

紀伊半島沖での「かいいい」「かいよう」による二船式反射法地震探査 のデータ取得とデータ処理

野 徹雄*¹ 鶴 哲郎*² 朴 進午*² 三浦 誠一*² 藤江 剛*²
伊藤 亜妃*² 片山 健*¹ 馬場 和美*¹ 伊藤 誠*¹ 細谷 慎一*¹
佃 薫*¹ 清水 賢*¹ 田中 仁氏*¹ 橋本 結*¹ 寺田 育正*¹
柴田 秀紀*¹ 鈴木 啓吾*¹ 大渡 祐樹*¹ 瀧澤 薫*¹

海洋科学技術センターでは、2002年8月から9月にかけて、地震発生帯の深部構造イメージングを目的とした地震探査を南海トラフ熊野灘海域において実施した。この調査では、従来の屈折法および反射法地震探査の他に、海洋調査船「かいよう」および深海調査研究船「かいいい」による二船式反射法地震探査を実施した。二船式反射法地震探査ではCOP方式を採用し、最大オフセット約20kmに及ぶ良好なデータを取得することができた。その結果、速度解析精度の向上および深部構造イメージングの改善が見られた。本論文では、二船式反射法地震探査のデータ取得ならびにデータ処理の結果について報告する。

キーワード: 二船式反射法探査, 長大オフセット記録, 共通オフセット記録 (COP)

Data acquisition and processing of two-ship multi-channel seismic reflection experiment by R/V KAIREI and R/V KAIYO off Kii Peninsula

Tetsuo NO*³ Tetsuro TSURU*⁴ Jin-Oh PARK*⁴ Seiichi MIURA*⁴
Gou FUJIE*⁴ Aki ITO*⁴ Takeshi KATAYAMA*³ Kazumi BABA*³
Makoto ITO*³ Shinichi HOSOYA*³ Kaoru TSUKUDA*³ Satoshi SHIMIZU*³
Hitoshi TANAKA*³ Yui HASHIMOTO*³ Ikumasa TERADA*³ Hideki SHIBATA*³
Keigo SUZUKI*³ Yuuki OHWATARI*³ Kaoru TAKIZAWA*³

From August to September 2002, a marine seismic survey was conducted to image deep structures of seismogenic zone in the Nankai Trough by Japan Marine Science and Technology Center. In addition to conventional refraction and reflection data, a two-ship multi-channel seismic reflection data was observed by the common offset profiling (COP) manner in the survey. Resulting maximum source-receiver offset distance reaches 20 km long, which enables us to analyze stacking velocities with higher accuracy than the conventional one. Furthermore, imaging quality is also improved for some deep structures. We report here on both data acquisition and processing results of the two-ship survey.

Keywords : Two-ship multi-channel seismic reflection experiment, Long offset seismic profile, Common offset profile (COP)

*1 日本海洋事業株式会社 海洋科学部

*2 海洋科学技術センター 固体地球統合フロンティア研究システム

*3 Marine Science Department, Nippon Marine Enterprises, Ltd.

*4 Institute for Frontier Research on Earth Evolution, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

海洋科学技術センター(JAMSTEC)では、1999年より深海調査研究船「かいれい」と海洋調査船「かいよう」に大容量エアガンを搭載し、主に「かいよう」では海底地震計を用いた屈折法、「かいれい」では最大5100m長のストリーマケーブルを用いたマルチチャンネル反射法地震探査(Multi-Channel Seismic reflection:MCS)を行ってきた。これらのシステムを用いた地震探査によって、日本近海における巨大地震発生帯の深部構造が徐々に明らかになってきつつある。

反射法地震探査による深部構造イメージングにおいては、できるだけ長いオフセット(震源-受振点距離)の記録を取得することが望ましく、近年長大オフセットのデータ取得が頻繁に実施されるようになった。長大オフセットの記録の利点としては、速度精度の向上、重合数の増加(S/N比の向上)やAVO(Amplitude Variation with Offset)解析の精度向上への期待があげられる。長大オフセット記録のデータを取得する方法は主に3種類あり、できる限り長いストリーマケーブルを曳航して観測を行う方法、発震船と受振船の二隻の観測船を用いる二船式、海底敷設ケーブルを用いる方法がある。現在のところ、「かいれい」及び「かいよう」では、5kmを越える長大ストリーマケーブルによるデータ取得やOBC(Ocean Bottom Cable)等を用いた海底敷設ケーブルによるデータ取得を行うことができない。

JAMSTECの「海洋底ダイナミクス研究」及び「固体地球統合フロンティア研究」の一環として、2002年8月から9月にかけてKR02-11及びKY02-09行動で、南海トラフでの地震発生帯の深部構造のイメージングを目的とした構造探査が熊野灘において実施された(図1)。本調査では、「かいれい」による反射法探査と「かいよう」による自己浮上型海底地震計を用いた屈折法探査とともに、「かいよう」を発震船、「かいれい」を受振船とした二船式反射法地震探査が行われた。二船式反射法地震探査は、二隻の観測船を使用するため、一隻単独で行うよりは調査効率等に問題があるが、理想的に調査が実施されると、長大ストリーマケーブルを曳航した観測よりも、ケーブルの曲がりの影響の少ないデータを取得することができる(図2)。また、熊野灘は航行船舶が多く、長大ストリーマケーブルの曳航と比較すると、二船式反射法探査の方がケーブルの断線等のリスクは少なく、安全に調査を実施することができる(図3)。

