

緊急地震速報を用いた減災システム構築のための強震動評価法

萩原 由 訓 野 畑 有 秀

Estimation of Seismic Ground Motion for a Disaster Mitigation System with Earthquake Early Warnings

Yoshinori Hagiwara Arihide Nobata

Abstract

The Japan Meteorological Agency (JMA) has provided Earthquake Early Warnings (EEW) for advanced users since August 1, 2006, advanced EEW users in this case being those who can estimate seismic ground motion (e.g., intensity and peak ground acceleration) from information available about the earthquake in the EEW. However, there are limits to the accuracy of such estimates. In this paper, we describe a disaster mitigation system to decrease the estimation error using both on-site monitoring and the EEW system, and we discuss the estimation of ground motion over a long period.

概 要

2006年8月1日から開始された高度利用者向けの緊急地震速報によって、地震の震源位置・マグニチュードを地震発生直後に知ることができるようになった。この情報を用いることで、大きな揺れの到達前に震度をはじめとする地震動を予測することが可能である。しかし、予測の精度にはなお問題があり、精度向上は緊急地震速報を用いた地震動評価にとっての課題のひとつである。本論文では、この問題の解決のために緊急地震速報を用いて地震動予測を行う地点においてモニタリングを行い、そのモニタリングの結果を用いて予測精度を向上させるシステムの構築について、およびその精度向上について述べた。また、一般に広く用いられる地震動の指標は震度であるが、地震による被害を説明するためには震度のみでは不十分である。特に、長周期地震動についてはその他の指標を用いる必要がある。そこで、緊急地震速報を用いた長周期地震動の予測についての検討も行った。

1. はじめに

1.1 緊急地震速報の概要

緊急地震速報は、地震の発生直後に、震源に近い地震計で観測された地震波データを気象庁が解析して震源位置や地震の規模(マグニチュード、以下M)を直ちに推定し、これに基づいて各地での主要動の到達時刻や震度を予測し、可能な限り素早く知らせる地震動の予報および警報である¹⁾。地震波が数地点で観測され、強い揺れが予測された場合に、原則1回だけテレビやラジオなどを通じて提供される「一般向けの緊急地震速報(警報)」と、地震波が1地点で観測された時点より、Mと震源位置が推定される度に複数回これらを発表する「高度利用者向けの緊急地震速報(予報)」との2種類がある¹⁾。なお本稿では、後者の速報を用いた検討について紹介する。

1.2 緊急地震速報の限界

1.1節で述べたように、緊急地震速報は、震源に近い地震計で地震波が観測された後、震源やMなどを推定・配信という手順を踏むため、地震の検知時刻から第1報が提供されるまでに平均で5.4秒を要し²⁾、震源近傍では強い揺れの到達に間に合わない。この問題に対しては、運用当初から議論されてきており、現地地震計と組み合わせることで大きな揺れ到達までの余裕時間を稼ぐ試み³⁾

が行われている。

また、震度予測には統計的な距離減衰式を用いているため、予測精度には限界があり、±1階級程度の誤差を伴う⁴⁾。これについては近傍の観測データを用いて震度予測の精度を向上させる検討が行われている⁵⁾。しかし、近傍に観測データが常にあるとは限らない。さらに、緊急地震速報を利用した減災システムの適用先は数多く考えられ、被害等のトリガーとなる地震動の指標も震度や最大加速度、最大速度など異なることが予想される。そのため、あらかじめ予測式を作成できる事例ばかりではない。従って、緊急地震速報を利用する際には、モニタリングと学習システムを併用することが有効であると考えられる。Fig. 1に本稿で考える減災のための緊急地震速報のあり方のフローを示す。緊急地震速報の情報である震源位置とMをもとに、応答予測(地盤、建物、設備、機器、システム、人間)を行い、それらに対応した警報を発報する。その結果をモニタリングし、予測と実際の差を学習させることで、予測の精度を向上させ、次の緊急地震速報に備える。ここで、地震は稀に発生する現象であり、過去の事例による事前学習を応答予測の初期値として組み込んでおくことが望ましい。

