

技術論文

C A E を利用したレーシングヨットの開発

Development of Racing Yacht by Means of C.A.E.

小杉 隆司*
Takashi Kosugi永海 義博**
Yoshihiro Nagami古川 忠文***
Tadahumi Furukawa

要 旨

最近は、有限要素法（FEM）による構造解析を中心としたC A Eが設計に広く取り入れられ、大いに役立ちはじめている。この流れの中で、マリン部門の設計においてもC A Eを活用して、設計精度や効率の向上を図ろうとしている。例えば、ヨットの設計では従来から行われている排水量計算や帆走性能計算などに加えて、3次元C A Dによる船型設計や2次元C A Dによる構造設計、さらにFEMによる構造解析が取り入れられはじめている。特に、構造解析は3年ほど前からのアメリカズ・カップ挑戦艇の開発に呼応して精力的にその手法開発が行われてきた。最近の高級レーシングヨットの艇体はC F R Pなどの複合材料を用いたハニカムコア材のサンドイッチ構造積層板から構成され、その異方性材料の解析が重要なのである。

なお、本件は工業調査会刊の月刊誌「CAD & CIM」1990. 5, No.14に掲載されたものである。

は じ め に

最近のマリンブームの中で、日本においてもヨ

* マリン事業本部 技術管理部

** マリン事業本部 アメリカズカップ室

*** 技術本部 要素研究部

Abstract

Recently, CAE, centering around structural analysis by using a finite element method (FEM), has been widely applied for, and of great service to designing. Under the situation, the Marine Division is planning to improve precision and efficiency of designing by using CAE as well. For example, in designing a yacht, in addition to displacement calculation and sailing performance calculation, a three-dimensional CAD for designing a type of a ship, a two-dimensional structural designing as well as structural analysis by FEM have started to be applied. Especially, application methods of the structural analysis have been actively developed to construct yachts for the Americas Cup since three years before. A body of recent luxury racing yachts are made of laminated plate sandwiched with honeycomb core materials which use composite materials such as CERP, and it becomes increasingly important to analyze anisotropic materials.

This article was published on the No.14 issue of "CAD & CIM", a monthly magazine published by Industrial Research Foundation, in May 1990.

ットレースに対する関心が急速に高まりつつある。ヨットレースの最高峰である「アメリカズカップ」に日本から初挑戦という話や、アドミラルカップ、ケンウッドカップなどのビッグレースで日本艇の健闘などが聞かれるようになってきた。ここではレーシングヨット開発の概要を、C A Eの面から紹介する。

