

## 深海底から噴出する重油・ガスの 自動追跡水中ロボットの誘導シミュレーション

|       |               |
|-------|---------------|
| 木村 亮太 | 大阪大学大学院工学研究科  |
| 加藤 直三 | 大阪大学大学院工学研究科  |
| 鈴木 博善 | 大阪大学大学院工学研究科  |
| 千賀 英敬 | 大阪大学大学院工学研究科  |
| 吉江 宗生 | (独) 港湾空港技術研究所 |
| 田中 敏成 | (独) 港湾空港技術研究所 |

|                  |  |
|------------------|--|
| Ryota Kimura     | Graduate school of Osaka University<br>E-mail: Kimura_Ryota@naoe.eng.osaka-u.ac.jp |
| Naomi Kato       | Graduate school of Osaka University  |
| Hiroyoshi Suzuki | Graduate school of Osaka University  |
| Hidetaka Senga   | Graduate school of Osaka University  |
| Muneo Yoshie     | Port and Airport Research Institute  |
| Toshinari Tanaka | Port and Airport Research Institute  |

### Abstract

Heavy disasters of oil spill on the sea have occurred in recent years. These disasters bring enormous damage on the ocean environment as well as regional economies. An oil drifting simulation must be carried out to forecast where the spilled oil will wash ashore and to adequately deploy oil recovery machines, which requires the meteorological and oceanographic data around spilled oil transmitted in real time starting when the oil spill occurs. A project funded by JSPS is being carried out for 5 years since FY2011 to construct an innovative system for the prevention of ocean disasters. SOTAB-I is a part of such a system. (SOTAB is the abbreviation for Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy.) It has the functions of autonomous tracking and monitoring of spilled plumes of oil and gas from seabed. It is equipped with a buoyancy control device, two pairs of rotational fins for guidance and control and sensors to detect dissolved gas and oil. It has two modes of motion, vertical and horizontal. In vertical mode, it repeats descending and ascending using the buoyancy control device and samples the data of the spilled oil and gas in addition to the current around the robot. In horizontal mode, it moves parallel to the seabed taking photos of the oil well. This paper describes the guidance simulation of the robot in such two modes.

### 1 諸言

#### 1.1 研究背景

エネルギー需要の高まりから、海底での油田掘削量は増加しており、同時に探査や生産時に流出事故が起きる可能性も高まっている。実際、2010年のメキシコ湾原油流出事故に代表されるように、近年でも海における重油流出事故は世界各地で発生している。このような事故によって流出した油は、海水と混ざり合いエマルジョン化・高粘度化する。こうした油はその粘性ゆえに残存性が高く、回収が困難であり、周辺地域に甚大な環境被害を及ぼし、被害地域の生態系や自然環境の回復には膨大な時間と労力が必要となる。被害を最小限に抑えるためには、海底からの油・ガスの噴出を一早く止める方策をとるとともに、海上で浮流している油を回収するか、漂流が予想される沿岸に適切な油防除機材を重点的に配置す

るなど、油を早急に回収する措置が有効である。これを実現するため、さらには大規模な事故を未然に防ぐための油・ガスの海底生産システムまわりの定期的なモニタリングを行うため、これら一連の防災システムを SOTAB(Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy)プロジェクトとして<sup>1)</sup>深海底から噴出する油・ガスを自動的に追跡するロボット SOTAB-I (図中 手段 1)とともに、海象情報発信機能を搭載して漂流油を追跡するロボット SOTAB-II (同 手段 2)<sup>2),3)</sup>と、油追跡シミュレーション(同 手段 3)を組み合わせた流出油の追跡・漂流予測システムの構築を行う5年間にわたる研究を2011年度より実施している。

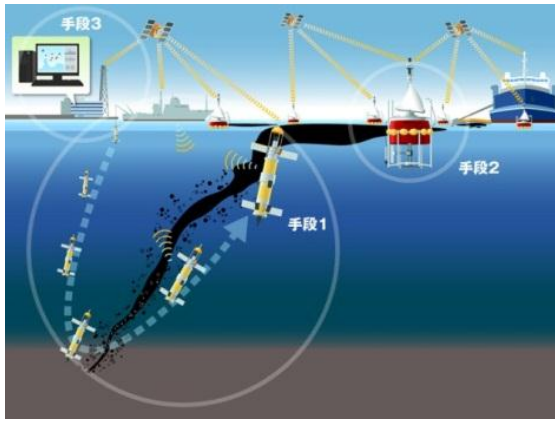


Fig. 1 Concept of whole system

## 1.2 研究目的

本研究では SOTAB-I の設計開発のための誘導シミュレーションを行った。SOTAB-I には大きく分けて 2 つの調査モードが想定されている。1 つは潜航・浮上を繰り返しつつ付近の潮流や流出重油の性状のデータを収集する Vertical モード (Fig. 2)。もう 1 つは深海底において、海底面に対し水平に移動しながら搭載した撮影機材により重油噴出現場の様相を記録する Horizontal モードである (Fig. 3)。