本稿では、まず2章でモニタリングを有する緊急地震速報システムについて述べる。実際の減災システムのモニタリングとは、制御すべき構造物の応答や、システムの

不具合を監視する事を指すが、ここでは簡単な事例として、地動最大速度が制御のトリガーになる場合を検討する。また、予測精度向上のためのモニタリング結果を用いた学習について述べる。最後に3章では長周期地震動予測への事前学習の適用例について述べる。

2. モニタリングを有する緊急地震速報システム

2.1 システムの概要

本節では、大林組技術研究所(東京都清瀬市)において2007年に構築したモニタリングを有する緊急地震速報システムについて述べる。本システムは、観測値の大きさをトリガーとする一般の地震観測システムでは精度よく記録することが難しい長周期地震動に対し、緊急地震速報を利用することで観測を可能とした地震動観測システムとしても位置付けられる。このような地震観測は、常

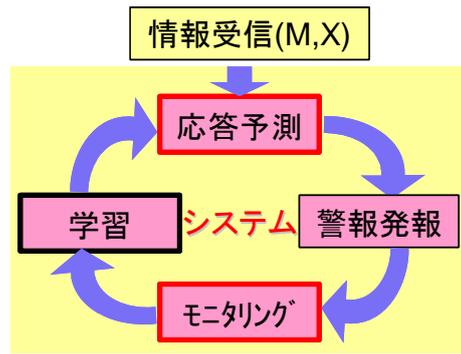


Fig. 1 緊急地震速報を利用した減災システム
Disaster Mitigation System with
Earthquake Early Warnings

