神戸港内のタグボートが造る航走波の実態調査

塩谷 茂明*・溝下 和裕**・土橋 保***・久野 真之****

On Substantial Examination of Ship Waves Generated by Tug Boats in Port of Kobe

Shigeaki SHIOTANI, Kazuhiro MIZOSHITA,
Tamotsu THUCHIHASHI and Masayuki KUNO

Abstract

This paper deals with the substantial examination of ship waves generated by tug boats in port of Kobe. Such examination is very important because the ship waves generated by tug boats react to many smalls vessels sailing and operating in the port. The tug boats having the high power engine generate the larger ship waves than other sailing ships in the port and the small vessels are endangered by the waves. It was confirmed that the substantial examination of the ship waves generated by tug boats in port of Kobe became evidently.

Keywords: Ship waves, Tug boat, Port of Kobe, Substantial examination

キーワード: 航走波、タグボート、神戸港、実態調査

1. はじめに

神戸港は日本を代表する国際貿易港の一つであり、国際貿易の拠点として拡充を図るとともに、現在もウォーターフロント開発等鋭意推進している。年間総入港隻数はおおよそ 43,300 隻数であり、そのうち外航船舶は 8,300 隻で主な船種はコンテナ船、液体タンカー、自動車専用船、貨客船等で、内航船舶は 35,000 隻で、貨物船、客船、フェリー等である。

一般に、航行船舶が造る航走波の大きさは、船舶の高速化及び大型化に比例して増加する⁽¹⁾。しかし、神戸港に出入港の船舶は、海上衝突予防法、港則法その他関係法規の遵守が義務付けられ、航路及び航法も厳しく定められ、また船舶の輻輳度も高く、低速航行を余儀なくされている。その結果、大型船舶による航走波は小さく、むしろ大型船舶の出入港時の離着岸支援作業を行う引船（タグボート）が、作

業現場までの往復航行中に高馬力出力走行を行い、大きな航走波を生成する事がある。それ以外の船舶では、高速旅客船、プレジャーボート及び観光船等があるが、法規の遵守から港内での低速航行が義務付けられているため、航走波は小さい⁽²⁾。このように、神戸港内で、大きな航走波を造る代表的な船舶はタグボートであり、実際に本船の舷側で荷役中のはしけ等が航走波の影響を受けたり、護岸上の釣り人から越波等の苦情が港湾関連局に届くこともある。しかし、これまでタグボートに関する航走波の実態調査は少なく、今後港内交通環境保護の観点から、タグボートによる航走波の実態把握は重要かつ緊急である⁽³⁾。

このような背景の下、神戸港内のタグボートによる航走波の実態調査を行い、その解析結果から有益な情報を得たので、ここに報告する。

* 正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)
shiotani@maritime.kobe-u.ac.jp

** 非会員 (株) 船舶研究所 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通 2 丁目 2-1)

*** 非会員 神戸市みなと総局みなと振興部海務課 (〒650-8570 神戸市中央区加納町 6-5-1)

**** 非会員学生 神戸大学海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

2. 航走波の計測実験

2.1 神戸港のタグボートの概要

神戸港内のポートアイランド北物揚場（船溜り）に神戸港で稼働のタグボート基地があり、複数事業者が総数 20 隻のタグボートを運営する。Table 1 に神戸港のタグボートの主要目一覧を示す。

神戸港内のほとんどのタグボートは、総トン数が 150～200 トン、全長が 30～35m の一般的タグ船型である。航海速力は 12～14 ノット、主機関馬力は 2 機 2 軸搭載で 1300ps～3600ps と高出力を有する。

