

タイトル	炭素繊維シート補強ポリマーセメントモルタルを用いたシーカヤックの制作
著者	串山, 繁; KUSHIYAMA, Shigeru
引用	北海学園大学工学部研究報告(39): 63-76
発行日	2012-02-14

炭素繊維シート補強ポリマーセメントモルタルを用いた シーカヤックの制作

串 山 繁*

Sea Kayak Production using Polymer Cement Mortar Reinforced with Graphite

Shigeru KUSHIYAMA*

要 旨

ものづくりの楽しさを体感し併せてコンクリート系材料に興味、親近感を抱いてもらいたいとの主旨から、海外、国内において学術団体主催のカヌー制作コンテストが実施されている^{1),2)}。同主旨と同じ狙いでプロジェクトチームを編成し、制作面でより高い施工精度が要求されるカヤックの制作を試みたので、本報告でその概要について述べる。

1. はじめに

カヌーの制作コンテストにおいては、使用材料をはじめとする制作規定が存在するが、本報告で述べるカヤック制作はコンテスト参加を意図したものではない。そこで、コンクリート系材料を使用することを守るべき必須条件とし、市販製品と比較し遜色のない実用的な使用に耐え得る強度、耐久性能、運動性能、美観性を持ったカヤック制作を目標とした。

上記の目標を実現するには、軽量で一定の強度を確保することが要求される。溶接金網で補強した軽量モルタルのカヌー船体構造仕様では板厚15mm前後、全長18フィートで重量約57(kgf)程度となり、カヌーに比べ船体ボリュームの小さいカヤックの設計には、このような仕様は不向きである。船体に作用する力は、力学的には圧縮強度よりも曲げ強度、引張強度が支配的となる。このため、圧縮強度には劣るが非常に軽量な骨材を使用したポリマーセメントモルタルを引張特性に優れた炭素繊維シートで補強する船体構造とした。

以下に、船体デザイン、ポリマーセメントモルタルの調合、強度試験結果およびシーカヤックの制作について述べる。

* 北海学園大学工学部建築学科

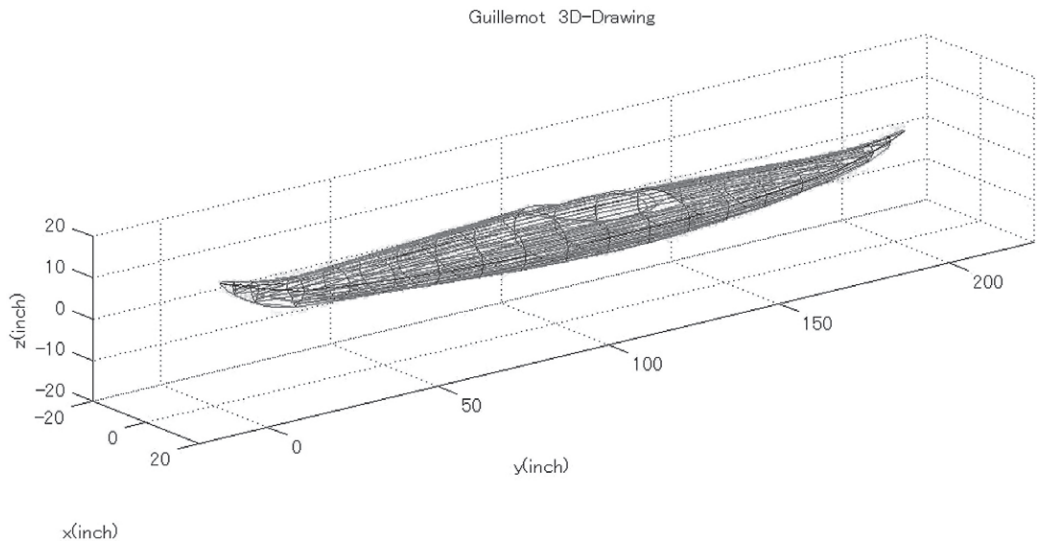
* Department of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

