第22回地盤震動シンポジウム(1994)

地盤震動研究の新たな展開

――面的・即時的評価への取組み――

1994.10.31

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・出版権は他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越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

The 22nd Symposium of Earthquake Ground Motion (1994)

New Phase of Development on Earthquake Ground Motion Research:

Spatial Evaluation and Real-time Propagation for Effective and

Rapid Countermeasure

October 1994 Tokyo

Sponsored by Architectural Institute of Japan

	• .	

第22回地盤震動シンポジウム (1994)

地盤震動研究の新たな展開

一面的・即時的評価への取組み一

1.∄	三旨説明	主査	北川	良和(建設省	建築研究所)	· 1
2. ፲	面的地震動予測の現状と課題					
(1)	サイスミックマイクロゾーニングにおける	る地震軍	か評価の)現状		
			金子	史夫(応用地	質㈱)	. 3
(2)	名古屋地域を例としたボーリングデータの	の整備と	利用		E	
			今岡	克也・石田	栄介(名古屋大学) …	13
(3)	国土数値情報とサイスミックマイクロゾー	ーニンク				
	松岡	昌志・	翠川	三郎(東京工		23
(4)	常時微動の利用 一短周期微動の水平上			y-ac process secondaria		
	可能性について― 若松	邦夫・	安井	譲(大林組	技術研究所)	35
(5)	地震動の面的評価への弱・強震観測の利用	刊	工藤	一嘉(東大地	震研究所)	45
(6)	地震動の時空間分布 一観測記録を含む多	条件付用				
			川上	英二(埼玉大	学)	53
恃別諱	青演					
	「強震動の面的・即時的情報の地震防災によ	おける名	と割と其	明 待 」		
4			太田	裕(東大地	震研究所)	63
3. 🖹	F測の利用と即時性への取組み					
(1)		スー・「	ヘラス	Ĩ		
(1)	7,777		中村		[総合技術研究所]	73
(2)	都市ガス導管網の地震時警報システム SIO	GNAL	の開発			
				恒雄(東大生	達技術研究所)	85
			野田	茂(鳥取大	(学)	
			吉川	洋一(東京ガ		
			大谷	泰昭(㈱富士	:総合研究所)	
(3)	リアルタイム地震工学を目指して		野田	茂(鳥取大	(学)	95
			黒目	公郎(東大生	産技術研究所)	
谷松	第21同地般奪動シンポジウムの報告					112

CONTENTS

The 22nd Symposium of Earthquake Ground Motion (1994) New Phase of Development on Earthquake Ground Motion Research: Spatial Evaluation and Real-time Propagation for Effective and Rapid Countermeasure

Prefa		
	by Yoshikazu Kitagawa ·····	1
2-1	On Evaluation of Seismic Ground Motion for Seismic Microzoning in Japan by Fumio Kaneko	3
2-2	Arrangement and Utilization of Boring Data with the Example of Nagoya Region by Katsuya Imaoka and Eisuke Ishida	13
2-3	The Digital National Land Information and Seismic Microzoning by Masashi Matsuoka and Saburoh Midorikawa	23
2-4	Application of Microtremors -Estimation on Application Characteristics of Soil Deposits Based on Spectral Ratio of Horizontal to Vertical Spectra of Microtremors-	
	by Kunio Wakamatsu and Yuzuru Yasui ·····	35
2-5	Weak and Strong Motion Observations for Spatially Evaluating Ground Motion due to an Earthquake	
	by Kazuyoshi Kudo ·····	45
2-6	Space-time Variation of Earthquake Ground Motion Including Observed Strong Ground Motions by Hideji Kawakami	53
Invite	d Paper:	
	Information in Space and Time-Domains of Seismic Strong Motions	
	and Its Expectation as Basic Material for Better Earthquake Protection Strategies by Yutaka Ohta	63
3-1	On the Real-time Earthquake Disaster Prevention System: UrEDAS and HERAS by Yutaka Nakamura	73
3-2	Development of City Gas Network Alert System Based on Monitored Earthquake Ground Motion by Fumio Yamazaki, Tsuneo Katayama, Shigeru Noda,	ΩĘ
	Yoichi Yoshikawa and Yasuaki Otani	00
3-3	Towards the Advancement of a Sophisticated Real-time Earthquake Engineering by Shigeru Noda and Kimiro Meguro	95
Арреі	ndix	
	Report on the 21st Symposium (1993)·····	13

1. 主 旨 説 明



第22回地盤震動シンポジウム開催にあたって

主旨説明 Preface

> ゴヒノリ 良 禾口 Yoshikazu KITAGAWA

第22回地盤震動シンポジウムを迎えるにあたり、 関係各位の御尽力・御支援に対して、地盤震動小委 員会主査としてここに厚く御礼申し上げます。

地盤震動小委員会では歴代の主査のもと毎年時宣に応じたテーマでシンポジウムを開催してまいりました。また1993年(平成5年)には、国際的貢献に資するため、当小委員会での過去20年間の研究活動をもとに、この10年間の地盤震動、特に地震動評価に係わる研究、技術の進歩・蓄積をふまえ "Earthquake Motion and Ground Conditions"を出版致しました。これを機に当面の小委員会活動方針として、地震防災に係わる地盤震動の諸問題の発掘・整理・方向づけを行うよう努力しております。今回のシンポジウムでは、地震動評価の"点から面への展開"と "オフラインからオンライン(リアルタイム)への展開"の2つをテーマに取りあげました注)。

面的に地震動を評価することは、地震防災上重要なサイスミック・マイクロゾーネーションにかかわるもので、その重要性は改めて述べるまでもありません。ここでは「面的地震動予測の現状と課題」と題し、利用方法、地震動や微動の高密度観測から得られた問題点の整理と解釈、地震動の空間的な分布を把握するための理論的方法などについて、要素技術としての現状紹介と面的にどの程度の精度で地震動を評価できるかについて的を絞りました。

リアルタイム (即時的) で地震動を評価すること は地震防災対策の一環として位置づけられるもので、 その重要性は今後ますます増してくるものと考えら れます。ここでは「予測の利用と即時性への取組み」 と題し、地震動のモニタリングシステムとその利用 例、地震動の即時的利用の可能性と今後のあり方に ついて、総合技術としての現状紹介とどの程度の即 時性をもって地震動を評価できるのかについて的を 絞りました。

これら2つの課題に共通する事項としては、精度、 データの利用法が挙げられます。これまでの研究で は理学的知見をもとに点としての精度をあげるべく、 時間をかけた研究・技術の進歩・蓄積がはかられて まいりました。また、1970年代頃から地震動や震害 分布の地域差(最近では1993年釧路沖地震、1994年 ノースリッジ地震等)が認識されると共に、都市の 地震災害が重要な課題となり、盆地地盤、不整形地 盤といった面的広がりを考えた地震動評価も重要な 課題として注目されるようになってまいりました。 現像のシュミレーション、地震動の予測、地震防災 の事前対策といった観点からこれまでは研究態度も じっくり腰を落ち着けて行われておりました。一方 ではこれら研究・技術の進歩・蓄積をもとに、地震 の直前・直後の地震防災対策を講ずるために、地震 の早期感知等リアルタイムシステムが開発される等 即時的に地震動を評価出来るようになってまいりま した。

これら一連の研究動向は目的に応じた地震動評価に要する時間とその精度、意志決定に必要なデータと地震動評価の精度との関係など、目的・時間軸に沿った地震動評価の考え方を整理する必要性を指摘しております。

これらの状況のもと、総合討論では、上記2つの 課題、すなわち面的広がりをもつ地震動評価、時間 軸に沿った地震動の評価の考え方やその精度につい て、現状における研究レベルの把握と今後の研究動 向について、会員各位と討論を行い、地盤震動の観 点から地震災害の軽減に少しでも役立てれば幸いと 考えております。

建設省建築研究所国際地震工学部長,工博

Director, Int. Inst. of Seism. and Earth. Eng. (IISEE), Build. Res. Inst. (BRI), Min. of Const. (MOC)

注)課題毎の裏読本

話題提供して戴く方々の簡単な内容紹介と討議に係わる最小限のポイントを以下に列挙します。

2. 面的地震動予測の現状と課題

要素技術の紹介、知見・問題点の整理

(1)金子史夫(応用地質)

既往の実施例とその目的の紹介、どの程度の精度を考えたらよいのか? 精度に応じた手法は変える必要があるのか?

(2)今岡克也(名古屋大)

名古屋地区を例にボーリングデータの整備状況の紹介、どの程度一般的にデータが使えるのか?

(3)松岡昌志 (東京工大)

国土数値情報の整備状況と利用例の紹介、地震動評価の精度をどの程度考えたらよいのか?

(4) 若松邦夫 (大林組)

短周期微動の性質、微動による地震動評価の可能性(精度、適用限界等)の紹介、微動からどの 程度の精度をもって面的に地震動評価したらよいのか?

(5)工藤一嘉(東大震研)

北海道南西沖地震の余震観測を例に観測点間隔と地震動振幅のバラッキについて紹介、マイクロ ゾーネーションにおいて地震動振幅のバラッキをどの程度考えたらよいのか?

(6)川上英二(埼玉大)

観測点間隔と地震動との相関性、時空間の相関を表現するデータについて紹介、時空間分布として地震動を表現したとき、その精度をどの程度考えたらよいのか?

3. 予測の利用と既時性への取組み

地震動モニタリングシステム、利用法の紹介、どのような判断でどのような精度で地震動を評価した らよいのか?

(1)中村豊 (JR総研)

地震防災対策としてのリアルシステムとその将来像の紹介、どのような理学的、工学的判断を行 えばよいのか? その精度はどの程度考えたらよいのか?

(2)山崎文雄(東大生研)

地震時緊急遮断システム、意志決定に必要なデータとその収集方法の紹介、どのような工学的判断を行えばよいのか? 今後の取り組み方・あり方においてどの程度の精度を考えていけばよいのか?

(3)野田茂(鳥取大)、目黒公郎(東大生研)

時間軸に沿ったデータ収集とその利用法の紹介、リアルタイム情報の利用の精度はどの程度考えたらよいのか? 他の自然災害対策での利用状況はどうなっているのか?

4. 総合討論

点と面による地震動評価の違いは何か? 時間軸に沿って地震動評価の考え方を変えるのか? その時の精度は異なるのか? 地震防災対策に必要な時間と精度との関係はどうなっているのか?

2. 面的地震動予測の現状と課題



第22回地盤震動シンポジウム 日本建築学会 1994.10.31

サイスミックマイクロゾーニングにおける 地震動評価の現状

ON EVALUATION OF SEISMIC GROUND MOTION FOR SEISMIC MICROZONING IN JAPAN

金子史夫 Fumio KANEKO

In an effort to mitigate the effects of the destructive earthquakes in the future, seismic microzoning projects have been conducted by many local governments in Japan. The evaluation of seismic ground motions, the basis of seismic microzoning, is reviewed using recent examples. In most of the cases, the objective area is divided using grids to classify the ground, and to calculate the seismic acceleration of the ground surface using the one-dimensional analysis. The estimated acceleration is then converted into seismic intensity. The developments in science and computer technology have improved importantly the seismic microzoning techniques, and similar improvement of the quality and quantity of basic data on geology, soils and seismic observations is now being required. It is difficult to evaluate the accuracy of the results, because they depend on the purposes and scope of the projects. Some comparison examples indicate that the accuracy of the estimated results may be within +-20%.

1. はじめに

地震防災対策を立案し、実施して地震災害を軽減することを目的として、将来に発生が予想される地震による地震動や地震被害を予測し、その特性を把握するサイスミックマイクロゾーニング調査が、県や市などの地方自治体においてよく実施されている。

この調査の基礎となる地震動予測は、構造物などの 建設に伴って実施される場合は点での評価であるのに 対し、サイスミックマイクロゾーニングでは広い地域 を統一的な観点から評価し、その結果は広い分野への 活用を目的としたものとなる。

本報では、過去に実施された事例をもとに、広い地域を対象とした地震動予測の現状について述べる。

2. サイスミックマイクロゾーニングと地震動予測 現状サイスミックマイクロゾーニングは、将来に被 害をもたらす可能性のある地震を想定することから始 まり、図-1に示すように、被害予測や対策の検討ま でを含んだ総合的なものとしてとらえられている。

最終的な目的は地震防災であるが、県・政令指定都市と市町村、施設の管理者などの立場によって目的や想定項目が異なる。また、地域的な地震に対する脅威の様相によっても違いがある(太田,1994など)。 技術的にも、社会的な活用面からの要請、学問や技術の進歩、コンピュータの高速化によって、想定項目が増え、より詳細な解析を実施する傾向にある。

地域内の地震動の強さの分布を把握することがサイスミックマイクロゾーニングの基本である。サイスミックマイクロゾーニングでは、地震動予測以降の被害 予測などに活用されることが重要であり、全体としての精度のバランスが不可欠である。

サイスミックマイクロゾーニングにおける地震動予測は、図-2に示すように、震源の評価、基盤中の地震動の伝播、そして表層地盤の評価と地表地震動の表現に大きく分けられる。それぞれが相互に密接に関係しているが、以下、各項目の現状について述べる。

応用地質株式会社・探査工学研究所・地震防災部部長

Manager, Earthquake Engineering Department, Eng. Geophy. Research Institute, 0YO Corporation

3. 広い地域を対象とした地震動予測の現状

3.1 震源と想定地震

まず対象とする地震を想定することになるが、日本では、過去の被害地震を解析し、特定の地震を決定論的に想定する傾向が強い。

1970年代から80年代にかけては、関東大地震や東海 地震のような過去の激甚な被害をもたらした巨大地震 を想定して、点震源と観測結果に基づいた経験的な距 離減衰式が用いられることが多かった。

1980年代にはいると、計算速度の高速化やデータの整備が進み、断層モデルを使った方法が提案されて、適用されるようになった。1978年の東海地震を対象とした大規模地震対策特別措置法の制定が大きな影響を及ぼしている。

また、最近では首都圏直下のマグニチュード 7 クラスの地震も想定対象とされるようになり、活断層も考慮されている。このように進展した背景には、震源のメカニズム及び地震動推定方法の研究の進展や、多くの被害地震の震源断層の要素が実用に供されるようになったことの寄与が大きい。

3.2 基盤と基盤地震動

基盤地震動の評価方法と採用される基盤層の間には 密接な関係がある。

1970から80年代には、多くの場合、洪積世の砂礫層あるいは通常の建築物を基礎とするような、N値が50回を越える地層(S波速度(Vs)にして350~500m/s程度)が基盤として採用され、距離減衰式による同心円状の基盤加速度が用いられることも多かった。この基盤層の採用については、土木や建築の分野では構造物の建設のためにボーリングなどの資料調査がこれよりも浅い地層を対象として実施されており、資料が豊富である(深い地盤の資料が不足していた)ことによるものである。

次の段階では、表層の影響を排除した基盤での地震動を半経験的な手法、すなわち断層モデルを用いて基盤での応答スペクトルを求める方法が提案され、用いられるようになった。翠川・小林(1978など)によるものが代表的である。この方法の利点は、断層モデルや応答スペクトルの採用のみならず、破壊の方向を考慮できる点にある。いくつかの過去の地震による震度分布との対比によって妥当性が検証されている。

こうした手法が実用的になった背景には、夢の島をはじめとする人工地震探査や重力探査の成果及び、地質構造に関する研究成果によって、深い(硬い)地層までの地盤構造を考慮することが次第に可能となってきたことが影響している。実際には、予測の手法と地盤の資料の双方が相互に影響しあった結果である。また首都圏を中心に、基盤層としては、先の Vs=350~500m/s程度の地層から、700m/s程度の地層(第三紀層)さらには地殻の表層となる3000m/s 程度の地層が採用されるようになってきている。

最近は、翠川・小林の方法の考え方を基本として、これに現地付近で得られた観測記録に基づいた応答スペクトルの経験式などを当てはめることで、できるだけ現地の特性(震源、基盤内の伝達特性)を反映する方策もとられている(工藤,1993)。

さらに、最大値や応答スペクトルのみならず波形を 予測するために、小地震の波形から大地震の波形を合 成する方法(Irikura,1983)の採用が試みられている。 この方法の優位性は、震源過程が同様な適当な観測波 形があれば途中の伝播経路の特性を考慮した波形が得 られる点である。ただし、この方法で広い範囲を想定 する場合にはどこでも観測記録が実在するわけではな く、まだ実験段階にある。

また、Vs=3000m/sから500m/s 程度の間の基盤層の違いについては、地質年代あるいは地層のS波速度によって、それぞれに地盤の増幅率を与える方策が工夫されている。最近はこうした深い地盤についても、次に述べる表層地盤の一部としてとらえて、代表的な地層構成のモデルとして評価が行われている。

なお、震源の近傍の地震動の評価に関しては、課題 が依然として残されている。

3.3 表層地盤とその増幅特性の評価

地表地震動、ひいては各種の被害に最も大きな影響を与えるものは、表層の地盤の違いである。日本では 関東大地震の頃から指摘されており、国際的にも最近 ESG研究として活発な研究が続けられている。

表-1は、各自治体で実施された表層地盤の地震動評価についてレビューしたものである。

これによれば、表層地盤の評価に際しては、多くの 場合に対象とする地域をメッシュに分割している。こ れは解析や評価の煩雑さを避けるための方策であり、 地形や地盤の変化に合わせたポリゴンによる表現の方が妥当であるとも考えられる。しかし、時間及びデータの限られた範囲内では、やはり解析や評価の簡易さが鍵となる。ただし、最近のマッピング技術の進展(GISの活用など)によって、近い将来にはポリゴンによる表現が主流になることも想像される。いずれにしても、これまでの事例によれば、次第に1kmメッシュから500m~250mメッシュへと細かく分割し、できるだけ詳細に表現する努力が続けられている。

ところで、分割数の細かさとともに、地下の地層構成とその物性の評価が問題である。初期の頃には、対象範囲を、地形あるいは数種類の代表的な地盤モデルで代表させていたが、次第に200~300種類といった数多くの地盤で代表するようになってきている。

一方、最近では、ボーリングや地盤物性のデータがファイル化され、次第に蓄積されており、こうした情報を駆使すれば詳細な評価ができる。しかし、地盤は連続的に、また三次元的に変化して分布しており、どの程度に分割すれば評価が適切であるのかも問題である。これについては定説や理論があるわけではなく、限られた情報と時間のなかで、対象範囲の広さ、データの疎密及び地層構成の複雑さの状況に応じて判断されているのが実態である。

また、表-1の事例によれば、ほとんどが代表的な地盤のモデルに対して、一次元の応答解析によって増幅特性が評価されている。つまり、不整形の地盤において二次元的あるいは三次元的な影響が表れることが考慮されていない。しかし、 Kaneko et.al.(1991)は広い範囲を対象とした場合には、二次元や三次元の計算は膨大な時間がかかることとデータが不足していることを挙げて、一次元の応答計算でも限られた時間とデータのなかでは妥当性(実用性)があることを示している。また、不整形地盤の影響がある場合については、常田ら(1993)による不整形地盤での一次元と二次元の計算結果の比較の研究が参考になる。

3.4 地表地震動の表現

表-1の事例によれば、初期のものはほとんどが最大加速度で、また次の時期では、最大加速度を算出した後に震度階や震度ランクで地表地震動を表現している。最近では、最大加速度をそのまま震度階に換算することへの疑問が投げかけられており、応答スペクト

ル及び周期特性を考慮した計測震度によって地表地震動を表現することが増えている。ただし、計測震度は 主要動の継続時間の評価が今後の課題である。

また、従来、地震動を一つの値のみで表現することは問題があることが指摘されてきており、最大加速度や震度だけでなく、応答スペクトルや応答波形などの情報も残して、精度の高い被害予測を十分に可能にするための工夫がされている。近い将来には、波形によって広域での地表地震動分布の表現がされるようになることを期待したい。

4. 最近の事例

同一の地域で、5~10年の間をおいて2回実施された3つの自治体の事例を以下に紹介する。

4.1 東京都の例

1978年の1回目では、図-3に示したように、5種類の表層地質によって区分し(ポリゴン)、それぞれの表層地質に対して相対的な増幅度を与えている。系統的に広い範囲での地震動予測が行われた初期の例である。

これに対して2回目の場合(1991年)には、地域を500mメッシュに区分し、基盤層の違いを増幅度で考慮して、123種類に表層地盤を分類して行われている。図-4は、南関東地震(関東大地震の再来を想定)による震度分布を評価したもので、ここでの特徴は、基盤地震動を、関東大地震の際の木造建築物の倒壊率分布をもとにして評価している点である。

両者を単純に比較することは難しいが、表層の地質の違いをポリゴンで忠実に表現し簡潔なものとなっている点は前者が、また地層構成までを考慮している点では後者が優れている。

4.2 埼玉県の例

最初に実施された例(1982年)では、1 kmメッシュを使い詳細な地盤解析が行われた先駆的な典型例である。南関東地震による震度分布(図-5)では、点震源と距離減衰式を採用していて、2 回目(1992年)の例(図-6)に比べるとやや見劣りがするが、当時としては先進的なものであった。 $2 \text{ 回目では、断層モデルと翠川・小林による方法を採用し、さらに人工地震探査を実施して深さ約<math>5 \text{ km}$ までの深い地盤(V s = 3000

m/s程度の地層)についても詳細な評価を行っている。表層地盤は、地域を500mメッシュに区切り、 241種類の代表地盤を当てはめている。震度分布図(図-6;計測震度を採用)は、河川の形や地盤の分布状況を良く反映したものとなっている。

4.3 神奈川県の例

1回目は1982年から85年にかけて実施され、人工地 震探査によって深い構造を探って、基盤層としては第 三紀層 (Vs=700m/s) を採用している。平野部で500m メッシュ、山地部は1kmメッシュを併用している。図 -7は南関東地震を想定した震度分布図である。

1992年の例は、その発生が危惧されている神奈川県西部地震を想定したものである(図-8)。対象地域内の地震観測記録を活用して、基盤層(Vs=3000m/s程度の層)での地震動を経験的なグリーン関数を用いた波形合成の方法によって求めている。表層の地盤は、地域(神奈川県の西部地域に限っている)を250mメッシュに区切って、310種類の代表地盤を用いて詳細に評価している。現状での最も先進的な例と言える。予測の手順に関しては、工藤(1993)に述べられているので割愛する。

5. 予測結果の精度について

先の表-1をもとに対象地域の面積と、代表地盤が代表する平均的な面積の関係をとって、図-9に示した。年代を追うごとに細かく解析している様子が明らかである。また、一つの代表地盤が代表する広さは、県単位(およそ1000km²以上)では10km²程度、市単位(およそ1000km²未満)では1~5km²程度が現状の細かさのレベルとして見ることができる。対象地域の全体の面積(サイズ及び要求される細かさを含む)とデータの疎密、解析にかけられる時間などが影響しているものと考えられる。

また、サイスミックマイクロゾーニングでは、広い 範囲での地震動分布を統一的に評価することが課題で あり、実績(過去の地震における観測記録など)との 実証例が必ずしも多いわけではない。図-10は、数少 ない比較例であり、町程度の広さを単位とした比較結 果は±20%程度となっている。

さらに、様々な予測方法が採られていることを考慮 して、いくつかの段階での比較を試みた例がある。こ れを図ー11、表-2、及び図-12に示す。現状の技術レベルでの精度は以前と比べてかなり良くなっていることが明らかである。また、活用する側の要求する精度によって手法を変えることも可能であることを示しているとも言える。

6. あとがき

現状のサイスミックマイクロゾーニングにおける地 震動予測は、細かさを追求している状況にある。

震源から地表までの多くの過程を各段階での適当な方法を組み合わせたハイブリッドなものとせざるを得ない現状にあるため、多くの想定地震に適応できる一貫した手法の開発が課題である。二次元や三次元の解析手法によって一括して評価することが難しい現状では、地域を区分して代表地盤を抽出することが行われるが、この分割の基準についても検討がさらに必要であろう。このような広い範囲を評価することの固有の課題の他にも、地震学や地震工学の抱えている、近距離での地震動の評価、非線型の問題などは、同時にマイクロゾーニングにおける課題となっている。

地盤はかなり細かく評価されてきているが、被害予 測の観点からは、家の一軒一軒の程度のレベルが欲し いところでもある。しかし、データや解析の精度との 兼ね合いである。

以上のように、様々な課題を抱えてはいるものの、 広い範囲での地震動分布の平均像をかなりの精度で与 えている現状にある。地震学、地震工学あるいは地盤 工学の進展に伴ってマイクロゾーニングの技術も進展 してきているが、逆にこれに伴って、基礎的な地盤や 観測記録などのデータの充実も不可欠である。

参考文献

Irikura, K. (1983), Semi-empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquake. :Bull. Disas. Prev. Res. Inst., KyotoUniv., Vol.33, pp.63-104.

神奈川県(1985),神奈川県地震被害想定調査報告書 (地質地盤),450p.

神奈川県(1992),神奈川県西部地震被害想定調査手法 編報告書,443p.

金子史夫(1990).地震被害予測手法の現状,物理探査: 第43巻,pp.467-473.

- Kaneko, F. and K. Tonouchi (1990), A Study on Seismic Ground Evaluation Method for Seismic Microzoning: Proc. Intern. Symp. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol. I, pp. 245-250.
- 工藤一嘉(1993),神奈川県西部地震から予想される強 震動:地学雑誌, Vol.102, No.4, pp.471-481.
- 翠川三郎・小林啓美(1978),地震動の地震基盤からの 入射スペクトルの性質:日本建築学会論文報告集、 No.273,pp.43-52.
- 翠川三郎・小林啓美(1979),地震断層を考慮した地震 動スペクトルの推定:日本建築学会論文報告集,No. 282,pp.71-81.
- 太田 裕(1994).強震動情報と地震防災、「強震動地震学・地震工学研究の現状と展望」(その4): 2輯,第47巻, pp.113-136.
- 埼玉県(1982),埼玉県地震被害想定策定調査報告書, 356p.

- 埼玉県(1992),大規模地震被害想定調查報告書,415p.
- 瀬川秀恭,山本明夫,金子史夫(1989),地震発生時の地 震動分布把握へのサイスミックマイクロゾーニング の適用について:第20回地震工学研究発表会,講演概 要,pp.37-41.
- Shima, E., M. Komiya and T. Tonouchi (1988), Estimation of Strong Ground Motion in the Tokyo Metropolitan Area during the 1923 Great Kanto Earthquake: Proceedings of the 9th WCEE, Vol. II, pp. 441-446.
- 常田賢一,田村敬一,金子正洋,山本明夫(1993),不整形 地盤における地震応答スペクトルの検討:第22回地 震工学研究発表会,講演概要,pp.231-234.
- 東京都防災会議(1978),東京区部における地震被害の 想定に関する報告書, 491p.
- 東京都防災会議(1991),東京における地震被害の想定 に関する調査研究,223p.

対策: 神野側との 対策が主になる

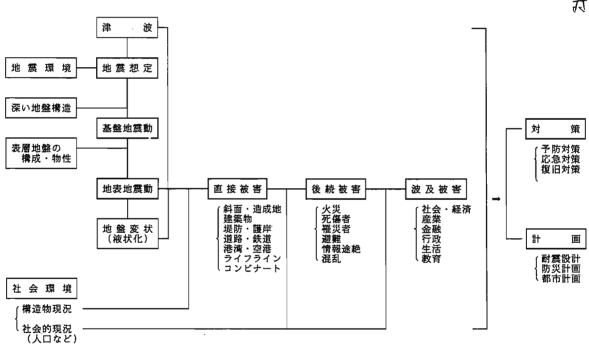


図-1 地震被害予測の流れ

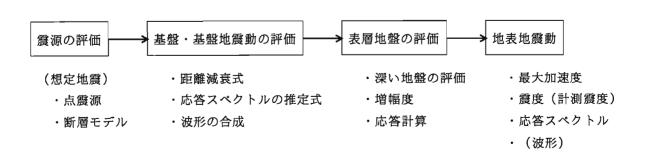


図-2 サイスミックマイクロゾーニングにおける地震動予測の流れ





1-770

自治体における地震動評価

No.	年	対象地域 の 面 積 (km)	区分単位	地 盤 区分数	地盤区分 要 素 1)	表層地盤 の増幅度 2)	計算結果 3)	震度階 4)
1	1974	136	1kmメッシュ	不明	T, G	М	Acc	PGA
2	1975	213	500mメッシュ	10	T, G	M	Acc	SI
3	1977	1869	500mメッシュ	42	T, G	М	Acc	SI
4	1977	8380	1kmメッシュ	5	T, G	F	Acc	PGAL
5	1978	2166	1kmメッシュ	5	S	RVs	Amp	AmpL
6	1978	5138	1kmメッシュ	7	Т	F	Acc	PGAL
7	1978	5778	1kmメッシュ	7	Т	F	Acc	PGAL
8	1980	13133	1kmメッシュ	13	Т	F	Acc	PGAL
9	1980	7324	1kmメッシュ	7	Т	F	Acc	PGAL
10	1981	800	す。 リコ、ソ	36	T, G	M	Acc	PGAL
11	1981	15277	す。ハコ・ハ	7	Т	F	Acc	PGAL
12	1981	328	500mメッシュ	不明	T, G	М	HL	PGAL
13	1982	11434	1kmメッシュ	47	T, G	M	НL	PGAL
14	1982	3799	1kmメッシュ	60	T, G	М	Acc, AmpR	SI
15	1982	5150	1kmメッシュ	17	T, G	M	Acc, AmpR	SI
16	1982	49	1kmメッシュ	5	Т	F	SI	SI
17	1982	4145	1kmメッシュ	16	T, G	M	Acc	PGAL
18	1982	7290	1kmメッシュ	188	T, G	М	Acc, AmpR	SI
19	1982	250	す。ハフ、ハ	8	T, G	М	Acc, AmpR	SI
20	1983	5138	1kmメッシュ	23	T, G	М	Acc, AmpR	SI
21	1985	2402	500mメッシュ	198	T, G	M	Acc, AmpR	SI
22	1985	136	500mメッシュ	112	T, G	M	RS	PGAL
23	1985	737	す。 リコ、ン	28	T, G	M	Acc	PGAL
24	1985	430	す。 リコ、ン	185	T, G	M	Acc, AmpR	SI
25	1986	4191	1kmメッシュ	153	T, G	M	Acc, AmpR	SI
26	1990	3799	500mメッシュ	241	T, G	M	H, RS	iSI
27	1990	35	500mメッシュ	25	T, G	M	H, RS	iSI
28	1990	7779	500mメッシュ	32	Ť.	M	Acc, AmpR	SI
29	1991	114	250mメッシュ	82	T, G	M	H, RS	iSI
30	1991	1057	250mメッシュ	310	T, G	M	H, RS	iSI
31	1991	2166	500mメッシュ	123	T, G	М	Acc, AmpR	SI
32	1992	5147	500mメッシュ	316	T, G	M	H, RS	iSI
33	1992	100	250mメッシュ	85	T, G	М	H, RS	iSI
34	1993	77	250mメッシュ	51	T, G	М	H, RS	iSI
35	1993	1630	500mメッシュ	299	T, G	М	H, RS	iSI

1) T: 地形区分, G: 地層構成による区分, S: 表層地質区分

2) M: S波の重複反射, F:経験的距離減衰式, RVs:表層と基盤のS波速度比

3)Acc:最大加速度, Amp:表層地盤の増幅度, HL:伝達関数の増幅度, AmpR:基盤入射加速度と 地表加速度の関係, SI:震度階, H:伝達関数, RS:地表の応答スペクトル

4)PGA:地表最大加速度、SI:震度階、PGAL:地表加速度のレベル、AmpL:増幅度のレベル、issi. 有象で提案の計測
要度

iSI:気象庁提案の計測震度

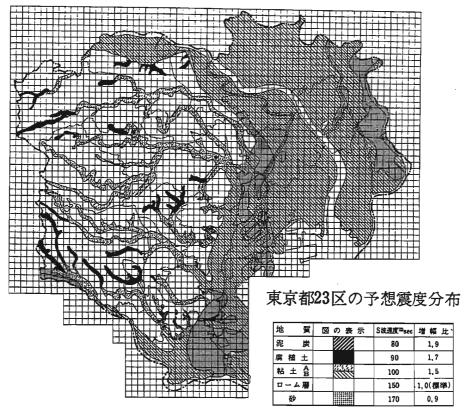


図-3 東京都23区の予想震度分布 (東京都防災会議,1978)

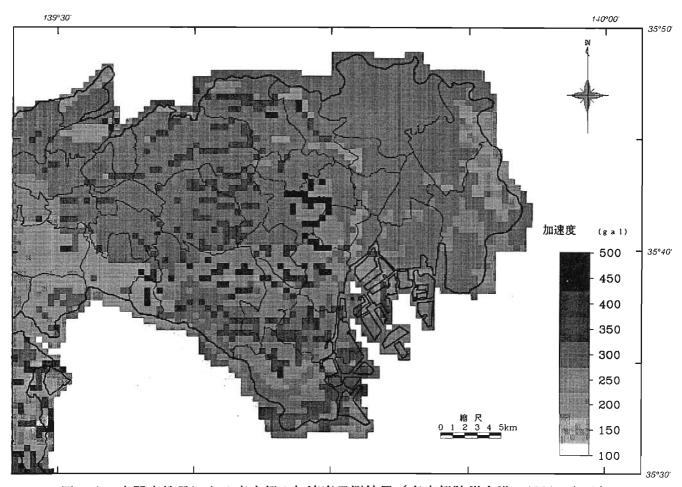


図-4 南関東地震による東京都の加速度予測結果 (東京都防災会議, 1991, 部分)

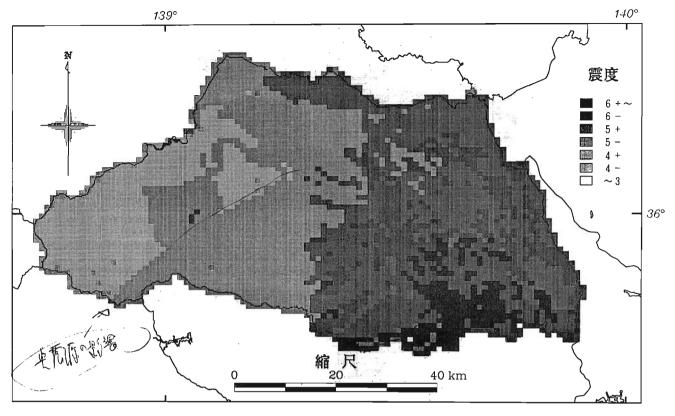


図-5 南関東地震による埼玉県の震度予測結果 (埼玉県, 1982)

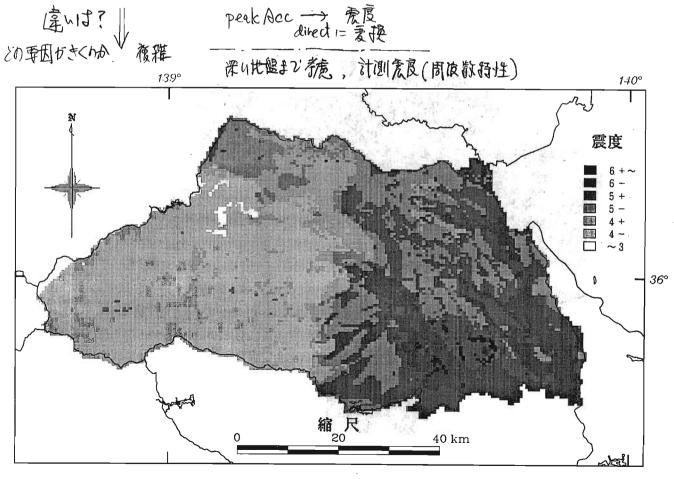
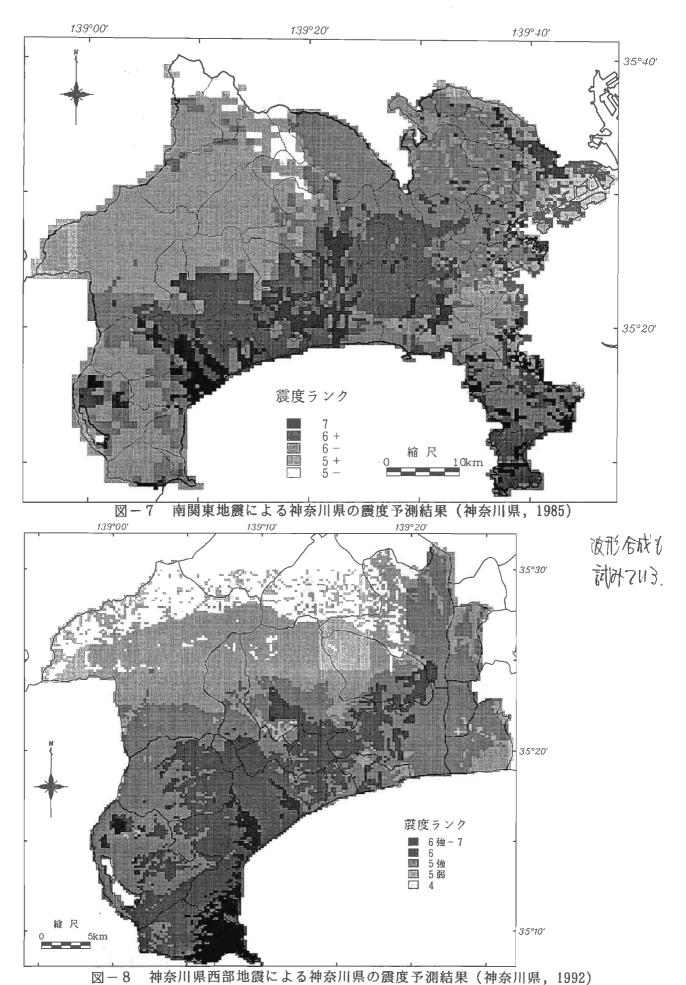


図-6 南関東地震による埼玉県の震度予測結果 (埼玉県, 1992)



神奈川県西部地震による神奈川県の震度予測結果(神奈川県, 1992)

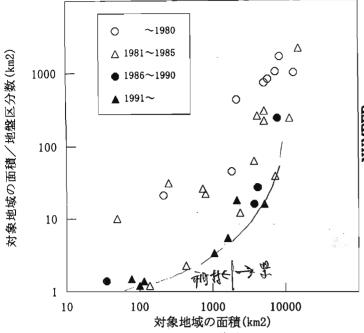


図-9 対象地震の面積と代表地盤の 平均的代表面積の関係

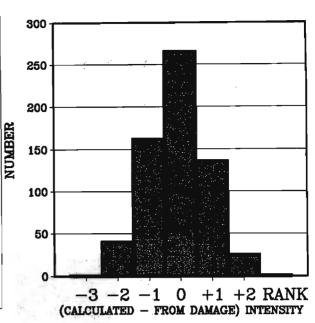
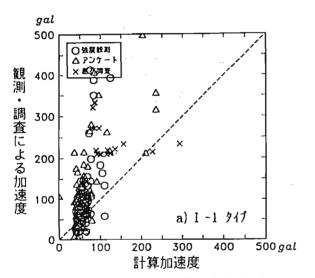


図-10 予測した震度と被害から換算した 震度の差 (Shima et.al.,1988)



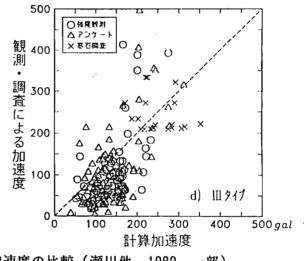


図-11 計算加速度と観測調査による加速度の比較(瀬川他,1989,一部)

gal

表-2 地震動予測の計算タイプ (瀬川他, 1989)

計算タイプ	基盤地震動 の評価	表層増幅特性 の評価
I — 1	1~4種の地類 示方書)ごとの	開分類(道路橋 の距離減衰式
1 - 2	点震源からの 距離減衰式	表層Vsによる 増幅度評価
11	点震源からの 距離減衰式	観測地震波に よる応答計算
111	断層モデルを 考慮した計算	観測地震波に よる応答計算

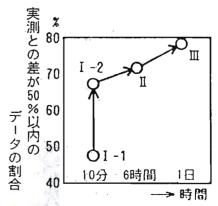


図-12 計算結果の実測加速度に対する 精度の推移(瀬川他,1989)

(2) 名古屋地域を例としたボーリングデータの整備と利用

Arrangement and utilization of boring data with the example of Nagoya region

今岡 克也* 石田 栄介**
Katsuya Imaoka Eisuke Ishida

In this report, the construction and utilization of geotechnical database are introduced with the example of Nagoya region. According to the questionnare to the user of the geotechnical information, it is required that (1) the region of data collection should not be administrative but geographical, (2) the location of boring logs should be described as correctly as possible. For the utilization of the database, the formation of geological sections, the judgement of the risk of liquefaction and the prediction of the predominant period of the surface ground are introduced. It is shown that the predominant period presumed by the boring data generally correspond to those gained from the microtremor observations carried out at 140 sites in Nagoya region.

土痘工学会 中部支部的主体

1. はじめに

構造物が計画・建設されるサイトでは、地盤の支持 力算定、液状化や圧密沈下の予測などの目的からボーリ ング調査が実施され、その数量は年間に約18万本、総 延長約 450万 m にも及ぶと言われている¹⁾。このように してサイト毎に得られた地盤情報は、1次利用が終わる と永久保存されるか、一定期間が過ぎれば廃棄される場 合が一般的である。しかし最近では、情報処理技術の飛 躍的な発展により、各サイトの地盤情報を地域毎に収集・ 整備して, 点の情報を3次元的に評価することで信頼性 を高めていこうとする動きが各方面で進められている。 この動きは、地盤情報が、数値やコード化され易いこと と, 省力化・正確化・加工性向上などの理由から地盤調 査業者もデータのデジタル化を進めていることが良い影 響を及ぼしている。そして,地域毎に収集・整備された ボーリングデータの2次利用には、①各種構造物の計 画・建設時の地盤調査の合理化、②各種開発・建設事 業などが周辺環境に与える影響評価,③ 地震・台風・ 豪雨・高潮などが襲った場合の災害の防止・軽減,④ 地盤沈下や地下水汚染の防止,などの社会的な要求を満 たすものと期待されている。しかし,地域毎の地盤情報 データベースの構築と利用には,"情報が効率的に管理 され更新が容易である","情報内容の信頼性が確保されている","情報に対する責任や権利のあり方が確立 されている","情報の利用に一定のルールが形成されている",などの前提が必要とされ,現時点で有効に機能している例は少ない。

この報告は、研究や公共施設の設計などの目的に限定して公開された「最新名古屋地盤図資料編データベース」を例としてボーリングデータの整備と利用の現状について紹介し、さらに、土質工学会中部支部名古屋地盤データバンク研究委員会が実施した地盤図や地盤情報に対するアンケート調査結果に基づいて、地盤情報を利用している担当者の意識についてまとめたものである。

Assistant Proffesor, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nagoya University. Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nagoya University.

^{*} 名古屋大学工学部建築学科 助手·工博

^{**} 名古屋大学工学部建築学科 大学院生·工修

表-2 柱状図ファイル登録項目(文献(2)より)

	ŧ	ž.	題		. 7	Ť-	-9-	数	盘				地	Í	t			土	質	<u>.</u>		ħ	基準	貫入	試験(ハ	値)		
住状図 番 号		查	E 内	査	١t		区分	土 層 数	個	资料额 類	第一層下端深度	第二層下端深度		第一地層地質名	第二地層地質名	第一層下端深度	第二層下端深度		第一土層土質名	第二土層土質名	武 験 一回目	一回目始深度		台架度 試験開	最終 開 開	一回目№値回数	二回目》值回数	

2. ボーリングデータの収集・整備

2-1 最新名古屋地盤図資料編データベース

(1) 最新名古屋地盤図の概要

昭和44年に名古屋市域では、都市地盤図の整備という全国的な動きと社会的な要請に答えて「名古屋地盤図」が出版された。この地盤図は 1641本のボーリング柱状図と 390の土質試験データを掲載していたが、出版後まもなく品切れとなった。そこで、土質工学会中部支部では、昭和55年から名古屋地盤研究委員会を設け、名古屋地盤図改訂出版についての検討・準備の作業を始めた。そして、昭和58年に当時の土質工学会中部支部関係者ならびに中部地質調査業協会をはじめ専門家 44名の研究・討議の結果、単に前回の改訂版ではなく、多くの点で独特の最新性を備えた「最新名古屋地盤図」および「名古屋市域地質断面図」が発刊された。

その主な特長は、① 収集した全ての資料をデジタル化して図形表示は計算機を用いて実施していること、② 名古屋地域の地質構成を東西 11 断面、南北 9 断面で表現して地盤の全体構造が詳細に理解できるようにしたこと、③ 地盤図 に掲載されたデータを主に地盤や防災の研究者を対象に公開したことである。

(2) データの収集と数量

地盤資料データは、その使用目的を"最新名古屋地盤図の作成に限る"という条件で、建設省中部地方建設局・運輸省第五港湾建設局・郵政省東海郵政局・JR東海・日本道路協会名古屋建設局・住宅都市整備公団中部支部・愛知県の土木部と住宅供給公社・名古屋港管理組合・名古屋高速道路公社・名古屋市の建設局、土木局、交通局、下水道局、水道局、計画局と公害対策局・NTT東海・中部電力・東邦ガス・名鉄・近鉄などの公共機関および法人から提供していただいた。このように収集したボーリング柱状図は約12,000本あったが、その中から4172本を精選し、表-1に示した数量の室内および原位置試験の結果とともにデータベース化され資料編に掲載されている。

表 - 1 最新名古屋地盤図の資料編掲載の試験数

(文献(4)より)

試験	項目	ボーリング 柱 状 図 数	試験数
標準貫	入試量	₹ 4,172	95,702
土質試験	力学・物	理 714	1,873
	物	理 363	5,227
孔内水平	載荷試験	₹ 407	1,112
現場透	水 試 影	₹ 351	506

表-3 名古屋地盤図における地質層序(文献(2)より)

地	質	時	代	地 層	名 記	夛
		沖 秋 (完衆	攂	沖積層(南陽層)	A	
新	第			漁尾層		
				〔第一碟層〕 鳥居松碟層	D ₅	
生	122	洪和	¥ 111	大會根層	D ₄	
=	紀	()		帝 (大) (本) (本) (本) (本) (本) (本) (本) (本) (本) (本	D _{tU} D _{tL}	
	"			海部・弥富界層	Dm	
代				八事・唐山層	D _{1.2}	
	第三紀	鮮 爱		瀬戸層群 東海層群 (矢田川累	層) P	

(3) データファイルの構成

(a) ボーリング位置と柱状図番号

各ボーリング柱状図には、調査位置を示す柱状図番号が付けられている。それは、国土地理院の 1/25,000 の地形図に相当して大区画(A~J)を決め、大区画を縦・横 10 等分し 00~99 の中区画番号を決めている。さらに中区画を縦・横 4 等分して 11~44 の小区画番号が決められ、最後に小区画を縦・横 2 等分して 1~4 の細区画番号が決められている。そして、最終的には縦 115 m・横 140 m のメッシュが最小となっている。

(b) 柱状図ファイル

選定資料はいわば原資料に相当し、土質の記号表示は、柱状図に記載されている現場土質名をそのまま表-2に示す項目をコーディングしている。標高は、調査地点の地盤高を東京湾平均海面 (T.P.) で示している。

地質は、表-3の層序表に基づいて、地質の専門家による判定結果を地層記号として表記した。なお、盛土・埋土・表土・農耕土等は、厚さ1m以上で土質名がわかる場合には地質記号として「B」の記号を用いた。

土質名は、表 - 4 のコードを用いて3桁の数字の組合せで記号化した。

(c) その他の試験ファイル

土質試験データについては 7100試料について,表 - 5 に示す 30 項目について掲載している。孔内水平載荷試験と現場透水試験データについては, それぞれ 1112 個と 506個と数が少なかったことから,原資料より入力用の一覧表を作成し,表 - 6,7 の項目で掲載している。

(4) データベースの利用状況

最新名古屋地盤図資料編データベースは、土質工学会中部支部の要請により名古屋地盤図出版会が交付するもので、交付申請者は中部支部に利用目的を提示することになっている。そして、交付を受けることができる人は、① 土質工学会会員およびその関係者が研究目的に利用する場合、②公共・公益機関が公共・公益事業の目的に利用する場合、に限定されている。また、これらの地盤情報データベースを利用して得られた結果に対する責は利用者が負うことになっている。

現在までの利用目的を図 - 1 に示すと, 地盤の増幅特性や液状化危険度の算定など " 地震防災に関連した研究 " が 44 % でもっとも多く, 次いで " 公共施設の設計 " 20 %, " データの統計解析 " 16 % などと続いている。

表 - 4 現場土質名コードおよび土質記号(文献 (2) より)

											_				_	
主	:	6	Z	Ę	<u>.</u>		1	Í	R	号	.	補	İ	助	配	号
±	質	名	± 質 コード	[大図	记号	±	質	名	土 質 コード	固大图	污	±	質	名	土質コード	図式記号
丧		±	000	\triangleright												
粘		±	100			粘	±	質	10			粘土	:\$	じり	1	
シ	ル	ŀ	200			シ	ルト	質	20		11	シル	·ት \$	ヒり	2	بمسمع
	砂		300			砂		質	30			砂	ŧ i	じり	3	
砂		碟	400	000	000	凝	灰	質	40	A^^	A ^A	1	ŧ	<u>ل</u> . با	4	30°
亚		炭	500			有	機	質	50	, YY	, Y ^Y	玉	5\$	じり	5	စ
既	植	±	600	Y Y Y	Y Y Y	固		耤	60			1	t S	じり	6	8
岩		盤	700			微		細	70			腐核	物	tti	7	Y
٨	I	物	800	Z Z Z	W W	風		18	80		/	貝物	設・ま	腐れ	8	8 8
ŧ	n	他	900			Ā		層	90			浮	石ま	t !	9	

表-5 室内土質試験ファイル登録項目 (文献(2)より)

1	柱状	図番号	16	日本	統一土質分類
2	試料	番号	17	現場	土質名(上部)
3	採取	上端深度	18	現場	土質名(下部)
4	採取深度	下端深度	19	土粒	子比重
5	地層		20	自然	含水比
6		磔 分	21	湿潤	密度
7	粒	砂分	22	_	一軸圧縮強度
8		シルト分	23	軸	破壊ひずみ
9		粘土分	24	軸圧縮試	変形係数
10		最大粒径	25	験	鋭敏比
11		60%粒径	26	三軸	排水条件
12	度	30%粒径	27	三軸圧縮試験	粘脅力
13		10%粒径	28	試験	せん断抵抗角
14	液性	限界	29	-	圧密降伏荷瓜
15	塑性	限界	30	圧密試験	圧縮指数

表-6 孔内水平載荷試験ファイル 表-7 現場透水試験ファイル 登録項目(文献(2)より) 登録項目(文献(2)より)

1	柱状図番号	6	降伏圧力	1	柱状図番号	4	透水係数
2	試験番号	7	破壞圧力	2	試験番号	5	測定方法
3	測定深度	8	変形係数	3	測定深度	٠.	
4	現場土質名	9	試験方法		·	_	
5	初期圧力						

2-2 地盤情報に関する意識調査

(1) 最新名古屋地盤図に関する意識調査

名古屋地盤データバンク研究委員会では、前述した 「最新名古屋地盤図」の利用状況ならびに今後の地盤情報のあり方に関して、購入者を対象としてアンケート調査を実施した。ここでは、その中で主要な項目に対する結果を図-2にまとめて、地盤図の一般的な利用者の意識について考察する。なお、アンケートの発送は657通であり、回答は296通(回収率45%)であった。

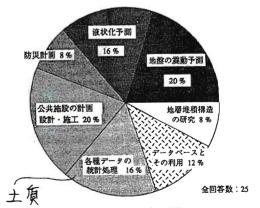


図 - 1 最新名古屋地盤図資料編データベース の利用目的(文献(6)を加筆)

はじめに、データ収集範囲であるが、"最新名古屋地盤図の範囲のままで良い"との回答はわずか18%であり、"濃尾平野を中心とした範囲"が42%ともっとも多く、残りも"名古屋市の周辺地域を含めてほしい"との回答であった。この結果から、地盤図の範囲は行政区画ではなくて、平野域とその周辺地域などのように地質的な範囲とすることが強く要望されていることが分かる。

次に、ボーリング柱状図の密度であるが、この地盤図では縦115 m・横140 mのメッシュ毎に代表的なものを一つ掲載する方式を取っており、この程度で良いとの回答が40%ともっとも多かった。しかし、"メッシュを1/4に細分化せよ"という回答が28%、"メッシュ毎の代表ではなく全て収録せよ"が31%あり、約6割の人が密度を上げて欲しいという要望を持っていることが分かる。また、ボーリング柱状図位置の表示方法についても、"この地盤図のようなメッシュ方式で良い"との回答が42%ともっとも多かったが、"地図上へのプロット方式"や"緯度・経度による座標値方式"などでより詳細な位置を知りたいとの回答が合わせて58%もあった。このように、ボーリング柱状図位置の正確性を高めて、より多くの情報が欲しいという要請が強いことが分かる。

最後に、今後の地盤情報の供給の形態を伺ったところ、書籍とデータベースの希望者が半々であった。

図 - 2 最新名古屋地盤図に関する 意識調査の結果(文献(6)を加筆)

(4) 今後の地盤情報の形態は

どのようなものが良いか

(3) ポーリング柱状図の位置の

表示方法はどれが良いか

(2) 地盤情報に関する意識調査

次に、名古屋地盤データバンク研究委員会が、濃尾平野内の公共機関の地盤関連の部署を対象として実施した「地盤情報に対する意識調査」の結果の中から主なもの紹介する。このアンケートの発送総数 242 通であり、そのうち回答数 103 通であり、回収率は 43 % であった。

はじめに、地盤調査資料に対する認識を伺ったところ、"非常に重要と考えており、収集整備が必要"との回答が69%もあった。また、"あまり重要ではないが、収集整備されておれば便利"の回答が29%あり、既存の地盤調査資料の収集整備が必要性はほとんどの人が認識していることが分かる。

しかし、部署の仕事に関連して、過去の地盤調査資料の利用状況を伺ったところ、"しばしば利用する"との回答が40%に対して、"あまり利用しない"51%、"まったく利用しない"9%であり、現状では利用できていない部署の方が多かった。

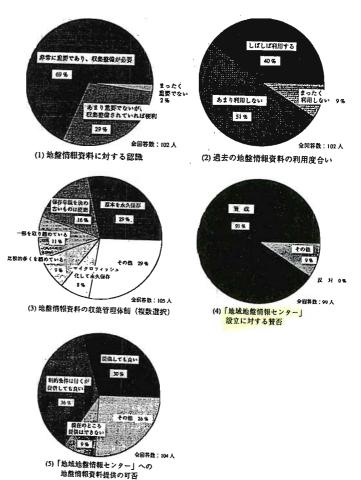


図-3 地盤情報に関する意識調査の結果 (文献(6)を加筆)

