名古屋港での航跡波の解析と自然条件の影響

池田 哲郎¹・三崎 隆央²・伊東 啓勝³・大竹 剛史⁴・山田 貴裕⁵

¹国土交通省名古屋港湾事務所（〒455-0045 愛知県名古屋市港区築地町2）

E-mail:ikedat852a@mlit.go.jp

²国土交通省名古屋港湾事務所（〒455-0045 愛知県名古屋市港区築地町2）

E-mail:misaki-t852a@mlit.go.jp

³正会員 株式会社エコー 技術本部 調査解析部（〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4）

E-mail:ito@ecoh.co.jp

⁴正会員 株式会社エコー 技術本部 調査解析部（〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4）

E-mail:otake@ecoh.co.jp

⁵正会員 株式会社エコー 技術本部 調査解析部（〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4）

E-mail:yamada@ecoh.co.jp

名古屋港の主航路周辺では、入出港する船舶によって発生する航跡波が停泊する船舶へ不測の動揺をもたらす場合があり、過去に小型船舶転覆事故が発生していることから、航跡波の影響に関する安全対策の検討が進められている。本研究では、現地波浪観測及び数値シミュレーションによる航跡波の解析及び自然条件の影響把握に関する調査を実施し、結果をもとに今後の安全対策に役立つと考えられる知見を整理した。これらの結果、航跡波高と船速の関係性は船種・入出港の条件で異なることが明らかとなり、これらの船舶条件別の航跡波高の推定式を得た。また、伝搬する航跡波は、潮位・地形の影響を受けて波高が顕著に増幅する場所が異なることや、一定方向の流れ（木曽川）の影響により入出港で航跡波高に違いが生じていることを確認した。

Key Words : shipwave, automatic identification system, field observation, numerical simulation

1. 研究目的

名古屋港の主航路周辺（図-1）は、航路を入出港する船舶によって発生する航跡波が停泊する船舶へ不測の動揺をもたらすことがあり、漁業操業や工事船、荷役作業へ影響を及ぼす場合がある。特に西航路西側の浅場にある養殖区域は、小型船舶の利用が多く、過去に小型船舶の転覆事故が発生しており、航跡波の影響が懸念される場所である。

このような背景から、航跡波の影響低減と安全性確保の方策の検討に必要な基礎的知見を得ることを目的とした調査が進められてきた。板生ら¹⁾は名古屋港での冬季15日間の現地波浪観測（冬季調査）とシミュレーションに基づいた航跡波調査の結果をまとめている。しかしながら、冬季は湾内発生波の影響で航跡波の抽出が困難である場合が多く、航跡波データのサンプル数が限られ、詳細な条件別の解析結果が得られていない。

本研究では、湾内発生波の影響が比較的少ない秋季を対象とした現地波浪観測を30日間実施した。航跡波データを多く取得した上で、航跡波の解析及び自然条件の影響に関して得られた結果をもとに、今後の安全対策に役

立つと考えられる知見の整理を目的とした。

2. 航跡波の解析

本研究では、航跡波の解析に必要な現地波浪データと航行船舶情報を取得した。現地波浪データは、航路付近での波浪観測を行ない、航路を入出港する船舶の航跡波の波形データを取得した。航行船舶情報は、観測期間中のAIS（Automatic Identification System；船舶自動識別装置）

図-1 調査位置図（St.1とSt.2；波浪観測地点）

図-2 観測期間中の風・波浪・潮位・河川水位（秋季）

データの収集・整理を行ない、航跡波の発生時刻と航行船舶の位置情報から波浪観測地点へ最接近時刻を確認し、航跡波の発生源となる船舶を関連付けた。これらの観測・解析の方法と内容は、観測期間と時期を除き、過去に実施した冬季調査（2014年12月）と同等なものとした。

(1) 航跡波のデータ取得

a) 現地波浪観測

波浪観測は、図-1に示す東西の航路からそれぞれ200m離れた2地点（St.1とSt.2）で実施した。観測期間は約1ヶ月（2016年9月28日～11月1日）とし、多機能型海象計（WH-08Σ）により0.1秒間隔の連続観測（水位と流速2成分）を行なった。

観測期間中の外力特性は、調査対象周辺での気象海象条件把握のため、アメダスの風観測（セントレア）とナウファスの波浪観測（伊勢湾）、潮位（名古屋港）を収集した。調査海域は河口に近い場所であるため、木曽川（横満蔵）と庄内川（当知）の河川水位のデータを収集した。

