# 免震病院を対象とした入力地震動の策定例

 — 震源近傍の強震動、及び、深部地盤構造を考慮した入力地震動策定
 —
 Evaluation of Input Ground Motion for a Base-Isolated Hospital Building
 Considering Near-Source Strong Ground Motions and Deep Sedimentary Layers

久田嘉章\*, 翠川三郎\*\*・山中浩明\*\*\*, 鱒沢 曜\*\*\*\* Yoshiaki HISADA\*, Saburo MIDORIKAWA\*\*, Hiroaki YAMANAKA\*\*\*, Yoe MASUZAWA\*\*\*\*

Near-source strong ground motions from the hypothetical Tokai earthquake were evaluated in order apply to the seismic design of a base-isolated hospital building in the Shizuoka prefecture. Microtremor array observations were also carried out to estimate S-wave velocity structure under the building site. Three methods were used to evaluate the ground motions: a empirical method (Kobayashi-Midorikawa, 1982), a semi-empirical method (Irikura, 1986), and a theoretical method (Hisada, 2000; Kamae et al., 1998). Because of the forward and backward directivity effects, the theoretical method exhibited the maximum and minimum ground motions at longer-periods, while the empirical and the semi-empirical methods showed about the average. It was confirmed that the base-isolated building satisfied the safety design criteria for all the estimated ground motions.

### 1 はじめに

本論文では、平成14年9月に開院した静岡県立静岡 がんセンター・病院本棟における入力地震動策定を紹介 する(平成11年日本建築センター評定)。本病院は図1 に示すように、静岡県駿東郡長泉町に位置し、平常時の がん治療に加え、震災時には災害拠点として機能するこ とが期待されている。このため病院本棟は免震構造とし て設計された。

本サイト周辺には図2に示すように仮想東海地震をは じめに、富士川河口断層帯、神縄・国府津-松田断層帯 などが大規模なA級活断層帯が存在している。震源近 傍の強震動には長周期パルス波や、地表断層による大変 位(fling)などが発生するため、免震建築が耐震建築 と比べ必ずしも安全となる保証はない(例えば久田、 2001)。また長周期強震動には深部地下構造が大きく影 響するため、工学的基盤よりも深い地盤特性も適切に評 価して入力地震動を設定する必要がある。

以上のことから、本建物の入力地震動の策定には、微 動を用いた深部地盤構造を調査し(山中担当)、経験的 手法・半経験的手法(翠川担当)、及び理論的手法(久 田担当)による地震動評価を行い、それをもとにした



図1 静岡県立静岡がんセンターの遠景(左)とサイト位置(右)

\* 工学院大学建築学科 助教授・工博 Associate Prof., Dept of Architecture, Kogakuin Univ. Dr. of Eng.

東京工業大学人間環境システム専攻 教授・工博 Prof., Dept. of Building Environment, Tokyo Inst. of Tech.

\*\*\* 東京工業大学環境理工学創造専攻 助教授・工博 Associate Prof., Dept. of Env. Science and Technology, Tokyo Inst. of Tech. \*\*\*\* 株式会社 横河建築設計事務所 建築設計部 工修 Dept of Architecture, Yokogawa Architects & Engineers, Inc.



図2 建設サイト、及び入力地震動策定の祭に参考にした想定震源



図3 地下1階(免震層)の平面図及び断面図

構造的・機能的安全性の確認を行った(鱒沢担当)。ここ では主として微動アレイ観測による地盤構造推定と各手 法を用いた地震動策定について紹介する。

#### 2 想定地震と構造計画概要

静岡がんセンターは、図1、2に示すように富士山麓 の愛鷹火山南東部に位置し、静岡県の地震地域係数は 1.1 以上のB地域に相当する。当サイトで考慮すべき震 源モデルとして、図2に示すように仮想東海地震、仮想 神奈川県西部地震、さらに富士川河口断層帯、及び神縄・ 国府津-松田断層帯による地震などが考えられる。この 中で建設サイトに最も大きな影響を及ぼす地震として、 仮想東海地震(M8)を対象とした入力地震動策定が行 われた。仮想東海地震は、平成13年に中央防災会議から 新しい想定震源域が公表されているが、ここでは建設サ イトに近く、より影響のより大きいと考えられる石橋モ デル(1976)を用いている。表1に使用した震源パラメ ータを示す。

