

水中翼船の6自由度の走行シミュレーション

6-degree-of-freedom Motion Simulation of Hydrofoil

宇野 雅彦 (Masahiko Uno)

指導：増山 豊教授

Key Words: Solar boat, Hydrofoil, Excel VBA, 6 D.O.F, Motion simulation

1. 緒言

水中翼船とは水中翼を用い、船体を水面から浮上させて走行する船のことである。この利点として、造波抵抗を軽減することができるからである。

船をより少ないエネルギーで効率よく走行させるとき、もしくは、より速度を必要とする場合において、周りの流体から受ける抵抗が重要な要素を占める。その全抵抗の中で波を作るためにエネルギーを損失する造波抵抗は大きな割合を占める。そのため、船体を水面に接触させないことにより、造波抵抗を小さくし、高速・高効率な走行を可能にしている。同じ速度で走行するにしても、抵抗が少なければ、それだけ燃料の使用量を少なくできるので、環境にも貢献できる。

本論文ではその水中翼船を取り上げ、6自由度でのシミュレーションプログラムを作成する。プログラムを作成するにあたっては、Excel と、Excel 中の Visual Basic Editor を用いる。そして、その作成したシミュレーションプログラムを評価・検討する。

Excel を用いる理由として、広く一般的に普及しているソフトであり、ほとんどのパソコンにインストールされているため、特別なものを必要とせず、パソコンさえあれば使用することができるためである。また、最も普及している表計算ソフトであるといえるので、多くの人が使い方を知っていて、扱いやすいという利点がある。

この水中翼船の6自由度シミュレーションを用いることによって、一つの要素が、例えば水中翼面積など、が水中翼船の全体にどのような影響を与えるかということを知ることができ、船の性能の評価を容易に行うことができる。そして、水中翼船の向上に役立てることができる。

今回、われわれが用いた水中翼船「Golden Eagle」は全没型のカナード配置の船である。動力はソーラーパネル、太陽の光である。この船は「ソーラー&人力ボートレース全日本選手権大会」にあわせて作られている。Fig.1 に「Golden Eagle」の全体図を示す。

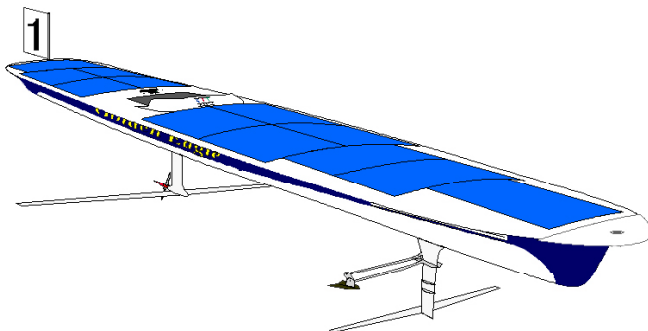


Fig.1 Golden Eagle

2. 船体の概要

大会の規定に合わせ、走行速度を競うスプリントレース、スラロームレース、走行距離を競う耐久レースの計3種類の仕様を用意した。艇体は同一のものを使用したが、各レースに適した仕様で出場できるよう水中翼、ストラット、駆動部等が変更可能である。艇体の諸元を Table 1 に、概要図を Fig.2 に示す。

動力はソーラーパネルとバッテリーからの電力で、使用することのできる電力と、それにともなう速度は、耐久仕様が 400~500W で 4.0~4.5m/s、スラローム仕様が 800~1600W で 5.5~6.5m/s、スプリント仕様が 2200~2700W で 8.5~10.0m/s である。

