

レース用ヨット「国際470級ディンギー」の開発 Development of racing yacht "International 470 Class Dinghy"

原 以起 藤井 茂 服部 孝史



Abstract

In Yamaha Motor's aim to popularize marine sports, the company has been involved in world-class yacht racing as a boat builder, such as in the Trance-Pacific-Okinawa Single-handed yacht race(1975), Melbourne-Osaka double-handed yacht race (1990), Auckland-Fukuoka yacht race (1993), America's Cup (1992). In addition, since acquiring the construction license of the world-famous "International 470 Class Dinghy" in 1975, the company has mainly contributed to the spread and raising of the domestic sailing sports. After that, due to the slump in the domestic economy after the collapse of the economic bubble, the company lost its involvement in yacht racing in 2002, but due to the recent rise in global sailing sports, Yamaha Motor is returning to the world racing scene for the first time in about 20 years. In order to do this, we decided to work on the development of the "International 470 Class Dinghy", which has a large number of participants both in Japan and overseas and has many technical challenges. This report provides an overview of the development process.

1 はじめに

当社では、マリンスポーツの普及を目的として、太平洋一沖縄・単独横断レース(1975年)、メルボルンー大阪ダブルハンドヨットレース(1990年)、オークランドー福岡ヨットレース(1993年)、アメリカスカップ(1992年)など世界レベルでのヨットレースにボートビルダーとして関わってきた。また、世界的に普及している「国際470級ディンギー」の建造ライセンスを1975年に取得以来、主に国内のセーリングスポーツの普及と底上げに貢献してきた。その後バブル崩壊後の国内景気の低迷から2002年を最後にヨットレースへの関わり合いを絶っていたが、昨今の世界的なセーリングスポーツの盛り上がりを受け、およそ20年ぶりに世界のレースシーンに復帰すべく、国内外を問わず参加人口が多く、技術的にもチャレンジ要素が多い

「国際470級ディンギー」の開発に取り組むこととなった。本稿では、その開発過程について紹介する。

2 開発目標と設計コンセプト

国際470級ディンギーは、World Sailing および International 470協会によって、船型から構造に至るまで詳細かつ厳格にルール(クラスルール)が規定されており、定められた設計・製造基準の中で、競合艇に対してどこまで性能を高められるか、同時に選手のパフォーマンスをどれだけ引き出せるか、開発者には極めて繊細なバランス感覚が求められる。

我々開発チームは、次の3つの視点で開発方針を定め、ターゲットとする大会レース海面の過去海況データ分析、競合艇の船型・構造分析を徹底的に行い、目標値を設定した。

- (1) 艇体抵抗の減少
- (2) 規定重量と艇体剛性の両立
- (3) 艇体慣性モーメントの最適化



図1 試作艇航走(上)と全景(下)

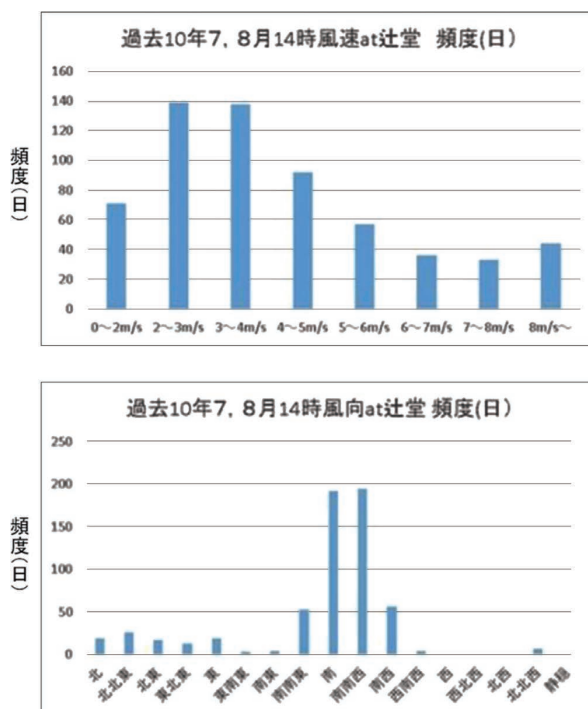


図2 風速データ一例 風速発生頻度(上) 風向発生頻度(下)

