Lewis-Formに基づく航跡波造波モデルの開発と NOWT-PARIへの導入

樋口 直人¹・平山 克也²

¹ 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:higuchi@pari.go.jp

² 正会員 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:hirayama@pari.go.jp

港内水域が高度に利用された現在の港湾では、港外から来襲する波浪だけでなく、港内の航行船舶により生じる航跡波などの港内波浪が港内静穏度に与える影響も考慮する必要がある。そこで本研究では、海岸工学分野で提案された従来の航跡波造波モデルを参考とし、航路設定に関する平面2次元場への拡張性や対象船舶の汎用化が期待される新たな航跡波造波モデルを開発して、港内波浪場の算定に広く活用されているNOWT-PARIへ導入した。船型のモデル化では従来の放物線近似に加え船体動揺計算にも活用されるLewis-Formによる近似も試みた。この結果、既往の実験結果に対して放物線近似と同等以上の再現性が確認され、様々な船型に対する航跡波の造波が可能となったが、計算格子幅に依存する本モデルの造波特性に関する改善は今後の課題である。

Key Words : *Lewis-Form, Boussinesq model, ship wave, block coefficient, harbor tranquility*

1. はじめに

港内静穏度解析では、一般に、港外から来襲する波浪による影響について調査することを目的とし、港内波浪場や荷役稼働率の解析結果から、最適な防波堤配置等の施設計画や荷役岸壁の運用方法について検討する。しかし、港内水域が高度に利用された現在の港湾においては、港外から来襲する波浪のみならず、船舶の入出港時に発生する航跡波が、周囲の船舶の航行、荷役の安全性に悪影響を与える事例が散見される。そこで今後は、港内で発生する波浪についても把握する必要がある。

航跡波に関する研究は、主に造船工学分野においてなされているものと思われる。しかし、船体の推進力を効率的に利用することを目的とした船型による造波抵抗や操船性に関する検討が多数を占め、発生した航跡波の伝播や変形に関する検討はほとんど行われていない。一方、海岸工学分野では、谷本ら¹⁾や小林ら²⁾により航跡波の造波モデルが提案され、数例の実験結果³⁾を用いた精度検証や数値実験がなされている。しかし、計算格子軸に沿った航路に、船首、船尾の区別がないスレンダーな船型の船舶を航行させる状況では、上述したような港湾利用の実務に広く活用することは未だ難しいと思われる。

そこで本研究では、港内で発生・伝播する航跡波の再現計算を可能とするために、平面2次元場で航路を自由

に設定でき、かつ将来的に様々な船舶を対象とする可能性を秘めた航跡波の造波モデルを提案した。また、既往の実験結果や計算結果、及び現地観測結果をもとに別途提案された船種別の推定式に対する再現計算を行い、新たに開発した本モデルの妥当性を検証した。

2. 航跡波造波モデルの開発

(1) 航跡波造波モデルの概要

本研究では、港内静穏度解析の実務に広く利用されているブシネスクモデル；NOWT-PARI⁴⁾ ver4.6c8aに対し、航跡波造波モデルを新たに付加した。したがって、造波された航跡波の伝播・変形は、沖から入射した波と同様、ブシネスク方程式を用いて計算される。

航跡波の造波は谷本ら¹⁾に倣い、船舶の進行方向を正とする x 軸に対し、船速 U と船舶の断面積 S に依存する流量 Q_y の湧き出しと吸い込みを移動境界によって与え、式(1)のように表現した。なお、 α は船舶の線状近似に伴う中央横断面積係数である。また、 m は本研究で導入した後述する造波モデル補正係数である。

$$Q_y = \pm \frac{1}{2} U m \alpha \frac{ds}{dx} \quad (1)$$

ここで、計算領域内での Q_y の与え方について、谷本ら

¹⁾のモデル（以下、谷本モデルと呼称）ではスタッガード格子の境界上に集約して与えるようであるのに対し、本研究では航路設定の平面2次元場への拡張性を考慮して1格子分の幅を設け、従来の造波境界と同じ線境界入射法⁵⁾を両側面に適用して、それぞれ Q_s の正負別に与えている。したがって、本モデルでは式(1)によって造波される航跡波が格子幅に依存することから、この補正係数 m （谷本モデルに対しては $m=1$ ）を導入した。なお、船舶を表す1格子幅の領域は、船舶を透過する波エネルギーは非常に小さいとみなしスポンジ層として設定した。

