

浮流重油自動追従ブイシステムの開発（第1報）

—浮流重油自動追従ブイの運動解析—

正員 千賀英敬*	正員 加藤直三*
馬蓉*	学生員 伊東飛鳥*
学生員 宮川智行*	吉江宗生**
藤田勇**	正員 大森英行***

Development of a Spilled Oil Chasing Autonomous Buoy System (1st Report)
- Analysis of maneuverability of a Spilled Oil Chasing Autonomous Buoy -

by Hidetaka Senga, <i>Member</i>	Naomi Kato, <i>Member</i>
Rong Ma,	Asuka Ito, <i>Student Member</i>
Tomoyuki Miyagawa, <i>Student Member</i>	Muneo Yoshie
Isamu Fujita	Hideyuki Omori, <i>Member</i>

Summary

In recent years, the congested tanker route and abnormal weather unfortunately raise the possibility of sea accidents. Spilled oil from a stranded ship pollutes the ocean environment and also does damage to the regional economics. Therefore, in order to prevent damages spreading, it is very important for us to take adequate measures as soon as possible. Under the circumstances, we are developing an autonomous buoy, which is dropped into the sea and chases spilled oil autonomously when the ship accident occurs. This buoy is expected to inform us in real time of the location of the spilled oil and meteorological and oceanographic data around it. This paper is the first report on the development of a spilled oil chasing autonomous buoy system. This paper firstly introduces the total system of a spilled oil chasing buoy, and secondly shows the experimental and numerical results of maneuverability of the buoy model.

1. 緒言

1997年に発生したナホトカ号の大規模重油流出事故後も、船舶からの油流出事故は2002年にスペイン沖で座礁・沈没したプレステージ号等、世界各地で発生している。流出した重油は波により水と混ざりエマルジョン化し、粘度が非常に高くなる。従って沿岸に漂着した場合の残存性は高く、自然環境に与える被害は非常に大きい。またその回復には多大な時間と労力を必要とし、地域経済にもたらす損失も大きい。

このような浮流重油の沿岸への漂着を防止し、油流出事故による環境被害を最小限に止めるためには、重油を海上で回収すること、また数に限りのある流出油回収機材を漂着予測

沿岸域へ如何に重点的に配置するかが問題となる。前者には流出油の正確な現在位置が必要であり、後者には流出油の高精度漂流予測を行うために漂流海域におけるリアルタイムでの気象・海象条件が必要である。しかしながら、これらの必要情報をリアルタイムで供給する機器は未だ存在しない。

本研究では、事故による油流出直後から重油を自動追従すると同時に、漂流位置及びその周りの気象・海象条件をリアルタイムで基地局へ供給する浮流重油自動追従ブイシステムの開発を目指している。本論文はその第1報であり、まず浮流重油自動追従ブイシステムの説明を述べる。

また浮流重油自動追従ブイの形状最適化に用いることを目的とし、運動解析プログラムの開発を行った。その妥当性及び浮流重油自動追従ブイの運動性能を検証するため、ブイ模型を用いた水槽実験を行った。本論文では両結果の比較から得られた考察も報告する。

* 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
** (独) 港湾空港技術研究所
*** (株) 三井造船昭島研究所

原稿受理 平成18年9月7日

2. 浮流重油自動追従ブイシステムの概要と研究計画

2.1 浮流重油自動追従ブイシステム

これまでの浮流重油を発見するための代表的な例として、次の手法が挙げられる。

- ① 油の発光現象を利用した監視システム（蛍光ライダー）
- ② 赤外分光光度計を用いた油種特定
- ③ 油膜監視ブイ

①は（独）海上技術安全研究所により開発されたヘリコプターによる監視システムである¹⁾。このシステムにおいては、ヘリコプターの航続時間の制限から長時間の流出油追跡は難しい。②は第六管区海上保安本部による手法で、海水を採取後、実験室で解析を行い油種や排出源の特定を行う。③はゼニライトブイ社による海上に設置し常時観測を行うブイであり、浮流油の追跡を行うことは出来ない。

上記を踏まえ、本研究では次の2つの特性を持つ浮流重油自動追従ブイの開発を目指す。

- ・流出直後に海上に投入され、浮流重油の自動追従を行う
- ・重油漂流海域の気象、海象データのリアルタイム供給

これらの2つの特性を合わせ持つブイは、第一に浮流重油の現在位置を供給することによる海上での流出油回収作業を支援する。そしてリアルタイムでの気象・海象データの供給による、高精度の漂流予測を可能とし、漂着予測沿岸において適切な対策を予め講じることが可能となる。

浮流重油自動追従ブイは、油の流出直後から長期間にわたってリアルタイムデータを供給することが求められる。従って浮流重油を自動追従するためにかかるエネルギーをなるべく低く抑える必要がある。海面上にてプロペラを用いた水平方向移動を行う場合、移動時には常に作動させている必要がある。また推進機構としてプロペラを用いた場合、高粘度の重油の影響によりプロペラが故障して正常に作動せず、追従を行えなくなる可能性がある。そこで本研究では浮力と翼角の制御により、水平方向への移動を行う仕様とした。(Fig. 1)。

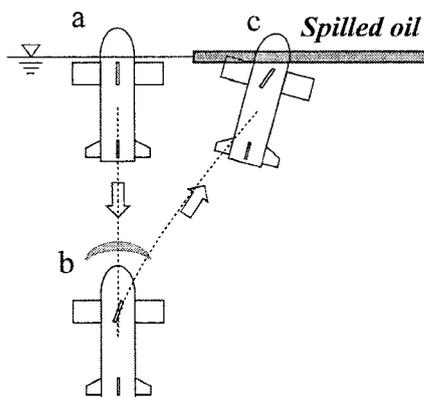


Fig.1 Schematic image of spilled oil chasing buoy

Fig. 1 に示すように、波・風等の外乱により重油中から外れた場合、接触式センサーによりブイ周囲に重油が無いことが検知され、ブイは追従制御モードへと移行する(a)。追従制御モードでは、先ず浮力調整装置により浮力を低減させ潜航を開始する。一定の水深に達した後、非接触式センサーにより、ブイ上方の油塊浮流位置及びその領域の検知を行う。そして浮力増加及びフィンによる浮上方向制御を行い油塊の検知された方向へと浮上を開始する(b)。浮上後、接触式センサーによりブイ周囲の重油の有無を検知し、ブイが油塊の中に納まるまでこの潜航・浮上による自動追従は繰り返される(c)。また、ブイが重油中にある場合、現在位置及び周囲の気象、海象データをリアルタイムで基地局へと供給する。