本報告では、同調査での二船式反射法地震探査におけるデータ取得とデータ処理についての結果と今後の課題についてまとめる。

2. データ取得

二船式反射法探査には、二船間の距離を拡げながら観測する方式(Expanding Spread Profiles:ESP)と二船間の距

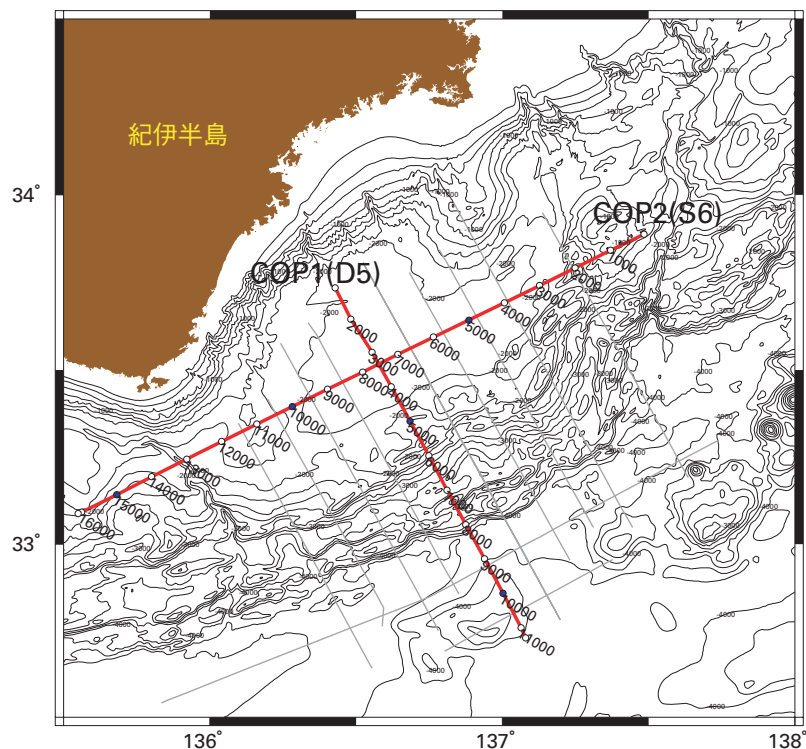


図1 KR02-11/KY02-09で実施した地震探査の測線図。赤線が二船式反射法探査を実施した測線。灰色の線が「かいれい」単独での反射法探査測線。赤線上の数字はCMP番号で、1000CMPの距離は12.5kmである。

Fig. 1 Location map of seismic survey lines in the KR02-11/KY02-09 cruise. Red lines are two-ship seismic survey lines. Grey lines are conventional MCS survey lines using R/V KAIREI. The number on red lines show the CMP number, and 1000 CMP is equal to 12.5km.

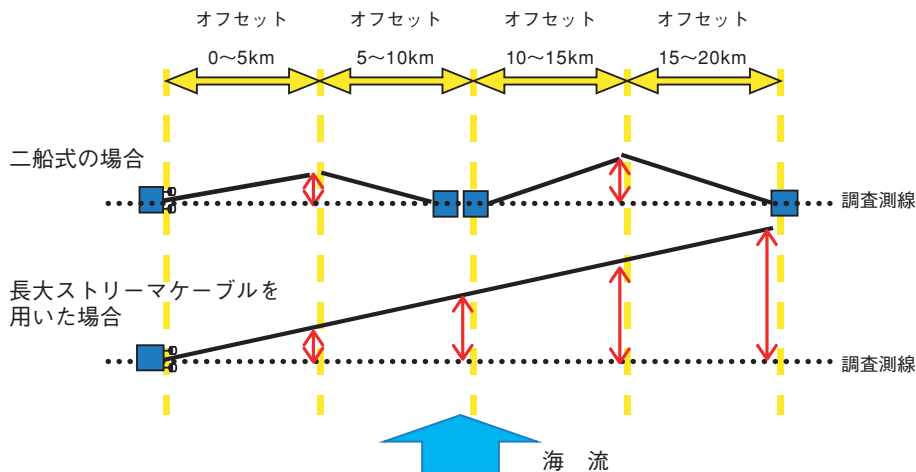


図2 海流によるケーブルの影響に関する概念図。二船式反射法探査と長大ストリーマケーブルを用いた場合について比較である。図はオフセット0~20kmのデータを取得することを仮定しており、黄色い点線が5km毎のラインである。青の四角が受振船、黒の実線がストリーマケーブル、黒の点線が調査測線(重合測線)、赤い矢印がケーブルの曲がりの大きさ、水色の矢印は海流の流向を示す。海流の条件が同等であった場合、長大ストリーマケーブルはオフセットが大きくなるほど、ケーブルが測線から離れていくため、二船式反射法探査のようにオフセット毎に分けてデータ取得の方が海流の影響は小さい。

Fig. 2 The influence of the streamer cable due to an ocean current. This image is comparison between a two-ship seismic survey and a seismic survey using very long streamer cable. A blue square is the receiving vessel. A black solid line shows a streamer cable distribution. A black dotted line is a survey line (a stacking line). Red arrows are the size of the feathering. A light blue arrow is an ocean current. The feathering angle of a two-ship seismic survey is smaller than a seismic survey using very long streamer cable, when the condition of an ocean current is same in both surveys.

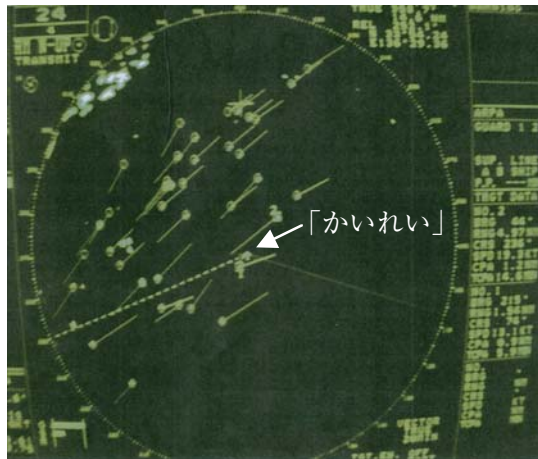


図3 二船式反射法探査のデータ取得中の「かいいい」のレーダーの画像。中心が「かいいい」の位置で、中心から半径24マイル(約44km)以内を表示している。調査海域では航行船舶が多いことが分かる。

Fig. 3 A picture of R/V KAIREI's radar during the two-ship survey. The center of a circle is a position of R/V KAIREI. More than 40 running ships can be recognized within a 24 mile radius from KAIREI.

