

浅海水路中の航走波の特性および繋留船舶に及ぼすその影響

倉田 克彦*・小田 一紀**・平井 住夫***

1. ま え が き

航行する船舶が起す波（航走波）については、これまでも実験的あるいは理論的な研究が数多くなされてきた。その先駆けとなったものは、W. Froude による航走波の詳細なスケッチであり、また移動する点衝撃（Point Impulse）によって水面に生じる波についての理論解析である^{1),2)}。この理論解析の結果は、船首波が卓越している場合には、航走波の波紋の実験あるいは実測による結果とほぼ一致しているが^{3),4)}、衝撃（船）の移動速度に関係しないこと、船の大きさ、形状あるいは水深の影響が含まれていないという欠点があった。その後、船舶の形状ならびに船舶周辺の流れの影響を加味して、より厳密に航走波の解析を行なった研究の結果が発表されている^{4),5)}。

さらに、運河や港湾のような比較的水深が浅い水域における航走波の特性についても、模型実験あるいは現地観測により調べられており^{6)~8)}、これらの結果は、点衝撃による波に対する解を水深が比較的小さい場合にまで拡張した結果⁹⁾とほぼ一致することが確かめられている^{8),6)}。

一方、航走波が繋留船舶（特に小型船舶）に及ぼす影響についてその重要性が指摘されており^{10)~12)}、これに関する現地観測ならびに模型実験の実施例もある¹³⁾。しかしながら、浅海域における航走波の特性および航走波が繋留船舶に及ぼす影響についての検討は未だ十分とは言えない。

なお、これらの模型実験による航走波の波紋ならびに時間波形は、実船によるそれらとほぼ一致することが報告されており^{4),14)}、この点から言えば、航走波に関しては模型実験は非常に有効な手段である。

本論文においては、港湾内のような水深が比較的小さい水域での航走波の特性ならびに航走波によって惹き起される繋留船舶の動揺について行なった実験の結果について述べる。

2. 実 験

2.1 実験方法

幅が約 6.7 m、長さが約 40 m の水路の上方に直線上のレールを設け、その上に速度制御が可能な車を走らせ、それに模型船を曳航させて、船舶の航行状態を再現した。このレールに 2 m 間隔でリミットスイッチを取り付け、それらによって航走船の時々刻々の位置ならびに速度を容易に知ることができるようにした。

“航走波実験”においては、船の針路と直角方向に針路から 50 cm 間隔で並べた 6 台の容量式波高計によって航走波を測定した。“繋留船舶動揺実験”においては、図-1 に示すように、針路から約 2.5 m 離れた位置に、航走船の針路と船首尾線が平行になるように繋留された小型船の航走波による動揺をポテンシオメーターを利用して 6 自由度運動計測器によって測定した。また、航走船の針路に関して繋留船の重心位置と対称な位置にサーボ式波高計を設置して航走波の測定を行ない、その波を繋留船への入射波と見なした。

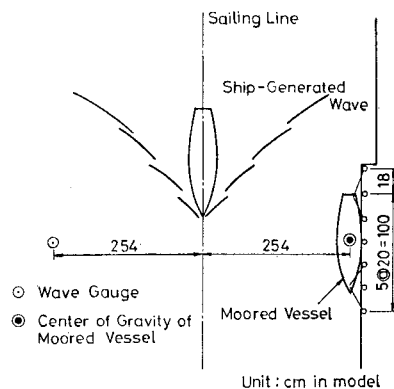


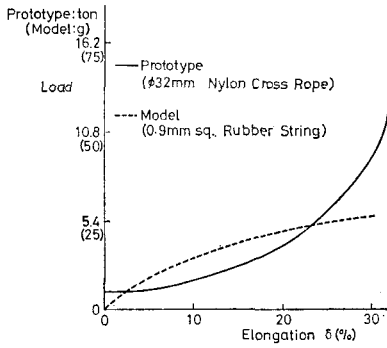
図-1 繋留船と航走船

繋留船は現地におけると同様に、4本の繋留ロープによって、防舷材を介して接岸した状態に保たれている。模型に用いた繋留用ロープ（0.9 mm 角の糸ゴム）ならびに防舷材（9 mm × 9 mm × 3.3 mm の板ゴム）の荷重-歪曲線は、図-2 に示すように実物のそれらと比較的似通

