

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1345 June 2018

NOWT-PARI による航跡波の造波とその検証
- 実港湾への適用を目指して -

平山 克也
樋口 直人
長沼 淳也

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 新たな航跡波造波モデルの開発	4
2.1 航跡波造波モデルの概要	4
2.2 航跡波造波モデルの基本特性	5
2.3 航跡波の浅水・屈折変形の再現性	8
3. 平面水槽における航跡波の計測実験	9
3.1 計測実験の概要	9
3.2 航走時の航跡波	11
3.3 旋回時の航跡波	11
4. 平面水槽で計測された航跡波の再現計算	17
4.1 再現計算の概要	17
4.2 航走時の航跡波	17
4.3 旋回時の航跡波	23
5. 航跡波造波モデルの汎用性に関する検討	30
5.1 内挿補間によるモデル補正係数の試算	30
5.2 観測結果に基づく航跡波推定式との比較	31
6. まとめと今後の課題	32
7. おわりに	32
謝辞	33
参考文献	33
記号表	33
付録A トータルステーションの計測結果（航跡図及び船速の時系列）	34
付録B 旋回時の航跡波の実験結果（最大波高及び最大周期）	51

Modeling of Ship Wave Generation for NOWT-PARI and Its Verification - To Apply the Model for Port and Harbor Operation -

Katsuya HIRAYAMA*

Naoto HIGUCHI**

Junya NAGANUMA***

Synopsis

In recent 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 modified 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. In addition, the horizontal 2D model for ship wave generation are introduced to deal with a flexible layout of navigation channel in a harbor. Besides, ship waves generated at a turning point of navigation channel are newly measured with using a radio-controlled sailing model ship and a measurement system of the moved ship position. So, though these results could be almost represented by using the present models, a cause for overestimation of the maximum wave height at the outside of turning ship is not understood because the influence of sailing ship oscillation for ship wave generation is still not clear. On the other hand, the way to estimate with both the midship section coefficient: α and the tuning parameter of side fluxes generated by sailing ship: m are introduced in order to apply the present models to various ship shapes. Especially, it is proposed that “ m ” would be estimated with an interpolation among several calculation results of ship wave reproduction for model experiments, those are given to various ship properties and water depths. The verification with an estimation based on observation results, however, indicates that the present “ m ” may be under estimated for the actual scale. Therefore, it is required to consider viscous effect in the model experiments of ship wave, those are conducted by using self-sailing or towed various model ships.

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

* Head, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
** Trainee, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
*** Senior Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

NOWT-PARI による航跡波の造波とその検証

－ 実港湾への適用を目指して －

平山 克也*・樋口 直人**・長沼 淳也***

要 旨

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を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一部改良を施したものにに加え、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。また、既往の研究ではみられなかった旋回時の航跡波に関する水槽実験を独自に実施し、航跡波の新たな計測方法を提案した。さらに、旋回時の航跡波の再現計算を可能とするための航跡波造波モデルの平面 2 次元場への拡張を実施し、自由な航路設定が可能となった。ただし、航跡波に対する Heaving, Pitching, Rolling 等の船体動揺の影響に関する考察とその対応はまだ不十分であり、旋回時に航路外側で生じる航跡波の最大波高を過大評価することの改善等は今後の課題である。一方、様々な船型に対して本造波モデルを適用できるよう、モデル補正係数 m 及び中央横断面積係数 α の設定方法を示した。特に、 m 値は本研究で実施した複数の航跡波の再現計算結果をもとに内挿して与えることを提案したが、模型船に対する計算結果とは異なり、実船に対する観測結果（推定式）に対しては過小評価となっている可能性がある。そこで、今後は、実験水槽内で計測される航跡波に対する水の粘性効果を考慮するとともに曳航または自走する船舶諸元が異なる模型船をそれぞれ複数用意し、造波方法の違いに影響されないモデル補正係数の推定を行う必要があると考えられる。

キーワード：Lewis-Form, ブシネスクモデル, 航跡波, ブロック係数, 港内静穏度

* 海洋研究領域 波浪研究グループ長

** 海洋研究領域 波浪研究グループ 依頼研修員 ((株)エコーより出向)

*** 海洋研究領域 波浪研究グループ 主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

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（例えば、平田ら、2017）。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、航跡波の発生・伝播や変形を扱う実務への適用を想定した検討はほとんど行われていない（例えば、日本海難防止協会、1976）。一方、海岸工学分野では、谷本ら（2000）や小林ら（2000）により航跡波の造波モデルが提案され、数例の実験結果（倉田ら、1983）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、及び旋回時の航跡波を含めて独自に実施した実験結果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。さらに、現地観測結果をもとに池田ら（2017）によって提案された船種別の推定式に対する再現計算も合わせて行い、実務への適用性についても検討を加えた。

2. 新たな航跡波造波モデルの開発

ここでは、港内静穏度解析の実務に広く利用されている公開版ブシネスクモデル（平山、2002）；NOWT-PARiver4.6c8a)に対し、新たに導入した航跡波造波モデルの概要を示すとともに、既往の実験・計算結果に対する再現計算を通じて明らかとなった本造波モデルの基本特性、並びに浅海域における波浪伝播特性について述べる。なお、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。

2.1 航跡波造波モデルの概要

航跡波の造波は谷本ら（2000）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 の変化量に依存する流量 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 は船舶の船型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の係数（以下、モデル補正係数と呼称）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（2000）のモデル（以下、谷本モデルと呼称）ではスタ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（石井ら、1993）を両側面に適用して、それぞれ Q_y 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。

(1) 放物線近似

谷本ら（2000）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。

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

さらに、本研究では、様々な格子幅に対する差分計算の安定性を確保できるよう、式(2)で近似される船首端及び船尾端での先鋭な船型に代えて、これら付近の断面積変化（船長のそれぞれ2.5%の範囲）を、次式のように修正することとした。しかし、船長の95%の船型はやはり式(2)で近似されることから、本研究では、この式で近似される船型も同様に、放物線近似と呼称することとした。

$$S(x_s) = \begin{cases} 19S_0 \left(\frac{2x_s}{L_{pp}} + 1 \right)^2 + \frac{1}{20} S_0 & -1 < \frac{2x_s}{L_{pp}} \leq -0.95 \\ S_0 \left[1 - \left(\frac{2x_s}{L_{pp}} \right)^2 \right] & -0.95 \leq \frac{2x_s}{L_{pp}} \leq 0.95 \\ 19S_0 \left(\frac{2x_s}{L_{pp}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{20} S_0 & 0.95 < \frac{2x_s}{L_{pp}} \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

(2) Lewis近似

本研究では、船舶の断面積分分布の算出方法の1つであるストリップ法に良く用いられるLewis-Form (Lewis, 1929) (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(4)及び式(5)で与えられる。また、これらを式(6)に従い積分することにより、第 n 番目における船体断面の断面積 S_n 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(7)~(10)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Lewis (1929) が提案した表-2.1を準用することとした。なお、これらのステーション番号に対応する x 方向の位置は、垂線間長 L_{pp} を等分割した位置である。すなわち、St.00が船首側、St.09が船尾側であり、図-2.1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、4次の多項式を用いて船長方向にこれらを繋げた3次元形状を図-2.2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。

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

$$z(\theta) = M \{ (1 - a_1) \cos \theta + a_3 \cos 3\theta \} \quad (5)$$

$$S_n = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} |y(\theta)_n z(\theta)_{n+1} - z(\theta)_n y(\theta)_{n+1}| d\theta \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{(1-H)(1+a_3)}{(1+H)} \quad (7)$$

$$a_3 = H \left[\frac{-(2CH - H + 1) + (H + 1)\sqrt{4C - 3}}{2(CH^2 - H^2 - H - 1)} \right] \quad (8)$$

$$M = B/2(1 + a_1 + a_3) \quad (9)$$

表-2.1 Lewis (1929) 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

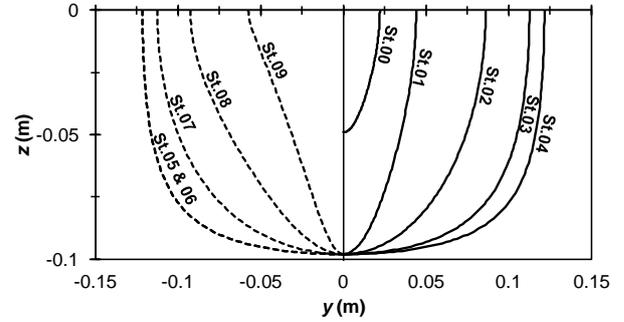


図-2.1 Lewis-Form を用いた船体の各断面形状、縦軸：喫水面下の鉛直座標、横軸：船幅方向の水平座標

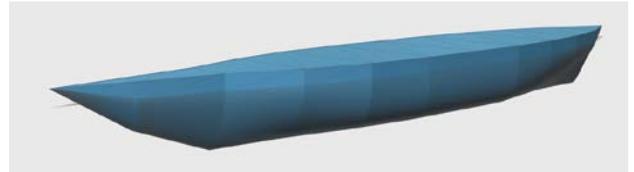


図-2.2 Lewis-Formを用いた船体の3Dイメージ

$$H = B/2d \quad (10)$$

2.2 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 (2000) と同様、倉田ら (1983) 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。

(1) 倉田ら (1983) の実験概要とそのモデル化

倉田ら (1983) 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間隔で設置した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 $L_{pp} = 1.36\text{m}$ 、船幅 $B_s = 0.243\text{m}$ 、喫水 $d = 0.098\text{m}$ である。また、水深 $h = 0.146 \sim 0.246\text{m}$ に対し船速 U を $0.56 \sim 1.88\text{m/s}$ に変化させて、航跡波の最大波高 H_{max} などを整理した。なお、これらの実験条件に対する水深フルード数 ($U^*(gh)^{-0.5}$) は $F_h = 0.42 \sim 1.40$ であった。

図-2.3に、本モデルに用いた放物線近似 (式(3)) 及びLewis近似 (式(4)-(10)) による船舶の断面積分分布を示す。

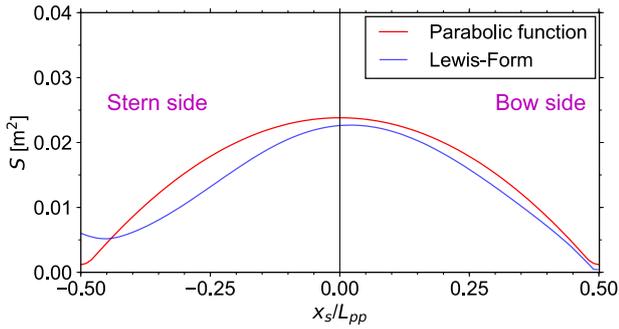


図-2.3 放物線及びLewis-Formによる断面積分布の比較，縦軸：断面積，横軸：船舶の船首尾方向の位置

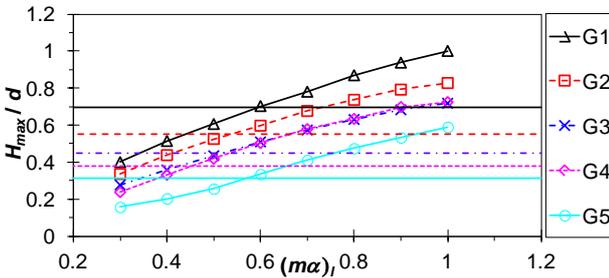


図-2.4 補正係数 $m\alpha$ による無次元最大波高 H_{max}/d の変化，縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：Lewis近似のモデル補正係数と中央横断面積係数の積

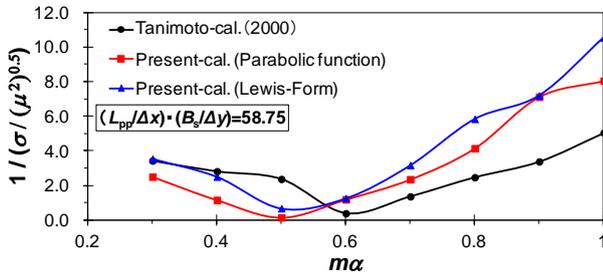


図-2.5 補正係数 $m\alpha$ に対する誤差変動係数の逆数の変化，縦軸：誤差変動係数 CV の逆数，横軸：補正係数 $m\alpha$

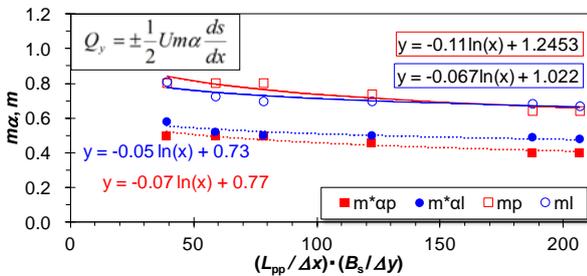


図-2.6 $(L_{pp}/\Delta x) \cdot (B_s/\Delta y)$ に対する最適 $m\alpha$ 値及び m 値の変化 ($d/h=0.67$)，縦軸：最適 $m\alpha$ ， m 値，横軸：垂線間長と船幅に対する空間解像度の比

x_s/L_{pp} 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，これは実際の没水体積 V_s と一致しないため，放物線近似を用いた小林ら（2000）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積係数 $\alpha=0.62$ を導入した ($V_s=\alpha V_s'$)．

ここで，実際の 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 $BC=V_s/L_{pp}/B_s/d$ と呼ばれる．そこで，同様に近似モデルの V_s' を直方体の体積で除したものをモデル体積率 $MC=V_s'/L_{pp}/B_s/d$ 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（1983）が用いた模型船のブロック係数は $BC=0.415$ であったことに加え， BC を MC で除することにより，本研究において船型を一部修正した放物線近似でも中央横断面積係数は谷本モデルと同等であること ($\alpha_p=0.62$)，及び小林ら（2000）の再現計算において，もしLewis近似を用いた場合には $\alpha_l=0.72$ の中央横断面積係数が推定されたと推測された．なお， α_p, α_l は上述した倉田ら（1983）の模型船に対する中央横断面積係数である．また，添え字 p, l はそれぞれ，放物線近似（式(3)），Lewis近似（式(4)-(10)）に関する諸量であることを示す．

(2) モデル補正係数の推定

小林ら（2000）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モデル補正係数 m は，谷本ら（2000）の方法を一部参照しながら以下のように推定した．

Lewis近似を用いた本モデルを例に， $h=0.146\text{m}$ ， $F_h=0.91$ として得られた倉田ら（1983）の実験結果を用いて， $m\alpha$ の最適値を推定する方法について述べる．なお，小林ら（2000）と同様，計算に用いた格子幅は $\Delta x=\Delta y=0.075\text{m}$ とした．図-2.4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 $0.46\sim 0.59$ にばらつく（平均値 0.54)．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 $(m\alpha)_i$ 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 $(m\alpha)_p$ 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-2.5に示す。また、図には合わせて、谷本ら(2000)の再現計算結果も示した。ここで、格子幅 Δx 及び Δy の影響は船舶諸元のうち船長(垂線間長) L_{pp} 及び船幅 B_s と密接に関係することから、凡例にはこれらの比を掛け合わせた値: $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)=58.75$ ($\Delta x=\Delta y=0.075\text{m}$)を示してある。図より、放物線近似では $(m\alpha)_p=0.50$ 、Lewis近似では $(m\alpha)_l=0.52$ がそれぞれ最適値であることがわかる。さらに、谷本モデルでは、 $m=1$ であることを踏まえ、小林ら(2000)と同様に最適値として $\alpha=0.62$ が推定されることがわかる。

さらに、これと同様に、 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)=39.05$ ($\Delta x=\Delta y=0.092\text{m}$)、 78.22 ($\Delta x=\Delta y=0.065\text{m}$)、 122.2 ($\Delta x=\Delta y=0.052\text{m}$)、 187.4 ($\Delta x=\Delta y=0.042\text{m}$)及び 206.6 ($\Delta x=\Delta y=0.040\text{m}$)に対する $(m\alpha)_p$ 及び $(m\alpha)_l$ の最適値を算定し、 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ 値に対してプロットした結果を図-2.6に示す。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、 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ 値が大きくなるにつれて減少することがわかる。これは、計算格子幅 Δx (及び Δy)が小さいほど、船長に沿った1格子幅の水域での水位変動が増幅されるためと考えられる。

一方、 m_p 及び m_l の値はほぼ一致し、これらの係数が近似モデルによらず対象船舶の形状に対する差分条件の違いを補正する係数であることが伺える。しかし、計算格子幅が大きい場合には、 m_p に比べ m_l がやや小さくなる傾向が見て取れる。この原因は、 Δx に対し、図-2.3を船長方向に微分して得られる断面積変化量分布の差分精度が粗くなるために、放物線近似とLewis近似による差異が小さくなり、 $(m\alpha)_l$ 値が $(m\alpha)_p$ 値に近づくためであると考えられる。なお、特に放物線近似では、計算格子幅 Δy (及び Δx)が大きくなり船舶を表す水域での水位変動の増幅が小さくなるほど、 m_p 値は谷本モデルと同じ"1"に近づくと同推察される。

なお、これらの近似曲線には仮に対数曲線を用いたが、この妥当性は、ここで対象とした船舶諸元及び喫水と水深との関係($d/h=0.67$)に対してしか保証されていないことに注意されたい。

(3) 倉田ら(1983)による航跡波の再現計算

ここでは、小林ら(2000)と同様に $\Delta x=\Delta y=0.075\text{m}$ とした計算格子を用いて、倉田ら(1983)の水槽実験に対す

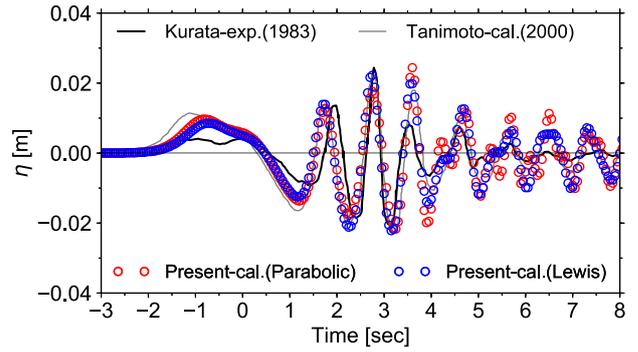
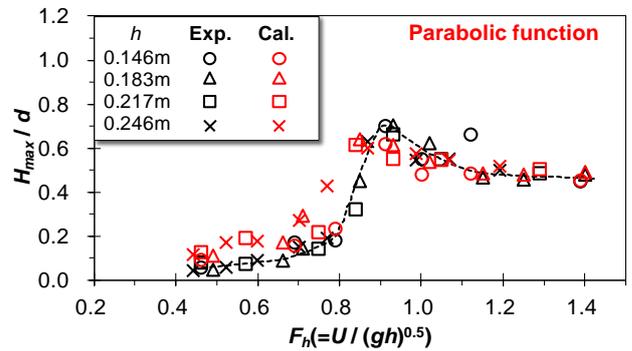
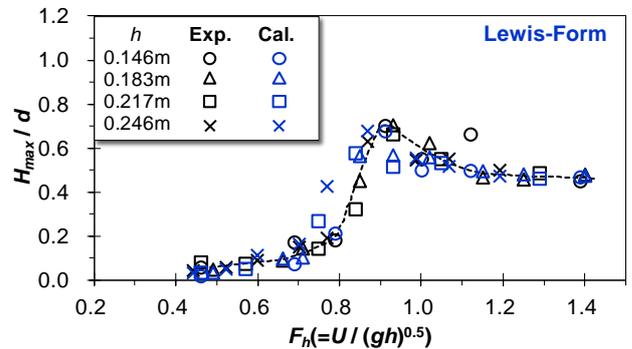


図-2.7 航跡波の波形の再現性(航路から1.5m地点:G3), 縦軸:水位, 横軸:時間



(a) 放物線近似



(b) Lewis近似

図-2.8 水深フルード数 F_h による無次元最大波高 H_{max}/d の変化, 縦軸:最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸:水深フルード数 F_h

る再現計算を実施した。なお、モデル補正係数としては、図-2.5で確認した $m\alpha$ の最適値を α_p 、 α_l で除して得られる $m_p=0.80$ 、 $m_l=0.73$ をそれぞれ用いた。

(a) 波形の再現性

前項で着目した再現計算結果($h=0.146\text{m}$, $F_h=0.91$)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-2.7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。

(b) 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-2.8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、 H_{max} 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(0.89)に比べ、Lewis近似(0.92)では僅かに向上する。

2.3 航跡波の浅水・屈折変形の再現性

ここでは、前節と同じ模型船を想定して谷本ら(2004)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を想定して換算される現地量に対して実施した。

(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 $y=0m$ 、斜面上端では $y=675m$ 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 $2.5m$ ($\approx 0.042m \cdot 60$)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-2.6に従い、 $(L_{pp}/\Delta x) \cdot (B_s/\Delta y) = 187.4$ に対する値として、放物線近似では $(m\alpha)_p=0.40$ ($m_p=0.64$)、Lewis近似では $(m\alpha)_l=0.48$ ($m_l=0.67$)を用いた。なお、谷本ら(2004)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

$y=100m$ 位置で算定された F_h 値に対する航跡波の最大波

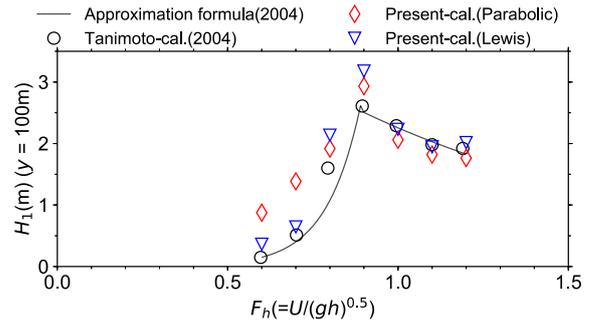
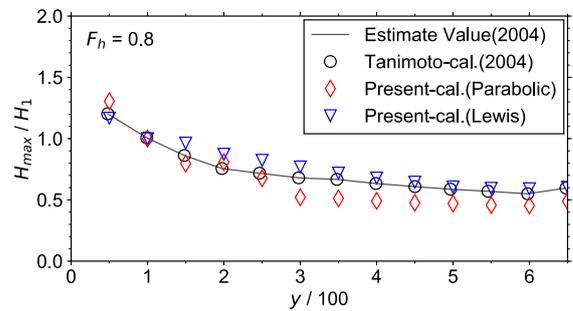
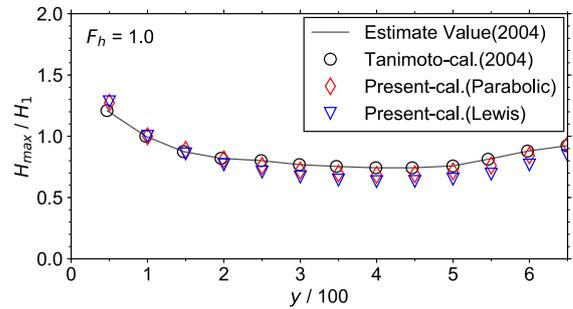


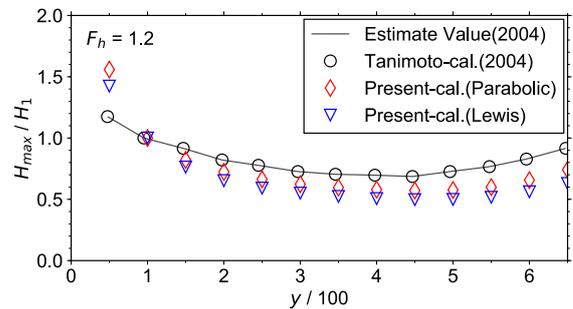
図-2.9 F_h 値による航跡波の最大波高 H_1 の変化 ($y=100m$)、縦軸：航路から100m地点の最大波高、横軸：水深フルード数 F_h



(a) $F_h = 0.8$



(b) $F_h = 1.0$



(c) $F_h = 1.2$

図-2.10 斜面上での最大波高比 H_{max}/H_1 の変化、縦軸：最大波高 H_{max} と航路から100m地点の最大波高 H_1 の比、横軸：航路から岸方向への距離を100mで除した値

高 H_1 の変化を、谷本ら（2004）による計算結果及び近似式とともに図-2.9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（2004）による算定値とともに図-2.10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、 $F_h=1.0$ 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、 $F_h=0.8$ では $y=300$ m付近において放物線近似により造波された航跡波の最大波高が急激に低減する傾向がみられた。また、 $F_h=1.2$ で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。なお、この傾向は上述の $F_h=1.0$ でも僅かに



写真-3.1 模型船（ラジコン船）



写真-3.2 トータルステーション（ニコン・トリンプル製 Trimble S6）

みられる。現時点においてこれらの原因は不明であるが、本モデルでは特に $F_h=1.0$ 以上のとき、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。

3. 平面水槽における航跡波の計測実験

前章では、少なくとも本研究で用いた航跡波造波モデルは、計算格子幅に応じたモデル補正係数 m を導入することにより、倉田ら（1983）が用いた模型船が様々な船速で造波する航跡波を、概ね妥当に再現できることが確認された。しかし、このモデル補正係数は、一通りの水深上を航行するある模型船が造波した、航跡波の実測値に基づいて推定されたものであった。

そこで、本章及び次章では、異なる水路・船舶諸元に対して新たに航走波の計測実験を行い、これらの結果を再現するモデル補正係数を別途推定して、その違いについて考察を加えた。さらに、平面水槽において模型船を自走させて実施した本実験の特性を踏まえ、直線的な航路形状だけでなく、変針点において異なる曲率で旋回する曲線的な航路形状も対象とし、様々な水深、船速に対する航跡波を計測するとともに、本研究で用いた航跡波造波モデルによるこれらの再現計算を実施した。

3.1 計測実験の概要

航走波の造波は、長さ約40m、幅約18mの平面水槽（デュアルフェースサーペント水槽）において実施した。ところで、造船工学分野を中心とした既往の航跡波の造波実験では、固定された模型船に一樣流を作用させる方法や、模型船を固定した曳航台車によって水路を走らせる方法などがある。しかし、上記の平面水槽では一樣流の発生装置や曳航台車を有しないため、このいずれの方法も適用できない。

そこで、本研究では、モーターとニッケル水素バッテリーで船尾のプロペラを駆動する自走式のラジコン船（写真-3.1）を模型船として選定した。この模型船の船舶諸元は垂線間長 $L_{pp}=0.75$ m、船幅 $B_s=0.20$ m、喫水 $d=0.066$ m（ブロック係数 $BC=0.471$ ）である。また、自走する模型船の時々刻々の位置情報の取得には、陸上構造物の3D計測などに用いられる測量機器であるトータルステーション（写真-3.2、ニコン・トリンプル製 Trimble S6）を利用することとした。本研究では、このうちレーザを反射するプリズムの自動追尾機能を活用して、模型船上に搭載した全方位プリズムを時間間隔0.4s（2.5Hz）で追尾することにより、模型船の位置と航行速度（船速、向き）を計測した。さらに、このとき発生する航跡波の計測は

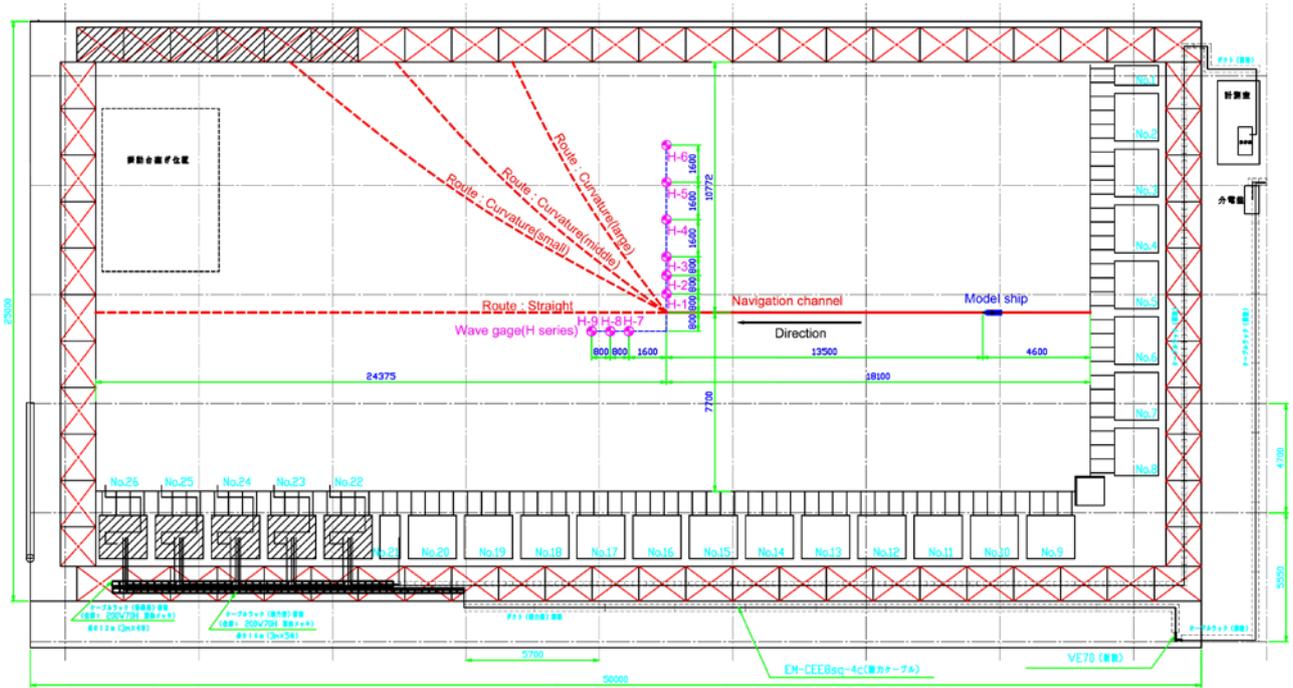


図-3.1 実験配置図 (全体図)

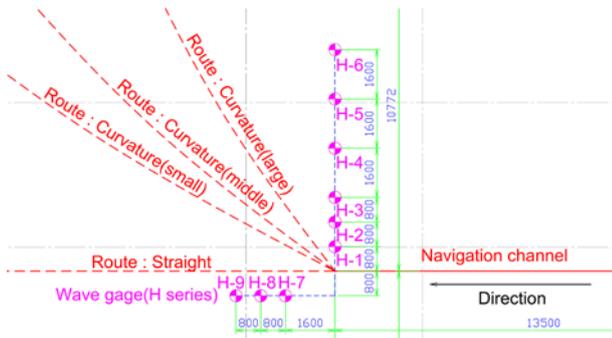


図-3.2 実験配置図 (拡大図)

平面水槽内に設置 (後述) した容量式波高計により実施したが、トータルステーションとプリズムの間に遮蔽物が存在すると、その通過時の位置が欠測となり、システム上、その次に計測された位置情報に置き換えられてしまう。そこで、少なくとも計測対象位置でそのような不具合が生じないように、容量式波高計に付随するケーブル等の取回しには細心の注意を払うとともに、計測対象とする航路に応じ、見通しが良い位置にトータルステーションをその都度移設して計測を実施することとした。

