

海洋ガスハイドレート資源の確率論的評価手法

渡部芳夫*

Yoshio WATANABE (1999) A new statistical approach to marine gas hydrate resources appraisal. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 50 (5/6) p. 421-430. 3 figs., 2 tables.

Abstract: A new approach to statistical resource appraisal method of marine gas hydrate is hypothetically discussed based on the scarce accumulation of actual production wells. On the proposed method, both the existence probability of the gas hydrate deposit and its controlling parameters of volumetric yield of deriving methane gas are statistically dealt. Within the prospecting field given by hydrate stability conditions, the estimated yield will be given by probability distribution curve which enables us to set respective appraisal on geologic, economic, and politic point view.

The conventional methods would always give a fixed value based on the linear function of volumetric estimates, which caused the indefinite errors. The proposed method will give the flexibilities of judgement based on the distribution of probabilities of the given estimate by the cumulative probability distribution, with known and controlled error derivatives during the estimate.

要 旨

海底堆積物中のメタンハイドレートを非在来型資源としてとらえるために、天然ガス資源としての資源量評価手法について、現実の開発生産の実績が無い現状に基づき、新たな手法の概念を提案する。ガスハイドレート資源評価手法では、鉱床の存在自体を確率的に取り扱うだけでなく、個々の鉱床の規模(資源量)を規制している種々のパラメータを確率論的に検討する必要がある。ハイドレート鉱床が存在する確率が定義された海域のみを対象とし、ガスハイドレートの量的評価を行う。その試算結果は確率密度曲線により与えられるため、中庸な判断は50%値を、リスク判断を最重視する場合には95%値を、そして逆の立場では5%値を用いるなどといった、種々の算定者の立場での引用を可能とする。

従来の資源量試算値は、唯一の確定値あるいはこれに類似する中央値と最大誤差といった、ごく限定された数値として報告されることが多かった。これらの試算手法では、種々の精度の計算パラメータが一次関数として採用される場合が多く、あるひとつのパラメータの精度が最終値を大きく規定することとなっている。今回提案した試算手法は、算定の段階で不確定なパラメータがあったとしても、試算結果の利用段階で問題のあるパラメータの精度を特定して排除することが可能であり、さらに最終試算結果が確率密度曲線という、利用者の立場ごとに値(数値)に幅のある形で提供できる特徴がある。

1. はじめに

天然に存在するガスハイドレートについては、すでにシベリアの凍土域で70年代からメタンハイドレートに由来する天然ガスが開発されている。しかし、天然ガスハイドレートが一般の注目を集めるようになったのは、海底堆積物中にメタンハイドレートが広く分布していることが分かってきた最近のことである。海洋ガスハイドレートが強い関心をもたれている理由は、海底下のメタンハイドレートが次世代の天然ガス資源として有望であるとの認識が高まってきたこと(国際深海掘削計画 ODP-Leg164など)により開始された国内外のプロジェクトによるところが大きい。非在来型資源としてとらえるためには、海底堆積物中のどこに、どのような形で、どれくらいの量のメタンハイドレートが存在するかを知らなくてはならない。わが国では、1995年より日本列島周辺海域における石油代替の次世代エネルギーとしてメタンハイドレート鉱床を開発するプロジェクトが開始され、産学官による共同研究機構のもとで基礎的な研究開発プログラムが進められている。本稿では、ガスハイドレートそのものに関する紹介は他報に譲り、上記の3点目の課題である、どれくらいの量の資源量が存在するかという点について、現実の開発生産の実績のない資源の商業的な探査開発活動に不可欠な資源量評価の手法について考察を加え、新たな手法の概念を提案する。

*資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)

Keywords: resources assessment, marine gas hydrate, play, probability, statistical method

2. 在来型資源の資源量評価手法とそのガスハイドレート資源量評価への適用性

石油天然ガスなどの在来型燃料資源に関する量的評価作業は数多く行われているが、そこで用いられている基本的な概念は比較的限られている。新たな鉱種や新規探鉱地域など、未知の評価対象を扱う場合には既知の鉱床との比較(アナロジー)を用いることが多い。一方、既に開発済の鉱床など、量的評価の基礎となるデータが得られている対象の場合には統計学的手法が主として採用される。まず、これらの評価手法の非在来型資源への適用性とその限界にふれる。

もっとも古くから用いられてきた評価手法は、比較類推法の代表的な例である面積法・容積法(Areal and Volumetric Yield Methods)である。これは既に探鉱情報の蓄積のある既存フィールドから対象地域の石油地質・工学的特徴に似通った地域を選定し、双方の地表面積あるいは探鉱対象の下限深度から得られる探鉱対象の容積比を比較して資源量計算を行うものである(Miller, 1979)。探鉱情報に乏しい広域評価に際して採用される場合が多く(McCrossan and Porter, 1973; Miller *et al.*, 1975)、評価手法に客観性・再現性があるため、アナロジーの再検討やパラメータの更新による再評価が比較的簡略に行える。その反面、比較に用いる基準となる地質学的パラメータが詳細に設定できない場合、ごく限られた情報に基づく比較類推が行われてしまうため、評価結果の精度には限界がある。特に、海洋ガスハイドレートの場合には、アナロジーの対象とすべき鉱床が存在しないため、比較対象に際し地球化学的要素や確率論などを取り入れざるを得ない。その代表例が地化学条件を考慮に入れた容積法の一つである地化学的物質収支法(Geochemical Material Balance Methods)で、資源量計算に必要な各種パラメータ自体を種々の地球科学情報から設定し、ガスハイドレート生成モデルに基づいた資源量計算を行う(Gornitz and Fung, 1994; 佐藤ほか, 1996)。この手法は特にガスハイドレートについては未探鉱地域の広域評価に有効で、評価計算のパラメータに客観的数値を用いているため最新の探鉱情報を反映させられるが、評価計算の基礎となるガスハイドレート生成に関する地化学プロセスのモデルや各パラメータ値の推定精度を向上させる必要がある。