一方、船幅は格子幅に依存せず式(1)の S によって表現することは、両モデルに共通している。以下では、この S のモデル化について詳述する。

a) 放物線近似

谷本ら¹⁾は、船型による断面積の変化を式(2)のように放物線で近似（以下、放物線近似と呼称）した。ここで、 S_0 は船幅 B に喫水 d を乗じた中央断面積とし、 L_{pp} は船舶の垂線間長、 x_s は船舶の中央からの距離である。

$$S(x_s) = S_0 \left[1 - \left(\frac{2x_s}{L_{pp}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

b) Lewis近似

表-1 Lewis⁹⁾が提案した慣性係数の一覧

ステーション 番号	慣性係数	ステーション 番号	慣性係数
St.00	0.91	St.05	1.14
St.01	0.91	St.06	1.14
St.02	1.00	St.07	1.03
St.03	1.10	St.08	0.90
St.04	1.14	St.09	0.78

図-1 Lewis-Formを用いた船体の各断面形状

図-2 Lewis-Formを用いた船体の3Dイメージ

本研究では、船体動揺計算において船舶の断面積分布の算出方法の1つであるストリップ法に良く用いられるLewis-Form⁹⁾（以下、Lewis近似と呼称）を新たに適用した。Lewis近似では、円断面を写像関数として等角写像することにより、船体断面に近い形状を得ることが可能である。この手法を用いることで、船体形状の自由度が高くなり、様々な船舶を表現した計算が可能となる。

まず、任意位置 x_s の船体断面の座標値 y 、 z はそれぞれ式(3)および式(4)で与えられる。また、式(3)、(4)を式(5)によって積分することで、任意位置 x_s における船体断面の断面積 S_{x_s} を求めることができる。さらに、これらの式に用いる各係数は式(6)～(9)によって与えられる。ここで、 a_1 、 a_3 は y 、 z を求めるための係数であり、 C は慣性係数、 M は縮減係数、 H は船幅喫水比である。ただし、船体の断面形状を支配する慣性係数 C はLewis⁹⁾が提案した表-1を準用することとした。すなわち、St.00が船首側、St.09が船尾側であり、図-1に示すように、慣性係数が大きいほど断面形状が太り、小さいほど痩せる傾向にある。また、これらを繋げた3次元形状を図-2に示す。Lewis近似で得た船型は実際とよく似た形状となっている。

$$y(\theta) = M \{ (1 + a_1) \sin \theta - a_3 \sin 3\theta \} \quad (3)$$

$$z(\theta) = M \{ (1 - a_1) \cos \theta + a_3 \cos 3\theta \} \quad (4)$$

$$S_{x_s} = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} |y(\theta)_n z(\theta)_{n+1} - z(\theta)_n y(\theta)_{n+1}| d\theta \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{(1-H)(1+a_3)}{(1+H)} \quad (6)$$

$$a_3 = H \left[\frac{-(2CH - H + 1) + (H + 1)\sqrt{4C - 3}}{2(CH^2 - H^2 - H - 1)} \right] \quad (7)$$

$$M = B/2(1 + a_1 + a_3) \quad (8)$$

$$H = B/2d \quad (9)$$

(2) 航跡波造波モデルの基本特性

ここでは、谷本モデルを用いた小林ら²⁾と同様、倉田ら³⁾の水槽実験に対する再現計算を行い、導入した航跡波造波モデルの妥当性を確認した。

倉田ら³⁾は、長さ40m、幅6.7mの水路の中央において、模型船を滑走させることにより生じた航跡波を、航路から直角方向に0.5m間隔で5台の波高計（航路に近い側から順にG1～G5）により計測した。ここで、模型船の諸元は垂線間長 $L_{pp}=1.36$ m、船幅 $B_s=0.243$ m、喫水 $d=0.098$ mである。また、水深 $h=0.146 \sim 0.246$ mに対し船速 U を $0.56 \sim 1.88$ m/sに変化させて、航跡波の最大波高 H_{max} などを整

