

3. 2. 3 沿岸海域および海陸統合構造調査

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31年度
 - 8) 平成32年度
- (e) 平成27年度業務目的

(2) 平成27年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法と成果
 - 1) 調査地域の地質概要
 - 2) データ取得
 - 3) データ解析
 - 4) 地質学的解釈
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成28年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
	教授	岩崎 貴哉
	助教	石山 達也
	助教	蔵下 英司
	特任研究員	加藤 直子
	特任研究員	Claringbould, Johan S.
	技術職員	田中 伸一
	技術専門職員	宮川 幸治
	技術職員	田上 貴代子
	技術専門職員	辻 浩
	技術職員	渡辺 茂
	技術職員	坂 守
	技術職員	安藤 美和子
岩手大学工学部	准教授	越谷 信
愛知教育大学	教授	戸田 茂
新潟大学理学部	教授	豊島 剛志
	講師	小林 健太

(c) 業務の目的

震源断層・津波の波源断層の位置と形状を明らかにするために、北海道から九州北部にいたる日本海沿岸地域において、マルチチャンネル反射法地震探査を行う。また、海陸統合構造調査を行い日本海～陸域にいたる複雑な海陸接合部を含む基本的な地殻構造を明らかにし、津波波源モデル・震源断層モデルの高度化のための基礎資料を得る（図 1）。

(d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成25年度：

中越～上越、富山トラフ、能登半島沖、金沢沖の二船式による反射法地震探査、富山トラフ海陸統合反射法地震探査を海域 715 km、陸域 15 km の区間で実施した。計 10 測線において、海底活断層の深部形状の推定に資する基礎資料が収集できた。また、富山トラフの地殻構造が明らかになった。

2) 平成26年度：

福井沖～鳥取沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。堆積盆地の構造も含めた総合的な検討により、断層の再活動過程についての情報が得られた。海陸統合調査は、能登半島西方の羽咋沖海域から砺波平野を経て富山平野西端にいたる領域「かほく-砺波測線」で実施した。海陸統合反射法地震探査では、羽咋沖から砺波平野、富山平野西部を構成する堆積盆地の基本的な形状と断層の深部形状が明らかになった。

3) 平成27年度：

山口～北九州沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。海陸統合測線は、南丹市美山町静原から、若狭湾に至る約80 kmの陸上及び海域区間からなり、既存の新宮-舞鶴測線と連続させ、島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するための基礎データを取得した。これらの反射法地震探査の結果、断層モデル構築の基礎となる活断層とその形状が明らかになった。

4) 平成28年度：

島根県沿岸から対馬海盆南部において、震源断層の形状把握を目的として反射法地震探査を行う。島根半島を横断する測線で海陸統合反射法地震探査を実施し、宍道褶曲帯と呼ばれる背弧変形帯の地殻構造の特性を明らかにする。

5) 平成29年度：

北海道北稚内沖から石狩湾にいたる沿岸海域において、反射法地震探査を行う。石狩低地帯東方の馬追丘陵から積丹半島北方を経て日本海盆にいたる420 kmの測線で海陸統合反射法地震探査を行う。この測線では、札幌市街地に伏在する可能性の高い活断層を通過する他、日本海盆までの複数の活動性の高い活断層を横断する。

6) 平成30年度：

積丹半島から松前半島に至る沿岸海域において、反射法地震探査を行う。下北半島から津軽海峡を経て日本海盆にいたる450 kmの測線で海陸統合反射法地震探査を行う。この測線では、下北半島西縁に推定される断層の他、日本海盆までの複数の活動性の高い活断層を横断する。

7) 平成31年度：

津軽海峡～村上沖に至る沿岸海域において、反射法地震探査を行う。出羽丘陵から庄内平野、大和碓にいたる550 kmの測線で海陸統合地殻構造調査を実施する。この測線では、庄内平野東縁断層帯の他、大和海盆地に至る間の多数の活断層を横断する。

8) 平成32年度：

データのとりまとめを行う。とくに、データ解析手法などに大きな進展があった場合には、初期のデータの再解析等を行い、均質なデータとして利用可能にする。

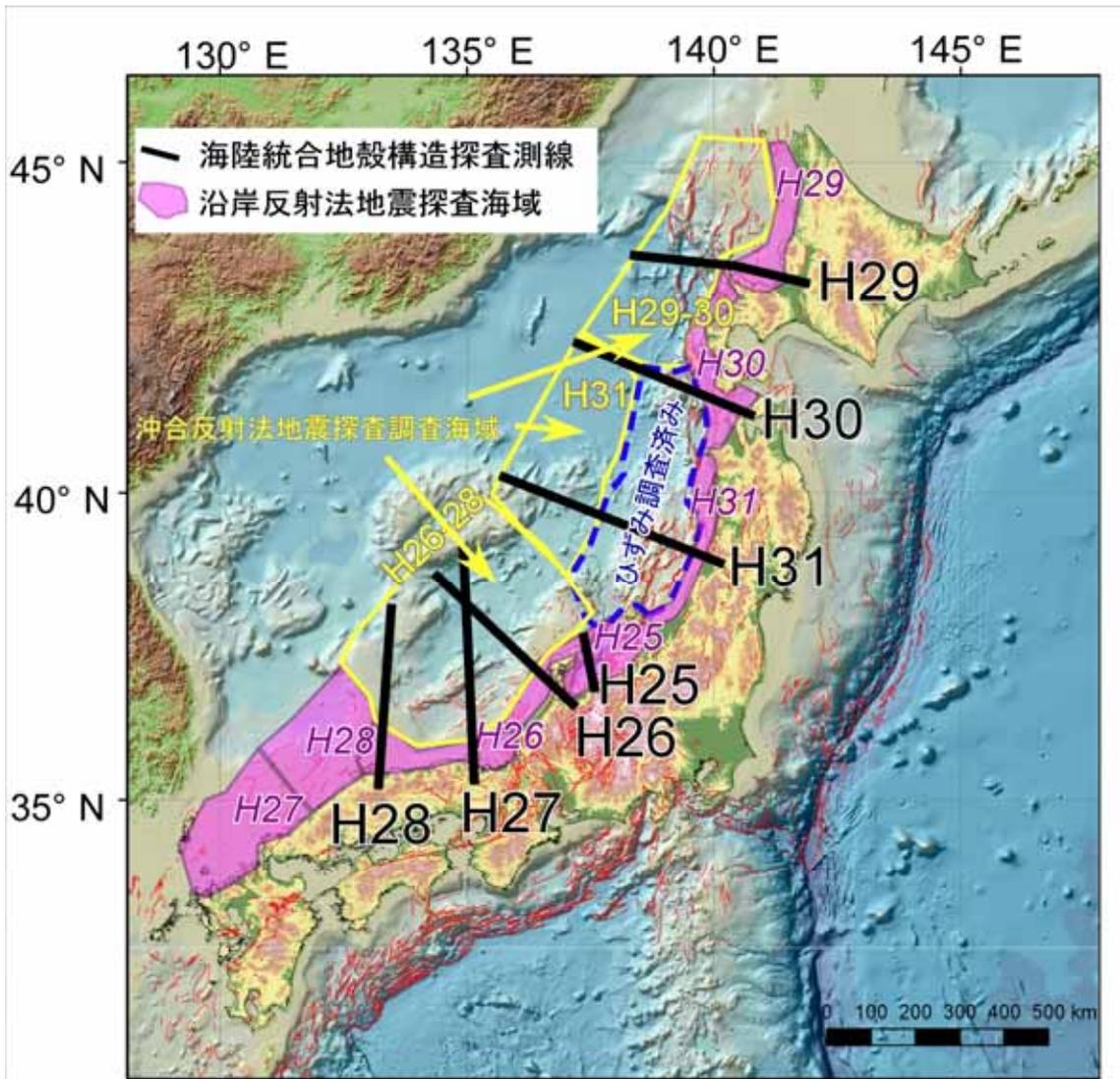


図1 日本海地震津波プロジェクトにおける制御震源を用いた構造探査地域。
Hは平成の省略。活断層は日本列島の地質編集委員会編(1996)¹⁾による。

(e) 平成27年度業務目的

震源・津波波源断層の形状把握を目的として、山口～北九州沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施する。活断層の深部形状の他、島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するために、南丹市美山町静原から、若狭湾に至る約80kmの陸上および海域区間において、海陸統合地殻構造調査を行う。この測線は既存の新宮-舞鶴測線⁷⁾に接続し、日本海側に延長した測線を構成する。

