

機関番号：14501

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760563

研究課題名 (和文) 滑走型高速船の航走性能評価シミュレーション手法の開発

研究課題名 (英文) Development of a simulation method for evaluating the planing performance of high speed crafts.

研究代表者

勝井 辰博 (KATSUI TOKIHIRO)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：80343416

研究成果の概要 (和文)：これまで滑走艇の性能評価は模型試験による推定、もしくは実機作成後の事後評価が主流であった。これに対し本研究では、滑走艇周りのポテンシャル流れの数値解析手法を基礎とした滑走艇の航走性能シミュレーション法を開発し、その推定精度の検証を行ったものである。報告者らが開発した滑走艇周りの流れの数値解法ではチェーンが水に濡れないチェーンドライ状態を含めて航走時の浸水面形状を精度よく求めることができるため、艇に作用する流体力の推定精度が高い。この手法を用いて定常航走時の滑走艇の航走姿勢を求める方法を示し、実験結果と比較したところ滑走状態に入らない低速域を除いてよく一致した。また、横傾斜航走時の復原モーメントの計算結果から傾斜航走時の横安定性を評価する方法を示し、水槽試験結果と定性的に一致する結果を得た。さらに、トリム変化による揚力変動の計算結果とポーポージング発生の相関を調査し、トリムに対する揚力変化率がある閾値を超えるとポーポージングを発生するという見出し。以上により滑走艇周りの流の数値解析によって滑走艇航走性能を評価できることを示した。

研究成果の概要 (英文)：The planing ship performance was usually evaluated by tank test which spends much cost and time. The present study proposed a simulation based evaluation method of planing ship performance which is applicable for hull design. The flow around planing ship was solved with potential flow assumption and the wetted surface area and hull bottom pressure distribution in arbitrary planing attitude including chine dry situation was obtained. Based on the calculated hydrodynamic forces acting on the hull, the planing attitude was estimated. The planing attitudes corresponding to various ship speeds agreed well with experimental results except the lowest speed. The transverse stability in inclined planing condition was also evaluated by numerical simulation and it was agreed with tank tests results qualitatively. In addition, a method to estimate the porpoising (longitudinal instability phenomena) occurrence condition based on the simulation was presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：船舶流体力学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：滑走艇, 航走姿勢, 浸水面形状, 流体力特性, 横安定性, ポーポージング

1. 研究開始当初の背景

滑走艇は高速船舶の代表的船型であり、巡視艇からプレジャーボートまで幅広い用途に利用されている。巡視艇は現在も沿岸警備の要の一つとして大きな役割を果たしている。四方を海に囲まれ、海洋国家を標榜する我が国にとって沿岸警備は重要な問題であり、巡視艇の高性能化は恒常的な課題である。また、プレジャーボートはユーザーの増加にともなって事故の増加が顕著であり、いわゆる“安全性能”のさらなる向上が求められる状況にあった。このように滑走艇の性能向上に対する社会的ニーズは大きく、そのためには精度よく滑走艇の性能を評価する手法の確立が不可欠と考えられていた。滑走艇の最大の特徴は、船体が浮力ではなく揚力によって支えられることであり、このために航走時の船体の姿勢が静止時に比べて大きく変化するという排水量型船舶にはない特性を有する。さらに、非常に高速で航走する場合には、ポーポイジングとよばれる縦揺れ不安定現象や直進航走時に船体が横傾斜したまま航走する横不安定現象が生じることがあることが知られており、時として転覆にいたることもある。このような不安定現象は重大事故に繋がる懸念されるため、船型設計の時点でその発生の可能性を事前に把握できることが望ましく、さらにはどのような船型改良によってその危険性を回避できるかについての指針が明らかになっていることが理想的である。これまでは滑走艇の性能評価あるいは性能推定の手法としては、実験的手法が主流となっていた。実験的手法とそれに基づく経験則の作成は有用な手法であるが、過去のデータに基づく内挿的推定である経験式では、新しい船型に対応することができないという難点があり、実験そのものについても滑走艇の航走フルード数域での実験が可能な試験水槽に限られること、また相対的に小型となる模型船を用いた高速での水槽試験では、外乱影響を極力排除して精度の高い実験を実施することが難しいなどの問題点がある。さらには模型試験の実施には多くのコストを要するため、比較的小型で設計、開発にそれほどコストをかけられないことが多い滑走艇にとっては、1隻ごとに水槽試験を実施することは開発コスト上、厳しい状況にあった。このため、滑走艇の性能を評価できる高精度でかつ簡便なシミュレーション手法が確立されれば、滑走艇設計にとって大きく貢献できる状況にあったと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は滑走艇の航走性能評価シミュレーション手法を開発し、滑走艇の高性能化と船型設計の高度化に寄与することを目的と

