

メタンハイドレート開発研究の最前線

名古屋大学環境学研究科附属地震火山・防災研究センター 渡辺俊樹

1. はじめに

メタンハイドレート(Methane Hydrate)とは水分子の立体網状構造中の空隙にメタンが取り込まれた構造をとる包接化合物の一種である。外見は白いゼリー、あるいは湿った雪のような氷状の固体であるが、着火すると燃焼することから「燃える氷」として知られるものである。メタンハイドレートは世界中の海底や極地域に存在し、21世紀の「環境に優しい」燃料としての莫大な量の天然ガスを供給する大きな可能性を秘めていることから、現在我が国を始め国際的に研究が取り組まれている。

メタンハイドレート研究は多岐に渡っている。材料としての物理的・化学的性質に着目した研究、成因や分布、海底崩壊との関連などを解き明かすための海洋科学や地球科学、地球温暖化と関連した環境問題からの研究、そして資源としてのハイドレート研究などである。筆者はメタンハイドレートの専門家ではないのでそれぞれの詳細は参考文献や関連情報を参照いただくとして、本ニュースレターではカナダ・マッケンジーデルタでの国際共同研究プロジェクトと昨年12月に行われた国際会議の報告を中心に我が国のメタンハイドレート開発戦略もあわせ、ハイドレート開発研究の最前線について紹介したい。

2. メタンハイドレートの基礎知識

2.1. メタンハイドレートとは

メタンハイドレート(Methane Hydrate)とは、図1に示すように、水分子の立体網状構造中の空隙にメタンが取り込まれた立体クラスター構造をとる包接化合物の一種である。メタンハイドレートはメタンハイドレートの体積の170倍のメタンガスを含むことができる。

ガスハイドレートの研究は1810年のDavyによる塩素ハイドレート、1888年のVillardによる炭化水素ガスのハイドレートの発見に始まる。1930年代に寒冷地において天然ガスのパイプラインが閉塞・破損する事故が多発し、その原因としてガスハイドレートの生成が指摘されたことがきっかけとなり、ガスハイドレートの研究が再び積極的に行われるようになった。その後、永久凍土層や大陸縁辺部の海底に多量の天然のメタンハイドレートの存在が確認され、炭化水素資源としてのハイドレート研究が始まった。メタンハイドレートに含まれる天然ガスの量は全世界の天然ガスと原油、石炭を合わせた化石燃料の既存の総埋蔵量の2倍以上と言われ、また、日本周辺海域にも日本が消費する天然ガスの100年以上の量が存在すると推定されている。したがって、メタンハイドレートを安全に

利用することができれば、石油・天然ガスの99%を輸入に頼っている日本にとって極めて有効なエネルギー資源となる。

メタンハイドレートの生成に最も影響する条件は温度と圧力である。図2に示すメタンハイドレート安定曲線において、低温・高圧側がハイドレートが安定に存在する領域(安定領域)である。赤点線で示した地温曲線が