(2) 平成27年度の成果

(a) 業務の要約

震源・津波波源断層の位置と形状を明らかにするために、山口～北九州沖の沿岸海域において、計5測線、海域675kmの区間で、地殻構造調査を実施した。反射法地震探査は、

長さ 4 km のストリーマケーブルを曳航し、1950 立方インチのエアガン発震によって、データを取得した。本海域は古第三系の堆積盆地を覆って、日本海拡大に伴う堆積盆地が形成された。この新第三系の堆積盆地は、北北東-南南西方向の横ずれ断層運動を伴って形成され、中新世後期には北西-南東及び南北方向を短縮軸とする変形を受けた。第四紀後期の断層は、山口沖では北北西-南南東方向、対馬周辺海域では北東-南西走向で中～高角度の傾斜を示す。

海陸統合調査は、南丹市美山町静原から、若狭湾に至る約 80 km の陸上および海域区間において、海陸統合地殻構造探査を行った。この探査によって 2006 年に実施した文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトにおいて得られた新宮-舞鶴間の島弧断面を海域に延長し、前弧域から背弧にいたる連続的な構造断面を得た。また、舞鶴測線では、断層モデル構築に有効な基礎データが得られた。

(b)業務の実施方法と成果

1) 調査地域の地質概要

調査地域は、山口沖から北九州沖にいたる対馬海域と、海陸統合探査を行った若狭湾から舞鶴に至る地域である（図 2）。初期中新世の日本海の形成に伴う地殻変動によって西南日本は時計回りに回転した。回転の極が北九州沖に位置したために、本地域の地質構造は中国・北陸沖とは異なる特徴を有している（酒井、1993）²⁾。本海域については、1968 年から資源探査を目的として、反射法地震探査をはじめとして 5 本での掘削が実施され、それらの成果の一部が公表されている（南、1979; 相場・関谷、1979）³⁾⁴⁾。また、1970 年代に水路部によるシングルチャンネルの音波探査が実施され、その成果は桂（1992）⁵⁾によって取りまとめられている。山口沖から北九州沖の海底活断層については、北西-南東もしくは北北西-南南東走向の断層の分布が知られている（日本海における大規模地震に関する調査検討会（日本海検討会）、2014）⁶⁾。



図 2 調査測線概略図

2) データ取得

海陸統合測線を含めた計 6 測線で、地殻構造調査を実施した(図 2)。沿岸域の海上反射法地震探査は、東側が山口県萩市北西沖、西側が長崎県五島列島北西海域にわたる地域で実施した。海陸統合地殻構造調査として、探査測線を京都府舞鶴市沖合の若狭湾地域に設定し、海上エアガン発震を行い、陸域にも受振点を設置して、海陸統合反射法地震探査を実施した。

a) 山口-北九州沖沿岸海域調査

i) 調査測線

本調査では、山口県萩市北西沖海域から北九州沖を経て、五島列島北西沖海域に至る、総計約 675 km の海上反射法地震探査を実施した(図 3)。以下の計 5 測線から構成される。

- ・ YK-1 長崎県五島列島北西沖海域: 測線長 58 km
- ・ YK-2 長崎県平戸島北西沖海域: 測線長 80 km
- ・ YK-3 福岡県北九州北西沖海域: 測線長 107 km
- ・ YK-4 山口県長門-下関北西沖海域: 測線長 80 km
- ・ YK-A 山口県萩市北西沖-五島列島北西沖海域: 測線長 350 km

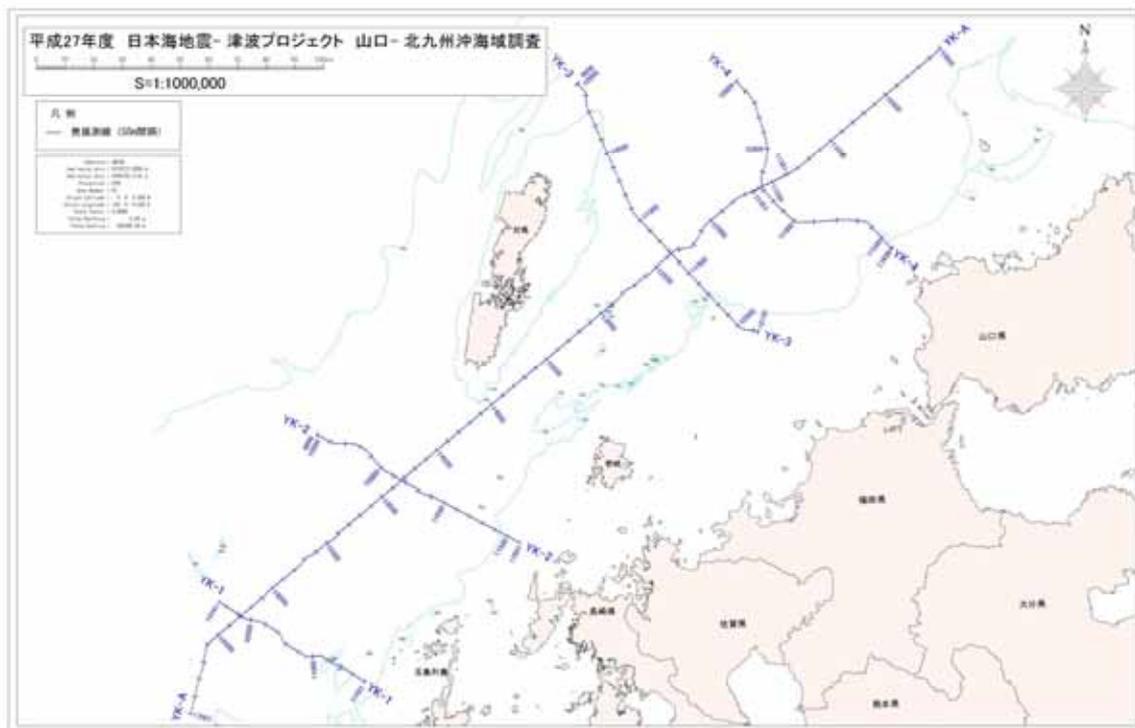


図 3 調査測線位置図 [山口-北九州沿岸測線]

国土交通省行政区域データ・海上保安庁水深線データを使用

ii) 海上反射法地震探査

本調査では、平成 27 年 7 月 31 日から同年 8 月 9 日まで山口-北九州沿岸の測線で、2 交代による 24 時間体制にてデータを取得した。深部地殻構造の抽出に足るオフセット距離

を確保するため、全長約 4000 m のストリーマーケーブルを使用した。エアガンアレイの総容量は、1950 cu. in. である。エアガンアレイの構成図を図 4 に、ストリーマーケーブル・エアガン配置図を図 5 に示す。観測船の位置は、小型航行システム (CHiPS2) により管理され、観測船が予定発震位置に達すると有線によって発震信号が伝達される。同時に、観測室内の探鉱機に対して TB (time break) 信号が有線にて伝達され、データ収録が開始される。また、警戒船が観測船の前後に就き、航行船舶や漁具の警戒作業を行った。

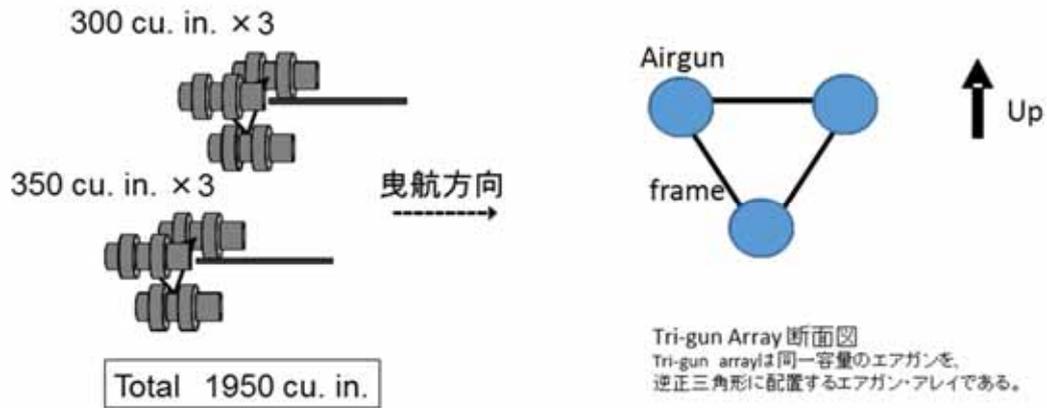


図 4 エアガンアレイ構成図 (1950 cu. in.)