当センターの病院本棟は、地震時の災害拠点として病 院機能を維持させるため免震構造として計画されている。 病院本棟は鉄骨鉄筋コンクリート・一部鉄骨造で、地下 1階、地上11階、軒高 53.45m、建築面積・延べ床面 積はそれぞれ約14,763 m<sup>2</sup>、64,155 m<sup>2</sup>である。架構はブ レース付きラーメン構造(一部耐震壁)、基礎は杭基礎で ある。

図3に示すように免震部材は1階床下及び地下1階床 下に設置し、一部は1階と地下1階の中間に設置した。

免震部材は積層ゴムとすべり支承を併用し、減衰機構は 鋼棒ダンパーと鉛プラグを用いている。基礎固定での設 計用1次固有周期は短辺で0.91秒、長辺で0.86秒であ り、免震層を含めた等価線形モデルによる1次固有周期 は、免震層変位の1 cm レベルで1.42秒、10 cm レベル (レベル1)で2.42秒、20 cm レベル(レベル2)で2.90 秒、40 cm レベル(余裕度検討レベル)で3.33秒である。

表1 仮想東海地震の震源パラメータ(石橋モデル)

緒元	設定値
地震規模	M 8
断層北東端位置(°)	(35.14 N, 138.73 E)
断層の最浅端深さ (km)	2
走行(°)	N198E
傾斜角(°)	34
長さ (km)	115
幅 (km)	70
平均すべり量 (m)	4
平均すべり角(°)	71

### 3. 微動のアレイ観測によるS波速度構造の推定

サイトでは多くのボーリング調査や深さ60mまでの

PS検層などが行われている(株式会社横河建築設計事務所,1998)。それらによると当地では愛鷹火山の噴出によるローム層が地表より約20mまで堆積し、以深は凝灰角礫岩層で構成されている。一方、長周期強震動の特性を調べる上で重要な地震基盤までの地盤構造は殆ど知られていない。そこで本研究ではまず微動のアレイ観測を実施し、S波速度3 km/s 程度の地震基盤までのS波速度構造を推定した。

微動観測は加速度計(アカシ JEP-6A3)の上下成分を 用いた。アレイ観測は、建設サイトの隣にある長泉高校 を中心としたアレイ(大、中、小)と、長泉高校の校庭 内と建設サイト敷地内にて十字アレイで行った。大、中、 小アレイでは観測点間の距離をそれぞれ、0.5~2.2 km、 0.3~0.9 km、0.08~0.25 km とし、三角形の中心・頂点・ 各辺の中点での合計7点で実施した。十字アレイでは7 点の観測点を0.04~0.23 kmの観測点間の距離で行った。 解析方法は、約330秒の記録のフーリエスペクトルから 使用する周波数範囲を決め、Capon (1969)のf-k (周波 数一波数)スペクトルから各周波数の微動の位相速度と 到来方向を決定した。さらに各データセットに対して周 期ごとの位相速度を求め、その平均値を Rayleigh 波の1 次モードの位相速度とみなし、分散曲線を求めた。速度 構造の推定は、山中・石田(1995)の遺伝的アルゴリズ ム(GA)を用いて、観測された分散曲線との比較から最 適解を検索した。その際、各層で密度は固定し、P波速 度はS波速度から狐崎他(1990)の関係式

#### Vp=1.11\*Vs+1.29 ..... (1)

を用いてS波と連動させた。S波速度や層厚に関し、様々 な条件で逆解析を実施した。

表2aは、建設サイトで行われたPS検層のS波速度 を用い(表の\*印)、他のS波速度と層厚を変化させる検 索条件を示している。この条件から得られた最適解を表 2bに、観測による分散曲線との比較を図4に示す。図 より観測から得られた平均値(〇印)と理論分散曲線(実 線)と良く対応していることが分かる。



#### 第30回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2002

表 2a: 地盤逆解析の探索条件(S波速度を固定し、層厚 を変化させた場合:\*印はPS検層結果による)

