小型全没式水中翼船の運動性能について

正員 寺尾 裕*

A study on the simulation of the motion of personal full-submerged hydrofoil craft

by Yutaka Terao, *Member*

Summary

A new energy utilization project developed by Tokai University was started in 1991. It was ordered to develop high-speed one-man water racer fully using solar power. In 1994, a new type watercraft was launched, that was full-submerged hydrofoil craft with 480W solar power. Her dynamical performance was tested during sea trials and improved year by year. This paper discusses the new maneuvering method of the hydrofoil craft with two struts and a tandem hydrofoil system. Her motion's control system was quite simple. Without any automatic control, roll motion stabilized by the driver's weight shift and steering like bicycle or motor cycle. This paper proposes a new equation of motion to describe her turning motion. The results of the numerical analysis show, which concerned the stability of the lateral motions and yaw-roll-sway coupled turning motions.

1. 緒 言

東海大学海洋学部では自然エネルギー利用のためのプロジェクトとしてソーラーボートの開発を 1991 年より開始した。これは小型 1 人乗りのレーサーを対象としたものである。また全没式水中翼船ソーラーボートの開発を 1994 年よりおこない、現在二艇の水中翼艇を所有している。いずれも船長 5 m 以下で、出力 480W のソーラーパネルと 12V 5AH 4 個の鉛蓄電池をもち、DC500W のモータ 1 つを使用、プロペラ推進で翼走するものである。前後に完全没水式水中翼を装着し、1 時間平均 7-8Kts 程度の走行性能を有する。

その艇のうち、かもめ 50 二世は、この形式の艇として 94 年にはじめて浮上走行に成功した。本艇には、ドライバの体重移動を積極的に利用する、独特の操船シス

テムを採用した。そのため、高い運動性能を発揮する。また同時に優れた長距離性能をもち、我が国のソーラーボート大会において何度も優秀な成績をおさめている。この運動性能を明らかにするために新しい運動方程式を考え、数値解析を行い、その性能を明らかにする。

2. 艇の概要

艇の重量は、前後脚下端に取り付けられた、逆 T 字 2 枚のエンテ式完全没水水中翼で支える。操縦は右手で T 字型操縦桿を前後、左右回転させ、前脚を動かすことで行う。

操縦桿を手前に引くと、リンクで結ばれた前脚が手前に引かれ、前翼の迎角が増加する。このために前翼揚力が増加、船首が上昇し、それとともに船体中央部近傍に取り付けられた主翼の迎角が増加する。主翼迎角増加により、増加し

東海大学海洋学部マリンデザイン工学科

原稿受理 平成 10 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 10 年 11 月 12 日, 13 日

た揚力で船体は上昇する。逆に操縦桿を前方に押せば、船首が下がり、揚力が低下し船体が沈下する。

Fig. 1 KAMOME50-2

T型操縦桿を右に回せば、リンクで結ばれた前脚は右に回り、右舵となり、船首は右に回頭することになる。操縦系はこのような簡単なシステムで成り立っている。

艇は二翼全没水型の中翼船であり、フラップ等の装置を有さず、横方向安定性を有さない。そのため、左右の横バランスはドライバーが左右に積極的に体重を移動することにより制御する。これは、自転車やバイク等の二輪車が左右バランスを体重移動で取りながら走行することに似ているが、二輪車には存在するジャイロ効果が期待できないために、安定走行させるには技量を必要とする。また艇の排水量は 1225N(125kgf)であり、そのうち約半分がドライバーの体重となる。

Table 1 Principal dimensions

Hull Material	CFRP
Motor	500W(DC)
Loa	4800mm
Bmax	1330mm
Displacement	1225N(125kgf)
Driver Weight	588N(60Kgf)
Fore Foil Area	0.055m ²
Fore Foil Aspect Ratio	7.65
Aft Foil Area (Endurance)	0.22m ²
Aft Foil Aspect Ratio	9.55

Fig.2 Configuration of the hydrofoils
(Endurance and sprint foil)

3. 水中翼の干渉

本艇は全没式水中翼艇であり、前後に二枚の翼を有する。そのため、翼は前後翼の干渉および水面との干渉を受ける。前後間の翼干渉には渦格子法を用い計算を行い、後者には Wadlin¹⁾ 式による揚力減少係数を考え、検討を行った。

Fig. 3 Schematic view of the vortex lattice model

計算には、いずれも実海域試験で使用した翼を平均幅で一定として単純化して用いた。翼は水面鏡像の影響を含んだ形で、Fig.3 のように前後翼とも 5×5 のメッシュに分割し、合計 50 元の連立方程式を解いた。点線で示されるのが自由渦であり、実線格子に組まれたのが翼の束縛渦である。定式化および計算の詳細は省く。以下計算には DosV パソコンと Delphi3.1 を使用した。

