人工地震による首都圏南西部の地下深部探査 (4)

——横浜市舞岡発破および大黒発破による人工地震波の解析——

東京工業大学大学院総合理工学研究科* 山中浩明[†]・瀬尾和大・佐間野隆憲

On the Seismic Prospecting in the Southwestern Part of the Tokyo Metropolitan Area (4)

—Analysis of Explosion Seismic Data from Explosions at Maioka
and Daikoku in Yokohama City—

Hiroaki YAMANAKA, Kazuo SEO and Takanori SAMANO

The Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta 4259,
Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 227 Japan

(Received August 8, 1990; Accepted January 23, 1991)

The seismic refraction survey was conducted in the southwestern part of the Tokyo Metropolitan area to make clear the deep sedimentary structure. Two explosions were made at Daikoku and Maioka in Yokohama city in 1988, and the resultant seismic waves were observed at 83 temporary observation sites along four surveying lines:

- a) Yumenoshima to Enoshima,
- b) Daikoku to Nagatsuta,
- c) Nagatsuta to Kanazawa, and
- d) around Takatsu.

The travel time analysis for the above data and additional data from previous explosions in the area for reference has been made.

The followings were our conclusions:

- 1) The subsurface structure consists of five layers characterized by P-wave velocities of 1.8, 2.3, 2.9, 4.7 and 5.5 km/s. The top layer with a P-wave velocity of 1.8 km/s disappears around Enoshima. The layer with a P-wave velocity of 5.5 km/s could not be confirmed for the southwestward area.
- 2) The topography of the layer with a P-wave velocity of 4.7 km/s forms a synclined structure having its maximum depth of more than 4 km between the Maioka and Daikoku explosion sites. The depth to this layer becomes drastically shallower toward Enoshima.
- 3) The step-like topography of the layer with a P-wave velocity of 5.5 km/s, which has been found in the previous study, could not be confirmed, because of low S/N ratios of the observed seismograms.

Key words: Tokyo Metropolitan area, Sedimentary layers, Basement structure, Explosion seismology, Seismic refraction method.

§ 1. 緒 言

1968 年十勝沖地震の際に周期 2~3 秒の成分を顕著に含んだ強震動が八戸で得られて以来、強震動に含まれ

る周期 1 ないし 2 秒から 20 秒程度までのやや長周期成分の特性を理解することが地震工学上の重要な課題のひとつとなっている。やや長周期地震動を構成する波動は主に表面波であり、P 波速度 5 km/s 以上を有する地層までの深い地盤の構造に大きく影響されることがその後の多くの実測に基づく研究から明らかにされている [例

* 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

[†] 現在、鹿島建設株式会社小堀研究室

Fig. 1. Map of the studied area, the southwestern Kanto district, Japan. Squares and circles indicate explosion sites and temporary observation sites, respectively.

えば, SEO and KOBAYASHI (1980)]. また, 解析的には KUDO (1978) が 1974 年伊豆半島東方沖地震の際に東京本郷で観測された変位波形をかなりよく再現しており, 適当な断層パラメータと地下構造モデルを与えれば, やや長周期地震動の予測が可能であることを示唆している. しかし, 平行層で近似されたひとつの地下構造モデルですべての地震の場合について対応することは難しいと考えられる. さらに, 座間 (1981), 山中・他 (1989) は現実的な深い地盤モデルに対して表面波伝播の数値シミュレーションを行い, 観測点直下を近似した平行層から成る地下構造モデルのみでは表面波の伝播・増長過程を詳細に知ることは難しく, 観測点に表面波が到達するまでの伝播経路に沿った地下構造の影響も考慮することの重要性を指摘している. したがって, 地震動予測という工学的な目的のためには地下構造に関する精度の高い 3 次元データを用意し, そうした地下構造の影響を正確に評価することが重要となる. そのためには, 地震波の励起・伝播に関する計算手法の開発と地下構造の詳細な調査が必要である. 前者については 1985 年メキシコ地震の後に多くの研究者によって研究が進められてきている [例えば, SANCHEZ-SESMA *et al.* (1988), KAWASE and AKI (1989)]. しかし, 地下構造については, 表面波伝播

の数値シミュレーションの結果を直接的に左右してしまうにもかかわらず, メキシコ市の場合も含めて十分に明らかにされている例はあまりない.

こうしたなかで東京都や横浜市をはじめとする首都圏では, 1975 年に東京都夢の島を発破点として深い地盤の構造調査を目的とした人工地震探査が実施されて以来, かなりの数の人工地震探査が行なわれ, 特に, 南西部では高い密度で測線が設けられている [山中・他 (1988)]. その結果, P 波速度にして 5.3 ないし 5.6 km/s を有する基盤層の 3 次元的な形状が明かとなっている [首都圏基盤構造研究グループ (1989), 東・他 (1988)]. こうした人工地震探査の結果は表面波伝播のシミュレーションなどに取り入れられており, 観測記録の特徴がよく説明されている [YAMAMOTO *et al.* (1989), YAMANAKA *et al.* (1989)]. しかしながら, こうした地下構造データには未だ未知な部分が残っており, 地震動予測を行なう場合にはかなり大胆な仮定が必要になることがある. 例えば, 全般的に言えることであるが, 深さ 1 km 程度の比較的浅い部分の構造についての精度は低い. また, 具体的な地域としては, 横浜市南部から江ノ島に至る部分では瀬尾・小林 (1980) によって夢の島での人工地震の記録について解析が行なわれているが, 逆

Table 1. Origins of explosions.