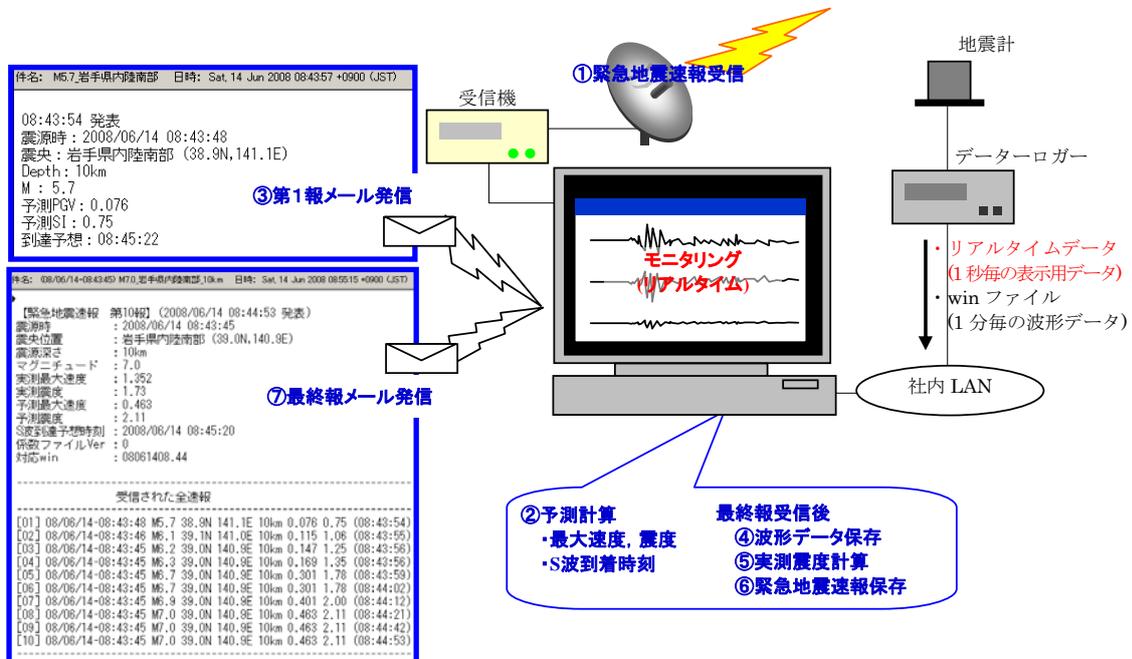


Fig. 2 システム構成の概要
Composition of System

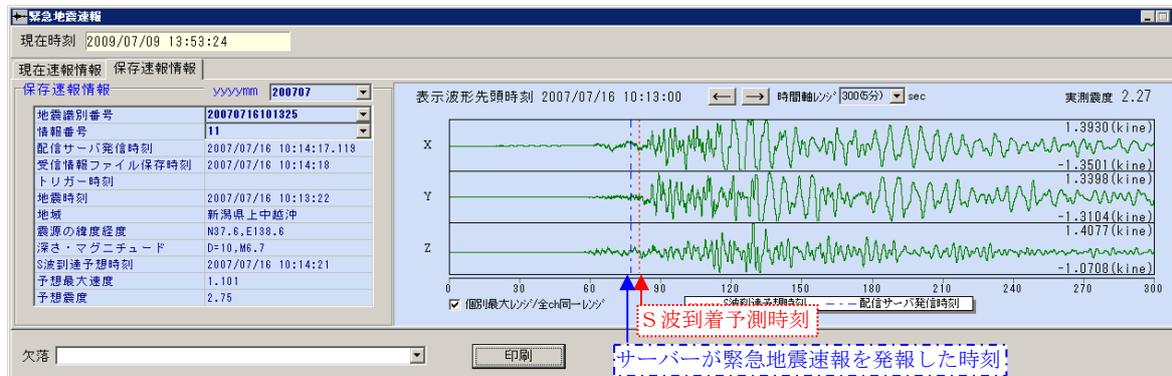


Fig. 3 波形のモニタリング例
Example of Monitoring (Wave Data)

時観測と事後の地震情報を使った手作業とによれば可能ではあるが、情報を入力しやすい緊急地震速報をトリガーにし自動で実行させた点に特徴がある。Fig. 2にシステムの概要図を示す。本システムは、衛星通信を利用した緊急地震速報受信機（白山製：KB2000U），サーボ型速度計（東京測振製：VSE-11, VSE-12），データローガー（白山工業：LS7000），およびこれらのデータの処理を行うパーソナルコンピュータ(PC)からなっている。

平常時は、地震計からの地動速度データを常時データローガーに記録するとともに、社内LANを通じてリアルタイムにその波形をPCの画面でモニタリングしている。どこかで地震が発生し緊急地震速報を受信(Fig. 2, ①)すると、まず第1報の情報(震源位置およびM)から地動最大速度(以下、PGV)，震度およびS波到達時刻を予測する(Fig. 2, ②)，応答の予測手法については次節で詳しく述べる。また、常時モニタリングしているPC上の波形に対して、緊急地震速報の発報時刻とS波到達予測時刻とを時刻歴上に明示する。この結果、無感地震に対しても緊急地震速報の発報時刻とS波到着時刻の関係がリアルタイムに確認できる(Fig. 3)。次に、第1報の情報とこれらの予測値とを登録したメールアドレスに送信(Fig. 2, ③)する。随時更新される緊急地震速報の最終報を受信した後、地震波形データ(winフォーマットのファイル)をデータローガーからPCへコピー(Fig. 2, ④)する。このとき、対象とするファイルは、最終報から計算されるS波到達予想時刻より1分前のファイルから、Mと震源距離(X)より求まる地震の継続時間分のファイルとする。地震の継続時間は(1)式⁹⁾を基にして求める。ただし、(1)式は、工学的基盤でのS波主要動部の加速度波形を対象としているおり、ここではS波主要動部に続く表面波などによる長周期の地震動も対象とするため、(1)式によるtdの10倍の値を継続時間としている。

$$td = t1 + t2 + t3 \quad (1)$$

$$t1 = 10^{\wedge}(0.229M - 1.112)$$

$$t2 = 10^{\wedge}(0.433M - 1.936)$$

$$t3 = 10^{\wedge}(0.778 * \log_{10}(X) - 0.34)$$

次に、記録された速度波形データから加速度波形を算出するとともに、実際の計測震度も計算(Fig. 2, ⑤)する。続いて、第1報から最終報までの緊急地震速報と実測値(PGV，計測震度)とをまとめてファイルに保存する(Fig. 2, ⑥)。最後に、このまとめた情報をメール送信する(Fig. 2, ⑦)。また、過去の地震の波形表示も可能となっている。

2.2 応答の予測手法

Fig. 4にこのシステムにおける応答予測のフロー図を示す。なお先述したように、前節のシステムでは地動最大速度を対象としているが、本予測手法の対象は特定の指標に限らないため、ここでは応答予測値という表現を用いることとする。

