海底精密音響測距実験 —その可能性を示す観測結果—

東京大学海洋研究所*

藤 本 博 巳

東京大学地震研究所**

金 沢 敏 彦

海洋電子***

村 上 英 幸

Experiment on Precise Seafloor Acoustic Ranging
—A Promising Result of Observation—

Hiromi FUJIMOTO

Ocean Research Institute, University of Tokyo,
1-15-1, Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164, Japan

Toshihiko KANAZAWA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Hideyuki MURAKAMI

Kaiyo Denshi, Inc., Kasumigaseki-kita,
2-17-3, Kawagoe 350, Japan

(Received April 26, 1995;

Accepted June 15, 1995)

§1. はじめに

最近 Differential GPS (Global Positioning System) による測位精度が向上し、プレート運動ばかりでなくプレート境界の変動についても、測地学的観測から変動のメカニズムを明らかにする研究が開始されている [例えば, HEKI *et al.* (1993)]. しかし最も大きな変動が起こっているプレート境界は、特殊な場所を除けば電波の届かない深海底にあるので、海底における地殻変動観測が重要である。中央海嶺やトランスフォーム断層の変動帯の幅は 1 km 程度であるから、たとえば 3 km の距離変化を 1 cm の分解能で検出できれば、海洋底の拡大運動のモニタリングが可能になる。沈み込み帯では変動帯の幅は大きい、三陸沖の日本海溝ではプレート運動による歪みの大半は非地震性のすべりで解放されており [川崎・他 (1993)], 日本海溝で起きる大きな地震はプレス

リップを起こしている [例えば, 加藤・他 (1995)] 等の興味深い問題がある。このような問題も、陸上における GPS 観測や地震観測と海底の地殻変動観測を合わせるにより、詳しい解析ができる可能性がある。

海底の地殻変動観測のうち、水平方向の変動を観測する手法の一つとして提案されているのが、海底精密音響測距である。そのような観測は技術的な困難さからまだ行われていないが、海底間の 3 km の距離を 1 cm の精度で測定することは可能であることを示唆する海底実験の結果が得られたので報告する。

§2. 水中音響測距の問題点と海底間の観測の利点

水中音響測距における問題点はいくつかあるが、次節で述べる音波の伝播時間の精密測定他、音速変化の補正が重要である [FUJIMOTO *et al.* (1990)]. 音速は、温度、圧力、塩分の増加とともに速くなるが、中でも温度の影響が最も大きい。例えば相模湾の底層にある約 2.5°C の海底で音響測距を行うと、0.001°C の水温変化は 3 km の距離で 1 cm の距離変化に相当する。

海面と海底の間ではなく、深海底間で音響測距を行う利点は二つある。最大の利点は水中音速が安定していることである。一般的には海流の影響は表層約 500 m に限られるから、1,000 m より深い海中の温度は安定している。沈み込み帯のように陸の斜面に近い場所では、深海底でも潮汐等に伴って 0.1°C 程度の温度変化はあるが、表層に比べればその温度変化は二桁程度小さい。二つ目の利点は音響雑音が少なく、高い S/N 比で信号を受信できることである。海上における音響測位で問題となるのは、観測を行っている船や波浪による音響雑音である。

§3. 計測システム

通常の中測位に用いられる音響トランスポンダーの測距分解能は 1 m 程度であるから、1 cm の測距を行うためには測定分解能を 2 桁上げなければならない。そのためには受信信号の S/N 比を向上させることが不可欠であり、我々は、GPS 測位等で用いられている M 系列信号の相関処理を用いたパルス圧縮法を採用した。これは精密音響測距における標準的な方法である [例えば, SPIESS *et al.* (1991), TAKEUCHI (1991)].

