

# 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報の2）

大阪大学大学院工学研究科

教授 加藤 直三

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

### 4.1 浮流重油の漂流と自動追跡

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34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ました<sup>15)</sup>。

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、帆を大きくします。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、潮流計が挙げられます。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。

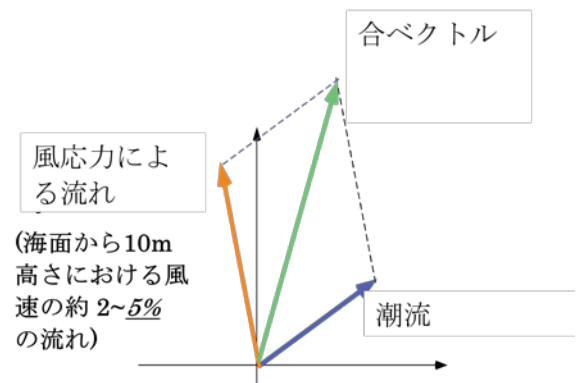


図34 浮流重油の漂流方向

### 4.2 新 SOTAB-II の設計変更

前回の報告<sup>1)</sup>では、円筒型のブイを用いた実験より、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ず、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り、流体抵抗の少ないブイの形状が望まれることを説明しました。そこで、新 SOTAB-II にヨット型船型を採用することにし、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（図35参照）。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

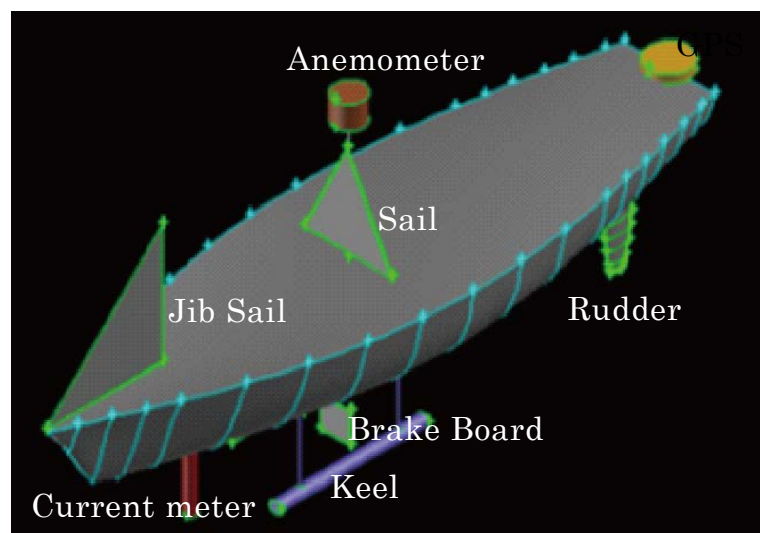


図35 新 SOTAB-II の形状

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しました。また操舵性に関して、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たため、新たに帆（ジブセイル）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。

その後、油検知センサーの選定にあたり、その設置位置と重量が動的安定性に大きな影響を及ぼすことがわかり、再度、形状を設計し直すことにしました。

#### 4.2.1 油検知センサー

使用する油センサーは、Inter Ocean System の Slick Sleuth SS300<sup>16)</sup>です

(図 36 参照)。このセンサーは、工場の排水などに重油や原油が混じっていないかを検査するものであり、固定して用いるのが本来の利用方法です。センサーの照射口から紫外光を照射します。センサーの測定範囲内に重油や原油など、励起光に反応する物質がある場合、その励起蛍光を受信口で捉えることで油の有無を判断します。受信口で

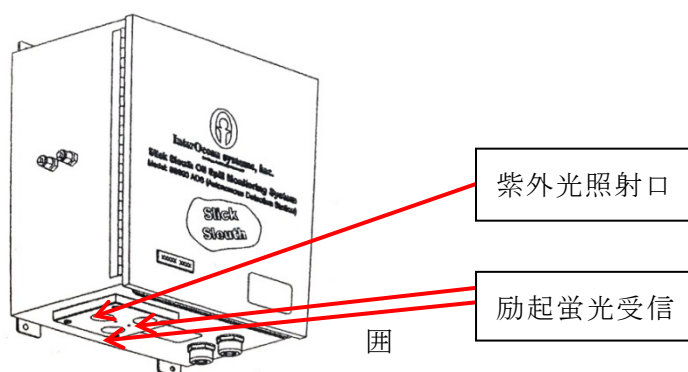


図 36 Slick Sleuth SS300 の外形図

は反応した光の強さを読み取り数値化します。その数値があらかじめ設定した閾値を超えた場合は「油がある (Y)」そして、超えない場合は「油がない (N)」と測定結果をアウトプットします。センサーの測定範囲は照射口からの照射角  $14^{\circ}$  以内で、検出の最大距離は 5 m となっています。SOTAB-II の周囲を隈なく測定するため、このセンサーをマストの頂点（喫水から 1.6m の位置）に設置します。ただし、センサーの外箱は樹脂製の軽い素材のものに取り替え、全重量が 10kg となります。

#### 4.2.2 動的安定性

図 37、図 38 に、以前の設計にセンサーを搭載したものと、そうでないものの動的安定性の比較を示します。全く動的安定性を確保できていないことがわかります。これを解消するには、船体下部に設置しています。キールの重量の増加や設置位置の変更をし、重心の高さを低くする必要があります。しかし、表から分かるようにセンサーの設置により喫水線高さが上昇しており、これ以上の重量の増加は困難です。そこで、これまではオリジナルの 1/5 スケールを使用してきましたが、排水量の確保のため 1/4 スケールを用います。こととしました（表 3 参照）。

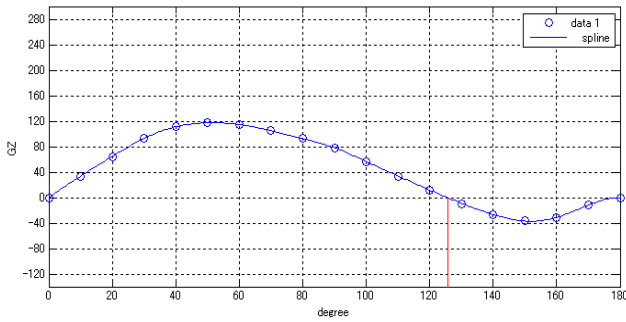


図 37 変更前の復原力曲線

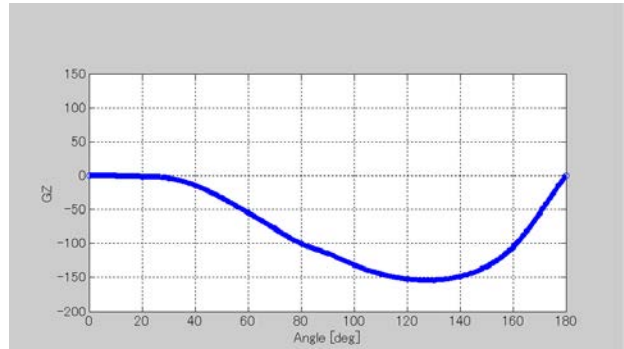


図 38 油検知センサーを搭載した場合の復原力曲線

表 3 1/4 スケールの船体の主要目

DIMENSIONS		オリジナル	1/5スケール	1/4スケール
HULL				
LOA	m	10.68	2.136	2.67
LWL	m	8.55	1.71	2.1375
BMAX	m	3.04	0.608	0.76
BWL	m	2.42	0.484	0.605
Draft(Canue body)	m	0.41	0.082	0.1025
Displacement(DWL)	kg	3460	27.68	54.0625
Displacement(2WL)	kg	6570	52.56	102.65625
Wetted Surface Area	m2	16.6	0.664	1.0375

