船舶に働く航走波強制力の一研究 —水槽実験と簡易計算—

定兼 廣行*・湯田 紀男**・高井 大將***

A Study on Ship-Generated Wave Forces Acting on a Boat —Water Tank Experiment and Simplified Calculation—

Hiroyuki SADAKANE, Norio YUDA and Daisuke TAKAI

Abstract

We have shown oscillation characteristics of a boat on ship-generated waves. In order to explain the oscillation characteristics dynamically, it is necessary to know the characteristics of the wave exciting forces caused by ship-generated waves, which have the transient properties and the feature of three dimensional wave pattern. And if the above wave forces can be obtained by calculation, we can easily examine the oscillation characteristics of ships of different forms and various sizes of ships.

In this paper, we carry out following studies:

- (1) The ship-generated wave forces are measured by model experiments using water tank.
- (2) A means of estimating simply the ship-generated wave forces is developed under some assumptions.
- (3) A part of the calculated results are compared with the measured.
- (4) By using the calculation means developed, the effects of ship-size on the wave forces are examined.

1. はじめに

最近、高速船が活躍する中で、海洋レジャーの普及に伴う遊漁船等の増加があり、また航路付近で停留もしくは微速航行する小型漁労船が従来から見られる。あるいは比較的静穏な湾内や港内では養殖筏や作業用浮体等が見られ、これらはいずれも航走波の影響を受け易い。航走波による船舶等の動揺は場合によってはトラブルや事故発生の原因になる事がある。このような問題を客観的に検討するためには、航走波による周辺船舶の動揺に関する資料が必要となる。

我々はこれまでに、ある小型船を動揺対象船として航走船との離隔距離及び動揺船の向首角を種々変えて動揺の特徴を主に実験的に調査してきた^{(1),(3)}。これによると、(イ)離隔距離による動揺量の変化は航走波の波面傾斜等によって規格化でき、この規格量の動揺倍率は離隔距離に拘わらず概ね同じ数値となることを示した。これは、この動揺倍率を用いて、離隔距離 S による波高の減衰量を基に任意 S での動揺角が概算できることを意味する。さらに、(ロ)上記倍率の変化は動揺船の向首角に対して特徴的に現れ、二次元波浪中の動揺から類推可能なものもあるが、縦揺れ等は類推が困難であった。これは航走波の三次元性によると推測されるが、まだ確認されていない。そしてまた(ハ)動揺量を推定するためには合理的に航走波

* 正 会 員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 学生会員 大阪大学大学院 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

***学生会員 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

強制力を知る必要があることを指摘した⁽²⁾。上記(イ)と(ロ)の動揺特性は結局のところ航走波強制力によってもたらされるわけであるから、これら動揺の検証はこの波強制力を調査することによって概ね目的が達せられる。さらに、この波強制力を計算によって推定できるなら、船舶の船形や寸法に因る動揺量や動揺特性の差違を詳細に検討することが可能となり、これは動揺を客観的に評価する上で有用な情報となる。

本研究はこのような認識の下に実施するものであり、具体的に下記が研究目標である。

- (1)水槽実験により航走波強制力を計測し、動揺特性を検証する。
- (2)簡略化計算法による航走波強制力の概算を試み、この方法の妥当性を見る。
- (3)この計算法を用いて航走波強制力の特徴の一、二を調査する。

最近、船舶の動揺を視野に入れた滑走艇による航走波の研究が精力的に進められており興味深い知見が示されている⁽⁴⁾。

2. 水槽実験

2.1 波強制力の計測実験

2.1.1 実験方法

実験方法は前報⁽³⁾を踏襲しており、図1に示す

ように、航走船模型は右片舷のみとし、船体中央縦断面を水槽の左側壁に接して曳引電車で曳航し、動揺船は所定の離隔距離 $S=2.4\text{m}$ に配置する。 S はこの1種類のみとした。動揺船は航走船sail lineに平行に引いた線を中心に向首角 α を右(+90°)から左(-90°)に変化させて航走波との出会い角を種々変える。

動揺船に働く航走波強制力は、船体の上下動のみを自由として横揺モーメント若しくは縦揺モーメントを計測する。以下、具体的に供試模型船と強制力計測装置について述べる。

(1)供試模型船 航走船の主要目は、 $L \times B/2 \times d = 200 \times 20 \times 14.5(\text{cm})$ であり、この片舷模型船は神戸商船大学の練習船の線図を基に製作した。船速 V は、 1.40m/s と 1.68m/s の2種類とした。それぞれのフルード数は 0.316 と 0.379 となる。また動揺船は、写真1に示すような角型ハードチェーン船型であり諸要目を表1に示す。船長は 84cm であり航走船の約 0.4 倍である。

