日奈久断層帯海域部における超高分解能三次元地震探査（UHR3D）
― データ取得 ―

菊地秀邦*，須田茂幸（地科研），阿部信太郎（産総研）

Ultra-High-Resolution 3D(UHR3D) Seismic Survey in Hinagu Fault Zone, Yatsushiro Sea, Kyushu, Japan. -Data Acquisition-

Hidekuni Kikuchi* , Shigeyuki Suda (JGI), Shintaro Abe (AIST)

Abstract: To delineate the active fault distribution, an ultra-high resolution 3D (UHR3D) seismic survey which covers 1km x 2km was carried out in Hinagu Fault Zone, Yatsushiro Sea in February 2017. In this survey, four streamer cables of "Autonomous Cable System (ACS)" developed by JGI, Inc. and a boomer source were employed. To acquire high resolution data, the ACS cables were towed at very shallow depth less than 10 cm. Since the ACS does not require cumbersome electrical cablings between the recorder and the streamers, time and labor for deploying/retrieving of streamers can be remarkably reduced. High accuracy GPS navigation system with real-time binning capability also contributed to high maneuverability of the field operation.

1. はじめに

日奈久断層海域延長部では，これまで，様々な機関によって音波探査を主体とした海底活断層調査がなされてきた（例えば楮原･他, 2011）．2016 年に発生した熊本地震以降は，特に平成 28 年度の文科省による総合的な活断層調査の一環として，海上ボーリングや年代測定による活断層評価が進みつつある. 阿部･他（2017），須田・他 (2017)は，これらの調査の一例であるが，ここではその一手法である超高分解能三次元地震探査（UHR3D）について述べる.

従来の海底活断層調査では二次元測線を約 1km~2km 間隔の格子状に設定して実施されてきたが，格子状の二次元測線だけでは，測線間の断層の空間的なつながりは各測線での断層位置から推測するしかなく，横ずれ断層の変位量の推定も困難である．また，二次元地震探査では，側方への構造の傾斜が大きい場合，側方からの反射波があたかも測線直下の反射波であるかのごとく現れるので三次元構造の位置や形状を正確には表現できない問題もある.

本調査では，三次元地下構造を正しくイメージするとともに断層の走向および傾斜を空間的かつ詳細に把握するために，地科研が開発した独立型ストリーマケーブル（Autonomous Cable System : ACS），およびブーマー震源を用いた超高分解能三次元地震探査を実施した．本講演ではデータ取得手法について述べる.

2. データ取得概要

熊本県八代海の津奈木町沖海域(図１)において 2017 年 2 月 5 日から調整を含めて 6 日間にわたり超高分解能三次元地震探査(UHR3D)を実施した.

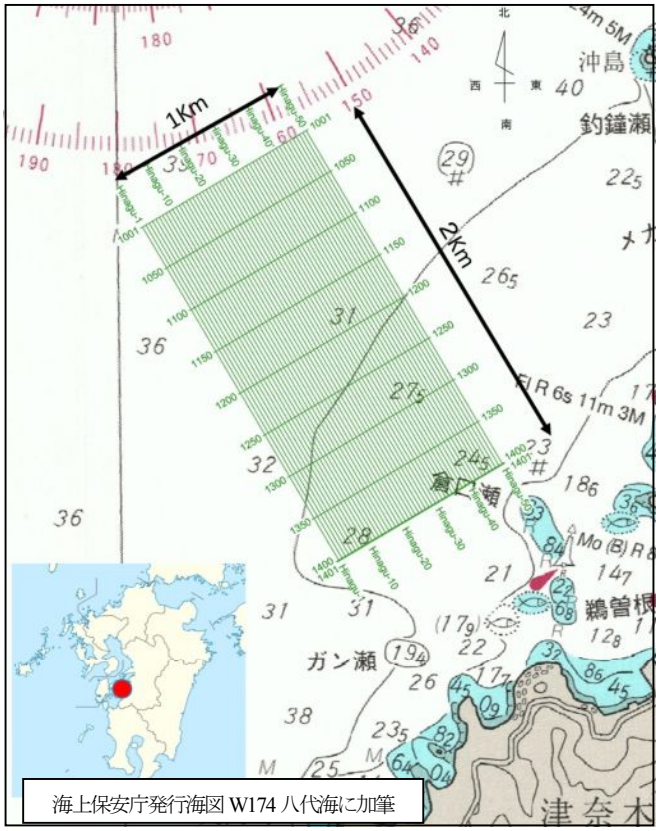


図１　調査海域図

調査海域は長さ 2km，幅 1km（2km²），水深は回頭範囲を含めて約 8m から約 40m であった．ACS を 4 本曳航し，ブーマーを震源とした 3D 観測を実施した．観測したセイルライン数は 50 本，補間測線（インフィル）は 10 本実施した．ストリーマケーブルを曳航した観測作業は日中に行い夜間は作業を実施していない．冬季の調査であったが海況は比較的に良好で荒天待機は発生しなかった．

