

東海事業所

免震構造設計用入力地震動策定報告書

1997年5月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and Nuclear
Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1997

公開資料
PNC TN 8410 97-124
1997年5月

東海事業所
免震構造設計用入力地震動策定報告書

瓜生 満*
篠原 孝治* 寺田 修司*
山崎 敏彦* 中山 一彦*
近藤 俊成** 細谷 寿***

要旨

従来の原子力施設建家は、いわゆる剛構造と呼ばれる耐震構造を採用しており、その設計用入力地震動の策定手法（大崎の手法と呼ばれる）は確立されたものであり、多くの実績を有している。これら剛構造建家の固有周期は0.1～0.5秒程度の短周期側にあるが、免震構造建家の固有周期は大地震時には2～4秒程度のやや長周期側にある。

したがって、原子力施設建家に免震構造を採用する場合、やや長周期地震動を適切に評価する必要があり、その評価手法には様々なものが提案されているものの、いまだ確立されたものはない状況であった。また、検討対象とすべき地震そのものも、やや長周期という観点から表面波の影響等、遠距離の大地震を加える必要があり、さらに多角的な評価検討が必要であった。

ここでは東海事業所の再処理施設建家に、積層ゴム及び鉛ダンパーからなる免震装置を用いた免震構造を採用する際に策定した免震構造設計用入力地震動の評価手法について報告する。

なお、本報告で示した免震設計用入力地震動は、東海事業所における第三紀層地盤立地の免震施設建家に適用されるものである。

* 建設工務管理室
** (株)日建設計
*** 検査開発(株)

目 次

1. まえがき	2
2. 設計用入力地震動の策定基本方針	3
2.1 基本方針	3
2.2 考慮すべき地震	4
2.2.1 設計用最強地震	4
2.2.2 設計用限界地震	6
2.3 基準地震動	7
2.4 設計用入力地震動	8
3. 基準地震動の策定	10
3.1 歴史地震	10
(1) 地震の活動性	10
(2) 敷地周辺の被害地震	10
3.2 地震動の強さの統計的期待値	11
3.3 活断層	12
3.4 地震地体構造	13
3.5 基準地震動の策定	14
3.5.1 基準地震動 S_1 、 S_{1K} の策定	14
(1) 解放基盤表面における基準地震動 S_1	14
(2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K}	15
3.5.2 基準地震動 S_2 、 S_{2K} の策定	18
(1) 解放基盤表面における基準地震動 S_2	18
(2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K}	19
4. 免震構造を採用した施設の設計用入力地震動の策定方法	21
5. まとめ	23

(参考文献)	24
Appendix - I 東海事業所敷地におけるやや長周期の地震動について	81
Appendix - II 地震基盤の設定根拠について	99
Appendix - III やや長周期地震動の各種評価手法について	107
Appendix - IV 小林、石田、工藤、入倉の手法の概要について	119
別添資料 免震構造設計用入力地震策定入力データリスト	143

表 一 覧

表 0 - 1 基準地震動に係る用語の定義	1
表 2 - 1 地震と基準地震動の関係	6
表 3 - 1 敷地周辺に影響を与えた地震	27
表 3 - 2 敷地周辺の活断層	28
表 4 - 1 免震構造設計における設計用入力地震動の諸元	29
表 4 - 2 剛構造設計における設計用入力地震動の諸元	29

図一覧

図 2-1	遠距離地震の敷地に対する影響	5
図 2-2	免震構造の設計用入力地震動の策定法	9
図 3-1	歴史地震の震央分布と規模	30
図 3-2	マグニチュード、震央距離及び気象庁震度階の関係	31
図 3-3 (その 1)	茨城県南部 (1895.1.18 U-2)	32
図 3-3 (その 2)	茨城県沖 (1896.1.9 U-3)	33
図 3-3 (その 3)	茨城県沿岸 (1930.6.1 U-12)	33
図 3-3 (その 4)	茨城県沖 (1938.5.23 U-14)	34
図 3-3 (その 5)	茨城県沖 (1938.9.22 U-15)	35
図 3-4	河角の震度期待値	36
図 3-5	金井による地震基盤における地震動の限界速度分布	37
図 3-6	統計的期待値	38
図 3-7 (1)	敷地周辺の活断層分布図 (全体)	39
図 3-7 (2)	敷地周辺の活断層分布図 (拡大)	40
図 3-8 (その 1)	微小地震の震央分布図	41
図 3-8 (その 2)	微小地震の震源深さ分布図	42
図 3-9	福島県沖 (一部宮城県沖) から茨城県沖にかけての 海域のマグニチュードが 6 以上の被害地震	43
図 3-10 (1)	基準地震動 S_2 に対する最大マグニチュード 及び日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模	44
図 3-10 (2)	基準地震動 S_2 に対する最大マグニチュード 及び日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模	45
図 3-11	解放基盤表面における基準地震動 S_1 の速度応答スペクトル	46
図 3-12	解放基盤表面における基準地震動 S_1 の速度応答スペクトル の適合度	47
図 3-13	解放基盤表面における基準地震動 S_1 の加速度及び速度波形	48
図 3-14	地震基盤表面における基準地震動 S_{1K} の速度応答スペクトル	49

図 3-15 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{1K}-M$ の速度応答スペクトルの適合度	50
図 3-15 (2) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{1K}-F$ の速度応答スペクトルの適合度	51
図 3-16 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{1K}-M$ の加速度及び速度波形	52
図 3-16 (2) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{1K}-F$ の加速度及び速度波形	53
図 3-17 解放基盤表面における基準地震動 S_2 の速度応答スペクトル	54
図 3-18 (1) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-M の速度応答スペクトル適合度	55
図 3-18 (2) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-N の速度応答スペクトル適合度	56
図 3-19 (1) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-M の加速度及び速度波形	57
図 3-19 (2) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-N の加速度及び速度波形	58
図 3-20 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K} の速度応答スペクトル	59
図 3-21 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{2K}-M$ の速度応答スペクトルの適合度	60
図 3-21 (2) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{2K}-N$ の速度応答スペクトルの適合度	61
図 3-22 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{2K}-M$ の加速度及び速度波形	62
図 3-22 (2) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{2K}-N$ の加速度及び速度波形	63
図 4-1 (1) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1I} の速度応答スペクトル	64
図 4-1 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{2I} の速度応答スペクトル	65

図 4-2 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{11}-M$ の加速度及び速度波形	66
図 4-2 (2) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{11}-F$ の加速度及び速度波形	67
図 4-2 (3) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{21}-M$ の加速度及び速度波形	68
図 4-2 (4) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{21}-N$ の加速度及び速度波形	69
図 4-3 地盤の速度構造	70
図 4-4 設計用入力地震動の策定概念図	71
図 4-5 設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* の策定フロー	72
図 4-6 (1) 基準地震動 S_{1K} をもたらす地震及び遠距離大地震 ^{*1} による 地震動の建家の基礎底面における速度応答スペクトル	73
図 4-6 (2) 基準地震動 S_{2K} をもたらす地震及び遠距離大地震 ^{*1} による 地震動の建家の基礎底面における速度応答スペクトル	74
図 4-7 (1) 目標とする設計用入力地震動 S_1^* の速度応答スペクトル	75
図 4-7 (2) 目標とする設計用入力地震動 S_2^* の速度応答スペクトル	76
図 4-8 設計用入力地震動 S_1^* の加速度及び速度波形 (建家の基礎底面：標高 - 0. 2 m)	77
図 4-9 設計用入力地震動 S_2^* の加速度及び速度波形 (建家の基礎底面：標高 - 0. 2 m)	78
図 4-10 (1) 設計用入力地震動 S_1^* の速度応答スペクトルの適合度 (建家の基礎底面：標高 - 0. 2 m)	79
図 4-10 (2) 設計用入力地震動 S_2^* の速度応答スペクトルの適合度 (建家の基礎底面：標高 - 0. 2 m)	80

表0-1 基準地震動に係る用語の定義

用語	説明
基準地震動 S_1	設計用最強地震よりもたらされる地震動であり、敷地の解放基盤表面において、発電用原子炉施設の耐震設計審査指針に基づき定義される。
基準地震動 S_2	設計用限界地震よりもたらされる地震動であり、敷地の解放基盤表面において、発電用原子炉施設の耐震設計審査指針に基づき定義される。
基準地震動 S_{1K}	基準地震動 S_1 をもたらす地震に加え、やや長周期領域の地震動の評価という観点で想定した地震を含む設計用最強地震よりもたらされる地震動であり、敷地の地震基盤表面等において、やや長周期の地震動の周波数特性を評価可能な手法により定義される。
基準地震動 S_{2K}	基準地震動 S_2 をもたらす地震に加え、やや長周期領域の地震動の評価という観点で想定した地震を含む設計用限界地震よりもたらされる地震動であり、敷地の地震基盤表面等において、やや長周期の地震動の周波数特性を評価可能な手法により定義される。
入力地震動 $S_1(R)$, $S_2(R)$, $S_{1K}(R)$, $S_{2K}(R)$	各基準地震動（模擬地震波）を定義される位置から建家の基礎底面まで上昇させた地震動。 なお、入力地震動 $S_1(R)$ を剛構造の施設の耐震設計に用いられる設計用入力地震動 S_1 、入力地震動 $S_2(R)$ を剛構造の施設の耐震設計に用いられる設計用入力地震動 S_2 とする。
設計用入力地震動 S_1^*	入力地震動 $S_1(R)$, $S_{1K}(R)$ 及び表面波を評価可能な手法等により求められる速度応答スペクトル（減衰 5 %）をスムーズに包絡して求められた（目標とする）速度応答スペクトルに基づき作成した免震構造の設計用入力地震動
設計用入力地震動 S_2^*	入力地震動 $S_2(R)$, $S_{2K}(R)$ 及び表面波を評価可能な手法等により求められる速度応答スペクトル（減衰 5 %）をスムーズに包絡して求められた（目標とする）速度応答スペクトルに基づき作成した免震構造の設計用入力地震動

1. まえがき

筆者等は昭和63年頃より東海事業所を敷地とする原子力施設免震構造建家の適用研究を推進してきたが、国内で初めての原子力施設への適用計画として再処理施設ユーティティ施設（以下再UC施設という）が平成6年頃より現実的な対象として設定されることとなった。

免震構造の耐震安全性の確認に際しては、設計用入力地震動の評価が最重要案件の1つである。

従来の東海事業所の剛構造設計用基準地震動としては、ガラス固化技術開発施設の設置（昭和63年2月9日 62安（核規）第865号）に伴い、設計用最強地震による模擬地震波（S₁波）が策定されている。

設計用限界地震S₂については、再UC施設以前に東海再処理施設ではA sクラスに分類されるものが無かった事から、設計検討用の模擬地震波の試作を行ったのみであった。しかし、兵庫県南部地震（1995年1月17日）を契機に再処理施設耐震性再確認用として、直下地震及び地震地体構造によるものとして2波の設計用限界地震による模擬地震波（S₂波）を策定している。

再UC施設の耐震重要度分類はA sクラスであり、建家の基準地震動は原子力施設の耐震重要度分類に応じて、基準地震動S₁及びS₂をもたらす地震「設計用最強及び限界地震」を選定する必要があるが、さらにやや長周期地震動を考慮する必要があるとの観点から対象とする地震の様相が通常の耐震設計と異なっている。

つまり、再UC施設において剛構造として検討すべき対象（下部基礎版上の機器類、共同溝等）についてはS₁波及びS₂波として点震源モデルによる上記の模擬地震波を用いるが、免震構造に関する部分（下部基礎版、免震層、上部構造）に対しては、さらにやや長周期を考慮可能な断層モデルによる模擬地震波を新たに策定する必要がある。

具体的には上記地震動のうち解放基盤表面もしくは地震基盤表面で定義されるものについて重複反射理論を用いてそれぞれ建家基礎面まで上昇させ、地表面において作成した模擬地震波を加え、これらの速度応答スペクトルをスムーズに包絡させ設計用入力地震動S₁*及びS₂*を策定するものである。

本報告書では、上記地震波の策定根拠や計算方法をまとめると共に、建物入力用地震波としての基盤表面からの引き上げ条件等についても整理した。

2. 設計用入力地震動の策定基本方針

2.1 基本方針

免震構造設計に用いる基準地震動は、剛構造設計に用いられる基準地震動 S_1 及び S_2 に加え、やや長周期の地震動（以下、やや長周期地震動という）を適切に評価したものであることが要求される。

免震構造設計に用いる設計用入力地震動を策定する際に用いるべき基準地震動は、基本的に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（以下、耐震設計審査指針という）」における考え方を準拠し、2種類の基準地震動 S_1 （設計用最強地震によりもたらされる地震動）と S_2 （設計用限界地震によりもたらされる地震動）を考慮する。

また、やや長周期地震動は震源近傍だけではなく、震央から数百km程度まで被害をもたらすことに注意が必要であるとされている⁽¹⁾。このため、剛構造設計では設計用最強地震又は設計用限界地震として評価されない遠距離の規模（マグニチュード）の大きな地震についても免震構造設計では表面波の卓越等、やや長周期地震動の評価の観点から、これらの地震を考慮した上で、基準地震動を策定する必要がある。

即ち、基準地震動 S_1 及び S_2 を策定するための歴史地震、活断層等の調査は耐震設計審査指針に基本的に準ずるが、さらに、距離減衰により地震動の加速度応答が震度V未満に低下する遠距離に存在する歴史的な大地震及び大地震の発生源になると考えられる活断層も必要に応じて検討の対象とし、これらの地震と耐震設計審査指針で規定する地震によりもたらされる免震構造設計用の基準地震動（本報告書では、これらを基準地震動 S_{1K} 及び S_{2K} という）を策定するものとする。

やや長周期地震動の特性は、震源の特性と地震伝播経路の特性、観測地周辺の深い地下構造の影響を受ける⁽²⁾ために、基準地震動策定にあたっては、その影響を適切に考慮する。その場合、対象とする地震動の周期に応じて地下深部の速度構造、不整形性の程度等を敷地ごとに適切に考慮する必要がある。さらに、地震によっては、敷地において表面波が卓越する場合があるため、その影響を評価する必要があり、震源断層や地震波伝播経路の深い地下構造等の影響を考慮した適切な方法に基づき、工学的見地からの検討を加えて、免震構造の設計用入力地震動（本報告書では、これらを設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* という）を策定するものとする。

なお、敷地周辺の地盤が表面波等のやや長周期領域での揺れやすさが卓越する地域かどうかを既往文献^{(3) (4) (5) (6)}、地震観測結果あるいは解析等により評価するものとし、その調査結果をAppendix-Iに、その評価上設定が必要な地震基盤についてその設定根拠をAppendix-IIに示す。

2.2 考慮すべき地震

2.2.1 設計用最強地震

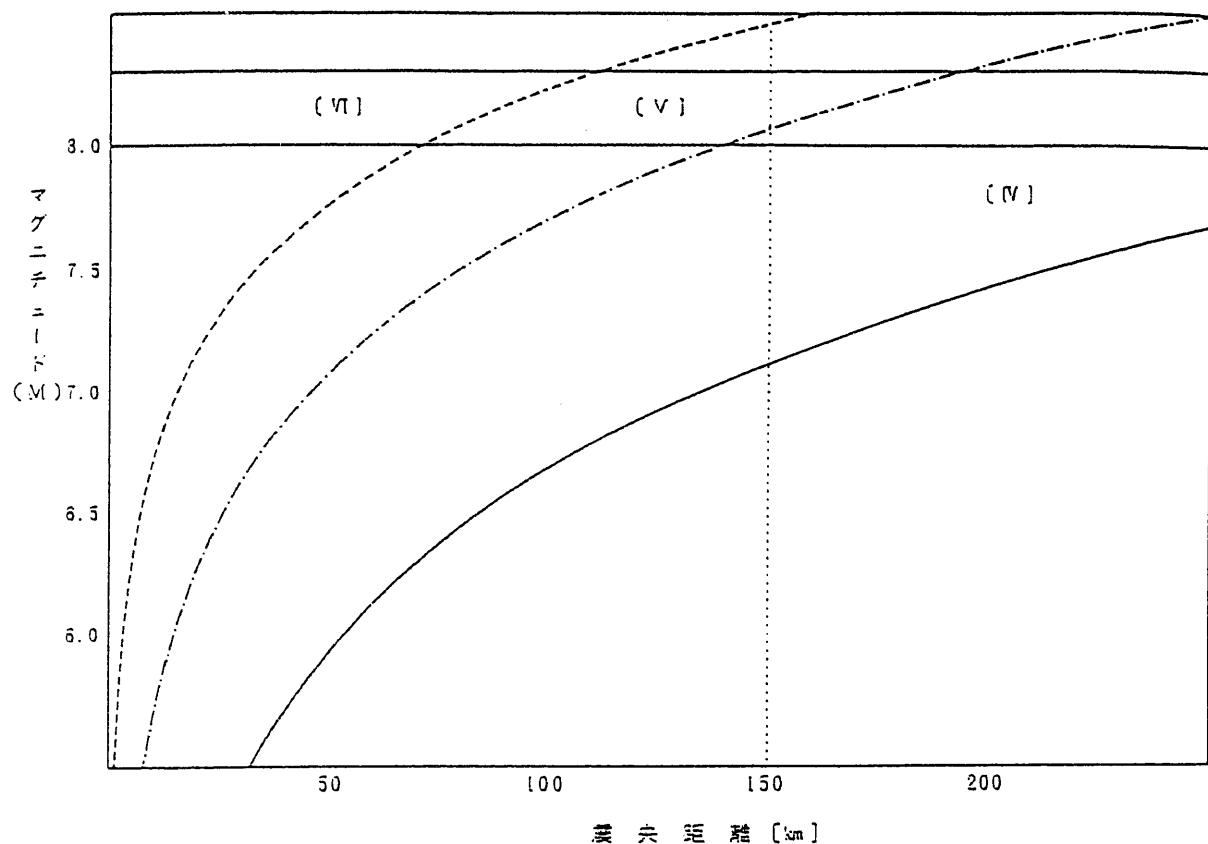
基準地震動 S_{1k} をもたらす設計用最強地震としては、歴史的資料から過去において敷地又はその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、敷地及びその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震（歴史地震）並びに近い将来に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きいものを想定する。

歴史地震の評価としては、実際に震度V以上の被害記録があるもののに他に、地震のマグニチュードと敷地までの震央距離の関係⁽⁷⁾ から、敷地に震度V以上の被害を与えたと推定されるものを選択し、設計用最強地震としている⁽⁸⁾。

図2-1に示すように、震央距離が150kmを超えるとマグニチュード8.0の地震でほぼ震度IVの領域に、震央距離が200kmを超えるとマグニチュード8.3の地震でほぼ震度IVの領域となり、震度即ち加速度領域の判定ではこれらの地震は設計用最強地震に選択されないことになる。

しかしながら、免震構造設計に必要な基準地震 S_{1k} の策定においては、表面波等のやや長周期地震動の卓越に留意する必要があることから、基準地震動 S_{1k} をもたらす地震に加え、震央距離が150kmを超える範囲におけるマグニチュード8.0以上の歴史地震についても設計用最強地震としての検討の対象とする。

同様に活動度の高い活断層による地震についても、基準地震動 S_{1k} をもたらす地震に加え、免震構造設計においては半径150kmを超える範囲にわたり検討の対象とする。



震央距離 [km]

(〔IV〕、〔V〕、〔VI〕は気象庁震度階級で
村松、島又ほかによる。)

図2-1 遠距離地震の敷地に対する影響（村松⁽⁷⁾に加筆修正）

2.2.2 設計用限界地震

基準地震動 S_2 をもたらす設計用限界地震としては、地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。

また、免震構造設計に必要となる基準地震動 S_{2k} の策定においては、基準地震動 S_2 をもたらす地震に加え、活断層については半径 150kmを超える範囲にわたり検討の対象とする他、当該地域における地震地体構造で想定される地震に加えて、隣接する地域の内、地震地体構造上最大のマグニチュードを与える地域の地震を想定するものとする。

なお、基準地震動 S_2 及び S_{2k} には直下地震によるものも含むものとする。

以上の地震と基準地震動の関係をまとめて表 2-1 に示す。

表 2-1 地震と基準地震動の関係

基準地震動	歴史地震	活断層による地震	備考
S_1	<ul style="list-style-type: none"> 震度V以上の被害 距離減衰式で震度V以上の評価 	<ul style="list-style-type: none"> A級活断層 1万年前以降に活動 微小地震の活動が顕著 	剛構造設計用
S_{1k}	<ul style="list-style-type: none"> 上記の地震 遠距離 ($\Delta \geq 150\text{km}$) で大規模 ($M \geq 8.0$) 地震 	<ul style="list-style-type: none"> 上記の活断層 上記以外の遠距離 ($\Delta \geq 150\text{km}$) の活断層 ($M \geq 8.0$) 	免震構造設計用

基準地震動	地震地体構造による地震	活断層による地震	直下地震	備考
S_2	<ul style="list-style-type: none"> プレートの運動や大規模な構造線から想定 	<ul style="list-style-type: none"> S_1 以外の A 級活断層 B～C 級活断層 5万年前以降に活動 	<ul style="list-style-type: none"> $M=6.5$, $X=10\text{km}$ 	剛構造設計用
S_{2k}	<ul style="list-style-type: none"> 上記の地震 隣接する地域で最大規模となる地域で想定される地震 	<ul style="list-style-type: none"> 上記の活断層 上記以外の遠距離の活断層 ($M \geq 8.0$) 	<ul style="list-style-type: none"> 上記の地震 	免震構造設計用

注) M : マグニチュード
 Δ : 震央距離
X : 震源距離

2. 3 基準地震動

本資料で対象とする免震建家は、下部基礎版、免震装置が設置される免震層及び上部構造からなり、その水平方向の等価固有周期は想定される地震動下において2～4秒程度である。

剛構造設計では耐震設計審査指針に基づき大崎の手法⁽⁸⁾により基準地震動を策定するが、その対象とする周期は0.02秒から2秒までである。そのため、2～4秒程度の周期を含む免震構造設計用の基準地震動を策定する必要がある。一般に、この免震構造の固有周期を含む1秒から10秒程度の周期はやや長周期と定義される。

やや長周期地震動を評価する場合には、地震によっては敷地において表面波が卓越する場合があることを考慮して、そのスペクトル特性等を評価しておく必要がある^{(3) (4) (5)}。その場合、やや長周期地震動のスペクトル特性は、深い地下構造の影響を受けるために、その影響を考慮するとともに、震源断層の影響も考慮した適切な方法によって基準地震動 S_{1k} 及び S_{2k} を策定することが必要となる。

基準地震動 S_{1k} 及び S_{2k} の策定にあたっては、図2-2に示すように、やや長周期地震動成分を含んだ精度の高い地震記録が当該敷地において得られているかどうか、また、当該敷地の地下構造の不整形性の影響が小さい単純な構造と見なし得るものかどうか⁽⁶⁾ 等の条件によって、種々の方法が選択される⁽¹⁷⁾。したがって、これらの条件に基づいて、適切と判断される手法を選択することが要求され、その場合、当面は複数の評価法に基づき基準地震動 S_{1k} 及び S_{2k} を策定することとする。

文献(11)では岩盤での地震動の周波数特性の評価手法として、前述の大崎の手法以外に小林の手法^{(5) (12) (13)}をあげている。

小林の手法は発電用原子炉施設や防災関係において使用実績があるが、対象とする周期は0.1秒から5秒程度と一般的な免震建家の固有周期を包絡する。さらに、既往文献^{(14) (15) (16)}によるとこの小林の手法の他にやや長周期の地震動の評価手法として、地震基盤表面での評価が可能な石田の手法(0.1秒～10秒で定義)^{(10) (17)}、表面波の評価が可能な工藤の手法(数秒～数十秒で定義)⁽¹⁸⁾、直接敷地の建家支持地盤での評価が可能な入倉の手法(0.1～10秒で定義)⁽¹⁹⁾等がある。これら代表的な評価手法の位置づけをAppendix-IIIに示す。

なお、小林の手法は、想定する断層面をいくつかの小要素に等分割し、その小要素毎に点震源を仮定し、小要素の地震動の応答包絡波形を重ね合わせることによって、地震基盤(せん断波速度が3km/s以上の岩盤)表面における速度及び加速度の最大値を予測する手法であり、断層の大きさや形状、破壊の伝播の方向等の影響も考慮することができる。小林の手法では、この地震動の包絡波形の予測に距離減衰式を用いており、その意味では経験的手法としての側面を有している。

石田の手法は、長周期領域でハスケルモデル、短周期領域では応力降下量によるスペクトル補正係数を用いる方法で、地震基盤表面において加速度フーリエスペクトルを設定し、模擬地震波を作成することができ、理論的手法と経験的手法を折衷した方法ともいえる。

工藤の手法は、多層構造である媒質中でせん断が発生した場合の理論地震動を解くことによって、地表面での表面波の予測を行うものであり、理論的手法といえる。

入倉の手法は、中小の地震記録を用いて地震の相似則から合成のためのパラメータを推定し、時間軸上で重ね合わせ観測地点での大地震の地震動波形を予測するものであり、半経験的手法といえる。

2.4 設計用入力地震動

設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* は、耐震設計審査指針に準拠し定められる基準地震動 S_1 及び S_2 の速度応答スペクトル（短周期領域の速度応答スペクトル）と、基準地震動 S_{1K} 及び S_{2K} の速度応答スペクトル（やや長周期領域の速度応答スペクトル）を建家の基礎底面においてスムーズに連動させたひとつの速度応答スペクトルに基づいて作成することを原則とする。

基準地震動 S_1 及び S_2 並びに基準地震動 S_{1K} 及び S_{2K} は、用いる方法により定義する位置が異なるため、各手法で作成された模擬地震波を建家の基礎底面まで上昇させ策定した速度応答スペクトルをスムーズに包絡することにより目標とする設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* の速度応答スペクトルを設定するものとする。また、設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* の模擬地震波を作成するにあたっては、その位相については、原則として一様乱数を用いることとする。

なお、鉛直地震に関して耐震設計審査指針の規定を準用する場合は、敷地地盤及び免震建家の上下動地震応答特性が耐震設計審査指針での想定と同程度のものであることを評価した上で適用するものとする。

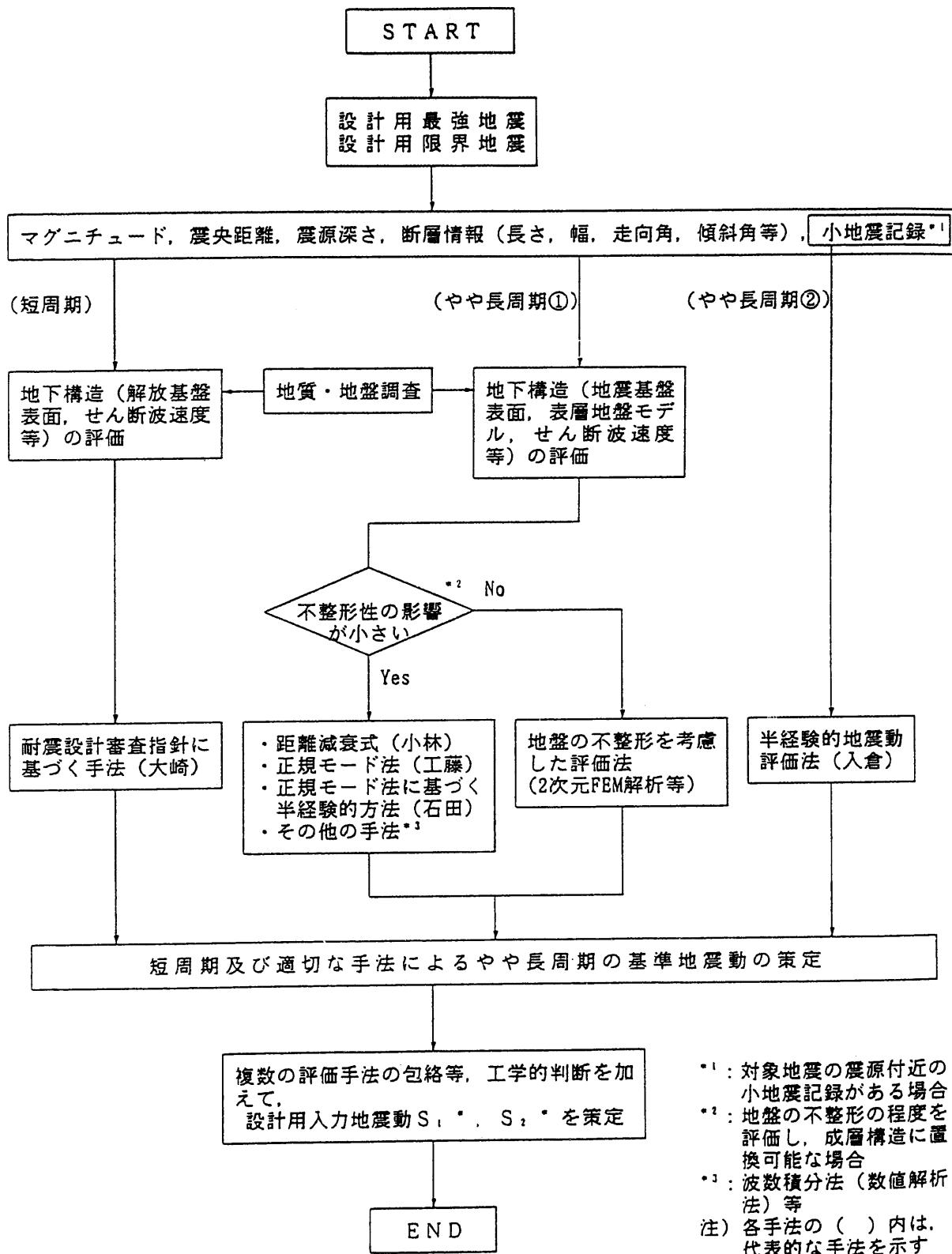


図 2-2 免震構造の設計用入力地震動の策定法

3. 基準地震動の策定

3.1 歴史地震

(1) 地震の活動性

茨城県及びその周辺地域の有史以来1993年までの被害地震の発生状況を調査した。調査に用いた主な文献は、「資料 日本被害地震総覧⁽²⁰⁾」、「被害地震の表と震度分布図⁽²¹⁾」、日本付近のM 6.0以上の地震および被害地震の表：(1982)⁽²²⁾、(1985)⁽²³⁾」、「新編 日本被害地震総覧⁽²⁴⁾」、気象庁「地震月報」(1981～1992)⁽²⁵⁾である。

図3-1は、1884年以前については文献(20)及び(24)より、1885年以後については文献(22)及び(23)により求めた敷地周辺及び遠方^{*1}で発生した地震の震央分布を示す。図示した地震は半径50km以内ではマグニチュードが6.0以上、50km超ではマグニチュードが7.0以上、150km超ではマグニチュードが8.0以上（一部8未満を含む）を有するものである。これらの地震のうちマグニチュードが6.5以上の地震について、地震規模、震央距離などを表3-1に示す。

(2) 敷地周辺の被害地震

家屋に被害が生ずる目安となるのは、震度V以上の地震であるが、図3-1に示したものについて、マグニチュード、震央距離及び気象庁震度階との関係⁽⁷⁾を図3-2に示す。これによれば、敷地に震度V以上の影響を与える可能性のある地震は、U-2、U-3及びU-12である。

また、表3-1に示すように、気象庁震度階で水戸における震度がV以上となっているのは、U-12、U-14及びU-15である。

これら5個の地震による被害状況を図3-3に示す。

さらに、やや長周期の地震動を評価する観点から、被害の程度に係わらず上記5個の地震に加えて、遠距離のマグニチュードが8.0以上となる地震番号131、149の地震を考慮するものとする。

なお、1980年以降、敷地に被害を与えたマグニチュードが6.0以上の地震はない。

*1：本報告では敷地から250km程度の範囲としている。

3.2 地震動の強さの統計的期待値

地震動の強さの統計的期待値を求めたものとして、河角マップ⁽²⁶⁾と金井マップ⁽²⁷⁾がある。

河角マップは地表での加速度期待値を、金井マップは基盤での限界速度分布を表している。それぞれのマップを図3-4及び図3-5に示す。

これらのマップによれば、地表での加速度期待値は、75年、100年及び200年でそれぞれ100～150gal、150gal、300galとなり、基盤での速度期待値は、同様に3cm/s、3～4cm/s、4cm/sとなる。

これとは別に、敷地基盤における地震動の強さの統計的期待値を次式により求めるものとする。

$$\frac{y}{Y} \sum_v^{\infty} N(V) = 1$$

ここで、

v : y 年間における最大速度振幅の期待値

y : 期待年数

$N(V)$: 速度振幅Vの頻度スペクトル

Y : 統計年間

図3-6に、地震資料が豊富となった1646年以降の70個の地震を対象に求めた統計的期待値を示す。同図によると 200年期待値は約5cm/sとなり、金井マップを若干上回るものとなっている。

3.3 活断層

活断層によって発生すると考えられる地震は以下を考慮する。

設計用最強地震に関して、地震の主な発生源としては、過去に地震が発生したと推定されるもの、A級活断層に属し10,000年前以降活動したもの、又は地震の再来期間が10,000年未満のもの、あるいは微小地震により断層の現在の活動性が顕著に認められるものとする。

設計用限界地震に関して、地震の主な発生源としては、上記を除きA級活断層に属するもの、あるいはB及びC級活断層に属し50,000年前以降活動したもの、又は地震の再来期間が50,000年未満のものとする。

敷地を中心として、「新編 日本の活断層－分布図と資料⁽²⁸⁾」、「50万分の1 活構造図（東京）⁽²⁹⁾」、「鹿島灘海底地質図（20万分の1）⁽³⁰⁾」、「地質学論集⁽³¹⁾」、「活断層について⁽³²⁾」の文献に示される断層について、歴史地震及び最近の微小地震について調査した結果、関谷断層以外には陸域及び海域ともに過去に地震が発生したと推定される断層がないこと（図3-7参照）、微小地震観測により現在の活動性が顕著と認められる断層がないことを確認した（図3-8⁽³³⁾参照）。設計用最強地震及び設計用限界地震として敷地に影響を与えると想定される活断層をまとめて表3-2に示す。同表より、設計用最強地震として、考慮すべき最も影響の大きな活断層は関谷断層である。

「新編 日本の活断層－分布図と資料」などに示される関谷断層については、活動度A級、確実度Iとされており、早川⁽³⁴⁾は、関谷付近より上流の筈川の河岸段丘の区分・対比から、その変位速度を1～2m／1,000年としている。さらに、関谷断層沿いでは、岩生・今井⁽³⁵⁾、加藤⁽³⁶⁾、日本自然保護協会⁽³⁷⁾らにより断層露頭が確認されている。岩生らによると、関谷断層の変位は西側の相対的隆起であり、断層の西側にある背斜の東翼が直立していることから、西側傾斜の逆断層と推定されている。この断層の北端付近では、福島県によって田島地域に関する地質調査⁽³⁸⁾が行われているが、栃木県と福島県の県境以北では、関谷断層の延長の存在は報告されていない。また、断層の可能性を示す地形的特徴も示されていない。南端に関しては矢板市の西方の寺山付近の宮川で断層露頭が確認されているが、それ以南では、明瞭なリニアメントも確認されていない。

これらから、関谷断層の全長を確実度のやや劣る中間部分も合わせて、約40kmであるとし、この区間に本断層の第四紀後期の活動を想定する。

また、付表3-2より設計用限界地震として考慮すべき活断層で、最大速度振幅が関谷断層を上回るものはない。

以上のことから、関谷断層による地震を設計用最強地震及び設計用限界地震として考慮する。

ここで、断層長さと地震のマグニチュードの関係を松田⁽³⁹⁾の式によって求めると、マグニチュードは7.5となる。

さらに、やや長周期の地震動評価の観点から、関谷断層に加え、遠距離のマグニチュードが8.0以上の地震が想定される日本海溝沿いの海域断層④を設計用最強地震として考慮する。その断層長さは約112kmであり、松田の式によりマグニチュードは約8.25となる。一方、当該地域の地震地体構造は表マップ⁽⁴⁰⁾によると8・1/4の延長上に当たること、日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模⁽⁴¹⁾によると7・1/2となることから、表マップの8・1/4を採用し、8.25と評価する。

なお、表3-2より設計用限界地震として考慮すべき活断層で、最大速度振幅が海域断層④を上回るものはないため、遠距離のマグニチュードが8.0以上の地震が想定される日本海溝沿いの海域断層④を設計用限界地震として考慮する。

3.4 地震地体構造

敷地周辺における地震の発生状況を概観すると、福島県沖及び茨城県沖の海域で発生している微小地震は、深さ0～30kmに帯状に分布しており、深さ30km～100kmでは、やや敷地に近い位置で発生している。この分布は、太平洋プレートとユーラシアプレートの境界位置と対比することができる。一方、福島県沖（一部宮城県沖）から茨城県沖にかけての海域に発生した過去におけるマグニチュードが6.0以上の被害地震を、マグニチュードと震央距離について整理した結果を図3-9に示す。マグニチュードが7.0以上の地震は、震央距離35km以上の位置において発生している。過去に発生したマグニチュードが7.0以上の地震は、いずれも太平洋プレートとユーラシアプレートの境界での破壊現象に伴う地震であると考え、このタイプの最大の地震としては、文献(40)及び(41)（図3-10）に基づき、マグニチュードが7・3/4の地震が震央距離35kmの位置に発生することを想定する。

以上により、地震地体構造上の地震としてマグニチュードが7・3/4、震央距離35kmとし、震源深さはこの位置における太平洋プレート上面の深さがほぼ50kmと想定されること⁽⁴²⁾、微小地震の分布が30km～50kmの深さで密度が高いことを総合的に勘案して、安全側に30kmに設定する。

さらに、やや長周期の地震動評価の観点から、敷地を含む地域に隣接する地域の内、最も大きな影響を与えるものとして文献(28)及び(29)に基づき、遠距離のマグニチュードが8.0以上の地震として、宮城県沖地震（U-19）の震央位置にマグニチュードが8.5の地震を想定する。

3.5 基準地震動の策定

敷地において策定すべき基準地震動は以下の2種類に分類される。

- (1) 従来の耐震設計で用いられている大崎の手法による基準地震動
- (2) 免震構造の固有周期に対応するやや長周期成分を考慮した小林の手法による基準地震動

3.5.1 基準地震動 S_1 、 S_{1K} の策定

- (1) 解放基盤表面における基準地震動 S_1

当該敷地において策定すべき基準地震動 S_1 は、過去の歴史地震のうち敷地周辺に震度V以上の影響を及ぼしたもの及び関谷断層を考慮して、下表に示す6個の地震によって求めるものとし、地震動の当該敷地の解放基盤表面での最大速度 V_0 は金井式によって求めるものとする。

番号	発生年月日	震源地名	地震規模M	震央距離Δ(km)	震源深さH(km)	最大速度 V_0 (cm/s) ^{*1}
U-2	1895年 1月18日	茨城県南部	7.2	42	50	4.2
U-3	1896年 1月 9日	茨城県沖	7.5	35	50	7.2
U-12	1930年 6月 1日	茨城県沿岸	6.5	15	30	4.0
U-14	1938年 5月23日	茨城県沖	7.0	90	0	2.0
U-15	1938年 9月22日	茨城県沖	6.5	37	30	2.4
F-1	——	関谷断層	7.5 ^{*2}	86	16.5	4.1

* 1) 解放基盤表面での最大速度 V_0 は金井式による⁽⁴³⁾。

$$V_0 = 10^{0.61M - (1.66 + 3.60/X) \log X - (0.631 + 1.83/X)}$$

M : 地震のマグニチュード
 X : 震源距離 (km)

* 2) 関谷断層の地震規模は松田式による⁽³⁹⁾。

$$M = \frac{1}{0.6} (\log L + 2.9)$$

M : 地震のマグニチュード
 L : 断層長さ (km)

また、地震動の周波数特性は大崎の設計用速度応答スペクトルにより与えるものとし、これら6個の地震動の速度応答スペクトルを図3-11に示す。そのうち、すべての速度応答スペクトルを包絡しているU-3の速度応答スペクトルを目標とする基準地震動 S_1 の速度応答スペクトルとする。

さらに、基準地震動 S_1 の継続時間及び振幅包絡線の経時的变化は久田式⁽⁴⁴⁾により、また、位相は一様乱数にて規定するものとする。

以上の結果、作成した基準地震動 S_1 の最大速度、最大加速度、スペクトル強さ比（S I 比）及び目標とする速度応答スペクトルに対する基準地震動 S_1 の速度応答スペクトルの比を下表に、速度応答スペクトルの適合度を図 3-12に示す。また、その加速度及び速度波形を図 3-13に示す。

基準地震動	最大速度 V_{max} (cm/s)	最大加速度 A_{max} (gal)	S I 比	最大応答 スペクトル比 $SV(T)/SV_o(T)$
S_1	9.4	146.1	1.00	$0.85 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.27$

ただし、 $S I \geq 1.0$ 、 $SV(T)/SV_o(T) \geq 0.85$ とする⁽⁴⁵⁾。

ここで、

$$S I \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} SV(T)dT}{\int_{0.1}^{2.5} SV_o(T)dT}$$

S I : スペクトル強さ

SV : 基準地震動の速度応答スペクトルの速度応答値

SV_o : 目標とする速度応答スペクトルの速度応答値

T : 周期

(2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K}

翠川・小林⁽¹²⁾によれば、周期0.2秒以上ではマグニチュードが5～6で周期の増大とともに速度応答量は減少し、マグニチュードが7～8で増大する他、一般的な傾向としてマグニチュードが大きい程、また震源距離が大きい程、短周期成分に対するやや長周期成分の速度応答量の比は大きくなるとしている。したがって、当該敷地において策定すべき基準地震動 S_{1K} は、(1)に示す基準地震動 S_1 をもたらす6個の地震に加えて、遠距離のマグニチュード8.0以上の地震として131、149及び日本海溝沿いの活断層（F-2）を想定する。

小林の手法を適用するために設定した地震の規模と断層の諸元を下表に示す。

番号	発生年月日	震源地名	地震規模 M	震央距離 Δ (km)	震源深さ H (km)	断層長さ [*] L (km)	断層の幅 ^{**} W (km)
U-2	1895年 1月18日	茨城県南部	7.2	42	50	52	26
U-3	1896年 1月 9日	茨城県沖	7.5	35	50	75	37.5
U-12	1930年 6月 1日	茨城県沿岸	6.5	15	30	23	11.5
U-14	1938年 5月23日	茨城県沖	7.0	90	0	42	21
U-15	1938年 9月22日	茨城県沖	6.5	37	30	23	11.5
F-1	——	関谷断層	7.5	86	16.5	40 ^{*2}	33 ^{*2}
131	1677年11月 4日	千葉県東方沖	8.0	163	——	132	66
149	1703年12月31日	房総半島沖	8.2	206	——	166	83
F-2	——	海域断層④	8.25 ^{*3}	195	30	112 ^{*3}	56

* 1) 断層長さは、 $L = 10^{0.5M - 1.88}$ 、断層の幅は、 $W = L / 2$ とする⁽⁴⁶⁾。

ただし、関谷断層については長さを40km、幅を33kmとした。

* 2) 関谷断層については長さを40km、幅は下式⁽¹⁾ の2倍とする。

$$D = 10^{0.353M - 1.435}$$

* 3) 海域断層④については長さを 112kmとした。地震規模は文献(40)による。

小林の手法は、想定する断層面をいくつかの小要素に等分割し、その小要素毎に点震源を仮定し、小要素の地震動の応答包絡波形を重ね合わせることによって、地震基盤（せん断波速度が3km/s以上の岩盤）表面における速度及び加速度の最大値を予測する手法であり、断層の大きさや形状、破壊の伝播の方向等の影響も考慮することができる。

小林の手法により求められた、これら地震動の速度応答スペクトルを図3-14に示す。同図より、U-3の速度応答スペクトルは、F-2を除いた全ての速度応答スペクトルを包絡していることが分かる。したがって、U-3の速度応答スペクトルを目標とする基準地震動S_{IK-M}の、F-2の速度応答スペクトルを目標とする基準地震動S_{IK-F}の速度応答スペクトルとする。

ただし、

$$\log SV_o(T) = a(T) \cdot (\log M_0 - 26.6) - b(T) \cdot \log X + 2.36^{(13)}$$

ここで、

$SV_o(T)$: 速度応答スペクトル（減衰5%）(cm/s)

M_0 : 地震モーメント

X : 震源距離 (km)

a(T), b(T) : 個々の地震の地震基盤における最小自乗法により求めた係数

以上の結果、作成した基準地震動 $S_{IK}-M$ 、 $S_{IK}-F$ の最大速度、最大加速度、スペクトル強さ比（S I 比）、目標とする速度応答スペクトルに対する基準地震動 $S_{IK}-M$ 、 $S_{IK}-F$ の速度応答スペクトルの比を下表に、速度応答スペクトルの適合度を図3-15に示す。また、その加速度及び速度波形を図3-16に示す。

基準地震動	最大速度 V_{max} (cm/s)	最大加速度 A_{max} (gal)	S I 比	最大応答 スペクトル比 $SV(T)/SV_o(T)$
$S_{IK}-M$	13.3	119.2	1.01	$0.95 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.10$
$S_{IK}-F$	14.5	75.2	1.00	$0.87 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.59$

ただし、 $S I \geq 1.0$ 、 $SV(T)/SV_o(T) \geq 0.85$ とする^(4,5)。

ここで、

$$S I \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{10.0} SV(T)dT}{\int_{0.1}^{10.0} SV_o(T)dT}$$

3.5.2 基準地震動 S_2 、 S_{2K} の策定

(1) 解放基盤表面における基準地震動 S_2

当該敷地において策定すべき基準地震動 S_2 は、地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものにより想定する。なお、直下地震によるものもこれに含む。

これら想定した設計用限界地震を下表に示す。ただし、設計用限界地震において考慮すべき活断層については、設計用最強地震において考慮した関谷断層の最大速度振幅を上回るものがないことから、関谷断層より想定される地震を考慮する。

設計用 限界地震	マグニチュード M	震央距離 Δ (km)	震源深さ H (km)	最大速度 V_0 (cm/s)
地震地体構造	7.75	35	30	14.6
直下地震	6.5	7	7.2	13.5
関谷断層	7.5	86	16.5	4.1

基準地震動 S_1 と同様に大崎の手法により求めた直下地震、地震地体構造及び関谷断層に対応する速度応答スペクトルを図3-17に示す。そのうち関谷断層に対応する速度応答スペクトルを包絡している地震地体構造の速度応答スペクトル並びに直下地震に対応する速度応答スペクトルを、目標とする基準地震動 S_2 の速度応答スペクトルとし、それぞれ基準地震動 S_2-M 並びに S_2-N とする。

また、基準地震動 S_2-M 、 S_2-N の最大加速度、スペクトル強さ比 (S I 比)、目標とする速度応答スペクトルに対する基準地震動 S_2-M 、 S_2-N の速度応答スペクトルの比を次表に、速度応答スペクトルの適合度を図3-18に示す。また、その加速度及び速度波形を図3-19に示す。