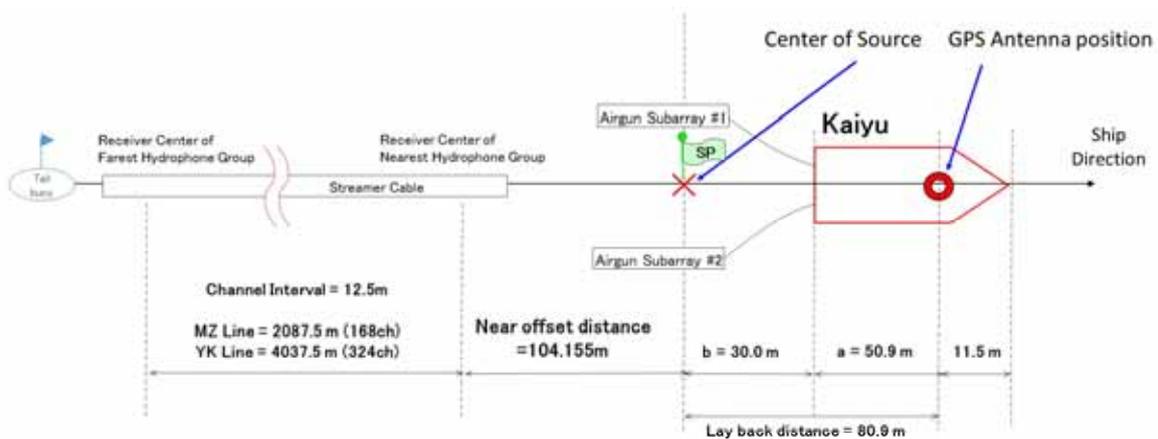


図 5 ストリーマーケーブル・エアガン配置図

活発な漁業活動のために、しばしば予定測線から回避しつつ観測を行うことになり、予定測線から離れた観測測線で調査を行った箇所がある。また、対馬海流による影響も受け、日々変化する潮流によりストリーマーケーブルの曲がり複雑に変化する場合が多かった。

iii) 調査仕様

発震系仕様(海上エアガン発震)

- ・ 震源 エアガンアレイ (1950 cu.in.)
Bolt1500LLTri-Gun
- ・ 発震点間隔 50 m
- ・ 発震深度 標準 6.0 m
- ・ エアガン容量 1950 cu.in
- ・ エアガン圧力 2000 psi

受振系仕様

- ・ 受振器 ハイドロフォン
SEAL デジタルストリーマケーブル
- ・ チャンネル数 324 チャンネル
- ・ 受振点間隔 12.5 m
- ・ ケーブル曳航長 4050 m
- ・ ケーブル深度 6.0 m
- ・ 受振点数 168 点

記録系仕様

- ・ 探鉱機 24 ビット A/D によるデジタルテレメトリ型
SEAL デジタルストリーマ探鉱機
- ・ サンプル間隔 2 ms
- ・ 記録長 10 s
- ・ プリアンプゲイン 0 dB

測量仕様

DGPS による航測システムを用いて発震点及び観測船位置を決定



図 6 観測船(かいゆう、左)とストリーマケーブル (右)。

iv) 観測記録

全域を通じ、総じて記録品質の良いデータが取得されている。その中で、各測線で共通して見られたノイズ要因が主に3点あった。

・多重反射ノイズ (図7)

これは水深の浅い場所で顕著に確認され、場所によっては直達波の確認が困難となるほど強くなる場合もあった。海底面及び海底面下の浅部における反射面の反射係数が大きく、地下深部へ達する発震エネルギーは大きく減衰してしまっている可能性があるため、データ解析の際にはこの点に十分注意しパラメータ検討を行った。

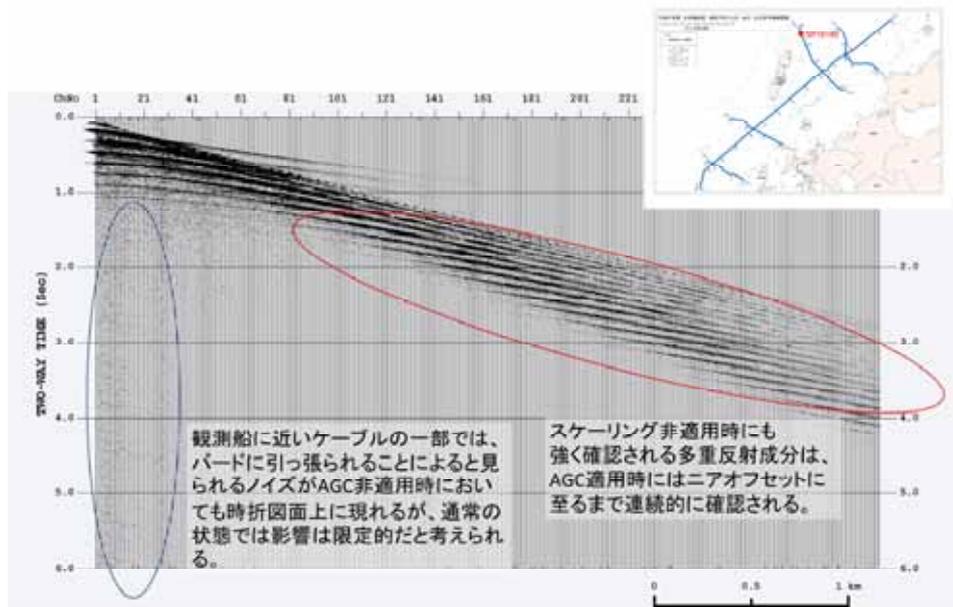


図7 発震記録中の典型的ノイズ例 多重反射ノイズ (YK-3 SP10160)

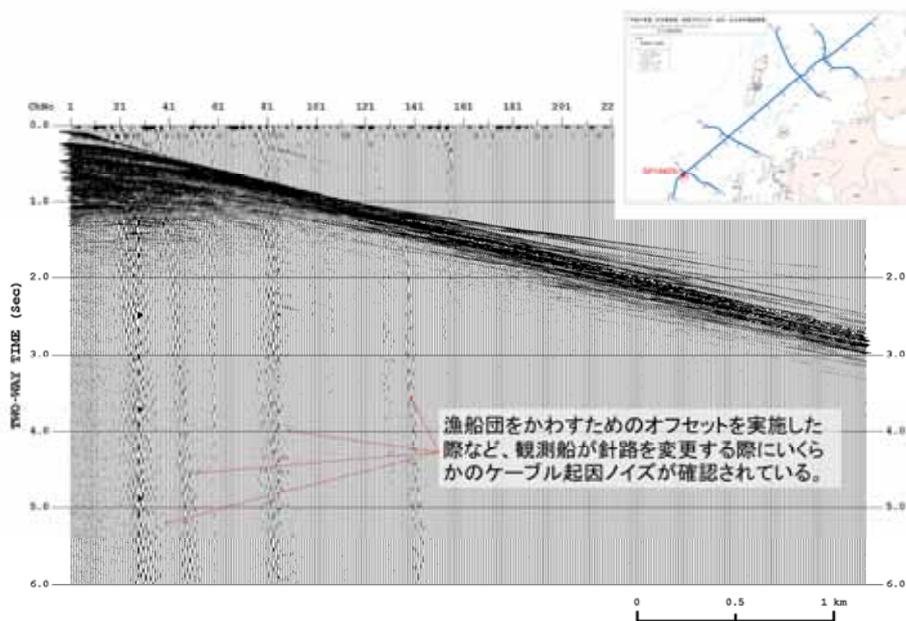


図8 発震記録中の典型的ノイズ例 ケーブル曳航ノイズ (YK-A SP16625)

