HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ウォータージェット型水中ビークルの運動性能
Author(s)	朴, 俊成; 芳村, 康男
Citation	水産工学, 47(2), 129-138
Issue Date	2010-11-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50337
Rights	日本水産工学会. 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである.
Type	journal article
File Information	SK47-2_129-138.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

The Japanese Society of Fisheries Engineering

水産工学 Fisheries Engineering
Vol. 47 No. 2, pp.129～138, 2010

【研究論文】

ウォータージェット型水中ビークルの運動性能

朴 俊成[1]・芳村康男[2*]

Study on Dynamics Model of Underwater Vehicle Controlled by Water-jet System

JunSeong PAK[1] and Yasuo YOSHIMURA[2*]

Abstract

This paper addresses the dynamics model of an underwater vehicle with a water-jet propulsion system. Our aim is to develop the vehicle for the use of oceanographic survey, fisheries and ocean exploration. Hydrodynamic forces acting on the vehicle with 4 fins are determined for −90.0～90.0 degrees of attack angle and −2.0～2.0 of non-dimensional rate of turn including conventional towing tank test such as Oblique towing test and Circular motion test. In addition, in order to characterize the effects of vehicle motion on water-jet forces, experiments to measure the side force and yaw moment produced by water-jet units have been made. A water-jet model is also incorporated into the simulation. The model is used to simulate the vehicle. The authors use the simulation as a predictive design tool to evaluate and compare the performance of the vehicle before it has been fully developed.

1. 緒 言

近年，海洋開発や生物資源の調査を行う上で，水中ビークルの開発が盛んに進められている。従来の水中ビークルの研究では，制御方法と推進方法に様々な工夫が考案され，開発が進められてきた。制御方法では，水上からケーブルによって遠隔操作されるROV方式があるが，ケーブルの長さによって調査範囲が制約されることや，複雑な海中環境の中ではケーブルが絡む恐れがある。これに対し，内蔵されたプログラムにより外部のコントロールなしで運用できる自律型水中ビークルAUVがある。AUVの推進システムには，従来のプロペラ方式の他，魚の泳法を模倣した生物模倣型ロボットなどがあり，推進性能や回頭性能といった操縦性能の研究が行われている。

しかし，従来のプロペラ方式においては，キャビテーションによる騒音や回転流の発生により至近距離で生態調査を行う際，海中生物の逃避行動を招く恐れがあると考えられる。また，魚類型推進に代表する生物模倣型推進においては，大きな加速度を伴う急発進泳動や急旋回運動といった魚類の複雑な運動を表現するためには多関節型運動機構や人工筋肉といった複雑な推進装置が必要になるなど未解決の問題が多く残されている[1)]。

このように水中ビークルの推進システムにおいては，推進装置がビークル本体から外に突き出したプロペラ方式，胸鰭・尾鰭方式が多いが，海中環境を調査する際，網や索といった障害物に絡まる危険性のみならず推進器による騒音そして複雑な機構など多くの問題を抱えている。

そこで著者らは，ウォータージェットによる推進システムの自立型水中ビークルを考案し，高い操縦性を持つ水中ビークルの開発を目的として研究を行ってきた[2),3)]。

本論では拘束模型試験により得られたビークルの流体力の特性やウォータージェット噴射による駆動力特性をモデル化し，それに基づいたシミュレーション計算によってこの種の水中ビークルの有用性を検討する。また，

2009年10月29日受付，2010年1月28日受理
キーワード：水中ビークル，ウォータージェット推進，操縦性，自走試験
Key words：underwater vehicle, water-jet propulsion, maneuverability, free running test

[1] Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato-cho 3-1-1, Hakodate 041-8611, Japan（北海道大学大学院水産科学院 〒041-8611 函館市港町3-1-1）
[2] Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato-cho 3-1-1, Hakodate 041-8611, Japan（北海道大学大学院水産科学研究院 〒041-8611 函館市港町3-1-1）
* Tel/Fax：0138-40-8520, y-yoshi@fish.hokudai.ac.jp

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

シミュレーションと自走試験の結果と比較することによってシミュレーションの有効性を確認する。

2. 模型試験の概要

1) ウォータージェット推進型水中ビークルの基本構造と供試模型船

本水中ビークルのコンセプトは，本体内に1台の水中ポンプを持ち，10個の固定した噴射口からウォータージェット噴射をすることで，水中を3次元的に自動潜行するAUV方式を想定している。しかし，実験においては具体的なポンプ制御装置がまだ実現できないため，複数の小型ポンプを使用してこの種のビークルの可能性を検討することとした。

操縦性の観点からは通常の直進，上昇，下降，回頭を含め，その場回頭，横移動などの操縦ができ，高効率的に海中調査や生態観測を行うことを目指すものである。なお，ビークルの形状は任意の6自由度運動を容易にするため，取りあえず回転楕円体とし，船尾には直進安定用に4枚の安定フィンを設けた。重力と浮力は基本的に釣り合う構造とし，ロールとピッチは若干の復原力を持たせるようビークルの重心を下げた。Fig.1にコンセプトとしたビークルの概略図を示す。

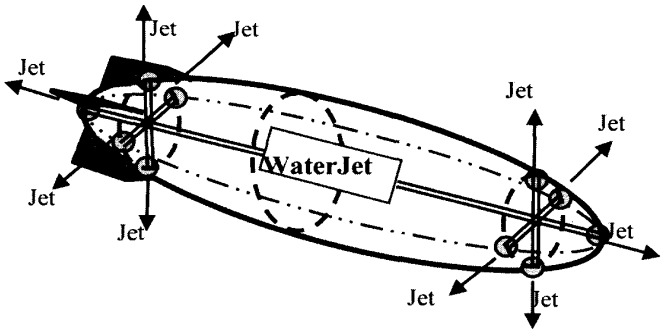

Fig.1 Outline of a vehicle control system consisting of 10 outlets and one water-jet pump.

2) 拘束模型試験

模型船を曳航水槽の曳引電車にストラットを介して取り付け，水中の模型船に作用する流体力を3分力計で計測した。実験は直進曳航状態で斜航角βを付けた斜航試験とこれに一定の無次元回頭角速度r'を与える拘束回頭試験（CMT）を実施した。これらの実験は北海道大学水産学部水槽にて実施し，この実験の概略図をFig.2に図示する。3分力計で計測される力（前後力，横力，回頭モーメント）からストラットに働く流体力，またストラットと模型船の慣性力を控除し，(1)式で模型船に働く流体力を無次元化した。

$$\left.\begin{aligned} X'_H &= X_H \Big/ \left(\frac{\rho}{2} LDU^2\right) \\ Y'_H &= Y_H \Big/ \left(\frac{\rho}{2} LDU^2\right) \\ N'_H &= N_H \Big/ \left(\frac{\rho}{2} L^2 DU^2\right) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし，ρは水の密度，Uは曳航速度，X_HおよびY_Hは定常運動時の安定フィンを含む水中ビークル本体に作用する前後力および横力，N_Hは回頭モーメントである。

