

小型滑走艇の高速旋回時の動的不安定性

A Dynamic Instability of Small Planing Craft at High Speed Turning

神戸庄二 Shouji Kanbe

●研究開発センター 基盤技術研究室

要旨

A small planing craft that has V-shape hull and hard-chine is good for running in a little rough sea at high speed. But it has been known to have various motion instabilities. From these, we may choose so-called corkscrew motion, which was supposed to include roll oscillations (chine walking) mainly and heave oscillations (porpoising) partly at high speed turning, as one of the most difficult problems to predict its occurrence at design stage and one of the most serious problems for safety. If it happens, the driver is hard to maintain his position due to large lateral acceleration and may lose craft control. This report shows that this turning instability at high speed comes from vertical dynamic instability at heeled attitude at turning, and proposes some criteria that are useful to design a new boat that has enough turning stability. These criteria are obtained from the turning motion simulation program that is newly developed as a design tool, which can judge the degree of turning stability at early design stage. Adding extra keel to hull bottom is a very effective measure for turning stability. Though its effect has been known from experience but it has been confirmed quantitatively by this simulation for the first time.

1 はじめに

小型滑走艇はV型の船型とハードチャインを持ち、高速で走行するのに適しているが、いろいろな動的な不安定性を持つことが知られている。例をあげると、まず直進時に突然大きくヒールしたまま走行したり、トリムが大きく減少して船首を下げたまま回復しないで走行する等の非振動的な不安定性がある。また、直進滑走時にポーポイジングと呼ばれるヒープとピッチの周期的な連成運動がしばしば生じることは良く知られている。これらの不安定性の対策はD.L.Blount and L.T.Codega⁽¹⁾などで論じられているように明らかになっており、ポートメーカーでは設計段階で十二分に検討されている。とは言っても小型滑走艇には他にも動的不安定問題がいろいろ残されている。その中で最も設計段階での予測が困難でかつ安全性に重大な影響を及ぼす問題の一つに、高速旋回時に“corkscrew”と呼ばれる周期的運動が激しく生ずるケースがあげられる。この運動はロールの周期的な運動(chine walking)が支配的であるがピッチの周期的な運動(porpoising)も含む現象と推定されている。この運動はいったん起きると操船者は大きな横Gを受けるため、体を保持することが難しく操船不能になる場合もあり、安全上大きな問題といえる。本研究はこの動的不安定問題が与えられた走行条件で生ずるのか否かを設

計段階で予測し、もしある可能性があるのであればそれを回避する手段を検討する設計ツールを開発する目的で行われた。

2 平面旋回運動の記述

2.1 運動方程式

上述の問題を取り扱うに当たり顕著な現象として大きな横Gが発生することを考慮し、まずは平面旋回運動時の安定性の検討を行うのが適当であると考えた。座標系は図1に示すように船体固定座標系とし原点は重心位置に置く。x軸は船首方向、y軸は右舷水平方向、z軸は鉛直下方向を向くものとする。

(x, y, z) 軸方向の並進速度成分を (u, v, w) とし (x, y, z) 軸方向の角速度成分を (p, q, r) とする。また、 (x, y, z) 軸は慣性主軸であると仮定すると、船体運動は次のように表わせる。

$$m(u + wq - vr) = X \quad (1-1)$$

$$m(v + ur - wp) = Y \quad (1-2)$$

$$m(w + vp - uq) = Z \quad (1-3)$$

$$I_{44} \dot{p} + (I_{66} - I_{55}) qr = L \quad (1-4)$$

$$I_{55} \dot{q} + (I_{44} - I_{66}) rp = M \quad (1-5)$$

$$I_{66} \dot{r} + (I_{55} - I_{44}) pq = N \quad (1-6)$$

小型滑走艇の高速旋回時の動的不安定性

ここで I_{44}, I_{55}, I_{66} は船体慣性モーメントを表わし X, Y, Z は船体に作用する外力, L, M, N は外力のモーメントを表わす。

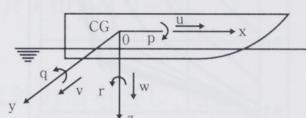


図1 Coordinate system

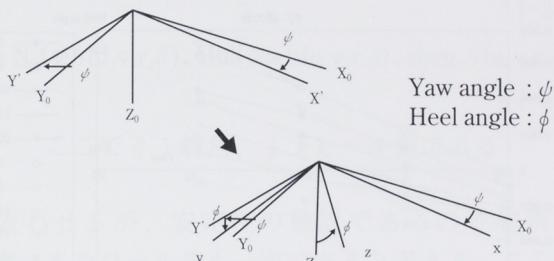


図2 Orientation of body axes to fixed axes

次に空間固定座標系と船体固定座標系の関係を考える。旋回運動であるから pitch 变化は微小であるとして無視すると、

$$p = \dot{\phi} \quad (1-7)$$

$$q = \dot{\psi} \sin \phi \quad (1-8)$$

$$r = \dot{\psi} \cos \phi \quad (1-9)$$

空間固定座標系の原点の速度を固定座標系で表わすと、

$$U = u \cos \phi - v \cos \phi \sin \phi - v \sin \phi \sin \phi \quad (1-10)$$

$$V = u \sin \phi + v \cos \phi \cos \phi - w \sin \phi \cos \phi \quad (1-11)$$

$$W = v \sin \phi + w \cos \phi = 0 \quad (1-12)$$

ここでは旋回運動を考えているので鉛直方向の速度 : W は 0 と考える。結局、未知数は u, v, w, p, q, r の 6 個であり方程式は以下の 6 つの式である。