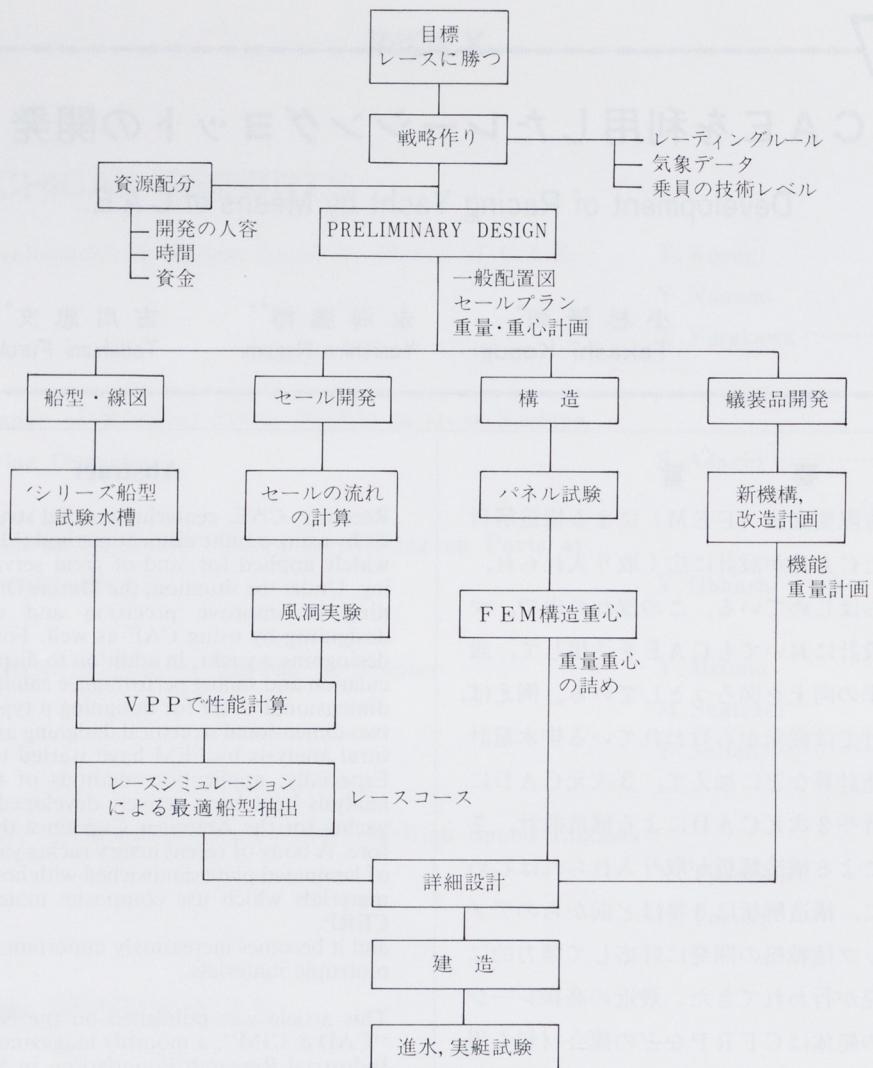


図1 レースに勝つためのフロー・チャート

開発ステップとCAEの役割

図1はレーシングヨットの開発プロセスの例である。数年前まではレース艇の開発といえば、1人の設計者がいて、個人の経験と感性に頼って行なわれていた。しかし、近年カーボンファイバーやケブラーといった先端素材の船体への利用や搭載する電子機器の進歩により、従来からの手法では勝てなくなってきた。高精度のシミュレーションや膨大な情報を迅速に処理するためには、どうして

もコンピュータや信頼性のある実験を駆使した開発が必要になってくる。コンピュータの利用は、各ステップで積極的に行なわれているが、主要な部分としてはつきの通りであろう。

- ① 気象データベースを使っての風向風速の統計解析
- ② 水槽実験用パラメトリック船型の線図作成
- ③ スーパーコンピュータを利用したキールやセールの流れの計算
- ④ VPP (Velocity Prediction Program)

による性能シミュレーション

- ⑤ F E Mによる構造解析
- ⑥ C A Dを利用した詳細設計
- ⑦ 実艇試験でのリアルタイム解析

コンピュータの利用によって従来よりさらに抵抗の少ない艇、さらに軽い艇の設計が短期間で可能になってきた。そして、このような開発手法で作られたレース艇の性能は、必ず上位クラスに位置することになる。

性能シミュレーション

ヨットの性能を決める大きな要因として、船体の水線長や幅、重量、あるいはセールの面積などがある。これらを決められたルールの範囲内でどのようなサイズにすれば、設定されたコースで最も早く帆走できるかを推定することは、基本計画時のポイントになる。車やプロペラで走る船は、抵抗=推力であるからその推定は比較的楽である。しかし、風のエネルギーで進むヨットは、斜めから受ける風の力から前進力を得るので、前進方向、横方向、横倒し力、旋回力の4つの運動の釣合を

考えねばならず、非常に複雑になる。この力の方程式を表わしたのが、図2である。この非線形の4元連立方程式を解くプログラムをV P Pと呼ぶ。求める解としては、速力、横流れ角、倒れ角、舵角である。

V P Pの難しさは、F E Mのような解析手法ではなく、個々の力をいかに精度よく推定するかという点にある。市販されているV P Pもあるが、これは一般的のプロダクションヨット用であり、とてもレース艇には使えない。いい換えれば、独自のV P Pをもっていない開発チームに勝算はないということになる。個々の力の推定は、船体については水槽実験から求め、セールについては風洞実験から基礎的な係数を求め、コンピュータによる流れの計算結果や経験則で補足して作り上げていく。

