### V.5 フローアシュアランスの研究

### V.5.1 可視化実験

(1) 目的

海洋産出試験におけるガス生産実施時の生産流体の輸送における、ハイドレート再生成と再生 成したハイドレートによる生産ラインの閉塞の可能性を把握する事を目的とする。

(2) 経緯

第1回海洋産出試験の実施に際しては、坑内でガスと水を分離し、別々に洋上施設に輸送する 想定で坑内システムを設計した。このシステムでは、運転条件によっては、海底面付近において 水生産ラインの温度・圧力がハイドレートの安定条件となる可能性が高く、生産水中にガスを同 伴した場合、ハイドレートが再生成し、閉塞等の生産障害を生じる可能性が考えられた。しかし ながら、当時は流れという動的環境における検討事例は少なく、生産流体の輸送に伴うハイドレ ート再生成に関する検討を行うための十分な知見がなかった。そこで、これらの知見を深め、海 洋産出試験におけるフローアシュアランス上のリスクを低減することを目指し、2011年より Oilfield Production Technology 社(現 Oilfield Technology 社)に委託し可視化実験による検討を開 始した。

第1回試験開始前においては、水が流動する条件下にメタンが存在した場合の再ハイドレート 化の可能性、及びそれに伴う閉塞の可能性について検討を実施した。第1回試験では、当初の想 定よりも高い塩分濃度の水の生産や出砂を経験した。これを受け、第1回試験後の検討では、塩 分の影響や流体中に混入する細粒分の影響を考慮した検討を実施した。さらに第2回海洋産出試 験の前には、ハイドレートが再生成する際の気泡径やハイドレートの粒径を観察し、生成したハ イドレートの粒子の集積や管壁への付着、ハイドレートスラリーの輸送物性に関して検討した。 これらの検討結果をもとに、流動条件下におけるハイドレート生成モデルの検討や、ハイドレー トスラリーの見かけ粘性の推算モデルの構築を実施した。

(3) 内容及び成果



① 生産流体中での再ハイドレート化と再生成したハイドレートによる閉塞の検討

図1 初期の実験で使用した装置の概略と流動状況の可視化

2011 年に開始した本検討では、まず流動する中でのハイドレート生成過程の把握を目的とし

V-51 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

た実験を実施した<sup>[1]</sup>。サファイヤガラス製の観察窓を有する圧力容器を用い、ハイスピードカ メラやレーザーを用い、生成過程での流体の変化や流体性状の変化を観察し、流動環境下にお けるハイドレート再生成や粘性の定性的な変化を確認した(図 1)。

次の段階では、第1回試験で使用する装置内の流路の再ハイドレート化に伴う閉塞の可能性 に関する検討を進めた<sup>[2]</sup>。本検討では、実験装置の見直しを行い、装置の流路の基本要素であ る水平区間、鉛直区間、コーナー区間、デッドエンド部分を透明配管で構成したフローループ を構築し、流路全体を観察できる装置とした(図 2)。これにより、各区間の流れを可視化し、 ハイドレート再生成、蓄積の状況を観察することが可能となった。また、ハイドレート生成に 伴う流体の見かけ粘性の定量的な評価を可能とすべく、流量や密度などの計測も行った。これ らの実験の結果、流動条件下では、ハイドレート生成に伴う流路の閉塞の可能性は低く、また BOP 内におけるハイドレート蓄積による生産障害が起こる可能性も低いといった結果を得た <sup>[3]</sup>。



図2 フローループの概要と可視化

第1回試験において生産水の塩分濃度が高かった事、出砂が生じた事などを受けて、第1回 試験後の検討では、試験中に採取した生産水や生産水中に含まれた細粒分の影響などを考慮し た検討を実施した<sup>[4]</sup>。その結果、塩分濃度の影響によりハイドレート再生成の生じる圧力のシ フトは見られたが、砂や細粒分の粒子を含むことによる顕著な影響は見られなかった。

2015年からは第2回海洋産出試験に向けた検討を開始した。それまでの検討から、流速及 よびフローラインの形状が、ハイドレートの集積・管壁への付着といったフローアシュアラン スの問題と関係することがわかってきた<sup>[2][3]</sup>。一方で、「メタンガスと生成したハイドレート の体積割合」、「フロー中のメタンガスの気泡径やハイドレートの粒径」といった要素とフロ ーアシュアランス上の問題との関連については、明らかになっていなかった。この問題に対し、 フローループを用いた実験を実施するとともに、過去に取得したデータも活用して、ハイドレ ート生成及び見かけ粘性を推算するモデルを構築した<sup>[5][6][7]</sup>。また、開発したモデルの適用範 囲に関して整理した。

② 気液分離検討のための坑内に流入する気泡挙動の検討

坑内における気液分離を考えるうえで、坑内に流入する気体の気泡径は重要な要素の一つで ある。第1回試験の実施にあたり、グラベルパックを通過し坑内に流入する気泡の気泡径及び 挙動に関する検討を(公財)深田地質研究所に委託し実施した<sup>[1]</sup>。実験の都合上、流動環境下に おける実験ではないなど、現実の状況とは異なる実験ではあったが、グラベルの種類による気 泡径の差や流入量の影響などが確認された。ただし、これらの気泡が、坑内に流入した後の現 象については、考慮できていなかった。

第2回試験では、第1回試験において気液分離がうまくいかなかった経験から、坑内機器等の設計の見直しを行った。坑内の流動挙動の可視化については、③に後述するが、坑内流入時の気泡径についても検討を実施した。実験では、出砂対策装置を通過して坑内へ流入した気液 二相流の流動挙動や気泡径を把握する事を目的としており、平成 30 年度末までには結果が確認できる予定である。

③ 第2回海洋産出試験における気液分離に関する検討

第1回試験では、坑内における気液分離がうまく機能せず、水ラインからガスが生産される といった現象が確認された。このことから、第2回試験では、より効率的に坑内での気液分離 が可能となるよう検討を進め、坑内機器の見直しを実施した。しかしながら、2坑の内の1坑 井では、気液分離が十分にできず、水生産ラインからガスを生産する現象が発生した。

これを受けて、数値計算などを用いて、ESP やデュアルチュービング周辺の流れに関する検討を実施し、ESP に気泡が流入する可能性の評価などを実施した。

引用・参考文献

[1] 櫻井俊輔・寺尾好弘・中塚善博、2012: 生産システムの管内流動の研究、平成23年度 石油開発技術本部年報、195-197

[2] 櫻井俊輔・中塚善博・浮田利康、2013: ガス産出実験の流動確保の研究(実験と数値 解析)、平成24年度石油開発技術本部年報、230-232

[3] Sakurai, S., Nakatsuka, Y., Edwards, T.J., Hoskin, B.J., Manning, D.K., 2014: An Experimental Study for Flow Assurance of the Methane Hydrate Production Test System. In: Offshore Technology Conference.

[4] 櫻井俊輔・中塚善博、2015: 管内流動に関する検討、平成26年度石油開発技術本部年報、144-145

[5] 野々上友也・櫻井俊輔、2016: 管内流動に関する検討、平成27年度石油開発技術本部 年報、117-118

[6] 野々上友也、2017: 管内流動に関する検討、平成 28 年度石油開発技術本部年報、133-135
[7] 野々上友也、2018: 管内流動に関する検討、平成 29 年度石油開発技術本部年報、170-173

### V.5.2 管内流動に関する実験

### (1) 概要

MH層からのガス生産の際には、管内は塩水系混相流の状態になるが、高圧下での塩水系混相 流における流動様式に関するデータは報告例が少ない。また、減圧法適用時に坑底圧が大きく変 動してしまうと、ガス生産が安定しないことが考えられるため圧力制御が重要になるが、そのた めにも管内の流動様式の把握が必要である。その様な観点から、高圧下での塩水系混相流に関す るデータ取得を行うとともに、流動状態を把握し、ガスの長期生産安定に資する技術整備を進め た。具体的には、室内実験レベルのフローループ試験装置や管高さ28 mの高圧試験装置(以下、 フィールド規模検証試験装置)を導入し管内の流動特性の把握を進めた。

(2) フローループ試験装置について

図1に、垂直フローループの外観写真を、また図2にその概略図を示した。本装置では、フロー ループ装置における二相流動特性の全容を把握するために、水平流区間及び下降流区間にそれぞ れ観測窓(VW-2及びVW-3)を設置し、上昇流テスト区間に設置した多孔管流路における圧力損 失を評価するために、差圧計(DP-2)を設けている。

フローループ装置本体は、全長10.4 m、内容積6.24 Lで、下部水平管区間中央に設置された浸 水式遠心ターボポンプ(ESP)と長さ1,500 mm、内径50 mmの垂直テスト管が、内径21 mmの ステンレス配管で接続されている。フローループ装置の温度は、二重管配管の外管に、冷却装置 により温度制御されたグリコール水溶液を循環させ、内管を循環する流体と熱交換することで制 御されている。