$$m = (\dot{u} + w q - v r) = X \quad (1-13)$$

$$m = (\dot{v} + u r - w p) = Y \quad (1-14)$$

$$I_{44} \dot{p} = L \quad (\because I_{55} \doteq I_{66}) \quad (1-15)$$

$$I_{66} \dot{r} + (I_{55} - I_{44}) p q = N \quad (1-16)$$

$$w = -v \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \quad (1-17)$$

$$q = r \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \quad (1-18)$$

また ϕ と ψ はそれぞれ式 (1-7) と (1-9) より、

$$\dot{\phi} = p \quad (1-19)$$

$$\dot{\psi} = r \frac{1}{\cos \phi} \quad (1-20)$$

なお、船体の位置は式 (1-10), (1-11) を時間積分することより求められる。

$$X_0 = \int_0^t U dt \quad (1-21)$$

$$Y_0 = \int_0^t V dt \quad (1-22)$$

以上で平水中の旋回運動は完全に記述される。

次に船体に働く外力の内で附加質量 (m_{**}), 附加慣性モーメント (J_{**}) による流体力は参考文献⁽²⁾より、

$$X_A = -m_{11} \dot{u} + m_{22} v \cdot r \quad (1-23)$$

$$Y_A = -m_{22} \dot{v} - m_{11} u \cdot r - m_{22} \alpha_y \dot{r} + m_{22} l_y \dot{p} \quad (1-24)$$

$$L_A = -J_{44} \dot{p} + m_{22} l_y \dot{v} + m_{11} l_x u \cdot r \quad (1-25)$$

$$N_A = -J_{66} \dot{r} - m_{22} \alpha_y \dot{v} \quad (1-26)$$

ここで I_x, I_y はそれぞれ m_{11}, m_{22} の中心の z 座標であり、また α_y は m_{22} の中心 x 座標である。これらの式を式 (1-13), (1-14), (1-15), (1-16) に代入し、 $w \cdot q, w \cdot p, p \cdot q$ を含む項は微小であるとして省くと、

$$(m + m_{11}) \dot{u} - (m + m_{22}) v \cdot r = X_R \quad (1-27)$$

$$(m + m_{22}) \dot{v} + (m + m_{11}) u \cdot r + m_{22} \alpha_y \dot{r} - m_{22} l_y \dot{p} = Y_R \quad (1-28)$$

$$(I_{44} + J_{44}) \dot{p} - m_{22} l_y \dot{v} - m_{11} l_x u \cdot r = L_R \quad (1-29)$$

$$(I_{66} + J_{66}) \dot{r} + m_{22} \alpha_y \dot{v} = N_R \quad (1-30)$$

ここで、右辺は外力項のうち、附加質量項を除いた成分を表わす。この4つの式を適当な初期条件のもとで解くことで船体運動が予測される。また、残りの未知数は式 (1-17) (1-18) より、空間固定座標系で表わした船体の位置や姿勢は式 (1-19) (1-20) (1-21) (1-22) より計算される。右辺の外力項は艇体の重力、浮力、滑走揚力、舵や推進器などの付加物による力および風による力が

小型滑走艇の高速旋回時の動的不安定性

考えられるが、中でも滑走揚力が最も重要である。この滑走艇の船底に作用する力を推定する方法としては Robert F.Smiley⁽³⁾ の2次元のくさび型断面に働く横力の推定法と C.C.Hsu⁽⁴⁾ の揚力面理論を適用した方法がある。もっとも前者はヒールした場合を考慮しておらず、旋回時に大きく内傾する小型滑走艇に適用することは難しい。

図3-1～4はC.C.Hsu⁽⁴⁾による推定法と1/10縮尺模型を使った実験値との比較を示す。実験はヒープとピッチをフリーにし、ロール角とヨウ角をそれぞれ変化させて、横力と横揺れの復原力およびヨウ・モーメントを計測した。船型は小型滑走艇の代表的なものであるストレートVでデッドライズ角は約19度である。なお、各値は艇体固定座標系で表わしている。ロール角が小さいケースでの両モーメントの実験値と計算値の一一致が良くないが小型滑走艇の旋回時のロール角は一般に大きいことを考慮すると、計算値は実用的な領域ではおおよそ許容できる範囲内にあると思われる。

図4は上述の運動方程式を積分し結果得られた23フィートの小型艇の旋回軌跡の例を示している。船首のターンが270度を超えたあたりから計算値との乖離が目立つが（原因として、実験値は自艇の引き波に当たって姿勢が変わること、また旋回中のフルード数が低くなり過ぎて計算による艇のトリム及び抵抗変化の推定精度が落ちることなどがあげられる）、実用上必要と思われる180度までの計算結果は比較的良好な一致を示している。

2.2 旋回運動の安定判別式

2.2.1 Yawing

旋回時の安定性の問題としてまず、針路安定性を考える。艇が高速旋回中になんらかの外乱を受け船首を小さく振った後の運動を考える。式(1-28)、(1-30)を再掲すると、

$$(m + m_{22})\dot{v} + (m + m_{11})u\dot{r} + m_{22}\alpha_y\dot{r} - m_{22}l_y\dot{p} = Y_R \quad (1-28)$$

