

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	水平伝搬音波の伝搬時間計測による黒潮海域の音速鉛直分布の推定法
Title	
著者(和文)	蜂屋 弘之, 大槻 茂雄, 奥島 基良
Author	hiroyuki hachiya, SHIGEO OHTSUKI, Motoyoshi Okujima
出典(和文)	日本音響学会誌, Vol. 44, No. 5, pp. 377-381
Journal/Book name	, Vol. 44, No. 5, pp. 377-381
発行日 / Issue date	1988, 5

水平伝搬音波の伝搬時間計測による黒潮海域の 音速鉛直分布の推定法*

蜂屋 弘之・大槻 茂雄・奥島 基良**

(東京工業大学精密工学研究所)

(昭和 62 年 7 月 28 日受理)

内容梗概 黒潮の流軸の変動は、気象・漁業に大きな影響を与え、その長期連続観測が望まれている。本論文では、この黒潮の状況を広域に高精度で連続観測する新しい計測法を提案し検討を行っている。本方法は、黒潮海域の音速鉛直分布を、場所に依存する係数を含む深度の関数として近似表現し、25 km 隔てて設置した送受波器アレー間を伝搬する水平伝搬音波の上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差から、音速近似式中の係数を反復逆演算により求め、その海域の詳細な音速鉛直分布を推定するものである。誤差のある伝搬時間差測定値から音速鉛直分布を推定する計算機シミュレーションを行ったところ、黒潮海域の音速鉛直分布を十分な精度で推定することができた。

1. はじめに

黒潮の流軸の変動は、気象・漁業に大きな影響を与え、その長期連続観測が望まれている。しかし、この黒潮を観測船で観測するにしても、幅 100 km、深さ 1,000 m に及ぶ流れの全体を連続観測することは現実的でないし、また流速計などの測器を係留するにしても 2 m/s にも達する流軸付近の強流域に係留することは非常に困難である。

このような海洋変動の広域観測技術として、近年 Munk らは広い海域の周囲に多数の音波送受波装置を係留して、その間の音波伝搬時間から海洋構造の空間分布を推定する海洋音響トモグラフィを提案し、海洋実験を行い、海洋中の数百 km の空間的広がりをもつ中規模変動を推定できることを示した^{1)~3)}。しかし、黒潮海域は水平方向 100 km で数℃の温度変化があり、数百 km で温度変化 1℃程度の海洋中の中規模変動と比べて音速の変動が可成り大きい。このように変動が大きい海域では、音波伝搬時間からの海洋構造の推定は、精度が極めて悪くなることが指摘されている^{4), 5)}。特に、海洋構造の鉛直方向変動の推定は、鉛直方向の音速分布の変化が音波の経路を大きく変えるため精度の良い推定は非常に困難である。また、超音波パルスを海底から垂直に送

波し、海面で反射し再び海底に達するまでの所要時間を測定し記録する IES (Inverted Echo Sounder) は、黒潮海域の鉛直方向変動の積分値を安定に連続計測できるが⁶⁾、表層の音速変動に敏感で詳細な鉛直分布を求めることはできず、水平方向の情報も得ることができない。

本論文では、黒潮の状況を広域に高精度で連続観測するため、比較的短い距離離れた鉛直アレー間を伝搬する音波の伝搬時間から、送受波器間の海域の詳細な音速鉛直分布を推定する方法を考案し検討を行っている。比較的短い距離範囲では、音速の鉛直分布も急激な変化をしないので、本推定法で、この距離範囲の海域の平均的な鉛直分布が計測できると考えられる。そして、水平方向にこのような鉛直アレーを複数配置することで、音速の 3 次元分布を得ることができると考えられるが、本論文では音速の水平方向分布の推定については扱わない。

まず、黒潮海域の音速鉛直分布を、場所に依存する係数を含む深度の関数として、多項式で表現することを提案する。そして、音波の水平伝搬時間を安定に高精度で測定する送受波器アレーの設置法について述べ、音波伝搬時間測定値から音速鉛直分布近似式中の係数を決定する推定アルゴリズム・推定誤差等を、計算機シミュレーションにより検討した結果について述べる。

2. 音速鉛直分布の近似式

黒潮海域における音速鉛直分布と水平伝搬音波の経路の一例を Fig. 1 に示す。表面から深度 1,500 m 程度までの領域の音速分布は、海流の状況に依存しており、水温分布によって特徴づけられている。一方、1,500 m 以深は、水温がほぼ一定であるが、深度が増すに従って圧

* An estimation method of vertical sound speed profile in the Kuroshio by measuring sound transmission time.

