

## 弾性波シミュレーションによるメタンハイドレート BSR

倉本真一\*

Shin'ichi KURAMOTO (1998) Nature of methane gas hydrate BSR from elastic wave simulations. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 49 (10), p. 509-516, 7 figs.

**Abstract :** Methane gas hydrate studies have recently attracted attention due to their importance for significant natural resource and the global tectonic and dynamic linkage of the Earth. Free gas zone below a hydrate stability zone is also focused on a significant reservoir of natural gas. Reflection seismic survey is a particularly important method to detect the base of gas hydrate stability zone as a BSR (Bottom Simulating Reflector). Elastic wave simulations are carried out to understand the acoustic nature of methane gas hydrate BSR in sediments. Two geological models are presented, and have been used for computer simulations (forward modelings). According to the results, BSRs are recognized quite well anywhere at the BSR potential boundaries, if low-velocity zone is present just beneath the methane gas hydrate layer. BSR amplitude is strong enough to be recognized in a seismic profile, but it should be paid due attention for the interpretation of the phase and amplitude of BSR. 'Tuning effect' is a significant factor modifying the appearance of phase and amplitude information of BSR.

### 要 旨

近年メタンガスハイドレート研究は次世代資源としてだけでなく、グローバルなテクトニクスやダイナミクスに深く関係するものとして注目されている。またメタンガスハイドレート層の直下にはフリーガス（遊離ガス）の存在も期待されている。このメタンハイドレート層の下底は反射法音波探査記録によってBSR（海底面疑似反射面）として認識できる。地質モデルに基づいた弾性波シミュレーションによって、メタンハイドレートBSRの音響特性を明らかにした。その結果 tuning effect によってBSRの見かけの位相や振幅情報が変化することが明らかになり、それは記録の解釈などにとって重要な情報を与える。

### 1. はじめに

音波探査記録に現れる特異な反射面の1つであるBSR (Bottom Simulating Reflector; 海底面疑似反射面)のうち、メタンハイドレートの安定領域下限における音響インピーダンスの急変を原因とするBSRは、メタンハイドレート層の物性やBSR直下に存在すると考えられているフリーガス（遊離ガス）の存在を示唆する極めて重要なマーカーである (white, 1979; 倉本,

1996)。このメタンガスハイドレートに起因するBSRは一般的に強振幅で位相が反転した反射面として反射法音波探査記録上に認められ、ほぼ海底面に平行な面として見える。しかしながらBSR直上の堆積物中にどれくらいのメタンハイドレートが存在しているのか、あるいはBSR直下の堆積物中にはどれくらいのフリーガスが存在しているのかという疑問に対して、音波探査記録からの定量的な議論は容易ではない。それは反射法音波探査による堆積物中のP波速度の見積り誤差が大きいことや、堆積物中のフリーガスとP波速度の関係が一義的に決まらないことによる。特に堆積物中の間隙を占めるフリーガスの割合とP波速度の関係は必ずしも詳細に明らかにされているわけではなく、Domenico (1976) による実験結果が現在でも引用されているにすぎない。Domenico (1976) はフリーガスが数%存在するだけでP波速度は急激に遅くなることを明らかにしたが、P波速度があまりに急激に変化するためフリーガスの存在量との対応を詳しく議論することはできない。またDomenico (1976) の実験結果はGeertsma (1961) による理論的アプローチによる堆積物中のP波速度の見積りとも異なり、傾向として数%のフリーガスがP波速度を急激に低下させることは一致しているが、絶対量の違いなどの理由については詳しく議論されていない。

Keywords : Methane Gas Hydrate, BSR (Bottom Simulating Reflector), Free Gas, Elastic Wave Simulation, Tuning Effect