Name	Origin time						Latitude	Longitude	Charge kg
	Y	M	D	H	M	S			
Daikoku	1988	11	28	02	02	00.542	35°27'10.53"	139°41'55.00"	300
Maioka	1988	11	28	02	12	00.685	35°23'03.58"	139°33'09.80"	300

測線を構成する発破がないために、地下構造を決定するまでには至っていない。しかも、この地域の地下構造は相模トラフで発生する大きな地震の際に東京をはじめとする首都圏中心部への表面波の伝播経路に対応している。首都圏でのやや長周期地震動の予測を行なう際に、この地域の地下構造の影響を正確に評価しなければならず、この地域の地下構造が未知のままであることは望ましくない。

本論では1988年11月28日に横浜市によって地震防災を目的として横浜市舞岡町と大黒埠頭において実施された発破による人工地震を観測し、横浜市の観測データも併せて解析を行い、首都圏南西部、特に夢の島から江ノ島までの深い地盤の構造を明らかにすることを試みた。

§ 2. 人工地震の観測

人工地震は Fig. 1 に示した横浜市戸塚区舞岡町と同市鶴見区大黒埠頭を発破点として横浜市により実施されたものである。以下ではそれぞれを舞岡発破、大黒発破と呼ぶ。両発破の諸元が Table 1 に示されている。観測点数は合計 83 点で、観測にはおもに固有周波数 4.5 Hz の地震計が用いられた。観測点の位置は Fig. 1 および Table 2 に示されている。観測点はこの地域における既往の人工地震探査の測線を考慮して配置され、測線としては夢の島および東扇島から大黒・舞岡発破点を経由して江ノ島に向かう夢の島-江ノ島測線、横浜市長津田と大黒発破点を結ぶ長津田-大黒測線、舞岡発破点からほぼ南北に展開された長津田-金沢測線、及び舞岡発破点から川崎市高津に向かう高津測線の 4 測線が設けられた。夢の島-江ノ島測線においては瀬尾・小林 (1980) により夢の島発破の観測結果に基づいて地下構造についての議論が行なわれており、今回の 2 つの発破はその逆測線を構成する発破に対応している。また、長津田および長津田と舞岡発破点の中間の岡津では以前に発破が行なわれ、その間では精度よく地下構造が求められている [山中・他 (1986)]。首都圏南西部には P 波速度 5.5 km/s 層の上面に段差状の構造があることが指摘されているが [山中・他 (1988)]、高津測線はその段差の存在をさらに明確にすることを目的として設けられたものである。

観測記録の例としていくつかの測線において得られた上下動成分の観測記録が Figs. 2(a)~(e) に示されている。各図のトレースの振幅は任意のスケールである。また、この地域では P 波速度約 4.8 km/s を有する層が厚く存在していることが明かになっているので [山中・他 (1988)]、横軸の走時は 4.8 km/s で換算してある。Figs. 2(a), (e) にみられるように舞岡発破の際の東扇島付近および高津付近では観測された記録の S/N 比が低く、初動の到着時刻が読み難くなっている。それ以外の観測記録は概ね良好なものである。各観測波形に付けられた黒丸は読み取った初動の到着時刻を表している。各発破に対して読み取られた初動の走時と震央距離が Table 2 に示されている。

§ 3. 走時解析結果と地下構造

読み取った初動走時を用い、上記の 4 測線について走時解析から地下構造の推定を行なった。その際には後続位相の走時も補足的に考慮し、また既往の結果、とくに、以前に発破が実施された長津田、岡津、東扇島、夢の島での構造もしくはタイムタムを参考にして解析を行なった。なお、以下では単に速度を示す場合には P 波速度を示すことにする。

3.1 夢の島-江ノ島測線の地下構造

夢の島-江ノ島測線ではすでに何回か夢の島発破による人工地震の観測が行なわれており [瀬尾・小林 (1980)、首都圏基盤構造研究グループ (1989)]、ここではその観測結果も考慮して地下構造を推定した。

Fig. 3 は夢の島-江ノ島測線に対する走時曲線である。図中の□は大黒発破、●は舞岡発破による各観測点の初動あるいは顕著な後続位相の走時を表わしている。また、既往の夢の島発破による初動走時も△と▲で示してある。舞岡発破による初動走時から、発破点 (MOK) から江ノ島 (ENS) 側へは 1.9, 2.4, 3.1, 4.7 km/s の見かけ速度が得られ、大黒発破点 (DKK) に向かっては、大黒・東扇島 (HOG) 付近で初動の到着時刻が読み難いために 4 本目は不明であるが、1.8, 2.3, 及び 2.9 km/s の見かけ速度が得られる。また、大黒発破による結果からは、夢の島 (YMS) 側へは 1.8, 2.2, 2.8 km/s の見かけ速度と震央距離 7 km 以遠でデータは少ないが 5.0 km/s の見かけ速度が得られ、舞岡発破点に向かっての見かけ

Table 2. Locations, epicentral distances and travel times of initial phases obtained from the Daikoku and Maioka explosions.

