

海洋環境総合観測ロボット「FLYING FISH」の開発について：大気海洋間における物質・熱・運動量の交換過程の計測法の開発研究：第2報

小寺山, 亘
九州大学応用力学研究所：教授

中村, 昌彦
九州大学応用力学研究所：助教授

山口, 悟
九州大学応用力学研究所：助手

<https://doi.org/10.15017/4744017>

出版情報：応用力学研究所所報. 80, pp.49-69, 1996-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



海洋環境総合観測ロボット「FLYING FISH」の開発について

— 大気海洋間における物質・熱・運動量の交換過程の 計測法の開発研究（第 2 報） —

小 寺 山 亘* 中 村 昌 彦†
山 口 悟‡

概 要

地球環境の悪化は深刻な状態になっている。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重要な課題として期待されている。長時間連続データを取得するためのブイシステムを補完する空間連続計測手法として、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 Flying Fish について述べる。

1. 結 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、地球環境の悪化は深刻な状態になっている。したがって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重要な課題として期待されている。この背景には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、大気に比較して未解明の要素が多いと言う事実がある。このことが環境予測に重大な支障をもたらすことが指摘され、各国で集中的に研究する体制が整えられつつあるなかで海洋における計測手段の不足が大きな問題として浮上して来た。

従来から海洋ではその変動周期が大気に比べて長いので、長時間の連続計測が重視されている。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であり、世界的にさ

*九州大学教授，応用力学研究所

†九州大学助教授，応用力学研究所

‡九州大学助手，応用力学研究所

さまざまなタイプのブイシステム¹²⁾が開発されて来た。しかしながら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、小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。

さらに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。この方法では機動性に乏しく、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、様々の時空間的スケールを持つ流れ・波動・前線・渦などの流体現象が存在する。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。一方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。

以上が海洋中の流速・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高速曳航式海洋物理・化学観測ロボット「Flying Fish」の開発の動機である。これらのいづれの計測項目も鉛直方向のプロファイルが海洋学上重要であり、そのために正確な深度制御が要求される。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400 mもあり、動揺によるビーム先端の振れを小さくするために姿勢安定性が重要^{3,4)}である。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・反応液の容器を内部に設置している為に、動揺が大きい場合は計測が不可能となる。これらの理由のために Flying Fish は高精度の深度、縦揺れ、横揺れ制御を主翼、水平尾翼をつかって行う。

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 Flying Fish について述べる。

2. Flying Fish の概要

Flying Fish の計測概念は図1に示すように、最大10ノットで移動しながら、水面から200 m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。また将来的には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。