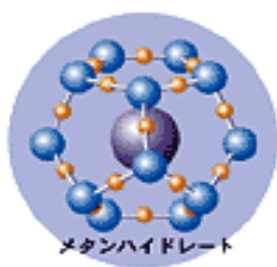


図-1 メタンハイドレート

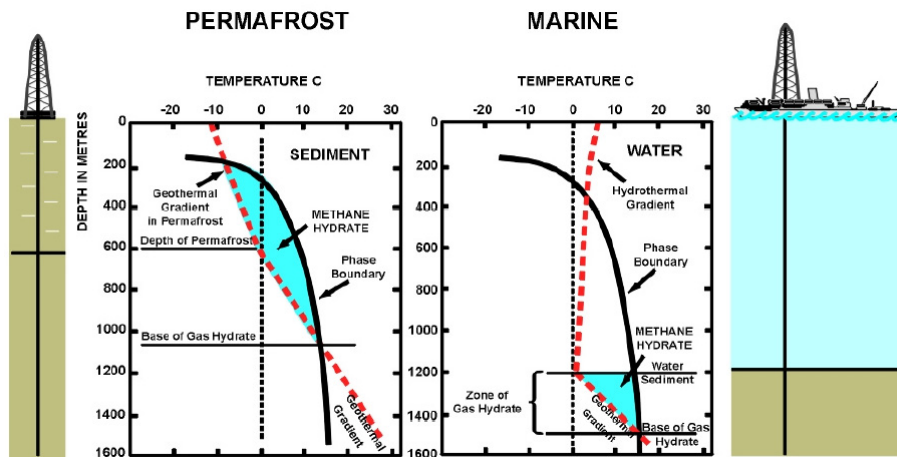


図-2 メタンハイドレート安定曲線と存在域

ら、永久凍土層下および海底下の特定の深度においてハイドレートが存在可能であることがわかる。図3にメタンハイドレートの分布を示す。日本周辺の大陸棚にも豊富に存在し、特に南海トラフが調査フィールドとして着目されている。

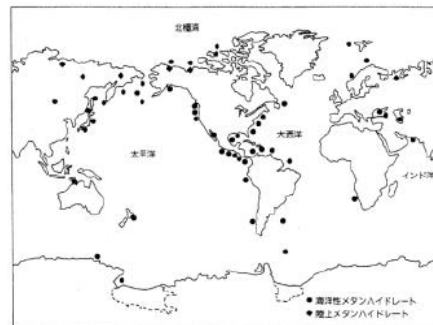
2.2. メタンハイドレートの探査

海底下におけるメタンハイドレートの探査には反射法地震探査が用いられる。メタンハイドレート層の下にはハイドレートが分解して生成したメタンガスが存在すると考えられている。ハイドレート層とガス層との境界は物性のコントラストが強く良好な反射イベントを形成する。通常、地温勾配（等温度線）は海底にはほぼ平行であることから、この反射イベントは地層の傾斜と無関係に海底面から一定の深度に存在し、しばしば地層と交差する。また、ガス層が低インピーダンスであることから反射波の位相が反転するため、地震探査記録上で容易に視認できる。この反射面は海底面の形状を反映していることから海底疑似反射面 Bottom Simulating Reflector（略してBSR）と呼ばれている。メタンハイドレートの分布はBSRの分布を調べることによって把握できるとされている。

2.3. メタンハイドレートの開発

メタンハイドレートは地中に固体で存在し井戸を掘っても自噴しないため、従来の天然ガスの開発手法は適用できず、新たな採取技術の開発が必要となる。図-2より、メタンハイドレートからメタン

<世界のメタンハイドレート分布>



[出所：Kvenvolden, K. A., (1996) を参考にエネルギー総合工学研究所が作成]

<日本周辺のメタンハイドレート分布>



[出所：佐藤幹夫他(1996) 地質学雑誌第102巻 第11号を参考にエネルギー総合工学研究所が作成]

図-3 メタンハイドレートの分布

ガスを分離抽出するためには、高温・低圧側に状態を移行させればよい。現在検討されている主な回収方法は次の通りである。

加熱法： 地表から加温した流体（熱水や蒸気）を循環させ、メタンハイドレートを加熱によって分解させてメタンガスを発生させる方法。

減圧法： 坑井内の圧力を低下させてメタンハイドレートの分解を促進させる方法。減圧法には泥水の比重の低下、泥水の減量のほか、パッカーと減圧ポンプを備えたツールが使用される。

分解促進剤注入法： メタンハイドレート層にメタノールなどの分解促進剤（インヒビター）を注入しメタンハイドレートの分解を促進させる方法。

メタンハイドレートの分解は周辺の熱を奪う吸熱反応であり、分解の速度を低下させる「自己保存効果」を持つ。その影響もありいずれの方法も効果が坑井周辺に限定されることから、高い分解効率が期待できずコスト上の問題がある。

