

CFRP 製ポータブルスタンションの船舶への適用に向けた研究

中村 仁 仙波浩雅*¹ 亀岡 啓 田中義雄*² 山田盛一*² 福谷政広*²

Development for Application of CFRP-Portable-Stanchions to Ships

NAKAMURA Hitoshi, SENBA Hiromasa, KAMEOKA Kei, TANAKA Yoshio*¹, YAMADA Morikazu*¹
and FUKUTANI Masahiro*¹

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いて、持ち運びが可能な支柱であるポータブルスタンションを試作し、現行の金属製品との比較及び船舶での実証試験を実施した。その結果、重量は約 75%軽量化され、耐荷重値においてはほぼ同等の値を示すことが分かった。また、実証試験においては軽量化したことによる作業効率の向上効果が認められ、省力化に大きく寄与することが分かった。

キーワード：高機能素材、炭素繊維強化プラスチック、軽量化、高剛性、船舶、省力化

はじめに

現在、車等の大型貨物を運搬する船舶において、貨物室や通路からの作業員の落下防止策として、ポータブルスタンションと呼ばれる金属製の支柱を設置し、ロープを張っているが、1 隻あたり数百本必要であるため、支柱を立てる作業の効率が非常に悪く、また、作業中に支柱を落下させることによる副次的な事故の可能性が排除できないことが問題となっていた。

そこで、本研究では、軽量かつ高剛性な材料である CFRP を用いてポータブルスタンションを試作し、上記課題の解決を図ることを目的とした。

実験方法

1. CFRP 製ポータブルスタンションの設計及び試作

評価する CFRP 製ポータブルスタンションの形状としては、現行品（鉄製）の形状寸法を基準とした。スタンション本体は、CFRP パイプ（外径：φ 30 mm、内径：φ 26 mm、t=2.0 mm）に船体ソケット取り付け部及びロープを通す部分のステンレス製部品を接着接合した構成とした。接着は、CFRP パイプ及び金属製部材内部をブレイククリーナーで脱脂した後、二液混合型接着剤（セメダイン(株)製 EP-008）を用いて行った。

2. CFRP 製及び金属製ポータブルスタンションの機械的特性評価

CFRP 製ポータブルスタンションと現行の金属製ポータブルスタンションの機械的特性評価は、万能材料試験機（株島津製作所 AG-I 50 kN）に、実際の船体に取り付ける際のソケットと同サイズの鉄製パイプを固定し、そこにスタンションを水平に差し込み、スタンション頂部（ソケット固定端部から 995 mm 位置）に垂直方向に 100 N ずつ集中荷重をかけた際の、長手方向水平軸に対するたわみ量は目視により測定、また、最も応力集中が起きると考えられるソケット部近傍にひずみゲージを取り付け、長手方向（軸方向）及び周方向の曲げひずみを測定した（図 1、図 2、図 3 参照）。

*1 現愛媛大学社会連携推進機構

*2 株式会社新来島どっく

この研究は、「炭素繊維関連産業創出事業」の予算で実施した。

愛媛県産業技術研究所業績第 2 号

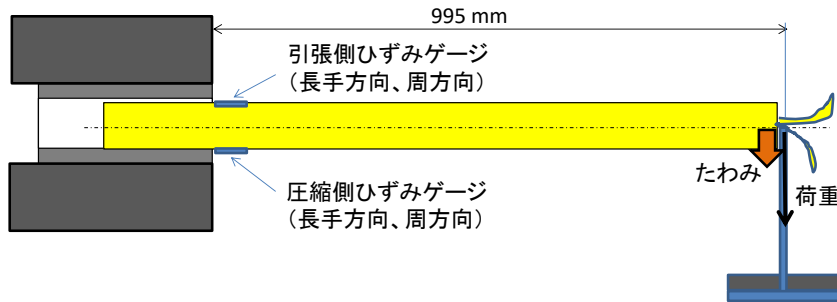


図1 ポータブルスタクションの耐荷重試験方法概略図)



図2 ポータブルスタクション物性評価方法 (左: 金属製、右: CFRP 製)



図3 ポータブルスタクション物性評価方法 (左: たわみ量測定、右: ひずみ量測定)

3. 3点曲げ試験による CFRP パイプの曲げ特性評価

CFRP パイプの厚みに対する曲げ剛性・強度の評価を行うため、内径は同一 ($\phi 26$) で厚さの異なる 3 種の CFRP パイプ ($t=1.0$ 、 1.5 、 2.0 mm) を用意し、先端半径 5 mm の圧子を用いて、支点間距離 450 mm、押し込み速度 5 mm/min の条件で、それぞれに対し 3 点曲げ試験を実施した。