これら 2 つの調査モードを実現するためのシミュレーションプログラムの構築、それを用いた仮想実験、及び CFD 計算による機体流体力係数の推定を行った。

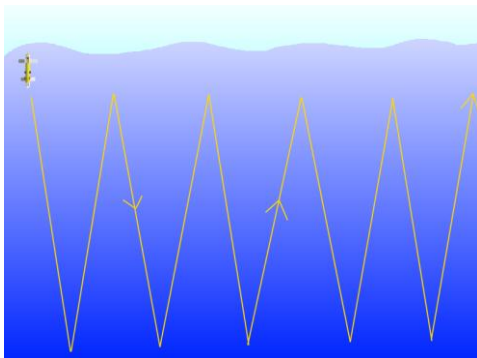


Fig. 2 Vertical mode

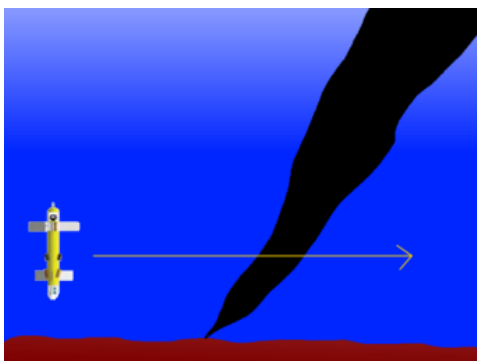


Fig. 3 Horizontal mode

## 2 重油・ガス追跡ロボット SOTAB-I 概要

### 2.1 ロボット概要

SOTAB-I は内部に搭載した浮力調整装置により、2,000m 深度まで潜航・浮上し、機体上部に設置された可動翼の翼角を制御することで水平方向に移動することが可能である。また、搭載された質量分析計により重油やガスパリュームの性状を調査、ADCP により周辺の潮流の観測、その他センサ類により、付近の海象情報を収集し、音響通信測位装置を用いて機体の位置情報と収集したデータを随時洋上の母船に送信する。

### 2.2 運動モード

先述した通り、SOTAB-I は上下動をしつつ付近の潮流や重油の性状を調査する Vertical モード、そして海底面に対し一定の距離を保ちつつ水平に移動する Horizontal モードの二つの運動モードを採用している。

Vertical モードはさらに二つのケースに分けられる。流出現場を中心とし、円柱状のルートを通りながら付近の潮流の様相、重油の分布を確認するケース I (Fig. 4)、及び重油の分布している範囲のみを移動することで重油の性状を詳細に調査するケース II である (Fig. 5)。Fig. 4、Fig. 5 共に灰色で示されているものが流出した重油・ガスのプリュームであり、黄色いラインが SOTAB-I の軌跡である。また、Fig. 5 は重油・ガスパリュームの鉛直断面内を SOTAB-I が移動する様子を示している。

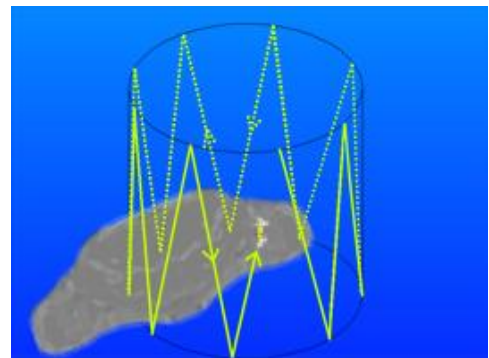


Fig. 4 Case I

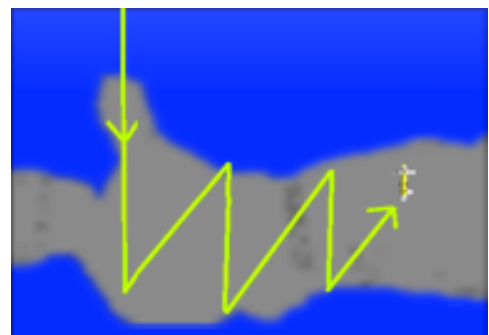


Fig. 5 Case II

## 3 機体の運動方程式とシミュレーションプログラム

### 3.1 座標設定

機体の運動方程式を記述するため、次のように機体固定座標系を定義した (Fig. 6)。

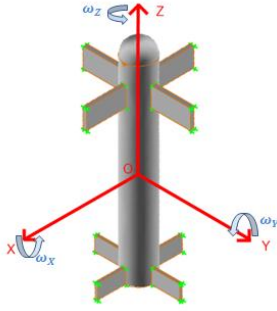


Fig. 6 Body fixed coordinate system

機体の位置と姿勢を定義するため、機体固定座標系の他に、空間固定座標系 $(X_E, Y_E, Z_E)$ を導入し、機体の姿勢は空間固定座標系 $(X_E, Y_E, Z_E)$ に対する機体固定座標系 $(X, Y, Z)$ の向きとして、 $Z-Y-X$ 系のオイラー角 $(\psi, \theta, \phi)$ を用いて定義した。