なお実験は，サイズの異なる2種類の船尾のフィンを取り付けた状態，およびフィン無しについて実施した。

3. 拘束試験結果とモデル化

前述のように，本水中ビークルは10個の噴射口からのジェット噴射を用いて横移動や後進，その場回頭などの操船を頻繁に行うこととし，広範な運動を想定している。そのため，斜航角βは±90.0degrees，無次元回頭角速度r'（$=rL/U$, L：全長，U：前進速度）は無限大（その場回頭状態）まで考える必要がある。従って，本水中ビークルの流体力の表現は，(2)式に示すようにur, vrといった項にCross-flowを加えたモデルを使用した[4),5)]。即ち，流体力X_H, Y_H, Z_Hは，r=0の値を斜航角βの周期関

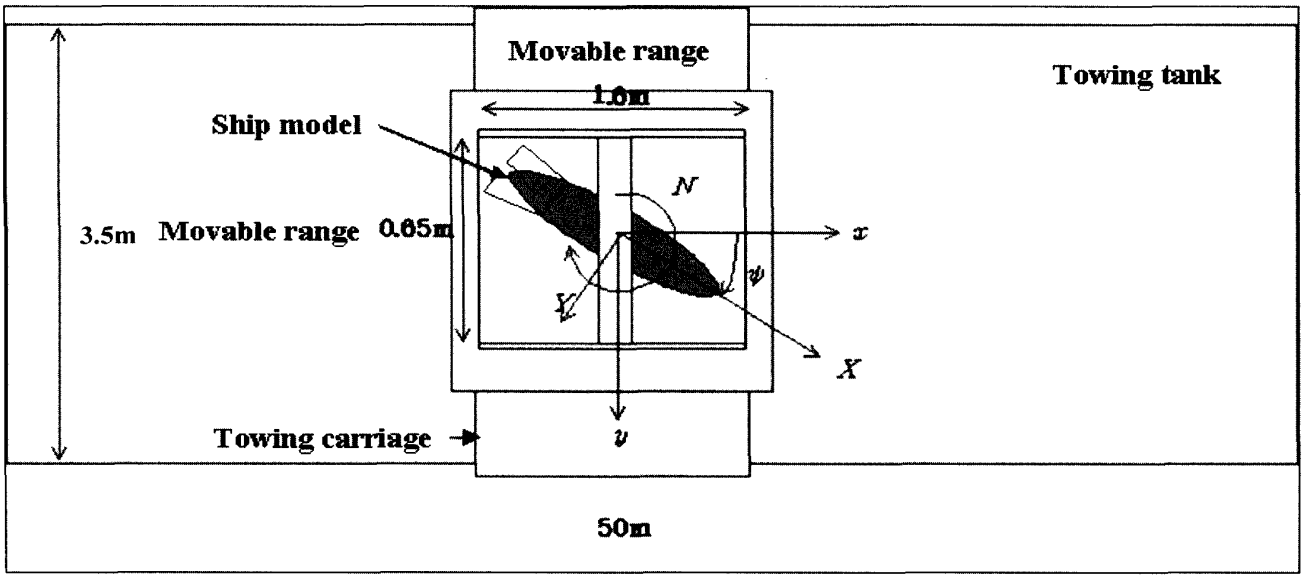

Fig.2 Test facility for the Circular Motion Test.

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

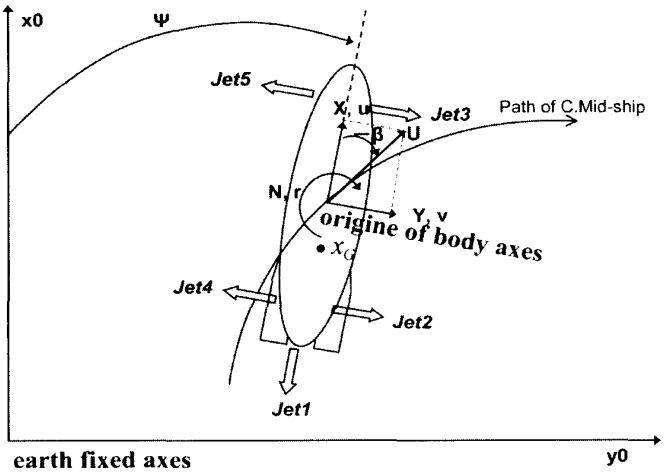

Fig.3 Coordinate systems.

数で表し，その係数は実験値を最小自乗近似して求めた。Y_H、N_Hのrに依存する力はcross flow dragとして扱い非線形流体力を表現した。水中ビークル運動と流体力の座標系（水平運動状態）をFig.3に示す。

$$
\left.
\begin{aligned}
X_H &= (m_y + X_{vr})vr + \frac{\rho}{2} LDU^2 \sum_{n=0}^{2} a_n \cdot \cos n\beta \\
Y_H &= (Y_r - m_x)ur + \frac{\rho}{2} LDU^2 \sum_{n=1}^{2} b_{Yn} \cdot \sin n\beta \\
&\quad - \frac{\rho}{2} DC_{D0} \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} |v + C_{rY} rx|(v + C_{rY} rx)\, dx - L|v|v \right\} \\
N_H &= N_r |u| r + \frac{\rho}{2} L^2 DU^2 \sum_{n=1}^{2} b_{Nn} \cdot \sin n\beta \\
&\quad - \frac{\rho}{2} DC_{D0} \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} |v + C_{rN} rx|(v + C_{rN} rx)\, x dx \right\}
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots(2)
$$

1）操縦流体力

(1) ビークル本体に作用する流体力

種々の斜航角（$-90.0^\circ \leq \beta \leq 90.0^\circ$）と無次元回頭角速度（$0.0 \leq r' \leq 2.0$）に対して計測した流体力（$X'_H$、$Y'_H$、$N'_H$）とCross-flowモデルによる近似をFig.4に示す。同図にはCross-flowモデルで近似した流体力特性を各曲線で示す。r'が大きくなるにつれ同定精度が落ちる傾向はあるが，Cross-flowモデルを用いているため，計測された流体力が大斜航角でも比較的良く表現できている。

(2) フィンによる操縦安定性

安定フィンのサイズやその有無による操縦安定性への影響を調べるために，2種類のフィンとフィン無しの状態について条件で評価を行った。スタビリティ評価の状態はそれぞれ，標準サイズフィン，標準サイズフィンの面積半分の（1/2）サイズフィン，フィン無し状態である。Fig.5にこられの側面図を示す。

フィン無し状態では針路不安定になることが予想され，直進中もWJ噴射による制御が求められる。Table 2には各状態で計測した操縦流体力微係数とスタビリティーレバー（$\ell'_r - \ell'_\beta$）を示すが，（1/2）サイズのフィンを取り付けた場合のスタビリティーレバーの値は0.18と正となり，針路安定であることから制御が比較的容易になることがわかる。