する。その基礎となる滑走艇周りの流場解析手法は、積分方程式によって定式化されたポテンシャル流れを数値的に解くものであり、滑走艇の航走時浸水面形状をも未知として取り扱う手法であって、報告者の研究グループが独自に開発した方法です。この方法の特徴は、粘性の影響は考慮できないものの、姿勢固定で航走するときの滑走艇の浸水面積、船底圧力分布を妥当な精度で計算できることがこれまでに示されている。この流場解析手法を基に自由航走時の滑走艇まわりに作用する流体力の推定手法を開発し、船型のわずかな違いによって生じる滑走艇の定常航走姿勢、抵抗性能、縦横安定性の違いを実用上妥当な精度で推定可能な滑走艇の性能評価シミュレーション法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

(1)チェーンドライ状態の滑走艇の浸水面形状と船底圧力分布の計算法の開発

姿勢を固定された状態の滑走艇(Fig.1)の浸水面形状と船底圧力分布は、未定境界の連立積分方程式(1),(2)式によって決定される。

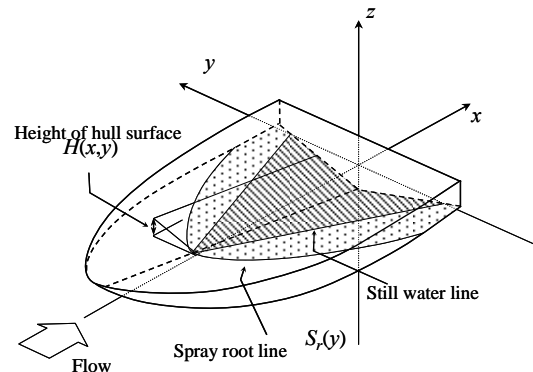


Fig.1 Flow configuration around a planing ship.

$$\frac{\partial H}{\partial x}(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{2p(\xi, \eta)}{(y - \eta)^2} d\eta \times \int_{s_r(\eta)}^0 \left\{ 1 + \frac{x - \xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} \right\} d\xi \quad (1)$$

$$H(s_r(y), y) = \frac{1}{4\pi} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{2p(\xi, \eta)}{(y - \eta)^2} d\eta \times \int_{s_r(\eta)}^0 \left\{ s_r(y) - \xi + \sqrt{(s_r(y) - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \right\} d\xi \quad (2)$$

(1)式は揚力面の積分方程式、(2)式は浸水面の前縁境界であるスプレールートライン上で波面の盛り上がりで滑走艇底面高さが一致する条件を課す積分方程式である。これら積分方程式の数値解法は著者によって示されている。この手法ではまず仮の浸水面形状を設定

し、浸水面を矩形のパネルに分割して(1)式を解き、(2)式を満足するまで逐次浸水面を変更して繰り返し計算を行う。

具体的なスプレールートライン形状の変更方法はFig. 2に示すようになる。すなわち各y断面での仮のスプレールートラインの位置 $S_r(y)$ での波面の盛り上り、 $h(S_r(y), y)$ と、滑走艇底面高さが等しくなる位置を $S_r'(y)$ としたとき、 $\alpha S_r'(y) + (1+\alpha) S_r(y)$ を次のスプレールートとして更新するものである。 α は緩和係数であり、適当な値を設定すれば効率的にスプレールートを探査できる。

