

第33回地盤震動シンポジウム(2005)

地震動予測地図を考える

―地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)―

2005.11.18

社団法人 日本建築学会
構造委員会 振動運営委員会
地盤震動小委員会

ご案内

本書の著作権・出版権は（社）日本建築学会にあります。本書より著書・論文等への引用・転載にあたっては必ず本会の許諾を得てください。

コピーも私的利用の範囲を超えることは法律で禁じられています。

社団法人 日本建築学会

第33回地盤震動シンポジウム(2005)

地震動予測地図を考える

—地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)—

2005 年 11 月

編 集
著作人

社団法人 日 本 建 築 学 会

〒108-8414 東京都港区芝 5 丁目 26 番 20 号

TEL 03-3456-2051

FAX 03-3456-2058

<http://www.aij.or.jp/>

印刷所

株式会社 エーヴィスシステムズ

The 33rd Symposium of Earthquake Ground Motion (2005)

Revisit to Seismic Hazard Map

— How to Apply the Results of Earthquake Ground Motion Research
to the Seismic Design (Part 4) —

November 2005

Tokyo

The Research Subcommittees on the Earthquake Ground Motion

The Architectural Institute of Japan

第33回地盤震動シンポジウム(2005)

地震動予測地図を考える

－地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)－

目 次

1. 主旨説明	川瀬 博…………… 1
2. 地震動予測地図の事例紹介	
2-1 全国を概観した地震動予測地図について	藤原広行…………… 3
2-2 海溝型地震の震源モデルと首都圏の強震動評価 縦横一起・三宅弘恵・大大特Ⅰ研究グループ……………	19
2-3 内陸地殻内地震の強震動評価：上町断層系を例として 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・吉田邦一・吉見雅行……………	25
2-4 南海地震による近畿圏の強震動予測	釜江克宏・川辺秀憲…………… 35
【特別講演】	
福岡県西方沖地震の被害から見た耐震設計の課題 －地震地域係数の在り方－	多賀直恒…………… 41
3. 地震動予測地図の要素技術と耐震設計への活用	
3-1 擬似動的震源モデルによる予測強震動の距離減衰特性	三宅弘恵…………… 53
3-2 地震動のばらつき評価	池浦友則…………… 57
3-3 設計地震動への確率論的予測地図の活用と課題	石川 裕…………… 67
3-4 確率論的予測地図と地域係数	大川 出…………… 71
3-5 設計用入力地震動と地震動予測地図	野畑有秀…………… 77
4. 資料	
第32回地盤震動シンポジウム(2004)報告	吉村智昭…………… 85

The 33rd Symposium of Earthquake Ground Motion (2005)

Revisit to Seismic Hazard Map

— How to Apply the Results of Earthquake Ground Motion Research
to the Seismic Design (Part 4) —

TABLE OF CONTENTS

1 . Introduction	(Hiroshi Kawase)	1
2 . Reviews of Representative Seismic Hazard Maps		
2-1 National Seismic Hazard Maps of Japan	(Hiroyuki Fujiwara)	3
2-2 Source Modeling of Subduction-zone Earthquakes and Strong Motion Validation in the Tokyo Metropolitan Area	(Kazuki Koketsu, Hiroe Miyake, DaiDaiToku I Research Group)	19
2-3 Ground Motion Prediction of Crustal Earthquake : Uemachi Fault System as an Example	(Haruko Sekiguchi, Yuko Kase, Haruo Horikawa, Kunikazu Yoshida, Masayuki Yoshimi)	25
2-4 Strong Ground Motion Prediction in Kinki District for Nankai Earthquake	(Katsuhiro Kamae, Hidenori Kawabe)	35
【Special Lecture】		
Disaster of West off Fukuoka Earthquake and Related Topics of Aseismic Design — Optical Estimation of Local Seismic Effect —	(Naotsune Taga)	41
3 . Important Items of Seismic Hazard Maps and Perspective on Applying to Seismic Design		
3-1 Characteristics of Attenuation Relationships of Simulated Ground Motions Generated by the Pseudo-Dynamic Source Modeling	(Hiroe Miyake)	53
3-2 Prediction Error and Amplitude Variation of Strong Motions	(Tomonori Ikeura)	57
3-3 Application of Probabilistic Seismic Hazard Analysis to Determine Reference Earthquake Motions	(Yutaka Ishikawa)	67
3-4 Probabilistic Ground Motion Map and Seismic Zoning Coefficient	(Izuru Okawa)	71
3-5 Design Earthquake Ground Motion for Dynamic Analysis of Buildings and National Seismic Hazard Maps	(Arihide Nobata)	77
4 . Appendix		
The Report on the 32 nd Symposium of Earthquake Ground Motion	(Chiaki Yoshimura)	85

1. 主旨説明

第33回地盤震動シンポジウム(2005)の開催にあたって 主旨説明

The 33rd Symposium of Earthquake Ground Motion (2005) Introduction

川瀬 博*

Hiroshi KAWASE

At the beginning of the new decade of our continuous 30 years activity of the Committee of Earthquake Ground Motion last year, we have started a series of discussion on how to apply the results of our earthquake ground motion research to the seismic design. To make it clear what we have achieved and how we can transfer our state-of-the-art knowledge to broader range of users, we need to cover various issues of strong motion prediction and design ground motion specifications based on it. It should include, but not limited to, source studies, path attenuation, site effects, soil-structure interactions, and code provisions. This year we decide to discuss issues related to the seismic hazard map of Japan, which consists of two different approaches, namely probabilistic one and deterministic one. We expect to share our up-to-date information with researchers, engineers, and practitioners for broader application of the seismic hazard map to the anti-seismic design of buildings.

1. はじめに

地盤震動シンポジウムは第30回から、それ以前のように毎年度単発的にテーマを設定するのではなく、ある一つの大きなテーマに沿って研究成果・レビュー・議論を積み上げ、その蓄積をもとに関連分野に影響力を発揮しようと考え、その中期的な基本テーマとして「地盤震動研究を耐震設計に如何に生かすか」を選んでいく。その第一段として最初の年には「設計用地震動は工学的基盤で決められるか？」を主題として、そして一昨年度には「震源断層を考慮した設計用地震動評価：地域波策定の現状と将来展望」を主題として、様々な角度からの問題提起とそれを受けた活発な議論をしていただいた。昨年度には「表層地盤増幅」を取り上げ、「基礎構造系振動小委員会」に共催をお願いして、地盤震動研究の立場と相互作用を含む構造物の動的設計の立場から表層の地盤増幅をどう評価すべきかについて議論を深めた。

このように、最新の研究成果を如何に実際に役立てていくかという視点を導入したことにより、それまでよりもより広い分野の方々の関心を得ることができ、より多角的で有意義な議論がなされてきた。本年度のシンポジウムはこれまでと少し趣向を変えて、平成17年3月に地震調査研究推進本部（推本）がその6年間の調査研究成果の集大成として発表した「全国を概観した地震動予測地図」を正面に据えて、建築における地盤震動という観点からみたときの、その目的と概要、および工学的な意義を共有し、その特性・限界を把握しつつ最も有意義な活用法を議論しようと考えた。

2. 地震動予測地図と強震動予測

本編で詳しく解説されているのでここで紹介する必要はないのであるが、地震動予測地図は日本の多数の研究者がかわる全日本的体制で極めて学術的に進められてきた。その

主目的は現時点で我々が有する科学的知識を集大成する形で日本全国の地震動の揺れ（実際には震度）を評価しようとしたもので、全国を対象にした確率論的評価と頻度の高い特定の地震のシナリオ型詳細強震動予測とに分かれている。ただ、これも本文中に記述されているが、両者は現時点では融合されておらず、それは将来の検討課題となっている。

確率論的評価に関しては、古くは河角マップと呼ばれる歴史地震情報に基づいた地震危険度マップが作成されて以来、様々な研究者によって作成されてきた危険度マップと類似のものである。異なっているのは未だかつてない規模で実施された活断層調査や海溝性地震の活動度調査の情報が整理され反映されていることである。従って現時点でこの確率論的予測地図は最高の予測精度を有しているといえる。しかし、このプロジェクトが文部科学省を主体として進められてきた関係で、土木・建築の世界でこれをどのように有効活用していくかについては、関係者の努力にもかかわらず、これまで十分議論されてきているとは言い難い。

特に地盤震動の観点からは、設計用入力地震動の策定法に関する整理と研究推進が主要な課題であるが、それに関して推本では強震動評価部会およびその下の強震動分科会（いずれも主査は入倉孝次郎京大名誉教授）において議論が重ねられ、推奨予測手法が結果とともに提示されているので、地震動策定法について議論する上で大いに参照すべきと考えられる。

3. 話題提供と議論

以上のような背景と目的によって、地盤震動小委員会およびシンポジウム企画WGで議論し、今年度のシンポジウムを特別講演を含む3部構成とすることとした。まずPART1においては「地震動予測地図の事例紹介」と題して、まず推本の

* 九州大学大学院人間環境学研究院 教授・工博

Professor, Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

「全国を概観した地震動予測地図」について、その主担当である藤原弘行氏に少し時間をかけて解説していただいた後、発生が危惧されている3つの地震に関して最近実施された研究チームの方々から独自の強震動予測結果を報告していただくこととした。推本の強震動予測手法だけでなく、3者3様の予測手法を紹介してもらうことで、予測技術の現状を理解していただくことができるものと期待している。

午後に入って特別講演では、地震災害全般に造詣が深く、今年3月の福岡県西方沖地震においても独自の観点から調査されている福岡大学教授の多賀直恒先生に、恐らく1万年に1回かそれ以下の低頻度イベントであった福岡県西方沖地震での地震動と被害の関係から、地域係数のあり方に関する先生のお考えをご披露いただくことにした。

これら強震動予測および地震動予測地図の現状報告と実地震の被害に基づく問題提起を受けてPART2では「地震動予測地図の要素技術と耐震設計への活用」と題して、地震動予測地図を作成する上で利用している各要素技術の現状と課題、および予測地図を工学的に応用する場合の課題について

5名の方に話題提供いただくことにした。特に三宅弘恵氏と石川裕氏には確率論的アプローチと決定論的アプローチの融合に向けて有効な試論あるいは技術開発の一端をご紹介いただいております、今後の研究の方向に関する示唆に富んだご報告が聞けるものと期待している。

最後に総合討論として、以上の報告・基調講演をもとに、地震危険度と地域係数の問題や、設計に用いる地域波および告示スペクトルとの関係など、今後どのように予測地図の成果を耐震設計に活かすかについて、幅広く議論することとしたい。例年通り、各講演時間を少しずつ削らせていただき、これに1時間を確保しているのも、是非参加された皆さんからの活発な討論をお願いしたい。特に実際に実務に携わっておられる方々から生々しい問題提起の声をお聞かせいただきたいと願っている。これはそうした事実裏付けられた現場からの問題提起を今後の地盤震動小委員会の活動、特に「設計用地震動作成指針」の策定に向けた活動に反映させて行きたいからである。以上、参加者各位の積極的な参加を期待して主旨説明を閉じたい。

2. 地震動予測地図の事例紹介

全国を概観した地震動予測地図について

NATIONAL SEISMIC HAZARD MAPS OF JAPAN

藤原 広行*

Hiroyuki FUJIWARA

The Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP) of Japan published the national seismic hazard maps of Japan in March 2005, which was initialized by the earthquake research committee of Japan (ERCJ) on a basis of long-term evaluation of seismic activity, and on a basis of strong-motion evaluation. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), in the meantime, also promoted a special research project 'National Seismic Hazard Mapping Project of Japan' to support the preparation of the seismic hazard maps. Under guidance of ERCJ, we have carried out the study of the hazard map. The hazard maps consist of two kinds of maps. One is a probabilistic seismic hazard map (PSHM) that shows the relation between seismic intensity value and its probability of exceedance within a certain time period. The other one is a scenario earthquake shaking map (SESM). For the PSHM, we used empirical attenuation formula for strong-motion, which was followed the seismic activity modeling by ERCJ. Both of peak velocity on the engineering bedrock ($V_s=400\text{m/s}$) and on ground surface are evaluated for sites with approximately 1km spacing. The potential JMA seismic intensities on ground surface are also evaluated by using an empirical formula. For the SESMs, based on the source modeling for strong-motion evaluation, we adopted a hybrid method to simulate waveforms on the engineering bedrock and peak ground velocity. In this project, we developed an open web system to provide information interactively and retrievably, and named this system as Japan Seismic Hazard Information Station, J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>). We aimed to distribute a process of uncertainty evaluation and to meet multi-purpose needs in engineering fields. The information provided from J-SHIS includes not only results of the hazard maps but also various information required in the processes of making the hazard maps, such as data on seismic activity, source models and underground structure.

1. はじめに

「全国を概観した地震動予測地図」が、地震調査研究推進本部地震調査委員会により平成 17 年 3 月 23 日に公表された。「全国を概観した地震動予測地図」は、国が主体となって行った日本で初の全国を対象とした総合的な地震ハザード評価の取り組みとして位置づけられる。こうした取り組みが行われた背景は以下の通りである。

平成 7 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震は、6,400 名を超える犠牲者を出し、我が国の地震防災対策に関して多くの課題を残した。特に地震に関する調査研究に関しては、その研究成果が国民や防災機関に十分伝達される体制になっていないとの指摘がなされた。この地震の教訓を踏まえ、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、議員立法により、平成 7 年 7 月に地震防災対策特別措置法が制定された。同法に基づき、地震に関する調査研究の責任体制を明確にし、政府として一元的に推進するため、政府の特別の機関として、地震調査研究推進本部が総理府に設置（現在：文部科学省に設置）された。地震調査研究推進本部には、政策委員会と地震調査委員会が設置され、(1)総合的かつ基本的な施策の立案、(2)関係行政機関の予算等の調整、(3)総合的な調査観測計画の策定、(4)関係行政機関、大学等の調査結果等の収集、整理、分析及び総合的な評価、及び(5)それらの評価に基づく広報がその役割とされた。

地震調査研究推進本部は、平成 11 年 4 月に、今

後 10 年間程度にわたる地震調査研究の基本方針、活動の指針として、「地震調査研究の推進について－地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」（以下では総合基本施策と呼ぶ）を策定した。総合基本施策では、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を基本的な目標に掲げ、当面推進すべき地震調査研究として以下の 4 つを主要な課題とし、必要な調査観測や研究を推進するとした。その 4 つの課題とは、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実、及び④地震予知のための観測研究の推進である。

特に、地震動予測地図の作成は、推進すべき主要課題の筆頭に掲げられ、これに基づき地震調査研究推進本部地震調査委員会では、平成 16 年度末を目標として、「全国を概観した地震動予測地図」の作成が開始された。独立行政法人防災科学技術研究所では、「全国を概観した地震動予測地図」の作成に資するため、平成 13 年 4 月より、特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」を立ち上げ、地震動予測地図作成に必要な要素技術の研究開発、及び、地震調査委員会及び関連する部会・分科会の指導の下に、実際の地震動予測地図作成に関する作業を実施してきた。こうして、平成 17 年 3 月に

「全国を概観した地震動予測地図」¹⁾が完成した。

以下では、防災科学技術研究所の特定プロジェクトにおいて「全国を概観した地震動予測地図」の作成をサポートしてきた立場から、予測地図の概要及び今後の課題についてまとめる。

2. 確率論的地震動予測地図

地震の発生及びそれに伴う地震動の評価（地震ハザード評価）は、現状では数多くの不確定要素を含んでおり、現在の地震学・地震工学のレベルでは、将来発生する可能性のある地震について、地震発生の日時、場所、規模、発生する地震動等について、決定論的に1つの答えを準備することは困難である。こうした不確定性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的手法であり、地震発生の不確定性及び強震動評価の不確定性を確率論的手法²⁾を用いて評価したものが「確率論的地震動予測地図」である。

「確率論的地震動予測地図」を作成するためには、確率論的地震ハザード評価が必要となる。確率論的地震ハザード評価とは、ある地点において将来発生する「地震動の強さ」、「対象とする期間」、「対象とする確率」の3つの関係性を評価するもので、現在行っている地震ハザード評価の大まかな手順は、以下に示す通りである。

- ① 地震調査委員会による地震の分類に従い、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ② モデル化したそれぞれの地震について、地震調査委員会の長期評価結果（図1）に基づき、地震の発生確率を評価する。
- ③ 地震の規模と位置が与えられた場合の強震動評価のための確率モデルを設定する。
- ④ モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さが、ある値を超える確率を評価する。
- ⑤ 上の操作をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせることで、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さが、ある値を少なくとも1度超える確率を計算する。

このようにして、地点毎に地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち2つを固定して残る1つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である。

「確率論的地震動予測地図」では、日本全国を約1kmメッシュに分割し、工学的基盤（S波速度400m/s）での最大速度を求め³⁾、別途モデル化した表層地盤増幅率⁴⁾（図2）を用いて地表での最大速度及びそれより変換した計測震度の計算⁵⁾を行っている。

「確率論的地震動予測地図」は、今後発生し得るすべての地震を考慮したもので、地域ごとの地震ハザードの相対評価を行うための基本的な情報として

利用可能である。ただし、地表での震度の予測値は、約1kmメッシュでの簡便な手法を用いたもので、ある地域内での詳細な情報が必要な場合には、別途検討を加えることが必要である。

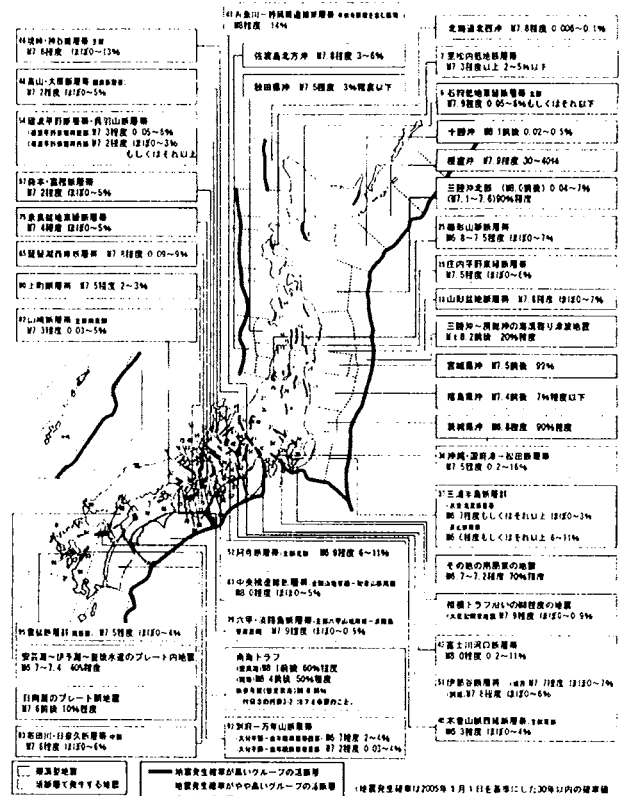


図1 主要98断層帯の位置及び海溝型地震の発生域と主な長期評価結果（地震調査委員会）。

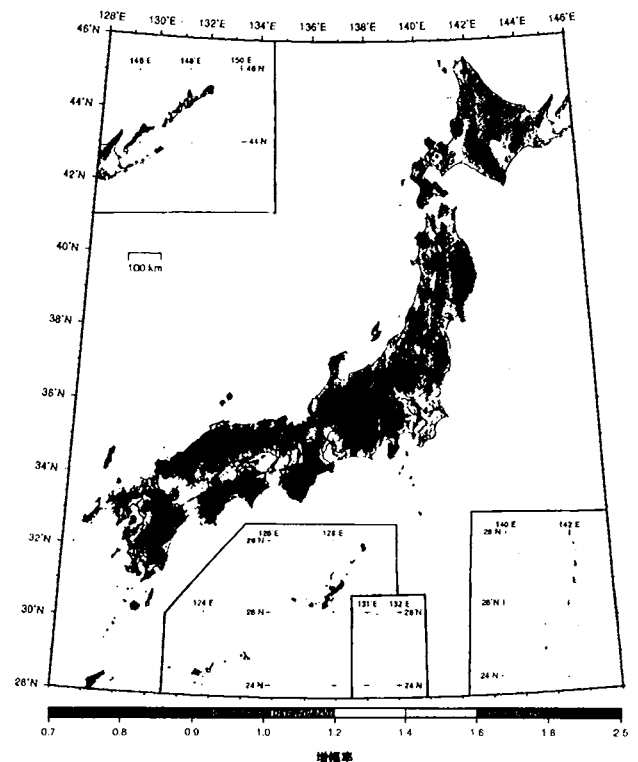


図2 表層地盤による最大速度の増幅率。

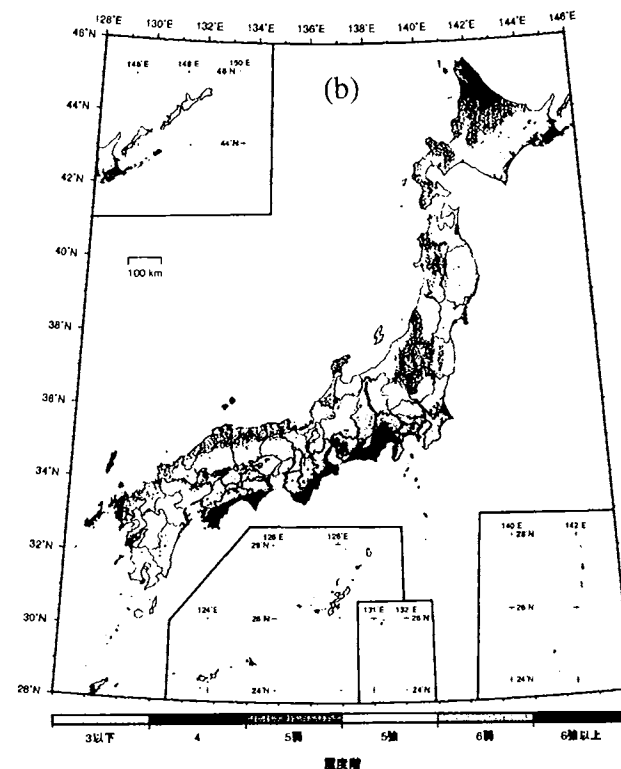
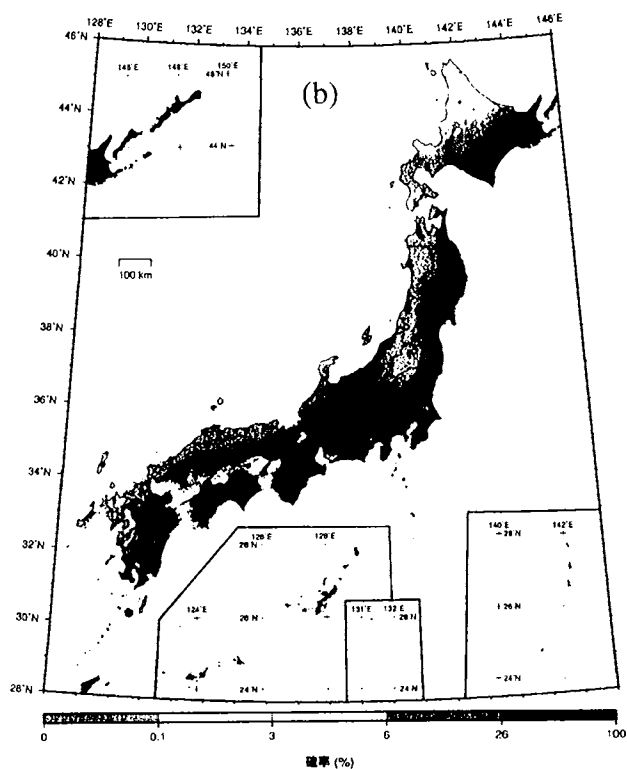
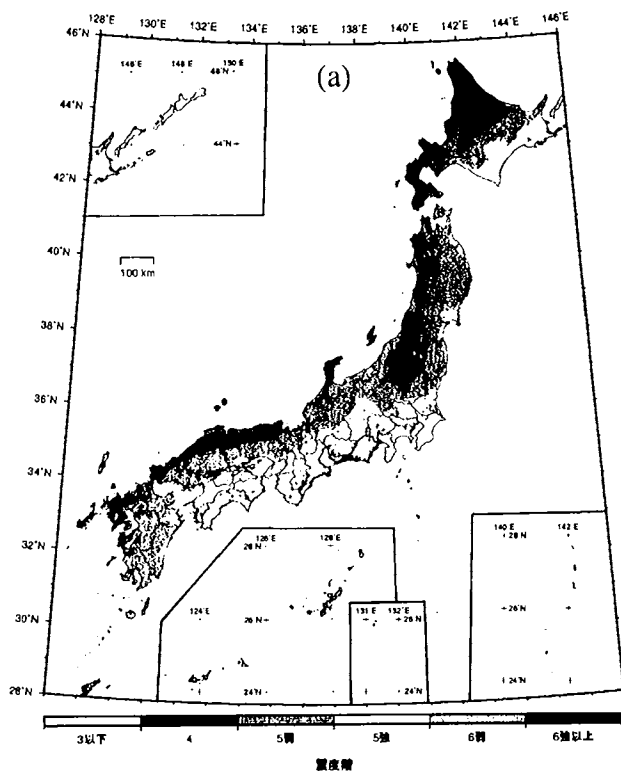
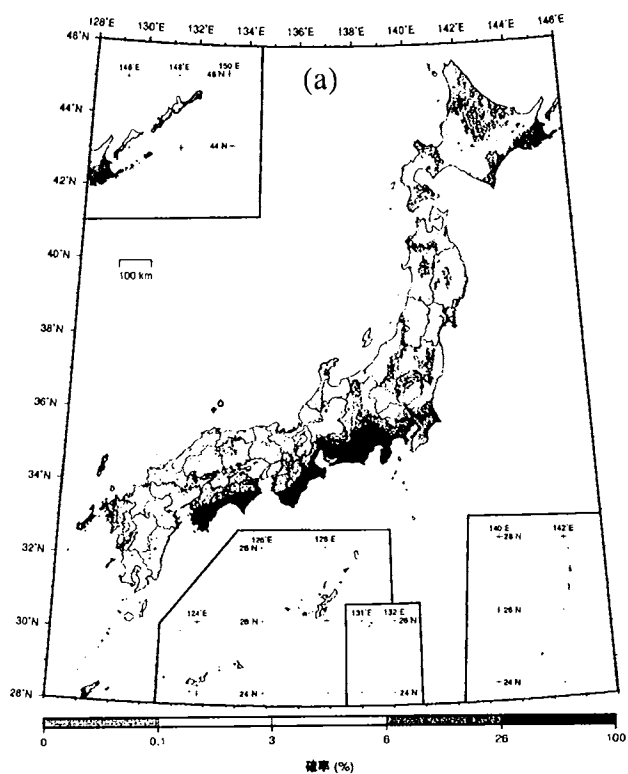


図3 (a)今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図。(b)今後30年以内に震度5弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図。基準日は2005年1月1日。(地震調査委員会公表)

図4 (a)今後50年以内に39%の確率で一定の震度以上の揺れに見舞われる領域図。(b)今後50年以内に5%の確率で一定の震度以上に見舞われる領域図。基準日は2005年1月1日。震度6強以上には震度7の可能性も含まれる。(地震調査委員会公表)

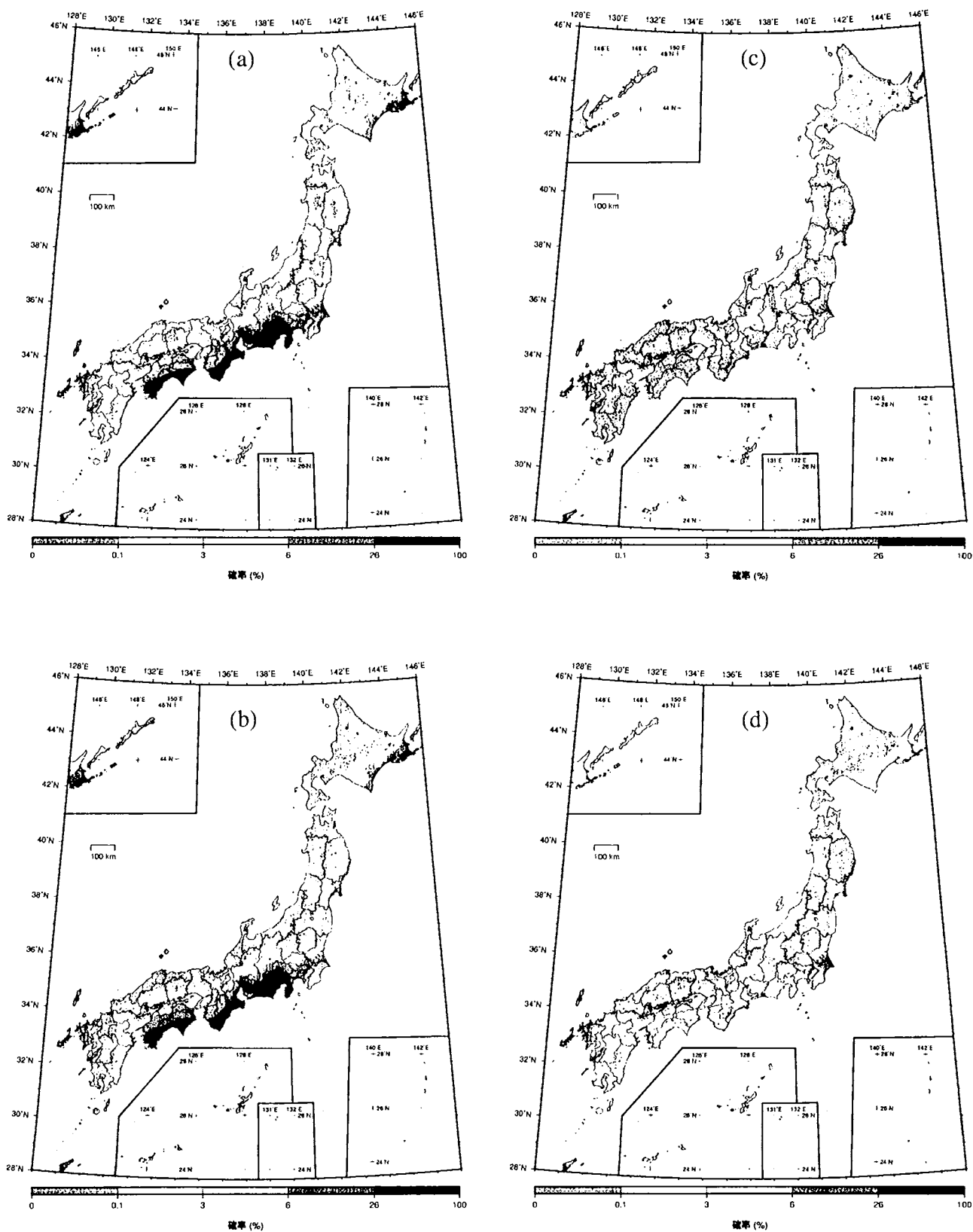


図5 今後 30 年以内に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図。(a)すべての地震を考慮した場合。(b)海溝型地震のみを考慮した場合。(c)主要 98 断層帯の固有地震のみを考慮した場合。(d)全ての地震から(b), (c)で示した地震を除いた, その他の地震のみを考慮した場合。基準日は 2005 年 1 月 1 日。(地震調査委員会公表)

地震調査委員会より公表された確率論的地震動予測地図の例を示す。図3には、(a)今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図、(b)今後30年以内に震度5弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図を示す。なお、基準日は2005年1月1日である。図4には、(a)今後50年以内に39%の確率で一定の震度以上の揺れに見舞われる領域図、(b)今後50年以内に5%の確率で一定の震度以上に見舞われる領域図を示す。基準日は2005年1月1日である。なお、震度6強以上には震度7の可能性も含まれる。図5に、考慮した地震が異なる場合の今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図を示す。(a)すべての地震を考慮した場合、(b)海溝型地震のみを考慮した場合、(c)主要98断層帯の固有地震のみを考慮した場合、(d)全ての地震から(b)、(c)で示した地震を除いた、その他の地震のみを考慮した場合を示す。東海、東南海、南海地震によるハザードが支配的であることがわかる。

3. 主要98断層帯の長期評価の取扱い

地震調査委員会による主要98断層帯で発生する地震の長期評価では、評価に用いた情報量の不足のため、平均活動間隔と最新活動時期が幅を持って評価され、結果として地震発生確率が幅をもって示されているものが多数ある。このため、長期評価に基づいた「確率論的地震動予測地図」の作成にあたっては、幅をもって示された地震発生確率の数値の扱いが問題となる。

地震調査研究推進本部事務局の調査によれば、最近の約200年間では、主要98断層帯に関連する被害地震は10あり、約20年に一度の間隔で発生していると試算されている。こうした過去の地震活動と比較した場合、「確率論的地震動予測地図」作成で用いられている地震活動モデルが、主要98断層帯全体としてみたときに、妥当なものとなっているかどうかについての検討を行った。

主要98断層帯に対する長期評価の結果に基づき、今後200年間にそれぞれの活断層帯で地震が発生する確率を評価する。この際、平均活動間隔と最新活動時期に幅があるものについては、

- (1) 地震発生確率の最大値を採用する場合（最大ケース）

地震発生確率の最大値は、地震調査委員会の公表資料における地震発生確率のランク分けに使用されている。

- (2) 平均活動間隔と最新活動時期の中央の値の組み合わせを採用する場合（平均ケース）

「全国を概観した地震動予測地図」の「確率論的地震動予測地図」作成で採用されている。

- (3) 平均活動間隔と最新活動時期の幅を平均化する場合（積分平均ケース）

平均活動間隔と最新活動時期の幅の分布形状

（前者は一様分布、後者は一様分布に活動間隔の信頼度関数に相似の重み関数を乗じたもの）を仮定した上で、積分操作により確率値を平均化したもの。

- (4) 地震発生確率の最大値と最小値の算術平均値を採用する場合（確率平均ケース）

以上、4ケースを検討する。なお、時間軸の原点は、2005年1月とする。

使用する平均活動間隔と最新活動時期の数値は、「確率論的地震動予測地図」の作成に用いられたものである。なお、長期評価で地震発生確率が評価されていないもの（平均活動間隔が不明のものなど）については、平均変位速度を仮定して確率を評価している。

以上の条件で計算した、今後200年間の地震発生数の確率分布を推定した結果を図6に示す。今後200年間に発生する地震数の期待値は、最大ケース15.0回、平均ケース6.6回、積分平均ケース6.4回、確率平均ケース9.4回となる。

平均ケースを採用した場合と最大ケースを採用した場合の主要98断層帯の地震のみを考慮した「確率論的地震動予測地図」の例を図7及び図8に示す。

地震調査研究推進本部事務局の試算と比較した場合、「確率平均ケース」の結果が最も近く、「最大ケース」は大きめ、「平均ケース」と「積分平均ケース」はともに小さめの結果となっている。地震発生数の期待値は、主として地震発生確率の値が大きい活断層で決まることから、ケースによる地震発生数の期待値の差は、ケースによって確率の値に大きな違いのある、比較的少数の活断層によりもたらされていると考えられる。つまり、地震発生確率の幅が大きい少数の活断層の評価精度を向上することが、全体としての精度向上につながると考えられる。

主要98断層帯の評価結果に対して、最新活動時期及び平均活動間隔のそれぞれの中央値をとって発生確率を計算した場合、過去200年間の地震発生数と比較したとき、地震数が若干過小評価されている可能性があることがわかる。現在この原因が特定できているわけではないが、今後の予測地図改良の方向性として、それぞれの断層帯における固有規模の地震の設定方法の改良や、現在は予測地図作成において考慮されていない固有規模よりもひとまわり小さい地震を適切に扱うことが必要だと考えられる。また、幅を持って評価された平均活動間隔及び最新活動時期についても、単に中央値を用いるのではなく、個々の断層帯で得られている知見を少しでも活用し、適切な確率値が用いられるよう検討を加えることが望まれる。

「確率論的地震動予測地図」の作成においては、個々の活断層で発生する地震の評価を独立に行って、それらを積み上げる形でハザード評価が行われてきた。今後の予測地図作成手法の改良においては、全体としてのハザードを評価する視点を加えることも

重要と考えられる。

近年発生した被害をとまなう地震には、2004 年新潟県中越地震をはじめとして、2000 年鳥取県西部地震、2001 年芸予地震、2003 年宮城県北部地震、2003 年十勝沖地震、2005 年福岡県西方沖地震などがある。このうち、「確率論的地震動予測地図」の作成において、予め震源断層が特定されていたとはっきり言えるのは 2003 年十勝沖地震だけであり、鳥取県西部地震、宮城県北部地震、新潟県中越地震、福岡県西方沖地震は、震源断層が予め特定しにくい地震として統計的な処理によりかろうじて地震ハザードが評価された地震群に属するものであった。地震群としての統計的な取扱いでは、個々の地震の姿が見えないため、これらの地震が「確率論的地震動予測地図」では考慮されていないとの誤解が生じやすくなる。「確率論的地震動予測地図」に対する理解と信頼性の向上のためには、発生頻度が比較的高く、被害地震となる可能性のある、固有規模よりもひとまわり小さい内陸の浅い地震についても、できる限り多くの地震について震源断層を特定して目に見える形で表すことにより、その認知度を高めておくことが望まれる。

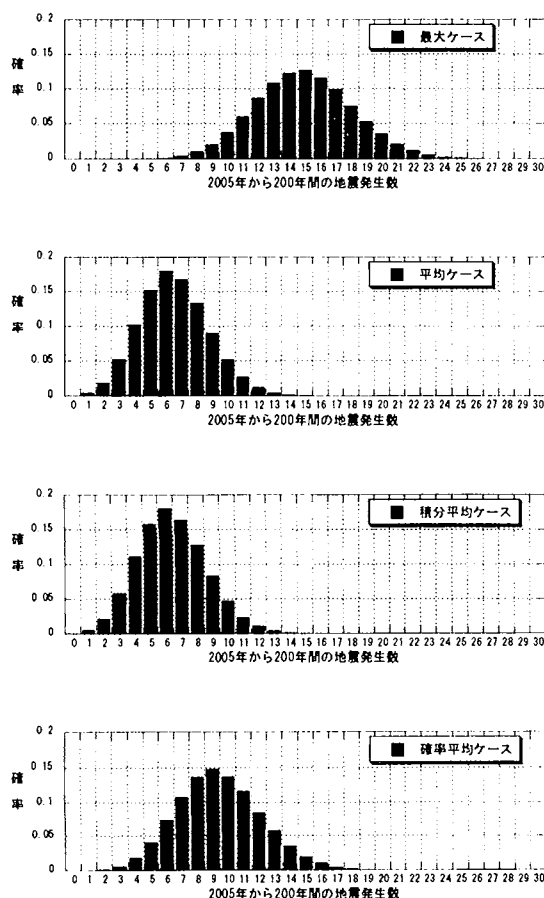


図6 今後200年間の地震発生数の確率分布。地震発生数の期待値は、最大ケース15.0回、平均ケース6.6回、積分平均ケース6.4回、確率平均ケース9.4回となる。

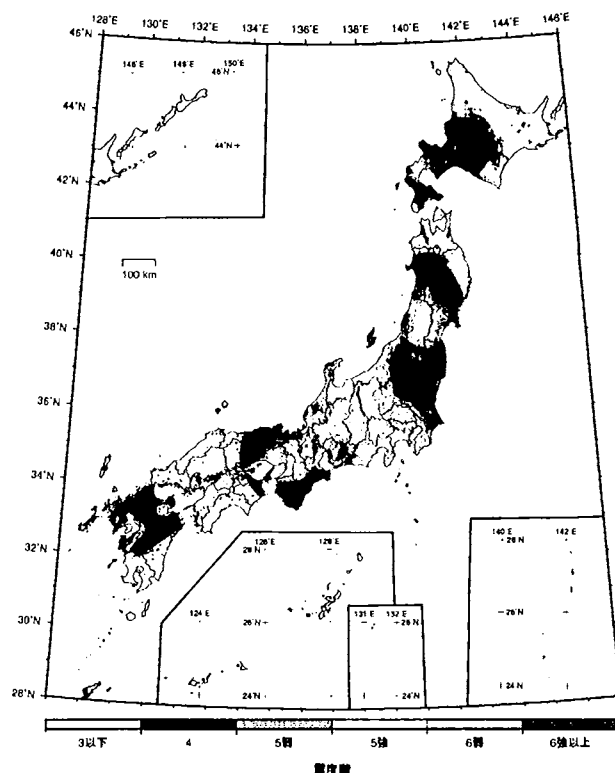


図7 平均ケースを採用し確率を計算した場合、今後30年以内に3%の確率で一定の震度以上の揺れに見舞われる領域図(主要98断層帯の固有地震のみの場合)。

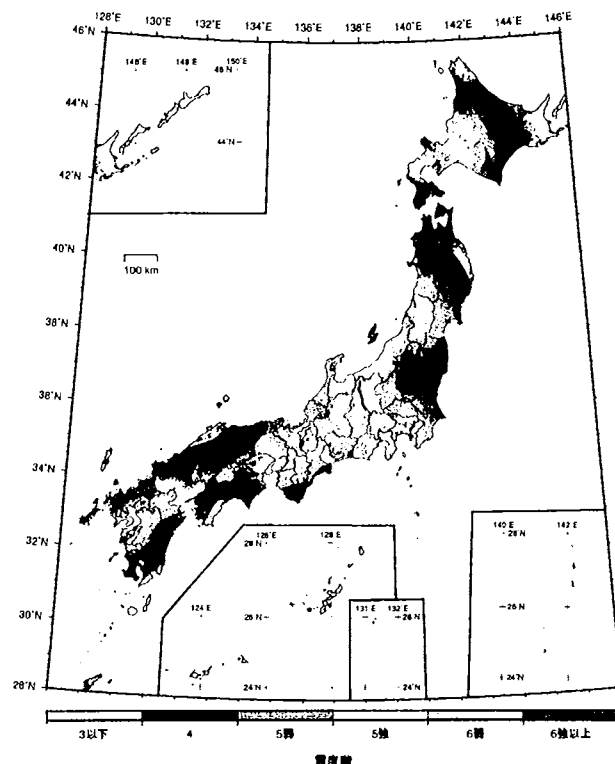


図8 最大ケースを採用し確率を計算した場合、今後30年以内に3%の確率で一定の震度以上の揺れに見舞われる領域図(主要98断層帯の固有地震のみの場合)。

4. 強震動評価の不確定性の扱い

「全国を概観した地震動予測地図」の確率論的地震動予測地図における、強震動評価の不確定性は、距離減衰式のバラツキを用いて評価されている。本来、確率論的地震ハザード評価においては、対象地点において、震源断層が特定された1つの地震に対するハザードを評価する場合、震源に関わる不確定性と伝播経路及びサイト特性の不確定性は分離して評価すべきものである。しかしながら、現状では、各地震ごとに、各観測点において震源特性と伝播経路・サイト特性を分離して評価するために十分なデータは得られていない。このため、現在ハザード評価に用いられている距離減衰式は、様々な地震と観測点を区別せずまとめたデータセットを用いて回帰されることとなり、そのバラツキには、震源特性、伝播経路特性、及び各観測点のサイト特性のバラツキが含まれており、超過確率の計算に用いる地震動のバラツキの程度を大きめに評価している可能性がある。バラツキの大きなモデルで計算された低確率の地震動レベルは、過大評価される可能性があるため、こうした問題点を改善するための検討を行った。

① 地震動上限値の設定について

最大振幅の絶対値としての上限値を設定するかどうか、分布の裾の打ち切りをするかどうか、の2つの視点での検討が行われた。この結果、これらの課題は、非線形増幅の影響やバラツキの分布形状（現在は対数正規分布を使用）そのものの妥当性に立ち戻った検討が必要な中長期的課題であるとされた。現段階では、最大振幅の上限値の絶対値を明示することは困難であり、統計的な観点から、分布の裾を平均 $\pm 3\sigma$ で打ち切ることが妥当であるとの結論に至った。

② 予測地図作成に使用するバラツキの値について

現状の距離減衰式のバラツキを用いた強震動評価手法においては、距離減衰式に残存しているサイト特性の推定に関わる不確定性が、認識論的不確定性に分類できることから、これを除去し、偶然的な不確定性のみを抽出する試みを2003年十勝沖地震のデータを用いて行い、サイト特性を除去した後のバラツキが常用対数標準偏差で0.2程度になることを確認した。これに基づき、今後の方向性として、バラツキの種類を分類して評価することは重要であると認識し、偶然的な不確定性と認識論的不確定性を分離する手法を積極的に取り入れる方針とした。

これとあわせて、バラツキの振幅依存性を考慮するか否かについても検討が行われ、現状では必ずしも十分なデータに基づいたものではないものの、データからは振幅依存性が認められること⁶⁾から、バラツキの振幅依存性についても取り入れることとし、図9に示す値を確率論的地震動予測地図作成において用いることとした。この数値の設定根拠は以下のとおりである。

- ・ 十勝沖地震の本震・余震に基づく検討結果か

ら、認識論的不確定性を除去すると、工学的基盤でのバラツキの値は、全体として概ね0.2程度となる。振幅依存性は、若干認められるものの、推定最大速度で40cm/sを超えるデータがなく、小振幅ではほぼ0.2で一定値となる。

- ・ 翠川・大竹⁶⁾の結果からは、最大速度の推定値が数10cm/s以上の範囲のバラツキが0.15となっている。ただし、この結果には、認識論的不確定性が含まれていることから、それを除去すると、さらに小さくなる可能性もある。
- ・ 十勝沖地震の解析結果及び翠川・大竹⁶⁾の結果で、10~20cm/s程度のバラツキの値を見ると、いずれも0.2かそれをやや下回る値であり、概ね整合している。このことを勘案し、認識論的不確定性を考慮した場合の大振幅の領域でのバラツキの値として、翠川・大竹⁶⁾の結果がほぼ上限値であると考え、暫定的に図9に示す値とする。

なお、今回用いたバラツキの値は、「全国を概観した地震動予測地図作成」のための暫定的なものであり、さらなる検討が必要である。

震源モデルを仮定し、地震動を物理的なモデルに基づいて評価する詳細法による地震動評価は、現状では、確率論的地震ハザード評価においては用いられていない。しかし、よりきめ細かな強震動評価を行うためには、将来的には、詳細法による地震ハザード評価を確率論的地震ハザード評価に取り込むことが必要と考えられる。これが可能になれば、理論的には、震源特性に対する不確定性と、伝播経路特性及びサイト特性に関する不確定性を完全に分離して扱うことが可能となり、より物理的解釈の明確な地震ハザード評価が可能となると期待される。

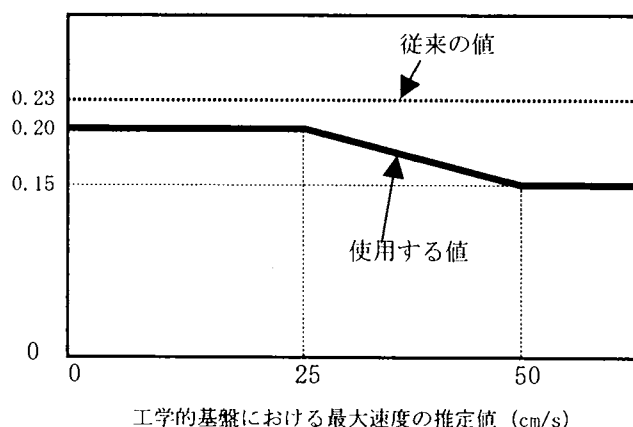


図9 地震調査委員会による確率論的地震動予測地図作成のための使用したバラツキの値。縦軸は常用対数標準偏差。

5. 震源断層を特定した地震動予測地図

「全国を概観した地震動予測地図」においては、地震発生の長期評価により発生確率が高いと評価された一部の地震については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価を行うことにより、シナリオ地震による詳細な強震動評価を実施し、震源断層を特定した地震動予測地図を作成している。

これまでに評価された地震は、図10に示すように、糸魚川－静岡構造線断層帯の地震、宮城県沖地震、森本・富樫断層帯の地震、布田川・日奈久断層帯の地震、三浦半島断層群の地震、山形盆地断層帯の地震、三陸沖北部の地震、砺波平野断層帯の地震、琵琶湖西岸断層帯の地震、石狩低地東縁断層帯の地震、高山・大原断層帯の地震、山崎断層帯の地震がある。さらに、全国を概観した地震動予測地図の公表後に、中央構造線断層帯（金剛山地東縁－和泉山脈南縁）の地震、日向灘の地震についての強震動評価が公表されている。

これに加えて、2003年9月26日に発生した十勝沖地震については、海溝型地震に対する強震動評価手法の検証作業が実施され結果公表されている。

震源断層を特定した地震動予測地図では、約1kmメッシュの分解能で、工学的基盤での時刻歴波形及び最大速度値、地表面での最大速度値及び最大加速度値から求めた計測震度の分布を計算されている。詳細な強震動評価手法としては、ハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、差分法や有限要素法により弾性波動論に基づいた理論的なモデルに対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を行う。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われ、地震調査委員会が公表した「全国を概観した地震動予測地図」報告書¹⁾では、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）」（以下「レシピ」と呼ぶ）としてまとめられている。以下では、地震動予測地図の作成において用いられている詳細な強震動評価手法について、その要素技術毎に概要をまとめる。

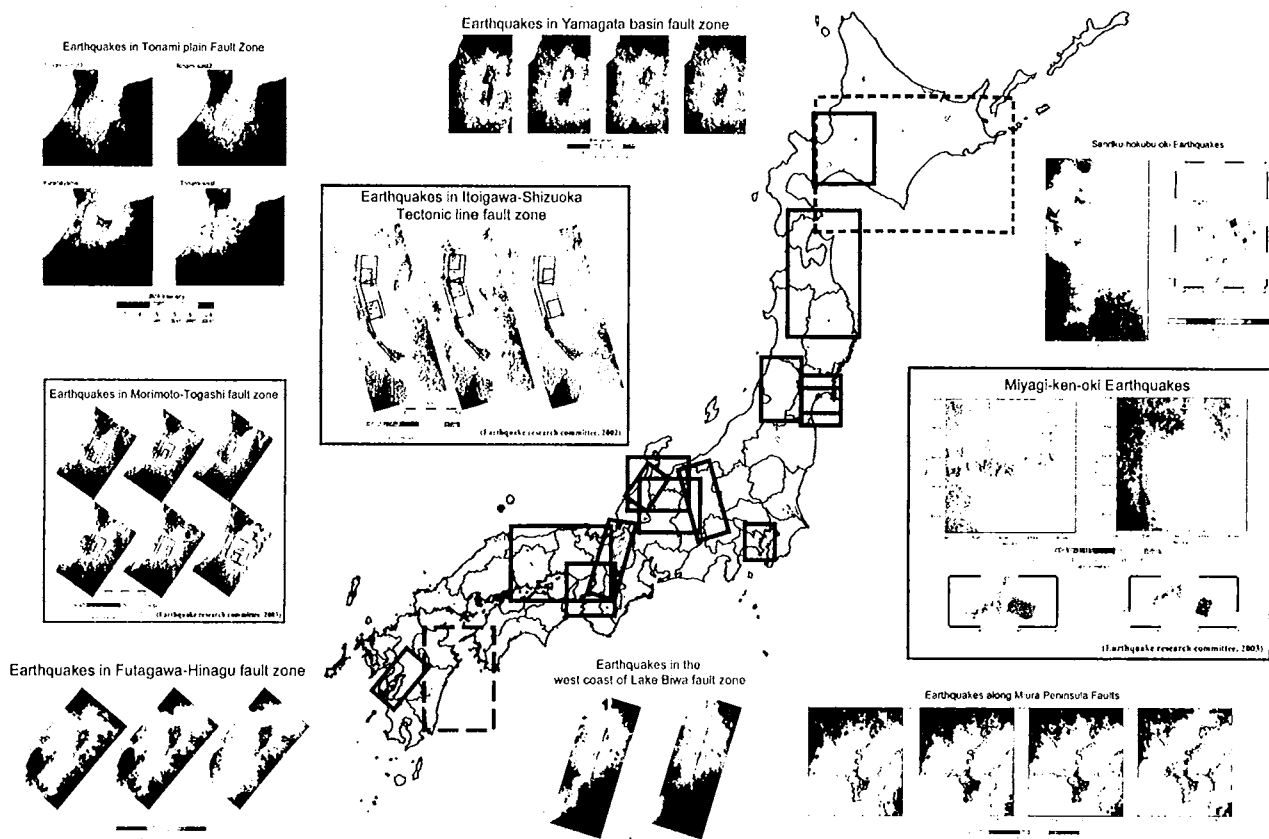


図 10 これまでに詳細な強震動評価手法により震源断層を特定した地震動予測地図作成に関する検討が実施されてきた断層帯および強震動評価結果の例。

「レシピ」は、これまでの検討結果から、強震動予測手法の構成要素となる要素技術について、その手法や考え方をとりまとめたものである。「レシピ」では、震源断層を特定した地震を想定した場合の強震動を高精度に予測する手法が述べられており、今後も新たに得られる知見を反映して、修正を加え改訂されていくことが前提とされている。「レシピ」による強震動予測は、(1)特性化震源モデルの設定、(2)地下構造モデルの作成、(3)強震動予測計算手法（ハイブリッド法）、(4)予測結果の検証の4つの過程からなる。

(1) 特性化震源モデルの設定

強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータで表した震源モデルを「特性化震源モデル」と呼ぶ。

強震動評価を実施するために必要な特性化震源モデルに対する震源パラメータの設定は、大きく3つの部分に分けられる（図11）。具体的には、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊様式を示すその他の震源特性の設定である。

震源断層を特定した地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、評価すべき断層帯の地震について、長期評価の結果を基本として、将来最も起こる可能性が高いと考えられるシナリオを選定することを目指しており、与えられた断層規模に対しては、これまでの経験から得られている平均的な地震動を発生させるパラメータを与えることが基本となっている。従って、現在のシナリオ地震に対する強震動評価結果は、もっとも起こりうる可能性が高い地震に対する平均的な地震動評価となっている。しかし、通常、震源モデル推定の不確定性のため、平均的なケースを1つに絞り込むことが困難な場合が多く、その場合には、複数のシナリオを想定することとされている。

a) 巨視的震源特性

巨視的震源特性とは、断層の幾何学的位置、大きさ、深さ、地震の規模、断層の平均滑り量などである。

このうち断層の幾何学的位置、大きさ、深さについては、地震調査委員会による長期評価の結果に基づいてパラメータの設定を行う。地震の規模（地震モーメント M_0 (dyn・cm)）は、活断層で発生する地震に対しては、長期評価から見積もられた断層面積 S (km²)に対して、次式を用いて設定する^{7), 8), 9)}。

$$S = \begin{cases} 2.23 \cdot 10^{-15} \cdot M_0^{2/3}, & M_0 \leq 4.7 \cdot 10^{25} \\ 4.24 \cdot 10^{-11} \cdot M_0^{1/2}, & 4.7 \cdot 10^{25} < M_0 \leq 1.0 \cdot 10^{28} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、海溝型の地震については、過去の地震のデータ等を用いて、それぞれの地震の特性に応じた設定を行う。

b) 微視的震源特性

震源断層の微視的パラメータとは、アスペリティの位置・個数及び面積、アスペリティ及び背景領域の平均滑り量・実効応力、 f_{max} 、滑り速度時間関数などがある。アスペリティの位置の設定に関しては不確定性が大きく、設定が困難な場合が多い。このため、現状では、アスペリティの位置の設定に関しては、トレンチ調査等で大きな変位量が観測された地点の付近に置くことを基本としている。また、アスペリティの個数は、1セグメントあたり1個または2個とする。

アスペリティの面積 S_a は、地震モーメントと加速度震源スペクトルの短周期レベル A (dyn・cm/s²)の経験的關係をもとに、次式を用いて求める。

$$\begin{aligned} S_a &= \pi r^2 \\ r &= \frac{7\pi}{4} \cdot \frac{M_0}{A \cdot R} \cdot \beta^2 \\ A &= 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 R は断層面積と面積が等しい円形クラックの半径、 β は震源域のS波速度。

アスペリティと背景領域でのそれぞれの平均滑り量 D_a 及び D_b の比は、2対1とする。

アスペリティでの平均応力降下量は、次式を用いて求める。

$$\Delta\sigma_a = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^2 R} \quad (3)$$

アスペリティでの実効応力 σ_a は、この平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ と等しいと仮定する。また、背景領域での実効応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{(D_b/W_b)}{(D_a/W_a)} \cdot \sigma_a \quad (4)$$

ここで、 W_a および W_b は、アスペリティ及び背景領域の幅を示す。

f_{max} については、地域性を考慮して地震毎に設定する。しかし、パラメータ推定のためのデータの蓄積は未だ十分ではない。

滑り時間関数としては、動力学的震源モデルに関する考察より得られた近似式¹⁰⁾を用いる。

c) その他の震源特性

その他の震源特性としては、破壊開始点、破壊形態、破壊伝播速度がある。

破壊開始点については、活断層の分岐形態が利用できる場合それにより推定し、アスペリティの外側に置く。内陸活断層の場合、特に情報がない場合、アスペリティの下部に置く。破壊の開始点とアスペリティの位置関係は、強震動分布に大きく影響するので、モデル設定の根拠が十分でない場合、複数のケースを想定する。破壊形態は、破壊開始点から一定速度で、同心円状に破壊が伝播するとする。破壊伝播速度は、 $V_r = 0.72\beta$ とする¹¹⁾。

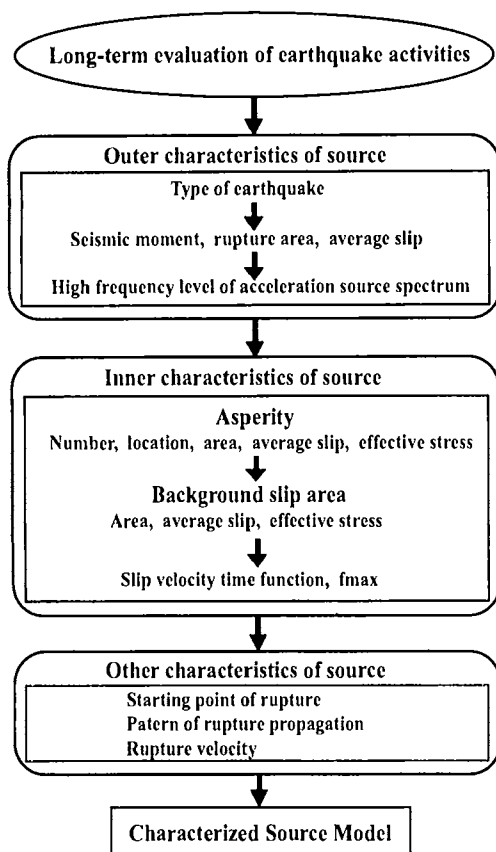


図11 震源パラメータの設定.

