

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

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。この紙面をお借りして、その紹介をさせていただきます。

1. 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

海面に流れ出た重油は、波により水と混ざりエマルジョン化・高粘度化し、沿岸に漂着すると残存性が高くなります。そうすると、自然環境に大きなダメージを与え、その回復には多大な時間と人手が必要となります。また地域経済に大きな影響と損失をもたらします。日本では、1997 年にナホトカ号重油流出事故によって、C 重油 6240KL が流出し、日本海の沿岸に多大な被害をもたらしました。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、海底石油生産システムにおける事故や活発な地震活動や海底地滑りにより、ガスが噴出すると、航行船舶や航空機、また自然環境に重大な被害をもたらします。この事故例として、まだ記憶に新しいですが、2010 年にメキシコ湾のルイジアナ (Louisiana) 州沖で海洋石油掘削基地 Deepwater Horizon が爆発・炎上し、水深 1522m の海底から総流出量約 78 万 KL の重油が流出しました。この爆発した施設の周辺に、いまだに重油のプルームが存在していることが確認されている。この事故を踏まえ、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思われます。また、いつ、海底から流出した重油やガスが、どこへ、どれだけ、海面に浮上するのか、そして浮上した油・ガスはどこへ流れ着くのかという疑問に答えるためには、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。

このような社会的背景とは別に、学術的な観点からは、深海におけるガスハイドレートの生成・分解、油・ガスの移流・拡散を含んだマルチスケールの現象であること、またガスの生成・分解に関する熱力学と動力学を含んだマルチフィジックスの現象であること、実海域でのリアルタイムデータを融合した精度の良い環境予測問題を含んでおり、未解決な領域となっています。

1.2 研究の目的

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する。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。

1.3 本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置付け

海面の重油の位置を追跡するシステムとして、これまで

(1)蛍光ライダー、(2)漂流ブイ、(3)Xバンドレーダ、(4)人工衛星
があります。

(1)は海面に向けて紫外パルスレーザーを当て、画像撮影する方式で、航空機に搭載するため飛行時間に限界があります。

(2)は重油の位置から離れた場合、追尾する機能は持っていない。

(3)はその大きさにより、ロボットには搭載不可です。

(4)は一日に数回しかデータが取得できません。

このように、浮流重油の位置をリアルタイムで常時追跡するシステムの研究はこれまでに世界に類がないと思われま

一方、長期間、海底から海面までの三次元空間の環境モニタリングを行う海中ロボットとして、

(5)アルゴ・フロート、(6)水中グライダー
があります。

(5)は、鉛直に立ち浮力調整装置によって、鉛直方向に浮上する。

(6)は、流線型胴体に固定翼が付き、浮力調整装置を使って潜航・浮上により長距離移動する。

この研究の海底から噴出する油・ガスの自動追跡ブイ「SOTAB-I」(Spilled Oil and Gas Tracking Autonomous Buoyの略)は、頭部の可動式翼により鉛直移動と水平移動の中間に位置する運動機能を有し、また重油やガスのブルームをそれらの検出センサーによって、長期間追跡することができ、このような海中ロボットはこれまでに世界に類がないと思われま

浮流重油の漂流シミュレーションについては、これまで多くの研究がなされており、人工衛星や現場観測で得られたデータを融合し、そのシミュレーションの精度向上を図る研究もなされています。しかし、重油の漂流位置や海象・気象に関するリアルタイムデータを漂流シミュレーションに用いる研究はこれまでなされていないと思われま

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現象はまだ十分に把握されておらず、ましてや重油やガスのブルームの範囲、海中環境のデータを融合して、拡散シミュレーションの精度向上を図る研究はこれまで行われていないと思われま

1.4 研究の到達目標

これまで筆者は外部研究資金や共同研究によって、船舶からの流出重油の自動追跡ブイロボッ

トや浮流重油漂流シミュレーションの研究開発を行ってきました^{i), ii)}。

本研究は、

- 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
- 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
- 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
- 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

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。

1)においては、浮力と翼角の制御により、鉛直方向および水平方向への移動が可能な

仕様とし、ロボットの下部に、海中の油やガス成分が検出可能なセンサーや海洋環境計測センサーや流速センサーを配置し、また、ロボットの頭部にGPS、衛星との情報通信装置を備え、母船との音響通信モデム、音響海中位置検出装置を搭載した垂直円筒型の海中ロボットを開発し、その運動特性の水槽での試験と評価、センサーの試験室での試験と評価、メキシコ湾での油流出事故周辺や日本の新潟沖でのメタンハイドレード分布海域での海中の油やガスの三次元マッピングや重油、ガスのプルームの自動追跡制御の試験と評価を行います（図1の手段1）。

2)においては、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を新たに開発し、過去の実験データと比較し、評価します。そのモデルを用いて、メキシコ湾での油流出事故海域や日本の新潟沖でのメタンハイドレード分布海域に適用し、プルームの範囲や海中環境のデータを取り込んで、拡散シミュレーションの精度向上を図ります（図1の手段3）。

3)においては、帆の面積と角度を制御し、マストの上部に浮流重油の検出センサーを取り付けた浮遊式ブイの海面漂流特性、浮流重油を昼夜にわたって検出可能なセンサー特性、浮流重油の自動追跡制御性能の試験と評価を、実際の重油を用いた油回収実海域再現水槽や海域試験にて行います。

次に、複数のブイロボットを用いて、日本での海面上のターゲットの自動追跡実験や、ノルウェーでの実際の重油を用いた海洋実験に参加し、その検証実験を行います（図1の手段2）。

4)においては、これまでに開発した重油の蒸発・分解・拡散などの過程を考慮した大気—海洋

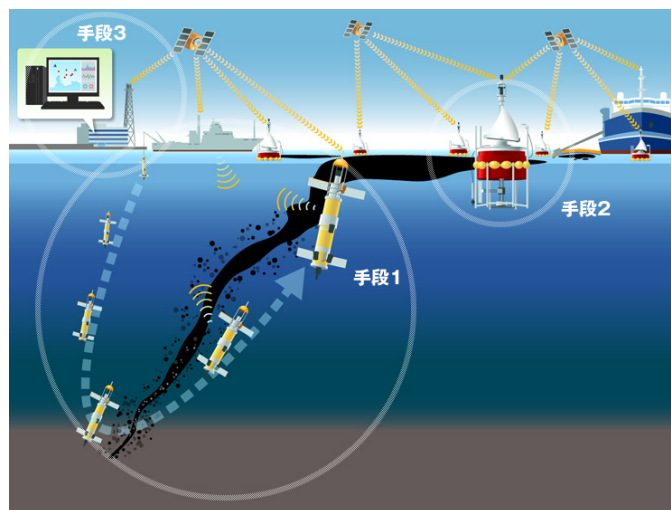


図1 SOTABプロジェクト概念図

モデルをベースに、モデルの更新を行い、日本海で起きた重油流出事故の漂流シミュレーションや、各県間の重油の回収比に関して評価を行います。このモデルを用いて、複数のブイによって得られた重油の漂流位置や海象・気象のリアルタイム データをシミュレーションに融合する手法を開発し、重油の漂流予測精度について評価します（図 1 の手段 3）。