離を固定して観測する方式(Constant Offset Profiles: COP)の主に2種類のデータ取得方法がある。「かいいい」「かいう」を用いた二船式反射法探査では、測線COP1と測線COP2の2測線において、COP方式によるデータ取得を行った(図1)。測線COP1の場合(図4)、オフセット毎に4測線に分けてデータを取得し(測線D5[オフセット0~5km], COP1a[オフセット5~9km], COP1b[オフセット9~14km], COP1c[オフセット14~19km]), 測線COP2の場合は5測線に分けてデータを取得した(測線S6[オフセット0~4km], COP2a[オフセット4~8km], COP2b[オフセット8~12km], COP2c[オフセット12~16km], COP2d[オフセット16~20km])(図5)。測線COP1及び測線COP2において、測線D5と測線S6は、「かいいい」単独でデータを取得した測線である。

震源はエアガン(BOLT Technology社 1500LL air gun, 空気圧2000psi [約13.79MPa], 総容量約12000cu.in. [約200liter])を用い、最大204チャンネル(最大約5100m)のストリーマケーブル(Sercel社 Syntrak960 Digital Streamer)によってデータを受振した。エアガンによる発震は、測線COP1の場合、測線D5では50m間隔のDistance mode(一定の距離間隔で発震を行う方法)で行い、二船式探査の測線(COP1a~1c)では発震間隔49~78s(約100m間隔)のTime mode(一定の時間間隔で発震を行う方法)で行った。測線COP2では、すべての測線の発震間隔を56~160s(測線S6は約50m間隔, 測線COP2bは約200m間隔, それ以外の測線は約100m間隔)

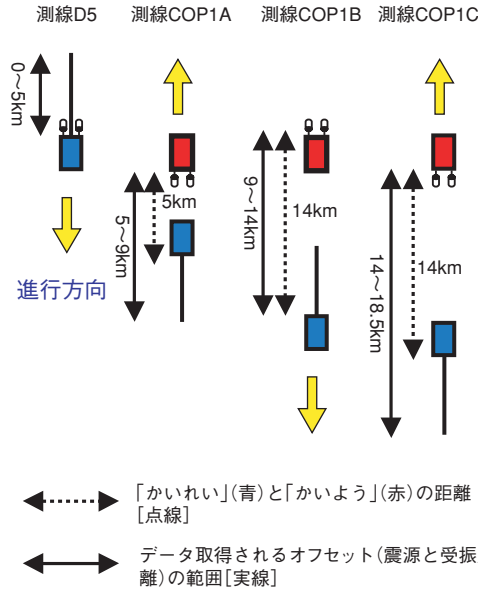


図4 測線COP1のデータ取得の概念図。図の上方向が北北西，下方向が南南東を示す。青い四角が「かいいい」，赤い四角が「かいよう」，黒い実線はストリーマケーブル，白い円柱はエアガン，黄色い矢印は進行方向を示す。

Fig. 4 Image about data acquisition of line COP1. Top in this figure is NNW, and bottom is SSE. Blue squares are R/V KAIREI. Red squares are R/V KAIYO. A black solid line is a streamer cable. White cylinders are air guns. Yellow arrows show the directions of ship movement.

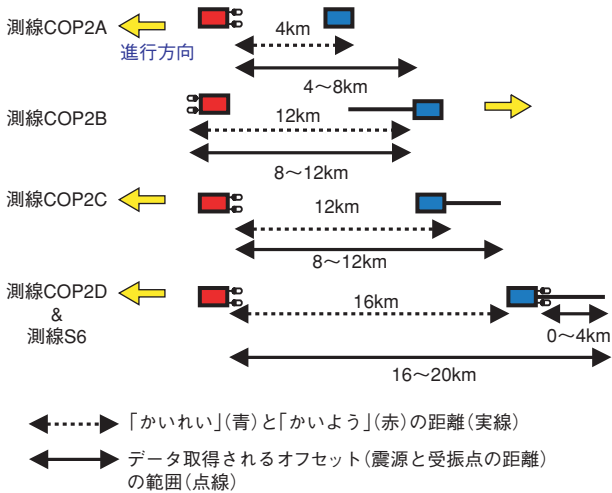


図5 測線COP2のデータ取得の概念図。図の左方向が西南西，右方向が東北東を示す。青い四角が「かいいい」，赤い四角が「かいよう」，黒い実線はストリーマケーブル，白い円柱はエアガン，黄色い矢印は進行方向を示す。

Fig. 5 Image about data acquisition of line COP2. Left in this figure is WSW, and right is ENE. Blue squares are R/V KAIREI. Red squares are R/V KAIYO. A black solid line is a streamer cable. White cylinders are air guns. Yellow arrows express the ship movement directions.

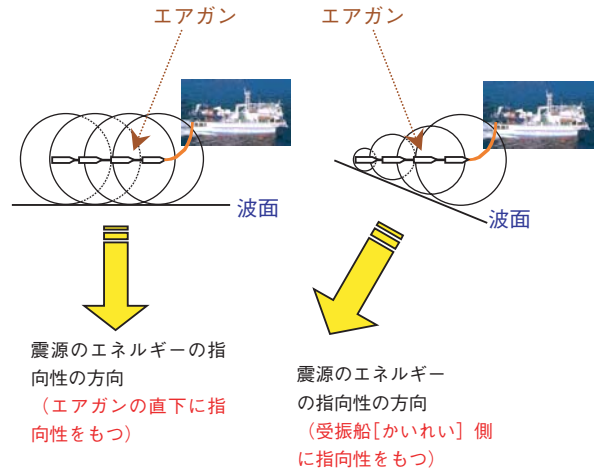


図6 震源のエネルギーの指向性に関する概念図。左図が通常地震探査で行っているエアガンの発震。右図がエアガンの各組のショットタイミングをずらした発震。

Fig. 6 Image about the directivity of source energy. The left figure is conventional shooting. The right figure is the shooting with time delays for air guns.