基準地震動	最大速度 V _{max} (cm/s)	最大加速度 A _{max} (gal)	S I 比	最大応答 スペクトル比 SV(T)/SV _o (T)
S ₂ - M	16.1	270.0	1.00	$0.89 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.29$
S ₂ - N	13.8	370.0	1.00	$0.89 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.24$

ただし、S I ≥ 1.0 、 $SV(T)/SV_o(T) \geq 0.85$ とする^(4,5)。

ここで、

$$S\text{ I 比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} SV(T)dT}{\int_{0.1}^{2.5} SV_o(T)dT}$$

(2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K}

当該敷地において策定すべき基準地震動 S_{2K}をもたらす地震は、基準地震動 S₂で想定した3個の地震に加えて、遠距離のマグニチュードが8.0以上として海域断層④(F-2)及び地震地体構造の観点から、敷地を含む地域に隣接する地域のうち、最も大きなマグニチュードとなる宮城県沖にマグニチュードが8.5の地震を想定する。また、その震央位置は過去の同地域の地震のうち敷地に最も近くなるU-19(1978年6月12日の宮城県沖地震)の震央位置に想定する。

小林の手法を適用するために設定した地震の規模と断層の諸元を下表に示す。

設計用 限界地震	マグニチュード M	震央距離 Δ (km)	震源深さ H (km)	断層長さ L (km)	断層の幅 W (km)
地震地体構造	7.75	35	30	99	49.5
関谷断層(F-1)	7.5	86	16.5	40	33
直下地震	6.5	7	7.2	23	11.5
海域断層④(F-2)	8.25	195	30	112	56
隣接地震地体構造	8.5	235	37	235	117.5

以上によって求めた地震地体構造、関谷断層に対応する速度応答スペクトルを図3-20に示す。同図より、地震地体構造の速度応答スペクトルは直下地震を除いた他の地震の速度応答スペクトルを包絡していることが分かる。

したがって、地震地体構造の速度応答スペクトルを目標とする基準地震動 $S_{2K}-M$ の、直下地震の速度応答スペクトルを目標とする基準地震動 $S_{2K}-N$ の速度応答スペクトルとする。

以上の結果、作成した基準地震動 $S_{2K}-M$ 、 $S_{2K}-N$ の最大速度、最大加速度、スペクトル強さ比（S I 比）、目標とする速度応答スペクトルに対する基準地震動 $S_{2K}-M$ 、 $S_{2K}-N$ の速度応答スペクトルの比を下表に、速度応答スペクトルの適合度を図3-21に示す。また、その加速度及び速度波形を図3-22に示す。

基準地震動	最大速度 V_{max} (cm/s)	最大加速度 A_{max} (gal)	S I 比	最大応答 スペクトル比 $SV(T)/SV_0(T)$
$S_{2K}-M$	19.1	203.0	1.01	$0.85 \leq \frac{SV(T)}{SV_0(T)} \leq 1.25$
$S_{2K}-N$	23.0	280.9	1.04	$0.86 \leq \frac{SV(T)}{SV_0(T)} \leq 1.14$

ただし、 $S I \geq 1.0$ 、 $SV(T)/SV_0(T) \geq 0.85$ とする⁽⁴⁵⁾。

ここで、

$$S I \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{10.0} SV(T) dT}{\int_{0.1}^{10.0} SV_0(T) dT}$$

4. 免震構造を採用した施設の 設計用入力地震動の策定方法

本施設に用いる設計用入力地震動の策定は、基準地震動 S_1 及び S_2 並びに S_{1K} 及び S_{2K} 、さらに、表面波が卓越する可能性のある遠距離のマグニチュードが8.0以上の地震による地震動に基づき以下の手順により行う⁽⁴⁷⁾。

- ① 剛構造設計で用いている大崎の手法による基準地震動 S_1 及び S_2 の速度応答スペクトルを、解放基盤表面 GL - 280m ($V_s = 1,200 \text{m/s}$) で定義し、それぞれの模擬地震波を作成する。
- ② やや長周期領域を考慮した小林の手法による基準地震動 S_{1K} 及び S_{2K} を、地震基盤表面 GL - 1,630m ($V_s = 3,000 \text{m/s}$) で定義し、それぞれの模擬地震波を作成する。
- ③ 基準地震動 S_{1K} 及び S_{2K} をもたらす地震に対して、石田の手法により地震動 S_{11} 及び S_{21} を作成する(図4-1及び図4-2)。
- ④ 上記①、②、③で作成した模擬地震波を本建家の基礎底面まで重複反射理論を用いて上昇させ、建家の基礎底面におけるそれぞれの地震動の速度応答スペクトルを求める。ただし、建家の基礎底面まで上昇させた場合、上記手法の定義域外のスペクトルを持つ地震動が生成されるため、本施設では、周期10秒までの範囲におけるスペクトル特性についても考慮するものとする。なお、解放基盤表面及び地震基盤表面から地表面までの地盤モデルについては、P波屈折法探査並びにP-S検層の結果を基に、建家の地震応答が厳しくなるように定めるものとする(図4-3)。
- ⑤ 工藤の手法及び入倉の手法により、基準地震動 S_{1K} 並びに S_{2K} をもたらす地震及び遠距離のマグニチュードが8.0以上の地震による地震動の建家の基礎底面における速度応答スペクトルを求める。
ただし、近距離の地震では表面波は卓越しないと考えられるので、工藤の手法はこれを適用しない他、入倉の手法についても適切な小地震記録がない場合はこれを適用しない。
- ⑥ ④で求めた地震動の速度応答スペクトル及び⑤で求めた速度応答スペクトルをスムーズに包絡し、表面波の影響を評価した上で目標とする免震構造設計用の速度応答スペクトルを設定し、これを用いて設計用入力地震動を作成する。

この概念図及び策定フローを図4-4及び図4-5に示す。また、建家の基礎底面において小林の手法、石田の手法、工藤の手法及び入倉の手法により求められる速度応答スペクトルを図4-6に、大崎の手法により求められた速度応答スペクトルを加えて設定した免震構造設計用の目標とする速度応答スペクトルを図4-7に示す。

この速度応答スペクトルを基に、位相特性を一様乱数として作成した設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* の加速度及び速度波形を図 4-3 及び図 4-9 に、最大加速度、最大速度スペクトル強さ比等をまとめて表 4-1 に、速度応答スペクトルの適合度を図 4-10 に示す。

また、剛構造設計の設計用入力地震動の諸元については表 4-2 に示す。

なお、小林、石田、工藤、入倉の各手法の概略を Appendix-IV に示す。

5. ま と め

耐震重要度分類A s クラスの再UC施設建家に免震構造を採用することに伴い免震構造設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* を策定した。

策定に当たって、従来の剛構造を対象とした地震に加え、新たに遠距離の大地震を含めた地震を考慮した。これは地震よっては、震源が浅くある程度の距離がある場合表面波が成長し免震構造の固有周期と一致する恐れがあるためである。また、やや長周期地震動を評価可能な断層モデルについて、複数の手法を用いこれらを包絡する事により安全側に評価した。これらの評価手法による地震動は、地震基盤において規定されるもの、地表面において規定されるものに別れるが、敷地及び敷地周辺の地盤の速度構造を地質調査、弾性波探査等の結果により適切に設定することにより評価可能となる。

以上により、東海事業所における免震構造設計用入力地震動を最新の知見に基づいて策定したことにより、従来の剛構造と同等な安全性を確保することが可能となったと考える。

なお、本報告書に示した考え方、方法は他の原子力施設に免震構造を採用する場合にも十分適用可能と考えられる。

(今後の課題)

現在の最新の知見に基づき、種々の手法を用いてやや長周期地震動の評価を行ったが、近年の計算機能力の飛躍的向上、計算技術の向上等により、かなり詳細な解析手法も提案されており、このような手法に対する継続的な検討を行うことが必要である。

また、現状に満足することなく、今後のさらなる地震観測の蓄積により、上下動をも考慮した多面的な検討を行っていく必要がある。

(参考文献)

- (1) 宇津徳治他編集：“地震の辞典”，朝倉書店，p. 330，(1994)
- (2) 日本建築学会：“地震動と地盤”，pp. 319-329，(1983)
- (3) 岡田成幸，鏡味洋史：“日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み”，日本建築学会論文報告集 267号 (1978)
- (4) 工藤一嘉，嶋 悅三：“日本各地における地震動の増幅特性（周期3～15秒）”，第7回日本地震工学シンポジウム (1986)
- (5) 小林啓美，長橋純男：“地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質”，日本建築学会論文報告集 240号，pp. 79-92，(1976)
- (6) 堀家正則：“複数の曲がった境界を有する減衰のある媒質の地震動応答計算法へのAL法の拡張とそれを用いた堆積盆地の地震動の特性”，地震第2輯，40 (1987)
- (7) 村松郁栄：“震度分布と地震のマグニチュードとの関係”，岐阜大学教育学部研報告，(1969)
- (8) 日本電気学会：“原子力発電所耐震設計技術指針 (JBAG 4601)”，pp. 352-356，(1987)
- (9) 大崎順彦：“原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン”，大崎総合研究所研究報告84-01，(1984)
- (10) 石田勝彦：“強震地動スペクトル特性の評価に関する一考察”，日本建築学会論文報告集，第314号，pp. 48～58，(1982)
- (11) 日本電気協会：“原子力発電所耐震設計技術指針 (JBAG 4601)”，pp. 56-61，(1987)
- (12) 翠川三郎，小林啓美：“地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質”，日本建築学会論文報告集，第273号，pp. 43-52，(1978)
- (13) 小林啓美，翠川三郎：“半試験式に基づく震源域近傍での地震動スペクトルの推定”，第18回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集，p. 79，(1981)
- (14) 日本電気学会：“原子力発電所耐震設計技術指針 (JBAG 4601-1991追補版)”，pp. 11-15，(1991)
- (15) 日本建築協会：“地震荷重－地震動の予測と建築物の応答”，pp. 14-73，(1992)
- (16) 瀬川・金子：“やや長周期地震動の評価方法の検討”，地震学会，(1992)
- (17) 石田勝彦，矢花修一，増子芳夫，佐々木俊二：“免震設計された発電用原子炉施設設計用地震入力の一提案”，電力中央研究所報告・研究報告U93063，(1994)
- (18) 工藤一嘉：“長周期構造物への地震入力に関連した表面波の評価”，第5回日本地震工学シンポジウム，pp. 273～280，(1978)

- (19) 入倉孝次郎：“震源のモデル化と強震動予測”，地震第2輯，第46巻, pp. 495-512, (1994)
- (20) 宇佐美龍夫：“資料 日本被害地震総覧”，東京大学出版会, (1981)
- (21) 気象庁：“被害地震の表と震度分布図”，(1983)
- (22) 宇津徳治：“日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885～1980年”，東京大学地震研究所彙報, Vol. 57, pp. 401-463, (1982)
- (23) 宇津徳治：“日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表1885～1980年（訂正と追加）”，東京大学地震研究所彙報, Vol. 60, pp. 639-642, (1985)
- (24) 宇佐美龍夫：“新編 日本被害地震総覧”，東京大学出版会, (1987)
- (25) 気象庁：“地震月報”，(1981～1992)
- (26) 河角 廣：“わが国における地震危険度の分布”，東京大学地震研究所彙報, Vol. 29, (1951)
- (27) 金井 清 他：“日本における建物に震害を受けた度数の分布”，東京大学地震研究所彙報, Vol. 28, (1950)
- (28) 活断層研究会編：“新編 日本の活断層－分布図と資料”，東京大学出版会, (1991)
- (29) 地質調査所：“50万分の1 活構造図（東京）”，(1982)
- (30) 海上保安庁：“鹿島灘海底地質図（20万分の1）”，(1986)
- (31) 松田時彦：“活断層と地震－その地質学的研究”，地質学論集, 第12号, (1976)
- (32) 垣見俊弘 他：“活断層について”，地質調査所, (1978)
- (33) 科学技術庁防災科学技術研究所：微小地震データ, (1989～1993)
- (34) 早川唯弘：“筑波上流域における河岸段丘の発達と関谷断層の活動”，活断層研究, pp. 41-53, (1985)
- (35) 岩生周一, 今井功：“塩原図幅地質説明書”，地震調査所, (1955)
- (36) 加藤祐三：“那須火山の岩石学的研究”，岩石鉱物鉱床学会誌, Vol. 51, p. 233-242, (1964)
- (37) 日本自然保護協会編：“日光国立公園沼原揚水発電計画に関する調査報告書”，(1971)
- (38) 福島県：“田島地域の地質”，福島県地質調査報告, (1973)
- (39) 松田時彦：“活断層から発生する地震の規模と周期について”，地震第2輯, Vol. 28, pp. 269-283, (1975)
- (40) Omote, S. et al. : “A new Proposal for Estimating the Expected Maximum Earthquake Force at a Nuclear Power Plant Site”, Proceedings of the Second South Pacific Regional Conference on Earthquake Engineering, Victoria University Wellington, 1979

- (41) 垣見俊弘, 岡田篤正, 衣笠善博, 松田時彦, 米倉伸之：“日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模”，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集 F21-01，(1994)
- (42) 萩原尊禮編：“日本列島の地震 地震工学と地震地体構造”，鹿島出版会，(1991)
- (43) 金井 清：“地震動・地盤振動, 建築構造学大系 1 地震工学”，彰国社，(1968)
- (44) Hisada, T. & Ando, H. : “Relation between Duration of Earthquake Ground Motion and the Magnitude”, Kajima Institute of Construction Technology, (1976)
- (45) 日本電気協会：“原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-1987) ”，p. 66
- (46) 佐藤良輔：“日本の地震断層パラメター・ハンドブック”，鹿島出版会(1989)
- (47) 瓜生 満：“核燃料施設への免震技術の適用”，原子力工業, Vol. 40, No. 8, pp. 63-71, (1994)

表3-1 敷地周辺に影響を与えた地震

地震番号		年月日	震央		深さ (km)	マグニチュード M	震央距離 △(km)	気象庁震度 (水戸)	備考
宇津	宇佐美		°E	°N					
—	131	1677. 11. 4	142.0	35.5	—	8.0	163	—	千葉県東方沖
—	134	1683. 6. 18	139.65	36.75	—	7.3	92	—	日光
—	149	1703. 12. 31	139.8	34.7	—	8.2	206	—	房総半島沖 (元禄関東地震)
U-1	—	1894. 6. 20	139.8	35.7	S	7.0	109	IV	東京都東部
U-2	—	1895. 1. 18	140.4	36.1	S	7.2	42	IV	茨城県南部
U-3	—	1896. 1. 9	141	36.5	S	7 1/2	35	IV	茨城県沖
U-4	—	1905. 7. 7	141.8	37.4	S	7 3/4	150	III	福島県沖
U-5	—	1921. 12. 8	140.2	36.0	S	7.0	61	IV	茨城県南西部
U-6	—	1923. 6. 2	142	35.9	S	7.3	140	—	茨城県沖
U-7	—	1923. 6. 2	142	36	S	7.1	135	—	茨城県沖
U-8	—	1923. 9. 1	139.5	35.1	S	7.9	180	IV	相模湾 (関東大地震)
U-9	—	1923. 9. 1	139.8	35.4	S	7.0	136	—	東京湾
U-10	—	1924. 8. 15	141.6	36.2	S	7.1	93	III	茨城県沖
U-11	—	1924. 9. 18	140.2	36.3	S	6.6	40	III	茨城県中部
U-12	—	1930. 6. 1	140.62	36.57	30	6.5	15	V	茨城県沿岸
U-13	—	1931. 6. 23	141.05	36.47	10	6.6	40	III	茨城県沖
U-14	—	1938. 5. 23	141.58	36.65	0	7.0	90	V	茨城県沖
U-15	—	1938. 9. 22	141.02	36.40	30	6.5	37	V	茨城県沖
U-16	—	1938. 11. 5	141.65	37.28	30	7.3	132	IV	福島県沖
U-17	—	1938. 11. 14	141.5	37	60	7.0	100	I	福島県沖
U-18	—	1942. 11. 16	141.12	36.37	20	6.5	47	III	茨城県沖
U-19	—	1978. 6. 12	142.17	38.15	40	7.4	235	IV	宮城県沖 (宮城県沖地震)

注) 「深さ」の欄のSは、プレート境界又はその近くの地震。

この表は、「資料 日本被害地震総覧」又は「新編 日本被害地震総覧」(1884年以前)

「日本付近のM 6.0 以上の地震及び被害地震の表」(1885年以後)による。

表3-2 敷地周辺の活断層

断層名		震央距離 (km)	1) 確実度	2) 活動度	長さ (km)	3) マグニチュード (M)	最大速度 振幅 (cm/s)
陸域	関谷断層	86	I	A	40	7.5	4.1
	綾瀬川断層	102	II~III	B~C	35	7.4	2.9
	大阪-足沢断層	94	II	B~C	10	6.5	0.9
	二ツ箭断層	84	II	B	6	6.1	0.6
	赤井断層	74	II	C	5	6.0	0.6
	湯ノ岳断層	66	II	B	6	6.1	0.9
	井戸沢断層	59	II	-	10	6.5	1.8
海域	海域断層①	83		B	31	7.3	3.4
	海域断層②	105		B	33	7.4	2.8
	海域断層③	36		B	8	6.3	2.6
	海域断層④	195		A	112	8.25	3.5

(注)

1)確実度 I : 活断層であることが確実なもの

II : 活断層であると推定されるもの

III : 活断層の可能性があるが、変位の向きが不明であったり、他の原因
も考えられるもの2)活動度 A : 平均変位速度（認定に用いた第四紀の基準地形や第四紀層の変位量
をその形成時から現在までの年数で割った値）が 1m/1,000年以上
10m/1,000年未満のもの

B : 平均変位速度が 0.1m/1,000年以上 1m/1,000未満のもの

C : 平均変位速度が 0.01m/1,000年上 0.1m/1,000年満のもの

なお、海域断層については崖高200m以上をA、崖高200m未満をBとした。

3)マグニチュード (M)

松田式 $\log L = 0.6 M - 2.9$ (L : 断層長さ) より算出

ただし、海域断層④については文献(28)による。

表 4-1 免震構造設計における設計用入力地震動の諸元

設計用入力地震動	建家の基礎底面での最大値		S I 比	最大応答スペクトル比 $SV(T)/SV_o(T)$	位相特性
	最大加速度 (gal)	最大速度 (cm/s)			
S_1^*	270	39.5	1.01	$0.92 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.15$	一様乱数
S_2^*	511	59.9	1.03	$0.94 \leq \frac{SV(T)}{SV_o(T)} \leq 1.32$	一様乱数

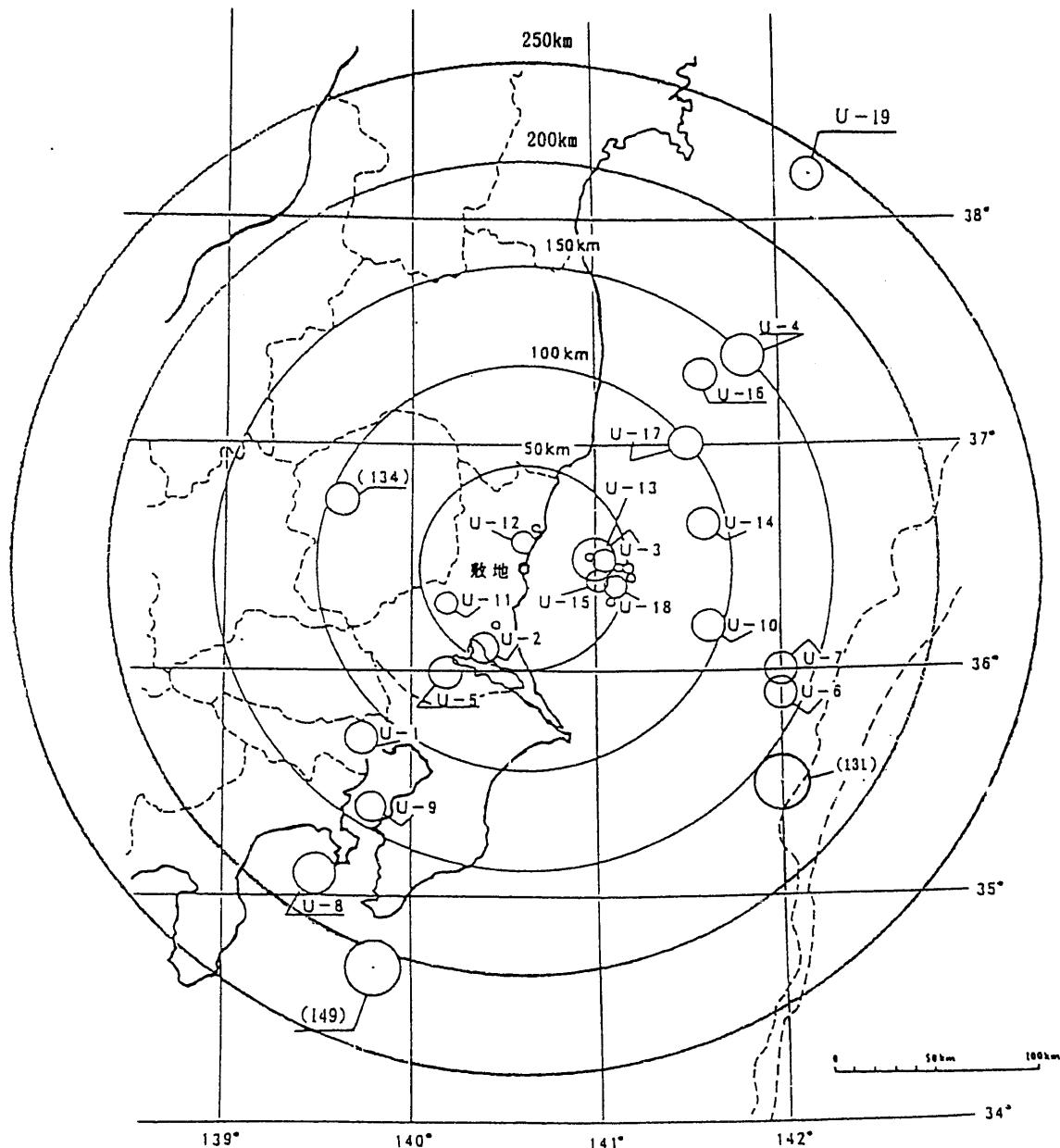
ただし、 $S I \geq 1.0$ 、 $SV(T)/SV_o(T) \geq 0.85$ とする⁽³³⁾。

ここで、

$$S I \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{10.0} SV(T) dT}{\int_{0.1}^{10.0} SV_o(T) dT}$$

表 4-2 剛構造設計における設計用入力地震動の諸元

No.	設計用入力 地震動 S_1 及び S_2	建家の基礎底面での最大値		位相特性	備考
		最大加速度 (gal)	最大速度 (cm/s)		
1	$S_1(R)$	184	11.5	一様乱数	$S_1(R)$ は大崎の手法で作成した基準地震動 S_1 を解放基盤表面(GL-280m) から建家の基礎底面(GL-5m) まで上昇させたもの。
2	$S_2 - N(R)$	379	17.2	一様乱数	$S_2 - N(R)$ は大崎の手法で作成した基準地震動 $S_2 - N$, $S_2 - M$ を解放基盤表面(GL-280m) から建家の基礎底面(GL-5m) まで上昇させたもの。
3	$S_2 - M(R)$	332	22.0	一様乱数	$S_2 - M(R)$ は大崎の手法で作成した基準地震動 $S_2 - N$, $S_2 - M$ を解放基盤表面(GL-280m) から建家の基礎底面(GL-5m) まで上昇させたもの。



U - 1 ~ U - 19は文献(9)より作成

() の数字は文献(7), (11)の地震番号

半径 5.0 km 以内は Mが 6 以上

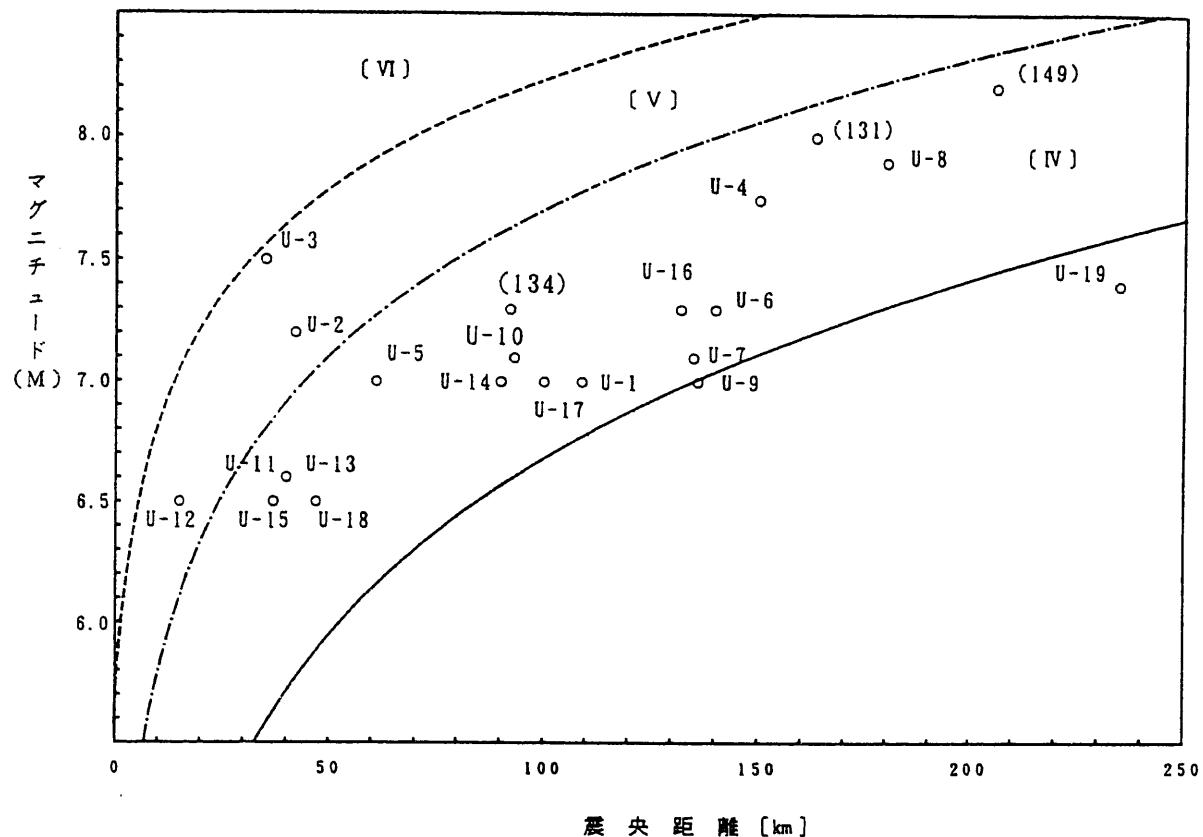
(ただし Mが 6.5 未満は番号を付していない)

半径 5.0 km 超は Mが 7 以上, 半径 15.0 km 超は

Mが 8 以上 (一部Mが 8 未満を含む) を表示してある

M : マグニチュード
 凡例
 ○ $6.0 \leq M < 6.5$
 ○ $6.5 \leq M < 7.0$
 ○ $7.0 \leq M < 7.5$
 ○ $7.5 \leq M < 8.0$
 ○ $8.0 \leq M < 8.5$

図 3 - 1 歴史地震の震央分布と規模



(〔IV〕, 〔V〕, 〔VI〕は気象庁震度階級で
村松, 勝又ほかによる。)

図3-2 マグニチュード, 震央距離及び気象庁震度階の関係

1 U-2

312 1895 I 18 (明治 28) 22 時 48 分 震ヶ浦付近 $\lambda=140.4^{\circ}\text{E}$ $\varphi=36.1^{\circ}\text{N}$ (B) $M=7.2$ 局部的被害はそれほど大きいとはいえないが被災範囲が広い。とくに被害の大きかったのは茨城県の鹿島・新治・那珂・行方各郡と水戸で、東京の下町にもかなりの被害があった。このほか、千葉県では銚子で小被害、松戸で土蔵の落壁および亀裂あり、取手で土蔵の半潰1、土蔵壁の破損、佐原町では倒壊家屋1、その他土蔵の破損等數十。また、福島県猪苗代・群馬県佐位郡でも小被害。

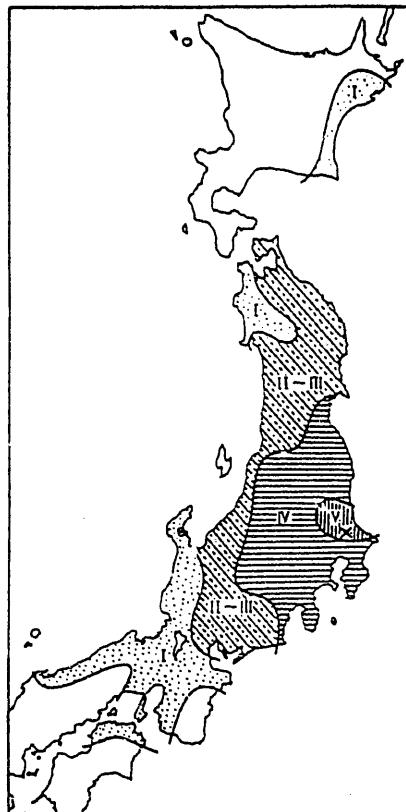


図 312-1 震度分布 [気象庁による]

表 312-1 被害一覧

府県名	都市区名	死傷者	東 北		東 北(非庄家)		東 北		東 北		備考
			死	傷	震	半	震	半	震	亀	
茨 城 県	水 戸	1 10	4	2	29	5	1	55	5		とくにひどかったのは水戸市下市・那珂郡猿町・兎島郡豊津村・新治郡石岡町であった。
	東 木 城	6 1	140			32	3		4		
	那 珂	5 5	2	132		21	2		17		
	鹿 島	3 7	9	37	81	3	6	1			
	行 方	5 4	2	35		2			7	1	
	新 治	3 3	1	435		176	17				
福 島 県	武 田	1		77		2			1		
				79		2					
県合計			4 34	37 53	1,190	6 9	375	33	49	3 2	
東 京 府	津 田	1 6		59		70		3			下町の被害が目だつ。しかし破損は甚歎なもののがほとんど。震は否委員の筋違ひ吊り金物が落らただけ。
	日 本 橋	1		1 53		2 95					
	京 本			57		1 4					
	芝 さ	1		2 62		48					
	麻 布	3	1	23		1 31					
	赤 坂	3		77		67		1			
神 奈 川 県	下 谷	1		88		38	2	3			
	浅 草	2		34		42		3			
	本 所	2		41		1 71		27		1	
	深 川			18	1	59		11			
千 住	千 住	11 1	1 55	3 1	44	9 9					
府合計			1 31	4 5 615	4 6 677	15 68	3 1	1			
埼 玉 県	北 足 立			100		54	4	48			浦和・岩槻辺で強く、亀裂からは泥砂を噴出した。
	南 埼 三			95		26	1	31			
埼玉県合計				210		89	6	134	3		
神奈川県	横 浜	1 3		29		19	4				家庭庭園は木造についての数字。並に瓦瓦・石造の破損64。
神奈川県	足 利			1 3 多		6					矢板、夏沼でも小破壊。

* 東京の場合のみ、JR注記。

(「新編 日本被害地震総覧」による)

図 3-3 (その1) 茨城県南部 (1895.1.18 U-2)

PNC TN8410 97-124

2. U - 3

314* 1896 I 9 (明治 29) 22 時 17 分 鹿島
灘 $\varphi=141^{\circ}E$ $\varphi=36\frac{1}{4}^{\circ}N(C)$ $M=6.6^*$
水戸付近から久慈・那珂両川の沿岸地方で家
屋・土蔵の小破あり。また猪苗代湖でも小破
害があった。弱い津波あり (周期 8 分). [0]

(「新編 日本被害地震総覧」による)

図 3 - 3 (その 2) 茨城県沖 (1896. 1. 9 U - 3)

3. U - 1 2

459 1930 VI 1 (昭和 5) 02 時 58 分 那
珂川下流域 $\lambda=140.62^{\circ}E$ $\varphi=36.57^{\circ}N$
 $M=6.5$ $h=30$ km 水戸 (煉瓦壇倒る),
久慈 (崖崩れ 1, 倉庫傾斜 1, 煙突倒壊 1),
鉢田 (石垣崩る), 石岡 (土蔵に亀裂), 真壁・
土浦 (壁の剥落), 宇都宮 (神社の灯籠の頭が
落ちた) などの被害があった。

(「新編 日本被害地震総覧」による)

図 3 - 3 (その 3) 茨城県沿岸 (1930. 6. 1 U - 12)

4. U-14

488* 1938 V 23 (昭和 13) 16 時 18 分 塩
屋崎沖 $\lambda=141.58^{\circ}\text{E}$ $\varphi=36.65^{\circ}\text{N}$ $M=$
 7.0 $h=0 \text{ km}$ 被害は小名浜付近の沿岸と、
内陸の福島・郡山・白川・若松付近にあった。
とくに郡山・須賀川・猪苗代の付近で強く、
煉瓦煙突の折損、壁落、壁や道路の亀裂があ
った。小名浜でも同様の小被害があり、小崖
崩れもあった。小名浜に震後 22 分で小津波
(全振幅 83 cm) が押し寄せた。福島県の被害
は家屋 250 カ所、煙突の倒壊 7、橋梁堤防損
6、水道管破損 2 カ所等で、茨城県でも煙突
5 本折損し、磯原で土蔵の倒壊 1、岩代熱海・
湯本・飯坂等の温泉に異常があった。[-1]

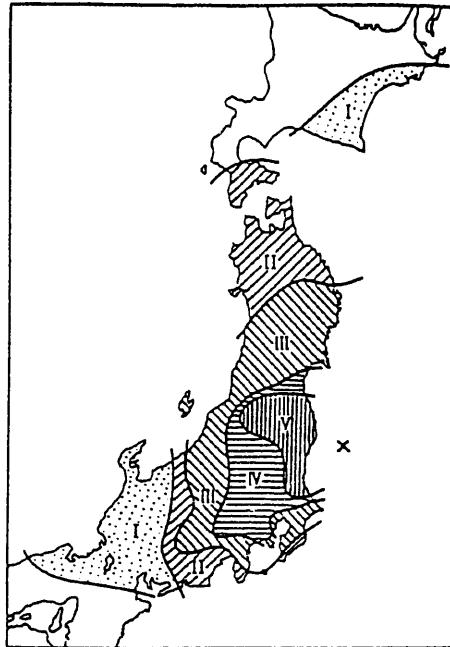


図 488-1 震度分布 [気象庁, 1938 から作成]

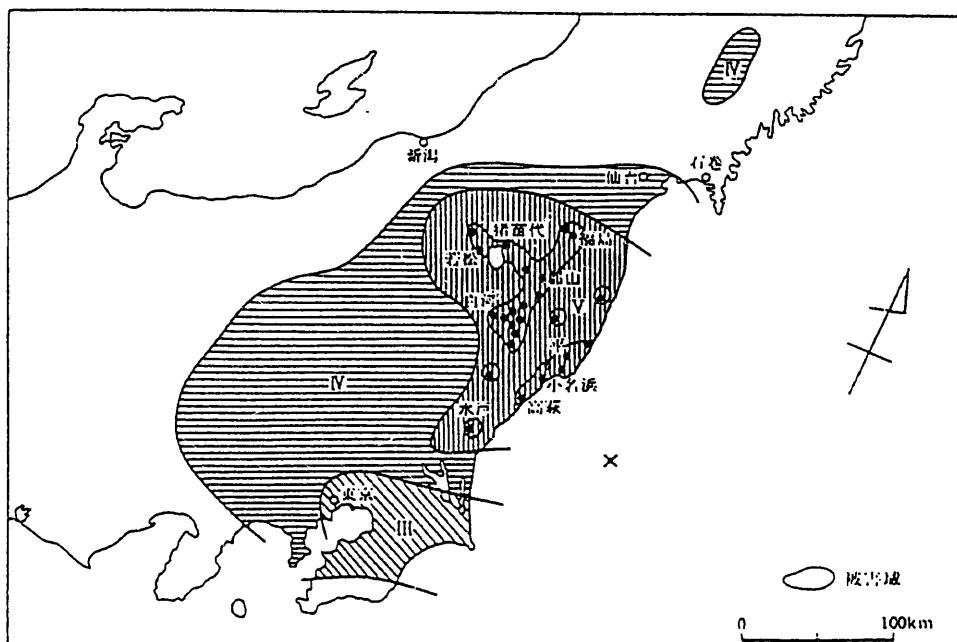


図 488-2 被害地域 [竹花・副田, 1938]

(「新編 日本被害地震総覧」による)

図 3-3 (その 4) 茨城県沖 (1938.5.23 U-14)

5. U - 1 5

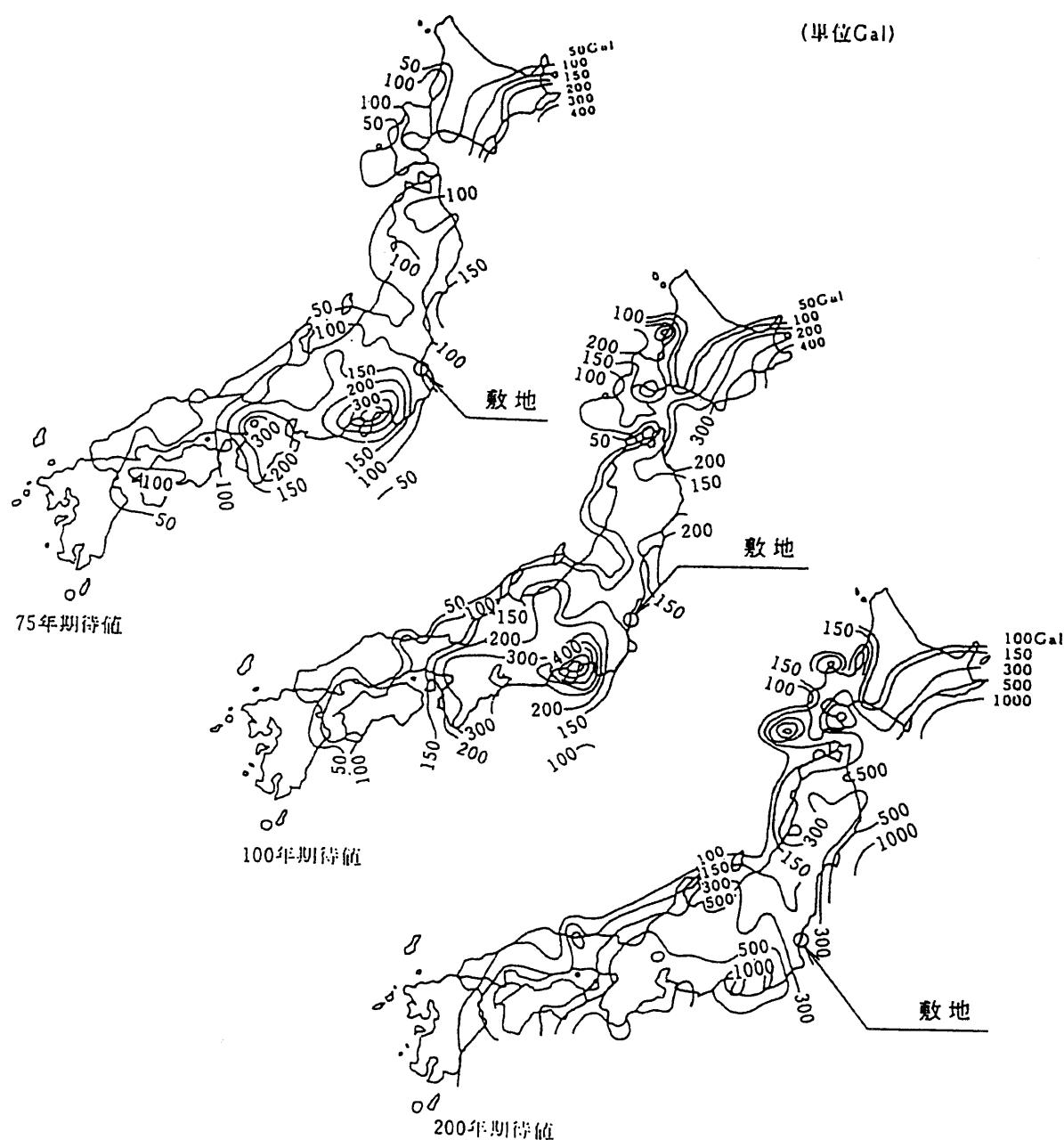
491 1938 IX 22 (昭和 13) 03 時 52 分 鹿

島灘 $\lambda=141.02^{\circ}\text{E}$ $\varphi=36.40^{\circ}\text{N}$ $M=6.5$

$h=30 \text{ km}$ 水戸 (震度 V) で僅少被害.