・ケーブル曳航ノイズ（図 8）

漁船団を回避するために観測船が変針する場合や、ケーブル深度を変更する場合などで、水深制御用バードに抵抗がかかるためにノイズが生じることがある。これらのノイズは、バード（深度調節器）を設置した周辺のチャンネルにのみ強く生じるノイズであり、後述するデコンボリューション処理によりノイズ抑制処理を行った。

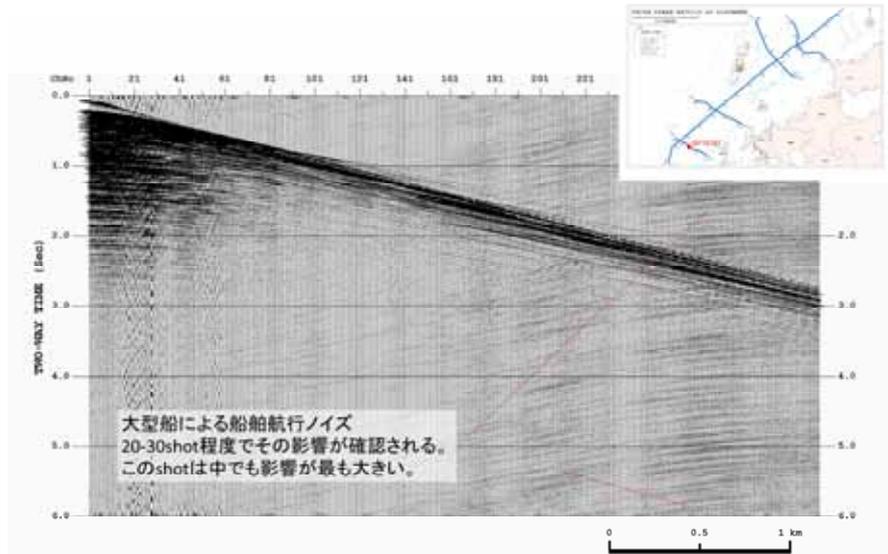


図 9 発震記録中の典型的ノイズ例 航行船舶ノイズ（YK-1 SP10787）

・航行船舶ノイズ（図 9）

観測対象地域は航行船舶の往来が非常に激しく、データには時折これらのノイズが確認されることがあった。しかし、水路通報などを活用し事前の周知がなされた事や、警戒船による適切な警戒業務が行われたことから、こうしたノイズの影響を受ける場面は極めて限定的であった。また、ケーブル上を通過した船舶は小型船舶に限られており、その影響はほとんどデータには現れなかった。

以下に、各測線のデータ品質を示す。

・YK-1 測線

全般的には、海況が良好で波浪ノイズはほとんど無く、S/N の高い良好な記録が取得できた。対馬海流の流れる海域であることから、流れに交叉する当測線では、ケーブルが北東方向にやや曲がった状態での観測が多かった。図 10 に発震記録例を示す。

・YK-2 測線

全般的に天候・海況共に穏やかで、波浪ノイズは小さく、S/N の高い良好な記録が取得できた。しかし、対馬海流の影響を受け、ストリーマーケーブルは、全般的に北東方向にやや曲がった状態であった。ケーブル深度は、既定の 6 m 前後で安定していた。図 11 に発震記録例を示す。測線の南東部では水深が徐々に浅くなり、屈折波および多重反射波が顕著に表れるようになった。

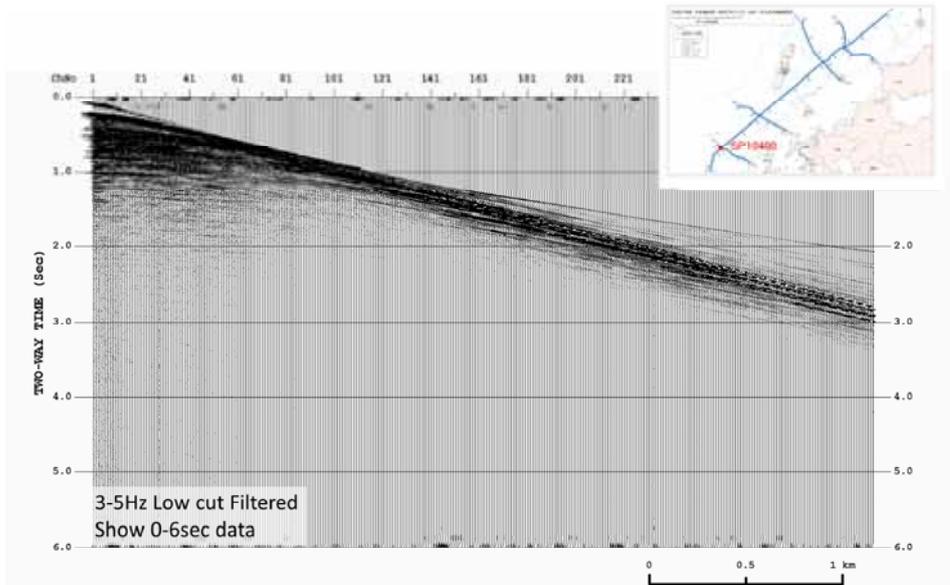


図 10 山口-北九州沿岸測線典型的発震記録例 YK-1 SP10400

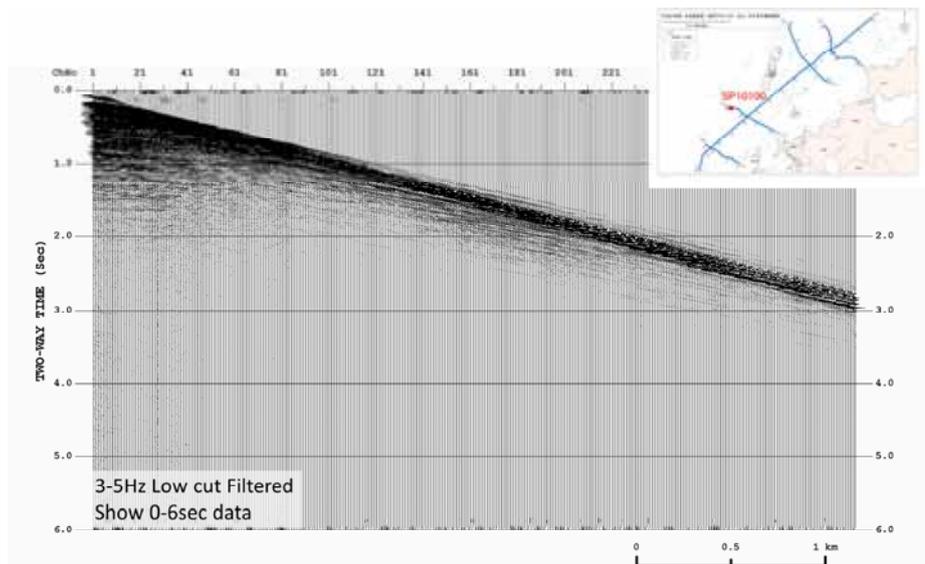


図 11 山口-北九州沿岸測線典型的発震記録例 YK-2 SP10100

・ YK-3 測線

全般的に海況が良好なためノイズレベルの低い環境でデータ取得ができた。図 12 に発震記録例を示す。場所によっては海流の流れに逆らう向きに進む場合もあり、観測船の推進出力を上げることによる観測船本体に起因したノイズが顕著に見られる。

・ YK-4 測線

全般的に海況は良好で、ノイズレベルの低い環境でデータ取得ができた。場所によっては、海流の影響などを受けた軽微なノイズ（ケーブル曳航ノイズ）が確認されるものの、それらはデータ処理において抑制可能なレベルであった。図 13 に発震記録例を示す。ショット記録上には、0.6 秒から 1.0 秒付近に複数の反射波が他の測線と同様に見られる。