### 3.2 運動方程式

前節で定めた座標系を用いて、ラグランジュの運動方程式を解くことにより次の運動方程式を決定した。

$$\begin{pmatrix} M + A_{11} & 0 & 0 & 0 & A_{51} & 0 \\ 0 & M + A_{22} & 0 & A_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M + A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{24} & 0 & I_{XX} + A_{44} & 0 & 0 \\ A_{15} & 0 & 0 & 0 & I_{YY} + A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{ZZ} + A_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{-F_1 \sin \theta + F_{HX} + (M + A_{22})\dot{y}\dot{\gamma} - (M + A_{33})\dot{\beta}\dot{z} + A_{24}\dot{\alpha}\dot{\gamma}\} \\ \{F_1 \cos \theta \sin \phi + F_{HY} - (M + A_{11})\dot{y}\dot{x} + (M + A_{33})\dot{\alpha}\dot{z} - A_{15}\dot{\beta}\dot{\gamma}\} \\ \{F_1 \cos \theta \cos \phi + F_{HZ} + (M + A_{11})\dot{\beta}\dot{x} - (M + A_{22})\dot{\alpha}\dot{y} - A_{24}\dot{\alpha}^2 + A_{15}\dot{\beta}^2\} \\ \{F_2(y_B \cos \theta \cos \phi - z_B \cos \theta \sin \phi) + M_{HX} \\ + (A_{22} - A_{33})\dot{y}\dot{z} + A_{24}\dot{\alpha}\dot{z} + A_{15}\dot{y}\dot{x} + (I_{YY} - I_{ZZ} + A_{55} - A_{66})\dot{\beta}\dot{\gamma}\} \\ \{F_2(-z_B \sin \theta - x_B \cos \theta \cos \phi) + M_{HY} \\ - (A_{11} - A_{33})\dot{x}\dot{z} - A_{15}\dot{\beta}\dot{z} - A_{24}\dot{y}\dot{\gamma} + (I_{ZZ} - I_{XX} + A_{66} - A_{44})\dot{y}\dot{\alpha}\} \\ \{F_2(x_B \cos \theta \sin \phi + y_B \sin \theta) + M_{HZ} \\ + (A_{11} - A_{22})\dot{x}\dot{y} - (A_{15} + A_{24})(\dot{\alpha}\dot{x} - \dot{\beta}\dot{y}) + (I_{XX} - I_{YY} + A_{44} - A_{55})\dot{\alpha}\dot{\beta}\} \end{pmatrix} \quad (1)$$

### 3.3 シミュレーションプログラム

SOTAB-Iの機体形状を選定するため、基本となるシミュレーションモデルについて、計算機を用いて式(1)の運動方程式をNewmark- $\beta$ 法を用いて解き、結果をフィードバックすることで最適な形状と制御方法を導き出した。

基本となるモデルの主要目はSOTAB-Iのプロトタイプのものを用いた(Table. 1)。機体形状は、上部に半球のついた円筒に上部可動翼4枚と下部固定翼4枚が設置されたものとなっている(Fig. 7)。また、機体の流体力微係数は主にUSAF DATCOM Methodを用いて算出している(Table. 2)。Table.2の表中における $\alpha$ は可動翼の迎角を表し、流体力微係数は上から順に揚力傾斜 $C_{L\alpha}$ 、揚力係数 $C_L$ 、安定微係数 $C_{m\alpha}$ 、零揚抗力係数 $C_{D0}$ 、抗力傾斜 $C_{D\alpha}$ 、ダンピング係数 $C_{mq}$ である。ただし、ダンピング係数については航空機力学入門を参照した。<sup>4)</sup>

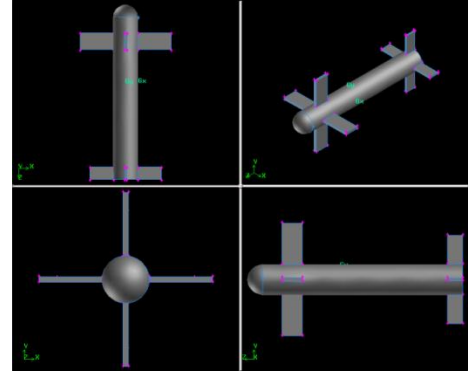


Fig.7 Simulation model (prototype)

Table.1 Principal Particulars of the robot

|            |           |           |
|------------|-----------|-----------|
| 機体全長 [mm]  |           | 2247      |
| 機体直径 [mm]  |           | 297       |
| 気中重量 [kgf] |           | 110       |
| 水中重量 [kgf] |           | -3.0~+3.0 |
| BG [mm]    |           | 70        |
| 可動翼        | コード長 [mm] | 200       |
|            | 翼幅 [mm]   | 400       |
|            | 翼暑 [mm]   | 36        |
| 固定翼        | コード長 [mm] | 150       |
|            | 翼幅 [mm]   | 320       |
|            | 翼暑 [mm]   | 26        |

Table.2 Derivative of the fluid forces

|               | 浮上  | 潜行  |
|---------------|---|---|
| $C_{L\alpha}$ | 0.56697                                   | 0.56697                                   |
| $C_L$         | $0.56697 \alpha$<br>$+0.21229 \alpha^2$   | $0.56697 \alpha$<br>$+0.26119 \alpha^2$   |
| $C_{m\alpha}$ | 1.0418                                    | 0.5467                                    |
| $C_{D0}$      | 0.21073                                   | 1.5105                                    |
| $C_{D\alpha}$ | $0.56697 \alpha^2$<br>$+0.21229 \alpha^3$ | $0.56697 \alpha^2$<br>$+0.26119 \alpha^3$ |
| $C_{mq}$      | -138.3122                                 | -247.935                                  |

### 3.4 シミュレーション結果

SOTAB-Iの機体形状を決定する為に、次の二つを選定の基準とした。

- i). 2,000m 深度までの往復に要する時間
- ii). その時の水平方向移動距離

ii)については、潜航・浮上のどちらの場合も可動翼の翼角を制御し、揚力を得ることで水平方向の推進力としている。以下、シミュレーション結果を示す。

#### (1) 基本モデル (翼角：潜航時 30度, 浮上時 30度)

シミュレーションの結果を、横軸を水平移動距離、縦軸を深度としてグラフ化したものがFig. 8である。この結果より水平移動距離は2,221mであった。また、往復に要した時間は10,926秒、約3時間となった。

