



## 高密度強震計ネットワークを利用した深部地下構造調査

高秀秀信<sup>1)</sup>、阿部 進<sup>2)</sup>、中島徹也<sup>3)</sup>、乾 晋<sup>4)</sup>

1) 正会員 前横浜市長 工博

2) 横浜市総務局災害対策室長

3) 横浜市総務局災害対策室防災技術課長

e-mail : te00-nakajima@city.yokohama.jp

4) 横浜市総務局災害対策室防災技術課担当係長

e-mail : su00-inui@city.yokohama.jp

### 要 約

リアルタイム地震防災を目的に設置された、高密度強震計ネットワークで観測された地震の走時データに3次元逆解析を適用し、横浜市直下の3次元P波、S波速度構造を求めた。得られた結果から、横浜市北部と南部で地震基盤が深く、西部で浅いことが推定された。地下構造と地震動の関係について検討するために、3次元地下構造モデルを用いて波動シミュレーションを行った。さらに、得られた最新の3次元地下構造モデルを用いて想定地震による地震動の計算を行い強震動予測図(地震マップ)を作成した。本調査結果は、深部地下構造調査等、今後進められる予定の高精度な地震動予測の作業において、強震計ネットワークが有効であることを示した。

キーワード： 地下構造調査、強震計ネットワーク、地震基盤、強震動予測

### 1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)は、神戸市を中心に人的ならびに物的に甚大な被害を引き起こした。特に、神戸市須磨区を西端とし、西宮市に至る長さ25km、幅1~2kmの帯状の地域においては、家屋その他の建築物および各種土木構造物が強烈な地震動により激甚な被害を受けた。気象庁は、被害状況からこの帯状の地域における震度をⅦと判定したが、後にこの帯状の地域は「震災の帯」と呼ばれるようになった。

この「震災の帯」の発生原因については、当初、直下に存在する伏在断層の活動によるという説もあったが<sup>1)</sup>、その後神戸市付近で集中的に実施された地下構造調査の結果、神戸市街地背後の六甲山地から大阪湾に向かって急激に落ち込む基盤岩の構造が明らかになり、その特異な地下構造が地震波の伝播、増幅に影響を及ぼしたことが原因の一つであることが認識されるに至った<sup>2),3)</sup>。その後、本地域はもとより、他の地域や他の地震についても、深部地下構造と地震被害分布との関係に関する研究が精力的に行われ<sup>4),5)</sup>、より正確な地震動を予測するためには、表層地盤だけでなく、より深部の地下構

造についても精度よく把握する必要があることが認識されるようになった。

科学技術庁（現文部科学省）では、全国的に堆積平野の地下構造を調査する計画を立案し、各種調査手法の有効性の確認と効率的な調査法の組み合わせを確認することを主たる目的に、1998年度より地震関係基礎調査交付金により、地方公共団体において主要な堆積平野の地下構造調査を開始した<sup>6)</sup>。横浜市は、モデル地区の一つとして、1998年度から2000年度にかけて、市直下の深部地下構造調査を実施した。

横浜市では、兵庫県南部地震直後から、地震防災対策の見直しを行うとともに、地震が発生した場合の被害軽減を目的としたリアルタイム地震防災システムとして、市域150ヶ所に地震計を設置した高密度強震計ネットワークを整備した。このような高密度なネットワークであれば地下構造調査にも利用可能であることに着目し、横浜市では、物理探査に加え、この高密度強震計ネットワークで観測された地震データも利用して深部地下構造調査を実施することにした。反射法地震探査や微動探査等の物理探査の多くは、測線や測点をベースにした探査であるため、地震動を予測する上で重要な3次元の地下構造を効率よく求めることは難しい。それに対して面的に配置された強震計ネットワークデータの解析からは3次元の情報が見られるため、両者を相補的に利用することにより精度の高い3次元地下構造を推定することが可能となると考えられる。

横浜市では、また、得られた3次元地下構造モデルを用いて、南関東地震等の想定地震による強震動の予測も行い、関東地震の被害分布等と比較することにより、地盤モデルや計算方法の検証を行うとともに、得られた成果を地震防災行政に生かした。

本稿では、強震計ネットワークデータを利用した深部地下構造の推定方法と結果について述べ、深部地下構造調査におけるその有効性を示す。また、得られた3次元地下構造モデルを用いて、地震動のシミュレーションを行い、深部地下構造と地震動との関係について考察するとともに、横浜市で想定される地震のうち、南関東地震について実施した強震動の予測結果について紹介する。

## 2. 横浜市高密度強震計ネットワーク

横浜市の高密度強震計ネットワークは、約430km<sup>2</sup>の市域内の150地点に強震計が設置され、1997年5月より稼働している<sup>7)</sup>。図1にネットワークの観測点配置図を示す。観測点間隔は、ほぼ2km程度で、極めて高密度な観測が行われている。各観測点には、加速度型デジタル強震計が設置されており、加速度の計測範囲は±2000cm/s<sup>2</sup>で、18ビットのA/D分解能で、毎秒200サンプルのデータがICカードに書き込まれる。GPSにより記録の絶対時刻も記録されている。このことは、地震波の到達時間を利用して地下構造を求める場合には、特に重要である。各観測点は、高速デジタル回線（ISDN）で3つの観測センター（横浜市災害対策室、横浜市消防局、横浜市立大学）と結ばれている。

実際の地震によって強震計が作動すると、各観測点では、加速度波形が記録されるとともに、計測震度、最大振幅、継続時間、応答スペクトルなどが計算される。動作後約30秒後に計測震度の速報値がセンターに通報される。計測震度の確定値や応答スペクトルなどは動作後3分以内にセンターに通報される。通報された震度は直ちに地図上に表示され、災害対応のための一次情報として利用される<sup>8)</sup>。

リアルタイム地震防災目的以外にも、本高密度強震計ネットワークのデータは、地震工学や地震学の分野の研究でも色々な目的に利用され、その有効性が示されている。例えば、観測された地震波形情報と地形、地盤分類との比較検討<sup>9)</sup>、ネットワークで観測された地震動の伝播の空間的・時間的変化から、横浜市周辺での広域的な地震波の伝播特性や市域での表面波の増幅特性の推定などが行われている<sup>10),11)</sup>。

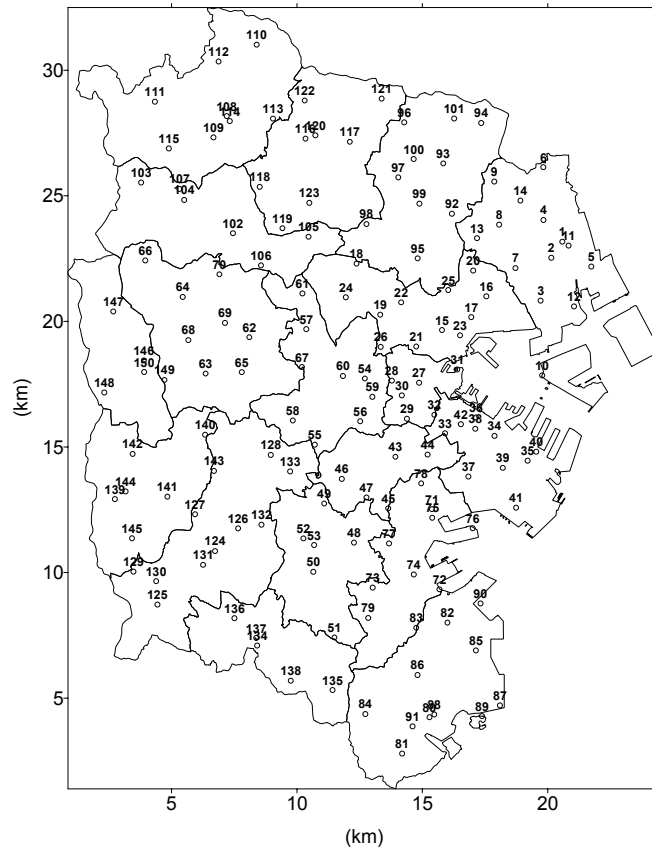


図1 横浜市高密度強震計ネットワークの観測点位置図

### 3. 高密度強震計ネットワークデータを利用した深部地下構造の推定

関東平野では、古くから首都圏基盤構造研究グループによる人工地震探査、科学技術庁（現独立行政法人）防災科学技術研究所による深層地殻活動研究のための深層ボーリング調査や反射法地震探査が実施され、深度数kmにおよぶいわゆる地震基盤までの概略の地下構造が把握されている<sup>12),13)</sup>。しかしながら、これらの調査結果は、関東あるいは南関東地域全体の概略の地下構造を表すにすぎず、横浜市域の詳細な地下構造を把握するには必ずしも十分とは言えない。

そこで、横浜市の深部地下構造調査では、これら既往データに加えて、新たに反射法地震探査と微動探査を計画するとともに、市域全体に展開された強震計ネットワークで観測される地震データを利用し、より精度の高い3次元地下構造を推定することとした。Aki and Lee(1976)<sup>14)</sup>の先駆的な研究に始まり、地震学の分野では、各種地震計ネットワークの観測データを利用して地下構造を求める研究は数多く実施されてきた。最近では、日本全国に張り巡らされた大学の地震観測網やK-net等の観測データを利用してトモグラフィ的解析を行い、日本列島下の詳細な地下構造を求める研究も盛んに行われている(例えば、Zhao et al., 1994<sup>15)</sup>)。そこで、本調査でも、これらの研究と同様に、高密度強震計ネットワークで観測された関東周辺の地震データのP波、S波初動走時データを用いて、トモグラフィ的解析により、横浜市直下の3次元速度構造を求めることとした。