\* 海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

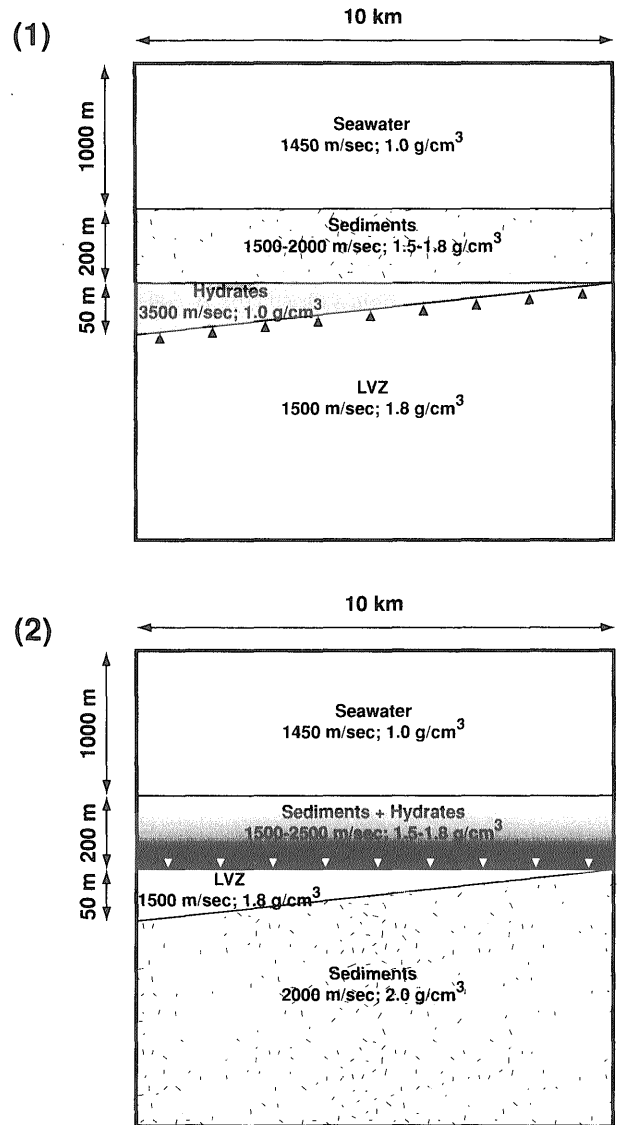
本小論ではBSR直下のフリーガスの存在を認めた上で、BSRの振幅や位相を変化させる要因としてどのような現象があるかを地質モデルを作り、それに対する弾性波のレスポンスを議論する。

## 2. メタンハイドレート層の地質モデル

メタンハイドレート層の安定領域下限を示すメタンハイドレートBSRが、反射面として存在するための基本的要因は、メタンハイドレート層下の地層にフリーガスが存在することである (MacKay *et al.*, 1994; 倉本, 1996; 倉本, 1997)。フリーガスの存在量がBSR反射面の振幅の大きさを左右しているかについては、すでに述べたように現段階では新たな実験結果あるいは理論的考察を持たなければならない。しかしフリーガスの存在量以外にもBSRのみかけの振幅や位相を左右する要因が存在する。それを地質モデルに基づいて、音波探査プロフィールを再現し、議論する。

弾性波 (本小論では反射波のみを扱う) を用いたモデル計算には、地層の物性、特に密度と弾性波速度の情報が必要である。もちろんこれらは地域性があり、堆積物の堆積環境 (堆積物組成, 堆積速度, 続成作用など) によって変化する。本小論では平均的な堆積物を第1図に示した地質モデルのように仮定する。モデル(1)は水深1000mの所に厚さ200mの堆積物が堆積し、その下に塊状のメタンハイドレート層が厚さ50mから0mに徐々にその層厚を側方に変化させていくモデルである。さらにメタンハイドレート層の下にはフリーガスを含んだ堆積物が堆積している。海底下の堆積物は深くなるに従って堆積物自身の自重により圧密されP波速度が上昇する。それは海底付近では1,500 m/secであるが、直線的に速くなり200m下では2,000 m/sec程度にまで成るモデルを仮定した。密度はそれに伴って1.5 g/cm<sup>3</sup>から1.8 g/cm<sup>3</sup>に変化する。メタンハイドレートは均質で、P波速度は3,500 m/sec, 密度は1.0 g/cm<sup>3</sup>と仮定した (倉本, 1996)。フリーガスを含む堆積層は第1図ではLVZ (Low Velocity Zone) と表示した。このLVZのP波速度は1,500 m/sec, 密度は1.8 g/cm<sup>3</sup>とし、層厚は反射波に影響を与えないぐらい厚い層として仮定した。第1図(1)の地質モデルは塊状のハイドレート層が存在した場合のモデルで、黒三角印で示した部分がBSRに成る部分である。このモデルの目的は塊状のメタンハイドレートが存在した場合のBSRに与える音響学的影響を考察することにある。

一方第1図(2)のモデルは堆積物中の間隙をメタンハイドレートが充填するモデルである。(1)のモデルと同様に水深1,000mの所に厚さ200mの堆積物が堆積し、その堆積物中にメタンハイドレートが充填しているモデルである。その下にはフリーガスを含んだ堆積層 (LVZ)



第1図 弾性波シミュレーションを行った地質モデル。(1)メタンハイドレートが塊状の層として存在する場合、(2)メタンハイドレートが堆積物の間隙を充填する場合を示す。詳細は本文を参照のこと。

Fig. 1 Geological models for elastic wave simulation. (1) Massive hydrate layer model. (2) Pore space fill model. (see text for explanation)