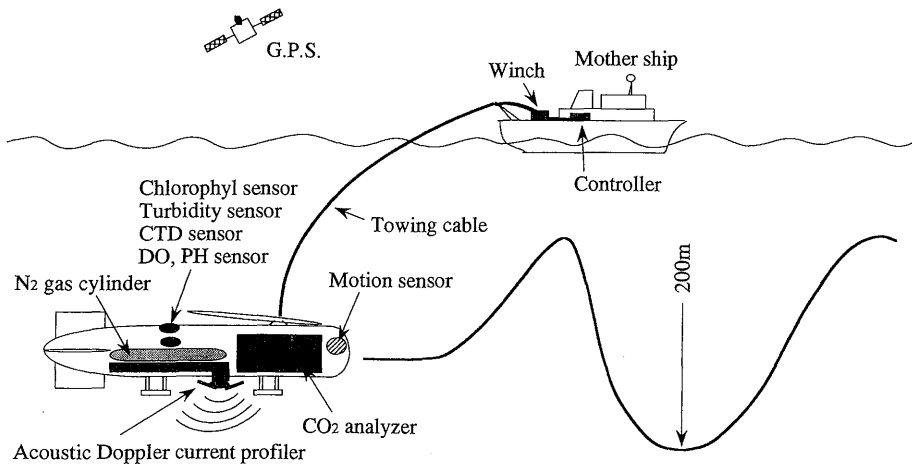


図1 Flying Fish のシステム概念図

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、反応液の量で制限される）

2.2 主要寸法と構成

2.2.1 曳航体

曳航体は配置図（図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。

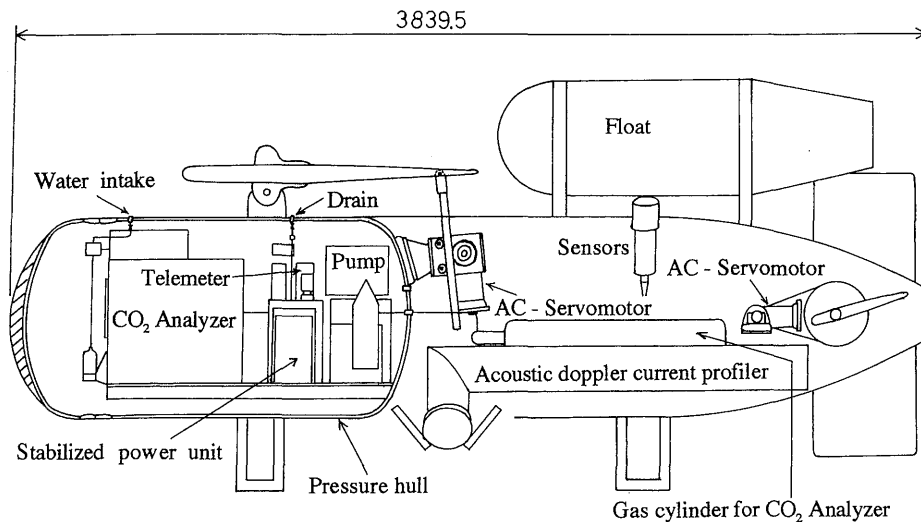


図2 Flying Fish の断面構造

長さ×巾×高さ=3,840×2,260×1,400 mm

空中重量=約 1400 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ーを介して行う。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・圧力制御装置は図 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) で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。

テレメーター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

System Block Diagram

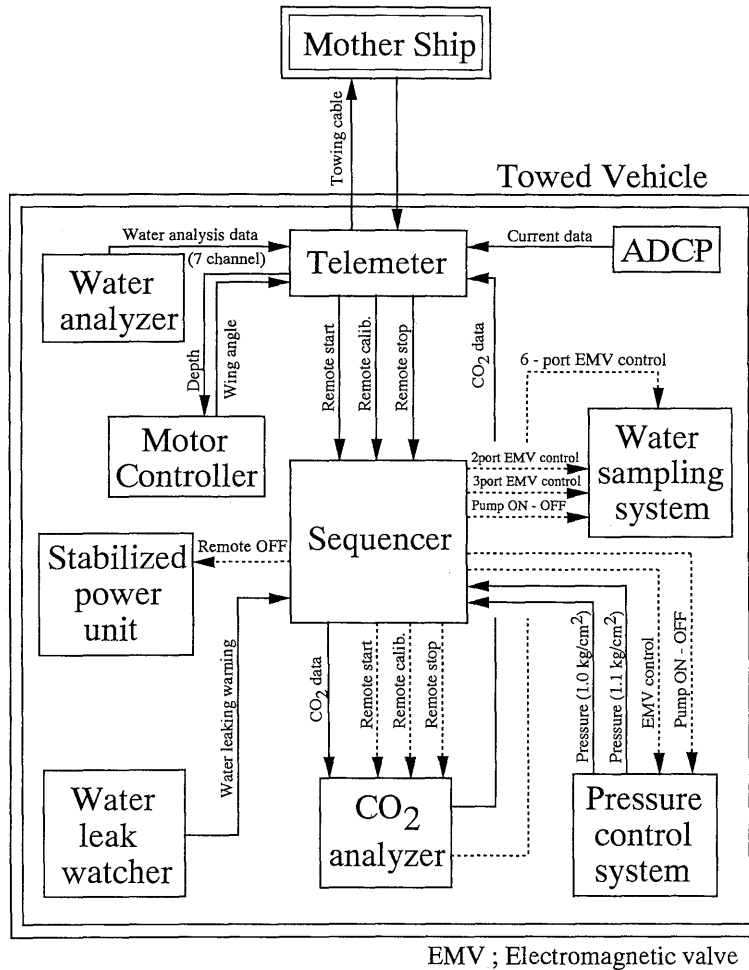


図3 システムのブロックダイアグラム

機構は図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減速効果を加えて、結局減速比は主翼の場合は $1/508$ 、水平尾翼の場合が $1/264$ である。この状態で最大翼角速度はそれぞれ 35 度/sec 、 70 度/sec である。数値シミュレーションの結果によれば 10 度/sec 程度以上要求することはないので十分である。これらのモータ馬力と減速比は後に述べるような潜航深度変更時や針路変更時に翼に加わる揚力とモーメントを数値計算によって求めて決めた。平成7年度の海上実験によって、主翼のモータが時折過負荷になる