一方生産情報のそろっている評価対象での統計学的手法としては、鉱床発見動向外挿法(Historical Performance Methods)があげられる(Moore, 1996; National Petroleum Council, 1973; Kaufman *et al.*, 1975; Rozendal, 1986)。これは、累積生産量や発見鉱床規模などの時系列統計値をもとに、近未来における外挿値を求める手段である。手法自体の制限として長期間にわたる記録を必要とすることから、海洋ガスハイドレート鉱床

を対象にはできない。また、単一の油層・プロスペクトあるいはフィールドといったある程度限定された規模の資源量評価には、油層工学的変数を用いて確率的に算出する探鉱プレイ解析法(Exploration Play Analyses)が用いられている(U.S. Department of the Interior, 1979; White, 1980; Baker *et al.*, 1984; Proctor *et al.*, 1984; Dolton *et al.*, 1993)。本手法は、評価結果が単一の数値ではなく確率分布として導き出される特徴を持ち、この点については、上記の地化学収支法や容積法と組み合わせることにより、海洋ガスハイドレート鉱床の評価手法としての可能性を持っている。この代表例として、1995年に公表されたUSGS 米国石油天然ガス資源量評価プロジェクトによる全米のメタンハイドレート資源量評価(Collett, 1995)、それに引き続く北部アラスカにおける評価(Collett, 1997)などがあげられる。これについては、次項で検討する。

3. ガスハイドレート資源量評価報告

これまで公表されてきたメタンハイドレートの資源量試算値には大きなばらつきが認められる(第1表)。これらの試算に共通する点は、それぞれの試算の根拠となる限られたハイドレート地域のパラメータを、類推法により大陸全域、海洋全域あるいは地球総量へ適用した面積法あるいは容積法が用いられていることである。実際に、これらの報告に用いられているパラメータは数が限られており、その精度は必ずしも高くない。

一方、USGS のガスハイドレート資源量評価報告における評価手法の概念・パラメータ・試算値の解釈などについては基本的にはUSGS が従来から行っている在来型資源量評価に用いられている探鉱プレイ法(e.g., Dolton *et al.*, 1993)をメタンハイドレートに適用したものに過ぎないが、メタンハイドレート評価のためのいくつかの工夫がされている。基本的には探鉱対象単位であるプレイと個々のハイドレート集積プロスペクトに関する存在確率を算定し、ハイドレートが存在したときのメタンガス量に関する容積パラメータ値を与えることにより、モンテカルロ法シミュレーションによる確率分布曲線としての最終試算値を得るものである。前者には十分な起源有機物量・メタンガス生成タイミング・ガス移動経路の存在・トラップの存在・十分な有効間隙の存在・集積機構の存在等の確率からなり、それらを掛け合わせるによりリスク係数(確率値)が算出される。後者のメタンガス量に関するパラメータは、ハイドレート安定領域容積・有効孔隙率・ハイドレート集積率・ハイドレートガス体積比について、最大値(0%確率、すなわちそれ以上の値である可能性が全く無い理論的最大値)から最小値(100%確率、すなわち必ずそれ以上の値である理論的最小値)までのパラメータ値を一定区間ごとに

第1表 海洋および大陸地域におけるガスハイドレート中のメタンガス量とその炭素量試算結果 (Prensky, 1995を改変).
 Table 1 Resources appraisal for marine and continental gas hydrate methane and its carbon amount (after Prensky, 1995).

Methane gas 10 ¹⁵ m ³	Methane gas 10 ⁵ Tcf	Methane carbon 10 ¹⁵ kg	Reference
Oceanic			
3.1	1.1	1.7	McIver (1981)
5-25	1.8-8.8	2.7-13.7	Trofimuk <i>et al.</i> (1977)
7600	2700	100	Dobrynin <i>et al.</i> (1981)
17.6	6.2	11	Kvenvolden (1988)
19.5	6.9	11	MacDonald (1990)
26.4-139.1	9.3-49.1	---	Gornitz and Fung (1994)
Continental			
0.014	0.005	7.5	Meyer (1981)
0.031	0.011	17	McIver (1981)
0.057	0.02	31	Trofimuk <i>et al.</i> (1977)
34	12	1800	Dobrynin <i>et al.</i> (1981)
----	----	400	MacDonald (1990)

推定して指定するものである(第2表)。このような確率分布による試算表示の最大の特徴として、試算結果が単一の数値ではない点があげられる。このため、試算結果の確率分布において、厳格なリスク管理が必要な場合には最小値に近い値を採用し、開発を促進する立場などの場合には最大値よりの値を取ることが可能である。

この Collett (1995) の報告における問題点としては、以下の点があげられる。まず、メタンの起源として微生物発酵起源と熱分解起源が区別して扱われているが、実際のリスク計数の算出には確率の大きい値だけが採用されている。この場合、両者の起源によるメタンガスの供給が予想される場合には探鉱リスクが過小評価される可能性がある。微生物発酵起源のメタンガスを主体とするプレイと熱分解ガスの供給が無視できない混合起源のプレイを分けて定義することが解決法の一つであろう。

次に、起源有機物量のしきい値として有機炭素量0.5%を採用し、実際の作業では海底表層堆積物の含有量公表値を根拠に作業しているが、堆積物中での垂直方向（地質時代ごと）の含有量の変化や有機物組成によるメタン生成量（活性度）の違いが反映されていない。この点は、現実の掘削試料が得られない海域では根本的な解決策を見つけるのは非常に困難であろう。堆積盆モデリングや底質堆積物のデータなどから大まかな有機物供給量や組成の時間変化を復元して対応すべきであるが、その際の定量化は将来の大きな課題である。