2. 船体デザイン

カヤックの船体デザインは、大きくアルユートバイダルカ (Aleut Baidarka) と西グリーンランドのイヌイットカヤック (Inuit Kayak) に大別される。流木を主な材料としているので、船の大きさは小さいが、いずれの形状も極北で暮らすエスキモーの人々が先人の知恵を代々受け継ぎ、静かに速く進む現在の形状へと進化させた。アルユートバイダルカは、相対的に丸い船底 (multiple chines), 直線的なシアライン (sheer line), V字型のデッキ (deck) を有し、船首 (bow), 船尾 (stern) のオーバーハングが小さい。他方、イヌイットカヤックは船底が角張っており (hard chine), 弓なりのシアライン, 比較的フラットなデッキを有し、船首, 船尾のオーバーハングが大きい。しかしながら、安定性, 操作性, スピードの内, 何を重視するかでこれら3つは互いにトレードオフの関係にあるので船体形状は変化に富む。

当研究室でのカヤック制作は初めての試みであり、制作期間を夏休みに集中的に当てる都合上、船体デザインは参考文献³⁾に掲載されている3つの内、イヌイットカヤックの形状を有する全長内法寸法16.74フィートのGuillemot (船名) に同じとした。同文献に掲載されている設計シートは、船首と船尾を結ぶ主軸に沿った1フィート間隔 (両端のみ1/2フィート間隔) の各切断面形状を一覧表にしたオフセットと呼ばれる数値表である。

制作に当たっては、上記切断面 (以後、フォームと呼ぶ) を原寸で描画せねばならない。大きな方眼紙を用いて描画することも可能であるが、コンピュータにオフセットデータを取り込み描画の方が都合がよい。図-1は、自作のmatlabプログラムにより各フォーム、コックピットの離散的な形状データを直線で繋ぎ合せて描いた船体形状図である。先に述べたシアアラ