層	Vs(km/s)	層厚(km)	密度(g/cm³)
1	0.16 *	0.001~0.02	1.7
2	0.25 *	0.001~0.02	1.7
3	0.60 *	0.01~0.05	1.7
4	0.91 *	0.01~0.30	1.8
5	1.0~2.2	0.01~2.00	2.0
6	2.5~3.5	-	2.5

表2b:表2aの探索条件における逆解析結果

層	Vs(km/s)	層厚(km)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
1	0.16	0.004	1.7
2	0.25	0.016	1.7
3	0.60	0.043	1.7
4	0.91	0.17	1.8
5	1.55	1.14	2.0
6	3. 30	-	2.5

表3a:本解析で用いる地盤モデル(山中モデル)

層	密度	Vp	Vs	層厚	Qp	Qs
	$(g/cm^3)$	(km/s)	(km/s)	(km)		
1	2.0	1.7	0.6	0.043	100	50
2	2.1	2.3	0.91	0.17	160	80
3	2.2	2.9	1.55	1.14	300	150
4	2.4	5.5	3.0	2.00	400	200
5	2.8	6.5	3.8	-	400	200

表3b:工藤他(1978)を参考にした地盤モデル

(P波速度け推定)	1	•	2層け山中モデルと同じ)	)
		-		,

層	密度	Vp	Vs	層厚	Qp	Qs
	$(g/cm^3)$	(km/s)	(km/s)	(km)		
1	2.0	1.7	0.6	0.043	100	50
2	2.1	2.3	0.91	0.17	160	80
3	2.2	2.9	1.45	1.00	300	150
4	2.5	3.8	2.3	1.00	350	175
5	2.5	5.0	2.5	2.00	360	180
6	2.8	6.0	3. 7	15.0	400	200
7	3.0	6.8	3.9	-	400	200



図4 工藤モデル(左)と山中モデル(右)によるグリーン関数の比較(周期2秒の Ricker 震源)
 (距離 30 km, 深さ5 km 上:変位波形、下:速度フーリエ振幅スペクトル)

入力地震動策定のために微動観測による深部地盤構造 の探査が行われることはまれである。そこで微動観測に よる地盤構造と、既存の結果から推定した地盤構造とで、 地震動特性にどのような差が出るのか理論グリーン関数 を計算し比較した(久田、1997)。伊豆半島ではいくつ かの地下構造に関する研究が行われている。まず工藤 他(1978)は1978年伊豆半島東方沖地震の余震観測に よるS波走時および本震の強震記録解析から伊豆半島

北部のS波速度構造を推定している。また人工地震に よる P 波速度構造も推定されている (Asano et al., 1982)。ここでは微動観測をもとにした地盤構造モデル (山中モデル、表3a)と、工藤他(1978)による最適 モデル (C-Model) を用いて、グリーン関数を計算した (工藤モデル、表3b)。なお工藤モデルには表層地盤 として山中モデルによる工学的基盤を加えている。震 源は観測点から水平距離30 km、深さ5 kmの位置に、 周期2秒のRicker 波を発生する点震源とした。図4に 2つの地盤モデルによる transverse 成分と radial 成 分の変位波形、及び速度のフーリエ振幅スペクトルを 示す。工藤モデルは山中モデルに比べ堆積層が厚いた め地震動の振幅が大きいが、基盤とのコントラストが 小さいため分散が明瞭でなく、波形の継続時間は短い。 従って対象サイトにおける長周期強震動の評価には、 適切な深部地下構造を用いる必要があることが分かる。

#### 4 半経験的手法と経験的手法とによる入力地震動策定

半経験的手法と経験的手法を用いて仮想東海地震を対 象とした静岡がんセンターでの入力地震動を作成した。 半経験的手法は Irikura (1983、1986)、岩崎他(1986) による手法を用いた。要素地震波を得るために、静岡が んセンターに隣接する長泉高校で1998 年5月より強震

