リフラフォン方式による海上弾性波探査

浅野 郡 司*・ 神田 祐 太 郎**

Marine Seismic Survey by “REFRAPHONE” System

Gunji ASANO and Yūtarō KANDA

Abstract

In order to investigate the geophysical property of sea bottom an acoustic exploration method with a sonoprobe, sparker or airgun as a source depending on the investigation purpose has been commonly used. Since this method provides a graduation recoding by a reflected acoustic wave at boundaries below sea bottom, a vertical section of geological structure can visibly be recognized. However, for the purpose to investigate the hardness of rocks in such cases as an investigation of engineering geology, it is not sufficient because this method does not indicate the wave velocity of rocks.

A marine seismic investigation called “Refraphone method” has been carried out by improving seismic source and geophone at sea bottom. In this method 3 to 4 hydrophones (8 to 10 depending on the situation) for the marine refraction method survey are positioned on the profile line at sea bottom and a popping ship navigating on the line at 2 to 3 knots pops an airgun, which is connected to a high pressured nitrogen gas cylinder and kept at a certain depth under the sea surface, at regular interval of 6 to 14 seconds. The refraction waves are recorded in a data recorder simultaneously with the popping timing transmitted from the ship at each receiving point.

Some characteristic of this new method are summarized as follows;

- (A) Since an airgun is used instead of the dynamite, no damage accrues to fishes. There is no explosion sound in the air, as the gun pops more than 5 meters under sea surface.
- (B) Surveying time can be reduced by an easy operation in comparison with traditional methods. The operation on the sea with a slow tidal current is carried out more efficiently than on the ground. This applies also to that in narrow strait with a fast tidal current since it can be carried out taking the advantage of a short period of turning current.
- (C) A radio wave telrometer used for guiding recording ships and a popping ship makes the position measurement more accurate than before.

A refraction wave investigation “Refraphone method” provides similarly reliable data to those obtained from a ground surface seismic investigation. By the analysis of records in “Refraphone method” the survey on the sea surface can easily be performed in order to investigate the distribution of longitudinal wave velocity which indicates the hardness of rocks, velocity and width of fractured zone recognized as a low velocity zone, properties and thickness of weathered layer which covers bed rocks, thickness of sedimentary layer and its velocity which indicates the solidity of the layer, and so forth.

概 説

海底の地質を調査する目的でおこなわれる物理探査としては、ソノプローブ、スパークー、エアガンなどの音源を調査目的に応じて選択した音波探査が、一般には普

及している。これらは海底以深の地層で反射した音波を受振し、増幅濾波して濃淡記録で表現するので、あたかも地質構造の断面を直観的に知り得るような判り易さがあるが、地層を伝播する音波速度が判らないので、岩石の硬軟を調べることを目的とした土木地質の調査には不十分である。かつて津軽海峡トンネルや在来線の関門海峡トンネルでは、両岸に受震器を据えつけて測線上数十

* 日本国有鉄道鉄道技術研究所

** 日本物理探査株式会社

(A) ダイナマイトではなくて水中発震器を使用しているので魚族への被害はなく、水面下 5 m 以深で発震するので空中音を発しない。

(B) 作業が従来の方法に比べ、労力的に楽で測定時間が短縮される。従って潮流の小さい海上では陸上の測定作業よりも能率よく、豊予海峡のような潮流の速いところなどでも転流時の僅かな時間帯を利用して測定作業ができる。

(C) 観測船、発震船の誘導などに、電波測距儀を使用するので測点位置の精度が高い。

このようにリフラフォン方式による屈折波探査法は、従来からおこなわれている地表弾性波探査と同じような成果が得られ、解析によって、岩盤の堅硬度をあらわす縦波の伝播速度の分布、低速度帯として検出される断層破碎帯の速度およびその幅、岩盤を被う風化岩の性状および厚さ、未固結堆積層の固結度をあらわす速度と層厚などについての調査が容易に行えるようになり、豊予海峡の海底地質調査においても、期待どおりの成果が得られたので調査方法、解析方法や成果の一部について記述する。

1. 測定作業

1.1 測線の設定

調査地域の平面図に計画された測線を現地に設定することから始まる。測線付近に設置されている三角点の緯度経度をもとに、海岸近くまでトラバース測量によって基準点を設け、これらの座標系から測線の方位等を決定