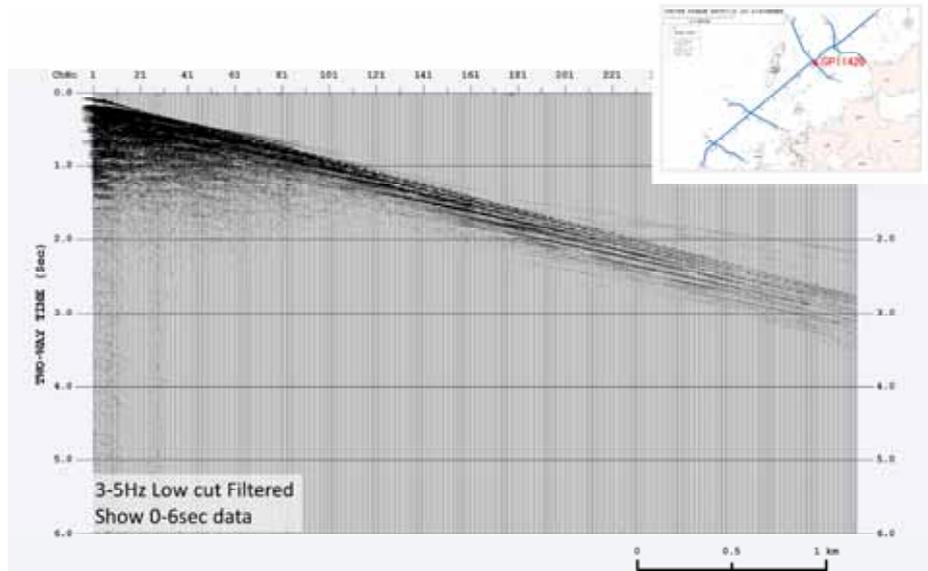


図 12 山口-北九州沿岸測線典型的発震記録例 YK-3 SP11420

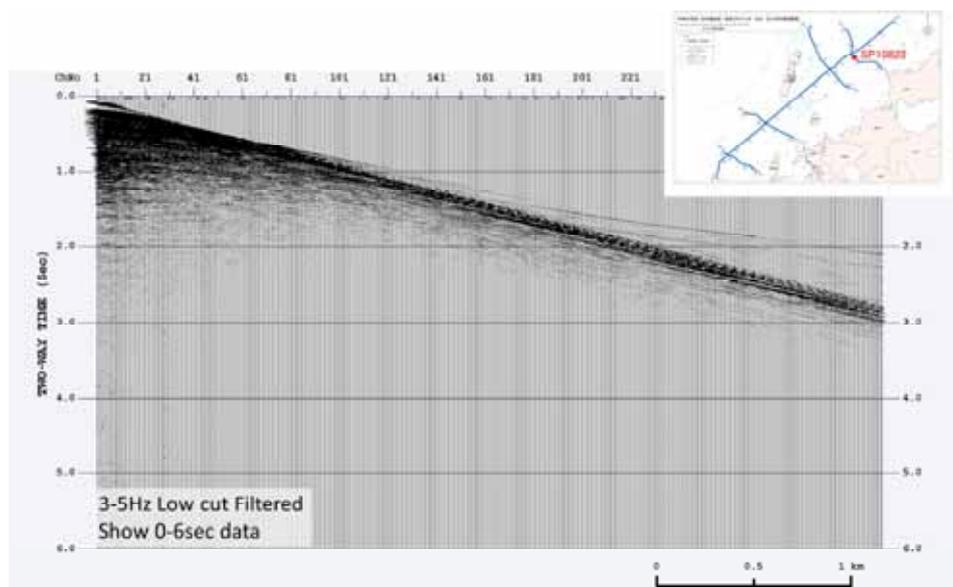


図 13 山口-北九州沿岸測線典型的発震記録例 YK-4 SP10825

・ YK-A 測線

全般的に天候・海況共に良好で、波浪ノイズはほとんど無く S/N の高い良好な記録が取得できた。ただし、測線近傍に設置されていた漁具との干渉を避けるため、オフセット発震を行う際に進行方向を変える場合や、小型の漁船がストリーマケーブル上を通過する際には部分的に微小な航行船舶ノイズの混入が見られた。図 14-16 に発震記録例を示す。