2.4. 環境への影響

メタンガスが燃焼する際に放出する二酸化炭素の放出量は石炭や石油より少なく、硫黄酸化物はほとんどゼロ、窒素酸化物も石油や石炭に比べて少ないことから、メタンガスはクリーンなエネルギーであると評価されている。メタンガスそのものは二酸化炭素の 21 倍（100 年間で見た場合）の強力な地球温暖化物質である。しかし、二酸化炭素が大気中で分解されるのに 50-100 年要するのに比べ、メタンは 12 年程度で分解される。メタンが環境に与える影響については研究途上であるが、メタンが大量に大気中に放出されるのは好ましくない。また、生産によりメタンハイドレートを失った地盤が不安定になり、地盤沈下や海底地滑りを引き起こす可能性が指摘されている。

3. 日本の開発戦略

平成 13 年 7 月に経済産業省の検討委員会である「メタンハイドレート開発検討委員会（委員長：田中彰一東京大学名誉教授）」が、今後のメタンハイドレートに係わる調査・研究の中長期計画としてメタンハイドレート資源化へ向けた 2001 年度から 16 年間にわたる「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を発表した。この計画は世界に先駆けてメタンハイドレートを資源として研究するもので、現在この計画に沿って研究が推進されている。以下にこの計画の内容を簡単に紹介する。

3.1. 基本方針

我が国周辺の相当量の賦存が期待されているメタンハイドレートについて、将来のエネルギー資源として位置付け、その利用に向け、経済的に掘削・生産回収するための技術開発を推進し、エネルギーの長期安定供給確保を図る。

3.2. 目的

1. 日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化。
2. 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定。
3. 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択、並びにその経済性の検討。
4. 選択されたメタンハイドレート資源フィールドでの産出試験の実施（2011 年度まで）。
5. 商業的産出のための技術を整備（2016 年度まで）。
6. 環境保全に配慮した開発システムの確立。

3.3. スケジュール

「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」は 16 年間に及ぶ計画であり、3 フェーズに分かれている。各フェーズの概要は以下の通りである。

【フェーズⅠ（2001年度～2006年度）】

- 我が国近海での物理探査、試錐によるメタンハイドレート賦存有望地域の選定、産出試験実施場所の確定
- カナダ等陸域でのメタンハイドレート産出試験、並びに生産技術の検証
- メタンハイドレートに関する基礎研究（探査技術、分解生成技術等）

【フェーズⅡ（2007年度～2011年度）】

- 我が国のメタンハイドレート賦存有望地点での海洋産出試験、並びに評価
- メタンハイドレートに関する基礎研究（生産技術、環境影響評価等）

【フェーズⅢ（2012年度～2016年度）】

- 商業的産出のための技術の整備、並びに経済性等の評価

3.4. 計画実行形態

経済産業省は同計画に基づき、メタンハイドレート開発検討委員会、石油公団、（独）産業技術総合研究所および（財）エンジニアリング振興協会とともに、2001年12月に「メタンハイドレート資源開発研究フェーズ1（2001年度～2006年度）実行計画」を策定した。2002年3月には石油公団、（独）産業技術総合研究所、（財）エンジニアリング振興協会からなる「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」を組織した。