神戸港のタグボートは大型船の出入港に合わせてタグボート基地から出航し、船舶離着岸の支援作業を行う。

Fig.1 Tug boat and container ship

Table 1 Principal particulars of tug boats in port of Kobe

	G/T (ton)	LOA (m)	Lpp (m)	B (m)	D (m)	Draft (m)	Speed (knot)	Bollard Pull (Max) (tonf)	Main Engine Type	B.H.P. (PS)	B.H.P (kW)
A	198	34.0	29.0	9.2	4.18	3.0	13	55	Z280-EN	D 3600PS x2	2647
B	197.8	31.0	27.0	8.8	3.49	2.7	12	36	—	D 2600PS x2	1911
C	196.0	31.0	27.0	8.8	3.48	2.6	12	36	—	D 2600PS x2	1911
D	195	33.5	29.5	9.2	4.18	3.2	13	45	6DLM -28S	D 3600PS x2	2647
E	158	30.8	26.4	8.6	3.78	2.6	13	37	6N21A -EV	D 2600PS x2	1911
F	153	30.8	25.5	8.6	3.80	2.7	13	35	—	D 2600PS x2	1911
G	191	33.4	31.5	9.2	4.00	2.6	14	48	6L28HX	D 3600PS x2	2647
H	153	31.5	29.7	8.6	3.75	2.0	12	40	6L25CXE	D 2600PS x2	1911
I	161	31.5	26.1	8.6	3.80	2.7	13	42	6L25HX	D 2600PS x2	1911
J	193	33.3	29	9.2	4.17	3.2	14	50	Z280-EN	D 3600PS x2	2647
K	152	30.8	25.5	8.6	3.78	3.2	13	36	6L25BX	D 2600PS x2	1911
L	154	30.3	25.8	8.6	3.77	2.7	12	36	6L25BX	D 2400PS x2	1764
M	199	33.0	28.5	9.2	4.183	3.1	14	50	6L28HX	D 3600PS x2	2647
N	160	30.9	26.0	8.8	3.78	2.7	12	36	6L27.5X	D 2600PS x2	1911
O	164	30.9	26.0	8.8	3.78	2.7	12.3	36	6L27.5X	D 2600PS x2	1911
P	193.67	28.4	25.0	8.5	3.48	2.6	11	30	8PSHTcM -26D	D 2100PS x2	1544
Q	195	33.9	29.5	9.4	4.00	3.1	14	52	6L28HX	D 3600PS x2	2647
R	195	34	29.9	9.2	4.20	3.2	14	—	Z280-FN	D 3600PS x2	2647
S	101.27	23	19.1	6.6	3.00	2.3	11	18	6L20AX	D 1300PS x2	955
T	157	31.5	26.5	8.6	3.78	2.6	13	36	—	D 2600PS x2	1911

Fig.1 は神戸港内六甲アイランドのコンテナターミナルにおいて、大型船舶の着岸支援作業を実施中のタグボートの様子である。タグボートがコンテナ船の船尾を岸壁に向かって押している。

2.2 不特定タグボートの航走波計測の概要

実際に、午前中に入港の大型船舶に合わせ、早朝 6 時過ぎにタグボートは基地を出港し、作業終了後の 9 時頃に帰港する。また、大型船舶が出港する午後 4 時過ぎに再び基地を出港し、6 時頃に帰港する。

タグボートの出動数は日々異なるが、午前中に基地を出入港するタグボートの航走波を港内防波堤端で計測した。岸壁からおよそ 2.5m 海上に張り出した棒の先端に、超音波型波高計を鉛直下向きに 1 台固定し、航走中のタグボートから到来する航走波を計測した。波高計の設置場所は岸壁からの反射波の影響がないように、位置を調整した。

従来の研究から、航走波は船舶からの距離と船速に深く依存することが分かっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。波高計と船舶までの距離はレーザー距離計で、船速は防波堤上に設置の間隔が既知の 2 本の支柱間の通過時間をストップウォッチで計測し求めた。波高計の計測データを AD 変換後パーソナルコンピュータに記録・保存した。サンプリングタイムは 0.1s、データ数は 1000 個である。波向は防波堤上で方位盤を用い波の到来方向を目測した。

Fig.2 General arrangement of Ryuoh2

Table 2 Particulars of tug boat Ryuoh2

Item	Item
Gross 194ton Ton	Main Eng. 1323kWx750min ⁻¹ (B.H.P) x 2sets
L.O.A. 34.0m	Aux. Eng. 118kWx1800 (B.H.P) min ⁻¹ x 2sets
L.P.P 29.9m	Bollard P. Fore 50.5t, Aft 48t
B(MLD) 9.2m	Max. speed 14.6kt
D(MLD) 4.2m	Propeller Azimuth drive Unit propeller
d(Des.) 3.2m	KST-180ZF/A x 2sets

また、計測記録のバックアップとして、航走波の波高、波長、波数及び波向きを岸壁からの目視観測で記録した。

航走波の計測は 4 日間実施した。

2.3 特定タグボートの航走波の詳細計測

タグボート基地から出入港のタグボートは、航行状況が個別に異なるため、航走波の詳細な特性の把握調査は難しい。そこで、タグボートによる航走波の特性を把握のため、特定のタグボートを用いた航走波の計測実験を行った。供試船は神戸市みなと総局所有のタグボート「竜王 2」である。