本装置を用いた実験では、強剪断を受ける高圧二相流からマイクロバブルが生成されると、マ イクロバブルは高圧流動内で安定的に存在すること<sup>[1]</sup>、本装置の二相流ポンプでは、低圧のみな らず高圧条件下においても、単相流の場合に比べて水動力が著しく低下すること<sup>[2]</sup>、本装置にお ける気泡生成過程を画像解析により定量的に評価するなど<sup>[3]</sup>、流動様式に関する様々な知見が得 られている。



図1 フローループ装置の外観写真(垂直部分)



図 2 フローループ装置の概略図 PT: 圧力伝送器、DP: 差圧伝送器、RT: 測温抵抗体、 FT: タービン式流量計、VW: 観測ガラス窓

(3) フィールド規模検証試験装置について

フィールド規模検証試験装置を図3に示す。本装置は、坑井管を模擬した全長28 mの鉛直管を 主とした実験装置になる。現場試験で得られた条件を基に、圧力1.0~3.0 MPa、塩分濃度0~7.0 wt%、ガス空塔速度0.25~2.0 m/s、液空塔速度0.25~1.2 m/sの条件で、管内流動に関する基礎 データの蓄積が可能となった。

本装置の鉛直管の下部から液とガスを供給し、気液分離部で分離したガスは鉛直管頂部へ、液 は水分離ラインへ流した状態で、高圧・塩水条件下の流動様式やガスホールドアップに対する気 液流量の影響などを観測した。これらの試験結果の一例を図4に示す。ガスホールドアップは、ガ ス空塔速度、液空塔速度とともに増加傾向が見られる<sup>(4)</sup>。これは、液空塔速度の増加と共に流動 場の乱れが増すことにより、微細気泡の発生が促進され、液相中のガス滞留時間・滞留量が増加 するためと考えられる。本実験装置を通して、流動様式に関する様々な知見を得ることが出来る と考えている。



図3 フィールド規模検証試験装置鉛直管 及び 鉛直管概要図



図4 様々な液空塔速度におけるガス流速とガスホールドアップの関係 (空塔速度は鉛直管内径2 inch 基準、Pw:圧力(鉛直管下部)、jL:液空塔速度)

引用・参考文献

[1] Shimizu, T., Yamamoto, Y., Tenma, N., 2016, : Shear-Induced Microbubble Generation at High Pressures, J. Chem. Eng. JPN, 49 (6), 519-525

[2] Shimizu, T., Yamamoto, T., Tenma, N., Narita, H., 2015, : Electric Submersible Pump Performance under Methane/Water/Methane Hydrate Pipe Flows, Procs. 25th Int. Ocean and Polar Eng. Conf., ISOPE, 132-138

[3] Shimizu, T., Yamamoto, Y., Tenma, N., 2016, Experimental Analysis of Two-Phase Flows and Turbine Pump Performance, Int. J. Offshore and Polar Eng., 26 (4), 371-377

[4] 柴田尚人・高橋正浩・天満則夫・守屋英教、2018:圧力と塩分濃度が鉛直管を上昇する気液 二相流の流動状態に与える影響に関する研究、混相流シンポジウム講演論文集

## V.6 生産性向上の研究

### V.6.1 坑井刺激と改修技術

(1) 概要

長期にわたり安定な生産を行う上で、出砂現象、スキン形成、細粒砂蓄積、圧密による浸透性 低下や MH 再生成による流動障害などの生産障害対策・抑制技術の開発が必要である。例えば、 長期のガス生産を行う場合には、粘土やシルトなどの細粒分が坑井近傍に集まり、スキンを形成 することで浸透率が低下する懸念がある。このような浸透率低下に伴う生産障害対策として、坑 井内から地盤に振動を与えて(加振)、細粒分を移動させる方法を検討している。

また、減圧法適用に伴う圧密変形などにより浸透率の低下による生産障害も考えられるために、 水圧破砕法(フラクチャリング)による流路形成などの改善方法の可能性も検討している。

(2) 超音波照射法による貯留層障害対策技術

減圧法適用時には、分解したガスや水の移動に伴って、地層に含まれるシルトや粘土といった 細粒分が生産井に向けて移動し、生産井近傍に集積する可能性がある。MH 層を構成する骨格粒 子の間隙に細粒分が集積すると、生産井近傍における流体の浸透性が低下し、ガス生産レートの 低下につながる恐れがある。また、坑井近傍に細粒分が集積した浸透率の極めて小さい層(スキ ン層)が形成されると、坑井内を減圧しても MH 層の圧力が下がらず、所定のガス生産量が得ら れないという問題が懸念されている。そこで、生産井近傍に粘土やシルト(細粒分)が集積して、 浸透率が低下する貯留層障害の対策技術として、図1に示すように坑井内から地盤に振動を与え、 地盤粒子の孔隙を閉塞する細粒分を水とともに移流させ、坑井近傍の浸透率を改善する方法の研 究開発を行っている<sup>[1] [2]</sup>。

貯留層障害には、細粒分の粒径や含有量、粒子の間隙径などが関連していることが分かってき ており、室内実験などで、これらの因子を基に加振効果の検討・整理を行った。具体的には、現 場の貯留層特性に合わせた粒度分布の試料を用いて、現場試験の条件を参考に、注水実験を行う ことにより、実坑井では詳細を確認することができない目詰まり過程の把握や、加振による浸透 率改善効果の検証などを室内実験にて進めている。装置としては、1次元流れの浸透実験用の小 型実験装置や、放射状の流れが扱える中型実験装置などを準備して検証を進めている。

成果の一例として、図2に示す小型実験装置を用いた加振による浸透率の改善効果を示す。実験 では、数百Hz - 40kHzの間で加振周波数を変化させて、10数kHz - 20kHzの場合に最も顕著な改 善効果が確認された。また、実験終了後に試料を回収して、試料内の細粒分含有率の分布を調べ たところ、改善効果の高かった10数kHz - 20kHzの振動を加えた試料で除去できる細粒分の量(振 動の影響範囲)が最も多いことも確認された。

1次元流れではあるが、孔隙内の細粒分を取り除き透水性の改善を行うためには、10数kHz-20kHzの加振周波数が最も効果が高い結果となったので、さらに放射状流れで、規模を大きくし た場合の加振周波数に関するデータ取得などを進めている。実験に必要な加振器の試作や、室内 実験によるデータ蓄積を行うことで、現場での適用可能な機器の概念設計などが可能になるもの と考えている。



図1 超音波による細粒分除去技術の適用イメージ



図2 小型実験装置(試料寸法: φ5cm×10cm、1次元流れ)の結果

(3) フラクチャリング(水圧破砕)

減圧法適用時には地層の圧密変形が生じ、その影響で坑井周囲の浸透率が低下する可能性が高 く、その対策も必要である。その対策として、フラクチャリング(水圧破砕)の利用が考えられ る。すなわち、MHを胚胎する地層にフラクチャリングで人工フラクチャーを作成できれば、そ れを介して減圧・加熱等の刺激を広範囲に及ぼすと同時に発生したメタンガスを効率良く回収し、 さらには、坑井周囲の低浸透部による生産障害を解消できると考えられる。しかしながら、MH を胚胎する地層を構成するのは未固結堆積物であり、従来のフラクチャリングで想定されている 固結した岩石とは特性が大きく異なっている。そこで、砂泥互層を成すMH層に対するフラクチ ャリングによる浸透率の改善の可能性について実験と解析を進めている。

具体的には、現場で採取されたMH堆積層の粒径分布を模擬した試験片を作成し、フラクチャ リングの室内実験を行っている。実験では、試験材料の力学特性の違いによって、フラクチャー 伸展挙動にも違いがみられる結果になった。また、フラクチャリング流体として機械油、水にベ ントナイトを混ぜた流体(ベントナイト流体)など数種類の粘性と性状の異なる流体を用いて、その 効果について確認した。さらに、フラクチャー伸展挙動を理解するために、粒状体個別要素法 (DEM)による数値解析を行い、せん断すべりの発生とそれによる粒子間の間隙の形成過程の違 いが、フラクチャーの伸展挙動に大きく影響する可能性を示すなど、未固結堆積層におけるフラ クチャリングの適用の可能性は大きくなっている<sup>[3][4][5]</sup>。さらに室内実験などを通して、データを 蓄積することで、現場での最適な適用条件が明らかになるものと考えている。

(4) まとめ

スキン形成や圧密変形などによる浸透率の低下に対する対策技術として、超音波による加振や フラクチャリングなどの手法について紹介した。超音波による加振では、1次元流れでの検討を経 て、さらに規模を大きくした放射状流れでの室内実験による検討なども進めているが、現場での 適用を可能とするための機器開発や検証なども進めていく必要がある。また、現場でのフラクチ ャリングの適用を考えると、更に多くの実験条件下でのデータ取得や数値シミュレーションなど によるメカニズムの解明などの検討を進め、適用可能な条件を明確にする必要がある。

引用・参考文献

[1] 露木健一郎、藤田雄一、三浦悟、田島大輔、2014:細粒分による生産障害の対策に関する研 究ー細粒分による目詰まり形成、加振による細粒分の流出について、第6回メタンハイドレート 総合シンポジウム講演集,80-85

[2] 露木健一郎、三浦悟、海老剛行、北本幸義、2018:メタンハイドレート生産障害対策のための加振による透水性の改善手法 -加振周波数と透水性改善効果の関係-、土木学会第73回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-147.