小翼、および極小翼は高速走行時に使用する。そのため、最低浮上速度での検討を行う必要が生じた。両 Fig.4、5 中の C_L は実際に使用する最低浮上速度における翼加重領域 (12Kt 相当) での C_L である。

前翼は 1 種類のみ使用した。ただし、前翼の深さを変え、後ろに置かれた翼深さは一定として計算を行ったのが Fig.4 である。Fig.5 は前翼深さを固定し、後翼深さを変更したものである。両方の結果より、長距離レースで使用する翼 (大翼) の取り付け位置は翼干渉を受けにくい位置におかれている事がわかる。しかし、極小翼は設計が悪く、取り付け位置によっては揚力が発生しにくいという計算結果となった。

ただし、前翼の後流としての自由渦流出方向は、流入方向に沿って流すとして計算してあるため、後流渦変形による影響は考えていないことに注意しなければならない。ここで計算に用いた少翼および極小翼は、200m の距離でのスプリントレース用に開発した翼 (Fig.2 参照) であり、翼面積を大翼に比べて小さくしたものである。そのため高速性能は満たすが、ドライバーにとり、左右のバランスが取りにくいことになった。実際には少翼 (翼面積: 大翼の 1/2 程度) のものをレースには使用することになった。

Fig.4 Aft Foils lift coefficients depend on the fore foil depth

Fig.5 Aft Foils lift coefficients depend on the aft foil depth

4. 縦運動特性の解析

縦運動方程式をたてて、縦運動を考える。ここでは前翼を操作したとき、運動が収束するかどうかをシミュレートしてみた。計算に使用する翼は大翼とする。これは Fig.4, Fig.5 に示されるように前翼との干渉効果が互いの深関係の干渉感度が小さく、特性が把握しやすいと考えたためである。計算では、艇は前進速度を変えず、横安定を保ち運動をすると考える。また翼の深さによる揚力変動を Wadlin 式で考慮することとし、翼列干渉効果を取りいれない計算を行う。また直接 Runge-Kutta 法による数値解を求め、縦運動を計算し運動の傾向を把握する。縦運動方程式に用いた船体固定座標系は Fig. 6 とする。

Fig. 6 Coordinate system of the vertical motions and dynamical model

4.1 縦運動方程式

縦安定性を考えるために Fig.6 に示すアナロジーを用いる。翼は迎角により揚力を発生するから、強制力を発生すると考える。また翼には翼減衰がある。さらに翼が水面に近くなれば、水面効果により翼揚力は減少する。これはあたかも縦運動系に復元力のように作用する。しかし、この効果は Wadlin 式 (Fig.7) より、深さ方向の非線形性をもつので非線形バネが系に取り付けられ、下向きに作用していると考えられる。そのためこの系は2自由度の非線形振動系をなすことになる。

Lift reduction coefficients AR=10

$$K = \frac{1}{1 + \frac{\frac{A}{4\sqrt{\frac{1}{4} + 4\left(\frac{h}{c}\right)^2}} \cdot \frac{A^2}{4} + \frac{1}{4\left(\frac{h}{c}\right)^2} + \frac{1}{4\left(\frac{h}{c}\right)^2} + \frac{1}{4\left(\frac{h}{c}\right)^2} + \frac{1}{4\left(\frac{h}{c}\right)^2}}{\frac{2}{A}(\sqrt{1+A^2}+1)}}$$

Wadlin's Formula

A : Aspect Ratio, h : foil depth, c : foil cord.

Fig.7 Lift reduction coefficient

人が関与する操縦系では、振動系を制御できなければならない。しかし、系の固有周期が、人の応答速度を越えるものであれば追従できないし、運動に発散傾向があるものであれば操縦は不可能となる。そのため、人制御の遅れ速度 0.2-0.45 秒以上の運動周期が確保できるか、また運動が短時間で収束するかを主に検討することにする。しかし、現実にはこの艇は操縦は難しいものの、1週間程度のドライバーのトレーニングで安定走行が可能となっているので、人が乗りこなせる限界内にあるものと考えられる。

今 α を前翼の迎角増加量とする。このとき、本艇の前脚は前方に α の角度で振り出すように動作する。通常の水中航船はフラップや、翼迎角を直接変化させるが、本船は他の操縦の場合と異なる。そのため、方程式も異なった形で展開する。