観測を実施した。その結果、1998年6月房総半島沖地震 (M5.6、深さ 50 km、Amax=1.4 gal)、1998 年 6 月茨城 県南西部地震(M4.7、深さ70km、Amax=1.4 gal)など の記録を得た。一方、静岡がんセンターから約3km南東 に位置する長泉消防本部では静岡県震度情報ネットワー クの計測震度計が設置されており、1997年10月遠州灘 地震(M5.0、深さ30 km、Amax=5.8 gal)、1998年5月 伊豆半島東方沖地震(M5.4、深さ10km、Amax=19.5gal)、 1998 年6月房総半島東方沖地震(M5.6、深さ 50 km、 Amax=0.9 gal) などの強震記録が得られている(図5)。 このうち、1998年6月房総半島沖地震では長泉高校と長 泉消防本部とで共通の強震記録が得られている。そこで 図6に示すように両者の記録を比較してみると、長泉高 校では表層地盤に起因する 0.4 秒の顕著な卓越周期が見 られたが、それ以外の周期成分の強震動は類似であった。 長泉高校の地盤は溶岩層の上に15m程度のローム層(N 値5程度)が堆積し、一方、消防本部の地盤は溶岩層の 上に5m程度の砂礫層(N50以上)が堆積している。 従って長泉高校での0.4秒の卓越周期は表層地盤の特性 を反映していると考えられる。従って静岡がんセンター の工学的基盤における要素地震波として長泉消防本部に おける強震記録を使用することにした。



図5 半経験的手法のために検討した中小地震と長泉高校・長泉町消防本部の強震観測点 (仮想東海地震の断層面、及び小断層における地震タイプ)

要素地震は、仮想東海地震の震源域にある 1997 年 10 月遠州灘地震(M5.0、深さ 30 km)と、震源域ではない ものの浅い震源による長周期強震動を考慮するため 1998 年 6 月房総半島東方沖地震(M5.4、深さ 10 km)と を使用した(図 7)。

仮想東海地震の断層パラメータは表1の値を用い、断 層面を図5に示すように25個の小断層に分割した。 1997 年 10 月遠州灘地震の記録を用いて、図5 にある小 断層Aによる地震(M6.6 相当)の記録を合成し、一方、 1998 年6月房総半島東方沖地震を用いて小断層Bによ る地震(M6.6相当)の記録を合成した。その際、大地震 の応力降下量を 50 bar とし、推定されている小地震の応 力降下量から大地震と小地震の応力効果量の比をそれぞ れ 3.5 と 2.5 とした。図5に示した小断層のうち、a要 素にはA地震を、b要素にはB地震を使用し、東海地震 による記録を合成した。その際、破壊は断層面の西南端 の要素から開始するとし、破壊伝播速度を2.7 km/s、地 震波の伝播速度を3.7 km/sとした。図8に合成波形(E W成分)と応答スペクトルを示すが、最大加速度が約350 gal、最大速度は約 25 cm/s、速度応答で 100 cm/s 前後 であった。

一方、経験的手法では Kobayashi and Midorikawa (1982)による手法を用いた。半経験的手法と同じく図 5による要素分割を行い、始めに地震基盤(S速度3km/s 相当)における応答スペクトルと包絡波形を合成する。 次に地震基盤から工学的基盤までの増幅率を表3aの山 中モデルを用いて重複反射理論により評価した。図8に 合成波形と応答スペクトルを示すが、最大加速度が約 500 gal、最大速度は約35 cm/s、速度応答で50~100 cm/s 前後であった。







による長泉町消防本部における強震記録







図8b 半経験的・経験的手法による速度応答スペクトル

## 5 理論的手法と統計的グリーン関数法による入力地震 動策定

次に長周期強震動(周期約1秒以上)の作成に理論的 手法を、短周期強震動(周期約1秒以下)には統計的グ リーン関数法を用いて、両者を加え合わせたハイブリッ ド手法による入力地震動策定を行った。理論的手法では、 震源アスペリティーと破壊伝播効果に起因する長周期パ ルス波や、断層の食い違い変位に起因する大変位効果

