

# メタンハイドレート層厚探査手法の研究

門元之郎\* 西田泰憲\*\* 竹田博\*\*\* 星島一輝\*\*\*\*

## Method for Exploration of Methane Hydrate Layer Thickness

Yukio KADOMOTO, Yasunori NISHIDA, Hiroshi TAKEDA, Kazuteru HOSHISHIMA

It is well known that BSR (Bottom Simulating Reflector) indicates the existence of natural methane hydrate under the seafloor. But the method for estimating the thickness of methane hydrate layer, which represents the amount of methane hydrate storage, has not been established yet.

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) carried out plural number of seismic survey experiments with different acoustic frequencies, and confirmed that the thickness of methane hydrate layer might be estimated, which could be a useful method for estimation of hydrate layer in the future.

If a high frequency seismic survey by unmanned underwater vehicle is executed and the additional BSR is confirmed on top of the BSR previously confirmed by conventional seismic reflection from the sea surface, it can be well assumed that rather thick layer of methane hydrate exists. Furthermore, MES suggests the possibility that storage amount of methane hydrate can be accurately estimated by taking the methane hydrate storage ratio assumed by AVO analysis and inversion analysis into consideration.

海底におけるメタンハイドレート(MH)は一般的に海上地震探査により得られる海底擬似反射面(BSR)によってその存在が把握されてきたが、賦存量を把握する上で重要な、MH層厚を推定する手法は未だ確立されていない。

そこで、三井造船は、複数の周波数を用いた地震探査を実施することによって、海底下に賦存するMH層厚を推定できる可能性があることを実験的に確認し、新しい手法として提案した。

通常の上反射法地震探査によってBSRが確認された海域において、無人水中航走体による高周波地震探査を実施し、その上方に新たにBSRが確認されれば、その間には比較的厚く、MHの濃集した層が存在する可能性があり、層厚を推定できることになる。更に、AVO解析及びインバージョン解析によって推定したMH賦存率を考慮することによって、MH賦存量をより正確に推定できる可能性がある。

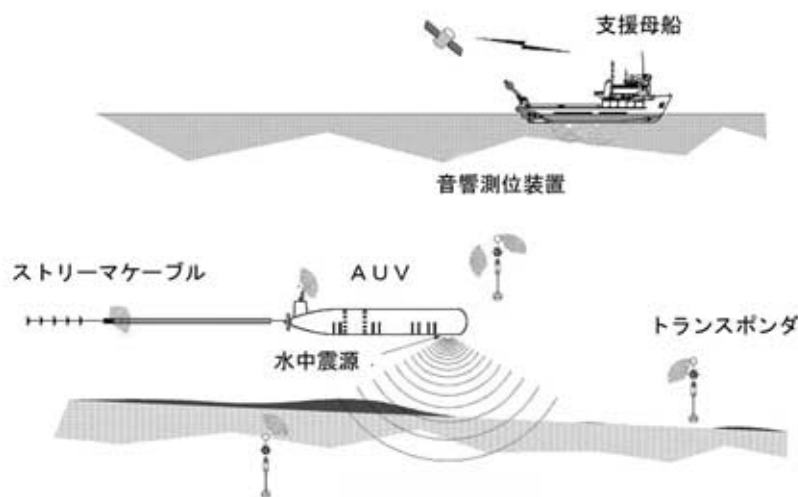


図1 新たに提案したMH探査システムの概念図  
New Concept of Exploration for MH

\* 船舶・艦艇事業本部 事業開発部

\*\* 船舶・艦艇事業本部 水中機器部

\*\*\* 技術本部 玉野技術開発センター

\*\*\*\* 技術本部 CAEセンター

## 1. メタンハイドレート (MH) 探査の背景

日本周辺海域に賦存する MH 量は、メタン量に換算して  $10^{14} \text{ m}^3$  と見積もられ、我が国が現在消費している天然ガス量の 100 年分に相当すると推定されている<sup>1)</sup>。しかし、この試算には多くの仮定が含まれており、MH を資源として評価するためには、MH の賦存状態を正確に把握する必要がある。