し、海岸線まで測線を延長してここに誘導点を設ける。

測定時には、この誘導点にトランシットおよび電波測距儀の従局を設定して、受震船によって水中受震器を測線上の海底に設置するための誘導を行なう。受震船は普通 5~10 ton の漁船を現地で調達し、豊予海峡の調査では受震点間隔を 800~1000 m として 3 隻使用した。海底下 20 m~30 m の比較的浅い部分を対象とする調査では、1 隻の受震船で 3 点ぐらいの水中受震器を受持ち、受震点間隔を 100~200 m として 3 隻使用している。

測定の際には、発震船に電波測距儀の主局を設置し、発震船が測線上を航行する際に、トランシットにより刻々発震船の位置を誘導し、電波測距儀によって基準点からの距離が、2 秒間隔で打ち出されてくるので、発震器の発震時位置が 10 cm の精度で記録される。

海岸線と平行になるような測線では、延長上に誘導点が設けられないので、2 つの基準点によって円座標を作成し、この座標上に測線をプロットして、2 つの基準点からの電波測距儀の打出す距離をもって船位置を出し航行する方法をとった。

また、測定と同時に音響測深機により測深を行ない、潮位記録で補正して、測線の海底地形断面図を作る。

1.2 探査機器

発震船、受震船に搭載し測定に使用された主な機器は表-1 の通りである。

1.3 測定方法

作業は各分担に応じて次の表-2 に示す順序で行われる。

表-1 発震船および受震船の装置

発 震 船 (5 トン~60 トン)		受 震 船 (3 トン~30 トン)	
機 器 の 名 称	規 格	機 器 の 名 称	規 格
高 圧 発 震 器	49 P-II 型 220 ϕ , 150 kg	水 中 受 震 器	NGP 製 52 R 型 ケーブル 400 m 付
7000 l 窒素ポンプ	150 kg/cm ²	50 A-3 型 増 幅 器	3 チャンネル 80 dB 4 dB ステップ切替
減 圧 弁 装 置	1 次 250 kg/cm ² 2 次 150 kg/cm ² max	J J Y 受 信 機	SONY EM-2000 F
データー・レコーダ	SONY DFR-1902	ポップマーク受信機	50 VD 型
J J Y 受 信 機	SONY FM-2000 F	データー・レコーダー	SONY DFR-1902
電 波 測 距 儀 主 局	MRB-201 型テルロメーターまたは 8D030 型オーディスター	—	—
音 響 測 深 機	RASADENSHI RS-61 型	—	—

表-2 作業標準例

	測 量 班	受 震 船	発 震 船
手続	海上保安庁、地元漁業協同組合に作業手順日程等の説明を行ない海上作業の諒解を得る。		
準備作業	① 基準点の選定 ② 基準点の諸元をもとに測線との関係を求める。 ③ 平面図上に円座標を作図して測線を設定 ④ 海図及び潮汐表により転流時（作業時間）を調べる。	① 記録室の艤装 ② ケーブル巻揚装置の艤装 ③ 受震器とケーブルの接続 ④ 受信用アンテナ装備 ⑤ 測定機器の据付整備	① 発震器 (airgun) 取付 ② 発震器昇降装置艤装（吊下ワイヤー、引き綱ワイヤーウィンチ） ③ 高圧窒素ボンベ積み込み ④ 測量室艤装（電波測距儀主局装備） ⑤ 発信用アンテナ装置 ⑥ 音響測深機取付
測定作業	① 転流時より2時間前に出発、基準点に電波測距儀誘導点に電波測距儀とトランシットを設置して船の現場到着を待つ。 ② 測定開始の指令を受け受震船へ受震船を誘導、所定の位置に受震器投入を指示。 ③ 測定開始の指示により発震船を刻々誘導する。	① 測量班の指示に従い所定の位置に至り海底受震器を設置、ケーブルを十分伸ばし、データーレコーダーに接続、ノイズの無いことを確かめ作業開始を待つ（受震船3隻） ② 測定開始の指示によりデーターレコーダーに震動記録、ポップマーク、標準刻時を記録。 [浅い海では1隻の受震船で3~4点の受震器を受持つ]	① 発震船は受震点設置のため受震船に協力。 ② 受震点でのノイズの無いことを確かめ測定開始の指示を出し測線の一端から航行、測量室では航跡を記録し、ポップの位置を記入。 ③ 音測機により発震器の深度と水深を確かめて、2~3ノット/時程度で航行6~14秒間隔でairgunをポップさせる。 ④ 船長は測量室よりの指示に従い操舵により測線上を航行に努める。
撤収	① 作業中止の指令により基地を片付けて帰る。 ② 反射波の測定が行われる時は引続き、船位置の誘導を行なう。	② 潮流、風波などのため受震器のノイズが大きくなった時は、測定作業中止の提案を行なう。 ② 中止の指令により受震器の引揚げを行ない終了後帰港する。	① 測線について予定した屈折波の測定が完了した場合や受震器のノイズが大きくなった時は、測定の中止を指令する。 ② 参考のため反射波の測定を行なうことがある。
内 業	① 航跡図の整理図化	① 受震ケーブルの保守、整備 ② データーレコーダーよりのアナログ記録に再生 ③ 記録再生に際しフィルター使用	① 作業用機器の点検整備 ② 音響測深機記録によって海底断面図作成 ③ 窒素ボンベの補充