[3] Shimizu, H., Shazree, M., Ito, T., Narita, H. 2014, Flow-coupled DEM modeling for hydraulic fracturing in unconsolidated sands, *Proc. the 14th International Conference of the* 

International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (14th ICIACMAG), MS 10-07.

[4] 吉川悠利,清水浩之,伊藤高敏,天満則夫,長尾二郎,2016: 個別要素法による未固結地層フ ラクチャリング挙動に影響を与える要因の検討,第8回メタンハイドレート総合シンポジウム, 21-25.

[5] 伊藤高敏, 天満則夫, 2018: 未固結砂層フラクチャリングに伴う破壊挙動の基礎的検討, 石 油技術協会誌, 83(6), 491-498

#### V.6.2 增進回収法

#### (1) 概要

減圧法とは、高圧低温下の安定条件にあるMHを分解条件下にする生産方法であり、分解過程 では、吸熱反応がおこっている。その際にはMH周辺の地層の顕熱等も利用した熱供給により分 解が進行するため、そのバランスによっては未回収分が生じる可能性がある。そのため、地層温 度を回復し二次回収するための生産増進法の研究も進めている。

検討している生産増進法としては、氷の生成潜熱をハイドレート分解に用いる強減圧法、2坑井 間で電流を通して、その抵抗によって地層を加熱する通電加熱法、MH層内での部分酸化による 発熱を加熱源とする部分酸化法やCO<sub>2</sub>-水エマルジョンを地層内に圧入し、CO<sub>2</sub>ハイドレートの生 成熱を用いてMHを分解するCO<sub>2</sub>-水エマルジョン圧入法などが挙げられる。

(2) 強減圧法

減圧法は、貯留層内の圧力を減圧することで、初期の貯留層温度と減圧後の貯留層内圧力に対応する三相平衡温度との温度差に相当する顕熱をハイドレートの分解に利用する手法である。そのため、顕熱を消費し終えた後はハイドレートの分解が滞り、生産レートが減退することが知られており、一般に貯留層内のハイドレートを通常の減圧法のみですべて採収することはできない。そこで、MHの4重点(ハイドレート相・水相・ガス相が共存する点,温度273k,圧力2.56MPa)より低い圧力まで減圧することで、貯留層内に積極的に氷を生成させ、この氷の生成潜熱を用いて生産性を向上させる方法として、強減圧法の開発を進めている「1」。図1に示すAIST北海道センターにある世界最大の室内試験装置 High-pressure Giant Unit for Methane Hydrate Analyses (略称; HiGUMA)を用いて室内実験を行い、実際に強減圧法による生産増進効果の検証や数値シミュレーションによる検討などを実施した。

図2は、HiGUMAを用いた実験結果の一例であるが、通常の減圧法から強減圧法に移行した際の回収率の変化について、初期の貯留層温度とハイドレート分解時の温度の差に対して整理した グラフである。通常の減圧過程では、分解時の温度の低下によって初期の貯留層温度との差が大 きくなり、ハイドレートの分解潜熱として消費することができる貯留層の顕熱が増加するため、 回収率はほぼ線形的に増加した。一方、強減圧に移行する2.5 MPaから2.1 MPaへの減圧過程では、 氷の生成に伴い分解時の温度が氷点に維持され初期の貯留層温度との差は変化しなかったが、氷 の生成潜熱が供給されることでハイドレートの分解が促進され、回収率が大きく増加し、増産効 果が期待される結果となった。なお、強減圧法では、通常の減圧法より坑底圧が低くなるためハ イドレートの再生成が生産におけるリスク要因となる懸念もあり、その適用条件について更なる 検討が必要と考えられる。



図1 大型室内試験装置(High-pressure Giant Unit for Methane Hydrate Analyses)の本体部



図 2 通常減圧から強減圧移行時の回収率の変化<sup>[2]</sup> Reproduced from Ref. [2] with permission from the Royal Society of Chemistry.

(3) 通電加熱法

通電加熱法は、重質油の地下回収技術の一つとして電気エネルギーを用いた熱攻法 (Electric/Electromagnetic Enhanced Oil Recovery, EEOR 攻法と呼称)技術として多くの適用例 が報告されている通電法の一方式である抵抗加熱法を基にしている。抵抗加熱法は貯留層内に直 流電流を流し、主に地層水の抵抗によってジュール熱を発生させ、加熱する方法であり「地下か らの天然ガス生産法」として MH を含めた天然ガス回収法として既に米国にて特許取得済みの技 術である<sup>[3]</sup>。図3に示すように本手法は最低2坑の垂直井孔から電流を通電し、適当な電圧を維 持することで地中の MH 層の加熱を行い、MH を分解し、天然ガスを回収する手法になるが、通 電電流が、通常交流電流数百アンペア - 1,000 アンペア程度、電圧は数百ボルト - 1,000 ボルト以 上を想定しており、通電電力容量を考慮すると、生産増進法として適用が困難と考えられた<sup>[4]</sup>。



図3 通電加熱法の概念図

そこで、現場での現実的な通電可能性を検討するために、室内実験にて基礎データの取得を進めてきた。具体的には堆積層に電解質として海水を模擬した NaCl 溶液を通水し、その電解質への交流による通電加熱と、減圧法を組み合わせることでメタンガスの回収効率を増加させることを試みた。これまでに、図4に示すような室内実験装置を用いて、減圧実験下での通電加熱実験を行った。模擬 MH 試料を用いて減圧実験のみと、10MPa から 3MPa への減圧後約 10 分後からコアの通電加熱を行う通電加熱実験を行ったところ、両者の実験に共通して減圧実験のみでは MH の分解に伴う吸熱反応とコア温度低下により放出ガス量が間欠的に変化するが、通電加熱においては定常的な生産速度で、かつ減圧のみと比較すると生産速度が約 1.5 倍 - 2 倍に増加するなどの増進効果が確認された [5]。現場での適用を検討するためには、さらに様々な条件下での基礎データの取得やフィールドスケールでの数値シミュレーションなどによる検討が必要になると考えられる。



図4 模擬メタンハイドレート試料を用いた通電加熱実験

(4) CO<sub>2</sub>-水エマルジョン圧入法

CO<sub>2</sub>-水エマルジョン圧入法は、地層温度の低下に対して、CO<sub>2</sub>ハイドレートが相平衡となる 10℃程にCO<sub>2</sub>ハイドレートの生成熱を用いて、数℃ほど加温し、生産に利用する方法である。孔 隙率40%程の水飽和した豊浦砂を用いた室内実験では、CO<sub>2</sub>-水エマルジョンを圧入して、CO<sub>2</sub>ハ イドレートが生成すると、理論計算値と実験とシミュレーションの結果から、砂層を約9℃温度 上昇させる熱量が得られることを確認している<sup>[6]</sup>。

そこで、本手法の現場での適用条件などの検討・整理が進められている。例えば、CO2ハイドレートを生成するためには、CO2とほぼ同容積の水の注入が必要であるが、この水として減圧法 適用時に得られる生産水や海水自身が利用できれば、より現場へ適用に繋がると考え、海水や塩 化ナトリウム(NaCl)水溶液を利用した場合のエマルション生成を図5の装置を用いて確認してい る。また、エマルション中に多数浮遊するCO2滴径を微細化できれば、表面積が大きくなるため CO2ハイドレートの生成をさらに促進する効果が期待されるため、微細化に関する検討などを行 った。これらに関連して現場にて適用する場合のCO2-水エマルジョンの注入装置に関する概念設 計や、設計に必要なパラメータなどの取得を行っている。



図5 CO<sub>2</sub>-水エマルジョン圧入法の室内実験装置

(5) 部分酸化法

MH 層への熱を投入する手法として、MH 堆積層内及び坑井近傍にてハイドレートが分解した メタンの一部、及び、酸化熱発生を想定する領域付近に存在するその他の有機物を酸化させ、そ の酸化発熱を加熱源として MH の分解に有効利用する部分酸化法による生産増進法の可能性につ いても検討している。