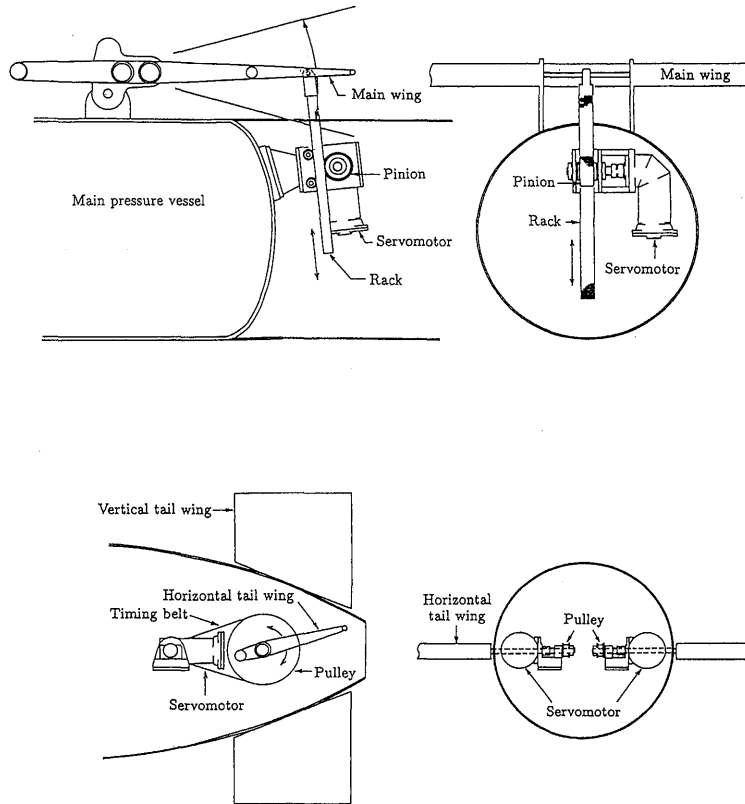


図4 翼の駆動装置

ことが起こったので、現在さらに4倍減速比を増して、1/2032に改修中である。主翼モータの負荷が大きいのは、回転中心がモーメント最少の位置から外れているためであり機構上やむを得ない。翼制御のための指令値は横揺れ・縦揺れ制御の為に目標値が常に0であるので曳航体の内部で発せられる。また深度制御の為に目標値が変えられる時のみ、船上管制装置から伝達される。制御システムについては、数値シミュレーションのところで、詳しく説明する。

(3)多成分水質計測装置

多成分水質計測装置は、海水の水温・塩分・深度・DO（溶存酸素量）・PH・濁度・クロロフィルを計測するものである。曳航体の非耐圧部に搭載し、7種類のセンサが4つのセンサゾンドに分散配置され、別ユニットの制御部に集約され各種の演算・補正処理がなされる。また、それ自体が耐圧構造であり水深200mまでの圧力に耐えらる。水温は白金抵抗体の抵抗変化を、塩分は電磁誘導方式で測定された電気伝導度を塩分方程式により変換することにより、深度は圧力による静電容量の変化を測定することにより測定している。DO（溶存酸素）は、酸素の酸化還元反応を利用した電気化学的方程式で、隔膜を透過してカソードに達した酸素の還元反応及びアノードでの酸化反応により生じる電流変化を検知するこ

とにより測定される。濁度は、2個のトランスミッターから発射される赤外パルスビームが交差するゾーンに存在する懸濁粒子による散乱光をレシーバで受光することにより、その受光強度より測定される。クロロフィルはクロロフィル色素の蛍光波長に合わせた光度を計ることにより測定される。

(4)全炭酸分析計とその支援装置

全炭酸分析計は、海水に酸を加え、析出した炭酸ガスを非分散赤外線ガス分析法で分析することにより、海水中の溶存炭酸量を測定する装置である。また大気との物質交換過程に直接関係の深い海水中の分子状の炭酸ガス濃度を直接測定することはこのシステムでは困難であるので全炭酸濃度の実測値と同時に計測した水温・塩分・PH を使って平衡式⁹⁾を用いて算出する。炭酸ガス濃度は海水に接する空気中の炭酸ガス分圧 $p\text{CO}_2$ の値で最終的に表現する。図5に全炭酸分析計とその支援装置である採水装置・圧力制御装置のフローチャートを示す。採水装置は、全炭酸分析計へ海水を供給する為のものであり、圧力制御装置は、炭酸ガスを運ぶために使われたキャリアガスを耐圧部から放出させる為のものである。全炭酸分析計はキャリアガス (N_2 ガス) を使用しており、連続計測を行えば耐圧容器内の圧力が増加し、分析計の測定誤差の要因となる。このため容器内の圧力を大気圧に保持するのが、この装置である。圧力が大気圧以上であれば、三方弁を開としてタンク内に海水を流入させることにより、タンク内のガスを放出させる。それが済めば三方弁を切換えてタンク内の海水をポンプで排出させる。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^2 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