しかしチャインドライの場合、船側近傍では滑走艇底面高さは水面高さに比べて高くなっているから、上記のスプレールートの更新方法では、スプレールートは滑走艇後方へと移動していき、やがて滑走艇後端よりもさらに後方へ移動しようとする。この時点で数値解法が破綻するため、その縦断面においては浸水部分がなくなると判断する手続きが必要となる。しかし、収束前の計算過程において一旦浸水部分がなくなった断面は積分方程式(2)の計算対象から外れてしまうため、最終的にその断面において浸水部分が存在するような場合でもその解にたどり着くことはできなくなってしまう。そこで、本研究では、計算過程において上記のような理由から浸水部分がなくなってしまうような断面に対してはごく微小な浸水長を確保し、積分方程式(2)式の計算対象として計算を継続するという手法をとった。ただし、この”仮想的な”浸水面の部分では積分方程式(2)を満足することが無いため、収束判定を行う対象からのみ除外することにした。これにより、これまでは不可能であった、チャインドライ状態での計算が可能となった。

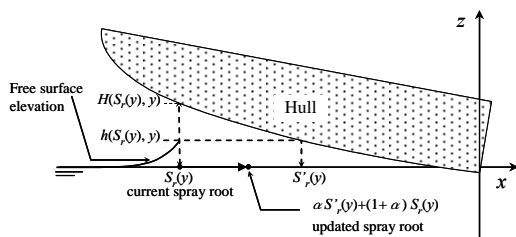


Fig.2 The procedure to update the spray root.

(2)シミュレーションに基づく滑走艇の横安定性の評価法の開発

(1)で示した計算法は任意の形状、航走姿勢の滑走艇の浸水面形状とそこに作用する圧力分布を計算できるから、横傾斜滑走状態での船底圧力による復原モーメントを計算し、滑走艇の横安定性の評価を行い、水槽試験に

より検証することを考える。Fig.3は船体後方から見てキールラインを中心に反時計まわりに θ [deg]だけ横傾斜している時の船尾断面図と艇に働く力である。船体重量 W 、浮力 B であり、船底圧力 P を y, z 軸成分に分けたものが横力 F_y 、揚力 L となる。横復原モーメント M_G は重心を起点とした時計まわりを正とし、正の場合安定となる。計算および実験の対象とする柱状滑走艇模型の主要目をTable 1示す。実験では航走姿勢を固定した状態で、6分力計を介して高速曳航台車に取り付け、5[m/s]で曳航し、その時の船体に働く力の計測を行った。なお、Table 2に実験ケースを示す。

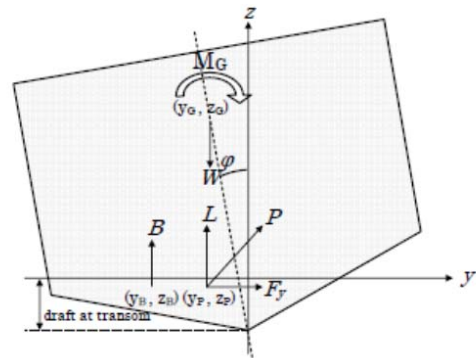


Fig.3 The procedure to update the spray root.

Table 1 Principal dimension of planing model.

Model	M90
length: LOA [m]	0.9
breadth: B [m]	0.21
depth: D [m]	0.18
chine height: hc [m]	0.0377
deadrise angle: β [deg]	19.73
center of roll moment: (x_g, y_g, z_g) [m]	(0.45, 0, 0.1)

Table 1 Experimental conditions.

forward speed: U [m/s]	5
trim angle: τ [deg]	2,4,6
draft at transom: dT [m]	0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04
angle of heel: ϕ [deg]	5

