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

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*

Resource Assessment of Methane Hydrate by Applying a Probabilistic Approach in the Eastern Nankai Trough, Japan

Tetsuya FUJII*, Tatsuo SAEKI*, Toshiaki KOBAYASHI*,
Takao INAMORI**, Masao HAYASHI*, Osamu TAKANO*,
Tokujiro TAKAYAMA*, Tatsuji KAWASAKI***, Sadao NAGAKUBO*,
Masaru NAKAMIZU* and Kenich YOKOI*

Abstract

A resource assessment of methane hydrate (MH) in the eastern Nankai Trough was conducted through a probabilistic approach using 2D/3D seismic reflection data and drilling survey data obtained from Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) Tokai-oki to Kumano-nada exploratory test wells. We extracted more than 10 prospective MH-concentrated zones characterized by high resistivity in well log, strong reflectors and high velocity on seismic profiles (data), and turbidite deposits delineated by sedimentary facies analyses.

The amount of methane gas contained in MH-bearing layers was calculated using a volumetric method for each zone. Each parameter, such as gross rock volume (*GRV*), net-to-gross ratio (*N/G*: ratio of sandy layer divided by gross thickness), MH pore saturation (*Sh*), porosity, cage occupancy, and volume ratio, was given as a probabilistic distribution for a Monte Carlo simulation, considering the uncertainty of these values.

The *GRV* of each hydrate-bearing zone was calculated from both strong seismic amplitude and velocity anomalies. The *N/G* was determined from the relationship between LWD resistivity and grain size in zones with existing wells. A seismic facies map created by a sequence stratigraphic approach was also used for determining the *N/G* in zone without well controls. *Sh* was estimated from a combination of density and NMR logs, together with calibration by gas volume measured from onboard MH dissociation tests using a pressure temperature core sampler (PTCS). *Sh* in a zone without well control was estimated from the relationship between seismic P-wave interval velocity and *Sh* from NMR log at a well site.

A total area of 4687 km² of Bottom Simulating Reflectors (BSRs) was interpreted within the

* 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

+ 現所属：株式会社地球科学総合研究所

** 現所属：東京ガス株式会社

* Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

+ Present address: JGI, Inc.

** Present address: Tokyo Gas Co., Ltd.

survey area in the eastern Nankai Trough (12000 km²). The total amount of methane gas in place contained in MH in the survey area was estimated to be 40 tcf as a Pmean value (10 tcf as P90, 83 tcf as P10). Total gas in place at the MH-concentrated zone (767 km²) was estimated to be 20 tcf (Half of the total amount) as Pmean value. Sensitivity analysis indicated that *N/G* and *Sh* have higher sensitivities than other parameters.

Key words : methane hydrates, resource assessment, eastern Nankai Trough, probabilistic approach

キーワード：メタンハイドレート，資源量評価，東部南海トラフ，確率論的手法

I. はじめに

南海トラフをはじめとする日本周辺海域の海底面下では、地震探査データからメタンハイドレート（以下 MH）の分布下限を示すとされる海底擬似反射面（BSR）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資源としてのポテンシャルが期待されているが、実際の MH の分布、産状、賦存量については、いまだ不明な点が多い。

佐藤ほか（1996）により、日本周辺海域の MH 層および直下のフリーガス層中のメタン量の試算が行われ、日本の天然ガス年間消費量（1994 年）と比べて 2 桁大きいという評価結果が公表された。また、1999 年に静岡県沖合いに掘削された経済産業省（METI）による基礎試錐「南海トラフ」により、砂質層中に孔隙充填型の MH が確認され、その回収に成功した（Takahashi *et al.*, 2001; 高橋ほか, 2001; 中水ほか, 2004; Tsuji *et al.*, 2004; Uchida *et al.*, 2004）。これらのイベントを契機として、経済産業省は 2001 年に産学官から成る MH 資源開発研究コンソーシアム（通称 MH21）を組織し、MH の資源化に関するプロジェクトを 16 年計画で開始した。この一環として、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 1～5 月にかけて基礎試錐「東海沖～熊野灘」が掘削された（辻, 2004; Takahashi and Tsuji, 2005; Fujii *et al.*, 2005, 2009; 藤井ほか, 2005; Tsuji *et al.*, 2009）。本掘削作業では、掘削同時検層（Logging While Drilling: LWD）が計 16 地点、コアリン

グ作業が計 4 地点、ワイヤーライン検層が計 2 地点、および長期間の地層温度測定が 1 地点で実施された（図 1）。これらを含む以下に示すデータセットを用いて、2005 年から 2006 年にかけて同調査海域を対象とした MH の資源量評価を実施した。

- ・ 1999 年基礎試錐「南海トラフ」（6 坑井）。
- ・ 2001 年 2 次元基礎物理探査（2,802 km²）。
- ・ 2002 年 3 次元基礎物理探査（3 海域、1,960 km²）。
- ・ 2004 年基礎試錐「東海沖～熊野灘」（16 地点、32 坑井）。

日本周辺海域の MH の資源量評価については、上述の試算を含むいくつかの評価結果がこれまで発表されている（Krasen, 1992; 奥田, 1993; 佐藤ほか, 1996; Satoh, 2002）。しかし、これらの算定はいずれも測線間隔の粗い 2 次元地震探査データに基づき解釈された BSR の面積に対し、一定のネット層厚を掛け合わせるにより算出した概算であり、詳細な検討は実施されていなかった。本プロジェクトでは、特に東部南海トラフをモデル海域として設定し、高精度の 2 次元/3 次元地震探査データおよび多数の坑井データを取得した。これらを活用して、MH 濃集帯という新たな概念を導入し（Saeki *et al.*, 2008）、MH 資源量評価を実施した。

II. メタンハイドレート賦存層の特徴と分類

1) MH 賦存層の特徴

基礎試錐「東海沖～熊野灘」から得られたコアや検層データと 2 次元/3 次元地震探査記録を比較

図 1 調査海域における 2 次元/3 次元地震探査測線図および基礎試錐「東海沖～熊野灘」の坑井位置図。

Fig. 1 Location map of 2D/3D seismic survey and METI Tokai-oki to Kumano-nada exploratory test wells.