一般に、MH の存在は、海上からの反射法地震探査によって得られる BSR (Bottom Simulating Reflector: 海底擬似反射面) によって把握されている。BSR とは、海上反射法地震探査記録に出現する反射波イベントのことであり、海底にほぼ並行で、海底面とは逆位相の信号が連続的に繋がって現れる特徴を有する<sup>2)</sup>。この BSR は MH 層の下限を示すと考えられているが、MH の賦存量を推定するには MH 層厚を推定すること、すなわち MH 層上限を特定することが極めて重要な要素である。しかしながら、その特定手法は現段階ではいまだ確立されていない。

## 2. MH 探査の研究目標

最近の国内外の調査で、探査に利用した反射法地震探査の震源の周波数によって、BSR の現れ方に大きな差が存在する事実が明らかになってきた。このことは BSR の上方に存在している MH の層厚と、調査に利用した震源周波数の間に関係があることを示唆している<sup>3)</sup>。本研究では、探査周波数として複数の周波数を用いて水槽実験を実施し、これらの現象を実験的に確認することによって、MH 層厚を推定できる可能性について把握することを第一の目標としている。更に、得られたデータについて、AVO (Amplitude Variation with Offset) 解析<sup>\*1)</sup> (\* は末尾の付録「用語解説」を参照。以下同様) 及びインバージョン解析<sup>\*2)</sup> を実施し、MH 資源量評価についての検討を加えるものとする。また、将来 MH の資源量評価を詳細に行うために必要となる MH 探査システムについて調査検討を実施する。

## 3. MH 層厚探査手法の提案

水槽実験の結果から、高周波の探査を実施することにより MH 層上面を観測できる可能性があることが判明した。また MH 層が一定の層厚を有する場合に、AVO 解析及びインバージョン解析を適用することで、正確な資源量として把握できる可能性があることも判明した。一方、高周波による探査を実施する最適なシステムについて検討した結果、AUV (Autonomous Underwater Vehicle) に震源及びストリーマケーブルを搭載し、海底近くで運用する方法 (図 1) が有利であるという結論を得た。これらの結果を基に MH 層厚を推定する手法として、以下の提案を行った。探査手法フローを図 2 に示す。

まず、広い範囲を対象に通常の海上反射法地震探査を実施し、BSR が観測される海域を調査する。その調査によって BSR が出現した場所は MH が存在する可能性が高いと考えられるが、その賦存形態が単層の厚い MH 層なのか、あるいは薄層の MH と泥層の互層構造になっているかなどの判

別は困難である。そこで次に、BSR が出現した場所に対し、AUV を用いた反射法地震探査を実施する。AUV には可変周波数型の震源とストリーマケーブルを搭載し、高周波による反射法地震探査を実施する。使用する周波数は AUV の潜航前にセットし探査を実施するが、必要に応じて異なる周波数を用いた探査を継続して実施する。そこで前ステップで観測された BSR より上方に BSR が観測されれば、この海域には比較的厚く、MH の濃集した層が存在する可能性がある。更に、その海域に対して、AVO 解析とインバージョン解析を適用することで、MH 量の推定を行い、より正確な資源量として把握できることになる。

## 4. 物理モデル実験

周波数の違いによる BSR の現れ方を確認するために、MH 層を想定した物理モデルを用いた水槽実験を実施し、複数の周波数震源に対する反射波記録を取得し解析した。

### 4.1 物理モデル

実海域における MH 層の構造として、10 m 以上の厚さの MH 層からなる濃集構造と、MH 薄層と非 MH 薄層が交互に重なってできた薄層互層構造が考えられているが、本実験では探査を行う上でより困難な構造である薄層互層構造を想定した物理モデルを用いた。物理モデルの互層構造は、MH 層を減衰の少ないステンレスで模擬し、非 MH 層をステンレスとの音響インピーダンス差を考慮してアクリルで模擬した。各層の厚さは 1 MHz のステンレス中における波長が 5.79 mm であることから 5 mm と 10 mm の 2 種類を選定し、層厚と積層数を変えて表 1 に示す 4 パターンを作成した。各モデルのモデル番号は層厚と積層枚数を表している。各モデ