$$(I_{66} + J_{66})\dot{r} + m_{22}\alpha_y\dot{v} = N_R \quad (1-30)$$

簡素化のために $u = U_s$ とし l_y を含む項は他の項に比べて小さいとすると、

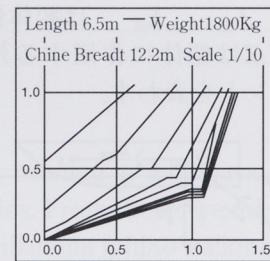


図3-1 Lines

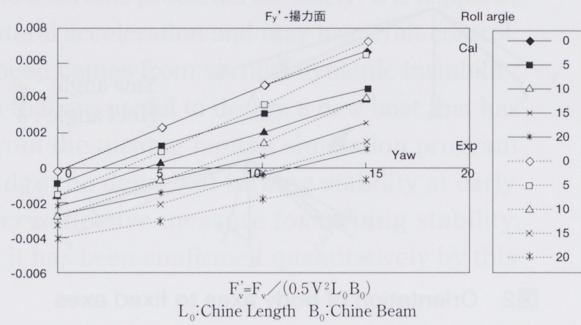


図3-2 Side force

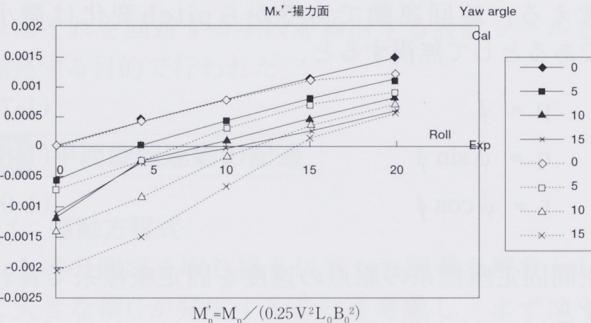


図3-3 Roll moment

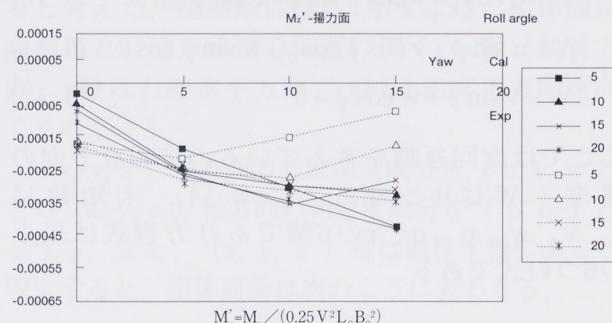


図3-4 Yaw moment

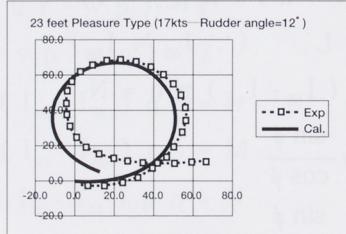


図4 Turning track

$$(m + m_{22}) \dot{v} + (m + m_{11}) U_s r + m_{22} \alpha_y \dot{r} = Y_R \quad (1-31)$$

$$(I_{66} + J_{66}) \dot{r} + m_{22} \alpha_y \dot{v} = N_R \quad (1-32)$$

一方、右辺は外力項を表し、通常、

$$Y_R = Y_R(u, v, r, \delta), \text{ Hull 流体力}(u, v, r, \phi), \text{skeg 力}(u, v, r, \phi) \quad (1-33)$$

$$N_R = N_R(u, v, r, \delta), \text{ Hull 流体力}(u, v, r, \phi), \text{skeg 力}(u, v, r, \phi) \quad (1-34)$$

ここで δ : 舵角、 ϕ : ヒール角である

と表わせるが、安定性の検討であるので舵角は一定、またロール角も一定であると考える。ここで v と r について微小変化を考えて、

$$v = v_s + \Delta v \quad (1-35)$$

$$r = r_s + \Delta r \quad (1-36)$$

と表わすと式 (1-33), (1-34) は、

$$Y_R = Y_v \Delta v + Y_r \Delta r + Y_R(\text{const}) \quad (1-37)$$

$$N_R = N_v \Delta v + N_r \Delta r + N_R(\text{const}) = 0 \quad (1-38)$$

と表現できる。これらを式 (1-31), (1-32) に代入し、遠心力の釣り合いより、

$$(m + m_{11}) U_s r_s = Y_R(\text{const})$$

であることを考慮すると、両式は次のように表わされる。

$$(m + m_{22}) \Delta \dot{v} + (m + m_{11}) U_s \Delta r + m_{22} \alpha_y \Delta \dot{r} = Y_v \Delta v + Y_r \Delta r \quad (1-39)$$

$$(I_{66} + J_{66}) \Delta \dot{r} + m_{22} \alpha_y \Delta \dot{v} = N_v \Delta v + N_r \Delta r \quad (1-40)$$

この両式から、 Δv を消去すると、

$$\begin{aligned} & [(m + m_{22})(I_{66} + J_{66}) - m_{22}^2] \Delta \ddot{r} \\ & + [m_{22} \{ Y_r + N_v - (m + m_{11}) U_s \} - (m + m_{22}) N_r \\ & - (I_{66} + J_{66}) Y_v] \Delta \dot{r} \\ & + [(m + m_{11}) U_s N_v + Y_v N_r - Y_r N_v] \Delta r = 0 \quad (1-41) \end{aligned}$$

ここで $m_{22} \alpha_y$ を m_{22y} と略記している

この式に Routh-Hurwitz の安定判別を適用すると、

$$(m + m_{22})(I_{66} + J_{66}) - m_{22y}^2 > 0 \quad (1-42)$$

$$m_{22y} \{ Y_r + N_v - (m + m_{11}) U_s \} - (m + m_{22}) N_r \\ - (I_{66} + J_{66}) Y_v > 0 \quad (1-43)$$

$$(m + m_{11}) U_s N_v + Y_v N_r - Y_r N_v > 0 \quad (1-44)$$

これらの式が満たされれば、Yawing 角速度は微小外乱を受けた後時間が経つにつれて減少し針路は安定する。式 (1-42) (1-43) の各項のオーダー比較をすると m_{22y} を含む項は他の項に比べて非常に小さく無視できることが分かる。従って、式 (1-42) はほとんどの場合成立する。また、式 (1-43) も左辺の {} 内と m_{22y} , N_r , Y_v がそれぞれ負の値をとることを考えるとやはりほとんどの場合問題なく成立する。以上より問題になるのは式 (1-44) のみである。式 (1-44) を書き直すと、

$$\frac{Y_v \{ Y_r - (m + m_{11}) U_s \}}{Y_r - (m + m_{11}) U_s} \left[\frac{N_r}{Y_r - (m + m_{11}) U_s} - \frac{N_v}{Y_v} \right] > 0 \quad (1-45)$$