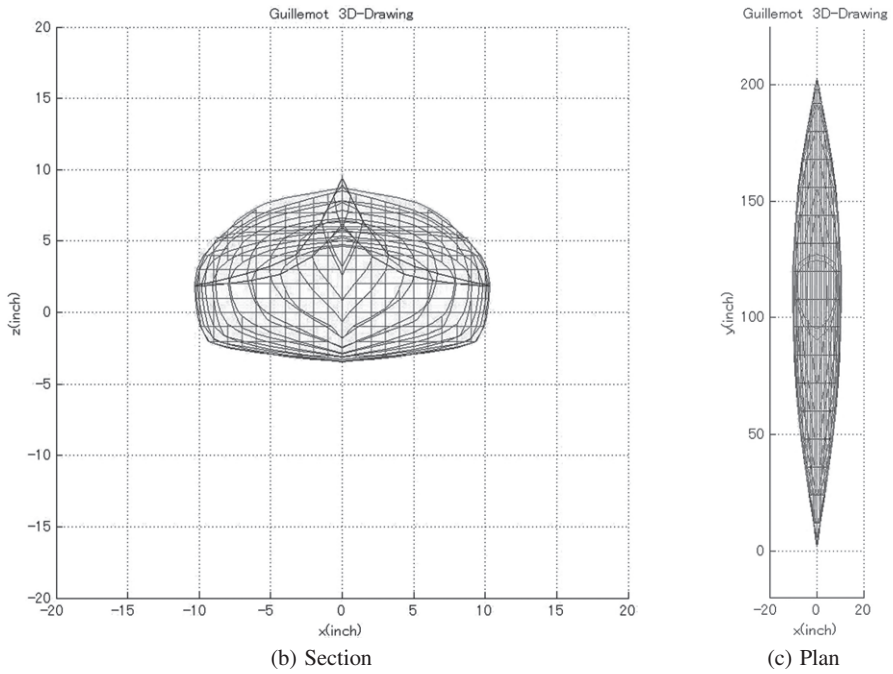


図-1 船体形状

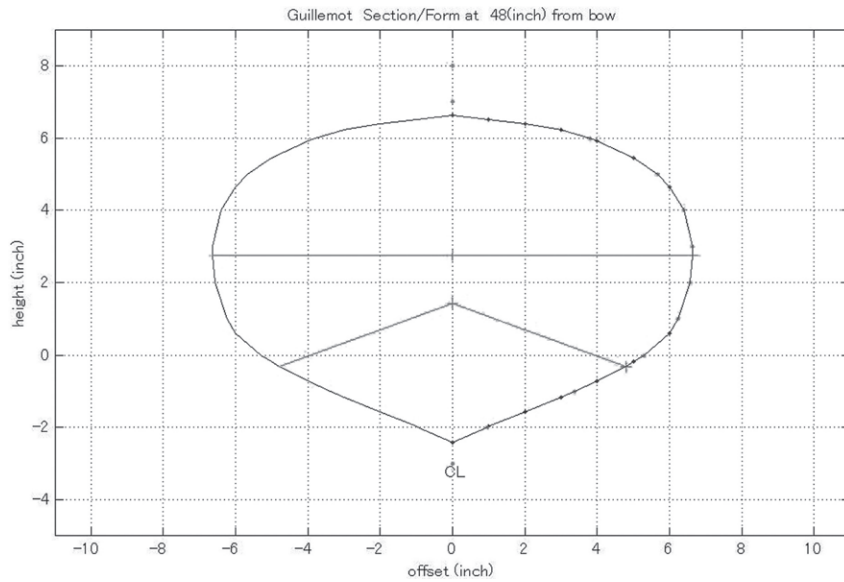


図-2 船首から48 (inch) 位置 5 番目のフォーム

インとは、同図 (b) のフォーム或いは (c) の平面図の船体最大幅を結ぶ外形線、即ちハルとデッキの継目線を云う。図-2 は、船首から48inch位置 5 番目のフォームを示しており、右半分に表示された複数点の座標値が参考文献³⁾の設計シートに与えられている。

表-1 船体諸元 (設計時)

Total Surface Area	4.736 (m ²)
Total Kayak Solid Volume* ¹	37.89×10 ³ (cm ³)
Kayak Weight	28.68 (kgf)
Total Weight* ²	93.68 (kgf)
Gravity Center of Kayak body	262.3 (cm)
Gravity Center (Paddler + Kayak)	283.3 (cm)
Total Buoyancy	92.64 (kgf)
LCB (Longitudinal Center of Buoyancy)	277.6 (cm)
VCB (Vertical Center of Buoyancy)* ³	2.73 (cm)

*¹ Total Kayak Solid Volume=Thickness×Total Surface Area (Design thickness=0.8cm)

*² including Paddler Weight=65(kgf), *³ VCB: below DWL (Design Water Line)

表-1は、プログラム内で求めたポリマーセメントモルタル使用の設計時における船体諸元である。ただし、離散的なデータを補間して算出している。その意味であくまでも参考値であるが、同表よりパドラーの体重を65 (kgf) とした場合のトータル重量が93.68 (kgf)、トータル浮力が92.64 (kgf) であり、また船首からの軸方向重心位置が283.3 (cm)、同様に浮心位置が277.6 (cm) と概ね良好な一致を示していることが分かる。調合時の比重に基づくカヤック重量は28.68 (kgf) であるが、これにはモルタルの乾燥に伴う軽量化や船体内外のグラスファイバーシート、エポキシ樹脂塗布など仕上材重量を考慮していない。

3. ポリマーセメントモルタル (PCM) の調合, 強度試験結果

3.1 調合

モルタル或いはコンクリートの性質を改善する目的で混和されるポリマー (polymer) は重合体の意味で、硬化後ポリマーセメントモルタル (PCM: Polymer Cement Mortal) は、セメント水和物とポリマーの網状構造が一体化した結合体となる。本報告では接着性能、可撓性能の向上を目的としたスチレンブタジエン (SB) ラテックス (Nipol LX206: 日本ゼオン株式会社) と接着性能、耐摩耗性、耐給水性能の向上を目的としたアクリル系合成高分子エマルジョン (ペタルスAC-300: 昭和電工株式会社) の2つを使用した。

調合は、UAH (University of Alabama in Huntsville) のカヌー制作資料^{4),5)}を参照した。ただし、UAHの調合表にはポリマー混和剤の詳細および製品名は記されていない。それらについては重量構成を変えずに、上記で示した国内で調達可能な製品を当て、調合表はUAHの2002年versionに同じとした。軽量骨材としては、UAHと同じK25 Spheres (住友3M) を使用した。表-2に、その調合表と本報告のカヤック制作に必要なとされた絶対量を示す。