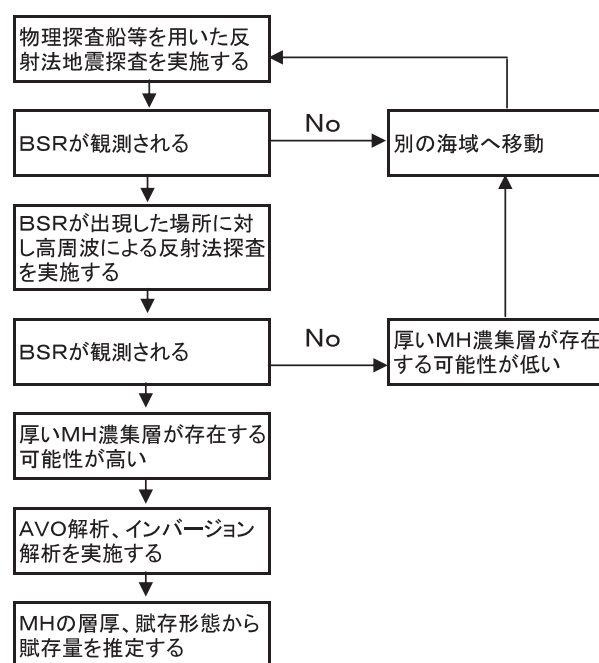


図 2 MH 探査の概略フロー  
Schematic Flow of Exploration for MH

ルの積層順はどれも同じで、一番上面がアクリル層である。作成したモデルの外観の一例として「モデル 10-5」を図 3 に示す。

4.2 計測装置

計測装置の概略を図 4 に示す。本計測装置はハイドロホン及びトランスデューサの位置を制御するトラバースシステムと、データ計測を行う計測システムから構成されている。これらは 1 台のコンピュータで制御する構成になっている。

実験装置外観を写真 1、実験水槽の仕様を表 2 に示す。使用した周波数は、100 kHz、300 kHz、500 kHz、750 kHz、1 MHz の 5 種類である。

4.3 実験要領

物理モデルを水槽中央に設置し、トランスデューサとハイドロホンを水槽中央部から外に向けて等間隔で移動させることにより、CDP (Common Mid Point)<sup>\*3)</sup> データを計測する手順で実験した。計測シーケンス概略を図 5 に示す。S/N 比向上のために、発振間隔 0.5 秒、発振回数 64 回で同一計測点に対して繰り返し計測し、CDP 重合を行うこととした。

4.4 計測結果及び考察

水槽実験計測結果の一例として、モデル 10-5 に対する周波数 100 kHz 及び 1 MHz の CDP 重合結果を図 6 に示す。モデル層構造から受波記録に伸びている破線は、受波点においてモデル上面と下面からの反射波の現れる時刻を示している。

CDP 重合結果から以下の知見を得た。

- (1) 低周波を用いた計測結果では互層構造内部からの反射波は弱く、互層構造下部からの反射波が強くなる。これは、エアガンなどを使用した低周波探査においては BSR が

観測されるが、MH 層上面は観測されないことに対応している。

- (2) 高周波を用いた計測結果では互層構造上部の近くで反射波が強くなり、互層構造最下部からの反射波は弱くなる傾向にある。これは、DTAGS (Deep Towed