のTime modeで行った。測線S6と測線COP2dは、「かいいい」「かいよう」の両船でエアガンを曳航し，交互に発振することで，1回の調査で2測線分のデータを取得した。また，通常「かいいい」または「かいよう」で行う構造探査は8基のエアガンを同時に発震するが，今回の二船式反射法探査では，エアガン2基を1組として4組のエアガンを測線方向に対して一定間隔に並ぶような曳航を行い，各組の発震時をずらして調査を実施した。この方法は，震源のエネルギーの指向性をエアガンの直下よりもストリーマケーブル側にもたせることにより，探査対象深度における反射波の距離減衰の影響を軽減させることを目的として行った(三浦・他[2002]) (図6)。

その他の主なデータ取得仕様は，受振点間隔が25m，サンプリング間隔が4ms，記録長(Water delayを含む)が測線COP1で最大27s，測線COP2で最大26sで，総測線長は測線COP1が約110km，測線COP2が約160kmである(表1)。

「かいいい」「かいよう」のデータ取得システムの時刻はGPS timeを用い，発震時における「かいよう」の船位及び発震点と「かいいい」の船位及び受振点の座標はDifferential GPSを用いて把握した(図7)。これらの測位データはリアルタイムでそれぞれの観測室(ドライラボ)内にある測位制御システム(Concept System社 SPECTRA)へ送り，UKOOA P1/90形式で収録した。観測終了後，「かいよう」で取得された測位データのうち，発震点データについては，データ処理時のGeometry set(測位データをもとに，各トレースのCMPやオフセット等を決定し，トレースヘッダーへ適用する処理)において必要とされるため，E-mailで「かいいい」へ送信した。ストリーマケーブルで受振したデータはリアルタイムで「かいいい」ドライラボ内にある探鉱機(Sercel社 Syntak960)へ送り，3480テープにSEG-D 8048 formatで収録した。また，

表1 「かいいい」「かいよう」二船式反射法探査のデータ取得仕様。

Table 1 Summary of data acquisition of a two-ship seismic exploration.

LINE ID	Offset	Source						Receiver			Record length(s)	Sampling rate (ms)	
		Volume	Pressure	Depth	Mode	Total SP	Shot interval (ave.)	Total ch.	Receiver interval	Depth(Ave.)			
COP1	D5	~5km	12000cu.in.	2000psi	10m	Distance	2624	50m	204	25m	15m	13.5	4
	COP1a	5~9.5km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	1050	100m	168	25m	15m	20	4
	COP1b	9.5~14km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	962	100m	168	25m	15m	20	4
	COP1c	14~19km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	1052	100m	192	25m	15m	20	4
COP2	S6	~4km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	3835	50m	153	25m	15m	21	4
	COP2a	4~8km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	1745	100m	156	25m	15m	20	4
	COP2b	8~12km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	689	200m	156	25m	15m	20	4
	COP2c	12~16km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	1529	100m	153	25m	15m	20	4
	COP2d	16~20km	12000cu.in.	2000psi	10m	Time	2130	100m	153	25m	15m	21	4

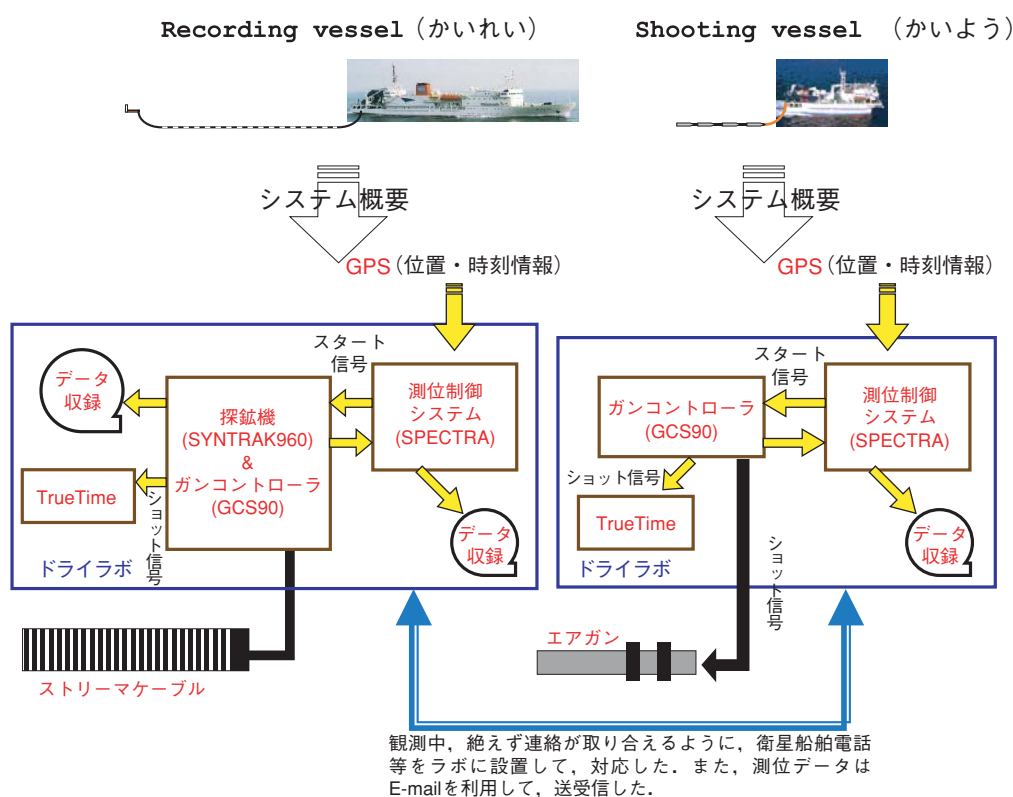


図7 「かいいい」「かいよう」二船式反射法探査データ取得の流れ図。

Fig. 7 Concept of data acquisition of a two-ship seismic exploration using R/V KAIREI and R/V KAIYO.

