

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1327**      September 2016

津波による油流出に関する数値計算法の開発

松崎 義孝  
藤田 勇

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要旨	3
1. まえがき	4
1.1 背景	4
1.2 既往の研究	4
1.3 本論文の目的と構成	5
2. STOC を用いた津波の計算方法と、OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法	5
2.1 概要	5
2.2 STOC を用いた津波の計算方法	5
2.3 STOC を用いた津波の計算条件	6
(1) 気仙沼港	6
(2) 仙台塩釜港仙台港区	6
(3) 大船渡港	6
2.4 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法	7
2.5 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算条件	8
(1) 気仙沼港	8
(2) 仙台塩釜港仙台港区	8
(3) 大船渡港	8
3. STOC を用いた津波の計算結果と、OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算結果	9
3.1 STOC を用いた津波の計算結果	9
3.2 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算結果	11
(1) 気仙沼港	11
(2) 仙台塩釜港仙台港区	11
(3) 大船渡港	12
4. 考察	12
5. あとがき	17
謝辞	18
記号表	19

# Development of a simulation model for oil transport resulting from a tsunami

**Yoshitaka MATSUZAKI\***

**Isamu FUJITA \*\***

## Synopsis

A great number of onshore and nearshore facilities were damaged by the tsunami triggered by the Great East Japan Earthquake of 2011. These included tank facilities, which caused a number of oil spills. In cases that oil spills spread out onto the sea, the damage by such spills might be caused in both the short- and the long-term. To prepare for such oil spill incidents and develop protection measures for them, improvement of predictions of oil advection and diffusion is required. Our goal, therefore, is to develop a simulation method to predict advection and diffusion of oil spilled owing to a tsunami.

In this study, we propose a simulation method for modeling the transport of oil that is spilled as the result of a tsunami. We use a simulation model, OIL-PARI, to examine spilled oil transport on the water surface using a particle tracking method, and another simulation model, STOC, to simulate seawater motion between offshore and coastal zones. To confirm the method, hindcast simulations are applied to the oil spill incidents that occurred in Kesenuma, Sendai, and Ofunato bays following the Great East Japan Earthquake. We then present a discussion of the simulation results and problems arising from the models.

The simulations show that in cases where the oil spill was located in the interior of a bay -i.e., the mouth of the bay was far from the oil spill site- the spilled oil did not flow out of the mouth of the bay as a result of the tsunami, but rather remained within the bay. Spilled oil was moved by wind and other advection forces following the tsunami, and in all cases, movement due to the weak westerly winds that dominated. For example, Kesenuma and Ofunato bays both have a long north to south dimension, so oil spills simulated in the interior parts of these bays were not blown out by the wind. Conversely, in Sendai Bay, oil spilled at mouth of the bay was modeled to flow out into the open ocean.

To fully understand the mechanisms of spilled oil transported as a result of a tsunami, additional studies are necessary. These include: (1) collection of observational data concerning the locations of spilled oil, which can be used to validate simulation results, (2) verification of simulated tsunami current speeds and directions, and (3) estimations of phenomena associated with oil settling and adhesion with soil and/or sand, and relationships between adhesion and mixing energy.

**Key Words:** oil spill, tsunami, numerical simulation, particle tracking method, hindcast simulation

---

\* Senior Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Information and Tsunami Department

\*\* Director of Department, Frontier Technology and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826 Japan

Tel.: +81-46-844-5107 Fax: +81-46-844-1274 E-mail: matsuzaki-y@pari.go.jp

# 津波による油流出に関する数値計算法の開発

松崎 義孝\* 藤田 勇\*\*

## 要 旨

2011年3月の東北地方太平洋沖地震、及びそれに伴う津波により多くの海岸付近の施設が被災した。貯油タンクを持つ施設においては、貯油タンク本体や周辺の配管から漏油し、多くの油が陸上や海上に流出した。ひとたび港湾施設等から油流出が発生し海上に拡がると、短期的及び長期的に様々な被害を引き起こす。今後予測される津波による油流出被害に備えるため、油の移流及び拡散範囲を予測する数値計算法の開発が期待されていた。

本論文では、海上流出油の移流及び拡散の数値計算法である OIL-PARI (松崎・藤田, 2014) に高潮・津波数値シミュレータ STOC (富田・柿沼, 2005) を用いた津波の計算結果を用いて、東北地方太平洋沖地震に伴う津波による油流出に関する再現計算を実施した。対象は、宮城県気仙沼港、仙台塩釜港仙台港区、岩手県大船渡港の3港とし、津波によって流出した油の移流及び拡散計算結果について考察し、課題を整理した。

数値計算の結果、気仙沼港や大船渡港のように油の流出源が湾奥にあり、湾口までの距離がある場合、津波の引き波による移流のみで油は湾外に流出せず、大部分が湾内にとどまるものと考えられる。津波の影響が収まった後は風等の影響で油は移流及び拡散するけれども、震災時は弱い西風が卓越しており、気仙沼湾や大船渡湾のように南北方向に長い場合は、油は湾外に流出しにくい条件であった。一方で、仙台塩釜港仙台港区のように油流出地点が湾口に近い場合は津波によって油の一部が湾外に流出するものと考えられる。

本論文において、津波による油流出に関する数値計算法の基礎を構築することができた。津波により流出した油の移流拡散現象をさらに理解するためには、(1) 災害時の油拡散に関する観測データの収集、(2) 津波の流速の再現結果の検討、(3) 津波によって流出した油が海底に沈降する現象についてどのように評価するか、また対象とする港湾の底質状況及び津波による攪拌エネルギーの評価を行う必要があると考える。

キーワード:油流出, 津波, 数値計算, 粒子追跡モデル, 再現計算

---

\* 海洋環境・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ 主任研究官 (併) 新技術研究開発領域 油濁対策研究グループ

\*\* 新技術研究開発領域長 (併) 油濁対策研究グループ

〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所

電話:046-844-5107 Fax: 046-844-1274 E-mail: matsuzaki-y@pari.go.jp

## 1. まえがき

### 1.1 背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震及びそれに伴う津波により、多くの海岸付近の施設が被災した。製油所、火力発電所、工場、燃料販売所といった貯油タンクを持つ施設においては、貯油タンク本体や周辺の配管から地震や津波の影響によって漏油し、多くの油が陸上や海上に流出した（例えば、図-1.1）。消防庁が行ったアンケート結果（畑山, 2012）によると、屋外タンク貯蔵所においてタンク本体が津波によって被害を受けた基数は167基、配管が被害を受けた基数は250基であり、確認されているだけで46,000kLもの油が流出している。これは1997年に日本海で発生し、甚大な被害をもたらしたナホトカ号油流出事故の油流出量の約10倍である。確認されていない油流出や車等からの小規模な油流出を含めると、膨大な量の油が流出したと考えられる。

油流出の各海域の状況について着目する。宮城県気仙沼市では、気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部（2012）によると、朝日町及び潮見町に設置されていた100kL以上の屋外貯油タンク23基中22基が津波により流失した。流出した油の種類はガソリン、軽油、灯油、重油で、流出した油の量は11,521kLと見積もられている。中家・千葉（2011）や中村ら（2012）の調査によると、流出した油の一部は湾内の海底に沈積した。

宮城県仙台市では、仙台市消防局（2012）によると、JX日鉱日石エネルギー株式会社仙台製油所において、屋外タンクの配管2か所から重油約4,400及び3,900kLが流出した。また、全農エネルギー株式会社仙台石油基地において、屋外タンク貯蔵所の付属配管2箇所が破損し、ガソリン約1,200kL及び重油約1,400kLが防油堤内に流出した。

岩手県大船渡市では、佐々木（2012）によると、太平洋セメント株式会社大船渡工場の重油タンク1基が破壊し、そこからC重油800kLが流出した。油痕は赤崎町2kmの海岸に限定的にあり、県道9号線に沿った多くの家屋の塀、側壁、電柱には高さ3mの間に油の痕跡が残っていた。以上のように、震災時は人命救助最優先であるため、油流出被害は着目されないけれども、通常時であれば報道で大きく取り上げられるような災害であった。

ひとたび港湾施設等から油流出が発生し海上に拡がると、船舶の入港や係留ができないため、緊急物資の運搬に大きく影響を及ぼす。また、流出した油が陸上にまで運ばれると、津波火災の要因になる、港湾施設等が使用できない、悪臭、毒性による人体への影響が懸念される、といった問題が発生する。さらに津波時の油流出では、遡上した津波の濁水中の土砂に重油が付着することもある。図-1.2の右は精水に重油をいれて攪拌したもので、左は土粒子（カオリン）を含む水に



図-1.1: 震災が発生した際に製油所が被災を受けた例（仙台市消防局撮影）

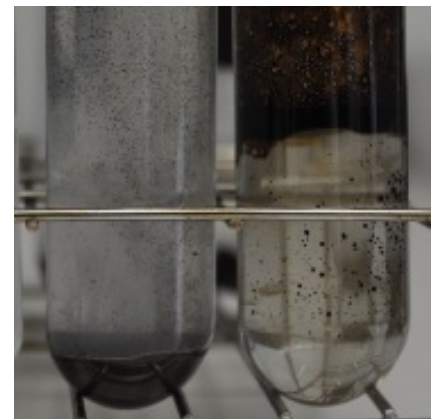


図-1.2: 左：土粒子（カオリン）を含む水に重油を入れて攪拌したもの。右：精水に重油をいれて攪拌したもの。

重油を入れて攪拌したものである。精水に油を入れて攪拌しても油は沈降しないが、土粒子を含む水に重油を入れて攪拌すると重油の一部は土粒子に付着し沈降する。流出した油が海底に沈降、堆積すると、長期的な環境問題、風評被害を引き起こす可能性がある。

過去の津波による顕著な油流出被害として、1964年アラスカ地震津波や1964年新潟地震津波等が挙げられる。今後は南海トラフ巨大地震に伴う津波による油流出被害も予想される。一方で、津波によって流出した油の移流拡散範囲がどの程度か、従来よくわかっておらず、シミュレーションモデルによる海上流出油の移流及び拡散を予測する技術の開発が期待されていた。

### 1.2 既往の研究

津波により流出した油の挙動を予測する数値計算法の研究は、後藤（1985）、岩渕ら（2006）によって行われている。他の先行研究は特に見当たらず、検討事例の少ない研究テーマである。後藤（1985）は油の鉛直加速度は重力加速度に比べ小さいと仮定し、油を津波と同様に流体と考え非線形長波理

論を用いて解いている。岩渕ら（2006）も油に非線形長波理論を用いて水・油 2 層流モデルを解いている。爲廣・小谷野（2006）は後藤（1985）のモデルを用いて仙台塩釜港仙台港区及び気仙沼港を対象とし、明治三陸地震、宮城県沖（連動型）地震を想定した津波被害予測を実施している。これらの方法は油の移流及び拡散を計算する際に格子を設定するオイラー的な計算手法である。オイラー的な計算手法は油膜の挙動を評価するのに適した方法と考えられる。しかしながら、オイラー的な計算手法は油が 1 つの塊になっている必要があり、津波のように乱れの強い流れ場での油の乱流拡散を表現することが困難である。

