

## 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

河原 翔	大阪大学大学院工学研究科
高木 洋平	大阪大学大学院基礎工学研究科
伴 貴彦	大阪大学大学院基礎工学研究科
岡野 泰則	大阪大学大学院基礎工学研究科
加藤 直三	大阪大学大学院工学研究科

### Numerical investigation of behavior of methane gas/hydrate seeping out from deep sea floor

Sho KAWAHARA	Graduate School of Engineering, Osaka University
Youhei TAKAGI	Graduate School of Engineering Science, Osaka University
Takahiko BAN	Graduate School of Engineering Science, Osaka University
Yasunori OKANO	Graduate School of Engineering Science, Osaka University
Naomi KATO	Graduate School of Engineering, Osaka University

kato@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

#### Abstract

To prevent leaked oil and gas from subsea oil and gas production facilities from spreading and causing further damage over wide areas and over time, the position of oil and gas leakage should be identified as soon as possible and adequate countermeasures should be taken to stop the leakage and spray the oil dispersants. Furthermore, diffusion of leaked oil and gas should be monitored in a wide range. We are now developing a disaster mitigation technique based on combination of numerical models on leaked oil and gas behavior and underwater robots. The robot is equipped with sensors for detecting spilled out gas or heavy oil, and automatically chases leaked oil and gas. Test run of this robot is scheduled off Joetsu in Niigata Prefecture, 2014. Seepage of methane from the seabed has been observed off Joetsu. The performance of the robot is to track and detect seeping methane bubbles or hydrate particles in the test run. In this study, behavior of methane such as state change or diffusion range has been predicted, and the search range of the robot has been suggested by applying a numerical model developed in parallel with the robot.

#### 1 はじめに

近年、活発化する海底資源の掘削に伴い、掘削基地での事故が発生している。実際に、2010年にはメキシコ湾重油流出事故が発生し、大規模な環境被害と経済的損失が生じた。これに対して様々な防災対策が構築されており、大阪大学ではSOTABプロジェクト<sup>1)</sup>が進められ、水中ロボットと数値モデルを用いた減災手段の構築を目指している。この水中ロボットは流出した重油やガス成分を検知し、それらを自動追跡できるように設計されている<sup>2)</sup>。2014年度には水中ロボットの試験運転と性能評価を兼ねて、新潟県上越沖でメタンプレュームの観測調査を行う予定である。

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

これらの現象は AUV や魚群探知機を用いて観察されてい

るが<sup>4)</sup>、プレュームの立体的な構造や詳しいメタンの拡散範囲は明らかになっていない。水中ロボットの試験運転では広大な海洋空間でこれらの現象を捉えることになり、予め探査範囲を織り込んでおく必要がある。

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

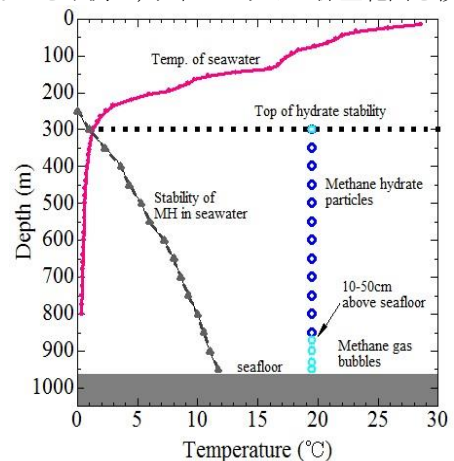


Fig. 1 Methane seepage Phenomenon<sup>3)</sup>

## 2 数値モデル

### 2.1 CH<sub>4</sub> モデル

深海底から流出するメタンの挙動を予測する数値モデルについては既往の研究が報告されており、Yapa らのグループは流出ガスをラグランジ安的に追跡する数値モデルを提案している<sup>5,6</sup>。また、鋤崎らのグループでは、メタンガスの漏洩による環境への影響を予測・評価するための数値モデルの開発が進められている<sup>7</sup>。