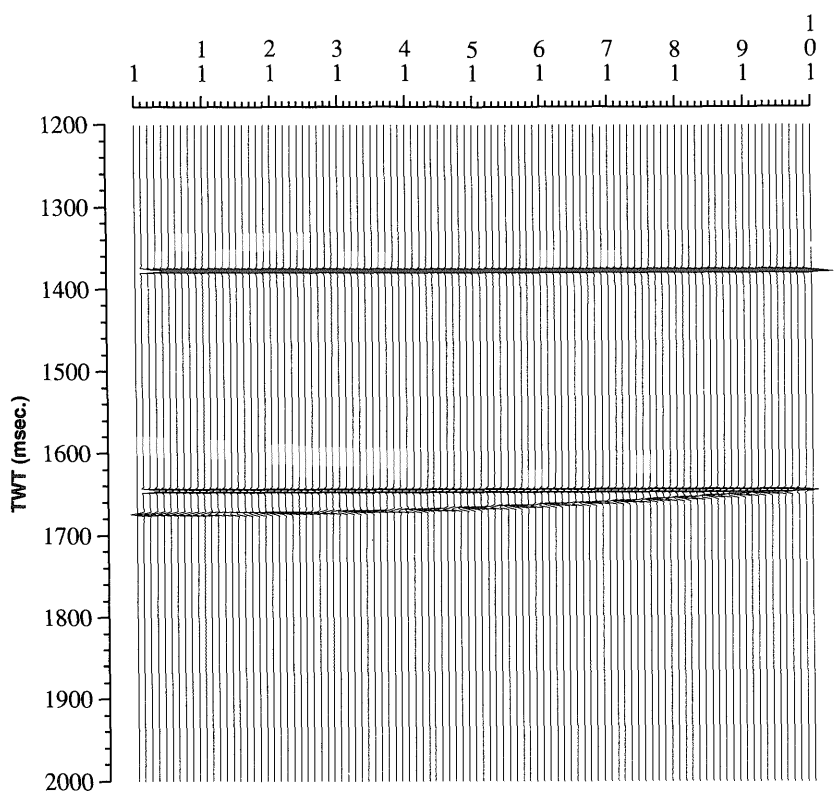
が、厚さ50mから0mまで側方に変化する。このLVZの下にはフリーガスを含まない堆積層が堆積するモデルである。海底下の堆積物はP波速度が1,500 m/secから2,500 m/secまで変化し、密度は1.5 g/cm<sup>3</sup>から1.8 g/cm<sup>3</sup>に変化するとした。(1)のモデルより海底下の堆積物のP波速度が速いのはメタンハイドレートが間隙を埋めている影響である。LVZは(1)同様に1,500 m/sec, 1.8 g/cm<sup>3</sup>とした。フリーガスを含まない堆積層は2,000 m/sec, 2.0 g/cm<sup>3</sup>とした。図中の白三角印はBSRに成る部分である。このモデルの目的はLVZの形状がBSRに与える音響学的影響を考察することにある。