データ取得時の二船の連絡体制をより密にするため、それぞれのドライラボに衛星船舶電話を設置した(図7)。

3. データ処理

取得データは、地震探査処理ソフトウェアLandmark社 ProMAX 2D及びMercury International Technology社iXLを用いて、処理を行った。

約20kmに及ぶ長大オフセット記録のデータ処理においては、主に次の3つの問題がある。

1つはNMO (Normal moveout) 補正に伴う問題である。オ

フセットが大きくない場合、NMO速度はRMS (Root mean square) 速度で近似できるが、オフセットが大きいデータに関しては、より正確なNMO補正を行うために、高次項まで考慮し精度を向上させる必要がある。そのため、速度解析及びNMO補正については、Castle (1994)によるLong offset correctionを用いた。Castle (1994)の補正は、4次項まではほぼ正確に補正され、6次項に対しても非常に良い近似値が得られる。

また、NMO補正は走時が早い領域やオフセットが大きい領域ほど補正量が大きくなるため、波形が時間方向へ大きく引き延ばされるという問題がある(NMO stretchingの問題)。

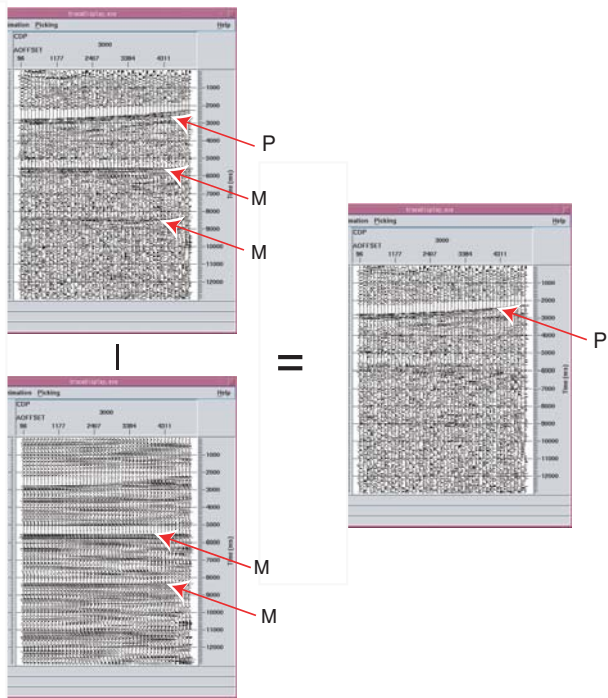


図8 今回適用した多重反射抑制処理の例。左上図は、多重反射の速度でNMO補正を行ったデータ。左下図は、ラドンフィルタによって多重反射だけを残したデータ。右図は、左上図から左下図を引いたデータ。図中のPは海底面からの1次反射(シグナル)を示し、Mは海面-海底間の多重反射を示す。

Fig. 8 An example of multiple suppression processing. The left-top figure shows a CMP gather after the NMO correction using multiple velocity. The left-bottom figure are only multiples extracted by a radon filter. The right data is subtracting the left-bottom data from left-top data. The latter subtracted from the former leaves a record in the right figure.

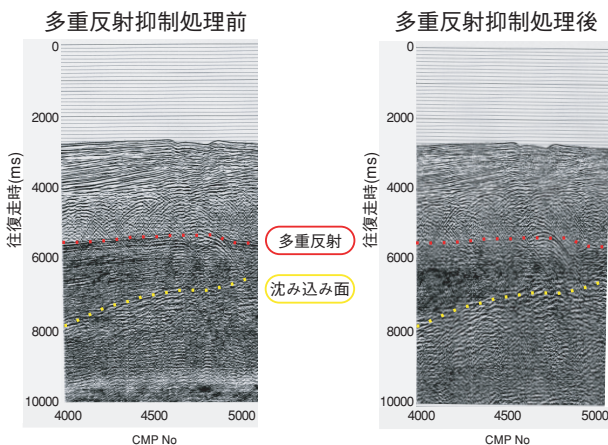


図9 多重反射抑制処理の適用に関する重合断面での比較(測線COP1)。左図は多重反射抑制処理が適用されていない断面。右図は多重反射抑制処理が適用されている断面。1000CMPの距離は12.5kmである。

Fig. 9 Effect of multiple suppression processing (Line COP1). The left profile is applied multiple suppression, and the right profile isn't applied multiple suppression.

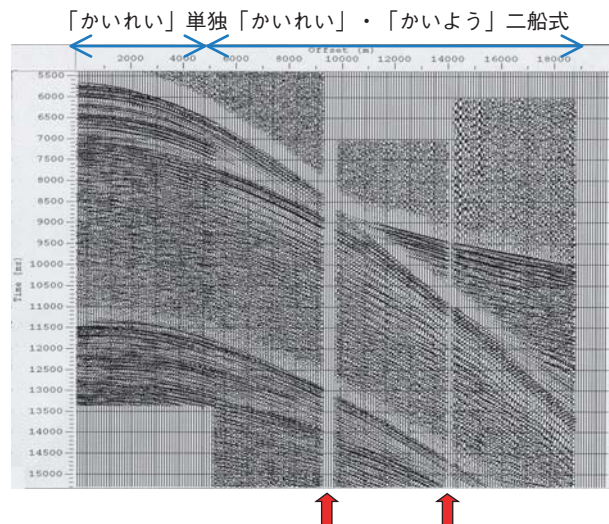


図10 NMO補正適用前のPre-stack data (CMP gather data, 測線COP1のCMP No.8500)。縦軸が往復走時(ms), 横軸がCMP No.である。1000CMPの距離は12.5kmである。赤い矢印の区間は、データが存在しないオフセットである。

Fig. 10 Pre-stack data (CMP gather data) before NMO correction (Line COP1, CMP No. 8500).

特に、本調査の記録はオフセットが約20kmにも及ぶため、NMO stretchingの問題は非常に大きく、また海底面及び浅層での反射波と深部構造での反射波の交差による影響も生じる。そこで、Stretch muteによる自動的なミュートの適用によって、反射波が交差している領域が強制的にミュートされることを防ぐために、Stretch muteの影響を小さくし、重合の際悪影響を与える部分について目視によるミュートのパラメータを設計することを重視した。

2つ目の問題は多重反射抑制に関してである。ここでは、特に海面-海底間の多重反射抑制を中心に検討する。二船式データの特異性から多重反射抑制に関して留意しなければいけない点は以下のとおりである。

- ・オフセットが大きくなると、反射波初動が海底面反射ではなくなる。そのため、反射波が複雑に交差してしまう。
- ・オフセット毎に分けてデータを取得しているため、各測線の連結部での記録が不連続になる。
- ・オフセットの大きいデータについては、空間エリアジングの問題やNMO stretchingの問題がある。