#### 3.1 走時遅れ解析

微小地震のネットワークと異なり、強震計ネットワークの場合、かなり大きな地震（震度で2～4）でないと150ヶ所全数に近い数の観測点で地震が記録されない。そのような大きな地震は、比較的地震

の多い横浜市周辺といえども、2~3ヶ月に1回程度しか発生しない。そのため、150ヶ所の強震計が稼働を始めて以来5年近くになるが、地下構造の解析に使用可能なデータは未だ30地震程度以下にとどまっている。そのような比較的数少ないデータを利用して地下構造を求めるために、本調査では、トモグラフィ的逆解析を行う前に、以下に述べるような簡単な解析を行い、概略の地下構造を把握することとした。

ネットワークで観測される地震のP波、S波の走時データには、震源距離の違いによる走時差が含まれる。そこでここでは、この震源距離の違いによる走時差が概略距離に比例すると考え、直線回帰によりトレンド成分を求め、原走時から除去した。この処理により概略ではあるが、ネットワーク直下の地下構造（深度10km程度以浅）の影響のみを反映した走時差分布（ここでは、「走時遅れ図」と呼ぶ）が求められる。このような解析結果の一例を図2に示す。この図では、震源の異なる2つの地震（東京湾（M5.4、D=107.7km）と千葉県北西部（M5.3、D=74.3km））について、P波走時とS波走時に関する走時遅れ図を示している。震源位置、波種（P波、S波）が異なるにも関わらず、走時遅れ図には共通の傾向が見られることがわかる。つまり、走時差の小さい場所は基盤が浅く、大きい場所では深いことがこれらの図から推測される。S波の最大走時差（約0.6秒~0.8秒）が、P波のそれ（約0.3秒~0.4秒）の2倍強ということから、この走時差が主に堆積層の厚さの違いから生じていることがわかるとともに、この図から、横浜市北部及び南部地域の基盤が深く西部地域で浅いという概略の基盤深度を推定することができる。

このように、観測された走時の簡単な解析により、いわゆる地震基盤の概略の深度分布を把握できることは、その後の詳細な解析の初期モデルを検討する上でも、またその他の調査計画を立案する上でも極めて有効である。その際、横浜市のような強震計の設置密度が無くともある程度の利用は可能である。この点は、横浜市以外の自治体等の強震計ネットワークデータを利用してここで実施したような走時遅れ解析を適用することを考慮した場合に重要な点である。図3は、そのような例として、150ヶ所から18ヶ所（行政区単位）のデータを抜き出して、P波の走時遅れ図を作成した結果である。150箇所のデータを利用して得られた結果と比較して示すが、18箇所のデータの解析からも、基盤深度分布の概略の傾向を把握できることがわかる。

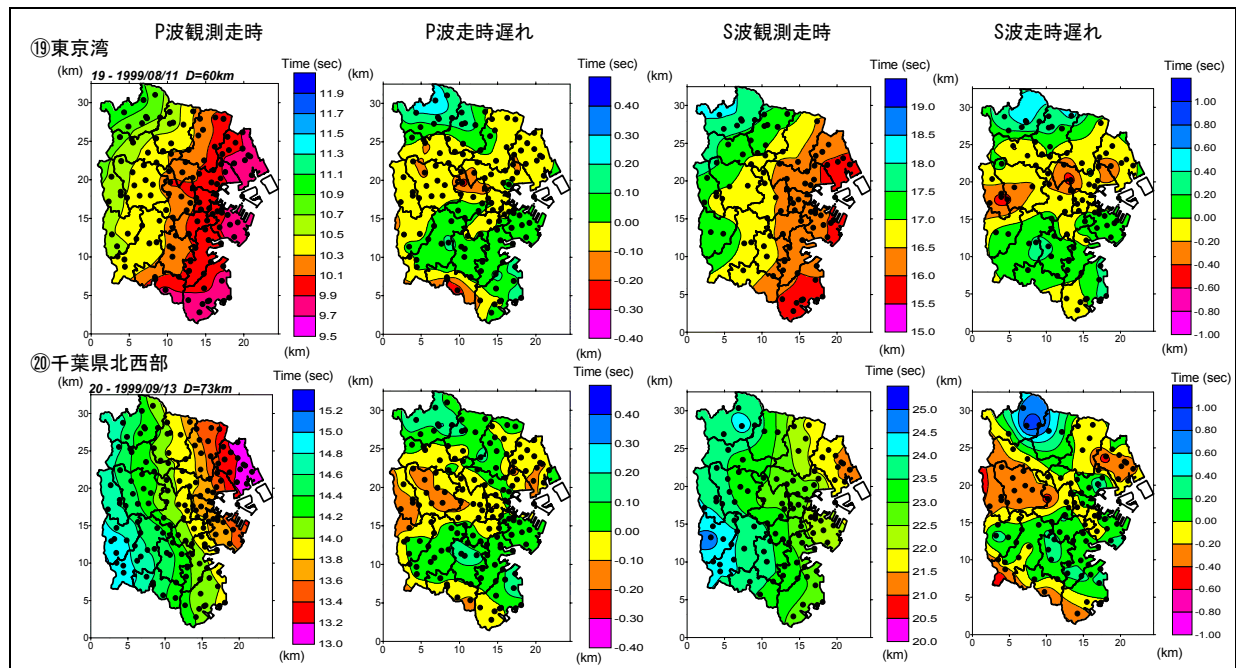


図2 走時遅れ図（震源：千葉県北西部、東京湾）

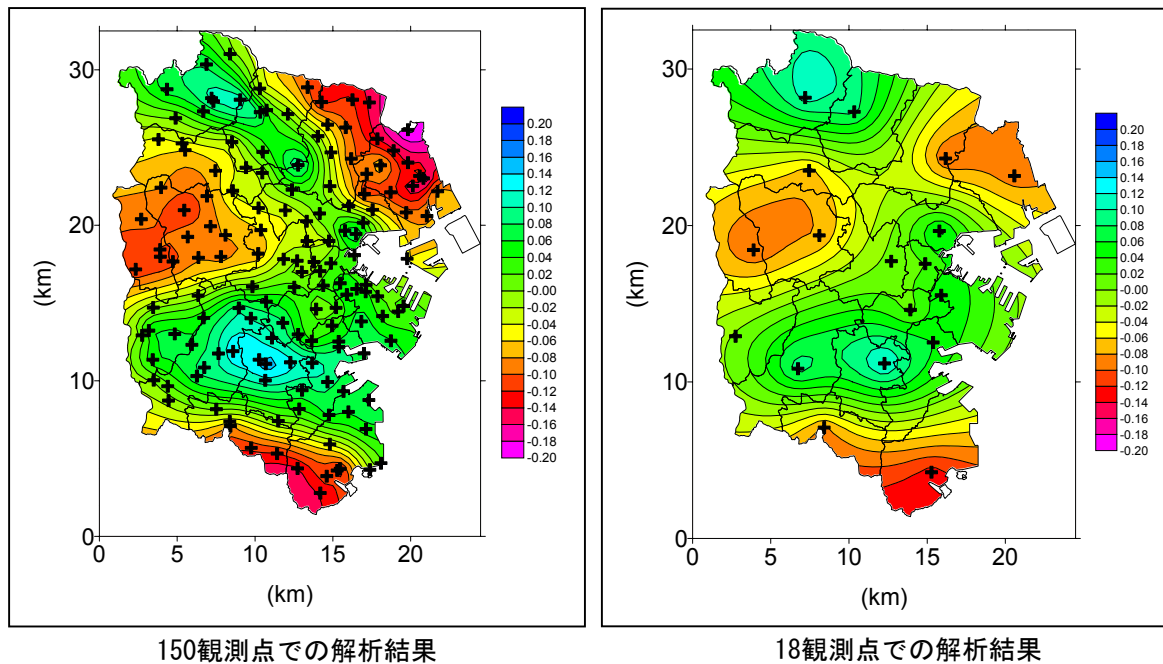


図3 観測点密度が少ない場合の解析結果例  
(表1に示す地震のうち震源の深さが50km以上の地震のP波走時遅れを重ねた結果)

### 3.2 走時データの逆解析による3次元地下構造の推定

逆解析に使用する地震データは、解析結果の精度、信頼性を確保するために、

- どの観測点でもP波、S波とも十分な精度で初動時刻が読み取り可能なS/N比を有すること（原則計測震度で3以上）
- 多数の観測点で記録されていること（原則140観測点以上）
- 震央位置が横浜市を中心に可能な限り東西南北方向に均等に分布すること

という3つの条件をできるだけ満足するものを選択した。その結果、表1、図4に示す26個の地震が選ばれた。

一方、横浜市の地下構造のモデル化に当たっては、地震計の設置間隔が2km弱であること、対象とする地震の卓越周波数（波長）等を考慮し、水平方向には東西、南北それぞれ2km、深度方向には0.4kmの直方体グリッドでモデル化した。モデルの大きさは、東西×南北×深度方向に、40km（20個）×42km（21個）×10km（25個）とした。モデルの原点は、北緯35度17分45秒、東経139度27分35秒とした。横浜市域の大きさは、東西南北に25km×30km程度であるが、深度10km以上を解析モデルとしたため、モデル内を通り強震計ネットワークで観測される地震波の波線（波の伝播経路）全てを含むことができるよう市域より大きなモデルとした。

