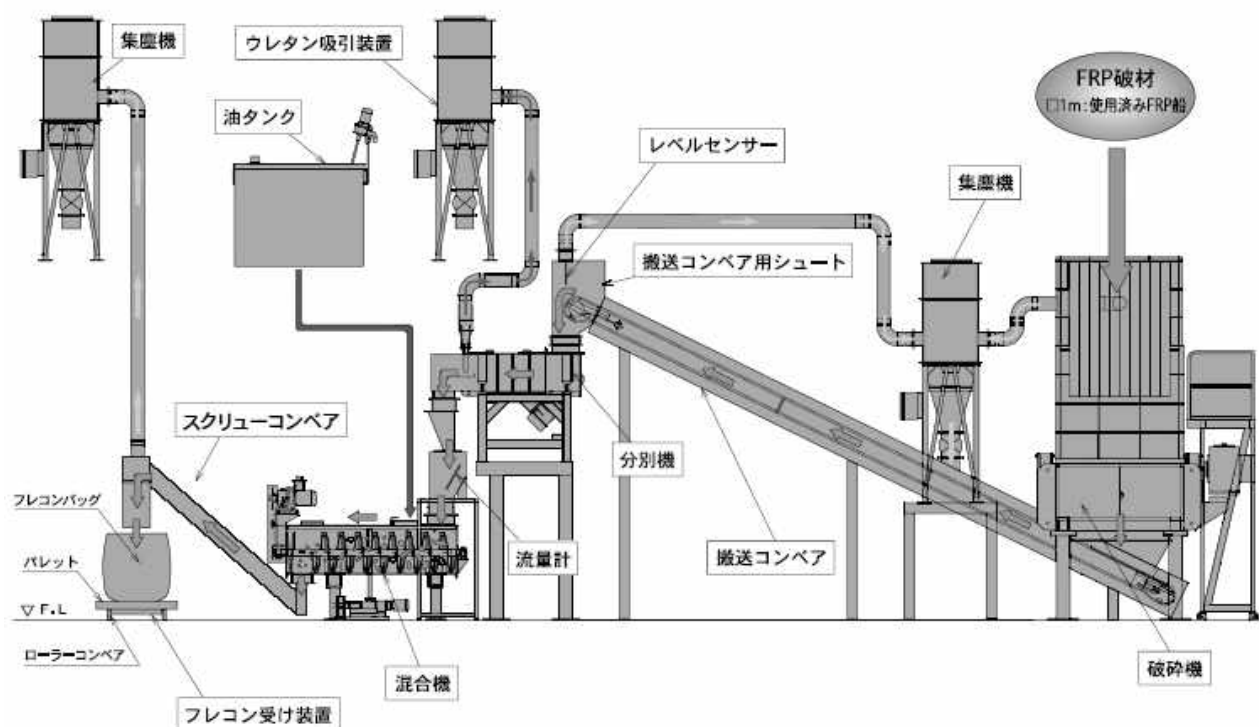


図 2.3 F R P 船リサイクルプラントのフロー図

2.6.3 F R P 船リサイクルプラント

平成 15 年度に下関市の中間処理場に設置した F R P 船リサイクルプラントのフロー図を図 2.3 に示す。本プラントは、一軸剪断式破碎機、搬送コンベア、ベルトコンベア、分別機、発泡ウレタン吸引装置、流量計、混合機、廃油タンク等で構成されている。

2.6.4 試験条件等の詳細

破碎機は、ウエノテックス（株）製一軸剪断式破碎機 UC-130 を用い、破碎機の固定刃と回転刃の材質に汎用冷間ダイス鋼 DC53 を採用した。

ウレタン等発泡材の分別については、雨の影響で、水分を多く含む粉体が装置内部に付着し、F R P 破材の装置内輸送及びウレタンの分別に支障を来す結果となった。そのため、製造速度は、設計値 3 トン / 時間の約 1/3 ~ 1/2 で行った。集塵機で回収したウレタン発泡材等の回収率は、搬入された F R P 破材の全重量 59.68 トンの約 4.1%、重量で 2.47 トンであった。

F R P と廃油の目標混合率は、重量比で宇部興産 15%（F R P：廃油=100：15）、住友大阪セメント 17%（F R P：廃油=100：17）であったが、廃油消費量から計算すると、宇部興産用は平均値で 7.1%、住友大阪セメント用は 11.6%であった。

製造物の搬出については、宇部興産（株）へは混合物を、（株）トクヤマへは F R P をフレキシブルコンテナ（フレコン）へ入れて、10 トンユニック車で搬出した。また、住友大阪セメント（株）へは、20 トンフルトレーラー（ダンプ機能・牽引付、10 トン貨車 2 台連結）に混合物をバラ積みにして搬出した。

