

滑走艇の超高速航走時に作用する揚力により発生する 横不安定現象に関する研究

—不安定現象の発生メカニズムと推定法—

正員 片山 徹* 学生員 藤本 将史**
正員 池田 良穂*

A Study on Transverse Stability Loss of Planing craft due to Lift Force caused by Super High Forward Speed

by Toru Katayama, *Member* Masashi Fujimoto, *Student Member*
Yoshiho Ikeda, *Member*

Summary

In this study, one of mechanisms of transverse stability loss at super high forward speed is investigated. Towing tank test is carried out to observe the characteristics of the instability and it is confirmed that the instability has strong relationship to the change in running attitude and hydrodynamic roll moment due to high forward speed. And it has been also found that the dangerous maneuvering motions may be caused by heeling due to the transverse stability loss. Based on some existing empirical formulas to estimate the dynamic normal force (; lift) acting on planing hull, the estimation method of inception of the unstable phenomenon is proposed and its validity is confirmed through comparing with measured results.

1. 緒 言

近年推進器の性能が向上し、 $F_n > 4.0$ (F_n : 全長フルード数) に達するような小型ボート (全長 6~8m 程度) が登場している。このような超高速で航走可能な滑走艇において、船体の殆どが水面上に露出するような超高速航走時に、安定して直立することが困難となり僅かにふらつき、さらに直進が困難となり船首揺れが発生する場合があるといわれている。

高速滑走艇の横不安定現象に関する研究例としては、Luis Codega and James Lewis¹⁾や Edward M. Lewandowski²⁾がある。彼らは最大速度 $F_n = 1.7$ 程度の滑走艇を対象とし、前者では実験的検討を行い、その試験法を提案している¹⁾。一方後者では理論的検討を行い、その主たる原因は付加物によって発生する流体力にあることを示した²⁾。しかしながら、本研究で対象とする超高速域での横不安定現象としては、針路不安定も同時に起きるような複合型不安定現象といわれるコークスクリュア³⁾が知られているが、この種の不安定現象に関する公表データはほとんどなく、その発生条件や発生原因に

ついては十分には把握されていない。このような不安定現象の発生機構を解明するためには、同様の状況を水槽試験や実機試験で再現するとともに、そのモデル化が必要であり、さらにはその推定法を確立することが、滑走艇の高速航走時の安全性を確保する上で急務であると考えられる。

本研究では、超高速域での複合型不安定現象の一つであると考えられる前述の不安定現象の発生の切っ掛けが、前進速度の増加に伴って船体を支持する流体力の主要成分となる動的流体力 (揚力) の作用による横復原モーメントの喪失にあると考え、超高速域 ($2.0 < F_n < 5.0$) での横不安定状態を水槽試験で再現すると共に、その発生推定モデルを構築し、実験結果と比較検討した結果について報告する。さらに、この横不安定現象発生時の船体に働く横力および回頭モーメントを計測し、船首揺れの発生可能性について、若干の検討を行った結果についても報告する。

2. 不安定現象再現実験

2.1 実験概要

模型船の航走姿勢 (浮上、トリム、横傾斜) を自由とした状態で3分力計 (抵抗、横力、回頭モーメント) を介して高速曳引台車に取り付け、一定速度で曳航し、そのときの船体

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程

原稿受理 平成18年3月17日

の航走姿勢（浮上量、トリム角、横傾斜角）および船体に働く力（抵抗、横力、回頭モーメント）の計測を行った。実験状態図および座標系を Fig.1 に示す。前述の実験で横傾斜が発生した状態においては、横傾斜角を直立状態（零度）に固定した実験も実施し、そのときの浮上量およびトリム角の計測を行った。

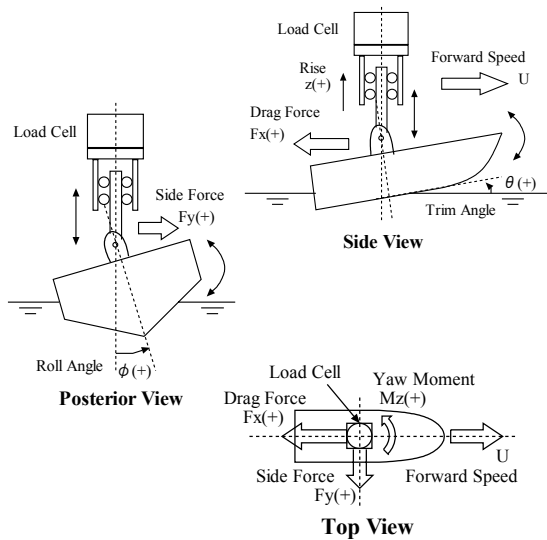


Fig.1 Schematic view of experiment and coordinate system.

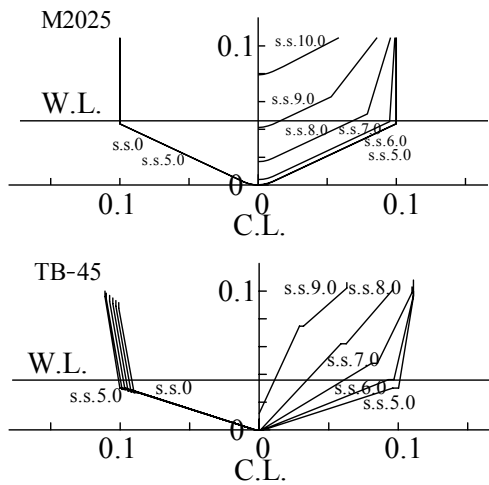


Fig.2 Body Plans of M2025 & TB45.