解析は以下のステップに従い実施した。

- (1) 震源から上記モデル底面に配置した仮想震源までの走時を、鶴川ほか(1984)<sup>16)</sup>による1次元速度構造モデルを用いて計算する。
- (2) 上記モデル底面の仮想震源から地表の観測点までの走時を3次元レイトレーシング法により計算する。ここで用いたレイトレーシング法は、ホイヘンスの原理に基づく方法で、モデル内の各グリッド点を仮想震源として次々に波線を繋いでいき、最終的に震源と観測点間の最短時間を与える波線と走時を得る方法であり、複雑な地下構造モデルに対して適用可能な手法として広く利用されている<sup>17)</sup>。
- (3) 上記(1)と(2)の走時を加算し、震源から観測点までの理論走時を得る。

表 1 解析に使用した地震の一覧

年月日	時	分	秒	震央位置	東経(度)	北緯(度)	深度(km)	規模	P波読み取り	S波読み取り	
1	1997.07.09	18	36	18.19	千葉県北西部	140.156	35.555	074.3	M5.3	145	145
2	1997.08.09	05	34	49.16	埼玉県南部	139.474	35.838	065.9	M5.0	137	136
3	1997.09.08	08	40	38.91	東京湾	139.984	35.539	107.7	M5.4	145	145
4	1997.09.24	07	02	36.81	山梨県東部	139.004	35.546	021.2	M4.1	46	44
5	1997.12.06	15	40	47.23	千葉県北部	140.119	35.698	051.1	M4.7	56	
6	1998.01.14	02	17	8.77	千葉県中部	140.244	35.584	073.1	M5.2	147	148
7	1998.01.16	10	57	55.40	千葉県南部	140.345	35.182	057.3	M4.8	147	147
8	1998.04.26	07	37	36.64	伊豆半島東方沖	139.161	34.954	008.8	M4.8	136	
9	1998.05.03	11	09	5.45	伊豆半島東方沖	139.154	34.961	006.9	M5.1	137	
10	1998.05.16	03	45	6.25	千葉県南部	139.931	34.968	068.2	M4.8	147	149
11	1998.07.20	10	43	26.92	東京都	139.529	35.645	025.1	M3.7	119	121
12	1998.08.29	08	46	42.78	千葉県中部	140.055	35.609	063.6	M5.4	149	146
13	1998.11.08	21	40	44.76	千葉県北西部	140.052	35.611	075.5	M4.9	150	150
14	1998.11.28	00	22	58.67	千葉県北西部	140.095	35.635	062.0	M4.6	143	144
15	1998.12.03	05	15	37.92	千葉県北西部	140.046	35.612	064.3	M4.4	141	139
16	1999.04.25	18	13	11.93	千葉県北東部	140.312	35.519	088.9	M4.7	141	142
17	1999.05.22	09	48	15.73	神奈川県西部	139.177	35.450	019.4	M4.3	139	147
18	1999.05.28	12	11	6.51	神奈川県東部	139.4796	35.5169	36.3	M3.4	71	73
19	1999.08.11	18	27	55.28	東京湾	139.810	35.395	060.4	M4.0	127	134
20	1999.09.13	07	56	47.52	千葉県北西部	140.179	35.571	072.6	M5.2	148	150
21	2000.02.11	20	57	42	山梨県東部	139.05	35.49	15	M4.6	149	149
22	2000.06.03	17	54	46.7	千葉県北東部	140.819	35.584	70	M5.4	119	96
23	2000.08.14	16	33	46.1	千葉県北西部	140.15	35.763	81.3	M4.4	104	110
24	2000.08.27	08	42	12.3	千葉県北西部	140.136	35.759	81.2	M4.6	111	124
25	2000.09.29	08	56	8.6	神奈川県	139.686	35.506	91.5	M4.9	137	144
26	2000.09.29	09	55	59.0	東京湾	139.66	35.488	89.2	M4.2	94	105
									合計	3285	2988

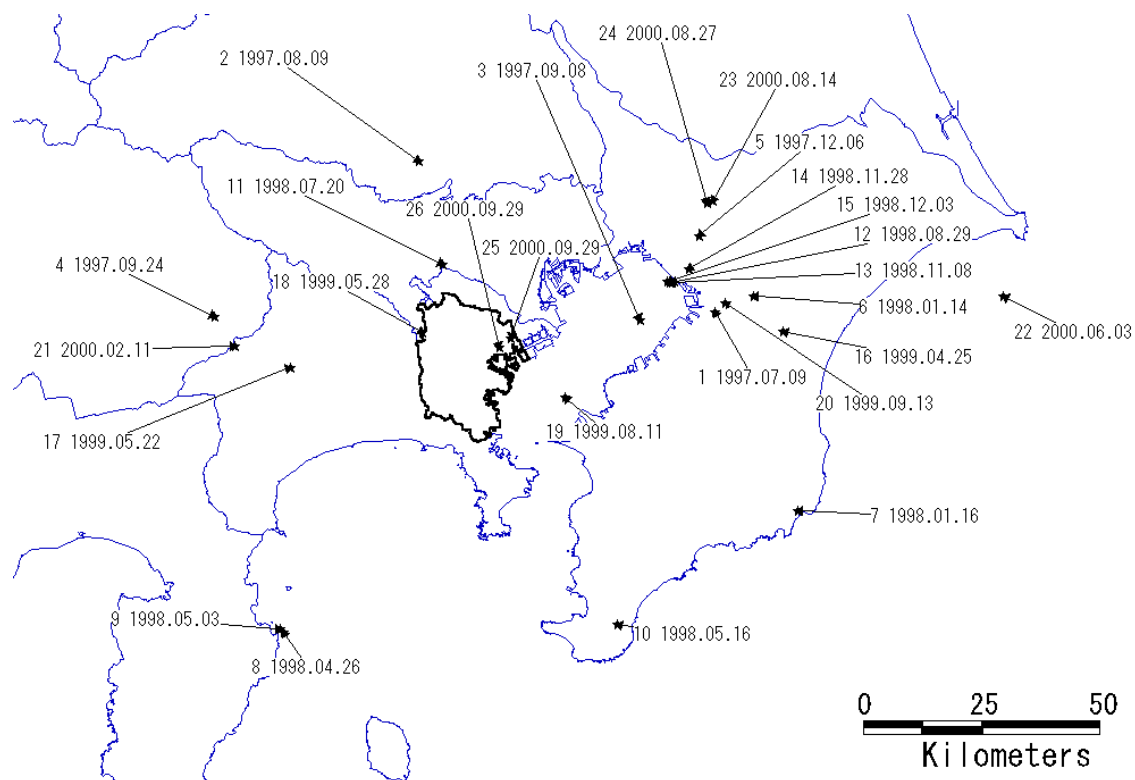


図 4 解析に使用した地震の震央分布

- (4) 上記のようにして求めた理論走時と観測走時の差を最小にするようモデルを修正する。今回の逆解析では、観測走時データよりも未知数の方が多いため逆問題を解くことになるため、モデル修正には、収束は遅いが、安定した解の得られるSIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)法を用いた<sup>17),18)</sup>。本手法は、代数的再構成法の一つで、走時計算時に得られたモデル内の各直方体グリッド内を通過する波線の長さに応じて上記走時残差を分配することによって各グリッドに与えた速度値を修正していく方法である。
- (5) 上記計算を繰り返し、理論走時と観測走時の差が十分小さくなった時点で計算を終了する。今回の計算では、数回程度の繰り返し計算で走時残差が十分小さくなった（読み取り誤差程度）ので、最終的には10回で終了させた。

以上の計算を行うためには、初期モデルが必要であるが、今回の計算では、南関東地域の広域モデルとして山田・山中(2000)<sup>19)</sup>が提案したモデルを基に、横浜市付近に特徴的な $V_p=4.8\text{km/s}$  ( $V_s=3.0\text{km/s}$ とした)層を加えた概略の3次元速度構造モデルを新たに作成、使用した。本モデルは、後述する長周期地震動の計算の際にも用いたが、伊豆半島から南関東全域を含むモデルである。図5には、今回使用した初期モデル(3次元モデル)から抜き取った2次元断面の一例を示す。この断面は、過去に実施された人工地震探査の測線(夢の島-平塚)沿いの断面であり<sup>20)</sup>、 $V_p=4.8\text{km/s}$ 層が含まれる。

以上の解析で得られた最終的な横浜市直下の3次元速度構造モデルを図6に示す。この図には、3次元モデルから取り出したS波速度の深度スライスと $V_s=3.0\text{km/s}$ (地震基盤と定義)の上面深度を表わしている。この結果を見ると、前述した走時遅れ図でも概略把握できた通り、横浜市の西部で地震波速度の大きい地震基盤相当層が浅く、北部と南部で深いことが明瞭に把握できる。