(3)シミュレーションに基づくポーポイジング発生評価法の開発

ポーポイジングの発生は滑走艇の転覆につながるため、どのような条件下で発生するかを把握することは重要であるが、これまでは模型試験結果から導かれた経験則に基づいて評価されてきた。Savitskyは柱状滑走艇の系統的模型試験結果から、ポーポイジングの発生限界トリム角を示している。この限界トリム角はデッドライズアングルごとにまとめられ、揚力係数 C_L の1/2倍の平方根、 $(C_L/2)^{1/2}$ に対して定められている。限界トリム角は $(C_L/2)^{1/2}$ が大きいほど大きく、デッドライズアングルが大きいほど大きい。滑走艇はこの限界トリム

角を超えて滑走するとポーポイズングを起こす。同様にCelanoはポーポイズングの発生限界トリム角 τ_{crit} を(3)式の経験式で示している。

$$\tau_{crit} = 0.1197 * \beta^{0.7651} * \exp\left(15.7132 * \sqrt{\frac{C_L}{2}} * \beta^{-0.2629}\right) \quad (3)$$

ここで、 β はデッドライズアングル[deg]を表している。これからも明らかなように、揚力係数の増加とともに限界トリム角も大きくなるが、揚力係数が同じであっても、デッドライズアングルが大きくなるにしたがって限界トリムアングルが増加し、ポーポイズングを起こさず安定滑走が可能な領域が増加する。揚力係数の無次元化は浸水面積ではなく、滑走艇の幅の2乗を用いて行われているため、デッドライズアングルの違いによる浸水面積の違いが限界トリム角に影響しているわけではなく、揚力そのものが同じでも限界トリム角が異なることを示す。

これらの関係は限界トリム角を把握する上で有用であるが、 C_L を用いて表されているため、滑走艇の航走時喫水と限界トリム角の直接的な関係が明確になっていない。また、柱状滑走艇を対象としているため、デッドライズアングルが長手方向に変化するような実用的な滑走艇船型に対して適用することが難しいなどの問題がある。加えて経験則に基づく式であるため、ポーポイズング発生の物理的背景が不明瞭である。しかし、ポーポイズング発生の有無が滑走艇の非定常運動に基づく動的流体力を調べなくても、定常航走時の揚力とデッドライズアングルのみから判定できるという事実は興味深い。このことを参考に、(1)で示した数値解析手法によって得られる滑走艇の揚力特性からポーポイズング発生判定を行うことを試みる。

ポーポイズング発生は定常航走状態にある滑走艇の航走姿勢の乱れが大きな運動につながっていると推察されるから、各航走姿勢での滑走艇の揚力だけではなく、姿勢変化に対する揚力の変化にも着目する必要があると考えられる。そこで、滑走艇のデッドライズアングル、船尾喫水、トリム角を系統的に変化させ、揚力および揚力変化率と(3)式に基づくポーポイズング発生限界の相関関係について調査した。

4. 研究成果

(1)チャインドライ状態の滑走艇の浸水面形状とチャインドライ発生条件

デッドライズアングル20[deg]、幅210[mm]の柱状滑走艇をトリム角3.8[deg]、船尾喫水22.5[mm]で航走させたときの浸水面形状の

計算結果と実験結果の比較を Fig.4 に示す。計算、実験ともにチャインドライ状態となり、浸水面形状の計算結果は実験結果と定性的に一致するが、実験結果は船速の上昇に伴って浸水面形状が後退する傾向が見られる。これは実験時の風圧の影響が予想され、本研究による方法は妥当な精度でチャインドライ状態の滑走艇の浸水面形状を推定できる。

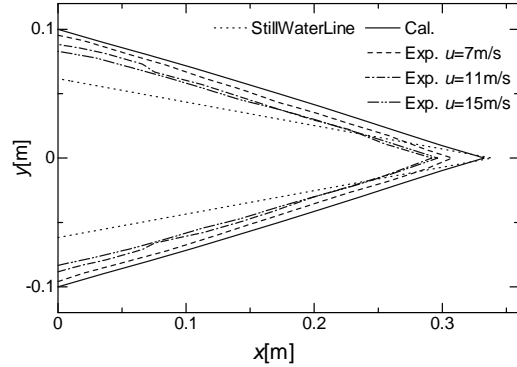


Fig.4 Comparison of spray root lines.