図 6 に、地層内部分燃焼加熱法の概念図を示す。本研究の対象となる貯留層では、ハイドレート の分解に伴い遊離水が生成し、反応場として想定される領域は水飽和率の高い条件となるため、 酸化反応は液相中での酸化が主体となって反応が進行することが想定される。そこで、低温高圧 条件下の多孔質体中や坑井内の環境を再現した室内実験装置を用いて、酸化発熱による堆積層内 の発熱効果に関する実験を行い、酸注入の効果が大きいことを確認した<sup>[7]</sup>。また、堆積層模擬実 験装置を用いて酸と堆積物を反応させる部分加熱実験を行い反応速度などの各種パラメータを収 集した。これらのパラメータを基に部分酸化発熱による生産増進の可能性に関して数値解析を行 った。対象とした貯留層モデルは、孔隙率 40%、MH 飽和率 40%で、泥層・砂層・泥層の1ユニッ トとして、酸注入プロセスにおける解析を行ったところ、鉱物の溶解に伴う発熱により形成され た高温域が時間経過と共に圧入井から生産井の方へ拡大し、MH の分解を促進し、ガスの増産効 果が確認された。また、注入された酸や水相に溶解した鉱物によって分解促進や貯留層内の浸透 性の改善効果も期待されることが分かった。

さらに様々な条件下での基礎データの取得や数値シミュレーションによる検討が必要であり、 実験データを活用して MH の増産効果の評価を解析して実証的な結果を得た<sup>[8]</sup>。



図6 部分酸化による MH 生産促進及び浸透率改善効果の概念図

# (6) まとめ

生産増進法として、強減圧法、通電加熱法、CO2-水エマルジョン圧入法及び部分酸化法につい て紹介した。これらの手法は室内実験や数値シミュレーションなどによって原理や増進効果の確 認が行われた。しかしながら、現場での適用を考えると、更に多くの実験条件下でのデータ取得 やフィールドスケールでの数値シミュレーションなどによる検討が必要である。また、現場での 適用が可能な機器の概念設計、機器開発や検証なども行う必要がある。

# 引用・参考文献

[1] Konno, Y., Uchiumi, T., Oyama, H., Jin, Y., Nagao, J., Masuda, Y., and Ouchi, H., 2012 : Dissociation Behavior of Methane Hydrate in Sandy Porous Media below the Quadruple Point, Energy Fuels, 26(7), 4310–4320

[2] Konno, Y., Jin, Y., Shinjou, K., Nagao, J., 2014 : Experimental evaluation of the gas recovery factor of methane hydrate in sandy sediment , RSC Advances, 4, 51666

[3] Method of producing natural gas from a subterranean formation, United States Patent: 3916993, Katz; Marvin LaVerne (Dallas, TX)

[4] Minagawa, H., Ito, T., Kimura, S., Kaneko, H., Narita, h., 2014 : Depressurization and Electrical Heating of Hydrate Sediment for Gas Production, INTERNATIONAL Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 24, No.3, 218-223.

[5] Minagawa, H., Ito, T., Kimura, S., Kaneko, H., Noda, S., Tenma, N., 2017 : Laboratory-scale Experiment of Depressurization and Electrical Heating of Methane Hydrate Sediment for Gas Production, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 50, 147-156.

[6] 池川 洋二郎、2007: CO2 ハイドレートの生成熱を用いた地層温度上昇によるメタンハイド

レートの分解可能性に関する室内実験と解析による評価,土木学会論文集, Vol.63, No.4

[7] Nakano, Y., Kaneko, F., Sakamoto, Y. and Komai, T., 2018 : Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference, 199-204

[8]中野裕介,中村謙吾,坂本靖英,駒井 武、2018:酸注入による原位置発熱を利用したメタン ハイドレート貯留層からのガス増進回収効果の評価,石油技術協会誌,Vol.83(6),162-169. V.7 気象・海象及び海底地盤の安定性の研究

### V.7.1 気象・海象

V.7.1.1 海域流況調查

(1) 目的と経緯

海洋産出試験海域は、水深 1,000m 前後で黒潮流軸の北側にあたり、黒潮の直接的な影響が少 ないと推測されるものの、黒潮流軸の変動や蛇行により流況はその反流や分岐流あるいは暖水塊、 冷水塊の影響を受けることが予想される。また、過去実施された短期間の流況観測結果からも表 層、中層、底層でそれぞれ複雑な流れを示すことが確認されている。このように当該海域の流況 は、複雑な流れがあることが想定されることから海底に設置される坑口装置と洋上生産設備を配 置する浮体構造物間を繋ぐライザーの挙動等について予め検討する必要が生じた。

しかし、当該海域において長期間の流況観測事例はなく、流況解析を行うためのデータが不足 していたため、海洋産出試験が実施される東部南海トラフ海域の第二渥美海丘周辺をモデル海域 として、3測点において1年間の長期流況観測を実施し、海洋産出試験に使用するライザーの挙 動解析等に資する詳細な流向・流速データを取得し流況を把握することとした。

(2) 内容及び成果

① 内容

調査は、2011 年 12 月から 2012 年 12 月までの 1 年間、AC-1、AC-2、AC-3 の 3 地点(表 1、 図 1)において、ADCP<sup>\*1</sup> (Acoustic Doppler Current Profiler:超音波多層ドップラ流向流速計) を取り付けた係留系(図 2)を用いて実施された。回収したデータ類は、QC (Quality Control: 品質管理)及び各種補正を施した後、深度ごとにそれぞれ時系列データとして整理し、統計処理 した後、流向流速については全観測層の観測層ごとに時系列ブラフ、最大流速、平均流速、出現 頻度、潮流楕円、スティックダイヤグラム、ベクトル図、出現確立毎の鉛直プロファイル等、水 温については各地点の観測層ごとの時系列グラフとしてとりまとめた。また、潮位については係 留系最下部に取り付けた水位データに補正処理を施し MSL (Mean Sea Leve:平均水面)を基準 として時系列グラフを作成するとともに、調和分解を実施し主要分潮を算出した。

**※**1 : ADCP

送波器から発射した超音波の水中浮遊懸濁粒子からの反射波のドップラ効果による周波数変化 を測定して流向流速を測定するもの。

地点No.	計測期	間(JST)	位置(W	가 (m)		
	開始	終了	緯度	経度	小木(11)	
AC-1	10-Dec-'11 12:00	08-Dec-'12 07:20	33° 56.683′ N	137° 17.992′ E	1135	
AC-2	07-Dec-'11 15:20	11-Dec-'12 07:10	33° 53.883′ N	137° 15.757′ E	1278	
AC-3	10-Dec-'11 15:50	07-Dec-'12 08:10	33° 55.862′ N	137° 19.923′ E	854	

表1 調査地点と観測期間



### 2 成果

ア 測点 AC-1 における最大流速と平均流速(表 3) 観測期間中の最大流速は2012年10月8日05:00 (JST:日本標準時)に観測された75m層の1.08m/s で、このときの流向は267°であった。他の層にお ける最大流速は171m層[0.98m/s(流向267°)、 2012年7月25日08:30(JST)]、395m層[0.79m/s (流向337°)、2012年11月30日16:40(JST)]、 859m層[0.37m/s(流向149°)で2012年11月 10日06:25(JST)]、1,128m層(底上7m)で[0.51m/s (流向52°)2012年11月13日00:10(JST)]で あった。

一方、観測期間中の平均流速は、75m 層 0.37m/s、 171m 層 0.33m/s、395m 層 0.22m/s、859m 層 0.09m/s、 1,128m 層では 0.12m/s となっている。

イ 測点 AC-2 における最大流速と平均流速(表 4)
 観測期間中の最大流速は、2012年10月19日23:20
 (JST)に観測された 57m 層の1.22m/s で、このと



きの流向は 106°であった。他の層の最大流速は 185m 層 1.05m/s(流向 205°)、2012 年 10 月 3 日 06:10(JST)]、393m 層 [0.75m/s(流向 313°)、2012 年 12 月 1 日 06:20(JST)]、839m 層 [0.46m/s(流向 308°)、2012 年 6 月 20 日 18:35(JST)]、1,179m 層(底上 7m)で[最大 0.58m/s(流向 328°) 2012 年 8 月 3 日 15:30(JST)]であった。

一方、観測期間中の平均流速は 57m 層 0.37m/s、185m 層 0.31m/s、393m 層 0.21m/s、839m 層 0.13m/s、最下層の 1,179m 層では 0.10m/s となっている。

ウ 測点 AC-3 における最大流速と平均流速(表 5)

観測期間中の最大流速は、2012 年 1 月 21 日 15:50 (JST) に観測された 49m 層の 1.09m/s で、 このときの流向は 247°であった。他の層の最大流速は 177m 層 [1.05m/s (流向 318°)、2012 年 11 月 25 日 22:10 (JST)]、385m 層[0.73m/s (流向 326°)、2012 年 11 月 30 日 14:00 (JST)]、 745m 層 [0.51m/s (流向 259°) 2012 年 11 月 16 日 06:55 (JST)] となっているが、847m 層

(底上 7m)では 2012 年 6 月 20 日 01:40(JST)に最大 0.75m/s(流向 307°)の強い流れを観 測している。

一方、観測期間中の平均流速については 49m 層 0.38m/s、177m 層 0.33m/s、385m 層 0.23m/s、 745m 層 0.14m/s、847m 層 0.13m/s となっている。

③ まとめ

AC-3の底層では平均流速 0.12m/s と微弱な流れを示すが、しばしば第二渥美海丘北西側斜面に 直交する 0.5m/s 以上の強い NW 流を観測したことから、海洋産出試験地点周辺も同じような特 徴を示すと推測される。また、A-1、AC-2、AC-3 ともに上層、中層、下層、底層ではしばしば同 時刻にそれぞれ全く異なった流向を観測することがあったが、これは当該海域の流況の特徴であ ると考えられる。

当該海域における表層の流況は、NE-SW 流が卓越していること及び潮流楕円から潮汐力(起 潮力)によって支配されていることがわかった。また当該海域は、黒潮流軸変化や蛇行により発 生する反流や分岐流あるいはこれらに付随する暖水塊や冷水塊の影響が強いことがわかった。ま た、第二渥美海丘斜面付近の底層流は、流向流速の時系列変化などから水温や密度によって引き 起こされる密度流や海底地形等のほか内部潮汐の影響を受けていると推測される。

参考文献

志村栄一・岡山晴高(2012):大水深における係留系を用いた長期流況観測,第23回海洋工学シンポジウム,日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会,2012年8月.