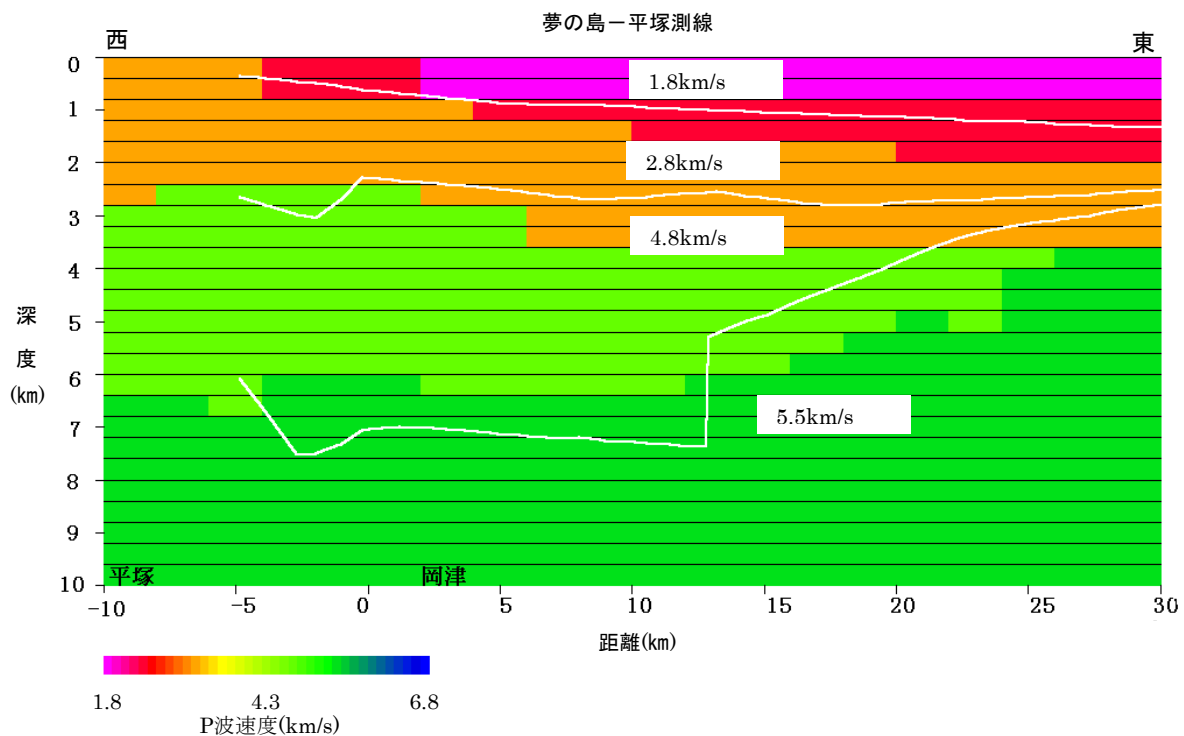


図5 逆解析で使用した初期モデルから抜き取った断面の一例  
(人工地震探査測線(夢の島-平塚)に沿った断面。図中の白線と数字は、人工地震探査で得られた速度境界と速度値(山中ほか、1988))

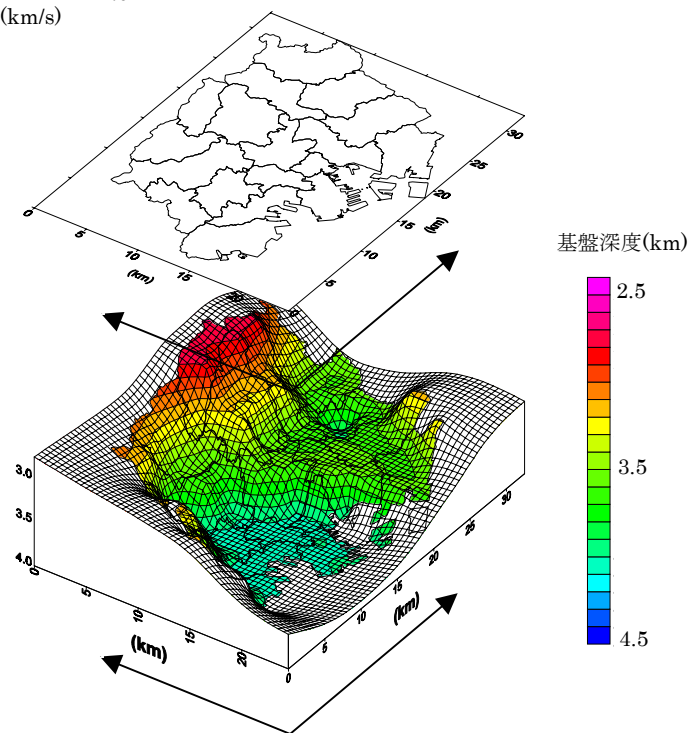
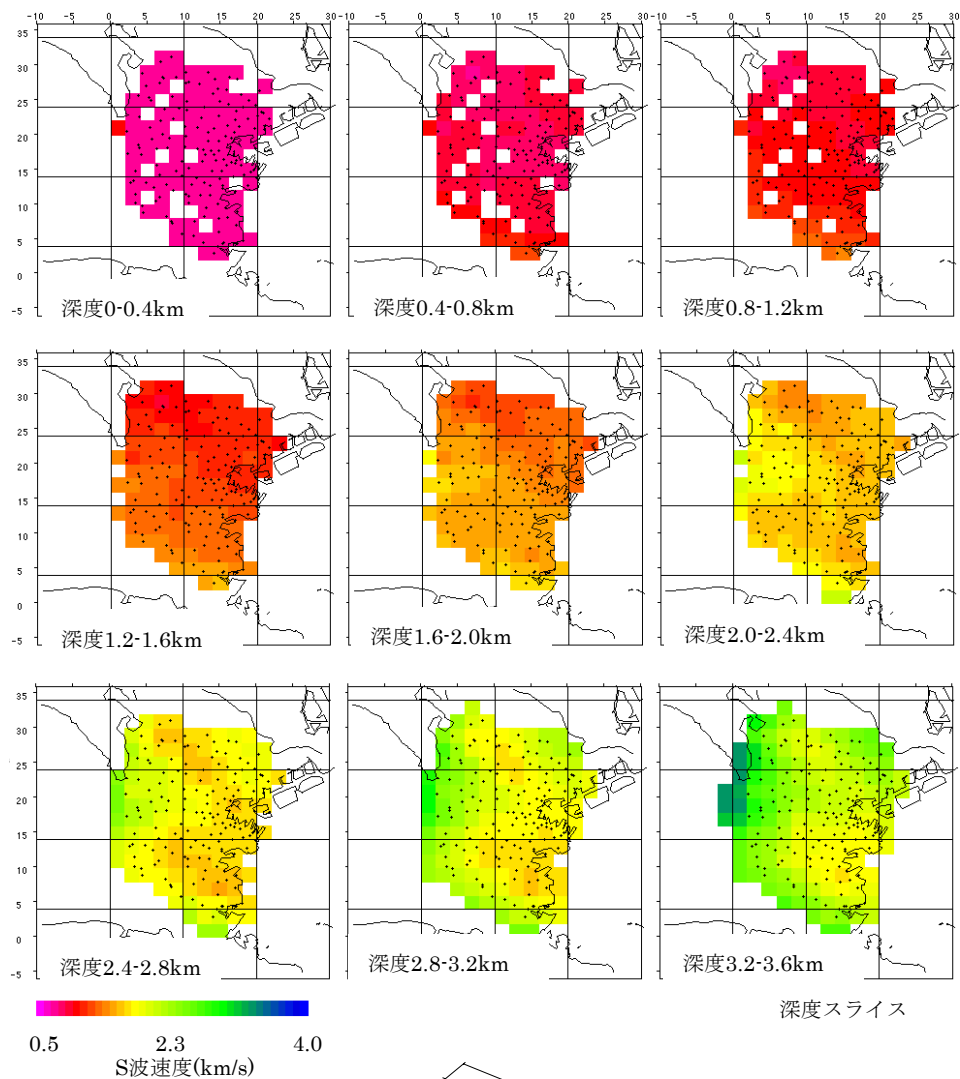


図6 逆解析の結果得られた3次元速度構造モデル



### 3.3 物理探査結果との比較

横浜市直下の深部地下構造を把握するために、本調査と同時に、P波反射法地震探査と微動アレイ探査を実施した<sup>21),22)</sup>。ここでは、それらの探査結果との比較を通して、強震計データを利用した地下構造解析結果について検討する。

微動アレイ探査は、観測点直下の1次元S波速度構造を探査する手法であるが、観測点を面的に多点配置することにより、広域的な地下構造を把握することができる。そこで、本調査でも、市全域のS波速度構造を把握することを目的に、市内全域28ヶ所に面的に観測点を配置した。図7左図中に示す△点が観測点の位置である。最大アレイ半径は2km~4kmとした。分散曲線の解析には、空間自己相関法<sup>23)</sup>、逆解析には、遺伝的アルゴリズムを用いた<sup>24)</sup>。逆解析に当たっては、既往データを可能な限り利用して初期モデルや拘束条件を設定した。

探査の結果得られたVs=3km/s相当層（地震基盤）の上面深度と先に示した強震計データによるS波走時遅れ図を比較したものを図7に示す。市北部の推定分布に若干の違いはあるものの、両図を比較すると、市西部で基盤が浅く、北部と南部で深いという概略の傾向はよく一致していることがわかる。

反射法地震探査は、大型バイブレータ震源を使用し、市北部の2測線で実施したが、ここでは、そのうち、図7右図中に示す位置にある測線での結果を比較に利用した。図8は、反射法地震探査測線近傍の強震計観測点4点（図7右図中大黒丸で示す）でのS波走時解析結果と反射法断面を比較した結果である。強震計データの解析によって得られた3次元速度構造から、上記強震観測点位置のP波とS波の速度分布を抜き出したものが図9であるが、P波とS波の速度変化のパターンはよく一致していることがわかる。そこで、反射法断面との比較では、反射法探査で得られた反射面位置と走時解析で得られたS波速度分布を重ね、両者の詳細な比較を行った。

