高分解能三次元反射法地震探査 -SoundArray 3D-
新潟県上越沖での実施例

猪野滋、菊地秀邦、淺川栄一（地科研）、蛭田明宏、大川史郎、松本良（明治大学）

High-Resolution 3D Reflection Seismic Survey(SoundArray 3D) Off Joetsu, Niigata Prefecture, Japan

Shigeru Ino, Hidekuni Kikuchi, Eiichi Asakawa (JGI), Akihiro Hiruta, Shiro Ohkawa, Ryo Matsumoto (Meiji University)

Abstract: A high-resolution 3D seismic survey with short cables was carried out off Joetsu, Niigata Prefecture, using "SoundArray 3D (SA3D)" System developed by Sound Oceanics, Inc. This survey was conducted to delineate detailed gas chimney structures in which shallow methane hydrates deposit. Additionally 2D lines with a longer cable were also acquired for velocity analysis because SA3D with short cables is not suitable to have accurate velocity structure. The original data were heavily contaminated with swell and induction noises, etc., then a comprehensive noise suppression was applied to eliminate such noises. The footprint noises caused by variation of cable depth and other water column statics were also suppressed to enhance S/N ratio. Thanks to the elaborate processing, a high resolution 3D data volume was obtained and the data have been used to reveal the fine structure of the gas-chimneys and BSR in this region.

1. はじめに

明治大学は（株）地球科学総合研究所に委託して、日本海表層メタンハイドレート賦存海域において、米国 Sound Oceanics 社が開発した SoundArray 3D（以下 SA3D 略す）を用いて高分解能三次元反射法地震探査を実施した。

日本海において表層メタンハイドレートは海底面～深度約 150m といった地下浅部の堆積層の中に賦存することが確認されている。賦存域ではガスチムニーと呼ばれる構造が発達しているケースが多い。通常、堆積層の浅層調査には、kHz オーダーの音波を使って反射断面を得るサブボトムプロファイラー(SBP、Sub-bottom Profiler)を用いることが多い。しかし、ガスチムニー構造では、海底面直下に高速度物質であるハイドレートが堆積していて強い反射が発生し、ガスチムニー構造内への音波の伝播が妨げられることや、ガスチムニー構造内の速度不均質等のために、SBP では音波が散乱してしまい、ブランキング現象が発生して明瞭な反射波が得られず、ガスチムニー構造の内部を把握することができなかった。また、SBP では振源エネルギーが弱く 50m 以深の反射波を捕らえることは困難である。通常の石油探鉱仕様の三次元反射法地震探査も実施されているが、大型のエアガンを使うため、低周波の断面となり、高分解能な断面を得ることができていない。