本実験には 2 種類の異なる特徴を持つ模型船を使用した。Fig.2 に、これら模型船の正面線図を示す。同図上側の模型船 M2025 は、デッドライズアングルが一定であり、船体中央断面から船首方向にかけてキールラインが徐々に持ち上がる形状となっている。一方、同図下側の模型船 TB-45 はディープ V モノヘドロン型滑走艇であり、船体後半は先の模型と同様一定のデッドライズアングルを持っているが、そのチェーン幅は後方に行くに従って若干狭くなり、また中央断面から船首にかけては、キールラインがあまり上方へと持ち上がらず、デッドライズアングルが徐々に大きくなっている。

Table 1 に模型船の主要目および曳航点を示す。なお、実験では模型船の航走姿勢に関わらず、曳航力は曳航点に水平に与えられている。

Table 1 Principal particulars & experimental conditions.

Model	M2025	TB-45
all over length: L_{OA} (m)	0.6	1.0
breadth: B (m)	0.20	0.22
depth: D (m)	0.106	0.102
draft at transom: d_a (m)	0.0403	0.0365
displacement: W (kgf)	2.8	3.1
initial trim angle (degree)	-2.258	0
height of the center of gravity: KG (m)	0.097	0.140
deadrise angle (degree)	25	18
longitudinal towing position from transom (m)	0.240	0.435
height of towing position from Base-Line (m)	0.149	0.075
towing speed (m/sec)	5 - 12	5 - 14

2.2 不安定現象の発生と航走姿勢

Fig.3～5 に模型船 M2025 の実験結果、Fig.7～9 に模型船 TB-45 の実験結果をそれぞれ示す。同図中には、横傾斜を自由とした場合の結果を○印、横傾斜角を直立状態に固定した場合の結果を□印で示している。さらに、Fig.6 および 10 には、横傾斜角を直立状態に固定した場合の浮上量およびトリム角の計測データを基に平水面に対する水線面形状を算出して示している。

Fig.5 に示すように、模型船 M2025 ではフルード数 4.9 の時に、約 7 度に至る横傾斜が発生した。横傾斜が発生した速度で、横傾斜角を直立状態に固定した時の浮上量およびトリム角を Fig.3 および 4 で見ると、これらは横傾斜の有無でほとんど変わっておらず、前進速度の増加に伴う浮上量およびトリム角の変化も連続的であることがわかる。次に、Fig.6 に示す平水面に対する水線面形状を見ると、前進速度の増加に伴う姿勢変化（僅かに浮上し、船首を下げる）の結果、水線長がわずかに短くなるとともに水線幅は大幅に狭くなり、細長い 3 角形へと変化していくことがわかる。

一方、Fig.9 に示す模型船 TB-45 では、フルード数 2.2 以上の速度域で、約 20 度に至る横傾斜が発生した。横傾斜が発生した速度域で、横傾斜角を直立状態に固定した場合の浮上量およびトリム角を Fig.7 および 8 で見ると、横傾斜の有無で姿勢が大きく異なっており、横傾斜角を直立状態に固定した場合の前進速度の増加に伴う姿勢変化は、横傾斜の発生する速度を境目に不連続に変化している。Fig.10 に示す平水面に対する水線面形状を見ると、横傾斜が発生する速度までは M2025 と同様に水線長が僅かに短くなるが、横傾斜が発生する速度になると急激な船首下げと浮上量の減少により、

水線長が長くなるとともに水線幅も狭くなり、細長い5角形へと変化することがわかる。

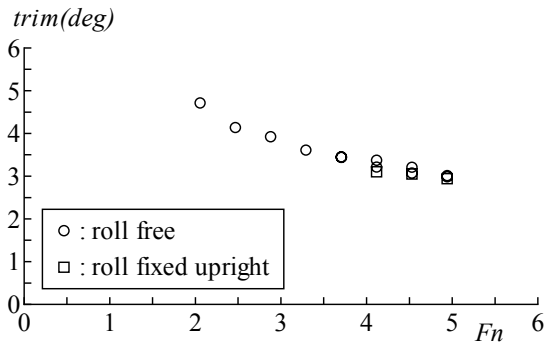


Fig.3 Measured trim angle for M2025.

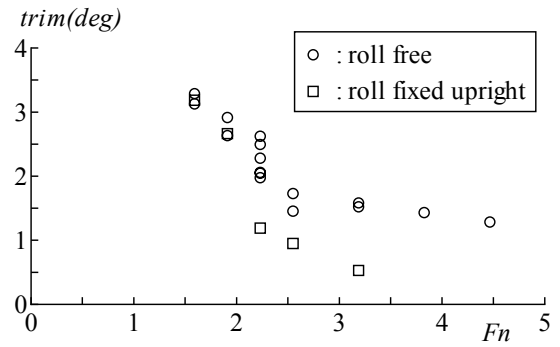


Fig.7 Measured trim angle for TB-45.

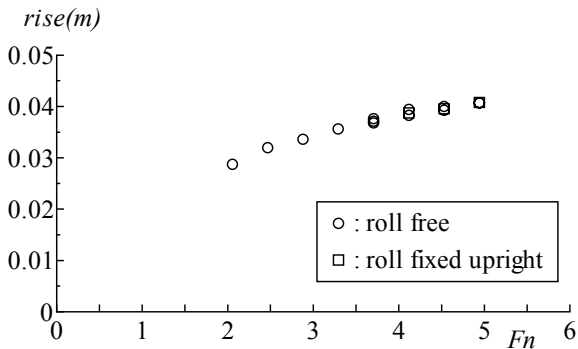


Fig.4 Measured rise for M2025.