反射法断面中央部において深度が2.8kmから3.6kmに急変する明瞭な反射面があるが、これが当地域の地震基盤上面からの反射波と推定された。この測線下では、ここに見られるように、約1km弱の落差の段差構造が検出された。また、基盤上位の堆積層（三浦、上総層群）も下盤側で厚くなっていることがわかる。強震計データの解析で得られた速度構造は、基盤の段差構造や堆積層の厚さの変化とよく一致していることがわかる。この地下構造に対して計算された地震波の走時遅れは観測された走時遅れとよく一致している。このことは、強震計データの解析により、この規模の基盤の深度変化や堆積層の厚さの変化は十分把握可能であること、従って、強震計データの解析が、深部地下構造調査に極めて有効な手法の1つになり得ることを示している。

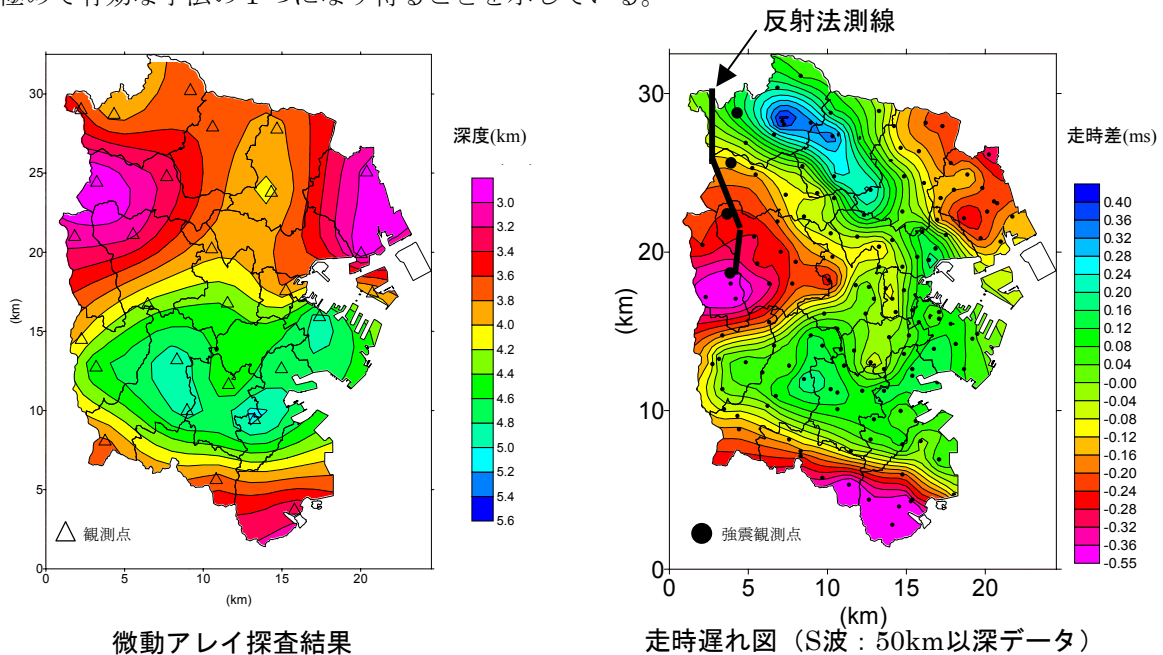


図7 微動アレイ探査結果と走時遅れ図の比較

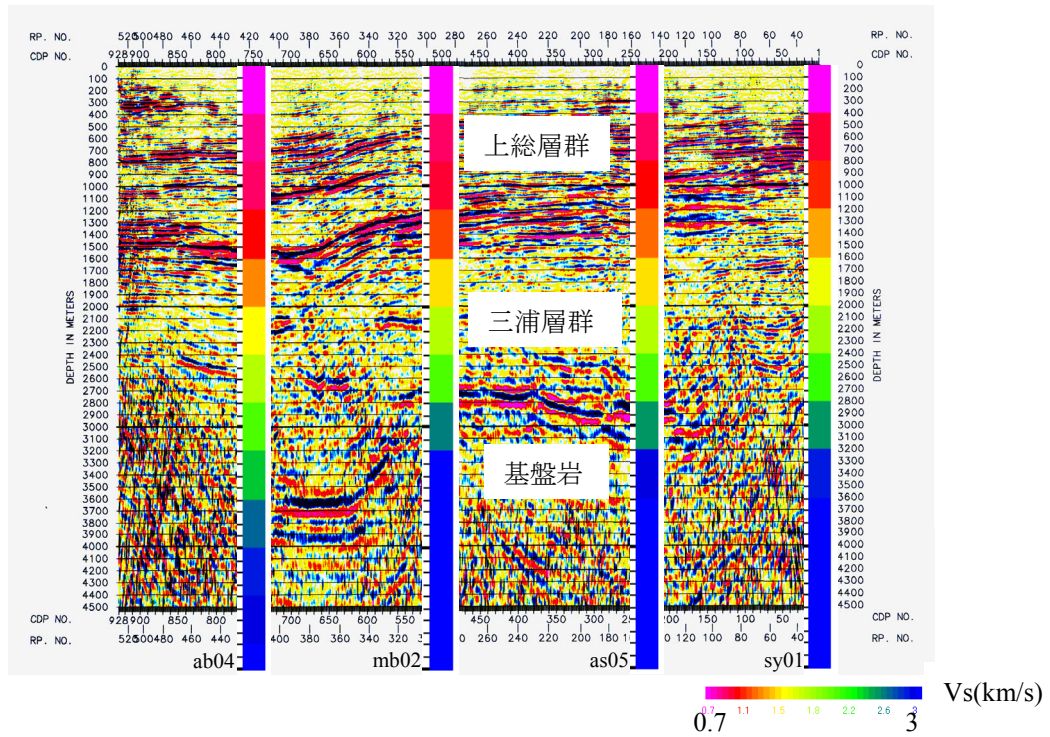


図8 反射法地震探査結果との比較結果  
(ab04、md02、as05、sy01は強震計観測点番号)

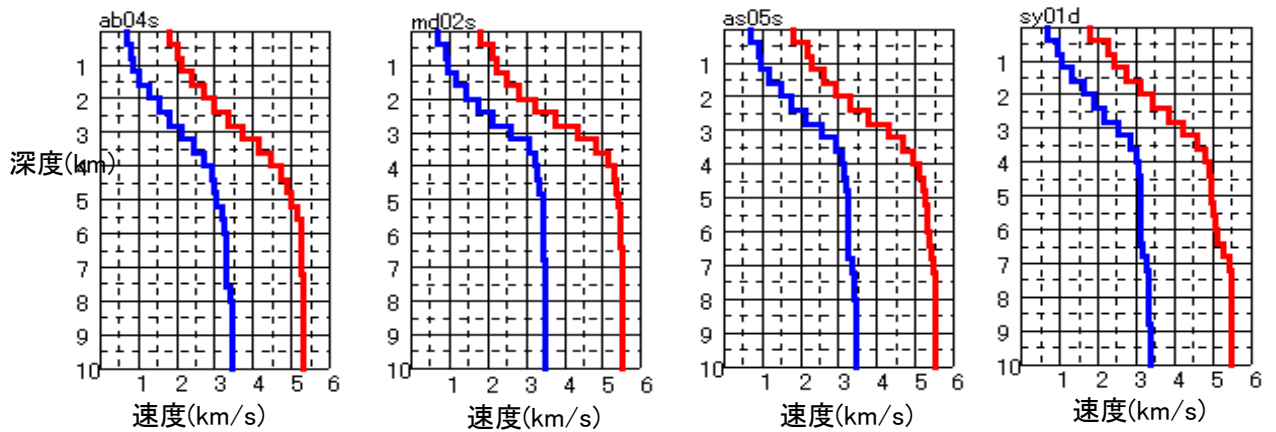


図9 強震計データの逆解析で得られた速度構造のうち、反射法測線位置に近い4観測点 ab04、md02、as05、sy01におけるP波、S波速度プロファイル (赤線：P波速度、青線：S波速度)

#### 4. 3次元地震動シミュレーションによる地震動と深部地下構造に関する検討

堆積盆地が地表での地震動にどのような影響を及ぼすかについては既に多くの研究があるが、今回得られたような細かな3次元地下構造の変化による影響に関する研究は少ない。ここでは、今回のモデルを用いて3次元波動のシミュレーションを行い検討した。

3次元での計算を行う前に、現象と計算方法を理解するためにまず2次元での計算例を示す。図10は、上述した反射法探査結果および強震計データの解析結果をもとに作成した横浜市北部の2次元の地盤モデルとそれに対する計算結果である。基盤を含む深度5kmまでを対象に、基盤の段差構造と上位の堆積層の厚さの変化をモデル化した。計算では、2次元差分法を用い、モデル直下に垂直下方から平面SH波（リッカーウェーブレット）を入射した場合の地表（標高0m）での速度波形を計算し、各地点での最大振幅（応答倍率で示す）を段差位置からの距離に対して示した。地震波の周波数（波長）による応答の違いを見るために、0.5、1.0、1.5Hzの3種類について計算を行った。図からわかるように、基盤の落差、堆積層の厚さの違いにより生じた回折波と直接波の干渉の結果、段差近傍下盤側で震動が大きく、上盤側で小さくなるという影響が現れている。周波数が高いほどその影響が大きく、段差のどちら側に位置するかによって、震動の大きさが6割も違う場合があることを示している。