さらに、地盤調査資料の収集・整備体制について伺ったところ、"地盤調査資料の原本を永久保存"29%、"マイクロフィッシュ化して永久保存"8%、"地盤調査資料内の一部を取り纒めている"11%、"比較的多くの情報を取り纒めている"9%、"保存年限を決めて古いものは廃棄処分にする"16%、"その他"29%となっている。その他の内容は、"収集管理体制がまったくない"、"データが整備されていないため不明"、"重要な資料のみ保存"というものが多かった。この結果から、地盤調査資料が保存されているものの積極的な利用を目的として加工・保存されているものはわずか2割であることが分かる。

地盤調査資料を積極的に加工している部署では,多 くの地盤情報をデータベース化して管理・利用できる体 制を作り上げている機関,多くの地盤情報を図表化して いる部署,調査項目リストや調査地点を地図上にプロッ トしている部署などがあった。しかし,一方では,廃棄 処分している部署もあり,その際の保存年限に関する回 答をみると,工事完了後廃棄,会計検査後廃棄,2~3 程度保存,5年程度~10年以上保存のように,各部署に よって大きくばらついている。

以上のように、「地盤調査資料の収集・整備が必要であるという認識が強いが、一方では、地盤調査資料を保存する一定に基準的な方法が確立されていない」ことが明瞭に現われている。

地盤情報データバンク委員会で提案する「(仮称) 地域地盤情報センター」設立に関する賛否・意見を伺っ たところ、91%の部署の方の賛成を得た。

さらに、このセンターへの資料提供の可否と意見を 伺ったところ、"提供可能"30%、"制約条件は付くが 提供可能"36%、"提供できない"9%、"その他"26%、の回答であり、合わせて約7割の部署から資料提供 可能との回答を戴いた。そして、制約条件に関する指摘 の多かった順から、"提供した地盤調査資料の利用目的 を限定する"、"現在計画中・施工中の資料は提供できない"、"提供できる調査結果の種類を限定する。"であった。また、地盤調査資料を提供できない理由としては、 "営利目的で利用される可能性がある"との回答が8件、 "資料を利用した際の責任問題が不明確との回答が4件"、"法的な裏付けがない"との回答が2件となっており、 これらは克服しなければならない重要な課題である。

2-3 地盤情報データベースに関する諸権利

地盤情報を 2 次利用するために収集・整備してデータベースを作成して利用する際には、元の地盤情報に係わる著作権と所有権について検討しておく必要がある。 ここでは、地盤情報データバンク委員会がまとめた見解を紹介する。

(1) 著作権について

昭和61年の著作権法改正により、「データベース」は「論文、数値、図形その他の情報を電子計算機を用いて検索することができるように体系的に構成したもの」と定義され、百科事典のような「編集著作物」ではなく、創作的知的作業によって作成されたものであることから、データベース全体が一つの「著作物」として保護されることになった。したがって、地盤情報データベース自体には著作権が存在する。

一方,データベース内の個々のデータの基になる地盤調査報告書についての著作権はどうであろうか。著作権法では,「著作物とは,思想又は感情を創作的に表現したものであって,文芸,学術,美術又は音楽の範囲に属するものをいう」とある。この観点では,地盤調査報告書の試験データは客観的事実そのものであり,思想・感情の創作的表現物とは言えないので,著作物の対象外と考えてもよいと思われる。ただし,観察記事や推定地層断面については創作性があれば著作物であるため,これらを含めてデータベースを構築する場合には,著作権問題に配慮する必要がある。

(2) 所有権について

地盤調査報告書に記載されたデータを第三者が利用 しようとする場合には、その所有権者の許諾が必要にな る。この所有権の問題は、地盤情報が公共・公益事業の 実施に伴って得られる公共的地盤情報であるか、個人ま たは民間企業の活動に伴って得られる私的地盤情報であ るかによって大きく異なる。

はじめに、公共的地盤情報は、もともとの公共・公益事業が各地域内の住民の生活基盤の整備や福利厚生を主目的として実施されていることを考えると、付帯的に得られた地盤情報も各地域住民の財産とも考えられる。したがって、公共的地盤情報の公開・二次利用が、地域の地盤防災的な目的で有効に還元されれば、"目的外使用の禁止"や"公務員に課せられた守秘義務"の適用には当たらないと考えられる。

次に、私的地盤情報の所有権は、地盤調査業者から 地盤調査報告書が納入され、対価が支払われた時点で発 注者に移行したものと考えられる。しかし、建設工事等 の請負形式によっては設計者や工事施工者が地盤調査の 発注者になる場合もあり、その所有権の帰属先を明確に しておく必要がある。そして、学会として所有権に対し て、"地盤情報が社会の共有財産であるとの認識"の風 潮を高めて、私的地盤情報の提供を社会に啓蒙すること の先導的役割を果たす必要がある。

2-4 地域地盤情報センター

地盤情報データバンク委員会では、既存の地盤情報を地域毎に共有財産として一元的に管理するための推進 母体として「(仮称)地域地盤情報センター」設立の必要性を指摘している。このセンターの考えられる業務および関連学協会との関連を概念的には図 - 4 に示す。

その業務としては、次の3つが挙げられる。

① データ管理業務: データの入出力およびデータベースシステムの管理

②調査・研究業務:データの信頼性評価,地域の地

盤特性解明のための調査・研究

③公開管理業務 :データの公開および管理,刊行

物等の出版

この中で②の業務の一つであるデータの信頼性評価は、個々のボーリング情報だけでは判断できるものではなく、地域の共有地盤情報データベースシステム体制が確立して、周辺地域の情報を評価対象として初めて実現可能となる。

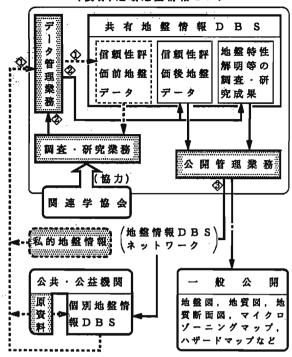
3. ボーリングデータの利用

3-1 地層断面図の作成

(1) 名古屋市の地形概要

名古屋市は日本でも有数な平野のひとつである濃尾平野の南東に位置し、その地形は図-5に示すように南西部には沖積平野が広がり、北東部には洪積台地や丘陵地となっている。また、熱田神宮周辺から名古屋港にかけては17世紀以降の干拓地・埋立地であり、ほとんどすべて海抜ゼロメートル地帯である。そのため、昭和34年の伊勢湾台風の際には、洪水・高潮によって市内だけでも死者・行方不明者 1909人という大きな被害を受けた。

(仮称)地域地盤情報センター



一般公開地盤情報の流れ

図 - 4 (仮称) 地域地盤情報センターの業務 (文献(2)より)

(2) 沖積層の分布マップ

最新名古屋地盤図資料編データベースのボーリング 柱状図から沖積層厚を算定し5m毎に分類したものを図-6に示す。この図から沖積層が厚く堆積する地域は、 前述の干拓地・埋立地と、庄内川の流域である西部一体、 さらに東部では山崎川や天白川の流域に分布していることが分かる。

(3) 地層断面図の作成

資料編データベースの柱状図は,「名古屋市域地質断面図集」の東西 11 断面,南北 9 断面の合計 20 の断面図作成に利用された。各断面線の間隔は約 2 km である。この断面図には,断面線に沿った約 1800 本の柱状図が使用され,図-7の例のように図中に出力されている。これらは,地域の地盤の専門家によって作成されたものであるが,データベースを活用することによって大幅に作業が短縮できた。また,図の西側で洪積層基底面が不明のように,地質断面図を作成する場合には,100m以上の深い柱状図はないことが多いために不明確な部分が存在する。これは,断面図の作成はボーリングデータの 2次利用であるかぎり仕方のないことかもしれない。

3-2 液状化危険地域の予測

ここでは、地盤情報データベースの利用目的でもっとも高いものの一つである地震時の液状化危険度の判定を行なった例を紹介する。この例では、算定フロー(図-8)に示すように、柱状図データ・土質試験データ以外に土地条件図・地形分類図のデータを用いて予測精度を高めている。また、液状化抵抗係数 FL の算定には、

図 - 5 名古屋市域の地質概略図 (文献(4)に一部加筆)

地表面最大加速度を 200 gal として「道路橋示方書・同解説」(日本道路協会,平成2年)の方法を用いている。 (a) 土質試験データの補充

(4) 工具試験 アータの相比 データベースの柱状図の中には

データベースの柱状図の中には、土質試験の結果が あるものとないものがある。できるだけ多くのデータを 活用して液状化危険度の判定を実施するためには、必要 な土質試験データを補充する必要がある。ここでは、土

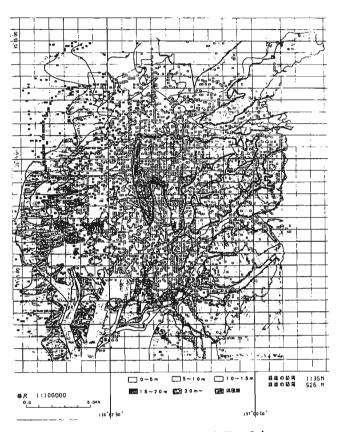
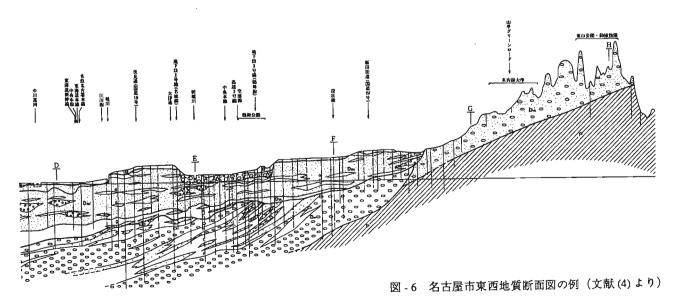


図-7 名古屋市域の沖積層の分布



質毎に,① 地下水面下の単位体積重量,② 細粒分含有率,③ 平均粒径,④ 液状化の可能性のある砂の含有率を集計して,代表値を表-8 のように求めて使用した。

(b) 地下水位の推定

液状化危険度の判定には、地下水位が大きな影響を 及ぼす。しかし、地下水位は季節毎に変動することが知 られ、柱状図に記入された孔内水位データは欠落してい るものが多い。したがって、この解析では中区画毎に孔 内水位を集計して、0m~4mの5つの中から最頻ラン クを求め、小さい値を水位として用いた。

(c) 微地形による液状化危険度の判定

過去の経験から表 - 9 のように地形分類ごとに液状化

表 - 8 土質試験データの平均値

名古屋地盤図 中の土質名称	地下水面下の単位 体積重量(tf/m³)	無粒分含有率 Fc(X)	平均粒径 D50 (mm)	液状化する可能性 のある砂"'(X)	砂層とし ての意み
砂	1.90 (76)	10. (151)	0.30 (373)	90. (373)	1.0
粘土質砂	1.85 (15)	35. (8)	0.15 (9)	44. (9)	0.5
シルト質砂	1.80 (53)	35. (40)	0.15 (88)	84. (88)	0.7
粘土選じり砂	1.85 (7)	25. (5)	0.20 (13)	77. (13)	0.8
シルト混じり砂	1.85 (23)	20. (31)	0.20 (67)	69. (67)	0.8
砂礫運じり砂	1.90 (8)	10. (29)	0.60 (77)	72. (77)	0.8
シルト	1.70 (248)	85. (52)	0.02 (101)	10. (101)	0.0
砂質シルト	1.75 (221)	70. {64}	0.04 (175)	10. (175)	0.0
砂碟	1.90 (12)	10. (73)	2.50 (205)	6. (205)	0.0

()内は資料数 #i: 粘土分合有率(Pe)が20X以下かつ平均拉径が(D50)0.072mx以上0.6mx以下の物

の可能性の高中低を決めて, 地盤情報データベースを利用したその他の判定と組み合わせることによって総合的な判定を行なった。

(d) 予測結果と過去の履歴地域との比較

図 - 9 に液状化危険地域の判定結果と過去の地震(濃 尾地震(1891)・東南海地震(1944)・三河地震(1945))で 液状化履歴があった報告されている地域を示す。

この図から地盤情報データベースを用いて算定された液状化危険地域は、主に沖積層の厚い地域に重なっており、過去の地震によると履歴地点も、庄内川流域などで良い一致を示していることが分かる。

表 - 9 微地形による液状化危険度の評価分類

液状化の可能性	地形からみた。判定
判定ランク:3 可能性が高い	提立地、水面上の盛土地 現、旧河道 発達が發弱な自然提防 後背湿地 砂丘と低地の境 砂丘間低地
判定ランク:2 場合によって可能性あり	上記以外の低地
判定ランク: 1 可能性が低い	・台地 ・丘陵 ・山地

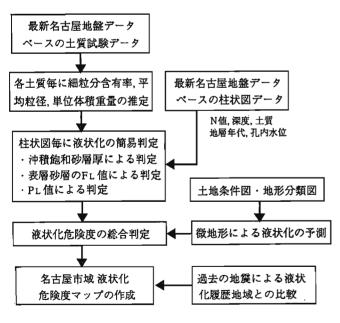


図 - 8 液状化危険地域の算定フロー

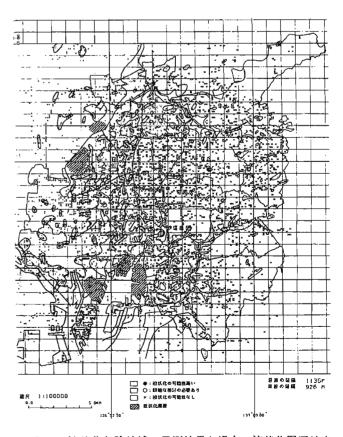


図 - 9 液状化危険地域の予測結果と過去の液状化履歴地点

3-3 表層地盤の卓越周期の算定

ボーリングデータの地震防災への利用としてもっとも 期待されているものは表層地盤の振動特性の予測であろう。ここでは、図 - 10 に示す算定フローに従って各柱 状図データから表層地盤の卓越周期を算定した。また、 その値の一部は、名古屋市内 140サイトで実施された常 時微動観測の結果と比較して検討してみた。

(a) せん断波速度推定式·密度推定式

ボーリング柱状図データから動的地盤モデルを作成するためには、N値・深さ・土質・地層からせん断波速度(Vs)と密度を推定しなければならない。ここでは、45本(915データ)のPS検層データを用いて、Vs推定式と密度推定式をそれぞれ図-11,12のように作成して実測データと比較してみた。これらの推定式の相関係数は0.87と0.79であり、特に大きな値に対する実測データが不足なため暫定的なものと言える。

(b) 表層地盤の周波数応答解析

表層地盤の卓越周期の算定は、ボーリングデータ毎に設定された動的地盤モデルに対して、1次元波動論による周波数応答解析の結果を用いた。その際、基盤は、共通のものを用いるべきではあるが、今回の解析では、ボーリング柱状図データを重視して、各データの下層でせん断波速度が最大となる層を基盤と見做している。

(c) 常時微動との卓越周期の比較

常時微動観測は、多賀・谷口らが昭和50年前後に名古屋市内の小・中・大学等の校庭、社寺境内、公園、団地の広場等の総計140地点で、主として深夜の静穏時に実施したものである。各サイトにおける常時微動の卓越周期は、約3~10分間の水平2成分の波形のフーリエスペクトルの卓越周期の平均値を採用した。常時微動の観測地点周辺のボーリングデータから得られた表層地盤の卓越周期と常時微動のものとの比較を図-14に示す。基盤までの深さで解析していないためにボーリングデータからの周期は、常時微動のものよりやや短めになっているが、両者は比較的良く対応している。

(d) 表層地盤の卓越周期の算定結果

図-15は、全ボーリング調査地点で1次元応答解析を行ない、表層地盤の卓越周期を求めたものである。この図から、卓越周期は、名古屋市の西南部の沖積層の厚い地盤で長く、東北部の洪積地盤が露出する地盤で短くなっていることが分かる。

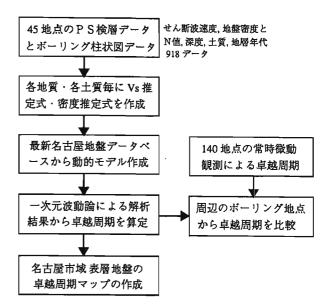


図-10 表層地盤の卓越周期の算定フロー

4. まとめ

名古屋地域を例として、ボーリングデータの収集・整備の問題点や利用例を報告した。地盤情報は地域の共有財産として一括管理することが望ましく、表層地盤の震動予測にためには各地層・土質毎のPS検層データの収集が重要であることが確認された。

< 参考文献 >

- 1) 矢島壯一: ボーリングデーターベースの標準化の試み, 土と基礎, Vol.37, 1989.1, pp.17-22.
- 2) 松澤 宏・西堀高弘・杉村昌広:地盤情報としての「最新 名古屋地盤図」, 土と基礎, Vol.37, 1989.1, pp.53-58.
- 3) 日本建築学会東海支部・土質工学会中部支部・名古屋地 盤調査研究会:名古屋地盤図,コロナ社,1969.
- 4) 土質工学会中部支部:最新名古屋地盤図,名古屋地盤図 出版会,1988.
- 5) 土質工学会中部支部:名古屋地域地質断面図集,名古屋地盤図出版会,1987.
- 6) 名古屋地盤データバンク研究委員会:委員会報告, 地盤 情報データベース化の現状と将来像に関するシンポジウム 発表論文集, 1993.12., pp.1-40.
- 7) 松澤 宏: 地盤情報データーベースにかかわる権利 地域 地盤情報整備に向けて - , 地質と調査, 1994, No.2, pp.40-46.
- 8) 多賀直恒・今岡克也・名倉繁樹・西澤崇雄: 地盤データーペースをもとにした名古屋地域の液状化予測, 第26回土質工学研究発表会, 1991.7., pp.983-986.
- 9) 小磯利博:名古屋市域における地盤構造の推定とその応用,名古屋大学工学部建築学科卒業論文,1991.3.
- 10) 飯田汲事・多賀直恒・正木和明:名古屋地盤の常時微動に関する調査,名古屋市防災会議,1976.3.
- 11) 多賀直恒・酒井利銀, 宮崎正:常時微動計測による地盤・ 構造物の振動特性 - 名古屋市域測定例 - , 日本建築学会論文 報告集, Vol. 307, 1981.9., pp.58-65.
- 12) 谷口仁士:常時微動による地盤の振動特性および地震動 災害に関する研究,愛知工業大学修士論文,1976

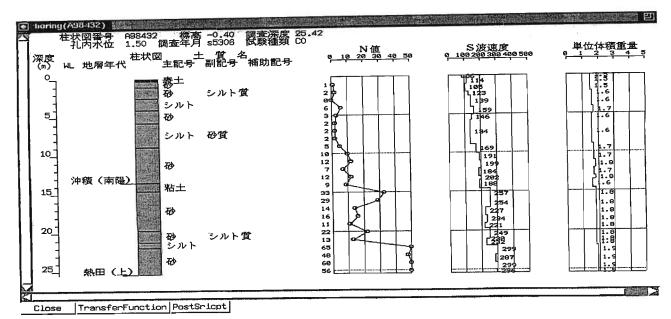


図-13 ポーリング柱状図と動的地盤モデルの例

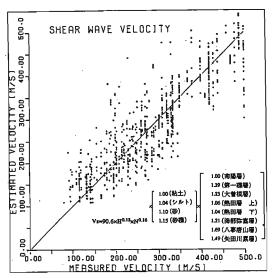


図-11 せん断波速度推定式と実測値との比較

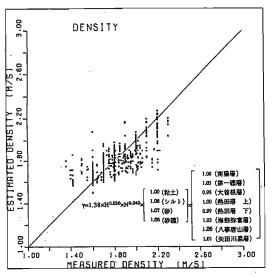


図-12 密度推定式と実測値との比較

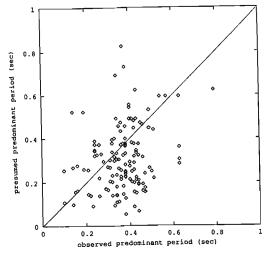


図 - 14 常時微動観測と数値解析による 表層地盤の卓越周期の比較

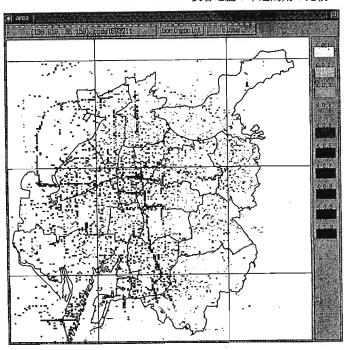


図-15 表層地盤の卓越周期の推定結果

国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング

THE DIGITAL NATIONAL LAND INFORMATION AND SEISMIC MICROZONING

松岡昌志*,翠川三郎**

Masashi MATSUOKA and Saburoh MIDORIKAWA

As the GIS database for seismic microzoning, the Digital National Land Information (DNLI) is introduced. The DNLI is a nation-wide database consisting of natural and socioeconomic attributes. The geological and geomorphological data, which will be useful for seismic microzoning, are given for the standard mesh with 1 x 1 km's size. A procedure for seismic microzoning using the DNLI is also introduced. In this procedure, the site amplification capability and liquefaction susceptibility are evaluated at each standard mesh. Then, ground motion and liquefaction potentials are mapped for a hypothetical earthquake.

1. はじめに

近年の研究の発展により、地震の震源パラメータ、震源から対象地点までの伝播経路および地点直下の地盤構造を把握することによって、その地点での地震動強さを予測することが可能となってきた。しかし、このようにして得られる値は「点」での値であり、地域の地震動災害を予測する上では「点」から広がりをもった「面」での地震動強さを推定する必要がある。さらに、地震動に起因する各種の地震危険度を総合的に予測しておくことは、地域の地震防災対策計画や災害復興計画をより合理的に進める上で重要である。このことは国や自治体に強く認識されており、県や都市を対象とした地震被害想定について研究、検討がなされているいの。

しかし,近年首都圏をはじめとして,大都市域では 都市相互の関係は非常に密接化しているため,行政区域にとらわれずに,さらに広域の都市群に対して地震 危険度を総合的に評価することが望まれる.また,地 震危険度の評価項目としては,震度,液状化危険度, 建築物の被害,ライフラインの被害などがあり,これ ら多数の項目に対して地域的な分布を総合的に取り扱 う必要がある.

このような多数の地点での多種の情報を取り扱う手段として、地理情報システム(GIS)が多くの分野で用い

られるようになってきた 6^{10} . GISとは、空間的位置に基づいた情報の収集とそのデータベースの作成にはじまり、空間的に分布する多数のデータからある目的のために必要な情報を取り出し、それを解析して、その目的にかなう新しい情報を生み出し、その結果を出力するといった一連の流れを取り扱う情報処理システムである 6^{10} . 従ってGISは単なる地図表示ではなく、「混沌」とした多数のデータの中から、ある目的にかなった「秩序」ある新しい情報を生み出すための道具といえる.

GISをサイスミックマイクロゾーニングに応用できれば、実際の被害や予想される被害から適切な緊急対応や防災対策が可能となるであろう。そのためにはデータベースが必要となるが、新たに作成するとなると膨大な時間と労力が要求される。従って、既存のデータベースが利用できれば労力が大幅に削減できる。

日本全国を網羅した地盤情報を含むデータベースとして国土数値情報がある⁸.このデータベースには、海岸線、標高、河川流路といった地形情報や表層地質、地形分類、土壌分類などの地盤情報が含まれている.ただし、従来サイスミックマイクロゾーニングで用いられてきた地盤データベースと異なり、地盤の深さ方向の情報は含まれていないので、これから地盤のS波速度構造やN値の分布を直接推定することは非常に困難で

Research Assoc., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng. Assoc.Prof., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{*}東京工業大学総理工社会開発工学専攻 助手・修士(工学)

^{**}東京工業大学総理工社会開発工学専攻 助教授・工博

ある.しかし、比較的地表に近い地盤状況が抽出されることが期待でき、マイクロゾーニングに活用できる ものと考えられる.

ここでは、GISデータベースとしての国土数値情報の概要を紹介し、これを利用した震度分布予測および液状化危険度分布の予測手法について述べ、首都圏での計算結果について示す、なお、ここで示す手法はすでに発表したもの⁹⁾⁻¹¹⁾に若干の改良を加えたもの¹²⁾で、計算結果も若干異なっている.

2. 国土数値情報の概要

国土数値情報の整備は、昭和49年の国土庁が発足したことに伴い開始された国土情報整備事業の一部として行われてきており、実際のデータ作成は、国土庁のほかに建設省国土地理院、海上保安庁、気象庁、地方公共団体などの関係機関の協力により実施されてきたり、平成4年9月現在までの、国土数値情報のデータ整備の経過を表-1に示す。昭和49年度に海岸線データが整備されたのをはじめとして、次年度は標高や土地分類といった自然条件にかかわるもののほとんどが整備されている。その後、次々と新しいデータが整備されるとともに土地利用や公共施設、地価公示などは追加や修正が繰り返されて現在に至っている。

これまでに整備された国土数値情報は表-2に示すように、大別すると①自然条件に関するデータ、②国土の骨格に関するデータ、③法規制指定地域等に関するデータ、④施設等に関するデータ、⑤土地に関するデータ、⑥沿岸域に関するデータ、⑦経済・社会に関するデータに分類される。

自然条件に関するデータとしては、標高、起伏量、 土地分類、河川流路、海岸線などがあげられ、国土の 骨格に関するものでは行政界の位置、道路・鉄道の位置などが整備されている。法規制指定地域等は各種法 律で定められた開発振興指定地域、都市計画区域、国立公園等に関するデータがある。施設に関するデータ としては、官公署・病院・学校等の公共施設及び文化 財等であり、土地に関するものとして、土地利用面積 や地価公示に関するデータが整備されている。沿岸域 に関するものとしては、水深・波浪等の自然的条件、 港湾等の施設、区域指定、土地利用、埋立・干拓区域 等の沿岸構造に関するデータがある。最後に経済・社 会に関するデータには通産省の工業統計調査や商業統 計調査、農水省の農業センサスデータが含まれる。た だし、これらのすべてが公開されているわけではない。

これらのデータの内, サイスミックマイクロゾーニングに利用できそうなものの内容をみると. 海岸線や

表-1 国土数値情報の整備経過[文献8)より抜粋]

作成年度	
	海岸線(海岸線の位置,延長等)
昭和50年度	地形(標高,山岳標高,平均・最高・最低標高
	起伏量,傾斜量)
	土地分類(表層地質,地形分類,土壤,谷密度)
	湖沼(水涯線の位置, 湖沼面積)
	行政界(行政界の位置, 市区町村の面積)
	指定地域(開発振興,都市計画,自然環境保全
	に係わる指定地域の有無など)
	文化財(文化財の位置, 散布度)
昭和51年度	土地利用(分類別土地利用面積)
昭和52年度	流域(河川流路, 流域界, 水文観測所の位置等)
	砂防指定地域
昭和53年度	道路・鉄道(道路・鉄道の位置,道路密度)
昭和54年度	地価公示(標準地の位置,公示地価等),土地分類
昭和55年度	公共施設(官公署,公園,学校,病院,
	社会福祉施設の位置), 指定地域, 地価公示
昭和56年度	公共施設,指定地域,地価公示,標高,海岸線
昭和57年度	公共施設,地価公示,海岸線,気候値
昭和58年度	公共施設,地価公示,道路(高速自動車道)
	鉄道,気候値
昭和59年度	公共施設, 地価公示, 道路(国道・都道府県道)
	標高,沿岸域,気候値
昭和60年度	公共施設,地価公示,指定地域,沿岸域,気候値
昭和61年度	公共施設,地価公示,道路・鉄道,沿岸域,気候
昭和62年度	公共施設,地価公示,土地利用,沿岸域,気候値
昭和63年度	公共施設,地価公示,土地利用,沿岸域,気候値
平成元年度	公共施設,地価公示,都道府県地価調査,
	土地利用,沿岸域
平成 2年度	公共施設,地価公示,都道府県地価調査,鉄道,
	指定地域(都市計画区域),沿岸域

表-2 国土数値情報の種類

分類項目	内 容
①自然条件に関す	標高,起伏量,傾斜,地形分類,
るもの	表層地質, 土壤, 谷密度, 河川流路,
	流域界,海岸線,湖岸線,気候等
②国土の骨格に関	行政界の位置,道路・鉄道の位置,
するもの	道路の密度等
③各種法規制指定	首都圏整備法・近畿圏整備法・
地域等に関する	中部圈開発整備法,農業振興法・
もの	山村振興法等の開発振興指定地域,
	都市計画法による都市計画区域等,
	自然公園法による国立公園等
④各種施設等に関	官公署・病院・学校等の公共施設
<u> するもの</u>	及び文化財等
⑤土地に関するも	土地利用面積(15分類), 地価公示,
<u></u> の	都道府県地価調査
⑥沿岸域に関する	水深・波浪・潮流等の自然条件,
もの	港湾・マリーナ等の施設,港湾区域・
	漁業区域等の区域指定、沿岸土地利用現
	況,埋立・干拓区域等の沿岸構造等
⑦経済・社会に関	通産省の工業統計調査及び商業統計調査、
するもの	農水省の農業センサス

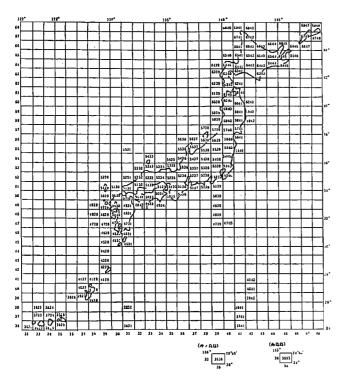


図-1 標準地域メッシュの1次メッシュ区画 [文献8)より抜粋]

河川流路などは連続する座標値で表現したベクトル型データで与えられ、地形(標高など)、土地分類(表層地質、地形分類、土壌)などはラスター型データでメッシュ単位にその属性が与えられている。国土数値情報ではそのメッシュの決め方に3段階の標準地域メッシュシステムを採用している。これは、まず、20万分の1地勢図の大きさに相当する1次メッシュを図-1のように定め、次に、この1次メッシュを縦横それぞれ8等分することで2次メッシュを得る。これは2万5千分の1の地形図の大きさに相当する。さらに、2次メッシュを縦横10分割して3次メッシュ(基準地域メッシュをが横ちれる(図-2参照)、基準地域メッシュの大きさは、緯度方向で30秒、経度方向で45秒(約1x1km²)であり、日本全国が約39万の基準地域メッシュに分割されている。

土地分類はこの基準地域メッシュに対してその属性が与えられている。その内容には、表層地質データとして、未固結堆積物や火山性岩石などの岩石の区分、岩体及び岩片の硬軟を示す岩石のかたさ、沖積世、洪積世といった地質の形成年代、そして、断層の有無が数値化されている。地形分類データは主分類と副分類から構成され、主分類には三角州性低地、ローム台地、山地といった地形分類、副分類はそれを補う分類であり、埋立地や人工改変地などが記されている。土壌データには褐色森林土壌や黒ボク土壌などが含まれる。これらのデータは国土庁の縮尺10ないし20万分の1の土地分類図に基づいている。標高データは国土地理院の

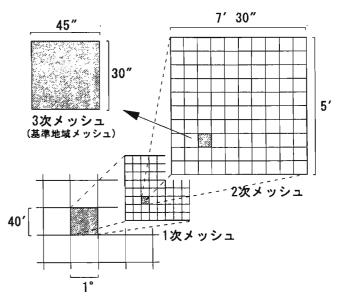


図-2 メッシュ分割の概略図

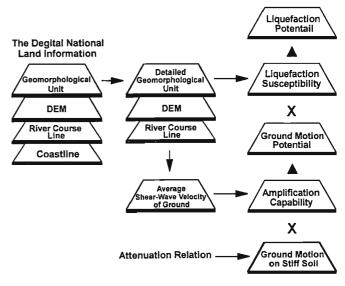


図-3 地震危険度予測手法のフロー

縮尺2万5千分の1の地形図に基づいたもので,基準地域 メッシュをさらに縦横4分割した分割地域メッシュ(約 250x250m²)に対して値が与えられている. なお,基準 地域メッシュごとの地盤情報はそのメッシュ内の占有 面積の大きい地盤条件に対応する.

3. 国土数値情報を利用したサイスミックマイクロゾー ニング

国土数値情報を利用したサイスミックマイクロゾーニングの1例として、震度分布予測および液状化危険度予測について紹介する。予測手法のフローを図-3に示すとおりで、国土数値情報から各地点での地盤の揺れやすさと液状化のしやすさを抽出し、想定地震時の危険度を評価するものである。

震害予測のための地震動強さとしては地震動の周期

特性を反映した応答スペクトルが用いられる場合が多いが、スペクトルを推定できるほど詳細な地盤情報を国土数値情報から得ることは期待できない。そこで、本研究では、地震動強さを表す単一の尺度としては最も適切なものの一つと考えられている最大速度振幅¹³⁾を採用する。最大速度振幅は、各種構造物の被害^{13)・13)}や液状化発生¹⁶⁾を評価するための尺度として適当であることや高震度で気象庁震度階との相関が高いこと¹⁷⁾が指摘されている。また、最大速度振幅の値は地盤の非線形性の影響を受けにくい^{16),18)}ため、振幅の小さな場合の結果を大振幅の場合に適用しても大きな誤差を生じないことも最大速度振幅を用いる利点のひとつである。

地盤のS波速度構造がわかれば地盤による地震波の増幅特性を解析的に評価できる¹⁹⁾が、増幅特性を評価する簡便な物理量として、地表からある深さまでの地盤の平均S波速度が有効であることが指摘されている²⁰⁾ ²⁵⁾. 図-4は、1987年千葉県東方沖地震の強震記録から抽出された最大速度振幅に対する地盤の増幅度[ARV]と深さ30mまでの地盤の平均S波速度[AVS]との関係²⁵⁾を示している。この平均S波速度とは深さ30mから地表までのS波の伝播時間を30mで除したものである。ここで、第三紀ないしそれ以前の地盤の丘陵地(AVSが600m/s程度)を基準の地盤とし、この地盤での増幅度を1としている。この関係は(1)式で表現できる²⁵⁾。ただし、AVSの単位はm/sで、式の最後の値は標準偏差を示している。

log ARV = 1.83 - 0.66 log AVS
$$\pm$$
 0.16 (1) (100 < AVS < 1500)

従って、国土数値情報に含まれる情報から任意の地点の地盤の平均S波速度が推定できれば、この式により地盤の平均S波速度を地盤の増幅度に変換できる。そして、増幅度分布を既往の距離減衰式により得られた基準地盤での地震動強さに乗じることで、最大速度振幅で評価した震度分布が得られる。

次に、液状化危険度の評価について考えてみる. 過去の地震による液状化履歴から、液状化発生の難易と微地形分類との間に密接な関係があることが指摘されている²⁶⁾⁻³⁰⁾. 数量化理論による解析結果においても、多数の土質的要因の中で微地形が液状化発生に大きく影響していることが確認されている³¹⁾. 地形分類とは、地盤の成因、形態、構成する物質、形成時代がそれぞれの基準の中において等質となるものをまとめたものであり³²⁾、地盤の構成と密接な関係がある.

そこで、液状化発生を評価するための地震動強さの 尺度として最大速度振幅が有効であること¹⁰⁾をふまえ

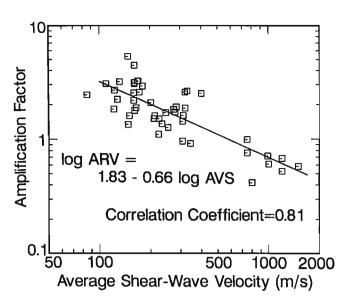


図-4 最大速度に対する地盤の増幅度と深さ30mまでの 地盤の平均S波速度の関係[文献12)による]

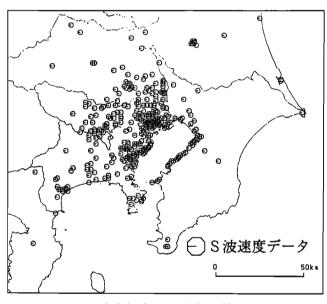


図-5 S波速度データの分布[文献9)による]

た上で,各微地形での液状化を発生せしめる最大速度 振幅が提案され³³⁾,微地形分類のみから液状化発生の 有無を推定することが可能となっている.この手法は 地盤調査資料を必要としないことから広い地域に対し て液状化危険度を予測する場合には非常に有効な手法 と考えられる.

そこで、国土数値情報に含まれる地形学的情報から 液状化予測に必要な微地形に分類し、対象地域に対し て微地形分類図を作成し、これに前述の予測震度分布 を重ね合わせ、液状化危険度が評価できる.

4. 震度分布予測

4.1 地盤の平均S波速度の推定

ここでは、地盤の平均S波速度と国土数値情報に含まれる地盤情報の相関を検討し、地盤の平均S波速度を推

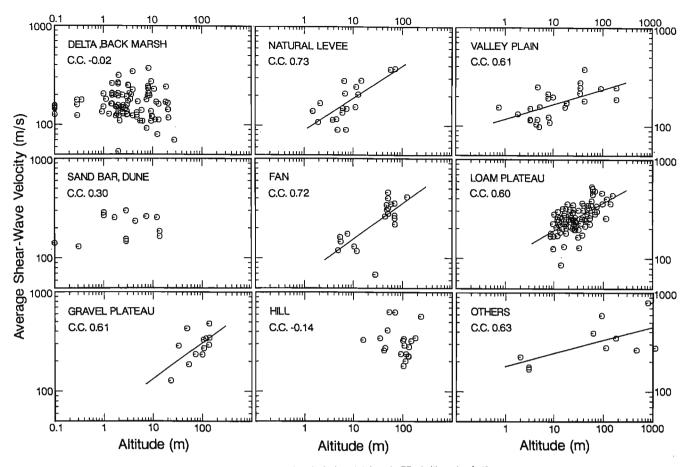


図-6 微地形の平均S波速度と標高の相関[文献12)による]

定する経験式を導くことをを試みた、地盤のS波速度のデータベースはすでに整備されており、このデータベースは関東地方を対象に538地点でのデータから成っている⁹. これから地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度を計算した、平均S波速度の得られた地点数は459地点で図-5にその分布を示す.

ある程度の深さまでの地盤の平均的特性は、地盤の 形成過程を反映している地形分類^{32),34)}と相関が高いと 考えられる.しかし、国土数値情報の地形分類は比較 的粗いため、まず、国土数値情報に含まれる地形学的 情報を基に、地形分類から微地形分類に細分類を行っ た.そして微地形分類ごとに地盤の平均S波速度と地理 的条件との関係を検討した.細分類の手順の概要は5章 に示されており、詳細は文献11)を参照されたい.

図-6に各微地形分類での地盤の平均S波速度と標高との関係を示す.これより,両者のバラツキは大きいものの,微地形によっては標高が低い程,平均S波速度が小さいことがわかる.この理由のひとつは,地形の堆積環境を考えてみると,同一の地形であっても河川の上流と下流では堆積物の構成が変化していて^{32),35)},下流ほど堆積物は細粒になり地盤のS波速度が小さくなる傾向にあることがあげられる.そして,上流下流が標高という指標に反映されていると考えられる.

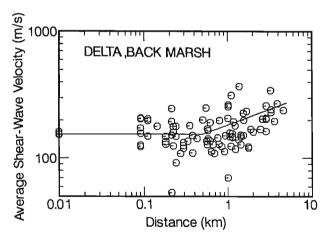


図-7 デルタ・後背湿地の平均S波速度と主要河川 までの最短距離の関係[文献12)による]

標高との相関がみられない微地形の中でも、デルタ・後背湿地は平均S波速度のバラツキが大きい.これらの微地形は平均S波速度が小さく、地震波の増幅が大きくなることが予想され、サイスミックマイクロゾーニングにおいて注目すべき微地形であることから、さらに検討を加えた.これらの微地形は低地部における河川の氾濫によって形成されることから、平均S波速度は氾濫堆積物の厚さと関係が深いことが予想される.図ー7はデルタ・後背湿地における地盤の平均S波速度と主要河川からの最短距離の関係を示している.国土数

値情報には河川の流路位置データがあることから,これを利用した. バラツキがあるが傾向としては距離が 1km程度までは平均S波速度が150m/s程度と小さく, 距離が大きくなるに従い平均S波速度も大きくなる. これは河川付近では氾濫堆積物が厚く,河川から離れるに従い薄くなることに対応していると考えられる.

以上を整理すると、地盤の平均S波速度は次に示す回 帰式から推定可能である。

 $\log \text{AVS} = \mathbf{a} + \mathbf{b} \log \mathbf{H} + \mathbf{c} \log \mathbf{D} \pm \sigma$ (2) ここで、 \mathbf{H} は標高(m)、 \mathbf{D} は主要河川からの距離(km)、 \mathbf{g} な標準偏差、 \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} は微地形ごとに与えられる回帰係数である(表-3参照).

この式で推定された地盤の平均S波速度と実測の平均S波速度の比較を図-8に示す. 実測値に対する推定値の比の対数の標準偏差は0.13となり, 比較的精度よく推定できている.

4.2 増幅度分布の推定

(2)式と(1)式を利用して、首都圏およびその周辺地域の地盤の増幅度分布を計算した。まず、国土数値情報から(2)式に関連する情報を取り出し、各地点での地盤の平均S波速度を計算した。国土数値情報の基準地域メッシュの大きさは約1km四方であり、対象とした地域は、関東地方ほぼ全域と中部・東海地方の一部を含めた約36,000メッシュからなっている。

得られた平均S波速度から(1)式を用いて最大速度に対する地盤の増幅度を求めた.得られた増幅度の分布を図-9に示す.増幅度は河川付近の低地で2.4倍,埋立地で2.2倍と比較的大きな値を示し,山地では0.8倍程度と小さな値を示す.

4.3 想定地震に対する震度分布予測

前述の地盤の増幅度分布を利用して、地表面最大速度振幅で評価した震度分布図が得られる.ここでは、多数の強震記録が得られた1987年千葉県東方沖地震について地表面最大速度分布を計算し、観測結果と比較して、本手順の妥当性を検証し、さらに、近い将来に発生の恐れが高く首都圏に大きな影響を与えると予想される仮想東海地震についての予測結果を示す.

1987年12月17日の千葉県東方沖地震はマグニチュード(M)6.7の中規模地震であったが、強震観測網の比較的充実した首都圏近くで発生したことから各機関によって多数の強震記録が得られた³⁶⁾. この地震における基準地盤での最大速度振幅を計算するために、(3)式で示すJoyner-Booreによる岩盤での最大速度振幅の距離減衰式³⁷⁾を用いた. この式は近距離での記録を含め

表-3 地盤条件ごとの(2)式の係数[文献12)による]

Geomorphological			_		data
unit or Geology	a	b	c	σ	#
Reclaimed Land	2.23	0	0	0.14	132
Artificial Transformed Land	2.26	0	0	0.09	7
Delta,Back Marsh D ≤ 0.5	2.19	0	0	0.12	36
D > 0.5	2.26	0	0.25	0.13	57
Natural Levee	1.94	0.32	0	0.13	18
Valley Plain	2.07	0.15	0	0.12	26
Sand Bar, Dune	2.29	0	0	0.13	13
Fan	1.83	0.36	0	0.15	20
Loam Plateau	2.00	0.28	0	0.11	95
Gravel Plateau	1.76	0.36	0	0.12	12
Hill	2.64	0	0	0.17	22
Other Geom. Units	2.25	0.13	0	0.16	10
(e.g. Volcanic Mountain)					
Pre-Tertialy	2.87	0	0	0.23	3

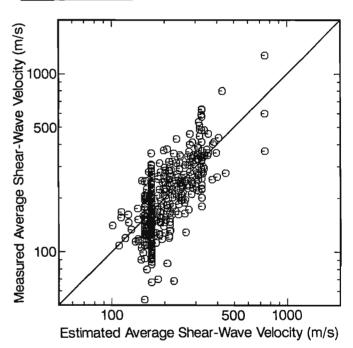


図-8 推定平均S波速度と実測平均S波速度の比較 [文献12)による]

た多数の記録に基づいて得られたもので、現在までに 提案されている最大速度に関する距離減衰式のうちで 信頼性の高いもののひとつと考えられる。また、地震 の規模が中程度までであれば日本の地震に対しても適 用できることが確認されている³⁸⁾.

 $\log V = 0.49 \text{ Mw} - \log r - 0.0026 \text{ r} - 0.77$ (3) ここで、Vは岩盤での最大速度(cm/s)、Mwはモーメントマグニチュード、rは距離(km)である.

(3)式を得る際にJoyner-Booreが用いた記録が得られた岩盤でのAVSは平均的に1,200m/s程度と考えられ²²⁾, (1)式で基準とした地盤のそれ(600m/s)と異なる. (1)式よりAVS=1,200m/sの地盤に対する AVS=600m/sの地盤

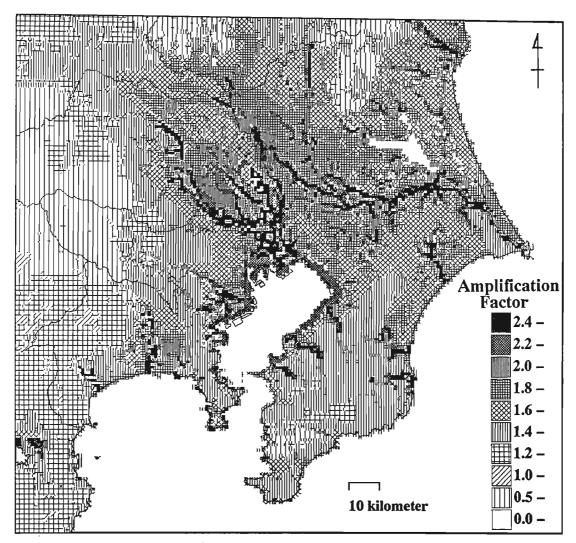


図-9 最大速度に対する地盤の増幅度分布[文献12)による]

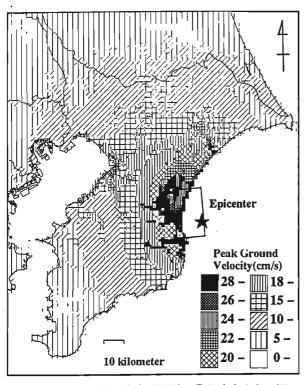


図-10 1987年千葉県東方沖地震の最大速度分布予測 [文献12)による]

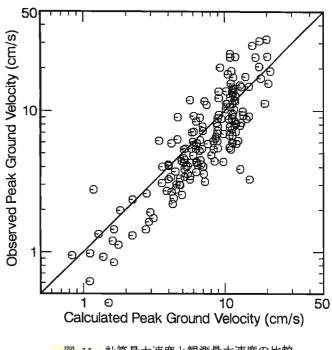


図-11 計算最大速度と観測最大速度の比較 [文献12)による]

での増幅度は約1.6倍となることから、この倍率を(3)式にかけて、以下のようにAVS=600m/sでの地盤に対する最大速度Vに補正した。

 $\log V' = 0.49 \text{ Mw} - \log r - 0.0026 r - 0.56$ (3)

(3)式のMwにこの地震の地震モーメント³⁹⁾から推定される値である6.5を代入し、rを断層面からの最短距離として基準地盤での最大速度振幅Vで求めた.この値に図-9の増幅度を乗じて、地表での最大速度振幅を求めた.対象地域での計算された最大速度分布を図-10に示す.図-11には推定値と観測値の比較を示す.観測値に対する推定値の比の対数の標準偏差は0.19となる.微地形分類から地盤の平均S波速度に変換する際の対数標準偏差が0.13、地盤の平均S波速度から増幅度に変換する際のそれが0.16であることを考えると、本手法ではこの程度の誤差はさけられないものと考えられる.ただし、将来、より詳細な地盤データが整備されれば、さらに精度の高い予測が可能になると思われる.

本手順を用いて、近い将来発生する可能性の高い大地震として、M8クラスの東海地震の震度分布予測を試みた.前述のJoyner-Booreの距離減衰式³ファは主にMw7以下の地震の記録に基づいているので、この程度の規模をもつ地震の地震動強さの推定に関しては適当な距離減衰式とは言いにくい.そこで、距離減衰式については(4)式に示す1985年チリ地震 (Ms=7.8)に対する距離減衰式⁴0)を用いた.この式は断層からの距離30~200kmの記録に基づくもので、近距離でも比較的信頼性が高いものと考えられる.また、この式は同様の地震規模および断層メカニズムを持つ1983年日本海中部地震(M=7.7)に対しても適用できることが確認されている.

log V'=3.34 + 0.17 d - log (r+30) - 0.0018 r (4) ここで、dは振幅の方位依存性の影響を示すパラメータで、1 方向破壊伝播のときに破壊が遠ざかる観測点に対して0、破壊が近づく観測点に対して1の値をとる。(4)式を求める際に用いられたチリの強震観測点の地盤のAVSは600m/s程度と推定されている⁴⁰⁾.この値は本研究での基準地盤のAVSとほぼ同じことから、(4)式をそのまま用い、rに石橋による断層面⁴¹⁾からの最短距離を代入し、方位依存性の影響を考慮せずにdに0.5を代入して、基準地盤での最大速度振幅を求めた。

これに増幅度をかけて求められた地表での最大速度 振幅の分布を図-12に示す.これをみると,小田原を 中心とする神奈川県西部や相模川流域では,震度VIに 相当する最大速度40cm/sないしそれをやや上回る値を 示している.これは,中央防災会議により震度VIに以 上なると予想された地域⁴⁰とほぼ対応する.

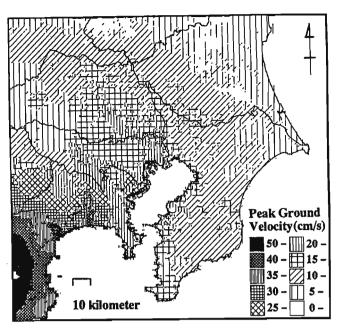


図-12 仮想東海地震の最大速度分布予測 [文献12)による]

荒川, 江戸川, 中川沿いの低地や東京湾岸の埋立地では, 断層からの距離が100km以上でありながら, 20cm/sないしそれをやや上回る値を示す. また, 埼玉県の東部や群馬県の一部では最大速度は15cm/sないしそれをやや上回り, 震度 V の範囲はこの程度の地域にまで広がるものと予想される.

5. 液状化危険度分布予測

5.1 国土数値情報の地形分類と液状化予測のための微地形分類の対応とその細分類

国土数値情報に含まれる地形分類は前述の液状化予測に必要な単位にまで細分類がされていない. そこで国土数値情報の地形分類と液状化予測に必要な微地形分類の対応関係を調べ, 地形分類を微地形分類に細分類することを試みた.

図-13に地形分類,微地形分類30,33),及び各微地形で液状化を発生せしめる最大地動速度33)を示す。また、微地形の模式図を図-14に示す。液状化の最も発生しやすい微地形は、埋立地、干拓地、自然堤防、旧河道、砂丘末端緩斜面、砂丘間低地であり、次に、発生しやすいものは後背湿地、谷底平野、デルタである。砂州、緩扇状地では比較的発生しにくい。その他の微地形では液状化発生の可能性は非常に小さい。微地形分類のうち、埋立地や干拓地については国土数値情報においても地形分類されている。後背湿地、谷底平野、デルタは三角州性低地の地形分類としてまとめられているしかし、地形分類には自然堤防、旧河道、砂丘末端緩斜面、砂丘間低地、砂丘、砂州のような細分類がされていない。

そこで、これらの微地形が分布する地域における国土数値情報での地形分類の対応を調べた結果、図-13のような関係が得られた. すなわち、砂州・自然堤防、砂丘砂の堆積する砂礫台地、被覆砂丘の地形分類から自然堤防、砂丘末端緩斜面、砂丘間低地、砂丘、砂州の微地形分類に細分類される. 扇状地性低地については、その平均勾配や周囲のメッシュの地形状況から緩扇状地、扇状地、谷底平野に細分類する. 旧河道は自然堤防などと共に最も液状化が生じやすい微地形である³³³). しかしながら、小縮尺の土地分類図を原資料とする国土数値情報では旧河道は面積が小さいため表現されていない. 一般に主要河川の自然堤防の隣接部にはその形成に関与した旧河道が分布することから、ここでは、自然堤防を抽出することによって、旧河道も併せて抽出できると考えた.

細分類には海岸線の位置,河川流路,標高値を利用し,以下に示す地形学的根拠に基づきコンピュータ上で機械的に行える手順を求めた¹¹⁾.

- ・自然堤防は海岸線から離れて分布する.
- ・自然堤防は河川沿いに分布する.
- ・砂丘は砂州と比較すると低地に対する比高が大きい.
- ・砂丘は比較的標高が高い.
- ・砂丘末端緩斜面は低地に対する比高が小さい.
- ・砂丘間低地は比較的平坦で周囲より標高が低い.
- ・谷底平野は台地や丘陵地などに挟まれて分布する.
- ・緩扇状地は勾配が小さい.

この分類手順を津軽平野,能代平野,庄内平野,新 潟平野,青森県小川原湖付近の低地,濃尾平野に適用 して微地形分類図を作成し,その妥当性を検証したと ころ,実際の微地形分類との対応はよく,誤分類の割 合が3%程度と小さいことが確認された.

5.2 関東地方の微地形分類図の作成

本分類手順を中部・東海地方の一部を含む関東地方のほぼ全域に適用し、図-15に示す微地形分類図を作成した。国土数値情報の砂州・自然堤防のうち内陸部に分布するものや主要河川沿いについては自然堤防に分類された。相模川の左岸側の藤沢から茅ヶ崎にかけては砂丘及び砂丘末端緩斜面となり、右岸側の平塚付近では砂州が分布する結果となった。茨城県鹿島海岸では砂丘が分布するが、九十九里平野の砂堤列は低地との比高が比較的小さいことからほとんどが砂州に分類された。埼玉県北西部に広がる扇状地性低地をみると、そのほとんどが緩扇状地となった。これらの結果は既往の微地形分類図^{27,28}とよく対応している。

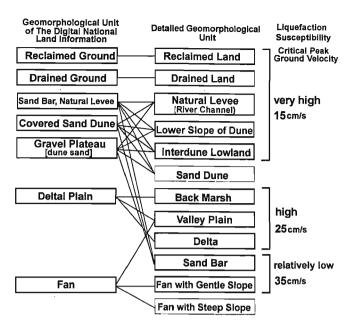
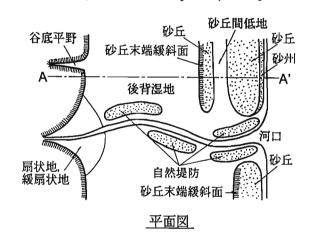


図-13 国土数値情報の地形分類と液状化予測のための 微地形分類との対応関係[文献11]に加筆]



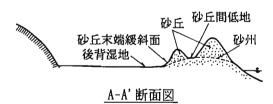


図-14 微地形の模式図[文献11]による]

5.3 想定地震に対する液状化危険度分布予測

前述の微地形分類図と最大速度振幅で表現された地表での震度分布により、液状化危険度分布予測が可能となる.ここでは、液状化被害地域の検討が詳細にされている1987年千葉県東方沖地震と仮想東海地震についての予測結果を示す.