2.2 研究の実施方法

本研究は今後2年以内に浮流重油自動追従ブイシステムの海上試験を行う予定である。従ってブイ本体の開発と、重油検知センサーの開発及びデータ受信システムの構築を同時に行う必要がある。今後の研究計画は Fig.2 に示すとおりである。

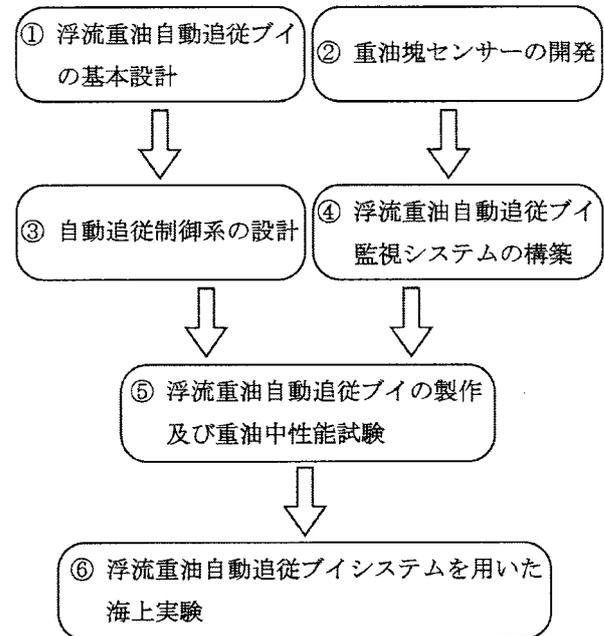


Fig.2 Flow chart of this project

Fig.2 に示される①～⑤の具体的な内容としては、

- ① 浮流重油自動追従ブイ及び制御系の設計
 - ・ブイ本体の設計
 - ・ブイ模型を用いた水槽での運動性能試験
- ② 重油塊センサーの開発
 - ・接触、非接触式重油塊検知センサーの開発
 - ・センサー部のみの性能確認試験
- ③ 自動追従制御系の設計

- ・浮流重油の自動追従を行うための制御系の設計
 - ④ 浮流重油自動追従ブイ監視システムの構築
 - ・ブイ側の情報受発信、海象計測システムの構築
 - ・陸上側の重油漂流位置表示システムの構築
 - ⑤ 浮流重油自動追従ブイの製作及び重油中性能試験
 - ・①～④の結果を基に、重油検出装置、気象及び海象計測装置、GPS のリアルタイムデータ計測用機材を搭載したブイの製作
 - ・ブイの情報受発信能力及び浮流重油自動追従性能の確認
 - ・ブイ機材及び各システムの調整
 - ⑥ 浮流重油自動追従ブイシステムを用いた海上実験
 - ・⑤までに製作、構築されたシステムの海上での性能確認
 - ・海上でのデータ取得、及び通信面からの浮流重油自動追従ブイシステムの有効性評価
- である。

研究計画の①、③に関しては主として大阪大学が担当し、また②、④に関しては(株)三井造船船島研究所と油回収実海域再現水槽を所有する(独)港湾空港技術研究所が担当する。⑤、⑥に関してはこれら3つの研究機関が共同で行う。

3. 浮流重油自動追従ブイの運動の数値解析

浮流重油自動追従ブイの実用化に向け、最適な機体の重量分布及びフィンの形状等を決定するため、運動解析プログラムの開発を行った。以下に浮流重油自動追従ブイの運動方程式の導出過程を簡潔に示す。

3.1 座標系と浮流重油自動追従ブイの運動方程式

剛体であるブイに働く流体力を計算する場合、各変数は機体固定座標系で表す方が便利である³⁾。本研究では、機体固定座標系 $O-XYZ$ の原点 O は機体の重心 G と一致するようにとり、この座標系 $O-XYZ$ における機体の運動速度 U 及び角速度 ω の成分をそれぞれ (U_x, U_r, U_z) 及び $(\omega_x, \omega_r, \omega_z)$ とする。また機体の位置と姿勢を定義するために空間固定座標系 $O_E-X_EY_EZ_E$ を導入する。これらの座標系を Fig. 3 に示す。

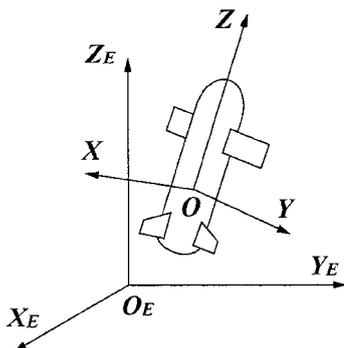


Fig.3 Coordinate system of spilled oil chasing buoy

$O_E-X_EY_EZ_E$ 系における機体の位置 (X_E, Y_E, Z_E) は、 $O-XYZ$ 系における機体の位置 (X, Y, Z) 及び Z_E 軸 $\rightarrow Y_E$ 軸 $\rightarrow X_E$ 軸の順を有する回転 ψ, θ, ϕ で定義するオイラー角を用いることにより、以下のように表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} X_E & Y_E & Z_E \end{bmatrix}^T = E(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

ここで $E(\phi, \theta, \psi)$ は次式で示される座標変換行列である。

$$E(\phi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$O_E-X_EY_EZ_E$ 系における機体重心座標を (x_E, y_E, z_E) とし、 $O-XYZ$ 系における機体重心の移動速度を (U_x, U_r, U_z) すると(1)式及び(2)式より以下の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{dx_E}{dt} &= U_x \cos\theta \cos\psi + U_r (\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi) \\ &\quad + U_z (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \\ \frac{dy_E}{dt} &= U_x \cos\theta \sin\psi + U_r (\sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi) \\ &\quad + U_z (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \\ \frac{dz_E}{dt} &= -U_x \sin\theta + U_r \sin\phi \cos\theta + U_z \cos\phi \cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

また、オイラー角と機体角速度 $(\omega_x, \omega_r, \omega_z)$ の関係は次式となる。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_r \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_B(\phi, \theta) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