表 4 キールの大きさ

	半径	長さ
キールサイズ	40mm	630mm
設置位置	船底から400mm	
重量	約30kg	

図 39 に、船型のスケールとキールの大きさの変更（表 4 参照）に伴う復原力曲線を示します。復原力消失角は、125° と以前とほぼ同等の水準まで戻すことができたことがわかります。

#### 4.2.3 セール、ブレーキ板

油センサーは、他センサーに比べ大きいいため、船体に与える影響も大きくなります。特に風による船体の流体抵抗が大きくなりました。そこで、浮流油の追従性能を調整するため、セールやブレーキ板の再設計を行いました。

風により受ける流体力が増加したことで、以前のブレーキ板では船速を制御しきれなくなります。そこで、まず船速を制御できる最低限のブレーキ板の大きさを確保し、次にブレーキ板に対して十分な推進力を得られる帆を検討しました。浮流油の移動速度を風速の 2~5% と想定し直し、以前のものよりも広範囲での速度調整が求められます。図 40 は、ブレーキ板の大きさが 300×500mm で、セール（長方形）の大きさが 750×750mm に対して、ブイの速度が風速の 2-5% に対する船体の抗力、帆を畳んだ状態の風による船体を受ける推力、帆が満帆状態の風による船体を受ける推力を表しています。船体の抗力が、帆を畳んだ状態で風から船体を受ける推力と帆が満帆状態で風から船体を受ける推力の間であれば、帆の調整で浮流重油を追跡できることとなります。船速が風速の 2~4% の場合では、セールから得られる推進力が全体の抵抗力を上回っており、帆の調整を行うことで船速を上げることができます。しかし、5% の場合では抗力が帆を全開にしたときの推進力より大きくなってしまっているため、常にブレー

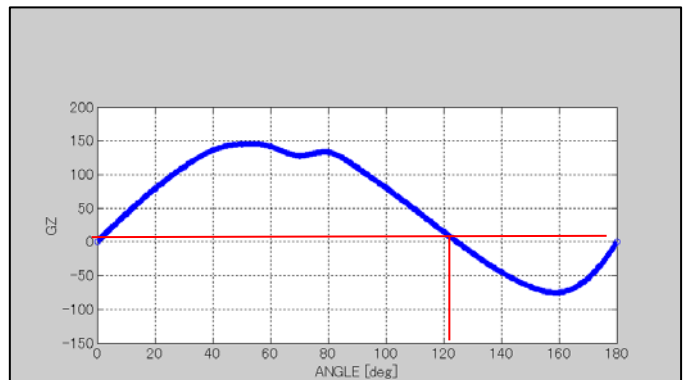


図 39 船型変更後の復原力曲線

キがかかった状態になってしまい、船速が風速の 5%の速度に達することができないことがわかります。よって今回の設計においては、風速の 2~4%の範囲にのみ対応するものとしています。