3. 観測システムの構成

使用した観測システム (図 2) は観測船後部両弦にクレーンを設置して 4 本の ACS を 10m 間隔で曳航している．ACS は独立型収録装置 (図 3)とアクティブセクション (図 4, 受振器内蔵)で構成されている．アクティブセクションは長さ 80m，受振器間隔 5m，チャンネル数は 16ch である．受振された信号はデジタル化されて収録装置へ連続的に記録される．

高周波数成分を記録するために ACS にフロートを取り付けて浮力を調整して海面下 0.1m 以内を曳航し，震源は高周波成分を発生できるブーマーを用いた（図 9, 10）．

ACS は観測船とは単にロープのみで繋がっており，従来のストリーマケーブルのように信号線を船上の観測室に引き込む必要がないのでケーブル投入・揚収のハンドリングは容易である．その効果は曳航するケーブル本数が増えるほど顕著になる．今回の作業では 4 本のケーブルを投入するのに約 15 分，揚収に要した時間は約 10 分と極めて短時間であった．

航測装置として ION Concept 社の ORCA を使用した（図 5）．ORCA は GPS を受信して自船の位置を表示する他に震源と各ストリーマケーブルのテールブイに装着している相対型 GPS(relative GPS ： rGPS)により発振点位置と受振点位置を高精度にモニターすることにより，リアルタイムに反射点分布を計算して表示することができる（図 6，7）．これにより，均一な重合数となるようなインフィルの策定が容易となる．