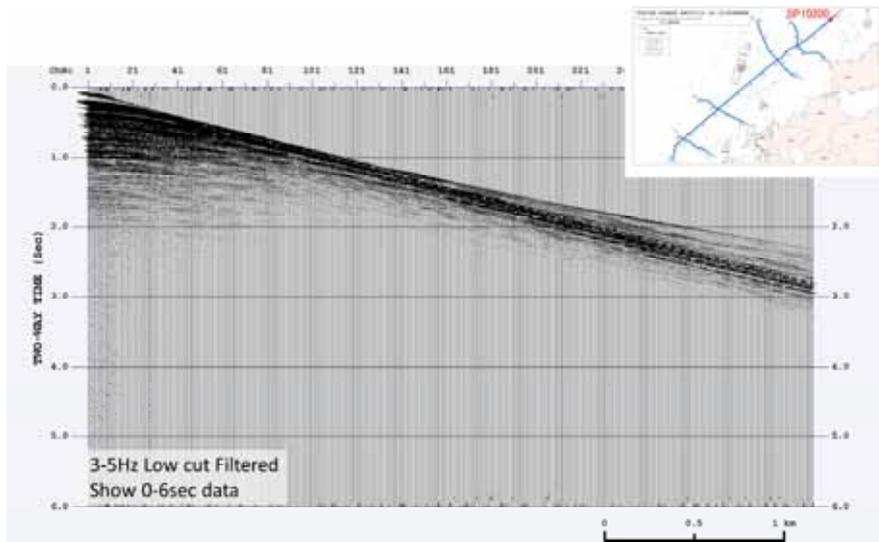


图 14 山口-北九州沿岸測線典型的發震記錄例 YK-A SP10200

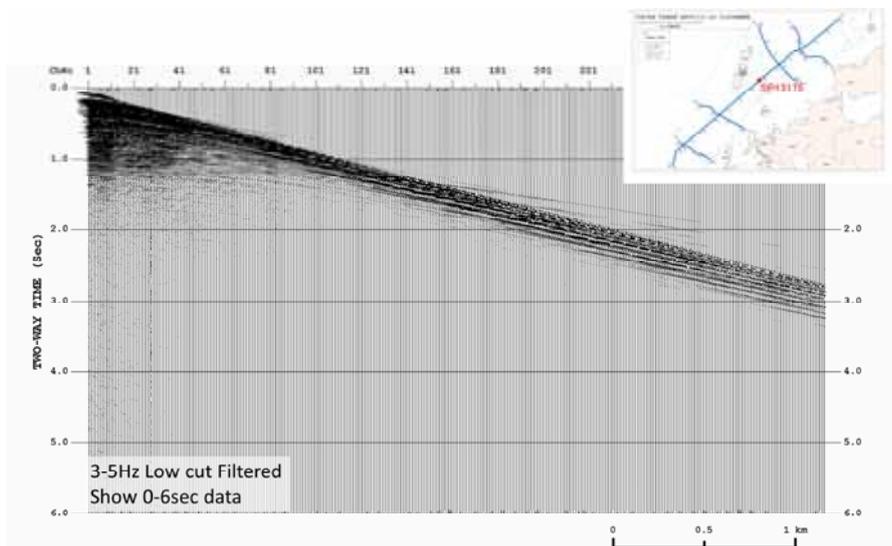


图 15 山口-北九州沿岸測線典型的發震記錄例 YK-A SP13175

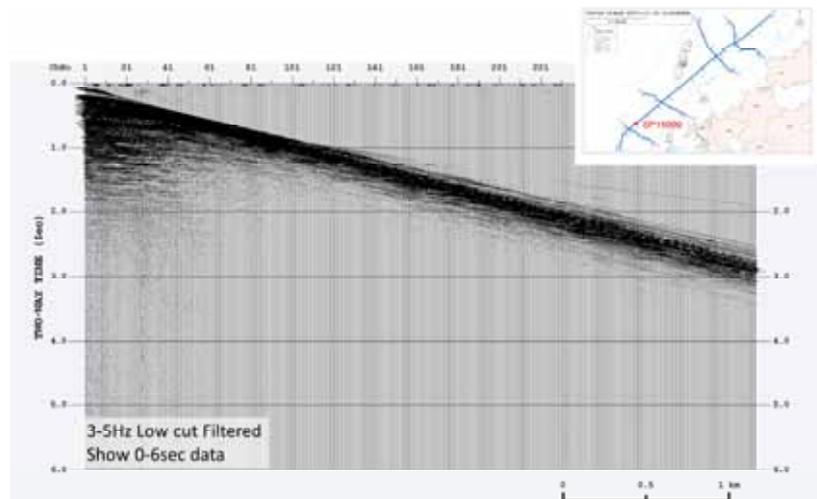


图 16 山口-北九州沿岸測線典型的發震記錄例 YK-A SP16000

b) 「舞鶴沖測線」海陸統合反射法地震探査 (MZ)

i) 調査測線

本調査は、京都府舞鶴市大浦半島北東海域に約 50 km の調査測線を南北方向に設定した。この調査測線は、平成 16 年度大都市圏地殻構造調査新宮-舞鶴測線の北方延長部に位置する。本海域データの取得時に、陸域区間（福井県大飯郡高浜町上瀬地区から京都府舞鶴市、綾部市五泉町神子谷地区に至る区間）においても受振器を展開した（図 17）。

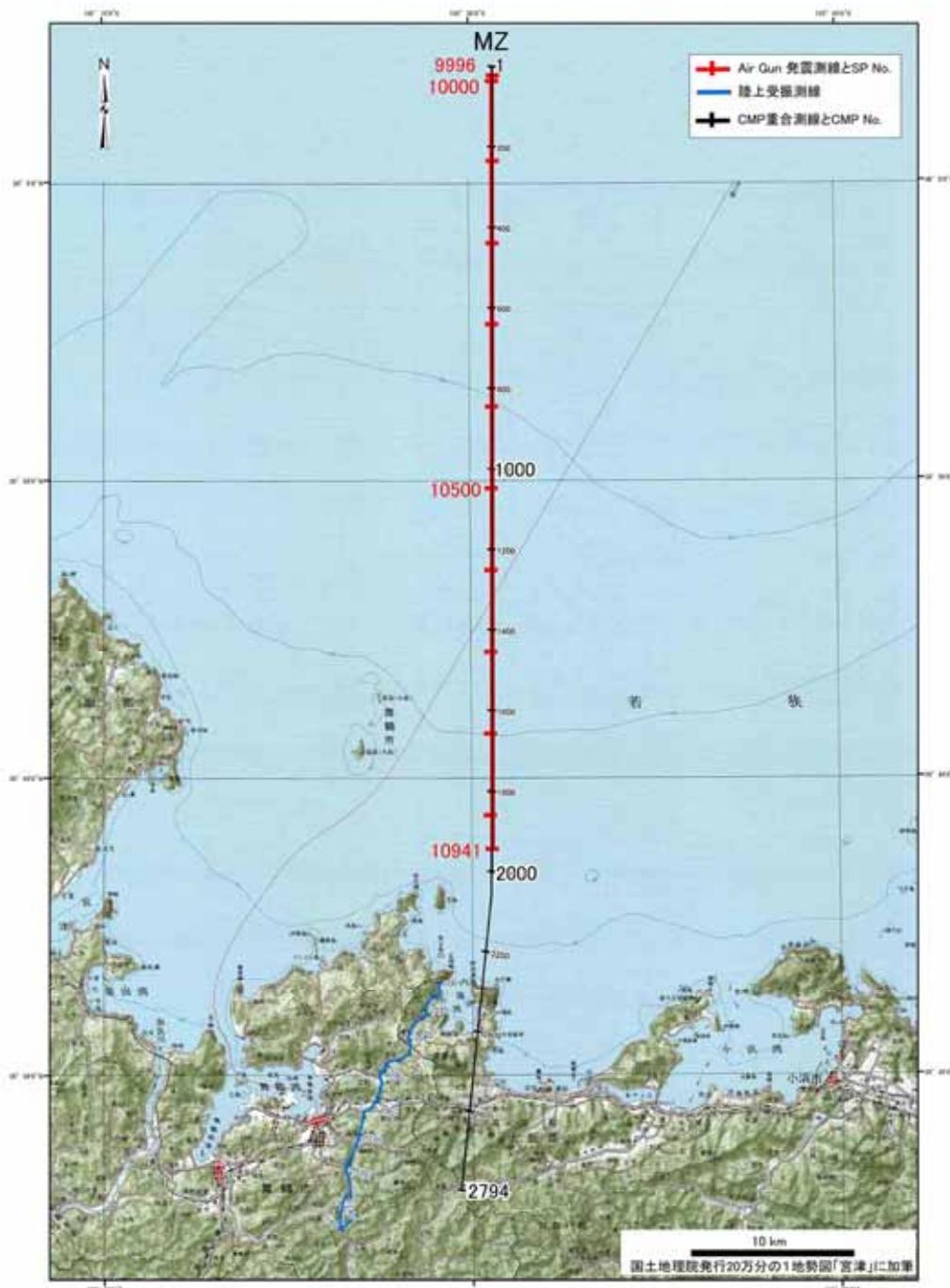


図 17 海陸統合反射法地震探査「舞鶴沖測線」測線図

ii) 調査概要

本調査は、平成 27 年 7 月 27 日から 29 日に陸上受振システムの展開を行い、海上発震を 7 月 31 日に行った。その後 8 月 1 日から 2 日に撤収作業を行った。陸域では独立型受振システム (GSR) 161 台を用いてデータ取得を行った。舞鶴沖測線では、航行船舶や漁業活動の影響が大きいことが想定されていたため、全長約 2000 m の短いストリーマーカーケーブルを使用した。深部構造を得るためにガン容量 1950 cu. in. のエアガン (発震圧力 2000 psi) により発震した。ケーブル深度とエアガン深度は共に 6 m とした。

iii) 調査仕様

調査仕様は以下のとおりである。

発震系仕様

陸上バイブレータ発震

- ・震源 エアガンアレイ (Bolt1500LLTri-Gun)
- ・発震点間隔 標準 50 m
- ・発震深度 標準 6.0 m
- ・エアガン容量 1950 cu.in
- ・エアガン圧力 2000 psi

受振系仕様

- ・受振器・受振点 陸上区間：
ジオフォン：
4.5 Hz シングル
161 点 (標準 100 m 間隔)
海上区間：
ハイドロフォン：
168 チャンネル
ケーブル曳航長 2100 m
ケーブル深度 6.0 m

記録系仕様

- ・探鉱機 海上区間：
24 ビット A/D によるデジタルテレメトリ型
陸上区間：
GSR (独立型受振システム)
- ・サンプル間隔 2 ms
- ・記録長 海上区間：8 s
陸上区間：連続観測 (GSR)

測量

- 海上区間： DGPS による航測システムを用いて発震点及びストリーマ船位置を決定
- 陸上区間： GPS による測量

iv) 観測記録

観測時の天候は良好で、波高は 0.5 m 未満であり測線全域でノイズレベルが低く、S/N の高い品質の良いデータが取得された。図 18-19 に発震記録例を示す。測線北部のショット記録には、複数の反射波が明瞭に認められる。