Table 1 Specification of solar boat

Race category	Endurance	Slalom	Sprint
Body length [mm]	5990		
Body width [mm]	890		
Body height [mm]	410		
Fore wing Type	NACA0012		
F wing Span [mm]	920	700	
F wing Chord [mm]	45	35	
F wing Area [m ²]	0.0414	0.0245	
F wing Aspect Ratio	20.44	20	
Aft wing Type	DF101		
A wing Span [mm]	1830	1650	1500
A wing Chord [mm]	77.5	78.835	65
A wing Area [m ²]	0.142	0.13	0.0975
A wing Aspect Ratio	23.58	20.94	23.077
F strat Span [mm]	340		
F strat Chord [mm]	55		
A strat Span [mm]	390	345	370
A strat Chord [mm]	90	80	95
Mass with crew [kg]	120	120	120

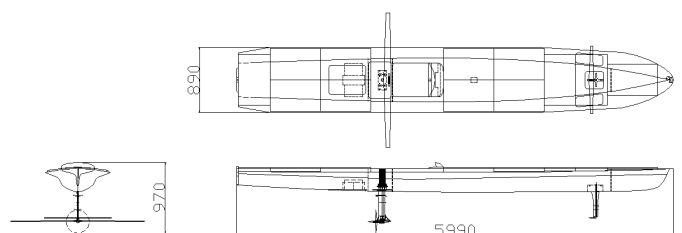


Fig.2 The outline of the Golden Eagle

3. 走行シミュレーション

3.1. 座標系について

このシミュレーションは、水中翼船の走行状態をシミュレーションするものである。浮上後の状態だけでなく、浮上途中の計算も考慮に含ませてある。6つの自由度について計算を行っている。それは、進行方向に対する水平方向成分と、進行方向に対して直角の水平方向成分と、垂直方向成分と、ピッチングモーメント成分と、ローリングモーメント成分と、ヨーイングモーメント成分である。Fig.3 に6自由度の方向を示す。

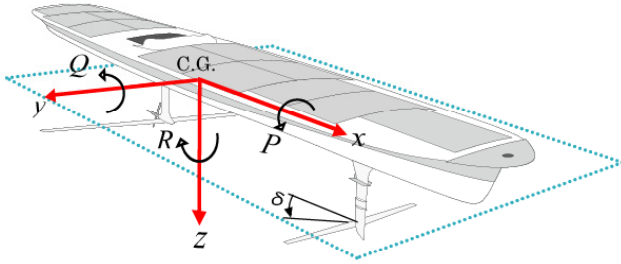


Fig.3 6-dgree-of-freedom

3.2. 計算について

プログラムを作成するにあたっては、Excel と、Excel の中の Visual Basic Editor を用いる。マクロを使用しているので、マクロを使えるようにする必要がある。4次ルンゲクッタ法で計算を行っている。

この走行シミュレーションでは、x 方向、y 方向、z 方向、y 軸まわりのピッチングモーメント Q、x 軸まわりのローリングモーメント P、z 軸まわりのヨーイングモーメント R の6自由度で計算を行った。これらの位置、速度、加速度が時間ごとにどのように変化していくのかを計算によって求めている。

計算をはじめるとにあたって、いくつか入力しなければならない値がある。それは船体の質量や水中翼の寸法などその船の諸元である。それと、計算の時間間隔や終了時間など計算についての数値も必要である。それから、時間ごとに入力する必要のある値として、プロペラ回転数と舵の角度も必要になる。最後に、これは船体が変わらなければ変更の必要はないが、浮力などの数値が必要である。

船体に大きく影響を与えるものは次にあげるものであり、これらについて力などを計算する必要がある。主翼、前翼、主ストラット、前ストラット、プロペラ、乗員の重心位置、船体の浮力。

3.3. Excel について

このシミュレーションの特徴として、Excel を用いたことによる扱いやすさがある。そのため、水中翼の翼幅や翼弦長、取付迎角などの項目を簡単に Excel シート上で入力することができる。また、結果をまとめるにあたって、Excel の機能を用いて、簡単に表やグラフなどにすることができる。また、それぞれの値をさらに計算するときにも便利である。

Fig.4 と Fig.5 にその Excel シートの入力部分と出力部分の一部を示す。Fig.4 は主に水中翼についての値を入力する部分である。Fig.5 の「発走」のボタンを押すことにより結果を表示することができる。