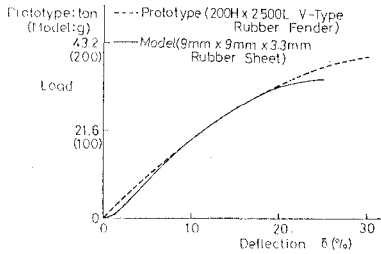
* 正会員 工修 大阪市立大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 兵庫県土木部港湾課



(a) 繫留ロープ



(b) 防舷材

図-2 繫留ロープならびに防舷材の荷重歪曲線

ったものである。

船舶が繫留される物揚場は、(i) 栈橋式、(ii) 水の動きを一切拘束せず、しかも反射波の影響もない透過式（一種のドルフィン式）ならびに (iii) 直立壁式の3つの形式のものを用い、形式の違いによる繫留船舶の動揺の違いを調べた。なお、模型の幾何学的縮尺は 1/60 を想定した。

2.2 実験条件

(i) 航走波実験

航行船舶は、36 G.T. の満載状態のカーフェリーである。港湾内での通常の航行速度は、最高 10 knots 程度であるが¹⁵⁾、船速が小さくなると航走波が非常に小さくなること、ならびに船速の変化による航走波の特性の変化を調べる目的もあって、航行速度 $V_s \approx 56 \text{ cm/s} \sim 188 \text{ cm/s}$ （現地の値に換算して 8.5 knots $\sim$ 28 knots）とした。また、水深の違いによる航走波の特性の違いを調べるため、水深 $h = 14.6 \text{ cm} \sim 24.6 \text{ cm}$ に変化させた。

(ii) 繫留船動揺実験

満載あるいは軽荷状態の 199 G.T. の小型貨物船を、前述のようにして物揚場に繫留した。航走船の速度 $V_s \approx 53 \text{ cm/s} \sim 185 \text{ cm/s}$ (8 knots $\sim$ 28 knots) とし、水深 $h = 18.3 \text{ cm}$ である。なお、物揚場の水深は 8.2 cm である。

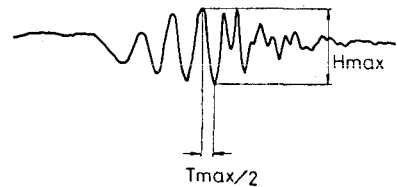
航走船および繫留船の諸元ならびに動揺性能を表-1 に示す。

表-1 航走船および繫留船の諸元ならびに動揺性能

諸 元		繫 留 船	航 走 船
垂 線 間 長		83.3 cm	136.7 cm
幅		15.0 cm	24.3 cm
吃 水	満 載 状 態	5.5 cm	9.8 cm
	軽 荷 状 態	2.3 cm	
繫 留 船 時 固 有 周 期	縦 揺 れ	満 載 0.6 $\sim$ 0.7 s	軽 荷 0.6 $\sim$ 0.7 s
	横 揺 れ	1.2 $\sim$ 1.25 s	0.6 $\sim$ 0.7 s
	船 首 揺 れ	3.7 $\sim$ 4.5 s	2.7 $\sim$ 3.2 s
	前 後 揺 れ	1.75 $\sim$ 2.4 s	—
	左 右 揺 れ	1.0 s	—
	上 下 揺 れ	0.55 $\sim$ 0.65 s	0.45 $\sim$ 0.6 s

2.3 実験結果の解析について

航走波およびそれによって惹き起される繫留船の動揺は、“決定論的な遷移現象（時系列）”と見なされ、このような時系列の解析には、例えばフーリエ積分を用いる方法が考えられるが、ここでは解析の第一歩として、その時系列中の最大振幅に注目した。すなわち、航走波の最大波高 $H_{\max}$ ならびに最大周期 $T_{\max}$ を読み取り、それらのフルード数 $Fr = V_s / \sqrt{gh}$ (g : 重力の加速度) ならびに針路からの距離 x による変化を調べた。また繫留船の動揺振幅の最大値と航走波の特性（主として航走船に関するフルード数 Fr により規定される）との関係調べた。航走波の最大波高 $H_{\max}$ を、図-3 に示すように、航走波形の中で相隣る峰（谷）と谷（峰）との間の鉛直距離の最大値として、最大周期 $T_{\max}/2$ をそれらの峰（谷）と谷（峰）との間の時間間隔として定義する⁶⁾。

図-3 航走波の最大波高 $H_{\max}$ と最大周期 $T_{\max}$ の定義

航走波の特性波長ならびに特性周期として、船速 V_s と等しい伝播速度 C_0 を有する深海波の波長 L_0 と、波長 L_0 と波速 C_0 とから定まる周期 T_0 とをとる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{特性波長} \quad L_0 = 2\pi C_0^2 / g = 2\pi V_s^2 / g \\ \text{特性周期} \quad T_0 = L_0 / C_0 = 2\pi V_s / g \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

