

## 舟艇設計における運動シミュレーション

## The Motion Simulation on the Boat Design

神戸庄二 Shoji Kanbe 末森 勝 Masaru Suemori

●技術本部基盤技術研究室／舟艇事業部技術室

## 要旨

ボートの基本計画において最もウエイトが高いもののひとつに船型開発がある。設計者は仕様を仮決めし、構造検討、重量重心計算、性能計算などの一連の基本計画作業（デザインスパイラル）を何度も繰り返し、船の諸性能を確認しながら船型のスペックを決定する。このスパイラルの精度が高ければ高いほど、繰り返す回数が多ければ多いほど、よい性能の船が開発できる。大型船の世界では、船型データを入力し波浪中の運動を計算する手法は当たり前となっているが、当社のような滑走艇（比較的スピードが速い船）に関しては、スピードと復原性を推定する方法しか確立されていないのが現状であった。近年ボートも乗り心地などのニーズが年々増してきたため、波浪中の運動を推定するシミュレーションソフトを開発し、設計ツールとして使用できるシステムを開発した。これによって性能開発のレベルアップ、精度向上および時間短縮が可能となった。

## 1 はじめに

ボート開発において設計段階では船の性能を決定づける「3S（Speed（速度）、Stability（復原性）、Structure（構造））」という重要な項目がある。ここで仕様や3Sを考慮し船の計画をたてる代表的な基本計画の例をあげる。まず長さや幅などの主要寸法とエンジン出力などの仕様を決め、計画図を描く。それをもとに船型や構造などを仮決めし、重量、復原性、スピードなどを推定する。ここでスピードや復原性などの性能が想定した目標（商品品質）を満足していればよいが、そうでない場合は再び主要寸法や仕様の仮決めのステップまで戻り、変更の後再び船型と構造の仮決め、重量、復原性、スピードの推定などのステップを繰り返す。これがデザインスパイラル（図1）といわれるものである。

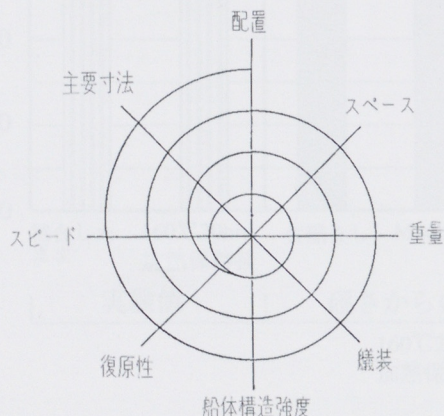
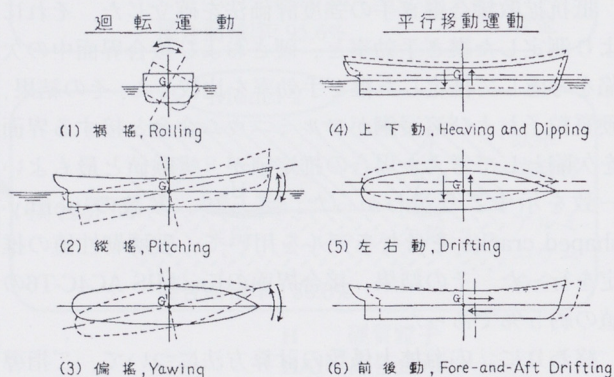


図1 デザインスパイラル例

このデザインスパイラルを多く回せば回すほど、性能推定方法の精度がよければよいほど、性能のよい（品質のよい）船を開発することができる。

従来、ヤマハ発動機㈱（以下、当社という）で設計段階で検討してきた性能は、大きく分けると「スピード」と「復原性」の2つである。スピードについては、模型試験や従来艇のテストデータを統計処理した手法で行われている。また復原性に関しては、独自に開発された「UFOシリーズ」と呼ばれるソフトをEWS上で利用している。しかし近年、「乗り心地」や「横揺れ（図2）」を向上する要望が高まってきたため、これら波浪中の運動を推定するソフトを開発することになった。本稿ではそのソフトの概要とこれらの性能方法をまとめたシステムについて述べる。