-----部はほとんどの場合正の値をとるので == 部を検討すれば良い。== 部はそれぞれモーメントを力で割った形であり、Yaw 減衰力および Sway 減衰力の着力点の位置を表わしていると考えられる⁽⁵⁾。従って、この部分を艇長で割った無次元値を比較することにより、各艇の方向安定性の度合いがわかる。

$$\left(\frac{N_r}{Y_r - (m + m_{11}) U_s} - \frac{N_v}{Y_v} \right) / Lc \quad (1-46)$$

2.2.2 Rolling

次に低速の旋回では問題にならないが、高速で走航中に舵を切った場合に発生する可能性のある “Rolling の不安定性” の問題を考える。式 (1-29) を再掲すると、

$$(I_{44} + J_{44}) p - m_{22} l_y \dot{v} - m_{11} l_x u \cdot r = L_R \quad (1-29)$$

外力項は、

$$\begin{aligned} L_R &= L_R(u, v, r, \delta), \text{ Hull 流体力}(u, v, r, \phi), \text{skeg 力}(u, v, r, \phi) \\ &= L_v v + L_r r + L_p p + L_\phi \phi \\ &\quad \text{減衰力} \quad \text{復原力} \quad (1-47) \end{aligned}$$

ただし $\delta = \delta_s (= \text{const})$, $u = U_s$

小型滑走艇の高速旋回時の動的不安定性

とし、Roll角およびRoll角速度は、

$$\phi = \phi_s + \Delta\phi \quad (1-48)$$

$$p = \Delta p = \Delta\dot{\phi} \quad (1-49)$$

とする。すると、式(1-47)は、

$$L_R = L_v v_s + L_v \Delta v + L_r r_s + L_r \Delta r + L_p \Delta p + L_\phi \Delta \phi_s + L_\phi \Delta \phi \quad (1-50)$$

式(1-29)に代入すると、

$$(I_{44} + J_{44}) \Delta \dot{p} - m_{22} l_y \Delta \dot{v} - m_{11} l_x U_s r_s - m_{11} l_x U_s \Delta r - L_v v_s - L_v \Delta v - L_r r_s - L_r \Delta r - L_p \Delta p - L_\phi \phi_s - L_\phi \Delta \phi = 0 \quad (1-51)$$

定常状態では、

$$-m_{11} l_x U_s r_s - L_v v_s - L_r r_s - L_\phi \phi_s = 0 \quad (1-52)$$

であるから、

$$(I_{44} + J_{44}) \Delta \dot{p} - m_{22} l_y \Delta \dot{v} - m_{11} l_x U_s \Delta r - L_v \Delta v - L_r \Delta r - L_p \Delta p - L_\phi \Delta \phi = 0 \quad (1-53)$$

ここで、簡単のために l_x, l_y を含む項と $L_r \Delta r$ は他の項に比べて小さいとすると、

$$(I_{44} + J_{44}) \Delta \dot{p} - L_p \Delta p - L_\phi \Delta \phi = L_v \Delta v \quad (1-54)$$

この式と式(1-39), (1-40)よりRollingの安定判別式を求められる。 m_{22y} を含む項は小さいのでこれを省くと、

$$(m + m_{22}) \Delta \dot{v} + (m + m_{11}) U_s \Delta r = Y_v \Delta v + Y_r \Delta r \quad (1-55)$$

$$(I_{66} + J_{66}) \Delta \dot{r} = N_v \Delta v + N_r \Delta r \quad (1-56)$$

Δr を消去すると、

$$a \Delta \ddot{v} + b \Delta \dot{v} + c \Delta v = 0 \quad (1-57)$$

$$\text{ただし } a = (m + m_{22})(I_{66} + J_{66})$$

$$b = -[(I_{66} + J_{66})Y_v + (m + m_{22})N_r]$$

(=式(1-43)で m_{22y} を省いた形)

$$c = \{(m + m_{11})U_s - Y_r\} N_v + Y_v N_r (=式(1-44))$$

同様に式(1-54)も書き直すと、

$$L_v v = f(\Delta\dot{\phi}, \Delta\dot{\phi}, \Delta\phi) \quad (1-58)$$

ただし

$$f(\Delta\dot{\phi}, \Delta\dot{\phi}, \Delta\phi) = (I_{44} + J_{44}) \Delta \dot{p} - L_p \Delta p - L_\phi \Delta \phi \quad (1-59)$$

($\because \Delta p = \Delta\dot{\phi}$)

式(1-58)を式(1-57)に代入して Δv を消去すると、

$$a \ddot{v} + b \dot{v} + c v = 0 \quad (1-60)$$

式(1-59)に代入すると、

$$a_0 \Delta \ddot{\phi} + a_1 \Delta \dot{\phi} + a_2 \Delta \dot{\phi} + a_3 \Delta \phi + a_4 \Delta \phi = 0 \quad (1-61)$$