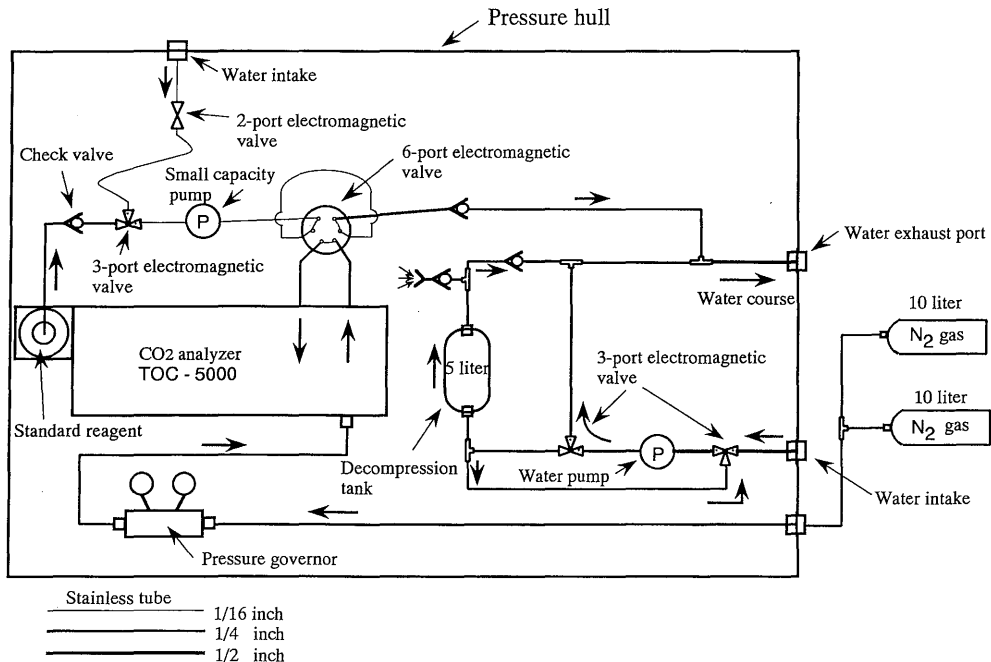


図5 溶存炭酸分析装置のフロー

スポンベ (10 L, 150 kg/cm²) を耐圧容器外に設置し, 150 kg/cm² から 5~6 kg/cm² に減圧し供給される。2 本のガスポ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ものは 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) 以内に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。図 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表 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

表 1 計測センサーの特性

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

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

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パリ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のケブラー曳航ケーブルを用意している。ケブラー曳航ケーブルは強度メンバーが鋼線の代わりにケブラー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ブドマス法、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図6に示す。