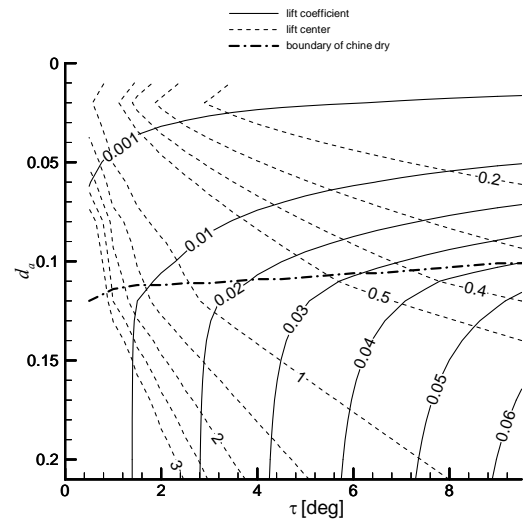


Fig.5 Hydrodynamic characteristics of prismatic hull. (Deadrise angle:20 deg)

Fig.5 はデッドライズアングル 20[deg]の柱状滑走艇に作用する流体力特性の計算結果を示したものである。横軸はトリム角 τ 、縦軸は船尾喫水 d_w (船幅で無次元化しているため船尾喫水船幅比を表す)であり、実線と破線がそれぞれ揚力係数、揚力中心の船尾端からの距離の等値線図を表している。また一点鎖線はチャインドライ航走の境界線であり、船尾喫水船幅比がこの線よりも小さいところでチャインドライ航走になることを表している。これを見るとチャインドライ航走の境界線を境に滑走艇に作用する流体力特性は大きく異なることが分かる。したがってチャインドライ航走の条件を把握することは重要である。

Fig.4 よりチャインドライ航走の境界はトリ

ム角に対して変化が小さく、ほぼ船尾喫水船幅比だけで決まることが分かる。これはデッドライズアングルを変化させても同様の傾向があり、デッドライズアングルが 5, 10, 15, 20[deg]の 4 種類の柱状滑走体の計算結果をもとにチャインドライ航走判定式を作成すると、船尾喫水船幅比 d_a 、デッドライズアングルを β [deg]として、

$$d_a < 0.006\beta \quad (4)$$

となる。すなわちチャインドライ航走の限界はほぼ船尾喫水船幅比だけで決まり、その大きさはデッドライズアングルに比例して大きくなる。

(2)シミュレーションに基づく滑走艇の横安定性の評価

Fig.6 にトリム角が 4[deg]での横復原モーメントを示す。実験値、計算値ともに船尾喫水が浅ければ不安定である。ただし、実験値は船尾喫水の増加に伴って、横復原モーメントがなだらかに増加するのに対し、計算値は急激に増加し、船尾喫水が 0.018[m]では実験の 2 倍程度になる。そこからなだらかに減少し、0.027[m]からはほぼ一定値を示す。このように、計算値は船尾喫水によって 3 つの領域に分けられる。これは浸水面形状の違いによって生じている。Fig.6 にトリム角が 6[deg]での浸水面形状を示す。実線が計算、破線が実験でのスプレールラインを表している。この時の船尾喫水は 0.02[m]で右舷(写真上側)はチェーンが僅かに浸水し(パーシャルと呼ぶ)、左舷(写真下側)はチャインドライである。計算値のチェーンの状態を見ると、船尾喫水が 0.01[m]の場合はチャインドライ状態となる。0.02[m]では一方がパーシャル、他方がチャインドライの状態、0.03[m]では一方がチェーンウェット、他方がパーシャルの状態となる。このように船尾喫水によってチェーンの状態を分類し、Fig.2 にその境界線を引いた。この境界は横復原モーメントの傾向が変化する境界と合致している。船尾喫水が 0.01[m]では浸水面が小さく、船底圧力も小さいため、横復原モーメントは小さくなる。船尾喫水が 0.02[m]では浸水面および船底圧力が大きく、キールラインを挟んで左右の圧力差が大きくなるため、横復原モーメントは大きくなる。船尾喫水が 0.03[m]では傾斜側の浸水面前縁の長さが小さいため、傾斜側の船底圧力が小さくなることで横復原モーメントは小さくなる。計算値と実験値の横復原モーメントが若干異なる原因は Fig.7 に示すように、計算よりも実験のスプレールラインの方が後方にさがっている。これは実験では空気圧の影響により浸水面が押しも戻されるためと考えられる。特にチャインドライの状態ではその傾向が強く、計算値は実験値よ

