

遠方の観測点の地震情報を用いた即時地震動予測

萩原由訓 野畑有秀

Real-Time Forecasting of Ground Motion with Earthquake Information of Front Site

Yoshinori Hagiwara Arihide Nobata

Abstract

The Japan Meteorological Agency (JMA) has provided Earthquake Early Warnings (EEW) to advanced users since August 1, 2006. Advanced EEW users can forecast seismic ground motion (e.g., Seismic Intensity, peak ground acceleration) from the earthquake information. However, the accuracy and earliness of the forecasting are limited. This paper describes a regression equation to decrease the error and increase the rapidity of forecasting with real time earthquake information.

概要

東北地方太平洋沖地震以降、南関東や南海トラフでのM8~M9クラスの巨大地震の発生が危惧されている。このような巨大地震に対して、地震発生後、迅速に揺れの大きさを予測することが被害低減に非常に有効である。現在、広く利用されている地震警報は、2006年8月より気象庁から配信されている高度利用者向けの緊急地震速報である。ユーザーは、この情報を用いて揺れの大きさや最大加速度を予測し、被害低減に利用している。しかし、この緊急地震速報にも、精度や迅速性の面での技術的な限界が指摘されている。本報では、緊急地震速報の限界を補うため、予測地点を限定した即時地震警報システムに用いる地震動予測式を作成した。さらに実際の地震での検証を行い、大きな揺れまでの余裕時間を30秒程度稼げることを確認し本手法の有効性を示した。

1. はじめに

2011年1月時点の地震調査研究推進本部¹⁾による地震の長期評価によれば、宮城県沖地震の30年以内に発生する確率は99%であり、いつ地震が発生してもおかしくない状況にあると考えられていた。そのような状況の中で、2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、東北から関東にかけての広い地域において地震動および大津波による甚大な被害が生じた。現在でも、関東におけるマグニチュード(M)8クラスの地震の30年発生確率は最大5%、M7クラスは70%程度といわれている²⁾。さらに、南海トラフにおけるM8~M9クラスの地震の30年発生確率も60~70%とされている³⁾。歴史的に見ても、869年に東北地方で巨大地震(貞観地震)が発生した18年後に、M8を超える南海地震が発生しており、南海トラフにおいても巨大地震の発生が切迫していると考えられる。

このような大きな地震に対して、地震発生直後、出来るだけ迅速に、精度良く、陸域対象地点に襲来する地震動の大きさを予測することは、地震被害低減を達成するために非常に有効である。例えば、避難訓練体験済みの小学生が机の下に全員避難完了するまでの時間は4秒、早い生徒で2秒程度であることが分かっており⁴⁾、日ごろの訓練と地震動到達前の数秒の猶予が、人的被害低減に効果を発揮することが大いに期待できる。その他にも、半導体工場では、工場内で使用している特殊危険性ガスや薬品の供給遮断を行うことで人的被害、2次被害の防止を図ることができ、さらに、精密機器の稼働をストップすることで、機器自体の被害を低減できる。その結果、製

品に対する被害の低減・復旧時間の短縮が可能となり、機能停止・製品の出荷不能などの間接被害も削減することができる⁵⁾。

地震に対する被害低減対策として現在広く用いられているものに、2006年8月より気象庁が配信を行っている高度利用者向けの緊急地震速報がある。緊急地震速報は、観測された地震動から震源位置、Mを推定し、これらより震度を推定するシステムである。大地震が発生しても主要動(大きな揺れ)が到達する前に警報が出されることにより、人的・物的被害の軽減を期待することができる。また、一般向けも2007年10月から運用され、テレビやラジオその他の媒体を通じて緊急地震速報に触れる機会が増え、社会全体として地震に対する被害低減への機運が高まっている。東北地方太平洋沖地震においてもほとんどの地域で、一般向けの緊急地震速報(警報)発表から主要動到達まで5秒以上の余裕があった⁶⁾。一方で、緊急地震速報には以下のような技術的な限界や課題点も指摘されている。

- 1) 緊急地震速報は、観測記録を用いて震源を推定し、配信を行うという手順を踏む。そのため、直下で発生する地震などでは、緊急地震速報が主要動の到達に間に合わない、または余裕時間が短くなってしまう場合がある⁷⁾。
- 2) マグニチュードは地震動の最大変位振幅から求められる。大地震は揺れ始めから最大変位振幅が発生するまでに時間がかかるため、初期の緊急地震速報のマグニチュードは過小評価になる^{8),9)}。
- 3) 緊急地震速報を用いて推定される震度は、震源の