図-10に示す千葉県東方沖地震の最大速度分布に図-15の微地形分類図を重ね合わせ、最大速度振幅が図-13に示す液状化の発生せしめる最大速度振幅の1.25倍以上となる地域を液状化危険度大、1~1.25倍となる地域を危険度中、0.75~1倍となる地域を危険度小として図-16に示す。

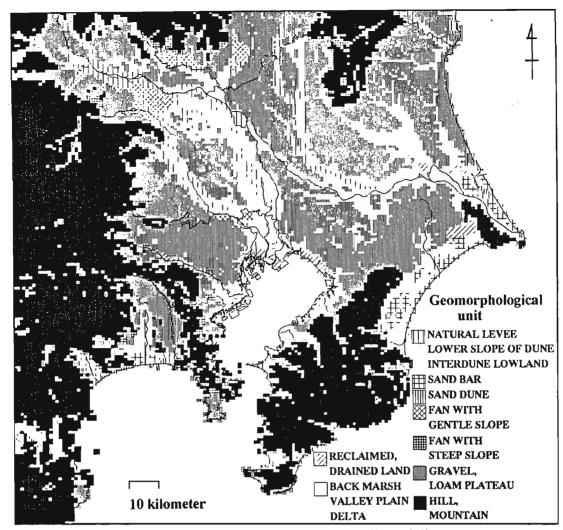


図-15 関東地方における微地形分類図[文献11)に加筆]

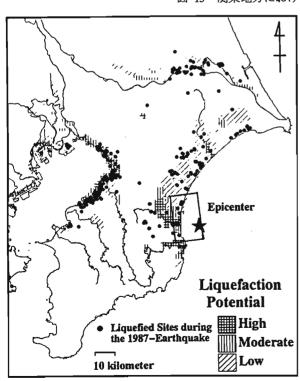


図-16 1987年千葉県東方沖地震の場合の液状化危険度予測と 液状化発生地点[文献11)を修正]

この地震における液状化は277箇所で発生したと報告されており⁴³⁾,これらの地域では液状化に基づく建物被害も多く発生した.図中の・印は地震の際の液状化発生地点⁴⁴⁾を示す.予測結果は九十九里浜付近の低地,千葉県内陸の谷底平野,東京湾岸埋立地などで液状化発生の危険性があることを示し、実際の液状化発生地点とおおむね対応している.

但し、九十九里浜の北部と利根川沿いの液状化発生は予測結果には現われていない。九十九里浜北部の液状化被害は砂鉄採掘地跡の埋戻し地盤でのものであり4つ。このような人工的な地盤改変はその規模が大きくない限り国土数値情報のみからでは判別が困難である。また、利根川沿いの液状化被害は旧河道や旧池沼に発生した4つ。前述のように、本研究では、主要河川付近の自然堤防を抽出することによって、その旧河道を含めた抽出が可能であると考えている。しかし、利根川は近世初頭に人工的に流路変更が行われたため、その下流平野には発達した自然堤防が形成されるには至っていない。従って、利根川下流平野では旧河道の付近に大規模な自然堤防が存在しない特殊な地域といえる。

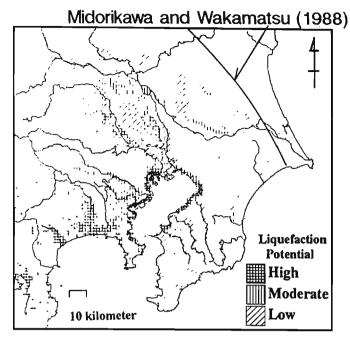


図-17 仮想東海地震の場合の液状化危険度予測 [文献11]を修正]

この様な特殊な微地形の配列は国土数値情報のメッシュの大きさの問題から、評価することが難しい. 評価の精度を向上させるためには、さらに細かいメッシュに基づくデータベースの整備が必要と考えられる.

図-12に示す仮想東海地震の予測された最大速度分布に微地形分類図を重ね合わせて求めた液状化危険度分布を図-17に示す. 静岡県の沼津付近, 神奈川県の酒匂川流域や相模川流域, 東京湾岸の埋立地のほぼ全域で液状化危険度が大きい. また, 震源域から100km以上離れた荒川低地, 中川低地, 東京低地において液状化発生の可能性があり, 特に荒川, 古利根川, 中川沿いの自然堤防においては液状化危険度が大きいという結果が得られた. 但し, この結果には, 千葉県東方沖地震の場合にみられたような小規模な人工的地盤改変などの影響による液状化危険度は含まれていない.

過去の地震で液状化発生がどの程度の範囲にまで及んだかについて検討した例として、断層面から最も遠い液状化地点までの距離[D]とマグニチュード[M]との関係が(5)式のように示されている¹⁰.

log D = 0.6 M - 2.4 (6.4 < M < 8.2) (5)式のMに7.8を代入したときに求められる最も遠い液状化発生地点までの範囲を図中の実線で示す. これは本結果での液状化危険度小の地域までの範囲とおおむね対応しており、本予測結果の妥当性を支持している.

最後に、これまでに得られた情報を統合し、新たな情報に変換した簡単な例を述べる。これまでの研究によると液状化発生の有無が木造家屋の被害に与える影響が大きいことがいわれている^{45),46)}。図-18は既往の

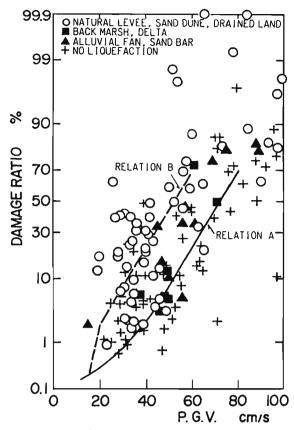


図-18 液状化地点および非液状化地点での木造家屋の 被害率と最大地動速度との関係[文献46)より抜粋]

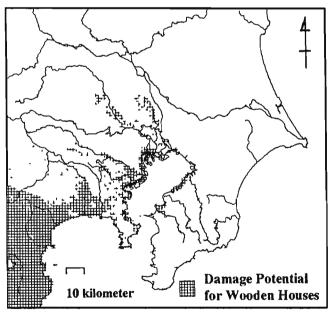


図-19 仮想東海地震の場合の木造家屋に 被害が生じる可能性のある地域予測

被害地震における液状化地点および非液状化地点での木造家屋の被害率と最大地動速度の関係を示している ⁴⁶. この関係をもとに最大地動速度と液状化発生の有無から木造家屋の被害率を導くことができる. 仮想東海地震の場合を例にあげて示す. 図-17において液状化の危険度が中以上の場合, 図-18の関係 B を用い、それ以外の地点においては関係 A を用いる. 最大地動

速度の分布は図-12を用いる。そして木造家屋の被害率が1%以上を木造家屋に被害が生じそうな地域とすると図-19が得られる。これらの手順はコンピュータ上で迅速に処理される。

6. まとめ

国土数値情報の概要を示し、これをGISのデータベースとしてサイスミックマイクロゾーニングに応用し、震度分布予測と液状化危険度分布予測を簡便かつ迅速に行えるシステムを構築した。また、国土数値情報は全国を網羅した数値地理データベースであることから、全国的な応用が容易であり、より広い地域に対して、統一基準で評価できる可能性がある。今後は、斜面崩壊危険度予測などを加え、総合的な地震危険度評価システムへ展開していきたい。

参考文献

- 1) 神奈川県: 神奈川県地震被害想定調査報告書, 1985.
- 2) 東京都防災会議: 多摩地域における地震被害の想定に関する 報告書, 1985.
- 3) 川崎市:川崎市地震被害想定調査報告書, 1988.
- 4) 東京都防災会議:東京における地震被害の想定に関する報告 書, 1991.
- 5) 埼玉県: 大規模地震被害想定調査報告書, 1992.
- 6) Antenucci, J.C. et al.: Geographic Information Systems: A Guide to the Technology, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- 7) 東京地学協会:メッシュマップと地学,地学雑誌, Vol.99, No.6, 1990.
- 8) 国土庁計画調整局・国土地理院:国土数値情報(改訂版), 国土情報シリーズ8,大蔵省印刷局,1992.
- 9) 松岡昌志,翠川三郎:国土数値情報を利用した地盤の平均S 波速度の推定,日本建築学会構造系論文報告集,No.443, pp.65-71,1993.
- 10) 松岡昌志,翠川三郎:国土数値情報を利用した広域震度分布 予測,日本建築学会構造系論文報告集,No.447,pp.51-56, 1993.
- 11) 松岡昌志, 翠川三郎, 若松加寿江: 国土数値情報を利用した 広城液状化危険度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 452, pp.39-45, 1993.
- 12) Matsuoka, M. and Midorikawa, S.: GIS-Based Seismic Hazard Mapping using the Digital National Land Information, Proc. Ninth Japan Earthq. Engnrg. Sympo. 1994, (印刷中)
- 13) 岩田隆ほか6名:制御用地震センサーに使用する地震動強度 指標の実証的評価,第21回地震工学研究発表会講演概要, pp.613-616,1991.
- 14) 長橋純男, 小林啓美: 地震動の強さを評価する尺度としての 地震動最大振幅, 日本建築学会論文報告集, No.181, pp.15-22, 1971.
- 15) 土岐憲三: 水道管路の震害予測, 京都大学防災研究所年報, 第22号B-2, pp.1-23, 1979.
- 16) Midorikawa, S. and Wakamatsu, K.: Intensity of Earthquake Ground Motion at Liquefied Sites, 土質工学会論文報告集, Vol.28, pp.73-84, 1988.
- 17) 翠川三郎,福岡知久: 気象庁震度階と地震動強さの物理量と の関係,地震,第41巻,pp.223-233,1988.
- 18) Sugito, S., Goto, H. and Takayama, S.: Conversion Factor between Earthquake Motion on Soil Surface and Rock Surface with Nonlinear Soil Amplification Effect, Proc. Seventh Japan Earthq. Engarg. Sympo., pp.571-576, 1986.
- 19) 例えば競味洋史,小林啓美:関東地震の川崎における地表面 の加速度分布(地盤と木造物地震被害率),日本建築学会論 文報告集,第176号,pp.17-23,1970.

- Shima, E.: Seismic Microzoning Map of Tokyo, Proc. Second International Conf. Microzonation, Vol.1, pp.433-443, 1978.
- 21) 翠川三郎: 地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度 ・最大速度分布の推定, 第8回地盤震動シンポジウム資料集, pp.59-64, 1980.
- 22) Joyner, W.B. and Fumal, T.E.: Use of Measured Shear-wave Velocity for Predicting Geologic Site Effects on Strong Ground Motion, Proc. Eighth WCEE, Vol.2, pp.777-783, 1984.
- 23) Borcherdt, R. et al.: Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, CA, Proc. Fourth International Conf. Seismic Zonation, Vol.3, pp.545-552, 1991.
- 24) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の 最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築 学会構造系論文報告集, No.442, pp.71-78, 1992.
- 25) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site Effects on Strong-Motion Records Observed during the 1987- Chiba- kentoho- oki, Japan Earthquake, Proc. Ninth Japan Earthq. Engnrg. Sympo. 1994, (印刷中)
- 26) 古藤田喜久雄, 若松加寿江: 日本海中部地震による液状化現象と地形条件との関係, 土と基礎, Vol.32, No.9, pp.59-63, 1984
- 27) 古藤田喜久雄, 若松加寿江: 関東大地震の液状化地図, 基礎 工, Vol.6, No.11, 1978.
- 28) 古藤田喜久雄, 若松加寿江, 渡辺一夫:1923年関東大地震に よる相模川下流地域の地盤震害, 第7回日本地震工学シンポ ジウム講演集, pp.43-48,1986.
- 29) 若松加寿江:液状化問題の地形・地質的背景, 応用地質, Vol.32, No.1, pp.28-40, 1991.
- 30) 若松加寿江: 詳細な微地形分類による地盤表層の液状化被害可能性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B 分冊構造 I, pp.1443-1444, 1992.
- 31) 山田公夫: 想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測, 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, pp.37-45, 1992.
- 32) 大矢雅彦編:地形分類の手法と展開,古今書院,1983.
- 33) Kotoda, K., Wakamatsu, K. and Midorikawa, S.: Seismic Microzoning on Soil Liquefaction Potential Based on Geomorphological Land Clasification, 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.2, pp.127-143, 1988.
- 34) 池田俊雄:わかりやすい地盤地質学, 鹿島出版会, 1986.
- 35) 門村浩: 扇状地の微地形とその形成, 扇状地, 古今書院, pp. 51-96, 1971.
- 36) 強震観測事業推進連絡会議:強震速報 No.37, 国立防災科学 技術センター, 1987.
- 37) Joyner, W.B. and Boore, D.M.: Prediction of Earthquake Response Spectra, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept., 82-977, 16pp., 1982.
- 38) Midorikawa, S.:Preliminary Analysis for Attenuation of Peak Ground Velocity on Stiff Site, Procs. Intern. Workshop on Strong Motion Data, No.2, pp.39-48, 1993.
- 39) 山田尚幸:体積歪計で観測された1987年12月17日千葉県東方 沖の地震、地震学会講演予稿集, No.1, p.66, 1988.
- 40) 翠川三郎: 1985年チリ地震及び1983年日本海中部地震の地震 動最大加速度・最大速度振幅の距離減衰,日本建築学会構造 系論文報告集,第422号,pp.37-44,1991.
- 41) 石橋克彦: 東海地方に予想される大地震の再検討-駿河湾大地震について-, 地震学会講演予稿集, No.2, pp.30-34, 1976.
- 42) 小林啓美:大規模地震対策特別措置法による地震防災対策強 化地域の指定,建築雑誌,No.1224, pp.15- 17, 1984.
- 43) 大谷圭一他 4名: 千葉県東方沖地震災害調査報告,主要災害 調査, No.29, 国立防災科学技術センター, 1988.
- 44) 若松加寿江: 微地形調査による表層地盤の液状化特性の評価, 1987年千葉県東方沖地展による液状化被害地域の検討, 日本 建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.29-37, 1991.
- 45) 金井清:木造家屋の震害に就いて、地震災害予測の研究(地 展保険調査報告No.2), pp.1-17, 1982.
- 46) 翠川三郎, 若松加寿江: 液状化の影響を考慮した簡便な木造 家屋の被害分布予測, 日本建築学会構造系 論文報告集, No. 393, pp.18-23, 1988.

(4) 常時微動の利用

ー短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性についてー

(4) APPLICATION OF MICROTREMORS

 ESTIMATION ON AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF SOIL DEPOSITS BASED ON SPECTRAL RATIO OF HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRA OF MICROTREMORS

若松邦夫*, 安井讓**
Kunio WAKAMATSU and Yuzuru YASUI

This paper presents the fundamental characteristics on spectral ratio of horizontal to vertical spectra of S hort-period microtremors, their relation to ground amplification and possibility of earthquake prediction based on its spectral ratio. The results are summarized as follows:

- 1)The spectral ratio of microtremors can be simulated by surface waves generated by a ground noize.
- 2)The peaks of this spectral ratio almost correspond to the 1st. mode ground amplification due to S-wave from each imaginary bedrock with relative strong reflection boundary.
- 3)This spectral ratio can be substituted as the ground amplification factor in the limited condition and it is very useful to estimate the relative strength of earthquake motin in the limited area where the ground environment does not change largely.

Keywords: short-period microtremors, spectral ratio, surface wave, predominant period, ground amplification, earthquake ground motion

短周期微動、スペクトル比、表面波、卓越周期、地盤増幅特性、地震動特性

1. はじめに

微動はその微動源の違いから、主として人工的振動源に起因する周期1~2秒程度以下の短周期微動(常時微動)と波浪等の自然外乱に起因する長周期微動に分けて議論される場合が多い。本小論は前者の短周期微動に着目し、地盤の増幅特性評価および地震動推定等に関する微動の活用に焦点を当て私見を述べるものである。

短周期微動を地盤構造の推定や地震動特性の予測あるいは総合的な観点からのマイクロゾーニング等の工学的目的に利用する研究は、1950年代の金井清らいの先駆的な研究以来数多く認められる。それらの具体的な研究内容は、地盤の卓越周期あるいは堆積層厚の評価,地震動スペクトル形状との対比,地震被害との関連等多岐に渡っている。しかし、地盤の卓越振幅や増幅特性を微動から直接評価することを目的とした研究は、KANAI et al. 2)による卓越振幅を考慮した地盤種別判定法に関する研究や瀬尾・他3)による二地点間のスペクトル比から地震動を予測した研究等があるが比較的少ない。このような中で中村・他4)は、地表面における水平成分スペクトルを上下成分スペクトルで除すという新しい方法を提案し、

これにより表層地盤のS波増幅特性が近似的に得られる ことを観測事実として示した。スペクトル比をとること 自体は、レーリー波のそれが地盤の層構造を反映するこ とを利用し、地盤構造の評価に適用した既往の研究[例 えば、野越50, 堀家60] があるが、これを表層地盤の増 幅特性に結びつけたところに意味がある。中村・他はこ の現象の理論的根拠として、実体波の重複反射で説明で きるとした。しかしながら、この説明には異論[例えば、 堀家⁷〕もあり、時松・他⁸ は微動の主たる波動成分が 表面波であるとの立場から、多数のサイトにおいて上下 動に対する水平動のスペクトル比をレーリー波基本モー ドのそれと比較し、観測から得られるピーク周期が地盤 の一次固有周期に対応することを理論的に検証した。大 町・他⁹⁾も同様な観点から理論的に補強し、常時微動と 表面波の関連性を明らかにした。但し、これらの研究で は、スペクトル比の振幅値の評価に関しては触れられて いない。

中村・他はまた、このスペクトル比のもう一つの特徴 として、それが振幅レベルに因らず極めて安定したもの であることを指摘している。この事実は他の研究からも

*大林組技術研究所振動研究室 主任研究員

**大林組技術研究所振動研究室 室長 工博

Chief Research Engineer, Vibration Engineering Dept., Technical Research Institute, OBAYASHI CORPORATION.

General Manager, Ditto, Dr.Eng.

確認されている「例えば、A-1短周期グループ¹⁰⁾, A-1 長周期微動共同観測グループ」
う。これは微動の主た る波動成分が実体波か表面波かは別として、微動を構成 する波動の構成比率が振幅レベルに因らずほとんど変化 しないことを意味している。波動の構成比率はサイトの 地盤環境および微動源環境に依存すると思われるが、ス ペクトル比が安定して得られることは卓越周期のみなら ずそのピーク振幅値の議論をする上で極めて重要な性質 である。微動から地盤の卓越周期のみを評価するのであ れば、ALLAM A. and E. SHIMA¹²)あるいは瀬尾・他¹³⁾ が指摘するように、比較的コントラストの強い地層構成 を呈する地盤であれば、その解釈は波動によらないと言 えると思われる。しかし振幅特性を考える場合、短周期 微動が主として表面波から成るとするとその評価は極め て難しくなる。その理由は、高次モードまでを含んだレ ーリー波とラブ波の構成比率、地盤の内部減衰およびS 波・P波コントラストがスペクトル比のピーク振幅値に それぞれどのような影響を及ぼすかが明らかでないため である。また工学的に利用する立場においても、その適 用範囲や地震動の予測精度と言ったことが問題となる。 これらの点を明確にしておくことが上下動に対する水平 動のスペクトル比(以下、水平上下スペクトル比または H V-Rと呼ぶ)を用いる上で最も重要であると思われる。

このような背景から、地盤構造が詳細に調査され且つ 地震観測が実施されているサイトを選定して微動観測を 行い、水平上下スペクトル比の基本的性質に関する理解 を現象面から補強すると共に、同スペクトル比のシミュ レーション解析、S波増幅特性との関連および地震動推 定の精度に関して検討し、水平上下スペクトル比の特質 およびその適用範囲を明らかにした。

2. 観測およびデータ処理

2.1 観測サイトおよび観測条件

微動の観測サイトとして、東京4地点および仙台11地点の地震観測サイトを選定した。両地域の観測位置を図1および図2に示した。東京における観測サイトは沖積層あるいは洪積ローム層上に位置しており、セン断波速度で400m/sec程度以上のいわゆる工学的基盤上に軟らかい地盤が堆積した場所である。一方、仙台においてはそのような場所の他に、第三紀中新世から鮮新世に属する強固な岩あるいは工学的基盤がほぼ露頭しているサイト(TAMA,TRGA,ORID,MIYA)もいくつか含まれている。工学的基盤から上位層の周期特性としては、0.1ないし0.2秒程度の短周期から1秒を超えるような一次固有周期を有するサイトまで様々である。

観測は地表の地震計近傍に微動計を設置し、水平2成分および上下成分を測定した。観測時間は15分程度とした。観測に用いたセンサーは、サーボタイプの速度計で

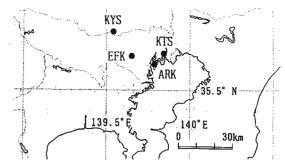


図1 東京における微動観測サイ

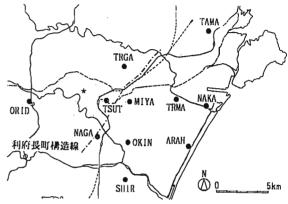


図2 仙台における微動観測サイト

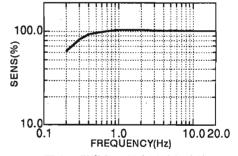


図3 微動計の総合周波数特性

あり、増幅器との総合的な周波数特性は図3に示すように、 $0.3\sim20$ Hz程度までほぼフラットな特性を有している。センサーと増幅器の最大総合感度は、 $0.1x10^{-3}$ cm/s ec/voltである。なお、測定成分は速度とした。

2.2 データ処理方法

観測波形には交通振動等の雑振動部分が散見されるため、各波形から20.48秒を基本単位とする数値データをノイズの少ない順に10組選定し、それぞれの観測サイトの解析用データを作成した。具体的には、観測波形の中から二乗平均値の最も小さい区間を探し出し、その部分を逐次取り出しながら10組のデータを選定するものである。各データはFFTにより周波数領域に変換し、水平成分については位相を考慮して直交2成分を合成した。さらに、0.3HzのParzen Windowを施し、相乗平均をとることによって最終的な水平2次元フーリエスペクトルおよび上下フーリエスペクトルを求めた。ここでは、これらの比として水平上下スペクトル比を定義した。

3. 水平上下スペクトル比の基本的性質に関する現象面からの理解

15観測点の内、代表的な地盤構造を示すサイトを取り上げ、微動の水平上下スペクトル比とPS検層結果に基づくS波増幅特性および地震観測の結果と比較することにより、その基本的な特質を実証的な観点から解釈する。3.1 ピーク周期

水平上下スペクトル比に見られるピーク周期とS波の 卓越周期の関係について比較検討する。

1)表層に明瞭な境界が認められる場合

このような地層構成の代表例としてKTSおよびNA GAを選定し、両者を比較する。両サイトのPS検層結 果を表1、表2に示した。これらの表に見られるように、 両者とも表層にセン断波速度100m/s程度の軟弱な沖積層 を有する地盤であるが、KTSはGL-57.8mに工学的基盤 が認められ全体の振動性状がほぼ単層と見なせる軟弱層 で決まる地盤であるのに対して、NAGAはGL-28.45m の工学的基盤から浅部が明瞭な2層構造を呈する地盤で ある。KTSにおける水平上下スペクトル比を図4に、 またNAGAの結果を図5にそれぞれ示した。同図には、 工学的基盤以浅をモデル化したときの一次元波動による S波の増幅特性(h=1,3,5%)も併せて示してある。これ らの図より、一次周期に関しては、KTS, NAGAと も水平上下スペクトル比に認められるピークと計算結果 は極めて良く対応しているのが分かる。しかしながら二 次周期に関しては、2カ所の境界を有するNAGAでは、 明瞭なピークが認められるが、表層が単層とみなせるK TSでは、ほとんどピークを認めることができない。N AGAの二次周期は、ほぼ浅部境界(GL-4.85m)からの 一次周期に対応しているものであり、水平上下スペクト ル比には高次の効果は一次に比べて現れ難いようである。 この現象は次のMIYAの場合にも認められ、後に示す 数値解析結果からも確認されるところである。このこと は、P、S波の重複反射による卓越周期の違いを考えれ ば、微動は実体波の鉛直入射では説明が付きそうにない ことを意味しているものとも推測される。

また、KTSにおける微動の水平2次元スペクトルを図6に示した。同図には、水平上下スペクトル比ではほとんど認められない0.3~0.4秒程度に二次周期に対応するピークが認められる。このピークの微動源との関係および波動成分については本論では追求しないが、スペクトル比をとることにより貴重な情報を取り逃がしてしまう可能性のあることも記憶されるべきであろう。

つぎに、地震観測結果との比較を行う。両サイトの地表におけるS波主要動部の水平2次元フーリエスペクトルを複数の地震の相乗平均として図7および図8に示した。これらを微動の水平上下スペクトル比(図4,図5)と比較すると、KTSの二次周期およびごく短周期成分

表1 KTSの速度構造

Depth(m)	Vs(m/sec)	Vp(m/sec)	
0~ 4.50	100	4000	
~ 6.50	140	1320	
~ 10.50		1170	
~ 20.50	110	1220	
~ 28.50		1400	
~ 32.50	150	1270	
~ 36.75	240	1270	
~ 46.50	240	1490	
~ 57.80	290	1560	
~ 60.60	370	1870	
~ 62.15	300	1720	
~ 64.50	400	1870	

表2 NAGAの速度構造

Depth(m)	Vs(m/sec)	Vp(m/sec)
0~ 0.80	100	240
~ 4.85	105	920
~ 9.30	290	1600
~ 20.25	170	1050
~ 28.45	290	1640
~ 56.50	600	1990
~ 81.00	530	4700
81.00~	700	1700

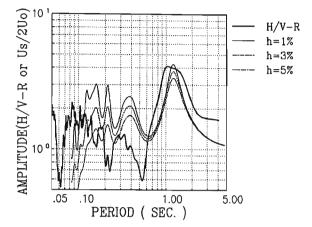


図 4 K T S における水平上下スペクトル比 (太実線) と S 波増幅特性 (細線, BEDROCK; GL-57.8m) の比較

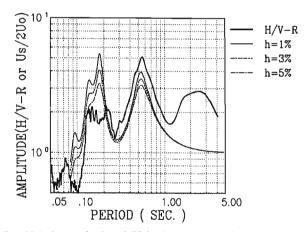


図 5 N A G A における水平上下スペクトル比 (太実線) と S 波増幅特性 (細線, BEDROCK; GL-28.45m) の比較

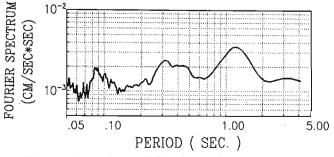


図6 KTSにおける微動の水平2次元スペクトル

を除けばほぼ両者は大よそ調和的であることが認められ、 水平上下スペクトル比による地盤の増幅特性評価にある 程度の可能性があるものと推測される。

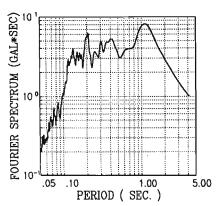


図7 KTSにおける地震記録の水平2次元スペクトル

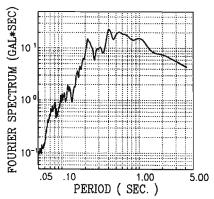


図8 NAGAにおける地震記録の水平2次元スペクトル

2) 表層に明瞭な境界が認められない場合

比較的硬質な地盤が露頭し、深度と共にセン断波速度 が漸増するような地盤においては、表層付近に明瞭な境 界が認められない場合が多い。そのような地盤の代表例 としてMIYAを取り上げる。MIYAのPS検層結果 を表3に示した。同表に見られるように、本サイトの層 構造は、極表層を除けばセン断波速度400m/s程度から徐 々に速度を増し深度60m程度まで明瞭な境界が認められ ない地盤である。得られた水平上下スペクトル比を図9 (太実線)に示した。同図によると、1秒以下の短周期 領域はほぼフラットであり、ピークらしいものはほとん ど無いが、2秒弱に大きなピークが認められる。PS検 層結果の最深部境界(GL-54m)から上位層のS波の増幅 率を同図中(破線)に示してあるが、2秒弱のピークを 説明することはできない。本ピークがより深い構造の影 響を反映したものであることが推察される。仙台地方の 深層構造は明確ではないが、鹿嶋・他14)は既往の研究 成果を総合的に判断してMIYAの基盤までの構造を表 4のように提案している。この基盤から上位層の S波増 幅特性を同じく図9中に示してある。その一次周期は水 平上下スペクトル比のピークと良く対応しており、実測 から得られたピークが基盤からの動特性を反映している

表3 MIYAの速度構造

Depth(m)	Vs(m/sec)	Vp(m/sec)
0~ 1.50	210	380
~ 3.00	350	580
~ 7.00	400	1000
~ 11.00	430	1200
~ 22.00	480	4000
~ 34.00	540	1600
~ 46.00	570	1800
~ 54.00	480	1300
54.00~	680	1900

表4 M J Y A の推定深層 地盤構造¹³⁾

Depth(m)	Vs(m/sec)	Vp(m/sec)	
GLー54mまでは PS検層による			
~ 154.0	680	1900	
~ 654.0	1400		
~ ∞	3000		

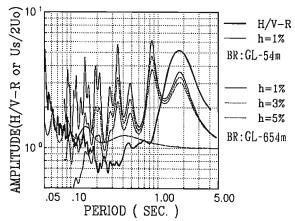


図9 MIYAにおける水平上下スペクトル比(太実線)と S波増幅特性(破線:BEDROCK(BR);GL-54.0m, 他細線: BR;GL-654m)の比較

ものであることが推察される。1~2秒付近のピークは仙台における他の複数の観測点においても認められた。ソースの特定は別として、ある程度の微動源さえあればかなり深い層からの特性を把握することができることを示している。このことは逆に、スペクトル比のピークがどの層からの影響を反映したものであるか、規準露頭点からの移動観測や関連地質資料との対応を行うなど十分な配慮が肝要であることを示唆しているものと思われる。

高次振動に関しては、計算から得られるS波増幅特性にはいくつか見られるものの、水平上下スペクトル比にはほとんど認められない。これはKTSの場合と同様な傾向である。

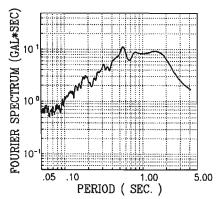


図10 MIYAにおける地震記録の水平2次元スペクトル

つぎに、地震観測記録との比較を行う。MIYAの地表における主要動部の水平2次元スペクトルを複数の地震の相乗平均として図10に示した。同図より、地震動スペクトルと水平上下スペクトル比との関係は、一次周期は比較的良く対応するものの、高次振動に関しては必ずしも適切に評価されていないのが分かる。高次を議論の対象とする場合においては、このような地盤での水平上下スペクトル比による検討は十分注意すべきであろう。3)水平上下スペクトル比とS波増幅特性のピーク周期の関係

以上の実測的検討から、水平上下スペクトル比にはある程度のコントラストを有する境界から上位層の特性が反映されていることが認められた。ここでは、全観測サイトの水平上下スペクトル比に認められるピーク周期と一次元波動によるS波の卓越周期の関係についてまとめる。但し、スペクトル比により深い層からの影響が強く表れ、PS検層から得られる周期が埋もれてしまう場合もいくつか認められ、それらについては比較の対象外とした。結果を図11に示した。同図より、両者の関係は極めて良く対応しており、実用的には水平上下スペクトル比から地盤のS波による卓越周期を評価し得る可能性のあることが分かる。

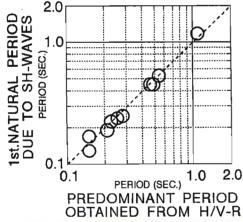


図11 水平上下スペクトル比のピーク周期とPS検層に 基づくS波1次周期の関係

3.2ピーク振幅値

ここでは水平上下スペクトル比のピーク振幅値が地盤のS波増幅率と観測事実としてどの程度対応するかに着目して比較検討する。

東京における二組の観測サイトを取り上げ、地層構成の違いがスペクトル比形状にどのように反映されるか具体的に比較する。最初に工学的基盤上に関東ローム層を有する点で共通するKYSとEFKについて示す。KYSの表層は一次堆積ロームで覆われ、工学的基盤の速度は比較的小さいのに対し、EFKの表層は軟弱な二次堆積ロームが狭在し且つ下層の速度は大きく、平均的なコ

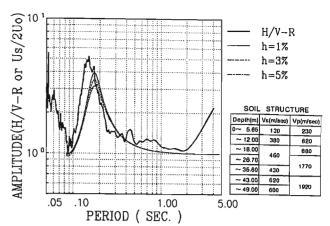


図12 KYSにおける水平上下スペクトル比(太実線) とS波増幅特性(細線, BEDROCK: GL-5.65m)の比較

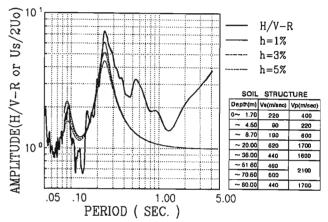


図13 EFKにおける水平上下スペクトル比(太実線) とS波増幅特性(細線,BEDROCK:GL-8.7m)の比較

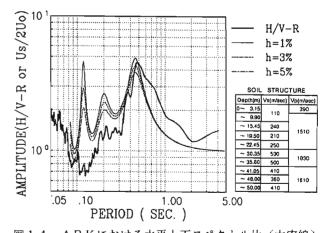


図 1 4 A R K における水平上下スペクトル比(太実線) とS 波増幅特性(細線, BEDROCK; GL-22.45m)の比較

ントラストはEFKの方が大きな地層構成を呈している。両者のPS検層結果および水平上下スペクトル比をS波の増幅特性と比較して図12、図13にそれぞれ示した。これらの図より、水平上下スペクトル比にはインピーダンス比の違いが表れ、ピーク振幅値はKYSよりEFKの方が大きくなっているのが認められる。またそれはS

波の増幅率に比較的調和的である。つぎに観測サイトが近く、層構造が比較的良く似ているKTSとARKについて考察する。両者とも表層のVs=110m/sの層が一次周期に支配的であり、一次の固有周期のみ異なる地盤である。ARKのPS検層結果および水平上下スペクトル比をS波の増幅特性と併せて図14に示した。KTSの結果(図2)と比較すると両者の増幅率はほぼ等しく、水平上下スペクトル比の振幅が表層と基盤のインピーダンス比に関連したものであることが伺える。

以上示した一次元波動の増幅率は境界層を見かけ上の基盤として計算したものである。すなわち、境界層以深は半無限層としている。表層が二層構造を示すNAGA(表2)について上部境界(GL-4.85m),下部境界(GL-28.45m)および表4の推定深層構造を付加した境界(GL-681m)をそれぞれ見かけの基盤としてS波増幅特性(h=1%)を求め、水平上下スペクトル比と比較して図15に示した。同図より、各ピーク周期の振幅値は対応する見かけの基盤からの増幅率に調和的であるのが認められる。このことは、地表に震源を持つ微動の波動成分が鉛直下方から入射する実体波的なものより、他の波動の卓越を示唆しているものとも考えられる。

前項3)に示したピーク周期に対して、そのピーク振幅値と地盤の減衰定数を1%にしたときのS波増幅率との関係を示したのが図16である。同図に見られるように、両者の関係は比較的良い比例関係にあり、水平上下スペクトル比のピーク振幅値からS波の増幅率をある程度評価できる可能性のあることが推察される。しか理を施した上での値であり、またたとえ同一地盤であってもした上での値であり、またたとえ同一地盤であっても微動源環境により微動を構成する波動の構成比率は一定とは極めて難しく、本観測サイトでの観測事実としてこの程度の相関があると見るべきものであろう。

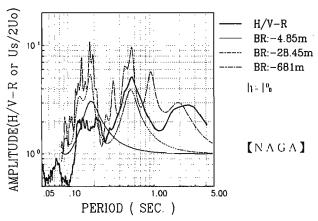


図15 水平上下スペクトル比(太実線)と基盤深さを変化 させた場合のS波増幅特性(細実線:BEDROCK(BR);GL-4.85m, 点線:BR;GL-28.45m, --点鎖線:BR;GL-681m) の比較

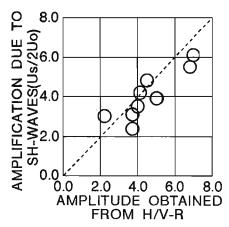
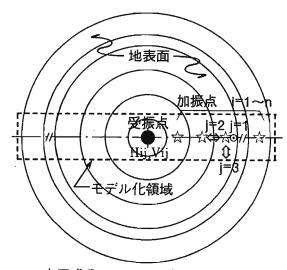


図16 水平上下スペクトル比から得られるピーク振幅値と PS検層に基づくS波増幅率の関係

4. 水平上下スペクトル比のシミュレーション

水平上下スペクトル比の基本的性質に関する検討から、短周期微動を実体波の重複反射で解釈するにはやや困難と思われる現象が観測事実として認められた。そこで、ここではWaas, G. ¹⁵⁾ による波動伝達境界を有する二次元有限要素法(但し、基盤はダッシュポットにより処理したもの)により、地表面ノイズを想定した水平上下スペクトル比のシミュレーションを試みた。微動源と受振点のモデル化は、LACHET, C. and P.Y. Bard ¹⁶⁾ を参考とした。計算の手順は以下のようなものである。図17に示すように、受振点を中心とするモデル化領域を切り出し、地表面に等密度で分布する微動源をいくつかの加振点で



Hij: 水平成分, Vij: 上下成分

i: 加振点(100~1000m.50mピッチ)

j:加振方向(1:上下,2:水平面内,3:水平面外)

水平上下スペクトル比 =
$$\frac{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\sum\limits_{j=1}^{3}(\alpha i_*Hij)^2\right)}}{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\sum\limits_{j=1}^{2}(\alpha i_*Vij)^2\right)}}$$

αi:各加振点の支配面積比

図 1 7 計算モデルおよび水平上下スペクトル比の評価法

代表させ、各加振点において水平(面内,面外)および 上下の単位振幅加振を行う。つぎに、受振点での水平・ 上下成分の振幅を各加振パターンで得られる最大振幅の 二乗和平方根として評価し、最後に上下成分に対する水 平成分の比率を計算するものである。なお二次元モデル による解析のため、受振点での振幅の評価に際しては、 受振点を中心とする同心円で囲まれた各加振点の支配面 積比を考慮し、微動源強さに比例して振幅を補正した。 加振点と受振点の距離は100m~1000mとし、各加振点の 間隔は50mピッチとした。地盤の内部減衰は材料減衰と して与え、S波、P波ともh=2%とした。また、水平と上 下の加振比率はどの程度が現実的か不明であるが、ここ では単純に同レベルとした。この方法は本来三次元であ る波動の伝搬を二次元として扱っている点で近似的なも のであるが、水平上下スペクトル比の傾向を把握するた めには大きく間違っていないであろうと判断し採用した ものである。本モデルは、地表面加振であり且つ遠方場 を扱うことから、面内加振はレーリー波が、また面外加 振はラブ波がそれぞれ卓越すると考えられるため、実体 波の影響に関しては特に触れない。また、最下層のダッ シュポットはPS検層結果の最深部に設置した。

シミュレーションの対象として、3節に示したKTS, NAGAおよびMIYAを選定した。表層に境界をもつ KTSおよびNAGAの結果を図18、図19に示した。 地盤モデルは表1,表2に示した速度構造を用いた。これらの図から、計算結果は実測から得られる水平上下スペクトル比を短周期領域まで含めて極めて良くシミュレートしており、短周期微動はほぼレーリー波とラブ波の集合として解釈することができるものと思われる。 縦軸の振幅値に関しては加振比率の妥当性の問題もあり、絶対値そのものに関する議論は余り意味を持たないが、大凡の振幅の評価も可能であることが推測される。また、NAGAに関しては、周期2秒程度に基盤からの影響と思われるピークが認められるが、ここで用いた地盤モデルではそこまでの周期を評価することはできない。

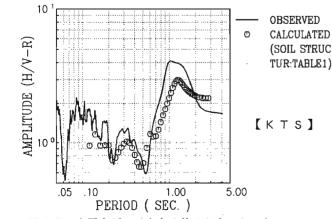


図18 水平上下スペクトル比のシミュレーション

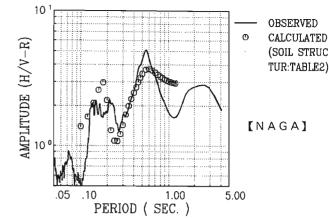


図19 水平上下スペクトル比のシミュレーション

つぎに、表層付近に明瞭な境界の存在しないMIYAについて示す。MIYAについては前述したように、PS検層モデルでは水平上下スペクトル比に認められたピーク周期を説明できないことが分かっているため、地震基盤までの推定モデル(表4)を用いてシミュレーションを行った。結果を図20に示した。同図より、両者は良い対応を示すことが認められる。MIYAのような地層構成を示す地盤での微動の解釈には、深い地下構造の影響を考慮しなくてはならないことを示すものである。

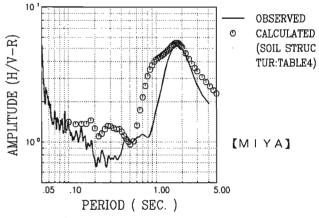


図20 水平上下スペクトル比のシミュレーション

5. 地盤モデルによる水平上下スペクトル比のピーク振幅値に関する検討

ここでは単純な地盤モデルによる数値解析を通して、水平上下スペクトル比振幅とS波増幅率の関係について理解を深める。地盤モデルは図21に示すように表層地盤の定数をVs=100m/s, Vp=500m/secに固定した2層モデルとし、基盤のS波あるいはP波速度のみを変化させた4ケースを設定した。また地盤の内部減衰は材料減衰として与え、表層および基盤とも同一とし、h=0%および2%について計算を行った。モデル最下層のダッシュポットの設置深さに関しては、基盤層のセン断波速度を有する単層地盤を想定し、その一次固有周期が目標とする周期

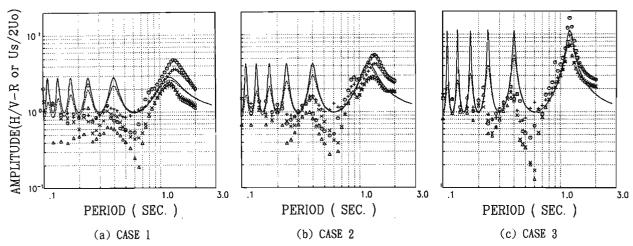


図 2 2 基盤のS波速度を変化させた場合の水平上下スペクトル比(3方向加振[○:h=0%, +:h=2%], 面内2方向加振[△:h=0%, ×:h=2%]) とS波増幅特性(実・点線[h=0%, 2%])の比較

Vs — Vp — ρ — H		BEDROCK		
(m/s) (m/s) (t/m²) (m)		Vs(m/sec)	Vp(m/sec)	
100 — 500 — 1.4 — 30	CASE 1	200	1600	
	CASE 2	300	2	
/200\ - /1600\ - 2.0 - ∞	CASE 3	800	"	
$\binom{200}{300}$ $\binom{1600}{800}$ $\binom{2.0 - \infty}{(h=0\%, 2\%)}$	CASE 4	300	800	
\ 800\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \				

図21 地盤モデルおよび計算ケース

を十分包絡する位置に設定した。基盤のP波速度をVp=1 600m/secに固定し、S波速度をVs=200,300および800m/s ecに変化させたときの水平上下スペクトル比をS波増幅 特性(h=1%,2%)と併せて図22(a)~(c)に示した。な お、水平上下スペクトル比は前節に示した3方向の加振 パターンに準じて計算したものの他に、ラブ波成分を取 り除いた面内 2 方向の加振パターンの結果も示してある。 これらの図よりまず、水平上下スペクトル比の形状を概 観すると、それはほぼレーリー波で決まり、ラブ波でか さ上げされた形と見ることができる。一次固有周期に着 目すると、S波増幅率は面内2方向と3方向の両加振パ ターンの間に位置しているのが認められる。レーリー波 (面内2方向加振)の水平上下スペクトル比に地盤の内 部減衰の影響はほとんど無く、そのピーク振幅値にある 程度のラブ波成分を加えることにより、S波増幅率と同 等な値が得られるようである。この関係は、表層地盤に ある程度の内部減衰が期待できれば、かなり広い範囲の インピーダンス比に渡って成り立っているのが分かる。 しかし、地盤の内部減衰が0%の場合は、ラブ波によるか さ上げ幅が大きく影響するため、地盤の減衰が極めて小 さい場合はスペクトル振幅値とS波増幅率を結び付ける ことには注意する必要があろう。

本地盤モデルのハスケルの理論に基づく水平上下振幅 比はピーク周期において極めて大きな値を示すが、ここ で示した結果では、減衰が0%の基本モードにおいてもス ペクトル比がある程度の値に収まっている。これは、多

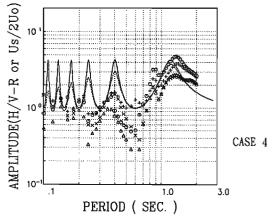


図23 基盤のP波速度を変化させた場合の水平上下スペクトル比とS波増幅特性の比較(記号は図22に同じ)

くの高次振動が励起されていることによる結果と考えられる。更に、高次振動については、S波コントラストが小さくなるに従い、ピークが不明瞭になってゆく傾向にあり、基盤のS波速度が200m/secのケースではほとんど高次のピークを見い出すことはできない。またコントラストが大きいケースにおいても、次数が高くなるに従いピークは不明瞭になる。これは多数の高次成分により各次の水平上下振幅比の増幅あるいは落込みの特性が互いに打ち消されることによる効果と推測される。

つぎに、基盤のS波速度をVs=300m/secに固定し、P 波速度をVp=1600m/secから800m/secに変えたときの結果 を図23に示した。同図とVp=1600m/secの結果を比較す ると、一次周期付近において若干振幅の低下が認められ るものの、全体的な形状にほとんど変化は無く、この程 度の範囲内では水平上下スペクトル比に及ぼすP波コントラストの影響は小さいものと考えられる。

微動レベルにおける地盤の内部減衰がどの程度か明確ではいないが、嶋・他 17 は列車によって起こされた波動の減衰から減衰係数 $\alpha=2x10^{-3}/m$ を、また野越 18)は微

動観測より α =1.31x10 $^{-3}$ ~2.86x10 $^{-3}$ /mをそれぞれ観測結果として示している。これらの値は、振動数を5Hz, 波動伝搬速度を200m/sec程度と仮定すると大よそh=1~2%程度の値となる。この程度の減衰が期待できればかなり広いインピーダンス比に渡って、水平上下スペクトル比振幅と S 波増幅率を結びつけて考えて良さそうであり、両者の関係は工学的に使用可能な範囲で対応付けられそうであることが分かる。

6. 水平上下スペクトル比を用いた地震動推定

ここでは、仙台における水平上下スペクトル比から推 定される地震動スペクトルおよび地震動強さを地震観測 結果と比較し、その妥当性について検討する。

1993.1.15の釧路沖地震(N=7.8)を例に取り、観測スペ クトルと推定スペクトルをパワースペクトルの形で比較 した。仙台においては先に述べたように、基盤からの特 性が各水平上下スペクトル比に反映されていると考えら れるため、岩盤であるTAMAのGL-33m (Vs=1400m/sec) における観測記録を基盤波と見なして、地表のパワース ペクトルを推定した。観測記録の内、S波主要動部約20 秒間を解析の対象とした。硬質地盤から軟弱地盤までの 代表的な観測サイトについて、結果を図24に示した。 基盤波が厳密には特定できないため振幅の絶対値そのも のの議論は余り意味を持たないが、これらの図から、各 サイトとも実測スペクトルと推定スペクトルの形状は全 体的に極めて調和的であり、水平上下スペクトル比を近 似的に地盤の伝達特性と見なすことの妥当性が認められ る。しかしながら、詳細に見ると浅層の影響が強く現れ る短周期領域においては、推定スペクトルが観測値を下 回っている場合が多い。この理由は、このスペクトル比 がもつ以下に示す二つの特徴に起因するものと思われる。 一つは、水平上下スペクトル比のピーク振幅値が見かけ の基盤からの増幅率にほぼ対応することから、短周期領 域においてはそこでの基盤波が過小評価されたためであ り、もう一つは、単層に近い地層構成を呈する地盤にお いては高次成分が現れ難いことに因るためである。

このように水平上下スペクトル比はある基盤からのS 波増幅特性をある程度表現するが、必ずしも絶対的なそれを示す訳ではない。しかしながら、大局的な地盤構造が大きく変わらない限定された地域において、共通な各基盤からの特性が把握されていれば、線形ではあるが地震時の相対的な特性をある程度評価することが可能であると考えられる。仙台における地盤構造は単純ではなく、必ずしも上記の条件を満足するものではないが、スペクトル比から推定される地震動強さと観測最大加速度を比較し、その推定精度について検討した。比較は以下のように行った。前述のようにして求められた地表の推定パワースペクトルを0.1秒~3秒の間で積分し平均パワーを

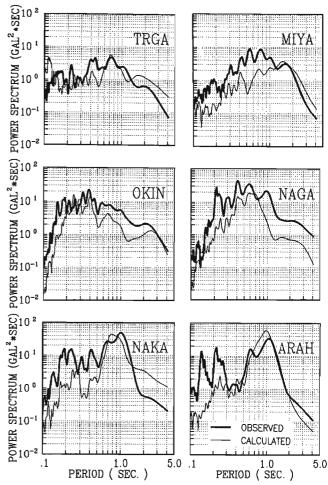


図24 観測(太実線)と水平上下スペクトル比から評価 (細線)されるパワースペクトルの比較

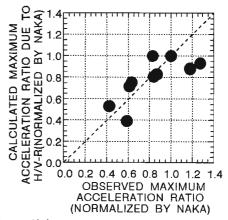


図25 観測値と水平上下スペクトル比から推定される最大 加速度比の比較(両者ともNAKAで基準化)

求め、観測最大加速度と平均パワーの平方根をそれぞれ NAKAの結果を規準にして両者を比較した。基盤入射 波を特定できないため相対的な大きさの比較である。予 測の対象とした地震は前述の釧路沖地震の他に、'89.10. 29の三陸はるか沖地震(M6.5)および'89.11.2の岩手沖地 震(M7.3)とし、同じく主要動部約20秒を解析の対象とし た。平均パワーの平方根と観測最大加速度の関係を3地 震の平均値として図25に示した。同図には岩盤である TAMA以外の全てのサイトを示してある。若干のばら つきはあるものの、両者は比較的良い比例関係にあるこ とが認められ、水平上下スペクトル比が相対的な地震動 強さの評価に有用であることが分かる。

7. まとめ

短周期微動の水平上下スペクトル比に着目し、その基本的性質の解明および工学的利用に対する適用範囲に関して、実測および解析の両面から検討した。その結果明らかになったことを以下に記す。

- 1)短周期微動の水平上下スペクトル比は、微動を地表面 加振により生じるレーリー波とラブ波の集合と仮定した 解析によりほぼシミュレートされる。
- 2)水平上下スペクトル比に見られるピーク周期は、ある 程度のコントラストを有する境界を見かけの基盤とした ときの、各基盤からのS波一次振動の卓越周期にほぼ対 応する。
- 3)高次の振動に関しては、水平上下スペクトル比に明瞭なピークは現れ難く、高次振動を評価の対象とするような場合は注意が必要である。
- 4)水平上下スペクトル比のピーク振幅値は、対応する見かけの基盤からのS波一次周期の増幅率に調和的である。この関係は、地盤にある程度の内部減衰が期待できれば比較的広い範囲のインピーダンス比に渡って成立する。5)水平上下スペクトル比の各ピークは、必ずしもある基盤からの絶対的なS波増幅特性を示すものではなく、地震動予測を考えた場合、目的とする周期に対応する基盤スペクトルの特定に十分注意する必要がある。
- 6)水平上下スペクトル比は、地盤環境が大きく変わらない限定された<mark>地域の相</mark>対的な揺れ易さの評価には十分適用できるものと考えられる。

以上のように、短周期微動の水平上下スペクトル比は、 種々の制約条件をもつものの、地盤震動特性の把握や地 震動推定の評価に有用であることが確認された。しかし、 地盤の非線形効果の取り込み、微動を構成する波動の構 成比率とそれが増幅率に及ぼす影響の実測的確認等に関 しては今後更に検討する必要があるものと考えられる。

〈謝辞〉

本研究はESG研究委員会微動観測部会(震災予防協会内に設置)における「1993年釧路沖地震に関わる合同微動観測研究グループ」での研究が端緒となったものであり、本部会の研究代表者である東京工業大学瀬尾和大助教授に心より御礼申し上げます。本研究を進めるに当たり、ESG研究委員会のメンバーの方々から有益な議論を頂きました。仙台における微動観測では、建設省建築研究所国際地震工学部部長北川良和博士並びに鹿嶋俊英氏に大変お世話になりました。またEFKのPS検層結果は東京ガス(株)よりご提供頂きました。記して感謝致します。

仙台における地震観測記録は、建設省建築研究所と (社)建築研究振興協会の共同研究として実施されている 高密度観測強震事業により得られたものである。本事業 の運営に当たっては、同協会内に建設省建築研究所、建 設業16社および設計事務所連合からなる「高密度強震観 測運営委員会」が設置されている。

《参考文献》

- 1) 例えば、KANAI K., T. TANAKA, K. OSADA: Measurement of Micro-tremor. I.; Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.32, pp.199-209, 1954.
- 2) KANAI K., T. TANAKA: On Microtremors. VII.; Bulletin of
- the Earthquake Research Institute, Vol.39, pp.97-114, 1961.
 3) 瀬尾和大, 佐間野隆憲: 地震動予測への微動の活用について;日本建築学会大会学術講演種概集(北陸), pp.191-192, 1992.
- 梗概集(北陸), pp. 191-192, 1992.
 4) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み;
 第7回日本地震工学シンポジウム,
 pp. 265-270, 1986.
- 5) 野越三雄, 五十嵐亨: 微動の振幅特性 (その 2) ; 地震第2輯, 第24巻, pp.26-40, 1971.
- 6) 堀家正則:微動の位相速度及び伝達関数の推 定;地緩第2輯,第33巻,pp.425-442,1980.
- 7) 堀家正則:微動の研究について;地震第2輯, 第46巻, pp.343-350, 1993.
- 8) 時松孝次, 宮寺泰生:短周期微動に含まれる レイリー波の特性と地盤構造の関係;日本建 築学会構造系論文報告集, 第439号, pp.81-87, 1992.
- 9) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄功:常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用;土木学会論文集, No.489/I-27, pp.251-260, 1994
- 10) A-1短周期グループ: 釧路市内の広域を対象とした短周期微動の同時観測;文部省科学研究試験研究B研究成果報告書,地震時の地盤振動特性評価のための微動の活用に関する研究,pp.13-31,1994.
- 11) A-1長周期微動共同観測グループ: 釧路市内の広域を対象とした長周期微動の同時観測;文部省科学研究試験研究B研究成果報告書,地震時の地盤振動特性評価のための微動の活用に関する研究,pp.33-54,1994.
- 12) ALLAM A. and E. SHIMA: An Investigation into the Nature of Microtremors.; Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.45. pp.43-59, 1967.
- Vol.45、 pp.43-59, 1967. 13) 瀬尾和大, 佐間野隆窓: 地震動予測への微動の活用について(2);日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.87-88, 1993.
- 14) 鹿嶋俊英, 北川は:各種地盤における高密度強緩観測(その6平均スペクトルによる増幅特性の検討);日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.367-368, 1990
- 15) Waas,G.: Earth Vibration Effects and Abatement for Military Facilities. Report 3. Analysis Method for Footing Vibrations through Layered Media.; U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report S-71-14, Sept. 1972.
- 16) LACHET,C. and P.Y.Bard: Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique; Journal of Physics of the Earth(Japan),submitted 1994.