前進速度を U とし、前翼への流入角を α_f 、後翼への流入角を α_a とし、角度が微小であるとして線形化する。前翼揚力 L_f 、後翼揚力 L_a 、前翼のアスペクト比 AR_f 、後翼のアスペクト比 AR_a として

$$\alpha_f = \vartheta + \alpha + (\dot{Z} - (l_f + s_f \alpha) \dot{\vartheta}) / U \quad (1)$$

$$\alpha_a = \vartheta + (\dot{Z} + l_a \dot{\vartheta}) / U \quad (2)$$

$$L_f = \frac{1}{2} \rho A_f U^2 C_L(\alpha_f, AR_f) \quad (3)$$

$$L_a = \frac{1}{2} \rho A_a U^2 C_L(\alpha_a, AR_a) \quad (4)$$

と書けよう。これに水深による揚力変化を取り入れ、翼の3次元修正を行い、運動を数値積分で直接解くこととする。

4.2 縦運動の計算結果

あらかじめ釣り合いを計算しておき、その所から急に前翼角2度増加するように操縦したときの運動を計算した。翼は3次元修正および Wadlin 式による翼深さの揚力修正を行い、前後翼深さ変化とともに順次運動計算を進める。計算ステップは0.02秒毎とした。

翼が水面に近くなれば、水面への翼による造波により、全体の抵抗が急激に上昇し前進速度低下が引き起こされると考えられるが、本計算では艇の水平方向速度は一定として計算を行った。計算結果の一例を Fig.8 に横軸実時間(秒)とし以下の様に示すこととする。

1. 全揚力の増加分を、今までの定常状態の全揚力(排水量分)を基準にして示す。
2. 発生したモーメントは、船体に作用するモーメント増加分を今までの前翼で支えていたモーメントを基準にして示す。
3. 船体の Heave 量の変化は、重心から主翼までの距離を基準とし、それがどのくらい変化したかをしめすことと

し、上昇量%を正として表す。

4. Pitch は船首下げ正として角度として表す。

これより、艇の位置保持(Heave Pitch 制御)には微妙な制御が必要であることがわかる。また、縦方向には強い安定性と運動収束性を持つこともわかる。いくつかの翼寸法についても検討したが、運動傾向はほとんど変わらないことがわかった。

運動周期は1.5-2秒以上となり操縦上の問題はないと考えられる。

Fig.8 Results of the calculated vertical motion ($\alpha = 2\text{deg.}$)

また逆操作を行えば、艇は沈下し直ちに着水する。着水すれば艇体は大きな浮力による復元力を発生することになり、沈下は止まる。そのため、下降動作では翼揚力に関係する大きな振動現象はありえず、縦操縦の問題とはならないので取り上げない。

5. 操縦運動方程式と旋回特性

揚力面に作用する動的揚力を利用し、浮上する船舶として完全没水式水中翼船を考える。一方の対極として排水量型の船舶を考え、旋回運動の考察を行っておく。

完全没水式水中翼船は、船と航空機との中間の挙動をし、6自由度の運動を行うが上下運動を自由表面で拘束される。そのため走行中の艇の深さ方向の変化は、ほぼ水中翼の翼弦長のオーダーとなる。一方、排水量高速船の旋回運動は大きな横傾斜を伴う。その例として高速コンテナ船では低いGMの影響によりその現象が顕著である。だが排水量型の船舶では、復元力は浮力によるものであり、重力方向と一致し復元力-重力間での横力発生はありえない。

完全没水式水中翼艇では、翼揚力を船体垂直上方に発生させる。そのため横傾斜により、重力成分との合力による横力を発生する。この横力をキャンセルさせるためにはバンクターンを行う必要がある。

Fig.9 Schematic view of the hydrodynamic side force generated by the turning motion

本艇はドライバーの体重移動により、大きな横傾斜モーメントを発生できる機能を有する。そのため、この点に着目して旋回運動の変化を解析する。

旋回性能を検討するために、船体の深さ方向の変化は考えない操縦方程式を考える。このようにして横傾斜時の揚力を確保しておく。ただし、運動は大傾斜横傾斜角まで取り入れたものとして取り扱う。運動方程式は参考文献²⁾を拡張した形で考え検討する。

船体前後方向の重心移動は考えず、横方向のみの重心移動を考えて解析を進める。完全没式の水中翼船の運動方程式を取り扱うとし、水中部は翼と脚部よりなると考え、その他の付加物影響を除く。そのため流体力学的な取り扱い、線形翼理論で取り扱えると考え定式化を進める。

5.1 旋回運動方程式

水中部の x 方向の付加質量 m_x は微小として取り除き、 W は船体の重量、 w をドライバーの重量、 s_y をドライバーの y 方向移動量とすると

$$(I_z + J_z)\ddot{\psi} + m_y l_z^y \dot{\psi} = N_0 \quad (5)$$

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} - m_x l_z^x \dot{\psi} - s_y w \cos\phi + C\dot{\phi} = L_0 \quad (6)$$

$$m\ddot{u} - (m + m_y)\dot{v}r = X_0 \quad (7)$$

$$(m + m_y)\dot{v} + m\dot{u}r + m_y l_z^y \dot{\psi} - m_y l_z^x \ddot{\phi} - (W + w)\sin\phi = Y_0 \quad (8)$$

