

# 海洋環境総合観測ロボット「FLYING FISH」の 開発研究

正員 小寺山 亘\* 正員 山口 悟\*  
正員 中村 昌彦\* 正員 赤松 毅人\*\*

Development of an Observation Robot 「Flying Fish」  
for Comprehensive Measurements of Ocean Environment

by Wataru Koterayama, *Member* Satoru Yamaguchi, *Member*  
Masahiko Nakamura, *Member*, Taketo Akamatu, *Member*

## Summary

A pitch, roll and depth controllable towed vehicle has been developed and named as "FLYING FISH". The towed vehicle equips with an acoustic Doppler current profiler (ADCP), CO<sub>2</sub> analyzer and sensors for measuring temperature, salinity, dissolved oxygen, PH, turbidity, chlorophyll.

Flying Fish enables us to obtain the space continuous data of physical and chemical properties in the ocean upper mixed layer efficiently. Its maximum submerged depth is 200 m. The length is 3.84 m, breadth 2.26 m, height 1.4 m, weight in air 1400 kg and weight in water is about 0 kg.

Numerical simulations were carried out in order to design mechanical parts of the control system and estimate the accuracy of motion control of Flying Fish. The simulations are based on the six degree freedom motion equations for underwater vehicle and lumped mass method for the towing cable. Field experiments were conducted to confirm the performance of Flying Fish and accuracy of numerical simulations. Results of field experiments and numerical simulations are compared.

## 1. 緒 言

あらゆる産業分野で強力・大規模に開発が推進されてきた結果、地球環境の悪化が深刻な状態となり、それぞれの学問分野からの地球環境保全のための貢献が強く求められている。海洋工学分野からの寄与としては海洋汚染の防止、環境と調和のとれた資源・空間開発法の確立等とともに、海洋環境の計測法の開発が期待されている。

これまで、船舶海洋工学の分野では海洋計測に対する関心は波浪計測等の直接的に海洋構造物の設計に結び付く項目に集中して来た。この事は海洋工学が石油産業と強く結び付いて発展してきたことと深く関係している。地球環境の将来予測を行うに当たって海洋の役割は極めて大きいにも関わらず、大気に比較して海洋には未解明の要素が多い。

大気中の現象は昔から気候・気象の変化として、また最近では大気汚染の問題と関連して、一般の直接的な関心を集めて来たのに対して、海洋は船舶の運航や漁業に従事する、言わば専門家に注目されてきたに過ぎない。地球環境問題の視点から見ると、海洋に関する情報は量的・質的に不十分であり環境予測に重大な支障をもたらすため、各国で集中的に研究する体制が整えられつつある。このような背景のもと、海洋計測手段の不足が大きな問題として浮上して来た。海洋計測を困難にする原因としては、人間の生活している空間と深海底の圧力差が数百気圧にも及ぶこと、海中では電波を通信手段として使えないこと等が挙げられる。海洋調査は宇宙調査よりも困難であると言う根拠はここにある。

海洋計測は時間連続計測と空間連続計測の2つに分けられる。海洋ではその変動周期が大気に比べて長いので、従来、長時間の連続計測が重視されてきた。黒潮等の海流の変動やエルニーニョ現象等を研究するためには、少なくとも数年、場合によっては20年以上の観測データが必要である。この為には定置型の長期モニタリングシステムが有効

\* 九州大学応用力学研究所

\*\* 三菱重工業(株)神戸造船所

原稿受理 平成8年1月8日

春季講演会において講演 平成8年5月15, 16日

であり、世界的にさまざまなタイプのブイシステムが開発されて来た。著者等も、海洋混合層計測用海面ブイシステム<sup>1)</sup>や海中ブイシステム<sup>2)</sup>などの開発に参加したが、その中で、ブイシステムは時間連続データを取得するためには極めて有用であるが、海洋中に多数のブイシステムを長期間維持することは経済的・技術的に困難であり、少数のブイシステムだけでは黒潮やフロントなどのように、空間的に変化の大きい現象を解明する事はできないことが分かって来た。したがって、空間的にも時間的にも有用なデータを取得するためには、長期モニタリングシステムを補完する計測手法を開発する必要がある。

著者等は、空間連続計測が可能な曳航体を用いた計測システムとして、昭和61~63年にDRAKE (Depth and Roll Adjustable Kite for Energy flux measurement) システムを開発した<sup>3)</sup>。平成元年~3年には本システムを使用して黒潮の断面流速分布計測<sup>4)</sup>を実施した。この研究プロジェクトは世界で初めて直接測流による黒潮の断面流速分布を描くことに成功し、さらに海中ブイシステムによる長期変動のモニタリングの計測結果と合わせて黒潮の構造解明に大きく寄与することによって成功裏に終わった。しかし現在の地球環境問題に対処するには、海洋中の流速・水温などの物理量の計測だけでは不十分に成りつつある。海洋は熱・運動量の貯蔵庫であるとともに、物質についても大きな容量を持っている。従来からも海洋中の物質の計測は行われてきたが、それは観測船を止めて採水ボトルを降ろし、海水を採集して、研究室で分析する方法が主であった。この方法は機動性に乏しく、空間的に連続計測を行う事は、ほとんど不可能であると言える。

環境問題への対処の必要性からだけでなく海洋学の面から見ても流れと物質を同時に計測する事は重要である。すなわち海洋には大気中と同様に、様々な時空間的スケールを持つ流れ・波動・前線・渦などの流体现象が存在する。これらの物理的現象によって海水溶存物質は輸送・拡散また時には凝縮されることになり、流れ場などの解明のためにも物質の計測が不可欠である。また、地球温暖化の主要な原因物質である炭酸ガス等の大気中濃度や気候変動の長期予測を行うためには、物質・熱・運動量の巨大な貯蔵庫である海洋、特に大気海洋相互干渉の主な場である海洋混合層での変動量を適確に把握する事が不可欠である。流れと物質の同時計測を目的として、著者等は平成4年度から流速・水温などの物理計測に加えて海水中の化学物質までも計測できる高速曳航式海洋物理・化学観測ロボット Flying Fish を開発中である<sup>5)</sup>。このシステムにより、海洋中の流速・水温・塩分・溶存炭酸・溶存酸素・濁度・クロロフィル・PHを同時に、実時間で、かつ空間連続的に計測する事が可能となる。

Flying Fish により計測される化学物質量は海洋学上その鉛直方向のプロファイルが重要となる。そのため、曳航体

には正確な深度制御性能が要求される。また流速の鉛直分布を計測するための超音波流速計は計測可能なビーム範囲が400mもあるため、曳航体の動揺によるビーム先端の振れを小さくするためには、その姿勢安定性が重要である。さらに、主要な計測器である溶存炭酸分析計は自由表面を有する標準液・反応液の容器をその内部に有するので、曳航体の動揺が大きい場合には計測が不可能となる。これらの理由のため、Flying Fish には高精度の深度、縦揺れ、横揺れ制御性能が要求される。

これまで海洋観測に用いる曳航体は海上実験での簡便性を重視するあまり、機能的には高度なものが開発されなかった。しかしながら、海洋観測用機器に要求される機能はますます複雑かつ高度なものとなってきている。本論文では平成4年度~7年度にかけて九州大学応用力学研究所の研究プロジェクト「大気海洋間の物質・熱・運動量の交換過程の計測法の開発研究」において開発された曳航式の観測ロボットの構成、設計法、制御系および海上実験の結果について述べる。