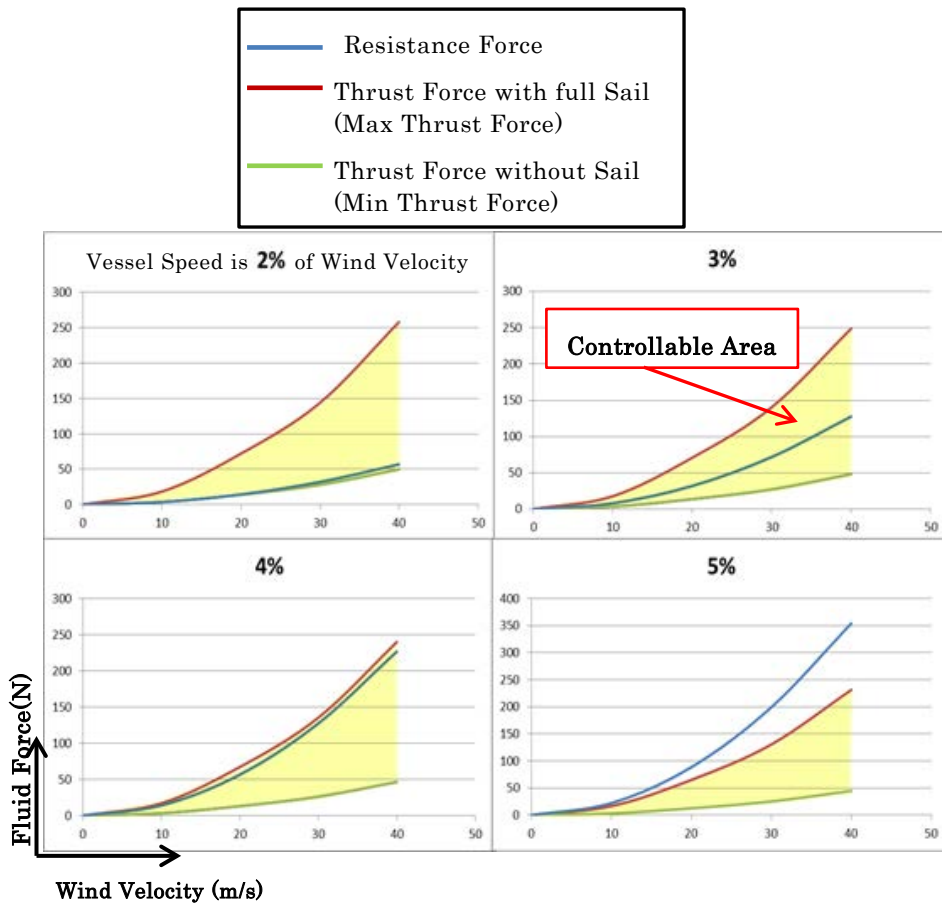


図 40 風速と船体の抗力，推力の関係

#### 4.2.4 製作された新 SOTAB-II

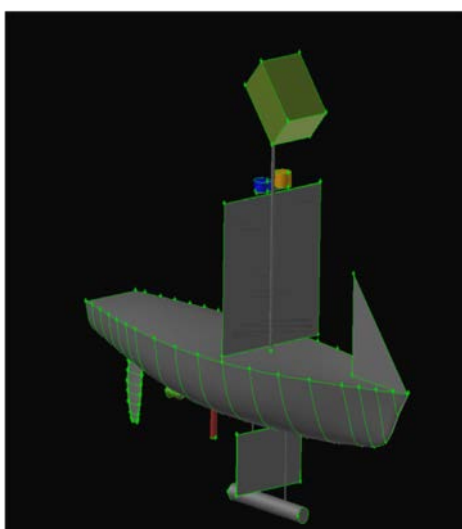


図 41 新 SOTAB-II の外形図

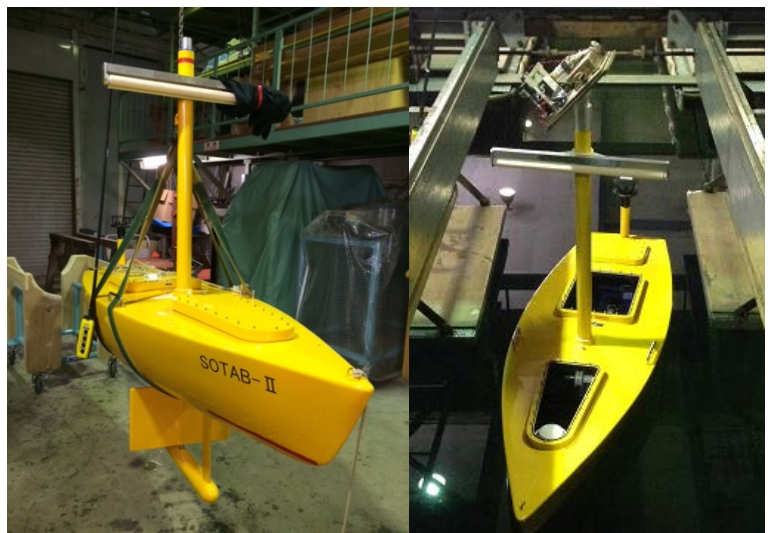


図 42 新 SOTAB-II の写真

上記の過程を通して設計された新 SOTAB-II の外形図を図 41 に示します。マスト上部に油検知センサーが取り付けられています。また船体下部には、ブレーキ版とキールが取り付けられています。

その後、帆の上下用、油検知センサーの回転用、ラダーの回転、ブレーキ版の開閉用、スラスター用のモータを選定し、図 42 に示す新 SOTAB-II を製作しました。

### 4.3 制御設計

新 SOTAB-II の運動方程式を立て、それを数値的に解いて、新 SOTAB-II の制御設計に用いました。

#### 4.3.1 帆の制御

セールの制御は PID 制御を用いて、風速の情報から必要なセール面積を計算し制御します。検証として、風速： $WV = \sin(\omega t) + 2$  [m/s] ( $\omega = \pi/200$ )、目標船速：風速の 3% の速度と設定しました。図 43 に、風速の時間変化を、図 44 に、帆の面積の制御の時間変化を、図 45 にブイの速度を示します。ブイの速度は、風速の 3% をほぼ満足する制御ができています。

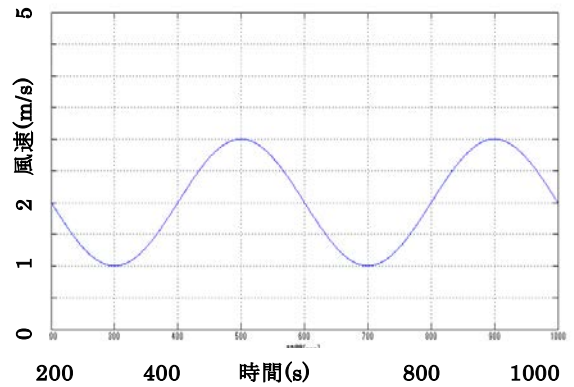


図 43 風の入力

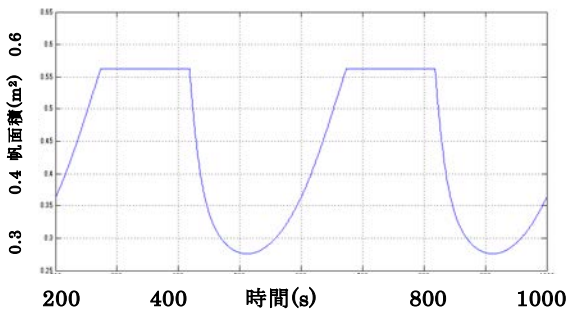


図 44 帆の面積応答

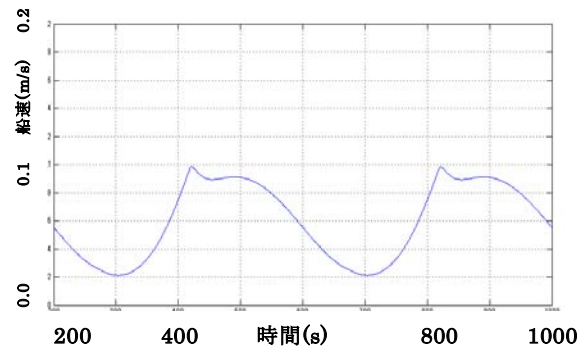


図 45 ブイの速度応答

#### 4.3.2 舵の制御

SOTAB-II の船速は風速の 2-5% であるため、非常に遅い。そのため舵から発生する力も小さくなり俊敏な旋回はできない。図 46、図 47、図 48 は、風速 3m/s、ブイの速度は風速の 3% として、SOTAB-II が 20deg 旋回する時の軌跡、ヨー角、舵角の時間変位を示します。舵角は方位角で PID 制御を行っています。ただし、最大舵角を 20 度に制限しています。20deg 旋回するのに 1000 秒近くかかってしまっていますが、船速は風速の 3% なので 0.09m/sec であり、その間に進んだ距離は