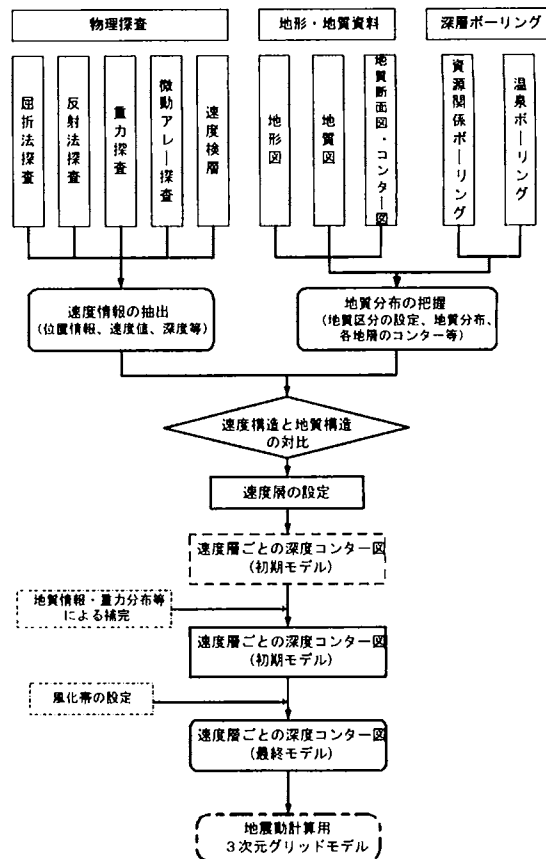


図13 深部地盤構造モデルの作成

(2) 地下構造モデルの作成

地下構造のモデル化では、上部マントルから地震基盤（S波速度3km/s相当層）までの地殻構造、地震基盤から工学的基盤（S波速度400m/s～700m/s相当層）までの深部地盤構造、工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けてモデル化を行う（図12）。

a) 地殻構造

地震学的手法により求められた地震波速度構造、地震波減衰構造を用いてモデルを作成する。内陸の活断層の地震では、深さ方向にモホ面を含む領域まで、また海溝型の地震では、プレートの構造をモデリングする必要がある。

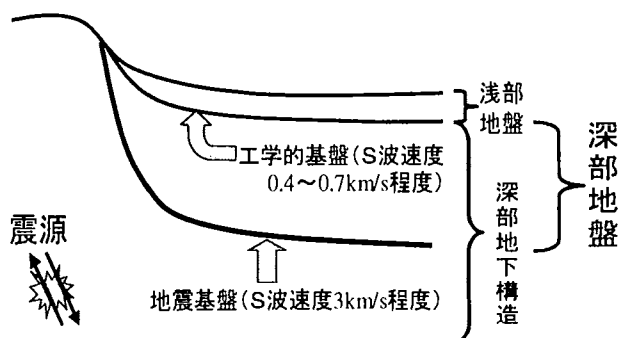


図12 地下構造モデルの概念図

b) 深部地盤構造

深部地盤構造は、地震動の比較的長周期部分の特性に大きな影響を与える地下構造であり、決定論的に扱える周波数領域での地震動の計算において重要な要因となる。図13に深部地盤構造モデル作成の流れ図を示す。深部地盤構造モデリングのためのデータとしては、深層ボーリング、反射法・屈折法弾性波探査、微動探査、重力探査等がある。ただし、これらのデータは地域により様ではないため、地域ごとに、データの蓄積の状況に応じたモデル作成の考え方が必要となる。強震動評価のための地下構造モデリングにおいては、弾性波の速度構造が最も重要なパラメータとなる。従って、これらの値を直接的に求めることのできるデータが多く得られるほどモデル化の精度は高まると考えられる。十分なデータが利用できる場合、複数の深層ボーリングデータにより速度構造を各点毎に正確に把握し、広域的な形状は屈折法データ、山地境界部等の詳細な構造は、反射法探査データから推定し、それらの隙間を微動アレイ探査や重力探査、地質情報等を用いて補完することにより三次元構造モデルを作成する。実際の地震動観測記録とその構造モデルを用いた計算結果を比較することにより、作成した構造モデルの検証を行うことが望まれる。

しかし、実際には上述した手法により3次元構造モデルを作成するに足る情報が十分に得られていな

い場合が多い。このような場合、面的な情報として利用可能なものは、重力探査データ及び地質構造情報であり、これらを用いて間接的に速度構造を推定しなければならない。重力探査データは、密度構造を反映したものであり、重力探査データのみから速度構造を求めると不確定性が大きくなる。これを補完するために地質構造情報を用いたモデリングが行われている。図14に、これまでに作成してきた深部地盤モデル（地震基盤深度）を示す。これらモデルは、強震動評価モデルとして十分な検証がなされてはならず、あくまで初期モデルとして位置づけられるものであり、今後、各種検証に基づいたモデルの高度化が必要である。

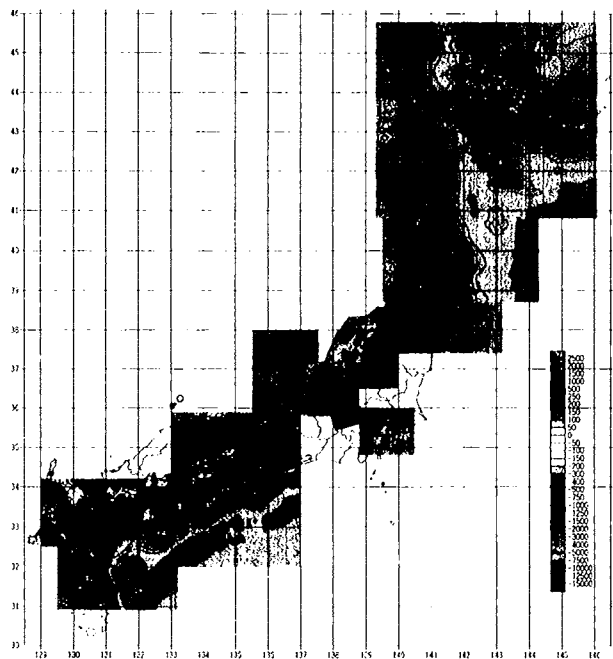


図14 これまでに作成してきた深部地盤モデル（地震基盤深度）。

c) 浅部地盤構造

浅部地盤構造のモデル化では、表層地質データやボーリングデータを用いて地盤構造モデルを作成することが基本となる。ただし、浅部地盤構造は局所的な変化が大きく、面的に精度良く広域を覆う浅部地盤モデルを作成するためには、膨大なデータ収集が必要となる。そのため、現状では、広域での面的な評価が必要な場合には、簡便な表層地盤増幅率の評価法として、国土数値情報を利用した手法^{11), 12)}を用いている。具体的には、全国を網羅した3次メッシュ（約1kmメッシュ）の国土数値情報のうち、地形区分データ及び標高データ等に基づいて、微地形区分データを作成し、それぞれの微地形区分に対して標高や主要河川からの距離を考慮した経験式を用いて、表層30mの平均S波速度を計算し、次に、表層30mの平均S波速度と工学的基盤から表層への地震動

の最大速度の増幅率との経験的な関係式を用いて、それぞれのメッシュ毎の浅部地盤による最大速度の増幅率を得る。

一方、浅部地盤に対する情報が十分に収集可能な場合は、より詳細なモデル化の手法として、多数のボーリングデータ及び地形・地質データを収集し、地形・地質から区分できる地域ごとに代表となるボーリング柱状図を抽出し、これをメッシュ毎に当てはめる方法も有効である。

強震動予測手法（詳細法：ハイブリッド法）

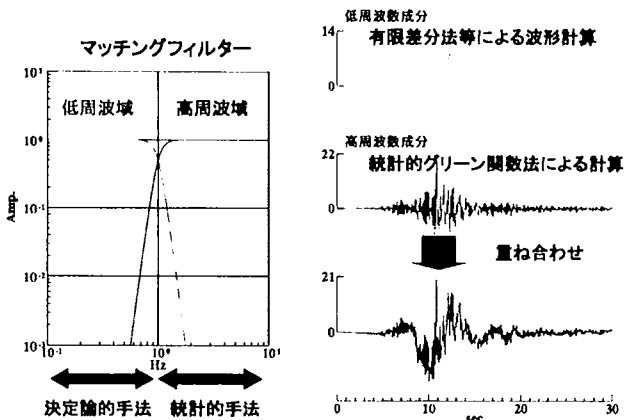


図15 ハイブリッド法の概念図

(3) 強震動予測計算手法（ハイブリッド法）

地震動の特性は、低周波数帯域では弾性波動論に基づいた決定論的な物理モデルによる理論的考察によりある程度定量的に説明可能であることが、過去に起きた地震動の記録を解析することにより明らかにされてきている。一方で、高周波数帯域では、震源のモデル化及び地下構造のモデル化の双方において、物理モデルに基づく理論的な予測に必要とされるパラメータ決定のための情報量が不足し、不確定性が急速に大きくなるため、事実上決定論的な予測が困難となり、統計的手法の導入が必要となる。詳細な手法による強震動評価では、周波数帯域が0.1Hz～10Hz程度の地震動を評価することを目指しており、この周波数帯域には、上述した低周波数帯域及び高周波数帯域の両方、そしてそれらの中間の遷移周波数帯域が含まれている。

このように物理的性質の違う2つ周波数帯域を含んだ広周波数帯域に対して強震動の評価を行うためには、それぞれの周波数帯域の特徴を活かした計算手法を用いることが最も効率的である。ハイブリッド法は、このような背景の中で提案された手法である。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、差分法^{13), 14)}や有限要素法¹⁵⁾により弾性波動論に基づいた理論的なモデルに対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法¹⁶⁾と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を

行う。最後に遷移周波数領域においてそれぞれに対してマッチングフィルター処理を施して重ね合わせることににより、全周波数帯域での計算を行う(図15)。

a) 低周波数帯域での計算法

低周波数帯域での波形合成は、特性化震源モデルと地殻構造及び深部地盤構造モデルを組み合わせた物理モデルに対して、地震波動伝播を記述する弾性波動方程式を、差分法^{13),14)}や有限要素法¹⁵⁾などの数値計算手法を用いて解くことにより行う。近年の計算機性能のめざましい進歩と計算手法そのものの高度化により、現在では、現実に近いモデルに対する計算が実施可能となりつつある。具体的には、例えば、森本・富樫断層帯の地震に対する強震動評価では、90km*60km*40kmの領域を地震基盤より上部を100mメッシュでモデル化した計算を、有限差分法を用いて行っているが、この場合の計算時間は、防災科学技術研究所の計算機(origin3800)で64cpuを用いた並列計算を行った場合、6000タイムステップの計算で4時間半程度を要した。計算量の見積もりの目安として、同一の領域に対して計算メッシュサイズが半分になると、計算時間は16倍、計算に必要なメモリー容量は8倍となるため、計算機環境及び作業工程を踏まえたモデル作成が必要となる。

b) 高周波数帯域での計算法

高周波数帯域の計算で用いられる統計的グリーン関数法¹⁶⁾は、経験的グリーン関数法^{17),18)}をもとに作り出された手法である。経験的グリーン関数法では、大地震による強震動を評価するために、大地震が発生する領域内で発生した中小規模の地震記録をグリーン関数として用い、大地震の波形を合成する手法であり、伝播経路や表層地盤の不均質構造の影響を強く受ける短周期地震動の評価に有効な手法と考えられている。しかし、現実には、強震動の評価を行う場合、評価すべき大地震に対して評価する領域内で適切な中小地震の記録が得られているとは限らない。このような場合にでも適用できる手法として提案された統計的グリーン関数法では、グリーン関数として中小地震の記録の代わりに、統計的に評価された関数をグリーン関数として用いることにより、データが十分得られていない場合でも評価可能となっている。ただし、統計的グリーン関数法は、グリーン関数が統計的に処理され平均化され、本来グリーン関数を持っている位相情報が失われているため、対象地域及び震源固有の特性を十分には反映しきれないという限界をもつ。特に断層の極近傍での波形合成に関しては、その精度向上は今後の重要な課題であると考えられる。

c) 2つの手法の重ね合わせ

ハイブリッド法による低周波数帯域と高周波数帯

域の接続は、現状では1Hz程度の周波数を設定して、マッチングフィルターを用いて行っている。接続周波数の設定は、本来は、地震波動場の特性を考慮して、決定論的なモデリングが可能な周波数帯域と、統計的なモデリングが可能な周波数帯域の遷移周波数帯域内に設定すべきであるが、現状では、以下の3つの理由により、接続周波数が物理的な遷移周波数帯域よりも低周波側に設定される場合が多い。

- ① 計算機性能・計算技術の限界
- ② 震源のモデル化の限界
- ③ 地下構造のモデル化の限界

ここで、①の計算機性能・計算技術の限界については、今後数年程度で大幅な改善が期待でき、近い将来に上記問題点はある程度解決できる可能性がある。

一方、②及び③については、①と比較して解決が圧倒的に困難であると考えられる。これらの問題の解決のためには、地震観測網により得られる記録の蓄積や地下構造調査によるデータ収集、データベース化が不可欠であり、これらは長期間にわたる計画的な研究インフラの整備なくしては実現が困難である。長期的展望に立った問題解決のための戦略が必要であろう。

(4) 予測結果の検証

地震調査委員会では、活断層で発生する地震に対しては、2000年鳥取県西部地震の観測記録を用いて、また、海溝型地震に対しては、2003年十勝沖地震の観測記録を用いて「レシピ」の検証を実施し、公表している。

6. 2種類の予測地図の融合

「全国を概観した地震動予測地図」は、「確率論的地震動予測地図」と「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の違う地図を組み合わせたものとして公表されている。

2つの地図の関連を明確にすること、あるいは「震源断層を特定した地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」に取り込むことを「融合」と呼んでいる。地震動予測地図の融合については、2つの考え方が示され議論が行われてきた。

- ① 2種類の地図は独立に作成されるが、それぞれの位置づけを解説し、相互に関連づける。2種類の地図を関連づけるための方法論として、例えば、確率論的想定地震¹⁹⁾の概念を用いる。
- ② 「シナリオ地震による地震動予測地図」において用いられる詳細法による地震動評価を用いて、確率論的地震ハザード評価を行う。

考え方①で示されている2種類の地図の関連づけとは、ある対象地点において想定しうる全地震を考慮した地震ハザード評価において、個々のシナリオ地震がどのような位置づけにあるかを明確にすることである。確率論的想定地震とは、対象とする確率

レベルに対応するような強さの地震動を起こしうる可能性が高い地震をシナリオ地震として選定するための方法論である。詳細な方法で評価されたシナリオ地震による地震動が、確率論的地震動予測地図においてどの程度の確率レベルに対応するかを示すことにより、両者の関係を明確にすることが可能となる。「全国を概観する地震動予測地図」においては、考え方①に沿って、「確率論的地震動予測地図」と「震源断層を特定した地震動予測地図」の位置づけを解説し、両者を関連づける方向で説明がなされている。

考え方②で述べられている詳細法による地震動評価は、現状では、計算作業量及び計算に必要な情報量の不足のために地震動予測地図作成のための確率論的地震ハザード評価においては用いられていない。しかし、よりきめ細かな強震動評価を行うためには、将来的には、詳細法による地震ハザード評価を確率論的地震ハザード評価に取り込むことが必要と考えられる。考え得るすべてのシナリオ地震に対して発生確率を割り振り、それらに対する強震動評価計算をハイブリッド法に代表される詳細法で行うことが理想的な状況としては考えられる。このためには、未だ十分に議論されていない「震源断層を特定しにくい地震」に対する強震動評価手法の高度化の検討が不可欠となる。

データ利用の観点からは、計算されたデータがすべてのシナリオ毎に独立に取り出せるようなデータ構造を持った地震ハザードデータベースが構築され、それに基づいた確率論的地震ハザード評価が行えるようになることが究極的な地震動予測地図作成につながると考えられる。これが可能になれば、「震源断層を特定した地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」における1つの事象として直接位置づけることが可能となり、両者の関係は大変わかりやすくなることが期待される。今回公表された「全国を概観する地震動予測地図」は、本来あるべき地震ハザード評価に向けての最初の第一歩であり、今後の継続的な発展が望まれる。

7. 地震ハザードステーション J-SHIS

「全国を概観した地震動予測地図」は、地震発生の長期的な確率評価と強震動の評価を組み合わせた「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されており、地図の作成に必要なデータまで含めると膨大な量の情報が含まれている。

防災科学技術研究所では、地震動予測地図の利用に関する検討の一環として、「地震動予測地図工学利用検討委員会」を設置し検討を行ってきた。本委員会がまとめた報告書²⁰⁾では、「全国を概観した地震動予測地図」を最終成果物としての地図そのもの

のだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも併せた情報群としてとらえることにより、「地震ハザードの共通情報基盤」として位置づけるべきとの提言がなされた。この提言を実現するために、防災科学技術研究所では「全国を概観した地震動予測地図」のインターネットを利用した公開システムの開発に取り組み、同報告書により提案された名称を採用し、「地震ハザードステーション J-SHIS」として、平成17年5月9日より運用を開始した (<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)。

図16に、J-SHISの表示画面の例を示す。「確率論的地震動予測地図」のページでは、陸域の地震や海溝型地震によって発生する地震について、それぞれの地域の揺れやすさを全国レベルで評価した結果を公開している。地震の種類・地震動の大きさ・確率・期間といった条件を変更して全国地図を表示し、地域を選択して拡大閲覧ができる。拡大した地図は、約1 km²の単位での表示であるが、市区町村境界や鉄道(JR)、主要道路等が表示されていることで、地図上で自分の知りたい地域の位置をより正確に知ることが可能となっている。また、市区町村名、路線名(JR・私鉄各路線)、駅名(JR・私鉄各駅名)で検索することもでき、さらに確率や最大速度といった解析数値をメッシュ単位で取得することもできる。

「震源断層を特定した地震動予測地図」のページでは、糸魚川ー静岡構造線断層帯や宮城県沖地震のように詳細なデータが得られている断層について、高度な強震動予測手法を用いて、より踏み込んだ詳細な強震動評価を行った結果を公開している。公開される情報には、速度波形、地表の震度のデータに加えて、断層形状や断層パラメータなどが含まれている。これまでのアクセス状況を図17に示す。

「全国を概観した地震動予測地図」の作成のためには、活断層・地震活動に関する情報や地下構造に関する情報等の大量の情報が用いられていると同時に、それら情報に基づいた地震ハザード評価のために、各種の評価手法や判断が取り入れられている。

一方、現状では、こうした大量の情報に基づいたとしても、地震ハザード評価には多くの不確実性が残存していることも事実である。このため、地震ハザード評価に必要な不確実性を評価するプロセスにおいては、さまざまなレベルにおいて客観的な科学的手法に加えて、各種の判断がなされる場合がある。このため、こうした不確実性評価のプロセスを経て作成された地震動予測地図は、利用目的・利用者によっては、その最終的な評価結果としての地震動予測地図のみの情報開示では不十分な場合があり、その評価プロセスで用いた手法や判断及び用いた情報を併せて開示することが望ましいと考えられる。また、地震動予測地図のユーザは、一般市民、行政担当者、技術者、研究者など多岐にわたると考えられ、それぞれの立場で必要とする情報項目も異なること

が予想される。このように、地震ハザード評価に関する情報開示に対しては、多様なニーズに応えられるような開示情報項目の多様性が要求されるとともに、最終的な評価結果だけでなく、不確定性の評価プロセスで用いた手法や判断、用いた情報など階層的な構造を持つ情報群について広く公開されることが望ましいと考えられる。

このような観点から「全国を概観した地震動予測地図」は、単に最終成果物である「予測地図」そのものだけが強調されるのではなく、日本全国に対する地震ハザード評価に関わる各種情報をとりまとめ、多様なニーズに対応可能なように情報を整理・処理するプロセスを含めた地震ハザード評価に関する情報群としてとらえることが重要である。これは、言い換えれば、地震ハザードの共通情報基盤として「全国を概観した地震動予測地図」を位置づけることと解釈することができる。

「全国を概観した地震動予測地図」を地震ハザードの共通情報基盤として位置づけ、それらを十分に機能させ、さらに発展させるためには、情報作成者側と利用者側を結びつけるためのインターフェースの整備が不可欠となる。また、地震調査研究の進展による発信情報の高度化や利用技術の進歩による多様な発信情報に対するニーズに即応できるように、地震ハザード評価の共通情報基盤としての地震動予測地図が定期的に更新・改良されていく仕組みを確立することも必要である。現状では、まだ J-SHIS は上記の機能のほんの一部を実現したにすぎない。今後、J-SHIS が上記の要望を満たすものとしてさらに発展するよう努力していきたい。

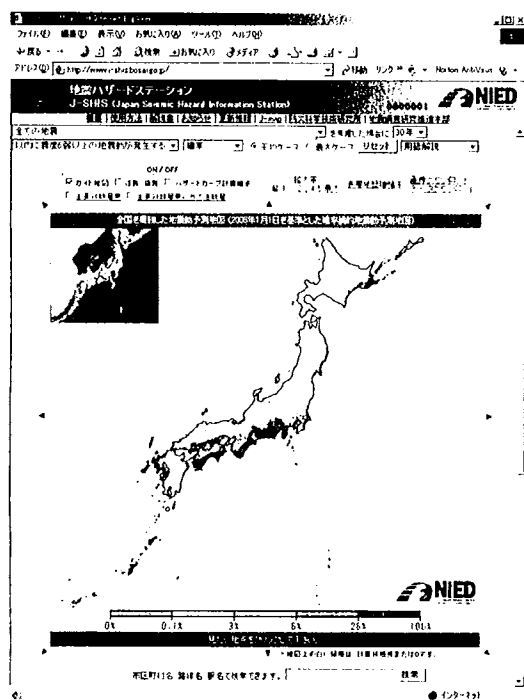


図 16 地震ハザードステーション J-SHIS の表示画面の例。(http://www.j-shis.bosai.go.jp)

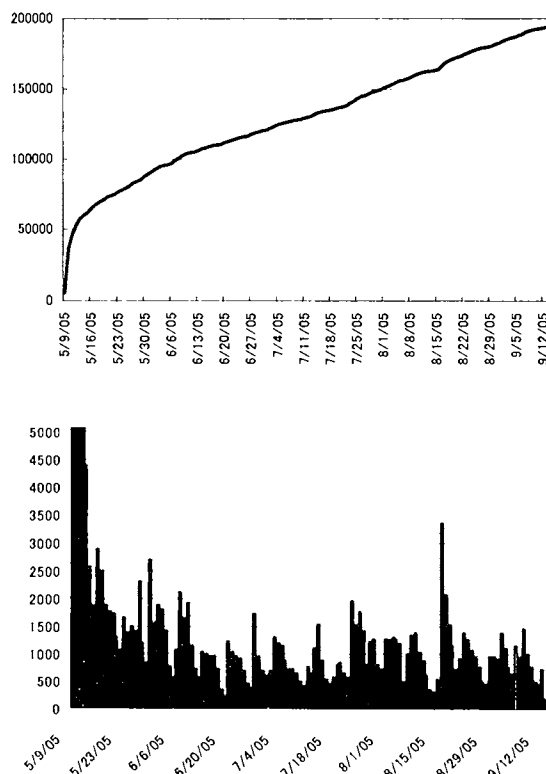


図 17 (a) J-SHIS へのアクセス数(累計)の推移。(b) J-SHIS へのアクセス数(日別)の推移。

8. 今後に向けて

「全国を概観する地震動予測地図」の作成の基本となった総合基本施策は、平成 11 年 4 月に、今後 10 年程度の地震調査研究の基本として定められたものであり、「全国を概観する地震動予測地図」は、その前期 5 年間の成果として位置づけられる。従って、公表された「全国を概観する地震動予測地図」は、最終成果物でなく、今後も継続的に改良され、よりよいものとなっていくことが望まれる。このため、今後の課題をまとめる。

98 主要断層帯の地震に対する地震活動の長期評価においては、BPT 分布を用いた評価が行われているが、評価に必要な情報量の不足のため、最新活動時期及び平均発生間隔が幅を持って評価され、その結果として地震発生確率が幅を持って評価されている場合が多い。確率論的地震ハザード評価においては、幅を持って評価された発生確率の扱いが今後の課題である。長期評価結果の公表に当たっては、パラメータ推定についての信頼度が併せて示されているが、現状では、地震動予測地図には、信頼度についての評価結果は反映されておらず、今後の検討課題となっている。

また、複数の異なった判断を扱うためのロジックツリーは、現状の地震動予測地図作成には用いられていないが、その導入の必要性については、今後の検討課題となっている。

確率論的ハザード評価における強震動評価の課題

として、発生確率が高い地震に対する低確率の強震動評価の信頼性の問題がある。現状の評価では、強震動の生起確率の計算に距離減衰式のバラツキが用いられている。この場合、強震動レベルが、経験的距離減衰式のバラツキの分布の裾野の形状で決まる場合があり、過大評価になる可能性が指摘されている。強震動評価のばらつきの要因についての整理及びばらつきの設定法についてのさらなる検討が必要である。さらに、距離減衰式のバラツキだけでなく、詳細法による各点毎のバラツキ評価の検討も重要な課題である。

震源断層を特定した地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、将来最も起こる可能性が大きなシナリオを選定することになっている。しかし、将来発生する地震について、これまでの調査で得られた情報は限られており、シナリオの選定においては多くの不確定要因を抱えた状況での判断が必要となる。このため、パラメータ設定の不確定性に伴う評価結果のバラツキの評価が重要な課題となっている。

また、ハイブリッド法の精度を上げるためには、前述した3つの要因について、計算技術の高度化、震源モデルの高度化及び地下構造モデルの高精度化が不可欠である。このうち計算技術については、計算機性能の進歩及び計算科学技術の成果により、近い将来、ある程度問題が解決されることが期待できる。

一方、震源及び地下構造に関しては、地震観測網の充実及び地下構造調査、地下構造情報のデータベース化が研究発展にとって不可欠である。特に地震防災の観点からは、強震動評価に資する表層から地球内部構造に至る地下構造・地質情報が重要である。地下構造は、我が国固有のものであり、それに関する情報は、国民共有の国家財産であるとも考えられる。しかしながら、過去我が国においては各種の目的で膨大な地下構造調査が実施されてきたが、それらに関するデータの中には十分活用されないまま死蔵の状態にあるものも少なくなく、データの一部は散逸の危機にある。現状では、我が国には地下構造・地質情報を網羅したデータベースが存在しない。データの散逸を防ぎ、誰でもが利用可能なデータベースを構築することは火急の国家的課題であるとも言える。特に、地下構造・地質情報は、様々な目的を持った調査の結果得られることが多いため、関連するデータが各省庁・自治体・関係機関等に散在して存在している。関係機関の連携のもとこれらデータを統合化した地下構造データベースを構築することが望まれる。

地震動予測地図の工学利用に関する検討を目的として、防災科学技術研究所では「地震動予測地図工学利用検討委員会（委員長：亀田弘行）」を設置し検討を行ってきた。平成16年9月にまとめられた

地震動予測地図工学利用委員会報告書²⁰⁾（以下、工学利用報告書）では、地震動予測地図を「地震ハザードの共通情報基盤」として位置づけることを提案し、それらを実現するための仕組みとして「地震ハザードステーション構想」が示されている。「地震ハザードの共通情報基盤」として求められる情報は多岐にわたり、複雑で膨大な量のデータ群から構成される。こうした情報を、データ作成者側と利用者側の双方が、効率的に作成・管理・運用・利用するためには、以下の条件を満たす仕組みが必要となる（工学利用報告書より）。

- ① 膨大な基礎データを一元的に維持管理すること
- ② 評価結果が客観的かつ公平なものであり説明責任を果たせること
- ③ ユーザ・フレンドリな成果公表体制を長期にわたって維持できること
- ④ システムを統括する責任体制を明確化すること

地震調査研究に基づく地震動予測地図とその利用に必要な地震リスク評価の関係が継続的に機能するためには、それぞれの作成条件と利用条件を明示して理解し合う関係を推進することが不可欠である。地震動予測地図の作成者側と利用者側が連携できる仕組みを作り、両者がすれ違わないような努力が必要となる。このためには、上記条件を満たすような「地震ハザードステーション」の構築が不可欠である。

また、地震調査研究の進歩による発信情報の高度化、利用技術の進歩による発信内容の多様化等に即応できるよう、地震ハザード評価の共通基盤としての地震動予測地図が、定期的に更新・改良されていく仕組みを確立することが望まれる。

謝辞

本研究は、地震調査研究推進本部地震調査委員会及び関連する部会・分科会の指導の下に実施された。防災科学技術研究所に設置された確率論的予測地図作成手法検討委員会（翠川三郎委員長）、及び、地震動予測地図工学利用検討委員会（亀田弘行委員長）からは、数多くの貴重なご意見を頂いた。また、検討作業を担当頂いているプロジェクト関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書, 2005.
- 2) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 石井透, 早川譲, 奥村俊彦, 功刀卓, 神野達夫, 森川信之, 小林京子, 大井昌弘, 原温子, 奥村直子：北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例, 防災科学技術研究所研究資料, 246, 2003.

- 3) 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, 第523号, 63-70, 1999.
- 4) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第3号, 13-27.
- 5) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, 第1巻, 51-56.
- 6) 翠川三郎, 大竹雄: 地震動強さの距離減衰式に見られるバラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第1号, 59-70, 2003.
- 7) Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, T., Kagawa, T., Smith, N., Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80, 1999.
- 8) Wells, D.L. and Coppersmith, K.J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002, 1984.
- 9) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875, 2001.
- 10) 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*, 53, 1-9, 2000.
- 11) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523, 1976.
- 12) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム資料集, 23-34, 1994.
- 13) Pitarka, A.: 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 14) Aoi, S., and Fujiwara, H.: 3D finite-difference method using discontinuous grids, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 918-930, 1999.
- 15) 藤原広行, 藤枝忠臣: 3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 94, 2002.
- 16) 壇一男, 佐藤俊明: 断層の非一様滑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, 509, 49-60, 1998.
- 17) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol.33, Part2, No.298, 63-104, 1983.
- 18) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium*, 151-156, 1986.
- 19) 亀田弘行, 石川裕, 奥村俊彦, 中島正人: 確率論的想定地震の概念と応用, *土木学会論文集*, 第577号, 75-87, 1997.
- 20) 防災科学技術研究所: 「地震動予測地図の工学利用 ―地震ハザードの共通情報基盤を目指して―」: 防災科学技術研究所研究資料第258号, 2004.

海溝型地震の震源モデルと首都圏の強震動評価

SOURCE MODELING OF SUBDUCTION-ZONE EARTHQUAKES AND STRONG MOTION VALIDATION IN THE TOKYO METROPOLITAN AREA

瀬戸一 起^{*1} 三宅弘恵^{*1}

大大特I研究グループ

Kazuki KOKETSU Hiroe MIYAKE

DaiDaiToku I Research Group

The Tokyo metropolitan area is under constant threat of strong ground motions mostly from future plate-boundary earthquakes along the subducting Philippine Sea and Pacific slabs. We introduced a method of building their source models with a pseudo-dynamic approach and a hybrid of deterministic and stochastic ground-motion computations. This method was verified through strong motion validation of the 1923 Kanto earthquake. We upgraded the ground motion simulation of the 1923 event using source model along the new geometry of the Philippine Sea slab, geophysical-based velocity model, and efficient computational tool. The source process was inferred from strong-motion, teleseismic, and geodetic data with the new geometry of the slab by Sato et al. (2005). The 3D velocity-structure model beneath the Tokyo metropolitan area has been constructed by integrating refraction, reflection, borehole, microtremor, and gravity data as well as ground motion spectra (Tanaka et al., 2005). We carried out low-frequency ground motion simulation using these models and the finite element method with a voxel mesh developed by Koketsu et al. (2004). The simulated ground motion is in good agreement with the seismogram observed at Hongo in Tokyo.

1. 首都圏の来るべき地震

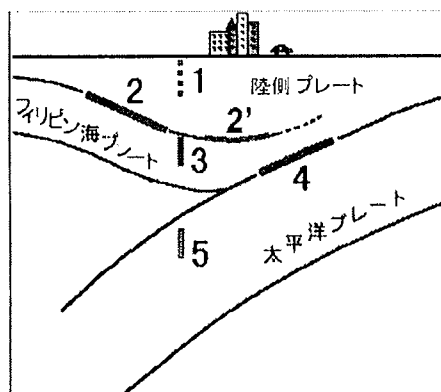


図1. 首都圏下のプレート構成と地震グループ（地震調査委員会^[1]に加筆）。

首都圏ではフィリピン海プレートと太平洋プレートの両方が陸側プレートの下に沈み込むという、非常に複雑なテクトニクスとなっているため、図1に示す以下のような様々な地震の発生が考えられる。

- 1 活断層による内陸の浅い地震
- 2 フィリピン海プレート上面の浅いプレート境界地震
- 2' フィリピン海プレート上面のやや深いプレート境界地震
- 3 フィリピン海プレート内部のスラブ内地震
- 4 太平洋プレート上面のやや深いプレート境界地震
- 5 太平洋プレート内部のスラブ内地震

これらのうちグループ1に属する地震の30年発生確率は、表1に示すようにそれほど大きいものではない。また、フィリピン海プレート上面の浅いプレート境界地震（グループ2）には1923年関東地震と1703年元禄地震が相当するので、その発生間隔は220年であるが、前回の関東地震から約80年しか経過していないので、現時点の30年発生確率は0.065%しかない。

したがって、首都圏の来るべき地震として考慮すべきは図1のグループ2' + 3 + 4 + 5で、これらは

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

活断層名	30年発生確率
関東平野北西縁断層帯	ほぼ0%
平井-櫛挽断層帯	0.43%
立川断層帯	1.3%
伊勢原断層	ほぼ0%
神縄・国府津-松田断層帯	4.2%
衣笠・北武断層帯	0.0047%
武山断層帯	8.4%
三浦半島断層群南部	1.9%
北伊豆断層帯	ほぼ0%

表 1. 首都圏の活断層の地震の 30 年発生確率 [2].

すべて沈み込むフィリピン海プレートあるいは太平洋プレートに直接的に関わる海溝型地震である。グループ 2' + 3 + 4 + 5 全体の 30 年発生確率は 72% と非常に高い。また、中央防災会議から専門調査会報告や対策大綱 [3] が出された「首都直下地震（東京湾北部地震）」もグループ 2' に属し、直下といいながら活断層の地震ではなく海溝型地震である。

さらには南海トラフ沿いの巨大地震（東海地震・東南海地震・南海地震：図 2）も、やや遠方ではあるが長周期地震動などで首都圏に影響を及ぼすので、同じく考慮すべき海溝型地震である。3 地震の 30 年発生確率は 86%、61%、48% で、これらもまた非常に高い値である（表 2）。

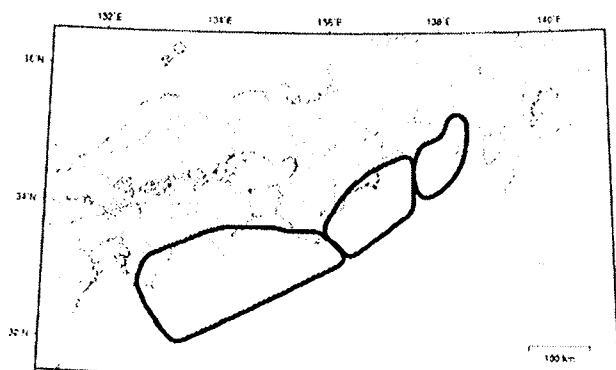


図 2. 南海トラフ沿いの東海地震・東南海地震・南海地震の震源域。

	発生間隔	前回	経過時間	30 年確率
東海地震	118.8 年	1854 年 12 月	150.0 年	86%
東南海地震	86.4 年	1944 年 12 月	60.1 年	61%
南海地震	90.1 年	1946 年 12 月	58.0 年	48%

2005 年 1 月現在

表 2. 東海・東南海・南海地震の 30 年発生確率 [2].

2. 海溝型地震の震源モデル化 [4]

海溝型地震の中でも浅いプレート境界地震は比較的短い間隔（100～200 年程度）で繰り返し発生しているだけでなく、その繰り返しの途中で常に同じ場所

がアスペリティ（断層すべりの大きかった領域）になるという「アスペリティモデル」が提唱されている [6],[7]。このアスペリティモデルに依拠すれば、もし一回前の地震時の震源過程がわかっている場合（東南海地震 [8]、宮城県沖地震 [9] など）、それを来るべき地震の震源モデルとすることができる。

ところが、プレート境界地震はその規模の大きさから、震源過程の解析が長周期帯に限定して行われていることが多い。そのため、前回地震の震源モデルをそのまま用いると、予測強震動の中周期帯（1～5 秒程度）でスペクトルが落ち込むことが予想される。この落ち込みを補うため、震源過程モデルを基に擬似動的震源モデル [10] を構築し、これを中周期帯を含んで周期 1～2 秒程度までの強震動をカバーする長周期側震源モデルとする。

一方、深いプレート境界地震やスラブ内地震は発生間隔が長いので、一回前の地震が詳しくわかっていないことが多い。また、浅いプレート境界地震でも東海地震などでは、一回前が近代的地震観測以前の歴史時代のため、やはり詳細がわからない。そうした場合には内陸地震と同じように特性化震源モデル [11] を用いることになる。ただし、断層面積やアスペリティ総面積などのスケールリング則が、内陸地震と海溝型地震では異なるという研究があるので（たとえば Somerville・他 [12]）、改めて日本付近の海溝型地震の震源過程モデルを収集し、特性化 [13] とスケールリングの作業をプレート境界地震に施した。

その結果 [14] によれば、地震モーメント M_0 (Nm) に対して断層面積 S (km²) とアスペリティ総面積 S_a (km²) は

$$S = 1.49 \times 10^{-10} M_0^{2/3}, S_a = 2.90 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (1)$$

とスケールリングされる。(1) 式を内陸地震に対する結果 [13] と比較すると、同じ M_0 に対してプレート境界地震はやや大きい (S は 1.43 倍、 S_a は 1.25 倍) が、従来の 2 倍以上大きいという結果 [12] に比べるとかなり内陸地震に近い結果となった。

なお、最近の地震ほど豊富なデータにより震源過程の解析精度が上がっていると考えられるので、2003 年十勝沖地震、1996 年 10 月および 12 月日向灘の地震、1994 年三陸はるか沖地震のモデルだけ取り出してスケールリングを行ってみた (図 3)。しかし、その結果

$$S = 1.41 \times 10^{-10} M_0^{2/3}, S_a = 2.90 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (2)$$

は S がわずかに小さくなるだけで (1) 式とほとんど変わらなかった。どちらの場合も S に対する S_a の比

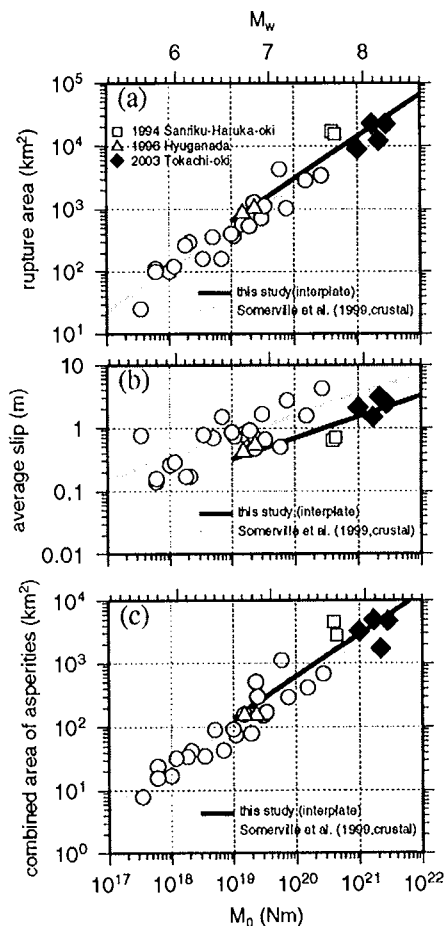


図3. 断層面積・平均すべり量・アスペリティ総面積のスケールリング。

率は、内陸地震の22%^[13]とほぼ同じ値となった。

内陸地震では、短周期成分を含む強震動を生成する領域と、地震動の長周期成分の解析から得られるアスペリティ領域（すべりの大きい領域）がほぼ一致するとして支障がないことが知られている^[15]。ところが、2003年十勝沖地震^[16]や1978年宮城県沖地震^[17]では、強震動生成域がアスペリティ領域に比べかなり小さい面積でないと短周期を中心とした強震動を説明できないという解析結果が公表されている（図4）。この点に関して今後、われわれのグループも何らかの形で貢献すべく、一部の解析作業を始めたところである。

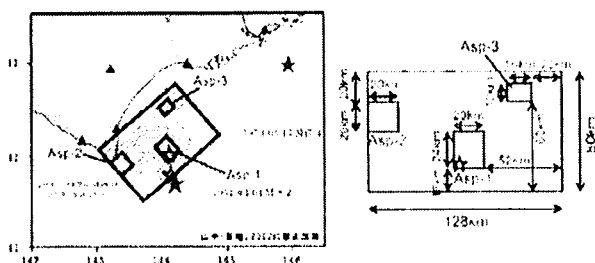


図4. 2003年十勝沖地震の強震動生成域とすべり分布^[16]。

3. 強震動評価

前節で提示した震源モデル化手法を、まず1923年関東地震を対象とした強震動評価で検証している。関

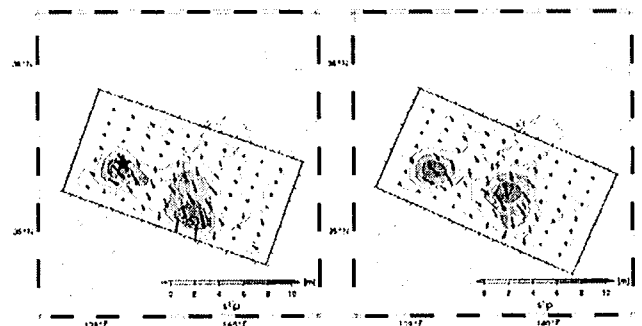


図5. 1923年関東地震のすべり分布（左：Kobayashi and Koketsu^[19]，右：Sato et al.^[20]による）。

東地震は震源過程がわかっている地震^{[18],[19],[20]}であるので、そのすべり分布（図5）から擬似的震源モデル（図6）を作成した。また、検証作業に用いる

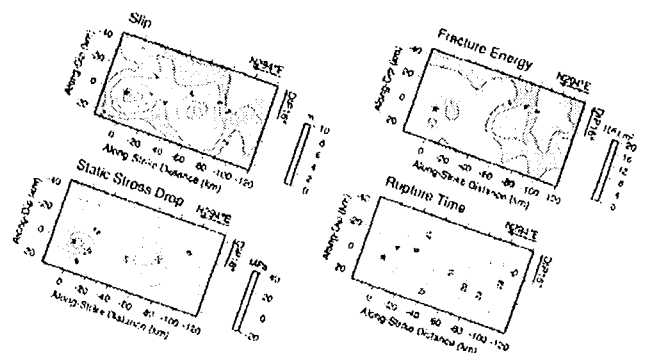


図6. 1923年関東地震の擬似的震源モデル^[4]。

地下構造モデルと表層増幅率地図については、後述する大都市大震災軽減化特別（大大特）プロジェクトの成果を組み込みながら高精度化をはかっている。プレート境界地震では海溝やトラフ付近の構造不均質が地震動に与える影響が大きいと予想されるので、そのモデルの改良と紀伊半島南東沖地震等を用いた検証も行っている^{[21],[22]}。

図5右の震源過程モデル、図7の地下構造モデルとボクセル有限要素法^[25]を用いた強震動シミュレーションの結果の一例を図8に示す。このシミュレーションにより再現された東京・本郷の強震波形を図9に示した。当地では東京帝国大学地震学教室の地震計が東西成分（N77°E）を観測しており、その波形にシミュレーション結果はよく一致している。

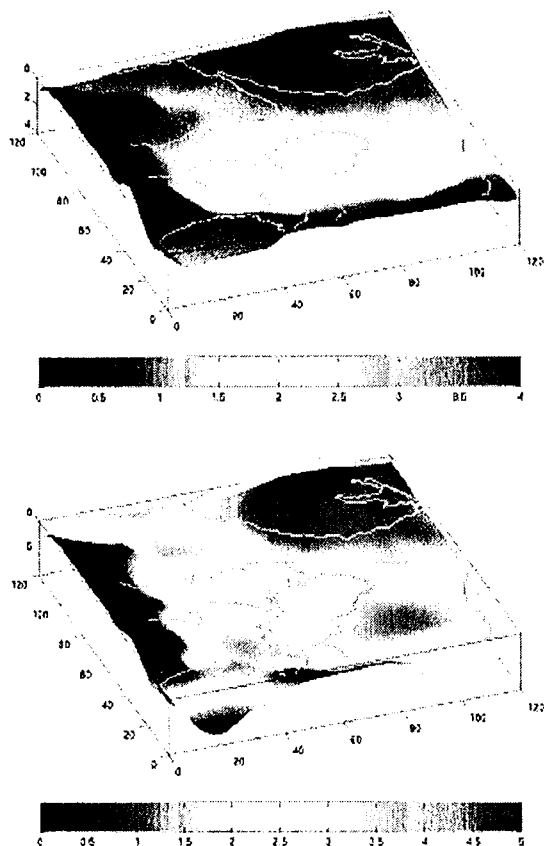


図7. 地下構造モデル内の三浦層群上面および基盤面上面の形状 [23].

4. 大大特プロジェクトの研究成果

2002年に始まった大大特プロジェクトのテーマ1「地震動（強い揺れ）の予測」では、図10に示す4本の測線で大規模な反射法探査を実施し、首都圏下に沈み込むフィリピン海プレート上面の形状を直接的にイメージングすることに成功した。その結果（図10）によれば、フィリピン海プレート上面は従来のモデルより全体的に浅くあるべきで、たとえば東京都下では従来のモデルがほぼ深さ40kmであるのに対して、探査結果は深さ約25kmであることを示している。もしこれが事実であるとする、首都圏直下地震の震源域である東京湾北部ではプレート上面が約10km浅くなるので、この地震の断層面もそれだけ浅くしなければならない。そうすると首都圏での揺れは、中央防災会議^[5]の予測よりかなり強くなるざるを得ないと想像される。

上記の反射法探査ではプレート上面だけではなく、堆積平野と地殻最上部を区切る地震基盤もイメージングされている。こうした情報や、既存の各種探査やボーリングなどのデータも併せて解析して、図7の地下構造モデルが構築されている^[24]。また、表層増



図8. 1923年関東地震による強震動のシミュレーション（地震発生後10, 20, 30秒のスナップショット）[24].

幅率地図は地形地盤分類図を利用して作られる。従来は1kmメッシュの分類図が用いられていたが、同じく大大特プロジェクトで250mメッシュの分類図が作成された（図11）^[26]。

5. おわりに

海溝型地震の震源モデル化手法は、これまで述べてきたように、1923年関東地震を対象に強震動評価を行うことにより検証され始めている。また、内陸地震の震源モデル化手法も、2004年新潟県中越地震の強震動評価を通して検証されつつある^[27]。来年度以降、これら検証作業が確定後、一回前がわかっているプレート境界地震とわかっていないプレート境界地震、それぞれについて一、二例の強震動評価・予測を実施する予定である。

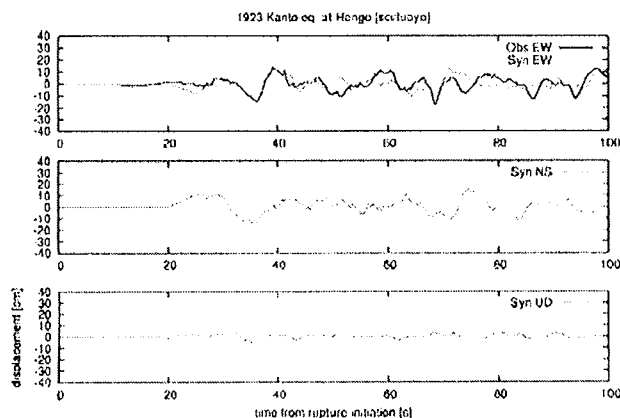


図9. 東京・本郷におけるシミュレーション波形と観測波形の比較（観測は N77°E 成分のみ）[24].