図-4 はリフラフォン方式の測定状況を、ブロックダイアグラムで表わしたものである。図-5~6 は豊予海峡での調査の写真である。

1.4 記録再生

リフラフォン方式による測定で、データーレコーダーに記録されたものは、発震船より電波搬送されてくるポップマーク、屈折波信号、直接波としての水中音波、時間校正のためのクリスタルタイマーによる1/100秒刻時およびポップ番号などの会話音声である。これと同時に

モニター用2ペンレコーダーに震動およびポップマークを書かせて測定記録を監視し、良好な記録が得られるように測定機器の調整を行っていく。

このような磁気記録を再生してアナログ記録として、しかも、これを距離の順に一枚の特殊記録紙に、50点まで自動的に書かせる間歇波動整列記録装置（特許出願中）一（図-7）を開発した。

本装置は2台のドラム部とデーター記憶およびコントロール部とから成り、1枚の記録紙（550mm×530mm）

図-4 リフラフォン方式の測定状況ブロックダイアグラム

図-5 港に停泊中の発震船
船尾に吊してあるのは水中発震器，その上は
測量室と電波測距儀主局アンテナ

にポップ信号と波動を連続して 50 回まで記録することができ、記録が終了すると自動的にもう一方のドラムに切り替わり、連続して 1 つの受震点に対する記録を再生することができる。記録の例を 図-8 に示した。また再生に際しては、ノイズのある場合にはこの卓越したノイズの周期のものを汨波するように、汨波器を通すことによって S/N 比の大きい良好な記録を再生することができるので、一連の記録からの初動の読みとり精度が向上した。

図-6 水中発震器と鉄棒

図-7 間歇波動整列記録装置
左より予備ドラム，記録ドラム，データー記憶およびコントロール装置

2. 解析方法

2.1 走時曲線の解析

アナログ記録から、初動走時を読んで走時曲線を作成する。走時曲線は受震点の近くでは海水を伝播した直接波であり、発震点が受震点の直上にあるときの走時は $t = \text{水深 (m)} / 1500 \text{ m/sec}$ となり、発震点が遠ざかるに従い、上向きの双曲線となり、やがて、海底の第 1 層、第 2 層海底の岩盤を伝播してきた屈折波の走時となる。

走時曲線の解析については、陸上の測定で得られる走時曲線の解析方法と同様に、表層除去法の計算を行ない、「はぎとり線」を求めて、岩盤の速度と深度走時を求める。深度走時は発震点から岩盤までの深さに相当する時間である。陸上部の解析では、この深度走時を中間発破点の走時曲線から求めた表土や、風化帯の速度で、それぞれの層の厚さを計算して、速度断面を作図するのに対して、リフラフォン方式の走時曲線では、深度走時の中には、発震点から海底までの水深に相当する深度走時が含まれている。従って水深に相当する深度走時 (D_w) を (1) 式で計算し、測定した初動の走時から差し引いて、残りの深度走時をもって岩盤を被う層の深度走時とする。

