

付録

提供波に関する概説文

以下の提供波に関する概説文をまとめる。

提供者	対象地震	対象地点
第1次提供波		
佐藤俊明(清水建設)	関東地震	東京本郷・大手町と横浜MM21地区
久田嘉章(工学院大学)	東海地震	静岡県駿東郡長泉町
釜江克宏(京都大学)	南海地震	西大阪と大阪管区気象台
愛知県建築住宅センター	東南海地震	名古屋市中区三の丸
第2次提供波		
関口・他(産総研)	東南海, 南海地震	大阪平野
土方・他(東京電力, 他)	東南海, 東海地震	関東平野
釜江・川辺(京都大学)	東南海, 南海地震	大阪平野
鶴来・香川(地盤研)	東南海, 南海地震	大阪平野
野津(港湾空港研)	東海地震	静岡(強震観測点等)
鈴木・岩田(京都大学)	東南海地震	濃尾平野(強震観測点)
土方・他(東京電力, 他)	東海地震	関東平野
愛知県設計用入力地震動研究協議会	新東海地震(東海・東南海)	濃尾平野
構造物部会との連携で行われたもの		
野津(港湾空港研)	東南海, 南海地震	ダムサイト, 名古屋港等

概説文: 関東地震の東京および横浜における予測波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

1923年関東地震の再来を想定している。対象地点は、東京・大手町気象庁(TOK, 緯度 35.687 度, 経度 139.758 度)、東京・本郷東大構内(HNG, 緯度 35.715 度, 経度 139.763 度)および横浜・みなとみらい地区(YKL, 緯度 35.452 度, 経度 139.634 度)の3地点である。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

長い間、日本の建造物の耐震設計や各種防災対策を考えるうえで大きな指標とされてきた関東地震は、量・質的に十分な波形記録が得られているわけではない。佐藤・壇(清水建設)は、最新の知見を反映した震源モデルや地下構造モデルを用いて、ハイブリッド合成法により広帯域の地震動の再現を行なっている。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

- 手法の概要と特色 短周期領域(周期4秒以下)については経験的グリーン関数法(東京・大手町 TOK)ないし統計的グリーン関数法(東京・本郷 HNG および横浜・みなとみらい地区 YKL)により、長周期領域(周期4秒以上)については3次元有限差分法により、それぞれ計算し、両者を足し合わせた広帯域ハイブリッド合成法が用いられている。
- 有効周期帯域 周期 0.07～50 秒程度である。
- 予測地点の最表層の S 波速度 HNG および YKL については、S波速度で 430m/s の工学的基盤での波形が計算されている。TOK については、気象庁の地表の記録が用いられているが、この地点の地盤構造の推定値が(壇ほか、2000)の表1に示されている。それによると表層の S 波速度は 200 m/s である。
- 予測成分(水平、上下) NS および EW の水平2成分である。

4. 震源モデルについて

- 震源モデルについては、地殻変動データおよび遠地実体波データを用い、マルチタイムウィンドー法により同時インバージョンを行うことにより推定された有限断層モデル(Wald and Somerville, 1995)を忠実にモデルに取り入れている。ただし、短周期領域の計算では、 ω^{-2} モデルに整合するようにモデルが修正されている。
- 過去の地震の震源モデルに基づく平均的関係を用いて、震源モデルが設定されているわけではないが、用いられているパラメータは平均的関係から大きくはずれているようにはみえない。
- アスペリティ位置や破壊様式は、地殻変動や遠地実体波のデータの同時インバージョンから推定された Wald and Somerville のものを用いている。

- ・ 経験的グリーン関数法において、小地震の応力降下量は観測記録とのフィッティングから推定され、ラディエーションパターンの補正については考慮されていない。
 - ・ ハイブリッド法における接続周期付近での落ち込みの影響については特に対処されていない。
5. 伝播経路モデル(いわゆる地殻構造)について
6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて
- ・ 経験的グリーン関数法では、1990 年神奈川県西部地震(M5.1)の記録が経験的グリーン関数として用いられている。この地震の震央は関東地震の震源域のほぼ西端に位置する。距離補正の際に Q 値による補正は行っていない。
 - ・ 深い地盤構造については、最近の中小地震の直達波が再現できるように作成した水平成層構造を基に、深井戸や人工地震探査結果等を総合的に考慮して、工学的基盤まで 3 次元盆地構造がモデル化されている。
 - ・ 神奈川県西部地震の首都圏各地のシュミレーションにより、周期 3.3 秒以上の帯域で直達波に引き続く後続波も含めて観測波形を良好に再現できることが確認されている。
 - ・ 工学的基盤で波形が与えられており、浅部地盤構造による増幅の影響は考慮されていない。
7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？
- ・ 予測波の検証については、長周期成分については、東京・本郷での計算波形が横田らにより復元された今村式強震計記録と全体的な特徴が近いことが確認されている。短周期成分については、計算値の分布が木造建物全壊率分布と比較され、両者は調和的であることが示されている。
 - ・ 広帯域地震動としては、計算パラメータを変化させて予測波がどの程度ばらつくかについての検討はなされていない。しかし、統計的グリーン関数法の結果に関しては、初期位相の乱数を変えた 3 ケースについて計算し、計測震度の変動幅が 0.15 以内であることを確認している(壇ほか、2000)。
8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討
- ・ 日本建築センター波(通称)などの高層ビルの設計用スペクトルとの比較がなされ、予測波のスペクトルがこれらと同程度ないしやや小さいことが示されている。
 - ・ 本予測波を用いた高層ビルの耐震検討事例が既に複数行われている。

9. 自由コメント

既往の研究成果を最大限に活用したもので、計算がなされた当時(2000年頃)では最高水準にあるものである。ただし、1)その後、震源モデルや地下構造モデルの見直しや修正が行われていること、2)ハイブリッド法における接続周期(4秒)付近での落ち込みの影響については特に対処されていないので、この周期付近で過小評価になっている可能性もあること、3)経験的グリーン関数法では断層の西端部で発生した1種類の小地震の記録を断層の中央部や東部の要素についても適用している

ために、伝播経路の影響を精度良く評価しているとは限らないこと、なども注意点として、指摘できる。

10. 作成者のコメント

本提供波は、1923年関東地震の震源近傍の広帯域地震動を再現する目的で、1990年代に行われた一連の研究の最終結果の一つである。作成者は、確からしい最終結果を得るために、以下の考え方をとった。すなわち、対象周期における震源の複雑さのスケールと地震波伝播における地下構造の複雑さのスケールのバランスを意識した上で、独立したデータで検証された途中結果を積み重ねて得られた最終結果は、自動的に、ある程度の確かさで、当時の強震動を再現しているはずである。このような意図のもとに、一連の研究では以下のステップを踏んでいる。

- (1) 周期数秒以上を対象とした1923年関東地震の不均質断層モデルの同定(文献4)、
- (2) (1)の断層モデルを用いた日本国内の長周期地震動の再現性の検討(文献5,6)、
- (3) 首都圏の3次元地下構造モデルの開発と小地震による検証(文献7)
- (4) 首都圏の周期4秒以上の長周期地震動シミュレーションと復元記録との比較(文献7)
- (5) (1)と整合する短周期に適用可能な不均質断層モデルの開発と検証(文献8,9)、
- (6) (5)の断層モデルを用いた短周期地震動シミュレーションと震度との比較(文献8,9,10)
- (7) 広帯域ハイブリッド法による広帯域波の合成(文献1,2,3)

以上の各ステップの検証結果を踏まえて最終結果をみた場合、作成者として特に気になるのは以下の3点である。

第1点は、(1)の震源モデルの長周期地震動の再現性の精度に関することである。これについては、(2)の文献6をご覧頂きたいが、グリーン関数の精度が高いと考えられる岐阜の関東地震の強震記録(武村ほか、1994)の周期3秒から10秒におけるシミュレーション波の振幅は、記録の7割から9割程度となっている。この結果に基づけば、(1)のWald and Somerville(1995)の震源モデルによる長周期地震動の計算結果は、多少、過小評価傾向にあるのではないかと考えている。

第2点は、広帯域ハイブリッド法の技術的問題であり、自由コメントでも指摘されている、「接続周期(4秒)付近での落ち込みの影響については特に対処されていない。」に関することである。この指摘はその通りである。周期4秒付近は、免震ビルや超高層ビルなどの建造物の固有周期付近に対応する重要な周期帯域であり、何らかの技術的改良が必要と考えている。しかし、実体波だけでなく表面波が卓越することを考えると、短周期地震動のラディエーションパターンの補正などに関して、現状でもよい解決策が得られておらず、今後の検討課題と考えられる。ただし、提供した東京と横浜の波に関して、接続周期付近で顕著なスペクトルの落ち込みがないことだけは計算当ても確認している。

第3点は、統計的グリーン関数法により計算された地震動はS主要動部分のみを対象としたもので、首都圏の厚い堆積層で励起された表面波による継続時間の長い後続動が表現されていないことである(文献10)。したがって、統計的グリーン関数法を短周期帯域に適用したハイブリッド法の波では、接続周期である4秒から1秒程度までの地震動の継続時間が過小評価されていることには注意を要する。なお、経験的グリーン関数法を短周期帯域に適用したハイブリッド法ではこのような問題点はない。

自由コメントにあるように、現在では、震源モデル、地下構造モデルともに新しいモデルが研究

開発され、広帯域ハイブリッド法の技術も作成者が本提供波形を計算した当時と比べれば、進んでいることは確かである。したがって、現状では、最新の研究成果を用いて、広帯域地震動を作成することが望まれる。作成者としては、特に上記の第3点を除けば、東京と横浜の提供波に関しては、最新の研究成果と比較した場合、特に大きな相違が生じないでほしいと暗に願っていることを書き添えておきたい。

11. 参考文献

- 1) 佐藤俊明・壇一男: 関東地震による首都圏の広帯域強震動予測, 免震構造設計指針, pp.263-273, 2001.
- 2) 佐藤俊明・壇一男・R.W. Graves・P.G. Somerville: 1923年関東地震($M_s 8.2$)の断層の非一様すべり破壊を考慮した3次元有限差分法と半経験的グリーン関数法のハイブリッドによる東京の広帯域強震動シミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第一分冊, pp.679-684, 1998.
- 3) 佐藤俊明・渡辺基史・壇一男: 3次元有限差分法と統計的グリーン関数法を用いた広帯域ハイブリッド法による1923年関東地震の東京と横浜の強震動シミュレーション, 日本地震学会1999年秋期大会, p.13, 1999.
- 4) Wald, D. J and P.G. Somerville: Variable-rupture model of the 1923 great Kanto, Japan, Earthquake: geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 85, 159-177, 1995.
- 5) Sato, T., D. V. Helmberger, P.G. Somerville, R. W. Graves, and C. K. Saikia: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan earthquake ($M_s 8.2$), Part 1: Source estimation of a calibration event and modeling of wave propagation paths, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 183-205, 1998a
- 6) Sato, T., R. W. Graves, P.G. Somerville, and S. Kataoka: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan earthquake ($M_s 8.2$), Part 2: Forward simulation of seismograms using variable-slip rupture models and estimation of near-fault long-period ground motions, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 206-227, 1998b
- 7) Sato, T., R. W. Graves, and P.G. Somerville: Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo Metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake ($M_J 5.1$) and the great 1923 Kanto earthquake ($M_S 8.2$) in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 579-607, 1999.
- 8) Dan, K. and T. Sato: A semi-empirical method for simulating strong ground motions based on variable-slip rupture models for large earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 36-53, 1999
- 9) 壇一男・佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予

測, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp.49-60, 1998.

- 10) 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・宮腰淳一・佐藤智美:統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震($M_{JMA}7.9$)の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 530 号, pp.53-62, 2000.

以上

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

本予測波は、想定東海地震に対して、震源の比較的近傍(ただし下盤側)に位置する静岡県立静岡ガンセンター(以下SCC, 静岡県駿東郡長泉町下長窪)の工学的基盤($V_s=600\text{m/s}$ 相当)における地震動を評価したものである。想定震源域は、中央防災会議による新しい想定震源域(平成13年)ではなく、サイトにより近い石橋モデル(1976)の震源域を採用している。想定地震のモーメントマグニチュードは $M_w=7.9$ であり石橋モデル($M_w=8.0$)より若干小さめに設定されている(表 1)。震源断層から対象地点までの最短距離は十数kmである。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

免震構造の採用された病院本棟の設計用入力地震動として作成された。地震動の作成にあたり、地震動に影響を及ぼしやすい破壊伝播方向については、対象サイトにおける地震動の上限レベルと下限レベルを把握する意図の下に、破壊がサイトに近づくケース(メキシコ型 1, チリ型 1)とサイトから離れるケース(メキシコ型 2, チリ型 2)が検討されている。ただし、滑り量等のパラメタについては、過去に発生した同等の規模の地震の震源モデルを参考にしており、必ずしも上限を意図したものではない。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

長周期側(周期約 1 秒以上)では理論的手法(水平成層構造)を、短周期側では統計的グリーン関数法を用いたハイブリッド法である。理論的手法のための震源モデルとして k^2 モデルを用い、 ω^{-2} モデルに従う地震動の励起を実現している。有効周期帯域は 0.1-10 秒、予測地点の最表層のS波速度は 600m、予測成分は水平上下 3 成分である。

4. 震源モデルについて

想定東海地震と同じタイプの海溝型地震である 1985 年メキシコ地震と 1985 年チリ地震の震源に関する情報を参考に設定している。海溝型地震に理論的手法を適用した場合、コーナー周波数よりも高周波側でのスペクトルの落ち込みが問題となることが多いが、本モデルでは k^2 モデル(Hisada, 2001)を用いることにより ω^{-2} モデルに従う地震動の励起を実現している。 k^2 モデルのパラメタ(小断層サイズや破壊伝播速度の変動幅)は、メキシコ地震およびチリ地震の震源近傍における観測スペクトルが再現されるように定めている。

過去の海溝型地震の平均像との関係を整理すると次の通りである。まず、メキシコ型モデルとチリ型モデルの平均応力降下量は 2.0MPa および 2.3MPa であり(表 1)、海溝型地震に関する平均値とされる 3.0MPa よりも若干小さい程度である。また地震モーメントと短周期レベルの関係については、本モデルはアスペリティモデルではないため簡単な式で評価することはできないが、少なくともメキシコ型モデルにより励起される短周期レベルは 1985 年メキシコ地震の震源近傍におけるスペクトルレベルと調和的であることが確認されており、また、1985 年メキシコ地震による短周期レベルの励起特性は壇他(2001)の図を見る限り海溝型地震としては平均に近かったと考えられることから、本モデルによる短周期レベルの励起は海溝型地震としては平均に近いものであると考えることができる。

震源における滑り量の分布としては不均質な分布が与えられており、その分布は 1985 年メキシコ地震および 1985 年チリ地震の滑り量分布を参考に定められている。破壊伝播方向については、破壊がサイトに近づくケース(メキシコ型 1, チリ型 1)とサイトから離れるケース(メキシコ型 2, チリ型 2)が検討されている。

表-1 メキシコ型モデルとチリ型モデルの主な震源パラメータ久田他(2002)の図 17 および表 5 より

	メキシコ型モデル	チリ型モデル
長さ(km)	125	120
幅(km)	80	75
面積(km ²)	10000	9000
平均滑り量(m)	2.01	2.23
密度(g/cm ³)	2.8	2.8
S波速度(m/s)	3800	3800
地震モーメント(dyne*cm)	8.13E+27	8.11E+27
モーメントマグニチュード	7.9	7.9
平均応力降下量(MPa)	2.0	2.3

5. 伝播経路モデル(いわゆる地殻構造)について

次項(6.)を参照のこと.

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

長周期側(周期約 1 秒以上)のグリーン関数の算定には水平成層構造が用いられており、2 次元～3 次元の地下構造の影響は考慮していない。現地での微動アレー観測結果に基づき、地震基盤に至る S 波速度構造が与えられている。それによると地震基盤(S 波速度 3000m/s)上面の深度は 1353m となっており、対象サイトは堆積層の比較的厚い場所であることがわかる。過去の中小地震の波形に基づいてグリーン関数の妥当性を検証することは特に行われていない。そこで、対象地点に最も近い K-NET 観測点における中小地震の記録を用いて検証を実施してみたところ、2 次元～3 次元の地下構造に起因すると考えられる後続位相は再現されないものの、S 波については良好に再現されることが確認できた(付録 1 参照)。浅い地盤構造については、工学的基盤における地震動を評価したものであるため、特に考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

震源モデルの妥当性そのものについては、対象地震と類似した海溝型地震である 1985 年メキシコ地震と 1985 年チリ地震の震源近傍における強震記録により検証されている。震源モデルとグリーン関数と組み合わせた全体としての予測結果については、過去の地震の震度分布や距離減衰式との比較等は実施されていないが、他の強震動予測手法(半経験的手法および経験的手法)を用いた地震動予測結果との比較が実施されており、理論的手法による結果のばらつきの範囲内に、他の手法による結果が収まったとされている。予測波のばらつきについては、メキシコ型およびチリ型の選択によるばらつきと、破壊伝播方向によるばらつきが検討されている。なお、本予測波のメキシコ型 1 とチリ型 1 は周期 5 秒前後で速度応答が 200kine 前後となっているが、2003 年十勝沖地震の記録との比較から、M8 クラスの地震の震源近傍では周期 5 秒前後でこの程度の応答が発生することは十分にありうるものと考えられる(付録 2 参照)。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

設計用地震動や設計用スペクトルとの比較は特に紹介されていないが、予測波を用いて病院本棟の耐震設計が実施されている。

9. 自由コメント

本算定結果を利用する場合、次の二点に留意する必要がある。

まず一点目として、一般に地震動は震源断層との位置関係やサイト特性に大きく影響されるため、ここで算定された地震動は、想定東海地震の震源近傍における地震動のあくまでも一例にすぎず、震源近傍における地震動として平均的なのか、それとも強めなのか(あるいは弱めなのか)の検討は今後の課題である。震源断層との位置関係に関して言えば、対象サイトは逆断層の下盤側に位置しており、一般に下盤側の地震動は上盤側よりも小さいと考えられている。上盤側に位置する駿河湾の西側では、中央防災会議(平成13年)の震源を想定した場合、サイトによっては地表で200kineを越えるとの試算結果(野津, 2005)も出されており、今後、さらに議論を深めていく必要がある。

留意すべき二点目として、ここでは水平成層構造のグリーン関数が用いられているため、S波は表現されているが、2~3次元的な地下構造の影響による後続位相は考慮されていない。従って地震動の継続時間という点では大幅に不足している可能性も否定できないため、地震動の継続時間の影響を受けやすい盛土・堤防・護岸のようなタイプの構造物の耐震検討や液状化の検討には適さない可能性が高い。

9. 参考文献

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透(2001):断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp.51-62.

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

久田嘉章・翠川三郎・山中浩明・鱒沢曜(2002):免震病院を対象とした入力地震動の策定例ー震源近傍の強震動, 及び, 深部地盤構造を考慮した入力地震動策定ー, 第30回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会.

野津厚(2005):経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集, 土木学会・日本建築学会, pp.99-106.

10. 予測波作成者コメント

この地震動は平成14年9月に開院した静岡県長泉町の県立がんセンターの免震建物(病院棟)のための入力地震動です(センター評定は平成11年)。当時は海洋型巨大地震のための強震動予測レシピなどは無く、信頼できる震源パラメータを設定するため、過去の類似な地震(1985年メキシコ地震、チリ地震)の震源直上の強震記録(それぞれ岩盤4点)を再現できる広帯域な震源モデルを作成しました。使用に際しては、地盤モデルは建設サイト直下の地盤モデルを作成し(微動観測を用いて東京工業大学の山中先生が担当)、さらに逆断層の下盤側に断層最短距離で約20kmの地点に位置するなど、特殊な条件下であることに十分注意して頂きたいと思います。(工学院大学 久田嘉章)

付録1 長周期側(1秒以上)でのグリーン関数の検証

対象地点(SCC)に最も近いK-NET観測点(SZO009)における中小地震の記録を用いて、本予測波の策定に用いられた水平成層構造の検証を実施した。ここでは、東海地震の震源断層から遠くない位置で発生している2001年4月3日静岡県中部の地震の記録を用いた。水平成層構造は周期1秒以上の成分の算定に用いられているため、ここでは周期1秒以上の成分を対象に検証を行う。図1に震央位置とK-NET観測点を、図2にF-NETによるCMT解をそれぞれ示す。

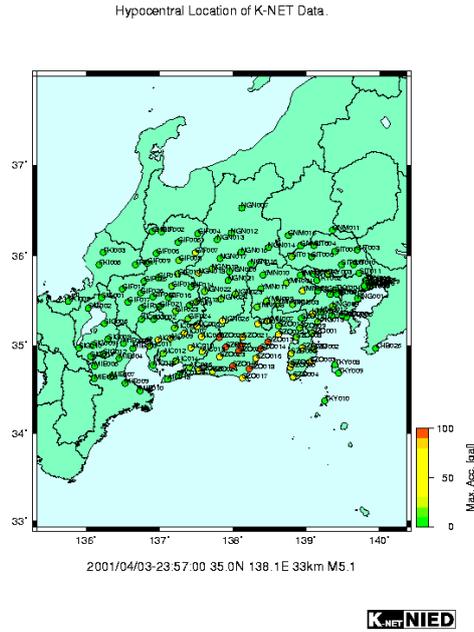


図1 2001年4月3日静岡県中部の地震の震央とK-NET観測点

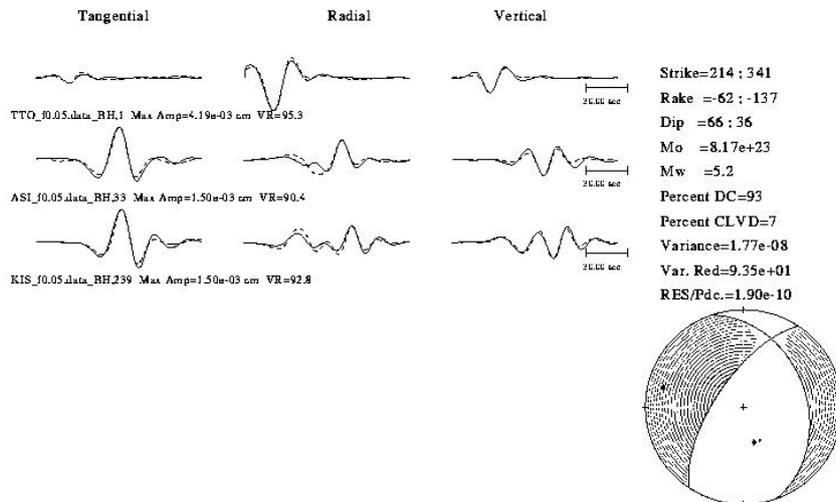


図2 2001年4月3日静岡県中部の地震のF-NETによるCMT解

本予測波の策定に用いられた水平成層構造の最下層(深さ 35km, F-NETによる)に点震源を置き, 水平成層構造の応答をBouchon(1981)の方法で計算した. ただし, 地震モーメントについては, F-NETによる値(8.17E+16Nm)は $\rho = 3.2\text{g/cm}^3$, $\beta = 4.46\text{km/s}$ として評価された値であるため, モーメントを保ったまま水平成層構造の最下層($\rho = 2.8\text{g/cm}^3$, $\beta = 3.8\text{km/s}$)に置くと震源スペクトルを過大評価することになる. ここでは, $\rho \beta^3$ の比を用いて補正を行い, 地震モーメント 4.41E+16Nmの点震源を置いた.