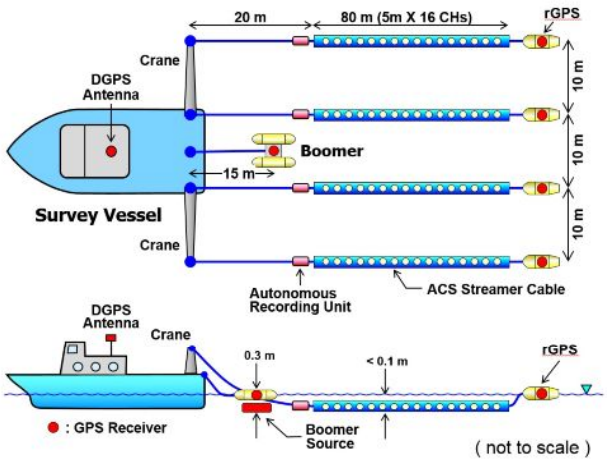


図 2　観測システム構成



図 3　ACS の独立型収録装置

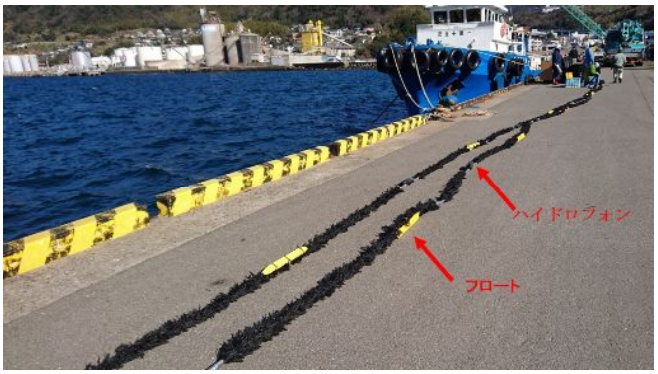


図 4　岸壁で準備中の ACS アクティブセクション



図 5　観測室内風景・航測機器 ORCA

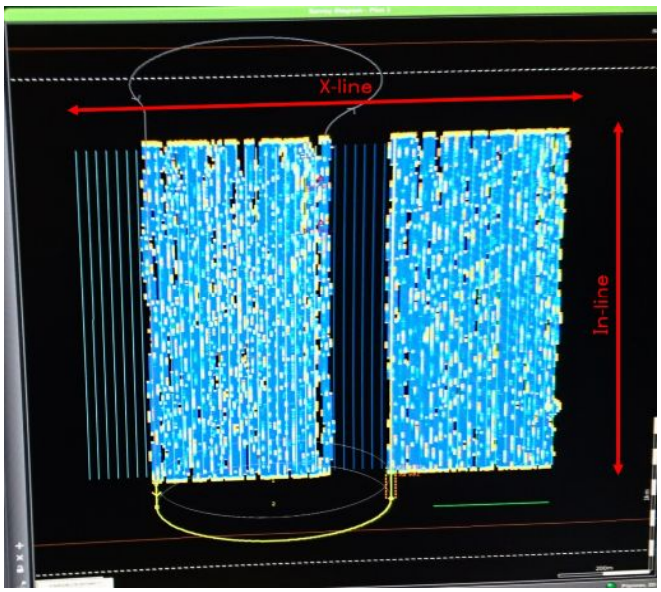


図 6　航測装置 ORCA の画像例
観測 3 日目時点の反射点分布

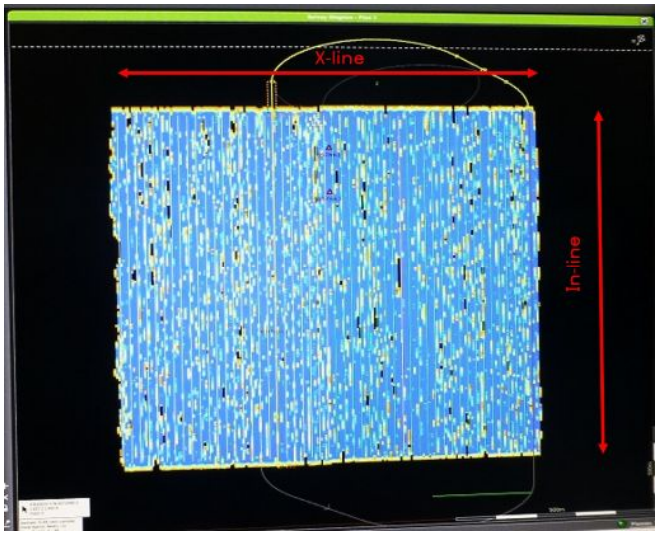


図 7　航測装置 ORCA の画像例
観測最終日の反射点分布

4. データ取得仕様

観測船	第十英祥丸 188 トン
ストリーマケーブル数	4 本
ストリーマケーブル間隔	10.0m
ストリーマケーブル深度	0.1m
チャンネル数	16ch×4
発振点間隔	5.0m
ビンサイズ (InLine×XLine)	2.5m×5.0m
サンプル間隔	0.1msec
記録長	0.4sec*
震源/エネルギー	ブーマー/300J
震源深度	0.3m
スワス幅	20m/Sail Line

*記録は連続記録，切り出し作業で記録長を指定

5. ACS データの切り出し

ACS の特徴として，システムを起動してから連続してデータを内部に記録している．観測作業終了後に震源の発振時刻に合わせて収録装置からデータを切り出す作業が必要となる．切り出し作業は自動化されており，船上での QC 目的としてのショット記録を短時間で確認することができる（図 8）．

本調査のデータ処理に関しては別途講演予稿を参照されたい．

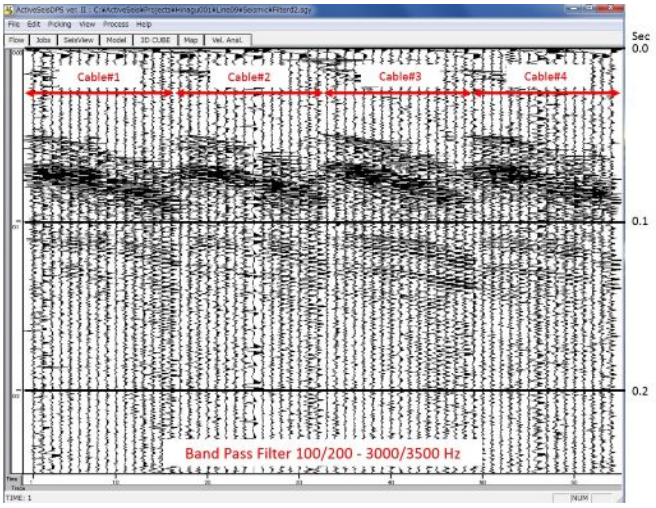


図 8　切り出したショット記録例

6. おわりに

今回の三次元調査は極浅層を対象としていることからストリーマケーブルを海面付近で曳航して，震源にブーマーを用いた．従来の海底下約 1 km をターゲットとする 高分解能三次元地震探査システム（HR3D，例えば猪野・他，2016）と比較しても，さらに高分解能（3kHz に達する高周波数成分）な三次元データを取得することができた．HR3D に比べさらに小型･軽量な機器を用いるため，より機動性に富むオペレーションが可能である．

また，小規模な三次元調査であっても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難しく，正確に地下構造を把握するにはリアルタイムに反射点分布を表示できる航測システムは必須である．

海面付近を曳航すると僅かな波浪でも受振器の位置が上下に変動するためにデータ処理の精度に影響を与える．今後は音響測位によるハードウェア的な位置測定およびソフトウェアによる補正が課題である．

参考文献

椿原京子・他(2011) : 布田川・日奈久断層帯海域部における高分解能マルチチャンネル音波探査, 活断層・古地震研究報告, No.11, p.273-294, 2011.