推定誤差に加えて、地域性を反映していない日本全国単一の経験式を用いることによる誤差も含む。

これらの技術的課題を補うように、対象地点に設置した地震計で検知される初期微動の大きさから主要動の大きさを予測し、直下地震に対しても余裕時間を期待することができるオンサイトの地震警報システムが検討されている^{10), 11)}。一方で、情報通信技術の向上により、従来専用回線が必要だったリアルタイムの観測データを、専用回線を用いることなくインターネットを介してだけでも手軽に得ることができる環境が整い始めている。その結果、対象地点の地震計だけでなく周辺の地震計の観測情報を用いて地震動を予測する、気象庁の全国を網羅した緊急地震速報とオンサイト警報との中間に位置づけられる、地域的な警報システムも構築され始めている¹²⁾。

本報では、このような地域的な即時地震警報システムに用いるための地震動の予測式作成について検討を行い、実際の地震に適用した場合の結果を報告する。まず、上述した緊急地震速報の技術的課題を補うために、以下に基づき予測式を作成した。

- 1) 震源推定の誤差を回避するために、震源に近い観測点（以下、前線観測点とする）での記録を、震源推定に用いるのではなく地震動予測に直接利用する。
- 2) 推定誤差を低減しかつ地震動予測を迅速化するために、前線観測点と予測対象とする観測点（以下、予測観測点とする）の地震記録から回帰分析により、予測観測点の地震動の予測式を作成する。

次いで、今回の検討対象とした宮城県沖の範囲内で発生した東北地方太平洋沖地震の余震の記録を用いて、作成した予測式の検証を行った。最後に、全く別の地域で同様に予測式を作成・適用し、本予測式の作成方法の有効性を示した。

2. 検討範囲と観測データ

対象とする地震の範囲を北緯38~38.75°，東経141.5~142.5°とした。これは地震調査研究推進本部¹³⁾の宮城県沖地震の震源モデル(A1およびA2)がほぼ入る範囲である。この中で1996~2008年に発生した地震のK-NETおよびKiK-netの記録を利用した。地震動予測の基準となる前線観測点をIWT009とした(Fig.2)。この観測点は佐藤・巽¹⁴⁾や川瀬・松尾¹⁵⁾がインバージョンの基準点にしており硬質地盤上の観測点である。佐藤・巽¹⁴⁾はS波の1次元増幅特性を求め、12Hzにピークを持ち4Hz付近までの低周波数領域で増幅がないことを示しており、本検討においても基準の観測点とするのに適していると判断した。そのS波の1次元増幅特性をFig.1に示す。

予測観測点は、前線観測点からそれぞれ約36km, 26km離れたIWTH22およびIWT011とした(Fig.2)。IWTH22は北上山地内の観測点であり、前線観測点であるIWT009

と同様に硬質地盤上に位置しており、7.2Hz付近に増幅特性のピークを持つ。一方、IWT011は北上低地に位置し、2.8Hzにピークを持っている。これらのS波の1次元増幅特性をFig.1に示す。

これらの地点で観測された地震のうち、Table 1の地震を対象とした。前線観測点とそれぞれの予測観測点とともに記録が得られている地震を対象とした結果、IWTH22で17地震、IWT011で20地震の記録を用いて回帰分析を行った。Table 1およびFig.2に対象とした地震を示す。