3. 結果と考察

3.1 最大波高のフルード数による変化

航走波の性質はフルード数によって変化することが知られている^{6), 16)}。航走波の針路から 50 cm 離れた測点 1 における最大波高 [$H_{\max}$]₁ (以降 $H_{\max}$ と略記する)

のフルード数 F_r による変化を示したものが 図-4 である。図の縦軸は、便宜上航走船の吃水 d によって無次元化した最大波高 $H_{\max}/d$ である。図-4 によれば、水深 h の違いにかかわらず、 $H_{\max}$ の F_r による変化は実線で示される一つの曲線によって表わされるようである。 $0.4 < F_r < 0.7 \sim 0.8$ の範囲では、船首から生じる diverging wave と transverse wave とが重なる cusp locus 付近の波が最も大きく、その波高は F_r に応じて $H_{\max}/d \approx 0.05 \sim 0.2$ の間の値をとる。 $0.7 \sim 0.8 < F_r \leq 1.0$ の範囲では、前述の cusp locus と針路とのなす角度が 90° に近づいていき、その cusp locus 付近の波と、船首から針路と直角方向に延びた峰線を持ち船とともに進む“衝撃波的な波”との重なりによって波高が変化し、 $F_r \approx 0.9 \sim 0.95$ で $H_{\max}/d$ は最も大きくなる。 $F_r > 1.0$ となれば、transverse wave は存在しなくなり、diverging wave は後に取り残されたような形となり、それと船尾から生じ針路とほぼ直交した峰線を持つ波(船尾波)とが存在する。この場合には、 F_r の増加とともに $H_{\max}/d$ は減少し、 $F_r > 1.2$ となると $H_{\max}/d \approx 0.45 \sim 0.5$ とほぼ一定になる。このような $H_{\max}/d$ の F_r による変化の傾向は Johnson⁶⁾ による結果と同じであるが、Johnson による $H_{\max}/d$ の値は 図-4 に示す値より大きい。この違いは、主に船型の違いによるものと思われるが、これについては未だ検討していない。

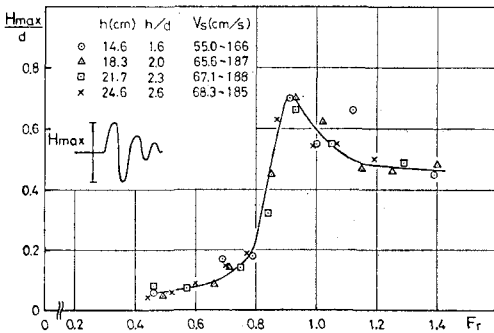


図-4 最大波高 $H_{\max}$ のフルード数 F_r による変化

3.2 最大波高の針路からの距離による変化

航走波の最大波高の針路からの距離による変化を示したものが 図-5 である。図の縦軸は測点 1 における最大波高 $[H_{\max}]_1$ を基準とした時の、他の測点 j における最大波高 $[H_{\max}]_j$ の値、すなわち $K_j = [H_{\max}]_j / [H_{\max}]_1$ の値を示している。一方、図の横軸は測点 j と測点 1 の針路からの距離の差 $\Delta x_j = x_j - x_1$ と、航走波の特性波長 L_0 との比 $\Delta x_j / L_0$ である。

フルード数の違い、および水深の違いによって幅はあるが、実験を行なった条件の下では最大波高は $\Delta x / L_0$ の増加とともにそのほぼ $(-1/3 \sim -1/2.5)$ 乗に従って減衰するようである。この結果は理論解析結果^{1),9)} とは

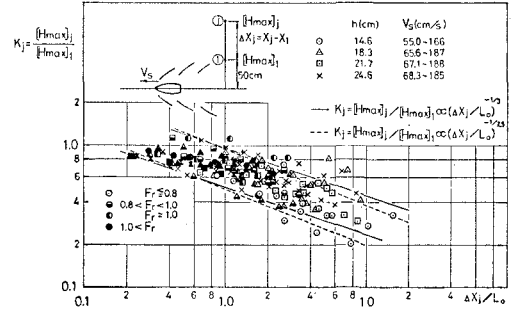


図-5 最大波高 $H_{\max}$ の針路からの距離 x による変化

ほぼ同じであるとともに、航走波の特性波高の x による変化ともほぼ一致している。この特性波高は最大波高とは同じではなく、また水深に無関係である。最大波高と特性波高の針路からの距離による変化の様子が互いに一致し、またそれらが理論解析の結果と同じであることより、航走波の波高は、深海域あるいは浅海域を問わず、またフルード数の如何に拘わらず、針路からの距離のほぼ $(-1/3)$ 乗に従って変化すると言えるようである。