猪野滋・他(2016) : 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,物理探査学会第 135 回学術講演階論文集, 117-120

阿部信太郎・他(2017) : 日奈久断層海域延長部における海底活断層調査－海上ボーリングと高分解能マルチチャンネル音波探査に基づく活動性評価－, 日本地震学会 2017 年秋季大会予稿集（準備中）

須田茂幸・他(2017) : 日奈久断層海域延長部における海底活断層調査－超高分解能三次元探査による断層性状の把握－, 日本地震学会 2017 年秋季大会予稿集（準備中）



図 9　観測船観測風景（天草を背景に陸上から撮影）

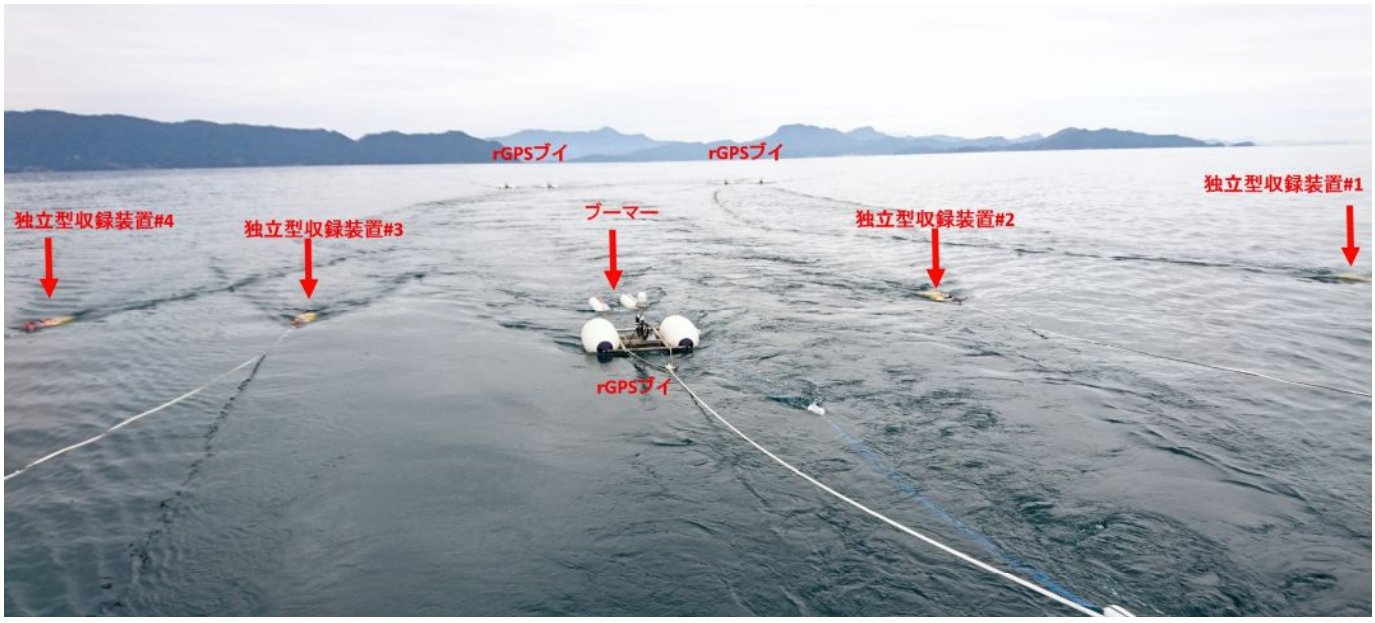


図 10　ACS 曳航状況（観測船の船尾から撮影）

日奈久断層帯海域部における超高分解能三次元地震探査（UHR3D）
― データ処理 ―

猪野滋*，須田茂幸，菊地秀邦，大川史郎（地科研），
阿部信太郎，大上隆史，八木雅俊，岡村行信（産総研）

Ultra-High-Resolution 3D(UHR3D) Seismic Survey in Hinagu Fault Zone, Yatsushiro Sea, Kyushu, Japan. - Data Processing-

Shigeru Ino*, Shigeyuki Suda, Hidekuni Kikuchi, Shiro Ohkawa(JGI),
Shintaro Abe, Takashi Ogami, Masatoshi Yagi, Yukinobu Okamura (AIST)

Abstract: An ultra-high resolution 3D (UHR3D) seismic survey was carried out in Hinagu Fault Zone, Yatsushiro Sea, Kyushu, Japan, using "Autonomous Cable System (ACS)" developed by JGI, Inc. with a boomer source. This survey was conducted to delineate the detailed active fault distribution and its activities in this area. The original field data were heavily contaminated with various environmental noises, amplified by very shallow cable acquisition, then a comprehensive noise suppression was applied to eliminate such noises. The footprint noises caused by various type of water column statics, such as tidal changes and cable depth variations, were also suppressed to improve reflection images. Thanks to the elaborate processing, a high resolution 3D data volume was successfully obtained. This result demonstrates the feasibility of UHR3D in precise delineation of the subsurface active fault system in this region.