航跡波の計測実験において設定した航路及び波高計配置を図-3.1 (全体図) 及び図-3.2 (拡大図) に示す。航路は、直線航路に加え、その途中に設けた変針点において3種類 (小, 中, 大) の曲率で右舷側に回転させた屈曲

表-3.1 各ケースの船速 U [m/s]及び水深フルード数 F_h , 括弧外: 船速 U [m/s], 括弧内: 水深フルード数 F_h

航路: 直線			
case	h=0.15m	h=0.20m	h=0.30m
case01	1.00 (0.82)	1.13 (0.81)	1.18 (0.69)
case02	0.97 (0.80)	1.08 (0.77)	1.11 (0.65)
case03	0.94 (0.78)	1.03 (0.74)	1.03 (0.60)
case04	0.85 (0.70)	0.87 (0.62)	0.96 (0.56)
case05	0.67 (0.55)	0.70 (0.50)	0.78 (0.45)
case06	0.53 (0.44)	0.44 (0.32)	0.51 (0.30)
航路: 曲率 (小)			
case	h=0.15m	h=0.20m	h=0.30m
case07	0.99 (0.82)	1.15 (0.82)	1.24 (0.72)
case08	0.96 (0.79)	1.09 (0.78)	1.15 (0.67)
case09	0.93 (0.77)	1.02 (0.73)	1.06 (0.62)
case10	0.89 (0.73)	0.86 (0.61)	0.93 (0.54)
case11	0.71 (0.59)	0.73 (0.52)	0.76 (0.44)
case12	0.51 (0.42)	0.49 (0.35)	0.56 (0.33)
航路: 曲率 (中)			
case	h=0.15m	h=0.20m	h=0.30m
case13	1.00 (0.82)	1.15 (0.82)	1.19 (0.69)
case14	0.98 (0.81)	1.06 (0.76)	1.10 (0.64)
case15	0.95 (0.78)	1.03 (0.74)	1.02 (0.59)
case16	0.89 (0.73)	0.85 (0.61)	0.95 (0.55)
case17	0.68 (0.56)	0.70 (0.50)	0.77 (0.45)
case18	0.49 (0.40)	0.45 (0.32)	0.55 (0.32)
航路: 曲率 (大)			
case	h=0.15m	h=0.20m	h=0.30m
case19	0.99 (0.82)	1.15 (0.82)	1.23 (0.72)
case20	0.97 (0.80)	1.07 (0.76)	1.13 (0.66)
case21	0.95 (0.78)	1.01 (0.72)	1.06 (0.62)
case22	0.89 (0.73)	0.86 (0.61)	0.94 (0.55)
case23	0.69 (0.57)	0.72 (0.51)	0.78 (0.45)
case24	0.47 (0.39)	0.46 (0.33)	0.60 (0.35)

航路からなる計4種類を設定した。なお、屈曲航路の変針角度はそれぞれ、約30°、約40°、約55°である。また、変針点は、直線航路に垂直な測線の延長上に設けることとした。波高計は、この測線上の6地点（H-1～H-6）、及び直線航路に平行な3地点（H-7～H-9）の計9地点に設置し、直線航路に最も近いH-1及びH-7～H-9での航路からの距離は0.8mとした。また、直線航路に沿った変針点からH-7までの距離は1.6mとした。さらに、H-1～H-3及びH-7～H-9の波高計間隔は0.8m、H-3～H-6の波高計間隔は1.6mとした。

模型船が自走する水深は0.15m、0.20m、0.30mの3種類とした。また船速は、各航路について6種類ずつ設定した。これらの諸条件を組み合わせた計72ケースについて、トータルステーションで計測した時々刻々の位置情報から得た船速 U [m/s]を表-3.1に整理した。ここで、括弧内の数値は水深フルード数 F_h を示す。この結果からわかるように、本実験による航跡波の計測は、模型船の性能限界の制約上、水深フルード数 $F_h=0.30\sim 0.82$ の範囲で実施した。なお、図-2.8及びその考察に従えば、 $F_h=0.80$ 程度を越えて生じる H_{max} は、船舶の先端で発生するソリトンに起因していると考えられる。したがって、最大の H_{max} が発生する F_h を設定するまでには至らないものの、本実験で造波された航跡波は、倉田ら（1983）と同様、航行船舶の前後で発生する波がそれぞれ支配的となる範囲をカバーしているものと仮定した。

このうち、水深 $h=0.15\text{m}$ 、水深フルード数 $F_h=0.82$ としたcase01（直線）、case07（屈曲：曲率（小））、case13（屈曲：曲率（中））、case19（屈曲：曲率（大））における航跡及び船速の計測例を図-3.3～図-3.6に示す。なお、図中のハッチング箇所は、模型船が波高計H-1～H-6列の延長線を横切る直前の5秒間を示しており、この区間を平均した値を計測結果の代表船速として定義した。また、他のケースの計測結果については、付録に示す。

3.2 航走時の航跡波

直線航路に対して垂直な測線上に配置したH-1～H-6の波高計を対象とし、それらにおいて計測された航跡波形をゼロアップクロス解析して得られる、各水深での水深フルード数 F_h による最大波高の変化を図-3.7に、最大周期の変化を図-3.8にそれぞれ示す。ただし、図-3.7では最大波高 H_{max} を模型船の喫水 d で、図-3.8では最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ g は重力加速度）でそれぞれ無次元化している。なお、各図内には、航路に対する波高計の位置関係とともに着目している波高計を星印で示した図を窓表示した。

まず、図-3.7をみると、いずれの水深でも H_{max} は F_h のとともに増加し、ある F_h 値を超えるとその傾きが急激に大きくなるのがわかる。図-2.8の考察に従えば、これは船尾で発生する後続波が卓越する状態から船首で発生するソリトン波が卓越する状態へと遷移したためと考えられる。また、この F_h 値は水深によって異なり、水深0.15m（ $d/h=0.44$ ）では $F_h=0.70\sim 0.80$ 、水深0.20m（ $d/h=0.33$ ）では $F_h=0.62\sim 0.72$ 、水深0.30m（ $d/h=0.22$ ）では $F_h=0.56\sim 0.61$ である。すなわち、喫水に対して水深が深い（水深に対して喫水が小さい）ほど、より小さな F_h 値でソリトン波の卓越による H_{max} の増大が生じることがわかる。なお、図-2.8においてこの F_h 値は0.8程度であることが読み取れるが、このときの喫水水深比は $d/h=0.67$ であり、これは図-3.7の結果と矛盾しない。さらに、これらの関係は伝播距離に応じて変化しないが、 F_h により変化する H_{max} の値は、特に喫水に対して水深が深いほど、大局的にみて伝播とともに減少する傾向が伺える。

次に、図-3.8をみると、 H_{max} と同様、いずれの水深でも T_{max} は F_h のとともに増加し、ある F_h 値を超えるとその傾きが急激に大きくなるのがわかる。また、水深0.15m及び0.20mに加え、水深0.30mのH-5～H-6地点におけるこの F_h 値も H_{max} と同様である。さらに、これらの関係が伝播距離に応じて変化しないことも H_{max} と同様であるが、 T_{max} の値は大局的にみて伝播距離によらずほぼ一定である。一方、水深0.30mのとき、航路に近いH-1～H-4地点におけるこの F_h 値は H_{max} に対するものに比べ少し小さい。この原因についてはいまのところ不明であるが、水深に占める喫水の割合が2割程度と最も小さいこととの関係が疑われる。

なお、 F_h に応じて変化する T_{max} の値は高々0.2～0.6s程度であり、通常の水理模型実験で造波する実験波の周期1.0～2.0s程度に比べ非常に小さい。したがってこの場合には水の粘性（表面張力）による波高減衰の影響が無視できないため、特に航路から離れた位置で計測された航跡波の伝播波高を現地量に換算して評価する場合には、注意が必要である。

3.3 旋回時の航跡波

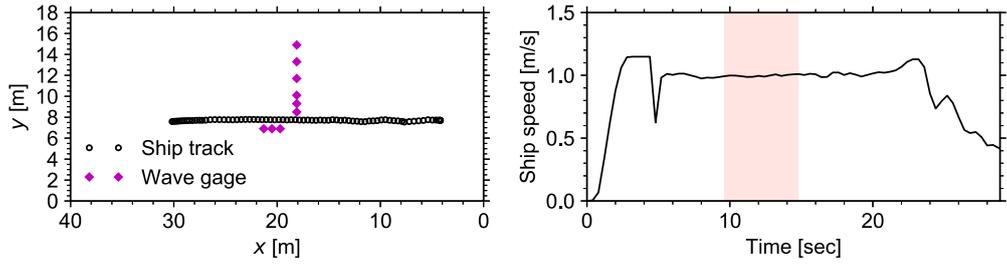
直線航路では、航跡波は航路に対して左右対称に伝播するため、模型船の右舷側のみで計測された航跡波形を対象として解析を実施した。一方、変針点においてある曲率で右舷側に旋回することが求められる屈曲航路に対しては、旋回時に発生する航跡波が左右非対称に伝播することが想定される。そこで、この様子を捉えるために、ここでは、屈曲航路の内側に位置するH-3、及び外側に位置するH-7、H-9で計測された航跡波形に着目して解析を

実施した。直線航路と同様に、航跡波をゼロアップクロス解析して得られる各水深フルード数 F_h による最大波高の変化を、曲率が小さいものから順に、図-3.9～図-3.11に示す。また、最大周期の変化を、図-3.12～図-3.14に示す。なお、最大波高 H_{max} を模型船の喫水 d で、最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (g は重力加速度)でそれぞれ無次元化している。また、各図内には、航路に対する波高計の位置関係とともに着目している波高計を星印で示した図を窓表示した。ここで、直線航路での計測結果との対応をみる際には、屈曲航路の内側に位置するH-3では旋回時の曲率が大きくなるほど航路が近づき、外側に位置するH-7, H-9では航路が遠ざかることに留意されたい。また、H-7, H-9については直線航路での計測結果を示していないが、これらと航路からの距離が同じH-1での計測結果を代用できることを付記しておく。

まず、図-3.9～図-3.11をみると、いずれの水深及び航路でも、直線航路と同様に H_{max} は F_h とともに増加し、ある F_h 値を超えるとその傾きが急激に大きくなるのがわかる。また、水深に応じたこの F_h 値の違い（水深0.15m ($d/h=0.44$): $F_h=0.73-0.80$, 水深0.20m ($d/h=0.33$): $F_h=0.61-0.74$, 水深0.30m ($d/h=0.22$): $F_h=0.54-0.62$)も直線航路の場合とほぼ同様であり、曲率による違いは認められない。したがって、 F_h 値の増加に従い、船尾で発生する後続波が卓越する状態から船首で発生するソリトン波が卓越する状態へと遷移し、かつ喫水に対して水深が深い（水深に対して喫水が小さい）ほど、より小さな F_h 値でソリトン波の卓越による H_{max} の増大が生じる現象は、曲率の大きさに関わらず、変針点付近の屈曲航路周辺でも同様にみられることが確認された。

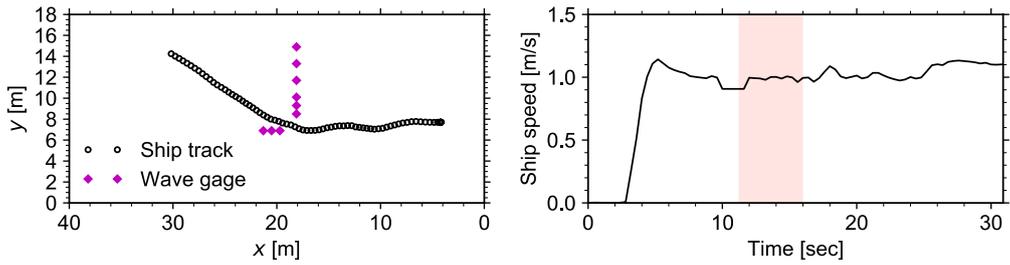
一方、航路の左右で計測される H_{max} 値の大きさについては曲率による違いが僅かに認められる。すなわち、曲率の増加に伴い航路が近づくH-3では、特に喫水に対して水深が深いほど、 F_h 値が小さく後続波が支配的となる範囲で H_{max} 値が僅かに増加し、逆に遠ざかるH-7, H-9では H_{max} 値が僅かに減少する傾向が伺える。これらはいずれも、直線航路でも確認された、伝播に伴う波高減衰の違いによるものと考えられる。しかし、航路ごとにみると、屈曲航路内側のH-3では、外側のH-7, H-9に比べて航路に近い曲率（大）のケースだけでなく、航路に垂直・平行な2つの測線のほぼ対角線上に変針する曲率（中）や、航路が遠い曲率（小）のケースでも、後続波が支配的となる範囲でより大きな H_{max} 値が計測されていることがわかる。この原因としては、H-3に代表される屈曲航路内側では、変針点前後の直線航路上でそれぞれ造波された航跡波が重畳するためと思われる。

次に、図-3.12～図-3.14をみると、いずれの水深及び航路でも、直線航路と同様に T_{max} は F_h とともに増加することがわかる。しかし、屈曲航路の外側に位置するH-7, H-9では、曲率によらず、その傾きが急激に大きくなるような F_h 値はみられない。また、内側に位置するH-3でも、曲率が大きくなるほど、この F_h 値の出現傾向は直線航路でみられたものと異なるようになる。すなわち、屈曲航路では、直線航路と同様に、 F_h 値の増加に従い後続波が卓越する状態からソリトン波が卓越する状態へと遷移するものの、 T_{max} 値の大きさは、特に屈曲航路の外側ではほぼ線形に増加する。この原因としては、船舶の航行に伴い船首で造波されるソリトン波の重畳過程が変針点の前後で変化するため、航路の外側ではその影響が、ソリトン波が卓越する前から最大波の周期の増大となって現れたのではないかと推測される。一方、同様な影響は航路の内側でも現れるが、変針前後でのソリトン波の重畳角度は航路の外側と内側で異なるため、 T_{max} 値に関して、外側とは異なる変化傾向が生じたものと思われる。



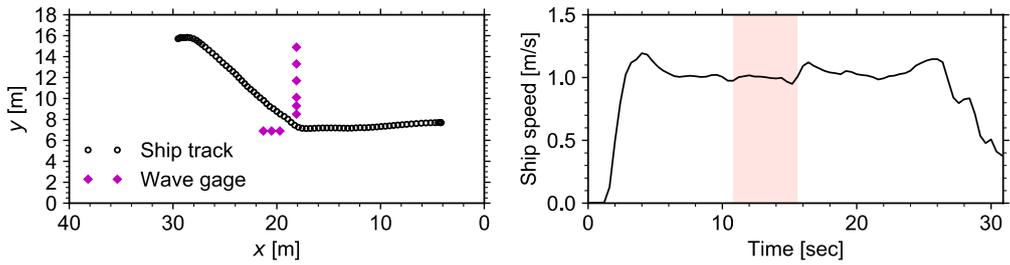
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-3.3 トータルステーションによる代表的な計測結果 (直線航路: case01 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.82$))



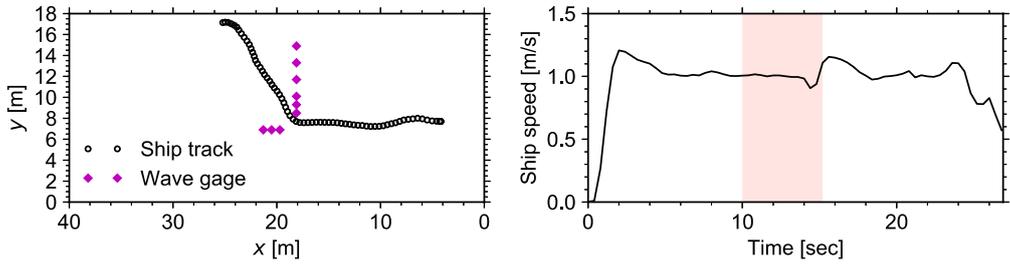
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-3.4 トータルステーションによる代表的な計測結果 (屈曲航路【曲率(小)】: case07 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.82$))



(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-3.5 トータルステーションによる代表的な計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case13 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.82$))



(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-3.6 トータルステーションによる代表的な計測結果 (屈曲航路【曲率(大)】: case19 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.82$))

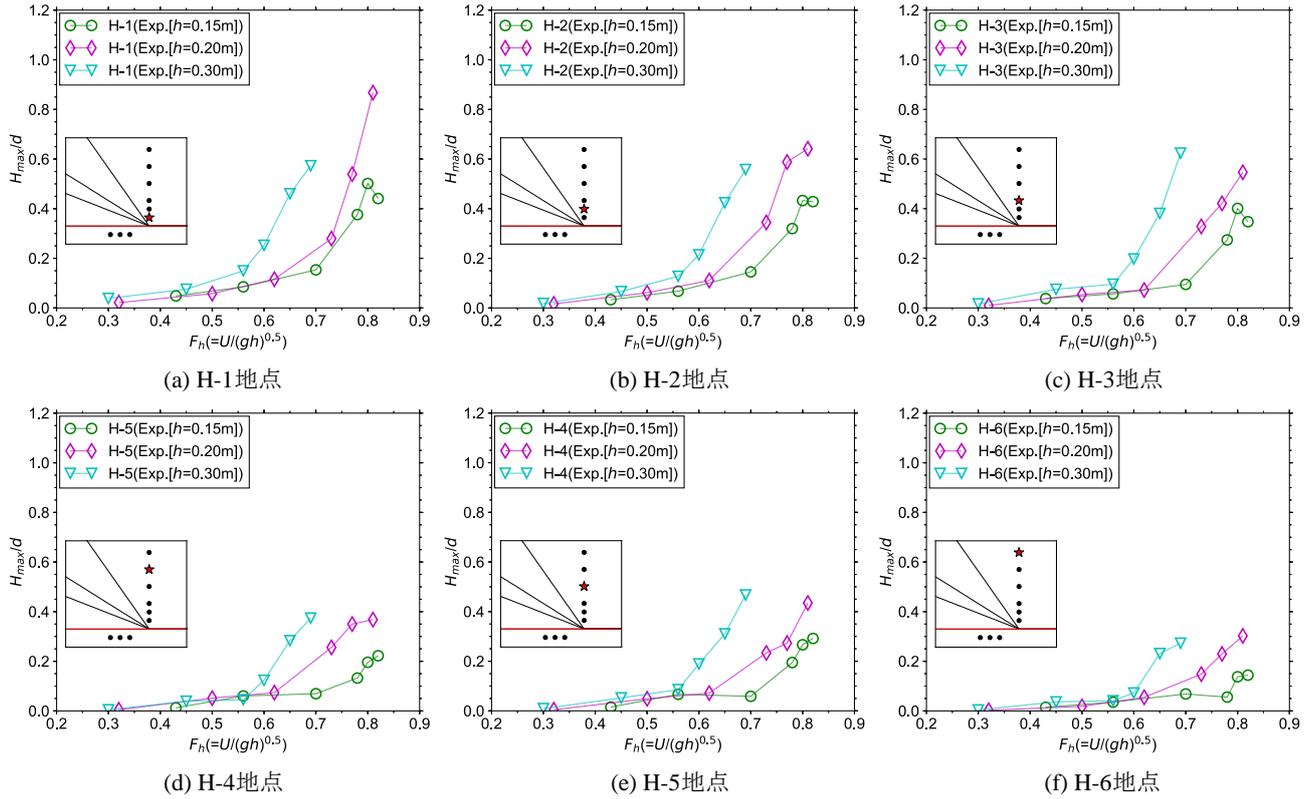


図-3.7 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（直線航路，計測地点別の水深による違い），
縦軸：最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

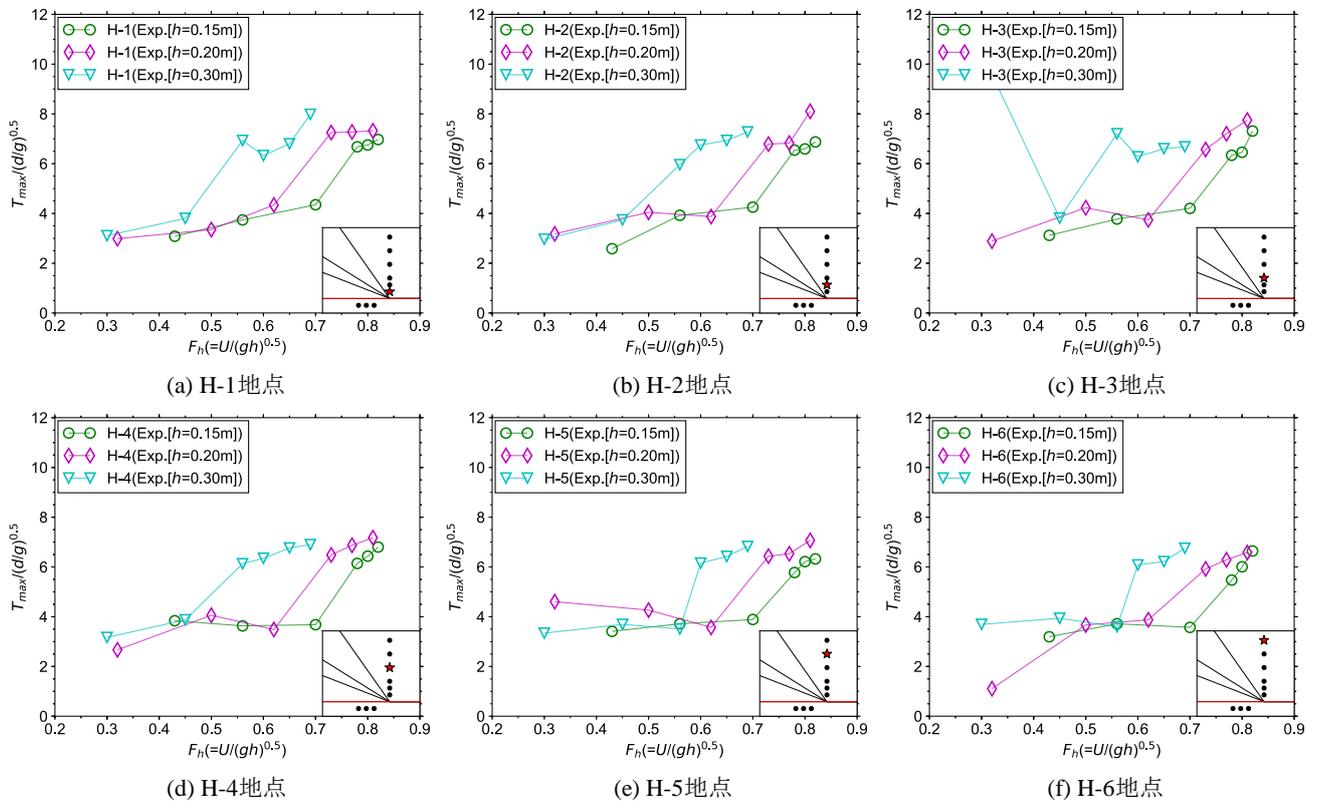


図-3.8 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化（直線航路，計測地点別の水深による違い），
縦軸：最大周期 T_{max} を $(d|g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

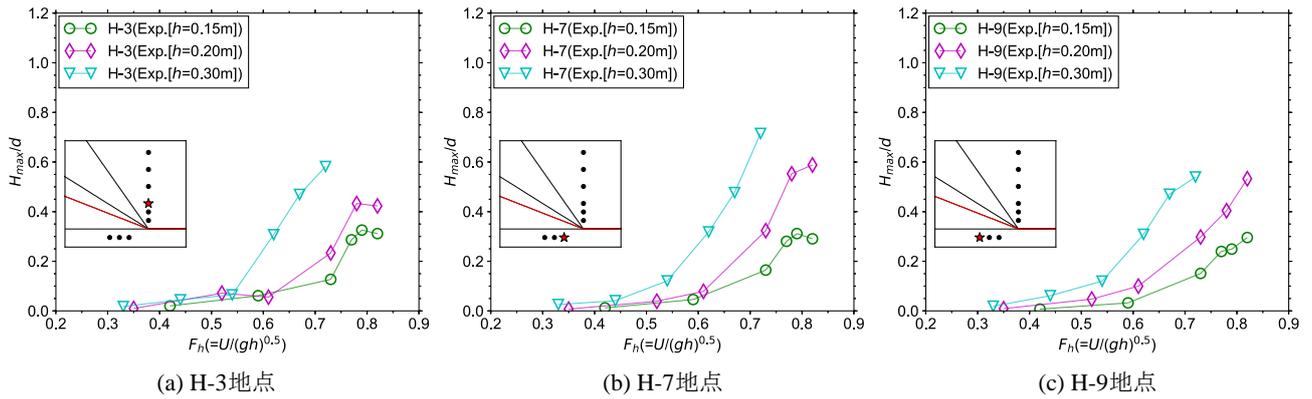


図-3.9 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（小）】，計測地点別の水深による違い），
縦軸：最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

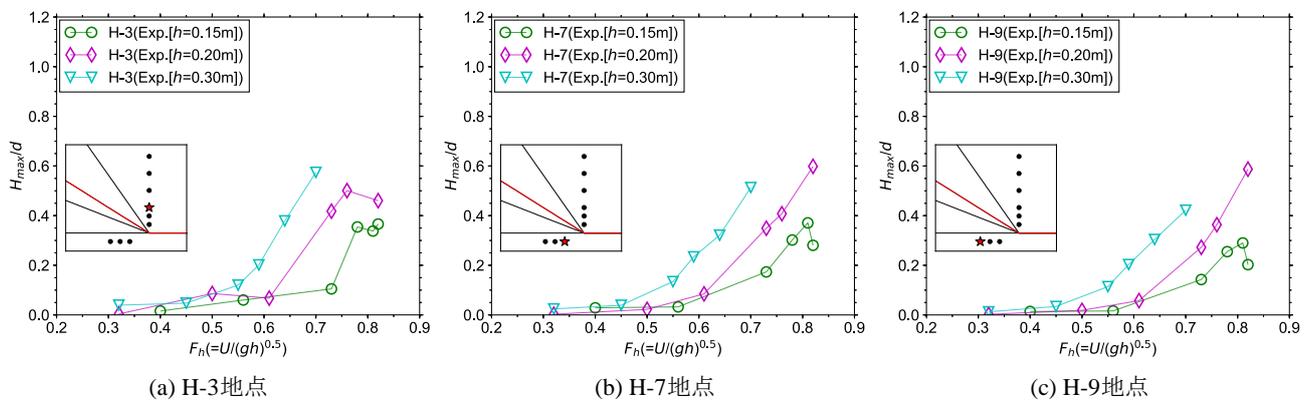


図-3.10 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（中）】，計測地点別の水深による違い），
縦軸：最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

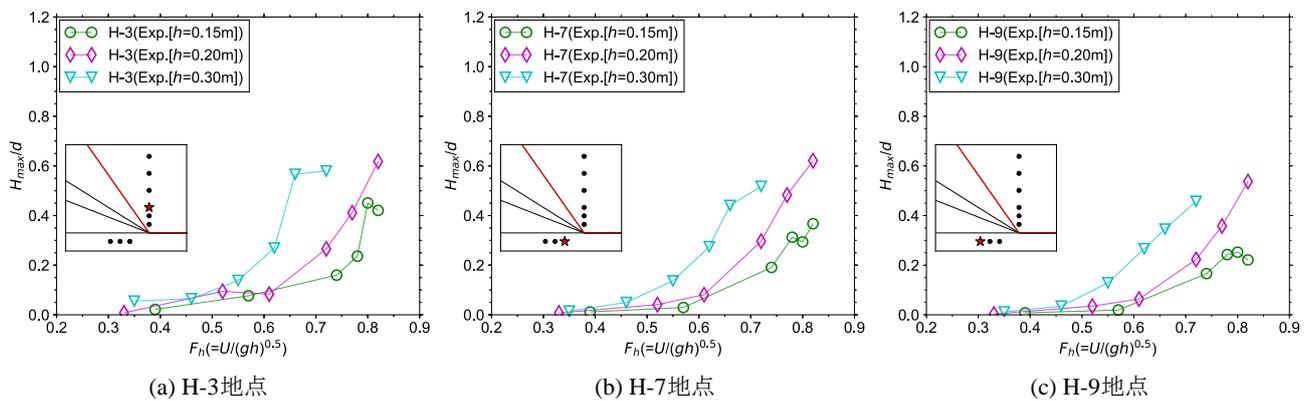


図-3.11 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（大）】，計測地点別の水深による違い），
縦軸：最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

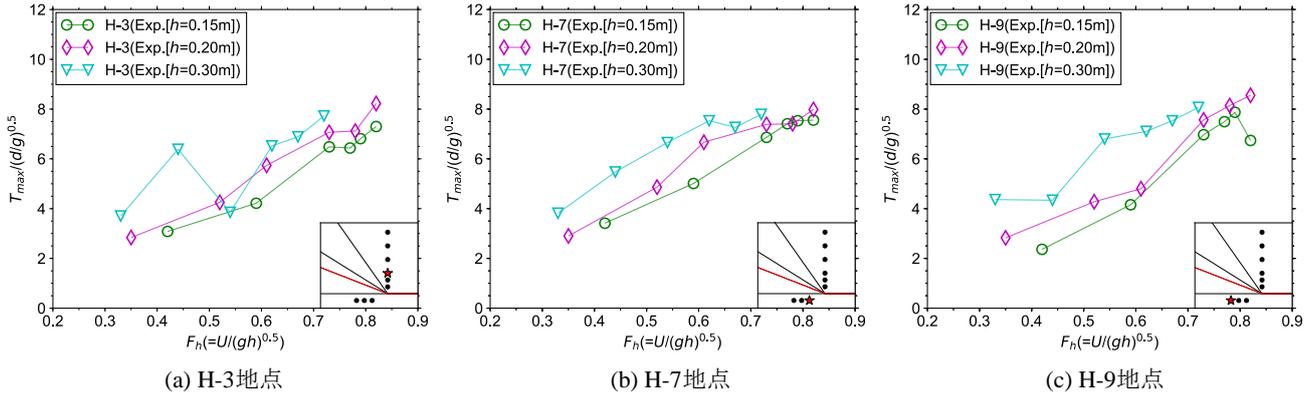


図-3.12 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化（屈曲航路【曲率（小）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

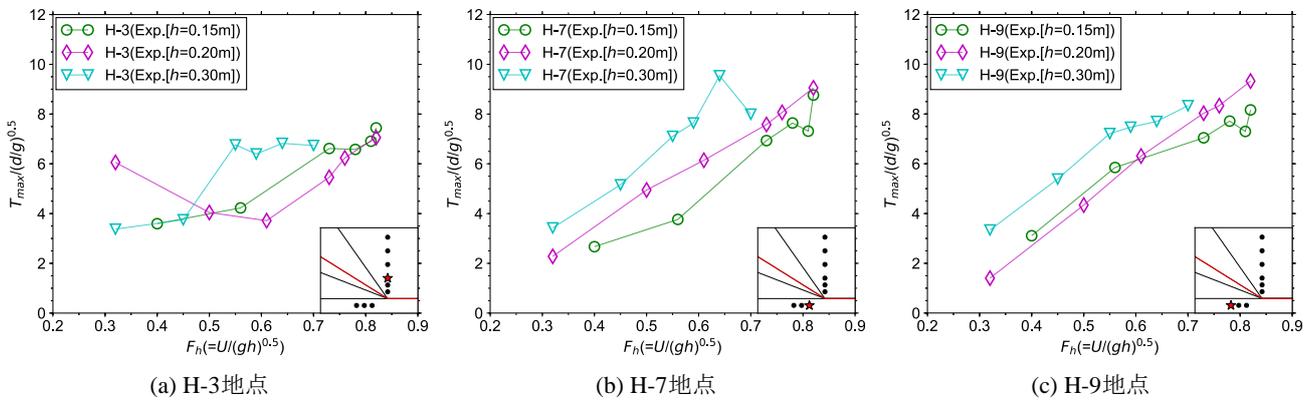


図-3.13 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化（屈曲航路【曲率（中）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

