高速域において抵抗が最小となる高速艇船型

正員 吉 田 靖* 正員 田 中 宏 績*
正員 永 井 保*

Hull Forms of High Speed Craft having smallest Total Resistance at High Speed Range

by Yasushi Yoshida, *Member* Hirotsugu Tanaka, *Member*
Tamotsu Nagai, *Member*

Summary

This paper is concerned with the hull form parameters having smallest resistance at Froude number 3.5 ($= V/\sqrt{L^{1/3}g}$). Using model test data in still water of the high speed craft, and with or without conditions concerning shapes and initial trims, we first determined the hull form having smallest total resistance by applying the non-linear optimization technique.

Second, the deviation of hull form parameters is discussed from the view-point of five ship form elements which were obtained by factor analyses using experimental data. And, then, 95 percentage predictions are pursued to the resistance performance from Froude numbers 0.5 through 3.5.

ま え が き

著者らは、試験結果を用いてフルード数 3.5 において、形態、初期仰角に制限条件を与えない場合、与えた場合において全抵抗を最小にする船型を非線形最適化技法によって求めてみた。

このようにして得られた船型について、試験結果の因子分析に基づく船型 5 要素の見地から総合的に偏差の検討を行ない、フルード数 0.5 より 3.5 までにおける抵抗性能に関して 95% 予測を行なってみた。

記 号 の 説 明

船型要素と抵抗性能に関しては、文献 1) および 2) を参照。

▲: Fig. 2 では、1 次式で求めた船型の偏差と抵抗性能を示す。Fig. 4 では、第 2 主成分まで制限条件として、1 次式によりクラスターから求めた船型の偏差を示し、Fig. 6 では、その船型の抵抗性能を示す。

△: Fig. 4 では、第 3 主成分まで制限条件として、1 次式によりクラスターから求めた船型の偏差を示し、Fig. 6 では、その船型の抵抗性能を示す。

■: △と同様であるが、2 次式によって求めた船型の偏差と抵抗性能を示す。Fig. 2 では、2 次式で求めた船型の偏差と抵抗性能を示す。

Fig. 2 と Fig. 6 において、縦の細実線は R' , 4θ および $4D$ の 95% 予測¹⁾を示す。

Fig. 2 における I は初期船型の抵抗性能を示す。

Fig. 3 においての記号は次のとおり。

(1) Z_3 の数値は、2 次式の船型要素など²⁾で主成分分析した第 3 主成分に関するスコア²⁾。

(2) ①は、クラスター内で初期値とした模型の番号 i を示す。

(3) ㉔のクラスターにおける点線は、船型の特性から、実線で示すクラスターでは初期値が定まらなかったため、非負化定数³⁾を変更したクラスターを示す。すなわち、全長は平均から 2.5σ まで、transom のわん曲度は同じく 3.0σ まで、その他の船型要素は同じく 2.0σ までとして非負化の定数を定めた。

(4) Linear (i) は、クラスターの制限条件を第 i 主成分までとり、1 次式で求めた抵抗性能を示す。ただし、 $i=2, 3$

(5) Quad. は、クラスターの制限条件を第 3 主成分までとり、2 次式で求めた抵抗性能を示す。

1 フルード数 3.5 において最小抵抗となる船型

実験範囲内で、船型要素が実験模型の平均値付近にあって、フルード数 3.5^{1), 2)}における全抵抗を最小にするような船型を非線形最適化技法³⁾によって求めてみた。その結果、Fig. 1 に示すような船型が得られた。Fig. 1 で細い実線は全抵抗を船型要素の線形和として推定した場

* 防衛庁技術研究本部第 1 研究所

Fig. 1 Hull form parameters with smallest resistance through all range

Fig. 2 Factors and resistance performance with smallest resistance through all range

合¹⁾ (以下“1次式”という。), 太い実線は全抵抗を船型要素の線形和のほかに2次の項をも加えた式による推定の場合¹⁾ (以下, “2次式”という。)である。

Fig.1 の船型を用いて, 実験結果の因子分析に基づく船型5要素²⁾の見地から検討を行なった結果を Fig.2 に示す。Fig.2 の左には, 船型に関する5要素すなわち, 形態, chine, 初期仰角, 艇の前部形状および全長とtransomを列挙している。そして, これらの各要素に対しては, 得られた船型と実験した模型の平均からの偏差を標準偏差の単位で記入してある。ここで, ▲は1次式, ■は2次式によって全抵抗を推定した場合の偏差を示