** Hiroyuki Hachiya, Shigeo Ohtsuki and Motoyoshi Okujima (Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 227)

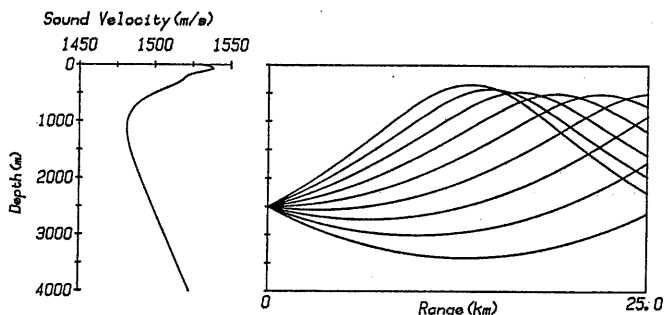


Fig. 1 Example of vertical sound speed profile and ray paths in the Kuroshio.

力が増加し、音速も大きくなる。この領域は海流の影響をほとんど受けず常に安定である。黒潮海域では深度 1,000 m 付近に音速極小層があり、海中で水平方向に送波された音速は、この音速極小層に捕えられ、この層を中心に屈折しながら伝搬することになる。この音速鉛直分布を、水平方向に伝搬する音波の伝搬時間から求めることができれば、それから水温分布を求めることができ、地衡流計算から海流の流速を求めることができる。

黒潮の流速分布を知るためには音速の鉛直分布を精度 1 m/s 程度で推定することが望まれる。音速鉛直分布の推定のためには、音速鉛直分布を場所に依存する係数を含む深度の関数として表現することが有効と考えられる。そこで、次のような多項式による音速の近似式表現を提案する。

$$C(Z) = \sum_{i=1}^N H_i \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{Z-Z_i}{B_i} \right)^2 \right\} + 0.0163 Z + 1458,$$

ここで

C : 音速 (m/s), Z : 深度 (m),

$$B_i = E \frac{Z_M}{D-1} D^{(i-1)/(N-1)},$$

$$Z_i = 40 + \frac{Z_M}{D-1} (D^{(i-1)/(N-1)} - 1) - B_i,$$

$$N=6, D=10.3, Z_M=800, E=0.64$$

H_i は場所により変化する音速鉛直分布に依存する係数であり、その地点の音速鉛直分布に適合するように最小二乗法によって決定される。この六つの係数 ($H_1 \sim H_6$) により一つの音速鉛直分布が表現できる。 N, D, Z_M, E などの値は、対象とする海域での音速鉛直分布の基本形状に依存するが、海域の範囲が決まれば定数として扱うことができる。ここでは、黒潮海域で 1976 年から 1983 年までに計測された音速鉛直分布計測値に最も適合するように、これらの値が決められた。

近似式中の

$$\sum_{i=1}^6 H_i \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{Z-Z_i}{B_i} \right)^2 \right\}$$

の項は、音速鉛直分布の場所により変動する成分を表す

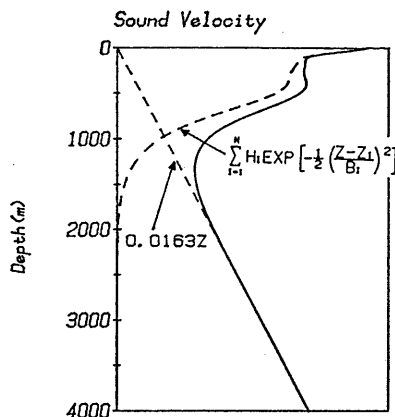


Fig. 2 Approximation of the vertical sound speed profile.