図3の黒線はこの地震によるSZO009の速度波形(周期1秒~10秒)である. 図3の赤線が算定結果である. これを見ると, S波については良好に再現されているが, 2次元~3次元的な地下構造に起因すると考えられる後続波は再現されないこと, 従って, 当該グリーン関数を用いて算定された地震動は, 継続時間という点では大幅に不足している可能性も否定できないことがわかる.

なお, ここでは, 予測波の算定に用いられた水平成層構造の上面すなわち $V_s=600\text{m/s}$ の地層の上面における合成波とSZO009における観測波を直接比較しているが, SZO009では深さ7mと比較的浅い位置に $V_s=690\text{m/s}$ 層の上面が見られ, その意味では比較を実施する上で不都合はないものと考えられる. ところで, SZO009とSCCは水平方向に約5km程度離れているため, これら二地点における深層地盤が共通のものであるとは限らない. より厳密な検証を実施するためには justpoint での中小地震記録を必要とする. しかしながら, SZO009の観測波に含まれるのと類似した後続位相は十数km南に離れたSZO008(K-NET 沼津)の観測波にも見られること, これら二地点に挟まれた位置にあるSCCも, 比較的厚い堆積層の上にあることが明らかにされていること(概説文の本文参照)などから, 仮にSCCにおける観測記録を利用して同様の検討を実施したとしても, 図3と類似した結果が得られる可能性が高いものと考えられる.

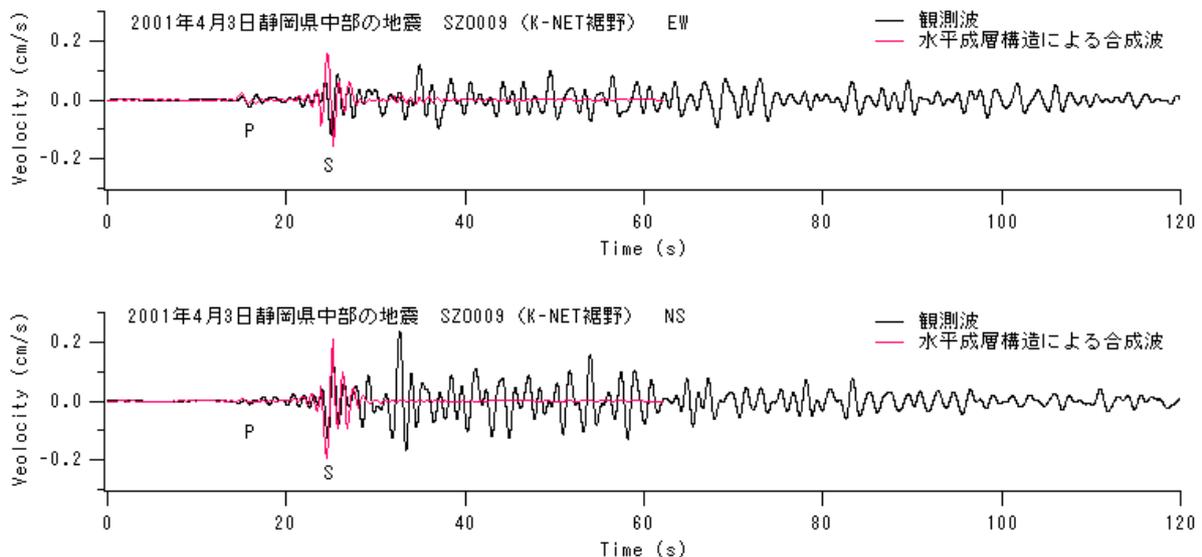


図3 SZO009(K-NET 裾野)における観測波と合成波の比較

付録2 想定東海地震長泉町予測波と2003年十勝沖地震観測波の比較

想定東海地震長泉町予測波は、地震の想定規模をMw7.9として計算されている。この予測波をほぼ同じ規模で発生した2003年十勝沖地震(Mw8.0)の際の観測波と比較することは、本予測波妥当性の理解に資するものとの考え、ここでは十勝沖地震の震源近傍で比較的振幅の大きかったK-NET大樹観測点における観測波NS成分とK-NET直別観測点における観測波EW成分から計算される速度応答と予測波から計算される速度応答を4通りの減衰定数に対して比較した。周期3秒程度以上の周期帯域における予測波の速度応答レベルは、M8クラスの地震が発生した場合の震源近傍における地震動として、あり得るものと言える。

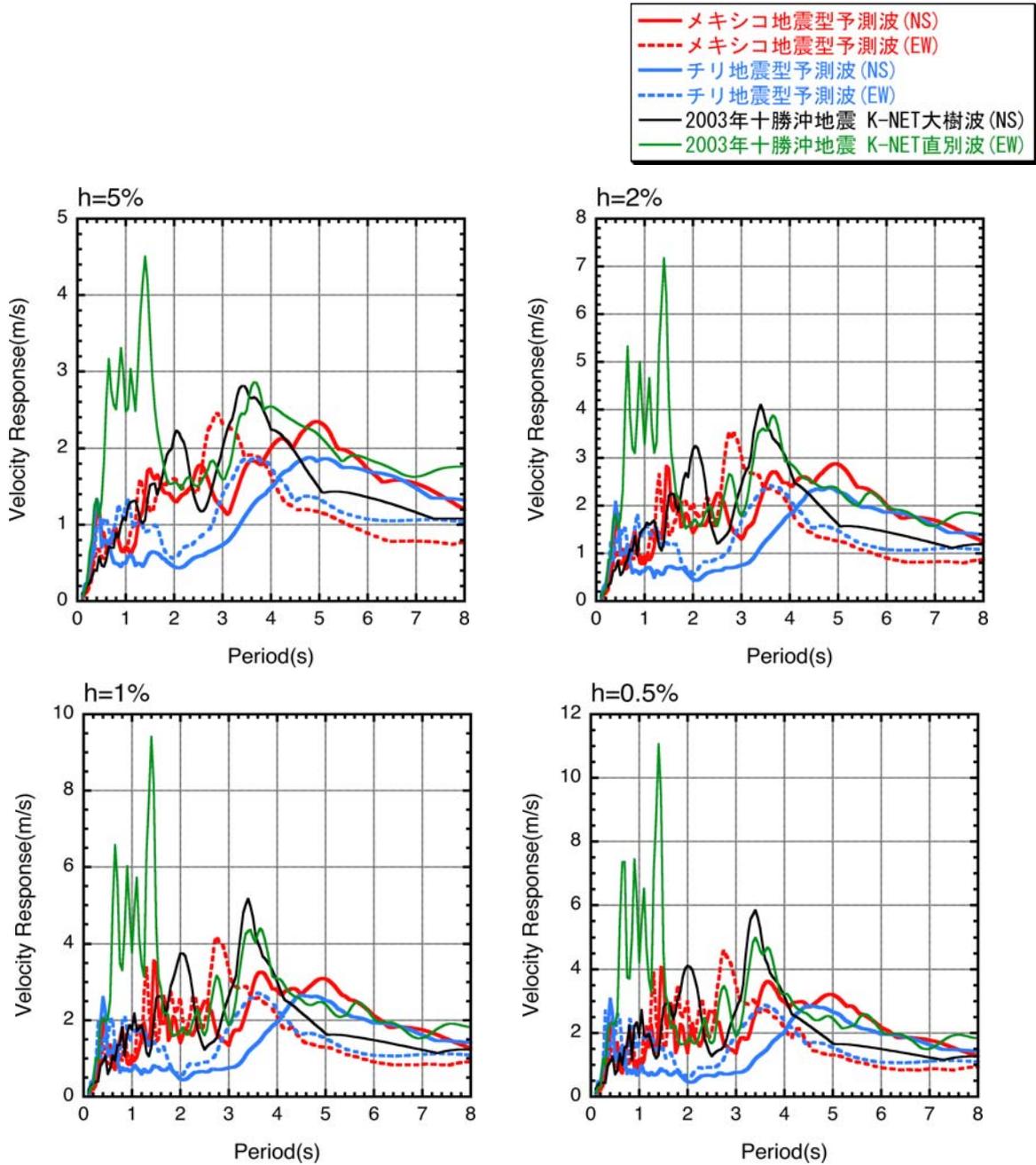


図1 予測波の速度応答スペクトルと2003年十勝沖地震による速度応答スペクトルの比較

概説文：想定南海地震の大阪における予測波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震：

想定南海地震 地震モーメント： $8.34 \times 10^{21} \text{N}\cdot\text{m}$ ，マグニチュード： $M_j 8.4$ ($M_w 8.55$)

地震動予測地点：

以下の2地点である。両者とも大阪市内にある京都大学防災研究所の地震災害部門の強震観測点である。

OSA（大阪管区気象台）：N34.678, E135.537（旧測地系）

WOS（西大阪の木津）：N34.648, E135.482（同上）

OSAは比較的硬質な上町台地上の観測点、WOSは大阪市西部の大阪湾岸の軟弱地盤上の観測点である。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

本予測波は、将来発生が予測される南海地震に対する地震災害軽減の検討、特に大阪に建つ超高層ビル、免震ビル、石油タンクなど長周期建造物の安全性の検討に用いられることを念頭に作成された広帯域波である。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

- ・ 手法の概要と特色

経験的グリーン関数法を利用している。有効周期帯域

参考文献からは、少なくとも0.1秒から10秒の周期範囲は有効である。予測地点の最表層のS波速度予測地点は地表面であるが、参考文献にはS波速度は記されていない。予測成分（水平、上下）2成分（NS, EW）

4. 震源モデルについて

- ・ どのような根拠で設定されているか？

政府の地震調査研究推進本部（以下、推本と略する）が発表しているアスペリティを有する特性化震源モデルをやや単純化したモデルを用いている。推本の特性化震源モデルは、過去の地震から得られた情報（アスペリティの場所や震度分布など）に基づき、強震動予測のためのレシピに従って構築されたものであり、震源スペクトルは ω^{-2} モデルを満足するものである。

- ・ 過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係

準拠している推本の断層モデルの地震モーメントに対する短周期レベルは、過去の南海ト

ラフ沿いの巨大地震の震度分布を再現できるように設定されたものである。

- ・ アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

準拠している推本の断層モデルでは、アスペリティの位置は過去の地震の既往の震源インバージョン結果などに基づき、すべり量の大きいところに設定されており、破壊開始点も過去の地震を参照して設定されている。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

経験的グリーン関数として用いる小地震は、1991年10月20日に和歌山県沖の深さ37km付近で起こったマグニチュード5.1の地震である。この地震の震源パラメータは、硬質地盤で観測された強震記録の変位震源スペクトルから推定している。この小地震とターゲットである想定南海地震のマグニチュードの差が3以上あることから、この小地震を一気に多数重ね合わせて想定南海地震の地震動を計算すると、その地震動のスペクトルに人為的な谷ができる。これを回避するために、小地震から一気に（一段階で）想定南海地震の地震動を合成するのではなく、少しずつ規模の大きな地震の地震動を波形合成する、いわゆる多段階波形合成法を採用している。本計算では3段階で波形合成を行っている。

また、この小地震を想定地震の断層面に配する際、ラディエーションパターンの補正は行っていない。

5. 伝播経路モデル（いわゆる地殻構造）について

- ・ どのような根拠（既往の文献、調査情報等）で設定されているか？

経験的グリーン関数の中に包含される。距離補正をおこなう際の伝播経路特性（Q値）は、Q値は1Hz以下で100固定、1H以上で $Q=100 f^{**0.7}$ を用いている。なお、Asp-1やAsp-2では、小地震との距離がそれほど変わらないので、Q値の影響は少ないと考えられる。

- ・ 過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？

伝播経路特性の影響を含んだ小地震記録が経験的グリーン関数として用いられている。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

1枚の断層面に1つの小地震（グリーン関数）を配している。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- ・ 3次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

経験的グリーン関数として考慮されている。

ただし、小地震の深さとアスペリティの深さの違いによる堆積盆地への入射波の違いの影響については否定できない。

- ・ 対象地点の深い構造

著者によれば、対象地点の地震基盤深さはOSAで500m程度、WOSで1000m程度の可能性があるとのことである。これによる地盤の卓越周期はOSAで約5秒、WOSはもっと長いと推定される。

- ・ 浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性は？
地表面の波形である。地盤非線形性は考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

過去の南海地震の地震動強さや経験的な距離減衰式と本波形の地震動強さとの比較は直接的には行われていない。しかし、以下に述べるように、間接的な検証は行われていると考えられる。強震動予測結果は、予測に用いる震源モデル、伝播経路モデル、予測地点周辺の地盤モデルならびに強震動予測手法に依存する。このうち、震源モデルに関しては、本波形の計算に用いた断層モデルが準拠している推本の断層モデルの検証が、過去の地震（安政東海地震、昭和東南海地震）の広域震度分布との比較ならびに既往の経験的な距離減衰式との比較という形で行われている。推本の強震動予測と本強震動予測とで異なるのは強震動予測手法である。推本では、統計的グリーン関数法が、本波形計算では経験的グリーン関数法が用いられている。経験的グリーン関数法は予測地点で得られた観測記録を直接用いるために、統計的グリーン関数法よりも伝播経路や予測地点の地盤構造の影響をより精度良く反映していると一般的には考えられている。

最大速度に関して、経験的グリーン関数法による結果と経験的距離減衰式との比較が行われ、地盤条件を考慮すると両者がほぼ整合することが確認されている(釜江・川辺, 2003)。また、震度についても昭和南海地震や推本が使った震度分布との比較も行っている。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・ 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

告示スペクトルとの比較が行われている。応答値は、周期 5 秒付近で 2000 年建築基準法改正に伴う安全限界レベルを越えている。

- ・ 予測波を用いた応答計算事例の有無

参考文献には記載されていない。しかし、2004 年 1 月 18 日に放映された NHK スペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」をはじめとして、各所で本提供波による応答計算が行われている。

9. 自由コメント

2 地点の提供波形の特徴は、最大速度 25cm/s から 30cm/s、地震動の継続時間が 4-5 分以上（大阪 OSA では 6-7 分、西大阪 WOS では約 4 分）にわたっており、周期 5 秒付近の地震動が卓越していることである。また、周期 5 秒における減衰定数 5% の擬似速度応答は約 150cm/s 程度であり、建築基準法の告示スペクトルの安全限界（80cm/s）を大幅に超えていることにも留意する必要がある。

地震動の 5 秒の卓越周期は両地点の地盤固有の卓越周期である。大阪平野の卓越周期は場

所によって異なることに注意する必要がある。また、西大阪 (WOS) の継続時間が大阪 (OSA) の継続時間よりも短くなっているのは、経験的グリーン関数として用いた西大阪地点の小地震の記録時間が大阪地点 (OSA) と比べて 120 秒ほど短くなっているという人為的なものであることに注意する必要がある。

対象とする地震の断層長さが約 200 km 以上の巨大断層面の各点から放射される地震波として、1 つの小地震記録を補正して経験的グリーン関数として用いることに関して、伝播経路を精度よく反映しているかどうかは検証する必要があると考えられる。また、1 つの小地震記録を断層面各点に割り付ける際に、ラディエーションパターンの補正をどのように行っているかも周期数秒以上の長周期帯域の地震動の大きさ、特に、5 秒の地震動の大きさの精度を考える上で重要である。しかし、小地震でそのことを説明できるほどのデータもなく、OSA や WOS での小地震の長周期地震動にその影響が現れているのかどうかの検証もできない状況から、現状では補正なしでやらざるを得ないと考えられる。

結論として、適切な小地震の地震観測記録が不足している現状を踏まえれば、大阪 (OSA) の地震動は予測地震動として最も合理的な地震動のひとつと考えられる。

10. 著者コメント

経験的グリーン関数法は適切な記録があれば広帯域強震動予測手法として非常に有用なものと考えられる。それはこれまでに行われている 1995 年兵庫県南部地震や 2003 年十勝沖地震などのシミュレーションを通じて示されている。ただ、予測される地震動は、経験的グリーン関数としての中・小地震の観測記録に依存したサイト特有のものである。従って、OSA や WOS 以外のサイトにおいてこれらの予測地震動をそのまま用いることは原則として好ましくない。また一般に、南海地震のような非常に大きい震源域を対象とした強震動予測では、震源 (アスペリティ) 位置などを考慮した複数の中・小地震記録を使うことによって伝播経路特性を自動的に取り込むことが可能となり、予測地震動の精度向上に繋がる。ここで作成した予測地震動は 1 個の地震記録のみを使って得られているため、例えば四国沖に存在するアスペリティから予測された地震動の精度上の問題は否定できない。なお、大阪平野を考えた場合は震源近傍の 2 つのアスペリティからの寄与が大きく、1 個しか地震記録を使わなかったことによる影響は小さいものとも考えられる。ただし、地震の規模が非常に小さいことによって非常に多くの重ね合わせが余儀なくされていることは、現実の断層破壊現象を非常に均質に取り扱う結果となっており、予測地震動の低減衰での応答スペクトル値が非常に大きくなる結果を引き起こしているのも事実である。現在、3次元有限差分法によって理論長周期地震動の検討も行っている所であり、今後そうした検討結果も踏まえ、予測地震動の信頼性を検証していく予定である。

11. 参考文献

- 1) Kamae, K, H. Kawabe, and K. Irikura: Strong ground motion prediction for huge subduction

earthquake using a characterized source model and several simulation techniques, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 655.