3次元差分法を用いて同様に、今回得られた3次元地下構造モデルに対するSH波の応答を計算した結果を図11に示す。ここでは、周波数0.2と0.5Hz（リッカーウェーブレット）について計算した地表での速度振幅比をカラーで表示した（0.5Hzの計算結果に見られる若干の縞模様は、表層の速度構造の急変とモデル境界の影響により発生したものと推定される）。2次元の場合に比べて周波数も低いためにややわかりにくいですが、特に0.5Hzの場合、基盤深度の浅い北西部を取り囲むように震動の大きい部分が分布しており、2次元の場合と同様、回折波による影響が現れた結果であると推測される。震動の大きさの違いは2次元の場合と同程度（数10%程度）であるが、深部地下構造だけの影響でも、地表の地震動にこのような地域差が現れる可能性があるということは、深部地下構造調査の重要性の一端を示したものと言える。

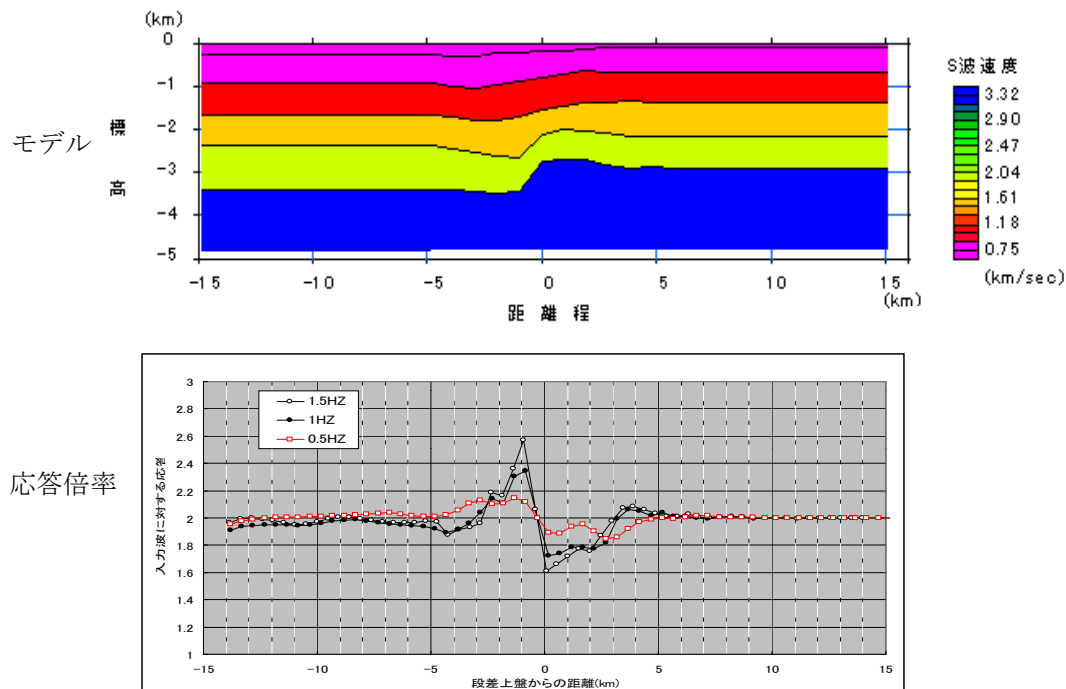


図10 2次元シミュレーション結果

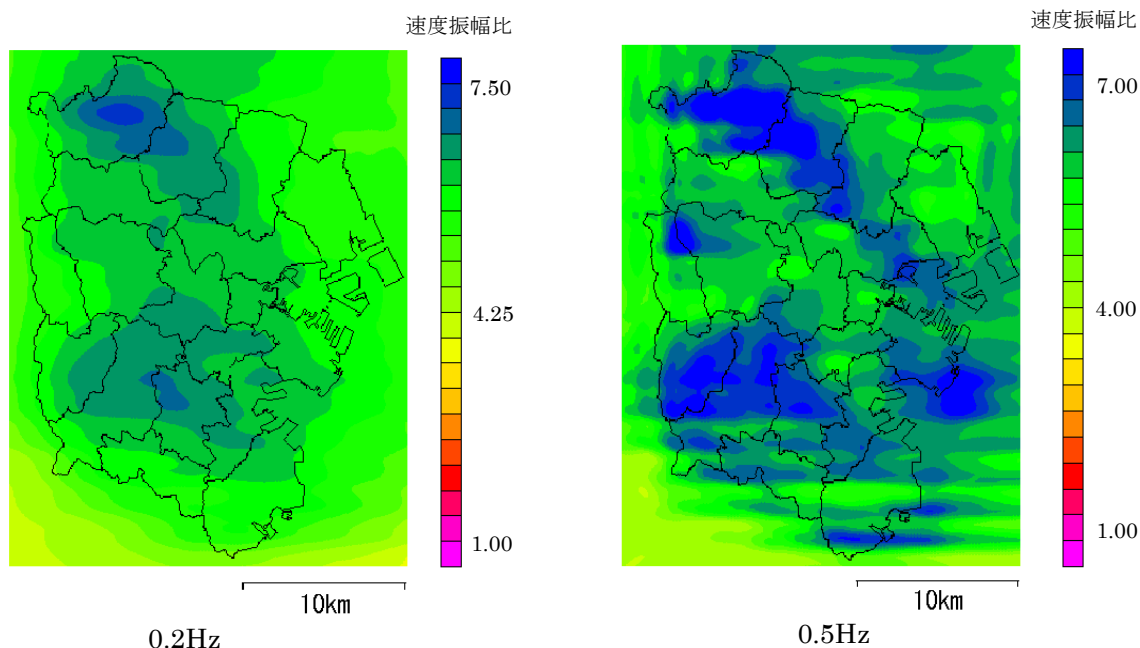


図11 3次元シミュレーション結果  
(左：0.2Hzの計算結果、右：0.5Hzの計算結果)

## 5. 3次元地下構造モデルを用いた強震動予測図（地震マップ）

本調査で得られた最新の3次元地下構造モデルを用いて、地震の揺れの強さを示す地震マップを作成した。地震マップは、横浜市に影響を及ぼすと想定される南関東地震、東海地震、横浜市直下地震、神縄・国府津一松田断層帯地震による、市内各地域における地盤の揺れの程度を予測し地図上に示したものである。ここでは、震源断層について最もよく研究されている南関東地震（関東大震災）を想定した地震動の計算結果を紹介する。

図12に今回用いた計算の流れを、図13に想定した震源断層のモデルを示す。今回の計算では、統計的グリーン関数法により短周期帯域の波形を計算し、3次元差分法により計算した長周期帯域の波形と足し合わせることで広帯域の地震波形を計算する、いわゆるハイブリッド法<sup>27)</sup>を用いた。

短周期成分と長周期成分の重ね合わせに際しては、0.25Hz（4秒）を中心に、コサイン型のローパスフィルターを長周期成分に、ハイパスフィルターを短周期成分に用いた（重畳範囲は0.18～0.35Hz）。重ね合わせ周波数は、地盤モデルや計算方法、考慮すべき地震動の周波数帯域等を考慮して決めるべきであるが、今回の計算では、南関東平野全域という広域を対象とした計算が必要なことから、主に差分法の計算条件をもとに決めた。

地盤構造モデルとしては、差分法の計算には、前述した南関東全域をモデル化した広域の3次元地下構造モデルを、統計的グリーン関数法により工学的基盤での小地震波形（要素波形）を計算する際に用いる地震基盤から工学的基盤までの深部構造として、今回の調査で得られた詳細な3次元地下構造モデルを用いた。工学的基盤における波形に対して、等価線形法により求めた表層地盤の応答倍率をかけ、150の強震観測点での地表の地震波形を計算した。横浜市では、150の強震観測点の表層倍率をもとに、市内全域の50mメッシュの倍率を推定し、リアルタイム地震防災システム(READY)<sup>28)</sup>で利用している。今回の計算では、そのシステムに150地点での計算波形を入力することにより、市域内の

50mメッシュの詳細な地震動を計算した。図14は、そのような手法で計算した南関東地震に対する震度予測図（地震マップ）である。

図15は、高浜ほか(2001)<sup>29)</sup>による関東大震災時の全壊率分布である。北部に比べ、南部で倒壊率が大きいという特徴があるが、この結果は、地震マップにおいて予測震度が北部に比べ南部で大きいという特徴と概略一致しており、予測結果の妥当性を示していると思われる。