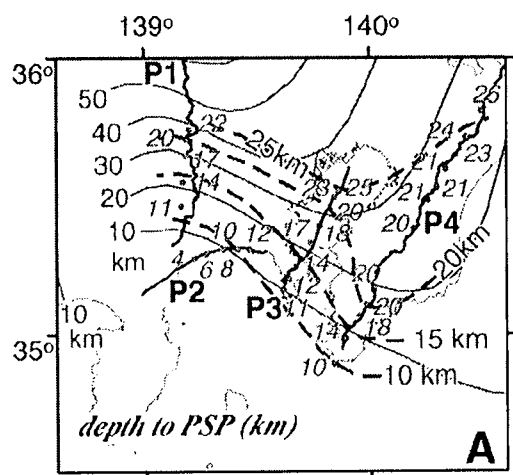


図10. フィリピン海プレート上面の従来のモデルと大分特プロジェクトによる最新モデル[20].

謝辞

本研究は文部科学省受託研究：大都市大震災軽減化特別プロジェクト・テーマI「地震動（強い揺れ）の予測」及び電力共通研究「設計用地震の想定および設計用地震動の評価手法の高度化に関する研究」の補助を得た。東京・本郷における関東地震の波形記録は片岡俊一氏（弘前大）から提供を受けた。

参考文献

- [1] 地震調査委員会: 日本の地震活動, 追補版, 地震調査研究推進本部, 395 頁, 1999.
- [2] 地震調査委員会: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 本編・分冊 1, 地震調査研究推進本部, 121 / 213 頁, 2005.
- [3] 中央防災会議: 首都直下地震対策大綱, 32 頁, 2005.

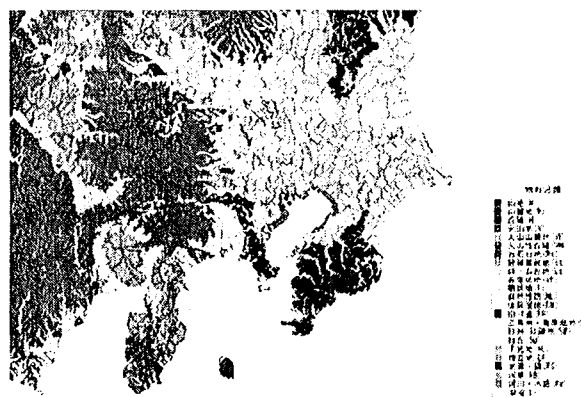


図11. 首都圏の最新地形地盤分類図[26].

- [4] 瀬戸一起・三宅弘恵・大分特I研究グループ: プレート境界地震の震源モデル化と強震動評価, 日本地震学会講演予稿集, A050, 2005.
- [5] 中央防災会議: 第12回首都直下地震対策専門調査会資料, 2-2, 98 頁, 2004.
- [6] Yamanaka, Y. and M. Kikuchi: Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109** (B7), Art.No.B07307, 2004.
- [7] Matsuzawa, T., T. Igarashi and A. Hasegawa: Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (11), Art.No.1543, 2002.
- [8] Ichinose, G. A., H. K. Thio, P. G. Somerville, T. Sato and T. Ishii: Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (M-s 8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, *J. Geophys. Res.*, **108** (B10), Art.No.2497, 2003.
- [9] 呉長江・瀬戸一起: 強震波形記録による2005年・1978年宮城県沖地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, PM20, 2005.
- [10] Guatteri, M., P. M. Mai, and G. C. Beroza: A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 2051–2063, 2004.
- [11] 入倉孝次郎・三宅弘恵, シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, **110** (6), 849–875, 2001.
- [12] Somerville, P. G.・佐藤俊明・石井透・N. F. Collins・壇一男・藤原広行: 強震動予測のためのプレート沈み込み帯沿い地震の不均質すべりモデルの

特性抽出, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 163-166, 2002.

- [13] Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 59-80, 1999.
- [14] 室谷智子・三宅弘恵・瀬戸一樹: 海溝型地震の不均質断層パラメータのスケーリング則, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会, S52-006, 2005.
- [15] Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura, Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93** (6), 2531-2545, 2003.
- [16] Kamae, K. and H. Kawabe: Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{JMA}=8.0$) estimated by the empirical Green's function method, *Earth Planets Space*, **56** (3), 323-327, 2004.
- [17] 地震調査委員会: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 分冊 2, 地震調査研究推進本部, 262 頁, 2005.
- [18] Wald, D. J. and P. G. Somerville: Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 159-177, 1995.
- [19] Kobayashi, R. and K. Koketsu: Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, **57** (4), 261-270, 2005.
- [20] Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, *Science*, **309** (5733), 462-464, 2005.
- [21] 早川俊彦・古村孝志・馬場俊孝: 2004 年紀伊半島南東沖の地震の強震動シミュレーション (その 2) - 海域構造が励起する長周期地震動 -, 日本地震学会講演予稿集, B088, 2005.
- [22] 池上泰史・三宅弘恵・瀬戸一樹: 海溝型地震による長周期地震動 (2): 伝播経路での発達過程, 日本地震学会講演予稿集, B089, 2005.
- [23] 田中康久・瀬戸一樹・三宅弘恵・古村孝志・佐藤比呂志・平田直・鈴木晴彦・増田徹: 首都圏下の速度構造の大大特コミュニティモデル (1): 屈折法・重力・自然地震データによる第一次モデル, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会, S079P-010, 2005.
- [24] 田中康久・池上泰史・小林励司・三宅弘恵・瀬戸一樹: 首都圏の強震動評価: 1923 年関東地震の地震動シミュレーション, 日本地震学会講演予稿集, P207, 2005.
- [25] Koketsu, K., H. Fujiwara and Y. Ikegami: Finite-element simulation of seismic ground motion with a voxel mesh, *Pure Appl. Geophys.*, **161** (11-12), 2463-2478, 2004.
- [26] 若松加寿江・松岡昌志: 大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, 2003.
- [27] 古村孝志・三宅弘恵・瀬戸一樹・須田茂幸・川崎慎治: 小千谷市街地の P 波・S 波反射法探査と地下構造モデル構築, 日本地震学会講演予稿集, P177, 2005.

内陸地殻内地震の強震動評価：上町断層系を例として

GROUND MOTION PREDICTION OF CRUSTAL EARTHQUAKE: UEMACHI FAULT SYSTEM AS AN EXAMPLE

関口春子* 加瀬祐子*

堀川晴央* 吉田邦一*

吉見雅行*

Haruko SEKIGUCHI Yuko KASE

Haruo HORIKAWA Kunikazu YOSHIDA

Masayuki YOSHIMI

We have worked on a ground motion prediction study for the Osaka sedimentary basin, southwest Japan, to develop a method for a high quality prediction by incorporating geological, geographical and geophysical survey data. We constructed a detailed 3D subsurface structure model of the basin compiling the latest geophysical survey data. For rupture scenarios, we performed dynamic rupture simulations under constraints of geological data about active faults. Ground motion in wide frequency range were computed with the rupture scenarios and the 3D subsurface structure model. In this article, we demonstrate our subsurface structure model, earthquake scenario generation process, and predicted ground motion for Uemachi fault system which lies beneath the Osaka plain.

1. はじめに

産業技術総合研究所・活断層研究センターでは、地形・地質・地球物理の最新情報を融合することにより、地震動予測結果を左右する要素を精度よく推定する方法の開発を目指して研究を進めてきた。

信頼性の高い地震動予測には、精度の高い地下構造モデルと物理的に実現性の高い地震シナリオの構築が必須であると考え、地下構造調査結果と地質学的知見に基づく最新の3次元地下構造モデルの作成と、活断層調査結果および破壊シミュレーションに基づく地震シナリオの作成を地震動予測研究の中心に据えた。モデル領域(地震動の予測計算を行う領域)には、数多くの活断層と堆積層厚3 kmに達する大阪堆積盆地を擁する阪神地域を選び、実践的に予測研究を行った。

本稿では、活断層情報と破壊シミュレーションに基づく地震シナリオのモデル化の話を中心に、大阪平野を南北に延びる上町断層系を例とした地震動予測について紹介する。

2. 地震動予測計算の流れ

地震動予測計算の全体的な流れを図1に示す。地震動計算は、工学的基盤面までの地震動計算を、低周波数成分と高周波数成分とに分け、前者を3次元差分法(Pitarka, 1999)、後者を統計的グリーン関数法(大西・堀家, 2000)を変更)で計算し、これらを足し合わせてから、工学基盤以浅の浅層地盤の応答を等価線形法(DYNEQ:吉田・末廣, 1996)で

計算する。工学的基盤面までの低周波数成分の計算に用いる震源は、断層の過去の変位量分布に関する情報の多い活断層に関してはこれを利用して破壊の3次元差分法(加瀬ほか, 2002)による動的シミュレーションで地震シナリオを推定し、それ以外の震源については運動学的に地震シナリオを推定する。この地震シナリオを入力にし、3次元的に不均質な速度構造モデルを媒体に用いて3次元波動場を計算する。

工学的基盤面までの高周波数成分の計算に用いる震源は、低周波数成分の地震シナリオを基に統計的グリーン関数法のスキームにあったパラメータをモデル化する。速度構造モデルは工学的基盤面以深を1次元モデルに近似したものを用いる。

3. 地震シナリオの構築

断層面上の不均質なすべり量分布は、震源域近傍の強震動に大きな影響を与える。例えば1995年兵庫県南部地震では、神戸側の断層面上の2つのアスベリティ(すべりの大きい部分)から発生した地震波が、破壊の前方指向性により神戸側に幅1秒ほどのパルス地震波となって到来し、その波が堆積層により増幅し、盆地端部で生成された表面波と重なって強められ(図2)、いわゆる“震災の帯”が形成されたと考えられている。不均質なすべり分布は、当然、地震動予測においても、重要な要素である。

これまでの地震動予測のための地震シナリオの設定に

* 産業技術総合研究所 活断層研究センター

Active Fault Research Center, GSJ/AIST

においては、活断層情報は断層面の幾何形状や平均すべり量を与えるのに用いられ、地震シナリオの不均質性の設定には、過去の地震のすべり分布モデルから統計的に得られたスケーリング則に従う大きさとすべり量のアスペリティを使い、アスペリティの位置に関しては様々な場合を考えるという方法が、多く用いられている(例えば、入倉ほか、2002)。このような方法は、地震破壊の複雑さの普遍的特徴を具体化することができるが、その不均質分布の形状は拘束しない。

我々は、活断層情報をより積極的に用いることにより、地震シナリオのできるだけ多くの要素を拘束することを考えた。地震破壊プロセスは複雑で、そのすべてを予測することはできない。しかし、安定した地殻構造のところと同様の造構応力が作用し続けているとすれば、1つの断層に繰り返される地震も大枠は似たようなものになるだろう。そうであれば、それぞれの活断層に固有な不均質なすべり量分布の大まかな特徴(長波長成分)は、過去の地震によるずれから推定できると考えられる。

この考え方を支持する事例として、Lindvall *et al.* (1989)、Sich and Jahns (1984) のカリフォルニアの断層についての研究がある(図 3)。彼らは、過去の地震による変動地形を調べ、地表断層沿いの変位が各所でおおよそ一定であること、地震にはいくつかのパターンがあり、これが繰り返されていることを示唆する結果を見出している。

このような繰り返される地震の相似性に関する研究を背景に、活断層で発生する固有規模の地震の不均質なすべり分布は、“ある程度”相似であるという考えに立って、断層面上の不均質すべり分布を活断層の地表トレースにおける過去の地震の変位量分布から推定することを考えた。さらに、小さなスケールの不均質性として、破壊現象に特徴的なフラクタル的複雑さをすべり分布に添加する。

また、すべりの不均質だけでなく、破壊の広がり方やすべりの時刻歴も、発生する強震動の分布や強さを大きく左右する要因であるが、これについて動力学的に妥当なものを与えるため、自発的な破壊伝播過程の動力学的シミュレーションにより予測する。上記のすべり分布を応力降下量分布に変換し、臨界すべり量(D_c)や静・動摩擦係数などの動的パラメータを仮定し、摩擦構成則のもとに自発的な破壊の進展をシミュレーションすることにより、動力学に基づいた地震シナリオを得ることができる。この方法を用いることにより、これから発生する地震の、起こりうる地震シナリオのみをモデル化することができる。

3.1 活断層情報に基づく地震シナリオの作成方法

地震シナリオの作成は、断層面上のすべり量分布モデルの作成、静的応力降下量分布への変換、初期応力場モデルへの変換、動的破壊シミュレーション、という作業からなる(図 4)。

断層面上のすべり量分布は、走向方向には活断層調査から得られた1回の地震による変位量分布と相似にし、傾斜方向には、ここでは地震発生層全体が破壊する場合を考え、地震発生層下端においては、脆性から延性への遷移を考慮した地震のシミュレーション(Tse and Rice, 1986)の結果を参考にして零に収束する分布を考える。1回の地震による変位量の分布が得られていない場合は、平均変位速度を用いてすべり分布モデルを想定できるが、断層系内の異なる活動履歴をもつセグメントの存在を考慮したり、1回分の変位量を見積もったりする必要がある。この、走向方向の分布と傾斜方向の分布を掛け合わせて、長波長の不均質すべり分布を作る。

さらに、すべり分布にフラクタル的複雑さを添加する。前節で作成したすべり分布に乱数を掛け合わせてから、Mai and Beroza (2002)がすべり分布モデルから直接的に導出した統計的な不均質性を参考に、その分布を波長領域で $k^{-1.75}$ になるよう調整した。

すべり量分布のモデルは、Okada (1992)の定式(半無限媒質内の静的な変位が作るひずみ場の理論式)を用いて静的な応力降下量分布に変換する。断層面の幾何形状、広域応力場の向きと静的応力降下量分布モデルから、断層面上の初期応力分布のモデルを作る。破壊の開始点の位置を与え、断層破壊プロセスをシミュレーションし(図 4)、地震シナリオを得る。

3.2 活断層調査によって得られた上町断層系の特徴

大阪平野の中央部には、千里丘陵の佛念寺山断層、上町台地西縁の上町断層、および泉北の坂本断層などが知られていた(活断層研究会, 1991)。1995年兵庫県南部地震後に精力的に行われた、反射法地震探査(大阪市, 1997; 杉山, 1997 など)や詳細な地形判読(国土地理院, 1996)により、それまで、地形やボーリングデータから推定されていた伏在断層・撓曲の存在が確認され、佛念寺山断層、上町断層、桜川撓曲、住江撓曲と泉北丘陵西縁に分布する断層群が一連の断層系をなしていることが明らかになった。この断層系は逆断層で、全長は45 kmほどになる。この断層での地層の食い違い量が複数箇所で測定されている(図 5)。

この食い違い量とその地層の堆積年代から算出される平均上下変位速度は、0.1–0.4 m/千年であり、断層系北部で大きく、南部が小さい(図 6)。図 6には、後述の大阪堆積盆地 3 次元地盤構造モデルの地層の食い違い量から計算した平均上下変位量も示している(この値は、反射法地震探査やボーリングで得られた値を重力異常のデータを用いて内挿したものとみなせる)。上町断層系のセグメンテーションについては、次の2つの可能性が考えられる。1つ目は地表トレースの特徴をそのまま反映したもので、佛念寺山断層、上町断層北部から桜川、住之江撓曲に繋が

る北セグメントと、そこで左へステップして、上町断層南部から泉北丘陵西縁断層群へと続く南セグメントの2つのセグメントに分かれるというものである。しかし逆断層は、地表付近で分岐して地表トレースが複雑になる場合があり、上町断層系の中央部で断層がステップして見えるのもごく表層のみの分岐である可能性がある。そこで2つ目の可能性として、上町断層系全体が単一のセグメントであるとも考えられる。

最新活動については、新淀川北岸で行われた反射法探査と群列ボーリングより、時期は9,200~9,500年前、上下変位量は1.6~1.9 m以上、最大約2.4mと推定されている(杉山ほか, 2003)。

3.3 上町断層系の地震シナリオ

上町断層系については、新淀川北岸での最後の地震による変位量を満足するよう、平均変位速度の分布から断層面上のすべり分布モデルをつくる。全体が単一の断層面である可能性と、ステップしている可能性とが考えられることは前節で述べたが、ここでは単一セグメントの場合を考える。図6に示したように、断層トレース上の各部の平均上下変位速度の分布には、北側に大きい、南側に小さい2つのピークが認められる。2.1節で述べた、断層面上の不均質すべり分布の作成法を適用すると、北側に面積と変位量が相対的に大きいアスぺリティ、南側にやや小さいアスぺリティを持つ分布が想定される。深さ方向の分布については、すべりが地震発生層全範囲に広がった場合を考え、深さ19 kmあたりで零に収束する分布を仮定している。最終すべり量分布のすべり量の絶対値は、1回の地震の変位量が得られている新淀川付近の地表の上下変位を計算し、これが2.5m程度になるように調整した。最終すべり分布モデルと、そこからOkada(1992)の定式を使って計算された応力降下量分布モデルを図7に示す。

こうして得られた静的応力降下量分布モデルを、東西圧縮の広域応力場を仮定して初期応力場モデルに変換し、これをもとに動的破壊のシミュレーションを行った。破壊開始点としては、初期応力場の複数あるピークの中から選んだが、破壊開始点を置く位置により、破壊域が違うシナリオが得られた(図8)。単一セグメントモデルで断層面の北端に近いところから破壊を開始させた場合、破壊は断層面の南端まで広がるが、断層面の南端に近いところから破壊を開始させると、断層面の中央部よりやや南の、小さいすべり量を仮定した部分で破壊が止まる。これは、すべり量の小さい部分がバリアのような役割を果たしており、破壊が北から始まった場合には、北部の大きなすべりによって破壊フロントに大きなエネルギーが集中し、バリアを乗り越えるのに対し、破壊が南から始まった場合には、南部のすべり量が小さいため破壊フロントに供給されるエネルギーが小さく、バリアを乗り越えられないためと考えら

れる。上町断層系の想定地震は、全体が破壊するとMw6.9程度(シナリオ1, 2, 3)、北部のアスぺリティのみが破壊するとMw6.8程度(シナリオ4)、南部のアスぺリティのみが破壊するとMw6.4程度(シナリオ5)になった。

4. 大阪堆積盆地の地盤構造モデル

本研究で対象とする大阪堆積盆地のような盆地構造は、盆地内部の厚い堆積層による地震動の増幅、反射、回折や、盆地端での2次的な波の励起などにより波動場が複雑な様相を示すため、詳細なモデル化が必要とされる。そこで、本研究においては、ボーリングデータなどの地質情報や、反射法地震探査や重力探査などの地球物理学的な情報を元に新たに地下構造モデルを作成した。モデルの作成にあたっては、地下構造に関する情報量、地震動計算手法、地震動計算に必要なモデルの精度を考慮し、堆積盆地全体を包括する深部モデルと、表層数十から百メートル程度までの沖積層部分を主体とする浅層モデルとに分けてモデル化を行った。そして、地震基盤以深(S波速度が3.1 km/s以上)の構造は、前田・渡辺(1984)の水平成層構造モデルを用いている。以下では、深部地盤構造モデル、浅層地盤構造モデルについて述べる。さらに、高周波成分のモデル化に必要な、高周波エンベロープの経時特性のモデル化についても述べる。

4.1 深部地盤構造モデル

大阪堆積盆地に関しては、OD1-OD9の深層ボーリング、基盤に達する温泉ボーリング、大阪平野や大阪湾における反射法地震探査などにより、90年代初めに、その地質構造の概略が明らかになっていた。また、1995年の兵庫県南部地震以後、様々な機関により、深層ボーリング、反射法地震探査、古地震学的調査が行われ、さらに詳細な情報が提供された(例えば、市原, 2001)。

大阪堆積盆地は、周囲の山地が隆起し楕円形の盆地部分が沈降してできた凹地に、大阪層群、段丘層、沖積層が厚く堆積しており、その層厚は中央部で1000~3000mに達する。東、西、北の盆地端は活断層で山地と区切られ、盆地内部にも上町断層系、大阪湾断層、仮屋沖断層などの活断層が存在している(例えば、活断層研究会, 1991)。

大阪堆積盆地の3次元速度構造は、香川ほか(1993)によって初めて数値モデル化され、後に宮腰ほか(1997; 1999)、趙ほか(2002)、Kagawa *et al.* (2004)によって改良されている。これらのモデルでは、3層に区分された堆積層の層境界と基盤上面の深さ分布がスプライン関数によって展開されており、モデルを構成するデータがコンパクトで、任意の地点の直下の構造を取り出せるという長所がある。

これに対し我々は、モデル領域を主要な断層で幾つかのブロックに分割し、それぞれのブロックで堆積層の構造

をモデル化した(堀川ほか, 2003)。この方法により, 逆断層による急峻な基盤形状なども忠実に表すことができる。図9に地盤構造モデルの基盤岩上面深度分布を示す。モデルは, 水平方向100m, 深さ方向50mのメッシュ数値データの形で表されている。各メッシュの地震波伝播速度と密度は, 反射法地震探査やPS検層の結果から得られた深さや堆積年代との相関関係をもとに与えられている。構築した地下構造モデルが地震波伝播をどれだけ精度よく再現できるかについては, 近傍で起こった小地震(M $\sim$ 4)の地震動のモデリングを行い, 観測波形と比較して検証し, その結果に応じてモデルの変更を行っている。この地盤構造モデルは, 産業技術総合研究所地質調査総合センターから出版されている。

4.2 浅層地盤構造モデル

大阪堆積盆地では, 深さ100m程度までの浅い部分については, ボーリング調査が数多く行われており, 地質や地震波速度などの情報が比較的豊富に存在する。本研究では大阪平野で行われた約3万本のボーリングデータを集めた関西圏地盤情報データベースを利用し, 浅層地盤(沖積層～段丘層)構造モデルを作成した(山本ほか, 2005; 吉田ほか, 2005)。モデルは, 水平方向500m間隔のメッシュでモデル化されている。沖積層部分(ここではおおむね $V_s=350\text{m/s}$ 以下, 大阪湾沿岸域の最深部で深さ50m程度まで)では, 鉛直方向に2m刻みに地層を分割し, 各細分層で卓越する土質(粘土, 砂・礫)と平均的なN値および有効土被り圧をデータベース化し, 同時に各土質に対して有効土被り圧, N値に対するS波速度の経験式を求め, S波速度構造を作成した。段丘層部分では, 第一洪積砂礫層と海成粘土のMa12層を判別し, これらそれぞれについて深さに対するS波速度の経験式を求め, S波速度構造とした。図9にモデル化した沖積層厚の分布を示す。

なお, 等価線形法による計算においては地盤の非線形性を考慮するが, 非線形性を表すひずみ-剛性率モデルにはHardin-Drnevichモデル(Hardin and Drnevich, 1972)を採用し, その媒質固有パラメータである基準せん断ひずみ γ_r ($G/G_{\max}=0.5$ でのせん断ひずみ, $G, G_{\max}$ は剛性率と微小変形時の剛性率。)と最大減衰定数 $h_{\max}$ は, 古山田(2004)が大阪平野の土について室内実験より求めた値を用いた。

4.3 高周波エンベロープの経時特性

統計的グリーン関数法で高周波数成分を合理的に合成するためには, 地震動予測のモデル領域内での高周波の経時特性を調べ, この経時特性に従う統計的グリーン関数を生成する必要がある。高周波エンベロープには地域差があることが明らかになっている(例えば, 干場ほか, 2003)。大阪盆地内のボアホール地震観測記録を用いて, 高周波数成分の経時特性を調べた(堀川ほか, 2005)。Saito *et al.*

(2002)によるエンベロープを仮定し, そのエンベロープの幅を規定するパラメータのマグニチュード, 震源距離依存性を観測記録をもとに推定した。

5. 予測地震動の計算結果

得られた地動速度の最大値の分布と計測震度の分布を図10に示す。シナリオ1は初期破壊クラックを断層系北端近くの応力降下量分布のピークに置いた場合で, 破壊は断層面の南端まで達する。それに伴い, 強震動の領域は, 断層系全体の震源近傍域に及ぶ。震源域の強震動の強さ分布をさらに細かく見ると, 断層面上の2つのすべり量の大きな分布を反映して, 南北に2つの大振幅領域が広がる分布になっていることがわかる。しかし, すべり量分布がそのまま地表面に投影された形ではなく, 北から南へ進んだ破壊の前方指向性により, 少しずつ南にずれて現れている。地動速度の最大値は, 工学基盤面上におけるものでは最大値は1.39 m/sであるが, 浅層地盤の影響を加味すると2.0 m/sを越える領域が上町台地の東西に現れ, その最大値は2.25 m/sとなる。上町台地の西側では比較的沖積層が厚く, 特に増幅の効果が大きく出ている。また, 速度で2.0 m/sを超えるあたりと, 震度7相当の領域が概ね対応している。

シナリオ2は, 断層北端よりやや南, アスぺリティの中心部近くから破壊を開始させた場合で, 破壊は断層面の南端まで達するが, 進展の仕方はシナリオ1と異なり, 断層面中央部付近で破壊の進展が一旦止められ, それから浅いほうから深いほうへと破壊が広がっている。破壊開始点から断層傾斜方向上向きに向かう破壊が, 逆断層の地震で最も強い前方指向性の現れる方向になるが, シナリオ2ではこの方向に進んだ破壊がアスぺリティの中心の応力降下量の最も大きいところを通るため, その先の地表面での地震動が非常に大きくなっている。一方, 南方への破壊進展はシナリオ1に比べて勢いがやや小さく, また南側での破壊が深い方向へ向いたため, 断層沿いの南の地域での強震動域の広がり方は, シナリオ1に比べて弱くなっている。

6. おわりに

我々の地震動予測研究では, 最新の情報による地下構造モデルの作成と, 地震シナリオの作成方法の高度化を中心に据えた。

地下構造モデルの作成では, 地下構造調査結果をできるだけ忠実に表現するようにモデルを作り, 中小地震を用いて検証をしている。しかし, 地下構造調査の密度が低く重力異常データや地質情報による内挿に頼っている部分については, 変更の自由度が大きく, 検証結果から正しくモデルの修正することが難しい。地下構造モデルの精度を必要なレベルまで上げていくには, 中小地震によるモデ

ルの検証, 検証結果にもとづく地下構造探査の追加, そして地下構造の修正を繰り返すことが必要であろう。

地震シナリオの想定では, 活断層での過去の地震による変位の情報を直接取り込むことにより, その活断層で起こる地震の特徴を再現することを試みた。このような方法をとるには, ひとつの活断層について密度の高い変位の履歴の情報が必要である。また, この方法は, ひとつの活断層で同様の地震が繰り返されることを仮定しているが, この仮定がどのような条件下で妥当なのかを検証するに足る, 詳細な活断層情報も望まれる。

謝辞 関西地震観測研究協議会, 大阪ガス, 気象庁, 鉄道技術総合研究所が観測された, 1995 年兵庫県南部地震の波形を使用させていただいた。図の作成には, Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1995) を使用した。記して感謝します。

参考文献:

- Hardin, B. O. and V. P. Drnevich (1972) Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves, J. SMFD, Prod., ASCE, Vol.98, No. SM7, 667-692.
- 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.
- 堀川晴央・関口春子・吉見雅行・吉田邦一 (2005) 大阪地域で観測される高周波エンベロープの特性化, 日本地震学会 2005 年度秋季大会。
- 市原実 (2001) 特集＝続・大阪層群－古瀬戸内河湖水系－, アーバンクボタ 39, 株式会社クボタ, 65pp.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・川辺秀憲 (2002) 強震動予測のための修正レシビとその検証, 第 11 回日本地震工学シンポジウム講演論文集, pp. 567-572.
- Kagawa, T., B. Zhao, K. Miyakoshi and K. Irikura (2004) Modeling of 3D basin structures for seismic wave simulations based on available information on the target area: case study of the Osaka basin, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1353-1368.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南荘淳 (1993) 大阪堆積盆地における深部地下構造のモデル化, 第 22 回地震工学研究発表会講演概要, 199-202.
- 加瀬祐子・堀川晴央・関口春子・佐竹健治・杉山雄一 (2002) 上町断層系の動的破壊過程の推定, 活断層・古地震研究報告, no. 2, 325-340.
- 加瀬祐子・関口春子・堀川晴央・石山達也・佐竹健治・杉山雄一 (2003) 活断層情報から推定した不均質応力場中の動的破壊過程: 上町断層系・生駒断層系への応用, 活断層・古地震研究報告, no.3, 投稿中.
- 活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層－分布図と資料－, 東京大学出版会.
- 国土地理院, 1:25,000 都市圏活断層図.
- 古山田耕司 (2004) 土の非線形モデルが地盤の応答評価に与える影響, 第 32 回地盤震動シンポジウム (2004) 論文集, 表層地盤の増幅特性の評価の現状と課題－地盤振動研究を耐震設計に如何に活かすか (その 3)－, 97-104.
- Lindvall, Scott C. and T. K. Rockwell, K. W. Hudnut (1989) Evidence for prehistoric earthquakes on the Superstition Hills Fault from offset geomorphic features, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.79, No. 2, pp. 342-361.
- 前田直樹・渡辺晃 (1984) 微小地震の破壊様式－近畿地方中北部の微小地震活動について－, 地震 2, 37, 579-598.
- 宮腰研・香川敬生・越後智雄・堀江佳平・澤田純男 (1997) 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化 (その 2), 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 33-36.
- 宮腰研・香川敬生・趙 伯明・徳林宗孝・澤田純男 (1999) 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化 (その 3), 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, 185-188.
- 水野清秀・寒川旭・関口春子・駒澤正夫・杉山雄一・吉岡敏和・佐竹健治・荻谷愛彦・栗本史雄・吾妻崇・須貝俊彦・栗田泰夫・大井田徹・片尾浩・中村正夫・森尻理恵・広島俊男・村田泰章・牧野雅彦・名和一成 (2002) 50 万分の 1 活構造図「京都」(第 2 版), 地質調査総合センター.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- 大西良広・堀家正則 (2000) 統計的グリーン関数法を用いた 3 成分地震動合成法の兵庫県南部地震への適用, 構造工学論文集, 46B, 389-398.
- 大阪市 (1997) 上町 (上町断層帯) に関する調査, 平成 7 年度・平成 8 年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集, 90-94.
- Pitarka, A. (1999) 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68.
- Sieh, K. E. and R. H. Jahns (1984) Holocene activity of the San Andreas fault at Wallace Creek, California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 883-896.

Sekiguchi, H., K. Irikura and T. Iwata (2002) Source inversion for estimating continuous slip distribution on the fault - Introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults -, *Geophysical Journal International*, **150**, 377-391.

関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・石山達也・佐竹健治・杉山雄一 (2003) 活断層情報を用いた想定地震の不均質すべり・応力分布の推定. 活断層・古地震研究報告, no. 3, 273-284.

杉山雄一 (1997) 上町断層系の反射法弾性波探査. 地調研究資料集, **303**, 105-113.

杉山雄一・七山太・三浦健一郎・吉川猛・横田裕・末廣匡基・古谷正和・栃本泰浩・廣瀬孝太郎・横山芳春・北田奈緒子・竹村恵二 (2003) 上町断層系の補足調査(その 2)-新淀川北岸における追加ボーリングと S 波反射法地震探査データの再解釈に基づく上町断層の活動性評価-. 活断層・古地震研究報告, no. 3, 117-143.

Tse, S. T. and J. R. Rice (1986) Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, **B, 91**, 9, 9452-9472.

Wessel, P., and W. H. F. Smith (1995) New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **76**, 329.

山本浩司・田中礼司・関口春子・吉田邦一 (2005) 字岩情報データベースによる大阪堆積盆地の Vs 推定式と浅層地盤モデル, 第 40 回地盤工学会研究発表会.

吉田邦一・山本浩司・関口春子 (2005) 大阪平野強震動予測のための浅層地盤モデルの構築, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会.

趙伯明・香川敬生 (2002) 2000 年鳥取県西部地震 (MJ7.3) の大阪堆積盆地における 3 次元強震動シミュレーション. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会講演予稿集, S081-008.

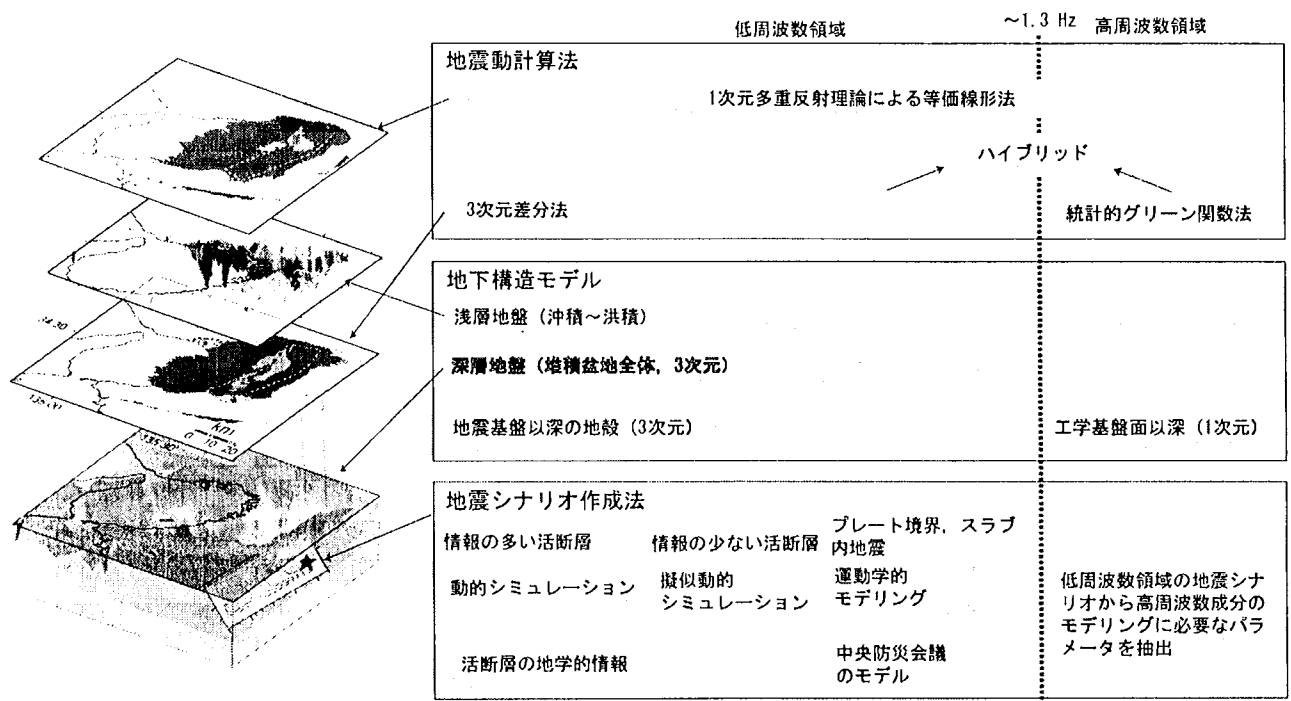


図 1. 地震動予測計算の流れ

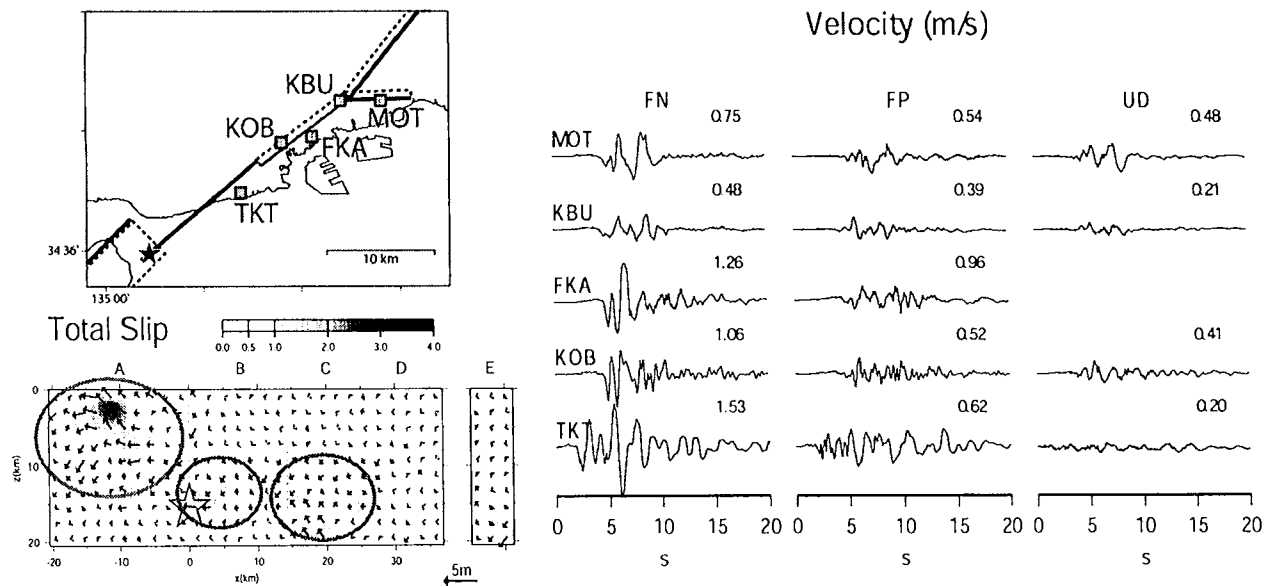


図 2. 1995 年兵庫県南部地震の、震源近傍の速度記録と波形インバージョンによるすべり分布モデル (Sekiguchi *et al.*, 2002 におよそのアスぺリティ位置を加筆)。観測波形は、関西地震観測研究協議会 (MOT: 本山, KBU: 神戸大学), 大阪ガス (FKA: 葺合), 気象庁 (KOB: 神戸気象台), 鉄道技術総合研究所 (JR 鷹取) による。

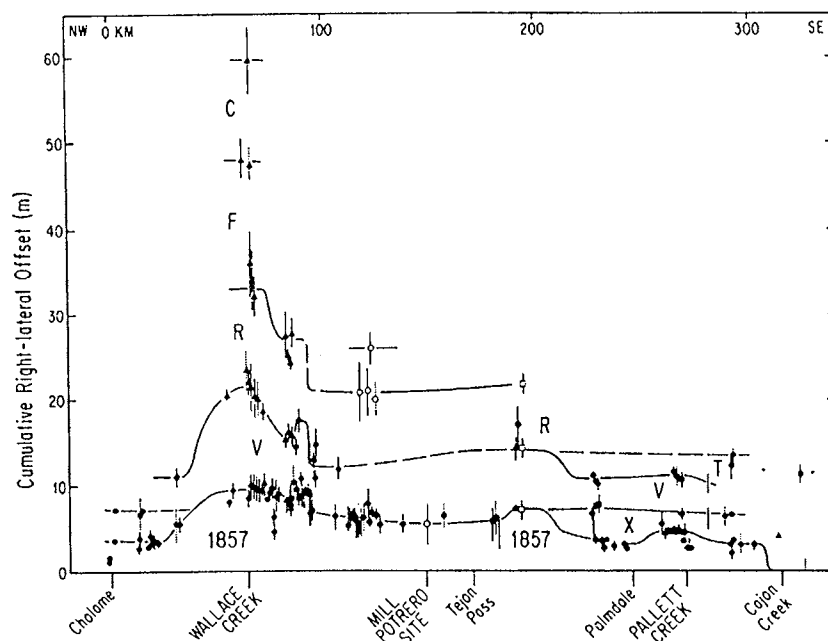


図 3. サンアンドレアス断層南中部セグメント沿いで、変動地形の測定より得られた過去の地震による変位量の分布 (Sieh and Jahns, 1984).

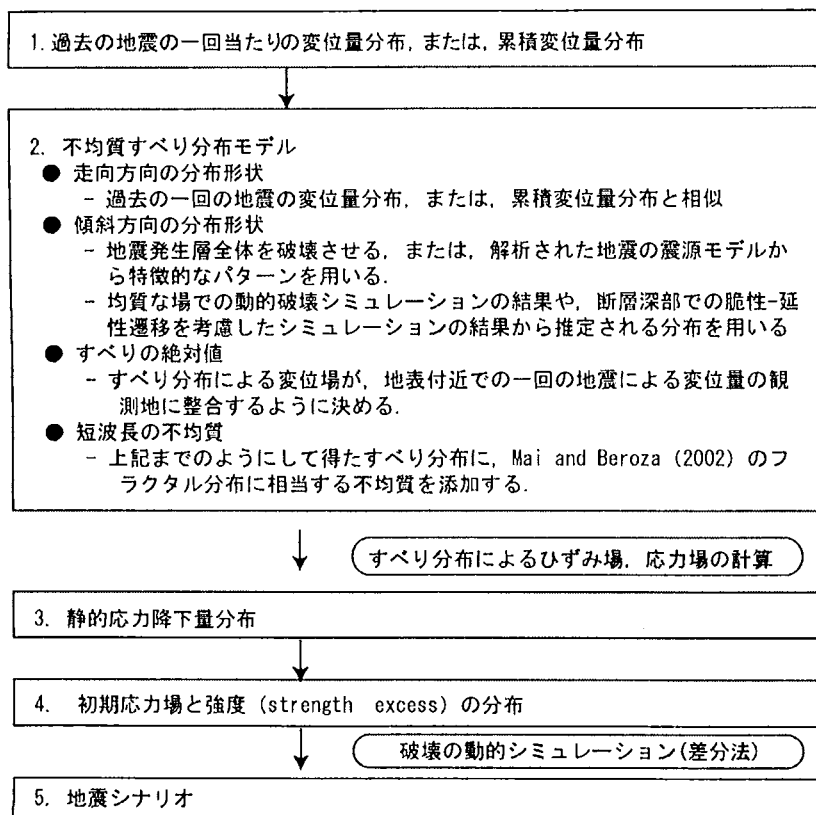


図4. 地震シナリオ作成の流れ

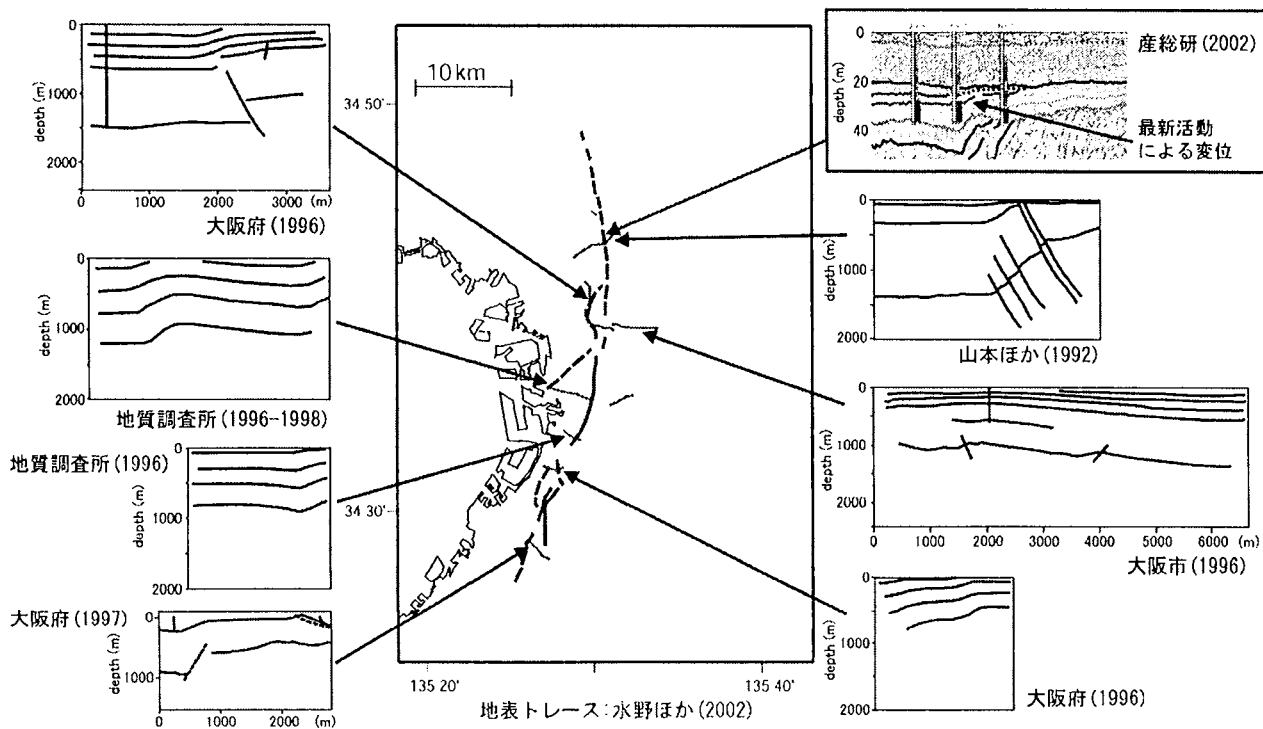


図5. 上町断層系を対象とした反射法地震探査.

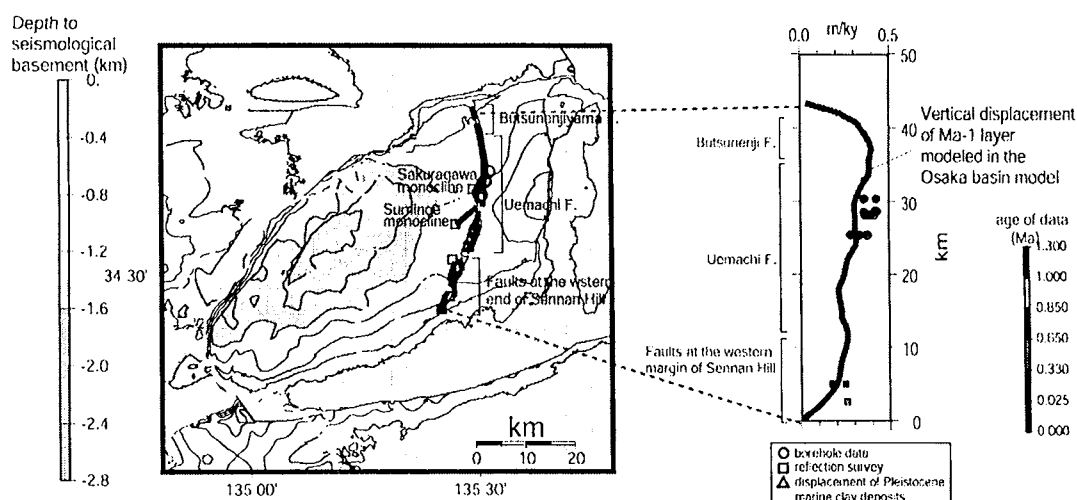


図 6. (左) 大阪堆積盆地の地盤構造モデルの基盤深度分布. 赤線は, 水野他(2002)による上町断層の地表トレース. 上町断層系の累積変位に関するデータが得られたボーリング地点 (○), 反射法地震探査測線と上町断層系との交点 (□), 段丘面 (Δ). 右) 大阪堆積盆地の地盤構造モデルでモデル化されている Ma-1 海性粘土層の, 上町断層をまたいだ深さの差より得られる平均変位速度分布.

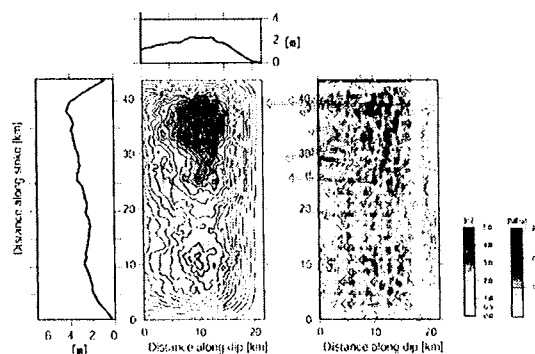


図 7. 上町断層系の最終すべり量分布(左)と静的応力降下量分布(右)のモデル. 全体が単一セグメントであると考えた場合.

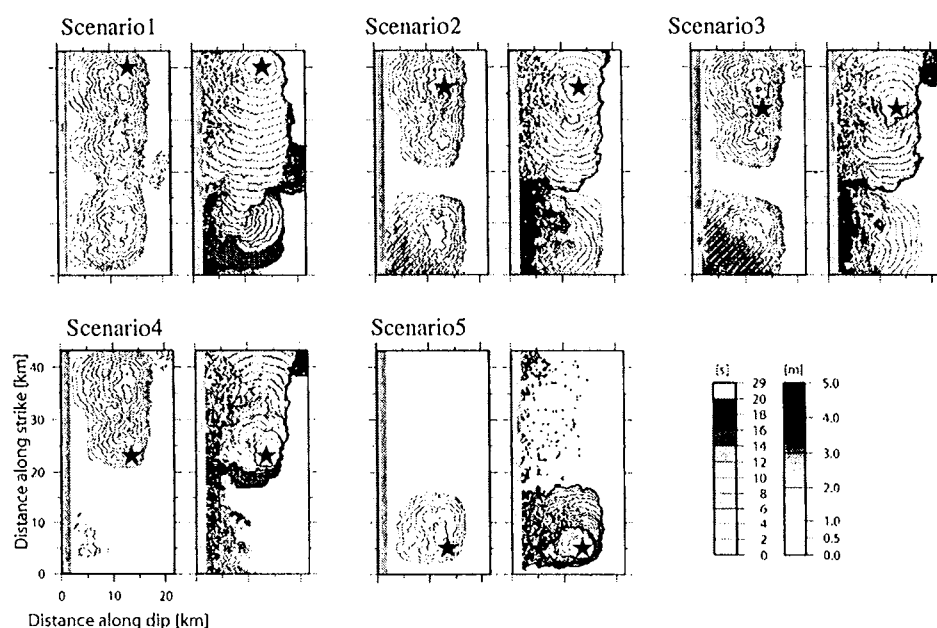


図 8. 図 7 の応力降下量分布に基づき, 様々な場所に初期破壊クラックを置いて破壊の動的シミュレーションを行って得た地震シナリオの, 最終すべり量分布(左)と破壊時刻(右)の分布.