す。さて, 因子ごとに偏差を検討してみることにする。

b_1 を単位長さにとれば, 形態に関しては, 全長が短く, 幅の小さい, そして排水量の大きい船型である。chine の高さに関しては, 全長にわたって低い chine の船型である。初期仰角は大きい船型であり, これは重心位置が後方に寄っていることを示している。艇前部形状については, Ord. 0 における keel の高さと Ord. 2 における chine の高さがともに低い船型である。全長が短くしかも transom が後方に張り出している船型である。

以上のような船型要素をもった船型の 0.5 より 3.5 までの抵抗性能について 95% 予測を行なってみる。Fig.

2 の右には、3.5 までのフルード数に対し、 R' 、 $\Delta\theta$ および ΔD に関して 95% 予測を行なった結果を示す。図では▲と■の位置が接近しているの、抵抗性能を 1 次式で推定しても 2 次式で推定しても、ほぼ同じ結果が得られている。それから抵抗を最小化する初期値としては、1 次式の場合には船型要素の平均値を、2 次式の場合には模型 No. 20 をそれぞれ用いた。Fig. 2 では No. 20 を I で示した。

さて、I と求まった船型について抵抗性能を R' 、 $\Delta\theta$ 、 ΔD の順に検討してみる。

まず R' については、フルード数 3.5 において、 R' が 0.035 から 1 次式では 0.018 に、2 次式では 0.016 に下っている。しかしながら、抵抗係数曲線で last hump 付近となるフルード数 1.0 では R' が 0.092 から 1 次式では 0.128 に、2 次式では 0.127 に上昇している。

次に $\Delta\theta$ について述べると、初期の状態よりもかなり大きな値となっており、特にフルード数 2.5 では約 5 度にもなっている。

また、 ΔD については、フルード数 1.5 で -0.24 程度となり、模型 No. 20 に比べかなり船尾が沈んでいる。また、フルード数が 3.5 では 0.03 となり、かなり浮上していることがわかる。

ところで、2 次式では模型 No. 20 のほかに、No. 6 を初期値としてみたがほとんど同じの抵抗性能が得られている。

2 形態、初期仰角および chine に条件を付加した場合、フルード数 3.5 で最小抵抗の船型

フルード数 3.5 における模型試験では、 R' の平均値が 0.034 であったが、いずれの条件を付加しても得られた船型の R' は 0.020 程度に改善されている。

これらの制限条件は、試験結果の主成分分析によるクラスター²⁾で表現される。ここでは前回²⁾と異なり、2 次式による 14 個の船型要素など¹⁾に関しての主成分分析の結果を中心に述べることにする。主成分分析の結果は、Fig. 3 に示すごとく船型要素の偏差の特性によって 13 種類のクラスターに分れる。ここで分類の基準となった Z_1 、 Z_2 および Z_3 の軸についての意義は、因子負荷量絶対値²⁾の大きい船型要素等に注目すれば次のようになる。すなわち、 b_1 を単位長さにとれば、 Z_1 は形態の大小を示す軸であり、 Z_2 は初期仰角を示す軸であり、そして Z_3 は chine の高さを示す軸である。さて、この Z_1 、 Z_2 および Z_3 によって表現される 13 個の各クラスター内は船型要素の偏差の特性が類似している²⁾から、形態あるいは初期仰角それから chine の特性を保持する必要があるれば、制限条件としては、クラスターの外側を

構成している多面体の内側であるという条件を付与すればよいことになる。例えば、 Z_1 軸の右端の㊸を含むクラスターは、 b_1 を単位の長さにとれば、形態が大きいすなわち船尾幅の小さい特性を持つクラスターであり、左端の㊸のクラスターは、形態の小さいすなわち船尾幅の大きいクラスターである。ただし、クラスターの外側を規定しても、特性は、主成分分析の累積寄与率²⁾によれば 3 軸によって約 86% しか保持できなく、残りの 14% は情報量の損失²⁾となる。ここではクラスター内であるということで第 3 主成分まで条件を付与するほかに、情報量の損失を減少する目的で、第 4 主成分スコア Z_4 が最小値から最大値までの間であるという条件をも付与し、○で示した番号の模型を初期値として、これらの条件内での抵抗最小の船型を非線形最適化技法の適用により求めた。