1. はじめに

日奈久断層海域延長部では，これまで，様々な機関によって音波探査を主体とした海底活断層調査がなされてきた(例えば楮原･他，2011)．2016 年に発生した熊本地震以降は，特に平成 28 年度の文科省による総合的な活断層調査の一環として，海上ボーリングや年代測定による活断層評価が進みつつある．阿部･他(2017)，須田・他(2017)は，これらの調査の一例であるが，ここではその一手法である超高分解能三次元地震探査（UHR3D）について述べる．

従来の海底活断層調査では二次元測線を約 1km~2km 間隔の格子状に設定して実施されてきたが，格子状の二次元測線だけでは，測線間の断層の空間的なつながりは各測線での断層位置から推測するしかなく，横ずれ断層の変位量の推定も困難である．また，二次元地震探査では，側方への構造の傾斜が大きい場合，側方からの反射波があたかも測線直下の反射波であるかのごとく現れるので三次元構造の位置や形状を正確には表現できない問題もある．

本調査では，三次元地下構造を正しくイメージするとともに断層の走向および傾斜を空間的かつ詳細に把握するために，地科研が開発した独立型ストリーマケーブル（Autonomous Cable System：ACS），およびブーマー震源を用いた超高分解能三次元地震探査を実施した．本講演では，本調査で得られた三次元データに対して実施されたデータ処理について述べる．

2. データ取得

データ取得は，図 1 に示す 2km×1km の調査域で行われた．データ取得に関する詳細は，データ取得に関

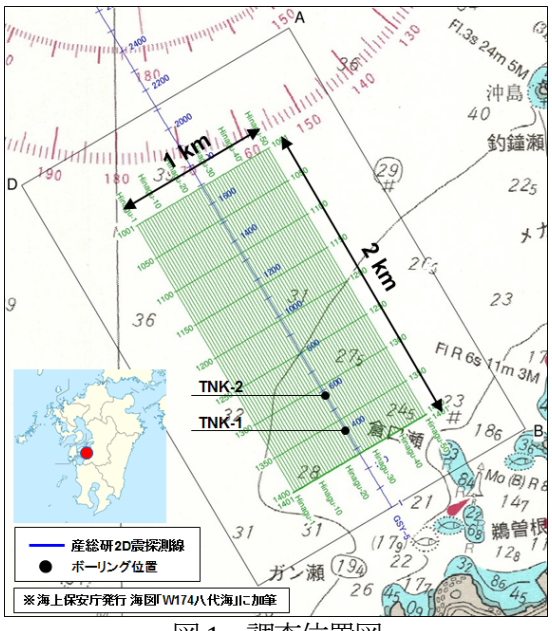


図 1　調査位置図

する講演予稿を参照されたい．データ処理に関係するデータ取得仕様を以下にまとめる．

ストリーマケーブル数	4 本
ストリーマケーブル間隔	10.0m
ストリーマケーブル深度	0.1m
チャンネル数	16ch×4
受振点間隔.	5.0m
発振間隔	5.0m
ビンサイズ（InLine×XLine）	2.5m×5.0m
サンプル間隔	0.1msec
レコード長	0.4sec

3. データ処理

本調査のデータ処理では，超高分解能データを用いて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．

- 複合型ノイズ抑制処理
  本調査では高周波数成分を確保する目的でケーブル深度は非常に浅く設定されたため，環境ノイズの影響を強く受けており，様々な特徴のノイズが見られたことから，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 2 は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．
- 速度解析
  本調査ではケーブル長 80m でデータ取得されており最大オフセットは高々90m しかないため，水深は 25~40m と比較的浅いものの，ムーブアウト量は最大 25msec 程度しかない．しかし，高分解能調査であるため反射波の周波数は最大 3kHz にも達しており，速度解析では海底面下 100msec までは十分な精度の重合速度を得ることが可能であった．
- フットプリント抑制処理
  本処理の中間結果ではフットプリント（振幅や時間のばらつきによる，インライン方向の縞模様）が顕著に見られた．フットプリントは，潮汐の影響や Water Column Statics（データ取得時期の違いに起因する各種の時間差），ケーブル深度の不規則な変化，不均一な反射点分布，海底面近傍の局所的な反射異常等に起因すると考えられたため，これらを総合的に抑制する処理を適用した．このようなフットプリントは，分解能が向上するほど顕著に現れるため，高分解能探査では重要な処理項目であり，注意深い処理が必要である．例えば対象海域では潮汐変化が大きいため，潮汐補正では対象海域の潮位を反映した GPS 標高値（高精度測位システムを利用）を用いた．図 3 にフットプリント抑制処理適用前後のクロスライン方向の重合記録例を示す．フットプリント抑制前に見られた海底面反射波の段差やうねりが，抑制処理により解消され，イメージが劇的に改善されたことが分かる．