2) 釜江克宏・川辺秀憲：南海地震の強震動予測手法，平成 14 年度「巨大地震・津波による太平洋沿岸巨大連担都市圏の総合的対応シミュレーションとその活用手法の開発」成果報告書，pp. 36-49, 2003. (http://www.ddt33.dpri.kyoto-u.ac.jp/katsudou/h14_houkokusho_mokuji.htmlで入手可能)

以上

概説文：想定東海・東南海連動地震の名古屋市三の丸地区における予測波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震：想定新東海地震（東海地震と東南海地震の同時発生を想定したもの）

地震モーメント： 3.11×10^{28} dyne \cdot cm, マグニチュード： $M_w 8.3$, $M_j 8.3$

地震動予測地点：名古屋市三の丸地区 名古屋第1合同庁舎地点

北緯 35 度 10 分 40 秒, 東経 136 度 54 分 22 秒

2. 予測波の作成目的と位置づけ

国土交通省, 愛知県, 名古屋市の3者が, 名古屋市三の丸地区における耐震改修設計（免震を含む）のための設計用入力地震動の予測をおこなったもの。震源断層モデルに政府中央防災会議の東海地震と東南海地震の同時発生を想定している。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

・ 手法の概要と特色

提供波形は, 以下の2ステップにより作成している。第1ステップは, 強震動の計算である。これには経験的グリーン関数法を利用している。2枚の断層面それぞれに対し, 2個の小地震をランダムに配置した11ケースの計算を行い, 入射方向やRadiation Patternの影響を軽減するように努めている。また, この11ケースそれぞれに対して, 要素断層内の地震波放射位置をランダムに与えた11ケースの計算を行い, 要素断層からの地震波放射が周期的にならないように工夫している。計算ケース数は全体で $11 \times 11 = 121$ ケースである。この121ケースの地震動をみると地震動の大きさや卓越周期がばらついており, 設計用地震動としてどのケースを選択するかが問題となる。

そこで, 第2ステップでは, これらの問題を解決して, 対象とする断層モデルによる平均的な大きさ, 卓越周期, 位相を有する1組の模擬地震動（水平2成分, 上下1成分）を作成している。この作成は, 具体的には, 次のように行っている。まず, 平均スペクトルとして, 水平2成分, 上下1成分の成分毎に121ケースの地震動の減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルの平均値を計算する。位相に関しては, 3成分の中で最大速度が最も大きくなるEW成分に着目し, 121ケースの位相とEW成分の平均応答スペクトルから模擬波を121個作成し, その最大速度が中央値となる位相を選定する。NS成分とUD成分の位相は, EW成分に対応するケースのものを選ぶ。なお, 模擬波の作成においては, 様々な周期の正弦波の重ね合わせで表現し, そのフーリエ振幅スペクトルを修正しながら目標とする応答スペクトルに適合するように収束計算を行って作成している。

- ・ 有効周期帯域

周期 0.1～5 秒（免震構造の周期に概ね該当する 3 秒を含む）[参考文献記載値]

- ・ 予測地点の最表層の S 波速度
S 波速度 0.4km/s 以上（工学的基盤面）
- ・ 予測成分（水平、上下）
3 成分（NS, EW, UD）

4. 震源モデルについて

- ・ どのような根拠で設定されているか？

政府中央防災会議の東海地震と東南海地震の設定に準拠している。中央防災会議の設定が基本的に入倉レシピに準拠しており、 ω^{-2} モデルを指向している。

- ・ 過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係

文献には記載されていないので不明。

- ・ アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

固着域に関する現状の研究を踏まえ、かつ過去の地震による震度分布を再現するように設定された、中央防災会議のモデルに準拠している。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

小地震（グリーン関数）の地震モーメントは FREESIA による値を用い、応力降下量は観測記録から推定している。

5. 伝播経路モデル（いわゆる地殻構造）について

- ・ どのような根拠（既往の文献，調査情報等）で設定されているか？

経験的グリーン関数の中に包含される。ただし、距離補正をおこなう際の伝播経路特性（Q 値）は、既往の研究（田居・他，1994）を参考に、 $Q=200f^{0.7}$ と設定している。

- ・ 過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？

伝播経路特性の影響を含んだ小地震記録が経験的グリーン関数として用いられている。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

2 枚の断層面に 4 つの小地震（グリーン関数）を配し、大断層に経験的グリーン関数法を適用する際の入射方向や Radiation Pattern の影響を軽減するように努めている。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- ・ 3 次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

経験的グリーン関数として考慮されている。

- ・ 深い地盤構造と卓越周期

三の丸地点の地震基盤（S 波速度 3km/s の層）までの深さは 565m、地震基盤から工学的基盤までの地盤の卓越周期は約 3 秒である。

- どのような根拠（地下構造探査や既往の文献等）で設定されているか？
浅い地盤構造は、計算地点周辺のPS検層を参照にモデル化されている。
- 過去の中小地震の波形に基づきモデル化がなされている、あるいは検証されているか？
深い地盤構造は経験的グリーン関数として評価されている。浅い地盤構造はモデルで評価されているが、地震観測記録による検証は報告されていない。
- 浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性は？
浅層地盤モデルを用いて地表面観測記録が工学的基盤面に引き戻されている。工学的基盤面の波形であるため、地盤非線形性は考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- 検証の方法と検証結果
文献では検証は行われていない。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無
告示スペクトルとの比較がおこなわれている。
- 予測波を用いた応答計算事例の有無
参考文献には記載されていない。

9. 自由コメント

提供波形（3成分加速度）では、大地震動の継続時間がほぼ2分にわたっており、水平動では周期3秒程度（上下は2秒程度）が卓越していることが特徴である。これは、参考文献に記載されている対象地点周辺の地盤卓越周期とも対応している。なお、周期3秒における疑似速度応答は200cm/sを上回っている。提供波形に一切の処理をおこなわない場合、速度に積分した時点でオフセットが生じる。10秒より長周期を低減するフィルターを施すと参考文献に記載されている最大速度、最大変位にほぼ相当する。また、減衰を小さくした応答スペクトルでも卓越周期で極端に応答が大きくなることはなく、要素断層の規則的な破壊などによる人工的な周期特性が影響している危惧は無いと思われる。

結論として、周期5秒以下で利用する限りにおいては、合理的な地震動となっているものと思われる。

また、他の想定断層（内陸地震）と併せて生起確率の評価をおこなっていることが特徴であり、想定新東海地震の100年間の生起確率は0.99である。

10. 参考文献

- 1) 名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版）

2) 田居・他 (1994): 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 1, pp. 751-756

1 1. 著者のコメント

作成した工学的基盤の地震波の計測震度は5.3である(宮腰・他, 2005)。この地震波と同じ位相特性をもつ地表面での地震波(工学的基盤に引き戻す前の地表面における経験的グリーン関数法による合成波形)の計測震度は5.7(震度6弱)である。1854年安政東海地震における三の丸地区での震度は5であり、過去の地震の震度に比べると作成した地震動はやや大きいといえる。

(宮腰・他 (2005): 日本地震工学会大会-2004梗概集, pp. 394-395)

以上

概説文:産業技術総合研究所南海地震波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震： 想定南海地震（中央防災会議（2003）の震源モデルに準拠）

地震モーメント： 8.75×10^{28} dyne・cm, マグニチュード： $M_w 8.6$

対象地点： 大阪平野内

観測点 緯度 経度 （日本座標系表示）

OSK003 34.7636 135.4711

OSK005 34.7222 135.5127

OSK006 34.5861 135.4738

OSK008 34.4405 135.3902

OSKH02 34.6595 135.3924

WOS 34.648 135.482

FKS 34.687 135.474

YAE 34.680 135.612

ROKKOG 34.6771 135.2701

2. 予測波の作成目的と位置づけ

産業技術総合研究所による、阪神地域をモデル地域とした地震動予測手法高度化の研究プロジェクトの一環として、南海地震の地震動予測を行っている。震源モデルは中央防災会議（2003）の震源モデルに準拠しつつ、より合理的な改訂をおこなっている。また、ターゲットとする大阪堆積盆地の長周期地震動をより精度よく推定するため、統計的グリーン関数法を採用した中央防災会議に対して、長周期成分についてはより物理的な地下構造モデルと決定論的な波動伝播計算法（差分法）を用いている。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲**・手法の概要と特色**

震源モデルは中央防災会議（2003）の震源モデルに変更を加えたものを用いている。ここで言う震源モデルの変更は、中央防災会議（2003）のオリジナルのすべり量と破壊伝播速度の分布にアスペリティサイズ以下の様々なスケールの不均質を付け加え、高周波成分を励起させるようにしたものである。地震動計算の長周期成分は3次元地下構造モデルを用いた3次元差分法により、短周期成分は統計的グリーン関数法により計算し、これらをハイブリッドする方法を採っている。

- ・有効周期帯域

0-5 Hz (浅層地盤構造モデルのモデル化周波数帯域が5 Hz までのため)

予測地点の最表層のS波速度

提供9地点の最低S波速度は120 m/s, 大阪平野全体を見たときにはおよそ100 m/s である。

(著者の私信)

- ・予測成分 (水平, 上下)

3成分

4. 震源モデルについて

- ・どのような根拠で設定されているか?それは ω^{-2} モデルになるように考慮されているか?

中央防災会議(2003)に準拠している。加えて、アスペリティ以下のスケールの不均質をすべり分布と破壊伝播速度の分布に乘せることにより、およそ ω^{-2} モデルになるように配慮している。

- ・過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係 (全体像:地震モーメントと破壊面積,地震モーメントと短周期レベルとの關係など,不均質性:地震モーメントとアスペリティ総面積との關係)とどのような關係となっているか?

中央防災会議(2003)のモデル化の時点で考慮されていると考えられる。

- ・アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

上述の通り。

- ・ハイブリッド法の場合、接続周期付近での落ち込みに配慮されているか?

別々に計算された低周波数成分と高周波数成分の位相の違いによる、接続周波数付近での落ち込みについては、特にこれを回避するような作業は行われていない。ただし、断層面全体の寄与を足し合わせた後の波形について、低周波数成分のスペクトル、高周波数成分のスペクトル、およびこれらをハイブリッドした波のスペクトルを比較し、対数座標で見て顕著な落ち込みのないことは確認されている。

5. 伝播経路モデル (いわゆる地殻構造) について

- ・どのような根拠 (既往の文献, 調査情報等) で設定されているか?

主に、古村(2002)に基づく。他に以下の情報を参照している。

領木(1999):古村(2002)のモホ面深度の元情報として

山崎・大井田(1985):古村(2002)のプレート形状の元情報として

香川・他(1990):基板上面P波速度

堀川・他(2003):第1~3層のQ値

渋谷(2001):密度構造に関して

- ・過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか?

2004年9月の紀伊半島南東沖地震系列の地震の1つをモデル化している。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- ・ 3次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

大阪堆積盆地の3次元地盤構造を長周期成分の計算に用いている。

- ・ どのような根拠（地下構造探査や既往の文献等）で設定されているか？

堀川・他（2003）による大阪堆積盆地の地盤構造モデルに準拠している。

- ・ 過去の中小地震の波形に基づきモデル化がなされている、あるいは検証されているか？

大阪堆積盆地近傍で起こった小地震のモデル化が実施されている。

- ・ 浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性が考慮されているか？

浅層地盤構造をモデル化して1次元応答計算によりその影響を考慮している。地盤の非線形性を等価線形法で考慮している。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

計測震度値に関して、中央防災会議（2003）、鶴来・他（2005）との比較がおこなわれている。乱数の異なる3つの震源モデルによる計算結果のうち、ほとんどの地点で最も大きい計測震度のものと、鶴来・他（2005）の計測震度が概ね整合している。中央防会議（2004）の計測震度に比べると全体的に小さめである。

堆積層構造や地殻構造のモデル化に関する検証は、前述の通りである。

- ・ 予測波のばらつきの検討の有無

震源モデルの作成に乱数を用いており、乱数の違いによる震源モデル、および予測地震動のばらつきを見積もるため、3つのモデルに関する結果が示されている。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・ 計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

無し。

- ・ 予測波を用いた応答計算事例の有無

無し。

9. 自由コメント？

断層破壊モデルを用いたこれまでの強震動評価でおざなりにされがちであった、計算モデルの定性的、定量的な検討が緻密に実施されており、その精度から鑑みて十分に精度の高い結果が得られているものと考えられる。

ただし、計算波形による応答スペクトルには顕著な凹部が見られる（周期4秒付近）、その成因と耐震検討での検討法についての考察が必要と考えられる。

10. 参考文献

- 中央防災会議 (2003) 東南海, 南海地震等に関する専門調査会 (第16回)資料
- 古村孝志 (2002) 3次元不均質場での波動伝播と強震動シミュレーション, A70, 日本地震学会講演予稿集, 2002年度秋季大会, 横浜
- 堀川晴央・水野清秀・石山達也・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・末廣匡基・横倉貴伸・岩淵 洋・北田奈緒子・Arben Pitarka (2003) 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, No. 3, 291-324.
- 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 江見 晋 (1990) 発破実験より推定される大阪堆積盆地構造, 地震2, 43, 527-537.
- 領木邦浩 (1999) 西南日本の3次元深部構造と広域重力異常, 地震2, 52, 1, 51-63.
- 澁谷拓郎 (2001) レシーバ関数解析による四国東部地域の地殻およびスラブ構造, 月刊地球, 23, 10, 708-711.
- 鶴来雅人・趙 伯明・Petuhkin Anatoly・香川敬生 (2005) 南海・東南海地震の大阪府域における強震動予測. 構造工学論文集, 51A, 501-512.
- 山崎文人・大井田徹 (1985) 中部地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状, 地震2, 38, 193-202.

11. 著者コメント

本研究による想定南海地震の予測計算の特徴は以下のとおり.

- ・震源モデルの大枠は, 中央防災会議のモデルに基づいているが, さまざまなスケールの不均質をすべり分布と破壊伝播速度分布に導入することにより, 広帯域で ω^{-2} に近い震源スペクトルを再現できていること.
- ・大阪堆積盆地の深部・浅部構造について, 独自に作成した詳細なモデルを用いていること.
- ・同程度の震源距離の地震を使って, 大阪地域の経験的な高周波エンベロープをモデル化し, 用いていること.

また, 本予測波を用いる上で注意していただきたい点は以下の点が挙げられる.

- ・乱数を変えて作成した震源モデルによる大阪地域での予測波の強さに幅があること.
- ・大阪堆積盆地の外部に設定した地下構造モデル (主に, 古村, 2002 による) には, この地域に分布する付加帯, 新第三系~第四系は考慮されていないため, 合成波にはこの浅い構造に起因する後続波が不足していると考えられる. これらの浅い構造を考慮すると, 継続時間はさらに長くなるが, 直達部分には影響しないため, 最大振幅はさほど変化しないと予想されること.

以上

「想定東海地震での関東平野における長周期地震動」へのコメント

武村雅之・畑山健

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

・想定地震

中央防災会議(2001)による東海地震、地震モーメント $1.3 \times 10^{21} \text{Nm}$ ($M_w 8.0$)

・強震動予測地点

関東平野内の東京湾岸に立地する火力発電所を中心とした以下の7地点である。

地点名	東経	北緯	記号
品川	139.7564	35.6153	SNG
川崎	139.7617	35.5056	KWS
横浜	139.6792	35.4683	YKH
千葉	140.1181	35.5589	CHB
新豊洲	139.7954	35.6458	STY
姉ヶ崎	140.0286	35.4828	ANG
東扇島	139.7422	35.4872	HOG

なお、緯度・経度の値は旧測地系による。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

東京湾岸部の火力発電所に関連する石油タンクの被害予測のための、東海地震発生時の首都圏における長周期、長継続時間の地震波の評価。検討周期を4秒以上としているため、高層建築物などの被害予測はターゲットとしていない。震源断層モデルは中央防災会議(2001)による東海地震の断層モデルに

準拠して設定し、関東平野等の地下構造モデルはこれまでの観測地震動を説明し得るようにチューニングしたものを採用していることから、将来発生し得る長周期地震動を忠実に予測しようと努めた結果であり、必ずしも上限の予測を意図したものではないと言える。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

・手法の概要と特色

計算手法は有効周期を4秒以上としたハイブリッド法であり、4～9秒は要素地震を用いた半経験的波形合成法、9秒以上は差分法を採用している。ただし半経験的波形合成法の要素波も差分法により計算された波形を採用している。評価地点のS波速度は $V_s 0.6 \text{ km/s}$ であり、予測成分は3成分である。

4. 震源モデルについて

・どのような根拠で設定されているか？

中央防災会議(2001)による東海地震の断層モデルに基づき、曲面から平面に単純化したモデルを作成している。2つのモデル(応力降下量一定、変位一定)のうち、応力降下量一定モデルを採用している。応力降下量等はレシピに従い構築されている。すべり速度時間関数については、キャリブレーションでは2等辺三角形であるが、東海地震では9秒以下は exponential 型、9秒以上は中村・宮武(2000)を採用している。

・アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

準拠している中央防災会議(2001)では、全体の断層面を3つのセグメントに分割し、それぞれの内陸側と海側にアスペリティを1つずつ配置している(アスペリティの数は合計6つ)。2つの破壊開始点(断層面中央、西側端部)の

うち関東平野側に影響の大きな西側端部が用いられている。

5. 伝播経路モデル（いわゆる地殻構造）について

- どのような根拠（既往の文献、調査文献等）で設定されているか？

関東平野の地盤構造以外では、Ichinose et al.(2003)による水平成層構造モデルを用いている。これは浜名湖周辺で発生した小地震の中伊豆における記録を説明できるように最適化した地下構造モデルであり、 $V_S 3.0\text{km/s}$ を超える地震基盤の上に厚さ 2km 前後の $V_S 2.3\text{km/s}$ 層があるモデルである。ただし、Ichinose et al.(2003)の地下構造が後続波を含めた地震動の評価に耐えられるものかどうかの見解は述べられていない。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- 3次元盆地構造がモデル化されているかあるいはその影響が加味されているか？

関東平野は Sato et al.(1999)による3次元地下構造モデルが用いられている。差分法領域は、関東平野と断層面の両者が包含されるように設定されている。

(図より EW 約 310km、NS 約 280km) 深さは 50km である。Sato et al.(1999)による最小 V_S は 0.6km/s であり、この地層上での地震動が出力されているものと考えられる。グリッド間隔は 0.4km であり、4 秒以上の波動伝播は表現できる。

Sato et al.(1999)のモデルでの海側の堆積層と Ichinose et al.(2003)による水平成層構造モデルの接続方法や、Sato et al.(1999)の地震基盤より深い地盤の水平成層構造モデルとの関係は明記されていない。

本検討の大きな特徴の1つとして、計算波形の後続位相を再現するために、

Q=5000（参照周期 5 秒）が地盤全域に適用されている。

- ・ 浅い地盤構造

$V_S < 0.6 \text{ km/s}$ の表層地盤は考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

1997 年 3 月 16 日の愛知県東部の地震（M5.8、深さ 41km）を用いて、震源近傍地点、関東平野端部（秦野）、東京湾沿岸（姉ヶ崎）の 3 地点で、観測記録との比較が行われている。波形を詳細に見ると、3 方向で振幅、位相が良好に整合しているとは言い難いが、地盤全域に Q=5000 を適用することにより、姉ヶ崎における長い継続時間の再現に成功しており、地盤構造の妥当性を検証している。一方、秦野では Q=5000 を採用しても観測波の後続部分の説明は難しく、震源から秦野に至る伝播経路で 3 次元の堆積構造の影響（例えば駿河湾の影響）が現れている可能性がある。Ichinose et al.(2003)による成層構造の仮定の見直しが必要であるかもしれない。

一般に震源近傍の地下構造は情報が少ないために簡単なものを仮定する場が多いが、地震が発生する海溝そのものが特徴ある 3 次元構造をしており、プレート境界地震の地震動に、その影響がどの程度あるのかという検討は、今回の場合に限らず今後の課題であろう。

東海地震の予測波に関しては、ほぼ同じ地震規模で同じ距離の 2003 年十勝沖地震(M8.0)時の K-NET 苫小牧での記録と比較し、速度応答レベルが同等となっていることを確認している。

8. 予測波と設計用入力地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に

関する検討

- ・ 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

2003年十勝沖地震(M8.0)時のK-NET 苫小牧での記録との比較がされている。姉ヶ崎での卓越周期は10秒であり、速度応答レベルは苫小牧に匹敵する120cm/s(h=5%)となっている。

- ・ 他の検討例との比較

東海地震を含む南海トラフによる関東地域の長周期地震動に関する差分法の計算結果が、古村(2003)、翠川・他(2004)によっても示されている。評価地点によって結果が異なるため、直接の比較はできないが、古村(2004)では東南海、東海地震時の地震動評価を行っており、6~8秒で80~90cm/sの応答レベルとなっている。翠川・他(2004)は東海地震を対象に長周期地震動評価を行い、10秒で230cm/s(h=2%)の応答レベルの地震動となっている。

9. 自由コメント

- ・ 本評価のキーポイントは、9秒以下の短周期領域の評価のための半経験的波形合成に際して理論的に計算された地震動波形を要素波として用いていることと、堆積層も含め大きなQ値の仮定をしている点であると考えられる。従来の理論的検討結果からみれば、前者は4~9秒の周期成分の振幅の嵩上げに、後者は継続時間の延伸にそれぞれ寄与している。
- ・ 1997年3月16日の愛知県東部の地震(M5.8、深さ41km)のシミュレーション解析では、関東平野端部(秦野)で、計算による継続時間が既に短か目となっており、先に述べたように、駿河湾などの3次元地下構造の影響が的確に考慮できれば、Q=5000というやや現実味に欠ける仮定をしなくとも良くなる可能性がある。
- ・ 今回の場合のようにアスペリティが大きい場合には、すべてを理論的に計算

すれば、やや長周期成分を過小評価してしまう。9秒以下の短周期の地震動の半経験的波形合成において用いた要素波は同じ差分法から評価したものであるため、理論的な計算に用いるグリーン関数自体に大きな違いが出るとは考え難い。結局、4~9秒の周期成分を効率的に嵩上げしているのは、 ω^2 乗の震源スペクトルの相似側に基づく経験的グリーン関数法の考え方を理論グリーン関数に適用したことによる。経験的グリーン関数法では、要素地震として想定地震の地震規模に比してマグニチュードが2程度小さい地震を採用することが重要であるが、本計算でもこの点に配慮している。

- 現状の強震動評価においては、地下構造の情報不足、さらには震源過程の不均質さに関する情報不足などから、理論的にすっきりとした評価をすることはなかなか難しい。本評価はそれらの点をよくわきまえ、観測記録の情報や、経験的評価法の特性を利用して、結果の精度をできるだけ補償しようとしている点は、工学的な観点から評価できる。
- 2004年9月5日東海道沖の地震($M_j=7.4$)の際にK-NET姉ヶ崎で記録された地震動の速度応答(減衰1%)は周期11.5秒付近で卓越している。本予測結果でも姉ヶ崎(ANG)の速度応答(減衰5%)は周期10秒付近で卓越しているが、当該地域において周期10秒程度の揺れが卓越することは観測事実からも支持される。
- 本予測波について計算した計測震度は0.0である。これは、計測震度の計算において考慮される地震動の周期帯域がおおむね周期0.1から2秒であるのに対し、本予測波の有効周期が4秒以上であることによる。

10. 参考文献

中央防災会議：東海地震に関する専門調査会、<http://www.bousai.go.jp/jishin/>

chubou/tokai、2001

古村孝志：深部地盤のモデル化と 3D シミュレーション、地震防災シンポジウム

「地震防災と地盤—強震動予測のための地盤探査の現状と課題」講演論文集、
pp.4-1-4-6、物理探査学会、2004.

土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下 貢・早川 崇・渡辺基史・佐藤俊明：

東海地震の関東平野における長周期地震動予測、日本地震学会講演予稿集
2004 年度秋季大会、B020、2004

土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下 貢・早川 崇・渡辺基史・佐藤俊明：

東海地震の関東平野における長周期地震動予測、海溝型巨大地震を考える—
広帯域強震動の予測—シンポジウム論文集、pp.61-64、巨大地震最大対応共同
研究連絡会地震動部会、2005

Ichinose, G A., Thio, H. K., Somerville, P. G., Sato, T., and Ishii, T.: Rupture process of
the 1944 Tonankai earthquake (M_s 8.1) from the inversion of teleseismic and regional
seismograms, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. B10, 2497, 2003

中村洋光・宮武 隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間
関数の近似式、地震 2、53、1-9、2000

翠川三郎・三浦弘之・山中浩明：東京で観測されたやや長周期地震動の特徴と
高層ビルへの影響、パッシブ制振構造シンポジウム 2004、東京工業大学

Sato, T., R. W. Graves, and P. G. Somerville, Three-dimensional finite difference
simulation of long-period strong motion in the Tokyo metropolitan area during the
1990 Odawara earthquake (M_j 5.1) and the great 1923 Kanto earthquake (M_s 8.2) in
Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 579–607, 1999.