した結果、当該海域における MH 賦存層の特徴として以下のことが判明、または再確認された。

(1) MH は厚さ数 cm ～ 1.5 m (平均数十 cm) の、海底扇状地成のタービダイトの砂泥互層に賦存し、船上でのコアの温度測定や堆積相解析の結果から、特に砂質層に選択的に濃集する (Fujii *et al.*, 2005, 2009; 藤井ほか, 2005)。(図 2)

(2) BSR は当該海域において MH の存在を示唆する重要な指標ではあるが、必ずしも MH 層の濃集度や厚さの指標とはならない (Fujii *et al.*, 2006; Saeki *et al.*, 2008; Tsuji *et al.*, 2009)。

(3) 比抵抗検層などから認定された MH が濃集する区間の上面は、地震探査記録上で正の極性を持つ強振幅反射波に対比できる。

(4) 高密度速度解析から得られた P 波速度が高い区間は MH が濃集する区間とよく一致し、MH 層の認定に有効である (稲盛ほか, 2006; Saeki *et al.*, 2008, 佐伯ほか, 2008)。

2) MH 賦存層の分類

上述の特徴を踏まえ、われわれは MH が賦存する地層を大きく以下の 2 種類に分類した (表 1)

(Fujii *et al.*, 2008; Saeki *et al.*, 2008)。

(1) MH 濃集帯 (層)。

(2) 濃集帯以外の MH 賦存層 (メタン含有量の少ない MH 賦存層)。

(1) の MH 濃集帯は、以下のすべての条件を満たす地層 (領域) として定義した。

(a) 物理検層による高比抵抗区間が認識される (坑井データがある場合)。目安として 3 ohm-m 以上のネット区間が計 10 m 以上の砂質層を判断基準とした。本基準値 (10 m) は、各坑井位置における比抵抗検層と特徴的な強振幅反射波 (後述) との比較・対応により、経験的に決定した。

(b) 地震探査データにより、特徴的な強振幅反射波が認識される (特に上面)。上面の反射波は海底面と同じ正の極性で、掘削した坑井の中で MH が濃集している区間の上面にはほぼ常に認められた。一方、下面は負の極性で、多くの場合は BSR に対応するが、MH 安定領域下限付近に砂質層が存在しない場合は当該深度で強振幅反射波が発現せず、より浅部 (上位) で見られることもある (III 章 1-1) 節で説明)。

図 2 基礎試錐「東海沖～熊野灘」の掘削結果から示唆された MH 賦存堆積物の特徴。MH は厚さ数 10 cm から 1.5 m 程度のタービダイトの砂泥互層の砂層中（極細粒～中粒）に濃集している。堆積物の年代は微化石分析の結果から中期～後期更新世（1 Ma 前後）と推定される。

Fig. 2 Characteristics of MH-bearing sediments suggested from the results of METI Tokai-oki to Kumano-nada exploratory test wells. MH is concentrated in the turbidite sand layers with a thickness of 10 cm to 1.5 m. Ages of sediments are estimated to be middle to late Pleistocene based on a microfossil analysis.

(c) 周囲に比較し相対的に高い地震波区間速度を有する（調査海域により異なるが、目安として 2 km/sec 以上）。

(d) BSR または BSR 相当深度よりも上位に位置する。

(e) 堆積学的解釈（シーケンス解析）により、海底扇状地成のタービダイト砂層（チャネル（水路）またはローブ（舌状体））の分布が予想される。

(b) および (c) の概念の詳細と具体例については、Saeki *et al.* (2008) に示されている。

一方、(2) の濃集帯以外の MH 賦存層は、地震探査断面上で BSR が認識される上記以外のエリアで、MH の濃集度（海底面から BSR 深度までのマクロスケールで見た単位体積当りのメタン含有量）が相対的に低く、現段階では生産に向かないと推定される地層である。具体的には、①砂層孔隙充填型と推定されるものの、物理検層による比抵抗の上昇がスパイク状かつ断続的なタイプ、あるいは ②連続的な比抵抗上昇が見られるものの、比抵抗値そのものは 3 ～ 10 ohm-m 程

表 1 本評価における MH 賦存層の分類 (Fujii *et al.* (2008) を一部改変)。

Table 1 The categorization of MH-bearing layers applied in this study (from Fujii *et al.* (2008)).

	MH 賦存タイプ	定 義
(1) MH 濃集帯 (層)	砂質層 孔隙充填型	(a) 物理検層による高比抵抗区間 (坑井データがある場合：目安として 3 ohm-m 以上のネット区間が計 10 m 以上の砂質層). (b) 地震探査データにより、特徴的な強振幅反射波が認識される (特に上面). (c) 周囲に比較し相対的に高い地震波区間速度を有する (目安として 2 km/sec 以上). (d) BSR (または BSR 相当深度) よりも上位に位置する. (e) 堆積学的解釈により、海底扇状地成の砂層 (タービダイト) の分布が予想される.
(2) 濃集帯以外の MH 賦存層	①砂質層 孔隙充填型	砂層孔隙充填型と推定されるものの、物理検層による比抵抗の上昇がスパイク状かつ断続的 (3 ohm-m 以上のネット区間が計 10 m 未満)
	②泥質層間発達型 (層状または塊状)	連続的な比抵抗上昇が見られるものの、比抵抗値そのものは 3-10 ohm-m 程度と比較的小さく、泥質堆積物中の隙間 (フラクチャー) を層状または塊状に充填しているタイプ

度と比較的小さく、泥質堆積物中の隙間 (フラクチャー) を層状または塊状に充填しているタイプがその例である。

本評価では、上記の 2 種類 ((1) および (2)) の層を分けて評価することとした。また、従来から MH 層の直下に存在すると推定されてきたいわゆるフリーガス層については、本調査で取得した物理検層の解析結果 (密度孔隙率と中性子孔隙率の関係) から顕著なガス層の兆候が確認されなかったこと、また地震探査データからはガスの存在を示唆する兆候 (高周波成分が減衰しているように見られる特徴的な反射波) が認められるものの定量評価に耐え得る十分なデータが坑井位置で得られていないことから、今回は資源量算定の対象としては扱わなかった。

今回算定対象としたのは、各エリアの構造解釈により摘出された濃集帯 16 構造、および濃集帯以外の MH 賦存層 (BSR 分布域) である。なお、石油・天然ガスの有望構造のリスク評価で通常用いられる地質的試掘成功確率 (中西, 2000) については、評価を実施していない。これは従来型の石油・天然ガスとは異なり、MH 濃集帯について

は上述の (b) ~ (e) の特徴により、かなりの高確率で MH 濃集帯の位置を試掘前に予測することができると考えているためである。

III. 評価手法

MH 原始資源量の算定は、以下に示す容積法を用いて実施した。

(1) MH 濃集帯

$$\text{MH 原始資源量} = GRV \times N/G \times \phi \times Sh \times VR \times CO/28.3$$

(2) 濃集帯以外の MH 賦存層

$$\text{MH 原始資源量} = \text{Area} \times \text{Net thickness} \times \phi \times Sh \times VR \times CO/28.3$$

上式の各算定パラメータの意味と決定方法の概要を表 2 に、計算方法のイメージ図を図 3 に示す。なお、ここで言う MH 原始資源量とは、調査海域の海底面下に存在する MH 結晶中に含まれるメタンの総量を意味しており、繰り返しになるが MH 安定領域 (BSR) より下位のガスや、間隙水中の溶存メタン量は含まない。また、実際に生産して回収できる割合 (回収率) を考慮していないことから、「確認埋蔵量」とは異なる。実

表 2 メタンハイドレート原始資源量評価に用いた各パラメータの評価方法の概要 (Fujii *et al.* (2008) を一部改変).

Table 2 Outline of estimation method for each parameter used for the MH resource assessment (Modified from Fujii *et al.* (2008)).

