三次元速度構造を求める数値実験

山形大学理学部 長谷見晶子

(昭和 58 年 10 月 14 日受理)

Numerical Experiments on Determination of Three-Dimensional Velocity Structure

Akiko HASEMI

Faculty of Science, Yamagata University

(Received October 14, 1983)

First arrival time data calculated for an artificial velocity model were inverted using the method based on AKI and LEE (1976) under various conditions. The effect of the number and the quality of data, initial values of source locations and origin times and inhomogeneous source distribution were examined through the results of these numerical experiments. The prominent feature of the results are summarized as follows. (i) Results concerning to peripheral blocks are affected more hardly by the change of conditions than those concerning to interior blocks. (ii) It is difficult to know velocities in blocks adjacent to the outer region even if a large number of stations and sources are used.

§1. はじめに

1970 年頃から世界各地で微小地震観測網の整備が進められてきた [LEE and STEWART (1981)]. これらの観測網による観測データの蓄積と電子計算機の発達のおかげで、地震波走時を使つて詳しい地下構造を調べられるようになった. AKI *et al.* (1976, 1977) は遠地地震の初動走時のインバージョンにより観測網の下の三次元速度構造を求める方法を開発した. また, AKI and LEE (1976) はこの方法に修正を加えて近地地震のデータに適用した. それ以降, これらの方法は世界各地の数多くの観測網のデータに適用されている [AKI (1981, 1982)]. 日本でも近地地震のデータを用いていくつかの研究が行われてプレートのもぐりこみの様子 [HIRAHARA (1977, 1981); HORIE and AKI (1982)], 造山帯の下の構造 [MIYAMACHI (1983); TAKANAMI (1982)], 火山帯の下の上部マントルの状態 [HASEMI *et al.* (1983)] などが調べられている.

ところで, この方法によつて得られる結果の正確さは観測点や地震の密度, 観測誤差, 対象とする地域の構造などに関係する. この研究では, AKI and LEE (1976) の方法に基づいて地殻～上部マントルの速度構造を求める場合を想定して数値実験を行い, 観測点や地震の密度, 観測誤差, 震源の初期値が変化すると得られる構造がどのように変わるかを調べた. ただし,

昭和 56 年 10 月 8 日発表

* 旧姓 堀江

Fig. 1. Vertical cross section of the assumed velocity model. Velocities are constant in the y-direction.

Fig. 2. Block configuration. a. Horizontal view. b. Vertical view.

ここではインヴァージョンの際のダンピングのかけ方、ブロックの大きさや配置は一定とし、これらの条件の変化による影響については調べていない。

§2. 数値実験の方法

近地地震の走時データのインヴァージョンにより三次元速度構造を求める方法の概略は次のようである。(詳しい説明や議論は AKI and LEE (1976), HORIE and AKI (1982)などを参照されたい。)まず、適当な速度構造(ここでは水平成層構造)と震源要素(震源位置 x, y, z と発震時 ot)とを仮定し、各観測点での走時残差 $T(o-c)$ を計算する。次に、各層を適当な大きさのいくつかのブロックに分割する。走時残差は震源要素と各ブロック内の速度の仮定した値からのずれ $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta ot, \Delta v$ の一次結合で次のように近似できる。

$$T(o-c) = \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial T}{\partial ot} \Delta ot + \sum_{k=1}^L \left(-\frac{l}{v} \right)_k \left(\frac{\Delta v}{v} \right)_k.$$

ただし、 L は波が震源から観測点に到着するまでに通過したブロックの数、 v, l はそれぞれ k 番目のブロック内の速度と波線の長さである。数多くの走時データを使えば、問題はこれらのずれの量を未知数とする大きな連立一次方程式を解くことに帰着する。実際には未知数、データの各々が必ずしも独立ではないので、方程式を解く際にはジェネラルインヴァージョン法を用いる必要がある。ここではダンブトリーストスクエアズ法を使う。この方法で求めた解の信頼性は標準偏差とリゾリューション行列の対角成分(以下、リ

Table 1. Average velocity V_a (km/sec, upper number) calculated from the velocity model shown in Fig. 1, and fractional velocity difference $\Delta V/V = (V_a - V)/V$ (% , lower number) in row of blocks in each layer, where V is initial velocity, 6.3 km/sec for the first layer and 7.8 km/sec for the other layers.