最終的に決定した船型は実物を用いた水槽試験とCFD(数値流体力学)との突き合わせ検証の結果、当社既存艇や競合艇に対し低速域(=ターゲットとする風速域)で4%ほど抵抗が少なく、高速域でも同等以上の性能が見込めるものになった。

3 技術開発

3-1. 船型

船型は、艇の性能を決定づける最重要ファクターであり、一度モールド(型)を作ったら簡単には変更できないため、プロジェクトの序盤で最も慎重に検討される。クラスルールでは50年ほど前に設計された基本船型から7mmの幅の中で差異が許されているので、その範囲内でどのような形にするべきか、対象となるレース海面の平均的な海況において、航走抵抗が最小となるように設計する。

海況については、今後国内で国際大会が数多く開催される神奈川県江の島沖の風向・風速を主眼に置き、過去の気象データを収集・分析した。

特に最高峰の世界戦が行われる7月末から8月前半の江の島付近ではシーブリーズが成熟しきらない軽風が多いことが示されており、また仮にレースシリーズ中に強風になっても、強風時は選手のテクニックによる差が大きく、船型の差で得られるメリットは軽風時の方が大きいことから、本プロジェクトでは軽風域で速い船を狙うこととした。

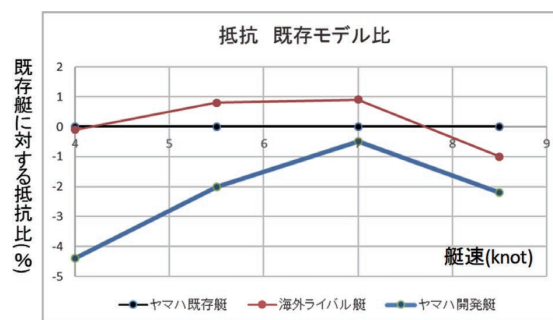


図3 航走抵抗比較図(当社既存モデルを水準とした抵抗比)



図4 水槽試験の様子
(実艇を使ったヨットの水槽試験は希少な経験となった)

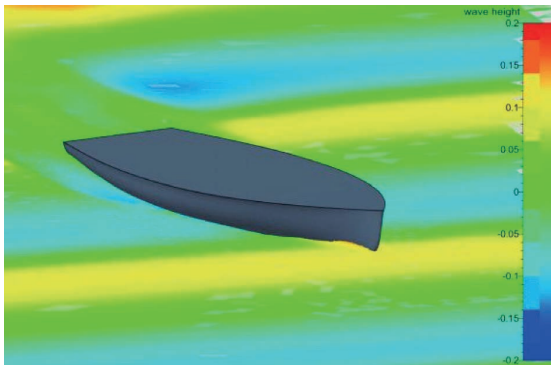


図5 CFDによる波浪海面上航走シミュレーション

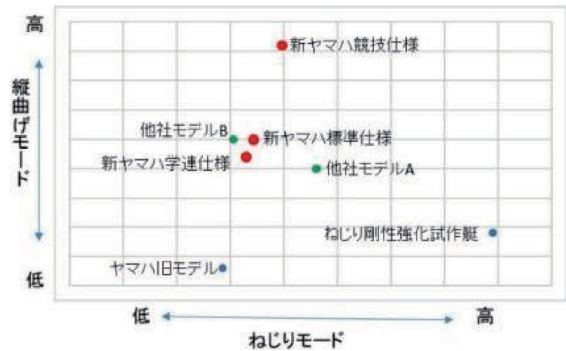


図7 剛性(縦曲げモード、ねじりモード)のポジショニングチャート

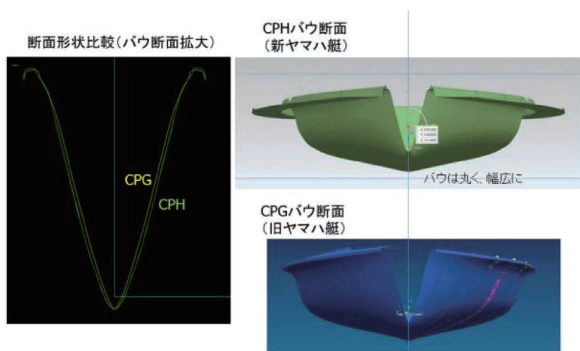


図6 当社旧モデル:「CPG」と新モデル:「CPH」の船型差異(一部抜粋)