志村栄一・岡山晴高(2013): 第2渥美海丘周辺海域の流況, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集,AIST,pp.121-128.

V.7.1.2 風及び波

目的及び経緯

風及び波浪は、船舶や浮体式構造物に大きな影響を与える主要な外力として洋上における作業

限界などを検討するうえで必要不可欠な要素である。ISO (International Organization for Standardization:国際標準化機構)などの国際規格では、作業船や洋上作業の限界となる風速と 波高等の再現期待値を明確に規定している。

とくに外洋における作業は、陸地から大きく離れているため人命の安全のために海象条件が作 業限界を超える前に作業海域を離脱し、高波浪の影響が及ばない海域あるいは近隣港湾へ避難し なければならない。

したがって、洋上作業においては事前に対象となる海域の風速や波高、波の周期等の再現期待 値を算定するとともに作業限界を明確に規定しておく必要がある。また、作業限界の基準となる 風速や波高、周期の特性や出現率等は、海域によって大きく異なるため海域毎に算定する必要が ある。

以上のことから、第二渥美海丘海域において、3秒間平均風速(最大瞬間風速)、1分間平均風 速、10分間平均風速、1時間平均風速、有義波高、有義波周期、有義波波長、最大波高、最大波 周期について1年、5年、10年、25年、50年、100年の再現期待値及び1時間平均風速並びに 有義波高の非超過確率等、表1に示す項目を算定することとした。

	項目	再現期待値	非超過確率	備考
	3秒間極値風速(最大瞬間風速) (U <sub>3sec</sub> = U <sub>max</sub> )	0	-	$U_{3\rm sec} = U_{\rm max} = 1.25 \times U_{10\rm min}$
	1分間平均風速 (U <sub>1min</sub> )	0	-	$U_{1\min} = 1.11 \times U_{10\min}$
風	2分間平均風速 (U <sub>2min</sub> )	0		$U_{2\rm min} = 1.08 \times U_{10\rm min}$
	10分間平均風速 (U <sub>10min</sub> )	0		日本気象協会波浪推算DB
	1時間平均風速 (U <sub>1hour</sub> )	0	0	$U_{1\mathrm{hour}} = 0.92 \times U_{10\mathrm{min}}$
	有義波高 (H <sub>1/3</sub> )	0	0	日本気象協会波浪推算DB
	有義波周期 (T <sub>1/3</sub> )	0	-	$T_{1/3} = 4.1 \times \sqrt{H_{1/3}}$
波	有義波波長 (L <sub>1/3</sub> )	0	-	$L_{1/3} = 1.56 \times T_{1/3}^2$
	最高波波高 (H <sub>max</sub> )	0	-	$H_{\rm max} = 1.86 \times H_{1/3}$
	最高波周期 (T <sub>max</sub> )	0	_	$T_{\rm max} \approx T_{1/3}$

表1 算定項目一覧

(2) 内容及び成果

① 内容

解析には、気象庁 GPV (Grid Point Value: 格子点値) モデルによる海上風をもとに第三世代 波浪スペクトルモデル (WAM: Wave Modelling group)を用いて推算された 1951 年から 2013 年までの 63 年間分の一般財団法人日本気象協会波浪推算データベースである「全球波浪推算デー タベース (1951-2013 年)」、及び「日本沿岸局地波浪推算データベース (2001-2013 年)」を使用 した (表 2)。

これらのデータは、補正・同化した後精度を確認したうえで統計処理を施すとともに経時変化 を求めた後、「方位別、年別・月別出現頻度」及び「再現期待値及び非超過確率」を算出した。 なお、再現期間は1、5、10、25、50、100年とし、非超過確率の区分は10、20、30、40、50、 60、70、80、90、91、92、93、94、95、96、97、98、99%とした。

項目	内	容											
対象海域	第二渥美海丘海域(33°56′N、137°19′E)												
使用データ	<ul> <li>一般財団法人日本気象協会 波浪推算</li> <li>&lt;全球波浪推算データベース&gt;</li> <li>概要:NCEPデータ、気象庁GPVモデルデー第三世代波浪スペクトルモデルを</li> <li>期間:1951年~2013年</li> <li>間隔:空間分解能0.5°(約50km)、時間項目:平均風速、同風向、有義波高、有</li> <li>&lt;日本沿岸局地波浪推算データベース&gt;</li> <li>概要:気象庁GPVモデルデータによる海」第三世代波浪スペクトルモデルを</li> <li>期間:2001~2013年</li> <li>間隔:空間分解能2′(約3.7km)、時間項目:平均風速、同風向、有義波高、有</li> </ul>	<b>1</b> データ/ -タによる。 ・ 使用 引義版局部( と し 使用 と に 使用 と に ( 分 縦 周 、 ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) (	< −ス 毎上風をも。 時間 1次モーメ: こ波浪を推算 時間 1次モーメ:	とに波浪を シト周期)、 <sup>真</sup> ント周期)、	推算 、平均波向 、平均波向								
データ期間	1951~2013年(60年間)												
	風速、波高、周期、波向データは、統計処理を施し、経時変化及び出現頻度を求めると ともに気象学的解析を行った。												
	百日	通	年	月	別								
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	全方位	方位別	全方位	方位別								
統計処理	波高階級別出現頻度         〇         〇         〇           周期階級別出現頻度         〇         〇         〇         〇           風速階級別出現頻度         〇         〇         〇         〇												
(出現頻度)													
	波高階級別出現頻度	0	0										
				方位》	<u> 别:16</u> 方位								

表2 解析に用いたデータ

※1:GPV = Grid Point Value: 格子点值

※2:NCEP(National Centers for Environmental Prediction:米国国立環境予報センター)

② 成果

ア 再現期待値

表3は、3秒間平均風速(最大瞬間風速)、1分間平均風速、10分間平均風速、1時間平均風速、 有義波高、有義波周期、有義波波長、最大波高、最大波周期の再現期待値である。

表 3 再現期待値														
		Wind	Speed		Waves									
Return Period	$U_{3  m sec}$	$U_{1\min}$	$U_{10\min}$	$U_{1\mathrm{hour}}$	H 1/3	T <sub>1/3</sub>	$L_{1/3}$	$H_{\mathrm{max}}$						
	(m/sec)	(m/sec)	(m/sec)	(m/sec)	(m)	(sec)	(m)	(m)						
1yr	35.4	31.5	28.4	26.1	6.70	10.5	174	12.46						
5yr	40.7	36.2	32.6	30.0	9.85	12.8	255	18.32						
10yr	43.0	38.2	34.4	31.7	11.22	13.6	291	20.87						
25yr	46.0	40.9	36.8	33.9	13.03	14.7	337	24.24						
50yr	48.3	42.9	38.7	35.6	14.39	15.5	373	26.77						
100yr	50.6	44.9	40.5	37.3	15.76	16.2	408	29.31						
							$T_{r}$	$T_{1/3} \approx T_{1/3}$						