No	STATION	LOCATION		DAIKOKU EXP.		MAIOKA EXP.	
		LAT.	LONG.	D(km)	T(s)	D(km)	T(s)
1	H. OHGISHIMA 1	35 30 06.8	139 46 14.7	8.51	3.79	23.70	7.277
2	H. OHGISHIMA 2	35 29 50.4	139 45 45.9	7.63	3.60	22.82	----
3	H. OHGISHIMA 3	35 29 32.9	139 45 20.8	6.79	3.36	21.90	5.617
4	H. OHGISHIMA 4	35 29 15.6	139 44 52.6	5.91	3.01	21.11	6.447
5	OHGISHIMA 1	35 28 28.9	139 43 57.7	3.92	2.19	19.17	----
6	OHGISHIMA 2	35 28 16.5	139 43 28.4	3.11	1.82	18.34	----
7	OHGISHIMA 3	35 27 53.5	139 42 53.4	1.98	1.18	17.22	----
8	DAIKOKU SHOT P.	35 27 10.5	139 41 55.0	0.11	----	15.19	5.81
9	HONMOKU FUTO	35 26 42.9	139 40 22.4	2.48	1.44	12.84	5.22
10	SHIN YAMASHITA	35 26 20.9	139 39 54.1	3.41	1.86	11.87	4.86
11	MOTO MACHI	35 26 06.5	139 39 17.9	4.43	2.39	10.86	4.58
12	YAMATE CHO	35 25 55.4	139 38 39.7	5.44	2.78	9.86	4.26
13	OH-HIRA CHO	35 25 32.9	139 38 18.9	6.22	3.03	9.06	3.95
14	ISOGO KAMI MACHI	35 25 16.5	139 37 41.6	7.29	3.46	7.99	3.59
15	TAKIZU	35 25 09.0	139 37 11.7	8.07	3.74	7.22	3.34
16	OH-OKA	35 24 46.3	139 36 30.7	9.31	4.07	5.97	2.87
17	SAIDO	35 24 40.4	139 35 52.1	10.26	4.50	5.07	2.51
18	OHKUBO	35 24 18.2	139 35 24.2	11.20	4.78	4.10	2.10
19	KAMI NAGAYA	35 24 00.4	139 34 45.5	12.31	5.09	2.98	1.58
20	MARUYAMADAI	35 23 43.5	139 34 16.9	13.20	5.33	2.09	1.13
21	HIGIRIYAMA	35 23 21.0	139 33 43.4	14.28	5.62	1.00	0.62
22	MAIOKA SHOT P.	35 23 03.6	139 33 09.8	15.17	5.78	0.12	----
23	SHIMOKURATA	35 22 48.8	139 32 57.1	15.79	5.88	0.56	0.33
24	KOSUGEGAYA CHO	35 22 25.1	139 32 47.7	16.37	6.02	1.31	0.70
25	IJIMA CHO	35 22 00.7	139 32 35.2	17.05	6.06	2.13	1.12
26	KASAMA SHO	35 21 31.3	139 32 08.3	18.12	6.18	3.24	1.60
27	TAMANAWA	35 21 08.2	139 31 38.7	19.14	6.33	4.23	2.02
28	TAMANAWA CHU	35 20 38.3	139 31 19.8	20.07	6.33	5.27	2.49
29	KAMI MACHIYA	35 20 00.4	139 31 6.0	21.07	6.45	6.45	2.83
30	FUKASAWA KOH	35 19 37.7	139 30 22.2	22.37	6.62	7.63	3.18
31	NISHI KAMAKURA	35 19 14.7	139 30 08.4	23.09	6.80	8.41	3.39
32	KATASEYAMA	35 18 52.4	139 29 59.0	23.71	6.91	9.12	3.52
33	ENOSHIMA	35 17 50.9	139 29 00.4	26.07	7.32	11.51	4.00
34	TITECH NAGATSUTA	35 30 34.1	139 29 16.9	20.11	6.28	15.07	5.28
35	WAKABADAI	35 30 09.1	139 29 34.5	19.46	6.07	14.19	5.04
36	HODOGAYA C.C.	35 29 08.8	139 30 20.6	17.88	5.83	12.04	4.63
37	SEYA KOH	35 28 30.0	139 30 8.0	17.99	5.78	11.05	4.44
38	H. KIBOUGAOKA	35 27 40.0	139 30 51.6	16.75	5.69	9.20	3.90
39	KUNREN KOH	35 27 05.4	139 31 00.0	16.52	5.67	8.14	3.52
40	KANKYO KYOKU	35 26 32.8	139 31 09.5	16.32	5.66	7.13	3.22

速度としては、1.8, 2.3, 2.9 km/s 及び震央距離 10 km 過ぎから 17 km 程度の区間で 4.1 km/s がみとめられる。

これらの結果から、表層構造としては 1.8, 2.3 および 2.9 km/s の 3 層が考えられる。4 層目については、この測線と交差する逗子と横浜市港北の間 (Fig. 1 参照) で

以前に人工地震探査が行なわれ、P 波速度 4.7 km/s を有する層が厚く存在していることが指摘されており [山中・他 (1988)], 大黒発破による見かけ速度 5.0 と 4.1 km/s の走時はこの 4.7 km/s 層を伝播した屈折波であると解釈できる。

ところで、江ノ島に向かう側での大黒発破による初動

Table 2. Continued.