3.3 最大周期のフルード数による変化

各フルード数ごとに各測点において得られた $T_{\max} / T_0$ の値には若干のばらつきが見られるので、それらの平均値 $\overline{T_{\max} / T_0}$ を求め、そのフルード数による変化を示したものが 図-6 である。ここで、 T_0 は式(1)による航走波の特性周期である。図中の $\odot$ 印は $\overline{T_{\max} / T_0}$ と $T_{\max} / T_0$ の範囲を示し、 $////$ は Sorensen⁷⁾ による現地観測の結果 ($T_{\max} / T_0$) の範囲である。また、図中の実線および破線は、 $\overline{T_{\max} / T_0}$ の F_r による変化の様子を表わすように描いたものである。

$F_r > 0.8$ の範囲では $\overline{T_{\max} / T_0} \approx 0.6 \sim 0.7$ とほぼ一定値を示しており、この結果は、Sorensen による現地観測の結果とほぼ同じである。この F_r の範囲では、cusp locus 付近の波の周期、すなわち diverging wave と transverse wave の周期が船速のみによって定められることが判る。 $0.8 < F_r < 1.0$ の範囲では $\overline{T_{\max} / T_0} \approx 1.2$ となる。この場合は diverging wave, transverse wave

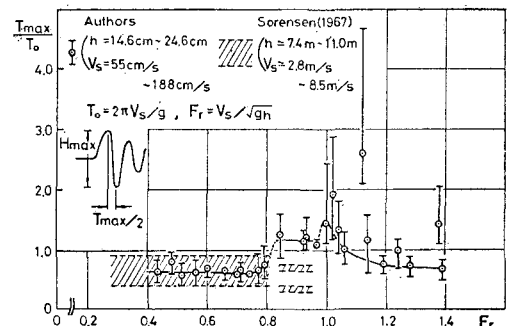


図-6 最大周期 $T_{\max}$ のフルード数 F_r による変化

だけではなく“衝撃波”の影響が大きくなって周期が長くなるようである。この周期も船速のみによって定められる。 $F_r \approx 1.0$ では $\overline{T_{\max}}/\overline{T_0} \approx 1.3 \sim 2.0$ と最大の値を示すようである。 $F_r > 1.0$ となれば F_r の増大とともに $\overline{T_{\max}}/\overline{T_0}$ の値は減少し、 $F_r > 1.2$ となれば $\overline{T_{\max}}/\overline{T_0} \approx 0.8$ とほぼ一定になる。

3.4 繋留船の動揺 (満載状態)

(i) 上下揺れ (Heaving)

上下 (鉛直) 方向の最大揺れ幅 $\xi_{\max}$ と航走波の最大波高 $H_{\max}$ との関係を示したものが図-7である。実験値にばらつきはあるが、フルード数を広範囲に変えた場合にもほとんどの実験値が $0.9 < \xi_{\max}/H_{\max} < 1.1$ の範囲内あるいはその近くにある。したがって、上下揺れについては、フルード数の値、すなわち航走波の特性の違い、あるいは物揚場の形式の違いにかかわらず、航走波の最大波高と同じだけの揺れが生じると言える。

(ii) 左右揺れ (Swaying)

左右揺れの最大振幅 $\eta_{\max}$ と、航走波の最大波高 $H_{\max}$ との比 $\eta_{\max}/H_{\max}$ とフルード数 F_r との関係を図-8に示す。図によれば、直立壁式の場合が他の形式の場合に