2. 研究計画と研究体制

2.1 研究計画

本研究は、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や、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の確立のために、ロボットの設計・製作、重油などの検出センサーの特性試験、運動シミュレータの開発を行い、その性能を評価します。

その後、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では、メキシコ湾での油流出事故周辺海域や、新潟沖でのメタンガス発生海域における海洋実験を行う予定です。

浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットは、複数台製作し、ノルウェーで実際の重油を用いた海上実験を行う予定です。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の確立のために、海底近くのプルームの海洋実験データを融合する手法を開発します。

浮流重油漂流シミュレーション技術では、大気-海洋モデルを用い、複数のブイによって得られた重油の漂流位置や、海象・気象のリアルタイム データをシミュレーションに融合する手法を開発します。

2.2 平成 23 年度の計画

平成 23 年度は、次の 4 項目について研究を行っています。

- 1) 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に関する研究(SOTAB-I)
- 2) 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
- 3) 海面浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットに関する研究(SOTAB-II)
- 4) データ同化手法を取り入れた浮流重油漂流シミュレーションに関する研究

1)の研究項目を実施するにあたり、これまで研究開発を行ってきた SOTAB-I（参考文献 i）右図参照)では、重油の有無を検知する接触式センサー及び潜航した状態から上方の重油塊浮流位置やその領域の検知を行う非接触式センサーを取り付け、浮力と翼角の制御により、鉛直方向及び水平方向への移動を行うことができる運動機能を持たせていました。新しい SOTAB-I では、旧 SOTAB-I の運動機能を活用し、水深 2000m まで



図 2 浮流重油自動追跡ブイ
(旧型 SOTAB-I)

の油やガスなどの海底生産施設まわりの海底から海面までの三次元空間を移動しつつ、油ガス検知センサーにより、海中の重油やガスのプルームを追跡しモニタリングする新たな海中ロボットを設計する。そのために次の二つの副研究項目を実施します。

- ① 海中ロボットに搭載する音響流速センサー、音響通信モデム、音響位置検出装置の音響機器の特性試験を行います。
- ② 海中の重油やガスのプルームを追跡しモニタリングする海中ロボットの誘導制御アルゴリズムの検討を行います (図 3 参照)。

2)の研究項目は 2 年にわたって実施する計画で、初年度は、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を新たに開発し、過去の計算や実験データと比較し、評価します。

具体的には、ハイドレードの形成と分解、ガスの溶解、ガスの挙動、潮流によるガスのプルームからの分離など、流体力学と化学熱力学の干渉を含んだ複雑な油とガスの拡散過程を表現します。

3)の研究項目では、このプロジェクトの前に、港湾空港技術研究所との共同研究で開発された、海面浮遊式浮流重油自動追跡ブイ SOTAB-II (2 号機、図 4 参照) を用いて海上実験を行い、風と潮流の中における挙動を詳細に求めます。

SOTAB-II(2 号機)の胴体部は円筒状であり、流体抵抗が大きく、風による漂流速度があまり出せないことが考えられ、新たにセーリング・ヨット型の新 SOATB-II を考え、具体的な搭載物を想定して、設計を行います。

4)の研究項目では、これまでに開発した重油の蒸発・分解・拡散などの過程を考慮した大気—海洋モデルⁱⁱⁱ⁾をベースに、沿岸の影響を考慮したモデルの更新を行い、日本海で起きた重油流出事故の漂流シミュレーションを行い、各県間の重油の回収比に関して評価を行います。

次に、変分法を用いたデータ同化手法を風モデルに適用して、各県間の重油の回収比がどの程度観測地に近づくのか、評価を行います。

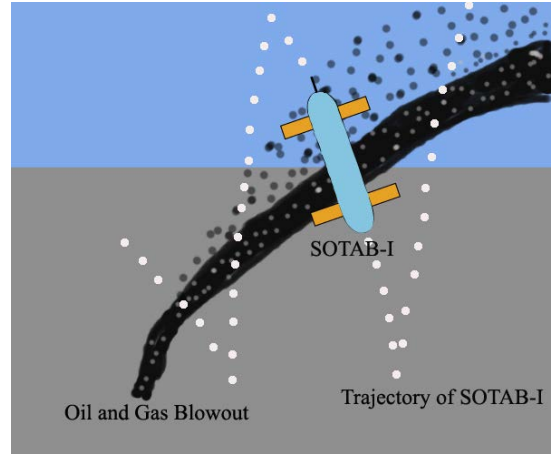


図 3 SOTAB-I の運用概念図

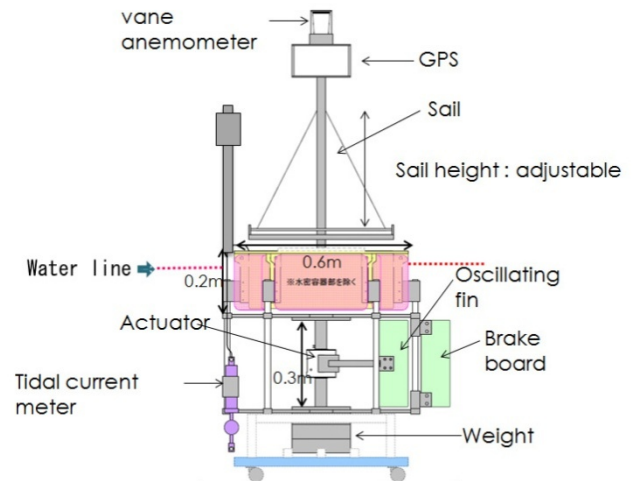


図 4 SOTAB-II(2 号機)の各部配置

2.3 平成 24 年度以降の計画

2.2 の 1)の研究項目では、まずミッションを満たす運動機能を発揮するための海中ロボットの

形状設計、要素機器の設計、運動制御システムの設計、海中ロボットの運用計画作成を支援する運動シミュレータを開発します。これを用いて、ケーススタディを行い、海中ロボットの最適な形状設計と本体の設計・製作を行う。