（出展：理論船舶工学下巻：大串雅信著）  
注。偏揺れは、現在船首揺れという表現が一般的である。

図2 船体運動について



## 2 縦運動シミュレーションについて

### 2.1 機能の概要

本ソフトは、小型高速艇が正面向かい波の中を高速で走航するときの運動、すなわち上下動と縦揺れの二自由度の運動をOrdinary Strip Method<sup>(1)</sup>をベースに高速艇用に開発した計算方法でシミュレーションするものである。(図3)

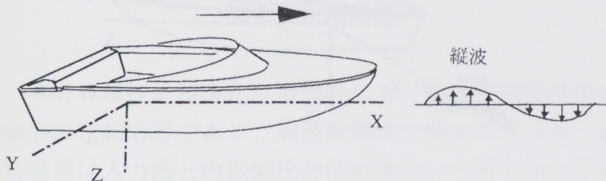


図3 波浪中縦運動

高速で走航している艇には、低速で走航する一般商船などとは異なり、静的な復原力（浮力）のみでなく動的な揚力（Planing Force）が働く。さらに図4に示すように、Pile upという海面の盛り上がり現象やハードチェーンでの水切り現象が生ずる。

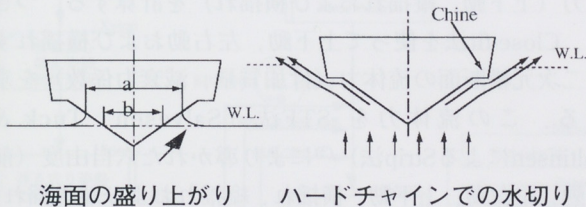


図4 高速艇特有の現象

従って、運動シミュレーションはこれら高速艇特有の現象を考慮する必要がある。計算は船体の流体力を求めることから始まるが、三次元の船体の流体力を理論的に求めることは、現在、非常に難しい。このために本手法では次のような近似法を採用している。まず、船体を図5に示すように船長方向に分割し薄いStrip片にする。(Strip法というのはこのことによる。)

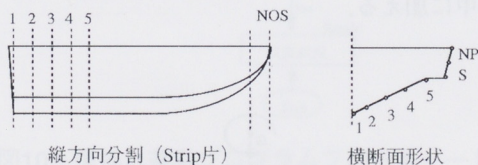


図5 Strip法について

二次元形状の流体力はポテンシャル理論で比較的簡単に求めることができるので、この各断面の二次元流体力をそれぞれ計算する。こうして求めた値を再び船長方向に足し合わせて、艇全体の流体力を求める。なお、本手

法で採用した二次元断面の流体力（付加質量、減衰力係数）の計算法はW. FrankによるClose-fit法<sup>(2)</sup>である。また、ある断面位置の喫水は時々刻々変化するので、この流体力を求める計算はシミュレーションの各時間ステップごとに実行される。運動シミュレーションの結果、求められた運動応答はフーリエ解析され、入力波との振幅比と位相差が計算される。また、船長方向の船体の質量分布を入力していれば、剪断力分布と曲げモーメント分布も計算される。最後に、指定された船底位置に発生する衝撃水圧の最大値を出力して終了する。参考のためにプログラムフローチャートを図6に示す。