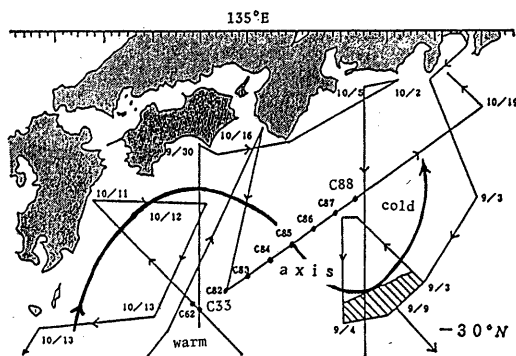


Fig. 3 Location of CTD measurements in the Kuroshio at KH76-4 Cruise of Hakuho-maru (1976), the Ocean Research Institute, University of Tokyo.

項で、6 項の和によって、黒潮海域の音速鉛直分布の変動を表現できる。また、深度に比例する項及び定数項は、場所によって変化しない 1,500 m 以深の音速分布を表現している。この様子を Fig. 2 に示す。

本近似式の精度を確かめるため、東大白鳳丸観測航海 (1976 年 9~10 月) のときに得られた CTD 計測値から Mackenzie の式⁷⁾により算出した音速鉛直分布と比較検討した。Fig. 3 はこの観測航海の航跡図で、CTD 観測

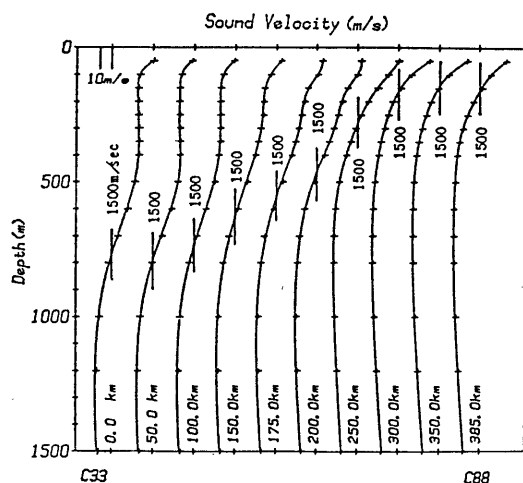


Fig. 4 Comparison between approximate and measured vertical sound speed profiles in the Kuroshio.

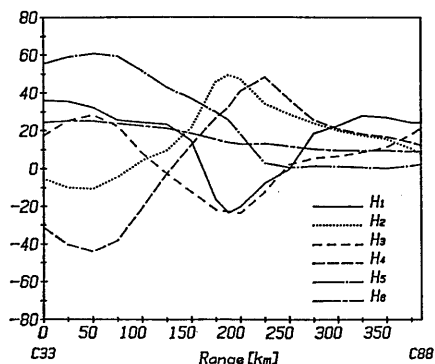


Fig. 5 Change of coefficients H_i of the approximate equation in the Kuroshio.

点 C33 と C88 を結ぶ観測線は、図中の太線で示される黒潮の流軸をほぼ垂直に横断しており、この観測線に沿っての水温分布は、黒潮海域における水温分布の典型と考えられる。この CTD 観測値から得られた音速分布(+印)と近似式による音速分布(実線)の比較を Fig. 4 に示す。両者は非常によく一致しており、本近似式は $\pm 1\text{ m/s}$ 程度の誤差で黒潮海域の音速鉛直分布を表現できる。

暖水塊中心 C33 から冷水塊中心 C88 までの各位置での、近似式中の係数 H_i の変化の様子を Fig. 5 に示す。横軸は、暖水塊中心を基準とした各地点までの距離である。暖水塊中心から流軸にかけて係数 H_i の変動は大きい、冷水塊側では比較的变化が小さくなっている。

3. 音波伝搬時間の計測方法

Fig. 1 に示したように、黒潮海域では深度 2,500 m ほどに設置した音源から送波された音波は、距離 25 km

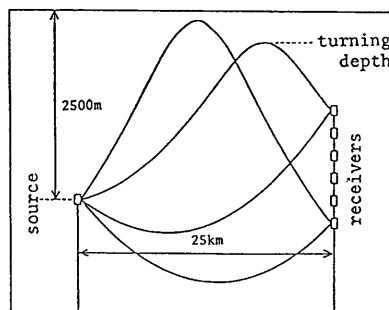


Fig. 6 Transducers geometry for the estimation of sound speed profile in the Kuroshio.