このV P Pを使って設計者は、重量、長さ、セール面積などを変えて、どの組合わせが最も速いかを探っていく。また、V P Pの結果を使い、それにレースコースや予測される風速分布を考えて、レースでの勝算を計算するプログラムも利用される。

①推力(船の中心線方向)

$$\boxed{\text{セール推力}} - \boxed{\text{艇の風圧抵抗}} = \boxed{\text{摩擦抵抗}} + \boxed{\text{造波抵抗}} + \boxed{\text{波浪中抵抗増加}} + \boxed{\text{リーウェイによる誘導抵抗}}$$

艇、キール、ラダー
ヒールによる影響も考慮する

②横力

$$\boxed{\text{セール横力}} + \boxed{\text{艇の風圧抵抗}} = \boxed{\text{艇の横力}} + \boxed{\text{キール横力}} + \boxed{\text{ラダー横力}} + \boxed{\text{トリムタブ横力}} + \boxed{\text{波浪強制力}}$$

③傾斜モーメント

$$\boxed{\text{艇体+キール復原モーメント}} = \boxed{\text{セールの傾斜モーメント}} + \boxed{\text{RIG重量の傾斜モーメント}} + \boxed{\text{キール流体力による傾斜モーメント}} + \boxed{\text{波浪強制力}}$$

④ヨーモーメント

$$\boxed{\text{セールによるヨーモーメント}} + \boxed{\text{風による艇のヨーモーメント}} = \boxed{\text{艇体のヨーモーメント}} + \boxed{\text{キールのヨーモーメント}} + \boxed{\text{ラダー、トリムタブのヨーモーメント}} + \boxed{\text{波浪強制力}}$$

図2 釣合い方程式

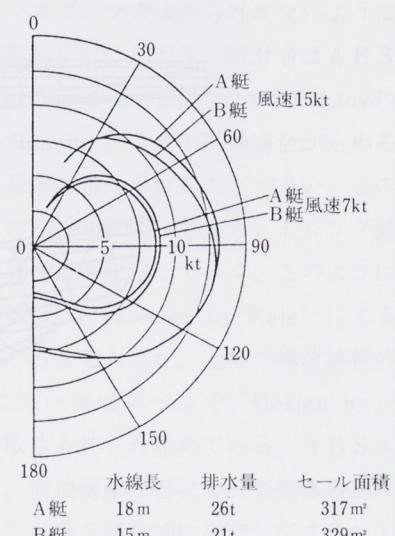


図3 POLAR CURVES

V P P の結果は数値とポーラカーブという形で出力される(図3参照)。ポーラカーブは風に対する艇の角度とそのときの速度を連続的に結んだもので、1つの風速に対して1つのポーラカーブが作成される。図のポーラカーブはA艇、B艇という要目の違う2艇の性能を表わしており、微風ではB艇、強風ではA艇が速いのがわかる。

線図とCAD

技術計算によって予測された性能にもとづいて、より詳細な船体の面創成が行なわれる。当然のことながら、船体は3次元の面から構成されているので、面を作り上げたり、そのできばえを評価することはたいへんやっかいな作業である。最近の船体設計におけるこれらの線や面のフェアリング計算は、もっぱら3次元CADシステムが利用されている。

図4はあるレーシングヨットの設計で検討した船体形状の例である。これらは3次元空間における構成点の座標値、線の構成や特性、あるいは面データをもっているので、面の編集に大いに役立

つ。さらに、このフェアリングされた線や面データに基づいて復原力計算や排水量などの船舶計算が行なわれる。そして、この計算結果が設計目標値に達するまで幾度となく船体形状の変更が繰返される。最終的な船体形状が決定された段階でラインズやオフセットテーブルが出来され、図面としての体裁が整えられる。

つぎに、この船体形状データは2次元CADシステムに受け渡され、詳細な設計が施される。ここでは2次元CADシステムを用いてデッキプランを検討したり、構造設計を行なうことになる。このシステムの主な特徴としては、日本語表示のオンスクリーンメニューによる使い勝手の向上、マクロ機能を利用した処理の簡便化、あるいはマルチウィンドウを用いた作業の合理化などが挙げられる。

一方、デッキプランを練るうえで艤装品の取付けも考慮しなければならない。この艤装部品は多くの場合、海外の部品メーカーから調達される。そして、最近ではこれらの部品はCADデータとしてフロッピディスクや磁気テープで送られてくるケースが増えている。そこで、IGESやDX

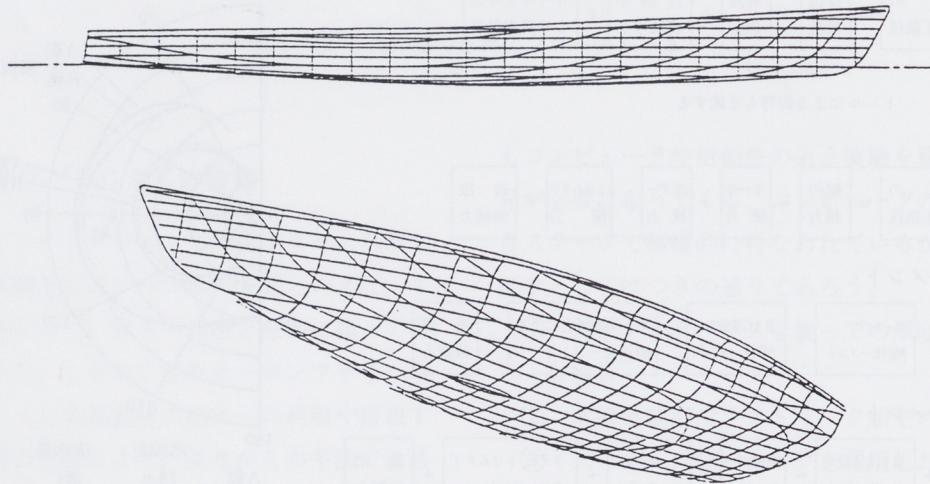


図4 船体線図

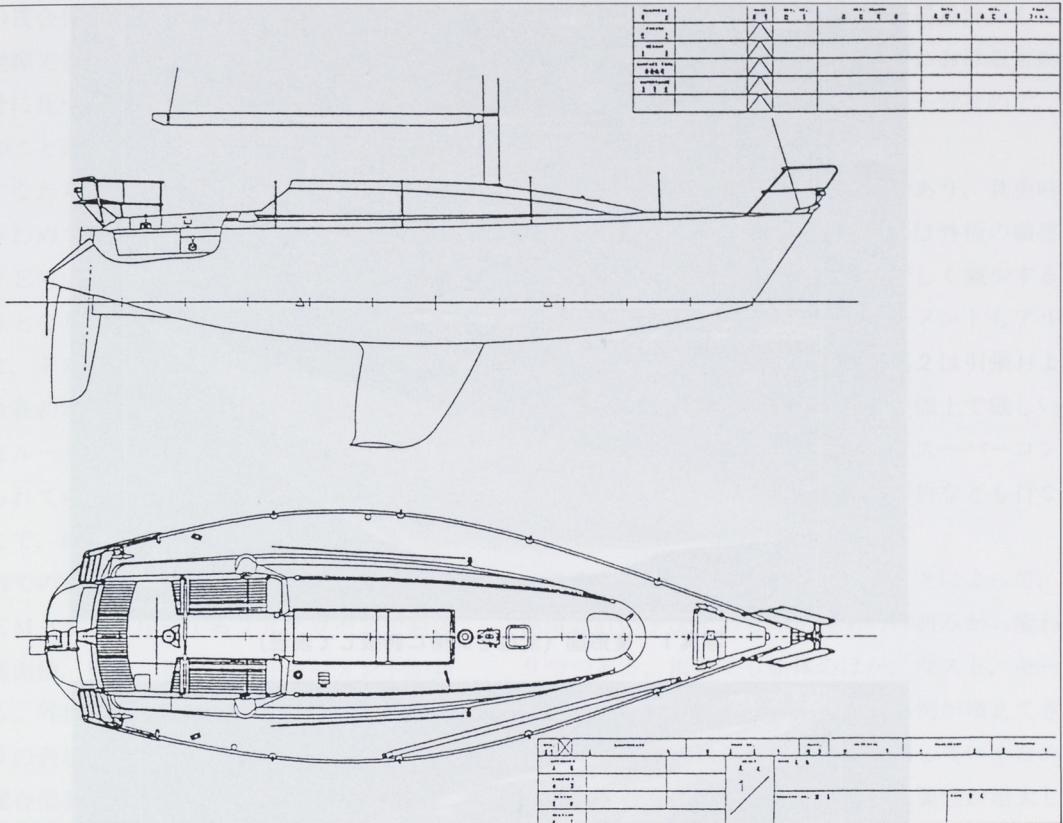


図 5 ヨット艦装図

F形式の図面データ変換機能をもつC A D インターフェイスプログラムが必要となる。変換された部品データベースを用いることによって、指定した部品の形状が即座に利用でき、便利である。こうして作られた図面例を図5に示す。

C A D の利用による効果としては、つぎの点が挙げられる。

① 製図時間の短縮

特に、水槽実験に使うシリーズ船型（長さ、幅など比例変化）の線図生成や、フェアリング時間の短縮に効果がある。

② 精度や信頼性の向上

③ 生産現場に直結したデータの出力

外板厚みを差し引いた形状データや、任意の位置での断面データが容易に出力できる。

構造解析

レーシングヨットのクラスルールでは、レースを健全なマリンスポーツの域から外れないように材料や構造に制約を設けており、設計者はA B S (American Bureau of Shipping)やロイド(Lloyd's Register of Shipping)などの船級協会が定める構造基準への準拠を求められることが多い。この場合、これらのルールに従ってスカントリング計算を行ない詳細構造を決定していく。このようにヨットの構造設計は、“Design by Rule”によるのが従来からの方法であるが、近年の構造解析の進歩と普及に伴い実用レベルで“Design by Analysis”が取り入れられ始めている。A B S ルールなどでは、波浪衝撃などによって船体各部にかかる最大水圧荷重を経験的に設定してスカントリングを定めている。しかし、これによらなくて

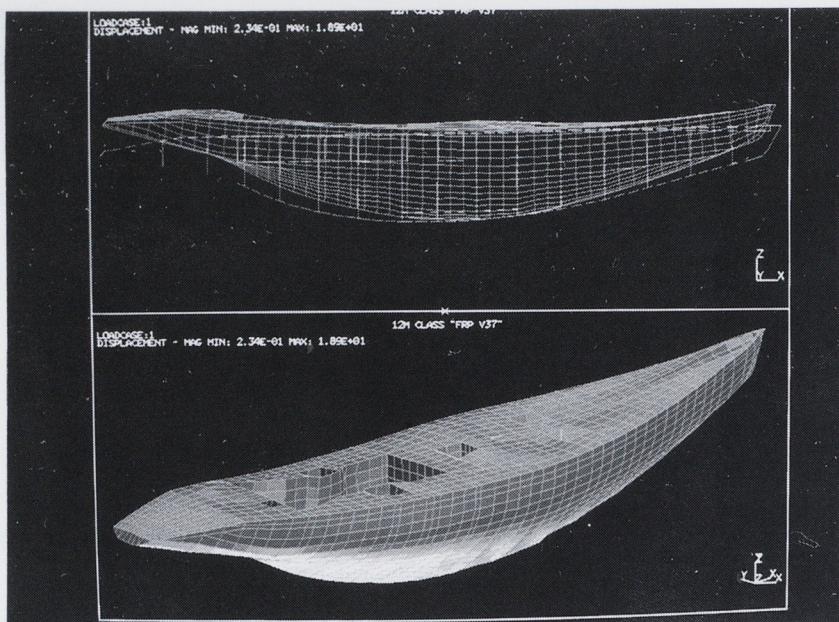


写真1 変形図（変位を50倍に誇張して表現）

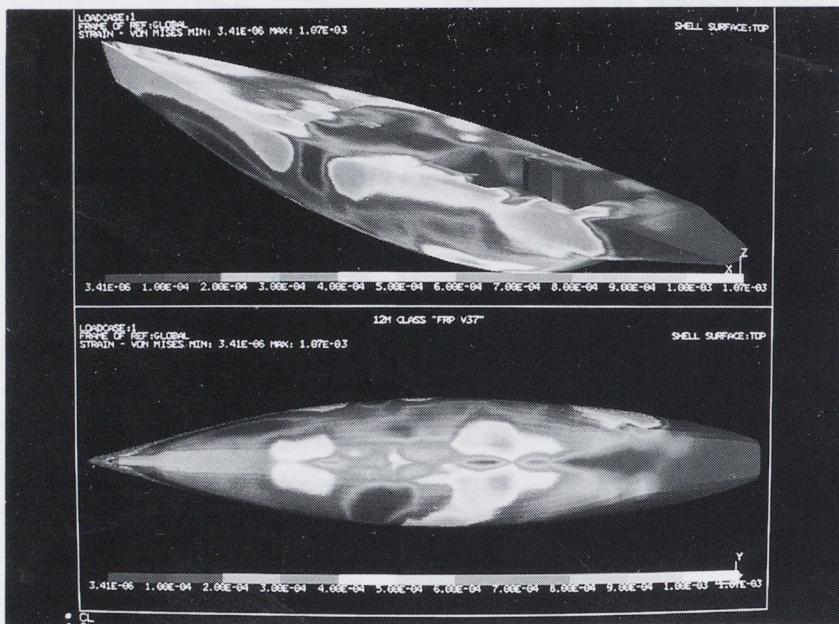


写真2 歪み分布図

も強度上安全であることが証明できれば、船級協会の承認を取得することができる。その1つの方法がFEMを用いた構造解析である。

現在、レース艇の材料はFRP（ガラス、カーボン、ケブラーなどの繊維強化プラスチック）が主流である。初期のFRPでは積層が単板構造であ

り、設計も疑似等方性の板として扱われた。しかし、最近では複合材料のもつ優れた性質を引き出すために纖維配向の最適化が検討され、1方向纖維が多用されている。さらに発泡プラスチックやハニカムを心材とするサンドイッチ構造をとることも多い。こうして異方性の積極的な利用や高度

な材料の複合化によって、より高強度・高剛性な性能を発揮できるようになった。その一方で、従来の設計に比べてこの外板設計がより多くの自由度をもつことになり設計自身が複雑になってしまった。すなわち、構造解析なくしては十分な構造検討はきわめて困難であるといえる。このように、いまやF E Mによる構造解析は船体設計に不可欠なツールとなりつつある。

つぎに、その解析事例としてF R P製12m級ヨット（全長約20m）での構造解析を示そう。このクラスはルールによりロイド規格に準拠することが決められていて、全体的な船体の強度は十分ある。そこで、構造設計の主眼は高剛性化、ルールの範囲内での軽量化、慣性モーメントの低減になる。F E Mモデルを作成するプリプロセスで船体各部の表面積、重量、重心、慣性モーメントが計算できる。外板は積層板要素を用いて実際の積層構成通りの表現をし、また、骨材は一般的な梁あるいは複合梁要素を用いてモデル化する。つぎに荷重条件を設定する。マストおよびそれを支えるワイヤの荷重とバラストキールの復原力は容易に

推定できるし、類似船を使っての静荷重計測も容易にできる。しかし、波浪中の帆走における変動荷重や衝撃荷重の推定は現状では不十分なので、荷重倍数または安全率として考える。

写真1はF E Mによる解析結果であり、負荷時の船体たわみを示す。船体のたわみは外板の繊維の方向を最適化することにより、著しく減少することができた。また船体の慣性モーメントもアルミ製の艇に比べ小さくできた。**写真2**は引張および圧縮の歪みの分布であり、強度評価上で厳しい箇所のチェックもできる。さらに、スーパーコンピュータを用いてデッキ部の座屈解析なども行なわれる。

このように構造解析を利用することによって、構造設計の手法そのものが従来の枠組みから変わりつつある。海外でも船体のほか、マスト、セールなどの設計に構造解析を用いた事例が増えってきた。そして、高価な材料を有効活用していくためにも、今後もますます構造解析の重要性が増大していくであろう。

■著者■



小杉 隆司



永海 義博



古川 忠文