港湾空港技術研究所は海上流出油の移流及び拡散のシミュレーションモデル OIL-PARI（松崎・藤田，2014）を有している。OIL-PARI は船舶からの油流出に関する予測計算、再現計算を行うなど（松崎，2015）、多くの実績を有している数値計算法である。このモデルは流出油を粒子の集まりと考えたラグランジュ的な計算方法である。ラグランジュ的な手法は油の乱流拡散を再現することが容易であるため、津波時の油流出の計算にも応用が可能であると考えられる。

また、港湾空港技術研究所は高潮・津波数値シミュレータ STOC（富田・柿沼，2005）を有している。STOC は流体運動の最も基本的な理論式に基づいた、非静水圧で三次元的な流体運動を解析する STOC-IC と、理論式に静水圧近似を適用して広領域の高潮や津波を計算する STOC-ML を適直接続することにより、沖合からの伝播から陸上への浸水までを一連に計算し、構造物周りなどで非静水圧的に三次元運動をする流体も解析することが可能な数値計算モデルである。また、STOC は陸上への津波遡上も数 m 程度の細かい計算メッシュで精緻に計算を行うことができるため、STOC の計算結果を用いて油の漂流、遡上計算も行うことができる。STOC は東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行うなど（例えば、高橋，富田，2013）、多くの実績を有している数値計算法である。

### 1.3 本論文の目的と構成

以上のような背景と既往の研究を踏まえて、本論文では OIL-PARI に STOC による津波の計算結果を用いて、東北地方太平洋沖地震津波による油流出を対象とした再現計算を実施する。計算結果から、津波によって流出した油の移流及び拡散に関する計算方法及びその妥当性について検討する。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章では、STOC を用いた津波の計算方法と計算条件、及び OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法と計算条件について述べる。

第 3 章では、東北地方太平洋沖地震に伴う津波による油流出が発生した気仙沼港、仙台塩釜港仙台港区、大船渡港を対象に再現計算を実施し、計算結果の妥当性について検証する。

第 4 章では、計算結果を基に考察を行い、今後検討すべき

内容について整理する。

第 5 章では、本論文で得られた研究成果を総括する。

なお、本論文では津波来襲から数時間程度の比較的短期の油の移流及び拡散を対象としており、津波の影響が収まった後の長期的な油の挙動、物性の変化、環境影響評価等は研究の対象としない。

## 2. STOC を用いた津波の計算方法と、OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法

### 2.1 概要

本数値計算法では、流出した油は水（津波）と同じ速度で移動していくと仮定し、STOC で計算された津波の流れ場を OIL-PARI の移流外力条件として入力し、時々刻々の油の挙動を計算した。また、油の有無によって津波の状況が変わることは無視できると仮定し、STOC によって先に津波の計算を実施し、計算結果のアウトプットファイルを読み込んで OIL-PARI の計算を実施した。

本再現計算の対象は第 1 章で述べたとおり、気仙沼港、仙台塩釜港仙台港区、大船渡港とした。以下で津波、油それぞれの計算方法について説明する。

### 2.2 STOC を用いた津波の計算方法

STOC を用いた津波の計算方法の概要について説明する。詳細は富田・柿沼（2005）を参照していただきたい。STOC の基礎方程式は、porous モデル（榊山ら，1990）を適用した 3 次元の連続方程式と、Reynolds 方程式である。なお、このモデルでは、水面位置を鉛直方向に積分した連続方程式から算出するため、碎波のように水面形が鉛直方向に多価になる場合には適用できない。

$$\frac{\partial \gamma_i u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j u_i u_j}{\partial x_j} + C_i = -\frac{\gamma_v}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ + \gamma_v \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_0} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \gamma_j v_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 $x_i$  はデカルト座標系 ( $x, y, z$ )、 $u_i$  は  $x_i$  方向の流速 ( $u, v, w$ )、 $\gamma_i$  は  $x_i$  方向の有効面透過率 ( $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, 0 \leq \gamma_i \leq 1$ )、 $\gamma_v$  は有効体積多孔率（メッシュ内を占める液相の体積率、 $0 \leq \gamma_v \leq 1$ )、 $t$  は時間、 $C_i$  は Coriolis 項、 $\rho_0$  は基準密度、 $p$  は圧力、 $\rho_w$  は流体密度、 $g_i$  は各方向の重力加速度 ( $0, 0, g$ )、 $v_e$  は実効動粘性係数（動粘性係数と渦動粘性係数の和）、 $\eta$  は水面変動、 $h$  は基準水面からの水深である。

表-2.1: 気仙沼港の STOC 計算条件

計算領域	1	2	3	4
格子間隔 $\Delta x, \Delta y$ [m]	1350	450	150	50
格子数	1000 × 1350	420 × 840	540 × 960	720 × 960
実効渦動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	100	50	10	5

$C_i$  は  $f_0$  を Coriolis のパラメータとすると,  $C_i$  は  $x$  及び  $y$  方向でそれぞれ  $-f_0v$  及び  $f_0u$  となる. これらを基礎方程式として, Staggerd メッシュで空間を離散化し, leapfrog 法により時間発展させる. 本計算において鉛直方向は単層で計算している.

### 2.3 STOC を用いた津波の計算条件

津波の入力波形は, 藤井・佐竹のモデル ver 8.0 (Fujii ら, 2011) に, Mansinha and Smylie (1971) の方法を適用して, 地震発生から 300 秒間の水位の時系列を求めて入力した. 藤井・佐竹のモデル ver 8.0 は深海底や日本沿岸の海底に設置している津波計, GPS 波浪計や検潮所等で観測された津波の波形から, 各断層がどのように動いたかを逆解析して求めている. 初期密度場は 1,026kg/m<sup>3</sup> とした. 計算の安定のため, 津波が陸地に遡上する状況において津波の先端の移動を標高差によって制限している. 遡上判定に用いる限界水深は  $1.0 \times 10^{-4}$  m に設定した. 実効渦動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s] は STOC のマニュアル (独立行政法人港湾空港技術研究所, 2015) を参考に設定した.

計算結果は 10 s 毎に最も内側のネスティング計算領域の流速  $u, v$  をファイルに出力し, OIL-PARI の移流外力の入力ファイルとした. 各港ごとの STOC の計算条件は以下で説明する.

#### (1) 気仙沼港

計算格子は 4 領域のネスティングを行った. 地形, 粗度, 堤防データは中央防災会議から公開されている「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」において検討されたデータを使用した. さらに, 藤井・佐竹のモデルから計算される 300 秒間の地盤変動量を重ね合わせた量を高さデータ (地形および堤防の高さ) に加えた. これにより気仙沼港付近では -0.70 m 前後の地盤変動量を考慮することになる. 初期水位は T.P. -0.42 m, 計算時間は地震発生から 12 時間, 時間ステップ  $\Delta t$  は 1 s とした. その他の気仙沼港の STOC 計算条件は表-2.1, 計算範囲は図-2.1 の通りとした.

#### (2) 仙台塩釜港仙台港区

計算格子は 6 領域のネスティングを行い, 第 6 領域は計算時間短縮のため並列計算を行った. 地形, 粗度, 堤防デー

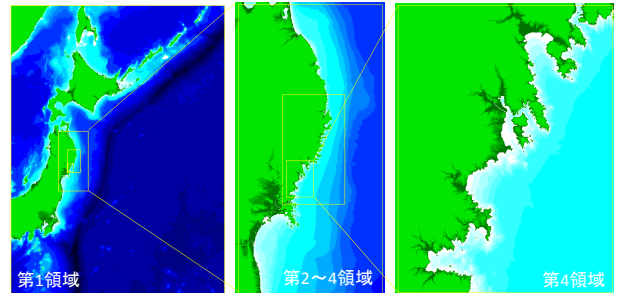


図-2.1: 気仙沼港を対象とした STOC 計算範囲

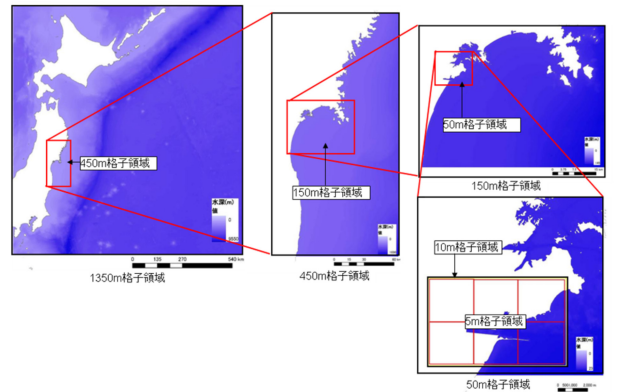


図-2.2: 仙台塩釜港仙台港区を対象とした STOC 計算範囲

タは, 第 1~4 領域は中央防災会議から公開されている「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」において検討されたデータ, 第 5, 6 領域は 2005 年航空レーザー測量の結果を基に入力データを作成し設定した. 地盤沈下量は考慮せず, その分の初期水位を計算領域全体で上げた. 防波堤, 防潮堤は測量結果による現況を再現し入力した. 初期水位は T.P. +0.0 m (津波来襲時の潮位: T.P. -0.42 m, 地盤変動量: T.P. -0.35 m), 計算時間は地震発生から 12 時間, 時間ステップ  $\Delta t$  は 0.1 s とした. その他の仙台塩釜港仙台港区の STOC 計算条件は表-2.2, 計算範囲は図-2.2 の通りとした.