要素機器の設計の中で、浮力調整装置については、深海環境を考慮して、旧 SOTAB-I で用いた空気容量調整式から、ゴム膜を用いた油容量調整装置に変更します。

この海中ロボットには、環境センサーとして、水中質量分析計、CTD (Conductivity Temperature Depth Profiler の略:水温、塩分濃度、溶存酸素等を測定する装置)、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler の略:多層流向流速計) を搭載する。

各種基本性能試験を行ったあと、メキシコ湾での油流出事故周辺海域や新潟沖でのメタンガス発生海域における海洋実験を行います。

2.2 の 2) の研究項目では、メキシコ湾で起きた深海での油噴出事故に関して、海底付近における物理環境を求めるため、同湾における海洋モデルを開発します。次に、これまでに公開されているデータの収集を行います。

これらの情報をもとに、前年度の研究で開発し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を適用し、油の拡散の様子を計算の上、これまでに公開されているデータと比較・評価します。

次に、2.2 の 1) の研究項目の中で計測されたメキシコ湾や新潟沖の海中の重油・ガス成分の三次元マッピングや潮流分布を融合させ、重油・ガスのブルームの三次元的拡散状況をシミュレーションする技術の評価を行います。

2.2 の 3) の研究項目では、海面の重油に対する検出センサーの特性試験を、図 4 の SOTAB-II (2 号機) を用いて行い、その後、新 SOTAB-II の設計・製作を行います。複数台の新 SOTAB-II を製作します。

次に、製作された新 SOTAB-II の海面漂流特性、浮流重油の自動追跡制御性能の試験と評価を、ノルウェーで、実際の重油を用いて海上実験を行います。

2.2 の 4) の研究項目では、大気—海洋シミュレーションを実施し、2.2 の 3) の研究項目で得られたノルウェー沖での計測データやその他の観測データを融合させ、浮流重油の漂流シミュレーション技術の精度評価を行います。

さらに、2.2 の 2) と 4) の研究成果を用い、深海からの油とガスの噴出の拡散シミュレーション技術と浮流重油の漂流シミュレーション技術を一体化させます。

2.4 研究体制

研究体制は以下のような 4 つのグループから成り立っています。

(1) グループ 1

研究内容：深海から噴出する重油やガスのブルームの自動追跡を行う海中ロボット技術
新 SOTAB-I の開発と実験

(2) グループ 2

研究内容：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

術とデータ同化

(3) グループ 3

研究内容：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、新 SOTAB-II の開発と実験

(4) グループ 4

研究内容：浮流重油漂流シミュレーション技術の開発と評価とデータ同化

参加機関は、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻、大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻、港湾空港技術研究所、東海大学海洋学部です。

3. 研究内容

3.1 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（新 SOTAB-I）に関する研究

3.1.1 新 SOTAB-I の形状

新 SOTAB-I は、平成 24 年度に設計・製作を行うため、その形状は現時点では決まっています。

概念図を図 5 に示します。

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 1 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。

3.1.2 新 SOTAB-I の誘導

どのように新 SOTAB-I が海底からの重油やガスのプルームの自動追跡を行うか、検討するため、図 6 に示す旧 SOTAB-I を用い、誘導シミュレーションを行いました。

新 SOTAB-I は大きく分けて 2 つの調査モードが想定されています。

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 α モード、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 β モードです。

α モードはさらに二つのケースに分けています。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、及び重油が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 です。

β モードでは、流出現場を中心とした半径 5m の円に内接する正多角形の対角線に沿って移動するアルゴリズムを想定しています。流出現場の真上を様々な方向から通過しつつ撮影を行うことに

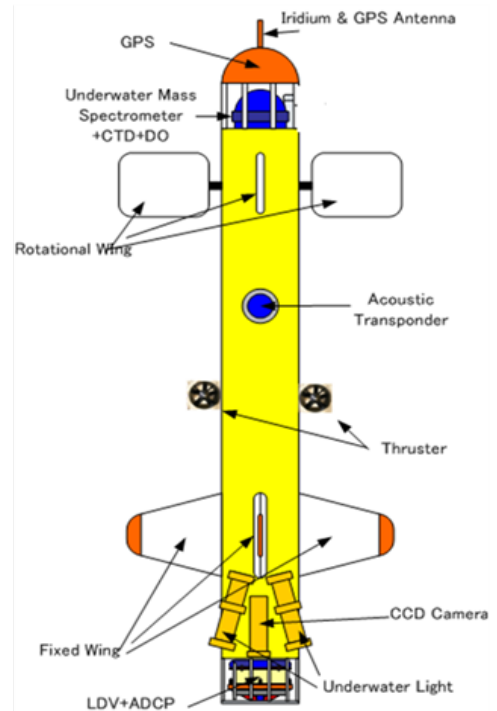


図 5 新 SOTAB-I の概念図

よって流出現場付近の様相をモザイクによる画像データ収集を行うものです。



図6 SOTAB-I (旧型)

表1 SOTAB-I(旧型)の主要目

Total length [mm]		3020
Diameter [mm]		267
Weight in air [kgf]		116
Weight in water [kgf]		-3.0 ~ +3.0
BG [mm]		70
Movable fin	Chord [mm]	200
	Span [mm]	400
	Thickness [mm]	36
Fixed fin	Chord [mm]	150
	Span [mm]	320
	Thickness [mm]	26