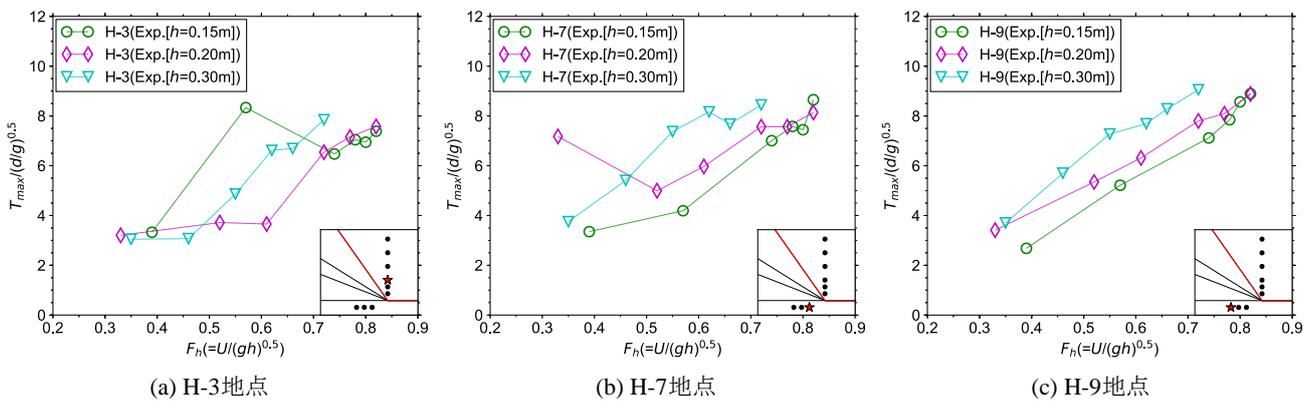


図-3.14 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化（屈曲航路【曲率（大）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

4. 平面水槽で計測された航跡波の再現計算

4.1 再現計算の概要

2.2節において、倉田ら(1983)の実験結果に対し実施したときと同様に、3章で示した平面水槽実験のうち直線航路で造波された航跡波の計測結果を用いて、自走する模型船(ラジコン船)に対するモデル補正係数 m_p , m , 及びそれらの $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ に対する変化を各水深 $h=0.15\text{m}, 0.20\text{m}, 0.30\text{m}$ ($d/h=0.44, 0.33, 0.22$) に対して推定した。また、これらのモデル補正係数を用いて、水深フルード数 F_h に対する航跡波の最大波高 H_{max} ・周期 T_{max} の変化特性に関する再現計算を実施した。

(1) 模型船(ラジコン船)の船舶諸元

模型船(ラジコン船)における船首尾方向の断面積分布は、実際の形状を3Dスキャナー(Sense™ (3D systems製))で走査し取得した3次元的な座標情報を用いて設定した。この3Dイメージ(STLデータ)を図-4.1に示す。また、模型船のSTLデータから得られた断面積分布を、模型船の船舶諸元(垂線間長 $L_{pp}=0.75\text{m}$, 船幅 $B_s=0.20\text{m}$, 喫水 $d=0.066\text{m}$)をそれぞれ式(3)(放物線近似), 式(4)-(10)(Lewis近似)に代入して得られた断面積分布 S と比較した結果を図-4.2に示す。さらに、模型船のブロック係数

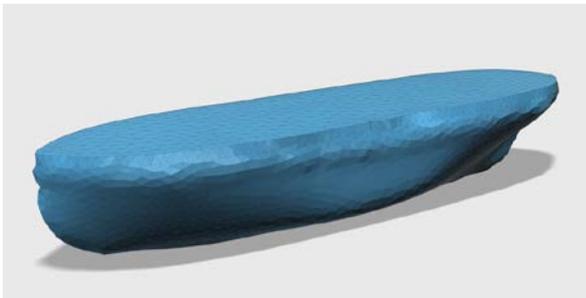


図-4.1 3D スキャナーで得た模型船の3Dイメージ

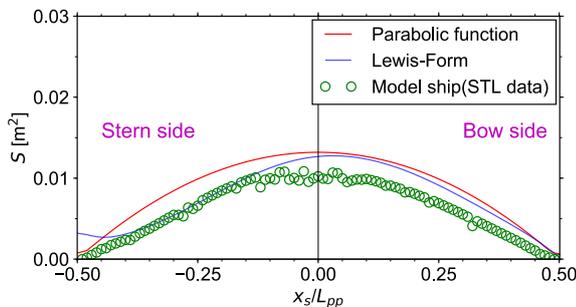


図-4.2 模型船(STLデータ)及び放物線, Lewis-Formによる断面積分布の比較,
縦軸:断面積, 横軸:船舶の船首尾方向の位置

$BC=0.471$ に対する中央横断面積係数はそれぞれ、放物線近似では $\alpha_p=0.71$, Lewis近似では $\alpha_l=0.80$ と算定された。

(2) 航跡波造波モデルの平面2次元場への拡張

2.1節で示した航跡波造波モデルは、平面2次元場で設定した計算格子のいずれかの格子軸に沿った直線航路を、船舶が航行することを想定している。そこで、航路が途中で屈曲する場合も含め、平面2次元場に対し航路を自由に設定できるように、ここでは式(1)を式(11), (12)のように拡張した。

$$Q_x = \pm \frac{1}{2} U m \alpha \frac{dS}{dr} \sin \theta \quad (11)$$

$$Q_y = \pm \frac{1}{2} U m \alpha \frac{dS}{dr} \cos \theta \quad (12)$$

すなわち、航路が計算格子の x 軸に沿う1次元場では、船速 U と船舶の断面積 S の変化量に依存する流量の湧き出しと吸い込みを表現するために、 y 軸方向のみに Q_y を与えていた。一方、平面2次元場では、 x 軸に対する船舶の進行角度 θ (反時計回りを正)に応じて、 x 軸方向にも流量 Q_x を与えることとした。ここで、 r は船舶の進行方向に沿う船舶の中心位置からの距離である。

平面2次元場での航跡波の造波は、1次元場と同様、針路と船速または各時刻における船舶の位置に応じて、船舶の両側に設定した造波境界を時々刻々と移動させることで実施される。したがって、航跡波を造波するための入力データとしては、任意に設定した航路上の各位置での船速または各時刻での船舶位置の一覧である。なお、船舶の船首尾方向の断面積分布 S は、放物線近似, Lewis近似のいずれの場合も、1次元場と同様、式(3)または式(4)-(10)で与えられる。

4.2 航走時の航跡波

(1) モデル補正係数の推定

模型船(ラジコン船)の船舶諸元に対するモデル補正係数の推定は、2.2節と同じ差分条件のなかから4種類を選定し、 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)=39.05$ ($\Delta x=\Delta y=0.062\text{m}$), 78.22 ($\Delta x=\Delta y=0.044\text{m}$), 122.2 ($\Delta x=\Delta y=0.035\text{m}$), 166.7 ($\Delta x=\Delta y=0.030\text{m}$), 206.6 ($\Delta x=\Delta y=0.027\text{m}$)とした。また、再現対象とする実験ケースは、 $h=0.15\text{m}$ ではcase02 ($U=0.97\text{m/s}$, $F_h=0.80$), $h=0.20\text{m}$ ではcase01 ($U=1.13\text{m/s}$, $F_h=0.81$), $h=0.30\text{m}$ ではcase02 ($U=1.11\text{m/s}$, $F_h=0.65$)とし、いずれも航路に最も近いH-1(0.5m)地点において F_h に対し最も大きな H_{max} が計測されたケースとした。さらに、 $m\alpha$ の最適値を

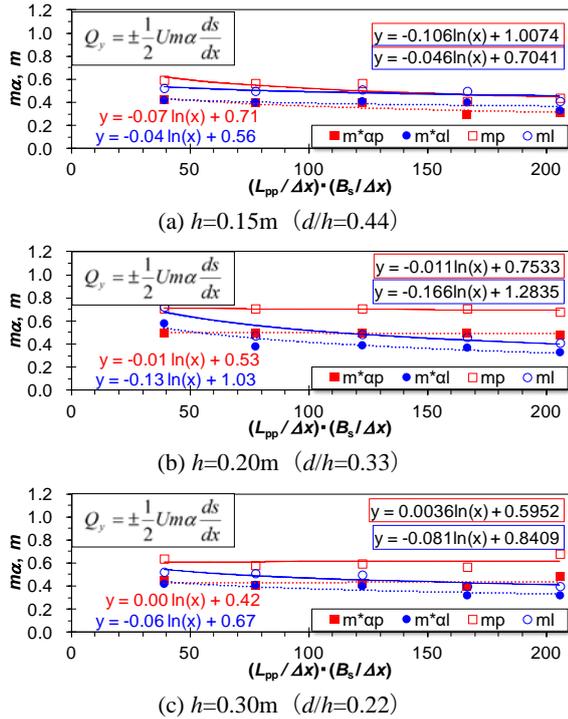


図-4.3 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ に対する最適 $m\alpha$ 値及び m 値の変化，縦軸：最適 $m\alpha$ ， m 値，横軸：垂線間長と船幅に対する格子解像度の比

推定するための変動係数 CV は，計測実験において水の粘性（表面張力）による波高減衰の影響が懸念されるH-4～H-6地点を除き，H-1～H-3地点における実験結果と計算結果を比較して得られる最大波高の誤差を対象に算出した。

図-4.3に，各水深で推定された最適な $m\alpha$ 及びモデル補正係数 m を示す。水深0.15m ($d/h=0.44$)では，放物線近似，Lewis近似ともに，最適な $m\alpha$ 及び m は $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ が大きくなるにつれて減少し， m^*p 及び m^*l はほぼ一致している。これらはほぼ同じ水深で倉田ら（1983）が用いた模型船に対する傾向と同様である。しかし，船舶諸元に依存しないモデル補正係数 m の値は，ラジコン船に対する値のほうが全体的に2割程度小さい。したがって，この原因は，水深に占める喫水の割合（ d/h ）の違いによるものと考えられる。すなわち，倉田ら（1983）が用いた $d/h=0.67$ に比べて本実験に用いたラジコン船の喫水が浅いために，水深方向に様な横流出・流入流量を与える本モデルでは，それらの流量をより低減させる必要があったものと推察される。ただし，模型船を曳航台車に完全に固定した倉田ら（1983）の水槽実験とは異なり，本研究で用いたラジコン船ではHeaving, Pitching, Rolling等の自由運動を伴うため，それらによる造波ロスが航跡波の最大波高を低減した可能性も考えられる。

また，喫水に比べ相対的に水深がより深い $h=0.20\text{m}$ ($d/h=0.33$)

$h=0.33$)， 0.30m ($d/h=0.22$)について，Lewis近似では $h=0.15\text{m}$ ($d/h=0.44$)と同様，モデル補正係数は $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ が大きくなるにつれて徐々に小さくなる。それに対し，放物線近似では，モデル補正係数は $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ によらずほぼ一定である。この原因はいまのところ不明であるが， d/h が小さい場合，船首尾方向の各断面で喫水が一定である放物線モデルでは，計算格子幅 Δy （及び Δx ）が小さいときに顕著となる，船体を表す1格子幅の水域での水位変動の増幅があまり生じていないようである。このように， $h=0.20\text{m}$ ($d/h=0.33$)， 0.30m ($d/h=0.22$)については放物線近似とLewis近似のモデル補正係数の変化傾向は大きく異なり，対象船舶の喫水に対し，式(1)または式(11)，(12)で表わされる航跡波の造波モデルを適用できる相対水深の範囲を超えている可能性がある。

(2) 最大波高の再現性

直線航路に対して垂直な測線上に配置したH-1～H-6の波高計を対象とし，それらにおいて計測された航跡波形をゼロアップクロス解析して得られる，各水深での水深フルード数 F_h による最大波高の変化について，3.2節で示した実験結果に対する再現計算の結果を，水深別に，図-4.4 ($h=0.15\text{m}$)，図-4.6 ($h=0.20\text{m}$)，図-4.8 ($h=0.30\text{m}$)にそれぞれ示す。なお各図とも，最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化するとともに，航路に対する波高計の位置関係及び着目した波高計を星印で示した図を窓表示した。また，これらの再現計算に使用した空間解像度は図-4.3の作成でも使用した $\Delta x=\Delta y=0.044\text{m}$ ($(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)=78.22$)であり，各造波モデルに対する各水深でのモデル補正係数はこのとき推定されたものをそのまま用いた。

まず，全体を通してみると，放物線近似，Lewis近似ともに， H_{max} が F_h に応じて増加し，かつ伝播とともに H_{max} が全体的に低減する実験結果の傾向については，どちらも比較的よく表現できていることがわかる。

次に， $h=0.15\text{m}$ ($d/h=0.44$)とした図-4.4をみると，放物線近似では F_h が0.7程度以下において全体的に H_{max} 値を過大に算定するとともに，伝播により H_{max} が低減するH-4，H-5地点において， F_h の増加に伴う H_{max} の急激な増大が再現されず逆に減少している。一方，Lewis近似では，いずれの F_h 値に対する H_{max} 値も比較的よく再現しており，放物線近似に比べ適用性が高いことが確認できる。ただし，より詳細には，航路に近いH-1，H-2地点において F_h が0.6-0.7程度以上のとき若干の過大評価，航路から離れたH-5，H-6地点においていずれの F_h 値に対しても若干の過小評価となっている。

また， $h=0.20\text{m}$ ($d/h=0.33$)とした図-4.6をみると，放

物線近似, Lewis近似による実験結果に対する再現性は, それぞれ図-4.4の傾向とほぼ同様であるが, 図-4.6ではこれらの傾向がより顕著に表れている. ただし, 放物線近似ではH-4, H-5地点でも F_h の増加に伴う H_{max} の急激な増大が再現されるようになり, Lewis近似では特にH-2地点での再現性がさらに向上している.

一方, $h=0.30\text{m}$ ($d/h=0.22$)とした図-4.8をみると, 両近似による再現性は, 図-4.6よりはむしろ図-4.4の傾向に近い. すなわち, 放物線近似では F_h が0.7程度以下において全体的に H_{max} 値を過大に算定しているが, それ以上の F_h 値に対する H_{max} 値の再現性はかなり良い. また, Lewis近似では, 航路に近いH-1, H-2地点において放物線近似と同程度に H_{max} 値を過大評価するものの, その他の地点では, 放物線近似に比べいずれの F_h 値に対する H_{max} 値も非常によく再現している.

これらの結果から, Lewis近似は, いずれの水深でも, F_h 値の増加に伴う H_{max} 値の増大や伝播に伴う H_{max} 値の低減を全体的によく再現できることが確認された. また, 図-2.8と同様, 特に F_h 値が小さいときの再現性が高いことから, 少なくとも, 船尾で発生する後続波が卓越する航跡波の造波に対して適用性が高いと言える. 一方, 放物線近似では, いずれの水深でも, F_h 値が大きく船首で発生するソリトン波が卓越する場合には, 伝播に伴う低減も含めて H_{max} 値をよく再現できることが確認された.

ただし, これらの再現計算に用いたモデル補正係数は H_{max} 値がほぼ最大となる F_h 値が大きい場合を対象として推定されたものであった. したがって, 特に放物線近似に対しては, F_h 値が小さい場合に適用できるモデル補正係数を別途推定して使い分けることにより, 後続波が卓越する場合にも航跡波の再現性の向上が期待できるものと思われる.

(3) 最大周期の再現性

最大波高と同様, H-1~H-6地点で計測された航跡波形をゼロアップクロス解析して得られる, 各水深での水深フルード数 F_h による最大周期の変化について, 3.2節で示した実験結果に対する再現計算の結果を, 水深別に, 図-4.5 ($h=0.15\text{m}$), 図-4.7 ($h=0.20\text{m}$), 図-4.9 ($h=0.30\text{m}$)にそれぞれ示す. なお各図とも, 最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ で無次元化するとともに, 航路に対する波高計の位置関係及び着目した波高計を星印で示した図を窓表示した. また, これらの再現計算に使用した空間解像度及びモデル補正係数については, 上述の通りである.

まず, 全体を通してみると, 放物線近似, Lewis近似とともに, F_h が概ね0.5以上のとき, T_{max} が F_h に応じて増加し,

かつこれらの値が伝播距離に応じて変化しない傾向は, どちらも比較的良好に表現できていることがわかる.

次に, $h=0.15\text{m}$ ($d/h=0.44$)とした図-4.5をみると, 放物線近似, Lewis近似ともに, F_h が0.7程度以下において全体的に T_{max} 値を過大に算定するとともに, 伝播するにつれて小さな F_h から順に T_{max} 値がさらに過大に算定されている. また, この傾向はとくにLewis近似において顕著にみられる. しかし, F_h が概ね0.8以上では, 伝播距離に関わらず, 両近似ともに T_{max} 値を比較的良好に再現している.

また, $h=0.20\text{m}$ ($d/h=0.33$)とした図-4.7をみると, 両近似ともに, 実験結果に対する再現性は図-4.5の傾向とほぼ同様であるが, 図-4.7ではこれらの傾向がより顕著に表れている. ただし, F_h が0.7-0.8程度以上では, 伝播距離に関わらず, 両近似ともに T_{max} 値を比較的良好に再現している.

一方, $h=0.30\text{m}$ ($d/h=0.22$)とした図-4.9をみると, 両近似による再現性は, 図-4.7よりはむしろ図-4.5の傾向に近い. すなわち, Lewis近似において T_{max} 値をより過大に算定し, かつ伝播とともに実験結果との差が大きくなる傾向は依然としてみられるものの, 大きな F_h 値に対して伝播距離に関わらず両近似ともに T_{max} 値を比較的良好に再現する傾向は, F_h 値が0.5-0.6程度以上からみられるようになる.

これらの結果から, 放物線近似, Lewis近似ともに, いずれの水深でも, 水深フルード数 F_h が小さく船尾から発生する後続波が卓越する場合には, T_{max} 値を過大に算定する傾向にあることが確認された. その一方で, 各水深において, 両近似ともに T_{max} 値を比較的良好に再現できるようになる F_h 値はいずれも, 後続波が卓越する状態からソリトン波が卓越する状態へと遷移する付近に当たるため(3.2節参照), 放物線近似, Lewis近似はともに, ソリトン波が卓越する航跡波の最大周期に対する再現性は高いと言える.

なお, 後続波が卓越する航跡波の最大周期に対して, 再現性が未だ不十分である原因としては, 空間解像度の不足が挙げられる. すなわち, これらの再現計算に用いた計算格子幅 $\Delta x=\Delta y=0.044\text{m}$ は, ソリトン波が卓越する航跡波の最大周期 $T_{max}=0.5-0.6\text{s}$ ($T_{max}(g/d)^{0.5}=7$ 前後)の波長0.4-0.6m (水深0.15-0.30m)を, 9~13分割できる解像度を有する. しかし, 後続波による航跡波の最大周期が仮に0.2s程度 ($T_{max}(g/d)^{0.5}=2.5$ 程度, 波長0.06m程度)であった場合には, ソリトン波と同程度の解像度を確保するために現在よりも7~8倍程度細かな計算格子を用いる必要がある.

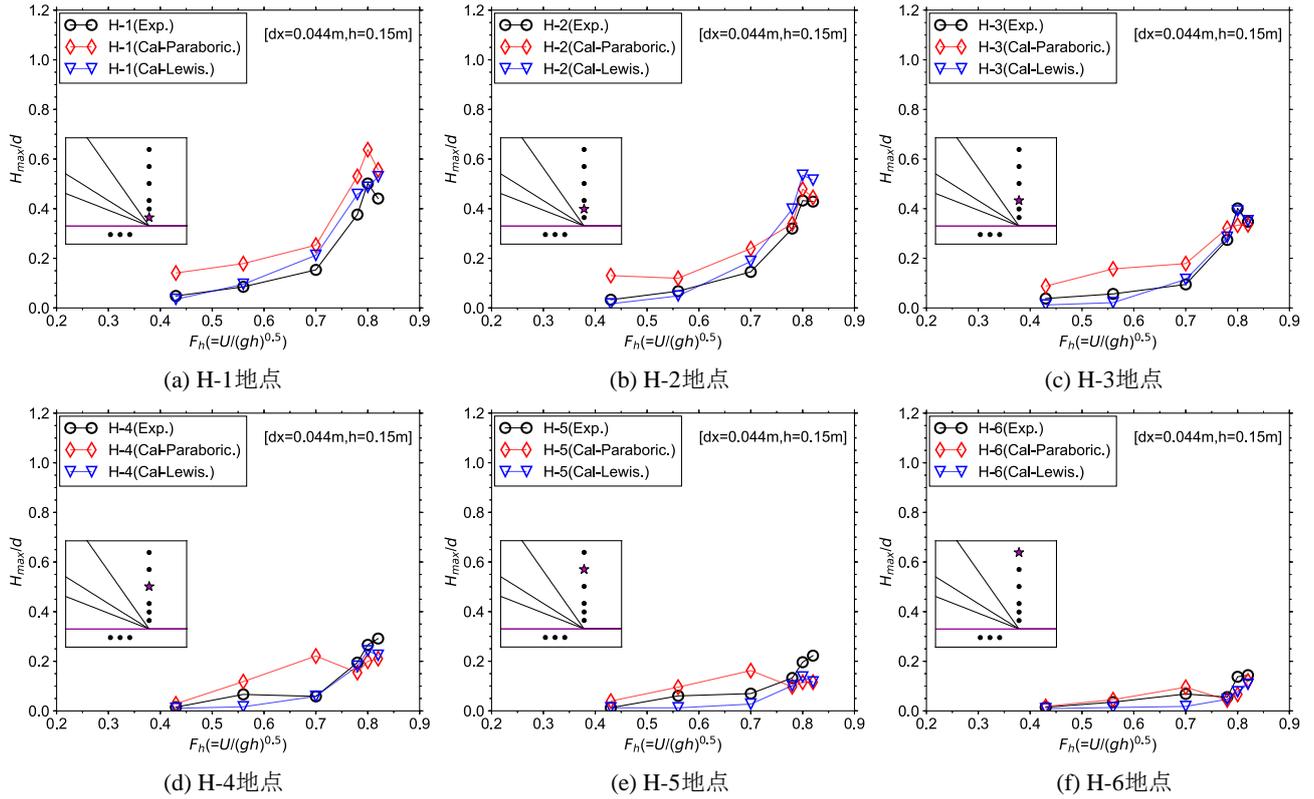


図-4.4 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (直線航路, 水深 $h=0.15\text{m}$),
縦軸: 最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値, 横軸: 水深フルード数 F_h

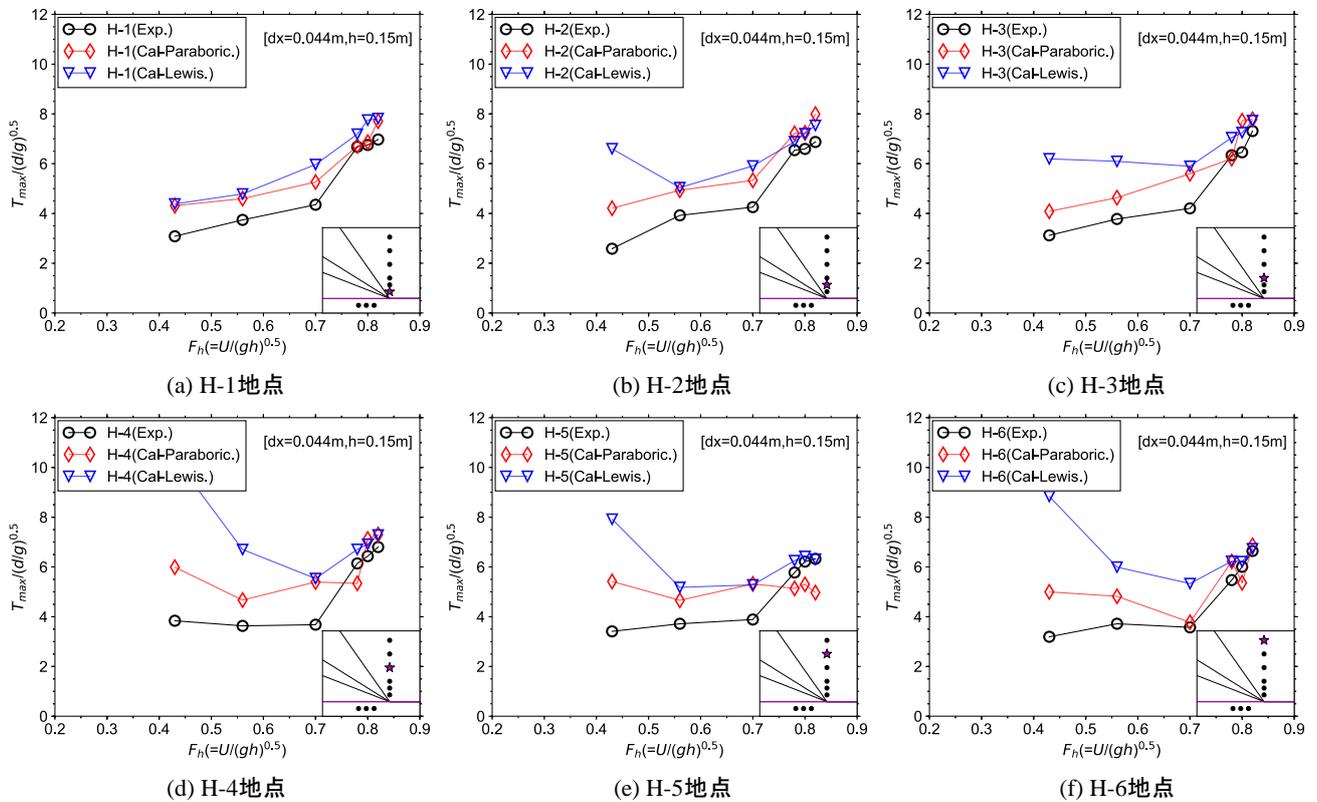


図-4.5 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較 (計測地点別) (直線航路, 水深 $h=0.15\text{m}$),
縦軸: 最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (d : 喫水, g : 重力加速度) で無次元化した値, 横軸: 水深フルード数 F_h

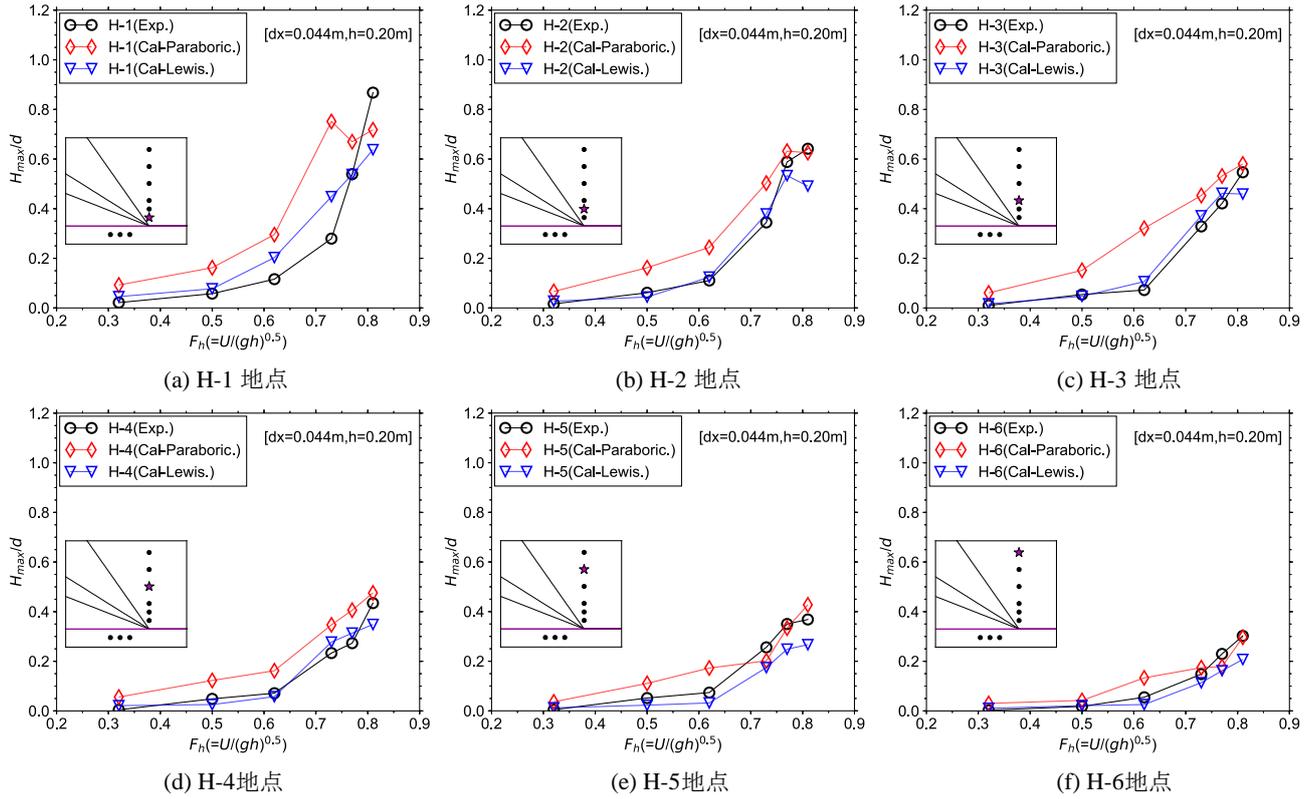


図-4.6 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (直線航路, 水深 $h=0.20\text{m}$),
 縦軸: 最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値, 横軸: 水深フルード数 F_h