以下ではデータ処理結果を示す．

図 4 および図 5 は UHR3D のマイグレーション結果の鳥瞰図およびタイムスライスの一例である．調査域の南側で明瞭な断層が認められるものの，その走向はこれまで予想されていた方向（楮原・他, 2011）とは異なり，直線上ではなく雁行状になっていることが判明した．北側に認められる断層についても，従来考えられている走向とは異なっている(図 5 参照)．図 6 は北側の断層に沿って見られるチャネル構造を示したものであるが，過去の堆積環境が明瞭に確認できる．

正確な断層走向の解明や，過去の堆積環境を示すチャネル構造のような地質現象の視覚化は，二次元地震探査では困難であり，三次元地震探査により可能となったものである．

4. おわりに

本調査の UHR3D では，探査深度は海底面下約 300m 程度までであるが，既往の高分解能三次元地震探査（HR3D，探査深度は海底面下約 1km まで，例えば猪野・他，2016）に比較しても，さらに高分解能なデータ（3kHz に達する高周波数成分）を取得することが可能である．UHR3D によって高精度な三次元データを取得できたことで，断層分布や地質構造，地層分布を空間的に把握することができた．UHR3D 探査は活断層調査に極めて有益な手法であり，詳細な断層分布や地質構造，構造発達史等の解明に役立つものと期待される．とりわけ，トレンチ調査が極めて困難である海域部での横ずれ断層の調査において，UHR3D 探査が非常に有効的な手段となるであろう．

参考文献

椿原京子・他(2011)：布田川・日奈久断層帯海域部における高分解能マルチチャンネル音波探査, 活断層・古地震研究報告，No.11，p.273-294，2011

猪野滋・他(2016)：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，物理探査学会第 135 回学術講演会論文集，117-120

阿部信太郎・他(2017)：日奈久断層海域延長部における海底活断層調査－海上ボーリングと高分解能マルチチャンネル音波探査に基づく活動性評価－，日本地震学会 2017 年秋季大会予稿集（準備中）

須田茂幸・他(2017)：日奈久断層海域延長部における海底活断層調査－超高分解能三次元探査による断層性状の把握－，日本地震学会 2017 年秋季大会予稿集（準備中）