周囲環境に対する粉塵の影響を検討するため、プラント周辺の粉塵の測定を行った。粉

塵測定値は、風速・風向、測定位置（風上・風下）、天気等により大きく影響を受ける。また、FRPから発生する粉塵以外に、使用した建設機械や発電機から排出される煤煙の影響により、粉塵の測定値は大きく上昇することが分かった。従って、プラントは、外部環境の影響を受けないように屋内に設置するべきであると考えられる。また、粉塵を取り扱う以上、清掃等にあたっては、防塵マスク、保護眼鏡等の着用が必要である。

騒音規制法による第4種指定区域内に相当する中間処理場の許容限度は、70dB以内である。中間処理場の境界地線では、プラント稼働中の平均騒音値は65.5dBとなり、許容限度以下であった。

中間処理場へ搬入したFRP破材は59.68トン、使用した廃油は3.61トンであった。また、FRP及び混合物以外のゴミ類は、搬入FRP破材の重量の7.8%(4.65トン)と少量であった。中間処理場で製造した混合物をフレコンに入れて一時保管したが、廃油がフレコンからにじみ出る現象は起こらなかった。

2.6.5 セメント焼成

セメント焼成実証試験の結果、FRP船リサイクルプラントにより製造された製品（FRP破砕物及び混合物）は、セメント焼成が可能であることが判明した。製品処理中に粉塵の発生は見られたものの、問題となる程の粉塵発生量ではなかった。混合物が、廃油混合率15～17%で製造されれば、ほとんど粉塵は発生しないと考えられる。製造物の発熱量及び塩素濃度に関しては、通常のセメント焼成にほとんど影響がないことが分かった。

また、事業化を行う場合の適正費用は、混合物あるいはFRP単一1トン当たり1万円～2万円（平均約13,000円/トン）であるとのセメント会社からのコメントが得られた。

第2章の参考文献

- 1) 林愼也、奥沢務、岩垣幸雄、横溝修、野間口兼政：廃プラスチックリサイクルシステムの提案、船研発表会講演集、(1997)、pp.93-98
- 2) 細田衛士、室田武：循環型社会の制度と政策、岩波講座環境経済・政治学第7巻、(2003)、p.132
- 3) 国土交通省海事局船用工業課：FRP廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト、平成12年度実施報告書、(2001)
- 4) 国土交通省海事局船用工業課：FRP廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト、平成13年度実施報告書、(2002)
- 5) 林愼也、松岡一祥、高田篤志、古谷典彦：FRP廃船のセメント燃料へのリサイクルの試み、海技研発表会講演集、(2001)、pp.353-356
- 6) 関西新技術研究所：ダイオキシン - 化学・分析・毒性 - 、(1999)
- 7) 環境省：ダイオキシン類による大気の汚染、水質及び土壌の汚染に係る環境基準について、環境省告示第46号、(2003)
- 8) 国土交通省海事局船用工業課：FRP廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト、平成14年度実施報告書、(2003)
- 9) 秋山繁、林愼也、勝又健一：FRP廃船のセメント焼成リサイクル実証試験、海技研発表会講演集、(2003)、pp.1-6

3. FRPブロック接合船の開発

FRP船の廃棄量そのものを減少させることを目的として、損傷部位のみを交換し再使用することができるFRPブロック接合船について開発研究を実施した。

3.1 FRPブロック接合の要件と接合方法の開発¹⁾

船体の損傷部位のみを取り替え可能とするには、自動車、家電等で用いられているパーツ化が有効であるものの、一体成形を基本とするFRP船体については困難とされていた。そこで、以下の3つの課題を満足するようなFRP接合方法について検討した。

- ・着脱が容易で、軽量かつ高強度であること。
- ・接合部強度の信頼性が確保できること。
- ・リサイクル時の効率を考慮し、異種素材の使用を極力抑えること。

3.1.1 接合箇所の選定と接合方法

図3.1にブロック接合船体の概形を示す。継手位置としては、ガネル、チェーン、あるいはキールといった外板が折れ曲がる部位に継手を配置することにより、継手自体が縦強度に寄与する構造を考えた。接合方法は、図3.2に示すようなアラミド等の有機繊維のロープによるスパイラル締結法を採用した。すなわち、各ブロック端部にロープを螺旋状に通す穴および溝を設けた半円柱状のコアを成形し、接合はコア同士を突き合わせた後、ロープにより縫合・緊張するものである。この接合法を採用することにより、締結用ロープを切断することにより解体を容易に行えるほか、廃棄の際の分別についても金属等の異種素材が含まれないため有利である。