りも横復原モーメントが大きく見積もられるが、むしろ実船の場合は空気圧の影響は小さくなるため、計算に近い値となる可能性もある。無論、詳しい検証が必要であるが、数値解析により滑走艇の横復原性の評価は可能であると考えられる。

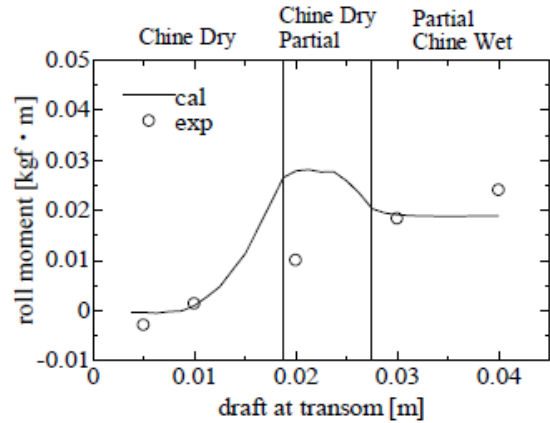


Fig.6 Comparison of roll moment (Trim : 4 deg)

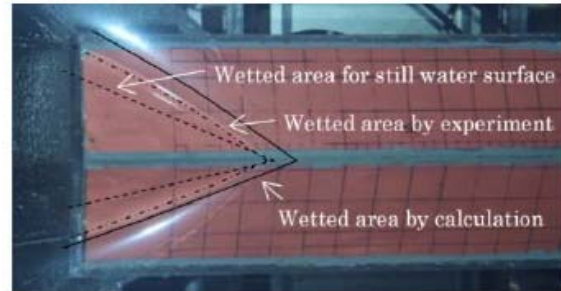
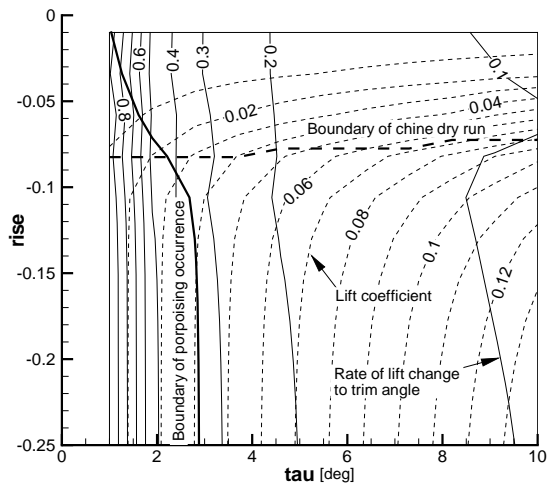


Fig.7 Comparison of wetted surface area

(3)シミュレーションに基づくポーポイジング発生評価法

Fig.8 にそれぞれデッドライズアングルが 15deg の場合の揚力特性の計算結果を示す。図の横軸はトリム角 τ [deg]、縦軸の rise はセンターラインにおける船尾端船底の高さの z 座標を表している。図中の細い波線は揚力係数 C_L の等値線である。 $C_L = L / (0.5\rho b^2 U^2)$ と定義しており、船幅と速度が同じ滑走艇を対象とすれば、揚力係数の値は揚力の値に比例する。計算で得られる浸水面形状から、チャインドライ航走状態となる船尾喫水とトリム角を調べてみると、チャインドライ航走とチェーンウェット航走の境界は Fig.8 の太い波線になる。この線より喫水が浅い状態ではチャインドライ航走となり、喫水が深いとチェーンウェット航走となる。チャインドライ航走となるのはトリム角によらず、船尾での喫水がある値を下回ったときであり、この喫水の閾値はデッドライズアングルに比例して大きくなる。