まず、適度に離散化したマグニチュードM(j)および深

さのデータD(k)を有する標準地域メッシュの2次メッシュ区画(以下、これをメッシュと呼ぶ)を用意する。メッシュは(C(i), M(j), D(k))で表わす。なお、C(i)は2次メッシュコードである。予測対象となる地点(以下、サイト)からそれぞれのメッシュ中央までの距離X0(C(i), D(k))をあらかじめ算定する(Fig. 4, ①)。次に、応答予測値を距離、M，深さをパラメータとする関数と仮定し、各メッシュ中央で発生する地震に対する応答予測値V0[X0(C(i), D(k)), M(j), D(k)]を前もって計算し、初期値として登録しておく(Fig. 4, ②およびFig. 5)。

緊急地震速報を受信した際、まず震央の緯度経度から該当する2次メッシュコードC(I)を求め、緊急地震速報によるマグニチュードmおよび震源深さdから該当するメッシュ(C(I), M(J), D(K))を特定する(ここで、M(J) ≤ m ≤ M(J+1), D(K) ≤ d ≤ D(K+1)) (Fig. 4, ④)。

実際の震源距離とサイトーメッシュ中央の距離とでは多少差があるため、あらかじめ求めて(Fig. 4, ①)おいたX0(C(I), D(K))を用いて、応答予測値に距離補正を行いV1[X(D(K)), M(J), D(K)]とする。V1[X(D(K)), M(J), D(K)], V1[X(D(K+1)), M(J), D(K+1)], V1[X(D(K+1)), M(J+1), D(K+1)]についても同様に求める(Fig. 4, ⑥)。

さらに、緊急地震速報のマグニチュードmおよび震源深さdを用いて補正を行い、最終的な応答予測値Vpreとする(Fig. 4, ⑦)。

モニタリングデータ取得後にモニタリング結果VobsとVpreとを基に補正係数を作成し、これを学習結果とする。

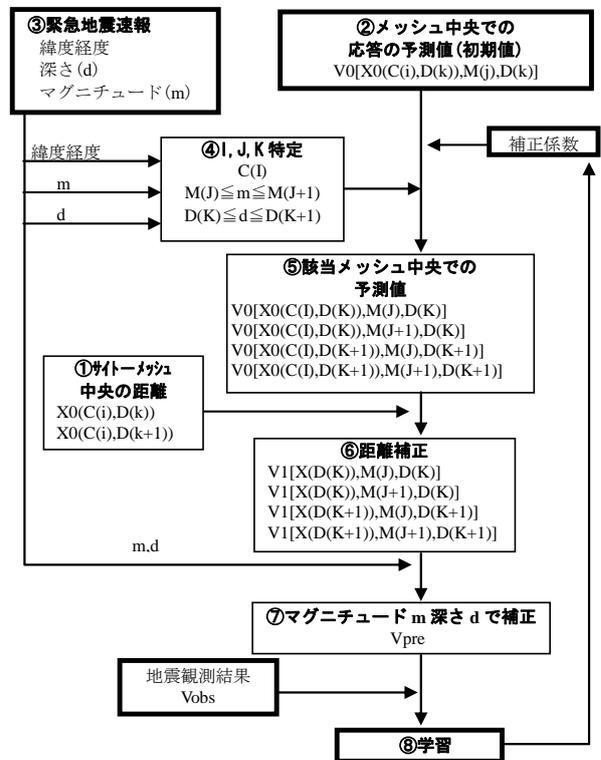


Fig. 4 フロー図
Flowchart of Estimation

次の緊急地震速報受信時には、初期値にこの補正係数を掛けて予測を行う。

2.3 モニタリング結果を用いた学習

本節では、PGVを評価し、モニタリング結果を用いて学習した事例を示す。PGVの初期値を求めるにあたり、既往の距離減衰式⁷⁾を用いており、表層地盤の増幅率はJ-SHIS⁸⁾の値を基に求めている。初期値の一例をFig. 6に示す。

2008年3月から2009年6月までの約1年4ヵ月の間に発報された緊急地震速報のうち、M4以上の地震により観測されたPGVと上記の初期値とを用いて学習をした結果を