(4)式を $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ について解き、次式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega_x + \omega_r \sin\phi \tan\theta + \omega_z \cos\phi \tan\theta \\ \dot{\theta} &= \omega_r \cos\phi - \omega_z \sin\phi \\ \dot{\psi} &= \omega_r \sin\phi \sec\theta + \omega_z \cos\phi \sec\theta \end{aligned} \quad (5)$$

従って、空間固定座標系 $O_E-X_EY_EZ_E$ における6つの未知量 $x_E, y_E, z_E, \phi, \theta, \psi$ の初期条件と、機体固定座標系 $O-XYZ$ における6つの未知量 $U_x, U_r, U_z, \omega_x, \omega_r, \omega_z$ の時刻履歴が与えられれば、(3)式と(5)式を連立させて解き、空間固定座標系に対する機体の重心位置及び姿勢を求めることが可能となる。

一方、機体とその周りの流体は次式で表されるラグランジュの運動方程式より導出した。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (6)$$

ここで、 Q_i は q_i に対する一般力、 T は機体と流体の運動エネルギーである。(6)式において q_i を $O_{\sigma} X_0 Y_0 Z_0$ に従ってベクトル要素とし、機体が XZ 平面及び YZ 平面に関して対称な形状を成していることを考慮すると、最終的に以下の運動方程式を得ることが出来る⁴⁾。

$$\begin{aligned} M\dot{U}_x + A_{11}\dot{V}_x + A_{15}\dot{\omega}_r - \omega_z \{ MU_y + A_{22}V_y + A_{24}\omega_x \} \\ + \omega_r \{ MU_z + A_{33}V_z \} = F_x \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M\dot{U}_y + A_{22}\dot{V}_y + A_{24}\dot{\omega}_x - \omega_x \{ MU_z + A_{33}V_z \} \\ + \omega_z \{ MU_x + A_{11}V_x + A_{15}\omega_r \} = F_y \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M\dot{U}_z + A_{33}\dot{V}_z - \omega_r \{ MU_x + A_{11}V_x + A_{15}\omega_r \} \\ + \omega_x \{ MU_y + A_{22}V_y + A_{24}\omega_x \} = F_z \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (I_{xx} + A_{44})\dot{\omega}_x + A_{24}\dot{V}_y - U_z \{ MU_y + A_{22}V_y + A_{24}\omega_x \} \\ + U_y \{ MU_z + A_{33}V_z \} - \omega_z \{ I_{yy}\omega_r + A_{55}\omega_r + A_{15}V_x \} \\ + \omega_r \{ I_{zz}\omega_z + A_{66}\omega_z \} = M_x \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (I_{yy} + A_{55})\dot{\omega}_r + A_{15}\dot{V}_x - U_x \{ MU_z + A_{33}V_z \} \\ + U_z \{ MU_x + A_{11}V_x + A_{15}\omega_r \} - \omega_x \{ I_{zz}\omega_z + A_{66}\omega_z \} \\ + \omega_z \{ I_{xx}\omega_x + A_{44}\omega_x + A_{24}V_y \} = M_y \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (I_{zz} + A_{66})\dot{\omega}_z - U_y \{ MU_x + A_{11}V_x + A_{15}\omega_r \} \\ + U_x \{ MU_y + A_{22}V_y + A_{24}\omega_x \} - \omega_r \{ I_{xx}\omega_x + A_{44}\omega_x + A_{24}V_y \} \\ + \omega_x \{ I_{yy}\omega_r + A_{55}\omega_r + A_{15}V_x \} = M_z \end{aligned} \quad (12)$$

ここで M は機体の質量、 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} は慣性性能率、 A_{ij} は機体の付加質量及び付加慣性モーメントであり、物体表面に吹出し分布を配置する Hess & Smith 法を用いて算出した。また、 $V = (V_x, V_y, V_z)$ は機体の絶対速度ベクトル $U = (U_x, U_y, U_z)$ と機体周りの流体の速度ベクトル $W = (W_x, W_y, W_z)$ との相対速度ベクトル $V = U - W$ である。

(7)~(12)式中における外力 (F_x, F_y, F_z) 及びモーメント (M_x, M_y, M_z) は流体の密度を ρ 、重力加速度を g 、機体の排水体積を V_B 、機体内部の浮力調整装置による浮力を F_{buoy} 、また機体に働く流体力 (F_{HX}, F_{HY}, F_{HZ}) 及びそれらによるモーメント (M_{HX}, M_{HY}, M_{HZ}) を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} &= (\rho g V_B - Mg + F_{buoy}) \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \sin\phi \\ \cos\theta \cos\phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{HX} \\ F_{HY} \\ F_{HZ} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} &= (\rho g V_B + F_{buoy}) \begin{pmatrix} y_B \cos\theta \cos\phi - z_B \cos\theta \sin\phi \\ z_B(-\sin\theta) - x_B \cos\theta \cos\phi \\ x_B \cos\theta \sin\phi - y_B(-\sin\theta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{HX} \\ M_{HY} \\ M_{HZ} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 流体力及びモーメント

機体に働く流体力 (F_{HX}, F_{HY}, F_{HZ}) は、瞬間的な機体の速度に垂直及び平行な成分である揚力 L と抗力 D に分解することができる。計算の単純化のため、これらの力を XZ 及び YZ 平面内でそれぞれ独立させて取り扱う。それぞれの面内での揚力 L_x, L_y 及び抗力 D_x, D_y は、機体の相対速度 (V_x, V_y, V_z) から得られる XZ 及び YZ 平面内の合速度 (V_{cx}, V_{cy}) 、動圧と機体の排水体積 V_B の $2/3$ 乗で無次元化された揚力係数 C_{Lx}, C_{Ly} 及び抗力係数 C_{Dx}, C_{Dy} を用いることにより、以下の式で表すことが出来る。

$$V_{cx} = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}, \quad V_{cy} = \sqrt{V_y^2 + V_z^2} \quad (14)$$

$$\begin{cases} L_x = \frac{1}{2} \rho V_{cx}^2 V_B^{\frac{2}{3}} C_{Lx} & L_y = \frac{1}{2} \rho V_{cy}^2 V_B^{\frac{2}{3}} C_{Ly} \\ D_x = \frac{1}{2} \rho V_{cx}^2 V_B^{\frac{2}{3}} C_{Dx} & D_y = \frac{1}{2} \rho V_{cy}^2 V_B^{\frac{2}{3}} C_{Dy} \end{cases} \quad (15)$$

