

# 船型試験における波形解析への等価特異点の適用

三船 正純\*

Masazumi Mifune

本技術紹介は船型試験における波形解析法に等価特異点法を導入することの有用性を概説する。水槽試験を援用して造波抵抗の少ない船型を開発する有用な手段として、船が起こす波のスペクトル解析(波形解析)が挙げられる。その際、一般に用いられるNewman-Sharma法では模型船の速度が早くなると往々として計測波数が不足し解析誤差が大きくなる。一方、本報で紹介する等価特異点法では原理的に計測波数不足による誤差が生じないため、寸法的に制約のある水槽設備でもこの方法により高速船の波形解析を精度良く行うことが可能となる。

キーワード：波形解析、Newman-Sharma法、等価特異点法、造波抵抗、波形抵抗

## 1. はじめに

船が起こす波がどのようなものであるかを計測することは、起こす波を少なくし、ひいては波による流体抵抗(造波抵抗)を低減する上で、非常に重要である。そのため船型試験水槽では水槽側壁等に波高計を設置した区間を設け、その区間を模型船に通過させて船が起こす波を計測すること(波形計測)が、一般的に行われている。その解析には波形解析と呼ばれる計測波形の拡散方向成分に関するスペクトル解析が、波の素性を分析するのに有用な手段として重用されている。

目を転じると昨今、飽和しつつある陸上流通を補う目的で海上物流へのモーダルシフトが果たす役割は大きくなり、海上輸送のスピードアップの要請は増しつつある。このような背景から船舶の高速化が進んでおり、試験水槽で高速船の実験を行うことも増えている。しかしながらその際の波

形解析において従来用いられてきたNewman-Sharma法は船が高速になると解析誤差が大きくなるため、船型開発に支障を生じていた。

本紹介では先ず、通常用いられているNewman-Sharma法<sup>1), 2)</sup>(以下、N-S法と略す)が、高速船の試験解析に用いられる場合に遭遇する問題点に触れる。次にその対策として導入した等価特異点法について概説し、最後に両者を比較検討することにより等価特異点法の妥当性および有用性を検証する。

## 2. 従来法(N-S法)の問題点

船の波は、船速に依らず一定の角度(この現象を数学的に解明した人名<sup>3)</sup>を採りKelvin角と呼ばれ、航路と19度28分を為す)で拡散していく(図1参照)。そのため対岸から反射した波が本来の計測波形に干渉することを避けるには、船速に係わらず水槽対岸が船体からずっと遠いことが必要となるが、船型水槽という制限のある設備では自

\* 研究開発事業部 試験・解析技術部 次長

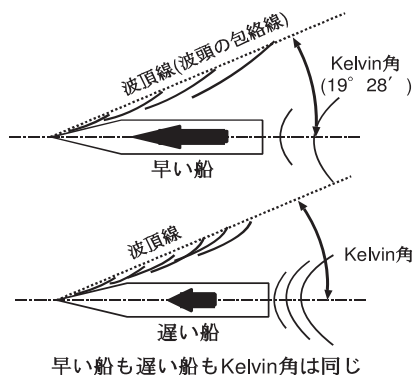


図1 Kelvin角

ずと限界がある。そのため水路幅10mのIHI船型試験水槽では、船首端から35m後方までを計測区間としている。(図2参照)。N-S法では原理上、無限後方までの波形データが必要となるが、この計測区間の制限のため、仕方なく計測可能区間で得られた波形から後方波形を外挿推定し解析している。この制限がもたらす波形解析の誤差を一般に打ち切り誤差(truncated error)と呼んでいる。

一方、船が起す水波は船の前進速度の自乗に比例して波長が長くなる。そのため限られた計測区間で計測できる波数は模型船の速度が早くなるにつれ少なくなり、後方波の推定精度が悪くなって打ち切り誤差も大きくなってしまう。図3にコンテナ船とフェリーの計画速度(フルード数0.24と0.33)での波形計測例を示す。ここでフルード数とは次式で定義される船の前進速度の無次元値の一つで、その値が大きいほど船が早い。

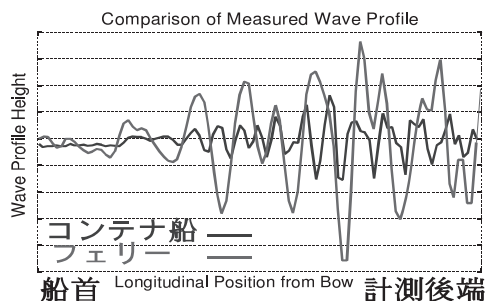


図3 コンテナ船とフェリーの計測波形

$$\text{Froude Number} : F_N \equiv \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (1)$$

where,  $V$  : ship advancing speed  
 $g$  : acceleration of gravity  
 $L$  : ship length