佐藤俊明・渡辺基史・早川 崇：巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域
ハイブリッド法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.521-526、2004

11. 予測波作成者コメント

本検討で用いた地震動評価法の特徴は、「9. 自由コメント」に述べられているとおりである。特に、M8クラスの巨大地震に対する地震動予測において、従来の理論的方法を特性化震源モデルに適用した場合、周期約10秒以下（本計算では周期4秒から9秒）のやや長周期成分を過小評価する問題に対して、半経験的方法で用いる小地震の波形を理論的方法で計算するという工夫を施し、問題の解決を図っているところに本地震動評価法の大きな特徴があると考えている。

本方法で計算される地震動の精度は、地下構造モデルの精度に大きく依存することから、想定地震の震源域で発生した小地震の観測地震波形を用いた地下構造モデルのキャリブレーションが重要であるとの認識のもとに、小地震の計算波形と観測波形との比較を行った。その結果を踏まえ、観測地震波の長い継続時間を再現するために、ここではQ値として5000という大きな値を第一近似的に採用することとした。この数値を採用した意図は、「減衰を全く考慮しない地下構造モデルを設定したい」ということであり、特に5000という数値自体に大きな意味を持たせているわけではない。

今後、「9. 自由コメント」でも指摘されているように、震源域（駿河湾）付近から関東平野盆地端部までの3次元地下構造を考慮したうえで、複数の観測記録を用いて3次元地下構造モデルのキャリブレーションを行い、Q値を含む地下構造モデルの更なる見直しを図っていきたいと考えている。

概説文：想定南海地震の大阪における予測波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震：

想定南海地震 地震モーメント： $8.34 \times 10^{21} \text{N} \cdot \text{m}$ ，マグニチュード： $M_j 8.4$ ($M_w 8.55$)

地震動予測地点：

大阪平野全体について盆地構造を考慮した地震動が予測されているが、波形が提供されているのは以下の9地点である。

OSK003, OSK005, OSK006, OSK008：K-NET 観測点

OSKH02：KiK-net 観測点

WOS（西大阪の木津：京大防災研観測点）N34.648, E135.482（旧測地系）

FKS（大阪市福島区：関震協観測点）N34.687, E135.474（同上）

YAE（東大阪市弥栄：関震協観測点）N34.680, E135.612（同上）

ROKKO-G（六甲アイランド）

WOS は大阪市西部の大阪湾岸の軟弱地盤上の観測点である。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

本予測波は、将来発生が予測される南海地震に対する地震災害軽減の検討、特に大阪に建つ超高層ビル、免震ビル、石油タンクなど長周期建造物の安全性の検討に用いられることを念頭に作成された長周期波である。文献 1)で記述されているように、近年の文献を参考にし、文献 2)の地下構造モデルと震源モデルを高精度化したモデルによる計算が実施されている。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

・ 手法の概要と特色

3次元有限差分法を利用している。解析領域の周囲には吸収領域を設けるとともに吸収境界条件を適用し、領域内から領域外に進行する波が再び領域内に戻らないようにしている。

・ 有効周期帯域

グリッド間隔と速度構造からは周期 2.5 秒以上が有効とされている。提供波形には 0.05～0.4Hz（2.5～20 秒）のバンドパスフィルターが施されている。

・ 予測地点の最表層の S 波速度

対象が長周期成分のため、個々の予測地点における表層地盤の影響は考慮されていない。

地下構造モデルの最表層の S 波速度は 0.4km/s である (6.参照)。

- ・ 予測成分 (水平、上下)
3 成分 (NS, EW, UD)

4. 震源モデルについて

- ・ どのような根拠で設定されているか？

政府の地震調査研究推進本部 (以下、推本と略する) が発表しているアスペリティを有する特性化震源モデルをやや単純化したモデルを用いている。推本の特性化震源モデルは、過去の地震から得られた情報 (アスペリティの場所や震度分布など) に基づき、強震動予測のためのレシピに従って構築されたものである。断層面はフィリピン海プレートの形状に合わせて設定されている。

- ・ 過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係

準拠している推本の断層モデルの地震モーメントに対する短周期レベルは、過去の南海トラフ沿いの巨大地震の震度分布を再現できるように設定されたものである。

- ・ アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

準拠している推本の断層モデルでは、アスペリティの位置は過去の地震の既往の震源インバージョン結果などに基づき、すべり量の大きいところに設定されており、破壊開始点も過去の地震を参照して設定されている。

5. 伝播経路モデル (いわゆる地殻構造) について

- ・ どのような根拠 (既往の文献, 調査情報等) で設定されているか？

S 波の Q 値 Q_s は S 波速度 V_s [m/s] に比例すると仮定し、 $Q_s(f) = 0.5V_s \cdot f$ で与えられている。既往の 3 次元シミュレーションによる合成結果の後続波が過小評価になっていることから、差分法によるシミュレーションを行い、後続波を再現する最適な値を設定したものである³⁾。

- ・ 過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？

差分法によって計算された 2000 年 10 月 31 日の三重県中部の地震 (M5.7) による大阪平野の速度波形と観測波形との比較により、周期 2.5~20 秒の周期帯での妥当性が検証されている³⁾。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- ・ 3 次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

近年発表された文献に基づき、大阪平野内の堆積盆地構造 (3 層)、基盤の速度構造 (6 層)、フィリピン海プレート上面の形状がモデル化されている。

- ・ 対象地点の深い構造

文献2)の図3によれば、予測地点の地震基盤深さはOSK005で500m程度であるが、その他は1000～2000mの範囲にある。大阪平野内はS波速度が上から0.4, 0.55, 1.0km/sの3層構造である。

- ・ 浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性は？

予測されているのはS波速度0.4km/s層上面における地震動であり、浅い地盤構造は全く考慮されていない。ただし、対象としている長周期地震動に対しては、浅い地盤構造はあまり影響しないものと予想される。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

長周期地震動が対象ということもあり、過去の南海地震の地震動強さや経験的な距離減衰式と提供波形の地震動強さとの比較は行われていない。

提供波形の計算に用いた震源モデルが準拠している推本の震源モデルについては、過去の地震（安政東海地震、昭和東南海地震）の広域震度分布ならびに距離減衰式との比較という形で検証されているが、長周期帯域でのこの震源モデルの妥当性は未確認である。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・ 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

特に行われていない。

- ・ 予測波を用いた応答計算事例の有無

特に行われていない。

9. 自由コメント

提供波形のうち減衰定数5%の疑似速度応答が最も大きいのは、ROKKO-GにおけるNS成分の波形であり、応答スペクトルには固有周期4秒と7秒付近に300cm/s程度のピークが見られる。このほか、OSK006の波形にも固有周期5秒付近に200cm/sを超えるピークがある。2003年十勝沖地震でも固有周期3～5秒で300cm/sに近い速度応答を示す強震記録が得られていることから、提供波形の長周期地震動の強度は現実的なものであるが、建築基準法の告示スペクトルの安全限界（80cm/s）を大幅に超えていることに留意する必要がある。

現時点では震源モデルの大幅な精度向上は困難と考えられるが、震源スペクトルが ω^{-2} モデルを満足するかどうか文献からは不明である。

地下構造モデルについては、近年の研究成果に基づいて設定されているものではあるが、中規模地震の地震動シミュレーションにより検証、あるいはチューニングされるのが望まし

い。

ただし、提供波形は、最新の知見に基づいて震源モデルと地下構造モデルを設定し、事例の豊富な3次元有限差分法により計算されたものであることから、対象とする周期帯域(2.5～20秒)では一定レベルの妥当性が確保されていると考えられる。

10. 著者コメント

これまで大阪平野を対象とした東南海、南海地震時の長周期地震動を3次元有限差分法によって予測してきた。その後、長周期地震動評価のための最適な減衰の設定手法に関する検討や、2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震などのシミュレーションから、大阪平野内での高精度な長周期地震動予測のためには大阪平野内のみの3次元地下構造のモデル化のみならず、震源から大阪平野に至る地震波の伝播経路における減衰も含めた地下構造のモデル化が重要であることがわかった。今回提出した南海地震に対する大阪平野内での予測長周期地震動は、文献2)で紹介した結果とはいくつかの変更点による違いがある。大阪平野の3次元地下構造モデルの若干の変更、震源のすべり速度時間関数の変更、大阪平野以外の地下構造モデルの追加などである。計算結果は場所によって非常に大きな振幅を示す(例えば六甲アイランド)が、紀伊半島南東沖の地震でも強い長周期地震動が観測されており、地下構造の影響が推察される。また、今回の予測地震動の妥当性については十分検証できていないのが現状ではあるが、以前提出した経験的グリーン関数法による南海地震時の予測地点(WOS)での当該周期範囲における振幅、卓越周期及び継続時間がほぼ一致することは確認している。なお、紀伊半島南東沖の地震のシミュレーションではフィリピン海プレート上部や陸域における低速度層も考慮したが、ここで行った南海地震の予測は大阪平野以外の領域では低速度層を含まないモデルとなっており、その影響も含めより詳細な検討を行う予定である。

11. 参考文献

- 1) 釜江克宏, 川辺秀憲: 想定南海地震の強震動予測, 地震動部会提出資料(2005年6月16日), 2005.
- 2) Kamae, K, H. Kawabe, and K. Irikura: Strong ground motion prediction for huge subduction earthquake using a characterized source model and several simulation techniques, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 655, 2004.
- 3) 川辺秀憲, 釜江克宏: 長周期地震動評価のための Q_s 値の周期依存性に関する検討, 日本地震学会 2004年度秋季大会, 2004.

以上

概説文： 想定南海，想定東南海，および，想定南海・東南海連動地震の大阪府域における予測波

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

・ 想定地震

中央防災会議(2002)によるモデルをベースとした，東南海地震(Mw8.18)，南海(Mw8.55)，および，東南海・南海連動地震。

・ 強震動予測地点

観測点名	緯度	経度		
ABN	34.636	135.519	阿倍野	関西地震観測研究協議会
CHY	34.439	135.626	千早	関西地震観測研究協議会
FKS	34.687	135.476	福島	関西地震観測研究協議会
MRG	34.681	135.572	森河内	関西地震観測研究協議会
OCU	34.589	135.508	大阪市大	関西地震観測研究協議会
SKI	34.564	135.469	堺	関西地震観測研究協議会
SRK	34.813	135.601	茨木白川	関西地震観測研究協議会
TDO	34.480	135.408	忠岡	関西地震観測研究協議会
TYN	34.802	135.502	豊中	関西地震観測研究協議会
YAE	34.679	135.612	弥栄	関西地震観測研究協議会
OSK001	34.9675	135.3928	能勢	防災科学技術研究所 K-NET
OSK002	34.8541	135.5986	高槻	防災科学技術研究所 K-NET
OSK003	34.7636	135.4711	豊中	防災科学技術研究所 K-NET
OSK004	34.7372	135.6422	四條畷	防災科学技術研究所 K-NET
OSK005	34.7222	135.5127	大阪	防災科学技術研究所 K-NET
OSK007	34.5544	135.6086	羽曳野	防災科学技術研究所 K-NET
OSK008	34.4405	135.3902	岸和田	防災科学技術研究所 K-NET
OSK009	34.4333	135.5844	河内長野	防災科学技術研究所 K-NET
OSK010	34.3722	135.2577	泉南	防災科学技術研究所 K-NET
OSKH01	34.3944	135.2864	田尻	防災科学技術研究所 KiK-net
OSKH02	34.6595	135.3924	此花	防災科学技術研究所 KiK-net
OSKH03	34.5215	135.6636	太子	防災科学技術研究所 KiK-net
OSKH04	34.7597	135.7081	交野	防災科学技術研究所 KiK-net

* 緯度，経度は日本座標系。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

今後の防災対策に資することを目的に，南海・東南海地震を対象とした地震動シミュレーションを行い，大阪府域における地震動を試算している。震源モデルはできる限り忠実に中央防災会議の震源モデルを用いているが，中央防災会議の地震動計算が全周波数帯域に対して統計的グリーン関数法を用いたのに対し，この研究では長周期領域は 3 次元地下構造モデルと差分法を用いたより物理的

な理論に基づくモデリングを目指している。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

- ・ 手法の概要と特色

1~2秒以下の短周期領域を統計的グリーン関数法で、それ以上の長周期領域を3次元差分法で計算し、これらをハイブリッドしている。短周期領域の計算では、経験的サイト増幅特性を考慮している。

- ・ 有効周期帯域

0.067~10sec (0.1Hz~15Hz)

- ・ 予測地点の最表層のS波速度

長周期領域の差分計算では、 $V_s=0.35\text{km/s}$ が最表層のS波速度。

短周期側の計算では、地震基盤以浅の速度構造モデルは明示的には使われていないが、地震基盤から地表までの部分の経験的なサイト増幅特性を考慮することにより実際の地盤の最表層のS波速度まで含まれていることになる。

- ・ 予測成分(水平、上下)

水平の2成分

4. 震源モデルについて

- ・ どのような根拠で設定されているか？それは ω^{-2} モデルになるように考慮されているか？

中央防災会議のモデルに準拠。断層面は、南海地震、東南海地震、それぞれ2つの平面で近似されているため、位置は若干ずれている。統計的グリーン関数で計算される高周波数領域については、その計算法の性格上、震源モデルが ω^{-2} モデルになるよう考慮されている。

- ・ 過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係(全体像:地震モーメントと破壊面積,地震モーメントと短周期レベルとの關係など,不均質性:地震モーメントとアスペリティ総面積との關係)とどのような關係となっているか？

中央防災会議によるモデル化の時点で、過去の地震の震源モデルに基づく平均的な關係を満たすように、アスペリティサイズなどが設定されている。

- ・ アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

中央防災会議のモデルを踏襲。

- ・ ハイブリッド法の場合、接続周期付近での落ち込みに配慮されているか？

差分の計算の適用周波数範囲内で両地震動のスペクトルがスムーズに繋がるように、短周期側と長周期側の接続周期をスペクトルレベルがほぼ同じ周期に選んでいる。ただし、このこと自体は、選んだ接続周期での位相をチェックしていなければ、落ち込みに配慮しているとは言えない。(注:論文には書かれていないが、著者コメントにあるような方法で落ち込みへの配慮がされているとのこと)

5. 伝播経路モデル(いわゆる地殻構造)について

- ・ どのような根拠(既往の文献,調査情報等)で設定されているか？

層構造の形状:Zhao et al.(1994),

P 波速度:京都大学鳥取地震観測所が震源決定に使っているモデル

S 波速度:Furumura et al.(2003)

フィリピン海プレート形状:荻原(1991)

フィリピン海プレートの速度構造:渋谷ほか(2000), 小平ほか(2000)

Q 値(短周期の計算):中央防災会議(2001)

- ・ 過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？
検証されていない。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて(推本と同じではまずいですかね?)

- ・ 3次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

大阪堆積盆地の3次元地下構造モデルが用いられている。

- ・ どのような根拠(地下構造探査や既往の文献等)で設定されているか？

趙・他(2002)

- ・ 過去の中小地震の波形に基づきモデル化がなされている、あるいは検証されているか？

2000年鳥取県西部地震のモデル化により、大阪堆積盆地の構造モデルが検証されている。

- ・ 浅い地盤構造(工学的基盤より浅部)増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性が考慮されているか？

長周期領域の計算には、浅い地盤構造は考慮されていない(が、影響は少ないと考えられる)。短周期領域の計算では、地震基盤から地表までの部分の経験的なサイト増幅特性の付加により考慮されている。地盤非線形性は考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

検証方法-1:計測震度を、中央防災会議の計算による計測震度と比較している。中央防災会議の計測震度は、歴史記録から推定された過去の南海、東南海地震の震度と同等になるようにチューニングされているため、間接的に、これらの値との比較ともなっている。

検証結果-1:計測震度は、風化岩上の観測点では4.4程度(震度4)、洪積層上の観測点では断層にやや近い位置にある府南部で5.0程度(震度5強)、府中部や北部では4.5~4.8(震度5弱)、沖積層上の観測点では4.7~5.6(震度5弱~6弱)となっている。大局的に見れば、中央防災会議の出した値と顕著な差はない。

検証方法-2:東南海地震のシミュレーション波と、2004年9月5日の紀伊半島南東沖の系列の2地震(MJMA6.9および7.4)の波形、および、擬似応答スペクトルを比較

検証結果-2:マグニチュードが全く異なるので、振幅は違うが、継続時間が長いことや長周期領域が卓越することといった特徴が共通している。

- ・ 予測波のばらつきの検討の有無

記述無し.

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・ 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

記述無し.

- ・ 予測波を用いた応答計算事例の有無

記述無し.

9. 自由コメント

論文中では、“サイト特性による”短周期エンベロープを推定し、これを用いた予測波も計算されているが、今回提出された予測波は、これを用いないバージョンであることに注意が必要である。

理論的手法により計算された長周期領域に関して、10km四方の小断層中央に点震源を1つ設定し、震源時間関数に中村・宮武(2000)のすべり速度時間関数を用いている。中央防災会議のモデルのすべり分布が滑らかなものであるとすれば、差分計算の有効周波数範囲を考えると、このすべり時間関数をそのまま震源時間関数として使うには小断層サイズが大きく、長周期領域のうち、比較的周期の短い成分に影響があると思われる。

10. 著者コメント

長周期差分による震源時間関数には、中村・宮武(2000)のすべり時間関数の立ち上がりを周期1秒程度に変更し、最終すべり量を調整したものをを用いている。このことによって、周期1秒程度のランプ関数を持った小地震をすべり方向に合成した結果としてコストロフ型の震源時間関数となったことを模擬している。このようにして、ハイブリッド合成の周期帯域での長周期地震動の落ち込みが生じ難くなるように工夫している。また、これによって10km四方の小断層にも対応させている。更に、ハイブリッド合成では短周期側と長周期側のS波立ち上がりのフェーズを目視で合わせ、落ち込みが生じないようにしている。

計算結果の長周期側の精度については、

- 1) 鳥取県西部地震の長周期地震動が再現されたモデルを用いていること。
- 2) 紀伊半島東方沖地震の観測記録と卓越周期が大きく外れていないこと。
- 3) 紀伊半島東方沖地震の規模と比較して、計算とシミュレーションのスペクトル比が大きく外れていないこと。

は最低限の抑えとして確認している。

11. 参考文献

(暫定波の主要な参考文献)

鶴来雅人, 趙伯明, Petukhin Anatoly, 香川敬生, 南海・東南海地震の大阪府域における強震

動予測, 構造工学論文集, 51A, 2005.

(本概説文中の参考文献)

中央防災会議 東南海, 南海地震等に関する専門調査会: 第7回資料,

<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/7/index.html>, 2002.

中央防災会議, 東海地震に関する専門調査会: 第8回資料, 2001.

趙伯明, 香川敬生, 大阪盆地モデルの高精度化およびその応用-2000年鳥取県西部地震

(MJMA7.3)の強震動シミュレーション, 第11回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, 97, 2002.

Furumura, T., B. L. N. Kennett, and K. Koketsu, Visualization of 3-D wave propagation from the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan, earthquake, Observation and numerical simulation, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 667-682, 2003.

伊藤潔, 松村一男, 和田博夫, 平野憲雄, 中尾節郎, 澁谷拓郎, 西上欽也, 片尾浩, 竹内文朗, 渡辺邦彦, 渡辺晃, 根岸弘明, 西南日本内帯における地殻内地震発生層, 京都大学防災研究所年報, 38, B-1, 209-219, 1995.

小平秀一, 蔵下英司, 徳永雅子, 高橋成美, 中西理子, 三浦誠一, 朴進午, 金田義行, 岩崎貴哉, 平田直, 伊藤潔, 1999年海陸統合地震探査で明らかになった紀南海山列の沈み込みとその地震学的意味, 日本地震学会講演予稿集, B49, 2000.

中村洋光, 宮武隆: 断層近傍地震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震第2輯, Vol.53, pp.1-9, 2000.

萩原尊禮, 日本列島の地震, 鹿島出版会, 1991.

澁谷拓郎, 伊藤潔, 西田良平, 松村一男, 渡辺邦彦, 四国頭部の地殻構造, 地球惑星科学関連学会 2000年合同大会予稿集, CD-ROM, Se-006, 2000.

Zhao, D, A. Hasegawa, and H. Kanamori, Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events, Journal of Geophysical Research, 99, 22313-22329, 1994.

