

# 高速滑走艇の波浪中運動特性に関する基礎的研究

## - 前後揺れが上下揺れおよび縦揺れに及ぼす影響について - \*1

正会員片山 徹\*2, 正会員池田 良穂\*2

### Characteristics of Longitudinal Motions of a Planing Craft in Head Waves at Very High-Speed - Effect of Surging on Heaving and Pitching -

By Toru KATAYAMA (Member) and Yoshiho IKEDA (Member)

In this study, characteristics of longitudinal motions of a planing craft running at very high-speed in regular head waves are experimentally and theoretically investigated. The results of experiments to measure motions in waves at constant forward speeds show that a craft jumps from water in some cases. Variation of resistance acting on the model in waves is also measured, and the results show that the resistance acting on it varies significantly. Using the measured resistances, simulations of longitudinal motions are carried out to reveal the effects of surge on pitch and heave motions. The results show that the surge effects make vertical motions grow more violently in some case, although a variation in forward speed is not so large.

**Keywords :** High-Speed Planing Craft, Stability, Longitudinal Motion, Surge, Heave, Pitch

#### 1. 緒言

PWC(Personal Watercraft)と呼ばれる小型滑走艇は、小さな船体に大きなジェット推進力を持ち、現在その前進速度はフルード数 $Fn=6.0$ ( $Fn=U/\sqrt{gL_{OA}}$ )にも達している。このような小型滑走艇が波浪中を航走するときには、波面から完全に飛び出すような激しい運動をし、単に乗り心地が悪いというだけでなく、乗船者を船体から振り落としたり、着水時に船首を水中に突っ込み縦方向への転覆(plow-in)を引き起こしたり、さらには衝撃水圧による船底破損を招くなどの危険性があることなどが知られている。

著者らはこれまでに、小型滑走艇模型を用いて $1.0 < Fn < 5.0$ の超高フルード数域における正面規則波中での運動計測実験(船速一定, 上下揺れおよび縦揺れ自由)を行い、船体が水面から完全に飛び出す跳躍運動も含めたその運動特性について調査した。さらに、理論的アプローチとして、ポテンシャル理論を基とした既

存の理論計算法の本実験で計測されたような跳躍運動を含めた波浪中船体運動推定への適用性について検討し、非線形ストリップ法において高速艇特有の一部流体力について実験値を援用することで実用上十分な精度で波浪中船体運動を推定可能であることを示した<sup>1)</sup>。

ところで、跳躍運動が生じる可能性があるような超高速域での波浪中船体運動性能評価においては、波による大きな抵抗変動が生じ、もはや前進速度一定の基での船体運動評価は妥当でない可能性がある。そこで本研究では、正面規則波中を超高速で航走し、水面から船体が飛び出すような跳躍運動を含めた状態で、船体に働く抵抗を計測しその特性について調査した。その結果、抵抗は波によって周期的に大きく変動し、その変動幅(両振幅)は平水中航走時の抵抗値の2倍以上となり、大きな前後揺れを誘起する可能性があることがわかった。そこで、実験で計測した抵抗変動を基に前後揺れの推定を行い、さらに前後揺れが上下揺れおよび縦揺れに及ぼす影響について、シミュレーションを用いて調査した。その結果、前後揺れ速度の振幅は前進速度の定常成分の数パーセントに過ぎないが、高速域においてはこの前後揺れが縦運動(上下揺れお

\*1 平成13年11月16日造船三学会秋季連合大会において講演, 原稿受付 平成13年11月30日

\*2 大阪府立大学大学院工学研究科



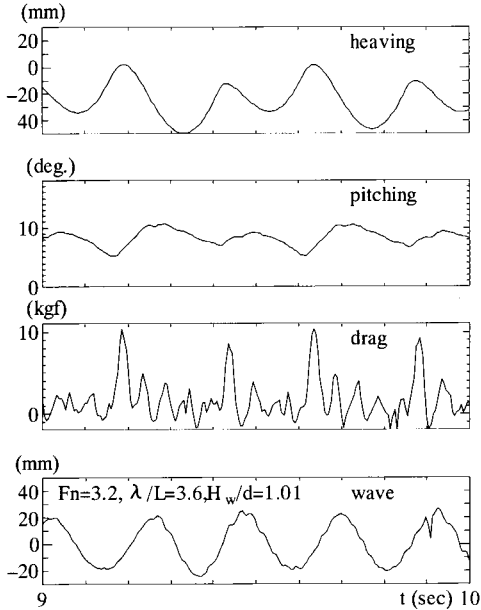


Fig. 4 Measured motions, drag and wave profile at  $Fn=3.2$ .