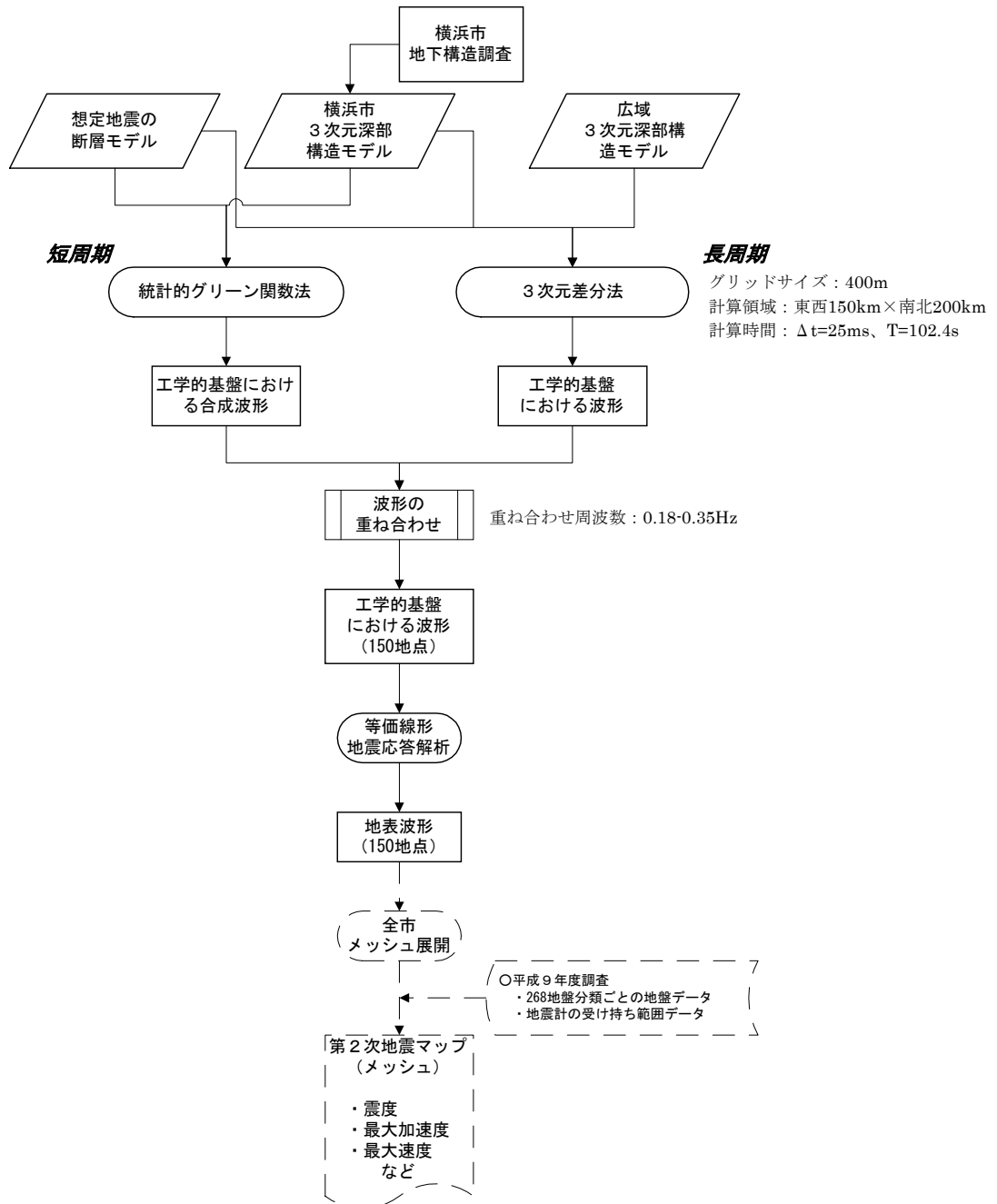
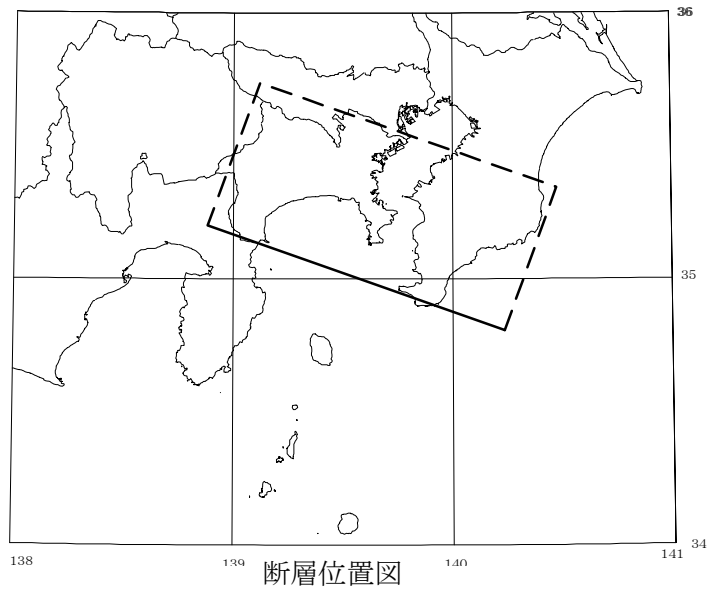


図 1 2 今回用いた地震動計算の流れ



断層パラメータ

	南関東地震
地震モーメント $M_0$ (dyne·cm)	$8.3E+27$ <sup>4)</sup>
長さ $L$ [km]	130 <sup>1), 2)</sup>
幅 $W$ [km]	70 <sup>1), 2)</sup>
走向 $\theta$ (N° E)	290 <sup>1), 2)</sup>
傾斜 $\delta$ (°)	25 <sup>1)</sup>
すべり角 $\lambda$ (°)	162 <sup>2)</sup>
平均すべり量 $D$ (m)	2.4 <sup>3)</sup>
ライズタイム $\tau$ (s)	4.1
破壊速度 $V_r$ (km/s)	3.0 <sup>1)</sup>
地震基盤のS波速度 $V_s$ (km/s)	3.7 <sup>1)</sup>
震源域の地盤の密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.8 <sup>1)</sup>
上端深さ $d$ (km)	2 <sup>1), 2)</sup>
断層基準点位置	
北緯(°)	34.8075 <sup>1)</sup>
東経(°)	140.235 <sup>1)</sup>