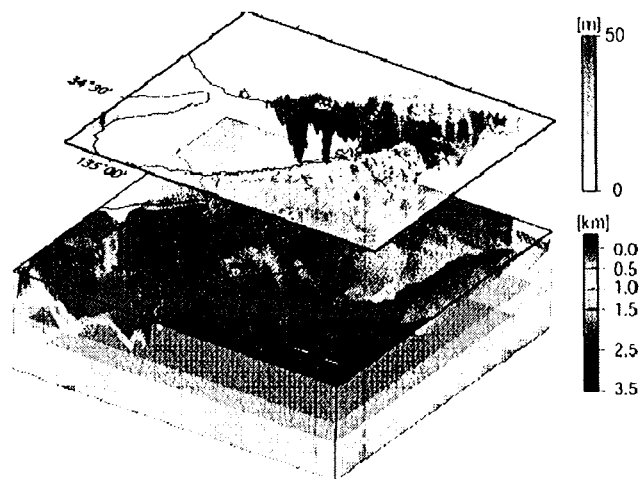


図 9. 大阪堆積盆地の深部地盤構造モデルの基盤深度分布(下)と、浅層地盤構造モデルの沖積層厚分布(上)。

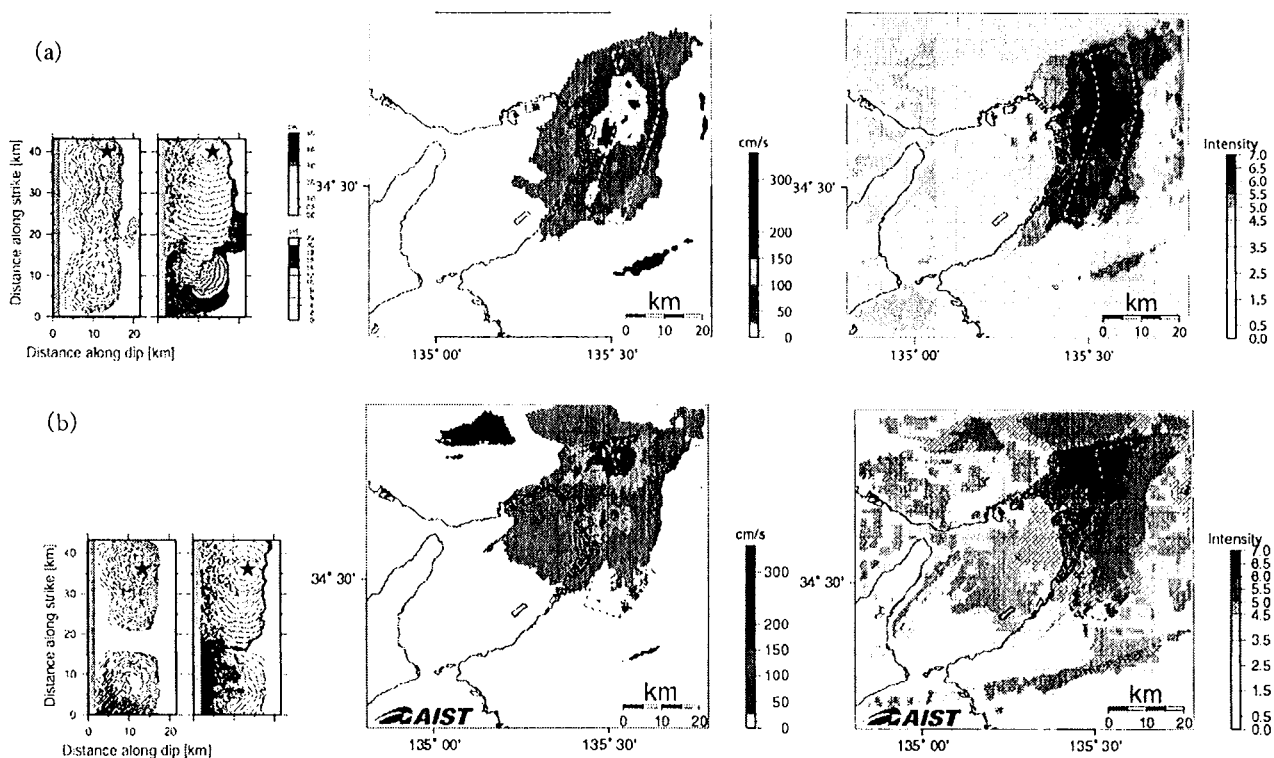


図 10. 上町断層系の地震シナリオとそこから計算される地動速度の最大値の分布と計測震度分布。(a)断層の北端部近くから破壊を開始させた場合(図 8 のシナリオ 1 に対応)。(b)断層北端よりやや南のアスペリティ中心部近くから破壊を開始させた場合(図 8 のシナリオ 2 に対応)。

南海地震による近畿圏の強震動予測

STRONG GROUND MOTION PREDICTION IN KINKI DISTRICT FOR NANKAI EARTHQUAKE

釜江克宏

Katsuhiko KAMAE

川辺秀憲

Hidegori KAWABE

Long period ground motions from the hypothetical Nankai earthquake (M8.4) occurred along the Nankai trough have been predicted in Kinki district using 3-D finite difference method. We basically use the characterized source model composed of asperities proposed by the Headquarters for Earthquake Research Promotion in Japan. This model is based on the recipe for predicting strong ground motions from the subduction earthquakes by Irikura et al. [1]. We pointed out that the characteristics (predominant periods and amplitudes) of the long period ground motions change depending on the deep underground structure inside the Osaka basin. We strongly encourage the structural engineers to investigate the seismic safety of high-rise buildings, base-isolated buildings and oil tanks which are sensitive to the long period ground motions.

1. はじめに

フィリピン海プレートの沈み込み速度がほぼ一定であるために、南海トラフでは周期的に巨大地震（東南海地震・南海地震）が発生する。その発生間隔は 90~150 年と言われている。前回の昭和の東南海地震(1944 年)・南海地震 (1946 年) から既に 60 年近くが過ぎ、地震調査推進本部・地震調査委員会・長期評価部会によって今後 30 年以内の発生確率が東南海地震で約 60%、南海地震で約 50%と発表されている。こうした現状を踏まえ、東海地震も含めた 3つの海溝型巨大地震時の強震動予測が種々の機関で実施されている。中央防災会議からは東海地震や東南海、南海地震の同時発生を想定した強震動予測結果が公表されており、減災対策などに供せられている。しかし、現時点で公表されている結果は統計的グリーン関数法によって計算されたもので、巨大地震特有の長周期地震動の予測精度は十分ではないとの指摘もある。特に近畿圏を考えた場合、大都市大阪で想定される地震動は既に実施された強震動予測結果などから、長周期成分の卓越した継続時間の長いものとなり、その震動特性は大規模堆積盆地構造を反映したものになることが予想される¹⁾。このような継続時間の長い長周期成分の卓越した地震動は、2004 年紀伊半島南東沖で発生した地震(M7. 4, M6. 9) 時の観測記録によっても立証されている。我々は既に想定南海地震及び想定東南海地震時の強震動を主として大

阪市やその周辺を対象とし、経験的グリーン関数法によって予測した。この方法は震源の位置など適切な地震の記録を経験的なグリーン関数として用いることによって、伝播経路やサイトの特性を自動的に考慮できる利点を有している。ただし、今回対象とする巨大地震のように震源域が非常に大きい場合への適用については、種々の課題があることも事実であり、予測精度向上に向けた検討も今後必要である。一方、長周期地震動に対しては理論的な計算がコードの開発や計算機的能力向上によって既に可能となっており、ハイブリッド法などの予測問題にも適用されている。ここでは、主として南海地震に対して行った有限差分法を使った理論長周期地震動予測結果について紹介する。結果の一部については既に第 2 次暫定波として土木・建築合同委員会に提供済みである。

2. 震源モデル

震源モデルは地震調査推進本部・強震動評価部会による震源モデルを参考に作成した。図 1 にそのモデルを示す。モデルにある 3つのアスペリティ及びアスペリティ以外の領域（背景領域）の震源パラメータは、強震動評価部会によって評価されたもの（ケース 2）を用いた。推本のモデルでは複雑なプレートの形状を忠実に反映させた湾曲する 1 枚の断層面が採用されているが、ここでは 3 枚の断層面に置き換えてモデル化した。ただし、それぞれの断層面の深さは、フィリピン海プレート上面と同じ位

置になるように設定した。背景領域については、解析対象領域内のみを考慮した。一部解析領域からはみ出した部分もあるが、結果に与える影響は小さいものと考えられる。すべり速度時間関数は中村・宮武(2000)²⁾の近似式を用いた。

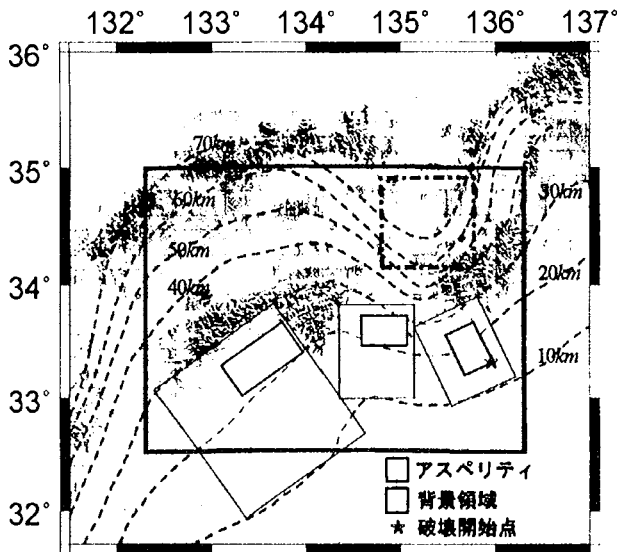


図1 想定南海地震の震源モデル。太線は差分法による解析領域、一点鎖線は大阪平野の堆積盆地構造モデル設定領域、点線はフィリピン海プレート上面の等深線を示す。

3. 3次元地下構造モデル

大阪平野の3次元地下構造モデルについては、既にいくつものモデルが提案されているが、ここでは堀川・他(2004)³⁾を用いた。3次元でモデル化された大阪平野の領域は図1に一点鎖線で示されている。大阪平野外の領域については地表に基盤岩が露頭していると仮定した。また、フィリピン海プレート上面の形状は hori et. al. (2004)⁴⁾に基づき、速度構造は Nakanishi et. al. (2002)⁵⁾に基づき作成した。設定した地下構造の物性値を表1に、破壊開始点近傍の南北断面のP波速度構造を図2に示す。ここでは、堆積盆地構造設定領域の堆積層は、堀川・他(2004)³⁾の地下構造モデル³⁾を3層構造(表1のLayer1~Layer3)に置き換えて使用した。堆積盆地構造設定領域の基盤岩上面深度と波形計算地点を図3に示す。

表1 地下構造モデルの物性値

Layer Number	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	Layer 7	Layer 8	Layer 9
Vs (km/s)	0.4	0.55	1.0	3.2	3.87	4.33	2.5	3.9	4.5
Vp (km/s)	1.6	1.8	2.5	5.4	6.6	7.2	4.8	6.8	7.8
ρ (g/cm ³)	1.7	1.8	2.1	2.7	2.8	3.0	2.6	2.9	3.1
Qs (1/Hz)	200	275	500	1600	1935	2000	2000	2000	2000

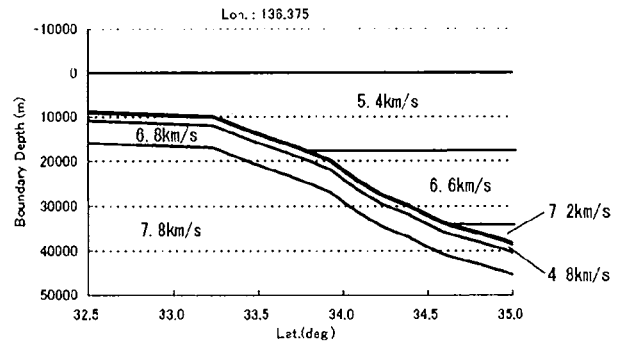


図2 東経136.375度の南北断面P波速度構造。

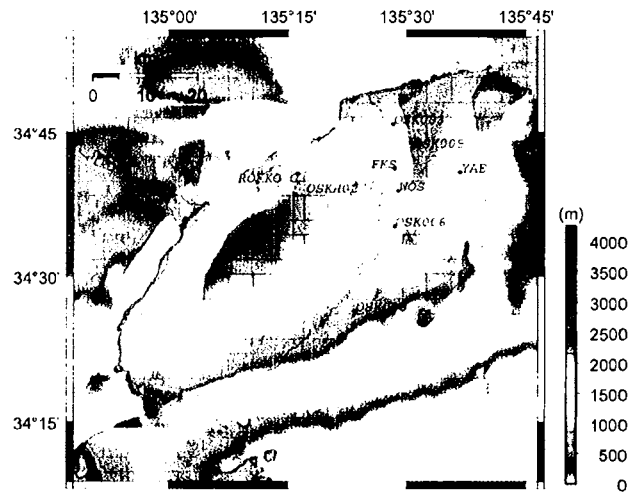


図3 大阪平野の堆積盆地構造設定領域の基盤岩上面深度と波形計算地点。

4. 計算手法及び計算条件

地震動の計算は、スタaggerドグリッドを用いた空間4次・時間2次の精度の3次元有限差分法(Graves, 1996)⁶⁾に、不等間隔の Staggered Grid (Pitarka, 1999)⁷⁾を設定して行う。差分法解析領域の周囲には40グリッドの吸収領域(Cerjan et al., 1985)⁸⁾を設け、その外側に Clayton and Engquist (1977)⁹⁾による吸収境界条件を適用して差分法解析領域内から解析領域外に進行する波が再び領域内に戻らないように吸収境界を設定する。

差分法への減衰の適用は Graves⁶⁾の手法を用い、(1)式に示す周波数依存性を仮定した。

$$Q_s(f) = Q_{s0} \times (f/f_0) \quad (1)$$

ここで、 f は周波数(Hz)、 f_0 はreference frequency(Hz)、 Q_{s0} はreference frequencyにおける Q_s 値、 $Q_s(f)$ は周波数 f での Q_s 値である。

本計算では減衰 Q_s の値はS波速度に比例すると仮定し、(2)式のように表す。

$$Q_s(1) = \alpha \times V_s \quad (2)$$

ここで、 $Q_s(1)$ は1HzにおけるS波の減衰(Q_s 値)、 V_s はS波速度(m/s)、 α (s/m)は係数である。ここでは既往の研究¹⁰⁾から、 α の値を1/2とした。ただし、 $Q_s(1)$ の値の上限は2000とした。

5. 計算結果

図4には9地点における3成分の速度波形を示す。グリッド間隔と速度構造から有効周期範囲が2.5秒以上となるため、ここでは波形に2.5~20秒のバンドパスフィルターをかけた。最大速度は30cm/sから60cm/s程度であるが、中には六甲アイランドのように100cm/sを超えるサイトもある。この周期帯域からすると非常に大きな速度振幅となっており、今後この結果の原因について詳細な検討が必要である。現時点で考えられる理由の1つは、図1に示した震源モデルから、破壊開始点近傍にあるアスペリティ

での指向性効果が影響していることと、六甲アイランド近傍での盆地端部の影響が重なったためであろう。このサイトでは2004年紀伊半島南東沖の地震(本震:M7.4)時にも特に大きな長周期地震動が観測されており、複雑な地下構造の影響が推察される。図5には紀伊半島南東沖地震時の六甲アイランドやその周辺湾岸域や大阪市内などでの観測記録の擬似速度応答スペクトルと観測点を示す。この図からも六甲アイランドでの揺れが他の地点より大きいことがわかる。今後この揺れの違いが現在用いている地下構造モデルによって説明できるか検討する必要がある。

次に今回行った理論長周期地震動評価結果と過去に実施した経験的グリーン関数法(EGFM)による結果¹¹⁾とを比較した。対象とするサイトはWOSであり、図6に速度波形(2.5秒~10秒)での比較を、図7には擬似速度応答スペクトルでの比較を示す。図6の波形の比較から、最大振

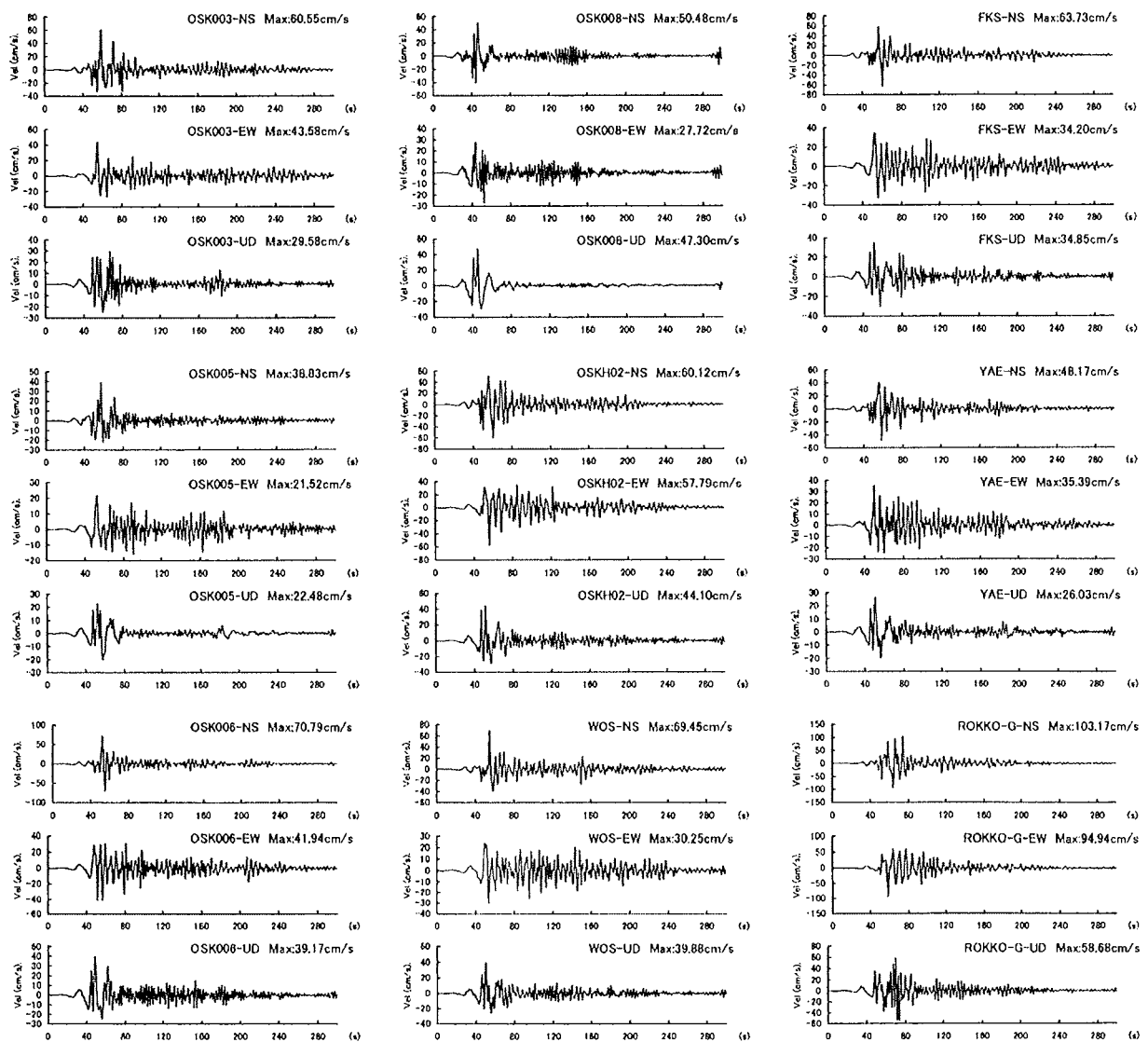


図4 想定南海地震の予測速度波形(フィルター:2.5~20.0秒)

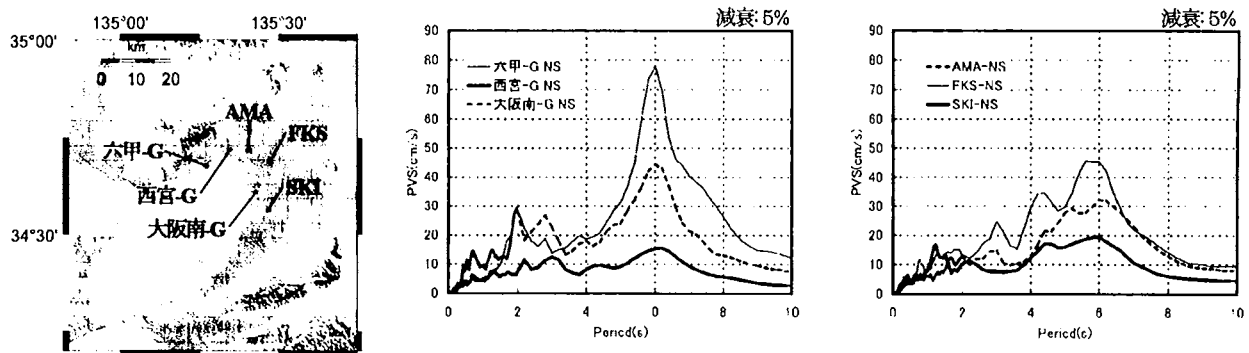


図5 2004年9月5日紀伊半島南東沖 M_j 7.4の地震の大阪平野内で観測された記録の擬似速度応答スペクトル

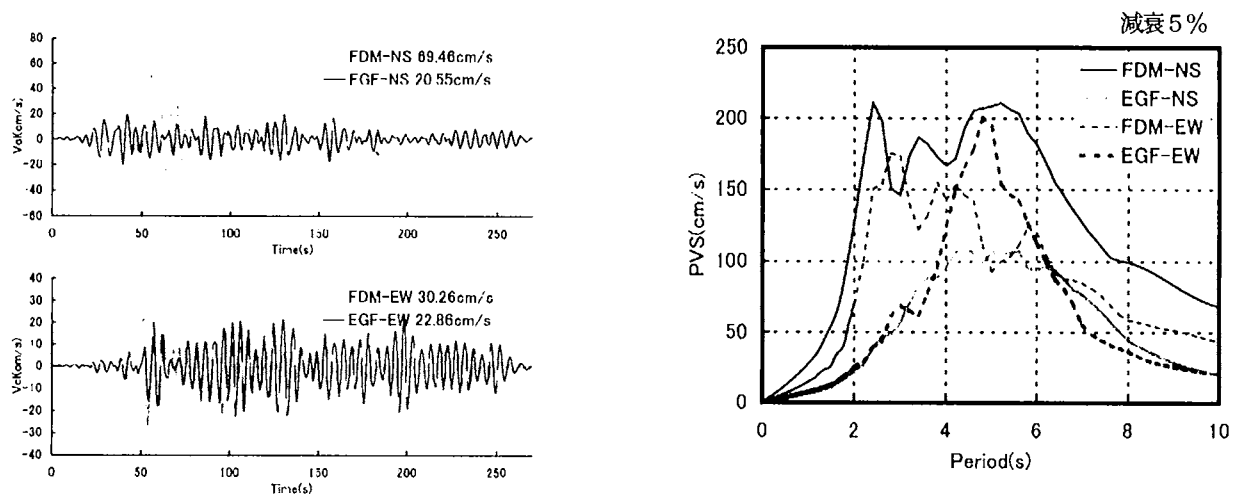


図6 WOSにおける想定南海地震の3次元差分法(FDM)による予測波形と経験的グリーン関数法(EGF)による予測波形の比較(フィルター:2.5~10.0秒)

幅はNS成分で大きく異なるが、波形の継続時間や包絡形はよく似た結果となっている。また、図7によって同じ成分で比較した場合、NS成分ではスペクトル形状はよく似ているものの、応答振幅が倍程度違っており、EW成分では卓越周期に違いが見られるのが現状である。これらの違いの原因としては、まず震源モデルに若干の違いがあること、EGFMでは震源放射特性の影響が考慮されていないことなど、両手法間で差があることや理論的結果には、前述したように震源近傍のアスペリティからの指向性効果が大きく影響し、最大速度値やスペクトルを規定していることが考えられる。EGFMは短周期領域も含めた広帯域強震動を予測する上で非常に有効な手法であり、今後理論長周期地震動評価の高精度化とともに、両手法における差異の原因について検討することが重要である。

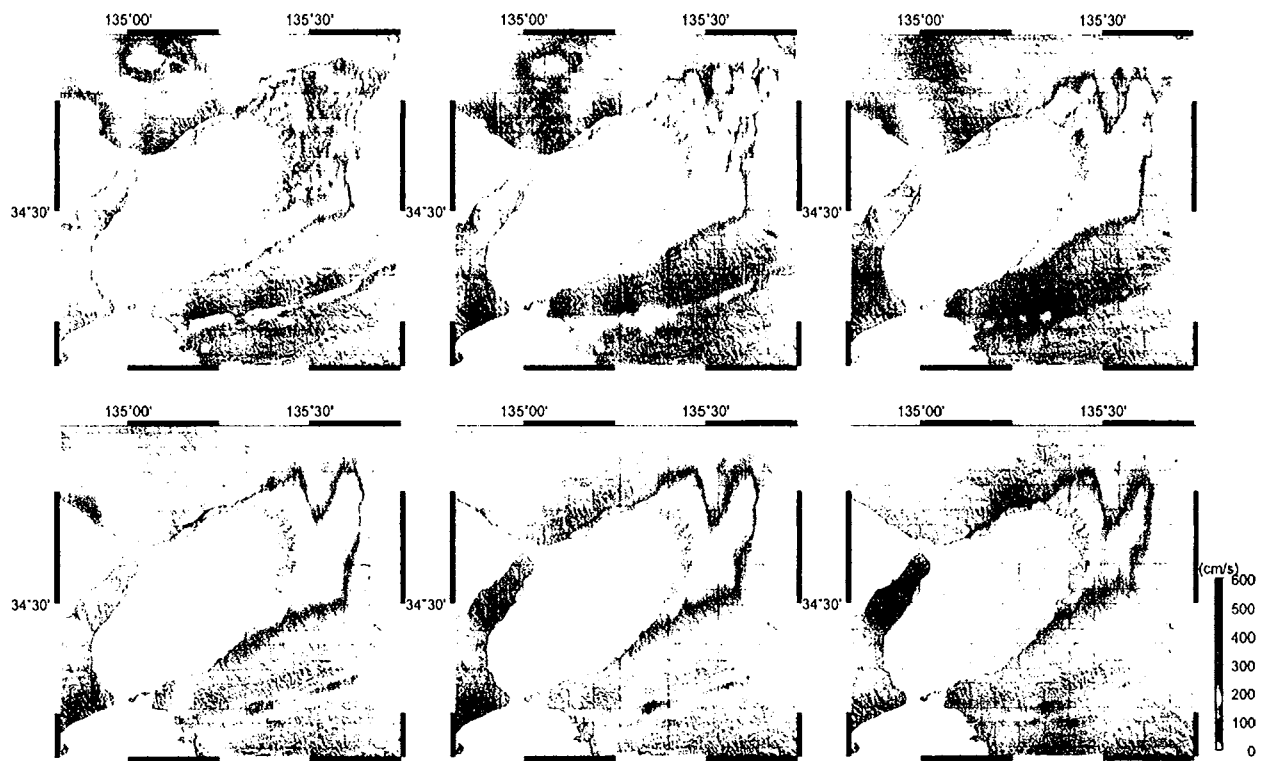
最後に主として大阪平野全体についての周期毎の揺れやすさ(擬似速度応答スペクトル振幅値)を図8に示す。大阪平野では震源近傍のアスペリティからの寄与が最も大きく、断層直交方向のNS成分で大きな応答振幅値を示

図7 WOSにおける想定南海地震の3次元差分法(FDM:2.5秒以上が有効)と経験的グリーン関数法(EGF)による予測波形の擬似速度応答スペクトルの比較

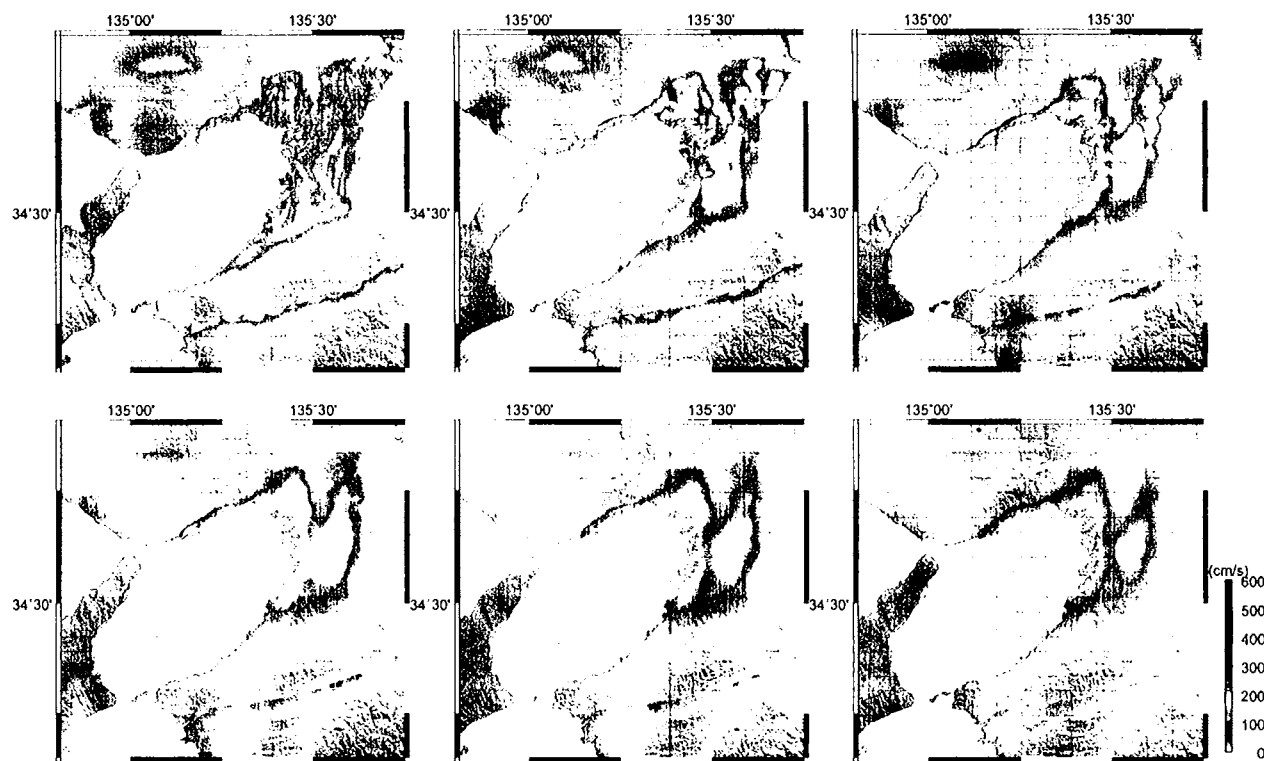
しており、揺れやすい周期は盆地の基盤岩深度に応じて変化していることがわかる。こうした情報は、大阪平野内に立地する高層・超高層建築物、免震構造物や湾岸部に立地する石油タンク施設での安全性検証に重要な役割を果たすものと考え、今後震源モデルの影響、破壊開始点の影響などの検討に加え、東南海地震時の同様な検討を実施していく必要がある。さらに、南海・東南海地震は大阪平野のみに影響を与える地震ではなく、関西圏としては京都、奈良、和歌山などの平野部にも堆積盆地の規模に応じた長周期地震動の影響が想定され、より広域な地震動予測が必要であり、現在作業を進めているところである。

6. おわりに

ここでは想定南海地震時の主として大阪平野を対象とした長周期地震動評価結果を報告した。その結果、震源の影響や深部地下構造の影響で非常に大きい長周期地震動が評価された地点も出現したが、既に実施した経験的グリーン関数法による結果とも整合するサイトもあり、今後の



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図8 想定東南海地震時の大阪平野内の周期ごとの擬似速度応答スペクトル振幅値の分布。
それぞれの図で上段左から3秒、4秒、5秒、下段左から6秒、7秒、8秒における分布

高精度化に向けた初期的な情報を得ることができた。また、大阪平野の面的な長周期地震動の卓越周期分布なども提示することができ、長周期構造物の耐震安全性の検証に向けた初期情報が提供できたと考える。今後は高精度化とともに、より広域での地震動評価を行い、結果を提供していきたい。

謝辞：本研究は、文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト、科学研究費補助金（基盤研究 B、課題番号 17310108、科学研究費補助金（基盤研究 C、課題番号 17560503）、及び科学研究費補助金（若手研究 B、課題番号 16710132）により行ったものである。また、本研究では独立行政法人港湾空港技術研究所及び関西地震観測研究協議会の地震記録を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Irikura, K., H. Miyake, T. Iwata, K. Kamae, H. Kawabe, and L. A. Dalgue (2003). Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake, *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No.46B, pp.105-120, (in Japanese with English abstract).
- 2) 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*, 第 53 巻, 第 1 号, pp.1-9, 2000.
- 3) 堀川晴央, 他: 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, *活断層・古地震研究報告*, No.3, pp.225-259, 2003.
- 4) Hori, T., N. Katob, K. Hiraharac, T. Babaa, Y. Kanedaa: A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai Trough in southwest Japan: lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, *Earth and Plan. Sci. Lett.*, 228, 215-226, 2004.
- 5) Nakanishi, A., et. al.: Deep crustal structure of the eastern Nankai trough and Zenisu ridge by dense airgun-OBS seismic profiling, *Mar. Geology*, 187, 47-62, 2002.8)
- 6) Graves, R.W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1091-1106, 1996.
- 7) Pitarka, A.: 3D finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 8) Cerjan, C., D. Kosloff, R. Kosloff and M. Reshet: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic boundary condition, *Geophysics*, Vol.50, pp.171-176, 1985.
- 9) Clayton, R. and B. Engquist: Absorbing boundary condition for acoustic and elastic wave equations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.67, pp.1529-1540, 1977.
- 10) 川辺秀憲, 釜江克宏: 長周期地震動評価のためのQs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.
- 11) Kamae, K., H. Kawabe and K. Irikura: Strong ground motion prediction for huge subduction earthquakes using a characterized source model and several simulation techniques, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 655, 2004.

特別講演

福岡県西方沖地震の被害から見た耐震設計の課題 —地震地域係数の在り方—

Disaster of West off Fukuoka Earthquake and Related Topics of Aseismic Design
Optical Estimation of Local Seismic Effect

多賀直恒^{*1}

Naotsune TAGA

Synopsis : The seismic activity, i.e. the site and the time of the generation of earthquake events, is generally dependent variously on place by place. The frequency of generation of earthquakes is also dependent on plate-boundary events or active faults events. The number of frequency period is about 100 to 1000 or 10000 years by the type of earthquake generation. The Fukuoka earthquake in 2005 took place in the rarest place in Japan. The seismic design method of structures is governed by the origin and the propagation path of earthquake, the soil layers and structural properties. The effect of seismic activities on design method is represented by local coefficient of seismic zoning. The weighted coefficient is decided by previous historical information of local earthquake generation and is classified by four groups 1 to 0.7. The reasoning comprehension is based statistically on the expectation value of 100 years or return period of acceleration record on previous seismic records and information. Here in this paper, the basic concept and the quantitative analysis of seismic zoning coefficient will be discussed by some destructive earthquakes.

キーワード：想定外地震、サイスミシティー、地震活動度、地震被害、直下地震、液状化、擁壁の崩壊、RC柱のせん断破壊、ブロック塀の倒壊、家具の転倒、窓ガラスの崩落、不整形地盤の局所的増幅

1. 福岡西方沖地震被害の特徴と耐震設計の課題

(1) 福岡地震の特徴と教訓

発生から10年を経過した阪神大震災時の神戸の街と今回の福岡の地震被害の状況を比較対比してみると、いずれも過去の被害地震の経験の少ない地域に突如として起こった稀な地震と捉えたり、被害の原因を全て地震の規模や限定された地域に帰すことは間違いである。被害を発生させた大半の原因は、現代社会における都市のあり方や住宅の造り方をはじめ社会活動が原因であると考えられる。

阪神大震災の見方は、日本の都市の在り方や都市の安全について日本人の安全に対する基本的な対応を改めて再考させた。福岡地震は地震の規模や被害の程度こそ違いがあるが、日本の別の街で同様の印象を待たせるものであった。震災から現在までの動きを見て、一体これまで都市の安全に対して何が行われてきたのだろうか。震災の説明はどこまで進んだか、これまでの震災の教訓はどれだけ活かされてきたか、都市の安全はどこまで改善されたか。科学や学問はどれだけ問題に答えてきたか、これまで科学者の説明責任が行政の緊急対応が問われていたが、一方で住民自身の防災意識や災害観が他者依存型で脆弱であった。専門家の危険に対する的確な判断や安全に対する対策提言は十分に行われてきたか、防災の専門家や研究者は、必要な情報を自治体や地域住民の理解を得るに十分な説明をしているか。「自分の命は自分で守る」「地域の安全はそこに住む住民が協力して守る」という原則を国民はよく理解しているのか、他者依存で行政依存的な体質と防災意識を改善する必要があると思われる。事前対策の必要性は論を待たないが、災害発生直後の緊急対応において、地域防災力としての地域住民の連帯意識と歴史的に形成されたコミュニ

ティーによる復旧体制に神戸でも福岡でも地域間の格差が認められる。

阪神大震災や福岡地震の重要な教訓は、現代の技術力には限界があったことである。都市構造自体を災害に強いように造り替えなければならない。日本の社会システムの精神構造が耐震設計されていなかった。都市の安全や環境のためには、科学的な認識をもとに、既存の学問の領域を超えた対応が求められる、新しい研究組織を構築して対応することが求められている。

どれほど強固に造った建築や都市の様々な施設も、時間を経過すれば自然の力によって破壊される。或いは戦争やテロなどの人間の力によっても同じことが起こる。この事実を我々は忘れていた。我々は、戦後60年の経済成長の中で華やかな消費都市で生活し、安全な都市を造り上げたかのように信じていた。我々の生活する都市はいつでも危機に陥る可能性があることを我々の社会が無視し或いは覆い隠してきたのではないか。そのことが地震による被害を大きくしたといっているだろう。

(2) 福岡地震の耐震設計上の課題

a) 想定外の地震の扱いに関しては、現行の耐震設計法では特別な扱いは考慮されていない。

b) 地域係数 $Z=0.8$ は適正か、この地域の全域的な被害状況(震度VI弱)から全体的総合的に判断されるべきであろう。被害を受けた構造種・地盤種などによる被害状況からは、特に問題は無いようである。

c) 構造体の被害は過去の被害の再現的なものが多く見受けられた。従ってこの地震による新たな被害現象や被害形態はなかった。

^{*1} 福岡大学

d) 非構造材の被害 地震動の大きさと構造設計上の問題として、構造部材の設計上の対応は一般に社会に普及浸透している反面、非構造部材・二次部材やブロック塀の倒壊・家具の転倒などの居住空間の外側周辺や内部空間における耐震性整備が十分に行き渡っていない。基本的には、都市の古いストックである脆弱な構造を持つ住宅や建築物の耐震性の未整備の問題が解決されていない、具体的な対応が先延ばしにされているところに問題がある。

e) 屋内の被害と怪我人の関係 死亡被害はブロック塀の倒壊によるもの1人で、重傷者81人、軽傷者992人であったが、住宅の倒壊や損傷による避難者は、最大2759人に及んだ。震源に近い玄界島の住民は約700人の島民が全員避難をした。

f) 都市部と周辺部における地域の連帯感と復旧過程における地域コミュニティ 百万都市の中に住んでいる住民とその周辺の比較的古い佇まいや習慣が残存している地域とでは住民同士の連帯感や緊急時の対応の仕方にかかなりの格差がある。都市周辺地域や島などでは日常生活の中でのコミュニティの緊密度が地震の発災直後の対応や復旧に当たっての連帯行動においてその真価が発揮されている。

g) 被災者支援体制とボランティア活動 総体的に災害規模が比較的軽微であった点から考えると、一般の被災者支援の体制は、初動段階での対応が不十分であったなどの理由でボランティア活動が有効な対応が出来なかったといわれている。

h) 住民の防災意識と災害観 日本人一般の災害に対する見方や行動原理とこの地域特有の考え方や特徴を挙げるような事象は特になかったが、地震災害に対する対策に関しては、統計的に関心は薄く、地震対策の準備をしている統計的な数値の比較からは地域性を指摘できる。

2. 地震災害の組織としての取組

(1) 大学の研究組織としての対応

都市災害管理学の創生 学会が行う地震被害調査の意義と問題点を考えてみよう。専門分野からの災害へのアプローチは、それぞれ個別の方法で行われてきた。被害状況を調査記録し早期に情報を公表公開する、学問の役割は、科学的な研究成果と行政企業住民の橋渡しをすることも求められている。

福岡地震は何を地域に提起し教訓として何を学ぶべきか。2005 福岡地震は単なる地震活動度の低い地域に突発的に発生した地震ではない。九州の都市の地震災害を考える場合のモデルとして、地域の特徴に対応した発想でこの地震災害を考えてみる。この地震を契機に九州地域の都市での地震災害というものを今一度考える絶好の機会である。地域の地震防災対策、地域の安全を考える立場からいくつかの事象の意味と理由を挙げて九州の都市の地震災害モデルと考える。耐震工学は、地震から人間を守る、建物を地震で壊れないように造るということを出発に発展した。阪神大震災は、耐震構造、耐震設計など工学的手法では十分でないことを示し、解決のつかない多くの問題を提起してきた。

a) 老朽化し密集木造家屋の古いストックが地域に残存し放置されている

b) ライフライン依存社会で住宅が健全でも、構造的機能が保持できても生活機能に支障が生じる

c) 住宅崩壊・避難所生活・仮設住宅への移住・公的復興住宅への転換・自宅の復旧・再建の道程

d) 人命を守るハードな対策と助かる命を助ける地域共同体の重要性

e) 地域の安全を地域で守る自主的組織と行政からの緊急対応と支援体制

災害を、地域の都市全体で発生した事象として見る総合的系統的に記述する学問体系とそれを担う人材や学会の役割組織がない、災害の全体像を見るために福岡県西方沖地震は一つのモデルとして考えられる。重要な地震災害・地震防災の問題を提起してくれる地震である。そのために学会の調査は重要な役割を担っている。こうした立場から大学改組の中で九州大学においては従来の災害科学を統合して「都市災害管理学」なる新しい研究カテゴリーを組織した講座を創生した、では都市災害管理学とは何か。

災害問題は極めて学際的な問題であることはいうまでもない。またその問題解決には総合的・系統的見地からの対応がぜひとも必要である。学際的という意味は、関係する学問領域が、地震学、地質・地形・地盤工学、建築構造（木造、RC造、S造）建築計画・建築設計、都市計画・地域計画・農村計画、歴史意匠、材料施工、災害心理・人間行動、避難所・避難行動、情報通信、災害医療など、関係する学問分野は実に多岐にわたる分野を動員して災害現象の全体像はその姿をほのかに現すことが出来る。それの一つ構造物の崩壊だけを見て災害は語れない。そこで生活している人間の行動、それを守る器である建築物の地震時の状況を詳細に調べることが必修の条件である。具体的な事例として列举すると、

地震被害の総括

(a)福岡県は日本で一番地震活動度が低い地域での地震で想定外と呼ばれる。地震対策の整備が低いこと、M7の地震が発生し震度VIの被害が生じる可能性を誰が予測したか。

(b)都市中心部での市街地でビルの窓ガラスの破損落下した被害は、都市公共空間における安全性という面で大きな問題を提示している。(c)昭和53年に仙台で事例・マンションのドアの開閉支障は、住民に取って避難路を塞ぐ生死の重要な問題である。

(d)昭和53年同様・ブロック塀の倒壊による死者の発生は、日常生活空間での安全性整備の重要性を示している。

(e)昭和53年・RC柱のせん断破壊 昭和43年 昭和53年・外壁のせん断破壊は、既存不適格構造物の維持管理の問題である。

(f)住民意識の希薄さ 市民意識の変化 実に多岐にわたる問題を包含している。

学会調査報告の結果の考察

(a)地域の特性 (1. 玄界島 2.福岡市中心部 3.糸島、志賀島 4.その他)

(b)被害尺度の比較 (1.被災度 2.全壊・半壊・一部破損 3.耐震診断判定指標Is 4.調査基準 北大岡田方式 D1, 2.5 グレード 5.学会調査 大破、中破、小破、一部破損 6.行政の尺度 資産価値の減退に基づく全壊・半壊の判定等)

(c)被災度の比較 1995 神戸市 1997 鹿児島 2005 玄界島
2005 福岡市 ストックの被害度・耐震診断 木耐協の調査結果
を図示する)

(2) 学会としての取組

地震の発生或いは地震被害に関係した学会には、土木学会・地盤工学会・地震学会、日本地震工学会、建築学会、その他多くが存在する。土木学会と地盤工学会は地域の研究者を組織していち早く、迅速な行動と情報の社会的公表・マスコミ対応の使命を果たしていた、それに対して建築学会の取組は地味でマスコミや社会的な対応に関してはやや迅速性に欠けた印象を持った。しかし関係する被害現象が専門性の違いを発揮することがありそれぞれの調査活動をして報告書の形で公表されている。

学会活動と社会的な説明責任として、学会としての組織の立場と研究者として個人的な見識で現象に立ち向かい社会に対して専門性を説明する立場がある。組織と個人は常に立場が一体的に考えられる場合が多い。

地震災害は社会的な影響の大きい現象であり住民や行政とのかわりも重要である。県や市町村などの自治体の行政の動きも独自の動きと連携が必要な場合が多い。特に地域の安全を考える場合には、重要な役割を担っている。科学的な専門的な学問上の成果をどのようにして地域の災害に対する安全対策に活用するか、まさに行政と学会の連携を有効に活用して住民の安全を守ることを実践することが求められる。地震に関する地域防災計画は基本的には防災アセスメントに基づき、災害対策を策定し地域の安全対策を提示して成果を公表して、情報の公開と社会的な責任と義務を果たさなければならない。ここでは、特に横断的な学会同士および学会内部の各種委員会との連携があれば、その効果は非常に効率よく発揮できる。地域・分野を横断的に繋ぐ組織を形成して災害を総合的に捉え、各専門分野をクロスオーバーして有機的総合的な立場からのアプローチとして、1997 鹿児島地震の鹿児島大学の研究組織と報告書が例として指摘できる。災害規模が大きかったり被害地域が広範であったり対応する組織機構造が適正規模でないとい効率的な連携は難しい。土木学会・地盤工学会・建築学会の報告書と鹿児島大学の 1997 報告書を比較してみるとその片鱗が理解できよう。

(3) 建築学会災害委員会と九州支部の対応

この地震の被害状況と時間の経過で考えさせられた問題点の幾つかを挙げると、

a) 基本的な問題は組織の問題意識と指導性 学会が組織を挙げて行う地震災害調査では何を考えなければならなかったか、地域で発生した 10 年前の鹿児島地震と福岡地震の違いを併せ見つめて検討してみよう。学会という組織の意味と、科学的研究による学問の成果として社会的な説明と還元が求められる。地震被害の学会としての見方が問題である、建築学会としての災害報告になっていない。九州支部としての被害の対応の仕方、災害を見る視点、地震被害は構造委員会が主体となって調査を行う基本的には地震被害の見方が問題であると思われる。災害を総合的に見て地

域の重要な課題と考えるか、学会の立場から専門性を重視した調査を行うか、専門性も如何に関係の分野を関連付けて被害現象を総合的に調査するか、そこで取組む基本的な姿勢が問われる。

b) 学会も縦割り社会である。地震災害を構造を主体とした被害と見るか、地域全体の災害からの復旧を視野に入れた建築計画・都市計画・地域計画的な見地から問題を迫るかで扱いや対応が全く違って来る。この点からは構造と計画の乖離や、さらには、地震・地質関係の理学系の動き、県や市など行政の調査 新聞テレビラジオなどマスコミの取材などと、それぞれ立場の違った方向から災害を見ると、果たして学会は災害をどのような立場で何を調査すれば社会的な責任を果たしたことになるのか難しい問題である。

c) 調査対象と内容については、専門家がいるかないかで決まり、建築の構造的な被害を中心に地震被害報告 13 章で学会として地震被害の概要を報告し記録にとどめた。全体の構成に何らかの意味があるのか、内容のウエイトの置き方に関心があるかないか、アンサンブルハーモニーがあるか 纏めと課題と教訓は地震動の項目はあるが、地盤・地形・地質関係の項目は無い 被災時の人間行動や激震地での復旧体制の整備など時系列的に被災地全体に関する時空間での全体像を如何に描けるかが課題である。

d) 情報公開と出版 災害情報は社会に何を伝えたか、学会の伝えた情報は社会に何を提供しているか、災害研究者には何を伝えているか、行政の報告や企業の被害報告とは、何が違うのかを真剣に考える。地域住民は何を得たか、被災したマンションの住民は何か必要な情報を汲み取ることが出来たか。災害情報の社会的な扱いは、学会・マスコミ・行政と伝達方法や伝達目的が違う。情報の流れ 個人や学会の速報 インターネット社会の情報の即時性 マスコミの情報の伝達威力 学会の報告会とマスコミの取材 地震や断層関係に関心が集中している 報道も然り九州支部での災害報告書の作成原理は、学会としてどのような立場を提示しているのだろうか。総合的な体をなしていない構造被害を主体にしたレポートである。

e) 特徴 学会として建築学会として学会の支部として災害をどのように捉えているか 行政企業の対応の仕方 初動体制 企業内の緊急対応 行政・企業の被災住民の関係は 悉皆調査の意味づけ 玄界島の調査、市内中央部の調査 地盤・地形・地質関係の情報が欠落している 住民の意識と行動は社会・住民・一般の人の安全に関する対する意識 地震統計が示す マグニチュードと震度 発生の頻度 新聞記事 朝日 想定外の意味するもの 重要な内容を持っている

f) 専門性と社会的責任 被害現象を防災の専門家は社会に向かって被害原因と結果を被災住民に対して十分説明できたか 専門家の見る説明の不可解さ 説明責任を果たしているか 自分の専門はこれである、それ以外は分からない 逆に専門でもない分野の解説を試みる、させられる 専門知識と常識をどのように考えるか 災害は進化する 社会時代に变化で災害も変わる

h) 耐震設計上の課題 地震動の破壊力と建築構造物の耐震性の関係 調査結果ら見た福岡地震の実像 $Z=0.8$ は十分に目

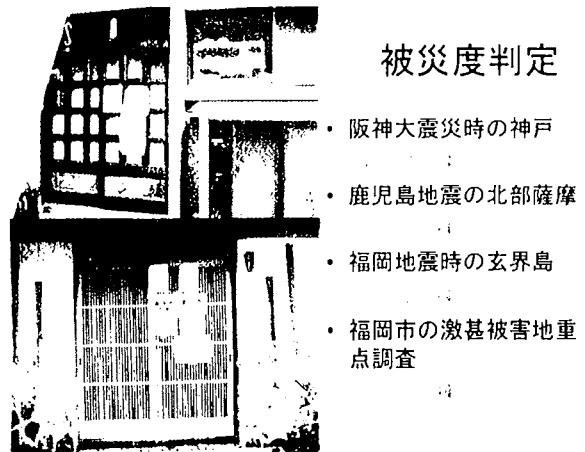
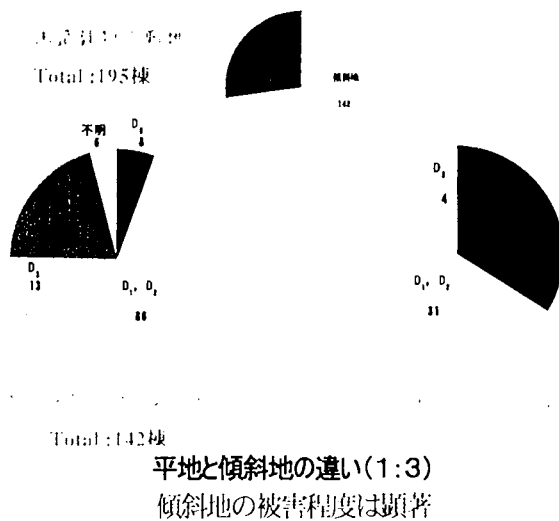
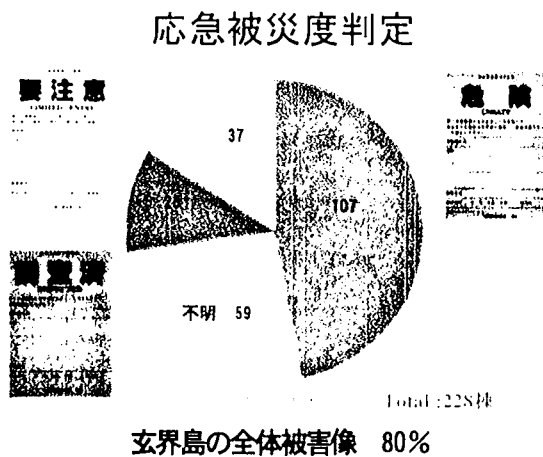
的を果たせた。a) 玄界島・福岡市内の住宅の被災度判定結果 b) 福岡市中心部における構造別被害ランクと c) 地震規模と震度及び地震観測記録の値 d) 被害の特徴を地域性とした場合の意味

3. 福岡地震被害状況のマクロな視点

- (1) 応急被災度判定という指標
- (2) 建築学会悉皆調査の意味
- (3) 地域的な被害レベルと地震動強さ
- (4) 地域係数と値と現実

(1) 建築学会悉皆調査の意味

玄界島の住宅被害の全体像



玄界島の応急危険度判定

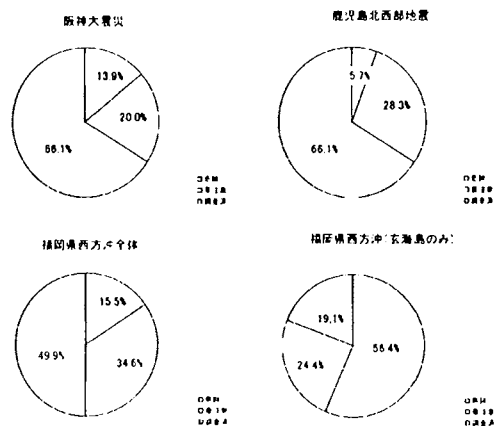
危険・要注意⇒ $107+37/228=$

傾斜地と平地の比較 $142:53/195$

66.1 : 20.0 : 13.9	神戸
66.1 : 28.3 : 5.7	鹿児島
19.1 : 14.4 : 56.4	玄界島
49.9 : 34.6 : 15.5	福岡

阪神大震災・鹿児島地震の比較

1/3、1/3、80%、50%



阪神大震災と玄界島の被災度

1. 震度Ⅶといわれるかなり広範囲の地域に対する神戸での被災度をみると、危険・要注意は三分の一で、残りの三分の二は安全である。
2. 鹿児島地震の場合、地域は限定され地方の都市での被災度であるが危険・要注意と安全の比率は略同様である
3. 福岡市内は、この比率が半々である。
4. 玄界島は、安全は2割で、危険・要注意が8割である。

(2)福岡市中央区の悉皆調査

福岡市街地（中央区）悉皆調査 1

1) 調査建物の概要

中央区の調査建物			中央区=(大名1, 2, 警固1, 2, 今泉1, 2, 赤坂1, 薬院2)
全体	木造	非木造	
1510 戸	405 戸	1105 戸	
100 %	26.8 %	73.2 %	

中央区の非木造建物の内訳				
非木造全体	鉄骨造	RC造	SRC造	その他
1105 戸	394 戸	533 戸	139 戸	22 戸
100 %	35.7 %	48.2 %	12.6 %	2.0 %