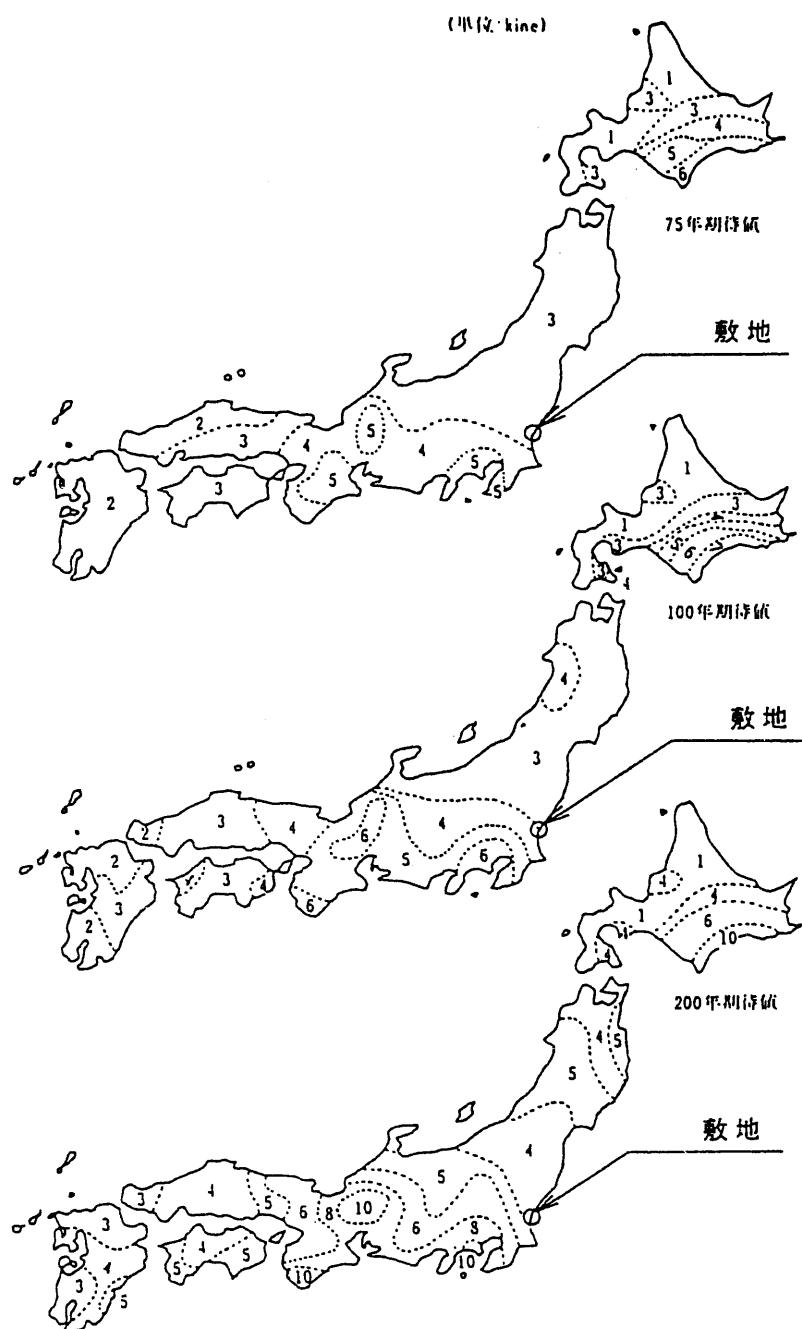
(「新編 日本被害地震総覧」による)

図 3-3 (その 5) 茨城県沖 (1938. 9. 22 U-15)



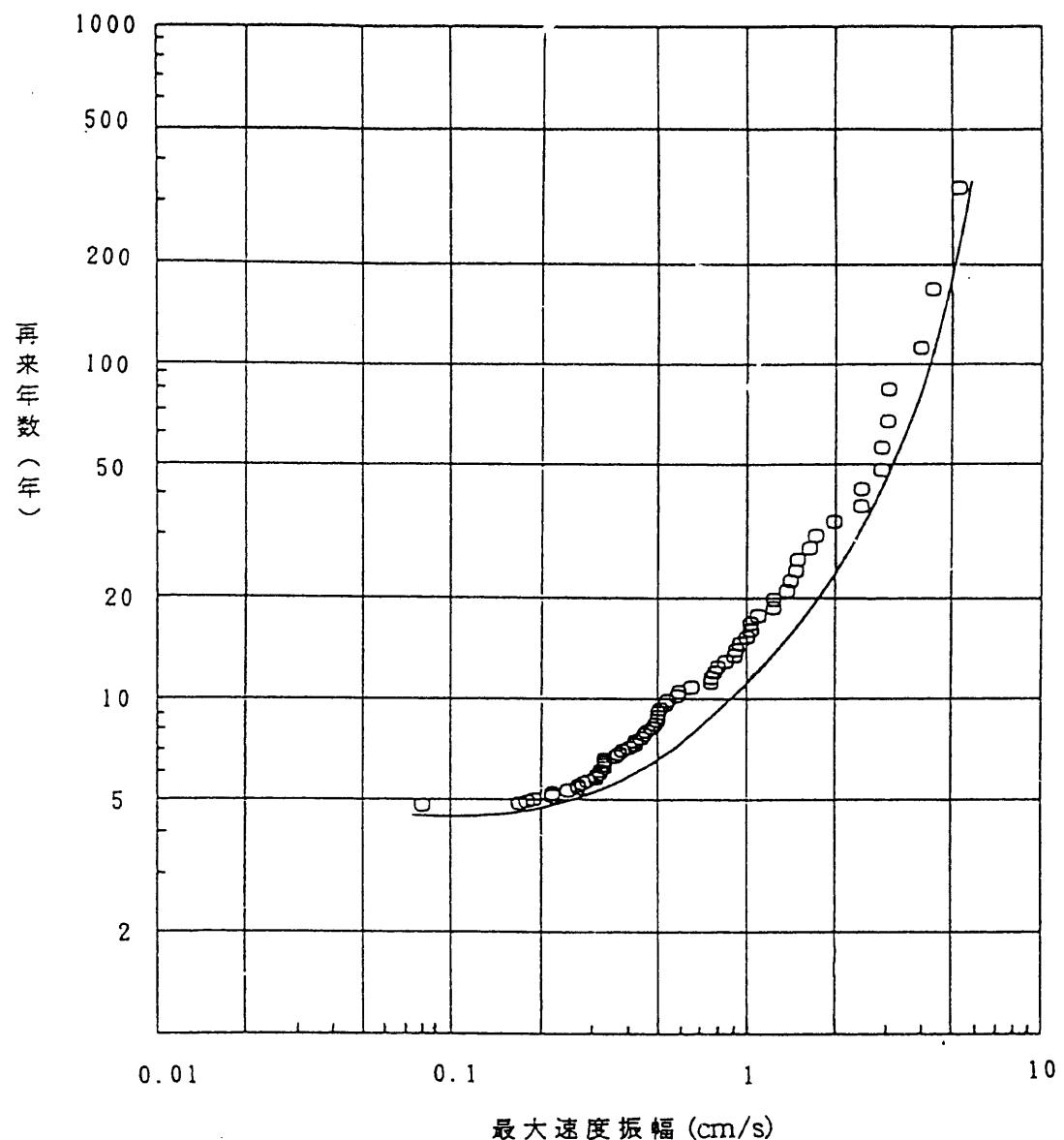
(「東大地震研究所彙報 Vol. 29(1951)」による)

図3-4 河角の震度期待値



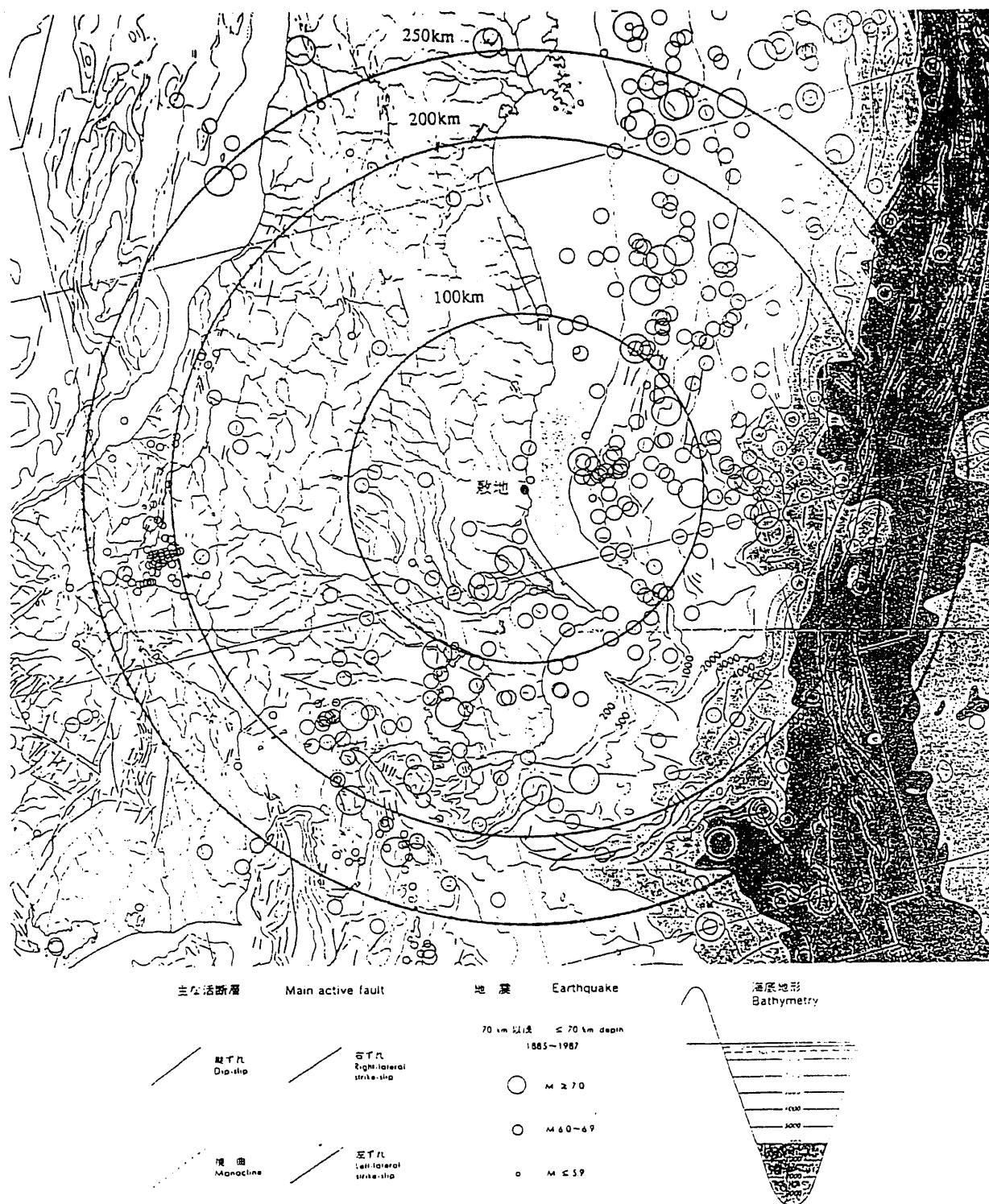
(「東大地震研究所彙報 Vol. 28(1950)」による)

図 3-5 金井による地震基盤における地震動の限界速度分布



統計年間：347年（1646～1993）

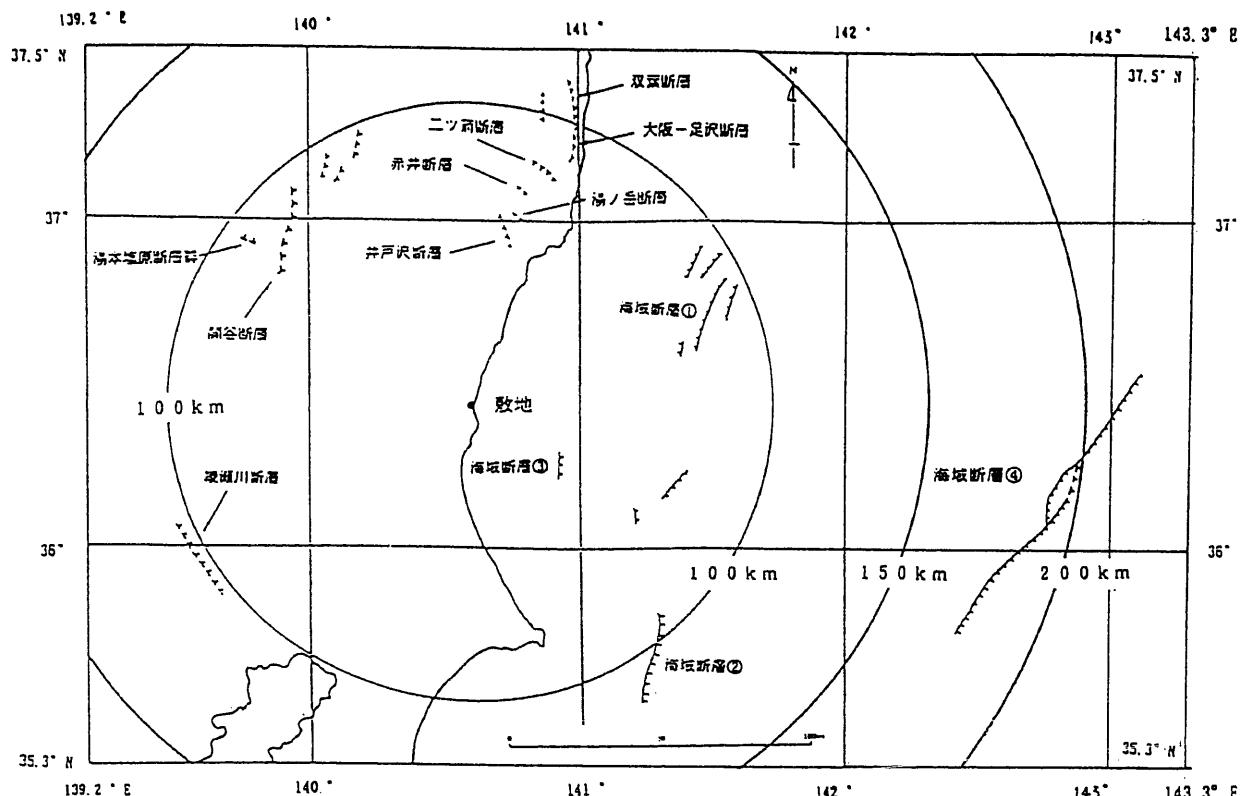
図3-6 統計的期待値



(活断層研究会編「新編 日本の活断層－分布図と資料」)

付図Ⅱ・300万分の1 日本と周辺の活断層・地震分布図による

図3-7 (1) 敷地周辺の活断層分布図(全体)



(活断層研究会編「新編 日本の活断層－分布図と資料」による)

陸域		活断層（確実度Ⅰ）
凡例	—エエエエ—	活断層（確実度Ⅱ）
海域	———	活断層

図3-7 (2) 敷地周辺の活断層分布図（拡大）

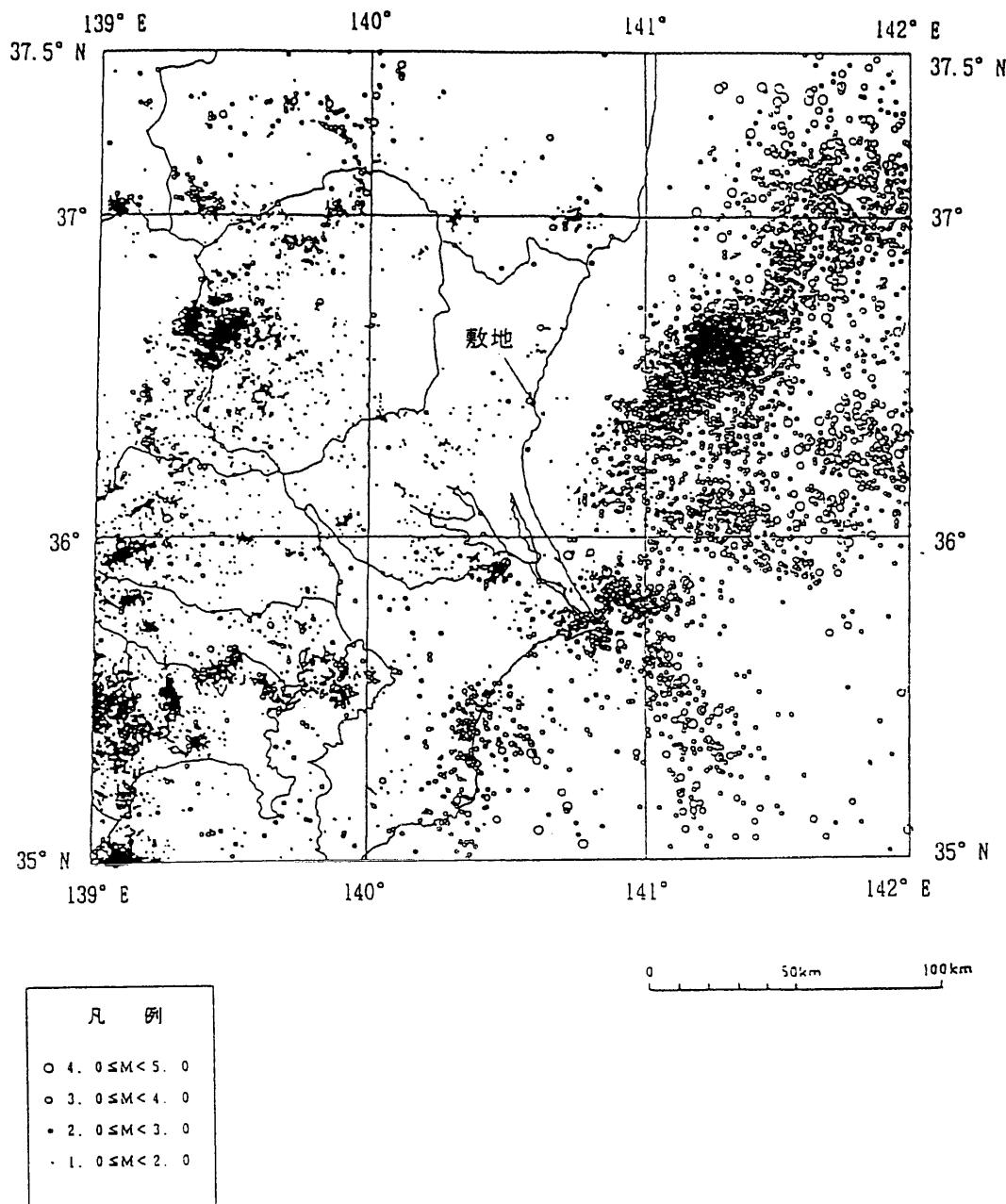


図 3-8 (その1) 微小地震の震央分布図
(1989年1月～1993年12月、震源深さ 0～30km)
(科学技術庁防災科学研究所 微小地震データによる)

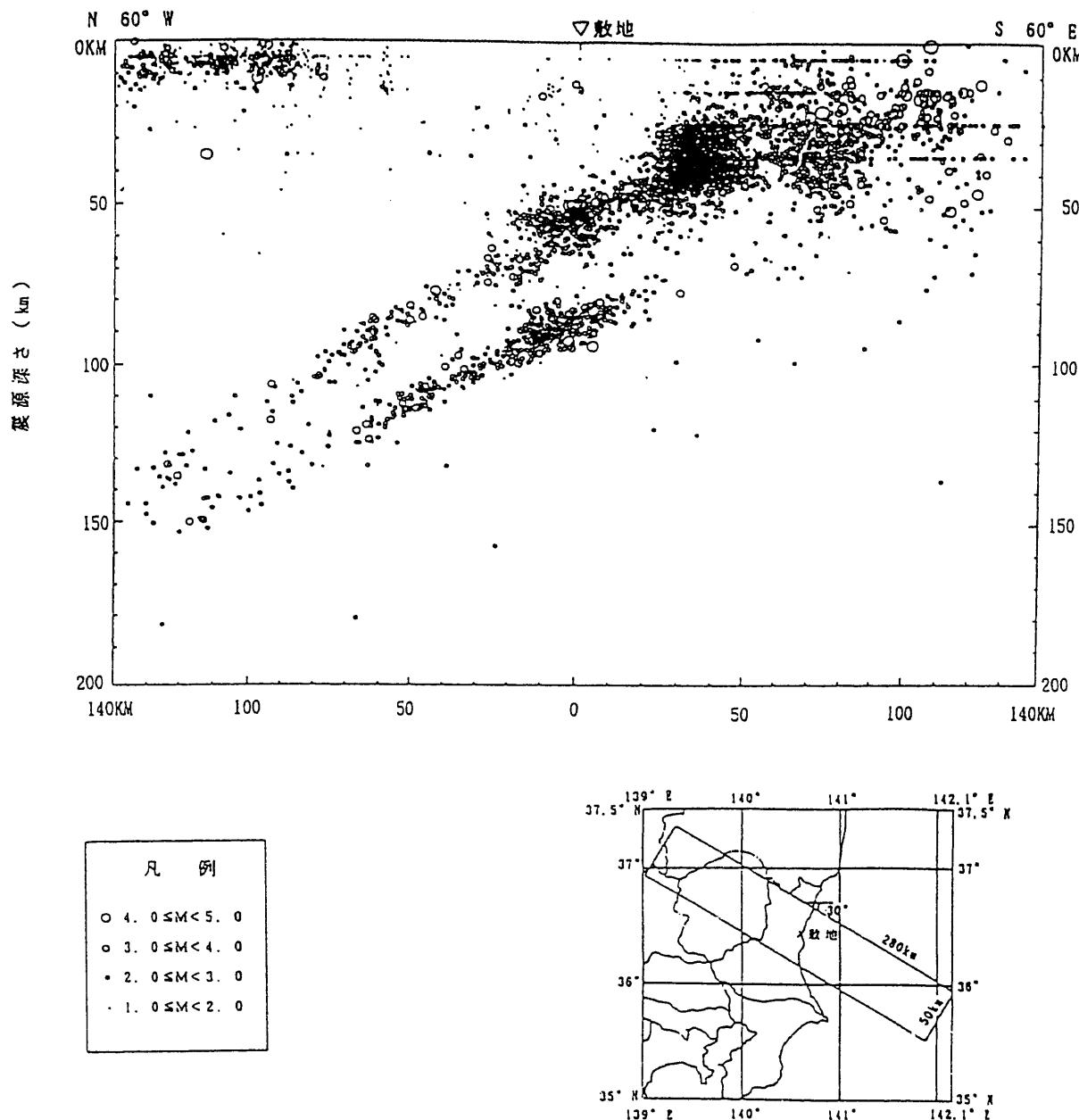
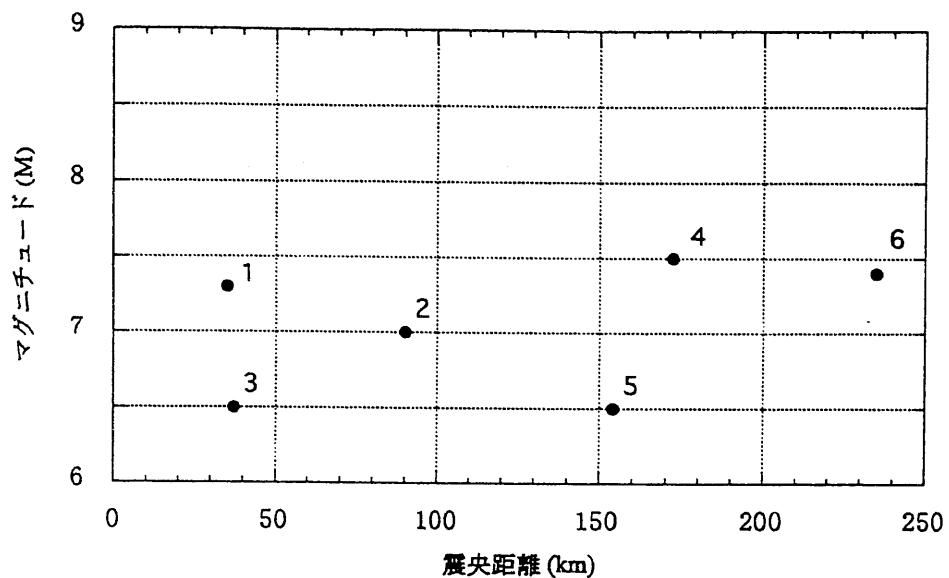
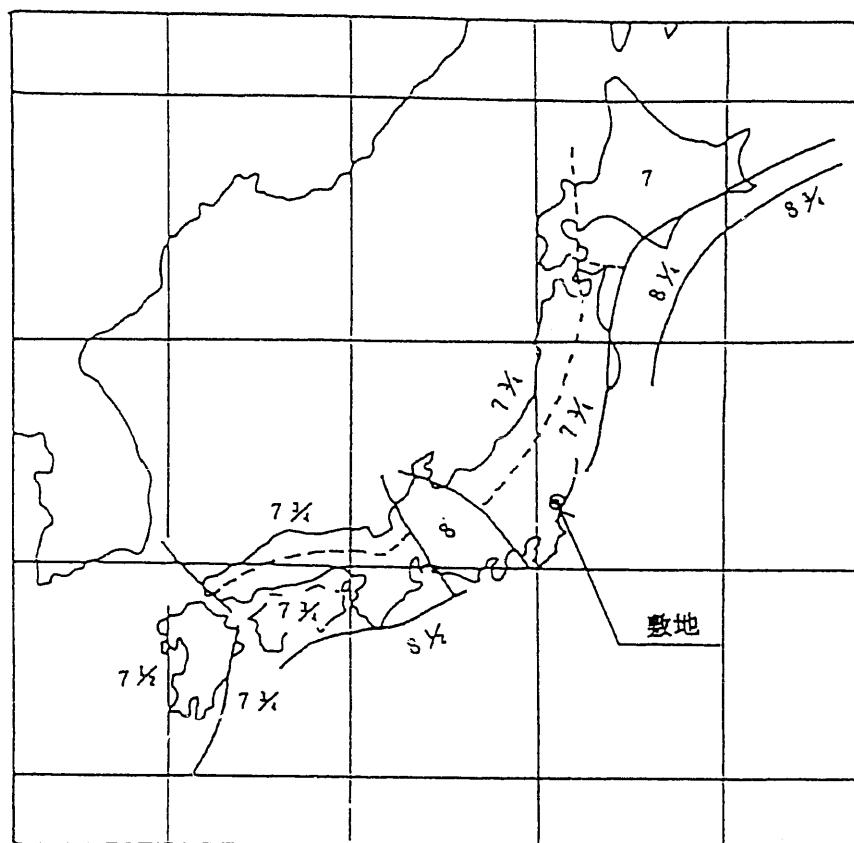


図3-8 (その2) 微小地震の震源深さ分布図
(1989年1月～1993年12月)
(科学技術庁防災科学研究所 微小地震データによる)



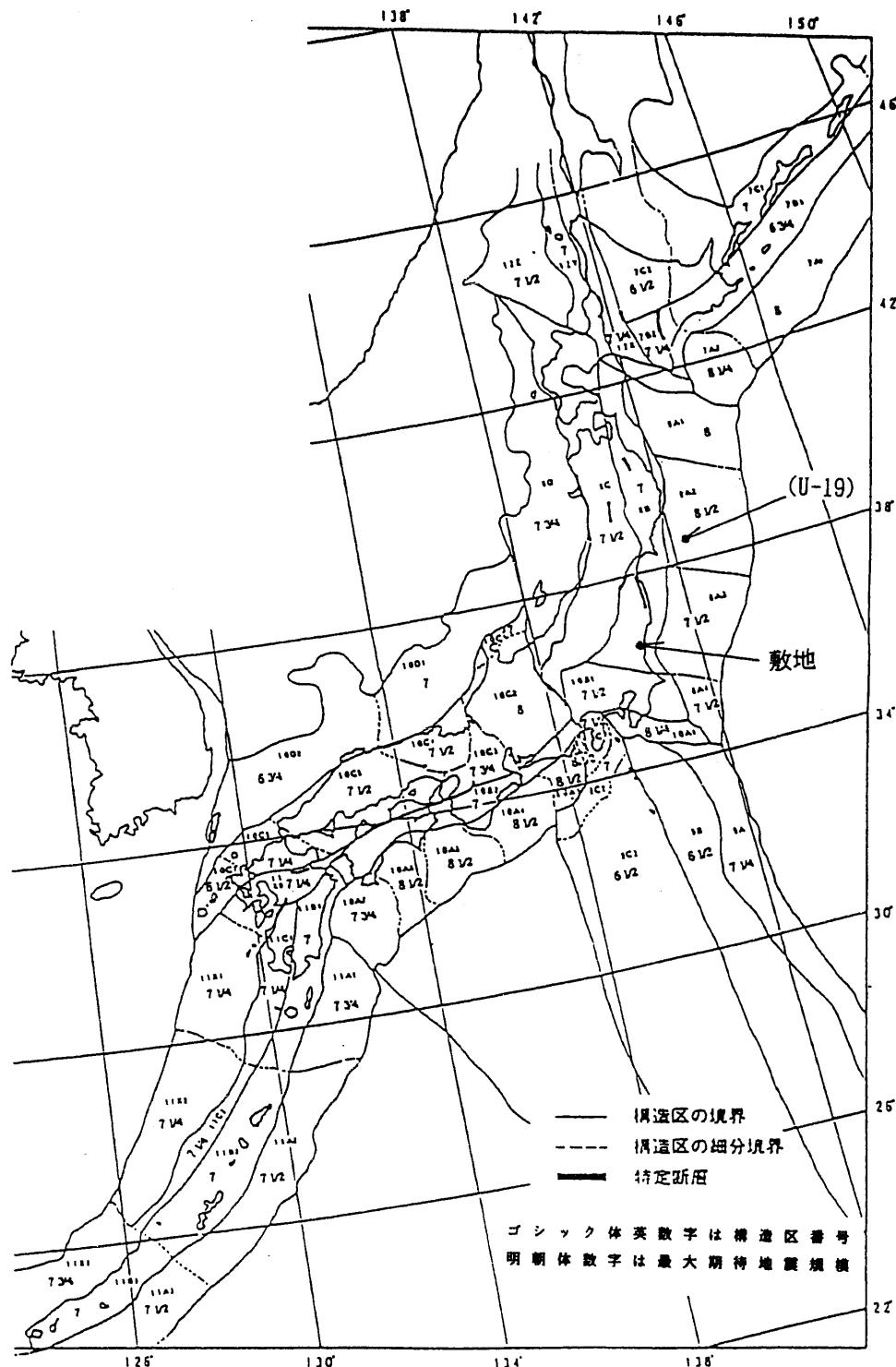
番号	発震日	震央地名	マグニチュード
1	1896. 1. 9	茨城県沖	7.3
2	1938. 5. 23	茨城県沖	7.0
3	1938. 9. 22	茨城県沖	6.5
4	1938. 11. 5	福島県沖	7.5
5	1942. 2. 21	福島県沖	6.5
6	1978. 6. 12	宮城県沖	7.4

図3-9 福島県沖（一部宮城県沖）から茨城県沖にかけての
海域のマグニチュードが6以上の被害地震



基準地震動 S_2 に対する最大マグニチュード
(OMOTE・他、1979⁽²⁸⁾による)

図 3-10 (1) 基準地震動 S_2 に対する最大マグニチュード
及び日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模



日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模

(垣見・他、1994⁽²⁸⁾による)

図3-10 (2) 基準地震動 S_2 に対する最大マグニチュード

及び日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模

(基準地震動 S_1)

(sec)	(cm/s)		
A=0.02	Sv= 0.37	U-3	(M=7.5 Δ=35km)
B=0.15	Sv= 9.69	U-2	(M=7.2 Δ=42km)
C=0.33	Sv=21.12	U-12	(M=6.5 Δ=15km)
D=0.82	Sv=21.12	U-14	(M=7.0 Δ=90km)
E=2.00	Sv=14.16	U-15	(M=6.5 Δ=37km)
		F-1 (関谷)	(M=7.5 Δ=86km)

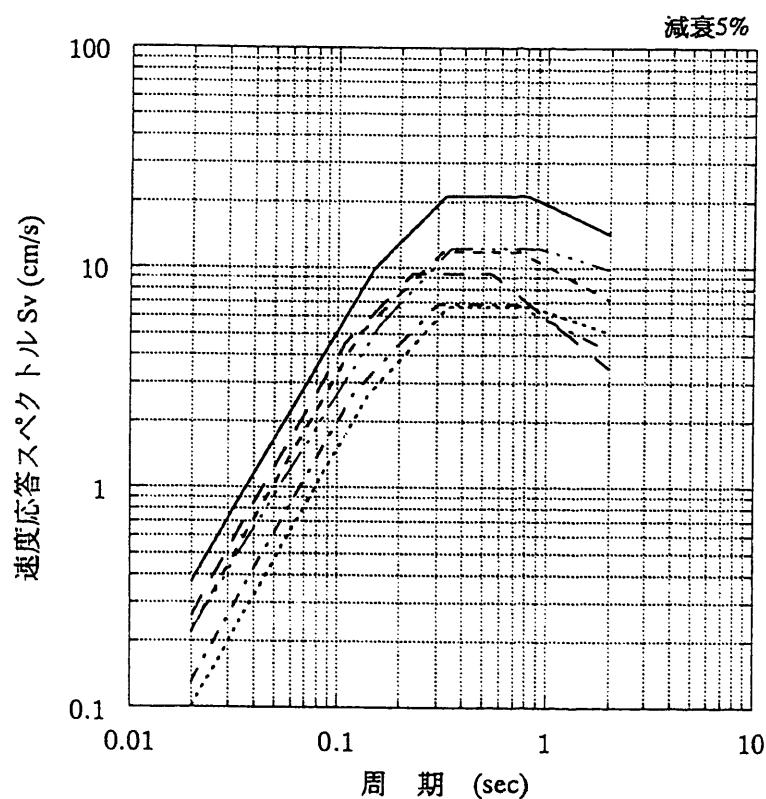


図3-11 解放基盤表面における基準地震動 S_1 の速度応答スペクトル

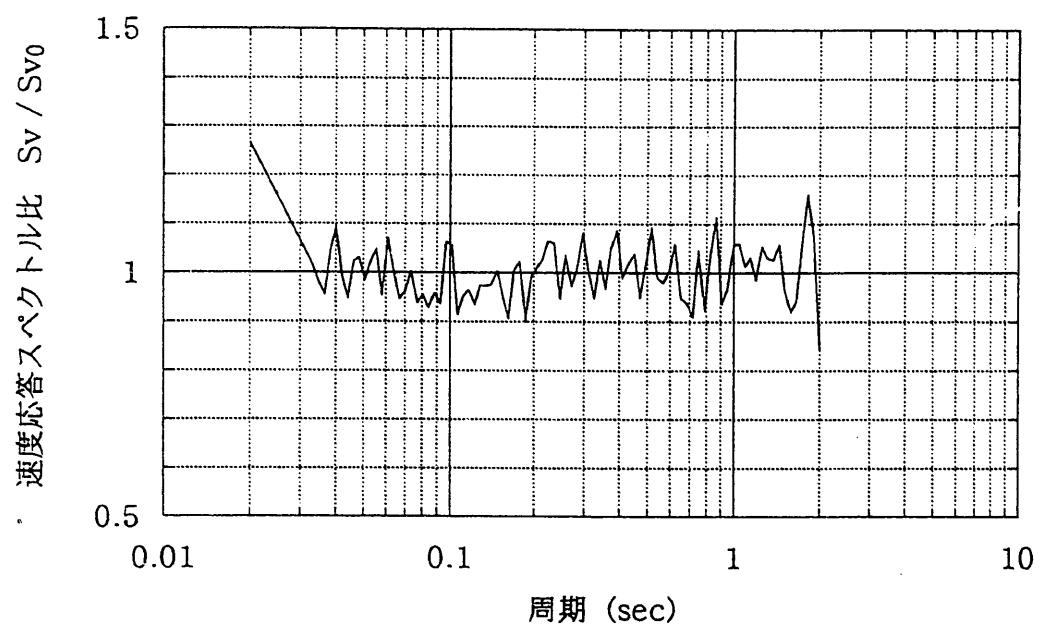


図 3-12 解放基盤表面における基準地震動 S_1 の速度応答スペクトルの適合度

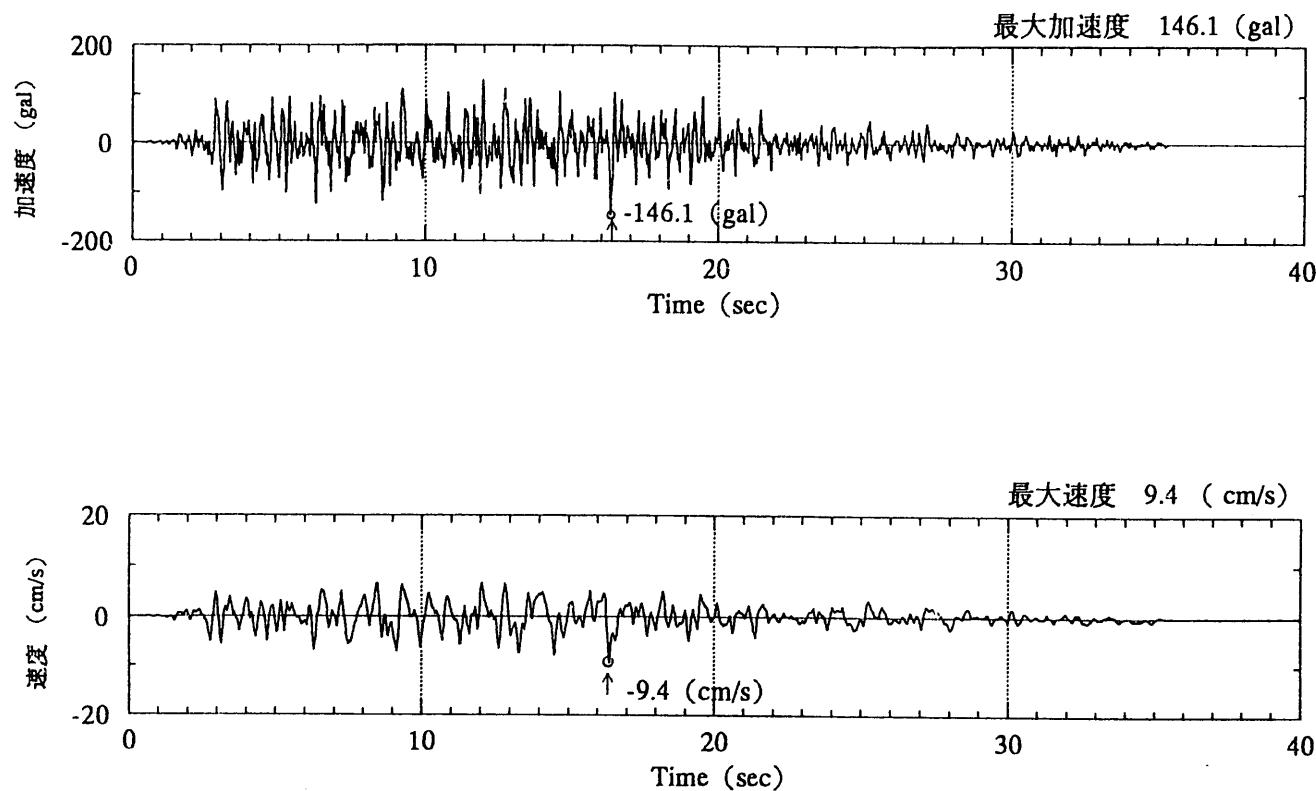
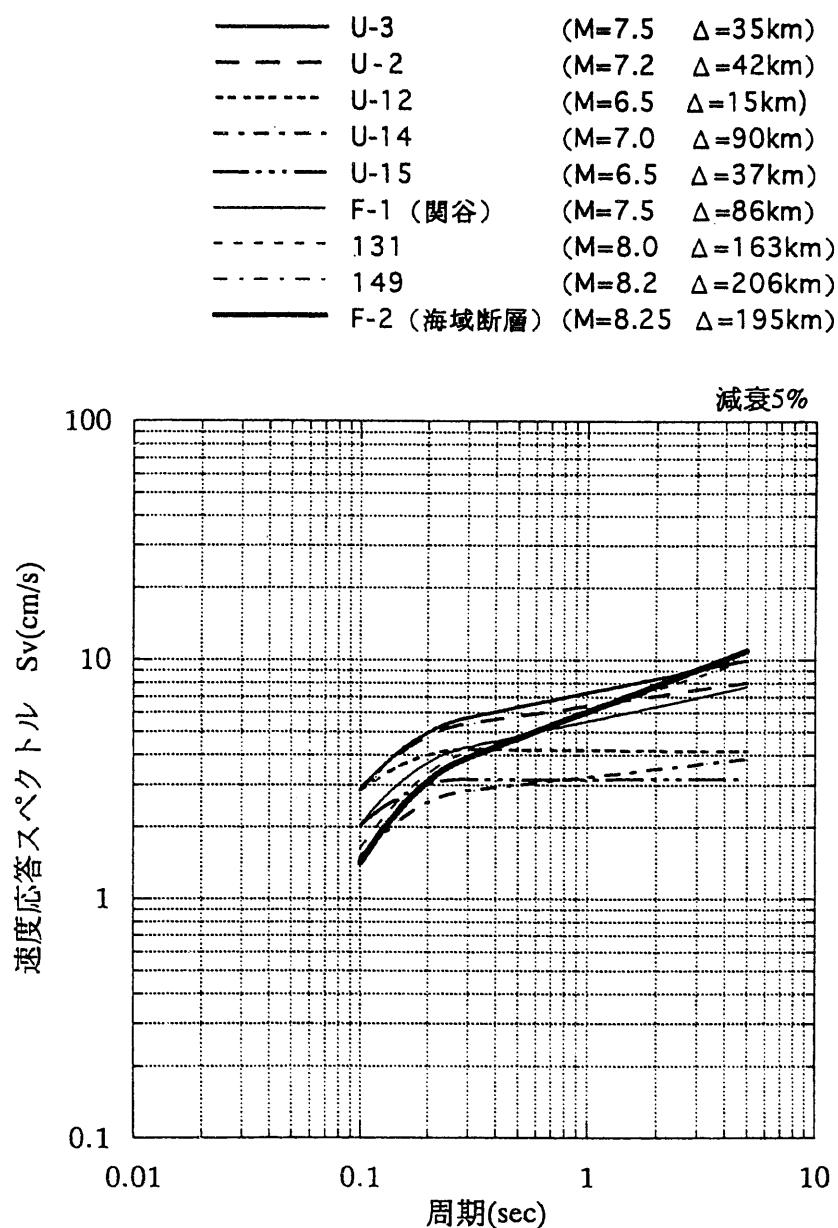


図 3-13 解放基盤表面における基準地震動 S_1 の加速度及び速度波形

図3-14 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K} の速度応答スペクトル

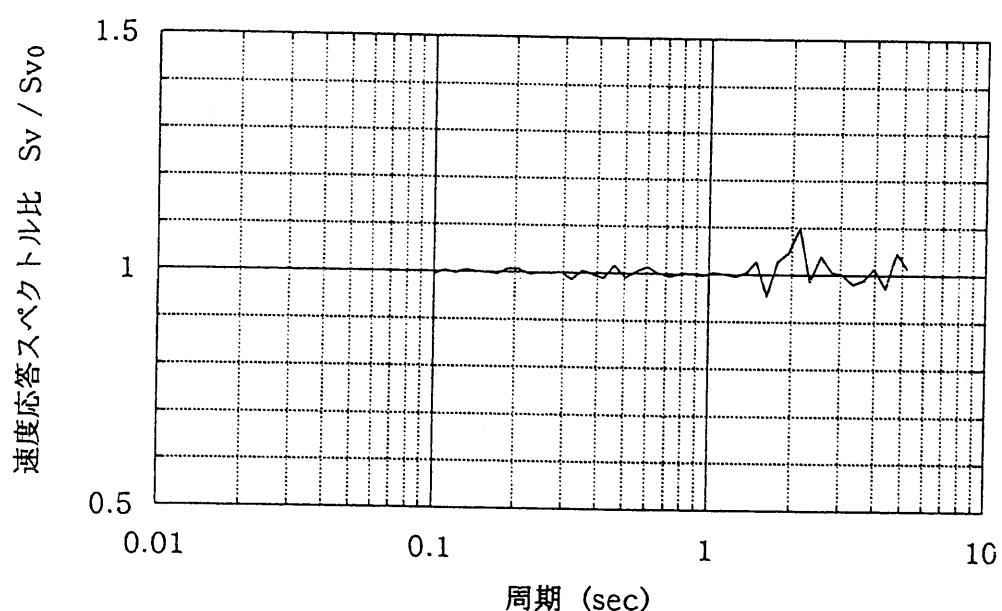


図 3-15 (1) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K-M}
の速度応答スペクトルの適合度

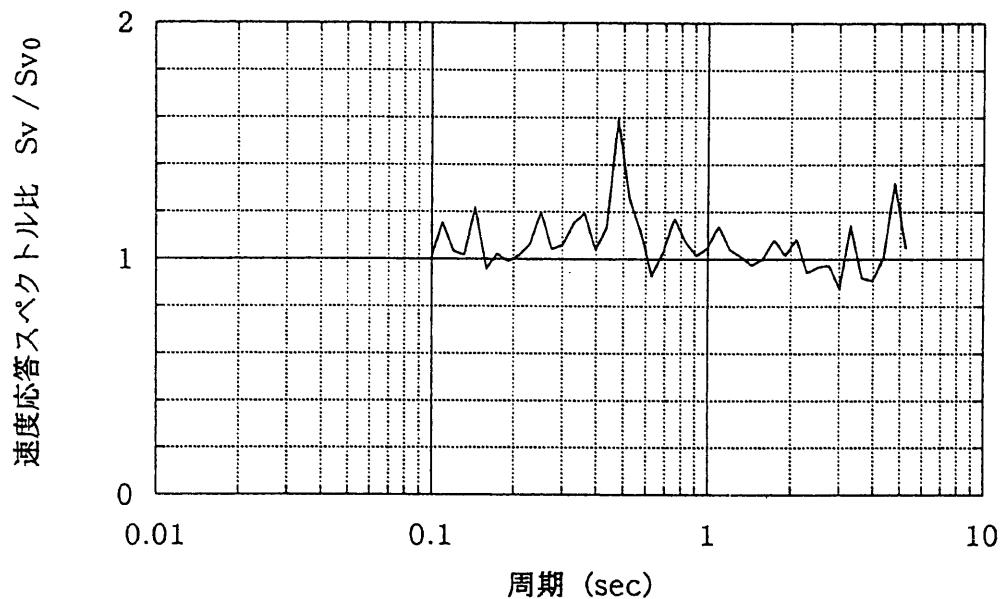


図 3-15 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K-F}
の速度応答スペクトルの適合度

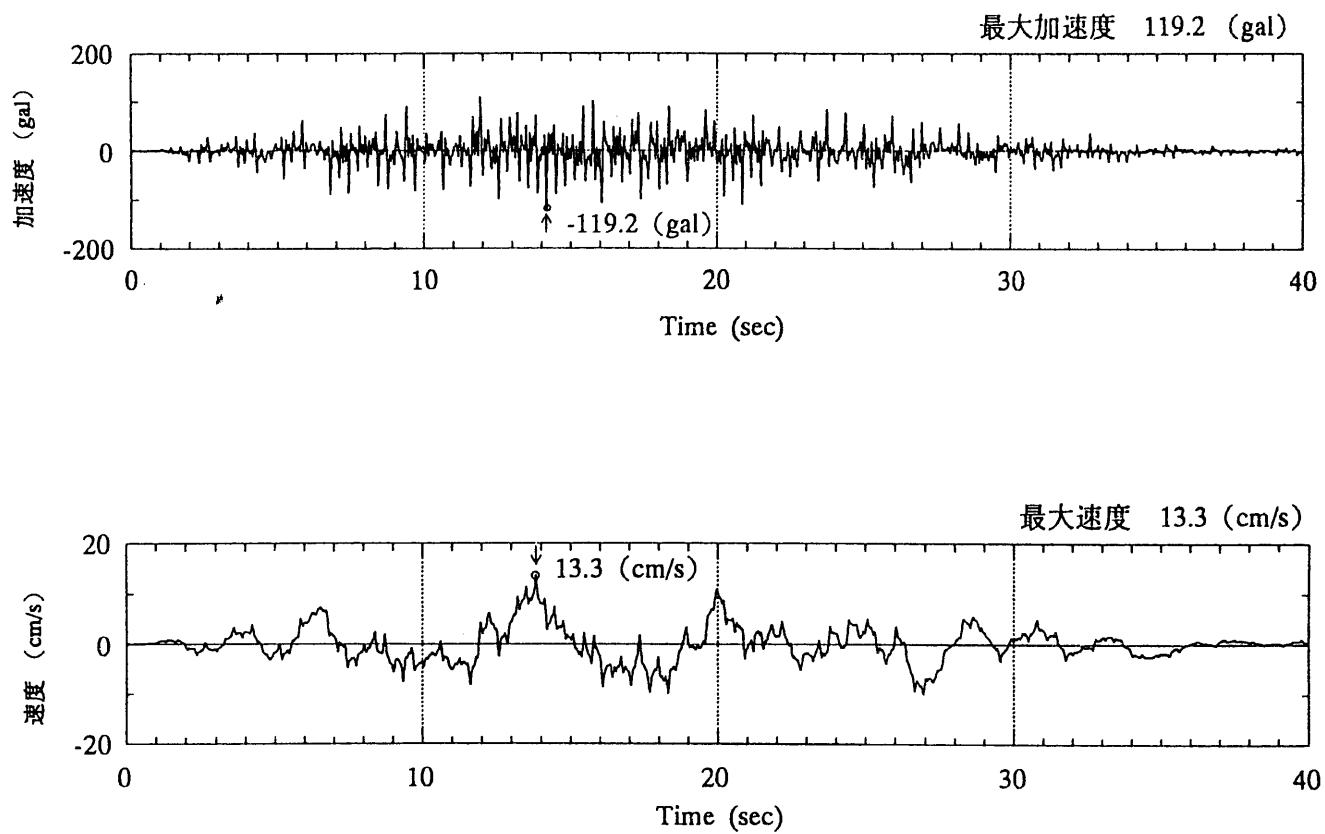


図 3-16 (1) 地震基盤表面における基準地震動 S_{IK-M} の加速度及び速度波形

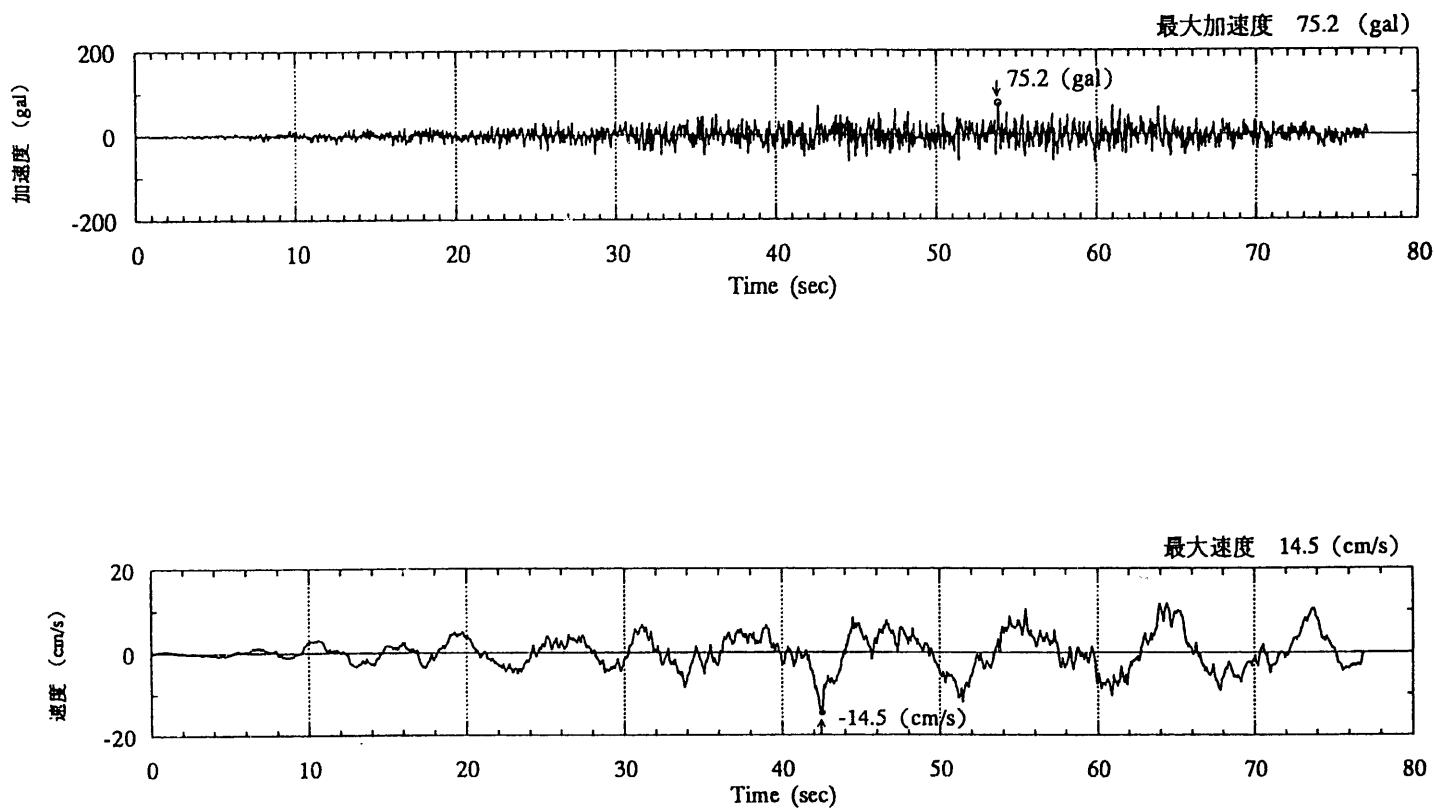


図 3-16 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{1K}-F の加速度及び速度波形

(基準地震動S ₂ -M)		(基準地震動S ₂ -N)	
(sec)	(cm/s)	(sec)	(cm/s)
A=0.02	Sv= 0.84	A=0.02	Sv= 1.30
B=0.12	Sv=17.59	B=0.10	Sv=18.40
C=0.30	Sv=42.84	C=0.17	Sv=30.10
D=0.62	Sv=42.84	D=0.40	Sv=30.10
E=2.00	Sv=20.75	E=2.00	Sv= 6.20