	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1									
2	流体密度	rho=	1025	kg/m ³	引力加速度	g=	9.807	m/s ²	
3	乗員質量	yoimmass=	60	kg					
4	艇体質量	kaimass=	60	kg					
5	全機重心位	lhg=	0.42	m	前翼までの	lrwt=	3.25	m (主翼前縁より)	
6	主翼				前翼				
7	翼幅	wspan=	1.83	m	翼幅	tspan=	0.92	m	
8	平均空力翼	wchord=	0.0775	m	平均空力翼	tchord=	0.045	m	
9	取付角	wsetang=	6	deg	取付付け角	tsetang=	0	deg (一番低いとき)	
10	零揚力角	wzerolift=	-2.5	deg	零揚力角	tzerolift=	0	deg	
11	テーパ比	wtaper=	0.55		テーパ比	ttaper=	0.5		
12	アスペクト比	waspect=	23.612903		アスペクト比	taspect=	20.444444		
13	翼面積	waree=	0.141825	m ²	翼面積	taree=	0.0414	m ²	
14	上反角	w dihedral=	3	deg	上反角	t dihedral=	2	deg	
15			0.0523599	rad			0.0349068	rad	
16									
17	モーメント係	womac=	0						
18	空力中心	hrwc=	0.25	比翼弦長					
19					主翼面積/全翼面積		77.40483	%	
20	主翼翼厚比	tyokuatuh=	0.11		前翼翼厚比	tyokuatuh=	0.12		
21									

Fig.4 Input sheet

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	初期高さ	y0=	0	m					
4	初速度	vel0=	0.0001	m/s					
5	初期角度	theta0=	0	deg					
6	時間間隔	dt=	0.05	s					
7	終了時間	tend=	20	s					
8									
9									
10									
11									
12									
13	時刻	x	x速度	x加速度	z	z速度	z加速度	ピッチ角	ロール角
14	t	x	vx	ax	z	vz	az	theta	dtheta
15	0	0	0.0001	-2.23E-06	0	0	-5.1E-09		
16	0.05	4.997E-06	9.989E-05	0.0002211	-1.44E-06	-0.000115	-0.006507	0.0016802	0.063196
17	0.1	1.027E-05	0.0001111	0.0009005	-2.14E-05	-0.000808	-0.02182	0.0056373	0.086412
18	0.15	1.695E-05	0.0001567	0.0020532	-9.59E-05	-0.002287	-0.036304	0.0093878	0.0556963
19	0.2	2.734E-05	0.0002605	0.0036824	-0.000259	-0.00427	-0.041033	0.010622	-0.008569
20	0.25	4.495E-05	0.0004458	0.0057702	-0.000522	-0.006174	-0.033446	0.0086812	-0.064497
21	0.3	7.443E-05	0.0007354	0.0083058	-0.000866	-0.007492	-0.019006	0.0049671	-0.075957
22	0.35	0.0001216	0.0011515	0.0112773	-0.001259	-0.008125	-0.00762	0.0020352	-0.035245
23	0.4	0.0001932	0.0017155	0.014673	-0.001673	-0.008445	-0.00727	0.0019628	0.0320245
24	0.45	0.0002972	0.0024406	0.0185399	-0.002108	-0.009066	-0.010001	0.0005022	0.0383607

Fig.5 Output sheet

3.4. 運動方程式

以下に船体の動きを表す運動方程式をあらわす。6つの自由度の動きを計算するので、6つの方程式で表すことができる。

$$m(\dot{U} + QW - RV) = X$$

$$m(\dot{V} + RU - PW) = Y$$

$$m(\dot{W} + PV - QU) = Z$$

$$I_{xx} \dot{P} - I_{xz} (\dot{R} + PQ) - QR (I_{yy} - I_{zz}) = K$$

$$I_{yy} \dot{Q} - I_{zx} (R^2 - P^2) - RP(I_{zz} - I_{xx}) = M$$

$$I_{zz} \dot{R} - I_{zx} (\dot{P} - QR) - PQ(I_{xx} - I_{yy}) = N$$

m : 全質量 (船体+乗員)

I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} : x,y,z 軸まわりの慣性モーメント

I_{zx} : z-x に関する船体慣性乗積

右辺の X,Y,Z,K,M,Nそれぞれは水中翼やストラットなどの抵抗, プロペラによる推進力, 重力の成分からなる値である.

