V. 基盤技術の開発

V.1 コア取得技術と実績

(1) 目的

採取地点の圧力を保持したまま回収される「圧力コア」は、MH を含む堆積物の原位置での性 状を把握する上で貴重な情報源である。目的の地層から確実にコアを採取するため、圧力コアの 取得装置(コアラー)の継続的な改良と実証に取り組んだ。

(2) 経緯

JOGMEC の前身である石油公団は 1995-2000 年度の特別研究で、圧力コアラーの PTCS (Pressure Temperature Core Sampler)を、米国ユタ州の Aumann & Associates 社 (AAI 社) に 委託し開発した。フェーズ1において、2001 年度からコア回収率や作業性を向上させる改良を実 施した後、2003 年度基礎試錐「東海沖~熊野灘」においてコアリング作業を行い、圧力コアに関 しては回収率 79%及び保圧成功率 90%を記録した^[1]。

PTCS は、コアを船上で脱圧して観察と分析に供する前提で設計された。しかし、その後圧力 コアの分析装置 PCATS (Pressure Core Analysis and Transfer System)が登場し、これに対応し たコアラーを用いることで、観察、分析、保管を保圧下で行うことが原理上は可能になった。こ れに伴い、PCATS に適合したコアラーとして、Hybrid PCS (Hybrid Pressure Core Sampler) が、AAI 社と(独)海洋研究開発機構(現(国研)海洋研究開発機構)と JOGMEC により共同 開発された。

JOGMEC は、2012 年 7 月に第二渥美沖のハイドレートを含む砂泥互層を対象として、Hybrid PCS と PCATS を用いたコアリングを実施した[2-6]。その結果、MH を含む地層の性状把握における、圧力コア分析の有効性が実証されたが、後述の通り、Hybrid PCS の保圧動作の信頼性に課題が残った。そのため、既に旧世代と見なされていた PTCS の良好なコア回収の実績が見直され、そのボールバルブのメカニズムを維持したまま、PCATS に対応させることになった。

2014年にJOGMECが保管していた PTCS を AAI 社に輸送し、一部のパーツを再製作する等の改造を実施した。この改良機を HPTCIII (High Pressure Temperature Corer III)と呼ぶ。2015年に工場で完成試験をした後、米国テキサス州の陸上リグにて実証試験を行った結果、期待される性能を発揮することが確認され、2018年の第2回海洋産出試験の追加データ取得作業において、HPTCIIIと PCATS を用いたコアリング作業が実施された。

(3) 内容及び成果

① 各コアラーの概要と特長

表1に PTCS と Hybrid PCS、HPTCⅢの仕様を比較した。

| Item | PTCS [1] | Hybrid PCS [2] | HPTC III |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Drill pipe OD | 6 5/8 inch | 5" or 5.5 inch | 6 5/8 inch |
| Max. pressure of Autoclave | 24 MPa | 35 MPa | 35 MPa |
| Compatibility w/PCATS | No | Yes | Yes |
| Core OD | 66.7 mm | 51 mm | 54 mm |
| Core length | 3 m | 3.5 m | 3.5 m |
| Core bit | 10-5/8" PDC Bit | 10-5/8" PDC Bit | 10-5/8" PDC Bit |

表1 コア取得装置の基本仕様

これらは全てロータリー方式のコアラーである。いずれもコアを収納するインナーバレルをワ イヤラインで昇降できるため、効率的にコアを採取できる。インナーバレルはコアが収納される オートクレーブと、蓄圧した窒素ガスを搭載した圧力制御部などから成る(図1)。ワイヤライン でインナーバレルを引き抜く際に、オートクレーブが奥に収納され、オートクレーブ先端のボー ルバルブが閉止する。直後に圧力アキュムレーターと導通することで、オートクレーブが設定さ れた圧力となり、必要に応じ予想坑底圧以上まで加圧される。



図1 PTCS と HPTCⅢの動作を示す概念図

Hybrid PCS は、地球深部探査船「ちきゅう」で使われる他のコアラー、HPCS (Hydraulic Piston Coring System)や ESCS (Extended Shoe Coring System)と互換性をもち、コア径も 51mm (2inch) となる。そのため一般的なドリルパイプが使用できるが、インナーバレルの直径 が PTCS よりも小さく、オートクレーブの保圧メカニズムもこれに合せた仕様になった。一方の HPTCIIIは、先に開発された PTCS を PCATS 対応に改良したツールである。そのため、PTCS 用のアウターバレルと 6-5/8"ドリルパイプを使用しており、基本的な保圧メカニズムも PTCS と

V-2 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

同様である。ただしコアビットは新規に製作した。

Hybrid PCS と HPTCIIIは、PTCS と違ってオートクレーブ上部のフランジが PCATS に合う よう設計されている。この PCATS と接続するときのボールバルブやフランジ径から、コアライ ナーの径が制限されるため、PTCS よりも取得できるコアの直径が小さくなった。また、オート クレーブの耐圧は PCATS と同じ 5,000psi に設計されている。

② 圧力コア取得の実績

第1回試験の前年、2012年7月に、第二渥美沖にてハイドレートを含む砂泥互層を対象にコア リング作業を実施した。コアリング井 AT1-C において、ESCS および Hybrid PCS を用い、計 60mの区間をコアリングした。Hybrid PCS に関しては、18本のコアを掘削し、51mの区間から 計 35mのコアを採取した。船上に回収したコアのうち、8本で12MPa 超を、4本で5.5MPa 超、 6本でそれ未満の圧力保持を確認した^[2]。つまり、コア回収率は69%、12MPa を超える保圧成功 率は44%となった。

2018年3-4月には、第2回試験の追加データ取得作業として、AT1-CW1およびAT1-CW2で、 HPTCIIIを用いたコアリングを実施した(表2)。2坑で計127.9mの区間をコアリングし、計49 本のコアを取得、コアの長さは計96.4mとなった。船上回収時のオートクレーブの圧力は、設定 値よりも低かった(5-10MPa)3回を除き、46回は予想坑底圧(約13MPa)を上回った。図2に オートクレーブ内の温度圧力履歴の一例を示す。これらのデータにより、49本全てのコアがハイ ドレートの安定条件に維持されたまま船上に回収されたことが確認された。以上をまとめると、 コアの回収率は平均77%、坑底圧を超える保圧の成功率は94%となった。

| | CW-1 | CW-2 |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| Date | 2018/4/7 - 4/12 | 2018/3/30 - 4/4 |
| Depth interval | 1,280.0m-1,330.9m | 1,286.5m-1,343.7m |
| (below rotary table) | 1,339.8m-1,350.9m | 1,356.6m-1,362.7m |
| Number of cores | 24 (20 + 4) | 25 (23 + 2) |
| Number of successful pressure | 23 | 23 |
| boost (> bottomhole pressure) | | |
| Total depth Interval | 61.9m | 63.3m |
| Total length of cores recovered | 46.1m | 50.3m |

表2 圧力コアリングの概要と結果



AT1-CW2 Run#08P

図2 オートクレーブの温度圧力履歴

(4) まとめ

保圧コアの分析装置 PCATS の登場に対応し、新しい圧力コアラーを開発し、室内及びフィールドでの実証を繰り返し行った。PTCS を改造し制作した HPTCIIIを第2回試験の追加データ取得作業に適用し、高いコア回収率と保圧成功の成果を挙げ、同海洋産出試験の評価作業に貢献した。

参考文献

- [1]"Pressure Temperature Core ampler (PTCS) 圧力・温度保持コアサンプリング技術—",川崎 正行、梅津覚、安田優人、石油技術協会誌 第71巻 第1号、平成18年.
- [2]"A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyu", Y. Kubo, Y. Mizuguchi, F. Inagaki, and K. Yamamoto, Scientific Drilling, Sci. Dril., 17, 37–43, 2014, www.sci-dril.net/17/37/2014/, doi:10.5194/sd-17-37-2014.
- [3] "Data report: Hybrid Pressure Coring System tool review and summary of recovery result from gas-hydrate related coring in the Nankai Project", Inada, N. and Yamamoto, K., Marine and Petroleum Geology, 66 (2015) 323-345.
- [4] Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012–2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough, Koji Yamamoto, Marine and Petroleum Geology, 66 (2015), 296-309.
- [5] Data report: Hybrid Pressure Coring System tool review and summary of recovery result from gas-hydrate related coring in the Nankai Project, Norihito Inada, Koji Yamamoto, Marine and Petroleum Geology, 66 (2015), 323-345.
- [6] Physical properties and sedimentological features of hydrate-bearing samples recovered from the first gas hydrate production test site on Daini-Atsumi Knoll around eastern Nankai Trough, Kiyofumi Suzuki, Peter Schultheiss, Yoshihiro Nakatsuka, Takuma Ito, Koji Yamamoto, Marine and Petroleum Geology, 66 (2015), 346-357.