Fig.2 に竜王 2 の一般配置図を、Table 2 に主要目を示す。竜王 2 はごく一般的なタグボートの大きさであるが、船種は汽船・第 4 種船・引き船と多様で

Fig.3 Outline of experiment of ship waves

あり、泡水兼用消火器と粉末化学消火銃の化学消防装置、海面油流出油処理装置、ウォーターカーテン等を有し、海上での消火活動なども行い、さらに進

路警戒船などの資格も有する。

航走波の計測実験は、供試船からの距離が一定で船速が変化する場合、及び船速が一定で供試船からの距離が変化する場合で行った。Fig.3 は航走波の計測実験の概略を示す。ここに、供試船からの距離とは、供試船の航跡線から波高計までの距離である。波向は航走波が波高計に到来する方位と航跡線との交角で定義した。供試船の船速及び針路の計測は船上で、供試船と波高計間の距離はレーザー距離計及び波向は方位盤を用い、陸上で目視計測した。

実験海域は神戸港内のポートアイランド南西岸であり、防波堤に囲まれた静穏な海域である。計測した防波堤は水面付近の海水が透過するため、壁面での航走波の反射影響はほとんどない。

3. 簡易式航走波の推定計算

航走波の簡易式最大波高は次式で表される⁽⁶⁾。

$$H_{MAX} = H_0 \left(\frac{100}{S} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{V_k}{V_K} \right)^3 \quad (1)$$

ここに、 H_{max} は任意の観測点における航走波の最大波高(m)、 S は観測点から航跡中心線までの距離(m)、 V_k は船の実際の航行速力(knot)、 V_K は満載航行速力(knot)である。

H_0 は航走波の特性波高といわれ、船が満載航行速力で走っているときに航跡中心線から 100m の距離で観測される最大波高のことであり、次式で表される。

$$H_0 = \left(\frac{L_s}{100} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{EHP_w}{2.2 L_s V_K}} \quad (2)$$

ここに、 L_s は L_{pp} (m) (垂線間長) に等しく、 EHP_w は造波馬力(PS)であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} EHP_w &= EHP - EHP_F \\ EHP &= (0.6175 \sim 0.7425) \times SHP_m \end{aligned} \quad (3)$$

$$EHP_F = \frac{\rho}{2} S V_0^2 C_F \frac{V}{75}$$

$$S = 2.5 \sqrt{V L_s}$$

$$C_F = \frac{0.075}{\left(\log_{10} \frac{V_0 L_s}{\nu} - 2 \right)^2}$$

SHP_F は連続最大軸馬力(PS)、 EHP_F は船と同じ長さと表面積を持つ平板の抵抗に見合う馬力、 ρ は海水密度で $104.5(\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$ 、 V_0 は満載航行速力 $0.514 V_K(\text{m/s})$ 、 C_F は摩擦抵抗係数、 ν は水の動粘性

係数で $1.2 \cdot 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ 、 ∇ は船の満載排水量($\nabla = t/1.025)(\text{m}^3)$ である。

航走波の縦波の周期は日本海難防止協会による次式によって求めることができる。

$$T = T_0 \cos \theta, \quad T_0 = \frac{2 \pi V_k}{g} \quad (4)$$

ここに、 T_0 は横波の周期(s)、 V は船の実際の速力(m/s)、 g は重力加速度(9.8m/s^2)である。

θ は $35^\circ 16'$ で Kelvin の造波理論から得た航跡線に対する縦波の方向であり、波はこの方向に伝播すると仮定した。

4. 実験結果

4.1 各種タグボートの場合

Fig.4 は神戸港が基地のタグボートによる航走波の計測結果を示す。(a)図は航走波の最大波高である。横軸は船速、縦軸が最大波高である。ここに、最大波高とは航走波の水面変位の時系列において、山から谷の高さの最大値である。個々のタグボートと波高計間の距離が一定でなく、0-50m、50-100m 及び 100-200m に分類して示した。高速になると波高は増加するが、低速でも短い距離で波高が高い場合もある。最大波高は 60cm であり、岸壁などの反射影響を考慮すると、岸壁で波高がおおよそ 2 倍に達する波の発生が予想される⁽⁵⁾。(b)図は最大波の周期を示す。計測値は散在し、タグボートと波高計間の距離がこの程度の計測範囲では、船速に依存しないで、おおよそ同程度の値になる。(c)図は Fig.3 で定義した波向を示す。航走波の観測は港内で対岸との距離が短い狭い水路で行ったことから、タグボート基地から出入港のほとんどのタグボートは水路内で岸壁におおよそ平行に航行することから、タグボートの針路を岸壁に平行であると仮定して波向を求めた。図中の実線は Kelvin 波の波向である。船速及び距離に関係なくおおよそ kelvin 波の波向と同程度の値を示す。