パラメータ			単位	評価の元データ (評価方法)		確率分布
MH 原始資源量 (gas in place)			bcf	坑井データあり	坑井データなし	
(1)	GRV	総岩石容積	MMm ³	地震探査強振幅反射波 (上面 + 下面 (BSR)) 地震波区間速度異常, 砂の分布 (堆積学的解釈)		対数正規分布
	N/G	ネット／グロス比	frac.	地震探査強振幅反射波 + LWD 比抵抗	地震探査ファシス分布図 + 岩相柱状図	対数正規分布
(2)	Area	分布面積	km ²	BSR の分布		対数正規分布
	Net thickness	ネット層厚	m	LWD 比抵抗		対数正規分布
(1) と (2) 共通	φ	孔隙率	frac.	LWD の密度検層 (コア分析結果で較正)	周辺坑井の密度検層 + コア分析値	正規分布
	Sh	MH 飽和率	frac.	LWD の NMR 検層 + 密度 検層 (PTCS を用いた分解 ガス量実測値で較正)	既存坑井における地震波区 間速度と MH 飽和率との関 係	正規分布
	VR	容積倍率	frac.	基本的に 172 (0℃, 1 気圧)		一様分布
	CO	ケージ占有率	frac.	基本的に 0.96 (近年の天然試料の観測値)		三角分布
	28.3	変換係数		1 bcf = 28.3 MMm ³		

(1) MH 濃集帯, (2) 濃集帯以外の MH 賦存層.

bcf: billion cubic feet, MMm³: million cubic meter, frac.: fraction (比率).

容積法による評価－確率論的手法を適用

$$\text{MH 原始資源量} = \text{GRV} \times \text{N/G} \times \phi \times S_h \times \text{VR} \times \text{CO} / 28.3$$

モンテカルロシミュレーション(クリスタルボール使用)

図 3 本スタディで適用したメタンハイドレート原始資源量算定方法の概念図.

Fig. 3 Schematic diagrams of the MH resource assessment method applied in this study.

図 4 濃集帯の総岩石容積評価の手順 (α 濃集帯の例). 図右下の地震波速度分布図では、黄色い箇所が相対的に速度の速い箇所、黒い箇所が速度の遅い箇所である。同時に示したスケールは解釈ソフト上での相対的な表示であり、絶対値ではない。Fujii *et al.* (2008) を一部改変。

Fig. 4 Procedure of GRV evaluation for MH-concentrated zones (Example of α MH-concentrated zone). Yellow parts on the velocity profile are higher interval velocity zone, while black parts are lower interval velocity zone. The scale bar in the velocity profile is a relative display on the seismic interpretation software, rather than an absolute value. Modified from Fujii *et al.* (2008).

際の算定に当たっては、用いる各パラメータの不確実性の幅を考慮し、確率論的手法による評価を適用した。すなわち各パラメータを確率分布として与え、モンテカルロシミュレーションにより各濃集帯および濃集帯以外の MH 賦存層の資源量を確率分布として計算し (図 3 下)、最終的にこれらを足し合わせた。以下に MH 濃集帯とそれ以外の賦存層に分けて各パラメータの評価方法を解説する。

1) MH 濃集帯

1-1) 総岩石容積 (GRV)

GRV は、いわば全体の器の大きさ (容積) である (図 3a)。MH 濃集帯の認定 (解釈) および総岩石容積の評価は、図 4 に示すとおり II 章 2) 節

の (a) ~ (e) で述べた基準に従い行った。すなわちまず坑井位置で物理検層データ (主に比抵抗) と地震探査記録上の反射波を対比し、MH 濃集帯の上面と下面を認定した。上面の LWD 比抵抗値が下位に向かって急増する深度は地震探査記録上の正の極性を持つ反射波に、下面の LWD 比抵抗値が下位に向かって急減する深度は負の極性を持つ反射波に対応する。上面と下面を認定した後は、図の黄緑色の点線に示すとおり地震探査記録上でピッキング (反射波の追跡) を行い、さらに地震波速度解析の結果 (図 4 右下) から示唆される高速度帯と対比しながら分布を絞り込んだ。

また、坑井データがない場所では、II 章 2) 節の (b) ~ (e) の基準に従い、上述と同様の手順

で濃集帯の抽出を行った（違いは最初の坑井データとの対比のステップがないことである）。実際の地震探査解釈の実例は Saeki *et al.* (2008) に示されているので参照されたい。

GRV の計算に必要な時間から深度への変換（深度変換）では、SVWD (Seismic Vision While Drilling: VSP の LWD 版) および地震波速度解析から推定した MH 濃集帯の区間速度 2000 m/sec（一定）を用いた。

GRV の確率分布については、3 次元地震探査エリアについては、深度変換に用いた区間速度の振幅 (1800 ~ 2200 m/sec) が $\pm 10\%$ 程度存在すること、またこれに加えて地震探査解釈の不確実性の幅が存在することを考慮し、上記から見積もられた濃集帯容積の $\pm 20\%$ をそれぞれ P90 (Probability, 90)¹⁾、P10 (Probability, 10) とする対数正規分布とした (図 4 左下)。

一方、2 次元地震探査エリアの濃集帯の解釈は、3 次元地震探査エリアで得られた経験に基づき、アナロジー的に実施した。すなわち同じ濃集帯分布エリアにおいて 3 次元地震探査断面と 2 次元地震探査断面上の反射波の特徴を比較し、類似性を認識し、2 次元地震探査エリアでの解釈に適用した。解釈の結果、2 次元地震探査エリアでは比較的大規模な濃集帯が複数抽出された (図 5a)。しかしこれらの GVR の確率分布については、上記から見積もられた濃集帯容積を P1 (最大) とし、これにリスクファクター 0.4 をかけた容積を P50 とする対数正規分布とした (図 5c)。このリスクファクター 0.4 は、以下の 2 つのリスク要素を考慮して決定した ($0.8 \times 0.5 = 0.4$)。

① 測線間隔が粗い (4 ~ 5 km) 2 次元地震探査データを用いて解釈されていることにより、今後 3 次元地震探査データを用いた再解釈により濃集帯面積が減少する可能性 (α 濃集帯のケーススタディでは 0.8 ~ 0.9 と評価された)。

② α 濃集帯 (図 5b) との比較検討から、強振幅反射波上面から BSR (相当) 深度までの間で、MH 濃集区間が連続していない箇所も存在すると予想される (図 5a)。特に α -2 坑井に見られるような BSR が不明瞭な箇所は、砂層が存在せず

MH が濃集していない可能性が高い (図 5b の右)。そのような箇所が存在することによる全体的な厚さ減少の可能性 (α -2 坑井の例では 0.38, 2 次元地震探査エリア濃集帯全体としては 0.5 程度と見込まれる, 図 5a)

1-2) ネットグロス比 (N/G)

1-2.1) 坑井データのある濃集帯

ネットグロス比は、地層全体の厚さに対して、MH の濃集が期待される砂質層が占める割合である。一般には、岩相認定に用いられる自然ガンマ線検層を用いて決定することが多い。しかし、当該調査海域の MH 濃集帯では砂層と泥層における自然ガンマ線検層のコントラストに欠しい (Tsuji *et al.*, 2009)。一方、MH 濃集区間においては、LWD 比抵抗とコア分析で得られた粒度に比較的良好な正の相関が見られている (図 6 左上, Fujii *et al.*, 2009)。この関係が見られるのは、基本的に MH が濃集する区間のみであるが、これは粒度が大きいほど孔隙径が大きく、メタンの移動 (集積) に適しているためであると考えられる。今回の掘削結果から、MH 濃集区間においては、ある程度の砂が存在すれば MH が形成され、少なからず比抵抗の上昇として現れる (MH は砂層に選択的に濃集する) ことが判明している (図 2)。つまり MH 濃集区間においては、比抵抗値があるベースとなる閾値よりも高いかどうかを見ることにより、砂質層の認定に適用できる。