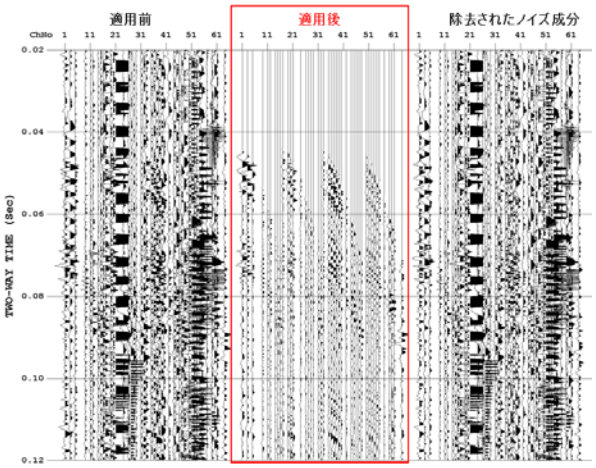


図 2　複合型ノイズ抑制処理適用前後の発振記録例

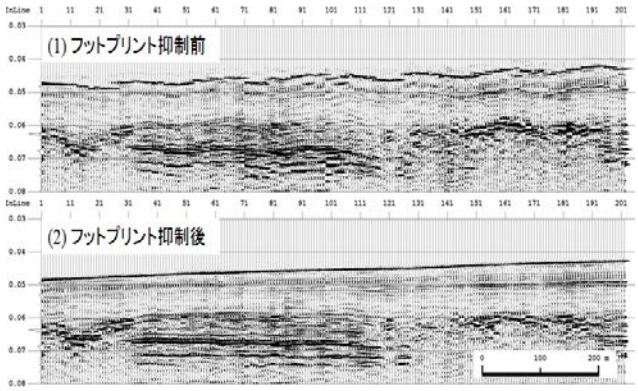


図 3　フットプリント抑制処理適用前後の比較
（クロスライン重合記録例）

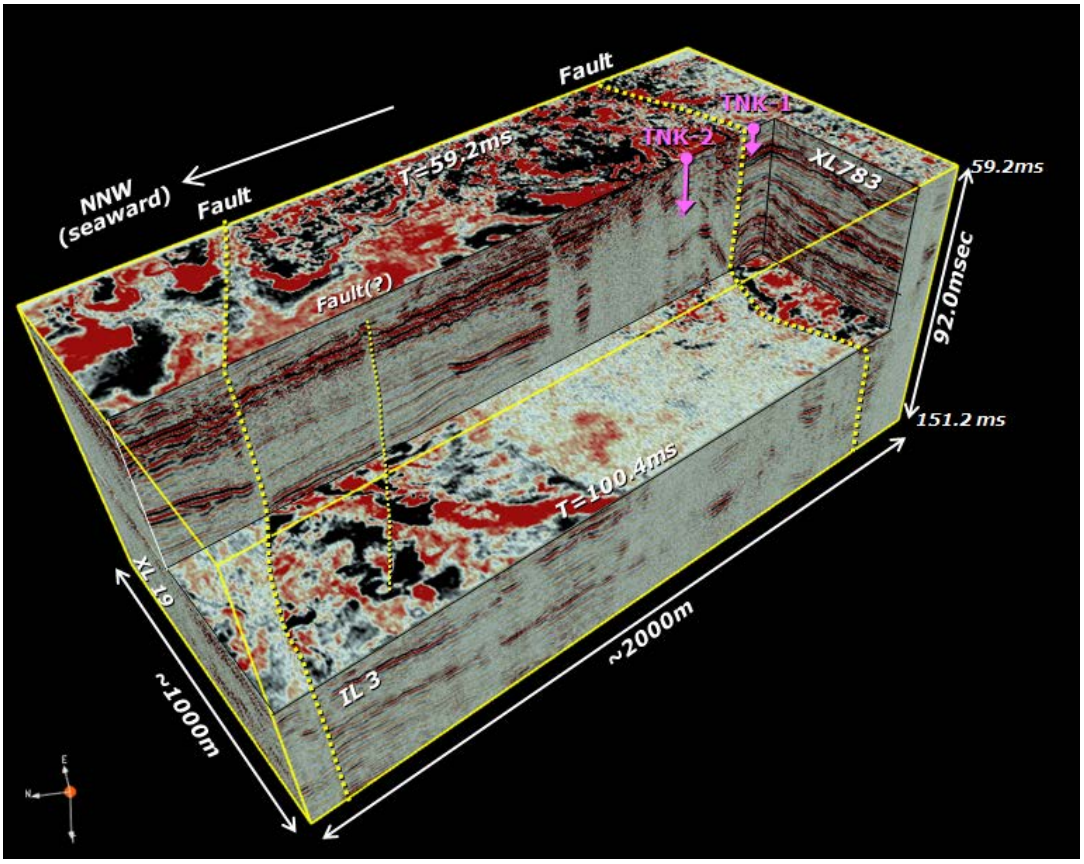