(15)式を用いることにより、機体に働く流体力 (F_{HX}, F_{HY}, F_{HZ}) は次式で表すことが出来る。

$$\begin{aligned} F_{HX} &= -L_x \cos\alpha - D_x \sin\alpha \\ F_{HY} &= -L_y \cos\beta - D_y \sin\beta \\ F_{HZ} &= L_x \sin\alpha + L_y \cos\beta - (l \cdot D_x \cos\alpha + m \cdot D_y \cos\beta) \end{aligned} \quad (16)$$

(16)式において α 及び β は XZ 及び YZ 平面内における機体の迎角、そして l 及び m は XZ 及び YZ 平面の抗力を Z 軸方向に合成する際の重みであり、それぞれ次式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_x}{V_z} \right), \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_z} \right) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} l &= \cos^2 \gamma \\ m &= \sin^2 \gamma, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

次に、流体力によって機体重心回りに働く X, Y として Z 軸回りのモーメント (M_{HX}, M_{HY}, M_{HZ}) を考える。この時、簡便のために流体力による Z 軸回りのモーメントは 0 とした。 X 及び Y 軸回りのモーメントは動圧 $1/2 \rho U^2$ と機体の排水体積 V_B で無次元化されたモーメント係数 C_{Mx}, C_{My} を用いることによ

り、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} M_{HX} &= \frac{1}{2} \rho V c r^2 V_B C_{MX} \\ M_{HY} &= \frac{1}{2} \rho V c x^2 V_B C_{MY} \\ M_{HZ} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

3.3 揚力係数、抗力係数及びモーメント係数

機体の X 軸上及び Y 軸上には同一の可動翼そして固定尾翼がそれぞれ取り付けられている。揚力係数 C_{Lx}, C_{Ly} 及び抗力係数 C_{Dx}, C_{Dy} は機体の胴体部、可動翼部、そして尾翼部で発生する成分に分解し、それぞれ添え字 fus, w, t を用いて表すと以下の式となる。

$$\begin{cases} C_{Lx} = (C_{Lx})_{fus} + \frac{S_w}{V_B^{3/2}} (C_{Lx})_w + \frac{S_t}{V_B^{3/2}} (C_{Lx})_t \\ C_{Ly} = (C_{Ly})_{fus} + \frac{S_w}{V_B^{3/2}} (C_{Ly})_w + \frac{S_t}{V_B^{3/2}} (C_{Ly})_t \\ C_{Dx} = (C_{Dx})_{fus} + \frac{S_w}{V_B^{3/2}} (C_{Dx})_w + \frac{S_t}{V_B^{3/2}} (C_{Dx})_t \\ C_{Dy} = (C_{Dy})_{fus} + \frac{S_w}{V_B^{3/2}} (C_{Dy})_w + \frac{S_t}{V_B^{3/2}} (C_{Dy})_t \end{cases} \quad (20)$$

ここで、 S_w と S_t はそれぞれ可動翼及び尾翼の面積である。

同様に、流体力による機体重心回りのモーメント係数を機体各部における成分に分解すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} C_{MHX} &= (C_{MHX})_{fus} + \frac{c_w S_w}{V_B} (C_{MHX})_w + \frac{c_t S_t}{V_B} (C_{MHX})_t \\ &\quad + \frac{l_w S_w}{V_B} (C_{Ly})_w - \frac{l_t S_t}{V_B} (C_{Ly})_t \\ C_{MHY} &= (C_{MHY})_{fus} + \frac{c_w S_w}{V_B} (C_{MHY})_w + \frac{c_t S_t}{V_B} (C_{MHY})_t \\ &\quad + \frac{l_w S_w}{V_B^{3/2}} (C_{Lx})_w - \frac{l_t S_t}{V_B^{3/2}} (C_{Lx})_t \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 l_w, l_t は機体重心から各翼の空力中心までの距離であり、 c_w, c_t は各翼の平均空力翼弦である。

本研究では、(20)及び(21)式を用いて流体力係数を推定するにあたり、レイノルズ数とマッハ数の影響、そして翼に関する抵抗及びピッチングモーメントは無視した。従って以下の流体力係数は0とした。

$$\begin{aligned} (C_{Dx})_w = (C_{Dx})_t = (C_{Dy})_w = (C_{Dy})_t = 0 \\ (C_{MHx})_w = (C_{MHx})_t = (C_{MHy})_w = (C_{MHy})_t = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

(20)式中の胴体部の揚力係数 $(C_{Lx})_{fus}, (C_{Ly})_{fus}$ 及び抗力係数 $(C_{Dx})_{fus}, (C_{Dy})_{fus}$ は DATCOM METHOD⁵⁾ を用いて算出し、各

平面内での迎角 α 及び β の関数とした。また、可動翼と尾翼の揚力傾斜をそれぞれ a_w, a_t 、 X 及び Y 軸に対して垂直に取り付けられた可動翼の翼角をそれぞれ δ_x, δ_y とすると、可動翼部及び尾翼部での揚力係数は、浮上・潜航時に関してそれぞれ以下の式で表される³⁾。

・浮上時

$$\begin{aligned} (C_{Lx})_w = a_w(\alpha - \delta_x), \quad (C_{Lx})_t = a_t(\alpha - \varepsilon_{xw}) \\ (C_{Ly})_w = a_w(\beta + \delta_y), \quad (C_{Ly})_t = a_t(\beta - \varepsilon_{yw}) \end{aligned} \quad (23)$$

・潜航時

$$\begin{aligned} (C_{Lx})_w = a_w(\alpha - \delta_x - \varepsilon_{x1}), \quad (C_{Lx})_t = a_t \alpha \\ (C_{Ly})_w = a_w(\beta + \delta_y - \varepsilon_{y1}), \quad (C_{Ly})_t = a_t \beta \end{aligned} \quad (24)$$