Fig.5 はタグボートと波高計間の距離と航走波の関係を示す。(a)図は最大波高を示す。船速を 0~5、5~10 及び 10~15 ノットに分類した。各船速において距離が長くなると波高の減衰が確認できる。(b)図は航走波の周期を示す。データが散在し定性評価が困難であるが、この程度の距離範囲内では距離に関係なくおおよそ一定値を示した。(c)図は航走波の波向を示す。Kelvin 波の波向より僅かに大きい、距離に依存しないでおおよそ一定値を示す。タグボートの船型が通常船舶より肥大しているからであろう。

(a) Wave height

(a) Wave height

(b) Wave period

(b) Wave period

(c) Wave direction

(c) Wave direction

Fig.4 Ship waves of measured tug boats
(Speed variable)Fig.5 Ship waves of measured tug boats
(Distance variable)

4.2 竜王 2 の場合

Fig.6 は距離が 100m の一定で速力に変化する場合の航走波を示す。(a)図は最大波高を示す。実線は 3.で示した簡易式航走波の予測計算結果である。計算結果は速力の 3 乗に比例している。両者を比較すると、高速で、実験値の方が定量的に僅かに小さいが、全体に簡易式計算法でタグボートの航走波の推定が可能である。

(b)図は航走波の周期を示す。簡易式計算法では周期は船速に比例するが、実験値は散在するため定量的評価は十分でないが、定性的にはおよそ計算結果と一致する。

(c)図は航走波の波向を示す。実験値はおよそ Kelvin 波の波向に一致する。

Fig.7 は機関出力が 75% (船速 11.8 ノット) で距離が変化した場合の航走波を示す。(a)図は最大波高を示す。実験値は散在するが、距離が増加すると波高が次第に減衰し、簡易計算式で概ね波高の予測が可能である。

(b)図は周期を示す。距離に関し顕著な変化を示さないが、およそ一定値となり、簡易式計算結果とも一致する。

(c)図は航走波の波向を示す。実験値は Kelvin 波と概ね一致し、およそ一定値を示す。

Fig.8 は機関出力が 100% (船速 12.7 ノット) の一定値で距離が変化した場合の航走波を示す。(a)図は最大波高を示す。実験値は散在するが、距離に反比例している。タグボートとの距離が短い 100m で最大波高が 80cm となり、300m で 40cm 程度に減衰している。簡易式計算結果は実験値より定量的に僅かだけ大きく予測している。

(b)図は周期を示す。距離に対する顕著な変化はなく、およそ一定値を示し、簡易式計算結果とも概ね一致する。

(c)図は航走波の波向を示す。実験値は距離が短い時 Kelvin 波より大きく、距離が長くなると若干小さくなる。

Fig.9 は竜王 2 の航走波を示す。機関出力 100% で航走中である。タグボートは方形係数が高い肥大船型で、高馬力出力のため、船体に最も近い航走波の波峯線は碎波し、波エネルギー損失を起こしている。後続波は一部分碎波しながらも比較的粗度が大きく波高が高い波峯線を維持しながら伝搬している。このように、航走波は碎波の繰り返しにより次第に安定な波となって遠方に伝搬するが、今回の実験のように供試船からの距離が接近した範囲では、距離

(a) Wave height

(b) Wave period

(c) Wave direction

Fig.6 Ship waves of Ryuoh2
(Speed variable)

(a) Wave height

(a) Wave height

(b) Wave period

(b) Wave period

(c) Wave direction

(c) Wave direction

Fig.7 Ship waves of Ryuoh2
(Power=75%, Distance variable)

Fig.8 Ship waves of Ryuoh2
(Power=100%, Distance variable)

に対する波周期及び波向の変化が顕著に現れなかったものと思われる。

Fig.9 Ship waves generated by Ryuoh2

5. 結論

神戸港内で稼働のタグボートによる航走波の計測実験を行い、航走波の特性について調査した。神戸港が基地である各タグボートの一般的な航走波及び特定のタグボートを用いた詳細な航走波の特性の把握を行った結果、以下の主要な結論を得た。

(1) 神戸港内で稼働の一般のタグボートが造る航走波の最大波高は約 60cm 程度である。

(2) 一般のタグボートによる航走波の波高は船速の 3 乗に比例する。周期はデータが散在しているが、船速に強く依存しないで、およそ一定の値を示す。波向は Kelvin 波の波向に概ね一致する。

