

Ⅲ. 我が国周辺のメタンハイドレートの資源量評価

Ⅲ.1. 資源として成立しうるハイドレート（BSR と濃集コンセプト）

日本周辺海域の海底面下では、地震探査データから MH の分布下限を示すとされる BSR（海底疑似反射面）が広範囲に確認されており、MH の存在を示唆している。これらは将来の天然ガス（主にメタンガス）の需要に寄与しうる炭化水素資源の候補の一つとして期待されている。

(1) BSR

MH の安定領域の下限境界では、上位に固体である MH が存在し、その下位ではメタンと水という流体が存在することになり、地下の物性が異なる。地下に伝播した地震波は、このような物性の違いに起因するインピーダンスコントラストによって BSR と呼ばれる反射波を生成する。したがって、BSR は MH の安定領域の下限を示唆し、そのために、MH の存在指標となりうる。BSR の特徴としては、①海底面とほぼ並行である、②地層境界としばしば斜交する、③海底面と逆位相の反射波である、といったことが挙げられる。これらの特徴を踏まえて、フェーズ1では、1971－2002 年の間に実施された基礎調査により取得された地震探査データを用い、日本周辺海域における MH に起因する BSR の分布状況が明らかにされた（図1；林ほか，2010）。その後、MH の賦存状況や資源量を評価するためのデータ取得を主目的として、2004 年の基礎試錘「東海沖～熊野灘」では16箇所のサイトに坑井が掘削された。MH の賦存状況は各坑井で異なっており、BSR の分布傾向からだけでは、MH の濃集箇所や、その層厚を予測することは難しいことがわかった。そこで、探鉱対象としての有望性という観点から、MH 賦存層全体ではなく、特定の部分に評価の対象を絞ることを目的として、MH 濃集帯という新規コンセプトが導入された。