図3によれば、早いスピードで計測されたフェリーの波はコンテナ船に比べ振幅こそ大きいものの、波の山数(波数)はコンテナ船の半分程度しか計測できていないことが分かる。

### 3. 等価特異点法の概説

前節で例示したような少ない計測波数で波形解析を行うには、N-S法のような無限後方までの波形データに依らない解析法が必要となってくる。そこで有用となってくるのが線形造波理論に基づく等価特異点法であり、本節ではこの手法を概説する。

船の造波のような攪乱に伴う水波は、線形造波理論に基づけば攪乱源を数学的特異点に置き換え、

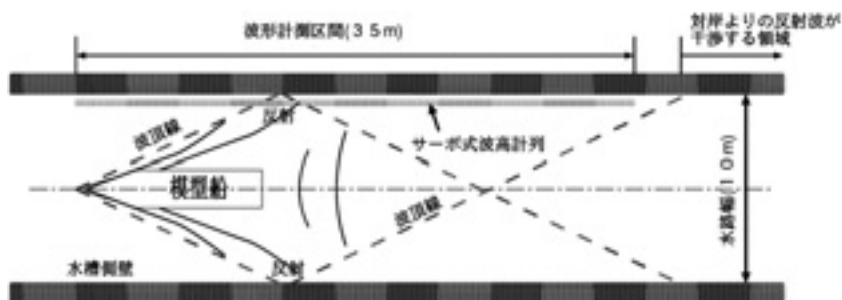


図2 水槽壁での波反射と計測区間

特異点の位置と種類とその強さに関する境界値問題に帰着することができる。つまり水を攪乱する船体を、それと同じ水波を生じさせる特異点に置き換え、かつ波形が与えられればその特異点の分布を一意に求めることが可能となる。また今仮りに特異点の分布が与えられると、その特異点が生じる波紋や振幅関数と呼ばれる周波数分布（スペクトル）を求めることができる。つまり線形造波理論の仮定に基づけば波形、特異点分布および振幅関数の三者が一対一対応となるが、等価特異点法とはこの三者関係を利用するもので波形から直接、振幅関数を求めるN-S法とは特異点分布を介すことが異なる。以下に特異点の一例である点吹き出しが起こす波形と振幅関数を示すが、定式化の課程は紙面の都合により線形造波理論の専門書<sup>4)</sup>に譲り、最終結果のみを記す。

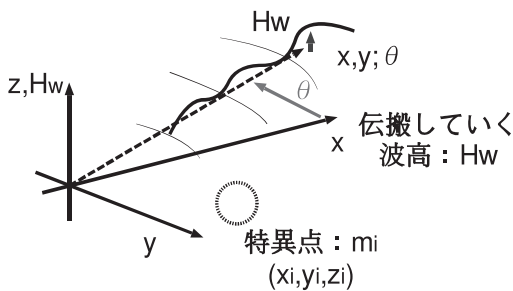


図4 特異点:  $m_i$  から生じる波:  $H_w$

前進速度で無次元化された強さ  $m_i$  の  $M$  個からなる没水吹き出し群が生じる波高:  $H_w^{equiv.}$  は次式で表される。

$$H_w^{equiv.} = \frac{4K}{V} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \{ P \cos(K \cdot p \cdot \sec^2 \theta) + Q \sin(K \cdot p \cdot \sec^2 \theta) \} \sec^3 \theta d\theta \quad (2)$$

where,

$$\left. \begin{aligned} P \\ Q \end{aligned} \right\} = \sum_i^M m_i \frac{\cos}{\sin} \{ K \sec^2 \theta (x_i \cos \theta + y_i \sin \theta) \} e^{K \cdot p z_i \sec^2 \theta}$$

$$p = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta$$

$$K = \frac{g}{V^2}$$

式(2)を見て分かるとおり、特異点を作る波形やそれに伴う振幅関数:  $P, Q$  は特異点の強さ:  $m_i$  に関して線形であり、特異点の位置:  $(x_i, y_i, z_i)$  を仮定すれば波形と特異点強さおよび振幅関数が一次従属の関係をなす。これが線形造波理論と呼ばれる所以である。この特異点を含む積分方程式で表される波高:  $H_w^{equiv.}$  が計測された波高データ:  $H_w^{exp.}$  となるように特異点強さを解けば振幅関数:  $P, Q$  を数値的に求めることができる。