これらの外力とSt.1とSt.2の波浪の時系列図を図-2に示す。なお、図中のSt.1とSt.2の有義波の波浪諸元値は、通常波の解析に従い20分毎の生データをゼロアップクロス法より算出したものである。

観測期間中は、セントレアで風速10m/s以上や伊勢湾とSt.1、St.2の地点で波高1m以上の条件は少なく、大き

図-3 調査位置（St.1とSt.2）と航跡図の重ね合せ図（2016年9月28日～10月31日）

な出水はなかった。周期は、いずれの地点も2～3秒が多かった冬季調査とは異なり、3秒以上が多数見られた。

一方、河川水位と潮位の変化は、ほとんど同じであり、木曽川や庄内川からの大きな出水は確認できなかった。

このように観測期間中は、風波が支配的な冬季観測とは異なり、湾内発生波による海水面の動揺が少ないことから、航跡波を抽出し易い状況であった。

b) 航行船舶情報（AISデータ）

航跡波の発生源である航行船舶の情報（船舶名や時刻、位置、船速、船の長さ等）は、AISデータから取得した。但し、船種については、AISデータ上の表記が複雑で取扱いが困難であるため、Marine Traffic（ライブ船舶マップ）²⁾のWebサイトから船舶名等で検索して取得した。

本研究では、取得した航行船舶の船種が船の長さ（Ls）によって概ね大別できることに着目し、コンテナ船（Ls=150～350m）、自動車専用船・RO-RO船（Ls=150～250m）、一般貨物船・タンカー他（Ls=50～150m）、タグボート（Ls=30m）の4区分に分けて整理した。

観測期間中の全航行船舶について、AISデータの位置情報を船別に時間順に並び替え、それぞれの航跡を整理した。全航行船舶の航跡の重ね合せ図を図-3に示す。期間中には、非常に多くの船舶が西航路と東航路を往来している様子が確認できる。

図-4に1日間（2016年10月1日）のAISデータを解析し、船種別に描いた航跡を船速ランク別に色分けした平面分布（船速マップ）を示す。これらの解析により得られた航行船舶の船種別特徴を以下に挙げる。

- ・コンテナ船は東航路と西航路の両方を航行し、他の船舶よりも航行位置が安定している。
- ・自動車専用船・RO-RO船は、東航路の航行が多い一方で、西航路の航行は少ない。これらの船速は他の船種に比べて速い傾向にあり、コンテナ船と同様、航行位置が安定している。
- ・一般貨物船・タンカー他は、西航路を航行時に船速が少し速い傾向にある。

図4 船種別船速マップの例（2016年10月1日）

・タグボートは、主に大型船の安全な着離岸のための誘導・補助を行うため、複雑な動きを示している。このように船舶は、船種によって航行位置や船速等、航行の仕方が異なることが確認できる。

c) 航跡波の抽出結果

秋季の波浪観測で得られたSt.1とSt.2の水位記録から、過去に実施した冬季調査と同じ手法（バックグラウンド波浪を取り除く方法）で航跡波高 H_{max} を算出し、AIS（船舶自動識別装置）の船舶情報と関連付けた。図-5に航跡波高の抽出例を示す。

このようにして抽出した航跡波の波高は0.5m前後が多く、周期は2～3秒台であり、航跡波高の最大値は、St.1で1.2m、St.2で0.9mであった。これらの結果は、冬季調査で抽出された値と同等な値であることから、航跡波データ取得が同等な精度で行われたことを表している。

図-6にこれまでの調査での航跡波の抽出対象とした船舶数を整理した。観測時期やサンプル数が異なり、St.1で取得した秋季調査のデータ数が最も多く、詳細な条件別解析が可能であることが確認できる。

(2) 航跡波高の推定

a) 航跡波高と船速の関係

これまでの冬季調査結果によって、航跡波高 H_{max} は(1)

図5 航跡波の抽出例（St.1）

図6 航跡波抽出の対象とした船舶数

式で表わされるフルード数 F_r との相関性が強いことが確認できており、今回の秋季調査のデータ（全船種・入出港）からも、図-7に示すとおり同様な関係が確認できた。これに加えて F_r 数の2乗に比例する関係が得られた。(2)式に示すように F_r 数の2乗に比例する関係式は、両辺

図-7 航跡波高とフルード数の関係 (全船種, 入出港)

の L_s が相殺され, (3)式のように船速のみで表わされる単純で取扱い易い式となる.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL_s}} \quad (1)$$

$$H_{\max}/L_s = a \times \frac{V^2}{gL_s} \quad (2)$$

$$H_{\max} = \frac{a}{g} \times V^2 \quad (3)$$

(L_s : 船の長さ, V : 船速, g : 重力加速度, a : 最小2乗法で得られる定数)