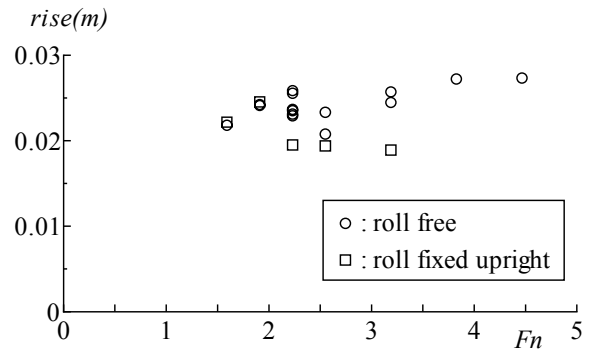


Fig.8 Measured rise for TB-45.

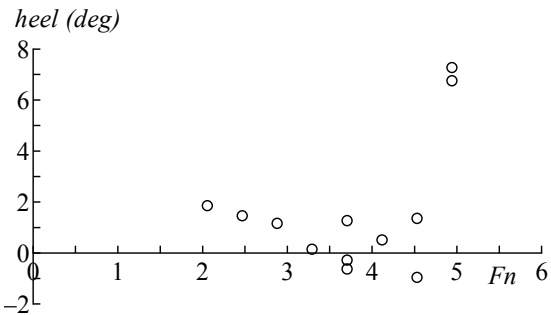


Fig.5 Measured rolling heel angle for M2025.

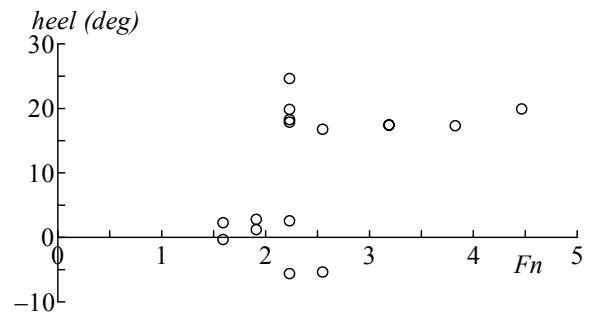


Fig.9 Measured heel angle for TB-45.

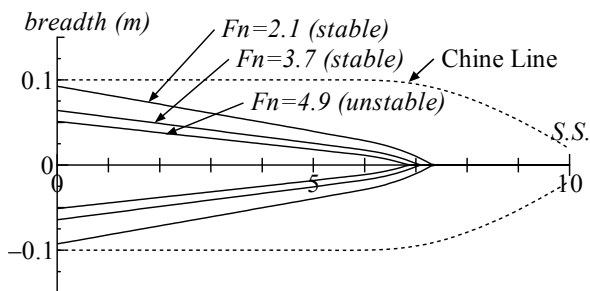


Fig.6 Water plane area for still water surface of M2025 at running condition.

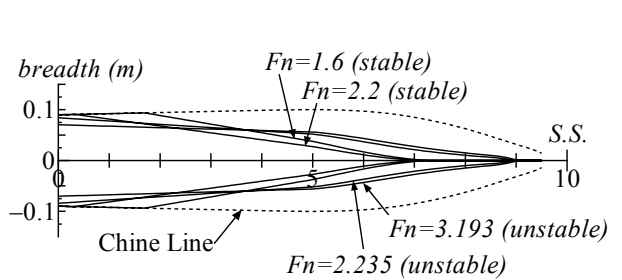


Fig.10 Water plane area for still water surface of TB-45 at running condition.

以上の結果から、船型の異なる M2025、TB-45 の両模型船において、前進速度が非常に高い状態 ($Fn > 2.0$) で横傾斜の発生が確認された。横傾斜の発生する速度で、横傾斜角を直立状態に固定した場合の浮上量およびトリム角から算出した平水面に対する水線長は両模型船で大きく異なるが、その幅が狭くなる傾向は同じであった。このような高速域では船体を支持する流体力のほとんどが前進速度の増加とともに発生する動的流体力(揚力)であることを考えると、横傾斜の発生原因は狭くなった浸水面に働く動的流体力(揚力)の作用により発生する横復原モーメントの寄与によるものではないかと予想される。次章では、動的流体力の横復原性への寄与についてのモデルを示すとともに、横不安定現象の発生機構について考察する。

3. 横不安定現象発生機構

滑走艇を対象とし、前進速度に伴って発生する動的流体力(揚力)によって生じる航走時の横復原モーメントに関する研究例として、Edward M. Lewandowski⁴⁾のものがある。この研究⁴⁾では、動的流体力(揚力)を Daniel Savitsky の経験式⁵⁾、その作用点を Robert. F. Smiley の経験式⁶⁾を用いて求め、動的流体力(揚力)によって生じる横復原モーメントを算出するとともに、実験結果と比較しその妥当性を示している。しかしながら、この方法を本研究に用いるには、動的流体力(揚力)の算出方法に柱状滑走体を用いた水槽試験で得られた実験式を用いているために、ここで対象とする模型船 TB-45 の様に、船首部分のデッドライズアングルが急激に増加するような船形で、この船首部分が浸水するような比較的小さな航走トリム角の場合や、超高速航走によってトランサムチェーンが浸水しないような場合は、その使用限界を超えるなどの問題がある⁴⁾。