図8 慣性半径、重心高さのポジショニングチャート

3-2. 構造

470艇の構造についても船型と同様に、構造の形態、船殻板厚、材料、最低重量などが定められており大きな自由度はないものの、構造設計上、主に性能に寄与する重心位置(前後・上下)、慣性半径、動剛性、静剛性を軸に、当社既存艇と競合艇の特性と比較した上で攻め所を決めていった。

まず開発初期に着目したのは、ドイツ製の艇で高い値を示したねじり剛性であった。470艇では風の条件によって艇を揺らしつつ、セールを繰り返して煽る動作が許されているので、それに適した高いねじり剛性を狙った試作艇を建造した。この艇は目論み通りねじり剛性が競合艇をはるかに上回り、既存艇に比べて剛性感が向上したものの、その反面、慣性半径が競合艇・既存艇より大きくなってしまい、選手による総合評価は芳しくなかった。

したがって、改めてレース艇開発の基本に立ち返り、慣性半径と剛性の最適値を探るため、重量を重心に集めると同時に評価時に重心位置を変更しやすいよう、規定重量下限より10%程度軽量の試作艇を新たに建造することとした。後の同艇の選手による評価では、必ずしも慣性半径は“小さすぎない”方がレースを戦う上では有利に働くということも判明し、最終的に慣性半径と剛性・強度のバランスは競合艇と同程度を狙った設計に落ち着いた。

一方で、艇を形作るFRP(繊維強化プラスチック)材料や積層構成の最適化についても検討を進めていった。

一般的なボートやヨットでは、比強度を高める代表的な手法としてガラス積層の間に低密度の発泡材やハニカムコアを挟むサンドイッチ構造をとることが多いが、470艇ではクラスルール上、FRPの単板構造しか認められていないことから、重量制限の中でルール上の最低板厚1.5mmを満たす必要があることから、近年各社ともに、チョップドストランドマット¹⁾と引っ張り強度の高いダブルバイアス²⁾を交互に配置する積層構成が主流となっている。

- 1) チョップドストランドマット(短いガラス繊維をランダム方向で任意の密度となるよう接着シート状にしたもの)
- 2) ダブルバイアス(±45°の2方向にガラス繊維を織らずに配置し糸で縫い合わせたもの)

本開発艇でも基本的には同様の積層構成を踏襲するが、ガラス繊維そのものについては従来品に対し単位断面積当たりの繊維密度を上げた製品を新規に採用したり、積層順序や枚数を工夫したりするなど、比剛性・比強度ともに高い積層構成を実現することができた。

主要構造を形成するFRP部品については、型構成と取付け

方法を全面的に見直した。特にリギン(マストとマストを支えるワイヤー)の加重を一身に受ける「Forward bulkhead」と「Forward Tank Web」と呼ばれる主要構造部材の船殻への設置方案は極めて重要で、方案検討とFEM 構造解析を繰り返し、部材形状、接着部位の最適化に至った。

新たに決定した方案は、旧モデルの製造手順とは大きく異なり工数も増加してしまうが、比剛性向上のメリットは非常に魅力的で、コストアップ分を補って余りあるものとなった。

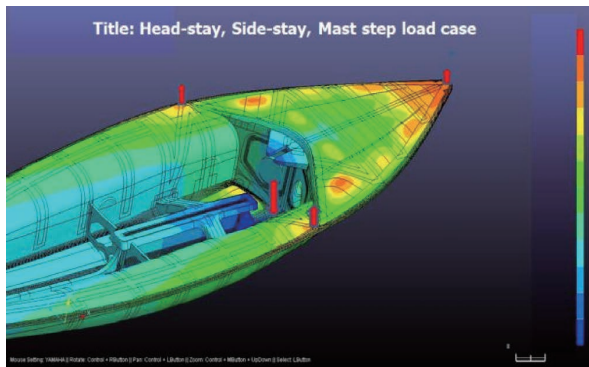


図9 構造解析一例
(マストステップ部には下向きに1tもの荷重がかかっている)

3-3. 試作艇評価

ヨットのテストは、エンジンで走るボートとはかなり事情が異なり、「風」「波」「乗り手」「リグチューニング」などの条件が複雑に絡まり艇のパフォーマンスに多大な影響を与えるため、そうしたファクターを可能な限り“整理して”評価を行う必要がある。しかし実際には、クリーンに条件を同じにすることは難しく、開発艇とベンチマーク艇とが、互いの受ける風を乱し合わないギリギリの位置をキープする、セッションごとに選手を乗り換えて乗り手の要素を排除するなど、精密にコントロールされたフォーマットでテストを行った。



