

## コンクリートカヌー製作の概要

代表者氏名	所属	カヌーの愛称
伊藤 幸広	佐賀大学 理工学部 都市工学科	かちがらす

## ○設計のコンセプトおよび構造上の工夫

**琵琶湖（南湖）用レース艇の最適設計**

開発、製作、練習期間が十分に取れないことを考慮し、今回のレース水域やレース条件に適合した艇の最適設計を試みた。艇の設計に係わる手順としては次のように行った。

レース水域の分析→ 市販艇の分析→ 艇の形状決定→ 艇緒元の算出→ 構造計算  
→ FRP 製実験艇の製作および各種性能の確認→ 新材料・新構造形式の検討

**【レース水域の分析】**

**【気象状況】** レース水域から 7.5km 離れた大津気象台の記録より、過去 6 年間の 9 月と 10 月の風速および風向を分析した結果、日平均風速は 1.3m/s と微風、日最大風速は 5m/s 程度、最大風速の風向は、北東から東南東が卓越することが明らかとなった。風波の予知曲線から、レース水域から吹送距離が最も長い北西から、風速 5m/s の風が吹いた場合でも、波高は 20cm 以下となり、波の周期も短いと推測される。

**【湖面状況】** レース水域のある烏丸半島周辺は水草が多く繁茂するエリアである。中でもコカナダモは、夏前に成長を止め湖底付近で茎が切れ、流れ藻となって湖面を漂流する。レース水域の表面流の流速は 1cm/s 以下の微弱な流れであるため、成長量の多い年は流れ藻がマット状となり湖面を広く覆う場合もある。

**【市販艇の分析】**

市販のレジャー用カヌーから国体等に使用するレース艇まで十数種類のカヌーについて、資料や実際の艇の実測によって、艇の各部形状や質量などのスペックを整理・分析した。

**【艇の形状決定】**

**【平面形状】** エントリーラインの喫水線における平面形状は艇の走波抵抗、すなわち艇速に大きく影響するため、本艇には 2 人乗りカナディアンカヌーレース艇（艇長 520cm、艇幅 40cm）の平面形状を採用した。今回のカヌー規定では艇長 4m 以下の制約から、艇中央部やスターン側においてもレース艇と同様の形状とすると、喫水が深くなり、また形状的に安定性の低い艇となる。そこで、前後非対称型の艇として、スターンから 95cm の位置で艇の最大幅を 60cm とし、喫水の低減、ローリング、ピッチングに対する安定性を確保する設計とした（図-1）。なお、漂流藻の対策から、喫水深さは可能な限り浅くすることとした。

**【断面形状】** 喫水下の断面形状はサーフェイスボリュームレシオが小さいラウンドボトムが最もスピードの出る形状であるが、ローリングに対する安定性が低く、全力で漕げるようになるためには長期間の練習が必要となる。本艇ではスピードと安定性のバランスをとり、バウから 150cm 辺りまではラウンドボトムとし、それより後方はフラットボトムとした。喫水上の高さは、最大波高が 20cm 以下と推測されることおよびパドルの操作性を考慮し、高さ 15cm とした。

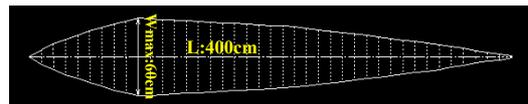


図-1 艇の平面形状

**【艇緒元の算出】**

全長 4m の艇を 10cm 毎に分割した断面図 40 枚を作成し、喫水、各部の浮力・浮心、クルーの着座位置など算出した。なお、艇の総質量は 36kg、クルー 2 名 174kg と仮定した。喫水深さは計算より 12.3cm となった。