#### (3) 大船渡港

計算格子は 8 領域のネスティングを行い, 第 8 領域は計算時間短縮のため並列計算を行った. 地形, 粗度, 堤防データは第 1 領域は GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) の 30 秒格子データ, 第 2~6 領域は中央防災会議から公開されている「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専

表-2.2: 仙台塩釜港仙台港区の STOC 計算条件

計算領域	1	2	3	4	5	6
格子間隔 $\Delta x, \Delta y$ [m]	1350	450	150	50	10	5
格子数	920 × 1000	267 × 540	432 × 324	249 × 240	930 × 595	a 600 × 574, b 600 × 574 c 620 × 574, d 600 × 576 e 600 × 576, f 620 × 576
実効渦動粘性 係数 [m <sup>2</sup> /s]	100	50	10	5	1	1

表-2.3: 大船渡港の STOC 計算条件

計算領域	1	2	3	4	5	6	7	8
格子間隔 $\Delta x, \Delta y$ [m]	5400	1800	600	200	100	50	10	5
格子数	300 × 170	93 × 264	81 × 90	87 × 129	112 × 160	170 × 270	750 × 1175	a 1240 × 1080 b 1240 × 920
実効渦動粘性 係数 [m <sup>2</sup> /s]	500	100	50	10	10	5	1	1

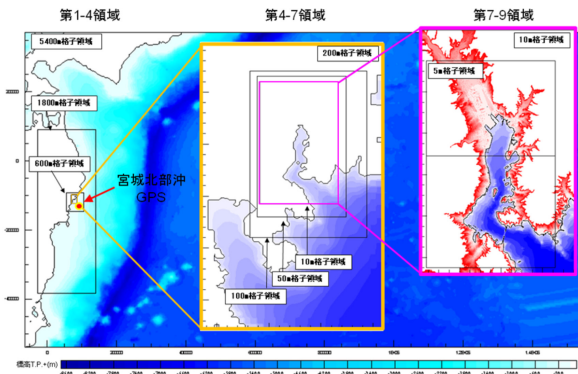


図-2.3: 大船渡港を対象とした STOC 計算範囲

門調査会」において検討されたデータ，第 7，8 領域は 2005 年航空レーザー測量の結果を基に入力データを作成し設定した。地盤沈下量は考慮せず，その分の初期水位を計算領域全体で上げた。湾口防波堤は測量結果による津波来襲後破壊された状況，防潮堤は測量結果による現況を再現し入力した。初期水位は T.P. +0.0 m（津波来襲時の潮位：T.P. -0.46 m，地盤変動量：T.P. -0.68 m），計算時間は地震発生から 12 時間，時間ステップ  $\Delta t$  は 0.05 s とした。その他，大船渡港の STOC 計算条件は表-2.3，計算範囲は図-2.3 の通りである。

## 2.4 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法

OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算方法の概要を説明する。詳細は松崎・藤田（2014）及び松崎（2015）を参照していただきたい。計算において，海上流出油は海表面の流況によって移動するとして，油を粒子の集合体に見立て，

ラグランジュ的に計算する。すなわち，各々の粒子  $k$  の位置  $X_k$  は，移動速度  $U_k$  に対して式（2.4）で計算する。

$$\frac{\partial X_k}{\partial t} = U_k \quad (2.4)$$

ここで， $t$  は時間を表す。時間積分は，Euler 陽解法とし，着目時間  $t$  の次の計算ステップにおいて，式（2.5）で計算する。

$$X_k^{t+1} = X_k^t + U_k \Delta t \quad (2.5)$$

ここで， $\Delta t$  は計算時間間隔である。通常時の油流出の場合に OIL-PARI では移流及び拡散の外力として海流，潮汐流，風による表面流，油膜自身の特性による油拡散，乱流拡散を考慮する。本計算においては，移流外力として風による表面流の他，津波の影響を新たに加え，潮汐流，海流等の影響は小さいと考えて無視した。また，油膜自身の特性による油拡散については，流出した油の物性が不明ことと，油の乱流拡散の影響と比較して相対的に小さい（松崎，2015）ことから無視した。以上のことから，油粒子  $k$  の水平 2 次元方向の移動速度  $U_k$  は（2.6）のように計算した。

$$U_k = U_{tsk} + U_{wk} + U_{dk} \quad (2.6)$$

ここで， $U_{tsk}$  は津波による移流速度， $U_{wk}$  は風による移流速度， $U_{dk}$  は油の乱流拡散速度を表わす。

風による表面流は式（2.7）の通りに計算した。

$$U_{wk} = C_w W_{10k} \quad (2.7)$$



ここで、 $C_w$  は風係数、 $W_{10k}$  は粒子  $k$  の位置における海上 10 m の風速を表わす。本計算モデルでは松崎 (2015) と同様に風係数  $C_w$  を 0.03 とした。

油の乱流拡散速度  $U_{dk}$  は式 (2.8) で計算した。

$$U_{dk} = \sqrt{\frac{2K_H}{\Delta t}} \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ここで、 $K_H$  は海水面極近傍の水平乱流拡散係数 [ $m^2/s$ ]、 $R_{n1}$ 、 $R_{n2}$  はそれぞれ独立した平均 0、分散 1 の正規乱数である。

本数値計算法では油粒子は水面上において移動させておき、津波が引いた後に油がある場合、すなわち STOC の計算において流体 (海水) がない場所において油粒子は動かないという計算条件を取った。

### 2.5 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算条件

まず、各港で共通の計算条件を示す。津波による移流速度は既に述べたとおり、STOC で計算された結果を用いた。風のデータは気象庁のメソ客観解析データ (MANAL) を用いた。図-2.4 より、いずれの対象港も発災後は 3~6 m/s 程度の西風が吹いていた。水平乱流拡散係数は STOC の計算格子間隔から  $1 m^2/s$  と仮定した。

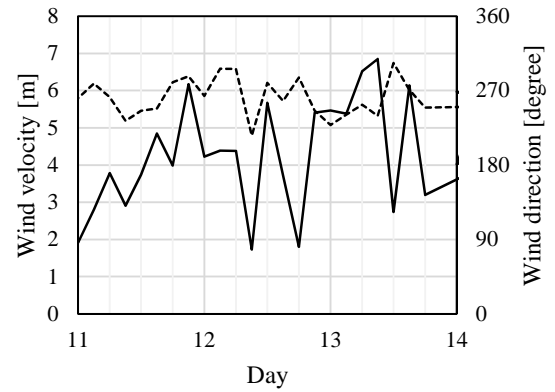
各港ごとの OIL-PARI の計算条件は以下で説明する。

#### (1) 気仙沼港

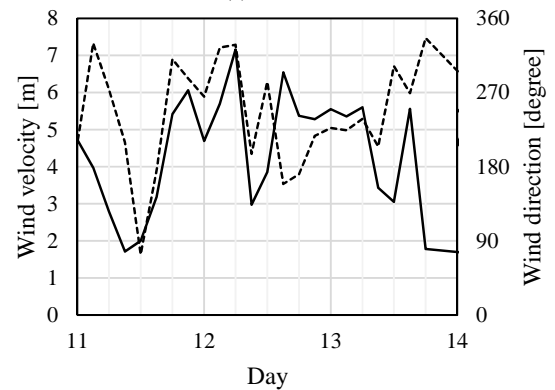
気仙沼港における油流出条件は気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部 (2012) を参考に設定した。油流出位置及び流出量は表-2.4 (a) の通りに設定した。気仙沼港では 100 kL 以上の屋外貯油タンク 23 基のうち、22 基が津波によって流されており、18 基は気仙沼市内で発見されているけれども、4 基は所在不明である。また、貯油タンクの漂流経路が不明であることから、本計算において油の流出は貯油タンク初期位置で発生し、その場において油流出が継続したと仮定した。また、油流出は津波来襲時に発生、1 時間継続し、その間の流出流量は一定であると仮定し、油流出開始時間を 15 時 27 分 (地震発生から 41 分後)、油流出終了時間を 16 時 27 分 (地震発生から 1 時間 41 分後) とした。油粒子数は計算時間との兼ね合いから 1152 個 (10 kL/個) とした。

#### (2) 仙台塩釜港仙台港区

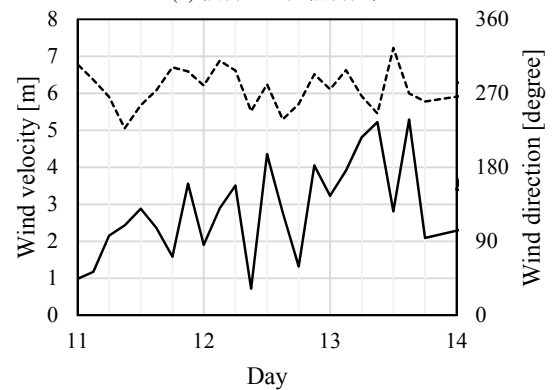
仙台塩釜港仙台港区における油流出条件は仙台市消防局 (2012) を参考に設定した。油流出位置及び流出量は表-2.4 (b) の通りに設定した。油流出は津波来襲時に発生、1 時間継続し、その間の流出流量は一定であると仮定し、油流出開始時間を 15 時 51 分 (地震発生から 1 時間 5 分後)、油流出終了時間を 16 時 51 分 (地震発生から 2 時間 5 分後) とした。油粒子数は計算時間との兼ね合いから 1660 個 (5 kL/個) とした。



(a) 気仙沼港



(b) 仙台塩釜港仙台港区



— Wind velocity    - - - - - Wind direction

(c) 大船渡港

図-2.4: 再現計算対象港における風況 (MANAL より作成)。横軸が日付、縦軸が風速及び風向。

#### (3) 大船渡港

大船渡港における油流出条件は佐々木 (2012) を参考に設定した。油流出位置及び流出量は表-2.4 (c) の通りに設定した。油流出は津波来襲時に発生、1 時間継続し、その間の流出流量は一定であると仮定し、油流出開始時間を 15 時 21 分 (地震発生から 35 分後)、油流出終了時間を 16 時 21 分 (地震発生から 1 時間 35 分後) とした。油粒子数は計算時間との兼ね合いから 1600 個 (0.5 kL/個) とした。

表-2.4: 油流出位置及び流出量

(a) 気仙沼港

油流出地点	東経	北緯	流出量 [kL]	
A 事業所	1	141.593453	38.888376	760
	2	141.593426	38.888534	1,150
	3	141.593399	38.888706	520
	4	141.593395	38.888864	360
B 事業所	1	141.592858	38.888258	1,830
	2	141.593014	38.888056	260
	3	141.593154	38.888255	900
	4	141.593215	38.887982	1,110
	5	141.593272	38.888268	340
	6	141.593327	38.888074	420
	7	141.593374	38.887863	1,030
	8	141.593537	38.887791	140
	9	141.593566	38.887967	570
	10	141.593550	38.888101	360
C 事業所	1	141.593203	38.887142	500
	2	141.593402	38.887061	500
	3	141.593563	38.886984	500
	4	141.593488	38.887218	30
	5	141.593590	38.887140	70
D 事業所	1	141.583583	38.893935	40
	2	141.583357	38.893801	110
	3	141.583136	38.893689	20
合計			11,520	

(b) 仙台塩釜港仙台港区

1	141.030610	38.275944	4,400
2	141.035192	38.279860	3,900
合計			8,300

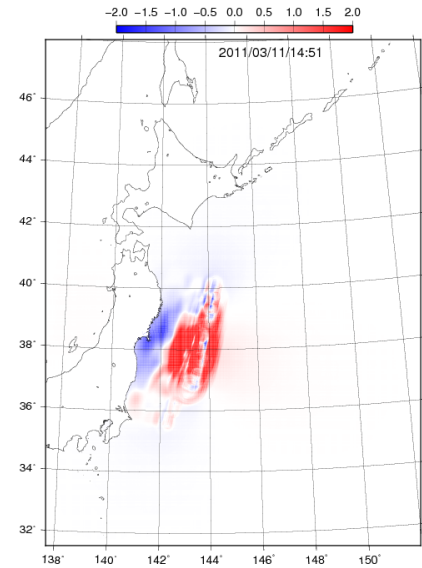
(c) 大船渡港

1	141.736149	39.065810	800
---	------------	-----------	-----

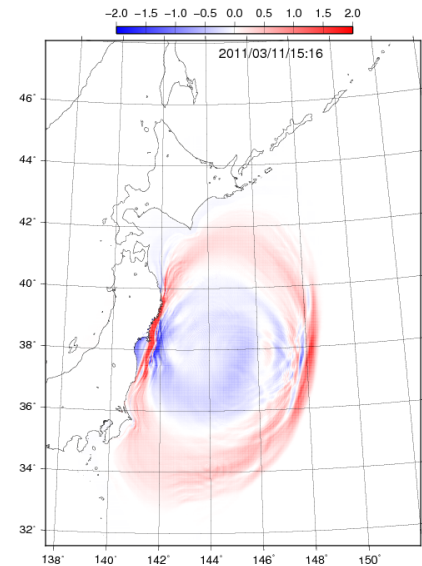
### 3. STOC を用いた津波の計算結果と、OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算結果