図-5 に示す資源開発研究計画の実行にあたり資源量評価、生産手法開発、環境影響評価の観点から研究が行われている。各グループの概要を以下に示す。

「資源量評価」においては、メタンハイドレートの探査技術の最適化を達成し、日本近海、特に南

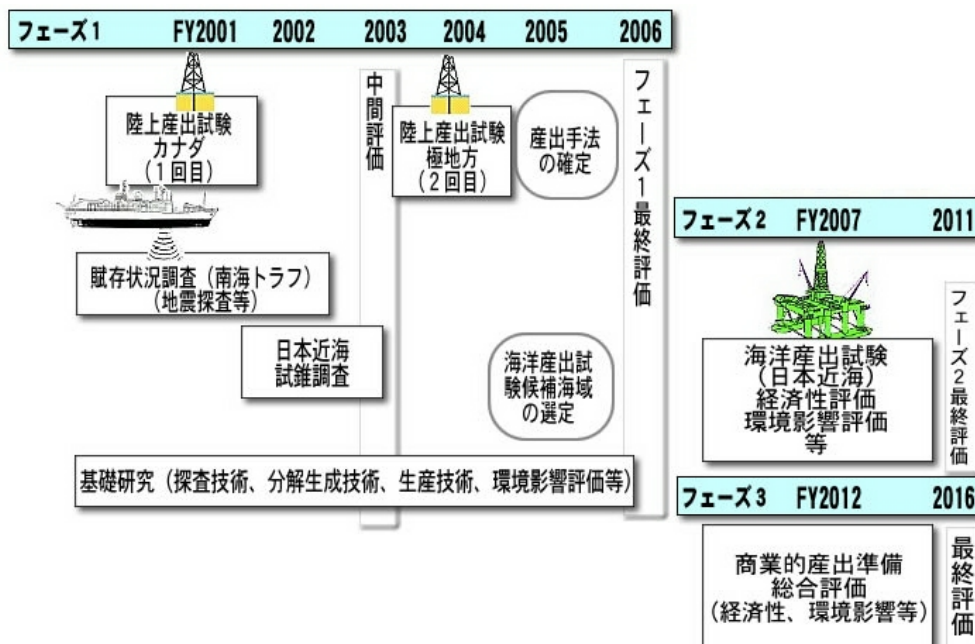


図-4 我が国におけるメタンハイドレート開発計画

（出典：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム）

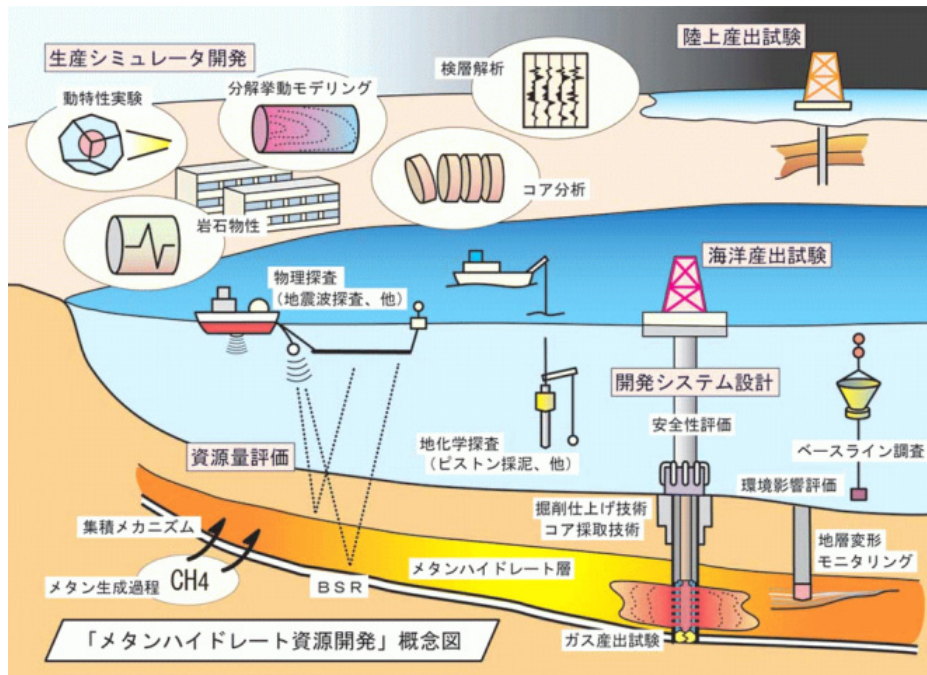


図-5 メタンハイドレート資源開発研究の概要
(出典：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム)