上記の点を考慮するため、約20kmに及ぶすべてのオフセットデータを統合して多重反射抑制処理を進めることは難しいと判断し、オフセット毎(測線毎)に分けて行うこととした。「かわいい」単独で取得したデータに関しては、以下の方法で多重反射抑制処理を実施した。

- (1) 多重反射のNMO速度を決定するための速度解析を行う。NMO補正を適用したときに、多重反射ができる限りフラットになるような速度を決定する。このとき重要なことは、海底面一次反射を実際より数%遅い速度に設定することである。それにより、海底面や

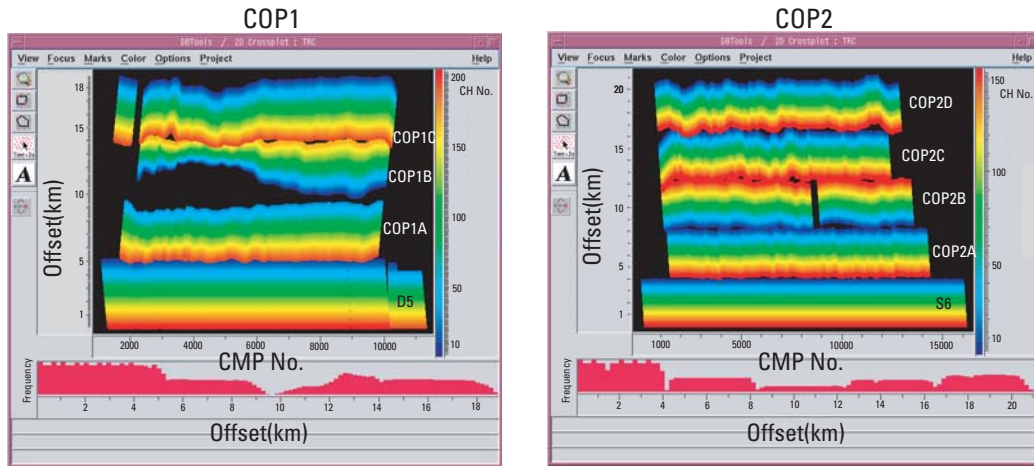


図11 「かいいい」「かいう」二船式反射法探査のデータ取得状況。左図が測線COP1, 右図が測線COP2である。図中の上のグラフは、X軸がCMP番号, Y軸がオフセット(km), 色がチャンネル番号である。図中の下のヒストグラムは、X軸をオフセット(km), Y軸が各オフセットのトレース数である。

Fig. 11 States about data acquisition of a two-ship seismic exploration using R/V KAIREI and R/V KAIYO. The left figure shows line COP1, and the right figure shows line COP2. The top graph (prismatic color graph) in this figure shows that X-axis is CMP No., Y-axis is source - receiver offset (km), and the tone of color is channel No. The bottom histogram shows that X-axis is source - receiver offset and Y-axis is frequency of traces in each offset.

1500m/sに近い反射面の速度を含む一次反射(シグナル)はオーバーコレクション(コヒーレントなイベントが上方へ曲げられる状態)され、また多重反射はフラットに揃い、シグナルとノイズが分離される。

- (2) (1)で決定した速度でNMO補正し、多重反射をフラットにする。その結果、シグナルはオーバーコレクションされる。
- (3) 水平に並んだ位相のみが残るようなラドンフィルタを設計し、(2)のデータに適用する。
- (4) (2)のデータから(3)のデータを引く。つまり、元のデータから多重反射を引く。
- (5) (4)のデータを(1)の速度で逆NMO補正する。
- (6) (5)のデータを速度解析し、一次反射のNMO速度でNMO補正する。

図8は(2)~(4)の経過を示す。上記の方法を、二船式データ(測線D5と測線S6以外)に関する多重反射抑制処理に適用することは、空間エリアジングの問題等により難しい。そこで、二船式データでは、以下の通り若干異なる処理方法を用いた。

- (i) シグナルと多重反射等のノイズが分離するような速度を与えてNMO補正する。5km以上のオフセットにおけるデータについては、海底及び浅層構造からの反射波データのNMO stretching等の影響により、重合時にS/N比を悪化させる要因になることが多い。そこで、今回の処理では重合時に5km以上のオフセットのトレースにおいて、海底及び浅層構造の反射波データは使用しないこととした。そのため、このデータについてのNMO速度は浅層構造内の速度と同等

で構わない。また、1500m/sより数%速いNMO速度として与えた方が、NMO stretchingの影響や空間エリアジングの影響が軽減できる。今回、1800m/sの一定な速度でのNMO補正を試みた。その結果、多重反射波及び1800m/s以下の反射面(海底面及び浅層堆積層)はアンダーコレクション(コヒーレントなイベントが下方へ曲げられる状態)され、1800m/s以上のデータ及びシグナルはオーバーコレクションされるという効果があった。

- (ii) アンダーコレクションされているイベントのみが残るようなフィルタを設計し、データに適用する。
- (iii) 元のデータから(ii)のデータを引く。つまり、元のデータから多重反射を引くということ。
- (iv) (iii)のデータを(i)の速度で逆NMO補正する。
- (v) (iv)まではオフセット毎(測線毎)に処理を行い、その後すべてのデータを統合させる。
- (vi) (v)のデータを速度解析し、一次反射のNMO速度でNMO補正する。

図9は上記の多重反射抑制処理によって、ノイズを抑制した例である。(1)~(6)及び(i)~(vi)の方法を用いることで、多重反射を抑制した。

3つ目の問題は、発震点、受振点やCMP(Common Mid Point)のGeometryについてである。Time modeでの二船式反射法探査であるため、発震点番号、Field file番号は測線COP1及び測線COP2内の個々のトレースを区別できる固有の番号ではない。そこで、速度解析の前段階までは、測線毎(オフセット毎)にデータ処理を行った。また、Geometry setに用いる測位データは、「かいいい」の受振点データと「かいいい」