#### 3.1 STOC を用いた津波の計算結果

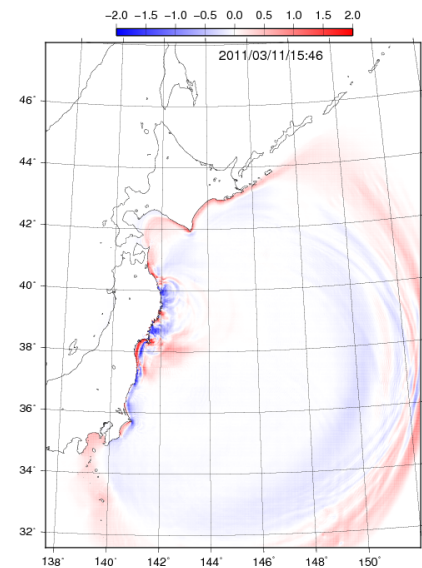
図-3.1 は気仙沼港を対象とした津波計算における水位の時間変化を表している。赤は水位が高く、青は水位が低いことを表し、単位は m である。地盤の隆起・沈降に伴う水位の初期変位が時間経過と共に伝播している。ネスティングを行っ



(a) 5 分後



(b) 30 分後



(c) 60 分後

図-3.1: 気仙沼港を対象とした津波計算の水位時間変化

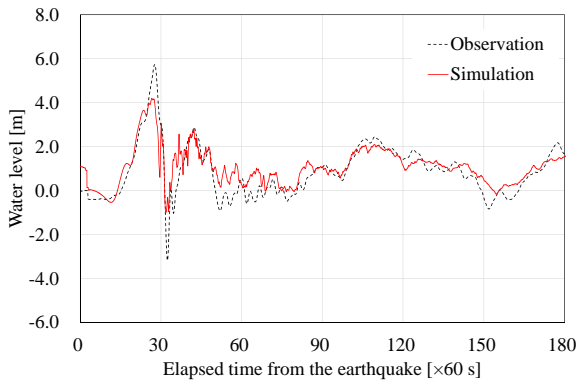


図-3.2: 宮城北部沖 GPS 波浪計による水位の観測結果と気仙沼港を対象とした STOC 計算結果の比較。横軸は経過時間、縦軸は水位。

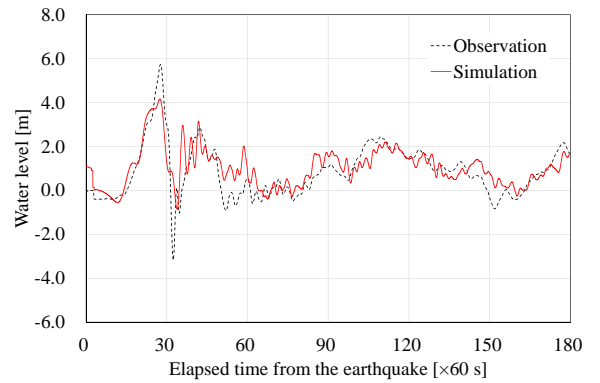
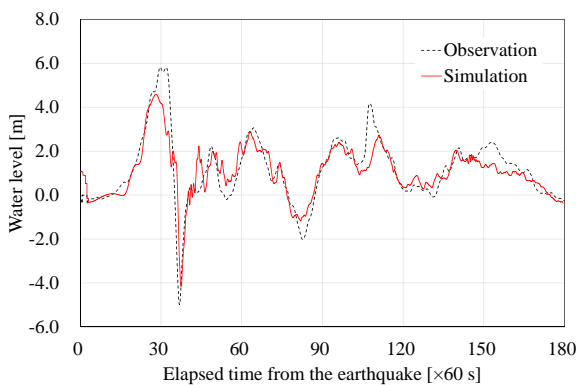
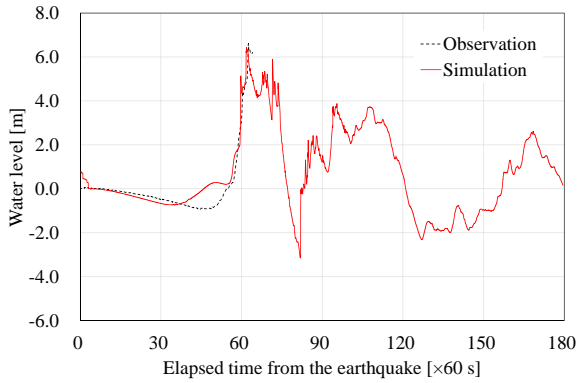


図-3.4: 宮城北部沖 GPS 波浪計による水位の観測と大船渡港を対象とした STOC 計算結果の比較。横軸は経過時間、縦軸は水位。



(a) 宮城中部沖 GPS 波浪計



(b) 仙台新港海象計

図-3.3: 各観測機器による水位の観測結果と仙台塩釜港を対象とした STOC 計算結果の比較。横軸は経過時間、縦軸は水位。

ている境界部分でもスムーズに計算が実施できていることが確認された。ここでは示さないものの、同じ波源モデルを用いている仙台塩釜港仙台港区、大船渡港を対象とした津波計算における水位も気仙沼港を対象とした計算と同様の計算が実施できていることも確認した。

図-3.2, 3.3, 3.4 に GPS 波浪計及び海象計による潮位の観

表-3.1: 観測機器の位置

	東経	北緯
宮城北部沖 GPS 波浪計	141.894444	38.857778
宮城中部沖 GPS 波浪計	141.683611	38.232500
仙台新港海象計	141.066111	38.250000

測結果と STOC の計算結果との比較 (位置は表-3.1) を示す。なお、観測波形は地盤沈下の影響を除去するため地震発生時の水位が 0 になるように全体を嵩上げしている。また、計算結果は地震発生から 5 分後 (全変動が終わる時刻) の水位が 0 になるように全体を嵩上げしている。また、仙台新港の海象計は津波の影響により観測途中でデータが途切れている。いずれの地点においても、時間経過に伴って水位が変動する様子を計算で再現されていることが確認された。なお、ピーク高さは計算が観測より過小評価となっている。

図-3.5 に仙台塩釜港仙台港区付近にある海象計による流速の観測結果 (流速の観測鉛直位置は海底から 3.5 m) と STOC の計算結果との比較を示す。流速の大きさ及び時系列ともにおおむね良く一致している。

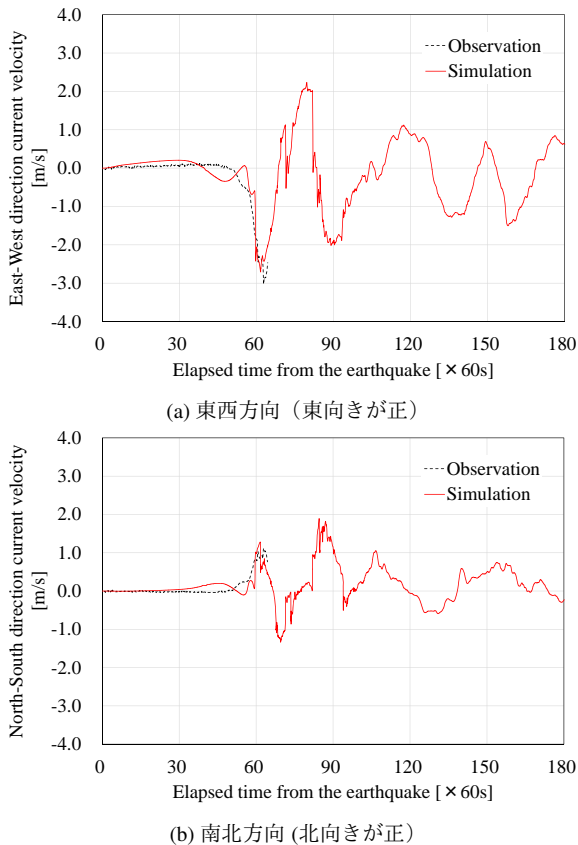


図-3.5: 仙台新港の海象計による流速の観測と仙台塩釜港を対象とした STOC 計算結果の比較。横軸は経過時間、縦軸は流速。

### 3.2 OIL-PARI を用いた油の移流及び拡散の計算結果

#### (1) 気仙沼港

図-3.6 に海上流出油の移流及び拡散の計算結果を示す。図中の赤色、青色の粒子はそれぞれ油が水面上を漂流していること、漂着していることを表す。また、水色の部分が水面（陸域においては浸水範囲）を表す。流出油は津波来襲時は押し波によって湾奥へ移流し、次に引き波によって湾口方向へ移流した。その後流出油は押し波引き波によって移流しながら拡散しているが、流出油は湾口付近までは移流せず、気仙沼湾の大島北側や東側に集中した。また、風の影響によって東向きに移流し、最終的には流出油の大部分が湾奥部、大島北側、東湾の東側海岸線に漂着した。

#### (2) 仙台塩釜港仙台港区

図-3.7 に海上流出油の移流及び拡散の計算結果を示す。流出油は津波来襲時に港内側へ移流した。仙台塩釜港の油流出源から外洋までは約 1 km 程度と近いことから、湾内側に流出した流出油は最終的には風の影響によって東向きに移流し、外洋に流出した。陸域に流れた油の一部は津波の流れから取り残され、堆積した。

#### (3) 大船渡港

図-3.8 に海上流出油の移流及び拡散の計算結果を示す。流出油は津波来襲時は押し波によって湾奥方向へ移流し、その後引き波によって湾口方向へ移流した。その後流出油は押し波引き波によって移流しながら拡散した。流出油の一部が湾口付近まで移流したが、ほとんどは湾内北側に分布した。海上の流出油は風の影響によって東向きに移流し、最終的には流出油の大部分が大船渡湾内の東側海岸線に漂着した。