海トラフ海域におけるメタンハイドレートの賦存海域と賦存量の把握を行い、海洋産出試験が実施可能と考えられるフィールドの選定を行う。貯留層特性などの詳細な検討を踏まえて資源量算定の精度を向上させ、海洋産出試験実施のために必要な情報を提供する。

「生産手法開発」においては、メタンハイドレート堆積層から高い生産性と経済性を有した天然ガスの生産技術を確認することを目標として、メタンハイドレート堆積層の基礎物性等の解析とその分解時の動特性を解明し、ガス生産性を評価するフィールド・スケールに対応可能なシミュレータを開発する。人工模擬堆積層による評価試験、陸上産出試験における検証、シミュレータによる評価を通じて、高効率のガス生産プロセスを選定する。

「環境影響評価」においては、海洋産出試験に備えてメタンハイドレート資源フィールドのベースライン調査（環境、生態系）を実施するとともに、環境に調和したメタンハイドレート開発に関する課題について調査、研究開発に取り組む。メタンガスの生産に伴い発生する低温水の影響、メタンガスの漏洩と地層変形について要素技術開発に取り組む。

4. From Mallik to Future ～マリック産出試験調査井プログラム～

4.1. マリック産出試験調査井プログラム

2002年、マリック産出試験調査井プログラムは、カナダ北部のマッケンジーデルタに存在する大規模なメタンハイドレート・フィールドにおいて、地下約1,200mの3本の坑井を掘削し産出試験を行った。この産出試験を通じて、世界で初めて地下の天然メタンハイドレートからメタンガスを遊離させ、地上で燃焼させることに成功した。同時に地層試料が採取され、坑井間物理探査技術や広範囲な検層、最新のハイドレート検層器を使用した検層も実施された。このプログラムには世界の100名を超える学際的に構成された技術者・研究者グループが参加した。