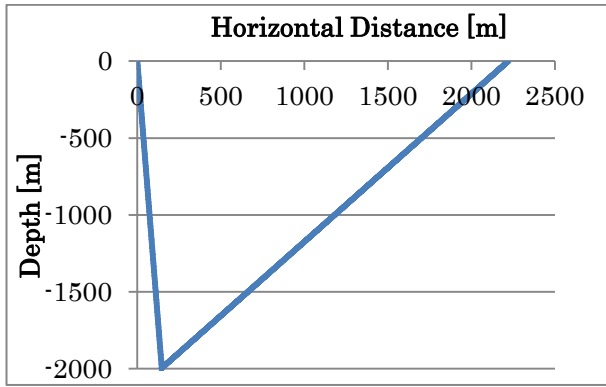


Fig. 8 Depth-Horizontal Distance

この結果を基に、水平移動能力の向上と所要時間の短縮をめざして機体形状を変更してゆく。

- (2) 底部半球モデル (翼角：潜航時 30 度，浮上時 30 度)  
 (1) で示した基本モデルでは水平方向の移動能力に乏しい。そこで、Fig. 9 に示すような底部半球の新モデルを考案した。

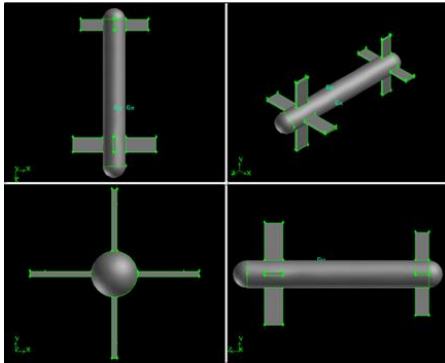


Fig. 9 New simulation model

また、モデル形状の変更により流体力微係数の値も次のように変更している。

Table. 3 Derivative of the fluid forces of new model

|               | 浮上                                       | 潜行                                       |
|---------------|--|--|
| $C_{L\alpha}$ | 0.44583                                  | 0.44583                                  |
| $C_L$         | $0.44583\alpha$<br>$+0.244447\alpha^2$   | $0.44583\alpha$<br>$+0.244447\alpha^2$   |
| $C_{m\alpha}$ | 0.72495114                               | 0.72495114                               |
| $C_{D0}$      | 0.218168                                 | 0.6961                                   |
| $C_{D\alpha}$ | $0.44583\alpha^2$<br>$+0.244447\alpha^3$ | $0.44583\alpha^2$<br>$+0.244447\alpha^3$ |

旧モデルに比べて流体力微係数の値の多くが減少していることが分かる。このモデルについて、先程と同様のシミュレーションを行ったところ、次のような結果を得た(Fig. 10)。この結果によれば、水平移動距離は 2,911m であり、水平方向移動能力が約 31% 向上している。これは、抵抗係数が小さくなることで機体にかかる流体抵抗が減少し、下降速度が大きくなった結果、翼に発生する揚力が大きくなり水平方向の推進力が生まれたからである。また、往復に要した時間は 10,112 秒と短縮している。

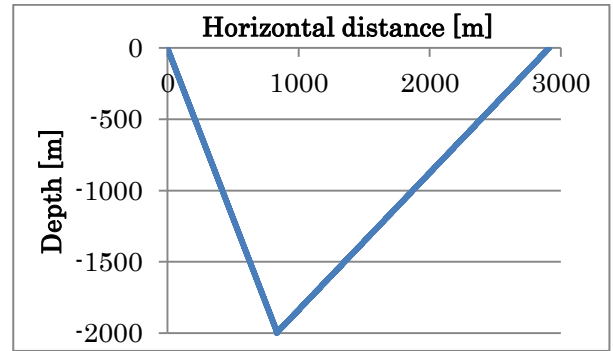


Fig. 10 Depth-Horizontal distance of new model

以下ではこのモデルを用いてシミュレーションを行っている。

### 3.5 運動パターン選定

本節ではこれまでの結果を基に、機体の安定性と水平方向移動能力の両立を試み、運動パターンを比較した結果を示す。ここにおける機体の安定性とは、機体傾斜角を指標としている。円筒の揚力損失が 50 度程度であることを考慮し、機体傾斜角の目安はよりストールの起こりにくい 35 度とした。また、水平方向移動能力は前節の結果を受けて、2,000m 潜航時の水平移動距離が 3,000m 程度であることを指標とした。

運動パターンの比較において、可動翼翼角と固定翼面積の 2 つをパラメータとして変更している。可動翼翼角は機体傾斜角に影響を与え、固定翼面積は主に水平移動距離に影響を与えることが事前のシミュレーションにより判明している。

翼翼角は前節で用いた 30 度を基本として 5 度刻みに 15 度～35 度までを、潜航・浮上の両方について、固定翼面積はプロトタイプの固定翼と同じ  $0.09\text{m}^2$  と、可動翼面積と同じ  $0.16\text{m}^2$  の 2 パターンについてシミュレーションを行った。以下に結果を示す(Table. 4)。