### イ 非超過確率

表4及び表5は、1時間平均風速の非超過確率である。

	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	97%	98%	99%	n(data)
Jan	1.9	4.8	6.4	7.7	9.1	10.5	11.8	13.1	14.5	16.6	16.8	17.2	17.6	17.9	18.2	18.7	19.3	20.0	21.3	46872
Feb	1.7	4.2	5.9	7.3	8.6	9.7	11.0	12.3	14.0	16.2	16.5	16.7	17.1	17.6	17.9	18.4	19.1	20.0	21.4	42659
Mar	1.5	3.7	5.2	6.5	7.6	8.8	10.0	11.3	12.9	15.1	15.6	15.9	16.3	16.7	17.4	17.9	18.7	19.6	21.1	46872
Apr	1.4	3.3	4.6	5.6	6.6	7.6	8.7	10.0	11.4	13.7	14.1	14.4	14.8	15.1	15.7	16.3	17.1	18.1	19.6	45360
May	1.2	2.9	3.9	4.9	5.7	6.6	7.6	8.8	10.2	12.3	12.6	12.9	13.3	13.7	14.2	14.6	15.4	16.2	17.7	46872
Jun	1.1	2.5	3.4	4.2	5.1	5.9	6.8	7.9	9.4	11.6	11.8	12.2	12.6	12.9	13.6	14.2	14.7	15.7	17.4	45360
Jul	1.1	2.5	3.5	4.4	5.2	6.0	6.9	8.0	9.4	11.4	11.8	12.1	12.3	12.8	13.3	13.9	14.5	15.6	17.2	46872
Aug	1.1	2.4	3.4	4.2	5.1	5.7	6.6	7.7	9.3	11.4	12.0	12.2	12.6	13.1	13.7	14.4	15.4	16.6	18.7	46872
Sep	1.1	2.6	3.7	4.6	5.4	6.4	7.4	8.6	10.0	12.2	12.5	12.8	13.3	13.9	14.4	15.1	16.0	17.3	19.6	45360
Oct	1.4	3.4	4.8	5.7	6.7	7.6	8.7	9.9	11.3	13.6	13.9	14.2	14.4	14.8	15.4	15.7	16.5	17.6	19.6	46872
Nov	1.3	3.5	4.9	5.9	7.1	8.0	9.3	10.5	12.0	14.2	14.4	14.8	15.1	15.5	16.0	16.5	17.1	18.1	19.4	45360
Dec	1.7	4.0	5.4	6.8	8.0	9.3	10.6	12.0	13.6	15.2	15.9	16.2	16.6	16.8	17.4	17.9	18.5	19.3	20.2	46848
All	1.2	3.1	4.3	5.4	6.5	7.5	8.8	10.2	11.8	14.2	14.4	14.8	15.4	15.7	16.2	16.7	17.6	18.4	20.0	552179

表4 1時間平均風速の非超過確率

表5 有義波高の非超過確率

	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	97%	98%	99%	n(data)
Jan	0.44	0.69	0.88	1.06	1.23	1.39	1.60	1.80	2.06	2.48	2.54	2.61	2.69	2.77	2.88	3.00	3.17	3.40	3.86	46872
Feb	0.47	0.71	0.89	1.05	1.21	1.37	1.56	1.79	2.09	2.57	2.64	2.74	2.83	2.93	3.06	3.22	3.41	3.67	4.02	42659
Mar	0.53	0.80	0.97	1.12	1.28	1.46	1.64	1.86	2.15	2.63	2.71	2.79	2.90	3.00	3.14	3.29	3.49	3.77	4.20	46872
Apr	0.61	0.91	1.07	1.19	1.32	1.46	1.60	1.77	2.03	2.42	2.48	2.56	2.65	2.76	2.88	3.02	3.20	3.47	3.94	45360
May	0.68	0.93	1.06	1.15	1.25	1.35	1.48	1.64	1.85	2.19	2.24	2.30	2.37	2.46	2.56	2.70	2.84	3.10	3.50	46872
Jun	0.81	1.00	1.11	1.18	1.27	1.36	1.47	1.60	1.78	2.16	2.21	2.28	2.34	2.42	2.51	2.61	2.77	3.06	3.57	45360
Jul	0.78	0.99	1.10	1.19	1.28	1.36	1.48	1.62	1.81	2.17	2.22	2.29	2.37	2.47	2.59	2.76	2.97	3.35	4.21	46872
Aug	0.77	1.04	1.16	1.25	1.33	1.41	1.54	1.72	2.03	2.58	2.68	2.78	2.90	3.05	3.29	3.59	3.98	4.61	5.67	46872
Sep	0.79	1.03	1.16	1.25	1.34	1.45	1.56	1.72	1.98	2.49	2.59	2.74	2.89	3.06	3.31	3.64	4.06	4.71	5.90	45360
Oct	0.74	1.02	1.17	1.28	1.39	1.51	1.65	1.82	2.06	2.55	2.63	2.71	2.79	2.86	3.01	3.21	3.44	3.76	4.41	46872
Nov	0.55	0.83	0.98	1.12	1.25	1.40	1.57	1.75	1.99	2.39	2.44	2.50	2.58	2.67	2.78	2.92	3.12	3.38	3.84	45360
Dec	0.49	0.73	0.98	1.03	1.19	1.35	1.53	1.72	1.98	2.37	2.43	2.50	2.58	2.68	2.78	2.90	3.04	3.24	3.61	46848
All	0.54	0.88	1.05	1.17	1.28	1.40	1.55	1.73	1.98	2.42	2.49	2.56	2.65	2.77	2.89	3.05	3.28	3.61	4.20	552179

(3) まとめ

第二渥美海丘海域における波向は、春から秋にかけて ESE から SE が卓越し、冬場は WNW の 出現がみられる。一方、波高は、夏・秋よりも、冬のほうが低い傾向がみられるが、これは季節 風よりも台風の影響が大きい結果であると考えられる。

風向は、春から秋にかけて東南東から南東 が多く出現し、冬は西北西が多く出現する。また、 風速は、夏よりも秋から冬にかけて大きな風速が出現する傾向がみられる。

当該海域における高波高及び強風は、台風によるものが多い傾向がある。

再現期待値のうち100 年確率風速(1 時間平均風速、通年、全方位)は37.3m/s、100 年確率 波高(有義波高、通年、全方位)は15.76m であった。

風と波の非超過確率のうち1時間平均風速は99%において20.0m/s(20.0m/s以下である確率が99%)となり、有義波高では99%において4.20m(4.20m以下である確率が99%)となった。

これら算定された風と波の再現期待値と非超過確率並びに統計データは、海洋産出試験の最適な作業期間の設定及び作業限界の検討並びに掘削船の位置保持の検討等に使用された。

今後は、数年ごとにデータの見直しが必要で、とくに数 10 年に一度、あるいは 100 年に一度 出現するような大きな擾乱があった場合は必ず見直すことが重要である。

# V.7.2 海底地盤

V.7.2.1 詳細海底地形地質調查

目的及び経緯

海洋産出試験周辺海域は東部南海トラフの北側斜面にあり、既存資料や地震探査結果から多く の凹凸地形や断層、リニアメント(線状構造)などが存在し、複雑な海底地形を形成しており、 付近には海底地すべりの跡や過去実施された基礎試錐などの掘削跡があることがわかっているが、 当該海域の詳細な海底地形や浅層地質の情報は十分なものではなかった。

このようなことから、当該海域において海洋産出試験地点の選定や測定機器の配置計画などの 検討に資するため、詳細な海底地形、リニアメントや細かい凹凸などの微地形、掘削跡や障害物 等の有無、海底面の詳細な状況、底質分布状況、表層堆積物の厚さや堆積状況の現況を把握する ことを目的とし、詳細海底地形地質調査を実施することとなった。

調査は、詳細海底地形地質調査として 2011 年 2 月に JAMSTEC ((国研)海洋研究開発機構) 所有の AUV (Autonomous Underwater Vehicle:自律型無人探査機)「うらしま」を用いて実施 されたが、この直後に東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)が発生したことや第 1 回海洋産出 試験に関連する掘削作業、調査作業により海底地形が改変されたこと、また ROV (Remotely operated vehicle:遠隔操作無人探査機)海底観察で当該海域に複雑な凹凸地形や多くの転石が分 布していることが想定されることが分かってきた。

このため、2015 年 6-7 月に深田サルベージ建設(株)が所有する AUV「Deep1」を使用して 2011 年 2 月調査の補足及び試験地点周辺の海底微地形や障害などを把握するために新たに海底微 地形調査を実施した。

(2) 内容及び成果

内容

本調査は、海洋産出試験井を中心とした 2km 四方の区域を含む 6km×6km 区域のほか、南西 側の 3km×4km の隣接区域を加えた範囲(図 1)において、MBES (Multi Beam Echo Sounder: マルチビーム音響測深装置)、SSS (Side Scan Sonar:サイドスキャンソナー)、SBP (Sub-Bottom Profiler:サブボトムプロファイラ)を搭載した AUV によって実施した。調査によって得られた データは、MBES、SSS、SBP それぞれの取得データに動揺補正、音速度補正等必要な補正処理 を施したうえで、AUV の航跡図にもとづき海底地形図、傾斜区分図、音圧図、地層断面図等とし てとりまとめ、海底地形、表層堆積物、海底面状況などに関し解釈を行うとともに考察した。



② 成果 (図 2)

海丘北側斜面東翼部(a)は、西端に海 洋産出試験地点があり、表層堆積層は 三次元地震探査結果等からブロック化 して活動が停止した地すべり移動体と 推定される。海丘北側斜面東翼部前面 (b)は、表層直下にスランプ層が分布し、 三次元地震探査結果より新しい NNW-SSEの断層や断層近傍に地形の 高まりが認められる。海丘北側斜面西 翼部平坦部(c)は、(a)と同じブロック化 した地すべり移動体の西側にあるが、 北端に急崖があり、崖下には崖錐堆積 物がみられる。海丘北側斜面西翼部前 面斜面(d)は、海底下に著しく変形した