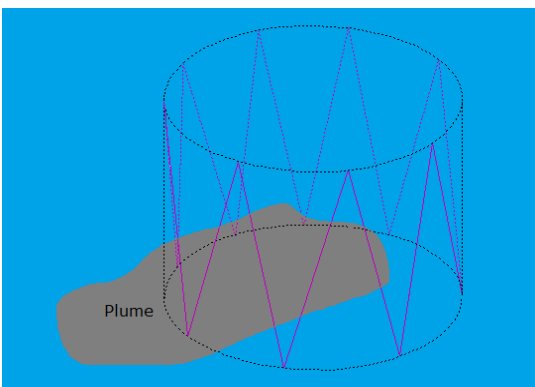


図7 αモード (ケースI) の誘導

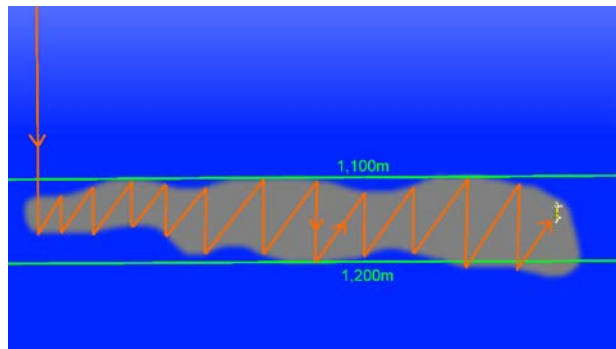


図8 αモード (ケースII) の誘導

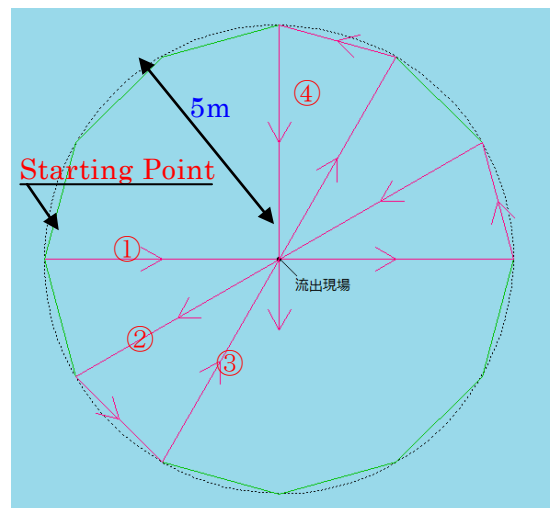
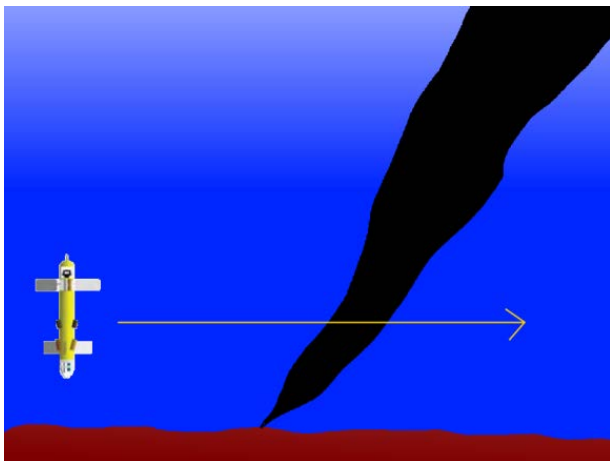
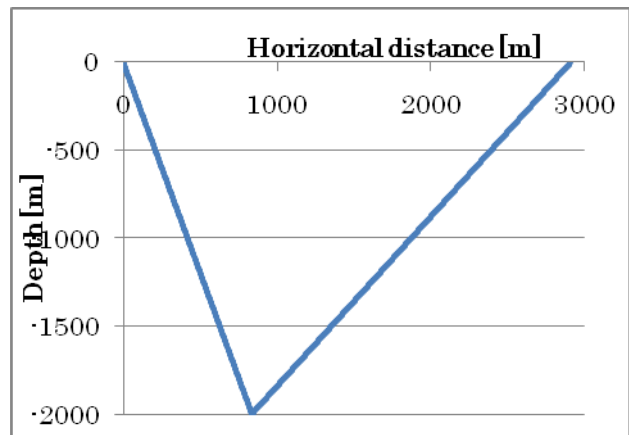


図9 βモードの誘導

図10に、潜航と浮上時に、翼角を30度にした場合の、鉛直面内の軌跡を示す。水深2000mまでの1回の潜航と浮上で、潜航時水平方向移動距離833[m]、浮上時水平移動距離2078[m]、合計水平移動距離2911[m]となります。このような誘導法で、油・ガスのプルームを検出することを考えています。1回の潜航・浮上に、10,000秒かかることから、



半径5kmの円筒状を探索するのに、11回の潜航・浮上を行って、約30時間を要することになります。

図10 潜航と浮上時の鉛直面内の移動

図11に、約100mの幅のある油のプルームがほぼ一定な水深に広がっている場合の新SOTAB-Iの誘導シミュレーションを示します。

新SOTAB-Iには、質量比200まで現場で分析が可能な水中質量分析計を搭載しており、αモード（ケースI）で判明したプルームの成分を検知しながら、流出重油の存在範囲から新SOTAB-Iが外れた場合に潜航・浮上を切り替えて、プルームの中を動く様子が示されています。

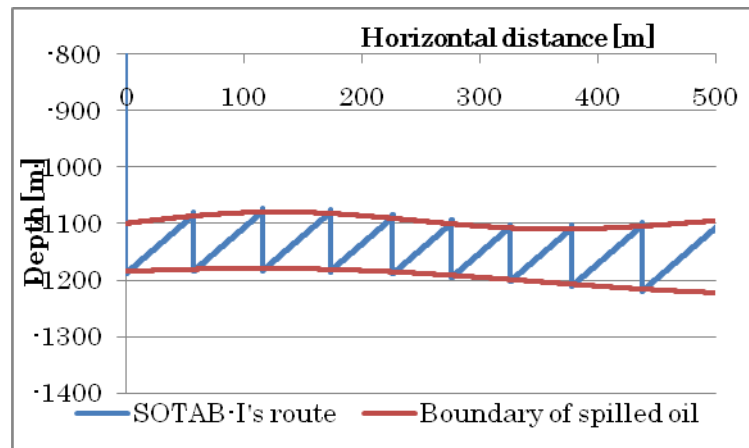


図11 αモード（ケースII）の誘導シミュレーション

3.2 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

図12は深海底からの石油の出の様子を簡単に示したものです。深海底から流出した石油は油成分とガスになり、ジェットとして勢いよく噴出します。その後はジェットの勢いに乗り、巻き上げられながら(プルーム状態)中立浮力レベルまで上昇します。ジェット/プルームの中では激しい乱流によって気泡や液滴が相互に作用しあい、気泡同士または液滴同士が衝突し、合体や分裂を行います。中立浮力レベルではプルームの密度と環境水の密度が等しくなり、気泡や微小な液滴に作用する浮力と重力がバランスする深度と考えられています。これは主にガスに影響するものです。中立浮力レベルを過ぎると油やガスは個別の液滴や気泡となり、環境流体の流れに漂いながら海面へと上昇していきます。海底から噴出する成分は重油以外にもメタンガス等の天然ガスを含んでおり、噴出したメタンガスは深海の低温・高圧条件下ではハイドレートを形成するため、単純な気液