以上の観察結果から、坑井データがある MH 濃集帯については、LWD の Ring 比抵抗 (比較的探査深度が深く、かつ垂直分解能が高い) をベースにネットグロス比を決定した。当該調査海域の MH 賦存層付近の LWD 比抵抗のバックグラウンドは 1.5 ~ 2.0 ohm-m であることから、明瞭な比抵抗上昇として認定し得る 3 ohm-m をカットオフ値の基準として適用することとした。なお、上述のコア試料の粒度分析結果と比抵抗値との関係から、3 ohm-m はおおむね中粒シルトに相当することがわかっている。Krumbein and Monk (1942) の経験式に従い粒度分布から浸透率を求めると、約 20 ~ 30 md に相当する。これは従来の石油・天然ガスのネット区間の認定基準

図 5 濃集帯の総岩石容積評価 (2次元地震探査エリアの強振幅異常エリア)。濃集帯の存在を示唆する強振幅異常の上面を紫色でピックアップしている。一方、下面についてはα-2坑井に見られるように必ずしもBSRが明瞭でない箇所がある。そのようなエリアではMHの垂直分布がα-2坑井のように限定されると考え、リスクファクターを導入した。

Fig. 5 GRV estimation for MH-concentrated zones in 2D seismic survey area. The tops of strong reflectors are shown by a purple line. On the other hand, the bottom of the MH-concentrated zone is not necessarily clear, which is similar to well α-2. Therefore, we introduced a volumetric risk factor to evaluate these MH-concentrated zones in the 2D seismic area.

(1 md) に比較するとやや固めの評価ではあるが、今後の研究で生産に寄与し得る MH 層の絶対浸透率の下限が明らかとなった場合、修正を加える必要がある。

なお、バルク密度と比抵抗が同時に上昇している区間 (特にバルク密度が 2.1 g/cm^3 以上 : 1-3.1) の式から孔隙率 33% 以下に相当) は、観測されている MH 賦存層の孔隙率 (40~45% 程度 : 後述) よりも明らかに低いことから、炭酸塩鉱物充填層と認定し、ネット区間から除外することとした。

ネットグロス比の確率分布については、LWD の Ring 比抵抗 5 ohm-m 以上をネット区間とした場合の N/G 比を P90, 2 ohm-m 以上をネット

区間とした場合の N/G 比を P10 とする対数正規分布を用いた (図 6 下)。この時いずれの場合も Pmean は 3 ohm-m をカットオフとした場合の N/G にほぼ相当する。

1-2.2) 坑井データの無い濃集帯

当該調査海域では、2次元地震探査データを用いてシーケンス層序学的手法により堆積相の解析が実施されている (高野ほか, 2007; Takano *et al.*, 2008; 高野ほか, 2009)。本解析により、掛川層群および小笠層群 (鮮新統~更新統) 中に 6 種類の地震探査ファシス (A, B, C, D, E, F) が認められ、その分布が明らかとなった (高野ほか, 2009)。

図 6 コア試料の粒度分布と LWD の比抵抗値の相関関係. MH 濃集帯のネットグロス比の評価に用いられた確率分布 (α-1 坑井の例). Fujii *et al.* (2008) を一部改変.

Fig. 6 Relation between grain size of core sample and LWD resistivity, and probabilistic distribution of N/G used for the resource assessment in MH-concentrated zones with control wells (example of Well α-1). Modified from Fujii *et al.* (2008).

坑井データのない濃集帯については、上記解析から得られた各シーケンスの堆積相分布図と、坑井検層解析から得られた坑井位置におけるネットグロス比とを対応させることにより、次の手順でネットグロス比を推定した (図 7)。まず各シーケンスの堆積相分布図に BSR 分布と濃集帯分布をオーバーラップし、BSR 分布と重なる箇所に着目して、濃集帯内部の地震探査ファシスの割合を見積もった。図 7 左は掛川層群下部シーケンス (Kg-a) の例であるが、2D 濃集帯内部のファシス A の割合は 100% となる。次に、LWD 16 坑井を用いて作成した岩相柱状図 (高山ほか, 2006) とシーケンス境界深度から、各海域における各ファシスの代表的なネットグロス比を評価した (図 7 右)。海域ごとに地域差が見られ、特に東海沖や第二渥美海丘の坑井ではファシス A

が最も陸に近く Proximal なため砂質分の割合が多く、ファシス E に向かって徐々にネットグロス比が減少する傾向が見られた。一方の熊野灘や遠州トラフは、全体的にネットグロス比が低く、必ずしもファシス A や B が C, D, E よりも高くはならない。調査海域全体を平均すると、図 7 右下に見られるような関係となったが、実際の評価ではこのような地域ごとの特徴を考慮に入れながら、これら 2 つの情報を掛け合わせることで、各シーケンスでの平均的な N/G 比を見積もり、これらをさらに各シーケンスが BSR 付近に分布する割合に応じて濃集帯内部のトータルのネットグロス比を評価した。

確率分布については、既存坑井の N/G 比の振れ幅 (± 20% 程度) よりもさらに不確実性が大いと考え、± 25% をそれぞれ P90, P10 とす

図 7 堆積相分布図を用いた坑井データの無い濃集帯におけるネットグロス比の評価の手順。Fujii *et al.* (2008) を一部改変。

Fig. 7 Procedure of *N/G* evaluation using seismic facies maps and lithofacies columns (MH-concentrated zones without control wells). Modified from Fujii *et al.* (2008).

る対数正規分布とした。

1-3) 孔隙率

1-3.1) 坑井データのある濃集帯

既存坑井のLWDの密度検層から求めたネット区間(3 ohm-m以上)における孔隙率を用いた。密度検層を用いた孔隙率(ϕ_d)の評価については、LWD検層データのバルク密度(ρ_b)を用いて、以下の式から算定した(Schlumberger, 1989)。

$$\phi_d = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_f)$$

ρ_{ma} : マトリックス密度 (2.65(g/cm³) を使用)

ρ_b : バルク密度 (LWDのRohB_CDN, g/cm³)

ρ_f : 流体密度 (地層水の密度として、1 を使用)

なお、粒度分析の結果からMH濃集区間の砂

図 8 MH 濃集帯における孔隙率の評価 (α -1 坑井および β -1 坑井における密度検層孔隙率とコア分析結果の比較) と密度検層孔隙率の確率分布 (比抵抗 3 ohm-m 以上の区間). Fujii *et al.* (2008) を引用.

Fig. 8 Porosity evaluation in MH-concentrated zones (comparison between porosity derived from density log and core analysis in Well α -1 and β -1) and probabilistic distribution of density porosity within MH-concentrated zone (net interval higher than 3 ohm-m). Quoted from Fujii *et al.* (2008).