図-3 放物線及びLewis-Formで近似した断面積分布の比較

理した。なお、このときの水深フルード数 ($U^*(gh)^{0.5}$) は $F_h=0.42\sim1.40$ であった。

図-3に、本モデルに用いた放物線近似及びLewis近似による船舶の断面積分布を示す。 x_s/L の正値は船首側、負値は船尾側を示す。放物線モデルに比べLewisモデルでは、全体的に断面積が小さくなるが、船尾ではLewisの方が肥大していることが確認できる。

ところで、この断面積分布を船長方向に積分すると、各造波モデルで設定した船舶の没水体積 V_s^* が得られる。しかし、一般に、これは実物の没水体積 V_s と一致しないため、放物線近似を用いた小林ら²⁾の再現計算では、航跡波の計測値に対する計算値の誤差が最小となるような中央横断面係数 α : $\alpha_p=0.62$ を導入した ($V_s=\alpha V_s^*$)。ここで、実物の V_s を垂線間長 L_{pp} 、船幅 B_s 、喫水 d からなる直方体の体積で除したものはブロック係数と呼ばれる。そこで、同様にモデルの V_s^* を直方体の体積で除したものをモデル体積率 MC と定義すると、放物線近似、Lewis近似ではそれぞれ $MC=0.67, 0.58$ で一定となる。これらを踏まえ本研究では、倉田ら³⁾が用いた模型船のブロック係数は0.415であったこと、及び小林ら²⁾の再現計算においてもLewis近似を用いた場合には $\alpha_1=0.72$ の中央横断面係数が推定されたであろうことが推測された。

a) 造波モデル補正係数の推定

小林ら²⁾が用いた谷本モデルとは異なり、本研究で用いた新たな航跡波造波モデルでは、式(1)を線状ではなく1格子分の幅を設けて適用した。そこで、格子幅による影響を補正するために導入した係数 ml は、谷本ら¹⁾の方法を一部参照しながら以下のように推定した。

まず、放物線近似、Lewis近似を用いた本モデルによる式(1)中の $m\alpha$ の最適値をそれぞれ $\alpha_{mp}=m^*\alpha_p$ 、 $\alpha_{ml}=m^*\alpha_1$ と定義した。ここで、 α_p 、 α_1 は上述した倉田ら³⁾の模型船に対する中央横断面係数である。

次に、Lewis近似を用いた本モデルを例に、 $h=0.146\text{cm}$ 、 $F_h=0.91$ として得られた倉田ら³⁾の実験結果を用いて、最適値 α_{ml} の推定方法について述べる。なお、小林ら²⁾と同様、計算に用いた格子幅は $\Delta x=0.075\text{m}$ とした。図-4では、各 $m\alpha$ 値に対して算定された各測点での航跡波の最大波高 $H_{\max}$ の変化を喫水 d で無次元化して示した。また、横軸に平行な各線は計測値であり、各測点での計算値と計

図-4 補正係数 $m\alpha$ による無次元最大波高 $H_{\max}/d$ の変化

図-5 補正係数 $m\alpha$ に対する誤差の変動係数の逆数の変化

図-6 船幅と格子幅の比 $B_s/\Delta x$ に対する最適な $m\alpha$ 値の変化

測値の交点が最適な $m\alpha$ 値になると思われるが、この値は $0.52\sim0.66$ にばらつく (平均値 0.59)。そこで、各 $m\alpha$ 値での計算値の誤差に対する変動係数を求め、この逆数が最小となる横軸の値を最適値 α_{ml} とした。ここで、変動係数は標準偏差 σ と平均値 μ を用いて $CV=\sigma/\mu$ と定義され、平均値の大きさによる影響を受けずに異なる標本間のばらつき具合を比較する際に用いられる。ここではこの逆数が誤差の平均値の大小関係を示すことに着目した。

