

## 流出重油・ガスの自動追跡システムの確立と 革新的海洋防災システムへの展開（第2報）（part 1）

大阪大学大学院工学研究科

教授 加藤 直三

平成23年度～平成27年度の間、日本学術振興会の科学研究費基盤研究（S）の支援を受けて、「流出重油・ガスの自動追跡システムの確立と革新的海洋防災システムへの展開」という研究課題に取り組んでいます。「海上防災」No.153<sup>1)</sup>では、研究の概要について、説明しましたが、プロジェクト開始から3年間の研究成果について、中間報告の形で説明します。

### 1. 研究の目的

船舶による重油流出事故に際し、環境被害を最小限に食い止めるには、流出重油を海上において可能な限り回収し、同時に流出重油の漂着が予測される地域へ適切な油防除機材を配置することが有効です。そのためには、浮流重油に関するリアルタイムデータを融合して、何時、何処に流れ着くのかという精度の良い漂流予測が必要不可欠となります。

一方、2010年に起きたメキシコ湾のルイジアナ（Louisiana）州沖での海洋石油掘削基地 Deepwater Horizon の事故を踏まえ、海底からの重油やガスの流出を定期的にモニタリングするシステムが必要となっています。また、事故後には、海中の重油・ガスの移流・拡散情報と高精度移流・拡散予測が必要となります。

本研究は、船舶からの重油流出事故や海底の油やガスの生産施設からの流出事故に際し、油やガスなどの海底生産施設まわりの重油やガスのプルームの追跡を行う海中ロボットや、海面の流出重油を回収に至るまで自動的に長期間に亘り追跡し、リアルタイムで情報を供給する複数の浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットに関する自動追跡システムを確立します。次に、ロボットから得られた油やガスの漂流位置、海象条件および浮流重油の性状に関するデータを使い、重油拡散シミュレーションの精度向上を図ることで、海底生産施設まわりの定期的な環境モニタリングを行うことや、流出重油の海上での回収や流出重油の漂流が予測される地域への適切な油防除機材の配置を行うことによって、革新的海洋防災システムへの展開を図ることを目的としています。この全体の研究を SOTAB プロジェクトと名付けています（図1）。

具体的には、

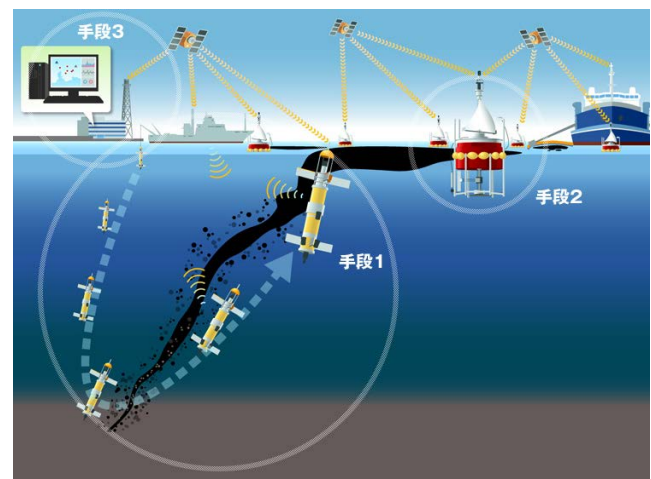


図1 SOTAB プロジェクト概念図

具体的には、

- 1) 深海から噴出する重油やガスのプルームの自動追跡を行う海中ロボット技術（手段1）
- 2) 海底から海面までの三次元空間の重油プルームの自動追跡を行う海中ロボットからのデータを用いた深海からの油とガスの噴出に関する熱化学的反応を含む拡散シミュレーション技術（手段3）
- 3) 海面に漂流する重油塊の自動追跡を行う浮遊式ブイロボット技術（手段2）
- 4) 浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットからのデータを用いた浮流重油漂流シミュレーション技術（手段3）

の開発と評価を行い、それらの技術を確立させ、事故により流出した重油を海上において可能な限り回収し、それと同時に流出した重油の漂流が予測される地域へ適切な油防除機材を配置することを可能とすること、また、油やガスなどの海底生産施設まわりの定期的な環境モニタリングを行う革新的海洋防災システムへの展開を図ることをこの研究の到達目標とします。

## 2. 海底からの重油やガスのプルームの自動追跡を行う海中ロボット（SOTAB-I）に関する研究

### 2.1 SOTAB-I の形状

海底からの重油やガスのプルームの自動追跡を行う海中ロボット（SOTAB-I）は、2013年3月に製作された。図2に、その形状を、図3に海洋実験中にSOTAB-Iの写真を、表1にSOTAB-Iの主要目を示します。最大潜航深度は、1、500mです。アクチュエータとして、浮力調整装置、上部可動翼（2対）、スラスタ2対を装備し、環境センサーとして、水中質量分析計（質量比200までのin-situ分析が可能）、CTDセンサー、ADCPを装備し、位置計測用に、GPS、DVL（Doppler Velocity Logの略：海底近くで音響を用いて水中ロボットの絶対移動速度を計測する装置）および音響位置計測装置を、通信用に、音響モデムとイリジウムアンテナを、海底観測用に、CCD（Charge Coupled Deviceの略：電荷結合素子）カメラと水中ライトを装備しています。

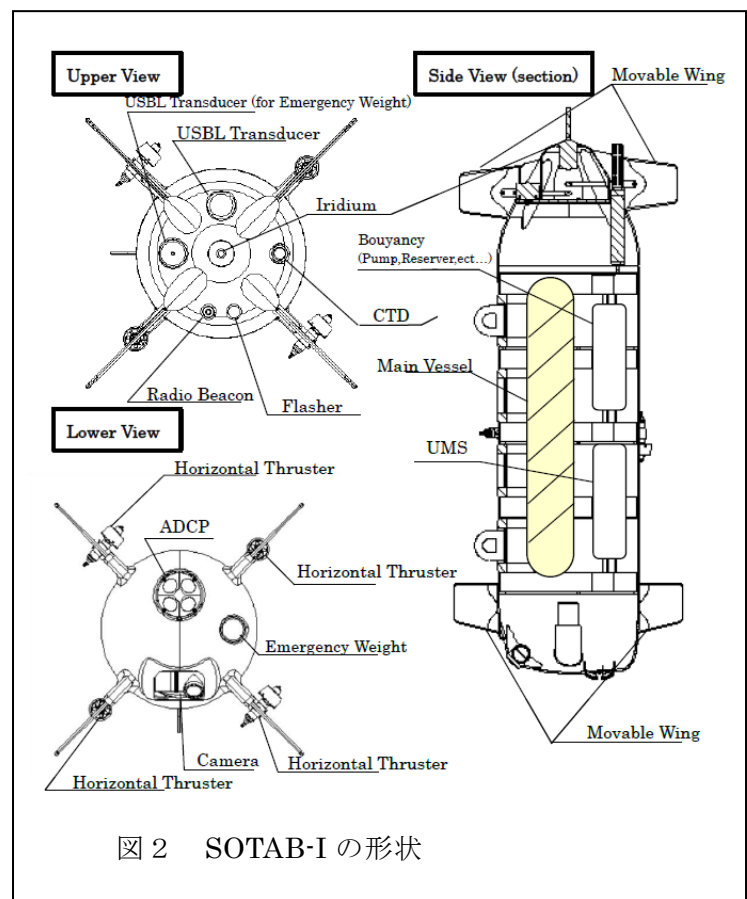


図2 SOTAB-Iの形状

### 2.2 SOTAB-Iの制御システム

図4に、SOTAB-Iの制御システムのブロック図を示します。SOTAB-IはMain CPUとSub CPUを搭載し、それぞれsMain0およびsioというプログラムを搭載しています。sMain0は主にアクチュエータの制御を、sioはセンサ類の制御、及びログの保存を行っています。母船とSOTAB-Iの間

表1 SOTAB-Iの主要目

Total Length		2503 mm
Diameter		667 mm
Weight in Air		311.6 kg
Weight in Water		±3.8 kg
BG		50 mm
LG		1304 mm
Movable	Chord	200 mm
	Wing	Span
Fixed	Chord	200 mm
	Wing	Span



図3 SOTAB-Iの写真

の通信は音響モデムを通じで行われます。USBLは音響モデムと位置計測でCOMポートをそれぞれ1chずつ使用します。また、母船甲板に取り付けられたDGPSとCompassにより母船の位置と方位を計測しており、合わせてCOMポートを2ch使用します。これら4chのうち、音響モデムはGUI表示用モニタに接続され、残りの3chはUSBL専用ソフトウェア、Track Linkを表示しています。モニタに接続し水中位置計測に用いられます。また、2つのソフトウェア、SOTAB-I専用GUIとTrack Linkは仮想COMポートで接続され、Track Linkより得られるデータもGUIに表示されます。また、GUI表示用モニタは船長室に置かれたワイヤレスモニタに複製され、操船に用いられます。