図10 上空から見た帆走テストの様子(ドローンで撮影)

さらに、乗り手の主観評価と計測データによる客観評価を突き合わせ、性能評価の“確からしさ”を高めた。実際のセーリング評価は、本プロジェクトと同時進行で活動している「YAMAHA Sailing Team“Revs”」および練習パートナー契約を結んでいる「Team Abeam」、470級ワールドランキング1位を保持しているオーストラリアの「Mathew Belcher & Will Lian」選手らにテストを依頼した。

テストを行う試作艇の最初の重要任務は“慣性半径と剛性の最適値を探る”ことにあるので、艇の慣性半径や重心の前後位置と高さ変更を海上でも容易に行えるよう、艇上で複数の錘(1個1kg～2kg)の設置位置を自在に変えることで、効率的に最適値の絞り込みが行えた。

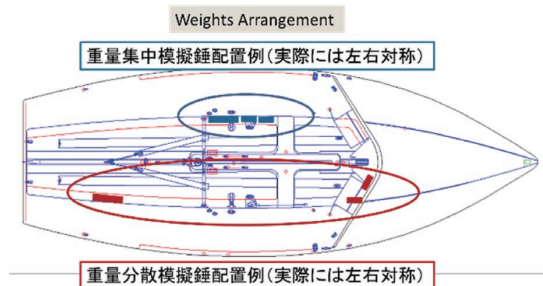


図11 重り配置計画

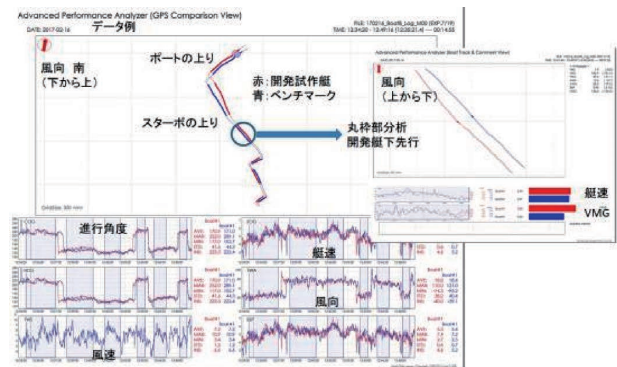


図12 テストデータ一例
(風上航における2艇のスピード、上り角度を比較)

2nd prototype Evaluation Sheet

		bad ← → good						
		1	2	3	4	5		
1	Boat Speed Light condition	2nd proto.	1	2	3	4	5	Boat speed was ok but not consistent in light condition. Sailed well in light but not in heavy.
	ZGM	1	2	3	4	5		
2	Boat Speed Heavy condition	2nd proto.	1	2	3	4	5	Sailed well in heavy condition. Boat was very stable.
	ZGM	1	2	3	4	5		
3	Boat Handling/ Maneuverability	2nd proto.	1	2	3	4	5	No issue.
	ZGM	1	2	3	4	5		
4	Comfortability	2nd proto.	1	2	3	4	5	Boat was very comfortable in light and heavy condition.
	ZGM	1	2	3	4	5		
5	Fitting Layout	2nd proto.	1	2	3	4	5	No issue.
	ZGM	1	2	3	4	5		
6	Style	2nd proto.	1	2	3	4	5	Same as Z1. Boat is great!
	ZGM	1	2	3	4	5		
Comments:								

図13 選手による主観評価記入チャート
(競合艇との相対比較値とコメントを記入)

一連のテスト結果から、

- (1) ターゲットとしている風速域でのスピードは競合艇を凌駕する。
- (2) 慣性モーメントは小さすぎない方がレースの場面では性能を発揮しやすい。
- (3) 乗員の乗艇位置変化に対する艇挙動は競合艇に比べデリケートである。

ということが検証され、当初のスケジュール通りに生産仕様の設計に反映できた。



図16 完成したハルメ型。表面が鏡のようになるまで磨き上げる。

4 製造

4-1. 型

性能に大きく関与するハル（下部船体）は、接水面形状が設計通り正確にフェアリングされている必要があり、かつ、クラスルールで定められている形状許容値に対する余裕が本艇の場合2mm程度しかない部分が多くあるため、全長約5mにもなるオ型では±0.2mm、メ型では±1mmの精度が要求され、通常のFRP製品型の1桁上のオーダーで製作する必要があった。型の精度はオ型完成時、メ型完成時に3Dレーザー計測器で検品し目標値通りであることを確認した。