以上の手続きで気づくことは、離散化された等価特異点の個数 ( $M$  個) だけ実験の波高データ:  $H_w^{exp.}$  があれば、特異点強さを未知数とする連立方程式は成立ち、また実験による計測波高:  $H_w^{exp.}$  の個数 ( $N$  個) が  $M$  個より多い場合は最小自乗法等により計測波高との誤差が一番小さくなる特異点の強さ:  $m_i$  を求めることができるのである。これはN-S法で問題となった外挿による無限後波の計測データを要しないことを意味する。

最小自乗法に基づけば、計測された波高:  $H_w^{exp.}$  と特異点による波高:  $H_w^{equiv.}$  の誤差:  $E$  の自乗和を最小にする特異点強さ:  $m_i$  の条件は、次式となる。

$$\frac{\partial \sum_j^N E_j^2}{\partial m_i} = 0 \quad (3)$$

$$\text{where, } E_j = H_{w_j}^{exp.} - H_{w_j}^{equiv.}$$

式(3)に式(2)を代入すると  $M$  個の未知数 (特異点強さ) に対し、 $M$  個の線形条件式が得られ陽に特異点強さを解くことができる。

また線形造波理論のさらなる長所として振幅関数:  $P, Q$  が与えられると、丸尾の運動量理論<sup>5)</sup> に従い、波が船体から伝搬する運動量 (波が後方へ伝搬することにより消失されるエネルギー) を求めることができる。このように後方に伝搬する波 (*free wave*) に伴う船体抵抗を、波形抵抗と呼んでいる。この丸尾理論に従えば、波形抵抗:  $R_{wp}$  は

次式で与えられる。

$$R_{Wp} = 8\pi\rho k^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (P^2 + Q^2) \sec^3 \theta d\theta \quad (4)$$

where,  $\rho$  : density of water

#### 4. 等価特異点法の検証

本節では前節で概説した等価特異点法による波形解析の妥当性を、低中速船および高速船で検証する。

##### 4.1 中低速域における検証

中低速船の代表としてコンテナ船の波形を解析してみる。コンテナ船程度の中低速船は通常用いられるN-S法でも妥当な解析結果が実績として得られているものである。

**波高の再現性** 振幅関数から任意点の波高が再現できることは既に述べたが、計測波高の波形解析をN-S法と等価特異点法で解析した振幅関数から、計測波形を再現してその両者を比較してみる。

図5に、コンテナ船における計測波形と両解析法から再現した波高の比較を示すが、等価特異点法の波高再現性は中低速船で実績のあるN-S法によるものと比べ、中低速でも遜色なく波高を再現できていることが分かる。

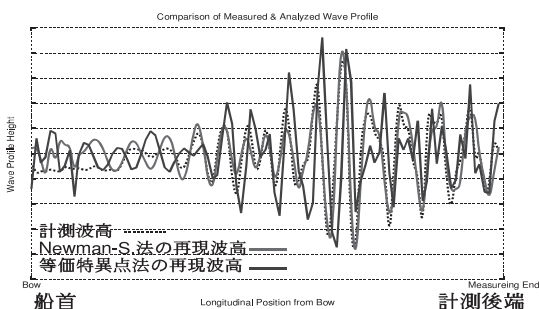


図5 コンテナ船の計測波高と再現波高

**波形抵抗** 式(4)により、振幅関数から波形抵抗を求めることができるが、両解析法による振幅

関数に基づく波形抵抗の比較を模型船に働く力から直接求めた造波抵抗と共に図6に示す。

造波抵抗は一般にその成分として波形抵抗と、船体の周りで局所的に波が崩れ、渦、泡や飛沫となって後方に伝わる波を形成せずに散逸する運動量の損失成分に大別される。(この運動量損失による成分を馬場ら<sup>6)</sup>は、船体後方において最終的には熱エネルギーに変わる渦エネルギーの収支を計測し、その成分分離の妥当性を実験的に検証し、この波として伝わらない造波抵抗成分を砕波抵抗と呼ぶことを提唱した。)

造波抵抗の内、波形抵抗と砕波抵抗の成分比は、速度変化に対しあまり急激な変化をすることなく、また高速になるほど波が崩れやすくなるため砕波抵抗の成分割合が増える傾向となるのが一般的である。ここで図6を鑑みると両解析法の波形抵抗値は低速で殆んど同じ結果を与え、早くなると乖離しているがN-S法では波形抵抗の割合が増えてしまっており、等価特異点法の方が妥当な解を与えている。