測距に用いた音波信号は、10 kHz のキャリア信号を位相変調してコード化した 5 次の M 系列信号である。一つのコードはキャリア 8 波よりなる、0.8 ms の信号である。5 次の M 系列信号は 31 個のコードからなるので、24.8 ms の信号となる。受信信号を同期検波し、0.2 ms 間隔で数値化して相関処理を行う。今回は最初の試

* 〒164 東京都中野区南台 1-15-1

** 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 〒350 川越市霞ヶ関北 2-17-3

験観測であり、コード化した信号の位相の 1/4 までしか読み取っていないが、その位相の 1/100 まで読み取ることができることは岸壁試験で確認している。

今回の海底測距試験の概要を Fig. 1 に示し、その計測動作を Fig. 2 に示した。海底に 2 台の測距装置 (A, B) を設置し、A を主局とすると、A が一定の間隔で既定の M 系列信号の音波を送信する。B の装置は、受信信号を数値化し、相関処理を施して音波の精密な到達時刻を求め、その時刻からある一定時間後に同じ M 系列信号を送信する。A も B と同じように受信信号の到達時刻を精密に求め、一定時間後に再度同じ信号を送信

Fig. 1. Schematic diagram of trial experiment of seafloor acoustic ranging. Two units of acoustic ranging system were deployed at the altitude of 8 meters.

する。この段階で、音波が A-B-A 間を伝播する時間が測定され、結果は装置 A に記録される。続いて B も同じように B-A-B 間を伝播する時間を求め記録する。水中を伝わる音波の伝播時間は流れの影響を受けるが、往復測定により、その影響と時計のドリフトの影響を共に回避できる。ほぼ同じ時刻で逆向きの往復測定の結果が二つの装置に記録されるので、測定結果の信頼性も評価できる。

§4. 海底測距実験とその結果

東京大学海洋研究所の淡青丸 KT-94-17 航海において、94 年 11 月 10 日に相模湾中央部の海底に 2 台の測距装置 A, B をほぼ東西に約 3.3 km 離して設置した。海底地形はゆるやかな斜面であり、水深は A の設置点が 1,360 m, B が 1,390 m である。今回の実験は測距装置の動作試験が主目的であったので、Fig. 1 に示すように、繫留系を用いて音響素子を海底から約 8 m 立ち上げ、水温は観測しなかった。底層流により繫留系が傾く影響については後述するが、実際の測距観測の場合には、装置をフレームに固定し凹地を挟んで観測することが必要である。海底では 10 分毎に 2 点間の往復測距を行い、それぞれの装置には 10 分毎の測距データが記録された。約 19 日間観測し、11 月 29 日に淡青丸 KT-94-18 航海において 2 台の測距装置のうち A を回収した。残念ながら B は回収できなかった。

回収された装置 A に記録されていた約 19 日間の音響測距結果を Fig. 3 に示した。横軸は 11 月の日付であり、縦軸は音波が AB 間を往復するのに要した時間である。観測データに見られる 0.2 ms のステップは測定分解能を表している。CTD 観測によれば相模湾の海底付近の音速は 1,484 m/s であるから、縦軸の 1 目盛 1 ms を距離に換算すると 74.2 cm に相当する。AB 間の距離

Fig. 2. Timing chart of the two-way acoustic ranging.

Fig. 3. Results of acoustic ranging on the seafloor of Central Sagami Bay at a baseline length of about 3.3 km. The ordinate shows two-way travel times in ms, and abscissa date of November 1994 in local time. Resolution of the ranging was 0.2 ms.

Fig. 4. Results of temperature measurements (November 1992–June 1993) with a quartz thermometer on the seafloor off Hatsushima Island, Sagami Bay [NAKANISHI *et al.* (1995)]. A frequency variation by 0.001° MHz corresponds to temperature variation by 1°C.

は、平均的な往復時間 4,455 ms より計算すると、3,305.6 m である。図の結果は、10 日前後の周期で、距離に換算して振幅約 2 m に相当する変動を示している。

§ 5. 考 察

二つの測距装置は安定な海底に設置したから、観測中に距離が変化したとは考えられない。まず吟味すべきことは、繫留系が傾く影響である。竹内・他(1994)によれば、底層流によって繫留系が傾くことによる水平変位 x は、流速 u が小さい ($u < 0.5$ m/s) 場合、 $x = KLu^2$ という式で近似できる。 L は海底からの高度である。 K は流体抵抗に関する係数であり、 $2 \text{ s}^2/\text{m}^2$ 程度の値をとる。