ただし

$$a_0 = a(I_{44} + J_{44})$$

$$a_1 = b(I_{44} + J_{44}) - a L_p$$

$$a_2 = c(I_{44} + J_{44}) - b L_p - a L_\phi \quad (1-62)$$

$$a_3 = -c L_p$$

$$a_4 = -c L_\phi$$

Routh-Hurwitzの安定条件より、各係数は全て正であることより、

$$a_0 = (m + m_{22})(I_{66} + J_{66})(I_{44} + J_{44}) > 0 \quad (\text{自明})$$

$$a_1 = -[(I_{66} + J_{66})Y_v + (m + m_{22})N_r](I_{44} + J_{44})$$

$$-(m + m_{22})(I_{66} + J_{66})L_p > 0 \quad (1-63)$$

$$a_2 = [\{(m + m_{11})U_s - Y_r\} N_v + Y_v N_r] (I_{44} + J_{44})$$

$$+ [(I_{66} + J_{66})Y_v + (m + m_{22})N_r] L_p - (m + m_{22})(I_{66} + J_{66})L_\phi > 0 \quad (1-64)$$

$$a_3 = -[\{(m + m_{11})U_s - Y_r\} N_v + Y_v N_r] L_p$$

$$+ [(I_{66} + J_{66})Y_v + (m + m_{22})N_r] L_\phi > 0 \quad (1-65)$$

$$a_4 = -[\{(m + m_{11})U_s - Y_r\} N_v + Y_v N_r] L_\phi > 0 \quad (1-66)$$

これらの係数の条件は L_p, L_ϕ が負の値であることを考えると、Yawingの安定条件の式(1-43)(1-44)が満たされていれば自動的に満たされることが分かる。(式(1-62)においてa,b,cがすべて正で L_p, L_ϕ が負の値であることより容易に分かる。)

さらに、安定条件は各係数より作る小行列式が全て正であることより、

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (1-67)$$

$$a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2 > 0 \quad (1-68)$$

式(67)を書き直すと、

$$bc(I_{44}+J_{44})^2 - b^2(I_{44}+J_{44})L_p + abL_p^2 + a^2L_pL_\phi > 0 \quad (1-69)$$

この式もやはり、式(1-43)(1-44)が満たされていれば自動的に満たされることが分かる。結局、式(1-43)(1-44)と式(1-68)を満たせばRollingの不安定性は生じないと判定できる。

2.3 旋回運動の安定判別式の適用

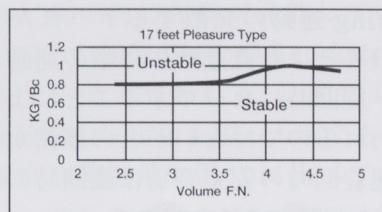
旋回時の安定性に大きく影響する設計パラメータとして速度と重心位置がまずあげられる。(ところで旋回中の安定判別をどの時点で行うのが妥当であるのかは今後良く検討すべき問題であると思われるが、ここでは旋回直前の状態と船首が60度ターンした状態の二つを選んだ。一般に旋回時の艇速は徐々に減じ180度もターンした時点では艇速はかなり落ちている。そこまで安定旋回し、その時点から不安定現象が始まるとは考えにくい。やはり、かなりの速度を保ちかつヒールが大きくなる時点を選ぶのが良いと思われる。この条件を満たすのが実艇の実験結果からおおよそ60度当たりであろうと推定した。) 図5は小型プレジャーボートの代表的な船型を用いて、旋回時における速度に対する重心の最大許容高さを計算した例である。この結果はE.M.Lewandowski⁽⁶⁾が導いた結果と類似しており、妥当な結果と思われる。また、図6は重心の前後位置の安定限界を計算した例である。このように前節までの結果を用いれば、開発段階で新艇の旋回安定性を事前に検討することが出来る。しかしながら、ハードチャインを持つ小型の滑走艇はほとんどの場合、

$$0.25 < KG/Bc < 0.50$$

であり、まず KG/Bc が 0.6 を超える設計をすることはない。また、X_{CG}もほとんどの場合、

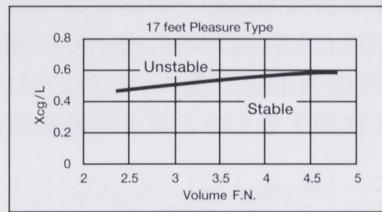
$$0.30 < X_{CG}/L < 0.40$$

であり X_{CG}/L が 0.5 を超えることはまずない。



KG : C.G. Height from keel
Bc:Chine breadth

図5 Predicted Maximum stable KG



Kcg : C.G. distance from transom
L : craft length

図6 Predicted Maximum stable Xcg

従って、前節までの結果はより細身の重心位置が高くなりがちな艇(例:中・大型の業務艇など)の検討には役立つと思われるが、ここで対象としている小型のハードチャイン艇の検討には不充分である。このことは実際に実験で旋回時にロールを中心とした周期的運動が激しく生じたり、いきなりスピンドルしてしまったり等の不安定な挙動を示す小型のハードチャイン艇について実験時の条件に合わせて計算しても、ほとんど安定と判定されてしまうことからも分かる。ただし後節で述べるが、Trim-flap等で強制的に艇のトリムを頭下げにした状態のようなやや特殊な条件下ではこの安定判別法が必要である。(このケースでは重心とハルに作用する流体力の位置が大きくずれるために方向安定性を保つことが出来なくなると推定される。図17を参照)

3 縦運動の記述

前節で述べたようにハードチャインを持つ小型の滑走艇を対象とする場合、平面旋回運動の安定性についてのみ検討したのでは充分であるとは言えない。この追加すべき内容を検討しているときにヒントを与えてくれたのは、図3で示した船底に作用する流体力を計測した模型実験であった。この実験では大きくヒールさせた条件の走行テス

トで pitching 運動の発散するケースが多く見られた。このことより直進時には縦の運動は安定であっても、旋回時にヒールすることにより縦の安定性を失われるのではないかとの推測が得られたので、高速旋回時の安定判別は旋回時の縦運動のそれも追加して調べることにした。

3.1 縦の安定判別式

縦運動は平面旋回運動との連成効果は少ないとして、上下揺れと縦揺れの二自由度の運動を独立して取り扱う。座標系は図7に示すように静水中で艇と等速で移動するものとする。運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \theta \end{bmatrix} = 0 \quad (2-1)$$

ここで A_{jk} : 広義の付加質量

B_{jk} : 広義の減衰力係数

C_{jk} : 広義の復原力係数

(広義と言うのはForceとMomentを含むから)