本研究ではメタンの挙動を予測する数値モデルとして、Yapa らの数値モデルを基として大阪大学で改良されたガス噴出モデル<sup>8</sup>を応用し、CH<sub>4</sub>モデルとして用いた。

ガス噴出モデルは、石油掘削施設における重油流出事故時に、ガス成分の拡散予測を目的として構築されたモデルである。重油流出事故時には噴出したガスがジェット/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・質量・熱量の保存を考慮しながら CV 内粒子数・相状態・濃度等をラグランジ安的に追跡する手法が採られる。海水とプリューム内の密度が釣り合う深さ(中立浮遊層)に達するとジェット/プリュームに対する計算は終了し、その後は個々の粒子を追跡する手法が採られる。

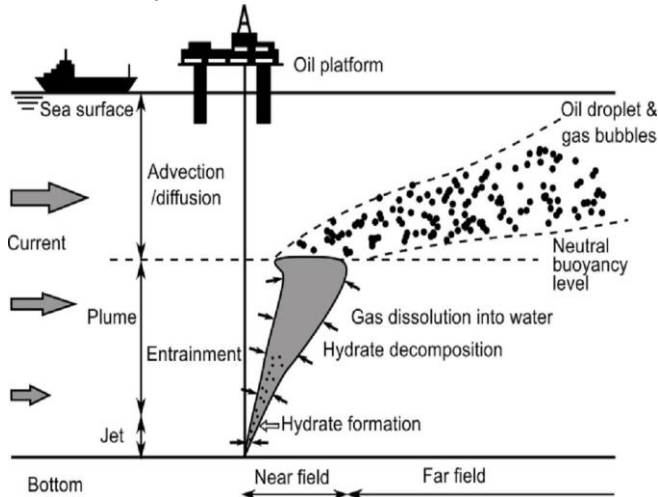


Fig. 2 Schematic diagram of oil/gas blowout in deep water<sup>5)</sup>

本研究が対象とするメタンガスの湧出現象では、メタンの放出量が少なく、ジェット/プリュームは形成されない。そのため、CH<sub>4</sub>モデルでは CV 段階の計算は直ちに終了し、個々の粒子の追跡計算が主になる。粒子の水平方向への拡散はランダム・ウォーク法を用いて計算する。粒子の漂流速度は以下の式で表される。

$$u_r = \gamma \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (1)$$

ここで、 $u_r$  (m/s) は粒子の水平方向漂流速度、 $D$  (m<sup>2</sup>/s) は水平拡散係数、 $\gamma$  は-1 から 1 の範囲のランダム数である。これより、粒子の移動は環境流体の流速を考慮して以下の式で表される。

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

ここで、 $u$  (m/s) は粒子の水平方向移動速度、 $u_w$  (m/s) は環

境流体の水平方向流速である。粒子の鉛直方向移動については水平方向と同様に拡散を考慮した上で、浮力による上昇速度も考慮する。上昇速度は気泡の形状に依存し、球形と楕円形、球形キャップの3種により分類される<sup>9)</sup>。

(1) 球形 ( $d \leq 1\text{mm}$ )

$$w = \frac{\text{Re} \cdot v}{\rho_a d} \quad (3)$$

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

$$w = \frac{v}{\rho_a d_c} M^{-0.149} (J - 0.857) \quad (4)$$

$$J = 0.94H^{0.757}, (2 < H \leq 59.3) \quad (5)$$

$$J = 3.42H^{0.441}, (H > 59.3) \quad (6)$$

$$H = \frac{4}{3} E_0 M^{-0.149} (v/v_w)^{-0.14} \quad (7)$$

$$M = g v^4 \Delta \rho / \rho_a^2 \sigma^3 \quad (8)$$

$$E_0 = g \Delta \rho d_c^2 / \sigma \quad (9)$$

(3) 球形キャップ型 ( $d > d_c$ )

$$w = 0.711 \sqrt{g d_c \Delta \rho / \rho_a} \quad (10)$$

ここで、 $w$  (m/s) は上昇速度、 $d$  (m) は粒子直径、 $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>) は環境流体の密度、 $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) は環境流体の動粘度、 $d_c$  (m) は粒子の臨界直径、 $\nu_w$  (m<sup>2</sup>/s) は水の動粘度、 $\Delta \rho$  (kg/m<sup>3</sup>) は粒子と環境流体の密度差、 $\sigma$  (kg/s<sup>2</sup>) は表面張力である。

