

資 料

古典的海洋観測からみた海洋トモグラフィについて*

中 村 重 久**

A note to ocean acoustic tomography in a scope of a traditional routine oceanography*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: This is a simple overview about the essential concept and purpose of the ocean acoustic tomography (or ocean tomography) referring to the recent research activities appeared mainly in the United States of America. The ocean tomography utilizes a perturbation of acoustic signals between a source and a receiver under the sea with a distance of several hundred kilometers through the sound channel located near the toe of thermocline or pycnocline. It seems that the satellite data is helpful for the ocean tomography. Remarks are for possible response to the idea of the ocean tomography in the northwestern Pacific, especially around the Japan Islands, and for expectation of other new techniques as effective tools for coastal oceanography, fishery and the related fields in order to promote our oceanography.

1. 緒 言

海洋中の音速極小層は、サーモクライン（温度躍層）あるいはピクノクライン（密度躍層）の下部付近にあって、これを利用すると、数百キロメートルの遠距離間でも、海中音波信号の送受信が可能である。これに関連して、ここでは、米国を中心として最近の海洋学的新技法のひとつとして注目されている“海洋トモグラフィ”の基本的概念と要点を、海洋観測に関心をもつ者の立場から記述した。日本の海中音波の研究やその応用の範囲がごく限定されているように感じられる現在、わが国の沿岸海洋や水産・漁業など関連分野での今後の問題としても検討しなくてはならないと考えている。

2. 海洋トモグラフィと海洋学

海洋トモグラフィは、ごく最近、海洋物理関係の分野で

耳にするようになった言葉である（たとえば WUNSCH, 1984）。語源からみると、トモグラフィ（tomography）は医学用語のひとつで、たとえば、人体内の断面をX線や超音波走査によって検査する手法である。このような手法を、医学関係者の間では computer aided tomography（略して CT あるいは CAT）と称している。すなわち、人体内の断層写真を人体を傷つけることなく得る新しい技法である。工学的な面からみれば、材料試験における非破壊検査に対応する。このようなトモグラフィの技術を海洋内部の断面調査に応用しようというわけである。言うならば、この場合、海洋学者は、海洋の医者として、海洋の断面の検査をし、海洋の時間的・空間的構造の診断と予測をしようとしているわけである。

ちなみに、1983年、西ドイツのハンブルグで開催された IUGG（国際測地学地球物理学連合）総会のシンポジウムのひとつとして‘oceanographic advances from new technology’が設けられ、そこでは、海洋トモグラフィに関する研究発表が3編みられた（CORNUELLE, 1983; WORCESTER, 1983; WORCESTER and MILLER, 1983）。

* 1986年11月5日受理 Received November 5, 1986

** 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所,
〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎
Shirahama Oceanographic Observatory, DPRI,
Kyoto University, Katada-Hatasaki, Shirahama,
Wakayama, 649-22 Japan

日本では、とくに海洋物理関係で注目的となっていくようであり、寺本 (1983) の記述と紹介や、友田・高野 (1983) の解説などの例がある。

また、計測技術全般の見地からみた海洋学的評価は FUGLISTER *et al.* (1984) によって行なわれている。

いずれにしても、ごく限られた海洋物理を専門とする分野のもの以外になじみのうすい、海洋トモグラフィの概念や基本的問題点を適確にとらえておくことは必要であろう。これが、あるいは、日本の海洋学にもいろいろの形で影響を及ぼすことも考えられる。ここでは、MUNK and WUNSCH (1982) の所論を中心にして、海洋トモグラフィの考え方と方向をわかるようにし、湾流についてのデモンストレーション (OCEAN TOMOGRAPHY GROUP, 1982) の例を参考にして考察をする。

3. 当面の課題

海洋のエネルギー源は、主として太陽からの輻射エネルギーと考えられる。もっとも、海水の運動には、天文潮のような直接的遠隔作用によるもののほか、風や気圧のような海面に対する大気的作用も考えられる。その運動は、大陸などの海岸線や海底地形という境界によって束縛されている。一方、海洋の存在は、大気に対して気候学的作用を及ぼしており、この気候学的予測は主要課題のなかでもとくに重要なものと考えられる。