Layer	Z(KM)	X(KM)				
		0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
1	0- 30	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	30- 60	7.6	7.6	7.7	8.0	7.6
		-2.6	-2.6	-1.1	2.2	-2.6
3	60- 90	7.6	7.6	8.0	7.7	7.6
		-2.6	-2.6	2.2	-1.1	-2.6
4	90-120	7.6	7.7	8.0	7.6	7.6
		-2.6	-1.1	2.2	-2.6	-2.6
5	120-150	7.6	8.0	7.7	7.6	7.6
		-2.6	2.2	-1.1	-2.6	-2.6

ゾルーションという) とから推定できる。リゾルーションが1に近い程信頼性は高く、0に近い程低い。

今回の数値実験では、 $150 \times 150 \text{ km}^2$ の範囲に広がる観測網で深さ約 150 km までのP波速度構造を調べる場合を想定した。Fig. 1 に仮定した速度構造を示す。構造は y 方向に一様である。インバージョンに用いる走時データは平田 (1979) のプログラムにより三次元波線追跡をして計算した。速度構造の初期値は厚さ 30 km, 速度 6.3 km/sec の第一層と速度 7.8 km/sec の半無限層とから成る水平二層構造である。Fig. 2 は各層をブロックに分けたときのブロック配置を示す。ブロックの一辺の長さは 30 km である。インバージョンの際のダンピングの大きさは、 $\sigma_0/\sigma_{\Delta x} = \sigma_0/\sigma_{\Delta y} = 0.1 \text{ sec/km}$, $\sigma_0/\sigma_{\Delta z} = 0.06 \text{ sec/km}$, $\sigma_0/\sigma_{\Delta \phi} = 0.6 \text{ sec/sec}$, $\sigma_0/\sigma_{\Delta v/v} = 10 \text{ sec}$ である。ここで σ_0 は走時残差の、 $\sigma_{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta y}$ などは

ずれの量の標準偏差である。初期の速度構造、ブロックの配置、ダンピングの大きさは以下に示すすべての場合に共通である。Fig. 1 の速度構造から計算した各ブロック内の平均速度 V_a

Fig. 3. Pattern of velocity difference corresponding to Table 1.

Fig. 4. Distribution of 9, 36 and 121 stations.

Fig. 5. Distribution of 45 and 125 sources. Upper, epicentral distribution. Lower, focal depth distribution.

と、 V_0 と初期速度との違いの割合 $\Delta V/V$ を Table 1 に示す. Table 1 の値が速度構造に関する正解に相当する. Fig. 3 は Table 1 に示した $\Delta V/V$ の値をパターンで表わしたものである.

§3. 結 果

まず、観測点や震源の数が得られる構造にどのような影響を及ぼすかを見るために、震源が

Table 2. Fractional velocity perturbation (in %) obtained using 9 stations and 45 sources (a), 36 stations and 45 sources (b), 121 stations and 45 sources (c) and 36 stations and 125 sources (d). Data are free from observational errors. True source locations and origin times are used as initial values.