潜水調査船で観測される底層流は多くの場合 0.1 m/s 以下であるので、 $u = 0.1$ m/s、 $L = 8$ m、 $K = 2 \text{ s}^2/\text{m}^2$ とすると、 $x = 0.16$ m となる。つまり観測データに対する底層流の影響は、あっても 16 cm 程度であり、観測された変動量より 1 桁小さい。

残された主要な問題は、底層の水温変化の影響である。上述のように、相模湾の底層水の場合、温度が 1°C 変化すると、音速は 0.3% 変化し、3.3 km の音響測距では約 10 m の変化となる。今回観測された測距データの変動の振幅は約 2 m であるから、振幅約 0.2°C の温度変化に相当する。問題は相模湾の海底の温度変化である。そこで 1992 年から翌年にかけて、今回の観測点の

近くで約 200 日間の熱流量観測を行った時に得られた底層水の温度変化を Fig. 4 に示した。10 日から 15 日の周期で、振幅約 0.2°C の変動が観測されており [中西・他 (1995)], 今回の音響測距の結果と調和的である。ちなみにその熱流量観測に用いたセンサーは小型の水晶温度計であり、 0.001°C の温度変化を精密に計測できることが確かめられている [中西・他 (1995)].

§6. ま と め

精密音響測距装置の試作機を用いて、相模湾の海底において、約 3.3 km の海底音響測距を約 19 日間にわたって行い、底層水の温度変化と考えられる変動を観測した。この海底観測では測距の分解能は約 15 cm であったが、その後に行った岸壁試験の結果では、検波信号のサンプリングレートを 1 桁以上上げることで、計測分解能を 1 cm 程度にまで向上させることができる。音速変化の補正をするために海底の温度変化を 0.001°C の精度で計測する必要があるが、そのような長期計測の実績もある。3 km 程度の海底の距離変化を 1 cm の分解能で検出できる見込みはたったので、今後は実際に温度変化の影響を補正できることを現場の観測により確認したい。

謝 辞

音響測距装置の係流系の組み上げと設置作業において、川崎地質(株)の古田俊夫氏に助力いただいた。またその係流系の設置・回収は淡青丸で行い、船長をはじめ

乗組員各位の世話になった。末広 潔氏はか 1 名の査読者には有益なコメントをいただいた。

文 献

- FUJIMOTO, H., J. SEGAWA, T. FURUTA and H. MURAKAMI, 1990, Installation of ocean bottom bases for observation of seafloor crustal movement, *Mar. Geod.*, **14**, 177-184.
- HEKI, K., G. R. FOULGER, B. R. JULIAN and C.-H. JAHN, 1993, Plate dynamics near divergent boundaries: geophysical implications of postdrifting crustal deformation in NE Iceland, *J. Geophys. Res.*, **98**, 14,279-14,297.
- 加藤尚之・大竹政和・平澤朋郎, 1995, 沈み込み域の巨大地震に先行する地震静穏化のメカニズム: プレスリップによる広域応力緩和, 地球惑星科学関連学会 1995 年合同大会予稿集, F41-05, 379.
- 川崎一朗・島村英紀・浅田 敏, 1993, サイレント・アースクェイク, 東京大学出版会, 254 pp.
- 中西正男・藤本博巳・村上英幸, 1995, 初島南東沖シロウリガイ群集域の海底および海水の温度変化, *地震* **2**, **48**, 71-79.
- SPIESS, F. N., D. E. BOEGEMAN, C. D. LOWENSTEIN and M. O. MCINTYRE, 1991, Precise seafloor positioning—a progress report, *Proc. INSMAP 90*, Marine Technology Society, Washington, D.C., USA, 125-131.
- TAKEUCHI, T., 1991, A long-range and high-resolution underwater acoustic locating system, *Proc. INSMAP 90*, Marine Technology Society, Washington, D.C., USA, 514-518.
- 竹内俱佳・李 節青・永井 豊・小寺山 亘, 1994, 海流による係留系の運動の実海域計測と解析, 日本造船学会論文集, 第 176 号, 203-211.