図-8 間歌波動整列記録装置によって再生されたアナログ記録 (受震点 700 m) ① 初動走時、② 屈折波初動、③ 1/100 秒刻時、④ ポップ番号、⑤ 基準点からの距離、⑥ 初動走時

$$D_w = \frac{Z_w \cdot \cos \theta_w}{V_w} \dots \dots \dots (1)$$

Z_w ……水深

θ_w ……屈折波の臨界角

V_w ……海水の弾性波速度

海底下の第 1 層の速度は、受震点に近い走時曲線に見掛けの速度としてあらわれているのでこの値を用いる。

また 図-9 の事例にも見られるように、海底第 1 層の走時曲線は、比較的直線性を示すことから、速度の変換点すなわち、走時曲線の折点を見つけることが容易である (走時曲線の中に ↓ で示した)。

海底第 1 層の速度および層厚を求めるためには、短い間隔で多くの受震点を設け、発震点間隔も小さいほど走時曲線の点が多くなって精度はよくなる。図-9 の如く水深 20 m 以下で潮流の小さい所での地質調査では受震点間隔を 100 m とし、測点間隔を 7~8 m としして測定している。

解析の手順としては、走時曲線の平行性などを確かめることによって、海底下の第 1 層、第 2 層、第 3 層の屈折波 T_1 , T_2 , T_3 を判定し、走時曲線の折点を求めて、折点距離から各層の厚さの計算を行う。この場合 図-10 に示すように、リフラフォン方式測定では受震器が海底に設置され、発震点は水面下数 m にあるため、発震点からの水深を Z_w , V_1 層、 V_2 層の厚さを、それぞれ、 Z_1 , Z_2 とすると

$$T_1 = \frac{x}{V_1} + \frac{Z_w \cdot \cos \theta_{w.1}}{V_w} \dots \dots \dots (2)$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2 \cdot Z_1 \cos \theta_{1.2}}{V_1} + \frac{Z_w \cdot \cos \theta_{w.2}}{V_w} \dots (3)$$

$$T_3 = \frac{x}{V_3} + \frac{2 \cdot Z_2 \cos \theta_{2.3}}{V_2} + \frac{2 \cdot Z_1 \cos \theta_{1.3}}{V_1} + \frac{Z_w \cdot \cos \theta_{w.3}}{V_w} \dots \dots \dots (4)$$

但し $\theta_{w.1}$, $\theta_{w.2}$, $\theta_{w.3}$, $\theta_{1.2}$, $\theta_{1.3}$, $\theta_{2.3}$ は図の屈折波の径路の屈折角とする。上式において $T_1 = T_2$ の距離を x_{12} , $T_2 = T_3$ の距離を x_{23} とすると、

$$Z_1 = \frac{x_{12}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} - \frac{1}{2} Z_w \cdot \frac{V_1 \sqrt{V_2^2 - V_w^2} - V_2 \sqrt{V_1^2 - V_w^2}}{V_w \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \dots (5)$$

$$Z_2 = \frac{x_{23}}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}} - Z_1 \frac{V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2} - V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}} - \frac{1}{2} Z_w \frac{V_2 \sqrt{V_3^2 - V_w^2} - V_3 \sqrt{V_2^2 - V_w^2}}{V_w \sqrt{V_3^2 - V_2^2}} \dots (6)$$

図-9 水深の浅い所の地質調査の実例

図-10 リフラフォン方式測定の水層構造走時曲線

一方この計算とは別に、 T_3 あるいは T_2 の走時曲線で、「はぎとり計算」の出来る部分について「はぎとり」を行ない、その層の速度を決め、深度走時を求める。さきに折点距離から求めた速度層の厚さと、深度走時から求めた層の厚さとをチェックをする。こうして各発震点における層厚の計算を測線全体に実施して、速度層断面図を作図する。なお最終的には、任意の発震点を選び、弾性波の径路を記入し、パス計算を行って、測定値（走時）との一致を確認して断面図を決定する。

2.2 解析結果の判定

図-9の速度層の名称は、中心線に施工されている4本のボーリング採取コアや N 値など参考にし、これと周辺の地質踏査結果を参照して決められる。

すなわち海底第1層は、上位が 1.5 km/sec、下位に至り 1.6 km/sec とする沖積層および洪積層のシルト、粘土、砂礫よりなる N 値 10~40 の未固結層と一致する。