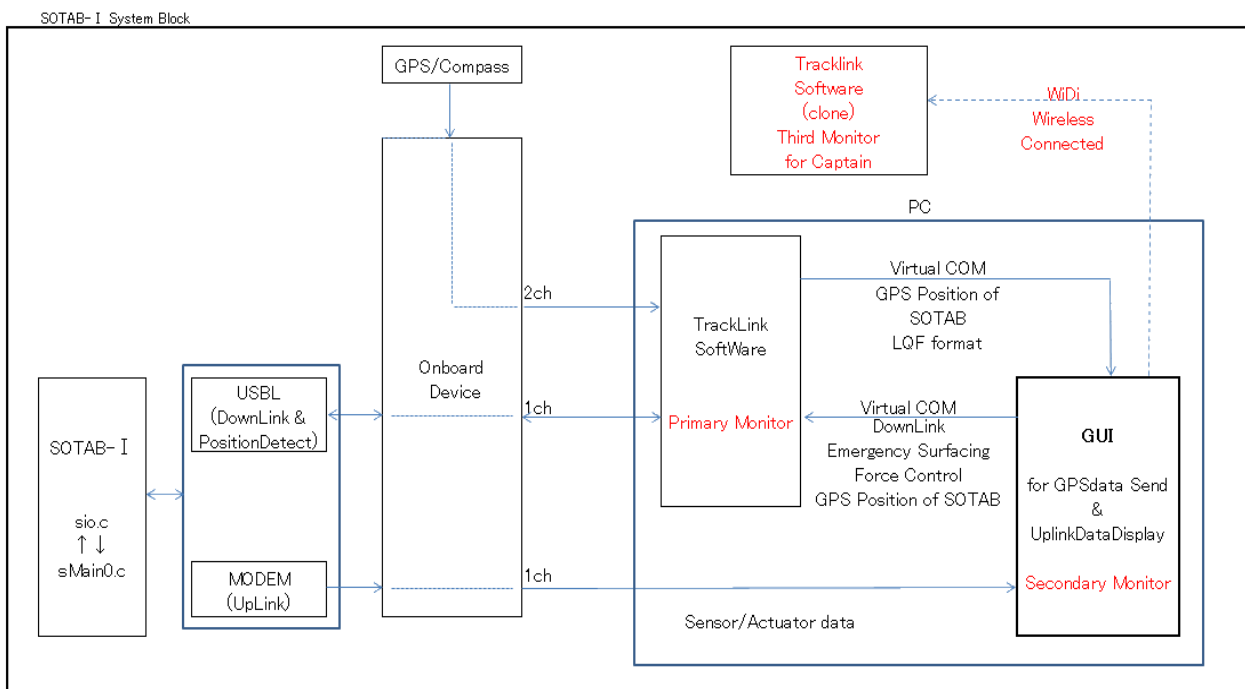


図4 SOTAB-Iの制御システムのブロック図

### 2.3 SOTAB-Iの運動モード<sup>2)</sup>

SOTAB-Iには、先述のように浮力調整装置、可動翼を用いて鉛直・水平の両方向に移動する $\alpha$ モード(図5)、また、機体側に搭載されたスラストを用いて海底面に水平に移動する $\beta$ モード(図6)を持たせています。

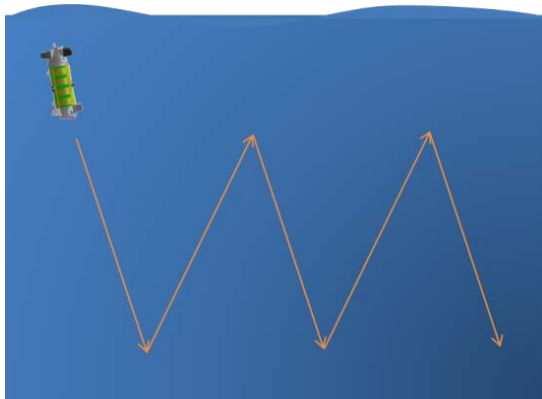


図5  $\alpha$  mode



図6  $\beta$  mode

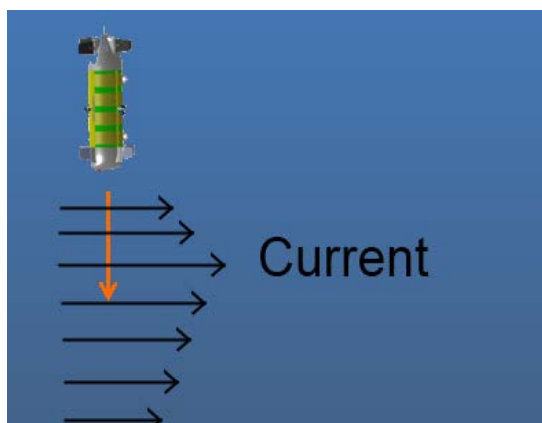


図7 潮流鉛直プロファイル計測モード

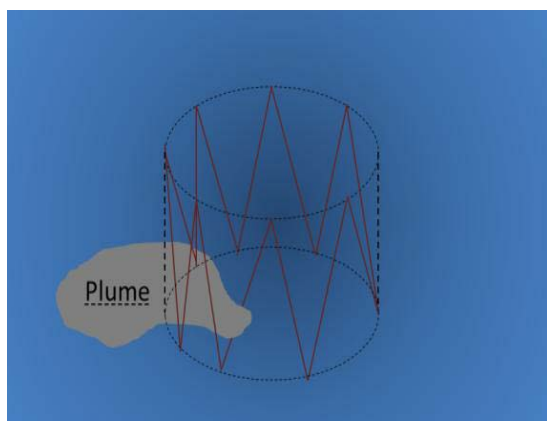


図8 概査モード

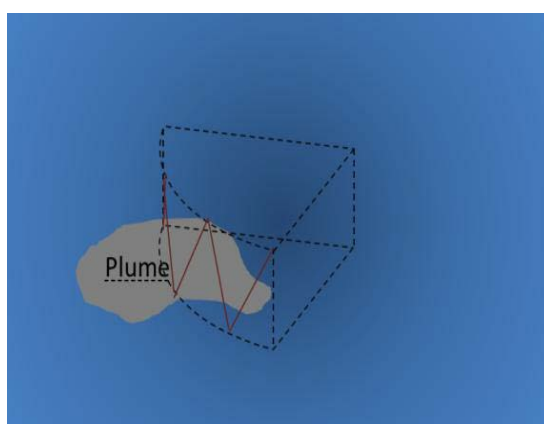


図9 精査モード

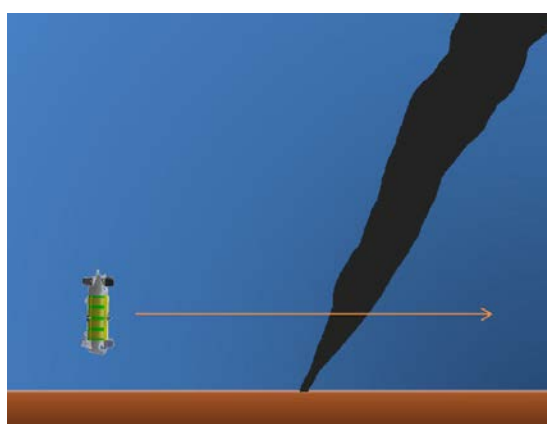


図10 海底写真撮影モード

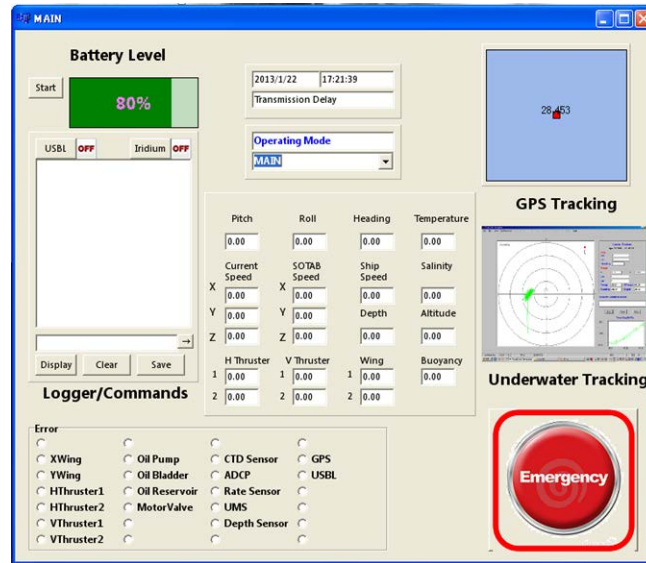


図 11 GUI の画面

これらを用いて SOTAB-I を運用していきます。運用にあたっては $\alpha$ モードを利用し、鉛直方向の潮流分布を計測する潮流鉛直プロファイアいます。計測モード(図 7)、重油流出地点を中心とした円筒状の領域側面を移動しながら重油の漂流分布を”荒く”調査する概査モード(図 8)と、判明した重油の漂流部分のみを”細かく”調査する精査モード(図 9)があります。また、 $\beta$ モードを利用し重油流出地点周辺の海底面を画像に収めて調査する海底写真撮影モードも考案されています(図 10)。さらに、実際の運用前に機器類の調整、チェックを本機専用の GUI(図 11)<sup>3)</sup>を通して行うマニュアルモードを持っています。

## 2.4 海洋実験

SOTAB-I を用いた海洋実験を、これまで駿河湾において、3 回 (2013 年 3 月 27 日-29 日、2013 年 7 月 31-8 月 2 日、2013 年 9 月 26 日-27 日)、アメリカ・メキシコ湾において 1 回 (2013 年 12 月 6 日-15 日) 行っています。駿河湾における最初の二回の実験は、SOTAB-I の運用法に時間が取られ、ほとんど実験データが収集できていないため、3 回目の駿河湾における海洋実験と、メキシコ湾における海洋実験について、説明します。