そこで、高周波数帯域の音波を発生させる小型 GI ガンを使った高分解能三次元反射法地震探査を実施し、ガスチムニー構造の詳細な把握を行った。

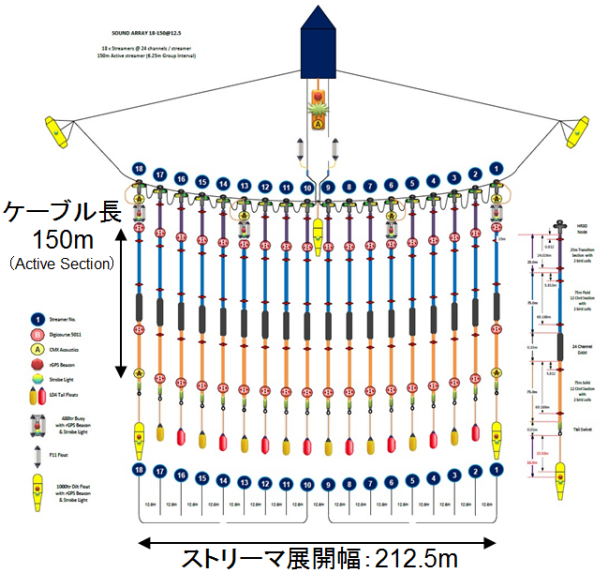


図 1　SA3D 観測システム構成図

2. データ取得

2-1 データ取得システム

今回使用した SA3D 観測システム(図 1)は 18 本のストリーマケーブルで構成されている。各ストリーマケーブルはエラスティックセクション(緩衝用)とアクティブセクション(受振器内蔵)で構成されており、アクティブセクションは長さ 150m、受振器間隔 6.25m、受振グループ数は 24ch である。受振された信号はデジタル化されて船上のデータ収録装置(図 2)へ転送される。海上３D 調査では風や潮流によりストリーマケーブルを測線に沿って直線的に曳航することは極めて難しく、ストリーマケーブルの曲がりを把握して高精度に各受振点位置とエアガンの発振位置をモニターすることが求められている。そのために航測装置は GPS を受信して自船の位置を表示する他に各ストリーマケーブルに装着している方位計付きのケーブル深度調整器によりケーブルの深度と方位をモニターしている。また、エアガンおよびストリーマケーブル(No.1, No.6, No.13, No.18)にはリファレンシャル GPS と音響測位装置が取付けつけられており発振点位置と受振点位置を高精度でモニターできる。これらのデータを複合的に処理することにより船上でリアルタイムに反射点分布を表示することが可能であるので、反射点の欠けている測線を補完する作業(インフィル)を適確に実施できる(図 3)。

2-2 データ取得作業

新潟県上越沖にて、以下の仕様でデータを取得した。

ストリーマケーブル長	150m
ストリーマケーブル本数	18
ストリーマケーブル間隔	12.5m
ストリーマケーブル深度	3m
チャンネル数	計 432ch (24ch x 18)
受振点間隔.	6.25m
発振間隔	6.25m
CMP ビンサイズ	3.125m x 6.25m
サンプル間隔	0.5msec
レコード長	3.1sec
振源	エアガン (GI Gun)
ガン容量	210cu.in.
空気圧	140 気圧(2,000psi)
エアガン深度	3m
スワス幅	112.5m/Sail Line
調査域面積	38.8 km^2 (2 箇所)

また、速度解析用に、1200m のケーブルを用いた 2D 測線データも 500m 間隔にて別途取得した。SA3D 現場作業風景を図 7 に示す。

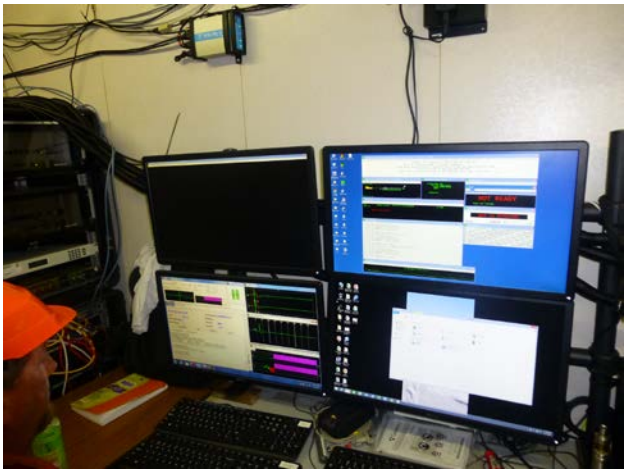


図 2　SA3D 船上データ収録装置

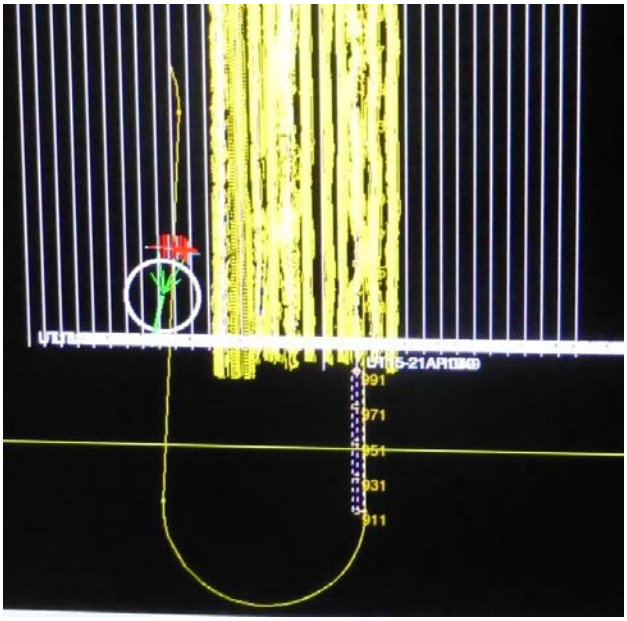


図 3　リアルタイム反射点分布表示

3. データ処理

本 SA3D 調査のデータ処理では、海底面直下の詳細構造を得ることを考慮して各処理を実施した。以下に本処理の特徴的な項目についてまとめる。

- 高精度の 3D ビンニング
  リファレンシャル GPS と音響測位装置から得られた受振点位置を用いることで、ストリーマケーブルの曲がりを考慮した 3D ビンニングを行った。
- 複合型ノイズ抑制処理
  取得された発震記録では、低周波数の波浪ノイズ、インダクションノイズ、線形ノイズなど様々な特徴のノイズが見られたため、これ