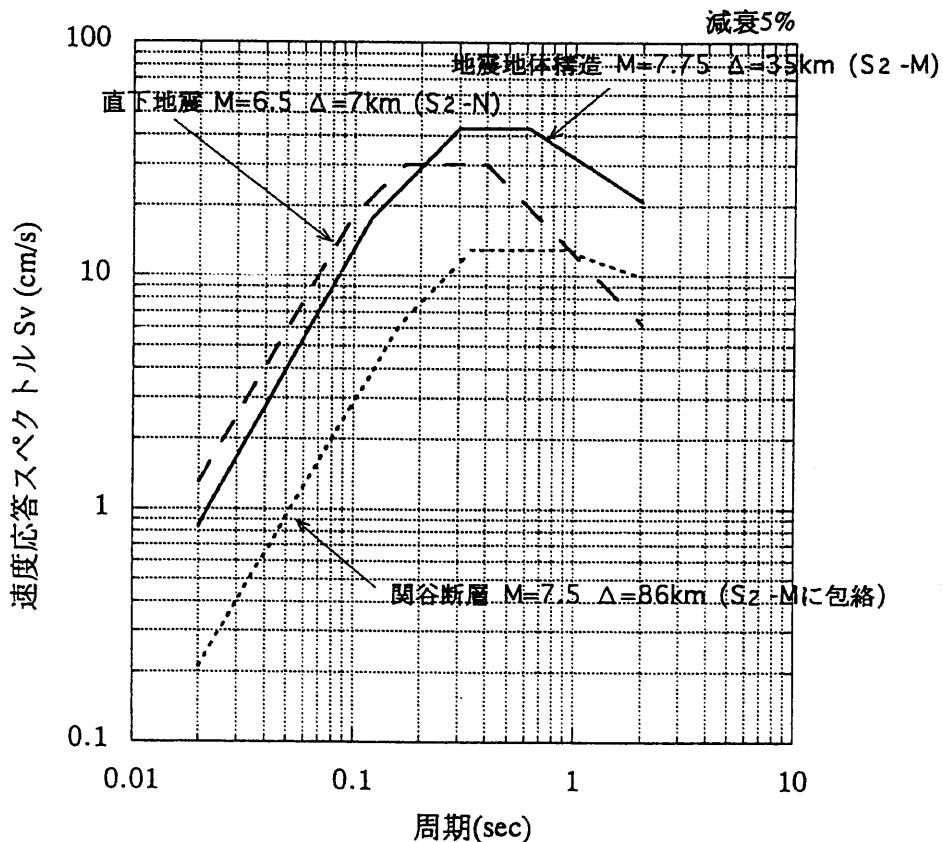


図3-17 解放基盤表面における基準地震動S₂の速度応答スペクトル

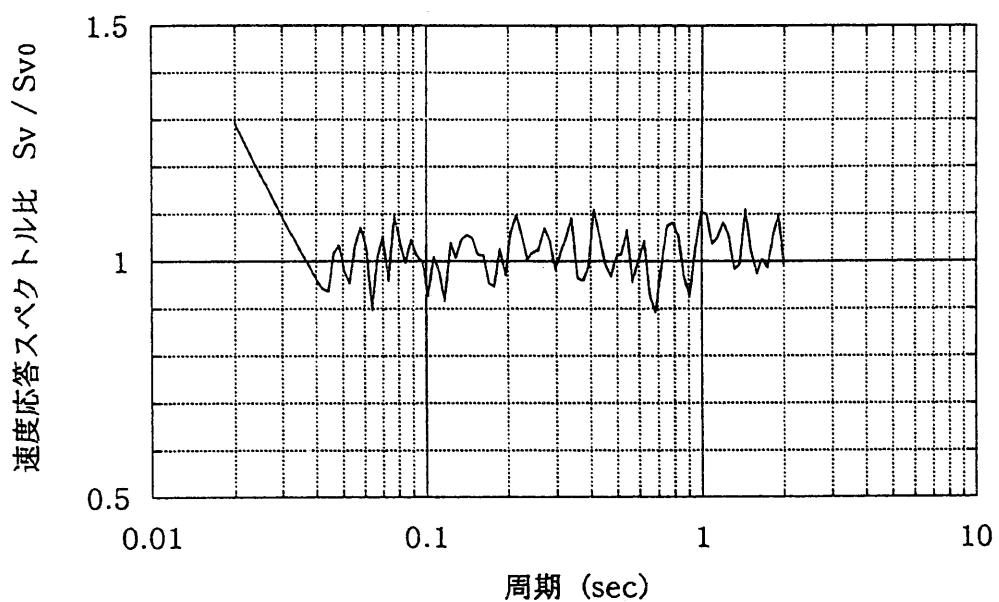


図 3-18 (1) 解放基盤表面における基準地震動 $S_2 - M$
の速度応答スペクトル適合度

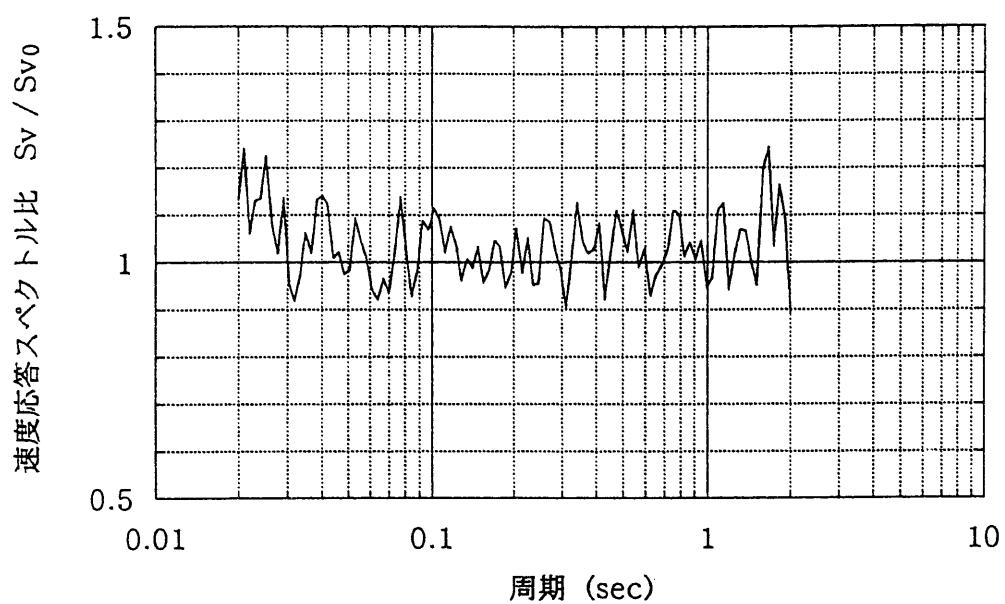


図 3-18 (2) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-N
の速度応答スペクトル適合度

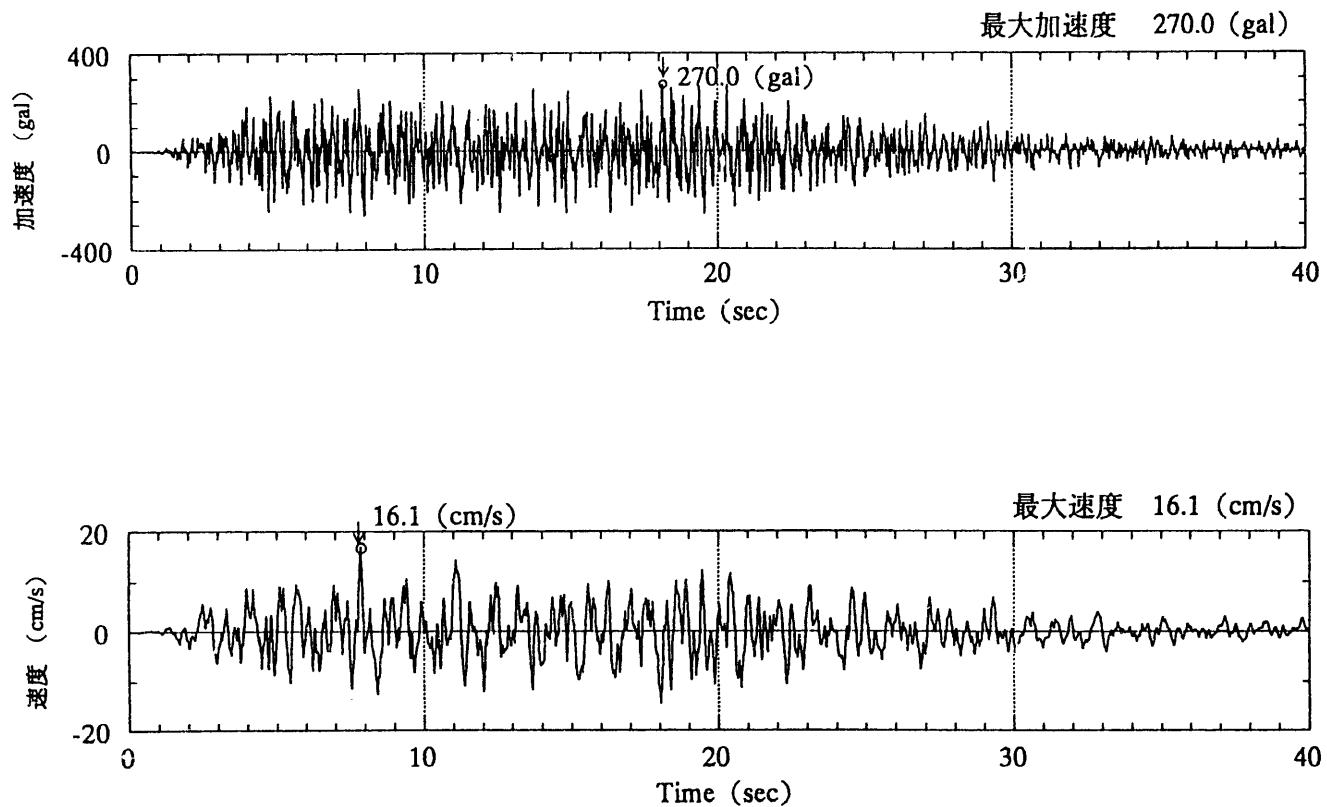


図 3-19 (1) 解放基盤表面における基準地震動 S_2-M の加速度及び速度波形

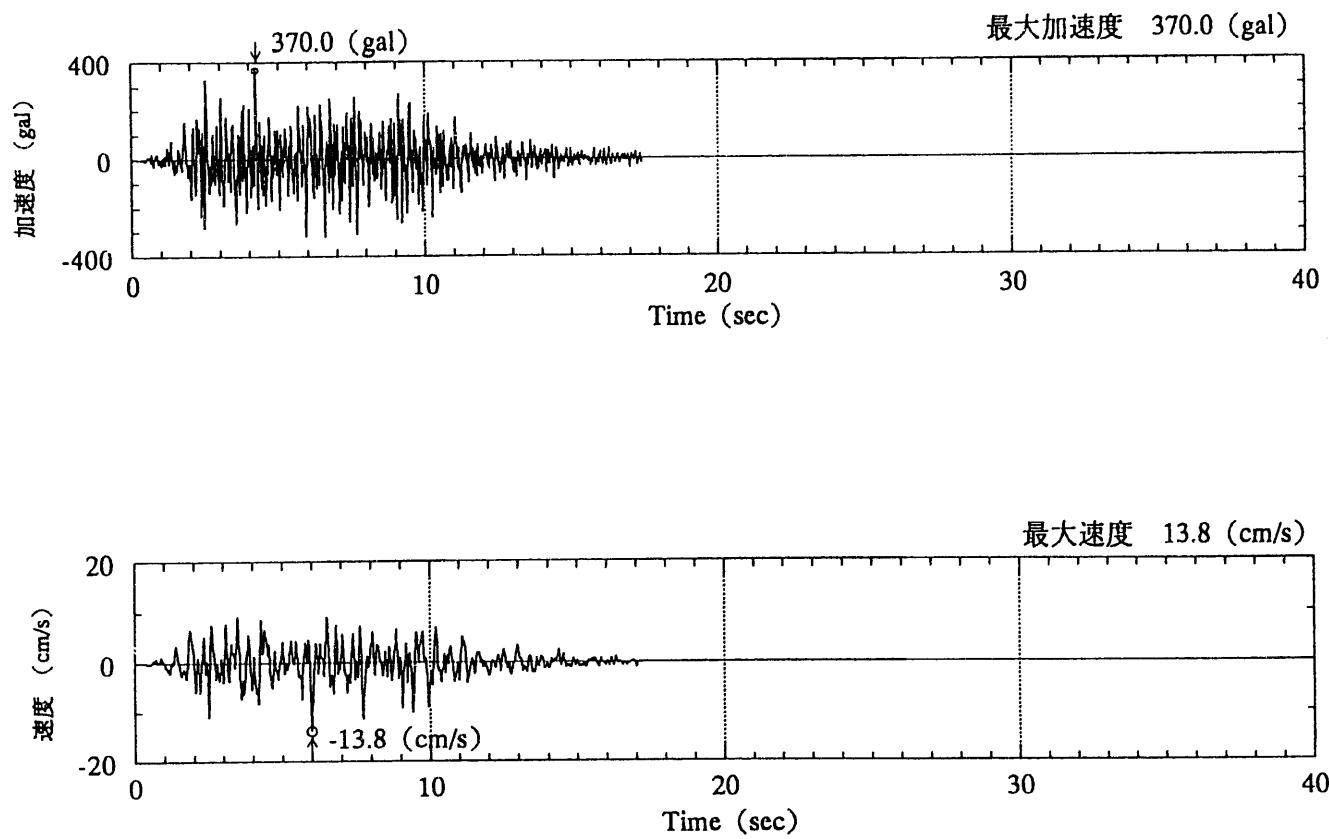
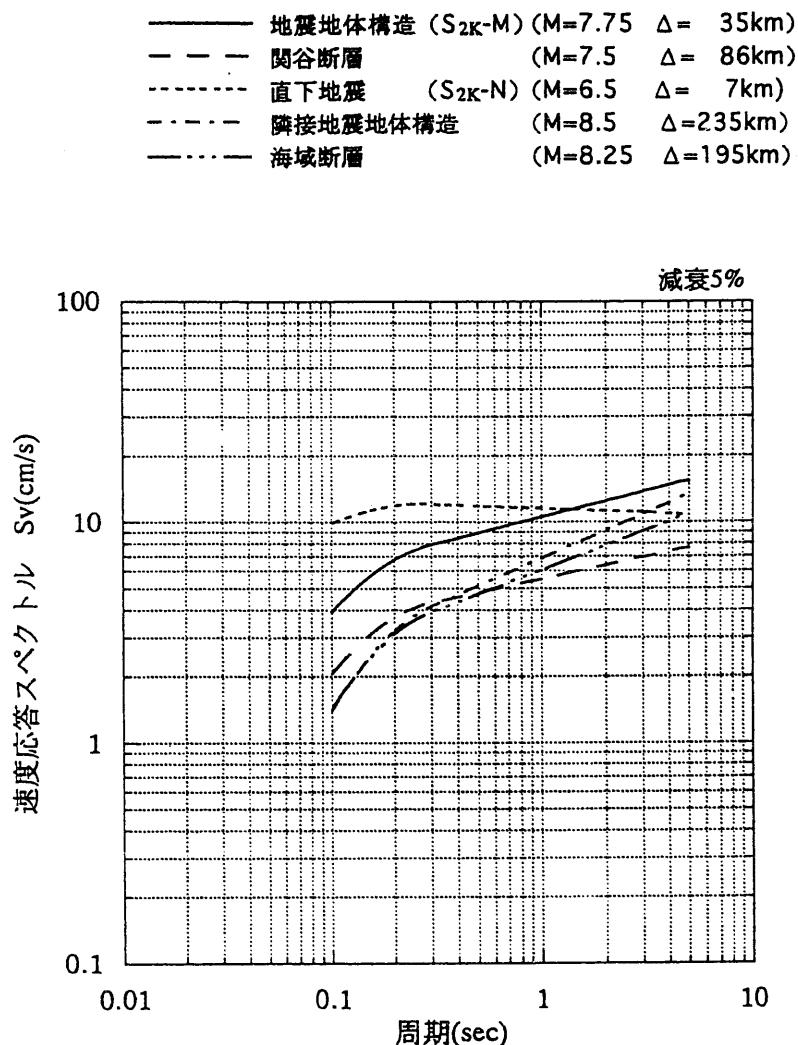


図 3-19 (2) 解放基盤表面における基準地震動 S₂-N の加速度及び速度波形

図3-20 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K} の速度応答スペクトル

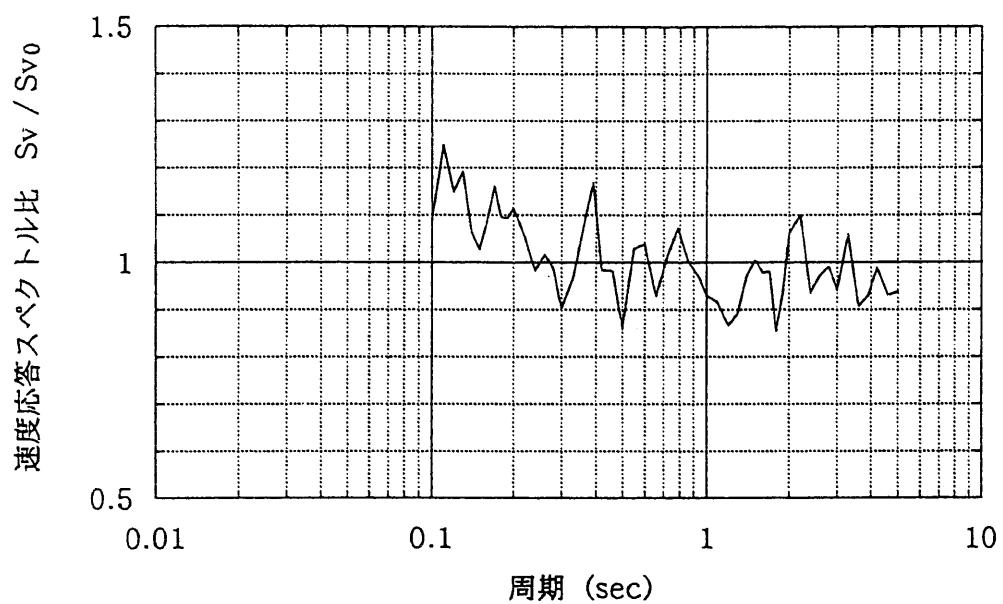


図 3-21 (1) 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K-M}
の速度応答スペクトルの適合度

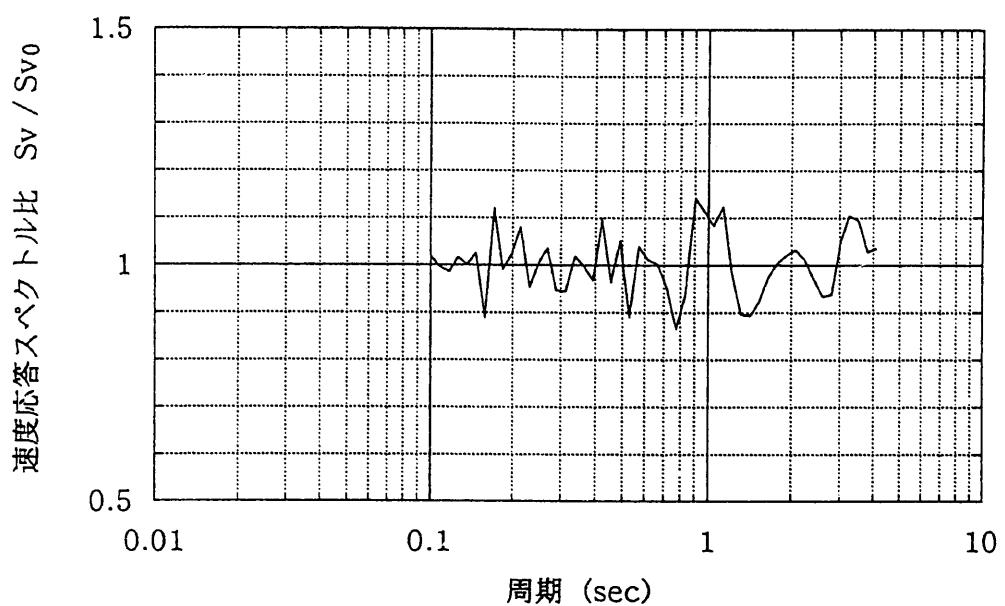


図 3-21 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{zK-N}
の速度応答スペクトルの適合度

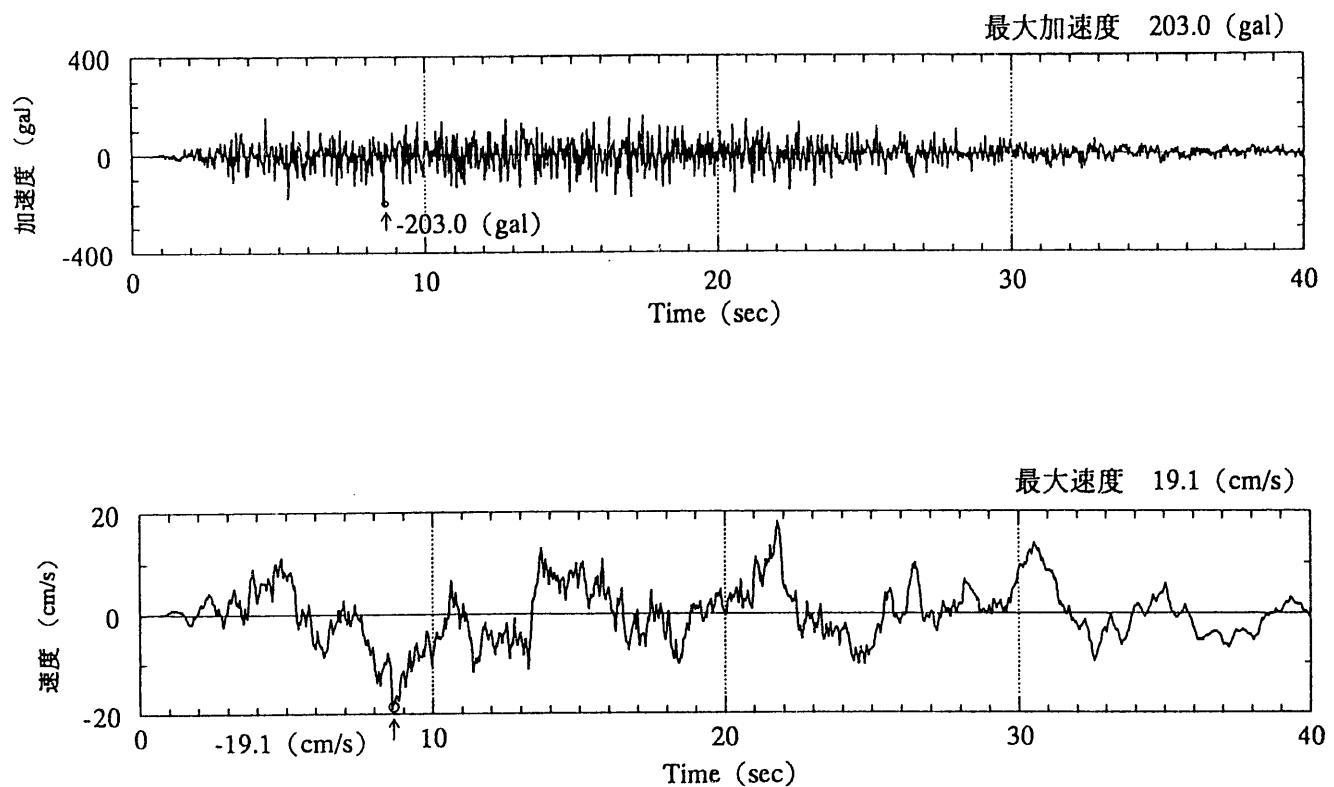


図 3-22 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{2K}-M$ の加速度及び速度波形

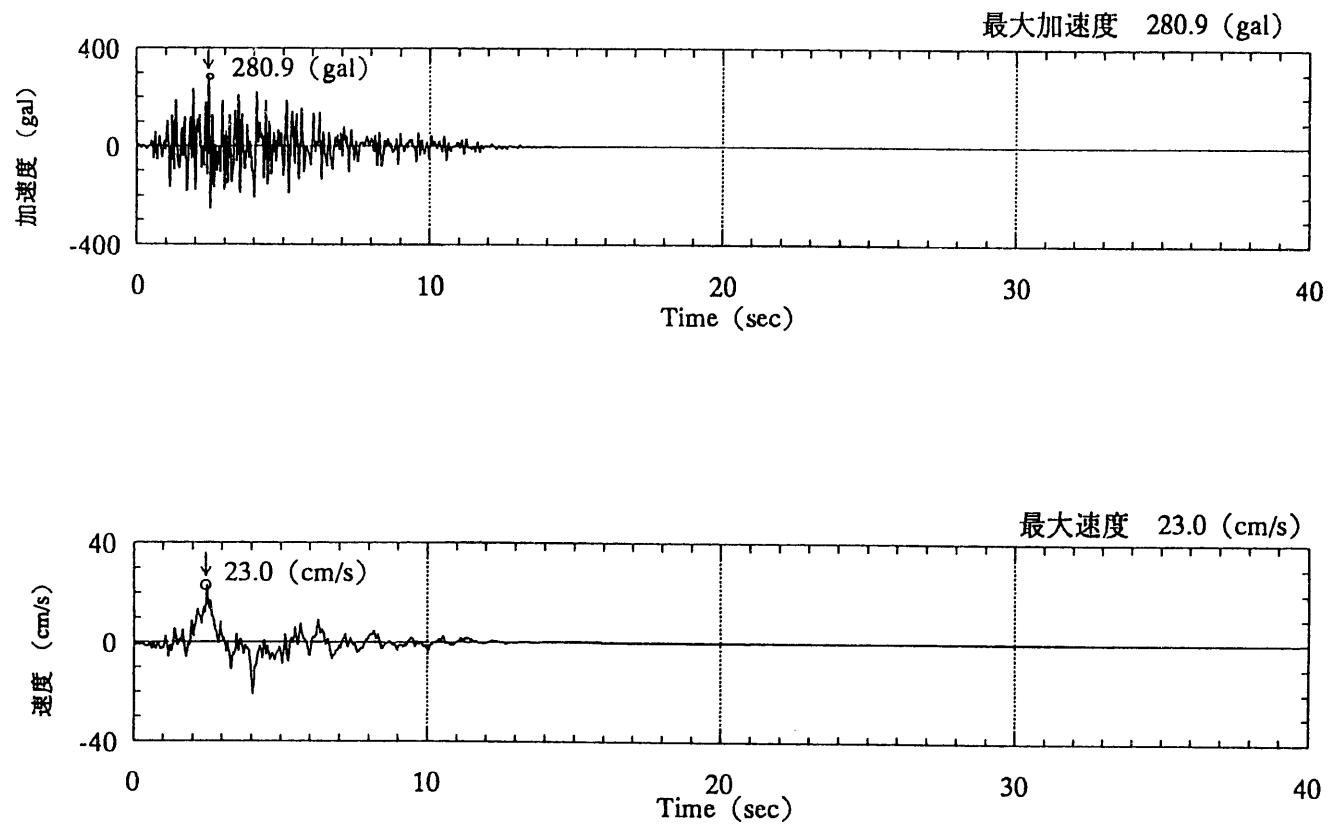


図 3-22 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{2K}-N の加速度及び速度波形

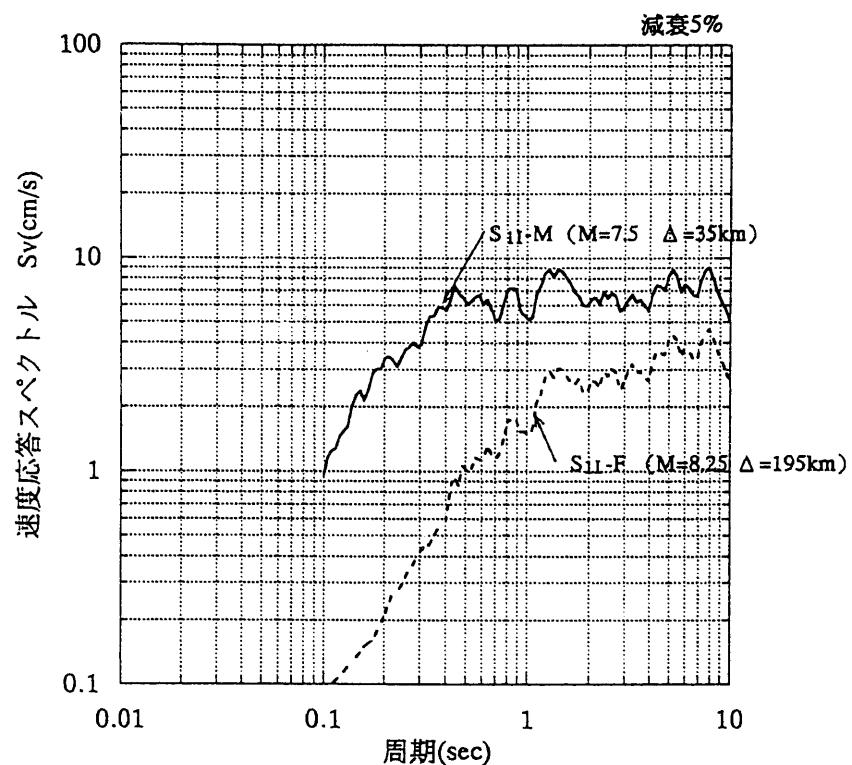


図 4－1 (1) 地震基盤表面における基準地震動 S_{11}
の速度応答スペクトル

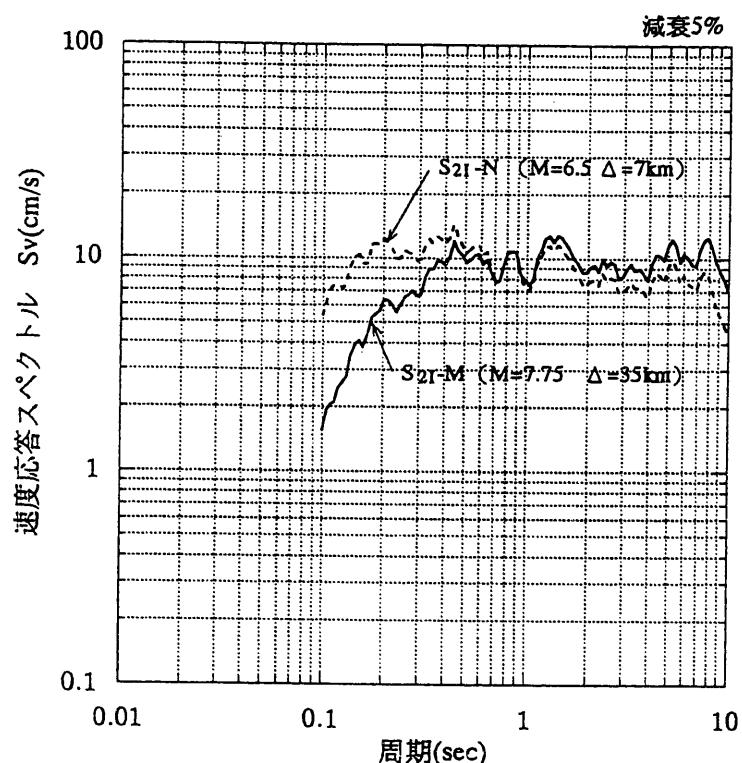


図 4-1 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S_{21} の速度応答スペクトル

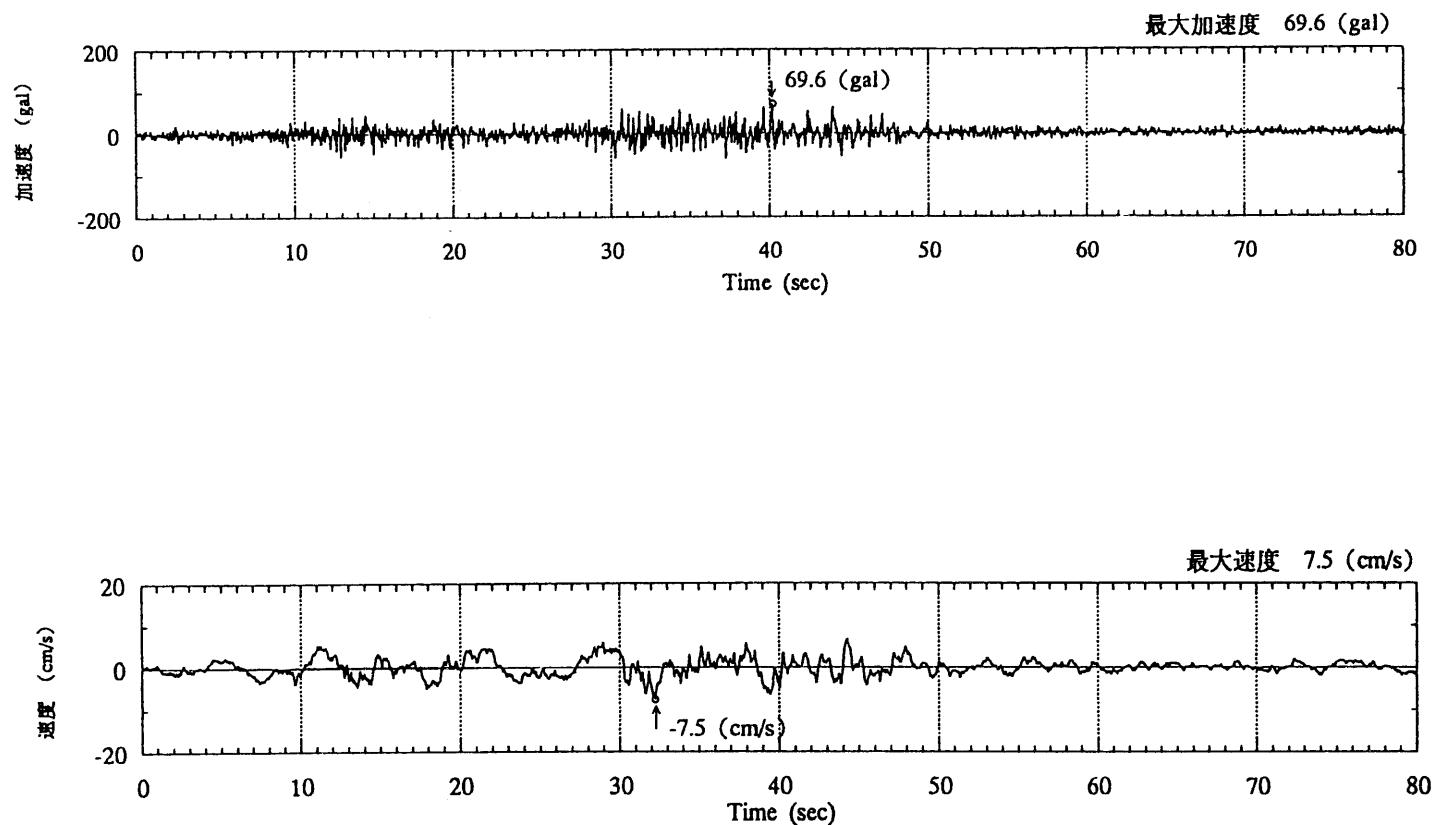


図 4-2 (1) 地震基盤表面における基準地震動 $S_{11}-M$ の加速度及び速度波形

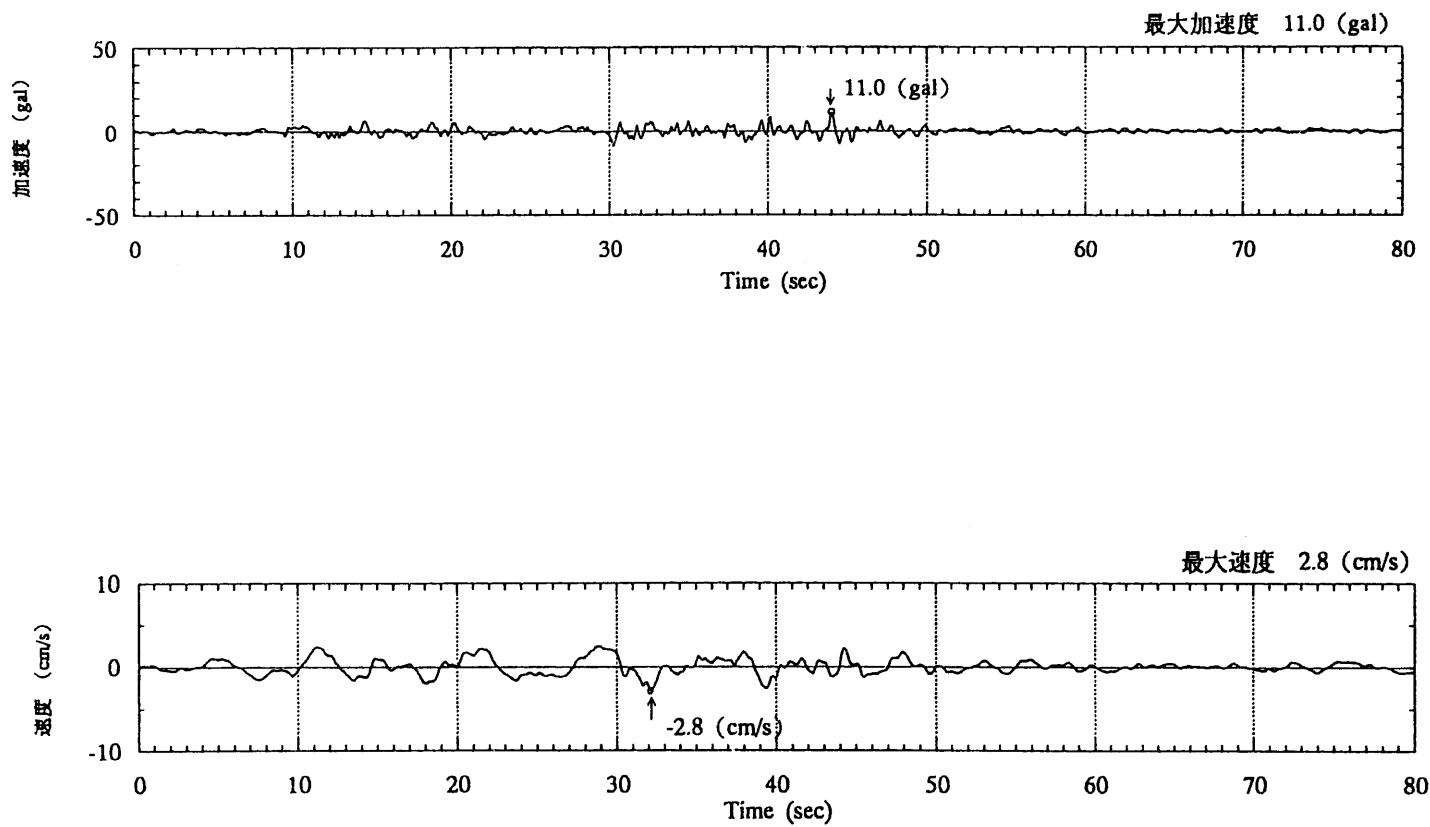


図 4－2 (2) 地震基盤表面における基準地震動 S₁₁－F の加速度及び速度波形

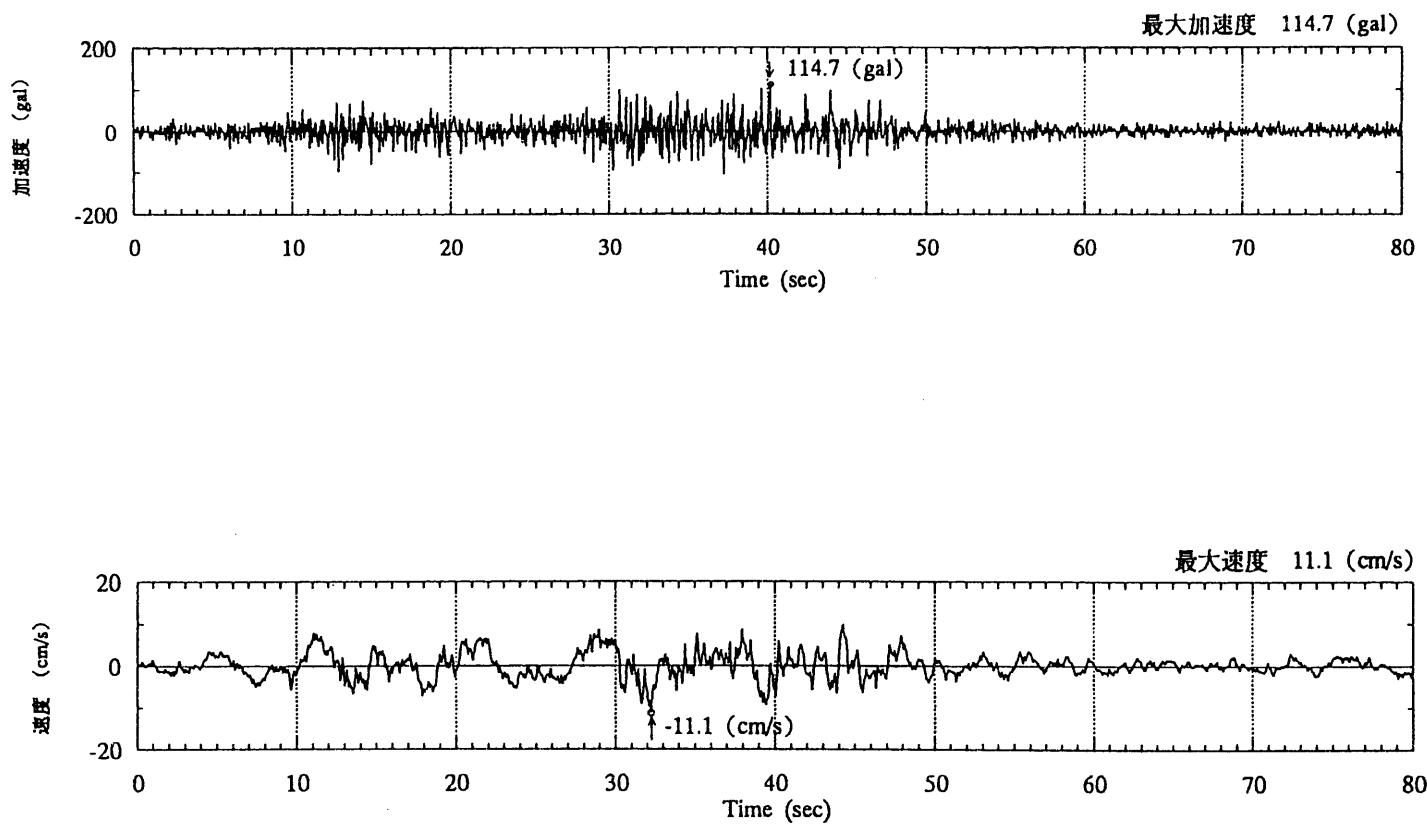


図 4-2 (3) 地震基盤表面における基準地震動 S₂₁-M の加速度及び速度波形

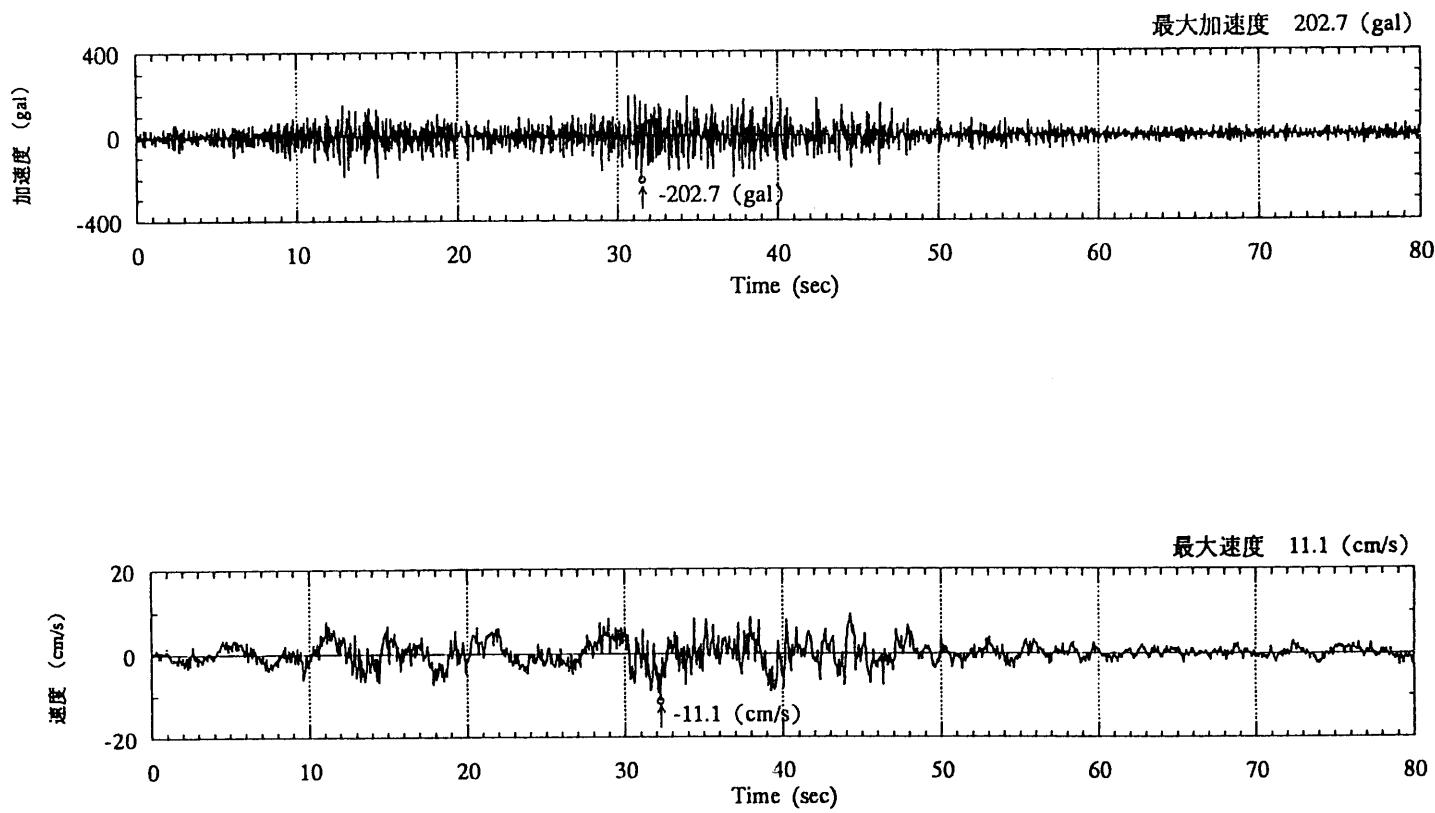


図 4-2 (4) 地震基盤表面における基準地震動 S₂₁-N の加速度及び速度波形

標高 +6m (GL ±0m)	せん断波速度 Vs (m/s)	重量密度 γ (t/m³)
4 (-2)	100	1.70
1 (-5)	250	1.74
-8 (-14)	460	1.79
-24 (-30)	520	1.79
-36 (-42)	470	1.83
-57 (-63)	570	1.82
-78 (-84)	600	1.81
-96 (-102)	470	1.81
-134 (-140)	550	1.78
-176 (-182)	570	1.74
解放基盤表面▽ -274 (-280)	530	1.71
	1,200	2.00
-894 (-900)	2,100	2.4*
地震基盤表面▽ -1624 (-1630)	3,000	2.6*