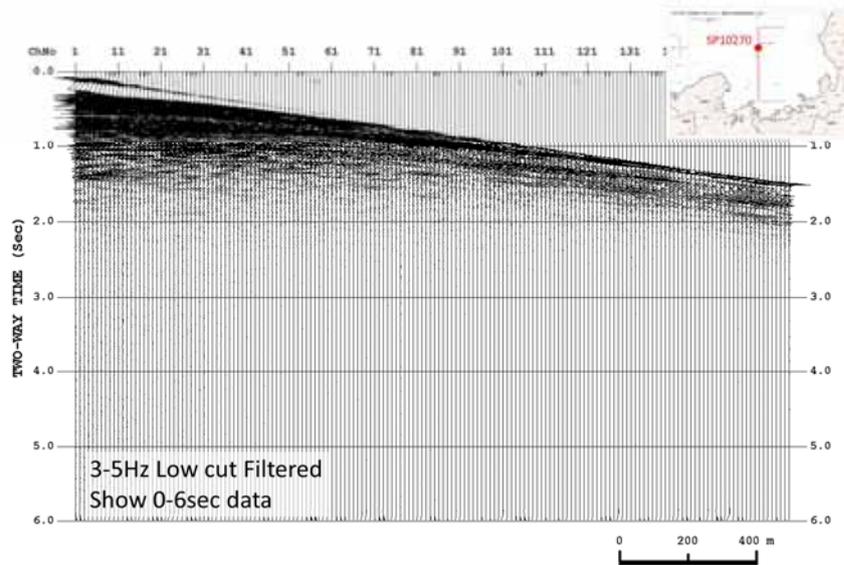


図 18 舞鶴沖測線典型的発震記録例 [1]MZ-1 SP10270

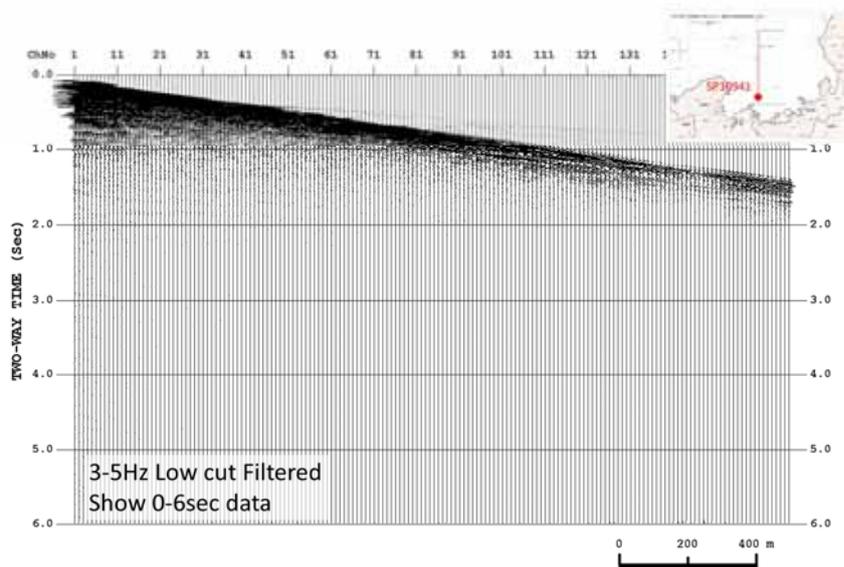


図 19 舞鶴沖測線典型的発震記録例 [2]MZ-1 SP10941

図 20 から図 22 に陸域受振器観測結果を示す。

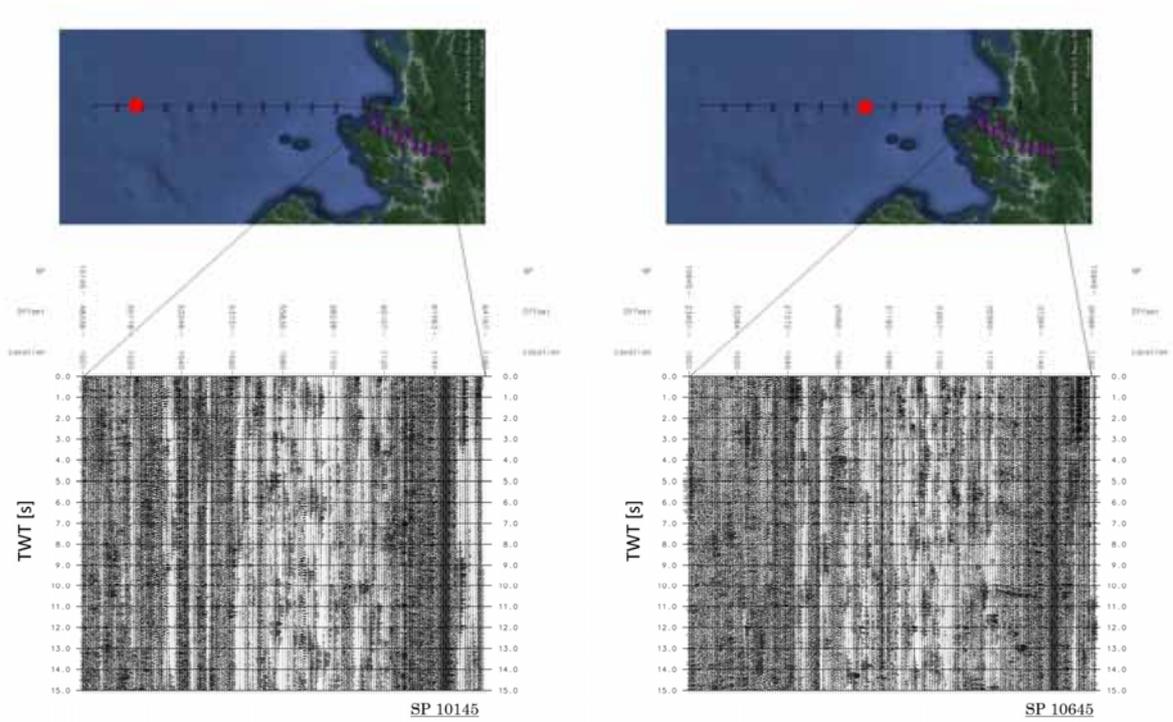


図 20 海域発震-陸域受振 発震記録例 [1]

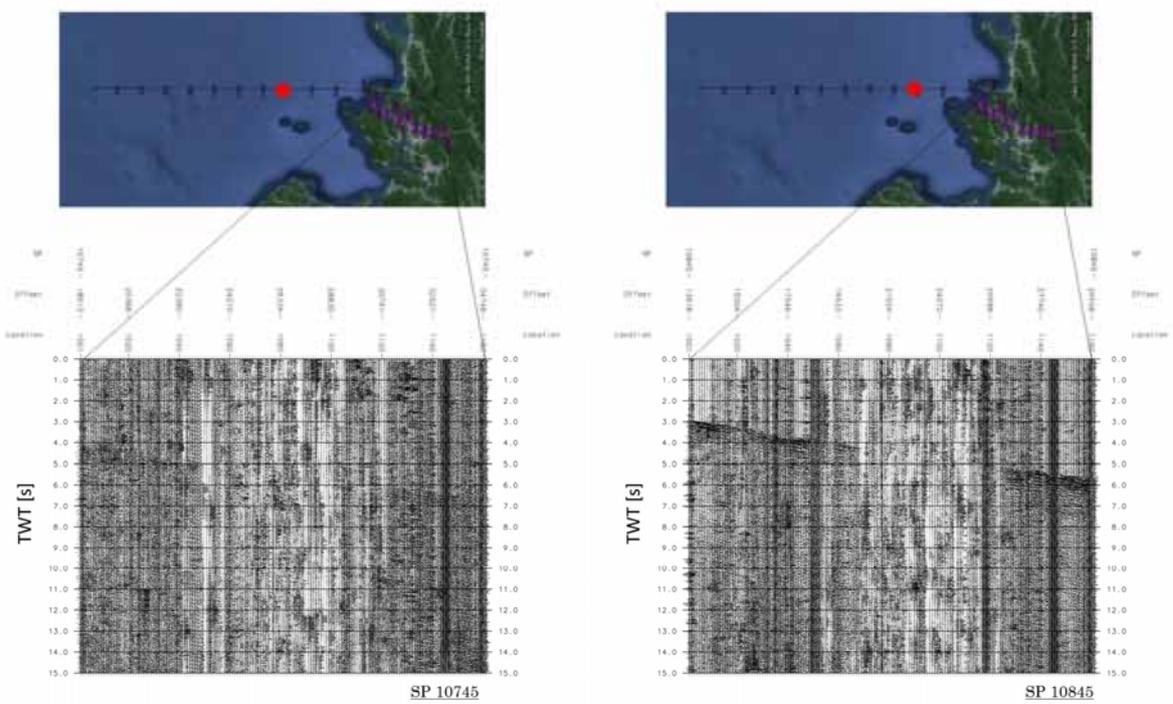


図 21 海域発震-陸域受振 発震記録例 [2]