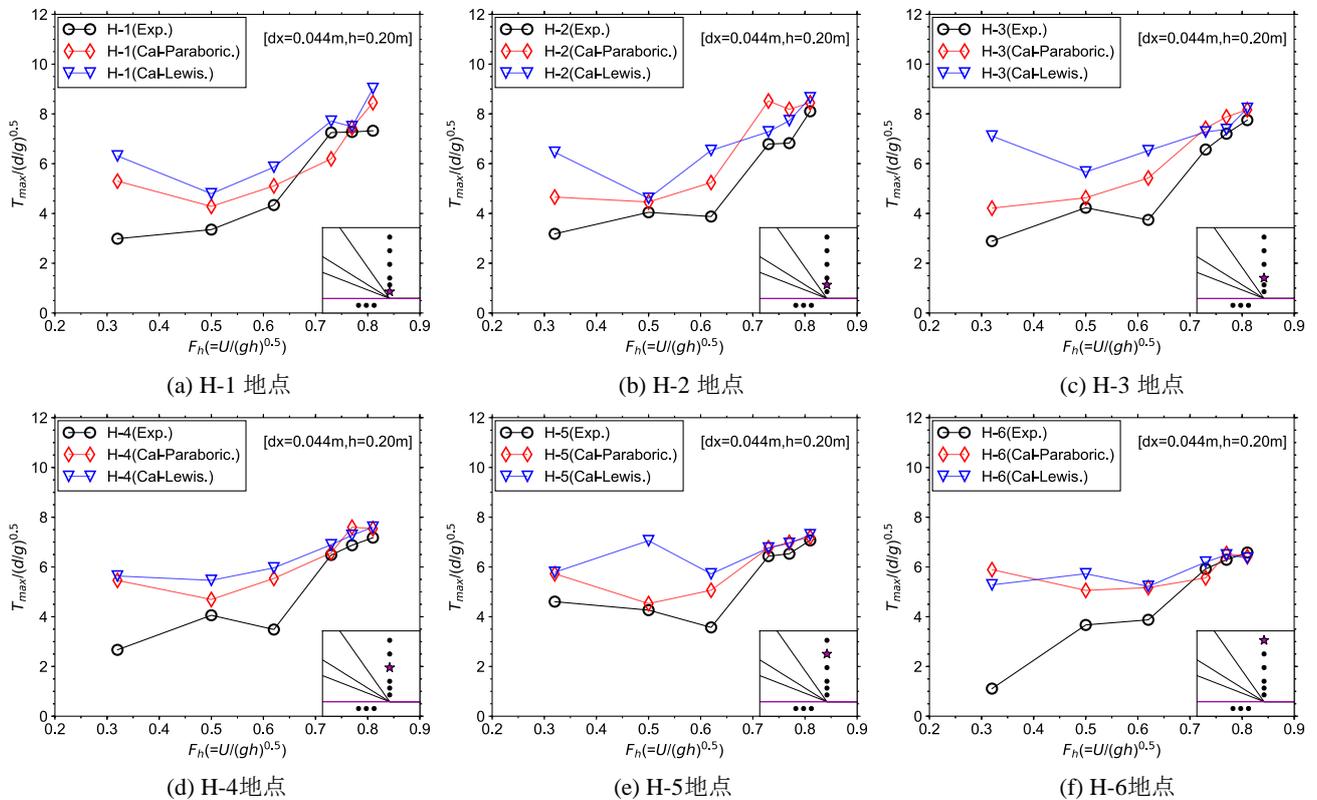


図-4.7 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較 (計測地点別) (直線航路, 水深 $h=0.20\text{m}$),
 縦軸: 最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (d : 喫水, g : 重力加速度) で無次元化した値, 横軸: 水深フルード数 F_h

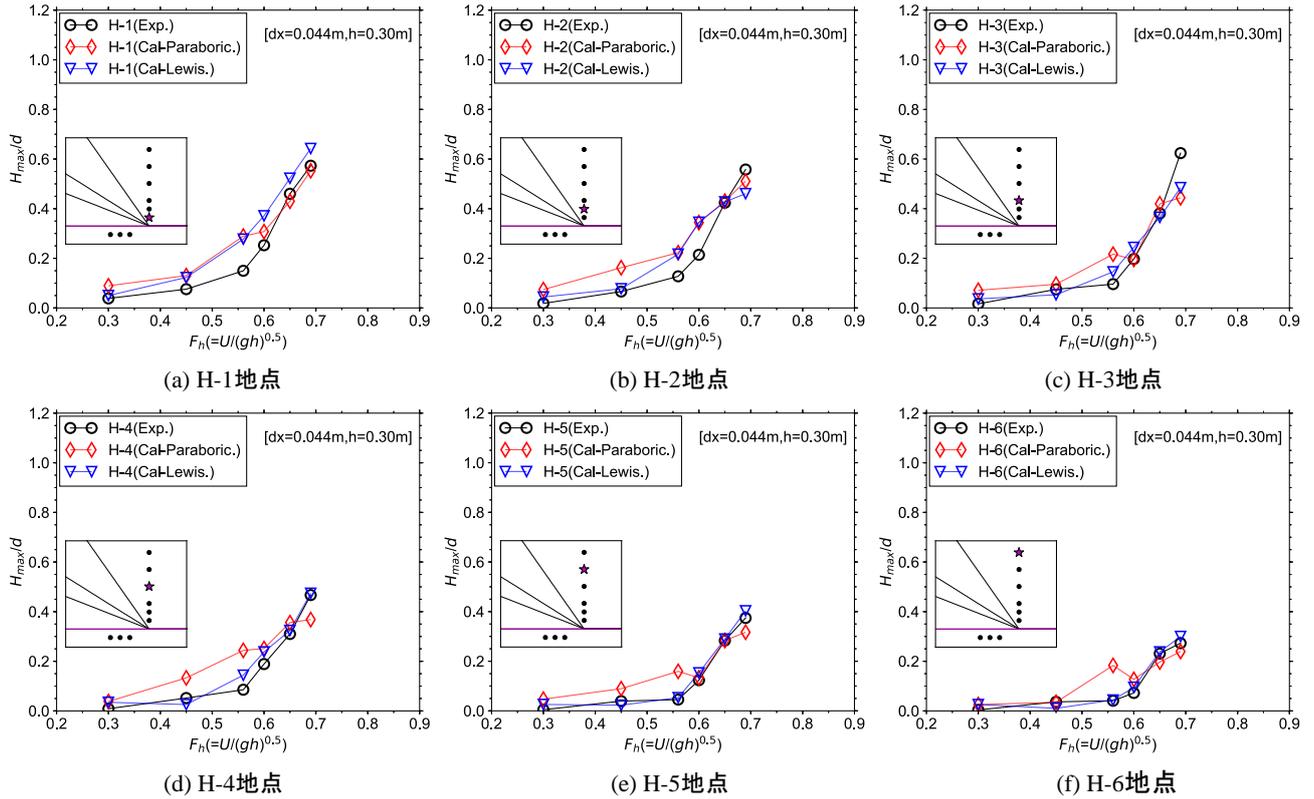


図-4.8 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較（計測地点別）（直線航路，水深 $h=0.30\text{m}$ ），
縦軸：最大波高 H_{max} を喫水 d で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

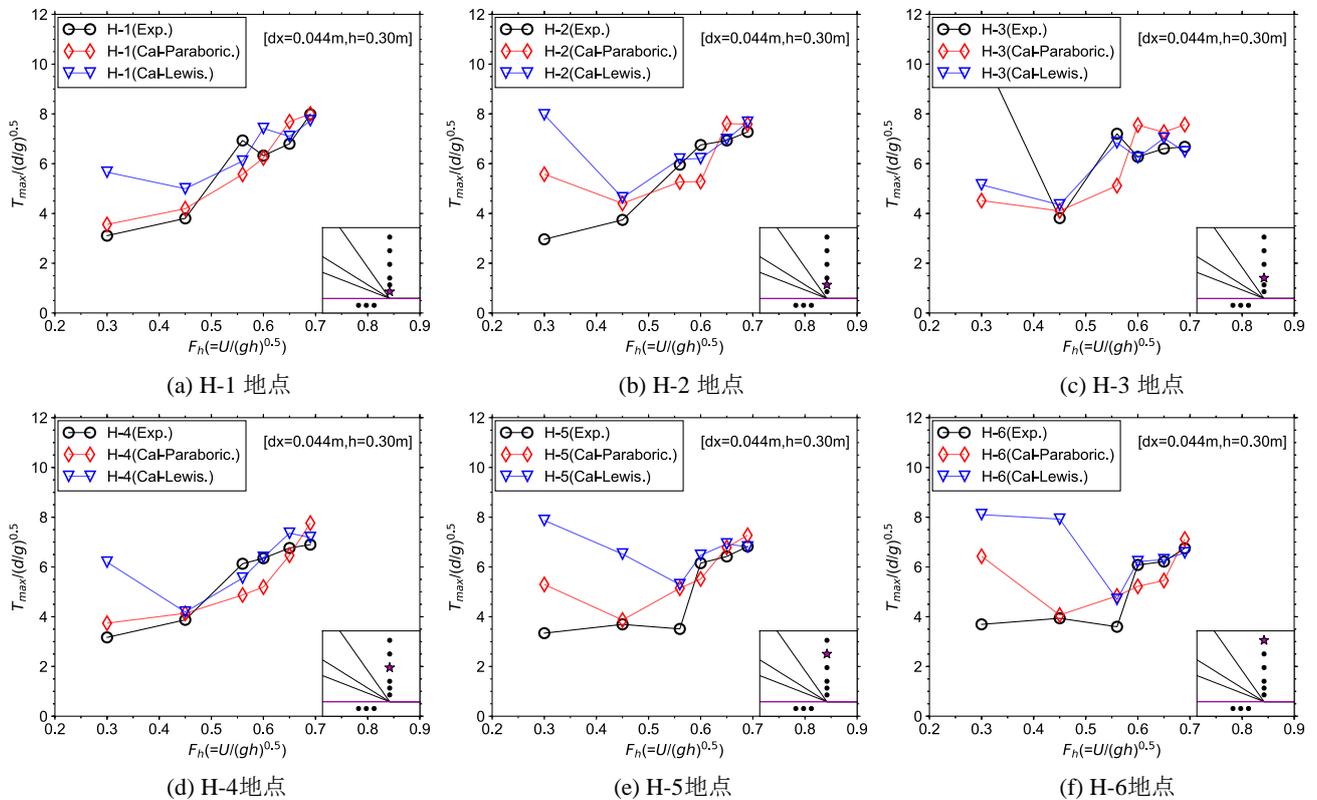


図-4.9 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（直線航路，水深 $h=0.30\text{m}$ ），
縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

4.3 旋回時の航跡波

ここでは、航走時（直線航路）に対して求めたモデル補正係数 m が旋回時にも適用できるものと仮定し、曲率を有する航路で造波された航跡波の最大波高及び最大周期の再現性を検討した。

すなわち、これらの再現計算に使用した空間解像度は4.2節でも使用した $\Delta x = \Delta y = 0.044\text{m} ((L_{pp}/\Delta x) * (B_s/\Delta y) = 78.22)$ とし、各造波モデルに対する各水深でのモデル補正係数はこのとき推定されたものをそのまま用いた。

なお、直線航路での計測結果との対応をみる際には、屈曲航路の内側に位置するH-3では旋回時の曲率が大きくなるほど航路が近づき、外側に位置するH-7、H-9では航路が遠ざかることに留意されたい。また、H-7、H-9については直線航路での再現結果を示していないが、これらと航路からの距離が同じH-1での再現結果を代用できることを付記しておく。

(1) 最大波高の再現性

屈曲航路の内側に位置するH-3、及び外側に位置するH-7、H-9で計測された航跡波形をゼロアップクロス解析して得られる各水深フルード数 F_h による最大波高の変化について、3.3節で示した実験結果に対する再現計算の結果を、屈曲航路の変針点における旋回時の曲率が小さいもの、及び水深が浅いものから順にそれぞれ、図-4.10～図-4.18に示す。なお、各図とも、直進航路と同様に最大波高 H_{max} を模型船の喫水 d で無次元化するとともに、航路に対する波高計の位置関係及び着目した波高計を星印で示した図を窓表示した。

まず、全体を通してみると、曲率や水深の違いによらず、放物線近似、Lewis近似ともに、 H_{max} が F_h に応じて増加する傾向については、いずれも比較的良好に表現できていることがわかる。

また、各水深 ($h=0.15\text{m}$, 0.20m , $h=0.30\text{m}$) での実験結果に対する再現傾向は、曲率の違いによらず、直線航路でみた傾向と比較的良好に一致した。特に、屈曲航路内側のH-3では、曲率が大きくなるにつれて航路からの距離が近づき、各 F_h に対して計測される H_{max} が次第に大きくなるが、それぞれの屈曲航路における再現性は、直線航路における各地点での再現性とよく対応している（すなわち、Lewis近似では、いずれの水深でも、 F_h 値の増加に伴う H_{max} 値の増大や伝播に伴う H_{max} 値の低減を全体的によく再現できる。一方、放物線近似では、いずれの水深でも、 F_h 値が大きくなると船首で発生するソリトン波が卓越する場合には、伝播に伴う低減も含めて H_{max} 値をよく再現できる）。

しかし、航路ごとにみると、屈曲航路外側のH-7、H-9

では、いずれの曲率においても、内側のH-3に比べて、放物線近似、Lewis近似ともに、 F_h 値によらず全体的に H_{max} 値を過大評価する傾向にある。この原因については現時点では不明であるが、3.3節で示した計測結果とその考察では捉えられなかった旋回時の内側と外側で造波される航跡波の違いが、式(11)及び式(12)による航跡波造波モデルにおいて再現されていない可能性が疑われる。

これらの結果から、放物線近似、Lewis近似ともに、屈曲航路外側の最大波高を過大に算定する傾向があるものの、屈曲航路内側ではいずれの水深でも、3.3節で考察した変針点前後の直線航路上でそれぞれ造波された航跡波の重畳も含めて、直線航路と同様の再現性を有していることが確認された。

(2) 最大周期の再現性

屈曲航路の内側に位置するH-3、及び外側に位置するH-7、H-9で計測された航跡波形をゼロアップクロス解析して得られる各水深フルード数 F_h による最大周期の変化について、3.3節で示した実験結果に対する再現計算の結果を、屈曲航路の変針点における旋回時の曲率が小さいもの、及び水深が浅いものから順にそれぞれ、図-4.19～図-4.27に示す。なお、各図とも、直進航路と同様に最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (g は重力加速度)で無次元化するとともに、航路に対する波高計の位置関係及び着目した波高計を星印で示した図を窓表示した。

まず、全体を通してみると、放物線近似、Lewis近似ともに、 T_{max} が F_h に応じて増加する傾向については、どちらも比較的良好に表現できていることがわかる。

また、各水深 ($h=0.15\text{m}$, 0.20m , $h=0.30\text{m}$) での実験結果に対する再現傾向は、曲率の違いによらず、直線航路でみた傾向と比較的良好に似ている。しかし、屈曲航路の外側に位置するH-7、H-9では、曲率が大きくなり航路が遠ざかるほど、 F_h が概ね0.5以上において T_{max} が線形に増加する傾向及びその値を、放物線近似、Lewis近似ともに、比較的良好に再現するようになる。一方、内側に位置するH-3では、曲率が大きくなり航路が近づくと、両近似において T_{max} を概ね再現していた F_h 値の下限値が上方へシフトしている。これらはいずれも、それぞれの曲率で計測された T_{max} 値に依存している。すなわち、曲率が大きくなるほど、ある F_h 値に対して計測される T_{max} 値が航路外側では大きく、航路内側では小さくなるために、再現計算に用いた格子幅によるこれらの波長に対する空間解像度が変化し、計算精度が外側では改善、内側では劣化するものと考えられる。したがって、 T_{max} の再現性を全般的に高めるためには、空間解像度の向上が不可欠と言える。

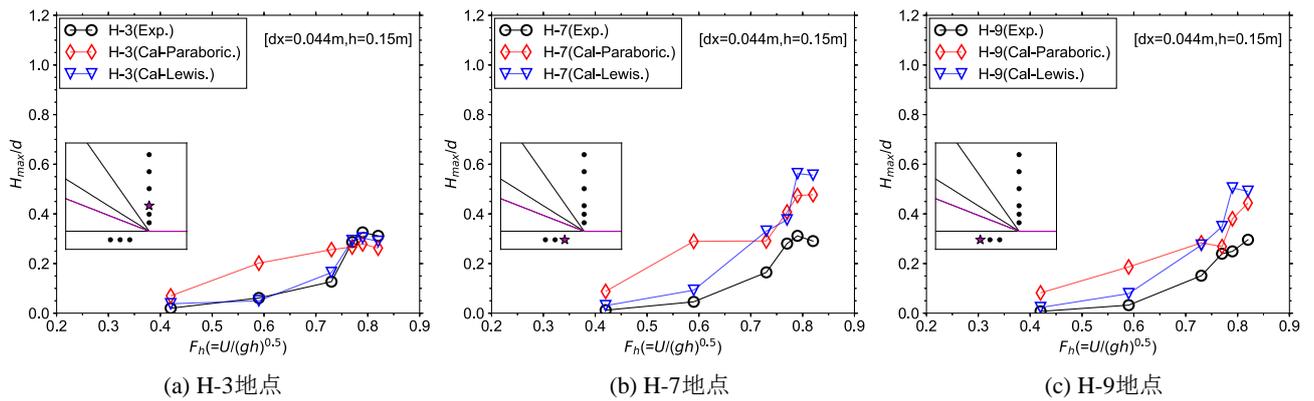


図-4.10 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (小)】, 水深 $h=0.15\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

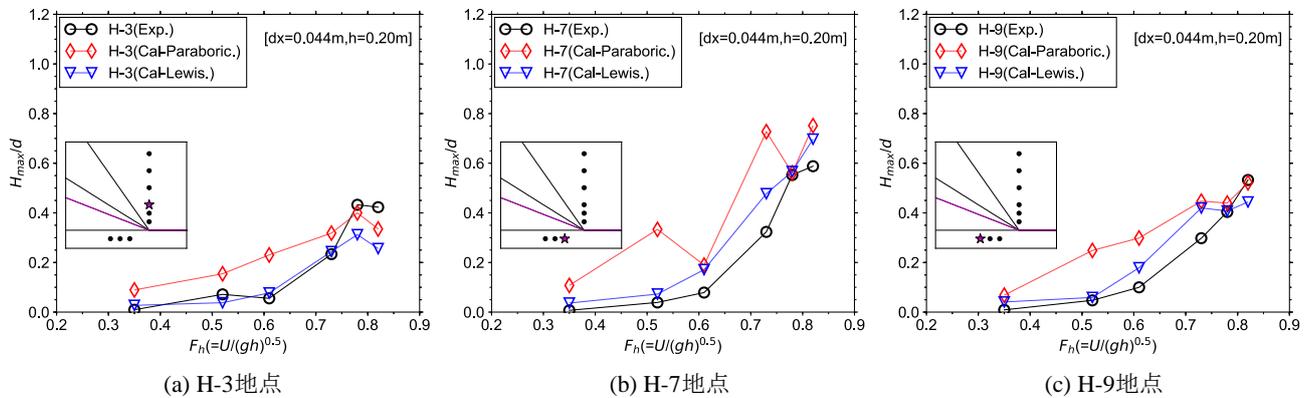


図-4.11 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (小)】, 水深 $h=0.20\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

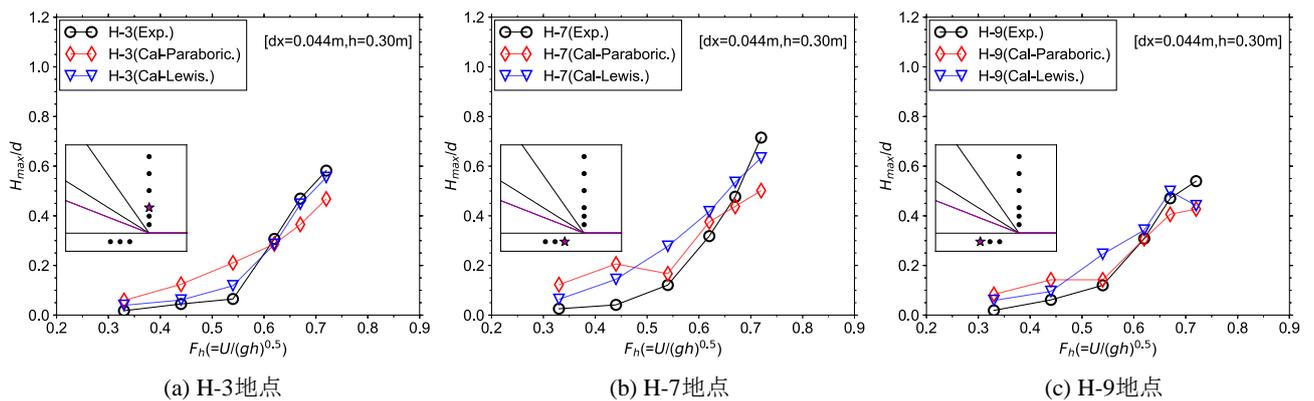


図-4.12 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (小)】, 水深 $h=0.30\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

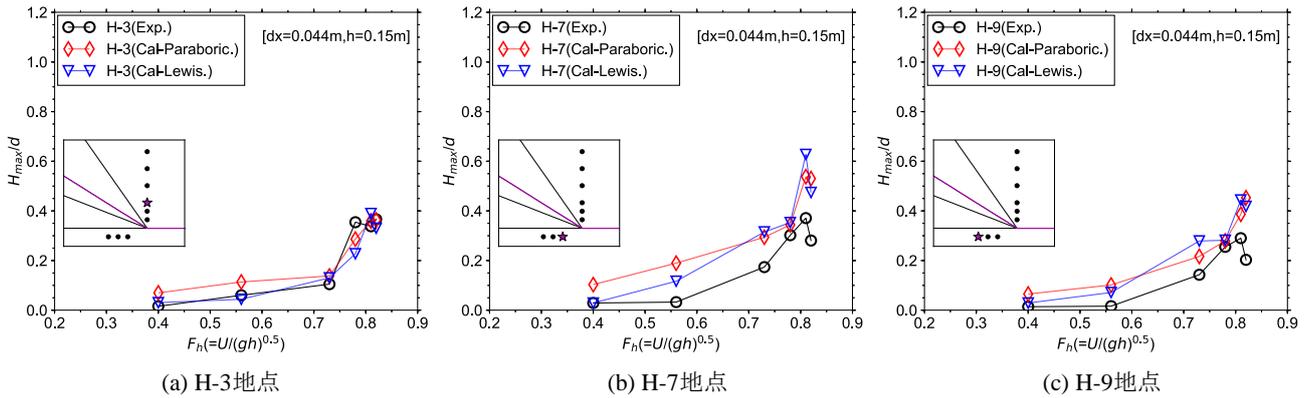


図-4.13 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.15\text{m}$ ），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

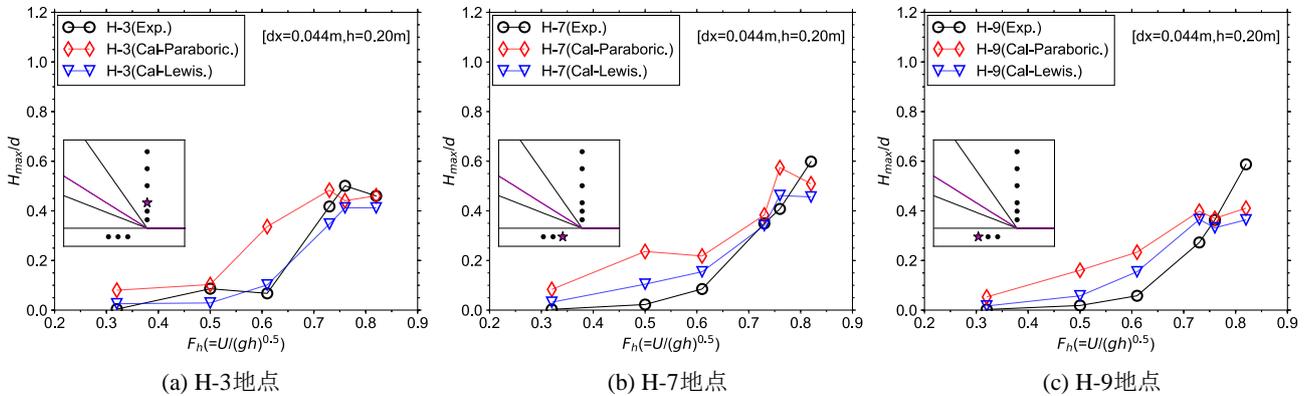


図-4.14 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.20\text{m}$ ），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

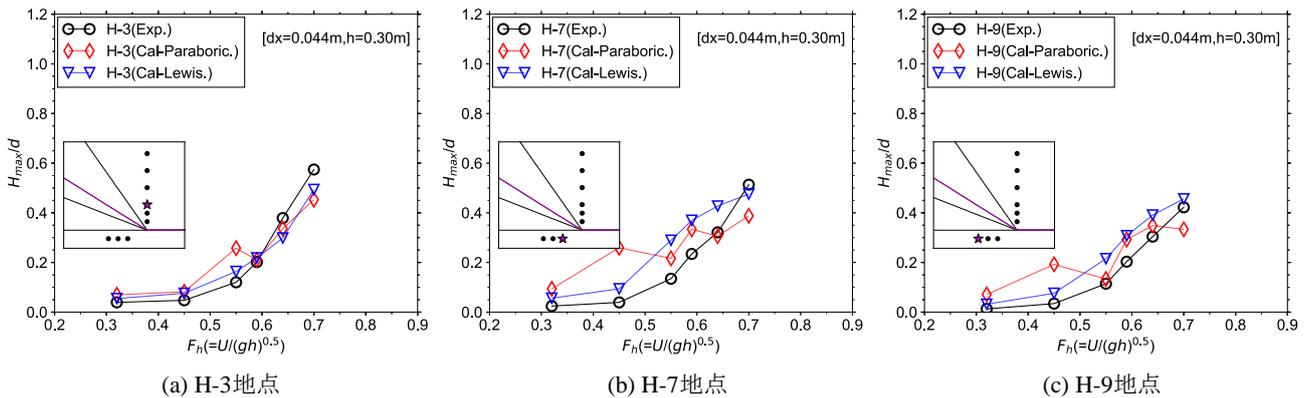


図-4.15 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.30\text{m}$ ），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

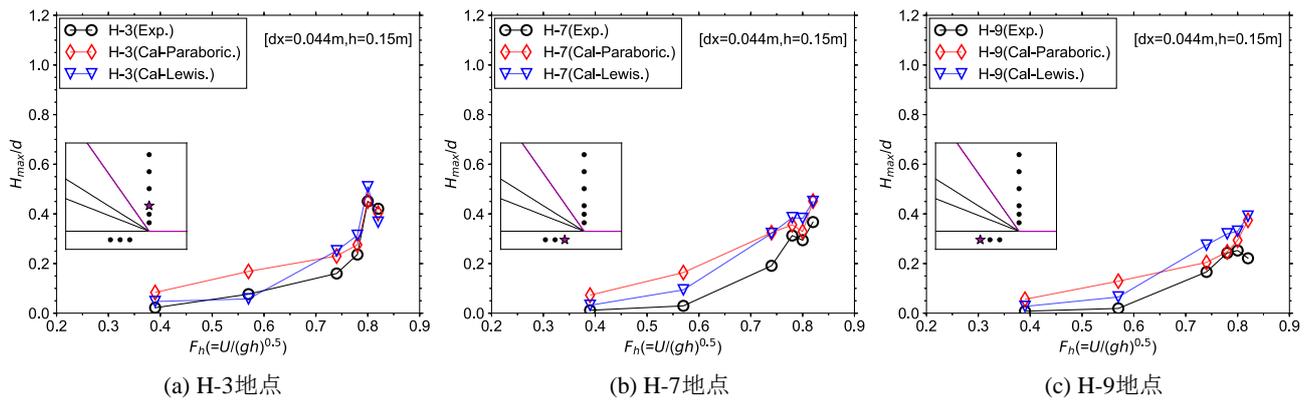


図-4.16 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (大)】, 水深 $h=0.15\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

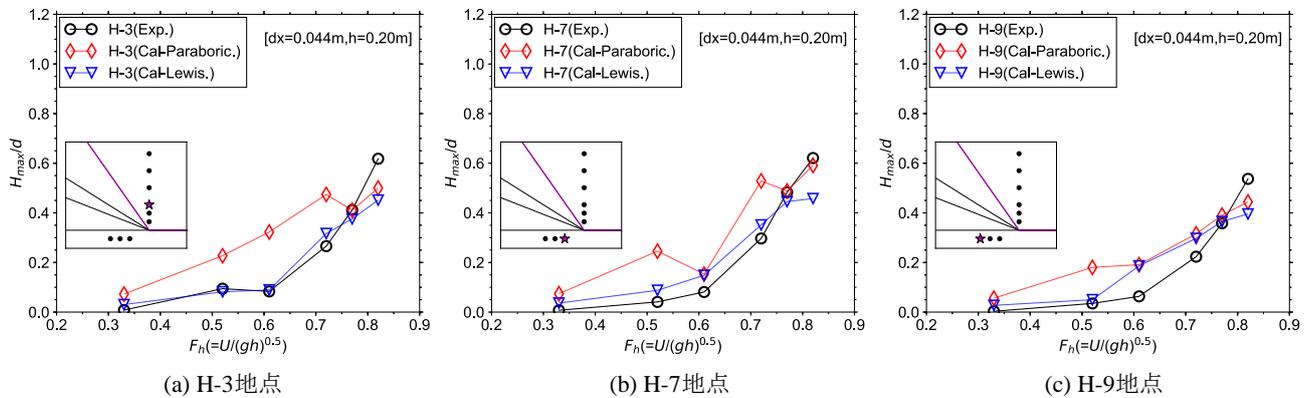


図-4.17 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (大)】, 水深 $h=0.20\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

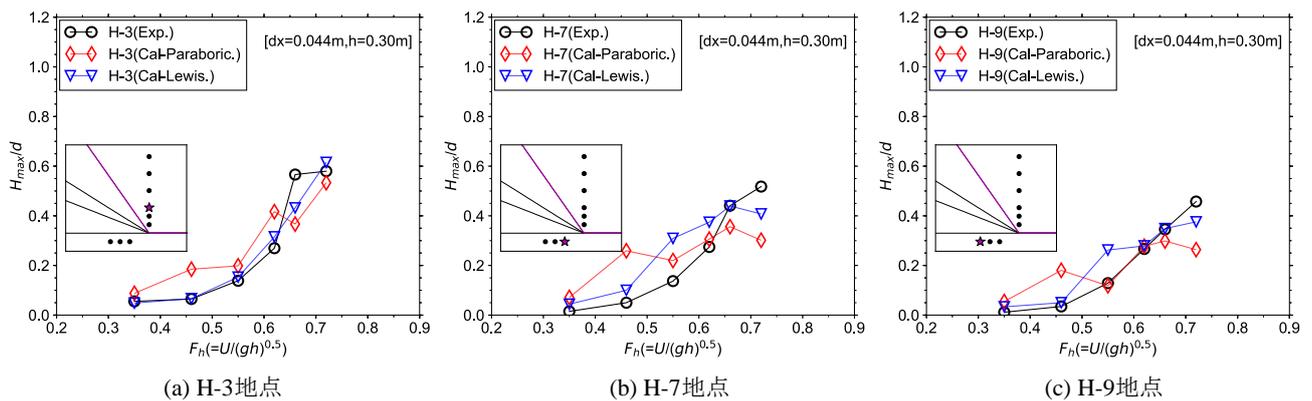


図-4.18 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化の比較 (計測地点別) (屈曲航路【曲率 (大)】, 水深 $h=0.30\text{m}$), 縦軸: 最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値, 横軸: 水深フルード数 F_h