ただし l_{ij} : ($i, j \in x, y, z$) は j 方向の付加質量の、i 軸着点までの距離とする。C は Appendix 参照。右辺 X_0 、 Y_0 、 N_0 、 L_0 は線形流体力項とする。

下線部が新たに付け加えた項である。また J_x は体重移動により変化させるが、移動位置に集中加重としてドライバーの体重が作用していると考えとりあつかう。

この座標は、運動開始時に航空工学でいう機体座標系と慣性座標系（重心座標系）を一致させて用いている。その後重心の移動を行う。これにより慣性座標系は変化するが、機体座標系を用い運動を記述したことに相当する。

Fig.10 Hull coordinate system

本艇のように高速旋回する水中翼艇では、前後脚への平均流入角に、以下のように高速旋回による修正を行い計算を行う。

$$\varepsilon_f = \beta + \delta - l_f \dot{\psi} / U + l_z^y \dot{\phi} / U \quad (9)$$

$$\varepsilon_a = \beta + l_a \dot{\psi} / U + l_z^y \dot{\phi} / U \quad (10)$$

ただし ε_f 、 ε_a はそれぞれ前脚、後脚への流入角、 β は流入角、 δ は前脚の舵角であり、 l_f 、 $l_a > 0$ であり、重心から脚の着点までのレバーとする。

5.2 旋回軌跡の計算結果

いま舵角操舵を滑らかに行うとし

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 \sin(t\pi/2) & (0 \leq t \leq 1) \\ \delta_0 & (t > 1) \end{cases} \quad (11)$$

とあたえ、またモーメント変化は s_y を体重移動距離として

$$M = wg \cdot s_y(t) \quad (t \geq 0) \quad (14)$$

とする。これは実際の艇の操船で行っている動作に近いものを採用したことになる。さらに、計算仮定としてピッチングおよびヨーイングの慣動半徑を

$$\kappa_{yy} = 0.25 L_{pp}$$

$$\kappa_{zz} = 0.25 L_{pp}$$

とする。

船速 8Kt で計算を行う。この艇速は本艇の1時間耐久走行時の速力であり、操船が難しい。そのためドライバーの体重移動量を制御変数と考え、旋回時の代表的旋回パターンを再現してみた。なぜなら高速旋回可能な、新しい操縦方式をもつ艇に対する操船方法に興味があったからである。

本艇ではドライバーの操船訓練を長時間繰り返し行う必要があった。学生ドライバーは卒業により入れ替わる。必然的に、何人かの学生新人ドライバーを訓練する必要性がでてきた。訓練を観察していると、操船にも個人差が存在し、上達する速度も個々に異なる。訓練を繰り返すうちに、操船方法にも異なる段階があることに気付いた。本艇は普通では左右バランスを取ることも難しい。その中で本艇のマーク旋回時間は、高々 10 秒以内に終了するが、熟練度に応じて旋回航跡も異なるし、定常走行軌跡も異なる。それをまとめてみると

- 1) 訓練初期段階：傾斜角度が大きくなると、それを押さえるように体重移動を行う。そのため、きれいな旋回ができない。また体重移動は大きく艇の航跡は安定しない。
- 2) 熟練段階：体重移動量は少なく、運動の先読みを行い体重移動を行う。運動の起こり鼻を押さえる体重移動動作を行う。航跡はスムーズであり、旋回も安定している。

1) は傾斜角 ϕ を検知して ϕ を制御するあるいは角度制御となり、制御が遅れがちとなる。2) はなめらかな角度制御に角速度制御を組み合わせる操船制御を行っていると考えられる。熟練段階に応じて異なる制御を行っていると考えられる。

ただし、人間には横傾斜角 ϕ 、および角速度 p を検知する分解能があまり高くなく不感帯が存在する。また動作をおこすにも遅れが存在する。操船操作量も操船訓練時からの観察では、初中級者はかなり荒い操作しかしていないように見える。熟練者になれば最小の運動を行い、または反

作用を積極的に利用して艇と一体となった操船を行う。

これらを定式化して、操船航跡シミュレータに組み入れ、運動を計算させ、1) 2) の仮定で航跡がどのように変化するかを知るために以下の例をシミュレートしてみた。

Case 0：無制御のもの。

Case 1：初心者者を仮定する。横傾斜角度制御とし、ある角度を越えたときに急激な体重移動動作をするもの。これは不感帯と、Bang-Bang 制御を組み合わせたものとなる。

$$|\phi| > \phi_{\varepsilon} ; s_y = -\phi \cdot s_{y1}$$

Case2：中級者を仮定し、角度に対応して体重移動を行うもの。

$$s_y = -\phi \cdot s_{y2}$$

Case3：角度、角速度制御とする。これは上級者の運動制御モードとなるであろう。

$s_y = k_p p + k_d \phi ; k_p = -2.0 ; k_d = -0.8$ とした。ただし艇の幅より $|s_y| \leq 0.3(\text{m})$ とする。