混相流として油・ガスの挙動を予測することはできない。本研究ではメタンハイドレートの形成・分解を考慮した深海からのメタンガス追跡数値モデルを検証します。図 12 に示すように、噴出したガスはジェット/プリュ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・物質・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します iv)。海水とプリューム内の密度が釣り合う深さに達するとプリューム相は終了し(中立浮力レベル)、その後は個々の気泡粒子の併合・分裂を考慮しながら追跡を行います。全ての階層で海水へのメタンガスの溶解を考慮し、熱化学的条件によってハイドレートが形成されるときに成長速度や分解速度を求めます。

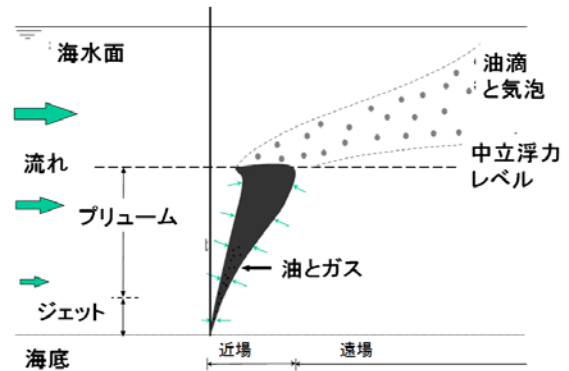


図 12 深海からの油・ガスの噴出のシナリオ

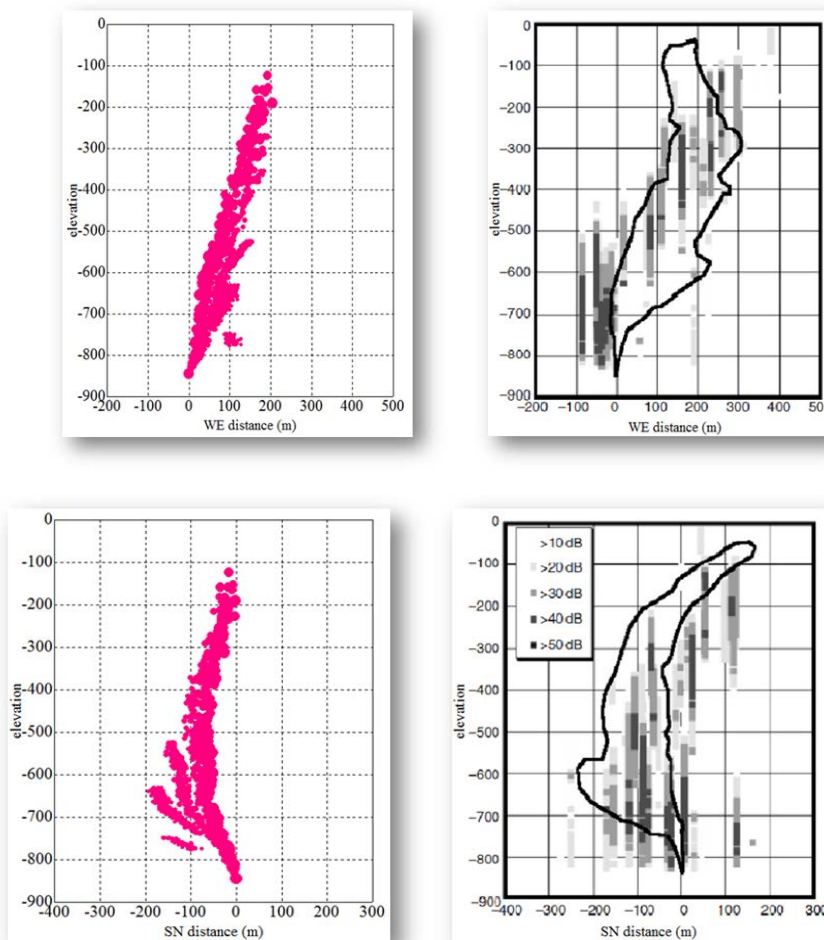


図 13 流出開始から 60 分後の各油滴 (1200 個) の位置のシミュレーション結果 (左図) と実験における流出開始から 60 分間の時間平均のエコサウンダーデータ (右図、灰色の棒線) と CDOG モデルの結果 (右図、黒色の実線)

3.3 海面浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボット (新 SOTAB-II) に関する研究

3.3.1 新 SOTAB-II のフィールド実験

浮流重油の挙動は潮流と風速のほぼ3%のベクトル和で表されます。図14に示したように、潮流に乗って流されるブイは、風向方向に潮流速度の成分を除き、風速のほぼ3%の速度を出すことができれば浮流重油を追従することが可能となります。浮流重油の挙動は風の影響が大きいことから、風を利用するものとして、帆を用いたブイを考案した。

帆の向きは、風向に対して常に90°となるようにとり、帆の大きさは、ブイの速度が重油の速度より大きい場合、帆を小さくし、また、重油の速度より小さい場合、帆を大きくする。ブイと浮流重油の移動方向と移動速度を知るために必要な計測機器として、GPS、風向風速計、方位計、潮流計が挙げられる。また重油塊から外れた場合は、ブイの上部に取り付けた重油塊検知センサーを用いて、ブイと重油塊の距離が離れないようにすることができます。

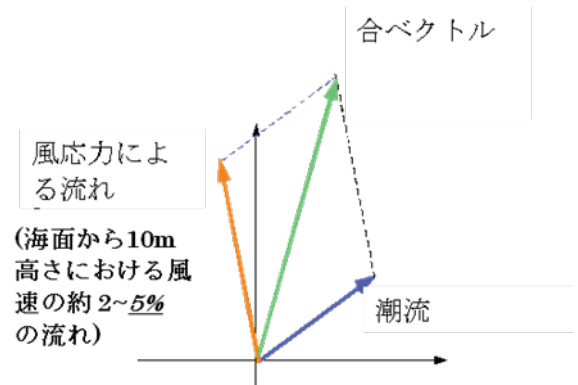


図14 浮流重油の漂流方向

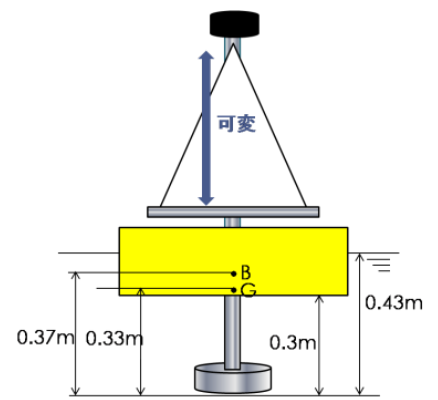


図15 SOTAB-II (1号機)