練り混ぜは、真密度0.25g/cm³のK25 Spheres微粉末が空練り時に空中に舞うことを避ける

表一 2 ポリマーセメントモルタル調合表

Mix Designation	UAH 2002	絶対必要量
Binding Materials	kg/m ³	kg (L)
Portland Cement	266.2	9.610
Latex/Nipol LX206	51.7 ^{*1}	1.866 (4.959L)
Acrylic Fortifier/ペタルスAC-300	16.4 ^{*1}	0.592 (2.499L)
Mass of Cementitious Materials	334.3	12.068
Aggregates	kg/m ³	kg
K25 Spheres	104.3	3.765
Weight of Combined Aggregates	104.3	3.765
Additive	kg/m ³	kg
Water	167.4 (318.4) ^{*2}	6.043 (11.49)
Properties		
Elastic Modulus (GPa)	0.793	—
7 day Tensile Strength (MPa)	1.77	—
28 Day Compressive Strength (MPa)	4.8	5.2
28 Day Bending Strength (MPa)	—	1.5
Poisson's Ratio	0.28	—
Unit Weight (kg/m ³)	757	757
Water/Cement	1.20	1.20
Water / Cementitious Materials	0.95	0.95

^{*1} Weight without water in the material contents

^{*2} Water 167.4+Water from Latex 96.1+Water from Acrylic Fortifier 54.9=318.4

為、手練りとした。ポリマーセメントモルタルは練り混ぜ時間を不要に長くすると連行空気量が増大し強度低下をきたす要因となるので、細心の注意を払い練り混ぜを行った。

なお、同表に示すように調合時PCMの密度は0.757 (g/cm³)である。また下段には材料の力学特性も表示されているが、これについては次節で言及する。

3.2 強度試験結果

強度試験用試験体は、UAHの試験結果と比較するため、参考文献^{5),6)}に記載されている試験体と同形状の2種類 (S試験体: $b \times t \times \ell = 1 \times 0.3 \times 5.5 \text{ inch}$, M試験体: $b \times t \times \ell = 1.12 \times 0.25 \times 9 \text{ inch}$) およびL試験体: $B \times D \times L = 4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ のモルタルバーとした。ただし、前者2つの試験体の板厚については、試験体型枠材料の都合から $t = 8 \text{ mm}$ に変更した。載荷は、S試験体についてはスパン10cmのカンチレバー載荷形式、M、L試験体についてはスパン10cmの単純支持梁中央集中載荷形式である。なお、試験体は次の3通り: 無補強PCM, グラスファイバーマット450# 補強PCM, 炭素繊維シート補強PCMとし、補強シートは板厚の中央に配置した。

試験結果を表一 3に示す。ただし、S、M試験体については、試験体板厚寸法のばらつきが

大きくなって、且つ非常に簡易な載荷装置（写真－1（a）参照）で最小100g単位の重りを単純に吊り下げ最大荷重を得たので、試験結果は参考値としての参照に留める。

同表より、M試験体の3通りの補強方法を比較するとグラスファイバーマット補強PCMの値が大きい。これは、グラスファイバーマットが炭素繊維シートよりも付着が良かった為である。L試験体では補強の有無の差異が認められないが、これは試験体の天端がやや平滑さに欠けていた為、載荷方向を補強シートの面内方向に一致させ、補強効果を除いたことによる。この意味でL試験体の、 σ_b 、 σ_c は全て無補強PCMの値と同等と見做してよい。先の表－2には、L試験体のこれら3つの平均値を掲載した。4週圧縮強度を比較すると、UAHの4.8 [MPa]に対して本試験結果は5.2 [MPa]であり、期待を損なわない結果が得られた様に思われる。

なお、ダイヤルゲージによる変位計測も試みたが、設置が困難であった為、ヤング係数は得られなかった。また、引張試験を行う試験治具の持ち合わせが無かった為、表－2には引張強度を記載していない。一方、UAHの表には曲げ強度の記載は無かった。



(a) M試験体



(b) モルタルバー試験体

写真－1 強度試験風景

表－3 4週強度試験結果

補強の有無	S試験体	M試験体	L試験体（モルタルバー）	
	σ_b [MPa]	σ_b [MPa]	σ_b [MPa]	σ_c [MPa]
無補強PCM	1.13 ^{*1}	1.13	1.47	5.34
グラスファイバーマット 450# 補強PCM	0.914	4.16	1.41	5.32
炭素繊維シート 補強PCM	2.42	2.36	1.59	4.94