No	STATION	LOCATION		DAIKOKU		MAIOKA	
		LAT.	LONG.	D(km)	T(s)	D(km)	T(s)
41	IZUMI-KU RYOKUEN	35 26 20.9	139 31 31.4	15.80	5.60	6.57	2.87
42	OKAZU KOH	35 25 44.1	139 31 39.2	15.70	5.79	5.45	2.52
43	KAMIYABE SHO	35 25 13.0	139 31 53.3	15.60	5.74	4.42	2.22
44	KAMIYABE CHO	35 24 53.7	139 32 20.1	15.10	5.72	3.62	1.84
45	MAIOKA CHU	35 24 22.5	139 32 51.7	14.65	5.62	2.47	1.29
46	H. TOTSUKA SHO	35 23 54.6	139 32 27.2	15.54	5.81	1.90	0.99
47	KAMIKURATA CHIO	35 23 31.6	139 32 55.7	15.18	5.79	0.93	0.56
48	NOBA	35 22 45.1	139 33 41.8	14.89	5.71	0.99	0.58
49	KOUNANDAI	35 22 01.1	139 34 41.4	14.51	5.70	3.00	1.57
50	KAMISATO CHO 1	35 21 42.6	139 35 12.5	14.33	5.69	3.98	2.03
51	KAMISATO CHO 2	35 21 19.6	139 35 42.3	14.33	5.65	5.01	2.46
52	KAMARIYA 1	35 20 42.7	139 36 09.5	14.79	5.71	6.28	2.92
53	KAMARIYA 2	35 20 34.2	139 36 40.1	14.57	5.62	7.02	3.13
54	KAMARIYA 3	35 20 14.4	139 37 09.6	14.71	5.66	7.99	3.48
55	DEIKI	35 19 52.5	139 37 39.2	14.96	5.65	9.00	3.79
56	OTOFUNE CHO	35 19 32.7	139 38 08.6	15.22	5.72	9.96	4.14
57	KIRIGAOKA KOH	35 30 23.9	139 30 20.7	18.49	5.92	14.22	5.03
58	MIHO CHO	35 30 07.7	139 30 59.6	17.40	5.73	13.48	4.91
59	KAWAIYUKU CHIO	35 30 00.4	139 31 37.3	16.43	5.53	13.05	4.89
60	TERAYAMA CHIO	35 29 49.2	139 32 29.8	15.06	5.40	12.54	4.79
61	KAMIYAMA CHIO	35 29 43.3	139 32 53.7	14.43	5.24	12.32	4.76
62	ARAI SHO	35 29 32.7	139 33 37.7	13.28	5.06	12.01	4.73
63	SASAYAMA SHO	35 29 22.8	139 34 05.6	12.52	4.93	11.77	4.74
64	KAMISUGETA CHIO	35 29 12.5	139 34 40.9	11.57	4.74	11.60	4.76
65	HAZAWA CHIO	35 29 05.9	139 35 30.0	10.34	4.39	11.71	4.60
66	SANMAI CHIO	35 28 50.2	139 36 02.8	9.40	4.22	11.54	4.91
67	MITSUZAWA 2	35 28 37.8	139 36 46.0	8.24	3.86	11.65	4.99
68	MITSUZAWA 1	35 28 29.3	139 37 20.8	7.33	3.54	11.87	5.11
69	HASHIMOTO CHIO	35 28 06.5	139 38 30.5	5.44	2.79	12.35	5.27
70	SUZUSHIGE CHO	35 28 16.3	139 39 07.6	4.68	2.48	13.20	5.43
71	DAIKOKU FUTO 2	35 27 29.0	139 40 37.7	2.03	1.22	13.95	5.62
72	DAIKOKU FUTO 1	35 27 18.6	139 41 06.2	1.25	0.73	14.36	5.79
73	SOUSAI JYOU	35 36 11.9	139 35 59.6	18.93	5.88	24.67	7.68
74	MIDORIGAOKA BOTI	35 35 56.1	139 35 52.5	18.59	5.85	24.16	7.607
75	KAMISAKUNOBE	35 35 34.9	139 35 42.1	18.16	5.87	23.47	7.457
76	MIYAMAEDAIRA	35 35 04.8	139 35 25.0	17.61	5.77	22.48	7.18
77	ARIMA	35 34 37.6	139 35 26.4	16.90	5.58	21.66	7.25
78	KAWASAKI KOH	35 34 14.7	139 35 21.7	16.40	5.60	20.95	6.867
79	SUMIREGAOKA	35 33 45.6	139 35 16.4	15.78	5.53	20.04	6.647
80	USHIKUBO	35 33 20.7	139 35 15.6	15.21	5.38	19.28	6.52
81	CHIGASAKI CHU	35 32 14.4	139 35 06.3	13.39	5.16	17.23	5.957
82	TOUHO CHO	35 31 24.6	139 35 00.2	13.06	5.05	15.69	5.67
83	H. HONGOU CHO	35 30 26.5	139 34 41.1	12.49	4.91	13.84	5.14

走時の見かけ速度は、震央距離約 17 km から 22 km では 10.8 km/s と速くなり、震央距離 22 km 以遠の江ノ島付近では 4.8 km/s となっている。夢の島発破による初動走時にも、この区間で大黒発破の初動走時とほとんど

同様の見かけ速度の変化が認められることから、この区間では 2 つの発破の初動は同一の層を伝播した屈折波であると考えられる。その層としては 4.7 km/s 層かその下層の 5.3 ないし 5.5 km/s の P 波速度を有する層

Fig. 2(a). Vertical velocities observed at the stations along the Yumenoshima-Enoshima line for the Maioka explosion. Each trace is normalized to its maximum amplitude.