得られた結果は、クラスターの特性を充分保持した実現可能な船型であるといえる。

さて、このような手順によって 78 隻の模型について 13 個のクラスターすべてにわたって抵抗最小の船型を決定したが、その結果について述べることにする。

2 次式で検討した場合に、船型の特性を表現する第 1 の要因は形態、次いで初期仰角、そして最後に chine である。しかも、これらの要因は相互に無関係である。

次に、これらの要因の特性がよく現われている船型について例をあげて述べることにする。

Fig. 4 には、船尾幅の小さい船型① No. 31 から 36 まで、同じく大きい船型② No. 67 から 72 まで、初期仰角の大きい船型③ No. 1 から 6 まで、同じく小さい船型④ No. 55 から 60 まで、chine の高い⑤ No. 49 から 54 まで、同じく低い⑥ No. 61 から 66 までの船型に関する偏差を示している。図の実線と点線とは試験模型の偏差を第 1 章と同様標準偏差の単位で記入してある。

さて、2 次式で得られた船型の偏差は■で示してある。この結果を 1 次式によって次の 2 とおりの検討を行なってみた。まず、11 個の船型要素で第 3 主成分までとり、情報量の損失軽減のため第 4 主成分スコア Z_4 が最小値以上最大値までの制限で船型を求めると Fig. 4 の△となる。次に近似度を下げて第 2 主成分までとり、情報量の損失軽減のため第 3 主成分スコア Z_3 について前記と同様な方法で条件を付与すると Fig. 4 の▲で示したごとくになり、近似度が粗い場合にはクラスターの制限条件は 5 または 6 となるが、一応抵抗最小の船型が得られる。

得られた偏差は、Fig. 4 の 6 例に共通していえることであるが、試験模型の偏差とはほぼ同様で、そして制限なしの船型の偏差に類似する傾向を示している。しかしな

Fig. 3 Magnitude of R' , $\Delta\theta$ and ΔD

Fig. 4 Analyses by five elements concerning hull form parameters

Fig. 5 Hull form parameters with smallest resistance for models No.31 through No.36

Fig. 6 Resistance performance for models No. 31 through No. 36

から 船尾幅の小さい船型① No. 31 から 36 までの船型では、Ord. 2 における keel の高さが試験模型より高くなっていることである。それから、初期仰角の大きい船型③ No. 1 から 6 までの船型と初期仰角が小さい船型④ No. 55 から 60 までおよび chine の高い船型⑤ No. 49 から 54 までの船型では、いずれも Ord. 0 における keel の高さが大きく、Ord. 2 における keel と chine の高さが大きくなっている。

Fig. 4 以外の船型についても得られた船型の艇前部を検討すると、模型 No. 7 から 12 まで、同じく No. 61 から 66 まで、同じく No. 67 から 72 まで、同じく No. 73 から 78 までの 4 種類のクラスターを除けば、すべて艇の前部が高くなっている船型である。

さて、Fig. 4 の船型について、抵抗性能を予測してみることとする。

まず、船尾幅の小さい船型① No. 31 から No. 36 までのクラスターからは、Fig. 5 のような船型が得られ、この抵抗性能は Fig. 6 に示すごとくなる。また一方、クラスター内の代表的な船型 No. 31 とははじめに採用した船型 No. 32 に対して、 R' 、 $\Delta\theta$ および ΔD を図示すると Fig. 6 のようになる。

Fig. 6 からわかるとおり、得られた船型は制限なしの場合と同様な傾向を示している。しかし、last hump 付近となるフルード数 1.0 での R' は、他のクラスターに比べて低めになり、フルード数 2.5 でのトリム角も他のクラスターに比べて低めにでている。

本クラスター以外の船型についても同じ要領で予測を行なった。その結果、last hump 付近フルード数 1.0 で R' が最大になり、フルード数 3.5 では R' が最小となる。また、 $\Delta\theta$ はフルード数 2.5 において最大となる。それから ΔD は、フルード数 1.5 において最小となり、フルード数 3.5 において最大値となる。各フルード数における最大および最小の抵抗性能をクラスターごとに示すと Fig. 3 のごとくなる (Fig. 3 参照)。