最後に、手法上の限界ではあるが、容積パラメータの推定全般に関し、最小値・中央値・最大値の推定値自体

に任意性が大きく、定量的な根拠や再現性が保証されていない印象がある。1995年の報告は初めての評価作業であったため、概算値をたたき台として提出した印象がある。その後得られたデータによりパラメータの推定値更新を絶えず続けることにより、より客観的な評価値に更新すべきであろう。例えば、この報告ではハイドレート集積率パラメータは地震探査断面におけるブランキングの強度ランクに基づいて算出されているが、直後に行われた ODP Leg164における解析結果 (Paul, *et al.*, 1996) に基づくと、ブレークリッジを含む海域 (Southeastern Atlantic Ocean) については最大4倍程度過大評価されていることになるため、パラメータ値の下方修正が必要となった。一方有効孔隙率に関しては、逆に若干過小評価値みであるが、ハイドレート集積率の修正の方が最終数値に大きく反映されるため、再評価値は縮小することになる。実際に1997年の北部アラスカに関する報告 (Collett, 1997) では若干のパラメータ値の修正が行われた。

以上の点はパラメータ値の改善により解決できるものばかりではなく、従来の探鉱プレイ法をメタンハイドレートの資源量評価にそのまま適用した限界を示していると考えられる。続いて、客観的なガス容積パラメータ値、特にハイドレート集積率や複合ガス起源などを正確に反映できる新たな評価手法の概念設計について述べる。

第2表 Collett (1995) による米国メタンハイドレート資源量評価の際の、探鉱プレイデータシートの一例。プレイとプロスペクトに関する確率値(上2段)は評価者により推定され、それぞれの積が探鉱リスク確率となる。下のガス容積パラメータは、0-100%の確率を持つ最小値をそれぞれ推定し、これらのテーブルをもとにモンテカルロ法シミュレーションによるガス量の確率密度曲線が算出される。最終的な評価値は、この確率曲線で表現された資源量を上記の探鉱リスクに相当する割合で縮小させたものとなる。

Table 2 An example of exploration play assessment sheet in U.S. Gas hydrate resources estimate by Collett (1995). Attributes for play and prospect are estimated by analysts which give the exploration risk parameter. Gas volume parameter are derived from montecalro simulation from the cumulative probabilistic curves of each parameters. The final judgement arises from the in-place resources given by this simulation and the exploration risk parameter.

	Attribute		Probability of equal or greater than..					Comments	
			100	95	75	50	25		5
Play Attribute	Microbial hydrocarbon source (S1)	0.85	0.85	(GS) 1.0					
	Microbial source sediment thickness (S2)	1.0							
	Thermogenic hydrocarbon source (S4)	1.0							
	Timing (T)		1.0						
	Migration (M)		0.8						
	Potential reservoir facies (R)		1.0						
	Marginal play probability (GS*T*M*R=MP)		0.8						
Prospect Attribute	Trapping mechanism (TM)		0.8						
	Effective porosity (>3%) (P)		1.0						
	Hydrocarbon accumulation (C)		0.8						
	Conditional deposit probability (TM*P*C=CP)		0.64						
Gas Volume Parameter	Attribute								
	Volume of hydrate stability zone (10 ¹² m ³)	94.4	100.3	112.1	118.0	123.9	135.7	141.6	
	Reservoir thickness in nonmarine systems (m)								
	Effective porosity (%)	30	32.8	43.8	57.5	68.8	77.8	80	
	Hydrate saturation (%)	2	3.2	8	14	20.5	25.7	27	
	Hydrate gas yield (m ³)	139	140.3	145.3	151.5	157.8	162.8	164	

4. ガスハイドレート資源量評価のための基礎パラメータ

堆積物に存在するガスハイドレートのガス資源量は、ハイドレートガス、溶存ガス、そしてフリーガスの3者を対象とすべきであろう。このうち間隙水中に溶存するメタンは、飽和状態であったとしても量的に他2者に比較して微量であるうえ、実際の資源としての有効な回収が困難であると予想されるため、在来型天然ガス資源の観点から見ても直ちに開発対象とは認められていない。一方、

ハイドレート層に付帯するフリーガスについては、ほぼ在来型の天然ガスリザーバーとしてとらえることが可能であり、さらに ODP Leg164 で初めて膨大な量のフリーガスが確認されたことから、経済性もある程度評価されている (Holbrook *et al.*, 1996)。しかしながら現在の時点では資源量評価の対象としてある程度広域にわたったフリーガスの探査手法が確立しておらず、現段階で精度の高い評価を行うには至っていない。このため、本稿での量的な検討の対象は、ハイドレートメタンのみを対象にする。

メタンハイドレートの資源量の算出には、メタンの存在状態に応じた計算式を設定する必要があり、固体のハイドレート中のガス量、付帯するフリーガス量、そして孔隙水中の溶存ガス量についての算出式は、式1-3に示すように単純化される。これらのハイドレートメタン計算式に用いられるパラメータのなかで、現状で十分な精度で把握が可能なものは非常に限られており、資源総量がここで表現されている一次式により算出される以上、すべてのパラメータの誤差は算出結果に累積されてしまう。

（式1-3）ガスハイドレートに付帯する形態別ガス量の計算式（HG：ハイドレートガス、FG：フリーガス、RG：間隙水中の溶解ガス；Gornitz and Fung, 1994を改変）

$HG = \text{安定領域容積} \times \text{有効孔隙率} \times \text{ハイドレート飽和率} \times \text{ハイドレート中のガス容積}$ (式1)

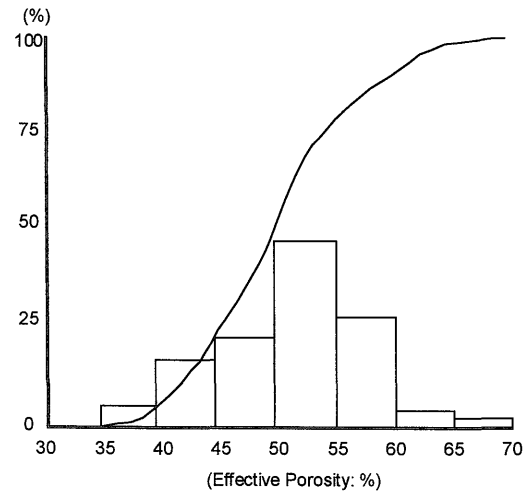
$FG = \text{貯留層容積} \times \text{有効孔隙率} \times \text{地層圧} \times \text{温度比} \times (1 - \text{水飽和率})$ (式2)