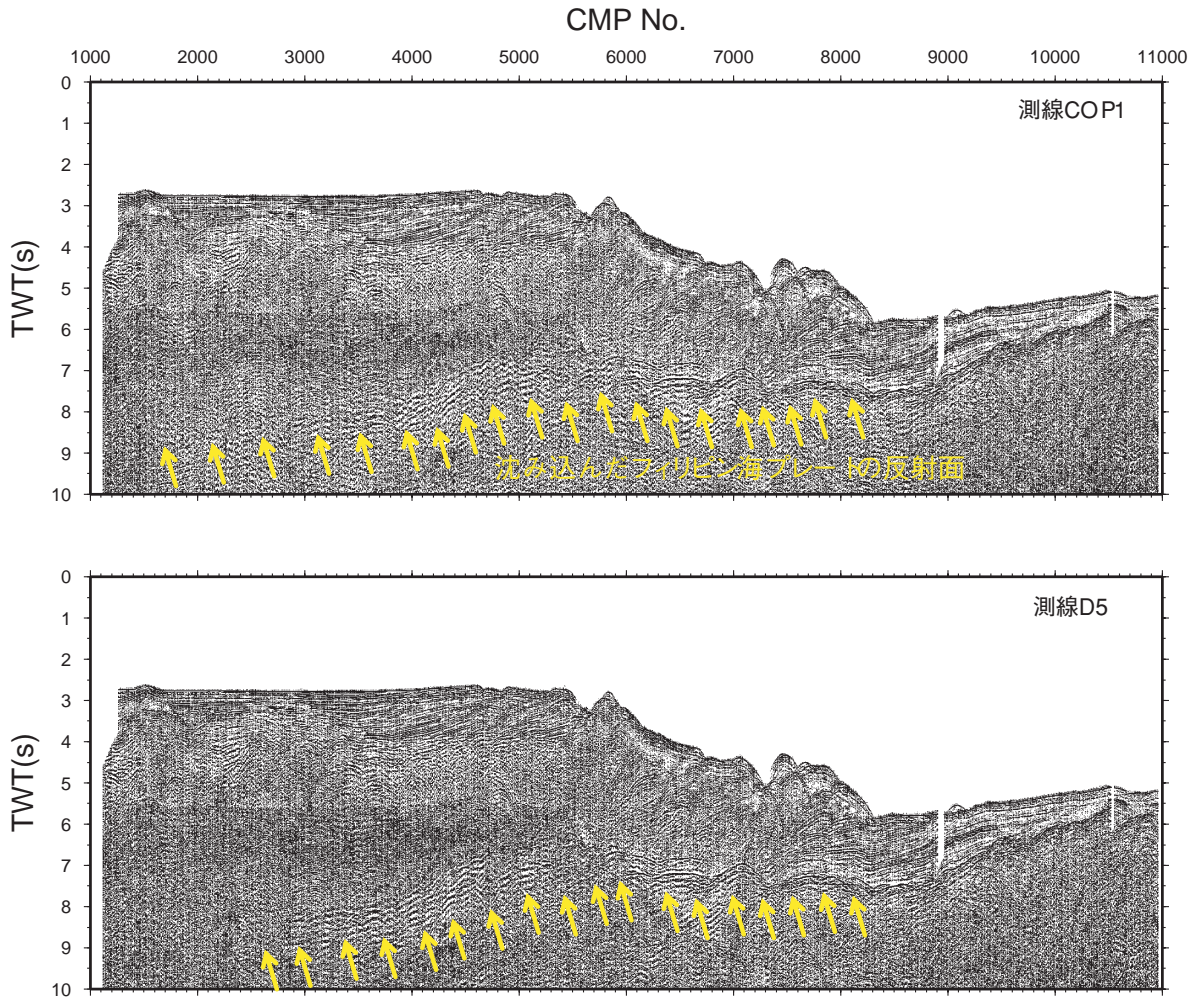


図12 本調査で得られた重合断面の一例(測線COP1)。下図は「かいいい」単独でのMCSデータ(オフセット0~5km)で反射法探査を行った測線(測線D5)。縦軸が往復走時(s)、横軸がCMP No.である。1000CMPの距離は12.5kmである。

Fig. 12 Stacked section of line COP1. The bottom profile is a conventional MCS data (offset 0 to 5km), and the top profile is a two-ship seismic data (source - receiver offset 0 to 20km).

よう」の発震点データを統合させたデータを使用した。さらに、全オフセットのデータを結合することを前提とした処理であるため、速度解析前に測線COP1及び測線COP2内のCMPの始点・終点のUTM (Universal Transverse Mercator's projection) 座標はそれぞれ固定して、CMPやオフセット等の計算を行った。

速度解析前に得られた全オフセットのCMP gather dataの一例を図10に示す。図のようにデータが存在しないオフセットがある。その理由としては、潮流の影響により、「かいいい」と「かしよう」の船間距離は完全には一定を保てないことなどによる。また、測線に直交する方向に対しても二船の位置には多少のずれが生じており、ストリーマケーブルの曲がりの影響もある。そのため、速度解析及びNMO補正前のデータ処理は、測線毎(オフセット毎)に実施することで、不連続となっているデータの影響をできるだけ軽減した。

4. 考察及び今後の課題

4.1. データ取得

データ取得については、測線COP1においては最大オフセット約19km、測線COP2においては最大オフセット約20kmに及ぶ良好なデータが得られた。これは「かいいい」と「かしよう」のデータ取得システムの時刻同期が正確に得られたということが要因として大きい。また、エアガンの発震時のずれを利用した震源エネルギーの指向性も成功し、エアガン間の発震時のずれの大きい場合、オフセットの大きい記録に振幅が大きくなる傾向が見られ、エネルギーの指向性もっていることが確認された。

しかし、今後、「かいいい」「かしよう」を用いた二船式反射法探査を実施する際の課題も見つかった。

1つは、Distance modeによるデータ取得のシステム開発である。Time modeで探査を繰り返した場合、データの密度が一定せず、同じ場所で発振することは事実上不可能なため、Shot gather dataを作成することはできない。Distance modeに