船尾幅の大きい船型② No. 67 から No. 72 までは、Fig. 3 ㊸を見ればわかるとおり、フルード数 1.0 における R' も、フルード数 2.5 における $\Delta\theta$ もともに高くなる。

また、初期仰角の大きい船型③ No. 1 から No. 6 までは、フルード数 1.0 における R' がやや高めにでるし、フルード数 2.5 におけるトリム角は増加する。

それから、初期仰角の小さい船型④ No. 55 から 60 までは、フルード数 1.0 における R' があまり大きくならない。

次に、chine の高い船型⑤ No. 49 から 54 までは、船型①と同様、フルード数 1.0 における R' があまり大きくならない。

また、chine の低い船型⑥ No. 61 から 66 までは、フルード数 1.0 における R' とフルード数 2.5 における $\Delta\theta$ とは、ともに高くなる。しかしながら、フルード数 3.5 における R' は、制限なしの船型と同程度に低くなる。

次に、 ΔD に関しては、全クラスターを通じ類似の傾向 (Fig.3 参照) をとっている。

以上求められた船型の抵抗性能についてまとめてみると次のようになる。

(1) 13 クラスター全部についてフルード数 3.5 の R' は当初平均 0.034 が、0.020 程度に低下し、改善されている。

(2) 船尾幅の大きい船型、初期仰角の大きい船型、低い chine の船型では、 R' は last hump 付近フルード数 1.0 で高くなっている。

(3) b_1 単位で中型以下の船型では、フルード数 2.5 において最大トリム角が当初よりも増加している。特に chine の低い船型では著しく大きなトリム角となっている。

(4) 浮上変化量については、いずれの船型でも同様の傾向を示している。すなわち、フルード数 1.5 での実験模型の ΔD の平均は -0.15 であったが、得られた船型では -0.20 程度に沈み、フルード数 3.5 で当初平均 -0.03 であったのが 0.02 程度に浮上している。

ま と め

著者らは、前回報告した高速艇の平水中水槽試験結果を用いて、高速域フルード数 3.5 において全抵抗を最小にする船型を非線形最適化技法によって求めた。得られた船型について、船型 5 要素の立場から偏差について、検討し、併せて抵抗性能の 95% 予測を行なった。

その結果、制限なしの場合では、船尾幅が大きく、低い chine で、初期仰角が大きく、艇前部の低い、そして全長が短くかつ transom が後方に張り出した船型を得た。この船型の抵抗性能は、抵抗係数曲線では last hump 付近フルード数 1.0 で抵抗係数が高くなり、また

フルード数 2.5 における最大トリム角は実験模型の平均 2 度 19 分が約 5 度に上昇している。

また、主成分分析を行なったクラスター内において、形態、初期仰角および chine に諸条件を付与した船型では、実験模型での抵抗係数の平均は 0.034 であったが、得られた船型では 0.020 程度に改善されている。船尾幅の大きい船型、初期仰角の大きい船型、低い chine の船型では last hump 付近フルード数 1.0 で抵抗係数が高くなる。それから、 b_1 単位で中型までの船型では、フルード数 2.5 における最大トリム角が大型の船型よりも増加してくる。特に、低い chine の船型では著しく大きなトリム角となっている。

終りに臨み、本研究を行なうにあたり、絶えず激励を賜わり、種々のご教示と有益なご意見をいただきました、田宮 真教授はじめ試験水槽委員会第 1 部会関係各位、寺沢一雄名誉教授、丹羽誠一専務理事、高橋幸伯教授はじめ船舶用軽金属委員会関係各位、並びに日本鋼構造協会最適化問題小委員会樋口道之助委員長はじめ近藤 潔氏、杉田進一氏、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 永井 保, 田中宏績, 吉田 靖: 高速艇に関する平水中水槽試験結果の統計解析, 日本造船学会論文集, 第 137 号, (昭和 50 年 6 月).
- 2) 吉田 靖, 永井 保: 高速艇の平水中水槽試験結果に関する主成分分析と因子分析, 日本造船学会論文集, 第 140 号, (昭和 51 年 12 月).
- 3) Kowalik, J. and N. R. Osborne.: Methods for Unconstrained Optimization Problems, American Elsevier Publishing Company, (1968 年).