(2)波強制力の計測装置 図2に示すように2個の小型検力計を船体に固着し、この検力計を介してロッドを取り付けてモーメントを検出する。図は縦揺モーメント検出時の状態であり、横揺モーメントの場合は2個の検力計を船体の左右方向に取り付け直す。

2.1.2 計測結果

(1)縦揺モーメント 計測した最大縦揺モーメントの正負の平均振幅 M_{Tp} を $W \cdot GM_L (\pi \cdot H / \lambda_{D1})$ で無次元化して図3(a)に示す。ここに W : 動揺船重量、 GM_L : 縦メタセンター高さ、 π : 円周率、 H : 最大波高、また λ_{D1} : sail line 方向の発散波の波長を表す。横軸は向首角 α である。図中の○印は $V=1.68\text{m/s}$ の、また△印は $V=1.40\text{m/s}$ の実験点であることを表す。向首角 α に対するこのモーメントの最大値は $\alpha=0^\circ$ 付近に、逆に最小値は -40° 付近に現れた。図3(b)については2.2節で説明する。

図1 模型実験の配置図

写真1 動揺供試模型（停留小型船）

表1 動揺供試小型船主要目

L×B=84×20.5								
喫水	重量	重心高さ	メタセンタ高さ	固有周期				
d_f	d_a	W	KG	GM	GML	T_r	T_p	T_H
7.3	7.5	7.7	9.8	2.3	76	0.8	0.6	0.5

単位: cm, kgf, sec

図2 縦揺強制モーメントの検出装置

(2)横揺モーメント 図4(a)は横揺モーメントの場合であり、○印と△印の意味は図3に同じである。また縦軸は最大横揺モーメント M_{Tr} の正負の平均振幅を $W \cdot GM \cdot (\pi \cdot H / \lambda_{D1})$ で無次元化している。ここに、 GM は横メタセンター高さである。向首角 α に対するこのモーメントの最大値は $\alpha = -15^\circ$ 付近に、また最小値は $\alpha = 40^\circ$ 付近に現れている。図4(b)については2.2節で説明する。

次に、今回の航走波強制力と動揺の関係を見るため、次節では文献(3)の動揺実験結果を簡単に紹介する。

2.2 動揺実験⁽³⁾

最大縦揺れ角の正負平均振幅を波面傾斜角($= \pi \cdot H / \lambda_{D1}$)で規格化して、前節と同様に向首角 α 軸上にとったものを図3(b)に示す。○印で示す $V=1.68\text{m/s}$ では、向首角 $\alpha=0^\circ$ 付近で最も激しい揺れが現れるが、△印の $V=1.40\text{m/s}$ では α による差違が明瞭でなく比較的变化の少ない応答となっている。

次に、最大横揺れは図4(b)に示すように向首角 α が -50° 付近で、また最小横揺れは向首角 30° 付近で明瞭に現れている。向首角 -50° は後に示す図6から分かるように動揺船が航走波の発散波をほぼ真横から受ける場合である。

図3と4で示したように各強制力と各動揺が得られたので次節ではこれら両者を対比する。

2.3 波強制力と動揺の関係

上下動のみを自由として計測した波強制力の特徴と、全て自由とした動揺とでは作用する強制力に相違がある。例えば横揺波強制力が左右揺れに影響を及ぼすなどの連成作用が上記の両者の関係を複雑にする可能性はあるが、これは少ないとして両者の関係を見ていくこととする。

(1)縦揺れ 図3(a)の強制力と同(b)の縦揺れ角とは向首角による変化が類似しており、最大値の現れる向首角は 0° 付近でありほぼ一致している。因みに、船速をパラメータにとって強制力と縦揺れ角軸上に実験点を置点すると図5を得る。○が船速 $V=1.68\text{m/s}$ 、△が 1.40m/s である。両実験点は多少散るが、概ね直線的に右上がりの傾向が明瞭である。

(2)横揺れ 図4(a)の強制力と(b)の動揺角を比べると最大値の現れる向首角に相違がみられる。この相違の原因は両実験における模型船の拘束条件の違いにあることが予想されるが、この相違の詳細は今後調査する必要がある。

図3 向首角 α による縦揺モーメント及び縦揺れ振幅の変化(水槽実験)

図4 向首角 α による横揺モーメント及び横揺れ振幅の変化(水槽実験)