 17) 嶋悦三、柳沢馬住、工藤一嘉:列車によって
- 17) 嶋悦三, 柳沢馬住, 工藤一嘉:列車によって 起こされた波動の減衰;地震 第2輯, 第23巻, pp.332-334, 1970.
- pp.332-334, 1970. 18) 野越三雄:微動の減衰性;地震 第2輯, 第25巻, pp.1-15, 1972.

地震動の面的評価への弱・強震観測の利用

Weak and Strong Motion Observations for Spatially Evaluating Ground Motion due to an Earthquake

工藤一嘉 Kazuyoshi KUDO

In order to spatially evaluate the severity of ground motion from an earthquake or to make a hazard map for strong shaking, it is inevitable to use not only strong motion data, but also geological / geotechnical data as well as weak motion records. We will be concerned with the case that we have to use weak motion data mostly. The topics are 1) linearity or nonlinearity of soil during the strong shaking, 2) significance of properties in the strong motion data which will correlate with the earthquake damage or ground failure and 3) the meanings of singular values, such as exceptionally high acceleration, long duration and so on.

1. はじめに

本シンポジウムで私に与えられたテーマは、地震災害対策のための最も基礎的資料として要請される地域地震動予測に、地震観測、特に強震観測がどれだけ役立つのか、観測の密度とその有効性の程度などを議論するようにとのことである。サイスミックマイクロゾーネイションマップを作成する場合について、最近、鏡味(1993)は「実際に観測された強震記録を利用する方法は直接的であり理想的である。しかし、このためには強震計が当該地域に相当密に配置されていることが条件となる。」と述べ、ごく近年の限られた例を示している。しかし、大きな被害を伴った地震で、強震計記録のみから地域区分が試みられたのは、本年(1994年)のノースリッジ地震の加速度記録を用いた例が始めてではないだろうか。鏡味が指摘するメキシコの例も先駆的な仕事ではあるが、データとしては中あるいは弱震動記録であり、必ずしも被害地震に対する直接的ゾ

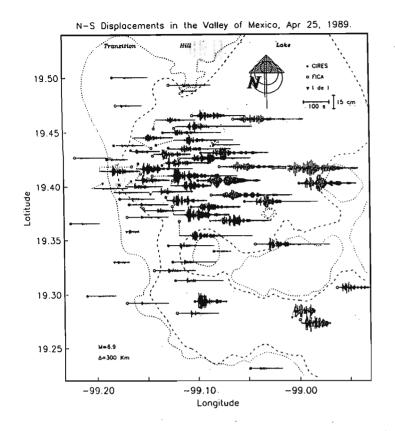
ーニングとは言えないように見える。また、現在のところ 強震記録によるゾーニングと言っても最大加速度に限定さ れており、他の特性量には手が及んでいない。事例の紹介 といくつかの問題点について触れてみたい。しかし、与え られたテーマに直接対処できてていないことはお許し戴き たい。

2. 強震記録に基づくマイクロゾーニングの例

1985年のメキシコ地震後に、メキシコ市には極めて密度の高い強震観測網が出来上がった。Seism. Res. LetterのVol. 64, No.1の表紙を飾っている、強震記録から求めた変位記象を地図上へプロットした結果を図1に示す。密にしかも比較的均等に観測点が分布しており、ゾーニングの作業に移行するのは当然に思える。Iglesias(1991)による、図1と同じ地震に対する水平動最大加速度のゾーニ

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo



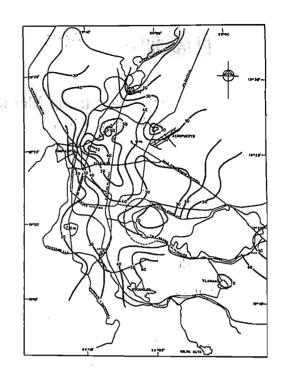


図2. メキシコ市における最大加速度の ゾーニング[Iglesias(1991)による].

図1. 高密度強震観測の例 (Seism. Res. Letter による).

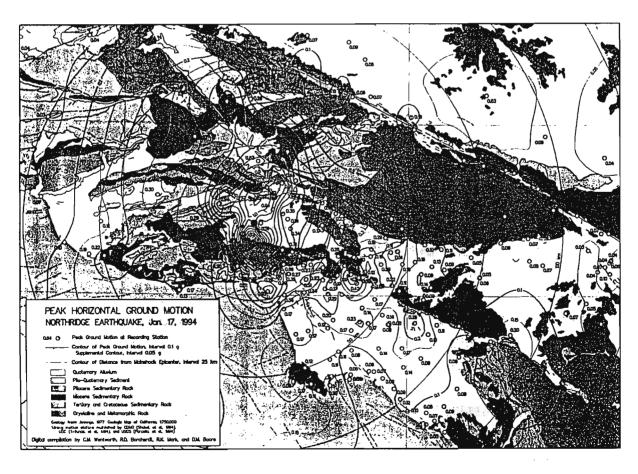


図3. 1994年ノースリッジ地震による水平動最大加速度の分布[Borchert(1994), Wentworth et al. (1994)による]

ング結果を図2に示す.しかし,ゾーニングの中で最大の加速度が70 gal程度で,1985年の地震で観測された20 galに比べてかなりレベルの低い震動である.

先に述べたように、被害地震の強震記録を直接用いた例は、ノースリッジ地震に対するBorchert (1994)の報告が最初ではないだろうか。図3の原図はWentworth et al. (1994)によって作成されたカラーの図であるが、ここでは色がついていないため、分かり難いがご容赦戴きたい。

強震観測点が増え、先の2例のように強震データを面 的に表現できるまでに進歩してきたともいえるが、強震デ ータそのものによるゾーニング手法が大きく進展したとい う印象が得られない、強震動データの面的表現への取り組 み方の問題もあると考えられるが、地震被災地から無被害 までの広域かつ系統的な強震記録が決定的に不足している ことに原因があろう. 強震動のデータセットが必要な程度 に密に (例えば500mx500mに1観測記録) 得られれば, 最大 値とか卓越周期などの特性値に対してなされるゾーニング は基本的には内挿・外挿の技術的問題に帰着し、表現すべ き特性値さえ決めれば、地震学・地震工学は必要ないかも しれない、しかし、そのような密なデータセットが揃うこ とは将来的にも極めて稀であり、また─般に必要な程度の 面積が自然を代表するとは限らず、さらに密な観測・資料 を必要とする場合も多い.強震動の面的予測では,「間接 的」であれ、他の資料・データ(地下構造・地理・地質・ 震度・弱震動記録・微動観測等)を援用せざるを得ないの が現状であろう、このうち、弱震動の利用に関わる事柄以 外は、それぞれ研究の最先端を行く方々からの報告・話題 提供が用意されており、ここでは弱震動の利用に関連した 問題を中心に整理してみたい.

3. 地盤の非線形性に関連して一弱震動は強震動の予測 の資料たりうるか?

Aki(1988)はレビューの中で "We may conclude, then, except for an obvious case of liquefaction, that the amplification factor obtained for a given site using the weak motion data can be used to predict the first order effect on strong ground motion at the site." と、弱震動に対して利用価値を高く評価している.しかし、1992年に開催されたESG国際シンポジウムにおいて、安芸は上記の考えを180度転換したと述べ、地盤(Soil)での強震時における非線形性の考慮の必要性を強

調した(Aki et al., 1992).

一般的傾向として、地震学研究者は線形の議論を好み、弱震動の利用を支持するが、工学研究者、特に土質力学ではむしろ非線形の地盤震動問題を中心に扱い、強震時の地盤の非線形挙動を支持する傾向がある。しかし、Singh(1988)、Chin and Aki(1991)、Darragh and Shakal(1991)などを受け、地震学研究者の中にも弱震動の利用に懐疑的な見解が浸透してきたとも言える。しかし、弱震動記録の利用を強く指示する見解も根強く残っている。Seekings and Boatwright(1994)はロマプリエタ地震の本震・余震の記録を用いて本震記録のない地点の地震動を最小自乗法的に推定し、震度分布との比較を試みているが、キャリブレーションとして観測と推定値を比較したのが図4である。多少の問題点を含みながらもかなり良い予測となっている。

強震時に地盤が非線形挙動をするか否かについて,最近の研究成果を中心に翠川(1993)がまとめている.弱震動と強震動の相関が良いとする研究と非線形性を強調する研究が平衡的に紹介されている.翠川(1993)はこの問題に関する結論として,線形・非線形の限界的ひずみレベルが 3×10^{-4} であること,線形性を主張した例はひずみが 10^{-4} を越えており,2つの潮流(線形派,非線形派)を統一的に説明できるとしている.

4. 地震動の特性値に関連して一特に震度との関係一

強震データを用いた前述の2例は、何れも最大加速度 によるゾーニングであり、地震動強さの一つの特性を表現 してることは間違いないが、地震被害あるいは体感などを 含む地震動の全体像あるいは平均像を表しているは限らな い、むしろ部分的であるとする研究者も少なくないであろ う.太田(1994)は「強震動情報の特性量表現」の章で、強 震記録の特性量(加速度,速度,変位の最大値,継続時間, 包絡形状,位相差などを取り上げている)および非計器観 測量「震度」のそれぞれが持つ意義と問題点や相互の関連 について整理している、その中で、「加速度の最大値≠工 学用加速度指標という概念が次第に根付いてきている」を 指摘しながらも、1gあるいはそれ以上の記録がどんどん 「生産」されている事情をふまえ、強震動の構造物、社会 等への破壊能をあらためて研究する必要性を訴えている。 皮相的ではあるが,一例として,「震度を知って計測的特 性量を推定できるか、あるいはその意義があるのだろうか」

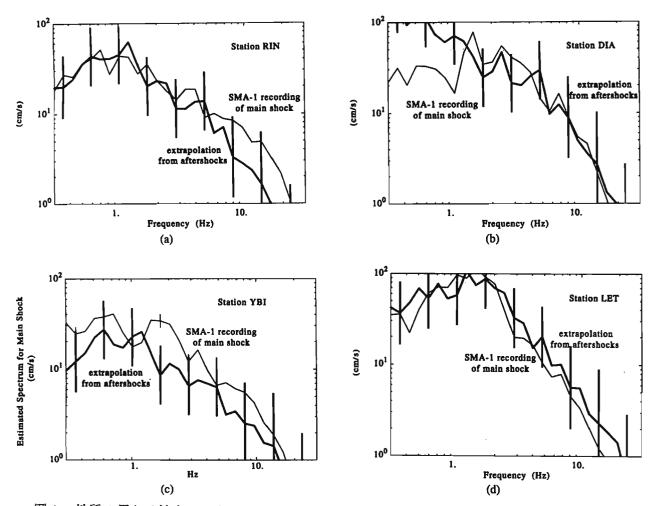


図4. 地質の異なる地点での余震記録を用いた本震(ロマプリエタ地震)の予測と観測記録との比較[Seekings and Boatwright(1994)による].

という問題を設定してみたい. 1993年釧路沖地震で釧路市内4箇所で加速度記録が得られ、荏本・他(1993)による詳細な震度調査・分布図がある. 震度と計測量との関係については、太田(1994)が指摘するように古くて新しい課題であり、多くの提案がある. 最近では岡田(1987)、翠川・福岡(1988)による検討があり、いずれも単純に最大加速度が震度の最も良い指標とは言えないとしているものの、適当な幅を考えれば、例えば釧路沖地震による釧路市内の最大加速度の分布図を作れる筈である. しかし、それが実行されていないのは、震度一最大加速度には幅がありすぎて意味がない、最大加速度だけの分布では意味がない、構造物への入力を考えるときには点の資料があれば十分であり面に広げる必要性がない等の理由が考えられるが、実際はどうなのであろうか.

現在、釧路市においてESG研究委員会による共同の 地震観測が実施されている。幾つかある課題の中で、地震 動の地域的バリエイションを計測的に確かめ、震度との対 応関係もとめることなどにも興味が持たれる。 5. 特異値に関連して-1994年北海道南西沖地震余震 記録を中心として-

昨年の釧路沖地震に関するシンポジウムでも話題になったことであるが、昨年・本年と極めて大きい加速度が観測され、いずれも構造物にはさしたる被害をもたらさなかったことである。釧路沖と同年に発生した北海道南西沖地震の余震観測において1.6gが観測され、しかも観測点の学校にはなんら構造的被害が発生しなかった。1994年ノースリッジ地震でも1.8gが観測されたTarzana周辺には構造物の被害は報告されていない。

釧路については昨年のシンポジウム他で多くの議論がなされており、繰り返しを避けたい. 1993年北海道南西沖地震余震で観測された最大加速度1.6gと関連のデータを紹介し、特異値の持つ意味ついて考えてみたい. 但し、最大加速度1.6gの記録に関する詳細は工藤・他(1994)を参照されたい.

強震観測事業推進連絡会議(1993)による報告をもとに

最大加速度(水平成分)-震央距離の関係を図5に示した. Fukushima and Tanaka(1990)によるM_{JMA}=6.5の水平最大加速度の距離減衰曲線を図に並記してあるが、震源に最も近い(震央距離18km)乙部町の観測点を除き、データの平均値をおおよそ近似している。従って、M_{JMA}=6.5の地震としてはごく平均的な加速度値であり、水平動としては世界最大級の加速度1.6gが特殊な値であることを意味している. 1.6gを記録した0TBにおける加速度記象とそのS波部分のフーリエスペクトルを図6に示す。なお、原観測記録に重力による検定からの補正を施してある.

本題に入る前に、我々の疑問は、M6.5の地震で震源距離が20km程度では、Near Field とは言い難いところであるが、何故1.6gもの最大加速度を記録したか、何故水平動に4倍もの差が生じたのであろうか等である。最大加速度としては世界最大級であるという特徴の他に、水平2成分間に4倍程度の差があることはこれまでに例のないことである。なお、S波部分には少なくとも2つの明瞭なフェイズが見え、2以上のイベントが重畳した結果と推定される。

先に述べたように、観測点周辺(しびの岬)は安山岩を基底として、柔らかい段丘堆積物で覆われている。大加速度記録が得られた原因の一つを探るため、強震観測点を

含む周辺で小地震のアレイ観測を行った、図7に示すように、安山岩が露出している0T1と段丘堆積物が覆っている部分(0T2,0T3,0T4,0T5)、岬と隔離した内陸部(0T6,0T7)での比較観測を行った、但し、0T7は図7の範囲外にあり、強震観測点と同一地点である0T3から南東約1kmの地点にある。0T2,0T3,0T4はほぼ同じ標高にあり、0T6では極表層はあるものの、周辺に0T1と同じ安山岩が露出している。

同時に観測された記録の一例を図8に示す.観測は固有周波数1Hzの動コイル型地震計を減衰常数(h)6.5で用い,

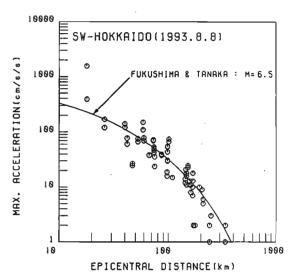
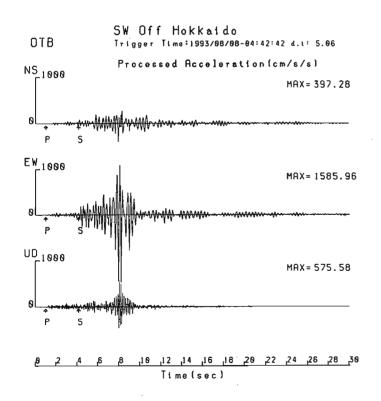


図5 1993年8月8日北海道南西沖地震 の最大加速度の距離減衰.



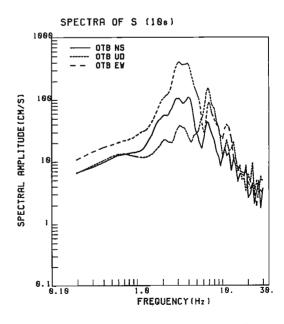


図6. 乙部町における1. 6gの観測記録とフーリエスペクトル.

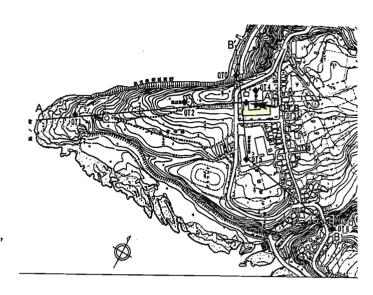
出力を加速度として得ている. 3. で触れたように、弱震 動と強震動の相関が高いという前提でいえば、図7に示す 狭い範囲で、表層のない岩盤地点を除き、M6.5の地震では おおよそ1gを越え、最も大きい加速度は2gに達していたと 推定される、従って、最大加速度から震度表示にするとす れば、どの式を使ったとしてもOT1を除き震度6となろう、 一方, 図9は図8に示す加速度記録を,1Hzのカットオフ周 波数をもつバターワースフィルターを通した後、直接積分 により求めた速度記象である、M6.5の地震でOTBの最大速度 は 57cm/sであり、この場合も比例的に最大速度を考えると、 狭い範囲で20-70cm/sに分布したことになり、翠川・福岡 (1988)から類推すればこの僅かな区域内で震度4と5の1 階級異なる場所が生じた可能性がある. OT1を規準にした 各地点のスペクトル比(水平成分のみ)を図10に示す. OT2, OT3, OT5 は卓越周波数や増幅度に若干の差はあるも のの、ほぼ同程度の増幅特性をもつグループと見なせる、 しかし、強震観測点であるOT3と30m程度しか離れていない OT4は前者に比べ増幅度は約1/2, 卓越周波数も有意に異な っている. 計測的特性値が、このような狭い地域で異なる 場合に、線引きをするか否かは、特性値と地震被害に関す るより豊富な経験を必要としている.

1994年ノースリッジ地震の際にTarzanaでの最大加速度1.8gは水平動では世界最大の加速度であるが、図3で理解されるように、周辺とは孤立した値を示している。Borchert(1994)による余震観測からの検討では、ごく観測点周辺のsite effectのようであるが、もしそうだとすれば、図3のTarzanaのデータ故に出来ている大きなピークの意味をどう考えるべきか、あるいはすそ野が広すぎるのではないかという疑問や批判も可能である。

6. その他の問題

まだまだ多くの問題点・疑問点があると考えられるが, 気のついたことを箇条書きにしてみると

1) 距離の問題:弱震動として用いられるのは、余震や核爆発、微小地震であり、基本的に遠地の記録である。強震動予測は一般に近地地震動の推定になり、問題はないのか.波動伝播が1次元問題でかたがつく、震源の方位依存性は考慮の用なし、等が言えなければ、震源一観測点の距離の問題は重要かと考える。Iglesias(1993)は震源の位置の違いで最大加速度分布が異なることを指摘しており、サ



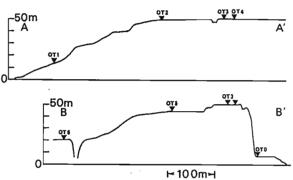


図7. 強震観測点周辺の地図・地形.0T1-0T6は小地震 観測点.0T1は露岩サイト,0T6はごく薄い表層は あるもののほぼ岩盤サイト.他は数m-10m程 度の厚さの軟らかい堆積層上である

イトだけでは決まらない要素を含めなければならないとす るとさらに手続きは面倒になる.

2) 弱震動記録の空間密度:弱震動記録を利用するといえども,広い範囲を必要な密度でカバーすることは極めて困難な作業である.他の資料-地質・物理探査・微動などーを必要とする.その時には関連する諸量と地震動の増幅・他に対する基本的理解が求められる.

このような問題設定をしていくと地震工学あるいは強 震動地震学全般を扱うことになりかねないので、後日の議 論としたい。

7. 謝辞 北海道南西沖地震余震の記録は北海道大学理学部, 笹谷 努・斎藤誠治・南雲秀樹, 東京大学地震研究所坂上 実・髙橋正義の各氏と共に得たものである.

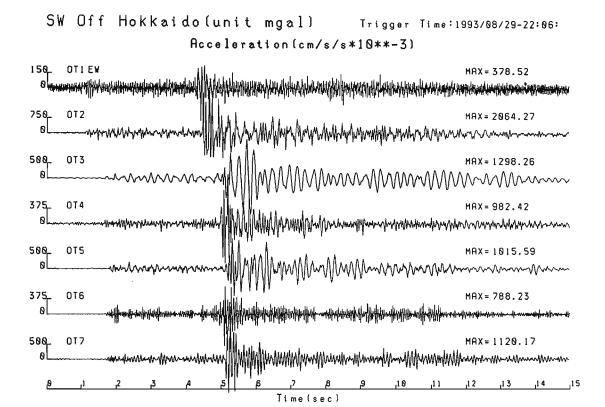


図8.8月8日の地震とほぼ震源を同じくする小地震のアレイ記録.水平動加速度記象.

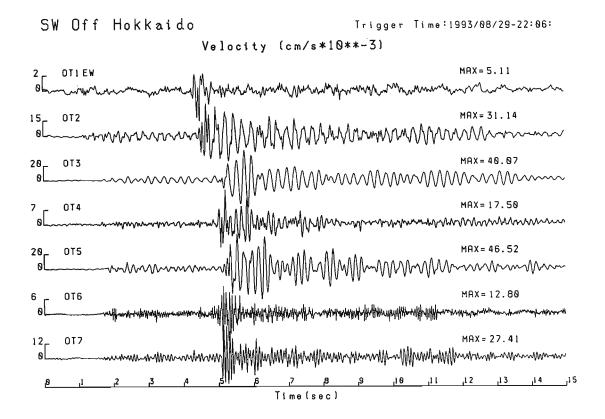


図9.8月8日の地震とほぼ震源を同じくする小地震のアレイ記録.水平動速度記象.

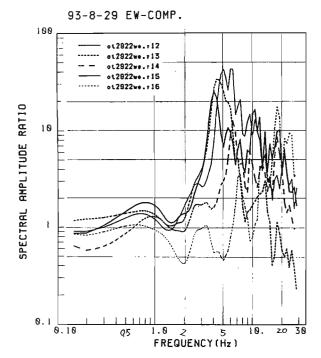


図10.0T1を規準としたスペクトル比.

参考文献

- Aki, K., 1988, Local site effects on strong ground motion, Earthq. Eng. Soil Dyn. II, ASCE, 103-155.
 Aki, K., B-H. Chin and K. Kato, 1992, Seismological and geotechnical studies of local site effect on strong and weak motions, Proc. Intn. Symp. ESG, Odawara, 97-110.
- Borchert, R. D., 1994, Strong ground motions generated by the Northridge earthquake of January 17, 1994: Preliminary implication for site-dependent design spectra, 1994年ノースリッジ地震災害調査 速報,日本建築学会ノースリッジ地震災害調査 団、83-114.
- Chin, B. H. and K. Aki, 1991, Simultaneous study of the source, path and site effects on strong motion during the 1989 Loma Prieta earthquake: a preliminary result on pervasive nonlinear site effects, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1859-1884.
- Darragh, R. B. and A. F. Shakal, 1991, The site response of two rock and weak ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1985-1899.

- 荏本孝久・鏡味洋史・望月利男, 1993, 釧路市内の震度分布と被害, 第21回地震震動シンポジウム, 49-60.
- Fukushima, M. and T. Tanaka, 1990, A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 757-783.
- Iglesias, J., 1991, Seismic zonation of Mexico city, Proc. 4th Int. Conf. Seismic Zonation, III, 471-478.
- 鏡味洋史, 1993, サイスミック ゾーネイション, 地震 2 , 46, 217-228.
- 工藤一嘉・笹谷 努・斎藤誠治・南雲秀樹・坂上 実・高橋正義,1994,1993年北海道南西沖地震の余震群の強震記録,月刊海洋,号外No.7,95-101.
- 強震観測事業推進連絡会議,1993,1993年8月8日北海道南西沖地震,強震情報,No. 35.
- 翠川三郎, 1993, 強震時にみられる地盤特性の非線形性, 地震2, 46, 207-216.
- 翠川三郎・福岡知久,1988, 気象庁震度階と地震動強さの 物理量との関係,地震2,41,223-233.
- 岡田成幸,1987, 震度と物理量に関する関係式の考察,地震災害事象の通信・面談・現地調査法にもとづく組織的研究(自然災害特別研究成果,代表太田裕),41-55.
- 太田 裕, 1994, 強震動情報と地震防災, 地震 2, 47, 113-136.
- Seekings, L.C. and J. Boatwright, 1994, Ground motion amplification, geology, and damage from the 1989 Loma Prieta earthquake in the city of San Francisco, Bull. Seism. soc. Am., 84, 16-30.
- Wentworth, C.M., R.D.Borchert, R.K.Mark, and D.M.
 Boore, 1994, Maps of peak horizontal and vertical
 accelerations recorded for the Northridge,
 California, earthquake of January 17, 1994 and
 general geology of epicentral region, USGS OpenFile Rep. 94-197.

地震動の時空間分布 一観測記録を含む条件付時空間関数-

Space-time variation of earthquake ground motion including observed strong ground motions

川上 英二* Hideji Kawakami

Records of strong motion are often used as the ground motion inputs in earthquake analysis and in the design of structures. The design of underground structures, however, requires more than just the time history at any particular point on the earth's surface. It also requires the space-time variation of the ground motion. Meanwhile, a real time estimation of the spatial distribution of the earthquake ground motion based on the observed records at several monitoring stations is required for emergency actions for the restoration of widely spread lifeline structures. Several methods have been developed for generating a simulated space-time variation that includes strong ground motions recorded at observation points. This simulated variation is characterized by an apparent velocity and by a coherence function. Here a case study is presented using motion recorded during the 1986 SE Off Boso Peninsula earthquake.

1. はじめに

地震による構造物の動的挙動を検討するための第一歩は、時間の関数として入力地震動を扱うことであった。 SMAC などの強震計が全国にわたって数多く設置され、最大加速度が大きい地震波形が次々に観測され、構造物の設計に役立つことになった。ただし、この地震動は一地点での記録であった。

その後、地震計を隣接して複数配置して地震動を同時 観測するアレー観測が盛んになった。そして、時間だけ でなく場所(空間)の関数として、地震動を扱うことの 重要性が注目された。しかし、最初は、主に理学的な興 味からの観測であった。波動の種類は何か、地震動はど のように伝播するのかなどの検討が進んだ。

更に,時空間関数としての地震動の性質は,構造物の 挙動にも大きな影響を与えることが判ってきた.大きい 基礎を有する剛な構造物に対しては、入力が場所に関して平均され入力が減少するという入力損失の理論¹⁾が観測結果から説明された。一方、地中埋設構造物・橋梁などの柔な長大構造物に対しては、逆に、入力が場所毎に異なる事により、相対変位、ひずみが増加することが指摘された²⁾。

上述の理由で、地震動の時空間分布を考える必要があることが指摘されてきたが、近年、単に時空間分布を考えるだけでなく、観測結果を時空間分布の全体像の一部分とみなす考えが提起された³⁾. そして、地震動の観測結果に基づく条件付時空間分布を扱うことが提案された.この目的は、次節に述べる主に2つである。本文では主にこれらに関して目的、理論、数値計算結果などを整理して説明する。

^{*} 埼玉大学教授, 工学部建設工学科 Professor, Dept. of Civil Eng., Saitama University.

2. 条件付時空間分布を考える目的

条件付時空間分布を考える目的としては、(1) トンネル・橋梁などの長大または地中構造物に対する設計用地震波形の作成 $^{8-8}$, および、(2) 地震動のモニタリングによる被害のリアルタイムの推定のための地盤震動の空間補間 $^{9-12}$ が近年提起されている。

2.1 長大・地中構造物に対する設計用地震波形の作成。

トンネル,パイプライン,地中埋設管路などの地震波動の伝播に伴う動的応答解析,耐震設計を行う場合,まず,管路・地盤・基盤を力学的にモデル化し,地盤または基盤における地震動を入力する必要がある¹⁸⁾(図-1参照).地盤または基盤からの地震入力は,管路に沿った各点で与える必要があり,この各点での入力の時刻歴を,つまり,時間および空間の関数としての地震波形をどのように想定するかは,管路の応答に支配的な影響を及ばすため重要な問題である.

従来,入力地震動としては実測された強震観測記録が 用いられる事が多い、しかし,地震波の水平方向のみか け伝播速度として,石油パイプライン基準¹⁴⁾のように地 盤のせん断波速度を用いるか,アレー観測記録の相互相 関関数のピークから求められた値を用いるかでは結果が 著しく異なる可能性がある.

前者の地盤のせん断波速度を用いてトンネルなどの設計を行う場合,構造物に生じるひずみが大きくなり過ぎて、設計ができないことがある。こうした場合,地盤と構造物との間が滑ると考え、これらの間に設置されるばねの定数を非常に小さく低減させて設計する場合がある。しかし、ばね定数をどの程度低減させれば良いかはよく判っていない。

一方,合理的であるという点では,みかけ速度としては後者の相互相関関数のピークから求められた値を用いるのが妥当であるが,波形の変形の影響を無視しているため,危険側の評価を与える可能性があるという問題?がある。例えば,図-2 で実線が波形の変形を無視した場合,破線・一点鎖線が変形を考慮した場合のひずみのスペクトルを表す。波形の変形を考慮することにより,二地点間の距離が特に短い場合,ひずみの大きさは数倍になる可能性があることを示している。

また、現実的という意味で観測波形は重要である.従来の時空間波形のシュミレーションでは、観測された地

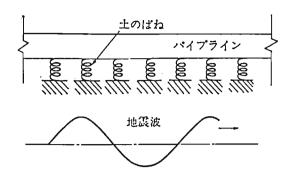


図-1 地中構造物のモデル化 (久保¹³⁾による)

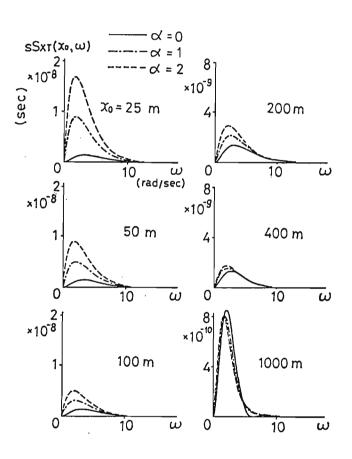


図-2 平均ひずみのスペクトル密度関数 _sS_{xτ}(x₀, ω) (x₀: 二地点間の距離, ω:角振動数, α:変形定数)

震記録をどの地点においても満足していないため,入力 波形として用いるには実際的でなく,解析結果の説得力 が弱い.このため,耐震設計において,少数の入力地震 動を設定して応答計算を行うに際しては,現実的な地震 波形であるという理由で、実際に観測された強震波形を 単純に場所に関して伝播させて応答計算を行う場合が多いものと考えられる。建築物の場合には、例えば、エル・セントロ、タフト、十勝沖などの地震波形を用いて耐 震性のチェックを行うことが多いが、地中構造物の場合 には、一地点における波形では不十分であり、時空間関 数としてのエル・セントロ、タフト、十勝沖などの地震 波形を想定する必要がある。

また、橋梁の設計に際しても、それぞれの橋脚、橋台からの入力地震動を決める際には、地中構造物の場合と同様に、条件付時空間分布を考える必要がある。

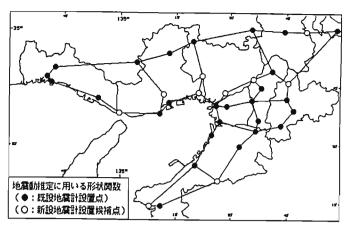
以上のように、第1の目的は、従来、設計に用いられてきたエルセントロ地震波形などの強震波形をある1地点では満足するような時空間関数としての設計波形を作ることである。最大加速度が大きい強震波形が隣接して得られることはあまり期待できないので、観測地点の数は1地点の場合が一般的であろう。また、空間の大きさは、構造物の大きさであり、長さ数km以下の範囲にわたっての時空間波形の想定が主な目的となっている。

2.2 地震動のモニタリングによる地盤震動の空間補間⁸⁻

近年,観測機器および無線網の充実に伴い,情報をリアルタイムで集めてライフラインなどのシステムの制御 (供給停止の判断など)に使うことが検討されている. 例えば,東京ガス (株)では,多数の地震計を供給地域に配置しており,無線により集められたデータを基に,各ブロックに対する供給停止の判断を行うシステムが検討されている. 必要な供給停止を行わなければ,ガス漏れによる二次被害を引き起こす可能性がある. 逆に,不必要な供給停止を行えば,生活が不便になるばかりでなく,復旧に余分な作業が必要になる.

最適な判断を行うためには、被害の分布を推定する必要があり、このためには、まず、外力である入力地震動を各地点に対して推定する必要がある。その際、地震計を設置した観測点でのデータを用いて推定することになる(図-3 参照).

以上の問題は,観測点での条件付時空間関数としての 地震動の補間の問題として提起されている⁹⁻¹²⁾.本例の 場合は,2.1 節の場合とは少し異なり,観測地点数は, 一般には数箇所または数十箇所であり,直径数十km の範 囲にわたっての内挿を目的としている.



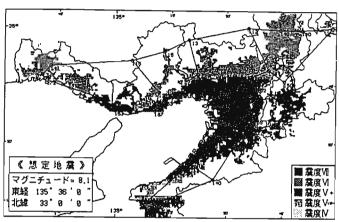


図-3 地震動のモニタリングによる地盤震動の 空間補間 (高田ら^{11,12)}による)

3. アレー観測結果から得られた時空間分布に関する知 見

アレー観測による実測結果を解析することにより、従来、(1)地震波動の水平方向のみかけの伝播速度、(2) コヒーレンシー、(3) 相互相関関数、クロススペクトル、周波数-波数 (F-K) スペクトルなどが求められている.

3.1 みかけの波動伝播速度

アレー観測波形の相互相関関数のピークのずれ時間と 2 地点間の距離から、地震波動の伝播速度が求められている。 図-4 には、これまでに得られている結果 $^{15-18)}$ を整理して示す。地震波動の水平方向のみかけの伝播速度は、何れも数km/s であり、地表層のせん断波速度が数百m/s であるのに対し、1 桁も大きいことがわかる。

3.2 コヒーレンシー

各振動数での2地点間の波形の相関を表すコヒーレン

シーで、求められている結果^{1・19・20}の一例を図-5に示す. 二地点間の距離が大きい程、また、振動数が大きい程、コヒーレンシーは小さく、波形は異なることになる.

3.3 相互相関関数,クロススペクトル,周波数-波数スペクトル

アレー観測結果より、相互相関関数、クロススペクトル、周波数-波数スペクトルが求められている.

地震波動の地表面に沿うみかけの伝播速度 c と コヒーレンシー $coh(\omega,x_0)$ (ω :角振動数, x_0 :二地点間の距離)が得られた場合,時空間地震波形をシミュレートするためのクロススペクトル $S_{x\tau}(x_0,\omega)$ は次式により想定することができる $^{1,2)}$.

 $S_{x\tau}(x_0,\omega)=S_{\tau}(\omega)\cosh(\omega,x_0)\exp(-i\omega x_0/c)$ (1) ここで、 $S_{\tau}(\omega)$ はパワースペクトルであり、観測記録のスペクトルを用いる。

4. シミュレーションの条件

地震動の振幅レベルの空間分布のみを考えるか、地震 波形の時空間分布を考えるかにより、また、これらの値 が確定量か、確率量であると考えるかによって扱いが異 なってくる。

4.1 振幅レベルの空間分布の条件

地盤の最大加速度,最大速度,SI値などの地震動の 振幅レベルを,確定量,あるいは,互いに相関を有する 複数の確率量であると考える.この空間確定量または確 率量を,観測結果を基に空間全体に内挿または外挿する 際,次の2つの条件を満足するものと仮定する.

条件(1): 空間確定量または確率量は、観測地点においては観測値に厳密に一致する.

条件(2): 確率量と考えた場合には、空間確率過程の 平均値、分散、自己相関関数は、想定した平均値、分散、 自己相関関数に一致する.

4.2 時空間波形の条件

地盤の変位を互いに相関を有する複数の確率過程と考える.この時空間確率過程は,次の2つの条件を満足するものと仮定する³⁾.

条件(1): 時空間確率過程は,観測地点においては観 測波形に厳密に一致する.

条件(2): 時空間確率過程と観測波形との 時間に関

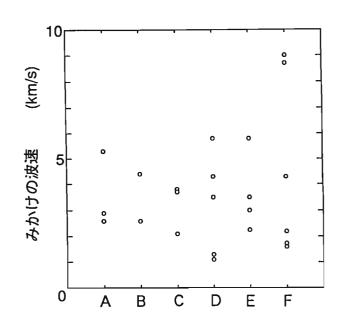


図-4 みかけの伝播速度

(A:田村ら¹⁵⁾, B:土田ら¹⁶⁾, C:0 Rourkeら¹⁷⁾, D.E.F:大石ら¹⁸⁾による)

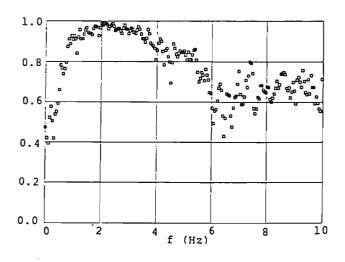


図-5 コヒーレンシーの例 (石井¹⁾による) (二地点間の距離 x₀=40m)

する自己相関関数(またはパワースペクトル)は一致する. また,時空間確率過程の相互相関関数(またはクロススペクトル)は,想定した相互相関関数に一致する.

ただし、この相互相関関数(またはクロススペクトル)の想定は、観測波形の自己相関関数と、地震波のみかけの伝播速度、波形の変形の程度(コヒーレンシー)とから行う。

5. 振幅レベルの空間分布のシミュレーション理論

地盤の最大加速度,最大速度,SI値などの外力の振幅レベルを確定量,または,互いに相関を有する複数の確率量と考え,内挿または外挿を行う.これらは時間の関数ではなく,空間だけの関数である.

従来、最大加速度 Amax などの数値を内挿する方法として、x-y 面を地表面にとり、 Amax=a+bx+cy+dxy などの関数を当てはめ最小自乗法で内挿する方法、有限要素法でよく用いられる形状補間関数で補間する方法¹¹¹、Kriging法、カルマン フィルターを用いる方法などが考えられる。観測値の誤差を考慮できるかどうか、簡便かどうかなど、方法により長所、欠点が異なる。

高田らいは、地震動の増幅特性を表す地盤パラメーターを用いて、任意地点における最大加速度の分布をリアルタイムに推定する一手法を提案している.

野田ら $^{21-22}$)は,正規確率場ばかりでなく,非正規あるいは非線形な確率場において,内挿の空間関数をシミュレートするための理論を提案し,推定精度に関しても詳細な理論を展開している.

6. 時空間波形のシミュレーション理論

これまでに観測記録を含む時空間地震波形をシミュレ ートする手法として以下の手法が展開されている.

- (1) 各々の時空間サンプルが, 4.2節の条件(2)を満足する方法
 - ① 二重フーリエ級数を用いる方法3.4)
- (2) 多くの時空間サンプルのアンサンブル平均が, 4.2節 の条件(2)を満足する方法
 - (a) 振動数領域での方法
 - ② 不規則確率過程のシミュレーション理論に基づく 方法5)
 - ③ 多入力線形システム理論に基づく方法()
 - ④ Kriging手法を用いる方法²³⁾
 - ⑤ フーリエ係数の条件付確率密度関数を用いる方法
 - (b) 時間領域での方法
 - ⑥ 多変数 (両側) ARモデルを用いる方法"

⑦ Kriging手法を用いる方法²⁴⁻²⁸⁾

以下では、①~⑦の方法についての理論および特徴を 簡単にまとめる.

① 二重フーリエ級数を用いる方法3.4)

場所 x と時間 t における地盤の変位を, u(x,t) で表し、これを二重フーリエ級数

$$u(x, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{a_{mn} \cos(k_m x) \cos(\omega_n t)\}$$

- + $b_{mn}\cos(k_mx)\sin(\omega_n t)$
- + $c_{mn} sin(k_m x) cos(\omega_n t)$

+
$$d_{mn} \sin(k_m x) \sin(\omega_n t)$$
 (2)

に展開する. 相互相関関数および観測記録から係数amn. bmn, cmn, dmnを決定する. 他の方法では, 時空間関数のサンプルのアンサンブル平均が4.2節の条件(2)を満足するのに対し, 本方法では, 各々のサンプルが, 条件(2)を満足する点に特徴がある.

② 不規則確率過程のシミュレーション理論に基づく方法

場所 i と時間 t における地盤の変位を,互いに相関を有する I 個の確率過程 $u_{\iota}(t)$ $(i=1,2,\cdots,I)$ で表す. $u_{\iota}(t)$ は,片側クロススペクトル $S_{XT}(x_{0},\omega)$ $(x_{0}: 二地点間の距離, \omega: 角振動数) が与えられた場合,次式で表すことができる.$

$$u_{i}(t) = \sum_{p=1}^{i} \sum_{n=1}^{N} |H_{ip}(\omega_{n})\sqrt{\Delta \omega}| \sqrt{2}$$

$$\cdot \cos\{\omega_{n}t + \theta_{ip}(n) + \phi_{pn}\}$$

$$(i=1, 2, \dots, 1) \qquad (3)$$

ただし、直流成分は存在しないものと想定しており、Nは十分大きな整数である。また、 $H_{\rm Lp}(\omega_{\rm n})\sqrt{\Delta\omega}$ は、片側クロススペクトルを要素とするマトリックスを分解して与えられる。 $\theta_{\rm Lp}({\rm n})$ は $H_{\rm Lp}(\omega_{\rm n})\sqrt{\Delta\omega}$ の偏角である。

本方法は,観測波形が1個である場合に有効であり, $u_1(t)$ が観測記録に一致するという条件は, ϕ_{1n} ($n=1,\cdots$, N)を乱数ではなく,観測記録から求めることで満足される.また, ϕ_{nn} ($p=2,\cdots$, i)($n=1,\cdots$, N) は $0\sim2\pi$ の範囲で互いに独立な一様乱数である.

③ 多入力線形システム理論に基づく方法60

非観測地点の地震波形を、観測記録を入力とする線形システムの出力として取り扱うものである。地点 x_i ($i=1,2,\cdots,1$)の中の地点 x_k ($k=1,2,\cdots,K$) (観測地点) にお

いて観測記録 $u_*(t)$ が得られているとする. このとき, 非観測地点 $x_v(v=K+1,K+2,\cdots,I)$ における地震波形 u_v (t)を次式でシミュレートする.

$$u_{v}(t) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{n=-N}^{N} H_{vk}(\omega_{n}) U_{k}(\omega_{n}) \exp(i\omega_{n}t) + z_{v}(t)$$
(4)

ただし、 $U_{\mathbf{k}}(\omega_{\mathbf{n}})$ は観測記録の複素フーリェ係数である。また、 $H_{V\mathbf{k}}(\omega_{\mathbf{n}})$ は複素伝達関数、 $Z_{V}(t)$ は付加雑音であり、想定したクロススペクトルから求めることができる。本方法の適用例としては、7節のシミュレーション結果の例で示す。

④ 周波数領域でKriging手法を用いる方法²³⁾

Vanmarcke・Fenton が提案した Kriging手法に基づく方法 2 s)では,まず,観測波形をフーリエ級数に展開し,観測地点 x_a におけるフーリエ係数 A_{ak} , B_{ak} を求め,非観測点 x_b における係数 A_{bk} , B_{bk} を Kriging手法により推定する.一方,観測点と非観測点のすべての地点に対して,無条件のフーリエ係数 A_{ak} , B_{ak} , A_{bk} , A_{bk} , B_{bk} を従来の方法によりシミュレートする.そして,観測地点におけるフーリエ係数から,非観測点における係数 A_{bk} , B_{bk} は次式で求められる.

$$A_{DK} = A_{DK} + A_{DK}^* - A_{DK}^*$$
 $B_{DK} = B_{DK} + B_{DK}^* - B_{DK}^*$
 A_{DK} , B_{DK} , A_{AK} , B_{BK} , A_{AK} , B_{BK} , A_{AK} , $A_$

⑤ フーリェ係数の条件付確率密度関数を用いる方法⁰・

亀田・盛川 $^{8.10}$) は,まず,観測波形をフーリエ級数に展開し,観測地点 x_a におけるフーリエ係数 A_{ak} , B_{ak} を求めている.そして,この値を条件と考え,非観測点 x_b における係数 A_{bk} , B_{bk} の分布である条件付確率密度関数

 $f(A_{bk}, B_{bk} | A_{ak}, B_{ak}(a=1, 2, \cdots, K))$ (6) を解析的に表している.これは,多次元の結合正規確率 密度関数で表され,平均値と標準偏差が問題になる.

その後、この問題を、条件付 初通過確率の問題に発展させている.

⑥ 多変数 (両側) A Rモデルを用いる方法"

地盤の変位を互いに相関を有する定常ガウス確率過程であると考え、地点 i と時刻 t (ここで、t は整数としても一般性を失わない)における地盤の変位を、互いに相関を有する平均値 0 の多変数 A R モデル $u_1(t)$

$$u_{i}(t) = \sum_{p=1}^{i} \sum_{m=1}^{M} b_{ip}(m)u_{p}(t-m) + \varepsilon_{i}(t)$$

$$(i=1, 2, \dots, I)$$
(7)

または,多変数両側ARモデル

$$u_{1}(t) = \sum_{m=-M}^{-1} b_{11}(m)u_{1}(t+m) + \varepsilon_{1}(t)$$
 (8)

$$u_{i}(t) = \sum_{p=1}^{i-1} \sum_{m=-M_{2}}^{M_{3}} b_{ip}(m) u_{p}(t+m)$$

$$\begin{array}{c}
-1 \\
+ \sum_{m=-M} b_{i,i}(m) u_{i}(t+m) + \varepsilon_{i}(t) \\
(i=2, \dots, 1)
\end{array}$$
(9)

で表す.ここで, $\epsilon_1(t)$ は誤差波形, M,M_2,M_3 はモデルの次数である.

式(7)(8)は,従来のARモデルであるが,式(9)は既に計算されている波形 $u_p(t)$, $(p=1,2,\cdots,i-1)$ については過去の値だけでなく,現在および未来の値をも使用している.係数 $b_{1,p}(m)$ は,相互相関関数を係数とする連立一次方程式により求めることができる.

与えられた K 地点の観測記録を含む時空間地震波形の シミュレーションを行う場合には、誤差波形 $\epsilon_i(t)$ (i=1, ..., K)を乱数に基づくのではなく、観測記録に基づいて決める必要がある。本方法は有力ではあるが、波形の発散の問題など検討すべき問題もある。

⑦ 時間領域でKriging手法を用いる方法²⁴⁻²⁸⁾

星谷・丸山 25,26) は,時間領域で,非観測点の波形を,観測点の時系列 $u_k(t)$ $(k=1,2,\cdots,K)$ の線形和として表す Kriging手法に従い,次のように表し,

$$u_{i}(t) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{m=-M_{2}}^{M_{3}} b_{ik}(m) u_{k}(t+m) + \varepsilon_{i}(t)$$
 (10)

誤差の分散が最小となるように係数を決める方法を展開 している.

7. 時空間波形のシミュレーション結果の例

本節では、一直線上に並ぶアレー観測地点の中の数点の記録を観測波形として選んで、観測地点間の地震波形のシミュレーションを行った結果の例を示す。そして、選んだ地点以外の観測波形とシミュレーション波形と比

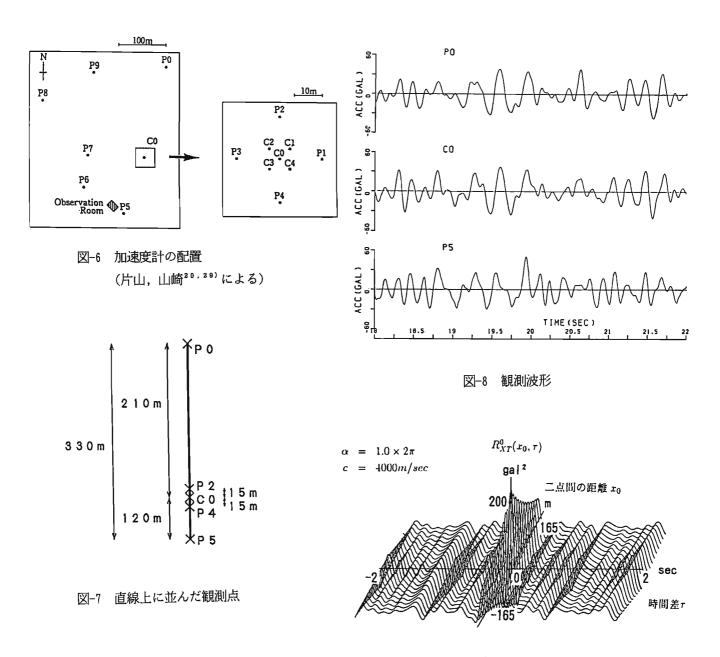


図-9 仮定した相互相関関数

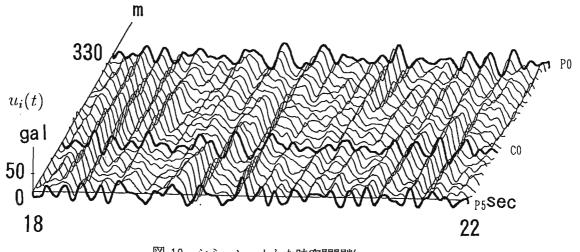


図-10 シミュレートした時空間関数 (α=1.0x2π, c=4000m/sec)

較し、方法の一つの検証を行った.

7.1 観測波形

数値計算には、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内において実施されている三次元高密度アレー観測²⁰, 29)の地震記録を使用する. 地震計の配置を図-6 に示す. 波形をシミュレートする地点は、P0-P2-C0-P4-P5をつなぐほぼ一直線に並ぶ地点である(図-7). P0-C0間は210m, C0-P5間は120m, P2, P4はC0から約15mの地点にある. そして、これら5地点の中、観測地点をP0, C0, P5の3地点のみと考え、15m間隔に並ぶ合計23地点での地震波形をシミュレートした.

本研究では、1986年6月24日に観測された房総半島沖地震における加速度記録(地下1m, NS成分)を使用する。定常な強震動の区間(t=18~22sec)を使用し、PO、CO、P5の各点の観測記録を図-8に示す。なお、本論文では、6節③の多入力線形システム理論に基づく方法を用いてシミュレートした結果を示してある。

7.2 クロススペクトル、相互相関関数

時空間地震波形をシミュレートするためのクロススペクトルは次式により想定する.

$$S_{XT}(x_0, \omega) = S_T(\omega) \exp\{-\alpha |\omega| |x_0|/(2\pi c)\}$$

$$\cdot \exp(-i\omega x_0/c) \qquad (11)$$

ここで、 $S_{\tau}(\omega)$ はパワースペクトルであり、3地点(P0、C0、P5)の観測記録のパワースペクトルの平均値を用いた。 α は波形の変形しやすさの程度を表すパラメーターであり、これを変形定数と呼んでいる $^{2\cdot3}$)。 $\alpha=0$ は波形が変形しない場合を表しており、 α が大きい程、二地点の波形の相関は減少する。c は地震波の地表面に沿うみかけの伝播速度である。本論文では、片山、山崎の研究 $^{20\cdot29}$ により $^{c=4}$,000m/secの値を、また、 $\alpha=2\pi$ を使用した。想定した相互相関関数を図-9に示す。

7.3 時空間サンプル波形

シミュレートした時空間地震波形のサンプルを図-10に示す.シミュレーション結果では観測地点(PO, CO, P5)においては観測記録に一致している事がわかる(図-10 太線).図-11には、シミュレートされた時空間地震波形から求められた相互相関関数を示す.波形サンプルの相互相関関数が、想定した相互相関関数に調和的であることがわかる.

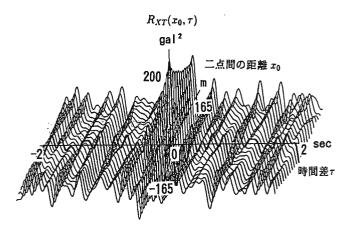


図-11 シミュレートされた時空間サンプル 関数の相互相関関数

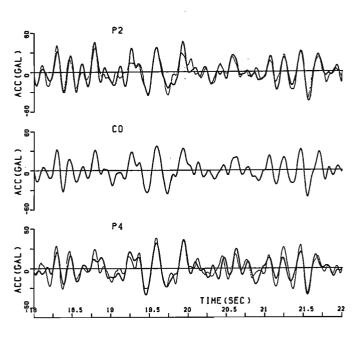


図-12 シミュレートされたサンプル波形と 観測波形との比較

さらに、シミュレートした時空間地震波形(図-10)から、COでの観測記録と、P2、P4においてシミュレートされた波形を取り出したものを図-12に太線で示す。そして、観測結果(細線)と比較して示してある。シミュレーション結果は確率量であり両者は厳密に一致する必要は無いが、調和的であることがわかる。

8. 結論

従来,地震動の時空間分布を扱う必要が指摘されてきたが,近年,単に時空間分布を考えるだけでなく,観測結果を時空間分布の全体像の一部分とみなす考えが提起されている。そして,地震動の観測結果に基づく条件付時空間分布を扱うことが提案されている。この主な目的は,(1)トンネル・橋梁などの長大または地中構造物に対する設計用地震波形の作成,および,(2)地震動のモニタリングによる被害のリアルタイムの推定のための地盤震動の空間補間である。本文では,目的,理論,数値計算結果などを整理して説明した。

9. 推定精度などの今後の問題点

地震波形を、時空間確率過程と考えた場合には、シミュレートされた波形は、サンプル波形であり、分布する確率量である。このため、この平均値および分散値は重要なパラメーターである。

2. 1節の設計波形を作成する目的では、設計においては、 結局は、入力波形としていくつかの時空間サンプル波形 を確定させて設計するため、シミュレーションそのもの が重要である。

一方、初通過確率、極値分布を考える際には、シミュレーションそのものより、平均値および分散を求めることが重要である。その際、平均値、分散の真値が与えられている場合、または、与えられておらず、観測地点における値から推定する場合など、実際に扱う問題によっていろいろな場合の定式化が必要になってくるものと思われる。

星谷・丸山^{25,26)}は,条件付平均値および条件付分散値の理論式を示している.観測地点においては,推定誤差は零になり,観測地点の中間点で大きな値を示している(図-13参照).

これまでに展開された理論を,実際の複雑な現象に適用できるようにするためには,理論をさらに今後拡張する必要がある.たとえば,従来は,簡単化のため,定常な場合を考えた理論が多いが,実際の現象は非定常であるので,区分定常などの考えを用いて,非定常な場合に対する理論も発展させておく必要があろう.