図 4　マイグレーション結果鳥瞰図例

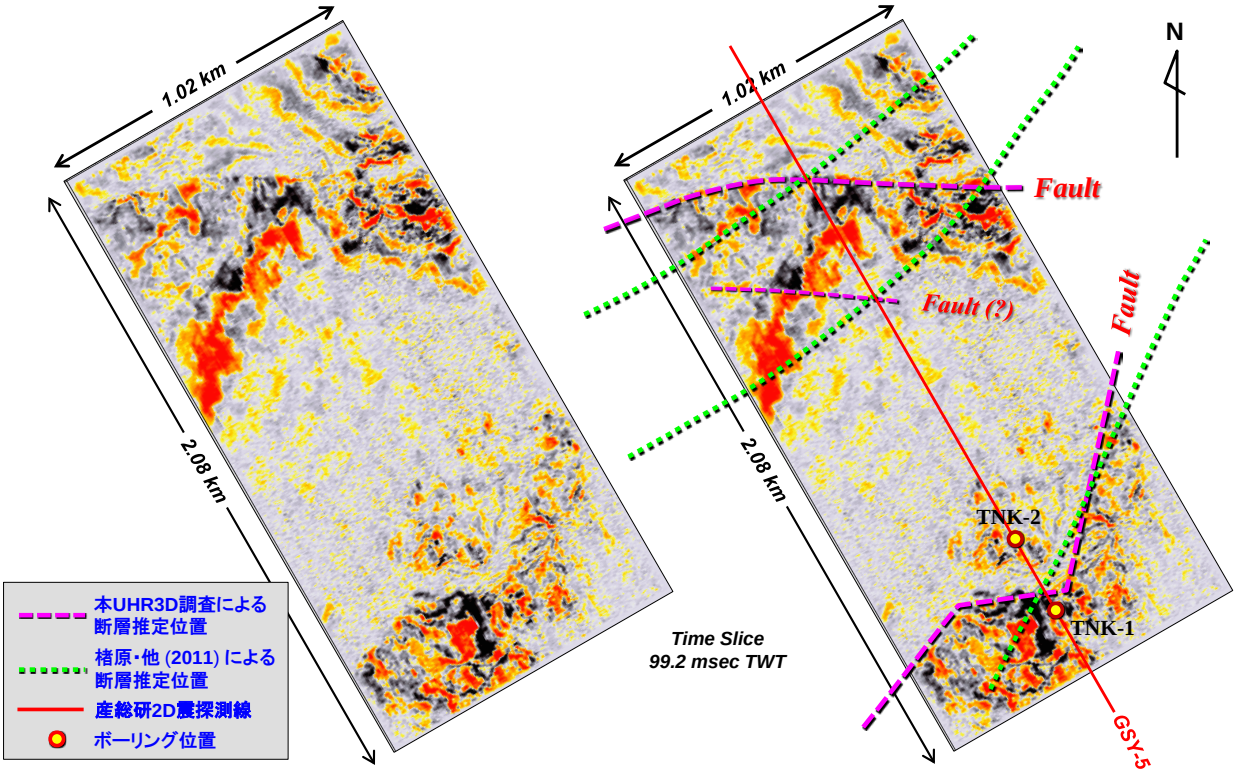


図５　タイムスライス表示例（左：解釈前，右：解釈後）

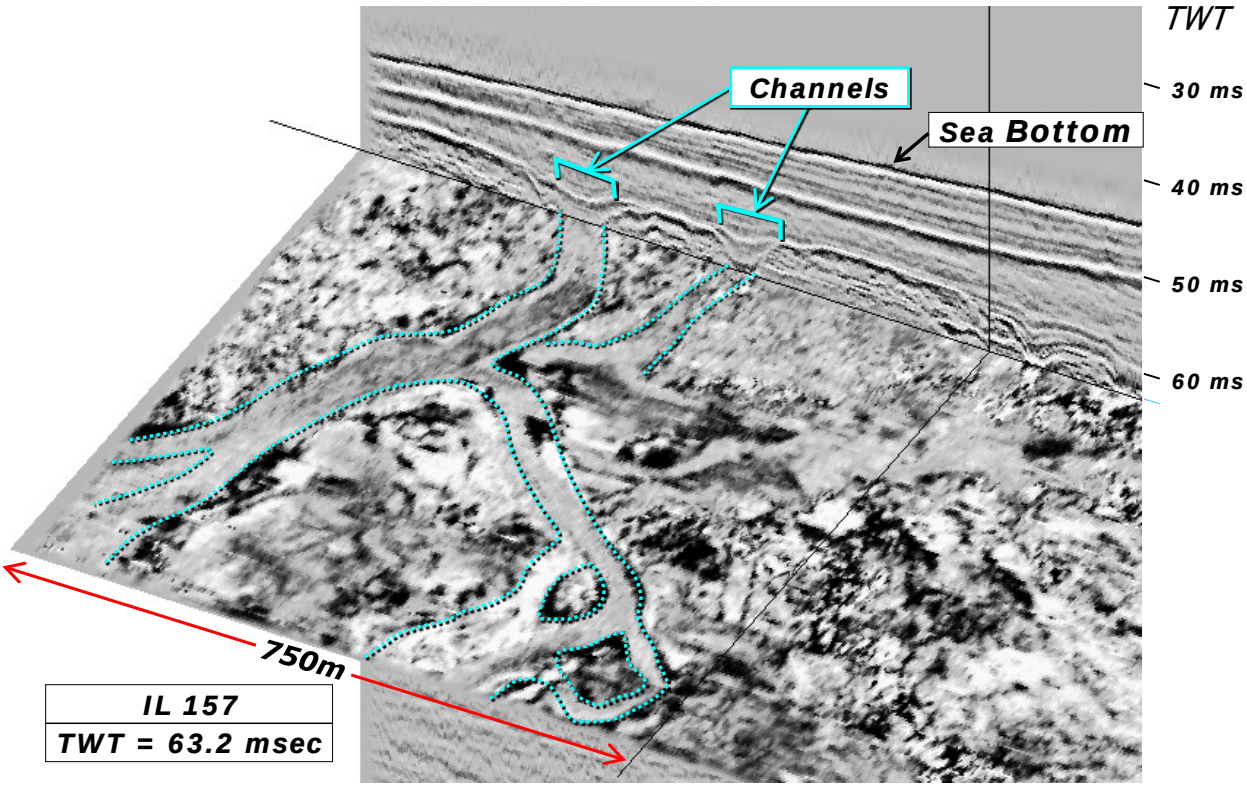


図６　三次元探査結果で明らかになったチャネル構造