上式の付加質量項と減衰力項は Ordinary Strip Methodにより求められる⁽⁵⁾。ただし、2次元断面のこれらの値は図7に示すようにヒールした状態のそれであり Frank の Close-fit 法⁽⁷⁾より計算される。復原力項は浮力と滑走揚力によるものであり、後者は前節で用いた文献⁽⁴⁾による方法より数値計算で求められる。また、池田等⁽⁸⁾によると上下揺れ減衰力項 : B_{33} と上下揺れによる縦揺れ連成減衰力項 : B_{53} は Strip 法によるポテンシャル理論に基づく成分だけでは不充分で、揚力による成分を考慮する必要がある。(文献⁽⁸⁾には揚力による横揺れ減衰力項 : B_{44} もポテンシャル成分項より支配的であると報告されている。従って、前節の式(1-47)の L_p にこの揚力成分による横揺れ減衰力項を加える。)

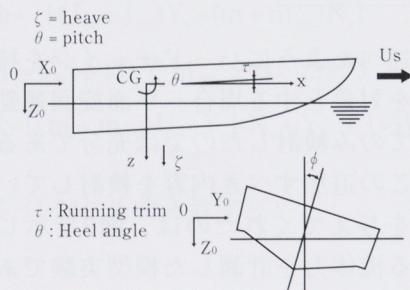


図7 Coordinate system for vertical motion

この揚力による減衰力項は、揚力による復原力項を C'_{**} と表わすと以下のように表わされる。

$$B'_{33} = \frac{1}{U_s} C'_{35} \quad (2-2)$$

$$B'_{53} = \frac{1}{U_s} C'_{55} \quad (2-3)$$

式(2-1)で表された縦の運動の安定判別はこの式をラプラス変換して特性方程式を求める⁽⁶⁾、

$$\Delta S = a_0 S^4 + a_1 S^3 + a_2 S^2 + a_3 S + a_4 \quad (2-4)$$

ここで

$$a_0 = A_{33} A_{55} - A_{35} A_{53}$$

$$a_1 = A_{33} B_{55} + A_{55} B_{33} - A_{35} B_{53} - A_{53} B_{35}$$

$$a_2 = A_{33} C_{55} + A_{55} C_{33} + B_{33} B_{55} - A_{35} C_{53} - A_{53} C_{35} - B_{35} B_{53}$$

$$a_3 = B_{33} C_{55} + B_{55} C_{33} - B_{35} C_{53} - B_{53} C_{35} \quad (2-5)$$

$$a_4 = C_{33} C_{55} - C_{35} C_{53}$$

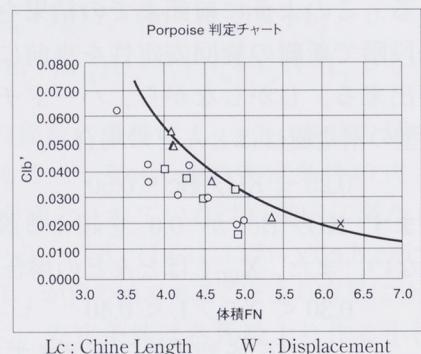
Routh-Hurwitz の安定判別条件より、

$$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 > 0 \quad (2-6)$$

$$\left| \frac{a_1 a_3}{a_0 a_2} \right| > 0 \quad (2-7)$$

$$\left| \frac{a_1 a_3}{a_0 a_2 a_4} \right| > 0 \quad (2-8)$$

この判別式(2-6), (2-7), (2-8)が妥当であるか否かを確認するために直進航走時の縦判定、すなわちポーポイジングの発生の有無を検討した。図8はその結果を示す。計算した艇はいずれも 10~35 フィートの小型滑走艇である。図中の実線は実艇の実験の結果から導き出した境界線を表わす。判定結果は実験値と良く一致しており、上述の式は実用上問題無いと思われる。



Lc : Chine Length
Bc : Chine Breadth
Us : Ship speed

$$C'_{1b} = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho U_s^2 B_c L_c}$$

図8 Porpoising stability

4 判別式の適用例

表1に旋回中の縦及び横の安定判別を計算した結果を示す。計算した例は一番上の23フィートの艇を除いていずれも実験時に旋回の不安定挙動を示した実績のある小型滑走艇である。

表1 Turning stability

Model	Us(Kts)	F.N.	Weight(Kg)	Cal.	Exp.
23 Pleasure	23.0	1.46	1462	○ ○	
31 Pleasure	29.0	1.58	3985	× ×	
27 Sport	46.0	2.74	3220	× ×	
17 Pleasure	27.6	2.03	700	× ×	
21 Sport	41.4	2.67	1800	× ×	
27 Pleasure	32.9	1.91	3910	× ×	
32 Pleasure	35.0	1.89	4460	× ×	

図9は旋回時の安定性について計算した例を、ポーポイジングの判定図に載せてみた例である。図中には上記の不安定性を示す艇について、速度を落として安定化した計算例も載せてある。図8に示したポーポイジングの判定例ほど明確な分布にはなっていない。これはこの図が重心高さ（またはヒール復原力）を考慮していないためと思われる。しかしながら全体的にはポーポイジングし易い艇は旋回時も不安定になり易い傾向を示していることが分かる。

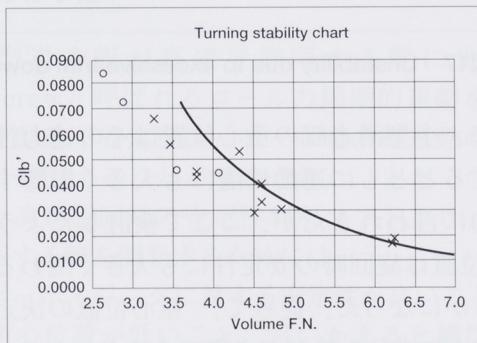


図9 Turning stability

図10は27フィート艇が全速で旋回に入った場合の計算例であり旋回時の不安定性を示している。横軸に時間をとりヒール角（図中：FAI）、横流れ角（PSAIOB）トリム角（TAU）、艇速（US,VS）および舵角（ANGRD）の変化が示されている。最大舵角は10度、転舵速度は2秒で最大舵角の約90%に達する設定である。旋回に入り内傾斜角が最大に達するころから徐々に縦の周期的な運動が生じ、