曳航ケーブルを n 個のランブ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。

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

$$(j = 2, 3, 4, \dots, N)$$

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。

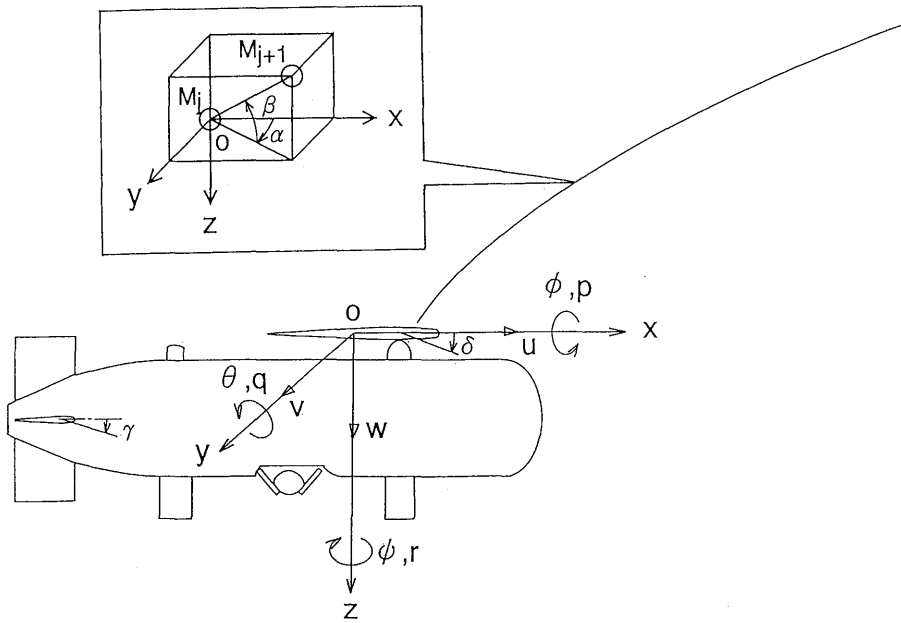


図6 座標系

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

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⁸⁾で求めた。

$$\begin{aligned}
 M_{yw}(s) &= \pi p b^2 \left[U b \left(\frac{1}{2} + a \right) \dot{\delta} + b^2 \left(\frac{1}{8} + a^2 \right) \ddot{\delta} - b a \dot{z} \right] - b \left(\frac{1}{2} - a \right) L_c(s) \\
 L_c(s) &= -2\pi p U b \left\{ w_{3/4}(0) \phi(s) + \int_0^s [dw_{3/4}(\sigma)/d\sigma] \phi(s-\sigma) d\sigma \right\} \\
 s &= Ut/b \\
 w_{3/4} &= - \left[U \delta + b \left(\frac{1}{2} + a \right) \dot{\delta} \right] + \dot{z}
 \end{aligned} \tag{3}$$

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⁹⁾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。

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

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。

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

ここで、

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

LQI 制御システムの状態変数線図を図 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。

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

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。

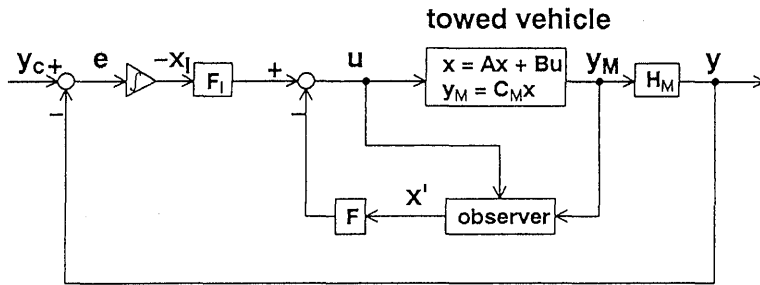


図7 制御システムの概念図

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

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、 Π はリッカチの方程式の解である。観測できない状態量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、実機の治療時に形状の変更が加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¹⁰⁾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。表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。

図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いため、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

表2 Flying Fishの流体力係数

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_δ	-0.199	Z_w	-3.280
M_γ	0.607	Z_δ	2.660
X_{uu}	-0.060	Z_γ	1.154

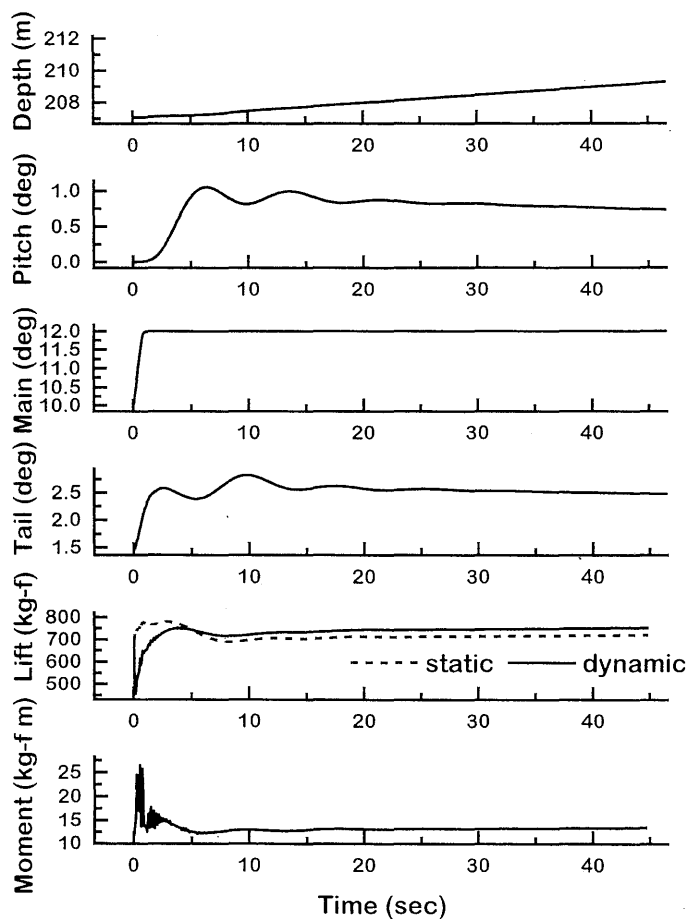


図8 深度変更時の運動シミュレーション

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れていない。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。したが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横断観測を行った。図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。実験風景の写真を写真1に示す。