図15にこのプロジェクトの前に、港

湾空港技術研究所との共同研究で開発された SOTAB-II (1号機) を示します (質量 36kg)。この試作機で実際の海上で実験を行い、下記の結果が得られました。

- ・帆があることにより、海面付近の風による推力を得ることができ、自身の漂流方向が潮流ベクトルと海面から10m高さ位置での風速3%ベクトルの合ベクトル方向に近付くことが示され、帆の有効性が示されました。
- ・帆の大きさを変えることにより、漂流速度を調整することが可能であることがわかりました。

図4にこのプロジェクトの前に、港湾空港技

術研究所との共同研究で開発された SOTAB-II(2号機)を示します。質量 60.0 kg で、胴体を直径 0.6m、高さ 0.2m の円柱とした。帆は最大で幅 0.4m、高さ 0.5m となり、0~0.1 m²で面積の変更が可能となっています。帆の上部には風向風速計と D-GPS、搭載

視覚センサー(カメラ)、イリジウムアンテナが取り付けられています。帆の下部に潮流計とブレーキ板及び可動ヒレが装着されています。



図16 淡路島沿岸における海洋実験

SOTAB-II(2号機)を用いて、琵琶湖および淡路島沿岸においてフィールド実験を行いました。図16に、淡路島沿岸における海洋実験の様を示します。実験では、GPS付きラバーシートも同時に漂流させた。このラバーシートは、浮流重油と同じような漂流挙動を示すことが明らかにされています⁷⁾。

図17に、淡路島沿岸での海洋実験におけるSOTAB-II(2号機)の漂流軌跡、海面から10mの高さにおける風速の3%の速度ベクトルの積分値、潮流ベクトルの積分値、海面から10mの高さ

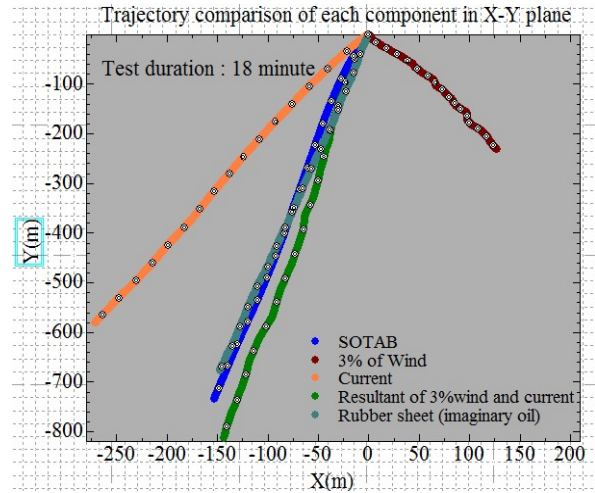


図17 SOTAB-II (2号機) の漂流軌跡

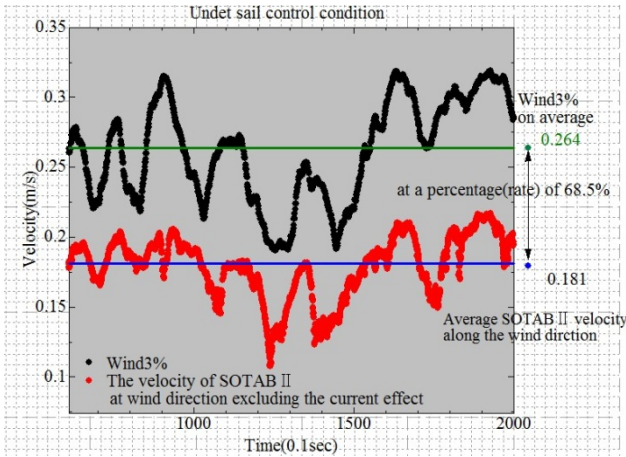


図18 帆の制御状態における風速の3%の速度と潮流成分を差し引いたブイの速度の時系列データ

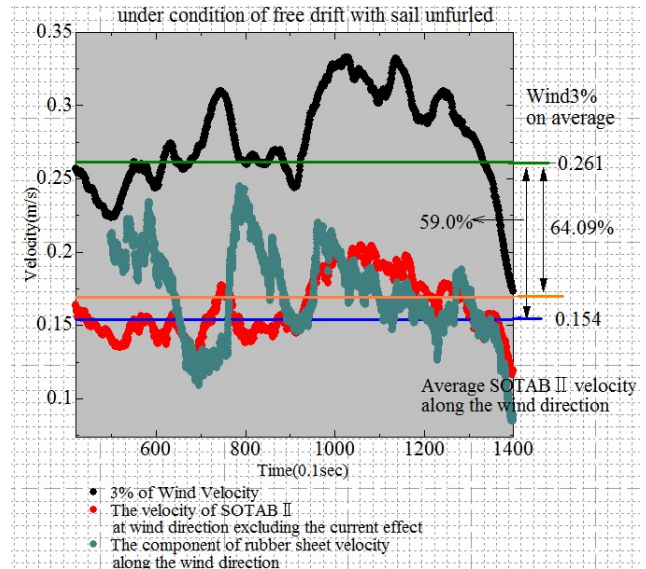


図19 満帆状態で帆制御がない場合の潮流成分を差し引いたブイの速度、潮流成分を差し引いたラバーシートの速度、風速の3%の速度の時系列データ

における風速の3%の速度ベクトルと潮流ベクトルの合ベクトルの積分値、ラバーシートの軌跡を示す。これから、SOTAB-II(2号機)の漂流軌跡がラバーシートの軌跡とほぼ一致しており、海面から10mの高さにおける風速の3%の速度ベクトルと潮流ベクトルの合ベクトルの積分値とは若干差が生じていることがわかります。この実験における潮流は、0.4-0.6 m/s であり、風の強さは8.0-10.0 m/s でした。もう少し詳しく、潮流成分を差し引いたブイの速度、潮流成分を差し引いたラバーシートの速度、風速の3%の速度との関係を見るために、図18に、帆の制御状態における風速の3%の速度と潮流成分を差し引いたブイの速度の時系列データを示し、図19に、満帆状態で帆制御がない場合の上記3つの速度の時系列データを示します。帆の制御状態においては、潮流成分を差し引いたブイの速度は、風速の3%の速度の9%程度であり、満帆状態で帆制御がない場