らのノイズ特性を考慮して、各種手法を複合的に組み合わせたノイズ抑制処理（複合型ノイズ抑制処理）を検討し適用した。図 4 が複合型ノイズ抑制処理の適用例であるが、ノイズ成分のみが効果的に抑制され、発振記録の品質が劇的に改善したことが分かる。

- 速度情報
  SA3D ではケーブル長 150m でデータ取得されており最大オフセットは高々 300m しかなく、本調査域では海底面も 1 秒以深と比較的深く、ムーブアウト量は海底面反射でも 10msec 程度しかないことから、SA3D の速度解析では十分な精度の速度を得ることは難しい。そのため、本処理では、SA3D 調査エリア内で同時期に 500m 間隔で別途取得された二次元測線(ケーブル長 1200m)で速度解析を実施し、得られた重合速度関数を空間的に内挿して SA3D データの処理に利用した。
- フットプリント抑制処理 SA3D データ処理の中間結果では時間スライス上にフットプリント（インライン方向の振幅のばらつきによる縞模様）が顕著に見られた。フットプリントはケーブル深度の変動や Water Column Statics（データ取得時期の違いに起因する各種の時間差）に起因すると考えられたため、これらを抑制する処理を適用した。

4. データ処理結果

以下では SA3D データ処理結果を示す。図 5 は、SA3D データと SBP データの比較である。SBP データは極めて高分解能であるが、上述したようにガスチムニー構造内部のブランキング現象によって、ガスチムニー構造の内部はほとんど確認できない。SA3D は分解能では SBP には劣るものの、ガスチムニー構造の内部が確認でき、ガスチムニー構造内の微細構造を知ることが可能である。

図 6 は SA3D の Chair-cut Display である。海底のマウンド構造では、海底面近傍の反射波に局所的な強振幅が見られ、表層メタンハイドレートの賦存が予想される。海底面下 200msec 付近に、海底面とは逆極性の顕著な反射波が見られるが、これは BSR（Bottom Simulating Reflector）と考えられる。本来、BSR は海底面反射波と平行に現れるが、ここでは海底面下～BSR 間に賦存するメタンハイドレートの高速度域に起因する走時の短縮によって、マウンド構造直下で反射波がプルアップを起こしていると考えられる。

5. 終わりに

SA3D によって高精度な 3D データを取得できたことから、ガスチムニー構造の三次元構造や海底面反射波の強振幅の空間分布、また BSR の詳細な形態を確認することができた。SA3D 結果はメタンハイドレート賦存状況やガスチムニー構造発達史などの把握に役立つものと期待される。

謝辞

本調査は、経済産業省のメタンハイドレート開発促進事業の一部として、産業技術総合研究所の再委託により明治大学が実施したものである。経済産業省、産業総合技術研究所には、本調査の成果の公表の許可をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