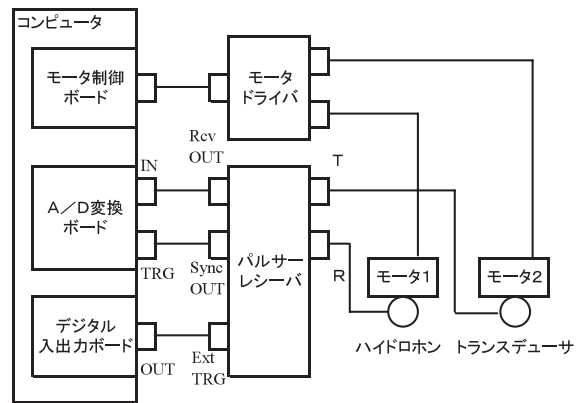


図 4 計測装置概略  
Summary of Measuring Device



写真 1 実験装置外観  
Experimental Device

表 1 物理モデルの種類  
Sorts of MH Layer Model

	モデル 5-3	モデル 5-5	モデル 10-3	モデル 10-5
薄層厚さ (mm)	5	5	10	10
積層枚数	3	5	3	5

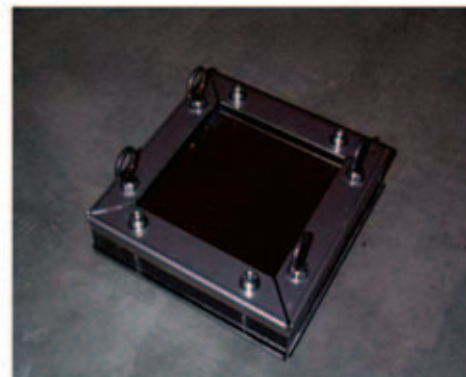
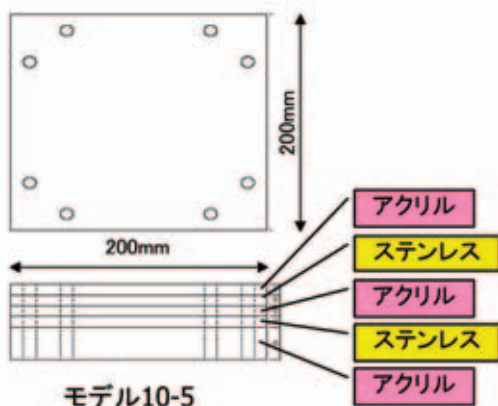


図 3 物理モデル外観 (モデル 10-5)  
Appearance of MH Layer Model

Acoustics / Geophysics System : 米海軍が使用した水中震源搭載深海曳航体) による高周波探査ではBSRが明瞭に観測されないことに対応している。

上記の結果が得られた理由として、以下のことが考えられる。

- (a) 低周波を用いた探査で互層構造内部からの反射波が弱いのは、層厚が波長の1/4から1/2程度であるため、境界面からの反射波の位相が相互に逆相に近くなり、干渉しあうためと考えられる。モデル下面からの反射波が強いのは、低周波波長の透過率が高いことと干渉が弱いことによると考えられる。
- (b) 高周波を用いた探査で互層構造内部からの反射波が強いのは、層厚が波長と比較して厚いため境界面からの反射波の位相がランダムになり、相互の干渉が弱いためと考えられる。モデル下面からの反射波が弱いのは、高周波波長の透過率が低いためと考えられる。

以上から、今回製作した物理モデルはハイドレート層をよ

く模擬しており、MH層の層厚と、使用した地震探査震源周波数の間には依存関係があることが今回の物理モデルを使った実験によっても裏付けられたと考えられる。

### 5. AVO解析とインバージョン解析

MH層内のMHの賦存量を推定するためには、層厚と層内のMHの賦存率が必要となる。近年、MHの賦存率を推定する手法として、地震波属性のポアソン比と音響インピーダンスを用いた推定方法が報告されている<sup>8)</sup>。そこで、水槽実験で得られたデータに対して、ポアソン比を推定するためのAVO解析、及び音響インピーダンスを推定するためのインバージョン解析を適用した。

**表2 実験水槽仕様**  
Specification of Experimental Tank

項目	仕様
内寸法	2 890 mm(W) × 1 025 mm(H) × 1 490 mm(D)
外形寸法	3 000 mm(W) × 1 325 mm(H) × 1 815 mm(D)
最大水深	948 mm
重量	1 086 kg
水槽内壁材料	SUS304