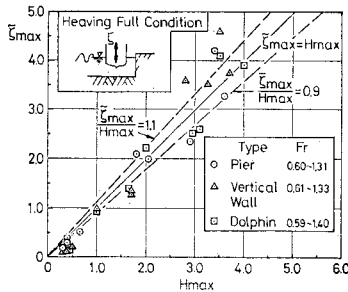


図-7 最大上下揺れ幅 $\xi_{\max}$ と最大波高 $H_{\max}$ との関係

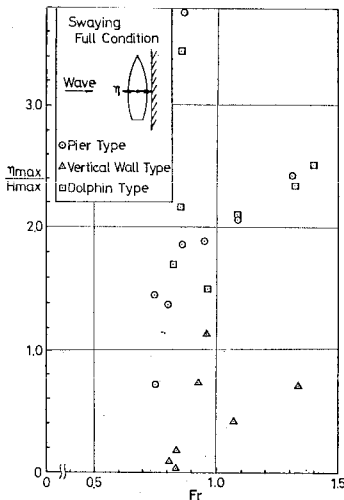


図-8 左右揺れの最大振幅 $\eta_{\max}$ のフルード数 F_r による変化

比して $\eta_{\max}/H_{\max}$ の値がかなり小さくなっている。これは、直立壁の存在のため左右揺れ方向の水の運動が抑制され、その結果として船舶の左右揺れに対する抵抗が大きくなり、船の運動が抑制されるためであると考えられる。

(iii) 縦揺れ (Pitching)

航走波の $H_{\max}$ および $L_{\max}$ (周期 $T_{\max}$ なる波の微小振幅波としての波長) から計算した最大波傾斜角 $\alpha_{\max} = \pi \cdot H_{\max}/L_{\max}$ と縦揺れの最大角度 $\theta_{\max}$ との関係を示したものが図-9である。 $\theta_{\max}/\alpha_{\max}$ の物揚場の形式の違いによる変動は比較的小さく、いずれの形式の場合も、 $F_r < 0.8$ の範囲では $\theta_{\max}/\alpha_{\max} \approx 0.1 \sim 0.2$ であって、 $F_r > 0.8$ となれば、 F_r の増大とともに航走波の峰線が繋留船の船首尾線に直交するようになっていくため、 $\theta_{\max}/\alpha_{\max}$ は急に大きくなり、 $F_r \geq 0.9 \sim 1.0$ では $\theta_{\max}/\alpha_{\max} \approx 0.5 \sim 0.6$ となる。

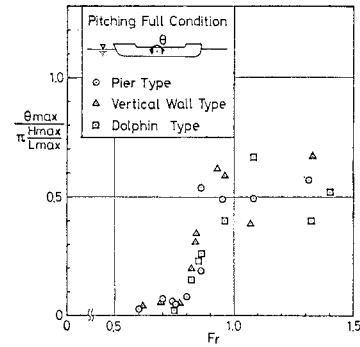


図-9 最大縦揺れ角度 $\theta_{\max}$ と最大波傾斜角 $\pi \cdot H_{\max}/L_{\max}$ との関係

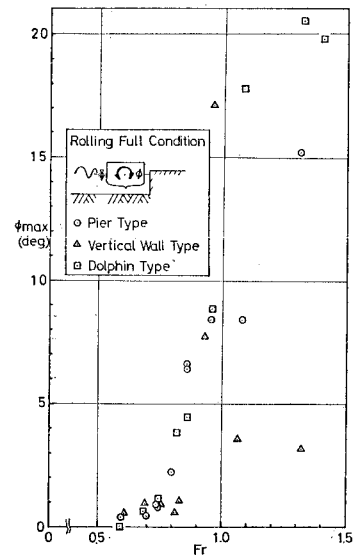


図-10 最大横揺れ角度 $\phi_{\max}$ のフルード数 F_r による変化

(iv) 横揺れ (Rolling)

横揺れの最大角度 $\phi_{\max}$ のフルード数 F_r による変化を図-10に示す。棧橋ならびに透過式の場合は、 F_r の増大とともに $\phi_{\max}$ は大きくなっていくのに対して、直立壁式の場合は $F_r > 1.0$ となれば F_r の増大とともに $\phi_{\max}$ は小さくなり、しかも $\phi_{\max}$ の値は他の形式の場合より小さくなっている。このことも、直立壁の存在による船舶動揺に対する抵抗の増大、すなわち水の運動に対する拘束の増加によるものと思われる。

なお、前後揺れ (Surging) および船首揺れ (Yawing) については省略する。

(v) 満載状態と軽荷状態における繫留船舶の動揺の違い

物揚場が棧橋形式の場合について、繫留船が満載状態の場合と軽荷状態の場合における動揺量の比較を行なった。その結果では、上下揺れ以外は軽荷状態の場合が満載状態の場合より動揺量 (最大振幅) は小さくなるようである。上下揺れについては、両方の場合ともにほとんど変わらない揺れ幅を示している。