Table 2-a					Table 2-b				
Layer 1					Layer 1				
-1.1	0.2	0.1	0.0	0.1	-0.8	-0.4	-0.2	0.4	-0.3
-0.4	0.1	-0.5	0.0	0.0	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	-0.1
-0.2	0.1	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	-0.1
-0.2	0.1	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	-0.1
-0.4	0.1	-0.5	0.0	0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	-0.1
-1.1	0.2	0.1	0.0	0.1	-0.8	-0.4	-0.2	0.4	-0.3
Layer 2					Layer 2				
-0.2	-1.0	0.5	1.5	-0.7	-0.3	-1.1	0.1	2.2	-1.7
-1.0	-1.7	0.4	2.3	-1.4	-1.1	-1.8	-0.1	3.0	-2.6
-1.2	-2.2	0.1	2.9	-1.6	-1.6	-2.5	-0.3	3.3	-2.5
-1.2	-2.2	0.1	2.9	-1.6	-1.6	-2.5	-0.3	3.3	-2.5
-1.0	-1.7	0.4	2.3	-1.4	-1.1	-1.8	-0.1	3.0	-2.6
-0.2	-1.0	0.5	1.5	-0.2	-0.3	-1.1	0.1	2.2	-1.7
Layer 3					Layer 3				
0.0	-0.9	1.5	-0.1	-0.3	-0.3	-1.4	2.0	-0.1	-0.5
-0.2	-1.1	1.7	-0.2	-0.5	-0.2	-1.8	2.5	-0.1	-0.6
-0.5	-1.8	2.7	-0.2	-1.0	-1.0	-2.3	3.3	0.0	-1.0
-0.5	-1.8	2.7	-0.2	-1.0	-1.0	-2.3	3.3	0.0	-1.0
-0.2	-1.1	1.7	-0.2	-0.5	-0.2	-1.8	2.0	-0.1	-0.6
0.0	-0.9	1.5	-0.1	-0.3	-0.3	-1.4	2.5	-0.1	-0.5
Layer 4					Layer 4				
-0.3	0.3	0.5	-0.5	0.0	-0.5	0.0	1.2	-1.0	-0.3
-0.7	0.5	0.7	-0.7	-0.1	-0.5	0.1	2.1	-2.0	-0.3
-0.6	0.4	1.4	-1.5	-0.3	-0.8	0.0	3.0	-2.3	-1.0
-0.6	0.4	1.4	-1.5	-0.3	-0.8	0.0	3.0	-2.3	-1.0
-0.7	0.5	0.7	-0.7	-0.1	-0.5	0.1	2.1	-2.0	-0.3
-0.3	0.3	0.5	-0.5	0.0	-0.5	0.0	1.0	-1.0	-0.3
Layer 5					Layer 5				
0.1	—	-0.1	—	0.0	0.0	—	0.0	—	-0.2
-0.1	—	-0.2	—	-0.1	0.1	—	-0.5	—	0.1
0.1	—	-0.2	—	0.0	0.0	—	-0.2	—	-0.1
0.1	—	-0.2	—	0.0	0.0	—	-0.2	—	-0.1
-0.1	—	-0.2	—	-0.1	0.1	—	-0.5	—	0.1
0.1	—	-0.1	—	0.0	0.0	—	0.0	—	-0.2

Table 2. (Continued)