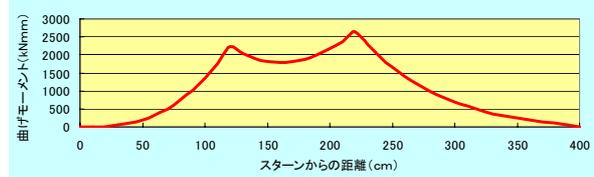


図-2 静水中曲げモーメントの計算結果

**【構造計算】**

艇の縦強度は、40 分割した各ブロックにおける質量と浮力から静水中せん断力、静水中曲げモーメントを算出し求めた。なお、レース水域は波高、周期とも小さいためホギングおよびサギング状態の検討は省略した。計算結果は図-2 に示すように、最大曲げモーメントは、2630kNmm でありスターンから 220cm の位置であった。これより同位置の底部のハル下縁に生ずる曲げ応力は  $3.90\text{N/mm}^2$  と求められた。ハルの変形による断面 2 次モーメントの減少を防ぐため、曲げモーメントの大きい位置付近に隔壁を設置することとした。

**【FRP 製実験艇の製作および各種性能の確認】**

形状設計に基づき FRP 製の実験艇を製作し、実際に水面に浮かべ、クルーが乗船し、ローリング、ピッチング、喫水等の確認を行った。結果として、全ての性能において設計条件を満足できるものであった。

**【新材料・新構造形式の検討】**

構造計算において仮定した艇の総質量 36kg の実現および縦強度を確保するために、超軽量であり曲げ強度の大きい従来に無いハル材の開発が必要となった。試行錯誤を繰返し、単位体積質量  $1.24\text{g/cm}^3$ 、曲げ強度  $17.3\text{N/mm}^2$  の超軽量ハル材を開発した。その詳細および強度等の性能照査の結果については次ページに述べる。

○使用材料の工夫

**主材料の94%に「環境にやさしい」材料を使用し、ハルの厚さ7.5mm、総質量39.4kgの超軽量艇を実現**

**【主材料】**

ハルを形成する主材料（モルタル部分）の94%（wt%）に「環境にやさしい」材料を使用した。使用した材料の種類と特性を表-1に、配合表を表-2に示す。予備実験等の結果から明らかとなった各使用材料の効果や選定理由を整理すると以下の通りとなる。

- ・回収水：「環境にやさしい」材料の使用
- ・エコセメント：「環境にやさしい」材料の使用
- ・シリカフューム：「環境にやさしい」材料の使用，強度増加，水密性向上
- ・中空セラミックス：「環境にやさしい」材料の使用，ハルの軽量化
- ・高性能AE減水剤：型枠への塗付け作業時の作業性向上
- ・酢酸ビニル樹脂エマルジョン：発泡作用による軽量化，塗付け作業時のたれ防止，硬化時の乾燥収縮抑制
- ・竹短繊維：「環境にやさしい」材料の使用，韌性向上，ひび割れ発生時のハルの剥落防止

表-1 使用材料の特徴

種類	材料	特性	環境対応
練混ぜ水	回収水	スラッジ沈殿槽中の上澄水	◎生コン工場から発生する産業廃棄物
結合材	エコセメント	太平洋セメント社製普通エコセメント，密度3.17g/cm <sup>3</sup>	◎都市ごみ焼却灰から製造されるセメント
	シリカフューム	エルケム社製940-U，密度2.20g/cm <sup>3</sup>	◎フェロシリコン製造時に発生する産業副産物
細骨材	中空セラミックス	太平洋セメント社製イースフィアーズ，密度0.70g/cm <sup>3</sup>	◎火力発電所から発生する産業副産物
混和剤	高性能AE減水剤	竹本油脂社製SSP-104，固形分率30%	-
	酢酸ビニル樹脂エマルジョン	コニシ社製木工エポンド，固形分率40%	-
繊維	竹短繊維	断面0.7×1.0mm，長さ20mm，密度0.85g/cm <sup>3</sup>	◎伐採竹，竹製品廃棄物から製造

表-2 モルタルの配合

水結合材比 W/B(%)*	空気量 (%)	単位量	回収水	エコセメント	シリカフューム	中空セラミックス	高性能AE減水剤	酢酸ビニル樹脂エマルジョン	竹短繊維 (vol%)
44.2	7.4	質量(kg/m <sup>3</sup> )	184	407	102	355	28.0	35.6	1.0
		体積(l/m <sup>3</sup> )	184	128	46.1	508	26.1	34.0	