福岡市街地（中央区）悉皆調査 2

2) 非木造建物の被害統計

鉄骨構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
292 戸	84 戸	16 戸	2 戸	0 戸
74.1 %	21.3 %	4.1 %	0.5 %	0 %

RC構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
405 戸	95 戸	28 戸	3 戸	2 戸
76.0 %	17.8 %	5.3 %	0.6 %	0.4 %

SRC構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
103 戸	20 戸	13 戸	3 戸	0 戸
74.1 %	14.4 %	9.4 %	2.2 %	0.0 %

福岡市街地（中央区）悉皆調査 3

3) 断層近辺の非木造建物の被害統計

断層近辺の調査建物			断層近辺=(大名1, 2, 今泉2, 警固1)
全体	木造	非木造	
907 戸	251 戸	656 戸	
100 %	27.67 %	72.33 %	

断層近辺の非木造建物の内訳				
非木造全体	鉄骨造	RC造	SRC造	その他
656.0 戸	252.0 戸	300.0 戸	84.0 戸	12.0 戸
100 %	38.4 %	45.7 %	12.8 %	1.8 %

福岡市街地（中央区）悉皆調査 4

4) 断層近辺の非木造建物の被害統計

断層近辺の鉄骨構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
194 戸	44 戸	13 戸	1 戸	0 戸
77.0 %	17.5 %	5.2 %	0.4 %	0.0 %

断層近辺のRC構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
216 戸	55 戸	25 戸	2 戸	2 戸
72.0 %	18.3 %	8.3 %	0.7 %	0.7 %

断層近辺のSRC構造の被害				
D0	D1	D2	D3	>D3
55 戸	14 戸	12 戸	3 戸	0 戸
65.5 %	16.7 %	14.3 %	3.6 %	0.0 %

福岡市街地（中央区）悉皆調査 5

5) 断層近辺の中高層マンションの被害統計

大名1, 2, 警固1, 今泉2, 薬院2の9階以上の中高層マンションの被害

	建物総数	D0	D1	D2	D3
1981より前	18	0.50	0.28	0.22	0.00
1981以降	62	0.58	0.29	0.08	0.05

1. 木造の混在率 1/4

木造：非木造 405:1105/1520 26.8% 73.2%

2. 無被害率 3/4

	D0	D1	D2	D3	>D3
S	74.1	21.3	4.1	0.5	0
RC	76.0	17.8	5.3	0.6	0.4
SRC	74.1	14.1	9.4	2.2	0

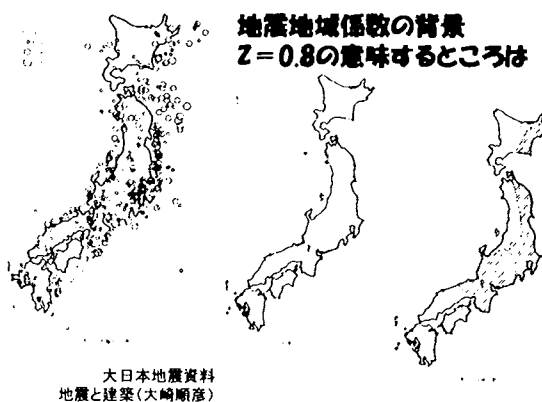
3. 被害レベル D1, D2でD3は僅か

4. 断層近傍 顕著な傾向は見えず

5. 中高マンションの被害と新耐震 特になし

8. 震度VI弱と震度VII

- 震度の差による被害程度の違い
- 震度VII あらゆる被害現象が最大級のレベルで発生し錯綜して、個別の被害が単純に見出せない状況
- 震度VI弱 個別の被害現象が単純に単独で鮮明に現れて状況が判断しやすい
- 少し被害レベルが上がると別の被害現象に移行する可能性がある



福岡という場所の過去の地震暦

震度VI弱から震度VIIへの行程

地域の安全の考え方 震度VI弱の被害の認識

被害激甚地域の被害の実態は

4. 耐震設計の系譜 歴史的変遷

(1) 日本の地震防災政策

日本の地震防災戦略の主要な課題は、地震予知に傾斜した防災政策と法律の制定及び予算措置であった。1962 年地震学者による国会答弁は、いわゆる「ブループリント(震予知の可能性の示唆)」に基づいて地震予知計画が策定され、1978 年大規模地震対策措置法の制定・強化地域の指定と予算の重点施策により、日本の特定地域を重点的に耐震対策を強化し国の予算を地震予知と強化地域の対策につぎ込んできた。前兆現象を観測し地震予知をキャッチして、判定会議で地震発生が確実のものと判定されれば警戒宣言を出して、関係地域の社会的機能を停止させて被害を未然に防ごうというものであった。しかし、明日起こってもおかしくない地震が 25 年間未だに起こっていない、実際に発生した被害地震は、強化地域でもない予測されていない地域で起こり、これは想定外と呼ばれる地震が相次いだ。1995 年阪神大震災の発生し関西には地震は無いという風評は一気に打ち消され、その後も 2000 年には鳥取地震が、想定を活断層が無い地域で M7.2 が発生した。福岡県西方沖地震 2005 これも想定外の地震であった。想定外の地震に対して安全をどのように考えたらよいか。現在では、1997 年を境に地震予知から地震防災へと戦略転換が行われようとしている、1997 年総理大臣の諮問機関「測地学審議会」の方向転換し、現在の科学技術の水準では地震予知は不可能であると初めて認め、新たな地震防災政策の転換を迫られた。地震予知の困難性を始めて認めた。

地震予知より耐震設計を重視する戦略を 日本の地震防災戦略の問題点 地震予知か地震防災か

地震予知の研究が国家プロジェクトとして取上げられたのは 1970 年のことである。地震予知連絡会が中心となって予知のための研究・観測が行われてきた。特に、『明日起こってもおかしくない』といわれている東海地震が、次に起こる大地震の最も有力な候補として重点的に取上げてからは、単に、予測技術といった領域に留まらないで社会問題となってきていることは広く知られている。学問的にも社会的にも、地震の予知に寄せる期待は大きい。しかし、どの程度の地震が「いつ」「どこで」起こるかを、せめて天気予報か台風情報並みの精度でいってもらわないと予知という言葉の本来の意味からは遠い。我々が期待するのは「明日起こってもおかしくない」ではなく「明日起こる」という情報なのである。これは少し期待しすぎとして、例えば一週間以内に強震が起こると予知されたとき、我々は一体どうすればよいのだろうか。豪雨の時のようにどこか安全な場所へ避難できるであろうか、限られた地域での土砂崩壊や低平地での避難ではなく地震予知での避難はもっと困難であろう。逃げる避難がだめだとすると頼れるものは住家を十分に耐震的にしておく以外に方法はないことになる。地震予知が可能になれば、耐震設計は必要でなくなるかという、とんでもない話で、耐震設計は依然として必要であり、この事態を考えるとますます必要になるとさえいえる。地震予知も大切であろうが、しっかりした耐震設計をしておけば、不意の地震にも、また例えば地震が予知された場合でも安心していられる。

(2) 地震荷重・地震力・耐震設計を考える

「耐震設計とは、想定される地震に対して安全な破壊しない建物をつくることである。」

a) 想定される地震とは何か 具体的には地震力・地震荷重を決めること

b) 建物が安全で壊れないとは 建物が十分な保有耐力を有している、部材構成が地震で壊れない大きさ 想定される地震動とは 地震の発生メカニズムは、プレートテクトニクスによる地球物理学的な意味において、地球内部のマントル対流により地球表面で地殻が形成され生成されて、地表面をゆっくりと移動してやがて地球内部のもぐりこみ消滅する過程で、a) 二つのプレートの接触面で岩石の歪が蓄積し破壊の限界で歪が開放されて地震が発生する b) プレートの周辺・境界部が歪むと内部にも当然の事ながら材料として歪が溜まりこれも限界に達すると地震が発生する 都市直下型がこれに相当する 想定される地震動をどのように想定すればよいか 想定外の地震動をどう扱うか

想定される地震の考え方

歴史的な背景としては、明治 24 年の濃尾地震の被害の実態に鑑み、菊池大麓により震災豫防調査会が組織された。その震災予防調査会の第一号には、その後の地震学・地震工学・耐震構造に関する基本的課題 18 項もの調査事項を挙げた。その筆頭部には「過去の地震被害を調査する」事が提起され、その任に当たったのが、小説家田山花袋の兄に当たる田山實であった。過去の古文書や歴史書などから地震に関する記述を探索し集成した、後に武者金吉により、「大日本地震資料」として整理され膨大な資料が集められたのである。河角広は、膨大な資料を整理して各地震の震源位置とマグニチュードを決定した。彼は、この資料に地震学の立場から、「マグニチュードと震度の関係」「震度の地震動の大きさ最大加速度の関係」を与え、古い地震記録の河角のリスト・河角マップなどのなで後世に残る重要な整理を行った。これらの資料から過去 1300 年間の日本における地震の発生による地域的な分布とその被害の大きさなどが明らかにされた。地震の地域性と周期性 「大日本地震資料」(1416.8.23-1848.1.28 の地震資料 6400 個) 田山実・武者金吉・河角広 (1982 理科年表 428 個) 宇佐美龍夫

耐震設計法 歴史的な変遷

年 代	地震動入力	構造解析
1916 (大正 5 年)	佐野利器の提案	原理
1924 (大正 13 年)	無差別	静的
1950 (昭和 25 年)	無差別	静的
1981 (昭和 56 年)	地域・地盤別	静的
現在	個別	準動的
将来	個別	動的

a) 佐野利器は、震度法なる地震力を世界で始めて表現する提案を「家屋耐震構造論」の中で提示した。即ち、彼は、震力なる表現で地震力を表現している。ニュートンの第二法則に従って、建築物を剛体とみなし、地震動を地盤が一定加速で運動しているという仮定の基に震力 F は建物重量に係数 k を乗じて得られる

$F=k \cdot W$ なる表記によって、地震力を水平方向の力として考えた。この k を彼は震度と呼んだ。b) 関東大震災の際の加速度の推定値から、c) 市街地建築物法などでは $k=0.2$ という定量値が与えられた。さらに下って昭和 25 年の d) 建築基準法では、震度を修正する係数を考えて $k=\alpha \cdot \beta \cdot k_0$ $k_0=0.2$ なる形で水平震度が与えられることになる。この α が地域係数であり、 β が地盤種別と構造種別により与えられた震度の補正係数である。その後の社会の変化といくつかの被害地震を経て昭和 56 年の建築基準法の大改正により震度法はせん断力係数法へと改変された。e) 新耐震設計法においても、基本的には設計体系の中に地域係数は記号の変化を除けばそのまま存在している。地域係数の与え方 $Z=1.0, 0.9, 0.8$ で沖縄 ($0.5 \Rightarrow 0.7$) を除けば同様の数値が地域の地震荷重の重さを示す数値として行政区画で与えられている。

地震の発生頻度と発生場所

過去の生起事象を対象に統計的に処理して、将来起こるであろう地震動の大きさ（震度・加速度）を予測する結果として、過去に大きな地震が起こったところでは将来も大きな地震が起こる。記録された歴史資料に基づけば 1300 年間の史実により、（プレート境界型地震）地質学的な事実に基づけば、数千年から数万年の事象をもとに発生頻度を想定予測できる（直下型地震）。地震の発生頻度や時間間隔により、信頼できる資料があれば、予測の精度は上がるが、いづれにしても科学的に事実を確認出来る手段があれば、確率統計的な予測と推定が可能となることで予測の網にかからないで突如として発生する地震が存在するのは当然である。発生は予測されてもいつ起きるかは確率的な事象であるから、人間のライフスパンや建築物の寿命の期間と地震動の再現期間とは整合しない。人間の寿命や建築物の耐用年限を、100 年としても、プレート境界型では時間的な対応が若干つきやすいが、都市直下型地震では、数千年から数万年に及ぶ地震の繰返し発生期間を考えると 100 年は誤差の範囲に入り予測は難しい。東海地震説が出て以後の被害地震はいずれもこの地域を避けて地震が発生している。

前提となる地震の発生頻度と場所の関係は

この地域係数の値の決定に対しては、基本的には河角リストに基づき河角マップに従っている。しかし、1 対 1 に対応はしているわけではない。これは工学的判断によっているといえよう。東京と福岡を 1.0 と 0.8 くらいにしておけばよいという工学的判断ではなかったか。河角マップに示された値は、過去の地震資料に基づき、少なくとも 100 年に 1 回起こる地震の最大加速度の予測値である。この加速度の分布は、直接震度分布として意味を持つと考えられる。東京近辺と九州北部を比較すると、加速度の値で、300 ガルから 50 ガル以下と 10 倍近い差がでてくる。

阪神大震災時の神戸の地震記録や、福岡地震時の福岡市内の地震記録などを参照すれば、過去の地震資料と地震地域係数と現実の発生した地震の記録の間には定量的な対応は附きにくい。予期せぬ地震が発生した場合の超過確率の問題である。100 年期期待

である加速度の値を地域の地震力の大きさを決めるには幅がありすぎるという人間的な評価があったのではないか。当時は、沖縄は日本返還前で数値は 0.5 であった。適性評価でない理由として、a) 過去の資料の精度 社会的政治的に資料の精粗がある b) 歪みの蓄積がゆっくりの場合、いまだ限界には遠い、これから先・・・年後には大きな地震の可能性がある 想定外の地震が生じる可能性がある。

（3）研究者と設計者の責任 耐震設計から見た地盤振動研究の動向と今後の展望を考える

設計とは何か。「設計とは社会的要請や需要に応じて行われるものである。従ってそれぞれの時代の政治・経済・技術などの社会的事情の大きく支配されることは言うまでも無い。また設計とはそれぞれの時代の社会的合意のバランスの上に成立つものであり、決して完全なものを追求する行為ではない。」

設計者は、時代の研究の動向に無関心ではいられない。社会は絶えずより完全なもの、より経済的なもの、より合理的なものを求める。それに応えるために、設計者は既往の研究成果を出来るだけ吸収し設計に応用することにより、社会的な状況が設計に反映され、既往の研究成果が設計に盛込まれる循環が継続的に実行されている。社会状況・設計方法・既往の研究成果を歴史的な流れで検討を加えることは甚だ面倒な作業ではあるが意義が大きい。その間にあってコンピューターの発達とその解析技術の工学への応用には目を見張るものがある。大型化・高速化・ダウンサイズ化・一般への普及にはこの分野の発展に大きく貢献している。

現状で研究者に課せられた責務は何か 研究という行為の特殊性 研究者倫理と研究者の社会に対する説明責任を履行 研究とは何か。「研究とは、必ずしも社会のニーズや実用面での効用に応えることを意味するものではない。むしろ研究者の個人的関心の追及に動機付けられたものが多く、過去に立派な研究を行いながらもその成果がいまだ実用に応用されていない事例は幾らもある。また、研究とは、その時代の流行に大きく支配される傾向が強い。例えば、過去の大地震において構造物の倒壊による人命の死亡率は非常に少ない。むしろ地震後の火災・崖崩れ・群集のパニック等による死亡率のほうがはるかに高い。社会的に見れば、構造物の耐震問題よりも、こうした地形の安定や防災上の問題の方がはるかに重要だともいえる。しかし、建築の領域においては、研究者の関心の多くは地震とそれによる構造物の応答の問題に集まり、斜面の安定や防災問題に関する研究は非常に少ない。かつての地盤の重複反射の問題や動的相互作用の研究に見られるように一種のブームがあり、何か新しい原理や理論が発表されると、それに関心が集中したちまちま食いつぶしてしまう傾向が強い。

研究とは、その動機において個人的関心や社会的な状況に影響を受け依存する傾向が強く、可なり偶発的な事象に支配される要因も多い。コンピューターの発達普及により研究の方法や設計の分野における質的な状況は著しく変化している。コンピューター技術が社会に浸透するに従った研究面でも施工など実用的な分野においても人間の学問的関心や社会的な対応が陰に陽に問題

を投げかけている。研究の規模の大型化多様化するに従い、研究主体が個人から組織へと移っていった解析技術は著しく発達したが反面解析結果や実態の現象を見る洞察力や詳細な考察を行う慎重な態度が失われつつある。実用的効用面が強調されてきた。

5. 地震動の工学的モデル化の方法

(1) 力の作用特性と運動規模の決定

耐震設計に当たって、構造物や荷重をモデル化すること、これはコンピューターの利用で建築物の安全性の検討は、領域が相当に拡大されたが、利用に当たって事前に実現象をコンピューターが解析できる程度にまで単純化された形に「モデル化」する必要がある。単純化・モデル化に当たって、何のために実現象を詳細にどの程度モデル化すればよいか考える必要がある。モデル化は単純で簡潔に設計者が必要とする情報を出力できるモデルが理想的である。

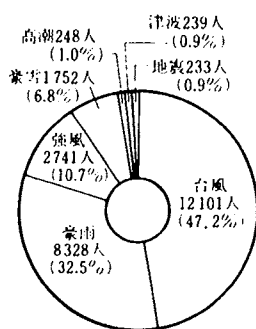
建築構造における構造解析の技術は、現在相当に進歩し発展してきている。それに対して、構造設計に最も強い影響を与える設計荷重に関する研究の進みは遅い。これは他分野からの技術の反映が比較的少ないばかりでなく、地震・風・雪のように自然現象を対象にしているものでは、現象そのものの研究が、工学・理学のいずれの分野でも中心的研究課題となりえず、学際的問題として取り残される傾向にあったことが原因であろう。さらに自然現象の場合には、局所的な多くの因子を含んでいるため実験による事象の再現が困難である。

建築物が問題としている大地震などの荷重現象が発生し観察されるのは極めて稀で、発生を心待ちに常時観測体制を整え測定計器類や人員を待機させることが殆ど不可能であり観測データが少ないこともこの分野の研究の遅れの大きな原因の一つと考えられる。地震現象が原因となる荷重・外力をどのようにモデル化し設計に活かすかということが主題である。

力の作用と性格の表現として、先ず地震現象に事例収集し、地震被害の解析・地震観測の解析を行って、モデル建築物とモデル地震荷重の対比から、実現象を単純モデルに置換する作業が求められる。次に、運動規模の大きさの決定つまり地震動の大きさを数値的に与えることが必要である。標準的な大きさの決定には、再来年数の決定、社会が望む目標としての安全性の尺度をきめて、設計用地震荷重値の決定が行われる。

(2) 地震現象の確率モデルと社会の要求水準

地震動のモデル化には二つの困難がある。それは、①力を簡単なモデルで表現すること ②社会が要求する経済と安全のバランスを考慮することである。経済を重視する社会と安全を重視する社会を比較するとその両者のバランスをどのように取るか、社会の要求するバランス点は、災害



の発生の際の社会の対応の仕方によってよく分かる。また日常生活における安全の程度も、社会の要求するバランス点を知る目安となる。例えば、人口1億2千万人の社会で、毎年1万人が交通事故で死亡している場合、平均寿命を80年とすると、国民の一人が死亡する確率は、 $P=0.008$ である。これから先30年間にすると、0.003 である。

$$p = 1 - (1 - 10^{-4}/10^8)^{80} \approx 0.008$$

この計算では、人口の変動や年齢別分布・性別分布を無視しているので全くの概算である。社会通念として、統計推理学上でも確率が、0.5%以下の現象を、極めて稀な現象/1.0%以下の現象を、非常に少ない現象/5%以下の現象を、少ない現象と考えている。

しかし、0.8%が非常に少ない現象といっても125人に1人は天寿を全うせずに交通事故で死亡するのは大きな社会問題である。(日本人は一年間の死亡統計のバックグラウンドリスクの概数を見ると、病死 10の-2乗、事故死は10の-4乗、災害による死亡は10の-6乗である)

一方、風水害、雪害、震害などの災害発生のパテンシャルの高いわが国でも、自然災害に伴う年平均死者数の人口比率は、 $3 \cdot 10^{-6}$ 程度であり、同じように平均寿命を80年とすれば約4000人に1人が自然災害で命を落とす計算となる。原因別では風水害が一番大きく雪害、震害の順となっている。このうち建物の倒壊に伴う死者数はさらに少なく殆ど確率的には0に近い。

これは、風、雪、地震などの対する設計荷重を通常50年に一度ないしは200年に一度程度の割合で発生する現象を目標に設定していることと矛盾するように見える。すなわち、200年に一度の稀な現象を設計荷重とした場合でも、設計荷重を超える確率Pは建物の耐用年数を50年とすれば、 $P=0.22$ (22%) であり、実際に被害よりもそして交通事故よりもはるかに大きい値となっている。それでも事実上死者数が少ないのはどのような理由が考えられるか。 $P = 1 - (1 - 1/200)^{50} \approx 0.22 \Rightarrow 22\%$

①自然災害の局地性 局地性の強い外力に対して、最も不利な状態を想定する ②警報と避難 突発的災害以外は、人命の損失を低減出来る ③建築物の保有余力 実際の構造物には設計耐力以上の余力耐力がある

将来は、設計荷重が目標とする安全性と、実現象における安全性とがもっと近づく方向に設計精度が高められよう。現在はコンピューターが次第に余力を削り取る設計へと進みつつあり建物に作用する外力と建物の耐力とを適切に推定評価することがますます必要となって生きている。

(3) 設計荷重と法律体系及び社会規範の体系

荷重を誰が決めるか。通常は設計者が各自で設計荷重を決める代わりに建築基準法などの規準や指針で設計用荷重を決めている。設計用荷重の理解は、①法令が守るべき最小限度を示す。②指針は法的拘束力はない。

③超高層建築物や原子力発電所の建屋などは審査会の審査を経て安全性が足しまめられている。そこでは指針に示されたルールに従って設計者自身が設計用荷重を決めている。④地域防災計画における想定地震の決め方

(4)地震動作用の性格の表現

固定荷重以外は、全て時間と共に変動する荷重である。モデル化ではこの変動を無視して静的荷重とするかまたは動的荷重にするかが第一の分岐点である。この動的か静的かは単に荷重の性質だけでなく、構造物の性質との相対関係で決められるべきもので一概に分離できない。動的荷重を静的荷重にモデル化する際は、動的荷重下でのモデル構造物の挙動すなわち変形や応力を求めてこれとほぼ同じ効果を与える静的荷重を選定する。

動的荷重をそのまま動的荷重としてモデル化する場合には多くの問題がある。

地震動について考えると過去に大きな地震動の記録が得られている地点では、その記録のスペクトルが一つの拠り所となる。また、荷重の特性を与える影響の大きい要因のある地点、例えば軟弱地盤のある地点では、その下位にある硬質地盤における標準的な地震動のフーリエスペクトル $F(\omega)$ が利用できるものとすれば、硬質地盤に対する表層地盤の伝達特性 $H(\omega)$ を推定して表層部分の揺れの特性を $H(\omega)F(\omega)$ として推定することが出来る。標準的な地震動のスペクトルをそのまま使用方法と位相スペクトルはランダムなものと仮定して確率統計的な推定法がある。

(5)設計用荷重の大きさ標準値の決定

大きさを決めるためには、荷重の大きさと安全の確率との関係をもとめる。自然現象による荷重は、大きさと頻度・再来年数との関係を過去の観測データを基に定める。設計荷重を求める問題では、稀に発生する大きな荷重が問題になるため、通常再来年数が建物の耐用年数を上回る部分、が対象になり耐用年数 y 、再来年数 R_p と安全率 P との関係は、自然現象の各年の最大値が互いに独立事象であるという仮定が成立すれば、 $P=(1-1/R_p)^y$ として得られる。社会及び建築主の要求から P ならびに y の値が定まり、 R_p が得られる。 R_p が求まれば、観測資料を統計処理して得られる R_p と荷重値の関係から荷重の大きさが求まる。

一方、学問技術の進歩は、未来を単位確率的にしか取り扱い得ない推定困難な問題と見る代わりに、もっと可能な予見を可能にしつつある。地震荷重の場合、大地震の発生間隔が長く耐用年数 y に匹敵するかそれ以上の値となるため、むしろ長年月地震の発生がない空白域などから、断層モデルを仮定し、半ば確定的な事象として捉える方向に進みつつある。

(6)社会的機能と重要性の考慮 機能別の耐震性

発電所の建築各部分に作用する地震力もモデルの一部として求まるが、この力に対して設計する場合、発電所では安全上の重要度に応じて、それぞれの耐震性に差を持たせるのも特徴である。放射性物質を多量に内蔵していてもそこが駄目になったら放射性物質を外部に漏らしてしまう恐れがある、そういった部分は最も重要なので A クラス。内蔵している放射性物質が少量で外部への影響が小さいものは B クラスとし、放射性物質とは全く関係のなく普通の工場並みに扱える部分は C クラスに分類している。

考えてみれば、構造物の部分が、全部が全部等しい耐震性を持つ必要は無く、それぞれの役割つまり機能別に、重点的な設計が出来るのであるから、この方法は合理的である。

もう少し考え方を推し進めると単に建築物の各部分についてではなく、建築物のそのものの耐震性にもその用途・震災時に必要とされる機能別に、例えば大地震時に最も活躍してもらわなければならない行政官庁、放送局、病院、消防署などは A クラス、無人の倉庫などは C クラスといった差をつけるのが合理的であり、必要ではないか。新耐震設計法ではこのことに触れていない。

6. 地域係数の意味を考えてみる

(1)耐震設計における地震動の地域性と周期性

a)地域別・地盤種別・構造種別の類型化

耐震設計はある予想された地震動入力に対して、建築が破壊しないようにする設計であるが、その手順は次のような段階に分かれる。

①構造計画 建築物の形、材料、構造部材の配置と概略の寸法を決定し、剛性・固有周期などが決まる。

②入力の決定 建築物への地震動入力は歴史的な変遷を経ているが、基本的には、地震動特性ばかりでなく地盤の特性、建築自体の特性を総合したものとして、定量的なものが定まることになっている。

③構造解析 地震動入力が決まると、各階に生じる層せん断力から柱・梁に働く力が計算される。

④部材設計 建築物各階にある柱梁・壁床などの寸法を精密に決め鉄筋コンクリート構造であれば、コンクリート断面、鉄筋の本数、太さ、配置などを決定する。

設計とは、要するに最良なる物を求めて試行錯誤的に行う行為であり、構造上の要求から美観の問題もあり経済の問題もありあらゆる要求事項をバランスよく調整して全体像を追求するのが構造計画である。

設計手法の歴史的変遷をみると、地震入力の静的か動的か性格の決定として、構造解析の方法は静的・準動的・動的扱いがある。当初、地震動入力の決め方の基本的原理そのものとして震度法に基づく無差別の評価、即ち、地域別・地盤別・構造種別が見差別に考えられた。しかし後に、地域別、地盤種別、構造種別の区分が行われる。

b) 設計震度の提案 1916 (大正 16 年) に佐野利器は家屋耐震構造論と題した 280 頁にのぼる大作を発表した。これが世に初めて「震度」という概念を打ち出したものである。その基本的な考え方は

1. 地震動の最大加速度⇒「最大加速度はその地震における最大震力の素因なり即ち地震の最大加速度の量はその地震の烈しさを意味するものと云うべし」

2. 震度 k は、 $\alpha/g \Rightarrow$ 「余の茲に震度と名付くるものは最大加速度の一の変形なり即ち地震動の最大加速度 α と重力の加速度 g との比 α/g にして常に k を以て之を表はさんとす。 W を以て物体の重量とせば震力は kW と記され得べく、凡ての物体はその重量の k 倍の力に依って静止を乱されんとすと云ひ得べし」

3. 震力 kW W は物体の重量⇒「震力は震度と重量との積なり、震度としてこの定数を用いる事の工学的利点は材料の重量の概念より震力の概念に直覚的に移行行き易きにあり」

これが、地震の破壊力を震度という概念で建築の設計体系に組み込んだ世界最初の提案であった。

c) 震度 k の値の決定 関東大震災の際に多くの建築物が崩壊した中で世界に先駆けて耐震設計を行った建物として日本興業銀行の体験が決め手となった。設計者内藤多仲は、建築の耐震設計に当たって震度 $2/15$ (0.133) という値を使っていた、これよりさらに安全を見て震力を大きめに見積もることとし、関東大震災直後の 1924 (大正 13 年) に「市街地建築物法」で、以後の耐震設計には震度 0.2 を用いるよう規定した。震度は一律に 0.2 と規定された。建築が木造であろうと鉄筋コンクリートであろうと、東京で建てる場合も福岡の場合も、軟弱地盤であろうと岩盤上であろうと設計に用いる震度は同一である。この時期の地震動入力は無差別の時代であったといえる。

2) 警固断層の調査結果 30 年発生確率が 0.4 から 6.5 に

a) 福岡地震に関連して、市内を南北に走る警固断層の発生確率が新しい調査の結果 30 年発生確率が従来の値から大幅に引き上げられた。30 年発生確率が 1997 年までは 0.4、今回の新しい調査結果によると 6.5 となる、これは、数値の問題と確率の問題を考えさせる。

b) 地震発生の地域性と周期性の特性を、歴史資料からの地震情報と発生場所の地域的な地学的断層資料からの情報などによって、統計的に整理され再現期間を想定して期待される地震動の加速度や速度の値の地域分布が河角マップ、金井マップなどの形で地図上に表現されている。

c) 昭和 25 年に制定された建築基準法は、地震荷重の決定に当たって地域的な地震活動の違いを設計手法に反映するために、その決定の根拠とされたのは河角の研究成果であるとされている。地域係数の意味は一体何であったのか。地震荷重のマクロな重み付けを大域的に 4 区分にして地域によって被害地震の発生の違いを設計法の中に組み入れた。ミクロには、地盤種別と構造種別による対応が図られた。地震活動度によって設計荷重の大きさに地域的な重みをつけることに一つの合理的な納得資料を与えたともいえる。

d) しかし、現代科学の進歩によって歴史的・地理的・観測上にえられた地震情報には空間的・時間的または地域的・時代的にかんがりの偏りがあることは否めない、バラつきがあり不確定な情報として捉えなければならない。

e) 地球の構成の物理的な成り立ちによるプレートテクトニクス的な立場からの地震発生のメカニズムは大域的な解釈と理解は可能であるが、個々のプレート境界やプレート内の運動に関して、人間活動のライフスパンや生活圏の広がりに関して時間的にも空間的にも整合性の取れる関係を持たない。つまり、地震発生の地域性と周期性は人間が耐震設計を行う上での制度において科学的な判断を与える確固たる情報を与えることは出来ない。

f) 翠川によればこの約 100 年間に日本列島を襲った巨大地震

や被害地震の震度 VI ないし震度 VII の影響圏は、日本の国土面積の 7% ないし 1% のオーダーである。地震発生は、狭い日本列島を間歇的かつピンポイント的に襲っておりこの 50 年間に発生した主要な被害地震を見ても、発生が懸念されている東海地震や南海地震・東南海地震に関係するものはない。やがて発生することは間違いない、この現象を耐震設計という現実の社会行為の中で定量的に位置づけしなければならないところに難しさと科学と現実の間に矛盾がある。

g) 30 年地震発生確率の地域分布が提示されても、その内容を我々の日常生活や建築活動の中でどのように連動させて地震対策を考えていくのか。切迫性の高い地域では、既存住宅には耐震診断を義務付け必要に応じて耐震補修や補強を行い、個人の収入ペースに従って行政の支援を行う社会的な仕組みをつくる。行政的には、社会的に重要度の高い施設で危険性があるないしは安全性の問題があるものに関して、改築改修命令を行い強制的な建築規制をかける

h) 理学、地震学、地質や断層に関する情報と工学における耐震設計の数値規定と国や行政の行う法律の体系や規準の内容が、相互関連性が非常に希薄である。理学的情報は不確定要素が強く、地球規模の空間的広がりで生じ、時代の活断層の運動を考えて数百万年の次元で現象が問題となり、一方、工学サイドでは、不確定な現象で分からなくても社会的・政治的さらには工学的判断のもとに定量的に数値化して、具体的には地震荷重を決定して構造物を設計しなければならない。開いた形で不確定要素を放置できる分野と地震動の構造物に与える影響を定量化しなければならない。学問は社会に向かって、これらの事実をどのように説明するか、勝手に専門性を主張してみても、国民や住民の理解は得られない。

i) 地域の安全を考えるに当たって、重要な指標である地震地域係数の設定根拠を巡っては極めて多くの要因と課題が関係している。現行の法律体系での規定と観測された地震記録、調査された被害の実態をどのように社会に向かって説明責任を果たすのか、一方では、関心ある断層による地震発生確率を定量的に定めて公表している。情報が公表されることに異議を唱えないが、数値の持つ社会的な影響やその関係地域の住民に対してどのような行動原理で対応すべきかを示さずに、理学的物理的な数値を唯公表するところに問題がある。つまり天気予報的な情報は日常生活の中での行動に連動して大いに役立っている。30 年発生確率が 5% では何をすべきか、10% になると日常の行動を控えるのか、そこが無責任に数値だけが一人歩きをしている。

j) 自治体・行政の動きとして、地震予知情報へ関心の高さが挙げられる。地震学者、断層研究者の専門性と地震防災分野へ関心度、専門性から外れた無責任な発現と社会的影響が注目される。行政の防災担当者の情報収集能力と地域の防災計画策定能力を考えると、徒に災害情報や地震情報を社会的・行政的に鼓舞して刺激し関心を高めてみても地震災害の軽減には貢献しない、必要なのは如何に地震災害を防ぐ具体的な施策を実施できる対策を立て実行できるかということではないか、中央防災会議の基本方針に従って、地方の県の防災会議の有機機能的な活動の必要

性がいわれるが、行政が行う行為の社会的影響力と住民の意識改革への対応を十分に考慮して地域の安全をどのように保証し確保するかを実感として感じることができる地域防災計画が求められる。

k) 地域の安全は一体誰が責任を持つのか、国や県の行政的な責任をどのように考えるのか、国民や住民の個人的な責任とどのように整合するのか、その間にあって防災の研究者の役割は何か、学者は評論家ではない社会に対し積極的に発言し提案しなければならない。耐震設計で重要な数値を与えている地域係数は、以外に安易に社会に受け入れられてきたキライがある。地震規模がマグニチュードで M6 か M7 かという議論よりも、現実に地域係数が 1.0 か 0.8 か或いは 0.5 でよいのか、基本的な考え方と数値化の問題が十分に議論される必要がある。

3) 想定外の地震の考え方

社会的に許容できる安全とは 確率論的設計法の考え方と利点と欠点は何か。現在の想定地震小さすぎるので、被害の「確率評価」を目指すために、大事故の発生頻度や被害を確率で予測評価する手法確率論的安全評価 PSA を用いると、日本の今の原子力発電所の耐震指針は、想定される最大規模の「地震に耐える」「安全機能は保持できる」などと規定されているが、想定外の巨大地震が起こる可能性はゼロとは言いきれない。PSA を使えば、例えばこうしたケースで周辺住民に死者が出る確率を「100 万年に一回」などと算出でき、社会が受け入れられる安全性かどうか、判断する基準に出来る。原発には安全性を保つ設備が何十にも設けられている。これらの対策がどれだけ事故防止に役立っているのかも数値で示せる。欧米でも導入に向けた取り組みが進められている。

その背景には、原子力発電所の耐震指針の見直しを、政府の原子力委員会が進めている。95 年の阪神大震災以来直下型の大地震が相次ぎ、想定外の事態が起こる可能性が無視できなくなったためである。焦点は、今の指針で想定する最大規模の地震の妥当性と、事故の発生頻度などを確率で予測評価する新手法をどのように採用するか。改定の中身によっては、既存原発の大規模補修が必要になることも考えられる。

安全委員会事務局は、改訂作業中の原発の耐震指針に、確率論的安全評価 PSA を新手法を「補完的に導入する」という方針を提出した。PSA は、巨大地震や航空機の衝突といった不測の事態を含め、原発事故の発生頻度や被害程度を確率で示す方法である。

「補完的」とは、事務局によると、「原発の新規建設の指針には盛り込まないが、実際の建設工事の段階での PSA を実施して、結果を報告するように求める」ことであるという。将来の本格導入を念頭に、とりあえずはじめて見ようというわけである。PSA 導入が議論されるようになったのは、現行指針では、大地震に対応しきれなく可能性が出てきたからである。現行指針は、78 年に原子力委員会が策定し 81 年に安全委員会が一部改定したものが四半世紀にわたって継承されてきた。当該地域で想定する地震動の考え方としては、a) 過去に近くで起こった大地震 b) 近くの

活断層が引き起こす大地震 c) 活断層のないところでは直下で起こるマグニチュード M6.5 の地震」のうち最大影響を与える地震を想定する。原子炉などの主要機器はこれに「耐える」などを求めている。だが、阪神大震災 M7.3 を契機に現行指針への不安が高まった。次いで、鳥取県西部地震 M7.3 が発生。この地震は活断層がないといわれていた場所で起き、しかも M6.5 を上回っていた。想定地震をもっと大きくすることを含め 01 年に指針の見直しが始まった。「想定外の地震が起こったらどうなるのか」—これに答えるために浮上したのが PSA である。安全性は危険性を数字で表せば社会的な判断基準として使いやすい。同様の評価手法は地震に限らず、原子力安全分野では広く適用され始めている。安全委員会では、昨年 12 月、炉心崩壊のような重大事故でも周辺住民が志望する危険性を「1 年当たり 100 万分の一度程度を超えない」という目標案を新たに示した。導入に当たって分科会の意見は分かれている。地震には未知の部分が多い。現状では計算の前提を少し変えるだけで、評価結果が大きく異なる、といった問題を抱えているからである。(朝日新聞 2004.12.1)

4) 「工学的判断とは、Engineering Decision or Judgment」

ある程度の不確定性を含む事象に対して、それを安全率でカバーする、予測や算定の精度は、不確定要素を含む関係から 1 桁違う場合や倍・半分という考えが通常慣用として言われている。

構造物を安全に造るという命題に対して、地震動に対して安全な構造物を設計するには、対象とする地震動が構造物に与える効果をどのように想定するか、これを設計体系から考えてみる。

①地震現象の性格を明らかにする。現象の扱い方から考えて時間に依存する状況を、静的に仮定する ダランベールの原理 慣性力の静的釣合問題 動的に時間依存の現象として扱う ニュートン、ラグランジェ、ハミルトン系の力学 ②地震動の規模、大きさの想定と決定 は地震動の構造物に与える影響を静的な力の釣合問題に置換して決定する。地震力は、建物の重量分布に基づく物体力として、ニュートン力学で評価する。その場合建物は近似的に剛体とし、地盤は一定の加速度で運動しているという前提に立つ。佐野利器の基本的な考え方 この大きな仮定と現実との違いを埋めるために①地震の発生する条件として、地震動の地域性と周期性を考慮する。

②構造物を支持する地盤条件に違いを考慮する。③現実の構造物の材料は一般に弾性体と仮定でき震動する。

これらの仮定との違いを設計上どのようにして対応を考えるか。①の課題に関しては、地震地域係数を考えて、地震力に重みをつけた。②③に関しては、地盤種別、構造種別という地盤条件や構造物の構造材料の違いによる特性の変化を類型化してクラス分けをして対処する。

過去の被害経験から軟弱地盤上の木造家屋の被害が大きかったので、通常の場合の 1.5 倍の重みでこれに対処した。逆に良い地盤上の鉄骨構造物はよく地震動に耐えた経験から地震力を軽減の係数 0.8 を与えた。昭和 25 年建築基準法は定量的な数値化が主として理学系の地震を専門にする研究者の意見で取り入れられた。昭和 25 年から昭和 56 年の間の社会的変化の中で、経験

に基づく考え方は、経験を超える事象が発生すると矛盾が露呈してそれを新たな経験に基づいてカバーしなければならない。新しい状況の出現には何があったか。

・建築構造物や施設の大規模化・複雑化・高機能化／強震記録の蓄積／応答スペクトルという概念の出現／コンピューターによる解析力の向上と進展／新しいタイプの地震被害 R C短柱のせん断破壊 地盤の液状化／

設計体系の基本的な考え方 地震力は、入力地震動と呼ばれるようになった、「入力地震動の考え方」なる呼称で通常地震工学における大命題として扱われるようになった。このような状況にあって、地震地域係数は研究者の主たる関心を引くテーマではなかった。従ってその考え方や背景となる地震資料に関する地道な研究は育ってこなかった。或いは無視され続けた。昭和25年の建築基準法制定の時期から、昭和56年大改定の時期まで30年間の間にいくつかの被害地震を経験して耐震設計法の改定を行う原動力があったが、地域係数を正面きって扱う研究は余り見受けられない。地震が何時どこで起こるか、発生するかは万人の知りたいところであるが、現実にはもっと違った関心事に注意が集中していたようである。設計者の責任で設計者判断で設計は行われるべきであるが、社会はこの問題に対しては、法律で一律に決めてあり余り疑問を挟まなかったのである。

まとめ

明治24年濃尾地震を契機に震災予防調査会が菊池大麓によって設立されその第1回報告書にその後の日本の地震学・地震工学・耐震構造研究の基本的な指針となる18項目の課題を提示している。これはその後展開される耐震設計の体系の歴史的変革の中で、考慮されるべき要因の均衡のとれた姿になっているか、地震と言う自然現象を、人間の社会を守る器としての建築構造物を造る設計行為の中でどのようなシステムを考えるか。

市街地建築物法、建築基準法、同大改正、のなかで、地域係数、重要度係数、地盤との相互作用などの影響因子を如何に取り込むか、設計体系を社会システムのなかでどのように組み込むか、成熟した社会で技術力は高く科学的な学問の成果を考慮でき設計者は、独立した判断で設計を行う自由も認められるべきである。しかし平均的な(最低限の安全性の保証)を国は法律体系としてこれはあくまでも新しく建築物を造るという耐震設計ということであり、既存不適格構造物が法律に照らしてみると四分の一の問題建物の存在を放置している。これは「地域係数」「重要度係数」「地盤との相互作用効果」(ATC3)などの考慮よりも地震国日本の耐震設計体系で既存不適格建築物の扱いが国の地震防災戦略の中で最重要課題であることにも拘らず放置し無視し続けているところに国の政策の欠陥があると言わざるを得ない。

参考文献:

震災予防調査会調査事業概略 18 項目 震災予防調査会報告第27号(自明治二十五年六月 - 至明治二十六年十月) 10-11.

佐野利器: 家屋耐震構造論上編 震災予防調査会報告第八十三号(甲乙) 大正三年十二月大正五年十月発行 震災予防調査会

大日本地震資料、田山實(甲・乙) 明治三十七年三月発行 震災予防調査会報告第46号

萩原俊雄編著/藤田和夫、山本武夫、松田時彦、大長昭雄著: 古地震一歴史資料と活断層から探る、東京大学出版会、1983年12月(続)、1989年3月発行

大規模地震対策指針法の概説、全国加除法令出版刊 昭和54年12月

文部科学省国立天文台編: 理科年表 机上版第76冊 2003 平成15年、丸善

新潟断層に関する新聞報道 朝日新聞 平成13年5月10日、平成17年8月10日

多賀直恒: ポスト阪神大震災の都市の思想、1998.10.30、九州大学大学院人間環境学研究所創設シンポ

和泉正哲: 建築構造物の設計、構造力学2、倍風館

多賀直恒: 防災街造りシンポ、1995 福岡、建築家協会

大田裕: 震源と地震入力の諸問題、第6回地盤振動シンポ概要集、1978.3.28

翠田三郎: 過去の事例に基づく激震動の発生頻度に関する基礎的考察 日本建築学会構造系論文集第502号 55-60.1997.12

大崎慎彦: 「地震と建築」 岩波新書、1983.8

宇佐美龍夫: 最新版「日本被害地震総覧」[416-2001]東京大学出版会 2003年4月初版

構造委員会「学会基準の在り方」委員会の報告 参照

山原浩: “設計面から見た地震断層の動向と今後の展望”、第6回地盤振動シンポ 1978.3.28

3. 地震動予測地図の要素技術と耐震設計への活用

擬似動的震源モデルによる予測強震動の距離減衰特性

CHARACTERISTICS OF ATTENUATION RELATIONSHIPS OF SIMULATED GROUND MOTIONS GENERATED BY THE PSEUDO-DYNAMIC SOURCE MODELING

三宅弘恵^{*1}

Hiroe MIYAKE

The past several years have seen substantial progress in physically based approaches to earthquake source modeling for the prediction of strong ground motion. Using the characteristics of the dynamic faulting based on the frictional law, the pseudo-dynamic source modeling has been proposed without carrying out the full-dynamic simulation. We explore the use of this approach for predictions of wave generation from the source at higher frequencies, where important engineering needs exist. We assume that wave generation is controlled by the product of maximum slip velocity and effective pulse width, where the maximum slip-velocity is calculated using a formulation based on the dynamic rupture simulation and the pulse width is expressed as a product of the rise time and a coefficient c , where c is a function of the aspect ratio of the fault. Using these characteristics of the dynamic faulting, we construct high-frequency source description that satisfies the above constraints. Once the slip-velocity functions are obtained, ground motions are simulated by convolution of the slip velocity and Green's functions using the discrete wave-number method in the low-frequency range, and by the ray-theory calculation using isochrone integration in the high-frequency range. The pseudo-dynamic approach provides similar waveforms and response spectra to those from the dynamic approach. We examine the variability of the ground motions and response spectra, particularly in the extremely near-fault region within 5 km of the fault. For identical slip and static stress drop distribution, variations in hypocentral location result in strong variations in the intensity of ground motions, indicating that the influence from the hypocenter location cannot be neglected for ground motion prediction in empirical attenuation relations.

1. はじめに

近年、強震動予測の高精度化がすすむにつれ、より現実的で物理に忠実な震源モデルの構築が求められている。そのアプローチとして、強震動予測のための動力学的な震源のモデル化が行なわれつつある (例えば、加瀬・他, 2002; Oglesby and Day, 2002; Guatteri *et al.*, 2003)。破壊の力学にもとづいた断層運動の表現は、地表地震断層と伏在断層の違いや、逆断層の性質、断層の幾何形状が破壊伝播に与える影響を見積もるうえで重要であり、有効な地下構造モデルを組み込んだ波形計算を行うことによって、地震動の解釈がより深まることが期待される。

動力学的な震源破壊の計算を行うには、各々の小断層における自発的 (spontaneous) な破壊進展を支配する摩擦構成則を仮定する必要がある。強震動予測に使用される地震規模やすべり分布が未知の場合は、断層形状と深さ依存性を考慮した摩擦構成則のパラメータを先見的に与えて動力学的な震源破壊の計算が行われる。しかしながら、大半の強震動予測では、あらかじめ地震規模やすべり分布が想定されていることが多い。このような震源モデルに対して動力学的な手法による強震動予測を行う

場合は、断層面の破壊伝播速度をモニターしながら、想定された不均質性をもつ最終すべり分布が再現される動的震源モデルの構築を目指す、という立場がとられている (Guatteri *et al.*, 2003)。ただし、上記の条件を満たす摩擦構成則をすべての小断層に対して推定するには、膨大な試行錯誤の計算が必要となる。

このような背景をもとに、動力学的な震源モデルの特徴を最大限生かした運動学的な震源モデルの記述方法として「擬似動的 (pseudo-dynamic) 震源モデル」が提案されている (例えば、Mai, 2001; Guatteri *et al.*, 2004)。本稿では、擬似動的震源モデルの構築手順をレビューし、予測地震動の距離減衰特性について議論する。

2. 擬似動的震源モデリング

擬似動的震源モデリングとは、震源における動的破壊シミュレーションで確認された理論式や経験式をもとに、最終すべり量・静的応力降下量・破壊エネルギー・破壊開始時刻・最大すべり速度・ライズタイム・強震動パルス幅といった一連のパラメータ (図 1) を、摩擦構成則にしたがう断層破壊の動的計算を行うことなく導出する方法である。地震動計算に必要なすべり速度関数の時空間変化は、最後の 4 つのパラメータで表現される。ここでは Guatteri *et al.* (2004) による擬似動的震源モデルの構

^{*1} 東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

築手順を示す。

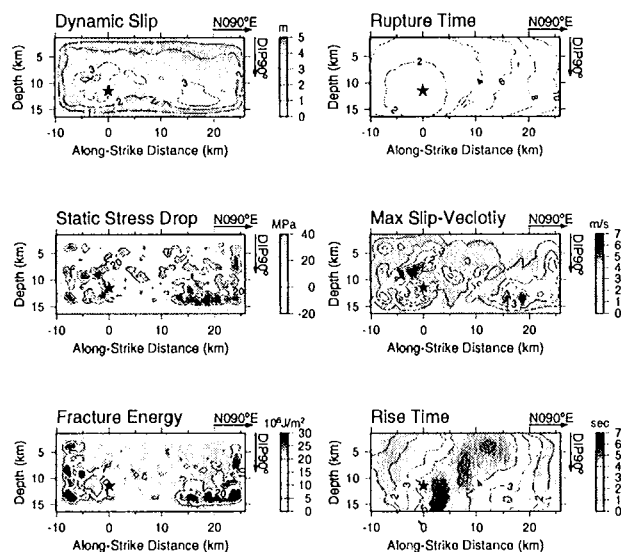


図 1. 動的破壊計算で得られた震源パラメータの例 (after Guatteri *et al.*, 2003). 擬似動的震源モデルでは、これらのパラメータがモデル化される。

(a) 最終すべり分布

最終すべり量分布には、数多くの波形インバージョンの不均質なすべり分布を調べた結果、特徴として見出された、von Karman 型の自己相関関数フィルターを適用した k-square 波数スペクトル分布 (Mai and Beroza, 2002) が与えられる。相関距離にはマグニチュード依存性を持たせている。

(b) 静的応力降下量

最終すべり分布の空間微分値を静的応力降下量とする (Andrews, 1980)。

(c) 破壊エネルギー

動的震源計算から得られた経験式にもとづき、破壊進展を司る破壊エネルギーを、応力拡大係数 (震源からの距離の平方根と静的応力降下量の積) の関数として表現する。

(d) 破壊開始時刻

静的応力降下量、破壊エネルギー、震源からの距離を用いて表現される crack resistance 値を介して、Andrews (1976) の動的破壊計算の定式化に沿って破壊伝播速度を推定する。

(e) 最大すべり速度

Day (1982) による長方形クラックにおける三次元の動的破壊計算結果に基づき提案された経験的關係に

従い、最大すべり速度を応力降下量の関数として推定する。ここでの応力降下量には、静的応力降下量と 0.6 倍の breakdown stress drop のいずれか大きい方の値が採用される (Guatteri *et al.*, 2004)。また、最大すべり速度の時刻には二次元の動的破壊計算結果に基づき提案された経験的關係 (Ohnaka and Yamashita, 1989) を用いる。

(f) ライズタイム

slip-weakening 摩擦構成則を想定した際の動的計算に従うように、断層端部からの healing が到達する時刻と破壊開始時刻の差をライズタイムとする。

(g) 強震動パルス幅

強震動の生成は、最大すべり速度とすべり速度を構成するパルス幅に影響されると考える。ここでは図 2 に示されるように、小断層における約半分のすべりが強震動の生成にかかわると仮定する (Guatteri *et al.*, 2004)。パルス幅は、ライズタイムと断層のアスペクト比を反映したカップリング係数 c の積として表現され (Miyake *et al.*, 2003)、破壊開始点に近いほど一つ目の三角形が尖った Kostrov 型の形状、断層の端に近づくほど c の値が増加して三角形の形状を示す。

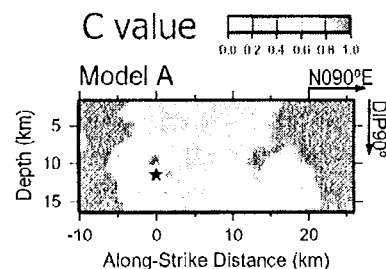
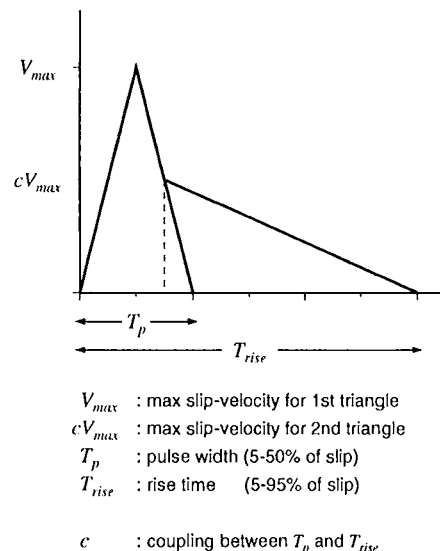


図 2. 仮定されたすべり速度時間関数と図 1 のすべり分布 (Model A) に対する c の値。

3. 強震動シミュレーションと距離減衰特性

ここでは M_w 7 の 6 つのシナリオ地震 (横ずれ断層) に対して擬似震源モデルを構築し (図 3), 0.1-10 Hz の周波数範囲で地震動計算を行った結果 (Miyake *et al.*, 2003) を紹介する. 震源モデルおよび観測点 (図 4)・地下構造は Guatteri *et al.* (2003) と同じものを用いた. 地震動計算は, 低周波数側の計算には Bouchon (1981) による波数積分法を, 高周波数側の計算には Spudich and Frazer (1984) による波線理論に基づくアイソクロン積分法を用い, 1 Hz をマッチングフィルターとした.