大川・他 (2016) 高分解能３次元地震探査によるガスチムニー構造内部の可視化、表層メタンハイドレート・フォーラム(講演要旨)、明治大学グローバルフロント

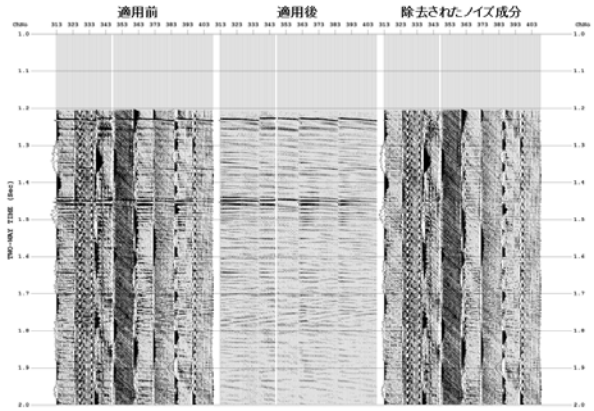


図 4　複合型ノイズ抑制処理適用前後の発震記録例

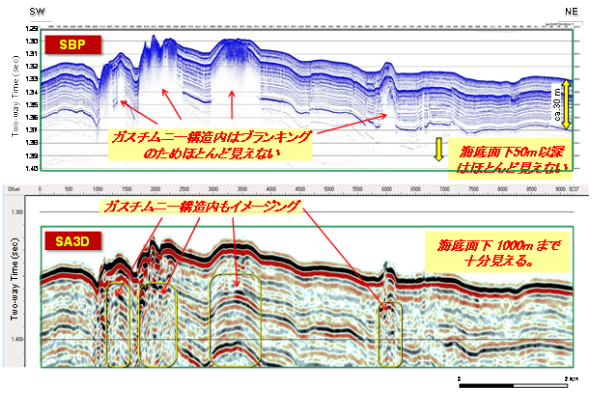


図 5　SA3D データ(下)と SBP(上)の比較
(表層ﾒﾀﾝﾊｲﾄﾞﾚｰﾄ・ﾌｫｰﾗﾑ 2016(参考文献)より抜粋)

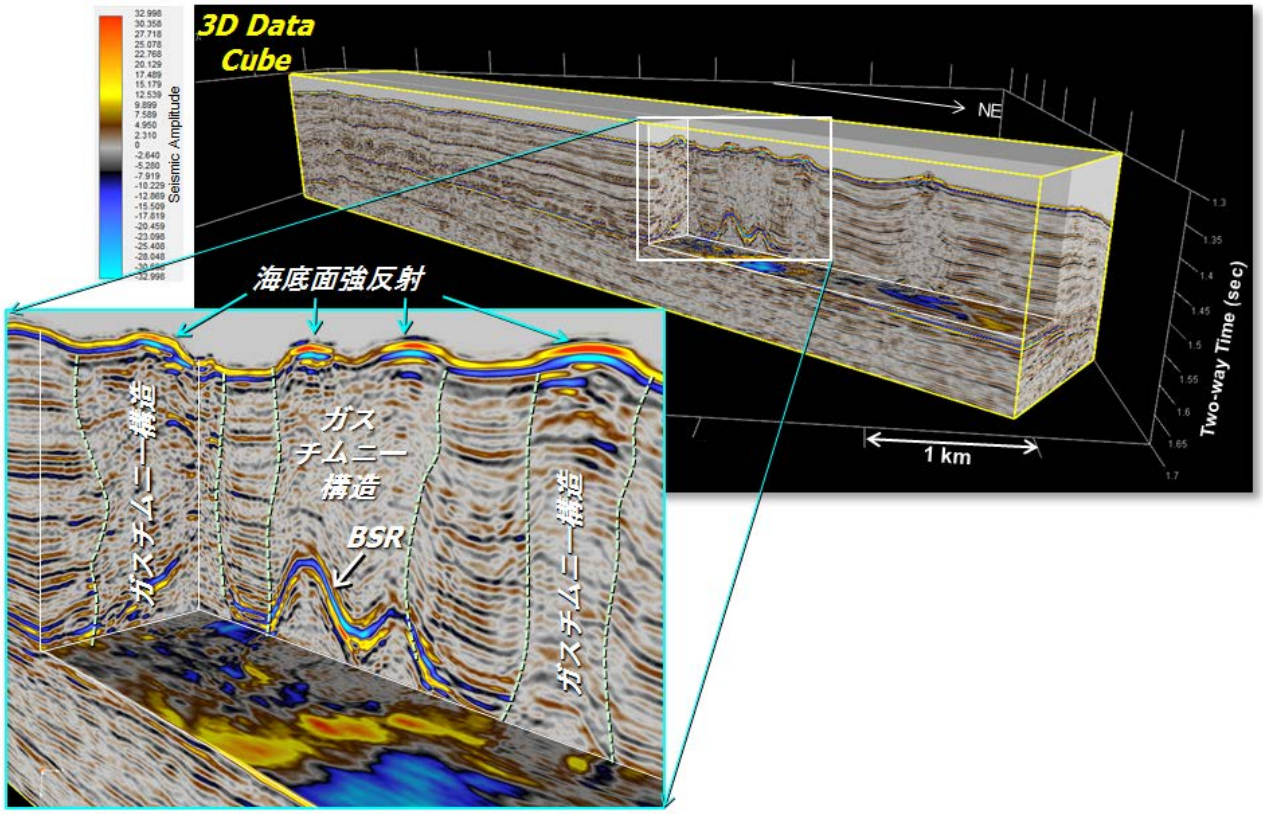


図 6　SA3D データの 3D 表示（Chair-cut Display）
表層メタンハイドレート・フォーラム 2016(参考文献)に加筆



図 7　SA3D 観測システム作業風景（船橋から後方を眺める）