図5 縦揺モーメントと縦揺れ角の関係

3. 航走波強制力の簡略計算

3.1 計算に用いる航走波の波紋

船速 $V=1.68\text{m/s}$ (実船対応船速: 15.5kts) の場合における航走波波高の等高線図を図6に示す。縦軸と横軸は船長 L で規準化しており、航走船は横軸上を右から左に進んでいる。

図中、等高線の太い線が集合している部分は水面が盛り上がっていることを表しており、この発散波の峯の方向は横軸に対して $45^\circ \sim 50^\circ$ の角度をなす。また発散波の外側包絡線はよく知られるように約 20° となっている。

3.2 強制力の計算方法

一過性の3次元波浪である航走波強制力を求めるに当たって、ここでは第1段階として最も単純に考える。つまり強制力は図6の水位に応じた静水圧のみによって生じるとし、波の水粒子運動が船体の存在によって乱されることに基づくディフラクション力などは一切考慮しない。

図7に示す船体表面の分割要素(四角形要素はさらに2つの三角形要素に分割)に働く静水圧を基に前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、及び船首揺れの6成分の航走波強制力を求めることができる。しかしこのような強制力を求めるに当たって、前章2.1節の水槽実験では上下動を自由としたのでこれに合わせ、航走波上で排水量が常に一定となるよう船体を上下に自由として計算する。このときの船体上下動揺の時系列計算結果を図8に示す。

図中の一点鎖線が船体上下動変位であり、また実線が船体中央における入射航走波の変位を表す。上下動変位は波高の7割程度となっており、これは概ね妥当な数値である。なお図中の破線は後に述べる縦揺モーメントである。

3.3 航走波強制力の時間変化の計算例

航走波は一過性の波浪であるので、これが動揺船を通過し終える間、強制力は過渡的に変化する。図8は縦揺モーメントの計算の1例を図8中に破線で示す。モーメントと水位変化の間に約 90° の位相差が見られるが、これは縦揺モーメントが航走波波面の傾斜角に主に依存することを示している。

次節ではこのような時系列計算値の最大値のみを取り出し、これの向首角に対する変化及び航走船船速の影響を見る。

3.4 最大航走波強制力の特徴

計算される力やモーメントは図8に示したように過渡的に変化するもので、水槽実験と同様に代表値として正負の最大値を取りだし、これらの平均振幅の向首角 α による変化を見たものが図9である。但し航走船と動揺船の離隔距離 S は実験計測との対応のため 2.4m の1種類のみである。図9の(a),(b)はそれぞれ縦揺モーメント、横揺モーメントである。図中太線は船速 $V=1.68\text{m/s}$ 、細線は船速が 1.40m/s における計算値であり、実線と破線はモーメントの向きを表している。

これらの計算結果から次のようなことが分かる。(イ)向首角 α によって各値は顕著に変化する。(ロ)最大値となる強制力の向きは常に同じではなく非対称であり、いずれが最大値になるかは向首角 α によって微妙に変わる。(ハ)船速の大きい方が上記(イ)と(ロ)の特徴がより明瞭に現れる。

図6 航走波の等高線図 ($V=1.68\text{m/s}$)

図7 船体表面の分割要素

図8 船体上下動変位と縦揺モーメントの時系列計算例

3.5 簡易計算と水槽実験との比較

今回の計算結果は3.2節の冒頭に述べた仮定の下で得られているので、実験結果と完全に一致することは期待できないが、今後の計算精度向上のために両者を比較しておく。

図3(b)及び図4(b)に示した動揺実験との比較のため、図9(a)縦揺モーメントと(b)横揺モーメントのそれぞれの平均振幅をとってこれを無次元化したものを図10(a)と(b)に示す。縦揺モーメントの場合、向首角による変化の様子は実験と計算の両者は酷似しており問題ないが、その数値において計算の方が約2倍大きい。この差は計算仮定によって生じたと考えられる。つまり、計算では静水圧を基としたが、実際には水粒子のorbital motionに因って発生する水圧変化を考慮する必要がある。言い換えれば、縦揺の有効波傾斜係数が本例の場合は約0.5ということになる。

一方、図10(b)の横揺モーメントと図4(a)のそれと比較した場合、向首角 α による変化の傾向は大略合うが、最大モーメントの現れる α が実験で -15° 付近、計算で -45° 付近となり異なった。これについてはディフラクション力の影響が考えられるが現在のところ十分説明ができない。また数値においても全般に計算の方が実験の約1/2であり、縦揺の場合の逆となった。このように最大モーメントが現れる α が相違することや数値の差が生じる原因は今後再調査の必要がある。