Table. 4 Relation between angle of body and fixed wing area/angle of movable wing

| パターン No. | 固定翼面積 [m <sup>2</sup> ] | 浮上        |             |
|----------|-------------------------|-----------|-------------|
|          |                         | 翼翼角 [deg] | 機体傾斜角 [deg] |
| 1        | 0.09                    | 30        | 36.83       |
| 2        | 0.09                    | 35        | 34.89       |
| 3        | 0.09                    | 35        | 34.89       |
| 4        | 0.09                    | 30        | 36.83       |
| 5        | 0.16                    | 30        | 37.31       |
| 6        | 0.16                    | 35        | 35.19       |
| 7        | 0.16                    | 35        | 35.19       |
|          |                         | 潜航        |             |
| 1        | 0.09                    | 30        | -44.11      |
| 2        | 0.09                    | 25        | -40.04      |
| 3        | 0.09                    | 20        | -34.72      |
| 4        | 0.09                    | 20        | -34.72      |
| 5        | 0.16                    | 30        | -45.24      |
| 6        | 0.16                    | 20        | -37.71      |
| 7        | 0.16                    | 15        | -31.38      |

パターン 1 は前節で行ったシミュレーション結果である。

この場合、潜航時の機体傾斜角が 44 度を超えているため、ストールの恐れがある。これと比較してより安定でかつ水平移動能力が高いものを選定する。潜航・浮上のどちらも機体傾斜角が許容できるものはパターン 3, 4, 6, 7 であった。次に、この 4 パターンについて移動距離を比較した(Table. 5)。

Table. 5 Differences of distance in several patterns

| パターン No. | 浮上       |            | 潜航       |            |
|----------|----------|------------|----------|------------|
|          | 移動距離 [m] | 所要時間 [sec] | 移動距離 [m] | 所要時間 [sec] |
| 3        | 2021.64  | 6115       | 727.13   | 4041       |
| 4        | 2078.44  | 5582       | 727.13   | 4041       |
| 6        | 1871.56  | 6184       | 926.27   | 4401       |
| 7        | 1871.42  | 6184       | 791.97   | 4046       |

この結果より、水平方向の合計移動距離が 3,000m に近いのはパターン 4 の 2,806m, パターン 6 の 2,798m である。また、それぞれの合計所要時間を比較するとパターン 4 の方が約 960 秒だけ短いことが分かる。以上の結果より、水平移動距離を効率よく稼ぐことができるのはパターン 4 であることがわかった。

### 3.6 機体の動的安定性

定常状態で運動中の機体に外乱を与え、その後の機体の状態を調べ、機体の動的安定性についても考察を行った。具体的な手法としては、シミュレーション上である時刻にピッチ角を変化させ、その後のピッチ角の変化を出力した。結果を以下に示す(Fig.11)。

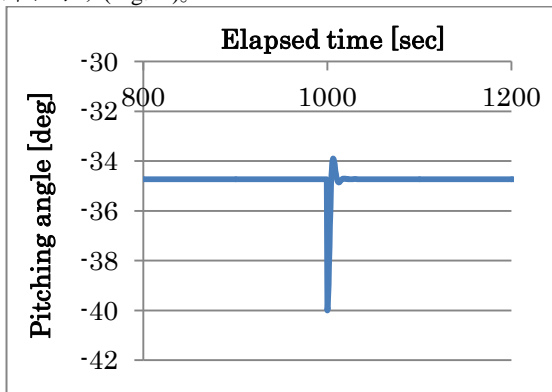


Fig.11 Pitching angle – Elapsed time

グラフは運動パターン 4 においてピッチ角 -34.72 度で潜航中、潜航開始から 1,000 秒の時点で外乱を与え、ピッチ角を -40 度としたときの角度変化と経過時間を表したものである。1,038.5 秒の時点でピッチ角は定常状態の -34.72 度に戻っている。この結果より、外乱が生じても減衰して定常状態に戻る、すなわち機体は動的に安定であることが分かった。

## 4 Vertical モード

### 4.1 Vertical モード ケース I 概要

SOTAB-I は Fig. 4 に示すような円柱表面を鉛直方向にジグ

ザグに移動しながら、水中質量分析計により重油の位置確認・性状調査を行う。また、同時に ADCP やその他センサ類により機体周辺の潮流等の海象条件も併せて収集する。ここでは具体例として 2010 年に起きたメキシコ湾での重油流出事故を想定し、深度 1,500m のところから深度 500m までの 1,000m を高さとし、流出現場を中心とした半径 5km の円柱状領域を考えている。

### 4.2 調査方法

前章で示したパターン 4 の移動方法を用いて、1,000m の間隔を鉛直方向に移動する場合、水平方向には約 1,400m 移動できることがわかる(Fig. 12)。

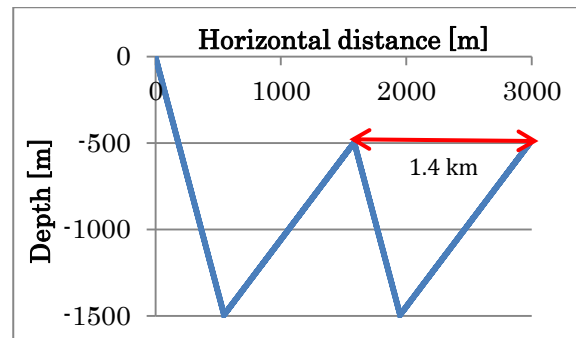


Fig. 12 Depth-Horizontal distance (1,000m submerging)

また、パターン 4 で 1,000m 往復潜航時の所要時間はおよそ 47 分である(Fig. 13)。

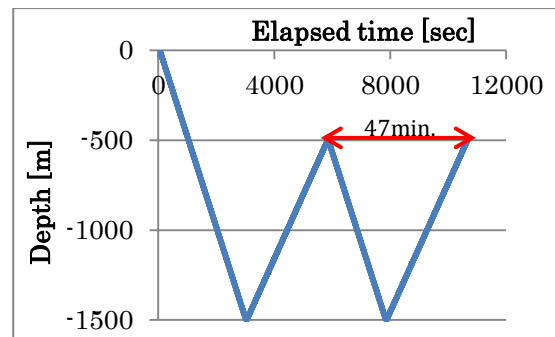


Fig. 13 Depth-Elapsed time (1,000m submerging)