質層中における頁岩含有量は 5% 程度と少ないことから、吸着水の影響は無視した。また、上記の検層バルク密度から求めた孔隙率は、既存坑井における以下のコアデータとの比較によって、問題ない値であることを確認している (図 8 a, b)。

- ・ヘリウムポロシメーターから求めた孔隙率 (10.34 MPa の封圧下で測定) (Uchida *et al.*, 2009)。
- ・水銀ポロシメーターから求めた孔隙率 (封圧なし) (Uchida *et al.*, 2009)。
- ・マイクロフォーカス X 線 CT のイメージから求めた孔隙率 (封圧なし)。

多くの坑井では、MH 賦存層中の密度検層孔隙率 (ϕ_d) は 40 ~ 45% で、その分布は正規分布または三角分布となっている (図 8c, d)。

1-3.2) 坑井データのない濃集帯

坑井データがない濃集帯の孔隙率評価について

は、まず各既存坑井の孔隙率の海底面からの深度変化トレンド (海底面下深度の関数) を把握した上で、これを評価対象となる濃集帯の海底面下深度に適用して推定することを想定していたが、既存坑井の MH 濃集区間における孔隙率深度プロットおよびコア分析結果は、MH 濃集区間では深度によらず孔隙率が 40 ~ 50% である (すなわち深度依存性が小さい) ことを示した。これは、MH が孔隙を充填しているため、地層の圧密作用があまり進行しないためと考えられる。

以上から、いずれの濃集帯に対しても、P90 : 0.4, Pmean (P50) : 0.45, P10 : 0.5 とする正規分布を用いることとした。

1-4) MH 飽和率

1-4.1) 坑井データのある濃集帯

油層やガス層の水飽和率の評価は、比抵抗検層の測定値を用いて、一般に以下のアーチの式を

図 9 坑井データがある濃集帯のMH 飽和率の評価 (α -1 坑井の例). NMR 検層から求めた MH 飽和率は, PTCS (Pressure Temperature Core Sampler) を用いて実測した MH 分解ガス量から計算した MH 飽和率を用いてキャリブレーションしている. Fujii *et al.* (2008) を一部改変.

Fig. 9 MH Pore-Saturation evaluation for MH-concentrated zones with control wells (example of Well α -1). MH pore saturation evaluated from NMR log was calibrated using MH saturation calculated from dissociated gas volume from Pressure Temperature Core Sampler (PTCS). Modified from Fujii *et al.* (2008).

ベースとして行われる (Schlumberger, 1989)。

$$Sw^n = (F^* Rw)/Rt \quad \text{ここで, } F = a/\phi^m$$

Sw : 水飽和率 (water saturation)

F : 地層係数 (formation resistivity factor)

Rw : 地層水の比抵抗

Rt : 真の地層の比抵抗 (true resistivity)

しかし, 上記手法による水飽和率評価では, a , m , n などの係数や Rw (地層水比抵抗) などの未知数が多いため, 評価値の不確実性が大きく, コア分析による詳細なキャリブレーションが必要となる。そこで本評価では, MH の飽和率の評価に有効とされる NMR (核磁気共鳴) 検層を用いた評価を採用した。本手法は, NMR 検層によって検知される「動き得る」水の地層中の割合 (TCMR: NMR 全孔隙率) を, 密度検層から求めた孔隙率 ϕ_d から差し引くことによって, 地層中の MH の割合 (ϕ_{MH}) を求め, MH 飽和率を求

めている (図 9a)。

具体的には, 検層データの NMR 全孔隙率 (TCMR) と密度検層から求めた孔隙率 (ϕ_d) を用いて, ネット区間 (3 ohm-m 以上) を対象として以下の式から算定した (Freedman *et al.*, 1998: DMR 法, Akihisa *et al.*, 2002)。

$$Sh = (\phi_d - TCMR)/\phi_d = 1 - TCMR/\phi_d$$

さらに, 上記 DMR 法による MH 飽和率評価の有効性を検証するために, 既存坑井の MH 濃集区間にて実施した圧力・温度保持コア採取器 (Pressure Temperature Core Sampler: PTCS) (高橋ほか, 2001; Takahashi and Tsuji, 2005; 川崎ほか, 2006) を用いた全分解ガス量測定結果 (図 9c) との比較を行った (Fujii *et al.*, 2009)。本解析では, Davie *et al.* (2004) を参考に推定したメタン溶解度 (90 mM = 2.02 L/L (water)) を

元に、間隙水中に溶存するメタンの影響も考慮して（ガス量の実測値から差し引いて）MH 飽和率を計算している。その結果、DMR 法によるネット区間の MH 飽和率は実測値とおおむね一致することが判明した（図 9b）。

なお、MH 飽和率の評価については、コアの間隙水を用いた分析的手法による検討も行われている（武内・松本, 2009）。同分析結果によると MH 濃集区間の MH 飽和率は $60 \pm 10\%$ 程度となっており、物理検層による評価値と調和的である。

1-4.2) 坑井データのない濃集帯

いくつかの既存坑井位置において、高密度速度解析による地震探査 P 波速度と NMR 検層による MH 飽和率の関係を検討した結果、MH 濃集区間において比較的良好な相関関係が得られた（図 10e）。よって坑井データがない濃集帯では、これらの相関式と各濃集帯の平均的な地震探査速度分布から MH 飽和率を推定した。ただし 3 次元地震探査エリアの一部の濃集帯については、地震探査区間速度が極めて速く、上述の相関式をそのまま適用すると MH 飽和率が 100% 以上になってしまうものもあり、このような濃集帯については、周辺坑井データから推定した当該地域の現実的な値を適用した。

確率分布については、既存坑井の MH 飽和率の振れ幅（例えば図 9d）を参考にし、 $\pm 20\%$ をそれぞれ P90, P10 とする正規分布とした。

今回は限られた坑井データを用いて導き出した地震波区間速度と検層から得られた MH 飽和率の直接的な相関関係を用いて、各濃集帯の MH 飽和率を大まかに推定した。今後はより多くの坑井データを解析して相関関係を検討し、地域差も考慮した評価を行う必要がある。

1-5) ケージ占有率

天然の MH 結晶の中には、メタン分子を含むケージ（籠）と含まないケージが存在する（図 3f）。全体の中でメタン分子を含むケージが占める割合をケージ占有率と呼ぶ。近年の天然 MH 試料（Cascadia, Kitami, Lake Baikal, Mallik, Okhotsk Sea）のケージ占有率（観測値）を参考にし（Lu *et al.*, 2005）、より現実的な値を採

用し、0.9 を最小、0.96 を最頻、1.0 を最大とする三角分布とした。

1-6) 容積倍率

一般的に用いられる標準状態（0℃, 1 気圧）での値 172 で一定とした（一様分布）。

2) 濃集帯以外の MH 賦存層

2-1) 構造面積（Area）

2 次元/3 次元地震探査記録から解釈した BSR 分布面積から、上述の濃集帯面積を差し引いた面積の $\pm 20\%$ をそれぞれ P90, P10 とする対数正規分布とした（図 11）。20% の振れ幅は、2 次元地震探査の粗い測線間隔による構造解釈の不確実性の幅を考慮したものである。本ケースの場合 P1（最大）は $5,549 \text{ km}^2$ であり、2 次元/3 次元地震探海域の最大面積（ $12,000 \text{ km}^2$ ）より小さい現実的な値となっており問題ない。