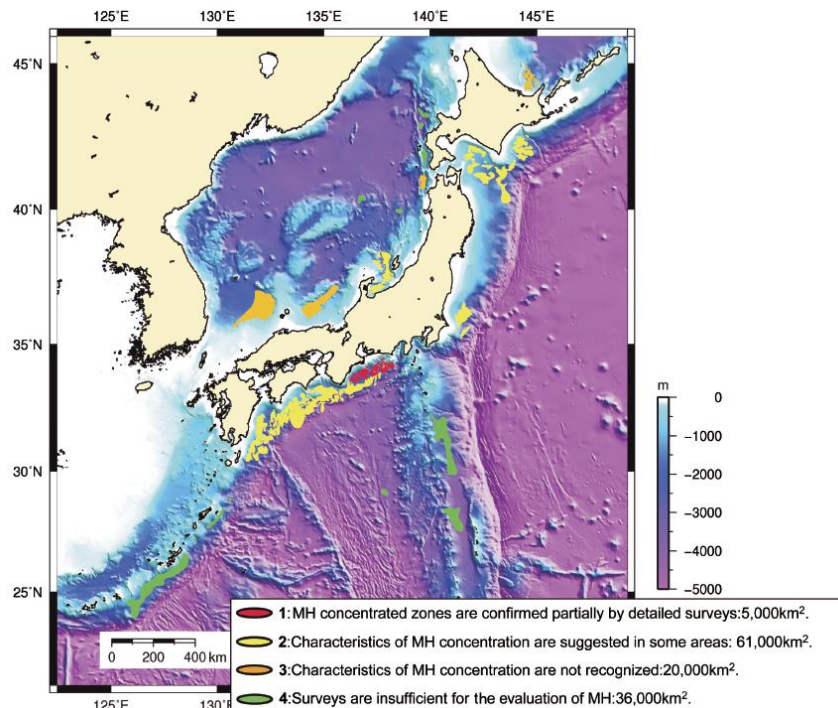


図1 2009年に公表されたBSR分布図（林ほか，2010）

(2) 濃集帯

MH 濃集帯は、孔隙率の高いタービダイト砂泥互層に形成され、検層データでは周囲の MH 賦存層と比較して高比抵抗、P 波速度構造では高速度を示す、特徴的な MH 賦存層である（図 2）。東部南海トラフにおける研究により、MH 濃集帯が成立している指標として、(A) BSR の存在、(B) BSR 上位のチャンネルあるいはローブなどのタービダイト砂泥互層の分布、(C) 強振幅反射波、(D) 地震波高速度異常、の 4 指標が採用された（佐伯ほか，2010）。これらの指標に基づき、坑井データ（コアと検層）及び二次元/三次元の地震探査データを用いた解析によって、東部南海トラフにおいて計 16 の濃集帯が抽出された。これらの濃集帯に対して、メタンガスの原始資源量が確率論的手法により算定された（藤井ほか，2009）。

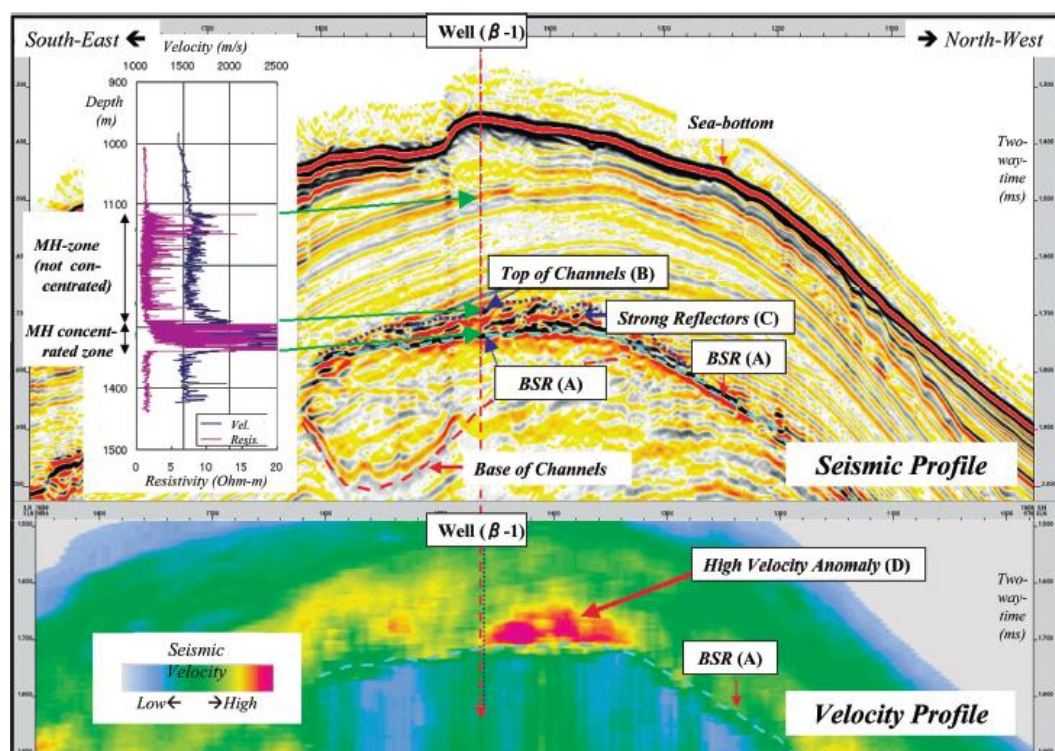


図 2 MH 濃集帯の特徴（佐伯ほか，2010）

フェーズ 1 の研究により MH の資源量評価に関する多くの成果が得られたが、東部南海トラフ海域以外の MH 濃集帯の分布、性状、賦存量については、依然として不明な点が多かった。また、BSR によって MH の存在が示唆されていたとしても、MH 濃集帯が形成されるかどうかといった因果関係を検討するためには、メタンの生成・移動・集積・MH の形成といったメタンハイドレートシステムの中で定量的手法により評価する必要があった。