日本周辺についてみれば、たとえば、黒潮の変動は、現象そのものが地球流体力学の問題としても究明されるべきであるが、同時に、沿岸の人間活動に大きな影響を及ぼすところから、その予測もまた重要である。沿岸域の海況も、黒潮の影響を直接・間接に受けていることを忘れてはならない。

ところで、このようなことから、海況の予測の問題を考えると、従来、関連機関などで得られている海洋観測データの利用には、いろいろ注意すべきことがある。観測船やブイによる観測は、多くの測点で同時刻のデータを得るには適当ではないが、直接測定の利点がある。海面付近のみに限れば、広範囲にわたって同時刻のデータ収集は、人工衛星を利用した計測によって可能となってきている。海洋のいろいろのスケールの渦をとらえるにもいろいろの方法が考えられると思うが、その中のひとつの新しい方法として海洋トモグラフィをあげることはできるであろう (たとえば ROBINSON, 1983)。

4. 海洋トモグラフィの出発点

海洋トモグラフィのデモンストレーション (OCEAN

TOMOGRAPHY GROUP, 1982) によれば、パーミューダ島と米国本土との間の主サーモクライン付近に伝わる音波の走時から湾流のバロトロピックな変化をとらえることができると言われている。このようなデモンストレーションの基盤は突如として出現したものではなさそうである。その出発点は、MUNK (1974) の SOFAR に関する研究あるいはそれ以前にさかのぼるものと考えられる。以来、MUNK らは、海洋トモグラフィの理論的基礎とそれに関連した諸問題について、いろいろの面から検討を重ね、その成果を次々と発表してきた (たとえば、MUNK and WUNSCH, 1979; MUNK, 1980; MUNK and WUNSCH, 1982a, b; 1983)。この間にも、彼らの海洋トモグラフィの考え方の延長線上にあると考えられる研究が LONGUETT-HIGGINS (1982) によって発表されている。一方、地震関係では、ボア・ホールに関連して地震トモグラフィの研究 (MCMCHAN, 1983) がある。これが、上述の海洋トモグラフィとどの程度関連があるかについては不明であるが、トモグラフィの発想の基盤には共通したところがあるものと考えられ、その発表が時期的にもほとんど同時期であることは大変興味深いことである。

5. 海洋トモグラフィの基本的方向

海洋トモグラフィの当初の意図については MUNK and WUNSCH (1982a) が述べている。これによると、その概要はつぎのとおりである。

(i) 背景

ここ数年、海洋大循環にも再び関心が向けられるようになり、その変動も研究されるようになった。中規模スケールの変動については、たとえば、MODE GROUP (1978) によるものほか多数の発表があり、最近の日本の例で著者の目にふれることのできたものには、IMAWAKI and TAKANO (1982), IMAWAKI (1983), IMAWAKI *et al.* (1984) などがある。このような海洋の変動現象は気候変動に対して重要な役割を果しているものと考えられる。この観点から、水温・熱輸送・流れ・渦度・湧昇などを対象とした同時刻観測の必要性にこたえるべく、MUNK and WUNSCH (1979) は海洋トモグラフィを提唱した。とくに、1981年の観測結果は OCEAN TOMOGRAPHY GROUP (1982) によって報告されている。この場合、水中音波のパルスの伝播時間の摂動は、水温・密度・流速の摂動との関連で説明できるものと考えられている。北大西洋西部での一連の観測にひきつづいて、1990年には、太平洋東部で 1,000 km 程

度の観測網での観測を予定しているようである。

(ii) 長 所

- a. かなりのスケールの空間的全体像の把握が可能となる。
- b. 係留ブイの数が多ければ多いほど情報量は増える。
- c. 装置は海面上に出ないように設置するので、たとえば、海水期でも利用できる。
- d. 強流域でのリモート・センシングと併用が可能である。
- e. 鉛直方向の分解能が顕著に大きい。