2-2) ネット層厚

BSR 分布エリア内に掘削された LWD 坑井（計 9 坑井、MH 濃集帯を除く）において、Ring 比抵抗 3 ohm-m 以上（根拠は 1-2.1）に記述をネット区間とした場合のネット層厚の最小値（約 0.6 m ）を P99, 平均値 6.4 m を Pmean, 標準偏差を 6.0 とする対数正規分布を用いた。この時 P1（約 30 m ）は BSR 分布エリア内の既存坑井（MH 濃集帯を除く）の最大ネット層厚にほぼ相当する。佐藤ほか（1996）では集積率（ R ）を 0.005 として、ネット層厚 2.0 m を用いている。一方、本評価では平均集積率（既存坑井における海底面から BSR 深度までの厚さとネット層厚から評価）は 0.020 となった。

2-3) 孔隙率

既存坑井 LWD の密度検層から求めたネット区間（ 3 ohm-m 以上）における孔隙率を適用した（MH 濃集帯と同じ手法）。

2-4) MH 飽和率

既存坑井 LWD の NMR 検層と密度検層から求めたネット区間（ 3 ohm-m 以上）における MH 飽和率を適用した（MH 濃集帯と同じ手法）。MH 濃集帯に比較すると全体的に低めの値（30% 前後：表 3 上）となっており、MH の濃集度の低さを反映している。

図 10 地震探査区間速度と検層による MH 飽和率との関係 (α-2 坑井の例). (a) は高密度速度解析による坑井位置での地震波 P 波速度 (m/sec), (b) は音波検層による P 波速度 (m/sec) で上下 5 m の移動平均値, (c) は NMR 検層による MH 飽和率 (fraction) で上下 5 m の移動平均値である. (d) は MH 濃集区間における (a) と (b) の関係プロットしたもの, (e) は MH 濃集区間における (a) と (c) の関係プロットしたもので, 比較的良好な相関関係が得られている. 今回の評価では (e) の相関関係を用いて, 坑井データのない MH 濃集帯の MH 飽和率を推定した. なお, (a) では MH 濃集区間より上でも区間速度が速くなっているが, これは地震波速度解析における時間方向の解析点密度 (解析精度) の関係で平滑化された速度が求められているためである. 実際にこのような P 波速度ではないことは音波検層データ (b) から確認できる. Fujii *et al.* (2008) を一部改変.

Fig. 10 Relationship between seismic velocity and MH saturation (example of Well α-2). Each depth plot shows (a) seismic P-wave velocity (m/sec) at well location, (b) P-wave velocity (m/sec) from sonic log (moving average of ± 5 m), and MH saturation (fraction) estimated from NMR log (moving average of ± 5 m). (d) is the correlation plot between (a) and (b), while (e) is the correlation plot between (a) and (c) in MH-concentrated zone. Modified from Fujii *et al.* (2008).

図 11 MH 濃集帯以外の MH 賦存層 (BSR 分布エリア) の評価方法 (Fujii *et al.* (2008) を一部改変)。

Fig. 11 Evaluation of MH-bearing layers other than MH-concentrated zones (BSR distribution). Modified from Fujii *et al.* (2008).

2-5) ケージ占有率および容積倍率

MH 濃集帯と同じ確率分布を用いた。

IV. 評価結果と考察

図 12 に各濃集帯の MH 原始資源量の確率分布を、また表 3 に既存評価 (佐藤ほか, 1996; Satoh, 2002) との比較を示す。今回の調査対象海域 (2 次元/3 次元地震探査) の全体の面積は約 12,000 km² で (図 1), この内 BSR が認められた範囲は 4,687 km² (約 40%), さらにその中で濃集帯と判定された面積は 767 km² となった。

資源量合計は Pmean (平均値) で約 40 tcf (trillion cubic feet), この内、濃集帯部分の合計は Pmean で約 20 tcf (全体のほぼ半分) と評価された。濃集帯部分の評価値だけでも、佐藤ほか (1996) による東部南海トラフ (7,000 km²) の算定結果に匹敵する値となった。2005 年の日本の天然ガス年間消費量 (2.9 tcf; BP Statistical Review of World Energy (2005)) に基づくと、

今回の東部南海トラフの評価値 (40 tcf) は、14 年分に相当する。また、本値は、調査海域において BSR 上 (4,687 km²) に平均 1.5 m の塊状ハイドレートが分布する量に相当する。

原始資源量の確率分布については、基本的にいずれの濃集帯も正規分布または対数正規分布となっている (図 12)。資源量の確率分布の P10/P90 比を見ると、坑井データを有する濃集帯では 3 ~ 7, 坑井データのない濃集帯ではそれよりやや大きく 4 ~ 14 である。Rose (1997) (または中西 (2000)) によるカテゴリー (表 4) に従うと、油ガスの探鉱段階の中では、開発井または評価井 (一部試掘井) を掘削する段階の確率分布に相当する。MH の資源量分布を従来型の油ガスの埋蔵量分布と同じ基準で議論するのは難があるものの、少なくとも分布の幅としてはおおむね妥当であると判断される。

感度分析²⁾の結果例を、図 13 に示す (トルネードチャート³⁾)。これは坑井データを有する 3 次

表 3 東部南海トラフにおけるメタンハイドレート原始資源量評価結果（メタンガス量）および既存評価との比較（Fujii *et al.* (2008) を一部改変）.
 Table 3 Results of MH resource assessment in the eastern Nankai Trough (Methane gas in place) and comparison with existing studies (from Fujii *et al.* (2008)).

カテゴリー		算定パラメータ (合計/平均)					MH 原始資源量算定結果			
		GRV (MMm ³)	N/G (frac.)	φ (frac.)	Sh (frac.)	VR (frac.)	CO (frac.)	P90 (bcf)	P10 (bcf)	Pmean (bcf)
MH 濃集帯	坑井あり	4,455	0.38	0.43	0.52	172	0.95	1,420	4,838	2,961
	坑井なし	34,931	0.37	0.45	0.51	172	0.95	4,830	34,553	17,318
	小計	39,386	0.37	0.44	0.51	172	0.95	6,250	39,391	20,279
濃集帯以外の MH 賦存層		Area 3,920 Km ²	Net thickness 6.4 m	0.48	0.29	172	0.95	3,770	43,139	20,056
		1,254,400 MMm ³	N/G 0.02							
合計								10,020	82,530	40,335

既存の評価 (佐藤ほか, 1996; Satoh, 2002)

		算定パラメータ					MH 原始資源量算定結果			
		Area (km ²)	Net thickness (m)	φ (frac.)	Sh (frac.)	Expansion Factor				
東部南海トラフ全域 (佐藤ほか, 1996)		7,000	2 (400 × 0.005)	0.5	0.5	155				19,135
			2	0.5	0.5	160				14,579
東部南海トラフ全域 (Satoh, 2002)		7,000	5	0.5	0.5	160				36,448
			10	0.5	0.5	160				72,897

GRV: Gross Rock Volume, N/G: Net to Gross ratio, φ: porosity, Sh: hydrate pore saturation, VR: Volume Ratio, CO: Cage Occupancy.