## 3. 弾性波シミュレーション

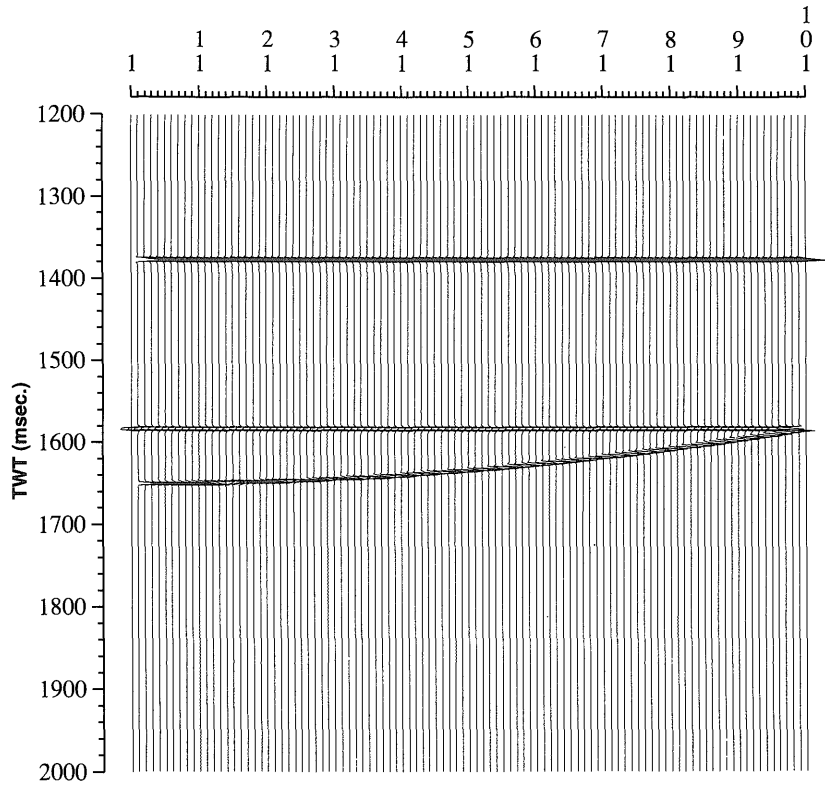
様々な解像度における弾性波シミュレーションが考えられるが、本小論では現在一般的に行われている海洋調査での観測機器を想定し、音源には45 Hzのリッカーウェーブレットを用い、受信はハイドロフォンを想定した。また単純化のためにゼロオフセットの反射波観測で反射波のみを扱った。データ集録は2 msecのサンプリング間隔で2秒間の記録を計算した。第2図及び第3図は第1図の(1)及び(2)の地質モデルに対するシミュレーション結果である。第1図のモデルで重要なのは各層の境界での物性であり、地層内で連続的に変化する物性は反射面としては形成されない。第1図(1)のモデル(第2図)ではメタンハイドレート層上面(正の位相)からの反射波とメタンハイドレート層下面(負の位相)からの反射が明瞭に見える。いわゆるBSRはメタンハイドレート層下面からの反射面である。自然界におけるBSRの特徴として、このようなメタンハイドレート層の上面と下面からの反射が両方見えるところは未だ報告されていない。後で述べるがこの特徴は塊状のメタンハイドレートが自然界には存在しないことを意味するのではなく、通常の反射法音波探査では観測できない解像度が要求されることを意味している。第1図(2)のモデル(第3図)ではメタンハイドレート層下面からの反射面(負の位相)がBSRを形成しており、LVZとその下の堆

積層との反射面はガス-水境界である。このようなガス-水境界の報告は未だ無いが、米国フロリダ半島沖のブレイクアウターリッジでの存在が指摘されている(<http://sepwww.stanford.edu/sep/christin/>を参照)。これらの計算結果にさらに実際に観測されるであろう条件を与え、より現実的な模擬反射断面を作成した(第4, 5図)。これはいわゆるマリンゴーストと呼ばれる海面での反射(音源を水深5m, ハイドロフォンを水深10mに設定した場合を仮定)を考慮に入れ、しかも適度なノイズと周波数フィルターと利得を調整したものである。このプロファイルが一般的に行われている海洋調査で観測される反射法音波探査記録に近いものであると考えられる。

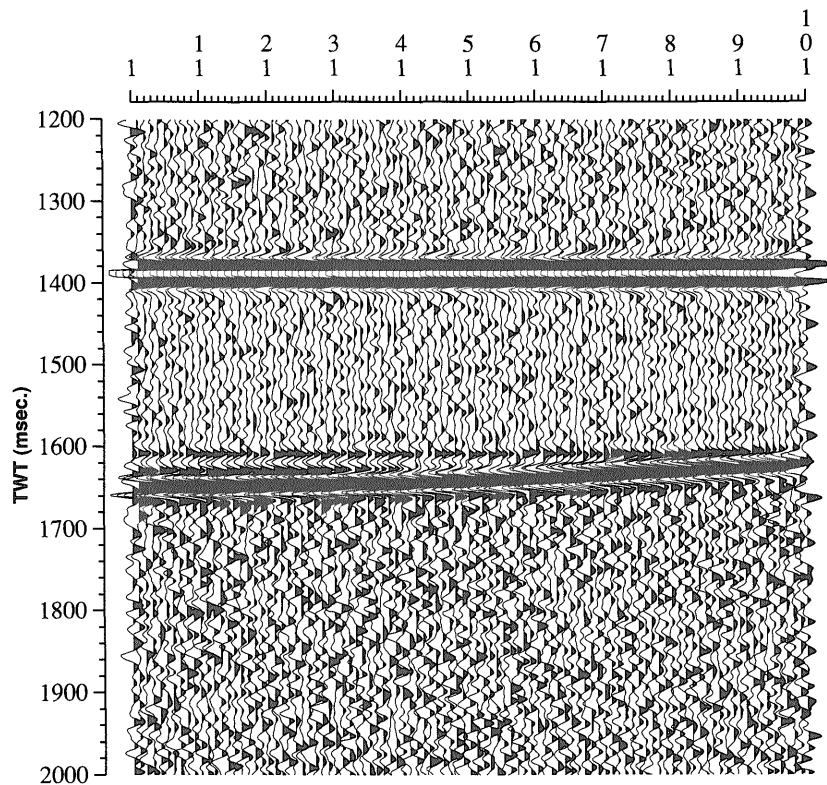
第4図で示される特徴はメタンハイドレート層上面からの反射は、下面からの反射に比べて振幅が小さく、メタンハイドレート層の厚さが薄くなると上面と下面の区別が出来なくなる。さらにメタンハイドレート層の厚さが薄くなると、BSRの位相が負であるのか正であるのか、プロファイルを見ただけでは区別が付きにくくなる。このような反射面の接近による見かけの分解能の変化は“tuning effect”(以降TEと呼ぶ)と呼ばれている。同様に第5図に示したモデルではLVZの厚さがある程度薄くなると識別が困難になる。しかしながらBSRとしての反射面は強振幅の反射面として認められる特徴は変わらない。TEを起こす原因は、メタンハイ