Table 2—c					Table 2—d				
Layer 1					Layer 1				
-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.6	-0.3	-0.2	0.3	-0.1
0.0	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.0
0.1	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
0.1	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
0.0	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.0
-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.6	-0.3	-0.2	0.3	-0.1
Layer 2					Layer 2				
-1.1	-2.1	-0.9	3.1	-1.9	-1.2	-1.8	0.0	2.9	-2.1
-2.0	-2.6	-0.9	3.2	-2.4	-1.9	-2.4	-0.4	3.4	-3.0
-2.3	-2.9	-0.9	3.5	-2.4	-2.0	-2.6	-0.5	3.5	-2.9
-2.3	-2.9	-0.9	3.5	-2.4	-2.0	-2.6	-0.5	3.5	-2.9
-2.0	-2.6	-0.9	3.2	-2.4	-1.9	-2.4	-0.4	3.4	-3.0
-1.1	-2.1	-0.9	3.1	-1.9	-1.2	-1.8	0.0	2.9	-2.1
Layer 3					Layer 3				
-0.2	-1.5	2.2	0.0	-1.8	-0.8	-2.0	2.5	0.0	-0.7
0.3	-1.5	3.5	0.7	-1.7	-1.4	-2.7	3.4	0.3	-0.3
-0.4	-1.6	3.9	0.5	-2.3	-2.3	-3.0	3.8	0.4	-0.4
-0.4	-1.6	3.9	0.5	-2.3	-2.3	-3.0	3.8	0.4	-0.4
0.3	-1.5	3.5	0.7	-1.7	-1.4	-2.7	3.4	0.3	-0.3
-0.2	-1.5	2.2	0.0	-1.8	-0.8	-2.0	2.5	0.0	-0.7
Layer 4					Layer 4				
-0.1	0.4	2.4	-2.0	-1.0	-0.6	0.3	1.3	-1.1	-0.4
-0.9	0.8	2.8	-2.9	-1.7	-0.5	0.5	1.9	-2.2	-0.9
-0.4	1.7	3.3	-3.3	-2.1	-0.4	0.7	2.4	-2.6	-1.5
-0.4	1.7	3.3	-3.3	-2.1	-0.4	0.7	2.4	-2.6	-1.5
-0.9	0.8	2.8	-2.9	-1.7	-0.5	0.5	1.9	-2.2	-0.9
-0.1	0.4	2.4	-2.0	-1.0	-0.6	0.3	1.3	-1.1	-0.4
Layer 5					Layer 5				
0.2	—	0.2	—	-0.4	-0.1	0.2	0.0	-0.2	-0.3
0.1	-0.1	-0.8	-0.3	0.7	0.0	0.1	-0.3	-0.2	-0.1
0.0	—	-0.3	—	0.1	0.0	0.0	-0.5	-0.3	0.0
0.0	—	-0.3	—	0.1	0.0	0.0	-0.5	-0.3	0.0
0.1	-0.1	-0.8	-0.3	0.7	0.0	0.1	-0.3	-0.2	-0.1
0.2	—	0.2	—	-0.4	-0.1	0.2	0.0	-0.2	-0.3

Fig. 6-(a)

(b)

(c)

Fig. 6. a-d Pattern of fractional velocity perturbation corresponding to Table 2a-d in the lower half region. Numbers of stations and sources used are given in the left upper side.

45 個で観測点が 9, 36, 121 点の場合, および震源が 125 個で観測点が 36 点の場合についてインバージョンを行った。観測点の分布を Fig. 4 に, 震源の分布を Fig. 5 に示す。震源要素の初期値としては真の値を用い, データは観測誤差を含まないとした。Table 2a-d は各々の場合について得られた各ブロック内の速度のずれの割合, Fig. 6a-d は Table 2 の値をパターンで表わしたものである。結果は $y=90$ km の線に関して対称なので, Fig. 6 には $y=0\sim 90$ km の範囲について示してある。インバージョンの前と後の走時残差の標準偏差を Table 3 に示す。Table 4 は震源 45 個, 観測点 36 点の場合の $\Delta V/V$ に関するリゾリューションと標準偏差である。Table 2, Fig. 6 に見られるように, 求めたずれの量は領域中央部のブロックでは大きく, 側面や底面に近いブロックでは小さい傾向がある。この傾向はデータが増えるに従って改善されていくが, 震源や観測点の密度がかなり大きい場合でも, 3, 4 層目の $x=0\sim 30$ または $x=120\sim 150$ km に位置するブロックや最下層のブロック内の速度は初期値からほとんど動いていない (Table 2c, d)。従って実際に速度構造を調べる場合には, 興味の対象となる地域の位置が領域の端の方にならないように観測点や震源を配置する必要がある。遠地地震のデータを用いて構造を調べる場合は, 近地地震の場合とは逆に深いところの速度が浅いところより精度よく求まる。そこで近地地震と共に遠地地震のデータを用いる方法も, 下方の層の速度分布を知るには有効であろう。震源の動きは深いところほど大きい, どの場合でも高々 2 km であった。震源 45 個, 観測点 36 点の場合の震源要素のリゾリューションは 0.5~1.0 の範囲で, 震央, 震源深さ, 発震時の標準誤差はそれぞれ 0.1~0.3 km, 0.3~0.6 km, 0.03~0.06 秒程度であった。