(fling)など、近年明らかにされてきた様々な震源近傍 における震源特性に加え、深部地盤構造による波動伝播 特性も考慮することができる利点がある。

理論的手法に用いる震源パラメータには、対象とする 地震の条件に近い過去の地震のパラメータを用いる場合 や、経験式によるパラメータを用いる場合などがある。 M8クラスの海洋型地震を対象とした場合、震源逆解析 による使用できるの震源パラメータは長周期の記録(通 常、周期3~4秒以上)であるため、工学的に必要な短 周期ではそのままでは適用はできない。そこで、震源近 傍で強震記録が得られ、東海地震と同じM8クラスの海 洋型逆断層タイプの地震である 1985 年メキシコ地震と 1985 年チリ地震を用い、短周期まで適用可能な震源パラ メータを構築し、仮想東海地震に適用した。

理論的手法のための震源モデルとして Hisada (2001)、 久田 (2002) を使用する。このモデルでは、断層面上の すべりや破壊開始時間の空間分布には空間波数 (k) の 2 乗に逆比例するモデル (k2 モデル)を仮定する。破壊開 始時間の k2 分布によって破壊フロントが乱れるため、震 源逆解析によるM8 地震の震源パラメータをそのまま用 いても、ω2モデルに従った短周期成分を励起すること ができる。一方、周期1秒以下の短周期成分には Kamae et al. (1998)による統計的グリーン関数法を用いる。これ は Brune (1970)の点震源モデルを断層面の小断層に分布 させ、Irikura (1986)の方法で重ね合わせる手法である。

上記の手法を 1985 年メキシコ地震と 1985 年チリ地震 に適用し、震源近傍で観測された強震記録を再現する震 源パラメータを構築した。図9は 1985 年メキシコ地震 の断層モデルと強震観測点(4地点)とすべり分布モデ ルである。断層モデルは Somerville 他(1991)、及び Mendoza and Hartzell (1989)を参考に構築し、理論的手 法のための破壊開始時間の分布には、図 10 に示すよう な k2 分布を用いた。k2 分布は、断層面を 8.3 km x 6.7 km の小断層に分割し、各小断層で平均破壊伝播速度に 1 σ が 1 km/s の正規分布を持つランダムな破壊伝播速 度を与えることで生成した。一方、図 10 には参考のた め一定の破壊伝播速度(Vr = 3 km/s)による破壊開始時 間の分布も示している。すべり速度関数は継続時間が単 純に1秒の三角形関数とした。地盤モデルは Somerville 他(1991)による表4aに示す構造を用い、グリーン関 数は、観測点が断層直上にあることから最下層の構造に よる全無限体のグリーン関数を計算し、重複反射理論に よる増幅率を乗じて地表での波形を合成した。理論的手 法は周期1秒以上、統計的グリーン関数法には周期2秒 以下で計算し、周期1~2秒で交差するフィルターをか けて両者を加え合わせた。図11に一例として観測点 CAL における理論速度波形と観測波形の比較を、図12 には加速度フーリエスペクトルの比較を示す。理論波形 には図10で示した2つの破壊開始時間のモデルによる 計算結果を示している。滑らかな破壊開始時間分布を用 いると周期1秒以上の長周期強震動の励起が不足する。 一方、k2 分布モデルではメキシコ地震で顕著に見られた 周期2秒前後で卓越する長周期強震動が再現されている。 なお本地震を対象に、最新の k2 モデルを用いて再度シ ミュレーションを行っている(久田 1999、Hisada



**2000**)

同様に図13は1985年チリ地震の断層モデルと観測 点位置(4地点)とすべり分布モデル、図14は破壊開 始時間の分布である。この場合、断層面を1.4 km x 1.2 km の小断層に分割し、各小断層で平均破壊伝播速度に 1  $\sigma$ が1 km/sの正規分布を持つランダムな破壊伝播速 度を与え、k2分布の破壊開始時間を生成した。表4bの 地盤モデルを用い、生成した理論速度波形と観測波形の 比較を図15に、スペクトルの比較を図16に示す。観 測波形は広い周期帯域で良く再現されている。

表4a:メキシコ地震に使用した地盤モデル

ρ	Vp	Qp	Vs	Qs	Thick
$(g/cm^3)$	(km/s)		(km/s)		(km)
2.50	4.6	200.0	2.7	100.0	0.4
2.68	5.8	200.0	3.4	100.0	5.6
2.78	6.4	200.0	3.7	100.0	-