1)Wald and Somerville(1995)<sup>25)</sup>

2)Kanamori(1971)<sup>26)</sup>

3) 不均質モデルの平均値, 合計値

4) $V_s, \rho$  より  $\mu = 3.8E11$  として  $M_0 = \mu DLW$  とした

図 1 3 想定南関東地震の断層モデル

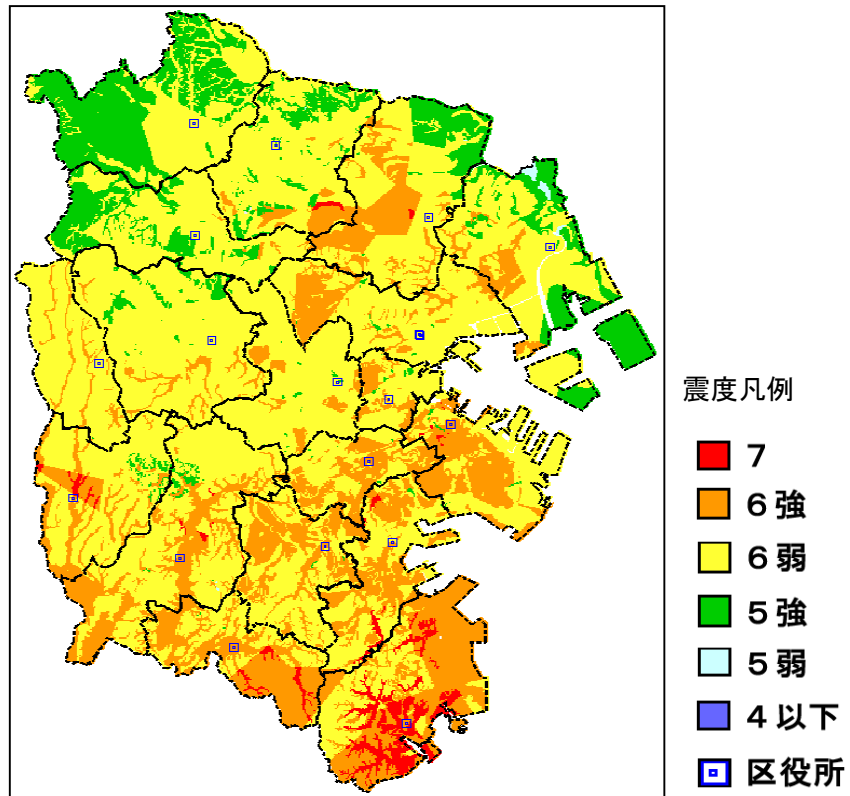


図 1 4 南関東地震に対する地震マップ（震度図）

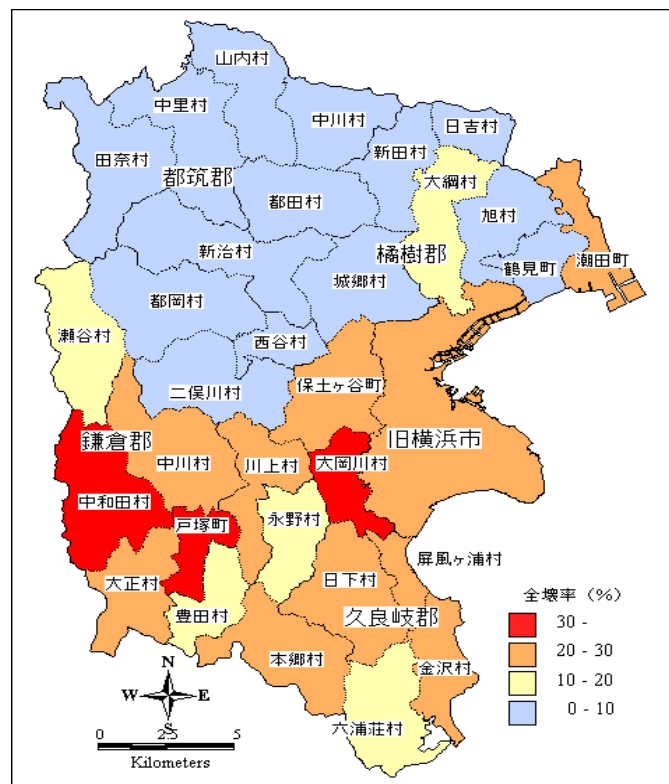


図 1 5 関東地震の際の全壊率分布（高浜ほか、2001）

## 6. 今後の課題と展望

横浜市の高密度強震計ネットワークは、大地震時の早期被害把握以外にも、日常的にもいろいろな用途として活用することを目的に整備した。きめ細かな震度分布を市民に公表することによって、地震に対する注意や関心を喚起すること。また、規模の小さい地震の記録を使って地震の震動特性を調べ、既知の地盤構造に対する理論計算と実際の観測データを比較し、計算手法や地盤構造の妥当性をチェックすること。さらに、深い地震について地震波の到達時間や波形を用い地下構造を調べることである。本稿ではこのうち、高密度強震計ネットワークを利用した深部地下構造の推定方法と結果について紹介した。

地表における地震動を正確に予測するためには、震源特性ならびに震源から表層地盤までの伝播経路の地盤特性が精度よく推定される必要がある。従来の地震動予測では、このうち特に短周期の地震動に最も影響を及ぼす表層地盤特性を詳細に考慮して計算を行っていたが、長周期も含めてさらに精度のよい予測を行うためには、堆積盆地に代表されるような深部地下構造の推定も重要になってくる。

深度数 km に及ぶ深部地下構造調査の場合、経済的な理由から一般にボーリング孔を掘削することは容易ではないため、地表から調査できる物理探査が有効である。上述の通り、現在進められている堆積平野の地下構造調査でも、反射法地震探査を中心とする物理探査が効果的に利用されている。しかしながら、現在用いられている測線や測点をベースにした探査法では、地震動を予測する上で重要な堆積盆地の 3 次元的な形状を効率よく求めることは難しい。そのような場合、横浜市のように面的に配置された高密度な強震計ネットワークが利用できれば、本稿で述べたような方法で 3 次元的な P 波、S 波速度構造を求めることができるため、物理探査で得られた 1 次元、2 次元探査結果を 3 次元的に補完することが可能となり極めて有効である。

また、強震計データが利用できれば、物理探査等で推定された地下構造モデルの検証を行うことができるのも大きな利点の一つである。現在、各地各機関で強震計のネットワークが整備されていることを考慮すると、今後の地下構造調査の中で、強震計データがさらに活用されることが期待される。

以上のように、横浜市がリアルタイム地震防災を目的に全国に先駆けて整備を進めてきた高密度強震計ネットワークが、高精度な地震動予測にも利用可能なことを示した。現状、横浜市のような高密度なネットワークが整備されている地域は少ない。今後、他の地域においてもこのようなネットワークが構築され、地震防災に活用されることを期待する。

## 謝辞

本調査を行うにあたり、横浜市地下構造調査委員会（委員長：横浜市立大学総合理学研究所教授 小島謙一）より多大の助言をいただいた。ここに記して深甚な謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 嶋本利彦：“震災の帯”の不思議、科学、65巻、pp195-198.
- 2) 入倉孝次郎：“震災の帯”をもたらした強震動、科学、66巻、1996、pp.86.
- 3) 川瀬博：Q：何が震度7の震災帯をもたらしたのか？A：盆地生成回折波／表面波との増幅干渉、地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集、1996.
- 4) 中川康一：大阪周辺域での震害と地盤構造、「阪神大震災」緊急合同報告会資料集、1995、pp.92-108.
- 5) Graves, R.W., Pitarka, A. and Somerville, P.G.: Ground-motion amplification in the Santa Monica area: Effects of shallow basin-edge structure, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.88, 1998, pp.1224-1242.
- 6) 科学技術庁：地震調査研究推進本部の活動と地下構造調査、第1回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2000、pp.81-85.
- 7) 横浜市：横浜市高密度強震計ネットワークパンフレット、1997.
- 8) 翠川三郎、阿部進：横浜市における細密震度分布の即時評価、第10回日本地震工学シンポジウム、1998、pp.3467-3471.



- 9) 山崎文雄、山内洋志、清水善久、中山涉、阿部進、鈴木誠：横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討ー地形・地盤分類との比較ー、第25回地震工学研究発表会論文集、1999、pp153-156.
- 10) 石原靖、齋藤正徳、菊池正幸：高密度強震計ネットワークを活用した平野部地下構造の解析、合同学会講演予稿集、1999、B85.
- 11) 山中浩明、片山愛、阿部進：横浜市高密度強震計ネットワークの記録を用いたレイリー波の伝播特性の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999.
- 12) 額縁一起：首都圏の地下構造、物理探査、48巻、1995、pp.504-518.
- 13) 鈴木宏芳：江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造、防災科学研究所報告、46巻、1996、pp.77-123.
- 14) Aki, K. and Lee, W.H.K. : Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P-wave arrival times from local earthquake, 1, A homogeneous initial model, J. Geophys., Res., Vol.81, 1976, pp.4381-4399.
- 15) Zhao, D, Hasegawa, A. and Kanamori H. : Deep structure of Japan subduction zone as driven from local, regional and teleseismic events, J. Geophys., Res., Vol.99, 1994, pp.22313-22329.
- 16) 鶴川元雄、石田瑞穂、村松正三、笠原敬司：関東・東海地域地震観測網による震源決定法について、防災科学技術研究所研究速報、1984、1-88.
- 17) Saito, H. : 3-D seismic travelttime tomography and its application at the Buckhorn Test Facility in Illinois, U.S.A., Proc. of the Second SEGJ/SEG Internat., Symp., 1992, pp. 473-487.
- 18) 佐々宏一、芦田譲、菅野強：建設・防災技術者のための物理探査、森北出版、1993.
- 19) 山田伸之、山中浩明：関東平野南西部における地震動のシミュレーションー伊豆半島東方沖で発生した地震ー、日本建築学会学術講演会梗概集、1999.
- 20) 山中浩明、瀬尾和夫、佐間野隆憲、翠川三郎、嶋悦三、柳沢馬住：人工地震による首都圏南西部の地下構造(3)ー1983,1984年に実施された人工地震のデータの総合解析、地震II、41巻、1988、pp527-539.
- 21) 横浜市：関東平野（横浜市地域）の地下構造調査、第1回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、1999、pp31-40.
- 22) 横浜市：関東平野（横浜市地域）の地下構造調査、第2回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2000、pp29-38.
- 23) 岡田広：微動探査法、物理探査学会ワンデーセミナーテキスト、1997.
- 24) 長郁夫、中西一郎、凌甦群、岡田広：微動探査法への個体群探索分岐型遺伝的アルゴリズム f GA の適用、物理探査、52巻、1999、pp227-246.
- 25) Wald, D. J. and Sommerville, P. G. : Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, Earthquake : Geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seis. Soc. Am., 85, 1995, pp159-177.
- 26) Kanemori, H. : Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., Vol.49, 1971, pp13-18.
- 27) 香川敬生、入倉孝次郎、武村雅之：強震動予測の現状と将来の展望、地震II、51巻、1998、pp339-354.
- 28) 横浜市：READY横浜市リアルタイム地震防災システム、横浜市パンフレット、1999.
- 29) 高浜勉、翠川三郎、新保寛、阿部進：1923年関東地震による横浜市での木造家屋の被害分布、第26回地震工学研究発表会講演論文集、2001、pp.105-108.

(受理：2001年11月27日)  
(掲載決定：2002年4月4日)

# Investigation of deep subsurface structure using the high dense strong motion seismograph network

TAKAHIDE Hidenobu <sup>1)</sup>, ABE Susumu <sup>2)</sup>, NAKAJIMA Tetsuya <sup>3)</sup>  
and INUI Susumu <sup>4)</sup>

- 1) Member, The Former Mayor of Yokohama, Dr. Eng.
- 2) Director of Disaster Preparedness Office, Yokohama
- 3) Manager of Disaster Prevention Technical Division,  
Disaster Preparedness Office, Yokohama
- 4) Assistant Manager of Disaster Prevention Technical Division,  
Disaster Preparedness Office, Yokohama

## ABSTRACT

To delineate deep subsurface structure beneath Yokohama City, we analyzed the P- and S-wave traveltime data of the earthquakes observed by the high dense strong motion seismograph network for the real-time earthquake hazards mitigation system. The three-dimensional velocity structure thus obtained shows that the base rock is deeper at northern and southern part of the city, while shallower at the western part. To study the effect of deep subsurface structure on earthquake ground motion, we simulated earthquake ground motions on the ground surface using the three-dimensional velocity model. We also made the prediction maps of earthquake ground motions, called “Shake Map”, for hypothetical earthquakes using this three-dimensional subsurface model. This investigation shows that a strong motion seismograph network can be effectively used for highly precise prediction of earthquake ground motion in the future.

*Key Words: Subsurface exploration, Strong motion seismograph network, Base rock, Earthquake ground motion prediction*