$RG = \text{貯留層容積} \times \text{有効孔隙率} \times \text{水飽和率} \times (1 - \text{地層水中のハイドレート容積率}) \times \text{ガス溶解係数}$ (式3)

ハイドレート安定領域容積については、BSRにほぼ相当すると考えられる安定領域下限深度を高精度に算定する必要がある（後述）。これには、海底面下の地温勾配・熱流量の長期間の精密な測定が必要であり、観測井の掘削が不可能ならば、事前調査段階での測定を行う必要がある。

一方評価対象地域での既存掘削情報が入手可能な場合には、有効孔隙率の深度変化が得られている事が多く、その場合には誤差を含めたパラメータ値として参照が可能である。すなわち、上記のハイドレート安定領域容積に対して、深度プロファイル方向での有効孔隙率値の頻度分布を求め、これを第1図に示すような確率分布曲線として求める。ここでは、岩相や深度に対する孔隙率値の依存性を全く考慮していない（全体の平均である）が、各パラメータ値の精度を高める必要がある場合には、上記の依存性が有意なグループごとに確率密度曲線を求めれば良いであろう。探鉱開発上の判断として、特定の岩相や深度帯のみを評価の対象とする場合にも同様の手続を行うことにより対応が可能である。誤差の判定は、求められた確率密度曲線自体から統計学的に得られる分散の大きさにより行うことになるが、最終的な評価値自体も個々の確率密度曲線に含まれる統計的誤差が含まれる形で得られることになる。

次のハイドレート飽和率に関しては、これまでたびたび指摘されてきたように、評価作業において最も未確定なパラメータと言えよう（Collett, 1995；佐藤ほか, 1996）。海底堆積物中での産状に関する確実な情報がまだODP Leg164の結果を除くとほとんど存在しないた



第1図 対象探査海域におけるハイドレート分布領域内での深度別有効孔隙値ヒストグラム。同時に、確率密度曲線を表示している。後述するように、評価対象が（岩相や深度などで）限定されている場合には、採用するデータもそれにより抽出されたもののみを対象とする。ここでの誤差は、この確率密度曲線の傾きと曲率、すなわち分散の大きさに基づき、純粋に統計学的に算出することが可能である。

Fig. 1 Histogram and cumulative curve of effective porosity values within the gas hydrate stability zone in a virtual target area. As stated below, the data should be selected from the prospecting lithology and/or depth intervals set by the estimate policy. Errors are calculated on the statistical methodologies from the variance of the dispersion.

め、安定領域内でのハイドレート分布の不均一性の数値化は非常に困難である。理想的には、精密に観察された産状から求められる平均飽和率をアナロジーに用いるべきではあるが、産状と物性との関連性から有効と考えられる地化学・物理探査指標（Proxy）、例えば音響特性や間隙水化学組成変化などの有効性の実証を確実にした上で適応することが現実的であろう。検層結果や実際に掘削回収された柱状試料の間隙水化学組成により推定されたハイドレート飽和率に関しては、ODP Leg146, 164などで報告されているように、物理探査結果や間隙水化学組成と孔隙率などから試算された値が与えられている。前者（*a.k.a.*, Spence *et al.*, 1995）では、必ずしも実際の掘削結果と整合的な数値が与えられなかったとの認識も得られており、現状では掘削により得られた柱状試料のデータ、特に間隙水化学組成が最も説得力のあるガスハイドレート存在量を指示すると考えられる（Paul, *et al.*, 1996；渡部, 1996）。このパラメータの精度向上が、今後最も重要な課題であろう。

一方、ハイドレート水和数については、結晶構造やガス充填率により大きく左右されることが判っており、天

然ハイドレート結晶の分析値の累積が必要とされている。天然のガスハイドレートの場合には、構造Iと構造IIが存在すると考えられており、メタンガスの場合には前者の構造をとるとされ、この理想的水和数に基づくメタンガスの容積係数は172となる(Kiefte *et al.*, 1985)。これまで実際の海域から回収されたI型のメタンハイドレート試料の水和数測定報告は非常に限られているが、クラスレイト中のメタン分子占有率が100%であったことはなく、現実には90%程度を上限とする値になるものと考えられる。メタン占有率の根拠としては、十分なメタンガスの供給と反応時間などであるが、これについては議論に足る報告が得られていない以上、経験的な数値からの推定(占有率90%;佐藤ほか, 1996など)を行うしかないであろう。これについては堆積物を合成系内を含む実験データとの比較が有効であろう。

このように、海洋ガスハイドレートに在来型資源量評価手法を適用する場合には、必要な計算パラメータが高精度には得られないことを予想しなければならない。これらのパラメータの精度は、基礎的な分析・解析研究の進展により向上し、資源量試算のばらつきも縮小するものと期待される。しかしながら天然メタンハイドレートをターゲットとした掘削が今後飛躍的に増加するとは期待できない現状では、試算に採用されるパラメータは他地域からのアナロジーに頼らざるを得ない。したがって、このようなアナロジー自体の誤差を最小限に抑える手段として、各パラメータの確率論的取り扱いを導入することにより、最終結果に幅を持たせる評価法を検討する必要があると考えられる。