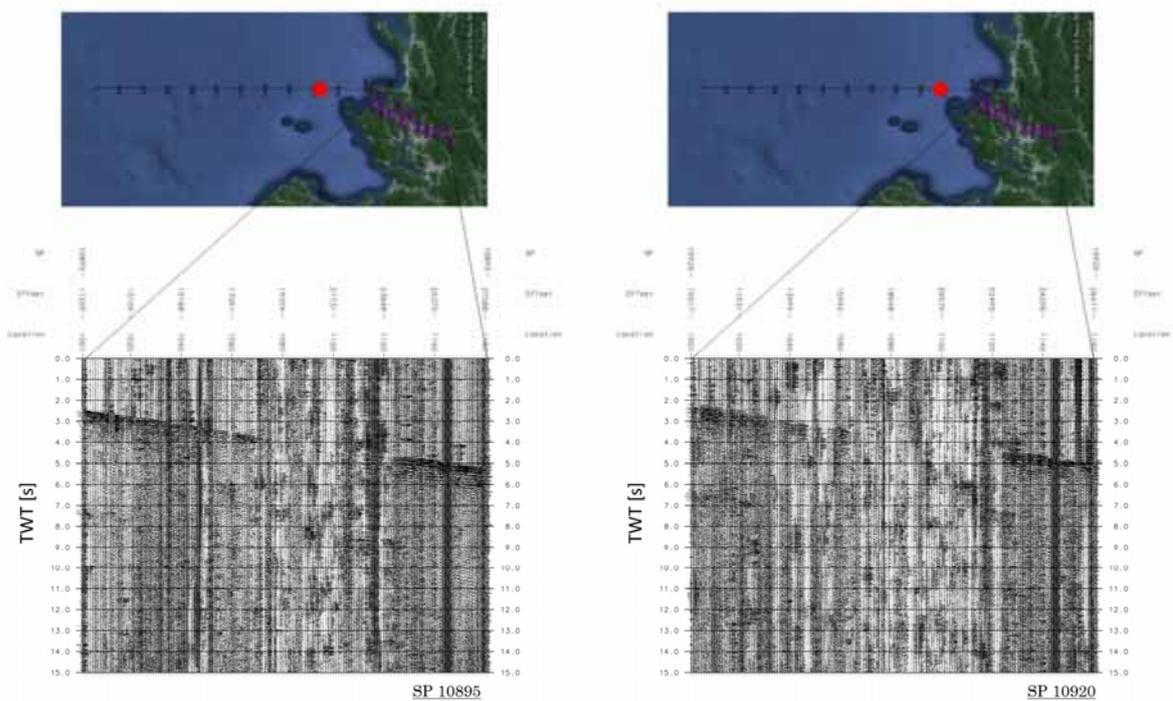


図 22 海域発震-陸域受振 発震記録例 [3]

3) データ解析

a) 海上反射法地震探査データ解析

本節では、山口沖～北九州沖の沿岸域及び、舞鶴湾での海上反射法地震探査測線(測線数 6 本、総測線長約 725 km)のデータ解析内容について記述する。図 23 にデータ処理フローを示す。

i) フォーマット変換およびデータ編集(Format Conversion and Trace Edit)

フィールドデータに記録された原記録(SEAL 探鉱機、SEGD フォーマット)について、Super X (JGI Internal Format)フォーマットへ変換を行った。また、S/N 比が著しく低いショットあるいはトレースを処理対象から除外した。

ii) トレースヘッダーへの測線情報の入力(Geometry Application)

Super X トレースヘッダーに関して、発震点、受振点および CMP の各インデックス、座標、オフセット距離等の測線情報を入力した。データ解析における基準標高面は平均海水面位置に設定した。発震点および受振点の水深について、海水速度 1,500 m/s により時刻補正をおこなった。

CMP 重合測線は、各測線について下記のように設定した。なお、CMP 測線の 1 番は、測線の東端または北端に位置によって定めたため、発震点番号と異なることもある。

CMP 間隔 : 25.0 m

CMP 範囲

YK-1	:	1 - 2395
YK-2	:	1 - 3342
YK-3	:	1 - 4521
YK-4	:	1 - 3874
YK-A	:	1 - 14255
MZ-1	:	1 - 2061

図 24 に山口沖～北九州沖、図 17 に舞鶴湾の CMP 重合測線および発震点分布を示した。
 図 25 に両海域の各測線の CMP 各種情報（重合数分布、オフセット距離分布、水深値）を示した。

iii) 最小位相変換 (Minimum Phase Conversion)

エアガン発震記録については、本観測に対応するエアガン震源波形観測記録を利用して最小位相変換処理を適用した。

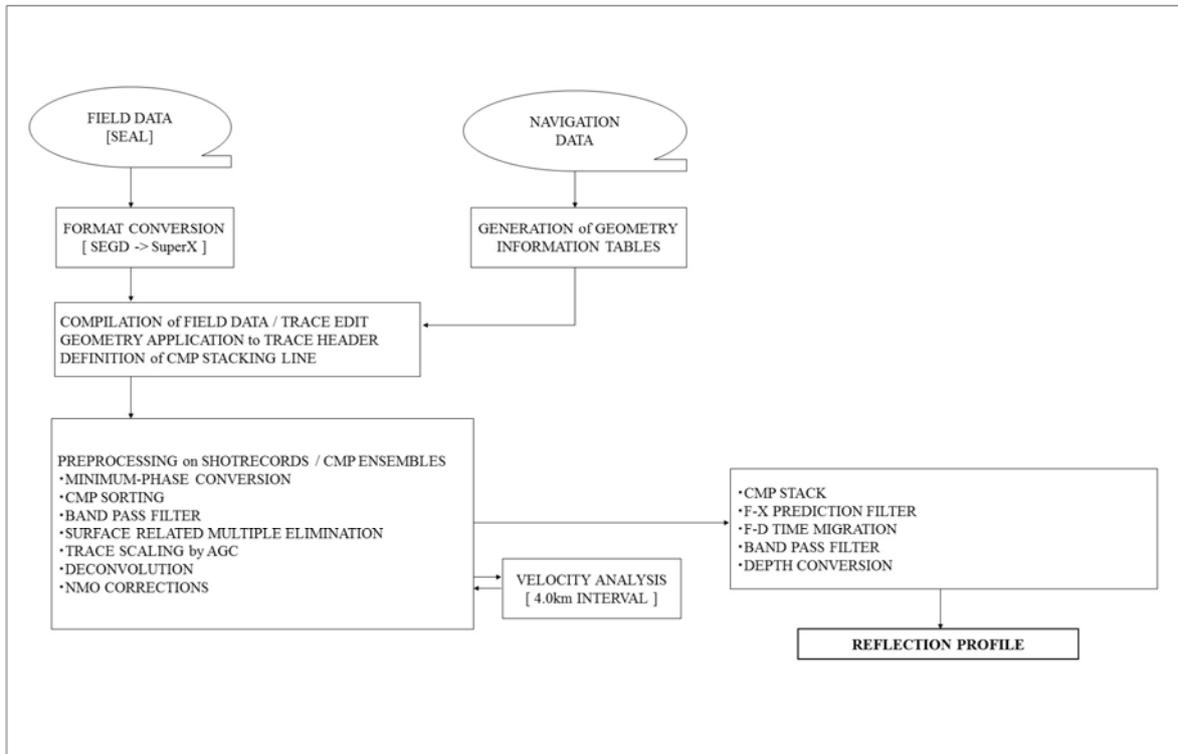


図 23 反射法データ処理フロー