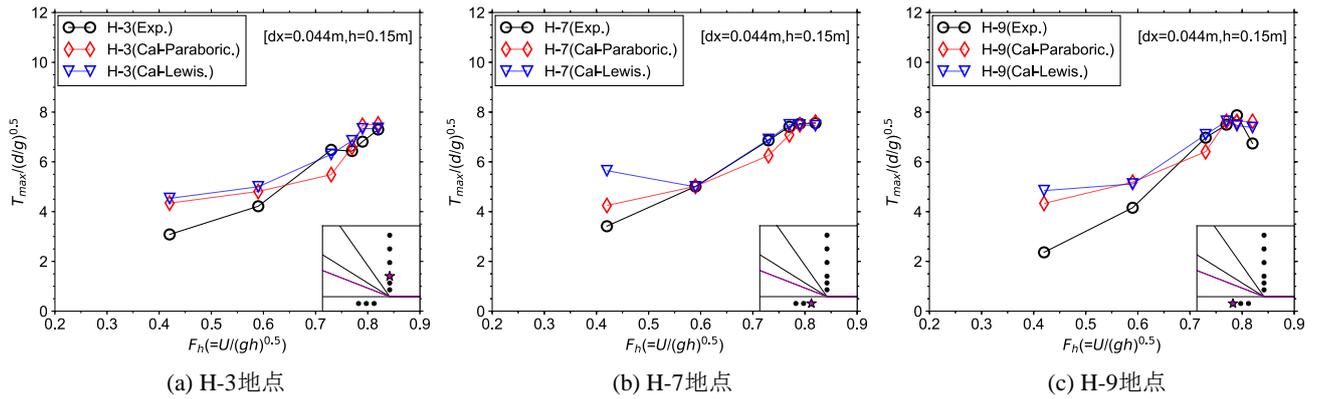


図-4.19 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（小）】、水深 $h=0.15\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

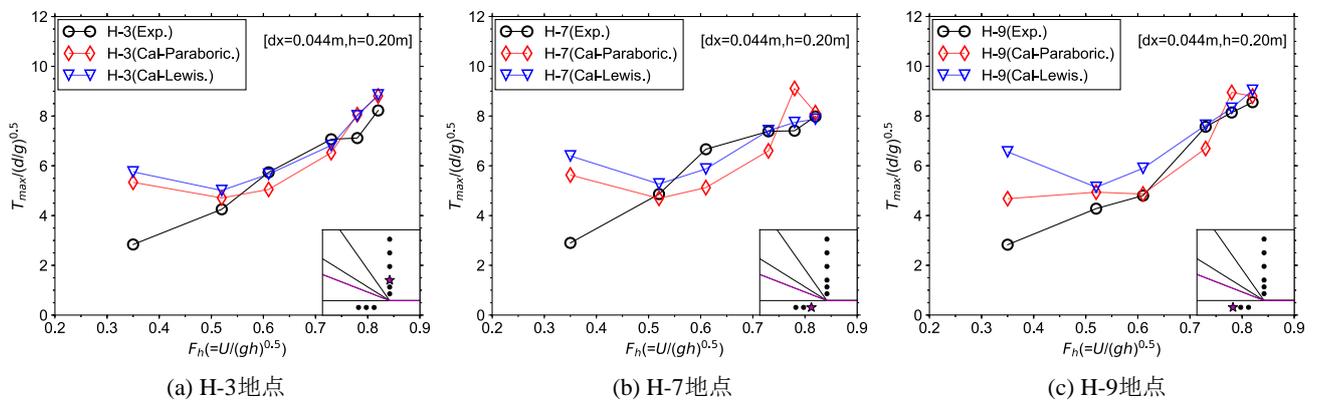


図-4.20 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（小）】、水深 $h=0.20\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

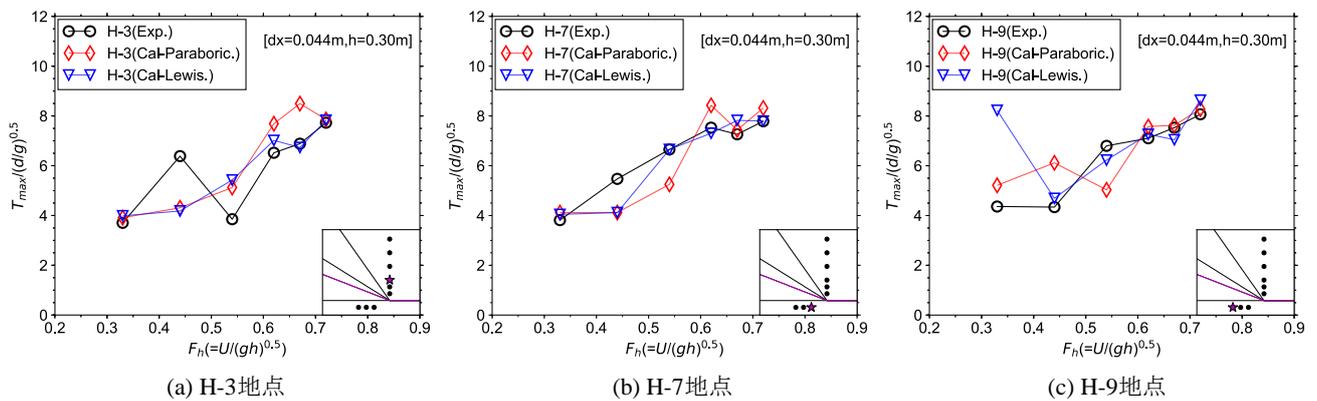


図-4.21 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（小）】、水深 $h=0.30\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

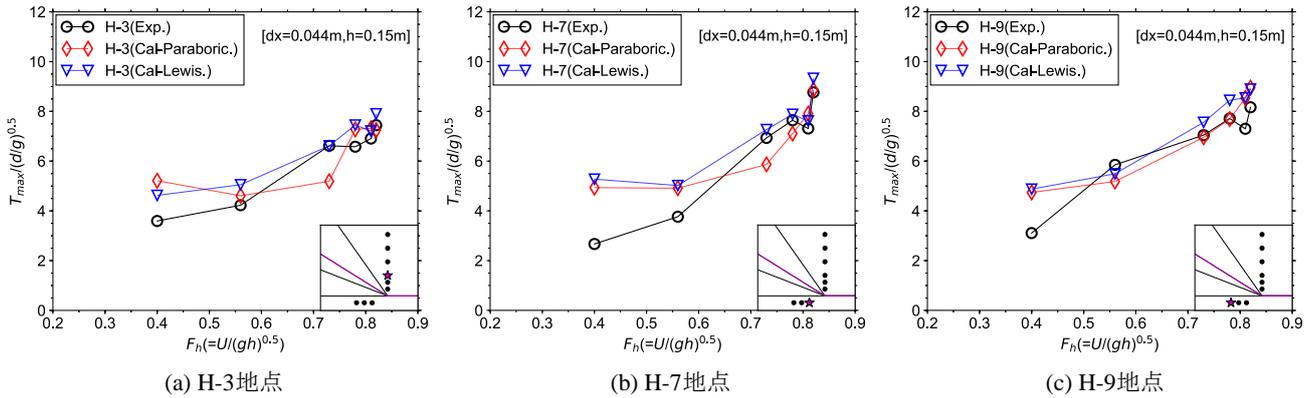


図-4.22 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.15\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

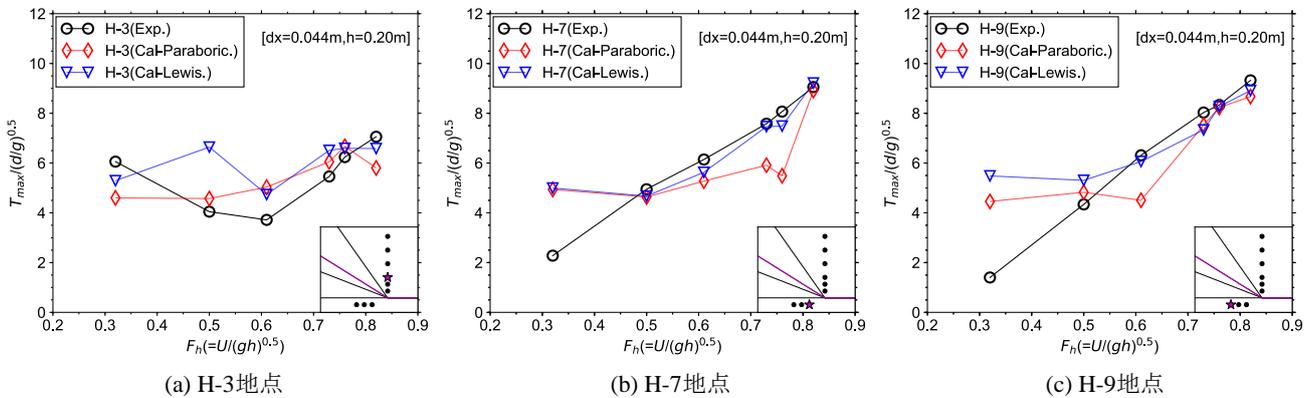


図-4.23 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.20\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

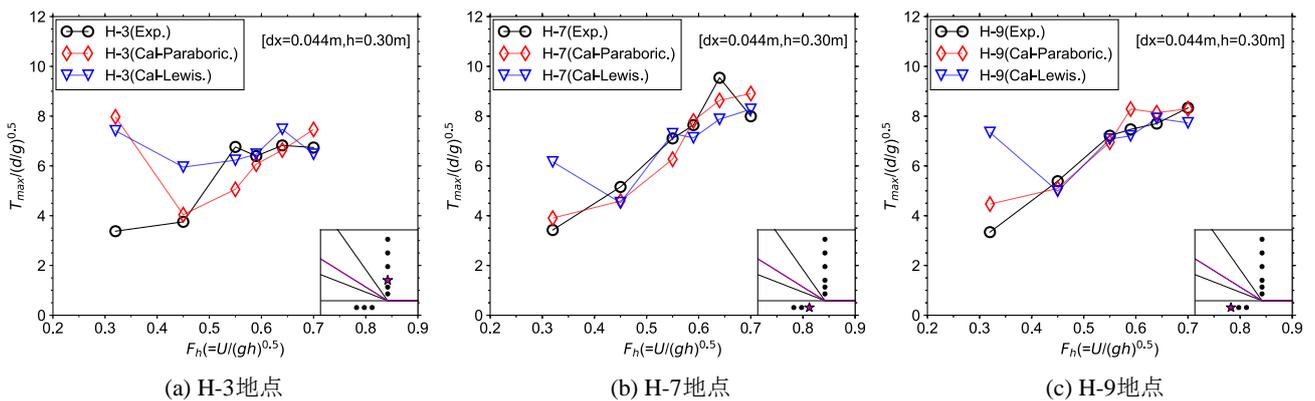


図-4.24 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（中）】，水深 $h=0.30\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

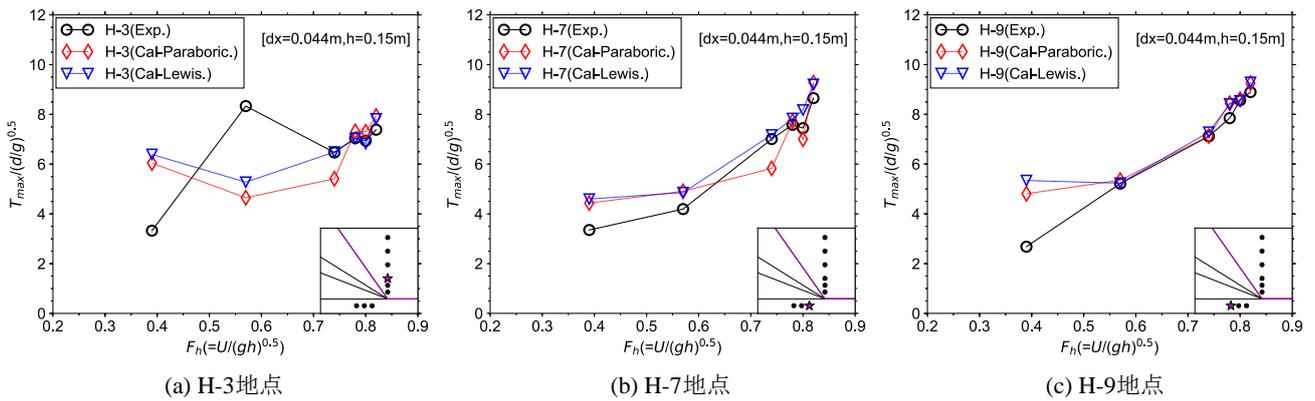


図-4.25 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（大）】，水深 $h=0.15\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

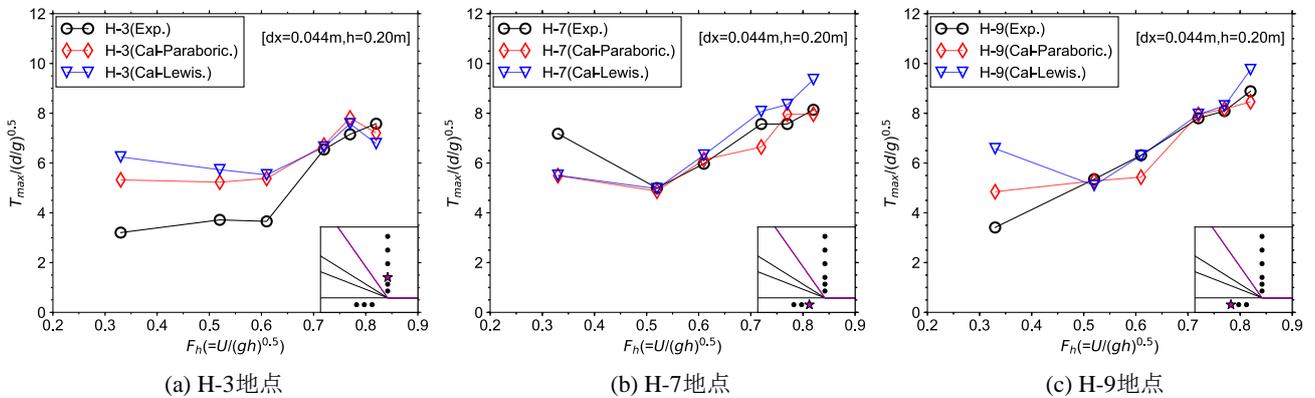


図-4.26 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（大）】，水深 $h=0.20\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

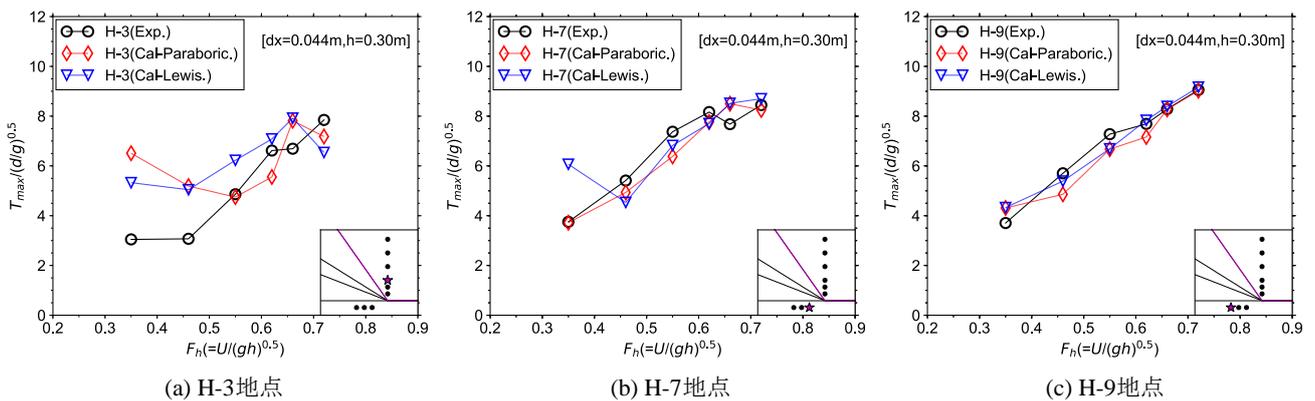


図-4.27 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化の比較（計測地点別）（屈曲航路【曲率（大）】，水深 $h=0.30\text{m}$ ），縦軸：最大周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

5. 航跡波造波モデルの汎用性に関する検討

名古屋港では、港内を航行する船舶に伴う航跡波の影響が懸念され、その観測結果に基づき、船長フルード数に対する船種別の最大波高の推定式が提案されている(池田ら, 2017)。ここでは、これらを再現目標として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。

5.1 内挿補間によるモデル補正係数の試算

本研究では、2.2節及び4.2節においてそれぞれ、各水深を航行する倉田ら(1983)の模型船及び独自のラジコン船による航跡波の計測結果に対する再現計算を行い、各船舶諸元の差分条件に対するモデル補正係数を推定した。

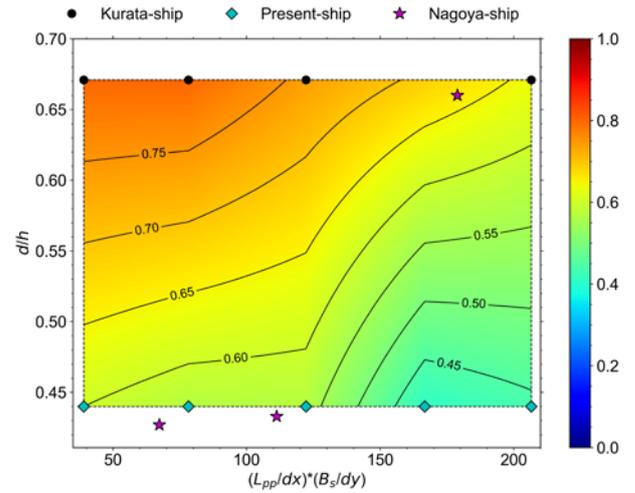
そこで本節では、本研究で新たに提案した航跡波造波モデルの汎用化を図るため、これらの推定結果を内挿補間することにより、本研究で対象としたものとは異なる船舶諸元に対する差分条件及び水深でのモデル補正係数を推定することを試みた。ただし、放物線近似及びLewis近似の違いにより空間解像度に対する m 値の変化傾向が異なっていた、図-4.3に示す喫水水深比 $d/h=0.33$ 及び 0.22 に対する m 値の適用性については、式(1)または式(11)、(12)で表わされる航跡波の造波モデルの適用範囲も含め、今後更なる検討を要するものと判断される。

したがって、ここでは、図-2.6及び図-4.3におけるそれぞれの喫水水深比($d/h=0.67$, $d/h=0.44$)に対して得られた、倉田ら(1983)の実験では4種類及び本研究で実施した実験では5種類の $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ 値に対する m 値を用いて、式(13)-(15)で表されるbilinear補間を適用した。その結果得られたモデル補正係数 m の平面分布を、近似モデル毎に図-5.1に示す。ここで、図中の○印は倉田ら(1983)の模型船、◇印はラジコン船に対するモデル補正係数の推定点である。また、☆印は次項で対象とする名古屋港の船舶諸元と水深に対するプロットである。

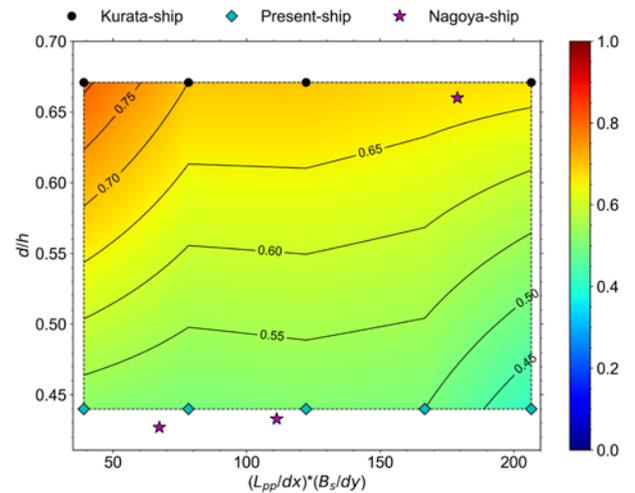
$$f(i, j_1) = f(i_1, j_1) + (f(i_2, j_1) - f(i_1, j_1))(i - i_1 / i_2 - i_1) \quad (13)$$

$$f(i, j_2) = f(i_1, j_2) + (f(i_2, j_2) - f(i_1, j_2))(i - i_1 / i_2 - i_1) \quad (14)$$

$$f(i, j) = f(i, j_1) + (f(i, j_2) - f(i, j_1))(j - j_1 / j_2 - j_1) \quad (15)$$



(a) 放物線近似



(b) Lewis 近似

図-5.1 主要な船舶諸元と水深、格子幅との比によるモデル補正係数 m の平面分布

なお、bilinear補間は、 (i_1, j_1) , (i_2, j_1) , (i_1, j_2) , (i_2, j_2) の4点の座標に対して、3回の線形補間を行うことで、任意点 (i, j) の座標における物理量 $f(i, j)$ を得る手法であり、○印 and/or ◇印の4点ごとに構成したそれぞれの領域に適用した。ここでは、 i 方向に2回の線形補間を行った後、 j 方向の線形補間を行ったが、bilinear補間は i 方向、 j 方向のどちらから補間を行っても補間結果は変わらない。

図-5.1の両図を見比べると、空間解像度によって喫水水深比 d/h に対する m 値の変化傾向はやや異なるものの、両者は比較的よく似ており、放物線近似及びLewis近似に対するモデル補正係数はほぼ共通とみなせる。なお、喫水水深比 d/h がより小さいときには、図-4.3で見たように、放物線近似において船舶諸元に対する差分条件によらず m 値がほぼ一定となる範囲があり、注意が必要である。

表-5.1 船舶諸元及び計算に使用した各係数

	垂線間長 L_{pp}	船幅 B_s	喫水 d	ブロック係数 BC
コンテナ船	165.0	27.1	9.9	0.443
RORO船	130.0	21.4	6.5	0.271
貨物船・タンカー	99.0	17.0	6.4	0.455
	中央横断面積係数		造波モデル補正係数	
	α_p	α_l	m_p	m_l
コンテナ船	0.66	0.76	0.66	0.67
RORO船	0.40	0.47	0.58	0.51
貨物船・タンカー	0.68	0.78	0.60	0.51

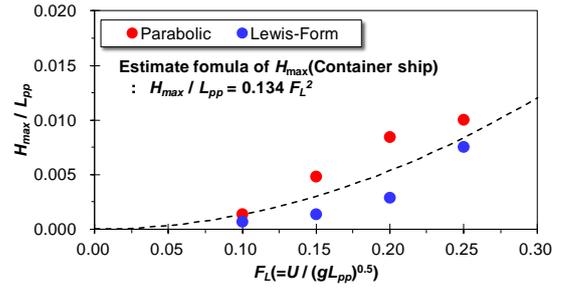
5.2 観測結果に基づく航跡波推定式との比較

(1) 計算条件

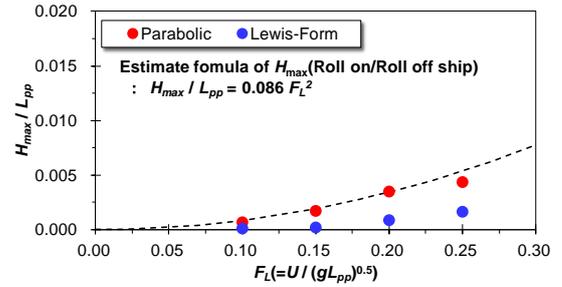
名古屋港では、水深15mの東航路を航行する船舶を対象として、航路から約200m離れた水深9.2mの位置で波高計による航跡波の現地観測を行い、コンテナ船（垂線間長 $L_{pp}=165.0m$ 、船幅 $B_s=27.1m$ 、喫水 $d=9.9m$ ）、RORO船（垂線間長 $L_{pp}=130.0m$ 、船幅 $B_s=21.4m$ 、喫水 $d=6.5m$ ）、貨物船・タンカー（垂線間長 $L_{pp}=99.0m$ 、船幅 $B_s=17.0m$ 、喫水 $d=6.4m$ ）に対する航跡波推定式が提案されている（池田ら、2017）。ここで、推定式の変数は船長フルード数 $F_L=U*(gL_{pp})^{-0.5}$ であり、船長 L_{pp} で無次元化された推定波高 H_{max} は F_L の2乗に比例するとしている。

これらの関係を再現するために本研究では、航路から波高計位置に至る海底地形を勾配1/35の平行等深線海岸と仮定し、2.3節と同様、等深線に平行な航路に沿った船舶の進行方向を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。一方、航路の沖側は水深15mの一定水深とした。なお、計算格子幅は $\Delta x=\Delta y=5.0m$ とした。また、船速は観測結果に基づき $F_L=0.10\sim 0.25$ の範囲で変化させた。さらに、船種別のブロック係数 BC （コンテナ船：0.443、RORO船：0.271、貨物船・タンカー：0.455）をそれぞれ放物線近似、Lewis近似に対するモデル体積率 $MC=0.67, 0.58$ で除して得られる中央横断面積係数はそれぞれ、コンテナ船： $\alpha_p=0.66, \alpha_l=0.76$ 、RORO船： $\alpha_p=0.40, \alpha_l=0.47$ 、貨物船・タンカー： $\alpha_p=0.68, \alpha_l=0.78$ であった。

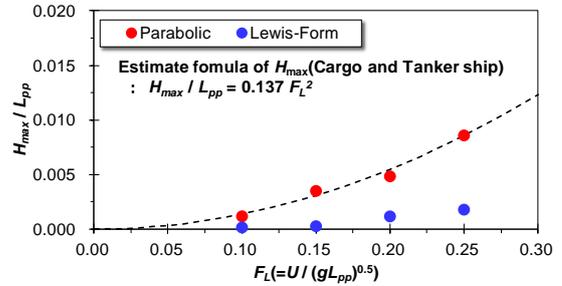
一方、船舶諸元に対する差分条件 $(L_{pp}/\Delta x)*(B_s/\Delta y)$ と喫水水深比 d/h を用いて図-5.1から読み取られるモデル補正係数は、コンテナ船： $m_p=0.66, m_l=0.67$ となる。また、RORO船及び貨物船・タンカーの条件については、図-5.1のコンターの枠外に位置するが、ここでは仮に近傍の値を代用することとし、RORO船： $m_p=0.58, m_l=0.51$ 、貨物船・タンカー： $m_p=0.60, m_l=0.51$ とした。そこで、これらを各 α 値に乗じることにより、本モデル（放物線近似、Lewis近似）に対する最適な $m\alpha$ 値が算定され、これらを式(1)に代入することにより、式(3)または式(4)-(10)で近似された



(a) コンテナ船（ブロック係数0.443）

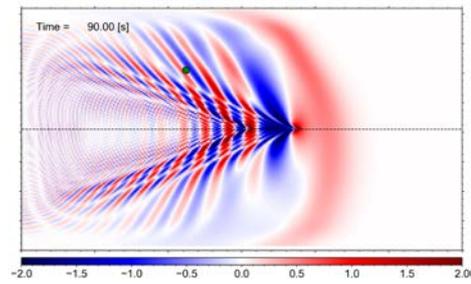


(b) RORO船（ブロック係数0.271）

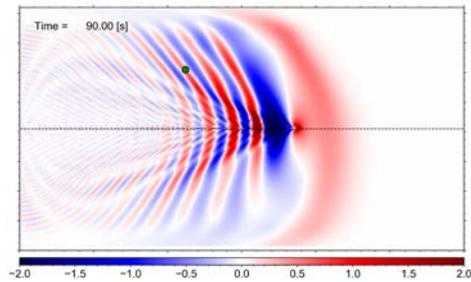


(c) 貨物船・タンカー（ブロック係数0.455）

図-5.2 船種別推定式に対する最大波高 H_{max} の再現性、縦軸：最大波高 H_{max} を垂線間長 L_{pp} で無次元化した値、横軸：船長フルード数 F_L



(a) 放物線近似



(b) Lewis近似

図-5.3 平面航跡波形（コンテナ船： $F_L=0.25$ ）

船種別の航跡波が造波されることになる。なお、これらの船舶諸元及び各係数について、表-5.1に整理しておく。

(2) 計算結果

名古屋港で提案された船種別の航跡波推定式（点線）に対し、本モデルによる再現計算結果（プロット）を重ねて、図-5.2に示す。図より、放物線近似による計算結果は、コンテナ船に対しては若干過大なものの、少なくとも $F_L=0.25$ までの範囲において船種別の最大波高を比較的良好に再現していることがわかる。一方、Lewis近似による計算結果は、コンテナ船に対する再現性は比較的良好なもの、RORO船や貨物船・タンカー船に対しては、最大波高をかなり過小評価することが確認された。これらの結果は、倉田ら（1983）の模型船や本研究で用いたラジコン船が造波する航跡波の再現計算結果とは異なり、本造波モデル（放物線近似、Lewis近似）全体として、実物大の船舶に対しては模型船に比べ造波される航跡波高が小さいことを示している。したがって、実物大の船舶に対しては図-5.1に示したモデル補正係数 m が過小であることが疑われるため、実験水槽で計測された航跡波高に対する水の粘性（表面張力）の影響について精査する必要があることが示唆された。

最後に、例として $F_L=0.25$ で航行するコンテナ船に対し、放物線近似及びLewis近似を用いて計算された航跡波の平面波形をそれぞれ図-5.2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てとれる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、航路設定に関する平面2次元場への拡張性を考慮して、航行船舶に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、船型の断面積分布として、従来の放物線近似に一部改良を施したのに加え、新たにLewis-Formによる近似を導入した。この結果、Lewis-Formでは実際により近い船型での航跡波の造波が可能になり、本研究または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、既往の研究ではみられなかった旋回時の航跡波に関する水槽実験を独自に実施し、ラジコンによる模型船とトータルステーションを併用した水槽実験における航跡波の新たな計測方法を提案した。

さらに、旋回時の航跡波の再現計算を可能とするために航跡波造波モデルの平面2次元場への拡張を実施し、自

由な航路設定が可能となった。ただし、航跡波に対するHeaving, Pitching, Rolling等の船体動揺の影響に関する考察とその対応は未だ不十分であり、旋回時に航路外側で生じる航跡波の最大波高を過大評価することの改善等は今後の課題である。

一方、様々な船型に対して本造波モデルを適用できるよう、モデル補正係数 m 及び中央横断面積係数 α の設定方法を示した。特に、 m 値は本研究で実施した複数の航跡波の再現計算結果をもとに内挿して与えることを提案したが、模型船に対する計測結果とは異なり、実船に対する観測結果（推定式）に対しては過小評価となっていることが疑われた。そこで今後は、実験水槽内で計測される航跡波に対する水の粘性効果を考慮するとともに、曳航または自走する船舶諸元が異なる模型船をそれぞれ複数用意し、造波方法の違いに影響されないモデル補正係数の推定を行う必要があると考えられる。

7. おわりに

本研究では、港内発生波を対象とした実港湾における静穏度解析の高度化に寄与するために、航路設定に関する平面2次元場への拡張性を考慮して、航行船舶に1格子分の幅を設けた航跡波造波モデルを新たに開発した。既往研究及び本研究で得られた航跡波の計測結果に対する再現計算を通じて、造波モデルのチューニング方法を示すと同時に、模型船が造波する航跡波を比較的良好に再現できることを確認した。しかしながら、実船による航跡波に対する再現精度やその検証は未だ十分とはいえず、より多くの検証を行うことで造波モデルのより良いチューニング方法や適用範囲を明らかにしていく必要がある。

一方、本造波モデルを実港湾に適用し港内静穏度を把握する際には、AIS（自動船舶識別装置）データの活用が不可欠であるため、このインターフェースをNOWT-PARIに導入するための開発も必要であるといえる。また、航跡波が他の航行船舶の安全性や、岸壁に係留された船舶の動揺・荷役の安全性・作業性に与える影響等について定量評価するためには、外洋から来襲する波浪に対しては有義波高・周期で整理されている荷役限界条件（沿岸技術センター、2004）とは別に、通常は第1波目に現れる航跡波の最大波高・周期に着目した整理が必要であり、そのための水槽実験や現地観測または数値シミュレーション手法の開発が必要になると考えられる。

(2018年2月2日受付)

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。

本研究の水槽実験の模型制作においては、平成28年度冬季実習生としてご来所された豊橋技科大学工学部 土方亮太郎氏（研究当時、学部4回生）に多大なご助力を頂きました。深く謝意を表します。

参考文献

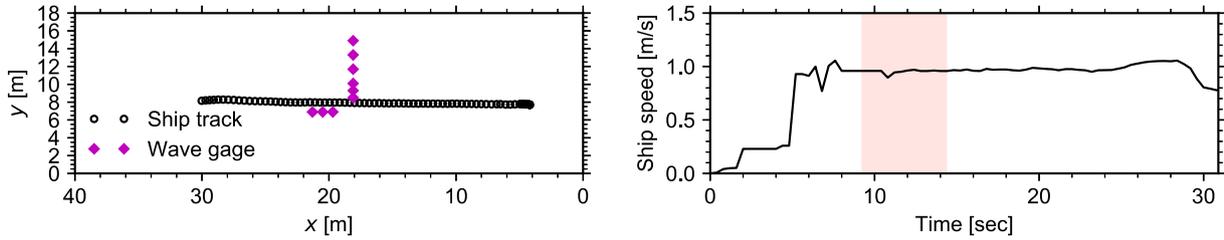
- 池田哲郎, 三崎隆央, 伊東啓勝, 大竹剛史, 山田貴裕: 名古屋港での航跡波の解析と自然条件の影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.505-510, 2017.
- 石井敏雅, 磯部雅彦, 渡辺 晃: 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.31-35, 1993.
- 財団法人 沿岸技術センター: 港内長周期波影響マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, No.21, 2004.
- 倉田克彦, 小田一記, 平井住夫: 航走波の特性及び繫留船舶に及ぼす影響, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.598-602, 1983.
- 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.
- 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.
- 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.
- 日本海難防止協会: 海上交通安全上に関する基礎的事項の調査研究 その3-航行船舶の航走波が小型船舶に及ぼす影響の研究, p.83, 1976
- 平田信行, 田原裕介, 大橋訓英, 小林寛, 宮崎英樹, 荒木元輝, 児玉良明, 小野寺直幸: 次世代CFDを用いた実海域省エネ性能評価に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第17巻, pp.53-72, 2017.
- 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.
- Lewis, F. M.: The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship, *Transactions of the SNAME*, 37th, pp.1-20, 1929.