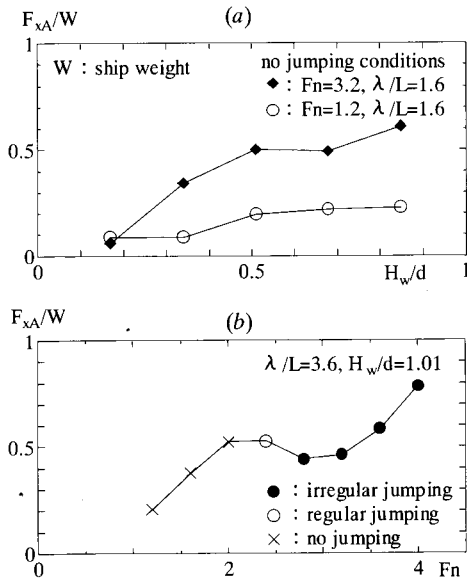


Fig. 5 Amplitude of drag force in waves.

### 2.3 抵抗変動振幅

Fig.5に、抵抗の時系列データをもとに、フーリエ級数展開により、その基本周波数成分（出会い周期成分）から抵抗変動の片振幅（以下、抵抗変動振幅と呼ぶ）を求めた結果を示す。また、抵抗変動振幅の大きさの比較対象として、平水中航走時の抵抗値（以下、平水中抵抗値と呼ぶ）をFig.6に示している。Fig.5(a)は、跳躍運動が生じない波高および前進速度での結果である。当然ではあるが、前進速度が高い $Fn=3.2$ での抵抗変動振幅は $Fn=1.2$ の場合より大きな値を示している。また、両前進速度ともに波高の増加に伴い抵抗変動振幅は大きくなり、 $Hw/d=0.5$ 以上の波高ではFig.6中の平水中抵抗値よりも大きな値を示す。一方Fig.5(b)は、前進速度の増加に伴い跳躍運動が発生する大波高( $Hw/d=1.01$ )での結果である。抵抗変動振幅は、前進速度の増加に伴い、増加する傾向を示しているが、跳躍運動が発生し始める速度域で一旦小さくなることがわかった。しかしながらその大きさは、全速度域でFig.6に示す平水中抵抗値よりも大きく、このような大きな抵抗変動振幅があれば、激しい前後揺れが誘起される可能性があると考えられる。

### 2.4 抵抗変動の位相

Fig.7に、抵抗変動、上下揺れおよび縦揺れの位相を示す。なお、それぞれの位相は、船体中央での入射波の振幅（下向き+）を基準として位相遅れを正として求めている。Fig.7(a)より、前進速度が比較的遅い $Fn=1.2$ から前進速度が増加し、跳躍運動が生じるような $Fn=2.4$ 以上の高速域まで、抵抗変動の位相と上下揺れの位相はほぼ一致し、抵抗変動と縦揺れとの位相差もほぼ90度と一定であることがわかる。また、Fig.7(b)からも、微小な波高から跳躍運動が発生するような大波高まで、前述のFig.7(a)と同様の結果が得られた。

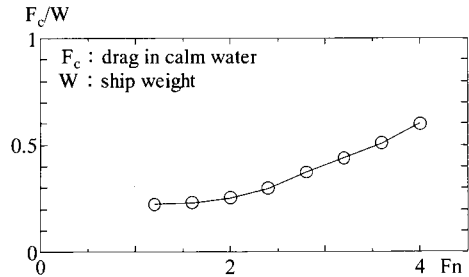


Fig. 6 Measured drag in calm water.