ここで $\varepsilon_{xw}, \varepsilon_{yw}$ 及び $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{y1}$ は、 XZ, YZ 平面においてそれぞれ浮上・潜航時に前翼となる翼によって後翼に対して生じる吹き下ろし角であり、可動翼及び尾翼のアスペクト比をそれぞれ $(AR)_w, (AR)_t$ とすると以下の式で表される。

$$\varepsilon_{xw} = \frac{2a_w}{\pi(AR)_w}(\alpha - \delta_x), \quad \varepsilon_{yw} = \frac{2a_w}{\pi(AR)_w}(\beta + \delta_y) \quad (25)$$

$$\varepsilon_{x1} = \frac{2a_t}{\pi(AR)_t} \alpha, \quad \varepsilon_{y1} = \frac{2a_t}{\pi(AR)_t} \beta \quad (26)$$

4. 浮流重油自動追従ブイの模型実験

開発した運動解析プログラムの妥当性を検証するため、そして浮流重油自動追従ブイの運動性能を検証するために、本研究では浮流重油自動追従ブイの基本模型を用いた水槽実験を行った。

4.1 浮流重油自動追従ブイ模型

現在のところ、浮流重油自動追従ブイ実機が用いられるのは表層の重油が最大で 0.15 [m/sec] で流されており、また潜航・重油位置の検知・浮上に合わせて約 40 [sec] 掛かる場合を想定している。従って浮流重油を追従するために、実機では 10 [m] 浮上する間に水平方向に最大で 6 [m] 程度移動出来る性能が必要である。今回作成した模型は翼角と浮力調整による移動試験を行うための模型であり、実機に要求される運動性能を満足するものではない。使用した模型の写真を Fig. 4 に、またその主要目を Table 1 に示す。Fig. 4 に示されるとおり、本研究で用いたブイの基本模型には XZ 及び YZ 平面にそれぞれ1対の尾翼が取り付けられており、主翼である可動翼に関しては1平面内(実験時における YZ 平面内)にのみ1対取り付けられている。この2枚の可動翼は同一の回転を行うため、本研究で使用したブイ模型は XZ 平面での運動のみを行う。また、本模型は浮力及び翼角に関して外部から

の入力により制御する機構となっている。

本研究で採用しているような浮力（重力）と翼角の調整により移動を行う海中器機としては、上野らによる研究成果が挙げられる²⁾。上野らは水深3,000mまで下降する器機を対象としており、機体の定常状態における運動が支配的である。一方、本研究で開発を目指している機体は海面と水深約10mとの間を潜航・浮上して浮流重油の追跡を行うため、過渡状態が支配的である。

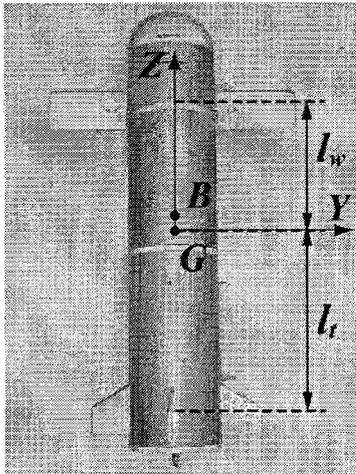


Fig.4 Model of spilled oil chasing autonomous buoy

Table 1 Principle particulars of the model

Length [m]	0.831	
Diameter [m]	0.165	
Wing	Chord [m]	0.075
	Span [m]	0.150
	l_w [m]	0.220
Tail wing	Chord at tip [m]	0.050
	Chord at root [m]	0.070
	Span [m]	0.070
	l_t [m]	0.425
Weight in air [kgf]	11.50	
Weight in water [kgf]	-0.150 ~ 0.150	

4.2 実験方法及び実験条件

浮流重油自動追従ブイは波等の外乱により重油塊から外れた場合、浮力と可動翼を制御することにより再度浮流重油塊内へ移動する。その運動性能を検証するため、一定の浮力に対して翼角を変化させる実験を大阪大学の長水槽(L x B x D = 100 x 7.8 x 4.35[m])内で外乱の無い静水で行った。

実験の手順は、まず一定の浮力 F_{buoy} 及び翼角 δ_x に設定したブイ模型を水槽底に設置された台に固定する。その後、支持棒を取り外すことによりブイ模型の固定を解き、浮力による模型の鉛直方向浮上距離Z、可動翼による水平方向移動距離

X、そしてY軸回りの傾斜角 θ を計測した。ブイ模型の3次元的位置計測には音響装置を、また傾斜角に関しては模型内部に取り付けられた方位傾斜計により計測した。

海中ロボットの運動には浮心・重心差であるBGが大きく影響を及ぼす。本実験に用いた模型は、内部のCPUや可動翼用サーボモータ等の配置場所の制限、そして浮力材を加減することによる浮力調整のため、BGを大きく変えて実験を行うことが困難であった。従って、本研究においてBGの変化による運動性能の比較に関しては議論しない。BGによる運動性能の比較には上野らによる研究²⁾が挙げられる。Table 2に今回行った実験の浮力(F_{buoy})とその時のBG及び翼角(δ_y)を、また実験装置の概略図をFig. 5に示す。

Table 2 Experimental conditions

Wing angle δ_y [deg]	F_{buoy} [kgf] and BG [m]	
	0.060, 0.032	0.120, 0.034
0	Exp001	Exp005
5	Exp002	Exp006
10	Exp003	Exp007
15	Exp004	Exp008

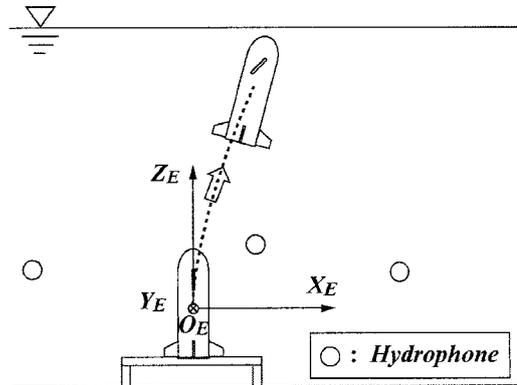


Fig.5 Overview of the experimental set-up

5. 実験・数値計算結果の比較及び考察

5.1 水平方向移動距離の比較

浮流重油自動追従ブイは自身の持つ翼の角度を変化させ浮上を行うことにより、水平方向移動を行う。Fig.6a, 6bに浮力をそれぞれ0.060, 0.120 [kgf]、翼角を0, 5, 10, 15 [deg]とした場合の水平方向位置時系列の実験・数値計算結果を示す。