4.1 Flying Fish の運転性能の計測

図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300.m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

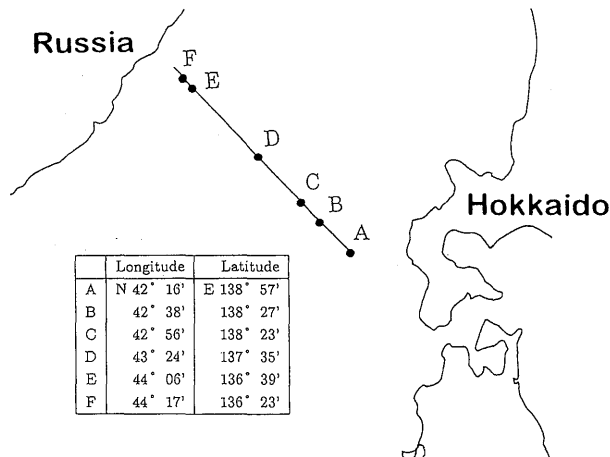


図9 実験海域

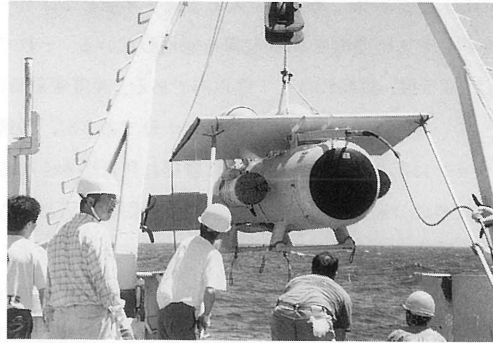


写真1 実験風景

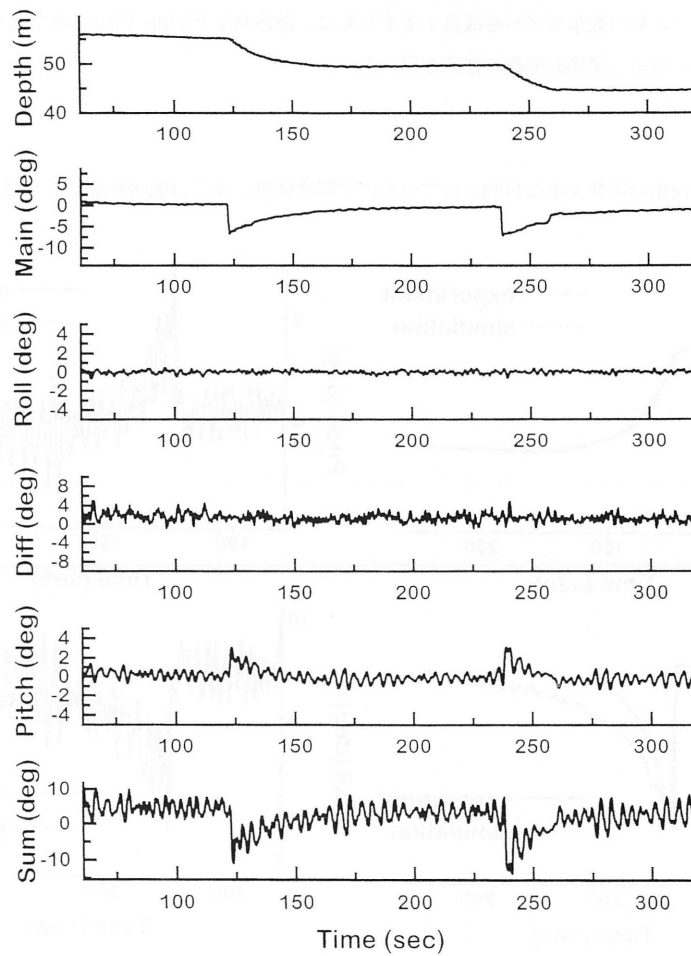


図10 運動の計測例

の差・縦揺れ・水平尾翼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 ± 0.05 m, 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。図11に図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Flying Fishの形状と一致した模型を作成し、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、