4. 結 論

本論文で述べてきたことは、次のように要約できる。

(1) 航走波の最大波高ならびに最大周期はフルード数 $F_r = V/\sqrt{gh}$ によって定められる。

(2) 最大波高は針路からの距離のほぼ $(-1/3)$ 乗に従って変化する。

(3) 繫留船の航走波による動揺は、航走船に関するフルード数 F_r によって異なり、また物揚場の形式によっても異なる。これは入射波としての航走波の特性がフルード数によって異なること、および物揚場の形式の違いによって物揚場前面の水の動きに対する抑制の程度、すなわち船舶の動揺に対する抵抗の大きさが異なることによる。この影響は左右揺れ、横揺れおよび船首揺れに顕著に現われている。

(4) 繫留船の上下方向の最大揺れ幅は、フルード数、物揚場の形式或いは繫留船の載荷状態にかかわらず、航走波の最大波高とほぼ同じになる。

(5) 繫留船が軽荷状態の場合の動揺振幅は、上下揺れを除いて、満載状態の場合より小さくなる。

5. あとがき

今後、理論的な解析と並行して航走船の船型、大きさ、吃水等の違いによる航走波の特性の違い、およびそれが繫留船の動揺に及ぼす影響を調べ、さらに物揚場の形式による動揺の違いを明らかにすることによって、小型船舶の繫留に対する、航走波の影響に関して一つの指針を

与えたく思っている。本論文をまとめるにあたり、実験ならびに結果の解析に協力いただいた、当時大阪市立大学工学部学生 (現在貝塚市役所勤務) 神前 裕君、現在大阪市立大学大学院生 北浦胤亮君および大阪市立大学工学部学生 松井圭一君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Stoker, J. J.: Water Waves, p. 219~p. 243, Interscience Publishers, New York, 1957.
- 2) Saunders, H. E.: Hydrodynamics in Ship Design, Vol. 1, Chap. 10, p. 168~p. 184, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1957.
- 3) Sorensen, R. M.: Ship-Generated Waves, Advances in Hydrosience, Vol. 9, p. 49~p. 83, Academic Press, New York, 1973.
- 4) 昭和49年度海上交通安全に関する基礎的事項の調査研究 その3 一航行船舶の航走波が小型船舶に及ぼす影響の研究一 中間報告書, p. 76~p. 77, (社)日本海難防止協会
- 5) 岡村・乾・梶谷: 局部流を考慮した航走波の解析, 日本造船学会論文集, 第138号, pp. 37~45, 1975.
- 6) Johson, J. W.: Ship Waves in Navigation Channels, Proc. of 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 666~690, 1958.
- 7) Sorensen, R. M.: Investigation of Ship-Generated Waves, Jour. of the Waterways and Harbors Div., Vol. 93, WW1, pp. 85~99, ASCE, Feb., 1967.
- 8) Brebner, A., P. C. Helwig and J. Carruthers: Waves Produced by Ocean-Going Vessels, A Laboratory and Field Study, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 455~465, 1966.
- 9) Havelock, T. H.: The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media, with Application to Waves on Water Produced by a Travelling Disturbance, Proc. of Roy. Soc., Ser. A 81, pp. 398~430, 1908.
- 10) Tanaka, H. and H. Adachi: Influence of Waves due to Large Ship upon Small Ships and Ocean Structures, 天然資源の開発利用に関する日米会議 (US-JAPAN Conference on Development and Utilization of Natural Resources), 第11回海洋構造物専門部会, 東京, 1982.
- 11) Powell, A. and W. R. McCreight: Effect of Ship Waves on Vessels and Ocean Structures, 天然資源の開発利用に関する日米会議, 第11回海洋構造物専門部会, 東京, 1982.
- 12) 竹内能忠・七沢 謙: 今治海岸におけるいわゆる「軍艦波」について, 日本海洋学会誌, 第17巻, 第2号, pp. 20~30, 1961.
- 13) Lee, T. T.: Ship Generated Waves in Navy Marina at Pearl Harbor, Tech. Rep. No. 38, James K. K. Look Laboratory of Oceanographic Eng., Univ. of Hawaii, Apr., 1976.
- 14) 田中 拓 他: 造波抵抗直接計測の船型試験への応用, 日本造船学会論文集, 第126号, pp. 11~24, 1969.
- 15) 例えば, 大阪港船舶航行実態調査報告書, 関西電力(株), (株)日本港湾コンサルタント, 1972.
- 16) 倉田・小田・平井: 浅海水路における航走波について, 第38回年次学術講演会講演概要集, 第II部門, 1983.