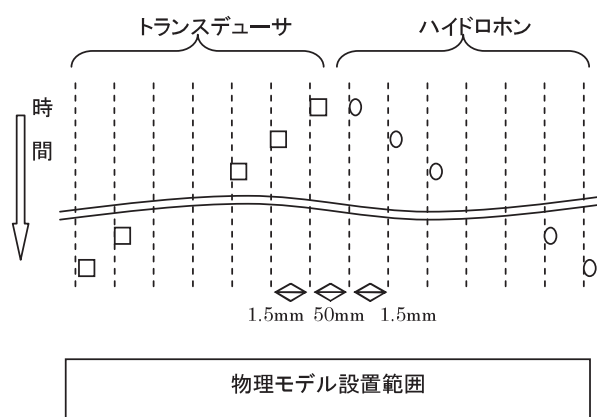


図5 計測シーケンス概略  
Sequence for Measurement

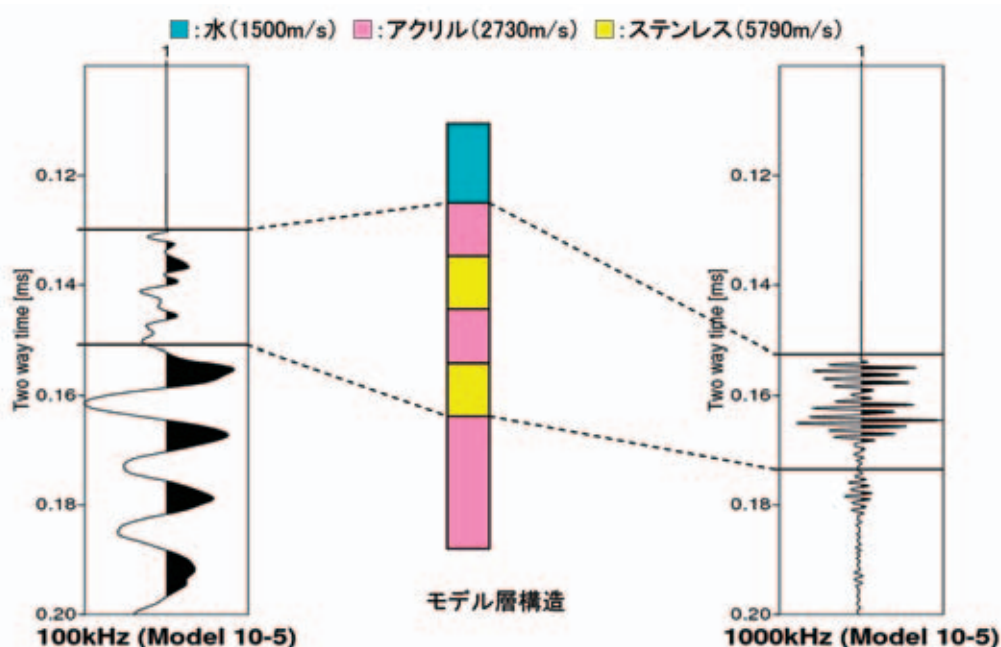


図6 水槽実験計測結果  
Measurement Result in Experimental Tank

5.1 AVO 解析及び考察

水槽実験で得られたデータについて AVO 解析を実施した。AVO 解析により得られた物性値を図7に、モデルに使用した素材の物性値を表3に示す。図7の左から、解析され

表3 素材物性値  
Material Property

	比重	速度 [m/s]	ポアソン比
アクリル	1.19	2 730	0.35
ステンレス (SUS304)	7.93	5 790	0.27

たP波速度・比重・ポアソン比を示す。

解析結果の物性値は、モデルの物性値とよく一致しており、実際の計測においても真値を推定できる可能性が大きいことを示唆している。

5.2 インバージョン解析と考察

物理モデルに対して取得されたデータをもとにインバージョン解析を行った。結果を図8に示す。モデルは左から各々10-3、10-5、5-3、5-5に対応する。赤の実線はインバージョンにより得られたP波インピーダンスを、青の実線は真値を示す。モデル5-3と5-5ではインバージョン結果に大きな誤