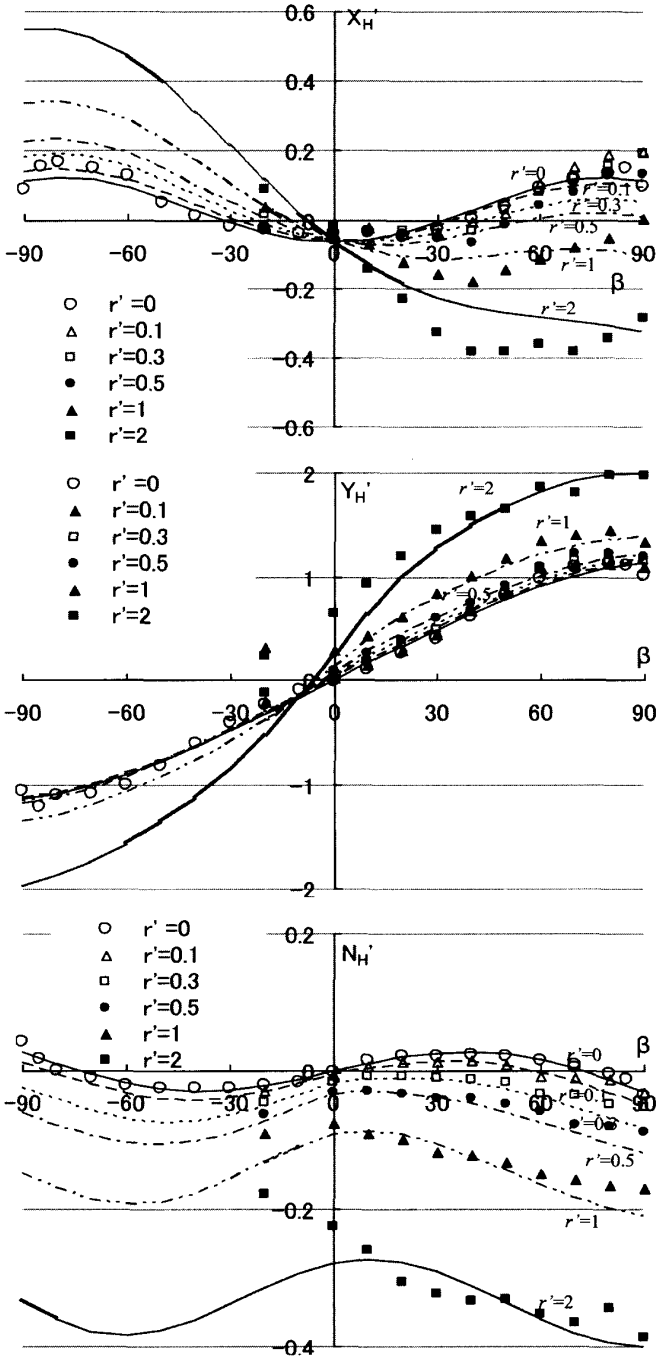

Fig.4 Comparison of hull force components between measured and approximated (with normal size fin).

Table 1 Principal dimensions of the model.

Length	L	(m)	1.200
Breadth	B	(m)	0.300
Depth	D	(m)	0.300
Mass	m	(kg)	57.86

2）ウォータージェットによる駆動力のモデル化

ウォータージェットによる駆動力は前進速度のみならず，横流れや回頭運動による影響を受けて変わる。WJ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

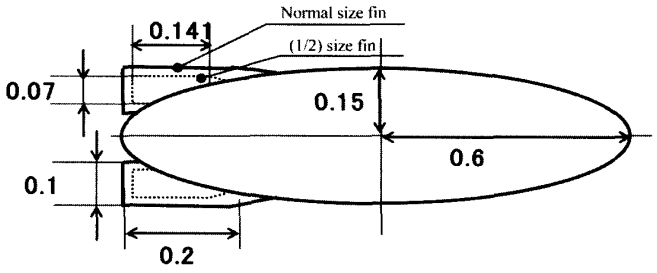

Fig.5 Side view. (unit : meter)

Table 2 Evaluation of stability on 3 conditions.

	Normal size FIN	1/2 size FIN	without FIN
Y'_R	0.607	0.510	0.367
$Y'r-m'_x$	0.101	0.160	0.050
$Y'r$	0.150	0.209	0.099
N'_β	0.046	0.074	0.126
$N'r$	−0.045	−0.038	−0.016
$\ell'r$	0.260	0.326	0.072
ℓ'_β	0.075	0.146	0.344
$\ell'r-\ell'_\beta$	0.185	0.180	−0.272

の推力（X_J, Y_J, N_J）は基本的に，ジェットの噴出速度の自乗に比例するから，(3)式のように無次元化する。

$$\left.\begin{aligned}(X'_J, Y'_J)&=(X_J, Y_J)/\frac{\rho}{2}AV_J^2\\ N'_J&=N_J/\frac{\rho}{2}LAV_J^2\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

ただし，Aは噴射口面積，V_Jは噴射速度である。ここで，ビークルの前進速度と横流れや回頭運動による影響を(4)式に示すようなモデル化を検討する。すなわち，

$$\left.\begin{aligned}X'_J&=(1+a_{JX})F'_{JX}\\ Y'_J&=\sum_{i=2}^{5}(1+a_{JYi})\cdot F'_{JYi}\\ N'_J&=\sum_{i=2}^{5}(1+a_{JNi})\cdot F'_{JNi}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4)$$

ただし，iはWJの番号（2～5）を表す。$F'_{JX}, F'_{JYi}, F'_{JNi}$は前進速度$u$によるWJの推力変化を表し，$u/V_J$の関数により表現する。また，$a_{JX}, a_{JYi}, a_{JNi}$は横流れや回頭運動による影響を表現する。

(1) **前進速度による推力変化**（$F'_{JX}, F'_{JY}, F'_{JN}$）

本研究では前進速度と噴射速度を変え，直進状態での後方向噴射（*Jet* 1），前方右噴射（*Jet* 3）及び後方右噴射（*Jet* 2）の駆動力を測定したが，以下には前方右噴射（*Jet* 3）の駆動力を**Fig.6**示す。上図から横力，回頭モーメント，横力のビークル中央から作用点までの距離l_Jをビークルの長さLで無次元化して示す。この図より横力は流速比u/V_Jが増加するにつれ減少し，さらには力の向きが逆になることがわかる。この現象は船舶のバウスラスターでも類似の研究が数多くあり，直進中のスラスターの性能については，前進速度が増加するに従い急速に