*推定値

図4-3 地盤の速度構造

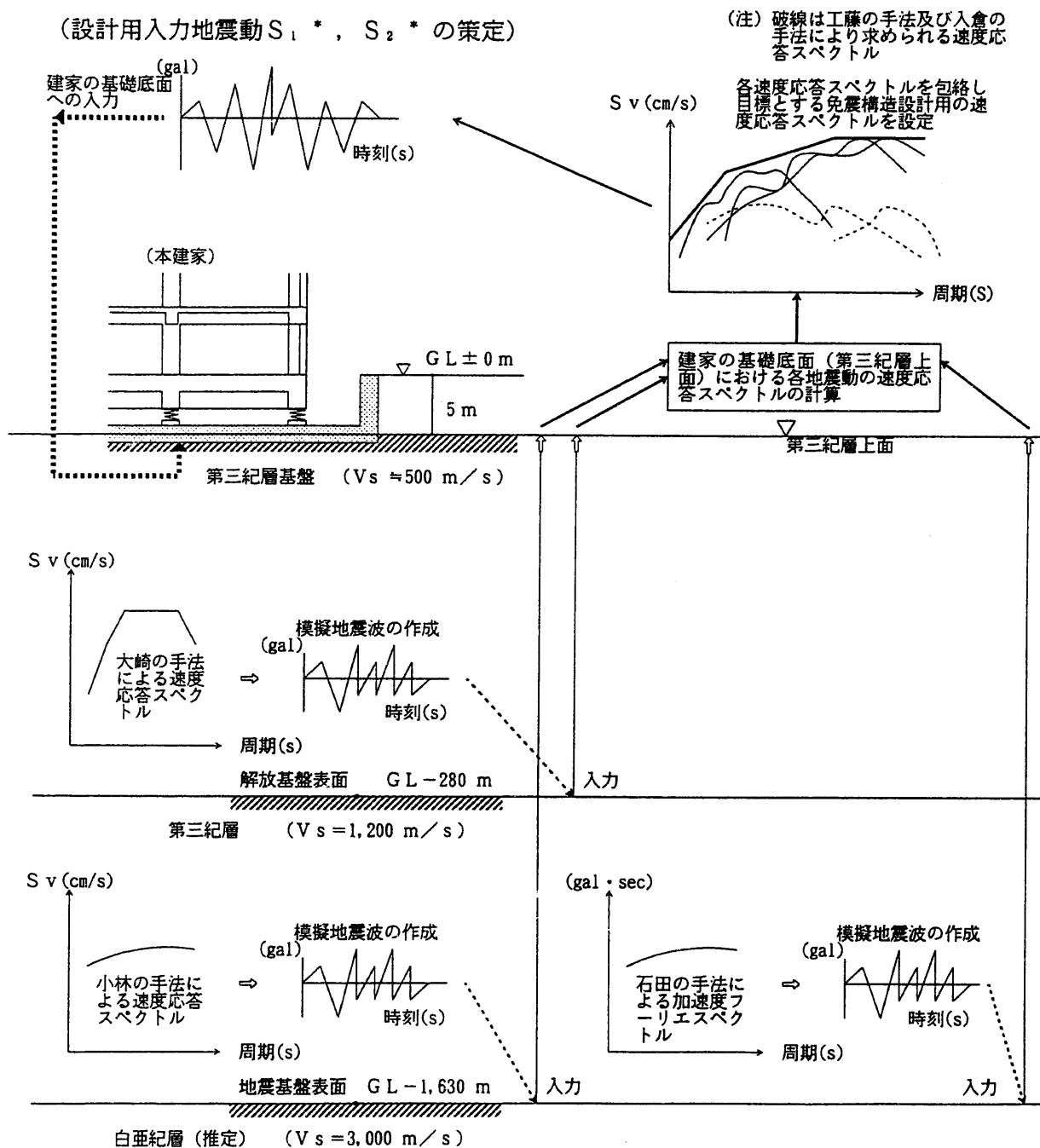
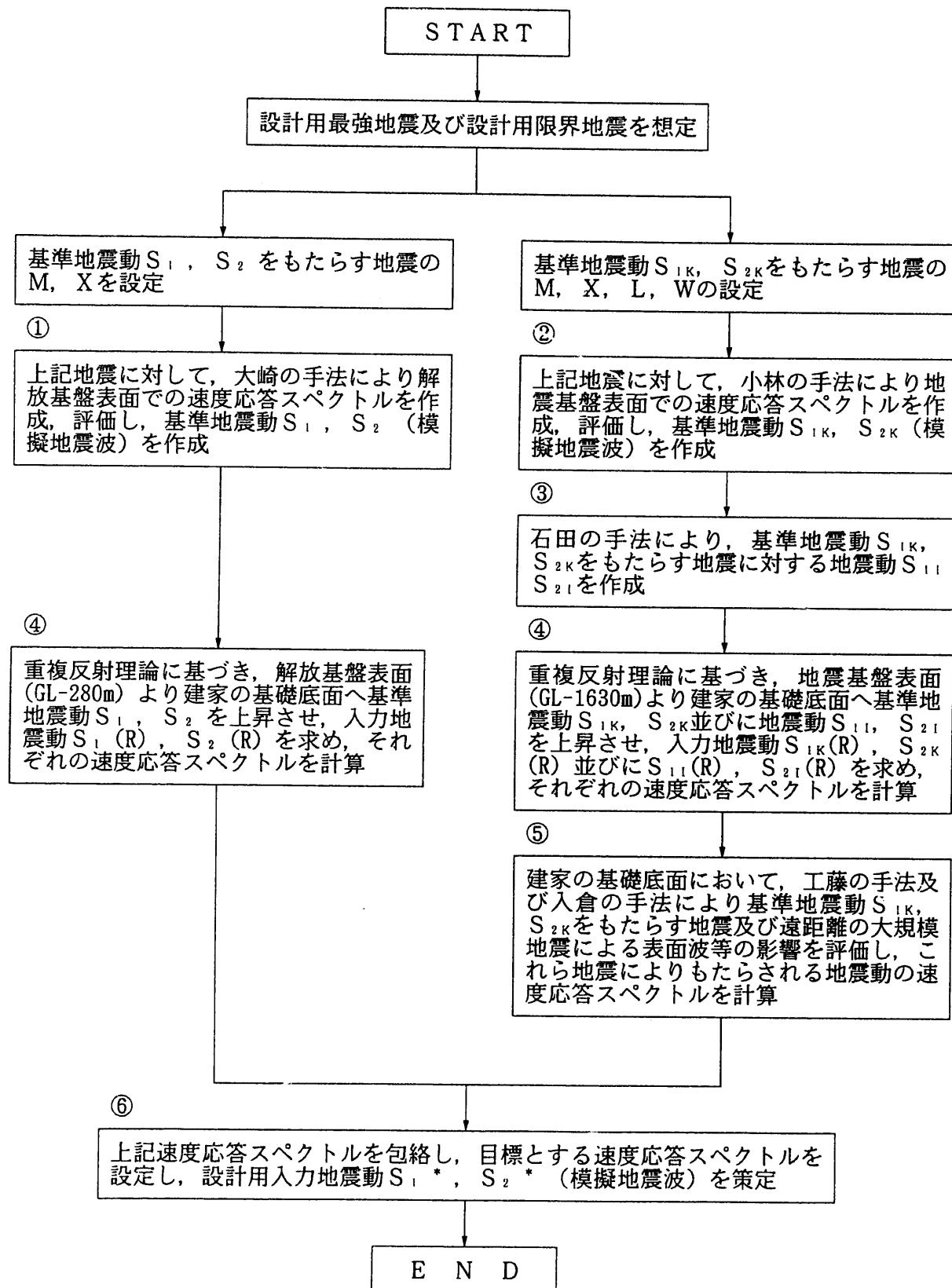


図 4-4 設計用入力地震動の策定概念図

図 4-5 設計用入力地震動 S_1^* 及び S_2^* の策定フロー

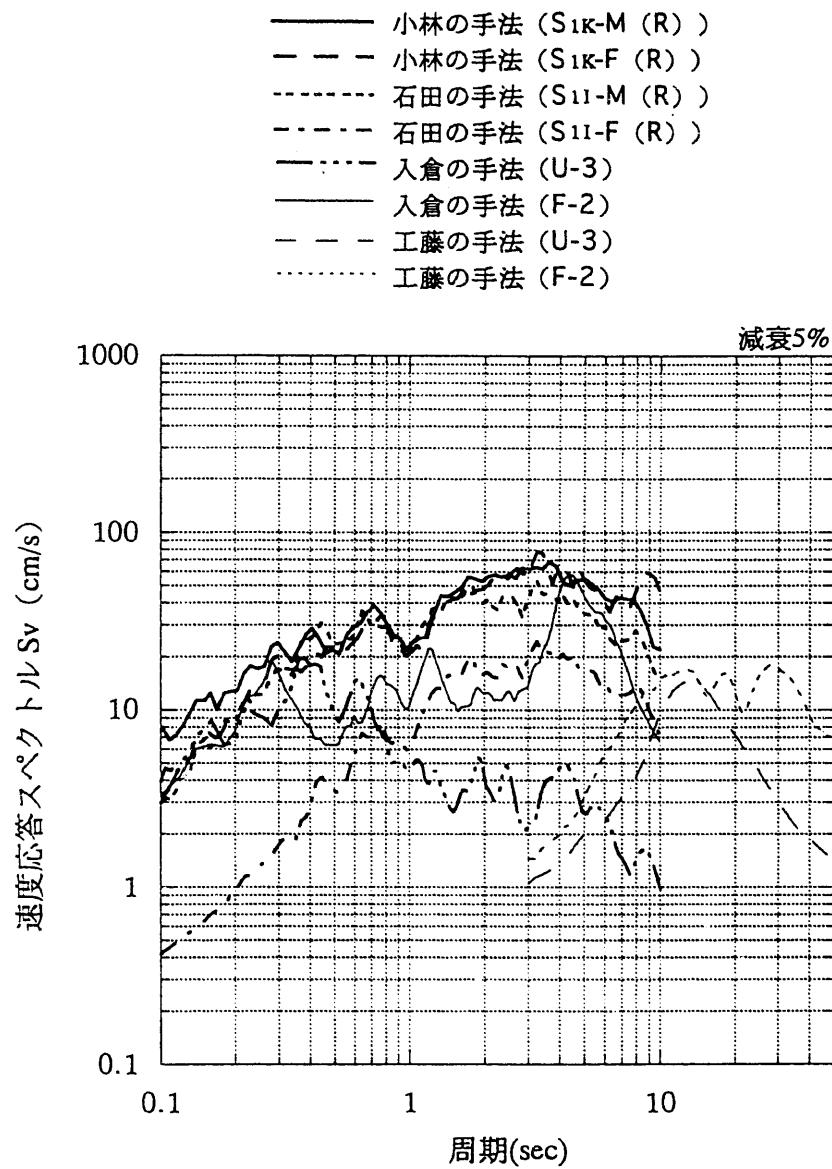


図4-6 (1) 基準地震動 S_{1K} をもたらす地震及び遠距離大地震^{*1}による
地震動の建家の基礎底面における速度応答スペクトル
(小林の手法、石田の手法、工藤の手法及び入倉の手法による)

* 1 : 遠距離大地震 震央距離100kmを越え250km程度以下、マグニチュード8.0以上の大地震

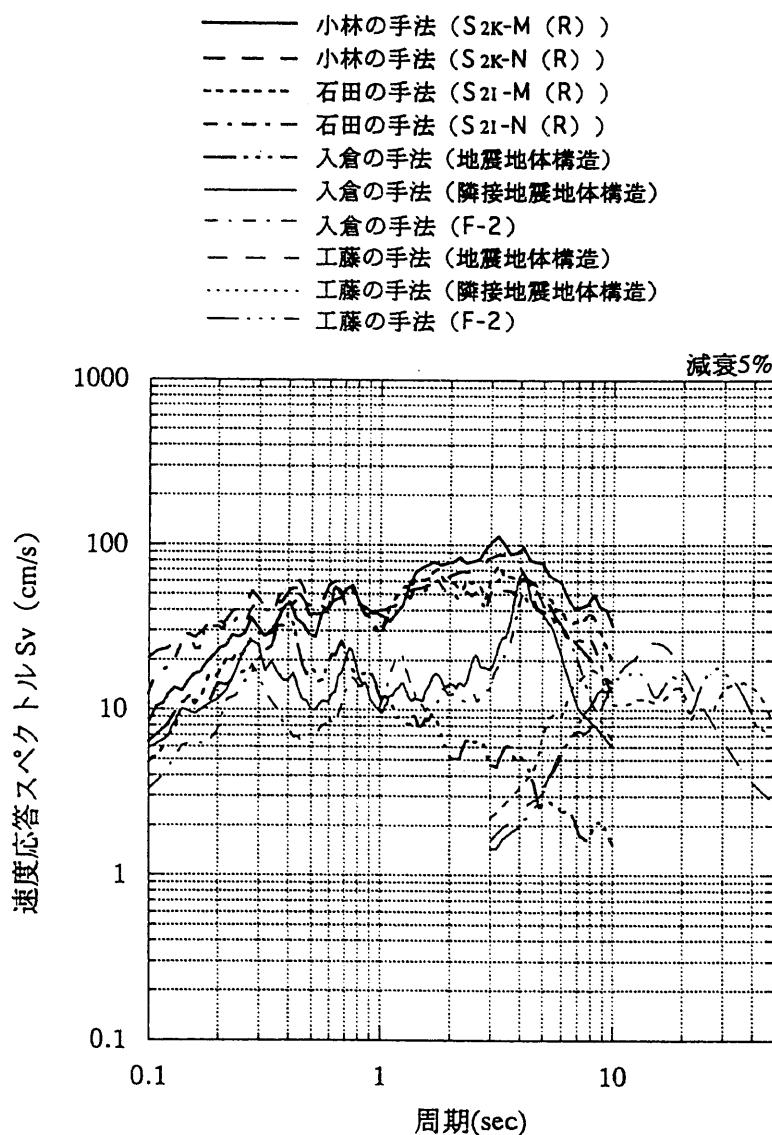


図 4-6 (2) 基準地震動 S_{2k} をもたらす地震及び遠距離大地震^{*1}による
地震動の建家の基礎底面における速度応答スペクトル
(小林の手法、石田の手法、工藤の手法及び入倉の手法による)

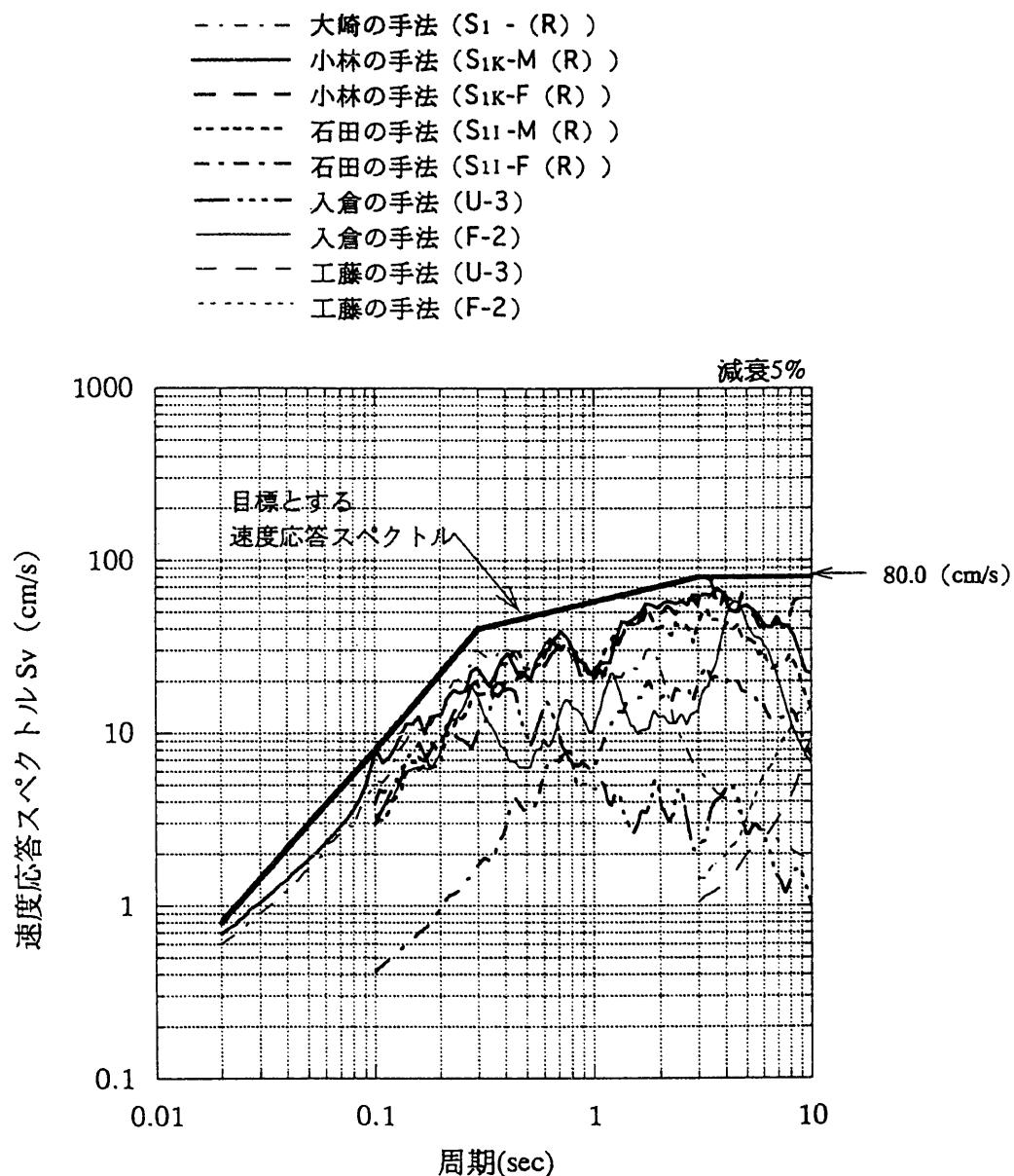
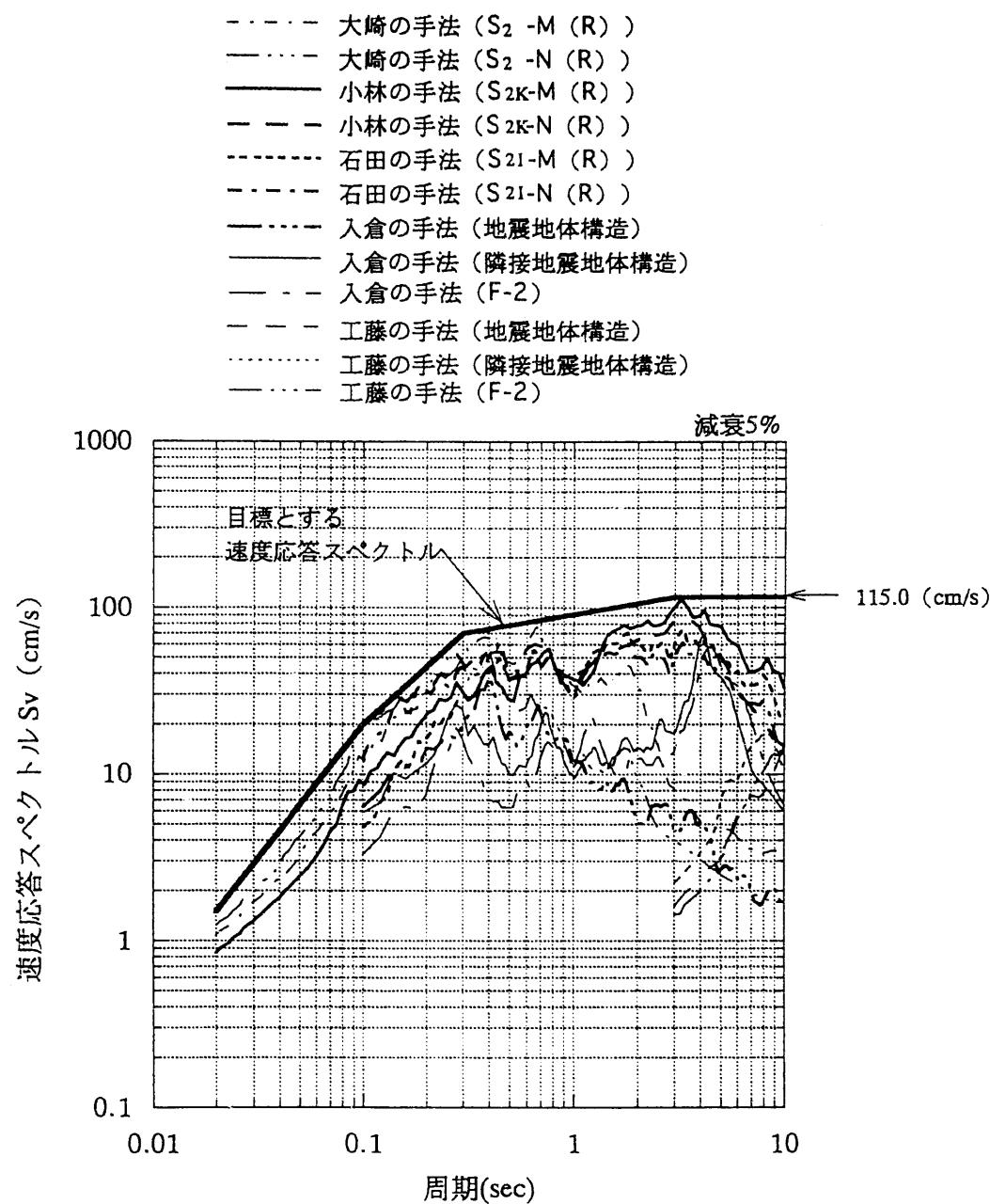


図 4-7 (1) 目標とする設計用入力地震動 S_{1*} の速度応答スペクトル

図 4-7 (2) 目標とする設計用入力地震動 S_2^* の速度応答スペクトル

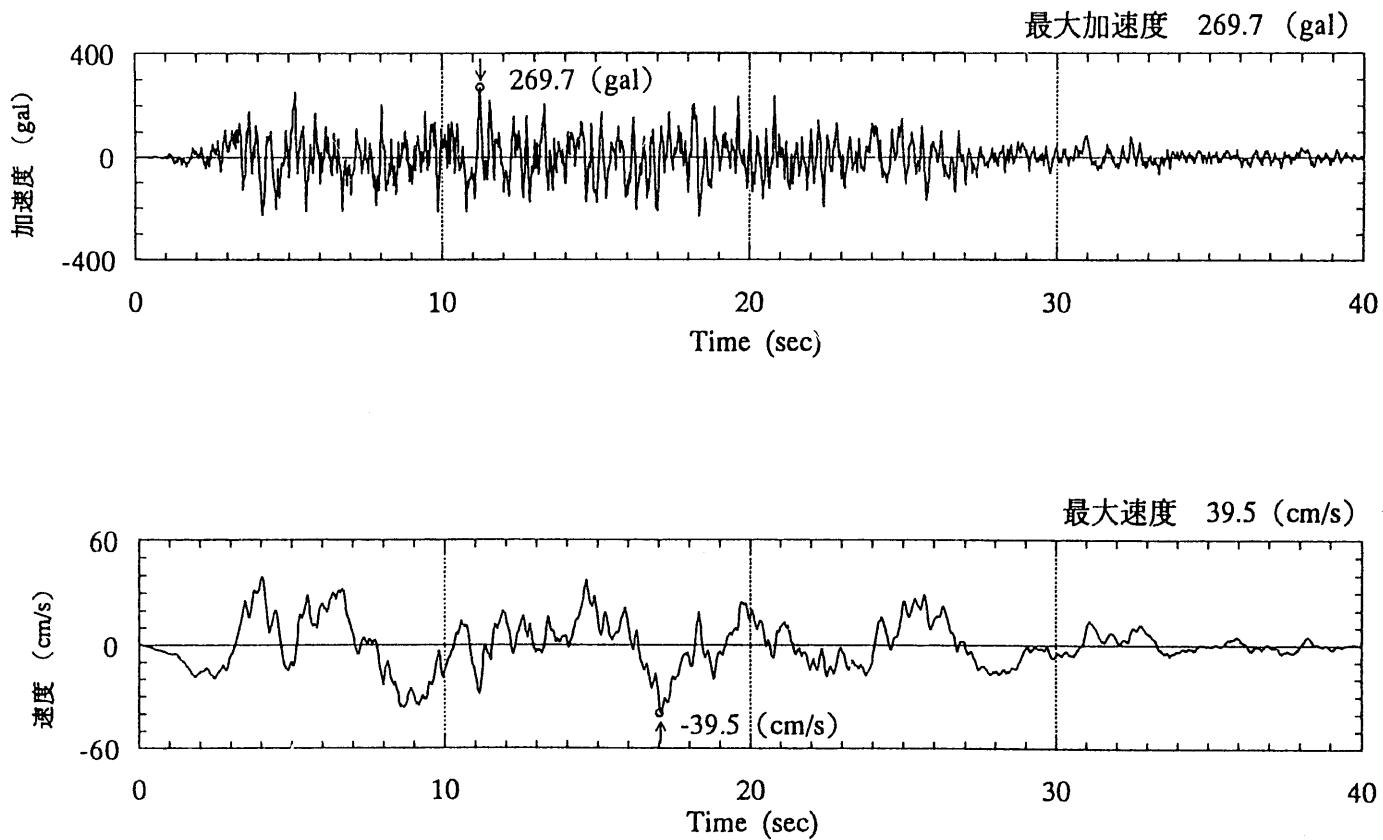


図 4-8 設計用入力地震動 S_1^* の加速度及び速度波形（建家の基礎底面：標高 - 0.2 m）

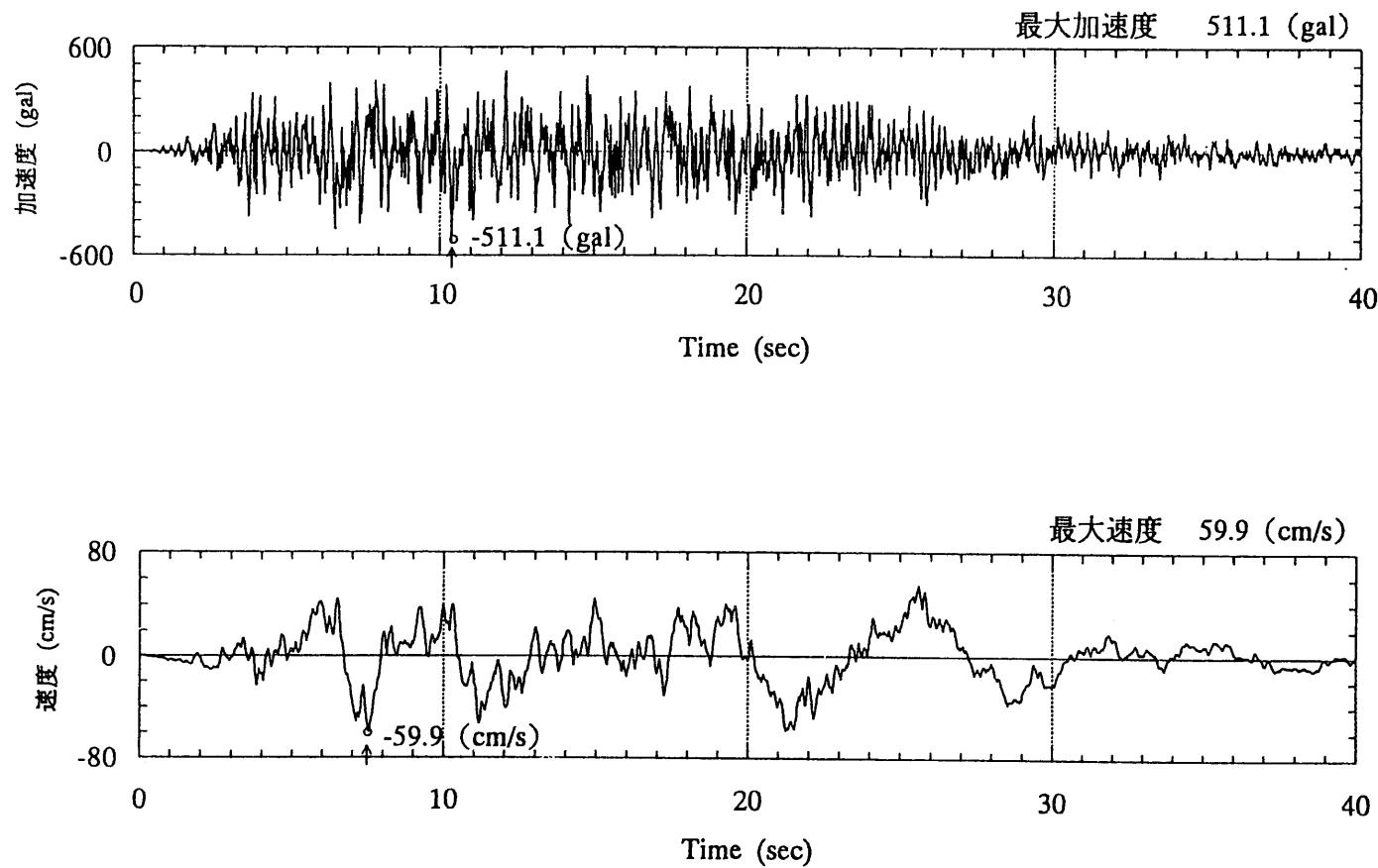


図 4-9 設計用入力地震動 S_z^* の加速度及び速度波形（建家の基礎底面：標高 - 0. 2 m）

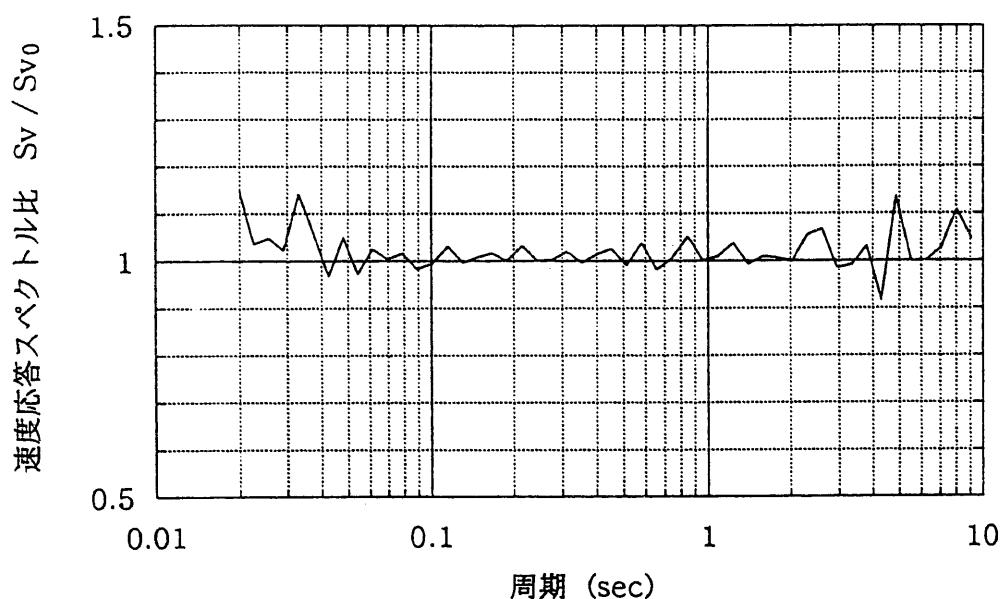


図 4-10 (1) 設計用入力地震動 S_1^* の速度応答スペクトルの適合度
(建家の基礎底面: 標高 - 0.2 m)

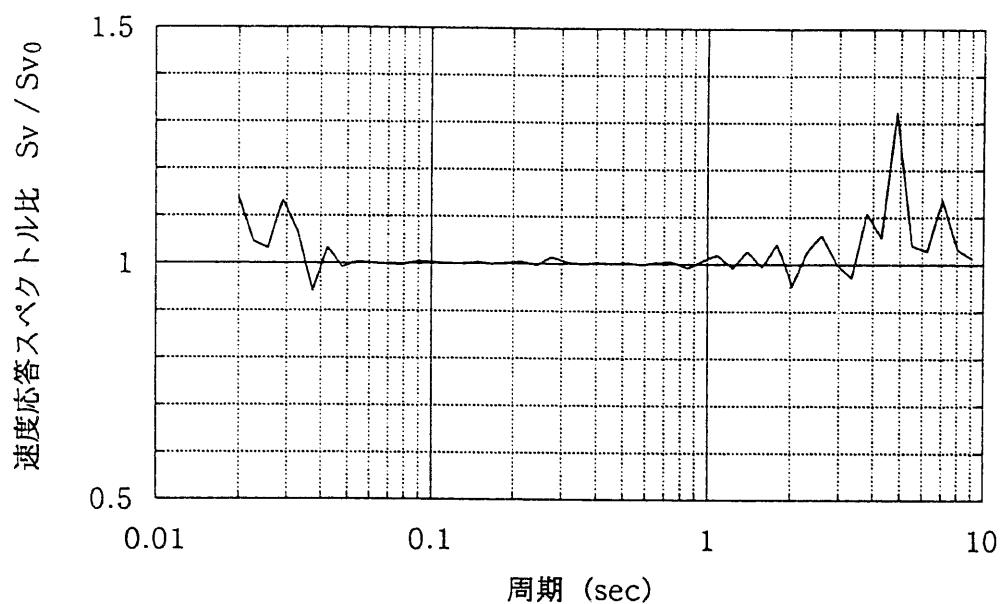


図 4-10 (2) 設計用入力地震動 S_2^* の速度応答スペクトルの適合度
(建家の基礎底面: 標高 -0.2 m)

東海事業所

敷地におけるやや長周期の地震動について

平成 8 年 12 月

目 次

1. はじめに	85
2. 敷地におけるやや長周期地震動について	
2. 1 敷地における地震動のやや長周期成分について	86
2. 2 地震観測による敷地における地震動の やや長周期成分についての検討	89
2. 3 敷地の深い地盤構造に基づく地震動特性	95
3. まとめ	97
参考文献	98

1. はじめに

再処理施設ユーティリティ施設建家（以下、本建家という）は、建家の上部構造を安定に支持し、かつ、固有周期を長周期化するための積層ゴムと地震エネルギーを吸収するための減衰機構（ダンパー）を用いた免震構造を採用しているため、その水平方向の固有周期は想定される地震動下において2～4秒程度となる。

耐震設計上は、この免震構造の固有周期帯域を含む1～10秒程度の周期はやや長周期と呼ばれており、敷地地盤のやや長周期の地震動特性は、当該敷地や地震波伝播経路のより深い地下構造の影響を受けるとされている。

従って本資料では、以下のことについて調査、検討した結果をまとめている。

- ① 敷地周辺における地震動特性、特にやや長周期成分の地震動について文献調査を実施した。
- ② 敷地での地震観測により、敷地周辺におけるやや長周期地震動の発生状況について調査を実施し、解析を行った。
- ③ 敷地の深い地盤の速度構造をモデル化し振動解析を行い、深い地盤の速度構造及び不整形性の影響によるやや長周期地震動の增幅について検討を行った。

2. 敷地におけるやや長周期地震動について

2.1 敷地における地震動のやや長周期成分について

本建家敷地において、敷地周辺の地震動特性、特にやや長周期成分の大きさについて文献調査を実施した。

岡田らは、『日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み』⁽¹⁾ の中で、やや長周期での敷地（地盤）の揺れやすさに深い地盤が大きく関与していることを明らかにし、中でも数100m～数kmの厚さの堆積層上に位置する地点は揺れやすいことを述べている。

さらに、気象庁の地震観測網で得られた最大振幅記録と震央距離との関係を統計処理することによって求めた、各観測地点でのやや長周期での揺れやすさ（マグニチュードと震央距離から定まる標準最大振幅に対する最大振幅の比）の評価では、東京の揺れやすさが2.0以上（日本の標準的な地点の揺れに比べ2倍以上の揺れが生じることを意味する）であるのに対して、敷地周辺では水戸が1.4、銚子が0.76、柿岡が0.95となっている（図-1参照）。敷地近傍においては第三紀層基盤が地下深度0～数10mと浅いことも合わせ考えると、図-1より敷地周辺では、やや長周期での揺れやすさとしては平均的な位置づけにある。

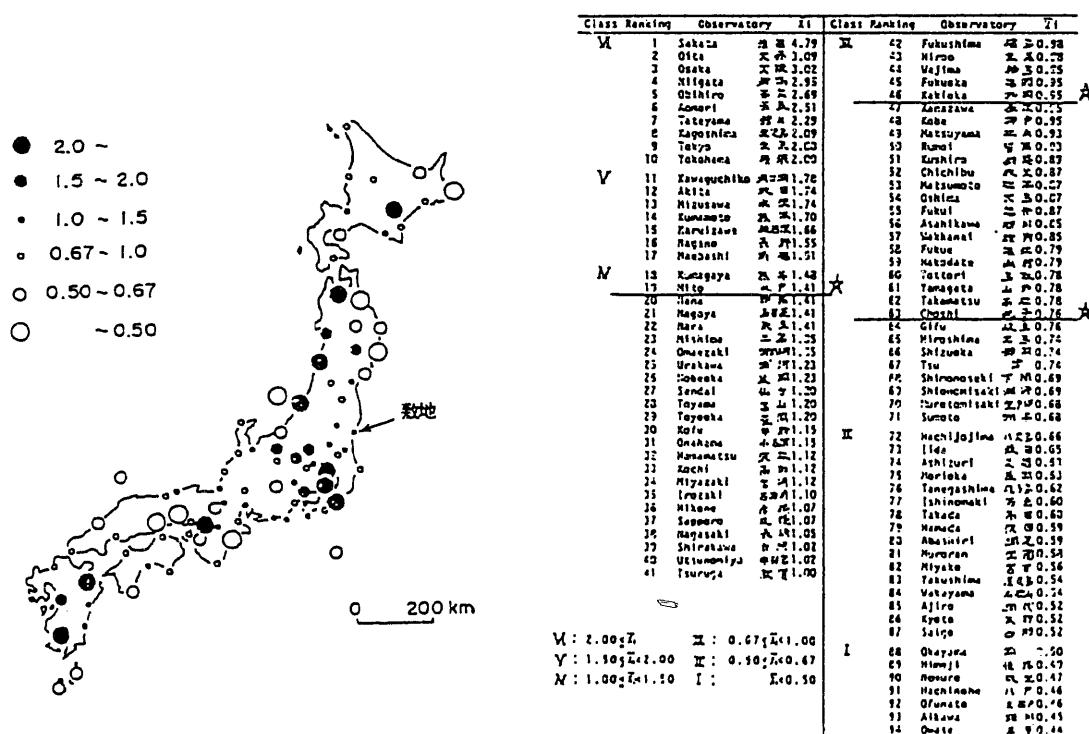


図-1 日本各地におけるやや長周期での揺れやすさの値(統計処理した値を6段階で表示)

また、工藤等⁽²⁾は、図-2に示すように全国各地における揺れやすさを周期毎に区分して示している。同図によると、敷地周辺での周期3～5秒での揺れやすさは全国平均的なものである。

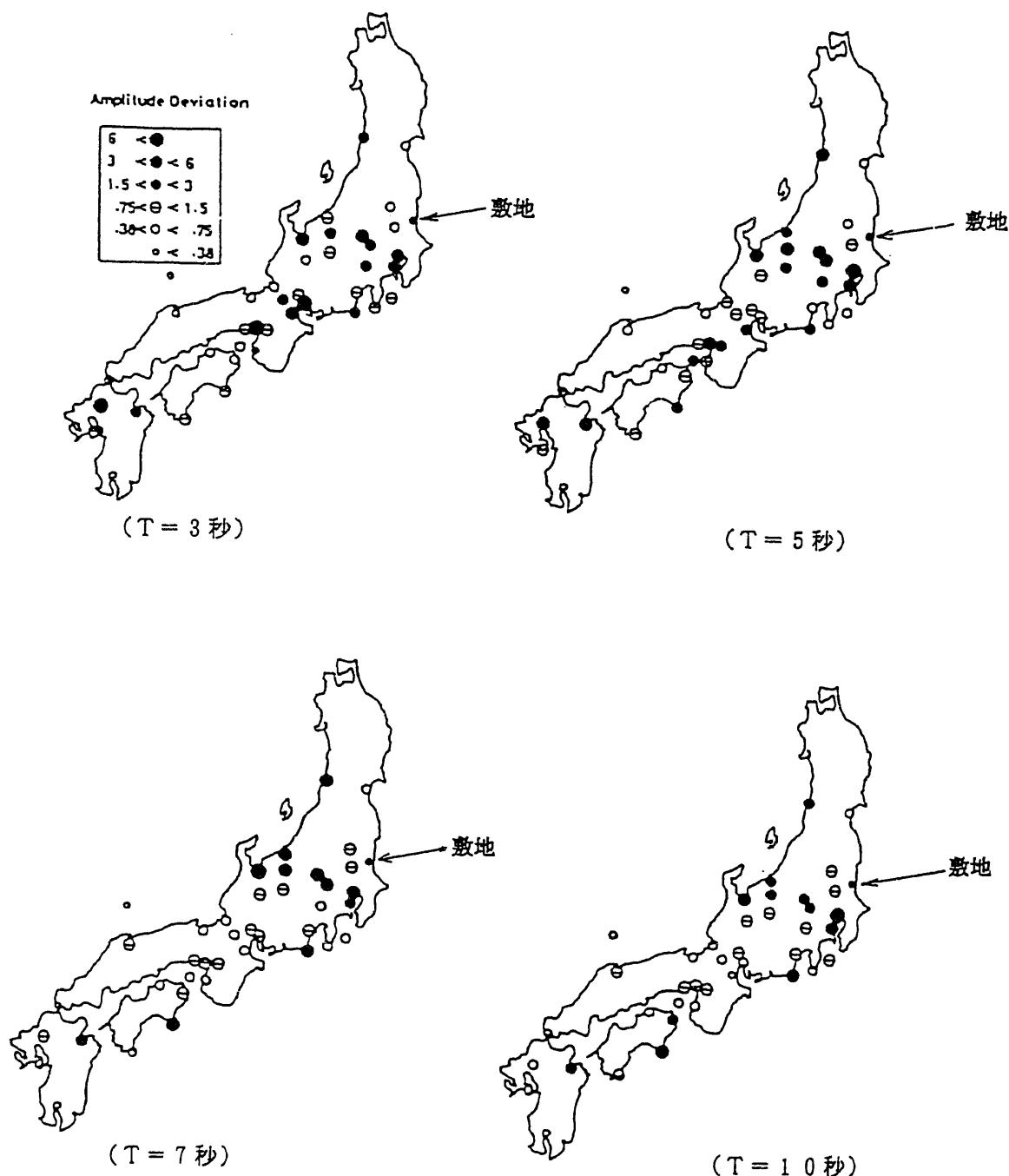


図-2 全国各地における周期毎の揺れやすさ分布図（6段階評価）

また小林・長橋⁽³⁾は、図-3に示すように全国各地の地震記録を基に、各観測点の地盤の増幅率と周期の関係を検討している。

この図によると、スペクトルの短周期側にピークを有し、長周期側ではほぼ一様に小さくなる地域として宮古、東海村等が挙げられており、長周期側でピークを有する地域として青森、八戸等が挙げられている。

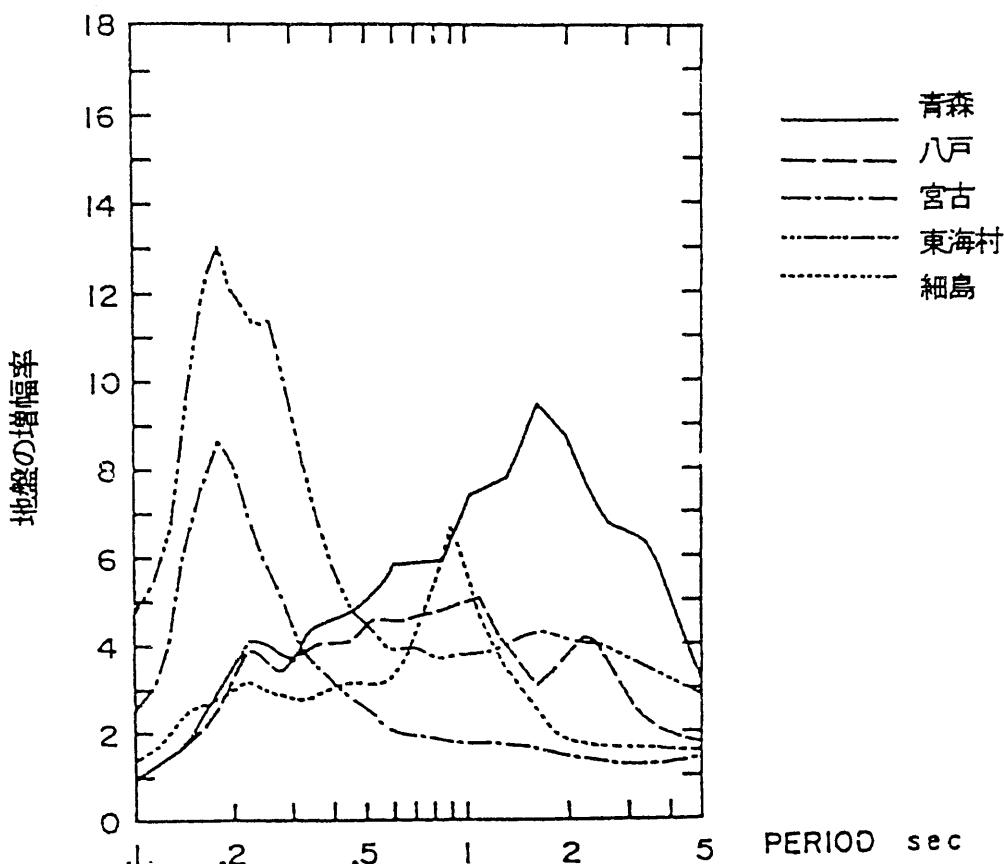


図-3 各観測地点での地盤の増幅率

以上の3つの文献は、敷地周辺においては、やや長周期での揺れやすさは全国の平均的な大きさの範囲にあり、やや長周期での揺れやすさが卓越する地域ではないことを示している。