これらを踏まえて、フェーズ 2 及び 3 では、資源量評価に関する研究課題として以下の 2 項目が設定された。

- 日本周辺海域の MH 賦存状況の評価
- メタンハイドレートシステムの検討

引用・参考文献

- 1) 藤井哲哉・佐伯龍男・小林稔明・稲盛隆穂・林雅雄・高野修・高山徳次郎・川崎達治・長久保定雄・中水勝・横井研一、2010：確率論的手法による東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価、地学雑誌、118(5)、814-834
- 2) 林雅雄・稲盛隆穂・佐伯龍男・野口聡、2010：日本周辺海域におけるメタンハイドレートに起因する BSR の分布、石油技術協会誌、75(1)、42-53
- 3) 佐伯龍男・藤井哲哉・稲盛隆穂・小林稔明・林雅雄・川崎達治・長久保定雄・下田直之・野口聡・中水勝・高野修・西村瑞恵・及川信孝・高山徳次郎、2010：メタンハイドレート探査手法とその基本コンセプト、石油技術協会誌、75(1)、9-19

III.2 日本周辺海域のメタンハイドレート賦存状況の評価

フェーズ2及び3では、日本周辺海域のMH賦存状況の把握を拡充することを目的に、フェーズ1で得られたBSR（海底疑似反射面）の特徴や濃集帯の指標に基づく解釈手法を用いて、それまでの古い二次元地震探査データのデジタイズ、一部の再処理等を行うとともに、新たに在来型の石油天然ガスのための基礎物理探査（国の物理探査船「資源」）で取得された二次元及び三次元の地震探査が実施された海域を中心にBSR分布域の詳細評価を実施するとともに、東部南海トラフ海域以外においても濃集帯分布状況に関する評価作業を実施した。すなわち、物理探査船「資源」で取得された新規の二次元地震探査データおよそ18,000km、三次元地震探査データおよそ24,000km³を加えて、BSR分布並びに濃集帯の見直しと評価の拡充を図った。なお、正確には、MHの存在が直接、坑井などで確認されて初めて濃集帯と呼べるので、直接的確認がなされていないことを明示する必要のある時に濃集帯候補と表現することとした。

III.2.1 BSRの分布

BSRは海底面に平行で地層層理面に斜交して延び、海底面反射波と逆位相で現れる反射面である。また、その上位にMHが賦存しているかどうかの判断の指標となり、MHの平面的な広がりを知る手がかりとなることから、BSRの分布域を把握することは重要である。

フェーズ1では、2006年以前に取得された基礎物理探査データの解釈により、図1に示すBSR分布図（2000年）をアップデートした。図2にBSR分布図（2009年）、表1に図2における色の分類を示す。

フェーズ2及び3では、フェーズ1で得られた知見を基に、2007年以降に取得された基礎物理探査データを加えて解釈作業を実施した。また、一部のフェーズ1の地震探査データの再処理を実施し、そのデータの再解釈も行い、BSR分布域のアップデート作業を行った。

フェーズ1からのアップデートは、既存の二次元地震探査測線エリアをカバーする新たに取得された三次元地震探査データの解釈による既存のBSR分布域の拡幅、あるいは分布域内の詳細化、フェーズ1で空白域であったエリアにおいて実施された二次元地震探査データの解釈による新たなBSR分布域の確認、である。

現在、既存の地震探査データの解釈作業を引き続き実施しており、今後、新たに開示される二次元あるいは三次元地震探査データを加えて解釈作業を進め、BSR 分布図のアップデートを行っていく。