U,W,V はそれぞれ x,y,z 軸方向の速度である. P,Q,R はそれぞれ x,y,z 軸まわりの角速度である.

4. 結果

4.1. 浮上途中の状態について

Fig.6 に浮上途中のシミュレーション結果と実験結果の比較を示す. 条件は, 耐久仕様であり, プロペラ回転数は 480[rpm]である. 実験結果は AMCS(Active Motion Control System)制御のときに用いる船体の前方と後方に取り付けたハイトセンサーにより測定している. このときの実験ではピッチ角の制御には滑走板を用いている. X 軸に時間をとり, y 軸にはピッチ角と浮上高さを表している.

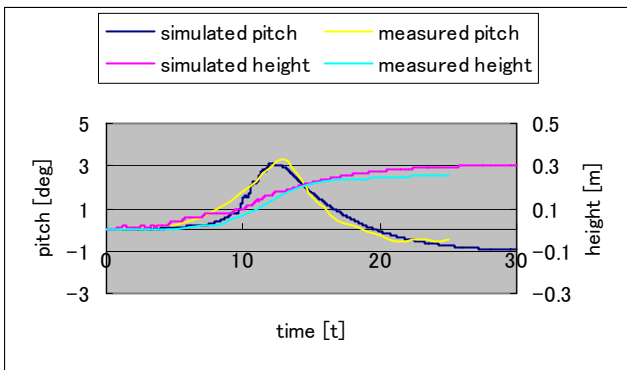


Fig.6 time to pitch and height

シミュレーションの値と実験値を比べるとよく一致していることがわかる. このことから, 浮力の計算や船体の抵抗が, 実際の数値に近い値を算出できていると考えられる.

細かく見ていくと, 浮上する前の部分でシミュレーションの値が凸凹しているのを見て取ることができる. 浮力の計算は, ピッチ角と浮上高さの二つから決まる値を使っている. これを表にしたものを用い, 近似をして値を計算している. この部分で, もう少し滑らかに近似を行うことができれば, 改善できるとであろうと考える.

4.2. 旋回状態について

Fig.7 に入力した舵の角度を示す. Fig.8 に船の航跡を示す. Fig.9 に船体のロール角を示す.