2005年11月21日

久野通也・増田徹

概説文：経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震：想定東海地震

強震動予測地点：断層近傍の K-NET 観測点 11 点とその他 1 点の計 12 点

2. 予測波の作成目的と位置づけ

統計的グリーン関数法において、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した断層近傍での予測手法の提案を目的としている。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

・ 手法の概要と特色

提供波形の作成は、以下の手順による。

- (1) 経験的サイト増幅・位相特性の抽出
- (2) 経験的サイト増幅・位相特性を用いた統計的グリーン関数法による予測
- (3) 等価線形手法による表層での非線形効果の計算

この論文の手法の特徴は、統計的グリーン関数法を用いる際に、グリーン関数として、従来のように震源スペクトルとモデル包絡線によって加速度波形を作るのではなく、サイトにおける増幅・位相特性を考慮している点である。

・ 有効周期範囲

論文の記述では 0.1-5s で有効となっているが、ここでは 0.1-3s の帯域での波形を提供

・ 予測地点の最表層の S 波速度

150m/s～690m/s

・ 予測成分（水平・上下）

水平 2 成分（EW、NS）

4. 震源モデルについて

・ どのような根拠で設定されているか？

中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」において検討された想定東海地震に対する震源モデルのうち、各アスペリティで応力降下量一定のモデルを採用している。

・ 過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係

中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」において検討されたモデルと同じ。

・ アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

アスペリティ位置は中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」のモデルと同じ。破壊開始点は、中央防災会議のモデル①と②の両方について検討している。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

5. 伝播経路モデル（いわゆる地殻構造）について

- ・ どのような根拠（既往の文献、調査情報）で設定されているか？

統計的グリーン関数法ではあるが、経験的サイト増幅・位相特性を適用している。伝播経路のQ値は、佐藤・巽（2002）による $Q=114 \times f^{0.92}$ を採用している。

- ・ 過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？

サイト増幅・位相特性は 2001 年に静岡県中部で発生した深さ 33km、M4.1 の地震、あるいは深さ 32km、M5.0 の地震の解析から得ている。得られたサイト特性は 2001 年に静岡県中部で発生した深さ 33km、M5.3 の地震で合成波と観測波と比較されている。

- ・ 経験的グリーン関数法の場合の詳細

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

- ・ 3次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

表面波部分を含む経験的サイト特性を用いている。

- ・ 深い地盤構造と卓越周期

- ・ どのような根拠（既往の文献、調査情報）で設定されているか？

- ・ 過去の中小地震の波形に基づきモデル化がなされている、あるいは検証されているか？

- ・ 浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性は？

浅い地盤構造の増幅効果は経験的サイト特性に含まれている。また、既往の構造モデルを用いて、地表から工学的基盤へ戻し、等価線形計算により非線形効果を考慮している。

7. 予測波の妥当性と検証がなされているか？

- ・ 検証の方法と検証結果

グリーン関数の妥当性については、合成波と観測波との比較がなされており、おおむね妥当な結果を得ている。

東海地震に対する予測波の妥当性については、予測震度と 1707 年宝永地震および 1854 年安政東海地震の震度との比較により、おおむね妥当であるとしている。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・ 設計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

なし。

- ・ 予測波を用いた応答計算事例の有無

なし。

9. 自由コメント

特定地点の地震動を予測するには、予測したい地点での地震観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法が最も信頼性が高いと考えられるが、本論文による手法は、地震観測記録が得られてはいるが、経験的グリーン関数法で要素地震として適切な中小地震の記録がない場合には、有効な選択肢となり得る。

本論文では、地震観測記録から予測波に影響を与える因子である震源モデル・伝播経路特性・サイト特性を分けて考察し、その結果得られた経験的サイト特性を用いて統計的グリーン関数法による強震動評価を行ったものであり、地震観測記録が有している情報を統計的手法に反映させた点で評価される。

他機関の評価結果と比較検討した上で、サイト増幅特性が大きいと判断され強い地震動が予想される地点では、本手法により評価された地震動の活用が望まれる。

ただし、以下の点については注意を要する。

- ① 地震基盤に対するサイト増幅特性の評価は基準点の取り方により大きく結果が変わり、妥当性の検証が難しいのが現状である。震源スペクトルとサイト増幅特性は常にその積の形で観測方程式に現れ、他の先見的条件を加えることによって分離解析ができる量であることから、サイト振幅特性の絶対値については注意が必要となる。
- ② 媒質の Q 値は既往の知見（佐藤・巽）のものを用いているが、サイト増幅特性の評価に用いたスペクトルインバージョンによる結果との整合を確認する必要がある。
- ③ 予測波の計算の具体的な手順において、発震機構解に従う放射振幅係数を地震波の射出方位によらず一定としているが、断層に比較的近い観測点では、やや長周期成分に対する放射振幅の方位依存性の効果に関して注意が必要である。
- ④ 断層近傍の強震動の妥当性を述べているが、中央防災会議が検討した際に用いた断層モデルは、要素断層（断層を分割したときの小断層）の拡がり $5\text{km} \times 5\text{km}$ であり、波形予測地点のうち距離の小さいところ（おおよそ 10km ）では、その比から考えて充分遠方とはいえないことから注意が必要であろう。
- ⑤ 他機関の評価結果（例えば、中央防災会議）と振幅レベルが著しく異なる地点については、発震機構解の効果、SV波やSH波の区別、地震基盤内部の深部地下構造を考慮した地震波の屈折と基盤への入射角等の計算条件を含めた原因の究明が必要である。

10. 参考文献

- 1) 野津厚、経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例、海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集、土木学会・日本建築学会、99-106、2005。
- 2) 古和田明、田居優、岩崎好規、入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価、日本建築学会構造系論文集、514、97-104、1998。
- 3) 中央防災会議、「東海地震に関する専門調査会」報告、2001年。
- 4) 中央防災会議、「東南海、南海地震等に関する専門調査会」報告、2003年。

1.1. 予測波作成者コメント

「9. 自由コメント」では本論文について適正な評価をしていただいていると思いますので、ユーザの皆様はその内容に注意を払っていただいた上で、波形をお使いいただければと思います。蛇足ながら、いくつか付け加えたいことがありますのでそれについて以下に記します。

まず自由コメント①に述べられている件ですが、これはスペクトルインバージョンについてまわる問題点です。これがどのようなことかを波形のユーザに御理解いただくために、一応御説明します。いま M 個の地震 ($i=1,2,\dots,M$) の記録が N 個の観測点 ($i=1,2,\dots,N$) で得られているものとします。そのとき、観測記録のフーリエ振幅スペクトルは震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の積として式 (1) で表現することができます (例えば岩田・入倉、1986)。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) P_{ij}(f) G_j(f) \quad (1)$$

ここに $S_i(f)$ は第 i 地震の震源特性 (震源スペクトル)、 $P_{ij}(f)$ は第 i 地震の震源から第 j 地点の地震基盤までの伝播経路特性、 $G_j(f)$ は第 j 地点のサイト増幅特性です。式 (1) の両辺の常用対数をとると次式が得られます。

$$\log O_{ij} = \log S_i + \log P_{ij} + \log G_j \quad (2)$$

スペクトルインバージョンではこの式を最小自乗法的に解いて震源特性やサイト増幅特性を求めます。ところが、式 (2) を解こうとするとき、震源特性とサイト増幅特性の間にはトレードオフがあります。例えばある S_i と G_j の組み合わせが解であるとする、 $S_i/2$ と $2G_j$ の組み合わせも解となってしまいます。このことを避けるための方法として、あらかじめ選定した岩盤観測点 (基準観測点という) においてサイト特性は 1 であるとする方法があります。しかし、この場合でも、基準観測点として選定した地点が本当に地震基盤に相当するのか、言い換えれば、算定されたサイト増幅特性が地震基盤に対応するものか、という点について、つねに議論になります。このことが①で指摘されている問題であり、①で「他の先見的条件を加えることによって分離解析ができる量である」と述べられているのはこのことです。

本論文で用いられているサイト増幅特性は野津・長尾 (2005) により算定されたもので

すが、この文献では、サイト増幅特性の客観性向上に寄与する目的で、現段階でとりうるいくつかの方策を講じています。これについてこの機会に紹介したいと思います。

野津・長尾（2005）では、全国を東北・北海道、関東、中部、近畿、中国・四国、九州の6つの地域に分け、それぞれの地域で、港湾・空港、K-NET、KiK-net、関西地震観測研究協議会の観測点を対象にスペクトルインバージョンを行っています。このうち、今回の強震動評価には中部の結果を用いました。地震の規模はM4.5以上M6.0未満とし、Lg波等、震源に由来する表面波の影響を可能な限り避けるため、震央距離150km以上の記録は用いませんでした。また、表層地盤の非線形挙動の影響を避けるため最大加速度100Gal以上の記録は用いませんでした。

中部地方を対象とした解析では、中部地方の316地点に近畿地方の44地点と関東地方の108地点を加えた計468地点を対象としています。合わせて240の地震による5401の記録（10802の水平成分）を解析に使用しました。解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-1に示します。

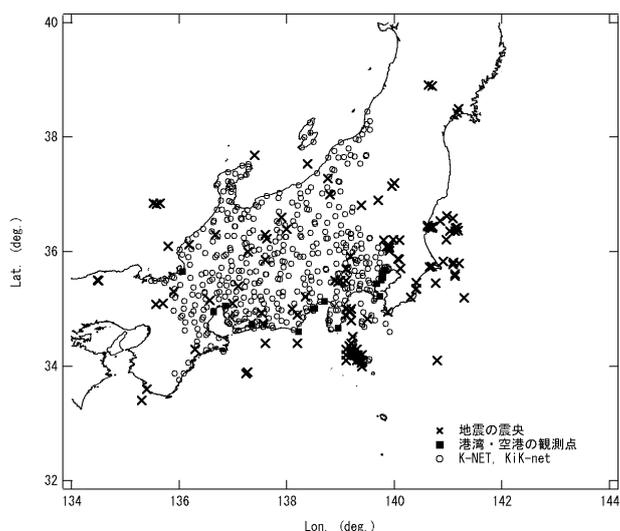


図-1 中部地方の解析に用いた地震の震央と観測点の位置

基準観測点の選定は次のように行っています。まず、予備的解析の結果に基づき、周波数ごとにサイト増幅特性の最も小さい地点を基準観測点として選定します。ただし、軟弱地盤において高周波数領域の振幅が小さくなることを考慮し、基準観測点として採用する地点を表層付近のS波速度が十分に大きい地点に限定します。具体的には地表から10mまでの平均S波速度が400m/s以上の地点から基準観測点を選択することとしました。また、個々の記録の特性が結果に大きく影響することを避けるため、複数（5地震程度）の観測記録が得られている地点に限定しました。

このような考え方で選定された基準観測点が妥当なものであるかについて検討するための一つの方法として、実際にインバージョンを行った結果得られる震源特性（震源スペク

トル)の低周波部分から算定される地震モーメントとCMT解(ここでは防災科学技術研究所のF-netによるもの)の地震モーメントとの比較を行いました。図-2に震源スペクトルの算定結果を示します。これを見ると、低周波側には周波数の自乗に比例する部分が見受けられ(規模の大きい地震では0.2Hz付近、規模の小さい地震では1Hz付近)、概ね ω^{-2} モデルに従うものとなっていることがわかります。図-2に示す震源スペクトルから、変位スペクトルの低周波側のフラットレベル U_0 を読みとり、次式により地震モーメントを算定しました。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3}{R_{\theta\phi} \cdot PRTITN} U_0 \quad (3)$$

ここに $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数であり、ここでは全方位の平均値0.63としました。PRTITNは地震波のエネルギーの水平2成分への分配を示す係数ですが、ここではもともと水平2成分のベクトル和を対象として解析を実施しているためPRTITN=1としました。図-3に地震モーメントの比較結果を示します。震源スペクトルの低周波部分から算定された地震モーメントとF-netによる地震モーメントはある程度整合しており、したがって、少なくとも、地震モーメントの算定に関わるような低周波数成分(対象とした地震のコーナー周波数から判断すると概ね1Hzよりも低周波側)に関しては、地震基盤からの増幅率に近いものが算定されていると考えています。

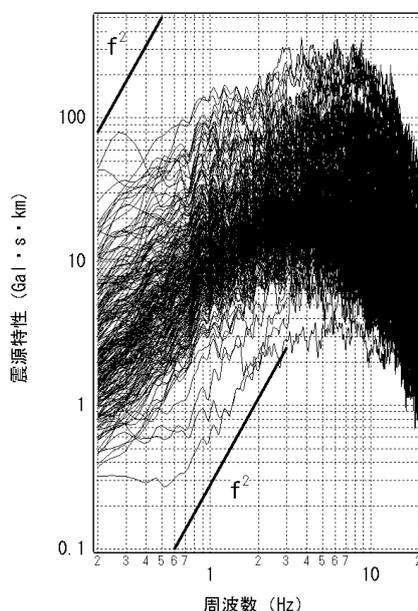


図-2 震源スペクトルの算定結果

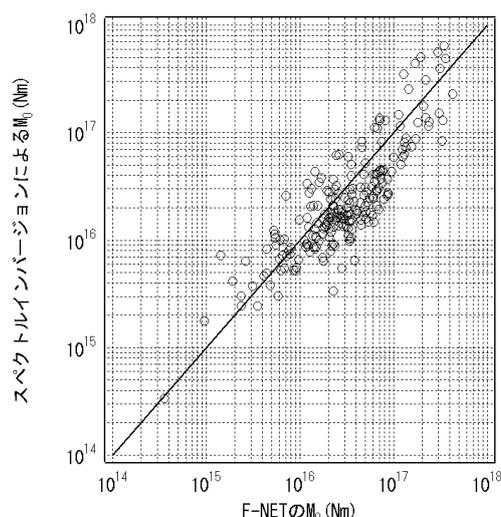


図-3 スペクトルインバージョンで得られた地震モーメントと F-net の地震モーメント

次に、中部地方で算定されたサイト増幅特性のうち、想定東海地震の震源近傍である K-NET の 12 地点のサイト増幅特性を利用し、2001 年 4 月 3 日静岡県中部地震 (M5.3) の強震動シミュレーションを実施し、その結果を観測スペクトルと比較することにより、サイト増幅特性の妥当性を検討しました (このことについては論文中にも述べています)。この検討が有意義であると考えられる理由は、強震動シミュレーションに利用できるアスペリティモデル (森川他, 2002) が、サイト増幅特性とは独立の情報から求められているためです。図-4 に結果を示します。合成波スペクトルと観測波スペクトルの一致は完全とは言えませんが、1Hz より低周波側では良く一致しており、また、高周波側でも観測スペクトルのレベルはある程度再現されていると考えています。一部、地点によって、合成波のスペクトルが小さめ出ている地点はあるものの、少なくとも、基準観測点の不備などにより、サイト増幅特性の算定結果が大幅に過大にはなっていないことが、御理解いただけるのではないのでしょうか。

なお、野津・長尾 (2005) では、付録 CD の中に、算定した全国の港湾地域強震観測、K-NET および KiK-net のサイト増幅特性のデジタル値を収録しています。これを御覧いただき結果について御意見等いただければ幸いです。

次に自由コメント②で述べられている伝播経路の Q 値につきましては、実は野津・長尾 (2005) では東海地方における伝播経路の Q 値を佐藤・巽 (2002) のものに固定して計算を行っています。従って指摘されているような矛盾はないこととなります。論文作成時の説明不足をお詫びします。

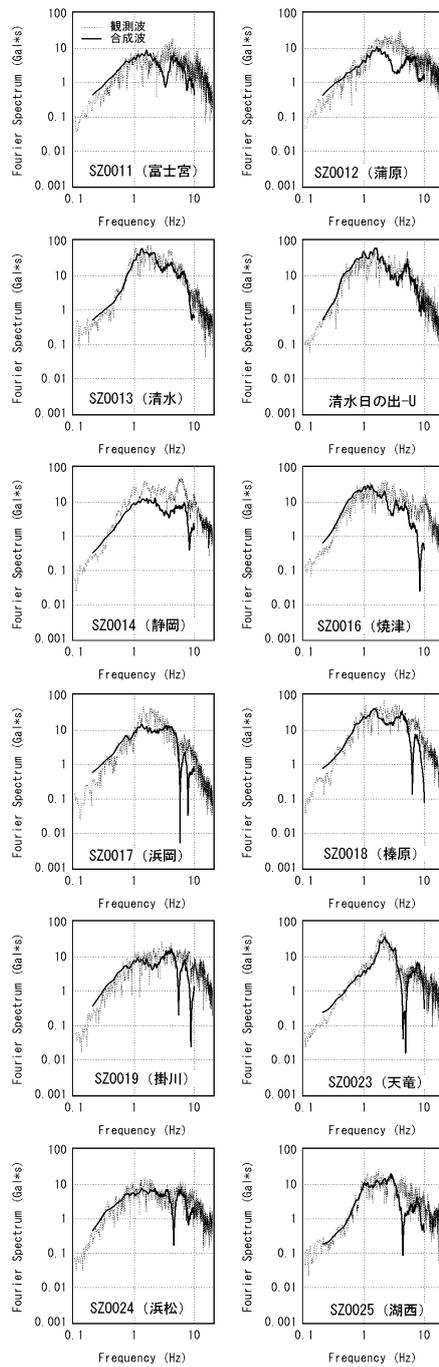


図-4 サイト増幅特性を利用した 2001 年 4 月 3 日静岡県中部の地震 (M5.3) の強震動シミュレーション

次に自由コメント③で述べられているラディエーション係数 $R_{\theta, \phi}$ の件です。理論的なラディエーション係数は震源のメカニズム及び震源とサイトの位置関係に応じて 0-1 の値をとり（例えば佐藤，1994）、全方位の平均値は 0.63 です。本研究では周期帯に係わらずラディエーション係数は平均値 0.63 を用いています。このことにつきましては様々な議論があることと思いますが、予測波作成者としては、平均的なラディエーション係数 0.63 を用いることは、以下に述べる理由により、工学的には十分に妥当な選択肢と考えています。

まず第一に、理論的なラディエーション係数が例えば周期 1-3 秒の帯域で実際の観測記録にそのまま現れるかどうかについては、それ自体が研究の途上であると著者としては認識しています。周期 1-3 秒の帯域でのラディエーションが完全に理論に従うという報告はこれまで見たことが無く、周期が長いほどラディエーションが理論に「近づく」という報告が多いように思います（例えば佐藤，1994）。また、仮にある特定の要素断層から射出される地震波が周期 1-3 秒の帯域で完全に理論に従うとしても、大地震の断層面上では滑り角が多かれ少なかれ揺らぎがあり、このことはラディエーションの平均化に寄与します。

また、平均的なラディエーション係数を用いることはロバストな予測につながり、このことも工学的には好ましいことと考えられます。先に述べたように理論的なラディエーション係数は 0-1 の値をとりますので、仮に 0.63 を用いた場合、どんなに過小評価したとしてもその違いは $1/0.63=1.6$ 倍を越えることはなく、かつ、上記のように実際には滑り角の揺らぎ等によりラディエーションが理論より鈍ると考えれば、過小評価の恐れはこれより小さいこととなります。理論的なラディエーション係数を用いた場合には、その値は震源のメカニズム及び震源とサイトの位置関係に応じて 0 に近い値をとることもあり、万が一の場合の過小評価は非常に大きなものとなります。つまり強震動予測のロバスト性という観点から、予測波作成者としては、平均値 0.63 を用いることが望ましいと考えます。

次に自由コメント④で述べられている要素断層の大きさの件について補足計算結果を示します。東海地震の震源近傍における強震動の評価において、要素断層の大きさに対し、震源距離が十分に大きくないことが、評価結果にどのような影響を及ぼしているか検討するため、一つの考え方として、中央防災会議の強震動評価で採用されている考え方、すなわち、幾何減衰の評価式を $1/R$ でなく $1/(R+C)$ とする考え方に基づき、強震動の評価を実施し直してみました（ここに C は要素断層の半径）。

中央防災会議の震源モデルでは、要素断層の大きさは概ね 5km 四方となっています。従って C の値は概ね 2.8km 程度の値をとります。一方、シンポジウムの論文にありますように PGV の大きい 3 地点（K-NET 清水，清水日の出，K-NET 榛原）のアスペリティからの最短距離は 12.4km，14.3km，19.9km となっています。従って $1/R$ と $1/(R+C)$ の違いは大きくても 2 割程度となります。今回対象とした 12 の観測点において、幾何減衰を $1/R$ とした場合と $1/(R+C)$ とした場合の地表における PGV を比較してみたところ、図-5 に示すようになりました。幾何減衰を $1/(R+C)$ とする場合には、どの観測点でも PGV は概ね 1 割程度小さくなりましたが、依然として PGV の大きい観測点も見受けられます。

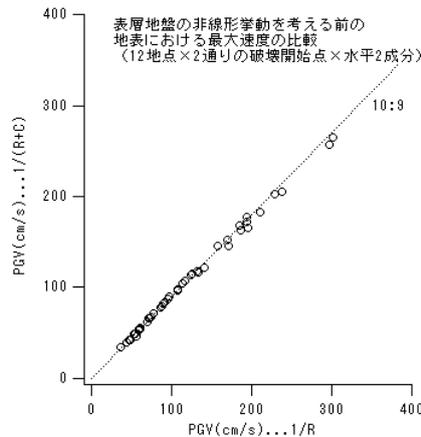


図-5 幾何減衰を $1/R$ とした場合と $1/(R+C)$ とした場合の地表における PGV を比較

次に、自由コメント⑤で述べられている他機関の評価結果との相違についてコメントいたします。予測波作成者として他機関の評価結果との相違は主にサイト特性の評価手法の相違にあると考えています。サイト特性の評価手法は（経験的グリーン関数法のようにサイト特性の評価を陽に実施しなくて良い手法を除けば）本研究のように強震観測に基づく方法と、地下構造探査の結果に基づく数値計算による方法に分けることができます。しかしながら後者の方法は十分な地下構造情報を必要としており、情報の多寡に応じて、適用できる地域や地震動の周波数に制約があるのが実状です。

サイト特性の評価が妥当に行われているかどうかのチェックは、対象地域で過去に実際に発生し、かつ震源が良く調べられている地震の強震動シミュレーションを実施することにより、行うことができます。例えば本研究において 2001 年 4 月 3 日静岡県中部の地震を対象に行っている強震動シミュレーションがこれに該当します。中央防災会議の検討に用いられたサイト特性の評価手法についても、既往の強震記録を説明できるか、との観点からのチェックが必要と考えています。

最後になりましたが、東海地震の震源近傍と一口に言っても、地点間の揺れの相違は相当大きいことを改めて強調したいと思います。図-6 は、SZO013 (K-NET 清水) と SZO014 (K-NET 静岡) について、スペクトルインバージョンで得られたサイト増幅特性の比をとり（実線）、これを 2004/9/5 紀伊半島沖地震のスペクトル比（破線）と比較したのですが、SZO013 (K-NET 清水) の方が揺れやすい傾向は、遠方で発生した大地震の記録にもあらわれています。予測結果の絶対値は震源モデル次第で変わりうるものですが、こうした相対関係に関する情報はロバストなものと考えられるため、災害対策を立てる上で参考になると考えます。ただし、本研究で採用した手法は、強震観測地点での離散的な予測結果しか与えないという欠点があります。図-6 の結果から、当然、K-NET 清水と K-NET 静岡の間ではどのように揺れの強さが変化するか、知りたくなるのですが、そのためには、微動など他の情報を援用することにより、離散的な予測結果を補間するなどのことが必要に

なってくるものと思います。

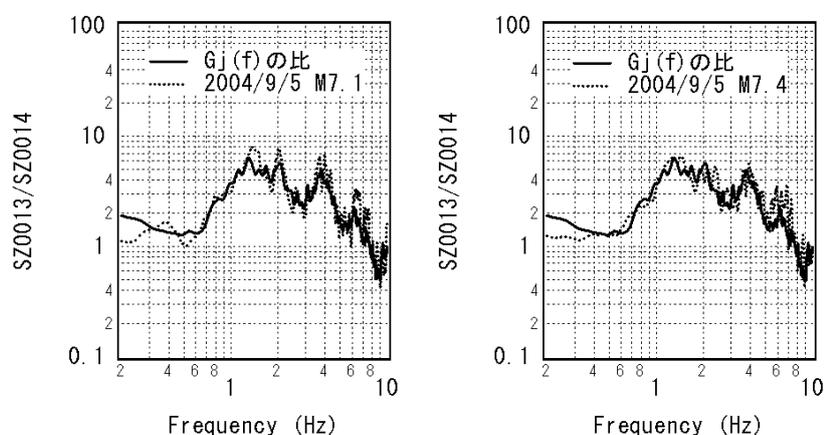


図-6 スペクトルインバージョンで得られたサイト特性の比（実線）と2004年9月5日記伊半島沖の地震のスペクトル比（左は前震、右は本震）

（港湾空港技術研究所 野津厚）

[予測波作成者コメントの参考文献]

岩田知孝・入倉孝次郎（1986）：観測された地震波から震源特性，伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震2，第39巻，pp.579-593.