CH<sub>4</sub>モデルでは全ての階層で海水への溶解を考慮し、熱化学的条件によってハイドレートが形成されるとき成長速度は以下の関係式から求められる。

$$\frac{dn}{dt} = K \cdot 4\pi r_h^2 \cdot \Psi \cdot (f_{dis} - f_{eq}) \quad (11)$$

ここで、 $dn/dt$  (mol/s) はハイドレート成長速度、 $K$  (mol/m<sup>2</sup>) は反応定数、 $r_h$  (m) は粒子半径、 $\Psi$  は球形からのずれを示す形状係数、 $f_{dis}, f_{eq}$  (Mpa) は溶解ガス及び三相平衡状態でのメタンのフガシティーをそれぞれ表す。本研究では  $\Psi = 38$  と計算した<sup>8)</sup>。ハイドレートの分解過程についても Eq. (11)と同様な式から分解速度を求めた。

### 2.2 環境データ

CH<sub>4</sub>モデルの入力値となる環境データについて述べる。環境データは大きく分けて二つのデータがあり、一つはメタンの湧出地点に関するデータ、もう一つは環境流体に関するデ

ータである。

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

次に、環境流体に関するデータとして、東西方向流速、南北方向流速、水温、塩分濃度がある。これらの入力値は任意の時間ごとに変化させることができ、本研究では 1 時間ごとに入力値を更新した。メタン湧出海域の観測値を用いることが理想的であるが、上越沖では全ての変数が揃った観測値のデータセットがなかったため、本研究では JAMSTEC の算出した再解析データである JCOPEP のデータセットを用いた<sup>10)</sup>。

Fig.3 は水温と塩分について、湧出地点における同時刻の再解析データとアルゴフロートによる観測値を比較したものである。各深度でよく一致していることが確認でき、別の日時、別の場所における値も一致していた。

Fig.4 は再解析データによる深度毎の流速で、それぞれ、湧出地点における 15 時の東西方向流速と南北方向流速を示している。正の値はそれぞれ東方向、北方向を示す。

東西方向流速に着目すると、深度が深くなるにつれて西向きの流速が強くなっていることが分かる。一般的には深海における流速は表層に比べて小さくなる傾向があり、尚且つ、Fig.4 に示した南北方向流速のように小さい。しかし、再解析データの値は 40cm/s と非常に強い流速になっており、明らかに異常値だと考えられる。そのため本研究では次の二通りの場合について計算した。①再解析データセットをそのまま使った場合。②再解析データセットの内、東西方向流速のデータのみ観測値に差し替えた場合。ただし、②で用いる東西方向流速については湧出地点における 2012 年 8 月 24 日 15 時の ADCP による観測値<sup>11)</sup>しか入手できなかったため、時間変化は考慮せず、定常流として扱った。深度毎の観測値を Fig.5 に示す。