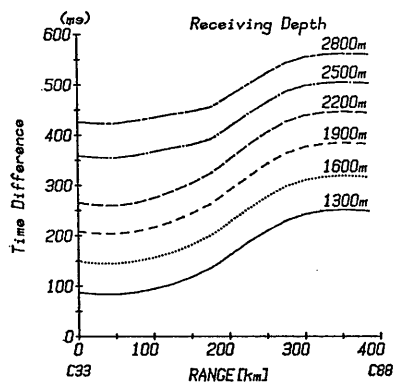


Fig. 7 Predicted time difference between transmission times along lower and upper path of each receiver.

ほど離れた地点ではおよそ 1,300 m ~ 2,800 m の深度で安定して受波することができる。そこで、水平伝搬音波の伝搬時間測定のため、Fig. 6 に示すように送受波器アレーを設置する。すなわち送受波器間隔を 25 km とし、送波器深度 2,500 m、受波器アレーを 1,300 m ~ 2,800 m まで 300 m おきに 6 個配置する。このようにして、上方伝搬波と下方伝搬波を各深度で受波する。各受波深度で測定した上方伝搬波の伝搬時間は、転回点以深の音速分布の情報を担っている。一方、下方伝搬波の伝搬経路・伝搬時間は、どの地点においてもほとんど変化しない(伝搬時間変動 1 ms 以下)。従って、上方伝搬波の伝搬時間は、下方伝搬波の到達時間を基準にとり、伝搬時間差を計測することにより、精度よく決定できる。暖水塊中心 C33 から冷水塊中心 C88 までの各地点における上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差を Fig. 7 に示す。送受波器間距離 25 km の範囲では、音速鉛直分布は水平方向に変化しないものとしている。この図のように、暖水塊・流軸・冷水塊はこの伝搬時間差により明確に区別でき、上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差の値からだけでも、その海域の状況のある程度推測できる。

上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差は、送受波器間

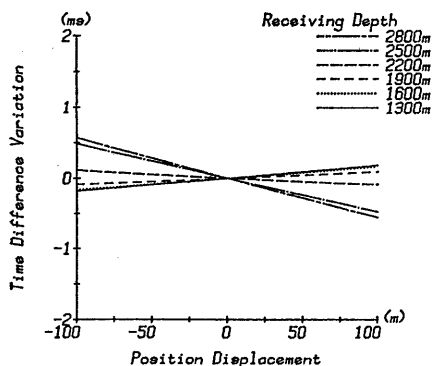


Fig. 8 Time difference variation caused by transducer position fluctuation.

の距離が多少変動しても、上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間がそれぞれ同じ方向に変動するので、伝搬時間差の変化は小さい。Fig. 8 に送受波器間距離が変動したときの伝搬時間差の変化を示す。送受波器間距離が水平方向に ± 100 m 変動しても伝搬時間差の変動は ± 1 ms 以下である。送受波器の位置が垂直方向に変化したときは、伝搬時間差もある程度変化するが、圧力の変化を測定することで補正できると考えられる。また、伝搬時間差は受波器側だけの時計により測定できるので、送波器側と受波器側との時計の時刻がずれていても推定に影響を与えない。

このように、送受波器を 25 km 程度離して設置し、送受波器間を伝搬する上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差を測定することは、黒潮海域の海洋変動を計測するのに極めて実用的な方法である。