それに伴いRoll角の振動が発散していく様子が分かる。（この運動がいわゆるcorkscrew motionを再現していると思われる。）図11は速度を落として旋回時の安定化を図った例である。速度が低いために内傾斜角は図10に比べて大幅に少なくなっていることが分かる。図12は最大舵角を10度から2度へ落として安定化を図った例である。図13は転舵速度を落とした例である。この計算例では安定判別の結果は不安定となるが図10と比べると内傾斜角は小さく、またトリムの変動も少なくなっており激しく振動することなく旋回できる可能性を示している。

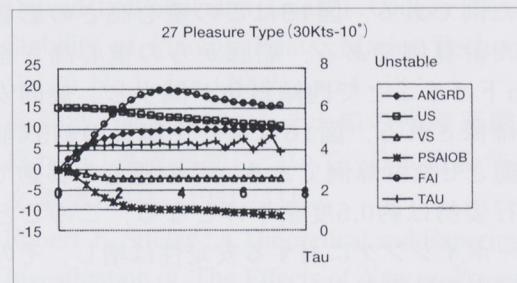


図10 Example Of Unstable turning

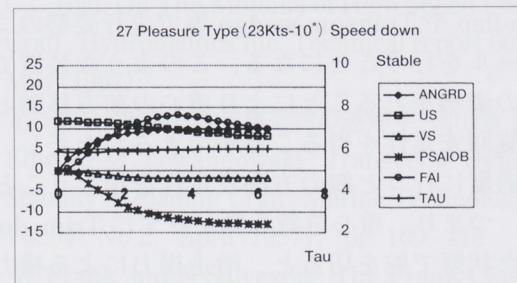


図11 Stabilization by Speed down

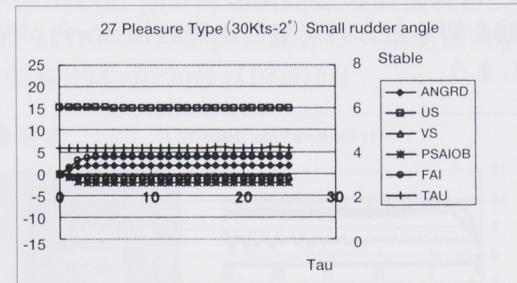


図12 Stabilization by Reducing rudder angle

小型滑走艇の高速旋回時の動的不安定性

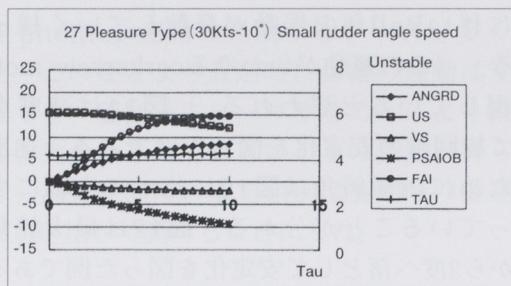


図13 Stabilization by Reducing rudder angle speed

つぎに重心位置が旋回安定性に与える影響を検討する。図14は重心が他の一般的な艇に比べて高く設定された17フィート艇の旋回不安定性を示した例である。図15はこの重心高さの影響を調べた計算例である。船底からの重心高さを約30cm下げることで内傾斜角が減少し、旋回安定性は確保される。図16は重心を艇長の約3%前方へ移動させた計算例である。この重心の移動で艇の走行姿勢は約0.5度頭下げとなる。このことによりボーポイジングに対する安定性は増し、その結果旋回安定性も得られることになる。しかしながら、重心の移動は大幅な設計変更を伴わざるを得なく実際の問題としては難しいと言える。通常はTrim-flapやTransom-wedge等で走行姿勢のコントロールを行うことになる。このような装置で頭下げの姿勢をとることにより重心の前方移動と同様に旋回安定性を得ることができる。ただし、これを過度に行うと艇の方向安定性を損なうことになる。つまり、重心位置を動かさずにTrim downさせた状態で舵を切ると、滑走揚力による横力の作用点が通常より前方で作用し、艇の保針性が失われてしまう。図17はそのような例を示している。Trim-flapにより約1.5度Trim downした状態で舵を切ると方向安定性が失われYaw角が発散してしまう。

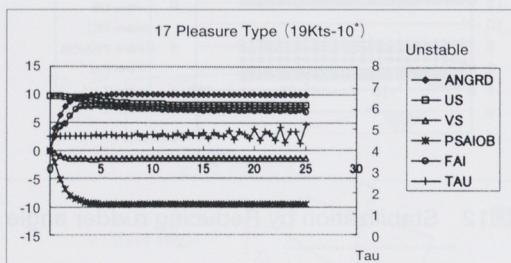


図14 Example of Unstable turning (2)