重油流出地点を中心都市、半径 5km を推進 500m から 1,500m まで調査する場合を想定する。この場合、半径 5km の円を 1 辺が 1.4km の正 24 角形に近似し、正 24 角柱の面上のルートを SOTAB-I が移動するものとする(Fig. 14)。



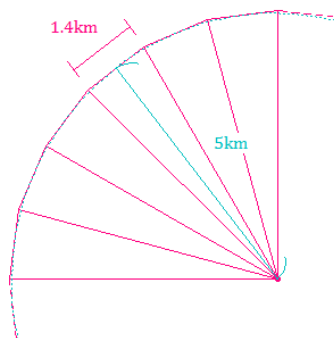


Fig. 14 Approximate circle as regular polygon (24)

#### 4.3 シミュレーション結果 (調査の所要時間)

上記の半径 5km, 高さ 1,000m の円柱領域を調査するときの所要時間は約 19 時間である。したがって、最初の潜航時間と円柱領域の調査終了後の浮上時間を合わせると、合計所要時間は約 20 時間となる。さらに、5km の半径を調査した後、母船に帰還せずに半径を 10km に広げる場合を想定する。この場合、半径 10km の円を正 48 角形に近似し、先と同様の調査を行うことで、約 61.5 時間で調査を終え母船に帰還する (Table. 6)。

Table. 6 Investigation of cylindrical field

| SOTAB-I の挙動      | 深度          | 所要時間      |
|------------------|-------------|-----------|
| 調査地点までの移動        | 水面～1,500m   | 50 min    |
| 半径 5km の調査       | 1,500m～500m | 20 hour   |
| 半径 10km の円周上まで移動 | 1,500m～水面   | 2.1 hour  |
| 半径 10km の円柱領域を調査 | 1,500m～500m | 38 hour   |
| 半径 10km の円周上で浮上  | 500m～水面     | 25 min    |
|                  | 合計時間        | 61.5 hour |

#### 4.4 Vertical モード ケース II 概要

このケースでは、SOTAB-I は海底から噴出した重油・ガスがどのような範囲に、どのような様子で分布しているかを精確に調査することを目的としている。SOTAB-I は期待に搭載された水中質量分析計により流出重油・ガスの存在を確認し、それらが検知されなければ進行方向を転換することで、常時重油・ガスの分布している範囲内のみを移動しながら効率的にデータの収集を行う。この際、ケース I とは異なり、翼角を小さく動かすことで水平方向の移動距離を小さくすることで重油範囲内に長く留まることを目標とする。一方で、流出した重油やガスは水平方向に広がりを持つため、水平方向の移動距離を抑制すると浮力調整の回数が増える。浮力調整装置の消費電力が機体の消費電力の大部分を占めるため、バッテリーとの兼ね合いを常に考えておかねばならない。

以下に示す図は深度 1,200m から 1,100m までの間に分布している流出重油の適当な断面を考え、その面内を SOTAB-I が移動する様子である (Fig. 15)。

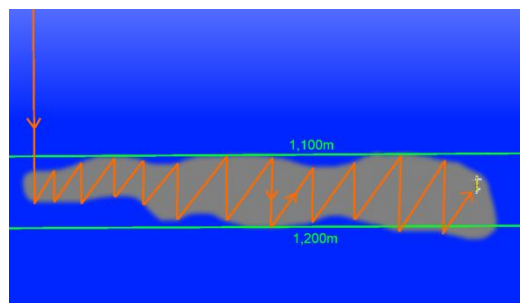


Fig. 15 Distribution of spilled oil & SOTAB-I's route

#### 4.5 シミュレーション結果

今回のシミュレーションでは適当な 2 つにお関数を用意し、それらで挟まれた範囲に流出重油が存在するものとして SOTAB-I の移動ルートを調べた。以下にシミュレーション結果を示す (Fig. 16)。

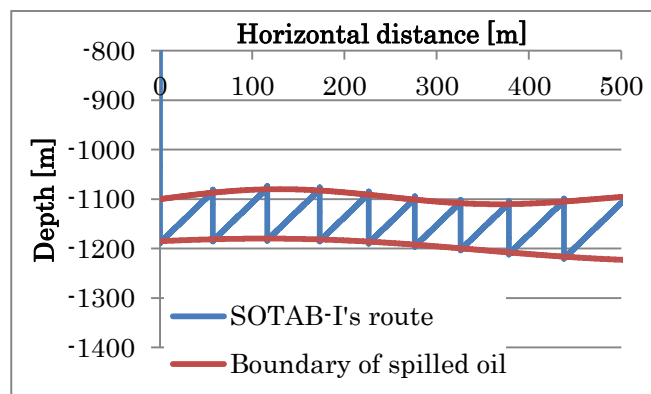


Fig. 16 SOTAB-I's route & boundary lines of spilled oil

質量分析計のデータを解析し、重油・ガスの存在が検知されない場合には運動の方向を切り替えるという単純なアルゴリズムを採用している。これは、海中に流出した重油やガスが鉛直面内の広がりよりも水平面内への広がりのほうが大きいという性質を加味してのものである。しかし、実際には周囲の潮流によりその分布は様々であることが予想される。SOTAB-I が完全に重油・ガスの存在範囲から外れてしまった場合、どちらの方向に重油が分布しているかを見失うことも危惧される。こういった事態に備え、事前にケース I を用いて重油の大まかな分布を調査し、母船からの命令を音響通信・測位装置を通じて SOTAB-I に送信することで、重油の存在範囲から完全に外れてしまった場合の誘導も可能となっている。また、今後はこの重油検出アルゴリズムに改良を加え、母船からの命令無しに SOTAB-I が自律して重油・ガスの分布を判断し、追跡調査を再開できるようにすることが課題となる。