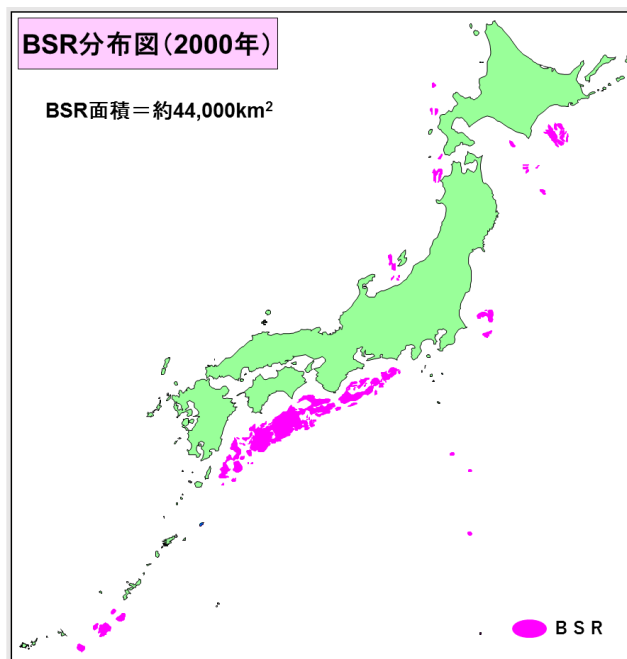


図1 日本周辺海域の BSR 分布図（2000 年）

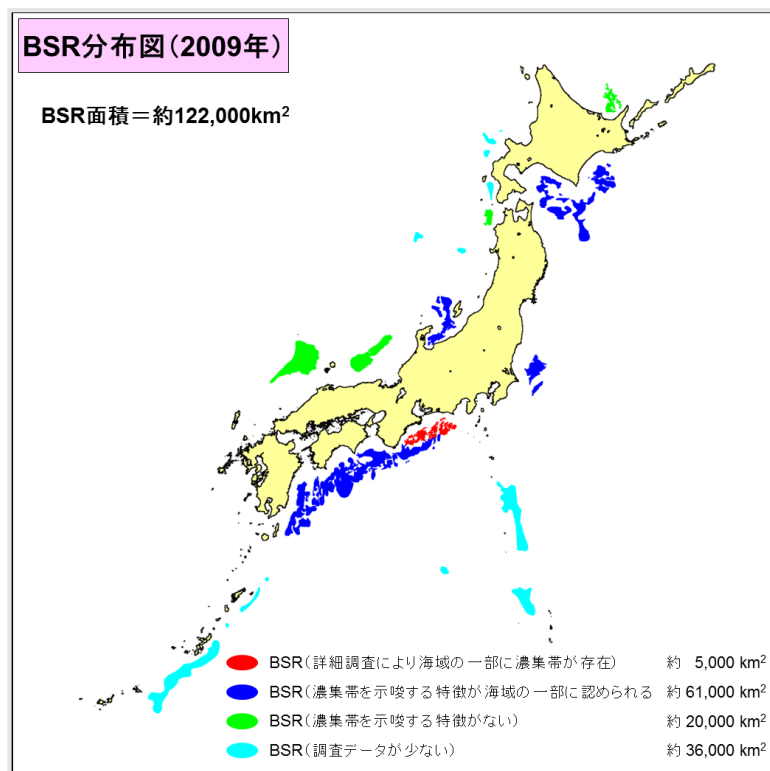


図2 日本周辺海域の BSR 分布図（2009 年）

表1 BSR 分布図（2009 年）における色の分類

	詳細調査により 濃集帯が存在	濃集帯を示唆す る特徴がある	濃集帯を示唆す る特徴がない	調査データが少 ない
BSR	あり	あり	あり	あり
MH濃集帯	示唆される	示唆される	示唆されない	示唆されない
二次元地震探査の解析	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み（デー タ量が少ない）
三次元地震探査の解析	実施済み	一部実施済み	未実施	未実施
掘削調査	実施済み	未実施	未実施	未実施
賦存状態・賦存量の推定 （現時点で）	可能※	困難	困難	困難

III.2.2 日本周辺海域のメタンハイドレート濃集帯賦存状況の評価

MH 濃集帯では、MH が空間的に高い密度で存在していること、地層にある程度の浸透率が見込めることから、石油開発の技術を使用して、減圧法等で比較的効率的にガスを生産できる可能性がある。そのため、MH 濃集帯は将来の資源フィールドとして優先順位が高い。

フェーズ1では、東部南海トラフ海域において MH 賦存状況の把握を行い、MH 濃集帯を抽出する技術等を確立した。これら東部南海トラフ海域での資源量評価で得られた知見を踏まえ、フェーズ2及び3では東部南海トラフ以外の日本周辺海域に対象を拡大し、MH 濃集帯の分布域及び規模を把握するための評価作業を推進した。