Fig. 7に示す。同心円状に分布していたFig. 6と比較すると円が崩れているのが見て取れ、学習の結果、応答予測値が変化していることがわかる。

3. 長周期地震動予測への適用例

3.1 長周期地震動予測のための事前学習(初期値の設定法)

本章では長周期地震動予測への適用例を示す。長周期地震動は、一般に地震波の伝播経路やサイト周辺の深部地盤構造の影響を大きく受ける。そのため、これらを考慮しないと予測が大きく外れる可能性がある。しかし、長周期地震動を誘発するような比較的規模の大きな地震

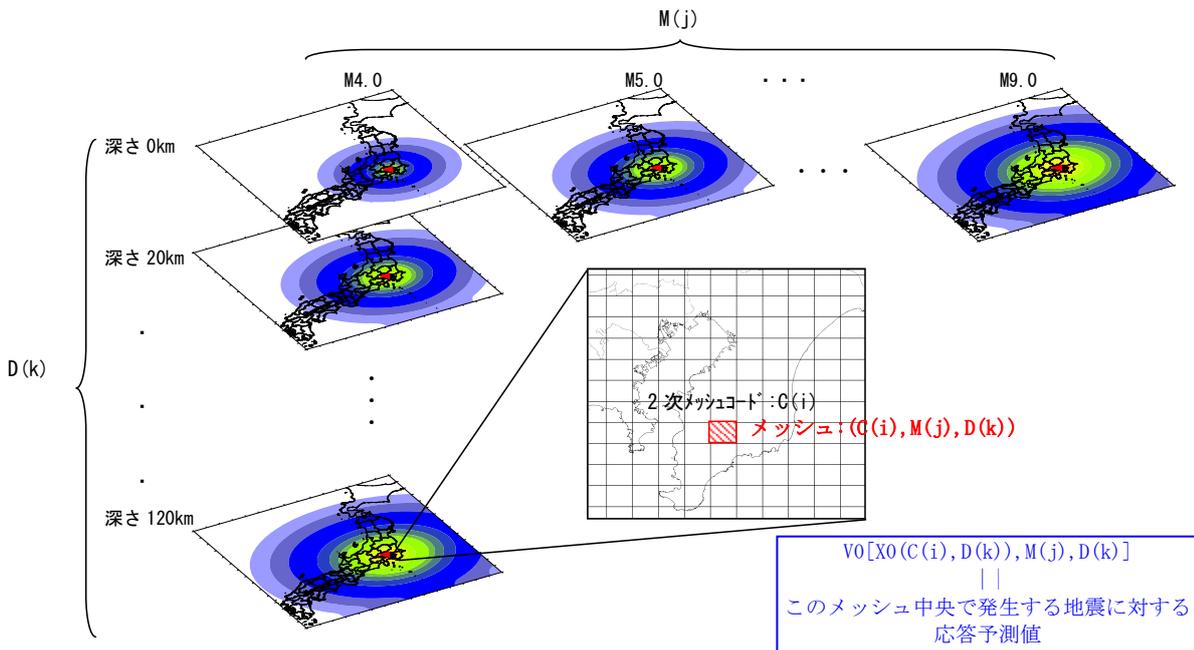


Fig. 5 予測の初期値のイメージ図
Image of Initial Value of Estimation

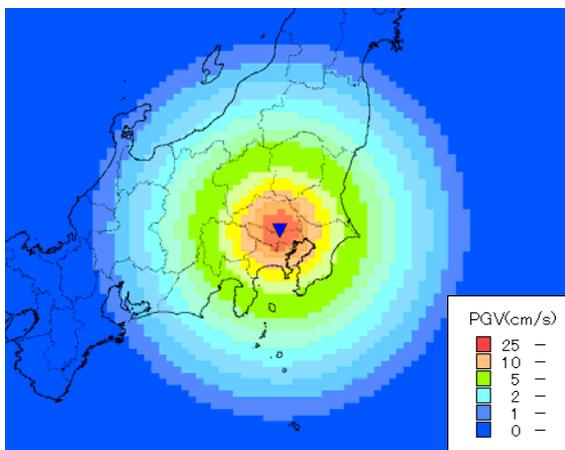


Fig. 6 PGVの初期値の例(M7, 深さ40km)
Example of Initial PGV (Magnitude:7, Depth:40km)