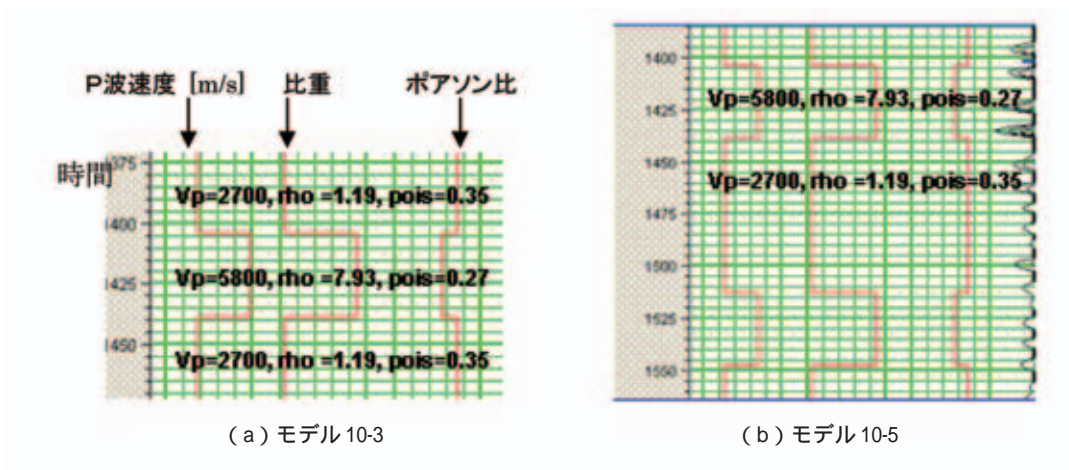


図7 AVO 解析結果  
Result of AVO Analysis

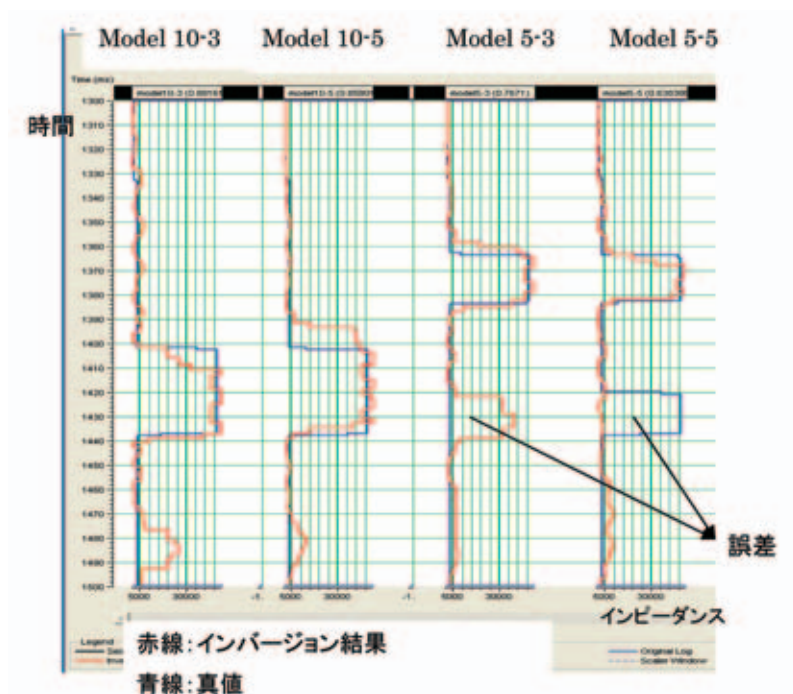


図8 インバージョン解析結果  
Result of Inversion Analysis

差が存在することが確認できる。これはP波インピーダンスの推定に関し、モデルの各層が薄くなるほど正しい値が推定されないことを意味する。しかしながら、擬似ハイドレート層が一定の層厚を有する場合（例えば、高濃集のMH層の層厚が10m以上の場合）には、ポアソン比並びにP波インピーダンスの値が反射法地震探査によって、ある程度正確に推定可能であることを示唆している。

### 6. 高周波震源を用いたMH探査システム

前章で提起したMH探査を行う場合、異なる周波数を発震することが可能な震源を用いて高周波による探査を実施する必要があるが、そのような探査を実施するには震源及びストリーマケーブルを海底近くに配置し、運用することが効率的である。その方法には曳航体による方法と、AUVによる方法が考えられる。

#### 6.1 曳航体による探査

曳航方式については、以下の場合の組み合わせにより4方式が考えられる。

- ・ディプレッサの利用の有無
- ・翼の制御による安定化の有無

これらを図9に示す。また各々の方式の特徴を表4に示す。

曳航性能が最も高いのはディプレッサを用い、曳航体の翼制御を行う方法であるが、ディプレッサを用いる方法は2段曳航となり、着水・揚収などシステムの取り扱い性が複雑となる。そこで、曳航体による最適な方法として、ディプレッサを用いないで翼制御を行う方法（表4の方式2）を選定する。