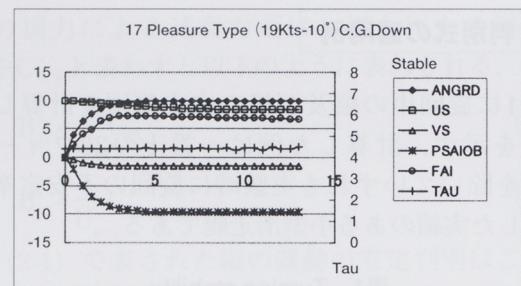


図15 Stabilization by C.G.shift to downward

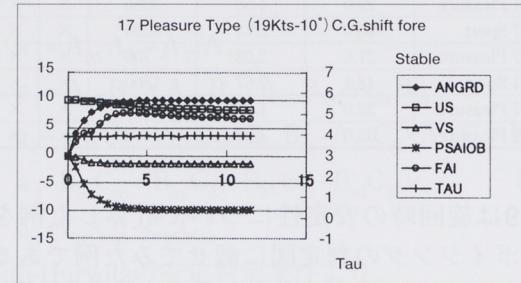


図16 Stabilization by C.G.shift to forward

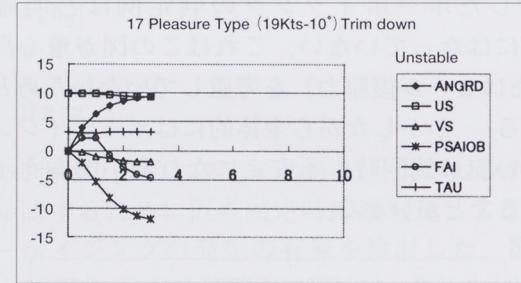


図17 Unstability due to excessive trim down

従来、小型滑走艇の重心位置はその速力性能を左右するとともに運動性能にも大きく影響すると経験的に言われきたが、ここで検討したように、重心位置は旋回時の安定性にも大きく関わることが明らかになった。従って、重心位置の決定は今まで以上に充分な検討が必要であると言える。

以上の方針は船型を変更するものではなかったが旋回安定性を確保するために従来から行われ、その効果が確認されている方法にキールのつまみ出しありまたは付加キールの取りつけという対策がある。船底のやや後方部分のキールを図18に示すように飛び出させるものである。高速旋回中に暴れる艇にこのキールを取り付けると船速はやや低下するものの旋回時の挙動は安定したものになる。

図19はこの付加キール(4m×0.2m)を取りつけた

例を計算してみた結果を示している。付加キール無しの図10に比べて内傾斜角は大幅に減少しトリム角の周期的変動も非常に小さくなっている。また、計算では考慮されていないが、斜航時の付加キール後流によるプロペラ効率の悪化により、実艇の旋回中の速度はより低下しその結果旋回時の挙動はより安定したものになると推定される。

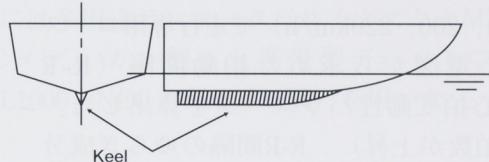


図18 Added keel

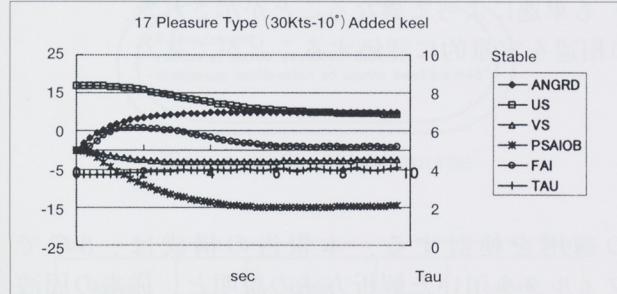


図19 Stabilization by Added keel

5 おわりに

小型滑走艇が高速で旋回する際に生ずるcorkscrewと呼ばれるロールの周期的運動を主体とした動的不安定性は、ヒール時の縦運動の不安定性に起因することが示唆された。また、今回開発した高速旋回時の安定性判別ソフトにより、安定に旋回する艇を開発するためには、

- (1) ポーポイジングに対する安定性が高いこと
- (2) 重心位置が低いこと、言いかえると横揺れの復原力が大きいこと
- (3) 旋回時の速度が遅いこと
- (4) 転舵速度が遅いこと
- (5) 付加キールを取りつけること

等が有効であることが分かった。特に(5)の付加キールは従来から経験的にその有効性が謳われてきたが、シミュレーション計算でもその有効性を確認できた。キールの追加は前にも述べたように旋回時の速度を落とす効果と横揺れの減衰力の増大による効果も期待できることより、旋回安定性

の確保の目的には最も適した手段と言える。しかしながら、直進走航時の最大速力性能の悪化をもたらすのも確かであることであり、その寸法や形状の決定には開発段階で十二分に検討することが必要であると思われる。

なお、小型滑走艇にはここで検討した旋回時のロールを主体にした激しい周期的な運動のほかにも様々な不安定な挙動がある。高速旋回中に外傾斜して真横に飛んでしまうケースなどは安全上大きな問題である。今後、機会があればこのような不安定現象の解明と対策にも取り組みたい。

■参考文献

- (1) Donald L. Blount and Louis T. Codega : Dynamic Stability of Planing Boats, Marine Technology Vol.29 No.1, Jan.(1992), pp.4 - 12
- (2) 孫景浩, 他 : 高速コンテナ船の操縦運動と横揺れとの連成挙動について, 日本造船学会論文集第150号, (1981) 11月
- (3) Robert F. Smiley : A Theoretical and Experimental Investigation of The Effects of Yaw on Pressures, Forces and Moments during Seaplane Landings and Planing, NACA Technical note 2817, Nov. (1952)
- (4) C.C.Hsu: On The Motions of High Speed Planing Craft, Hydronautics Inc. Technical report 603 - 1, May(1967)
- (5) 元良誠三: 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂 P.253
- (6) Edward M. Lewandowski : Transverse Dynamic Stability of Planing Craft, Marine Technology Vol.34 No.2, April(1997), pp. 109 - 118
- (7) W.Frank and N.Salvesen : The Frank Close-fit Ship motion Computer Program, NSRDC Report. 3289, June (1970)
- (8) 池田良穂, 他 : 高速滑走艇の横揺れおよび上下揺れ減衰力の揚力成分の一推定法, 関西造船協会誌 第229号, (1998) 3月

●著者



神戸庄二