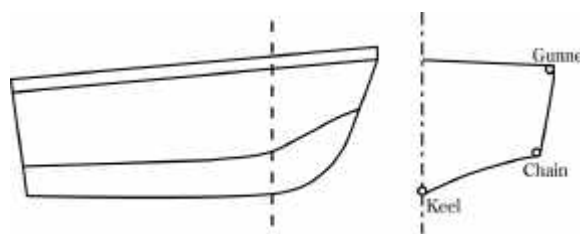


図 3.1 ブロック接合船体の概念図

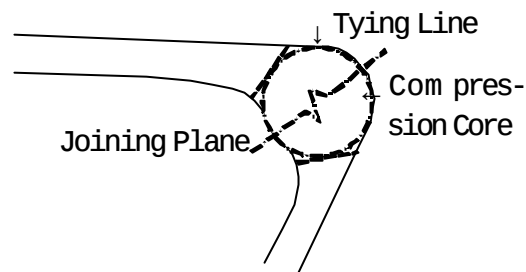


図 3.2 新しい接合方法

3.2 基礎継手および箱形試験体による強度確認

3.2.1 継手の曲げ強度および引張強度

図3.3に示すFRP基礎継手試験片を作成し、各スパン 300mm の4点曲げ試験を実施した。試験結果を図3.4に示すが、横軸は $N \times R$ (巻数とコア半径の積)、縦軸は最大モーメントを示す。図中の○印は母材の層間剥離による破壊、●印は緊張材の破断、△印はコアの圧縮側での層間剥離による破壊を示す。最大モーメントを上昇させるには母材の層間剥離強度の改善が有効であることが分かる。

基礎継手試験片による引張試験では、実施した試験条件における破壊のメカニズムがすべて緊張材の破断によるものであり、本試験で使用した直径2mmのアラ

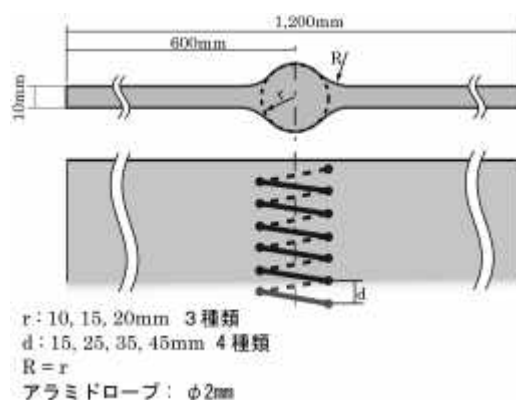


図 3.3 基礎継手の形状

ミドロープの破断強度が明らかに不足していた。したがって、本試験片に使用した緊張材の3倍の引張強度を持つ直径3mmのアラミドロープをこれらの試験片に使用すれば、引張強度は試験片の母材の引張強度の2/3程度まで改善されることが期待できる。

3.2.2 FRP箱形試験体による強度確認

図3.5に示すような箱形試験体をブロック継手により製作した。試験体を3点曲げ試験に供し、荷重、変位、および、ひずみを計測するとともに耐荷能力について検討した。試験体各部の変形は、初めに側外板が剪断座屈し、その後、隔壁と外板縫合部のずれと面外変形が生じ（写真3.1参照）285kNで最大荷重を示した。また、これと同時に中央隔壁と側外板上部の縫合箇所のアラミドロープが破断した（写真3.2参照）。図3.6に側外板の対角方向ひずみの変化を示す。図中の実線は軸ひずみ、破線は曲げひずみである。荷重130kNを超えると曲げひずみが増大してくるのが分かる。この値を本実験の弾性座屈荷重とすれば、崩壊荷重は座屈荷重の2倍以上であり、ブロック継手が十分な強度を持つことが明らかになった。