Fig. 2(c). Vertical velocities observed at the stations along the Nagatsuta-Kanazawa line for the Maioka explosion. Each trace is normalized to its maximum amplitude.

Fig. 2(b). Vertical velocities observed at the stations along the Yumenoshima-Enoshima line for the Daikoku explosion. Each trace is normalized to its maximum amplitude.

Fig. 2(d). Vertical velocities observed at the stations along the Nagatsuta-Daikoku line for the Daikoku explosion. Each trace is normalized to its maximum amplitude.

が考えられるが、後者とした場合、2つの発破のこの区間の初動走時の時間差(3.66秒)を説明する大黒発破点のタイムタームは、夢の島発破から求められている大黒付近のタイムターム [山中・他(1988)] と0.1ないし0.2秒の食い違いが生じる。また、江ノ島付近での舞岡

Fig.2(e). Vertical velocities observed at the stations along the Takatsu line for the Maioka explosion. Each trace is normalized to its maximum amplitude.

発破による初動走時の見かけ速度も4.7 km/sで、夢の島・大黒発破とはほぼ同じ値であることなどから、これらの走時も4.7 km/s層を伝播した位相によるものであると考えるのが妥当であろう。ただし、この場合には、夢の島発破で見かけ速度が5.3 km/sとなっている大黒付近までの震央距離20 km以内の初動は、5.3ないし5.5 km/s層(今回の実験のみからはこの層の速度を確定することはできないが、前報までの結果を考慮して5.5 km/sであると仮定し、以下では5.5 km/s層と記述する。)を伝播した屈折波によるものと考えられていることから、夢の島発破による舞岡・江ノ島付近の初動の伝播した層が大黒と舞岡間のある地点を境に5.5 km/s層から4.7 km/s層へ変わっていなければならないことになる。そこで、以上の3つの発破から求められる4.7 km/s層までのタイムタームの分布を比較することでその境界の位置を調べることにする。まず、舞岡および大黒発破について各地点のタイムタームを求める。その際の大黒発破点のタイムタームは、Fig. 3に示されている見かけ速度5.0と4.1 km/sの原点走時2.12秒から1.06秒とした。また、舞岡発破については、発破点付近で大黒および夢の島発破による初動の見かけ速度が10 km/s以上となっており、かなり急激な傾斜が予想されることから、江ノ島方向と大黒方向に対してそれぞれ異なるタイムタームを有していると考えた。すなわち、江ノ島に向かう方向に対してはその見かけ速度4.7 km/sの原点走時1.60秒から0.80秒であるとし、大黒発破点に向かう方向へは、大黒発破の舞岡発破点の走時5.78秒と発破点のタイムタームから得られる1.49秒とした。

Fig. 3. Travel time diagram for the Yumenoshima-Enoshima line. Open squares and solid circles indicate travel times obtained from the Daikoku and Maioka explosions, respectively. Travel times obtained from the previous Yumenoshima explosions are also indicated by solid and open triangles.

Fig. 4. Distributions of time terms obtained along the Yumenoshima-Enoshima line. Squares indicate time-terms to the top of the layer with a P-wave velocity of 4.7 km/s from the Daikoku and Maioka explosion data. Solid circles indicate time terms derived from the Yumenoshima explosion data, assuming that the reduction velocity of the initial phase changes from 5.5 km/s to 4.7 km/s at the epicentral distance of 30 km as indicated by a dotted line.

Fig. 5. Subsurface structure deduced for the Yumenoshima-Enoshima line.

求められた各地点のタイムタームは Fig. 4 に□で示されている。一方、夢の島発破の初動は舞岡(MOK)-江ノ島(ENS)間では 4.7 km/s 層を伝播していると考えられるので、舞岡および大黒発破から求められたタイムタームに夢の島発破から求められるそれが一致するように、初動の伝播した層が 5.5 km/s 層から 4.7 km/s 層に移り変わる点を求めることにする。そうすると、Fig. 4 の点線で示される夢の島(YMS)から約 30 km の地点で、初動が伝播した層が 5.5 km/s 層から 4.7 km/s 層に移り変わることになる。その時のタイムタームも同図に●で示されている。この移り変わりの原因については、4.7 km/s 層の厚さが極端に厚くなっている、あるいは媒質自体が横方向に速度が変わる不連続面を持っているなどの可能性が考えられるが、現時点でははっきり断言できない。

上記の解釈に基づいて地下構造の推定を行なった。その際に、舞岡発破点付近での急な構造の変化を考慮して、境界面に沿って伝播する波動の走時を図式で求め、この走時が合うように地下構造を決定した。得られた地