Figs. 6において、実験・数値計算の両結果より本研究で用いたブイ模型は翼角を変化させることによって水平方向移動が可能であることが分かる。また、翼角の増加に伴い、水平方向移動距離は増加していることが確認できる。

実験結果において、翼角が0 [deg]であっても水平方向に移動していること、また実験開始直後に $-X_E$ 側に移動を行っていることが確認出来る。これはブイ模型の初期傾斜角 θ_0 を

完全に 0 [deg]には出来ないこと、また実験計測開始時、ブイ模型の固定を解く際に傾斜角がついてしまったことが原因だと考えられる。浮力が大きい場合、この初期傾斜角が水平方向移動距離に及ぼす影響が大きくなるため、Fig.6bにおいて実験結果と数値計算結果に差が表れたと考えられる。また、実験結果には特に実験開始直後、水平方向位置が急に跳躍している箇所がある。その原因として、今回の実験において模型の位置計測に音響装置を用いており、水槽の底面や壁面での反射波や雑音が混入したためだと考えられる。

5.2 鉛直方向移動距離の比較

浮流重油自動追従ブイは内部に装備した浮力調整装置により、潜航・浮上を行う。Fig.7a 及び Fig.7b にそれぞれ Fig.6a, 6b に対応する実験の鉛直方向浮上距離を示す。

Fig.7a, 7b に関しては、実験と数値計算結果にはその挙動に関して大きな差は見られない。浮力の違いによる差としては、実験・数値計算両結果ともが 0.120 [kgf]と大きい場合の方が水底の台から水面までの距離約 3 [m]に達するまでの時間が短くなっていることが確認出来る。

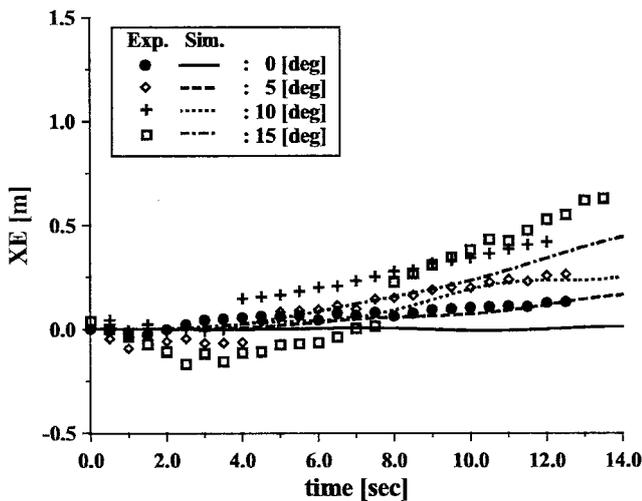


Fig.6a Time histories of horizontal motion
(Exp001 ~Exp004: $F_{buoy} = 0.060$ [kgf])

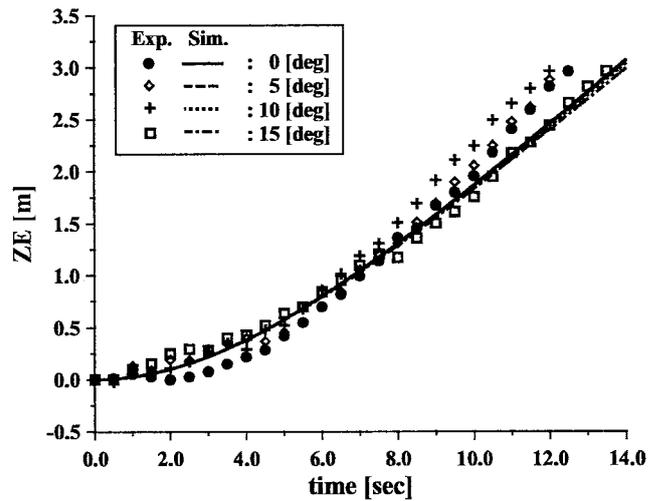


Fig.7a Time histories of vertical motion
(Exp001 ~Exp004: $F_{buoy} = 0.060$ [kgf])

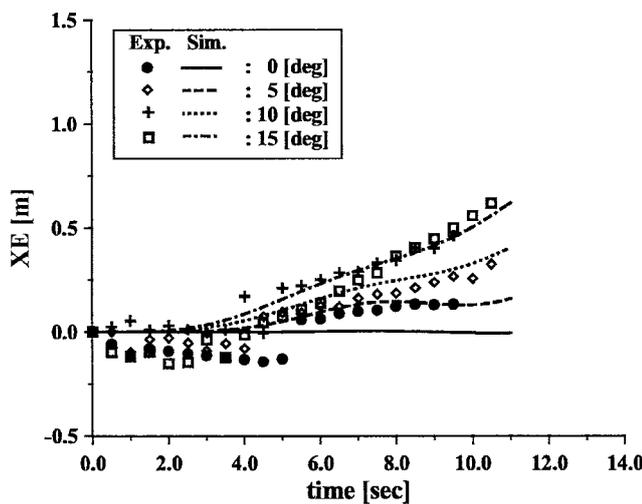


Fig.6b Time histories of horizontal motion
(Exp005 ~Exp008: $F_{buoy} = 0.120$ [kgf])

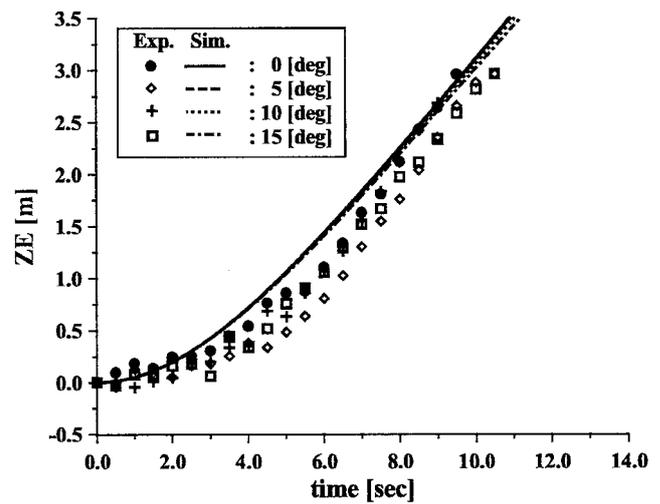


Fig.7b Time histories of vertical motion
(Exp005 ~Exp008: $F_{buoy} = 0.120$ [kgf])