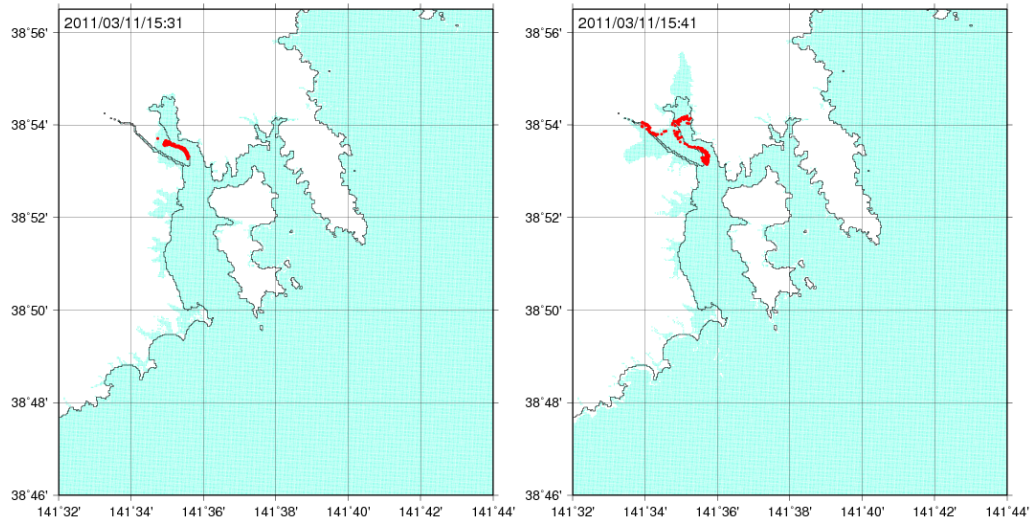
## 4. 考察

STOC を用いた津波の再現計算について、沖合いにある GPS 波浪計の設置位置において、STOC の計算結果のほうが観測結果よりも波形のピークが小さかった。原因としてはモデルの精度の他、入力波形の再現性によるところが大きいのと考えられる。藤井・佐竹のモデル ver 8.0 を使用し、津波の再現計算を行った場合、他の事例においても GPS 波浪計の位置におけるピーク高さは計算が観測よりも小さく（例えば、有川・富田, 2014）、波源モデルを修正することで津波再現精度を向上できると考える。

数値計算結果の妥当性の評価について、海水面の油の分布状況に関する空撮画像、動画等と数値計算結果を比較すべきであるけれども、そのような資料が見つからなかった。気仙沼港については、採泥による油の分布、分析調査が行われているため、採泥による油の分布、分析調査を参考にして流出油の漂流経路について考察する。

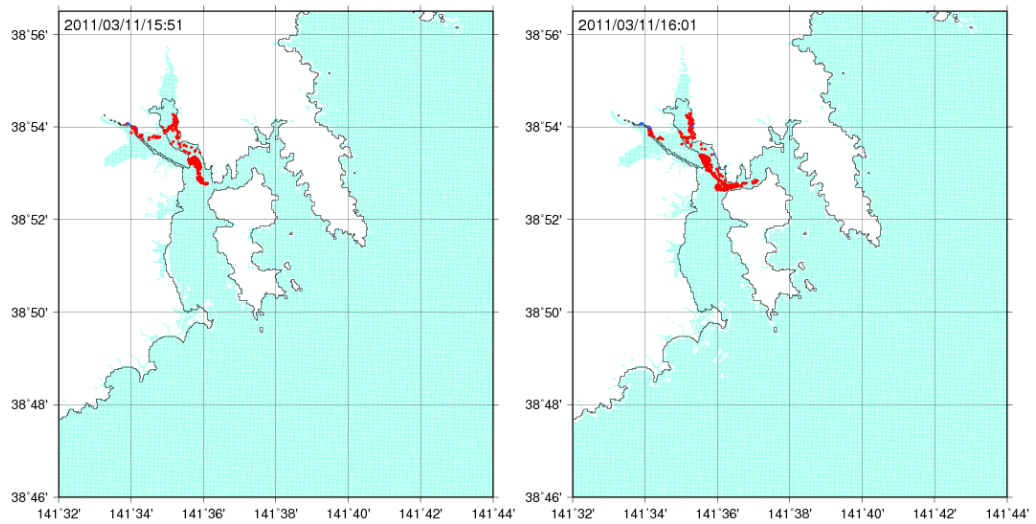
中家・千葉 (2011) によると、2011 年 8 月 9 日に気仙沼湾内 22 地点において海底土の油分分布及び臭気について調査した結果、湾奥から東湾にかけて、西湾の大島側の広い範囲で油分が確認され、湾奥部を中心に強い臭気が確認された（図-4.1）。図中の臭い判定の数値は評価者 3 名の平均値であり、油膜は底泥を 1 ml ほど清水に浸けて油膜の有無を確認した。中村ら (2012) によると、2011 年 7 月から合計 6 回、気仙沼湾内で採泥し、海底の油分を調査した結果、いずれの調査回においても湾奥および大島東湾にかけて油分濃度が比較的高く、西湾は油分濃度が比較的低かった。牧ら (2013) によると、2012 年 5 月から気仙沼湾内の海底油分調査（芳香族炭化水素）を行った結果、大島東側の方が西側より高濃度で検出されたことから、芳香族炭化水素により汚染された底質が主に東側を通過して沖合に拡がったことが示唆された、としている。

これらの結果から、気仙沼港で流出した油は気仙沼湾の東側や大島北側付近に多く移流し、その一部が沈降し、西湾側にはあまり移流していないことが示唆された。計算結果は平面 2 次元のみの計算であり、同じ条件で比較はできなく、また、油の流出条件や沈降について多くの仮定を用いているけれど



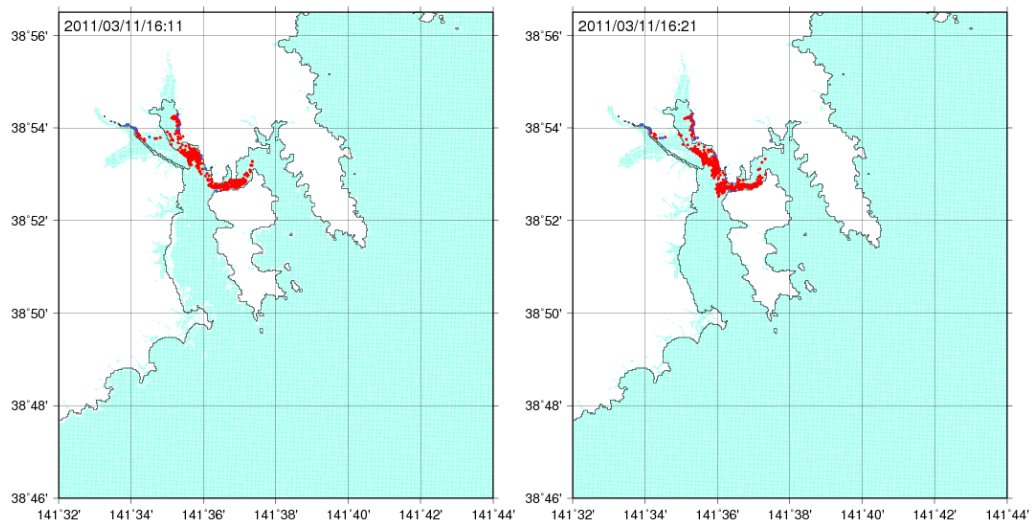
(a) 15:31 (地震発生から 45 分後)

(b) 15:41 (地震発生から 55 分後)



(c) 15:51 (地震発生から 1 時間 5 分後)

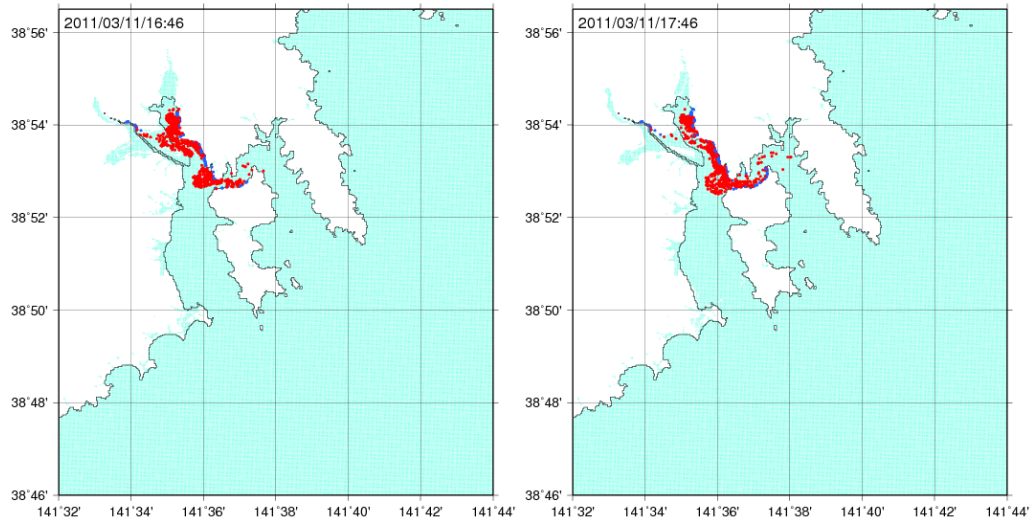
(d) 16:01 (地震発生から 1 時間 15 分後)



(e) 16:11 (地震発生から 1 時間 25 分後)

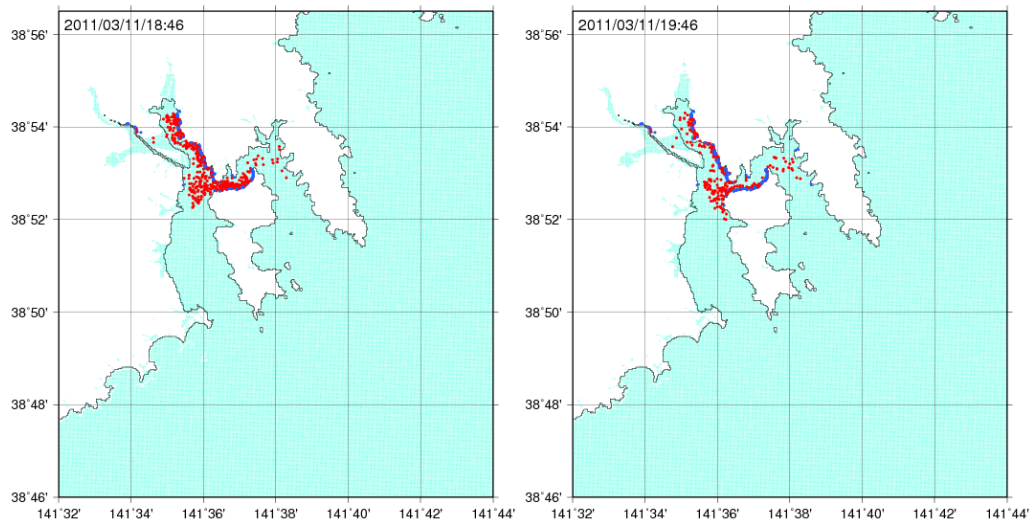
(f) 16:21 (地震発生から 1 時間 35 分後)

図 3-6(1): 気仙沼港における流出油の漂流予測計算結果 (10 分毎).