Fig.8 The relation between the trim variation of the lift coefficient and the critical condition for



porpoising.(Dead rise angle : 15deg)

一方、(3)式のポーポージングの発生限界のラインをFig.8 に図示すると図中の太い実線になる。この線よりもトリム角が大きければポーポージングが発生し、逆に小さければ安定滑走となることを示している。安定滑走の領域はデッドライズアングルの上昇とともに広がる。この傾向は特に喫水の深い所で顕著である。チェーンウェットの状態に限って考えると、限界トリム角はデッドライズアングルに比例して大きくなるが、揚力係数と限界トリム角の明確な関係は見出し難い。そこで揚力係数のトリム角に対する変化率を計算し、ポーポージング発生限界ラインとの関係を調べる。Fig.8 内の細い実線は差分近似による揚力係数の変化率(ΔC_L)の等値線図である $\Delta C_L=0.2$ の等値線上では、トリム角が 1deg 大きくなることによって、揚力係数あるいは揚力そのものが 20% 上昇することを意味する。揚力係数の変化率はトリム角に依存し、喫水に対しては変化が小さい。トリム角の減少に伴って揚力係数の増加率は大きくなり、この傾向は揚力特性が変化するチャインドライの境界をまたいでもあまり変わらない。どのデッドライズアングルの結果を見ても傾向、値ともに概ね同じであり、揚力係数のトリムに対する変化率はデッドライズアングルにあまり依存しないことが分かる。ポーポージング発生限界ラインとの関係を見ると、喫水が深くチェーンウェット航走状態にある場合については、限界ラインは揚力係数の変化率の等値線に沿うことが分かる。チェーンウェット状態で航走する滑走艇は、揚力のトリム角に対する変化率がある値を下回ったところでポーポージングを起こすと仮定すれば、その閾値はデッドライズアングルにほぼ反比例して減少するという結果となっている。デッドライズアングルごとにこの値がわかっているれば、どのような航走条件でポーポージングが発生するかを的確に知ることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 勝井辰博, 片山 徹, 望月健司: チャインドライ航走時の滑走艇の浸水面形状と船底圧力分布の数値解析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第6号, pp.167-168, 2008.
- ② Tokihiro Katsui, Toru Katayama, Kenji Mochizuki : Numerical Investigation on Running Attitude of Planing Craft, Proc. of the 3rd Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies and Advanced Maritime Engineering Conference, pp.501-506, 2008.
- ③ 勝井辰博, 岩 聖也: 滑走艇の揚力変動特性について—航走姿勢に対する揚力変化率とポーポージング発生との関係—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第6号, pp.167-168, 2010.

〔学会発表〕(計3件)

- ① 勝井辰博, 片山 徹, 望月健司: チャインドライ航走時の滑走艇の浸水面形状と船底圧力分布の数値解析, 平成20年日本船舶海洋工学会春季講演会, 2008年5月(長崎).
- ② Tokihiro Katsui, Toru Katayama, Kenji Mochizuki : Numerical Investigation on Running Attitude of Planing Craft, The 3rd Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies and Advanced Maritime Engineering Conference, Oct.2008(Chiba).
- ③ 勝井辰博, 岩 聖也: 滑走艇の揚力変動特性について—航走姿勢に対する揚力変化率とポーポージング発生との関係—, 平成22年日本船舶海洋工学会関西支部秋季講演会, 2010年11月(神戸).

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝井 辰博 (KATSUI TOKIHIRO)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号: 80343416