具体的には、フェーズ1で確立された地震探査データにおける MH 濃集帯に見られる四つの指標

- ① BSR の存在
- ② BSR 上位のチャネルあるいはローブなどのタービダイト砂泥互層の分布
- ③ 強振幅反射波
- ④ 地震波高速度異常

に基づき、MH 濃集帯となりうる候補地（MH 濃集帯候補）の抽出作業を進めた。

評価には、主に在来型石油天然ガスを対象として物理探査船「資源」によって新規取得された三次元地震探査データを用い、既存の BSR マップ（林ほか, 2009）等に基づき、ある程度有望と見込まれる海域のデータを優先的に精査した。

これまでの検討から、MH 濃集帯が成立する条件として、後背地からの十分な砂の供給と、MH 安定領域にタービダイトが堆積するような堆積盆の構造発達過程が重要であることが分かってきた。それらの条件が揃っていない地域では、BSR が見いだされていたとしても、MH が濃集している可能性は低いといえる。

また、二次元地震探査データのみが存在する海域においても比較的面積の大きい MH 濃集帯候補が見出されており、それらの海域については三次元地震探査データを取得し、MH 濃集帯候補

の規模・特徴を精査する必要がある。

ただし、現段階では、東部南海トラフ海域以外では MH 濃集帯に坑井が掘削された例はなく、本作業により抽出された MH 濃集帯候補は、MH の濃集が実証された地域にみられる反射波列に類似したものには過ぎない。

個別の MH 濃集帯候補の資源量を確定させるには、掘削調査が必須である。そのため、将来的には試掘によるコア及び検層データの取得並びに簡易試験等を実施する必要性が生じると考えられる。

MH は濃集帯の存在しない海域にも存在しているが、それらの MH からのガス生産には、より複雑な生産手法の開発が必要となる。そのため、検討の優先順位は低いものの、資源量の評価は継続していく必要がある。

III.3 メタンハイドレートシステムの検討

MH 濃集帯の形成にはメタンハイドレートシステムの存在が必要不可欠である。メタンハイドレートシステムとは、微生物起源と熱分解起源のメタンの生成・移動・集積・MH の形成までの一連の過程をシステムとしてとらえたものである（図 1）。このような鉱床成因論的な観点からメタンハイドレートシステムを検討することによって、我が国周辺海域のデータが少ない海域における MH 濃集帯の分布予測及び資源量評価の精度向上が期待される。

フェーズ 2 及び 3 では、メタンの生成に関する検討のための微生物・遺伝子分析の一部は AIST に委託し実施した。さらに、メタンの移動・MH の集積に関する堆積盆シミュレータを用いたケーススタディをそれぞれ実施した。