5. 評価手法への確率論の導入

在来型資源評価手法では、鉱床の存在自体を確率的に取り扱うだけでなく、個々の鉱床の規模(資源量)を規制している種々のパラメータを確率論的に検討する場合がある。前者は最終的に評価結果として得られる資源量が確率を伴った表記で得られる利点があり、前述のプレイ法で採用されている。一方、個々の鉱床パラメータすなわち石油地質学的指標の確率論的取り扱いには、貯留層孔隙率、有効貯留層体積、ハイドレート安定領域容積などの資源に関する量的変数だけでなく、ガス生成量や流出量、深部からの熱分解起源ガス移動経路メカニズムといった石油地質学的堆積盆解析に基づく定性的な概念も含まれる場合がある。海洋ガスハイドレートの資源評価では、これらの取り扱いについて以下のような特別な留意が必要となる。

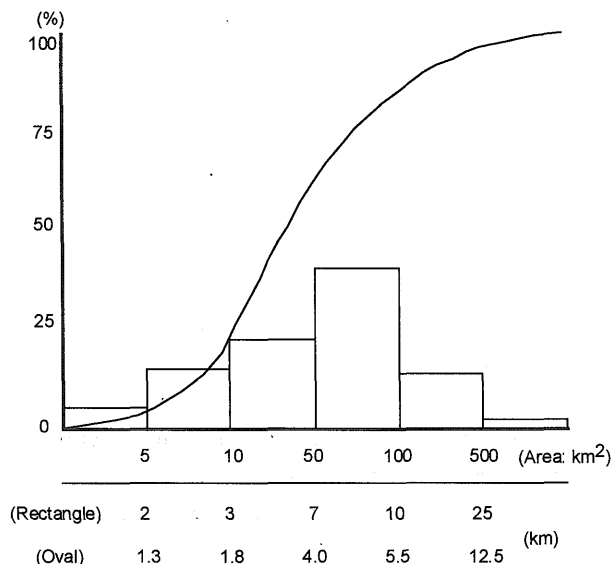
5.1 ガスハイドレートの存在確率

まず、ガスハイドレート鉱床ないしガスハイドレートそのものが存在する確率は、対象海域の堆積物中にガス

ハイドレートが存在するための十分条件が成立しているかどうかという判定を行い、その上で孔隙中に十分な孔隙水が存在しかつこれに過飽和なガス量に加わるかどうかを検討する。すなわち、純粋に温度圧力条件の安定領域の存否が最も重要である。この確率は、ガスハイドレートがどこに、そしてどれだけ濃集しているかという量的偏在性とは無関係である。対象海域にハイドレート安定領域が存在する場合でも、BSRの確認や掘削井からの探鉱情報などにより、安定領域内でのハイドレート存在が検証されている場合には鉱床存在確率は高い数値(100%に近づく)となるが、これ以外に検証する情報がない場合には、その段階で存在確率を実証する根拠がないため、安定領域全体をプールサイズとしその中におけるガス存在量の推定のもとに認定することにならざるを得ない。すなわち、ガスハイドレート存在確率の認定にも量的変数の導入が不可欠である。これに対し、先のUSGSで行われたガスハイドレート資源量評価(Collett, 1995, 1997)は、探鉱プレイ及びハイドレート集積プロスペクトに関する存在確率が評価担当者の判断にゆだねられている点で大きく異なっている。

対象海域に存在している安定領域存在面積に対し、ハイドレートが実際に存在する割合を確率値で算定する際、一般的な手段としては物理探査記録から得られるBSR分布域の認定に基づく手法が、現段階では最も有効と考えられている。これに対しODP Leg164では、ガスハイドレートの分布とBSRが必ずしも1対1に対応するのではなく、BSRを伴わないガスハイドレート分布域が確認された。従って、BSR分布域面積に基づく算定は、実際のガスハイドレート分布面積の最小値を与えることになる。また、鉱床プロスペクトが小規模となればなるほど、物理探査測線の密度が算定の精度に対して大きな影響を与えることになる。すなわち、通常の未探鉱海域での物理探査測線密度(ないし測線間隔距離)では、その海域における小規模なBSR分布域を認知できないことになり、これにより存在確率は常に過小評価となる危険がある。過小評価の程度は、対象海域における個々のBSR分布域の面積と探査密度の対応(第2図)により検討される。これは仮想的なBSR分布域プレイの面積ヒストグラムで、個々のBSR分布域の形態を方形と種々の楕円形としたときの平均横断距離を付記した。この例では、平均横断距離以下の探査測線間隔で探査を行えば、それ以上の規模のBSR分布域は認識されることになる。この面積ヒストグラム例では、探査間隔が5 km以下の場合には60-80%の小規模なBSR分布域が見落とされることが示されている。しかしながら、確認される20-40%のBSR分布域群の累計面積は、より規模の大きなBSR分布域から含んでいるために、本モデルの全BSR分布域面積和の80%程度となる。

さらに、探鉱開発対象規模について何らかの経済的判

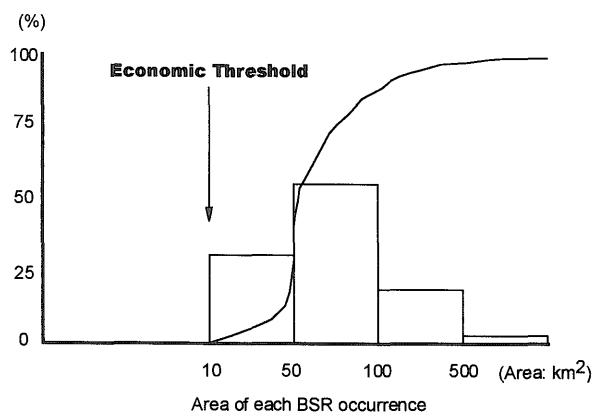


第2図 仮想的探査海域内に分布する個々のBSR分布域の面積ヒストグラム。それぞれの面積クラスターの平均横断距離を、分布域の形態が方形(Rectangle)の場合と楕円形(Oval)の場合について付記した。これは、探査間隔がこれ以上の距離である場合には認知されない値を示す。この面積ヒストグラム例では、探査間隔が5 km 以下の場合には60-80%の小規模なBSR分布域が見落とされることが示されている。しかしながら、確認される20-40%のBSR分布域の累計面積は、全分布域面積和の80%以上を占めるため、ハイドレート存在確率値自体の精度はそれほど下がらない。

Fig. 2 Histogram and cumulative curve of areal size distribution of BSR occurrences in a virtual target area. The numbers at bottom two rows correspond to the average intersect distance above which geophysical survey resolution the larger clusters of BSR occurrences will be recognized. In case the geophysical transects are spaced in 5km, 60 to 80% of the smaller BSR occurrences will be neglected. The total distribution area, however, is more than 80% of the sum of BSR because the larger occurrences are still recognized.