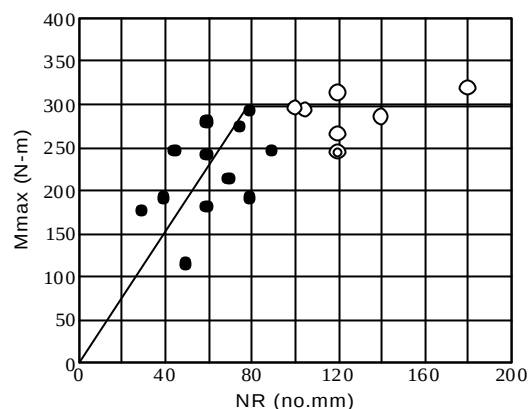


図 3.4 曲げ試験結果

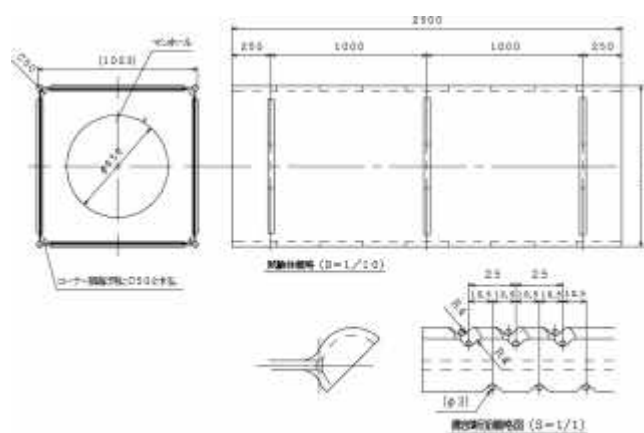


図 3.5 FRP箱形試験体

3.3 FRP ブロック接合船の開発²⁾

3.3.1 接合箇所の選定

ブロック接合船の船殻部を図3.7に示すように、



写真 3.1 隔壁の変形



写真 3.2 緊張材の破断
および側外板の破壊

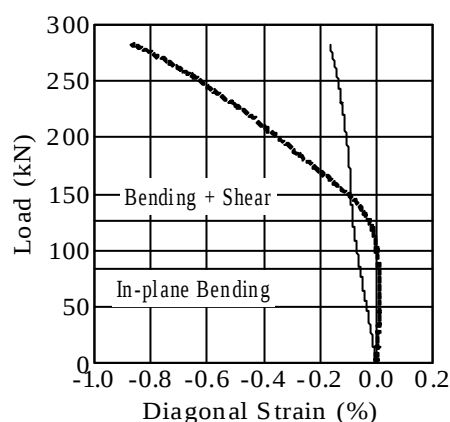


図 3.6 曲げ試験結果

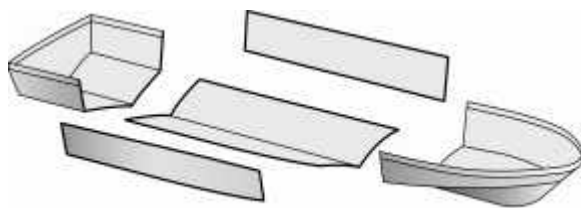


図 3.7 ブロック接合船分割図

甲板、船首、船側（両舷）および船底の 6 つのブロックに分割し、縫合・緊張することとした。図 3.8 に継手部の詳細を示す。

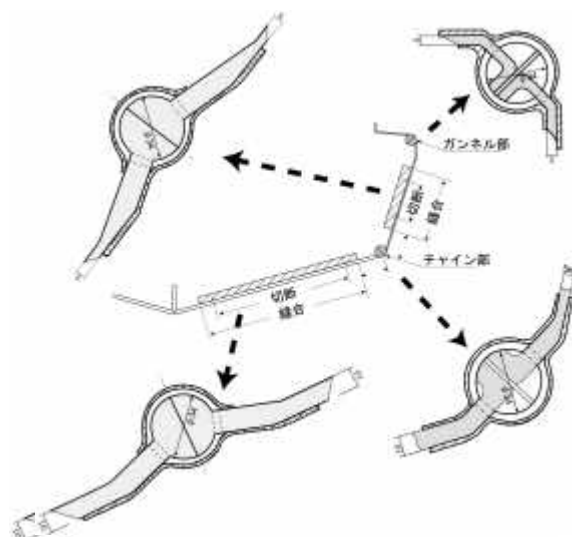


図 3.8 継手部詳細図

3.3.2 ブロック接合船の建造

継手部の型は、3D-CAD で作成したスパイラル状の溝を有するコア形状をもとに、ナイロン粉体を用いた CO₂ レーザー焼結により成形した。この継手部の型と外板部の型を用いて、船殻を一体成形した後、継手部を切断してパーツ化した。組み立ては、各パーツを仮組みした後、直径 3mm のアラミドロープを使用し、継手部を縫合・緊張し建造する。その後、止水処理、上部構造および必要装備品をぎ装し、写真 3.3 に示すブロック接合船が完成した。



写真 3.3 竣工艇

3.4 FRP ブロック接合船の強度試験

3.4.1 外板模型による静的曲げ試験

外板模型を図 3.9 のように支持上に設置し、10kN まで静的戴荷した。荷重と船体中央付近における縦曲げひずみの関係を図 3.10 に示す。荷重 - ひずみ関係は、ほぼ直線関係にあり、本曲げ試験の戴荷の範囲では弾性変形していることが分かる。また、10kN 戴荷時の垂直方向の撓み量は 3.9mm、水平方向は 0.0mm であり、小型船舶検査規則³⁾の FRP 船の強度基準を十分に満足している。