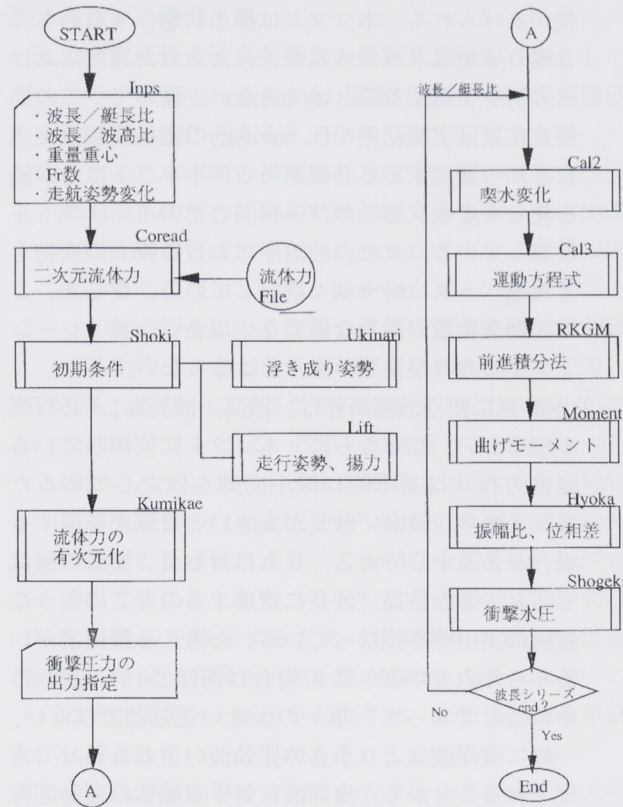


図6 縦運動プログラムフローチャート

### 2.2 適用範囲

本ソフトが対象としているのは一般的な小型高速艇、いいかえると船長／船幅がおおよそ3以上で、V型船型のハードチェーンを持つパワーボート（モーターボート）である。また、スケグを持つ漁船タイプでも、基本的にV船型に近い船底形状であれば適用可能である。

### 2.3 使用上の注意事項

本ソフトは上で述べたように、一般の大型商船の運動性能予測に適用されているOrdinary Strip Methodをハー



ドチェーンを持つ小型高速艇の縦運動性能の予測にも使えるように改良したものである。ただし、ベースはあくまでStrip法であるので、その適用範囲（Strip法の仮定：艇全体の流体力は、船体を船長方向に幾つかにStripしたElementsの二次元流体力の合計で表すことができる）に注意が必要である。また、その他の主な注意事項として以下の項目が挙げられる。

- (1) 流体力は、喫水を変化させるとハードチェーンの前後でその値が大きく変化する。従って、各断面形状の入力では、ハードチェーンが存在するならば必ずそれを含むことが大切である。
- (2) 入力データの中で重要なものの一つに、静止状態から平水の定常走行状態に移行する際の艇の姿勢変化量があげられる。本ソフトは静止状態、すなわち浮き成り姿勢は計算できるが、与えられた速度における姿勢を予測することはできない。従って、この姿勢変化量は実験結果やD. Savitskyの走航姿勢推定式などから別途求める必要がある。本ソフトはその値を使って走航状態における揚力とそのモーメントを計算している。また、波浪中における揚力の変動もそれをベースに時々刻々計算している。従って、この姿勢変化量が妥当な値でない場合、シミュレーションそのものが正しいものとはならない。
- (3) 本計算に使う波高条件は、波高/波長 $\leq 1/25$ 程度が望ましい。なぜならば、本ソフトに使用している運動方程式は基本的に微小変動を仮定しているため、あまりに波高/波長が大きいと計算が発散する場合があるからである。これに対して、実際の艇はもっと大きな波高/波長に遭遇するのでこのような制限は実用性を損なっている、と考える使用者がいるかも知れないが、この場合は海洋波（不規則波）中のことであって、単一の大きい正弦波ではない。一般に海洋波はより小さい正弦波の重ね合わせで表現されることから、海洋波に対する船体の運動応答も、小さい正弦波に対する応答の重ね合わせで表現されると考えられている。高速艇の波浪中における運動の場合については、波に対する応答の非線形性の性質があり必ずしも正確とはいえないが、やはり海洋波中の挙動は小さい正弦波に対する応答を重ね合わせることである程度の精度で予測できると考えられる。従って艇の性能予測に本ソフトを使用する場合、実際にはそれほど大きい波（正弦波）を考える必要はないのである。