## 2. Flying Fish の概要

Flying Fish の計測概念は Fig. 1 に示すように、最大10ノットで移動しながら、水面から200mの深度までを自由に昇降し、海洋混合層内の面的な計測を行う。また単に海洋中の計測だけではなく、Flying Fish を曳航しながら観測母船上で、気温・風速・大気中の炭酸ガス濃度等の計測も同時に行う。さらに海洋波が大気海洋間の物質・熱・運動量の交換過程に重要な役割を果たすことがわかっているので、観測中に母船の運動を計測し、逆問題を解いて、波高の推定を行う。

計測項目としては既に述べたように、特に海洋混合層内の流速・水温さらに海水中に含まれる炭酸濃度・塩分・溶存酸素・PH・濁度・クロロフィル等を混合層内の各深度ごとに測定する。とりわけ地球温暖化現象にとって重要な因子であるとされている大気中の炭酸ガス濃度と密接に関係している海水中の炭酸濃度を実時間で計測できることを大きな特徴としている。

Flying Fish は、曳航体・曳航ケーブル・船上管制装置の各サブシステムから構成される。曳航体には主翼・水平尾

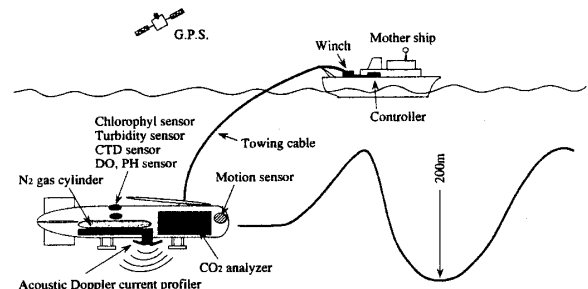


Fig. 1 Conceptual view of Flying Fish system

翼があり、その翼角を制御することにより、任意深度を保持しさらに、横傾斜角及び縦傾斜角を常に0にするように制御する事ができる。各センサーで計測された量は、曳航ケーブルを介してテレメータで伝送し、船上管制装置にGPS (Global Positioning System) で計測した測定位置とともに実時間で表示・記録される。

## 2.1 基本性能

Flying Fish の基本性能を以下に示す。

- (1) 曳航速度 2 ノット～10 ノット
- (2) 潜航深度 0～200 m
- (3) 連続計測時間 60 時間 (溶存炭酸分析器のキャリアーガス、標準液、反応液の量が制限される)

## 2.2 主要寸法と構成

### 2.2.1 曳航体

曳航体は配置図 (Fig. 2) に示すように、胴体部、主翼、水平・垂直尾翼から成り、主翼、水平尾翼は設定深度と、縦揺れ・横揺れ角度0を常に維持するために翼角を自動的に制御される。翼はアルミ製で軸はステンレス製、主要寸法は次の通りで、投入・揚収の容易さを考えて正浮力を持たせている。

長さ×巾×高さ=3,840×2,260×1,400 mm

空中重量=約 1,400 kg

胴体部は、耐圧部と非耐圧部から構成され、耐圧部にシーケンサー、翼制御用モータコントローラー、全炭酸分析計とそのための採水装置・圧力制御装置、無停電電源装置、テレメータ等を、また非耐圧部にはそれぞれが耐圧容器に収められた翼制御用モータ、超音波ドップラー式流速計・多成分水質計測装置・全炭酸分析計のためのキャリアーガスボンベなどを配置する。耐圧部は 200 m の水深に耐え

られるように設計され、材料は高張力鋼である。耐圧部以外の部分はアルミのフレームと FRP の板構造を基本として作られた。曳航体に搭載されるサブシステムの概略を以下に説明する。

### (1) シーケンサー・電源・テレメータ

船上管制装置と曳航体との信号、データの伝送はテレメータを介して行う。翼制御装置・ADCP・多成分水質計は直接船上管制装置によって、全炭酸分析計・採水装置・圧力制御装置の制御は Fig. 3 に示すようにシーケンサーが司っている。

電源は船上から曳航ケーブルを使って送電される。船上では 300 V に昇圧して送り、調査ロボット内の変圧器で 100 V に降圧して各計測機器へ供給するシステムとする。超音波ドップラー式流速計は、超音波を発する時に瞬時 (100～200 mmsec) にはあるが大電流が流れる。そこで電圧安定化の為、無停電電源装置を介して、各計測器・シーケンサー等に電力を供給する。なお、供給電流は 10 A 程度である。

テレメータは測定データ及び警報信号を曳航体より船上の管制装置に伝送する。さらに、船上管制装置から入力される制御信号は曳航体のシーケンサーに伝送される。

### (2) 翼駆動機構

主翼・水平尾翼の駆動はそれぞれ 400 W, 100 W の 1/33 の減速機付き AC サーボモータによる。その機構は Fig. 4 に示すように、主翼はラックピニオン方式、水平尾翼はタイミングベルトによってトルクを伝達する。水平尾翼面積は当初は  $0.23 \text{ m}^2 \times 2$  であったが、曳航開始時には低速であるので、縦方向浮力配置によるトリムモーメントを吸収できず不安定になることが海上実験の結果判明したので、 $0.5 \text{ m}^2 \times 2$  に増強した。タイミングベルトとラックピニオンの