## 2.5 抵抗の定常成分（時間平均値）

Fig.8に、波浪中抵抗の時間平均値（以下、抵抗の定常成分と呼ぶ）を、Fig.6の平水中抵抗値で割った値を示す。同図より、速度の遅い領域では、抵抗の定常成分が平水中抵抗値よりも大きい方が、 $Fn=2.8$ 以上ではこの関係が逆転することがわかる。これは、 $Fn=2.4$ を超える速度域では跳躍運動が発生しはじめ、さらに高速になると急激に運動が大きくなるために、船体が水面から飛び出している時間が増えることとなり、その結果として抵抗の定常成分が減少したものだと考えられる。

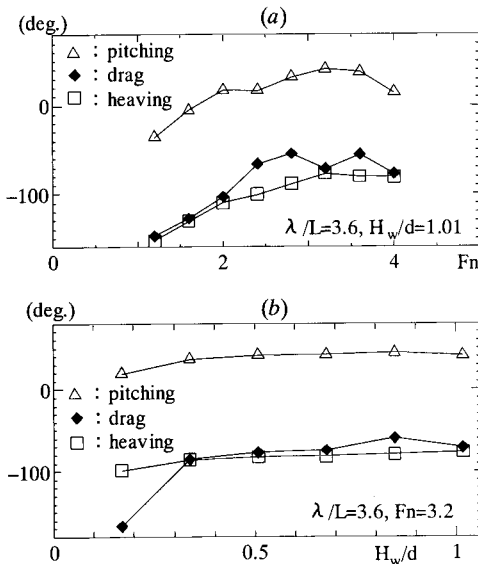


Fig. 7 Phase difference of drag force and motions.

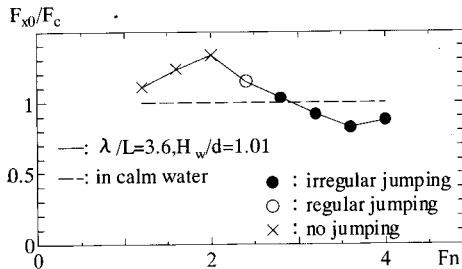


Fig. 8 Steady component of drag force.

## 3. 前後揺れの推定

第2節で述べたように、上下揺れおよび縦揺れが自由の状態では波浪中を一定速度で曳航された船体には、周期的に大きく変動する抵抗が働き、特に高速域では非常に大きなピークを持つような衝撃的な力が働くことが明らかとなった。このような抵抗が働く場合には、これが船体の前後揺れを誘起する可能性がある。

そこで、実験によって計測した抵抗変動を用いて、波浪中を推力一定で高速航走する場合の前後揺れの推定を行うこととする。なお本研究においては、実験で計測された抵抗変動を線形近似により正弦波と仮定した場合と、Fig.4に見られるような大きなピークを持つ衝撃力を考慮した波形を用いた場合の2ケースについて前後揺れの推定計算を行う。

### 3.1 線形近似に基づく前後揺れの推定

前後揺れの方程式は、上下揺れおよび縦揺れからの連成流体力が他の流体力に比べて十分小さいと仮定すると、以下の1自由度運動方程式として表すことができる。

$$(m + a_{11})\ddot{x} + B_{11}\dot{x} = -F(t) \quad (1)$$

$m$ : 船体質量,  $a_{11}$ : 付加質量

$B_{11}$ : 減衰力係数,  $F(t)$ : 前後揺れの強制力

ここでは、付加質量 $a_{11}$ は参考文献<sup>3)</sup>での実験計測結果をもとに十分に小さいものとして無視し、減衰力については簡単のために無視することとする。(1)式右辺の前後揺れの強制力を正弦関数と仮定すると次式を得る。

$$m\ddot{x} = -F_{xA} \cos(\omega_e t + \epsilon) \quad (2)$$

$\omega_e$ : 出会い周波数,  $\epsilon$ : 波との位相

(2)式を時間 $t$ に関して積分することで、前後揺れ速度が次式のように求められる。

$$\dot{x} = -\frac{F_{xA}}{m\omega_e} \sin(\omega_e t + \epsilon) = U_S \sin(\omega_e t + \epsilon) \quad (3)$$