### 3 横揺れ運動シミュレーションについて

#### 3.1 機能概要

本ソフトは停止時または微速で移動している小型高速艇の横波中の運動応答を予測する。（図7）

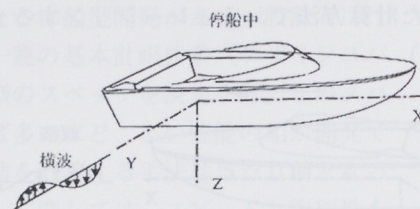


図7 波浪中横運動

縦運動の場合と同様に、やはりStrip法をベースに小型滑走艇特有の事情を考慮して改良を加えた計算手法を開発した。まず船体の重量重心、船型、静止状態の艇姿勢を入力する。なお、この静止状態の艇姿勢は内部計算で求めることもできる。入力値より、この姿勢における復原力（上下動、縦揺れおよび横揺れ）を計算する。つぎに、Close-fit法を使って上下動、左右動および横揺れする二次元横断面の流体力（付加質量、減衰力係数）を求める。この流体力をSTF法（Salvesen, Tuck & FaltinsenによるStrip法）<sup>(3)</sup>により導かれた六自由度（前後動、左右動、上下動、横揺れ、縦揺れおよび船首揺れ）の線形運動方程式の係数中に代入する。このSTF法は、縦運動で使っているOrdinary Strip Method法よりも小型滑走艇の特徴である幅広船型の横運動の推定に適しているため採用している。艇がハードチェーンやスケグを持つ場合は（図8）、横揺れにおける等価線形化した減衰係数を半実験式より計算し<sup>(4)</sup>、運動方程式の中に加える。

また、艇内に浸水がある場合（図9）は艇内の水の運動により復原力および減衰力が生ずる<sup>(5)</sup>、この浸水による影響を簡略化した形で計算し、同様に横揺れの運動方程式の中に加える。

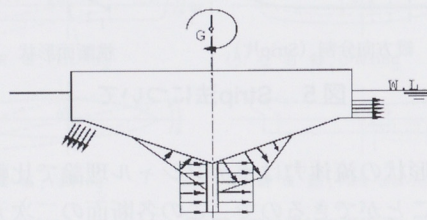


図8 渦による圧力分布



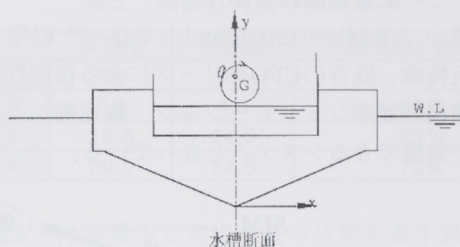


図9 水槽断面

本計算は停止時または微速時における微小線形波中の線形の運動応答であり、周波数領域で解かれている。計算結果は入力波との振幅比と位相差という形で出力される。参考のためにプログラムフローチャートを図10に示す。