#### 5. Horizontal モード

##### 5.1 Horizontal モード 概要

Horizontal モードにおいて SOTAB-I は、流出事故現場の様子を撮影機材により記録することを目的としている。海底面に対し水平に移動しながら、流出現場を中心に 10m 程度の距

離を機体底部に取り付けられたカメラを用いて撮影を行う。様々な方向から複数回の撮影を行い、得られた画像データをモザイクングすることで流出現場付近の様子を確認する。

移動には機体重心近くに取り付けられた水平移動用のスラスタを用いる。カメラのストロボ照射範囲が 1m 程度であると考え、海底高度 1m において撮影することを想定している (Fig. 17)。

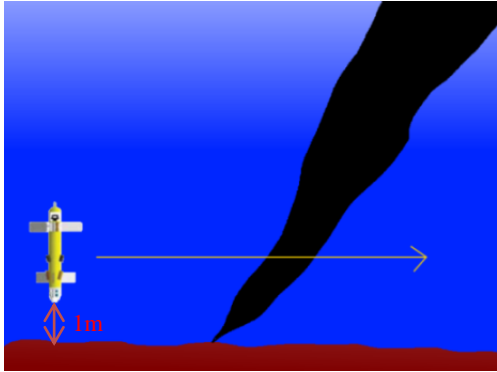


Fig. 17 Horizontal mode

5.2 海底高度 1m での静止シミュレーション

Horizontal モードに移行するために、SOTAB-I は海底高度 1m で静止する必要がある。以下に示すものは海底面が深度 1,500m にあるとし、その 1m 上、1,499m で SOTAB-I を静止させる場合のシミュレーションである。浮力制御による浮上加速度を考慮し、海底高度が 3m 以下となる前から浮力調整を行い海底高度 1m 程度で中性浮力を用いて静止することを想定している。この結果より、適切な浮力制御を行うことにより海底高度 1m で機体は静止可能であることがわかった (Fig. 18)。

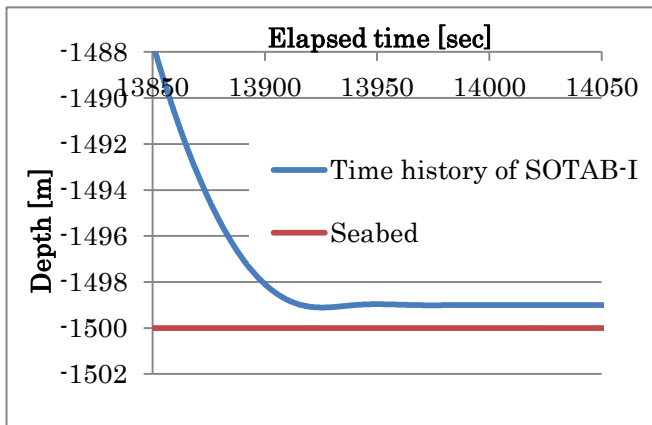


Fig. 18 Stop at an altitude of 1m from seabed

5.3 抵抗値の推定

このモードにおいて SOTAB-I は機体を垂直に立てたまま水平方向に移動する。この際に機体にかかる抵抗値を推定するために、CFD 解析を行った。以下に CFD 解析に用いた 2 つのモデルを示す (Fig. 19,20)。

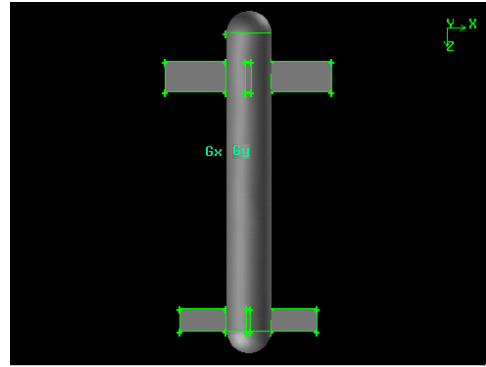


Fig. 19 CFD model 1

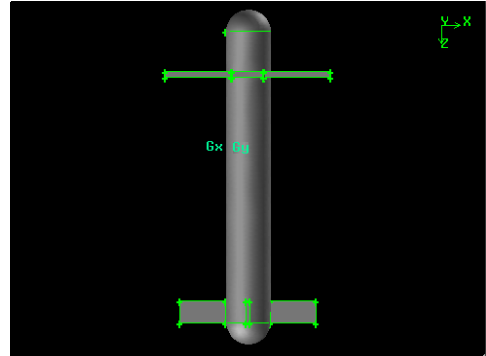


Fig. 20 CFD model 2

これらのモデルは可動翼を初期状態(0 度)にしているものと (Fig. 19), 可動翼を 90 度動かし、海底面に水平にすることで抵抗の軽減を図ったものである (Fig. 20)。

SOTAB-I が Fig. 16 のように水平方向に移動する際の速度を 035[m/s]と仮定し、移動時に機体にかかる抵抗値と抵抗係数は次に示すようになった (Table. 7)。ただし、流体の密度は 999.6[kg/m<sup>3</sup>]で一定とし、スラスタは機体重心の真横に取り付けられているとしている。