これらの推定式は船種や入出港による違いが見られたことから, 航行船舶の往来が頻繁で多くの航跡波データを抽出できたSt.1について, 船種・入出港による条件別解析を行い, 航跡波高 $H_{\max}/L_s$ と式(1)の F_r 数との関係を整理した.

b) 船種別・入出港別の比較

図-8(a)に示すコンテナ船の場合は, データのバラツキは小さく, F_r 数の2乗式に近い値を示す. 図-8(b)のタグボートの場合は, 船の長さが他の船種と比べて小さく, 従来の3.5乗式³⁾に近い値を示す. 他にも, 自動車専用船・RORO船や一般貨物船・タンカー他は, コンテナ船と同様, 2乗式で表現可能であることが確認できている.

図-9に船種別に入港時の関係式について, 航跡波高と船速で整理した. 図中には観測期間中の航跡波高の最大値を示しているけれども, 実際の航跡波がこれよりも大きくなることは考えにくい. 現地データより得た航跡波高はバラツキがあり, 図中には縦軸方向のバラツキの上限の目安として $+2\sigma$ (σ : 標準偏差)を含めた曲線を記載している. なお, σ の算出にあたっては, (2)式の状態でバラツキを考慮した場合, (4)式のような L_s が残る関係式となり取扱いにくい. そこで(5)式のように対数化して L_s が残らない形に置き換え, 対数化した2乗の関係式とのY軸方向の残差をとることで, σ を便宜的に得ることとした. このような過程を踏まえ, バラツキを考慮した推定式は最終的には(6)式に示す指数関数となる.

$$H_{\max \text{ 上限}}/L_s = a \times \frac{V^2}{gL_s} + 2\sigma \quad (4)$$

図-8 船種・入出港別の航跡波高と F_r 数の関係
(a: コンテナ船, b: タグボート)

図-9 航跡波高推定図 (入港時)

表-1 船種別・入出港別の定数 a と標準偏差 σ (括弧内数値)

船種区分	入出港	入港	出港
コンテナ船	0.134 (0.345)	0.160 (0.288)	0.116 (0.321)
自動車専用船・RORO船	0.086 (0.427)	0.082 (0.464)	0.089 (0.366)
一般貨物船・タンカー他	0.137 (0.353)	0.156 (0.335)	0.124 (0.303)
タグボート	— (0.341)	— (0.335)	— (0.305)

$$\ln(H_{\max \text{ 上限}}) = \ln\left(\frac{a}{g}\right) + 2 \ln V + 2\sigma \quad (5)$$

$$H_{\max \text{ 上限}} = e^{\alpha'} \quad (\text{但し, } \alpha' = \alpha + 2\sigma) \quad (6)$$

これらの推定式により船舶条件と船速から航跡波高の推定が可能となる. 表-1に航跡波高の推定に必要な船種別・入出港別に得られた最小2乗法による定数 a と対数化により算出して得られた標準偏差 σ を示す.

図-10 西航路西側での潮位・地形の影響（最大波高比分布；入港時、波高0.58m、周期3s）

図-11 養殖区域での潮位による最大波高比の変化

図-12 表層の流況分布（地点A：西航路，地点B：東航路）

図-13 入港時の航跡波進行方向

※流速は、南東方向成分を正としている。

図-14 流速（南東方向成分）別の航跡波高と船速

3. 自然条件の影響

(1) 潮位・地形の影響

西航路西側の浅場は小型船舶の利用が多く、伝搬した航跡波は潮位（水深）の影響を受けて変化することが考えられることから、ビジネスモデルNOWT-PARI⁴⁾による一方向規則波の波浪変形計算を潮位別に行い検証した。計算条件は、西航路入港時を想定し平均的な値である航跡波高0.58m、周期3sとした。図-10(a)に計算範囲と水深図、図-10(b), (c)に干潮時（NP.0）と満潮時（NP.+2.8m）の最大波高比分布を示す。図中の養殖区域では、屈折変形により波が集中する場所が潮位条件で変化することと、低潮時の砕波による波高減衰を確認した。

図-11に養殖区域での潮位による最大波高比の変化を示す。最大波高比の平均は潮位条件による差が小さい一

(2) 流れの影響

観測期間中のSt.1とSt.2近くの表層の流況データ（伊勢湾海洋短波レーダー⁵⁾）を収集・整理した結果、図-12に示すとおり南東方向に卓越していることを確認した。これらの南東方向の流れは、木曽川の河口部から海域へ向かう流れの方向と一致しており、図-13に示すように入港時の航跡波進行方向と逆向きになる。