### 2.4.1 2013 年 9 月 26 日-27 日の駿河湾における実験

2013 年 9 月 26 日、27 日の両日に静岡県駿河湾においてオキシテック(株)協力の下で海洋実験を行いました。図 12 に実験海域を示します。実験は図中に示す赤丸の箇所(北緯 35 度 02 分 51 秒、東経 138 度 43 分 15 秒)で行いました。この海域の水深は約 1000m です。

潜航試験は合計 3 度行われ、それぞれ目標深度は 50m/100m/100m です。また、3 度目の試験では浮上

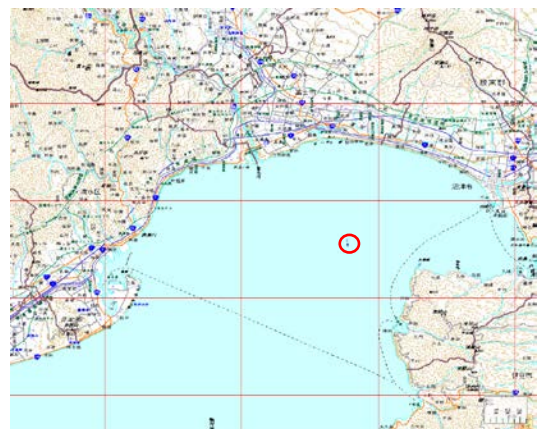


図 12 駿河湾での海洋実験場所 (赤丸)

時に可動翼の翼角を変化させ、水平方向への移動距離を調べました。さらに潜航時、浮上時における抵抗係数の推定を行いました。また、SOTAB-Iに錘を付け、ロープで吊り下げた状態で1,000 mの深度まで下げ、機器に異常のないことを確かめました。

#### 2.4.2 2013年12月6日-15日のメキシコ湾における海洋実験

2013年12月6日-15日の期間に、図13に示すアメリカ・メキシコ湾のミシシッピ河口付近の水深約50mの海域（2010年4月のDeepwater Horizon原油流出事故の地点より西側136kmの地点）にて、海洋実験を行いました。この実験では、水中質量分析計（SRI International製を搭載して、他のセンサーによるデータ取得と同時に、*in-situ*での水の分析を行いました。この期間、沿岸でSea state 3-4の海象で、沖合にあるDeepwater Horizon原油流出事故の地点近くでの調査を断念せざるをえない状況でした。その頃、アメリカは大寒波に襲われました。

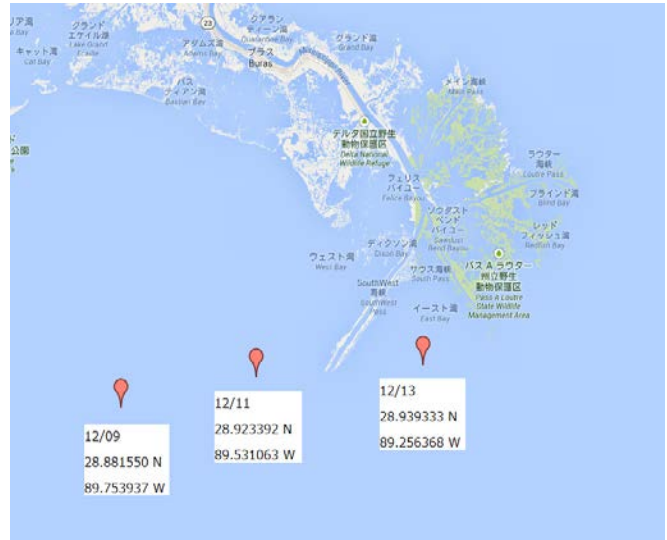


図13 メキシコ湾での海洋実験場所

#### 2.4.3 運動制御<sup>4)</sup>

SOTAB-Iは鉛直方向に移動する際、浮力調整装置で油を出し入れして機体の水中重量を変化させています。PID制御を用いた機体の潜航・浮上試験を行い、浮力調整装置の動作確認を行いました。図14に、目標深度100mに設定した時の、SOTAB-Iの実際の深度、浮力調整装置の浮力の割合（中立を50%として、+3.8 Kgを100%、-3.8 Kgを0%）の目標値と実際の値を示す。このときの深度の目標深度からのオーバーシュート量は、1.06 mでした。

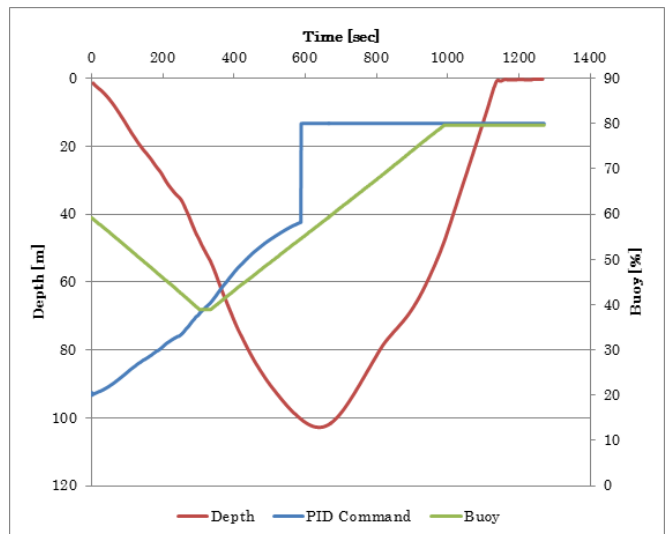


図14 浮力調整装置を用いた深度制御

SOTAB-Iの運動制御の中で、ロボットの安全性にとって重要な海底との衝突回避運動があります。

図15に、SOTAB-Iの三つの運用ゾーンを示します。”Robot Normal Operation Zone”は、2.3で述べた通常の運用モードを実行するゾーンとし、”Collision Avoidance Zone”は、海底との衝突の危険性が少しあるゾーンで、その下の”Critical Zone”に侵入しないような制御を行う。万が一、ロボットが”Critical Zone”に侵入した場合は、2基の上下スラスターの出力を最大にして、そこから抜け出す制御を行う。図16に、海底との衝突回避運動の記号の定義を示します。 $h_0$ を危険高度、 $h$ を

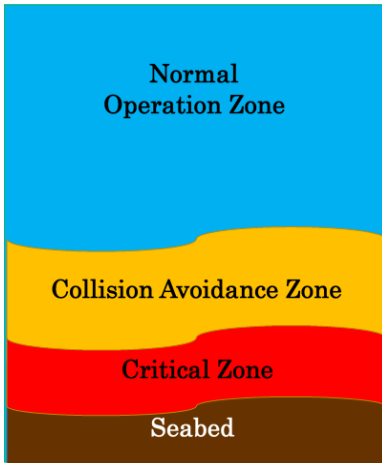


図 15 運用ゾーン

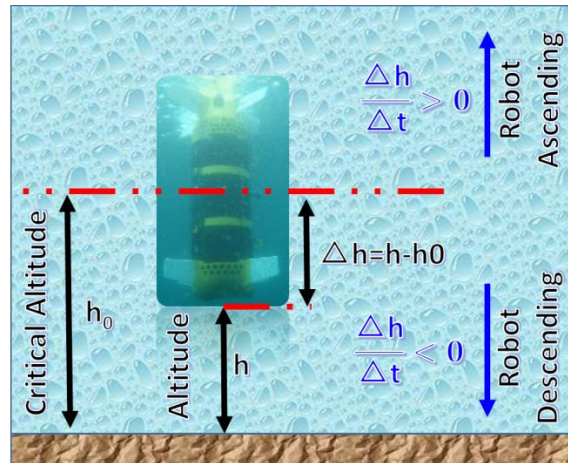


図 16 海底との衝突回避運動の記号の定義

SOTAB-I の海底からの高度とし、その差  $\Delta h$  を次のように定義します。

$$\Delta h = h - h_0$$

(1)

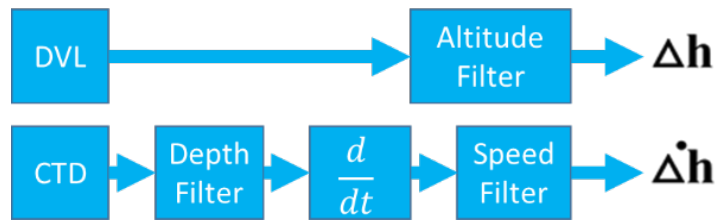


図 17 衝突回避運動への DVL と CTD の入力

またその時間微分を  $\dot{\Delta h}$  とします。

SOTAB-I には、その底部に ADCP+DVL が取り付けられており、海底からの高度 30m 以内では DVL も作動する。SOTAB-I の鉛直速度は、CTD の深度情報と DVL の高度情報の両方から得られます。図 18 は、メキシコ湾での実験で得られたデータの比較です。CTD の深度情報を用いた方が、データのばらつきが少ないことがわかります。図 19 は、CTD の深度情報から直接求めた鉛直速度と、フィルターを通したあとに求めた鉛直速度の比較を示します。明らかに、フィルターを通すことで、スパイク・ノイズが出ないことがわかります。図 17 に、衝突回避運動への DVL と CTD を用いた入力法を示します。