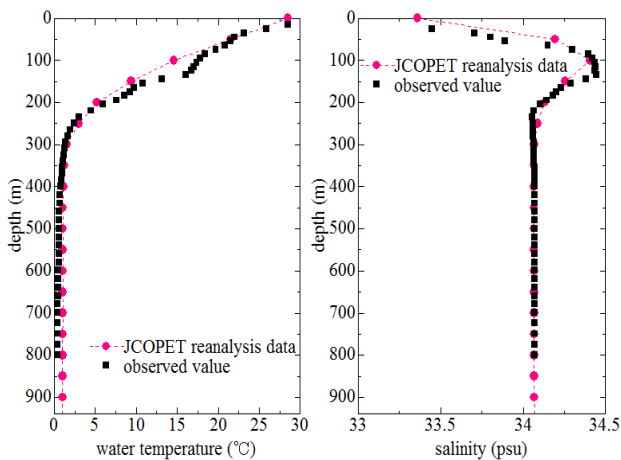


Fig. 3 Comparative diagram of temperature and salinity

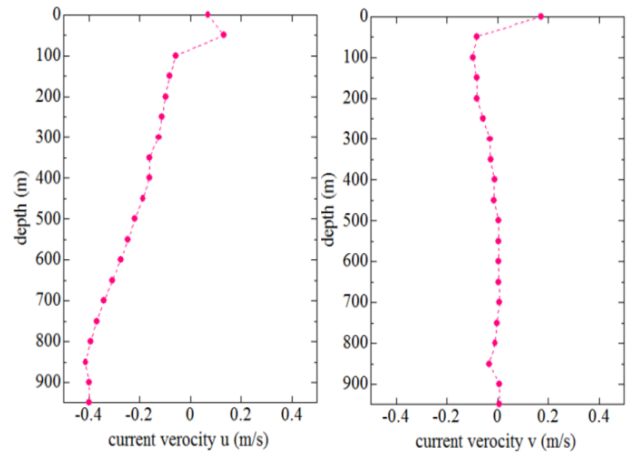


Fig. 4 Current velocity of W-E and S-N direction

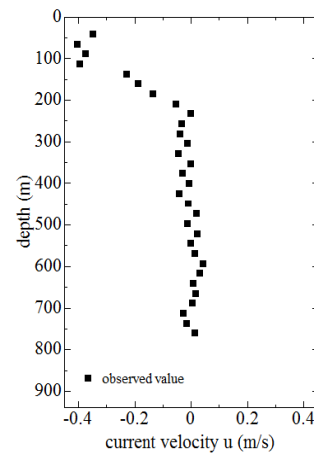


Fig. 5 Current velocity of W-E direction (observed value)

### 3 結果と考察

#### 3.1 再解析データセットをそのまま使った場合

2.2 で述べた①の場合について CH<sub>4</sub> モデルを用いて計算した結果を示す。Fig.6 は湧出開始から 5 時間後のメタンの拡散範囲を示す。青色の点がハイドレート粒子を、水色の点がガス泡を表す。

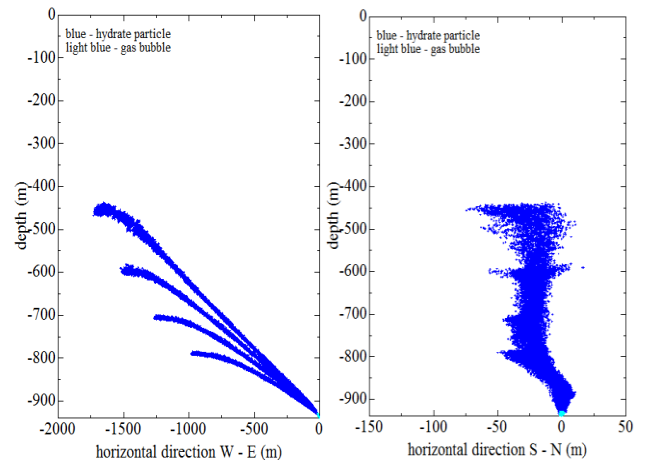


Fig. 6 Methane distribution after 5 hours

東西方向のグラフから、粒子が西向きに広く流されていることが分る。これは西向きの異常に強い流速が原因である。水平方向への移動が大きいと十分に粒子が浮上しておらず、ガス相に戻らずにハイドレート粒子のまま海中に滞留している。シミュレーションで算出された水深 500, 600, 700, 800m に到達した粒子群の上昇速度は非常に小さくなっており、鉛直方向への移動はほぼ停止していることが確認された。