2.2 地震観測による敷地における地震動のやや長周期成分についての検討

東海事業所では1988年から構内での地震観測を実施しており、現在までに100波程度の観測記録が蓄積されている。この中で水戸震度IVの地震は10回、震度IIIの地震は36回、震度II以下の地震は54回記録されている。

この地震の震源位置を、地震発生頻度の高い地域ごとに分類して図-4の地域分類図に示す。

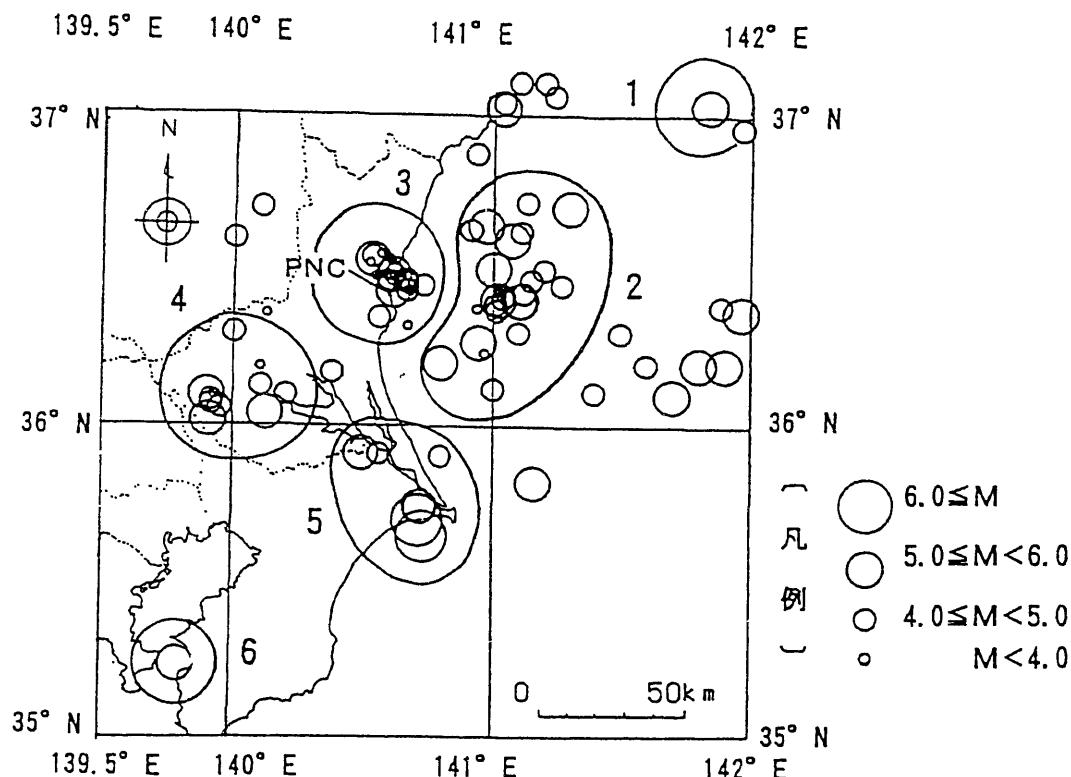


図-4 東海事業所で観測された地震の震源位置と発生地域分類図

(ただし地図外のものについては表示していない)

同図に基づき地震の発生地域を以下の6箇所に分類した。

- | | |
|-------|------------------|
| ゾーン1) | 福島県沖（もしくはそれ以北）地震 |
| ゾーン2) | 茨城県沖地震 |
| ゾーン3) | 鹿島灘、敷地近傍地震 |
| ゾーン4) | 茨城県南西部地震 |
| ゾーン5) | 千葉県北部地震 |
| ゾーン6) | 東京湾（もしくはそれ以南）地震 |

表-1では、地震の発生状況から発生地域をゾーン分類し、各ゾーン毎にマグニチュードが大きいものを選択し2～3個づつ記載している。これらの地震の地域特性（震源距離・入力方向等の違いによる敷地への影響）について検討するため、表-1に示した地域分類に基づいて作成した応答スペクトルを図-5～10に示す。

この図を見ると、福島県沖（図-5）および千葉県北部（図-9）の地震で、やや長周期側（3～4秒付近）に近距離地震では見られない卓越領域が存在している。これは短周期成分に比較して長周期成分の減衰が小さいためと考えられるが、最も大きな卓越を示している千葉県北部地震（図-9）でも2cm/sとレベル自体は小さい。

また全体の傾向としては、1秒以下の短周期側にピークを持つ茨城県沖（図-6）および鹿島灘、敷地近傍（図-7）の地震の発生頻度が高く、長周期成分が見られる遠方地震の発生頻度は小さい。

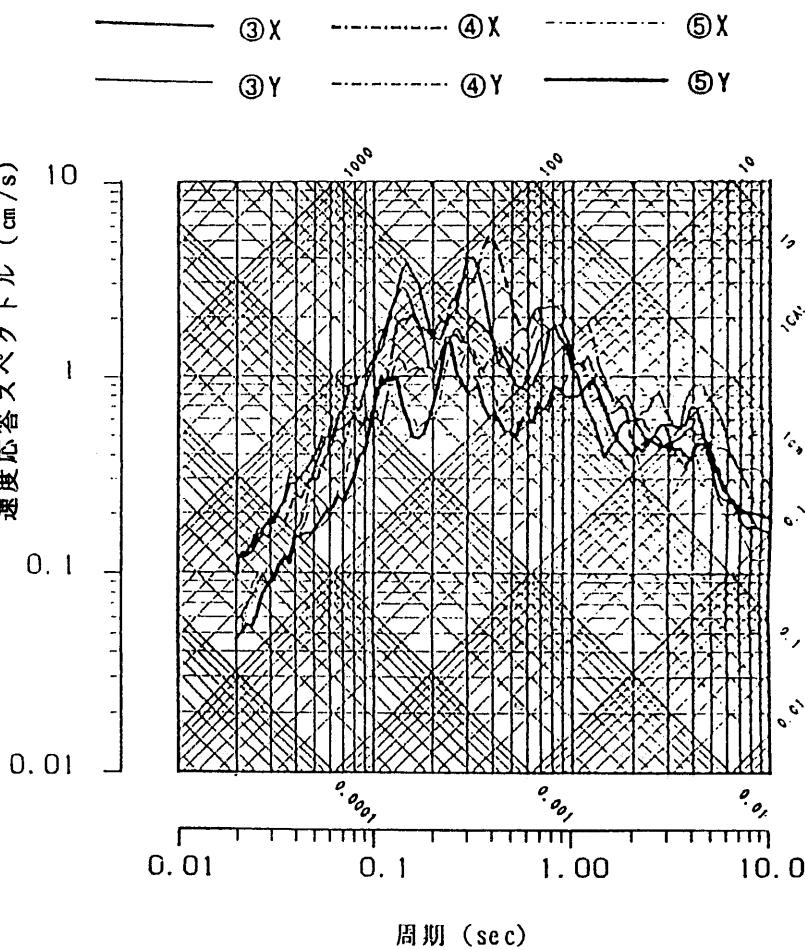
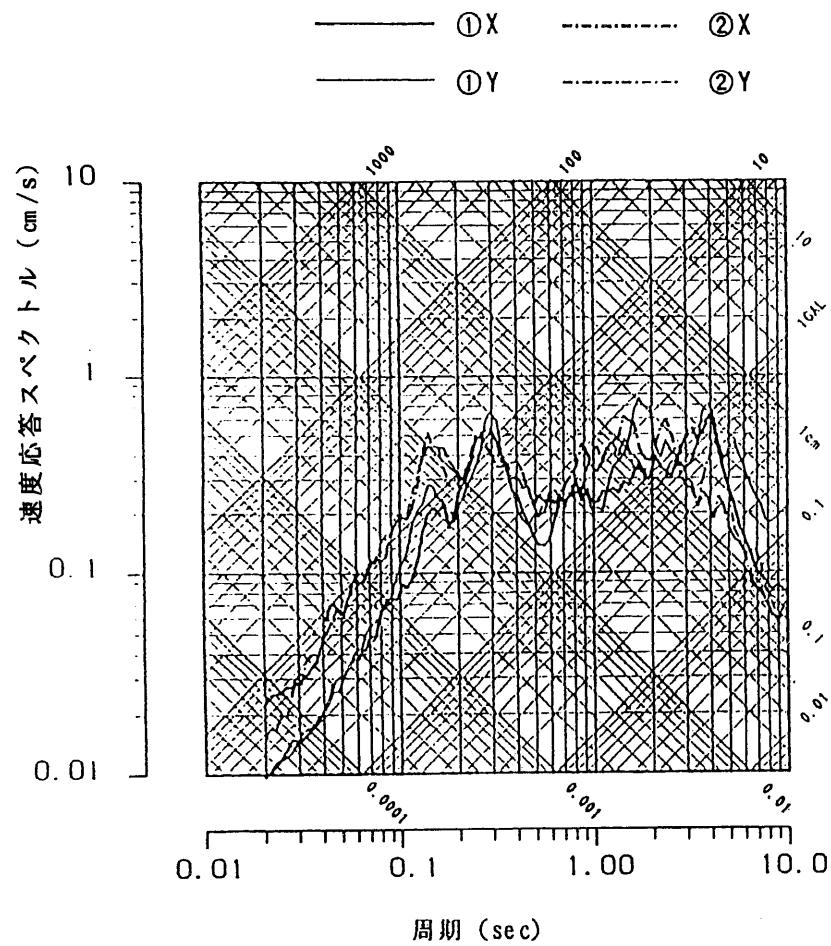
以上の地震観測では、短周期に大きな卓越成分を持つ地震が支配的であり、やや長周期成分の大きな地震で、加速度が大きいものは観測されていない結果となっている。

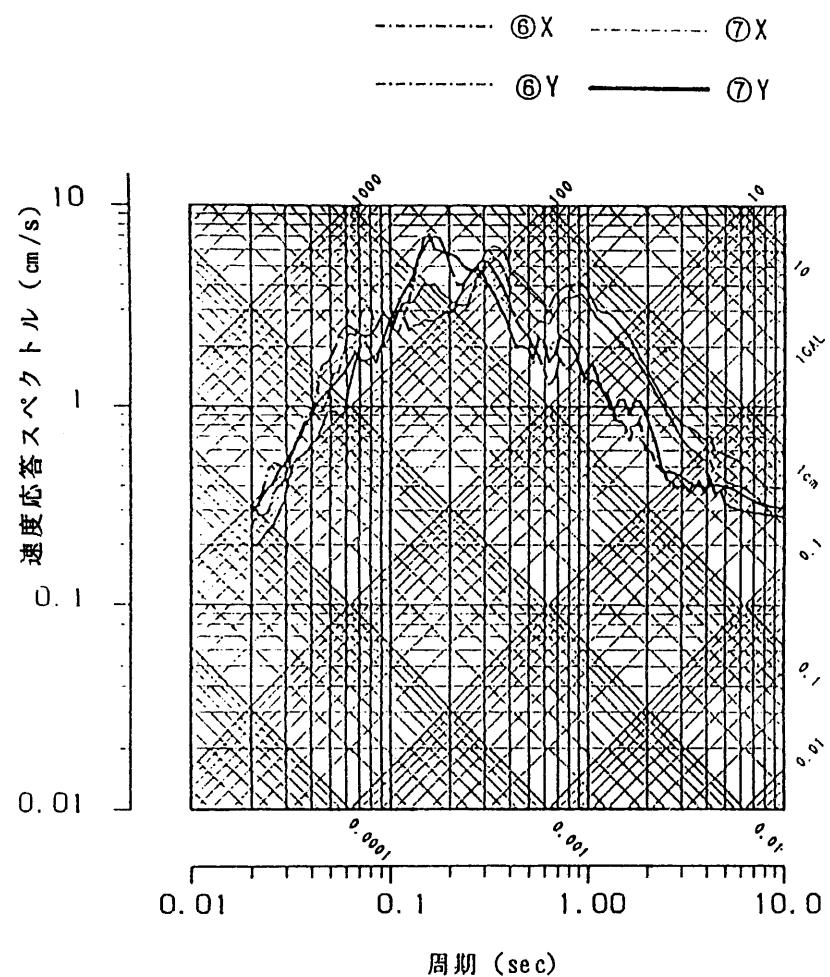
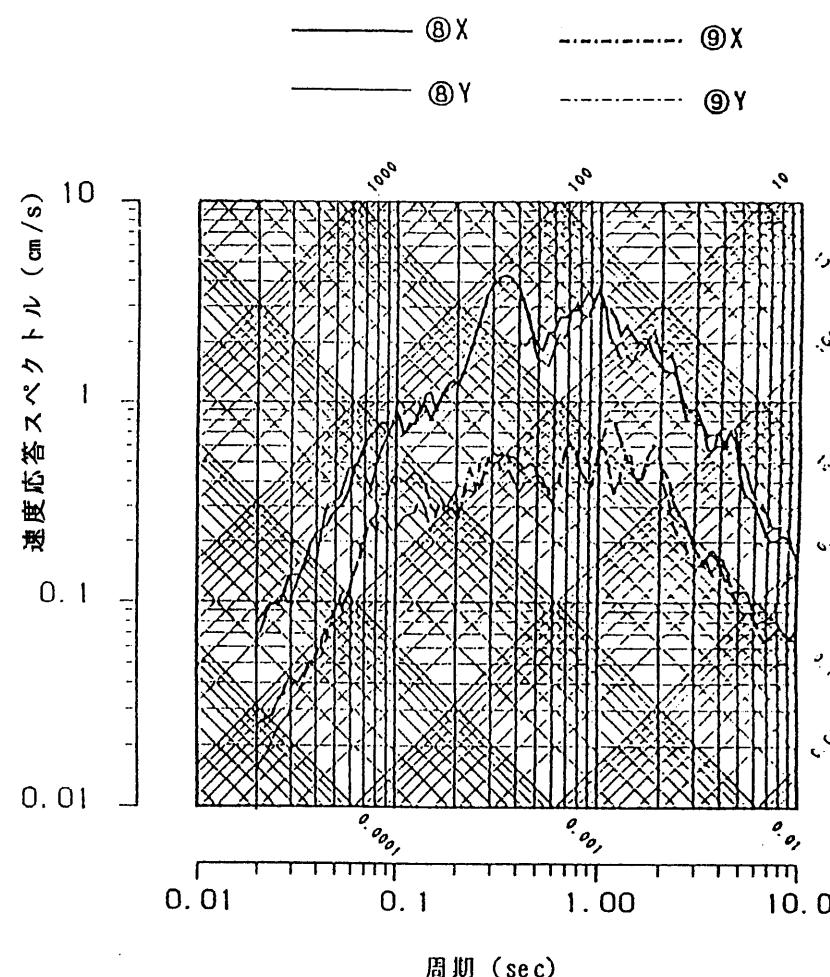
表-1 観測地震の地域分類表

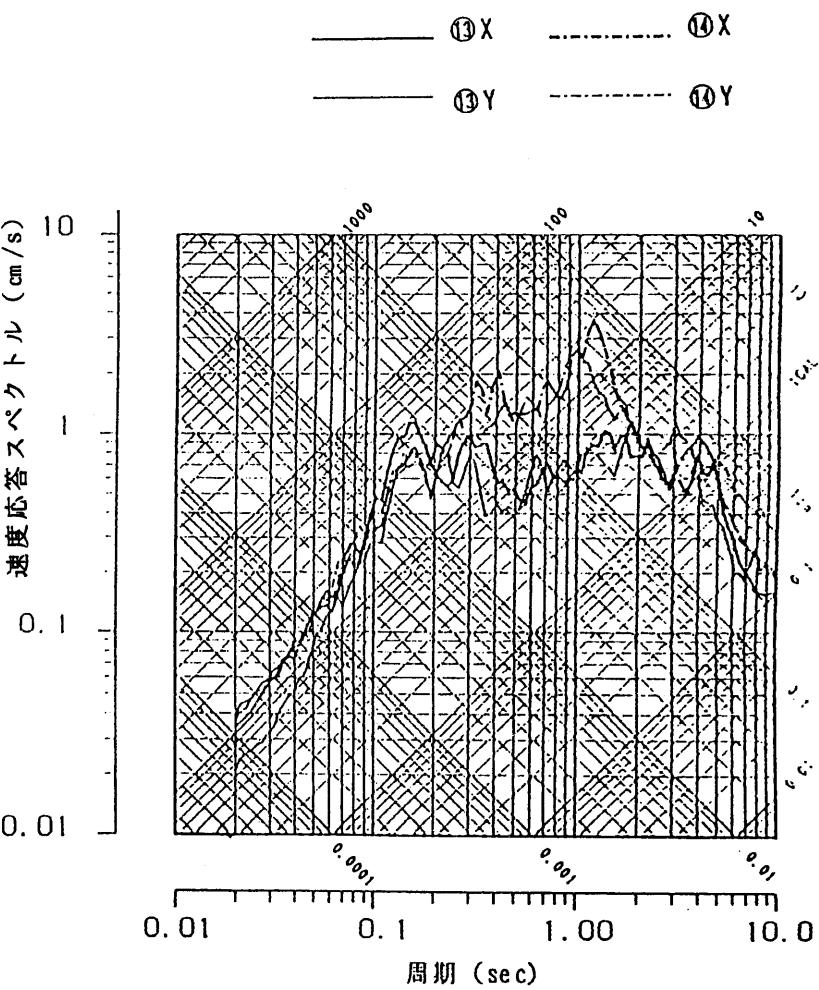
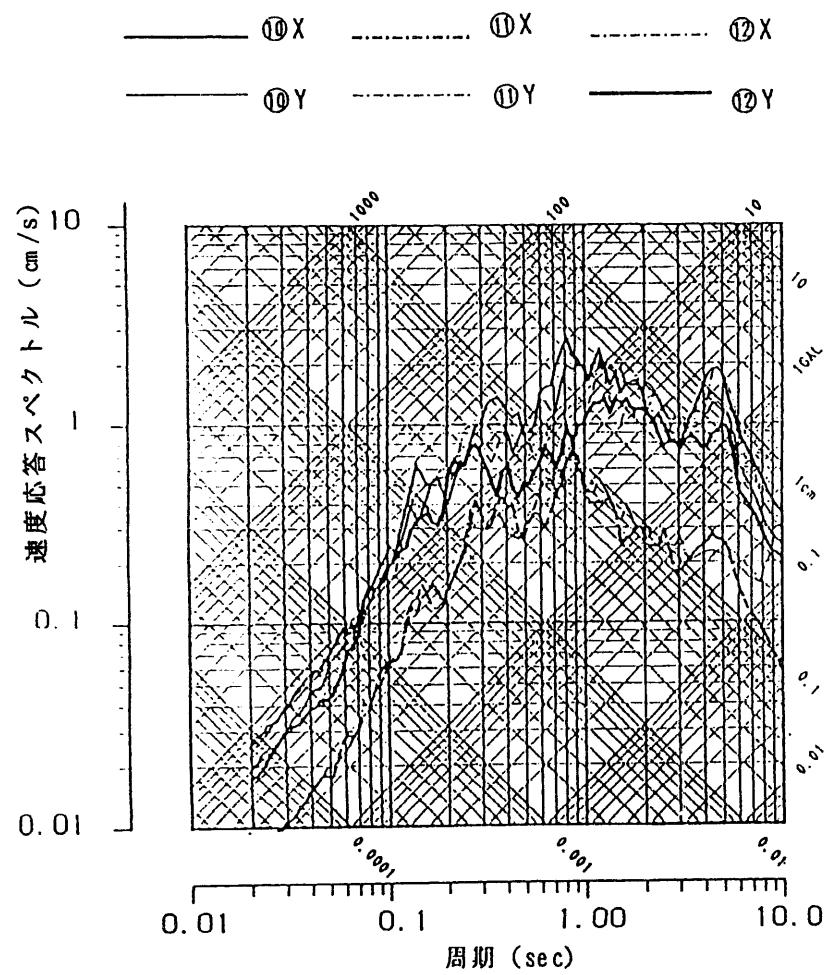
ゾーン	No	地震観測時刻	震源地	震度 (水戸)	マグニチュード	震央距離 (km)	深さ (km)	最大加速度(gal)		
								基盤※		
1	①	93.11.27 15:12:26	宮城県北部	II	5.9	246.6	112	X(NS)	5.0	
			経度 141° 20.3					Y(EW)	3.0	
			緯度 38° 34.9					Z(UD)	3.0	
	②	88.10.19 9:9:13	福島県沖	II	5.8	127.5	32	X(NS)	3.0	
			経度 141° 50.0					Y(EW)	3.0	
			緯度 37° 1.8					Z(UD)	2.0	
2	③	89.12.9 2:23:41	茨城県沖	IV	5.6	45.1	46	X(NS)	34.41	
			経度 141° 4.5					Y(EW)	33.24	
			緯度 36° 34.7					Z(UD)	20.0	
	④	90.8.5 12:36:35	茨城県沖	IV	5.8	45.2	39	X(NS)	28.29	
			経度 141° 6.6					Y(EW)	15.95	
			緯度 36° 24.1					Z(UD)	19.0	
	⑤	90.2.12 2:46:22	茨城県沖	IV	5.3	37.2	38	X(NS)	12.10	
			経度 141° 1.2					Y(EW)	13.81	
			緯度 36° 24.1					Z(UD)	10.0	
3	⑥	90.5.3 16:45:52	鹿島灘	IV	5.2	6.9	58	X(NS)	90.90	
			経度 140° 36.8					Y(EW)	53.58	
			緯度 36° 26.0					Z(UD)	28.0	
	⑦	90.10.6 23:33:10	茨城県中部	IV	5.0	6.0	51	X(NS)	101.19	
			経度 140° 36.8					Y(EW)	62.64	
			緯度 36° 29.1					Z(UD)	40.0	
4	⑧	89.2.19 21:27:28	茨城県南西部	IV	5.6	77.9	55	X(NS)	23.12	
			経度 139° 54.5					Y(EW)	19.17	
			緯度 36° 1.1					Z(UD)	15.0	
	⑨	90.7.4 3:32:39	茨城県南部	III	5.1	62.1	76	X(NS)	7.17	
			経度 140° 7.2					Y(EW)	4.48	
			緯度 36° 2.4					Z(UD)	5.0	
5	⑩	89.3.6 23:40:1	千葉県北部	III	6.0	83.3	56	X(NS)	8.04	
			経度 140° 42.8					Y(EW)	5.99	
			緯度 35° 41.6					Z(UD)	6.0	
	⑪	89.3.18 1:37:47	千葉県北部	II	5.2	79.1	51	X(NS)	2.11	
			経度 140° 43.7					Y(EW)	2.11	
			緯度 35° 43.9					Z(UD)	4.0	
	⑫	90.6.1 10:22:42	千葉県東方沖	III	6.0	89.0	59	X(NS)	7.39	
			経度 140° 43.8					Y(EW)	5.43	
			緯度 35° 38.5					Z(UD)	6.0	
6	⑬	92.2.2 4:4:49	東京湾	III	5.9	152.9	92	X(NS)	12.31	
			経度 139° 47.5					Y(EW)	6.18	
			緯度 35° 13.6					Z(UD)	8.0	
	⑭	93.10.12 0:56:43	東海道はるか沖	III	7.1	536.2	390	X(NS)	10.73	
			経度 138° 14.4					Y(EW)	11.26	
			緯度 32° 1.3					Z(UD)	6.0	

※基盤とは地震観測を行っているGL-39.5mの第三紀層上面

- 92 -

图-5 应答スペクトル図 ($h = 5\%$) <ゾーン1>图-6 应答スペクトル図 ($h = 5\%$) <ゾーン2>

図-7 応答スペクトル図 ($h = 5\%$) <ゾーン3>図-8 応答スペクトル図 ($h = 5\%$) <ゾーン4>



2.3 敷地の深い地盤構造に基づく地震動特性

2.1でも示したように、やや長周期での揺れやすさには、深い地盤の構造が大きく関与しているため、敷地周辺の地表面から地下深部に至る速度構造に基づき、模擬入力（Ricker Wavlet⁽⁴⁾）を行った際に発生する増幅について検討した。

敷地周辺の地下深部の速度構造は、1988年に実施したP波屈折法探査によって把握しており、せん断波速度（Vs）=3.0 km/sの地震基盤がGL-1.6 km～2.0 kmに位置し、地表面に向かってVs=2.1 km/s、Vs=1.2 km/s及びVs=0.5～0.6 km/sとなっている。解放基盤表面と定義されるのは、敷地ではGL-0.3 km付近に位置するVs=1.2 km/sの層であり、さらに地表面付近までVs=0.5～0.6 km/sの軟岩（第三紀砂質頁岩層）が覆っている。この第三紀層は、敷地南北方向で若干の深度変化を生じていることが分かっている。

深い地盤の速度構造の影響によるやや長周期地震動の振幅を検討するために、このP波屈折法探査に基づき敷地周辺の地盤の速度構造をモデル化した（図-11参照）。

図-12では、このモデルに模擬入力を行った際の応答を入射角（θ=0°，30°，45°）ごとに解析すると同時に、1次元解析（地盤構造を無限に水平成層構造と仮定した解析）と2次元解析（地盤構造の不整形性の影響も考慮した解析）の値を比較している。

この図から、模擬入力に対してθ=0°のときは減衰が大きく、θ=30°，45°の時も波動が10秒程度継続するが、応答値は徐々に減衰して初期地動の半分程度の大きさが最大であり、増幅傾向のない結果が得られた。

以上の解析結果は、敷地近傍では地盤の地表面から地下深部の速度構造の影響によるやや長周期成分の増幅の程度は小さく、地盤構造の不整形性の影響がほとんどない地盤であることを示している。

主側線における境界の深さ

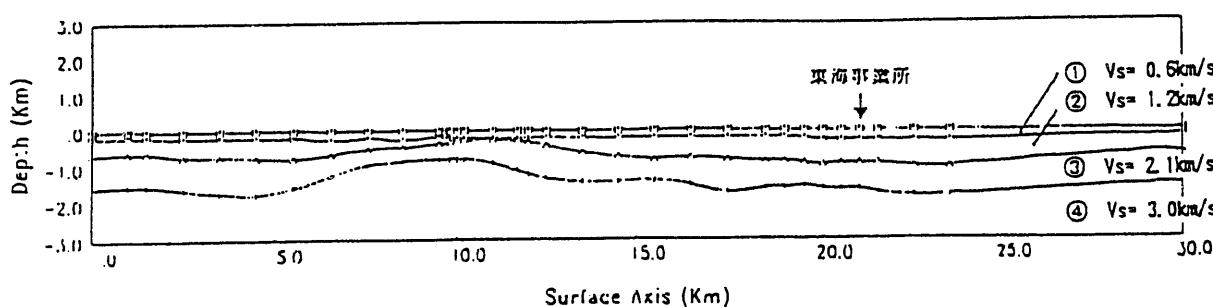
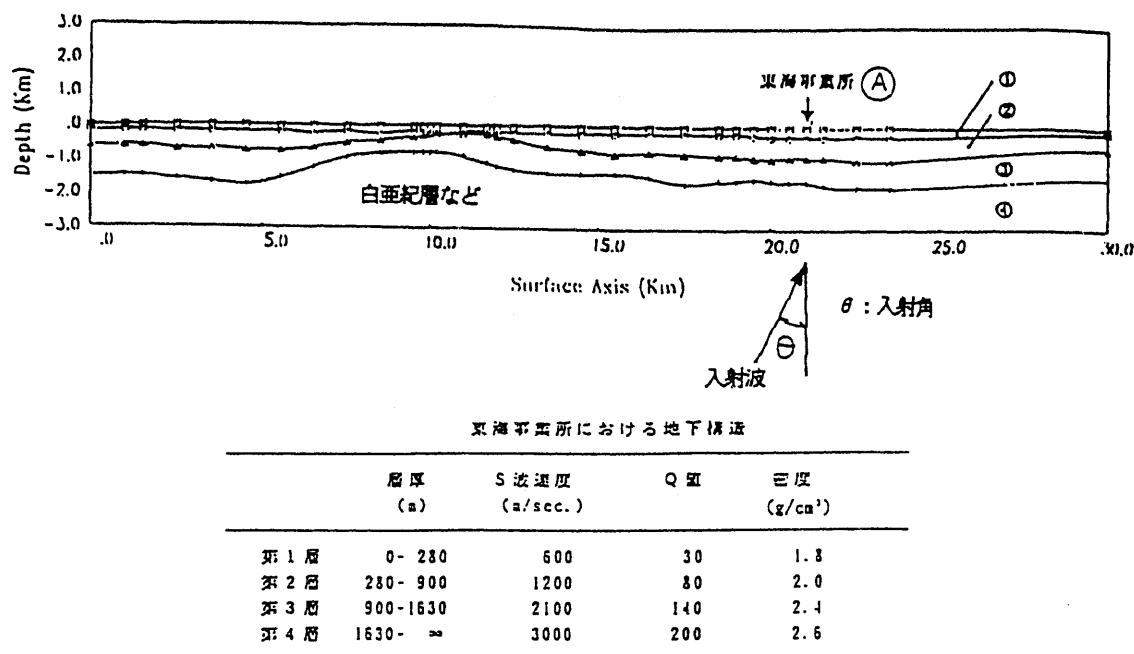


図-11 東海事業所の地下構造モデル



A点における応答

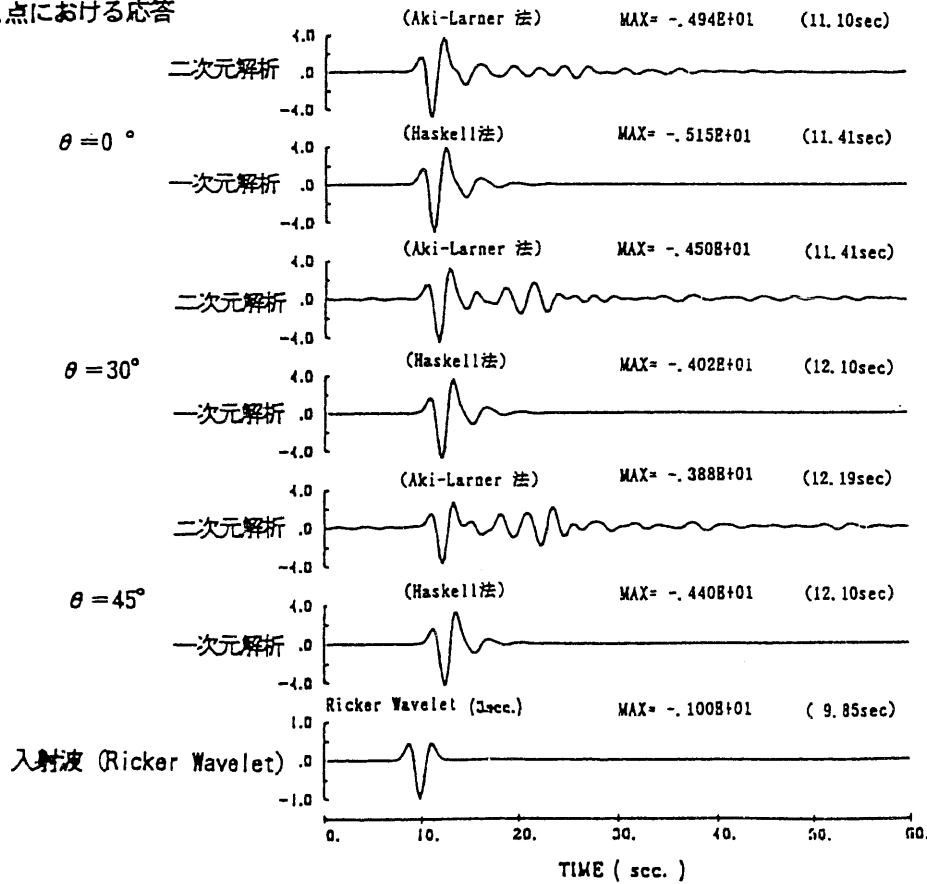


図-12 卓越周期3秒の入射波に対する応答波形（東海サイト）

3. まとめ

本建家敷地における1～2秒から10秒程度のやや長周期地震動について、マクロな観点による文献調査、実際の地震観測及び敷地の地表面から深い地盤までの速度構造、不整形性の影響について検討した結果をまとめて以下に示す。

- ① 本建家敷地周辺（茨城県中部）は、やや長周期での揺れやすさは全国の平均的な位置づけにある。
- ② 本建家敷地における地震観測によれば、地震の発生頻度の高い地域の地震動は短周期成分が卓越している。
- ③ 深い地盤までの速度構造や不整形性の影響による地震動の增幅傾向は小さい。
- ④ したがって、本建家敷地における地盤の地震応答解析に際して、一次元重複反射理論を用いることに特段の支障はないものと判断される。

参考文献

- (1) 岡田成幸, 鏡味洋史 『日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み』
日本建築学会論文報告集 267号 (1978)
- (2) 工藤一嘉, 嶋 悅三 『日本各地における地震動の增幅特性（周期3～15秒）』
第7回日本地震工学シンポジウム (1986)
- (3) 小林啓美, 長橋純男 『地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の增幅特性
と地震基盤における地震動の性質』
日本建築学会論文報告集 240号 (1976)
- (4) 堀家正則 『複数の曲がった境界を有する減衰のある媒質の地震動応答計算法へのAL
法の拡張とそれを用いた堆積盆地の地震動の特性』
地震第2輯, 40 (1987)

地震基盤の設定根拠について

平成8年12月25日

動燃では東海事業所における「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」でいう、“解放基盤表面”を求めるために、昭和59年に大規模なP波屈折法による探査を実施している。

この弾性波探査は、人工地震を震源とする屈折法探査法であり、人工地震は東海事業所構内と大洗工学センター構内に設けたボーリング孔（孔径300mm、深度75m）底で爆薬を爆発させて発生させた。

人工地震による地震動は、東海村～大洗町に至る約26kmの主測線と、ほぼ直交する方向の東海村～常北町に至る約22kmの副測線で観測し、波動の地下での伝播速度を測定した。観測点位置を図-1に示す。

地盤の速度構造は、測定によって得られた各観測点の走時と距離の関係をプロットして走時曲線を作り、この走時曲線の勾配からP波速度（V_p）の異なる速度層を求ることにより設定した。走時曲線を図-2に示す。

この結果、TP-280m付近から速度層の変化が見られ、4層からなる速度層が存在することが判明した。

第1速度層は地表面からTP-280mまで、爆破点近傍の走時を直接波によるものとみなし、原点を通る走時曲線の勾配からV_pを1500m/sとした。

第2速度層はTP-280mからTP-900mまで、第1速度層を水平成層と仮定して直接波に続く屈折波による走時曲線の勾配からV_pを2600m/sとした。

第3速度層はTP-900mからTP-1630mまで、東海爆破による走時ではこの層は明瞭には現れないが、ハギトリ走時から、この層の存在（分布）が推定された。この層のV_pは、大洗爆破による走時曲線の第2速度層に続く屈折波による走時曲線の勾配から、4400m/sと4000m/sの平均値4200m/sとした。

第4速度層はTP-1630m以深で、ハギトリ走時曲線の勾配からV_pを5500m/sとした。

次に、S波速度は観測結果からは決定できなかったため、P波速度から計算により求めた。

第1速度層及び第4速度層は、次のポアソン比（ν）と速度の関係式から、ポアソン比を第1速度層は0.45、第4速度層は0.3と仮定して求めた。

$$\nu = \left\{ (V_p/V_s)^2 - 2 \right\} / \left\{ 2 (V_p/V_s)^2 - 2 \right\}$$

これを変形して

$$V_s = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{2\nu-2}{2\nu-1}}}$$

$\nu = 0.45$ 、 $V_p = 1.5$ を代入し

$$V_s = \frac{1.5}{\sqrt{\frac{2 \times 0.45 - 2}{2 \times 0.45 - 1}}} = 0.5 \text{ [km/sec]}$$

$\nu = 0.3$ 、 $V_p = 5.5$ を代入し

$$V_s = \frac{5.5}{\sqrt{\frac{2 \times 0.3 - 2}{2 \times 0.3 - 1}}} = 3.0 \text{ [km/sec]}$$

第2速度層及び第3速度層は、次の吉村らの提案した実験式から求めた。この実験式を導いた相関グラフを図-3に示す。

$$V_s/V_p = 0.576 - 0.139/V_s$$

これを変形して

$$V_s = \frac{0.576 V_p + \sqrt{(0.576 V_p)^2 - 0.556 V_p}}{2}$$

$V_p = 2.6$ を代入し

$$V_s = \frac{0.576 \times 2.6 + \sqrt{(0.576 \times 2.6)^2 - 0.556 \times 2.6}}{2} = 1.2 \text{ [km/sec]}$$

$V_p = 4.2$ を代入し

$$V_s = \frac{0.576 \times 4.2 + \sqrt{(0.576 \times 4.2)^2 - 0.556 \times 4.2}}{2} = 2.1 \text{ [km/sec]}$$

また、速度層の層厚は原点走時から求めた。

以上のようにして求めた東海事業所における地下構造を図-4に示す。

また、地震基盤は $V_s = 3000 \text{m/s}$ 相当の地盤として定義されているので、東海事業所の敷地では第4速度層が該当する。

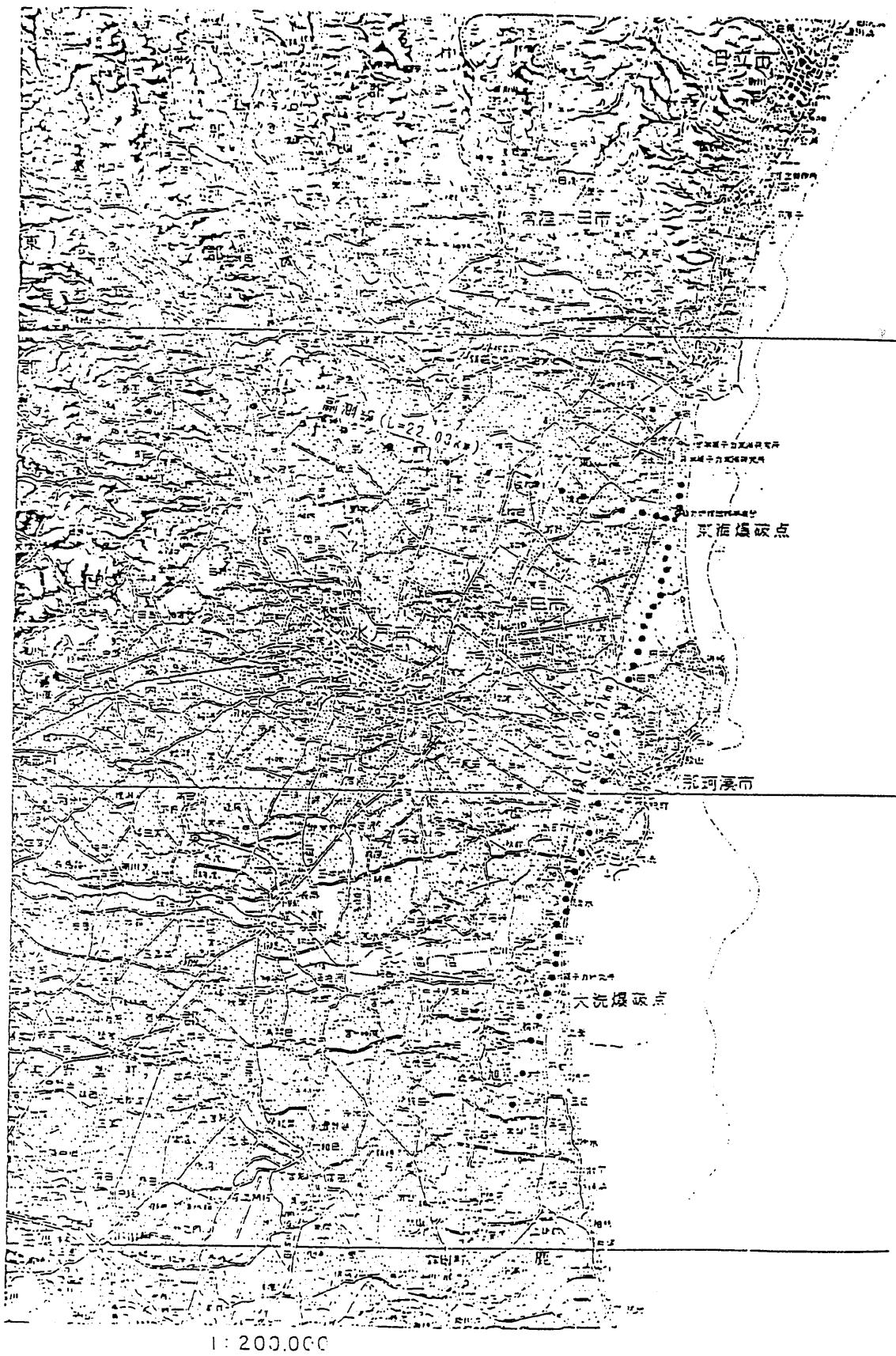


図-1 観測点位置

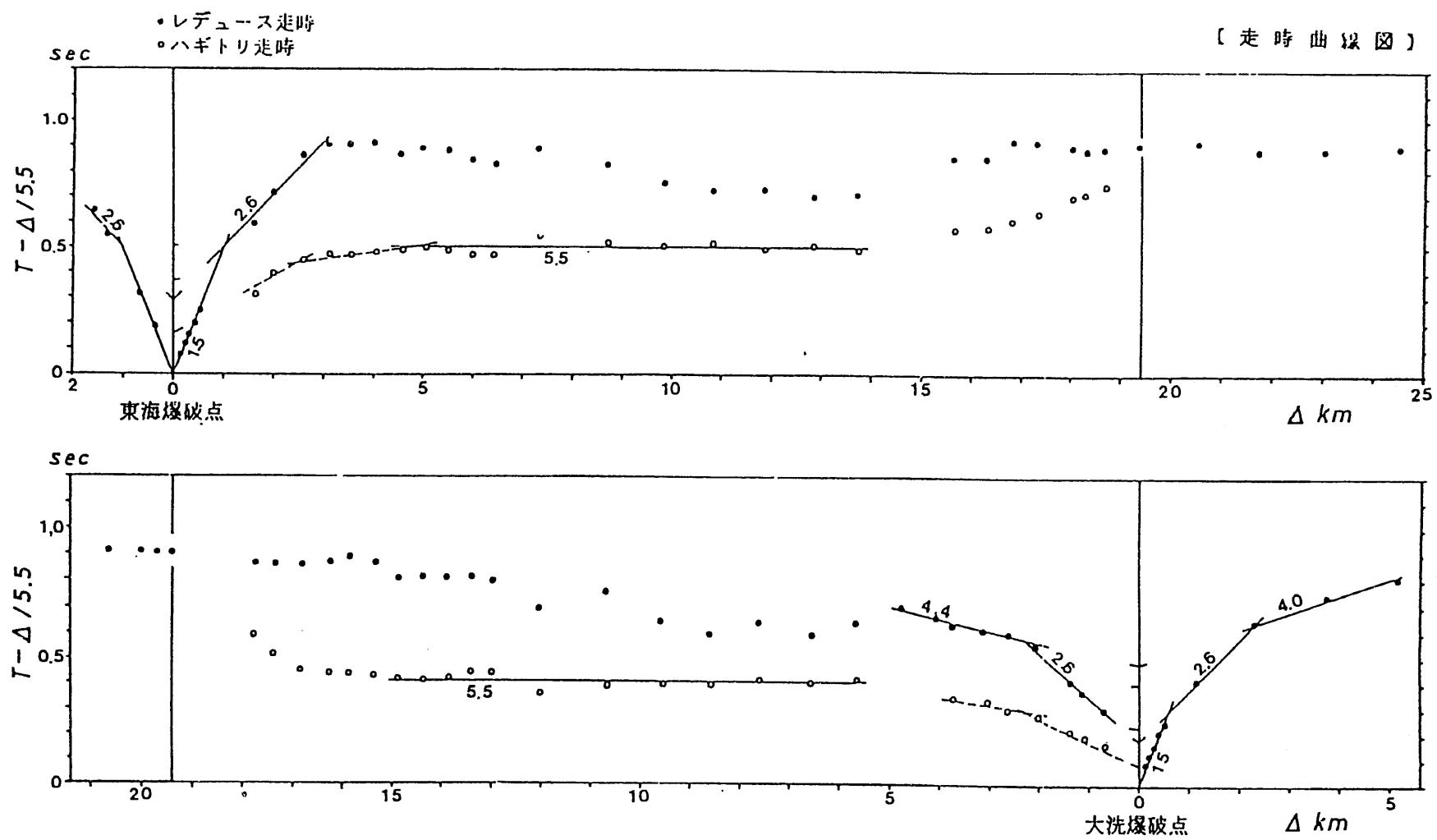


図-2 走時曲線（主測線）

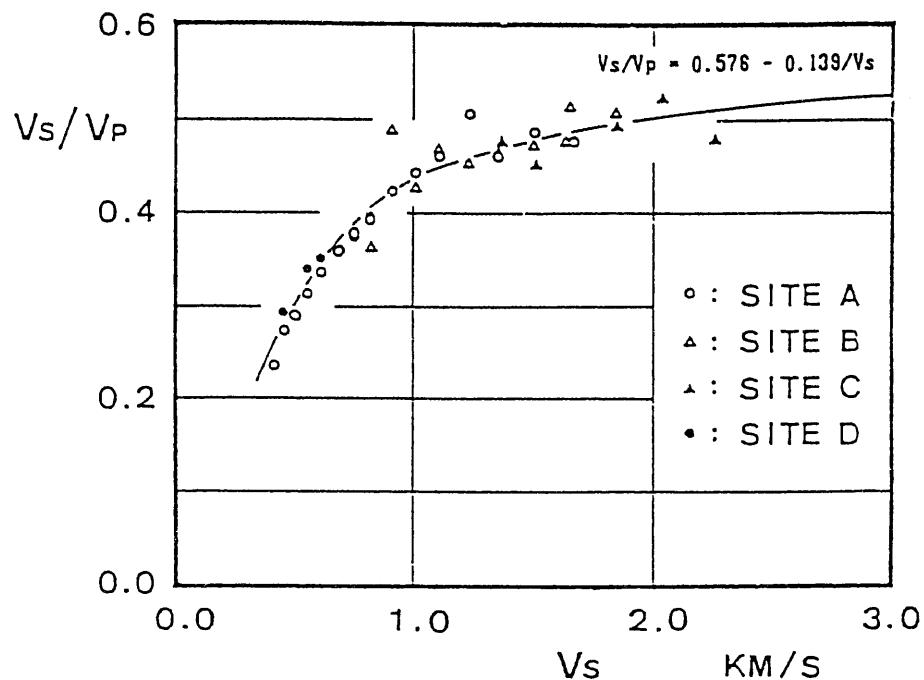


図-3 Vs/Vp-Vsの関係(Yoshimura et al, 1982, SEG)