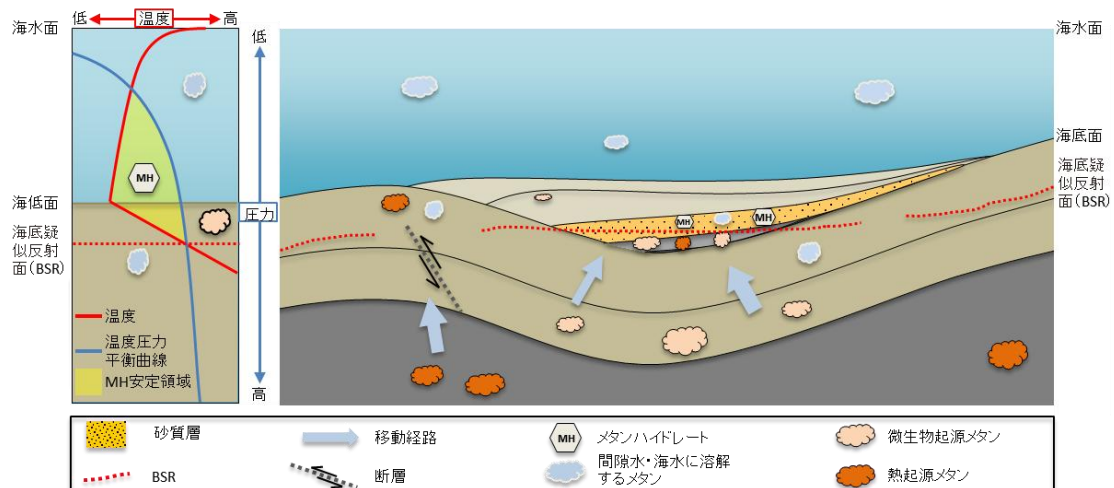


図 1 右図は MH 鉱床成立のイメージ図（メタンハイドレートシステムで検討）
左図は MH 安定領域と温度、圧力、BSR（海底擬似反射面）の模式的な関係図。

III.3.1 微生物・遺伝子分析によるメタン生成要因の検討

メタン生成要因の検討では、メタンの起源の解明と温度・圧力条件とメタン生成活動との関係

を明らかにする必要がある。したがってフェーズ2及び3では、東部南海トラフにおけるメタンの生成メカニズムを明らかにするため、基礎試錘「東海沖～熊野灘」や海洋産出試験の事前掘削で取得されたコア試料を用いて微生物・遺伝子分析を行った。メタン生成菌のバイオマーカーと考えられる Pentamethylicosane の炭素安定同位体分析及び微生物の群集構造解析の結果、MH層のメタンは微生物起源で、メタン生成菌の活動は堆積物表層付近よりもMH濃集帯及びその下の層付近で活発になっていることが示唆された（天羽ほか、2011、2016）。また、バイオマーカー分析及びメタン生成菌の培養試験の結果、メタン生成速度の最大値（最大増殖温度）は、30℃と40℃となり、圧力は5-15MPaまでメタン生成速度に影響がないことが示唆された。得られた分析結果に基づいて図2のようなメタン生成速度モデルを作成し堆積盆シミュレータに組み込んだ。

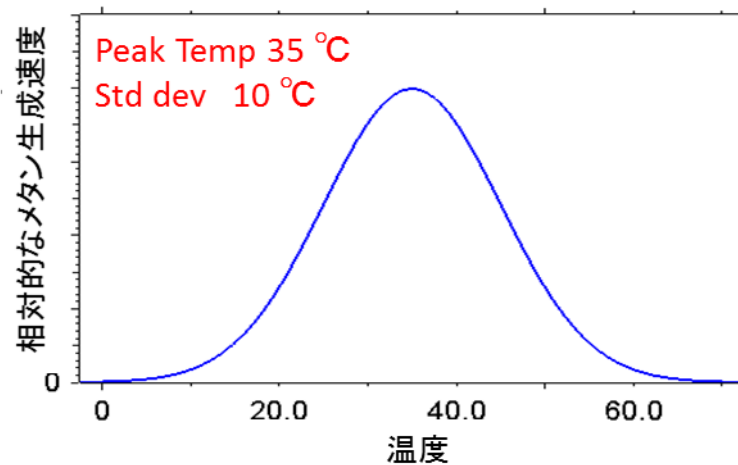


図2 地化学分析結果に基づくメタン生成速度モデル

III.3.2 堆積盆シミュレータによるメタンハイドレートシステム評価

堆積盆シミュレータ PetroMod™ (Schlumberger Limited) は、主に石油システムモデリングを目的として開発されたソフトウェアである。地層中の有機堆積物が熟成して炭化水素の生成、移動、貯留する過程をコンピュータ上で再現する。本ソフトウェアは石油や天然ガスのほかに MH を取り扱うためのガスハイドレートモジュールとして以下の機能も有している。

- ガス、水、MH の3相の取り扱いが可能
- 微生物メタン生成モデルの導入
- 温度圧力平衡曲線の導入による MH 安定領域の設定

メタンハイドレートシステム評価は、入力データの設定、モデル構築、数値シミュレーションといった一連の流れで実施される。具体的には、まず、モデル構築のための準備として、対象海域のデータレビュー（地質報告書、化学分析結果、地震探査・検層・速度データ）、ホライズングリディング、速度モデル作成とホライズンデータの深度変換などを行った。次に、モデル構築ではファシスモデルの作成、根源岩設定、シミュレーション境界条件設定などを行った。その後シ