下構造が Fig. 5 に示されている。図の点線はデータがなく、仮定した部分が多いことを示している。表層構造については後続位相の走時も考えて、1.8, 2.3, 2.9 km/s の 3 層を考えたが、初めの 2 つの層が既往の研究で明らかにされている 1.8~2.0 km/s 層に対応していると考えられる。4.7 km/s 層までの深さは舞岡(MOK)と大黒(DKK)の間の横浜市港南区周辺で最も深く、4 km を越えている。そこから江ノ島(ENS)に向かって急激に浅くなっているが、江ノ島付近でも 4.7 km/s 層までは 2 km 程度の深さであると推定される。東扇島(HOG)と大黒の間でみられる 5.5 km/s 層上面の段差は Fig. 3 の夢の島発破による走時曲線の震央距離約 20 km 付近にみられるステップ上の走時遅れを考慮したもので、この段差構造は前報[山中・他(1988)]でも指摘したように首都圏南西部のいくつかの測線に共通して認められる傾向である。5.5 km/s 層までの深さは、この段差より夢の島(YMS)側では 3 km 程度であるが、江ノ島方向へは大黒と舞岡の間までは約 6 km となっている。さらに江ノ島側では、夢の島発破の初動が 5.5 km 層から 4.7 km/s

Fig. 6. Travel time diagram for the Nagatsuta-Kanazawa line obtained from the Maioka explosion.

層に移り変わるために、5.5 km/s 層までの深さはその存在性を含めて不明である。

3.2 長津田-金沢測線の地下構造

長津田-金沢測線で得られた舞岡発破の走時曲線が Fig. 6 に示してある。表層3層については、夢の島-江ノ島測線と矛盾しない結果となっている。4.7 km/s 層に対応すると考えられる走時は、金沢 (KNZ) に向けた測線では初動としては得られていないが、長津田 (NGT) に向かう方向には震央距離 10 数 km 以遠で見かけ速度 5.0 km/s として得られている。その原点走時 2.32 秒から得られるタイムターム 1.16 秒は、前述の舞岡発破点における江ノ島または大黒に向かう測線での 4.7 km/s 層のタイムタームとは異なっているが、舞岡発破点付近で 4.7 km/s 層上面が急な傾斜を有していることを考えれば、この差異は説明できる。つまり、舞岡発破点周辺ではこの層は江ノ島に向かって急に浅くなっており、実際の屈折波の波線を考えれば、タイムタームも大黒、長津田、江ノ島の各方向の順で小さくなっていると考えられる。実際、長津田に向かう測線についてのタイムタームは Fig. 5 の舞岡発破点直下の構造から期待されるタイムタームに近い値となっている。

この測線は、Fig. 1 に示すように大黒発破に対してはファンシューティング状の位置にある。震央距離から考えて、この測線での大黒発破による初動はすべて 4.7 km/s 層を伝播した位相であると考えられる。そこで、大黒発破の初動走時からタイムタームを求めると Fig. 7 の●で示すようになる。ただし、屈折波の波線を考えると、この分布は測線より数 km 大黒よりの地下構造を表していると考えられる。舞岡 (MOK) から長津田 (NGT)

Fig. 7. Distribution of time terms along the Nagatsuta-Kanazawa line. Solid circles and open squares indicate time terms derived from the Daikoku and Maioka explosion data, respectively. Triangles indicate time terms derived from the Kurokawa and Okazu explosion data [YAMANAKA *et al.* (1986)].

に向かって数 km の地点を境にタイムタームの値が大きく異なっており、構造の急な変化を示唆している。図には舞岡発破および前報 [山中・他 (1986)] の黒川-岡津測線 (Fig. 1 参照) の結果もそれぞれ□と△で示されている。舞岡発破点から長津田方向に約 10 km 離れると 3 つのタイムタームはよく一致している。しかし、舞岡に近づくにしたがって、前報の結果と大黒発破から求められるタイムタームは異なってくる。これは大黒発破による初動が Fig. 5 に見られる 4.7 km/s 層の深さが最も深くなる部分を伝播しているのに対して、前報の結果はこの深い部分の北側の 4.7 km/s 層上面が平坦になっている部分で得られたものであるために生じた食い違いと考えられる。この差を定量的に調べるには 3 次元波線追跡などによる考察などが必要であろう。

上記の理由からここでは、表層構造については舞岡発破の結果を用い、4.7 km/s 層までの深さについては大黒発破による初動のタイムタームを用いて地下構造を推

Fig. 8. Subsurface structure for the Nagatsuta-Kanazawa line. Because of lack of data for the top layer and based on previous investigations, its P-wave velocity is assumed to be 2.0 km/s.

Fig. 9. Travel time diagram for the Nagatsuta-Daikoku line obtained from the Daikoku explosion.