断が存在する場合、例えばBSR分布面積が10km²を下回る場合には経済性を認めない場合などには、資源としてのハイドレートガスの量的評価を行う前に切り捨て作業が必要となる。この例では、第2図と同一のプレイにおける第3図に示したように、ほぼ探鉱開発対象となるBSR分布域総面積の97%程度が把握されることとなり、ハイドレート存在確率値の推定精度は非常に高くなる。

以上のどちらのケースの場合でも、ハイドレート存在確率値の推定精度と探査密度との関係は、その対象海域におけるハイドレート分布領域(ここではBSR分布域に近似)の面積分布関数により、最初に定義されることになる。現実には地震探査結果から個々のBSR分布域の



第3図 仮想的探査海域内に分布する個々のBSR分布域の面積ヒストグラム。第2図と同じ例について、経済的判断による足切り面積値を10km²とした場合。この場合には、探査間隔が同じ5 km 以下の場合でも、見落とされる小規模なBSR分布域は25%程度に過ぎず、確認される75%のBSR分布域の累計面積は、全分布域面積和の97%以上を占めるため、ハイドレート存在確率値自体の精度は非常に高い。

Fig. 3 Histogram and cumulative curve of areal size distribution of BSR occurrences in a virtual target area where an economical threshold is set at 10km². In the same case as in Fig. 2, the geophysical transects are spaced in 5km, only 25% of the smaller BSR occurrences will be neglected. The total distribution area is more than 97% of the sum of BSR which may not reduce the accuracy of this estimate.

認定作業を行う場合には、探査密度を越えた精密な分布域の把握は困難であろう。石油地質学的な変数の多くがほぼ対数正規分布することが指摘されているが(Lee and Wang, 1986)、BSR分布域については検証されていない。現実のBSR分布が地下の温度圧力条件が満たされている海域での海底地形や断層などの地質構造、そして海底堆積物中での孔隙分布やガス生成量などの非常に細かい要因により規制されているためである。逆に、高分解能地震探査によりBSR分布形態がより細かく認定できたとしても、BSR分布域間の空白域にガスハイドレートが存在しないとは言い切れず、むしろODP Leg164等の結果によればハイドレートの分布自体は連続していると考えの方が妥当と考えられる場合も多いであろう。従って、上記のBSR分布域の面積分布関数の精度を議論するよりも、現段階では誤差の算定に最も影響を与えると考えられる、ガスハイドレート分布をBSR分布により近似すること自体の解決が先決であろう。

5.2 ハイドレートガスの量的評価

第2の評価作業段階として、ハイドレート鉱床が存在する確率が定義された対象海域についてのみを対象とし、ガスハイドレートの量的評価を行う。ここで行う量

的評価の精度は、鉱床存在確率の精度とは全く別個のものであり、逆に鉱床存在確率の精度ごとに量的評価を別途行うことも可能である。これによれば、精度の高い確率値のみに基づいた結果を抽出することにより、非常に信頼性の高い評価を得ることも可能となる。その場合、対象海域の中での探査精度に基づいた領域区分を行い、個別に以下の量的評価を行うことになる。ハイドレート存在確率をBSR分布域面積により近似する場合には、物理探査密度に応じた探査精度クラスターを設定し、その面積割合ごとに以下の検討を適応することになる。

実際の評価過程で取り入れる量的パラメータは、評価対象のハイドレートガスの起源に応じて在来型の石油天然ガスを対象とした場合と大きく異なっている。バクテリア起源メタンのガスハイドレートの評価の場合には、トラップや移動経路の形成及び炭化水素の熱熟成タイミングといった指標は対象外となり、有効孔隙率とメタン生成量がまず重要となる。このメタン生成量については、早稲田・内田(1998)が非常に重要な考察を行っている。すなわち、深部起源の熱分解メタンガスの寄与を特段考慮する必要のない場合におけるメタンハイドレートの形成には、その時点でのハイドレート安定領域内部あるいはその近傍におけるバクテリア活動によって生成したメタンが第一義的に関与していると考えられる点である。さらに、これらのバクテリア起源メタンの生成量が、現存している有機炭素量をもとに算出可能であることが示されている。堆積時の有機物のメタン発酵バクテリアに対する選択性や現存有機炭素量の評価については一定の議論の余地は残るが、早稲田らの考察は、ガス生成パラメータの数値化に対して大きな示唆を含んでいる。一方ハイドレートガスが深部からの熱分解メタンを主とする場合や、BSR直下のフリーガスを評価対象とする場合には、ほぼ在来型の評価手法を適用することが可能であろう。

量的パラメータ中のハイドレート貯留層の究極的なプールサイズは、基本的にはガスハイドレート安定領域容積に等しいため、対象海域の水深・海底面温度・地温勾配の3パラメータにより算出される。もし対象海域においてこれらのデータのいずれかが欠けていたり、分布や信頼性に著しい不均一性がある場合には、対象をこれらのパラメータの信頼度に応じて分割し、独立したプレイとして別途扱う必要がある。しかしながら、このような分別に基づいたプレイごとの取り扱いには基本的に同一である。