V.2 コア分析取得技術

V.2.1 概要

原位置での条件を把握するためにはMHが分解しないように保圧した状態でコアを取得することが重要である。近年、この保圧状態でのコア取得が可能となり、米国地質調査所、米国ジョージア工科大学と共に、圧力コア試験に関する共同研究を実施した。これらの研究を通して、コアの物性解析を行うための圧力コアの分析装置を日本独自に開発し、高度化を行った¹¹。

V.2.2 圧力コア解析装置(Pressure-core Nondestructive Analysis Tools, : PNATs)について

AIST北海道センター内に導入した圧力コアの解析装置として、圧力コアの内部構造を非破壊で 評価する大型X線CT装置(PNATs-X)、非接触型P波計測装置(PNATs-PG)、非接触型バルク密度 (PNATs-PG)、力学特性評価装置(PNATs-TACTT)、接触型物性評価装置(PNATs-AIST IPTC)等 があり、これらの装置群を総称して、保圧コア解析装置(Pressure-core Nondestructive Analysis Tools,: PNATs)としている(表1及び図1参照)。他に大気圧下でもコア分析を行うが、分析の主な項 目は下記の通りである。

| | 保圧下 | 大気圧下 |
|------|----------------------------------|-------|
| 分析項目 | 堆積構造(PNATs-X) | 粒径分布 |
| | 力学特性(PNATs-TACTT) | 粒子密度 |
| | 浸透特性(PNATs-TACTT) | 鉱物組成 |
| | MH胚胎特性(PNATs-PG/PNATs-AIST IPTC) | 分解ガス量 |
| | バルク密度(PNATs-PG) | 水和数 |
| | | MH飽和率 |
| | | 熱物性 |

表1 圧力コア解析装置群と分析項目について



図1 圧力コア解析装置(Pressure-core Nondestructive Analysis Tools, : PNATs)

V.2.3 分析作業について

コア分析の作業の大まかな流れに関して以下に示す。

まず、保圧下ではPNATs-XによるCT断面・X線透像計測(堆積構造計測)並びにPNATs-PGに よるP波・バルク密度分布計測を行い、これらの計測を詳細分析前のインデックスデータとするこ とで、各種分析を行う指標とした。MHの存在が確認できないコア(部分)は、脱圧を行い粒度、鉱 物組成、真密度などの計測を行う。

次に、インデックスデータを参照し、MHの存在が示唆される箇所ではカット等を行い、 PNATs-TACTTによる力学・浸透率試験分析やPNATs-AIST IPTCによる点分析を行う。それぞれの 分析終了後脱圧を行いガスの捕集並びに残砂を計測する。

また、PNATs-TACTTやPANTs-AIST IPTCの分析に回せない短いコアなどは、水−ガス置換による LN2処理を行い水和数・熱物性計測も行われる。

コア分析の流れの一例を示したが、これまでに東部南海トラフ、インド国東海岸沖などで取得 された保圧コアの解析を通して、貯留層モデルの高精度化を可能とするコア分析技術の整備が行 われ、現在は、初期水浸透率、絶対水浸透率、浸透率異方性などの水理特性や、一軸圧縮強度、 三軸圧縮強度、圧縮・膨潤係数などの力学特性などの精緻な貯留層パラメータの取得が可能とな っている。

引用・参考文献

[1] Yoneda, J., Masui, A., Tenma, N., Nagao, J., 2013. Triaxial testing system for pressure core analysis using image processing technique. Rev. Sci. Instrum. 84, 114503.

[2] Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Egawa, K., Kida, M., Ito, T., Nagao, J., Tenma, N., 2015, Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure core sediments visualized under tri-axial compression. Marine and Petroleum Geology, 66, 451–459.

[3] Jin, Y., Konno, Y., Yoneda, J., Kida, M., Nagao, J., 2016, In situ methane hydrate morphology investigation: natural gas hydrate-bearing sediment recovered from the eastern Nankai Trough area. Energy Fuels 30 (7), 5547–5554.

[4] Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Kida, M., Katagiri, J., Nagao, J., Tenma, N., 2017, Pressure-core-based reservoir characterization for geomechanics: Insights from gas hydrate drilling during 2012-2013 at the eastern Nankai Trough, Marine and Petroleum Geology, 86, 1-16.

V.3 モデリングと数値シミュレーション技術

V.3.1 MH21-HYDRES

(1) 開発の背景

在来型油ガス田において油ガスの回収率、生産プロファイルなどを評価する場合、商用の貯留層 数値シミュレータを用いて貯留層シミュレーションを行う。それと同様に、MH貯留層に対して 減圧法や加熱法など様々な生産手法を適用したときの、貯留層内におけるMHの分解挙動やガ ス・水生産挙動を予測するには、MH生産特有の物理・化学現象を再現できる貯留層シミュレー タが必要となる。ただし、プロジェクト発足時はもとより、現在においてもMH貯留層を対象と した商用のシミュレータは存在しないため、MH21では、MH資源開発専用の貯留層シミュレータ 「MH21-HYDRES」を開発し、その改良を続けてきた。

(2) 概要

MH層からメタンを生産するには、坑井から何らかの外的要因を加えることによって地層内で MHを分解させ、遊離したメタンガスを坑井から汲み上げる必要がある。MH21-HYDRESでは、 この一連のプロセスをシミュレーションできるように、多孔質媒体中におけるMHの分解・生成、 ガス・水の流体流動、地層中の熱伝導など様々な貯留層内現象が取り扱えるようになっている。 これらは質量保存則、エネルギー保存則及びダルシーの法則(運動量保存則)を支配方程式とし てモデル化され、流体圧力、地層温度及び成分質量について解かれる。この際、支配方程式は有 限差分法により離散化され、数値解法によって近似解を求めることになる。シミュレーションに 必要な入力データは、貯留層の構造、離散化点における貯留岩特性や媒質の初期状態、また坑井 制御条件や境界条件などである。

- <u>貯留層の構造</u>:各レイヤーの深度やその広がり、グリッド分割数など
- 貯留岩特性: 孔隙率、絶対浸透率、相対浸透率、岩石熱伝導率など
- <u>初期状態</u>: 地層水やMHの飽和率、地層水の塩分濃度、流体圧力、地層温度など
- <u>境界条件</u>:貯留層モデル境界における流体及び熱の流動・非流動条件
- <u>坑井制御条件</u>:坑底圧力、ガス・水生産レート、インヒビター圧入レートなど

(3) MH21-HYDRES の特徴

MH21-HYDRESは、MH資源開発専用に開発していることが特長であるが、在来型油ガス田に 使用される貯留層シミュレータとの大きな違いは以下の機能を有していることである(図1)。

- ガス、水、ハイドレート、氷の4相の取り扱い
- メタン、窒素、二酸化炭素、水、メタノール、塩の6成分の取り扱い
- 速度論モデルによるハイドレート及び氷の生成・分解挙動計算
- ハイドレート及び氷の生成・分解に伴う発熱・吸熱量計算
- メタノールや塩の濃度に応じた、MH-メタンガス-水(氷)の3相平衡曲線
- 塩分濃度を考慮したメタンの水相への溶解度計算
- メタン、窒素及び二酸化炭素からなる混合ハイドレート相の取り扱い
- MHや氷など固相の影響を考慮した有効浸透率の計算
- 減圧法、熱刺激法、熱掃攻法、インヒビター圧入法、N₂/CO₂圧入法など各種生産手法の適 用



図1 MH21-HYDRESの概要

(4) フェーズ2及び3において改良・強化された主な機能

フェーズ1において実用に耐えうる段階までMH21-HYDRESの開発は進んだが、より詳細な試験 挙動予測・解析、新たな生産手法の開発・評価など、より高度なシミュレーションに対する要請 に応じてフェーズ2及び3においても開発は続けられた。フェーズ2及び3において改良・強化され た主な機能として以下のものが挙げられる。

- N₂/CO₂圧入に伴うCO₂ハイドレート生成及びCH₄生産過程モデル(平衡被膜モデルとハイドレート内分子拡散モデル)
- 通電加熱法のため計算ルーチン
- 複数坑井のグループ制御機能
- 最適化手法の導入(自動ヒストリーマッチング)
- 入力データ作成支援用グラフィカルユーザインターフェイスプログラムの開発
- 代表的な油ガス貯留層ビューアのフォーマットに対応した結果出力(図2)



図2 代表的な油ガス貯留層ビューアにより出力された3Dモデルによる温度変化

(5) MH21-HYDRESの成果

フェーズ1で参加したMH層を対象としたシミュレータの性能比較の国際プロジェクトにおいて、 MH21-HYDRESの計算精度や計算安定性に関する優位性は既に示されているが、様々な実フィー ルドに対する挙動予測や試験解析において活用されてきたという実践的な経験値も非常に高いシ ミュレータである^[1-5]。第1回及び第2回海洋産出試験前にMH21-HYDRESにより予測されたガ ス・水の産出量やMHの分解到達範囲等のデータは、試験候補地の選定、生産井及びモニタリン グ井の掘削位置や仕上げ区間の選定、坑内並びに船上機器の設計、作業指針などの作成に活用さ れ、産出試験の成功に大きく寄与した。その他にも、経済性試算用の生産挙動予測、新規生産手 法の検討など幅広い用途で活用されてきた^[6-7]。

(6) MH21-HYDRESによる第1回及び第2回海洋産出試験の予測・解析

第1回及び第2回海洋産出試験において、実際の生産挙動が事前予測と異なっている原因を探るために、試験中に取得したデータを随時取り込みつつ、様々な現象を想定した即時解析を行った(図 3)。また、試験後にはヒストリーマッチング等の事後解析も行われ、生産試験時のガス・水の生産挙動や貯留層内挙動の再現を試みることで、フィールドスケールでの減圧法適用時のMH分解 挙動やその他の貯留層内現象の解明、地質モデリングへのフィードバックなど様々な場面で本シ ミュレータが活用された(図4)。また、地層水の塩分濃度が地層深度に依存することが試験デー タより示唆されているが、それを考慮するための機能をシミュレータに追加するなど、試験の解 析に必要な機能を随時導入し、シミュレータ自体へのフィードバックも得られた(図5)。解析を 通して様々なことが分かったが、特に以下の三つについては今後詳細に検討すべきものである。