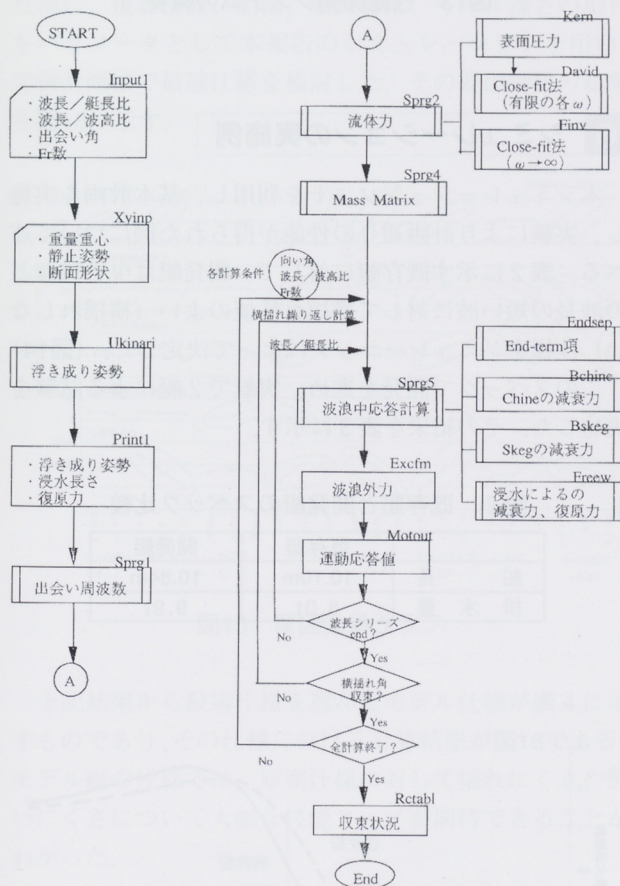


図10 横揺れ運動プログラムフローチャート

### 3.2 適用範囲

適用範囲は、縦運動シミュレーションソフトと同じである。

### 3.3 使用上の注意事項

本プログラムも縦運動と同じくベースはあくまでStrip

法であるので、その適用範囲に注意が必要である。その他の主な注意事項として以下の項目が挙げられる。

(1) 本ソフトは艇速の増大による艇姿勢の変化を考慮していない。また、高速で走行する際に船底に生ずる衝撃圧や動的な揚力なども考慮していない。従って、Froude数の上限をおおよそ0.5以下としているが、本来は停止時または微速時における運動応答の予測に開発されたものであることに留意する必要がある。

(2) 本ソフトは運動方程式の諸係数を静止状態の流体力から計算している。従って、浮き成りの静止姿勢が正しくなければ運動予測も正しくないと考えられる。内部計算による静止姿勢のデータには十二分の注意が必要である。

(3) 本計算に使う波高条件は、波高/波長 $\leq 1/25$ としている。波高のSteepnessに制限を加えている事情は縦運動と同じである。

(4) 浸水した水が艇の横運動に及ぼす影響の計算は、実際の浸水箇所の船底形状の複雑さや変形する自由表面の非線形性（波崩れ、跳水）などより、非常に困難なものになっている。しかしながら、設計者にとって艇の浸水による復原力性能の悪化を事前に評価する手段は、たとえ大幅に簡単化されたものであっても、有益かつ必要なものであると思われる。このため本ソフトでは、必ずしも厳密とはいえないが、線形のポテンシャル理論を採用し、浸水箇所の船底形状を同量の自由表面を持つ矩形の水槽に置き換えるなどの簡単化により、この種の予測手法の一つを提供することとした。なお、計算内部には簡単化による誤差を修正するために実験係数を導入してある。今後、実験データを積み重ねることにより、この実験係数テーブルを充実させ、より実用的な手法に改善していく必要がある。

(5) 出力は運動応答のすべてを表すという意味で、六自由度の運動応答を記述している。しかしながら、その中の前後方向の運動を表す前後動応答は、もともとStrip法の概念に合わないものであるといえる。特にトランサムを持つ高速船型においてはその精度は疑わしい。（しかし、船型が細長くなだらかに変化する船首船尾を持つ一般商船では、実用的な精度であるといえる。）船長/船幅があまり大きくなくトランサムを持つ高速船型の場合の前後動応答は、参考程度との認識が必要である。



## 4 シミュレーションと実艇の比較

シミュレーションの精度を検証するために、実艇による検証実験を実施した。表1に示す24フィートクラスの船型の異なる2艇を外洋で横波を受けるように停止させ、横揺れ角度と波高を計測した。

表1 実験艇のスペック

	A艇	B艇
排水量 (t)	2.550	3.427
重量重心 (m)	-1.456	-1.296
KG (m)	0.736	0.915

慣性装置により2艇の横揺れ角度を計測し、圧力式波高計で実験当時の波高を計測した。波と横揺れ角度の時系列データをそれぞれFFTにかけスペクトルを出し、横揺れ角を波高で割って波高に対する横揺れのスペクトルを導いた。実験結果を図11に示す。同じ条件でシミュレーションを実施したものを図12に示す。