翼による機体制御の方法は、以下が考えられる。

- ・主翼の迎え角制御による揚力制御で機体の上下揺(Heave)を軽減する。
- ・左右の水平尾翼の迎え角を双動的に制御して機体の縦揺(Pitch)を軽減する。
- ・左右の水平尾翼の迎え角を差動的に制御して機体の横揺(Roll)を軽減する。

#### 6.2 曳航体とAUV

曳航体とAUVの特徴を表5に比較した。双方の特徴は主にケーブルの有無で左右される。

曳航体による方法では、長尺ケーブル、ケーブルウインチ、ヒープコンペンセータなどのケーブル用ハンドリング装置を

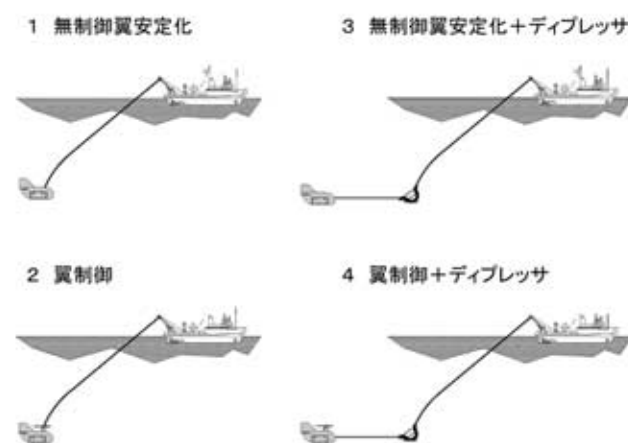


図9 曳航方式 Towing Method

表4 曳航方式比較 Comparison of Towing Method

評価項目	方 式			
	1	2	3	4
ディプレッサの有無	ディプレッサ無		ディプレッサ有	
翼制御の有無	翼制御無	翼制御有	翼制御無	翼制御有
深度の保持機能	母船上装置による	主翼制御による	母船上装置による	主翼制御による
姿勢の安定性	固定翼の流体力による	尾翼の制御による	固定翼の流体力による	尾翼の制御による
曳航索の影響 (母船動揺の影響)	最も大きく影響される	主翼の制御により軽減される	ディプレッサにより軽減される	ディプレッサ、主翼の制御により最も少なくなる
総合的運動性能	すべて母船上装置の人手による制御に頼る	自動制御が可能となるが、曳航索の影響が残る	曳航索の影響は軽減されるが自動制御機能はない	総合運動性能は最も良くなる
浮力材の必要性	曳航体の水中重量は重い方が良く浮力材は必要ない		曳航体の水中重量を0とする浮力材が必要	
曳航体の軽量化	最も軽量化可能	制御システムの分重くなる	曳航体は浮力材の重量増加、更にディプレッサの重量が追加となる	最も重量が重くなる
システムの単純性	最も単純である	曳航体は制御システム分複雑	ディプレッサが必要となる	曳航体は制御システム分複雑、ディプレッサが必要となる
着水・揚収作業の難易	最も容易である	主翼があり注意を要する	ディプレッサの着水揚収が必要で複雑である	最も複雑となる
コスト	最も低い	高い	低い	最も高い
総合評価	システムとしては単純であるが、深度・姿勢は安定化が難しい	深度・姿勢の制御が可能であり最も良い方法である	ある程度の性能も期待できるがディプレッサの操作が課題	最も高い性能が期待できるがディプレッサの操作が課題