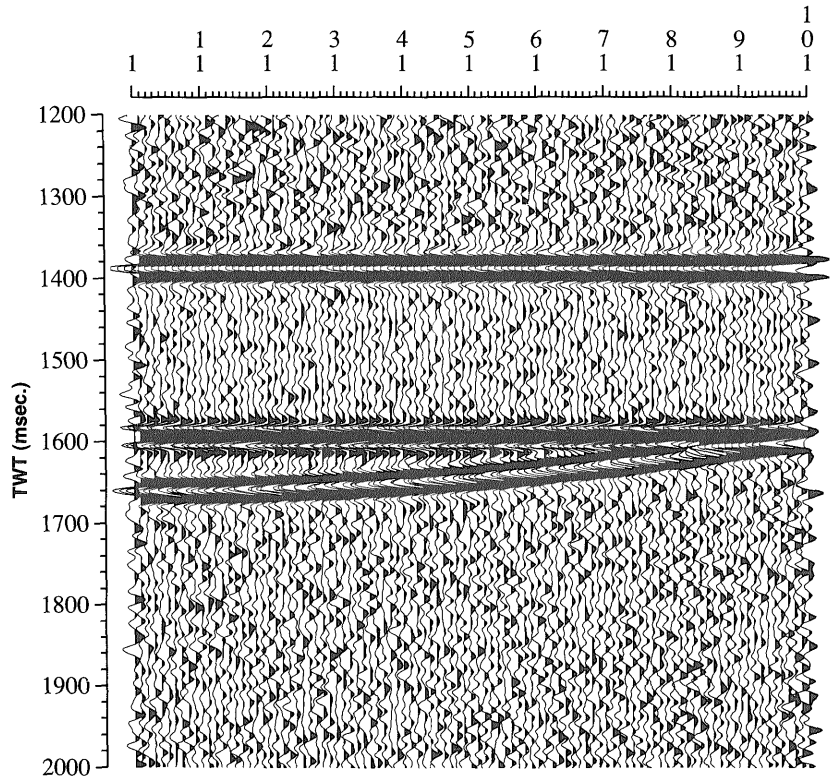
第2図 第1図(1)の地質モデルに対して行った弾性波シミュレーションの結果。  
Fig. 2 Result of elastic wave simulation for the geological model of Fig. 1 (1).



第3図 第1図(2)の地質モデルに対して行った弾性波シミュレーションの結果。  
Fig. 3 Result of elastic wave simulation for the geological model of Fig. 1 (2).



第4図 第2図のシミュレーション結果に対して、現実的な反射記録断面に近似する処理を施したもの。  
Fig. 4 Some realistic processings are applied to the result of elastic wave simulation (Fig. 2).



第5図 第3図のシミュレーション結果に対して、現実的な反射記録断面に近似する処理を施したもの。  
Fig. 5 Some realistic processings are applied to the result of elastic wave simulation (Fig. 3).