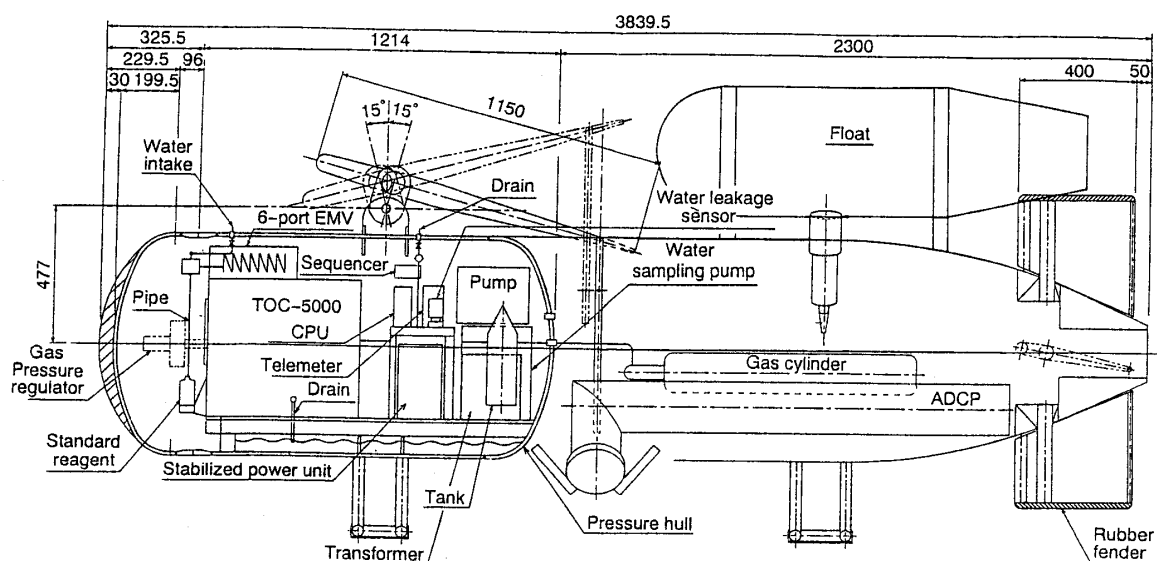


Fig. 2 Vertical view of Flying Fish



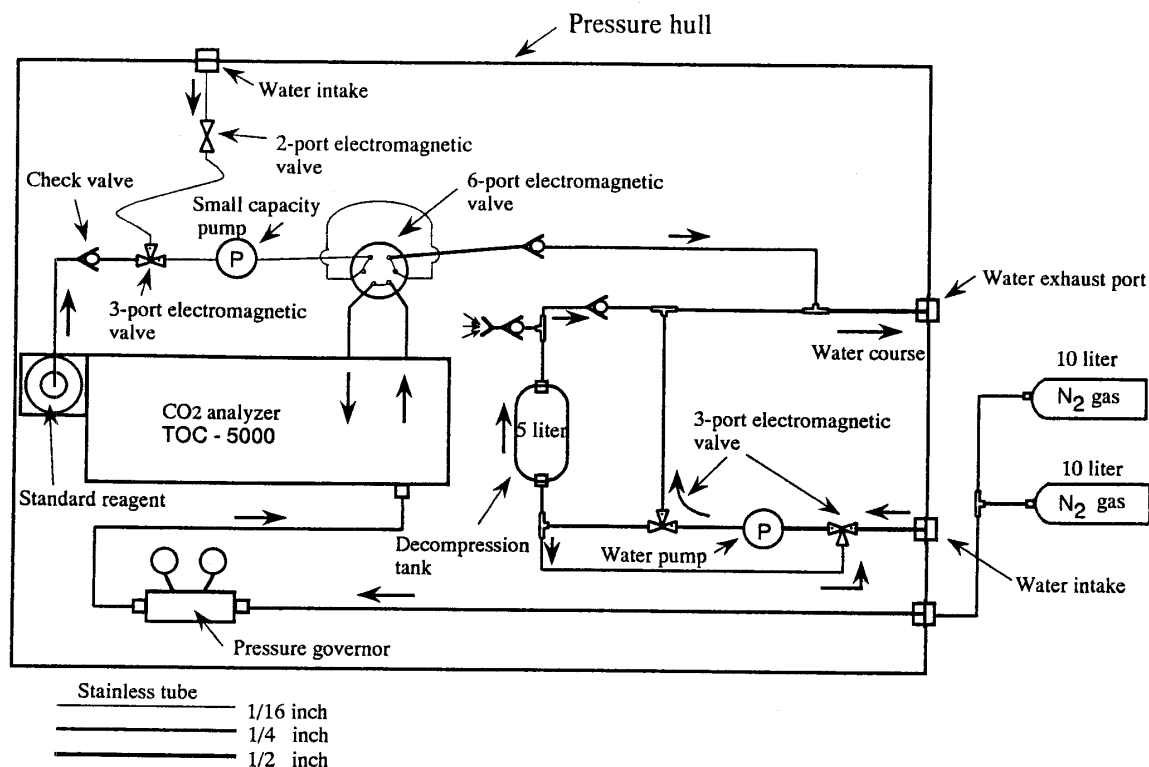


Fig. 5 Flow line of sampling water and carrier gas

排出させる。この過程で、容器内のガスが再びタンク内に流入してくる。小型ポンプはプランジャータイプであり、容量 200 W 最高圧力 35 kg/cm<sup>2</sup> でタンクの容量は約 5 リットルである。全炭酸分析計に必要なキャリアガスは 2 本のガスボンベ (10 L, 150 kg/cm<sup>2</sup>) を耐圧容器外に設置し、150 kg/cm<sup>2</sup> から 5~6 kg/cm<sup>2</sup> に減圧し供給される。2 本のガスボンベを積むことにより約 60 時間連続測定できる。

(5) 超音波ドップラー式流速計

超音波ドップラー式流速計 (Acoustic Doppler Current Profiler: ADCP) は海中の流速の鉛直分布を測定する。本システムで使用するのは 4 本の 150 kHz の超音波ビームを送受信し、流速計の位置から 400 m までの深さまでを 128 層に分解し、各層の流速を瞬時に測定できる。また、海底が測定レンジ (500 m) 以内であれば流速計の対地速度を求めて、各層の絶対流速を測定することもできる。Fig. 2 に示すように曳航体の非耐圧部の中心線上に下向きに配置されている。超音波ドップラー式流速計を含め測定データは、全てテレメーターで曳航ケーブルの信号線を介して船上の管制装置に送信される。

以上の計測装置の測定精度等についてまとめて Table 1 に示す。

異常監視センサーとしては、圧力計と漏水検知器を設ける。圧力計は耐圧容器内の異常圧力を検出するもので、圧力制御センサーとしても使用する。一方漏水検知器は圧力容器の底面付近に導電性の心線を配線しておき、もし水が浸水で溜まれば、海水を介して電流が流れる。この電流を

Table 1 Characteristics of sensors

<b>Acoustic Doppler current profiler</b> Acoustic frequency 150KHZ No. of acoustic beam 4 Range 250m/400m Velocity range 0-10m/sec Number of depth cell 128 Accuracy 0.5cm/sec Direction accuracy 2 degree	<b>Depth sensor</b> Type Electrostatic capacity Range 0-200m Accuracy 0.3% of full range Time response 0.2sec
<b>CO<sub>2</sub> analyzer</b> Measuring object Dissolved carbon Type Non-Dispersive Infra-Gas Analyzer (NDIR) Range 4ppb-5000ppm Accuracy 1% of range Time response 300sec	<b>Dissolved oxygen sensor</b> Type Polarographic Range 0-20ppm Accuracy 0.1ppm Time response 10sec
<b>Temperature sensor</b> Type Pt resistance Range -5 ~ 45°C Accuracy 0.02°C Time response 0.25sec	<b>pH sensor</b> Type Glass electrode Range 4-14PH Accuracy 0.05PH Time response 10sec
<b>Conductivity sensor</b> Type Induction cell Range 0-40mho/cm Accuracy 0.05mho/cm Time response 0.2sec	<b>Turbidity sensor</b> Type Infrared backscattering Range 0-100ppm Accuracy 2% Time response 0.25sec
	<b>Chlorophyll sensor</b> Type Fluorescence analysis Range 0.5-60 g/litter Accuracy 0.1% Time response 0.2sec

\*\* Maxium allowable submerged depth of all sensors is set at 200m

検知して漏水を発見するもので、耐圧容器内への海水の浸水を監視するものである。センサーで検知された信号は、シーケンサーを介して異常として船上管制装置に表示される。

2.2.2 曳航ケーブル

ケーブルは 12 線心 (銅線: 遮蔽付き信号線 8 本, 遮蔽なし 2 本, 電源線 2 本) よりなる外装 2 重の鋼製アーマードケーブル (破断張力 9 ton) である。長さは 800 m で直径 13.4 mm, 1 m 長さあたりの重量は 790 g である。鋼線曳航ケーブルは専用ウインチに巻き込んで使用する。専用ウインチにはスリッピングや張力計が付いているので、実験

には便利であるが、観測船によっては専用ウインチの持ち込みが困難な場合がある。その際には、200 m、または400 mのケーブル曳航ケーブルを用意している。ケーブル曳航ケーブルは強度メンバーが鋼線の代わりにケーブルが使われているだけで、内部の構成は全く同じである。ただし外径は18 mmである。

### 2.2.3 船上管制装置

観測船に積み、曳航体の運動制御、計測装置の制御及び計測されたデータの記録・表示等を行うものであり、前述の炭酸ガス分圧の計算もここで行われる。また潜航深度の設定や各サブシステムの作動状況の監視と漏水・圧力異常などの表示も行う。データの記録装置への出力はアナログとデジタルの両方可能である。