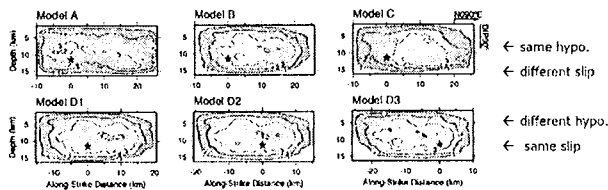


図 3. 計算に使用した 6 つのシナリオ地震のすべり分布. Model A, B, C は破壊開始点を固定し, すべり分布を変化させている. Model D1, D2, D3 は, Model B と同じすべり分布を採用しているが, 破壊開始点を変化させている.

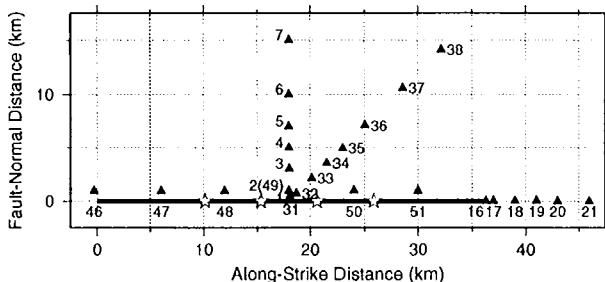


図 4. 断層近傍の観測点の観測点配置. 星はそれぞれの震源モデルにおける破壊開始点を示す.

擬似動的震源モデルによる強震動予測結果は, 動的震源モデルを入力とした場合と似通った波形・応答スペクトルが得られることが確認された. また, 1 Hz よりも低周波数帯域においては, Abrahamson and Silva (1997) の応答スペクトルの距離減衰特性と近いことが確認された.

従来の運動学的な震源モデリングと異なる特徴として, 動的および擬似動的震源モデリングでは, たとえすべり分布と静的応力降下量の分布が同一であっても, 破壊開始点を移動させることによって, 破壊エネルギーの分布が変化することが挙げられる. 破壊エネルギーは (d) 以降のパラメータの推定に強く影響しており, すべり量のやや大きい領域に破壊開始点を配置した場合, ライズタイムが小さい個所で最大すべり速度が大きな値を示す傾

向が見られる. したがって, 動的および擬似動的震源モデリングに基づいて試算される震源ごく近傍の波形には, 従来の経験式を上回るバラツキがみられる場合があることがわかった. 図 4 の左図は Model A, B, C に対する距離減衰で, 経験的關係とよい一致がみられている. しかし, 図 4 の右図に示される Model D1, D2, D3 に対する距離減衰は, Model B と同じ地震規模・すべり分布であるにもかかわらず, 破壊開始点の相違に伴う動的効果により, 経験的關係に対してバラツキが大きい結果が得られている. 特に震源近傍でその傾向が顕著である. このバラツキは, 動的計算から自然に出てくるバラツキと考えることができる.

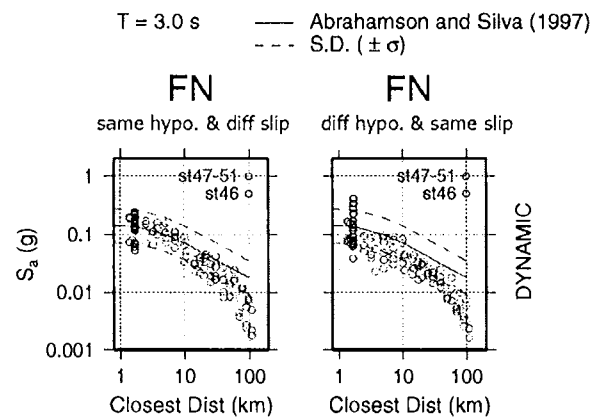


図 4. Model A, B, C (左) および Model D1, D2, D3 (右) に対する予測地震動の周期 3 秒の距離減衰. 断層直交成分.

現段階では, 擬似動的震源モデルではまだ 1~2 Hz 付近までの地震動までしか再現できておらず, より高周波数生成の地震動生成のためには, すべり速度関数のモデル化をさらに進めることが重要であると考えられる.

4. 今後の展望

本稿で紹介した擬似動的震源モデルの強震動予測における妥当性および実用性については, まだ検討段階ではあるが (例えば, Hartzell *et al.*, 2005), 米国・PEER による次世代距離減衰式プロジェクト NGA (Next Generation Attenuation) Program や米国・SCEC における CyberShake Project などに組み込まれつつある. NGA Program では, 巨大地震・大地震時の距離減衰特性の精度向上を目指して, 震源近傍の記録の少なさを動力的・擬似動的・運動学的震源モデルによる強震動予測結果を用いて新たな距離減衰式を作成する方針がとられており, 従来の経験的手法 NGA-E (Empirical) のみならず経験的手法に強震動予測結果を積極的に導入する NGA-H (Hybrid) の 2 種類の試みがなされている.

擬似動的震源モデリングは, 動的破壊計算から得られ

る理論式と経験式をもとに構築されている。そのため、これまでの運動学的震源モデリングでは表現しきれなかった、動的効果による地震動への影響が議論できるようになると期待される。今後動力学的な断層破壊の研究が発展するにつれて、擬似動的震源モデリングはさらなる進化を遂げることが可能であろう。

謝辞

本研究は Gregory C. Beroza 教授 (Stanford University), Martin Mai 博士 (ETH Zurich), Mariagiovanna Guatteri 博士 (Swiss Re) との共同研究として行なわれたものです。

参考文献

- Abrahamson, N. A., and W. J. Silva (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 94–128.
- Andrews, D. J. (1976). Rupture propagation with finite stress in antiplane strain, *J. Geophys. Res.*, **81**, 3575–3582.
- Andrews, D. J. (1980). A stochastic fault model, I. Static case, *J. Geophys. Res.*, **85**, 3867–3877.
- Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**, 959–971.
- Day, S. M. (1982). Three-dimensional simulation of spontaneous rupture: the effect of nonuniform prestress, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 1881–1902.
- Guatteri, M., P. M. Mai, G. C. Beroza, and J. Boatwright (2003). Strong ground-motion prediction from stochastic-dynamic source models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 301–313.
- Guatteri, M., P. M. Mai, and G. C. Beroza (2004). A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 2051–2063.
- Hartzell, S., M. Guatteri, P. M. Mai, P.-C. Liu, and M. Fiske (2005). Calculation of broadband time histories of ground motion, Part II: Kinematic and dynamic modeling using theoretical Green's functions and comparison with the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **95**, 614–645.
- 加瀬祐子・堀川晴央・関口春子・佐竹健治・杉山雄一 (2002). 上町断層系の動的破壊過程の推定, 活断層・古地震研究報告, **2**, 325–340.
- Mai, P. M. (2001). Characterizing earthquake source complexity for improved strong motion prediction, *Ph.D thesis, Stanford University, Stanford*.
- Mai, P. M., and G. C. Beroza (2002). A spatial random-field model to characterize complexity in earthquake slip, *J. Geophys. Res.*, **107** (B11), 2308, doi:10.1029/2001JB000588.
- Miyake, H., P. M. Mai, M. Guatteri, and G. C. Beroza (2003). Towards high-frequency ground motion prediction using a dynamic/pseudo-dynamic approach, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **84**, F1129.
- Oglesby, D. D., and S. M. Day (2002). Stochastic fault stress: implications for fault dynamics and ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 3006–3021.
- Ohnaka, M., and T. Yamashita (1989). A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong motion source parameters, *J. Geophys. Res.*, **94**, 4089–4104.
- PEER Lifelines Research Program (2003). Next Generation Attenuation of Ground Motions (NGA) Project http://peer.berkeley.edu/NGA_program/
- SCEC/CME (2005). CyberShake Project <http://epicenter.usc.edu/cmeportal/CyberShake.html>
- Spudich, P. and L. N. Frazer (1984). Use of ray theory to calculate high frequency radiation from earthquake sources having spatially variable rupture velocity and stress drop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 2061–2082.

地震動のばらつき評価

PREDICTION ERROR AND AMPLITUDE VARIATION OF STRONG MOTIONS

池浦友則*¹

Tomonori IKEURA

Strong-motion prediction error and amplitude variation of strong motions are discussed. Strong-motion prediction error is divided into three types of errors: 1) error due to unspecified conditions, 2) error due to incompleteness of simple expression on the effect of specified factors, and 3) error due to random characteristics of earthquake sources and/or seismic motions. The first and the second types of errors can be reduced through the calibration analyses using observed strong motion data. The third error, however, may be finally left unpredictable. In order to evaluate the standard deviation of the amplitude variation due to the third error, the analysis using pair of records consists of those observed at the same site due to the different two events of which magnitudes and hypocentral distances are almost the same is introduced and discussed.

1. はじめに

確率論的な地震動評価では、評価地点の周辺で発生が想定される様々な地震を考慮して、地震動振幅とその超過確率の関係を検討する。その際に、一定の条件で評価される地震動には「予測誤差」があるものとし、これを「ばらつき」として扱っている。しかしながら、地震動の超過確率はばらつきの大きさをどう仮定するかで大幅に変化する。このため、確率論的な地震動評価では、ばらつきを如何にして適確に設定するかが極めて重要な問題となる。

ばらつきの問題は、このように確率論的な地震動評価を通じてにわかに注目されるようになってきたが、「予測誤差」という意味では、我々がどれだけ正確に強震動を予測できるかに係ることといえる。したがって、すべての強震動予測法について共通する問題であり、断層モデルを用いた強震動予測についても同様に議論されるべき課題である。しかしながら、そこまで議論するのはなかなか大変なので、ここでは確率論的な地震動評価で主に用いられる距離減衰式の予測誤差を中心に議論をしようと思う。

なお、地震動の予測誤差と地震動のばらつきはしばしば一緒に意味で使われることがあるが、区別した方がわかり易い。地震動の予測誤差は、どのような予測の仕方をするかといった人為的な条件で変化し、後述するように評価条件を詳細かつ正確に与えることによってある程度まで小さくすることができる。これに対して、地震動のばらつきは、地震・地震動の不確定・

不規則な性質に起因するばらつき（偶然的な不確定性によるばらつき）であり、予測誤差の一つの要因である。そういったばらつきは、どのように条件を詳細に記述したとしても最後まで予測不可能な部分として残るだろう。その意味では「地震動の予測誤差」 $\geq$ 「地震動のばらつき」であり、強震動予測研究の目標は両者の関係が等号に近い予測法の確立ということになる。

本稿では、はじめに距離減衰式の予測誤差としてのばらつきについて、地点や震源地を特定して距離減衰式をキャリブレートすることにより、小さな予測誤差が得られることを示す。一方、そうしたアプローチとは別に、距離減衰式を介さずに観測記録から直接的に地震動のばらつきを評価することもできる。本項ではその例として、同一地点・同一マグニチュード・同一震源距離の地震動ペアを用いて地震動の再現性という意味でのばらつきを評価した検討を取り上げ、その結果をもとに地震動のばらつきを生み出す要因と要因毎のばらつきの大きさについて議論する。また、これに関連し、小地震による地震動のばらつきの大きさから大地震による地震動のばらつきの大きさを推定するための手がかりとして、アスペリティモデルから予想される地震規模依存性に関する議論を試みる。

2. 予測誤差としてのばらつき

一般に強震動予測では、条件を特定して地震動の平均特性を予測することを考える。したがって予測誤差としてのばらつきには、次の3つの種類の誤差がある。

- (1) 特定しなかった条件による平均特性の誤差
- (2) 特定した条件についてその平均特性を適確に表現できなかったことによる誤差
- (3) 地震・地震動が有する不確定さや不規則性による誤差

(1)の特定しなかった条件には、距離減衰式の説明変数や適用する地震の種類・地域・評価地点といった要因が考えられる。例えば震源特性としてマグニチュード M 、伝播経路特性として震源距離 X しか特定していないよりも、震源深さ H や地盤種別といった条件まで特定した方が予測誤差は小さくなるであろうし、また、地震・地震動の地域性や地盤特性のバリエーションが大きいことを考えれば、評価対象を特定することでより精度の高い予測ができるようになることは当然だろう。(2)の適確に表現できなかったことによる誤差としては、震源特性・伝播経路特性・サイト特性における複雑な影響を単純な関数形で表現したことによる誤差がある。これについては、マグニチュード M に対する依存性を M の一次式で表すかあるいは二次式で表すかといったことや距離減衰特性の関数形としてどのようなものを当てはめるか、また地盤増幅特性を地盤 V_s でモデル化することによる誤差といったことが挙げられるだろう。最後の(3)の地震・地震動の不確定さや不規則性による誤差は、地震が発生し地震動を経験してみなければわからないだろうということで、現在のところいかんともしがたい予測不可能な部分である。

これらの誤差のうち、(1)と(2)の誤差は、距離減衰式の説明変数を増加させ、関数形をより複雑にし、評価地域や評価地点を特定することによって切り詰めてゆくことができる。ただし、それらの操作は距離減衰式の安定性や適用上の利便性と裏腹な面があり、通常の距離減衰式の策定における目標とは必ずしも合致しない。

一般に、距離減衰式の策定では広い適用性と安定した回帰分析を実現するため、不特定多数の地震や観測地点のデータが扱われ、ある程度少ないパラメタで効率よく平均的な特性を表現することを目標にして作成される。そのため、そのようにして作成された距離減衰式で評価される地震動は多くの地震や観測地点の特徴をならした平均的な特性を表すものであり、個々の地震や観測地点に対しては、それほど大きく外れることがないかわりに非常に良く当てはまる保証もない。距離減衰式を策定した際の回帰分析による標準誤差はそういった予測誤差であり、各地で多くの強震記録が蓄積され、震源や伝播経路の地域性や観測地点のサイト特性に関する情報が充実しつつあることを考えると、これをそのまま予測の誤差として見込んでしまうのは

いかにも損であるといえる。

兵庫県南部地震以降、全国的な強震観測網の展開により各地で震源特性や伝播経路特性を検討するための強震記録が得られており、これらを活用して震源地と評価地点を特定したキャリブレーションを行えば、(1)と(2)の誤差はある程度圧縮することができるだろう。具体的には、評価地点で実際に観測された地震動に対して距離減衰式を当てはめることにより、距離減衰式からの残差（予測値に対する観測値の比の対数）を予め見積もっておけば、その距離減衰式を用いて予測する際にその残差分を補正することができるので、評価地点の震源特性・伝播経路特性・サイト特性を反映した予測によって、強震動予測の予測誤差を縮小することができる。

もちろん1地震1地点のデータだけでは、残差が安定的に評価できないし、得られた残差が震源特性に起因するのか、あるいはサイト特性に起因するのか判らないので、キャリブレーションに用いるデータは多いほど良い。実際に震源を特定して同一地震による複数地点のデータを用いれば平均残差によってその地震における地震波の励起特性が距離減衰式で規定されている平均特性からどの程度違うかが分かる(図1a)。したがって、予測に際してその補正を加えれば震源における地震波の励起特性に起因する誤差をおおよそ解消させることができる。同時にまた、その残差のばらつきからは距離減衰特性によるばらつきと地点間の揺れ易さの違いによるばらつきが把握される。特に、地点間における相対的なサイト特性の違いが予め把握されている場合は、さらにその違いを差し引いた残差の距離依存性からその地域における距離減衰特性の系統的なずれも把握できるようになる。

同様に、地点を特定して同一地点における多数の地震のデータを用いた場合は、平均残差からその地点におけるサイトファクターの平均的なずれを把握することができ、その補正によって大まかにはサイトファクターによる予測誤差が解消できる(図1b)。また、残差のばらつきからは震源特性と距離減衰特性の両方の効果によるばらつきが推定される。

複数地点・複数地震のデータがある場合は、上記の組み合わせによって残差のサイト特性、地震規模依存性、距離依存性を検討することにより地震規模や震源距離に対する系統的なずれが明らかになる。その誤差を補正する関数を導入すれば、不完全ながらも事実上、地点と地域性を反映した距離減衰式を再構築したことになる。こうしてできた距離減衰式はその地域や地点にしか使えないことにはなるが、その予測誤差は通常の距離減衰式に比べるとかなり小さくなる。

図2は震源地を特定し最大速度振幅について距離減衰式からの残差のばらつきを調べた奥村他(2004)による結果である。その結果によれば、地点を特定しない場合のばらつきの標準偏差は常用対数で0.3程度であるが、地点を特定して平均的なサイトファクターの補正を行えば0.2程度まで減少する。また、図3は森川他(2005)による同様の検討結果であり、地域を限定して最大加速度・最大速度・加速度応答スペクトルについて距離減衰式からの残差を検討している。これによれば地域による違いは多少あるものの、周期0.3程度以下の短周期領域におけるばらつきの標準偏差は常用対数で0.15程度と非常に小さい。これらの結果は、地域や地点を限定して距離減衰式を補正すれば、従来知られている距離減衰式の標準誤差（常用対数で0.3程度）に比べてかなり小さな誤差で予測が可能であることを示している。

3. 地震動のばらつき

以上のように、地震動の評価条件を特定することにより距離減衰式を用いたときの予測誤差を圧縮してゆることができる。では、予測誤差は一体どの程度まで小さくできるのだろうか。より詳細に、地震発生の場合としての不均質性や減衰性構造の不均質性を考えると、距離減衰式を用いた予測ではそれらの効果を単純な関数形で表現したことによる(2)の誤差があり、また冒頭で述べたように地震・地震動が有する不確定性・不規則性で生じる(3)の誤差がある。前者の誤差に関して距離減衰式の改良は必要とは思いますが、そもそも後者の地震・地震動の不規則な性質のために地震動の再現性が乏しいようであれば、その努力が報われる可能性は少ない。その意味で強震動予測の目標となる地震動のばらつきを観測記録から把握しておくことは有意義であろう。そこで以下では、地震動の再現性という観点でのばらつきを観測地震動から直接的に評価した研究例として池浦・野田(2005)の検討を紹介する。

3.1 データ

池浦・野田(2005)は、同一地点で観測されたマグニチュードと震源距離がそれぞれ等しい強震記録のペアを用いて観測される地震動にどの程度の違いがあるかを調べ、同一地点においてマグニチュードと震源距離が同一の地震で観測される地震動の再現性という意味でのばらつきの評価を試みた。検討に用いたデータは1979年から2002年までの電力共通研究による強震観測[Yasiro et al.(1998)]で得られた記録のうち表1に示す地点の記録であり、震源深さ $H \leq 60\text{km}$ 、 $\Delta \leq 200\text{km}$ の地震でMの差が0.0、Xの差が5%以内のデータのペア

である。表1では検索によって得られた記録のペア数も示されている。表中でPairsの欄の()は検索されたペアのうち、震源地が大きく離れた2つの地震あるいは震源深さが20km以上異なる2つの地震からなるペア（震源地が異なるペア）の数を意味する。また、表中には観測位置の地盤 V_s も示されているが、いずれの地点の $V_s=500\text{m/s}$ 以上の比較的硬い地盤であり、また観測記録の最大加速度は40Gal未満であるため以降の議論において地盤の非線形化の影響は無視できる。

観測地点毎の震央分布を図4に示す。図ではペアを構成している地震どうしを直線でつないで示している。TMKのペアの多くは前面海域の福島県沖によるものであり、HMYでは茨城県南西部の地震、SZJでは伊豆半島東方沖の地震が多い。また、図5はこれらの観測記録のマグニチュード(M)・震源距離(X)の分布と震源深さ(H)・震央距離(Δ)の分布である。SZJのデータペアはその他の地点とは異なる領域に分布しており、ごく一部を除き $M \leq 5.0$ 、 $X \leq 40\text{km}$ 、 $H \leq 20\text{km}$ 、 $\Delta \leq 30\text{km}$ の範囲のものである。

なお、解析では個々の観測記録ごとに長周期雑音の影響を受けていない周期帯域を判定して検討に用いる。解析に用いることができたデータペア数の周期分布を図6に示す。長周期領域では有効なデータが激減することに注意されたい。

3.2 ばらつきの評価法

これらのデータをもとに、観測地点毎に一定のマグニチュード・震源距離に対して固有な平均振幅 μ があるものとして、マグニチュードM、震源距離Xの地震の際に同一地点で観測された地震動のスペクトル S_{ij} ($i=1,2$ はペアと構成する2地震、 $j=1,2$ は水平2成分すなわちNS成分とEW成分)を μ と、 μ からのばらつき ε_{ij} の和で次のように表す。

$$\ln S_{ij} = \mu + \varepsilon_{ij} \quad (i=1,2; j=1,2) \quad \cdots(1)$$

ε_{ij} は、同一の観測地点・M・Xであるにも関わらずi地震の際にj成分のスペクトル振幅に生じるばらつきであるが、これは地震によるばらつき ε_{ei} と観測成分によるばらつき ε_{ej} の和で表される(cf. random effect model[Brillinger and Preisler, 1984]) (図7)。

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ei} + \varepsilon_{ej} \quad (i=1,2; j=1,2) \quad \cdots(2)$$

なお、 ε_{ei} 、 ε_{ej} 、 ε_{ij} は、PGAのばらつきを議論したAbrahamson(1988)にならい、平均値0の正規分布に従う確率量として扱う。また、以降では自然対数の対数標準偏差により地震動のばらつきの幅を議論する。

以上の条件のもとで、同時に観測された水平2成分の平均値に対するj成分の偏差を u_j とし、 ε_{ej} どうしの無相関性を仮定すると、成分によるばらつき ε_{ej} の

標準偏差 σ_e は u_j の標準偏差 σ_u によって次のように表される。

$$\sigma_e^2 = 2\sigma_u^2 \quad \cdots(3)$$

また、2地震間の違いに関しても、水平2成分の平均値をサンプルとして2地震の平均値を求め、その偏差 v_i の標準偏差 σ_v を導いて、地震によるばらつき ε_{ei} とうしの無相関性、 ε_{ei} と ε_{ej} との無相関性を仮定すると、地震によるばらつき ε_{ei} の標準偏差 σ_e は σ_v と σ_u によって次式により表される。

$$\sigma_e^2 = 2\sigma_v^2 + \sigma_u^2 \quad \cdots(4)$$

この結果、 ε_{ij} の標準偏差 σ は次式で評価される。

$$\sigma^2 = \sigma_e^2 + \sigma_e^2 \quad \cdots(5)$$

3.3 ばらつきの評価結果

上記で検索された全てのデータペアを用いて(3)～(5)式により評価した σ 、 σ_e 、 σ_v を図8に示す。なお、周期2秒付近から長周期側は長周期信頼限界の関係でデータが急減しているため短周期側に比べると信頼性は低い。この結果によれば、観測成分によるばらつきの標準偏差 σ_e は短周期側で0.23前後、周期2s付近で0.30前後であり、長周期になるにつれて徐々に大きくなる。一方、地震によるばらつきの標準偏差 σ_e は短周期側では0.4前後であるが、周期0.2sで0.5前後まで上昇し、さらに長周期側では周期5sにかけて低下する。長周期になるにつれて σ_e が小さくなる傾向は気象庁マグニチュードが周期4～5s程度で決定されていることと調和的である。また σ_e と σ_v を比較すると周期約0.2s以下の短周期側では σ_e が σ_v の半分程度であり、短周期領域では観測成分によるばらつきが相対的に小さく、全体のばらつきが地震によるばらつきにおおむね支配されることがわかる。

上記でばらつきの標準偏差を評価する際に用いたデータペアの中には、震源地が異なる2地震からなるペアも含まれているため、震源地の地域性の違いを無視したことによる影響がある。そこで、震源地が異なるペアと深さの差が20km以上のペアを排除して、改めて σ 、 σ_e 、 σ_v を評価した結果を図9に示す。これによれば、 σ_e にはほとんど変化がないが、 σ_e は震源地を限定したことにより周期0.5s以下の帯域で短周期になるほど顕著に減少している。また、この結果、両者の和で表される全体のばらつき σ も周期0.05s以下では0.4～0.45程度まで減少しており、同一震源地のデータペアに限ることにより特に短周期領域のばらつきが小さくなることが分かる。

また、地点毎に評価されるばらつきの標準偏差の特徴を見るため、データペアの数が比較的多く安定した結果が得られるTMKとSZJにおいてそれぞれ同一震

源地のデータペアによる σ 、 σ_e 、 σ_v を図10に示す。TMKでは福島県沖のプレート境界沿いに発生した $M=4.0\sim 5.8$ の地震による66ペア、一方、SZJでは伊豆半島東方沖で発生した $M=3.5\sim 5.7$ の海洋地殻内の地震による71ペアが対象となっている。両地点の結果を比較すると、まず σ_e は両地点で比較的良好に似た結果となっている。また、 σ_e についても長周期側では両地点の違いが顕著に現れるが、周期0.1s以下の短周期側ではおおむね同様の振幅特性であり、その結果、全体のばらつきの標準偏差 σ も短周期側では両地点でほぼ一致している。

3.4 ばらつきの要因と分解

以上のように、 M と X がそれぞれ等しい地震動スペクトル間のばらつきを観測成分によるばらつきと地震によるばらつきの和で表して各々の標準偏差を評価した。図11はこれらのばらつきがどのような要因によりもたらされているかを表している。ここでは、上記の要因のうち、成分によるばらつき、伝播経路の違いの影響、および震源の励起特性の違いと破壊伝播方向の違いの影響について、主に短周期地震動に注目した議論を試みることにする。

1) 成分によるばらつき

上記の結果によれば、成分によるばらつきの標準偏差 σ_e は特に周期0.1s程度から短周期の領域では地点によらず安定している可能性がある。実際に、先に指摘したように十分な数のサンプルがあるTMKとSZJでは σ_e がほぼ一致している。また、図8や図9によれば、水平2成分の最大加速度に関するばらつきの標準偏差を表す周期0.02秒の σ_e は0.24であるが、この値はYoungs et al.(1995)がほぼ同規模の地震($3.8 \leq M \leq 5.0$)のPGAから見積もった観測成分によるばらつきの標準偏差0.22に対応する。このため、不整形性等によって地盤応答の異方性が顕著でなければ、観測成分によるばらつきの標準偏差は短周期領域で0.22～0.24前後の値となることが考えられる。

2) 伝播経路の違いの影響

同一震源地に限ったとはいえ波動伝播経路の違いについては、図4に示したペア地震の震央分布からわかるように海溝沿いの地震群では震源位置が50km以上離れているペアも含まれており、厳密には波動伝播経路の違いが残されている。そこで、震源間距離(Source-to-Source Distance: ssd) が10km以内、5km以内の地震ペアに絞り込みながら σ_e 、 σ_v の評価を行い、 σ の変化を検討した結果が図12である。解析に用いること

ができたペア数は 10km 以内、5km 以内に対してそれぞれ 162, 104 個である。これによれば、ssd を絞ることにより σ は減少するが、その減少の仕方には周波数による違いがあり、長周期帯域では ssd を 10km 以内に絞った効果が顕著であるが、短周期側では $\text{ssd} < 10\text{km}$ から $\text{ssd} < 5\text{km}$ にしぼった効果が大きい。波動伝播経路における減衰特性が震源から観測地点に至る経路の平均的な特性で決まることを考えると、伝播経路特性に違いがあるとすれば震源間距離が大きいペアを除くほど σ_e が顕著に減少することが期待される。しかしながら、 $\text{ssd} < 10\text{km}$ の結果が 258 ペアの結果とさほど変わらなかったということは、検討データの震源地においては震源位置の違いが 50km 程度の範囲で伝播経路特性に大きな違いがなかったことを示唆する。一方、震源間距離が 5km 以内まで絞り込んだときに顕著に σ_e が低下したことは、伝播経路の違いが減少するというよりは、むしろ震源位置が近づくことによって地震発生時の条件が似かよってくるため震源の励起特性や震源メカニズムの違いが減少することを反映しており、その相関距離が 10km よりは短く 5km 程度であったことを示しているものと考えられる。

3) 震源の励起特性の違いと破壊伝播方向の違いの影響

震源特性の違いとしては、図 11 に示したように震源の励起特性の違い、震源メカニズムの違い、破壊伝播方向の違いがある。このうち震源メカニズムの違いは主に長周期帯域のばらつきに寄与する要因であり、短周期成分のばらつきには大きな影響を及ぼさない。そこで地震によるばらつきが主に震源の励起特性の違いと破壊伝播方向の違いの影響で決まると仮定してこれらの要因によるばらつきの大きさを定量的に推定することを試みた。まず、これらの寄与によるばらつきの標準偏差をそれぞれ σ_s と σ_D とすると、地震によるばらつきの標準偏差 σ_e は次式のように表される。

$$\sigma_e^2 = \sigma_s^2 + \sigma_D^2 \quad \cdots (6)$$

このうち σ_D の大きさに関しては、中村・八代(2000)が K-NET の記録を用いて方位による違いと観測成分による違いの 2 つの要因によるばらつきの標準偏差を周期 $T=0.02 \sim 1\text{s}$ の範囲で定量的に評価している。これを σ_{NY} として本検討の結果に組み合わせると次のように σ_e を σ_D と σ_s に分離することができる。

$$\sigma_D^2 = \sigma_{NY}^2 - \sigma_e^2 \quad \cdots (7)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_e^2 - \sigma_{NY}^2 \quad \cdots (8)$$

図 9 の σ と σ_e をもとに(7)式・(8)式により σ_D と σ_s を評価した結果を図 13 に示す。図中には参考のために σ 、 σ_e および中村・八代(2000)による σ_{NY} も示した。これによれば、周期 0.1s 以下の帯域では σ_D は 0.15～

0.2 前後であるが、 σ_s は 0.3～0.35 程度であり、 σ_s の方が σ_D に比べて大きい。ただし、この結果を定量的に扱う上ではデータが全く異なる点に注意しなければならない。中村・八代(2000)は震源からの方位による違いが明らかになるように震央を取り囲んで同心円状のデータ群を用いているため、彼らが評価した方位によるばらつきはやや大きい可能性がある。その場合、図 13 の σ_s はやや小さめに評価されていることになるが、それでも他の要因の影響を上回ったということは、震源における地震波の励起特性の違いが短周期地震動のばらつきを生み出す支配的な要因となっていることを意味する。

4. ばらつきの地震規模依存性について

上記で紹介した池浦・野田(2005)の検討は、同一地点・同一 M・同一 X といった理想的な条件を満足させるため、もっぱら M3.5～M6.0 程度の小規模地震によるデータに基づいており、評価された σ も小規模地震の性質を反映したものといえる。これに対して、例えば、PGA のばらつきについては地震規模依存性あるいは振幅依存性があり、大地震・大振幅の地震動におけるばらつきは小地震・小振幅のそれに比べて有意に小さくなるとされる[Youngs et al.(1995), 翠川・大竹(2003), Abrahamson(1988), Douglas and Smit(2001)]。そこで、小地震のばらつきから大地震のばらつきの大きさを推定する手がかりとして、地震規模によってばらつきがどのように変化するかを考えてみよう。

上記の結果によれば、周期 0.1s 以下の帯域で最大のばらつき要因となるのは震源の励起特性の違いによるばらつきであり、その標準偏差 σ_s は 0.3～0.35 程度であった。評価に用いられたデータの地震規模は小さく、個々の地震の震源は比較的単純なクラックあるいはアスペリティ領域でモデル化できる程度と考えられる。最近の強震動予測で用いられている不均質震源モデルで個々のアスペリティ領域の短周期レベルに上記と同様なばらつきがあるとすれば、複数のアスペリティがある場合にはそれらの中で最大の短周期レベルが震源全体の短周期レベルを代表することになる。その場合、地震規模の増加につれてアスペリティ領域の数が増加することにより、低い短周期レベルが代表になる可能性が減少する結果、全体として短周期レベルがばらつき難くなることが考えられる。図 14 は $N=1 \sim 6$ 個の正規乱数を考えたとき、それぞれその中の最大値について求められる確率密度関数であるが、これは、個々のアスペリティ領域の短周期レベルがすべて同一の対数正規分布 (μ : 平均値, σ : 標準偏差) に従うものとしたと

きの短周期レベルの最大値の確率密度関数を表すと考えることができる。小地震で1個のアスペリティ領域しかない場合は、その短周期レベルのばらつきの標準偏差は σ のままであるが、地震規模の増加とともにアスペリティの数が2個、3個、…と増えるにつれてばらつきは 0.83σ 、 0.75σ 、…と小さくなる。この計算ではアスペリティ領域が5個程度あると震源全体としての短周期レベルの標準偏差は単一アスペリティの σ に対して $2/3$ まで低下する。実際の現象にはもっと物理的な要因が働いているだろうし、上記のような単純なモデル化には無理があるだろう。しかしながら、地震動のばらつきが地震規模の増大とともに減少する理由については、こういった意外に単純な観点から検討してみるとよいかも知れない。

5. おわりに

距離減衰式を用いた予測誤差としてのばらつきの評価に関連して、距離減衰式のキャリブレーション解析が予測誤差を圧縮する上で有効な方法であることを述べた。また、予測誤差の下限にあたる地震動のばらつきを直接的に観測記録から評価した事例を紹介し、震源地を特定することにより地震動のばらつきが減少すること、しかしながらまた、たとえ震源地や地震規模を特定したとしても震源における短周期領域における地震波の励起特性のばらつきが自然対数の標準偏差で0.3（常用対数の標準偏差で0.13）程度は残る可能性があることを示した。さらに、地震動の地震規模依存性については、地震規模とともにアスペリティ領域の数が増える効果によって短周期レベルのばらつきが減少するといった考え方で説明できる可能性があることを述べた。

従来、強震動予測の研究では地震動の平均特性の把握が興味を中心であり、平均特性の地域性が問題として取り上げられることが多かった。最近ではばらつきの議論も盛んになってきたが、おそらくばらつきの大きさにも地域性はあるだろう。そのため確率論的な地震動評価の精度を向上させる上では、地震動の平均特性とばらつき特性の両方について地域性を明らかにすることが必要となる。地震動の平均特性はもちろんのことばらつきまで適確に推定するには多くの強震記録が必要となる。その意味で今後も全国的な強震観測網により精度の良い強震記録を蓄積してゆくことは極めて重要である。

参考文献

- Abrahamson, N. A., 1988, Statistical properties of peak ground accelerations recorded by the SMART 1 array, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 26-41.
- Brillinger, D. R., and H. K. Preisler, 1984, An exploratory analysis of the Joyner-Boore attenuation data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 1441-1450.
- Douglas, J., and P. M. Smit, 2001, How accurate can strong ground motion attenuation relations be?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1917-1923.
- 池浦友則・野田静男, 2005, 同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき—地震規模と震源距離がそれぞれ等しい強震記録ペアの分析—, 日本地震工学会論文集, 第5巻, 第3号, 12-30.
- 翠川三郎・大竹雄, 2003, 地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第1号, 59-70.
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・奥村俊彦・福島美光, 2005, 震源が特定された地震の地震動振幅のばらつき—観測記録に基づく検討—, 日本地震学会講演予稿集, 2005年秋季大会, B83.
- 中村亮一・八代和彦, 2000, 観測記録に見られる短周期地震動の方位依存性—ほぼ同一の位置・規模の2地震のスペクトル振幅比—, 日本地震学会講演予稿集, 2000年秋季大会, B11.
- 中村亮一・八代和彦, 2002, 観測記録に見られる短周期地震動の方位依存性—ほぼ同一の位置・規模の2地震のスペクトル振幅比—, 第11回日本地震工学シンポジウム, 157-162.
- 奥村俊彦・渡辺基史・藤原広行, 2004, 2003年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討, 日本地震学会講演予稿集, 2004年秋季大会, B26.
- Yasiro, K., S. Noda, K. Takahashi and S. Omote, 1998, Strong motion earthquake instrument array in and on hard stratum in the Kanto and Southern Tohoku areas of Japan, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Balkema, 271-278.
- Youngs, R. R., N. Abrahamson, F. I. Makdisi, and, K. Sadigh, 1995, Magnitude-dependent variance of peak ground acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1161-1176.

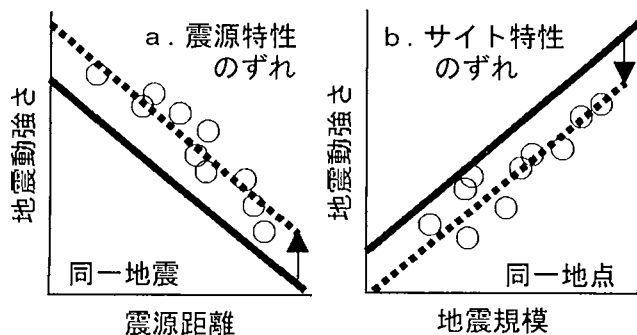
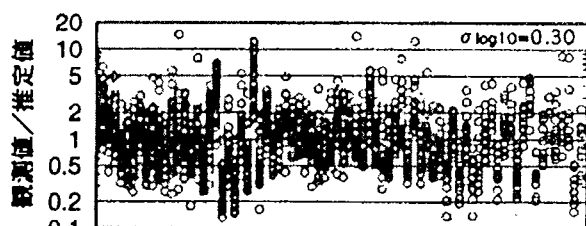
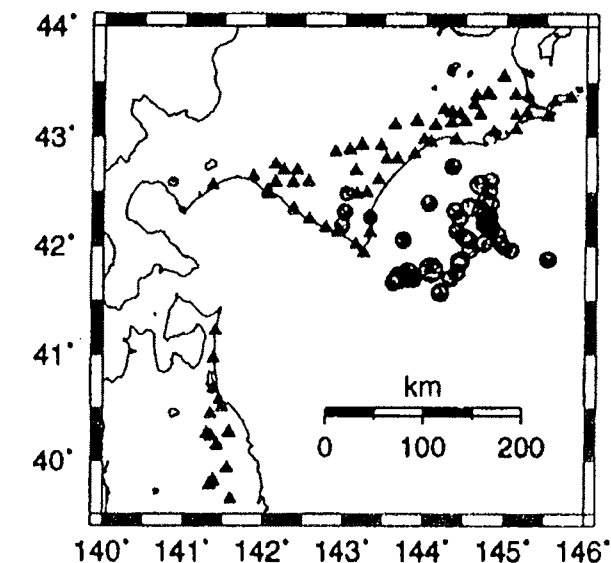
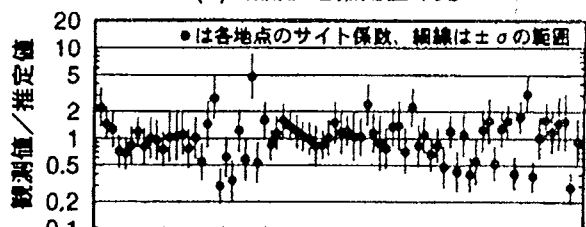


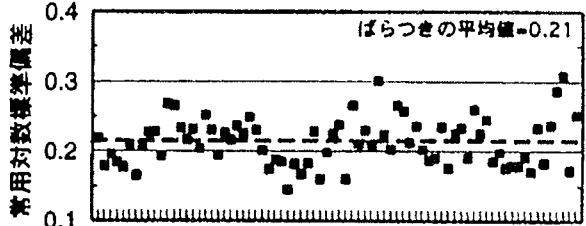
図1 震源特性とサイト特性の平均残差



(a) 観測値と推定値の比



(b) 地点ごとの比の平均値とばらつき



(c) 地点ごとのばらつきの大きさ

図2 奥村他(2004)の検討例

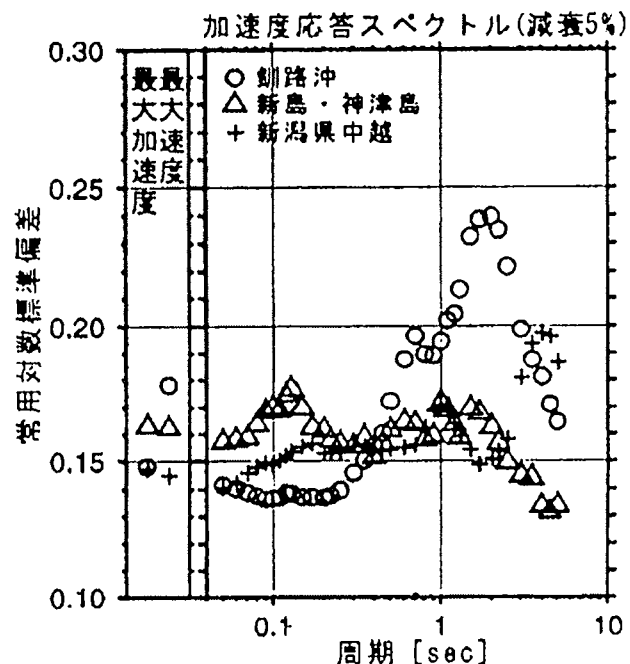
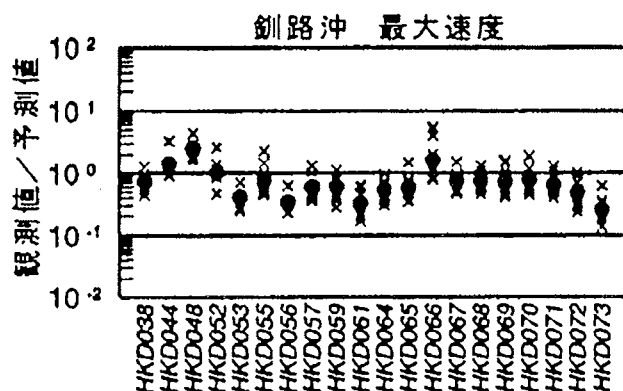
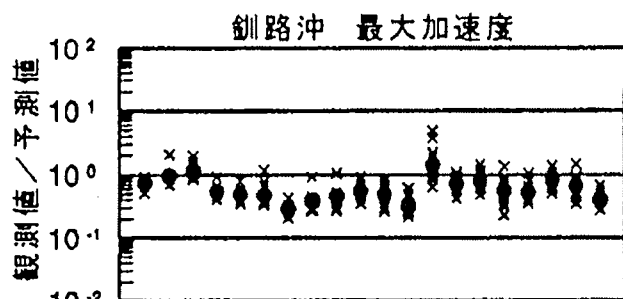


図3 森川他(2005)の検討例

表1 解析に用いたデータの観測地点

No.	Site	N.L.(deg)	E.L.(deg)	Depth	Vs(m/s)	Pairs
1	TMK	37.383	141.086	GL-100m	0.70	66(2)
2	IDG	37.408	141.000	GL	2.00	21(2)
3	HKD	37.375	140.928	GL	2.70	7(3)
4	KDG	37.186	140.875	GL-10m	2.20	3(0)
5	IWK	37.156	140.919	GL-21m	2.28	25(1)
6	OAR	36.333	140.600	GL-14m	1.00	11(1)
7	OGW	36.017	139.283	GL-10m	0.75	2(0)
8	HMY	36.000	139.383	GL-58m	2.10	57(6)
9	CHS	35.847	140.983	GL-18m	1.40	5(1)
10	TTY	34.950	139.900	GL-38m	0.60	4(0)
11	TTA	34.983	139.850	GL	0.50	3(0)
12	SZJ	34.967	138.967	GL-36m	0.65	71(1)
total						275(17)

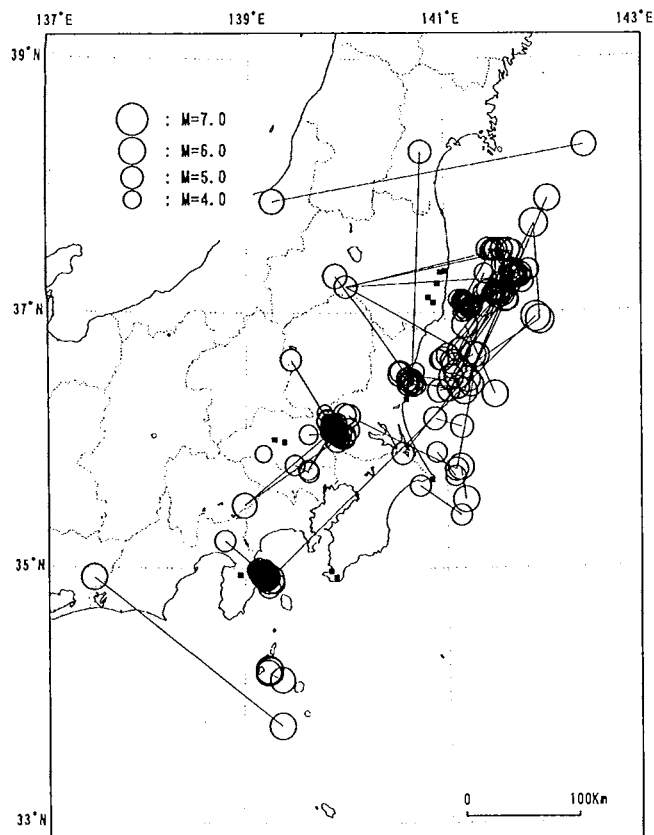
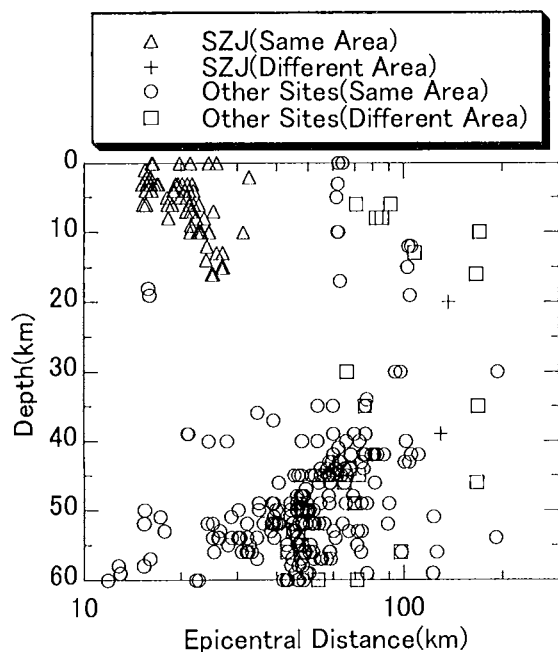
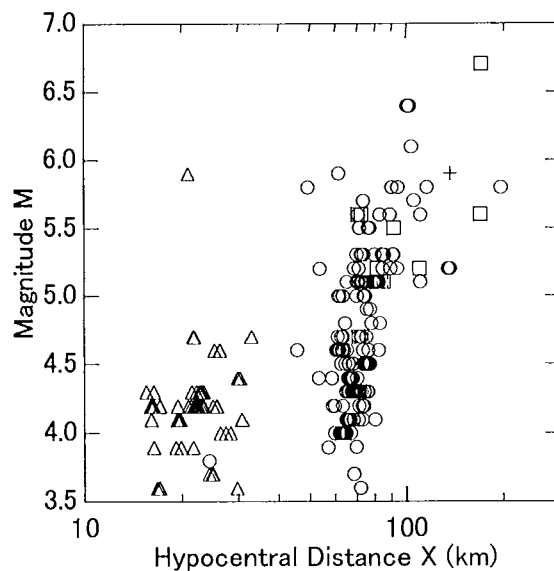


図4 解析に用いたデータの震央分布



(1) H-Δ 分布

図5 解析データの H-Δ 分布と M-X 分布



(2) M-X 分布

図5 解析データの H-Δ 分布と M-X 分布 (続き)

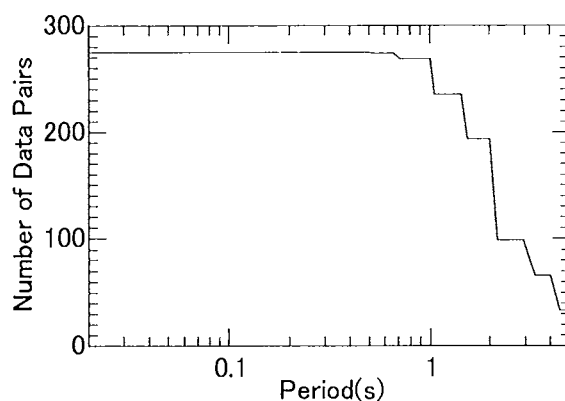


図6 解析に用いたデータペア数の周期分布

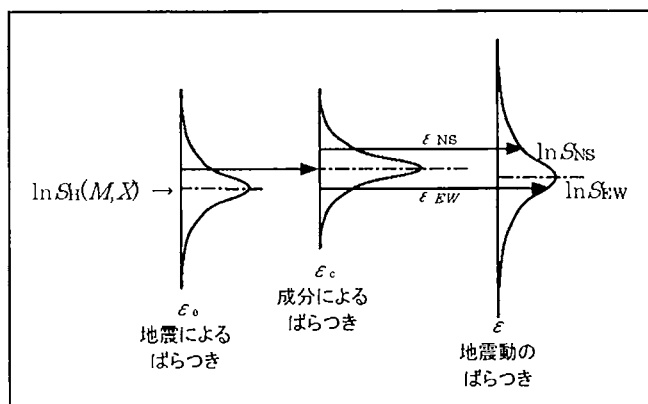


図7 地震動振幅のばらつきのモデル化

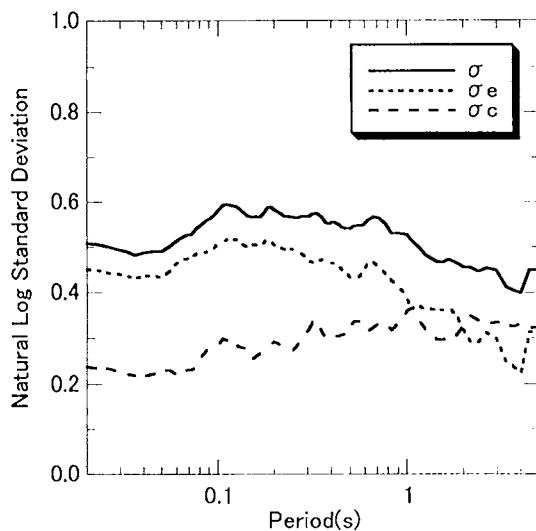


図8 全記録ペアの σ_e , σ_c , σ

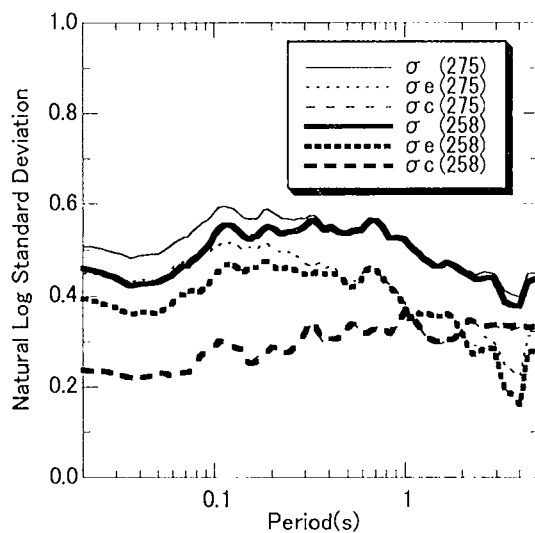


図9 同一震源地ペアの σ_e , σ_c , σ

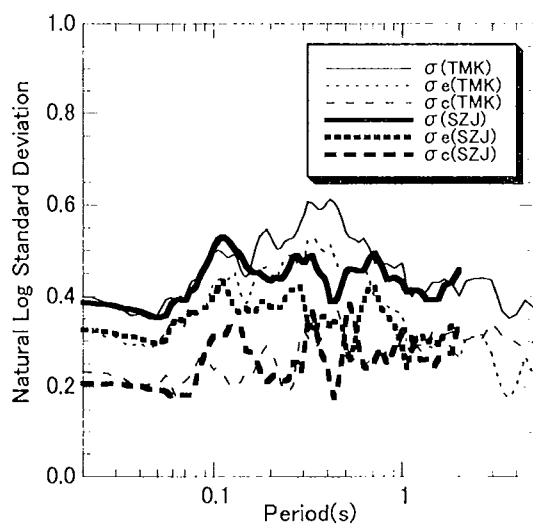


図10 TMK と SZJ における σ_e , σ_c , σ

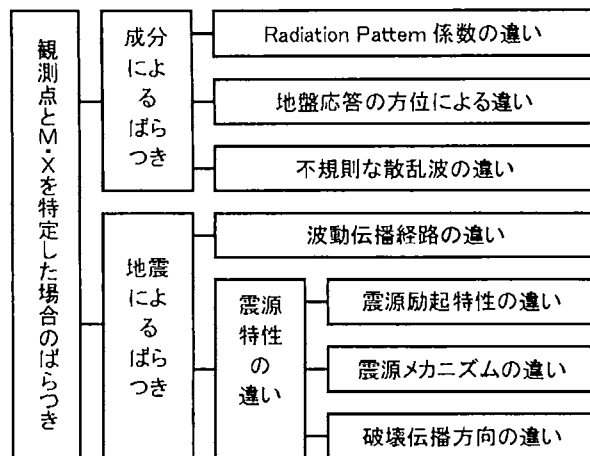


図11 同一地点・同一M・Xでのばらつきの要因

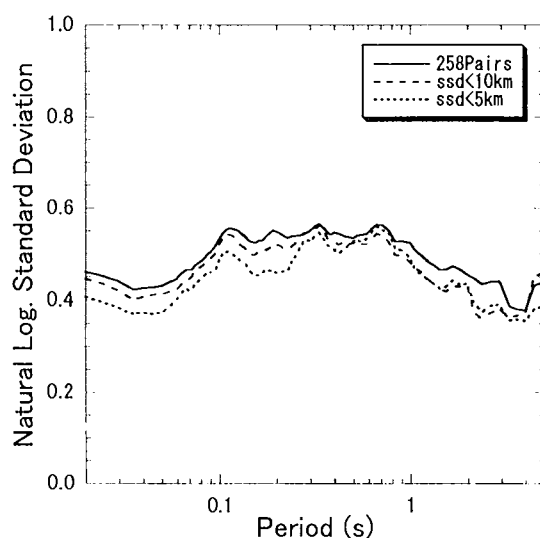


図12 震源間距離(ssd)による σ の変化

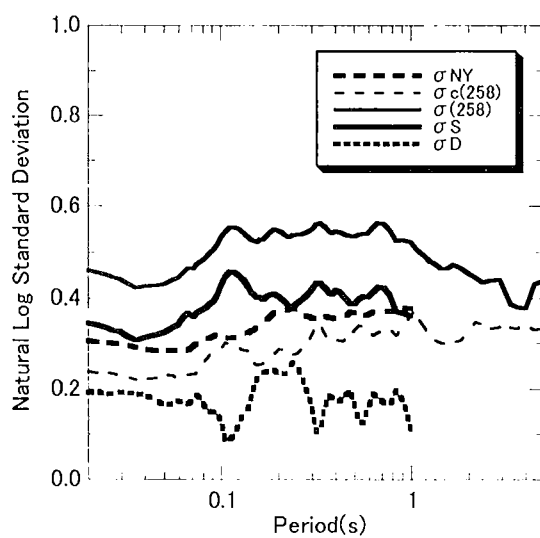


図13 ばらつきの分解

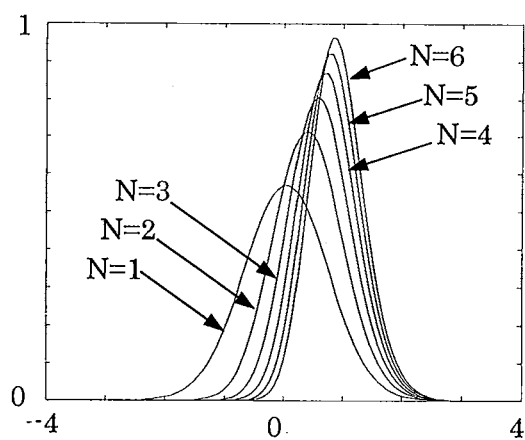


図 14 複数の正規乱数の最大値の確率密度分布

設計地震動への確率論的予測地図の活用と課題

APPLICATION OF PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS TO DETERMINE REFERENCE EARTHQUAKE MOTIONS

石川 裕*

Yutaka ISHIKAWA

This paper introduces the principle to determine the reference earthquake motions in the guideline of seismic performance assessment for civil engineering structures by the Earthquake Engineering Committee of JSCE. Probabilistic approaches to evaluate the ground motions for serviceability and scenario-based approaches for safety during or after an earthquake have been recommended. After that, this paper addresses the framework to integrate the probabilistic and scenario-based approaches for better practice of earthquake ground motion evaluation.