$U_S$ : 前後揺れ速度振幅

Fig.9に、(3)式中 $F_{xA}$ にFig.5に示す抵抗変動振幅を代入し、前後揺れ速度振幅 $U_S$ を算出し、それを前進速度の時間平均値 $U_0$ で割った値を示す。Fig.9(a)より、波高の増加に伴って前後揺れ速度振幅が単調に増加することがわかる。一方、Fig.9(b)からは、前進速度の増加に伴い前後揺れ速度振幅は増加するものの、跳躍運動を始める速度域では大きく減少し、さらに前進速度が高くなり $Fn=3.2$ を超える速度域では若干増加傾向を示すことがわかる。これは、Fig.5(b)に示す抵抗

変動振幅の跳躍運動を始める速度域での減少および  $Fn=3.2$  を超える速度域での増加に起因しているものと考えられる。なお、Fig.9中の前後揺れ速度振幅の最大値は前進速度の時間平均値の約6%であり、本研究で行った全ての推定結果中でもその最大値は前進速度の時間平均値の一割程度であった。

### 3.2 抵抗変動の非線形影響

ここまでは抵抗変動を正弦関数と仮定して線形近似を行ったが、Fig.10に示すような高フルード数域においては、抵抗の実験計測値は、船底と波面との衝突によって生じる高周波数の大きなピークを持つ。そこで、このような衝撃力を考慮した前後揺れの推定を行うこととする。ただし、本研究において計測した抵抗には、同図中に見られるように規則的な大きな衝撃力のピーク値の後に小さな振動が存在するが、菅井ら<sup>4)</sup>、平方ら<sup>5)</sup>が計測した実験値 ( $Fn < 2.0$ ) ではこのような小さな振動は見られず、これは今回用いた実験装置の持つ特性から生じた振動と考え、これを無視してFig.10中の実線のように抵抗変動を仮定することとした。

Fig.10中実線で示す抵抗変動を(2)式中右辺の前後揺れの強制力に代入し、オイラー法で解いた結果をFig.11に示す。同図中に示す線形解との比較では、前後揺れの波形には明らかに違いが見られるものの、その振幅および時間平均値の定量的差は小さい事がわかった。

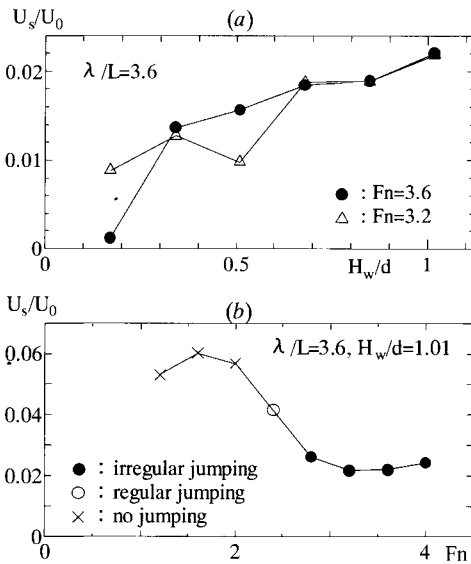


Fig. 9 Amplitude of surging velocity.

## 4. 前後揺れが上下揺れおよび縦揺れに及ぼす影響

### 4.1 上下揺れおよび縦揺れの計算方法

ここでは、第3節で推定した前後揺れが上下揺れおよび縦揺れに与える影響について、シミュレーション計算によって調査することとする。上下揺れと縦揺れの運動計算には、著者らが先の論文<sup>1)</sup>で提案した、高速滑走艇に特有な一部流体力に実験値を援用した非線形ストリップ法<sup>6),7)</sup>を用いる。ただし、前後揺れの影響を取り入れるために、前節で示した前後揺れの推定値を用いて各瞬間の波との船体の相対位置および前進速度での流体力を計算し、上下揺れおよび縦揺れを4次のRunge-Kutta法により時間領域で計算することとした。なお、前後揺れ速度には前節で示した線形解と非線形解の2パターンを使用し、それぞれ計算を行った。

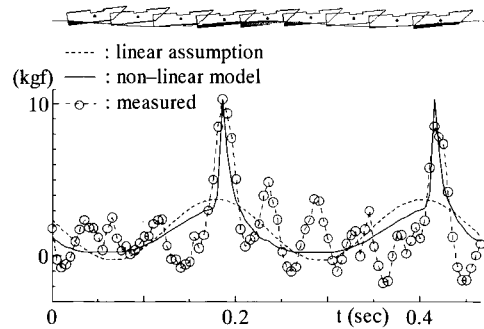


Fig. 10 Measured drag force and model.