乱雑な堆積構造をもつスランプ層が広範囲に厚く分布しており、海底面にはグラーベン(地溝) やリニアメントがみられる。

また、海洋産出試験地点付近の海底面の状況は図 5 に示すとおりであり、過去に掘削された多くの坑井跡や第1回海洋産出試験時に実施した 4C 探査用 OBC (Ocean Bottom Cable) 敷設跡

が明瞭に認められた。

これら一連の調査から海底下の表層堆積物は、軟弱な地層に炭酸塩クラストや炭酸塩岩の岩塊が混じる特徴的なものとなっていることも明らかになった。

以上のことから、第1回及び第2回海洋産出試験地点は、区域(a)の地すべりブロック西端に あり、変位も少なく安定な状態を保っているとみられる。

(3) まとめ

海洋産出試験周辺海域は、第二渥美海丘の北側斜面に位置し、海丘の構造運動に伴う隆起や断 層、褶曲、及びそれらに伴って発生したと考えられる海底地すべりなどにより複雑な様相を呈し ており、凹凸地形のほか、グラーベンやリニアメントが多数存在する。

海丘北側斜面には、海底下に海底地すべりを起源とする大規模なスランプ層が広範囲に堆積し ており、乱雑な堆積構造を示すことが分かった。これらスランプ層は、ガスを含む水などの流体 が上方に移動して形成されたと推定される脱水構造の痕跡が明らかになった。また、海洋産出試 験地点周辺には、過去の坑井跡や OBC 敷設跡などが多数認められる。

なお、本調査によって得られた結果は、海底土質調査結果とともに当該海域の地盤の安定性等 を検討するための基礎資料となり、研究開発計画を進めるためのジオハザード分析評価の精度を 高めるうえで大変重要となる。

参考文献

志村栄一・鈴木清史(2015): 第二渥美海丘北西斜面の地形および表層堆積物と地盤安定に関する検討,第7回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集 B-15, pp.121-125.

志村栄一・鈴木清史(2016):第二渥美海丘北西斜面の海底地すべり地形と表層堆積物の特徴,日本地球惑星科学連合 2016 大会,ポスター発表.

V.7.2.2 海底土質調查

(1) 背景及び目的

海洋産出試験は、海底下の MH 濃集帯から減圧法によりガスを生産するもので、海底下の比較 的浅い深度に適用するための様々な技術手法の確立が必要となる。また、試験候補地の地層は、 海底面下数百メートルと在来型の石油貯留層に比べて浅く、そこに大きな減圧を生じさせるため 以下のような技術課題がある。

● 海底面から MH 層までの地盤が坑井の重量を支持できるか(坑井安定性評価)、

- 減圧法の成立に必要なシール層の特性(シール層の特性及び生産挙動予測)、
- MHの分解による貯留層の圧密が浅部の地層に与える影響(分解に伴う地層変形)、
- 地すべりリスク評価の基礎データ取得(斜面安定性評価)

これらの技術課題検討のために海洋産出試験候補海域周辺においてボーリング調査を実施し、 表層から MH 層直上までの土質試料を採取し、原位置試験(コーン貫入試験)、土質試料の室内 土質試験を実施し、堆積層の力学特性などを把握することとなった。

### (2) 内容及び成果

内容

調査地点は、海洋産出試験候補地周辺で6点(AT·GT1、AT1·GT1A、AT1·GT2、AT1·GT2A、 AT1·GT2B、AT1·GT3)、地すべり地形周辺で2点(ATS·GT1、ATS·GT1A)とし、コアサンプ ルを取得するとともに、一部の坑井においては Dolphin system<sup>™</sup> (Fugro:図1)を用いた原位 置にてコーン貫入試験<sup>\*1</sup> (CPT: Cone Penetration Test:)を実施した。

取得した全てのコアサンプルは、船上において X 線 CT 画像の撮影を行い、一部の試料を除き MSCL-W<sup>TM</sup> (Multi Sensor Core Logger-Whole : Geotek Ltd.) による非破壊計測 (ガンマ線密 度、比抵抗、P 波速度、帯磁率、自然ガンマ線)を行うとともに、ガス、間隙水採取による地化学 分析、熱伝導率、非弾性ひずみ回復法 (ASR : Anelastic Strain Recovery) 及びコア変形法によ る応力測定ならびにコアの定方位化を行うために古地磁気測定を行い、半割コア試料については、 色調分析、コア記載を行った後 Working 試料は粒度分析、XRD (X-Ray Diffraction : X 線回折 分析)、密度分析を行った。また、コアサンプルは、陸上に持ち帰り物理試験(密度、土粒子の密 度、含水比、粒度分布、液性限界・塑性限界)及び力学試験(土の定ひずみ速度載荷による圧密 試験、土の圧密非排水三軸圧縮試験(CUB: Consolidated undrained triaxial compression test) 等)をそれぞれ実施した。

※1 コーン貫入試験(図1)

原位置試験のうちの一つで、地盤に 直接電気式静的コーンを突き刺して三 成分(貫入抵抗(qt)、周面摩擦抵抗(fs)、 間隙水圧(u))を同時に測定するもの



② 成果

図 1 Dolphin system<sup>TM</sup>(Fugro)の概要

上記のコアサンプルを用いた試験から当該海域の地盤特性に関して以下のことが明らかになった。

- 当該海域の土質試料は、他の海成粘土と性状が大きく異なる。これは、当該海域の試料には珪藻化石,石灰質ナンノ化石などの微化石及び石灰質殻を有する炭酸塩堆積物が多く含まれる地盤であることを示唆するものである。
- 当該海域の土質試料は、塑性指数及び活性度が低い。
- 試料の乱れの程度は、コア採取方法により大きく異なる。
- 一般に大きな過圧密比(OCR: Over-Consolidation Ratio)が計測され、これは浅い深度で 顕著であることから、当該海域では海底面付近では過圧密状態にあるが、深度の増加とと

もに正規圧密状態に近づく。

- 破壊時の最大応力比は、採取深度が大きくなるに従って低下する。
- 非排水せん断強さは深度と共に増加するが、強度増加率の値は深度増加と共に 0.6-0.7 程度 の値に漸近する傾向を示す。これは日本近海の海成粘土の試験結果と比較すると著しく大 きな値である。

(3) まとめ

海底土質調査によって得られた当該海域の土質試料は、各研究施設に送り、様々な物理試験及 び力学試験並びにコア分析等を実施した。

これらの結果と三次元地震探査結果や詳細海底地形地質調査結果等を併せて総合的に解釈した 結果、第1回海洋産出試験周辺は、海丘北側の斜面を滑落したと考えられる海底地すべり移動土 塊がブロック化して留まっており、海底土質調査結果より地盤として十分な強度を持つことから 安定しているという見方が成り立つことがわかった。

一方、海洋産出試験地点の北西側の第二渥美海丘北側斜面西翼部は、海底下に海底地すべりを 起源とするスランプ層が広く堆積しており、これらは乱雑な堆積構造を呈すると同時に上位層を 大きく変形させている特徴を示す。また、スランプ層分布域の海底は、グラーベンやリニアメン トが数多く認められることがわかった。以上のことから、第二渥美海丘北側斜面西翼部のスラン プ層分布域の地盤は、極めて不安定である可能性が高いことがわかった。

なお、これら検討結果は、当該海域の海洋産出試験やそれに伴う観測井、事前掘削に係る掘削 計画や坑井デザイン等に反映されている。

参考文献

Long, X., Tjok, K.-M., Trandafir,A.C., Sato, R. & Yamamoto, K. 2014. Evaluation of Geological and Geotechnical Characteristics for Deepwater Sediments in Offshore Japan, *The 24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, June 15 - June 20, 2014.

清水建設(株).2011.第 1 回海洋産出試験のための海底ボーリング調査で行うコア力学試験報告 書.

日本大学生産工学部土木工学科.2011.海底ボーリングコア試料に関する力学試験の計画策定・結 果分析.

応用地質(株).2011.海底ボーリング調査で採取したコア試料の力学試験報告書.

北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学部門教授田中洋行.2011. 海底ボーリングコア 試料に関する力学試験の計画策定のために実施した定ひずみ速度圧密試験結果.

山口大学大学院理工学研究科環境共生系専攻教授兵動正幸.2012. 海底ボーリングコア試料に関 する力学試験の計画策定のために実施した圧密非排水三軸圧縮試験結果.