また、曲げ弾性率及び断面形状から算出した断面 2 次モーメント¹⁾により、曲げ剛性に関する評価を行った。

4. CFRP 製ポータブルスタクションの船舶等における実証試験

今回試作した CFRP 製ポータブルスタクションについて、船舶における運用をシミュレートするために、実際の船舶における使用感について作業員への聞き取り調査を行った。

結果と考察

1. CFRP 製ポータブルスタクションの設計及び試作

試作したポータブルスタクション(現行鉄製品の代替用で CFRP 層厚み 2mm)の外観を図 4 に示す。顶部及び中央部には、設置後にロープを通すためのリング状部材を取り付け、底部には船体ソケットに差し込み固定するためのかぎ状部材を取り付けた(図 5 参照)。また、現行品との比較写真(図 6 参照)から、現行品と同様の形状が得られていることが確認できた。

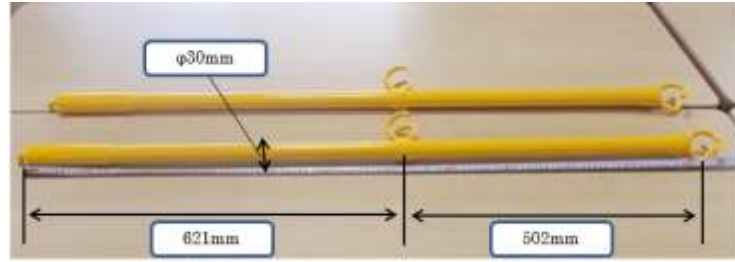


図4 CFRP製ポータブルスターションの外観及び概寸



図5 スターション各部（左：頂部、中央：中央部、右：底部）

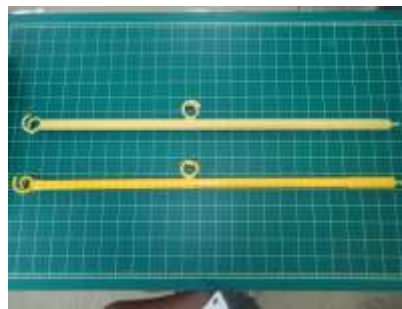


図6 ポータブルスターション形状比較（上：金属製、下：CFRP製）

試作品の重量を比較したところ、現行の金属製ポータブルスターションが約 3000 g であるのに対し、CFRP 製は約 760 g であり、約 75% の軽量化が達成できた。

2. CFRP 製及び金属製ポータブルスターションの機械的特性評価

(1) CFRP 製ポータブルスターションの機械的特性評価

スターション頂部への集中荷重時における CFRP 製ポータブルスターションのたわみ量及びひずみ量の測定結果及び試験後の破壊状態を図 7、図 8 に示す。500~600 N 負荷時に、すべての供試体において圧縮側で繊維の破断による破壊が生じ、破壊直前での最大たわみ量は平均 130 mm、圧縮側の長手方向（軸方向）ひずみが平均 6000 $\mu\epsilon$ であった。

また、その際の応力値は CFRP の縦弾性係数（75 GPa）及びひずみの実測値から、450 MPa 程度であると推測された。

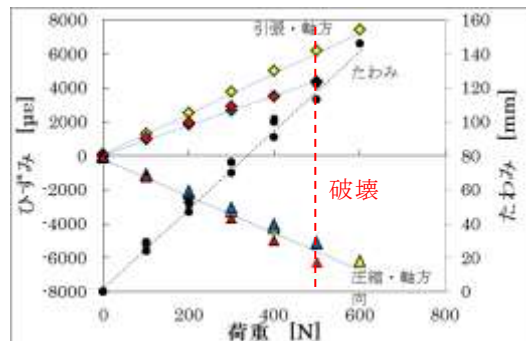


図7 CFRP製ポータブルスターションのたわみ及びひずみ量（n=3）

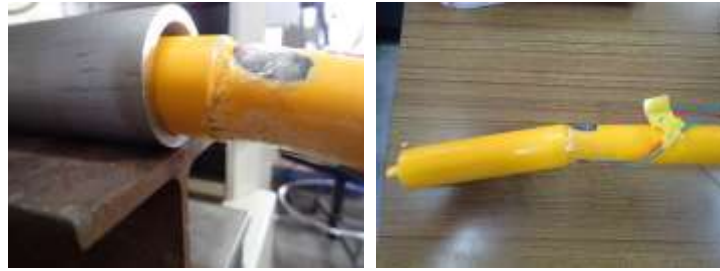


図8 CFRP ポータブルスターションの破壊状態

(2)金属製ポータブルスターションの機械的特性評価

金属製ポータブルスターションに対し、2-1と同様の試験を行った結果を図9に示す。

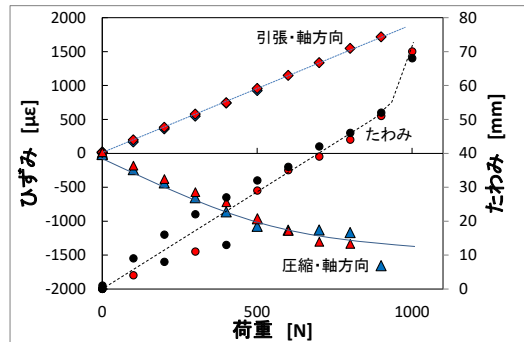


図9 金属製ポータブルスターションのたわみ及びひずみ量 (n=2)