また,従来は,話を簡単にするため,ガウス(正規) 過程を扱う場合が多いが,非正規,非線形な確率場を考 える必要がある場合も考えられ,これらの複雑な場合に

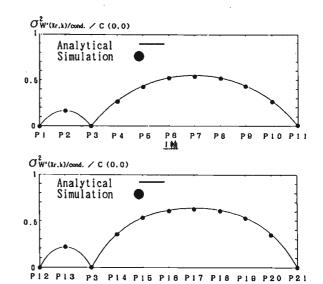


図-13 推定誤差分散を表す条件付分散値 (観測地点 P1, P3, P11, P12, P21) (丸山, 星谷²⁶⁾による)

対しても検討が進められている21,22).

謝辞: 本研究では, (財) 震災予防協会, 強震動アレー 観測記録データデース推進委員会/作業部会による強震 動アレー観測記録データベース(1992年10月)から東京 大学生産技術研究所片山研究室提供のデータを使用しま した.

参考文献

- 1) 石井清:確率論手法による地震波の入力損失の効果 の検討,第16回地震工学研究発表会講演概要,1981.
- 2) 川上英二・佐藤靖彦:地盤の相対変位・ひずみの推 定結果に及ぼす地震波形の変形の影響,土木学会論 文報告集, No. 337, 1983.
- 3) 川上英二:一地点の観測記録を含む地震波形の時空 間関数のシミュレーション , 土木学会論文集, No. 410/I-12.1989.
- 4) 川上英二:Imperial Valley 地震の観測記録を含む 時空間関数としての地震波形のシミュレーション, 第8回日本地震工学シンポジウム, 1990.
- 5) 川上英二・小野牧夫:一地点での観測記録を用いた 時空間地震波形のシミュレーション,土木学会論文 集, No. 441, 1992.

- 6) 川上英二・小野牧夫:多入力線形システム理論に基づく観測記録を含む時空間地震波形,土木学会論文集, No. 489, 1994.
- 7) 川上英二・小野牧夫:多変数ARモデルを用いた観 測記録を含む時空間地震波形,土木学会論文集,No. 489,1994.
- 8) 川上英二・小野牧夫・楊仲元: 房総半島南東沖地震 (1986)の観測記録を含む時空間シミュレーション波 形, 第9回日本地震工学シンポジウム, 1994.
- Kameda, H. and Morikawa, H.: An Interpolating Stochastic Process for Simulation of Conditional Random Fields, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 7, 1992.
- 10) Kameda, H. and Morikawa, H.: Conditioned Stochastic Processes for Conditional Random Fields, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, 1994.
- 11) 高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二:モニタ リングシステムにおける地震動補間法と精度の検証, 構造工学論文集, Vol. 40A, 1994.
- 12) 高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二: 地震動 モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推 定,構造工学論文集, Vol. 40A, 1994.
- 13) 久保慶三郎: 地震と土木構造物, 鹿島出版会, p. 127, 1981.
- 14) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準 の細目を定める告示,官報,号外第125号,1973.
- 15) Tamura, C., Noguchi, T. and Kato, K.: Earthquake Observations Along Measuring Lines on the Surface of Alluvial Soft Ground, Proc. Sixth World Conference on Earthquake Engineering, 1977.
- 16) Tsuchida, H. and Kurata, E.: Observed Earthquakes Ground Displacements Along a 2500 Meter Line, Proc. U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, 1976.
- 17) O'Rourke, M. J., Bloom, M. C. and Dobry, R.:
 Apparent Propagation Velocity of Body Waves,
 Earthquake Engineering and Structural Dynamics,
 Vol. 10, 1982.
- 18) 大石博・関口宏二:埋設管路の地震時ひずみ発生機

- 構に関する二,三の考察,土木学会論文集, No. 350, 1984.
- 19) 沢田勉: 地震動の工学的諸特性の解析とその応用に 関する研究, 1988.
- 20) Katayama, T., Yamazaki, F.. Nagata, S. Lu, L. and Turker, T.: Development of Strong Motion Database for the Chiba Seismometer Array, Earthquake Disaster Mitigation Engineering, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, January, 1990.
- 21) 野田茂・星谷勝:条件付対数正規確率場の同定,第 9回日本地震工学シンポジウム,1994.
- 22) 野田茂・星谷勝・塚本博之:対数正規確率場におけるユニバーサル・クリッギング,第9回日本地震工学シンポジウム,1994.
- 23) Vanmarcke, E. H. and Fenton, G. A. : Conditioned Simulation of Local Fields of Earthquake Ground Motion, Structural Safety, Vol. 10, 1991.
- 24) 星谷勝:条件付き確率場のシミュレーション理論, 土木学会論文集, No. 458/I-22, 1993.
- 25) Hoshiya, M. and Maruyama, O.: Stochastic
 Interpolation of Earthquake Wave Propagation,
 ICOSSAR' 93, Austria, 1993.
- 26) 丸山收・星谷勝・山口和英:定常・均一ガウス確率 場の条件付き地震波動シミュレーション,土木学会 論文集,No. 489/I-27, 1994.
- 27) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・水谷治弘: 非均質 な確率場を考慮した時空間波形のシミュレーション, 土木学会第47回年次学術講演会, I -340, 1991.
- 28) 野田茂・星谷勝・大霜正樹:クリッギングによる地 盤震動の条件付シミュレーション,第9回日本地震 工学シンポジウム,1994.
- 29) 片山恒雄・山崎文雄:地震動のアレー観測とデータベース,生研セミナーテキスト,東京大学生産技術研究所,1990.

特別講演



強震動の面的・即時的情報の地震防災における役割と期待

Information in Space and Time Domains of Seismic Strong Motions and Its Expectation as Basic Material for Better Earthquake Protection Strategies

太 田 裕* Yutaka Ohta

This paper aims at developing earthquake protection strategies in parallel with qualifying information in space and time domains on seismic strong motions. In the first step the existing framework of earthquake protection strategies for a regional district is reviewed to make clear how the information on seismic input motions has been utilized and to find bottlenecks for its further effective use. In the second step various proposals to elucidate more about characteristics of seismic strong motions are made as for further development of earthquake protection strategies. For this, existing protection strategies are criticized and subdivided into three stages of prior-event, on-event and post-event protections. Accordingly, ways for developing each stage of strategies are explored incorporated with the improvement in quality of information on seismic strong motions in space and time domains. Emphasized is the more necessity of developing the protection strategies for on-event and immediate situations, which is expected to be resulted from acquiring minute, site specific, and time varing information on seismic strong motions.

1. はじめに

ごく最近,筆者は『強震動と地震防災』と題す る報告を地震学会誌(地震2,47巻,1994, 113~136頁) に寄稿した. この中で, 表題 に関わる諸問題についてわが国内外の最近までの 研究展開を概観した. 本シンポジュームでは, こ の報告を前提知識とし、また地震防災の出発点が 地震被害の適正評価にあること、そしてこの適正 評価のための不可欠資料の一つが強震動情報であ るとの基本認識に立って, さらに突っ込んだ議論 を行ってみたい. その中で問題点の抽出に努め, 地震防災の今後の発展に向けて, 強震動がもつ地 震防災情報としての役割とさらなる活用への期待 について考えてみたい、このような観点から、こ の小文はまず上記報告のうち,表題に直接関係す る部分を, 問題展開の基礎資料として, 抄録して いる、次いで、これを前提とした今回の講演内容 について概要を記載する.講演は強震動情報がも つ諸特性の中から、「面」・「即時」の2語に力 点を置く. 前者については[点-線-面]という 地震の受け皿がもつ次元拡大の一つの終端として, [面=地域行政体(都道府県,市町村)]という

理解で話を進める.後者については,現有の地震 防災(対策)計画を地震発生を挟む時間軸に沿っ て時系列的に細区分し, [事前~事後] に至る時 間経過との関わりで再整理を行い、「即時=リア ルタイム,動的〕という考えに立ち議論を展開す る. このような流れの中で,強震動情報が地震防 災の諸戦略にどのように関わってくるかについて 考え、また、地震防災へのさらなる活用のために、 強震動情報をどのような形で獲得することが望ま れるかについて考察する. この小文はこのような, 講演の全体構成について述べている.講演では筆 者等が長年参加している地震防災対策支援即時情 報システム (通称:川崎システム) の構築につい て現況を報告し、話題に具体性をもたせたいと考 えている. なお, 関連文献の殆どが上記の報告に 集録されており, 再録は控えた.

2. 抄錄資料

以下の,縮字部分が上記翰文からの関係部分の抄録である。文章,章・節の番号付け等は若干変更した。

1.地震防災の枠組み

地震防災という言葉から,地域行政単位の地震に対する安全を想い起こ

* 東京大学地震研究所 教授 Professor, Earthq. Res. Inst., University of Tokyo

し、地震の工学といえば個々の構造物を対象とした耐震性の問題と理解するのが一般である。したがって、前者は専ら現実の社会が行政区分(都道府県、市町村等)毎にもつ地震に対するさまざまな危険要素を抉り出し、必要な防災措置を講ずることをイメージする。これに対して、後者は既存構造物の耐震化もさりながら、構造物の建設時点で地震安全性の確保、すなわち、耐震設計に力点が置かれたものと理解されている。笠原(1989)の言葉を借りれば、「前者は広域問題であり、かつ問題が科学技術にとどまらず、経済・社会にも、また市民の行動心理にまで及び、それが複雑に絡み合っている。つまり、開かれたシステムなのである。これに対して、後者、つまり施設耐震とは個々の施設・建物の耐震化に専念する立場で、むしろ建設工学が主体である。広域問題に比べれば閉じたシステムとして扱えるから、作業や当事者の範囲などその論郭は比較的判りやすい。」という。すなわち、地震の工学において前者は面的特性の重要性が強く現れる問題であり、後者は点の問題とみることができる。

1)地震防災計画

わが国は昭和34年(1959)の伊勢湾台風を契機として災害対策基本法を制定し、自然災害防止を国家レベルで扱うことを宣言した(防災法研究会、1987)。この第1条で制定の目的を明確に述べている。引用すると、「この法律は、国土並びに国民の生命、身体及び財産を災害から保護するため、防災に関し、国、地方公共団体及びその他の公共機関を通じて必要な体制を確立し、責任の所在を明確にするとともに、防災計画の作成、災害予防、災害応急対策、災害復旧及び防災に関する財政金融措置その他必要な災害対策の基本を定めることにより、総合的かつ計画的な防災行政の整備及び推進を図り、もつて社会の秩序の維持と公共の福祉の確保に資することを目的とする」、とある。これを受けて、都道府県(市町村)は「・・・当該地域に係わる防災に関する計画を作成し、及び法令に基づきこれを実施する責務を有する・・・」ことが述べられている。地域地震防災計画はこれを根拠に全国的に策定されている。これらはわが国が世界に誇ってよいものである。

ところで,現今,地震防災対策戦略は大別して3通りある [例えば,太 田(1989)]. すなわち,発災型防災対策,予防型防災対策,予知・ 警報型防災対策である。前2者は、わが国では長い歴史をもつ。第1のも のは発災後の緊急ないしは復旧対策に重点をおいており、第2のものは恒 久対策を主眼とした在来型の対策といえる。これに対して第3のものは, 最近の地震予知学の発展と軌を一にして重視されるに至った計画手法です 昭和53年(1978)施行の大規模地震対策特別処置法(大震法)によ って一挙にオーソライズされたものである。準備対策型の最新版といえる。 発災型が事後対策に専念するのに対して予防型および予知・警報型は事前 対策に力点をもつ。事前防災においては発生する地震について詳しく知る こと,およびそれに伴う震害を正確に予測し,危険要因のあらかじめの排 除に努めることが肝要となる。個々の構造物に対する耐震規定の制定と実 施の諸政策は事前(恒久)対策の最も整備されたものでもある。事後防災 においては災害発生の実態を的確に把握し,震害連鎖を断ち切り,被害の 時空間的拡大を阻止することが最優先の対策となる。いずれの場合にも、 地震入力と被害の関係をあらかじめ、あるいは即時的に知ることが大切と なり、災害の阻止点をこの関係の中に求めることになる。

2)地震災害のシステム関係

砂漠の真ん中で起こる地震は、如何に大きくとも人間社会への直接の影響はない。このことから容易に判るように、大地震と被害地震は必ずしも 1対1に対応しない。災害科学の分野では「人間社会がもつ災害危険ポテンシャルー素因ーが有限(ゼロでない)なるが故に、地震などの自然現象ー誘因ーの発生が災害という結果をもたらす。したがって、災害は両者の関係如何できわめて多様となる」と説明し、この素因一誘因一結果の相互関係を深く攻究することこそが主要な課題であり、防災への鍵が見いだされることを述べている。このような考え方は、システム論的にみると分かり易い【UNDRO(1979)】。以下は、太田他(1990)にしたが

って略述する。これは、地震という入力が、人間社会という系に災害という出力を与えるシステム関係にあることを基本においている。この関係を数式的にかくと、

output characteristic input

[D] = [P * V] * [E] (1)

のように表現できる。ここに、

D:Earthquake Disaster(あるいはRisk),地 震被害の規模・程度を表すが,より広義には震害危険の度合いを総称する P:Population,危険要素の数量,例えば人口・住家戸数など V:Vulnerability,被害関数(対象がもつ地震に対する脆 弱性の度合いを表し,これが大きい程被災危険度が高いとみる)

E:Earthquake Hazard,広義には地震襲来危険度を含み、 狭義には地震入力の強さを表わす

*:掛算的な演算子

である。なお,Eを地震動入力の強さの指標と限定すれば,被害関数はEの開数としてV(E)となり,(1)式はD=P*V(E)とかける。

したがって、人間社会がもつ危険ポテンシャルは系がもつ特性量P*V で表わせる。地震防災が目的とするのは、出力としての被害(あるいは震 害危険度)Dを低減することに他ならない。この方策は形式上2つある。 一つは系への入力・地震区・の低減を計ることであり、他の一つはP*V を下げることである。しかし、前者、すなわち、地震発生の制御は今後と も人智を越えた世界の問題である。とすれば、唯一操作可能なものは危険 ポテンシャルP*Vである。これには,また2つの方向がある。一つは危 険要素の個数P-正確には危険要素の種別とそれぞれの個数-の数量低減 を計ることである。先に、砂漠の大地震は被害をもたらさないと述べたの は、この極端ケース(P=O)に相当する。住家等の分散は被災対象物の 個数を低減することに当たる。時折、話題となる遷都を防災上からみれば Pの抜本的低減という政策論に他ならない。他方,系がもつ被害関数Vの 改善が極限にまで進むならば(V→O)、最も理想的であり、他の要因を 考慮する必要はなくなる。しかし,これは経済合理性を度外視した議論で あり,理想論に過ぎる。となれば,如何なる程度に耐震性を確保しておく べきかが実際上の問題となる。個別問題としては、前者(P)は地域(都 市) 計画学の主課題であり、後者(V) は耐震工学の主課題でもある。実 際には被災対象となる系は無数にあり、また相互に連鎖する関係にあるこ とから、事柄は複雑になるが、防災の基本はここに述べた通りである。か くして、(1)式を構成する個々の要素(D, P, V, E)について詳し い理解をもつこと、および被災対象(構造物、人、地域等)を決めて構成 式を具体的に組立てていくこと、が地震の工学・地震防災に取り組む場合 の出発点となっていることが判る。

3)E,V(E),D等

地域の防災とか構造物の耐震設計に関わって地域(注目地点)の地震入力 Eを想定する場合,少なくとも 2段階の考察が要る。第1段は地域(地点)の地震製来危険度を予測すること - 広義の評価ーであり,第2段はこれをベースとする強震動の予測 - 狭義の評価ーである。それぞれに多様な方法があり,目的に応じて適宜取捨選択される。第1段の方法として,まず地震危険度マップによる加速度等の期待値を算定する方式がある。これには,注目地点での既往地震資料をもとに得られた河角(1951)に代表されるものと,Cornell(1968)に始まる地震発生の確率モデルによるものがある。いま一つは過去に地域(地点)を襲った地類配録にもとづき想定地震を確定するという直接的なものであり,地域行政体が行う地震被害想定に多用されている。これらは,いずれも結局は既往の地震資料を原点においており,また統計手法による危険度評価である。予知からの成果に立脚する地震危険度評価法の今後の展開に期待するところが大きい。次に,第2段の作業に進むが,この段階の手法はきわめて多彩で

ある。本論の,以後の記載の殆どがこれに関わる内容となっており,重複 を避けるため,ここではこれ以上触れない。

被害関数V(E)について述べる。この概念は物部(1924)に始まる。彼は地震動強度(=入力加速度/重力加速度)と建物の全域率に関する経験式を提案し、地震動が及ぼす構造物への破壊性能を定量評価する道を切り開いた。以来,今日に至る構造物の震害調査研究の多くは,この考えの精緻化の歴史であるともいえる。建物等の被災Dとつなげて被害関数V(E)を記載した成書は多い。消防科学総合センター(1983)等はよく整理されており,参考になる。構造物の被災度は一部破損,半域,大破,全域のように段階的に区分されることが多い。被災度関数V(E)がそれぞれに存在することになる。

カリフオルニアの建築・土木構造物を対象としたATC-13レポートは被害関数V(E)が多様な構造物について、また被災度を無被害一全壊の間で段階別に詳しくかつ系統的に記述されており、地震防災上の有用な基礎資料となっている[Rojahn et al(1985)]。強震動入力の強さEとしてMM震度が用いられている。わが国にはこれに相当する系統的な資料はまだない。土木関係、特にライフライン系のような線状構造物の場合、被災度Dは(被災度別被害箇所数)/kmを指標に被害関数V(E)と結び付けられる。種々のライフライン系構造物の被害関数は高田(1991)によく整理されている。本論の後半でも、構造物・人・社会系がもつ被害関数について記載している。

4) 2次災害,震害連鎖

地震被害が力学的な"物"の破壊に留まる限り,瞬時の勝負で終わる。しかし,これに止まらず2次~3次の災害へと拡大する危険を伴うところに,地震の真の恐ろしさがある。このような場合,(1)式のような単純な図式はそのままでは成り立たない。そこでは,人間社会系は地震の前後で不変との暗黙の前提があった。しかし,この前提が破れ,系がより脆弱になるところに2~3次災害発生への素因がある。すなわち,1次的な災害の発生が地域がもつ諸機能を破壊し,2次災害を誘導し,これが地域を弱体化し,3次災害発生の素因を増長するという,ポジテイプのフィードバック系を構成する。このような場合,個々の危険要因Pがもつ被害災関数Vに加え,項目間の連関関係が同時的に考慮されなければならない。(1)式はこの観点から修正される必要がある。この点について詳述する余裕はないが,太田(1982),太田・岡田(1989),鈴木(1990)等が参考になろう。

2.地震被害の想定

地震被害の想定に関する研究と実務は、わが国ではかなり長い歴史をもっている。しかし、その殆どはオフライン的に行われていた。すなわち、何時か来るかも知れない地震に対してあらかじめの想定を行っておくといったものであった。これに対して、地震発生を時間原点として、オンラインあるいはリアルタイム的に地震の挙動を捉え、また被害を想定し、地域に必要な情報を即時的に伝達するという新しい手法が最近になって急激に発展してきた。これらの全体を被害想定と総称し、動向を概観する。

2.1 被害想定の目的と現状

1)防災計画との関係

災害対策基本法のなかで,災害及び災害の防止に関する科学的研究とその成果の実現に関する事項の実施に努めるべきことが強調され(第8条),これを受けて,都道府県(市町村)は当該地域の防災のための調査研究を推進することが述べられている(第40条および42条)。地震被害想定の作業はこれを根拠に,また地域地震防災の基本資料を得ることを目的に,行政単位で行われている。当然ながら,想定の殆どはオフライン的である。2)想定実施の極況

このような理由から,都道府県あるいは市町村単位での被害想定の実施 例は枚挙にいとまがない。しかし,その中味には当然**濃**淡があり,東京都 他の大都市圏とか近未来に地農発生が懸念される地域ではきめ細かい想定作業が進められる一方,一般の小規模市町村では想定というには粗に過ぎる作業に止まっている。想定手法については,当初はそれ自体がアカデッミクな多くの問題を内蔵していたことから,大学他の研究者がその開拓に力を注いできた。しかし,近年は民間のコンサルタントに委ねることが多くなった。このため,想定に関連する諸報告が学術誌に掲載されることが少なくなり,現況が仲々に掴みにくい状況にある。比較的最近までの,オフライン手法にもとづく地域毎の地震被害想定の実施状況については消防科学総合センター(1983),山村(1987),総務庁(1992)等が要領よくまとめている。

2.2 オフライン推定

1)被害想定の手順一般

オフラインの地震被害想定は地域を襲う(であろう)地震を設定するこ とから始められる。これは、過去当該地域を襲ったいくつかの被害地震の 再発を想定するのが通例である。次いで,想定した地震による地域への入 力地震動の強さの推定作業に入る。これには種々あるが、多用されている ものとしては,過去の地震記録による,期待値マップによる,震源・地震 規模を想定し強震動予測式を用いる。等の3種の方法があり、また適宜退 合させたものがある。将来的には地域を襲うであろう地震を地震予知から の成果を取り入れ,また入力地震動を数値実験的に提供できるようになる かも知れない。現在,このような研究が進められている唯一の事例は想定 東海地震である。さらに、伝播経路の変容・地盤増福等の効果を加味した 後,地域に入力する強震動を確定し,被害の推定に入る。この場合,1次 被害から2~3次被害に至る地震被害の殆どが推定対象となり得るかにみ えるが,実状(手法の確立,予測結果の確かさ等)はこれには程遠い。実 際は,かなりの精度で予測できるのは一想定した地震が襲来するとの大前 提を承認したとしても一精々が地盤の液状化発生、建物等の被害、あるい は人的被害等である。延焼火災等はさらに多くの仮定を設定することで、 数量表示が始めて可能となる。以後の、連鎖・波及被害の量的推定は容易 ではなく,多くはシナリオライテイング的,したがって定性的記載に止ま る。高次被害は地域がもつ多様な特性(社会環境)に影響されるところが 大きく,入力地震動の強さの関与は次第に小さくなる。なお,個別被害の 予測の実際手法については地域防災診断ハンドブック・地震災害編(19 83)がやや旧いがよく整理されており、参考になる。

2)2~3の代表事例

①東京・首都圏 被害想定の作業が最も熱心に,また継続的に行われている地域である。1978年に23区を対象とした初めての想定結果を発表して以来,折々の研究成果を取り入れながら,度々行っている。最新のそれは1990年に実施され,結果が広く報告されている[東京都防災会議(1990)]。被害想定の代表例であり,やや詳しく述べる。

まず、想定地震としては相模トラフに震源をもつ1923年関東地震の再発を主要地震とし、直下地震も射程内に入れている。被害想定の対象は物的・人的被害から、それらが都市機能・社会生活に与える波及被害をも取り込む努力をしている。被害は定量想定を基本とするが、定量化の困難な項目についても定性的に波及状況を検討する。以上を基本に、まず23区について、次いで多摩地区について想定作業が進められた。入力強震動については以下のように考えている。すなわち、再発関東地震(M7・9)については金森・安藤(1973)の地震断層モデルを基本に、また往時の被害データを参照に基盤への入射加速度を90~115gal(地域への距離の違いを考慮して)と決め、時刻壓波形として1968年十勝沖地震時の八戸の記録を採用する。他方、地域内の地盤構成資料からあらかじめ40パターンに分類された表層地盤の増幅特性を考慮することで、地表へ入射する強震動の地域内分布を500mメッシュ単位で算定する。結果は、区部では200~400gal、多摩地区では100~200galを得た。他方、直下地震(M6・9)としては1854年安政地震の再来

を想定し,点震源を荒川河口付近に仮定し,同様の流れで地表加速度分布を求めている。ただし,基盤入力波は1987年千葉県東方沖地震(M6。7)の白髭東拠点の地下40mでの観測波に準拠したものによっている。

被害想定項目は多様であるが、津波波高、建築物、道路・鉄道、ランフライン系(電気、水道、ガス)、危険物、出火・延焼、人的被害、帰宅困難者、食料・飲料水他生活必需品の自給・制約等の多くの項目についてともかく定置推定を行っており、この分野の現時点の一つの到達点を示している。ただ、先述のようにいくつかの項目を除けば、想定手法が確立している訳ではないことから、結果の利用に際しては相応の吟味が必要となる。

直下地震による被害は上記に比べて一局所的にはともかく一小さいことから,防災対応としてはほぼ関東地震の再発を考えることで一応よしとしている。なお,想定東海地震に対する被害想定も行われており,都内では震度VIに達する地区はなく,したがって大きな心配は要らないとの結論を得ている。関東の諸県一神奈川県を除く一はモデルを東京に準拠しながら,被害想定項目・方法などやや簡便な扱いとなっている。

なお、被害想定は通常500mx500mのメッシュを最小単位として 作業が進められる。しかし、このままでは想定結果が時に、当該地区がも つ自然・社会の諸特性からくる境界とのチグハグが目立ち、高い整合性を もち得ない場合がある。このような人工的不自然さを持ち込まないために は、地域をその発達の流れを踏まえ区分するなど、さらに小さな地区単位 でみる肌理細かい扱いが必要になる。このような観点から、被害想定の試 みが始められている[損害保険率算定会(1994)]。

②東海地震域 周知のように、昭和50年代の初頭に巨大地震の発生が警 告され、これを受けて大規模地震対策法(1978)が制定され、静岡・ 神奈川の両県他山梨・愛知の各県で事前の防災対策が継続的に進められて いる。これは地震(規模・位置)を正確に想定できるまれなケースになっ ている。このこともあって、地域地震防災に基本資料を提供すべく種々の 調査研究が行われた。この地震による強震動の予測のため、村松(198 1)を代表者とする特別研究組織が結成され、関連研究が精力的に進めら れた。しかし、こ時期に導入可能な方法はHaskell流のモデルに限 定されており、予測可能な強震動はやや長周期帯(数Sec以上)であり、 必然変位のレベルに止まっていた。小地震記録の合成による本震時の強震 動の予測法(Irikura法)は試行段階にあった。佐藤(1984) は速度レベルでの予測波形を算出したものの,周期1~2sec以下の短 周期波までには至らなかった。これらは当時の、理論にもとづく強震動予 測の可能性への期待と同時にその限界を示すものとなった。しかし、この 地震の被害想定は急務とされ,そのためには強震動入力についてより妥当 な知見が是非とも必要とされていた。この難点を最初に突破したのは翆川 ・小林(1980)である。彼らは地震断層から期待される加速度の詳細 予測は容易でないとの認識から、断層エレメント毎に発生する加速度波形 のパケットに注目し,その時間差累積和として,また波動伝播経路(含む 地盤の増幅特性)を既往地震のそれと重ねることで任意地点の加速度包絡 波形を予測するという、巧妙な、またきわめて工学的方法で広域にわたる 加速度の妥当な分布を得た。この結果は、大震法に伴う危険・要注意地域 の指定に際して基本資料として位置付けられている。この方法は東海地震 に限らず、多くの地域の地震被害想定において有用されている。

2.3 オンライン推定

1)考え方の一般

地震発生の瞬時に地域社会(防災担当者)が知りたいことはまず地震の全体像(震源位置,規模等)であり、およその被害についてである。さらに、どのような対策を、どのようなレベルで発動すべきかについて、指針情報が得られるならば即時の防災活動に益するところが大きい。このような観点から、いままでにも種々の機器が考案されてきている。震度表示計は相応の管及をもつ機器の一つである。これはセンサーとして加速度計をもつ装置であって、観測される加速度最大値を震度に変換・表示する、強

震動情報の簡易装置である。最近になって,PG等の小型計算機の処理機 能の向上を背景に、また従来の簡単に過ぎる機器には飽きたらず、種々の 地震防災情報システムが計画され、構築されるようになってきた。これら はオンラインの地震被害想定とでもいえるものである。しかし,実在のシ ステム毎に目的・対象とか処理内容など多様である。地震そのものの情報 に主力を注いだもの一位来の強震観測網システムにオンラインの情報処理 機能を具備したもの一から、地域内の強震動(震度)分布を得て、各種の 被害予測にまで推論を進めたもの,さらには緊急対策について指針情報を 出力する機能をもつものもある。対象も、特定の構造物に特化したものか ら、一般建物、あるいは市民レベルでの地震の瞬時の防災に資する情報を 提供するもの,そして地域行政体等の公的機関の地震時危機管理の一環と して位置付けられるもの等と幅が広い。いずれのシステムにおいても要求 される重要な要件は即時性と頑健性である。しかし、これを同時に満足す ることは難しい。このため、多くは既知の方法を使っているものの、上記 2点について注意を払いながら,目的・対象との関係で種々の工夫をして いる。また、出力情報の扱いもいろいろである。大きくは、処理・導出さ れる情報をデスプレイ装置上に表示するもの、印字出力するもの、また音 声その他の情報に変換して伝達能力を上げるもの等の受け身系のものと、 地震入力の大きさに応じて重要施設に制御情報を送出する能動系のものな どがある。いくつかのシステムを取り上げ、概観する。

2) いくつかの裏例

①UrEDAS (地震早期検知警報システム・ユレダス)等 Urgen t Earthquake Detection and Alart System として、従来の単純な警報装置を越えるシステムとして、 わが国で早い時期に提案されたものであり、ネーミングの巧さもあってよ く知られている。(旧)国鉄・鉄道技術研究所のチームによって開発され たものである[中村・上野(1986), Nakamura(1988)]. このシステムは原則的に、単一の地震観測点の地震波形データをリアルタ イム自動処理して、地震を初動部分で検知し、その諸元を直ちに推定し、 対象 (新幹線等の鉄道施設)への加害性が高いと判断されれば警報を出す ほか、センターへすべての検知地震の諸元(100パイト/観測点の程度) を伝送するというP波ー点型検知システムである。種々のテストの結果。 観測点のノイズが極端に高くなければ有感地震はほぼ100%検知できる こと,實央方位・距離と規模等の實源要素が地震検知後数Secで推定で きること。などを得ている。このシステムによって生み出される余裕時間 は [初期微動継続時間+観測点から対象地域までの主要動伝播時間]であ り、観測点をうまく配置することで10~数10secになり、この時間 を有効利用する直前の対策を工夫することが可能となる。このシステムは 東海道新幹線を始めとする鉄道施設に設置され、列車の地震時速度制御等 に直接の活用をもち、またこれらを越えた形で、災害発生を迅速に察知し て速やかに対応するシステムー総合地震防災システムーの構築に向けて努 力が続けられている。なお、このシステムは後で述べるCaltechの システムとの比較観測が継続中であり、1984年1月のNorthri dge地震時に興味ある記録を得ている模様である。

類似の考えに立つシステムが実験段階にある[宮村他(1993)]。 具体的には東海地震の発生が想定される震源域の近傍に観測点を設け、得られた情報を東京等に伝送することで主要動到達までの持ち時間(10~数10sec)を稼ぎ、これを直前の防災に利用していこうとするものである。実際に、伊豆半島の下田から東京都の調布に至る区間に数点の強震観測点をを設置し、種々の実験を開始している。情報伝達媒体・対象として、通常のモニター装置の他に末端ユーザーへの音声出力とかポケットベル等幅広いものを考えている。

②津波予測・警報システム 座間(1990)は1983年日本海中部地震に伴う津波が地震の7分後には既に沿岸(青森県深浦)に達しており、気象庁の最も早い警報発令が14分後であったことから、警報が後報となり、津波による多くの犠牲者を出した原因の一つとなったと述べ、早期建

波予測システムの開発の重要性を認め、関連の研究を進めてきている。こ れは一地点での地震観測データを現地でリアルタイム処理して達波情報を 迅速に求めることを狙ったものである。得られる即時情報として、震源・ 津波の高さ・到達時間等を挙げている。これは一地点ないしは数点の観測 点から津波に関するおよその情報を得ようとするところに特色をもち、比 較的手軽に設置が可能である。それだけにプロトタイプ的色合いを残して いる。気象庁は近年、特に1993年7月の北海道南西沖地震に伴う津波 の沿岸地域(奥尻島)への早期別来による死者多発を契機として,本格的 な津波警報システムの建設に乗り出しており,期待は大きい。現行の方式 では震源をP,Sの発露時から決め、さらに規模Mを決めることで、津波 予報を行っている。このため、震源決定に1~2分,規模Mの決定に5~ 7分がかかり、津波予報までに7~8分を必要としているが、ネックは規 模Mの決定にかかる時間である。P波の初動でこれを決めることで、津波 予報までの時間を2~3分に短縮するのが当面の目標であるという [気象 庁地震監視課(1994)]。しかしながら、さらに精度の高い予測を実 施するためには、いわゆる津波地震も無視できないことから、広帯域の地 震観測を必然とし、かつ震源過程を含む津波発生と伝搬の、高度のアルゴ リズム開発が必要となる.Izutaní et alによる,先述の方 法は基礎を与える研究となっている。

③TERRAScope and CUBE カリフォルニア工科大学が もつオンライン地震観測網の一つであり、1988年に南カリフォルニア 地域に6点の強震観測点で出発している [Kanamori (1992)]。 各観測点は24ビットのA/D変換器を装備する広帯域の地震計と強震計 とからなっている。これはまたIRISのプローバル地震観測網およびUSGSCL&US National Seismic network のサブ観測網としても位置付けられている。地震発生の瞬時に、Calt echのGopherシステムを通じて、自動ダイアルアップ的にデータ が検索できる。TERRASCOP Bの主目的は地域およびグローバル地 震学に対して質の高い資料を即時的に提供すること、特に、大地震直後の 震源パラメータの決定は地震災害の低減に直接寄与すること、等において いる。このような観点から、カリフォルニア工科大学とUSGSは共同し TCUBE(Caltech/USGS Broadcast of E arthquakes)プロジェクトをスタートさせている。これは、S CSN (Southern California Seismogra phic Network,220点の短周期地震計からなる)およびT ERRASCOPeの地震観測網を活用したリアルタイムの地震情報(広 報)システムとしての機能を受け持つことをを目標においている。いまま でに,1992年Landers地震を始めとする種々の地震について, 準リアルタイムの処理を行い良好な結果を得ている。1994年Nort hridge地震時には増設された16個のTERRA観測点において強 震記録を得ているときいている。地震情報の提供先ををあらかじめ契約し たユーザーに特定しようとしているところに大きな特徴をもっている。 ④川崎システム これは、地域の自然・社会環境に整合した、地域立脚型 の防災対策支援情報システムである。地震時に即時的に必要な情報を取り 出し、それによって事後対策を選定し、後続被害発生を抑制すべく指針案 を提供することを目的としている。システムの構成次第で個々の市町村は もとより、それらの集まりとしての広域行政体にまで幅広い適用が可能で ある [後藤(1990),太田・岡田(1990)]。

システムは地域単一点型ないしは多点型強震観測装置をもち,種々のソフトウエアーを組み込むことで実現される。システムは3段階のサプシステムで構成される。第1段は地震到来を即時に感知することで作動を始め,地震入力動の強さを評価し,第2段の被害推定サプシステムに伝える。第2段ではこれに即応し,地域の自然・社会環境(DB)に呼応した形で各種被害を即時的に推定する。地震被害としては,1~3次被害があるが,このシステムでは初期的被害を重視する。すなわち,津波,地盤,建物,土木構造物,ライフライン,火災,死傷,り災等の被害である。推定の精

粗・単位地区の広がりなど、観測点数に見合ったものとする必要がある。 第3段の対策支援サプシステムでは被害の推定結果を入力情報とし、地域がもつ応急対策計画にリンクした形で、支援情報を提供する。対策支援情報として、対策本部設置(職員動員)、直後被害調査等の他、緊急性の観点から救出・救急、消防出動、水・食料補給、選購等の項目を考える。

単一点型の場合,3成分を一組とする強震計記録装置およびPC型計算機を主体とする簡易システムとして構成される。より本格的な,地域多点型にあっては各観測点の地震情報をセンターに集め,スーパーミニコン程度のホスト計算機による総合処理によって結果の精度向上を計る。平常時にあっては,本システムが地震防災訓練・教育システムとしての機能を発揮できるよう,別段のソフトが用意される。現在,単一点型・多点型共に実用システムとしてほぼ完成の域に達している。なお,単一点型の流れに沿うシステムが,対象を学校等の集団生活場という生活弱者に的を絞った,簡易型システムとして構築段階にある[太田(1993)]。

⑤ライフライン系,その他 高田(1991)による解説があり,現況を 知るのに便利である。彼に従って説明する。一口にライフライン系といっ ても,ラインを通じて流れるものの実態は多様である。いくつかのものに ついて、キャリア(流れるもの)の地震被害と強震計による検知の可能性 について整理してみると,まず電気・水道系等については被害状況が容易 に目視他の手段で把握できることから、特段のモニター無しデモ済む。し かし,,ガス供給系被害の場合,ガス漏れ自体が目視できず,また2次災 害を引き起こす危険も大きい。鉄道・高速道路等で列車とか自動車そのも のの交通死傷を直接測定することは難事に属する。これらのシステムにあ っては被害状況の把握も重要ながら,それ以上に,被害発生危険を事前に 察知し,道時の対策を発動することが大切となる。この意味で,キャリア そのものの直接測定に替わり,ラインに沿う強震観測網を設け,記録情報 の早期収集を行い,被害発生危険を間接的に推論し,緊急・応急・復旧時 の適時対応に資することを目的とするシステムがもつ有用性がおよそ見当 つけられる。システムの制御あるいは被害予測判定は主として加速度の最 大値によっているとのことである。例えば、阪神高速道路公団では地震時 の交通規制を徐行=25~80gal,徐行・交通規制=80~150g al,通行禁止=150gal以上のように決めている。

ライフライン系の被害予測で加速度以外の指揮を導入したものとして, 大規模都市ガス供給システムを主対象とした,SI(値)センサーによる 被害早期検知システム「佐藤他(1985),永田他(1990)]があ る。供給システムの単位プロックの各所におかれたセンサーで得られたS I値は無線テレメータで自動的に管理中枢に伝達され,SI被害推定システムの処理をへて第一次被害推定が行われる。被害推定精度を高めるため, あらかじめ選定された複数の地点ではSI値に加え,加速度の時刻歴も伝達し,震源決定システム,損傷度評価システム等の処理を経てより高度な 推定・評価が行われ,最終的な判断がなされる。プロック内にはりめぐら された導管網の被害を推定するためには,離散点的なSIの観測値を面的 に拡張して解釈する必要があるが,これをファジイ推論の導入で克服して いる[礒山他(1990)]。現在,東京都内にSI観測点108点,う ち12点で地震波形とのものが観測できるまでになっている。

エレベータ等には地震時管制運転装置が設けられているが,多くは単純に加速度のみによって行っている。このため,種々の不具合が生じている。例えば,新宿副都心にある高層ビルにおいて,以下に示すような観測例があり,防災上あやうく大きな問題となるところであった。すなわち,1983年日本海中部地震時に最上階にあるエレベータ機械室が10cmを越える大振幅(卓越周波数0・2Hz,加速度16gal)を示し,事故発生の恐れがあり,本来ならば管理運転に入るべきところ,震動加速度が所定のレベル(30gal)に達しなかったところから,従来型装置は機能しなかった。このことから,加速度(最大値)のみを感知し,判断基準とする従来の地震感知器には問題があることが明らかになった。小野田・池田(1986)は,この点を改良するため,従来の加速度計測のみによる

簡単震度警報装置にS波(主要動)の波動エネルギーをアナログ的に算定するユニットを付加することで高層建物(やや長周期領域)におけるエレベータの運転制御に好結果を得ている。先に村松が入力地震動の周期に応じて震度を加速度から速度,そして変位と対比すべきことを提案していることを述べたが,彼の提案はこの事例に端を発している。

なお,1994年春期学会では「地震情報の早期伝達に関するシムボジューム」が計画され,関連の研究が多数報告されることになっており,地震に関する即時情報システムが市民権を急速に得てきている様子が伺える。

3. 地震防災の時空間的整理

3 1 空間的整理

地震防災が関わる被災対象は多種多様であるが, 簡単には

「点」の対象=単体構造物(建物・単体施設等)

「線」の対象=線状構造物(LL系施設等)

「而」の対象=地域行政体(都道府県,市町村等)

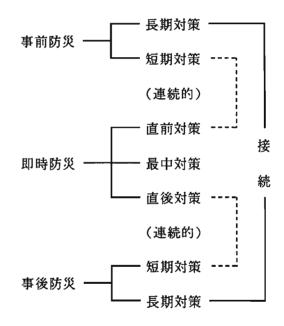
しかし、点・線・面の問題をこのように規定す るのはやや単純に過ぎる. 事実, 地震被害をどの ような詳しさで記載するかによって、このような 規定が当てはまらない状況も間々出現する。例え ば,世帯を単位とする地震からの安全を詳しく検 討しようとすれば、住家がもつ力学的耐震性 (「点」の耐震) は要請される一側面をカバーす るに過ぎず、室内環境とその中での人間行動の関 係にも考察を広げることが必要となり、秀れて 「面」の問題となる、逆に、本来「面」的な扱い を通常とする地域について,多くの市町村を含む 被災域全体として、あるいは地域行政体を一単位 とする地震被害に注目し,大局的観点から防災戦 略を立案することを想定するような場合には,行 政体規模に拘らず地域行政体=点とみる扱いが許 される.必然,強震動情報との関わりも点・線・ 面という対象についての規定の在り方とそれに伴 う諸特性を反映して大きく違っていくる.

このような理由から、対象の点~面に至る定義付けもさほど簡単な問題ではないことを承知しておくことが大切である。しかしながら、この問題の立ち入った考察は今後の課題として残し、ここでは点・線・面の区分については常識的な扱いに

止める. また,検討のを不必要に難しくしないため,[面=地域行政体]とする場合にについて主に考えることにする.

3.2 時系列的整理

抄録においても述べているように, 従来, これ は地震発生を挟む[事前対策,事後対策]に2大 別して策定されている. しかし, 強震動の情報を 有効に利用することで,一層肌理細かい対策戦略 を構想し、防災・減災への実効性を高めようとい う目的からみると、これはやや粗に過ぎるように 思われる. ここでは事前~事後に至る対策戦略は 本来一連のものとして把握すべきであるとの立場 から、いま少し細かい区分を試みる、細分試案と しては以下の通りである. 従来のものとの大きな 違いは事前・事後防災の間に地震発生時を含む 「即時の防災」という新たな区分を明確に導入し ている点にある、ここでは「即時=リアルタイム、 動態]という理解に立っている.これは表題に掲 げる「即時的」なる概念について考察を深めるた めの立脚点を与えてくれる.



以下,ここに示した防災対策の時系列区分にしたがって,対応する地震被害予測の在り方,そして強震動情報との関係について若干の考察を行う,

4. 強震動情報の役割と期待

そもそも地震防災上の諸対策・戦略は、わが 「敵」を的確に見極めるところに出発点をおく、 ここに、「敵」は地震そのものであり、直接には 地震に伴う(であろう)災害事象である。地震防 災への的確な対策そして実行への戦略はこれらを 詳しく知ることによって、始めて構想・立案が可 能となる、「地震被害の想定」は、この敵を知る ための基本作業である。そして、地震被害想定の 要となる情報が、本論の主題をなす「強震動情報 に他ならない。しかし、強震動情報の防災へ助 力り方(直接には被害想定への関わり方)は地震

4.1 事前防災

これは長期対策と短期対策とに区分される.前 者は別名「恒久対策」ともいわれ、地震に限らず 本来防災対策の中心ともなるべきものである。極 端にいえば、これさえ万全に実施できていれば、 他に特段の対策は必要としない筈である. これを 支える基本資料は、当該地域の「地震被害予測」 結果である. これによって, 地域がもつ地震危険 度が多様な被害項目毎に量的に浮き彫りにされ, 長期視点に立つ防災戦略「=地震安全の観点から みた地域(都市)改造]立案に基礎を与える.事 実,この観点から、非常に多くの行政体がこの作 業を進めてきている. 抄録においても, この意味 での地震被害予測 (オフライン推定) について現 状を述べている.しかし、この結果が地域の地震 安全性向上のための施策に活用されるためには、 それに先だって予測手法(およびそれを支える諸 資料の整備) に一層の質的整備が要望される.

地震被害予測法を支える3種の神器ともいえる ツールが存在する. これらは想定地震 [強震動入 力],事実データ「地域(自然,社会)環境デー ター],および知識データー[地震学的,耐震工 学的知見] であり, これら3者が程良くバランス するところに信頼性ある被害予測が結果する. こ の観点から既往の予測事例をみると,特に3者の バランスの点でとても十全とはいい難く, 問題点 を多々残している.まず、地震の想定であるが、 一般に過去の被害地震のデータベースから然るべ き地震(複数の場合もある)を選び-このこと自 体が充分研究課題となる-,その再来を仮定して 進められる。しかし、これはあくまでも仮定であ って, 運が悪ければ"何時来るかも判らない, 不 特定の地震"を想定することにもなりかねない. したがって, 得られた結果が期待 (懸念) される 被害の上限を指すのか否かさえ本来は見当が付か ない筈である-実際には地域を襲った最大級の地 震を想定することで上限被害を予測しようとして おり、実務上許容されることであるが一、その一 方で、予測の(見かけ)精度は益々向上し、(5 00m x 500m) を単位のメッシュ割りを標 準としたものから、最近では ($50m \times 50m$) を一単位とするもの、さらには自然の細かい地形 に対応した可変ブロック単位で強震動入力を推定 し、被害を予測するという動きも顕著になってき た. これに伴って、地盤情報も相応の肌理細かさ

が要求されるようになってきている. この傾向自体は被害予測の精緻化を促す刺激剤でもあり,大で、これは地域に分布する多種多様な構造物・施設等の耐震性に関する知見(経験的被害関数資料)の蓄積と整備を今まで以上に進めていくもある。 で要請することでもあり,仲々に厳しくもある。 これはまた,強震動がもつ事物の破壊性能を的確に規定するという古くて新しい問題にも直結する.

今仮に上限被害が的確に予測され、これをもとに地域改造を含む種々の対策が万全の態勢でも来でするならば、長期対策は"地震よ、いつでもからで、ではないである。といえる長所をもつ一方で、ではいり、ないの備えである。これが足枷となり、あるがというでは程遠いが長期としては日本をである。という状態が少なからず見受けられる。これがより、防災戦略立案の基礎資料としてはには、防災戦略立案の基礎資料としてはれる。

これに対して、短期対策を次なる地震の姿があ る程度以上みえてくる段階に実行開始点をもつも のと,筆者は理解したい.長期対策との違いは 「想定地震」に実体を付与できるか否かにある. この意味で, 地震被害の予測結果は長期対策に比 べてはるかに高い説得力をもつ、想定地震の設定 は地震予知の成果に依存するところが大きい. 「東海地震」,「神奈川県東部地震」等は好例と なっている.期間は人間のライフスパンよりかな り短い、このように、「敵」がみえてくると、被 害予測の作業にも自ずから力が入り、また結果の 防災への活用も一層直接的となる.これに伴って、 上述の3種の神器(予測技法他)そのもの,そし て予測結果も必然高い精度と詳しい中味が要求さ れる. したがって、被害予測も相当に労力を要す るものとなるが、防災への関わり具合もより直接 的なものとなり、やりがいのある作業となる.ア カデミックな観点からも強震動生成の震源過程, 伝播の新鮮な諸知見を活用する機会ともなり、魅 力ある研究分野を形成する. 地震発生時期の接近 は一科学的監視を続けるならば一他方では関連知 識の蓄積のプロセスともなり得るものであり、こ れを活用することで被害予測の精度が次第に向上 する、といったシナリオが描けるならばこれに優 るものはない、おぼろながらも見えてきた「敵」 には今まで以上に執拗に喰いついて行くべきであ

ともあれ,これらは静的かつオフライン的防災 の範疇に属しており,次なる即時防災への先駆け となるべきものである.

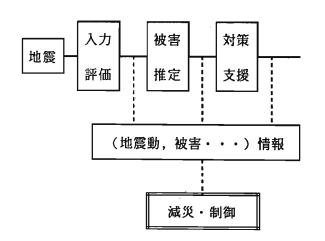
4.2 即時防災

常識的には即時防災=最中の防災と考えるべきであろうが、筆者は「直前」および「直後」の対策・戦略も含めた、やや異例の区分を採用する.これにはそれなりの理由がある.そもそも震害事象

には時間依存性の弱いもの(力学的被害の殆ど) と、逆に時間依存性の強いもの(死傷者の時間的 増大、出火-延焼への移行等、また2~3次被害 の殆ど)とがある.ここに時間依存性被害とは 「時間」そのものが被害の発生と拡大・進化に決 定的な要因となり,対策の適時性が強く要請され るものを指している. したがって, もし"何んら かの情報"を知ることで余裕時間の創出とかロス タイムの低減が可能となるならば、これが震害軽 減に大きく貢献するものと期待できる。 地域を地 震が襲う寸前(直前)にでも「地震の発生」が知 られるならば、それによる持ち時間を活用するた めの手段が種々工夫できる、また、地震のユレに 関する即時の情報が与えられるならば、これをも とに地震「最中」の, そして瞬時の対応を考える ことが相当に可能となる.一方,地震のユレその ものが終わった後でも種々の災害が時間的に拡大 ・進化する. この動きを抑制し, 遮断するのが直 後対策・戦略の基本となる.

地震情報システム 抄録において,現在稼動状態 (試験中を含む) にあるいくつかのシステムについて概要を報告しており,参照されたい.現有のシステムは以下の概念構成図で総括できる.主要ハードウエアは地震計センサー・小型計算機 はび観測点と本部とを結ぶ伝送施設等である.なりち,「即時防災」を支援する情報システムは,直前~最中~直後からなる時間領域のいずれを対

- 1段 - ◇ - 2段 - ◇ - 3段 -



象とするにせよ、ハードウェア的には似た構成で 実現できる。これらを一連の対象として単一のシ ステムで扱うことも決してできない相談ではない。

防災への基本情報創出のためのソフトウェアは いろいろに構成できるが、システムに期待される 目的に応じて役割・機能に濃淡ができる. 第1段 に力点をおいたもの、2段までを重視するもの、 そして1~3段の全体について総合性の高いソフ トウエアを持つもの等,次第に多彩になってきて いる.また、対象主体(点-線-面)とも関わっ て,出力情報(内容,形態,即時性の度合い等) も必然システム毎に違っている.対象を建物とか 単一線状構造物等とするか、地域行政体のような 複合体とし、多様な被害を考えるかによって、処 理結果の精粗が大きく左右される。当然、前者が 個々の対象に深く立ち入った形の処理・評価の可 能性が高い、実務上、対象の広がりと処理の深さ とは一種のトレードオフ関係にある、この種のシ ステムは現在ようやく緒に着いたところであり、 いまだ標準型は出現していない.川崎システムは 市全体を対象としたオールラウンドプレーヤを目 指しており、1~3段のすべてを視野に入れたや や欲の深いものとなっている.

ともあれ、このように直前〜最中〜直後という時間制約の厳しい環境下で、瞬時の情報創出をが明まれてきたのは、いうまでもなく、PCを始めとする小型計算機他の器機の急速な発展に入るが大きい。とは、当該分野で進むものと期待され、当該分野で進むものと期待され、当該分野であるとになる方で、先に注意したように、この結果見かりでは、たいう落としたように、というなきにもっておりで、たいきが望まれる。

直前対策・戦略 何んらかの情報で"今が直前" ということが判らないと,話は始まらない.この 点について、地震予知への期待は大きい、しかし、 短期予報が出せるにはまだ相当の年月を必要とす る. さりとて、他に的確な手段をいまだ持ち合わ せていない.したがって、この問題についてでき ることは余り多くはない. 一つは事前 - 短期対策 の項でみたように、事態の進展がもたらす種々の 観測データにもとづき,地震の全体像を漸次明ら かにしていくことであり,併行して強震動(波形, 特性量)の予測情報の折々の改善を計ることであ る-前震を種地震とする本震の強震動予測等は格 好の研究課題となる-. すなわち, 最新の地震被 害予測結果を常に提供できる態勢を整えておくこ とである.これは一見地味な作業ではあるが、不 可欠な作業でもある.

アイデアは相当以前からあったものの、最近になってやっと実現の運びに至ったものに、いわゆる"10秒前システム"がある。これは、地震発生をできるだけ震源に近い地点で感知し、この情報を電気通信系にのせて伝達することで、地震波が問題の地域に到達するまでの時間を余裕時間と

して創出することを原理とする考え方である、窓 源−当該地点間の距離が100 **k m**もあればデー タ処理に要する時間を除いて,正味10 *s e c*程 度の時間余裕ができる. 問題は、このような短い 時間を防災上どのように有効利用できるかにある。 当面は人間の介在しない形の防災,例えば重要施 設・機器の直前制御等、が格好の入門コースとな ろう.しかし,知恵を絞れば活用範囲は相当に拡 大できるに違いない。"これこれの時間があれば、 これだけの事前対策・制御ができる"といった整 理は立派な研究課題となる筈である.しかし,こ のシステムにも難点がある. 震源からの距離と生 み出される時間とはほぼ比例関係にある一方で, 被害は大まかにいって距離と共に次第に低減する. したがって, 一般には震源に近く, それ故被害の 厳しい地点程持ち時間が短くなるという、必然の 矛盾をシステムは内蔵する.情報の発信点(震源 近傍)と受信点(対象地域)とが交互に入れ替わ ることで平等性が保たれるとか、発信点に人口が なく、受信点に高密度人口があるような特別な場 合を除き、この難点を克服することは容易ではな い、1985年メキシコ地震は後者の場合に近く一 震源が太平洋岸,主対象地域がメキシコ市となっ ている-, もしこのようなシステムが稼働態勢に あったならば、防災・減災に大いに役立ったであ ろうと考えられる数少ない事例である. 最中対策・戦略 これはユレの始めから終わりに 至る強震動の継続時間を主対象におく,文字通り 寸秒を争う対策となる.したがって,何によりも まず強震動そのものを確実に捉えることが優先す

①震度/振幅(加速度/速度)の最大値を主情報 とするもの

る. この時, 強震動情報活用の戦略は強震動その

ものの捉え方、活用の目的如何で多様となる。大

ざっぱに

- ②震度/振幅(波形)の刻々の変化を主情報とするもの
- ③波形識別・先行予測等高度の処理を瞬時に行い, これら加工情報を活用するもの

場合のやや改善版としてという比較的簡単なもの から, 最近のトピックスでもある構造物制震に至 るものまであり、幅広い. しかし、これはハード ウエアシステムとしても, またソフトウェアにお いてもまだ未完の段階にあり、今後の研究を要す る点が残されている. その一方で、最中の対策・ 戦略展開に大きな可能性をもつことも疑いない. もし,刻々の情報が地域防災の担当部局とか, さ らには各世帯にまで瞬時に配達されるならば、地 震時の対応は従来とは違った,合理性ある行動と なることが期待できる.結果として,人間の側か ら,地域の「最中」の地震安全性向上に資すると ころ大となろう. しかし, 強震動のありのままの 姿は時間変動性が高く,あまりに複雑に過ぎ,地 震の専門家でもない一般人には即時の理解は無理 というものである. 強震動の, 何んらかの簡潔表 示が必要となる. この時,"時間変化の大局(ユ レの消長)を保持したまま"という条件を満たす ことが肝要である.これはすぐにでも考究すべき 課題となる.区分③の観点を本格的に取り込んだ システムの存在を筆者はまだ知らない. しかし, 区分②のシステムが実現の途上にある今日、その 発展型として区分③に属するといえるシステムが 出現するのも遠い将来ではないと確信できる.特 に,強震動の先行予測処理機能が導入可能となる ならば、これは「持ち時間」の創出に他ならず、 最中の対策・戦略の拡大に資するところが非常に 大きい筈である. やはり, 格好の研究課題となろ う、この他、「初動」とかS波の立ち上がり等, 重要位相の転換点を識別し,これらを主情報とす る,比較的簡単なシステムも当然を考えられるし, 意外の普及性をもつかも知れない.