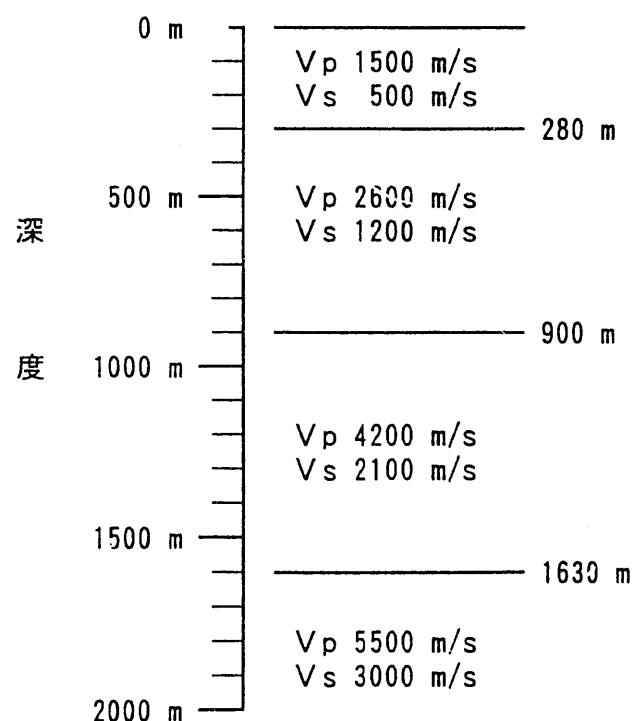


図-4 東海事業所における地下構造

やや長周期地震動の各種評価手法について

やや長周期地震の震動の各種評価手法について

1. 基本的考え方

積層ゴム及び減衰機構（ダンパー）を用いた免震構造を採用した場合地震によるダンパー降伏後の固有周期は2～4秒程度となる。例えば再処理施設ユーティリティ施設建家では1次固有周期がダンパーの降伏以前で1秒程度、設計用入力地震動 S_1^* 、 S_2^* が入力された場合（積層ゴムのせん断歪約200%変形時）の等価固有周期（ T_e ）は3秒程度となる。（下表及び計算例参照）

表 再UC建家の等価固有周期

	ダンパー 降伏前	S_1^* 入力時	S_2^* 入力時
等価固有周期	0.9秒	2.9秒	3.3秒

（計算例： S_2^* 入力時）

$$T_e = 2\pi \sqrt{M/K_e} \approx 3.3 \text{ sec}$$

ここで、

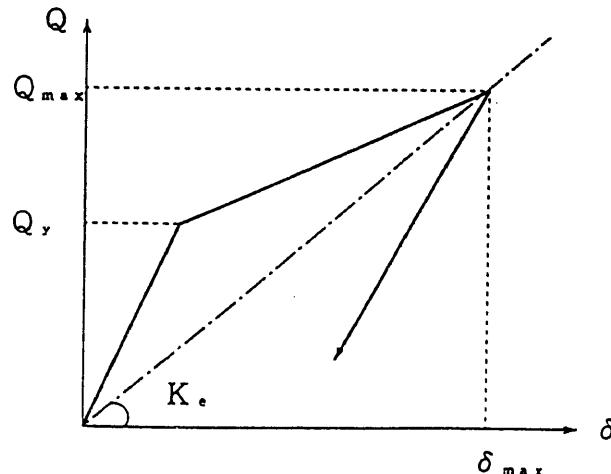
$$M = W/g = 20,600/980 \approx 21 \text{ t} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$$

$$K_e = 2468/32.5 \approx 76 \text{ t/cm}$$

このため、大崎の手法に加えて、免震構造の等価固有周期の3倍程度の領域（ $3.3 \times 3 \approx 10$ 秒）をカバーする評価手法を用いる必要がある。

耐震設計上は、この免震構造の固有周期帯域を含む1秒から10秒程度の周期は、やや長周期と呼ばれており、数秒以上の周期ではハスケルの研究に代表される断層モデルが有効との認識が一般的である。（原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601））

このやや長周期地震動の評価方法については、解析的な手法や半経験的な手法が多く提案されているが、必ずしも実務上広く用いられているわけではない。瀬川、金子⁽¹⁾は、実際に設計に用いるやや長周期地震動の評価を行うという立場から、これら多くの手法を検討し、結局6種類の手法にまとめられるとしている。また、各手法は適用限界や対象が異なるため、現状では各手法間の相違を考慮したうえで、設計用入力地震動としては、包絡形を用いることも1つの考え方であると述べている。

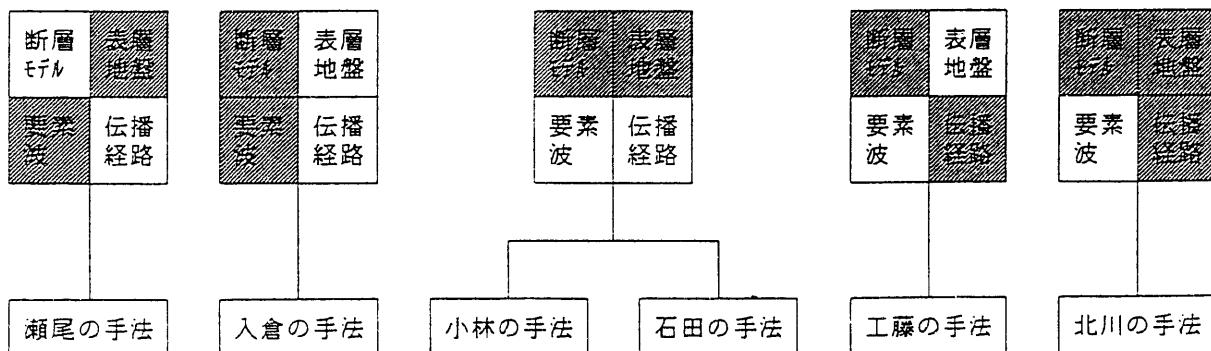


本施設では、原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601）及び文献(1)を基本とし、日本建築学会の分類も参考としつつ、これらの手法の適用性を考慮した上で、短周期については大崎の手法、やや長周期については小林の手法、石田の手法、入倉の手法及び工藤の手法により建家基礎底面で求められる速度応答スペクトルを包絡する速度応答スペクトルを設定し、設計用入力地震動を作成することとしている。

2. 評価手法

2.1 文献(1)に基づくやや長周期地震動の評価

やや長周期地震動の評価については、前述したように、文献(1)において 6 種類に分類されている。即ち、各手法を用いて実際に計算を行う際のモデル化の方法として、「断層モデル」、「表層地盤モデル」、「要素波」、「伝播経路モデル」の 4 つの要素のどの組み合わせによるかを分類したものである（各手法と各要素の関係は下図参照）。



これらのうち、5 種類について特定地域の速度応答スペクトルを試算しているが、断層モデルという観点からは瀬尾の手法は除外される他、評価結果を見ると北川の手法を除けば各手法はおよそ 2 ~ 3 倍の範囲に入るとしている。

2.2 原子力発電所耐震設計技術指針に基づく評価

敷地で設計すべき基準地震動については、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）2.3 基準地震動 2.3.1 地震動特性」に記載されている。その中の「(2)岩盤における地震動の周波数特性」において局所的な地盤構造の特性を除いた岩盤での地震動の周波数特性の評価法として「a. 大崎の手法」および「b. 小林の手法」が提案されている。

ここで大崎の手法が、速度応答スペクトルをマグニチュードMと震央距離Δを用いて周期0.02～2秒の範囲で定義しているのに対して、小林の手法は、速度応答スペクトルをマグニチュードMと震源距離Xを用いて0.1～5秒までの範囲で定義している。

また、JEAG4601の追補版（1991）では、断層モデルの調査・検討を行っており、

- ・地震動の長周期成分に対しては、それを良く説明する計算手法が確立されるようになった。
- ・短周期成分については、いくつかの計算手法が提案されているが、得られた結果に差異があり、未知の部分が多い。

とした上で、短周期地震動の計算手法として、以下の3種類6通りの手法について計算結果の比較を行っている。

- (1) 経験的グリーン関数を用いた波形合成法（入倉等3つの手法）
- (2) 応答包絡重ね合わせ法（小林の手法）
- (3) 不規則な破壊モデルによる手法（佐藤等2つの手法）

これら3種類6通りの手法を伊豆半島の東方で発生した地震に適用して震央距離10～60kmにおけるA～D点の最大加速度値を計算している。（別図2-1参照）

これよりB点（この地点のみGL-36m）以外では2～4倍の幅で観測値を包絡していることが分かるが、各手法の差異は明確ではない。一方、免震構造では入力される地震動の最大速度が地震エネルギーの観点から重要であるので、これを最大速度で表して別図2-2に示す。

この結果をまとめると大略以下の通りである。

- ① 入倉の手法(1)-1は、D点以外は観測値と非常に良く一致している。
- ② 小林の手法(2)は、全ての地点でほぼ良い対応を示す他、各手法の平均的な位置づけにある。
- ③ 佐藤の手法(3)-2は、最大加速度はそれほどでもないが、最大速度のバラツキが大きい。

以上、最大速度の観点からは、(1)、(2)の各手法間の差異は比較的小さく、観測結果とも調和的であるが、(3)の手法は短周期成分の模擬に力点があり、必ずしも速度応答が重要なやや長周期の地震動予測に適しているとは言いがたい結果となっている。

2.3 日本建築学会（地震荷重）による評価

日本建築学会（地震荷重）では、地震動予測の方法として大別すると

- ・ 地震学的な断層モデルに基づく方法
- ・ 工学的な模擬地震動作成法

に分かれるとしている。ただし、これまでに提案されている予測手法があまりに多様化しており、単純な分類は困難であるとして、経験的な側面が強い方法から理論的な側面が強い方法の順に、工学分野で提案されているものを対象として以下の5種類の分類を示している。

分類	方法	提案者	特徴
(1) 観測された強震記録に直接基づく方法	A	勝倉等	フーリエ解析により、強震記録を主に振幅特性をあらわす最小位相推移関数と位相特性をあらわす全域通過関数に分解し取り扱う。
(2) 地震動の最大値や応答スペクトルの距離減衰式を考慮した方法	B 1 B 2	大崎, 太田等	距離減衰式により求まるスペクトルと経験的にモデル化された位相特性から地震波を作成。原子力発電所での大崎の手法が代表的。
(3) 距離減衰式に断層の広がりの効果を考慮した方法	C	小林等	震源から出る地震波のエネルギーを距離減衰式によって経験的に評価し、それを断層面上に分配して地震基盤上の地震動を評価。
(4) 小地震記録の重ね合わせによる半経験的地震動評価法	D	入倉, 武村等	地震動の伝播経路の影響や地盤の増幅特性を同じ伝播経路をもつ小地震記録を用いて表現し、それを大地震の震源過程に従い足し合わせる。
(5) 理論的な評価法	E 1	工藤, 北川等	表面波の評価方法として正規モード法が有名で工学的には矩形断面を仮定して評価（工藤）。北川等はこのような表面波の評価を主体に実体波の評価も加味。
	E 2	石田	長周期成分の加速度フーリエスペクトルはハスケルモデルにより、短周期成分では応力の変化量によりスペクトルを経験的に求める。
	E 3	河野等	半無限ランダム媒質上に1層の表層地盤を持つ2層平行モデルを対象に、実体波、表面波を同時に考慮できるグリーン関数を用いて地震動を評価。

断層モデルとしての分類は、(3)、(4)、(5)が該当し、この中から本施設敷地の状況を考慮した上で、適用性の高い手法を選択するものとする。

2.4 評価手法のまとめ

文献(1)、JEAG4601、日本建築学会（地震荷重）に示される各手法について、やや長周期地震動の観点からまとめたものを別表2-1に示す。

同表より、ここで複数の文献に取り上げられているのは入倉、小林、石田、北川の各手法である。本施設の敷地では弾性波探査等により地震基盤までの表層地盤モデルが確立されており、このうち小林、石田の手法が地震基盤上においてそのまま適用可能である。

また、本施設の敷地では昭和63年より水戸震度IVの地震を10回観測しており、そのうちいくつかの地震の震央位置は本施設に想定する最強地震、限界地震の震央近傍に位置している。入倉の手法については、観測地点（本施設敷地）における深い地盤構造の影響を含んだ震源から建家支持地盤までの情報が反映できるため有効と考えられる。瀬尾、工藤、北川の各手法については対象とする地盤が地表であり、必ずしも本施設敷地における正確な評価が可能とはいえないと考えられるが、表面波についての検討も必要と考えられることから、表面波を工学的に評価する代表的な手法として、工藤の手法についても検討することとする。

以上により、敷地地盤の情報を有効に反映できる小林、石田、入倉の各手法及び表面波の影響を調べるために工藤の手法について定量的な評価を行うこととする。その際、評価すべき地震の断層パラメータについては、佐藤⁽²⁾等の適切な文献を参考に決定することとする。

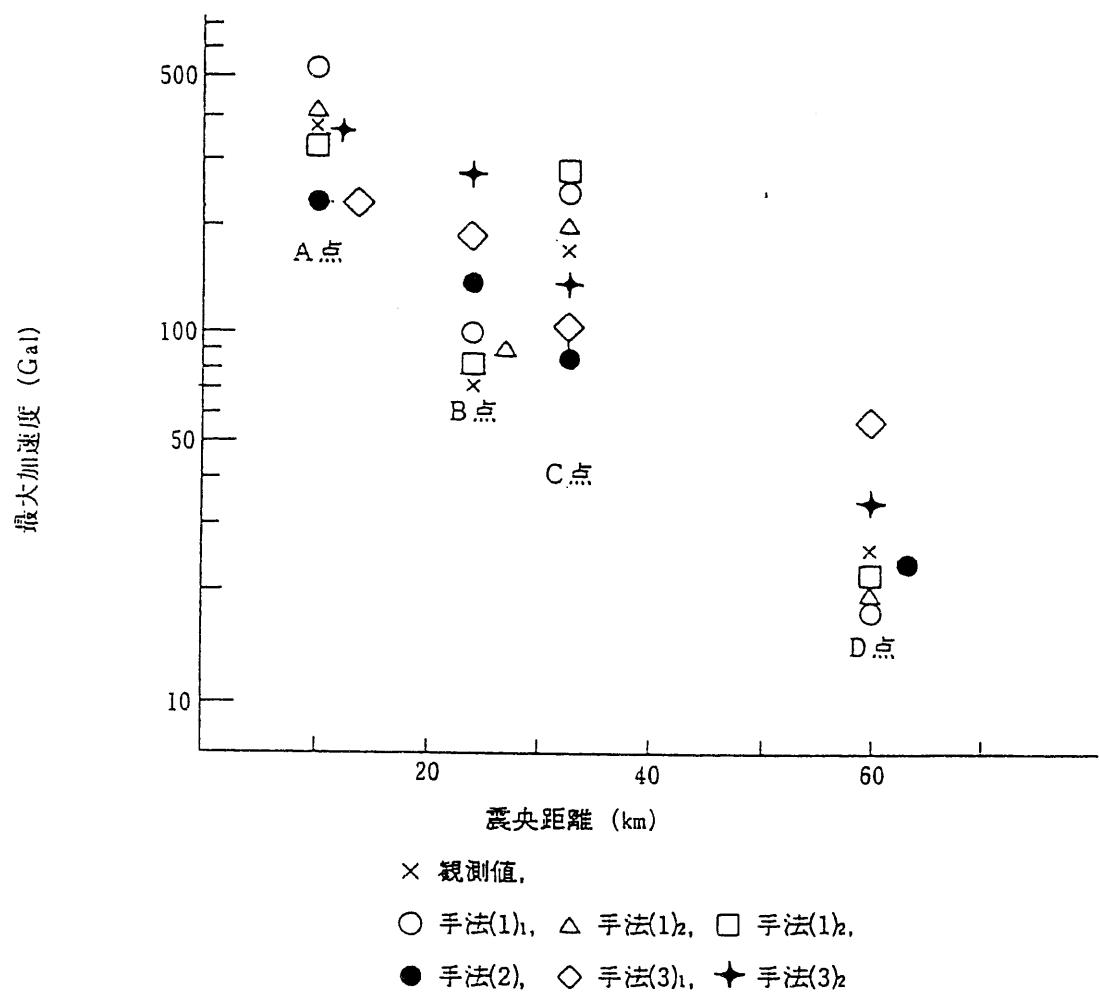
なお、小林の手法は静岡県で想定して東海地震の防災面等で比較的広く使用されている他、中部電力浜岡発電所、四国電力伊方発電所においても、耐震設計上、周期2秒までの範囲で使用されている。その他、四国電力伊方発電所においては、小林の手法の他に佐藤の手法、入倉の手法が考慮されている。

（参考文献）

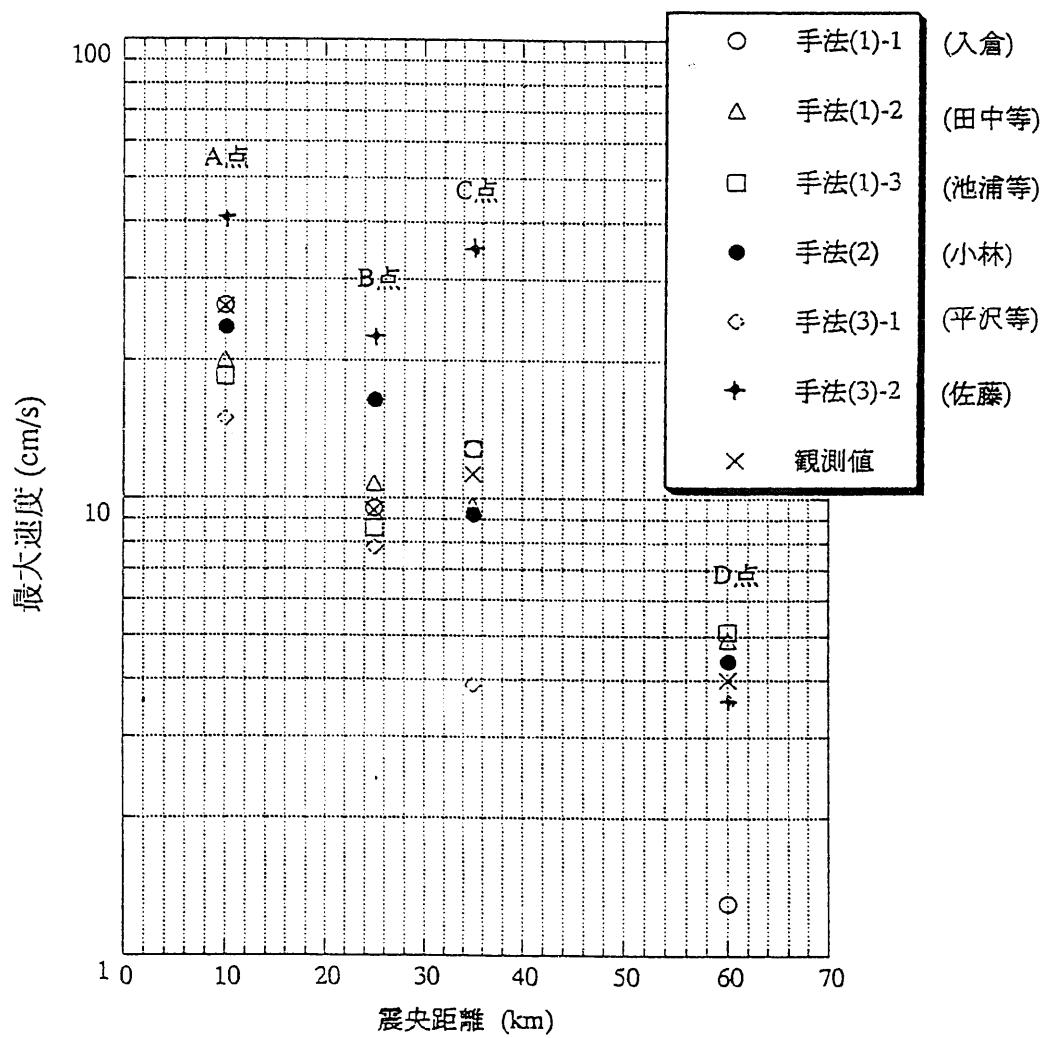
- (1) 瀬川・金子、「やや長周期地震動の評価方法の検討」、地震学会、1992
- (2) 佐藤良輔、「日本の地震断層パラメター・ハンドブック」、鹿島出版会、1989

別表2-1 やや長周期地震動の評価手法の比較一覧表

手 法	やや長周期地震動の評価方法の検討（瀬川・金子） 「A～Fの6種類の手法に整理」			原子力発電所耐震設計技術指針-JEAG4601(1987及び1991) 「(1), ~ (1), (2), (3), ~ (3), の3種類6手法を記述」 〔注：電力中央研究所報告1994〕	日本建築学会 - 地震荷重(1992) 「A, B1～B2, C, D, E1～E3の5種類8手法を記述」 (*は文献の内容を記述)	概 要		
						対象地盤	対象周期	適用上の注意点等
A	瀬尾の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路						
B	入倉の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路	・手法(1)：経験的グリーン関数を用いた波形合成法 地震動スペクトルのスケーリング則を用いた合成法 本震と同じメカニズムを有する小地震の観測記録を用いて相似的に断層パラメータを決定し地震波形を合成する	・分類(4)：小地震記録の重ね合わせによる半経験的方法 = (* D法と同じ分類) 地震波の伝搬経路の影響や地盤の增幅特性を、同じ伝搬経路をもつ小地震記録を用いて表現し、それらを大地震の震源過程に従って足し合わせる		小地震観測地点	0.1～10秒程度	断層に近い場合、本震と小地震の伝搬経路の関係に注意が必要
C	小林の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路	・手法(2)：応答包絡波形重ね合わせ法 断層を小要素に分割し、各小要素の応答波形を重ね合わせて断層全体からの地震波による応答包絡波形を計算	・分類(3)：距離減衰式の評価に断層の広がりの効果を考慮した方法=C法 震源から出る地震波のエネルギーを距離減衰式によって経験的に評価し、それを断層面上に分配して地震基盤上の地震動を評価する		地震基盤(及び地表)	0.1～5秒程度	断層面の至近距離では極端に大きな値になることがある
D	石田の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路	[注：免震設計された発電用原子炉施設の設計用地震入力の一提案] 実体波に加えて表面波も考慮の上、大崎スペクトルとやや長周期領域のスペクトルを対数軸上で直線で結ぶ	・分類(5)：理論的な評価方法=E2法 長周期領域ではハスケルモデル、短周期領域では応力降下量によるスペクトル補正係数を用いる方法		地震基盤(及び地表)	0.1～10秒程度	断層の長さ、若しくは円形断層に置換した場合の半径程度離れている必要有り
E	工藤の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路		・分類(5)：理論的な評価方法=(* E1法の原型) 正規モード法により、表面波を矩形断層を仮定して工学的に評価する		地 表	5秒程度～10秒超	断層面の距離は表面波の波長の2倍以上必要
F	北川の手法	モデル化の要素 断層モデル 表層地盤 要素波 伝搬経路		・分類(5)：理論的な評価方法=E1法 断層モデルにより局所的破壊事象の時間的、空間的分布を考慮した方法で、表面波の評価を主体に実体波の評価も加味している		地 表	0.5～10秒程度	断層から10km程度の場合、過大振幅となる場合があり、注意が必要
備考	「モデル化の要素」の欄で網掛けをしているのがその手法で用いているモデルの要素	・主目的は、短周期地震動の評価手法の比較検討 ・上記以外の手法 (1) 経験的グリーン関数を用いた波形合成法 ・手法(1)：(田中等) 加速度記録を主対象とした実用的合成法 ・手法(1)：(池浦等) 不均質すべりを考慮した合成法 (3) 不規則な破壊モデルによる手法 ・手法(3)：(平沢等) 移動震源確立モデルによる手法 ・手法(3)：(佐藤) 不規則な破壊モデルによる手法	・上記以外の手法 ・分類(1)= A法 (和泉・勝倉等) フーリエ解析により、既往地震記録をそのまま使用する方法 ・分類(2)= B1法 (金井・神田等) 距離減衰式と金井・田治見スペクトルによる経験的方法 ・分類(2)= B2法 (武村・太田等) 強震記録の平均応答スペクトルを使用する方法 ・分類(4)= D法 (武村・池浦等) 不均質滑りを考慮した半経験的地震動評価法 ・分類(5)= E3法 (河野等) 波動伝播理論と震源の動力学に基づく方法					



別図 2 - 1 最大加速度の距離減衰 (JEAG4601-1991 より抜粋)



別図 2-2 各手法の最大速度と距離減衰の関係

小林，石田，工藤，入倉の手法の 概要について

1. 翠川・小林の方法

地震基盤での速度応答スペクトルを求めている。また、地震基盤より上層については、S波の重複反射理論に基づいて立ち上げることによって、地表での速度応答スペクトルを求めている。方法の説明を以下に示す。

① 手法の概要

基本的に $V_s = 3 \text{ km/s}$ 程度の地震基盤への下方からの入射波の速度応答スペクトル ($h = 5\%$) を求める方法である。速度応答スペクトルの計算にあたっては、震源断層の広がりとその破壊様式の効果を考慮している。すなわち、震源断層面を 12×12 の小領域に分割し、おののの小領域を点震源と考え、各小領域から発せられた観測点での地震波の包絡波形（パルス）の形状を以下のようにして求める。図 3-4 にその概念を示す。

- ・小領域から射出され観測点に到達する包絡波形の継続時間は、小領域内での破壊所要時間と小領域から観測点に至る伝播経路での継続時間の伸びの和で表される。
- ・小領域からの包絡波形の高さ（振幅）は、震源の大きさに比べて震源距離が大きい場合を考えれば、包絡波形の作る面積が断層面の分割数によらないことから定められる。断層面を分割しない場合（点震源とみなした場合）の包絡波形の高さは、包絡波形の形状と速度応答スペクトルの相似性と、速度応答スペクトルの経験式に地震学的な判断が加えられたものとからマグニチュードと距離をパラメータとして定められる。

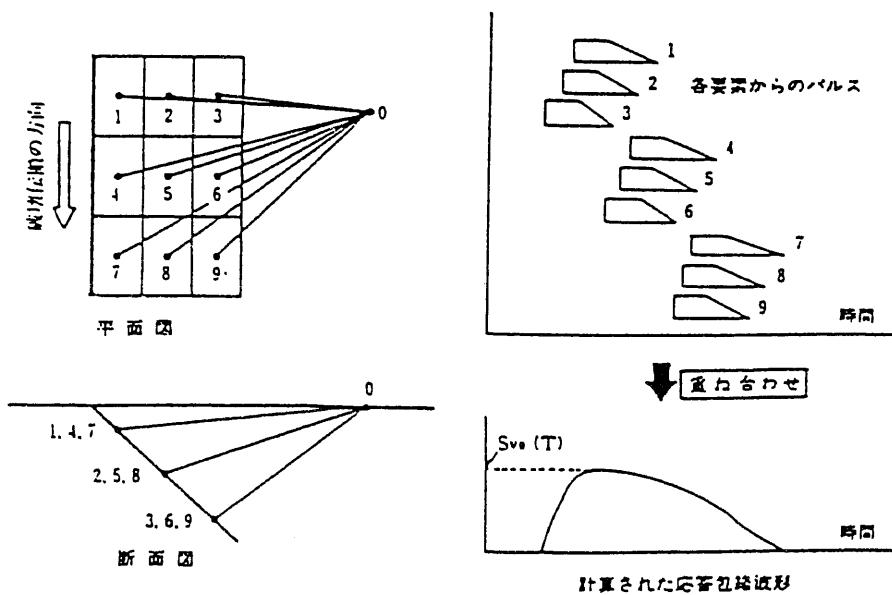


図 3-4 翠川・小林の方法の概念

断層面の形（大きさ）、破壊伝播速度などから各小領域での破壊開始時刻が定められる。

これに各小領域と観測点間の距離、地震波の伝播速度から求められる走時を加え、各小領域からの包絡波形の到達時刻が決まる。この到達時刻に従って包絡波形を重ね合わせることによって、観測点でのトータルとしての包絡波形が求められる。以上の操作を周期毎に行い、得られる包絡波形の最大値をつらねることによって速度応答スペクトルを得る。

② 得られる波形またはスペクトル

直接計算されるものは、 $V_s = 3 \text{ km/s}$ 程度の地震基盤への下方からの入射速度応答スペクトル ($h = 5\%$) である。ただし、水平2成分を合成した包絡波形にもとづくものである。地表での速度応答スペクトルは、表層地盤の増幅度を経験式またはSH波の重複反射によって評価しそれを基盤での速度応答スペクトルに乘じることによって得る方法が拡張法として示されている。さらに最大加速度値、最大速度値は速度応答スペクトルを積分することによって経験式から求める。

③ 対象とする波

対象とする短周期領域では地震動は主としてS波からなるものと考え、S波を対象として取り扱っている。

④ 対象周期範囲

経験式が強震計の記録であり、およそ2秒までが信頼できると考えられるが、地震学的な判断を取り入れることによって周期0.1秒から5秒までの短周期領域を対象としている。速度応答スペクトルの周期範囲も0.1秒～5秒の範囲内で定義されている。

⑤ 対象とする地盤

$V_s = 3 \text{ km/s}$ 程度の地震基盤（地殻の上面としてとらえている）を対象とし、地震基盤への入射速度応答スペクトルを求める。論文中に地表への拡張方法が示されている。

⑥ 対応できる震源距離

本手法は、経験的な距離減衰式と断層モデルに基づく理論地震動計算を結び付け、距離減衰式に震源の広がりの効果を加味し、震源近傍での評価を行うために提案された方法である。論文によれば“震源域近傍”まで適応可能である。ただし、断層が非常に浅いモデルを設定したような場合、震源域のごく近傍（断層面から数km以内）では極端に大きな計算結果が得られる場合がある。

適応距離の最大限界は明確ではないが、速度応答スペクトルの経験式を導いたデータセットは震源距離50～290km（Mは5.1～7.5）である。

⑦ 入力データ

計算にあたって必要な入力データは、断層パラメータと破壊伝播速度、破壊形式、破壊の開始点、震源域から観測点までのS波速度である。さらに、地表での地震動を評価する場合は、観測点の表層のS波速度、Q値（または減衰率h）、密度の構造が必要である。

⑧ 注意点

- ・論文によれば、震源領域近傍まで適用可能である。
- ・計算に必要なパラメータが少なく、計算も容易である。
- ・波形、フーリエスペクトルが得られない。
- ・あくまでも経験式に基づくものであり、物理的な明解さに欠ける点もある。
- ・経験式の変動係数が40%あるので、結果に対してもこの程度の変動を考慮しておく必要がある。
- ・速度応答スペクトルの経験式を導く際に用いたデータが、要素地震としてのマグニチュード5.1～7.5、震源距離50～290kmの海溝沿いの地震に限られている。
- ・波形を求めるのではなく、波形の包絡形を重ね合わせるため、原理的に大きめの値が求められるものと考えられる。
- ・本方法が応答スペクトルを基本としているのに対し、フーリエスペクトルの経験式を活用したものに「石田の方法」がある。この方法は、 $V_s = 3 \text{ km/s}$ 程度の地震基盤を対象としており、地表への增幅もSH波の重複反射で考慮している点も同様である。しかし、データセットの違いの他に、「石田の方法」では理論的に求めたフーリエスペクトルに観測加速度記録（強震記録）から定めたフィルターを作用させているのに対し、本方法では経験式の中で評価している。さらに、震源からの距離の取り方が異なる場合がある。また、「石田の方法」では距離減衰においてQ値を与えて評価しているのに対し、本方法では経験式の中で評価している。

⑨ 検証実績

- ・1968年十勝沖地震 北海道～東北
- ・1923年関東地震 関東地方
- ・1980年伊豆半島沖地震 伊豆半島 など多数

⑩ 文 献

翠川、小林(1979)；地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定,

日本建築学会論文報告集, 第282号

Kobayashi H., S. Midorikawa(1982); A Semi-Empirical Method for Estimating

Response Spectra of Near-Field Ground Motion
with regard to Fault Rupture, 7th E. C. E. S.

2. 石田の実体波スペクトルの手法の概要

ここでは、想定地震に対する地動予測に用いた手法（以下、石田の実体波スペクトルと呼ぶ）の概要紹介およびその適用性・適用限界等について述べる。

2-1 応力降下量による補正係数を用いた地動予測方法（石田, 1982、石田, 1986)^{1), 2)}

石田の実体波スペクトルでは、長周期成分の加速度フーリエスペクトルはハスケル(Haskell) モデル(Savage, 1972)³⁾ に従い、これは地震モーメントによって定まる。一方短周期領域においては、応力降下量 ($\Delta \sigma$) によって関数化されたフィルターによってスペクトル振幅が補正される。したがって短周期領域のスペクトルは、応力の変化量で定まり、この様な 2 つの領域のスペクトルが連続的に変化するようなスペクトルが得られる。この手法の適用は、断層を等価な円形と考えたとき、実測結果との比較から、ほぼその断層の境界程度までの適用は可能であろうと思われるが、それより震源域内における適用性についての検討は十分ではない。

この方法による加速度フーリエスペクトルの予測過程の概略を示す。

ハスケルモデルに基づく、遠方での S 波部分の理論加速度フーリエスペクトル $F_A(\omega)$ は、

$$F_A(\omega) = R_s(\theta, \phi, R) \cdot M_0 \cdot |G| \cdot \omega \cdot |F_1(\omega, \tau_0)| \cdot \omega^2 \quad (2.1)$$

と表される(Savage, 1972)³⁾。ただし、 $|F_1(\omega, \tau_0)|$ は破壊が一方向に伝播する有限長断層による波動の干渉効果、 $|G|$ は震源時間関数 $G(t) = \{1 - \exp(-t/T_0)\}$ のフーリエ変換、 M_0 は地震モーメント、 R_s は放射係数 (θ, ϕ, R の意味は図 2-1 参照)、 ω は円振動数である。

(2.1)式で表される $F_A(\omega)$ の包絡スペクトル $\overline{F_A}(\omega)$ は、観測された加速度記録のフーリエスペクトル $B(\omega)$ の包絡スペクトル $\overline{B}(\omega)$ と、ローパスフィルター $W(\omega)$ との間に、

$$\overline{F_A}(\omega) = \overline{B}(\omega) \cdot W(\omega) \quad (2.2)$$

の関係があると考え、このローパスフィルター $W(\omega)$ を実測結果から求め、その結果を関数化して、(2.3)式に示すような経験式を得た（石田, 1982)¹⁾

$$\left. \begin{aligned} A(T) &= a T / (1 + a T) \\ a &= 0.023 \Delta \sigma + 0.22 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

ただし、 $T (= \frac{2\pi}{\omega})$ は周期、 $\Delta \sigma$ は応力降下量である。

したがって、地震基盤 ($V_s \sim 3.0 \text{ km/s}$) での観測地動のフーリエスペクトル、 $\tilde{B} (T)$ は、 $A (T)$ を用いて、

$$\tilde{B} (T) = \overline{F A} (T) / A (T) \quad (2.4)$$

と表すことができる。なお、地震基盤以浅の地点、例えば地表でのスペクトルは、一次元多重反射理論の適用による伝達関数をもとめ、それを(2.4)式に乘することによって求められる。

ところで、設計に用いる地震動予測方法は、簡単なパラメータで表現されることが望ましい。もちろん、その予測結果が合理的なものであり、かつ、その結果を検証することができなくてはならない。そこで、断層パラメータを簡単な少数のパラメータに置き換えることによって(2.1)式を表すことを考える。

(2.1)式において、 $\omega \rightarrow \text{大の場合}$ 、 $|G| \propto \omega^2 \rightarrow 1/T_0$ 、 $F_A(\omega, \tau_0) \rightarrow 4V_r / \omega L_0$ (ただし、 $V_r = 0.72V_s$ 、 $\theta = 0^\circ$)、 $R_s(\theta, \phi, R) \rightarrow 1/4\pi V_s^3 \rho R$ ($\theta = 0^\circ$ 、 $\phi = 90^\circ$) となる。したがって、これらの関数を(2.1)式に代入すると、

$$F A (\omega) \approx \frac{1}{4\pi V_s^3 \rho R} \cdot M_0 \cdot \frac{1}{T_0} \cdot (4.0) \cdot \frac{V_r}{L_0} \quad (2.5)$$

となる。ここに、 V_s は S 波の伝播速度、 R は断層面上の点からサイトまでの距離、 T_0 は立ち上がり時間、 L_0 は断層長さ、 V_r は破壊伝播速度である。地震モーメント M_0 と断層長さ L_0 に関しては以下の関係を用いる。

$$\log M_0 = 1.5M + 16 \quad (\text{笠原, 1975}) \quad (2.6)$$

$$\log L_0 = 0.5M - 1.8 \quad (\text{大塚, 1964}) \quad (2.7)$$

立ち上がり時間 T_0 は、加速度フーリエスペクトル振幅が T^{-2} で減少する折れ曲がり点の周期を T^{C_2} とすると、

$$T^{C_2} / 2\pi \quad (2.8)$$

となる。また T^{C_2} は、 $L_0 = 2W$ (W : 断層幅)、断層面上のある点での滑りに要する時間が、震源時間関数 $G(t)$ の 90% に達する時間に近似的に等しいと仮定し (Savage 1972)³⁾、 $V_r = 0.72V_s$ 、 L_0 は(2.7)式を用いると、(2.9)式で表される。

$$T^{C_2} = 10^{0.5M-2.4} \quad (2.9)$$

この折れ曲がり点周期 T^{C_2} と、これまでに解析された我国のいくつかの地震のそれとを比較すると、(2.9)式から求められる T^{C_2} は実測値とよく一致している (石田, 1986)²⁾。

(2.6)式から(2.9)式を(2.5)式に代入し、地震基盤の $V_s \sim 3.0 \text{ km/s}$ 、 $\rho \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ として整理し、地震基盤への入射波の 2 倍を考えると、加速度フーリエスペクトルがフラットとなる周期帯 $T \leq T_0$ でのそのスペクトルは、

$$F A(T) = 18 \times 10^{0.5M-2} / R \quad (2.10)$$

となる。ただし、Tは周期である。また、FA(T)の単位はgal・sec、Rの単位はkmである。なお、中央から2方向に伝播する場合は、(2.10)式に相当するスペクトルは、以下のようなになる。

$$F A(T) = 11.5 \times 10^{0.5M-2} / R \quad (2.11)$$

(2.10)式、(2.11)式によれば、マグニチュード(M)と断層からサイトまでの距離(R)によって(2.1)式を表すことができる。また、(2.4)式による補正を(2.10)式に行い、波動伝播経路の特性を考慮することにより、地震基盤での加速度フーリエスペクトル(石田実体波スペクトル)は、(2.12)式のようになる。

$$F A(T) = [\{ 18 \times 10^{0.5M-2} / R \} / A(T)] \cdot \exp \{ -\omega R / 2V_s Q_s \} \quad (2.12)$$

ただし、 V_s は、ここでは、伝播経路のS波速度、 Q_s は伝播経路のQ値を表わす。

(2.12)式を用いることによって、歴史地震や将来発生するであろう大地震に対する地動予測のような、断層パラメータの特定が困難な地震に対して、加速度フーリエスペクトルを簡単に予測することができ、その妥当性は、いくつかの地震動観測記録によって検証されている。(石田, 1986、石田, 1987)^{2), 4)}。

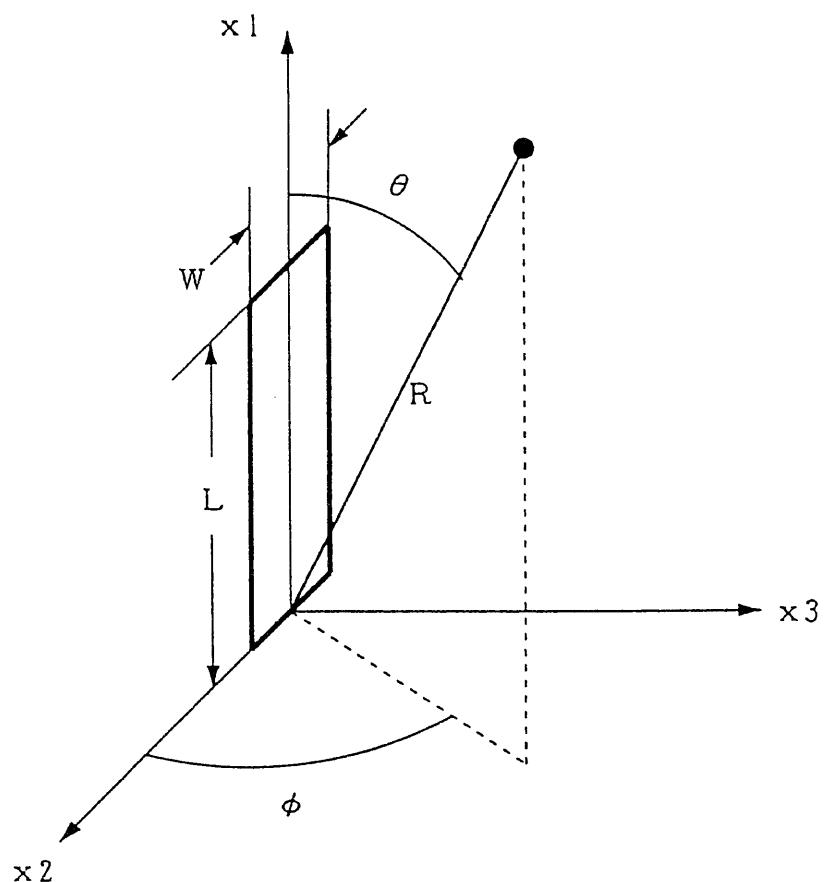


図 2 - 1 θ , ϕ , R の意味

2-2 スペクトル補正係数の意味についての考察（石田，1982）¹⁾

スペクトルの補正係数 {1/A(T)} の意味についての定性的に考える。

平均的な応力降下量 $\Delta \sigma$ と単純な断層モデルによる加速度パワースペクトル P_0 の関係は(2.13)式で表される(Hanks, 1979)⁵⁾。

$$P_0 = (0.61)^2 \cdot r_0 \cdot \frac{(\Delta \sigma)^2}{V_s \rho^2} \cdot \frac{(F_s)^2}{R^2} \quad (2.13)$$

ここで、 r_0 は断層面を一つの円形クラックとしたときの半径、 $\Delta \sigma$ は断層面上で一様としたときの平均的な応力降下量、 V_s は S 波速度、 ρ は密度、 F_s は S 波の放射係数、 R は距離である。この(2.13)式は(2.1)式の 2 乗、 $F_A(\omega)^2$ 、に対応するものである。(2.13) 式から、加速度スペクトル P_0 と $\Delta \sigma$ は、次式のような比例関係にあることがわかる。

$$P_0 \propto r_0 \cdot (\Delta \sigma)^2 \quad (2.14)$$

一方、地震波の高周波生成に、部分的な応力降下量 $\Delta \sigma_L$ が重要なかかわりがあるとすると、 $\Delta \sigma_L$ とパワースペクトルとの間には、パパジョージョ・安芸(Papageorgiou 他, 1983)⁶⁾によるスペシフィック・バリヤーモデルに基づいた表現によれば

$$\bar{P}_0 = (0.61)^2 \cdot W \cdot \frac{(\Delta \sigma_L)^2}{V_s \rho^2} \cdot \frac{(F_s)^2}{R_0} \quad (2.15)$$

となって、(2.13)式とほぼ同様な形となる。ただし、前者は円形クラック半径 r_0 に対して、後者は断層幅 W が変数となっている。また、 $\Delta \sigma_L$ は、スペシフィック・バリヤーモデルで定義される局所的な応力降下量である。したがって、(2.15)式から、 \bar{P}_0 と $\Delta \sigma_L$ について(2.16)式のような比例関係が得られる。

$$\bar{P}_0 \propto W (\Delta \sigma_L)^2 \quad (2.16)$$

スペシフィック・バリヤーモデルが地震波の高周波生成機構のモデルとして、どの程度妥当であるかは、今後の研究に待つところが多いと思われるが、ここでは、断層面上の強度の不規則な分布の一つの簡単な例として考え、応力降下量とスペクトル振幅の関係を定性的に考えるモデルとする。 \bar{P}_0 を観測地動スペクトル $B(\omega)$ に対応するものとする。これから、(2.16)式/(2.14)式の平方根は、(2.3)式から得られる $1/A(T)$ に対応することとなる。

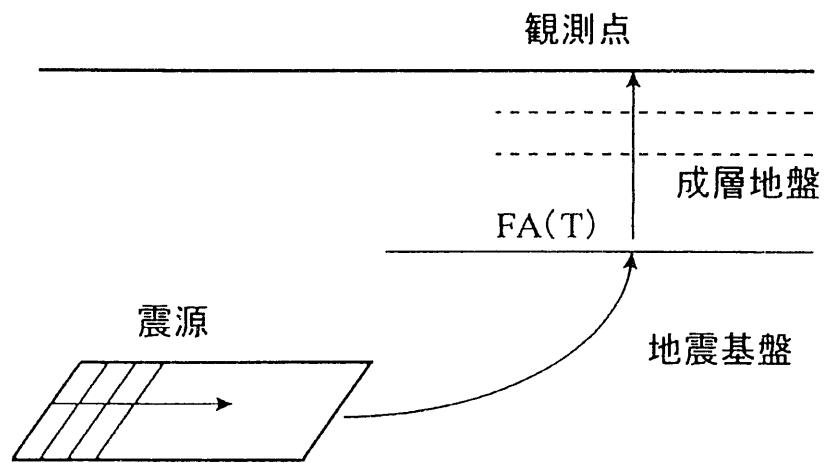
$$\sqrt{(\bar{P}_0/P_0)} \propto \frac{\Delta \sigma_L}{\Delta \sigma} \rightarrow 1/A(T) \quad (2.17)$$

(参考文献)