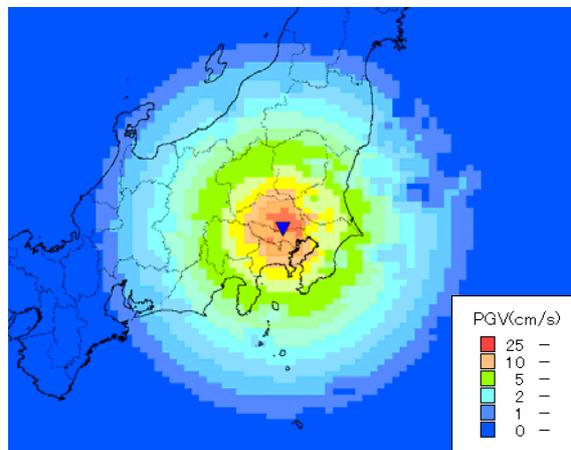


Fig. 7 学習後のPGVの例(M7, 深さ40km)
Example of learning (Magnitude:7, Depth:40km)

が発生する頻度はあまり高くない。そこでここでは、深部地盤構造に大きな相違がないと考えられる近隣での観測データを利用し、以下の方法で長周期地震動予測の事前学習を行った。

まず、長周期の距離減衰式として、座間⁹⁾による標準スペクトル($F_c(T)$)と、地震の起こり方が共通すると考えられる地域内で発生した地震の観測スペクトル($F_o(T)$)とから、その地域で発生する地震による地震動の特徴を把握する。

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{(a \cdot M - b)} \cdot \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 a , b は地震の種類(海溝型、内陸地震)と M によるパラメータである。 $\alpha(T)$ は0.001を用いた⁹⁾。また、カットオフ周期(T_c)は、(3)式とし、

$$\log T_c = 0.046 \cdot M + 0.561 \quad (3)$$

$T > T_c$ に対しては、(2)式に $(T_c/T)^2$ を乗ずる。

この $F_c(T)$ に対する観測スペクトル($F_o(T)$)の倍率を地域ごとに平均化し、これをその地域で発生する地震に対するそのサイトの増幅度($R(T)$)とする⁹⁾。

最後に、地域区分毎の $R(T)$ および $F_c(T)$ を用いて、次の(4)式により長周期地震動($F_p(T)$)の予測を行う。

$$F_p(T) = R(T) F_c(T) \quad (4)$$

3.2 長周期地震動の初期値

実際に予測を行うサイトから約2km離れた当社の地震観測点(SMD)において、2000年～2008年に観測された記録を用いて、前節の手法により各地域で発生する地震に対して増幅度を求めた。Fig. 7に観測点、震央位置(赤い★)および地域区分を示す。このときの地域区分は、太田他¹⁰⁾に倣った。Table 1に解析に用いた地震の諸元を示す。また、各地域における $R(T)$ の結果をFig. 8に示す(ただし、1地震しかない地域は除いた)。地域5(宮城沖～茨城沖)および地域11(紀伊半島付近)では、どの周期帯においても $R(T)$ は1より小さい。逆に、地域3(日本海東縁)はどの