表4b: チリ地震に使用した地盤モデル

ρ	Vp	Qp	Vs	Qs	Thick
$(g/cm^3)$	(km/s)		(km/s)		(km)
1.80	3.0	200.0	1.50	100.0	1.0
2.36	5.5	200.0	3.17	100.0	5.1
2.50	6.0	200.0	3.48	100.0	8.6
2.79	6.5	200.0	3.80	100.0	-



図 9 1985 年メキシコ地震の断層モデルと 強震観測点(左)とすべり分布モデル(上)



図10 1985 年メキシコ地震の破壊開始時間分布(左:破壊伝播速度が一定の場合、右:k2分布の場合)



図11 CALにおける理論速度波形(NS成分、上:破壊伝播速度が一定の場合、中:k2分布の場合) と観測波形(下)



図12 CAL における理論的手法による加速度フーリエスペクトル(NS成分、左:破壊伝播速度が一定の場合、中:k2分布の場合)と観測波形のフーリエスペクトル(右)



図13 1985年チリ地震の断層モデルとすべり分布モデル強震観測点の位置



図16 RPL における理論的手法による加速度フーリエスペクトル(左:破壊伝播速度が一定の場合、中:k2分布の場合)と観測波形のフーリエスペクトル(右)



図17 仮想東海地震に適用したメキシコ地震モデル(左)とチリ地震モデル(右)

構築したメキシコ地震とチリ地震の震源パラメータを 長泉町の静岡がんセンターにおける理論地震動に適用し た。図17と表5に使用した2種の断層モデルとすべり 分布を示す。破壊開始点は断層面の下端部とし、破壊が 観測点に近づく場合(破壊開始点1)と離れる場合(破 壊開始点2)の2ケースを考慮した。地盤構造は微動観 測をもとにした表3aの成層地盤を用い、半無限成層地 盤モデルのグリーン関数を使用した(久田、1997)。

図17に計算した速度波形(NS成分)を示す。Forward と backward の directivity 効果により、理論波形の性状 は大きく異なっている。すなわち破壊フロントが観測点 に近づく場合(破壊開始点1)、継続時間が短いものの、 大きな振幅となっているのに対し、破壊フロントが離れ る場合(破壊開始点2)、継続時間は長いものの、短周期 の卓越する小さな振幅の波形となる。図18に速度応答 スペクトル(h=5%)を示すが、前者は後者に対して周期 1~2秒以上で大きな応答を示している。

一方、巨大地震の震源近傍では、断層変位に伴う静的 項の寄与である大きな変位成分にも注意すべきである (久田、2001)。そこで変位波形を計算し、結果の一例を 図18に示す(メキシコ地震タイプ)。本地震の場合、観 測点が下盤側で断層面からも十数 km 離れているため、 永久変位は10 cm程度とその影響はあまり大きくは無 かった。図の破壊開始点1のケースに見られる50 cm近 い大きな変位は、forward directivity 効果による長周 期パルス波である。

A 6 区川 じた 医心木はの 展示 パックション							
断層モデル	石橋モデル	メキシコ型モデル	チリ型モデル				
断層長さ( <b>km</b> )	115	125	120				
断層幅(km)	70	80	75				
走向角(°)	N198E	N198E	N198E				
傾斜角(°)	34	34	34				
断層すべり (m)	4.0	0.7~4.2	0.7~4.2				
断層面下端深さ( <b>km</b> )	41	45	45				
断層面上端深さ( <b>km</b> )	1.9	0.3	3.1				
すべり角(°)	71	70	70				
破壊開始点深さ( <b>km</b> )	41	45	45				
破壞伝播速度( <b>km/s</b> )	3.0 (一定)	3.0 (ばらつき考慮)	3.0 (ばらつき考慮)				
k <b>2</b> 分布を生じさせる小 断層サイズ	_	8.3 x 6.7 km <sup>2</sup>	1.4 x 1.2 km <sup>2</sup>				

表5 使用した仮想東海の震源パラメータ



第17 東海地震を想定したメキシコ型モデル(上)とナリ型モデルに(下)よる長泉町で 速度波形(NS成分、左:破壊開始点1、右:破壊開始点2)