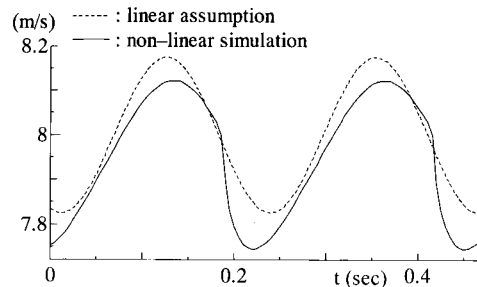


Fig. 11 Variation of forward speed ( $U_0=8$ m/s).

#### 4.2 シミュレーション結果

Fig.12,13に、計算結果の一例を示す。図中前半は、前後揺れを与えない状態での計算結果であり、後半は前後揺れを与えた計算結果である。Fig.12に示す比較的速度の遅い $Fn=1.2$ の場合、前後揺れを与える前と後で、上下揺れおよび縦揺れの計算結果に違いは見られない。一方、Fig.13の前進速度が $Fn=3.2$ と速い場合においては、前後揺れを与える前と後で、とくに縦揺れの運動振幅に違いが見られ、前後揺れを与えることで縦揺れ振幅が大きくなる結果が得られた。

最後に、Fig.13中の前後揺れの有無による縦揺れ振幅の変化の原因について考える。Fig.13の最下図に、シミュレーション計算中の船体に働く波浪強制モーメントを示している。同図から、前後揺れが無いときの波浪強制モーメントにはその値が周期的にゼロとなる領域があり、これは船体が水面から完全に跳躍しているためであることがわかった。一方、前後揺れを考慮した場合には、船体が若干沈み込み、跳躍運動が起きなくなり、その間船首上げの波浪強制モーメントが働くことにより縦揺れが大きくなったことがわかった。

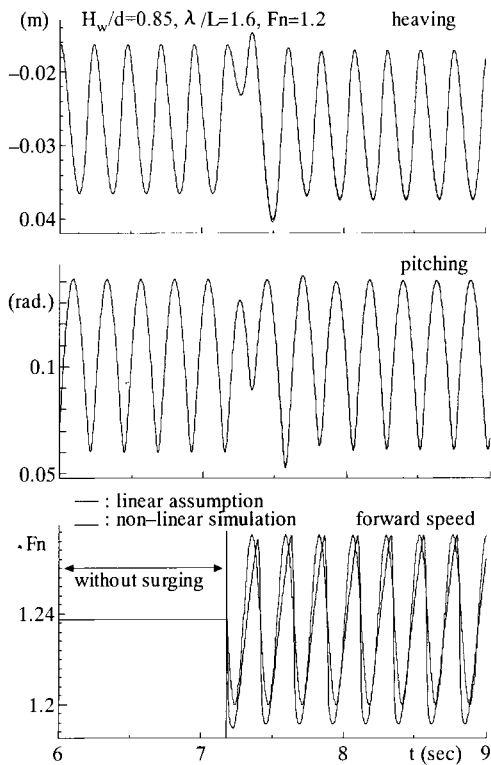


Fig. 12 Time history of motions in simulation.