旋回航跡図のメッシュ間隔は 5m として、Fig.11 より Fig.16 までに旋回計算時間 8 秒の結果を示す。計算時間間隔は 0.02 秒で行い、表示点の間隔は 0.1 秒間隔である。

はじめにドライバーの体重 588N (60Kgf) をそれぞれ、-0.2, -0.1, 0.0, 0.1, 0.2 m まで時刻 0 の時に急激に移動させ、舵中央とし、その後の航跡図を描く。

Fig.11 および Fig.12, 13 の航跡図は、体重移動量左舷側より右舷側へ、初期体重移動の結果の航跡を円の小さいものから大きいものへと順に示す。進行方向は右である。

Case 0 の計算結果は、初期体重移動がない場合のみ計算でき、その他はすぐに発散してしまう。Fig.11 に示すように体重移動を初期値として与えれば、航跡は舵角を取らずとも変針させることが可能である。ただし、Fig.12, Fig.13 は傾斜角に体重移動制御を与える事になり、航跡を安定させることができる。

Fig.11 Trajectory after initial weight shift (Case1)

Fig.12 Trajectory after initial weight shift (Case2)

Fig.13 Trajectory after initial weight shift (Case3)

Fig.14. Turing trajectory

(Case1: with initial weight shift, $\delta = 5\text{deg.}$)

Fig.15 Turning trajectory (Case2)

Fig.16 Turning trajectory (Case3)

Fig.15,16,17 に舵角を取った時の航跡を示す。Fig.15 には 5 度の右舵と初期体重移動を含めた計算を示す。上より $-0.2, -0.1, 0\text{m}$ の初期体重移動を行ってある。あらかじめ体重移動をしていない場合、どうにか旋回に持ち込めるが、途中で計算を中止した。これは後脚への流入角が 15 度を越えた時点で、翼失速が発生しているとして、旋回運動計算を中止したためである。

Fig.15 は角度を検出し横傾斜を押さえる制御を加える P 制御として舵角を 5,10,15,20,25,30 度まで変化させて航跡を計算させたものである。簡単な比例制御で運動を制御できることは興味深い。また当然のことではあるが、舵角を大きく取るに従い、旋回軌跡が小さくなる。

Fig.16 は角度、角速度を検出して PD 制御を行い、軌跡を計算した。舵角を 5,10,15,20,25,30 度まで変化させ計算を行った。いずれも問題なく、旋回軌跡を計算することができた。

これらより制御方法により最小半径の旋回軌跡をたどる可能性がわかる。PD 制御を行えば、最大舵角で旋回を小さく行うことができ、また旋回速度も Fig.15 の P 制御の計算結果よりはよいことがわかる。

これらの旋回軌跡は、実海域で定量的計測に成功していない。しかし、旋回走行試験において、ビデオにより一艇身以内で旋回できることを確かめてある。

5.3 走行時の流体力と横傾斜運動

この艇の運動制御には体重移動および操舵という 2 つの横運動制御モードが存在する。これについて考察と検討を加えておく。以下グラフを、横軸を時間軸は 10 倍の数値として表示する。計算は 8 秒まで行っている。

特に操舵なしでも初期の体重移動により軌跡の変化の大きい Fig.11 の場合について流体力および運動について調べておく。これは舵角 0 度で、時間 0 のとき体重を右に掛

けた大きな傾斜モーメントを艇に与えていたことに相当する。

すると船体は加重により右傾斜しはじめ、Fig.18 のように x 軸回り正の回転を開始する。x 軸回りの回転運動により、脚に作用する流体力は y 軸方向流速 v を増加する方向に働き、前後の脚迎角を減少させ負となるまで変化する。それにより、両脚には y 軸負の方向への大きな流体力が作用する。

Fig.18 には前後脚への流入角の変化を示す。図中◆が前脚、■が後脚への流入角を示す。

前脚も運動の影響より迎角は負となる。前脚は、重心からの脚取り付け位置は後脚より遙かに前にあり、レバーが長いこと、船首旋回影響により、後脚より迎角は大きくならない。また脚の翼面積も後翼より小さい。その結果前脚の揚力発生は後脚より小さく、回頭モーメントの発生も小さい。そのため、右傾斜により艇の船首は左へと回頭する傾向を生じる。

Case 1 の Bang-Bang 角度制御を行うとする。Fig.19 に示すように初期モーメントの影響により、以後の運動はただちに傾斜角が大きな値をもつので、人による体重移動制御を掛けて Fig.20 のように左回転となるように体重を左に移動する。これにより、左回りに x 軸回りの運動がはじまり、 v が減少し始める。 v が減ると前述の場合と同じ現象符号が逆転し、右に旋回を開始する流体力を発生する。このように制御が悪ければ、あとはこの繰り返しとなる。その途中で前進速力は低下しつづけることがわかる。