- 1) 石田勝彦(1982), 強震地動スペクトル特性の評価に関する一考察, 日本建築学会論文報告集, 第314号, pp. 48 ~58
- 2) 石田勝彦(1986), 強地震動スペクトル特性の評価に関する考察 (岩盤上での観測地震動スペクトルによる簡易半経験式の検討), 第7回日本地震工学シンポジウム, pp. 379~384
- 3) Savage, J. C. (1972), Relation of corner frequency to fault dimensions, *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, pp. 3788~3795
- 4) 石田勝彦(1987), 強震地動スペクトル特性の評価に関する考察 (深層井観測記録による検討), 日本建築学会大会学術講演概略集, pp. 406~407
- 5) Hanks, T. C. (1979), *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, pp. 2235 ~2242
- 6) Papageorgiou, A. S. and Aki, K. (1983), A Specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. I Description of the model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 693~722

— 石田の手法 —

長周期成分はハスケルモデル、短周期領域は応力沈下量により関数化されたフィルターによりスペクトル振幅を補正する手法である。



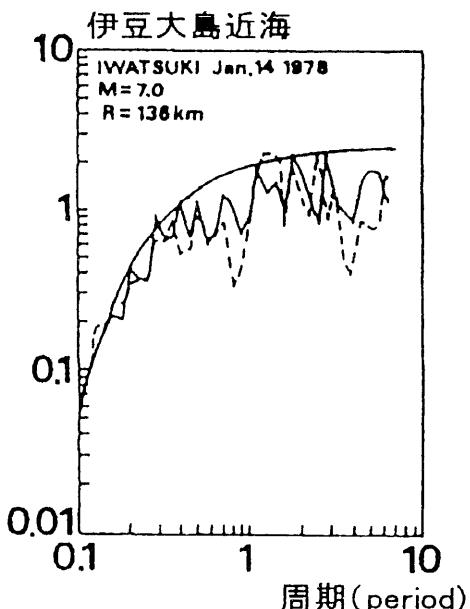
長周期 : $FA(T)$

短周期 : $FA'(T) = FA(T)/A(T)$

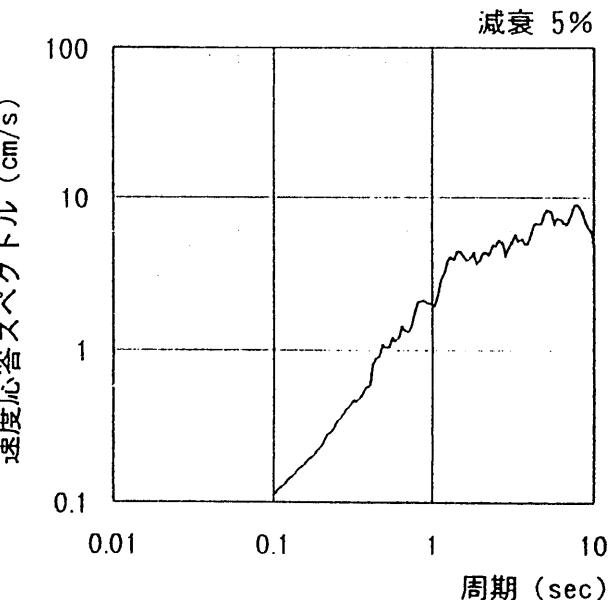
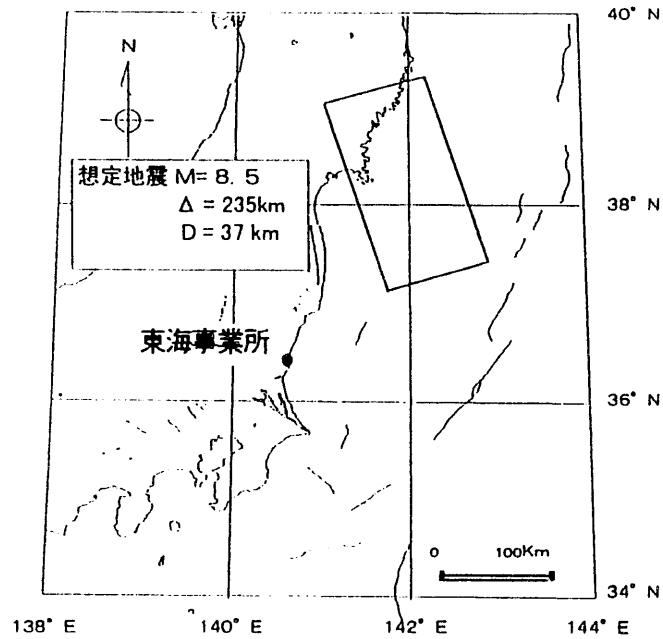
$FA(T)$: ハスケルモデル基づく
フーリエスペクトル

$A(T)$: ローパスフィルタ

比較例

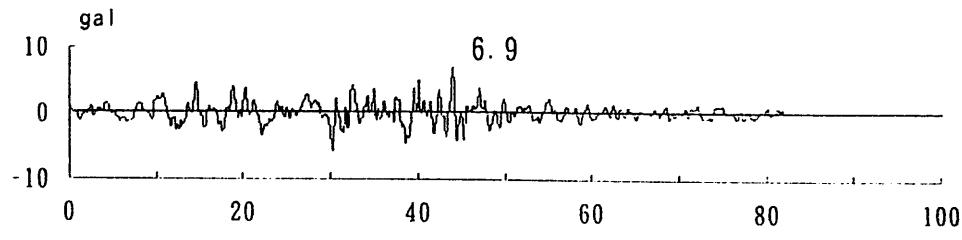


石田の手法の一例



速度応答スペクトル(地震基盤表面)

想定地震の震央位置



加速度波形(地震基盤表面)

3. 工藤の方法

断層より発生する表面波について、地表付近での波形とその速度応答スペクトルを求める。方法の説明を以下に示す。

① 手法の概要

媒質が多層構造である場合の、媒質内部にせん断が発生した場合の理論地震動が Herrman らによって与えられている。これを解く方法として、一つは Caniard-de Hoop の方法に基づく方法がある。しかし、この方法は厳密解あるいは波線理論と呼ばれるように得られる解は厳密であるが計算に手間がかかる。もう一つの方法は波数と周波数の 2 重積分によって評価するもので、そのうちの留数項が表面波を表わし、正規モード解と呼ばれる。この方法は、遠方近似解として用いられるのが一般的であるが、比較的近距離でも主要動を近似的に評価できることから、正規モード解によって波形の予測を行うものである。また、震源の広がりを考慮するため、断層を小領域に分割し、各領域からの寄与を足し合わせている。とくに、浅い地震に対して適応するメリットがある。

② 得られる波形またはスペクトル

変位波形のフーリエスペクトルおよびその逆変換としての変位波形が得られる。

③ 対象とする波

表面波（ラブ波、レーリー波）を対象としている。

④ 対象周期範囲

実際の地盤構造にもよるが、平行層を仮定するため経験的には周期 2 ~ 3 秒より長周期（数十秒まで）が主な対象となる。

⑤ 対象とする地盤

水平成層を仮定するため、震源から対象地点までの平均的な地盤構造を設定しなくてはならない。したがって、観測点付近に局地的な厚い層があるような場合など地盤構造が大きく変化する場合は、評価が難しい。2 つの水平成層構造地盤が接する垂直境界を考え、境界での反射・透過を考慮した評価も試みられている。

⑥ 対応できる震源距離

断層面からの距離は波長の 2 倍以上なくてはならない。

⑦ 入力パラメータ

断層パラメータ、破壊伝播速度、破壊形式、震源～対象地点を水平成層構造とした地盤の P 波速度、S 波速度、密度及び Q 値が入力パラメータとして必要である。

⑧ 注意点

- ・断層の広がりと破壊の伝播を評価するために断層面を小領域に分割して計算するが、分割の仕方に明確な基準が示されておらず、短周期では分割の仕方（小領域の大きさ）によって結果が影響を受ける場合もある。
- ・断層を軟弱な地層中に存在させると、経験的に過大な評価になる。
- ・震源から観測点までの地下構造が一様であることを仮定するため、観測点付近に厚い軟弱地盤が分布するような場合への適用は注意が必要である。
- ・深い地層の評価は、計算の安定のため、ある深さで打ち切られている場合がある。
- ・現段階では、断層の不均質性を考慮していないため、短周期の評価は一般に過小評価となる。
- ・「北川の方法」では表面波の計算に同じく正規モード解を用いているが、点震源を仮定しており、断層破壊の進行の影響を評価している本方法とは異なる。

⑨ 検証実績

- ・1930年北伊豆地震 東京
- ・1974年伊豆半島沖地震 東京・三島
- ・1923年関東地震 東京

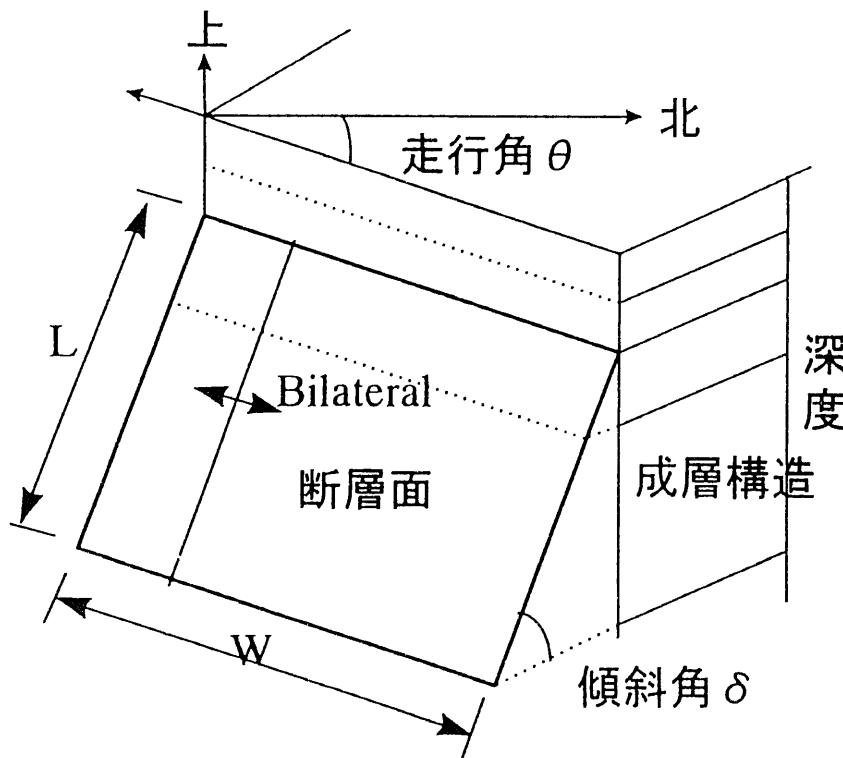
⑩ 文献

Kudo, K(1980);A Study on the Contribution of Surface Waves to Strong
Ground Motions, Proc. 7th W. C. E. E..

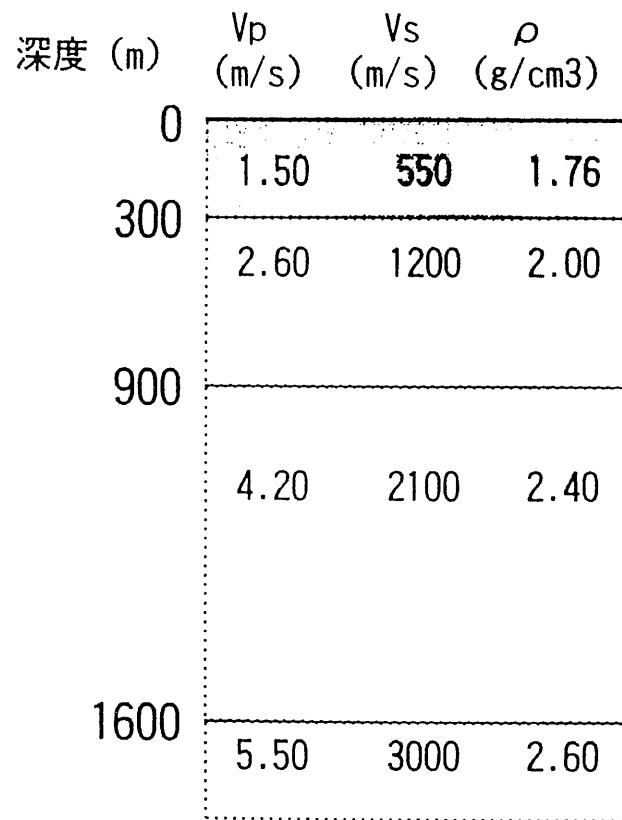
工藤一嘉(1982)；やや長周期の地震動波形予測とその周辺問題，第10回地盤震動
シンポジウム

— 工藤の手法 —

多層構造である媒質中でせん断波が発生した場合の理論地震動を解くことにより表面波の予測を行う手法である。

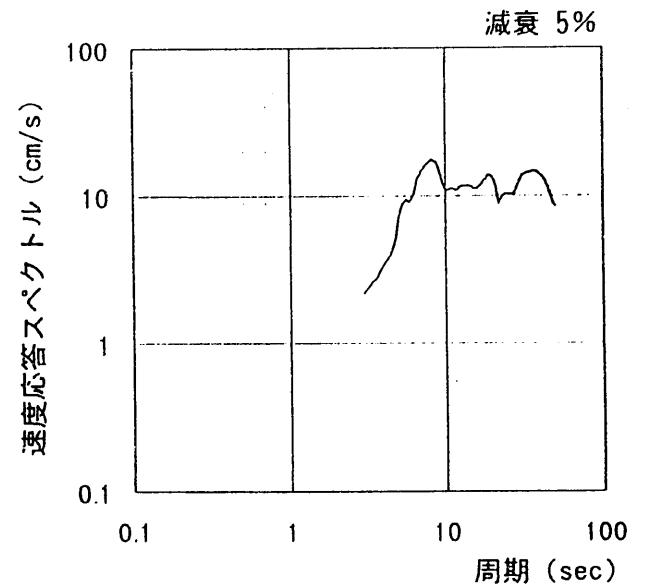
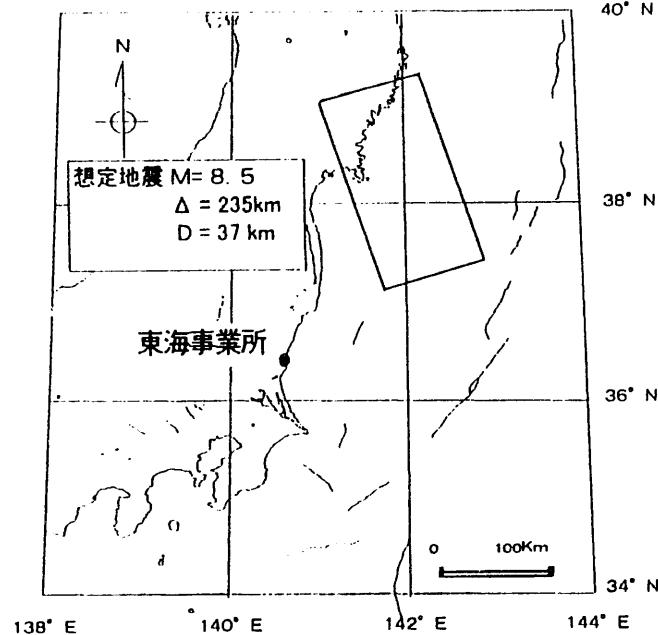


工藤の手法の概念



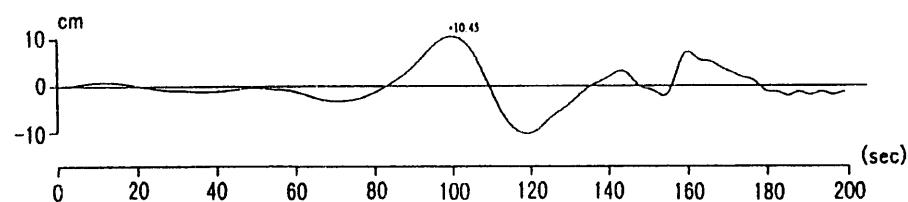
地盤モデル

工藤の手法の一例



速度応答スペクトル(建家基礎底面)

想定地震の震央位置



変位波形(地震基盤表面)

4. 入倉の方法

地表（観測地点）での要素波を用いて、対象地震の波形とその応答スペクトルを求めている。方法の説明を以下に示す。

① 手法の概要

対象とする地点で地震観測を行っても、必要とするような大地震記録を得ることは余程の機会に恵まれない限り難しい。したがって、観測記録を用いて地域特性を予測結果に反映させようすれば、中小の地震記録を用いることが必要になる。

本方法は観測された中小の地震記録に含まれている、震源から対象地点までの地震波の伝播経路の情報を地震記録の中に含まれているものとしてとらえ、中小の地震記録をグリーン関数として用いて、地震の相似則から合成のためのパラメータを推定し、時間軸上で重ね合わせて大地震の記録を得る方法である。合成に必要なパラメータは次のような考え方で定められる。図3-3にその概念を示す。

- ・重ね合わせる小地震の数は、大地震と小地震のモーメント比から決まる。
- ・大地震の断層面の分割個数は大地震と小地震の断層面積比で決められる。
- ・重ね合わせる小地震の数、大地震の断層の縦横の分割数は、震源パラメータの相似則が成り立つれば $\left(\frac{\text{大地震のモーメント}}{\text{小地震のモーメント}} \right)^{1/3}$ に等しい。

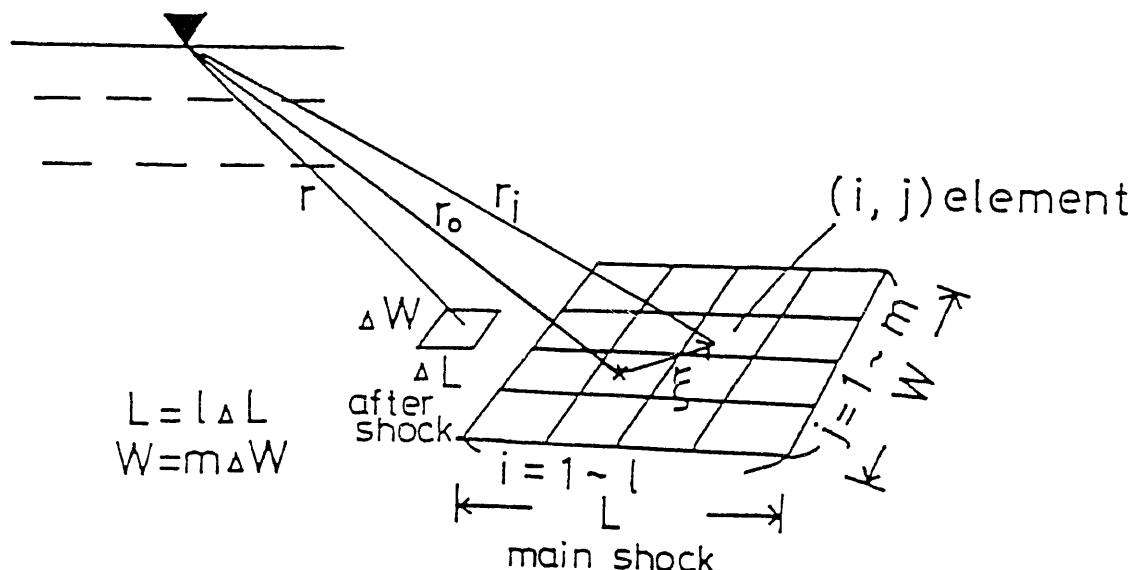


図3-3 入倉の方法の概念

分割させたおののおのの小領域から、大地震と小地震のすべり量の比に相当する個数の小地震が大地震のライズタイム内に発生すると考えて、時間軸上で、破壊伝播に要する時間や伝播経路の違いによる伝播時間の差を考慮して、重ね合わせを行う。

② 得られる波形またはスペクトル

用いる小地震記録の種類に従って、加速度、速度、変位の波形が得られる。

③ 対象とする波

小地震記録に含まれる波が対象となる。

④ 対象周期範囲

特に制限はない。しかし、用いる小地震記録によって限界がある。すなわち、用いる小地震記録の測定周波数帯域、あるいは、デジタイズに伴う長周期ノイズなどから、結果として有意義な周波数帯域が決まる。

⑤ 対象とする地盤

小地震の観測された地点が対象となるので、特に対象地盤を問わない。

⑥ 対応できる震源距離

手法による制限はない。しかし、観測点（対象地点）と断層が極端に近いような場合、また断層面が非常に広い場合には、小地震の経路と各要素からの伝播経路が同等と見なせなくなることに注意する必要がある。

⑦ 入力データ

必要なデータは、ターゲットとする地震のパラメータおよび要素地震波としての条件を満足している小地震波形とそのモーメント、断層モデル、破壊伝播速度、S波伝播速度である。

⑧ 注意点

- ・要素地震波としては、想定する大地震の震源域内で発生し、メカニズムも大地震のメカニズムと同等と見なせる地震で、対象とする周期帯域においてシグナルがノイズより十分大きいことが必要である。
- ・小地震記録の S/N 比に注意し、有効な周波数範囲を調べる必要がある。
- ・重ね合わせる個数は大地震と小地震のモーメントから定めるため、小地震のモーメントを評価することが重要である。
- ・断層が大きい場合、一つの小地震記録を全要素での要素波として用いてよいか、吟味が必要である。
- ・結果が小地震の震源特性の影響を受ける。
- ・破壊過程に対して、ランダムなものを考えるなどいくつかの方法が提案されている。将来の地震を考える場合には決定論的に決めるることは難しい。

⑨ 検証実績

- 1983年日本海中部地震 秋田港
- 1980年伊豆半島沖地震 川奈、中伊豆
- 1946年南海道地震 敦賀 など。

⑩ 文献

Irikura K. (1983);Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motion during Large Earthquakes, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., vol. 33.

Irikura K. (1986);Prediction of Storong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function, Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium.

Irikura K. (1988);Estmation of Near-Field Ground Motion Using Empirical Green's Function, Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Japan.

5. 対象地点

本検討の対象としている再処理施設ユーティリティ施設建設予定地点の位置は、次の通りである。

北緯 36度26.2分 東経 140度36.5分

6. 地盤条件

6-1 表層地盤モデル

対象地点の地盤モデルは、ボーリング調査、各種試験などの地盤調査結果から表5-1の通り求められている。本検討においては、このモデルを表層地盤モデルとして用いた。

表5-1 対象地点の地盤モデル

標高	S波速度 Vs(m/s)	密度 γ (t/m ³)	減衰率 h (%)
TP +1m (切り取り後の地表面)			
-8	460	1.79	2.0
-24	520	1.79	2.0
-36	470	1.83	2.0
-57	570	1.82	2.0
-78	600	1.81	2.0
-96	470	1.81	2.0
-134	550	1.78	2.0
-176	570	1.74	2.0
-274 (開放基盤表面)	530	1.71	2.0
-894	1200	2.00	1.0
-1624 (地震基盤表面)	2100	2.4*	0.5
	3000	2.6*	0.3

*は推定値

6 - 2 深い地盤構造

本検討地点付近では、人工地震探査がすでに実施されており、この結果は上記の地盤モデルに反映させている。さらに、対象とする地震（後述7章）から検討地点までの伝搬経路を考える場合の深い構造については、かつての大爆破探査が参考になる。これらによると、地下20~30kmまでは、 V_p (P波速度) = 5.8~6.5 km/s、それ以深は7.4~8.0km/sとなっている。これをS波速度に換算すると、

$$V_s / V_p = 0.576 - 0.139 / V_s \quad (\text{Yoshimura et.al, 1982})$$

を用いて、深さ20~30kmまでが V_s = 3.1~3.5km/s、それ以深が V_s = 4.0~4.35km/s程度となる。

7. 対象地震

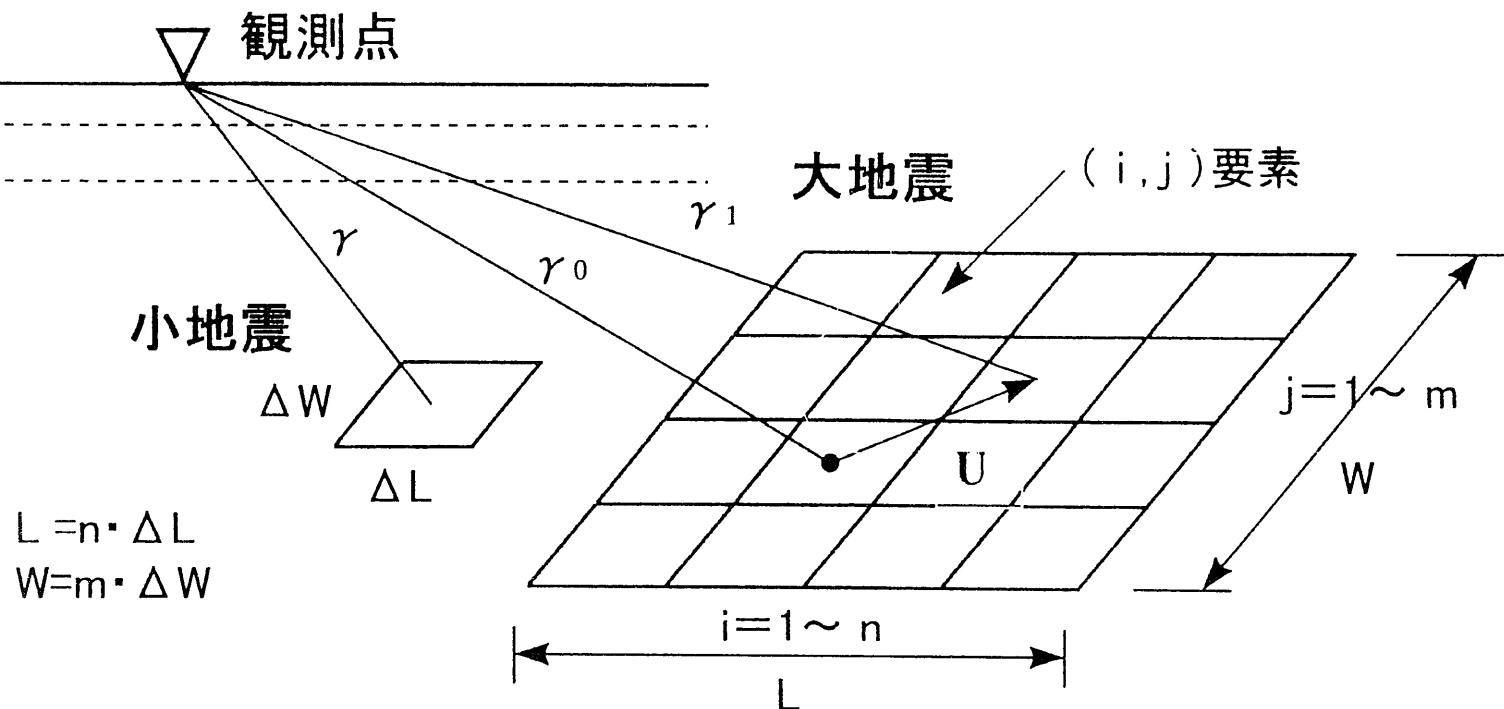
すでに対象とすべき地震像については検討が行われており、いわゆる最強地震 (S_1)と限界地震 (S_2)が設定されている。ここにおいても、耐震設計を考えるうえでの対象地震である、 S_1 、 S_2 の2地震について検討を行った。ここで評価しようとしている「やや長周期」の周期帯の地震動を及ぼす地震の規模（マグニチュード）は一般に7.5以上とされており、これに適合している。この S_1 、 S_2 地震に関して計算に必要なパラメータを表6-1のようにして設定した。基本的には、探査結果、研究成果のあるものについてはその値を活用し、ないものについては既往のマグニチュードを中心とした経験式、実験式に基づいて設定し、相互の整合のとれたものとした。

① S_1 、 S_2 関係

表6-1（図6-1）では、 S_1 、 S_2 を対象としており、これらの基礎となる塩屋崎沖地震は、太平洋プレートがユーラシアプレートもしくは北米プレートの下にもぐり込んでいく部分にあたり、既往の地震モデルあるいは地震活動を含むテクトニクスの観点から10°程度の伏角をもつものである。また、S波速度 (V_s) はAbe(1977)による破壊伝搬速度 (V_r = 3.0 km/s) から逆算しているが、深さ30km以上であるので上述の深い地盤構造とも整合している。

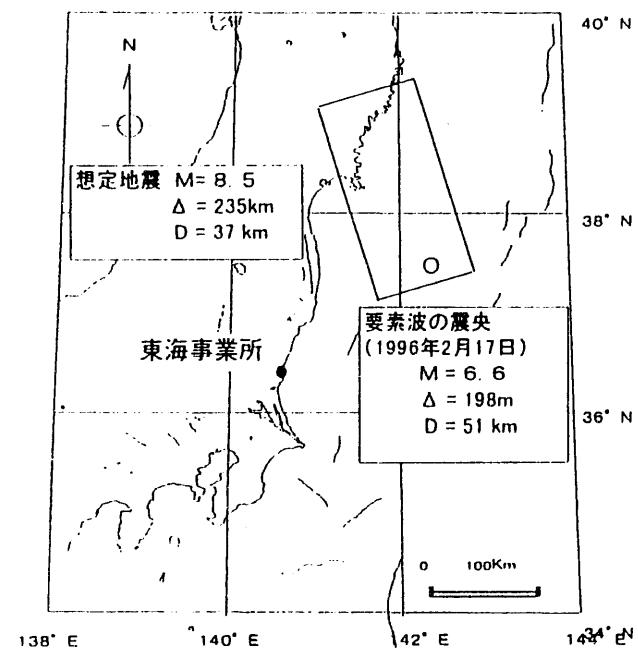
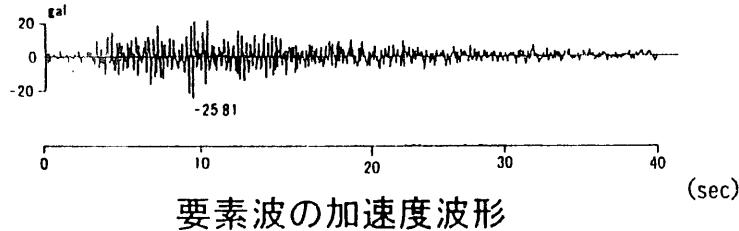
— 入倉の手法 —

中小の地震記録を用いて地震の相似則から合成のためのパラメータを推定し、時間軸上で重ね合わせ観測地点での大地震の地震動波形を予測することにより実体波と表面波を合わせて評価する手法。

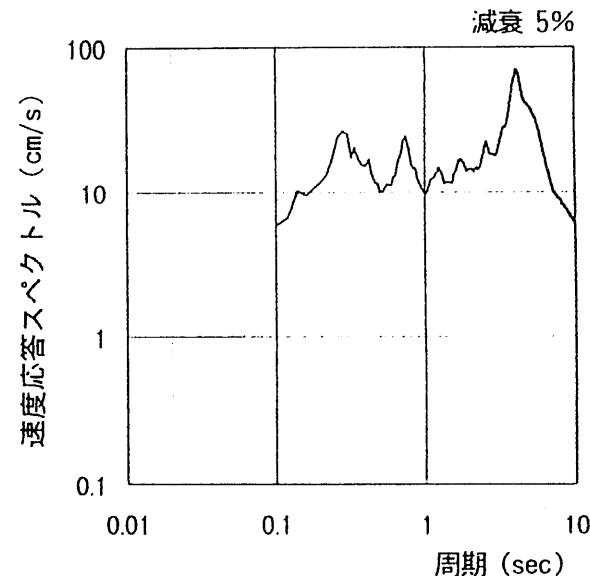


入倉の手法の概念

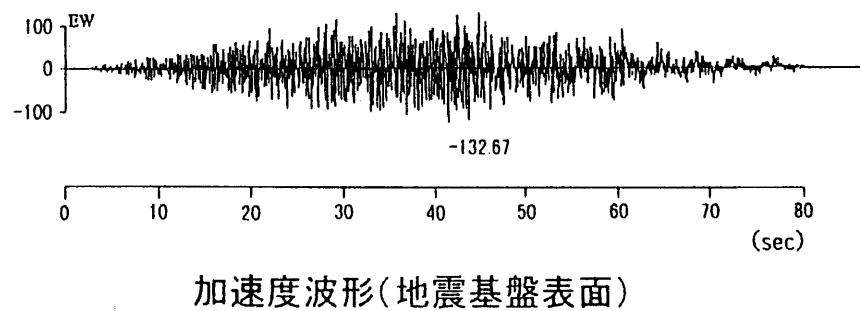
入倉の手法の一例



想定地震及び要素
波の震央位置



速度応答スペクトル(建家基礎底面)



加速度波形(地震基盤表面)

別添資料

免震構造設計用入力地震動策定

入力データリスト

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所
建設工務管理室

1. 大崎のコントロールポイント

プログラム名 : OHSAKISP.EXE

- U-3 (1896年1月9日 茨城県沖)

M=7.5

Δ=35 km

H=50 km

V0=7.2 cm/s

U-03 (ガラス固化開発施設設置時作成)	
0.02	0.37
0.15	9.69
0.33	21.12
0.82	21.12
2.00	14.16

- U-2 (1895年1月18日 茨城県南部)

M=7.2

Δ=42 km

H=50 km

V0=4.2 cm/s

U-02	
0.02	0.22
0.13	4.98
0.32	11.75
0.75	11.75
2.00	7.14

- U-12 (1930年6月1日 茨城県沿岸)

M=6.5

Δ=15 km

H=30 km

V0=7.2 cm/s

U-12	
0.02	0.26
0.11	4.51
0.23	9.35
0.55	9.35
2.00	3.48

- U-14 (1938年5月23日 茨城県沖)

M=7.0

Δ =90 km

H=0 km

V0=2.0 cm/s

U-14	
0.02	0.10
0.14	2.59
0.34	6.59
0.86	6.59
2.00	5.06

- U-15 (1938年9月22日 茨城県沖)

M=6.5

Δ =37 km

H=30 km

V0=2.4 cm/s

U-15	
0.02	0.13
0.12	2.64
0.30	6.81
0.72	6.81
2.00	4.20

- F-1 (関谷断層)

M=7.5

Δ =86 km

H=16.5 km

V0=4.1 cm/s

F-01	
0.02	0.22
0.16	5.40
0.35	12.20
0.93	12.20
2.00	9.80

・地震地体構造

M=7.75

Δ =35 km

H=30 km

V0=14.6 cm/s

S2-M D=35km H=30km	
0. 02	0. 84
0. 12	17. 59
0. 30	42. 84
0. 62	42. 84
2. 00	20. 75

・直下地震

M=6.5

Δ =7.0 km

H=7.2 km

V0=13.5 cm/s

S2-TYOKKA	
0. 02	1. 30
0. 10	18. 40
0. 17	30. 10
0. 40	30. 10
2. 00	6. 20

2. 大崎・模擬地震波

プログラム名：OHSAKI.EXE

S1 INPUT DATA

(ガラス固化開発施設設置時作成)

S2-M INPUT DATA

```
*OHSAKI    7. 7500   35. 0000   10. 0000 . 050 . 010          0. 5000   50. 0000
*        050 . 150  4      50      7106 30. 00 1100TOKAI S2-D H35, D30KM
*TIME     0. 0000   0. 0000   0. 0000
*CONT     0. 0200   0. 1200   0. 3000   0. 6200   2. 0000
*        0. 8400   17. 5900   42. 8400   42. 8400   20. 7500
-
```

S2-N INPUT DATA

```
*OHSAKI    6. 5000   7. 2000   10. 0000 . 050 . 010          0. 5000   50. 0000
*        050 . 150  20     50      7109 7. 00 1024S2 TYOKKA 95/4/4
*TIME     2. 4390   9. 0570   17. 4180
*CONT     0. 0200   0. 1000   0. 1700   0. 4000   2. 0000
*        1. 3000   18. 4000   30. 1000   30. 1000   6. 2000
-
```

3. 断層モデル・設定スペクトル、模擬地震波

プログラム名 応答スペクトル : DANSOU1.EXE
 模擬地震波 : DANSOU2.EXE

U-3 (S1K-M) INPUT DATA

```
*TITLE ----- DANSOU MODEL WAVE ----- [U-3]
*MAGNI 7.5000
*BUNKATU 12 12
*SHINGEN 35.0000 0.0000 50.0000[U-3]
*DANSO 74.1300 37.0700 0.0000 10.0000 200.0000
*START PT 1 6
*RUPT V 2.5000
*DENPAN V 3.0000
*TIME 40.0000 0.0100
*MWAVE1 .050 100 20 50 7600 4408
*MWAVE2 .050 100 20 50 7600 4408
-
```

U-2 INPUT DATA

```
*TITLE ----- DANSOU MODEL WAVE ----- u-2
*MAGNI 7.2000
*BUNKATU 10 10
*SHINGEN -18.7000 -37.3000 -50.0000u-2
*DANSO 52.4800 26.2400 0.0000 100.0000 160.0000
*START PT 3 8
*RUPT V 2.5000
*DENPAN V 3.0000
*TIME 40.0000 0.0100
*MWAVE1 .050 150 7 50 2341598 7042
*MWAVE2 .050 150 7 50 2341598 7042
-
```

U-14 INPUT DATA

```
*TITLE ----- DANSOU MODEL WAVE ----- u-14
*MAGNI 7.0000
*BUNKATU 12 12
*SHINGEN 90.0000 0.0000 -11.0000u-14
*DANSO 41.7000 20.8000 0.0000 100.0000 -20.0000
*START PT 3 8
*RUPT V 2.5000
*DENPAN V 3.0000
*TIME 40.0000 0.0100
*MWAVE1 .050 150 7 50 2341598 7013
*MWAVE2 .050 150 7 50 2341598 7013
-
```

U-15 INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	u-15
*MAGNI	6. 5000			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	37. 0000	0. 0000	-30. 0000	u-15
*DANSO	23. 4000	11. 7000	0. 0000	100. 0000 -20. 0000
*START PT	5	5		
*RUPT V	2. 5000			
*DENPAN V	3. 0000			
*TIME	40. 0000	0. 0100		
*MWAVE1			. 0500	0. 2000 10. 0000
*MWAVE2	. 050 . 150 7	50	2341598	7014
-				

F-1 INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	f-1 sekiya
*MAGNI	7. 5000			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	62. 2000	62. 2000	-16. 0000	sekiya
*DANSO	40. 0000	33. 0000	0. 0000	30. 0000 0. 0000
*START PT	3	8		
*RUPT V	2. 5000			
*DENPAN V	3. 0000			
*TIME	40. 0000	0. 0100		
*MWAVE1			. 0500	0. 2000 10. 0000
*MWAVE2	. 050 . 150 7	50	2341598	7025
-				

131 INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	1677/11/4
*MAGNI	8. 0000			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	124. 8000	-103. 9000	-24. 0000	1677/11/4
*DANSO	132. 0000	66. 0000	0. 0000	100. 0000 160. 0000
*START PT	1	1		
*RUPT V	2. 5000			
*DENPAN V	3. 0000			
*TIME	80. 0000	0. 0100		
*MWAVE1			. 0500	0. 2000 10. 0000
*MWAVE2	. 050 . 150 20	50	2341594	3441
-				

134 INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	1703/12/31	model1-1
*MAGNI	8. 2000				
*BUNKATU	10	10			
*SHINGEN	-72. 5000	-192. 6000	-29. 0000	1703/12/31	model1-1
*DANSO	166. 0000	83. 0000	0. 0000	60. 0000	225. 0000
*START PT	1	10			
*RUPT V	2. 5000				
*DENPAN V	3. 0000				
*TIME	80. 0000	0. 0100			
*MWAVE1			.0500		0. 2000 10. 0000
*MWAVE2	.050 .150 20	50	2341594	4441	
-					

F-2 (S1K-F) INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	KAI IKI-DANSOU	
*MAGNI	8. 2500				
*BUNKATU	10	10			
*SHINGEN	195. 0000	0. 0000	-30. 0000	KAI IKI-DANSOU	
*DANSO	176. 0000	88. 0000	0. 0000	100. 0000 -20. 0000	
*START PT	1	10			
*RUPT V	2. 5000				
*DENPAN V	3. 0000				
*TIME	60. 0000	0. 0100			
*MWAVE1			.0500	0. 1000 10. 0000	
*MWAVE2	.050 .150 20	50	7019	5444	
-					

地震地体構造 (S2K-M) INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	RUC S2-STAR M7.75
*MAGNI	7.7500			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	35.0000	0.0000	-30.0000	RUC S2-STAR M7.75
*DANSO	99.0000	49.5000	0.0000	100.0000 -20.0000
*START PT	5	1		
*RUPT V	2.5000			
*DENPAN V	3.0000			
*TIME	40.0000	0.0100		
*MWAVE1			.0500	0.2000 10.0000
*MWAVE2	.050 .150 20	50	7001	1054
-				

直下地震 (S2K-N) INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	S2K-N (U-12)
*MAGNI	6.5000			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	7.2000	0.0000	-7.0000	S2K-N (U-12)
*DANSO	23.4000	11.7000	0.0000	30.0000 120.0000
*START PT	5	5		
*RUPT V	2.5000			
*DENPAN V	3.0000			
*TIME	40.0000	0.0100		
*MWAVE1			.0500	0.2000 10.0000
*MWAVE2	.050 .150 7	50	2341598	1109
-				

隣接地震地体構造 INPUT DATA

*TITLE	DANSOU	MODEL	WAVE	S2-D (RINSETU) 1978miyagi
*MAGNI	8.5000			
*BUNKATU	10	10		
*SHINGEN	140.1000	190.2000	-37.0000	S2-D (RINSETU) 1978miyagi
*DANSO	235.0000	117.5000	0.0000	110.0000 20.0000
*START PT	1	10		
*RUPT V	2.5000			
*DENPAN V	3.0000			
*TIME	80.0000	0.0100		
*MWAVE1			.0500	0.2000 10.0000
*MWAVE2	.050 .150 20	50	2341594	3515
-				

4. SHAKE のインプットデータ

プログラム名 MRSHAKE.EXE (S2-N は SHAKE91)

U-3 (S1K-M) INPUT DATA

4096								
1								
4000	4096	0.01S1T.DAT	146GAL	99	1	(10F8.5)	10	
1.00		33.3						
8								
4	1	10	50.					
9	100.	LOMU (LM1)	SHEAR MODULUS					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
0.925	0.875	0.794	0.681	0.537	0.337	0.188	0.063	
0.001								
9	10.0	LOMU (LM1)	DAMPING					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
2.5	3.0	3.8	5.0	6.5	10.5	14.3	16.3	
17.0								
9	100.	SAND (MU1)	SHEAR MODULUS					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
0.900	0.825	0.700	0.488	0.300	0.175	0.100	0.050	
0.001								
9	10.0	SAND (MU1)	DAMPING					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
4.5	5.5	6.5	9.0	14.3	20.8	25.8	28.5	
29.0								
9	100.	NEND (MU2)	SHEAR MODULUS					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
0.994	0.975	0.913	0.775	0.525	0.250	0.100	0.025	
0.001								
9	10.0	NEND (MU2)	DAMPING					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
0.001	0.8	2.3	6.5	12.3	18.5	21.8	23.0	
23.5								
9	100.	SAND (GRA)	SHEAR MODULUS					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
1.0	0.994	0.975	0.925	0.788	0.538	0.263	0.106	
0.05								
9	10.0	SAND (GRA)	DAMPING					
1.0E-03	3.1623E-3	1.0E-2	3.1623E-2	1.0E-1	3.1623E-1	1.0	3.1623	
10.0								
0.001	0.3	1.3	3.3	5.5	7.3	8.3	8.5	
8.5								
2								
1	53	3 RUC	53-LAYER MODEL					
1 1		2.00		0.100	1.70	100.0	100.0	1.0
2 2		3.00		0.05	1.74	250.0	250.0	1.0
3 3		1.0		0.02	1.79	460.0	460.0	1.0

3 3	1	1.0	0.02	1.79	460.0	460.0	1.0								
4 3	1	4.0	0.02	1.79	460.0	460.0	1.0								
5 3	1	4.00	0.020	1.79	460.0	460.0	1.0								
6 3	1	4.0	0.02	1.79	520.0	520.0	1.0								
7 3	1	4.0	0.02	1.79	520.0	520.0	1.0								
8 4	1	4.0	0.02	1.79	520.0	520.0	1.0								
9 4	1	4.00	0.020	1.79	520.0	520.0	1.0								
10 4	1	4.0	0.02	1.83	470.0	470.0	1.0								
11 4	1	4.0	0.02	1.83	470.0	470.0	1.0								
12 4	1	4.0	0.020	1.83	470.0	470.0	1.0								
13 4	1	4.2	0.02	1.82	570.0	570.0	1.0								
14 4	1	4.2	0.02	1.82	570.0	570.0	1.0								
15 4	1	4.2	0.02	1.82	570.0	570.0	1.0								
16 4	1	4.2	0.02	1.82	570.0	570.0	1.0								
17 4	1	4.20	0.020	1.82	570.0	570.0	1.0								
18 4	1	4.2	0.02	1.81	600.0	600.0	1.0								
19 4	1	4.2	0.02	1.81	600.0	600.0	1.0								
20 4	1	4.2	0.02	1.81	600.0	600.0	1.0								
21 4	1	4.2	0.02	1.81	600.0	600.0	1.0								
22 4	1	4.20	0.020	1.81	600.0	600.0	1.0								
23 4	1	6.0	0.02	1.81	470.0	470.0	1.0								
24 4	1	6.0	0.02	1.81	470.0	470.0	1.0								
25 4	1	6.00	0.020	1.81	470.0	470.0	1.0								
26 4	1	6.3	0.02	1.78	550.0	550.0	1.0								
27 4	1	6.3	0.02	1.78	550.0	550.0	1.0								
28 4	1	6.3	0.020	1.78	550.0	550.0	1.0								
29 4	1	6.3	0.020	1.78	550.0	550.0	1.0								
30 4	1	6.3	0.020	1.78	550.0	550.0	1.0								
31 4	1	6.5	0.020	1.78	550.0	550.0	1.0								
32 4	1	7.0	0.02	1.74	570.0	570.0	1.0								
33 4	1	7.0	0.02	1.74	570.0	570.0	1.0								
34 4	1	7.0	0.02	1.74	570.0	570.0	1.0								
35 4	1	7.0	0.02	1.74	570.0	570.0	1.0								
36 4	1	7.0	0.02	1.74	570.0	570.0	1.0								
37 4	1	7.00	0.020	1.74	570.0	570.0	1.0								
38 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
39 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
40 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
41 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
42 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
43 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
44 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
45 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
46 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
47 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
48 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
49 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
50 4	1	7.00	0.020	1.71	530.0	530.0	1.0								
51 4	1	7.0	0.02	1.71	530.0	530.0	1.0								
52 4	1	0.10	0.010	2.00	1200.0	1200.0	1.0								
53	1		0.010	2.00	1200.0	1200.0	1.0								
3															
53	0														
4															
1	0	5.0	0.65												
5															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	53												

0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0												
11	11	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10													