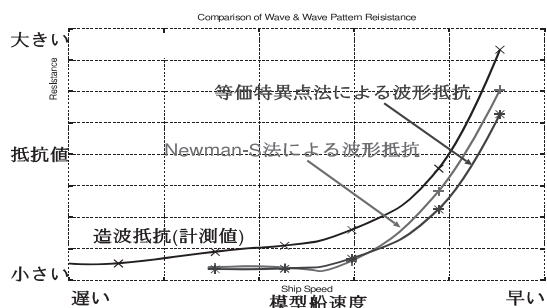


図6 コンテナ船の造波抵抗(計測値)と波形抵抗(解析値)

##### 4.2 高速域における検証

次にN-S法が苦手とする高速船の波形解析を高速船の代表としてフェリーで検証する。

**波高の再現性** 先ず前例と同様、振幅関数からの波形の再現性を比べてみたものを図7に示す。

図7によれば少ない波数で無限後方まで外挿した波形に基づくN-S法より、等価特異点法の方が計測波形の再現性は良好であることが読み取れる。

**波形抵抗** 最後にやはり同様に夫々の波形抵抗を造波抵抗計測値と共に図8に示す。図8によれば打ち切り誤差が介入し、得られた波形抵抗は速度変化に対して滑らかさが失われている。一方、等価特異点法に基づく波形抵抗は造波抵抗と比較しても、妥当な計算結果となっていることが分かる。

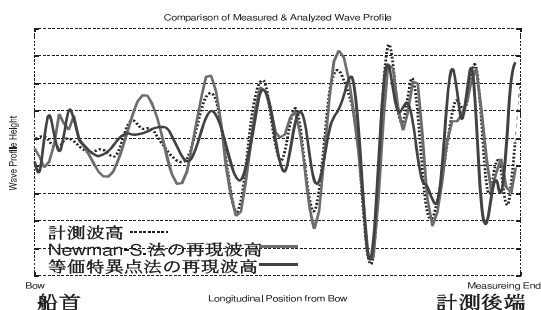


図7 フェリーの計測波高と再現波高

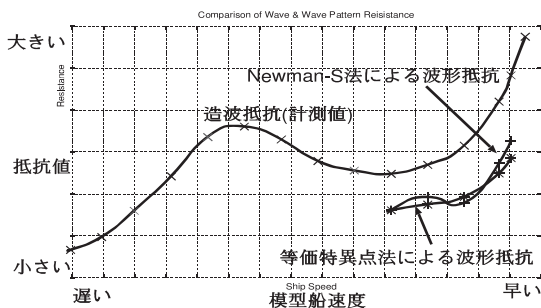


図8 フェリーの造波抵抗(計測値)と波形抵抗(解析値)

## 5. まとめ

本紹介ではまず、尺度的制限のある試験水槽において特に不都合となる高速船の波形解析に対し、等価特異点法による解析を導入することの意義と理論的根拠を概説した。そして次に従来法の代表であるN-S法との解析結果を水槽試験結果と

比較することでその有用性を検証した。その結果は以下の2点としてまとめられる。

- ・高速船への対応を目的として導入された等価特異点法であるが、中低速船でも実績あるN-S法に対し、遜色ない解析結果が得られる。

- ・高速船ではN-S法では不条理な結果しか得られないケースでも打ち切り誤差が原理的に介入しない利点を生かし、妥当な解析結果を得ることができる。

IICでは今後とも、水槽試験法およびデータ解析法に関する研鑽を図り、お客様に出来るだけ精度の良い試験データをリーズナブルにご提供していく。

## 参考文献

- (1) J. N. Newman : The Determination of Wave Resistance from Wave Measurements along Parallel Cut, *Proc. Int. Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann arbor, Michigan, 1963*
- (2) S. D. Sharma : A Comparison of the Calculated and Measured Free-wave Spectrum of an Inuid in Steady Motion, *Int. Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann arbor, Michigan, 1963*
- (3) L. Kelvin : On Ship Waves, *Proc. Inst. Mech. Eng., 1887*
- (4) 例えば、造波抵抗シンポジウムテキスト：日本造船協会, 1965
- (5) H. Maruo : Calculation of Wave Resistance of Ship, the Draft is as small as the Beam, *日本造船協会論文集 第112号 pp.161, 1962*
- (6) E. Baba : Wave Breaking Resistance of Ships, *Int. Seminar of Wave Resistance, 1973*



研究開発事業部  
試験・解析技術部  
次長

三船 正純

TEL. 045-759-2085  
FAX. 045-759-4321