4. 伝搬時間からの音速鉛直分布の推定

音速の鉛直分布を場所に依存する係数 H を含む多項式で表現したことにより、音速鉛直分布の推定は、受波器鉛直アレーを構成する 6 個の受波器それぞれに到達する上方伝搬波の伝搬時間から、音速近似式中の 6 個の係数 H を決定する問題に帰着する。すでに述べたように、実際に測定されるのは、安定に高精度で測定できる各受波器に到達する上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差であり、音速鉛直分布の推定もこの伝搬時間差からの値を用いて行われる。伝搬時間差計測値から音速鉛直分布を推定するアルゴリズムについて述べる。ここで、送受波器は Fig. 6 で示したように配置されているものとし、送受波器間距離 25 km の範囲では、音速鉛直分布は水平方向に変化しないものとして推定を行っている。

受波器 j で受波される上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差 t_j は H_i ($i=1\sim 6$) の関数であり、

$$t_j = f_j(H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6)$$

と表現できる。

関数 f_j は単純な形では表現できないので、伝搬時間

から H を求めるのに次のような反復逆演算を行う。

(1) 6 個の受波器から 6 個の伝搬時間差 t_{mj} ($j=1\sim 6$) が測定される。

(2) 適当な初期パラメータ H_{0i} ($i=1\sim 6$) を与える。

(3) $t_j = f_j(H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6)$

を計算する。

(4) $|t_j - t_{mj}| < \epsilon$ (ϵ : 収束判定基準値)

がすべての受波深度において満たされるなら終了。満たされなければ、修正量 Δt_j を次式で与える。

$$\Delta t_j = \frac{1}{n}(t_j - t_{mj})$$

n は Δt_j ($j=1\sim 6$) の最大値が 1 ms となるように与える正数。

(5) 係数 H_i の修正量 ΔH_i を計算。

$$\begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \\ \Delta H_4 \\ \Delta H_5 \\ \Delta H_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \Delta t_4 \\ \Delta t_5 \\ \Delta t_6 \end{bmatrix}$$

ここで、

$$A_{ji} = \frac{\partial t_j}{\partial H_i}$$

(6) 新しい H_i を求め、手順(3)に戻る。

$$H_i' = H_i + \Delta H_i$$

このようにして、初期値として与えられた H_{0i} を、測定された伝搬時間差と適合するように徐々に収束させ、音速鉛直分布を推定する。

5. 計算機シミュレーションによる推定誤差の検討

以上の推定アルゴリズムの収束性、推定誤差などを計算機シミュレーションにより検討した。

推定の基礎となる初期値は、暖水塊・流軸・冷水塊の 3 種類の代表値を用意し、伝搬時間差の値から適当なものを選び推定を行った。Fig. 7 に示したように、上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差は、暖水塊中心から冷水塊中心までの場所により 100 ms 程度変化するので、暖水塊・流軸・冷水塊の判定は容易にできると考えられる。計算機シミュレーションは次の手順で行われた。

(1) 推定しようとする音速鉛直分布を選び設定分布とする。

(2) この設定分布の時に測定される伝搬時間差を音線追跡を用いて計算する。

(3) 得られた伝搬時間差の値より音速鉛直分布の初期値を選ぶ。

(4) 測定伝搬時間差には最大 0.2 ms 程度の誤差があると考え、計算された伝搬時間差に、平均値が 0

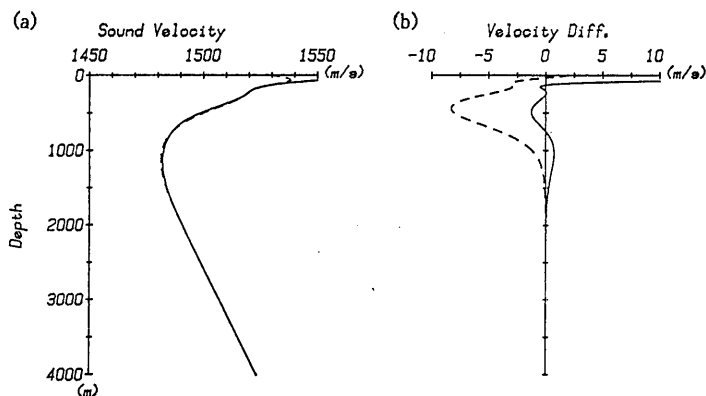


Fig. 9 The estimation result (dotted line) by inverting travel times and the correct model (solid line) (a) and the estimation error (solid line) and the difference between the initial model and the correct model (dotted line) (b).