## 3. 設計のための数値シミュレーション

設計のための基礎データを得るために、曳航体の運動、曳航ケーブルの運動・変動張力などの数値シミュレーションを行った。シミュレーションの結果を用いて、翼駆動用モータの馬力、主翼や水平尾翼面積の決定や潜航深度などの性能の確認をおこなう。

### 3.1 数値計算法

曳航ケーブルの運動はランプドマス法、曳航体の運動は6自由度運動方程式を使用した。

細部は文献(7)に詳しいので、ここでは簡単に説明する。計算に使用する座標系をFig. 6に示す。

曳航ケーブルを  $n$  個のランプドマスで表したとき、 $j$  番目の質点の運動は次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} m_{11j} & m_{12j} & m_{13j} \\ m_{21j} & m_{22j} & m_{23j} \\ m_{31j} & m_{32j} & m_{33j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_j \\ \ddot{y}_j \\ \ddot{z}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} \quad (j=2, 3, 4, \dots, N) \quad (1)$$

ここで、 $m_{ikj}$  は質量に関する係数、 $F_{xj}$ 、 $F_{yj}$ 、 $F_{zj}$  は質点に作用する力を表す。

曳航体の運動は次式で表す。

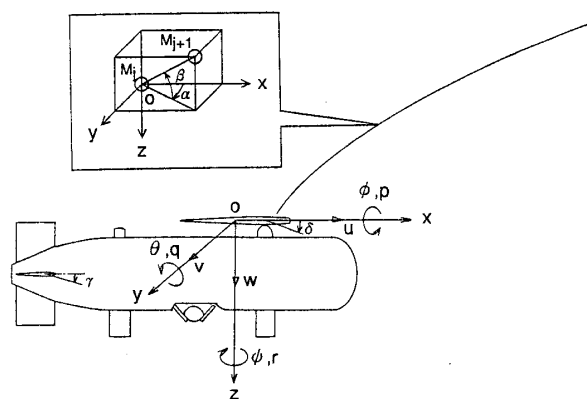


Fig. 6 Coordinate system

$$\begin{bmatrix} m+A_{11} & 0 & A_{13} & 0 \\ 0 & m+A_{22} & 0 & -mz_G+A_{24} \\ A_{31} & 0 & m+A_{33} & 0 \\ 0 & -mz_G+A_{42} & 0 & I_{xx}+A_{44} \\ mz_G+A_{51} & 0 & -mx_G+A_{53} & 0 \\ 0 & mx_G+A_{62} & 0 & J_{xz}+A_{64} \\ mz_G+A_{15} & 0 & & \\ 0 & mx_G+A_{26} & & \\ -mx_G+A_{35} & 0 & & \\ 0 & J_{xz}+A_{46} & & \\ I_{yy}+A_{55} & 0 & & \\ 0 & I_{zz}+A_{66} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{\phi} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $m$  は曳航体の質量、 $x_G$ 、 $z_G$  は曳航体の重心位置、 $A_{ij}$  は付加質量、 $I$ 、 $J$  はそれぞれ慣性能率と慣性乗積、 $F$  と  $M$  はそれぞれ曳航体に作用する力とモーメントを表す。(1)式、(2)式は機体固定軸座標での運動方程式であるのでこれをオイラー角を使って空間固定座標に変換し、時間領域で数値積分することで、ケーブルの運動・張力、曳航体の運動を求める。

翼駆動用モータの所要馬力は深度変更時などの非定常運動時に最大になる。非定常状態の揚力、1/4コード長軸回りのトルクは次式<sup>8)</sup>で求めた。

$$M_{yw}(s) = \pi \rho b^2 \left[ Ub \left( \frac{1}{2} + a \right) \delta + b^2 \left( \frac{1}{8} + a^2 \right) \delta - ba \dot{z} \right] - b \left( \frac{1}{2} - a \right) L_c(s)$$

$$L_c(s) = -2\pi \rho Ub \left\{ w_{3/4}(0) \phi(s) + \int_0^s [dw_{3/4}(\sigma)/d\sigma] \phi(s-\sigma) d\sigma \right\}$$

$$s = Ut/b$$

$$w_{3/4} = - \left[ U\delta + b \left( \frac{1}{2} + a \right) \delta \right] + \dot{z} \quad (3)$$

ここで、 $U$  は一様流速、 $b$  は1/2コード長、 $a$  は翼の回転中心位置、 $\phi(s)$  はワグナーの関数である。

### 3.2 制御システムの設計

制御システムは最適制御理論に基づいて設計する。DRAKEの場合は制御量が深度と横揺れであり、両者は運動方程式上干渉効果が小さいため、深度・横揺れともに1入力1出力の制御であった。そのため実績が最も豊富なPID制御方式を採用したが、Flying Fishの場合は深度と横揺れに加えて縦揺れの制御も行う。縦揺れと深度制御は強い連成を持つので、入力を主翼角・水平尾翼角の和、出力を深度・縦揺れとする2入力2出力の縦運動のシステムと、入力を水平尾翼角の差、出力を横揺れとする横運動のシステムとして取り扱う。制御方式としては最適制御方式が適当であると思われる。制御方式としてLQI制御理論<sup>9)</sup>に基づくシステムを用いた。深度と縦揺れの制御システムの設計について以下に示す。

縦運動に関する運動方程式は平衡点周りに線形化されて次式のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y_M &= C_M x \\ x &= [X \ Z \ \theta \ u \ w \ q \ x_j \ z_j \ \delta \ \gamma]^T \quad (4) \\ u &= [\delta_c \ \gamma_c]^T \\ y_M &= [Z \ \theta \ \delta \ \gamma] \end{aligned}$$

ここで、 $x$  は状態、 $u$  は操作入力、 $y_M$  は観測出力である。被制御変数ベクトルを  $y$ 、目標入力を  $y_c$  とすると、制御目的は次式で表される。

$$e = y_c - y \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty) \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} y &= [Z \ \theta]^T = Cx = H_M C_M x \\ y_c &= [Z_c \ \theta_c]^T \end{aligned}$$

LQI 制御システムの状態変数線図を Fig. 7 に示す。システムは次式で表される積分要素を含んでいる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BF & -BF_I \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -I_2 \end{bmatrix} y_c \\ \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C & 0 \\ -F & -F_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

次式を評価関数として、インパルス応答の二乗和を最少にする  $F$  および  $F_I$  を求める。

$$J = \text{tr} \left( \int_0^\infty G^T(t) \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} G(t) dt \right) \quad (7)$$

ここで、 $Q$  と  $R$  は重み行列である。 $F$  と  $F_I$  は次のように求められる。

$$[F \ F_I] = R^{-1} [B^T \ 0] \Pi \quad (8)$$

ここで、 $\Pi$  はリッカチの方程式の解である。観測できない状態はオブザーバーを用いて推定する。また状態方程式にはケーブルの運動も考慮できるようになっている。

3.3 数値シミュレーション結果と考察

曳航体の翼を駆動するモーターの所要馬力を決定するために、深度変更時の数値シミュレーションを実行する。

数値シミュレーションに用いる流体力係数は 1/6 スケールモデルによる模型実験より求めた。実験では、流速、縦傾斜角、船首角、主翼角、水平尾翼角を変化させた静的実験と、強制前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、船首揺れ、縦揺れ、横揺れの 6 つのモードの強制動揺試験を実施した。ただし、実験に用いた模型の形状は流体力学的見地からのみ決定されたものであり、実機制作時に形状の変更が加