そこで、本研究では上記のような状態でも計算可能とするために、動的流体力(揚力)の算出には、船体をストリップ法的に扱い運動量理論に基づき定式化された Peter R. Payne の方法⁷⁾を用い、各 2 次元断面でのその作用点を Edward M. Lewandowski⁴⁾の方法と同様に Robert. F. Smiley の経験式⁶⁾を用いて求め、その断面に作用する動的流体力(揚力)によって生じる 2 次元横復原モーメントを計算し、船長方向に積分することでトータル動的流体力(揚力)によって生じる横復原モーメントを算出することとした。

まず、3.1 節では、ストリップ法的に 3 次元 V 型滑走体に働く横復原モーメントを算出する方法を説明し、3.2 節では 3 次元 V 型滑走体のある断面に働く断面横復原モーメントに注目し、微小傾斜の仮定の下、横復原モーメントが消失する機構について考察する。最後に 3.3 節では前述の模型船に

本手法を適用し安定・不安定判別を行うとともに、実験結果との比較を行いその妥当性について検討する。

3.1 3次元V型滑走体に働く動的流体力(揚力)によって生じる横復原モーメント

Fig.11 に示すように、船体が重心周りに $\Delta\phi$ 微小横傾斜した場合、傾斜側では水面に対する船底のデッドライズアングルが減少し、それに伴い船底に垂直に働く力 N_x は ΔN_{x+} 増加し N_{x+} となる。さらに、浸水幅の増加に伴いこの力の作用点は船体中央から Δcp_{x+} 離れ cp_{x+} となる。一方、反対側の船底では、デッドライズアングルが増加するため船底に垂直に働く力は ΔN_{x-} 減少し N_{x-} となり、浸水幅の減少によって船体中央に Δcp_{x-} 近づき cp_{x-} となる。従って、それぞれの船底に垂直に働く力によって生じる横復原モーメントは、(1)および(2)式となる。

$$(cp_{x+} - KG \sin \beta_x) N_{x+} \quad (1)$$

$$(-1)(cp_{x-} - KG \sin \beta_x) N_{x-} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{cases} N_{x+} = N_x + \Delta N_{x+} \\ cp_{x+} = cp_x + \Delta cp_{x+} \end{cases}, \begin{cases} N_{x-} = N_x - \Delta N_{x-} \\ cp_{x-} = cp_x - \Delta cp_{x-} \end{cases} \quad (3)$$

(1)式と(2)式を足し合わせ、静水圧(hydrostatic pressure)による横復原モーメント M_{Bx} を足し合わせると(4)式を得る。

$$(cp_{x+} - KG \sin \beta_x) N_{x+} - (cp_{x-} - KG \sin \beta_x) N_{x-} + M_{Bx} = M_x \quad (4)$$

(4)式は、2次元V型断面に働く航走時の横復原モーメント M_x である。

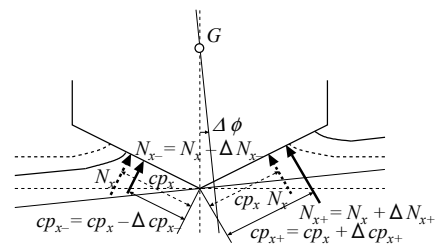


Fig.11 Dynamic normal force on a cross section of planing surface with heeling and its point of action.

3次元V型滑走体に働く航走時の横復原モーメントは、(4)式を船長方向に積分することで求められる。

$$M = \int_A^F M_x dx \quad (5)$$

さらに、(5)式を船体重量 W と微小横傾斜角 $\Delta\phi$ で割ると(6)式を得る。

$$\frac{M}{W \cdot \Delta\phi} \quad (6)$$

(6)式は航走時の復原力曲線の横傾斜角ゼロでの傾きを示し、

これが正の場合には安定して直立することができ、一方負の場合には不安定であることを示す。

次に、(4)式中の各項の算出方法について順に示す。直立する2次元V型断面（デッドライズアングルが40度以下）の片側の底面に垂直に働く動的流体力 N_x の作用点 cp_x は、Robert. F. Smiley⁶⁾によって提案された次式で算出できる。

$$cp_x = E_2 \frac{\pi}{4} c_x \quad (7)$$

ここで、式中 E_2 はチェーンが水に浸かっている場合は 0.8、そうでない場合には 1.0 である。また、式中の各記号は、Fig.12 に示すとおりである。

Fig.11 に示すように重心周りに微小横傾斜 $\Delta\phi$ した時の片側の底面に垂直に働く動的流体力の作用点は、微小横傾斜時の左右それぞれの船底に沿った浸水長さ c_{x+} および c_x を算出し次式を得る。

$$cp_{x+} = E_2 \frac{\pi}{4} c_{x+} = \frac{\xi_x + (\cos \Delta\phi - 1)KG}{\cos \beta_x \cos \Delta\phi (\tan \beta_x - \tan \Delta\phi)} E_2 \frac{\pi^2}{8} \quad (8)$$

$$cp_{x-} = E_2 \frac{\pi}{4} c_{x-} = \frac{\xi_x + (\cos \Delta\phi - 1)KG}{\cos \beta_x \cos \Delta\phi (\tan \beta_x + \tan \Delta\phi)} E_2 \frac{\pi^2}{8} \quad (9)$$

ここで、 ξ_x 、 β_x 、 KG は Fig.12 に示す直立時の平水面に対する喫水、デッドライズアングル、重心高さである。

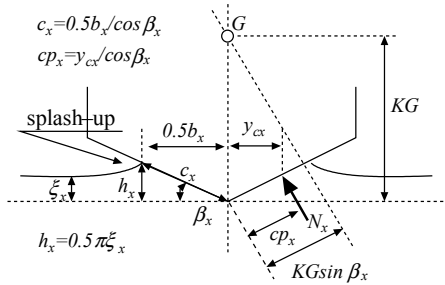


Fig.12 Symbols expressing geometric relations among the water surface, a cross section of planing surface and dynamic normal force on the cross section.

