

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226017

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) A New Spilled Oil and Gas Tracking Autonomous Buoy System and Application to Marine Disaster Prevention System

研究代表者

加藤 直三 (KATO, NAOMI)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00138637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 156,200,000円

研究成果の概要(和文)：海底の油やガスの生産施設からの流出や船舶からの重油流出の事故に際し、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浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットを開発し、海洋試験を繰り返し、それらの運用を確立した。一方、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、油やガスの拡散シミュレーションの精度向上を図った。これらは、海上での重油の回収作業の機会を増加させ、また深海での油やガスの生産施設からの流出の早期発見を可能とし、自然環境に対する災害の低減に寄与する。

研究成果の概要(英文)：There have been many major sea oil spills in recent years. These spills damage not only the ocean environment but also regional economies. In this study, an autonomous underwater robot for tracking and monitoring of spilled plumes of oil and gas from subsea production facilities, and a floating buoy robot for autonomous tracking of spilled oil on the sea surface and transmission of useful data to a land station through satellites in real time were developed and repeatedly tested at sea to establish those operations. On the other hand, the accuracy of simulations for predicting diffusion and drifting of spilled oil and gas by incorporating the real-time data from these robots was improved. The system described above can be applied to regular environmental monitoring and early warning around subsea production facilities, the collection of spilled oil drifting on the sea surface, and the deployment of oil-recovery devices.

研究分野：海洋防災

キーワード：油やガスの流出事故 重油やガスのプルームの追跡 海中ロボット 浮遊式ブイロボット 油やガスの拡散シミュレーション データ同化 早期発見

1. 研究開始当初の背景

(1)船舶の衝突・座礁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ある。それには、浮流重油に関するリアルタイムデータが必要不可欠となる。これまで、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世界的になされていない。

(2)2010年のメキシコ湾における海洋油田基地の爆発は、油やガスの生産施設からの大量流出の危険性があることを喚起した。この大事故を踏まえ、大事故を未然に防ぐための海底からの重油やガスの流出をモニタリングし、事故を早期に警戒するシステムが必要不可欠となった。

(3)浮流重油の漂流シミュレーションについて、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る。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。ま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。

2. 研究の目的

(1)本研究は 1)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、2)海底から海面までの三次元空間の重油ブ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、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。

(2)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、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、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やガスのブルームの自動追跡制御の試験と評価を行う。

(3)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、評価する。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、ブ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る。

(4)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う。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、その検証実験を行う。

(5)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を行い、各県間の重油の回収比に関して評価を行う。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する。

3. 研究の方法

(1)海底からの重油やガスのブ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

海中ロボットに搭載するセンサー類(CTD, ADCP + DVL)、音響位置計測装置の単独の性能試験を実施し、特性を把握する。

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する。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、海中ロボットの設計・製作を行う。

水槽実験、海洋実験を繰り返し、海洋ロボ

ットのソフトウェアの作り込みを行う。

メキシコ湾や新潟沖での海洋実験を行い、海洋ロボットの海中への展開とデータ収集を行う。

(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

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、評価する。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、潮流によるガスのブ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する。

新潟沖のメタンガス湧出に関するシミュレーションを実施し、実験データと比較・評価する。

(3)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

帆の面積と方向だけで海面を浮流する疑似油を自動追跡する円筒形のブイを製作し、海上で実験を行い、評価する。

油検知センサーを取り付けた新たな浮流重油自動追跡ブイロボットの設計・製作を行い、油回収実海域再現水槽や海上での実験を行い、性能の評価を行う。

(4)浮流重油漂流シミュレーションに関する研究

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う。

データ同化手法を取り入れ、SOTAB-II からの環境データや周囲の観測データの利用によって、各県間の重油の回収比の評価を行う。

4. 研究成果

(1)海底からの重油やガスのブ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

海底からの重油やガスのブ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1に海洋実験中のSOTAB-Iの写真を示す。最大潜航深度は、2,000mである。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



図1 SOTAB-Iの写真

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カメラと水中ライトを装備している。

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モード、また、機体側面に搭載されたスラスタを用いて海底面に水平に移動するモードを持たせている。運用にあたってはモードを利用し、鉛直方向の潮流分布を計測する潮流鉛直プロファイル計測モード、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がある。また、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持つ。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を通して行うマニュアルモードを持っている。

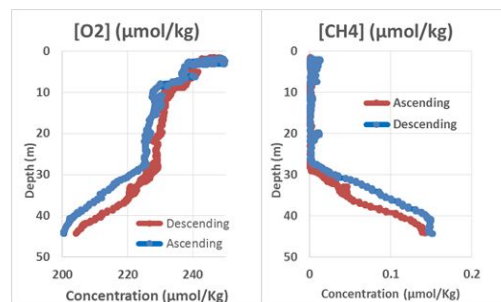


図2 メキシコ湾における溶存酸素とメタンガスの鉛直プロファイル

SOTAB-Iを用いた海洋実験を、これまで駿河湾において3回、アメリカ・メキシコ湾において1回(2013年12月6日-15日)、小松島沖において1回、富山湾において5回、上越沖において1回行った。これらの海洋実験を通して、浮力調整装置を用いた深度制御、海底との衝突回避運動を含む海底からの高