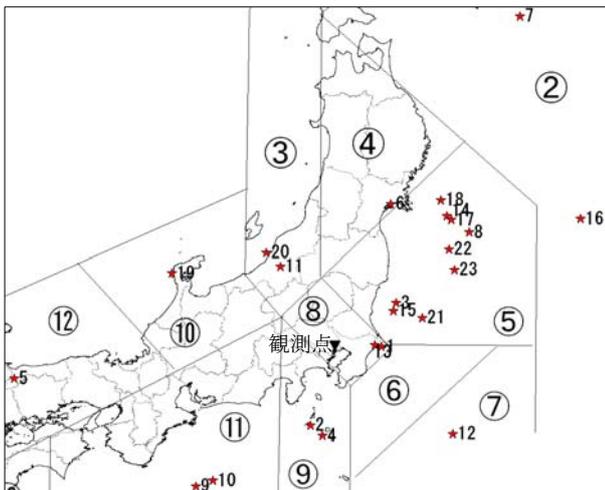


Fig. 7 解析に用いた震央と地域区分
Location of the Epicenter and Number of Seismic Zoning

周期帯においても1以上となっている。また、地域9(伊豆半島付近)の地震については、5.3秒付近から急激に $R(T)$ が大きくなり10秒では標準スペクトルの値より3倍程度大きくなることわかる。サイトから同程度離れた別の観測点の記録を用いた検討においても、同様の傾向を確認している。この傾向は、Fig. 9に示した初期値(加速度フーリエ振幅)の分布にも見て取れる。3秒付近においては地域8と地域9の $R(T)$ は同程度であるため、Fig. 9(左)では距離に応じて滑らかに値が変化しているが、6秒での初期値を示したFig. 9(右)においては地域8と地域9の値の大きさが逆転している。

なお、ここで求めた初期値を応答予測の初期値(Fig. 4,

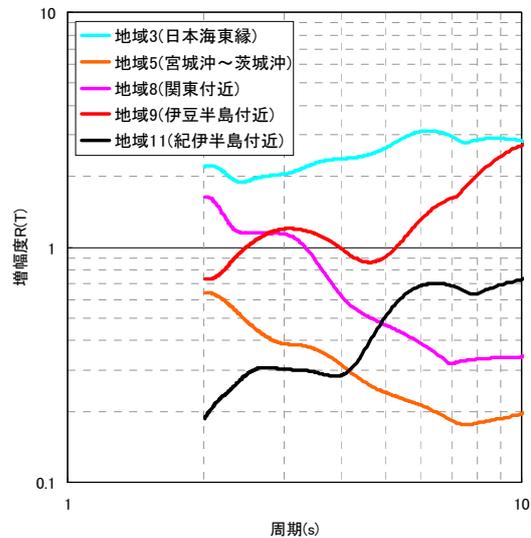
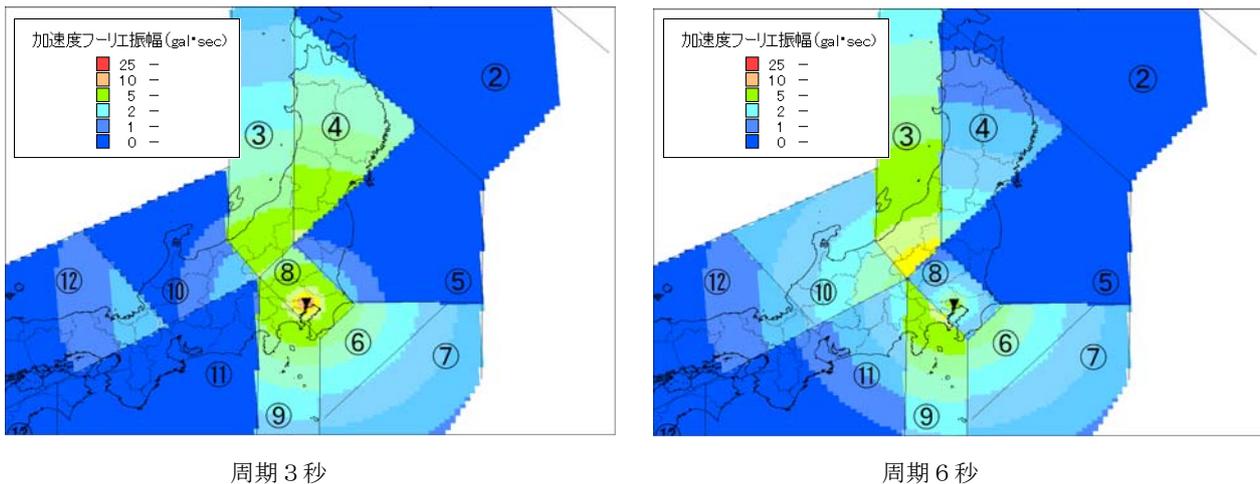