ともあれ,短い時間を最中の防災対応に生かす 工夫を鋭意進めると共に,種々のシステムが今後 どしどし提案されることを期待する次第である. 直後対策・戦略 直後対策の要諦は、なによりも まず、起こった(であろう)直接的被害の全体を 把握することにある.次いで,時間依存性の高い 被害を軸に,放置すれば拡大・進化するであろう 震害連鎖を阻止・抑制すべく最適の初動体制を確 立し、素早い実行に入ることにある. また常に適 時の対策・戦略を選定し,最大の実効効率をあげ るべく努力すべきことはいうまでもない、しかし、 これは言うほどに易しい問題ではない、被害の全 体を知ることだけでも相当な時間を必要とする. 既往の事例では、わが国でも地震後数10分以上、 場所によっては数時間を要し、途上国では半日~ 数日を要する場合が希ではない、これがなす術も 判らないままの、いわゆる"空白の時間"となり、 時間進行性の被害にとっては致命的時間長さとも なりかねない、強震動情報の即時的獲得とそれに もとづく早期の被害推定は、この空白時間の短縮 に殆ど唯一の手段を提供する. NHKを通じて報 道される各地の震度は地震のおよそを知り、地域 の被害の程度の見当付けに貴重な情報となってい る. 最近の事例では, 第1報は早ければ5分程度,

遅くても10数分を越えない程度にまで改善され てきている.しかし、その密度は県当たり2~3 点に止まり、地域レベルでみると「点」の情報に も達しない場合が少なくない。したがって、直後 対策の適正発動を目標とする地域の防災担当者に は強震動情報として粗に過ぎるといわざるを得な い、地域密着の強震動情報を是非獲得したいとこ ろである.この場合,理想としては地域が独自の 強震観測網をもつことである. しかも, これは高 密度な程良い. あるいは, 地域内外の既存地震観 測網による強震動情報が地震直後に収集・処理さ れ、地域に早期に伝達されるならば、これも事態 改善への有力な一案となる.しかし,事前-長期 対策の項で述べたように, 入力評価の単位が一辺 500mの標準メッシュに始まり、さらに細分化 が要求される今日, 地域内に相応の観測点をもつ ことがやはり重要となってくる. 強震動の本来的 研究にとって多点観測の重要性は論をまたない. 一度は超多点観測を実現してみたいものである.

現在,試験稼働にある川崎システムは前者の観 点、すなわち、強震動の肌理細かい情報を地域が 自らも獲得することが重要であるとの認識に端を 発している. 構成・機能概要は抄録でも紹介して いるが、市内に設置された7つの端末強震観測点 (現在は3点,近々増設予定)からの地震動強度 情報を中央に集め、総合処理をすることで地域内 地震動強度 (震度) 分布, 主要被害の程度・分布 推定および直後対策選定への参考情報を地震後2 ~3 分程度で出力できる形となっている、この意 味で、かなり意欲的なシステムとなっている。し かし、これに組み込まれたソフトウエアは基本的 には事前-長期対策において「地震被害の予測」 に使われる一般手法を多用しており、必ずしも革 新的なものではない.最も大きな違いは想定地震 が"実地震"となっていること、地震直後の自動 処理を旨としている点にある。したがって、時間 依存性の高い震害事象についての処理はまだ充分 とはいえない. この意味では、いまだ静的なシス テムの範疇に止まっている。このシステムが当面 目標とするところは地震直後の初動体制の最適確 立に向けて,支援情報を即時的に提供することに ある. 将来的には、被災現地からの"生データ" も逐次取り込む形の、動的システムへと発展して ゆくべきものと期待される. このグレードアップ 実現へのKev wordsは観測点の増設.地 域データベースの精緻化, 震害逐次データの取り 込み,および震害連鎖モデルの発展等となろう. ともあれ、この例-面の被災対象-に限らず、点 ・線の被災対象を含めて種々のシステムが積極的 に提案され、議論されることが望まれる.

4.3 事後防災

強震動情報の,事後防災への関わりは前2者における程明確ではない.むしろ,本震以後の余震発生の推移状況等,地震活動の消長についての一般情報が重要となる.事後-短期対策においては,

この時期が応急ないでは、 であることは、 であることを関するでは、 の移行け入がでは、 の移行け入がでは、 の移行け入ができるががれるでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでは、 ののに域なでいるでは、 ののに域なでは、 ののしいででは、 ののしいででいる。 ででいる。 ででいる。 ででいる。 ののに域は、 ののしいででは、 ののに域は、 ののしいででいる。 ででは、 ののにが、 ののしいででは、 ののにが、 ののしいででは、 ののにが、 ののにが、 ののしいででは、 ののにでいる。 ののにが、 ののにが、 ののしいででは、 ののには、 ののにでいる。 ののには、 ののにが、 ののには、 ののに、 のののに、 ののに、

5. おわりに

シンポジュームにおいて筆者なりに提供したい 話題を中心に、この小文を作成した、要は、地震 防災の諸対策・戦略に強震動情報が果たす役割が 大きいこと, そしてこれは地震被害予測の必須の 資料として位置付けられる点にあることを述べ, また強震動情報を時空間的に多様な地震防災の諸 相と対応する目的に一層適合した形で提供できる よう、強震動情報そのものの質的向上を計ること が大切であることを述べることにあった。すなわ ち、地震防災と強震動情報とが相互に影響し合う ことで、両者それぞれに質の向上が期待されるこ とを述べた積もりである. このため, この小文で は強震動情報がもつ意義が多少強調され過ぎた感 がなくもない. 地震被害の予測結果の適切さは, やはりこれを支える3種の神器ともいえるツール の程良いバランスにあることはことは再三述べた ところである. 地盤震動の研究者は強震動そのも のの一層の理解に力を集中するのは当然であるが, 事「地震防災」を考える場合,併行して事実デー タ(地域環境データ)とか知識データ(特に被害 関数等) の整備にも相当の努力をする必要がある. このことの重要性は1次~3次に至る震害連鎖に ついてみれば一層はっきりする、後2者は本シン ポジュームの、やや枠外にある事柄かも知れない。 それだけに、これらがもつ地震被害予測作業への、 ひいては地震防災学の発展に大きく寄与すること に留意し,強震動情報に加えて,これらを他人任 せではなく自ら整備していく態度を堅持すること が肝要となる. このことを敢えて最後に申し添え ておきたい.

この小文が、シンポジュームにおける議論の喚起にきっかけを与え、この分野の問題を考える際の一助ともなれば、誠に幸いである。

3. 予測の利用と即時性への取組み

3. 計画の利用と即時を進への取りま

リアルタイム地震防災システム:「ユレダス」・「ヘラス」

On the Real-time Earthquake Disaster Prevention Systems: UrEDAS and HERAS

中村 豊*

Yutaka NAKAMURA

UrEDAS, Urgent Earthquake Detection and Alarm System, is an integrated real-time earthquake warning system. Unlike conventional earthquake warning systems which generally issue an alarm when earthquake motion at the site exceeds a pre-set level, UrEDAS judges the destructive potential of an earthquake on the basis of the relation between magnitude and epicentral distance of the earthquake, and issues a necessary warning for a certain area which may sustain damage. UrEDAS consists of a single station with a three-component seismometer. UrEDAS performs two-step warning: within four seconds after the P-wave arrival, it estimates the earthquake parameters and issues a preliminary alarm. At the arrival of S wave, it improves the estimates and updates the warning. When several UrEDAS units are used, the data from each unit are synthesized to produce more definitive information.

HERAS, Hazards Estimation and Restoration Aid System, estimates the degree of the damage caused by the earthquake based on the synthesized information from UrEDAS units and on the relation between earthquake strong motion and damage, and display the result invisually within five minutes.

1. はじめに

地震の発生場所、時間、規模(いわゆる地震予知 の三要素)が正確に予知できれば、予知された発生 時間帯に被害が想定される地域で適切な安全対策を 実施することができるので、地震被害を最小限度に 抑えることができる。しかし、地震の発生時間や規 模は本質的に不確定である。すなわち、地震予知が 成功したとしても、予知の三要素にはある程度のば らつきがつきまとう。さらに現状では実用的な地震 予知は期待できない。そこで、地震の発生をできる だけ早く検知して、大きな地震動が到来する前に緊 急対策を実施することが考えられる。いわゆる地震 動の早期検知・警報である。これは、すでに発生し た地震についての警報・情報であり、地震予知にく らべて獲得できる余裕時間(直前対策に使える時 間)は少ないが地震予知のようなあいまいさはない。 実用的な地震予知ができない現状においては、これ は最善の地震警報である。

ここでは、主として世界で最初に実用化に成功した早期地震警報システム「ユレダス」について概説し、併せて、災害予測・復旧支援システム「ヘラス」や米国の地震情報システム「キューブ」についても触れる。

2. 地震動早期検知警報システムの構想

光と同じ速さ(30万km/s)の電気通信と地震動の 伝播速度(8km/s程度)の差を利用した地震の早期 検知・警報システムの考えは古くからあるようであ る。ちょうど明治維新の年(1868年)、11月3日付 のサンフランシスコ・デイリー・イブニング・ブル ティン誌にはJ.D.クーパー医学博士の次のよう な構想が掲載されている [Nakamura and Tucker 19 87]。

「・・・地震波動は、水面に石を投げ入れたときのように、震源から周囲に拡がっていく。そこで、次のような地震警報装置を提案する。すなわち、サンフランシスコから10~100マイル離れた震源の近くに感震器を設置し、大きな地震動を検知するとすぐにそのことを電信でサンフランシスコに伝える。そして、大きな地震動がやってくる前に、市の中央に建てられた高い塔に吊るされた大きな釣り鐘を乱打させれば、多くの人命を救うことができるだろう。もちろん、この警鐘が地震警報であることは知られていなければならないし、地震感知から通報・警鐘までを自動化する必要もある。・・・」(図1)

^{* (}財)鉄道総合技術研究所 工博

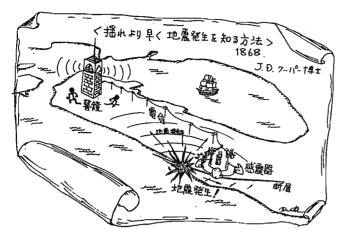


図1 揺れより早く地震を知る方法

これからほぼ100年が経過した1972年頃、第5回世界地震工学会議などで岡本舜三東京大学名誉教授や伯野元彦東京大学名誉教授らを中心とするグループによって、「10秒前大地震警報システム」構想が発表されている(例えば、[岡本ら 1972]、[伯野・高橋 1972]など)。これは東京を対象としたり、あのであるが、サンフランシスコを対象にしたり、しっつパー博士の構想と基本的に変わらない。しかし、最初の構想から100年以上経っても実用的な装置が現れなかったことを見ても、実用化はそれほど簡単ではない。結局「10秒前大地震警報システム」も実現しなかったが、その精神は東北新幹線の「海岸線検知システム」に生かされている。

単純に考えれば、大きな地震動を検知すると直ちに警報を出せばよい。しかし、実際にはどの程度の地震動を検知した時に、どこに警報を出せばよいのかを明確にしなければ、警報は出せない。高度に発展した社会では、狼少年的な警報発令は無用の混乱を引き起こし、却って危険であるからである。

原子力発電所やJRなどで使われている警報地震計は、ある一定の地震動振幅以上になれば、警報地震計のごく近傍の機器や施設に対して警報を出すことができる。この場合には、警報を受け取る側と警報を出す側とが隣接しているため、どこに警報を出せばよいかなどといった問題は生じない。しかし、警報を受け取る側が出す側からかなり離れていると、どこに警報を出すかが重要な問題となる。

さらに、いかに注意深く警報を発しても、結果的 に不要警報となることがあることを考慮しなくては ならない。すなわち、警報に対する合理的な解除方 法を準備しておくことが不可欠となる。

3. 海岸線検知システム

東北新幹線の場合、東北地方の太平洋岸から平均的に70km程度内陸を走っている。そして、この地域では地震はおおむね太平洋海底下で発生する。したがって、太平洋の沿岸ないし海底にいくつかの警報地震計を置けば、いち早く地震を検知することができ、警報を出すことができる。しかし、海岸線に置かれた警報地震計が地震を検知した時、ここから離れたところを走行する東北新幹線のどこに警報を出せばよいのだろうか?

検知した地震による被害地域をリアルタイムに想定して、その周辺を走行する列車群に対して警報するのが理想である。しかし、当時は「検知した地震による被害地域をリアルタイムに想定すること」は不可能であったため、以下のような現実的な対応策が採られている。

すなわち、ある検知点が動作した場合、動作した 検知点の近くで発生した地震の内、もっとも影響の 大きいものが再発したとみなして、この地震の想定 被害範囲を警報範囲とするものである。

どの程度の地震動で警報を発令すべきかという問題については、とりあえず従前の警報レベル(水平

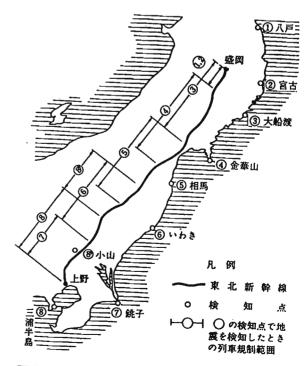


図2 東北新幹線の海岸線検知点とその規制範囲

合成加速度40Gal: cm/s 2) が採用されている。

これが、現在、東北新幹線で採用されている海岸線検知システムである[中村・斉藤 1982]。図2に示すように、8箇所の地震検知点が八戸から三浦海岸までの海岸付近に50km~80kmの間隔で設置されている。

地震が多発する海岸線で地震を検知する海岸線検 知システムの動作回数は月平均1回以上になると予 想された。しかも、その多くは海岸線近くの小地震 で新幹線にはなんらの影響を与えないと推測される 不要警報である。そこで、沿線での地震動の大き が震度5以上に対応する80Gal以上でなければ、新 幹線にとっては不要な警報であったと判断して直ち に運転を再開し、混乱をできるだけ少なくするよう 配慮した。当初の東北新幹線のように運転本数がそ れほど多くなければ、このような対処で、多少の不 要警報も列車運行にはほとんど影響しないようにで きたのである。

4. ユレダス

(Urgent Earthquake Detection and Alarm System: UrEDAS、地震動早期検知警報システム)

東海道新幹線のように列車の運行密度が高くなると、むやみに運行を停止する事はできなくなる。影響が大きすぎるのである。また、高速化に対応するためには、より多くの余裕時間が必要となる。このような背景の中で、まったく新しい概念に基づく警報システム「ユレダス」が開発された[中村 1985]。これは、数年前から米国を中心に提唱されているリアルタイム地震学の一部をこれに先駆けて実現したもので、その基本コンセプトは次のとおりである。

- ①地震動の初動(P波)で地震を検知する。
- ②地震規模Mなどの地震諸元を直ちに推定する。
- ③必要な地域に対して大きく「揺れ出す」前に警報を出す。
- ④以上の処理を、個々の地震検知点毎に独立して行 う(分散処理)。

従来の地震警報装置は、地震動の大きさが一定の

大きさを超えた場合に、装置近傍の施設などに警報を出す。これに対してユレダスは、発生した地震の P波初動が到達した後3秒以内に地震の規模や震央 距離を推定し、検知地震が被害を引き起こすと想定 される地域に警報を出す。警報はP波到達後4秒以 内に伝達される。S波が到達すれば、直ちに震源諸 元を再推定してより精度の高い情報を発信する。

すなわち、ユレダスは2段階のプロセス・機能を持ったリアルタイム地震警報・情報システムである。 P波到来直後に最初の第一次警報/情報を発信し、 続いてS波到来直後に第二次情報を発信する。検知 点から半径約250kmの円内の地震であれば、すべて の警報情報処理は30秒以内に終了する。

さらにユレダスを特徴づけるのは、3成分地震計を備えた単一観測点からなる完全自動システムであるということである。震源推定のためにネットワークを組む必要がないため、システム構成を簡単にできる。

複数のユレダスが使われる場合でも、個々のユレダスは独立に地震諸元を推定してそれぞれの判断により必要な警報を発令する。そして、各ユレダスが推定した地震諸元情報はユレダスセンターに集約され、より精度の高い地震諸元に統合される。この統合情報は、ヘラス(災害予測・復旧支援システム:後述)に送られ、地震後の合理的な対処のために利用される。

中央集中型の警報システムでは中央装置が破壊されてしまうとシステム全体の機能も破壊されてしまう。しかし、ユレダスは完全な分散型システムであり、たとえ破壊的な地震動に襲われてもシステム機能はダウンしない。主要動の到来と共にユレダスが破壊されても、既に警報は発令されており、当該地震の震源情報は必要な箇所に伝達されているからである。さらに、在来の警報地震計にくらべて余裕時間は増大し、地震の全体像に基づく警報のため誤りが少ないという利点もある。

4-1. ユレダスによる地震諸元推定

(1)原理

ユレダスは、単一観測点のP波初動部分の情報だけで、地震の規模、震央の方向、震央距離、震源の

深さをほぼリアルタイムで推定するが、その原理は つぎのとおりである。

1)地震規模(図3参照)

地震の規模は地震断層の大きさに比例する。地震断層が大きければ破壊に要する時間や断層生成に要する時間が長くなる。したがって、ここから発生する地震波動の周期も長くなる。このため、初動周期から地震規模M(マグニチュード)を推定することができる。その精度は±概ね0.5以内である。

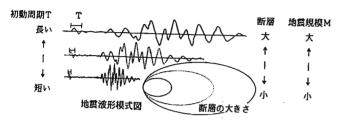
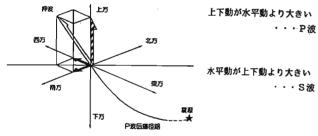


図3 地震の大きさと地震動の周期

2) 震央方向(図4参照)

P波は粗密波であり、波動伝播方向(震央方向に一致)と振動方向が一致している。したがって、P波初動の振動方向から震央方向を知ることができる。その精度は概ね±20°以内である。



「単一観測点の地動情報だけで地震波動の種別を知り、到来方向を知る」 図 4 震央方位推定原理

3) 震央距離と震源の深さ(図5参照)

地震波動の減衰特性を知っていれば、地震の規模 Mと震源距離からP波初動振幅を推定することができる。したがって、MとP波初動振幅から震源距離が推定できる。波動の地表面に対する入射角度を用いれば、震源距離から統計的に震央距離と震源の深さを推定することができる。一次震源距離の推定精度は倍半分の程度であるが、二次推定では概ね±20 km以内となる。

以上の推定は、検知した波動がP波であることを 前提としている。地震波動はほぼ真下から地表面に

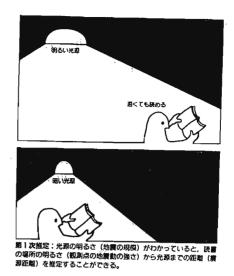


図5 初動情報に基づく震源距離の推定方法 入射するため、P波であれば上下動が卓越し、S波 であれば水平動が卓越する。このことから、PSは 容易に識別できる。

図6は東北地方の地震について、宮古一点の3方向成分地震波形をユレダスに入力して、リアルタイム推定した震源諸元(S波到来後の確定推定結果: 二次推定)を、気象庁や東北大学が数十点の観測データを時間をかけて処理して推定した震源諸元と比較したものである。

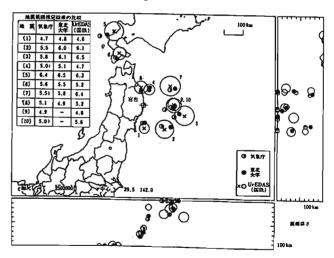


図6 各機関による地震諸元推定結果

これによれば、ユレダスの推定精度は、少なくともS波到来の段階では気象庁や東北大学の推定結果にくらべてに遜色ない程度になっていることがわかる。P波初動部分による一次推定結果の精度はこれよりは劣るので、P波警報は誤差を見込んで出すことになる。しかし、すぐ後に続くS波が到着した段階で警報の可否を是正できる。

4-2. ユレダスの警報基準の考え方

(1) 地震警報の目的

鉄道における地震警報の目的は次のようにまとめ られる。

- ①大きな地震動の中を走り続ける危険を避ける。
- ②被災した箇所に高速で突入する危険を避ける。

新潟地震や釧路沖地震の後の調査によれば、走行中の列車の運転士が地震の発生を知ることは、大きな地震動であっても簡単ではないようである。しかし、地震警報により運転士に地震発生が伝えられれば、①や②の危険回避が確実に行える。

(2) これまでの警報地震計の問題点

従来の警報地震計の問題点は、次の2点にまとめられる。

- ①警報発令が遅く、余裕時間が少ない。
- ②被害が出ないような小地震に対しても警報が出ることがある。

これらの問題は、地震動があらかじめ定められた 基準値を超えると警報を出すという、基本的な考え 方に起因している。この考え方では、余裕時間を長 くしようとすれば、基準値を小さくしなければなら ないが、そうすると不要な警報はますます増えるこ とになる。また、被害が出ないような小さな地震で も、震源の近くでは大きな地震動になるため、不要 な警報が出てしまう。

JRでは、地震動の大きさとして加速度を採用しているが、計測震度などほかの計測量であっても事情は大して変わらない。

地震被害は、地震動の大きさだけではなく、地震動の継続時間や振動周期の大きさにも関係しているのである。これらの影響は構造物の種別・劣化度によって異なるため、これらの観測結果から被害発生の有無を判断するには、まだまだ多くのデータや経験が必要である。また、こうした方法では判断に時間を要するため、迅速な警報は望むべくもない。

(3) 鉄道構造物の地震被害分析と警報基準

これまで100年を超える鉄道の歴史の中で、鉄道被害地震は、大きなものだけでも30個を超えている。平均して4年に1度大きな地震に見舞われたことになる。これらの地震による被害地点を、地震の規模M(マグニチュード)と震央距離 Δ の関係図にプロットすると、図7のようになる。

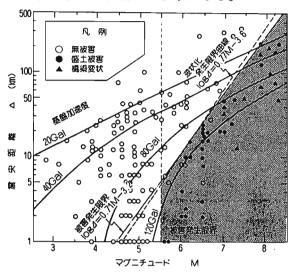


図7 地震規模と震央距離の関係図でみる被害発生範囲

これによると、M5.5より小さな地震では被害はほとんど生じないと考えてよい。これよりMが大きくなるとともに、被害範囲は次第に大きくなる。被害範囲は、概ね震央を中心にした円内に含まれる。円の半径は、M6、M7およびM8に対しておおよそ12 km、60 kmおよび300 kmとなる。この被害発生危険度の高い地域に警報を出せば合理的である。以後、この警報の出し方を $M-\Delta$ 法と呼ぶ

図7には、堅い地盤で観測される地震動の最大加速度の概略値も示している。警報地震計はふつう地表面に置かれる。やわらかい表層地盤で地震動が増幅されることを考えると、これまでの警報は図7の20が少等値線より下の地域に対して出警報ははでいると推測される。したがって、これまでは軽感ではもない(警報もれたところには警報を出さない(警報もれたところには警報を出さない(警報もれたところには警報を出さない(警報もれたところには警報を出さない(警報はほの)であることがわかる。

M-△法は鉄道のみならず、東京ガスの管路網の

被害予測に取り入れられるなど、広く一般の警報発令や警報解除の判断手法として普及し始めている。

4-3. 余裕時間と防災効果

コレダスにより獲得できる余裕時間は、検知点における初期微動継続時間に検知点から警報受信箇所までの主要動の伝播時間を加えたものから警報受信までの処理時間(現在4秒)を差し引いたものとなる。初期微動継続時間(秒)はおおむね震源距離(km)を8で除した程度の値となる。また、主要動の伝播速度は4km/s程度である。したがって、余裕時間は検知点が警報対象域から離れるほど、かつまた、震源に近いほど長くなる。震源から離れた警報対象域に検知点が置かれた場合でも、少なくとも初

ここでは、東北新幹線は海岸線から約70km内陸を 走り、大地震は海岸線から100km程度沖合いで発生 すると簡略化して考える。

期微動継続時間程度の余裕時間は確保できる。

海岸線検知システムで獲得できる余裕時間は、検知点と沿線各点のS波の到達時間差であり、平均17秒程度である。海岸線検知点がユレダスに置き変わったとすれば、獲得できる余裕時間は海岸線検知システムよりおよそ9秒多い約26秒となる。特に十勝沖地震の場合には、海岸線検知システムによる余裕時間がせいぜい20秒であるのに対して、ユレダスによれば40秒以上の余裕時間を稼ぐことができるものと期待される。海岸線検知システムとユレダスで確保できる余裕時間を図8に比較して示す。

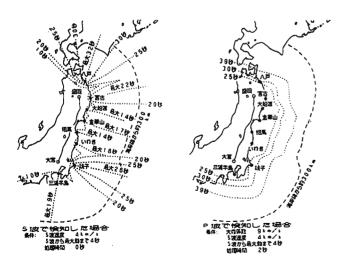


図8 太平洋側の地震を海岸線検知点で検知した時 の等余裕時分線

なお、新幹線沿線にユレダスが設置された場合の 余裕時間は、ほぼ初期微動継続時間に相当する17秒 程度と見積もられる。すなわち、沿線ユレダスに よって現在の海岸線検知システムと同程度の余裕時 間が獲得できることになる。

図9に東北新幹線の地震警報システムに捉えられた各地の地震波形を示す。地震波動が伝播する様子がわかる。各種のシステム(海岸線検知システム、海岸線ユレダス、沿線ユレダスなど)による余裕時間が、この地震の場合どのくらいになるかをこの図から読みとることができる。

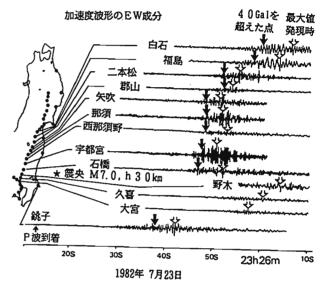
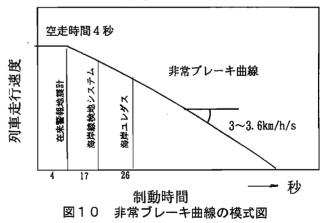


図9 東北新幹線の地震警報システムに捉えられた 各地の地震波形

次に、獲得される余裕時間により、列車の走行安 全性がどの程度向上するかについて簡単に検討する。 以下の説明の理解に資するため、図10に簡略化し た非常制動曲線を示す。



鉄道の非常制動は毎時3.6km/h程度が限度で、平均3km/h程度である。したがって、海岸線検知システム(平均余裕時間18秒)およびユレダス(平均余

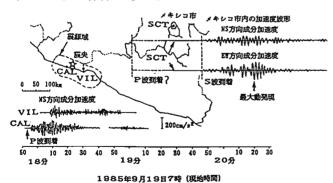
裕時間26秒)によって、列車の走行速度は、それぞれ約50km/hおよび約80km/hだけ減速される。

走行安全性が運動エネルギーに比例すると考えれば、走行安全性は走行速度の自乗に比例することになる。したがって、240~270km/hで走行している列車の安全性は、海岸線検知システムでは1.5倍程度に向上し、ユレダスでは2倍以上にまで向上するものと見込まれる。また、240~270km/hで走行する列車が非常停止するまでに大きく揺れる中を走り続ける距離は、沿線のみの在来警報システムで3km程度、海岸線検知システムで2km程度、ユレダスで1.5km程度と順次短くなる。

こうした減速効果により、脱線・転覆の危険性や 被災箇所突入の危険性は大幅に低下するものと期待 される。

さらに、従来の警報装置や海岸線検知システムでは地震の影響を的確に把握できないため、地震後の対応に時間を要するが、ユレダスの場合、検知した地震の全体像が把握されており、地震後の運転再開をより合理的に迅速に行うことができるという効果もある。

1985年のメキシコ(ミチョアカン)地震を例にとれば、太平洋沿岸にユレダスがあれば、図11に示すように警報から地震動(P波)がメキシコシティ到達するまでに50秒、メキシコシティでの地震動が大きくなり被害が発生するようになるまで50秒、の時間的余裕が生み出せる。メキシコシティにしかユレダスがない場合でも50秒の余裕時間が確保される。



「ユレダスの効果:メキシコ地震の場合の余裕時間」 図11 メキシコ地震の際の地震波形伝播状況

人は1分で100m以上移動できるので、事前に地震 時の望ましい避難行動が周知徹底されていれば、ユ レダスにより獲得される余裕時間で人的被害が大幅 に軽減できるものと期待される。 また、ユレダスは地震P波検知後3秒でマグニチュードなどの地震諸元を把握できるため、津波の有無と襲来地域をP波検知後4~5秒程度で判断することができる。したがって、ユレダスを市町村などで普及している防災無線などと直結すれば迅速な避難行動を喚起することができ、津波襲来までにはかなりの時間的余裕を確保することができる。これは気象庁が整備を進めている早期地震津波警報網からの津波警報・地震情報(地震後3~5分程度)を補完するものとなる。

以上のように、数秒以内の迅速な警報と1分程度 での的確な地震情報をもたらすユレダスは、鉄道・ 道路などの輸送・交通機関の地震時安全対策、高層 ビルの制震システムの起動、高層ビルのエレベータ 制御、化学プラントや原子力発電所などの地震時対 策、港湾関係者・沿岸住民のための津波警報システムなど、広く一般の地震防災に役立つものと期待される。

5. ユレダスの現状と将来

1994年現在、日本には3つのユレダスネットワークが稼働している。

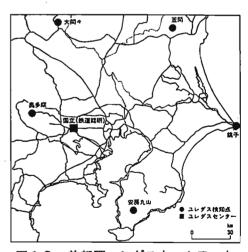
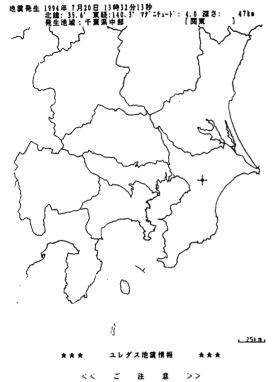


図12 首都圏ユレダスネットワーク

第一は運輸省の助成研究の一環として首都圏を対象に構築されたものである。これは図12に示すように5基のユレダスからなり、1989年春に完成している。統合されたユレダス情報のうち、M≥3.5で首都圏近傍(概ね東京駅を中心に半径200km程度以内)の地震については図13に示すような形で、約50のユーザーに対してテスト的にFAX送信(一般

公衆回線使用)されている。なお、この情報配信に要する時間はP波検知後4~5分であり、専用回線と放送型ポケットベルを使用したアメリカのキューブ(後述)とほぼ同じである。

1/20 13:36 FROM: RTR1/SDAC



森源位置、規模、時間の情報には誤差が含まれている可能性があります なおこの情報は、貴部内でのご利用に制限されています。

ユレダス地質最新情報 Ver. 3.01

(C) RTR1

図13 首都圏ユレダスのFAX配信情報例

現在のユレダス地震情報のFAX配信速度はやや遅いように思われるが、地震後の対応を判断する情報(地震情報)としては十分な早さではないかと考えている。しかし、業種によってはより早い地震情報や警報にも使える迅速な情報(P波情報)が必要になるものと思われる。そこで、P波情報については4~5秒で、地震情報についてはFAXを用いても2~3分で、伝達されるよう検討を進めている。来年度からは首都圏を対象にして、まずFAXによるユレダス地震情報の配信事業を開始する予定である。

第二は東海道新幹線(JR東海)の地震警報システムである。これは、14基のユレダス、25箇所の警報受信端末「ストップ」(Stop Trigar Operation Processor, STOP:変電所にあり、ここに設置されている在来型警報地震計からの警報も併せて隣接する変電設備にき電停止信号を送出する)、CTCセン

ターおよびこれらを結びつける地震情報中継システ ム「サイレン」 (Seismic Information Relay Networ k. SIReN: 7 簡所の中継所からなる地震情報ネット ワークシステム)で構成されている。このシステム は「のぞみ」が開業した1992年春よりP波警報と地 震情報が実際に使用され始めている。各ユレダスか らP波検知後4秒以内にストップに警報が伝えられ、 変電所からの色電が止められる。これにより、走行 中の新幹線に非常制動がかけられ、大きく震動する 中を高速走行する危険や被災箇所への突入の危険を 回避する。なお、最初の警報から1分の間に通報さ れてきた各地のユレダス情報を統合し、これを基に して地震後調査の必要性・調査区間などが特定され る。これらの結果は、運転再開指示書として1分半 後に印刷出力される。図14に東海ユレダスのシス テム図と運転再開指示書の出力例(見本)を示す。

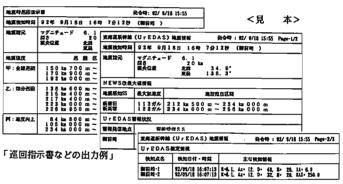


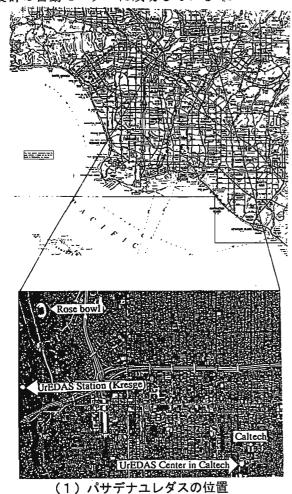
図14 東海システムの巡回指示書などの出力見本

なお、東海ユレダスの警報発令や運転再開の判断 には、最大加速度などの地震動の大きさではなく、 地震規模と震央距離とから判断するM-△法が用い られている。

最後は、青函トンネルの地震防災システム(JR 北海道)で、4基のユレダスからなるネットワーク を含んでいる[北川・中村 1987]。地震後の合理 的な対応を判断するため、規模や震央位置の統合情 報がCTCのCRTにほぼリアルタイムで表示され ている。

そのほか、研究用ユレダスが(財)鉄道総合技術研究所(以下、鉄道総研と略称)の国立研究所(1987年からユレダスによる地震観測開始)および宮古市(1984年からユレダスによる地震観測開始)に設置されている。

鉄道総研は、地震断層の存在がユレダスの推定精 度に与える影響を検討するため、カリフォルニアエ 科大学(カルテック: Caltech)の地震研究所と協力して、クレスゲ地震観測所(米国加州パサディナ)にユレダスを設置し、1993年9月から観測を開始した[Nakamura et al. 1994]。このパサディナ・ユレダスは1994年1月のノースリッジ地震およびその余震群の自動モニターに成功している[Nakamura e



Distance from UrEDAS at Kresge in km

(2) ノースリッジ地震のモニタ例 図15 パサデナユレダスの位置とノースリッジ地震 のモニタ例

tal. 1994b]。図15はパサディナユレダスの位置 およびノースリッジ地震のモニター例である。

本震発生後最初の24時間で700個あまりの地震を 検知して、うち約450個についてはその規模と震源 を自動的に推定している。さらに、その後の余震発 生状況についても的確にモニターし続けている(図 16)。この地震群はカルテックの地震研究所の一 室にあるユレダス情報表示装置に地震発生後直ちに (二次情報でも10秒前後で)表示されている。なお、 ユレダスの情報はキューブ(後述)にも送られ、迅 速な地震情報として参考にされている。

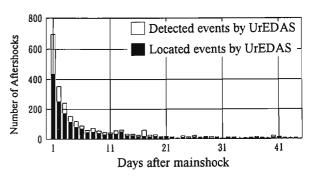


図16 /-スリッジ地震の1日あたりの余震回数の変化

6. キューブ (Caltech and USGS Broadcast of Earthquakes: CUBE)

最近米国で注目を集めている地震情報システム「キューブ」について概説する。これは、地震予知に代わる実用的な地震防災のための情報システムを模索していたカリフォルニア工科大学(Caltech)の金森博雄先生らにより構築された。先生らが提唱する「リアルタイム地震学」の第一段階を具体化している。リアルタイム地震学は地震現象をリアルタイムに解析し、同時にその情報を広く関係者に配信して地震防災に役立てようとするものである。

Caltechは1930年代から南カリフォルニア一帯の地震活動を定常的に観測してきた。現在では、南カリフォルニアに約250地点の地震観測点を展開し、これらの情報をパサディナにあるCaltechの地震研究所に集めて、地震の発生状況を自動的に監視している(図17)。キューブはこの自動的に決定された震源情報を関係機関に自動的に配信するシステムである。地震研究所で自動決定された高精度の地震情報は、ポケベル会社に専用回線で送られ、ここから放送型のポケットベルによって地震情報が配信され

る(図18)。受信用ポケットベルにはワークス テーションまたはパソコンが接続されており、送ら れてきた地震情報は約2週間分地図上に震央分布図 として表示される。キューブは会員制で運営されて おり、会員の年会費は2万5千ドルとのことである。 1994年9月現在、キューブ会員は18機関にの ぼっている。現在のキューブ情報は、震央位置、深 さおよび規模であり、情報配信に要する時間は3~ 4分とされている。これは首都圏におけるユレダス 地震情報のFAX配信とほぼ同じ内容・配信時間で ある。両者で異なるのは精度と、キューブは自動処 理結果をすべて送信し、ユレダスは比較的大きくて 首都圏付近で発生した地震(M>3.5、Δ<200km)に 限定している事である。

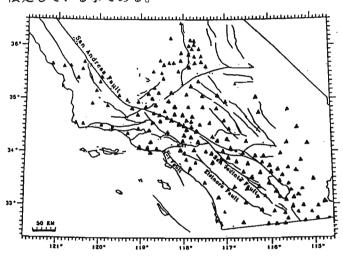


図17 南カリフォルニアの地震観測点分布

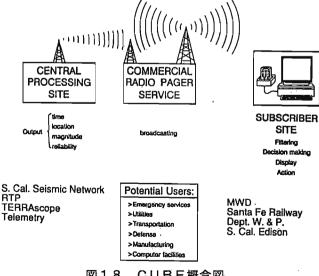


図18 CUBE概念図

本年1月のノースリッジ地震の際、多くの観測点 から一度に地震波形情報が送信されてきたため、自 動処理システムの処理能力を超えてしまい、30分 ~1時間程度システムダウンしてしまったとのこと である。しかし、システムダウンする前に本震直前 の地震の位置を送信しており、情報を受信した各機 関は規模については小さすぎるが地震の位置は間違 いないものと判断して、この地震への対応策を検討 し始めた。システムが復旧すると同時に、余震情報 が送られてきたため、ノースリッジ地震の全体像を いち早く捉える事ができた(図19)。キューブ情 報の受信機関は、キューブ情報が防災上非常に有効 であったことを表明している。

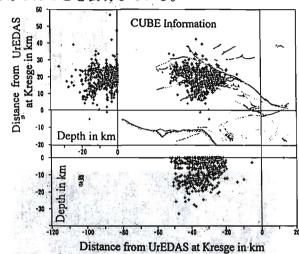


図19 CUBEによるノースリッジ地震のモニタ

なお、マスコミ向けにメディアキューブ(Media CUBE) が開発され、すでに運用されている。これ は、M<5の地震の情報は2~4分で自動配信し、 これ以上大きな地震についてはCaltechの地震研究者 によってチェックされるが遅くとも15分後には配信 されるという。現在テレビとラジオ1社ずつが加入 しているとのことである。

7. ヘラス (Hazards Estimation and Restration Aid System: HERAS、災害予測・復旧支援システム)

ヘラスは、地震発生と同時に被害発生の可能性を 判断し、被害の程度や地域的な分布を的確に推定す る対話型システムである(図20)。地震被害を的 確に予測することによって、地震後の対応を合理的 で迅速なものにすることをねらっている。つまり、 二次災害や労力、ダウンタイムなどを「減らす」こ とを目的としたシステムである。

このシステムを実現するためには、表層地場の地

盤

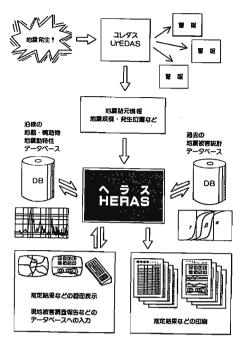


図20 地震対応部分のヘラスの概要

震応答特性を正確に把握して置く必要がある。この調査のために、常時微動を用いた表層地盤の地震動特性推定法と装置が開発された[中村 1988]。この方法と装置を用いて、首都圏のJR沿線の構造物と表層地盤の地震動特性が100m間隔で調査されている。東海道新幹線や山陽新幹線などを含めて、これまでに約2000kmの区間で延べ20000点を超える常時微動調査が実施されている。

一般に防災システムは災害発生時しか動作させないため、その操作に習熟しきれないことが多いと思われる。しかし、ヘラスは日常のメンテナンスにも利用できるため、日頃からその操作方法に習熟する

ことが可能である。

ヘラスは地震用のプロトタイプシステムが完成した段階で、1994年現在実用化されてはいないが、その基礎となっている地盤や構造物の調査手法は鉄道のみならずさまざまな分野で普及しつつある。また、ヘラスは地震のみならず自然災害全般を対象にした総合防災システムの中核として開発を進めている。

8. あとがき

ユレダスは鉄道に限られた地震防災システムではなく、よりひろく、鉄道管制、道路管制、エレベータ制御、津波警報、火山監視など社会一般のリアルタイム防災システムとして役立つものと確信している。いちはやく被害を予測したり、弱点箇所を抽出したりすることができるヘラスは、災害時のみならず日常の保守点検を支援することも可能であり、活躍が期待される。

ユレダスを日本全国に20kmメッシュで設置すれば、その総数は約2100基となる。これにより、ほとんどの地点で被害地震の主要動が到来する前に警報を受け取れるようになる。このユレダスネットワークは自然災害情報ネットワークとしても活用できる。これは「ユレダス2100ネットワーク構想」として1992年に発表したものであるが、関係諸機関の御協力を仰ぎながら早期実現を期したい。

謝辞:金森博雄先生をはじめとするカリフォルニア 工科大学地震研究所の方々のご協力に感謝します。 また、本稿の図面をまとめていただいた(株)シス テムアンドリサーチの西永雅行氏に感謝します。

主な参考文献

- 1) 伯野元彦・髙橋 博:10秒前大地震警報システム,自然,9月号.
- 2) Toshiro Fujiwara and Yutaka Nakamura: New Autmatic Train Stopping System During Earthquake (II),7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, pp. 1-11,1980.9.
- 3) 高山 昭・江本佑橋・阿部英彦・中村 豊:地震動早期検知システムの研究-新幹線の安全のために-,土木学会誌,Vol.66,No.5,pp.51-56,1981年5月.
- 4) 阿部英彦・涌井 ー・中村 豊:大規模地震に対する鉄道沿線の地震動予測 東海道新幹線沿線のサイスミック・マイクロゾーニングー,鉄道技術研究所報告,Vol.1216,No.531,pp.1-85,1982.9.5) 中村 豊・斉藤明夫:地震の早期検知・警報システムの開発,第6回日本地震工学シンポジウム講演集,pp.2009-2016,1982.12.
- 6) Yutaka Nakamura and Hidehiko Abe: Estimation of Seismic Motion and Damages of Structures for New Bullet Trains, 3th South Pacific Regional Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-19, May. 1983.

- 7) 中村 豊・斉藤明夫:地震波動種別の識別と単一観測点のデータに基づく無央方位の推定,第17回地震工学研究発表会講演概要集,pp.95-98,1983年7月.
- 8) Yutaka Nakamura: Development of Earthquake Early—Warning System for the Shinkansen, Some Recent Earthquake Research and Practice in JAPAN 1984, August. 1984.
- 9)中村 豊·富田健司:最大地羅動加速度の推定式,土木学会第39回年次学術講演会講演概要集,1-393,pp.785-786,1984年9月.
- 10)美藤恭久・中村 豊・富田健司:東海道・山陽新幹線のための地震時ダウンタイム短縮化対策,鉄道技術研究報告,Vol.1294, pp.1-38,1985年3月.
- 11) 中村 豊:地震(津波)警報のための地震早期検知を行う 1 点検知システムの考え方とパソコンによる実施例-,第18回地震 工学研究発表会講演概要集,pp.505-508,1985年7月.
- 12) 美藤恭久・中村 豊・富田健司:新幹線の新しい地震警報システムUrEDAS(ユレダス)について,第18回地震工学研究発表会講演概要集,pp.509-512,1985年7月.
- 13) 中村 豊:鉄道の震害と記録のあり方,鉄道土木,Vol.27, No.8,pp.37-40,1985年8月.
- 14) 中村 豊:国鉄における地震警報システム,鉄道技術,Vol.42,No.10,pp.371-376,1985年10月.
- 15) 美藤恭久・中村 豊:新幹線の地震警報システム,土木学会誌,Vol.71,No.4,pp.50-53,1986年4月.
- 16) Yasuhisa BITO and Yutaka NAKAMURA: Urgent Earthqu ake Detection and Alarm System, CIVIL ENGINEER ING IN JAP AN, JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, pp. 103-116, 1986. 17) 北川修三・中村 豊:青函トンネルの地震防災システムについて, 第19回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 505-508, 1987.7. 18) 中村 豊:首都圏を対象にした総合防災システムの構想, 第19回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 509-512, 1987年7月.
- 19) 中村 豊:常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定,鉄道総研報告,Vol.2,No.4,pp.18-27,1988年4月.
- 20) Y. NAKAMURA and B. E. TUCKER: Japan's Earthquake Warning System, California Geology, Vol.41, No.2, 1988.
- 2 1) Yutaka NAKAMURA: On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS), 9th World Conference on Earthquake Engineering, VII,1988.
- 22) 中村 豊:常時微動計測に基づく鉄道盛土の地震動特性の推定,鉄道総研報告,Vol.2,No.7,pp.34-42,1988年7月.
- 23) 中村 豊・佐溝昌彦:強震観測データを用いた表層地盤の地 震動特性の推定,第20回地震工学研究発表会講演概要集, pp.133-136,1989年7月.
- 24) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動を用いた鉄道盛土および基礎 地盤の地震動特性の推定,第20回地震工学研究発表会講演概要集, pp.393-396,1989年7月.
- 25) 中村 豊・中嶋 繁:常時微動を用いた新幹線の高架橋の地 震動特性の推定,第20回地震工学研究発表会講演概要集,pp.405-408,1989年7月.
- 26) 中村 豊・滝沢太朗:地表面における常時微動の水平/上下スペクトル比と表層地盤特性の関係,土木学会第44回年次学術講演会講演概要集,I-427,pp.906-907,1989年9月.
- 27) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動による盛土の地震応答特性の推定,土木学会第44回年次学術講演会講演概要集,I-436,pp.924-925,1989年9月
- 28) 中村 豊・中嶋 繁:常時微動による高架橋の地震応答特性の推定,土木学会第44回年次学術講演会講演概要集,I-437, pp.926-927,1989年9月.
- 29) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動による盛土と基礎地盤のせん 断波速度の推定,土木学会第45回年次学術講演会講演概要集,I-538,pp.1106-1107,1990年9月.
- 30) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動を用いた地盤の液状化予測,土木学会第45回年次学術講演会講演概要集,I-519,pp.1068-1069,1990年9月.
- 31) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動による表層層厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定,鉄道総研報告,Vol.4,No.9,pp.29-35,1990年9月.
- 32) 中村 豊:サンフランシスコ湾岸地域における常時微動測定,土と基礎,Vol.38,No.11,pp.13-18,1990年11月.
- 33) 中村 豊・大町達夫・年縄 巧:常時微動によるサンフランシスコ湾岸地域の地震動特性の推定,第8回日本地震工学シンポジウム,pp.673-678,1990年12月.
- 34) 滝沢太朗・中村 豊:常時微動による東京湾大井埠頭周辺地

- 盤の地震動特性の推定,第8回日本地震工学シンポジウム,pp.679-684,1990年12月.
- 35) 中村 豊・淹沢太朗・山口文敏:地盤改良による常時微動特性の変化,第21回地震工学研究発表会講演概要集,pp.89-92,1991年7月.
- 36) 中村 豊・滝沢太朗:常時微動を用いた鉄道橋梁の振動特性の推定,第21回地展工学研究発表会講演概要集,pp.565-568,1991年7月.
- 37)中村 豊・中嶋 繁:常時微動を用いたRCラーメン高架橋の 地震動特性とヤング率の推定,第21回地震工学研究発表会講演概 要集,pp.629-632,1991年7月.
- 38) 中村 豊・西永雅行:盛土の地震動特性と常時微動を用いた 盛土のせん断波速度の推定,第21回地震工学研究発表会講演概要 集,pp.641-644,1991年7月.
- 39) 中村 豊・富田健司:"ユレダス"と"ヘラス"-総合地震防災システムの構築-,土木学会誌,Vol.77,No.12,pp.10-13,1991年12日
- 40) ユレダス推進部中村研究室: 防災特集,RRR,No.9,pp.10-19,1992年9月.
- 4 1) 中村 豊:早期地震検知醫報システム「ユレダス」,地震 ジャーナル,地震予知総合研究振興会,No.14,pp.34-39,1992年12 月.
- 4 2) Hiroo KANAMORI:Real-Time Seismic Network for Research and Hazard Mitigation -TERRAscope and CUBE -, Proc.IDNDR Intl.Symp on Earthq.Disaster Reduction Technol. 30th Aniv. of IISEE Tsukuba, Japan, pp. 183-197, 1992.12
- 43) 大町達夫・中村 豊・中村 普:常時微動と被害,1990フィリピン・ルソン地震緩害調査報告,土木学会編,pp.222-248,1993年6月
- 44) 中村 豊・富田健司・渡辺保宣・西永雅行:1993年釧路沖地震の被害箇所と常時微動の関係,第22回地震工学研究発表会講演概要集,pp.367-370,1993年7月.
- 45) 西永雅行・中村 豊・富田健司:常時微動による液状化判定, 第22回地震工学研究発表会講演概要集,pp.131-134,1993年7月.
- 46) 富田健司・中村 豊・西永雅行:常時微動を用いた橋梁の振動特性の推定,第22回地震工学研究発表会講演概要集,pp.515-518,1993年7月.
- 47) 佐藤新二・中村 豊・日高和利:常時微動を用いた桁の固有振動数と支承バネ係数の推定,第22回地震工学研究発表会離演概要集,pp.519-522,1993年7月.
- 48) 田母神宗幸・中村 豊・立花三裕:橋脚等ブロック状構造物の健全度について,第22回地展工学研究発表会講演概要集,pp.615-618,1993年7月.
- 49) 山口文敏・中村 豊・富田健司:青函トンネル地震防災システムに捉えられた1993年釧路沖地震-トンネル覆工歪の変動-, 第22回地震工学研究発表会講演概要集,pp651-654,1993年7月.
- 50) 小林俊夫・中村 豊・田母神宗幸:洗掘に伴う橋脚の振動特性の変化-常時微動と衝撃試験の比較-,土木学会第48回年次学術講演会講演概要集,I-107,pp,362-363,1993年9月.
- 51) 田母神宗幸・中村 豊・立花三裕:斜面露岩の常時微動特性, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集,CS-21,pp.16-17,1993年9月.
- 52) 中村 豊・滝沢太朗・富田健司・齋田 淳・西永雅行:常時微動による地盤変状予測の試み,鉄道総研報告,Vol.7,No.10,pp.63-72,1993年10月.
- 53) 中村 豊・富田健司・西永雅行:常時微動による橋梁振動特性の推定,鉄道総研報告,Vol.7,No.12,pp.57-64,1993年12月.
- 54) 中村 豊・日高和利・佐藤新二・西永雅行:ラーメン高架橋および盛土の地震被害判定指標の提案,鉄道総研報告,Vol.8,No.5,pp.25-28,1994年5月.
- 55) 中村 豊・日高和利・西永雅行:常時微動による盛土の地震 被害の分析,鉄道総研報告,Vol.8,No.5,pp.29-33,1994年5月.
- 5 6) 中村 豊・田母神宗幸・佐藤新二・立花三裕:常時微動を用いた新しい橋脚健全度評価法の提案,鉄道総研報
- 告,Vol.8,No.5,pp.47-52,1994年5月.
- 5 7) NAKAMURA, Y. and ARAYA, T.: Urgent Earthquake Detection Alarm System (UrEDAS), SSA94, April 1994.
- 5 8) NAKAMURA, Y. and ARAYA, T.: Real-time monitoring of the Northridge Earthquake sequence by UrEDAS, SSA94, April 1994.
- 5 9) NAKAMURA, Y., ARAYA, T. and KANAMORI, H.: Comparison of UrEDAS and CUBE, SSA94, April 1994.

都市ガス導管網の地震時警報システムSIGNALの開発

Development of City Gas Network Alert System Based on Monitored Earthquake Ground Motion

山崎文雄* 片山恒雄* 野田 茂** 吉川洋一*** 大谷泰昭****
Fumio YAMAZAKI, Tsuneo KATAYAMA, Shigeru NODA, Yoichi YOSHIKAWA and Yasuaki OTANI

A seismic information gathering and network alert (SIGNAL) system for a large-scale city gas network has developed based on extensive earthquake monitoring and GIS. The monitoring system consists of 331 SI-sensors, 5 accelerometers and 20 liquefaction sensors. Once an earthquake occurs, monitored values by these sensors are sent to the network control center by radio. The emergency operation system is activated as soon as these monitored values are received. Then damage estimation to customers' buildings and pipelines, estimation of the magnitude and hypocenter, evaluation of the response spectrum, and decision analysis whether to shut-off or maintain the supply based on the estimated results are conducted. SIGNAL has started operation recently. This paper introduces SIGNAL and case studies using it.

1. はじめに

都市ガスは市民生活や産業にとって重要なエネルギー源であるが、1994年ノースリッジ地震の火災事例^{1), 2)}でも明らかなように、地震による二次災害の危険性を秘めている。したがって、東京首都圏のように密集度が高く地震活動度も高い地域では、その地震防災対策は極めて重要な課題といえる。

わが国においても、過去から最近の地震において、都市ガス施設はしばしば甚大な被害を被ってきており、その大部分がガス導管などの供給施設に発生している³⁾. 1978年宮城県沖地震⁴⁾, 1983年日本海中部地震⁵⁾, 1987年千葉県東方沖地震⁶⁾, 1993年釧路沖地震⁷⁾, 1993年北海道南西沖地震⁸⁾において、ガス導管の被害が発生し、結果としてガスの供給停止が行われている。このうち、宮城県沖地震がきっかけとなって、予防対策、緊急対策、復旧対策の3つからなる「地震防災対策ガイドライン⁹⁾」が日本ガス協会により作られた。この中で、緊急対策としては、ブロック化による緊急措置と情報収集システムの確立が提唱されている。緊急措置のための適切な情報は、事業者の規模によって異なり、近年、中・大規模の事業者に対しては、地震動強さの遠隔監視の重要性が指摘されている^{9),10)}.

このような背景から、今日、わが国の大規模都市ガス

事業者は、緊急対策としていろいろなレベルで供給を停止する仕組みを構築している(図-1).