絶対値の誤差はあるが、スペックが異なる船の横揺れ性能を比較するレベルでは満足ゆく結果が得られた。

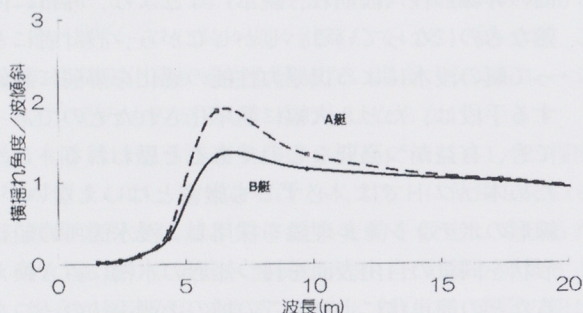


図11 実験結果

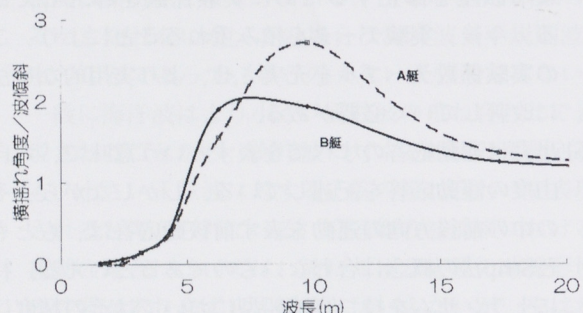


図12 シミュレーション結果

## 5 性能開発システムの概要

今回開発したシミュレーションソフトと、従来から設計で利用されている排水量など計算ソフトとを入力データまわりを中心に一本化し、性能開発システムとしてま

とめた。その概要を図13に示す。

表計算ソフトMicrosoft Excel上で作った船型データで、抵抗性能、既存のUFOシリーズによる復元性能、本報告の横揺れ運動シミュレーション、縦運動シミュレーションが実施できるシステムとなっている。

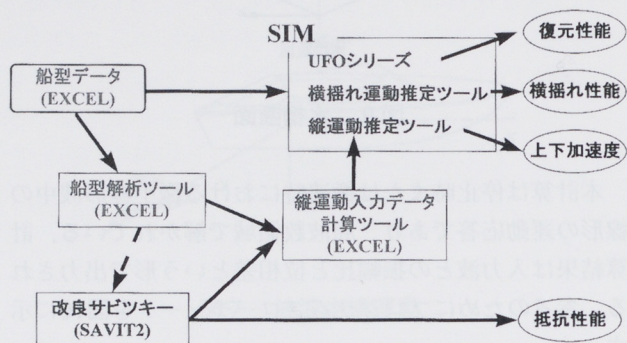


図13 性能開発システムの概要

## 6 シミュレーションの実施例

本シミュレーションソフトを利用し、基本計画を実施し、実験により計画通りの性能が得られた例について述べる。表2に示す既存艇に対して、開発艇は曳き波などの波長の短い波に対して横揺れ性能のよい（横揺れしない）仕様をシミュレーションによって決定した。（図14）

このスペックで開発を進め、実艇で2艇による試験を実施した。その結果を表3に示す。

表2 既存艇と開発艇のスペック比較

	既存艇	開発艇
船 長	10.10m	10.84m
排 水 量	8.0t	9.9t

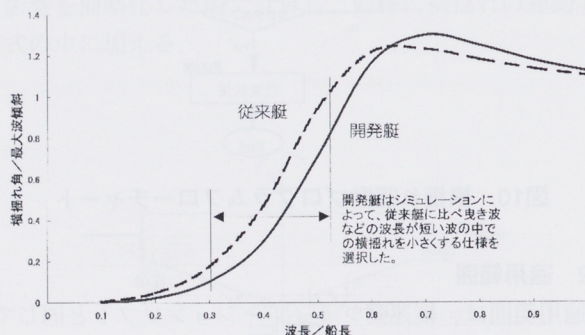


図14 シミュレーションによる開発艇と従来艇の比較



表 3 横揺れ角度の実験結果

	既存艇	開発艇	開発艇／既存艇
実験 1	9.0	6.5	72%
実験 2	7.0	4.5	64%
実験 3	16.5	14.5	88%
実験 4	20.0	14.5	73%