1. はじめに

この10年、地震および地震動に対する理解は飛躍的に向上した。定性的には従前より認識されてきたことも多いが、広範囲に展開された地震観測網の助けを得て定量化が行われつつある意義は大きい。とりわけ強調すべき点として、被害をもたらすような地震動はサイトごとに個性的かつ異なる「顔」を有することが明らかとなり、従来型の横並びの設計地震動では遅かれ早かれ説明責任が果たせなくなることが指摘できる。目標性能に応じたサイトスペシフィックな設計地震動を高い説明性の下に設定する枠組みを構築することが喫緊の課題である。

一方、将来の地震動を評価する方法としては「確率論的地震ハザード評価」と「シナリオ型地震動評価」が代表的であるが、これまで両手法は基本的に別個の概念として用いられてきた。例えば、2005年3月に地震調査研究推進本部（推本）により公表された「全国を概観した地震動予測地図」¹⁾では、「確率論的地震動予測地図」（確率論的地震ハザード評価）と「震源断層を特定した地震動予測地図」（シナリオ型地震動評価）が示されているが、目的に応じて両者をどのように組み合わせ、活用していくかは今後の課題とされている。

本稿では、土木学会地震工学委員会できとりまとめ中の耐震性能評価指針（案）における性能照査用地震動の設定に際しての上記両手法の取り扱いについて紹介するとともに、今後の展望として、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合の方向性について論じる。なお、後半部は文献2) を基に要約、加筆したものである。

2. 土木学会地震工学委員会・耐震性能評価指針（案）における性能照査用地震動

土木学会地震工学委員会では「土木構造物の耐震性能評価指針（案）」を取りまとめ中である^{3) 4)}。これは土木構造物の耐震設計の基本となるべき最近の考え方を学会指針の形でまとめたものである。ここでは、使用性と安全性に対する性能を照査するための地震動に関する考え方が示されているが、地震ハザード評価との関わりは表-1のように要約される。

「使用性照査用地震動」は、対象期間内に発生する確率が定量評価できる確率論的地震ハザード評価に基づいて設定することを基本としているのに対して、「安全性照査用地震動」はシナリオ型地震動評価に基づいて設定することを原則としている。

安全性照査用地震動の設定の考え方は、阪神・淡路大震災後に学会より出された提言における「レベル2地震動」の考え方を踏襲しており、表-1の末尾のa) とb) はそこでも指摘されていた事項である。また、c) に関しては、これまでの確率論的地震ハザード評価では地震動評価に距離減衰式が用いられることが一般的であったこと、ならびに確率論的地震ハザード評価に基づく一様ハザードスペクトルには発生確率が相対的に低い内陸活断層の影響が反映されにくいことがその理由として指摘されている。最大地動や一様ハザードスペクトルなどの古典的な確率論的地震ハザード評価のみからは神戸で経験したような「個性的な地震動」を評価しきれない可能性が高く、こうした点も考慮して、安全性照査用地震動の評価においては、シナリオ型地震動評価に基づくという考え方となっている。

* 清水建設（株）技術研究所

耐震設計の性能規定化あるいは国際化の流れの中で、安全性照査に用いる地震動とその超過確率（発生確率）の関係、もしくは設計された構造物の損傷や被害とその発生確率の関係を明示することの必要性は論を待たない。確率論的地震ハザード評価はそ

表-1 使用性・安全性照査用地震動の設定の考え方
（文献3）より抜粋）

【主文：抜粋】	
●使用性照査用地震動は、設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動とする。	
●安全性照査用地震動は、当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動とすることを原則とする。	
.....	
●使用性照査用地震動は、確率論的地震ハザード解析によって評価しなければならない。	
●安全性照査用地震動は、シナリオ型地震ハザード解析によって評価することを原則とする。	
●安全性照査用地震動の評価においては、不確定性を考慮してその発生確率の概略範囲を評価しておくのが望ましい。	
【解説：抜粋】	
「使用性照査用地震動」は、対象期間を明示しその期間内に発生する確率が定量評価できる確率論的地震ハザード評価に基づいて設定することを基本とした。	
確率論的地震ハザード評価に基づいて使用性照査用地震動を設定する場合、i) 社会的なコンセンサスの下に当該性能の許容リスクの水準に応じた確率レベル（ハザードレベル）を定め、それを満たすような地震動を設定する方法、ii) 地震動強さと超過確率の関係をそのまま構造物の応答・損傷解析に持ち込んで当該性能のリスクを確率論的に評価し、そのリスクレベルが事前に定められた水準以下となるようにする方法、の2通りの考え方がある。	
後者のii)の方法では、許容リスクレベルを陽に規定するのではなく、安全性を満たす複数の設計案の中で地震リスクを考慮したライフサイクルコストが最小となるものを選択するという方法も研究されている。	
「安全性照査用地震動」は使用性照査用地震動とは異なり、シナリオ型地震動評価に基づいて、対象地震を明確にした上で、その地震による地震動として設定することを原則とした。	
安全性が問題となるような低確率の問題に対して、確率レベルを全国一律に揃えて安全性照査用地震動を評価するには、以下に述べる課題が解決される必要がある。	
a) 安全性照査用地震動としての確率レベルの具体的な数値が不明確である。	
b) 確率レベルを全国で揃えた場合、現行の設計地震動と比べて遥かに大きな地域差が生じるが、その是非について議論が未成熟である。	
c) 内陸活断層の活動による「個性的な地震動」が評価されにくい。	

のための基本情報を提供するものであり、安全性照査用地震動の設定においても活用していくことを検討する必要がある。特に、シナリオ型地震動評価におけるシナリオの選定には任意性が残されており、そこに確率論的なアプローチを援用することが期待される。ただ、わが国では、最大級の強さの地震動が発生する確率にはきわめて大きな地域差があるという事実を正しく認識しておく必要がある。

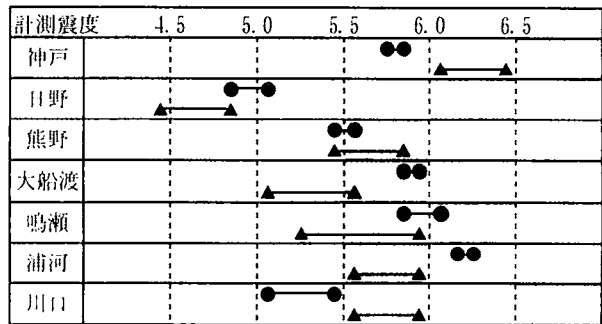
今後は対象地域あるいは対象地点が置かれた諸条件を的確に反映した安全性照査用地震動の設定方法を確認していく必要がある。そこでは、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価は対立概念ではなく、互いの長所を生かし、弱点を補完する形の体系化を目指すべきである。次章ではこうした観点からの今後の方向性について考えてみる。

3. 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合の方向性

(1) 最近の地震による最大震度の事後評価

図-1 は確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴について理解を深めるために、最近の主な地震を対象として、両手法により経験した最大の震度を事前に予測できたかどうかについて事後評価を行った結果である。評価条件の詳細は文献2)に拠らねたい。この図は確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価による各地点の計測震度の範囲（●または▲）を実際に経験した震度階（網掛け部）と重ねて示したものである。

同図より、両手法により予測された計測震度の大小関係は地点ごとに様々であり、実際に経験した震度階との比較からも、確率論的地震ハザード評価、シナリオ型地震動評価のいずれか一方ですべてが事足りるということにはならないことが理解できる。



* 網掛けの範囲が実際に経験した震度階
上段の●●が確率論的評価:50年超過確率10~5%の計測震度
下段の▲▲がシナリオ型評価:想定地震に対する距離減衰式の
平均値±標準偏差の計測震度

図-1 両手法による地震動評価の事後評価結果

シナリオ型地震動評価では、設定された震源モデルに対する地震動の詳細な予測とその不確定性の定量化が重要であることは当然であるが、加えて将来発生する地震をいかに想定できるかが重要な鍵である。地震動予測手法については精力的に研究されているが、その前段となる地震の想定のある方についても併せて考えていく必要があると思われる。特に、震源を予め特定しにくい地震をいかに想定地震としてモデル化するかについてはコンセンサスを得た方法論がないため、確率論的想定地震などとのリンクを含めて今後議論を積み上げていく必要がある。

一方、確率論的地震ハザード評価では活断層を含めた内陸の地震に対する確率モデルに課題が指摘される。上記の評価結果では最大震度が6強以上となった地震はいずれも内陸地震である。とりわけ震源を予め特定しにくい地震による地震動の予測は確率論的地震ハザード評価に期待すべきであり、その意味では事前予測という点で、少なくとも日野町や川口町に対する結果は満足し得るものではない。考慮すべき確率レベルの具体化を含めて、内陸地震の地震活動の評価モデルのあり方、評価結果の解釈と設計地震動評価への適用方法について一層議論を深める必要がある。

(2) 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合の流れと課題

サイトスペシフィックな設計地震動の設定を目指す現状において、確率論的地震ハザード評価ならびにシナリオ型地震動評価に対するニーズは多様化・高度化する方向にあり、それぞれの手法を従来型の手順に従って別個に適用するだけでは最早不十分である。これまでは、両手法の対立的構造が強調されるきらいがあり、議論を建設的に掘り下げる土壌が培われてこなかった。今後、使用データ、評価手法、評価結果の共有化や相互乗り入れを行うことによって相互補完的な関係を構築すれば、それぞれの弱点を克服し、多様化・高度化したニーズに応えることができると考えられる。こうした方向性をここでは確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の「融合」と定義している。

確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合の概念を具体化するために、評価手順のフローを図-2に示した。評価は図の下から上に向かって進んでいく。フロー最下部の「地震・地震動の基礎情報」から「確率論的地震ハザード評価」（左列）あるいは「シナリオ型地震動評価」（右列）を駆使し、最終のアウトプットに辿り着くことになる。ここでは、最終的なアウトプットを「確率表現」と「震度表現」に分類している。

ここで、確率表現とは、地震動とその超過確率もしくは生起確率がセットとなったアウトプットを意味しており、確率表示の確率論的地震ハザードマップのみならず、ハザードカーブ、一様ハザードスペクトル、生起確率付地震動波形群⁵⁾などについても包含したものである。一方、震度表現とは、超過確率もしくは生起確率がすでに消去された形での地震動情報を意味している。震度分布図（シナリオ型マップや震度表示の確率論的地震ハザードマップ）に加えて、個別地点での最大地動、応答スペクトル、時刻歴波形などが含まれる。

これまで行われてきた評価では、確率表現へは確率論的地震ハザード評価からの矢印、また震度表現へは確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価からそれぞれ別の矢印で結ばれているに過ぎなかった。本論文で定義する融合は、両手法の特徴・長所を組み合わせたり、互いの弱点を補完することにより、総合的な地震ハザード評価の体系を目指すものである。

図-2中、評価手法や条件の選定において、確率論的地震ハザード評価あるいはシナリオ型地震動評価の流れの中に他方が相互乗り入れする手順が「手法の融合」である。また、「結果の融合」として、それぞれの結果の総合化・統合化に加えて、両手法に基づく結果の組合せあるいは補完により確率表現あるいは震度表現の最終結果を導き出すことも重要な融合の手順として位置づけられる。

図-2に示した各項目、特に斜めの矢印でつながれた項目が融合の主たる論点となるが、これらについての議論は緒についたばかりである。今後、専門家間での合意形成を図るとともに、各手順や条件設定の標準化を目指していく必要がある。また、ここではアウトプットの形を確率表現と震度表現という2つに分類しているが、将来的にはアウトプットそのものも連続的な形で融合されていくものと思われる。

設計地震動の設定の観点からは、i) 確率論的地震ハザード評価（確率論的な規範）に基づいてシナリオ地震を設定する方法の体系化、ii) シナリオ型地震動評価の不確定性評価と確率論的地震ハザード評価への取り込み手法の体系化、iii) 両手法による評価結果から性能目標にリンクした設計地震動を具体的に決定する手順の標準化、が特に重要と思われる。i) ii) については著者ら⁶⁾も一部検討をはじめているが、発生確率に大きな差を有し、地震やサイトにより個別性が強い地震動評価を設計問題として標準化していくには相容れない要素も多い。多岐に亘る課題を解決していくためには、具体的な事例検討を積み上げていくことが必要である。

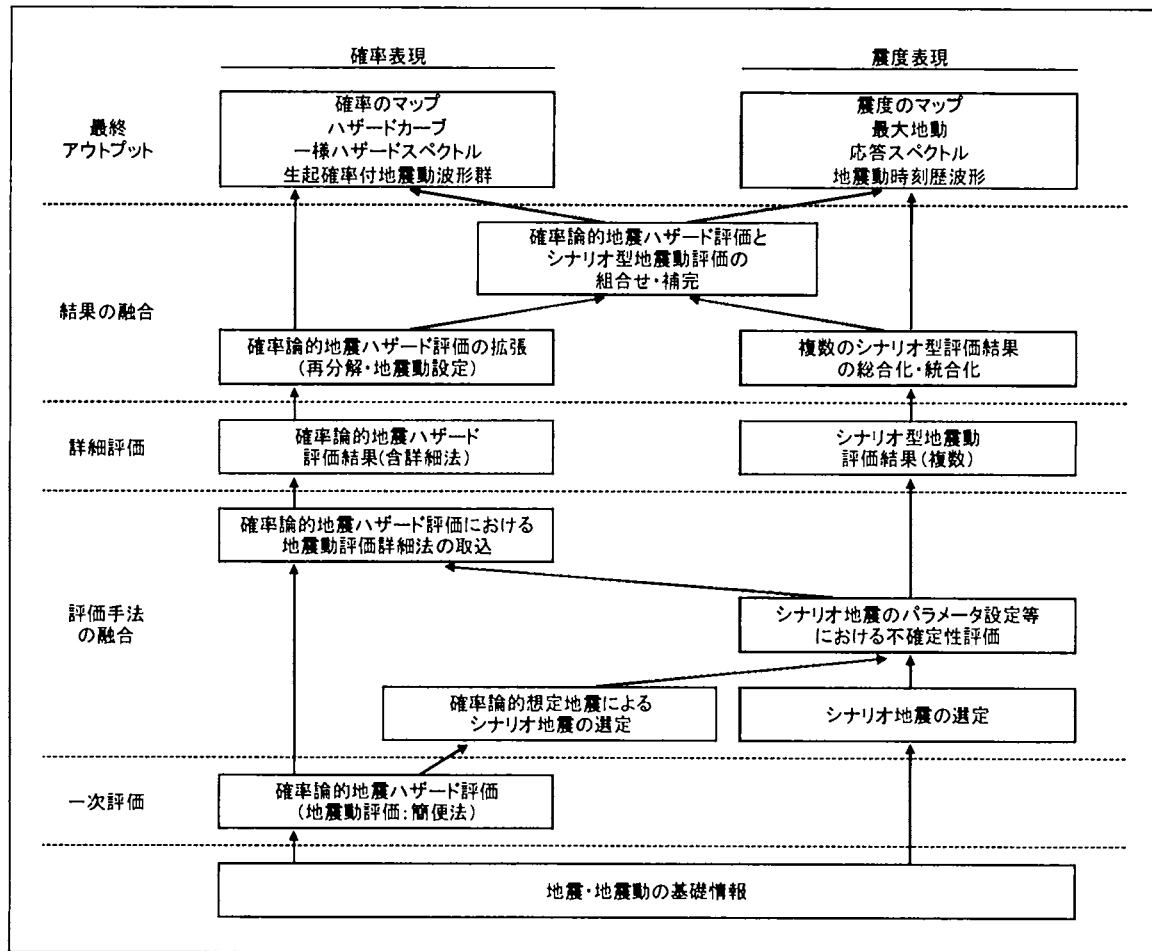


図-2 確率論的評価とシナリオ型評価の融合のフロー

4. おわりに

従来の耐震設計では、一部に「地震動は与えられるもの」とする風潮があったが、これからの耐震設計においては、シナリオ地震の選定から地震動の予測を含めて、設計の主体が責任をもって地震ハザード評価を行っていくべきと思われる。そのためには、設計者が地震ハザード評価を行うための客観的かつ公平な共通情報基盤を構築していく必要がある。

推本の長期評価や地震動予測地図をはじめとする昨今の調査研究プロジェクトは、こうした時代の要請に適合した成果や情報公開を生み出しており、地震ハザード評価に関連する基礎データの情報は次第に膨大なものとなりつつある。また、地震動予測地図の成果活用を支援するためのデータ公開システムとして「地震ハザードステーション」⁷⁾の運用も始められている。今後はこれらを一元的に管理すること、継続的に新しい情報を取り込んでいく体制を維持することが求められる。同時に、膨大な情報を容易に地震ハザード評価にフィードバックするための環境作りも望まれる。

謝辞： 確率論的評価とシナリオ型評価の融合に関する内容は岐阜大学・能島暢呂助教授との共同研究成果の一部である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書，平成17年3月23日，2005。（ホームページ：http://www.jishin.go.jp/main）
- 2) 石川 裕・能島暢呂：地震ハザード評価の体系化に向けて－確率論的評価とシナリオ型評価の融合－，土木学会地震工学論文集，Vol. 28, 2005.
- 3) 土木学会地震工学委員会：土木構造物の耐震性能評価指針(案)－第1編 総論－，(公表予定)
- 4) 当麻純一：耐震性能評価指針の原案－土木学会が最新の耐震性能評価体系を提案－，ベース設計資料，No.126，土木編，建設工業調査会，2005.
- 5) 安中 正・香川敬生・石川 裕・江尻譲嗣・西岡勉：期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法，土木学会地震工学論文集，Vol. 28, 2005.
- 6) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・能島暢呂・杉戸真太・久世益充：地震動予測マップの活用－その1：ハザード情報の利用－，土木学会地震工学論文集，Vol. 27, No.36, 2003.
- 7) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーションホームページ：http://www.j-shis.bosai.go.jp/

確率論的予測地図と地域係数

Probabilistic Ground Motion Map and Seismic Zoning Coefficient

大川 出¹⁾
Izuru Okawa

Synopsis

The seismic zoning coefficients for building design in Japan are briefly surveyed regarding their transitions to date, research backgrounds, problems and tasks for future improvement in the structural design scheme. With the recent appearance of the probabilistic ground motion maps proposed by the earthquake research promotion headquarters established in the MEXT, it seems that we are forced to re-evaluate the design seismic force and/or ground motion. It is a good opportunity to re-consider on the mutual concerns and involvements of the ground motion research and design seismic force specifications. Those had not necessarily been efficiently linked together in the past.

1. はじめに

いまから 50 年あまり前に河角博士によって作成された地震動マップに基づいて現地震地域係数の前身となる地域係数が定められた。当時は、地震に関するデータは現在ほど多くなく、また地震動生成メカニズムについても、それほど詳細には分かっていなかった。ここでは、建築物耐震設計に利用されてきた地震地域係数の移り変わりを概観し、最近公表された地震動予測地図と構造設計のための地震地域係数との関わりについて考えてみることにする。

2. 地域係数の移り変わり

2.1. 新耐震設計法(1981)以前

1950 年に制定された建築基準法における建築物の設計震度 $k_{設}$ は以下のようなものであった。²⁾

$$k_{設} = \alpha \cdot \beta \cdot h \cdot k_0$$

ただし、 α : 地域係数

β : 地盤と構造に関する係数

h : 建物高さに関する係数

k_0 : 標準震度 (0.2)

α が、ここで注目する地域係数であるが、その他の係数として、 β は第 1 種 (第三紀以前)、第 2 種 (硬質)、第 3 種 (沖積)、第 4 種 (軟弱) の 4 種類の地盤種別および構造種別に対して 0.6~1.5 の値、 h は現在の A_i 分布に対応するもので、高さ 16m までは 0.2、それ以上の場合 4m 毎に 0.01 を加算する。

この旧地域係数の原型は、図 1 に示す河角マップである。河角論文⁶⁾で示された 3 種類のマップのうち 100 年間に 1 回起こるレベルの地震動マップ (図 2) に基づいて、地域割りをを行った。地域割には同マップの 100 ガルと 200 ガルのコンターラインと当時の行政界が使われた。 α の値は、表 1 及び図 2 に示すように 0.8~1.0 の値をとっていた。つまり最大 2 割の低減を考えることになった。

当時の各係数に対応する都道府県、北海道の支庁名は表 1 に示すとおりである。地域係数が 1 の地域は、関東、中部、近畿に限られ、北海道、東北の太

平洋岸は、0.9 となっていた。その後約 30 年間、新耐震設計法が施行されるまで、この係数が使われることになる。

2.2. 新耐震設計法(1981)

建築研究所が中心となって実施された新耐震総プロにおいて、当時公表されていたいくつかの提案における成果を、それぞれの手法のデータの質や量などに応じて重みを付けて平均化し、図 5 に示す用に全国を 3 つのグループに分ける提案がされ¹⁰⁾、それに基づいて沖縄を加えて 4 つの分類による新たな地域割りが行われた。これが、現在使われている地震地域係数 (Z) である。当時の状況としては、1968 年十勝沖地震、同えびの地震、1975 年大分県中部地震などの発生があり、結果的には、東北地方太平洋側、大分県、宮崎県とその周辺地域などの地域係数が上げられている。ちなみに、土木分野でも同一の地域割りが用いられるが、係数値が建築分野とは異なっている。(0.7, 0.85, 1.0)

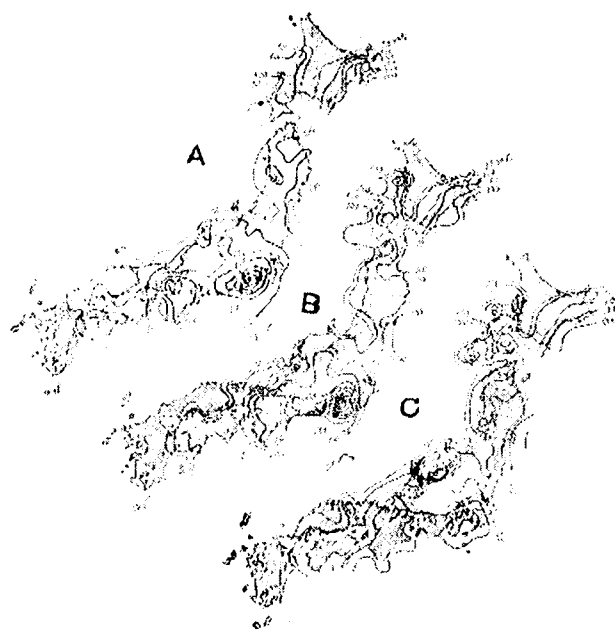
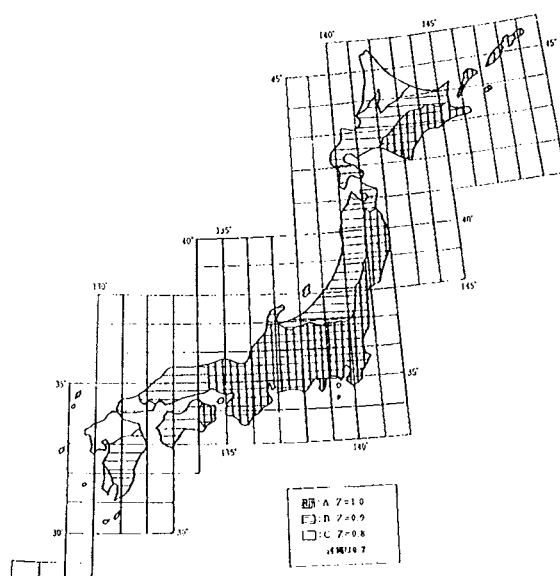
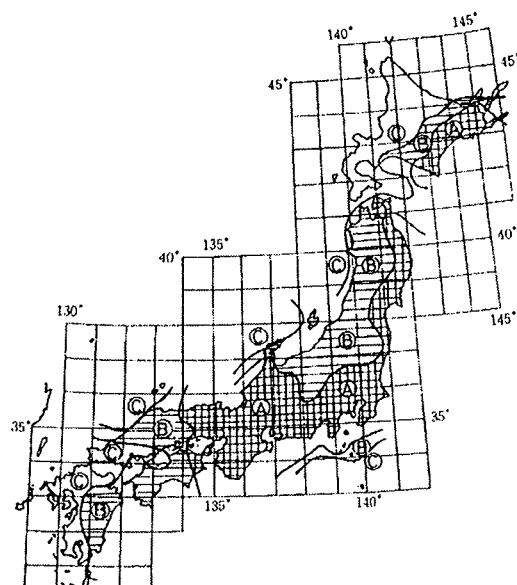
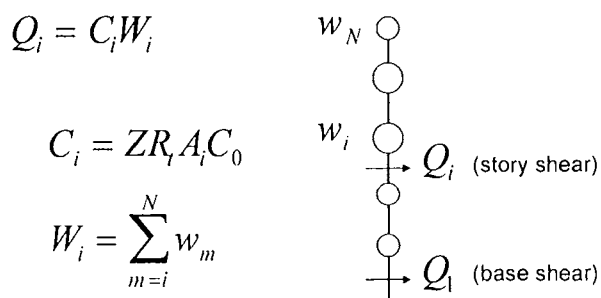
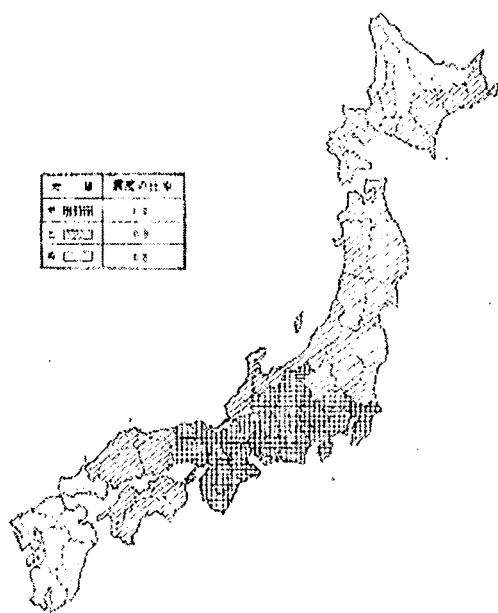
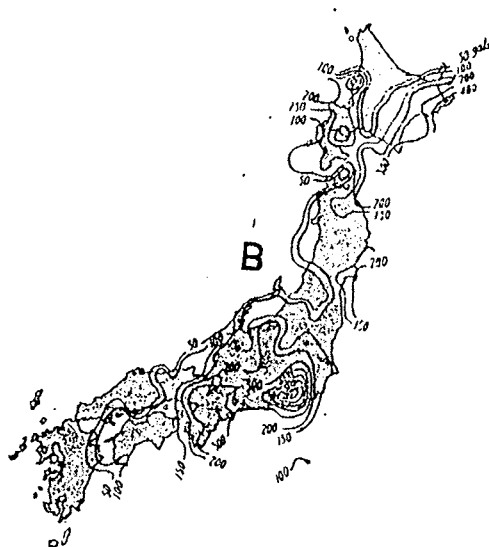


図 1 河角マップ (75、100、200 年) ⁶⁾



1950 年制定の基準法における地域係数と新耐震設計法における地震地域係数ともに、建物に作用する地震力（せん断力係数）について地域格差を与えるものである。

2000年の建築基準法告示改正に伴って、限界耐力計算の方法が告示に追加され、従来の許容応力度等計算の方法と並ぶ検証法となったが、いままでとの大きな違いは地震力でなく地震動を規定したことであった。具体的には、地震動の応答スペクトルを規定しているが、これにより設計する建築物の変形性能をも規定することとなった。従来の許容応力度等計算と限界耐力計算とで同一の地域係数を用いていることについては、本来別物であるべきという考え方もあり、地域係数そのものの見直しを含めて将来の課題である。

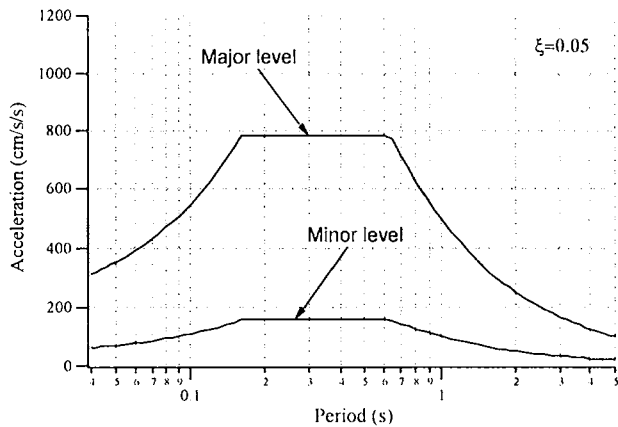


図7 限界耐力計算における2つのレベルでの加速度応答スペクトル（工学的基盤）

3. 確率論的予測地図

本年、文科省から地震動予測地図が公表された。そのうち、確率論的地震動予測地図は、工学的基盤及び地表での最大速度振幅と計測震度について将来の各地での生起頻度、及び期待値等で描いたものである。地震地域係数 Z はこのような予測地図にそのまま対応したものではない。図12は、同じく50年間超過確率5%の図である。このほかに50年間超過確率39%の図があり、それぞれ再現期間が100年(39%)、500年(10%)、1000年(5%)に対応したものととして公表されている。

限界耐力計算において、入力地震動は以下の式で与えられる。すなわち、

$$S_A(T) = G_S(T) \cdot \{Z \cdot S_0(T)\}$$

ここで、

$S_A(T)$ ：地表面応答スペクトル

$G_S(T)$ ：地盤増幅係数

Z ：地震地域係数

$S_0(T)$ ：解放工学的基盤の標準応答スペクトル

T ：周期

である。

一つの考え方としては、あとで述べるような米国流に次式の $S'_0(T)$ で表される基盤スペクトルをハザードマップとして定義してしまう方法がある。この場合には地域係数は不要であるが、我が国の地震地域係数は、必ずしも地震ハザードだけを考えたものでなく、0.8~1.0（沖縄は0.7）という最大20%の格差をそれに基づいて付けているにすぎない。

$$S_A(T) = G_S(T) \cdot \{S'_0(T)\}$$

$S'_0(T)$ ：解放工学的基盤の応答スペクトル

また、予測地図では、計測震度や最大速度という指標が使われているので、それと応答スペクトルとの関係についても検討する必要がある。さらに、地震地域係数として考えるならば標準応答スペクトルのレベル、地域係数そのものの範囲など、今後検討す

べき事項は多い。

また、現行基準法の地震地域係数は、地震動レベルには依らないが、一般に地震動の期待値の地域分布が再現期間に依存しないとはいえず、各設計レベル毎に独立の地域係数を与えることが妥当かどうかの議論も必要であろう。参考のため、前述の3つの再現期間に基づく予測地図から、50年超過確率5%の予測値に対する残り二つの確率に対応した予測値の割合を同様の地図に描いたものが図12、図13である。また、設計という観点から予測地図を眺めた場合、最大速度あるいは計測震度と設計用地震動とをどのように結びつけていくのか等検討することも必要である。すなわち、設計に使うための設計スペクトルや時刻歴との関係についても検討されなくてはならない。

ハザードマップと設計用地震動の関連性については米国に適当な前例がある。米国のハザードマップは、設計と連動しているところに特徴がある。すなわちゾーニングに使われる地震動指標は、構造物への設計用地震荷重に使われる。

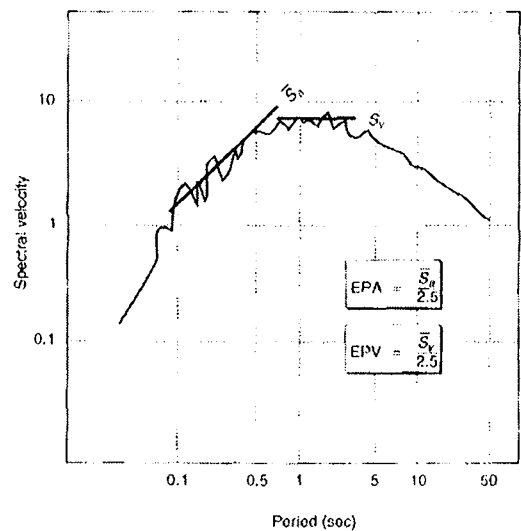


Figure 3.19 Determination of effective peak acceleration and effective peak velocity from response spectra. (After Applied Technology Council, 1978.)

図8 ATC3におけるEPA, EPVの定義¹⁾

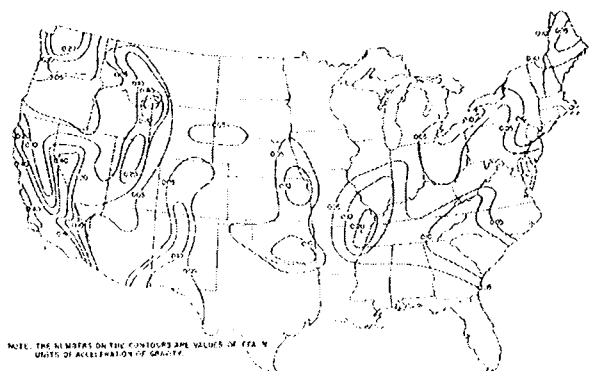


図9 ATC3におけるEPAによる地震動マップ¹⁾

米国では1978年にATC3というモデルコードが発表された。このコードにおける地震荷重の考え方は、NEHRP 規準で一元化されつつある今日でも依然として有効である。当時50年超過確率10%の設計スペクトルを有効加速度(EPA)、有効速度(EPV) (図8、図9)から組み立てる方法が提案されている。最新版のNEHRP 設計スペクトルは図10に示すように、米国地質調査所が作成するハザードマップをもとに設計スペクトルを組み立てる。すなわちハザードマップには5%減衰の加速度応答スペクトル値によるものがあり、周期0.2秒と、周期1秒のスペクトルのマップが与えられている。0.2秒のスペクトル値は、加速度スペクトルのフラットなレベルを決めるのに使われ、1.0秒のスペクトルは速度スペクトル一定と仮定した場合に対応して1/Tで変化する長周期部分を決めるのに使われる。

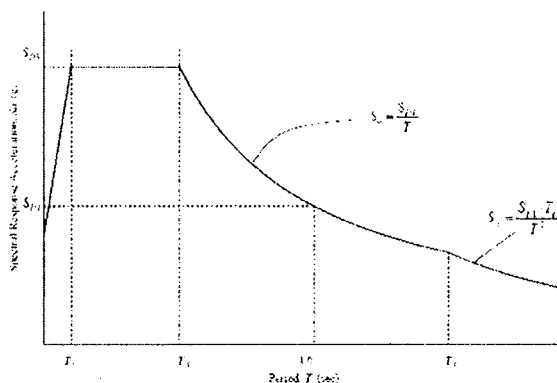


Figure 3.3-15 Long-Period transition Period.

図10 NEHRP2003における設計用地震動⁵⁾

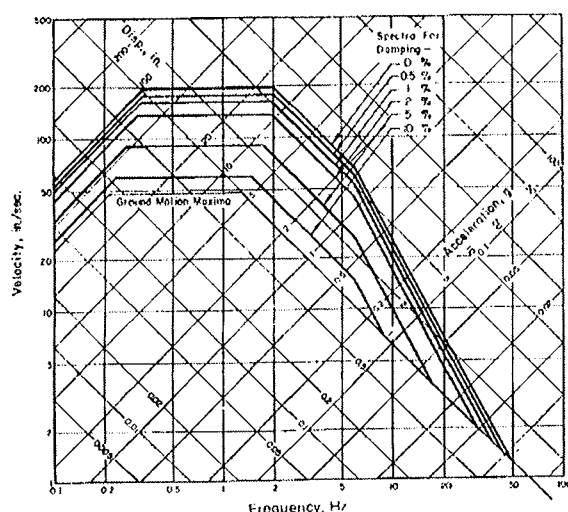


図11 ニューマーク・ホールの設計スペクトル³⁾

米国では、図11で示す設計スペクトルのひな形でもいうべきスペクトル形状が過去に提案されており、最新の地震荷重もこのフォーマットに則ったも

のとなっている。これに対して、わが国では一般建築物に対して設計地震動という概念は比較的新しく、設計者には十分に浸透していない。

このように米国のハザードマップは構造物の設計をも取り込んだものになっていて、種々の構造物に共通に使えるものとして提供されているが、わが国では構造物毎に構造規準が異なり、地盤の扱い方も分野ごとに異なっている。これは、設計地震力の算定が各構造に固有の特徴があるからであり、地震力を生じさせる地震動を考えさせるということでは今回のハザードマップの作成は非常に意義深いものであろう。

今回の地震動予測地図では活断層等の各特定震源を対象としたシナリオ型予測地図が提案されていることに特徴がある。特定の震源の影響が大きい建設サイトにおいては、この種類のマップのもつ重みが大きいと思われるが、これを確率論的地図と組み合わせ設計にどのように活用していくかは、工学サイドの今後の課題である。

4. 地震地域係数と地震動特性

最初に紹介した旧地震地域係数は加速度振幅の地域分布に基づいているので、地震動の特性のうちの短周期成分の大小を表わすであろう。さらに現在使われている地震地域係数Zは最大速度振幅の距離減衰式を用いた評価に主として基づいているので、中周期帯域の地震動の特性の大小を表していると推定される。地震動を規定するには短周期、長周期各部分が必要となるが、地域係数の観点からは、両帯域の地震動の地域格差がどの程度違うかが大きな関心となる。また、現行基準では2つの地震動レベルを規定してそれぞれ損傷限界、安全限界に対応させているが、それぞれの限界状態に対応する地震動レベルの地域格差は基準法では1:5になっているが、地域によっては、震源の位置や活動度などによって違いがあることが予想され、これらの事項についても今後さらなる検討を行う必要がある。現状は、周期帯域の違い、地震動レベルの違いともに同一の地域係数を使っている。

図14に、簡略的な方法を用いて行った各地の工学的基盤上における加速度、速度振幅の再現期間別の分布図を示した。

5. まとめ

どの構造分野もまだ設計地震力の設定に重きが置かれている状況であり、地震動にまで遡って設計荷重を考える場合は非常に限られている。そのような状況で地震動予測地図を設計に有効に組み込んでいくためには、各構造分野で地震動をベースにした設計の枠組みが構築される必要がある。

設計用地震力と地震動研究分野との連携が求められる。

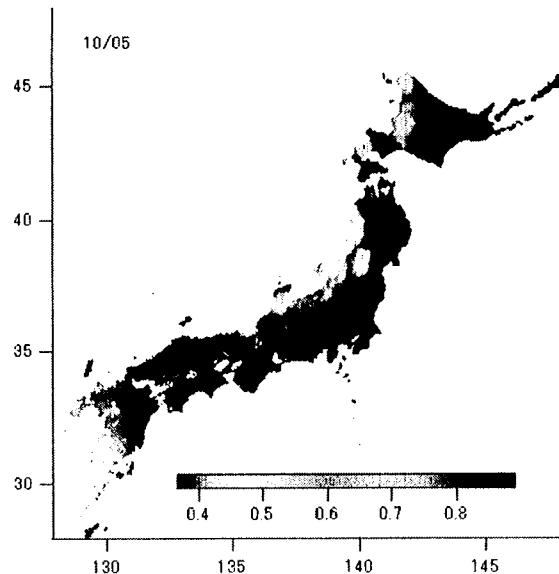


図 1 2 振幅比 (50年間超過確率 10%/5%)

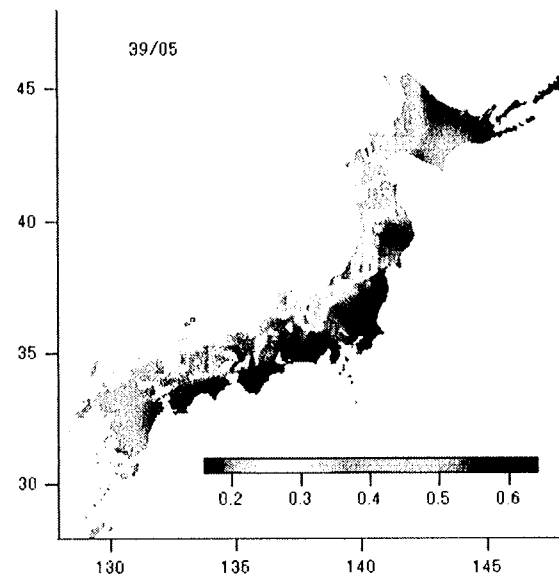


図 1 3 振幅比 (50年間超過確率 39%/5%)

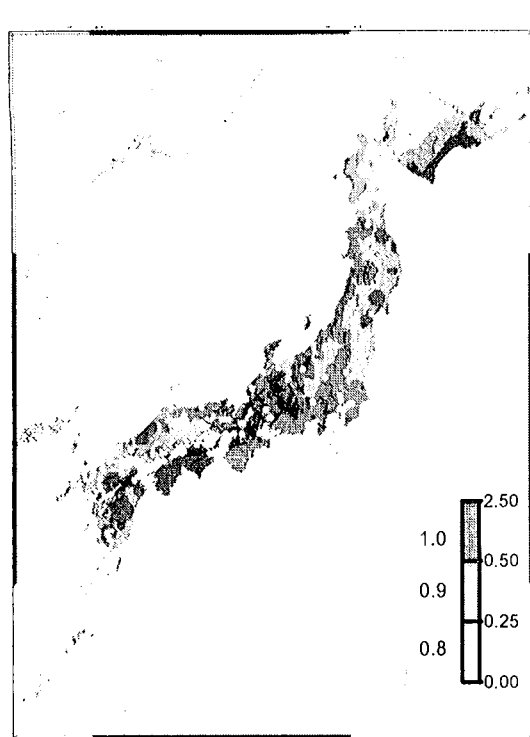
表 1 旧構造規定における設計震度の地域割り²⁾

地 域	震 度	地 名
甲 (100%)	0.2	千葉、埼玉、東京、神奈川、山梨、 静岡、長野、岐阜、愛知、滋賀、三 重、京都、奈良、和歌山、兵庫、大 阪

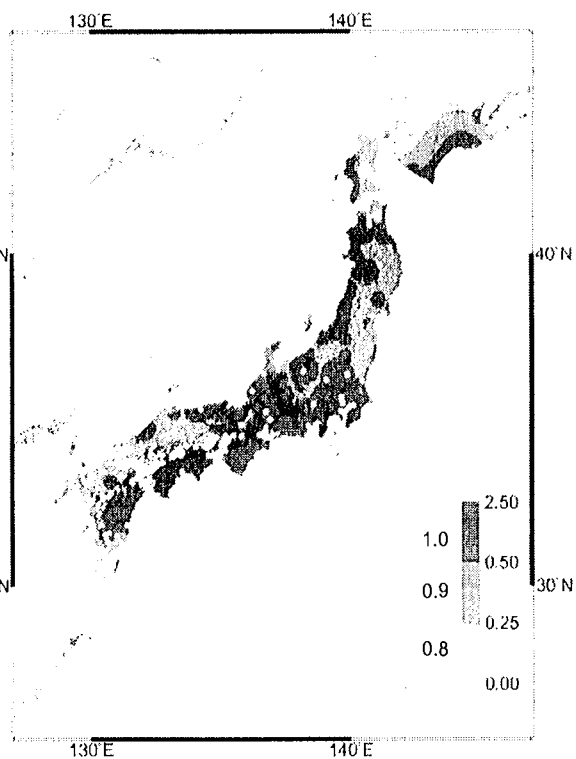
乙(90%)	0.18	青森、秋田、岩手、山形、宮城、福 島、新潟、栃木、群馬、茨城、富山、 石川、福井、島根、鳥取、岡山、広 島、香川、徳島、愛媛、高知、根室、 釧路、十勝、日高、胆振、渡島、檜 山、後志、石狩、空知
丙(80%)	0.16	山口、福岡、大分、宮崎、鹿児島、 熊本、佐賀、長崎、宗谷、網走、上 川、留萌

6. 参考文献

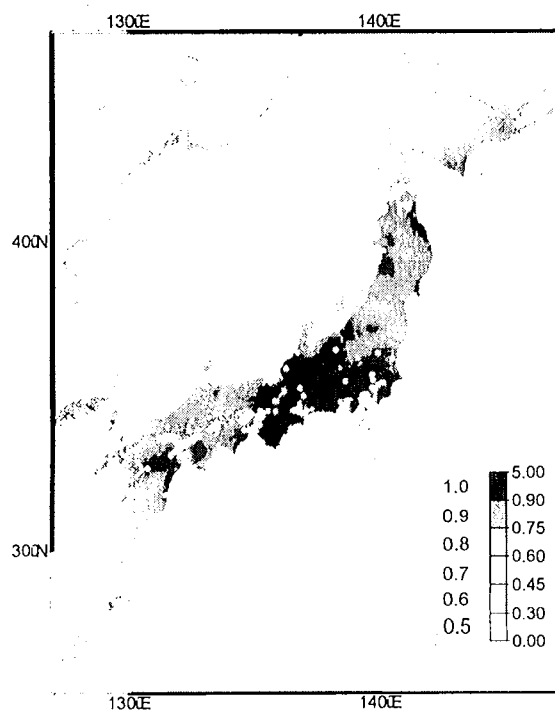
- 1) Applied Technology Council, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings", ATC3-06, June 1978
- 2) 酒井良男、「Ⅱ. 耐震構造法」建築耐震論、新訂建築学大系 第 19 卷、昭和 43 年 10 月
- 3) N.M. Newmark & W.J. Hall, "Earthquake Spectra and Design", EERI Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, 1982
- 4) 地震ハザードステーション、
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>、防災科学技術研究所、2005
- 5) Building Seismic Safety Council, "The 2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures and Accompanying Commentary, (FEMA450)
- 6) 河角廣、「我が国における地震危険度の分布」、建築雑誌、第 773、pp. 3-7、日本建築学会、1951
- 7) 基準法に関する委員会第一小委員会幹事、「震度の低減に就いて」、建築雑誌、第 773、pp. 28-31、日本建築学会、1951
- 8) 大川出、壇一男、藤堂正喜、「工学的基盤の加速度応答スペクトルを用いた建築物の耐震性能評価 (その 5) —設計用応答スペクトルとその地域格差の検討」、建築学会大会梗概集、B2 分冊、pp. 1133-1134、1999
- 9) 尾崎昌凡、北川良和、服部定育、「地震動の地域特性に関する研究 (その 1)」、建築学会論文報告集、第 266 号、pp. 31-40、1978



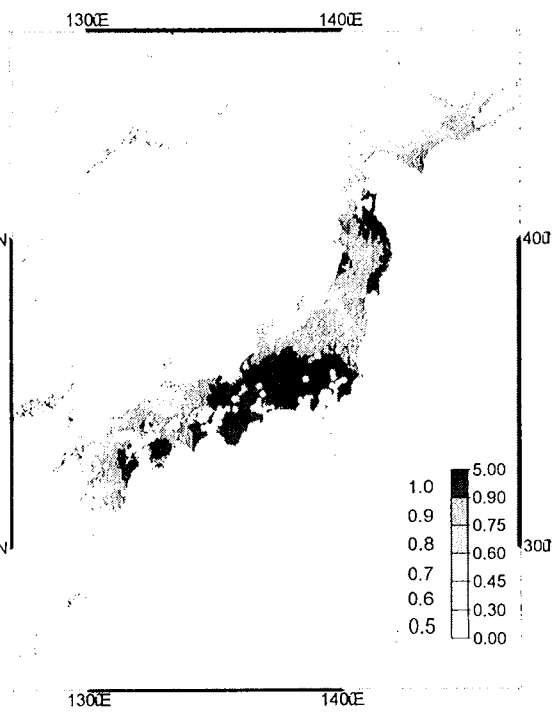
加速度振幅の期待値分布(500年最大値)



速度振幅の期待値分布(500年最大値)



加速度振幅地域格差(50年期待値)



速度振幅地域格差(50年期待値)

図14 期待値マップ評価例(工学的基盤における加速度振幅、速度振幅と再現期間)⁸⁾

設計用入力地震動と地震動予測地図

DESIGN EARTHQUAKE GROUND MOTION FOR DYNAMIC ANALYSIS OF BUILDINGS AND NATIONAL SEISMIC HAZARD MAPS

野畑 有秀*

Arihide NOBATA

The National Seismic Hazard Maps which consists of the probabilistic seismic hazard map and that for a scenario earthquake is published. This paper presents how to apply these maps to design earthquake ground motion for dynamic analysis of the buildings. At the first, the regional difference of return period of commonly used design spectra at the engineering base-rock is discussed. Next, the Earthquake response analysis and the risk assessment of the high-rise building are performed based on probabilistic seismic hazard map and publishing synthesized strong ground motion. And, it is described the important to get information of the assumption of source rupture process of the each scenario earthquake when using these synthesized strong ground motion to dynamic design.