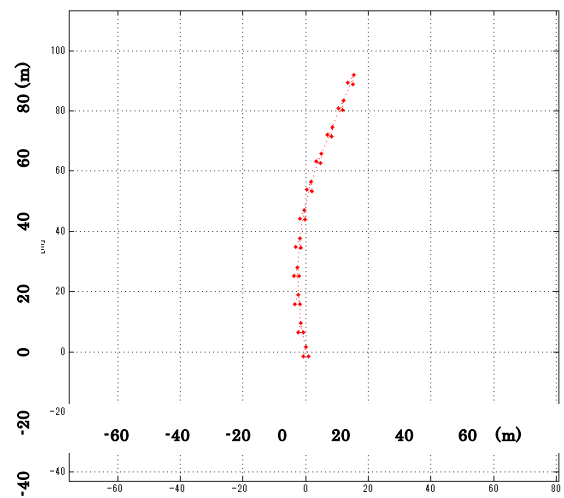


図 46 ブイの軌跡

およそ 90m です。規模にもよりますが、流出油の拡大範囲を考えれば十分な性能であると考えられます。

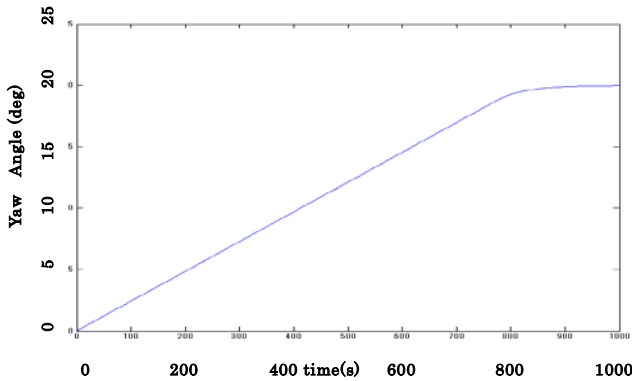


図 47 方位角の時間変化

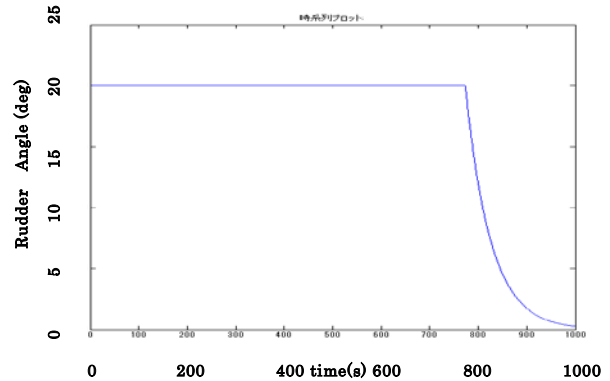


図 48 舵角の時間変化

### 4.3.3 油検知センサーを用いた制御

#### 4.3.3.1 油の検知方法

油検知センサーは、SOTAB-II のマスト上部、喫水線から 1.59m の高さに 45 度の角度で取り付けられます。またセンサーの測定範囲は、照射範囲から 14 度の角度内です。これから、測定範囲の船体からの水平距離が分かります。測定範囲は油検知センサーから水平距離で 1.24m から 2.04m となります (図 49)。

SOTAB-II ではセンサーを 20 秒で一周回転させ 12 点、30 度ごとに停止し、その点で測定を行うように考えています。これらから、このときの船体周辺の測定範囲を図 49 に図示しました。油検知センサーは水面に対して 45 度の角度を向いているため、図 50 に示されているように、楕円形の測定範囲となります。油センサーの最短測定間隔が 0.5 秒であり、センサーを保持しています。シャフトの回転速度は 5rpm であるので、センサーが SOTAB-II の周囲を 1 周するのにかかる時間はおよそ 20 秒です。SOTAB-II の船速は風速の 3% と非常に遅いことに加え、全周を測定し終えるまでの測定データを利用したの制御の判断は誤制御を誘発する可能性があるため、油センサーの測定データおよび制御指令は 20 秒ごとに更新するものとします。

#### 4.3.3.2 測定データの処理

センサーの測定データの出力は Yes/No のみなので、

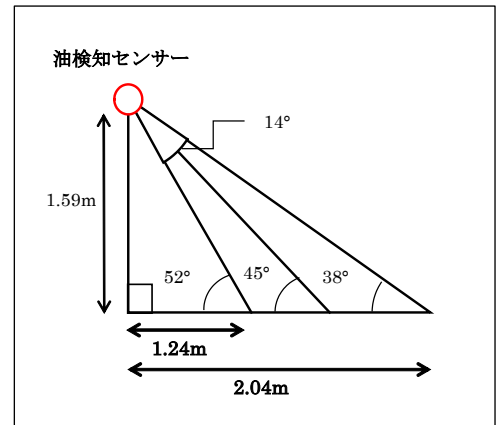


図 49 油検知センサーの測定範囲

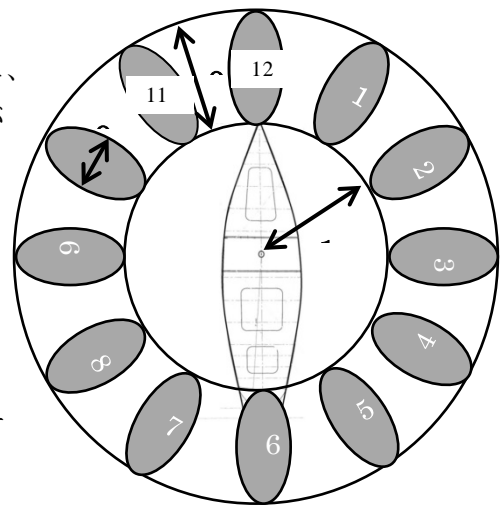


図 50 油検知センサーのブイ周りの計測範囲

これを Yes→1、No→0 に置き換えます。センサー測位点全 12 点が 1 の場合、SOTAB-II は完全に油膜内だと判断し、逆に全測位点が 0 の場合、完全に油膜外、その他の場合は SOTAB-II が油膜端にいるものとして扱います。

SOTAB-II と油膜の位置関係の時刻歴を残すため SOTAB-II が油膜端に出始めてからセンサーの測位データを蓄積し始めます。蓄積されたデータを各 12 点でそれぞれの累積値を求めます。平均値を比較することで図 51 のように油の検知数が少ない方向が浮かび上がります。この場合センサー 6 番の方向の検知数が少ないことがわかります。検知数が少ないことはその方向に油が少ないことを意味します。逆に SOTAB-II は油膜内から少しずつ油膜外に出ていくので、油検知数が少ない方向の逆方向に油があると推定されます。

#### 4.3.3.3 方位角制御

最小値が 1 つの場合、隣接する 2 つの点を含め、3 点でラグランジュ補間を

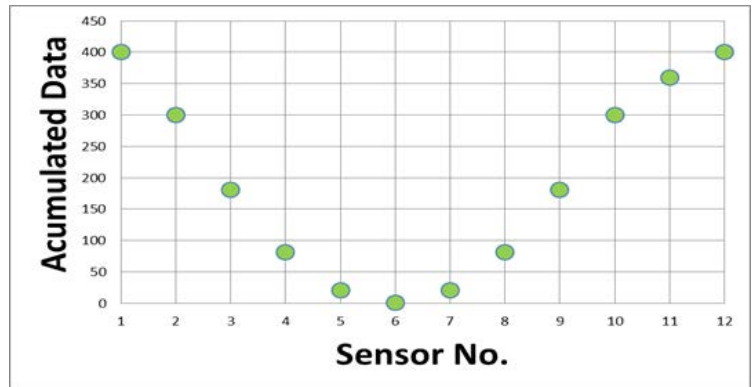


図 51 ブイ周囲の蓄積された検知数

を行い真の最小値を求めます。図 51 の様な最小値が複数の場合は、それらの点の中心地を最小値とします。最小値を得た方向の逆方向を目標方位角とします。目標方位は SOTAB-II 前方より右手方向に 0~180deg、左手方向に 0~-180deg とします。SOTAB-II が目標方位角に進むように舵角に対して PID 制御を行います。

#### 4.3.3.4 速度制御

浮流油は潮流と風速の 2-5% の合ベクトルの速度で移動する。SOTAB-II は潮流によって油とともに浮流するものとし、基本設定として風速の 3% の速度を目標速度として油膜内を浮流します。