記号表

- α : 中央横断面積係数
- a_1 : Lewis-Formの係数
- a_3 : Lewis-Formの係数
- BC : ブロック係数
- B_s : 船幅 (m)
- C : 慣性係数
- CV : 誤差変動係数
- d : 喫水 (m)
- Δx : x 方向の格子解像度 (m)
- Δy : y 方向の格子解像度 (m)
- $f(i_n, j_n)$: (i_n, j_n) 座標における物理量
- F_h : 水深フルード数 ($U^*(gh)^{-0.5}$)
- F_L : 船長フルード数 ($U^*(gL_{pp})^{-0.5}$)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : 水深 (m)
- H : 船舶の幅喫水比
- H_1 : 航路から100m地点の最大波高 (m)
- H_{max} : 最大波高 (m)
- i_n : n 番目の i 方向座標
- j_n : n 番目の j 方向座標
- L_{pp} : 垂線間長 (m)
- m : 造波モデル補正係数
- M : 縮減係数
- μ : 誤差の平均値
- Q_x : 航跡波による x 方向の流量フラックス
- Q_y : 航跡波による y 方向の流量フラックス
- S_0 : 船舶の中央断面積 (m^2)
- $S(x_s)$: 放物線近似の船長方向の断面積 (m^2)
- S_n : Lewis近似の n 番目の船長方向の断面積 (m^2)
- σ : 標準偏差
- T_{max} : 最大周期 (s)
- U : 船速 (m/s)
- x_s : 船長方向の中央からの距離 (m)
- $y(\theta)$: 船幅方向の水平座標 (m)
- $z(\theta)$: 喫水面下の鉛直座標 (m)

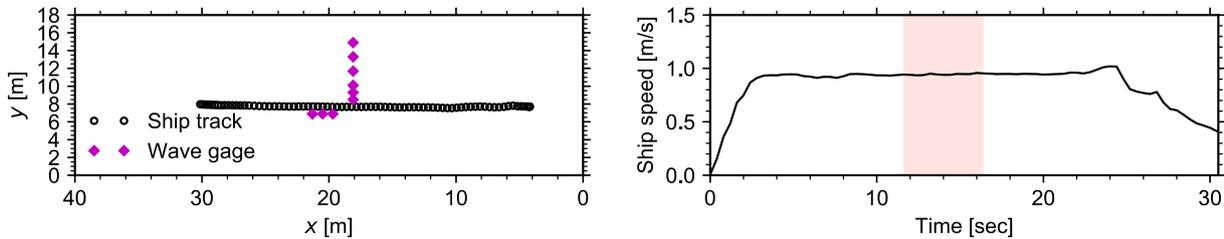
付録A トータルステーションの計測結果（航跡図及び船速の時系列）

以下に、本編に掲載できなかったトータルステーションの計測結果（航跡図及び船速の時系列）を掲載する。



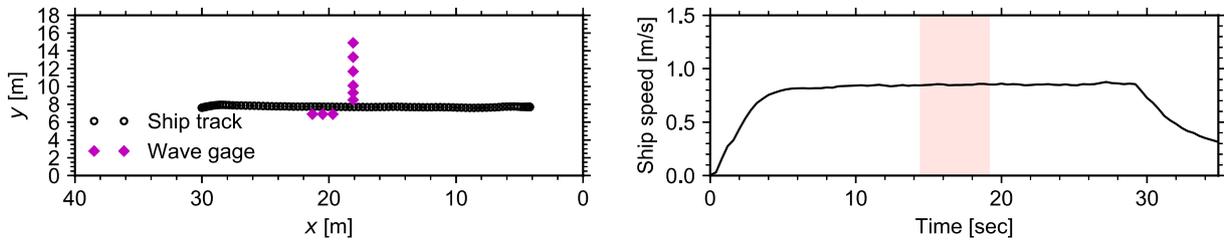
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.1 トータルステーションによる計測結果（直進航路：case02 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.80$))



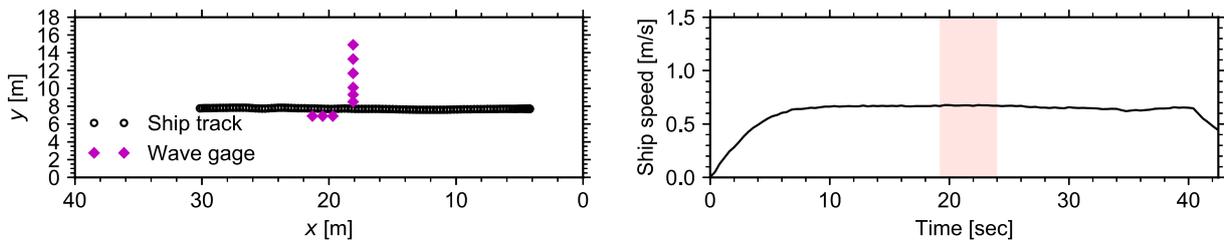
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.2 トータルステーションによる計測結果（直線航路：case03 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.78$))



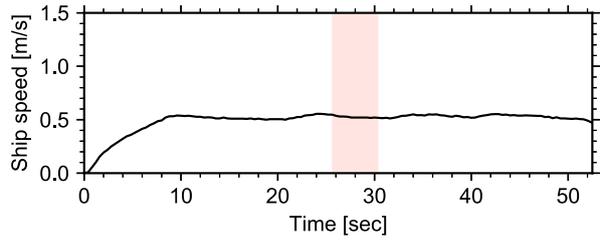
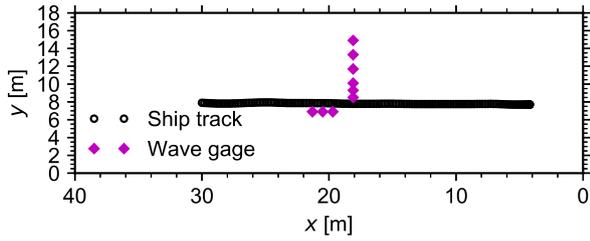
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.3 トータルステーションによる計測結果（直線航路：case04 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.70$))



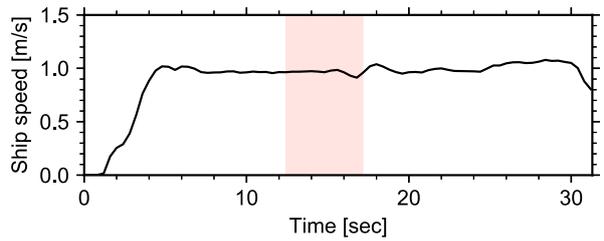
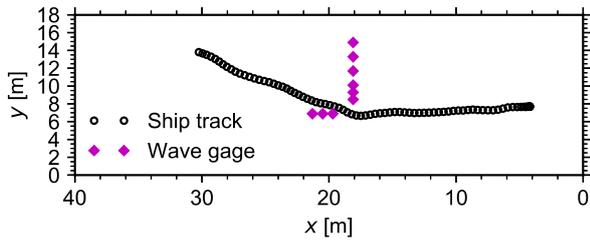
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.4 トータルステーションによる計測結果（直線航路：case05 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.55$))



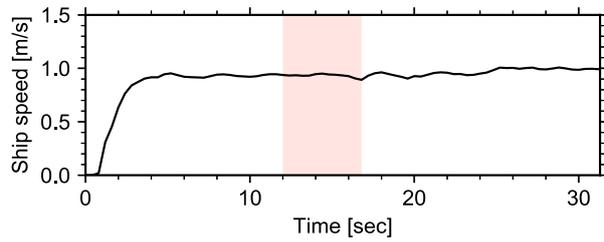
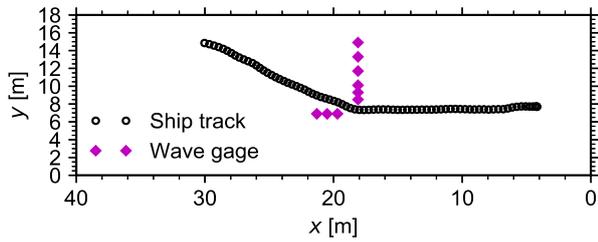
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.5 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case06 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.44$))



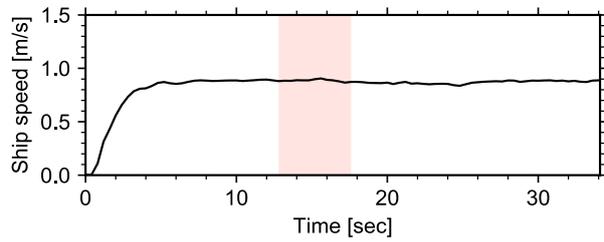
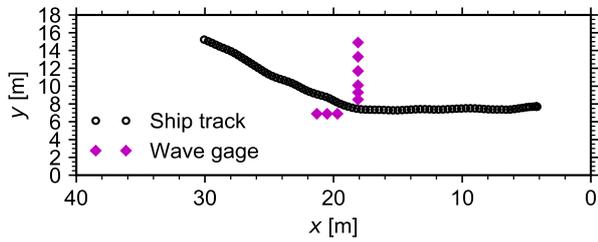
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.6 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (小)】: case08 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.79$))



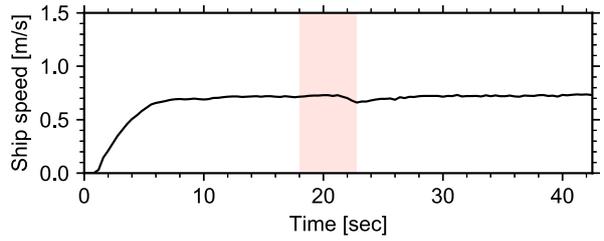
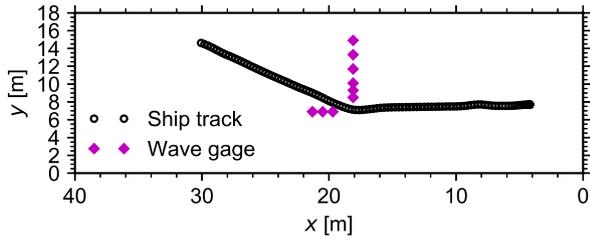
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.7 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (小)】: case09 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.77$))



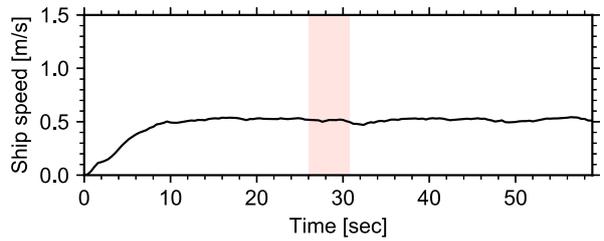
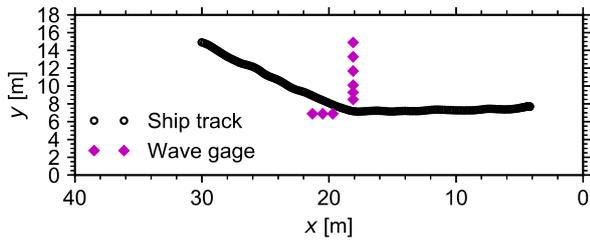
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.8 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (小)】: case10 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.73$))



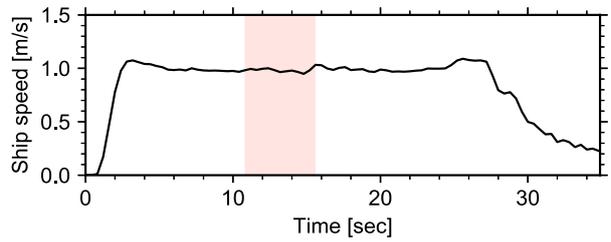
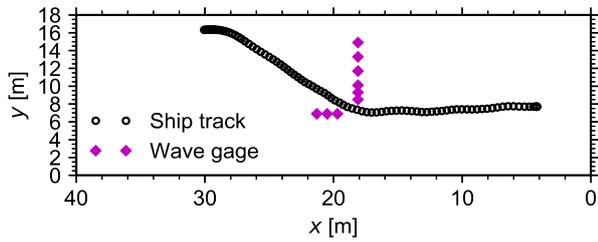
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.9 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case11 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.59$))



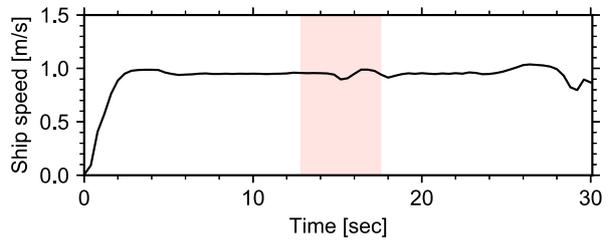
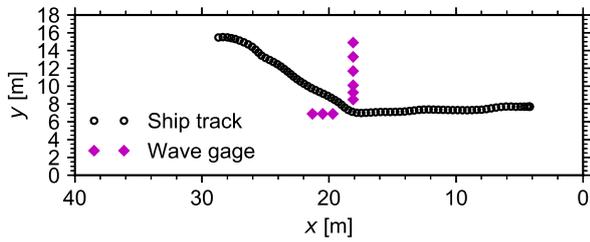
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.10 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case12 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.42$))



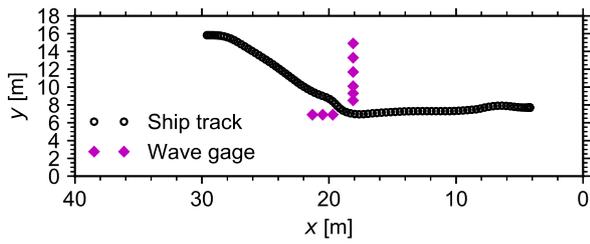
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.11 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（中）】：case14 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.81$))

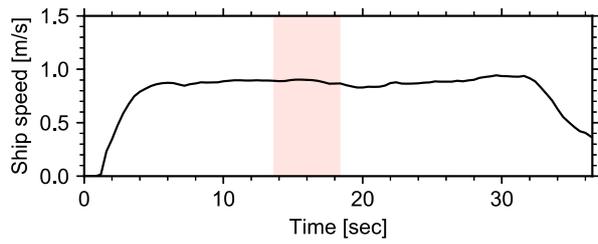


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.12 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（中）】：case15 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.78$))

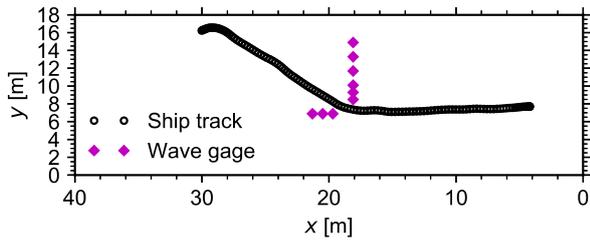


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

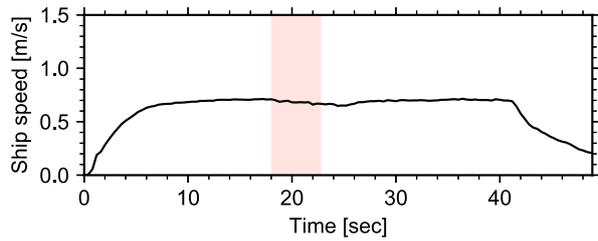


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.13 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case16 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.73$))

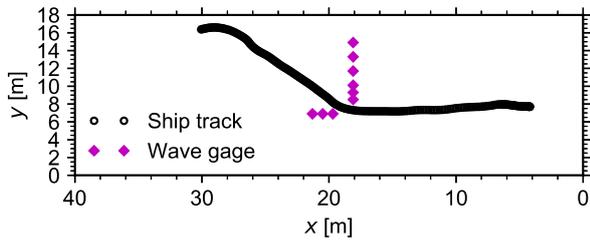


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

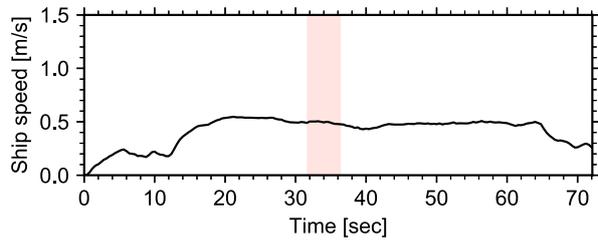


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.14 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case17 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.56$))

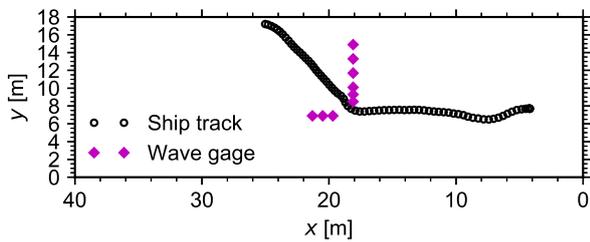


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

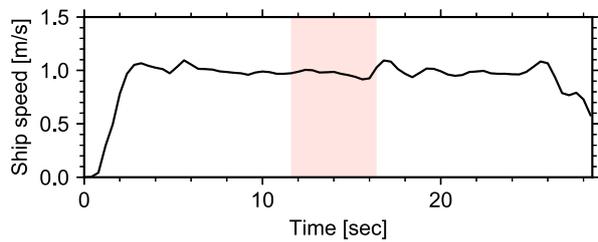


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.15 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case18 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.40$))

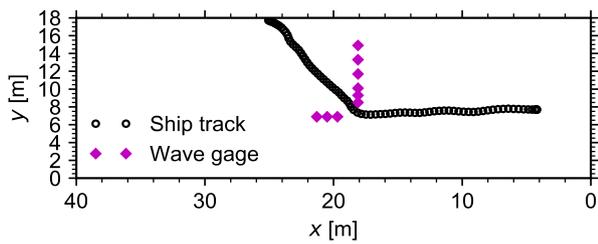


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

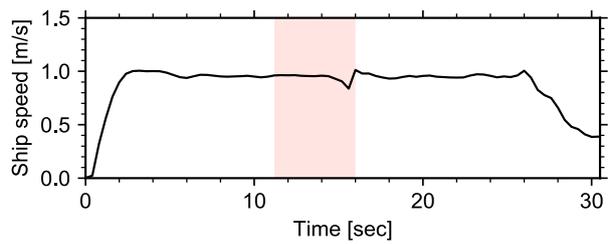


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.16 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(大)】: case20 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.80$))

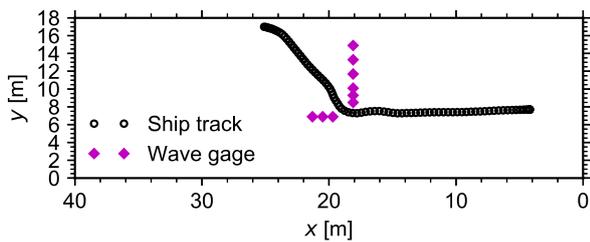


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

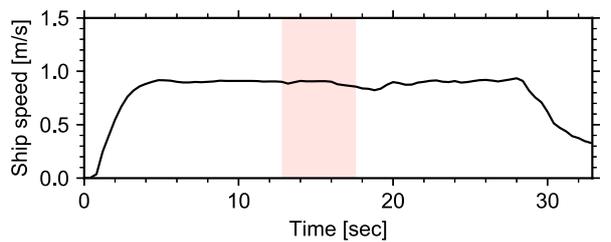


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.17 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case21 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.78$))

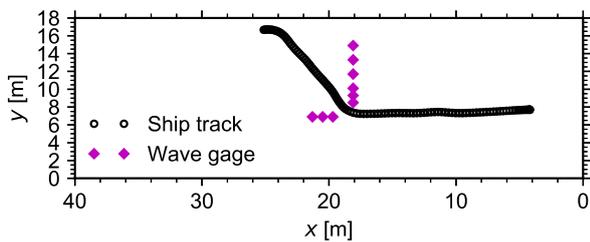


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

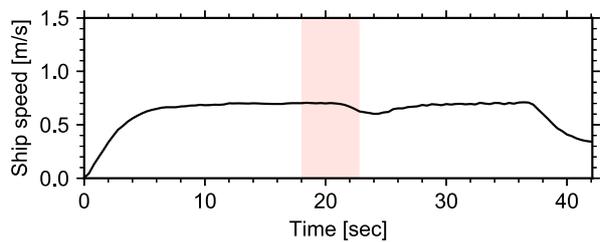


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.18 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case22 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.73$))

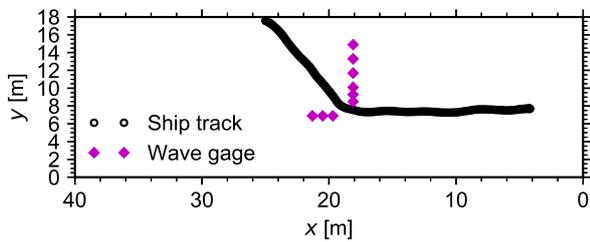


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

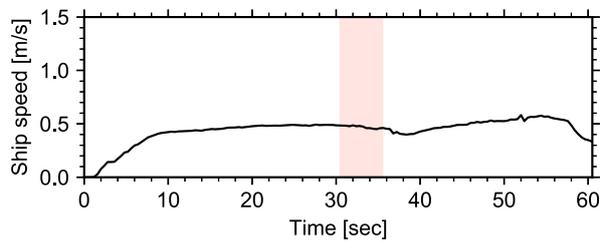


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.19 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case23 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.57$))

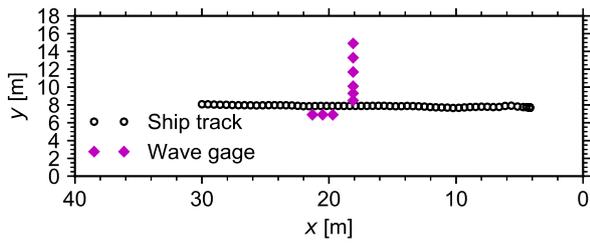


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

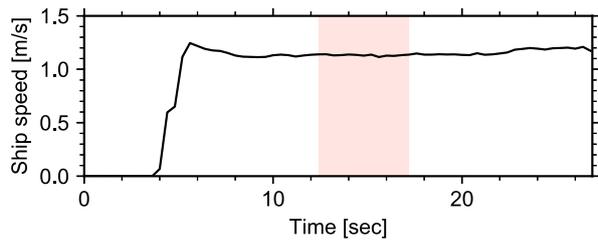


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.20 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case24 ($h=0.15\text{m}$, $F_h=0.39$))

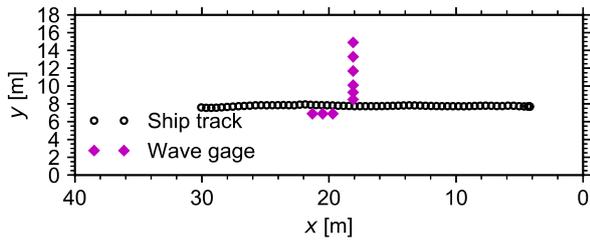


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

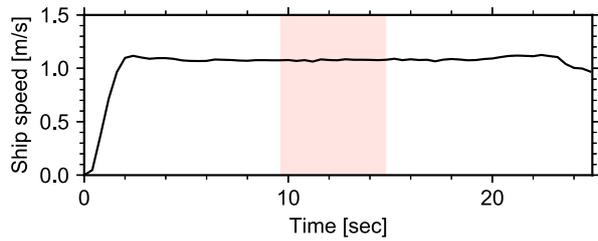


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.21 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case01 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.81$))

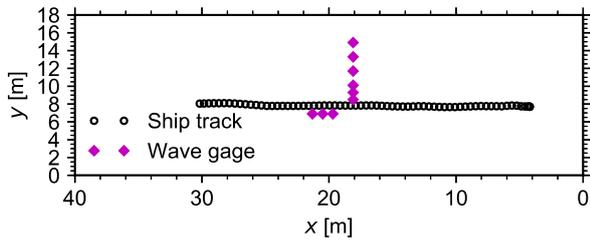


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

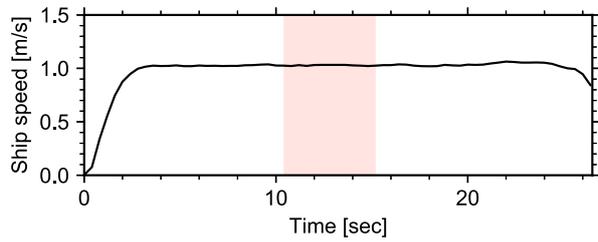


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.22 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case02 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.77$))

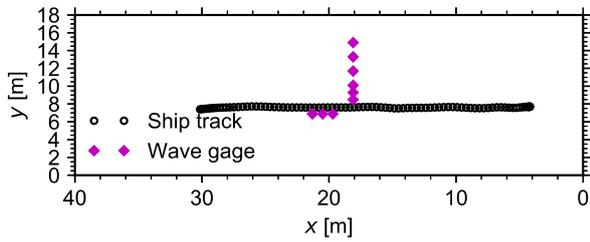


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

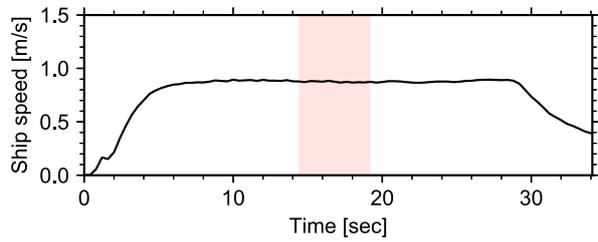


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.23 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case03 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.74$))

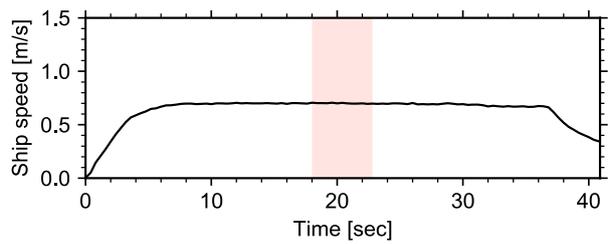
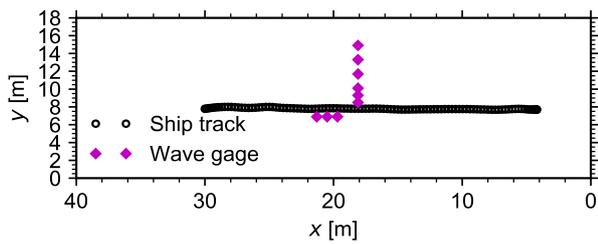


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)



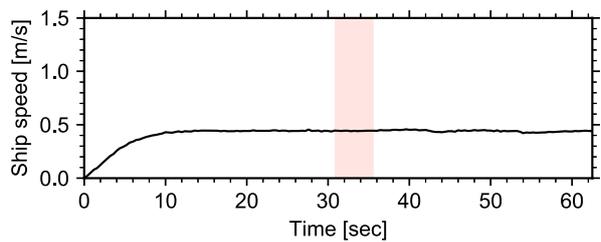
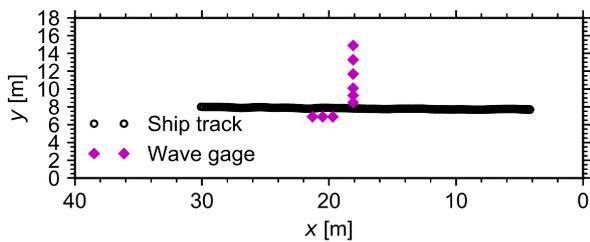
(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.24 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case04 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.62$))