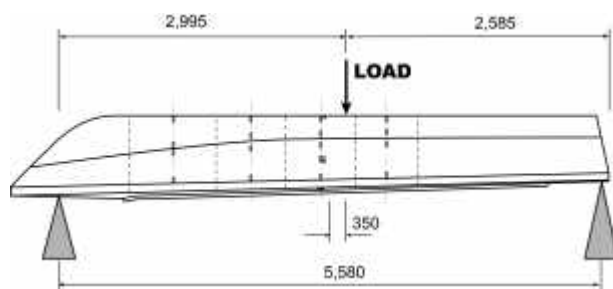


図 3.9 外板模型設置方法(単位:mm)

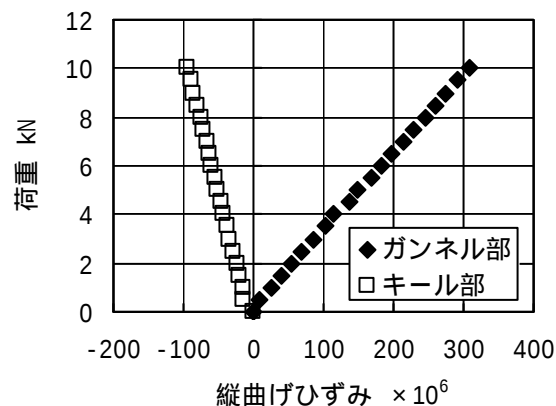


図 3.10 荷重 - 縦曲げ歪関係

3.4.2 外板模型による落下試験による強度確認⁴⁾⁵⁾

実艇と同寸法、同手法で製作した船体外板（外板模型という）に、上部構造、船外機および乗船定員分に相当する土嚢を積載し、平水中に自由落下させる試験を実施した。落下高さは0.5～2.5mまで0.5m刻みで、5ケース実施した（写真3.4参照）。落下試験後の船体には、写真3.5に示すように艇内横隔壁と船底外板の二次接合部に剥離が見られ、隔壁の接合に工夫を要することが判明したが、ブロック接合部そのものにはき裂やロープの破断等の異常は見られず、本接合法の強度が十分であることが確認された。



写真 3.4 落下試験 落下高さ 2.5m
(満載状態)



写真 3.5 船底パネルと隔壁間の剥離

3.5 有限要素解析による要検査項目の抽出

ブロック接合船の強度評価を行うため、落下試験に用いた外板模型をモデル化し、衝撃水圧に対する船体強度を有限要素法（FEMという）により計算した。ブロック継手のコア部には簡易的に単純梁要素を用い、他の外板部分には板要素を用いた。衝撃水圧分布はWagner⁶⁾の式から衝撃荷重および作用面積を求め、平均衝撃水圧に換算したものを使用した。計算結果を図3.11に示す。キールおよびチェーンの縦曲げひずみの計算値は、落下試験結果と良い相関を示したが、船体の開口部付近の変形の影響を受けるガネルについては、試験結果より小さめの値となった。

落下試験において剥離が検出された横隔壁と船底外板の二次接合箇所については、FEM計算においても、付加重量の慣性力に起因する（船底外板に土嚢を直接搭載したことによる）船底外板の過度の変形の影響から、周辺に比べ高い応力が見られたため、要検査項目として挙げられる。この部位は、横隔壁スロットとブロック接合コアとの隙間が非常に狭く、積層等による補強も困難なため、設計段階から作業性を考慮する必要がある。