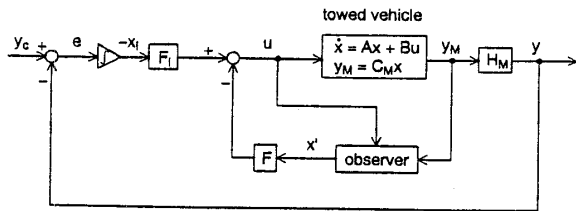


Fig. 7 Configuration of LQI control system

えられているので実機と異なる点も多い。主翼のアスペクト比はセンサー類を装備するに当り変更されたため、翼の揚力係数は理論近似解より求めたものを使用する。曳航体についての基礎的研究<sup>10)</sup>では、翼の揚力と減衰係数の理論近似解が実験値と非常に良く一致することが示されている。Table 2 に計算に用いた流体力係数を示す。水平尾翼の流体力係数は両側の尾翼角が等しいとして両翼の和として表している。

Fig. 8 は 800 m のケーブルで 6 ノットの一定船速で曳航中の Flying Fish に潜航深度 207 m から 10 m 深度増加を命令したときの初期変化の様子をシミュレーションした結果である。潜航深度 200 m 以上ではケーブルの拘束が大き

Table 2 Hydrodynamic coefficients

$A_{11}$	0.040	$X_{ww}$	0.678
$A_{33}$	0.937	$X_{\delta\delta}$	-1.366
$M_q$	-0.538	$X_{\gamma\gamma}$	-0.502
$M_w$	-0.208	$Z_q$	-1.017
$M_\delta$	-0.199	$Z_w$	-3.280
$M_\gamma$	0.607	$Z_\delta$	2.660
$X_{uu}$	-0.060	$Z_\gamma$	1.154

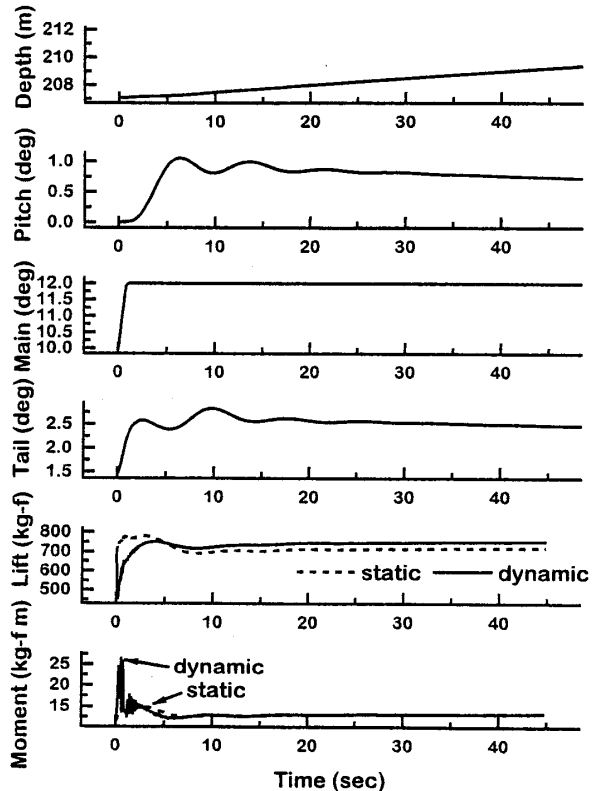


Fig. 8 Numerical simulation on depth changing ability of Flying Fish

いので、深度増加方向には時間がかかる。完全に運動が定常になるまでには100秒程度かかるが、図にはその前半の40秒間の様子を示している。設計上重要な問題はこのときの主翼の最大モーメントである。図中の動的トルクが(3)式を使ってトルクの計算に非定常性を考慮した結果である。ただし運動方程式には動的トルクの影響は考慮に入っていない。この点は今後改良の必要があると思われる。この図から最初の1秒間に動的トルクは26 kg-m程度までになることが分かる。400ワットのACサーボモータで減速比1/508の場合には定格トルクは66 kg-m程度見込めるので、摩擦損失・翼慣性モーメントなどを含めて6ノット程度の場合には十分余裕があると思われる。前に述べたように海上実験の結果では8ノットまではモータが過負荷になることはなかったが、9ノット以上では時折過負荷になって、モータがストップした。トルクは速度の2乗に比例するので、計算上9ノットで60 kg-mに達することになり、9ノット以上では定格トルクをオーバーすることになる。使用したACサーボモータは瞬間的には3倍程度の過負荷に耐えられるがその持続時間は周囲温度による。主翼角変化は連続して起こるので設計時には過負荷で使用することは考えにいけないほうが安全である。10ノットを最高曳航速度にしたいので、今後は減速比を現在の4倍にする予定であることは前に述べた通りである。また主翼角が一定値になってもモーメントに値が残っているのは、主翼回転軸が1/4コード長の点からずれているためである。縦揺れ角は最大1度程度で極めて小さく、制御に必要な水平尾翼角も3度程度である。従って縦方向に浮力のアンバランスがあっても、十分に余裕がある。

#### 4. 海上実験の結果と考察

平成4年度・5年度はハードウェアの開発途中であったので、伊万里湾口付近の試験運転に限られていたが、平成6年にほぼ完成し、観測航海に参加した。これまでに参加した航海は平成6年度・7年度のそれぞれ3週間に及ぶ北海道近海から韓国東岸に及ぶ日本海全域の総合調査と7年の若狭湾沖の2週間の対馬暖流の調査である。本論文では日本海総合調査での観測結果について述べる。観測母船はロシア極東海洋研究所のクロモフ号2140トンで日本、ロシア、韓国の3ヶ国の国際共同研究として行われた。日本の九州大学応用力学研究所、ロシアの極東海洋研究所、韓国のソウル大学理学部を中心としてその他北海道大学低温科学研究所・ロシア海軍水路部・韓国海洋研究所等からの参加者約30名の観測隊によって行われた。日本隊は係留ブイシステムによる測点の流速の長期モニタリングとFlying Fishによる測線上の空間連続計測を分担し、ロシア・韓国はCTD(塩分・水温計)による測点観測を担当した。著者等はFlying Fishによって北海道西岸からロシア南岸にかけての日本海北部を横断する空間連続計測を行った。

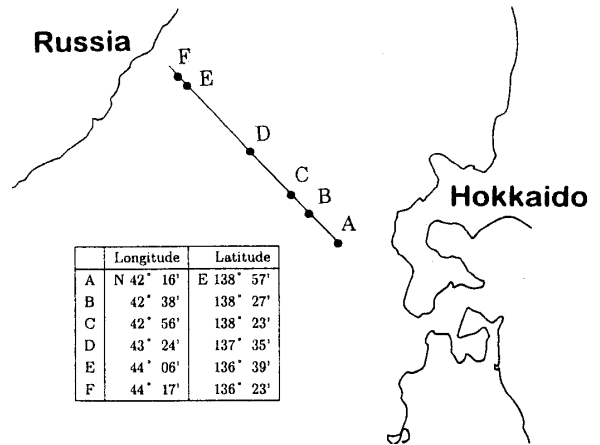


Fig. 9 Map showing field for experiment

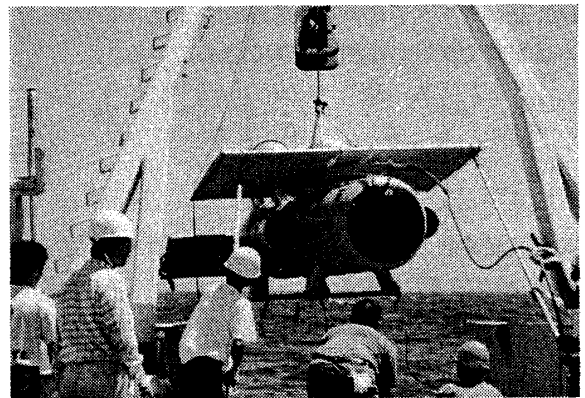


Photo. 1 Picture of a field experiment

Fig. 9に平成7年度のFlying Fishの測線の位置を示す。平成6年度も多少の違いがあるが、ほぼ同じである。海洋学的な目的はオホーツク海から日本海への熱量と物質の移動の観測である。また海洋工学的にはFlying Fishの全システムの試運転と運動性能確認である。実験風景の写真をPhoto. 1に示す。