次に, 観測点が 36 点, 震源が 45 個の場合について, 走時データに $-0.1\sim 0.1$ 秒の範囲のランダム誤差を観測誤差として加えて計算を行った。震源要素の初期値に真の値を用いた場合は観測誤差がないときとほとんど同じ結果となった。初期の速度構造で震源決定を行い, その震源要素を初期値とした場合についても計算を行った。その結果得られた速度のずれを Table 5, Fig. 7 に示す。Table 5, Fig. 7 を前出の結果 (Table 2b, Fig. 6b) と比較する

Table 3. Standard deviation of travel time residuals σ_0 (sec) before and after inversion corresponding to the results given in Table 2.

	a	b	c	d
σ_0 before inversion	0.22	0.22	0.22	0.21
σ_0 after inversion	0.09	0.07	0.06	0.06

Table 4. Diagonal elements of resolution matrix (a) and standard errors (in %, b) corresponding to the result given in Table 2-b.

Table 4—a					Table 4—b				
Layer 1					Layer 1				
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Layer 2					Layer 2				
0.3	0.6	0.7	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
0.3	0.6	0.7	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Layer 3					Layer 3				
0.2	0.5	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.7	0.7	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.7	0.7	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.2	0.5	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Layer 4					Layer 4				
0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
Layer 5					Layer 5				
0.1	—	0.1	—	0.1	0.2	—	0.2	—	0.2
0.1	—	0.1	—	0.1	0.1	—	0.2	—	0.1
0.1	—	0.1	—	0.1	0.1	—	0.1	—	0.1
0.1	—	0.1	—	0.1	0.1	—	0.1	—	0.1
0.1	—	0.1	—	0.1	0.1	—	0.2	—	0.1
0.1	—	0.1	—	0.1	0.2	—	0.2	—	0.2

Table 5. Fractional velocity perturbation (in %) obtained using 36 stations and 45 sources. Data contain observational errors of the boxcar distribution from -0.1 to 0.1 sec. Initial values of source locations and origin times are those determined for the initial velocity model.

Layer 1					Layer 4				
-0.5	-0.1	0.5	0.7	0.0	-0.3	-1.4	-0.3	-0.2	0.0
0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.2	1.5	0.1	0.8	-0.4	-0.1
0.3	0.3	0.1	0.4	-0.4	-0.3	-1.5	2.3	-0.6	0.0
0.4	0.3	-0.2	0.1	-0.1	-0.4	-1.3	2.0	-0.6	-0.1
0.0	-0.3	0.0	-0.0	0.0	1.3	0.5	0.9	-0.8	0.0
-0.6	0.1	0.4	0.7	0.1	-0.1	-1.5	0.0	0.1	0.0
Layer 2					Layer 5				
0.6	-0.3	-0.1	1.5	-0.8	0.0	-0.2	—	—	—
-0.5	-1.0	-0.3	2.8	-1.5	-0.8	0.6	—	—	0.0
-0.8	-2.5	-0.6	3.1	-1.6	-0.4	0.4	—	—	0.0
-0.6	-2.4	-0.4	2.8	-2.0	-0.8	0.2	—	—	0.0
0.4	-1.3	-0.1	2.8	-1.8	-0.6	0.5	—	—	0.0
0.5	-0.2	0.2	1.5	-0.4	-0.1	-0.2	—	—	0.0
Layer 3									
-0.6	-0.8	1.0	0.2	0.1					
0.9	-1.1	1.3	-1.4	-0.5					
-0.2	-1.2	3.5	-0.5	-0.5					
0.1	-1.1	2.9	-0.5	0.1					
0.9	-0.6	1.0	-1.0	-0.6					
-0.6	-0.9	1.5	0.3	0.0

Fig. 7. Pattern of fractional velocity perturbation corresponding to Table 5. Dashed lines indicate the region where resolution is larger than 0.7.

Fig. 8. Focal depth distribution of true (crosses), initial (solid circles) and inverted (open circles) hypocenters contained in the hatched area.

NO. OF EVENTS = 40

Fig. 9. Distribution of 40 sources. Upper, epicentral distribution. Lower, focal depth distribution.