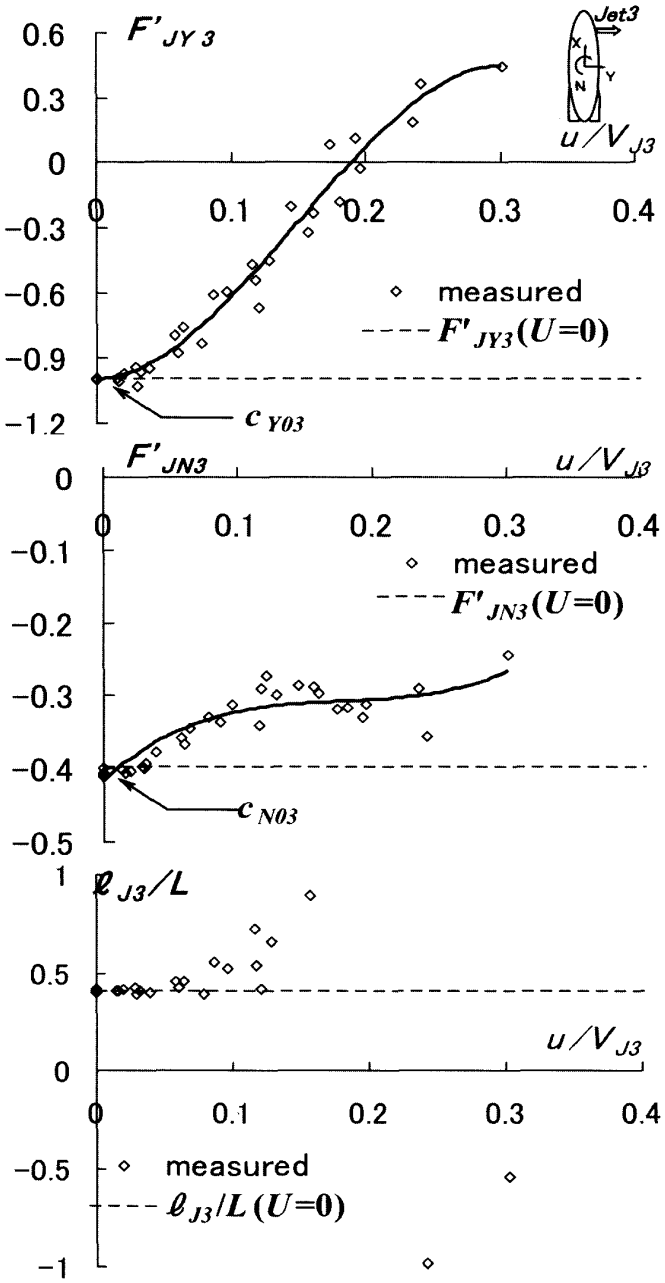

Fig.6 Non-dimensional lateral force and yaw moment for various ship's velocity ratio by *Jet* 3.

減少することが明らかにされている[6),7)]。また，回頭モーメントは流速比の増加にともない緩やかに減少している。そこで，この場合の駆動力を(5)式のように，前進速度成分uと各点の噴出速度との流速比$u'_i=u/V_{Ji}$の多項式で表現する。

$$\left.\begin{aligned}F'_{JX1}&=(c_{X1}u'_1+c_{X0})\\ F'_{JYi}&=\sum_{i=2}^{5}\left(c_{Y3i}u'^3_i+c_{Y2i}u'^2_i+c_{Y1i}u'_i+c_{Y0i}\right)\\ F'_{JNi}&=\sum_{i=2}^{5}\left(c_{N3i}u'^3_i+c_{N2i}u'^2_i+c_{N1i}u'_i+c_{N0i}\right)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(5)$$

ただし，$c_{X1}, \cdots, c_{N0i}$は多項式の係数である。また，噴射速度V_{Ji}は水中ビークル停止時（$U=0$）のWJ発生流体力

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

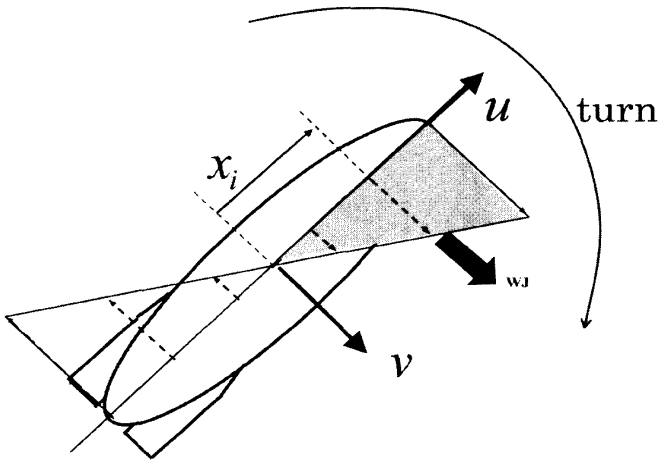

Fig.7 Lateral velocity ν_i on the outlet of *Jet*.

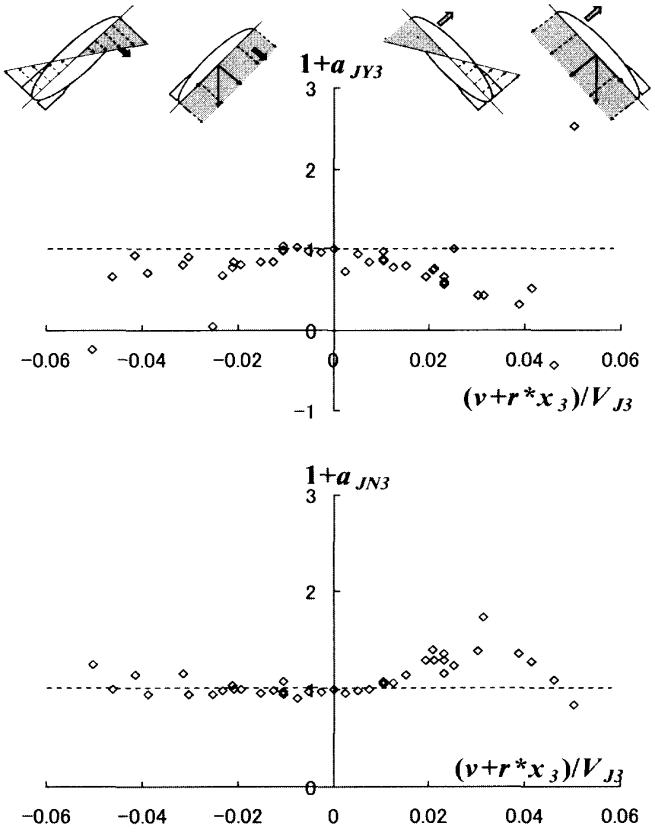

Fig.8 $(1+a_{JY})$ and $(1+a_{JN})$ of *jet* 3.