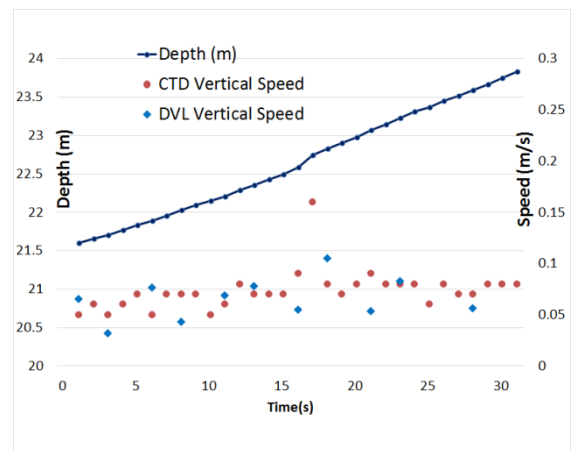


図 18 DVL と CTD を用いた鉛直速度

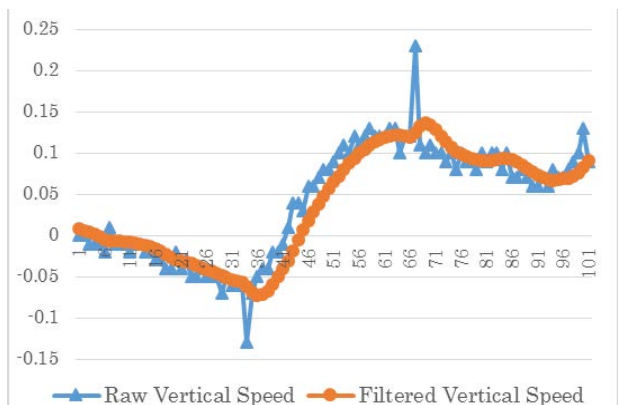


図 19 鉛直速度に関するフィルターの効果

図 20 は、“Collision Avoidance Zone” を 5m、“Critical Zone” を 1m に置き、高度 10 m から負の浮力量 4.0 Kg で下降する SOTAB-I が、“Collision Avoidance Zone”に入った場合、

鉛直スラスターを2基用いて、鉛直速度をゼロにするPID制御のシミュレーション結果を示します。

この結果から、浮力調整装置が最も負の浮力の状態であっても、2基のスラスターを用いれば、安全に海底から、3mの高度で静止することがわかります。

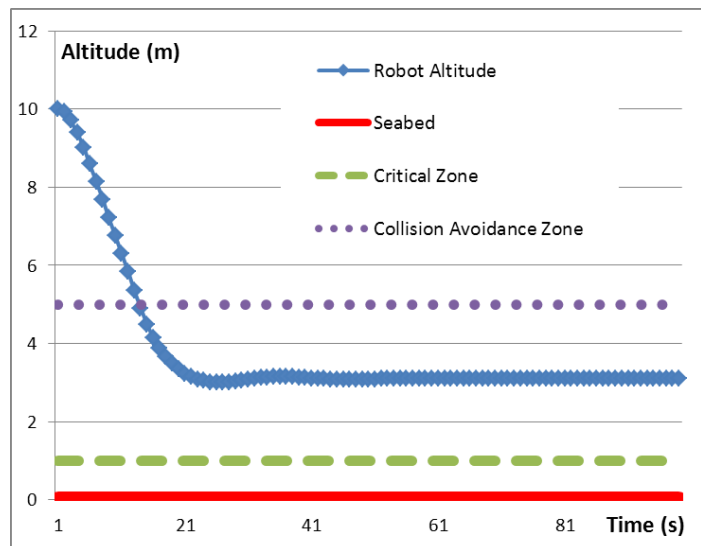


図 20 海底衝突回避運動シミュレーション

#### 2.4.4 潮流の鉛直プロファイルの計測

USBL と ADCP+DVL を用いて、SOTAB-I の絶対速度  $V_s$  と機体に対する潮流の相対速度  $V_c$  を得ます。これより、絶対潮流流速  $V$  は  $V=V_c+V_s$  で求めることができます。SOTAB-I の速度  $V_s$  を求める方法は以下の2通りがあります。

##### (1)USBL から得られる位置情報を微分する方法

USBL が記録しています。地球固定座標系の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の位置情報を後進差分することにより、 $V_s$  を求めた。駿河湾実験時の  $V_s$  はすべて USBL より算出しました。

##### (2)DVL から算出する方法

DVL は直接、対地速度を計測しています。ため、USBL を使用するよりも信頼できる速度データが得られます。しかし、DVL が使用可能なのは、SOTAB-I が海底から 30m 内の距離にいるときのみと使用可能範囲が限られます。

次に、SOTAB-I の速度  $V_s$  と相対潮流  $V_c$  の算出手順について説明します。

##### (a) SOTAB-I の絶対速度 $V_s$ の解析手順

USBL を用いた場合は、抽出した位置情報のログデータを、地理座標系からメートル単位へ変換します。次に、データの DB 外れ値処理とログ間隔の補間を行う。得られた値を後進差分し、SOTAB-I

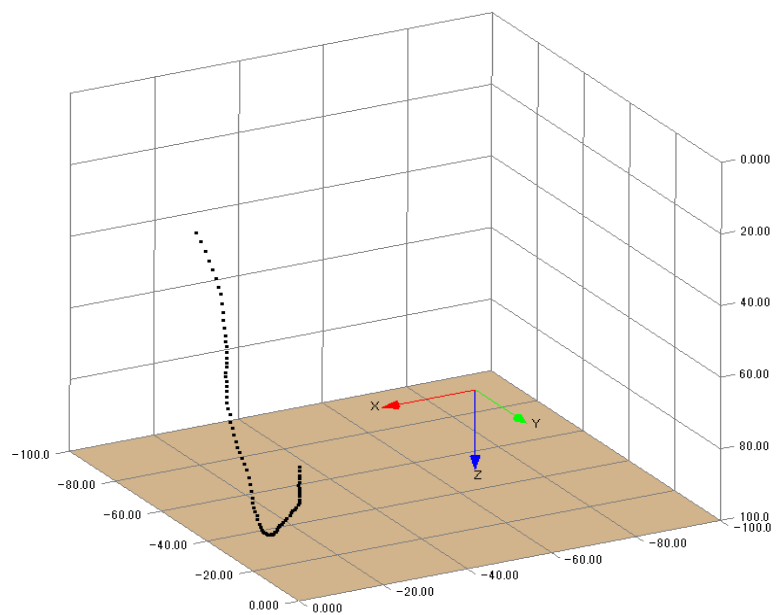


図 21 駿河湾での SOTAB-I の航跡



の絶対速度  $V_s$  とします。DVL を用いた場合は、抽出した速度データを地球座標系にオイラー角変換したものが  $V_s$  となります。

(b) 相対潮流  $V_c$  の解析手順

センサーのログデータから Roll、Pitch、Yaw、相対流速を抽出し、それぞれに移動平均処理を行う。次に、これらの角度を用いてオイラー角変換を行い、機体固定座標系から見た速度を地球固定座標系の速度に変換し、さらに移動平均処理を行って  $V_c$  を求めます。

USBL から得られる位置情報を微分する方法を用

いた潮流の鉛直プロファイルの解析結果に示します。

図 21 に、駿河湾における 100m 付近までの潜航時の航跡を示します。図 22 に、東西方向、南北方向の潮流の鉛直プロファイルを示します。ここでは、ロボットは水平面内にも移動して、その場における絶対速度を求めています、その横移動を無視して、プロットしています。

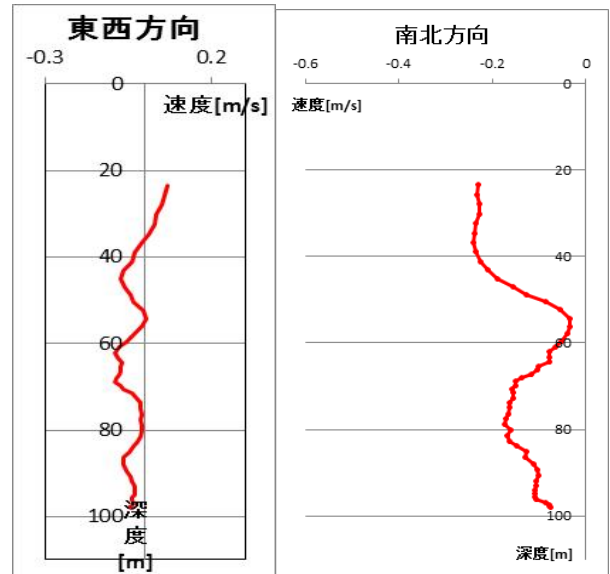


図 22 潮流のプロファイル

2.4.5 水中質量分析計を用いた水分析

今回 SOTAB-I に搭載しています。水中質量分析計は SRI International 製のメンブレン導入を用いたイオン・トラップ型で、質量比が 200 までの溶解ガスや揮発性有機化合物の検出結果を 7 秒おきに出力します。検出限界は 20 nmol/L となっています。図 23 に、耐圧容器内の水中質量分析計の構造（長さ\*直径=