と、領域の側面に近いブロックや 3, 4 層内のブロックに関する結果が悪くなっていることがわかる。Fig. 8 は震源の真の位置、初期位置、インヴァージョンで再決定した位置を示す図である。初期の震源位置は構造の影響を受けて、波線が 8.1 km/sec の領域を通る比率が大きい場合は浅く、比率が小さい場合は深くなっている。初期の位置と真の位置とのずれは深いところほど大きく、5 層目では水平距離で 7 km、深さで 15 km 程にもなる。インヴァージョンによる震源の動きは小さく、震源は真の位置からずれたままである。このことが原因で速度に関する結果が悪くなつたと考えられる。従つて震源要素の初期値としては、対象とする領域の速度構造の影響をあまり強く受けていないもの、例えば領域外の観測点の走時データも用いて決定した震源などを選んだ方がよさそうである。 σ_0 はインヴァージョンの前が 0.12 秒、後が 0.09 秒であつた。

最後に、震源分布が一様でない場合に得られた結果について述べる。仮定した震源は 40 個で、Fig. 9 に示すように 2 層目以下の高速度域内に分布する。観測点を 36 点とし、先の例

Table 6. Fractional velocity perturbation (in %) obtained using 36 stations and 40 sources. Data contain observational errors. Initial values of source locations and origin times are those determined for the initial velocity model.

Layer 1					Layer 4				
-0.1	-0.2	1.4	2.0	-0.3	—	0.0	-0.1	—	—
0.7	0.1	0.5	0.2	-1.5	—	-0.4	1.1	-0.2	—
0.8	0.4	0.1	-0.6	-2.2	—	-0.5	1.1	-0.1	—
0.9	0.3	0.0	-0.7	-2.1	—	-0.3	0.1	-0.3	—
0.6	0.5	0.4	0.1	-1.7	—	-0.2	0.5	-0.3	—
0.1	-0.1	1.4	2.1	-0.5	—	0.2	-0.5	—	—
Layer 2					Layer 5				
1.6	0.9	1.0	0.4	-1.2	—	-0.1	—	—	—
0.2	-1.2	-0.7	1.8	-0.6	—	0.1	-0.1	—	—
0.1	-3.2	-1.1	2.7	-1.5	—	0.4	-0.2	—	—
0.1	-3.4	-1.2	2.6	-1.4	—	0.3	-0.5	—	—
0.3	-1.7	-1.0	1.7	-0.9	—	-0.2	0.2	—	—
1.9	0.9	0.4	0.0	-1.0	—	0.0	—	—	—
Layer 3									
0.4	0.8	0.4	-0.5	—					
0.3	0.5	0.8	-2.0	—					
-0.5	-0.7	1.8	-1.3	—					
-0.5	-0.5	1.8	-0.9	—					
0.2	0.5	0.7	-1.7	—					
0.2	0.7	0.6	-0.7	—

Fig. 10. Pattern of fractional velocity perturbation corresponding to Table 6. Dashed lines indicate the region where resolution is larger than 0.7.

と同じ様にデータに観測誤差を加え、初期構造で決定した震源を初期値とした。Table 6, Fig. 10 は求まった速度のずれである。偏った震源分布による影響はこれまでに述べた例と同様に領域の側面に近いところや深いところで大きく、3 層目以下での速度のずれはかなり小さくなっている。しかし、この場合でも一番外側のブロックを除く 1, 2 層目内の速度分布や、深さが増すにつれて高速度域が x 座標の小さくなる方向へ移動するといった大まかな様子をみてとることは可能である。Fig. 11 に震源の真の位置、初期の位置、インヴァージョンにより再決定した位置を示す。前出の Fig. 8 の場合と同様に、対象とする地域の構造が初期位置と再決定した位置に影響を与えていることを見てとれる。Fig. 9 はプレートの沈みこみ地域にみられる震源分布と類似しているので、ここで述べた結果は沈みこみ地域の三次元速度構造を調べるときの参考になるものと思われる。また、Fig. 7 と Fig. 10 から、実際の観測データを扱う場合はリゾリューションが 0.7 程度以上なら解を信頼できること、領域のはじの方のブロックに関してはリゾリューションが 0.7 以上であつても信頼性が低いことなどが推察される。