係数c_{Y0i}を用いて運動量理論から(6)式によって求めた。

$$V_{Ji}=\sqrt{\frac{2|c_{Y0i}|}{\rho A}} \qquad \cdots\cdots(6)$$

ただし，$A=\frac{\pi D^2}{4}$であり，DはWJ噴射口の直径である。

(2) **横流れ速度による推力変化** $(a_{JX}, a_{JYi}, a_{JNi})$

横流れや回頭運動による横推力特性の研究は少ないが，船舶のサイドスラスタで斜航角10°の範囲で船体との干渉を調べた例があり，これによると斜航角と噴出方向によって横推力が変化することが示されている[8]。本水中ビークルは10個のWJにより大斜航角およびその場回頭などを行うため，それらの影響を考慮したモデル化も必

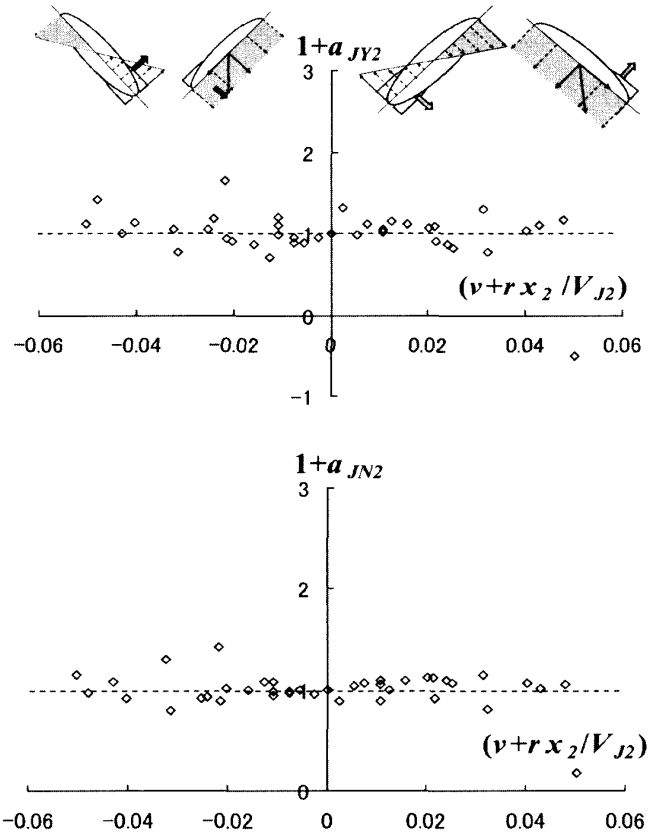

Fig.9 $(1+a_{JY})$ and $(1+a_{JN})$ of *jet* 2.

要と考えられる。そこで，(4)式に示したように，a_{JX}, a_{JYi}, a_{JNi}といった斜航角と回頭角速度による補正係数を考え，この値について検討する。その際，Fig.7に示すように，噴射口位置におけるビークルの横流入速度ν_i $(-U\sin\beta+r\cdot x_i)$ を用い，この速度と噴出速度との比，すなわち$\nu'_i=(\nu+r\cdot x_i)/V_{Ji}$に対して横推力とモーメントの変化を斜航角 −50.0〜+50.0 degrees, 無次元回頭角速度 −2.0〜+2.0の範囲で補正特性を調べた。ただし，x_iは重心からWJまでのx軸上の距離である。

ビークル前方で噴射する*Jet* 3についてビークルの横運動に対する推力変化をFig.8に示す。この図から，横力は噴射口位置における横流入速度の増加に対して減少する傾向がある。横軸の横流入速度がプラスの場合が同図の上段に示すように，噴射口に向かって流れ込む場合であり，この時も大きく減少することを示している。これに対し回頭モーメントは逆に横流入速度の増加に比例してやや大きくなる傾向が見られる。また，ビークル後方の*Jet* 2の場合をFig.9に示す。この噴射口の推力は，横流入速度における横流れ速度にそれほど変化しないことが確認できる。

これらの結果より，ビークルの横運動に対する推力やモーメントの変化は*Jet* 2, *Jet* 3でやや異なり，前方噴射の場合はバラツキが大きいが，概ね直進時の値と変わりなく，後述のシミュレーションでは(4)式のa_{JX}, a_{JYi}, a_{JNi}は零と見なして取り扱う。

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

4. シミュレーションと自由航走試験による検証

1) シミュレーション計算

本水中ビークルは6自由度の運動を想定しているが，本報ではまず3自由度の運動のみを取り扱い，垂直平面の運動については割愛する。船体中央で働く水中ビークル本体の流体力（X_H, Y_H, N_H）とし，WJによる駆動力を（X_J, Y_J, N_J）にすると，3自由度の運動方程式は(7)式で表現できる。なお，重心の前後位置であるx_Gを用いることで運動方程式は船体中央周りではなく重心位置のもので記す。

$$\left.\begin{aligned}(m+m_x)\dot{u}_G - mv_G r &= X_H + X_J \\ (m+m_y)\dot{u}_G - mv_G r &= Y_H + Y_J \\ (I_{zz}+J_{zz})\dot{r} &= N - x_G Y \\ &= (N_H + N_J) - x_G(Y_H + Y_J)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(7)$$

ただし，

m, I_{zz} ：船体質量，船体回頭慣性モーメント

m_x, m_y, J_{zz} ：前後方向船体付加質量，横方向船体付加質量，回頭方向付加慣性モーメント

u_G, v_G, r ：それぞれ重心位置の前後方向速度，横方向速度，回頭方向角速度

なお，付加質量，付加慣性モーメントは元良チャート[9]を使用した。シミュレーションの一例をFig.14～Fig.16の実線と点線で示す。Fig.14は後方噴射（*Jet* 1）と同時に前方右噴射（*Jet* 3）で左回頭する局面であり，Fig.15は*Jet* 3のみでその場回頭する場合である。各図で実線は駆動力モデルを採用した場合であり，点線が駆動力を一定にした場合である。駆動力一定の場合は回頭角速度がやや大きく，回頭半径も幾分小さくなる。Fig.16は*Jet* 1で前進かつ後方右噴射（*Jet* 2）で右回頭する局面のシミュレーションであるが，*Jet* 3の場合と異なり，前進速度が小さく回頭半径が相当小さくなっている。これはFig.15の*Jet* 3のみのシミュレーションで前進速度が発生し，*Jet* 2では逆に後進側の推力が発生することによっている。

2) 自由航走試験

前述のシミュレーション結果がどの程度正確に計算できているかを確かめるため，本ビークルを水中で実際に自走させ，シミュレーション結果と比較を行った。

(1) 計測システム

実験は運動中のビークルをデジタルカメラにより連写することで速度等を計測した。自走試験は北海道大学水産学部のスイミングプールで行い，その計測システムをFig.10に示す。ビークルの航跡のみならず回頭角，回頭角速度などの運動を計測するため，ビークルの上部にロッドを取り付け，水平ロッド上の3個のマーカーを撮影

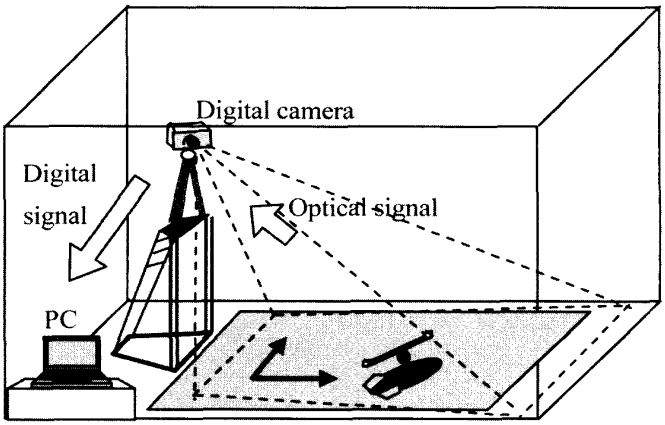

Fig.10 Schematic diagram for position and direction measurement system.