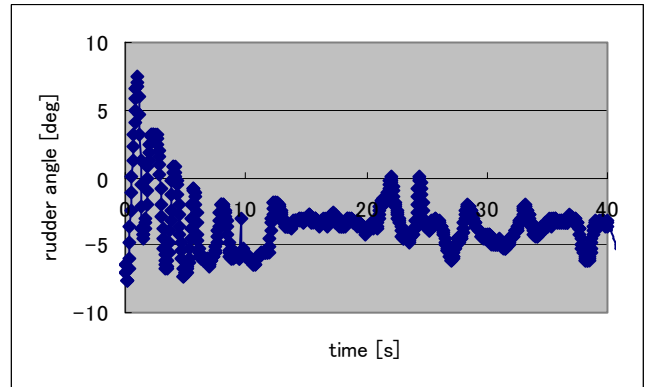


Fig.7 Input Date

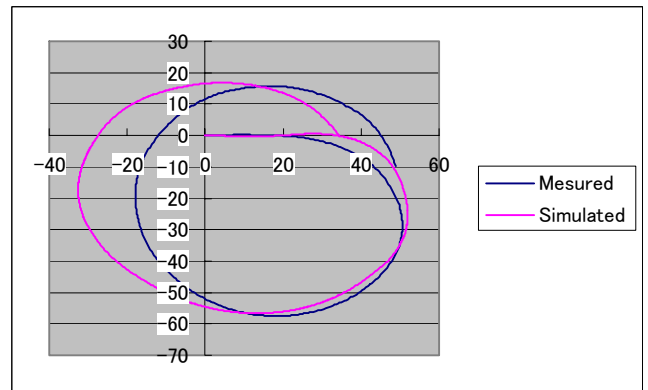


Fig.8 Trajectory

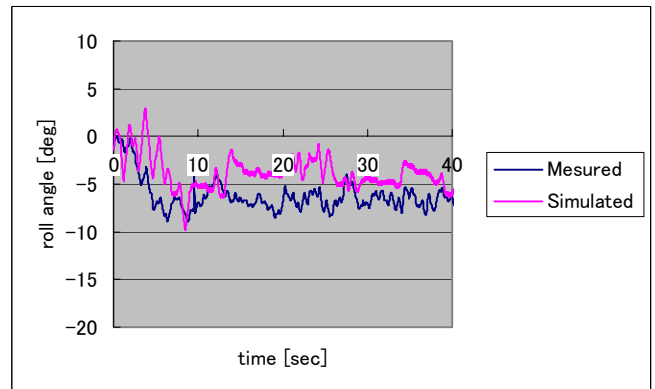


Fig.9 Roll Angle

Fig.8 は航跡を示しており, 単位はmである. この結果から, シミュレーションと実験値とが全体的に一致していることがわかる. しかし, 多少の差が出た. これは, 特に, ギアボックス部分の横方向に対する抵抗の計算が影響している. この部分は, ストラットが延長したと考え計算しているが, もっと正確に計算することにより, より一致すると考える. その

理由として、主ストラットの横方向の抵抗が小さいと、向心力が減少し、それに伴い、ヨーモーメントが大きくなるためである。

ロール角に関しては、少し、小さな値となったが、一致した結果となった。

5. 結論

本研究では、以下のことが得られた。

- ・小型水中翼船の 6 自由度シミュレーションプログラムを開発した
- ・旋回、ロール共に一致した結果となった。
- ・浮上の計算に関しても一致した。
- ・ギアボックス部分の横方向抵抗など改善の余地がある。
- ・今回のシミュレーションは実験結果と近い値を計算することができ、翼の迎角などによる影響も考慮に入れることができ、水中翼船の性能の評価に用いることができると考える。

参考文献

- 1) 吉田 真 他, “水中翼を用いたソーラーボートの試作設計 '01” 日本機械学会 北陸信越学会第 31 回学生員卒業研究発表講演会論文集, 2002
- 2) 鹿山 貴弘 “プロペラダイナモメータ船を用いたソーラーボート用二重反転プロペラの性能解析” 平成 13 年度金沢工業大学大学院修士学位論文, 2002
- 3) 増山 豊 “Excel で解く機械系の運動力学” 共立出版, 2002
- 4) Selig, M.S. 他, “Summary of Low-Speed Airfoil Data ; UNIVERSITY OF ILLINOIS Low -Speed Airfoil Tests Volume2” SoarTech Publications, 1996 年
- 5) 岡田正次郎 “推進器後流中に置かれた舵の性能に関する実験結果について” 造船協会論文集 第 104 号/105 号, 1958/1959
- 6) 藤井 齊, 津田達雄 “自航模型による舵特性の研究(2)” 造船協会論文集 第 110 号, 1961
- 7) 河野 匡彦 “小型水中翼船の離水特性と姿勢制御に関する研究” 平成 13 年度金沢工業大学大学院修士学位論文, 2002
- 8) 大野 康秀 “小型水中翼船の旋回運動と横安定性に関する研究” 平成 13 年度金沢工業大学大学院修士学位論文, 2002