負荷可能最大値である 1000 N 負荷時においても破断等の破壊は観察されず、最大たわみ量は平均 70 mm、圧縮側の軸方向ひずみが平均 1500 $\mu\epsilon$ であった。その際の応力値は鉄の縦弾性係数 (200 GPa) 及びひずみの実測値から、300 MPa 程度であると推測された。金属製ポータブルスターションについては、600 N 負荷付近において、たわみ及びひずみが持続的に増大し続けたことから、塑性変形が起きており、1000 N 負荷後に除荷した際に形状が復元しないことが確認出来た (図 10 参照)。

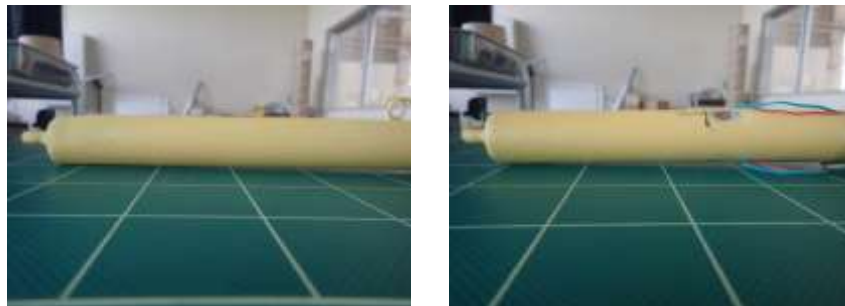


図10 金属製ポータブルスターションの塑性変形 (左：試験前、右：試験後)

以上の結果から、金属製ポータブルスターションの塑性変形開始点を破壊挙動とみなした場合、金属製及び CFRP 製ポータブルスターションは、共に約 600 N 程度の耐荷重値を示すことが分かった。

3. CFRP パイプの3点曲げ試験

ポータブルスターションの本体に使用している CFRP パイプについて、試作品に使用した CFRP パイプと同じ厚さ ($t=2.0$ mm) に加え、厚さの異なる 2 種類の CFRP パイプ試験片 ($t=1.0$ mm, 1.5 mm、内径 $\phi 26$) を用意し、3点曲げ試験による物性評価を行った (図 11 参照)。



図 11 CFRP パイプの 3 点曲げ試験（左列：最大押込時、右列：除荷後）

3 点曲げ試験の結果、最大荷重は $t=1.0\text{ mm}$ 、 1.5 mm 、 2.0 mm の場合、それぞれ平均 550 N 、 940 N 、 1480 N であり、それらの値を用いて算出した曲げ強さは、それぞれ平均 114 MPa 、 130 MPa 、 150 MPa であった。

また、曲げ弾性率及び断面形状から算出した断面 2 次モーメント¹⁾により求めた曲げ剛性は、 $t=1.0\text{ mm}$ 、 1.5 mm 、 2.0 mm の場合で、それぞれ $3.4\times 10^8\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ 、 $5.6\times 10^8\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ 、 $8.5\times 10^8\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ であり、最大荷重、曲げ剛性ともパイプの厚さの 3 次近似曲線と良く一致した。（表 1、図 12 参照）。

表 1 試験片寸法（実測値）と各種パラメータ（※最大荷重は $n=5$ の平均値）

厚さ t [mm]	外径 d_2 [mm]	内径 d_1 [mm]	断面 2 次モーメント I [mm ⁴]	断面係数 Z [mm ³]	支点間距離 L [mm]	最大荷重 P [N]	曲げ強さ [MPa]
1.0	27.9	25.93	7552	541.4	450	550	114
1.5	28.8	25.9	11682	811.3	450	940	130
2.0	29.75	25.9	16363	1100.1	450	1480	150