航跡ははじめの 1 揺れによる影響が大きく、船首方位は負へ、左へ向かうと考えられる。

これは、傾斜により傾いた方向と逆へ回頭するという、ちょうど小型ヨットの運動の場合と同じ運動傾向を示す性質があることを示す。このように体重移動による横傾斜運動は様々な流体力を発生させ、航跡変化をを引き起こし、縦船にとりかなり面倒なものとなることがわかる。

Fig.17 Motion velocities

Fig.18 Fore and aft strut attack angle

Fig.19 Heading and roll angle

Fig.20 Time history of the weight shift control

このような体重移動制御のパターンは初心者が多い。大角度に傾斜するまで体の反応が遅れ、艇の姿勢制御に失敗し、艇を安定走行させることができない。

ついで初心者を想定した操縦モデル(Case1)の、旋回時の流体力について考察を進める。右舵5度をなめらかに取り、初期値としてドライバーの体重は中心位置に置く。

Fig.21 に旋回運動時の艇に作用する力とモーメント、Fig.22 に運動、Fig.23 に船首方位角と横傾斜角、Fig.24 に前後脚への流入角、Fig.25 に舵角度と体重移動距離を示す。

右5度の小さな舵角により発生する左傾斜回転運動が、大きな傾斜角に発達するまで不感帯により見逃され、体重移動動作が遅れる。その後、大傾斜に反応し、体重移動制御を行い、艇に可能な最大限の動作を行う。このような荒い制御を行ってはいない運動が安定せず、その結果流体力も左右に振れ回る。不感帯にもよるが、制御に取りかかる時間遅れから発生する大きな横傾斜を大きな体重移動で押さえ込もうとする形になり、満足に定常旋回することさえできない。また、前進速度は旋回に移ることにより大きく減速してしまう。

次に、艇に体重移動による簡単な角度制御を与え計算を進めた。Case 2 の制御に相当する結果を示したものが、Fig.26 から Fig.30 である。Fig.26 に旋回運動時の艇に作用する力とモーメント、Fig.27 に運動、Fig.28 に船首方位角と横傾斜角、Fig.29 に前後脚への流入角、Fig.30 に舵角度と体重移動距離を示す。初期の舵による傾斜モーメントを押さえ込む、簡単な体重移動という傾斜角制御で、旋回運動が可能となることがわかる。また流体力も Case 1 とくらべて遙かに小さく滑らかに変化する。それに従い、運動も全て滑らかに推移している。

今度は計算最大舵角 30 度までを取った場合を考える。Case 2 および Case 3 のような横傾斜制御を与えた場合の旋回時流体力について検討する。Case 2 の角度制御を加え、旋回運動を行った計算結果を Fig.31 から Fig.35 に示す。Case 3 の角度、角速度制御を与えた場合の計算結果を Fig.36 から Fig.40 に示す。Fig.31,36 に旋回運動時の艇に作用する力とモーメント、Fig.32,37 に運動、Fig.33,38 に船首方位角と横傾斜角、Fig.34,39 に前後脚への流入角、Fig.35,40 に舵角度と体重移動距離を対比して示す。制御の差により艇に働く流体力が大きく異なることがわかる。

どちらも、初期の舵による傾斜モーメントを押さえ込み、その後も体重移動という傾斜角制御を行っているが、旋回運動が異なる。Fig.32、Fig.37 より、速力変化は全て滑らかに移項していることもわかる。Case 3 では前進速度成分に増速する傾向があらわれるが、Case 2 では減速となる。この差が Fig.33、Fig.34 における Heading angle の発達の差となって現れ、Fig.16、Fig.17 の旋回径の差となってくる。Fig.33、Fig.38 では見にくいですが、横傾斜も Case 2 は外傾斜となり、Case 3 では内傾斜となる。また Fig.34、Fig.39 に示すように脚流入角でも性質が異なっていることが興味深い。さらに、Case 3 で流体流入角は8秒経過後、ほぼ失速限界に近く、大きな流体力を発生していることもわかる。

Fig.21 Hydrodynamic forces and moments
(Case 1: $\delta = 5$ deg.)

Fig.22 Turning velocities and angular velocities
(Case 1: $\delta = 5$ deg.)

Fig.23 Heading angle and roll angle
(Case 1: $\delta = 5$ deg.)

Fig.24 Fore and aft strut attack angle
(Case 1: $\delta = 5$ deg.)

Fig.25 Time history of the rudder angle and weight shift operation (Case 1: $\delta = 5$ deg.)