##### 4.1 Flying Fishの運動性能の計測

Fig. 10は平成7年度の航海中に行った深度変更の実験結果である。このときは比較的海象は穏やかであったので、曳航索の長さは300mしか展張していない。上から深度・主翼角・横揺れ・左右水平尾翼角の差・縦揺れ・水平尾翼角の和の計測結果である。ただし平成7年度まではハードウェアに故障が時折起こるので、現場での対応がしやすい理由でPID制御を採用している。それでも定常状態では深度維持精度は±0.05m、横揺れは±0.5度、縦揺れは±1度以内である。深度変更時には横揺れは±0.5度、縦揺れは±3度程度に収まっている。この程度でも計測には十分であるが、最適制御に変更すれば深度変更時にも数値シミュレーションに示したように、さらに縦揺れ角は小さくなると思われる。縦揺れ角に周期4秒程度の振動が見られるのは観測母船の船体運動による影響と思われる。Fig. 11に

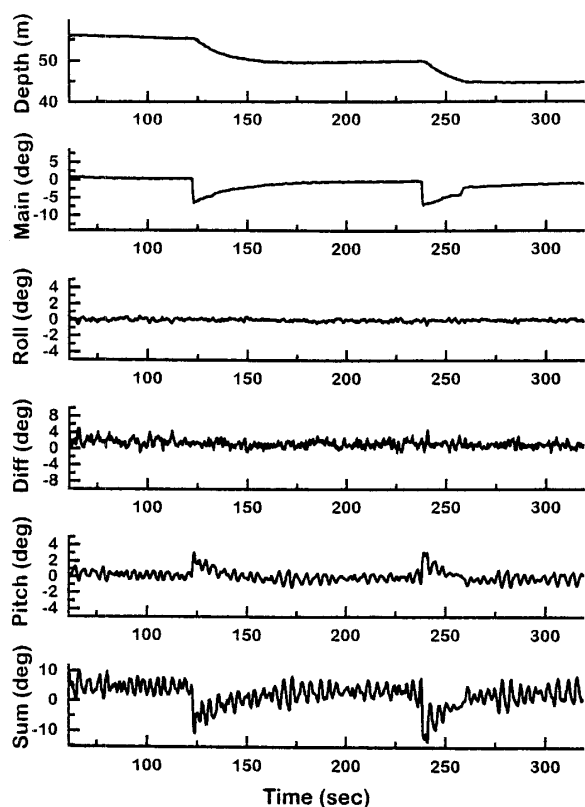


Fig. 10 Results of field experiments on motions of Flying Fish in depth changing mode

Fig. 10の実験結果から深度変更の瞬間を抜き出して、数値シミュレーションの結果と比較する。深度変化の様子と主翼角の最大値は実験とシミュレーション結果は良く一致している。しかし縦揺れ角の最大値は実験値の方がかなり大きい。この事は深度変更時のように非定常性が強い場合の運動の縦揺れに関する数学モデルが必ずしも、完全でないことを意味している。

今後は動的トルクの影響を運動方程式に取り入れたり、海上実験の結果からシステム同定などの手法によって、さらに運動の数学モデルを改良するとともに、最終的なFlyingFishの形状と一致したモデルを作成し、さらに精密な流体力係数の推定を行いたい。

#### 4.2 観測結果

本論文は計測技術の開発を主な目的にしているので観測結果に多くの紙面を割くことはできないが、計測結果と計測技術の開発は不可分の関係があるので若干の考察を試みる。現在までにFlying Fishによって得られたデータは膨大であるので、その一部を紹介する。Fig. 12は平成6年度に北海道西岸からロシア南岸に向けての測線上を曳航速度9ノット・深度30mを保ちながら航走し、計測した水温・塩分・溶存酸素・PH・濁度・溶存炭酸とこれらの計測値から平衡式を使って求めた炭酸ガス濃度 $pCO_2$ の時系列である。AE間はFig. 9に示すように約300kmもあり、D点での海中ブイシステムの回収をはさんで20時間程度の連続