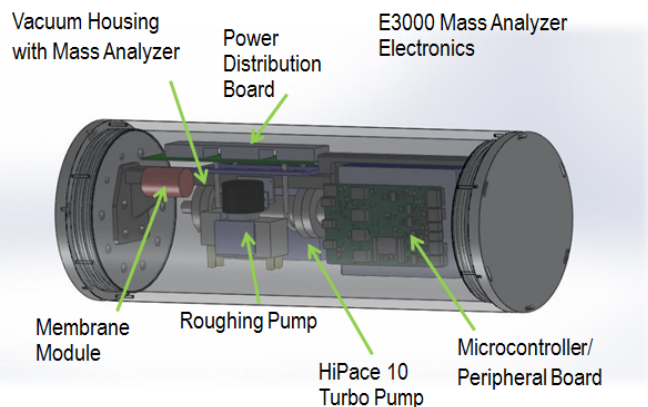


図 23 水中質量分析計の内部構造

64 cm \* 24 cm) を示します。空中重量は

35 Kgf, 水中では 5kgf です。表 2 に、代表的な溶解ガスや揮発性有機化合物と質量比を示します。

図 24 に、図 13 の 12/13 地点における深度に対する窒素、酸素、アルゴン、二酸化炭素のイオン強度の変化を表しています。これから、二酸化炭素は水面付近と海底付近において高くなっていること、酸素が若干それと逆の傾向が見えること、その他の成分は深度にあまり依存しないことがわかります。図 25 に、深度に対するメタン系炭化水素系のメタン、エタン、プロパン、ブタン、ペンタン ( $m/z=72$ ) のイオン強度の変化を示します。メタンは、二酸化炭素と同じく水面付近と海底付近において高くなっていますが、その他は深度の依存性が見えません。このように水中質量分析計を海洋ロボット SOTAB-I に搭載することで、海中の三次元の溶存ガスと揮発性有機化合物の分布を、リアルタイムで知ることができます。図 26 に、深度に対する芳香族炭化水素系のベンゼン、トルエン、キシレンのイオン強度の変化を示します。3 種とも深度の依存性が見えません。

表2 代表的な溶存ガスと揮発性有機化合物の質量比

M/Z VALUE	COMPOUND	ISOTOPIC FORM
15	Methane (CH <sub>4</sub> )	<sup>12</sup> CH <sub>3</sub> Fragment
28	Nitrogen (N <sub>2</sub> )	<sup>14</sup> N <sup>14</sup> N
30	Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Various
32	Oxygen (O <sub>2</sub> )	<sup>16</sup> O <sup>16</sup> O
34	Oxygen (O <sub>2</sub> ) Hydrogen Sulfide (H <sub>2</sub> S)	<sup>16</sup> O <sup>18</sup> O H <sub>2</sub> <sup>32</sup> S
39	Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Various
40	Argon (Ar)	<sup>40</sup> Ar
44	Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sup>16</sup> O
58	Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	Various
78	Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Various
92	Toluene (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	Various
106	Xylene (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	Various
128	Naphthalene (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )	Various

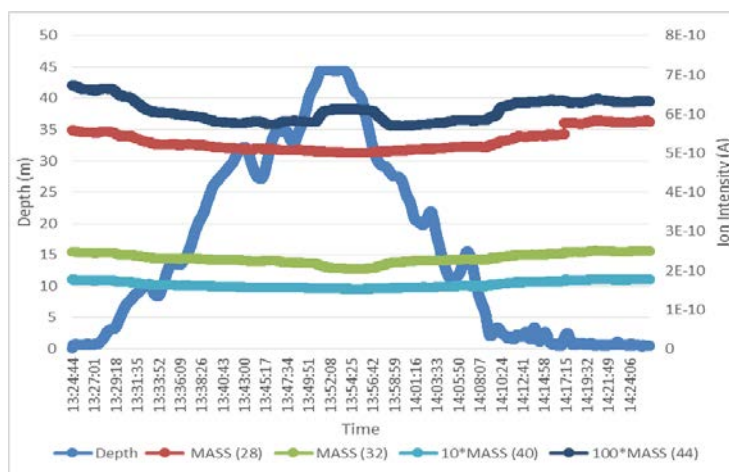


図24 深度に対する窒素、酸素、アルゴン、二酸化炭素のイオン強度の変化

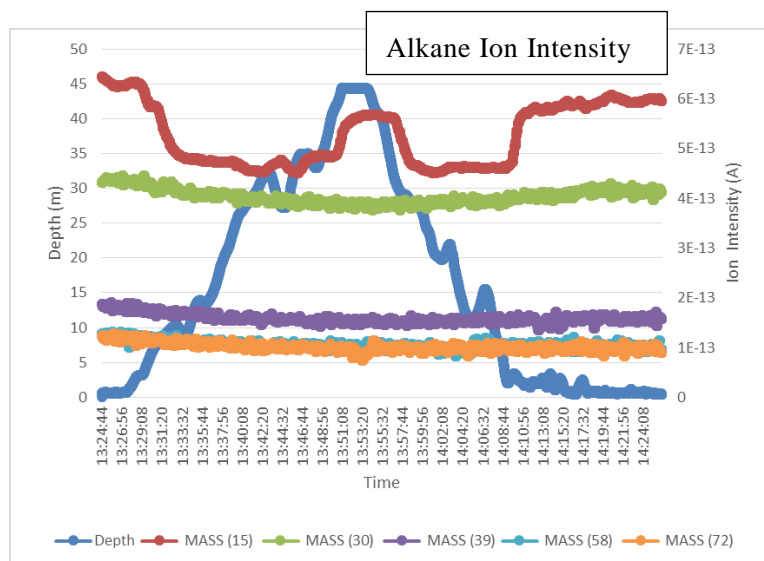


図25 深度に対するメタン、エタン、プロパン、ブタン、ペンタンのイオン強度の変化

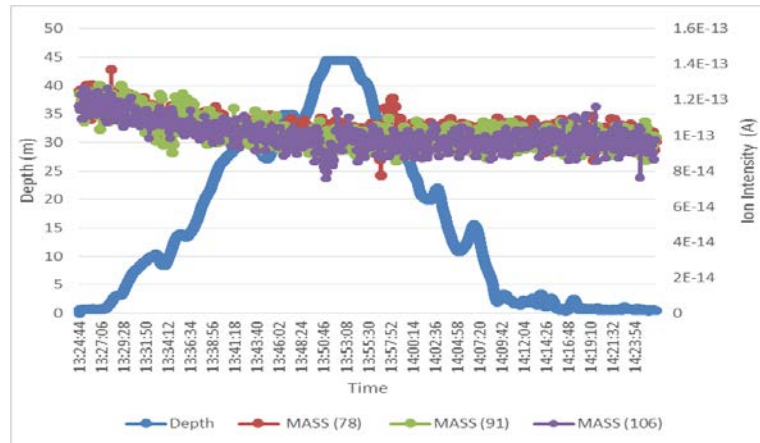


図 26 深度に対する BTX (ベンゼン, トルエン, キシレン) のイオン強度

3 深海からの油とガスの噴出に関する熱化学的反応を含む拡散シミュレーションに関する研究<sup>6)</sup>

上越沖の海底ではメタンハイドレート集積地が確認されており、そこからメタンガスが海水中に湧出してプリュームを形成する現象も確認されています<sup>7)</sup>。メタンガス泡は湧出後 3 秒ほどで約 10cm 浮上し、直ちにハイドレート化します。その後、浮上し、直ちにハイドレート化します。その後、海水中を浮上し深 300m 前後に到達すると海水温度の上昇と水圧低下によりガス相に戻ります。湧出したメタンは水面に到達することなく、最終的には海水中に溶解します (図 27 参照)。

これらの現象は AUV/AUV や魚群探知機を用いて観察されていますが<sup>8)</sup>、プリュームの立体的な構造や詳しいメタンの拡散範囲は明らかになっていません。水中ロボットの運用で広大な海洋空間でこれらの現象を捉えることになり、予め探査範囲を織り込んでおく必要があります。

そこで本研究では、数値モデルを用いてメタンの拡散範囲や相変化などを予測し、水中ロボットの探査範囲や相変化などを予測し、水中ロボットの探査範囲を検討しました。

3.1 メタンガス湧出モデル

深海底から流出するメタンの挙動を予測する数値モデルについては既往の研究が報告されて

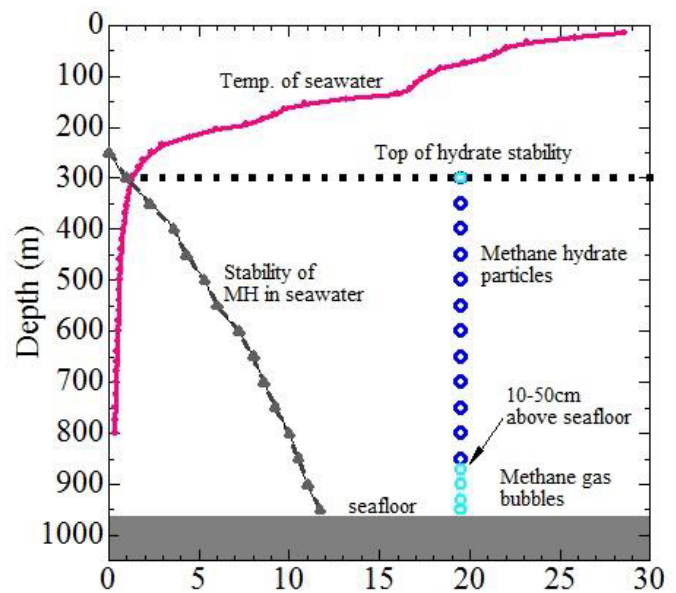


図 27 上越沖のメタンガス湧出現象<sup>7)</sup>

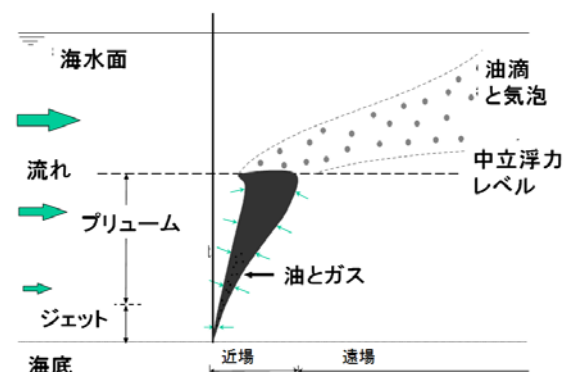


図 28 深海からの油・ガスの噴出のシナリオ

おり、Yapa らのグループは流出ガスをラグランジアン的に追跡する数値モデルを提案しています<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup>。また、鋤崎らのグループでは、メタンガスの漏洩による環境への影響を予測・評価するための数値モデルの開発が進められています<sup>11)</sup>。本研究ではメタンの挙動を予測する数値モデルとして、Yapa らの数値モデルを基として大阪大学で改良されたガス噴出モデル<sup>12)</sup>を応用し、メタンガス湧出モデルとして用いています。