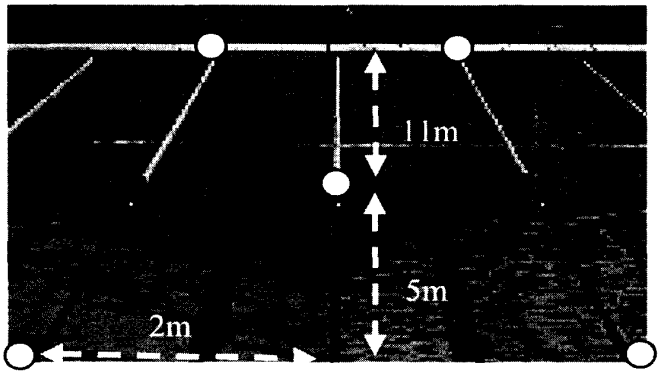

Fig.11 Photograph of calibration with measured points.

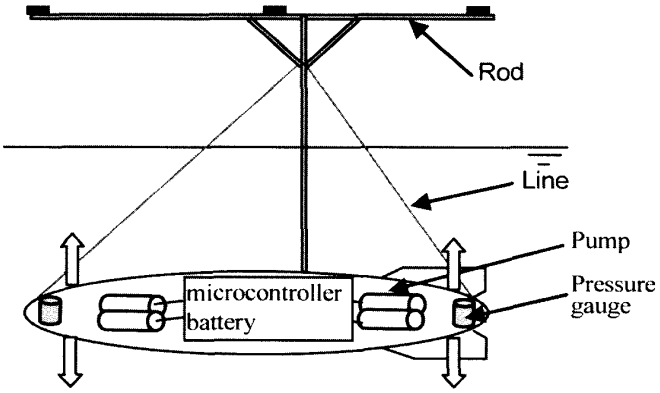

Fig.12 Vertical control system for free run tests.

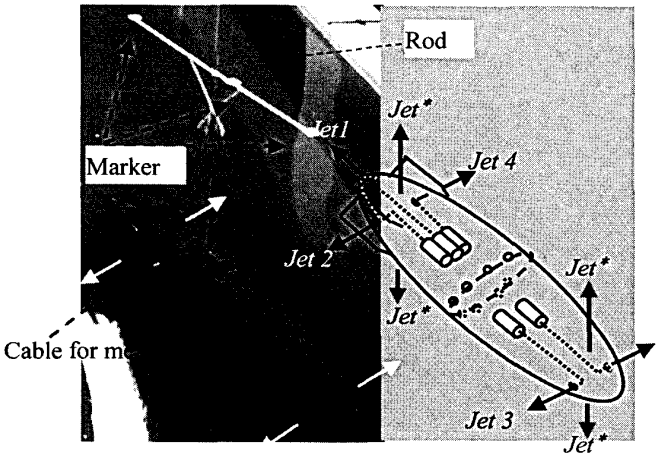

Fig.13 Photograph of model and arrangement of water-jet pumps and position markers.

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

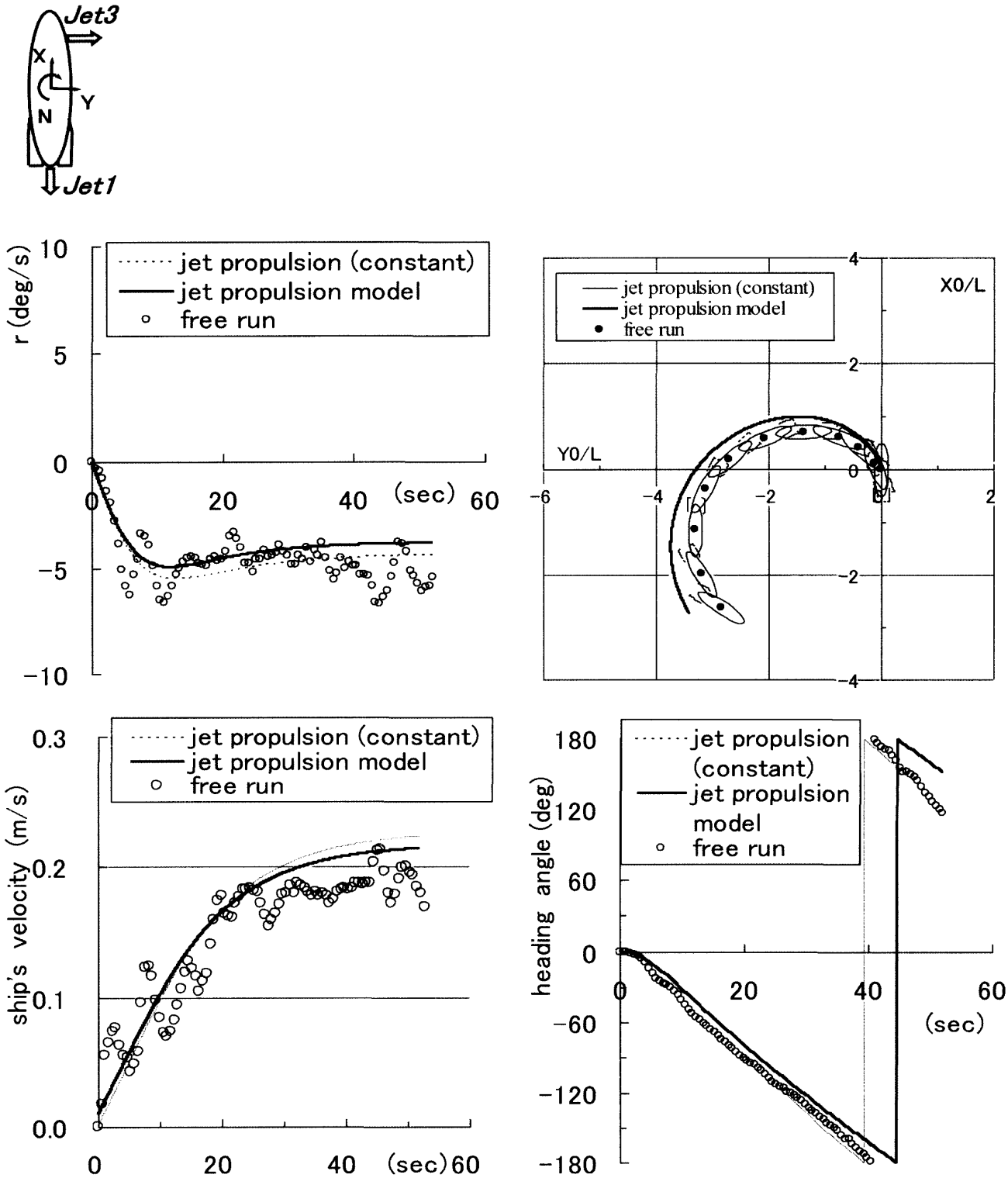

Fig.14 Comparison of trajectory, ship's velocity, *r* and heading angle by *Jet* 1 and *Jet* 3 between measured and simulated.