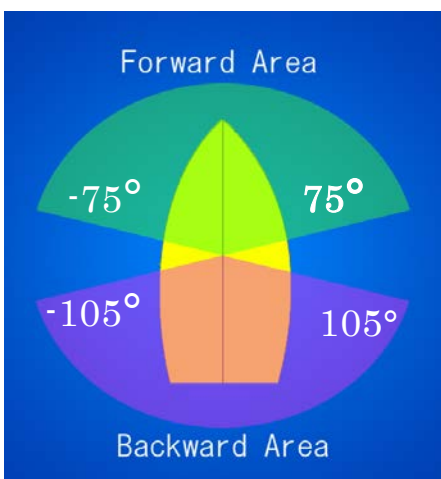


図 52 速度制御のためのブイ周囲の目標方位角の分類

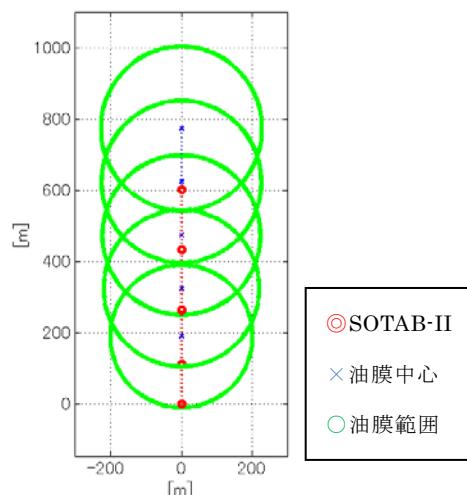


図 53 油膜自動追従のシミュレーション

ただ、浮流油がどの程度の速度で推移しているかが判断できません。よって目標速度を適宜変更しなければ SOTAB-II は油を追従することができません。そこで、目標方位角を基に目標速度を調整し浮流油の移動速度に近づくように制御を行うこととしています。目標方位角が前方方向(-75~75deg)の場合、目標速度を上昇させます。また後方(105~180、-105~-180)の場合、目標速度を減少させます。

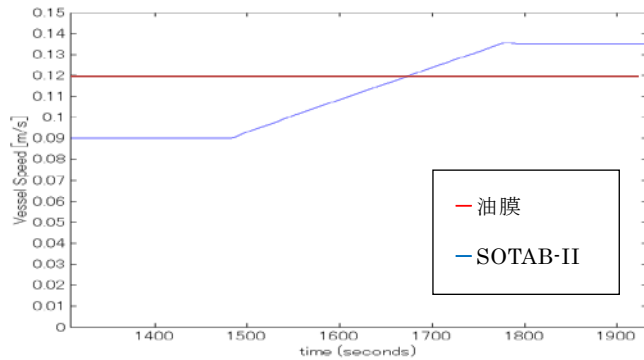


図 54 油膜と SOTAB-II の速度

#### 4.3.3.5 シミュレーション

油膜の移動速度が風速の 3%から 4%の速度に変化した場合の SOTAB-II の移動速度の変化を検証しました。計算条件は、風速:3m/sec、初期目標速度:風速の 3%、油膜移動速度:風速の 3%→4%、風向; 0deg、計算時間; 5000sec としました。初期条件として、SOTAB-II が油膜の後端に位置し、目標方位角をブイ前方に置いています。図 53 が SOTAB-II と油膜の軌跡を示しており、図 54 に油膜と SOTAB-II の速度の関係を示します。SOTAB-II の目標速度は上昇しつづけ油膜に追いつこうとしているのがわかります。

このようなシミュレーションを通して、制御システムの構築を行いました。幾つかの例外処理も組み込まれています<sup>17)</sup>。

## 5 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。

本研究で用いる重油漂流シミュレーションは、気象モデル・海洋モデル・重油追跡モデルで構成されます。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)<sup>18)</sup>を用いました。海洋モデルには、ラトガス大学、カリフォルニア大学などが開発した、プリミティブ方程式を持つ ROMS(Regional Ocean Modeling System)<sup>19)</sup>を用いました。重油追跡モデルは、本研究室で開発されたモデル<sup>20)</sup>を用いることとしました。

計算精度の評価方法としては、1997 年に島根県沖で発生したナホトカ号重油流出事故をテストケースとして扱い、都道府県ごとの重油漂着量をシミュレーション結果と観測値とで比較することと



しました。一方で、現在 SOTAB-II は開発中であるため、実際に観測値を得ることが出来ません。そこで、シミュレーション上で SOTAB-II を海上に投入し、擬似観測値を与えることで、その有効性を評価することとしました。なお、ナホトカ号重油流出事故は、冬季の日本海で発生したため 20m/s を超える風も吹いていたことから、海流・潮流に比べて吹送流が超越していました。そこで、本研究では気象モデル WRF においてデータ同化が可能な WRFDA(Weather Research and Forecasting Data Assimilation)<sup>21)</sup>を用います。ことで、気象場の再現性の向上を目指しました。図 55 に、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の全体の流れ図を示します。

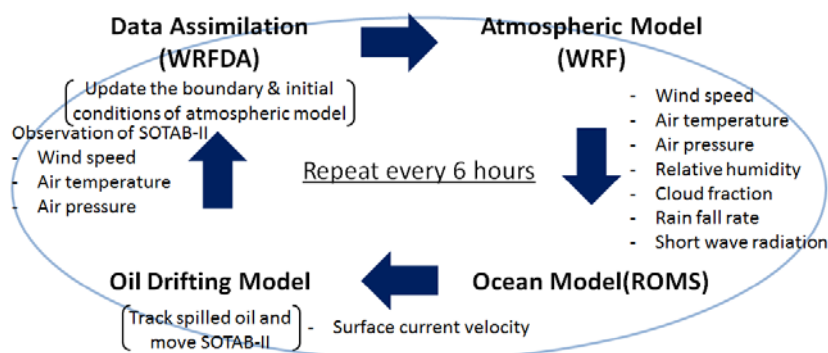


図 55 データ同化手法を取り入れた浮流重油漂流シミュレーションの流れ図

### 5.1 WRFDA(WRF Data Assimilation)の基礎理論式

WRFDA には、データ同化手法として、3次元変分法と4次元変分法、および、アンサンブルカルマンフィルタやハイブリット同化といった手法が実装されています。本研究では、データ同化手法として3次元変分法を適用しています。

3次元変分法の3次元とは空間3次元を示し、図56に示すように、解析時刻に得られた観測値を用いて最適な初期値を、(29)に示す評価関数の勾配式(30)を手掛かりに降下法により求めます。(29)式において、第一項は第一推定値への近さ、第二項は観測値への近さの重み付き平均を表します。

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}) \quad (29)$$

$$\nabla J(\mathbf{x}) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \mathbf{H}^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}) \quad (30)$$

ここで、

$J(\mathbf{x})$ は評価関数（最尤推定法を基礎におく汎関数）、 $\mathbf{x}$ は解析値、 $\mathbf{x}^b$ は第一推定値、 $\mathbf{y}$ は観測値、 $\mathbf{B}$ は背景誤差共分散行列、 $\mathbf{E}$ は観測誤差共分散行列、 $\mathbf{F}$ は代表誤差共分散行列、 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ は観測演算子（モデル格子点から観測点へ、モデル物理量から観測物理量