ミュレーションを実施、坑井での温度・圧力、BSR（海底擬似反射面）の深度などでキャリブレーションを行った。

本評価では資源量として対象堆積盆のメタン生成総量、MH 中のメタン、フリーガスのメタン、間隙水に溶解したメタン量なども検討した。MH 賦存状況の評価からある程度有望と判断された3 海域、中部地方太平洋側、中国・四国太平洋側、九州太平洋側においてメタンハイドレートシステム評価を実施した。ここでは代表例として、中部地方太平洋側の評価結果を示す（図3）。シミュレーションの結果、メタン生成は坑井周辺及び沈降域であるミニベースンで活発に生じ、生成したメタンは粗粒な堆積物を多く含むシート状またはチャネル状のタービダイト層のアップディップ方向に移動して集積するプロセスを確認した（Fujii et al. 2016）。

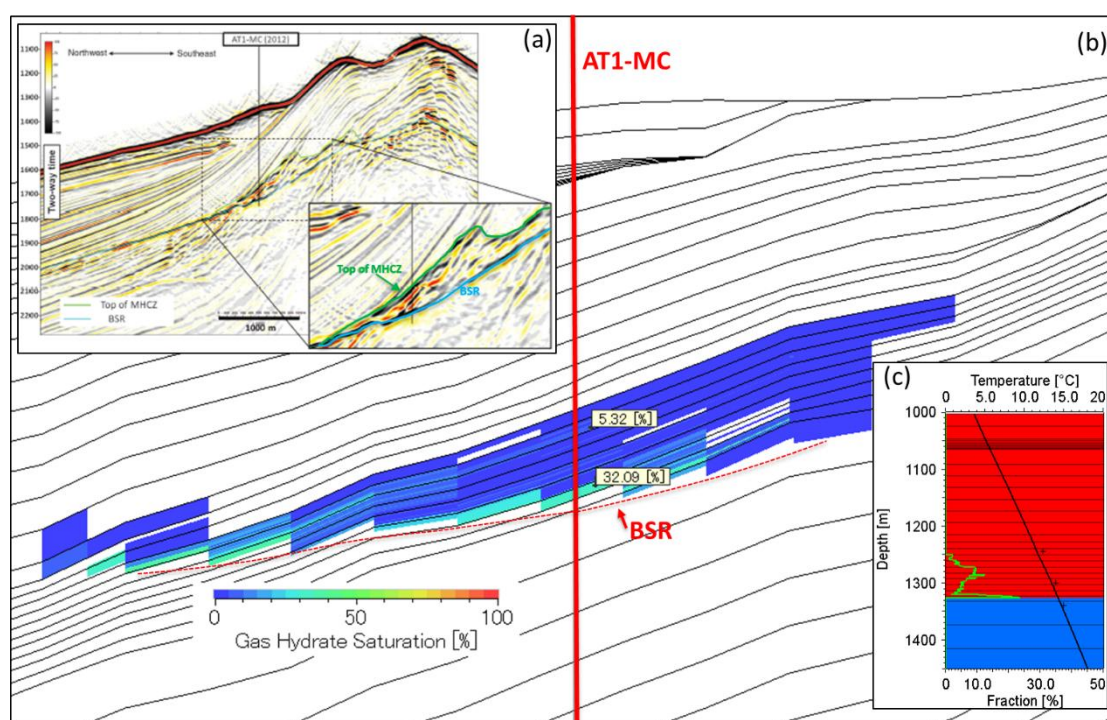


図3 メタンハイドレートシステムのシミュレーション結果、(a)地震探査データから解釈されたMH 濃集帯分布（図中の MHCZ（MH 濃集帯）と BSR の間）（Fujii et al. 2016）、(b) AT1-MC 坑井を通る断面における MH 飽和率分布(図の青色部)のシミュレーション結果、(c)AT1-MC 坑井位置の海底面下でのシミュレーション結果の温度分布(黒線)と温度観測データ(図中の+)、MH 飽和率(緑線)のシミュレーション結果（赤色は MH 安定領域で青色は不安定領域）。