- ①現在想定している地層水の塩分濃度や生産井設置時に添加した薬剤の影響だけでは、AT1-P2 井で観測された低減圧度下での高いガス生産レートの再現は難しい。
- ②わずか60 m程度しか離れていないAT1-P2井とAT1-P3井の間で絶対浸透率や初期水有効浸透 率の傾向が大きく変化している可能性が高い。
- ③AT1-P3井生産時に観測されたガス・水生産挙動や観測井の温度・圧力挙動は、生産井近傍に おけるスキン形成を仮定することでも再現できる可能性がある。



図3 第2回海洋産出試験の即時解析の例(スキン形成の感度分析)



図4 第2回海洋産出試験のAT1-P3井の各種データのマッチング例

第1回海産試験の想定BSR深度と第2回海産試験の想定BSR深度及び MT3とMT2の温度・圧力推移からの推定塩分濃度と深度の関係



図5 地層水の塩分濃度と地層深度の関係

(7) まとめと今後の課題

MH21-HYDRESの概要、フェーズ2及び3において改良・強化した機能やそれらを使った成果に ついて紹介したが、(6)で述べたような更なる検討課題へ対応するには、計算の高速化や既存機能 の強化などシミュレータ開発の継続が必要である。例えば、第2回海洋産出試験のAT1-P2井の生 産時には、通常の場合ほとんどガスの生産を期待できないような高い流動坑底圧力下(約9.8 MPa)において、10,000 m³/日を超えるガス生産量が計測されている。AT1-P2井の仕上げ区間内 の温度・圧力はMHの安定条件下にあり、同区間内にはフリーガスが存在しえない状況にあるこ とから、流動坑底圧力が高い段階から大量のガスが生産されたのは、AT1-P2井の試験時に、何ら かの要因により坑井近傍の一定範囲で極めてMHが分解しやすい状況が出現していた(すなわち ガスー水ーMHの三相平衡曲線(以後、三相平衡曲線)が高圧側に移行するような状況が出現し ていた)蓋然性が高いと考えられる。三相平衡曲線が高圧側にシフトした要因に関しては依然と して特定できていない。今後、第2回海洋産出試験の解析を進める場合には、AT1-P2井近傍に高 塩分濃度帯が存在し、減圧時に圧力伝播範囲が高塩分濃度帯に及んだ等、何らかの仮説に基づい てAT1-P2井生産時の高いガス生産量を合理的に説明できる貯留層モデルを構築していく必要が ある。同時にそれに対応できるようにシミュレータの改良を行う必要がある。

また、MHの分解に伴う地層の浸透性変化に関して、従来のモデル式ではフィールドスケールの 浸透性変化を必ずしも再現できないということを示唆するデータなども得られており、このよう な現時点では未解明な現象もシミュレータの予測精度向上のための課題と考えられる。

引用・参考文献

[1] M. Kurihara, A. Sato, H. Ouchi, Y. Ohbuchi, Y. Masuda, H. Narita, T. Ebinuma, and T. Fujii, 2009: "Examination on gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources", 石油技術協会誌, Vol. 74, No. 4, pp. 311-324

[2] H. Ouchi, M. Kurihara, A. Sato, Y. Masuda, H. Narita, T. Ebinuma, T. Saeki, T. Fujii, T. Kobayashi, and N. Shimoda, 2010: "Construction of 3 dimensional methane hydrate reservoir model in Eastern Nankai Trough and prediction of production test performance", 石油技術協会誌, Vol. 75, No.1, pp. 72-83

[3] M. Kurihara, A. Sato, K. Funatsu, H. Ouchi, Y. Masuda, H. Narita, and T. Collett, 2011: "Analysis of formation pressure test results in the Mount Elbert methane hydrate reservoir through numerical simulation", Marine and Petroleum Geology, Vol 28, Issue 2, Feb 2011, pp. 502-516

[4] M. Kurihara, A. Sato, K. Funatsu, H. Ouchi, K. Yamamoto, M. Numasawa, T. Ebinuma, H. Narita, Y. Masuda, S. Dallimore, F. Wright, and D. Ashford, 2010: "Analysis of Production Data for 2007/2008 Mallik Gas Hydrate Production Tests in Canada", SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10 June, Beijing, China, SPE 132155
[5] Y. Konno, T. Fujii, A. Sato, K. Akamine, M. Naiki, Y. Masuda, K. Yamamoto, and J. Nagao,

2017: "Key Findings of the World's First Offshore Methane Hydrate Production Test off the Coast of Japan: Toward Future Commercial Production", Energy & Fuels, Vol. 31, No.3, pp. 2607-2616

[6] Y. Konno, Y. Masuda, Y. Hariguchi, M. Kurihara, and H. Ouchi, 2010: "Key Factors for Depressurization-Induced Gas Production from Oceanic Methane Hydrates", Energy Fuels 24, pp. 1736-1744

[7] Y. Konno, Y. Masuda, K. Akamine, M. Naiki, and J. Nagao, 2016: "Sustainable gas production from methane hydrate reservoirs by the cyclic depressurization method", Energy Conversion and Management, Vol. 108, pp. 439-445

V.3.2 COTHMA

(1) 概要

MH 層からメタンガスを生産する方法として減圧法が有効であると考えられている。減圧法で は地層中に大きな圧力の低下をもたらすため、MH 生産時に坑井周辺の地層に圧密変形をはじめ とする様々な影響を及ぼすことが予想される。また、MH 層からのガス生産の過程では、固体と して地層内にある MH が分解して水とメタンガスに相変化するため、MH 層の強度低下を招き、 それが地層の変形を助長する。そのため、MH 生産時における地層の変形や応力状態などを予測 し、それらが坑井の健全性に及ぼす影響を評価することを目的に、応力・変形に加え、MH の生 成分解、それに伴う温度変化による熱伝導、水圧の変化に伴う浸透流などを完全に連成した有限 要素法による地層変形シミュレータ、COTHMA(Coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media)の開発を進めてきた^[1]。

当シミュレータでは、2次元平面ひずみ及び2次元円筒座標系、3次元直交座標系などの1次 元から3次元までの解析が可能である。また、最新の知見を踏まえた応力ひずみ関係の構成式を 逐次追加し、機能強化と改良及び室内実験結果などによる検証を繰り返すことにより、高精度化 を図ってきた。

(2) 地層変形シミュレータの機能、特徴

COTHMA では、減圧法、坑井加熱法、熱水圧入法、異種ガス圧入法などによるガス生産手法の取り扱いが可能であり、解析では以下の相状態や物性の変化を考慮することができる。

- MHの分解・再生成及び氷の生成・融解による相状態の変化
- 相状態変化により生じる堆積層の変形・強度特性の変化
- 相変化及び圧密による堆積層の浸透率の変化

また、境界条件については変位、圧力及び温度を固定あるいは時間変化として、外力について は荷重と流量(気相・液相流量)及び熱流量を節点、要素に与えることができる。

COTHMA のシミュレータとしての命題である地層の変形予測及びそれに伴う坑井の健全性評

価においては、MH 層や坑井の材料などの応力ひずみ関係がその結果に支配的であることから、 高精度化を目的に力学試験結果を反映した様々な構成式をシミュレータに導入してきた。MH 層 の全ての構成式は MH 飽和率による影響を考慮でき、拘束圧依存性を考慮した線形モデルや破壊 後の非線形特性を考慮したモデル、時間依存性を有する非線形モデル、塑性変形を考慮した弾塑 性モデルなどに対応している。また、坑井の材料である金属やセメント材料については、健全性 を評価する上で必要となる塑性ひずみを予測可能な弾塑性モデルを導入している。シミュレータ に導入した構成式を表1に示す。

| 構成式 | 土質材料1) | セメント | 金属 | |
|----------|----------------------------------|-------------------|---------------|--|
| 弾性モデル | 線形モデル | 線形モデル | 線形モデル | |
| 弾塑性モデル | 修正関ロ・太田モデル | Mohr-Coulomb モデル | Tresca モデル | |
| | 孫・松岡モデル Mohr-Coulomb モデル | Drucker-Pragerモデル | von Mises モデル | |
| | Drucker-Prager モデル | | | |
| 非線形モデル | Duncan-Chang モデル 炊工 D | | | |
| | 修正 Duncan-Chang モデル 二種混合体形モデル | | | |
| | 粘弾性コンプライアンス可変 型モデル | | | |
| 北泊形エニル2) | バイリニア型接触面モデル | | I | |
| アF版形でプルー | コンプライアンス可変型接触面モデル | | | |

表1 COTHMAに導入した構成式

注 1) 土質材料についてはどの構成式も MH 飽和率に対する依存性を考慮している

2) ジョイント要素用の構成式

(3) シミュレータの検証、成果

COTHMA は MH を含むコア試料の力学試験結果を検証材料として開発を進めてきたことから、 MH を含む地層の変形挙動を精度よく表現できるシミュレータになっている(図 2)。また、高圧力 を保持した状態で試験が可能な力学試験装置を導入し、その試験結果を基に力学パラメータの高 精度化と構成式の最適化を図るなど、シミュレータの精度向上を進めてきた。

また、坑井の健全性の評価に際しては、坑井モデルの精度向上を図るため、坑井を現場に即し た詳細なモデル化を行うと共に、ケーシング及びセメントと地層(砂層や泥層)間の接触面強度を得 るための室内模型実験を行い、例えば、ケーシング-セメント間の接触面強度に関して、有効拘 束圧などをパラメータとした実験式の導出を行っている^[2]。



図2 大型室内試験装置を用いた減圧ガス生産試験の再現解析

これらの成果は、海洋産出試験サイトの地盤情報を基に構築した数値地盤モデルを用いた解析 などに活用されている。例えば、図3として第1回海洋産出試験における地層の変形や坑井周辺 の応力状態などの解析例を示す。本解析結果によれば、減圧区間を中心にMH分解と有効応力の 増加に伴う圧密変形を主要因とする地層変形が生じていることが分かる。





(4)シミュレータの高速化

シミュレータは Windows と Linux の OS 下で動作し、Linux 版では並列計算も可能な PETSc ソルバーを実装しており、2 万節点程度のモデルで直接法と計算速度を比較すると、2 次元解析で 2 倍、3 次元解析で 100 倍以上の高速化を実現している。

(5)ユーザインタフェースの開発

COTHMAの入力データの作成を支援するプリプロセッサ及び解析結果の後処理を行うポスト プロセッサを開発することにより、解析作業の効率化を図った。また、これらのプリポストプロ セッサにはグラフィカルなユーザインターフェイス(GUI)の画面を作成し、シミュレータの操 作性を高めた。 (6) まとめ

地層変形シミュレータ COTHMA に関する概要、機能などを紹介した。また、現場試験などの 結果を通してシミュレータの信頼性向上を図るとともに、ユーザインターフェースなどの開発を 進め様々な機能強化も行った。さらに、実フィールド規模での長期の広域での検証等を行い地層 変形シミュレータに関する精度向上を進める必要がある。

引用・参考文献

[1] J. Yoneda, A. Takiguchi, T. Ishibashi, A. Yasui, J. Mori, M. Kakumoto, K. Aoki, and N. Tenma, 2018(accepected): "Mechanical Reaction of Reservoir and Well Completion of the First Offshore Methane Hydrate Production Test at the Eastern Nankai Trough: A Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Analysis", SPE J.

[2] 覺本真代、米田純、宮崎晋行、天満則夫、青木一男、糸井龍一 2013:メタンハイドレート
 生産井におけるケーシングーセメント間の摩擦強度に関する基礎的研究、Journal of MMIJ, Vol.
 129, No. 4, 116-123

V.3.3 地層力学(ジオメカニクス)に関する検討

(1) 経緯と目的

減圧法による MH 分解は、大きな圧力・有効応力変化を発生させる事象であるので、様々 な力学的な現象を発生させる可能性がある。具体的には、図 1 に示すような、掘削、生産、 安全に関わる諸問題が考えられる。これらに関する予測、リスク評価、解決策の検討には、 地殻の力学的条件(応力、孔隙圧力、堆積物の力学挙動等)に関する情報収集と、それをモ デル化する技術の統合化が必要である。MH21の研究プログラムでは、これらの地層力学(ジ オメカニクス)的観点での研究を多方面に渡って実施してきた。

(2) 地殻の力学的条件に関する情報とモデル化

応力評価

地層の力学的条件のうち応力に関しては、必要な情報(応力テンソル 6 成分の空間的な広がり)を評価できる確実な手法が存在しないため、コア、坑内試験(小規模水圧破砕など)、 物理検層などから総合的に評価する必要がある。

フェーズ 1 中の基礎試錐「東海沖~熊野灘」においては、ブレイクアウト法による応力方 位の評価と、圧力検層ツール CHDT (Cased-hole dynamics tester) による小規模水圧破砕、 弾性波検層解析 (S 波の異方性と分散曲線の関係) などから、応力情報を収集したが、フェー ズ 2 の第 1 回海洋産出試験で実施した圧力コアリングの際に、ASR (Anelastic Strain Recovery, Nagano et al., 2015) 及びコア変形法による応力計測を実施した。また、検層から の評価も、ブレイクアウト法の適用を中心に継続しており、比較的狭い範囲で、また深度に よっても最大水平応力方位が変化していることがわかる。応力度に関しては、基礎試錐にお ける分析とASRの分析でいずれも最大と最小の水平応力の差が小さい正断層型応力状態と評 価されており、整合的な結果となっている(図 2)。

② 1 次元地層力学モデル

検層データによる1次元地層力学モデルの構築(山本他、2011)を各坑井に対して実施した。フェーズ2からは、後に述べるケンブリッジ大学の地盤工学的モデルへの入力パラメータとして適用できるように、Modified Cam-Clayモデルのパラメータ *Pco、χ、κ、M*も次式より導出している。

 $p_{c0} = 5.83 + 2.182 p_e^{0.3} - 8.94 \phi^{0.3} + 15.1254 s_{hvd} + 1.27 vcl^{0.3}$

 $Log_{10}\chi = -2.556 + 0.0021 p_e^{5.0} + 4.347 \phi^{0.3}$

 $M = 2.038 - 0.3819 p_e^{0.311} - 0.284 vcl^{0.3}$

v = 0.32

 $\kappa = 0.01$ in methane hydrate zone

 $\kappa = 0.02$ outside methane hydrate zone

ここで、*pe*は垂直有効応力、*q*は孔隙率、vclは粘土含有量で、*Pco*の単位は MPa である。 図 3 に AT1-P2 井及び AT-P3 井の 1 次元地層力学モデルと、それを用いた掘削時のブレイ クアウト分析結果を示す。いずれの坑井も坑径拡大が著しかったが、AT1-P2 では特に顕著で あった。解析結果は、坑径拡大の箇所について実測と整合的であった。

③ 3 次元地層力学モデル

貯留層スケールでの解析には3次元地層力学モデルの構築が必要であるが、3次元の広が りをもったデータは地震探査データしかない。そのため、3次元空間に分布するP波速度(Vp) データと、強度評価に必要な主要な物性の間に

 $V_p = c_0 + c_1 s^{tot}_{hyd} + c_2 \varphi + c_3 p_e + c_4 v_{cl} + c_5 s^{tot}_{gas}$

なる線形関係を仮定する。ここで、*s*^{tot}cは成分 c の全体積における割合である。cn は場に応じた定数であり、この値が地震波速度と物性データの両方が存在するすべての地点で最適となる組み合わせを探すことが必要となる。

さらに、*V_p*は25m間隔でしか与えられず、各物性データは坑井で1次元的に与えられる。 そこで、物性分布を地層内の知りたい点(例えば応力解析の計算ノード)に与えるために、

 $Am + e = a_n$

の関係式を仮定する。ここで、mは情報を知りたい空間内の点(応力解析の計算ノード及び 計算ノードのサイズにアップスケールされた坑井上の点)における物性値及び V_pを格納した ベクトルで、 a_0 は既知のデータ(坑井上の物性と地震探査グリッド上の V_p)を格納したベクトル、eはガウス分布を仮定した誤差ベクトルである(図4)。ここで、誤差ベクトルを最小にする最適化問題として上式を解くが、得られる物性には物理的な制約がある(例えば 0<Vcl<1)ため、このような先験的な知見を取り込むためにベイズ統計の手法を適用した最適化スキームを使用した(Tarantola, 1987)。

同手法を用いて作成した a 濃集帯(海洋産出試験候補地地点の一つであったが、実際には 試験は行われなかった)の 3 次元地層力学モデルと、それに基づく産出試験実施時の断層の 再活性化の状況を図 5 に示す。同濃集帯は断層の発達が見られ、この地域で産出試験を行え ば断層変位が生じる可能性があることが示された(Qiu et al., 2012)。

この手法は海洋産出試験実施地点に適用され(図 6)、坑井とケーシング、出砂対策装置の 安定性評価などにも用いられた(図 7)。

(3) ハイドレートを含む堆積物の力学挙動のモデル化とアップスケーリング

ハイドレートを含む未固結堆積物の挙動をより現実に即して表現するために、ハイドレートの存在を考慮した修正 Cam-Clay モデルを採用した限界状態土質力学モデルを開発した (Uchida et al., 2012)。

さらに、実際の地層が積層構造を持つことから、MH を含むタービダイト堆積物の不均質 性を、等価な積層異方性材料に置き換えることとする。各層は水平に堆積した平行な地層と 仮定され、それぞれ独自の力学(弾性係数、強度)、水理(浸透率)、及び熱物性(熱伝導率、 比熱)と、異なるハイドレート飽和率(Sh)が与えられていると考える。これにより、異方 性モデル(Wheeler, 2003; Wongsaroj, 2006)を適用することで、精細メッシュと等価な物性 を持つ粗いメッシュに置き換える均質化の手順を開発した(Zhou et al., 2015, Zhou et al., 2018a)。

砂孔隙中のハイドレートの存在は、粘着力の発生とダイレーションの増加の二つの変化を 引き起こし、*p'-q*平面上の降伏曲面を拡げる働きがある(Uchida et al., 2012)。ここでは、 1)堆積物は均質であり、ハイドレート飽和率が層によって異なる(AMHCS-H)、2)堆積物 は、層によって異なる性質を持ち、ハイドレートは含まない(AMHCS-T)、3)堆積物は層に よって異なる物性値を持ち、それぞれの層が異なるハイドレート飽和率を持つ(AMHCS-TH) の3ステップで、異なる条件で数値計算を繰り返すことで決定していくプロセスをとってい る(図8)。

図 9 に、AMHCS-TH の降伏曲面の様相を示す。この場合、ハイドレート分解前と分解後 を考慮すると、材料の弾性テンソルの積層異方性を示すパラメータ(aHo, aro, A, 及び B)、初 期の降伏曲面を表す定数(BHo 及び Bro)、ハイドレート分解による降伏曲面の回転と硬化則を示 すパラメータ(ω, μ, η, 及び ρ)の10個のパラメータが必要になり、図 8 のプロセスでその 10 個のパラメータを徐々に最適化していく。 図10では、第1回海洋産出試験の減圧履歴を使って計算したガス・水生産レートの履歴を、 このプロセスで作成した均質化モデル(homogenized)と物性を単純に補間したモデル (conventional)に対してそれぞれ実測値との比較を示している。Case1は1mメッシュ、 Case2は3mメッシュであり、conventionalの結果は実測と異なり、またメッシュ分割点数 の影響も大きいが、均質化モデルは実測と近いだけでなく、メッシュ分割点数の影響も軽減 されていることがわかる。

また、図 11 と図 12 では、均質化モデルによる長期フローの計算を行い、ハイドレート分 解に伴う応力ひずみ分布が坑井周辺の地層に与える影響を評価している(Zhou et al., 2018b)。 ハイドレート分解初期には坑井方向への収縮によるせん断ひずみの発生、分解中は等方的な 圧縮、分解後は垂直有効応力の増加による沈下の発生が見られることが示される。

(4) 作井作業の影響検討

ハイドレートを含む未固結堆積物中で坑井を掘削・仕上げし減圧法でハイドレートを分解 させる状況を数値シミュレーションで検討する際に、作井作業に伴う、泥水、セメントによ る圧力変動が周囲の地層の応力と変形にどう影響するのか、詳細な検討を行った。

その検討においては、セメントの固化に伴う収縮の影響が無視できないと考え、シュルン ベルジェ社に委託して実施した海洋産出試験で使用するセメントを想定したセメント固化実 験の結果を用い、数値計算で地層とセメントの相互作用を検討し、セメントの収縮が地層の 浸透率とそれに伴う水の供給量に影響されることがわかった(Sasaki, et al., 2018a)。

また、坑井掘削過程と後のガス生産において坑井周辺で発生する応力・ひずみの詳細なシ ミュレーションを実施し(Sasaki, et al., 2018b)、塑性ひずみの発生は掘削段階、応力変化は セメント固化段階が重要であることなどがわかった(図 13)。

(5) まとめ

フェーズ2及び3の間、海洋産出試験フィールドを対象に、データの取得と解析を集中的 に実施し、1次元及び3次元ジオメカニクスデルの構築と、その結果を利用したモデリング 技術の開発を進めた。実測データが乏しいため、現状では実際の現象との比較が難しいが、 今後は地層内のひずみ計測なども組み合わせて、実証を進めて行く必要があると考えており、 陸上産出試験にむけた検討にも反映させている。

ジオメカニクスの課題については、他にも計測、コアの力学試験など様々な研究項目との 協同が必要であり、今後も MH 研究において総合的な取り組みが必要である。



図1 海洋産出試験において考えられていた貯留層の力学的な課題。



図 2 基礎試錐東海沖~熊野灘の検層データのブレイクアウト分析による応力方位(上、 Yamamoto et al., 2006)と応力度に関する情報(中)、並びに 2012 年の圧力コアリングの ASR データに基づく主ひずみ方位(下左、Nagano et al., 2015)及び第1回及び第2回海洋産出 試験坑井のブレイクアウト分析による応力方位(下右)。狭い領域で応力方位が変化している が、最大主応力が垂直応力となる正断層型の応力状態であること、最大と最小の水平応力の 差は小さいと見積もられていることは共通している。



図 3 AT1-P2 井及び AT1-P3 井の1 次元地層力学モデルと、それに基づくブレイクアウト解析の結果。結果は実際の坑壁拡大状況とよく整合している。



m : Unknown vector; Seismic velocity and mechanical properties on FEM nodes

a₀ : Know data vector, Seismic velocity on seismic grid and log data points on well

: Error vector with Gaussian distribution

е

Posterior probability (probability of \mathbf{a}_0 when *m* is given) Prior probability of m: considering physical limitation and expected mean value (m_0) $P(\mathbf{a}\mathbf{0} | \mathbf{m}) = ((2\pi)^n |\mathbf{C}_{\mathbf{b}}|^{\frac{1}{2}} Exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{a}\mathbf{0} - \mathbf{A}\mathbf{m})^T \mathbf{C}_{\mathbf{b}}^{-1}(\mathbf{a}\mathbf{0} - \mathbf{A}\mathbf{m})\right]$ $P(\mathbf{m}) = ((2\pi)^{nm} |\mathbf{C}_{\mathbf{M}}|^{\frac{1}{2}} Exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\right]$ 15

図 4 ベイズ統計に基づく 3 次元地層力学モデルの構築手順。ここでは、25m 間隔の地震波 速度と、坑井で与えられる物性パラメータから、3 次元空間内の計算点の力学パラメータを、 先見的知識を反映させて誤差最小化の手順で解析している。





図5 α濃集帯における3次元地層力学モデルで作成された粘着力cの分布(左上)、断層モ デル(右上)、及び同地域で産出試験を実施した場合に予想される体積ひずみの大きさ。ハイ ドレート分解と圧力変化は MH21-HYDRES の計算結果を使用した。断層の再活性化(変位 の発生)が起きる可能性が示された。



図 6 第 2 回海洋産出試験のモデル。3 次元地層力学モデルの Pc0 分布(左)と、P3 井掘削 時の有効応力変化の予測(ハイドレート分解と圧力変化は MH21-HYDRES の計算結果を使 用)



図7 海洋産出試験実施の際に AT1-P3 井周辺(上)及び坑井に加わる応力の予測。



図 8 タービダイト砂泥互層を積層異方性材料とみなすことでアップスケーリングする手順 の模式図。堆積物の均質性とハイドレート飽和率の分布の不均質を順次考慮して、必要な 10 個のパラメータを決定する。



図9 ハイドレートを含む堆積物の降伏曲面(左:等方材料(CMHCS)、中央:AMHCS-THの ハイドレート分解前、右:AMHCS-THのハイドレート分解後)。初期の堆積物の物性の不均質と ハイドレート飽和率の分布の不均質を考慮していて、ハイドレートの分解は異方性の低下(降伏 曲面の時計回りの回転)で表現される。



図 10 均質化モデル (Homogenized model) と物性を単純に補完したモデル (Conventional) のガス・水生産量と実測の差異。Case1 はメッシュが細かく、Case2 はメッシュが粗い。





メタンハイドレートの分解・生産に伴う長期フローを想定した 図 11 ひずみ分布の変化(Zhou et al., 2018b)



図 12 第二渥美海丘の条件で長期フローした場合の地層内各の降伏面の変化及び応力経路 (左)及び典型的な応力とひずみの変化パターン。(Zhou et al., 2018b)



図 13 坑井掘削の各ステージ(左)における応力ひずみの変化(右)(Sasaki, et al., 2018b)。 左:(a)掘削、(b)ケーシング設置、(c)セメンチング、(d)セメント固化、(e)ケーシングの重量 載荷、右:(a)垂直有効応力、(b)周方向有効応力、(c)半径方向有効応力、(d)間隙圧力、(e) 偏 差塑性ひずみ

参考文献

- Qiu, K., Yamamoto, K., Birchwood, R.A., Chen Y.-R., Wu, C., Tan, C.-P. & Singh, V. 2012. Evaluation of Fault Re-activation Potential during Offshore Methane Hydrate Production in Nankai Trough, Japan, OTC-22890-MS, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 30 April-3 May, 2012.
- Yamamoto, K., Murray, D., Khong C.-K., Yasuda, M. & Nakamizu, M. 2006. Geomechanics data acquisition techniques used in the METI Tokai-oki to Kumano-nada drilling campaign, the 12 th Formation Evaluation Symposium of Japan.
- Zhou M, Soga K., Yamamoto K. (2018a), Upscaled Anisotropic Methane Hydrate Critical State Model for Turbidite Hydrate - Bearing Sediments at East Nankai Trough, JGR Solid Earth, 30 July 2018, https://doi.org/10.1029/2018JB015653
- Zhou, M., Soga, K., Yamamoto,K. (2018b), Geomechanical responses during depressurization of hydrate-bearing sediment formation over a long methane gas production period. JGR 30 July 2018 https://doi.org/10.1029/2018JB015653
- Sasaki, T., Soga, K., Abuhaikal, M. 2018a: Simulation of wellbore construction in offshore unconsolidated methane hydrate-bearing formation, J. Petrol.Sci. Eng., 169, 205–219.
- Sasaki, T., Soga, K., Elshafie, M.Z.E.B 2018b: Water absorption and shrinkage behaviour of early-age cement in wellbore annulus, J. Natural Gas Sci. Eng., 60 (2018) 312–326.
- Tarantola, A., Tarantola, A., 1987, Inverse problem theory; methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier (1987)
- Yu Nagano, Weiren Lin, Koji Yamamoto (2015): In-situ stress analysis using the anelastic strain recovery (ASR) method at the first offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan, Marine and Petroleum Geology, 66, Part 2, 418-424.
- Uchida, S., et al. (2012) J. Geophys. Res.: Solid Earth (1978-2012), 117(B3).
- Wheeler, S. J., et al., (2003). Canadian Geotechnical Journal, 40(2):403-418.

Wongsaroj, J. (2006). PhD thesis, University of Cambridge.

- 山本晃司, Qui, K, Birchwood, R., 2011, 東部南海トラフの3次元地層力学モデル, 第3回メタンハイドレート総合シンポジウム
- Zhou, M., Soga, K., 山本晃司: 2015, ハイドレート含有タービダイトの非均質性・異方性の数値シミュレーション, 第7回メタンハイドレート総合シンポジウム

V.4 出砂現象の研究

V.4.1 大型室内試験装置

(1) 概要

2013年3月には、東部南海トラフの第二渥美海丘エリアにおいて、世界で最初の第1回海洋産 出試験が実施された。この試験では、減圧法によって6日間で約120,000m³のガスが生産された が、出砂現象が確認されるなど、安定的な生産を継続する上での課題も提示された。MH 層から 長期的に安定して、安全なガス生産を可能にするためには、本現象の評価並びにその対策技術の 開発が必要なことから、第1回海洋産出試験で確認された出砂現象に関して、海洋産出試験地の 貯留層を模擬した砂層試料及び海洋産出試験生産条件等で出砂現象を解析し、出砂現象の評価並 びにその対策技術開発を行うための装置開発を行った。

(2) 装置の特徴について

導入した大型出砂評価試験装置を図1に示す。本装置は大きく分けて、土層、固液分離タンク、 ウォーターポンプの三つの部分から成り立つ。土層は坑井周辺を模擬しており、中心には現場に て実際に使用されたスクリーンを設置することが可能な構造になっている。土層の大きさは、深 さ60cm、半径方向に50cmであり、約1tの砂が充填される。土層内には密度を測定するためのセ ンサー格納部が2本対角に設置されており、ここにRI密度計を挿入することで土層内の密度測定を 行える。土層底部には土層内の差圧を図るためのセンサーが合計12個設置されており、土層上部 には蓋を閉めた際にゴム製のバルーンが接触するように設置される。現場の条件を考慮して土層 に対して最大3MPaまで載荷可能な機構になっている。固液分離タンクはメインとサブの二つあ り、土層側に近いメインの分離タンク下部には秤が設置されており、出砂量を測定することが可 能である。装置内を流れる水はウォーターポンプにより循環する。土層と固液分離をつなぐパイ プにはアクリル製の観察窓が設置されており、出砂した砂の様子はここから観察することができ る。



V-33 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム



図1 大型出砂評価装置の概要

(上)装置全体写真、(下)装置概略図

大型出砂評価試験装置の仕様をまとめると以下の通りである。

- 内径:1180mm、高さ:600mm、土層体積:0.62m³
- バルーンによる上載圧:最大 3MPa、背圧:最大 1MPa
- ポンプの最大吐出量:0.4m³/min (576m³/day)、最大揚程:115.3m (1.13MPa)
- 本装置により得られる主なデータとしては、入口積算流量、出口積算流量、土層内差圧(12 か所)、土層内密度(2か所)、出砂量が挙げられる。
- (3) 実験例について

本装置による実験の流れ及び結果の一例を示す。実験では、土層の作成が必要になるが、原位 置での粒径を模擬するために、7号珪砂、8号珪砂、ファインサンドなどを混合し、砂の粒径分布 に対応させ、混合した土層試料は段階的に突き固めにより充填を行い作成した。その作成の流れ を図2に示す。図3には、作成した土層(出砂した砂の粒径に模擬した土層試料)を用いて、海洋産 出試験の条件などを参考に、7日間の連続注水実験を実施した際の圧力や注入量に関する結果を示 す。本実験の結果では、細粒砂の移動は生じやすいが出砂現象には至らないことが確認された。 現場での複雑な条件を全て再現は出来ないが、出砂現象に関して幾つかの事象は検討可能と考え られる。



図2 土層作成及び試験手順



図3 出砂試験における圧力、流動挙動

V.4.2 CT スキャナによる出砂現象の可視化とメカニズムの解明

(1) 目的と経緯

地下で発生する出砂現象の可視化は現象理解の重要な課題であり、継続的に研究している。その一環として、本研究では未固結地層内の生産井周囲で起こる出砂を室内実験で再現し、その過程をX線CTで可視化することでその発生メカニズムを検討した。

出砂につながる地層破壊発生後の対策として、坑井内にあって地層と接する金属パイプの生産 流体流入口にスクリーンを設置し、砂がパイプ内に流入することを防ぐことが行われる。ただし、 スクリーンの目開きを小さくしすぎると目詰まりを起こして生産障害となり得る。さらなる対策 として、スクリーンと地層の間に粒子径の粗い砂(グラベル)の層を設置する方法が行われる。 この方法は、確実性が高い反面、設置作業が複雑になることが欠点である。したがって、できる だけ限界に近い対策とすることが必要であり、その限界を見極めるためには出砂の挙動を正しく 理解することが不可欠となる。一方、MH は未固結の地層、つまり全体が既に破壊して砂粒子と なったような地層に存在しており、従来の石油・天然ガス開発が対象としてきた固結砂岩層とは 状況が大きく異なる。このため、上記のような従来の対策をそのまま適用できるかどうか定かで はない。実際のところ、2013年に行われた第1回の海洋産出試験では、従来の知見を踏まえた対 策が施されたものの、出砂が発生して流入量が処理レベルを超えたために試験期間が大幅に短縮 された。これらの状況を踏まえて未固結地層で発生する出砂挙動を調べる研究を行うことになっ た。

(2) 内容及び成果

本研究で検討した課題は以下の通りである。

- 室内出砂実験方法の構築
- ② 出砂に伴う砂層構造の変化
- ③ スクリーンの目開きと出砂の関係
- ④ GeoFORM[™]による出砂抑制効果
- ⑤ 生産流体に混入したガスの効果

それぞれの課題で得られた成果を以下にまとめる。

室内出砂実験方法の構築

本研究では図 1 のような状況を想定した。すなわち、圧縮応力(封圧)を受ける地層に埋め 込まれたケーシングパイプの一部にスクリーンが設けられており、そこを通って地層内の流体が パイプ内に流れ込む。このときのスクリーン近傍の状況(同図 b)を室内実験で再現し、出砂現 象とそれに及ぼす各種因子の影響を調べる。



図 2 室内出砂実験装置

この目的を達成するために製作した実験装置が図 2 である。この装置は、試験片を格納する 円筒容器と、その試験片に軸方向の圧縮応力(軸圧)を負荷するための機構からなる。CT スキ ャナで内部を可視化する場合、X線は装置中央に位置する黒色の円柱部分を半径方向に透過する。 試験片は直径 200 mm で長さが 150 mm の円柱形であり、東北硅砂 8 号、カオリン及び水を質 量比 100:30:13 の割合で混合した材料で作成する。東北硅砂 8 号及びカオリンの平均粒径はそれ ぞれ 130 及び 7 µm である。試験片の両端にピストンがあり、それを水圧で押し出すことによっ て試験片に軸圧を負荷する。ピストンには中央を貫通する流路があり、そこを通って水が試験片 内部に図 2 の左側から流入する。水はやがて反対側の試験片端面に到達し、同じくピストンの 中央を貫通する流路を通って砂と一緒に外に流れ出る。注水出口側の試験片端面とピストンが接 する部分には、出砂を防ぐスクリーンとして目開きが一様なメッシュをピストン側に取り付ける。 試験片から出てきた水と砂をシリンダーで受けて、その重量変化から出砂量を評価する。なお、 ピストンで軸方向に圧縮された試験片はポアソン比の効果で半径方向に膨張しようとするが、そ の変形が円筒容器によって拘束される。その結果、試験片が軸方向のみならず、およそ軸圧の半 分の大きさで半径方向からも圧縮される。 ② 出砂に伴う砂層構造の変化

直径 40 mmの注水出口に目開きが 460 µmのメッシュを取り付け、約 100 cc/minの流量で注 水を行った結果の例を図 3 に示す。注入圧が約 1MPa でピークとなった後に徐々に減少して 0.7MPa 強で落ち着きかけたものの、700 sec 付近から再び減り始めて終盤は 0.5MPa でほぼ一 定となった。出砂については、その重量変化からわかるように注入圧のピーク後に出砂が始まっ て一定のレートで継続した後、700 sec 付近から減り始めて終盤は零に近い状態となっている。 CT 画像は、実験中に撮影した試験片の半径方向断面の CT 画像を再構成して作成した軸方向の 断面を示しており、右側が注水出口側である。出砂が起こると同時に、円弧状に見える複数の破 壊面 (3 次元的にはお椀状の割れ目が複数重なった構造、以下、タマネギ構造と呼ぶ)が現れ、 小さいものから始まって、その外側により大きいものが段々に形成されている。しかし、出砂レ ートが低下した時刻(図3でT15と表示)以降には目立った変化がなくなっている。



図3 出砂実験結果の一例(注水出口メッシュ 460µm)

以上の結果を勘案するとタマネギ構造の形成過程は図 4 のように解釈される。すなわち、出 砂が始まると同図 a2 のようにメッシュ付近の砂の密度が低下し、その部分が荷重を支えられな くなるために、それより上流に位置する砂の塊がメッシュ側に移動する。同様な現象が繰り返し 起きて同図 a4 のようなタマネギ構造が形成される。これに伴って砂層内の水の流れが同図 b の ように変化する。すなわち、当初は同図 b1 のようにメッシュから一様な流速で水が流れ出るた めに出砂が進行するが、タマネギ構造ができると、層構造の間の隙間が流路となるためにメッシ ュに直行せずに、同図 b2 のように迂回する水の流れが増える。この結果、メッシュに接する砂 層内の流速が低下し、出砂も減少したと考えられる。また、タマネギ構造間の隙間という流路が 形成されることで、砂層内を水が流れやすくなり、その結果、注水圧も減少したものと考えられる。つまり、タマネギ構造の発達が出砂の抑制に機能することになる。



図4 出砂に伴う砂層内部構造の変化

③ スクリーンの目開きと出砂の関係

注水出口に取り付けるメッシュを、目開きが 390 µm、460 µm 及び 630 µm のそれぞれのもの に変えて行った実験で観察された出砂重量の時間変化が図 5 である。これからわかるように、 各メッシュの目開きの違いは砂粒子の 1、2 個分に過ぎないものの、それに伴って出砂挙動は大 きく変化し、出砂のレートが目開きと共に増えていく。ただし、砂粒子より目開きが大きくとも、 それが 3 倍程度であればほとんど出砂しない。これは、出口付近の砂粒子が複数連なってアー チ構造を形成し、砂粒子を出口側に押し出す力を支えるためと考えられる。

一方、なんらかの原因でスクリーンが破損した状況を想定して、目開き 390 µm のメッシュの 中央に図 6a のように直径約 2mm の穴を開けたものを用意し、それを注水出口に取り付けて実験 を行った。このときの実験結果が同図 b である。大きなレートで出砂が始まってすぐに注水圧 が零まで急減している。このとき撮影した CT 画像(図 7)から、穴周囲の砂が出て来たわけで はなく、砂の流出が試験片を軸方向に貫通する孔状の流路を形成したために注入圧の急減が起き たことがわかった。その孔は、重質油開発の分野で観測されているワームホールに相当する構造 と考えられる。また、注水圧が零になった後もしばらく出砂が継続していることから、ワームホ ールが砂を集積して運搬する機能を有していることがわかる。このことは、なんらかの原因で水 の流れが集中して砂が出始めると、そこを起点とするワームホールが形成されて出砂が促進され ることを示している。



図5 メッシュ目開きによる出砂レートの変化



図6 スクリーン破損を模擬した実験結果

④ GeoFORMTMによる出砂抑制効果

MH 層を対象にした出砂対策として、生産流体を回収するパイプ外側を GeoFORM™ という 発泡材で覆う方法が提案されている。その効果を調べるために、GeoFORM™ をφ52.5 mm で厚 さ 10 mm の円盤形に加工し、これをメッシュの代わりに注水出口に取り付けて上記の同様な実験 を行った。その結果、出砂は全く発生せず、粒径の小さいカオリンも観察されなかった。ただし、 注水圧が相対的に大きくなり、メッシュよりもやや流動抵抗が大きいことがわかった。図 8 は 実験後の GeoFORM™ の状況である。砂層と接していた側の表面がカオリンと思われる白色の 物質で覆われているが、極表面に留まっていて内部に侵入した様子はなかった。

図7 スクリーン破損を模擬した実験で得られた試験片軸方向断面 CT 画像

図8 GeoFORMTMの取り付け状況と実験後の断面

⑤ 生産流体に混入したガスの効果

MH からのガス生産時には水とガスが一緒にスクリーンを通って坑井に流入する。その状況 を模擬するために水に二酸化炭素を混ぜた流体を流す実験を行った。水と二酸化炭素の割合はお よそ2対1である。その結果、水のみを流した場合よりも2-3倍程度大きいレートで出砂が起 こることがわかった。ただし、CT で観測された内部構造の変化は水のみを流した場合と変わら なかった。このことから、水のみよりも炭酸水を流した場合の方が出砂量が増えるのは、試験片 内部ではなく、注水出口近傍で起こる破壊現象が変化するためと推定される。

(3) まとめ

未固結砂層からの出砂を模擬する室内実験を実施して下記の内容を明らかにした。

- 出砂が起こると同時に試験片内部にお椀状の破壊面が複数形成され(タマネギ構造)、注水出 口側から注水入口側に向かって徐々に拡大していく。この構造は出砂を抑制するように機能 する。
- 注水出口に設置したメッシュの目開きが砂粒子径の3倍程度を越えると出砂が発生するよう になり、目開きの大きさとともに出砂のレートが急激に大きくなる。
- スクリーンの破損で水の流れが集中して出砂が始まると、タマネギ構造が形成されず、破損 部から砂層内を上流に伸びるパイプ状の流路(ワームホール)が形成され、出砂は促進され る。
- GeoFORM™は未固結砂層からの砂のみならず 10µm 未満の粒子の流出も抑制できる。ただし、メッシュに比べて流動抵抗がやや大きい。
- 実際のMHからのガス生産時の状況を模擬するために水にガス(二酸化炭素)を混ぜた流体 を流す実験を行ったところ、水のみを流した場合よりも2-3倍程度大きいレートで出砂が起 こることがわかった。

参考文献

- 松原大樹, 伊藤高敏, 長野 優羽, X 線 CT を利用した未固結砂層の破壊と出砂の室内実験, 平成 27 年度石油技術協会春季講演会, 東京, 031, (2015.6.10-11). (優秀発表賞)
- Ito, T. and Nagano, Y., Laboratory Study of Sand Production in Unconsolidated Sands by Using X-ray CT for Methane Hydrate Development, SPE Workshop"Sand Management Workshop", Kuala Lumpur, (2016.4.25-26).

V.4.3 微生物地層固化の研究

(1) 経緯と目的

MH の賦存するような未固結の堆積物の出砂対策手法の一つとして、地層固化法が考えら れる。従来も化学物質を用いた地層固化法は出砂対策手法としても用いられてきたが、1)固 化による浸透率の低下が懸念されること、2)使用される素材が高温の貯留層用の場合が多く、 低温の MH 貯留層にはそのまま適用できないこと、などが課題であった。一方で、微生物を 利用させて炭酸カルシウムを析出させる MICP (Microbiologically induce calcite precipitation)の技術が土木分野などで実用化されており、MH 開発においても有用な手法で ある可能性があった。そのため、ケンブリッジ大学、富山県立大学との共同研究により、こ の手法が海洋で適用可能であるかどうかの検討を開始した。

(2) 技術の考え方

MICP は、地層に尿素及び塩化カルシウム、酢酸カルシウムなどのカルシウム源を送り込むと、微生物が尿素分解酵素(ウレアーゼ)を代謝して尿素が分解され、生じた炭酸とカルシウムイオンが結合することにより原位置でカルシウムを析出させて地層を強化する技術である。

MH 貯留層の出砂対策としては、

- 地層の浸透率をあまり下げないようにコントロールできること(一方、止水対策として は浸透率を下げられること)
- ある程度広がりをもった領域で地層固化を行うこと
- 深海の温度が低い嫌気環境下で実現できること

などが実現の条件となると考えられ、現在検討している対策技術のプロセスは次のようなものである。

- 初期からハイドレート飽和率が低くて浸透率が高い水層に対しては、掘削直後(ハイドレート分解開始前に)、ハイドレート濃集層の浸透率が低い状態で栄養塩と尿素を坑内に送って、選択的に水層に浸透させ MICP により止水処理を行う。なお、水層は出砂層になる可能性が高いため、出砂対策としても効果が期待できる。
- ハイドレート層の出砂対策としては、貯留層の浸透率を下げないように、減圧法などである程度分解をさせて地層の浸透率を上げた後で、析出量をコントロールした状況で作業を行う。
- また、出水量が徐々に増加した場合には、事後に出水対策に用いることも考えられる。 その場合は、生産層に影響しないような深度選択的な圧入技術が必要になる。
 外部からウレアーゼ活性が高い微生物を導入するのが一般的であるが、MH 層原位置の細菌に尿素活性があれば、外来の細菌を持ち込むことなく効果を上げることが期待される。

(3) MICP の効果の確認

はじめに、有用菌として知られていている好気性細菌が嫌気環境下で活性を持つか実験した。その結果、嫌気環境ではむしろ好気性細菌が急速にウレアーゼを代謝する現象が見られた(Jiang et al.,2016)。

また、MICP の効果の評価を行うために、砂の移動を可視化できる装置をケンブリッジ大 学に設置して、効果を確認する実験を行った(図 1)。この実験では、MICP によって出砂が 抑制されること、砂の移動によるグラベルの閉塞も抑制されることなどの結果が得られてい る (Jiang et al., 2018)。

(4) 原位置細菌の利用

MH 層原位置の細菌に尿素活性があれば、外来の細菌を持ち込むことなく効果を上げることが期待され、日本海側、及び東部南海トラフのサンプルの分析でウレアーゼ活性を持つ微生物が発見され(畠他、2016)、出砂抑制効果も見いだされている(林他、2017)。

これらの成果に基づき、第1回海洋産出試験の作業で2012年に取得された、可能な限り原 位置の状況を保った状態で AIST 北海道センターにて長期保管されている高圧コアサンプル を対象とし、コアサンプル内に既に生息しているウレアーゼ活性陽性微生物の働きを工学的 に高めることで炭酸カルシウムの析出能力を促進させる技術の基本的有効性を明らかにする ことを目的とした室内試験(目的微生物の優先化及び炭酸カルシウム析出能力評価)を実施 した。

試験の結果、1か月半程度の培養でウレアーゼ活性陽性微生物の増殖由来と考えられるアン モニウムイオン濃度の上昇が期待できることが明らかとなった。また、析出効率は高くない が、炭酸カルシウム析出が見られた(図2)。

(5) 圧力容器保管サンプル由来の単離微生物による強度増進効果について

第1回海洋産出試験の作業で2012年に採取されたサンプルを用い、目的とするウレアーゼ 活性を有する微生物の単離及び強度増進効果について検討を行った。

強度増進効果の評価では、豊浦砂のみ(微生物固化処理なし)をケース1、日本海側の表層型 MH胚胎層由来の微生物を対象に豊浦砂重量に対して3%程度のカルサイト析出率となるよう 処理を行ったケース2、同程度の析出率を目標に圧力容器由来の微生物を用いたケース3、同 じく圧力容器由来の微生物を用いて砂重量に対する炭酸カルシウムの析出率を1%程度とし たケース4の4試験区について土の圧密排水三軸圧縮試験(JGS0524)を行いCdおよびφdを 求めることとした。

なお、有効拘束圧は試験装置側の制約により 50,100,150kPa としている。結果を表1に示す。 試験の結果から、同じウレアーゼ活性を有する微生物であっても単離場所により強度増進メ カニズムが異なる可能性が示唆された。