ただし、 σ_b ：曲げ応力度、 σ_c ：圧縮応力度で試験体3本の平均値、圧縮試験は試験体1本当たり2回実施

^{*1} 試験体2本は初期荷重載荷前に耐えること無く破損した為、1本の値を記載

4. シーカヤックの制作

4.1 型枠・船体の制作

制作は、シアーラインから下のハル (hull) と上のデッキ (deck) の2つに大きく分けられる。夫々を制作後、ハルとデッキを合体する。エポキシ樹脂塗布、シート、隔壁 (bulkhead) の取り付け、コックピットの立ち上がり (coaming) 制作等は、合体前後に適宜行う。以下に、型枠・船体の制作詳細について記す。

型枠は、38×89×1820mmの角材2本半を連結した骨格材 (strongback) を長テーブル2台に縦1列に配置し、それに4か所棧木を直交方向に取り付け、棧木と長テーブルを蝦蛄万力で連結固定した。更に**写真-2**に示すように骨格材の所定位置に先に**図-1**、**図-2**で示したフォームを14枚、骨格材の両端に船首と船尾の形状を有するコンクリートパネルを取り付け夫々に各2枚配置し固定する。固定は10cm長の棧木を介して木ネジで固定する。

次に、各フォーム間に25,50mm厚スタイロフォームを適宜挿入し、両側にあるフォームの形状をガイドに滑らかな曲線となる様カッターおよび鋸でスタイロフォームを削り、**写真-3(a)**に示す様にサンドペーパーで整形する。なお、表面に生じたへこみについては、ハル制作時にはセメント：砂の容積比1：3のモルタルを用い整形したが、塗厚が薄いと上手く整形できなかつた為、デッキ制作時にはパテ処理に変更し整形した。以上で型枠制作完了となる。

次に船体の制作について述べる。先ず型枠を薄手のポリフィルム (大きな透明ゴミ袋) で被い、PCMに対する剥離材とする。その上に炭素繊維シートを被う。この炭素繊維シートは、目抜き平織りのカヤック制作に適した製品 (**表-4** 参照) であり、ハルについてはPCM板厚の内側、中央、外側の3層構造とした。**写真-4**は、船体内側の炭素繊維シート被覆状況を示したものである。同写真に見える緑の紐は、炭素繊維シートの浮きを押さえるためと炭素繊維シート間の塗厚を3mmに保持するため配置したカラーロープ (3mmφ) である。

写真-5に第1層PCM塗布状況を示す。1層分の塗厚が3mmと非常に薄いので、金鋺などでの均しは難しい作業のひとつであった。第1層PCM塗布の翌日、板厚中央の炭素繊維シートを被い第2層PCMを塗布する。そして、更にその翌日3層目となる外側の炭素繊維シートを配置し、その上にPCMを塗厚2mm塗布する。したがって、船殻の板厚は約8mmとなる。**写真-6**は、最終3層目のPCM塗布後1週間養生期間を経た後行った不陸調整研磨作業風景である。この研磨作業には、サンドペーパーを用いる。以上までがハルの制作である。

デッキの制作は基本的にハルの制作と同じことの繰り返しであるが、板厚中央の炭素繊維シートの挿入は省略した。**写真-7~10**はその様子を示したものである。**写真-9**のコックピット内部に骨格材と10,11番目のフォームが見えている。次いで、ハルとデッキの合体作業であるが、夫々が高い施工精度を確保していなければ合体が困難となる。この点がカヌーよりもカ



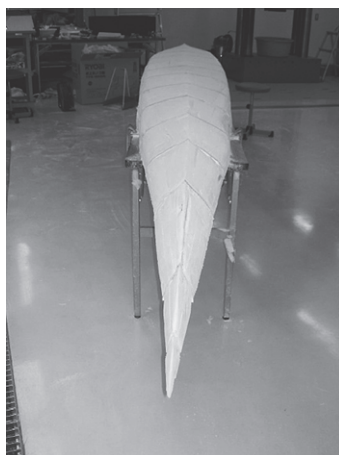
写真-2 フォームの設置

表-4 炭素繊維シートの方学特性

種類	PAN系高強度型
引張強度	4500MPa
ヤング係数	235GPa
フィラメント数	3000/tow
繊維比重	1.79g/cm ³
密度	12.5本/inch (縦/横)
繊維目付量	200g/m ²



(a) スタイロフォームの削り出し



(b) スタイロフォーム整形完了

写真-3 スタイロフォームの整形

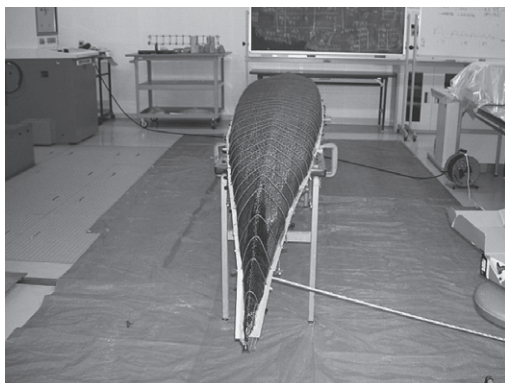


写真-4 船体内側の炭素繊維シート被覆



写真-5 第1層PCM塗布



写真-6 研磨作業

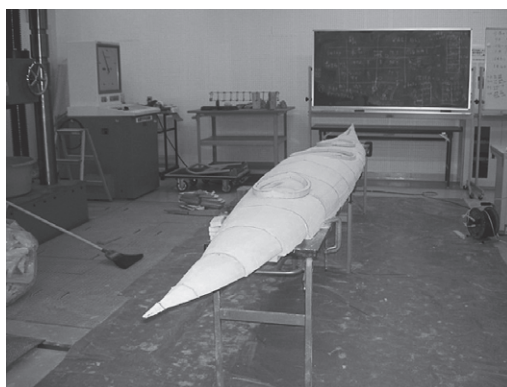


写真-7 スタイロフォーム整形完了

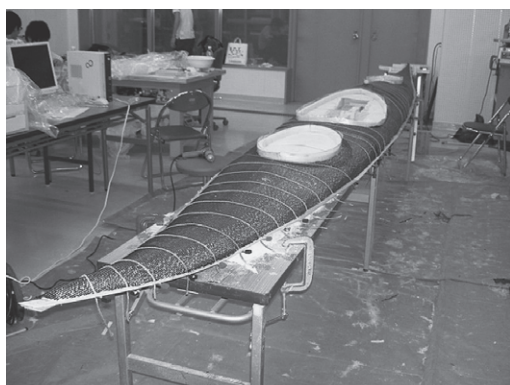


写真-8 船体内側の炭素繊維シート被覆

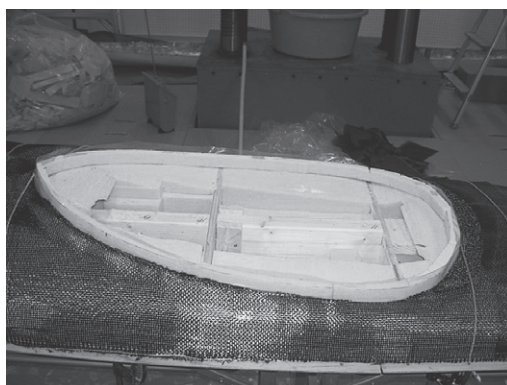


写真-9 コックピット周辺



写真-10 第1層PCM塗布

表-5 2011シーカヤック制作プロジェクト工程表

作業内容	5月	6月	7月	8月	9月
事前調査		→			
Hull & Deck設計		→			
材料調達		→			
調合設計, 強度試験			→	→	
型枠作成			→	→	→
PCM打設, 養生				→	→
仕上げ					→

ヤック制作を難しくしている。具体的には、シアラインの曲線、キールラインの通り、PCM塗厚の精度管理が重要であり、それらの精度が悪ければ本来滑らかなシアライン継目が角張り美観性を損ね、強度面での弱点、船内漏水の原因に繋がる恐れもある。

なお、工程表は表-5に示す通りで、夏休み開始直前までに主な材料調達、調合設計、写真-2の制作段階まで終え、8月末までにPCMの打設・養生、9月は塗装・仕上げに当たった。同表中、型枠作成以下の制作に要した実時数は、約1500man・hoursであった。

4.2 塗装・仕上げ

写真-11は、ハルの内側をグラスファイバーシート200#で被った上でエポキシ樹脂を塗布している状況を示している。写真-12は、ハルとデッキを合体後その継目を8cm幅のグラスファイバーシートで被いエポキシ樹脂で内貼りしている様子である。継目の空隙には接着用水中エポキシを外側から充填し継目を上記と同様に外貼りした後、全体をグラスファイバーシ-



写真-11 エポキシ樹脂塗布



写真-12 ハル〜デッキの継目内貼り



写真-13 エポキシ塗布完了時



写真-14 ハル第1層WR-LPU塗布



写真-15 デッキ第1層WR-LPU塗布

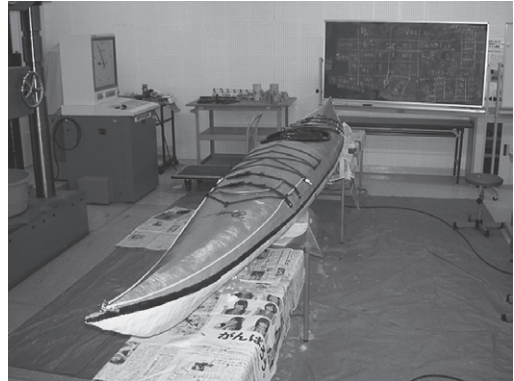


写真-16 完成シーカヤック

トで被いエポキシ樹脂を塗布する。外側デッキについてはEPトナー（着色顔料）を混ぜたエポキシを2回，外側ハルについては3回塗布した。写真-13は，エポキシ塗布完了時である。エポキシ硬化後，船体の外側およびコックピット内部には，最終仕上げとして紫外線カットのためのコーティング材料：WR-LPU（System Three社製マリン用水性ポリウレタン塗料）を写真-14，15に示す様に塗布した。この塗布は2層とした。なお，ハッチの蓋，シートなども適宜上記と同様の作業を行う。最後に，写真-16に示す様にフットプレイス，デッキ上部バンド，ロープ用ストラップアイ等を取り付けて全作業完了となる。

仕上げは美観性を左右する重要な工程であるが，曲率の強い船首，船尾，コーミング，一部角張ったシアラインの箇所ではグラスファイバーシートに本来避けるべき浮きが生じた。また，エポキシ樹脂塗布後，表面にアミンブラッシングが生じ，小さなゴミの付着が目立った。

4.3 材料費用

表-6は，カヤック本体の制作に要した材料費を示したもので，非常に高価な炭素繊維シートをはじめ船体の主要な素材は全てサンプルとして無償提供された為，合計金額は71940円で

表-6 カヤック本体材料費

製品名	メーカー	容量/質量	金額	備考
普通ポルトランドセメント	宇部三菱セメント	10kg	—	今年度購入の在庫使用
Nipol LX206	日本ゼオン	10L	—	サンプル提供
ペタルス AC-300	昭和電工建材	18L	2667	サンプル提供 送料のみ支払
K25 Spheres	住友3M	10kg	—	サンプル提供
炭素繊維シート	NCK日鉄コンポジット	1m幅×30m	—	サンプル提供
グラスファイバーシート200# ^{*1}	GOSE WELL ^{*2}	1m幅×25m	8750	送料込
グラスファイバーマット450#	ホームマック ^{*2}	1m幅×1m	600	
エポキシ樹脂	ナガヤケムテックス	7.2kg	26020	内送料3480
ラッカーシンナー	ニッペホームプロダクツ	250ml	398	
トナー白, 青, 黒	System Three	4 + 2 + 2 = 8 オンス	7500	内送料他2000
WR-LPU ^{*1}	System Three	1 / 5 ガロン	4700	紫外線カット
ゴム, U字パッキン	ホームマック ^{*2}	一式	4864	
水中エポキシ	ホームマック ^{*2}	1 kg	2480	使用分のみ
水性ペイント	ニッペホームプロダクツ	3種	1844	
ステッカー用紙	コジマ電気 ^{*2}		1326	
カヤック艀装品	秀岳荘 ^{*2}		10791	

^{*1} グラスファイバーシート, WR-LPUについては, 夫々の必要量25m, 約1/5ガロンの金額を掲載

^{*2} 販売代理店/販売店

ある。一方, 型枠材料・制作費については内訳表を省略するが, 型枠材料として38×89×1820mm角材3本, 桟木9尺2本, コンクリートパネル3枚, ラワンベニヤ1枚, スタイロフォーム25mm, 50mm各7枚と3枚, 制作費用としてカラーロープ33m, セメダイン, サンドペーパー, 木ネジ, ビニールテープ, 両面テープなど合計36431円であった。

その他, 道具類費用, 試験体作成用型枠費用, PCM調合用容器類費用, 電熱線スタイロフォーム切断道具作成費用などがある。主な道具類の費用としては, 卓上電動糸のこ盤, 電動スマートドリルドライバー(合計45180円)が挙げられる。

5. 結語

炭素繊維シートで補強されたポリマーセメントモルタル(PCM)使用のシーカヤック制作を試みた。完成後カヤックの船体諸元は, 外形全長16.86フィート(514.0cm), 外形最大幅21.26インチ(54cm), 艀装品を含む総重量33.0kgfであった。本作品は, 仕上げを含めた船体板厚平均値が9.1mm(ストラップアイのビス留め位置24か所の平均値)とやや厚目となり, エポキシ樹脂の使用量が接着用も含めて約7kgfと予想を3kgf程度オーバーしていた。今後,



写真-17 プロジェクトチームメンバー



写真-18 茨戸川での試乗（2011年10月16日）

調査設計やエポキシ樹脂塗布の工夫次第でPCM製カヤックであっても30kgf未満の艇を作成可能と思われる。また、総重量125kgf（＝パドラー体重65kgf＋前後ハッチの積荷：砂袋60kgf）に対する吃水線は、重心位置でシアライン下約1.8cmであった。様々な要因、制約から美観性を損ねた点も少なからずあったが、耐久性、強度の観点からは概ね十分な作品が完成したと思われる。写真-17, 18は夫々プロジェクトチームメンバー、茨戸川での試乗の様子である。

謝辞

船体の主要な素材であるSBラテックスは日本ゼオン株式会社から、アクリル系合成高分子エマルジョンは昭和電工建材株式会社から、炭素繊維シートはNCK日鉄コンポジット株式会社から夫々サンプルとして無償提供して戴きました。特に炭素繊維シートについてはPCM使用のカヤック制作に適した特注品を無償提供戴きました。また、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ のモルタルバー試験に際しては、北海道職業能力開発大学校建築科の田畑雅幸教授の協力を得ました。本学工学部内では社会環境工学科高橋義裕教授、材料実験室高橋和彦氏、土質実験室古館俊久氏の協力を得ました。関係各位に記して感謝申し上げます。

なお、本研究はカヤック制作プロジェクトチームを編成し実施しました。チーム構成メンバーは、プロジェクトマネージャー：佐野飛由馬、設計デザイン担当：今津拓哉、制作担当：前二者＋笠原修一、山崎健一郎、PCM調合担当：千家広大、荒木克也、北川義明、中澤侑紘の計8人、著者を含め全員初めてのカヤック制作を体験したが、互いに協力して夫々の役割をこなし、ほぼ当初予定の工程表通りに完成することが出来ました。プロジェクトチーム学生諸君の貢献に感謝致します。

参考文献

- 1) <http://www.asce.org/Student-Organizations/Events,-Activities,-and-Awards/Concrete-Canoe/2011-ASCE-Na>

- tional–Concrete–Canoe–Competition/
- 2) http://www.jsce.or.jp/branch/kanto/index_topics/canoe.html
 - 3) Nick Schade : The Strip–Built Sea Kayak, McGraw Hill, 1998.
 - 4) http://www.uah.edu/student_life/organizations/ASCE/Competition/2001.htm
 - 5) Abhishek Raut, John A. Gilbert, Teng K. Ooi : A Method for Producing Structurally Equivalent Graphite Reinforced Cementitious Composites, Proc. of SEM X International Congress, Costa Mesa, California, June7–10, Paper No.173, 6 pages (2004).
 - 6) John A. Gilbert et al. : Strategically Tuned Absolutely Resilient Structures(STARS),Proc. of SEM Annual Conference & Exposition on Experimental Mechanics and Applied Mechanics, Portland, Oregon, June7–9, Paper No.222(2005).