MMm³: million cubic meter, bcf: billion cubic feet.

坑井あり：坑井データにより確認された MH 濃集帯, 坑井なし：2 次元/3 次元地震探査データから解釈された MH 濃集帯.

図 12 各濃集帯の MH 資源量の確率分布と P10/P90 比. 左上から右下に向かってデータ量（密度）が減少することを反映して、不確実性の幅（P10/P90 比）が増大している.

Fig. 12 Probabilistic distributions of methane gas in place for each concentrated zone and P10/P90 ratio. The width of uncertainty (P10/P90) increases from the upper left to the lower right, which reflects the decrease in data density.

表 4 油ガスの探鉱ステージと対応する埋蔵量分布の P10/P90 比. Rose (1997) (中西 (2000)) に一部加筆.

Table 4 Oil and gas exploration stages and corresponding P10/P90 ratio of reserves distribution (Rose, 1997; Nakanishi, 2000).

Category	Development Well	Step-Out/Extension	Wildcat in Known Productive Trend	Rank Wildcat in Proven Trend	Rank Wildcat in New Play or New Basin
P10/P90	2.2–7.0	5–25	10–120	55–170	120–650

Development Well: 開発井, Step-Out/Extension: 評価井, Wildcat: 試掘井

元地震探査エリア内の濃集帯の例である。GRV については地震探査解釈の精度（信頼性）が高いことから振幅を ± 20% 程度と比較的狭く設定したため、2 次元地震探査エリア濃集帯を除くと結果への感度が比較的小さい。一方で、いずれの濃集帯についても不確実性の幅を大きく見た N/G 比の感度が大きく、次いで MH 飽和率の感度が大きい結果となった。これら 2 つのパラメータは算定結果に対する影響度が大きく重要であることから、今後精度を高めていく必要がある。

V. まとめと検討課題

2 次元/3 次元基礎物理探査「東海沖～熊野灘」、基礎試錐「南海トラフ」「東海沖～熊野灘」のデータを用いて、東部南海トラフにおける MH に含まれるメタンガスの原始資源量を確率論的手法により評価した。この結果、以下の結論を得た。

(1) 東部南海トラフの調査海域における原始資源量合計は、Pmean（平均値）で約 40 tcf と評価された（P90: 10 tcf, P10: 83 tcf）。

図 13 ある濃集帯のMH原始資源量の(a)確率分布および(b)感度分析結果(トルネードチャートの例(Fujii *et al.* (2008))を一部改変)。

Fig. 13 Example of (a) probabilistic distribution of gas in place for a MH-concentrated zone and (b) the result of sensitivity analysis (Modified from Fujii *et al.* (2008)).

(2) 坑井の高比抵抗、地震探査の強振幅反射波・P波の高区間速度で特徴付けられ、かつ堆積学的解釈によりタービダイトの砂層の分布が予想される「濃集帯」を調査海域内に計16摘出した。濃集帯部分の資源量合計は、Pmeanで約20 tcf(全体のほぼ半分)と評価された(P90: 6.3 tcf, P10: 39 tcf)。

(3) 感度分析の結果、いずれの濃集帯もネットグロス比およびMH飽和率の感度が大きく、今後の詳細解析を行う上で重要なパラメータであることが示唆された。

今後は、評価対象エリアを南海トラフ西部を含む日本周辺海域に拡大する必要がある。しかし今回の評価と同程度の精度の評価を行うには、3次元地震探査データ(または測線間隔が4~5 km以下の2次元地震探査データ)が必要である。ま

た、今回摘出された濃集帯については、MHの生産挙動把握および海洋産出試験候補地選定のための詳細な貯留層地質モデルの構築が必要である。特に濃集帯内部における地質不均質性(砂の連続性、シールまたはパスとなる断層の分布、ハイドレート層の浸透率)が生産性に影響を与える重要な地質パラメータである。

現段階では一つの濃集帯に対して1または2地点でしか坑井が掘削されていない。パラメータの精度向上には、Ⅲ章で述べた本評価で適用した手法の限界を踏まえながら、今後濃集帯内部の坑井データ数を増やして追加解析を実施する必要がある。また、坑井が掘削されていない大規模な濃集帯に対する坑井掘削と再評価も必要である。

謝 辞

本研究は、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)の一環として実施された。研究成果の公表を許可頂いた経済産業省・資源エネルギー庁、石油天然ガス・金属鉱物資源機構に感謝の意を表します。また、孔隙率評価に必要なデータの一部をご提供頂きました産業技術総合研究所のメタンハイドレート研究ラボに感謝の意を表します。また、原稿の執筆に当たっては、東京大学の松本 良教授および産業技術総合研究所の奥田義久氏より貴重なコメントを頂いた。ここに心から感謝の意を表します。

注

- 1) 90%以上の確率で達成される量(値)。よってP99は最小値、P1は最大値と言い換えることができる。
- 2) 分析したいアウトプットをいくつかの変数に分解し、その変数が変動したとき、アウトプットにどの程度の影響を与えるかを調べる手法。
- 3) 感度分析結果を図示する手法の一つで、感度分析の対象となる変数を、それぞれ取りうる変動幅(一般に80%の確率で起こりうる範囲)で動かした際のアウトプットの範囲を横棒グラフで表し、要素を上から並べていくもの。図の形が竜巻(トルネード)のように見えることから、このように命名されている。

文 献

Akihisa, K., Tezuka, K., Senoh, O. and Uchida, T. (2002): Well log evaluation of gas hydrate saturation in the MITI-Nankai-Trough well, offshore south-east Japan. *Proceedings of SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, 2002, Paper BB, 1-14.*