ガス噴出モデルは、石油掘削施設における重油流出事故時に、ガス成分の拡散予測を目的として構築されたモデルです。重油流出事故時には噴出したガスがジェット/プルームを形成するため、計算ではその中心軸に沿って円盤状のコントロールボリューム(CV)に分割し、運動量・質量・熱量の保存を考慮しながら CV 内粒子数・相状態・濃度等をラグランジアン的に追跡する手法が採られます。海水とプルーム内の密度が釣り合う深さ(中立浮遊層)に達するとジェット/プルームに対する計算は終了し、その後は個々の粒子を追跡する手法が採られます(図 28 参照)。

### 3.1.1 各粒子の運動

本研究が対象とするメタンガスの湧出現象では、メタンの放出量が少なく、ジェット/プルームは形成されません。そのため、メタンガスモデルでは CV 段階の計算は直ちに終了し、個々の粒子の追跡計算が主になります。粒子の水平方向への拡散はランダム・ウォーク法を用いて計算します。粒子の漂流速度は以下の式で表されます。

粒子の運動は、水平方向の東西方向(x方向)と南北方向(y方向)、鉛直方向についてそれぞれ計算しています。まず、水平方向の移動については以下の式で表されます。

$$u = u_w + u_r \quad (2)$$

ここで、 $u$  (m/s) は粒子の水平方向移動速度、 $u_w$  (m/s) は環境流体の水平方向流速、 $u_r$  (m/s) は粒子の水平方向拡散速度です。拡散速度はランダムウォーク法を用いて算出しており、以下の式で表されます。

$$u_r = \gamma \sqrt{\frac{2D_1}{\Delta t}} \quad (3)$$

ここで、 $D_1$  (m<sup>2</sup>/s) は粒子の水平拡散係数で、本研究では 0.01 としました。 $\gamma$  は-1 から 1 の範囲のランダム数です。次に、粒子の鉛直方向移動については水平方向と同様に拡散を考慮した上で、浮力による上昇速度も考慮します。上昇速度は気泡の形状に依存し、球形と楕円形、球形キャップの 3 種により分類されます<sup>13)</sup>。

(1) 球形 ( $d \leq 1\text{mm}$ )

$$w = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{\rho_a d} \quad (4)$$

(2) 楕円形 ( $1\text{mm} \leq d \leq d_c$ )

$$w = \frac{v}{\rho_a d_c} M^{-0.149} (J - 0.857) \quad (5)$$

$$J = 0.94H^{0.757}, \quad (2 < H \leq 59.3) \quad (6)$$

$$J = 3.42H^{0.441}, \quad (H > 59.3) \quad (7)$$

$$H = \frac{4}{3} E_0 M^{-0.149} (v/v_w)^{-0.14} \quad (8)$$

$$H = \frac{4}{3} E_0 M^{-0.149} (v/v_w)^{-0.14} \quad (9)$$

$$M = gv^4 \Delta\rho / \rho_a^2 \sigma^3 \quad (10)$$

$$E_0 = g\Delta\rho d_c^2 / \sigma \quad (11)$$

(3) 球形キャップ型 ( $d > d_c$ )

$$w = 0.711\sqrt{gd_c\Delta\rho/\rho_a} \quad (12)$$

ここで、 $w$  (m/s) は上昇速度、 $d$  (m) は粒子直径、 $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>) は環境流体の密度、 $v$  (m<sup>2</sup>/s) は環境流体の動粘度、 $d_c$  (m) は粒子の臨界直径、 $v_w$  (m<sup>2</sup>/s) は水の動粘度、 $\Delta\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) は粒子と環境流体の密度差、 $\sigma$  (kg/s<sup>2</sup>) は表面張力と定義されます。

### 3.1.2 ハイドレートの形成

粒子のハイドレート化についても Yapa らのグループで構築された基礎モデルを参考としてモデル化しています。以下にハイドレート形成に関する仮定を示します。

- (1) ガス分子はガスの濃度勾配のために多孔質のハイドレートの殻を通して拡散し、ハイドレート-水界面で水と反応してハイドレートを形成する。
- (2) ハイドレートの殻はハイドレート-水界面と同じ温度です。この仮定では、ガス相の熱伝導率は液相に比べて小さいため合理的です。それゆえ、ハイドレート-水界面ハイドレート形成によって放出された熱は水相を通して伝達される。
- (3) 気体の質量や熱伝達は準定常である。この仮定は、気泡の境界がゆっくり動く境界であることを示し、微小な時間ステップを用いることで満たされています。
- (4) 気泡の外側と内側の圧力は等しい。これはハイドレートの殻が多孔質であることによる。
- (5) ハイドレートの殻が端から分離することは無視されていて、ハイドレートの殻は気泡を均一に覆っています。

ハイドレートの形成は下記の式で表され、粒子ごとに計算が実行されます。

$$\frac{dn}{dt} = K \cdot 4\pi r_h^2 (f_{gas} - f_{eq}) \quad (14)$$

ここで、 $dn/dt$  (mol/s)はハイドレート成長速度、 $K$  (mol/m<sup>2</sup>)は反応速度係数、 $r_h$  (m)は粒子の半径、 $f_{gas}, f_{eq}$  (Mpa)はガス相及び三相平衡状態でのメタンのフガシティをそれぞれ表します。

反応速度定数  $K$  は下記の Ranz-Marshall の式によって算出されます。

$$Sh = \frac{Kd}{D_2} = 2 + 0.6Sc^{\frac{1}{3}}Re^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

ここで、 $Sh$ はシャーウッド数、 $d$  (m)は粒子の直径です。 $D_2$  (m<sup>2</sup>/s)はメタンガスの拡散係数で、本研究では $1.5 \times 10^{-9}$ としています。 $Sc$ はシュミット数、 $Re$ はレイノルズ数を示します。これを $K$ について解き、ハイドレート形成の式に値を与えます。

$$K = \frac{2D_2}{d} + 0.6 \frac{D_2^{\frac{2}{3}} \cdot u^{\frac{1}{2}}}{d^{\frac{1}{2}} \cdot \nu^{\frac{1}{6}}} \quad (16)$$

ここで、 $u$  (m/s)は粒子の速度、 $\nu$  (m<sup>2</sup>/s)は海水の動粘度を示します。

フガシティについては下記の式によってそれぞれ算出しました。

$$f = Hx^l \exp\left(\frac{pv^l}{RT}\right) \quad (17)$$

ここで、 $H$  (atm)はヘンリー定数、 $x^l$ は溶液中の溶存ガスのモル分率、 $p$  (atm)は圧力、 $v^l$  (m<sup>3</sup>/mol)は溶解するメタンガスの 1mol あたりの体積で、36.5としています。 $R$ は気体定数、 $T$  (K)は温度を示します。ヘンリー定数は下記の式により算出されます。

$$H = \exp\left\{-\left(\frac{A}{R} + \frac{B}{RT} + \frac{C \log T}{R} + \frac{DT}{R}\right)\right\} \quad (18)$$

ここで、 $A, B, C, D$ は定数で、それぞれ $A = -365.183$ 、 $B = 18106.7$ 、 $C = 49.7554$ 、 $D = -0.000285$ です。

### 3.1.3 ハイドレートの崩壊

メタン湧出モデルにおいて、ハイドレートの崩壊とはハイドレートからガスへの相変化を指し示します。メタン湧出モデルの基礎となったモデルにおいても、ハイドレートの崩壊をガス相への相変化として位置付けて扱っています。しかし、基礎モデルではハイドレートの崩壊によるハイドレート質量の減少は計算されていましたが、ハイドレート崩壊に伴うガス泡の発生はモデル化されていませんでした。本研究ではハイドレートの崩壊時に減少したハイドレートの質量分だけ、新たにガス泡が生じるようにモデル化し、メタン湧出モデルで扱えるようにしました。

ハイドレートの崩壊はハイドレートの形成過程と同様に下記の式で表され、粒子ごとに計算が実行されます。

$$\frac{dn}{dt} = K \cdot 4\pi r_h^2 (f_{hyd} - f_{eq}) \quad (19)$$

ただし、反応速度係数  $K$  はハイドレート形成の場合のように Ranz-Marshall の式を用いた算出は

せず、定数として与えています。本研究では基礎モデルを参考として、 $K = 1.24 \times 10^{11} (\text{mol/m}^2 \cdot \text{Mpa} \cdot \text{s})$ を用いて計算を行いました。

算出されたハイドレートの崩壊質量の分だけ、元の粒子の質量は減少し、新たなガス泡が生じます。新たなガス泡のサイズは1から8mmの範囲でランダムに決定しました。ただし、崩壊して生じた質量を超えることはないようにしました。崩壊したハイドレートの質量が十分に大きい場合には、複数個のガス泡が生じるとしました。逆に、1mmより小さいガス泡しか形成できない場合には、ガス泡は生じず、崩壊したハイドレートの質量は海水中に溶解したものとして扱いました。

ガス泡が新たに生じた場合、その泡は元のハイドレート粒子と同様の位置に生じ、同じ上昇速度を持つように設定しました。

### 3.1.4 ガスの溶解

ガスの溶解については基礎モデルを変更することなく、全く同様にして扱いました。メタンガスの海水への溶解は下記の式で表され、粒子ごとに計算が実行されます。

$$\frac{dm}{dt} = KMA(C_s - C_0) \quad (20)$$

ここで、 $m$  (kg)は溶解するガスの質量、 $K$  (m/s)は質量伝達係数、 $M$  はガスの分子量、 $A$  ( $\text{m}^2$ )は一つの気泡の表面積、 $C_s$  ( $\text{mol/m}^3$ )はガスの可溶性、 $C_0$  ( $\text{mol/m}^3$ )はガス泡内部のガス濃度を示します。質量伝達係数 $K$ については、基礎モデルと同様に Clift et al. (1978)の関係式を用いて算出しています<sup>13)</sup>。

$$K = K_1 \cdot D_f \quad (21)$$

(1)  $d \leq 5\text{mm}$

$$K_1 = 1.13 \sqrt{\frac{w_b \cdot D_3}{0.45 + 0.2d}} \quad (22)$$

(2)  $5\text{mm} < d \leq 13\text{mm}$

$$K_1 = 6.5 \sqrt{D_3} \quad (23)$$

(3)  $13\text{mm} < d$

$$K_1 = 6.94d^{-0.25} \sqrt{D_3} \quad (24)$$

ここで、 $D_f$  は溶解係数で、本研究では基礎モデルと同様に0.1とした。 $w_b$  (m/s)は粒子の上昇速度、 $d$  (m)は粒子の直径を示します。 $D_3$  は拡散係数で、本研究は基礎モデルと同様に $1.5 \times 10^{-9}$ としました。

$C_s$  は下記の式により算出されます。

$$C_s = H^* f^g \exp\left(\frac{(1-P)v^l}{RT}\right) \quad (25)$$

ここで、 $H^*$  (atm)はヘンリー定数、 $f^g$  (atm)はガス相のフガシテイ、 $P$  (atm)は圧力、 $R$  は気体定数、 $T$  (K)は温度、 $v^l$  ( $\text{m}^3/\text{mol}$ )は溶解するガスの1molあたりの体積を示します。

$C_0$  は下記の式により算出されます。

$$C_0 = \frac{n}{V} \quad (26)$$

ここで、 $n$  (mol) は一つの粒子に含まれるメタンガスの物質量、 $V$  (m<sup>3</sup>) は一つの粒子に含まれるメタンガスの体積を示します。

### 3.1.5 ハイドレートの溶解

ハイドレートの海水への溶解についても、ガスの溶解と同様に基礎モデルを変更することなく、全く同様の定式を用いました。ハイドレートの海水への溶解は下記の式で表され、粒子ごとに計算が実行されます。

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\beta \cdot D_4}{\Delta C} \cdot A \quad (27)$$

$$\Delta C = \frac{2r_h}{Sh} \quad (28)$$

ここで、 $m$  (kg) は溶解するハイドレートの質量、 $\beta$  は溶解に関する係数で、定数として扱い、本研究では基礎モデルと同様に  $\beta = 0.0094$  としました。 $D_4$  はハイドレートの海水への可溶性を示し、本研究では基礎モデルと同様に  $D_4 = 1.09 \times 10^{-9}$  としました。 $r_h$  (m) はハイドレート粒子の半径、 $Sh$  はシャーウッド数、 $A$  (m<sup>2</sup>) は一つの粒子の表面積を示します。

## 3.2 環境データ

メタンの湧出地点に関するデータは、過去の実地調査報告 から得た値を用いました<sup>7)</sup>。湧出地点は北緯 37.44 度、東経 138.00 度、水深 940m で、湧出物の初期温度を 0.2°C、放出量を 0.004Nm<sup>3</sup>/s、湧出口の直径を 0.01m としました。湧出する気泡サイズの初期分布は直径 5mm が 70%、6、7、8mm がそれぞれ 10% としました。対象とした日時は 2012 年 8 月 24 日 13 時から 18 時です。

次に、環境流体に関するデータとして、東西方向流速、南北方向流速、水温、塩分濃度があります。これらの入力値は任意の時間ごとに変化させることができ、本研究では 1 時間ごとに入力値を更新しました。メタン湧出海域の観測用いることが理想的であります。上越沖では全ての変数が揃った観測値のデータセットがなかったため、本研究では JAMSTEC の算出した再解析データである JCOPET のデータセットを用いています<sup>13)</sup>。図 29 は水温と塩分について、湧出地点における同時刻

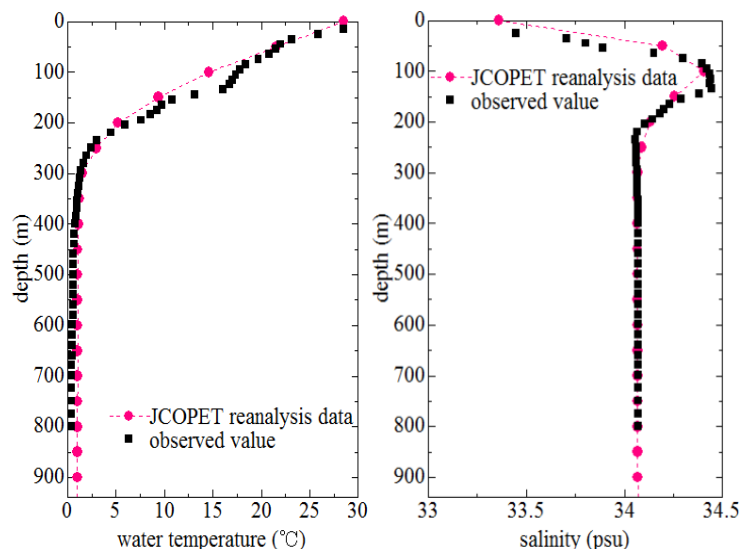


図 29 水温および塩分の再解析データと実験の比較

の再解析データとアルゴフロートによる観測値を比較したものです。各深度でよく一致していることが確認できます。別の日時、別の場所における値も一致していました。



図 29 は再解析データによる深度毎の流速で、それぞれ、湧出地点における 15 時の東西方向流速と南北を示しています。正の値はそれぞれ東方向、北方向を示します。

東西方向流速に着目すると、深度が深くなるにつれて西向きの流速が強くなっていることが分かります。一般的には深海における流速は表層に比べて小さくなる傾向があり、尚且つ、図 30 に示した南北方向流速のように小さい。しかし、再解析データの値は 40cm/s と非常に強い流速になっており、明らかに異常値だと考えられます。そこで、メタンの湧出地点は実際の観測地点よりも 5.5km 北の位置とすると、この位置に相当する海洋モデルの格子点においては、再解析データに異常値は含まれていないため（図 31 参照）、このデータを用いることにしています。

### 3.3 結果と考察

図 32 は湧出開始から 5 時間後のメタン拡散範囲を示します。青色の点がハイドレート粒子を、水色の点がガス泡を表します。図 31 について、東西方向への拡散は、水深による流向の違いによって、弓形のプルームが形成されています。湧出後は西向きの流速を受け 100m ほどの範囲に拡散したのち、表層付近では東向きの流速によって、

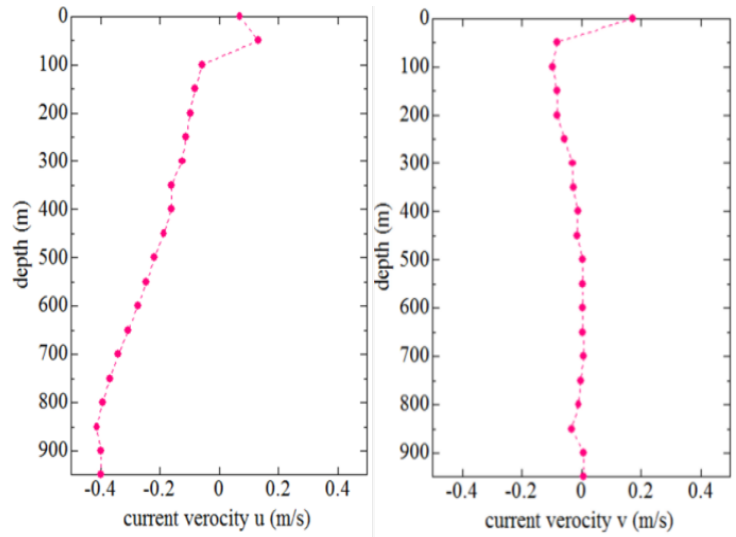


図 30 潮流の鉛直分布の再解析データ

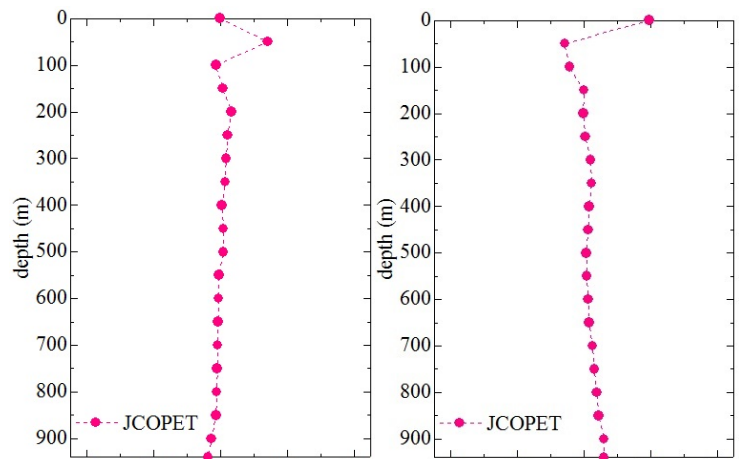


図 31 異なる地点の潮流の鉛直分布の再解析データ

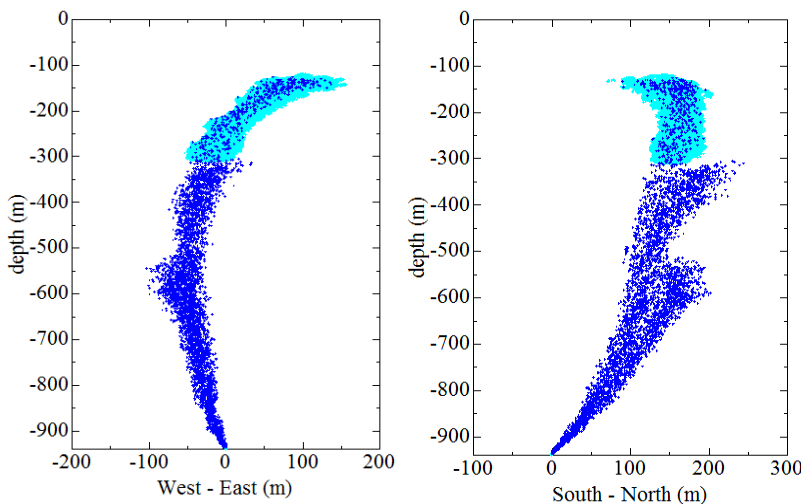


図 32 5 時間後のメタンガスの鉛直分布

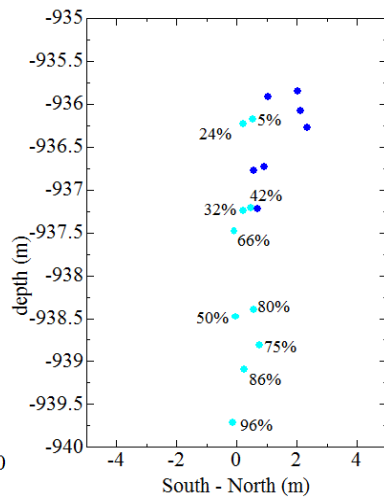


図 33 海底近くのガスの割合

最大で東側に 100mほど粒子が流されています。南北方向については北側に拡散しており、最大で北に 200mの位置まで広がっています。ハイドレートからガスへの相変化は水深 300mの位置で始まっており、最終的な粒子の到達深度は水深 120mとなっています。図 33 は海底付近における湧出開始から 5 時間後の粒子の位置を示し、それぞれの点は個別の粒子を示します。点の近くに記載したパーセンテージはその粒子に含まれるガス成分の割合を示します。海底近くで直ぐにガスがハイドレート化することがわかります。

## 謝辞

この研究は、日本学術振興会科学研究費基盤研究 (S)「流出重油・ガスの自動追跡システムの確立と革新的海洋防災システムへの展開」(課題番号: 23226017) (平成 23 年度—平成 27 年度) の支援を受け、実施しています。関係各位にお礼申し上げます。また、この研究の分担者である、大阪大学大学院工学研究科 鈴木博善氏、千賀英敬氏、大阪大学大学院基礎工学研究科 岡野 泰則氏、伴 貴彦氏、高木 洋平氏、東海大学海洋学部 坂上 憲光氏、神戸大学大学院海事科学研究科 小林 英一氏、(独)港湾空港技術研究所 吉江 宗生氏、田中 敏成氏には、多くの労を取って頂き、感謝申し上げます。また SRI International の R. Timothy Short 氏には、水中質量分析計の SOTAB-I への搭載と実験では、支援を頂き、お礼申し上げます。最後に、この研究の多くの成果が学生諸氏の尽力で得られており、この研究に従事した学生諸氏に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 加藤直三、流出重油・ガスの自動追跡システムの確立と革新的海洋防災システムへの展開、海上防災、No. 153、APR、2012、pp.19-35
- 2) R. Kimura, M. Choyekh, N. Kato, H. Senga, H. Suzuki, M. Ukita, K. Kamezuka: Guidance and Control of an Autonomous Underwater robot for tracking and monitoring spilled plumes of oil and gas from seabed, Proceedings of ISOPE 2013, June 30-July 5, 2013, Anchorage
- 3) R. Kimura, M. Ukita, K. Kamezuka, N. Kato, H. Senga, H. Suzuki, M. Choyekh, Construction of guidance and control system and GUI of an autonomous underwater robot: SOTAB-I, Proc. of CAMS 2013(IFAC), Spetember 17th-20th, 2013, Osaka
- 4) M. Choyekh, M. Ukita, R. Kimura, N. Kato, H. Senga, M. Yoshie, T. Tanaka, N. Sakagami, Structure of Control System of SOTAB-I for Autonomous Tracking of Spilled Oil, Proc. of ISOPE 2014, June 15 - June 20, 2014 (to be printed)
- 5) G. P.G. Kibelka, R. T. Short, S. K. Toler, J. E. Edkins, R. H. Byrne, Field-deployed underwater mass spectrometers for investigations of transient chemical systems, Talanta 64, 2004, pp.961-969
- 6) 河原 翔, 高木 洋平, 伴 貴彦, 岡野 泰則, 加藤 直三、深海底から湧出するメタンガス/ハイドレートの挙動予測、第 24 回海洋工学シンポジウム 平成 24 年 3 月、2014
- 7) R. Matsumoto, Y. Okuda, et al.: Formation and Collapse of Gas hydrate deposits in high Methane Flux Area of the Joetsu Basin, Eastern Margin of Japan Sea. Journal geography.

- 118(1), 43-71, 2009.
- 8) C. Aoyama, R. Matsumoto, et al.: Acoustical surveys of Methane plumes using the quantitative echo sounder in Japan Sea. Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. pp. 249-255, 2007
  - 9) Zheng, L., Yapa, P. D. and Chen, F.: “A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation”, J. Hydraulic Research, 41, pp.339-351, 2002.
  - 10) Chen, F. and Yapa, P. D.: “A model for simulating deepwater – Part II: Comparison of numerical simulations with “Deepspill” field experiments”, J. Hydraulic Research, 41, pp.353-365, 2002.
  - 11) S. Sukizaki, Y. Ishihara, K. Nakata, P.D. Yapa: 漏洩メタンとメタンハイドレート分解生成水の水中での拡散予測モデルの開発-数値モデルを用いた解析-. 月刊海洋, Vol.40, No.2, pp. 136-145, 2008.
  - 12) Y. Takagi, T. Ban, Y. Okano, S. Kunikane, S. Kawahara, N. Kato, K. Ohgaki: Numerical tracking of methane gas/hydrate and oil droplet in deep water spill. Inter-Academia 2012.
  - 13) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu, 2009: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr. 65, 737-756.
  - 14) H. Machiyama: 平成 24 年度 所内利用 新規巡航型 AUV による炭化水素海底資源の分布および CCS 環境モニタリングに関する基礎研究 2013-04-26, KAIYOU, KY12-10, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan.
  - 15) 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
  - 16) Inter Ocean System, <http://www.slicksleuth.com/>
  - 17) Swarn Singh Rathour, T. Akamatsu, N. Kato, H. Senga, N. Tanabae, M. Yoshie, T. Tanaka: Modelling and Control Design of Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy, Proc. of ISOPE 2014, June 15 - June 20, 2014 (to be printed)
  - 18) <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
  - 19) <https://www.myroms.org/>
  - 20) 椋本洋平、加藤直三、海洋モデル POM 気象モデル WRF を用いたナホトカ号重油流出事故後の重油追跡シミュレーション、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 8 号、pp.33-36、2009
  - 21) <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/>
  - 22) <http://www.atmos.umd.edu/~ocean/>
  - 23) <http://www.jamstec.go.jp/frgc/jcope/htdocs/distribution/index.htm>
  - 24) <http://www.pcs.gr.jp/>
  - 25) D. Mackay, W. Zagorski, Studies of water-in-oil emulsions, Environment Canada Manuscript Report EE-34, Ottawa, Ont.,1982

- 26) James A. Fay :Physical processes in the spread of oil on a water surface,International Oil Spill Conference Proceedings: June 1971, Vol. 1971, No. 1, pp. 463-467.
- 27) 余 錫平, 及川 一彦, 磯部 雅彦, 渡辺 晃, 静水場および波浪場における事故流出油の挙動に関する基礎的研究、海岸工学論文集、第 45 巻、1998、pp.916-920
- 28) 松崎 義孝, 藤田 勇, 油拡散を考慮した流出油の数値計算法の開発, 港湾空港技術研究所資料、No.1255, 2012
- 29) N. Kato, M. Hiratsuka, H. Senga, H. Suzuki: Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy, Proc. of OCEANS 2010 (MTS/IEEE SEATTLE), 2010