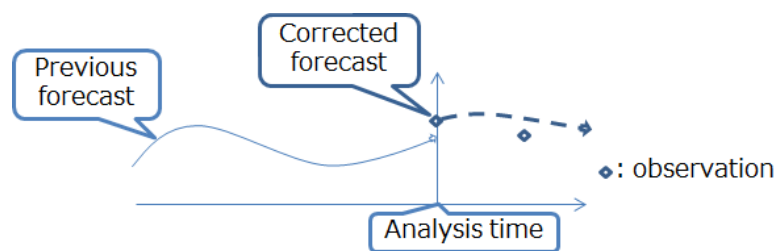


図 56 三次元変分法の流れ

への変換)と定義されます。

変分法を用いたデータ同化では、背景誤差共分散行列の選定が予報精度に大きな影響を及ぼします。本研究では以下の示す2種類の背景誤差共分散行列を用いて、第三章でそれぞれの比較を行います。以下にそれぞれの特徴を挙げます。

#### ① CV3

背景誤差共分散行列は以下の式より求められます。

$$\mathbf{B} = (\mathbf{V}\mathbf{B}_z\mathbf{B}_x\mathbf{B}_y)(\mathbf{V}\mathbf{B}_z\mathbf{B}_x\mathbf{B}_y)^T \quad (31)$$

ここで、 $\mathbf{V}$ はモデルの標準偏差、 $\mathbf{B}_z\mathbf{B}_x\mathbf{B}_y$ は水平2成分および鉛直成分の再帰型ついでにターを表します。CV3は任意の計算領域で使用可能です。

#### ② CV5

背景誤差共分散行列は以下の式より求められます。

$$\mathbf{B} = \overline{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T} \cong \overline{\mathbf{x}'\mathbf{x}'^T} \quad (32)$$

ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は真の背景誤差であるが、これを直接知ることはできない。そこで、 $\mathbf{x}'$ を異なる予報時刻による2つの予報から誤差を求めるNMC法(Parrish and Derber 1992)を用いて求めます。CV5は計算領域に依存するため、予め過去の統計から背景誤差共分散行列を作成しておかなければなりません。現在、世界中のほとんどの気象予報機関でNMC法が採用されています。

### 5.2 気象モデル WRF

WRFの支配方程式は、運動方程式・質量保存式・ジオポテンシャル式・湿位保存式・スカラー保存式・状態保存式です。WRFでは、差分法を用いて数値的に解いていますが、時間積分に三次のRunge Kutta法を適用しています。今回の計算領域は、 $31.2^\circ \sim 52.1^\circ \text{ N}$   $121.5^\circ \sim 148.5^\circ \text{ E}$ の範囲で、グリッドサイズは5 kmとしています。本計算で用いた初期値・境界条件は、NCEP/NCAR Global Reanalysis Products、1948-continuingで、データ出力は、水平解像度300km、鉛直17層、6時間間隔です。

### 5.3 海洋モデル ROMS

ROMSは $\sigma$ 座標系を用いていますが、本研究では、海面を漂う重油のシミュレーションを行うため、海面付近に層を集中させる設定としました。鉛直層数は40としました。計算領域は、WRFと同じにしています。初期条件には、クレスマンフィルターを用いてSODA(Simple Ocean Data Assimilation)を補間したものです。SODAは、メリーランド大学大気海洋学科とテキサスA&M大学の海洋学部間の共同プロジェクトとして、1990年代に開発された数値シミュレーションモデルです<sup>22)</sup>。本研究で用いた境界条件は、クレスマンフィルターを用いてJCOPE2(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)<sup>23)</sup>デイリーアウトプットを補間したものです。JCOPE2は、独立行政法人海洋研究開発(JAMSTEC)により、日本付近の海中の天気を予想するために開発されたものです。境界に与える変数は、東西南北流速及び鉛直積分値、塩分濃度、海水温度です。JCOPE2の出力データは1日毎なので、ROMSに与える際には時間軸方向に補間しています。

本研究で扱うナホトカ号重油流出事故は1997年1月に発生しましたが、海洋モデルの助走期間を考慮し、1996年11月1日を計算開始日としました(助走期間2ヶ月間)。そのため、SODAのマ

ンスリーアウトプットのうち、1996年11月のデータを用いることとしました。

#### 5.4 重油漂流モデル

重油漂流モデルとして、重油の性状変化・水平拡散(Spreading、 Diffusion)・移流を扱う。

##### 5.4.1 C重油の性状変化

海上に流出した重油は、時間経過とともに海象、気象の影響を受け性状が変化します。そのため、シミュレーション上で重油を扱う際にはこの性状変化を考慮する必要があります。本研究では、石油連盟油濁対策部<sup>24)</sup>が行った、冬季の荒天下(ナホトカ号の事故発生時は強風が吹く悪天候であったため)におけるC重油の経時性状変化実験の

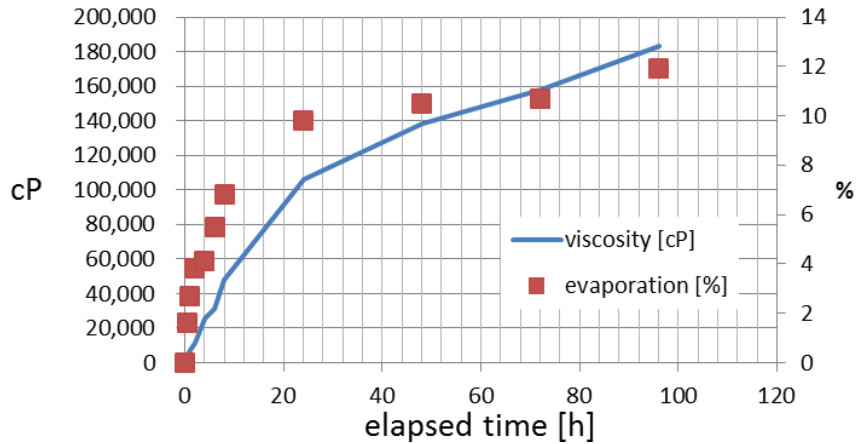


図 57 粘度および蒸発率と経過時間との関係<sup>00)</sup>

結果を用います。こととします。これによると、C重油は短時間で水分を取り込み、ほぼ6時間でエマルジョン化します。また蒸発率も短時間のうちに急速に上昇しますが、24時間を過ぎるとその変化はゆるやかになります。このことから本研究では、C重油は、短時間に多量の海水を取り込み、24時間後には肉厚で強固なムース油を形成する、ムース油は安定で粘度も高く波の影響を受けてもたやすくその形を変えない、ムース化した油は一つの塊として海面を移動すると考えます。

粘性度及び蒸発率の計算は、図57で示すように、経過時間の関数として得ることができます。含水率の計算については、以下のMackayら<sup>25)</sup>によるエマルジョンの粘度と含水率の関係式を用います。

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \exp\left(\frac{2.0 \cdot 5W}{1 - k_l W}\right) \quad (33)$$

ここで、 $\mu$ は油粒子の粘度、 $\mu_0$ はエマルジョンの粘度、 $W$ は含水率、 $k_l$ は比例定数であり、実験値から1.085と定められています。

密度変化の計算式は以下のように表現されます。

$$\rho_E = W\rho_W + (1 - W)\rho_0 \quad (34)$$

ただし、 $\rho_E$ はエマルジョンの密度、 $\rho_W$ は水の密度、 $\rho_0$ は油粒子の密度です。

体積変化は含水率と蒸発率から以下を用います。

$$V_E = \frac{V_0}{1 - W} \times (1 - E) \quad (35)$$

ただし、 $V_E$ はエマルジョン後の油粒子の体積、 $V_0$ は流出した重油の体積、 $E$ は蒸発率を表します。

##### 5.4.2 重油の水平方向の運動について

本数値計算で扱う重油の水平方向の運動は、①重油自身の性状による拡散(Spreading)、②流れ場の乱れによる拡散(Diffusion)、③潮流等を含む海流による移流(Advection)で構成されます。①は

Fay の 3 段階の広がり分布理論を適用、②はランダムウォーク法を適用、③は海洋モデル ROMS の計算結果を適用することとします。

#### 5.4.2.1 Fay の 3 段階の広がり分布理論について

Fay<sup>26)</sup>は、浮流油の静水面上の力学的な釣り合いから、広がりを時間的に 3 つの段階に区分できるとし、それぞれの段階について記述できる式を次元解析法で明らかにしました。その 3 つの段階の区分は、重力－慣性段階、重力－粘性段階、表面張力－粘性段階です。これらを(36)~(38)式に示します。重油が海上に流出してから 1 時間後までが(36)式の重力－慣性段階、1 時間後から 24 時間までが(37)式の重力－粘性段階、24 時間から 1 週間後までが(38)式の粘性－表面張力段階となります。

$$\text{重力 - 慣性段階} \quad l = C_1(\Delta g V_E t^2)^{1/4} \quad (36)$$

$$\text{重力 - 粘性段階} \quad l = C_2 \left( \frac{\Delta g V_E^2 t^{3/2}}{\nu_E^{1/3}} \right)^{1/6} \quad (37)$$

$$\text{重力 - 表面張力} \\ \text{段階} \quad l = C_3 \left( \frac{\sigma_0}{\rho_w} \nu_w^{-1/2} t^{3/2} \right)^{1/2} \quad (38)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ は実験結果から求められる係数、 $\Delta$ は水の密度に対する水と油の密度差の比、 $V_E$ は油の体積、 $\nu_E$ は油の動粘性係数、 $\rho_w$ は水の密度、 $\nu_w$ は水の動粘性係数を表しています。

Fay モデルの粘性－表面張力段階(38)式では、界面張力が拡がる方向に作用し、粘性が拡がりを抑える方向に作用するとして釣り合い式をたてています。しかし、余ら<sup>27)</sup>によると、界面張力は油の拡がりを抑える方向に作用すると主張しています。そこで、松崎ら<sup>28)</sup>と同様に、流出から 24 時間後も重力－粘性段階が続くとし、粘性－表面張力段階は考慮しないこととしました。

#### 5.4.2.2 ランダムウォーク法について

本研究では、重油の水平拡散を表現するために以下のようなランダム・ウォーク法を用いました。

$$U_{di} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi R_n) \\ \sin(2\pi R_n) \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2D_H}{\Delta t}} \quad (39)$$

ここで、 $R_n$ は乱数、 $D_H$ は水平拡散係数、 $\Delta t$ はタイムステップを表します。(39)式の水平拡散係数 $D_H$ は、以下の Smagorinsky モデルから求められます。

$$D_H = c\Delta x\Delta y(|\partial u/\partial y| + |\partial v/\partial x|) \quad (40)$$

ここで、 $c$ は Smagorinsky 拡散係数、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は格子間隔、 $u$ 、 $v$ は海流速度を表します。

#### 5.4.2.3 海面の移流による運動について

浮流重油の運動は、海面の移流による影響が最も大きい。一般的に、海面の移流速度は①海洋循環による海流速度、②潮の満引きによる潮汐流、③風による吹送流から構成されます。本研究では、①・②については、ROMS の開境界条件に用いた JCOPE2 において考慮されているため特に考慮していません。③の吹送流は気象モデル WRF の計算結果から、バルク法を用いて海表面にせん断応力として与えることとしました。なお、WRF の出力は 1 時間毎に行い、ROMS がその出力を読み込む際には時間軸方向に補間しています。

## 5.5 計算結果

### 5.5.1 データ同化なし

データ同化手法を適用しない場合、各県で回収された重油の比率について、表 5 に回収された重油の各県の割合の観測値と計算値との比較を示します。石川県・富山県への漂着量が過大に評価されています。のがわかります。RMSE は、観測値と計算値の平均二乗偏差を表します。

表 5 回収された重油の各県の割合の観測値と計算値との比較

	Observations	w/o DA
Tottori	0.6	0.0
Hyogo	2.9	0.0
Kyoto	7.3	0.0
Fukui	37.3	19.3
Ishikawa & Toyama	44.3	74.6
Niigata	7.6	6.1
RMSE		14.7

Unit %

### 5.5.2 データ同化の適用

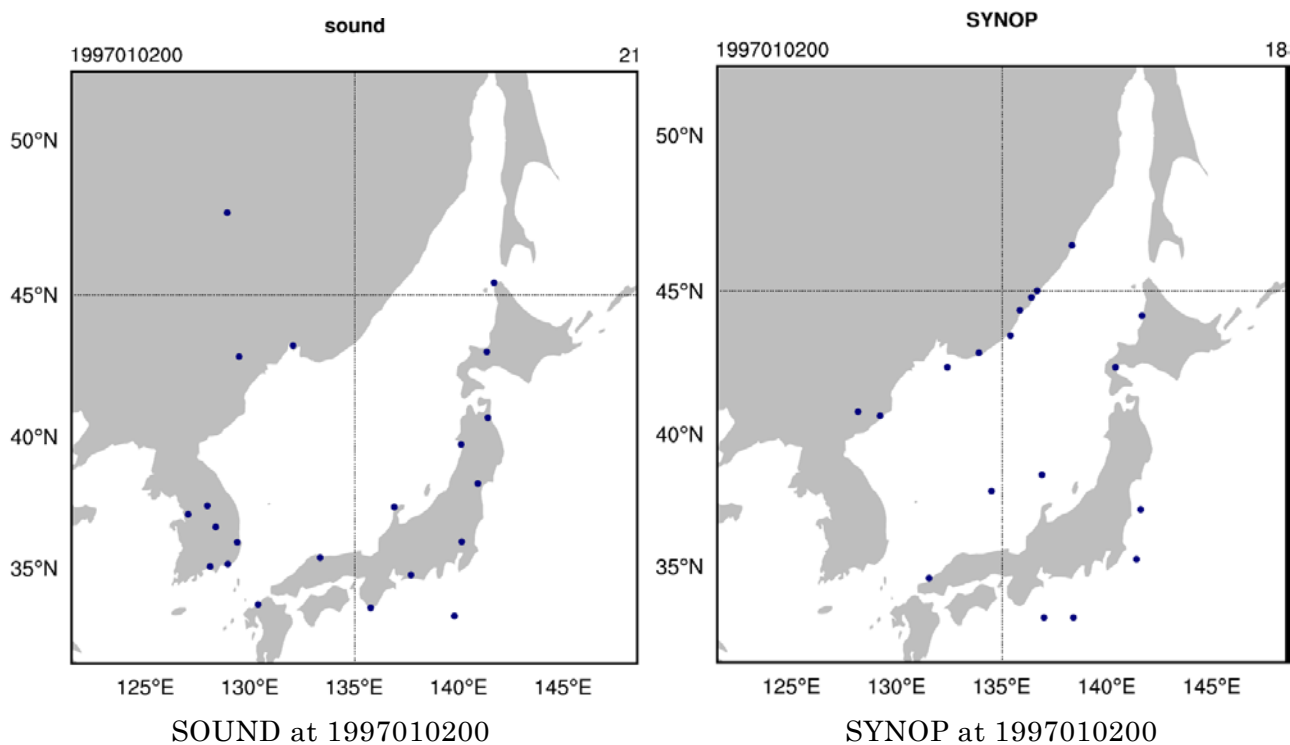


図 58 データ同化に用いた観測点

表 6 回収された重油の各県の割合の観測値と計算値との比較

	Observations	w/o DA	with DA
Tottori	0.6	0.0	0.0
Hyogo	2.9	0.0	0.2
Kyoto	7.3	0.0	24.5
Fukui	37.3	19.3	25.8
Ishikawa & Toyama	44.3	74.6	47.1
Niigata	7.6	6.1	2.5
RMSE		14.7	8.8

Unit %

データ同化を適用した場合の計算結果を示します。用いた観測値は、NCEP ADP Operational Global Surface Observations (ds351.0) and Upper Air Observations (ds353.4)です。それぞれ、地上気象台・ラジオゾンデで観測された値です（図 58）。

表 6 に、データ同化を適用した場合とそうでない場合の回収された重油の各県の割合の観測値と計算値との比較を示します。都道府県毎の漂着量で比較すると観測と近い結果となっていることがわかります。データ同化を適用しない結果と比べても、RMSE では約 6%向上しています。これより、浮流重油漂流シミュレーションにおいて、データ同化は有効と言えます。

### 5.5.3 SOTAB-II の観測値のデータ同化への適用

第 4 章で説明しましたように、SOTAB-II は、浮流重油を追従するように設計されています。本数値計算では、SOTAB-II が重油と等しい速度で移動すると仮定し、重油の漂流速度と同様に SOTAB-II を移動させることとしました。

実際の運用では、重油を効率的に追跡するために、事故海域に SOTAB-II を複数台投入することが計画されています。したがって、加藤ら<sup>29)</sup>が提案したように、重油塊を囲むように SOTAB-II を 500m 間隔で配置することとしました。この場合、本数値計算では、20 機を投入することになります。ナホトカ号重油流出事故の場合、事故発生時に瞬間流出した重油に加え、漂流を続けた船首からも流出しました。よって、漂流油を効率的に追跡するためには、SOTAB-II は船首も追跡する必要があります。そこで、本数値計算では船首の追跡を行う場合に加え、主船体が沈没した場所から流出する重油のみを追跡する場合の計算も行い、SOTAB-II の位置による漂流予測精度に対する影響を調べました。追跡方法は、事故発生時に全 SOTAB-II を投入後、約 80%の SOTAB-II に船首を追跡させる。その後、漂流油全体に SOTAB-II が分布するように、適宜船首の追跡を中止し、漂流

油の追跡を開始させることを行いました。さらに、SOTAB-II 機体数の計算精度依存性を調査するため、SOTAB-II の投入数(10、20、30 機)を変更し、その影響も含めて調べることとしました。前述した通り、SOTAB-II は開発中です。しかも、ナホトカ号事故当時には、同種のブイも、もちろん存在しないから実際の観測値を得ることはできません。そこで、予め高精度で計算した風況データを観測値として扱うこととしました。このデータセットは、第四章第四節 4.2 で用いたものと同じであり、6 時間毎に観測値が得られることとしました。これは、地上气象台やラジオゾンデからの観測値が 6 時間毎に得られることと同じとしています。

SOTAB-II には、計測機器として風向風速計・GPS・潮流計・油検知センサーが装備されています。先にも述べましたが、WRFDA で利用可能な気象変数は風向風速・気温・気圧・露点・湿度です。本数値計算では、風向風速・気温・気圧の観測機器を SOTAB-II に搭載することは比較的容易ですので、これらが観測できると仮定し、数値計算上では、SOTAB-II は 6 時間毎に、SOTAB-II が存在する位置での風向風速・気温・気圧をデータセットから補間することで、WRFDA に観測値として渡すようにしました。

なお、データ同化を実行する際、SOTAB-II が得る観測値に加え、气象台やラジオゾンデからの観測値も利用することができます。しかし、本研究では、SOTAB-II はデータセットの観測値のみを扱うこととしました。これは、SOTAB-II 単独によるデータ同化の有効性を評価するためです。

表 7 に示す Case1 から Case4 について計算を行いました。それぞれは、SOTAB-II の数や船首の追跡の有無によって異なります。それぞれの SOTAB-II の数や船首の追跡の有無は表 6 に示すとおりです。以下に計算結果を示します。

ここで、表 8 において 1 列目は都道府県毎の漂着量、2 列目はデータ同化なしの計算結果、3 列目は実際の観測値を用いてデータ同化を行った計算結果、3~7 列目の計算条件は、表 6 のとおりです。2 列目と 3~7 列目を比較すると、气象台およびラジオゾンデ等の観測地を用いず SOTAB-II から得られる観測値のみ用いたデータ同化でも、データ同化を用いないで行った結果よりも精度が向上していることがわかります。しかし、Case1 のように SOTAB-II を集中して配備すると、Case2 のような分散して配備する場合ほど精度が向上しないことがわかります。

SOTAB-II を 20 機投入する Case2 と 30 機投入する case4 では、精度に大きな変化はないことがわかります。Case2、4 を 10 機投入する Case3 とで比較すると精度の向上がみられることから、SOTAB-II が多すぎても予報精度に大きな変化はないことがわかりました。これより、ナホトカ号重油流出事故の場合、SOTAB-II は 20 機投入すれば十分であることがわかります。

表 7 SOTAB-II を用いた計算条件

	Number of SOTAB-II	Tracking of bow
Case 1	20	No
Case 2	20	Yes
Case 3	10	Yes
Case 4	30	Yes

表 8 SOTAB-II の観測値をデータ同化に用いた場合の回収された  
重油の各県の割合の観測値と計算値との比較

	Obs.	w/o DA	DA (real obs.)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Tottori	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hyogo	2.9	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0
Kyoto	7.3	0.0	24.5	29.3	12.3	11.8	10.5
Fukui	37.3	19.3	25.8	38.1	45.8	48.1	46.8
Ishikawa & Toyama	44.3	74.6	47.1	32.3	41.9	40.0	42.7
Niigata	7.6	6.1	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>RMSE</b>		14.7	8.8	10.7	5.32	6.10	5.32

## 6. おわりに

ここに紹介したプロジェクトの説明は、3年目の研究成果を扱っていますが、今後さらに2年間の研究成果については、改めて公表を行う予定です。

## 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: Comarison 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/frcgc/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