度制御,水中質量分析計を用いた in-situ での水分析 (図 2 参照), 潮流の鉛直プロファイルの計測 (図 3 参照) が可能であることを示した。

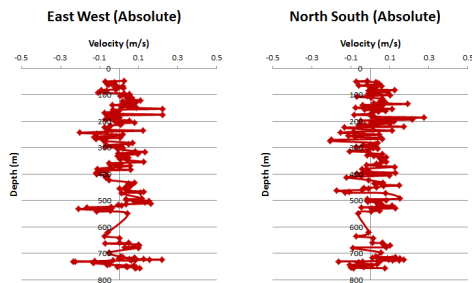


図 3 富山湾における潮流の鉛直プロファイル

(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

メタンの挙動を予測する数値モデルとして,メタンガスの移流・拡散,ハイドレートの形成と崩壊,ガスやハイドレートの溶解を取り入れたこれまでのラグランジ有限体積モデルに大阪大学で改良されたメタンガスの対流効果を取り込んだメタンガス湧出モデルを用いた。ノルウェーで実施された深海からのメタンガスの噴出実験“Deepspill”の実験値と比較し,メタンガスの挙動について,定性的な一致を見た(図 4)。

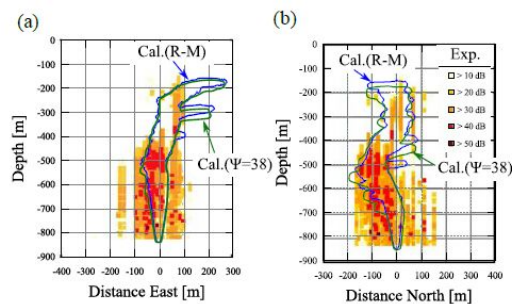


図 4 メタンガス噴出後 2 時間後のメタンガスの挙動の“Deepspill”実験と計算の比較

上越沖のメタンガスの湧出挙動を対象に,環境データ(深度,水温,塩分濃度,潮流の鉛直方向の分布)を用いて,シミュレーションを実施した。計算の結果より,メタンは海底からガス状態で湧出するとすぐにハイドレートへと相変化し,海水中を浮上することが確認された。水深 300m に到達した場合,ハイドレートの安定存在領域の限界に達し,ハイドレートからガス相へと再び相変化することも確認された。

(3) 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

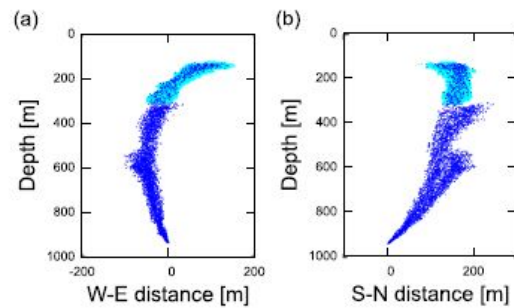


図 5 上越沖における海底から湧出するメタンガスの 5 時間後の挙動の計算



図 6 SOTAB-II の形状

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る。潮流に乗って流されるブイが,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る。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。まず円筒型のブイを用いた海洋実験から,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ることがわかり,流体抵抗の少ないブイの形状が望まれることを明らかにした。そのため,ヨット型船型を採用することにし,安定性,機器搭載に必要な排水量の観点から,セーリングヨットの船型を用い,各種機器の搭載によって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た。帆によって,浮流重油を追跡させるため,ブレーキ板を用いて調整することにした。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、形状を設計し直し、それをもとに新 SOTAB-II を製作した(図6参照)。

油検知センサーをマスト上部に取り付け、SOTAB-II が移動する重油塊の中に留まって重油塊を追跡する制御系設計を行い、SOTAB-II の重油塊の追従性能を池や海上にて検証した。油検知センサーが得るブイロボットの周囲のスキャン履歴情報をもとに、重油塊分布を近似的に表現するガウス型クラスターを行動判断の基準として、最も大きな重油塊を追跡する行動計画を編み出した。その際、ブイロボットの物理的拘束条件や周囲の環境条件を取り込み、時々刻々のブイロボットの目標方位角や速度の計算や重油塊の移動予測の計算を行う手法を採っている。

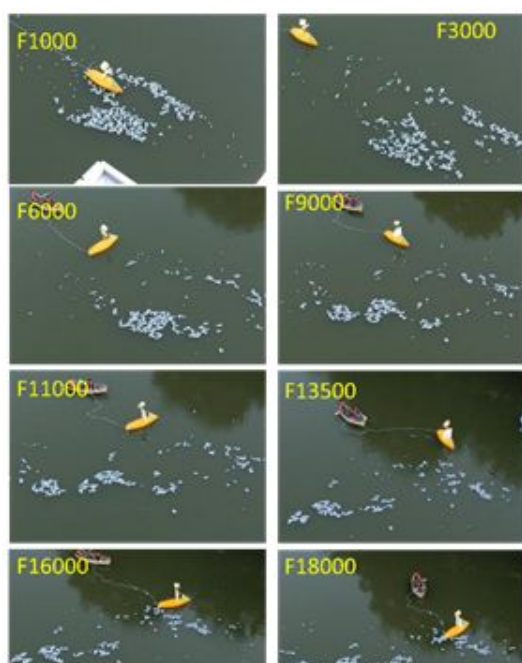


図7 SOTAB-II の疑似油の自動追従実験(実験初期に強制的にブイロボットを重油塊から引き離し、その重油塊の自動追従を行う)