ガスハイドレート量は、このプールサイズに有効孔隙率とハイドレート飽和率を掛け合わせた値で求められ、ハイドレートガス量は、さらにガスハイドレート中のメタンのケージ占有率とガスの容積係数をもとに算出される(前述;式1)。一つのハイドレート貯留層(プール)中でこれらの量的パラメータが系統的に異なる場合が予想されるときには、それらのクラスターごとにパラメー

タの設定を行う。実際の資源総量の算出には、それぞれのクラスターが互いに資源量について全く独立である前提で別個に求める方法(独立分布型と呼ぶ)と、クラスターの分布と資源量(ガス)の偏在が相互に依存している前提で求める方法(依存分布型と呼ぶ)のどちらかを採用する。前者は、塊状の砂岩に泥質岩が挟在する場合などで、ガスの発生からハイドレートの形成までが同一の岩質内で進行すると想定される場合で、ここでは岩相相互の依存性を検討する必要はない。一方、細かい砂岩泥岩互層からなるプールにおいて有効孔隙率が両者で系統的に異なるときなど、最終的なハイドレート充填率が砂岩泥岩比に依存していると考えられる場合には依存分布型の検討を行わねばならない。

基本的には、独立分布型のプール評価は、依存分布型の評価作業と手続きに違いはない。ただ、この場合には、前段の鉱床存在確率の判定段階で、個々のプールごとにその確率密度を推定し、以後の算定を独立に行う必要がある。一方、後者の依存分布型の場合には、鉱床存在確率は全てを包括して推定し、個別のプールの評価のためには最終的な量的算出段階結果について区分する必要がある。試算手続き上非常に配慮が必要となる。依存分布の地質モデルを、いかに対象堆積盆において構築するかが最大のテーマであろう。

6. まとめ：資源量の最終評価

最終的なハイドレート資源(ガス)量の試算値は、それぞれのプールに関する上述の種々の量的パラメータを用いたモンテカルロ法シミュレーションを行い、その結果である確率密度曲線にそれらのガスハイドレート鉱床の存在確率を乗じたうえで累計することにより行う。通常モンテカルロ法シミュレーションによる資源量評価の難点として、計算に用いる変数の独立性が挙げられているが、本手法の量的パラメータは、すべてがお互いに独立した値として定義されており、モンテカルロ法によるシミュレーション計算により適した性格を持つと言える。本手法では、第1段の鉱床存在確率も確率密度曲線として与えることになり、結果的には、2段の量的試算結果である確率密度曲線との間で再度モンテカルロ法によるシミュレーション計算を行うことにより、最終結果である「ガスハイドレート中のメタンガス存在量」の確率密度曲線が得られることになる。この手法の利点は、全てのパラメータに客観的な誤差評価の余地が残されていることと、各段階の再計算が容易であることである。その試算結果は確率密度曲線により与えられるため、中庸な判断は50%値を、リスク判断を最重視する場合には95%値を、そして逆の立場では5%値を用いるなどといった、種々の算定者の立場での引用が可能である。従来の資源量試算値は、唯一の確定値あるいはこれに類似

する中央値と最大誤差といった、ごく限定された数値として報告されることが多かった。ひるがえって、これらの試算手法では、種々の精度の計算パラメータが一次関数として採用される場合が多く、あるひとつのパラメータの精度が最終値を大きく規定することとなっている。今回提案した試算手法は、算定の段階で不確定なパラメータがあったとしても、試算結果の利用段階で問題のあるパラメータの精度を特定して排除することが可能であり、さらに最終試算結果が確率密度曲線という、利用者の立場ごとに値(数値)に幅のある形で提供できる特徴がある。

本報告では、プロジェクト期間に策定した評価手法概念のみを概説した。現在、日本の経済水域内における「海洋ガスハイドレート資源」を対象とした適用例として、南海トラフ海域の資源量試算を試行している。その結果は、別途報告することとした。

謝辞 本研究は、工業技術院特別研「島弧型炭化水素ポテンシャルの形成機構と予測手法に関する研究」により行われた。資源エネルギー地質部徳橋秀一グループ長には研究遂行時に種々の援助を頂いた。同部棚橋 学室長には原稿の査読と貴重なご指摘を頂いた。資源エネルギー地質部奥田義久部長、海洋地質部佐藤幹夫氏、地質調査所「天然ガスハイドレートプロジェクト推進チーム」各位には、未公表資料の提供と有益な議論を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Baker, R.A., Gehman, H.M., James, W.R. and White, D.A. (1984) Geologic field number and size assessments of oil and gas plays. *AAPG Bull.*, **68**, 426-437.
- Collett, T.S. (1995) Gas hydrate resources of the United States. In: Gautier, D.L. *et al.*, eds., 1995 national assessment of United States oil and gas resources on CD-ROM. *USGS Digital Data Series* 30.
- Collett, T.S. (1997) Gas hydrate resources of northern Alaska. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, **45**, 317-338.
- Dolton, G.L., Carlson, K.H., Charpentier, R.R., Coury, A.B., Crovelli, R.A., Frezon, S.E., Khan, A.S., Lister, J.H., McMullin, R.H., Pike, R.S., Powers, R.B., Scott E.W. and Varnes, K.L. (1981) Estimates of undiscovered recoverable conventional resources of oil and gas in the United States. *USGS Circular*, **860**, 87p.
- Dolton, G.K., Gautier, D.L., Mast, R.F. and Root, D.H. (1993) U.S. Geological Survey estimates of natural-gas energy resources, in: Howell, D.G., ed., *The future of energy gases. USGS Professional Paper* 1570, 495-505.
- Dobrynin, V.N.M., Korotajev, Y.P. and Plyuschëv, D.V., 1981, Gas hydrates--a possible energy resource, in Meyer, R.F., and Olson, J.C., eds., *Long-term energy resources*: Pitman, Boston, 727-729.
- Gornitz, V. and Fung, I. (1994) Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans: *Global Biogeochemical Cycles*, **8**, no. 3, 335-347.
- Holbrook, W.S., Hoskins, H., *et al.* (1996) Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling. *Science*, **273**, 1840-1843.
- Kaufman, G.M., Balcer, Y. and Kruyt, D. (1975) A probabilistic model of oil and gas discovery, in: J.D. Jaund, ed., *Methods of estimating the volume of undiscovered oil and gas resources. AAPG Studies in Geology*, **1**, 113-142.
- Kieffe, H., Clouter, M.J., and Gagnon, R.E. (1985) Determination of acoustic velocities of clathrates by brillouin spectroscopy. *Jour. Phys. Chem.*, **89**, 3103-3108.
- Kvenvolden, K.A. (1988) Methane hydrate -- a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?: *Chemical Geology*, **71**, 51-51.
- Kvenvolden, K.A. (1993) Gas hydrates as a potential energy resource--a review of their methane content, in Howell, D.G., ed., *The future of energy gases: U.S. Geological Survey Professional Paper* 1570, 555-561.
- Lee, P.J and Wang, C.C. (1986) Evaluation of petroleum resources from pool size distributions. In D.D. Rice (ed.) *Oil and gas assessment*, AAPG Studies in Geology, no. 21, 33-42.
- MacDonald, G.J. (1990) The future of methane as an energy resource: *Annual Review of Energy*, **15**, 53-83.
- Masters, C.D., Root, D.H., and Attanasi, E.D., 1991, Resources constraints in petroleum production potential. *Science*, **253**, 146-167.
- McCrossan, R.G. And Porter, J.W. (1973) The geology and petroleum potential of the