\*Wには回収水の他，高性能AE減水剤および酢酸ビニル樹脂エマルジョン中の水分も含む

上記の材料，配合により製造したモルタルは写真-1に示すように，水に浮く超軽量モルタルであり，密度0.82g/cm<sup>3</sup>，圧縮強度および曲げ強度は，それぞれ8.68N/mm<sup>2</sup>および3.04N/mm<sup>2</sup>であった。

**【補強材】**

モルタルの強度が低いことから，補強材に曲げ，ねじり，せん断応力の大部分を負担させる必要がある。各種応力に対して高い剛性を持つ補強材の実現のために予備実験を繰返し行った結果，写真-2に示すような新構造形式を開発するに至った。補強筋には，線径2.0mm，ピッチ25×50mmのステンレス製ファインメッシュ（交点の全てが溶着している格子状金網）を2枚重ねし（写真-3），さらに2枚のファインメッシュをカーボン繊維で巻き，樹脂を含浸させ固定し，補強材とした。交点が溶着されている格子状金網は亀甲，平織金網と比較しせん断に強く，またカーボン繊維による2枚のファインメッシュの一体化は，線材の座屈を防ぎ，加えてねじり，曲げ剛性を増加させる効果が明らかとなった。

写真-4のように新構造形式を採用したハル材のモデル試験体（厚さ約7.5mm）を作製し曲げ試験を行った結果，曲げ強度17.3N/mm<sup>2</sup>（ひび割れ発生時）の強度を得た。ちなみに比較用として，ファインメッシュ2枚のみでカーボン繊維巻き無しの試験体とコンクリートカヌーに多く用いられる亀甲状金網入り試験体の曲げ強度は，それぞれ11.9N/mm<sup>2</sup>および0.78N/mm<sup>2</sup>であった。

前述の構造計算より艇に発生する最大曲げ応力は3.90N/mm<sup>2</sup>であることから，開発したハル材の曲げ強度17.3N/mm<sup>2</sup>は4倍以上の安全率を持つこととなる。補強材の厚さを薄くできたことにより，塗付けるモルタルの厚さも薄くなり，約7.5mm厚のハル材を作製できた。艇体積に占める主材料の割合は9割程度である。超軽量モルタルを主材料として用いたこのハル材の単位体積質量は1.24g/cm<sup>3</sup>であり，これより艇自体の質量（隔壁を含み，浮力体，シート，フットレスト，塗装等を除く質量）は32.2kgとなった。浮力体，シート，フットレスト，塗装等を含めた艇の総質量は，39.4kgという超軽量艇を建造できた。