第2層は、2.0 km/sec~2.1 km/sec の速度を示す新第三紀鮮新世の火山岩類に対比される凝灰角礫岩と、古第三紀の頁岩・砂岩の互層より成る第3層の風化帯で、ボーリング結果と対比すると、 N 値が 50 以上を示す境が、弾性波探査による海底第2層の上面に一致する。従って構造物の基礎として安定した基礎地盤は、この 2.0~2.1 km/sec 層と判定した。

第3層は弾性波速度 2.5 km/sec~3.0 km/sec を示し、当地域の基盤である古第三紀の新鮮な岩盤に相当し、 N 値はこの層で 50 以上である。

3. 豊予海峡での調査例

海峡を横断する海底トンネルの場合、紀淡海峡や豊予海峡などはいずれも水深が 200m 近くあり、潮流も激しいので、受震点間隔は 800m~1000m にとることが多

い。転流時の作業といえども、2~3ノットの潮流があるので、発震船の航行速度が、最小3~4ノットでポップの間隔を14秒としたため、発震点間隔は20m程度になったが、1受震点の測点は40~50個となり、岩盤の速度分布を求めるための斜ぎとり計算を行ない、破碎帯などの検出も十分できた。また豊予海峡の場合でも、海底の堆積層の調査を目的とするときは、受震点間隔を100m~300mとし、発震点をできる限り深く（海底近く）沈めて発震することによって、海底第1層、第2層の速度や厚さを比較的精度よく調査できる。

発震器は高圧空気を用いているので、水深が大になると発震器に加えた圧力と水压の差によって作動するため、発震器へ送る圧力が70 kg/cm²で水深が100mの場合でも発震器は完全に作動するが、振幅は目立って小さくなる。したがって受震可能な震央距離は当然小さくなる。図-11は容量150ccの発震器の空気圧70 kg/cm²における各深度における波形を示した。振幅は深度100mで、深度10mのときのほぼ1/10に減衰する。また震動の周波数は深度100mのとき約100Hzで、10mのときの約2倍である。60mより深いと、ほとんどパルプは発生しなくなり単純な波形となる。図-12は各深度における振幅と周波数の変化を、150ccの発震器で実

図 11 150 cc 発震器の各深度における波形
(圧力 70 kg/cm²)

図-12 各深度における振幅、周波数の変化
(実測値)

験した実測値であり、図中一点鎖線で示した値は、大型500cc発震器の周波数推定値である。深く沈めても周波数は80Hz前後で、エネルギーは小型のものの3倍以上ある。

図-13は水深約180mの豊予海峡において特に海底堆積層の調査を目的とした、リフラフォン方式による走時曲線と解析の断面を示す。この場合は堆積層の厚さが40m程度あったため、発震点の深度が-85mの走時曲線および-60m、-40m、-20mの深度の走時曲線にも、海底第1層の1.7 km/secと海底第2層2.5 km/secとの折点、2.5 km/secと第3層5.0 km/secとの折点はかなり明瞭に把握することができて、図-13の上部に示すような地質断面を解析した。

図-13 水深180mの豊予海峡における岩盤被覆層の調査例

あとがき

今まで海底の弾性波地質調査を実施しようとすれば、まず、海底でダイナマイトを爆発させるとなれば、魚に対する被害という点で、地元漁業協同組合との諒解が得られないので調査ができない。また海底受震器にジンバル式のものを使う方法では海峡トンネル調査の場合、潮流と直角方向に直線状に沈めることが困難で、陸上の調査にくらべ精度が低い上に調査費が嵩む。その点リフラ

フォン方式による屈折法は、作業が比較的容易で調査結果も向上した。

今後なお水中発震器の強力化や曳行方法、測定機器の改良、測定方法など研究の余地は多いが、海上地質調査の発展に寄与できるものと確信する。

最後に本稿をまとめるにあたり、鉄道建設公団本社、白井慶治氏はじめ、鉄道建設公団下関支社の担当各位の御指導を賜った。各位に深く感謝する次第です。

(昭和 54 年 12 月 11 日受理)