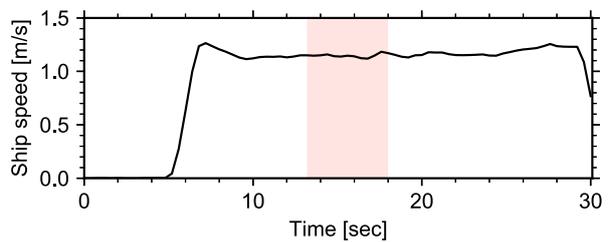
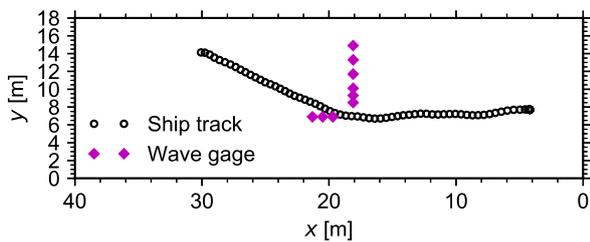
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.25 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case05 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.50$))



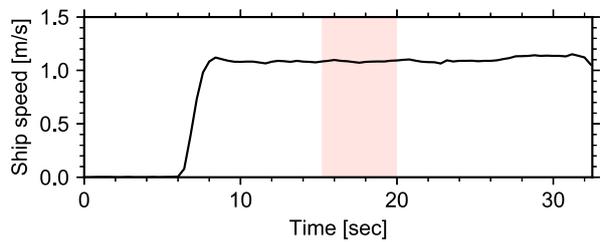
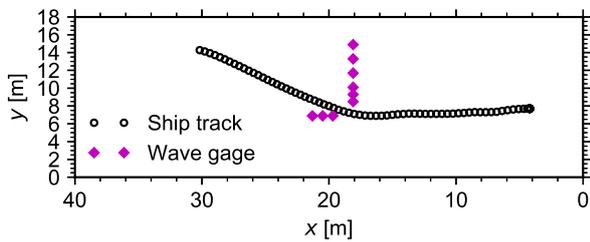
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.26 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case06 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.32$))



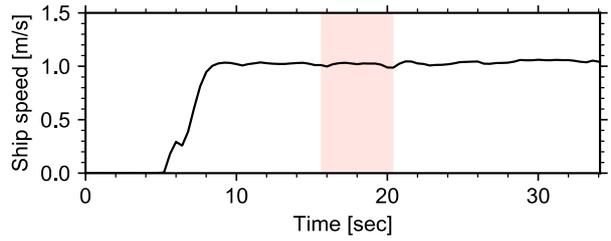
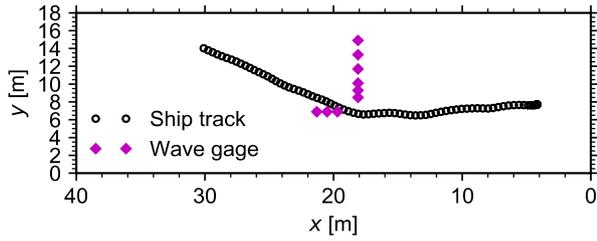
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.27 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(小)】: case07 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.82$))



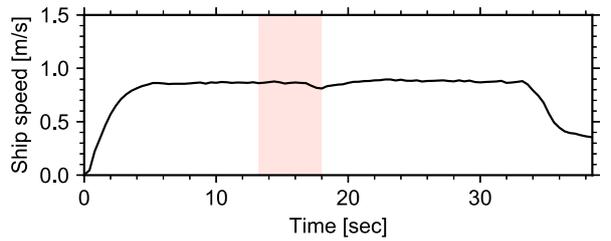
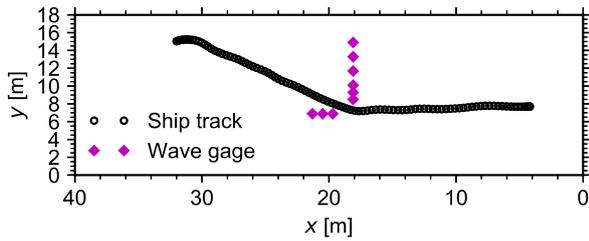
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.28 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(小)】: case08 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.78$))



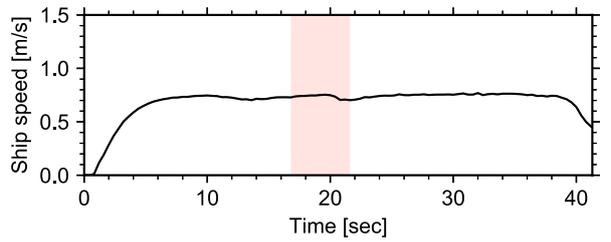
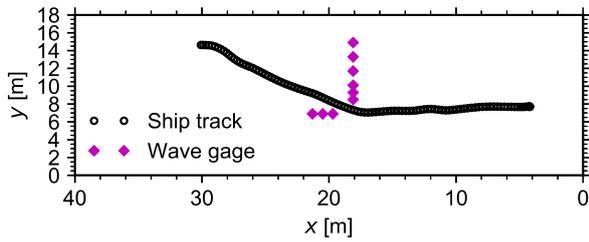
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.29 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case09 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.73$))



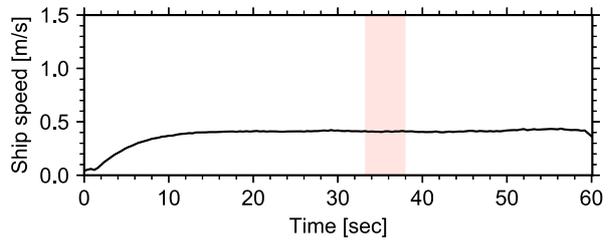
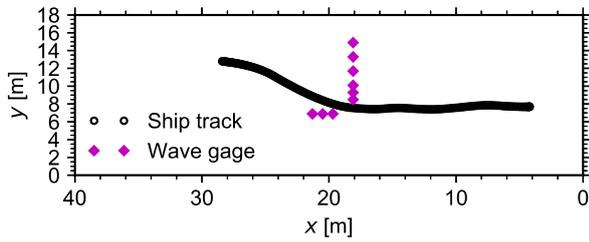
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.30 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case10 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.61$))



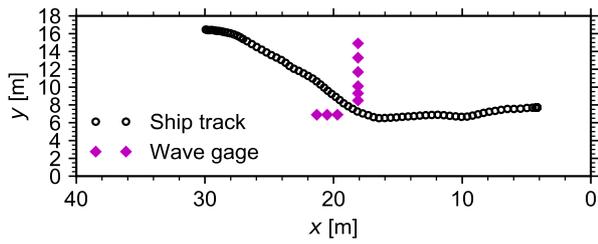
(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.31 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case11 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.52$))

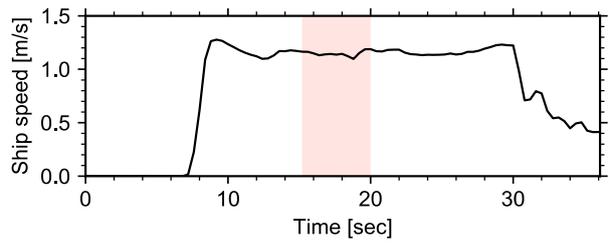


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標） (b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.32 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case12 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.35$))

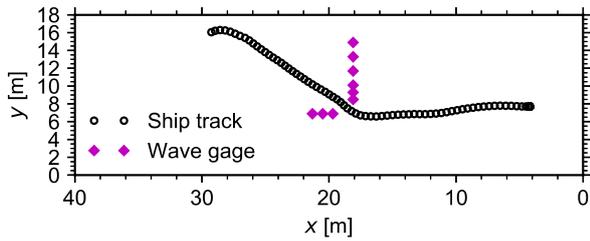


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

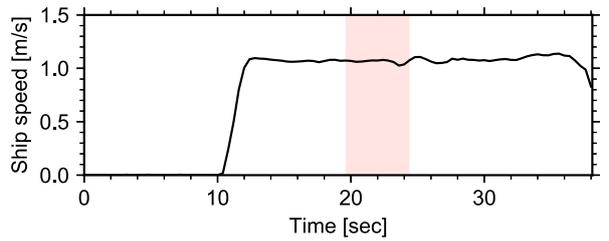


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.33 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case13 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.82$))

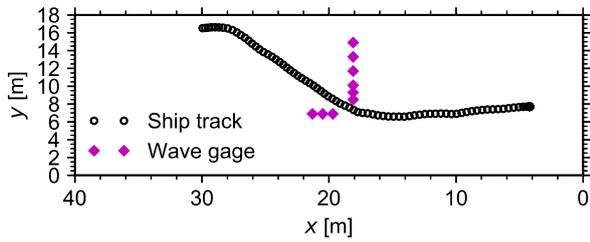


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

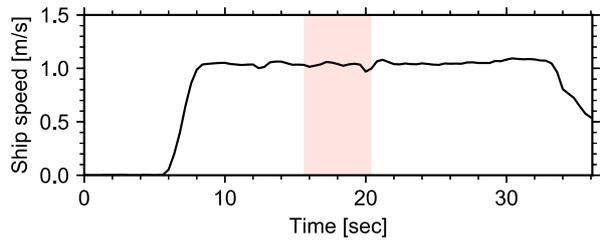


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.34 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case14 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.76$))

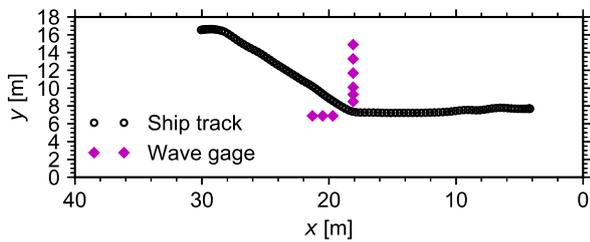


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

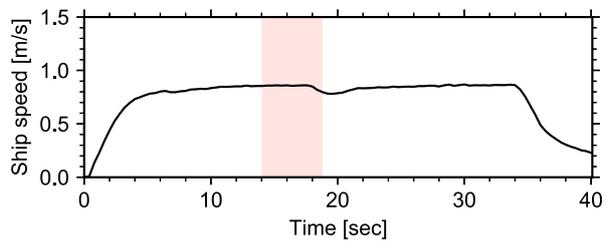


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.35 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case15 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.74$))

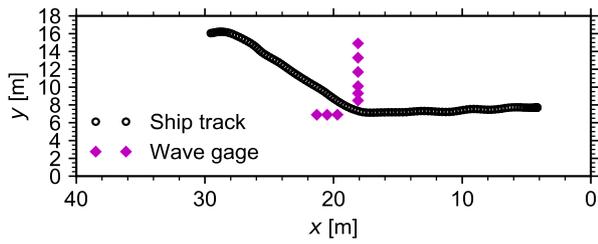


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

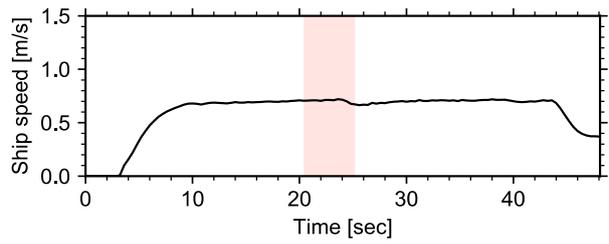


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.36 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case16 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.61$))

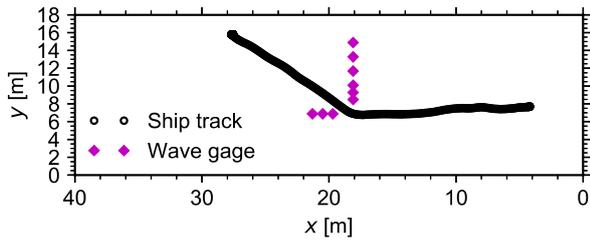


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

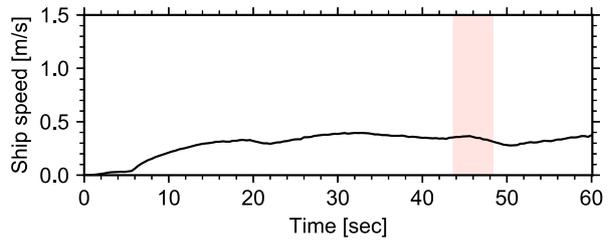


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.37 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（中）】：case17 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.50$))

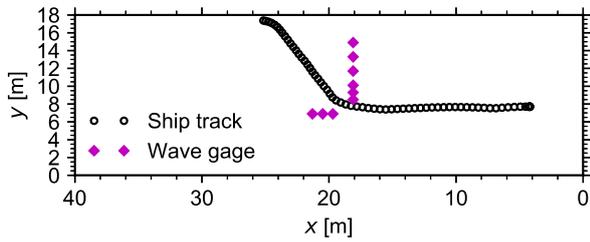


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

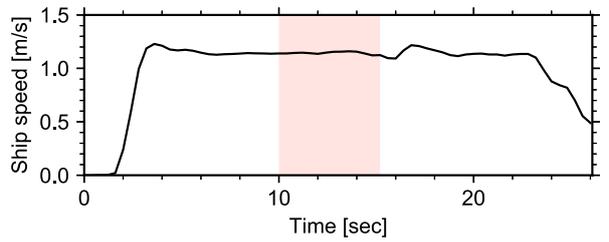


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.38 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（中）】：case18 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.32$))

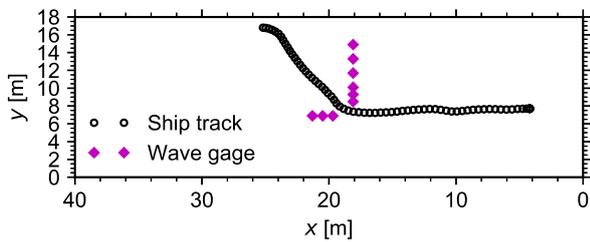


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

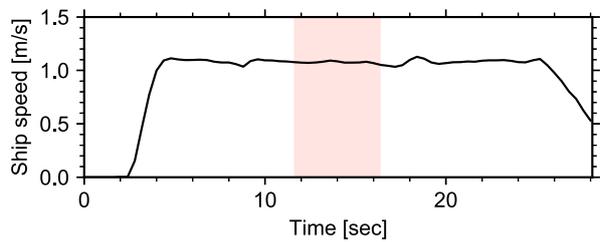


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.39 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（大）】：case19 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.82$))

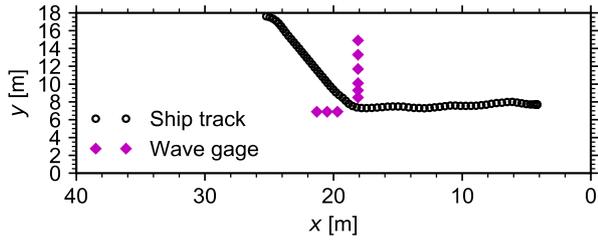


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

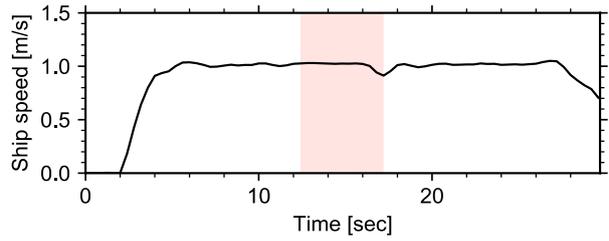


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A.40 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（大）】：case20 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.76$))

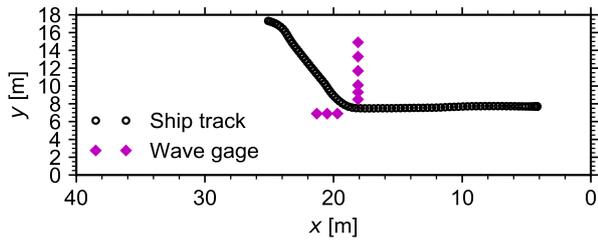


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

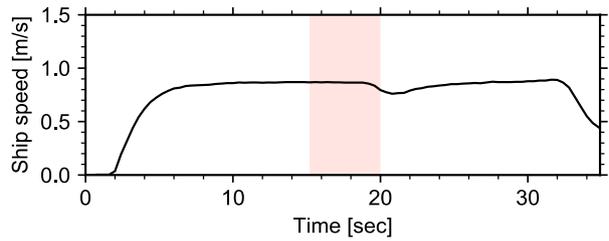


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.41 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case21 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.72$))

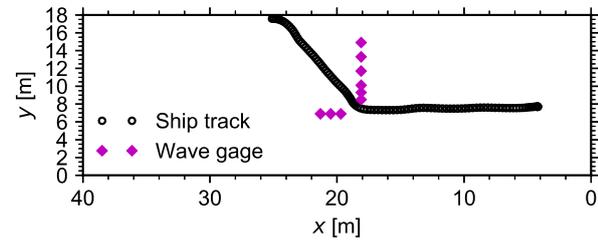


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

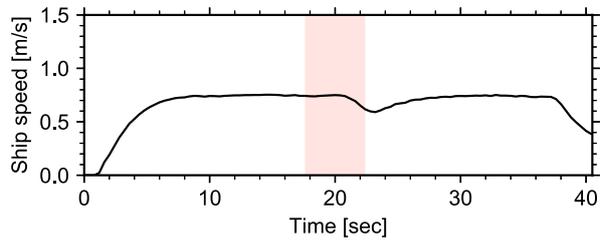


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.42 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case22 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.61$))

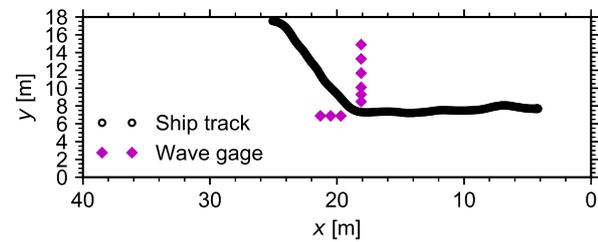


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

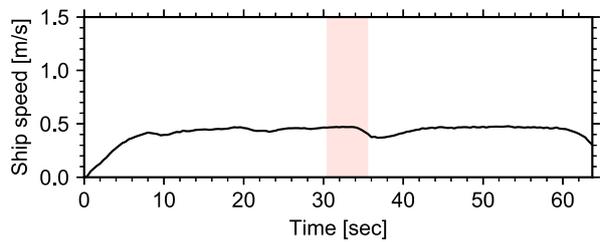


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.43 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case23 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.51$))

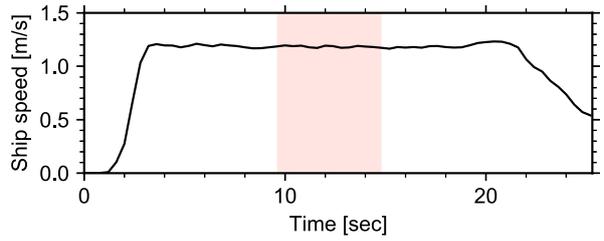
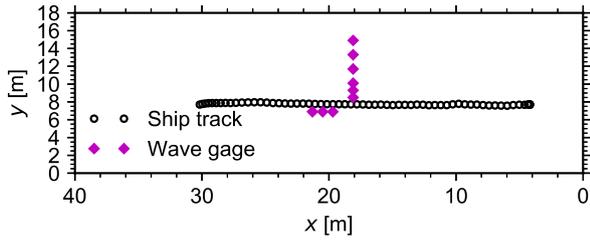


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)



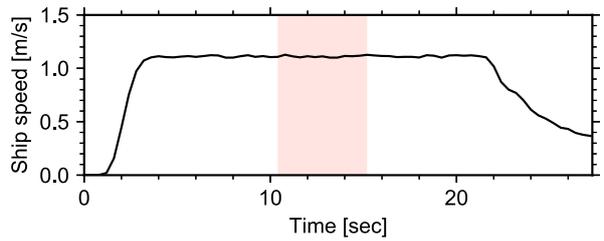
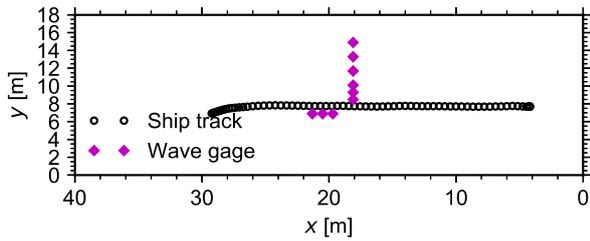
(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.44 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case24 ($h=0.20\text{m}$, $F_h=0.33$))



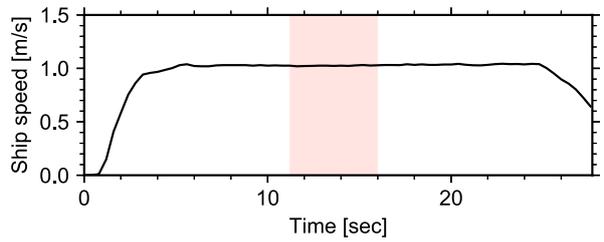
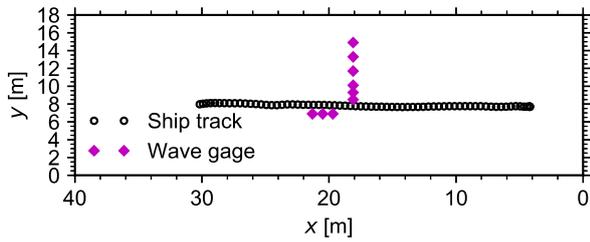
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A. 45 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case01 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.69$))



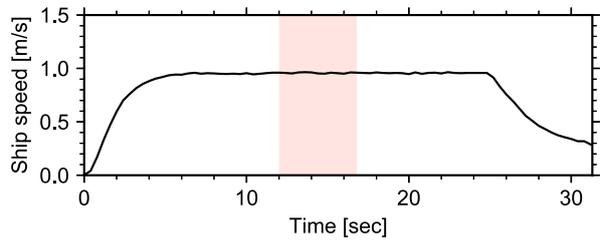
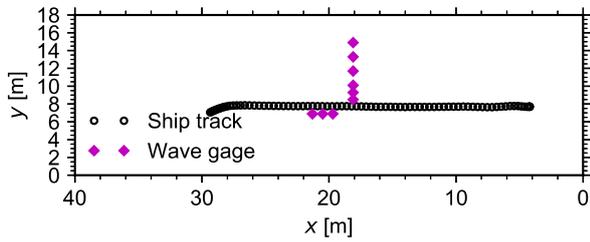
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A. 46 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case02 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.65$))



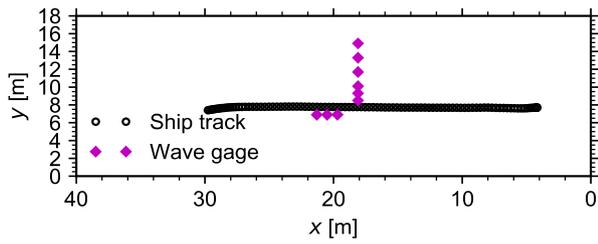
(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A. 47 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case03 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.60$))

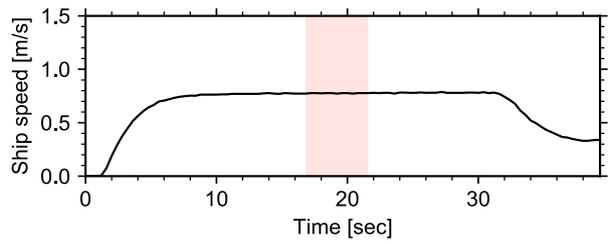


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標) (b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A. 48 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case04 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.56$))

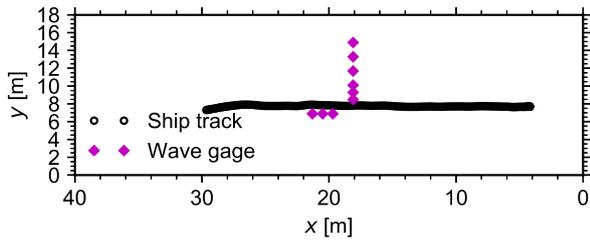


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

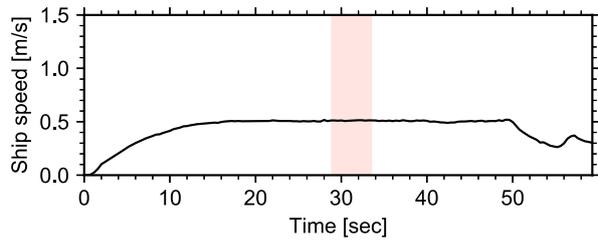


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.49 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case05 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.45$))

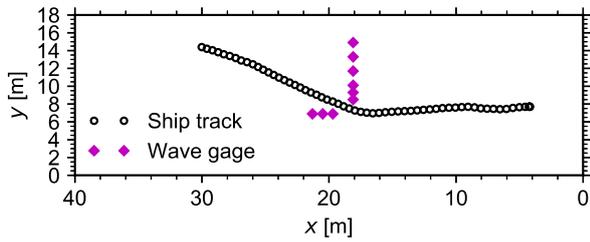


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

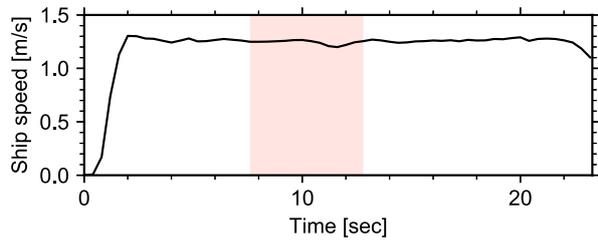


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.50 トータルステーションによる計測結果 (直線航路: case06 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.30$))

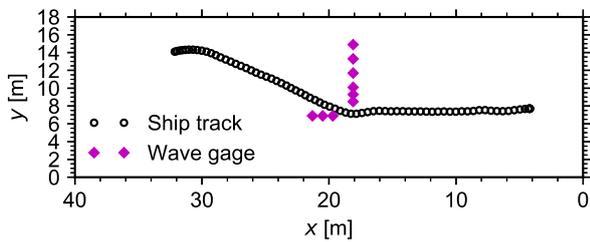


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

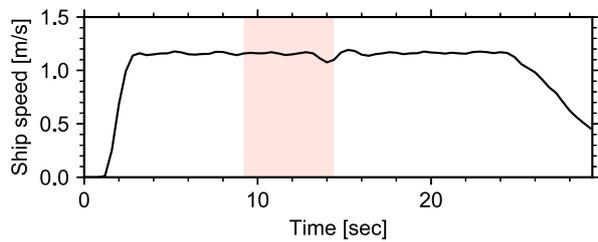


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.51 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(小)】: case07 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.72$))

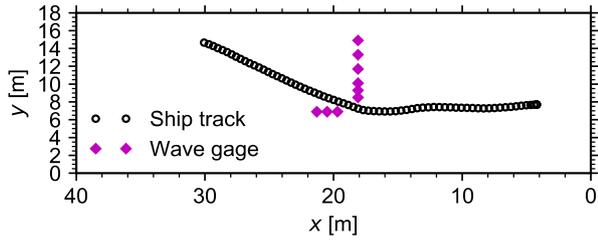


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

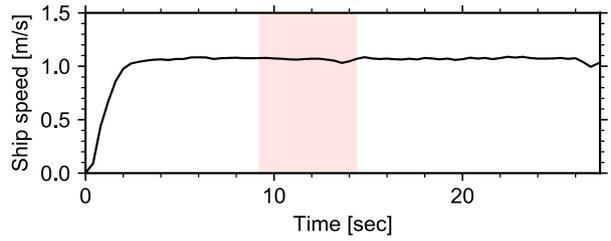


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.52 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(小)】: case08 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.67$))

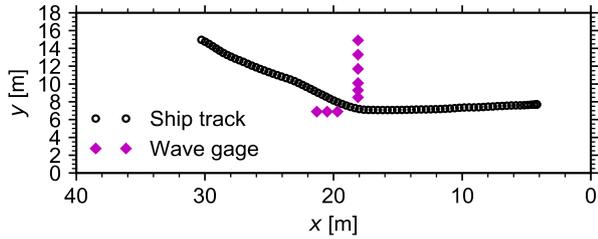


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

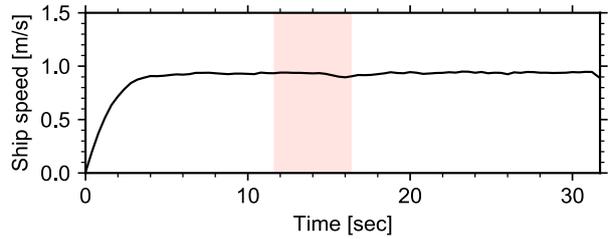


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A. 53 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case09 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.62$))

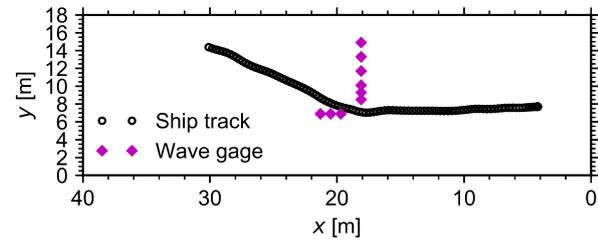


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

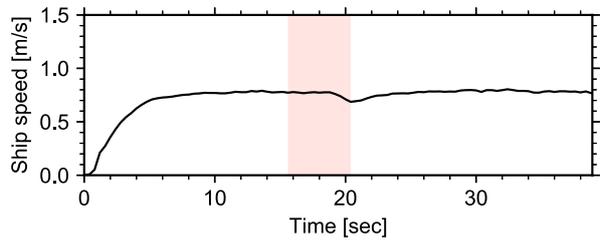


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A. 54 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case10 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.54$))

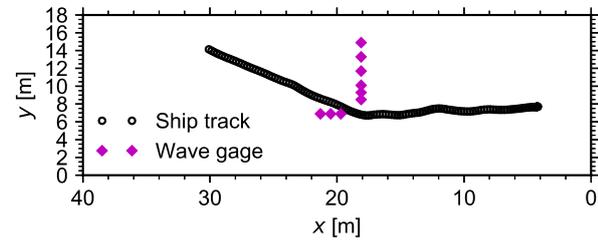


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

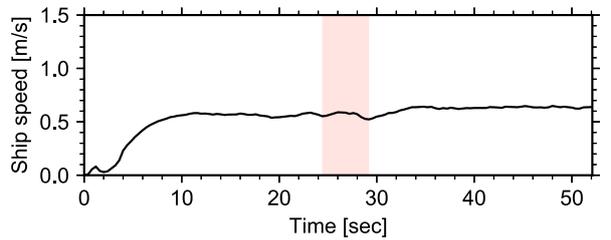


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A. 55 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case11 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.44$))

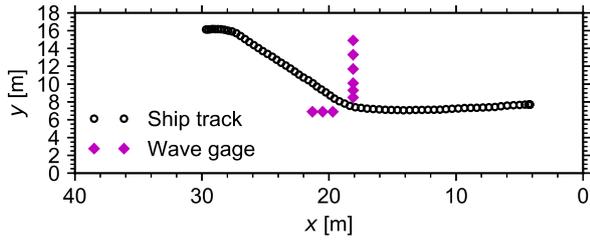


(a) 航跡図（縦軸：y座標，横軸：x座標）

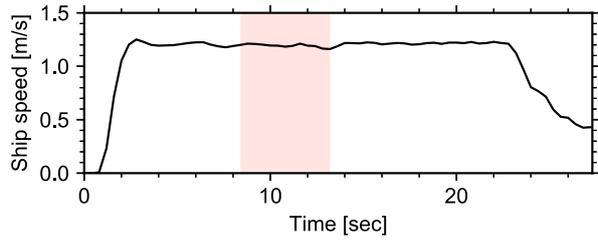


(b) 船速の時系列（縦軸：船速，横軸：時間）

図-A. 56 トータルステーションによる計測結果（屈曲航路【曲率（小）】：case12 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.33$))