需要家数約780万件と最大手の東京ガスを例にとると、末端の需要家レベルでは、感震器を内蔵したマイコンメータによって、震度 5 程度以上の揺れに対し、ガス供給を自動停止することになっている。また需要家に直接ガスを送る低圧導管網は、需要家3万~10万件を単位として常時、低圧ブロックを形成し、地区ガバナに取り付けられたSIセンサー $^{11)}$ がSI=30 cm/s を感知すると、供給を自動遮断する仕組みになっている。この自動遮断用のSIセンサーは、各低圧ブロックに約30箇所、全供給区域で約3,000箇所が設置されている。

さらに、ガバナステーションやガスホルダーと地区ガバナを結ぶ中圧導管網については、数十万件の需要家を含む大きな地域(中圧プロック)で、プロック化と供給停止が行えるようになっている。この中圧プロックの供給停止は、現在のところ、中圧導管網の被害確認情報に基づいて判断し、本社の防災・供給センターからの遠隔操作で行うことになっている。しかし供給区域が広いために、被害確認に時間を要する恐れがあり、地震動モニタリング結果のみから中圧プロックの地震被害を推定し、警報を発するようなシステムの開発が急務となっている。

本報告では、現在一部運用が開始されているSIGNAL

^{*} 東京大学生產技術研究所 (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

^{**} 鳥取大学社会開発システム丁学科 (Dept. of Social Systems Engineering, Tottori University)

^{***} 東京ガス(株)防災・供給センター (Center for Supply Control and Disaster Management, Tokyo Gas Co., Ltd.)

^{**** (}株)富土総合研究所 (Fuji Research Institute, Inc.)

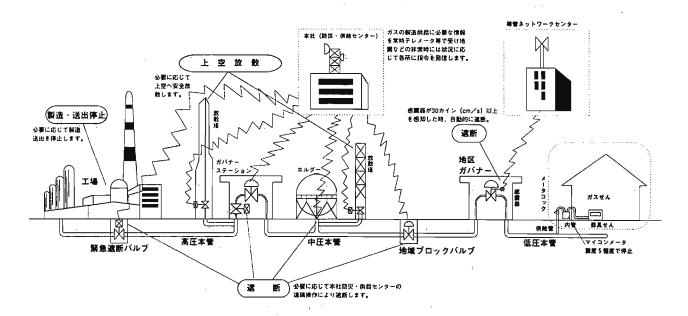


図-1 都市ガス供給システムと緊急措置

(<u>Seismic_Information Gathering and Networl Al</u>ert system)と 名付けられたシステムの概要¹²⁾を紹介し,想定地震によるケーススタディ結果を示す.

ここで、最近脚光を浴びているリアルタイム地震学や早期警報システムにおけるSIGNALの位置付けについて一言触れておこう。これらのシステムの先駆となったJRのUrEDAS¹³⁾は、地震動のうち最初に到達するP波を検知して、S波到達前に列車を安全に停止させようというものであり、超短時間での震源推定を目的としている。またこの結果を受けて、被害予測・復旧支援を行うHERASというシステムも開発されている。一方、SIGNALは、震源推定と被害推定の両方を統合したシステムになっており、地震動と地理情報システム(GIS)上のデータから、埋設管や需要家建物の被害を推定して、地震発生後10分程度で警報発令することを目指している。

米国においても、ノースリッジ地震において、CUBE¹⁴⁾ (the <u>Caltech-USGS Broadcast of Earthquakes</u>)という震源推定のシステムが注目を集めた。CUBEは、南カリフォルニアの200余りの地震観測点からの地震動をテレメーター、電話回線、無線などで集め、即時に震源位置とマグニチュードの計算を行い、震源情報をライフライン事業者や州緊急対策本部などのCUBEの契約者にポケットベルで連絡する。ノースリッジ地震の際、CUBEは必ずしも予定どおりには動作しなかったが、手段としての有効性は評価された。

またカリフォルニア州政府では、地震直後に構造物やライフラインの被害、それに人的被害などを迅速に推定することを目的とした、EPEDAT¹⁴⁾(the <u>Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool</u>)というGISに基づいたシステムの開発を始めている。これは、CUBEで推定された

震源位置とマグニチュードから、まず破壊の生じた断層 面を特定し、地震動強さの分布を予測、さらに、建物、 ガス、水道、高速道路などの包括的な被害推定を行う。 州政府がこのようなシステムを持つ利点は、被害地域や 被害程度を特定し、救助や緊急支援、それに復旧活動の 立案に用いるほか、予想被害額を集計し、連邦政府に求 める緊急援助額の根拠とする点が挙げられる。

このように、早期警報システムといっても各々のシステムで対象や目的が異なっているが、日本ではライフライン事業者が独自のシステムを開発し、米国では協同利用のシステムが作られている点が大きく異なるといえよう.

2. 地震動モニタリング・システム

中圧導管網の地震時警報システムSIGNALは、大規模な地震動モニタリングに基づいている。図-2は東京ガスの供給区域の中圧プロック分割であり、現在9のプロックが設けられている。

地震動モニタリングの中核をなすものは、全地域で331 箇所(各低圧プロックに3箇所)の観測点を有するSIセンサー・ネットワークである。この地震動モニタリング用 SIセンサーは、整圧所や地区ガバナに設置されており、 地震が発生すると地震動のSI値と最大加速度を観測し、 本社の防災・供給センターへ無線によりこれらの値をリ アルタイムで送信する。このうち31箇所における最大加 速度値は、従来からNHKにも提供されており、関東地方 で地震があった場合には、地震速報としてテレビ放送されている。

また、地震の震源やマグニチュードを独自に迅速に推

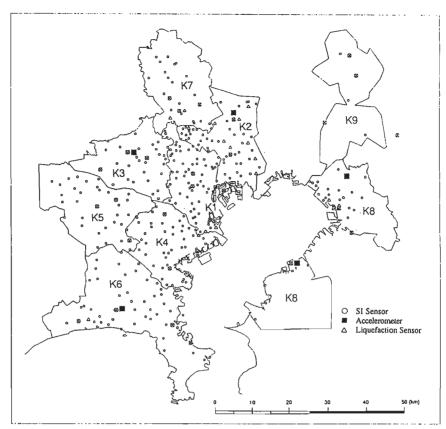


図-2 都市ガス供給網の中圧プロックとモニタリング用地震センサー

定することを主たる目的として、供給エリア外周部の5箇所(神奈川県藤沢市、東京都小平市、埼玉県草加市、千葉県四街道市、千葉県袖ヶ浦市)の東京ガス施設内に、地表および地中の地震計を設置している。地中地震計は深さ20~40mの比較的固い地盤に埋設され、3方向成分の加速度を観測し、無線で本社に波形を送信する。

さらに、液状化の危険性の高い地区には、新たに開発した液状化センサー¹⁵⁾を20箇所設置し、地震時のセンサー内の水位上昇量を本社に無線連絡し、液状化発生の有無を知らせる仕組みとなっている。

これらの地震動リアルタイム・モニタリングシステムは、計器の設置と無線システムの構築が最近終了し、1994年6月より本格稼働を始めた.

3. SIGNALの構成

現在構築を進めている地震時警報システムSIGNALの全体構成を図-3に示す、全体システムは、被害推定システム、震源推定システム、スペクトル評価システム、意志決定システムの4つのサブシステムから成っている。また事前に対象地域の地盤ゾーニングを行い、埋設管や需要家建物などの基本データを準備しておく、以下にそれぞれについて概要を述べる。

(1) 地盤ゾーニングと基本データ

地震動強さが、地盤条件に大きく左右されることはよく知られている。SIGNALでは、地震センサーの配置が

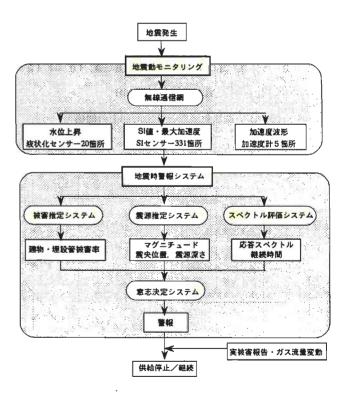


図-3 SIGNALのシステム構成とフロー

非常に密であるので、観測点間における地震動強さは補間などを行わず、各SIセンサーの観測値は、センサー近傍の同種の地盤での地震動強さを代表すると考えることにする。したがって、事前に対象区域全域の地盤ゾーニ

ングを行い,各SIセンサーの分担区域を定めておく必要 がある.

地盤分類は、地形により台地と沖積低地(谷底低地を含む)の2つに分類したあと、沖積低地についてはさらに固有周期により3つに区分し、計4通りの地盤分類とする、沖積低地の固有周期 $T_G(s)$ による分類は、従来の4種分類 $^{16)}$ の2-4種に対応する $T_G<0.2$, $0.2 \le T_G<0.6$, $T_G \ge 0.6$ で区分した。固有周期は、地層断面と地層ごとの代表的S波速度から求めたが、現在、常時微動観測 $^{17)}$ による確認も行っている。またボーリング柱状図に基づき、観測SI値と液状化層厚の関係 $^{18)}$ を地図として準備している。各SIセンサー分担区域における被害推定の基本データとして、埋設管については中圧導管と低圧導管の延長、管

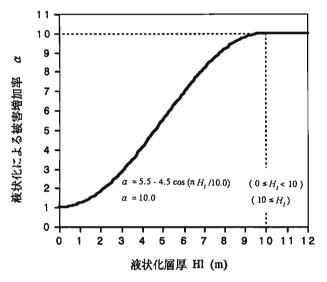


図-4 液状化層厚と被害増加率の関係

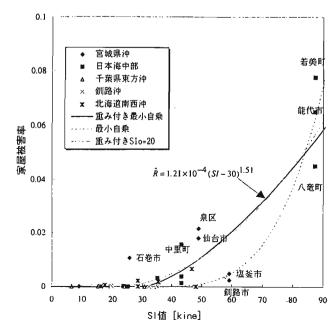


図-5 SI値と家屋被害率の関係

種, 管径などを, また需要家建物については契約数を準備している.

(2) 被害推定システム

SIGNALの中核をなすもので、無線で得られるSI値と最大加速度を用いて、各中圧プロックの被害程度を推定する。中圧プロックの供給停止は、中圧導管網の被害を前提としているが、過去の地震による被害事例は少ない、そこで、需要家建物や低圧導管の被害多発といった状況から、間接的に中圧管被害を予測することにする。

建物や埋設管の被害要因としては、震動被害と液状化などの地盤被害が主として考えられる。ここでは液状化の影響は、震動被害を増加させることで評価できるという考えに立ち、その増加率を液状化層厚の関数として図ー4のように与える。これは、液状化がまったく生じない時に増加率が1.0となり、液状化が10mの厚さで発生した時に増加率が10.0となる連続的な三角関数である。液状化層厚が10m以上になる場合は、被害増加率を10倍で頭打ちさせている。

また、宅地造成地や急傾斜地などでは、地すべりや地割れなどの地盤変状の起こりやすいことが知られている ¹⁹⁾. このため、該当するようなSIセンサー分担区域を事前の地盤ゾーニングで指定し、建物および埋設管の被害率を4.5倍に割り増す.

システムでは、まず観測SI値と最大加速度を入力として、各SIセンサー分担区域ごとに埋設管および需要家建物の被害率を推定する。この被害推定の方法として、ファジィ推論²⁰⁾に基づくものを既に提案したが、システムの実用化に向け簡便な手法を今回提案する。図-5は、実地震のデータに基づいて構築したSI値と建物被害率の関係²¹⁾である。同様に図-6は、実地震のデータに

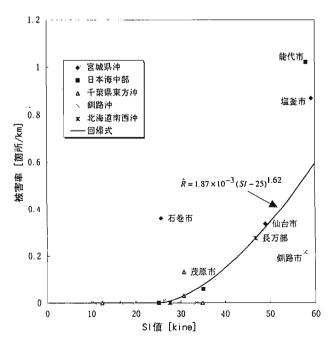


図-6 SI値と低圧ガス導管被害率の関係

基づく, SI値と低圧導管(ネジ鋼管)の標準被害率の関係 ²²⁾である. 埋設管の被害率は, この標準被害率に管種と 管径の補正係数²³⁾を乗じて算定する.

各SIセンサー分担区域で推定された建物および埋設管被害率より、建物被害棟数と埋設管被害箇所数を計算し、これらを低圧ブロックおよび中圧ブロック単位で集計して被害数量を求める。また、低圧ブロックおよび中圧ブロック単位での平均被害率も逆算により求める。

(3) 震源推定システム

本システムのように高密度な地震動モニタリングを 行った場合、各供給区域内の地震動強さは観測値で代表 できよう.したがって被害推定の目的からは、震源位置 やマグニチュードを推定する必要性はさほど高くない. しかし、震源位置やマグニチュードを知ることは、供給 停止の意志決定を行う上で極めて重要と考えられる.

震源推定²⁴⁾は、無線で送られてくる5地点の加速度波形(地表および基盤)を用いてリアルタイムで行う.図ー7は震源推定システムのフローチャートを示したものである.このシステムは次の5つのステップよりなる.すなわち,1)逐次型同定手法による観測記録の初動時刻(P波とS波)の決定,2)半無限地盤構造における震源情報の概略推定,3)多層地盤構造における理論走時と震源位置に関する偏微分係数の算定,4)2)の結果を初期値とし非負の深さを考慮した重み付き最小自乗法による震源位置と発震時刻の決定,および,5)気象庁の算定式に準じたマ

Location and Accelerogram at the Observation Point Determination of the Arrival Time of the Initial Motion Using the Sequential Identification Method Observed Travel Time Initial Estimate of the Hypocenter Calculation of the Theoretical Travel Time and Partial Differential Coefficient Solution of the Observation Equation Using the Iterative Calculation Weighted Least Squares Method with Non-negative Depth Convergence Criterion of Hypocenter O.K. Determination of the Hypocentral Position and the Time of Occurrence of the Earthquake Calculation of Response Calculation of the Displacement the Epicentral Strong-motion Seismograph Distance Determination of Magnitude 図-7 震源推定計算のフロー

グニチュードの推定である.

P波とS波の到着時刻およびSP時間の決定においては、オンライン処理のため、カルマンフィルターを用いている。さらに、本システムでは、地盤構造の違いが反映されるように、理論走時とそれの震源位置に関する微分を計算した上で、自動処理・震源決定を実施している。これらの点は既往の手法に見られない本アルゴリズムの特徴である。

また、この震源推定結果を用いて、マグニチュードと 震源距離による概略的な被害推定²⁵⁾を行うことも考えて いる

(4) スペクトル評価システム

スペクトル評価システムでは、5地点からの加速度波形を用いて、加速度応答スペクトルを計算する。また主要動の継続時間も計算する。これらの結果より、各地点における地震動の卓越周期などが分かり、被害を受ける可能性のある構造物の周期帯域をある程度特定できる。また過去の被害地震の加速度応答スペクトルや継続時間と比較することにより、地震動のおおよその破壊力をイメージできる。しかし波形を得られるのが5地点のみであるので、地点間のスペクトルの違いやその間の地域の評価は難しい。したがって、このサブシムテムの計算結果は、意志決定において参考程度の位置づけとすることを考えている。

(5) 意志決定システム

「供給継続」の3段階の判断を下す。効用関数を決めるのは容易ではないが、現在のガス事業者の判断基準などを

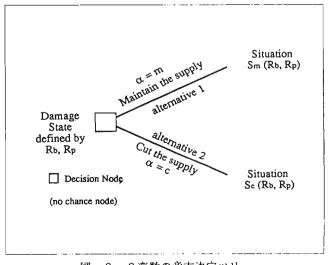
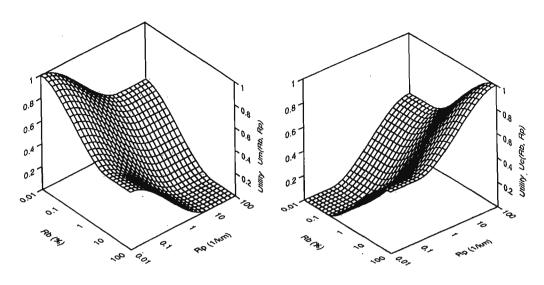


図-8 2変数の意志決定ツリー



代替案1: 供給継続

代替案2: 供給停止

図-9 2変数問題における効用関数の例

参考にしたいと考えている.

この一次判定結果に、震源推定結果とスペクトル評価結果を加味して二次判定を行い、SIGNALからの警報発令の有無を判断する。なお実際の供給停止は、このほかに実被害や火災の報告、さらにガスの圧力および流量情報などを考慮して、最終的に供給責任者により判断される

4. システム開発と観測記録

ワークステーション上で、SIGNALの開発を行っており、現在までに被害推定システムと震源推定システムの開発を終えた。

地盤ゾーニング・データベースは、250m×175mメッシュを単位とした地理情報システム(GIS)上で構築した。例として、都心の隣接する2つの中圧ブロック(K1,K2)の地盤分類をSIセンサー位置とともに図ー10に示す。SIセンサーの分担地域は、各センサーからの距離を漸増させながら、地盤分類が等しいメッシュを順次広げていくとういう方法で決定した。図ー11は各メッシュ単位での埋設管延長を示している。

モニタリングシステムの拡張を始めてからこれまでに、数個の地震が観測されている。ともに東京と横浜で震度4を記録した、1993年5月21日茨城県南西部地震(M5.4, H=60km)では147地点、同10月12日東海道はるか沖地震(M7.1, H=390km)では205地点、東京震度3の1994年5月27日東京都東部地震(M4.0, H=42km)では315地点で記録が得られた。観測されたSI値は、いずれの地震も最大4程度で、被害は当然ながら生じていない。しかしこのような記録の蓄積により、揺れやすい地域の特定や、地盤ゾーニングの評価が可能となろう。

SIGNALの震源推定システムについては、すでに得られた幾つかの地震で検証が行われている。図-12は、1993年5月27日東京都東部地震について、SIGNALの推定結果と、気象庁および他の3機関による震源推定結果とを比較したものである。この例では、SIGNALの結果は、震央位置、深度、マグニチュードのいづれもが、他機関のものより、気象庁の再計算値に近かった。この例は、震源が供給区域内であり、SIGNALの震源推定にとって最も理想的ではある。しかし、そのほかの地震にも適用した結果、震源が供給区域外であっても、かなり正確に震源情報が推定できることを確認している。

5. 事例解析

被害推定の事例解析は、東京都の地震被害想定²⁶⁾でも 用いられた1855年安政江戸地震を対象として行った.こ の地震は荒川河口付近を震源とする典型的な直下型地震 で、ここではマグニチュード7.0、震源深さ20kmと仮定 した.

地震動強度は、Annaka and Nozawa²⁷⁾の距離減衰式により、まず工学的基盤における最大加速度と最大速度を推定し、これに対数正規乱数による距離減衰式のばらつきを考慮した。SI値は最大速度より推定した²¹⁾、地表面での最大加速度とSI値は、工学的基盤における値に表層地盤による増幅率を乗じて求めた。ここで最大加速度の増幅率は、応答スペクトルの増幅モデル²⁸⁾より定め、SI値の増幅率は、応答スペクトルの距離減衰式²⁹⁾における周期ごとの地盤種別係数比より求めた。

このようにして決めた各SIセンサー分担地域のSI値を 震源距離に対して図ー13に示す。この想定地震は、震源

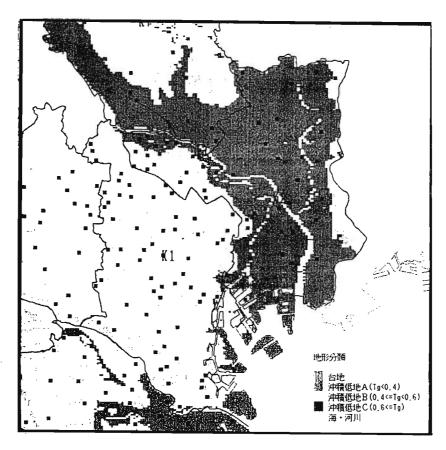


図-10 地形分類とSIセンサー設置地点

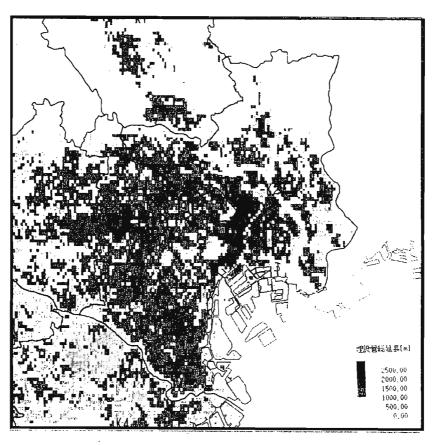
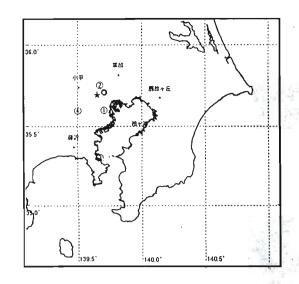


図-11 各メッシュにおける埋設管延長



	緯度/程度	気象庁(再計算) とのずれ	深度 (km)	マグニチュード
ク気象庁 (再計算)	35' 42'		42	4.0
	139 42			
①気象庁 (速報)	35' 36'	11km	30	4.1
	139' 42'			
②他機関A	35 45 36	8km	29.4	49
	139 39 36			
③他機関B	35 18 25	44km	31.4	4.1
	139 40 48			
①他機関C	35' 36	21km	24	3.9
	139* 30'			
★SIGNAL	35 41 30	6km	43.6	3.93
	139* 38′ 54″			

図-12 SIGNALによる震源推定結果の例

が対象とした中圧プロック内にあるため、近傍ではSI値が最大100 cm/sを越すような大きな地震動が予測されている。

最近の地震記録と地震被害事例より構築した被害推定 関数²²⁾を用いて、上で想定したSI値に対する各SIセン サー分担区域の埋設管被害率を推定し、図-14に示す。 この被害率は、中圧導管および低圧導管を合わせたもの で、液状化による被害率の割増しも考慮されている。こ の被害想定では、震源近傍で大きな被害が予測され、中 圧ブロック全体の埋設管被害予測結果は、K1ブロックで 中圧管被害4件、低圧管被害436件、K2ブロックで同じく 14件と663件であった。また需要家建物の被害は、K1ブ

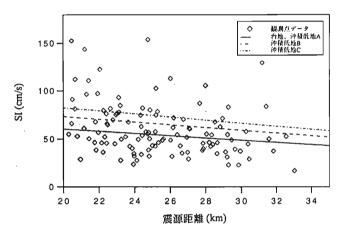


図-13 想定地震におけるSI値と震源距離の関係

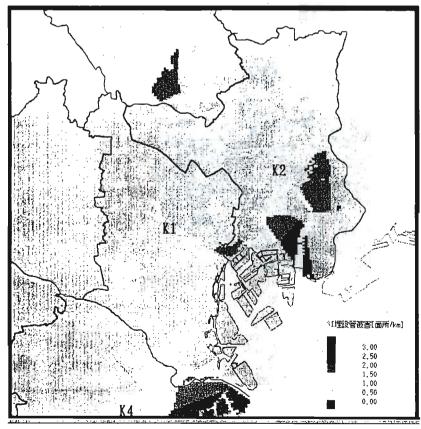


図-14 想定地震による各SIセンサー分担区域の埋設管被害率

ブロックで被害率3.3%.被害件数87,609件, K2ブロックで同じく14.3%, 222,251件であった. K2ブロックでの被害が大きいのは,この地域で液状化が大規模に生じると予想されることの影響が大きい.

これらの結果は、対象区域、構造物の定義、それに想定地震や被害推定法などに違いがあるので、東京都や国土庁などの被害想定結果と単純な比較はできないが、オーダー的にはそれらと近いものとなっている。しかしこのような数字は、計算式やさまざまな係数による影響が大きく、今後、広範な事例解析と慎重な吟味が必要といえよう。

6. まとめ

大規模都市ガス供給システムの地震による二次災害防 止のためには、甚大な被害が予想される場合、中圧導管 網のブロック化と供給停止が必要となる. 東京首都圏に おいてこの緊急措置判断を迅速に行うため、地震動モニ タリングシステムの展開と、それからの地震動情報に基 づく警報システムの開発を進めている。331地点における 地震動のSI値と最大加速度,5地点における加速度波形, さらに液状化の予想される20地点での水位上昇量を観測 し、無線でデータ収集するシステムは、世界でも例がな い大規模で高密度なものである。これらの情報をリアル タイムに処理し、供給地域の地震被害を推定するため、 地理情報システム上に、地盤条件、埋設管、需要家建物 などのデータベースを構築し、被害推定、震源推定、ス ペクトル評価、意志決定の4つのサブシステムから成るシ ステムの開発を行っている.本文では、このシステムの 基本的考え方を示すとともに、開発したシステムを用い た解析例を紹介した、今後、いろいろなケーススタディ を行って、本システムの実証性を高めていきたいと考え ている.

謝辞

SIGNALの開発に当っては、(財)地震予知総合研究振興会の中に作られた研究委員会を中心として、多くの方々の協力と意見を頂いている。とくに、現在の研究会メンバーである磯山龍二(日本技術開発)、鈴木崇伸(東洋大学)、童華南(東京大学生産技術研究所)、小川好(東京都土木研究所)、根岸七洋・狩野浩之(東京ガス)、赤坂望(富士総合研究所)の各氏、および前研究会メンバーであった安田進(東京電機大学)、東畑郁生(東京大学)、永田茂(鹿島建設)、森本巌(基礎地盤コンサルタンツ)の各氏には厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大町達夫代表:1994年ロスアンジェルス地震と都市機能障害 の調査研究,文部省科学研究費突発災害研究成果, 1994.
- O'Rourke, T.D. and Palmer, M.C.: The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: Performance of Gas Transmission Pipelines, NCEER Report 94-0011, 1994.
- 3) 山崎文雄:地震と産業被害、日本損害保険協会、1994.
- 4) 日本瓦斯協会:宮城県地震と都市ガス, 1979.
- 5) 日本ガス協会:日本海中部地震と都市ガス、1984.
- 6) 日本ガス協会関東中央部会:千葉県東方沖地震と都市 ガス, 1988.
- 7) 根岸七洋:釧路沖地震特集 3.4 ガス施設, 地震工学振興会ニュース, No.130, 震災予防協会, 1993.
- 8)日本ガス協会地震調査団:北海道南西沖地震ガス設備被害調査報告書(速報), 1993.
- 9) 日本ガス協会:地震防災対策ガイドライン、1981.
- 10) 日本ガス協会: 地震時の緊急措置判断のための情報に 関する研究報告書, 1991.
- 11) 佐藤暢彦・片山恒雄・大保直人・川崎勝幸:新しい制御用地震センサーの開発と試作,第18回地震工学研究発表会,1985.
- 12) 山崎文雄・片山恒雄・吉川洋一・大谷泰昭:地震動モニタリングに基づく都市ガス導管網警報システムSIG-NALの開発, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, 1994.
- 13) 中村豊・上野真: 地震早期検知警報システムUrEDAS の開発, 第7回日本地震地震工学シンポジウム, 2095-2100, 1986.
- 14) Eguchi, R., Goltz, J.D., Seligson, H., and Heaton, T.H.: Real-time Earthquake Hazard Assessment in California: the Early Post-earthquake Damage Assessment Tool and the Caltech-USGS Broadcast of Earthquakes, the 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1994.
- 15) 安田進・吉川洋一・森本厳: 1992年2月2日の地震による液状化センサーの記録, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, III, 1992.
- 16) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説 V 耐震設計編, 1980.
- 17) 布施光啓・山崎文雄・佐々木裕明:常時微動による地盤振動特性の推定,第9回日本地震工学シンポジウム論文集,1994.
- 18) 安田進・吉川洋一・牛島和子・石川利明: SI値を用いた液状化予測手法,第28回土質工学研究発表会,1993.
- 19) 損害保険料率算定会:人工地盤における地震被害予測 に関する研究,地震保険調査研究33,1993.
- 20) Cret, L., Yamazaki, F., Nagara, S., and Katayama, T., Earthquake Damage Estimation and Decision Analysis for Emergency Shut-off City Gas Networks Using Fuzzy Set

- Theory, Structual Safety, 12, 1-19, 1993.
- 21) 童華南・山崎文雄・佐々木裕明・松本省吾:被害事例 に基づく地震動強さと建物被害率の関係, 第9回日本 地震工学シンポジウム論文集,1994.
- 22) 高栖正洋・鈴木崇伸・磯山龍二・吉川洋一:埋設管被害と地震動強度の関係について, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集,1994.
- 23) 三菱総合研究所:東京における地震被害の想定に関する調査研究 供給処理施設分科会報告書、1988.
- 24)Noda, S. and Kano, H.: Hypocenter estimation system for earthquake countermeasures, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 15, No.1, 53-90, 1993.
- 25) 野田茂・磯山龍二・山崎文雄・吉川洋一:震源情報を 用いた地震被害の概略的推定法,第9回日本地震工学 シンポジウム論文集,1994.
- 26) 東京都防災会議:東京における地震被害の想定に関する調査研究, 1990.
- 27) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. 9 WCEE, II 107-112, 1988.
- 28) 奥村俊彦・堀内雅則・山崎文雄:表層地盤による加速 度応答スペクトルの増幅係数, 土木学会第49回年次学 術講演会講演概要集, I, 1500-1501, 1994.
- 29) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 275, 1978.

リアルタイム地震工学を目指して

Towards the Advancement of a Sophisticated Real-Time Earthquake Engineering

野田 茂*、目黒公郎**

Shigeru NODA* and Kimiro MEGURO**

With the recent improvement of earthquake measuring system, computer technology, information network system and methods of computer analysis, etc., "Real-Time Earthquake Engineering", which operates on the ongoing data to mitigate the earthquake damage, has become realistic as a new way for disaster mitigation. To reduce the earthquake damage, proper countermeasures of pre-, ongoing and post-earthquake are indispensable. Conventionally, pre-countermeasures have been taken based on many assumptions such as time, magnitude and location of earthquake, weather conditions and the number of fires, etc. The manuals of post-countermeasures are made following the simulation results from the pre-countermeasures. These are useful for the government and municipalities to know the approximate damage level and to make disaster mitigation plans. However, because of many assumptions, these results are often different from actual ones and the public cannot receive a useful information from them. Conventional earthquake engineering did not use the ongoing earthquake information to mitigate the damage. The data from the earthquake were considered to be used for the mitigation of next earthquake damage. Disaster information just after the earthquake, however, is very important to reduce the damage, especially, due to fires and tsunamis which are major causes of human loss. The main purpose of "Real-Time Earthquake Engineering" is to solve such problems. This paper points out the importance and the concept of "Real-Time Earthquake Engineering" and reviews the studies and systems being operated now.

1. はじめに

過去の地震災害を振り返ると、地震に対する特徴的な 被害が何であるかが見えてくる。

第1に挙げられるのは、日本では木造家屋が多いため、地震後の出火が大被害と結びつき易いという点である。1923年の関東地震による大火災はその典型例と言える。第2の特徴は、日本が島国であるために、海洋性の地震では断層の破壊に伴って津波が発生し、多くの犠牲者を出してきたことである。近年に至るまで、多数の犠牲者を出した地震では、この火事と津波が常に主たる原因となっている。その他では、崖崩れや液状化などの地盤災害、家屋の倒壊などの構造物被害がまず考えられる。

しかし、社会機構や生活様式が時代とともに変化する に従って、地震被害の内容も大きく変ってきた。

都市機能の基礎となる電力・ガス・水道などの「ライフライン」と呼ばれる施設が被害を受けて、都市機能が 麻痺することが多くなってきた。地震によるライフライン機能の停止だけで、都市生活に著しい支障をきたすな どと言うことは、関東地震当時は考えられなかったこと である。

また、1985年のメキシコ地震のように、林立する10階 建程度の鉄筋ビルが次々と倒壊することは、想像もでき なかったことである。 特に、この数十年間に、生活の電化や自動化、人口の 都市集中化が進んだ。都市には、電気・ガス・水道・電 話や交通などの制御網が、あたかも神経や血管のように 張り巡らされている。それをコントロールする脳の働き をしているのがコンピュータである。

高度に機能化した社会では、地震によるコンピュータの作動停止やライフラインの機能停止などにより、都市機能が全く麻痺しかねない。1923年の関東地震規模の地震が起きた場合、現代社会特有の新たな被害が大規模に発生する可能性は高い。特に人口や都市機能が著しく集中する東京では、地震被害がより深刻なものになるであるう。

地震が起こる度に、様々な現象が見い出され、それを 教訓として、地震工学の研究と実務が精力的に行われて きた。その結果、耐震技術は社会の安全性向上に大きく 貢献してきた。経験と知恵は地震への耐力を大いに高め たのである。

地震に強い都市をつくるためには、都市の様々な施設の耐震性を物理的に強化する一方で、地震直後において、被害早期把握のためのモニタリングとコントロールの技術、避難や復旧対策を重視しなければならない。文献1)は、このための問題点の指摘と解決していくべき技術課題などを明確に示している。

地震の影響は、一国の範囲にとどまらない。津波予報など、地震直後の情報は被害の規模を大きく左右する。

(Dept. of Social Systems Engineering, Tottori University)

(INCEDE, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

^{*} 鳥取大学工学部社会開発システム工学科

^{**} 東京大学生産技術研究所国際災害軽減工学研究センター

よりきめ細かな情報システムを構築し、文字どうり地球一丸となって、被害の抑制に取り組む必要がある。このため、新聞、テレビや雑誌は、最近、早期検知システムの話題を盛んに提供してきた²³⁻¹²³。「地震なんか恐くない」(図 1)と言うためにも、このような報道は心強いものである。

地震災害から身を守るためには、時々刻々と変化する 状況に対応したリアルタイム情報が必要になる。情報と しては、1)避難や2次災害防止のための情報、2)被災者 のための情報、3)緊急時の通信手段、4)被害情報、5)交 通情報、6)ライフラインに関する情報や7)安否情報など がある。被害状況によっては事前の計画が予定通りに機 能するとは限らない。何が地震時に必要な情報か、どの ようにしたら入手できるのか、などが大切になる。

地震災害を軽減するには、1)地震予知、2)施設や構造物の耐震性・耐火性の向上、3)防災対策と4)地震早期検知を実現することが大切である。特に、地震到来直前あるいは地震が都市に到達してしまって激しく揺れている最中でも、直面する地震の性質に関する情報を提供することができれば、これは大いに役立つ。

本小文では、各種の情報や計算機などの先端技術を、 オンラインかつリアルタイムに駆使することによって、 被害軽減対策を実現していくための考え方とその事例を 紹介する。なお、人々の行動をも考慮に入れた、「社会 システムのアクティブコントロール」の問題についても 触れる。

2. 従前の研究

(1) オフラインとオンライン

地震工学の目的は、地震が人命、財産や社会機能に及 はす、直接的・間接的損害を大幅に低減する技術方策を 考え、総合的な防災能力の向上をはかることにある。こ のためには、個々の構造物の耐震性向上の努力に加え て、地震時に発生した都市被害をできる限り早期に把握 して、緊急対応をとることが必要である。

これまで、地震危険度解析、地震動評価(理論的、半経験的と経験的)や波形処理(フーリエ解析、記録補正、統計的解析や不規則解析)などが活発に実施されてきた。震源のメカニズムを解釈し、詳細なモデル化を基にして、地盤内を伝播する地震波を解明しようとすることが極めて重要なことは言うまでもない。しかし、これらの研究は「リアルタイム地震学」を強く意識したものではない。中には、地震後数ヶ月あるいは数年かけて、成果を問うこともある。

地震被害の推定や復旧方策についても同様であり、各 機関は積極的かつ長期的な研究と実務を行ってきた。い わゆるオフライン的処理である。

広辞苑(第3版)によれば、オフラインとは「電子計算

機の入出力装置が計算機本体に直接連結されず、磁気テープ等の中間媒体によって情報が出し入れされる状態」とある。逆に、オンラインとは、「電子計算機の入出力装置が計算機本体に直接連結されて、情報が直接出し入れされる状態」である。ちなみに、「発生したデータを蓄積せずに、即座に処理すること。実時間処理。」がリアルタイム処理である、と記されている。ここでは、現象(地震)が発生したとき、離れた場所で直ちにそれを把握して対処できることを「オンライン」あるいは「リアルタイム」処理、そうでないのを「オフライン」(「バッチ」)処理と呼ぶ。

以下には、地震動の予測・評価と地震被害の想定に話題を限定し、オフライン的研究の概要を述べる。



図1 地震速報は被害を大きく左右する (日本経済新聞、1994年8月28日)

(2)強震動情報の把握

今日の強震動地震学は、種々の研究成果を世に生み出 してきた。

占くは、地震動の加速度の大きさを知ることに重点が 置かれていた。しかし、それだけでは強震動の特性を把 握できないことがわかってきた。計測技術の進歩と高精 度地震計の普及に伴い、IGを越えるような大きな加速 度も記録されるようになった。

人力地震動の規定は大きな研究テーマである。地震記録を観測し、それを解釈・分析・整理して表示することが、まず人切である。その上で、地震動の特性を表す指標が何なのかを知らなければならない。最大値、応答スペクトルあるいは継続時間などの諸量は、震源、伝播特性や地盤条件に左右される。そのための統計解析が行われている。

次に、震源の断層モデルを利用して、震源に関する情報を強震動予測に反映させることが試みられた。震源や地盤の不均質性は理論通りに扱えるものではない。従って、小地震記録をグリーン関数と見なすハイブリット・モデルが考え出されたのは当然の帰結である。これには現実的な魅力が伴う。

表層地盤の地震動増幅特性や周波数特性も重要な問題である。不整形地盤での地震動、やや長周期地震動の解明、深層地盤での地震観測や常時微動特性との対応など、各機関では神経を注いだ研究を実施している。

構造物の巨大化・長大化・超高層化に相まって、やや 長周期地震記録の取得と工学的な分析が進んだことも見 逃せない。このため、地震計の信頼性が検定され、地震 記録の修復法が色々と工夫された。

1点観測ではなく、多点の同時アレー観測は、官民学によって、積極的に実施されている。今日、地震記録データベースは、ある制約を満たせば、誰でも利用できる。この地震記録の普及によって、地震波を時間・空間の関数としてモデル化し、地震波動の構造が同定されるようになってきた。

日本地震学会では、1993年から、「強震動地震学・地震工学研究の現状と展望」と題して、一連のシリーズ報告を「地震」に掲載している。以下はそれらの論文のタイトルであるが、これより地震工学関連の研究の動向が理解できよう。

- 1. 強震動予測を中心とした地震工学研究のあゆみ
- 2. 地震観測に基づく観測点特性と経路滅衰特性の評価
- 3. 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション
- 4. 不整形地盤における波動伝播の数値計算法
- 5. 強震時にみられる地盤特性の非線形性
- 6. サイスミックゾーネイション
- 7. 地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動 向
- 8. やや長周期の地震動
- 9. 微動の研究について

- 10. 基盤構造の探査
- 11. 震源のモデル化と強震動予測
- 12. 建築構造物を対象とした設計用入力地震動の強さ
- 13. 地下構造の探査 -- 反射法地震探査とVSP (VERTICAL SEISMIC PROFILING)
- 14. 強震動情報と地震防災
- 15. 強震動地震学と土木耐震設計論
- 16.強震観測 一現状と展望—

これまで述べたことの多くは、オフラインの研究の域を越えていない。地震危険度解析や地震動の合成など、経験則の構築や地震動の物理的特性を知るための研究には、オフライン処理が適している分野もある。しかし、一般には、2(1)で示した「オンライン」あるいは「リアルタイム」処理にまで至っていないのが現状である。後述する「リアルタイム地震工学」に結び付けるためには、地盤や地震波動の特性を、面的かつリアルタイムに評価していく技術も必要である。

地域住民や構造物の安全性を確保するためにも、オンライン観測やオンライン制御などをキーワードとして、リアルタイム的な研究ができないものだろうか。

(3)地域危険度の想定

国あるいは各地方自治体などで行われている地震被害の予測法とその結果については、太田⁽³⁾と金子⁽⁴⁾が詳しく述べている。ここではその考え方についてのみ示す。

まず、将来起こるであろう地震の発生地域、規模や時刻などを仮定する。例えば、冬の夕方6時頃に1923年関東地震の再来を設定する。地震の震度や卓越周期は表層地盤の土質力学的性質や構造に大きく依存する。そのため、分類(例えば40分類)された地盤特性データベースが用いられる。

想定された基盤入力地震波から表層地盤の増幅過程を考慮して、地表の地震動特性(最大加速度など)が地域メッシュ毎に計算される。その際、液状化の発生が予想される沖積地帯においては、より詳細な解析が行われる。また、盛土・切土地帯や崖・よう壁・斜面地域においても同様に、地域の現状に合せて、地震動の強さが求められる。

各地区の地震動の推定のために、メッシュ(250m~1km)の地盤特性データベースや都市構造データベースが作成される。その上で、過去の被害地震の強震記録や災害記録に基づいて、各メッシュ毎の地震災害危険度が評価される。

地震によって発生する危険性には、建物の倒壊、崖崩れ、火災、避難中のけがや混乱によるパニックなど、様々なものが考えられる。その度合いは、地盤条件、家屋の密集度や避難場所の有無などの要因に左右される。

地域危険度は、建物危険度、ライフライン危険度、火 災危険度、人的危険度や避難危険度という側面で捉えら れ、積み上げ方式によって、評価される。各メッシュ上 で危険度が測定されると、その地域の都市全体における 危険度の程度がわかる。それにより、どういう対策を立 てればよいかを考える手掛かりが得られる。

しかし、地域危険度とは、被害の規模を予測したものではなく、あくまでも地域別の危険性を比較したものにすぎない。同じ危険度の地域でも、事前対策や住民の心構えなどによって、実際の被害は大きく変わる。

各自治体が被害の概要を知る上で、上述の方法は有用かもしれない。しかし、多くの被害想定結果はシナリオ的であり、今まさにというときに、どのくらい役立つか、特に地域住民に対しては、疑問である。

最近では、地域特性を考慮したミクロな地震被害想定が試みられるようになってきた¹⁵¹⁻¹⁸¹。今日の先端技術の発展は目ざましい。各自治体は、旧態依然とした被害想定のシナリオを書くのではなく、もうそろそろ、被害想定手法の見直しを行ってもよいのではないか。より微視的かつ高精度な情報を地域住民に提供していくべき時期にきているものと考えられる。

一つの新しい防災対策支援情報システムが太田らによって構築されつつある¹⁹⁾。このシステムの特徴は、1)地域の自然・社会環境に適応していること、2)多点の地震動モニタリングシステムによって、精度向上をはかっていること、3)リアルタイム情報を用いていること、4)事前対策に観測事実を活かして(更新して)、事後対策が決められていること、5)後続被害発生を抑制するための案が示されていることである。つまり、従来のオフラインからオンラインに変身した被害想定法が考えられているのである。

太田らのこの考え方は、川崎市の被害想定に活かされている^[3]。

3.リアルタイム地震学

(1)地震予知実現は2010年?

専門家は、地震予知の実現時期について、どのような見通しをもっているのであろうか。ここに、アンケート方式(2回繰り返しのデルファイ法)によってとりまとめられたデータがある 20 。

2003年: 地震計、傾斜計やひずみ計などの多種の観 測機器を統合・集積化したボアホール式観 測装置が全国に配置され、地震予知に利用 されるようになる。

2005年:海底において、各種地殻変動の連続測定手 法が実用化され、地震の短期予知に利用さ れるようになる。

2007年: 地震検知の全国ネットワークが構築され、 50km程度以上離れた地震に関して、事前に 情報が伝達される防災システムが普及す る。

2010年:被害の発生が予想されるマグニチュード7以 上の地震の発生の有無を数日程度以前に予 測できる技術が開発される。

この結果は、平均的な実現予測時期を示しているにす ぎない。従って、今後様々な条件が変われば、実現の時 期は早まったり、遅くなったりするであろう。

上記の予測年表を見ると、観測装置の配備、地震防災システムの普及や地震発生の直前予測というキーワードがピックアップされる。しかし、それぞれを実現するためには、技術的な困難、制度的な障害、コストの過大と資金確保の困難などの条件をクリアしなければならない。

直前の地震予知を実現するためには、各種の観測装置とそのネットワークづくりや、それらのデータを確実な予知に結びつける地震学の進歩などが必要である。まだまだ技術的に難しい問題が横たわっていて、予知の実現は楽観できない。科学技術の進歩のテンポの早い現代において、何故、地震学と観測システムの進歩が今一つ思うようにいかないのであろうか。

地震予知に関する専門家のコメントがある。例えば、 「固体地球内部現象についての検証には長期間を要する」、「観測資金の問題が大」、「東海地域の地震観測 でさえ困難」などである。これらは地震予知が生易しい ものでないことを示している。

(2)リアルタイム地震学とは?

しかし、そうは言っても、今日では、最新の機材、地震計測網、無線やGPS(Global Positioning System)の発展によって、従前とは異なった方法で、地震に対処できるようになってきた。それは、信頼できる即時地震情報伝達システムが進展してきたためである。

GPSは、人工衛星を利用して、位置決めをするシステムである。4個以上の人工衛星から電波を受信することにより、時々刻々変化する地殻変動はリアルタイムに捉えられる。しかも、上下・水平方向の3次元的な挙動を正確に測定できるのである。

地震発生は突発現象である。地震発生から地震災害が 起こるまでの時間的余裕はあまりない。例えば、集中豪 雨による崩れなどは比較的短い災害であるが、雨が降り 始めてから災害となるまでには時間単位の余裕がある。 しかし、地震災害において、この時間的余裕は数秒から 数十秒程度である。そのため地震対策には、これまで直 前対策がほとんど存在しなかった。

今日、地震観測の精度は向上し、通信・計算機技術は 飛躍的に進歩してきた。震源に近い所(例えば海洋性の 地震では最寄りの海岸)で地震波を観測し、その観測結 果を伝送して解析する。すると、地震波が対象地点に伝 播してくる前に、災害軽減に必要な情報を得ることがで きる。

最近、「リアルタイム地震学」が脚光を浴びている²¹ 111.12¹。これは、地震が発生すると、各種の観測データをリアルタイムに処理して、地震の発生位置、マグニチュードや断層の動きなどの地震の性質に関する情報を即座に提供する学問である。このためには、地震観測データを即時的に解析し、分秒の間に地震の性質を明らかにするための技術が必要である。

ときには、「リアルタイム地震学」に地震防災対策を含むような記述がある。「リアルタイム地震学」は、あくまでも、地震情報を即時的に提供するだけである。それを活かすのは、工学であり、社会科学であろう。すなわち、被害の特性を把握したり、その情報を各種の活動に役立て、地震災害を大幅に軽減しようとする学問は、「リアルタイム地震工学」あるいは「リアルタイム地震防災」と称するにふさわしい。

(3)事例紹介

a)東海地震の監視

過去の大地震の繰返し性と地殻ひずみの蓄積状況から 見て、M8クラスの大規模地震(東海地震)の発生が予想さ れている。

東海地域では、関係機関や大学により、地震、地殻変動(体積ひずみ、傾斜や伸縮)、潮位、地下水や地磁気など、各種の観測を高密度に実施している。これらのうち、短期予知に有効と考えられる観測データは、テレメーターで気象庁に送信され、24時間体制で常時監視されている。

気象庁では、世界でもたぐいまれな高密度・高性能の観測網を東海地域一帯に展開している。多種多様な観測データは、地震活動等総合監視システム(EPOS, Earthquake Phenomena Observation System) によって、リアルタイムで処理され、総合的に監視されている。EPOSでは、震源やマグニチュードの決定、体積ひずみ計による地殻変動データの補正など、膨大な情報処理が行われている。と同時に、観測データは、関係機関に伝えられ、管理されている。

b)地震津波早期検知網

①気象庁

地震を観測してから沿岸に津波が来襲するまでの時間 を利用して、地震の震源や規模などを決める。その結 果、地震が海底の浅い所で起こり、しかも規模が大きい 場合には、津波の有無とその規模が判定・発表される。

津波予報に必要な周期の長い地震波をも計測できるように、全国173箇所の地震観測網が構築されている²¹⁾。 その観測データは気象庁と全国6箇所の津波予報中枢に 伝送される。津波予報は2~3分程度で発表される。気象 衛星「ひまわり」による緊急情報衛星システムも導入された。 これまで、地震の発生から津波予報の発表までには、7~8分程度の時間がかかっていた。S波や表面波の最大振幅から地震の規模を求めるにはどうしても時間を要する。そのため、P波の周期と振幅から地震の規模を求める方法を導入して、時間の短縮がはかられた。P波の部分を用いるアイデアはUrEDAS(後述 f))と同様である。なお、P波とS波の到着時刻の差(SP時間)から震源位置を推定する方法(大森公式)は、現行通りである。

このシステムを利用すれば、津波を引き起こす地震を 判別したり、各地の津波の到着時刻や津波の高さなどを 瞬時に算出することもできる。このような試みは阿部に よっても実施されている²²。

②自治省消防庁消防研究所

消防研では、消防の初動(海面の監視)体制を支援するために、1地点の地震観測に基づいた早期津波予測システムを開発している^{23, 24}。

このシステムでは、まず、1地点で得られた地震動データをリアルタイムで自動処理し、地震の発生位置や規模を決定する。次に、これに基づいて、津波の規模、波高や最寄りの沿岸までの津波到達時間が迅速に求められる。このシステムの特徴は、1地点の地震動データを処理していることである。この点で、気象庁のシステムとは異なる。一連の処理は、前処理→P·S波の検知→震源の決定・地震規模の推定→津波情報の検出からなる。

P波やS波の検知にはUrEDASの考え方が活かされている。震央方位は、1)地震動の水平・上下成分の乗算による方法、2)座標変換による方法と3)主成分分析による方法によって、決められる。

震源距離はSP時間によって、マグニチュードは気象庁の回帰式によって算出される。マグニチュード、水平動最大振幅と震央距離間の回帰式が新しく導入され、これにより、震央距離を求める。震源深さは、同様に、新たな回帰式(マグニチュードと上下動の最大振幅に依存)から推定される。津波マグニチュードは、気象庁マグニチュードから、変換される。津波の予想到達時間は、津波の伝播速度と水深から計算される。

地域特性の影響も合せて、このシステムをモデル地域 に適用し、震源要素や津波情報の精度が検証された。そ の結果、津波防災活動の有効な支援システムとして、こ のシステムが機能することが明らかになった。

c)計測震度計の開発

これまで、気象庁から発表されている各地の震度は、 気象台や測候所の観測員が、ある基準に従って実際の揺れぐあいを、判断していたものである。震度は、地上の ある地点で感じられた揺れの大きさであるが、身近なも のや構造物への影響で表される。

このように震度は、地震動の強さを表す指数であるが、単純な物理量ではないため、体感測定によって決め られていた。 最近、気象庁では、震度観測の近代化をはかるために、客観性に欠けるなどの点を改め、機械計測による新しい震度計を開発した²⁵⁾。1991年4月1日に4箇所の機械を使って、機械診断は開始された。

新しく開発された震度計では、地震による最大加速度と振動の周期などの要素を組み合せて、体感測定で決めていた震度と近くなるように、震度を計算している。継続時間が長いほど、周期の長い振動ほど、インパクトは大きく、震度は大きくなる。震度計は、このような影響に対し、自動的に対応することができる。

1992年2月2日午前4時4分ごろ、東京湾で発生した地震により、東京では6年ぶりに震度5を記録した。震度計測を一部で機械化した気象庁にとって、機械で捉えた初めての強震であった。

この震度計は、平成6年度までに、全国の気象官署115 点(平成8年度までには全官署156地点)に整備される。こ の高密度震度情報網が構築されれば、同一基準による震 度を、リアルタイムにかつ自動的に測ることができる。

このデータを活用すると、あるいは計測震度計を設置 すれば、地震防災は大いに進展すると考えられる。

d)地震予知観測情報ネットワーク

地震予知計画の下で運営されてきた地震観測システムは、北人、東北大、東大地震研、名大と京大防災研の各地域センターとそのサブセンター、弘前大、高知大、九大と鹿児島大の地震観測網からなる²⁶⁾。それぞれは独立した観測網である。九州を除いて、各大学はオンラインで連結され、リアルタイムで波形データを交換している。

各大学で読み取られた観測データ(地震波到着時刻や 震源位置)は、オンラインで東大地震研の地震予知観測 情報センターに送られる。その上で、整理され、リアル タイム地震データとして、データベースに保存される。

東大地震研では、各大学から送られてきたデータを統合処理(前処理と本処理)している²⁷⁾。前処理では、データを震源時順に並び替えることと、震源時と震央距離が近い地震を同一地震と仮判定することが行われる。本処理では、親子法による同一地震の本判定と震源再計算が実行される。

地震データの公開や利用法については、文献26)に詳 しく述べられているので、参考にされたい。

e)科学技術庁防災科学技術研究所

関東・東海地域には、92地点の高感度・高密度の微小 地震観測網が展開されている。防災科研と外部機関の データを合せて、計100観測点の地震データは、電話回 線によって、収集される。

震源や発震機構解の決定などについては、文献28)の 方法などを基にして、自動的に行われる。この段階において、ARモデルとAICを併用して、P波やS波は検知される。震源情報は、気象庁と同様に、Geiger法によって 反復計算される。公式発表においては、オペレーターが CRTの画面を見て、自動処理による結果を修正してい る。マグニチュードは振幅と振動継続時間によって決め られる。

震源情報や発震機構解は、パソコン通信や計算機ネットワーク上のEmailによって、配送される²⁹⁾。ただし、関東・東海地域の外や、ルーチン観測開始当初の一部には、相当に大きな誤差を伴ったデータが含まれている。また、大きな地震の場合、記録飽和のため、マグニチュードは決定されないことがある。

f) **UrEDAS** (<u>Urgent Earthquake Detection and Alarm System</u>)

「リアルタイム地震学」あるいは「地震被害発生前の 地震時緊急情報提供システム」の先鞭は、何と言って も、鉄道総合技術研究所のUrEDASである。

UrEDASの詳細については文献30)で述べられている。 また、本シンポジウムにおいても、中村によって報告されている³¹¹ので、ここでは、考え方のみを簡単に示す。

UrEDASは、単一の観測点の地動データ3成分だけを用いて、リアルタイムで地震が検知され、直ちにその発生位置や規模を推定し、警報を出すシステムである。地震情報を鉄道総研に逐一送信していては時間がかかる。そこで、このシステムでは、情報を、現場で行うべきことに必要な情報と、鉄道総研からの指示で地震後に必要な情報に分けている。

UrEDASは、地震動の性質を巧みに利用したインテリジェント地震警報システムとしては、世界で初めてのものである。P波初動の部分で地震警報を出し、警報を電気信号によって、地震波よりも早く伝える。「揺れ出す前に情報を」という独自の地震通報システムがUrEDASである。

検知した地震波の初動に対し、1)震動方向から震央方位を推定し、2)周期から地震の規模(マグニチュード)を求め、3)震源距離(R)を決定するのがUrEDASである。地震の規模・初動の振幅・震源距離の関係式を利用して、計測された初動の振幅と2)で求めた規模とを組み合せることにより、震源距離が概略的に得られる。S波の主要動が到達すれば、SP時間から、さらに震源距離を正確に推定することができる。

震源近くでP波(地震の発生)をいち早く捉えて、電気信号で瞬時に情報を流す。すると、市街地では、地震が到達する前に、警報を受けとることができる。さらに、S波による大きな揺れは、P波よりも何秒か遅れて到着する。この余裕時間の中で、様々な対応をとることが可能である。

建設会社の鹿島では、東海地震の揺れが東京に到達する前に警報を出すため、UrEDASと全く同様な基本構想に基づいて、「直前検知・伝達システム」を完成させている²¹。

g) CUBE (Caltec-USGS Broadcast of Earthquakes)

カリフォルニア工科大学と米国地質調査所などは、南カリフォルニアに広域の地震観測網「CUBE」を構築し、通信網を介して、コンピュータ画面上に地震情報を提示するプロジェクトを進めている^{111,32}。

地震計としては、アナログ式の川式地震計が250箇所に、ディジタル式の新型地震計が15箇所に設置されている。地震をキャッチすると、地震波形は、電話回線を通して、コントロールセンター(カリフォルニア工科大学地震研究所)に送られる。

センターにはワークステーションが1台ある。これを使って、地震計測データから、震源位置(緯度、経度と深さ)とマグニチュードの規模が計算される。しかし、規模が大きい地震の場合、地震記録の中には複数の地震情報が含まれる可能性がある。このため、コンピュータがこれを見分けて、分析を始めるまでには時間を要する。事実、1994年の1月に発生したノースリッジ地震において、正確な地震情報を伝達できたのは、1時間以上も後のことだった。

そのため、最近では、波形情報を用いるのではなく、 最大加速度の距離減衰特性から震源推定をリアルタイム に行うことが試みられている。ただし、その基本的なアイデアは既に日本において提起されたもの³³⁾と同一である。この方法による結果は、概略推定の域を越えない。しかし、迅速な概略推定が行えるので、精度の面を犠牲にしても、大きなメリットを有している。

特に米国では、日本の気象庁で実施しているような地震情報の発表(速報)システムがない。このため、報道機関の他、CUBEに参加している企業(電気、ガスや水道など)は、CUBEの情報を受けとることで、速やかな2次災害防止策をとることができる。その意味で、CUBEシステムの意義は大きい。

4.リアルタイム地震工学

(1)リアルタイム地震工学とは?