(4) 浮流重油漂流シミュレーションに関する研究

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る。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・海洋モデルをベースに、気象モデルには、WRF(Weather Research and Forecasting)を用い、海洋モデルには、ROMS(Regional Ocean Modeling System)を用いた。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た。

シミュレーション上で SOTAB-II を海上に投入し、疑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た。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う。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)を用いた。データ同化には、3次元変分法を用いた。表において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、Case2 は、SOTAB-II の数を 20 台、ナホトカ号の船首からの重油も追跡させた場合を表す。Case3 は、10 台、Case4 は、30 台の場合を表す。実測の油回収率との差(RMSE)から、SOTAB-II の投入によって、予測精度が向上することがわかった。

	Obs.	w/o DA	Case 2	Case 3	Case 4
Tottori	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Hyogo	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Kyoto	7.3	0.0	12.3	11.8	10.5
Fukui	37.3	19.3	45.8	48.1	46.8
Ishikawa & Toyama	44.3	74.6	41.9	40.0	42.7
Niigata	7.6	6.1	0.0	0.0	0.0
RMSE		14.7	5.32	6.10	5.32

図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

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Mahdi Choyekh、Naomi Kato、Hidetaka Senga、他7名、Vertical Water Column Survey in the Gulf of Mexico Using Autonomous Underwater Vehicle SOTAB-I、Marine Technology Society Journal、査読有、Vol.49、No.3、2015、pp. 88-101

https://www.mtsociety.org/MTS_Journal/online.aspx

Swarn Singh Rathour、Naomi Kato、Hidetaka Senga、他4名、Spilled Oil Autonomous Tracking Using Autonomous Sea Surface Vehicle、Marine Technology Society Journal、査読有、Vol.49、No.3、2015、pp.102-116

https://www.mtsociety.org/MTS_Journal/online.aspx
Hidetaka Senga、Naomi Kato、Hiro Yoshi Suzuki、他4名、Field experiments and new design of a spilled oil tracking autonomous buoy、

J. of Marine Science & Technology、査読有、Volume 19, Issue 1、2014、pp 90-102
DOI 10.1007/s00773-013-0233-2

〔学会発表〕(計 48 件)

S.S. Rathour、Control Algorithm for Oil Spill Tracking Using ASV with Onboard Oil Detecting Sensor、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

M. Choyekh、Vertical Water Column Survey of Komatsu-shima in Japan Using Autonomous Underwater Vehicle SOTAB-I、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

Y. Yamaguchi、Estimation of Water Current Profile in Deepwater Using Autonomous Underwater Vehicle SOTAB-I、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

T. Ochi、The Effect of Liquid-Gas Interaction on Plume Structure in Blowout Flow、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

Y.Takagi、Numerical Prediction for the Methane Gas Rising from Seabed in Deep Water、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

H. Suzuki、Study on Spilled Oil Drifting Simulation Applying Data Assimilation with SOTAB-II、ISOPE 2015、2015 年 6 月 21-26 日、ハワイ(アメリカ)

〔図書〕(計 1 件)

N. Kato、Springer、Applications to Marine Disaster Prevention - Spilled Oil and Gas Tracking Buoy System、2016、220 ページ(出版予定)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/project/> 和文

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/project/en/index.html> 英文

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 直三 (KATO, Naomi)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00138637

(2) 研究分担者

鈴木 博善 (SUZUKI, Hiroyoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00252601

千賀 英敬 (SENGA, Hidetaka)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60432522

岡野 泰則 (OKANO, Yasunori)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：90204007

伴 貴彦 (BAN, Takahiko)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師

研究者番号：60454485

高木 洋平 (TAKAGI, Yohei)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：40435772

吉江 宗生 (YOSHIE, Muneo)

国立研究開発法人港湾空港技術研究所

所・新技術研究開発領域・領域長

研究者番号：80359231

田中 敏成 (TANAKA, Toshinari)

国立研究開発法人港湾空港技術研究所

所・新技術研究開発領域・主任研究員

研究者番号：40344311

有馬 正和 (ARIMA, Masakazu)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

教授

研究者番号：70264801

小林 英一 (KOBAYASHI, Eiichi)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：90346289

千葉 元 (CHIBA, Hajime)

富山高等専門学校・商船学科・教授

研究者番号：20369961

坂上 憲光 (SAKAGAMI, Norimitsu)

東海大学・海洋学部・准教授

研究者番号：20373102