図-14(a), (b)に南東方向成分流速を大小に分けて、船速と航跡波高の関係を入出港別に整理した。その結果、南東方向成分流速が大きい場合は、入港時の船速が出港時より遅いにもかかわらず、航跡波高は同程度となり、流れの影響を受けていると考えられる。

(3) 波浪・風の影響

波浪の影響については、航跡波とバックグラウンド波浪の重なりが考えられる。ナウファス観測地点では、年間を通して伊勢湾口から波向SとSSEの発生頻度が高く、冬季は風波による湾内発生波の影響がある。冬季、秋季のナウファスとSt1の波高は、時系列変化が良く一致していることから、対象海域近傍は、バックグラウンド波浪の影響を受けていると考えられる。しかしながら、バックグラウンド波浪の影響が強い状況下では、生波形からの航跡波高の抽出・判別が難しく、詳細は明らかではないものの、これらの重なり効果は、推定式による航跡波高とバックグラウンド波浪を合成し考慮できる。

また、風の影響については、運航者へのヒアリングによれば、航行船舶が強い横風（風速10m/s以上・風向WNW～NW）を受ける場合、速力を上げて針路を一定に保つ必要があり、航行船舶は速力を上げると言われており、強風時の速力増大に伴う航跡波高の増大が考えられる。しかしながら、AISデータ上の船速では、強風時の船速の上昇は確認できなかった。この要因は、航行船舶は強風時に機関出力を上げるものの、AISでの対地速力として大きくならないことによるものと考えられ、船速への影響は明らかとならなかった。加えて、強風時は風波の影響も同時にあり、航跡波の判別・抽出が難しい。

4. 主要な結論

以下に主要な結論をまとめる。

(1) 航跡波の解析

航跡波高と船速の関係性は、船種や入出港による条件で異なり、これらの船舶条件による航跡波高推定式（船速の2乗の関係式）を得た。

(2) 自然条件の影響

航跡波高への自然条件の影響を以下に挙げる。

- ・航跡波高は、地形の影響を受けて急に増大する場所があり、潮位によって増大場所が異なる。
- ・一定方向の流れ（木曽川）の影響を受け、航跡波高は入出港によって違いが生じていると考えられる。
- ・航跡波は、バックグラウンド波浪と重なり合い大きくなると考えられるものの、高波浪時や強風時は航跡波高の抽出・判別が難しい。

謝辞：本研究内容は、「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」で審議されたものであり、構成員である有識者及び学識者各位、行政機関関係者より貴重なご意見を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 板生考司, 松山公彦, 柴木秀之, 伊東啓勝, 宇野喜之: 名古屋港での航跡波の実態把握と影響検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.I_475-I_480, 2015.
- 2) Marine Traffic : ライブ船舶マップ -AIS- 船舶動静ならびに船舶位置, <https://www.marinetraffic.com/jp/>
- 3) 沿岸技術研究センター : 機関紙 CDIT, No.2, 2001.5, 22p., 2001
- 4) 平山克也 : プシネスクモデル (NOWT-PARI) を用いた高精度港内静穏度解析法の提案, 港湾空港技術研究所資料, No.1159, 90 p., 2007
- 5) 伊勢湾環境データベース : 伊勢湾海洋短波レーダー, <http://www.isewan-db.go.jp/radar/index.asp>

(2017.3.15 受付)

STUDY ON SHIP WAVE AND ITS INFLUENCE AFFECTED BY NATURAL CONDITIONS IN NAGOYA PORT

Tetsurou IKEDA, Takao MISAKI, Yoshimasa ITO,
Takeshi OHTAKE and Takahiro YAMADA

In Nagoya Port, large ships navigating in the main channel generate significant ship waves, which cause unexpected ship motions of berthing ships. Rollover accident of a small ship due to ship waves happened in the past, so that safety measures against the ship waves have been investigated.

In this study, findings contributing to future safety measures are summarized according to field observation data on wave agitation in the channel and numerical simulation on ship waves. Ship waves affected by natural conditions in the navigation channel are summarized, as well.

As a result, the relationship between wave heights of ship waves and ship speed is identified, in which ship waves depend predominantly on the ship type and the navigation condition of entering and outgoing the port. By applying the relationship, estimated formulas on wave height of each ship conditions are proposed. In the course of the study, it is confirmed that the propagating ship waves are affected by tide level and bathymetry, which create remarkably amplified point of wave height appearing in different area. The constant direction current due to Kiso River out flow is confirmed to affect also ship waves, in which ship waves generated by entering and outgoing ships are different in wave height.