合においては、59%程度に落ち、ラバーシートの速度は、風速の3%の速度の64%程度であることがわかります。

3.3.2 新 SOTAB-II の設計

上記の実験より、帆の制御状態においても、潮流成分を差し引いたブイの速度は、風速の3%の速度の69%程度で、浮流重油を完全には追跡できないこととなります。その原因に、胴体が円筒状をしたブイの流体抵抗の大きさにあると考えられますより流体抵抗の少ないブイの形状が望まれます。

そこで、新 SOTAB-II にヨット型船型を採用することにしました。

安定性、機器を載せるための排水量の観点から、金沢工業大学で開発されたセーリングヨット「KIT34」の船型を用いました。風速計などのセンサーや電池などの積載物により復原性が低下する

ため、それを補うために必要なキールの大きさと取り付け位置を、

プログラムを組みシミュレーションを行うことにより計算しました。浮流している油は風による水面流れ（風速の3パーセント程度）と潮流の流れの合ベクトル方向に漂流するため、船に帆を付け油と同じ速度で漂流できるように大きさを計算しました。しかしヨット船型なので抵抗が少なすぎるためブレーキ板を用いて調整することになりました。

具体的な計算方法は、船の3Dモデルを構築し、CFDを用いて船体のみが受ける推進力を求め、それに対して風速の3%を維持できるようにブレーキ板の大きさを求めました。帆の大きさは、風速によって大きさを変える必要があります。現実的な範囲での風速に対応できる大きさを確保するために、帆の面積を50%とした時、平均風速でブレーキ板を含めた船体の抵抗と釣り合う推進力を得ることができれば、あとは制御によって様々な風速にも対応できるとして、面積が50%の時を基本として求めました。新 SOTAB-II の運動方程式を考え、CFDによるPMM試験のシミュレーションから流体力係数を導き出し、運動シミュレーションのプログラムによって運動の様子を考察しました。

操舵性に関して、船速が非常に遅い場合には舵から得られる流体力が小さくなり舵のみでの旋回は困難であることが判明しました。そこで新たに帆を船体前方に設置することにより方向変換を行い易くし、必要な帆の大きさと設置位置を計算しました。以上の計算より、油と等しく風速の3%で浮遊することのできる新たな浮流重油自動追従ロボット新 SOTAB-II の設計をすることができました。

図 20 にその形状を示します。全長 2.1m、全幅 0.6m となります。今後、これを製作し、実用機に向けて、性能試験を繰り返す予定でいます。

3.3.3 新 SOTAB-II の数

流出重油に対して、何台の新 SOTAB-II が必要かどうかについて、流出時から蒸発、エマルジョン化、拡散の後、24 時間後に油の性状が安定した状態における油斑が円形であるとして、その周

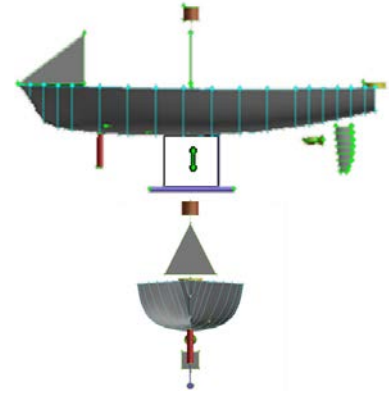


図 20 新 SOTAB-II の形状

囲に 500 m 間隔に SOTAB-II を配置するとして検討しました (図 21 参照)。ただし、次のような仮定を設けています^{vii)}。

- ① 体積 V_0 の量の油が海表面に流れ出るものとする。
- ② その流出した油は下の式に従って 24 時間内に半径 l m の円状に拡がるものとする。

$$l_{1,t} = C_1 \left(\Delta g V_E t^2 \right)^{1/4} \dots\dots\dots (0 \sim 1 \text{ hour}) \quad (1)$$

$$l_{2,t} = C_2 \left(\frac{\Delta g V_E^2 t^{3/2}}{v_E^{1/2}} \right)^{1/6} \dots\dots (1 \sim 24 \text{ hours}) \quad (2)$$

ここで

$$\Delta = \left(1 - \frac{\rho_E}{\rho_w} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \exp \left(\frac{2.5W}{1 - 1.085W} \right) \quad (4)$$

$$V_E = \frac{V_0}{1 - W} (1 - E) \quad (5)$$

- ρ_0, ρ_E, ρ_w : 流出油の密度、エマルジョン化した油の密度、海水の密度 (kg/m^3)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- t : 時間 (時)
- v_E : エマルジョン化した油の動粘性係数 (m^2/s)
- μ, μ_0 : 流出油の粘性、エマルジョン化した油の粘性
- V_0, V_E : 初期流出油の体積、エマルジョン化した油の体積 (m^3)
- W : 含水率
- E : 蒸発率

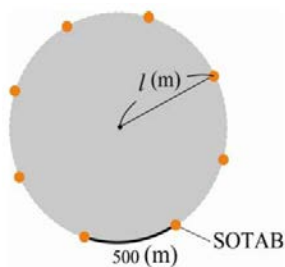


図 21 SOTAB-II の配置

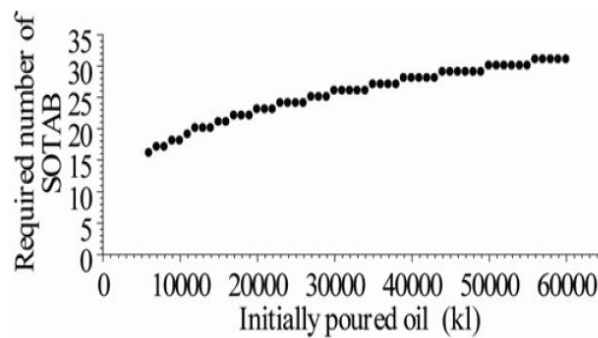


図 22 SOTAB-II の数と初期流出重油の体積との関係

図 22 に、SOTAB-II の数と初期流出重油の体積との関係を示します。1997 年に日本海で起きたナホトカ号流出重油事故では、C 重油 6240KL が流出したが、この場合は 16 台が必要となります。1989 年アラスカ沖で起きたエクソン・バルディース号は 41,000KL の流出量であったが、この場合は 28 台ということになります。