ドレート BSR だけの問題ではない。薄層の反射面を解析する場合は常に注意をすべき現象である。

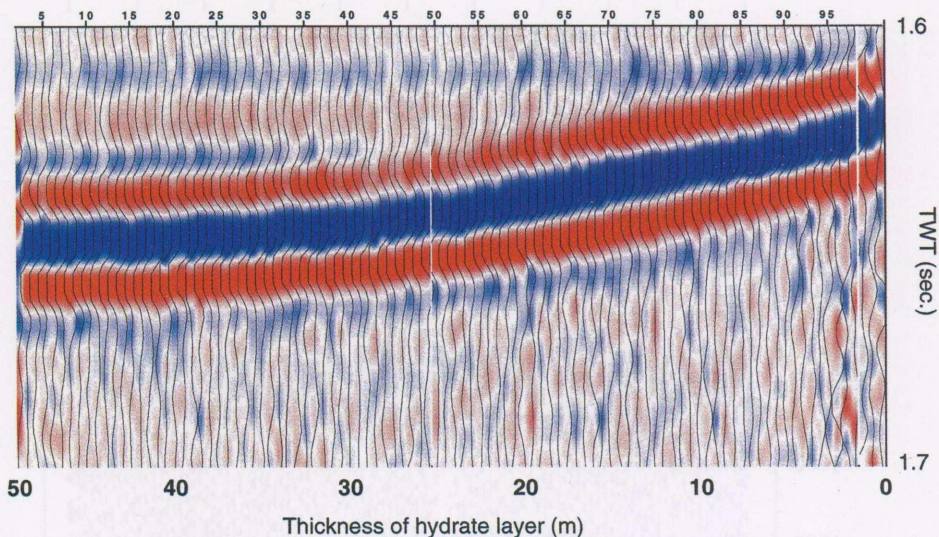
#### 4. 議 論

第6図は第4,5図のBSRの部分拡大し、青色(正)、赤色(負)に振幅情報を割り振って表示したものである。これにより一般的な波形表示より高分解能の表示ができる。第6図(1)を見てわかるように、塊状のハイドレートが存在しても、その厚さが30m以上ないとメタンハイドレート層の上面と下面を区別できない事が明らかである。またメタンハイドレート層上面からの反射波はBSRに比べて非常に弱い。従ってこれまでの一般的な反射法音波探査による解釈では、塊状のメタンハイドレート層の存在を否定することはできない。BSRは強振幅の反射波として顕著に確認できるが、例えば塊状メタンハイドレート層の厚さが10mの所で、先出のTEのため負の位相のBSRが存在することを認めるのは困難である。また塊状メタンハイドレート層の厚さによっては(例えば20m付近)、BSRの振幅が小さくなることもある。いずれも塊状メタンハイドレート層の上面と下面からの反射波がTEによって、その振幅や位相が見かけ上変化するためである。第7図にBSRの振幅強度(絶対値)の変化と塊状メタンハイドレート層の厚さの

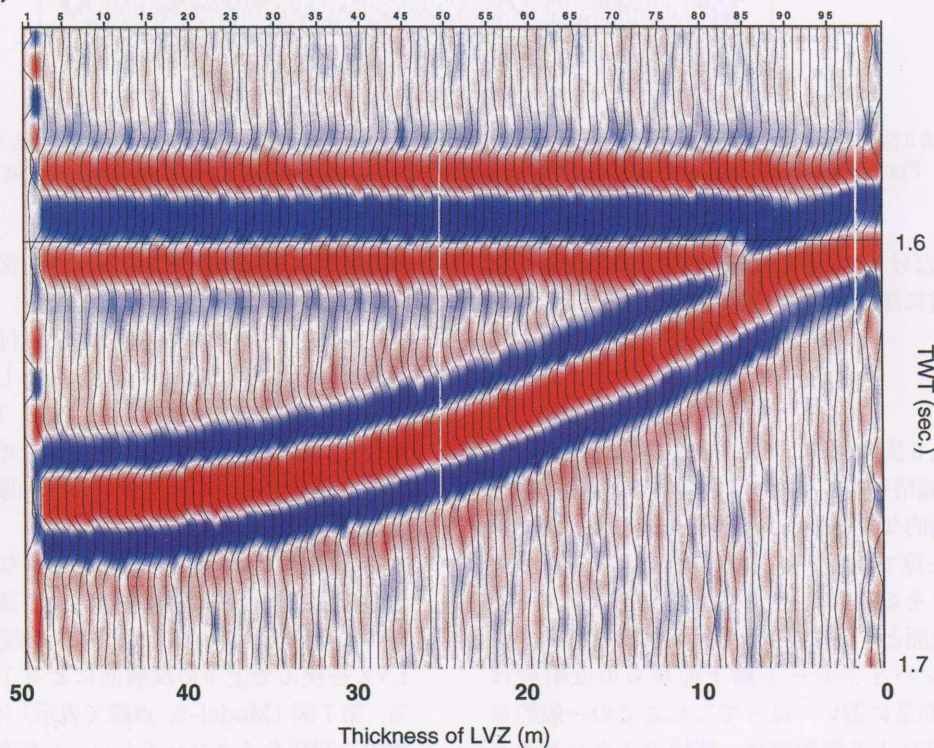
関係を具体的な数値として示した。図中Model-1(実線で表示)と示したものがそれである。BSRの振幅は塊状メタンハイドレートの厚さが20m付近で多少小さくなるが、14m付近では元に戻る。しかし塊状メタンハイドレートの厚さが7m以下になると、BSRの振幅は徐々に小さくなる事が明らかである。このような振幅の変化は単に塊状メタンハイドレート層の厚さによって引き起こされているのである。