することにより各マーカーのポジションを求めることにした。得られた静止画像（x, y）の座標から，プール（x_p, y_p）の座標に変換するには(8)式に示す射影変換[10]を用いた。

$$\left.\begin{aligned} x_p &= a_0 x + a_1 y + a_2 - x_p a_3 x - x_p a_4 y \\ y_p &= a_5 x + a_6 y + a_7 - y_p a_8 x - x_p a_9 y \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

ただし，a_0~a_9：射影変換の係数

なお，射影変換には実測した5個の点が必要になるが，その箇所をFig.11に示す。

(2) 深度コントロールシステム

Fig.12に示すように，ビークル内の前後2箇所に設置した圧力センサからの信号を受けてマイクロコントローラにより本水中ビークルを一定水深に制御することによって，水中での3自由度（水平面内）運動について実験を行った。なお，本ビークルはAUVを想定し，ビーク

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

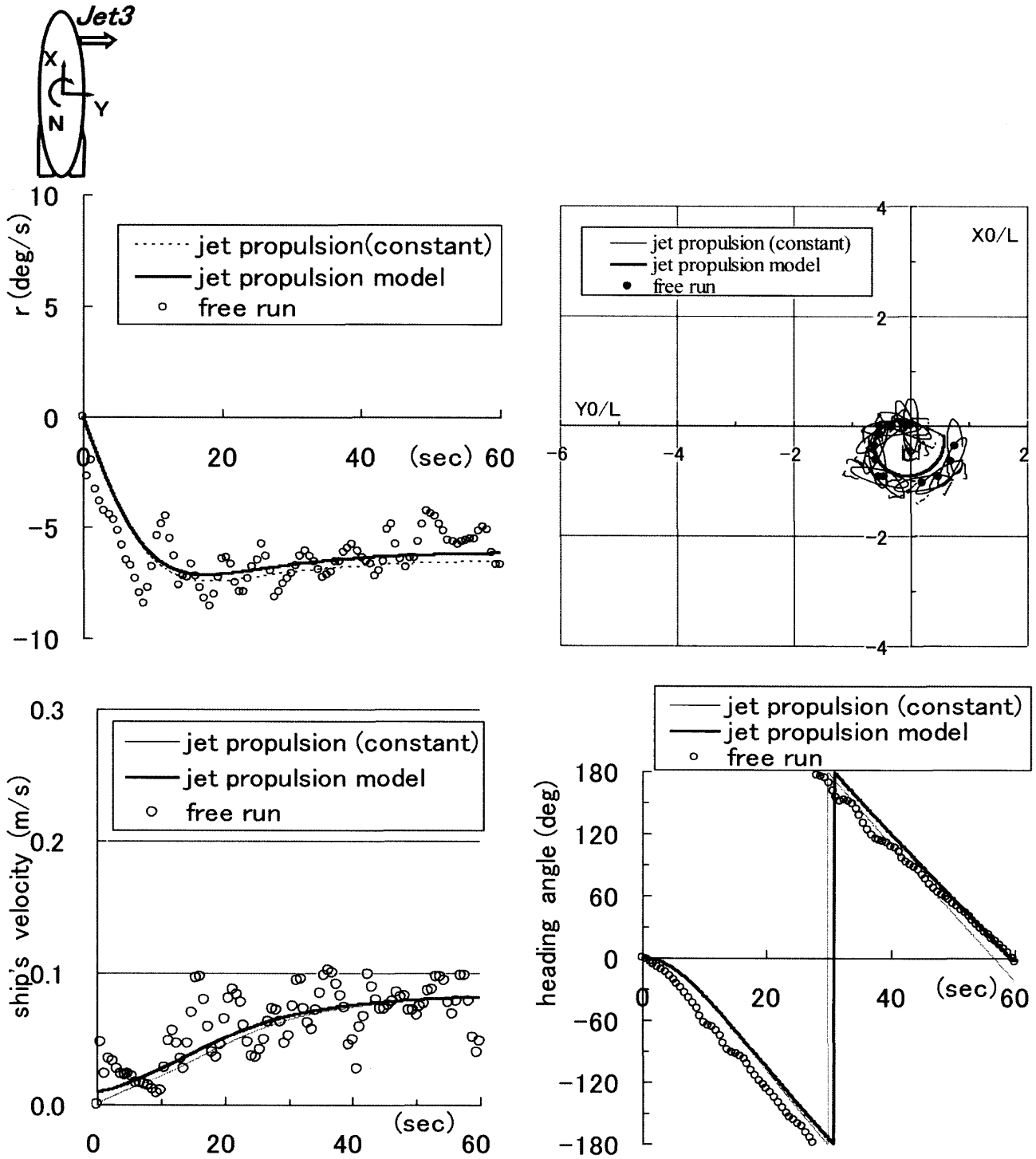

Fig.15 Comparison of trajectory, ship's velocity, *r* and heading angle by *Jet* 3 between measured and simulated.

ル内での制御を行うが，ビークルの姿勢を正確に計測するため，細い信号線を外へ出して陸上のパソコンに記録した。

水中ビークルの浮力と重量をほぼ一致させ，深度制御を容易にした。また，ビークルにはFig.12に示すように，ビークルの航跡と回頭角を計測するために水上に張り出すロッドを取り付けた。実験時の模型写真及び水平面の噴射口の配置をFig.13に示す。噴射口は船尾後方（*Jet* 1），船尾右舷（*Jet* 2），船首右舷（*Jet* 3），船尾左舷（*Jet* 4）の他，上下姿勢制御用のジェットをビークル前後の上下に配置し，その記号を*Jet**と表記している。WJの吸い込み口（インレット）は全て共通で，ビークル本体の中央に8個の吸い込み口を開けた。

3) 自走試験結果とシミュレーションの比較

自走試験のビークルの回頭角，回頭角速度，および前進速度を前述のシミュレーション結果と重ねてFig.14～16の○印で表示する。また，ビークルの航跡は姿勢を5秒おきに表示し，縦軸，横軸のスケールは全長*Lpp*に対する比としている。Fig.16の*Jet* 1で前進かつ後方右噴射（*Jet* 2）で右回頭する局面における前進速度はシミュレ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