1. はじめに

近年、地震調査研究推進本部や中央防災会議の公的機関により地震動予測が行われ、その結果を地図の形で公表するとともに、予測された時刻歴波形を含むデータも公開している（防災科学技術研究所：地震ハザードステーション、以下「J-SHIS」と称する、中央防災会議防災情報 HP）。さらに自治体等の検討も加えると、社会には、多くの予測地震動や地震危険度マップが流通されている。また、同時にこれらの工学的利用法についての報告（地震動予測地図工学利用検討委員会、2004）や、設計用地震動および地震荷重としてどのように利用していくかの報告もあり様々な提言がなされている（例えば、石井、2004、藤堂、2004）。

これらの公的機関による地震動予測の結果を、設計の実務に適用する場合、二つの側面があると考えられる。ひとつは、空間的に表現された地震動強さの差異をどのように考えるかであり、ひとつは、予測された地震動をどのように設計に反映していくかである。空間的に差異がある地震動の強さには、①地震の発生位置と活動度によるもの、②地盤の増幅によって定常的に差が生じるもの、さらには細かく論じれば「震源断層を特定した地震動予測地図」のように③断層の破壊過程のシナリオによって差が生じるものがある。例えば図1は「J-SHIS」による「今後50年以内に10%の確率で一定の工学的基盤上で最大速度以上に見舞われる領域図」を示しているが、これは①の地震活動度によって期待される地震動強さの空間的な差である。一方、地盤最近発表された「表層地盤のゆれやすさ全国マップ（中央防災会議、2005）」や、防災科学技術研究所の公開している「500m メッシュ地形分類データ（久保他、2003）」は、表層地盤による地表面地震動の定常的な揺れの差を示したものである。このような表層

地盤の増幅、さらには深層地盤の増幅に関しては過去の本シンポジウムで取り上げられているため、本稿では①と③に関わる空間的な差と公開された予測地震動をどのように設計に活かすかを、筆者なりに考察したことについて紹介させていただく。内容が散漫な点はお断り願うとして、この報告が、本シンポジウム討論の一助になれば幸いである。

2. 設計用入力地震動の現状

設計用入力地震動の現状に関しては、第31回本シンポジウム「地域波策定の現状と将来展望」の中で、長橋(2003)や井上(2003)が評定業務で使われる設計用入力地震動を紹介し、地域波の使い方や課題等を指摘している。また、吉村(2003)も実務から見た現状を紹介し問題点を挙げている。その中で指摘しているよ

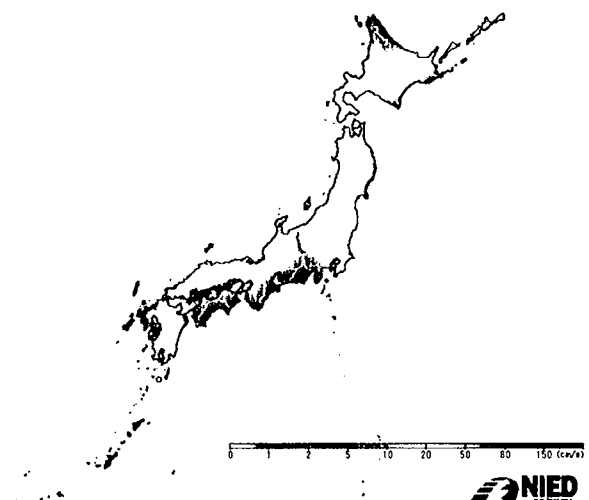


図1 今後50年以内に10%の確率で一定の最大速度以上に見舞われる領域図(J-SHIS)

*大林組技術研究所

うに、近年、実務設計においては「告示波」への依存度が大きくなっている。それは、日本建築センターが「時刻歴応答解析建築物性能評価業務仕様書」の中で「位相を適切に考慮した告示波3波以上用いるか、適切にサイト波を考慮した場合は告示波との合計で3波以上用いること、さらにこれに加え代表的な観測地震波を基準化したものを3波以上用いること」と記したことにより、評定物件に関しては必ず設計入力地震動として用いていることや、告示スペクトルのレベルが社会で認知された最低保障となっているという意識が広まったことも起因している。一方、予測地震動による構造物の評価は、予測された地震動レベルによりその位置付けが大きく変るのが現状である。ただし、建築学会における「東海地震等巨大災害への対応特別委員会(2005)」では、比較的振幅の大きな予測波によって、様々な構造物への影響評価が試されており、今後、このような予測地震動が実際の設計業務の中でより重要視されるものと期待される。本稿では、このような現状を踏まえ、「告示波」と地震動予測地図の関係がどのようなになっているのかを確認する。

2.1 告示スペクトルと地震動予測地図

野畑(2000)は、「告示」のレベルがどのような地震を想定しているのか検討を行っており、「極めて稀に発生する地震動」は、M7クラスでは、概ね10km～20km程度の地震を想定していることや、M8クラスでは20～50km程度の距離の地震を想定していることを示した。また、一様ハザードスペクトルの観点からも検討を行い、「極めて稀に発生する地震動」は再現年500～1000年程度の地震を、「稀に発生する地震動」は、概ね再現年10年～20年程度の地震を想定していることになることを指摘している。ただし、その時点で用いた震源モデルは地震調査研究推進本部における長期評価の結果が反映される前のものであった。そこで、

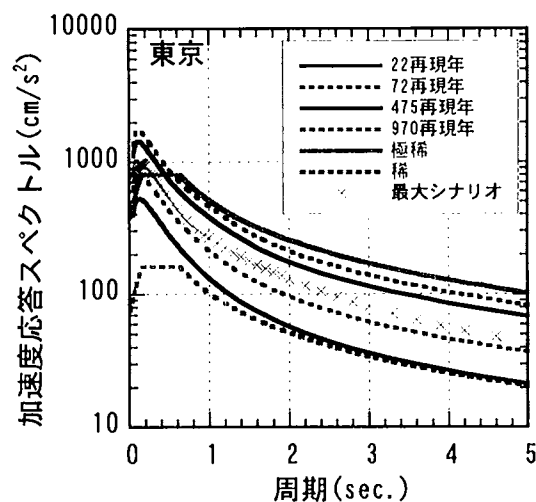


図2 東京における一様ハザードの評価と告示スペクトル

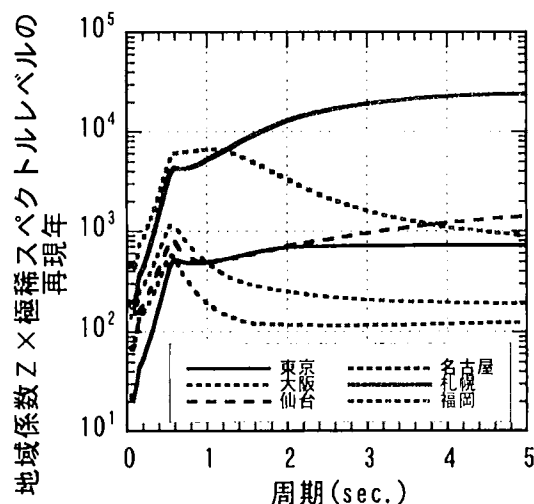


図3 各地域での告示スペクトルレベルと再現年の関係

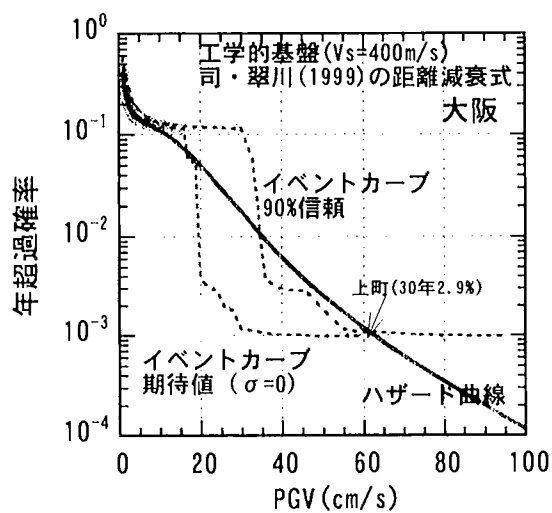
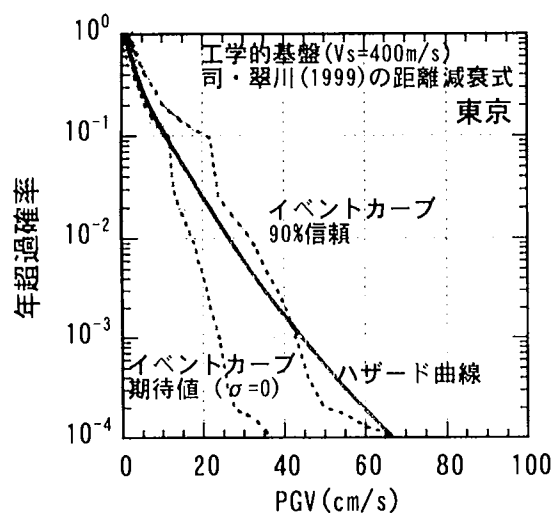


図4 ハザード曲線の例

本検討では、公表された長期評価結果をもとに、「J-SHIS」の結果をほぼ再現できるよう Yoshida et al.(2001)により離散化された地震発生モデルを用いて、「告示スペクトル」が意味する再現年の再確認を行った。以降「告示」と称した場合「極稀」のレベルをさすものとする。なお、本検討では、30年超過確率の平均ケースをもとに、年超過確率を計算している。用いたスペクトルの距離減衰式は、強震記録の蓄積が増えた近年のデータを用いて検討された内山(2005)による式である。なおこの式における工学的基盤のスペクトルは平均 S 波速度で 460~760m/s の基盤であり、「告示」で想定している S 波速度 400m/s より堅い地盤での評価である。この推定式を用いて一様ハザードスペクトルを計算したのが図 2 である。また、同図には地震発生モデルから推定される距離減衰式中央値の最大値を×で示している。従って、これ以上の応答スペクトルの評価値は、地震の発生による再現年ではなく距離減衰式のばらつきによって評価されている値であることを意味している。

「告示」レベルの地域による再現年の差を確認するために、地域係数 Z を考慮した「告示」のスペクトルレベルに合うように再現年をもとめた。ただし、その際に「告示」のレベルを S 波速度 400m/s から距離減衰式が定義された 600m/s 程度の工学的基盤に低減するために速度一定領域は $F_v=1.33$ 、加速度一定領域およびそれ以下の短周期領域は $F_a=1.19$ の値で除したスペクトルを対象としている(内山,2005)。図 3 に主な都市の結果を示す。この結果によると、東京、仙台では概ね 500~1000 年で、前回の結果との差はないが、大阪・名古屋で 100 年~200 年の再現年になっており、南海地震や東海地震の発生への恐れによる影響により危険度が高まっている傾向が見られる。これは以前までの危険度解析では見られなかった傾向である。札幌や福岡は、地域係数を考慮してもかなり長い再現年の地震動レベルを設定していることとなる。このように地域によって告示スペクトルの意味する再現年は大幅に異なっている。

東京と大阪のハザード曲線を計算したものが図 4 である。距離減衰式は「J-SHIS」と同じように司・翠川(1999)の式を基盤の速度補正した値 1.31 倍したものである。同図には、地震発生の不確実性と地震動評価の不確実性を確認(萩原, 2004)するために、距離減衰式のばらつきを 0 としたいわゆるイベントカーブの期待値とその 90%信頼曲線も併示している。これらのイベントカーブは、ハザードに寄与する各地震の貢献度と同様、ハザードカーブを理解する上で重要である。即ち、ハザードの情報に個々のイベント(地震)像がイメージできるからである。同図より推定される工学的基盤の超過確率 0.002(再現年 500 年)の最大速度は東京で約 40cm/s、大阪で約 52cm/s である。東京の例

では、最大速度と応答スペクトルの速度一定領域の倍率を 2 倍程度と考えると「告示」スペクトルレベルとほぼ適合している。ただし、この地震動レベルは地震発生で決まるレベルでなく地震動評価のばらつきで決まるレベルであることも理解できる。一方、大阪の例では上町断層の 30 年約 3% の地震が最大値を与えていることが理解できる。

3. 確率論的地震動予測地図と設計用入力

3.1 性能評価と地震動予測地図

近年、性能設計に伴って性能マトリックス表示が良く使われるようになってきている。一般には表 1 のような VISION-2000 で示された 2 次元の表示が殆どである。表 1 には前述したハザード曲線から平均的に評価した最大速度の比と、品確法での耐震等級も併せて示している。一方、「耐震メニュー2004(翠川, 2005)」では、より社会に受け入れやすいメニューをとという趣旨から確率的地震動評価と決定論的地震動評価の夫々について 3 次元表示をした耐震メニューが示されている。そこでは、耐震等級と設計用地震動レベルが建築主との対話の中で決定付けられる要素として表現され

表 1 性能マトリックスの例とハザードによる地震動レベルの平均的比率および耐震等級

設計用地震動レベル 再現期間	耐震性能レベル				ハザード解析による平均的な日震	耐震等級
	完全機能保持	機能保持	人命確保	破壊寸前		
Frequent(13 年)	●	—	—	—	約 0.4	—
Occasional(72 年)	■	●	—	—	約 0.6	—
Rare(475 年)	★	■	●	—	1.0	1.0
Very Rare(970 年)	—	★	■	●	約 1.2	1.25
						1.50

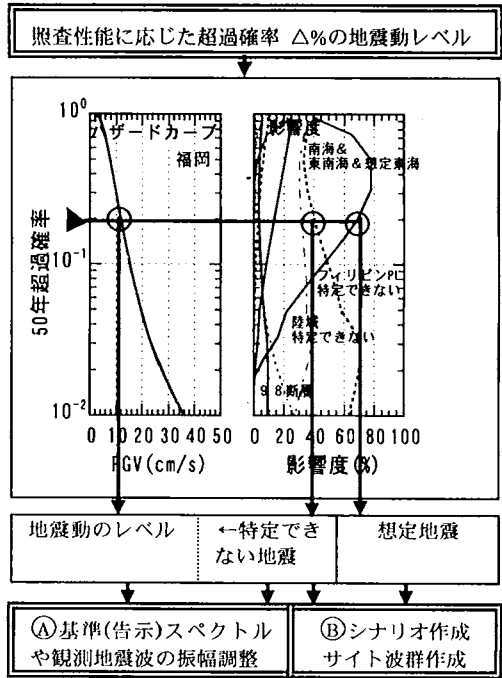


図 5 地震動予測地図に基づく設計用入力地震動

ている。このような耐震メニューを含め、社会的には性能設計の機運が高まっている。

一方、「告示スペクトル」のレベルは、2章で示したように発生確率に基づけば各地域によって非常に異なってしまうべきであるが、実際は2割の差である。即ち、「日本国内どこでもある程度の被害を伴う地震が発生する危険性があることを鑑みて、人命保護の立場から「告示」のレベルが建物の耐震性能最低保証として位置づけられているからである。確かに震源を特定できない地震の上限レベル(加藤他,2004)の評価事例から判断しても、現実的にはそれほど差をつけるのは難しく、性能マトリックス表示では、建物の持つ耐震性の最低レベルが存在し、全ての項目において再現年とは結びつかないのが現状である。今後、確率レベルに応じた性能表示は、生産の継続や、資産の保持など採算性や経済性に直結した機能に関する点に重点をおいて表現されていくものと考えられる。

図5に地震動予測地図を基に設計用地震動を策定する一般的なフローを示す。性能を照査するあるレベルが建築主との対話で決まれば、建設地点のハザードカーブより地震動の強さが推定される。④の方法は、推定された値そのものを用い、設計用スペクトル(例えば「告示」スペクトル)適合模擬波や観測波をその振幅に基準化する方法である。⑤の方法は、そのハザードレベルにおいて影響度の高いシナリオ地震をいくつか選択し、実際に断層面を設定し、破壊シナリオを特定して地震動を作成する方法である。この方法においては、後述する公開された予測地震動をそのまま用いることがコストの面からも優位であるが、その際には公開された予測地震動が、いくつか考えられる震源の

破壊シナリオ、例えば、アスペリティ位置や実効応力の大きさ、破壊開始点等の地震動のレベルを決定づける要素がどのような経緯で設定されているのかを十分把握しておく必要がある(石井,2004)。

3.2 耐震性能評価例

次に、モデル計算で耐震性能評価例を示すことにより地震動予測地図と耐震設計の関係についての検討をおこなう。建屋モデルとして、各階床面積1500m²の地上20階建てRC造事務所ビルを設定し、質点系のモデル化を行う。各層の復元力特性は図6のようなトリリニア型でモデル化し、履歴則としてTakedaモデルを採用する。各層の降伏耐力は図中に示した式をもとに算定した。1階の降伏せん断力係数は0.12となり、固有値解析による弾性1次周期は1.7秒となっている。本建物は60mを超えるため、工学的基盤上に建設されているものとして設計クライテリアをレベル1(告示「稀」乱数と実地震位相計5波, EL-CENTRO, TAFT,

20階建事務所ビル	
階高	400cm
各階の床面積	1500m ²
T=0.02H	1.6秒
降伏剪断力係数	0.12

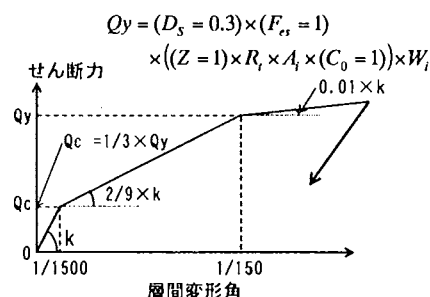


図6 建屋モデルの設定

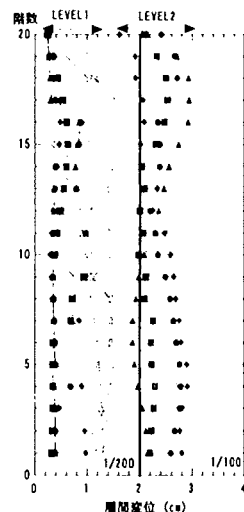


図7 レベル1と
レベル2 応答の確認

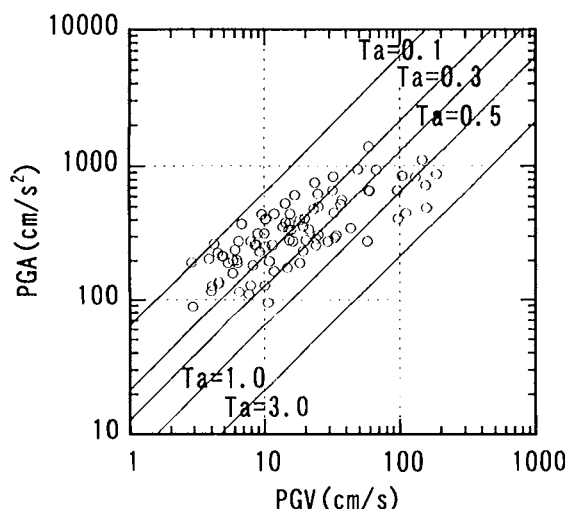


図8 パラメータスタディに用いた強震記録の分布

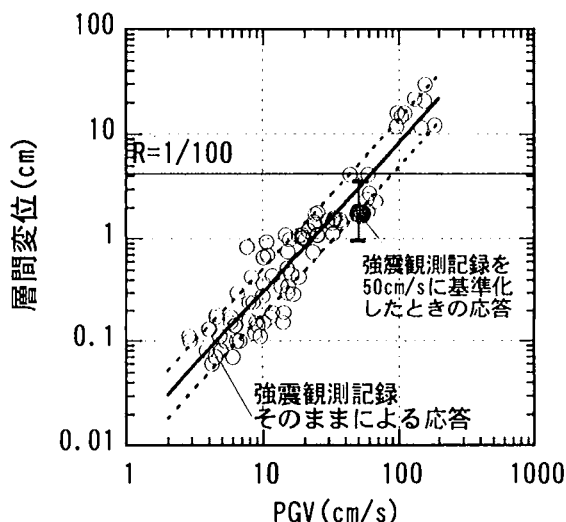


図9 強震記録に基づく最大速度と最大層間変位の関係

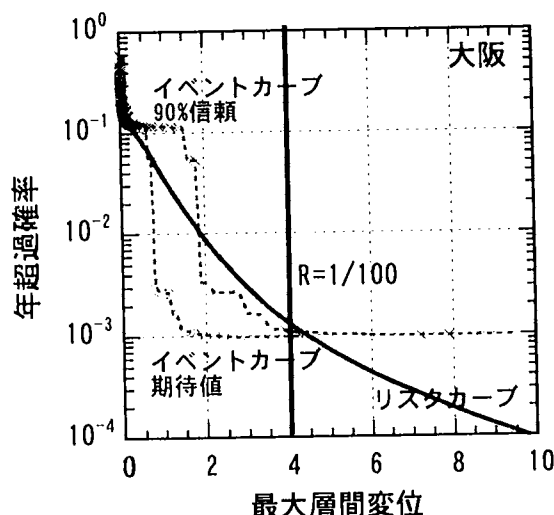
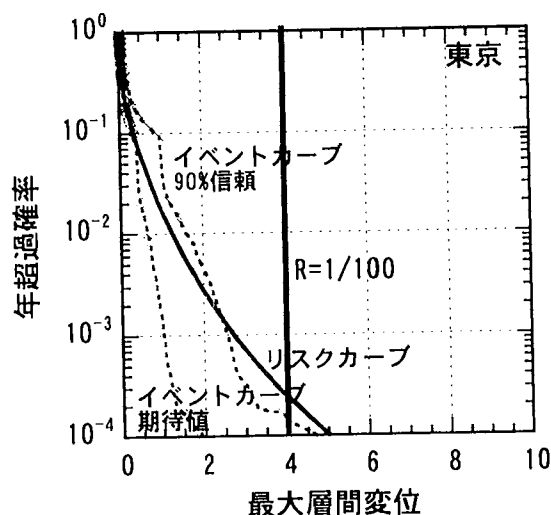


図 10 レベル 2 クライテリア (層間変形角が 1/100 を超える) リスク

八戸 25cm/s) で層間変形角 1/200 以下, レベル 2 (告示「極稀」乱数と実地震位相計 5 波, EL-CENTRO, TAFT, 八戸 50cm/s) で層間変形角 1/100 以下になるように設定した。図 7 に結果を示す。このモデルにおける層間変位と、地震動強さの関係をモデル化するために、応答計算により地震動の最大速度の関係をシミュレーションした。用いた入力地震動は、小さな振幅レベルには小さな地震の特徴が、大きな振幅レベルには大きな地震波の特徴があることより強震記録そのものを用いることとした。データセットとしては、地域や地盤種別や地震の像も特定しないという平均的な条件で、比較的小さな振幅から大きな振幅までを網羅するように整理した 87 波である (田内他, 2003)。図 8 に用いた地震波の最大速度と最大加速度の関係を示す。最大速度・最大加速度の比が概ねばらつくようなデータセットとなっていることがわかる。これら 87 波を建屋モデルに入力したときの最大層間変位と入力最大速度の関係を示す。両者の関係は両対数軸上でほぼ線形関係にある。同図には、用いた観測記録を 50cm/s に基準化して評価したときの最大層間変位の平均値とばらつきもあわせて示しているが、若干小さな値となっている。このことは、小さな振幅レベルの地震波形の振幅を基準化することによる応答評価への影響があることを示唆している。

図 9 の関係を用いて、本モデル建物の損傷度評価を行ったものが、図 10 である。層間変形角がレベル 2 のクライテリアを超える確率が各々評価できる。この建物は、東京では本クライテリアを超える確率が約 0.0003 であり、大阪では 0.001 である。また、イベントカーブの 90% 信頼がほぼリスクカーブと等価になっている。本検討では、地震時のリスク評価を行うことが目的ではないので、ここまでの例示とするが、一般のリスク評価ではこのような応答の荷重効果だけではなく、耐力 (変形) の不確実性を考慮して損傷度を

表 2 公開されている予測地震動波形より選択した波

No.	地震(断層)	ケース	サイト	基盤Vs
1	砺波平理断層帯・奥羽山断層帯	4	1	450
2	三浦半島断層群	4	1	500
3	高山・大原断層群	5	1	750
4	琵琶湖西岸断層群	2	1	500
5	山形盆地断層群	4	1	500
6	三陸沖北部	1	1	500
7	布田川・日奈断層帯	3	1	500
8	宮城県沖	2	1	400
9	森本・富樫断層帯	6	1	700
10	糸魚川・静岡構造線断層帯	3	1	500
11	中央構造線断層帯(金剛山地東縁-和泉山脈南縁)	2	1	350
12	山崎断層帯	6	1	590
13	石狩低地東縁断層帯	3	1	480
14	中央防災会議 東海地震	4	4	700
15	中央防災会議 東南海・南海地震	1	2	700
16	中央防災会議 南海地震	1	2	700

もともめ、その損傷度から損害額を算定している。特に損害額を推定する際には、損傷度と単純な線形関係にならない場合が多くかつ不確実性が大きいためリスクカーブとイベントカーブでは差異が生じるようになる。

3.3 地震発生モデルの提示

確率論的予測地図に付随して、その結果を耐震設計やリスク評価へ展開を図るための私見を少し触れておきたい。現在では不動産の証券化に伴い地震リスクの大きさを表す指標として PML が良く用いられている。BELCA(2000)の定義によれば、「対象施設あるいは施設群に対し最大の損失をもたらす再現期間 475 年の地震が発生し、その場合の 90% 非超過確率に相当する物的損失額の再調達価格に対する割合」とされており、地震発生確率に基づくイベントカーブに基づく評価が指示されている。

また、確率論的地震動評価と決定論的地震動評価の融合を図りながら、多様な評価に耐えうるべく時刻歴での損傷評価を目指して、生起確率付き断層モデルによる予測地震動群でのリスク評価が行われ始めている(壇,2005, 安中他,2005)。この場合も発生確率をもったシナリオ群を作成することになり、基本的にはイベントカーブに基づく評価になる。

このように、現在ではイベントカーブに基づくリスク評価が展開される方向にある。これはその後のイベントツリーやロジックツリーへの展開の容易さ、さらには、多数施設のポートフォリオ解析が可能となる利点(例えば Suwa et al.2004)があるからである。また、地震による構造物の損傷に最終的にどのシナリオが一番効いたのか、その発生の不確実性はどの程度なのかを立ち返って評価できるような仕組みが簡便にできる点に利点があると考えられる。このような仕組みができれば、実務者と研究者のやりとりがより増え、

そこからさらなる発展が期待できるものと思われる。

さらに、「全国を概観した地震動予測地図」が「地震ハザードステーション」により公開され、建築主と構造設計者の間に共通基盤が出来上がり、構造物に要求される性能と地震動レベルに関する対話が実務上で展開されることが期待されている。その場合、地域の相対的な危険度の説明には非常に有効であるが、耐震性能を議論する際には「475年の地震でも損失率が△%以下の建物です」といっても一般には理解し難く、地震像を提示した「発生確率×%の○地震が発生した時の損失率が△%以下です」と説明した方が建築主には受け入れやすいであろう。そのためには、多くのシナリオ地震群を用意した地震発生モデルを作成して提示し、それを基に地震動レベルを評価することが重要であろう。

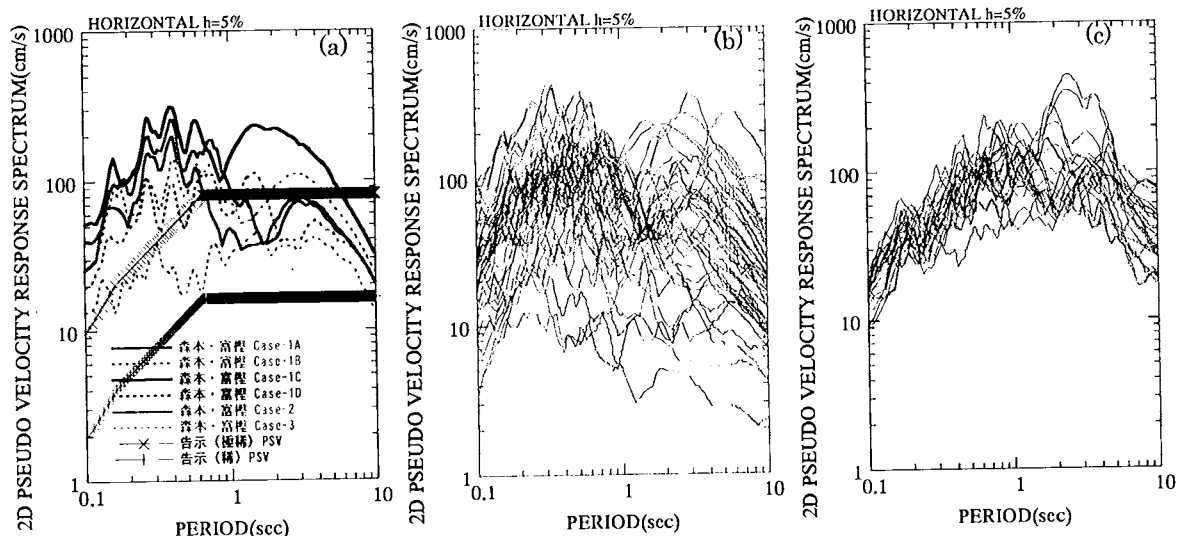


図 11 公開された予測地震動の擬似速度応答スペクトルと告示スペクトルのレベル

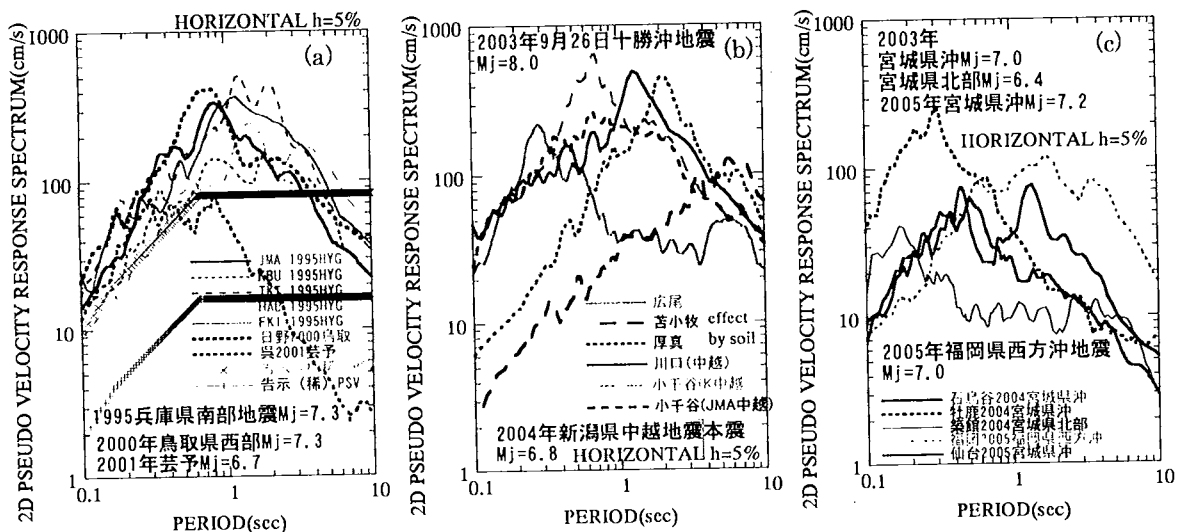


図 12 近年の被害地震における観測記録の擬似速度応答スペクトルと告示スペクトルのレベル

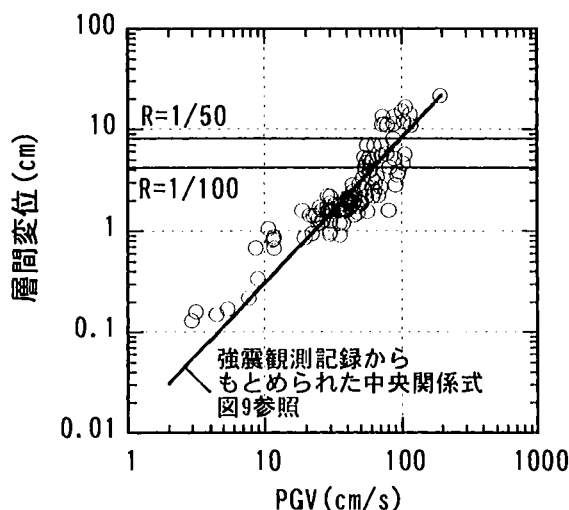


図 13 公開された予測地震動に基づく
最大速度と最大層間変位の関係

4. シナリオ地震による予測地震動と設計入力

はじめにでも述べたように「J-SHIS」では、地図情報だけでなく、「震源断層を特定した地震動予測地図」の成果である工学的基盤上の予測地震動も公開されている。また中央防災会議においても、東海地震、南海地震、東南海地震および各々の連動パターンの予測地震動も公開している。このように公開された波は、図 5 に示されたような設計入力地震動策定のフローにおけるシナリオ地震による予測地震動に位置づけられ構造設計に供されることが期待される。公開された予測地震動のレベルを確認するために、表 2 に示されるような地震を対象とし、地震毎にほぼ震源近傍にあたるような地点を適宜選び、その地点の波形をシナリオ数分対象として検討を行った。図 11 に擬似速度応答スペクトルを示す。(a)(b)が「J-SHIS」による予測地震動で、(c)が中央防災会議による予測地震動である。両者の違いは、地震調査研究推進本部は現在の知見で「最もあり得る」シナリオを設定しているのに対して、中央防災会議は防災の啓蒙のために地震動がより大きくなるようなシナリオを設定していることにある(石井,2004)。(a)は森本・富樫断層帯の評価結果で、設定シナリオの違いによる応答スペクトルの差異を確認したものである。設定するシナリオによって地震動のレベルは数倍以上にも変動するということがわかる。ここでの問題点は、設定されたシナリオだけで地震動強さの上限・下限を抑えているのかどうか、どのシナリオも同レベルで「最もあり得る」シナリオなのかどうかの判断は一般には難しい。また、地震動強さの面的分布において、どのシナリオでも建設サイトの地震動強さが定常的に大きいのか小さいのかの判断はシナリオの設定数にも依存するため判断が難しい。石井(2004)はシナリオ地震による予測地震動の耐震設計に用いる

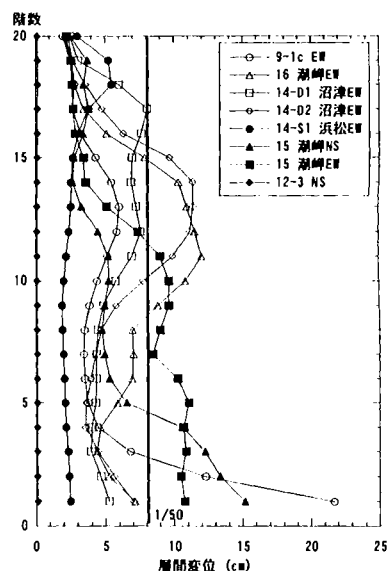


図 14 最大を示す層間変位の高さ分布の確認

際の留意点として、予測手法やパラメータ設定の精度以外に、地図が 1km メッシュと広いこと、震源過程のシナリオが限定されていることをあげている。

もう一つの課題として、詳細法に基づく予測地震動は、過去の震源近傍の記録の説明能力があり、それらに基づいてレシビを組み立て予測していることに起因する本質的な課題がある。図 12 に兵庫県南部地震以降の振幅の大きかった強震記録の擬似速度応答スペクトルを示す。観測記録は地表面での記録であり、工学的基盤での予測地震動と直接には比較できないが、両者のレベルは概ね対応していることがわかる。即ち、「告示」スペクトルに比べて観測記録とともに予測地震動も大きなレベルになっていることがわかる。これら公開された波を前述した建物モデルに入力し、地動の最大速度と最大層間変位の関係を示したのが図 13 である。図 9 で示した観測記録に基づく地動最大速度と最大層間変位の関係とほぼ等しく、観測記録の特性と予測地震動の特性は大きな違いがないことがわかる。地動最大速度が 100cm/s を超えるあたりで層間変形角は 1/50 を超える。また図 14 には、最大を示す地震での高さ分布を示す。最大になった地震は南海地震によるもので中央防災の予測地震動となっている。

構造設計に関わる本質的な課題とは、強震記録と被害の対応が現状では正確には評価できていないということである。予測地震動と設計入力の関係には、例えば、新潟県中越地震の川口の記録のように強震記録の大きさと被害の程度に乖離があることや(久田,2005)、過去の被害地震から推定される構造物の耐力と設計時の耐力に差があること(川瀬,2005)と同じよう問題が生じてしまうのである。設計における安全確認とは 2 章で示したようにあるクライテリアを定め、その中に全てが収まることを確認する行為であり、設計のみならず、施工時のコンクリートの強度管理をとってみて

も設計基準強度以上というあるラインを設けて管理することにより、建物の最低限を保障できる枠組みの中で構造物が社会に提供されており、必ずしも実建物の期待されるパフォーマンスの平均像になっていない。本当の性能設計への展開が図れるためにも、今後、設計・施工を含め、このような問題点をクリアしていくことが必要であろう。

5. まとめ

地震動予測地図の成果を如何に設計用入力地震動に取り込むかについての考察を行った。最初に、現状の設計入力地震動においては、「告示波」がその基本になっていることをあげ、その入力レベルが想定する地震動強さの再現年に関し、地震調査研究推進本部における長期評価の結果が反映された地震発生モデルを用いて再推定した。その結果、東京では既往の検討結果とほぼ同様に 500 年程度の再現年の地震であるのに対して、大阪では 100~200 年と危険度が高まっていることを示すとともに、地域によりその差が非常に大きいことを示した。また、20 階建事務所ビルをモデルとして、既往の強震観測記録の最大速度と最大層間変位の中央関係式を作成し、地震動予測地図に基づいた地震発生モデルにより東京と大阪で設計クライテリアを超える確率を計算した。その評価の過程で、確率論的地震動評価において、シナリオ地震群による地震発生モデルの作成が、今後、耐震設計や構造物のリスクを評価していく上で重要であることを指摘した。最後に公開された予測地震動を用いる際の留意点を指摘するとともに、建屋モデルに人力し、予測地震動の特徴が強震記録の特徴と同じであることを示した。そこには、強震記録と実被害の間に乖離の問題点があることと同様の課題が、予測地震動を直接設計に用いる場合にも生じすることを示し、性能設計をより推進していくためには、今後、設計者や施工を含め、構造物の真の性能評価を解明していく必要があることを述べた。

参考文献

- 文部科学省研究開発局地震・防災研究課(2005): 全国を概観した地震動予測地図について, 地震動予測地図ワークショップ-地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携-予稿集, pp.1-113
- 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション(J-SHIS), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 中央防災会議防災情報: <http://www.bousai.go.jp/index.html>
- 国土交通省・他編(2001): 2001 年度版建築物の構造関係技術基準解説書, pp.330
- 地震動予測地図工学利用検討委員会(2004): 地震動予測地図の工学的利用—地震ハザードの共通情報基盤を目指して—, 防災科学技術研究所研究資料, 第 258 号, p.314
- 石井透(2004): シナリオ地震地図の耐震設計への活用, 2004 年度建築学会大会パネルディスカッション資料「地震動予測地図」の建築物の耐震設計・評価への活用, pp.18-27
- 藤堂正喜(2004): 確率論的地震動地図の耐震設計への活用, 2004 年度建築学会大会パネルディスカッション資料「地震動予測地図」の建築物の耐震設計・評価への活用, pp.28-35
- 久保智弘・久田嘉章・柴山明寛・大井昌弘・石田瑞穂・藤原広行・中山圭子(2003): 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用、地震 2、56、pp.21-37
- 長橋純男(2003): 免震構造建築物を対象とした設計用入力地震動の作成動向—日本建築センター免震構造審査物件の場合—, 日本建築学会第 31 回地盤震動シンポジウム資料 pp.39-52
- 井上豊(2003): 大阪府・大阪市における検討用模擬地震動策定の概要, 日本建築学会第 31 回地盤震動シンポジウム資料 pp.53-56
- 吉村智昭(2003): 実務から見た設計用地震動評価の現状と問題点, 日本建築学会第 31 回地盤震動シンポジウム資料 pp.81-90
- (財)日本建築センター(2001): 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書, BIR 構造-02-01
- 東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会(2005): 巨大地震時に予測される長周期地震動とその耐震問題, 日本建築学会研究協議会資料, pp.211
- 野畑有秀(2000): 告示スペクトルは工学的基盤のスペクトルとして見なされるか?, 第 29 回地盤震動シンポジウム, pp.91-98
- Yoshida S., Imazuka Y. & Mizutani M. (2001): Seismic risk assessment procedures for a system consisting of distributed facilities. Part two - seismic hazard modeling, ICOSSAR
- 内山泰生(2005): 地表の強震記録に基づく工学的基盤での応答スペクトルの評価とその距離減衰特性, 東京工業大学博士論文, pp.276
- 翠川三郎(2005): 建築物の性能設計のための耐震メニューと地震動予測地図, 地震動予測地図ワークショップ-地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携-予稿集, pp.133-136
- SEAC: VISION2000 - Performance Base Seismic Engineering of Buildings, April, 1995
- 加藤研一, 宮腰勝義, 武村雅之, 井上大榮, 上田圭一, 壇一男(2004): 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—, 日本地震工学会論文集第 4 巻, 第 4 号, PP.46-86
- 安中正, 香川敬生, 石川裕, 江尻譲嗣, 西岡勉(2005): 期待損失評価のための確率論ハザードに適合した地震動波形群の設定方法: 土木学会地震工学論文集 CD-ROM, p.15
- 壇一男(2005): 地域地震動評価の展望—断層モデルによる予測地震動に立脚した建物の性能設計法の実装にむけて—, 日本建築学会 2005 年度大会, 最近の被害地震に学ぶパネルディスカッション資料, pp.19-26
- 田内建次, 大井昌弘, 水谷守, 吉田伸一, 今塚善勝, 藤原広行(2004): R C 造建物群の地震損傷度評価手法に関する検討, 日本建築学会大会学術講義概集 B2, pp.1041-1042
- 萩原山訓, 野畑有秀, 若松邦夫(2004): 地震ハザード解析に関わる 2 つの不確定性について, 日本建築学会大会学術講義概集 B1, pp.245-246
- Suwa H., Nobata A., and Seki M. (2004).: Evaluation of Portfolio Seismic Risk due to Different Allocations of multiple Building, 1st. International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.393-400
- (社)建築・設備維持保全推進協会(BEILCA)(2001): 不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成にかかわるガイドライン
- 久田嘉章(2005): 新潟県中越地震の地震動の特徴, 日本建築学会 2005 年度大会, 最近の被害地震に学ぶパネルディスカッション資料, pp.11-14
- 川瀬博(2005): 最近の被害地震の地震動の特徴, 日本建築学会 2005 年度大会, 最近の被害地震に学ぶパネルディスカッション資料, pp.3-10

4. 資 料

第 32 回地盤震動シンポジウム(2004)報告

吉村 智昭*

第 32 回地盤震動シンポジウム(2004)「表層地盤の増幅特性評価の現状と課題—地盤震動研究を耐震設計に如何に生かすか(その 3)」が、日本建築学会地盤震動小委員会と基礎構造系振動小委員会との共催で、2005 年 1 月 7 日(金)10:00~17:30、建築会館ホールにて約 240 名の参加者を集めて開催された。

司会は、午前の部は飛田潤(名古屋大学)と栗本修(大林組)、午後の部は飯場正紀(国土技術政策総合研究所)と早川崇(清水建設)、総合討論は小林喜久二(竹中工務店)と永野正行(鹿島建設)が担当した。

主旨説明

はじめに地盤震動小委員会主査の川瀬博(九州大学)より以下のように主旨説明があった。ここ 3 年、副題に示すとおり、「地盤震動研究を耐震設計に如何に生かすか」という継続テーマを取り上げており、2002 年度は「設計用地震動は工学的基盤で決められるか?」、2003 年度は「震源断層を考慮した設計用地震動評価: 地域波作成の現状と将来展望」、3 回目の 2004 年度は「表層地盤の増幅特性評価の現状と課題」を取り上げた。地盤震動研究の分野では、地震動が「震源」「伝播経路」「サイト」の 3 特性の積であると広く認識されているが、今回はサイト特性に関係する表層地盤の増幅特性に着目した。

セッション 1 最近の地震被害と表層地盤の関係

午前の 1 つめのセッションでは、最近の 3 つの被害地震から最新の研究紹介が 3 題あった。

大野晋(東北大学)は、「2003 年宮城県北部地震における震源域の地震動と表層地盤増幅」と題し、地点ごとに異なって観測された卓越周期や地震動強さが、工学的基盤以浅の表層地盤構造の違いにより説明できることを示した。

高井伸雄(北海道大学)は、「2003 年十勝沖地震における地震被害と表層地盤の関係」と題し、石狩平野における強震記録の分析結果を示し、長周期地震動が深さ数 km の堆積地盤構造の影響を受けていることを指摘した。

久田嘉章(工学院大学)は、「2004 年新潟県中越地震—地盤と地震被害—」と題し、震源域の山間部における被害の集中地域(山古志村や川口町など)は褶曲地域の背斜軸に近く、地滑りによる堆積層が地震動を増幅したとの見解があることを示した。

セッション 2 地震動研究からみた表層地盤の増幅特性評価の現状と課題

午前の 2 つめのセッションでは、地盤震動の研究者から表層増幅の評価方法について話題提供が 4 題あった。

境有紀(筑波大学)は、「表層地盤の増幅に影響するパラメータ」と題し、パラメトリックスタディにより、表層地盤の等価 1 次周期が 0.6 秒のときに、地盤の非線形により 1.2 秒震度が最大になって被害が大きくなることを指摘した。

佐藤智美(清水建設)は、「鉛直アレー観測記録の逆解析から評価される地盤材料物性」と題し、地震基盤から工学的基盤までの地盤増幅が大きいこと、減衰定数が非線形時にも周波数依存性があること、工学的基盤以深でも地盤の非線形性が認められることなどを指摘した。

川瀬博(九州大学)は、「強震記録のスペクトルインバージョンから評価される地盤増幅率」と題し、最新の研究において観測記録から分離したサイト特性を紹介し、地盤構造との関係を解説した。

森伸一郎(愛媛大学)は、「土の非線形特性に起因する強震時の地盤増幅特性」と題し、土のひずみに依存する変形特性を調べる室内試験法の現状と課題を議論し、非線形挙動のモデル化に関するコンセンサスに触れた。

招待講演

限界耐力設計法の導入に当って精力的に検討され、現状の形を形成する大きな原動力となった三浦賢治教授(広島大学)をお招きし、「限界耐力設計法の導入にあたって考えたこと—表層地盤増幅と動的相互作用効果—」と題して講演していただいた

*大成建設技術センター

セッション3 耐震設計における表層地盤の増幅特性評価の現状と課題

午後の3つめのセッションでは、主として基礎構造系振動小委員会のメンバーにより、表層地盤増幅および相互作用を考慮した耐震設計について5題の話題提供があった。

宮本裕司(鹿島建設)は、「耐震設計における表層地盤の位置づけ」と題し、地盤非線形や液状化を含む非線形相互作用効果を取り入れた地震応答解析法が開発され、一通りの設計解析ツールが整備された現状を紹介し、使用する設計者の判断、能力が重要になっていると指摘した。

小山信(建築研究所)は、「地盤増幅 G_s の設計上の留意点」と題し、パラメトリックスタディを行い、限界耐力計算による表層地盤の1次卓越周期と増幅係数の適用性について、等価線形計算と比較して議論した。

古山田耕司(鹿島建設)は、「土の非線形モデルが地盤の応答評価に与える影響」と題し、多地点での原位置採取資料による室内試験結果を整理し、土の非線形モデルを検討した。また、2003年十勝沖地震での杭被害の解析から土の非線形モデルの設定等での留意点をまとめた。

吉澤陸博(竹中工務店)は、「建物応答解析例からみた表層地盤モデル化の留意点」と題し、設計用入力地震動を作成する場合の留意点と時刻歴応答解析モデルを作成する場合の留意点を、応答解析事例を交えて指摘した。

福和伸夫(名古屋大学)は、「地震防災・耐震設計と表層地盤増幅」と題し、名古屋市、愛知県におけるハザードマップ作りや地震動評価において、表層地盤のモデル化や応答解析をどのように行ったか整理した。

総合討論

まず地盤増幅係数 G_s について一連の議論があった。

森伸一郎より、 G_s の導入は実務設計者にどのように受け止められているのかとの質問があった。三浦賢治は、入力地震動の定義位置が地表面から工学的地盤面になって合理的となり、設計者が地盤の卓越周期が何秒か考えること自体が相当な進歩であり、 G_s の精度が多少悪いことはこれに比べると小さいことであると述べた。飯場正紀は、 G_s による地盤増幅の評価が、建築主事が手計算で計算できるように計算が簡略化されている一方、時刻歴応答計算は複雑であり、極端な2極化が見られ、設計者が意図した点をもう少し簡単に判断できる体系が望まれるとの意見を述べた。

高坂隆一(梓設計)は、 G_s の問題点として、設計者によって評価結果が大きく変動する可能性ある点を挙

げ、構造設計上、同じ建物に対して地震力が何割も変動することは好ましくないとの意見を述べた。地盤増幅が全国的にデータベース化され、地表面でスペクトルが決められたほうが設計者としてはありがたいが、その可能性はないのかと述べた。これに対し、飯場正紀は、今回の改正基準法では工学的基盤を導入した方法論に注力されており、性能設計の観点からも設計者の意図を反映できるようにする点に力点が置かれたと述べた。全国的なデータベースは難しいが、都市部では地盤データが豊富であり、今後自治体等により地表面での評価結果のデータベースを作ることでも可能であり、設計者により自分で評価したり、あるいはデータベースをそのまま用いたりする選択がありうるのではないかと展望を述べた。

福和伸夫は、上記の議論に対し、都市部で防災向けマップの作成が充実しているが、多くの場合マップを作成しているのが防災部局であり、建築部局でないこと、したがってマップを作る目的が違っており、現状ではそのまま建築の目的には使えないことを指摘した。国土交通省など国が主導して、防災マップを作るときの地盤データに基づいて、同時に表層地盤の増幅特性を考慮した地表のスペクトルを付加的に計算して蓄積するなどの体制を整えてはどうかとの提案をした。

三浦賢治は、地表面でのスペクトルが設計者には扱いやすいとの議論の流れを受け、工学的基盤で地震動を決めることに意味があることを再度強調した。工学的基盤で決めることにより、杭の設計や相互作用の検討も可能となるのであり、再び地表面での定義に戻るの、好ましい方向の流れを逆行させることになるとの意見を述べた。

続いて、地盤の非線形性に関する議論が幾つかあった。

久田嘉章は、震源近傍で最初にやってくる大振幅のパルス波に対し、現状の繰り返し載荷によって評価した地盤定数は有効なのかと質問した。森伸一郎は現状の方法は減衰を過小評価している可能性があり、このようなパルスに対する試験方法はまだ議論されておらず今後の課題であると回答した。

従来から等価線形解析で用いられる SHAKE は手法として妥当であるのかという宮本裕司の質問に対し、森伸一郎は、レベル1程度の地震では問題なく使え、レベル2地震では地盤が著しく非線形化するので、応答結果を見ながら判断することになるが、ひずみが1~2%に収まれば使え、設計実務としては十分な精度を有していると答えた。ただし、佐藤智美が講演で指摘した減衰定数の周波数依存性や深い地盤の減衰など、研究的な側面

から十分検討されていない問題もあると述べた。

大淵俊行(安井建築設計)は、古山田耕司の講演で、2003 年十勝沖地震のシミュレーション解析において告示モデルの非線形特性を用いて評価した地表面加速度スペクトルが観測記録の半分程度になる結果を受け、告示モデルを扱う上での留意点について質問した。これに対し、古山田耕司は、告示モデルの非線形特性は限界耐力計算法で用いた時に整合するように定められていること、また限界耐力計算法でなく精算法で地盤の地震応答解析を行うためには原位置で採取した土試料による室内試験結果を用いることが望ましいと述べた。告示モデルの元になった試験結果の試料は、ごく浅い地盤の試料を用いているとか、粘性土といってもかなりシルト質であるとか、減衰が大き目であるといった点を認識した上で用いる必要があり、講演で示した例は、注意を喚起するために、深い地盤にまで適用した良くない例を敢えて挙げたと回答した。飯場正紀は、地盤を考慮すると、工学的基盤における設定、地盤増幅、相互作用と考えるべきステップが増え、各ステップで考慮された安全率を掛け合わせると最終の応答がかなり大きくなるという問題点があり、告示が最低基準であるという立場と、既存の設計レベルと同程度にするという観点から、減衰がやや大きめの非線形特性が選ばれたという経緯があると述べた。

最後に、地盤震動の研究者側あるいは設計者側への要望について議論された。

福和伸夫は、地盤震動研究者側に対し、多種多様なユーザーの立場に立ったアウトプットを心がけ、ユーザーの理解が深まってフィードバックがあるという状況になるように要望した。相互作用の研究は、現象の把握と設計への反映の間で苦闘しているという印象があると述べた。構造設計者へ対しては、現在地震への関心が高まっていることを利点にして、一般住民の理解が得られ、意匠設計者の都合に屈しない構造設計を行い、その際、今回テーマとなった地盤増幅という重要な問題を取り込んでレベルアップをしてもらいたいという要望を述べた。また、社会全体の問題として、最後には建築主事確認の問題に行き着くというしげらみがあり、構造設計界全体で解決を図る必要があると指摘した。

齋沢曜(横河建築設計)は、性能設計化に伴い客先への説明責任の重要性が増しており、構造設計担当者が直接客先に説明する必要性を述べた。森伸一郎は、設計者側に対して、建物や地盤の固有周期の測定を必ず実施してほしいという要望を述べた。川瀬博は、建物における地

盤観測が少ないので実施してほしいという要望を述べた。

北川良和(慶応大学)は、地盤震動研究者に対して、プロダクト・イノベーション(製品開発技術革新)という考え方に沿って、ものづくりにつながるアウトプットを心掛けて欲しいという要望を述べた。相互作用については細かいことにとらわれすぎている嫌いがあること、地盤の定数評価をしっかりとってもらいたいとの要望を述べた。設計者に対しては、プログラムありきの姿勢でプログラムに合うようにモデル化するのは、性能設計での説明責任が果たせないこと、地震動があるところでは小さくなり、あるところでは大きくなっても、日本全国トータルで見るとあるレベルになっているはずであり、トータルで説明できるものでないと説明責任が果たせないのではないかと意見を述べた。

最後に、加藤研一(鹿島建設)が本日の議論のまとめを行った。研究側においては、最近の地震研究より地盤非線形化と周期 1~2 秒成分の増加や大加速度生成との関連性、工学的基盤の非線形化など地盤非線形に関連して新たな課題が見いだされたこと、耐震設計側においては、大加速度記録の割に建物被害の小さいという点で設計と実際の地震時挙動には依然としてギャップがあること、解析手法が充実した一方で手法を適用する上での設計判断が重要となっていることなどを指摘した。

(文中敬称略)