で標準偏差 $\sigma = 0.1$ ms の正規分布誤差を加える。

(5) この伝搬時間差と初期値より前章で述べた推定アルゴリズムにより音速鉛直分布を推定する。

このようにして推定した黒潮海域の音速鉛直分布の一例を Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) は実線が CTD 実測値から算出した音速鉛直分布 (設定分布)、破線が伝搬時間差から本推定法により推定した結果 (推定分布) を示している。設定分布 (実線) と推定分布 (破線) は良く一致している。Fig. 9(b) は実線が推定分布と設定分布の差 (推定誤差) を示し、破線が初期値として与えた分布と設定分布との差を示している。与えられた初期値と測定誤差を含む伝搬時間差から、設定分布を精度良く推定していることが分かる。表面近くで誤差が大きくなっているが、これは表面近くをほとんど音波が通過しないことによる。深度 180 m ~ 2,000 m の範囲での最大誤差は 1.26 m/s、二乗平均誤差は 0.57 m/s である。

暖水塊中心から冷水塊中心までの各地点での音速分布推定値の二乗平均誤差を Fig. 10 に示す。二乗平均誤差の算出は深度 180 m ~ 2,000 m の範囲で行った。2,000 m 以深は音速が変化せず、また、180 m 以浅は音速がほとんど通過しないので除外した。二乗平均誤差はどの地点でもほぼ 1.5 m/s 以下であり、誤差のある伝搬時間差

測定値から十分な精度で音速鉛直分布を推定している。

6. おわりに

黒潮海域の海洋構造を、長期にわたり連続的に観測する新しい計測法の開発を試みた。本方法は、黒潮海域の音速鉛直分布を、場所に依存する係数を含む深度の関数として近似表現し、25 km 隔てて設置した送受波器アレー間を伝搬する水平伝搬音波の上方伝搬波と下方伝搬波の伝搬時間差から、音速近似式中の係数を反復逆演算により求め、その海域の詳細な音速鉛直分布を推定するものである。誤差のある測定値から音速鉛直分布を推定する計算機シミュレーションを行ったところ、伝搬時間差測定値から黒潮海域の音速鉛直分布を十分な精度で推定することができた。

文 献

- 1) W. Munk and C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring," *Deep-Sea Res.* **26**, 123-161 (1979).
- 2) The Ocean Tomography Group, "A demonstration of ocean acoustic tomography," *Nature* **229**, 121-125 (1982).
- 3) B. Cornuelli, C. Wunsch, D. Behringer, T. Birdsall, M. Brown, R. Heinmiller, R. Knox, K. Metzger, W. Munk, J. Spiesberger, R. Spindel, D. Webb and P. Worcester, "Tomographic maps of the ocean mesoscale. Part 1: Pure acoustics," *J. Phys. Oceanogr.* **15**, 133-152 (1985).
- 4) J. Spiesberger and P. Worcester, "Perturbations in travel time and ray geometry due to mesoscale disturbances: A comparison of exact and approximate calculations," *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 219-225 (1983).
- 5) J. Spiesberger, "Ocean acoustic tomography: Travel time biases," *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, 83-100 (1985).
- 6) 平 啓介, 深澤理郎, 乙訓 高, 北川庄司, 村上英幸, 寺本俊彦, 川辺正樹, "IES による黒潮の流軸の検出とその開発," *海洋科学* **16**, 179-186 (1984).
- 7) K. Mackenzie, "Nine-term equation for sound speed in the oceans," *J. Acoust. Soc. Am.* **70**, 807-812 (1981).

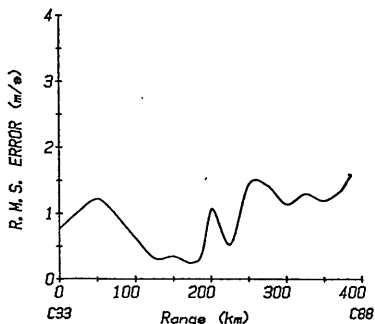


Fig. 10 RMS error of the estimation results.