放物線近似を用いた本モデルに対する最適値 α_{mp} の推定結果も含め、 $m\alpha$ 値に対する各計算値の誤差の変化を図-5に示す。また、図には合わせて、谷本ら¹⁾の再現計算結果に加え、格子幅を $\Delta x=0.042\text{m}$ とした場合の計算結果も示した。ここで、格子幅 Δx の影響は船舶諸元のうち船幅 B_s と密接に関係することから、凡例にはこれらの比 $B_s/\Delta x$ の値を示してある。図より、谷本モデルでは同様に最適値として $\alpha_p=0.62$ が推定されることがわかる。

さらに、放物線近似、Lewis近似を用いた本モデルの各最適値を $B_s/\Delta x$ 値に対してプロットした結果を図-6に示す。なお、図には合わせて、格子幅 $\Delta x=0.033\text{m}$ として得た結果もプロットした。各モデルの最適値及びこれら

を中央横断面積係数 α で除して得たモデル補正係数 m は
いずれも、 $B_s/\Delta x$ 値が大きくなるにつれて減少すること
がわかる。なお、ここでは仮に対数曲線で近似したが、
これらの近似式は、ここで対象とした船舶諸元に対して
のみ有効であることに注意されたい。

b) 航跡波の再現性

前項で着目した再現計算結果 ($h=0.146\text{cm}$, $F_h=0.91$)
のうち、航路から1.5m離れた地点G3で計算された航跡
波の波形を倉田らの計測結果に重ねて図-7に示す。なお、
これらの位相は最大波が互いに重なるように調整した。

放物線近似及びLewis近似を用いた本モデルはいずれ
も、谷本モデルと同様、最大波周辺の波形を概ね再現で
きている。しかし、いずれの造波モデルとも実験結果に
比べ、船舶の先端に発生するソリトンや最大波の後に続
く後続波の波高を過大に造波しているようである。

c) 航跡波の最大波高の再現性

水深フルード数 F_h によって変化する航跡波の無次元最
大波高 $H_{\max}/d$ について、航路から0.5m離れた地点G1で
の算定結果を実験結果とともに図-8に示す。 $F_h=0.8\sim 1.0$ 付
近で $H_{\max}/d$ が急激に大きくなるのは、船舶の先端に発生
するソリトン波によるものである。一方、それより小さ

図-7 航跡波の波形の再現性 (航路から1.5m地点: G3)

(a) 放物線近似

(b) Lewis近似

図-8 水深フルード数 F_h による最高波高 $H_{\max}$ の変化 (G1)

な F_h 値に対する $H_{\max}/d$ は船舶の後方で発生する後続波に
よるものであり、ソリトン波に比べると小さいものの、
 F_h 値によっては喫水 d の20%程度にまで達するため、港
外に比べ船速が遅い港内においても、航路水深が比較的
浅い場合には注意が必要である。本モデルによる計算結
果はいずれも F_h 値が小さい場合に若干過大ではあるが、
上述した特徴を比較的よく再現していることがわかる。
また、 $F_h < 0.9$ における実験値との相関係数は、放物線近
似(0.86)に比べ、Lewis近似(0.92)では僅かに向上する。

3. 航跡波の浅水・屈折変形の再現性

ここでは、前章と同じ模型船を想定し谷本ら⁷⁾が実施
した平行等深線海岸における航跡波の屈折・浅水変形計
算を対象として、これと同じ計算を放物線近似、Lewis
近似を用いた本モデルにより実施し、両計算結果を比較
した。ただし、計算は縮尺1/60に対して現地量で行った。

(1) 計算条件

平行等深線海岸に沿った水深15mの航路の沖側は一定
水深、岸側は水深1.5mに至る勾配1/50の一樣斜面とした
海底地形を想定し、航路に沿った船の進行方向をx軸の
正、これと直交する岸方向をy軸の正とした。このとき
航路上では $y=0\text{m}$ 、斜面上端では $y=675\text{m}$ と表される。ま
た、この外側にはスポンジ層による無反射境界を設定し
た。計算領域の格子幅は 2.5m ($\approx 0.042\text{m} \times 60$) とした。