定した。求められた地下構造が Fig. 8 に示されている。舞岡 (MOK) では 1.8 km/s 層と 2.3 km/s 層を精度よく推定できるが、金沢 (KNZ)・長津田 (NGT) ではそれらに対する情報が現時点では得られていないことから、1.8 km/s 層と 2.3 km/s 層を 2 層の平均的な速度であり、かつこれまでに逗子-岡津-黒川間の第 1 層の速度として得られている [山中・他 (1986), 山中・他 (1988)] 2.0 km/s を有するひとつの層と考えて 2.9 km/s 層の深さは求められている。このようにしても工学的には大きな違いは生じないし、舞岡での 2.9 km/s 層までの深さにも殆ど変化はない。4.7 km/s 層までの深さは舞岡と長津田の中間付近で急に变化しており、舞岡と金沢の間では深さ 4.5 km とほぼ一定である。前述したように、この図に示した地下構造は長津田-金沢測線の直下の構造と言うよりは測線から数 km 大黒よりの地域の地下構造を表していると考えた方がより現実的であろう。

Fig. 10. Subsurface structure deduced for the Nagatsuta-Daikoku line.

3.3 長津田-大黒測線の地下構造

長津田-大黒測線で得られた大黒発破の走時曲線は Fig. 9 に示すごとくである。見かけ速度 6.2 km/s を示す走時曲線以外の原点走時は夢の島-江ノ島測線で得られた大黒発破点での原点走時と等しくなっている。6.2 km/s を有する走時についてははっきりしないが、4.7 km/s 層の下に存在する 5.5 km/s 層である可能性がある。この走時曲線の原点走時からタイムタームは 1.46 秒となり、その値は夢の島発破から大黒付近の 5.5 km/s 層のタイムタームとして既に求められている値 [山中・他 (1988)] と矛盾しない。一方、舞岡発破はこの測線に対してはファンシューティング状になっているが、前述したように舞岡発破点のタイムタームが方向によって異なると考えられるので、ここでは地下構造を求める際にこのデータは使わないことにした。

この測線では逆測線を構成する発破が行なわれていないので、すでに地下構造が調べられている長津田での表層構造を参考にして、Fig. 9 の走時曲線から地下構造を求めると Fig. 10 のようになる。ここでも 2.9 km/s 層より上位の構造については、長津田-金沢測線と同様の理由で 2.0 km/s 層の 1 層とした。大黒 (DKK) での各層までの深さは山中・他 (1988) の結果とよく一致している。4.7 km/s 層までの深さは約 3 km とほぼ一定である。点線で示した 5.5 km/s 層までの深さは見かけ速度を参考にして求めたもので、大黒から長津田 (NGT) に向かってこの層までの深さは次第に浅くなる傾向を示している。しかし、山中・他 (1986) による黒川-岡津測線上としての長津田の地下構造では 5.5 km/s 層までの深さは約 8 km にまで達しており、ここでの結果と大きく異なっている。この理由については、測線の違いによるあるいは 5.5 km/s 層よりも下部の構造に起因している等が考えられるが、現時点では不明であり、今後、既往の結果と合わせて検討する必要がある。

Fig. 11. Travel time diagram for the Takatsu line obtained from the Maioka explosion.

Fig. 12. Travel time diagram for the Takatsu line obtained from the Daikoku explosion.

3.4 高津測線の結果

この測線の北の部分で観測された夢の島発破の記録に 5.5 km/s 層上面の西落ちの段差構造の存在を反映した後続位相が P 波初動直後に認められることが指摘されている [山中・他 (1988)]。舞岡発破はほぼこの段差の落ちた側に位置しており、この測線はこの段差の存在を確認することを目的として設けたものである。しかし、Fig. 2(e) に示された舞岡発破の観測記録でもわかるように初動部分での記録の S/N 比が低く、初動が不明瞭になっている。Fig. 11 の走時曲線に示されているように見かけ速度 4.7 km/s の走時が認められるが、震央距離 20 km 以遠でははっきりしない。また、大黒発破の走時は Fig. 12 に示すごとくで、初動走時は見かけ速度 6.1 km/s を示している。これは長津田-大黒測線と同様に 5.5 km/s 層に対応したものであると考えられる。このようにこの測線ではデータが不十分であるために、地下

構造は推定することはできず、また、段差の存在を確認することはできなかった。

§ 4. 議 論

今回の人工地震探査のデータ解析は既往の首都圏南西部での探査結果 [山中・他 (1986), 山中・他 (1988)] も参考にして行なった。その結果、長津田における 5.5 km/s 層の深さにかかなりの食い違いが生じた以外はこれまでの結果と比較的調和的な結果が得られた。とくに、舞岡発破点から東側 4~5 km の横浜市港南区北部周辺を中心として 4.7 km/s 層までの深さが向斜構造になっている点はよく対応している。長津田で生じた 5.5 km/s 層までの深さに関する食い違いについては、逆測線を構成する発破が行なわれていないので、詳しいことは判らない。こうした食い違いの原因として、同一地点でも測線の方に応じてタイムタームが異なっていることが考えられる。これは地下構造が急激に変化しているときに考えられることであり、3 次元波線追跡などに基づく検討が今後必要であろう。

表層構造の内部には、今回新たに中間層としての 2.3 km/s 層が認められた。類似の速度を有する地層は府中の深層井の構造にもみられることから [山水・他 (1981)]、この層が存在しているとしても不都合なことではない。この層が既往の地震探査の結果にあまり顕著に見られなかったのは、その層厚にもよるが、ここで行なったような観測点配置での屈折法では上位の層の速度が 1.8 km/s であるために探査されにくかったものと考えられる。しかし、1.8 km/s 層と 2.3 km/s 層を平均的に速度 2.0 km/s を持つ層として考えても層厚に大きな差は生じないと考えられる。