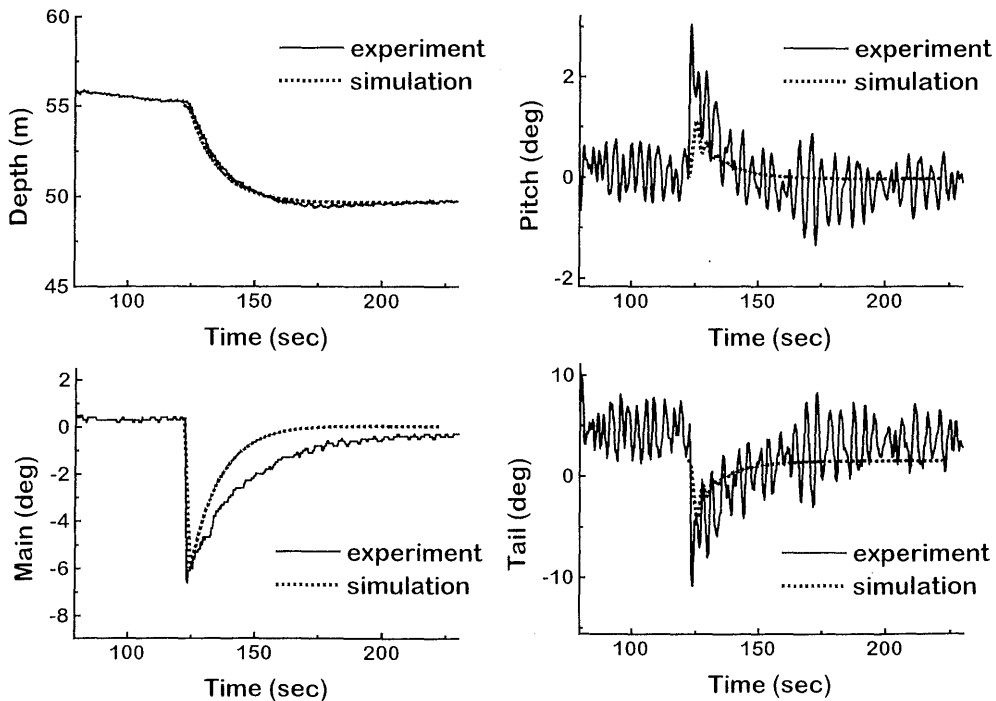


図11 運動計測と数値シミュレーションの比較

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。図 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を曳航速度 9 ノット・深度 30 m 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 間は図 9 に示すように約 300 km 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で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