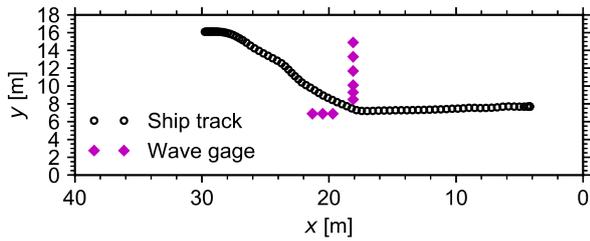


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

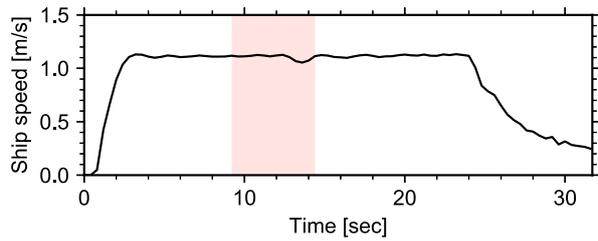


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.57 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case13 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.69$))

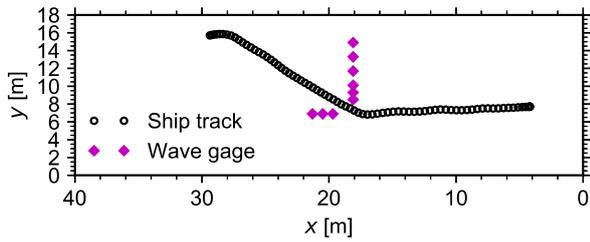


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

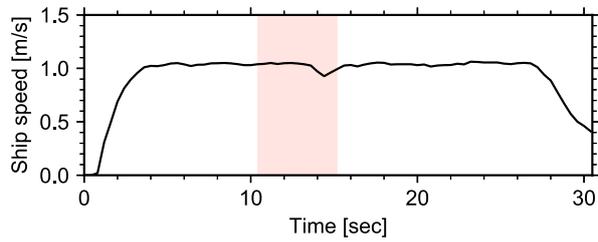


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.58 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case14 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.64$))

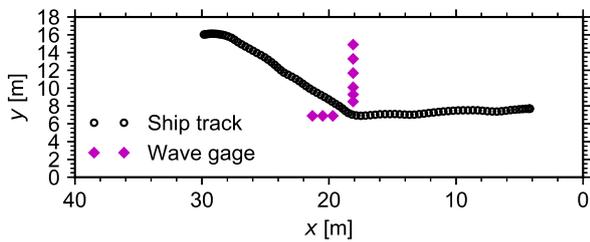


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

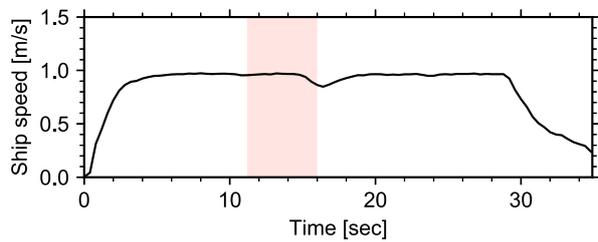


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.59 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case15 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.59$))

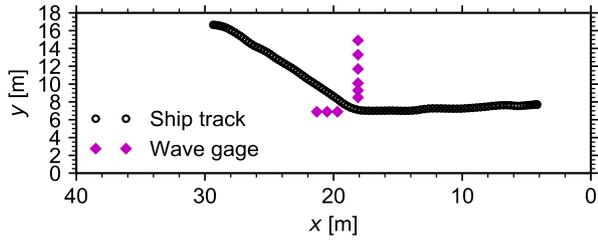


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

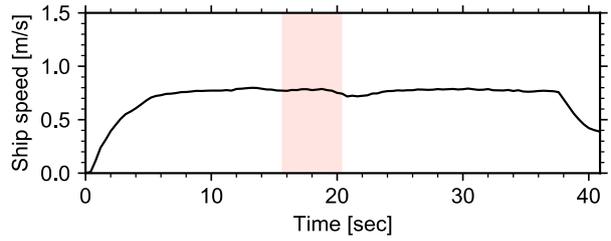


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.60 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case16 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.55$))

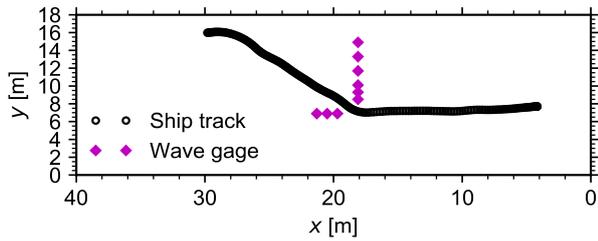


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

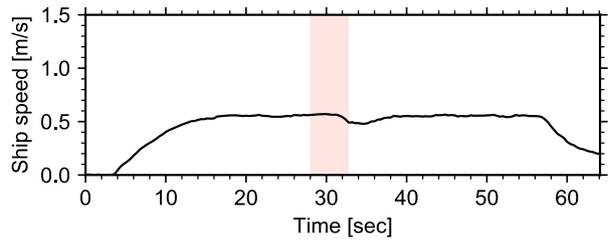


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.61 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case17 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.45$))

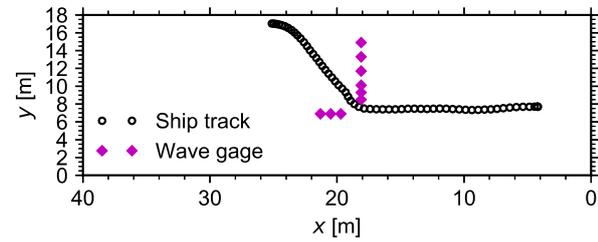


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

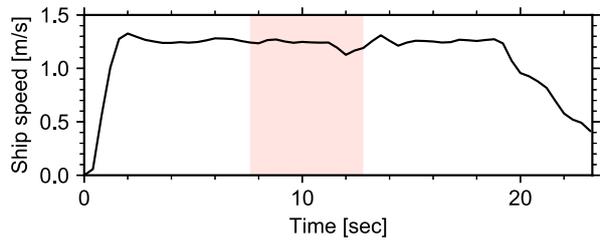


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.62 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(中)】: case18 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.32$))

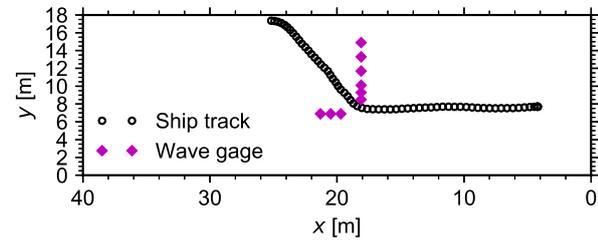


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

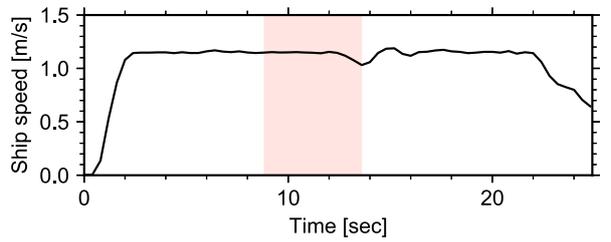


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.63 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(大)】: case19 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.72$))

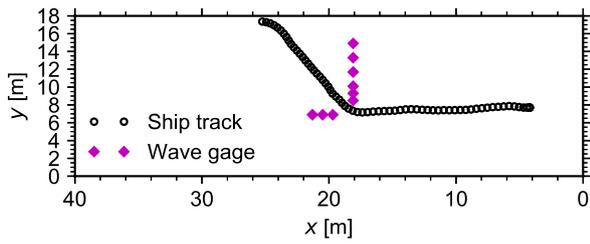


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

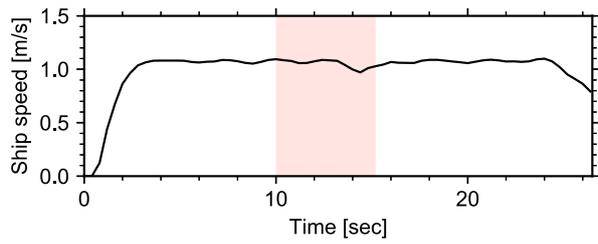


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.64 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率(大)】: case20 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.66$))

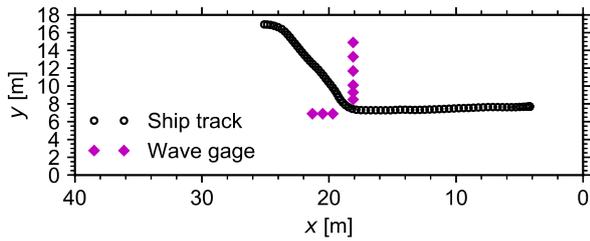


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

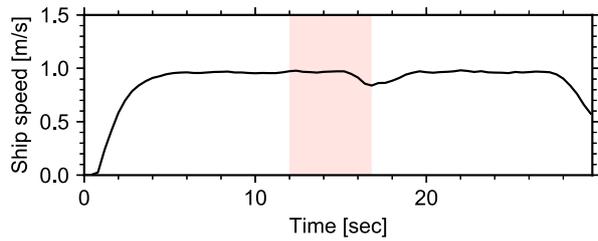


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.65 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case21 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.62$))

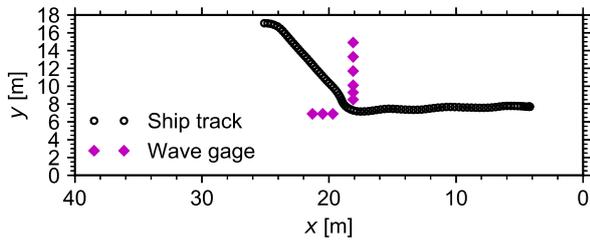


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

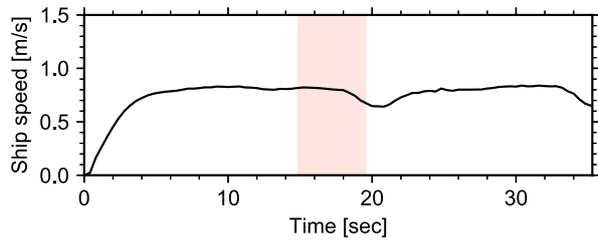


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.66 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case22 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.55$))

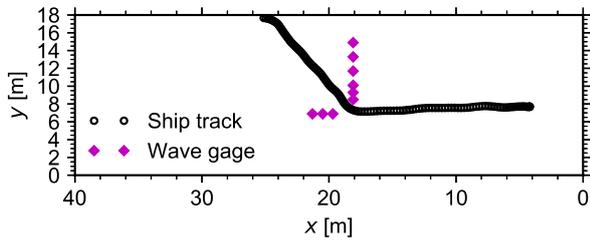


(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)

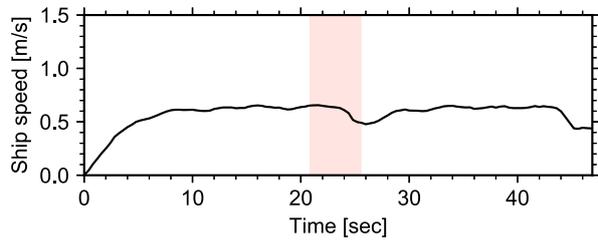


(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.67 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case23 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.45$))



(a) 航跡図 (縦軸: y座標, 横軸: x座標)



(b) 船速の時系列 (縦軸: 船速, 横軸: 時間)

図-A.68 トータルステーションによる計測結果 (屈曲航路【曲率 (大)】: case24 ($h=0.30\text{m}$, $F_h=0.35$))

付録B 旋回時の航跡波の実験結果（最大波高及び最大周期）

以下に、本編に掲載できなかった旋回時の航跡波の実験結果を掲載する。

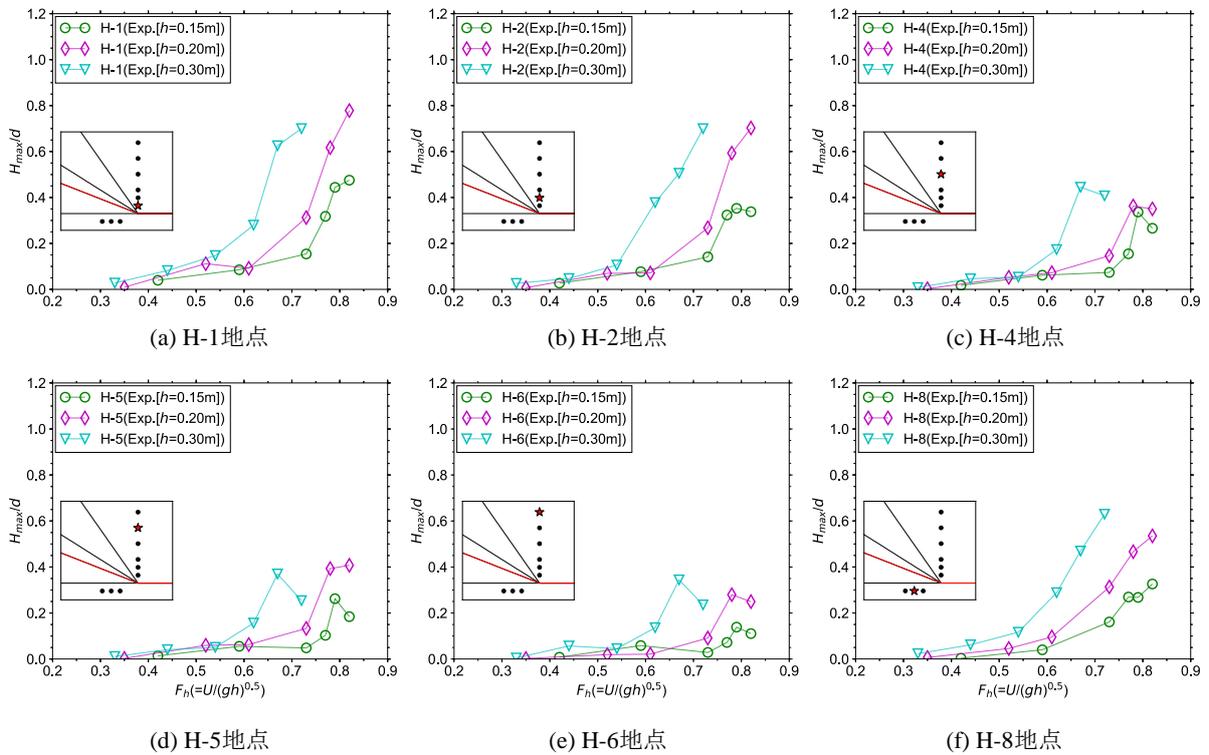


図-B.1 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（小）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

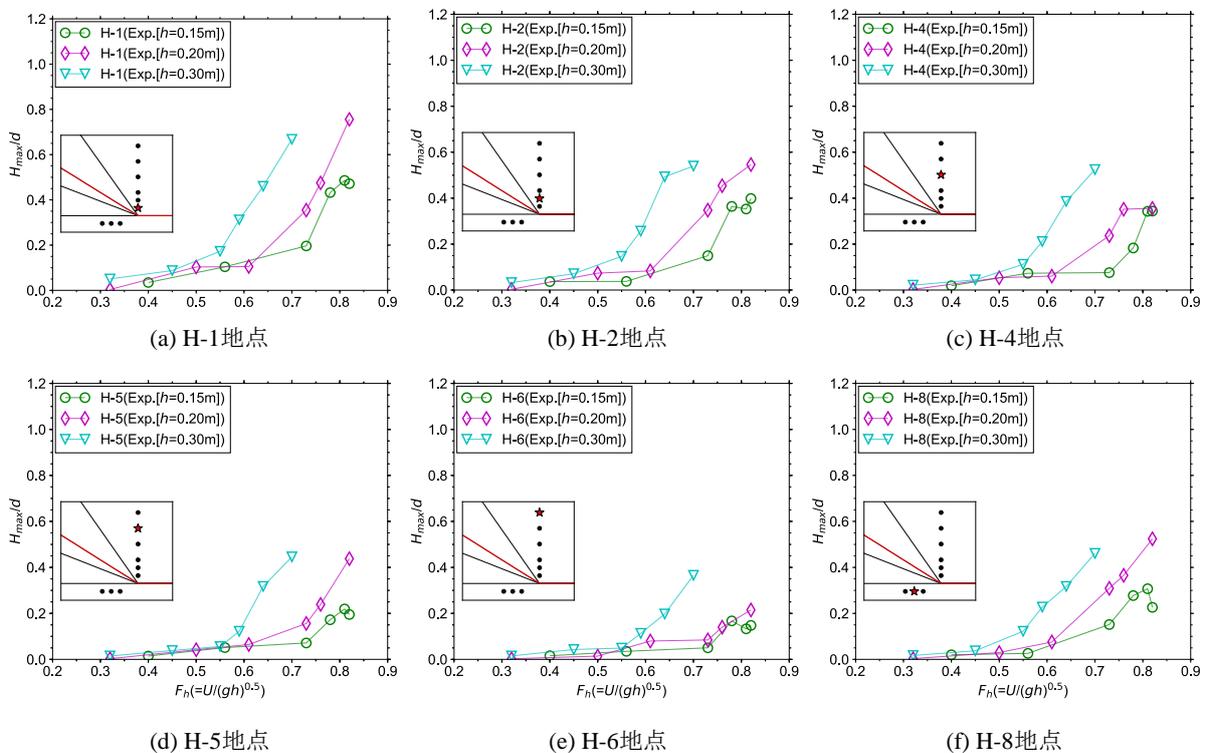


図-B.2 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（中）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

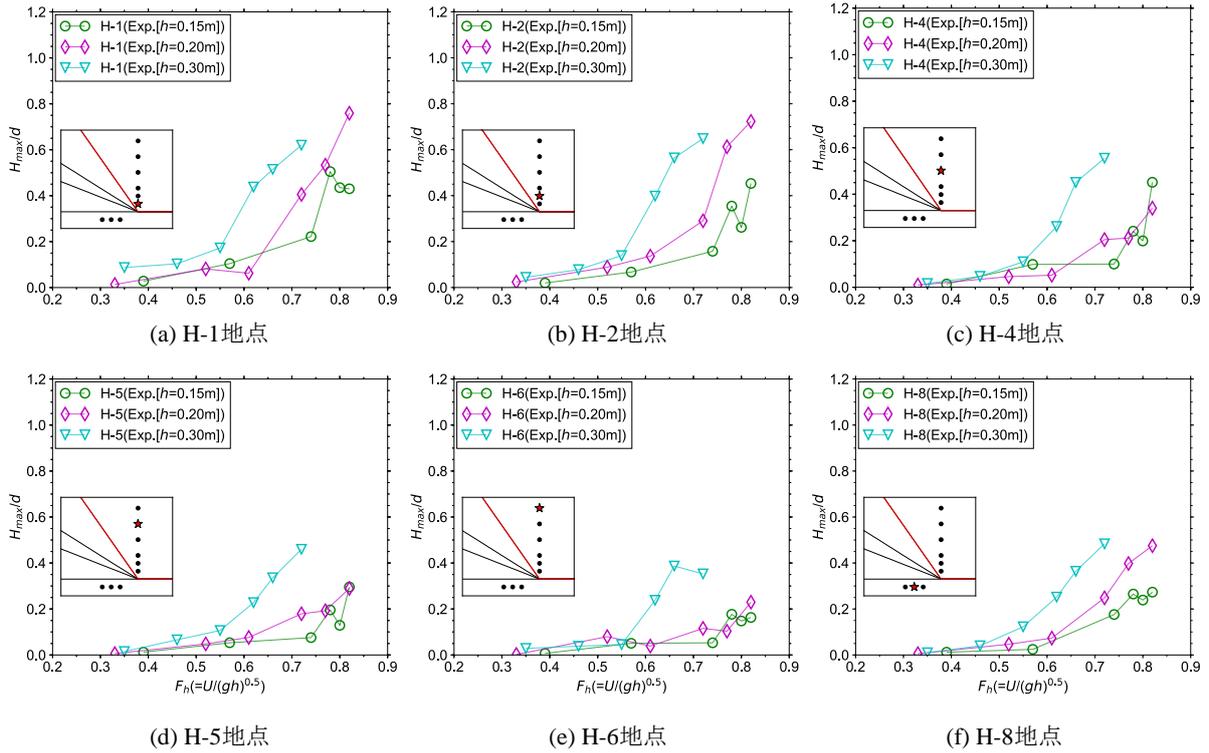


図-B.3 水深フルード数 F_h による最高波高 H_{max} の変化（屈曲航路【曲率（大）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最大波高 H_{max} と喫水 d の無次元値，横軸：水深フルード数 F_h

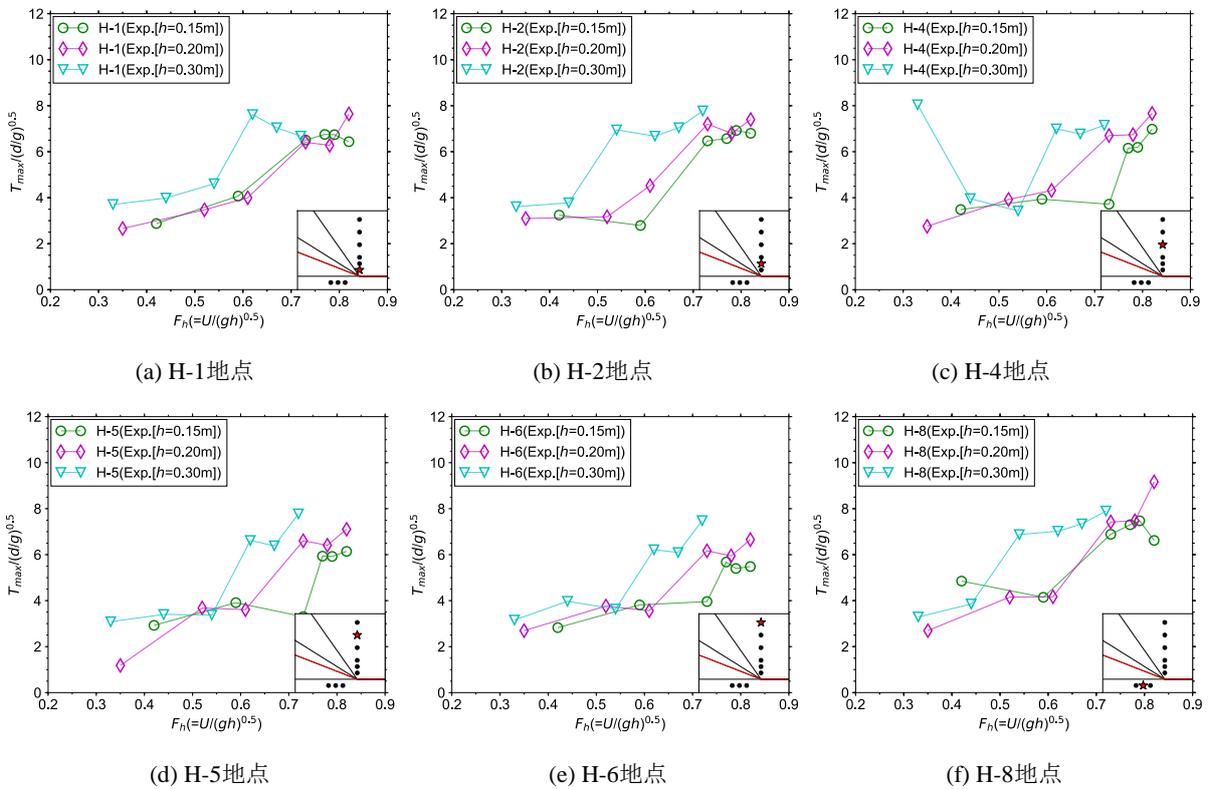


図-B.4 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化（屈曲航路【曲率（小）】，計測地点別の水深による違い），縦軸：最高周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ （ d ：喫水， g ：重力加速度）で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

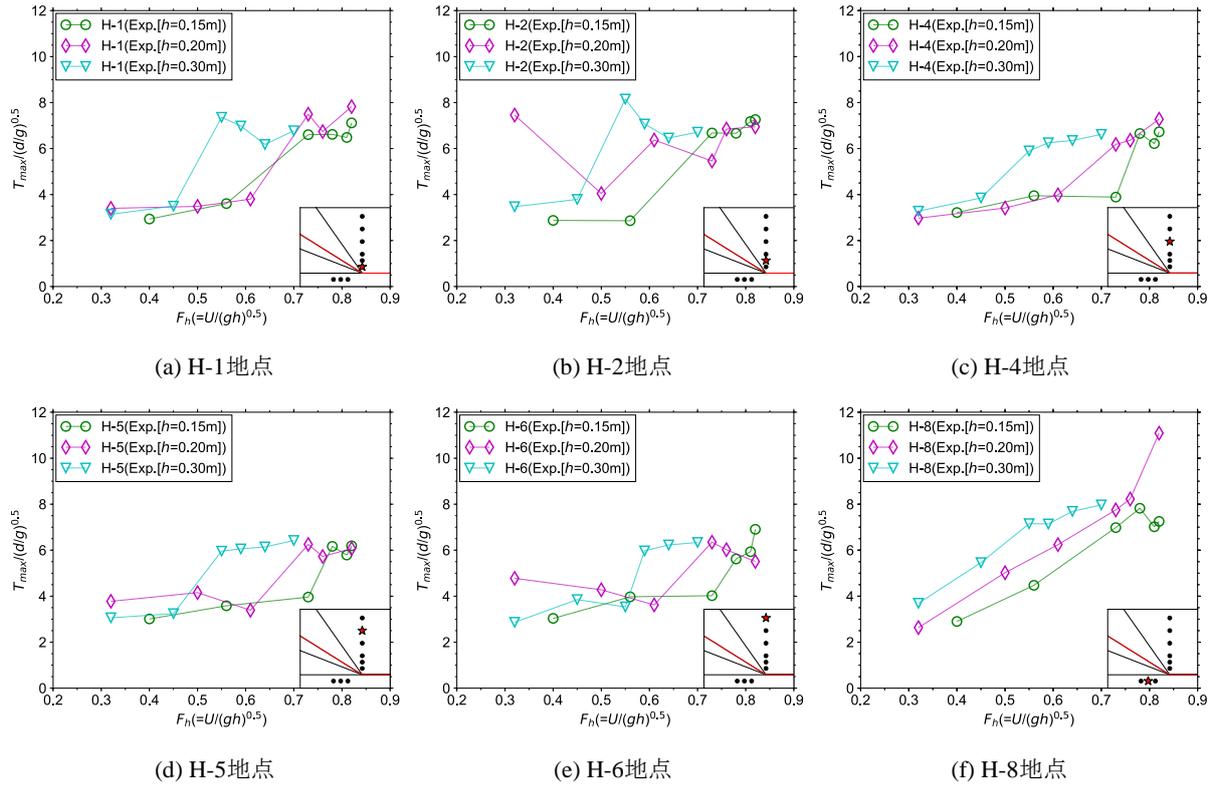


図-B.5 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化 (屈曲航路【曲率 (中)】，計測地点別の水深による違い)，縦軸：最高周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (d ：喫水， g ：重力加速度)で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

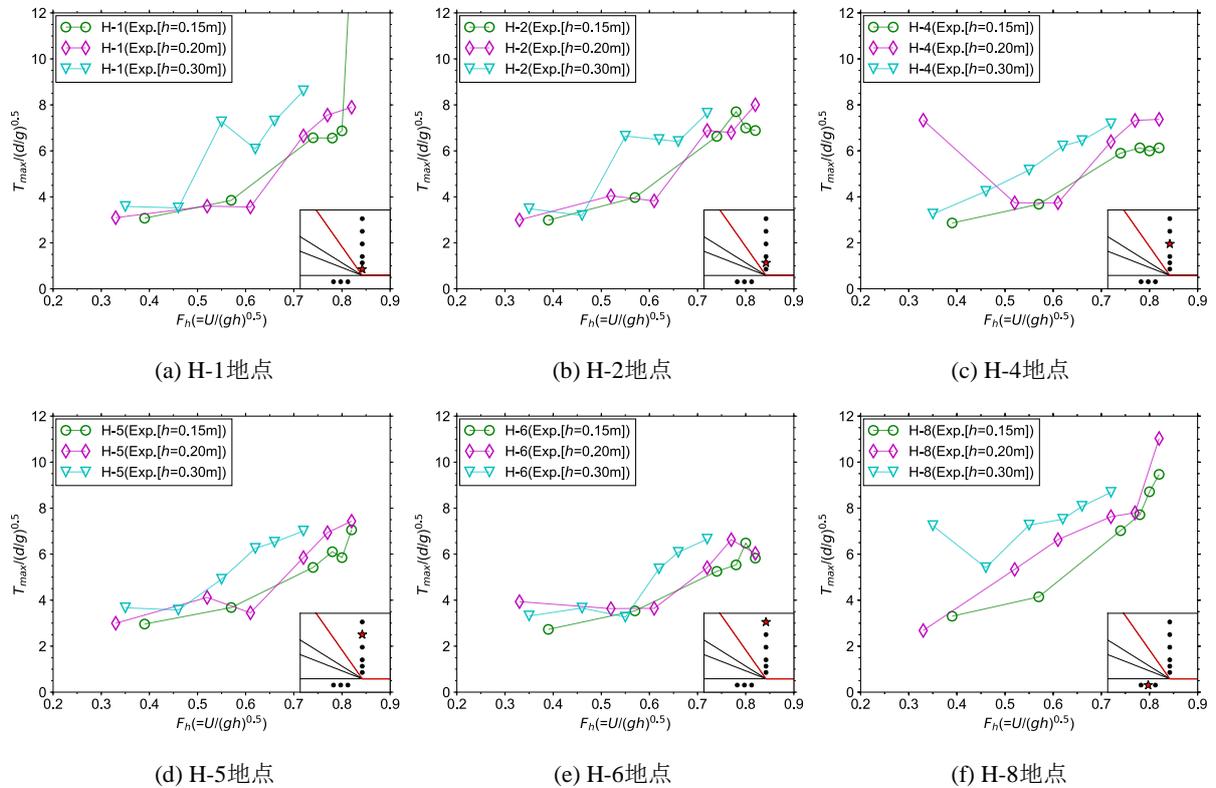


図-B.6 水深フルード数 F_h による最高周期 T_{max} の変化 (屈曲航路【曲率 (大)】，計測地点別の水深による違い)，縦軸：最高周期 T_{max} を $(d/g)^{0.5}$ (d ：喫水， g ：重力加速度)で無次元化した値，横軸：水深フルード数 F_h

港湾空港技術研究所資料 No.1345

2018.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。