### V.7.3 海底地すべりの研究

(1) 経緯と目的

MH の分解による地層強度低下とガス発生による有効応力低下が海底地すべりを発生させ る可能性は MH 研究の重要なテーマの一つである(Locat and Lee [2002], Kayen and Lee [1991], Nisbet and Piper [1998], Sultan et al. [2002b])。第1回及び第2回の海洋産出試験 が行われた第二渥美海丘の試験地点も地すべり堆積物の下にあり、さらに西側には、安乗口 海底谷に向けて落ち込むやや規模の大きい海底地すべり地形が存在している。また、同海域 が予想される東南海地震の震源に近く、地震等により自然に発生する海底地すべりも海底設 備や掘削船に被害を及ぼす可能性がある。さらに、海洋産出試験が意図的にハイドレートを 分解させる作業であることから、自然及び人為的な原因による斜面安定性の総合的なリスク 検討を実施することとした。

(2) 地すべりリスクの評価

ノルウェー沖の北海 Ormen Lange ガス田は、今から約 8000 年前に発生して北海沿岸に大 規模な津波の痕跡を残す Storegga 地すべりの滑落崖周辺で開発が進められたため、総合的か つ定量的なリスク評価が実施されてきた[Nadim et al., 2005; Solheim et al., 2005a; Sloheim et al., 2005b]。第二渥美海丘の検討では、Storegga 地すべりの研究を実施した Norwegian Geotechnics Institute (NGI) と共同で検討を行うことし、フェーズ1 (2001-2009 年)中に 取得した地震探査データに加えて、2011 年に行った海底地盤調査・海底地形調査 (V.7.2 参照) で取得したデータを利用し、次の三つのステップを踏んで実施した(山本&Kvalstad, 2010, 2012, 2013)。

- 海底地形と地震という自然の原因によるリスクを検討する
- MH 分解の影響を評価する
- ③ 地すべり発生時の影響を評価する

図 1 は、東部南海トラフの特定海域に見られる海底地すべり地形とそれを横切る断面の地 震探査記録である。やや規模の大きな地滑り痕が、西側の海底谷に向かって多段で広がって いるのがわかる。地震探査断面ではハイドレート安定下限を示す BSR(海底擬似反射面)が 観察でき、当該海域にハイドレートが存在することが示唆されるが、地すべりの基底はハイ ドレート安定境界(海底面下約 300m)に比べて浅く、ハイドレートと地すべりの直接の関係 は見いだせない。

ア 自然の原因による地すべりリスクの評価

はじめに、地形と地震の影響を調べるため、

- 地形による静的安全率評価の計算(図2)
- 垂直方向の1次元の地層強度モデルによる、東海・東南海・南海地震の同時発生を想定した動的応答を考慮した地震時のリスク評価(図3)

の二つを実施した。

この結果、平坦な地形では地震を想定しても地すべりのリスクはほとんど存在しないこと、 一部の急斜面で安全率(Factor of Safety, FoS)が1を下回り、また地震時を想定すると、特 定深度に大きなひずみが生じて地震時に FoS が小さくなることがわかった。

イ ハイドレートの分解の影響

引き続いて、MH の分解による安定性の変化を調べるため、濃集帯の深度でのハイドレー ト分解による円弧すべりの発生を想定し、幅 280m の範囲で当該深度の地層強度が半減する として、FoS の変化を計算した。円筒型のすべり、球面型のすべりなどを、形状パラメータ を変化させて検討したが、ハイドレート濃集帯が存在する深度が海底面から深いことから、 FoS の変化はごくわずかであった。(図 4)

ウ 海底地すべりによる津波発生と伝播の解析

3番目のステップとして、巨大地震の発生等により試験地点西側の地すべりが拡大した場合 を想定して津波のシミュレーションを行った。図1に示されるグラーベンの地形から西側の 約1.26km<sup>3</sup>の地盤が急速に移動する状況を想定し、津波の発生と伝播を解析した。この場合、 約10分後に最大波高1m程度の津波が志摩半島に到達することが計算された。(図5)

(3) まとめ

東部南海トラフは地震発生の可能性が非常に高い地域であり、それに伴う海底地すべりの リスクは今後の MH 開発で無視できない。今回実施した評価では、第二渥美海丘周辺の地形 は、静的な条件下では斜面不安定性は見られないが、地震発生時にはリスクが大きくなるこ と、特に地すべりの拡大が生じうる条件にあり、津波被害につながる可能性があることなど が示された。

その一方で、MH の存在する深部(海底面から 300m 程度)でのハイドレート分解による 地すべりリスクはごくわずかであると見られる。また、東部南海トラフに見出される地すべ り地形は、北大西洋など海洋が拡張しつつある領域の大陸斜面に見られる数百 km にわたる 規模の巨大地すべりに比べるとはるかに規模が小さく、第二渥美海丘付近の地すべり地形に 関しては、ハイドレートとの関係は見出せなかった。

今回実施した解析では、影響に関しては津波の伝播解析までで、海底設備、パイプライン、 掘削船などに与える具体的影響は検討しておらず、また商業化段階で数十 km<sup>2</sup> 以上の範囲で ハイドレートが分解した場合の影響も評価していない。今後も、有望濃集帯の選定や開発シ ステムの検討においては、海底斜面の安定性が重要課題と考えられ、データの取得と定量的 な評価が重要であると考えられる。



図 1 左:第二渥美海丘北西側の海底地形と地震探査断面。BSR よりはるかに浅い部分に地 すべりの基底が見られる。海洋産出試験実施地点(AT1)と地すべり内の ATS 地点で掘削調 査を実施した。右:海底地すべり滑落崖より東に見られるグラーベンの地形と正断層。地震 などによる地すべりの拡大が予想され、特に赤点線から西側は開発に際して留意する必要が ある。



図 2 地形の静的安全率評価:リスクの考えられる地形を多数抽出して斜面安定性計算を実施 し安全率(FoS)を評価した。静的な条件下では、一部の急斜面 FoS が 1 を下回る。



図3 地震による不安定性の評価: コア等による試験結果を元に地盤の応力ひずみ特性をモデ ル化し、浜岡4号機の耐震評価で用いられた東海・東南海・南海地震の同時発生時の予想地 震スペクトル(Chubu Electric Power Co., Inc., 2007)から生成した地震波形を入力して、1 次元安定性解析を実施し、塑性ひずみを計算した。





Change of Factor of safety by gas hydrate dissociation (50% reduction of shear strength). (FoS:  $2.372 \rightarrow 2.183$ )

Relationship between slide types (spherical and cylindrical), scales of the slide and FoS reduction.

図4 海洋産出試験によるハイドレート分解が円弧すべりの安全率(FoS)をどう変化させる のか検討した。ハイドレート分解により分解領域(幅約280m)の地層強度が半減すると仮定 し、円筒型及び球面型のすべり面を想定し、形状の違いを考慮した評価を行ったが、FoSの 変化はごくわずかにとどまった。



図 5 試験地域の西側の地すべりの拡大を想定した津波解析。巨大地震の発生等により 2.1×4km の範囲で最大 127.5m の地盤(体積 1.26km<sup>3</sup>)が左上の図に示されるように 6 分間で約4km 移動する場合の津波伝播を計算したところ、地すべり発生から約 10 分で津波が志摩半島に達すること、沿岸の最大波高さは 1m 以下であることなどが計算された。

参考文献

- Chubu Electric Power Co., Inc., 2007: Overview of Seismic Safety Assessment Results for Hamaoka Nuclear Power Station Reactor No. 4 (Deciding on Standard Ground Motion Ss), http://www.chuden.co.jp/english/corporate/press2006/0125\_2\_1.html.
- Kvalstad, T.J. (2010): Seafloor stability, International Symposium on Methane Hydrate Resources, MH21 Research Consortium, Tokyo, Japan.
- Locat, J. and Lee, H. J. (2002): Submarine landslide: advances and challenges, Can. Geotech. J., 39, 193-212.
- Lee, H.J. (2009): Timing and occurence of large submarine landslides on the Atlantic Ocean margin, Marine Geology, 264, 53-64.
- Mienert, J. (2004): Costa-continental slope stability; major aims and topics, Marine Geology, 213, 1-7.
- Nadim, F., Kvalstad, T.J. and Guttormsen, T. (2005): Quantification of risks associated with seabed instability at Ormen Lange, Marine and Petroleum Geology, 22, 311-318.
- Nisbet, E.G. and Piper J.W. (1998): Giant submarine landslide, Nature, 392, 329-330.

Yamada, et al, Submarine slides: Current Understandings and Future perspectives, 投稿中.

- Solheim, A., Bryn, P., Sejrup, H.P., Mienert, J., and Berg, K. (2005a): Prmen Lange-an integrated study within the Storegga Slide Complex, NE Atlantic continental margin; Executive summary, Marine and Petroleum Geology, 22, 1-9.
- Solheim, A., Berg, K., Forsberg, C.F. and Bryn, P. (2005b): The Storegga Slide complex: repetitive scale sliding with similar cause and development, Marine and Petroleum Geology, 22, 97-107.
- 山本 晃司,長久保 定雄,Tore Jan Kvalstad (2010):東部南海トラフのメタンハイドレート資源開 発における斜面安定性の研究,第2回メタンハイドレート総合シンポジウム.
- 山本晃司, Tore Jan Kvalstad (2012):東部南海トラフの斜面安定性に関する検討--ハイドレート分 解の影響と津波発生リスク,第4回メタンハイドレート総合シンポジウム.
- 山本晃司, Tore Jan Kvalstad (2013):メタンハイドレート海洋産出試験地付近のやや広域の斜面 安定性検討, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム.