

メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発

— 現場への適用を目指して —

天満 則夫

メタンハイドレート (MH) は次世代のエネルギー資源として期待されており、有効なガス生産手法として減圧法が提案されている。この減圧法を適用した場合にはMH層の圧密やMH分解に伴う変形が予想されており、変形の影響範囲の把握や変形に伴う坑井等の海底設備への影響を評価することが長期的に安全な生産技術を開発する上で必要である。そこで、地層の変形挙動や坑井の健全性評価を進めるために地層変形シミュレータ (COTHMA) の開発を中心とした地層特性評価技術の開発を進めた。現在、地層特性評価技術として「地層変形シミュレータの開発」、「坑井の健全性評価」と「広域の地層変形評価」の3課題の研究開発を進めており、この論文ではその実用化に向けた技術の体系化に関して論じる。

キーワード: メタンハイドレート (MH)、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)、地層変形シミュレータ COTHMA、ジオメカニクス

Development of evaluation technologies for sedimentary characteristics

– Applicability of the technologies to the assessment of methane hydrate sediments –

Norio TENMA

Methane hydrate (MH) is considered to be part of a new generation of energy resources. Depressurization has been proposed as a method of extracting methane gas from MH in marine sediments. During depressurization, sediment deformation may occur because of MH dissociation and increased effective stress. It is therefore important to develop long-term, safe methods for protecting equipment used on the sea floor against the impact of deformation. We have developed the “COTHMA” geo-mechanical simulator to predict sediment deformation during methane gas production from MH. We have also performed laboratory experiments (push-out tests) of well integrity to determine model parameters. Deformation and stress in the vicinity of a production well were evaluated to assess the integrity of the well. Our technologies for evaluating sedimentary characteristics consist of the development of the geo-mechanical simulator and the evaluation of well integrity and wide-area deformation. Based on this research, we are now preparing technologies for practical application.

Keywords: Methane Hydrate (MH), MH21 Research Consortium, COTHMA, Geo-mechanics

1 はじめに

メタンハイドレート (以下、MH) はメタン分子が高圧・低温下の条件で、水分子の籠の中に取り込まれた固体の結晶である。この高圧・低温下の条件になる環境として陸域では永久凍土地帯、海域では大陸縁辺部の堆積層 (例えば、水深 1000 m 以下の海底面より 200 ~ 300 m) 等があり、このような条件下で固体として存在している。圧力を下げたり (減圧)、温度を上げたりすると、メタンガスと水に分解することから新たな天然ガス資源として期待されている。これまでの調査・研究によって日本の近海にも多く存在することが分かっている。この MH 資源開発のために 2001 年度に「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)」が組織され、研究開発が進められている^[1]。

産総研メタンハイドレート研究センターは、この MH21

の中で生産手法の開発を担当し、有効な生産手法として減圧法を提案している^[2]。減圧法とは、地層中の原位置において水をくみ上げ圧力を下げることで MH をメタンガスと水に分解させて、メタンガスを採取する方法であるが、この減圧法を適用した場合には、図 1 に示すように MH 層の分解に伴う変形や圧密が予想されている。例えば、MH 層からのガス生産に伴い地層が変形すると生産井と地層との間に局所的な変形が起こり流路形成やガス漏洩といった生産障害を引き起こす可能性が考えられる。また、地層変形によって、坑井等の構造物の安定性に影響を与え、長期的に安全な生産を継続することが困難になることも考えられる。そのような観点から、安全かつ長期的に MH 層からのガス生産を行うためには、地層の変形挙動を予測できる数値シミュレータ等の評価技術を開発する必要がある。

産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Methane Hydrate Research Center, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan E-mail: tenma-n@aist.go.jp

Original manuscript received January 14, 2014, Revisions received August 25, 2014, Accepted August 28, 2014

しかしながら「分解過程でMH層の力学特性がどのように変化していくのか?」とか「MHが力学的にどのような役割をしているか?」といった数値シミュレータで扱うべき基本的な特性が、プロジェクト開始時には分かっていたので、地層変形や圧密を評価することができなかった。そこで、これらを評価し、安全かつ長期的にガス生産を行うための技術として「地層特性評価技術」の開発を進めている。この技術は、図2に示すように後述するMH層からのガス生産技術の開発課題の1テーマであり、メタンハイドレート研究センターは本課題の管理主体として研究開発を行っている。著者は、メタンハイドレート研究センター副研究センター長（生産モデル開発チーム長を兼務）として、この地層特性評価技術の開発に取り組んでいる。生産モデル開発チームは、研究員3名にテクニカルスタッフ等を含め計14名で構成されており、地層特性評価技術の技術開発に取り組んでいる。著者はチームの全体調整や研究の体系化等を行っている。この論文では、生産モデル開発チームとして取り組んでいる課題等を中心にこれまでに進めて

きた地層特性評価技術の進捗等について論じたいと思う。

2 メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) の取り組み

MH21では、2001年度～2008年度までの期間をフェーズ1とし、東部南海トラフ海域のMH層のメタンガス原始資源量の算定や、減圧法による陸上産出試験の成功等、多くの成果を挙げてきた。そして、2009年4月より、「我が国周辺海域での海洋産出試験の実施等の研究開発を通して、MH層のメタンガスがエネルギー資源となり得る可能性をより高い信頼性で評価するとともに、MH層の商業的開発のための技術の整備に必要となる技術課題の抽出を行う」ことを目的にフェーズ2が2015年度までの予定で開始された。フェーズ2では、東大の増田昌敬准教授をプロジェクトリーダーとして、フィールド開発技術グループ、生産手法開発グループ、資源量評価グループ、推進グループ等がMH21内につくられ研究開発を進めている。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。この試験は、①減圧法によりハイドレートからガスを生産できることの実証とガスの生産性の確認、②減圧法を海底下の比較的浅い深度に適用するための技術の確立等を目的に実施され、減圧法によって6日間で約120,000 m³のガスが生産された。また、貯留層評価等のための貴重なさまざまなデータが取得された。第1回海洋産出試験で得られたデータを基に、MH層内のさまざまな現象に関して各研究グループ・チームが連携をとりながら詳細な検討をしているところである。

また、世界的にみると、米国、韓国、中国、インド等の世界各国で研究が進んでいる。例えば、韓国では対馬海盆におけるガスハイドレート掘削調査、米国ではメキシコ

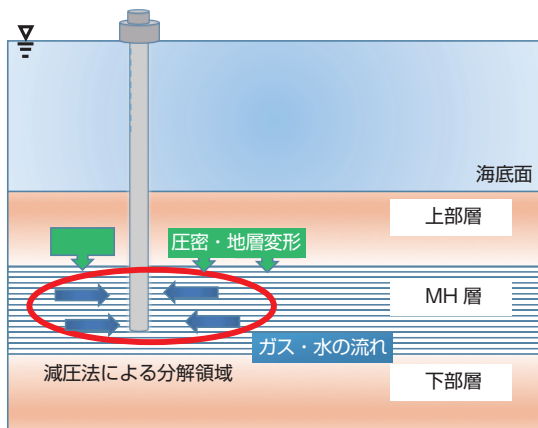


図1 MH層の力学挙動
MH層への減圧法適用によって、MHが分解して、圧密・地層変形が生じると予想されている。

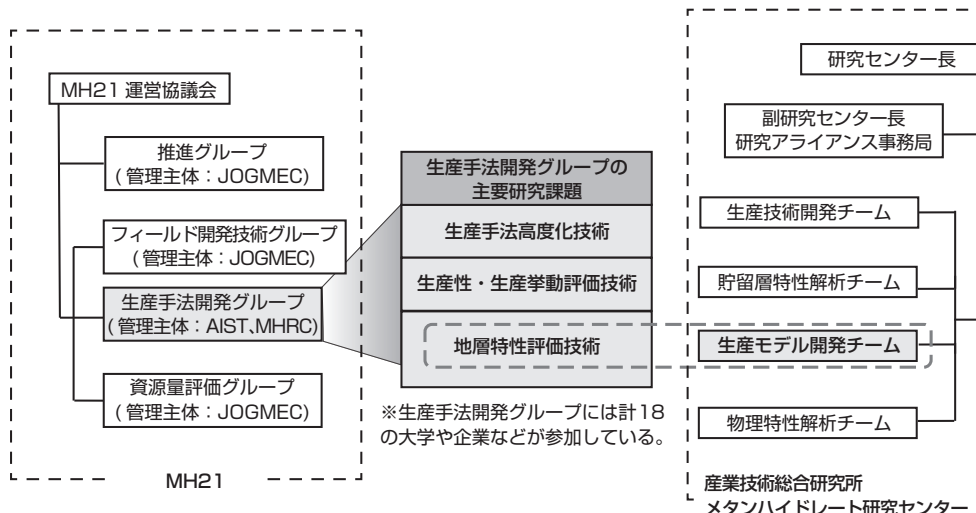


図2 生産手法開発グループと生産モデル開発チームの関係と研究課題
メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) にて、メタンハイドレート研究センター (MHRC) が生産手法開発グループの管理主体として研究開発を行っている。生産モデル開発チームは MHRC 内の研究チームとして地層特性評価技術の開発を進めている。

湾の地震探査調査等の資源量に係る調査が行われているが^[3]、海洋産出試験の実施には至っていない。

さて、メタンハイドレート研究センターは生産手法開発グループの管理主体として、減圧法を始めとするさまざまな生産手法に関して研究開発を進めている^[4]。フェーズ1では、減圧法、加熱法等の各種生産手法の検討を行い、エネルギー効率で有効な手法として減圧法を提案することとなった。フェーズ2では、この減圧法を適用し、さらにメタンガスを大量・安定的に生産する複合生産手法（併用法）の開発、生産シミュレータ（MH21-HYDRES）の機能強化と産出試験との検証、メタンガス生産における広域の地層変形等の評価を実施している。具体的には、「生産手法高度化技術」として、高い生産性と回収率を確保するための生産手法の開発を行うとともに、長期にわたり安定な生産を行うため、出砂、スキン形成、細粒砂蓄積、圧密による浸透性低下、MH再生成による流動障害等の生産障害因子の定量的解析と数式モデルの開発、生産障害対策技術、抑制技術の開発を行っている。また、貯留層の不連続性や不均質性をパラメータとして導入した貯留層モデルの開発と室内試験等との検証を通じて、生産シミュレータの精度を高め、実践的なシミュレータの開発を進める「生産性・生産挙動評価技術」の研究を行っている。さらにMH層からのメタンガス生産に伴う地層変形・圧密挙動について長期的な安全性を確保するための「地層特性評価技術」の研究を行っている。

3 地層特性評価技術について

MH層からのガス生産に伴い地層変形が予測されていることから、長期間にわたって開発対象域での安全・安心な生産を確保する技術の開発が、社会的受容性からも重要になっている。特に、図3に示すように開発対象域では、MH層内での変形挙動の他に、断層等の不連続性や地層の不均質性が海底面沈下や地層変形等に与える影響を評価することも必要である。また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷についても解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響を評価することも必要になっている。さらに、減圧法適用時に坑井壁面に大きな応力差が生じることから、この生産条件が坑井壁に与える応力を解析し、生産期間中における坑井の健全性について評価を行うことも重要である。これらの問題を解決するために、生産手法開発グループでは「地層特性評価技術」として①地層変形シミュレータの開発、②坑井の健全性評価および③広域の地層変形評価の課題を設定して、MH21の枠組みを活用して民間企業や大学等と連携しながら研究開発を進めている。

具体的には、①地層変形シミュレータの開発では、後述するCOTHMAの開発等を進めている。また、シミュレータでMH層の変形や圧密挙動を取り扱えることが可能になるように、MH層のさまざまな力学パラメータの取得も行っている。

②坑井の健全性評価では、地層変形シミュレータを基に減圧法適用時の坑井周辺の地層変形や応力分布等を解析・評価している。また、健全性評価に必要な坑井に係る物性値の取得も実施している。

さらに、③広域の地層変形評価では、断層等の不連続性や地層の不均質性が海底面沈下や地層変形等に与える影響を解析する手法を調査・検討することや、シミュレータによる感度解析の実施を行っている。また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷について解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響を評価することになっている。これらの課題は図4に示すようにお互いに関連しており、後述する「坑井の健全性評価」や「広域の地層変形評価」の知見を合わせた「地層変形シミュレータ」を開発し、最終的にはMH開発の策定に必要なさまざまな情報を提供できるようにすることを目標としている。

このうち、メタンハイドレート研究センター生産モデル開発チームでは、MH21の枠組みの中で、①地層変形シミュレータの開発として、コア試験等を通して力学パラメータの取得を行いながら、地層変形シミュレータの高度化を図るとともに、MH開発に特有な大水深未固結堆積層の力学特性の総合的な評価を行っている。また、②減圧法適用に伴う坑井および坑井周辺の応力分布等を評価し坑井の安定性等の評価を行っている。

以下では、地層特性評価技術の開発として現在、生産モデル開発チームが取り組んでいる開発中の地層変形シミュレータの概要や計算例、坑井の健全性評価の一環とし



図3 MH開発における地層特性評価技術の開発
長期的に安全・安心な生産手法が確立するためには、地層特性に係るさまざまな課題を解決していく必要がある。

て実施している接触面特性に関する研究やMH21の枠組みの中で民間企業や大学等と連携して取り組んでいる広域の地層変形評価の進捗等について詳細に示したいと思う。

3.1 地層変形シミュレータの開発

地層変形に関する数値解析は土木や建築分野等で開発や利用が進められている。通常では現場のコアを用いて室内実験等を行い、地層がどの程度の圧力で変形するかを示す変形係数等のパラメータを取得し、これらのパラメータを用いて有限要素法（FEM）等で、地層内の応力分布や変形量等を計算している^[5]。しかし、MH層からのガス生産では、減圧法によって、元々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なるため、これまで固体として寄与していたMHがなくなることになり、地層内の応力分布が変化する。さらに、分解に伴い発生した気体と液体が地層内を流動することになる。また、MHは分解の際は吸熱反応であるため、地層内での熱のやりとりも発生することになる。そのため、一般的な地層変形と異なり、MHを含む地層の変形係数や強度等の力学パラメータ、地層内の気液の流れやMH分解・生成に伴う温度変化等を取り扱えるようなシミュレータ開発を進めないとMH開発に係る地層の変形挙動を解析することができなかった。そこで、地層変形に関する解析や数値シミュレータの作成経験を有する西日本技術開発株式会社と共同で、地層変形用の数値シミュレータに対して、浸透流解析、熱伝導解析、MH分解・生成に関する機能を順次追加してMHを含む地層に関する数値シミュレータ開発を進めてきた^{[6][7]}。後述するMHの力学パラメータ等のシミュレータ上の取り扱いや数値シミュレータの基本設計は生産モデル開発チームが

中心に実施し、現在は、応力、浸透流、熱伝導、MH分解・生成等を連成したFEMになっている。シミュレータは、COTHMA (Coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media) と略称している。近年は、COTHMAと同様な機能を有する変形シミュレータがいくつか提案されているが^{[8][9]}、後述するように、COTHMAはMHを含むコア試料の力学試験結果を基にして開発を進めているため、MHを含む地層の変形挙動を最も精度よく表現できるシミュレータになっている。以下に開発・改良中のCOTHMAの特徴的な機能を示す。

- ①気液固3相を連成解析。
- ②減圧、加熱およびこれらを併用した生産手法に対応。
- ③MHの分解・再生成を考慮。
- ④水の生成・融解を考慮。

これまでは室内実験結果の再現を行い、シミュレータの検証を進めてきた^{[10][11]}。さらに、本シミュレータを用いて、フィールドスケールでのさまざまな感度解析も実施している^[12]。図5は、フィールドスケールでのシミュレータの検証として実施した予察的な検討結果の一例を示す^[13]。モデルは坑井を中心軸とした二次元円筒座標系の軸対称モデルで、坑井の右半分の領域を要素分割している。また、モデルではMH層とその上下に泥層を設けている。また、MH層であるがフィールドを参考に砂泥互層の簡便なモデルを仮定している。具体的には砂泥互層の厚みを1 m毎に交互に設定している。さらにMH層に達している坑井の区間で減圧する条件で計算を行っている。減圧開始の1日後、10日後および100日後の水圧、MH飽和度、変形量

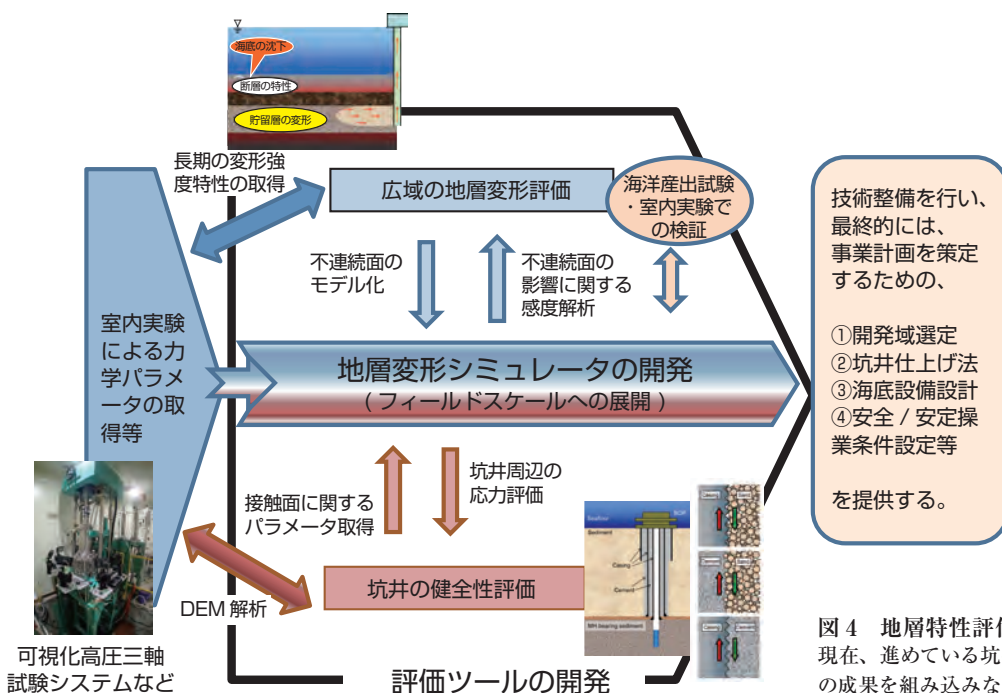
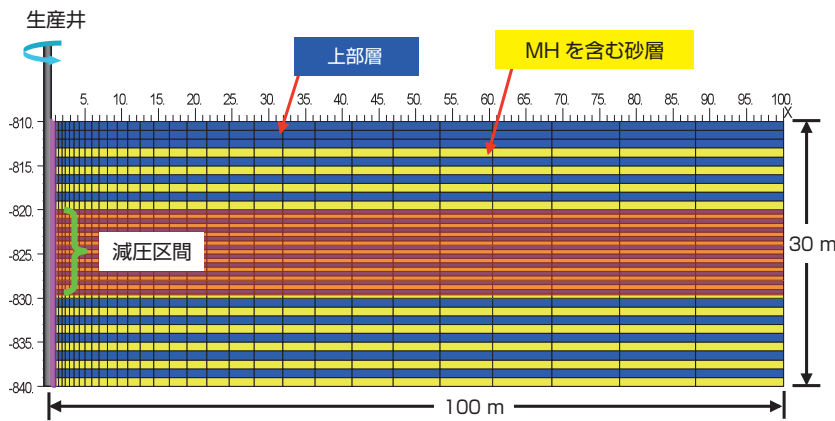


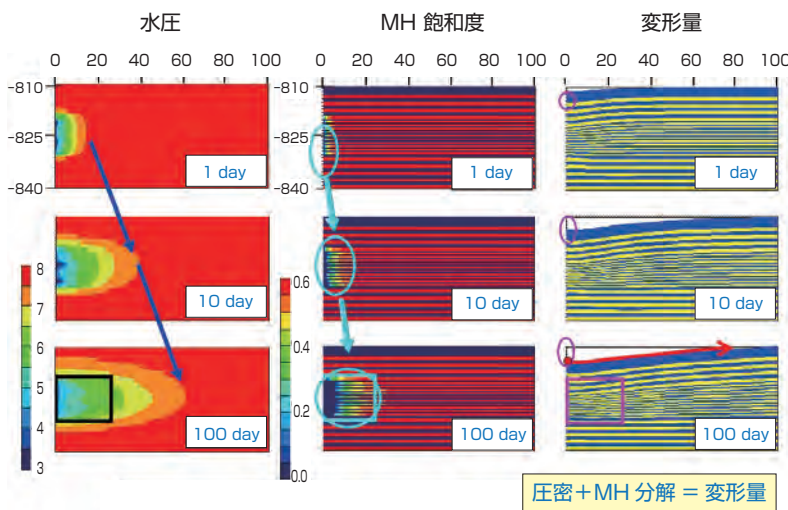
図4 地層特性評価ツールの開発
現在、進めている坑井の健全性や広域の変形評価等の成果を組み込みながら、ツール開発を進めていく。

のコンター図を示す。水圧変化から分かるように減圧開始後、減圧区間を中心に水圧の低下域が広がっている。減圧法によって低圧域が広がっていき、その領域に対応するようにMHを含む砂層にMH分解域が広がっており、砂層にはMH分解と圧密による変形の影響が表れている。このMH分解域が広がるに従い砂泥互層全体の変形も進んでいる。特に変形は圧密とMH分解に伴う影響が混在しており、分解域以上に広域に影響が出ている。ただし、計算では沈下は徐々に緩やかになっていき、坑井近傍での沈下はある程度まで進行した後にほぼ安定した結果となった。MH分解の影響も含まれているために、変形量は地層の圧密変形以上に大きくなったと考えられるが、MHが分解しても砂層内の骨格構造がある程度保たれるために変形が徐々に緩やかになっていったと推察される。現在は、これまで実施してきた感度解析結果の知見や、第1回海洋産出試験地の情報を基にした数値モデルを構築し、試験結果の検証を通してMH生産時の地層変形挙動などに関する解析・評価を進めている。

また、MHを含む地層の変形係数や強度（応力のピーク値）等の力学パラメータは、これまでに計測されたことがなく、またMHを含むコア試料の入手は困難であったので、力学パラメータを取得するためにMH専用の試験装置開発や試料を準備する必要がある。そこで、MH21の枠組みを活用して大学や民間企業等と連携しながらMHを含む模擬試料の作製方法を検討し、凍結した砂試料にガスを浸透させ所定の圧力と温度条件下で融解しながら作製する方法を確立した。また、従来の土質力学等で用いられていた三軸力学試験装置で模擬試料を扱えるように改造・開発することに成功し、MHを対象とした室内での力学試験が可能になった。さらに、MH21の研究開発の一環として2004年1月下旬から5月中旬にかけて「東海沖～熊野灘」にて基礎試錐が実施され、天然のMHコア試料を取得することに成功した。この天然のMHコアや、模擬試料を用いた力学試験の実施によって、MHを含むコアの変形係数や強度等の値が得られるようになり、MH飽和率（間隙内に占めるMHの体積比率）が大きいほど、変形係数



(a) 予察的な検討に用いたフィールドスケールのモデル概要図



(b) 計算結果のコンター図（水圧、MH飽和度、変形量）

図5 フィールドスケールでの感度解析結果の一例

フィールドスケールでの簡易モデルを用いて、減圧法適用時の地層変形に関して検討したコンター図である。MH層の分解や圧密による変形の影響が示されている。

※変形に関しては、変化を分かりやすくするために計算結果を30倍して表示。

や強度が大きくなる等の特性が明らかになった^{[14][18]}。これらの結果を基に実験式を導出し、地層変形シミュレータに組み込み、変形挙動の解析を可能にしている。

最近では、2012年夏に海上産出試験実施場所にて圧力コア（MHの分解を避けるために高い圧力を保持した状態のコア）の取得にも成功している。これらのコアは産総研北海道センターにて管理・保管されており、MH層に係るコアの詳細なデータ解析が進められている。さらに、MHを含むコアのより正確な力学パラメータを取得するために、高圧力を保持した状態で力学試験が実施できる「可視化高圧三軸試験システム」（写真1）を導入し、試験を実施している^[19]。本装置の特徴は、高い圧力を保持したまま採取された天然コアの圧力を減ずることなく装置に搬送し、ゴムスリーブを介して有効拘束圧を負荷し、圧縮試験ができることである。また、高圧下での三軸圧縮試験を可視化できるようにアクリルで試料セル部を作製してある。この結果、力学試験の過程でコアの局所的な変形を把握することも可能となり、地層に応力が付加された時のせん断面の肉眼観測、局所変形やひずみの定量化等が可能になる。本装置を用いることで地層変形シミュレータに用いる力学パラメータの精度向上に資することになる。

3.2 坑井の健全性評価

開発中の地層変形シミュレータを用いて坑井の健全性評価を進めている。例えば、減圧度（坑底部の圧力を原位置の圧力からどこまで減圧するか）の違いによって坑井周辺の応力分布が異なることなどが明らかになってきているが^[20]、さらなる解析精度の向上を進めるために、現場に即した坑井モデルの設定が必要になっている。特に、坑井はケーシング、セメントおよび地層の複合材料の組み合わせとなっていることから、各材料同士の接触面強度を把握することが重要である。しかし、MH層のような大水深・大深度の

条件下における坑井の接触面に関する研究報告はあまり多くない。そこで、これらのパラメータを取得し、現場に即した坑井モデルを構築するための貫入試験を行っている。写真2は、ケーシング-セメント間の接触面強度を取得するために準備した試料で、セメントで作製した中空の試料内に鋼棒が入り、この鋼棒を押し抜く貫入試験を行うことで材料間の接触面強度のデータ取得を行っている。これまでに、ケーシング-地層間、ケーシング-セメント間、セメント-地層間の接触面強度に関する実験を行い、例えば、ケーシング-セメント間の接触面強度に関して、有効拘束圧等をパラメータとした実験式の導出を行っている^{[21][22]}。今後、これらの実験式を用いた感度解析を進め、MH開発に適した坑井仕上げ法等を提案する計画である。

また、接触面では粒子破碎などによる局所的な変形も生じるが、貫入試験ではこの局所的な影響まで詳細に把握することは実験条件の設定や実験時間等の点から困難である。そこで、数値解析による評価として、個別要素法（Distinct Element Method; DEM）を用いた検討も行っている。DEMは多数の粒子の運動を追跡していく手法なので、実験では計測困難なマイクロな力学量を定量的に評価できる。接触面における「粗さ」が強度にも関係することが分かっているので、坑井表面スケールの凹凸や砂粒子の凹凸等さまざまなスケールの粗さをDEMで系統的に整理することを試みている。DEMによってさまざまな力学的条件下での接触面の特性を系統的に把握し、さらに貫入試験結果の再現等の検証から得られた知見によって、接触部の力学挙動の解明やモデリングを進めたいと考えている^[23]。

3.3 広域の地層変形評価

MH実用化に向けた開発では、図3に示すように開発対象地域の周辺において断層等の不連続面がある場合に、

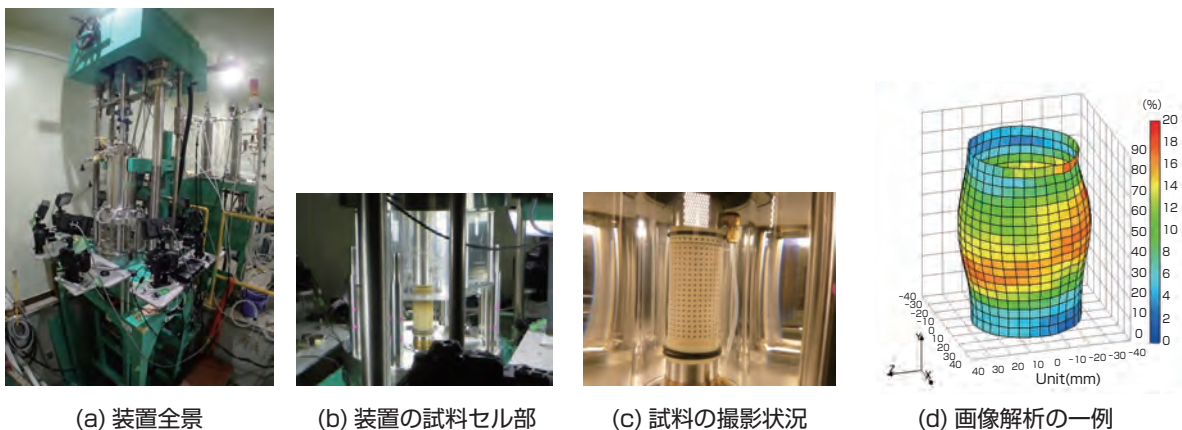


写真1 可視化高圧三軸試験システム

(a) 装置全景、(b) 装置の試料セル部、(c) 試料の撮影状況、(d) 画像解析の一例。装置全景からわかるように試料セル部にて画像を複数方面から取得でき、その画像データを用いて、試料表面の変化を把握することができる^[19]。

断層が水みちとなり減圧を継続できなくなる等、長期的な生産が継続できなくなることも考えられる。そこで、不連続面の影響評価を検討している。また、資源開発では減圧法を適用するために生産前、生産中、生産後に圧密等の変形挙動が大きく変わる可能性がある。その観点から長期的な地層特性についても検討することとした。広域の地層変形評価では、大きくこの2つの研究を実施している。まず、開発地域の選定手法を確立することを目的に、東部南海トラフの海底地盤を参考に数値モデルを作成し、その数値モデル上に仮想的に断層を設定して断層等の不連続性や地層の不均質性の影響について検討している。具体的には、断層のない数値モデルを基に減圧法を適用した場合の地層変形挙動と、断層を設定した場合の変形挙動に関して比較・検討することで断層等の不連続面が変形挙動に与える影響を把握し、開発域を選定する際にどのような地層条件が開発域として最適であるかの条件把握のための感度解析を行っている。これまでに考慮してきた感度解析のパラメータとしては坑井・断層間の距離、断層の傾斜角や正断層および逆断層の場合等がある^[24]。これまでの感度解析の結果では、減圧法の適用による地層変形挙動が断層を境に変わることが確認されている。今後、各パラメータの地層変形の影響を整理し、開発に適した場所を選定する際の考え方を確立する予定である。

また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷について解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響の評価を行っている。具体的には、MH層およびその周辺地層の現地基礎試錐により得ら

れた粒度構成等のデータを基に作製したMH模擬試料を対象に生産前後の状態を想定した条件下での三軸試験を実施している。減圧法適用時（生産中）や減圧終了後の水圧の回復（生産後）では、地層内の流体圧が変動するため、模擬試料内の空隙流体圧を変化させる試験を行い生産前後の変形強度特性の把握を行っている^[25]。今後は、試験結果から得られた変形強度に関するモデル開発を進め、これらのモデルを地層変形シミュレータに組み込むことで、長期の地層変形解析ができるように開発を進める予定である。

4 今後の研究開発について

2013年4月26日に閣議決定された「海洋基本計画」においてMH開発は、「日本周辺海域に相当量の賦存が期待されるMHを将来のエネルギー資源として利用可能とするため、海洋産出試験の結果等を踏まえ、平成30年度を目途に、商業化の実現に向けた技術の整備を行う。その際、平成30年代後半に、民間企業が主導する商業化のためのプロジェクトが開始されるよう、国際情勢をにらみつつ、技術開発を進める」との記載がある。この「海洋基本計画」に従い、現在「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の見直しが進められており、長期的に安定な生産技術の開発を進めることが示されている。今後も地層特性評価技術の開発を着実に進めていくことが必要になっている。

現在は2013年3月に実施された第1回海洋産出試験地で得られたコア解析の結果等を用いて三次元モデルを構築・更新し、海洋産出試験結果の検証を通してMH生産時の地層変形挙動などに関する解析・評価を進めており、

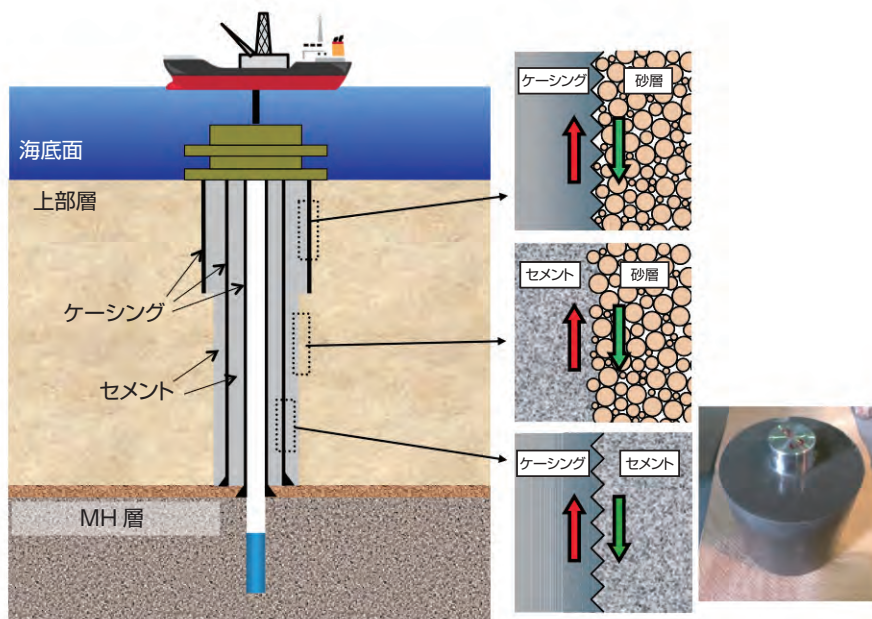


写真2 ケーシング・セメント間の接触面強度計測用試料（図面を一部修正）^[21]

坑井はケーシング、セメントおよび地層の複合材料の組み合わせなので、各材料の組み合わせに関する試料を準備して室内実験を行った。

これらの検証を通して地層変形シミュレータの改良を進めていく予定である。また、北海道センターには、MH層を対象とした世界最大の室内実験装置 High-pressure Giant Unit for Methane Hydrate Analysis (略称: HiGUMA) がある^[26]。この実験装置は、減圧法を適用した場合にコアスケールの室内実験では把握できなかったMH層の分解挙動やガスの生産挙動等を評価するための装置である。この装置を用いて、減圧法適用時の坑井近傍での変形挙動に関する計測も検討中である。減圧法を適用した際の変形挙動を計測し、実験の検証を通して地層変形シミュレータの精度向上を図りたいと考えている。

この地層変形シミュレータに、3.2や3.3にて述べたような坑井周辺の評価や広域での地層変形評価等で確立される開発選定手法等の機能を組み合わせたシミュレータ開発を進め、最終的にはMH層からのガス生産を行うための開発地域選定、坑井仕上げ方法、海底設備設計等の評価に資するツールの開発を進めていきたいと考えている。

5 おわりに

この論文では、「地層特性評価技術」として①地層変形シミュレータの開発、②坑井の健全性評価および③広域の地層変形評価の概要、成果や今後の開発方針等について論じてきた。

MH資源開発の実用化に向けて、今後、長期的に安定な生産技術を提案することは重要であり、力学特性の評価技術の視点は、その基盤技術になるものと考えられる。これまでの研究を通して、研究対象とすべき天然MHコアの入手や、模擬試料の作製方法の確立や天然MHコアを用いた試験結果との比較等を経て、MHを含む地層の力学特性の把握やMHの力学挙動を扱える数値シミュレータの開発が進んできたのは大きな成果と考えている。

また、第1回海洋産出試験に関する結果検証は、MH21の枠組みを基にした産学官の連携によって進められ、これらの研究活動の実施がMH開発に関わる人材の育成にもつながっている。さらに、この研究を通してさまざまな実験装置の開発が進んでいる。さらなるMHを含む地層の力学特性の把握を進め、数値シミュレータの精度向上等を進め「地層特性評価技術」の現場への技術展開を進めていきたいと思う。

謝辞

この研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法に関する研究開発」の一環として実施した。この論文を作成するにあたり、米田純研究員、片桐淳研究員、宮崎晋行研究員(兼務)をはじめとする生産モデル開

発チームのメンバーやMH21関係各位に対し、謝意を表する。

参考文献

- [1] MH21研究コンソーシアム, <http://www.mh21japan.gr.jp/>
- [2] M. Kurihara, A. Sato, H. Ouchi, H. Narita, Y. Masuda, T. Saeki and T. Fujii: Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough methane-hydrate reservoirs, *SPE Journal*, 125481-PA, (2009).
- [3] U.S. DOE: *Fire in the Ice, Methane Hydrate Newsletter*, 13 (2), (2013).
- [4] J. Nagao: Development of methane hydrate production method – A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests –, *Synthesiology*, 5 (2), 89-97 (2012).
- [5] 深田敦宏, 中野正文, 川村佳則, 松田隆: LNG地下タンク周辺盛土の地震時沈下予測解析, *土木学会第57回年次学術講演会*, 1087-1088 (2002).
- [6] 青木一男, 緒方雄二, 榊井明, 森二郎, 方火浪: メタンハイドレート生産に伴う地盤変動について, *資源・素材 2003 (A/B)*, 235-236 (2003).
- [7] 青木一男, 緒方雄二, 榊井明, 森二郎, 方火浪: メタンハイドレート開発時における地盤変動解析について, *資源・素材 2006(福岡)*, (2006).
- [8] M.Y.A. Ng, A. Klar and K. Soga: Coupled soil deformation-flow-thermal analysis of methane production in layered methane hydrate soils, *Proc. 2008 Offshore Technol. Conf., OTC19364*, (2008).
- [9] S. Kimoto, F. Oka and T. Fushita: A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation, *Int. J. of Mechanical Sciences*, 52 (2), 365-376 (2010).
- [10] 坂本靖英, 覺本真代, 宮崎晋行, 天満則夫, 駒井武, 青木一男, 山口勉: 減圧法によるメタンハイドレート分解時の圧密ならびにガス産出挙動に関する室内実験のシミュレーション-メタンハイドレート貯留層の浸透率評価に関する研究(第7報), *Journal of MMIJ*, 126 (12), 631-639 (2010).
- [11] 宮崎晋行, 坂本靖英, 覺本真代, 天満則夫, 青木一男, 山口勉: 細粒分を含む模擬メタンハイドレート含有砂質堆積物の三軸圧縮特性とメタンハイドレート分解時の力学挙動, *Journal of MMIJ*, 127 (9), 565-576 (2011).
- [12] 米田純, 宮崎晋行, 天満則夫, 兵動正幸: 減圧法を適用したメタンハイドレート堆積層の長期的変形予測, *第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM)*, JSRM-64, (2012).
- [13] M. Kakumoto, J. Yoneda, K. Miyazaki, N. Tenma, A. Masui, K. Aoki, H. Karasawa and R. Itoi: Preliminary study on well integrity during gas production from methane hydrate sediments, *Proc. Int. Symp. Earth and Technol. 2011*, CD-ROM, (2011).
- [14] A. Masui, H. Haneda, Y. Ogata and K. Aoki: Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments, *Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, 364-369 (2005).
- [15] A. Masui, K. Miyazaki, H. Haneda, Y. Ogata, and K. Aoki: Mechanical characteristics of natural and artificial gas hydrate bearing sediments, *Proc. 6th Int. Conf on Gas Hydrates*, CD-ROM, (2008).
- [16] K. Miyazaki, A. Masui, K. Aoki, Y. Sakamoto, T. Yamaguchi and S. Okubo: Strain-rate dependence of triaxial compressive strength of artificial methane-hydrate-bearing sediment, *Int. J Offshore and Polar Eng.*, 20, 256-264 (2010).
- [17] K. Miyazaki, A. Masui, Y. Sakamoto, K. Aoki, N. Tenma and T. Yamaguchi: Triaxial compressive properties of

- artificial methane-hydrate-bearing sediment, *J. Geophys. Res.*, 116 (B6), 102 (2011).
- [18] K. Miyazaki, Y. Endo, N. Tenma and T. Yamaguchi: A nonlinear viscoelastic constitutive equation for artificial methane hydrate-bearing sand under triaxial compression, *Proc. 8th Int. Conf. on Gas Hydrates*, CD-ROM, (2014).
- [19] J. Yoneda, A. Masui, N. Tenma and J. Nagao: Triaxial testing system for pressure core analysis using image processing technique, *Rev. Sci. Instrum.* 84, 114503 (2013).
- [20] 天満則夫, 宮崎晋行, 米田純, 覺本真代, 青木一男, 森二郎, 瀧口晃, 方火浪: メタンハイドレート生産時における坑井の健全性に関する研究, 第3回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 55-56 (2011).
- [21] 覺本真代, 米田純, 宮崎晋行, 天満則夫, 青木一男, 糸井龍一: 坑井の健全性に係るケーシングセメント間の接触面強度に関する基礎的研究, *Journal of MMIJ*, 129 (4), 116-123 (2013).
- [22] 米田純, 覺本真代, 宮崎晋行, 片桐淳, 天満則夫, 青木一男: 高拘束圧下の砂中ケーシング周面摩擦力に及ぼす表面粗さの影響, *Journal of MMIJ*, 129 (6), 278-283 (2013).
- [23] 片桐淳, 米田純, 天満則夫: メタンハイドレート開発における坑井と土の境界面を模擬した個別要素法解析, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 207-208 (2012).
- [24] 荻迫栄治, 西尾伸也, 傳田篤: メタンハイドレート生産時の地層変形に関するケーススタディー, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 136-140 (2012).
- [25] 横山奈津子, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 加藤晃: 南海トラフの深海底地盤を模擬したメタンハイドレート固結砂の三軸圧縮せん断特性, 第4回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 145-149 (2012).
- [26] 今野義浩, 神裕介, 長尾二郎: 大型室内試験装置によるメタンハイドレート増進回収法の検証, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 54-55 (2013).