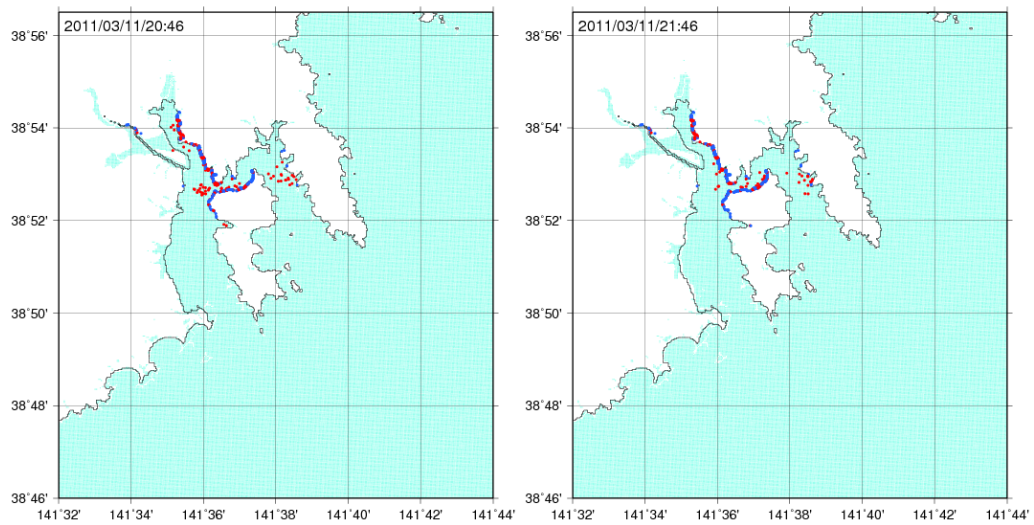
(a) 16:46 (地震発生から 2 時間後)

(b) 17:46 (地震発生から 3 時間後)



(c) 18:46 (地震発生から 4 時間後)

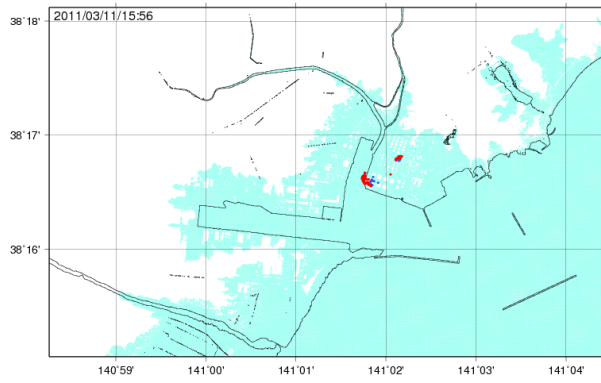
(d) 19:46 (地震発生から 5 時間後)



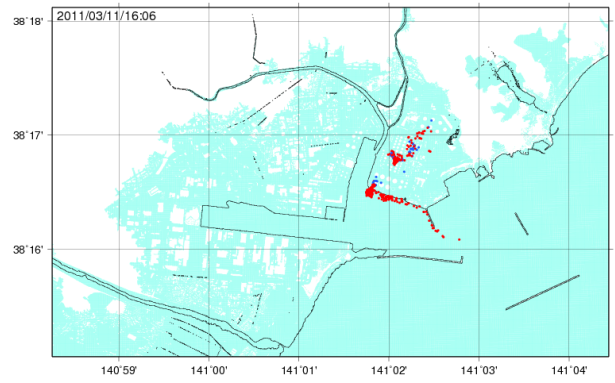
(e) 20:46 (地震発生から 6 時間後)

(f) 21:46 (地震発生から 7 時間後)

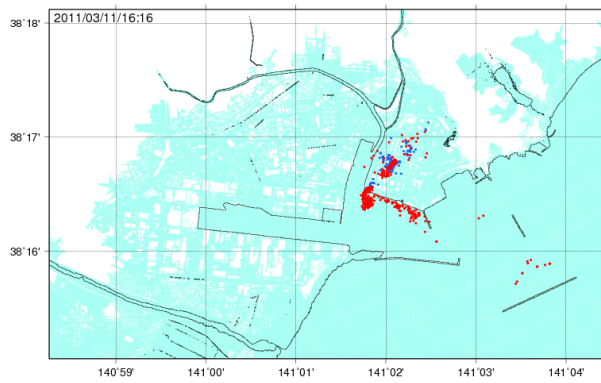
図 3-6(2): 気仙沼港における流出油の漂流予測計算結果 (1 時間毎).



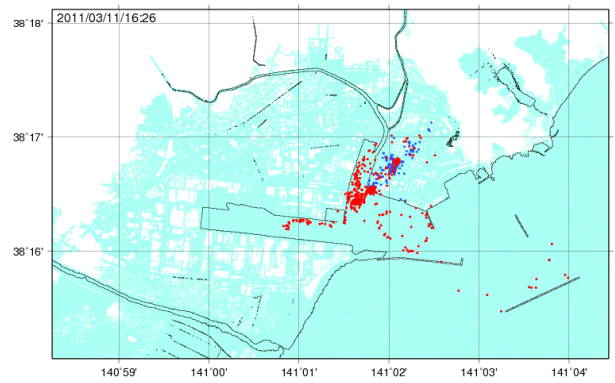
(a) 15:56 (地震発生から 1 時間 10 分後)



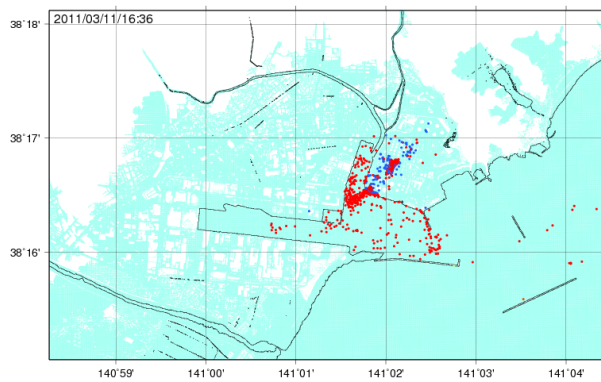
(b) 16:06 (地震発生から 1 時間 20 分後)



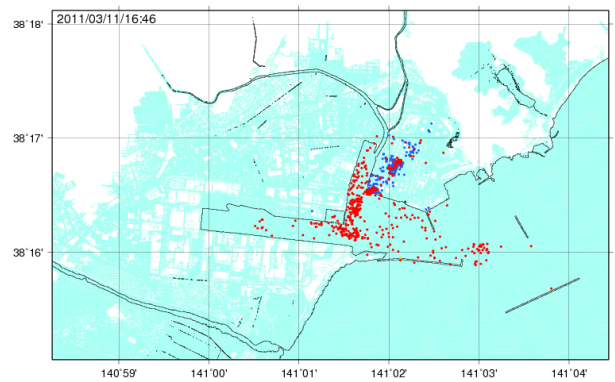
(c) 16:16 (地震発生から 1 時間 30 分後)



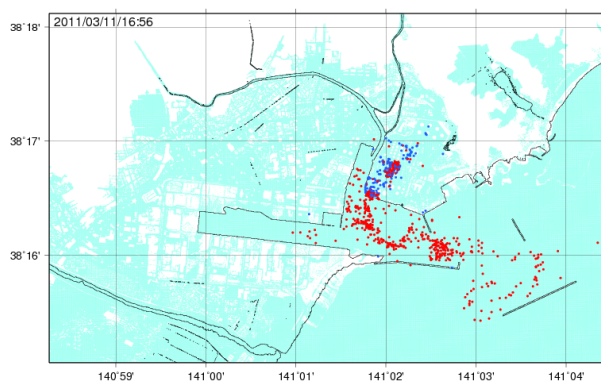
(d) 16:26 (地震発生から 1 時間 40 分後)



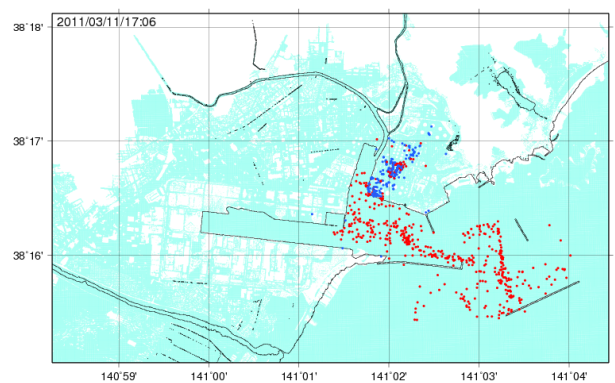
(e) 16:36 (地震発生から 1 時間 50 分後)



(f) 16:46 (地震発生から 2 時間後)

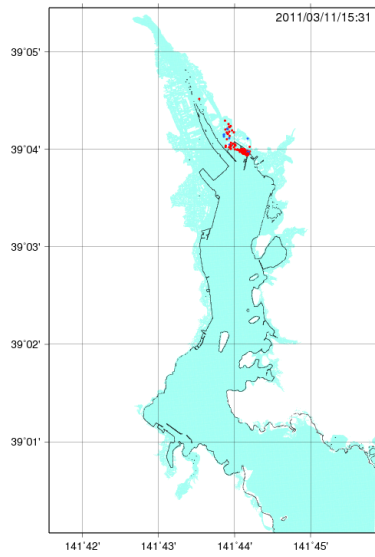


(g) 16:56 (地震発生から 2 時間 10 分後)

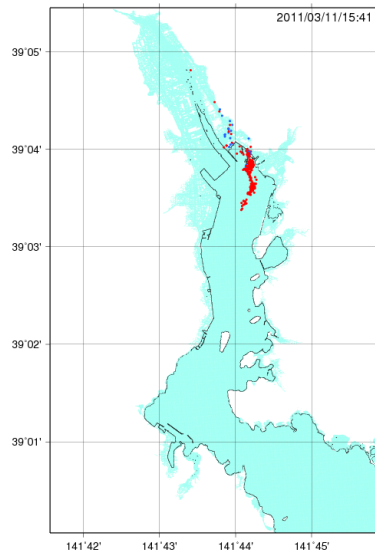


(h) 17:06 (地震発生から 2 時間 20 分後)

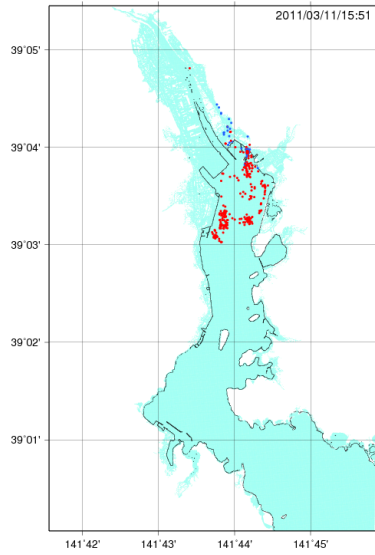
図 3-7: 仙台塩釜港における流出油の漂流予測計算結果 (10 分毎).