このプログラムに関し、2003年12月に国際会議が開催され、これまで非公開であった産出試験や

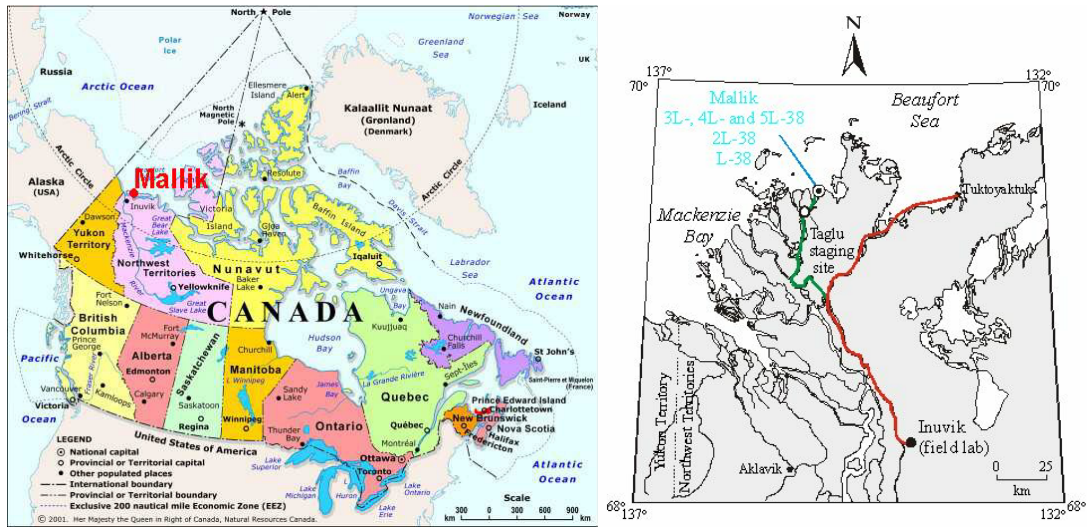


図-6 カナダ・マッケンジーデルタ・マリック試験フィールドの位置

調査の結果が公開され、プロジェクトの成果の全貌が明らかになった。ここでは国際会議でのプレス・リリースを元にその内容を紹介する。

- 協同研究体制

マリック 2002 年ガスハイドレート産出研究井プログラムは、日本の石油公団 (JNOC)、カナダ地質調査所 (GSC)、米国地質調査所 (USGS)、ドイツ地球科学研究所 (GFZ)、米国エネルギー省 (USDOE)、インド石油天然ガス省 (MOPNG)、国際大陸掘削プログラム (ICDP)、マッケンジー・デルタ探査共同体を形成する BP カナダ、シェブロンカナダ、バーリントン資源カナダ等の協同によって実施された。現場作業を石油資源開発 (株) (JAPEX) と石油資源開発カナダ (株) が、科学プログラムを GSC が担当した。

- 調査対象地域

マリック 2002 年ガスハイドレート産出研究井プログラムは、図-6 に示すカナダ北西準州マッケンジーデルタ・リチャーズ島のマリック・ガスハイドレート賦存地域において、深さ 1,200m の 3 本の調査坑井を掘削した。この 3 本の坑井は、中央の 1 本が産出試験井、両側の 2 本が観測井として、それぞれ 40m の間隔をおいて掘削された。Mallik 5L-38 坑井では深度 880-1,150m の区間からコア試料が採取され、ガスハイドレートと堆積物が回収された。コア試料は国際大陸掘削プログラム (ICDP) の科学者や技術者も参加して詳細に分析され、ガスハイドレート賦存層の地質学的、地化学的、地盤工学的、微生物学的な特性に関する詳細な情報が得られた。

- 科学的、技術的な新しい知見

- コア研究プログラム

マリックプログラムでは 150m 以上の良好なハイドレートを含むコア試料が採取され (図-7)、貯留層である堆積物の巨視的なレベルから顕微鏡的レベルまでの特性の研究が可能となった。特筆すべき研究として、ガスハイドレートが分解する際の動特性、岩石物理学的特性、分子化学的特性、圧縮強度や応力場などの地盤工学的特性の研究があげられる。

- 地球物理学的研究

ガスハイドレートの分布および賦存量を遠隔的に定量的に把握するために、広範囲にわたる地球物理学的調査が実施された。光ファイバーケーブルを利用した温度計により地下の温度情報が高分解能で得られた。地表、坑井内あるいは坑井間の地震探査、数々の先進的な検層も実施され、産出テスト前、中、後の生産層の変化の様子が坑井間物理探査技術によって測定された。その結果、地層内の浸透率、ガスハイドレートの賦存状態、割れ目の産状について研究することが可能となった。



図-7 Mallik 5L-38 井から採取された
メタンハイドレートのコア
(Photos courtesy of NRC,
<http://gashydrate.nrcan.gc.ca/mallik2002/>)

・ガスハイドレートの産出試験

本プログラムでは十分に制御・管理された小規模な短期試験を実施することを目標に、試験条件と地層の反応の両方を精密に測定しながら加熱や減圧によるガスハイドレートの挙動について研究された。長期的な貯留層の挙動を予測するためのシミュレーション・モデルの開発・改良も行われた。

減圧法および加熱法による産出試験が行われた。3回の短期間減圧法テストの結果、圧力による刺激によって分解・生産のガスハイドレートが可能であることが確認された。実験の結果、ガスハイドレートは浸透性に富み減圧により動き易いこと、人工的に地層を破砕することによりガス生産が大幅に増加するということが確認された。ガスハイドレートの濃集度が特に高い地層を対象として5日間にわたり加熱実験が実施されたが、ガスは実験中産出を続け、最大時には日産 1,500 立方メートルを記録した(図-8)。

4.2. マリック国際シンポジウム

この国際会議ではこれまで非公開であったマリック産出試験調査井プログラムにおける産出試験や調査の結果取得されたデータが世界に先駆けて公開され、プロジェクトの全貌が明らかになった。