写真-4 モデル試験体の曲げ試験

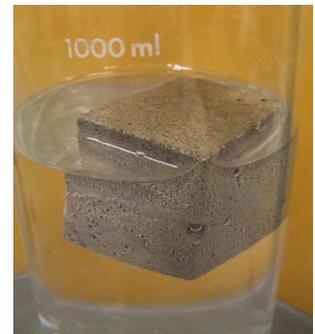


写真-1 水に浮く超軽量モルタル

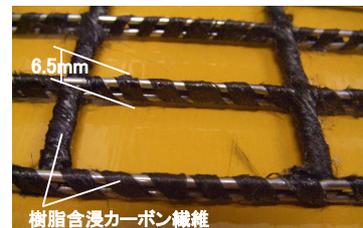


写真-2 開発した補強材の構造

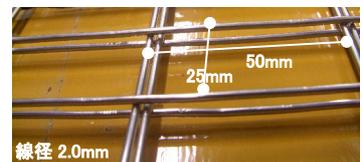


写真-3 補強筋を2枚重ねた状態

○製作過程の工夫

**「ものづくりとは、妥協しないこと。」**  
**ものづくりの厳しさ、楽しさ、奥深さを知る**

**【製作フロー】**

本艇の製作の流れと各工程に要したスタッフ数および日数を図-3に示す。なお、緑色の枠は設計工程である。設計の検討を始めてから、艇の完成に至るまでおよそ3ヶ月を要した。今回のような限られた製作期間（やり直しがきかない）の中で、確実により良い艇を仕上げていくために、2つの大きなまわり道をする戦略をとった。一つは、形状設計の確認を取るためにFRP製の実験艇を作製し、ローリング、ピッチング、喫水等の各種要求性能の検討を行なったことである（写真-4、5）。これにより本艇形状の微修正ができ、素人設計に確信が持てた。実質的にほぼ同一形状の艇を2艇製作したことになるが、FRP製実験艇は最終的に内型枠に転用し、製作精度の向上に大きく寄与した。もう一つの戦略は、超軽量ハル材の開発を徹底して行ったことである。この開発工程だけで全工程の1/3の1ヶ月間を要している。今回、水に浮く超軽量モルタルの開発と極薄く高剛性な補強材の開発が同時に実現できたことにより、約39kgという超軽量艇の製作が可能となった。

モルタル艇の製作工程としては、まずFRP実験艇にファインメッシュを針金で固定し、ファインメッシュの全ての部分にカーボン繊維を巻き付け、樹脂含浸を行った（写真-9）。その後、補強材に超軽量モルタルを厚めに塗付け（写真-10）、材齢2日で設計の艇形状となるようにモルタルを削り出し、研磨を行った（写真-11）。超軽量モルタルのもう一つの特徴として、切削性が高いことから正確な艇形出しと全体に渡り均一な厚さの薄肉ハル材の製作ができた（写真-12）。

**【製作時の苦労】**

製作工程は全体に渡り重労働であったが、全て手作業で行った約2万本の竹短繊維の作製と総延長200m以上のカーボン繊維巻付けは過酷であった。竹短繊維は機械でチップ状にすると繊維が分断され、高引張である竹の利点が生かせない。そこで2万本の竹短繊維をカッターナイフで裂いて作る方法をとった。カッターで指を無数に切りながら、まさに血のにじむ（ような）努力の賜物が写真-7である。

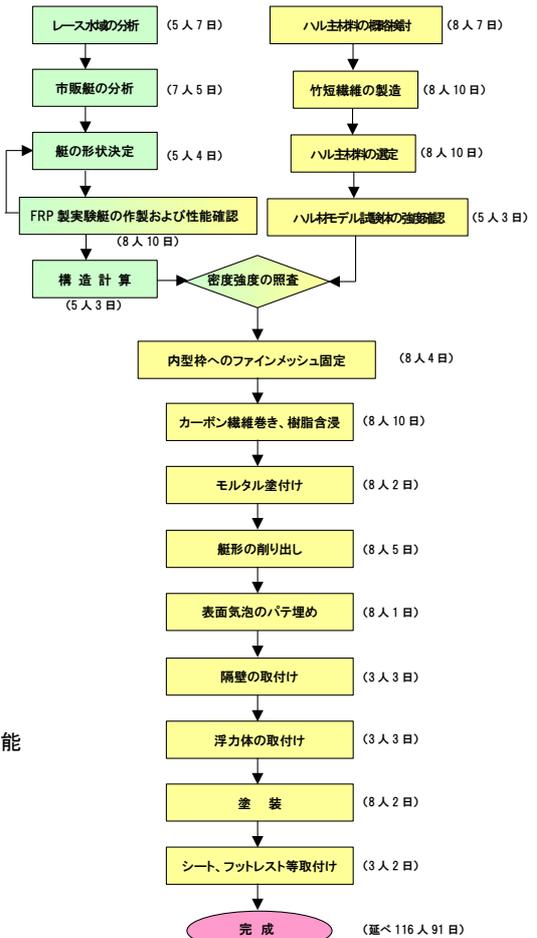


図-3 艇の製作フロー



写真-5 FRP実験艇の製作状況



写真-6 FRP実験艇による各種性能検証実験風景



写真-7 約2万本の竹短繊維



写真-8 竹短繊維の作り方



写真-9 カーボン繊維の巻付け風景



写真-10 超軽量モルタル塗付け完了



写真-11 サンドペーパーによる艇形の削り出し



写真-12 脱枠直後の艇 (7.5mmの薄肉ハル)