一方、直立する2次元V型断面の片側の船底に垂直に働く力 N_x は、Fig.13 に示す各横断面に働くキールに垂直な力 R_x から次式で求めることができる。

$$N_x = \frac{1}{2 \cos \beta_x} R_x \quad (10)$$

ここでは、2次元断面に働くキールに垂直な力の式として、運動量理論に基づく次式を用いる。

$$R_x = u_0 \cos \tau \frac{d}{dx} [m'_x v] \quad (11)$$

ここで、 u_0 は前進速度、 $v (=u_0 \sin \tau)$ はキールに垂直な速度成分、 τ はトリム角、 m'_x は上下方向の2次元断面付加質量で

あり、以下の Peter R. Payne の式⁷⁾を用いる。

$$m'_x = C_{m'x} \frac{\pi}{2} \rho \left(\frac{b_x}{2} \right)^2 f(A) \quad (12)$$

$$f(A) = \frac{1}{\sqrt{1 + (KA)^2}}$$

$$K = \frac{1}{4} + \sqrt{\frac{2\beta_x}{\pi}}, A = \frac{b^2}{S}$$

ここで、 b は船尾でのチェーン幅を示し、 b_x は対象としている断面の splash-up の影響を考慮した航走時浸水幅、 S は航走時浸水面のベースラインを含む平面への投影面積を示す。なお、(12)式中の $C_{m'x}$ は、チェーンが水に浸かっている状態とそうでない状態とに分けて以下の式⁷⁾で与えられる。

チェーンが水に浸かっていない場合(chine-dry)

$$C_{m'x} = \left(1 - \frac{\beta_{Ex}}{2\pi} \right)^2 \quad (13)$$

チェーンが水に浸かっている場合(chine-wet)

$$C_{m'x} = \left(1 + k \frac{z_{cx}}{b_x} \right) \left(1 - \frac{\beta_{Ex}}{2\pi} \right)^2, k = 2 \quad (14)$$

ここで、(13)(14)式中の β_{Ex} は effective deadrise angle と呼ばれ $\tan \beta_{Ex} = \tan \beta_x / \cos \tau$ で表される。 z_{cx} は、Fig.13 に示す長さを表し、splash-up によって初めて浸水したチェーン位置を基準に、対象とする断面のチェーン位置の鉛直方向距離を示す。

Fig.11 に示すように重心周りに微小横傾斜 $\Delta\phi$ した時の左右の底面に垂直に働く動的流体力 (N_{x+} および N_x) は、(10)~(14)式に、Fig.14 に示す b_{x+} および b_x 、 β_{x+} および β_x 、傾斜時の左右の z_{cx+} および z_{cx-} を用いることで算出される。

以上の方法で3次元V型滑走体に働く航走時の横復原モーメントを算出する際には、船型データ、重心高さ以外に、直立航走時の姿勢、前進速度、微小傾斜角が必要となる。本論文に示す計算においては、微小傾斜角を1度とした。また、前進速度は、与えられた航走姿勢で算出された静水圧による浮力と上下方向の揚力の和が船体重量と釣り合う様に与えた。

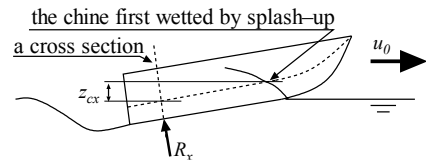


Fig.13 Local chine submergence below the level at which "splash-up" first wets the chine.

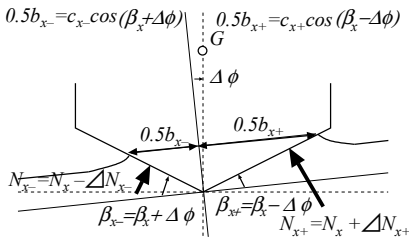


Fig.14 Symbols expressing geometric relations between the water surface and a cross section with small heel.

3.2 横復原力消失機構について

ここでは、前述の2次元V型断面に働く横復原モーメントの(4)式に(3)式を代入し、微小横傾斜の仮定のもと単純化した(15)式を用いて、横復原モーメントの消失機構について考察を行う。

$$\begin{aligned}
 & (\Delta c p_{x+} + \Delta c p_{x-}) N_x + (c p_x - K G \sin \beta_x) (\Delta N_{x+} + \Delta N_{x-}) + M_{Bx} \\
 & = (c p_{x+} - c p_{x-}) N_x + (c p_x - K G \sin \beta_x) (N_{x+} - N_{x-}) + M_{Bx} \quad (15) \\
 & = M_x
 \end{aligned}$$

(15)式の第1項は横傾斜によって左右の船底に垂直に働く力の作用位置が変化するために生じるモーメント、第2項は横傾斜によって左右の船底に垂直に働く力自身が変化するために生じるモーメント、第3項は横傾斜により平水面下の左右の船底に働く静水圧 (hydrostatic pressure) が変化するために生じるモーメントである。

まず、(15)式中第1項に(8)(9)式を代入し、横傾斜角が微小であると仮定すると、直立状態でチェーン部が浸水する状態とそうでない状態に分けて、次式が得られる。

$$(c p_{x+} - c p_{x-}) N_x = \begin{cases} 0 & (\text{chine-wet}) \\ \xi_x \frac{\cos \beta_x}{\sin^2 \beta_x} E_2 \frac{\pi^2}{4} N_x \Delta \phi (\text{chine-dry}) \end{cases} \quad (16)$$