(iii) 短 所

音速は水温や密度によって一義的に定まるわけではない。ただし、水温・塩分の関係が一定している海域では、水温場と塩分場（そして密度場）をそれぞれある程度の精度でもとめることができる (CORNUELLE, 1983)。

(iv) 観測項目とその目標とする精度

- a. 水温 2,500 m の測線上で 10^{-3} °K の変化の検出を可能にする。
- b. 熱輸送 流速と水温のトモグラフィから平均流速と平均水温はもとめる。これによって熱輸送をもとめる方法として考えられる主な方法は
 - ①数値モデルの利用
 - ②準線型バロクリニック・ロスビー波の力学的ような解析的方法
 - ③音波の正逆伝播時間の差を利用
- c. 流れ 音波の伝播時間を 10^{-6} の精度でもとめることを目標とする。これは、音速の 10^{-6} 程度の流速、すなわち 1.5 mm/s をもとめることに相当する。なお、現在の標準的流速計の精度は 1 cm/s 程度である。
- d. 渦度 観測アレイをめぐるシング・アラウンド伝播時間を正逆もとめる。その差 δA の精度を、アレイのスケール L に関係なく 10^{-6} とすると、得られる渦度は

$$1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} = 1 \times 10^{-5} \cdot f$$
 である。ただし、この場合、 $L=2,500 \text{ km}$ とし、 $f=2\Omega \sin \phi$ であり、 Ω は地球自转角速度、 ϕ は緯度である。
この場合、係留ブイの位置のふらつきは $10^{-6} \times L = 2.5 \text{ m}$ 以下、これにともなう δA のふらつきは 1.7 ms でなくてはならない。
- e. 湧昇 非発散の条件下で、質量の保存則が満たされているものとして、流速の鉛直成分については 10^{-5}

cm/s (およそ 1 m/day) を測定可能にする。

f. 船位決定の誤差は水平距離 1 m 程度にする。

装置の回収・移動(移設)やデータの収集・処理・解析のために、(i) 音波による海岸の受信局でのデータ転送、(ii) 海面からデータ信号を衛星中継して転送するなどが考えられる。

(v) 衛星によるデータとの関係

この約20年間に、いろいろの形で、人工衛星による海洋測定が可能になってきた。とくに、赤外線画像によってもとめた海面温度分布がよく利用されている。しかし、これには、大気中の水蒸気などに対する補正が必要である。このような衛星データの質・精度・得失は、以下に記すとおりである。

- a. 高度 SEASAT 搭載高度計の精度は 5 cm に近い。
- b. 軌道半径 誤差の主な原因として、地球重力場の不確定性や衛星に対する大気の抵抗が考えられ、太陽や地球のアルベド放射も無視できないであろう。現在利用できるジオイドに準拠して SEASAT 追跡データをみると、ランダム誤差は各軌道について 50 cm 以下と推定される。将来は、これが 10 cm 以下となるだろう。
- c. 潮汐 全地球的スケールでの数値モデルにおける精度は 10 cm 程度。
- d. 波浪 この影響は、波高の平均 2 乗の 5 パーセント程度。
- e. 大気中の水蒸気 大気の屈折係数に関係し、高度測定用パルス信号の遅速に関係する。航空機による直接測定による解決が考えられる。
- f. 電離層の電子密度 電子密度のモデルの利用および異った (2 つの) 周波数による高度測定による補正が必要。
- g. 大気圧の負荷 気圧換算で -1 cm/m bar の割合で外海の海面は、気圧に静的に追従していると考えられる。
- h. ジオイド 形状の決定が必要。

海上の観測と対比させて衛星搭載の高度計や散乱計による長短を要約するとつぎようになる。

長所 ごく短時間に全地球上を測定可。

全地球上でいろいろのデータが得られる。

力学的方程式の境界条件に必要な測定が可能 (高度計から表面気圧傾度、散乱計から渦度がわかる)。

短所 測定はごく表層のみに限られる。

このように、衛星による方法とトモグラフィによる方

たとえば黒潮の変動が考えられる。沿岸の海況変動予測の手がかりをもとめるためにも、沖合の情報が必要である。湾流域・大西洋の海洋トモグラフィの背景と実態とをよく見極めた上で、日本周辺海域で海洋トモグラフィに劣らぬ優れた技法を案出する努力も必要なことと考えられる。