本研究では瀬尾・小林 (1980) が明らかにできなかった夢の島-江ノ島測線の地下構造を明らかにすることができた。とくに、江ノ島では堆積層が 2 km の厚さを有しており、関東平野西縁のように基盤層が露頭となっていないことは注目すべき点である。地質的には江ノ島周辺では三浦層群または葉山層群が露頭しており、その地質の P 波速度は 2.8 km/s と求められている [Seo et al. (1982)]。しかし、今回の結果では 2.3 km/s 層が露頭となっていると考えられ、解釈はやや異なっている。ここでは屈折法に基づく解析を行なっているので、表層構造は仮定された部分が多く、観測された記録の後続位相部分の詳しい解析などからこの点について更に検討する必要がある。

§ 5. 結 論

横浜市舞岡・大黒における人工地震を観測し、既存の

人工地震の観測結果も考慮して走時解析を行い、首都圏南西部の堆積層の構造を明らかにした。その結果は以下のごとくである。

- 1) 堆積層のP波速度構成は上から1.8, 2.3, 2.9, 4.7, 5.5 km/sである。ただし、大黒から南西側では5.5 km/s層の存在は確認できなかった。また、神奈川県江ノ島周辺では1.8 km/s層は存在しない。
- 2) 4.7 km/s層までの深さは横浜市港南区北部で約4 kmと最も深くなり、そこを中心として向斜構造を成している。とくに、舞岡から江ノ島に向かって4.7 km/s層までの深さは急激に浅くなり、江ノ島付近においては約2 kmの深さとなっている。
- 3) 既往の研究結果で推定されていた5.5 km/s層上面の段差を確認するために測線を設けたが、観測記録のS/N比が低く、段差の存在を確認することはできなかった。

謝 辞

本論で用いた人工地震の観測に際しては東京大学地震研究所柳沢馬住助手、東京工業大学翠川三郎助教授および同大学大学院総合理工学研究科の大学院生諸氏のご協力を頂きました。また、横浜市総務局災害対策室には観測に際して便宜をはかって頂くと同時にデータを提供して頂きました。本研究を行なうに当たっては横浜市地層構造調査研究グループ委員（昭和63年度）の関東学院大学中川英憲名誉教授、同大学入江善久教授、横浜市立大学菊地正幸教授、神奈川大学荏本孝久助手にご助言を頂きました。記して感謝致します。

文 献

- 東 貞成・額根一起・柳沢馬住・嶋 悦三, 1989, 人工地震実験による首都圏の地下構造, 地震学会講演予稿集, no. 1, 188.
- KAWASE, H. and K. AKI, 1989, A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City, Bull. Seism. Soc. Am., **79**, 1361-1382.
- KUDO, K., 1978, Contribution of Love waves to strong ground motions, Proc. Second International Conf. on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, **2**, 765-776.
- SANCHEZ-SESMA, F. J., S. CHAVEZ-PEREZ, M. SUAREZ, M. A. BRAVO and L. E. PEREZ-ROCHA, 1988, On the seismic response of the valley of Mexico, Earthquake Spectra, **4**, 569-590.
- SEO, K. and H. KOBAYASHI, 1980, On the rather long-period earthquake ground motions due to deep ground structure of Tokyo area, Proc. 7th World Conf. Earthq. Eng., **1**, 9-16.
- 瀬尾和大・小林啓美, 1980, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査—夢の島—江ノ島測線の地下構造: 地震 **2**, **33**, 23-36.
- SEO, K., S. MIDORIKAWA, Y. MITANI and S. SHANG, 1982, Deep subsurface structure of the southwestern Kanto district, Proc. 6th Japan Earthq. Eng. Symp., 49-56.
- 首都圏基盤構造研究グループ, 1989, 夢の島人工地震実験資料集, 145-160.
- 山水史生・高橋 博・後藤典俊・太田 裕, 1981, やや深い構造のS波速度(3)—府中2750 m 観測井における測定とまとめ—, 地震 **2**, **34**, 465-479.
- YAMAMOTO S., Y. HISADA, T. HAYAKAWA and S. TANI, 1989, Simulation of long period ground motion on the Kanto sedimentary plain, Proc. of the National Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 97-102.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲・翠川三郎, 1986, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(2)—黒川—岡津測線および長津田測線の地下構造—, 地震 **2**, **39**, 607-620.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲・翠川三郎・嶋 悦三・柳沢馬住, 1988, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(3)—1983, 1984年に実施された人工地震探査データの総合的解析—: 地震 **2**, **41**, 527-539.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲, 1989, やや長周期地震動を対象とした深い地盤のモデル化に関する1考察, 地震学会講演予稿集, no. 1, 100.
- YAMANAKA, H., K. SEO and T. SAMANO, 1989, Effects of sedimentary layers on surface-wave propagation, Bull. Seism. Soc. Am., **79**, 631-644.
- 座間信作, 1981, 不規則構造に対する地震波の挙動 その3. 水平方向に不均質な媒質を伝播するLove波, 地震研究所彙報, **56**, 761-777.