つまり、この項はゼロもしくは正の値となり、横復原モーメントが消失するためには、第2項もしくは第3項が負となる必要がある。

(15)式第2項中 ΔN_{x+} および ΔN_{x-} は、直立時の左右のチェーンが浸水もしくは浸水していない状態で、微小横傾斜時にも左右のチェーンの浸水の有無が変化しない状態においては、正の値となる。このとき、(15)式第2項が負となるためには、次式が必要十分条件となる。

$$c p - K G \sin \beta < 0 \quad (17)$$

同不等式左辺は、直立して航走する時に片側の船底に垂直に働く力の作用線と重心位置との距離を示している。つまり、Fig.12において、船底に働く垂直な力の作用線が重心より下方を通る場合に(17)式が満たされる。たとえば、低速航走時に(17)式左辺が正であっても、船体が浮上し $c p$ が小さくなることで(17)式左辺が負となると考えられる。(15)式第2項が負となるその他の可能性としては、直立時の左右のチャイ

ンが浸水もしくは浸水していない場合に、微小横傾斜によって一方が浸水し他方が浸水しない状態となる場合が考えられる。横傾斜後に片側のチェーンが浸水しなくなる場合には ΔN_{x-} が非常に大きな負の値に、一方横傾斜後に片側にチェーンが浸水する場合には ΔN_{x+} が非常に大きな負の値となり、このような場合には(17)式左辺が正となる状態で(15)式第2項が負となる。

(15)式第3項は、微小横傾斜の仮定の下、次式で表せる。

$$\begin{aligned}
 M_{Bx} = & \begin{cases} (\text{chine above still water surface}) \\ \frac{\xi_x^2}{\tan \beta_x} \left\{ \frac{2}{3} \xi_x \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \beta_x} \right) - K G \right\} \Delta \phi \\ (\text{chine below still water surface}) \\ \frac{b_x (4 \xi_x - b_x \tan \beta_x)}{4} \left\{ \left(\frac{b_x^2 (2 - \tan^2 \beta_x) + 12 \xi_x^2}{6 (4 \xi_x - b_x \tan \beta_x)} \right) - K G \right\} \Delta \phi \end{cases} \quad (18)
 \end{aligned}$$

同式から、この項もまた(15)式第2項同様、前進速度が速くなり船体が大きく浮上し、チェーンが平水面上に露出した状態において負の値となる場合があることがわかる。

以上の結果より、2次元V型断面に働く航走時横復原モーメントは、(15)式の第2項および第3項の寄与によって消失し負の値となる場合があることがわかった。

3.3 安定・不安定判別結果

前節の方法を用いて模型船 M2025 および TB-45 について安定領域と不安定領域を算出した結果を Fig.15 および 16 に示す。同図では、横軸をトリム角、縦軸を船尾喫水とした図に安定・不安定領域を示している。なお、同図中には前述した実験結果も示している。実験結果との比較においては、M2025 では多少差異は見られるものの TB-45 では実験結果を良く表しており、前述の仮定のもと提案された安定・不安定判別推定法は定性的には妥当であると考えられる。

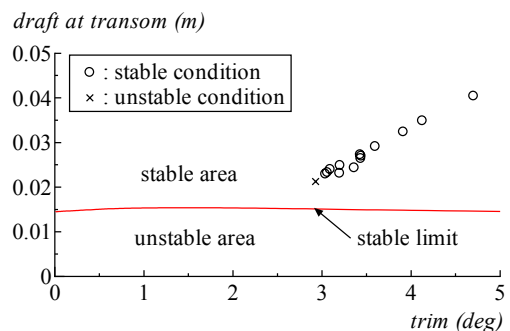


Fig.15 Stable limit for M2025 shown on running attitude.

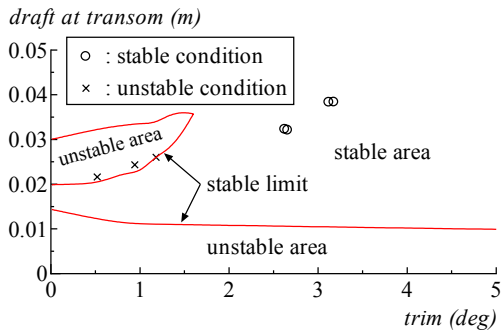


Fig. 16 Stable limit for TB-45 shown on running attitude.

次に、安定・不安定判別結果の詳細について検討する。

Fig. 15 に示す模型船 M2025 では、安定・不安定の境界線は 1 本、一方 Fig. 16 に示す TB-45 ではこの境界線が 2 本ある。Fig. 16 に見られる 2 本の安定・不安定の境界線の違いについて調べるために、同図中トリム角 1 度において船尾喫水を変化させた場合の(4)式と(15)式の各成分を、それぞれ船体重量と微小横傾斜角で割った値を、Fig. 17 に示す。(4)式で示す航走時横復原モーメントは、船尾喫水の減少に伴って減少して負の値となり、その後一旦増加して正の値となった後、再び減少して負の値となる。同図より、この主たる原因は(15)式第 2 項であることがわかる。Fig. 18、19 にトリム角 1 度で、船尾喫水が 0.023m および 0.011m での横復原モーメントの船長方向分布をそれぞれ示す。なお、両図には横傾斜角 1 度での splash-up を含む浸水面形状も示している。両状態を比較すると、船尾喫水が 0.023m の場合には浸水長の前方および s.s.2 付近で負の横復原モーメントが発生しているのに対し、船尾喫水が 0.011m の場合には浸水長前方でのみ負の横復原モーメントが発生している。これは、船尾喫水が深い 0.023m の場合には、直立時に船体後方のチェーンは浸水しており、横傾斜によって Fig. 18 下図に示すように、s.s.2 付近の横断面において、傾斜側はチェーンが浸水し他方はチェーンが浸水しない状態となり、負の横復原モーメントが発生したことがわかった。また、Fig. 18 の船尾喫水が深い 0.023m の場合の浸水長前方での負の横復原モーメントは、船首部分のデッドライズアングルが大きくなっているために、船底に働く垂直な力の作用線が重心高さよりも低い位置を通り、(15)式の第 2 項が負になったためであり、一方 Fig. 19 の船尾喫水が浅い 0.011m の場合の浸水長前方での負の横復原モーメントは、喫水が非常に浅くなり(15)式第 2 項が負になったためであった。