Fig.26 Hydrodynamic forces and moments
(Case 2: $\delta = 5$ deg.)

Fig.27 Turning velocities and angular velocities
(Case 2: $\delta = 5$ deg.)

Fig.28 Heading angle and roll angle
(Case 2: $\delta = 5$ deg.)

Fig.29 Fore and aft strut attack angle
(Case 2: $\delta = 5$ deg.)

Fig.30 Time history of the rudder angle and weight shift operation (Case 2: $\delta = 5$ deg.)

Fig.31 Hydrodynamic forces and moments
(Case 2: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.36 Hydrodynamic forces and moments
(Case 3: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.32 Turning velocities and angular velocities
(Case 2: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.37 Turning velocities and angular velocities
(Case 3: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.33 Heading angle and roll angle
(Case 2: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.38 Heading angle and roll angle
(Case 3: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.34 Fore and aft strut attack angle
(Case 2: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.39 Fore and aft strut attack angle
(Case 3: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.35 Time history of the rudder angle and weight shift
operation (Case 2: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.40 Time history of the rudder angle and weight shift
operation (Case 3: $\delta = 30\text{deg.}$)

Fig.41 Rudder and roll angle vs. weight shift control.

P DおよびP制御における制御量および横傾斜角の差を詳しく見るために Fig.33, Fig.35, Fig.38, Fig.40 から計算値を抜き出して重ねて Fig.41 に表示する。■▲はP D制御の場合の制御量と横傾斜を表し、□△はP制御の場合の制御量と横傾斜に相当する。同時に舵角も示す。

△と□は角度制御であるから、時間軸に対称となるのは当然である。制御方法による制御量の差は、計算終了時点の8秒後に最大で、0.4mにも達する。

Fig.17 からP D制御の時に、4秒でほぼ180度回頭を行うことがわかり、Fig.41 より旋回は右に内傾斜をしていることがわかる。ドライバーはその傾斜を押さえるために左舷に移動している。それに反して、P制御では、同時刻に艇は左に外傾斜しており、ドライバーはその傾斜を押さえ込むために右舷に居ることになる。また横傾斜の最大値の絶対値は、P制御はP D制御時の1/2より小さい。

ドライバーの位置は、いずれも傾斜を押さえる方向に移動している。実海域試験では外傾斜旋回の例は、旋回に失敗する時に多く見られる。旋回時の体重移動動作に無理があるのではないかと考えられる。

また、本艇ではドライバーの体重は艇の重量とほぼ同じオーダーとなる。そのためこの操作量は本艇の運動にとり、大きな比重を占めることがわかる。体重移動を用いる小型レジャー艇も増えてきている現状では、艇の運動性能解析にも、このような体重移動操作による運動変化の考察も必要になると思われる。

本艇では前進速度8Ktでも、舵と体重移動を併用すれば早い回頭運動が可能である。だが何らかの傾斜角の制御を行わなければ艇は走行さえできず、実船では旋回に至る前に着水して速度を失ってしまう。レース中での操船は、マークからマークへの回航コースを走り速度を競う。そのため、本艇であれば、4秒以下で180度ターンを終了し、次のコースへ向け艇の姿勢を制御する必要があることになる。実際の旋回では、旋回運動による速力変化による翼揚力変化とそれに伴う高さ、姿勢変化が複雑に絡み合う。そのうえ、マーク回航では他艇との駆け引きまでも含む。そのため単なる傾斜姿勢制御以上の、より高度な技量を要求する

ものとなろう。

本艇は使用条件より、脚が短い設計となっている。そのため一般の水中翼艇と比較しても脚長が短い。水中翼船は、本来飛行機よりも高度変化の許容度のはるかに少ないが、本艇のような形式の水中翼船を、よくドライバーが制御できるものだと思う。

逆に1週間程度のトレーニングで乗りこなしてしまう学生ドライバー諸君の制御学習能力の高さに驚かされる。

6. 結 論

1994年より新しい操船方式の1人乗り水中翼ソーラーボート艇の設計を行い、建造し走行データを積み上げ、速力性能向上に努めてきた。⁶⁾ この艇は比較的小出力のソーラーバッテリーと蓄電池という電力源を組み合わせ、速力を追求するレース艇として設計したものである。今回その理論的な運動性能解析を初めて行い、艇の縦と横方向の運動性能解析を試みた。

船体に作用する流体力は、翼に作用する線形流体力のみと考え評価を行った。その上で運動方程式を数値的に解析した。艇の運動解析は、縦方向と旋回時の挙動について別々におこなった。

旋回方程式には横方向の4自由度運動方程式とし、今までのものに単純な横方向の体重移動を織り込んだ新たな項を付け加え、直接数値解法を行った。また、人の横方向の安定操作を簡単なモデルを用い計算した。その結果