森川信之，笹谷努，藤原広行（2002）：経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築，日本地震工学シンポジウム（CD-ROM）.

野津厚，長尾毅（2005）：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112（印刷中）.

佐藤俊明（1994）：理論的地震動評価，地震動—その合成と波形処理，第2章，鹿島出版会，pp.21-88.

佐藤智美・巽誉樹（2002）：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp.15-24.

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

本予測波は、想定東南海地震に対して、濃尾平野内に位置する7地点の地表における地震動を評価したものである(Suzuki et al., 2005). 震源モデルとしては地震調査研究推進本部(2001a)のケース2を修正したものをを用いている. なお、7地点の内、AIC004(名古屋市緑区)、AIC009(豊田市)、AIC011(知多市)、GIF020(岐阜市)、MIE003(四日市市)、MIE006(津市)は K-NET 観測点、GIFH09(羽島市)は KiK-net 観測点であり、各地点の地盤条件については防災科学技術研究所 HP を参照されたい.

2. 予測波の作成目的と位置づけ

想定東南海地震による広帯域の地震動、なかでも、盆地効果による周期数秒の地震動と、計測震度に寄与する数 Hz までの短周期地震動の推定を主な目的として地震動評価を実施している. 震源モデルについては地震調査研究推進本部(2001a)のケース2を若干修正したものをを用いている. ケース2については「安政の地震の平均的な特性によるものよりもやや大きめの揺れをもたらすものの、比較したデータの範囲内にある」との記述が地震調査研究推進本部の説明(2001b)に見られる(ただし浜松以西の比較). また、今回算定された震度分布は地震調査研究推進本部(2001a)の震度分布と調和的であるとされることから(Suzuki et al., 2005), 今回濃尾平野で算定された地震動は概ね過去の地震を再現した地震動であると推察される.

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

経験的グリーン関数法を用い、広帯域(0.05-20Hz)の強震動を評価している. また上記7地点における経験的グリーン関数は概ね 0.1Hz 以上で精度があるとされている(岩田・鈴木, 2005). アスペリティからの地震動のみの評価ではあるが、盆地効果による周期数秒の地震動は十分に評価されているものと考えられる. 予測はすべて地表で行われており、表層地盤の非線形挙動を考慮しない場合の波が提供されている. 予測成分は水平上下3成分である.

4. 震源モデルについて

震源モデルについては地震調査研究推進本部(2001a)のケース2を修正したものをを用いている.

もともと地震調査研究推進本部のケース2は、海溝型地震の平均的な短周期レベル(壇他, 2001)に対し、 $\sqrt{2}$ 倍程度の短周期地震動を生成しうるようなモデルとして設定されている(地震調査研究推進本部, 2001b). また、先に述べたように、ケース2については「安政の地震の平均的な特性によるものよりもやや大きめの揺れをもたらすものの、比較したデータの範囲内にある」との記述が地震調査研究推進本部の説明(2001b)に見られる(ただし浜松以西の比較).

今回用いられたモデルは、地震調査研究推進本部(2001a)のケース2に対して若干の修正が行われているものの、短周期レベルは同程度である(表-1). なお、参考のため中央防災会議(2002)による東南海地震のモデルと比較すると、短周期レベルは今回のモデルの方が小さくなっている.

表-1 東南海地震の各震源モデルによる短周期レベル(Nm/s²)

Suzuki et al.(2005)	アスペリティ	1.14E+20
地震調査研究推進本部(2001)ケース2	アスペリティ	9.57E+19
〃	アスペリティ+背景領域	1.01E+20
中央防災会議(2002)	アスペリティ	1.40E+20
〃	アスペリティ+背景領域	1.43E+20

なお、経験的グリーン関数を重ね合わせる方法については、 ω^{-2} モデルに従うような方法(Irikura, 1986)が採用されている。

5. 伝播経路モデル(いわゆる地殻構造)について

経験的グリーン関数法を採用しているため、伝播経路の影響はグリーン関数の中に含まれており、結果に反映されている。大地震と小地震の伝播経路は、全く同一とは言えないものの、類似している。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

経験的グリーン関数法を採用しているため、深い地盤構造および浅い地盤構造の影響はグリーン関数の中に含まれており、結果に反映されている。なお、ここで利用されている小地震(M5.5)の記録を用いることにより、盆地効果による周期数秒の地震動が再現されるかという点については、2004年9月5日に発生した紀伊半島沖の地震の前震(19:07, M7.1)による大阪堆積盆地内の地震動が再現されることをもって確認している。なお、表層地盤の非線形挙動の影響は考慮されていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

予測波の最大速度の傾向は概ね距離減衰式(司・翠川, 1999)の傾向と一致することが確認されている。また予測波から算定された震度分布は地震調査研究推進本部(2001a)による震度分布と概ね調和的であると述べられている。地震調査研究推進本部(2001a)による震度分布は、先に述べたように、安政東海地震の震度分布(ただし浜松以西)と概ね調和的であるとされており、今回の算定結果も、歴史地震の震度分布によって間接的に検証されていると考えることができる。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

特に実施されていない。

9. 自由コメント

伝播経路および地盤構造の影響を適切に考慮できる経験的グリーン関数法が用いられており、また、しばしば経験的グリーン関数法の結果を左右する小地震の震源特性についても、紀伊半島沖の地震の前震のシミュレーションを通じて調べられている。従って、ここで提供されている地震動は、想定東南海地震に対する当該地域の予測波として、現段階では最も信頼性の高いものの一つであると考えられる。ただし、算定された地震動の継続時間はグリーン関数として用いられた小地震記録の長さに依存しており、継続時間が過小評価されている可能性が高い。また、提供波は表層地盤の非線形挙動を考えない場合の地表の地震動であり、地点によっては短周期成分が過大評価となっている可能性があるため、ユーザーは必要に応じてこの点に関する補正を行う必要がある。

10. 参考文献

Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156.

Suzuki, W., T. Iwata, K. Asano, and N. Yamada (2005): Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the

hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green's function method, Earth Planets and Space, Vol.57, pp.345-350.

岩田知孝・鈴木亘(2005):波形データに関するメモ, 地震動部会資料.

司宏俊・翠川三郎(1999):断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp.63-70.

地震調査研究推進本部(2001a):南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について(中間報告), <http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/01b/hyoka.pdf>.

地震調査研究推進本部(2001b):南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について(中間報告)説明, <http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/01b/setsume.pdf>.

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透(2001):断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号, pp.51-62.

中央防災会議事務局(2002):「東南海、南海地震等に関する専門調査会」第 7 回資料 2-1, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/7/siryoku2-1.pdf>.

11. 予測波作成者コメント

今回想定東南海地震の地震動予測に、経験的グリーン関数として使用した記録(9月8日3時36分MJ 5.5)は、K-NET 観測点等の場合、その記録長は加速度震動レベルによって決められているため、60-100 秒程度で、やや長周期の速度震動等に顕著になる後続動が過小評価になっている可能性があります。

評価地点のいくつかでは最大加速度で1gを越える点もあり、K-NET 観測点情報による浅部地盤構造からみて、経験的には非線形応答をしている点もあると考えられ、評価者の指摘のように、本評価では過大評価をしている可能性があります。

土方広帯域波概説文(案)

2006年1月20日作成

2006年3月31日追記

畑山・武村

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

●想定地震

中央防災会議(2001)による東海地震、地震モーメント 1.3×10^{21} Nm (Mw8.0)

●強震動予測地点

関東平野内の東京湾岸に立地する火力発電所7地点及び新宿の8地点である。

表1 予測対象地点

地点名	記号	東経	北緯	表層地盤の S波速度(m/s)	工学的基盤の S波速度(m/s)
品川	SNG	139.7564	35.6153	102	600
川崎	KWS	139.7617	35.5056	130	600
東扇島	HOG	139.7422	35.4872	100	700
横浜	YKH	139.6792	35.4683	140	600
千葉	CHB	140.1181	35.5589	120	600
姉ヶ崎	ANG	140.0286	35.4828	150	440
新豊洲	STY	139.7954	35.6458	130	380
新宿	SNJ	139.6954	35.6906	140	520

※緯度経度は日本測地系。

2. 予測波の作成目的と位置づけ

有効周期が4秒以上の長周期成分に限定された従来の想定東海地震関東平野提供波(土方波)に、周期4秒以下の短周期成分の予測結果を加えることによって、広帯域化したもの。予測波作成の狙いは、旧提供波と同様に想定東海地震発生時に最も起こりうる地震動を予測することであり、必ずしも上限の予測を意図したものではない。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

●手法の概要と特色

下表に示したようなハイブリッド法である。周期帯域毎に予測手法と地下構造モデルの有効性にきめ細かな配慮を行い、予測精度の向上を図っている。

表 2 強震動予測手法

周期帯域	予測対象における地点	
	東扇島	東扇島以外
9 秒以上	差分法	
5.5～9 秒	差分法により計算した要素地震波形を用いた波形合成法 ¹⁾	
1～5.5 秒	経験的グリーン関数法 ²⁾	経験的グリーン関数法に準ずる手法 ³⁾
1 秒以下		統計的グリーン関数法 ⁴⁾

1)アスペリティのサイズが大きい場合、理論的に差分法で計算してしまうとこの周期帯域では過小評価になってしまうことに配慮したもの。

2)要素地震は 1997 年 3 月の愛知県東部の地震(M5.8、深さ 41km)。

3)各地点における要素地震の観測波がないため、要素波は、東扇島の 1 次元地下構造モデルと東扇島地表記録から地震基盤波を推定した後、各予測地点の 1 次元地下構造モデルに則って推定した地表波としている。

4)東扇島の 1 次元地下構造モデルはこの周期帯域では有効ではなく、観測記録から地震基盤波を推定することは不可能と判断したことによる選択。

●予測波の適用範囲

地表と工学的基盤(2E)における水平 2 成分の地動加速度と地動速度が提供されている。表層地盤の S 波速度は表 1 に示す通り。また、工学的基盤と定義された地盤の S 波速度は表 1 に示すように予測地点により異なる。有効周期範囲の最短周期は東扇島を除き、統計的グリーン関数が一般的に適用されている 0.05 秒程度、東扇島は観測記録の信頼性から 0.167 秒(6Hz)である。一方、最長周期は 25 秒である。

4. 震源モデルについて

●どのような根拠で設定されているか？

中央防災会議(2001)による東海地震の断層モデルに基づき、曲面から平面に単純化したモデルを作成している。2 つのモデル(応力降下量一定、変位一定)のうち、応力降下量一定モデルを用いている。

●アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

準拠している中央防災会議(2001)では、全体の断層面を 3 つのセグメントに分割し、それぞれの内陸側と海側にアスペリティを 1 つずつ配置している(アスペリティの数は合計6つ)。2 つの破壊開始点(断層面中央、西側端部)のうち関東平野側に影響の大きな西側端部が用いら

れている。

5. 伝播経路モデル(いわゆる地盤構造)について

周期 5.5 秒以上の予測

関東平野の地盤構造以外では、Ichinose et al.(2003)による水平成層構造モデルを用いている。これは浜名湖周辺で発生した小地震の中伊豆における記録を説明できるように最適化した地下構造モデルであり、 $V_s 3.0\text{km/s}$ を超える地震基盤の上に厚さ 2km 前後の $V_s 2.3\text{km/s}$ 層があるモデルである。ただし、これが後続波を含めた地震動の評価に耐えられるものかどうかの見解は述べられていない。

経験的グリーン関数法による予測(周期 5.5 秒以下の東扇島)

要素地震は想定震源域の直近で発生したものであるため、伝播経路特性は妥当に評価できているものと考えられる。

経験的グリーン関数法に準ずる手法による予測(表 2)

上記に同じ。

統計的グリーン関数法による予測(周期 1 秒以下)

Sato et al.(1999)の関東平野 3 次元地下構造モデルにおける地震基盤以下の構造。Q 値は佐藤・他(1994)による周波数依存のもので、これは壇・他(2000)の統計的グリーン関数法による関東地震のシミュレーションでも用いられている。本予測における有効性・妥当性の程度は不明。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

● 深い地盤構造(工学的基盤以深)

周期 5.5 秒以上の予測

関東平野の深い地盤構造は Sato et al.(1999)による 3 次元地下構造モデルが用いられている。これは、小田原付近で発生した地震の際の関東平野における周期数秒の地震動を再現できるようにチューニングされたモデルである。なおQ値については後で詳しく説明する。

周期 5.5 秒以下の予測

予測地点近傍でアレー微動探査が行われている場合はその結果を、行われていない場合は Sato et al.(1999)の関東平野 3 次元地下構造モデルから抜き出したものを用いている。

● 浅い地盤構造

周期 5.5 秒以上の予測

差分法による計算は、表層地盤 $V_s=0.6\text{km/s}$ のモデルに対して行われており、浅い地盤の影響は考慮されていない。

周期 5.5 秒以下の予測

予測地点における PS 検層結果を用いている。Q は一律 25 としている。地盤の非線形挙動は考慮していない。

* 周期 5.5 秒以上の予測における伝播経路と深部地盤構造のモデルには、極めて大きな Q 値を与えている。これは、想定震源域付近で起きた地震の関東平野における観測波形の後続波を差分法により再現するためには、そのような値が適切であるという検討結果が得られたことによる。

* 経験的グリーン関数法に準ずる手法(表 2)における深部・浅部地盤の影響評価方法の精度検証は、東扇島と K-NET 浦安(予測対象地点ではない)における要素地震観測記録を用いて行われている。即ち、東扇島地表波から東扇島と K-NET 浦安における 1 次元地下構造モデルにより地震基盤波を介して計算した K-NET 浦安地表波を観測波と比較しており、応答スペクトルは倍半分の範囲で一致することを確認している。位相については、必ずしもよく合っているとは言えない。また、予測対象地点に対する同様の精度検証は、地震観測がないので行われていない。

* 統計的グリーン関数法による予測(周期 1 秒以下)での深部・浅部地盤モデルの精度検証は行われていない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

●長周期成分(周期 5.5 秒以上)

* 2003 年十勝沖地震(M8.0)時の K-NET 苫小牧での記録との比較がされている。姉ヶ崎での卓越周期は 10 秒であり、速度応答レベルは苫小牧に匹敵する $120\text{cm/s}(h=5\%)$ となっている。

●短周期成分(周期 5.5 秒以下)

* 予測波の地表最大加速度は、司・翠川(1999)の最大加速度距離減衰式から大きく外れない。

* 予測波の擬似速度応答スペクトルは、周期 2 秒以下では安中(1997)の距離減衰式から大きく外れない。

* 予測波から計算した計測震度は、宇佐美(1999)による 1854 年の安政東海地震の震度を若干上回る。

8. 予測波と設計用入力地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

特に行われていない。

9. 自由コメント

- * 現状の強震動評価においては、地下構造の情報不足、さらには震源過程の不均質さに関する情報不足などから、理論的にすっきりとした評価をすることはなかなか難しい。本評価はそれらの点をよくわきまえ、観測記録の情報や、経験的評価法の特性を利用して、結果の精度をできるだけ補償しようとしている点は、工学的な観点から評価できる。
- * 本件予測の最大の特徴は、周期 5.5～9 秒の帯域の予測を、差分法で計算した理論波形を要素波とする波形合成法により行っていることである。今回の場合のようにアスペリティが大きい場合には、理論的手法では、この周期帯域成分を過小評価してしまう恐れがある。これを避けるため、 ω^2 乗の震源スペクトルの相似側に基づく経験的グリーン関数法の考え方を理論グリーン関数に適用するという工夫を行ったものである。
- * 周期 5.5 秒以上の予測における伝播経路(成層構造と仮定)と深部地盤構造モデルには極めて大きな Q 値を与えている。こうすることにより、想定震源域近くで発生した 1997 年 3 月 16 日の愛知県東部の地震(M5.8、深さ 41km)の際の東京湾岸姉ヶ崎における長い震動継続時間の再現は可能となっているが、秦野での観測記録に見られる後続動は再現できていない。この秦野に見られる後続動は、震源域と伝播経路の 3 次元不均質性の影響(例えば駿河湾の影響)である可能性があり、これを的確に考慮すれば、極めて大きな Q 値というやや現実味に欠ける仮定は不要になるかもしれない。
- * 一般に震源近傍の地下構造は情報が少ないために簡単なものを仮定するケースが多いが、地震が発生する海溝そのものが特徴ある3次元構造をしており、プレート境界地震の地震動に、その影響がどの程度あるのかという検討は、今回の場合に限らず今後の課題であろう。
- * 経験的グリーン関数法では、要素地震として想定地震の地震規模に比してマグニチュードが 2 程度小さい地震を採用することが重要であるが、本計算でもこの点に配慮している。なぜこのような配慮が必要であるかについては、震源過程の不均質さと強震動の励起特性の関係をふまえて、今後解決しなければならない一般的課題である。
- * 東扇島以外の地点の周期 1 秒から 5.5 秒までの予測には、経験的グリーン関数法に準じた方法が用いられている。これは、各予測地点の要素地震波を東扇島地表観測波に基づいて作成するものであるが、その作成方法は必ずしも表面波部分に対して理論的に整合するものではない。本検討では、この作成方法の妥当性の検証は行われているが、その結果は、表面波が優勢な後続波部分についてはこの周期帯域では過小評価になると解釈できる。即

ち、本予測結果の周期 1 秒から 5.5 秒の帯域における後続波は過小評価になっている恐れがあると言える。

* 本ケースで使われた断層モデルは、統計的グリーン関数法によるシミュレーションにより 1854 年安政東海地震の震度[宇佐美(1999)]がほぼ説明できるようなものとなっている[中央防災会議(2001)]。それにもかかわらず、本予測波から計算した計測震度が、宇佐美(1999)の震度を若干上回ることについては、作成者は経験的グリーン関数法を採用したことにより統計的グリーン関数法では勘案されない後続動を評価したためだとしている。しかしながら、計測震度には周期 1 秒以下の地震動のほうが大きく影響し、後続動の影響は小さいものと考えられる。むしろ統計的グリーン関数法で仮定した地震基盤以浅の地下構造モデルの当該周期帯域における妥当性を検証すべきではないかと思う。

* 東海地震等南海トラフによる関東地域の長周期地震動予測のための差分法計算結果は、古村(2003)、翠川・他(2004)によっても示されている。予測地点が異なるため、直接比較はできないが、古村(2004)では東南海、東海地震時の地震動評価を行っており、6~8 秒で 80~90cm/s の応答レベルとなっている。翠川・他(2004)は東海地震を対象に長周期地震動評価を行い、10 秒で 230cm/s($h=2\%$)の応答レベルの地震動となっている。

* 予測結果の長周期帯域でのスペクトルレベルは、平均的には告示スペクトルと同等となっている。ただしいずれの地点でも共通に、周期 2~3 秒の卓越成分が顕著に現れており、超高層建物や免震建物の地震時応答に影響が大きいものと考えられる。この周期 2~3 秒の卓越の原因として、地震基盤からの高次の共振による増幅のほか、関東平野内での表面波伝播の影響も考えられる。しかし、経験的グリーン関数法に準ずる方法(表 2)が用いられた東扇島以外の地点における周期 2~3 秒の卓越は、東扇島で地震基盤相当の波を評価する際に仮定した地盤構造のミスマッチに起因するものである可能性も否定できない。

* 2004 年 9 月 5 日東海道沖の地震($M_j=7.4$)の際に K-NET 姉ヶ崎で記録された地震動の速度応答(減衰 1%)は周期 11.5 秒付近で卓越している。本予測結果でも姉ヶ崎(ANG)の速度応答(減衰 5%)は周期 10 秒付近で卓越しているが、当該地域において周期 10 秒程度の揺れが卓越することは観測事実からも支持される。

10. 参考文献

- 安中正・山崎文雄・片平冬樹:気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地震動及び応答スペクトル推定式の提案、第 24 回地震工学研究発表会講演梗概、53-80、1997
- 中央防災会議:東海地震に関する専門調査会、<http://www.bousai.go.jp/jishin/>

chubou/tokai, 2001

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・宮腰淳一・佐藤智美:統計的グリーン関数法による1923年関東地震(MJMA7.9)の広域強震動評価、日本建築学会構造系論文集、530、53-62、2000

古村孝志:深部地盤のモデル化と3Dシミュレーション、地震防災シンポジウム「地震防災と地盤—強震動予測のための地盤探査の現状と課題」講演論文集、pp.4-1-4-6、物理探査学会、2004.