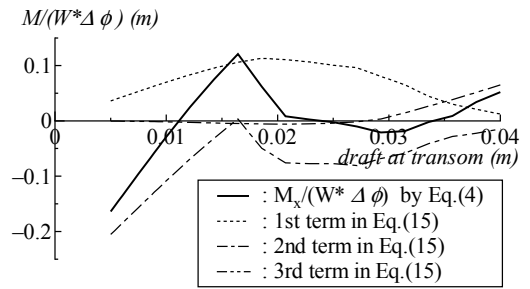


Fig. 17 Calculated running roll restoring moment of TB-45 at $\tau = 1.0$ deg.

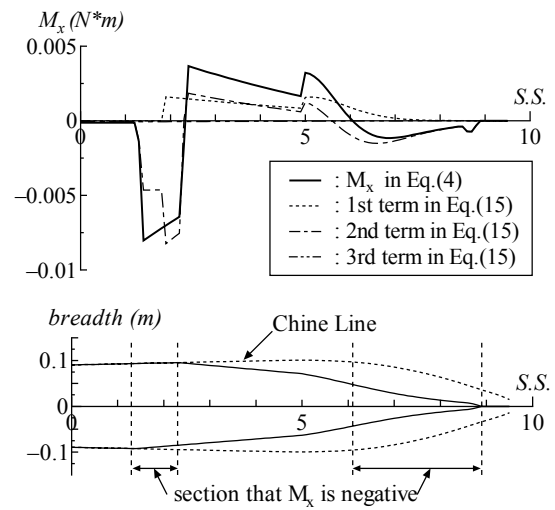


Fig. 18 Longitudinal distribution of calculated roll restoring moment and wetted surface area including splash up effects for TB-45 at $d_a = 0.023$ m and $\tau = 1.0$ deg.

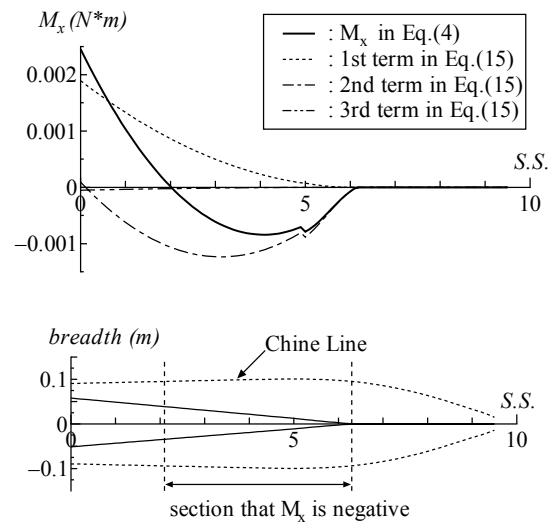


Fig. 19 Longitudinal distribution of calculated roll restoring moment and wetted surface area including splash up effects for TB-45 at $d_a = 0.011$ m and $\tau = 1.0$ deg.

最後に、Fig.15 中トリム角 3 度での安定・不安定境界線上での横復原モーメントの船長方向分布および横傾斜角 1 度での splash-up を含む浸水面形状を Fig.20 に示す。模型船 M2025 の場合も、模型船 TB-45 の船尾喫水が浅い 0.011m の場合と同様に、船首付近で負の復原モーメントが発生している。その主たる原因もまた、喫水が非常に浅くなることによって、船首部分から順に(15)式第 2 項が負となったためであった。

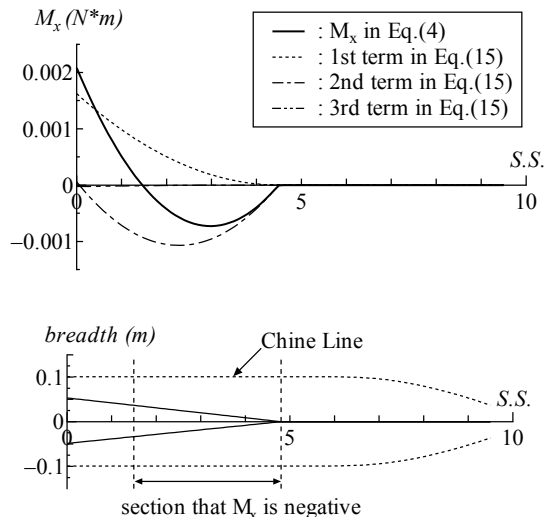


Fig.20 Longitudinal distribution of calculated roll restoring moment and wetted surface area including splash up effects for M2025 at $\tau = 3.0$ deg on the stability limit line in Fig.15.