Table. 7 Drag and drag coefficient between two models

|         | D [N]   | S [m <sup>2</sup> ] | C <sub>D</sub> |
|---------|---------|---------------------|----------------|
| Model 1 | 79.8053 | 0.89201             | 1.46127        |
| Model 2 | 47.2626 | 0.76087             | 1.01455        |

この結果、可動翼を海底面に対して水平にすることにより約 40%の抵抗削減ができることがわかった。次にこれら 2 つのモデルについて、重心をモーメントの中心とした場合の Y 軸周りのピッチングモーメントを示す (Fig. 8)。

Table. 8 Pitching moment around Y axis

|         | Moment [Nm] |
|---------|-------------|
| Model 1 | -7.1412103  |
| Model 2 | -22.290727  |

これより、モデル 1 の方が抵抗値は大きいもののピッチングモーメントは小さく、逆にモデル 2 は抵抗値は小さいもののピッチングモーメントが大きくなることが分かった。

5.4 ピッチングの制御

前節の結果よりどちらのモデルもピッチングモーメントは

負値となることが分かった。すなわち、可動翼の翼角を変更するだけではピッチングを制御できない。そこで、スラスト取り付け位置を機体重心の真横から変更することでピッチング防止を試みた。

抵抗値の小さなモデル2のように水平移動することが理想であるため、このモデルについてスラスト取り付け位置を算出した。スラストが一定となり機体が定速運動に入った状態で機体重心周りのモーメントを計算した。

その結果、重心から0.288[m]だけ下げた位置にスラストを取り付けることでピッチングモーメントを打ち消すことが可能である。以下にスラストを取り付けたモデルを示す(Fig. 21)。

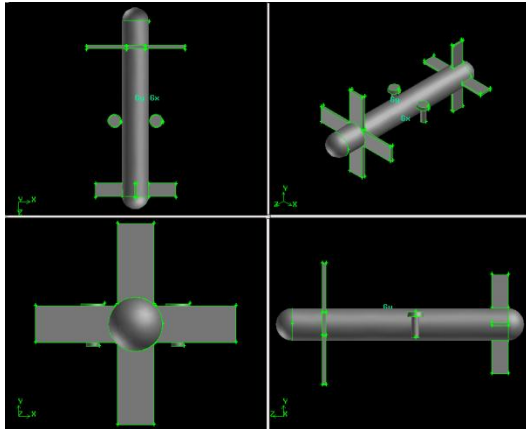


Fig. 21 SOTAB-I with thruster

## 6. 結言

### 6.1 研究結果

研究では、深海底から流出する重油・ガスの自動追跡水中ロボット SOTAB-I の誘導シミュレーションについて、以下のことを主として行った。

- イ. シミュレーションプログラムの構築
- ロ. 運用目的に適した機体形状・運動制御法の選定
- ハ. 浮力調整装置による鉛直移動時の誘導シミュレーション
- ニ. スラストによる水平移動時の運動予測

本研究で得られた結果は次の通りである。

- イ. 機体の流体力微係数は主に DATCOM Method を用いて算出した。機体の運動方程式を数値計算により解くことで誘導シミュレーションを行うプログラムを構築した。
- ロ. 実機をモデル化しシミュレーションを行うことで機体形状は円筒の上下に半球を取り付けたものが最適であること、可動翼翼角を的確に制御することで機体の安定を図りつつ長距離の移動が可能であることが分かった。
- ハ. 浮力調整と可動翼の制御により、重油流出現場を中心とした半径 5km の円柱領域の調査に 19 時間、その後、調査半径を 10km に拡大すると合計所要時間は 61.5 時間と

なる。また、搭載した機器類から得られるデータを用いることで、母船からの誘導なしに流出重油の存在範囲のみを自動で調査する可能であることを確認した。

- ニ. スラストを用いた水平方向移動時の抵抗値とピッチングモーメントを CFD 解析により推定した。その結果これらはトレードオフであり、可動翼翼角の制御だけではピッチングを防止できないことが分かった。そこで、スラストの取り付け位置を重心位置の真横から変更することで、具体的には 0.288m 下げることでモーメントの釣り合いをとることができる。

## 6.2 今後の課題

以下に今後の研究課題を述べる。

- (1) シミュレーションプログラムの高度化  
今回用いたシミュレーションでは、潮流の影響を考慮していない。より実機の運動に近づけるために、運動方程式に周辺流体の影響を入れる。
- (2) シミュレーションモデルの変更  
本研究で用いた SOTAB-I の主要目は、プロトタイプのもを基にしている。今後の設計における変更を考慮した新しいモデルを構築する。
- (3) スラスト取り付け位置・制御法と機体安定性の熟考  
スラストの取り付け位置はスラストが一体となった場合にモーメントが釣り合う位置として算出されている。そのため、スラスト発生直後などの場合に機体に発生するピッチングを考慮し、安定となるスラストの取り付け位置や制御法を導出する。

## 参考文献

- 1) <http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/project/>
- 2) H. Senga, N. Kato, M. Yoshie et al., Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy System, J. of Advanced Robotics, Vol.23, pp.1103-1129, 2009
- 3) H. Senga, N. Kato, H. Suzuki, M. Yoshie, T. Tanaka et al., Development of a New Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy, Marine Technology Society Journal, Vol.45, No.2, pp.43-51, 2011
- 4) 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