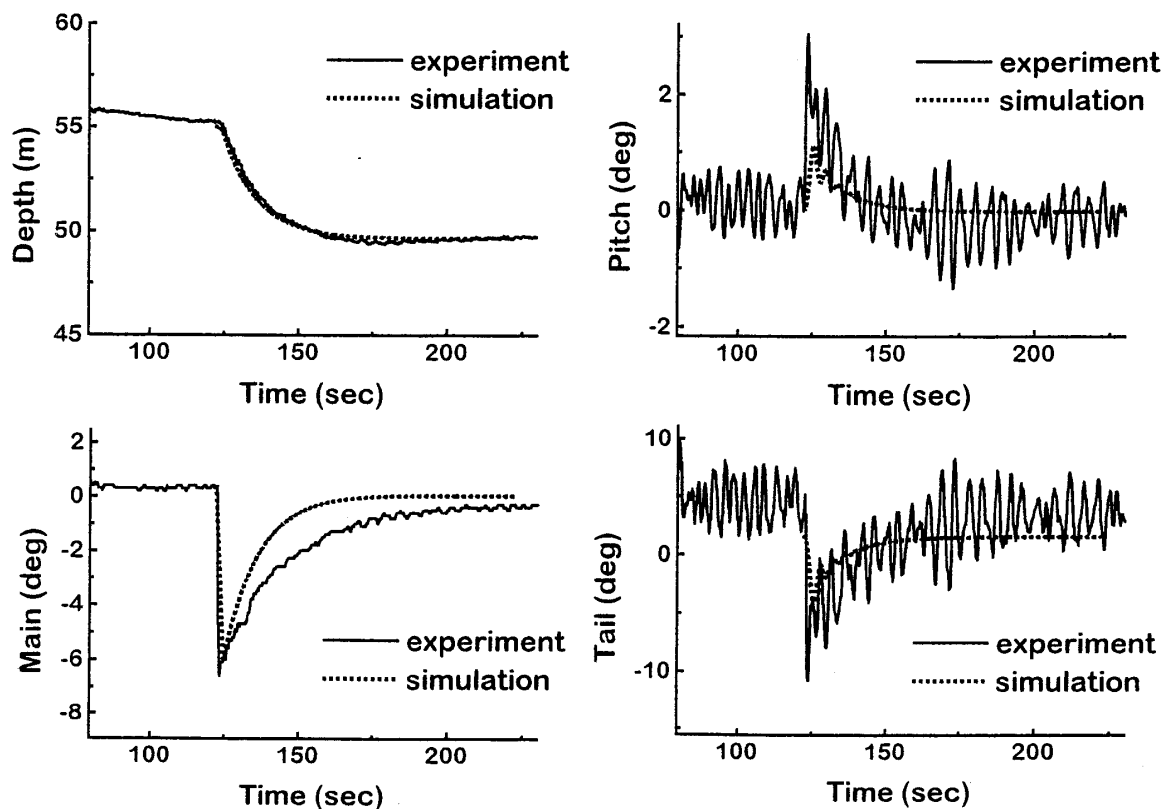


Fig. 11 Comparison of numerical simulation with field experiment

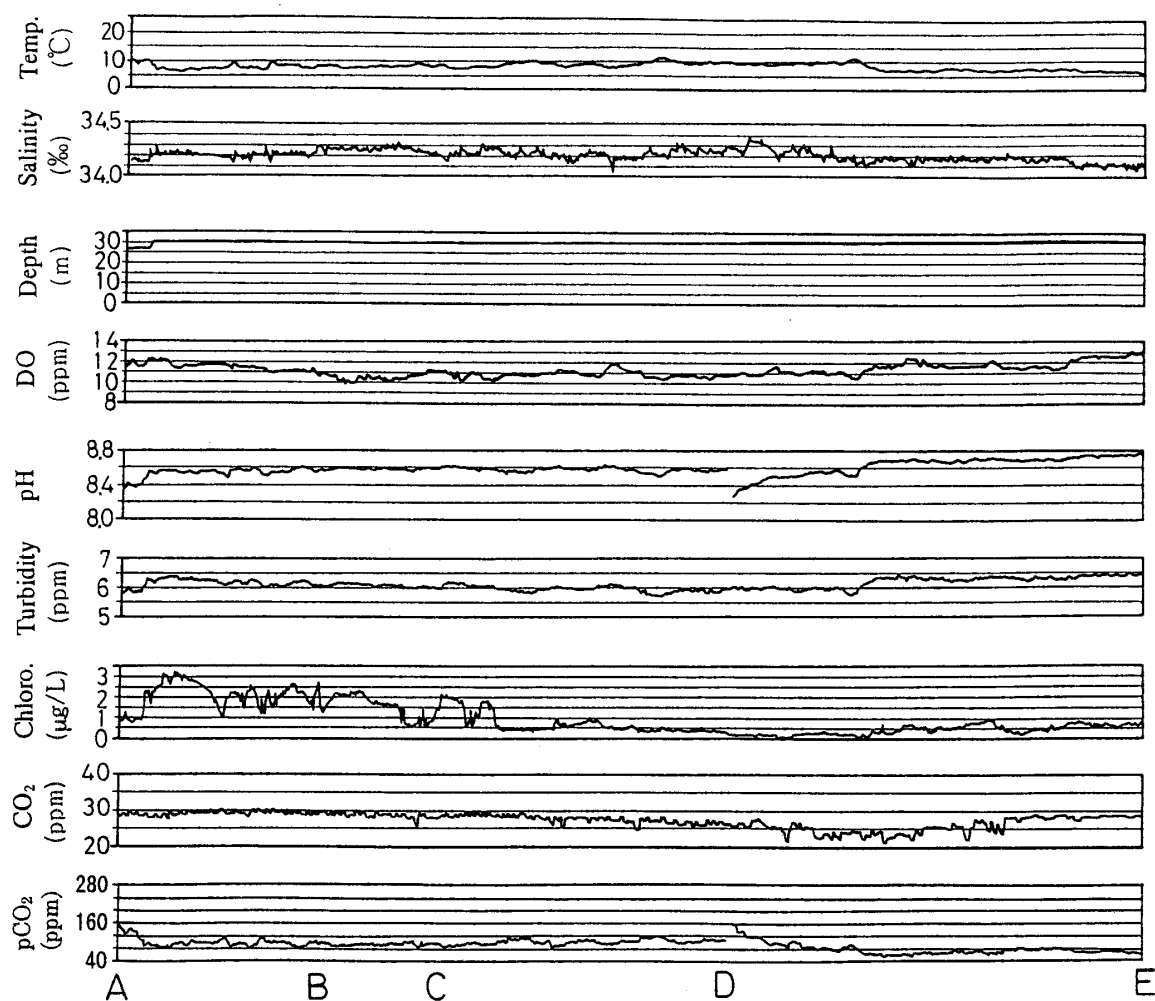


Fig.12 Chemical properties between Hokkaido and Russia obtained using Flying Fish

観測になった。このように多くの場合に長時間の連続観測になるのでシステムには高信頼性を要求される。

図に見られるように、中央部のD点を過ぎてDE間で水温が5度程度急に低下している。同時に塩分の低下と溶存酸素・濁度の増加が見られる。明らかにロシア沿岸には中央部から日本沿岸にかけてのものとは別の低温の水塊が存在していることがわかる。この北方からの水塊が対馬暖流の直接影響域を除いて日本海全域に行き渡ることによって日本海を特徴付けている。クロロフィルはこれらと異なる傾向を示しているがクロロフィルは植物性プランクトンの光合成の活性度を示すものであるため、昼夜の時間変化によるものが大きい。したがってクロロフィルの変動を単純に空間変動と見ることはできない。これらから中央部からロシア沿岸域に存在する水塊と中央部から北海道西岸の間にある水塊は短期的に見た場合にはその起源を異にすると言える。また北海道寄りの水塊の水温・塩分が比較的高く、対馬暖流の影響があるとも考えられるが、この点については北海道沿岸にももう少し近づいて観測する必要がある。ロシア観測船が日本領海内で観測することが容易でないことが

残念である。この間の溶存炭酸の計測値はD点を過ぎる地点で他の物質と同様に変化を示しているようにも見えるが、その後E点に近づくに連れて、再度上昇する。これはクロロフィルと時間遅れを持ちながらもある程度の相関があるように見える。したがって溶存炭酸については空間的な変化とクロロフィルと連動して日周期の時間的な変化を併せ持つと思えるが、この点について結論付けるには、さらにデータの蓄積を必要とする。また最下段の炭酸ガス濃度は平衡式の上からは当然溶存炭酸・水温・塩分・PHと相関を持つが、結果を見ると、中でも水温と極めて強い相関を持っている。平衡式の上からはPHの影響が最も強い。PHの測定精度が他のものに比べて、十分でないため炭酸ガス濃度の測定精度を懸念していたが、実際にはPHの変動範囲は小さいので、比較的バランスのとれた、測定精度になっている。炭酸ガス濃度は特に鉛直方向変化が大きく、また重要とされている。そこで、Flying Fishにより鉛直方向の計測を実施するために、比較的短い周期で曳航体の深度を大きく変化させる必要が生じる。このためには、現在手動で行っている深度目標値入力のパログラミングに