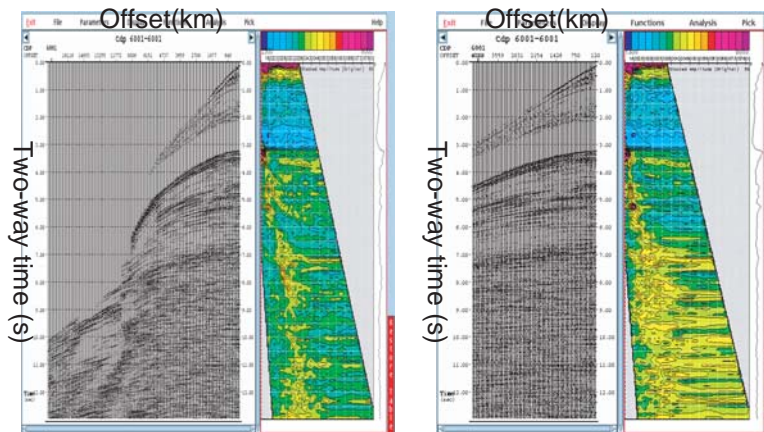


図13 速度スペクトルの比較(測線COP1)。左図が二船式データ(オフセット0~18km), 右図が「かいいい」単独でのMCSデータ(オフセット0~5km)。地震波速度の速い深部構造(図中の赤い点線の楕円)に関しては, 長大オフセット記録を用いることにより, 速度スペクトルのFocusingが改善されていることが分かる。

Fig. 13 Comparison of a velocity spectrum between a two-ship seismic data (left figure) and a conventional MCS data (right figure).

よるデータ取得するためには, 発震と受振を同期する送受信を確実にするシステムの構築もしくは発震船と受振船が同一のLAN環境化におこなうなどのシステム構築が必要である。

もう1つは, 「かいいい」「かいう」二船間の距離が一定せず, データが取得できないオフセットが生じる問題についても今後の課題となった。図11で示すように, データが取得できないオフセットができてしまい, CMP毎のデータ量にもかなり差が出てしまった。二船間の距離が数km離れていると, 海流等の状況も異なるので, 完全に二船間の距離を保つことは難しい。また, 現在のシステムでは, リアルタイムで発震と受振に関するGeometryを把握することができない。そこで, できるだけオフセットを重複させてデータを取得する必要があるが, ストリーマケーブルの曲がりの影響により, 重複している部分のデータが合わない可能性もある。できる限りリアルタイムで, 正確に二船間の距離と発震点と受振点のGeometryの情報を把握できるようなシステムを構築することが, 二船式反射法探査のデータ取得をより確実にかつ正確にするとと思われる。

4.2. データ処理

データ処理においては, 前節で述べたように, 特に3つの課題について試行錯誤しながら, 処理を進めた。その結果, モホ面や沈み込んだフィリピン海プレート等の深部構造のイメージングは改善された(図12)。

特に, 速度解析の精度に関しては, 速度スペクトルのFocusingが良くなる場合が多く, 解析精度が向上した(図13)。特に, 比較的地震波速度の速い深部構造に関しては, 長大オフセット記録を用いることにより, 速度スペクトルのFocusingが改善された。速度解析の決定精度の向上は, NMO補正の精度向上にも直結する。さらに, NMO補正に関しては, Long offset correctionを用いることにより, さらに処理

精度が改善された。しかし, NMO stretchingの影響が重畳結果をかなり左右した。長大オフセットの記録の活用とNMO stretchingの影響に関する問題については互いが深く関連する問題であるので, 今後も十分な検討が必要である。

多重反射抑制処理に関する問題については, 前述の方法が効果的であることが確認された。二船式データに関しては浅層構造を考慮しないため, 処理のルーチン化が比較的容易であった。しかし, 空間エリアジングの問題は前述の方法でも完全に解決することは難しい。NMO stretchingの問題と同様に, 長大オフセットのデータを有効に活用するためには, 長大オフセットデータの重要な情報を保ちつつ, 空間エリアジングを抑制させるということが非常に重要な課題である。

発震点や受振点などのGeometryの問題に関してはGeometry setなどのデータ処理上の技術的な問題はクリアされた。しかし, データ取得の問題と関連するが, 各測線間のデータが不連続となる問題については, 特にPre-stackでのデータ処理を複雑にする要因の1つとなっており, 今後の検討課題の1つである。

また, 鶴・他(2003)は, 今回の二船式データを用いて, AVO解析の検討を行った。断層面の物性の空間変化を推定できる可能性を示し, 二船式データがAVO解析に対しても有効であることが確認された。

5. まとめ

「かいいい」「かいう」による二船式反射法探査は, オフセット約20kmに及ぶデータが取得でき, 深部構造イメージングに効果的であることが確認された。航行船舶が多く, 漁業が盛んな日本近海においては, 長大ストリーマケーブルを曳航するより, 二船式によるデータ取得が有効であることも調査を通じて確認できた。今後, 二船式反射法探査が実施される可能性もあり, 今回の課題について検討を進めていきたい。

謝辞

海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システムの小平秀一博士、木戸ゆかり博士、深海研究部の高橋成実博士には本調査の事前準備段階で、多くの御指導と御協力をいただき、感謝申し上げます。今回の調査を行うにあたって、深海調査研究船「かいらい」の湯川船長をはじめとする乗組員の皆様、海洋調査船「かいよう」の長谷川船長をはじめとする乗組員の皆様には多大な御協力と御配慮いただき、感謝申し上げます。有限会社アーステクノの清水洋芳氏、南澤正樹氏には、データ取得時に大変お世話になり、感謝申し上げます。本稿をまとめるにあたり、日本海洋事業株式会社の樋泉昌之氏に御協力いただきました。また、本調査に関係された多くの皆様に御指導と御協力をいただいたことを深謝致します。

参考文献

- 1) 三浦誠一, 笠原順三, 鶴哲郎, 朴進午, 藤江剛, 小平秀一, 金田義行, “PS変換波取得をめざしたエアガンアレイ指向性実験(2)”, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, 225-225, (2002).
- 2) Castle, R.J., Theory of normal moveout”, *Geophysics*, 59, 983-999, (1994).
- 3) 鶴哲郎, 朴進午, 三浦誠一, 藤江剛, 伊藤亜妃, 金田義行, 笠原順三, KR02-11乗船研究者, “二船による反射法地震探査データの間処理報告”, 物理探査学会第108回学術講演会, 3, (2003).

(原稿受理:平成15年8月20日)