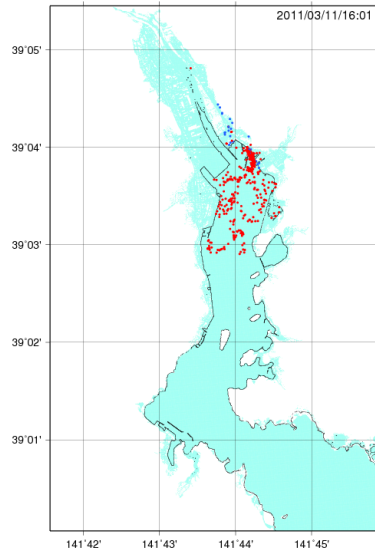
(a) 15:31 (地震発生から 45 分後)



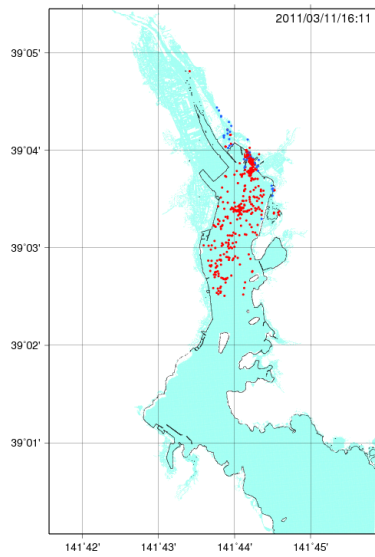
(b) 15:41 (地震発生から 55 分後)



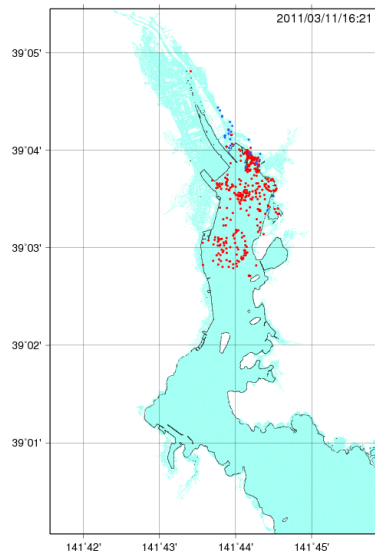
(c) 15:51 (地震発生から 1 時間 5 分後)



(d) 16:01 (地震発生から 1 時間 15 分後)



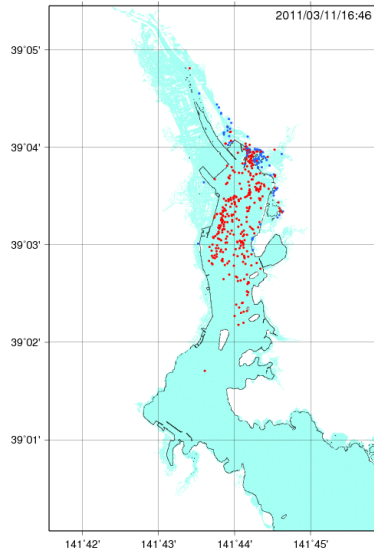
(e) 16:11 (地震発生から 1 時間 25 分後)



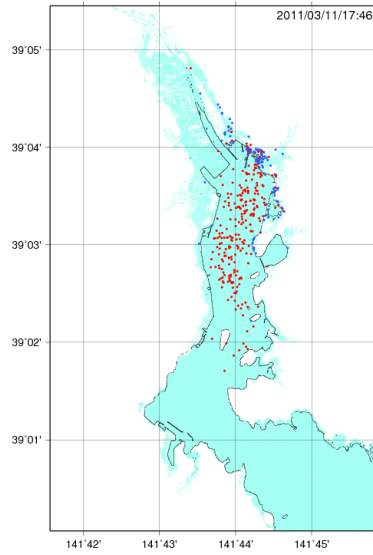
(f) 16:21 (地震発生から 1 時間 35 分後)

図 3-8(1): 大船渡港における流出油の漂流予測計算結果 (10 分毎).

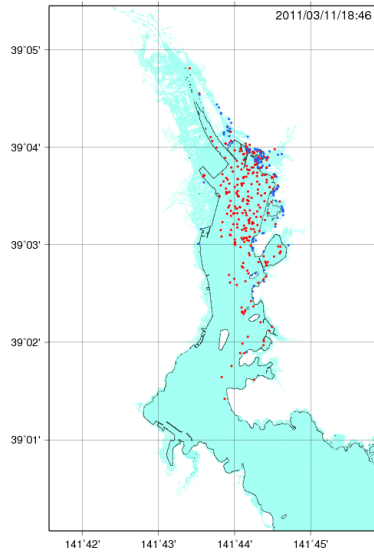




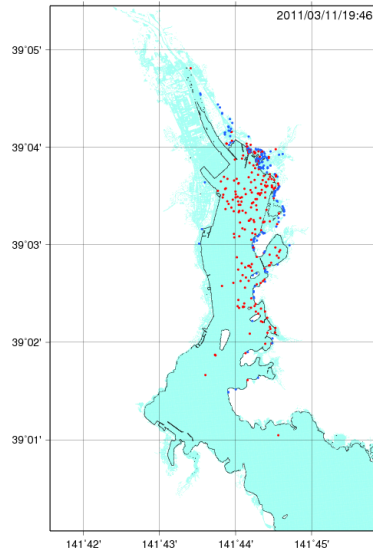
(a) 16:46 (地震発生から 2 時間後)



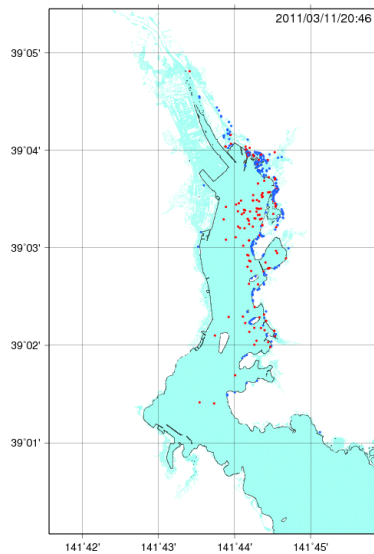
(b) 17:46 (地震発生から 3 時間後)



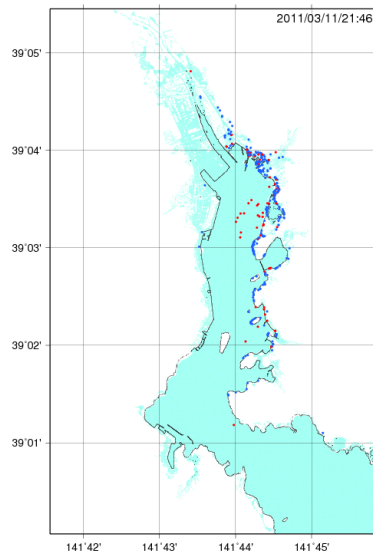
(c) 18:46 (地震発生から 4 時間後)



(d) 19:46 (地震発生から 5 時間後)



(e) 20:46 (地震発生から 6 時間後)



(f) 21:46 (地震発生から 7 時間後)

図 3-8(2): 大船渡港における流出油の漂流予測計算結果 (1 時間毎).

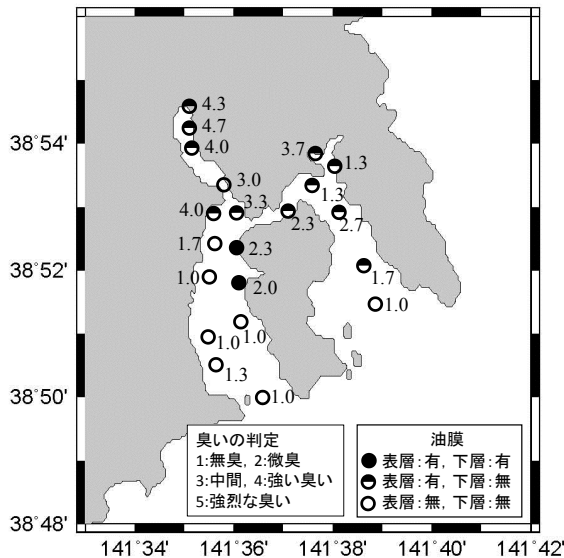


図-4.1: 気仙沼湾海底油濁状況調査結果（中家・千葉，2011 を基に作成）。

も、観測結果と同様の傾向を示している。

以上のことから、油漂流位置の検討は不十分であるものの、本モデルを用いて津波による油流出範囲の予測が可能であると考えられる。

本モデルは粒子のモデルを用いたラグランジュ的な計算手法を採用している。オイラー的な計算手法を用いたモデルとの比較を行っていないが、今回計算を行ったような広範囲の油の拡散はオイラー的な手法の再現は容易ではなく、ラグランジュ的な計算手法が有効であるものと考えられる。

次に、流出油が津波、風によって湾外流出したかどうかについて考察する。気仙沼湾や大船渡湾は湾口から油流出地点までの距離は約 6 km である。数値計算結果から津波の流速は平均で 3 m/s、第 1 波の最大潮位から最低潮位までの間に油が湾口方向へ移流すると考え、その時間は 20 分とすると、津波の引き波時に移動する距離は概算で  $3 \text{ m/s} \times 20 \times 60 \text{ s} = 3,600 \text{ m}$  と見積もることができる。このように津波の流速と周期の積よりも湾軸方向に長い湾の場合、津波だけの影響では油は湾外に流出せず、大部分が湾内にとどまるものと考えられる。一方で、仙台塩釜港仙台区のように、油流出点と湾口までの距離が約 1 km と油流出地点が湾口に近いう場合は津波によって油の一部が湾外に流出するものと考えられる。

津波の流速が小さくなった後は、海水面に浮いている油は風による表面流が移流成分として支配的になる。発災後は 3 ~ 6 m/s 程度の西風が吹いていたこと（図-2.4 参照）、及び湾の形状から、気仙沼港や大船渡港は西風では風向きと湾開口部が一致しておらず、油は湾外に流出しにくい条件であり、仙台港では油は外洋に流出しやすい条件であった。これらの状況から考えると、震災時の移流条件では気仙沼港や大船渡

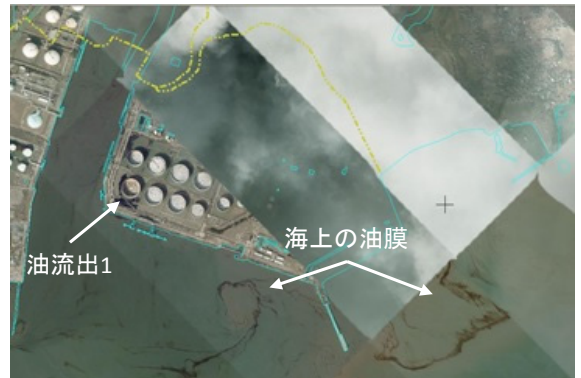


図-5.1: 複数枚の写真を合成した仙台塩釜港仙台区周辺の空撮写真の例。油流出 1 が表-2.4 の 1 番と対応。（出典：国土地理院，撮影日時：3 月 12 日 13:30~14:30）