浮力の違いによる水平方向移動距離に関して、実験開始直後には Fig.6a と 6b の両者に大きな差は見られない。また実験開始後 10.0 [sec]程度では、浮力 0.120 [kgf]の方が水平方向移動距離は長くなっていることが分かる。

Fig.7a の実験結果において、10.0 [sec]付近で翼角 0 [deg]の場合よりも翼角が 5, 10 [deg]の場合の方が、鉛直浮上距離が短くなっているが、初期傾斜の影響であると考えている。

5.3 傾斜角の比較

Fig.4 に示されるとおり、ブイ模型の浮心位置は重心位置よりも鉛直上方にあるため、静的には安定である。しかしながら、潜航・浮上及び水平移動を行う際、安定性のためにブイの傾斜角は非常に重要な要素である。

Fig.8a 及び Fig.8b にそれぞれ Exp001 ~ Exp004 及び Exp005 ~ Exp008 において計測された傾斜角の時系列を示す。

Figs.8 において実験結果と数値計算結果の一致はあまりよくない。これは Fig.8a の翼角 0 [deg] の実験結果を見ると、実験終了時の傾斜角は初期傾斜角よりも大きくなっており、実験の精度に問題があったことが考えられる。

傾斜角の計測結果は数値計算結果よりも短い周期で振動している。これには模型の下部が垂直に切り落とされた形状をしている影響が考えられるが、現在のところ主要原因を説明することは出来ない。今回用いた模型は実験時の取り扱いを容易とするために下部を平面形状としたが、この下部形状の影響を今後厳密に検証し、実機設計にかさす必要がある。

実験結果及び数値計算結果それぞれの傾向に関しては、実験開始時の初期傾斜角は各実験で様々であるが、水面到達後の傾斜角は翼角の増加に伴い増加していることは確認することが出来る。

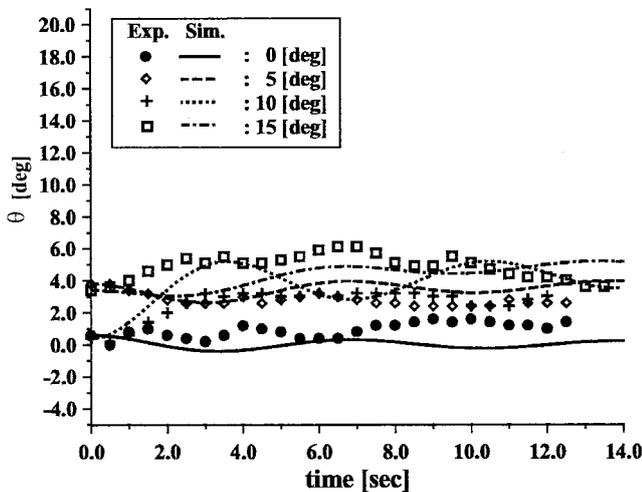


Fig.8a Time histories of pitch angle
(Exp001 ~Exp004: $F_{buoy} = 0.060$ [kgf])

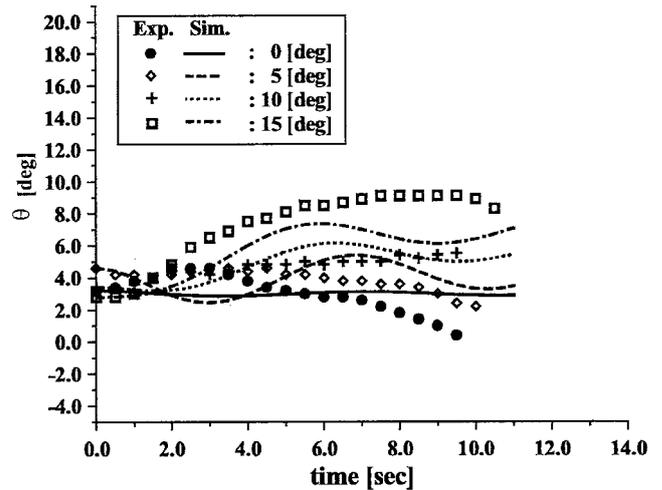


Fig.8b Time histories of pitch angle
(Exp005 ~Exp008: $F_{buoy} = 0.120$ [kgf])

今回の運動性能試験結果を踏まえ、最適な翼形状や翼配置とした新たな模型を作成し、自動追従のための制御実験を行う予定であるが、その際には傾斜角の計測に関して特に注意を払い実験を行う必要がある。

5.4 水平・鉛直方向移動距離と傾斜角の関係

今回の実験においては水槽の水深が 4.35 [m] であるため、浮力 0.120 [kgf] とした場合の計測時間は 10.0 [sec] 前後での比較に限られてしまい、浮力の違いによる水平方・鉛直方向移動距離及び傾斜角の関係を詳しく検証することが出来ない。そこで開発した数値計算法を用い、浮力を 0.02 [kgf] 刻みで変化させ、各浮力で模型が 3.5 [m] 浮上する間の運動特性の比較を行った。計算条件は Table 3 に、また鉛直方向 3.5 [m] 浮上にかかる時間、水平方向移動距離、そして傾斜角の算結果を Fig.9, Fig.10 そして Fig.11 にそれぞれ示す。

Table 3 Simulation conditions

Wing angle δ_γ [deg]	15
BG [m]	0.03
Initial pitch angle [deg]	0
F_{buoy} [kgf]	0.02 ~ 0.24