§ 4. まとめと考察

AKI and LEE (1976) の方法に基づいて三次元速度構造を求める場合、いろいろな条件（観測点と地震の数、観測誤差、震源要素の初期値、震源分布の偏り）が結果にどう影響するかを数値実験を行つて調べた。その結果をまとめると次のようになる。(i) 影響は対象とする領域の側面に近いところや深いところほど大きい。(ii) データ密度がかなり大きい場合でも領域の一番外側に位置するブロック内の速度を知ることは難しい。

今回の研究では議論を簡単にするために、インヴァージョンの際のダンピングのかけ方やブロックの大きさなどを一定にしている。また、解の評価は求まった値が正解 (Table 1) に近いかどうかだけを基準にしている。より精密な議論をするためには、データや未知数の数と精度に応じたダンピングをかけ、解を評価する際はリゾリューションや標準誤差を考慮に入れることが必要だろう。

Fig. 11. Focal depth distribution of true (crosses), initial (solid circles) and inverted (open circles) hypocenters contained in the hatched area.

最後にこの原稿を読んで頂き、有益な助言をして下さった京都大学防災研究所の平原和朗博士、三次元波線追跡プログラムをお借りした東京大学理学部の平田直氏にお礼申し上げます。

文 献

- AKI, K., 1981, 3-D Inhomogeneities in the Upper Mantle, *Tectonophysics*, **75**, 31-40.
- AKI, K., 1982, Three-dimensional Seismic Inhomogeneities in the Lithosphere and Asthenosphere: Evidence for Decoupling in the Lithosphere and Flow in the Asthenosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 161-170.
- AKI, K., A. CHRISTOFFERSSON and E. S. HUSEBYE, 1976, Three Dimensional Seismic Structure of the Lithosphere under Montana, *LASA, Bull. Seism. Soc. Amer.*, **66**, 501-524.
- AKI, K., A. CHRISTOFFERSSON and E. S. HUSEBYE, 1977, Determination of the Three-dimensional Seismic Structure of the Lithosphere, *J. Geophys. Res.*, **82**, 277-296.
- AKI, K., and W. H. K. LEE, 1976, Determination of Three-dimensional Velocity Anomalies under a Seismic Array Using First P Arrival Times from Local Earthquakes, 1. A Homogeneous Initial Model, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4381-4399.
- HASEMI, A. H., H. ISHII and A. TAKAGI, 1984, Fine Structure beneath the Tohoku District, Northeastern Japan Arc, as Derived by an Inversion of P-wave Arrival Times from Local Earthquakes, *Tectonophysics*, **101**, 245-265.
- HIRAHARA, K., 1977, A Large-scale Three-dimensional Seismic Structure under the Japan Islands and the Sea of Japan, *J. Phys. Earth*, **25**, 393-417.
- HIRAHARA, K., 1981, Three Dimensional Seismic Structure beneath Southern Japan: The Subducting Philippine Sea Plate, *Tectonophysics*, **79**, 1-44.
- 平田 直, 1979, 傾斜層速度構造モデルでの震源計算法, 地震学会講演予稿集, 秋季大会, p 118.
- HORIE, A. and K. AKI, 1982, Three Dimensional Velocity Structure beneath the Kanto District, Japan, *J. Phys. Earth*, **30**, 255-281.
- LEE, W. H. K. and S. W. STEWART, 1981, Principles and Applications of Microearthquake Networks (Chap. 7), Academic Press.
- MIYAMACHI, H., 1983, Velocity Structure of the Crust and the Upper Mantle beneath the Hidaka Mountains in Hokkaido, Japan as Derived from Local Earthquakes, Thesis, Hokkaido Univ.
- TAKANAMI, T., 1982, Three-dimensional Seismic Structure of the Crust and Upper Mantle beneath the Orogenic Belts in Southern Hokkaido, Japan, *J. Phys. Earth*, **30**, 87-104.