一方、船速は $F_h=0.6\sim 1.2$ の範囲で変化させ、式(1)中
の $m\alpha$ 値は図-5または図-6に従い、放物線近似では $\alpha_{\text{mp}}=0.40$ 、
Lewis近似では $\alpha_{\text{ml}}=0.50$ ($B_s/\Delta x=5.79$ に対しモデル補正係
数 $m=0.65$)を用いた。なお、谷本ら⁷⁾によると、斜面上で
現れる航跡波の最大波高は後続波によってもたらされる。

(2) 計算結果

$y=100\text{m}$ で算定された F_h 値に対する航跡波の最大波高 H_1
の変化を、谷本ら⁷⁾による計算結果及び谷本ら⁷⁾が提案し
た近似式とともに図-9に示す。 $F_h=0.9$ 以上ではいずれの
造波モデルも同程度の H_1 を発生させるが、それ未満の計
算結果はモデル間でばらつき、特に F_h 値が小さいときの
 H_1 は本モデルのうち放物線近似、Lewis近似、谷本モデ
ルの順に大きい。

また、 $F_h=0.8, 1.0, 1.2$ のとき斜面上でみられる最大波高
比 $H_{\max}/H_1$ の変化を、各地点での浅水・屈折・減衰変形を
考慮した谷本ら⁷⁾による算定値とともに図-10に示す。な
お無次元化した縦軸に合わせ、横軸に示した斜面上のy
座標は100mで除した。このうち、 $F_h=0.8$ 及び1.0では、斜
面上を伝播するにつれて航跡波特有の距離による減衰を
受けながら屈折・浅水変形する様子が、いずれの造波モ
デルでもほぼ同様に算定されている。しかし、 $F_h=1.2$ で

図-9 F_h 値による航跡波の最大波高 H_1 の変化 ($y=100$ m地点)

図-10 斜面上での最大波高比 $H_{\max}/H_1$ の変化

は本モデルのうち谷本モデル、放物線近似、Lewis近似の順に、斜面上を伝播する最大波高比が小さくなる傾向にある。また、この傾向は上述の $F_h=1.0$ でも僅かにみられる。現時点においてこの原因は不明であるが、本モデルでは谷本モデルに比べ航跡波の距離による減衰がより顕著となるようである。

4. 船種別の航跡波推定式との比較

名古屋港では港内を航行する船舶に伴う航跡波の観測結果に基づき、船種別の最大波高の推定式が提案されている。ここでは、これらを再現目標として船長フルード数 $F_L = U^*/(gL_0)^{0.5}$ に対する航跡波を船種別に算定し、様々な船型に対する本モデルの適用性を検討した。

(1) 計算条件

名古屋港において航跡波の観測が行われた東航路の水深は15m、航路から約200m離れた波高計の設置水深は9.2mである。本計算では、この間を勾配1/35の平行等深線海岸と仮定し、前章と同様、等深線に平行する航路に沿った船の進行方向をx軸の正、直交する岸方向をy軸の正とした計算領域を設定した。航路より沖側は水深15mの一定水深とした。なお、計算格子幅は2.0mとした。

一方、船速は観測結果に基づき $F_L=0.10\sim0.25$ の範囲で変化させた。また、観測船舶を代表する船型に対して船種別にブロック係数を算定したところ、コンテナ船：0.443、RORO船：0.271、貨物船・タンカー：0.455であった。したがって、2章で示した放物線近似、Lewis近似に対するモデル体積率 $MC=0.67$ 、0.58を補正する中央横断面積係数はそれぞれ、コンテナ船： $\alpha_p=0.66$ 、 $\alpha_1=0.76$ 、RORO船： $\alpha_p=0.40$ 、 $\alpha_1=0.47$ 、貨物船・タンカー： $\alpha_p=0.68$ 、 $\alpha_1=0.78$ 、と推定された。さらに、モデル補正係数は、図-6の検討に用いた $\Delta x=0.033$ mを現地量に直すと $\Delta x=2.0$ mとなることから、同じ差分条件を用いることを優先して、倉田らの模型船に対して設定した $m=0.65$ を準用することとした。これは、上記の船舶諸元に対する各 $B_s/\Delta x$ 値は模型船のそれとは必ずしも一致しないものの、そもそも図-6は模型船と異なる船舶諸元には適用できないため、各船舶諸元に対してそれぞれ適切なモデル補正係数を設定することは、現時点では困難と判断したためである。この結果、本モデル（放物線近似、Lewis近似）における式(1)中の ma 値はそれぞれ、 $m=0.65$ に上述した船種・造波モデル毎の中央横断面積係数を乗じて設定した。