- BP Statistical Review of World Energy (2005):<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6848&contentId=7033471> [Cited 2009/09/28].
- Davie, M.K., Zatsepina, O.Y. and Buffett, B.A. (2004): Methane solubility in marine hydrate environments. *Marine Geology*, **203**, 177-184.
- Freedman, R., Minh, C.C., Gubelin, G., Freeman, J.J., McGuiness, T., Terry, B. and Rawlence, D. (1998): Combining NMR and density logs for petrophysical analysis in gas-bearing formations. *Proceedings of SPWLA 39th Annual Logging Symposium*, 1998, Paper II, 1-14.
- 藤井哲哉・並川貴俊・奥井智治・川崎正行・落合浩志・中水 勝・辻 喜弘 (2005): 資源化を目指すメタンハイドレート探査—基礎試錐「東海沖～熊野灘」の成果概要—。平成 17 年度石油技術協会春季講演会要旨集, 50.
- Fujii, T., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochi-ai, K., Nakamizu, M. and Tsuji, Y. (2005): Modes of occurrence and accumulation mechanism of methane hydrate—Result of METI exploratory test wells 'Tokai-oki to Kumano-nada'. *Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates*, June 13-16, 2005, Trondheim, Norway, Vol.3, 974-979 (Paper ref. 3041).
- Fujii, T., Namikawa, T., Nakamizu, M., Nishimura, M., Takano, O., Kobayashi, T. and Tsuji, Y. (2006): Characterization of gas hydrate-bearing sediments for an attempt to resource assessment, eastern Nankai Trough, Japan. *Abstract of 17th International Sedimentological Congress, Fukuoka Japan, Volume B*, S-054.
- Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, O., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K. (2008): Resource assessment of methane hydrate in the eastern Nankai Trough, Japan. *Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 2008*, OTC19310.
- Fujii, T., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, K., Ochi-ai, K., Nakamizu, M., Nishimura, M., Takano, O. and Tsuji, Y. (2009): Methane hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan. in *Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards* edited by Collett, T., Johnson, A., Knapp, C. and Boswell, R., AAPG Special Publication, in press.
- 稲盛隆穂・羽藤正実・佐伯龍男 (2006): 地震波属性を用いたメタンハイドレート賦存層抽出の試み。石油技術協会誌, **71**, 34-43.
- 川崎正行・梅津 覚・安田優人 (2006): Pressure Temperature Core Sampler (PTCS) —圧力・温度保持コアサンプリング技術—。石油技術協会誌, **71**, 139-147.
- Krason, J. (1992): Gas hydrates in continental margins—Exploration and economic significance. *Abstract of 29th International Geological Congress, Kyoto, Japan*, 802.
- Krumbein, W.C. and Monk, G.D. (1942): Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, Technical Publication*, **1492**, 11.
- Lu, H., Moudrakovski, I., Riedel, M., Spence, G., Dutrisac, R., Ripmeester, J., Wright, F. and Dallimore, S. (2005): Occurrence and structural characterization of gas hydrates associated with a cold vent field, offshore Vancouver Island. *Journal of Geophysical Research*, **110**, B10204, doi:10.1029/2005JB003900.
- 中水 勝・並川貴俊・落合浩志・辻 喜弘 (2004): 資源化を目指すメタンハイドレート探査—基礎試錐「南海トラフ」の概要と今後の研究開発計画—。石油技術協会誌, **69**, 214-221.
- 中西健史 (2000): 石油公団探鉱投融資プロジェクトにおける石油地質リスクの定量評価およびそれを反映させた経済性評価。石油技術協会誌, **65**, 217-228.
- 奥田義久 (1993): シャーベット状の天然ガス資源—ガスハイドレート。 *Petrotech*, **16**, 300-306.
- Rose, P.R. (1997): Risk analysis of petroleum exploration ventures by modern corporations, a report commissioned by JNOC, 1997. 日本語解説: 佐藤隆一・高山 将 (1997): 石油探鉱における地質リスクの評価手法について。石油の開発と備蓄, **6**, 68-97.
- Saeki, T., Fujii, T., Inamori, T., Kobayashi, T., Hayashi, M., Nagakubo, S. and Takano, O. (2008): Extraction of methane hydrate concentrated zone for resource assessment in the eastern Nankai Trough, Japan. *Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 2008*, OTC19311.
- 佐伯龍男・稲盛隆穂・濱嶋多加志・Peter, W.・浅川栄一 (2008): 炭化水素ポテンシャル評価への高密度速度解析技術の適用。日本地球惑星科学連合 2008 年大会, O219-P006.
- Satoh, M. (2002): Distribution and resource of marine natural gas hydrates around Japan. *Proceedings of the Forth International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, May 19-23*, 175-178.
- 佐藤幹夫・前川竜男・奥田義久 (1996): 天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定。地質学雑誌, **102**, 959-971.
- Schlumberger (1989): *Log Interpretation Principles / Applications*. 2-8, 8-1.
- Takahashi, H. and Tsuji, Y. (2005): Multi-well exploration program in 2004 for natural hydrate in the Nankai-Trough offshore Japan. *Proceedings of 2005 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 2-5 May 2005*, OTC17162.
- Takahashi, H., Yonezawa, T. and Takedomi, Y. (2001): Exploration for natural hydrate in Nankai-Trough well offshore Japan. *Proceedings of 2001 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A.* OTC13040.
- 高橋秀明・米澤哲夫・武富義和 (2001): 基礎試錐「南

- 海トラフ」におけるメタンハイドレートの探鉱. 石油技術協会誌, **66**, 652-665.
- 高野 修・藤井哲哉・佐伯龍男 (2007): サイスマック層序学的手法による東海沖—熊野灘の後期鮮新世—更新世海底扇状地システムの復元と前弧堆積盆テクトニクス史の考察. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, G120-006.
- Takano, O., Nishimura, M., Fujii, T. and Saeki, T. (2008): Changes in submarine fan sedimentation processes in response to forearc basin tectonics along the Nankai Trough, Philippine Sea Plate subduction zone. *Abstract of 6th International Conference on Asia Marine Geology, Kochi Japan*, O-027.
- 高野 修・西村瑞恵・藤井哲哉・佐伯龍男 (2009): シーケンス層序学手法による東部南海トラフエリアのメタンハイドレート含有海底扇状地タービダイト砂岩分布解析および BSR 分布との関連の検討. 地学雑誌, **118**, 776-792.
- 高山徳次郎・藤井哲哉・西村瑞恵・中水 勝 (2006): 地質・地化学分野に関する研究開発 ⑤基礎試鑑「東海沖—熊野灘」で取得した検層データ解析. JOGMEC 技術センター年報, 平成 17 年度, 192-193.
- 武内里香・松本 良 (2009): 東部南海トラフにおけるガスハイドレートの生成集積過程に関する地質学的・地球化学的制約. 地学雑誌, **118**, 793-813.
- 辻 喜弘 (2004): 日本近海におけるメタンハイドレートの調査について. *Petrotech*, **27**, 952-956.
- Tsuji, Y., Ishida, H., Nakamizu, M., Matsumoto, R. and Shimizu, S. (2004): Overview of the METI Nankai Trough wells: A milestone in the evaluation of methane hydrate resources. *Resource Geology*, **54**, 3-10.
- Tsuji, Y., Fujii, T., Hayashi, M., Inamori, T., Kawasaki, M., Kitamura, R., Matsushima, J., Nagakubo, S., Nakamizu, M., Namikawa, T., Ochiai, K., Ohbi, K., Oikawa, N., Okui, T., Saeki, T., Shimizu, S. and Yamamoto, K. (2009): Methane hydrate occurrence and distribution in the eastern Nankai Trough, Japan—Findings of the “METI Toaki-oki to Kumano-nada” methane hydrate drilling program multi-well hydrate exploration program and the findings on hydrate distribution in the eastern Nankai Trough, off central Japan. in *Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards* edited by Collett, T., Johnson, A., Knapp, C. and Boswell, R., *AAPG Special Publication*, in press.
- Uchida, T., Lu, H., Tomaru, H. and the MITI Nankai Trough Shipboard Scientists (2004): Subsurface occurrence of natural gas hydrate in the Nankai Trough area: Implication for gas hydrate concentration. *Resource Geology*, **54**, 35-44.
- Uchida, T., Waseda, A. and Namikawa, T. (2009): Methane accumulation and high concentration of gas hydrate in marine and terrestrial sandy sediments. in *Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards* edited by Collett, T., Johnson, A., Knapp, C. and Boswell, R., *AAPG Special Publication*, in press.

(2008 年 11 月 10 日受付, 2009 年 9 月 24 日受理)