- (1) 完全没水式水中翼艇に特有な縦方向の運動性能を解析し、艇の縦運動の収束性を示した。
- (2) 体重横移動制御による旋回性能の一部を明らかにできた。

これらは、いずれも実海域で人力制御の2脚完全没水式水中翼艇の実海域走行試験結果と一致する傾向を示し、また本艇は人によって操船できているという現実を追認することになった。

だがここまでの解析では旋回運動に起因する横運動には4自由度までしか考慮していない。よって前後方向までの体重移動を考え、直接6自由度の方程式を解き、より精密な流体力モデルと運動方程式を構築し、運動および作用する流体力を明らかにしてゆくことが今後の課題である。

終わりに、艇の建造、整備と運営、数々の実海域試験を共にしてくれた方々、およびかもめ50のドライバーを努めてくれた学生諸君に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kenneth L. Wadlin, Charles L. Shuford, Jr., John R. McGehee: Report 1232: "A theoretical and experimental investigation of the lift and drag characters of hydrofoils at subcritical and supercritical speed." 1952, NACA RM L52D23a.
- 2) 孫 景浩, 野本 謙作: 高速コンテナ船の操縦運動と横揺れの錬成挙動について, 日本造船学会論文集, vol. 150, Dec., 1981, 232-244pp
- 3) 東 昭: 航空工学(II) 裳華房
- 4) 加藤 寛一郎, 大屋 昭男, 柄沢 研治: 航空機力学入門 東京大学出版会
- 5) 谷 初蔵: Manual steering を加えた船の針路安定性について, 造船協会論文集, vol. 109, 1961, 195-203pp.
- 6) 寺尾 裕: 人力およびソーラーボートの開発について, 日本造船学会誌 812 号, 1997.02, 84-89pp

Appendix

1. 2脚式水中翼船の直進安定性について

飛行機の迎角に対する静的釣り合いを模して考える。⁴⁾ このとき, 水中翼の前後脚を飛行機の主翼, 尾翼に置き換えて考えた事になる。一般の航空機の迎角静安定条件は

$$C_{m\alpha} < 0 \quad (13)$$

が条件となる。これは翼迎角増に対し, 逆方向のいわゆるピッチング復元モーメントが発生することに相当する。飛行機の迎角 α に相当するのは, 本艇の場合, 脚への流入角 β である。直進安定性を検討するには, z 軸回りのモーメントで考えればよいから, $C_{n\beta}$ を前翼のモーメント C_{na} を後翼のそれぞれの分担モーメントと考えれば

$$C_{n\beta} = (C_{nf} - C_{na})\beta < 0 \quad (14)$$

となればよい。

艇の船首揺れモーメント C_n について考える。脚は一つの対称翼とみなし, 翼の線形理論で考えれば発生するモーメントも流入角 β の1次関数で表される。本艇でも脚には対称翼型を採用した。そのため, この条件が成り立つのは

$$\begin{aligned} L_a &: \text{重心と後脚流力作用中心までの距離} \\ L_f &: \text{重心と前脚流力作用中心までの距離} \\ S_a &: \text{後脚面積} \quad S_f: \text{前脚面積として} \\ L_a \cdot S_a &> L_f \cdot S_f \end{aligned} \quad (15)$$

Fig.42 Fore and aft strut location

2. Roll Damping について^{3,4)}

本艇では, 重心回りの Roll Damping モーメントを考える必要がある。航空機の場合には, 翼と重心までの縦方向距離が大きくないので単純に取り扱われる様である。ここでは翼, 重心間距離が大きいのので新たに考え直しておく。

$$w = r_f \phi' \sin \zeta \quad (18)$$

は垂直見掛け流入速度の変化であり,

$$\varepsilon = w/U \quad (19)$$

は見掛け迎角の変化である。 r_f は回転軸より系散点までの距離である。

これらにより, 翼全体の Attack Angle の変化により発生するモーメントは, 翼のスパン方向の微小部分に発生する見掛け揚力を積分して計算する。スパンを $2s$ とすれば

Fig.43 Schematic view of the roll motion induced the roll damping moment.

$$\begin{aligned} M &= \int_{-s}^s \frac{1}{2} \rho c(s) U^2 C_{La} (w/U) r_f \sin \zeta ds \\ &= \frac{1}{2} \rho U C_{La} \phi' \int_{-s}^s c(s) (r_f \sin \zeta)^2 ds \\ &= \rho U C_{La} \dot{\phi} c_0 s \left(\frac{1}{3} s^2 + Y_G \right) \end{aligned} \quad (18)$$

ただし $c(s)=C_0$ とし一定幅翼とした場合であり, Y_G は重心の移動距離。つまり

$$C = \rho U C_{La} c_0 s \left(\frac{1}{3} s^2 + Y_G \right) \quad (19)$$