表5 曳航体と AUV の比較  
Comparison between Deep-Tow and AUV

運用方法	曳航体	AUV
母船の制限	ケーブルウインチ, ヒープコンベンセータなどハンドリング装置が必要 また船尾部に大型の A フレームが必要 曳航中は曳航体に拘束される	着水揚収用のクレーンが必要 AUV 運用中母船は自由である
甲板作業	ケーブルの付いた曳航体の着水・揚収作業がある	AUV の着水・揚収作業のみ
データの即時性	曳航ケーブルを通してリアルタイムのデータ収集が可能	収集データの取得は AUV 回収後
位置の精度	母船からの SSBL 計測精度または LBL の精度	同左
動的安定性	翼制御型では安定している	極めて安定である
運用時間	動力は母船より供給されるため無制限	搭載した電池の容量に制約される

搭載することによる母船への制約が非常に大きくなり、付帯作業も発生するが、AUV では船上装置もシンプルで作業性も良い。一方、曳航体ではケーブルによって給電及びデータ伝送を行うため観測効率が上がるが、AUV による方法では母船との間にケーブルを使用せず動力源としてバッテリーを用いるため探査時間が限られ、またデータの解析も AUV 回収後となる。

物理探査では計測位置を正確に把握することが極めて重要な要素となるが、どちらの場合も計測精度は音響測位精度に依存する。音響測位精度はピークルの安定性に依存するため、母船の動揺がケーブルを通して直接伝わる曳航体より、フリーで安定して航走する AUV の方が有利である。

また、MH 探査で詳細調査を実施する場合、目標とする領域は一般的な反射法地震探査に比較して狭いと考えられる。したがって、音響測位方式として LBL (Long Base Line) 測位<sup>\*4)</sup>の使用も実用性が高いと考えられる。また、同じ理由で連続運用時間も長時間にわたる必要が少ないことから、AUV の利用が総合的に有利と考えられる。

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」の「メタンハイドレート資源開発研究」に関する委託研究「メタンハイドレートの層厚・賦存様式推定に貢献する深海曳航式地震探査用可変周波数震源の開発研究」で行ったものである。本研究の遂行に当たり、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、京都大学ほか、ご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 佐藤．ほか：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，第 102 巻 (1996)，p. 59
- 2) 清水．ほか：南海トラフにおける BSR とメタンハイドレートの分布，物理探査，Vol.55，No.5 (2002)，p. 25
- 3) 亀井．ほか：メタンハイドレート層からの地震波応答についての検討，物理探査学会第 108 回学術講演会論文集，(2003)，p. 7
- 4) K. Aki, P. G. Richards: Quantitative Seismology, W.H. Freedman and Co. (1980)

- 5) 清水．ほか：南海トラフ海域（メタンハイドレート賦存域）での深海曳航式地震探査 - データ取得 - ，物理探査学会，第 105 回（平成 13 年度秋季）講演会予稿集，(2001)，p. 101
- 6) 清水．ほか：南海トラフ海域（メタンハイドレート賦存域）での深海曳航式地震探査 - データ処理 - ，物理探査学会，第 105 回（平成 13 年度秋季）講演会予稿集，(2001)，p. 105
- 7) 物理探査学会編：新版物理探査用語辞典，(2005)，愛智出版
- 8) 松島．ほか：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム 平成 14 年度研究成果報告会 探査技術分野，(2003-5)

## 付録．用語解説（新版物理探査用語辞典<sup>7)</sup>より抜粋）

### \*1) AVO 解析

反射法地震探査において、反射波の振幅がオフセットすなわち震源と受信点間の距離や入射角の増加に伴い、変化する現象のこと。P 波の反射波であっても、この現象は P 波速度と密度のみならず S 波速度にも依存する。この現象から油ガスの存在や貯留層の弾性常数を推定する技術を AVO 解析と呼ぶ。

### \*2) インバージョン解析

物理現象の観測値からその現象を生じさせる物理モデルを求める逆境界値問題の解のこと。逆解析とも呼ぶ。

### \*3) CDP (重合)

同一の反射点に対応する受信点と発振点の対を集め、経路の長さに対する NMO 補正を施して重合すること。CMP (重合)とも言う。

### \*4) LBL 測位 (海洋音響の基礎と応用, 海洋音響学会編より)

水中における位置計測方式の一つ。海底に 3 個以上の基準点 (トランスポンダ) を設置し、その基準点座標上での測点目標の位置を求める方式。

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 事業開発部  
TEL 03 - 3544 - 3411 門元 之郎