○その他

**【かちがらすという鳥】**

本艇の愛称につけた“かちがらす”とは、我が国では佐賀平野周辺のみには生息し、天然記念物に指定されている希少な鳥である。しかし佐賀大学の校内では日常的に見かけられ、愛嬌のあるしぐさで我々を和ませてくれている。“かちがらす”というのはこの地方の呼び名で、正式名称は“かささぎ”である。泣き声が「カチ カチ カチ」（勝ち 勝ち 勝ち）と聞こえることからこの名が付いたとも言われおり、昔の武士からは縁起が良い鳥とされてきた。飛ぶ姿は大変美しく、世界ではヨーロッパから北アフリカ、アジア、北米まで広範囲に生息するこの鳥にはファンが多い。



今回は時間が無く艇のカラーリングまでできなかったが、レース当日までには、艇全体をこの“かちがらす”をデザインしたフォルムとする予定である。

**【まとめ】**

本艇の特徴および設計・製作段階の特徴をまとめると以下の通りとなる。

- ・開発、製作、練習期間が十分に取れないことを考慮し、琵琶湖（南湖）のレース水域やレース条件に適した艇の最適設計を試みた。
- ・形状設計に基づき FRP 製の実験艇を製作し、各種性能の検証を行った。FRP 製実験艇はその後内型枠とし、モルタル艇の製作精度を高めることに用いた。
- ・ハルを形成する主材料（モルタル部分）の 94%（wt%）に「環境にやさしい」材料を使用した。
- ・密度  $0.82\text{g/cm}^3$  の水に浮く超軽量モルタルと 2 枚のファインメッシュをカーボン繊維で巻き、樹脂を含浸させ成形した新構造形式の補強材を開発し、7.5mm 厚、単位体積質量  $1.24\text{g/cm}^3$  の薄肉軽量ハル材を開発した。
- ・構造計算から求めた艇に必要な縦強度に対して 4 倍以上の安全率を持つ、曲げ強度  $17.3\text{N/mm}^2$  のハル材を開発した。
- ・艇長 397cm、最大幅 61.6cm、艇高（中央部）28.4cm のモルタル製カヌーで、艇自体の質量が 32.2kg、付属品を含む総質量が 39.4kg という超軽量艇を建造した。

○完成写真



写真-13 艇全景



写真-14 超軽量艇の証し

完成した艇の形状としては、艇長 397cm、最大幅 61.6cm（ガンネルを含む）、艇高（中央部）28.4cm となった。艇質量は設計値を若干オーバーしたが、写真-14 のように 1 人でも運搬可能な、コンクリートカヌーとしては超軽量艇に仕上がった。



写真-15 艇の底面の形状



写真-16 ニッポンチャレンジ艇

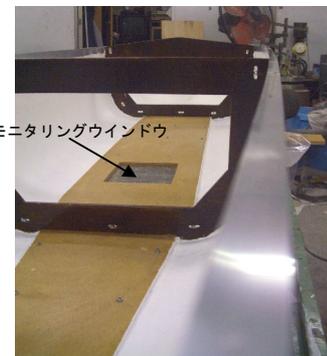


写真-17 艇内部の状況

琵琶湖南湖用レース艇の最適設計を試みた結果、写真-15 のような底面の形状となった。写真-16 は、ヨットレースの最高峰アメリカズカップに挑戦したニッポンチャレンジ艇を下から撮影したものであるが、奇しくも 2 艇の底面の形状は似たような形となった。写真-17 は艇内部の状況であるが、乗降時の踏抜き防止とシート取り付けのために配置した床板の中央部に、モニタリングウインドウを空けた。艇のモルタル表面を露出させたこの窓で、ひび割れ発生等の変状の確認を常時行っている。