(6) まとめと今後について MICP が出砂対策手法として有効な手法であるかどうかの実験的検討と、南海トラフの原 位置に有用菌が存在しているかどうかの検討を実施し、原位置微生物を用いて MICP を実現 できる可能性が示せた。この手法は出砂対策以外にも、帯水層の止水対策にも使用できる可 能性がある。

これらの成果を受けて、2018年に実施された圧力コア採取作業においては、サンプルの質 を保つための船上でのサンプリングを実施して、取得された試料の分析を進めている。さら に、これらの試料で得られたものと同じ微生物を利用して、MICP評価装置による具体的な 出砂抑制効果の試験も実施している。

南海トラフのハイドレート濃集帯の試料で MICP が実施できる可能性が高くなったことから、今後は室内実験に加えて原位置試験の実施も検討の対象となるであろう。

図1 MICP 評価装置。砂の移動状況を前面の窓より観察できる。 図中右側はグラベルを模擬し、砂の部分とは異なる応力を載荷できる。

(a). Without MICP treatment, 5s

(b). Without MICP treatment, 40s

(d). MICP treatment of 1.0M, 40s

図 2 MICP 評価実験の結果。この実験では、砂はグラベルを通過して装置外に排出されて いるが、MICP を施したサンプルでは、出砂が抑えられて、右上の空洞の体積が減少してい ることがわかる(写真では左がグラベル)(左)。また、装置に設置された圧力センサーで圧

V-45 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

カ勾配を見ると、MICP を施していない実験ではグラベル側(グラフ中では右側)で、徐々 に圧力勾配が大きくなる。これは砂分が移動してグラベルを目詰まりさせているからと解釈 されている。一方、MICP を施した試料では全体に圧力勾配が大きいが、変化はあまり見ら れない(右)。

図2 圧力コアから取得された試験サンプルと試験ケース(上)と、ウレアーゼ活性微生物の優 先化試験の結果(左下)及び炭酸カルシウム析出率(右下)。アンモニウムイオンの増加はウレア ーゼ活性微生物の増加に由来していると考えられる。

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 |
|---------|-------|-------------|-------------|-------------|
| | (未処理) | (表層型 MH 由来) | (砂層型 MH 由来) | (砂層型 MH 由来) |
| | | 目標析出率 3% | 目標析出率 3% | 目標析出率 1% |
| 粘着力 Cd | 3.9 | 9.2 | 0.9 | 3.6 |
| (kN/m²) | | | | |
| 内部摩擦角φd | 34.5 | 36.2 | 38.4 | 36.1 |
| (°) | | | | |

表1 表層及び砂層型胚胎層由来の微生物を用いた豊浦砂供給試験体の強度特性

表層型 MH 由来の微生物で固化した供給試験体と比較して砂層型 MH 由来の微生物で処理した供 試験体は炭酸カルシウムの析出量が増すにつれ φ d が増加する傾向が認められた。この理由とし ては、微生物が持つ酵素の特性により炭酸カルシウムの形状、サイズが影響を受けたことが考え られている。 参考文献

- Jiang, N..-J., Soga, K., Yoshioka, H., Yamamoto, K. (2016): Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP), Ecological Engineering, 90, 96-104.
- Jiang, N..-J., Soga, H., Yamamoto, K. (2018): A High-Pressure Plane-Strain Testing System to Evaluate Microbially Induced Calcite Precipitation as a Sand Production Control Method, GeoShanghai 2018 International Conference: Geoenvironment and Geohazard, May 27-30, Shanghai, China.
- 畠俊郎・高橋裕里香・西田洋巳・安田尚(2017):日本近海のメタンハイドレート胚胎層から単 離した微生物を用いた 土の強度増進効果に関する実験的検討、地盤工学ジャーナル Vol.12, No.1, 151-160.
- 林 祐斗・畠 俊郎(富山県立大環境)・米田 純・山本晃司(2017):減圧法による MH 生産時を想 定した微生物固化による出砂対策としての有効性評価に関する検討,第9回メタンハイドレ ート総合シンポジウム(CSMH-7)

V.4.4 出砂シミュレーション

(1) 経緯と目的

未固結の貯留層において MH を分解させてガスを生産する場合、出砂は避けては通れない 問題である。適切な出砂対策を講じる上では出砂の発生の予測が必要とされるが、石油業界 で用いられている出砂解析の数値シミュレーションモデルは岩石を対象としたもので、未固 結堆積物から継続的に砂が流入するような現象を扱うことは難しかった。そこで、JOGMEC では、ケンブリッジ大学と共同で開発した熱・流動・力学・化学反応(THMC)連成モデル をベースに、テクニオン大学、レンセラー工科大学と協力して、地層内からの砂の輸送をシ ミュレーションするモデルを開発し、陸上産出試験、海洋産出試験の結果の評価と出砂原因 究明に用いることとした。

(2) モデルの構成(内田他 2015、Uchida et al., 2016a)

このモデルは、他のMH生産シミュレータと同様に、多孔質流媒体内のガス・水の2相流、 伝熱、ハイドレート分解反応を計算できるのに加えて、地層の変形と応力変化を扱え、さら に、出砂現象の発生と砂の輸送を扱えるようになっている。モデルの中では、砂は、初期の 状態で変化しない部分 (V_{ssi}) と流動して水・ガスと一緒に流れている部分 (V_{fs})、さらに一旦 流動化したが再堆積した部分 (V_{ssi}) に分かれていて、 V_{fs} は流体 (ガス及び水)の流れに沿っ て流動するとしてその輸送を計算する (図 1)。

出砂の発生、輸送、再堆積は次のメカニズムで生じると考える。

- 出砂は、貯留層内の各点で動水勾配がある一定の値(臨界動水勾配 i^{cn})を超えると発生 する
- 貯留層内の各点における流れる砂の発生量(V_{ssi}の減少量)は、出砂ポテンシャル M^{drc} という量に比例する。
- 出砂ポテンシャル M^{dtc} は、全せん断ひずみの大きさ Ed が大きくなると増大する。
- 動水勾配が低下してある値ωsi^{crt}以下になると、砂は再堆積する
- 有効応力は、出砂の発生によって変化する(流動した固体が有効応力を担わないため、 残った固体が受け持つ力が増える)
- 浸透率は、ひずみに加えて出砂の量(有効空隙の変化)によって変化する。
- 以上のメカニズムを盛り込んだシミュレーションを行って、出砂の量を予測している。

(3) 第1回海洋産出試験の出砂のヒストリーマッチング(内田他 2015、Uchida et al., 2016b) このモデルを第1回試験に適用して、出砂現象のシミュレーションを行った。検層データ 等から得られた地層の浸透率などのパラメータを用いて、またモデルに含まれる経験的パラ メータは計測値に合致するように決定した(図2)。

この計算では、実際の坑井に設置されていたスクリーンとグラベルパックがモデル化され ていないため、初期から出砂が発生しているように表現されているが、この体積(25 m²=実 際に船上に上がった砂の量)が出砂発生時点で流動できるようにスクリーンの裏側に準備さ れていたと解釈することもできる。

また、図3に計算された貯留層内のガス飽和率(ハイドレート分解領域を示す)、及び流動 化した砂の量の分布を示す。実際に出砂が発生したと見られる砂泥互層区間の下部で、砂の 移動が発生していたことが計算されている。これは、当該区間の浸透率が高いため流速が速 く、ハイドレート分解も進んだこと、それらによって大きなせん断ひずみが発生したことが 原因であると考えられる。

(4) まとめ

未固結堆積物における出砂現象を定量的にモデル化できるように、地層内の砂の流動をシ ミュレーションできる数値解析モデルを開発し、第1回試験の出砂現象のヒストリーマッチ ングを行って、実測と整合的な結果を得ている。

さらに、スクリーンを含めたモデルの開発と、第2回試験の出砂現象の検討を引き続き実施している。また、モデルの中には経験的に決定しなければならないパラメータが複数含まれている。それらの値を定めるため、個別要素法を用いたシミュレーションや、砂試料を用いた室内実験を実施している。

図1 出砂モデルにおける堆積物の構成。*V*sが固体、*nV*が孔隙を示すが、流動計算においては流体と流れている砂*V*sは一体として扱われる。

図2 東部南海トラフの貯留層パラメータと減圧履歴を用いたガス・水・砂の累積生産量(実 測(点線)と計算(実線))。実際の坑井ではグラベルパックが施されていたので6日目まで出砂 は起きていないが、これだけの砂が流動する状況でスクリーンの裏側に準備されていたと考 えることができる。

図3 計算に使用した初期及びハイドレート分解後の浸透率(左),試験開始6日後の地層内 のガス飽和率分布,初期の状態で変化しない砂の量の変化率(=少なくとも一度は流動化し た砂の割合)。実際に出砂が発生したと見られる、砂泥互層区間最下部付近で一番多く流動す る砂が生成されていることがわかる。

参考文献

- 内田俊・Assaf Klar・山本晃司(2015): 地層内の粒子流動を考慮した出砂プロセスの数値解析モ デル, 第7回メタンハイドレート総合シンポジウム(CSMH-7)
- Uchida, S, Klar, A, Yamamoto, K (2016a): Sand production model in gas hydrate-bearing sediments, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 86:303-316: DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.04.009
- Uchida, S., Klar, A. and Yamamoto, K. (2016b): Sand production modeling of the 2013 Nankai offshore gas production test. In: F. Wuttke, S. Bauer & M. Sanchez (eds.) 1st International Conference on Energy Geotechnics, 29-31 August, Kiel, Germany. 451-458.