港において流出油の大部分は湾外に流出しなかったと考えられる。なお、風況が異なれば油が湾外に流出することも十分にあり得る。油流出発生時に北風が吹いている場合、気仙沼湾や大船渡湾においても油が湾外に流出する可能性がある。

## 5. あとがき

津波による油流出範囲をより理解するためには、以下の項目について追加の検討が必要であると考えられる。

まず、本論文では流出油の移流及び拡散位置について詳細な検討ができていないため、計算条件がこれでよいかの確認が十分にできていない。そのため、計算結果を検証するための油拡散状況のデータが必要である。例えば、空撮画像から図-5.1 のような情報を得ることができる。図より膜状及び帯状に油が浮かんでいる様子がわかる。しかしながら、計算結果の妥当性を検証するために必要な流出油の分布情報の時間オーダーは、数時間程度と比較的短期であり、この 1 枚の空撮画像からでは油の移流及び拡散範囲を推定できない。また、発災時は人命や被害状況確認のために航空機からの空撮を行っており、優先順位として流出油が対象はならず、今後発生する津波による油流出の際も、流出油の範囲を発災時に観測することは期待できない。そのため、今後津波により流出した油の拡散範囲を把握するには、例えば、発災前からビルのような高い場所から動画もしくは静止画を撮影する、衛星画像や衛星観測データの解析により海水面の油分布を把握する（例えば、石油連盟，2010）等により油拡散情報を収集する必要がある。

次に、津波の流速の再現結果の検討をする必要がある。津波の計算結果の妥当性の検証は検潮所の潮位観測値や現地調査による津波の浸水深及び遡上高と計算結果を比較する、といった津波の水位を対象とすることがほとんどである。津波の流速についての検討は十分にされておらず、空間的な流速

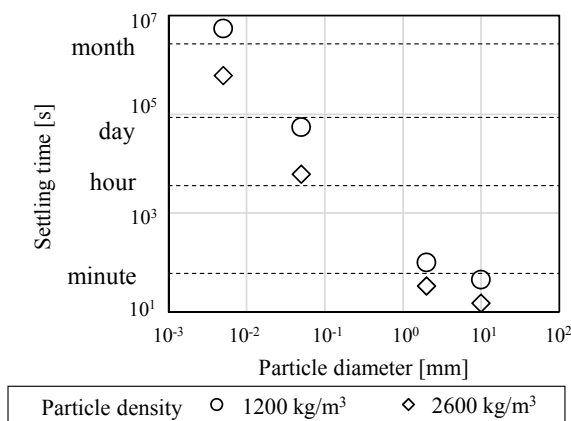


図-5.2: 沈降モデルを用いた沈降時間の計算の例。横軸が粒子の直径、縦軸が水深 10 m の海底に沈むまでの時間を表す。

分布の妥当性の検討となると、さらに困難となる。また、砕波の状況においても流速が一致しているか不明である。そのため、数値計算から得られた津波の流速が確からしいことを示すことが必要であり、再現精度が不十分であれば、津波の計算の入力条件や計算モデルを見直す必要がある。

次に、津波によって流出した油が海底に沈降する現象について、どのように評価するかといった検討が必要である。油の沈降の要因として、津波によって発生した濁水中の土砂に付着し、油の密度が海水の密度を超えて沈降する可能性が高いと考えている。その場合、油が土に付着した際にできる粒子の粒径及び密度によって沈降時間のオーダーが変わってくる。図-5.2 は実験に基づいた沈降速度を求めるモデル (Komar and Reimers, 1978) から求めた、水深が 10 m の海底に沈むまでの時間と粒子の直径の関係を示している。粒子密度によるけれども、油が土に付着した際にできる粒子の直径が大きい場合 (> 2 mm) は数分のオーダーで沈降し、小さい場合 (< 0.050 mm) は数時間から数か月といったオーダーで沈降する。油が土に付着した際にできる粒子の直径と密度がどのようになるか、計算対象とする現地の海域及び陸域土砂分布を考慮したうえでの検討が必要となる。

また、海上保安庁の広報資料 ([http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/120327\\_kesenuma.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/120327_kesenuma.pdf), [http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/20110805\\_sendai-shiogama.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/20110805_sendai-shiogama.pdf), [http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/20111026\\_ofunato.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN2/topics/pdf/20111026_ofunato.pdf)) によると、津波により水深が気仙沼港で最大約 7 m、仙台塩釜港仙台港区で最大約 1 m、大船渡港で最大約 3 m 深くなった。津波が発生した際にどの程度、海底もしくは陸上の土砂が巻き上がり、濁水となるのかの検討も必要である。静水の濁水に油が流入しても土砂に付着する割合は低く、攪拌エネルギーが高いときに土砂に油が付着すると考えられる。その際に、津波の攪拌エネルギーは実験及

び数値計算から、どのように評価すればよいかを検討しなければならない。

(2016 年 4 月 25 日受付)

## 謝辞

気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部様、仙台市消防局様、佐々木邦明氏には震災時の油流出に関する情報提供をしていただいた。内閣府中央防災会議から水深、粗度、堤防のデータを提供いただいた。みずほ情報総研株式会社 荒木和博氏、山崎昇氏にはプログラム開発および数値計算の実施を補助していただいた。元港湾空港技術研究所 本多和彦氏には STOC の計算方法について指導していただいた。本論文で用いた GPS 波浪計と海象計のデータは、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものである。本論文をまとめるにあたり、片山昭特別研究主幹、下迫健一郎特別研究主幹、井上徹教グループ長から貴重なご意見をいただいた。これらの研究の成果は国土交通省港湾局からの受託研究成果の一部である。港湾局 平野誠治課長補佐、伊藤吉孝係長、福永浩仁係長をはじめ、関係各位の支援に謝意を表す。

## 参考文献

- Fujii, Y., Satake, S., Shinohara, M., and Kanazawa, T. (2011): Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space Letter*, Vol. 63, pp. 815-820.
- Komar, P. D. and Reimers, C. E. (1978): Grain Shape Effects on Settling Rates, *The Journal of Geology*, Vol. 86, No. 2, pp. 193-209.
- Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1971): The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- 有川太郎・富田孝史 (2014): 階層型シミュレーションによる高精細津波遡上計算手法の開発, 港湾空港技術研究所報告, 第 53 巻, 第 2 号, pp.3-18.
- 岩淵洋子・越村俊一・今村文彦 (2006): 津波の陸上遡上域における油・水輸送問題の数値実験, 海岸工学論文集, 第 53 号, pp.1361-1365.
- 気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部 (2012): 東日本大震災消防活動の記録.
- 後藤智明 (1985): 津波による油の拡がりに関する数値計算, 土木学会論文集, 第 357 号, pp.217-223.

榊山勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.554-558.

佐々木邦昭 (2012): 東日本大震災 (平成 23 年 3 月 11 日) に伴う油濁について (気仙沼と大船渡の油濁を考える), 油濁情報, 第 1 号, pp.5-13.

石油連盟 (2010): 海上流出油全天候型早期自動認識システムの構築の可能性に関する調査報告書.

仙台市消防局 (2012): 東日本大震災における仙台市消防局の対応について, 大規模災害発生時における消防本部の効果的な初動活動の在り方検討会報告書.

高橋研也・富田孝史 (2013): 3 次元非静水圧流動モデルを用いた久慈湾における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 69 巻, pp.166-170.

爲廣哲也・小谷野喜二 (2006): 津波被害予測モデルの構築について, 沿岸技術研究センター論文集, 第 6 号, pp.43-47.

富田孝史・柿沼太郎 (2005): 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第 44 巻, 第 2 号, pp.83-98.

独立行政法人港湾空港技術研究所 (2015): STOC ユーザーマニュアル完全版.

中家浩・千葉充子 (2011): 震災後の県北部沿岸における漁場環境について沿岸水産物の安全・安心は保たれるか, 宮城県水産技術総合センター気仙沼水産試験場東日本大震災後の調査報告集 <http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/89341.pdf>, pp.5-6.

中村宏・山川鉦・尾長幸夫 (2012): 気仙沼湾における沈積油の分布, 東日本大震災被災地における調査研究事例アーカイブス.

畑山健 (2012): 石油タンクの津波被害について, 第 15 回消防防災研究講演会資料, pp.85-104.

牧秀明・金谷弦・中村泰男・福地信一・三浦和樹・佐々木久雄・田中伸幸・千葉信男・西村修 (2013): 東北地方太平洋沿岸海域における津波による底質の石油・炭化水素汚染, 第 47 回日本水環境学会年回講演集, pp.254.

松崎義孝 (2015): 海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法の開発, 港湾空港技術研究所資料, 第 1300 号, pp.51.

松崎義孝・藤田勇 (2014): 海水面における流出油の拡散・移流に関する数値計算法の開発と油流出事故の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, 第 1 号, pp.15-30.

## 記号表

$C_i$	: Coriolis 項
$C_w$	: 風係数
$f_0$	: Coriolis のパラメータ
$g$	: 重力加速度
$g_i$	: 各方向の重力加速度 (0, 0, $g$ )
$h$	: 基準水面からの水深
$k$	: 着目する油粒子
$K_H$	: 水平乱流拡散係数 ( $m^2/s$ )
$p$	: 圧力
$R_{n1}, R_{n2}$	: それぞれ独立した平均 0, 分散 1 の正規乱数
$t$	: 時間
$U_{dk}$	: 油粒子の乱流拡散速度ベクトル
$u_i$	: $x_i$ 方向の流速 ( $u, v, w$ )
$U_k$	: 着目する油粒子 $k$ の水平方向速度ベクトル
$U_{tsk}$	: 津波による油粒子の移流速度ベクトル
$U_{wk}$	: 風による油粒子の移流速度ベクトル
$W_{10k}$	: 粒子 $k$ の位置における海上 10 m での風速ベクトル
$x_i$	: デカルト座標系 ( $x, y, z$ )
$X_k$	: 着目する油粒子 $k$ の位置
$\gamma_i$	: $x_i$ 方向の有効面透過率 ( $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, 0 \leq \gamma_i \leq 1$ )
$\gamma_v$	: 有効体積多孔率 (メッシュ内を占める液相の体積率 ( $0 \leq \gamma_v \leq 1$ ))
$\Delta t$	: 計算時間刻み
$\Delta x, \Delta y$	: STOC の $x, y$ 方向空間格子
$\eta$	: 水面変動
$\nu_e$	: 実効動粘性係数 (動粘性係数と渦動粘性係数の和)
$\rho_w$	: 流体の密度
$\rho_0$	: 基準密度

港湾空港技術研究所資料 No.1327

2016.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。