片山³⁴は、震災後のどの時期にどのような機能が重要となり始めるかを、図2のようにまとめている。人命救助とともに社会機能の低下を、なるべく早く元の状態に戻すことは地震工学の根幹である。このように考えると、第1~4の時期に起こる被害や障害とその対応を踏まえて、地震工学は何をすべきかが、この図より理解できる。必要な情報を収集するための様々なセンサーを都市内あるいは構造物内に組み込むと、「人間系を含む社会システムのアクティブコントロール」が実施できることになる。

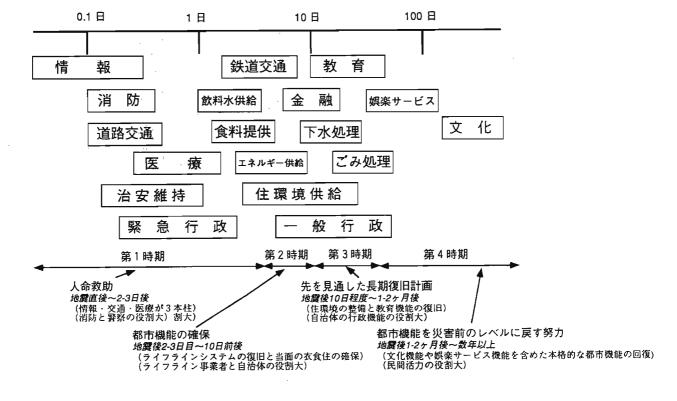


図2どの時期にどんな機能が重要となるか? (片山、1986の図に加筆)

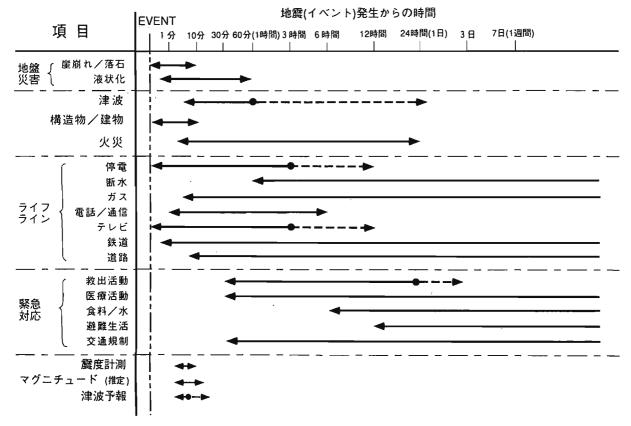


図3地震直後~1週間程度に起こる被害とその対応

図3に地震の直後から1週間(~10日間)程度に起こる主な被害や障害と対応活動を示す。この時期においては、事前に災害を予知していたか否かが、大きな差となって現れる。しかし、3.(1)で述べたように、災害予知技術においては技術進歩の阻害要因などを分析することが必要である。その結果、予知技術の進歩あるいは遅れに対して、防災対策をどう整備していくべきかを柔軟に考えることができる。

地震防災に関するこれまでの研究と実務のほとんどは、2.で述べたように、オフライン的処理が中心であった。しかし、「リアルタイム地震学」の登場により、オンラインあるいはリアルタイムに地震の挙動が捉えられるようになった。その結果、地震被害は各種のデータベースとGIS (Geographic Information System)を用いて、リアルタイムに推定できるようになってきた。

必要な情報は各地域に即時的に伝達される。2次災害の広がりが食い止められ、避難や緊急の対策、災害発生後の救援・復旧作業など、多様な処置がリアルタイムにできるようになるのも、夢ではなくなってきた。

現在、光ファイバーの設置や情報スーパーハイウェイ構想などをはじめとして、高度情報化社会が達成されようとしている。今我々は、このような高度な先端技術を活かし、リアルタイム性を重視した地震工学の研究を積極的に実施すべき時機にきていると考えられる。

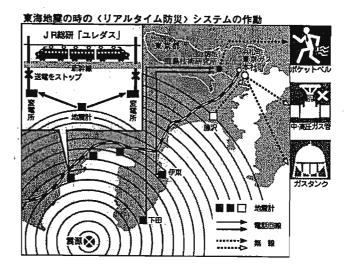


図4 大地震···揺れる前に即応 (朝日新聞、1994年5月25日)

地震情報の即時的検知・伝達システムの開発は既にいくつかの機関で試みられ、実施されている(図 4)。例えば、電車やガス供給施設のように、ある程度の地震の揺れを感知すると、即座に電車が停止され、ガスの供給が遮断される^{3)、5)-8)、10)}。もちろん、このために、地震動の空間的不連続性を補うように、地震計ネットワークは構成されている。

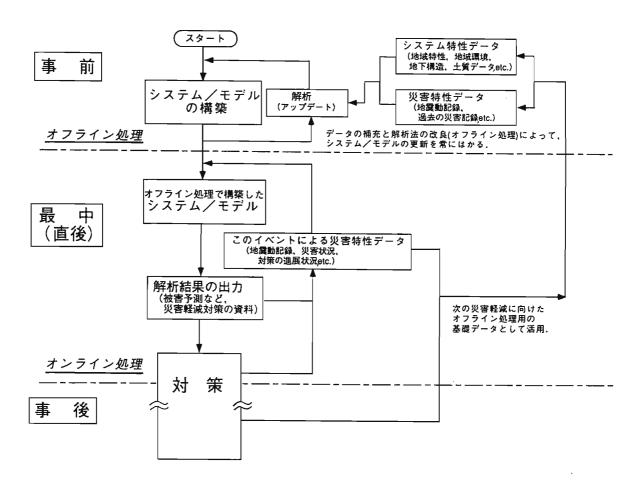


図5リアルタイム地震工学のフロー

地震動モニタリングシステムの構築においては、1)地震波の来襲を早く捉えて、緊急対応の時間をとり、2)地震記録をリアルタイムに処理して、地震諸元や地震波到来後の地盤震動の分布などを求め、3)構造物などの被害推定を行った上で、4)2次災害を防ぎ、適切な復旧・救援戦略を立てなければならない。このためには、「オンライン」や「リアルタイム」の考え方が必要となる。なお、この検討のためには地震情報の直前・最中・直後の処理技術を伴う。

地震計の設置数には限りがある。従って、複数地点で 強震記録を得て、これを用いて、リアルタイム被害推定 を行うためには未観測点での地震動を推定する必要があ る。すなわち、時間的にも、空間的にも、地震情報の不 足を補わなければならない。

このような場合、地震波動場の性質や地盤条件などの場所的な分布を考慮するとともに、それらの不確定性をも勘案して、地震動推定の内挿・外挿を行い、その推定精度をも評価することが重要であろう。また、現時点までに得られた情報を基に、将来時点の地震動を的確に予測する手法も必要である。

非均一な地盤の情報とその不確定性、地盤を伝播する 地震動の物理的特性や波動場の時空間的特性(例えば、 スペクトル特性)などの事前情報とともに、モニタリン グシステムから得られる地震動のリアルタイム情報を組

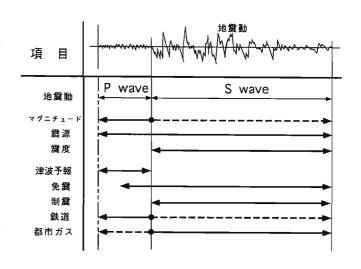


図 6 地震動情報の活用

み合せる。これより、時空間の地震動情報不足を補う方 法論を提起することは、被害推定を行う際、大いに役立 つに違いない。

一般的なオンライン地震工学の流れを図5に示す。図からもわかるように、オフライン地震工学とオンライン地震工学の基本的姿勢の大きな違いは、次のようである。オフライン地震工学では、今起こっている(今回の)地震のデータを、次回以降の地震災害軽減への材料とし

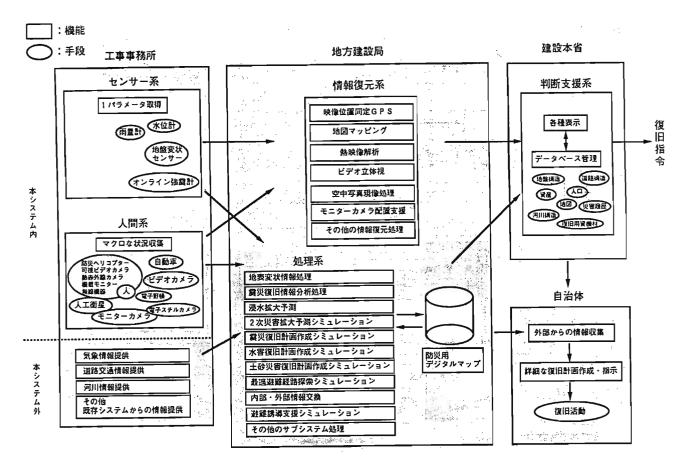


図7 災害情報システムの全体構成 (建設省、1993)

て、フィードバックする。それに対して、オンライン地 震工学では、今回の地震のデータをOngoing情報とし て、現時点の地震被害軽減に活用しようとする。すなわ ち、今起こっている現象が即時的に捉えられ、忠実に被 害軽減対策に活かされる。

オンライン地震工学では、事前のオフライン処理によって構築されたシステム(モデル)に、逐次通信されるデータを入力して、解析を行う。例えば地震動データ(実体波部分)は、図6に示すように、活用されている。解析の精度は、事前にオフライン処理によって準備されたシステムの精度と、地震直後に入力されるデータの質に依存する。ゆえに、オンライン地震工学はオフライン地震工学の十分な成果なしには存在し得ない。将来的には、地震の直後にもシステムを更新しながら、データを入力していくことになると考えられる。しかし現状では、システムを固定し、逐次入力されるデータの更新によって、解析結果の精度を高めていく手法がとられている。

地震の直後から質の高い情報が効率良く通信されると は限らない。オンライン地震工学では、入力データにし ろ解析結果にしろ、多少精度が低くても活用可能なもの を積極的に利用して、災害軽減を目ざす。すなわち、精 度の低い初期の段階では安全側の評価をするなどの処理 をしながら、逐次入力されるデータの更新によって解析 の精度を高めていく努力をする。従って、精度と時間の トレードオフをいかに行うかが重要なポイントになる。

以下では、先に述べたようなオンライン地震工学を実施していく上での問題点について、その解決のために何をなすべきか、考え方と方法論ならびに最新の成果を述べる。

(2)災害情報モニタリング

自然災害による被害を最小限に留めるためには、防災 工事などのハード面の対策の限界を考えると、ソフト面 の対策推進も重要になる。ソフト面と言っても、種々の レベルの対応が考えられるが、とりわけ災害情報システ ムの確立が必要であろう。

災害情報システムにも、地域防災用から個別業務用まで、種々のものがある。しかし、必要最小限の機能は次のようになる。まず、災害の発生前後において、時間経過とともに、ダイナミックにかつ質的・量的にも変化する各種の情報を収集・伝送し、整理・分析加工・表示などの処理がなされなければならない。そして、情報をそれを必要とする場所へ伝達する機能、予防や復旧計画な

どの業務を支援する機能、さらにはこれらの基盤となる データベースの機能がなければならない。

被災した範囲や程度を迅速かつ的確に把握するために は、情報収集機器とその利用技術の開発が求められる。

地上での情報収集機器としては、各種の検知センサーがあるが、広範囲に及ぶ高精度のデータを検知する適切なセンサーの配置法の研究が必要であろう。現地調査の情報を伝送するシステムの開発も求められる。空中からの情報収集は、広域的災害の場合、特に有用である。人工衛星、航空機やヘリコプターなどを用いた画像を中心とする情報の収集・処理技術の開発や改良である。

適切な災害情報システムには、情報収集技術だけでなく、情報伝達技術や情報処理技術も必須要件である。加えて、実際にシステム全体を機能させるためには、被害推定システム、被害拡大予測システムや復旧計画策定支援システムなど、必要な他のツールを開発することも重要である。建設省では、このため、総合技術開発プロジェクトとして、「災害情報システムの開発」(昭和62年度~平成3年度)を行ってきた(図 7)35)。

地震災害を対象とする場合は、まず地震動のモニタリングが必要になる。そのとき、1)どのような地震計を設置するのか、2)地震動の何を計測するのか、3)どの位置にいくつの地震計を配置すればよいのか、4)地震動情報の収集時間はどの程度にすればよいのか、5)地震計が設定されていない地域の地震動をどのように推定すればよいのかなど、色々な課題を克服しなければならない。さらに、地震動情報→被害推定→緊急対応や復旧計画などの一連の処理を、いかに効率良く行うかが問題になる。

(3)地盤震動の補間

地震動の時空間的な補間を行うためには、地盤条件の場所的な違いや地震波動場の性質を考慮しなければならない。このとき、上記のような情報には不確定性が存在するため、地震波動場は時空間の確率場となる。

地震動モニタリングによって特定の地点(一般には複数)で、地震動は観測される。この観測記録を拘束条件として、未観測点における地震動を推定したり、シミュレートするのが条件付確率場の問題である(図 8)³⁶⁾。未観測点が観測点と一致すると、求められたサンプルあるいは推定値は記録と完全に一致する。

観測波形を含む地震動時刻歴の条件付シミュレーションについては、川上³⁷⁾ によって、詳細に解説されている。そこで、ここでは、最大地動(最大変位、最大速度、最大加速度)、SI値や応答スペクトル(変位、速度、加速度)の条件付確率的補間の一例を述べる。

上記の地震動特性値は対数正規分布に従うことが知られている。そのため、野田・星谷³⁸⁾は対数正規確率場におけるシンプル・クリッギングの、野田・星谷・塚本³⁹⁾はユニバーサル・クリッギングの手法を提案した。前者

は地震動の確率的特性(平均値と共分散)が空間的に規定 されているときの、後者は平均値の場所的な変化が未知 のときの補間問題である。

図9はシンプル・クリッギングの、図10はユニバーサル・クリッギングの最適推定値(図(a))と変動係数、つまり推定誤差の標準偏差と無条件平均値の比(図(b))を示したものである。日地点の観測記録(最大地動)は〇のようになる。記録を得る前に、特性値の事前情報として、場所によらず、無条件平均値は2.5、無条件分散は2を仮定した。これらの数値はあくまでもケーススタディのために採用したもので、特に意味はない。共分散は2地点間の距離のみによって左右されるとした。

シンプル・クリッギングにおいて、内外挿地点の最適 推定値と推定誤差分散は、各々無条件場の平均値と分散 に近づく傾向にある。遠方場において、両者は理論的に 一致する。観測点において、推定誤差分散は0となり、 最適推定値は観測データと完全に一致する。

一方、ユニバーサル・クリッギングの変動係数は、内外挿地点において、シンプル・クリギングのものよりも大きくなっている。最適推定値は、無条件場の平均値を約2とみなして、計算されている。これは、遠方場における推定値を見れば、明らかである。この結果は、平均値という大事な情報が欠けているために、生じたものである。

(4)リアルタイム被害推定

地震発生を時間原点とし、地震動モニタリングによって、オンラインかつリアルタイムに被害を推定していこうという新しい手法が、最近になって急激に発展してきた。しかし、その際は事前処理として、地震動情報と地震被害を結びつける関数関係を見い出したり、被害の要

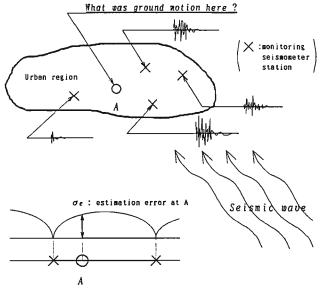
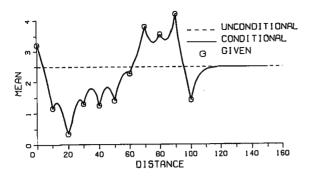
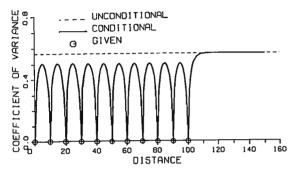


図8地震波動場の条件付確率的補間の概念図 (Kameda and Morikawa, 1992)



(a)最適推定值



(b)変動係数 (推定誤差の標準偏差/無条件平均値)

図9 シンプル・クリッギングによる最大地動の補間 (野田・星谷・塚本、1994)

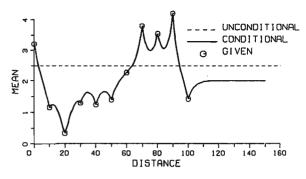
因を分析しておく必要がある。

最近、ニューラルネットワークを用いて、地震動強度と地震被害の関係を構築する研究が実施されるようになった40-42)。現有の知識だけではなく、人間の脳を模した最先端技術を活かした成果について、以下に紹介する。

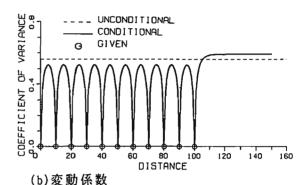
ニューラルネットワークによって関数関係を得るためには、適切な学習データを準備しておかなければならない。そのため、一般には、①過去の地震による実被害例と被害のあった近傍での地震動を収集する、②条件を変えた地震動を代表的な構造物モデルに入力し、数値計算によって被害データを作成する、という2つの方法が考えらる。文献41)では、前者の方法によって、ニューラルネットワークが構築されている。

図11はニューラルネットワークの構造の例を示したものである。入力層には最大加速度(PGA)、最大変位(PGD)とSI値を、出力層には構造物の被害程度(被害あり、被害ややありと被害なし)を含む。被害程度は、SI値により強く影響されるけれども、最大加速度とSI値の両方によって、カテゴリー化される。このことが図12より読みとれる。

構造物の被害は、地震動特性、地盤条件(卓越周期、 減衰定数や不整形性)や構造体の強度などの多種多様な 情報によって決まる。そのためには、多人力情報に基づ



(a)最適推定値



(推定誤差の標準偏差/無条件平均値)

図10 ユニバーサル・クリッギングによる最大地動 の補間(野田・星谷・塚本、1994)

いて、施設の被害程度を推定しなければならない。

地震が発生した場合、地震動の分布は、4.(3)の方法によって、即座にかつ正確につかめる。これと地盤や施設の情報をニューラルネットワークに入力すれば、各地の構造物の被害はリアルタイムに推定される。

(5)構造物系のオンライン制御

地震時のオンライン制御については、各方面で有効に 利用されている。ここでは、建築分野における地震防災 対策の例を2つ述べる。

a)制震構造物

これまでの耐震構造や免震構造は、地震に対して受動的に機能し、不確定な地震動をひたすら待ち受けていた。一方、地震動に対し、構造物自体が時々刻々と能動的に機能し、対応可能としたのが制震構造である⁴³。

揺れをできるだけ小さくするために、揺れをコントロールするアクティブな制御、すなわち「アクティブ制震ビル」が近年実現されるようになった⁴⁴⁾。

地面の揺れを検出するための外乱センサーや、構造物の各部位にセットされた応答センサーに、認識や判断といった知能を付加する。知能をもった構造物は、コンピュータの働きをかり、時々刻々と自らの体質(固有周期や減衰能力)を改善し、地震の破壊から身を守るのである。構造物に到達した地震動の外乱をいち早く感知

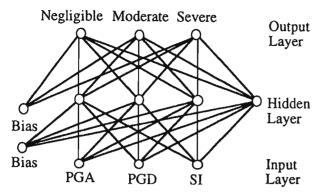
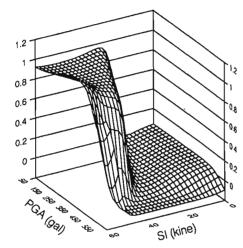


図11 地震被害推定のためのニューラルネット ワークモデル (Yamazaki, Molas and Fatima, 1994)



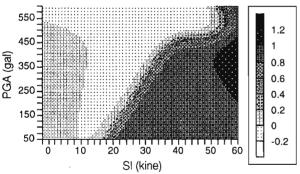


図12 最大加速度(PGA)とSI値による大被害の 起こり易さ (Yamazaki, Molas and Fatima, 1994)

し、その地震動の性質に応じて、構造物が共振して壊れることのないようにする。これが制震システムの考え方である。

大都市では都市機能がインテリジェント化し、ますます高度情報化社会が進むと考えられる。従来の耐震設計による構造物だけではなく、都市機能の崩壊を防ぐための制震構造物の出現が…層期待される。

構造物に到来する地震動をリアルタイムに捉え、制御 装置を働かせる制震システムは、地震防災・軽減を達成 する上で、意欲的な戦略と言えるであろう。

b)エレベーターの管制運転

エレベーターは、地震がきても損傷がないように十分 な耐震設計がなされ、地震時管制運転により、早急に最

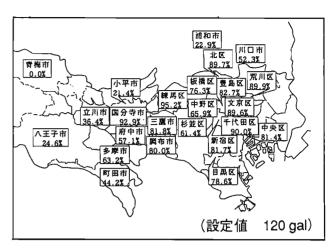


図 13 1992年2月2日東京湾浦賀水道沖地震によるエレベーターの停止率(加藤・山崎・片山、1994)

寄階に停止できるようになっている。

地震時管制運転では、地震感知器との連動によって、できるだけ早期にエレベーターを最寄階に停止させる。 ただし、小地震でやたらに停止し、なかなか運転再開ができないのも利用上困るので、地震の大きさに応じて、 停止・再運転の方法が定められている。

超高層ビル用の急行ゾーンのある一般乗用エレベーターに対し、地震の大きさ(地動の加速度)は、特低(25~40gal)、低(40~80gal)と高(80~100gal)の3段階に分けられている。

1992年2月2日に発生した東京湾浦賀水道沖の地震では、ほとんど被害がなかったにもかかわらず、多くのエレベーターが停止した。建物上部で設定値120galを感知して停止したエレベーターの停止率は、図13 のようである⁴⁵。都心部では大部分のエレベーターが停止したことがわかる。

小野田と池田40によれば、加速度式地震感知器は、一般ビルのエレベーターでは有効に動作し、超高層ビルでは適切に動作しないことがあるらしい。これは建物の固有周期が影響するためである。このため、小野田らは、加速度型感知器のかわりに、S波に注目した波動エネルギー式地震感知器を提案し、成功を収めている。

既往の研究によれば、建物の被害は、最大加速度よりも、最大速度やSI値との相関性が高い。従って、地震時管制運転においては、加速度計測によらず、構造や階数などの建物の諸条件を考えた上で、このような指標を用いることがよいかもしれない。

(6)ライフライン系のリアルタイム地震防災

a)SIGNAL (Seismic Information Gathering and Network Alert System)

東京ガスの地震時導管網警報システム(SIGNAL)については、その研究成果が既に発表されてきており^{47),48)}、

新聞などにおいても報道されている3.50%。100。また、本資料にも、山崎・片山らの紹介文が掲載されている400ので、ここではシステムの概要のみを記す。

地震が発生したとき、適切な緊急措置をとる上で何よりも必要なことは、被害の有無の状況を迅速かつ正確に 把握することである。すなわち、地震発生直後に、地域 ごとのガス管が、どの程度の被害を受けているのかを把 握する。その結果、どこの地域でガスの供給を停止する か、継続するかなどを即座に判断することができる。

供給エリア全体には356台の地震センサー(331台のSIセンサー、20台の液状化センサーと5台の基盤地震計)が設置されている。予めデータベース化された地盤・ガス管の情報や需要家情報と、無線により、リアルタイムで送られてくる地震情報を合せて、ガス管の被害は迅速かつ高精度に推定される。

SIGNALは、独自に震源を推定するとともに、高密度 計測網によって、地震動の分布を正確につかむ。

リアルタイムの地震動情報とともに、常時監視しているガス流量や圧力の変化と、社員が実施する被害状況を合せることにより、ブロックごとの供給停止などを判断することができる。

こうした多数のセンサーによる警報システムは世界初の試みである。SIGNALでは、導管損傷による火災などの2次災害の危険があれば、広い地域のガス供給の制御などの対策を講じる判断材料が得られる。

地震発生からガスの供給停止の判断や警報の発令まで、約10分間が目標になっている。

b)**HERAS** (<u>Hazurds Estimation and Restoration Aid System</u>) UrEDASでは、P波を検知してから3秒以内で震源情報 を算出し、被害推定地域を走る列車への電力供給を、4 秒以内に止めることができる。

東海道新幹線沿線(東京-新大阪間)には、14箇所にUrEDASが、また25箇所にSTOPなどが設置されている。地震計が揺れを検知すると、最寄りの2つの変電所に信号が送られ、その間の架線への送電は自動的に止まる。送電停止の情報は列車運行を管理している司令室にも送られ、誤動作が監視されている。

UrEDASによれば、被害地域は、地震の規模(M)と震央からの距離(△)を用いたM-△法によって推定される。この結果はマクロな被害推定情報である。そこで、より詳細で的確な地震被害予測システムとして、HERASが開発された^{31).50)}。

データベースとしては、東海道・山陽新幹線と首都圏などの在来線の線路下の約100mごとの地盤特性、高架橋や鉄橋などと建物の振動特性、ならびに過去の地震被害に関するデータが含まれる。これらデータベースをUrEDASで得られた地震情報と組み合せて、地震による路線被害が5分以内に推定される。

HERASは、地震の復旧対策の支援にも役立てること

を想定して、作られている。各地域ごとの被害を推定 し、どの地域にどのくらいの復旧作業員を重点的に投入 すればよいのか、などを迅速に判断することが容易にな る。

5.社会システムのアクティブコントロール

4.では、施設被害に基づいたオンライン推定制御法と その事例を紹介した。ここでは、地震直後の人間行動と の相互連関を考えた「社会システムのリアルタイム復旧 戦略」について述べる。

(1)緊急時の避難行動

人間は危機的場面では、何をし、また何をなしうるか。そして、そのことが生命の存亡に、あるいは取り返しのつかない惨事の出現に、いかに決定的にかかわることであろうか。

災害時の人間行動に関する研究の歴史は、40~50年前にさかのはる。それらは主に、1)異常時の心理特性に関する研究、2)避難行動に関する実験的研究、3)災害時の避難行動に関する事例研究と4)避難の予測方法(シミュレーション方法)に関する研究に分類される511。しかし、多くの研究はオフライン的である。

ここで、地震災害に伴う多発的な火災の延焼予測を考えてみよう。2次災害防止のための住民避難や緊急対策を行う上で、延焼予測やシミュレーションは、上述したオフライン的手法ではなく、状況の変化に迅速に対応できるリアルタイム手法でなければならない。

一般に火災時の避難行動は、地震動の強さ、火災の発生地域や件数、そのときの風の状況などを仮定して、どのように逃げればよいかという解析が行なわれる。しかしこれでは、実際の避難時に直面して、道路が壊れていたり、避難者でいっぱいだったりして使えないなどの、時々刻々と変化する状況に対応できない。このような情

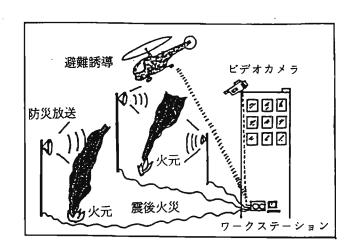


図14 震後火災の情報収集と避難誘導システム (伯野、1993)

報をオンラインで把握して、計算機による解析を行え ば、最適な避難戦略と誘導を行うことができるに違いな い。すなわち、仮定の積み重ねの結果としての予測値を 使うのではなく、実際に起こっている実情報に基づいた リアルタイム処理による予測である。もちろんこの予測 値は、逐次入力される新しい実情報によって更新され る。

伯野はこのようなオンライン避難行動の方法を提案している⁵²¹。その骨子は次のようである。

図14に示すように、地震直後から、高いビルの上などに設置したビデオカメラやヘリコプターによって、火元の位置、気象条件、交通渋滞や避難ルートの被害などの情報が収集される。あるいは、GPSによる災害監視を行うことができるかもしれない。これらの情報を計算機によって迅速に処理し、最適な避難ルートを決めて住民に伝える。これより人々は、時々刻々入ってくる新情報に基づいて計算された結果に従って、避難すればよい。

伯野の提案は、多くの仮定に基づいた単なるコンピュータシミュレーションではなく、フィードバック型 予測に基づいている。そのため、早期避難誘導システム としての説得力は高い。

(2)オンライン復旧戦略

広域的な大災害時においては、限られた人員と資機材のもとで、多くの被災施設をどのように復旧すればよいのかが特に重要になる。すなわち、被災した多数の施設に対して、地震後の機能停止をなるべく早く復旧するためにとるべき最適な戦術は何か、という研究である。

これまでも、復旧作業や意志決定を支援するシステムが研究されてきた。例えば、ライフライン系施設の復旧優先箇所を検討するためには、ネットワークアナリシスやオペレーションズ・リサーチによる復旧過程予測システムが用いられている。また、復旧工法選定エキスパートシステムなども考えられている。しかし、一般にこれらのシステムでは、オフライン的な処理がとられている。

では、より効率的な復旧対策を行うにどのようにすればよいのか。それは、5.(1)で述べたと同様な考え方により、リアルタイム復旧戦略システムを考えることが重要である。

被害発生位置やその程度を予測するという手段はできるだけ避け、それらの実際の情報を用いるのである。人・物などの情報は逐次人手できる。そこで、どのような手順で、どこから復旧していくのが最適かをオンラインで計算し、その結果に基づいて、復旧を行うのである。すなわち、現時点までの情報に基づき、次の時点の復旧行動の最適解を計算する。ただし、この時重要となるのは、客観的判断基準の下で、復旧過程を最適に制御

する方法論が採用されなければならない点である。このようにすれば、将来の復旧も予測できるわけである。もちろん、情報が加わる度にフィードバックし、予測型復旧方策を逐次更新する必要がある。

地震によるライフライン機能障害の時間的累積は最小 化されなければならない。そのためには、システムの構造をよく認識し、地震被害形態や復旧対策特性の相違を 考慮した上で、復旧戦略を展開する必要がある。

震災時の最適復旧戦略は、1)理論予測に基づくものと、2)経験や専門的知識を持つ専門家の社会的(社会工学的)判断に委ねることが考えられる。理論解析のみでは現実的な条件を全て加味することができない。従って、1)と2)の方法をハイブリッドした、しかもリアルタイム復旧戦術を策定することが、最も重要なことであろう。

都市には種々の財が集積し、それらが相互に密接な関係をもっている。従って、地震発生時に、個々の施設あるいはシステム間の相互依存体系の破綻は深刻になり、機能的な被害波及をきたす。このため、相互連関を視野に入れたオンライン復旧対策が行われなければならない。

都市内の構造物・ライフライン施設間は相互に結ばれている。さらに、日本全体の都市は一つのシステムとして構成されている。今日の情報化社会では、様々な影響がリアルタイムで世界中に広がる。ある都市の地震被害の影響は、一国全体、ひいては世界に波及する。特に東京のような、世界経済に影響を及ぼす国際的大都市の場合はなおさらである。このように考えると、地球規模のネットワークとして、リアルタイム被害推定とリアルタイム復旧戦術を実施すべきである。

6. オンライン被害を防ぐために

「リアルタイム地震学」や「リアルタイム地震工学」 を実現するためには、観測装置の維持管理、データ処理 方式や情報通信の安定確保を克服しなければならない。

大地震時には、都市機能をコントロールしているコンピュータ群の障害が予想される。コンピュータと通信回線が結合して生まれたオンラインシステムが機能停止すれば、「リアルタイム地震学」ならびに「リアルタイム地震工学」の価値は著しく低下する。

オンライン化されたコンピュータシステムの普及は目ざましい。現在、交通、救急、医療、物流や行政などの幅広い分野で、このシステムが利用されている。電力やガスの供給、航空機の離着陸やダムの水量調節など、数多くのものがこのシステムでコントロールされている。

コンピュータネットワークシステムは、現代社会の中枢神経的な役割を果たしている。ゆえに、オンライン被害は日本を麻痺させる可能性がある。各所でコンピュータの作動障害やケーブルの断線、火災などが起きれば、

ネットワークシステムの機能停止による被害は深刻なも のになる。

コンピュータシステムの耐震対策は早急に推進されるべき課題である⁹¹。

地震早期検知システムやリアルタイム地震防災システムを構築するためには、まず、同じようなシステムを異なる場所に構築し、十分なバックアップ体制を整えることである。遠く離れた2箇所のセンター周辺で、通信回線が同時に断絶することは考えにくい。こうしたデュアルシステム実現のためには、システムへの投資額が倍になる。その結果、効率と安全性の必要性の確立の間で、トレードオフが存在することになる。

もう一つの対策は、通信回線を2重化することである。2重化の方法には、1)中継局と無線回線を設ける、2)通信衛星と直接通信する、3)他の局との回線を2重化する、4)衛星局と無線回線を設ける、5)管轄局との回線を2重化するなど、色々ある。最も確実な方法は、地上の被害を受けにくい通信回線を利用することである。しかし、通信回線の2重化の費用は、デュアルシステムと同様に大きな問題である。

集中型管理システムは弱点をもっている。この点で、 UrEDASは並列分散型処理を行っているので、メリット を有する。

いずれにしても、上記のような対策を十分に施すことにより、オンラインシステムを原因とする都市機能の麻痺は、確実に避けなければならない。

7. おわりに

世界各地で、巨大地震が頻発している。迫りくる巨大 地震の被害を最小限に抑えるため、地震災害にリアルタ イムに対処するための新しいシステムが構築され、既に 一部実用化されている。

気象情報に続いて、自由化の波が押し寄せ、「地震防災産業」は成り立つのであろうか。天気予報の如く、リアルタイム防災マップを眺めることができないであろうか。「リアルタイム地震工学」は、地震に強い都市をつくると同時に、人間に優しく、時には強く人間をリードしていく学問であらねばならない。

世界中のどこからでも、いつでも地震計のディジタル記録を、自分の計算機に取り込める。「リアルタイム地震工学」が「リアルタイム地震学」の恩恵の上で成り立っていることを、我々は忘れてはならない。

GISやGPSによる防災管理とメインテナンスは、今後、ますます加速度的に進展していくであろう。このためには、能動的なセンサーを用いたデータ収集体制を確立していかなければならない。これらは、24時間体制により、様々な災害調査または予測、さらに予防対策に効果的に使えるようになるに違いない。

地震観測や避難計画といった地震防災問題の中枢には 大幅な予算を伴う。現行機器の老朽化や機能不全などの 問題もあろう。地震の真実を知り、今自分達が抱えてい る問題の存在を知っておくことは大切である。

都市全体の総合的な防災能力を向上させるには、情報 (被害の発生位置、被害状況や必要な救援の規模など)の 不足・途絶をなくし、情報を活かすシステムを構築する ことである。このため、東京ガスのように、大規模で高 密度な地震動モニタリングシステムを実施している企業 もある。しかし、今後は個々の企業・団体のモニタリングシステムを直結し、共有の財産とすることが求められよう。大地震が起こると、「東京は60秒で崩壊する」と いう指摘もある⁵³⁾。これを防ぐためにも、共有システムをもつことは大切である。

21世紀の初頭には、人工衛星によって、大きな地震災害が起こっても、子供や大人が、ポケット画面上で、リアルタイム防災情報を受け、適切な行動がとれるようになるであろう。

本小文では、地震の脅威とそれを防ぐために、「リアルタイム地震工学」の現状と将来的な展望を紹介した。 そして、地震災害の脅威を最小限に食い止める方策に関する提言を行った。

ところで、本小文は、従来のオフライン的(バッチ)処理の地震工学「オフライン地震工学」の重要性を軽視することを意図したものではない。「オンライン地震工学」がその本質的効果を発揮するためには、「オフライン地震工学」による事前の適切なシステムやモデルの構築が不可欠であることは言うまでもない。また、今回の地震で「オンライン処理」された成果や経験は、次の地震災害を軽減するための「オフライン処理」によるシステムやモデルの構築の重要な資料となる。

著者らは、今日の観測・通信・解析技術や電子計算機の進展状況を背景とし、更なる災害軽減を目ざす一つの方向性として、「リアルタイム地震工学」の確立を提起したのである。先人たちの努力によってこれまで培われてきた地震工学の知見を、オンラインあるいはリアルタイムに処理して、積極的に利用する「オンライン地震工学」は、今後重要な位置を占めていくであろう。

表題に関わる問題は概ね指摘したつもりであるが、著者らの薄学さゆえ、十分に説明できていない点が多々あることを懸念している。読者の皆様からのご批判やご意見をいただければ幸いである。本小文が、リアルタイム地震防災に少しでもお役に立てることを望む次第である。

参考文献

1)(社)土木学会関西支部:より安全な都市を日指してーライフライン系の地震防災-、平成3年度講習会テキスト、平成3年11月.

- 2) 宮村正光・諸井孝文・高橋克也:「地震情報の直前検知・伝達システム」の開発ー地震被害低減を目指す新しいコンセプトー、日経サイエンス、Vol.23、No.12、pp.6~11、1993年12月.
- 3) 日本経済新聞:地震検知システム広がる、初期微動 とらえ揺れる前に警報、鹿島 ボケベルに表示、東京 ガス瞬時に被害想定、JR総研復旧作業を支援、1994 年4月4日.
- 4) 朝日新聞:近畿覆う地震観測網、電気・ガス会社つな ぐシステム目指す、1994年5月13日.
- 5) 朝日新聞:大地震・・・揺れる前に即対応新システム 研究、検知数秒で速報/震源・規模も推定、ビルや JR・ガスが対策、復旧にも活用、1994年5月25日.
- 6) 日本経済新聞夕刊: すわ地震 即座にガス供給停止、 東ガス、被害感知システム、1994年6月11日.
- 7) 東京新聞:都心の地震見張り役 東ガスが警報システム、1994年6月11日.
- 8) 日刊工業新聞: 地震に自信、東京ガスが新システム、 地震時の導管網 瞬時対応できる、1994年6月17日.
- 9)日刊工業新聞:災害対策と情報通信の役割、コンピューターシステムなど新タイプの災害にも取り組み、情報の収集、伝達がカギ税制など国の支援も、回線切断に備え多ルート化電気通信事業者、早急な復旧作業の実現に住民の協力が不可欠、1994年6月29日.
- 10)読売新聞夕刊:グラッときたら即対応リアルタイム 地震防災導入企業増える、東京ガス 観測直後、8 万か所で被害予測、ガス栓の遮断まで10分、1994年 8月27日.
- 11)日本経済新聞:米ロスの二次災害防止策 地震発生、 数分で速報、震源・規模、企業に伝達、ガス・電力 会社速やかに対策、1994年8月28日.
- 12)溝上恵:巨大地震発生!大惨事は防げるか?地震に強い都市をつくるリアルタイム地震学、ニュートン、Vol. 14、No. 9、pp. 94~103、1994年9月.
- 13)太田裕:強震動情報と地震防災、地震、第2輯、第47 巻、第1号、pp.113~136、1994年6月.
- 14)金子史夫:サイスミックマイクロゾーニングにおける地震動評価の現状、第22回地盤震動シンポジウム「地盤震動研究の新たな展開ー面的・即時的評価への取組みー」、1994年10月.
- 15)損害保険料率算定会:地域特性を考慮した地震被害 想定に関する研究、地震保険調査研究30、平成3年10 月.
- 16)損害保険料率算定会:地域特性を考慮した地震被害 想定に関する研究Ⅱ都心住宅地におけるケーススタ ディ、地震保険調査研究32、平成4年7月.
- 17)損害保険料率算定会:地域特性を考慮した地震被害 想定に関する研究Ⅲ麻布·弦卷·墨田地域の相互比

- 較、地震保険調査研究35、平成6年1月.
- 18)損害保険料率算定会:地域特性を考慮した地震被害 想定に関する研究 IV住民アンケート調査と被害想定 手法の見直し、地震保険調査研究38、平成6年8月
- 19)太田裕・岡田成幸(編集): 震害予測情報システムに関する研究-基本構想と実現への考察-、文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果、平成2年3月.
- 20)科学技術庁:第5回科学技術庁技術予測調査2020年の 科学技術、未来工学研究所、1992年12月.
- 21)気象庁地震津波監視課:津波予報発表時間が大幅に 短縮されます! - 平成5年度補正予算(第2号)で津波 地震早期検知網等を要求 - 、第29回強震観測事業推 進連絡会資料、1994.
- 22)朝日新聞:パソコンで瞬時に津波の高さを予測、東 大教授らがプログラム、1994年6月27日.
- 23)座間信作・吉原浩:早期津波情報自動検出システム の開発とその適用、消防研究所報告、第64号、pp. 23~38、1987年9月.
- 24)座間信作・吉原浩:早期津波情報自動検出システム の開発とその適用(その2)地域特性の影響、消防研究 所報告、第67号、pp.9~19、1989年3月.
- 25)鉢嶺猛:計測震度計の導入始まる(速報)、地震学会 ニュースレター、Vol.3、No.1、p.28、1991年5月.
- 26)地震予知研究協議会:大学微小地震観測データの利用方法、地震学会ニュースレター、Vol.3、No.6、pp.48~53、1992年3月.
- 27)纐纈一起・鷹野澄・堀井誠司・宮武隆・阿部勝征・ 萩原幸男:地震予知観測情報ネットワークにおける リアルタイム地震データの統合処理、地震研究所彙 報、Vol.64、pp.517~532、1989.
- 28)鵜川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司:関東・ 東海地域地震観測網による震源決定方法について、 国立防災科学技術センター研究速報、第53号、1984 年3月.
- 29)防災科学技術研究所地圏地球科学技術研究部:パソコン通信による防災科学技術研究所の震源情報提供システム、地震学会ニュースレター、Vol.4、No.5、p.7、1993年1月.
- 30)中村豊:早期地震検知警報システム「ユレダス」誰が新幹線を止めるか?5秒前警報システムへの発展、 地震ジャーナル、第14号、pp.34~39、1992年12月.
- 31)中村豊:リアルタイム地震防災システム「ユレダス」・「ヘラス」、第22回地盤震動シンボジウム「地盤震動研究の新たな展開-面的・即時的評価への取組みー」、1994年10月.
- 32)Kanamori,H.: Real-time seismic network for research and hazard mitigation -TERRAscope and CUBE-, Proc. IDNDR Int. Symp. on Earthq. Disaster Reduction

- Technol.-30th Anniv. of IISEE, pp.183~197, 1992.
- 33)永田茂・片山恒雄・池田鉄哉・伊藤弘勇:SIセンサーを用いた震源の概略推定方法、第8回日本地震工学シンポジウム(1990)ー国際防災の10年記念ー論文集、第2分冊、pp.2109~2114、1990年12月.
- 34)片山恒雄: 地震と都市機能、新都市、第40巻、第8号、pp. 14~18、1986年8月.
- 35)(財)土木研究センター:建設省災害情報システムガイドライン(案)、平成5年1月.
- 36)Kameda, H. and Morikawa, H.: Simulation of conditional random fields A basis for regional seismic monitoring for urban earthquake hazards mitigation -, Intelligent Structures 2; Monitoring and Control Edited by Wen,Y.K., pp.13~27, Elsevier Applied Science, 1992.
- 37)川上英二:地震動の時空間分布-観測記録を含む条件付時空間関数-、第22回地盤震動シンポジウム「地盤震動研究の新たな展開-面的・即時的評価への取組み-」、1994年10月.
- 38)野田茂・星谷勝:条件付対数正規確率場の同定, 第 9回日本地震工学シンポジウム、1994年12月.
- 39)野田茂・星谷勝・塚本博之:対数正規確率場におけるユニバーサル・クリッギング、第9回日本地震工学シンポジウム、1994年12月.
- 40)山中弘之・野田茂・星谷勝:ライフラインの被害推 定のための新技法について、土木学会第47回年次学 術講演会講演概要集、第1部、pp.1482~1483、平成 4年9月
- 41) Yamazaki, F., Molas, G.L. and Fatima, M.: Use of neural networks for erthquake damage estimation, Proc. of 6th International Conference on Structural Safety and Reliability ('93 ICOSSAR), pp. 2263 ~ 2270, 1994.
- 42)高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二:地震動 モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推 定、構造工学論文集、Vol.40A、pp.1139~1149、 1994年3月.
- 43)小掘鐸三:制震構造ー理論と実際ー、鹿島出版会、1993年9月.
- 44)朝日新聞:「揺れないビル」競う 耐震は当然、あの手この手で風対策、ビルつなぎ支えあう、「緊張」

- 「休み」筋肉まねる、羽根車でブレーキ、1994年6月 22日.
- 45)加藤康広・山崎文雄・片山恒雄:エレベーターの管制運転及び故障と地震動の強さとの関係、上木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第1部(B)、pp. 1498~1499、平成6年9月.
- 46)小野田芳光・池田瑛司:波動エネルギー式地震感知器の開発、第7回日本地震工学シンポジウム(1986) 講演集、pp. 2101~2106、1986年12月.
- 47) Katayama, T., Yamazaki, F., Nagata, S., and Isoyama, R.: Fuzzy reasoning for earthquake damage assessment of large-scale city gas systems, Lifeline Earthquake Engineering Edited by Cassaro, M.A., A.S.C.E., pp. 639 ~ 650, August 1991.
- 48) Yoshikawa, Y.: Earthquake monitoring and damage estimation systems based on the online information for city gas pipeline operation, Proc. of the U.S.-Italy-Japan Workshop/Symposium on Structural Control and Intelligent Systems, USC Publication No. CE-9210, pp. 252~263, July 1992.
- 49)山崎文雄・片山恒雄・野田茂・吉川洋・・大谷泰昭:都市ガス導管網の地震時警報システムSIGNALの開発、第22回地盤震動シンポジウム「地盤震動研究の新たな展開 面的・即時的評価への取組みー」、1994年10月.
- 50)ユレダス推進部中村(豊)研究室: 災害予測・復旧支援システム「ヘラス」-地震対応部分のプロトタイプの完成-、RRR、第49巻、第9号、pp.20~29、1992年9月.
- 51)片山恒雄・山崎文雄・永田茂・横山秀史:緊急時に おける人間の避難行動に関する研究、東京大学生産 技術研究所耐震防災工学研究室 Report No.91-1 (15)、 1991年3月.
- 52)伯野元彦:地震直後30分間情報に基づく火災避難誘導、第22回地震工学研究発表会講演概要、pp.755~758、平成5年7月.
- 53)P.ハッドフィールド(竹内均監訳・赤井照久訳):東京は60秒で崩壊する!巨大地震がもたらす世界経済破綻の衝撃、ダイヤモンド社、1991年6月.

資 料



第21回地盤震動シンポジウム

釧路沖地震:蘇る過去の教訓と今日的課題

構造委員会 振動運営委員会 地盤震動小委員会・地震災害委員会 地震防災システム検討小委員会

標記シンポジウムが、1993年11月19日(金)、「釧路沖地震:蘇る 過去の教訓と今日的課題」として、建築会館において開催された。

まず、地盤震動小委員会主査の北川良和(建設省建築研究所)から主 旨説明があり、今回のシンポジウムが地震防災システム検討小委員 会との共催で開催されることを述べた。

続いて武村雅之(鹿島小堀研究室)より、やや深発地震という面から 見た釧路沖地震の特徴として、発震機構、既往の最大加速度距離減 衰式との比較、やや長周期地震動についての発表があり、さらに、 長橋純男(母崎総合科学大学)より、釧路沖地震と同様に、釧路気象台 で大加速度を記録した1962年広尾沖地震についての過去の共同研究 とその検討結果についてのレビューがあった。

次に、釧路市内の地盤震動に関して4編の発表が行われた。鹿島 俊英 (建設省建築研究所) は、釧路気象台に設置されていた建築研究所 の強震記録解析結果について発表し、井合進 (選輪省港湾技術研究所) は、釧路港湾で得られた鉛直アレイの記録に対して、地盤の応力ひ ずみ関係の非線形性、ダイレイタンシーを考慮に入れた地震応答解 析を行った結果について述べた。片岡俊一(海水建設)は、釧路気象 台構内とその周辺での高密度アレイによる常時微動観測の結果を報 告し、さらに、建物の地震応答解析について、壇一男(清水建設)に よる気象台の建物の動的解析結果と、田才晃(東京大学) ほかによる 気象台に隣接した RC 造の応答解析の結果を紹介した。荏本孝久 (神奈川大学) は、釧路沖地震における北海道内、釧路支庁管内、釧路 市内の震度分布について、アンケート調査による結果を報告した。

午後のセッションでは、被害の特徴と地震予防のテーマから4編 の発表があった。鏡味洋史(北海道大学)は、釧路における既往の被 害地震について、釧路市の発展の歴史と対応させながら、各地震の 発生条件と被害との対応について述べ、釧路沖地震について特徴的 な条件と災害の様相との関連についてまとめた。能島暢呂(広島工業 大学は、釧路沖地震によるライフライン系の被害として、水道管、 ガス、電力、電話、下水道、およびそれらの相互の影響について、 主として釧路市内に限定して報告した。水越薫(鹿島技術研究所)は、 釧路沖地震における人的被害の特徴について述べたうえで、街路で の落下物による人的被害に注目し、特に、ガラスの落下量、および 通行量データをもとにした地震発生時の人的危険度評価の試みを紹 介した。多賀直恒(8古屋大学)は、地震防災システム構築の際に留 意すべき点としていくつかのテーマを挙げ、それぞれについて、釧 路沖地震および過去の地震の事例を挙げ、コメントした。

続いて総合討論に移った。まず最大加速度の距離減衰に関して, 翠川 (東エ大) は Strike Slip の地震と、サブダクションの地震との発 生様式による距離減衰式の違いについてコメントした。また武村 (前出) は、最大加速度のばらつきが震源の影響によるものなのか、 伝播経路の影響であるかを見極めなければならないという見解を述 べた。川瀬(濁水建設)は、火山フロントの前後で異なるとされる距 離減衰式について, 近地地震の場合の適用方法や, 震源と観測点が

日本海側と太平洋側に分かれるときの適用について質問し、武村 (前出) は、近地地震の場合には、太平洋側と日本海側の距離減衰式 は同じになるのではないか、また、距離減衰の違いは、主として火 山フロントよりも日本海側を通るパスの長さに影響されるものと思 われると回答した。小林啓美(日本エ大)は、釧路沖地震の際、釧路 や浦河、苫小牧では加速度に対して変位が異常に小さく、構造物の 応答が変位振幅で効いてくるとすれば、釧路沖地震の構造物の被害 の少なさを説明できるのではないかと述べた。これに対し、武村 (前出) は、変位が小さいのはやや長周期にあたる波が震源から励起 しなかったためであるとし、川瀬(前出)は、釧路では釧路沖地震以 外の既往の地震記録でも変位振幅が小さくなる傾向があると述べた。

地盤震動の問題では、気象庁の地盤の固有周期について、板たた きや PS 検層による結果は0.2秒程度の値を示すという片岡 (溝水建 股)の発言に対し、翠川(前出)は、強震記録の解析では固有周期は 0.3秒程度になり、これが地盤の非線形性のためか、あるいはさら に深い構造によるものであるかを調べるために、さらに深い地点ま での地盤調査が必要であるとの見解を示した。また、武村(前出) は、気象台周辺の微動スペクトルにおいて顕著にみられる10 Hz の ピークについて、走行する自動車のタイヤによる振動のような震源 の影響なのではないかと述べた。

構造物の応答の問題に関して,工藤(東大地震研)から、構造物の 応答計算で最も効く要素は何かという質問があり、壇(前出)は、一 般に剛構造物の応答では、加速度レベルが最もよい指標であると思 うと述べた。川瀬 (前出) は、釧路沖地震の場合、最大加速度、速度 とも同じく3Hz前後の卓越振動数であることを指摘し、武村(前 出)は、最大加速度や最大速度の議論では、常に卓越周波数を意識 する必要があると論じた。横田 (清水建設) は、建物の支持層付近の 応答スペクトルは50 kine 程度であり、実際に建物に入る有効な入 力はそれほど大きくないのではないかと述べ、また田才(東京大学) は、開発局の建物の応答解析で非設計上の余力を考慮した解析を試 みたが、強度が増した分、卓越周期が短くなり応答スペクトルの ピークに近づいたため、結果はあまり変わらなかったと述べた。

地震防災に関する討論では、小川(都市防災研)の、地震防災上の 優劣では明らかに電力がガスに対して優位であり、防災の観点か ら、都市計画においてはガスを排除するべきではないかという意見 に対し、能島(広島エ大)は、エネルギー効率という観点からみれば ガスは明らかに電力よりも優位であり、防災という一元的な価値で とらえるべきではないと論じた。

最後に地盤震動小委員会幹事の瀬尾和大(東京エ大)より挨拶があ り、釧路沖地震をきっかけに幅広い分野の研究者が一緒に討論する 場を増やしたい、また広尾沖地震と同様に、最低でも6、7年は釧 路沖地震についての研究を継続してもらいたいという主旨の発言で シンポジウムを締めくくった。

●芝良昭/電力中央研究所



第22回地盤震動シンポジウム(1994) 地 盤 震 動 研 究 の 新 た な 展 開

1994年10月

> 〒108 東京都港区芝 5 丁目26番20号 TEL 03-3456-2051 FAX 03-3456-2058

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

·				
				۲
				Z.