図19 仮想東海地震(メキシコ地震モデル)による長泉町での変位波形 (NS成分、左:破壊開始点1、右:破壊開始点2)

### 6 各手法による結果の比較

上記に示した3手法、すなわち経験的手法(小林-翠 川手法)、半経験的手法、理論的手法(理論手法と統計的 グリーン関数法) で得られた地震動を比較検討する。表 6と図20に、3手法による波形の最大振幅値と速度フ ーリエスペクトル(h=5%)を示す。理論的手法による 結果は震源のパラメータの値で大きく変動するが、経験 的手法と半経験的手法の結果は比較的安定し、理論的手 法によるばらつきに対して中間程度の値を示している。 特に免震構造の応答に影響する長周期成分に着目すると、 最も大きな値は、理論的手法を用い forward directivity 効果が現れているメキシコ型地震によるものであり (MEX1)、逆に最も小さな値は backward directivity 効 果によるメキシコ型地震によるものであった (MEX2)。従 って、経験的手法や半経験的手法により経験的な地震動 特性を把握し、理論的手法により最悪条件や結果のばら つきを評価できたことは有効であった。

### 7 おわりに

静岡県長泉町に建設された静岡県立静岡がんセンター の設計にあたり、地域における地震動特性を評価するた め東海地震を想定した地震動予測を行った。まず微動 アレイによる地盤構造探査を行い、建設地における地震 基盤までの地盤構造モデルを構築した。地震動策定は、 経験的手法・半経験的手法・理論的手法を用い、最悪条 件や結果のばらつきを考慮して行った。その結果、 forward directivity 効果による長周期パルス波が当病 院の免震構造に最も大きく影響することを確認した。最 後に計算した全ての地震動を用い、静岡がんセンターの 構造的・機能的安全性の確認を行った(詳細は文献 Masuzawa et al, 2000を参照されたい)。

一方、2000年台湾集集地震の後、大規模な地表断層運動による大変位・大速度の波形が注目され、免震建築の 安全性が危惧されている(例えば、久田、2001)。当病院 の場合、逆断層地震の下盤側に位置し、さらに断層から 10数km離れているため、断層運動による永久変位の影響は大きくはなかった。もし当病院が上盤側の地表断層 の近傍で建設されていたら、想定される最悪の地震動(台 湾地震の石岡 TCU068 など)では免震建築は成り立たなか った可能性が大きい。今後は巨大地震の震源近傍、特に 地表断層が現れた場合の強震動特性の解明が急がれる。 同時に、それに対応できる耐震(免震・制振)構造の開 発も望まれる。一方、理論的手法を用いた場合、想定さ れる地震動の最悪条件が評価できる利点があるものの、 断層面の大きさ、破壊開始点やアスペリティーの深さや 位置、破壊開始時間の分布、すべり関数、グリーン関数 などの設定により、いくらでも最悪な地震動が作れるこ とも強調したい。現在、レシピ(例えば、入倉・三宅、 2002)などで理論地震動の作成法が標準化されつつある が、経験的な震源パラメータやそれによって作成された 強震動には考慮すべき大きな結果のばらつきが無視され る可能性があることに注意すべきである。結果のばらつ きは本来確率的に評価されるべきであり、より合理的な 耐震設計を行うために、今後、確率論を基礎としたリス クマネージメント手法などを採り入れていく必要性を痛 感した。

#### 謝辞

本研究では静岡県都市住宅部営繕課、静岡県健康福祉 部県立病院課がんセンター準備室の皆様のご協力を頂き ました。また静岡県総務部防災局観測調査室には地震観 測データを提供して頂きました。一方、県立長泉高校で は長い間強震観測点を提供頂き、貴重な記録を得ること ができました。微動観測アレイの実施では、長泉町役場 土木建築課と長泉高校の皆様のご協力を頂き、東京工業 大学の栗田勝実氏、山田伸之氏他、多くの大学院生と共 同で実施しました。