土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下貢・早川崇・渡辺基史・佐藤俊明:東海地震の関東平野における長周期地震動予測、日本地震学会講演予稿集 2004 年度秋季大会、B020、2004

土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下貢・早川崇・渡辺基史・佐藤俊明:東海地震の関東平野における長周期地震動予測、海溝型巨大地震を考える—広帯域強震動の予測—シンポジウム論文集、pp.61-64、巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会、2005

土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下貢・早川崇・渡辺基史・佐藤俊明:関東平野における東海地震の広帯域強震動予測、準備中

Ichinose, G A., Thio, H. K., Somerville, P. G., Sato, T., and Ishii, T.: Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (M_s 8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. B10, 2497, 2003

翠川三郎・三浦弘之・山中浩明:東京で観測されたやや長周期地震動の特徴と高層ビルへの影響、パッシブ制振構造シンポジウム2004、東京工業大学

Sato, T., R. W. Graves, and P. G. Somerville, Three-dimensional finite difference simulation of long-period strong motion in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake (Mj 5.1) and the great 1923 Kanto earthquake (M_s 8.2) in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 579-607, 1999.

佐藤俊明・渡辺基史・早川崇:巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域ハイブリッド法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.521-526、2004

佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明:表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性、日本建築学会構造系論文集、462、79-89、1994

司宏俊・翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、523、63-70、1999

11. 予測波作成者コメント

本検討は、昨年度予測した周期 4 秒以上の長周期成分に加え、短周期成分を予測し広帯域地震動を作成したものである。

短周期を対象とした代表的な強震動予測手法には、「統計的グリーン関数法」と「経験的グリーン関数法」がある。HOG(東扇島)地点では、東海地震の震源域で発生した 1997 年 3 月の愛知県東部の地震(M5.8、深さ 41km)(以後、東海小地震)の観測記録が得られている。この観測記録を分析すると、周期1秒以上の帯域で実体波に加えて表面波と考えられる後続動が優勢であった。

周期1～5 秒付近は免震建物や超高層建物の固有周期に相当し、同周期帯域の強震動の振幅ならびに後続動を含む継続時間の正しい評価がこれら建造物の耐震性の検討に非常に重要である。そのための強震動予測手法として、実体波のみならず表面波も考慮できる理論的方法が考えられるが、現時点では地下構造のモデル化や計算機能力等の点から周期1秒までを理論的方法で評価することは困難である。そこで本検討では、記録がない評価地点では小地震の地震動を推定し「経験的グリーン関数法」を適用することを考えた。具体的には、HOG(東扇島)地点の一次元地盤構造を用いて東海小地震の記録を地震基盤まで戻し、距離の補正を行った後、他の評価地点の一次元地盤構造を用いて表面位置まで持ち上げることで小地震波形を算定することを考えた。このように、観測記録が存在しない評価地点に対しても、HOG(東扇島)地点の記録を補正することにより「経験的グリーン関数法」を適用し強震動を予測している点が本検討の特徴である。本予測方法を用いたことにより、免震建物や超高層建物の耐震設計に重要な周期1秒以上で、表面波が卓越した後続動が評価された予測波となっている。

本検討では、表面波を含む地震動に対し一次元地盤構造に基づいて小地震波形を推定する方法を採用したが、本方法の適用性に関しては未だ十分な検討がなされていない。この検討には、予測地震の震源域で発生した小地震記録、特に後続動を含む長い継続時間の記録が必要である。しかしながら現時点において、このような観測記録は非常に限られており、今後の蓄積を待つ必要がある。

以上

1. 想定地震と強震動予測地点・領域

想定地震： 想定新東海地震（東南海地震と東海地震が連動する 1854 年安政東海地震タイプを想定新東海と命名している）

地震モーメント： 4.0×10^{28} dyne·cm, マグニチュード： $M_w 8.3$

対象地点： 濃尾平野内

観測点 緯度 経度 （日本座標系表示）

名古屋駅（NST）35 度 10 分 0.8 秒 136 度 53 分 12 秒

水上出張所（SJB）35 度 3 分 0 秒 136 度 51 分 36 秒

2. 予測波の作成目的と位置づけ

愛知県設計用入力地震動研究協議会では、性能設計化に向けた設計者の取り組みと免震・制震建物の普及への一助を成すために、地域の地震環境と地盤環境を考慮した地震動策定を目指したプロジェクトを進めている。提供波は、このプロジェクトの一環として作成された、名古屋地域の設計用入力地震動のうち、想定新東海地震を震源とするものである。入力地震動の策定にあたっては、地震環境や地盤環境の地域性や強震動予測に関する最新の知見を可能な限り反映させて、想定される最も起こり得る地震動波形を作成することが目標とされている。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

・手法の概要と特色

震源モデルは、様々な経験的スケーリング則によって巨視的・微視的震源パラメータを積み上げるレシピの考えに則って構築されたアスペリティモデルである。破壊域、アスペリティ位置は、地球物理学的知見に依って設定されている。

地震動計算のターゲット地域である濃尾平野について、あらゆる探査データをコンパイルし、その詳細な 3 次元地下構造をモデル化している。

地震動計算には、「ハイブリッド合成法」を用いている。長周期成分は、想定断層面上で小地震相当波形を計算し、経験的グリーン関数法の足し合わせ方法に沿って足し合わせる。この際、広い断層面をカバーするために、4 つの異なる震源位置を設定して、小地震相当波形を計算し、それらの周辺のアスペリティ及び背景領域の震源モデルをおのおのの小地

震記録を用いて足しあわせる。一方短周期成分は、統計的グリーン関数法により計算した小地震相当波形の短周期成分を経験的グリーン関数法の足し合わせ方法に沿って足し合わせる。こちらは、広い断層面をカバーするために2つの震源位置を設定し、距離の違いは統計的グリーン関数法のエンベロープ形状に反映させる。これらをハイブリッドする（佐藤・他、2006）。一般にハイブリッド合成法（佐藤・壇、2001）と呼ばれている方法では、長周期成分の計算は、断層面全体の寄与を理論的方法で一気に計算し、上述の「ハイブリッド合成法」のように小地震波形を作ってから経験的グリーン関数の足し合わせ方法に沿って足し合わせるといような作業と違うことに注意する必要がある。M8クラスの地震に対して特性化震源モデルを用いた場合、理論的方法で断層面全体の寄与を一気に計算した場合、周期2,3秒から10秒程度までの中周期帯域を過小評価することが指摘されている（佐藤・他、2004, 佐藤・他、2005）。今回ハイブリッド合成法で用いた長周期成分の計算方法ではこの問題の解決が図られている。

- ・有効周期帯域

0.1-10 Hz

- ・予測地点の最表層のS波速度

提供2地点の最小S波速度は100 m/s（SJB地点の最表層）。

- ・予測成分（水平, 上下）

水平2成分^{*3}

4. 震源モデルについて

- ・どのような根拠で設定されているか？それは ω^{-2} モデルになるように考慮されているか？

過去の東南海・南海地震の震源断層に関する最新の知見、震源パラメータに関して得られている経験則に加え、過去の地震の震度分布を参考に、震源パラメータが設定されている。破壊域については、1944年の東南海地震の震源断層モデル(菊地・他、1999)の深さ10-30km程度の範囲と、微小地震のメカニズムから推定される静岡県下の固着域(Matsumura, 1997)を合わせた部分としている。

後述のアスペリティサイズの設定を踏まえ、理論的な地震動計算手法によって震源スペクトルの経験則（ ω^{-2} 則）を実現できる周波数範囲を考慮し、ハイブリッドの接続周波数を決めている。

- ・過去の地震の震源モデルに基づく平均的關係（全体像：地震モーメントと破壊面積，地震モーメントと短周期レベルとの關係など，不均質性：地震モーメントとアスペリティ総面積との關係）とどのような關係となっているか？

地震モーメントと破壊面積：金森・編（1991）の、海溝付近の地震に関する地震モーメントと破壊面積の平均的な關係式に従う。

地震モーメントと短周期レベルとの關係：壇・他(2001)の経験則に従う。ただし、経験的な關係による平均値とその2倍の値を検討したが、最終的な予測地震動結果の

検証により、平均値の2倍のほうが妥当と判断し、この値を用いた。

地震モーメントとアスペリティ総面積との関係：石井・他（2000）が震源モデルの統計解析により抽出した関係に従う。

・アスペリティ位置や破壊様式の設定方法について

アスペリティ位置は、1944年東南海地震の多重震源モデル（菊地・他、1999）と静岡県下の固着域（Matsumura, 1997）を参考に設定。破壊は、破壊域の西縁の深部で始まり東方へ伝播するものとする。破壊は同心円的に広がるが、東南海セグメントと東海セグメントの継ぎ目で同心円破壊が途切れ、東海セグメントの西縁深部でまた一から始まるよう設定されている。破壊伝播速度は、2.83 km/s。

・ハイブリッド法の場合、接続周期付近での落ち込みに配慮されているか？

明示的に配慮されているわけではないが、3.における方法により考慮されている。

5. 伝播経路モデル（いわゆる地殻構造）について

・どのような根拠（既往の文献、調査情報等）で設定されているか？

フィリピン海プレートの速度構造：Nakanishi et al.(1998)

フィリピン海プレートの上端深さ：山崎・大井田（1985）

フィリピン海プレート、海洋性マンツルの密度：Nakanishi et al.(1998)

フィリピン海プレートのQ値：中村・植竹（1999）

コンラッド面・モホ面深度：Zhao et al.(1992)

下部地殻の速度構造：Aoki et al.(1972)、Ikami (1978)

上部地殻の速度構造：山口・他（1999）、愛知県（2000）、正木・他（1982）、Ukawa and Fukao(1981)

上部マントル・下部地殻の密度：Asano et al.(1985)

上部地殻の密度：渋谷・他（2000）

上部・下部地殻のQ値：Iwasaki et al.(1994)

Q値（統計的グリーン関数法で用いる）：田居・他（1994）

・過去の中小地震の波形から推定されている、あるいは検証されているか？

地殻構造、および、次項の深部地盤構造モデルを使って、2000年10月三重県南部の地震（M5.7）をモデル化している。その結果、2秒以上の長周期成分の振幅レベルや包絡形状の再現性は良く、モデルの妥当性を確認できたとしている（早川・他、2004）。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

・3次元盆地構造がモデル化されているあるいはその影響が加味されているか？

濃尾平野の3次元地盤構造が長周期成分の計算に用いられている。

・どのような根拠（地下構造探査や既往の文献等）で設定されているか？

同協議会が作成した濃尾平野の深部地盤構造モデル（早川・他、2002；福和・他、2002）

が用いられている。

- ・過去の中小地震の波形に基づきモデル化がなされている、あるいは検証されているか？

濃尾平野の西縁で起こった小地震のモデル化が行われている。また、微動、及び、自然地震の H/V スペクトルのピーク周波数と、Rayleigh 波基本モードの理論の H/V スペクトルのピーク周期を比較することによっても速度構造モデルの検証が行われている（早川・他、2002）。

- ・浅い地盤構造（工学的基盤より浅部）増幅の影響は考慮されているか？地盤非線形性が考慮されているか？

計算地点での浅層地盤構造が、PS 検層や室内土質試験結果を基にモデル化されている。地盤の非線形性が、逐次非線形地盤応答解析法により考慮されている。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

- ・検証の方法と検証結果

予測地震動の計測震度値に関して、1854 年安政東海地震と 1944 年東南海地震の震度分布（地震調査研究推進本部、1998）との比較がおこなわれ、これらがほぼ再現されている。工学的基盤での予測地震動を、経験的距離減衰式（Fukushima and Tanaka, 1991；安中・他、1997）と比較し、経験式のばらつきの範囲内で整合していることを確認している。

また、2004 年 9 月の東海道沖の地震とその前・余震の観測記録と、擬似速度応答スペクトルを比較している。震源が異なるため厳密な比較にはならないが、新東海地震の予測波と東海道沖の地震の観測波のスペクトル比は、応答スペクトルの経験式（Takahashi, 2000）の対応する規模のスペクトルの比とおおよそ整合することを確認されている。これは、予測波の伝播経路、サイト特性の評価の妥当性を支持するものである。

堆積層構造や地殻構造のモデル化に関する検証は、前述の通りである。

- ・予測波のばらつきの検討の有無

なし。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討

- ・計用地震動や設計用スペクトルとの比較の有無

建築基準法の告示スペクトルとの比較を示している。想定新東海地震の強震動波形から得られる応答スペクトルは、稀に発生する地震動の告示スペクトルをほぼ全周期領域で上回っている。また、極めて稀に発生する地震動の告示スペクトルに対してはほぼ全周期領域で下回っているが、極限られた周期帯で若干上回っている部分もある。

- ・予測波を用いた応答計算事例の有無

有、しかし、非公表。

9. 自由コメント

計算モデルの定性的、定量的な検討が緻密に実施されており、その精度から鑑みて十分に精度の高い結果が得られているものと考えられる。

10. 参考文献

- 愛知県（2000）：平成12年度濃尾平野地価構造調査，
http://www.pref.aichi.jp/bousai/ugstruct_h12.html
- 安中・他（1997）：気象庁87型強震計を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，
第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164.
- Aoki et al.(1972) : Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observations, J. Phys. Earth, 20, pp.197-223.
- Asano et al.(1985) : Crustal structure in the Northern part of the Philippine Sea Plate as derived from seismic observations of Hatoyama-off Izu peninsula explosions, J. Phys. Earth, 33, pp.173-189.
- 壇・他（2001）：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，545, pp.51-62.
- Fukushima and Tanaka (1991) : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11.
- 福和・他（2002）：濃尾平野の地盤調査とそのモデル化，月刊地球，号外No.37, pp.108-118.
- 早川・他（2002）：愛知県名古屋市を対象とした設計用地震動策定のための地下構造のモデル化（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, pp.131-132.
- 早川・他（2004）：巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域ハイブリッド法(その2)，日本建築学会大会学術講演概要集，構造II，pp.523-524.
- Ikami (1978) : Crustal structure in the Shizuoka district, central Japan as derived from explosion seismic observations, J. Phys. Earth, 26, pp.299-331.
- 石井・他（2000）：強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出，日本建築学会構造系論文集，527, pp.61-70.
- Iwasaki et al.(1994) : Precise P and S wave velocity structures in the Kitakami massif, Northern Honshu, Japan, from a seismic refraction experiment, J. Geophys. Res., 99, pp.22187-22204.
- 地震調査研究推進本部（1998）：日本の地震活動<追補版>.
- 金森・編（1991）：地震の物理，岩波書店.
- 菊地・他（1999）：気象庁強震記録による1944年東南海地震の震源過程2，日本地震学会1999年秋季大会，A57.
- 正木・他（1982）：名古屋地域の深部地盤構造II，第2回名古屋鍋田爆破および第1回豊

- 橋田原爆破実験, 愛知工業大学研究報告, 17B, pp.159-171.
- Matsumura (1997) : Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface, *Tectonophysics*, 273, pp.251-261.
- 中村・植竹 (1999) : 強震波形を用いたスペクトル領域での三次元減衰構造及び地盤増幅インバージョン, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.167-168.
- Nakanishi et al. (1998) : Detailed subduction structure across the eastern Nankai Trough obtained from ocean bottom seismographic profiles, *J. Geophys. Res.*, 103, pp.27151-27168.
- 佐藤・壇 (2001) : 免震構造設計指針, 日本建築学会, pp.263-274.
- 佐藤・他 (2004) : 巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域ハイブリッド法 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.521-526.
- 佐藤・他 (2005) : 巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域ハイブリッド法, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集, 土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会, 2005年2月19日土木学会講堂, pp.55-60.
- 佐藤・他 (2006) : 愛知県設計用入力地震動研究協議会による想定新東海地震に対する強震動予測, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集, 土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会, 2006年2月18日土木学会講堂, pp.101-107.
- 渋谷・他 (2000) : 四国東部の地殻および最上部マントルのS波速度構造ー石井観測点のレシーバ解析によりフィリピン海スラブを検出する試み, 日本地震学会講演予稿集, B58.
- Ukawa and Fukao (1981) : Poisson's ratios of the upper and lower crust and the sub-Moho mantle beneath central Honshu, Japan, *Tectonophysics*, 77, 233-256.
- 山口・他 (1999) : 名古屋市山王における温泉ボーリング孔を利用した地震観測 その(2) 物理検層結果について, 物理探査学会第101回学術講演論文集, pp.230-234.
- 山崎・大井田 (1985) : 中部地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状, *地震*, 38, pp.193-201.
- Zhao et al. (1992) : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands, *Tectonophysics*, 212, pp.289-301.

11. 著者コメント

本プロジェクトにおける予測地震動は、名古屋市を中心とする地域において、一般構造物と免震・制震構造物に対する設計用地震動策定の基礎資料として利用することを目的としている。このため、地震動策定においては、周期0.1秒から10秒程度の広帯域を対象とすること、地域性を考慮した上で、最も起こりえる平均的な地震動を作成する、という基本方針に基づい

ている。広帯域の地震動計算手法としては、ハイブリッド合成法を用いている。ここで、想定新東海地震の地震動計算においては、次のような工夫を行った。つまり、特性化震源モデルを用いた M8 クラスの地震の理論計算に内在される、周期 2, 3 秒以上の中周期帯域を過小評価する問題点を、理論グリーン関数の計算とそれを用いた波形合成により解決を図っている。

地震動予測結果の妥当性は、過去の東海・東南海地震の震度や液状化の有無との整合、距離減衰式との比較、観測記録との比較などにより判断した。予測結果が妥当でないと判断された場合には、再びパラメータ（具体的には加速度震源スペクトルの短周期レベル）をばらつきの範囲内で見直し、それを用いて再計算を実施した。このようなサイクルを複数回繰返し、最終的な地震動を設定しているところに、本検討の特徴がある。ただし、検証ターゲットの一つである観測記録との比較は、定性的な検証に留まっているため、今後の観測記録の蓄積を待つ必要がある。

これまでは、地震動作成の基本方針に則って、地域性を考慮した上で、最も平均的な地震動を 1 ケースだけ予測している。しかし、各種パラメータのばらつきが予測結果に与える影響の検討は必要であり、今後の課題としたい。また、深部および浅部の地下構造についても、今後の調査データを用いたチューニングを継続的に行う必要があると考えられる。

以上

概説文:ダムサイトにおける強震動評価(野津厚)に関する概説

京都大学防災研究所 岩田知孝
独立行政法人 消防研究所 畑山 健

1. 想定地震と強震動予測地点・領域 下表の通り.

表 対象地点と対象地震

対象ダム	所在地	予測対象地点	東経	北緯	想定地震
魚梁瀬ダム	高知県安芸郡馬路村	ダム基盤地震計設置点 ダム底部監査廊地震計設置点	134.1167	33.5833	東南海・南海地震連動
池原ダム	奈良県吉野郡下北山村	置点 ダム近傍 K-NET 観測点	135.9667	34.0500	東南海・南海地震連動
二津野ダム	奈良県吉野郡十津川村	NAR009(十津川)[地表]	135.7830	33.9000	東南海・南海地震連動
佐久間ダム	静岡県磐田郡佐久間町	ダム基盤地震計設置点	137.8000	35.1000	東海地震

2. 予測波の作成目的と位置づけ

上記ダムサイトにおける巨大地震時の強震動の予測を具体的に行ったもの。震源断層モデルは中央防災会議で検討されたものを用い、伝播経路特性とサイト特性は観測記録に基づく経験的評価結果によりその影響を考慮していることから、将来発生し得る強震動を忠実に予測しようと努めた結果であり、必ずしも上限の予測を意図したものではないと言える。

3. 強震動予測手法の特徴と予測波の適用範囲

統計的グリーン関数法を基調とする古和田・他(1998)の方法。この方法では、波形合成の際に足し合わせる小地震の波形(統計的グリーン関数)の作成において、予測対象地点等における過去の地震記録から得られる経験的なサイト増幅・位相特性を考慮する。経験的サイト位相特性は群遅延時間の解析により評価する。有効周波数範囲は、0.3—10Hz で、予測成分は水平動2成分である。

4. 震源モデルについて

・東南海・南海地震連動型

中央防災会議「東南海・南海地震に関する専門調査会」において検討された想定東南海・南海地震に対する震源モデルである。予測波の計算においては、背景領域の寄与を無視しうるとして、9つのアスペリティ領域からの寄与によって評価している。

・東海地震

中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」において検討された想定東海地震に対する震源モデルのうち、6つある各アスペリティで応力降下量一定のモデルを採用している。中央防災会議では破壊開始点を2ケース行っているが、本報告では破壊開始点1(2ケースのうち対象評価地点での地震動の大きいほう)の結果を示している。東海地震の予測波作成においては、アスペリティの他、背景領域からの寄与も考慮に入れている。

5. 伝播経路モデル(いわゆる地殻構造)について

統計的グリーン関数の作成において考慮する伝播経路のQ値は、観測波形を用いて推定された佐藤・巽(2002)による西日本海溝型(東南海・南海地震)、東日本海溝型(東海地震)の値をそれぞれ採用している。

6. 深い地盤構造及び浅い地盤構造の取り扱いについて

地盤構造の影響は予測対象地点等における過去の地震記録から得られる経験的なサイト増幅・位相特性により考慮している。ダムサイトにおけるサイト増幅特性の評価には、野津・長尾(2005)がダム周辺のK-NET観測点について算定している経験的なサイト増幅特性を援用している。ダム近傍にK-NET観測点がある池原ダムと佐久間ダムのサイト増幅特性については、いくつかの中小地震記録からK-NET観測点に対するダム観測点のスペクトル比を計算し、野津・長尾(2005)の算定結果に乗じることにより評価している。近傍にK-NET観測点がない魚梁瀬ダムのサイト増幅特性については、周辺のK-NET観測点のいくつかの中小地震記録と野津・長尾(2005)の算定結果から地震基盤入力地震波スペクトルを推定し、ダムにおける観測スペクトルをそれと除すことによって評価している。予測対象地点がK-NET観測点NAR009である二津野ダムのサイト増幅特性については、NAR009に対する野津・長尾(2005)の算定結果を用いている。経験的な位相特性は、予測対象地点の観測記録に対する群遅延時間の解析結果に基づいて評価している。表層地盤の非線形挙動は、堅固な地盤を対象としているとして考慮していない。

7. 予測波の妥当性の検証がなされているか？

東南海・南海地震の予測については近傍の参照に用いたK-NET観測点での想定地震に対する予測を行い、過去の地震の震度との対応を見ることで検証を行っている。東海地震については、野津(2005)によって近傍の参照地点に関する予測が妥当であることが示されている。

8. 予測波と設計用地震動や設計用スペクトルとの対応関係や建物応答に関する検討特に実施されていない。

9. 自由コメント

本予測波作成に用いられた手法については、(i)地震観測が行われている場所であること、(ii)しかしながら経験的なグリーン関数法において必要となる想定震源域で発生した中小地震の記録は得られていないという条件の下では、妥当なものが選ばれていると言える。即ち、本予測波は、震源から予測対象サイトまでの伝播経路(いわゆる地殻構造)、深い地盤構造、浅い地盤構造の影響を予測対象サイトにおける実地震記録から得られる経験的な特性によって評価する方法により作成されたものであり、本予測結果は、地下構造モデルの具体的設定が必要な方法により作成された予測結果に比べて説得力を有する。とはいえ、以下の2点については注意を要する。

1)予測地震動の振幅スペクトルは、採用した経験的なサイト増幅特性に大きく依存し得ること。

本予測手法で必要とされる地震基盤に対するサイト増幅特性の評価は、基準設定のやり方次第で大きく結果が変わることがあるなど難しい点があり、その評価結果の精度の検証(地震基盤に対する増幅率になっているか)も簡単ではないのが実情である。

2)予測地震動の位相特性は、採用した経験的なサイト位相特性に依存し得ること。

本予測波作成におけるサイト位相特性の考慮は、「震源距離が小さい小地震であること」という選定方針はあるものの任意に選んだ1つの地震記録に基づいて行われている。このサイト位相特性の考慮に用いる地震を変えれば予測波の位相特性も変わることはあり得る。

10. 参考文献

野津厚(2005):経験的なサイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例,海溝型巨大地震を考える一広帯域強震動の予測—シンポジウム論文集,土木学会・日本建築学会,99-106.