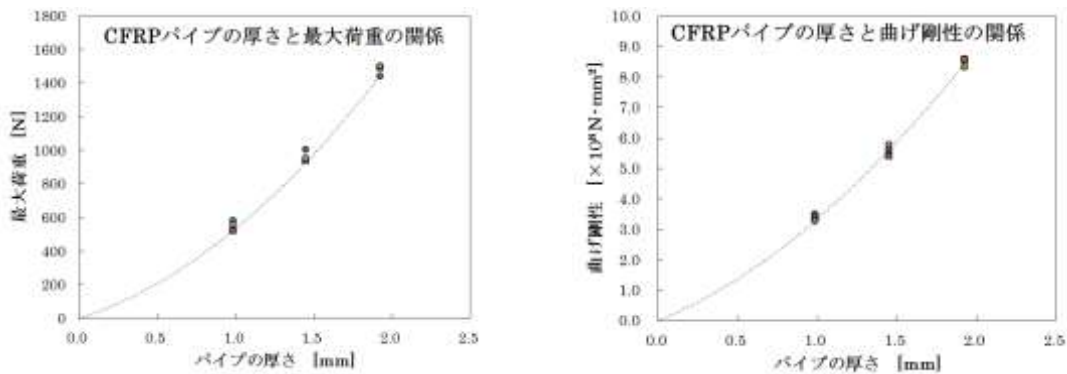


図 12 CFRP パイプの厚さと最大荷重及び曲げ剛性の関係

3 点曲げによる変形の挙動は、圧子直下での繊維の破断は起きているものの、構造体としての分断は無く、樹脂の特性によって延性材料に近い特徴を持つと推測された。

4. CFRP 製ポータブルスタクションの船舶等における実証試験

株式会社新来島どっくで建造した船舶に、実際に CFRP 製ポータブルスタクションを設置し、運用時における作業性の向上効果について聞き取り調査を行った（表 2、表 3、図 13 参照）。

表 2 実証試験条件

船番	SNO.5918
船名	OLYMPIAN HIGHWAY

船種	自動車運搬船（7500 台積み）
完工	2017 年 9 月 26 日
設置本数	20 本
用途	作業者の落下防止用ロープ支柱

表 3 CFRP 製ポータブルスタクションの使用感聞き取り結果

メリット	非常に軽量でありハンドリング性が良い
	貨物間の移動がスムーズに行える
	万が一貨物に接触した場合もダメージが軽微で済む
改善点	船舶に使用するスタクションの規格が、適用箇所によって異なる (適用箇所ごとに製作する必要がある＝コストアップ)



図 13 船舶への設置風景

軽量化による作業効率の向上効果が得られたことから、使用感は概ね好評であった。また、改善点として挙げられた規格の問題については、実際に船舶用部材として採用される際に、造船会社の設計で規格の統一を図ることで解決可能であるため、本製品の現行品に対する優位性が確認出来た。

ま と め

CFRP 製ポータブルスタクションの船舶への適用に向けて、現行品との物性比較や船舶における実証試験による検討を行った結果、以下の成果が得られた。

1. 現行品とほぼ同形状のポータブルスタクションを試作することができた。また、CFRP 製試作品の重量は、約 760g であり、現行の金属製ポータブルスタクションの約 3000 g に比べ約 75%の軽量化が達成できた。
2. CFRP 製及び現行の金属製ポータブルスタクションについて、先端に荷重をかけた時の周方向及び長手方向のひずみ量及び長手方向軸に対するたわみ量を測定した。その結果、CFRP 製では、500～600 N 負荷時に、すべての供試体において圧縮側で繊維の破断による破壊が生じ、破壊直前での最大たわみ量は平均 130 mm、圧縮側の軸方向ひずみが平均 6000 $\mu\epsilon$ であった。

金属製では、負荷可能最大値である 1000 N 負荷時においても破断等の破壊は観察されなかったが、600～700 N 負荷時から塑性変形が生じており、最大たわみ量は平均 70 mm、圧縮側の軸方向ひずみが平均 1500 $\mu\epsilon$ であった。

これらのことから、金属製ポータブルスタクションの塑性変形開始点を破壊挙動と見なした場合、CFRP 製ポータブルスタクションは、ほぼ同等の耐荷重値を持つことが示された。

3. 厚さの異なる 3 種類の CFRP パイプ試験片 ($t=1.0, 1.5, 2.0$ mm、内径 $\phi 26$) について、3 点曲げ試験による物性評価を行った結果、最大荷重や曲げ剛性は、CFRP 厚さの 3 次近似式と一致したことから設計が可能であることが分かった。

また、変形挙動については、構造体として見れば延性材料に近い特性を示すことが示唆された。

4. 船舶における実証試験について、作業員に対する聞き取り調査の結果、軽量化による作業効率の向上により、概ね好評であった。この結果から、船舶内作業の省力化に寄与することが示された。

また、改善点として挙げられた規格の問題については、実際に船舶用部材として採用される際に、造船会社の設計で規格の統一を図ることで解決可能であるため、本製品の現行品に対する優位性が確認出来た。

謝 辞

CFRP 製ポータブルスタクションの試作について、ステンレス部材の製造、全体のアッセンブリ及び塗装についてご協力頂きました小川ポンプ工業株式会社、CFRP パイプの成形にご協力頂きました東洋殖産株式会社に厚くお礼申し上げます。

文 献

1)大西清:JIS にもとづく機械設計製図便覧, 全面改訂新版(理工学社)第 10 章-29 節 (1955).