衣0 台子伝による地長仮の比較							
手法名		加速度	速度	変位			
		( <b>gal</b> )	( <b>cm/s</b> )	(cm)			
半経験的手法		350	25	16			
経験的手法		498	36	13			
理論的毛法	NS	393	64	52			
(メキシコ型1)	EW	353	64	29			
	UD	166	52	36			
理論的手法	NS	348	27	20			
(メキシコ型2)	EW	332	31	18			
	UD	178	18	20			
理論的毛法	NS	481	80	56			
(千川刑1)	EW	542	69	36			
() 9至1)	UD	274	47	43			
理論的手法 (チリ型2)	NS	457	29	21			
	EW	350	39	18			
	UD	350	22	14			

長6 各手法による地震波の比較



図20 仮想東海地震による各種法(半経験的手法、経験的手法、理論手法)による 速度応答スペクトル(5%減衰)の比較

#### 参考文献

Asano, S. et al., Crustral structure in Izu peninsula, central Japan, as derived from explosion seismic observations, 1. Mishima-Shimoda profile, J. Phys. Earth, Vol. 30, pp367-387, 1982

Boore, D.M., Stochastic simulation of High-frequency ground motions based on seimological models of radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, pp. 1865-1894, 1983

Brune, J. N., Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75, 4997-5009, 1970

Capon, J., High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, Vol 57, 1408-1418, 1969

久田嘉章、成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法,日本建築学会構造系論文集 第501号、pp.49-56、Nov.1997

Hisada Y. A hybrid method for predicting strong ground motions at broad-frequencies near M8 earthquakes in subduction zones, Proc. of the 12th World Conference on Earthq Eng, CD-ROM, 2000

久田嘉章、震源近傍の強震動 – 改正基準法の設計用 入力地震動は妥当か? –、第 29 回地盤震動シンポジウ ム、日本建築学会、pp99-110, 2001

Hisada Y.: A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.90, No.2, pp. 387-400, 2001

久田嘉章、k-2モデルによる強震動評価、月間地球/号 外、No. 37, pp. 179-186, 2002、pp99-110, 2002

Irikura, K., Prediction of Strong Acceleration Motion using Empirical Green's Function, Proc. 7<sup>th</sup> Japan Earthq. Engng. Sym., pp.151-156、1986

入倉孝次郎、三宅弘恵、予測のための震源のモデル化、 月間地球/号外、No.37, pp.62-77, 2002

石橋克彦、東海地方に予想される大地震の再検討-駿 河湾地震の可能性、地震予知連絡会会報、17、pp. 126-132, 1997

岩崎好規・他、震源放射特性を考慮した小地震の重ね 合わせによる震源近傍本地震動の合成、第7回日本地震 工学シンポジウム、1986

Kamae, K., K. Irikura, and A. Pitarka (1998), "A Technique for Simulating Strong Ground Motion using Hybrid Green's Function", *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol.88, No.2, pp.357-367.

狐崎 長琅 他、地震動予測のための深層地盤 P・S 波 速度の推定、自然災害科学 Vol.9, No.3, pp.1-17, 1990 Kobayashi H. and M. Midorikawa, A semi-empirical method for estimating response spectra of near-fielad ground motions with regard to fault rupture, Proc. 6<sup>th</sup> European Conf. On earthq. Engng., pp.161-168, 1982

工藤一嘉・他、伊豆半島のS波速度構造、東京大学地 震研究所彙報、第53号、pp779-792, 1978

Masuzawa Y. et al., Seismic design of a base isolated building in the vicinity of a hypothetical M8 earthqauke in subducntion zone, Proc. 12th World Conf. On Earthq. Engng., CD-ROM, 2000

Mendoza, C. and S. H. Hartzell (1989), "Slip Distribution of the 19 September 1985 Michoacan, Mexico, earthquake: Near-Source and Teleseismic Constraints", *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol.79, pp.655-669.

Somerville, P.G., M. Sen, and B. Cohee, Simulation of Strong Ground Motions Recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaiso, Chile Earthquakes, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol.81, pp.1-27. 1991

山中浩明・石田 寛、遺伝的アルゴリズムによる位相速 度の逆解析、日本建築学会構造系論文集、No.468, pp.9-17, 1995

株式会社横河建築設計事務所、平成10年度静岡県がん センター(仮称)建築工事・基本計画書(建設地での地 震動評価)、1998

第30回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2002