執筆者略歴

天満 則夫 (てんま のりお)

1990年工業技術院資源環境技術総合研究所入所、地熱貯留層の数値モデリングや抽熱特性に関する評価を専門分野とし、数値シミュレータの開発に従事。2009年度より産総研メタンハイドレート研究センターに異動し、これまでの専門を基にMH層開発に係る地層変形シミュレータ開発に携わり、地層特性評価技術の開発を目指している。



査読者との議論

議論1 全体的な評価

コメント(立石 裕:産業技術総合研究所中部センター、矢野 雄策:産業技術総合研究所)

この論文は、産総研メタンハイドレート研究センターで実施している研究開発の中の、「地層特性評価技術」について開発技術体系を俯瞰できる論文として仕上がっている。メタンハイドレート資源開発の国家プロジェクトの運営主体であるMH21の中で、同センターが果たしている役割を含めて、コア技術である地層変形シミュレータの開発と、これを基にした坑井の健全性評価および広域の地層変形評価が的確にまとめられており、シンセシオロジーの論文として適切であると判断します。

議論2 MH開発の世界的な位置付け

質問(矢野 雄策)

この論文では我が国のMH開発に係る技術開発について論じてい

ますが、新たな技術を開発しているという意味では世界に類のないものにチャレンジしていると思われれます。読者は、世界の中でのこの技術開発の位置付けも知りたいと感じると思います。背景として、世界ではMH資源はどのような国のどのような領域に分布しており、各国の技術開発の状況はどのようになっているのでしょうか。そして我が国のMHに関する技術開発はどのような位置付けにあるのでしょうか。また我が国ではMH21が開発までのロードマップを描いて進んでいるものと思いますが、世界では何らかの国際研究連携があるのでしょうか。また世界的なロードマップはあるのでしょうか。

回答(天満 則夫)

MH開発ですが、アメリカ、ロシア、カナダ、中国、インドなど各国で新たな資源として注目されており調査が進んでいますが、現在世界的には資源量を調べる調査が主になっており実際の生産技術の研究はほとんど進んでいません。そこで、世界的な位置付けに関して、「また、世界的にみると、米国、韓国、中国、インドなどの世界各国で研究が進んでいる。例えば、韓国では対馬海盆におけるガスハイドレート掘削調査、米国ではメキシコ湾の地震探査調査などの資源量に係る調査が行われているが、海洋産出試験の実施には至っていない。」との記載を追加しました。

議論3 既存の資源開発研究との関係

質問(矢野 雄策)

MHも坑井を用いて生産をする点では、在来型の石油や天然ガスと同様であり、石油・天然ガス開発の高度な技術体系の上にMH特有の技術体系を付加しようとしているものと思います。全く白地からの技術体系の構築と異なり、既存の大きな技術体系に新たな技術体系を付加しようとする場合には、それを効率的・効果的に進める考え方ができるように思います。地層特性評価技術の開発についても、石油や天然ガスにおいて、参考となるような先行研究があり、それを改良することによって効果的に研究が進むということはあるのでしょうか。それを実際に行っているのでしょうか。

回答(天満 則夫)

減圧法適用時の地盤沈下等の地層変形は、長期安定生産を検討する上で重要と考えられます。このような沈下の課題に関しては、例えば、水溶性天然ガス開発のような分野でこれまで検討されています。MH開発でも同様なことが生じると予想し、同様なアプローチとしてMH層を含む地層の力学特性の把握や、数値シミュレーションによる評価ができるような研究開発を進めてきた経緯があります。例えば、MHの力学特性を把握する際には、地層内に新たにMHが加わったと捉え、土質力学で行われる試験方法を参考に研究を進めました。具体的には、MH試料が圧力と温度の制御に関係するため、この制御をしながら力学試験ができる方法を検討し、この論文の「3.1地層変形シミュレータの開発」に記載したように、凍結した砂試料にガスを浸透させてMH模擬試料を作れるようにしています。この方法が確立されるまでは具体的に物性値を求める方法はなく大きな成果であったと思います。ただし、開発対象が海底数百mの未固結の地層ということや、減圧法を適用する場合の大きな減圧度(第1回海洋産出試験の場合には、約7MPaの減圧を行っています)など、これまでの研究では扱っていない条件になっていることも分かっており、このような違いを意識して研究を進めている状況です。

議論4 海洋産出試験との関係

質問(立石 裕)

2013年3月の海洋産出試験に関して、この研究は事前にどのような貢献をしたのでしょうか?それともシミュレータが未完成で具体的な予測には至らなかったのでしょうか?また、すでに1年近く経過しているため、結果とその解釈についてなんらかのリマークをすることはできないのでしょうか?成果管理の要請があっても出せないとすればやむをえませんが、フェーズ2が予定ではあと2年というタイミング

を考えると、論文としては、ちょっと竜頭蛇尾の印象があります。

回答（天満 則夫）

解析結果については、第1回海洋産出試験の坑井設計やモニタリング井の設置等を検討する際の基礎データとして活用されました。ただ、第1回海洋産出試験のデータについては、色々と検証を進めており、この論文にも記載していますが、現在もデータの検証のための室内実験や数値モデルの構築・解析を実施中です。そのため、現状についての報告とさせていただきます。

議論5 シミュレータ開発の意義

コメント（立石 裕）

シミュレータの開発が研究の柱であることは分かるのですが、シミュレータの役割や意義が明示的に説明されていないので、意地悪

い言い方をすれば、シミュレータの開発が自己目的化しているような印象を受けます。論文の初めの方で、なぜシミュレータの開発が必要なのかを説明したほうがよいと思います。担当者にとっては自明のことかもしれませんが、一般読者にとっては必ずしも明確ではありません。

回答（天満 則夫）

地層変形シミュレータの開発の意義を明確にするために、「1. はじめに」にての「・・・その様な観点から、安全かつ長期的にMH層からのガス生産を行うためには、・・・」以降に「地層の変形挙動を予測できる数値シミュレータなどの評価技術を開発する必要がある。」と追記するとともに、関連して「数値シミュレータで扱うべき基本的な物性が、プロジェクト開始時には分かっていなかったため、地層変形や圧密を評価することができなかった。」と追記しました。