実験 1～4 は発生した曳き波の状態が若干異なるが、2 艇は等しい曳き波のなかで横揺れ角度の計測を実施した。実験結果とシミュレーション結果を比較すると、今回狙ったとおりの性能を達成したといえる。

また、抵抗性能や縦運動、横揺れ性能などすべてを考慮し最適仕様を見いだそうとした実施例もある。

排水量12.5tで全長16mの船を例にすると、スピード、揺れにくさ、酔いにくさ、疲れにくさ、復原性の5項目について、原案仕様に対してよりよい仕様を見いだすために、重心位置、船幅、船底勾配、キール深さの項目をパラメータとして本報告のシミュレーションを用い、実験計画法で最適仕様を検討した。その要因効果の結果を図15に示す。

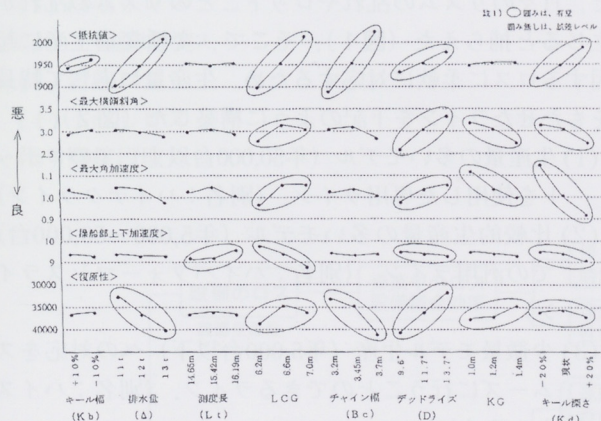


図15 要因効果グラフ

上記結果から最適仕様を選んだモデル仕様が表 4 に示すものであり、その仕様における計算結果が図16である。モデル艇の仕様では、原案仕様に対して揺れにくさや酔いにくさについて大幅な性能アップが期待できることがわかった。

表 4 原案とモデル案の仕様の比較

	原案仕様	モデル案仕様
重心位置	6.6m	6.4m
船 幅	3.7m	3.4m
船底勾配	11.7度	9.6度
キール深さ	現状	+20%

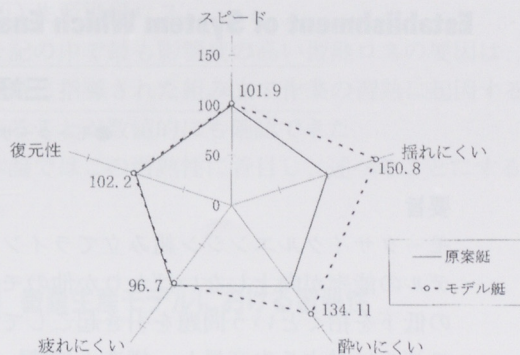


図16 原案艇とモデル艇の性能比較

## 7 むすび

従来、設計段階において把握することが困難であった縦運動や横揺れ運動のシミュレーションを確立することができた。また、これらのシミュレーションと従来の性能推定ソフトと有機的に結びつけ、設計者にとって手軽に利用できるシステムを構築することができた。

今後はシミュレーションツールの精度を向上させるとともに、設計者の仕様勝手がよりよくなるように改良を続けつつもりである。このシステムによって、より性能のよい商品が開発できるようになれば幸いである。

## 参考文献

- (1)元良誠三：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店
- (2)W.Frank, N.Savvesen：The Frank Close-fit Ship-motion Comouter Program, NSRDC Report, 3289 June 1940
- (3)N.Salvesen, E.O.Tuck, O.Faltinsen：Ship Motions and Sea Load, TSNAME, Vol.78, 1970
- (4)池田良穂，梅田直哉：小型ハードチェーン艇の横揺れ減衰力の一推定方法，関西造船協会誌 213号，1990
- (5)田宮真：遊動水の動的影響について，造船協会論文集 第103号，1958

## 著者



神戸 庄二



末森 勝