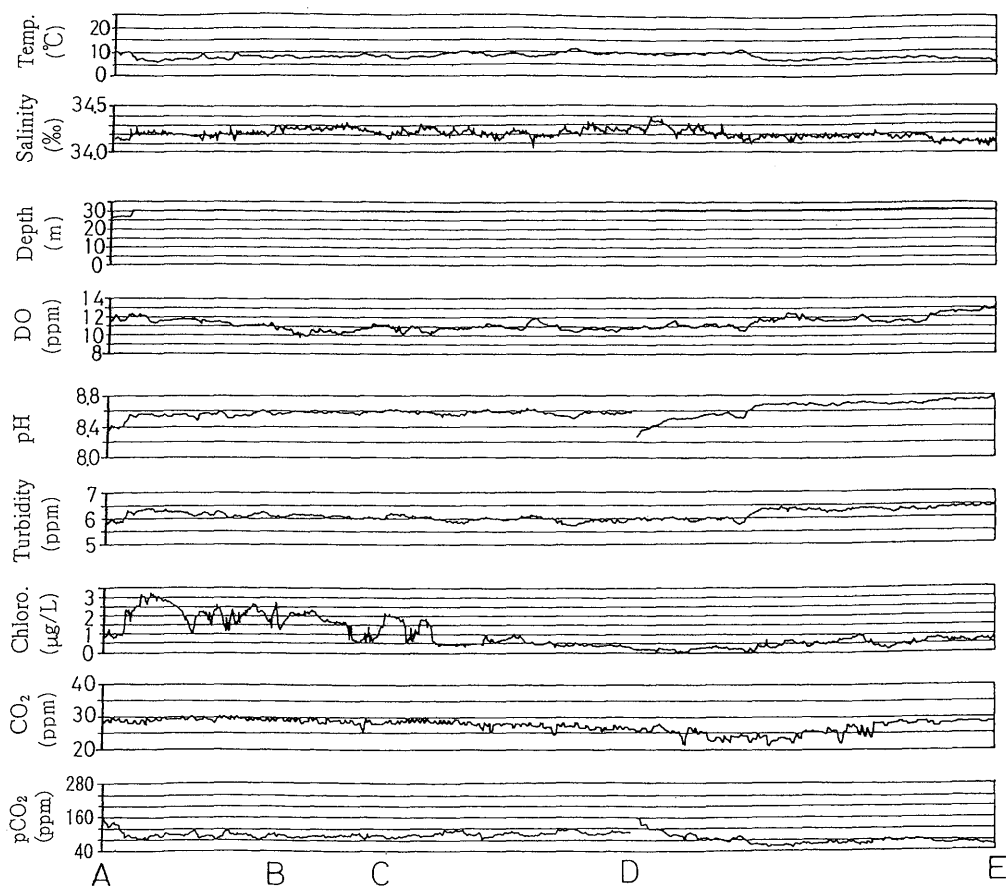


図12 スカラー量の観測結果

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ので、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についてはD点を過ぎる地点での変化は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、十分でないので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。また炭酸ガス濃度については特に鉛直方向変化が大きく、また重要とされているので、今後はFlying Fishの性能を生かして、鉛直方向の分布も計測したい。

超音波ドップラー式流速計による流速分布のデータを図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

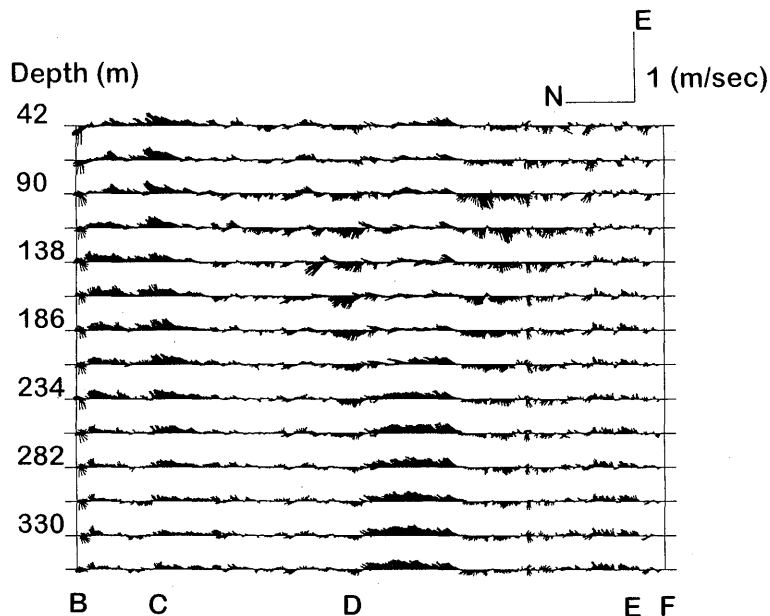


図13 流速分布

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 200 m 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が存在が顕著となる。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 $p\text{CO}_2$ 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。そこで図 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 5 m 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 5 m 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。

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

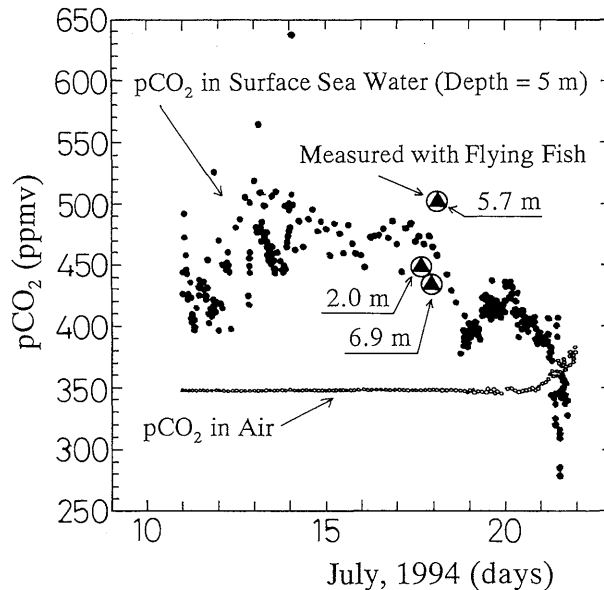


図14 炭酸ガス濃度の計測結果の比較

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 ± 0.05 m, 縦揺れは ± 1 度, 横揺れは ± 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働に十分である。
2. 深度変更時のような非定常状態でも縦揺れは ± 3 度, 横揺れは ± 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赤松・阿部・松井氏、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。さらに海上実験にあたって、全面的にご協力いただいたクロモフ号および長崎大学鶴洋丸の皆様と応用力学研究所の安部、北、稲田技官に深く感謝します。

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., Kawatake, K., Koterayama, W., Suhara, T. and Mitsuyasu, H.: Moored Instrument Observations in the Kuroshio Stuth 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) Kajiwarara, 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)

(平成 8 年 5 月 31 日 受理)