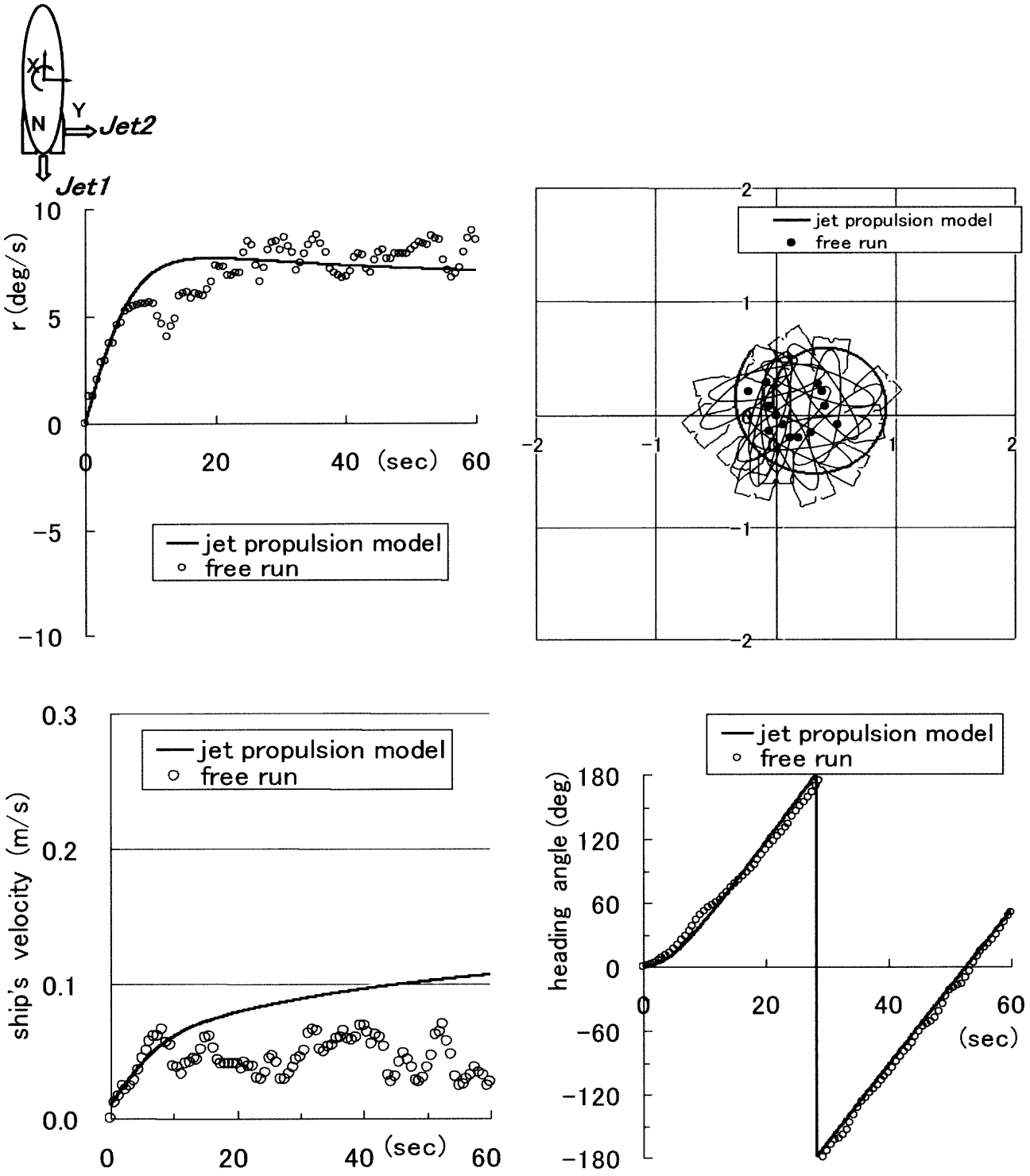

Fig.16 Comparison of trajectory, ship's velocity, *r* and heading angle by *Jet* 1 and *Jet* 2 between measured and simulated.

ーション結果と比べてやや過小になっているが，自走試験結果によるビークルの運動や航跡は概ねシミュレーション結果と合っており，前述のシミュレーションの結果が妥当であることを示している。なお，Fig.14, 15に示した駆動力モデルの違いによるシミュレーション結果は前進速度が0.2m/sと低かったため，その差はわずかであったが，前進速度を大きくすると両者に違いが現れ，前進速度を大きくした自走試験結果[3]とも良く一致する傾向にあることを付記する。

5. 結　　言

ウォータージェット型のビークルを供試模型として操縦流体力を詳細に計測し，これをモデル化することによって数値シミュレーションを行い，本ビークルの操縦性能について検討した。また，シミュレーション結果を自由航走模型試験と比較することによって妥当性を確認した。本研究で得られた主な結論を以下に要約する。

NII-Electronic Library Service

The Japanese Society of Fisheries Engineering

1) 自走試験やシミュレーションの結果から本ビークルの運動性能が明らかになり，開発の初期段階として一定の水深での平面運動を行える水中ビークルの可能性が確認できた。
2) 水中ビークルに働く流体力はCross-flowモデルなどを活用して表現できた他，ウォータージェットによる駆動力を流速比によってモデル化し，前進速度による駆動力の低下を表現することができた。ただし，ビークルの前進速度が低い場合は，駆動力を一定と取り扱っても良いことが明らかとなった。

本論では，水深一定の平面運動について検討を行ったが，上下のウォータージェットを制御して垂直運動についても研究を進めており，これらについては改めて公表する予定である。

謝　辞

本研究を進めるにあたって，駆動制御システムの設計に協力頂いた北海道大学水産学部学生（当時）の仲井庸二君に感謝の意を表します。また，水槽実験に協力いただいた同大学研究室の院生・学生諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

1) 山口　悟・鍵山　渓・寺田昌史：魚類型ロボットのための運動機構の開発，日本船舶海洋工学会論文集，1：27-34，2005.
2) 朴　俊成・芳村康男・中村朋矢・渡辺高弘：ウォータージェット制御型水中ビークルの研究，日本水産工学会学術講演会講演論文集，pp.133-136，2007.
3) 朴　俊成・芳村康男：ウォータージェット型水中ビークルの運動性能，日本水産工学会学術講演会講演論文集，pp.221-224，2009.
4) 芳村康男：浅水域の操縦運動モデルの検討（第2報），関西造船協会誌，**210**：77-84，1988.
5) Yoshimura Y, Nakao I, Ishibashi A：Unified Mathematical Model for Ocean and Harbour Manoeuvring，Proc. of MARSIM 2009, 2009.
6) John L.Beveridge：Bow-Thruster Jet Flow, *Journal of SHIP RESEARCH*, **15**：177-195, 1971.
7) Alistair Palmer, Grant E.Hearn, Peter Stevenson：Modelling Tunnel Thrusters for Autonomous Underwater Vehicles, NGCUV '08, 2008.
8) Kijima K.：The Effect of Drift Angle on Side Thruster Performance, *The West-Japan Society of Naval Architects*, **54**：179-189, 1977.
9) 元良誠三：船体運動に対する付加慣性モーメントについて（その4），造船協会論文集，**107**：83-90，1960.
10) 出口光一郎：ロボットビジョンの基礎，コロナ社，pp.12-24, 2002.

NII-Electronic Library Service