図-8 マリック生産試験井、(左) 厳寒の地の試験井(Mallik 5L-38)、
(右) 生産試験により噴出したメタンガスの炎。

(Photos courtesy of NRC, <http://gashydrate.nrcan.gc.ca/mallik2002/>)

- 1) 会議名：マリック国際シンポジウム（英文名：Mallik International Symposium）
- 2) 開催日：2003年12月8日（月）、9日（火）、10日（水）（3日間）
- 3) 開催場所：ホテルニューオータニ幕張、千葉市美浜区
- 4) 主催：マリック産出試験調査井プログラム及び石油公団
- 5) 協賛：カナダ地質調査所(GSC)、ドイツ地球科学研究所(GFZ)ポツダム、米国地質調査所(USGS)、米国エネルギー省(USDOE)、インドガス供給公団(GAIL)及び石油・天然ガス公団(ONGC)並びにBP-Chevron-Burlington グループ
- 6) 協力：国際陸上科学掘削計画(ICDP)
- 7) 開催された主なセッション等
 - ハイドレート試料の岩石物理、化学特性と貯留層特性
 - NMR と最新のロギング手法：マリックにおけるガスハイドレートの賦存形態の解釈
 - 光ファイバーを用いた坑内温度計測結果
 - 坑井間物理探査と生産層の状況把握
 - マリック調査井において実施された減圧法と熱水循環法による産出試験の結果
 - 最新のシミュレーション技術による産出試験データの解析

会議には13カ国235名が参加したと発表された。

物理探査関連のセッションでは、京都大学工学研究科松岡俊文教授が南海トラフとマリックのケースの最新のデータに基づき、物理探査の課題と展望について基調講演を行った。

- ・ 南海トラフにおける3次元反射法の結果が紹介され、特徴的な反射法断面とBSRの3次元分布が示された。
- ・ インピーダンス・インバージョンによりハイドレート層の存在や物性値を把握できる可能性があることが示された。
- ・ 二重BSRや海底すべりとBSRの消失との関連などさまざまなケースが紹介され、まだ明らかになっていないことが多いことが述べられた。
- ・ ハイドレート層の下限はBSRによって与えられるが上限を与える有効な探査法は確立されておらず、資源量の推定方法が確立されていないことが課題である。
- ・ ハイドレート層の特性を踏まえ、岩石物理学に基づく地震波属性解析の手法を開発することが有望な手法となりうる。

物理探査のセッションでは、マリック生産試験に関する検層、坑井間弾性波探査、VSP、3次元反射法地震探査の概要と解析結果が報告された。筆者らのグループは坑井間弾性波探査データを用いてハイドレート融解に伴う貯留層変化の検出（地層内に滞留したメタンガスの影響によると考えられる）に成功し、その結果を報告した。

5. おわりに

メタンハイドレート資源開発に関する諸研究は日本が世界に先駆けて行うものであり、マリック陸上掘削で得られた膨大な知見を詳細に分析するとともに、現在進行中の南海トラフにおける探査と掘削の結果に注目したい。

本ニュースレターの執筆にあたり、京都大学工学研究科松岡俊文教授の講演資料を拝借した。また、

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムのウェブサイトから図を許諾を得て掲載するとともに、内容を参考にさせていただきました。ここに記して謝意を表す。

参考文献およびウェブサイト

物理探査学会, 小特集: メタンハイドレート, 物理探査, 55, 5, 2003.

物理探査学会, メタンハイドレート, 物理探査ハンドブック,

Dallimore, S.R., Uchida, T. and Collett, T.S., Eds., 1999. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin 544.

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: <http://www.mh21japan.gr.jp/>

石油公団: <http://www.jnoc.go.jp/>

資源エネルギー庁石油・天然ガス課「メタンハイドレート開発計画について」:

<http://www.meti.go.jp/topic/data/e20205aj.html>

Natural Resources Canada, Mallik 2002 gas hydrate research well project:

<http://gashydrate.nrcan.gc.ca/mallik2002/index.html>