3.4 データ同化手法を取り入れた浮流重油漂流シミュレーションに関する研究

この研究では、海上で起きた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ために、漂流重油の追跡を行いリアルタイムで漂流状況を観測する浮遊式浮流重油自動追従ブイロボット SOTAB-II からのリアルタイムデータを地上局に送り、そのデータを使い浮流重油漂流シミュレーションによる漂流予測を精度よく行うことを目指しています。SOTAB-II は重油の漂流位置、海象条件、気象条件、浮流重油の性状に関するデータの収集を行います。

上記の浮流重油漂流シミュレーションには、Princeton Ocean 大学において海洋流動モデルとして開発されたプログラムコード POM(Princeton ocean model の略)を椋本が発展させたものと、気象モデルには、米国大気研究センター(NCAR)、米国環境予測センター(NCEP)、米国海洋大気庁(NOAA/FSL)、米国空軍気象局(AFWA)などが中心となって開発した圧縮性・非静力学の WRF(Weather Research and Forecasting の略)モデルを用いました。

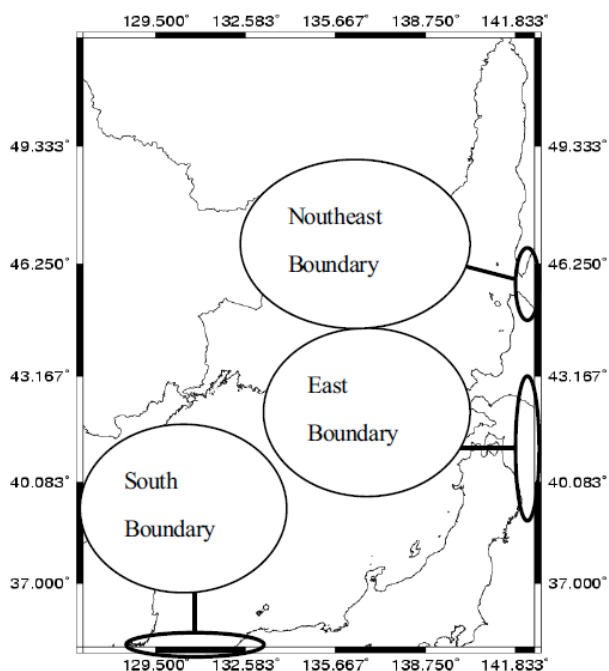


図 23 計算領域

表 2 WRF と POM の計算条件

計算条件		WRF	POM
計算範囲	北緯	33°~ 52°	33°~ 52°
	東経	127°~142.5°	127°~142.5°
格子間隔		1/6°×1/6°	1/6°×1/6°
タイムステップ		Δt= 60(sec)	Δt= 12(sec)
計算期間		1/1,1997~ 1/31,1997	1/1,1997~ 1/31,1997
初期値及び境界値		NCEP/NOAA Reanalysis datasets (2.5°間隔, 6 時間ごと)	潮位 水温 塩分濃度 (月平均値) 強制流量

漂流重油が風の影響を受けやすい性質を考慮し、本研究では気象データのデータ同化を行い、ナ

ホトカ号流出事故を例に漂流状況の再現性の精度向上についての検討を行うこととしました。

図 23 に計算の領域を、表 2 に WRF と POM の計算条件を示します。ここでは、三次元変分法を用い、その中の背景誤差共分散行列を異なる予報時刻による 2 つの予報から求める NMC 法ⁱⁱⁱ⁾を採用しました。表 3 に、各県の重油漂着量の割合で観測データについて、データ同化なし、三次元変分法との比較を示します。二乗平均平方根誤差で観測値と比較するとデータ同化を行うことにより 40%ほど精度が向上することがわかります。今回の検証は 1997 年の現業データを得ることができなかつたため、再解析データに対して、SYNOP (surface synoptic observations の略: 通報観測) と SOUND (ゾンデ) のデータを用いたデータ同化を扱っています。

今後、実際の運用を想定した現業データに対するデータ同化の検証を行う必要があります。さらに、浮流重油漂流シミュレーションにおいて、十分な漂流予測を行うために、新 SOTAB-II より得られる観測値を反映する手法を今後、開発していく必要があります。

表 3 重油漂着量の比較

	観測値 (%)	データ同化なし	三次元変分法
島根県	0.60	9.19	4.98
鳥取県			
兵庫県	2.90	2.16	1.37
京都府	7.30	9.26	5.11
福井県	37.30	54.50	47.28
石川県	44.30	21.08	30.60
新潟県	7.60	4.24	10.26
その他		1.12	1.94
	RSME	12.41	7.31

4. おわりに

ここに紹介したプロジェクトは、1 年目の研究成果のみ扱っていますが、今後 4 年間の研究成果について、順次、公表を行う予定です。また、このプロジェクトは、3.11 東日本大震災の前に申請書を提出し、その後に採択されたものであるため、3.11 東日本大震災からの復興に対して、直接、貢献することができません。しかし、SOTAB-I や SOTAB-II のセンサーを代えることによって、SOTAB-I は例えば、海中・海底の放射能のモニタリング、SOTAB-II は漂流がれきの自動追跡が可能となることから、それらへの展開についても検討を行う予定です。

参考文献

- i) Senga, N. Kato, M. Yoshie et al., Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy System, J. of Advanced Robotics, Vol. 23, pp.1103-1129, 2009
- ii) 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
- iii) 棕本洋平、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
- iv) Zheng、 L.、 Yapa、 P.D. and Chen、 F.H. (2003). A Model for Simulating Deepwater Oil and Gas Blowouts . Part I : Theory and Model Formulation、 J. Hydr. Res. IAHR、 41(4)、 339-351
- v) F. Chen and P. Yapa、 A model for simulating deepwater oil and gas blowouts. Part II: Comparison of numerical simulations with “Deepspill” field experiments、 Journal of Hydraulic Research Vol. 41、 No. 4 (2002)、 pp. 353.365
- vi) 松崎義孝、吉江宗生、藤田勇、竹崎健二、 薄い漂流物を用いた漂流実験と漂流推定方法の検討、海洋開発論文集、第 25 巻、 pp.33-38、 2009
- vii) 横山長之、海洋環境シミュレーション-水の流れと生物-白亜書房
- viii) Parrish、 D. F. and J. C. Derber、 The National Meteorological Center's Spectral Statistical-interpolation Analysis System. Mon. Wea. Rev.、 120、 1747-1763、 1992