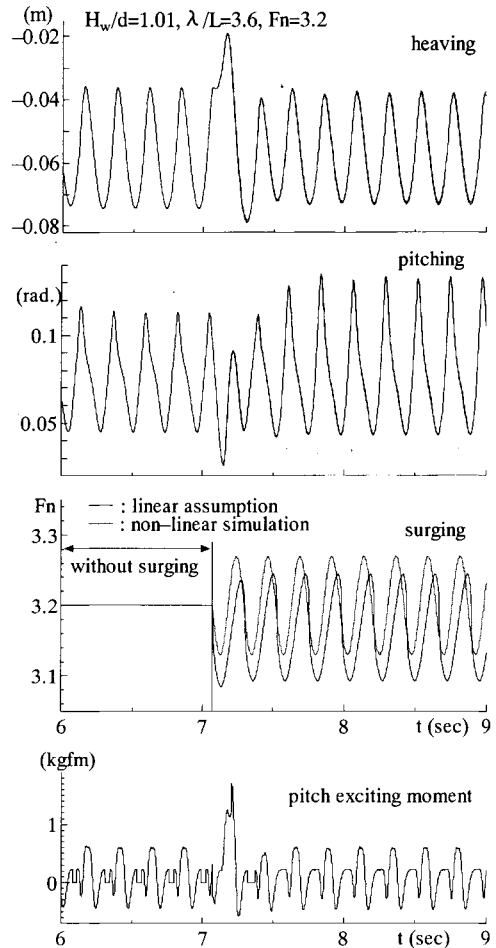


Fig. 13 Time history of motions and pitch exciting moment in simulation.

## 5. 結言

向波中を高速航走する滑走艇に働く抵抗について実験的に調査すると共に、抵抗の実験結果を用いた前後揺れの推定および前後揺れを考慮した波浪中船体運動シミュレーションを行い以下の結論が得られた。

1. 波浪中を一定速度で航走する船体には大きな抵抗変動が生じ、その変動成分は波高もしくは前進速度が増大すれば大きくなる。
2. 高速域では、船底が水面に突入することによって大きなピークを持つ衝撃力が働く。
3. 抵抗の定常成分（時間平均値）は、船体が跳躍運動を始めると減少する。
4. 前後揺れの速度の推定値は、最大でも前進速度の時間平均値の一割程度であり、超高速域では減少する傾向がある。
5. 比較的低速の $F_n=1.2$ で航走する場合には前後揺れの上下揺れおよび縦揺れへの影響は少ない。
6.  $F_n=3.2$ のような高速域では、前後揺れによって跳躍運動が抑えられ縦揺れの振幅が大きくなる。
7. 高速で波浪中を航走する滑走艇の運動性能を評価するためには、前後揺れの影響を無視できない。

## 謝辞

最後に、本研究には科学研究費補助金(13750852)を受けたことを付記し関係各位に御礼申し上げます。また、本研究を行うにあたり、当時大学院学生であった日並貴成氏（現ジャトコ・トランステクノロジー株式会社）にご協力を得たことに感謝致します。

## 参考文献

- 1) 片山徹，日並貴成，池田良穂，超高速で航走する滑走艇の正面規則波中運動特性，関西造船協会誌，第233号，2000，pp.55-62.
- 2) 池田良穂，片山徹，山下保己，大塚耕司，前田孝雄：高速艇の性能試験に関する研究（第1報）-高速曳航試験システムの開発-，関西造船協会誌，第223号，1995，pp.43-48.
- 3) 片山徹，池田良穂：高速滑走艇の発進加速性能について，日本造船学会論文集，第185号，1999，pp.81-89.
- 4) 菅井和夫，吉野泰平，山本徳太郎，大松重雄：高速滑走艇の船底波浪衝撃水圧に関する模型実験，日本造船学会論文集，第144号，1978，pp.163-171.
- 5) 平方勝，岡正義，竹本博安，宮本武，福島正朗：小型高速艇の荷重について（第2報）-波浪中水槽試験-，平成11年度船舶技術研究所発表会講演集，運輸省船舶技術研究所，1999，pp.1-6.
- 6) 元良誠三，藤野正隆，寺尾裕，尾子清夫，桜井和之：高速艇の船底衝撃圧発生のメカニズムについて，日本造船学会論文集，第144号，1978，pp.172-182.
- 7) 藤野正隆，Forng-Chen Chiu：向波中を航走する高速艇の縦運動および波浪荷重，日本造船学会論文集，第154号，1983，pp.151-163.