III.3.3 まとめと今後の課題

バイオマーカー分析及びメタン生成菌の培養試験の結果、メタン生成速度の最大値は30℃-40℃と得られた。これらの結果を参照しメタン生成モデル（ガス分布の温度依存モデルでピーク温度35℃と標準偏差10℃）を堆積盆シミュレータに組み込むことができた。

MH 濃集帯を鉱床成因論的な観点から定量的手法により検討することを目的として、堆積盆シ

ミュレータを用いたメタンハイドレートシステムの評価を実施した。中部地方太平洋側（第二渥美海丘エリア）ではシミュレーション結果を AT1-MC 井で取得した温度・圧力を用いてキャリブレーションした。地震探査データから解釈した MH 濃集帯分布とシミュレーション結果とを比較したところ、MH の集積箇所は大局的に一致した。シミュレーションにより MH の濃集過程を再現することによって、第二渥美海丘エリアにおいて地震探査データから抽出された MH 濃集帯の存在が、地質学・地化学的観点からも確認された。第二渥美海丘エリアの知見を踏まえてほかの二つの海域でメタンハイドレートシステム評価を行った。二つの海域では温度・圧力データがなかったが、BSR の深度や地震探査データから解釈した MH 濃集帯分布などでキャリブレーションを行った。また、シミュレーション結果に基づく MH の原始資源量の再評価などについても、今後検討を行う必要がある。

引用・参考文献

- 1) 天羽美紀・井澤柳子・眞保恵美子・波多野圭子・島田忠明（2011）：東部南海トラフメタンハイドレート含有堆積物中のバイオマーカーの深度分布、平成 22 年度技術センター年報、163-164.
- 2) 天羽美紀・眞保恵美子（2016）：地球化学的・微生物学的手法を用いた東部南海トラフにおけるメタン生成活動の推定、平成 27 年度技術センター年報、151.
- 3) Fujii, T., Aung, T. T., Wada, N., Komatsu, Y., Suzuki, K., Ukita, T., & Egawa, K. (2016). Modeling gas hydrate petroleum systems of the Pleistocene turbiditic sedimentary sequences of the Daini-Atsumi area, eastern Nankai Trough, Japan. Interpretation, 4(1), SA95-SA111.

Ⅲ.4 資源量評価のまとめ

我が国周辺の MH の資源量評価では、フェーズ 2 及び 3 において、「日本周辺海域の MH 賦存状況の評価」と「メタンハイドレートシステムの検討」を実施した。

「日本周辺海域の MH 賦存状況の評価」においては、二次元地震探査データの一部再処理など品質向上を図ったデータ並びに新規の地震探査データを用いて、砂層型 MH 濃集帯の探査・資源量評価を進め、フェーズ 1 までに作成されたメタン起源の BSR 分布図を改定した。また、東部南海トラフ海域以外の MH 濃集帯の評価も進め、摘出された濃集帯候補のうち、主要なものについては、その特徴をまとめ、データ集を作成した。また、「メタンハイドレートシステムの検討」では、フェーズ 2 までに構築した基盤技術を進め、東部南海トラフ以外の 2 海域を含めた 3 海域において、二次元及び三次元の堆積盆地シミュレーションを実施した。二次元及び三次元地震探査データを主とした評価に加え、堆積盆地シミュレーションによる MH の成因論的検討を行うことにより、より精度の高い評価につながると期待できる。

一連の評価の流れを概念図としてまとめた（図 1）。



図1 砂層型MHの評価手法 概念図

濃集帯が成立する可能性のある海域で、二次元地震探査データの再処理などで解釈データの品質向上が期待できるところにおいては、再処理等を実施して、濃集帯の評価を行う。ある程度の規模が見込まれる有望な濃集帯候補については、堆積盆地シミュレーションを実施し、メタンハイドレートシステムが抽出された濃集帯候補でもメタンハイドレートシステムが成立する可能性があるかを検討する。

これらの成果は、本邦石油開発企業が将来的に探鉱開発海域を検討・選定する上での基礎情報になると期待される。