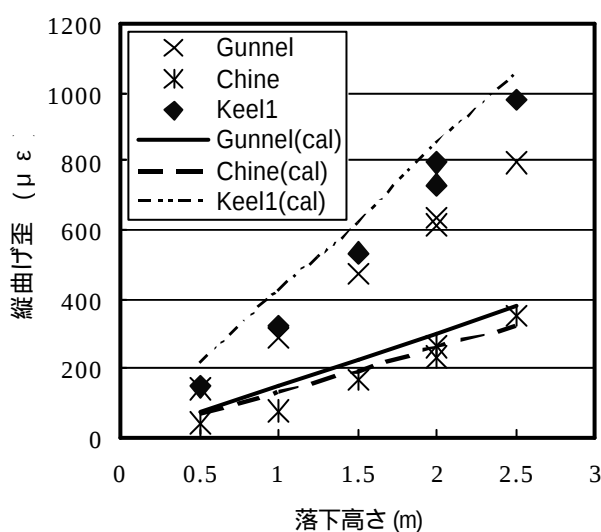


図 3.11 満載状態における縦曲げひずみの計測値と計算値の比較

3.6 ブロック接合船のコスト評価

ブロック接合船の解体試験を実施し、ブロック接合及び解体に要する標準的な工数を明らかにした。一例として船側パネルの解体手順を示す。

防水プライマ除去
アラミドロープ切断
ロープ引抜き
二次接合部切断
パネル切離し

解体作業に要した時間および船側部解体に要する推定時間をそれぞれ、表 3.1 および表 3.2 に示す。建造時の作業時間から、本ブロック接合船の船側ブロックを除去し、新しい船側ブロックを接合するのに要する作業時間は約 5,560 分、すなわち約 11.8 人日と推定された。ただし、作業のすべてを手作業で行なっているため、専用縫合装置等の開発により大幅なコスト削減が期待できる。

表 3.1 解体試験結果

部位	作業内容	長さ (mm)	作業時間 (min)
ガンネル部	プライマ除去	3,200	99.5
	ロープ引抜き		110.4
チェーン部	プライマ除去	3,050	56.7
	ロープ引抜き		222.0
船側・船首ブロック接合部	プライマ除去	600	11.6
	ロープ引抜き		49.0
横隔壁 5枚	デッキ、船側から切断		(35.9)
合計		6,850	549.3

表 3.2 ブロック接合船の船側部
解体に要する推定作業時間

部位	作業内容	長さ (mm)	作業時間 (min)
ガンネル部	プライマ除去	3,200	99.5
	ロープ引抜き		110.4
チェーン部	プライマ除去	3,050	56.7
	ロープ引抜き		222.0
船側・船首ブロック接合部	プライマ除去	600	11.6
	ロープ引抜き		49.0
横隔壁 5枚	デッキ、船側から切断		(35.9)
合計		6,850	549.3

第3章の参考文献

- 1) 松岡、岩田、勝又、林：新しいFRP ブロック接合法、平成 13 年度海上技術安全研究所発表会講演集、pp.357-362、平成 13 年 6 月
- 2) 田中、佐久間、安藤、岩田、松岡：リユース可能な FRP 船の開発、平成 15 年度海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.7-12、平成 15 年 6 月
- 3) 日本小型船舶検査機構：検査事務規程細則、第 1 編小型船舶安全規則に関する細則、附属書 [5] FRP 船強度試験の方法
- 4) 安藤、佐久間、田中、松岡、勝又、林：FRP ブロック接合船の落下試験と安全性、平成 16 年度海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.293-296、平成 16 年 7 月
- 5) 日本小型船舶検査機構：検査事務規程細則、第 1 編小型船舶安全規則に関する細則、附属書 [5-2] 落下試験
- 6) Wagner, H., “Uber Stosse und Gleitvorgange an der Oberflache von Flussigkeiten ”, Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechnik, Vol.12, No.4 (1932)

4 . 超音波による F R P 劣化診断技術の開発

F R P 廃船量の低減を総合的に図るには、第 3 章で述べたようなブロック接合技術、本研究で別途実施したサンドイッチ構造を基にした F R P 船の標準化技術、および損傷 F R P 船の再生技術等を用いて、F R P 船のリユースを推進させることが重要である。そのためには、経年 F R P 船の劣化状態を客観的に示す装置を開発する必要があり、超

音波を用いた F R P 劣化診断装置について検討した。

4.1 実損傷材を用いた基礎試験

F R P 板の剥離検出に超音波が利用可能かどうかを検討するため、F R P 板の破壊試験により得られた実損傷材を用いて垂直探傷を実施した。

(1) 対象

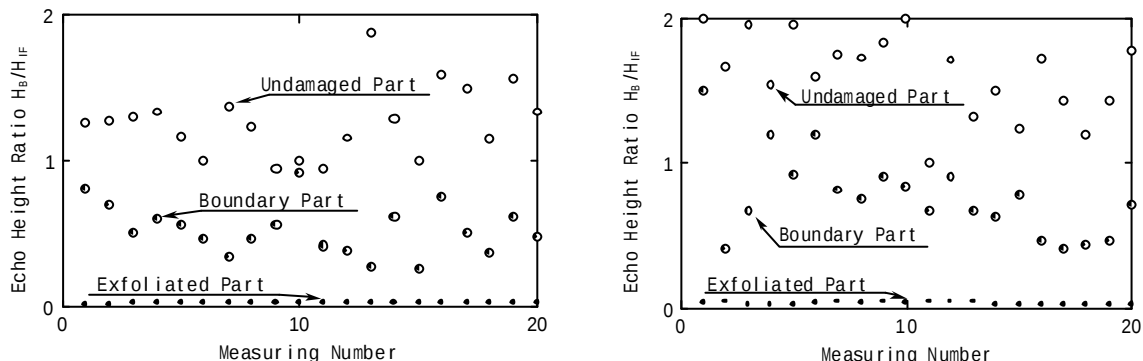
250mm 角の一般船用 F R P 板（板厚 5mm および 10mm）で、ガラス繊維が不飽和ポリエステル樹脂により接着され、積層されたものを用いた。剥離部と健全部の境界線は、予め X 線フィルム観察器により特定した。