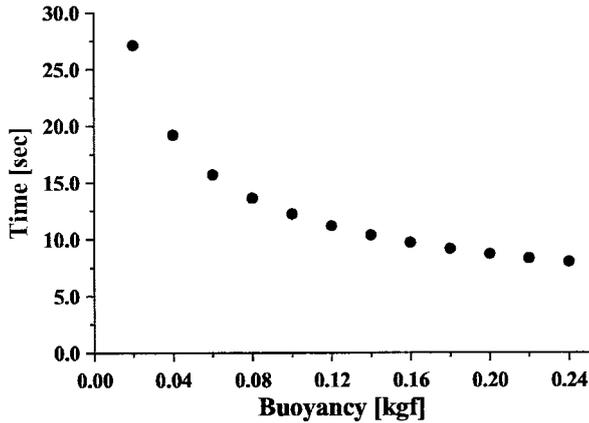


Fig.9 Necessary time to float

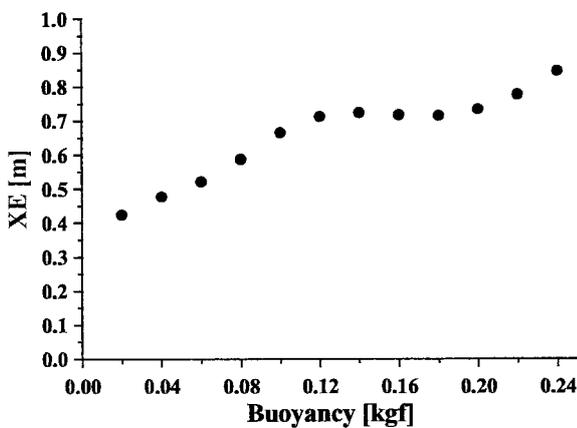


Fig.10 Comparisons of arrival distance

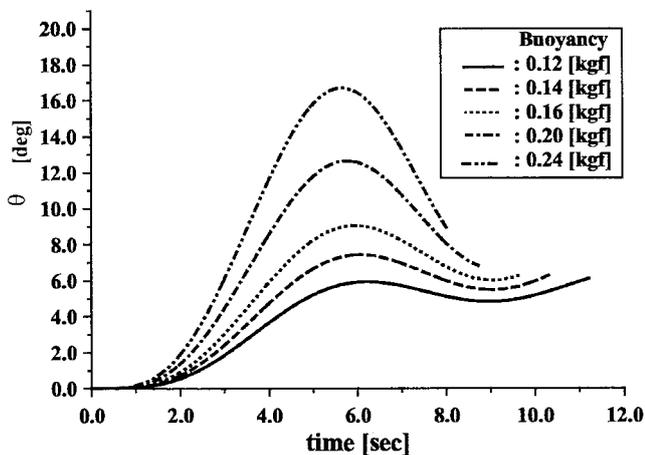


Fig.11 Time histories of pitch angle

Fig.9において、当然のことながら3.5[m]までの浮上にかかる時間は浮力の増加に伴い減少している。ブイが潜航・浮上を行う時に時間がかかると、その間に海面上の重油が風等により流されてしまうため、浮力は大きい方が望ましい。また、Fig. 10において水平方向の移動距離は浮力が0.14[kgf]付近で局所的なピークがあり、その後再度増加している。しかし Fig.11 に示されるとおり、浮力が増加すると浮上開始直後の可動翼に働く揚力も増加するため、模型の傾斜角が大きくなっており、運動の安定性に影響を及ぼすことが考えら

れる。開発を目指す実機は、前述したとおり水深10[m]を往復する予定である。ブイの姿勢が安定で尚且つ効率よく追従を行うため、最適な浮力を検証する必要がある。

6. 結言

船舶事故等による重油流出による被害を最小限にとどめる手段の開発は、近年その必要性が高まっている。本研究ではその一つ的手段として、浮流重油自動追従ブイシステムを提案した。開発を目指すブイは重油の流出直後に海中へと投入されて重油を自動的に追従すると同時に、重油の現在の漂流位置及びその回りの気象・海象状況をリアルタイムで地上の基地局へと送信することを目的としている。

重油の流出直後から長期間にわたり浮流重油の追跡とリアルタイムデータの送信を行うため、外乱により重油塊から外れた場合、ブイはなるべく低いエネルギーで再度重油内へと移動を行う必要がある。そこで、本研究では浮力と翼角の制御により水平・垂直方向移動を行うブイの基本モデルを作成し、水槽にてその基本的な運動性能実験を行った。また開発したブイの運動の数値計算法による計算結果との比較を行い、以下の結論及び考察を得た。

- ・ 浮力調節による浮上と翼角の増減により、水平方向への移動が可能である
- ・ 翼角の増加に伴い水平方向移動距離が増加する
- ・ 浮力の増加に伴い、一定時間内における水平方向移動距離及び鉛直方向浮上距離が増加する
- ・ 最小限の回数での潜航・浮上作業により目的位置へ移動を行うため、定められた潜航・浮上距離に対して水平方向移動距離を最大とする浮力の選定が必要である
- ・ 実験結果と比較し、本数値計算法は水平方向及び鉛直方向に関しては妥当な運動予測結果をもたらすが、傾斜角に関しては再度検証を行う必要がある
- ・ 実験開始直後における低速運動時の非線形影響を考慮することにより、数値計算の精度向上が考えられる

また、最小限の潜航・浮上作業により目的位置へ移動を行うため、開発した数値計算法を用いて機体、可動翼、そして尾翼等の最適形状を求め、新たにブイモデルを作成して制御実験を行う予定である。

謝 辞

本研究で運動性能試験を行った浮流重油追従ブイモデルは(独)港湾空港技術研究所と大阪大学の連携により作成され、共同で研究が行われました。多くの助言を頂いた関係者各位

に深く感謝の意を表します。

また今後の研究は、環境省の環境技術開発特推進費を用い、(独)港湾空港技術研究所、(株)三井造船昭島研究所、そして大阪大学の3者によって行われることを付記します。

参 考 文 献

- 1) 樋富和夫,山岸進,山之内博,柴田俊明,桐谷伸夫:“ 蛍光ライダーによる海洋汚染の検知に関する研究”, 船舶技術研究所報告, 第37巻, 第2号, 2000, pp. 57-64
 - 2) 上野道雄,二村正,安藤裕友,前田克杜弥,田村謙吉,久松勝久,佐伯延博:“ 深海ロボット中継機模型の降下運動計測実験”, 第17回海洋工学シンポジウム, July 17-18, 日本造船学会, 2003, pp. 477-482
 - 3) 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, 1982
 - 4) Akira Azuma and Ken-Ichi Nasu: “The Flight Dynamics of an Ocean Space Surveying Vehicle”, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Report No. 547, May, 1977, pp. 41-90
 - 5) Hoak, D. E.: “USAF Stability and Control Datcom”, AFWAL-TR-83-3048, Wright-Patterson AFB, 1960
-