- Canadian sedimentary basin - A synthesis. In: R.G. McCrossan ed., *The Future Petroleum Provinces of Canada-their geology and potential*. Canadian Soc. Petrol. Geol., Memoir 1, 720p.
- McIver, R.D. (1981) Gas hydrates, in Meyer, R.F., and Olson, J.C., eds., *Long-term energy resources*: Pitman, Boston, 713-726.
- Meyer, R.F. (1981) Speculations on oil and gas resources in small fields and unconventional deposits, in Meyer, R.F., and Olson, J.C., eds., *Long-term energy resources*: Pitman, Boston, 49-72.
- Miller, B.M. (1979) The evolution in the development of the petroleum resources appraisal procedures in the U.S. Geological Survey and a summary of current assessments for the United States: SPE-AIME eighth hydrocarbon economics and evaluation symposium. Dallas, Texas, SPE 7720, 79-90.
- Miller, B.M., Thonsen, H.L., Dolton, G.L., Coury, A.B., Hendricks, T.A., Lennartz, F.E., Powers, R.B., Sable, E.G. and Varnes, K.L. (1975) Geological estimates of undiscovered recoverable oil and gas resources in the United States. *USGS Circular*, 725, 78p.
- Moore, C.L. (1996) *Projections of U.S. Petroleum supply to 1980*. U.S. Department of Interior, Office of Oil and Gas, 13p.
- National Petroleum Council (1973) U.S. Energy outlook, oil and gas availability. Washington D.C., *National Petroleum Council Committee on U.S. Energy Outlook*, 786p.
- National Petroleum Council (1981) *U.S. Arctic oil and gas*. Washington D.C., National Petroleum Council, 284p.
- Paul, C.K., Matsumoto, R., Wallace, P.J., et al. (1996) *Proc. ODP, Init. Repts.*, 164: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Premsky, S.E. (1995) A review of gas hydrates and formation evaluation of hydrate-bearing reservoirs (paper GGG), presented at 1995 meeting of the Society of Professional Well Log Analysts, Paris, France, June 26-29.
- Procter, R.M., Taylor, G.C. and Wade, J.A. (1984) Oil and natural gas resources of Canada, 1983. *Geol. Surv. Can., Paper*: 83-31, 59p.
- Rozendal, R.A. (1986) Conventional U.S. Oil and gas remaining to be discovered: estimates and methodology used by Shell Oil Company. In: D.D. Rice, ed., *Oil and gas assessment-methods and application-*. AAPG Studies in Geology, 21, 151-158.
- 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. 地質雑, 102, 300-306.
- Semenovich, V.V., Bayalov, N.I., Karamarenko, V.N., Kontorovich, A.E., Kurentsov, Yu.Ya., Maksimov, S.P., Modelevsky, M.Sh., and Nesterov, I.I. (1977) Methods used in the U. S.S.R. for estimating potential petroleum resources. In: R.F. Meyer, ed., *The future supply of nature-made petroleum and gas technical reports*. New York, Pergamon Press, 139-153.
- Spence, G.D., Minshull, T.A. and Fink, C. (1995) Seismic studies of methane gas hydrate, offshore Vancouver Island. in, Carson, et al., eds., *Proc. ODP., Scientific Results*, 146, 163-174.
- Stern, L.A., Kirby, S.H. and Durham, W.B. (1996) Peculiarities of methane clathrate hydrate formation and solid-state deformation, including possible superheating of water ice. *Science*, 273, 1843-1848.
- Trofimuk, A.A., Cherskii, N.V. and Tsaryov, V.P. (1977) The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrence, in Meyer, R.F., ed., *The future supply of nature-made petroleum and gas*: New York, Pergamon Press, 919-926.
- U.S. Department of the Interior (1979) *Final report of the 105(b) economic and policy analysis, alternative overall procedures for the exploration, development, production, transportation, and distribution of the petroleum resources of the National Petroleum Reserve in Alaska (NPRA)*. Office of Mineral Policy and Research Analysis Report, 145p.
- 早稲田周・内田 隆 (1998) 天然ガスハイドレートの生成・集積モデル. 地調月報, 49, 527-539.
- 渡部芳夫 (1996) ブレークリッジ堆積物のコア温度測定, 月刊地球, 208, 640-646.
- White, D.A., (1980) Assessing oil and gas plays in facies-cycle wedges. *AAPG Bull.*, 64, 1158-1178.

(受付: 1999年 2月17日; 受理: 1999年 2月18日)