(3) 一般のタグボートによる航走波の波高は船舶からの距離に反比例し、距離が長くなると僅かだけ減衰する。周期は距離に依存しないで変化しない。波向は距離に関係なくおよそ Kelvin 波の一定値を示す。

(4) 特定のタグボート竜王 2 を用いた航走波の計測結果から、タグボートの航走波の最大波高及び周期は船速に比例し、簡易式計算法で概ね推定可能である。波向は Kelvin 波の波向とおよそ一致する。

(5) 竜王 2 による航走波の計測結果から、タグボートの航走波の最大波高は船までの距離に反比例する。簡易式計算式による値より僅かだけ小さいが、定量的に予測が可能である。

(6) 竜王 2 による航走波の計測結果から、タグボートの航走波の周期は船までの距離に関係なくおよそ一定値であり、簡易式計算式より僅かだけ小さいが、定量的に概ね予測が可能である。

(7) 竜王 2 による航走波の計測結果から、タグボートの航走波の波向は船までの距離に依存しないでおよそ一定値であり、Kelvin 波の値と概ね一致する。

本研究は神戸港内で稼働のタグボートの実態調査である。今後、線形造波理論などを用いた理論計算による航走波の波紋の定量的評価から、より高度な航走波の推定計算を行う所存である。

謝辞

本研究は、神戸大学大学院海事科学研究科と(株)船舶研究所の共同研究によって実施した。本研究のタグボートの航走波の計測実験に際し、神戸市所有のタグボート「竜王 2」の使用を快諾され、実験遂行において終始絶大なご協力いただいた神戸市みなと総局みなと振興部海務課職員の方々及び竜王 2 の船長をはじめ乗組員の方々に心より御礼申し上げる次第です。

また、神戸港内のタグボートの稼働状況をご提供いただき、航走波の計測実験が円滑に遂行出来たことに対し、神戸港タグボート協会の職員に対し深くお礼申し上げます。

最後に、本研究の航走波の実験に際し、終始ご協力いただいた、神戸大学大学院海事科学研究科塩谷研究室の卒業研究生及び博士課程前期課程の学生に深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Sorensen R. M. : Investigation of Ship-Generated Waves, Journal of the Waterways and Harbors Division, WW1, pp.85-99, 1967
- (2) 塩谷茂明, 藤富信之, 斉藤勝彦: 実海域における滑走艇による航走波の特性について, 日本航海学会論文集, No.98, pp.375-383, 1998
- (3) 藤富信之, 塩谷茂明, 戸田保幸, 溝下和裕: 実海域におけるエスコートタグボートが造る航走波と小型漁船の動揺計測実験について, 日本航海学会論文集, No.119, pp.1-7, 2008
- (4) 塩谷茂明, 藤富信之, 斉藤勝彦, 石田廣史, 山里重将: 三種類の小型実船による航走波の特性, 水産工学, Vol.33, No.2, pp.123-134, 1996
- (5) 塩谷茂明, 藤富信之, 斉藤勝彦, 山里重将: 実海域における高速艇が造る航走波中の小型船の動揺実験について, 日本航海学会論文集, No.99, pp.197-207, 1998
- (6) 日本海難防止協会: 海上交通安全に関する基礎的事項の調査研究、一航行船舶が小型船舶に及ぼす影響の研究一、完了報告書、p.83、1971

質疑応答

南清和（東京海洋大学）：

（１）航走波を計測された際に、波向はどのように計測されたのでしょうか。

（２）計測海域に存在する波は航走波を計測する際に影響があると思いますが、どのように取り扱われたのでしょうか。

塩谷茂明：

御討論ありがとうございます。

（１）のご質問は、論文にも記載していますが、防波堤に設置した方位板を用いた目視観測で計測しました。

（２）のご質問は、計測時期が夏期に実施したので、ほとんど無風状態であること、計測場所が港内の防波堤に囲まれた静穏な海域であるため、有義波高で 10cm 以内であったので、航走波に直接大きな影響を与えないと判断し、今回の実験では特別な処理を行っていません。

井関俊夫（東京海洋大学）：

航走波の時系列から周期を読み取るとき、波向きの補正等はいらないのでしょうか。

塩谷茂明：

御討論ありがとうございます。波浪中の船体運動等の研究では波向きが大きく影響します。また、波高計が航行船舶に搭載の場合、補正は必要です。しかし、今回の実験では、波高計は固定され、しかも 1 点での計測のため、波向きの補正は必要でないと考えています。