4. 計算による航走波強制力の一、二の調査

今回の簡略計算は一部調査を要する事項があるが概ね妥当な結果を与えるので、この計算を利用してもう少し航走波強制力の特徴を見ておく。例えば、航走波は図6に示したように3次元波浪であるので、船体は離隔距離 S によって強制力が微妙に変わるかもしれない。また同じ航走波を受けても動揺船の寸法によって強制力の大きさが異なる筈である。これらを具体的に計算で見てみよう。

4.1 離隔距離による強制力の変化

離隔距離 $S=100\sim 270\text{cm}$ (航走船船長の0.5~1.3

倍)の範囲における正と負の最大の横揺モーメントの変化を詳細に見ると図11のようになる。横軸は S 、縦軸はモーメントであり、太線は $V=1.68\text{m/s}$ 、細線は 1.40m/s である。離隔距離 S によるモーメントの変化は、 S の増加、つまり航走船から離れると共に単調に減少するのではなく大きな変動を伴う。

4.2 船体寸法による強制力の差違

動揺船の離隔距離を 2.4m に固定し、また動揺船を幾何学的に相似として動揺船の船長 L_m を $30\sim 100\text{cm}$ の範囲で変化させたときの縦揺モーメントを図12に示す。横軸は L_m と航走船船長 L との比であり、縦軸は縦揺モーメントを $W \cdot GM_L$ で規準化した数値である。太線と細線は船速 $V=1.68\text{m/s}$ と 1.40m/s の例である

図9 航走波強制力の計算例

図10 向首角 α によるモーメントの平均振幅の変化(計算)

図11 離隔距離 S による最大横揺モーメントの変化(計算)

ことを表す。この計算結果から、動揺船寸法が小さくなると相対的に縦揺モーメントが強く作用することがわかる。例えば航走波の15%と45%船長($L_m/L=0.15, 0.45$)の動揺船を比較すると、前者は後者の約2倍航走波強制力の作用を強く受けることが分かる。

図12 動揺船の船体寸法の大小による波強制力の相違

5. おわりに

今回の研究をまとめると以下のようになる。

- (1) 上下動のみを自由とした水槽実験を実施し、縦揺モーメントについては前報⁽³⁾の動揺実験結果を説明する有効な結果を得た。しかし横揺モーメントについては調査継続の必要がある。
- (2) 航走波強制力を一般的に求めることを目的に簡略計算を試みた。これは、実験計測等で得る波高分布を基に、水深に比例する静水圧を船体周りに積分して求める方法である。
- (3) 簡略計算の有効性を確認するため実験と計算を比較したところ、縦揺モーメントについては数値にはまだ隔たりがあるが動揺船の向首角による特性はほぼ説明できた。横揺モーメントについては実験結果との一致度に課題を残したが、主目的であった動揺特性の説明には有効であることが分かった。
- (4) 今回の計算法を利用して航走波強制力の特性を2点調査し次の結果を得た。
 - (a) 強制力は離隔距離と共に単調に減少するのではなく、変動を伴う。
 - (b) 動揺船が小寸法であるほど波強制力の作用は相対的に大きくなる。

今回の研究により、航走波の波高分布が与えられれば動揺船に働く波強制力を計算で求める見通しを得た。ただし流体力の扱いが原始的であるので、さらに推定精度を上げるためには今後この点の改良が必要である。

最後に、本研究経費の一部は文部省の科学研究(基盤研究(C)代表者定兼廣行)費によるものであることを付記し謝意とします。また研究実施にあたり、神戸商船大学戸田保幸助教授から懇切な指導と温かい支援をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 本田・定兼：航走波中における小型船の動揺と横転に関する水槽実験，日本航海学会論文集，第88号，pp.169-176，1990.3.
- (2) 定兼：航走波による小型船の最大横傾斜角計算の試み，日本航海学会誌「航海」，第106号，pp.27-29，1990.12.
- (3) 定兼・西代・湯田：航走波を受ける小型船の動揺に関する実験的研究，日本航海学会論文集，第91号，pp.79-88，1994.
- (4) 塩谷・藤富・斉藤：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，第98号，pp.375-383，1998.3.

質 疑 応 答

萩原秀樹(東京商船大学)：計算によると航走波強制力は、航走船からの離隔距離を長くしていくと単純に減少せず、変動しています。これはどのように理解すればよいのでしょうか。

高井大将：航走波の発散波は、波峰の短い波が並んで形成される3次元波浪ですので、航走船からの距離を順次細かく変えていくと小型船が出会う波の形状(最大波高の現れ方、波頂と波底の現れ方、波傾斜角等)が異なることになり、これが強制力を変動させるものと思います。