図14 フェアリング後のオ型を3D計測

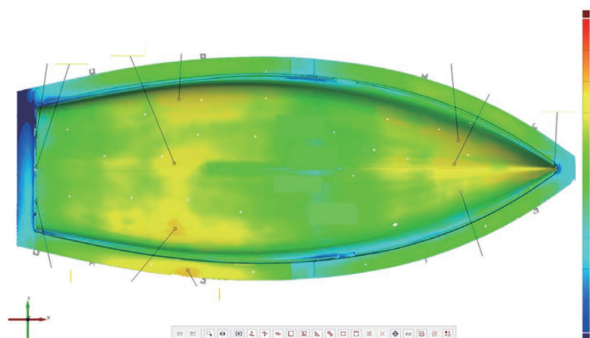


図15 メ型の3D計測結果（計測数値は伏せてある）

4-2. 治具

最終的な製品の出来栄を決定付ける「ハル・デッキカップリング治具」については、精度と作業性の両立に主眼を置き計画した。旧モデル用は鉄鋼管溶接構造で構造材の剛性によって精度を担保する考え方で造られていたが、それゆえ重量も重く(300kg)、カップリング作業には天井ホイス使用が必須となり、デリケートさが求められる上下左右同時の位置決め作業を困難にしていた。今回は重量剛性比に優れるアルミフレーム材を多用し、また製品を押さえる部分には偏荷重がかからないよう、デッキマスターオ型上で“部分的FRPメ型”を製作し、先のアルミフレームと合体させる構造とした。こうして重量も大幅に軽減され(75kg)、軽量チェーンブロックの使用が可能となり、快適かつ高精度のカップリング作業を実現した。また、センターボードやラダーブレードなど、性能上、断面形状の精度が極めて高く求められる製品については、高密度ケミカルウッド（センターボード用）や、アルミ（ラダー用）を素材としたダイレクトメ型により製作した。



図17 センターボード用型（左）、ラダー用型（右）

4-3. 工程

通常、ハンドレイアップによるFRP製品では、ガラス繊維の重量バラつきに加え、成形時に投入される樹脂重量も「樹脂枯れ」による不良発生リスクを避けるため、設計・製造基準の範囲内で若干多めに投入されるのが一般的であり、最終的な製品重量は製造基準の範囲内でバラつくことが避けられない。しかし、470艇ではルール下限ギリギリの重量でできていないと、

選手やコーチが拒否反応を示すため、出荷時点で“絶対に”艇体重量がルール下限値になるよう、全 FRP 部品のガラス繊維重量、投入樹脂重量、接着剤(ペースト)重量を毎工程ごとに1g単位で計量しながら積層・組み立て作業を行っている。



図18 レイヤー毎に樹脂重量を計量し
チェックリストに記録・管理する。

こうして470艇として認証を得るための重量計測時には、ルール下限値(ベアハル86kg)を常に達成している。つまり、出荷時の製品重量バラつきは±0%ということになる。

5 最後に

本プロジェクトに課せられたミッションは、世界レベルでのレースシーンで勝てる艇の実現であったが、20年にわたるヨット開発の中断は大きなハンデであり、これまでのやりかたが通用しないことはプロジェクト着手時点では明白であり、それをどう克服するかが最大のテーマであった。

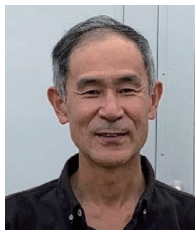
幸いなことに、これまで我々が公私ともに培ってきたセーリング界のネットワークに助けられ、世界最高峰のヨットレースプロジェクトに関わってきたプロフェッショナルの方々との協業体制を早期に構築できたことが、限られた期間の中での目標実現の最大の成功要因となった。

ここに本開発の全てのプロセスにおいて関わっていただいた皆様に感謝申し上げます。

■ 著者



原以起
Iki Hara
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部



藤井茂
Shigeru Fujii
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部



服部孝史
Takafumi Hattori
マリン事業本部
開発統括部
艇体開発部