Fig. 8 各地域における $R(T)$
 $R(T)$ for Each Area

Table 1 解析に用いた地震の諸元
The List of the Earthquake Utilized for Analysis

No	年	月	日	時	分	緯度	経度	深さ	M	地域区分
1	2000	6	3	17	54	35.6898	140.747	48.06	6.1	8
2	2000	7	1	16	1	34.19	139.194	16.06	6.5	9
3	2000	7	21	3	39	36.5293	141.119	49.37	6.4	5
4	2000	7	30	21	25	33.9712	139.411	17.04	6.5	9
5	2000	10	6	13	30	35.2742	133.349	8.96	7.3	12
6	2003	7	26	7	13	38.405	141.171	11.87	6.4	4
7	2003	9	26	4	50	41.7785	144.079	45.07	8	2
8	2003	10	31	10	6	37.8322	142.696	33.35	6.8	5
9	2004	9	5	19	7	33.0332	136.798	37.58	7.1	11
10	2004	9	5	23	57	33.1375	137.141	43.54	7.4	11
11	2004	10	23	17	56	37.2925	138.867	13.08	6.8	3
12	2005	1	19	15	11	33.937	142.019	31	6.8	7
13	2005	4	11	7	22	35.7268	140.621	51.51	6.1	8
14	2005	8	16	11	46	38.1495	142.278	42.04	7.2	5
15	2005	10	19	20	44	36.3817	141.043	48.32	6.3	5
17	2005	12	2	22	13	38.0727	142.354	40.28	6.6	5
18	2005	12	17	3	32	38.4487	142.181	39.91	6.1	5
19	2007	3	25	9	41	37.2207	136.686	10.7	6.9	10
20	2007	7	16	10	13	37.5568	138.61	16.75	6.8	3
21	2008	5	8	1	45	36.228	141.608	50.6	7	5
22	2008	7	19	11	39	37.521	142.264	31.6	6.9	5
23	2008	7	21	20	30	37.136	142.341	27.4	6.1	5



周期 3 秒
周期 6 秒
Fig. 9 長周期地震動予測(加速度フーリエ振幅)の初期値の例(M6)
Example of Initial Value of Long Period Ground Motion (Magnitude:6)
(Left:Period=3(s), Right:Period=6(s))

②)とすることで、あらかじめ発生地域による特徴を考慮した長周期地震動の予測が可能となる。

4. まとめ

緊急地震速報をより有効的に活用するためには、予測地点におけるモニタリングが重要であり、警報を出した後の結果を確認し、今後のためにその結果を使って学習していくことが肝要である。本稿では大林組技術研究所において2007年に構築したモニタリングを有する緊急地震速報システムの概要について紹介し、その学習事例について述べた。また、地震は稀に発生する事象であるため、事後の学習機能だけではなく、事前に学習しておくことが重要である。ここでは、長周期地震動を予測するために地震発生地域を考慮した事前学習を行い、その予測方法と検討した結果についてもあわせて報告した。

研究所における適用例では地震動評価の高精度化を目指したため、モニタリングの対象は地動速度である。その結果、緊急地震速報を利用した長周期地震動観測システムとしても稼働している。なお、実際は制御対象(例えば、エレベータのロープの揺れなど)をモニタリングすることとなり、そのモニタリングの方法は個々に検討する必要がある。

一方、リアルタイムに地動をモニタリングしていることより、緊急地震速報が間に合わない直下地震に対しても、初期微動の検知により主要動到達前の対応が可能ではあるが、その具体的な方法については今後の課題である。

参考文献

- 1) 気象庁HP, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/eew_naiyou.html
- 2) 緊急地震速報の本運用開始に係る検討会：「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」最終報告, (2007)
- 3) 宮村正光, 他：現地地震計による早期地震警報の研究 その2. 緊急地震速報と組み合わせた活用法, 日本建築学会大会梗概集, pp. 661-662, (2007)
- 4) 松森敏幸：本格運用から一年たった緊急地震速報の現状, 第8回国土セーフティネットシンポジウム, pp. 33-43, (2009)
- 5) 神田克久：観測データに基づいて地盤伝播特性を考慮した震度推定, 震度計の設置促進と震度データの利高度化に関するシンポジウム論文集, pp. 46-51, (2007)
- 6) 佐藤智美, 他：ポアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp. 19-27, (1994)
- 7) 司宏俊, 他：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 63-70, (1999)
- 8) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション(J-SHIS), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 9) 座間信作：やや長周期帯域における加速度スペクトルの半経験的表現, 消防研究所報告, 第89号, pp. 1-10, (2000)
- 10) 太田外氣晴, 他：巨大地震と大規模構造物, 共立出版, (2005)