野津厚,長尾毅(2005):スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性,港湾空港

技術研究所資料(刊行予定)

古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎(1998): 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 514, 97-104.

中央防災会議(2001): 「東海地震に関する専門調査会」報告

中央防災会議(2003): 「東南海, 南海地震等に関する専門調査会」報告

11. 予測波作成者コメント

本予測波に関連して, 9. で指摘されているような課題が残されているため, 注意してお使いいただきたいと思えます。

9. の 1) で指摘されているサイト増幅特性の客観性の問題(基準観測点の選定方法によって結果が変わるのではないか, 地震基盤に対する増幅率になっているか)は重要な問題です。野津・長尾(2005)では, この問題を完全に回避できているとは言い難いですが, サイト増幅特性の客観性向上に寄与する目的で, 現段階でとりうるいくつかの方策を講じてはいます。これについてこの機会に紹介したいと思います。以下の記述が, サイト増幅特性の信頼性を推し量る上で参考になれば幸いです。

野津・長尾(2005)では, 全国を東北・北海道, 関東, 中部, 近畿, 中国・四国, 九州の6つの地域に分け, それぞれの地域で, 港湾・空港, K-NET, KiK-net, 関西地震観測研究協議会の観測点を対象にスペクトルインバージョンを行っています。このうち, 今回, ダムサイトでの強震動評価には中部, 近畿, 中国・四国の結果を用いました。地震の規模は M4.5 以上 M6.0 未満とし, Lg 波等, 震源に由来する表面波の影響を可能な限り避けるため, 震央距離 150km 以上の記録は用いませんでした。また, 表層地盤の非線形挙動の影響を避けるため最大加速度 100Gal 以上の記録は用いませんでした。

中部地方を対象とした解析では, 中部地方の 316 地点に近畿地方の 44 地点と関東地方の 108 地点を加えた計 468 地点を対象としています。合わせて 240 の地震による 5401 の記録(10802 の水平成分)を解析に使用しました。解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-1 に示します。近畿地方を対象とした解析では, 近畿地方の 194 地点に中国・四国地方の 75 地点と中部地方の 153 地点を加えた計 422 地点を対象としています。合わせて 72 の地震による 3354 の記録(6708 の水平成分)を解析に使用しました。解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-2 に示します。中国・四国地方を対象とした解析では, 中国・四国地方の 243 地点に九州地方の 56 地点と近畿地方の 106 地点を加えた計 405 地点を対象としています。合わせて 63 の地震による 3092 の記録(6184 の水平成分)を解析に使用しました。解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-3 に示します。

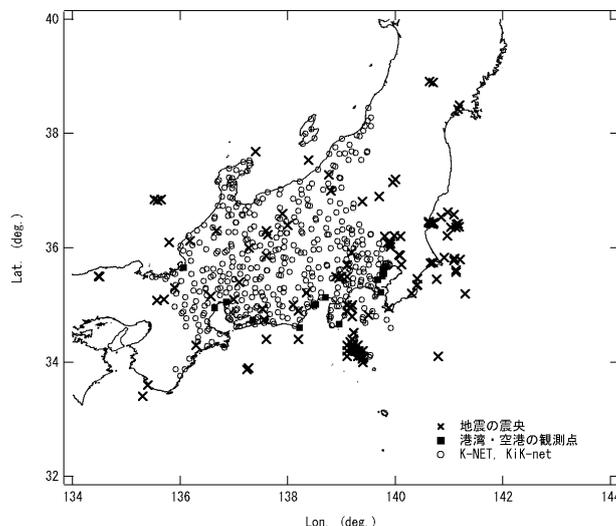


図-1 中部地方の解析に用いた地震の震央と観測点の位置

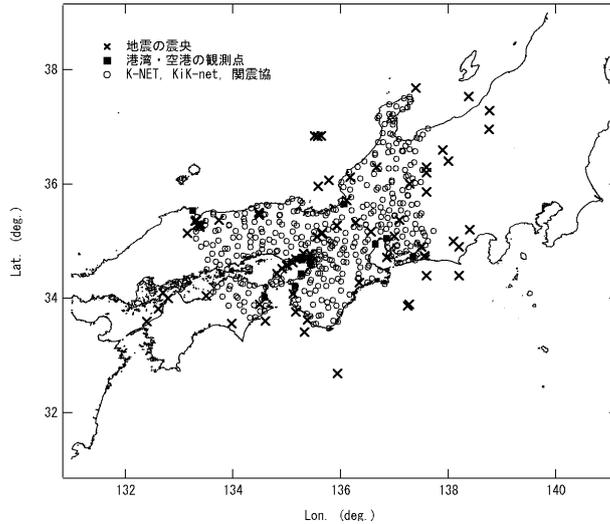


図-2 近畿地方の解析に用いた地震の震央と観測点の位置

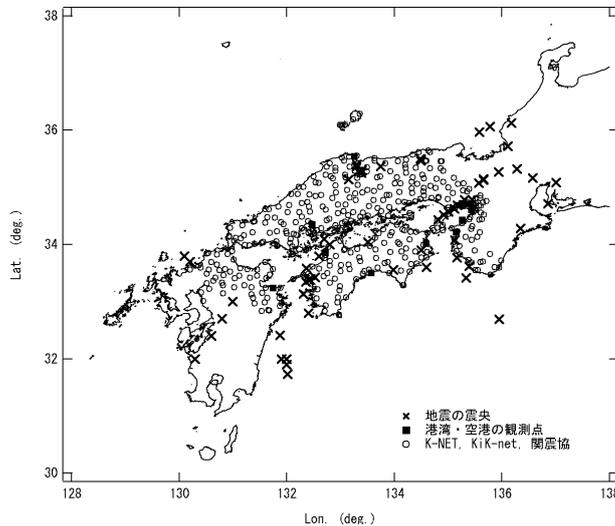


図-3 中国・四国地方の解析に用いた地震の震央と観測点の位置

基準観測点の選定は次のように行っています。まず、予備的解析の結果に基づき、周波数ごとにサイト増幅特性の最も小さい地点を基準観測点として選定します。ただし、軟弱地盤において高周波数領域の振幅が小さくなることを考慮し、基準観測点として採用する地点を表層付近のS波速度が十分に大きい地点に限定します。具体的には地表から10mまでの平均S波速度が400m/s以上の地点から基準観測点を選択することとしました。また、個々の記録の特性が結果に大きく影響することを避けるため、複数(5地震程度)の観測記録が得られている地点に限定しました。

このような考え方で選定された基準観測点が妥当なものであるかについて検討するための一つの方法として、実際にインバージョンを行った結果得られる震源特性(震源スペクトル)の低周波部分から算定される地震モーメントと、CMT解(ここでは防災科学技術研究所のF-netによるもの)の地震モーメントとの比較を行いました。図-4に震源スペクトルの算定結果を示します。これを見ると、低周波側には周波数の自乗に比例する部分が見受けられ(規模の大きい地震では0.2Hz付近、規模の小さい地震では1Hz付近)、概ね ω^{-2} モデルに従うものとなっていることがわかります。図-4に示す震源スペクトルから、変位スペクトルの低周波側のフラットレベル U_0 を読みとり、次式により地震モーメントを算定しました。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3}{R_{\theta\phi} \cdot PRITIN} U_0 \quad (1)$$

ここに $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数であり、ここでは全方位の平均値 0.63 としました。PRITIN は地震波のエネルギーの水平 2 成分への分配を示す係数ですが、ここではもともと水平 2 成分のベクトル和を対象として解析を実施しているため PRITIN = 1 としました。図-5 に地震モーメントの比較結果を示します。いずれの地方でも、震源スペクトルの低周波部分から算定された地震モーメントと F-net による地震モーメントはある程度整合しており、したがって、少なくとも、地震モーメントの算定に関わるような低周波数成分(対象とした地震のコーナー周波数から判断すると概ね 1Hz よりも低周波側)に関しては、地震基盤からの増幅率に近いものが算定されていると考えています。

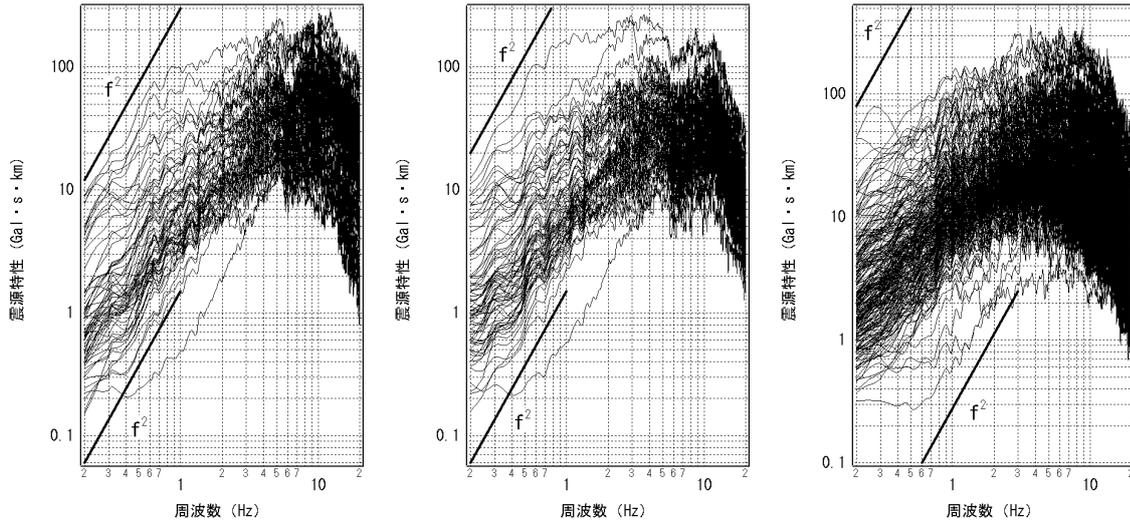


図-4 震源スペクトルの算定結果(左から中国・四国, 近畿, 中部)

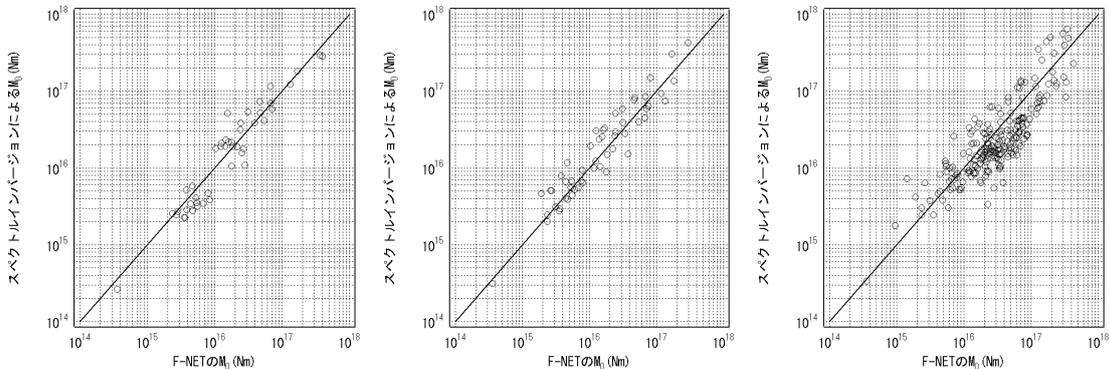


図-5 スペクトルインバージョンで得られた地震モーメントと F-net の地震モーメント
(左から中国・四国, 近畿, 中部)

次に、中部地方で算定されたサイト増幅特性のうち、想定東海地震の震源近傍である K-NET の 12 地点のサイト増幅特性を利用し、2001 年 4 月 3 日静岡県中部地震(M5.3)の強震動シミュレーションを実施し、その結果を観測スペクトルと比較することにより、サイト増幅特性の妥当性を検討しました。この検討が有意義であるとする理由は、強震動シミュレーションに利用できるアスペリティモデル(森川他, 2002)が、サイト増幅特性とは独立に提案されているためです。図-6 に結果を示します。合成波スペクトルと観測波スペクトルの一致は完全とは言えませんが、1Hz より低周波側では良く一致しており、また、高周波側でも、観測スペクトルのレベルはある程度再現されていると考えています。

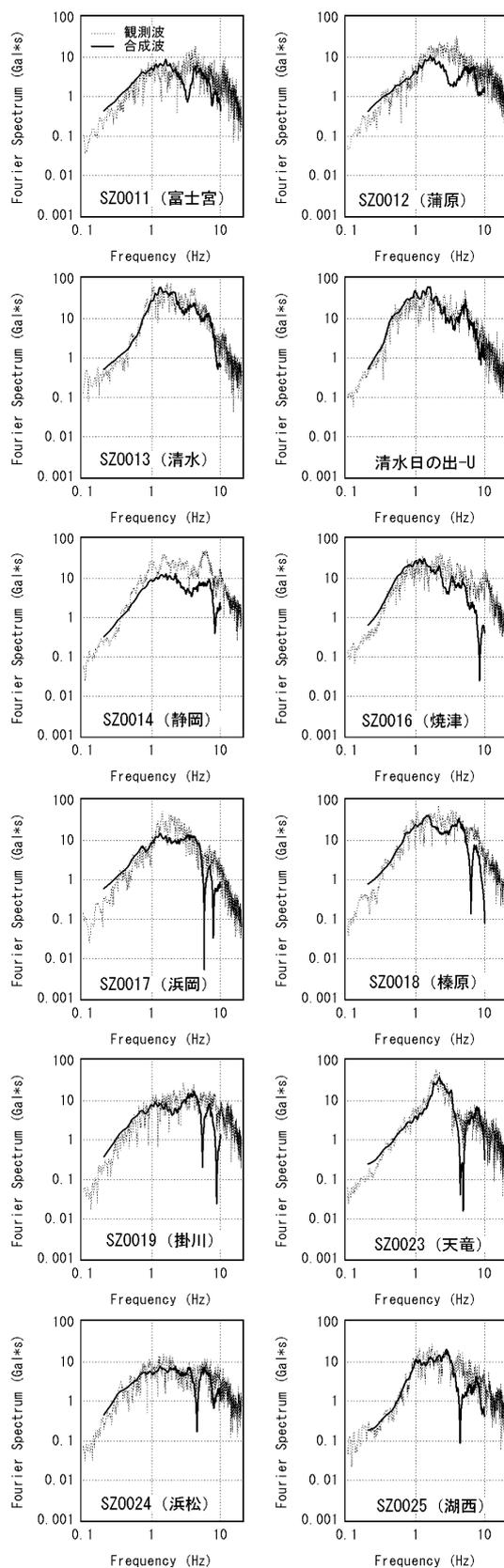


図-6 サイト増幅特性を利用した2001年4月3日静岡県中部の地震(M5.3)の強震動シミュレーション

最後に、異なる地方で算定されたサイト増幅特性が互いにどの程度一致しているか検討しました。その結果を図-7および図-8に示します。中部地方-近畿地方の5Hz以上の帯域での接続に問題が残されていますが、それ以外は、異なる地域での算定結果は互いに良く一致していると考えられます。

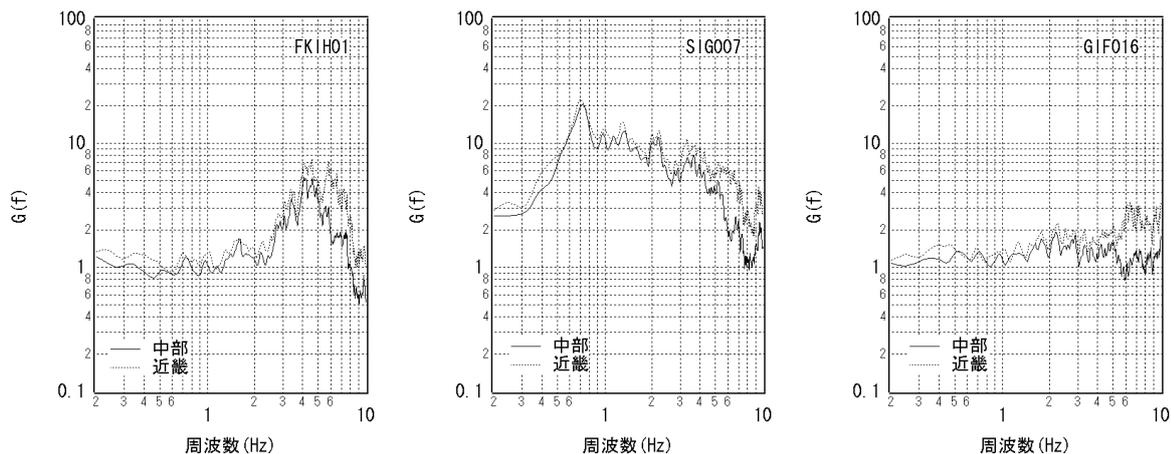


図-7 中部地方の解析結果と近畿地方の解析結果の接続状況

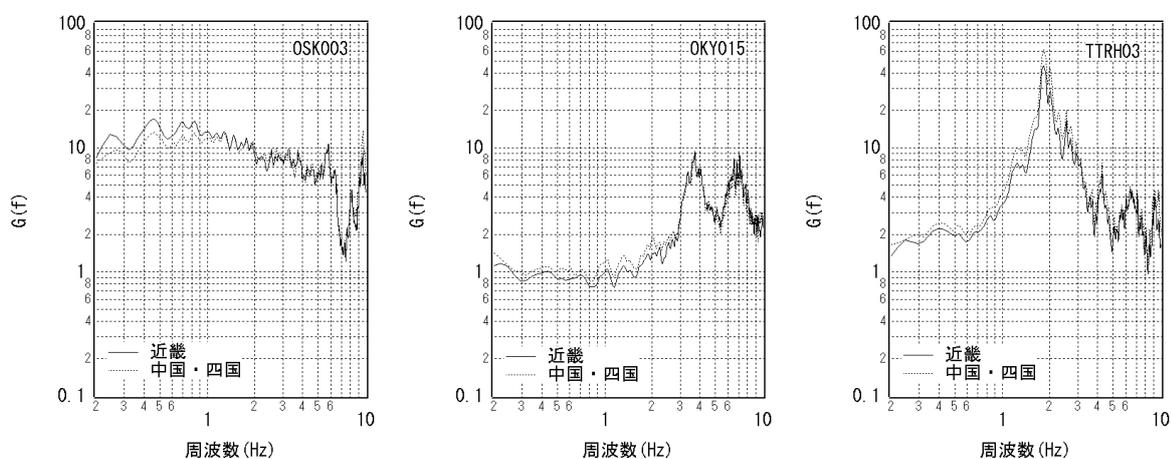


図-8 近畿地方の解析結果と中国・四国地方の解析結果の接続状況

参考のため、関西地震観測研究協議会の観測点である KBU と DIG において算定されたサイト増幅特性を鶴来他(2002)のものと比較して図-9 に示します。KBU におけるサイト増幅特性は良く一致しており、DIG におけるサイト増幅特性は野津・長尾(2005)の方が大きな値を示しています。

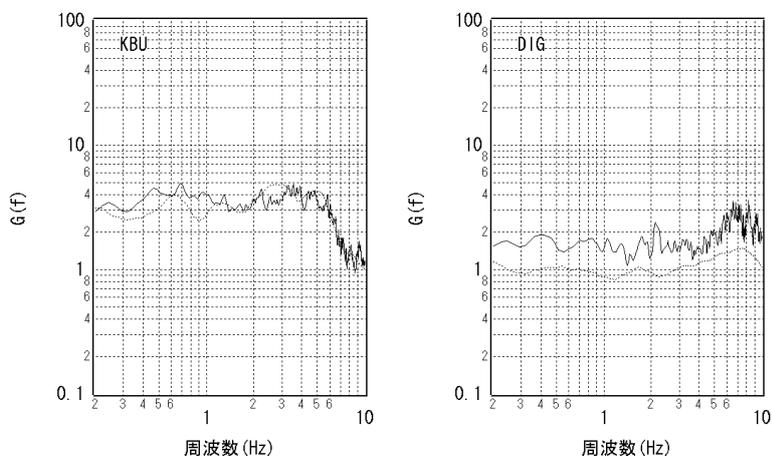


図-9 関西地震観測研究協議会の KBU と DIG におけるサイト増幅特性
実線は野津・長尾(2005)、破線は鶴来他(2002)