(2) 計算結果

名古屋港で提案された推定式で得た F_L 値による船種別の最大波高比 $H_{\max}/L_s$ （ただし、 L_s は船長）の変化に対し、本モデルによる再現計算結果を図-11に示す。図より、本モデルはいずれも $F_L=0.10$ で航行するどの船舶に対しても最大波高比を過小に算定している。しかし、それを超えた少なくとも $F_L=0.25$ までの範囲では、両モデルは概ね推定式の傾向を捉えている。ただし、RORO船をLewis近似して得られた算定値は、推定式による値に比べてかなり小さい。

最後に、例として $F_L=0.25$ で航行するコンテナ船に対して計算された航跡波の平面波形を図-12に示す。航路沖側（図の下側）の航跡波形に比べ、波高計（図中の●印）が設置された岸側の航跡波形では、斜面上の屈折・浅水変形による影響が表れている様子がみとれる。

5. おわりに

本研究では、航路設定の平面2次元場への拡張性を考

図-11 船種別の推定式に対する最大波高比 $H_{\max}/L_s$ の再現性

図-12 航跡波の平面波形 (コンテナ船, Lewis近似: $F_L=0.25$)

慮して1格子分の幅を設けた航跡波の造波モデルを新たに開発するとともに、船型の断面積分分布を従来の放物線近似に加え、新たにLewis-Formによる近似で表現した。この結果、実際により近い船型での航跡波の造波が可能になり、既往の実験結果に対する再現性も放物線近似に比べ同等以上であることを確認した。また、様々な船型に対して本造波モデルを適用するための中央横断面積係数の設定方法についても示した。一方、航跡波の造波状況が格子幅に依存する本造波モデルの特性を補正するために導入したモデル係数の汎用化は、今後の課題である。

謝辞：名古屋港の観測データに基づく航跡波の最大波高比の推定式は、「名古屋港における航跡波の影響に関する安全対策検討会」で審議された結果である。データを貸与して頂いた国土交通省中部地方整備局名古屋港湾事務所ならびに関係諸氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 小林豪毅, 倉田克彦, 今野博史: 浅水航走波の数値計算, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.375-380, 2000.
- 2) 小林豪毅, 谷本勝利, 倉田克彦: 水路幅による浅水航走波の変化と非定常性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.26-30, 2000.
- 3) 倉田克彦, 小田一記, 平井住夫: 航走波の特性および繫留船舶に及ぼす影響, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.598-602, 1983.
- 4) 平山克也: 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港空研資料, No.1036, 162p, 2002.
- 5) 石井敏雅, 磯部雅彦, 渡辺 晃: 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.31-35, 1993.
- 6) Lewis, F. M.: The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship, *Transactions of the SNAME*, 37th, pp.1-20, 1929.
- 7) 谷本勝利, 赤川嘉幸, 茂木勇佑, Dam Khanh TOAN: 平行等深線海岸における航走波の変形, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.779-784, 2004.

(2017.3.15 受付)

MODELING OF SHIP WAVE GENERATION BASED ON LEWIS-FORM AND INTRODUCTION TO BOUSSINESQ-TYPE WAVE TRANSFORMATION MODEL

Naoto HIGUCHI and Katsuya HIRAYAMA

In resent busy ports and harbors, their tranquility must be affected with not only storm waves propagated from outside but also harbor waves generated by inside ship navigation. In this study, a new ship wave generation method is developed and installed to a Boussinesq-type wave transformation model, considering expandability of setting of ship navigation channels and applicability for variable ship shape. For approximation of ship shape, not only the parabolic function but also the Lewis-Form are used. The Lewis model can reproduce results of past model experiments in over same accuracy on comparison with the parabolic model. However, improvement of dependency in spatial resolution for generating ship wave heights may be required in near future.