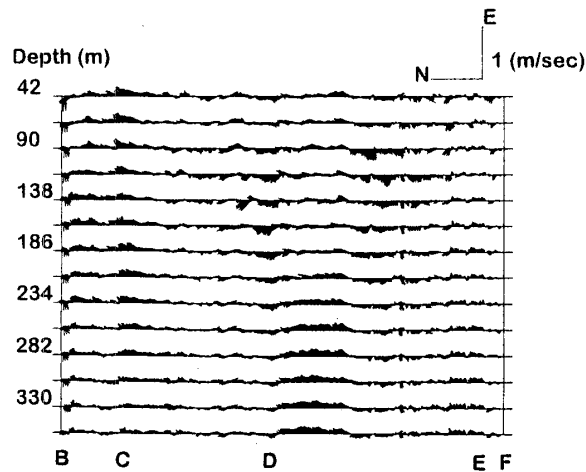


Fig. 13 Velocity distribution measured with ADCP of Flying Fish

よる自動化と、深度変更時の姿勢保持のための最適制御方式による高精度制御が不可欠となる。

超音波ドップラー式流速計による流速分布のデータを Fig. 13 に示す。このデータは平成7年度に得られたデータであるが6年度もほぼ同様の計測結果を得ている。平成7年度は船速をDGPS (Differential Global Positioning System) で求めたのでデータの質が良いのでこちらを示す。このデータを見ると日本沿岸からC点付近までは北東流、CからDまでは弱い北西流、E点をすぎるとほとんど流れがない。またDE間の一部200m以深に強い北東流が孤立して存在する。物質と流場の調査を総合してみるには物質の鉛直プロファイルを得ていないので少し無理があるが現在までのデータから言えることは、日本沿岸から中央部付近までは、対馬暖流の影響があると思われる暖かい水塊が存在し、ロシア沿岸に近づくにつれて、北方からの低温の水塊の存在が顕著となる。これを流場の観測で裏付けるには長期の測流によって平均値を求める必要がある。

炭酸ガス濃度  $pCO_2$  については本システムのように全炭酸を計測し、水温・塩分・PHの計測値と平衡式から求める間接法は気液平衡法（直接法）による測定と比べて信頼性の面で劣るとされてきた。そこで Fig. 14 に韓国チームの直接法の結果と比較する。韓国チームは母船の採水孔から船上に海水を汲み上げて、気液平衡を行った後に気体中の炭酸ガス濃度をガスクロマトグラフィによって計測した。したがって十分信頼性があると考えられるが、測定は水面下5mの採水孔の位置に限られている。図中には同時に大気中の炭酸ガス濃度も示されている。Flying Fishが5mの深度をたまたま横切った場合のデータに限られているために、比較出来るデータは多くないが、この図からわかるように、Flying Fishによる海水中の炭酸ガス濃度の計測は良い精度であることがわかる。

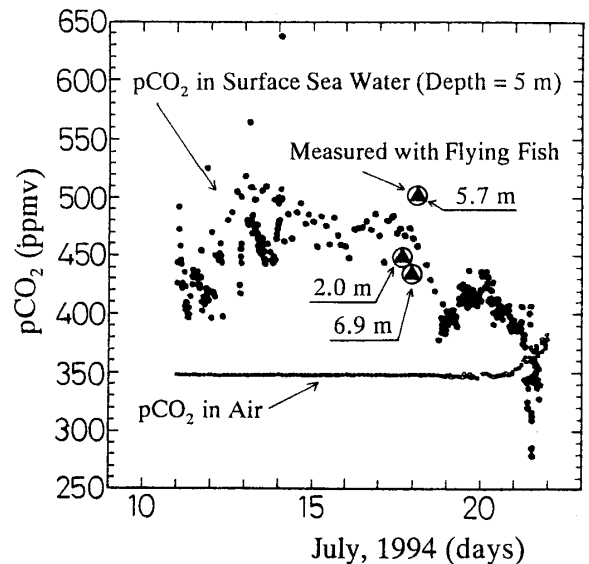


Fig. 14 Comparison of dissolved  $CO_2$  obtained with Flying Fish system and direct measurements

## 5. 結 論

海洋中の物理・化学・生物量の空間連続計測を目的として、深度・縦揺れ・横揺れの制御が可能な翼制御型曳航体「Flying Fish」を開発した。開発のための数値シミュレーションや2年間にわたる海上実験を行って、以下のような結論を得た。

1. 定常状態では Flying Fish の深度は  $\pm 0.05$  m、縦揺れは  $\pm 1$  度、横揺れは  $\pm 0.5$  度の精度で制御可能である。またこの精度は化学分析器である溶存炭酸分析装置の稼動に十分である。
2. 深度変更時のような非定常状態でも縦揺れは  $\pm 3$  度、横揺れは  $\pm 0.5$  度の精度で制御可能である。この姿勢変化は計測機器の維持の上で問題が無い範囲にある。
3. Flying Fish の運動に関する海上実験の結果と数値シミュレーション結果は実用上十分な精度で一致した。
4. Flying Fish は海洋データの空間変動を調べる上で、有効なシステムである。

今後は開発した Flying Fish システムを有効に利用して、海洋観測を行うとともに、さらに高精度の運動制御を目指して、Flying Fish の動特性の把握と制御システムの再設計を行いたい。

最後に本研究は文部省特定大型共同研究として行われたものであり、研究に参加された方々、特に実験隊長として日本・ロシア・韓国観測隊間の調整と交渉の労を執られた応用力学研究所竹松正樹教授、データの評価について貴重な討論をいただいた尹・オストロフスキー両助教授、炭酸ガスに関する計測データを提供していただいた、ソウル大学理学部金慶烈教授、Flying Fish システム制作に全面的に協力頂いた三菱重工業神戸造船所新製品新事業室の阿

部・松井両氏,九州計測器の吉田氏に深く感謝します。また溶存炭酸の測定システムについて,貴重なご意見をいただいた東京大学海洋研究所野崎教授,九州大学工学部小森助教授にお礼を申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Koterayama, W., Mizuno, S., Marubayashi, K. and Ishibashi, M.: Dynamics of Deep Sea Surface Buoy System for Ocean Mixed Layer Experiment, 日仏海洋学会誌 Vol. 30, No. 3(1992)
- 2) Takematsu, M., Kawatate, K., Koterayama, W., Suhara, T. and Mitsuyasu, H.: Moored Instrument Observations in the Kuroshio South of Kyushu, Journal of Oceanography, Vol. 42, No. 3(1986)
- 3) 小寺山 亘他: 海洋観測用高速曳航体の開発研究(第二報曳航体の構造と実海域実験), 日本造船学会論文集, 第166号, pp. 485-495(1989)
- 4) Kaneko, A., Gohda, N., Koterayama, W., Nakamura, M. and Mizuno, S.: Towed ADCP Fish with Depth and Roll Controllable Wings and its Application to the Kuroshio Observation, Journal of Oceanography, Vol. 49, No. 4(1993)
- 5) Koterayama, W. and Akamatsu, T.: Development of a Towed Vehicle for Physical and Chemical Measurements in the Ocean Upper Mixed Layer, Proc. of OCEANS' 93, Vol. 3, pp. 497-502 (1993)
- 6) 財団法人化学品検査協会: 炭酸ガス等の分析方法の標準化に関する調査研究報告書(1992)
- 7) Koterayama, W., Yamaguchi, S., Nakamura, M. and Moriyama, A.: A numerical study for design of depth, pitch and roll control system of a towed vehicle, Proc. of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, pp. 337-344(1994)
- 8) 藤井 斉, 大森秀夫: 操蛇速度と舵特性について, 関西造船学会誌第106号, pp. 13-21(1962)
- 9) Kajiwara, H., Koterayama, W., Nakamura, M., Terada, H. and Morita, T.: Control System Design of an ROV Operated Both as Towed and Self-Propulsive Vehicle, Proc. of 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, pp. 451-454(1993)
- 10) 大楠 丹, 柏木 正, 小寺山 亘: Towed Vehicleの動力学に関する基礎研究, 日本造船学会論文集, 第162号, pp. 105-115(1987)