(2) 方法

矩形パルス波を発信する汎用超音波探傷器を用いて、実損傷材の健全部、剥離部およびそれらの境界部を垂直探傷した。超音波探触子は、公称周波数 2MHz の広帯域型を用いた。

(3) 結果および考察

まず、各部位における界面エコーを比較したところ、剥離部と健全部には違いが認められたが、境界部と健全部では顕著な違いがなかった。そこで、底面および界面からのエコー高さの比で評価する方法を試みた。その結果、健全部、境界部および剥離部におけるエコー高さの比に明確な差がみられ、F R P の劣化診断に超音波が利用可能であることが明らかとなった（図 4.1 参照）。



(a) 板厚 10mm

(b) 板厚 5mm

図 4.1 健全部、境界部および剥離部におけるエコー高さの比

4.2 超音波伝播の理論的検討と剥離試験片による検証

(1) 理論的検討

4.1 で述べたように、界面および底面からのエコー高さの比を用いれば、F R P の剥離評価が可能であることが判明したので、現象の理論的検討を行った。

超音波の拡散がない範囲における厚さ t の F R P 平板において、底面からのエコー高さ H_B は、次式で表される。

$$H_B = KP_0 \cdot \exp(-2\alpha t) \cdot S \quad (1)$$

ここに、 K ：比例定数、 P_0 ：振動子における平均送信音圧、
 S ：振動子面積、 α ：伝播周波数での減衰定数（Np）
 振動子面積に等しい反射領域において、剥離面積 S_f と健全面積 S_g ($S = S_f + S_g$) が混在する深さ x における境界層からの界面エコー高さ H_{IF} は、次式となる。

$$H_{IF} = KP_0 \cdot \exp(-2\alpha x) \cdot r_{IF} \cdot S_g + KP_0 \cdot \exp(-2\alpha x) \cdot S_f \quad (2)$$

ここに、 r_{IF} ：ガラス繊維（平面として取り扱う）と樹脂との
 界面における反射率

超音波は、剥離の後方には伝播しないため、底面エコーに寄与する面積は、健全部の面積 S_g となるため、(1)式および(2)式から、エコー高さの比 H_B / H_{IF} は、次式となる。

$$H_B / H_{IF} = [S_g / (r_{IF} \cdot S_g + S_f)] \cdot [\exp(-2\alpha t) / \exp(-2\alpha x)] \quad (3)$$

健全面積率は、 $S_g / (S_g + S_f)$ となる。ここで、健全面積率 100%におけるエコー高さの比を H_1 とおくと、(3)式は、

$$(1 / H_1) \cdot (H_B / H_{IF}) = r_{IF} \cdot S_g / (r_{IF} \cdot S_g + S_f) \quad (4)$$

となる。すなわち、健全面積率 100%における(4)式の左辺は 1 となる。これを基準化されたエコー高さの比と呼ぶことにすると、界面における反射率のみに依存することになり、剥離評価の基準として扱い易い形で表現できる。

(2) 剥離試験片による検証

上述の理論を検証するために、図 4.2 に示すような剥離を人工的に設けた試験片を作成し、健全面積率をパラメータとした超音波探傷試験を実施した。剥離の表面からの深さは、図 4.2 中に示すように 1.7～7.1mm である。試験結果の一例を図 4.3 に示す。図には別途算出した界面反射率 r_{IF} を 0.3 として(4)式により計算した結果も併せて示すが、試験結果と良い相関が認められる。