第6図(2)ではLVZの厚さに関係なく、BSRは明瞭な負の位相を持つ強振幅反射面として認識できる。しかしそのLVZの層厚は15m以下では認識できない。これもLVZを挟んで上下の反射面によるTEによる影響である。第7図(Model-2,点線で表示)に示すように、堆積物中の間隙をメタンハイドレートが充填するモデルの方が明らかにBSRの振幅は塊状メタンハイドレートのモデルより大きい。またその振幅はLVZの厚さが8m位まではほぼ一定である。しかしそれよりもLVZの厚さが薄くなると、BSRの振幅は急変し、厚さ3-4m付近で最大となり、さらに薄くなると振幅は急激に小さくなる。勿論これらの塊状メタンハイドレートの厚さやLVZの厚さによるBSR振幅の変化は、音源の卓越周波数によって変化するものであるが、この変化もLVZの厚さの変化のみによって引き起こされているものである。

(1)



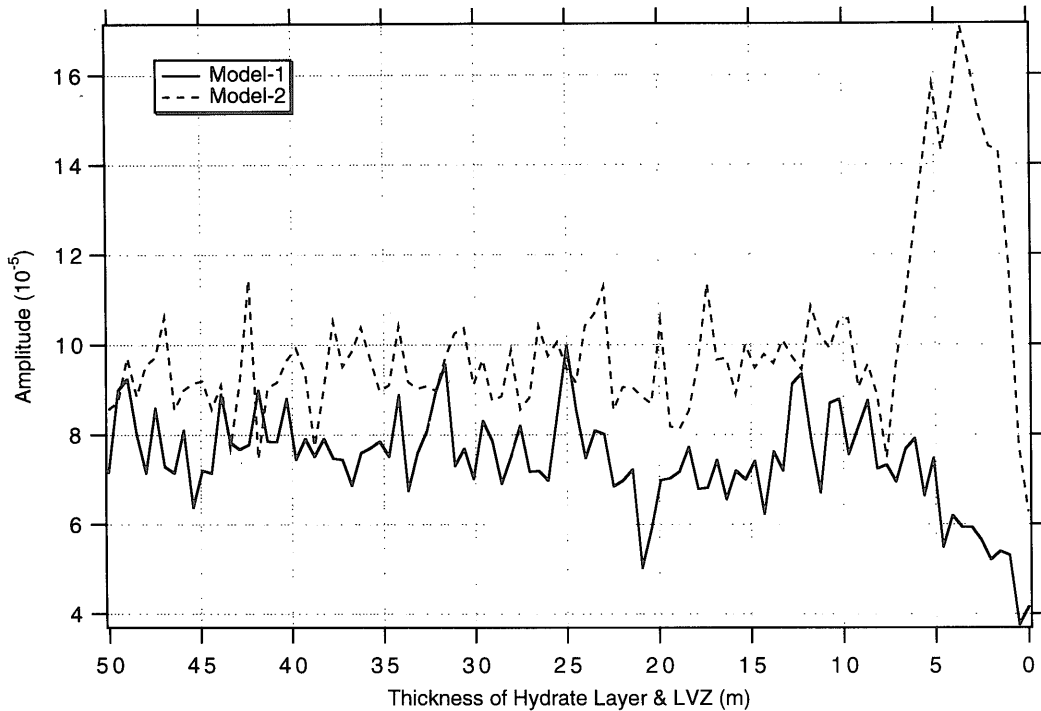
(2)



第6図 第4,5図におけるBSR近傍の反射記録を拡大したもの。振幅情報を青色(正),赤色(負)に振り分け,グラデーション表示した。  
 Fig.6 Zoom-in of BSRs of Figures 4 and 5. The amplitude of BSRs are shown in blue (positive)-red (negative) color gradation.

メタンハイドレート BSR の振幅は周辺の反射面のそれに比べて圧倒的に大きい。従って両モデルに共通して言えることは、フリーガスの存在による P 波の低速度層 (LVZ) が存在すれば、LVZ 層の厚さや塊状メタンハイドレート層の厚さに関係なく BSR は顕著な反射面とし

て音波探査記録上に認めることが出来る。しかし BSR 自身の振幅は周辺の地層からの反射面に比べても有意に大きい、反射面の重なりによる TE の効果によって BSR の見かけ振幅は最大 50% 程度変化すると考えられる (第7図)。倉本 (1996) はフリーガスの存在によって



第7図 第6図に示されたBSRの振幅(絶対値)の変化を塊状メタンハイドレート層の厚さ、LVZの厚さに対して表示した。実線は塊状メタンハイドレート層モデルを示し、点線は間隙充填モデルを示す。

Fig. 7 BSR amplitudes (absolute values) in Fig. 6 are presented with the thickness of massive methane gas hydrate layer and LVZ. Solid line shows the massive methane gas hydrate model. Dotted line shows the pore space fill model.