実測された情報と照らし合わせても到達水深が一致しておらず、妥当な結果とは言えない。

### 3.2 東西方向流速のデータのみ観測値に差し替えた場合

2.2 で述べた②の場合について CH<sub>4</sub> モデルを用いて計算した結果を示す。3.1 と同様に、Fig.7 は湧出開始から 5 時間後のメタンの拡散範囲を示す。青色の点がハイドレート粒子を、水色の点がガス泡を表す。

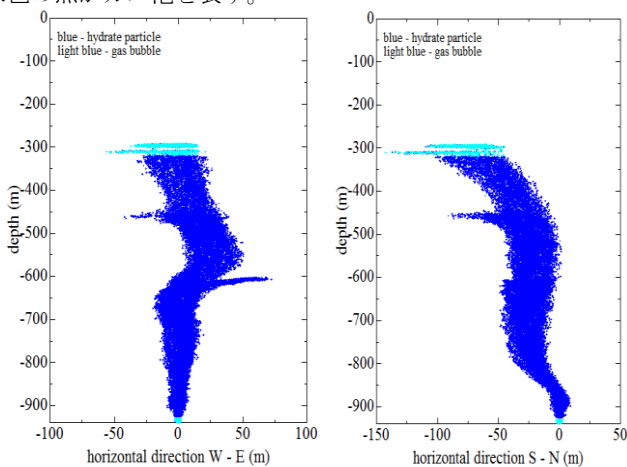


Fig. 7 Methane distribution after 5 hours

西向きの異常流速を除いたため、粒子が西向きに広く拡散せず、1本のブリュームとして立ち昇った様子が確認できる。湧出直後にガスがハイドレートに相変化して浮上を続け、水深 300m に到達すると再びガス相に戻る様子も再現できている。これは実測された情報ともよく一致している。

## 4 まとめ

本研究では、上越沖海底から湧出するメタンの挙動について数値モデルを用いてシミュレーションし、メタンの拡散範囲と相変化を調べた。

数値モデルに与える環境流体データによって計算結果は全く異なったが、観測値を用いて異常流速を修正した場合には、実測された情報と一致する湧出現象が再現された。

その結果を参考にすると、メタンの拡散は湧出点を中心に 100m<sup>2</sup> の範囲に集中しており、その範囲内で水中ロボットを運用することが効率的であると言える。メタンの拡散は流速に依存しており、試験運転当日に現場の海水流速を測定し、その流向方向に沿ってロボットを運用する必要もある。

本研究では、環境流体データが全てそろったデータセットで計算することができず、対象とした期間も 5 時間の範囲である。今後、別のデータセットを用いて検討することが必要であり、対象期間を延長して検討することも必要である。

さらに、2014 年度には水中ロボットの試験運転を兼ねて、上越沖の実地調査が行われるため、その際に得られるデータと数値モデルのデータを比較し、数値モデルの信頼性や問題点を検討していきたい。

## 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, pp. 19-35, APR, 2012.
- 2) M. Choyech, R. Kimura, N. Kato, H. Senga, H. Suzuki, M. Yoshie, T. Tanaka: Development of Spilled Oil and Gas Tracking and Monitoring Autonomous Buoy System and its Application to Marine Disaster Prevention. Proc. 23rd Int Offshore and Polar Engineering Conf, Anchorage, ISOPE 2013, 2013.
- 3) 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 of geography. 118(1), 43-71, 2009.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Chen, F. and Yapa, P. D.: "A model for simulating deepwater – Part II: Comparison of numerical simulations with "Deepspill" field experiments", J. Hydraulic Research, 41, pp.353-365, 2002.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) L. Zheng, P.D. Yapa: Buoyant Velocity of Spherical And Nonspherical Bubbles/Droplets. Journal of Hydraulic Engineering, pp852-856, 2000.
- 10) 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.
- 11) 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.