本文をまとめあげるまでには、多数の方々の御意見や御助言をいただいた。ここに心から感謝の意を表す。

文 献

- CORNUELLE, B.A. (1983): Inverse methods for the 1981 ocean acoustic tomography experiment. IAPSO Programme and Abstracts, XVIII General Assembly, Hamburg, FRG, 15-27 August 1983. p. 123-142.
- FUGLISTER, F.C., P.L. RICHARDSON, W.J. SCHMITZ, JR. and H.M. STOMMEL (1984): An account of the usefulness of new techniques of measurement in study of the Gulf Stream. *Mar. Technol. Soc. J.*, **17**, 13-18.
- 日高孝次 (1983): 海流の話. 築地書館. 230 pp. (とくに p. 211-215 の寺本俊彦の記述).
- IMAWAKI, S. (1983): Vorticity balance for mid-ocean mesoscale eddies at an abyssal depth. *Nature*, **303**, 606-607.
- IMAWAKI, S. and K. TAKANO (1982): Low-frequency eddy kinetic energy spectrum in the deep western North Pacific. *Science*, **216**, 1407-1408.
- IMAWAKI, S., K. TAIRA and T. TERAMOTO (1984): Mesoscale current fluctuations observed in the deep western North Pacific. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**, 39-45.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. (1982): On triangle tomography. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, **7**, 33-46.
- MCMECHAN, G.A. (1983): Seismic tomography in bore hole. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **74**, 601-612.
- MODE GROUP (1978): Mid-ocean dynamics experiment. *Deep-Sea Res.*, **25**, 859-910.
- MUNK, W.H. (1974): Sound channel in an exponentially stratified ocean with application to SOFAR. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **55**, 220-226.
- MUNK, W.H. (1980): Horizontal deflection of acoustic paths by mesoscale eddies. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 596-604.
- MUNK, W.H. and C. WUNSCH (1979): Ocean acoustic tomography: A scheme for large-scale monitoring. *Deep-Sea Res.*, **26**, 123-161.
- MUNK, W.H. and C. WUNSCH (1982a): Observing the ocean in the 1990s. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A307**, 439-464.
- MUNK, W.H. and C. WUNSCH (1982b): Up/down resolution in ocean acoustic tomography. *Deep-Sea Res.*, **29**, 1415-1436.
- MUNK, W.H. and C. WUNSCH (1983): Ocean acoustic tomography: Rays and modes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **21**, 777-793.
- OCEAN TOMOGRAPHY GROUP (1982): A demonstration of ocean acoustic tomography. *Nature*, **299**, 121-125.
- 大隅健一郎編 (1985): 模範六法 (昭和61年版). 三省堂. 1982 pp. (とくに p. 1803-1883, 国際法関連).
- ROBINSON, A.R. (1983): *Eddies in Marine Sciences*. Springer-Verlag, Berlin. 609 pp.
- 友田好文・高野健三 (1983): 海洋 (地球科学講座第4巻). 共立出版. 261 pp.
- WORCESTER, P.F. (1983): Ocean acoustic tomography: A progress report. IAPSO Programme and Abstracts, XVIII General Assembly, Hamburg, FRG, 15-27 August 1983. p. 129.
- WORCESTER, P.F. and J.G. MILLER (1983): Ocean acoustic tomography: The exploitation of vertical arrival angle. IAPSO Programme and Abstracts, XVIII General Assembly, Hamburg, FRG, 15-27 August 1983. p. 131.
- WUNSCH, C. (1984): Acoustic tomography and other answers. In "It's the Water that Makes You Drunk" (A Celebration in Geophysics and Oceanography 1982, Scripps Inst. Oceanogr., Univ. of Calif., San Diego, La Jolla, Calif.). p. 47-60.