P波速度が著しく低下する層がメタンハイドレート安定領域下部に存在する事を仮定すると、BSRの振幅強度を左右する要因はBSR直上のメタンハイドレート層の胚胎環境によることを指摘している。本小論での結果は反射係数を左右するメタンハイドレート層の本質的な物性(P波速度と密度)を反映したBSRの振幅強度をTEはさらに助長する方向に働く結果となり、現実の反射法音波探査記録ではさらに強調されてBSRの振幅が変化すると考えられる。BSRを音波探査記録上で確認するための重要な位相情報についても、見かけ上第6図(1)に示したように誤認する可能性がある。これもTEによる影響であるが、解釈する上で注意が必要である。

ではこのモデル実験で行ったことは実際の地質環境でのどのような問題を解決するのであろうか。厚い塊状のメタンハイドレート層が掘削されたという報告は無いが、シミュレーションの結果によると30m以下の厚さではそれを認識できない。しかし見かけ上、BSRの振幅が小さくなることと位相が反転して見える可能性があることから、塊状のメタンハイドレート層の存在の可能性を検討できるかもしれない。しかしこのようなTEを生じる反射面は、塊状メタンハイドレート層からの反射面である必然性はなく、メタンハイドレートとは直接関係ない地層からの反射面が存在することでも説明は可能である。それを見分けるのは今回の実験条件では不可能で

ある。つまりもっと高周波数の音源を用い、かつ薄層でも速度解析可能な程度のオフセットを持ったマルチチャンネル音波探査データあるいは屈折法による解析によって可能と思われる。塊状のメタンハイドレートのP波速度は明らかに周辺の地層に比べて速い。従ってその特徴を利用することが塊状メタンハイドレートの存否を確認できる方法であろう。

またメタンハイドレートが堆積物中の間隙を埋めて存在する場合は、LVZの薄い部分でややTEによりその振幅が変化する。これは例えば背斜褶曲軸部でLVZが厚く、翼部で薄くなる(厚さ1m以下)とすると、BSRの振幅は相対的に翼部より軸部で大きくなる傾向を示すかもしれない。しかしもう少し定量的な議論をするためには実際の物性情報が必要である。

メタンハイドレートの胚胎状況やLVZの厚さやその物性など、不明な点が依然多い。これらの基礎資料を得るためには、より高分解能な音波探査(高周波数音源の使用、オフセット距離の長いマルチチャンネル音波探査、深海曳航式音波探査など)や掘削などによる現位置データが必要である。また音波探査データの解析技術の向上も重要な課題である。

## 5. ま と め

メタンガスハイドレート BSR を中心に、現在の一般的音波探査で得られる質の記録を弾性波シミュレーションにより再現した。塊状のメタンハイドレートが存在する場合と堆積物中の間隙をメタンハイドレートが埋める場合の地質モデルを作り、それに対する反射波記録を作成した。その結果 LVZ の存在を仮定する場合は、地質モデルに依存して見かけの BSR の振幅や位相が変化することが明らかになった。これは例えば音波探査データの処理課程や解釈でも同様な注意が必要である事を示している。BSR の振幅の変化は BSR 直上のメタンハイドレートの胚胎状況によって基本的に左右されるが、TE によってさらにその変化は助長される。また胚胎環境の他にも薄層などの影響も十分考慮する必要がある。これはある意味で観測の制約であり、さらに高精度の地質解釈を行うためには高分解能の探査を行う事が重要である。

**謝辞** 本研究の推進にあたり、日頃より御議論いただいている地質調査所「天然ガスハイドレートプロジェクト推進チーム」の方々に感謝いたします。また匿名の査読者の方には図の改善を御指摘いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- Domenico, S.N., 1976, Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir. *Geophys.*, **41**, 882-894.
- Geertsma, J., 1961, Velocity-log interpretation: The effect of rock bulk compressibility, *SPE Jour.*, **1**, 235-248.
- 倉本真一, 1996, メタンハイドレート探査と BSR の持つ意味, *地質学雑誌*, **102**, 951-958.
- 倉本真一, 1997, もう一つの海底面—BSR—, *地質ニュース*, **510**, 12-17.
- MacKay, M.E., Jarrard, R.D., Westbrook, G.K., Hyndman, R.D. and Shipboard Scientific Party of Ocean Drilling Program Leg 146, 1994, Origin of bottom-simulating reflectors: geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism. *Geology*, **22**, 459-462.
- White, R.S., 1979, Gas hydrate layers trapping free gas in the Gulf of Oman. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **42**, 114-120.

(受付 1998年 6月 29日 ; 受理 1998年 7月 17日)