4. 横傾斜発生時の操縦運動について

第 2 章で詳述した水槽試験において、航走中に横傾斜が生じた時に、船体に働く横力 F_y 、回頭モーメント M_z を計測した。これらをもとに、ここでは船首揺れ発生の可能性について若干の検討を行う。

Table 2 に横力 F_y 、回頭モーメント M_z の計測値を示すと共に、その作用方向を Fig.21 に示す。同図中左側の TB-45 の場合は、内向傾斜の旋回運動を始めようとする流体力が働き、一方同図右側の柱状模型である M2025 の場合は、外向傾斜の旋回運動を始めようとする流体力が作用していることがわかる。一般に高速滑走艇が旋回運動を行う時には、内向傾斜となることが予想される。そのことから、TB-45 では、そのまま内向傾斜の旋回運動へと移行するものと考えられるが、一方 M2025 では旋回運動へ遷移する際に横傾斜が、外向傾斜から内向傾斜へと変化することが予想される。その過程で、旋回運動が直進運動へと変化し再度横不安定現象が発生し、反対方向への外向傾斜の旋回運動が始まろうとするこ

とが予想され、これらのサイクルを繰り返すことで、不安定な横揺れと回頭運動が発生する可能性があると考えられる。このような操縦不安定運動の解析については、今後シミュレーション⁸⁾で確認することとしたい。

Table.2 Measured roll moment, side force and yaw moment.

M2025			
F_n	3.710	4.122	4.534
ϕ : Roll (deg)	-3.084	-3.959	-4.681
F_y : Sway (kgf)	-0.108	-0.121	-0.165
M_z : Yaw (kgf m)	0.009	0.015	0.016
TB-45			
F_n	2.235	2.235	3.193
ϕ : Roll (deg)	-5.685	18.180	17.321
F_y : Sway (kgf)	0.171	-0.248	-0.197
M_z : Yaw (kgf m)	-0.052	0.121	0.146

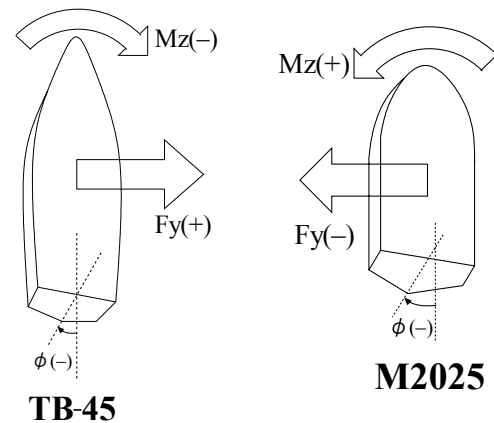


Fig.21 Direction of forces acting on hull with heel angle.

5. 結 言

本研究では、高速航走時の針路不安定現象発生時に同時に起こる横不安定性について、水槽試験および横不安定現象推定法の構築を行い以下の結論を得た。

- 1) 水槽試験により、全長フルード数 2.0 を超える超高速域で航走する滑走艇において、横安定性が不足し横傾斜する現象が発生することを確認した。
- 2) 超高速航走時の横復原モーメントの計算法を、Edward M. Lewandowski⁴⁾の提案する航走時横復原モーメントの算出方法に基づき、Robert F. Smiley⁶⁾および Peter R. Payne⁷⁾の提案する経験式を用いて構築し、船体の殆どが水面上に露出するような超高速域での計算が出来るように拡張した。

- 3) 上記計算法を用いて、本実験で計測された横傾斜は、船底に働く負圧がその発生原因ではなく、前進速度の増加に伴う航走姿勢変化によって動的流体力（揚力）の作用点が変わったために、航走時横復原モーメントが負となり発生することを示した。
- 4) さらに、計算により船型によっては、不安定現象発生領域が2箇所現れる可能性があることを示した。
- 5) 横傾斜の発生と共に、船体に横力および回頭モーメントが働くことを確認し、これらの力は船型が異なると異なった方向に働き、これらの力が複雑な操縦運動を誘起する可能性があることを示した。

参考文献

- 1) Luis Codega and James Lewis: “A Case Study of Dynamic Instability in a Planing Hull”, Marine Technology, Vol.24, No.2, pp.143-163, 1987.
- 2) Edward M. Lewandowski: “The Transverse Dynamic Stability of Hard-chine Planing Craft”, Journal of Ship & Ocean Technology, Vol.2, No.1, pp1-12.
- 3) Donald L. Blount and Louis T. Codega: “Dynamic Stability of Planing Boats”, Marine Technology, Vol.29, No.1, pp.4-12, 1992.
- 4) Edward M. Lewandowski, “Prediction of the Dynamic Roll Stability of Hard-Chine Planing Craft”, Journal of Ship Research, Vol.40, No.2, pp.144-148, 1996.
- 5) Daniel Savitsky and P. Ward Brown, “Procedures for the Hydro Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water”, Marine Technology, Vol.13, No.4, pp.381-400, 1976.
- 6) Robert F. Smiley: “A Theoretical and Experimental Investigation of the Effects of Yaw on Pressures, Forces, and Moments during Seaplane Landing and Planing”, NACA Technical Note 2817, 1952.
- 7) Peter R. Payne: “Recent Developments in “Added-Mass” Planing Theory”, Ocean Engineering, Vol.21, No.3, pp.257-309, 1994.
- 8) 木本亮、片山徹、飯田隆、池田良穂：滑走艇の操縦運動時の航走姿勢が旋回運動に与える影響について、日本船舶海洋工学会講演論文集、第2W号、pp.67-70、2006.