4.3 FRP劣化診断装置の開発と機能評価試験

損傷材の探傷試験および理論的検討の結果を基に図 4.4 に示すような携帯型劣化診断

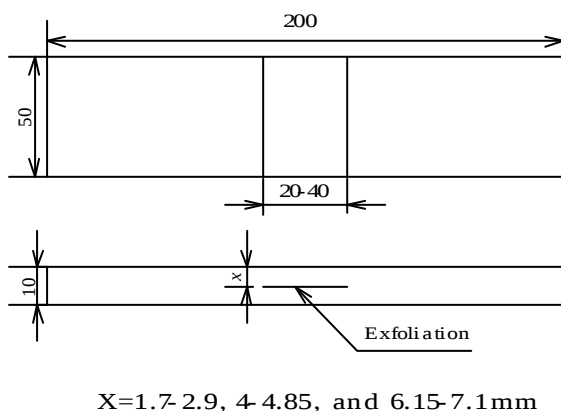


図 4.2 剥離試験片の形状および寸法

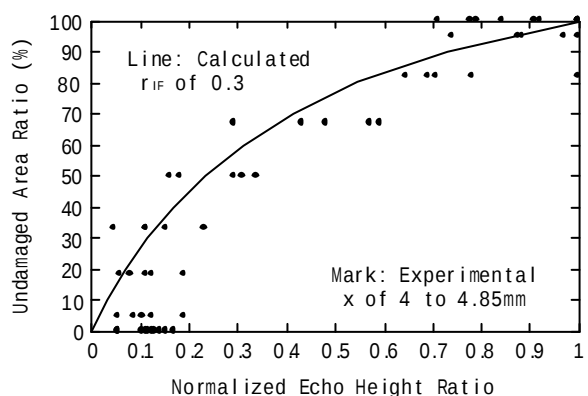


図 4.3 基準化したエコー高さの比と健全面積率の関係（ $x = 4 \sim 4.85$ mm）

装置を開発した。装置は、超音波パルサ、レシーバ、A/D 変換器、インタフェースボードおよび CPU から構成されており、幅 100mm、高さ 200mm、厚さ 40mm、重量 560g と小型軽量であり、片手でキー操作、もう片手で探触子操作が可能である。

劣化診断装置の機能評価試験は、補修のために上架された小型 F R P 漁船等に対して実施した。主に船体喫水線付近の目視により剥離と判断できる箇所を選定し、診断を行った。結果の一例（船齢 30 年の漁船）を図 4.5 に示す。同図には、測定位置の概略と診断結果を円グラフ（測定面積 70cm² に対する剥離面積率）で示すが、船の全長にわたって剥離が 50% 以上存在することが測定された。機能評価試験は、様々な気象条件下で実施され、本装置が問題なく稼働することが確認された。



図 4.4 劣化診断装置の外観

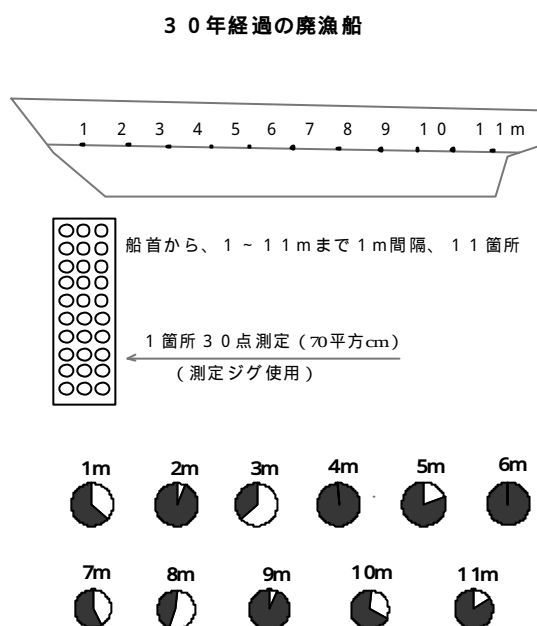


図 4.5 診断結果の例

第 4 章の参考文献

- 1) 勝又健一：F R P の剥離損傷の検出について、非破壊検査協会第 8 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、(2001)、pp.17-22 .

5 . おわりに

本研究は、国土交通省技術研究開発委託費（海事局船用工業課）により、平成 12 年度から 15 年度にわたり、研究課題「F R P 廃船の発生抑制に係わるリサイクル・リユース技術確立のための調査研究」の一環として実施されたものである。それぞれの要素技術開発はすべて所期の目標を達成できたと考えるが、今後、F R P 廃船の発生抑制に資するためには、開発技術の事業化、製品化に向けたさらなる検討が必要であることは言うまでもない。

なお、F R P 廃船高度リサイクルシステム推進委員会、同リサイクルWGおよび同リユースWG（いずれも委員長は金沢工業大学の金原勲教授）の委員の皆様からは、研究実施にあたり貴重なご意見、ご鞭撻を頂戴致しました。ここに感謝の意を表します。