3. 予測式の作成

3.1 予測式について

地震動の観測記録は周波数の関数として表現すると(1)式のように表せる。ここで右辺第1項は震源特性、第2項は伝搬経路特性、第3項はサイト特性である。

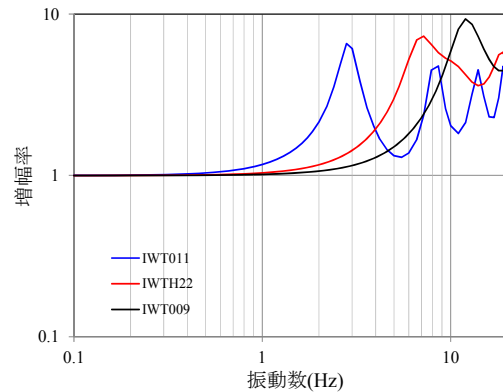


Fig. 1 S波の1次元増幅特性
1-D Amplification Characteristics of S-wave

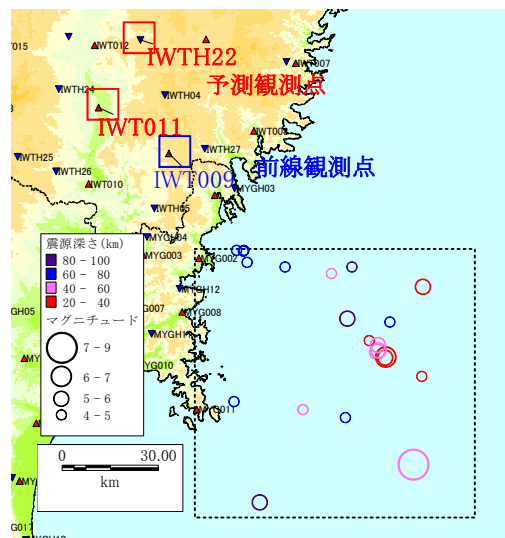


Fig. 2 検討範囲と利用する地震の震央および観測点
The Position of Epicenters and Observations

Table 1 検討に用いた地震の緒元
Parameters of Earthquake

No.	年	月	日	時	分	秒	緯度	経度	深さ	M
1	1996	5	23	18	36	29.8	38.647	142.31	38	5.1
2	1996	11	18	19	43	47.9	38.703	142.06	81	4.4
3	1998	5	21	6	53	47.9	38.558	142.04	84	5
4	2002	5	6	17	12	4.1	38.465	142.15	40	5
5	2003	5	27	10	47	12.48	38.749	141.68	66.2	4.1
6	2003	5	27	13	11	19.49	38.746	141.67	66.1	4.1
7	2003	10	4	8	11	28.89	38.715	141.69	74.3	4.5
8	2004	3	10	5	15	8.66	38.683	141.99	57.4	4.4
9	2004	12	29	22	58	48.77	38.449	142.18	39.4	5.5
10	2005	3	30	4	12	16.55	38.548	142.2	61.9	4.4
11	2005	8	16	11	46	25.74	38.15	142.28	42	7.2
12	2005	10	24	18	34	53.38	38.496	142.12	39	4.8
13	2005	12	17	3	32	13.41	38.449	142.18	39.9	6.1
14	2006	2	1	4	23	58.20	38.397	142.31	35.6	4.5
15	2006	3	19	16	27	44.62	38.748	141.65	65.4	4.1
16	2006	4	22	23	35	58.96	38.703	141.82	66.3	4.6
17	2006	7	1	8	28	13.23	38.47	142.16	40	5.3
18	2006	9	9	19	36	3.68	38.282	142.04	66.8	4.9
19	2007	11	7	20	5	41.84	38.327	141.64	61.1	4.6
20	2007	12	25	23	4	32.85	38.483	142.15	40.3	5.6
21	2008	6	2	0	58	28.93	38.304	141.89	46.1	4.8
22	2008	10	30	0	48	40.72	38.046	141.73	86.3	5.1

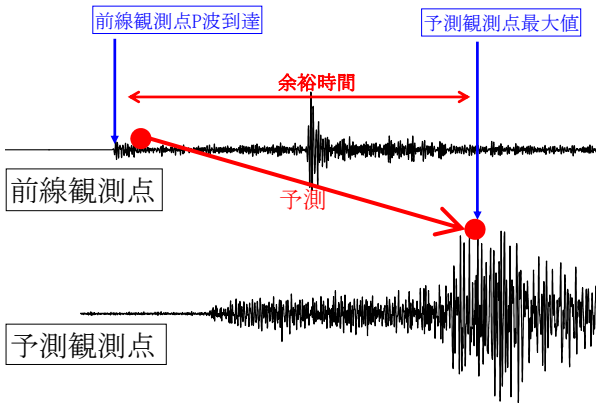


Fig. 3 予測のイメージ
Image of Forecast

$$O_i = S_i \times P_i \times G_i \quad (1)$$

(下付き文字のiはそれぞれP波の際はp, S波の際はsとする)

ここで、余裕時間を稼ぐために前線観測点の初期微動(P波)を利用して、予測観測点の大きな揺れ(S波)を予測(Fig.3)することを考える。(1)式に従い、前線観測点のP波の振幅値と予測観測点のS波の振幅値との比を考えると

$$\frac{O_{s,2}}{O_{p,1}} = \frac{S_s}{S_p} \times \frac{P_{s,2}}{P_{p,1}} \times \frac{G_{s,2}}{G_{p,1}} \quad (2)$$

(下付き文字の1は前線観測点, 2は予測観測点を表し, p, sはそれぞれP波, S波に関するものであることを表す)

となる。ここで、地震の対象領域を宮城県沖に絞り前線および予測観測点を特定していることでP波およびS波

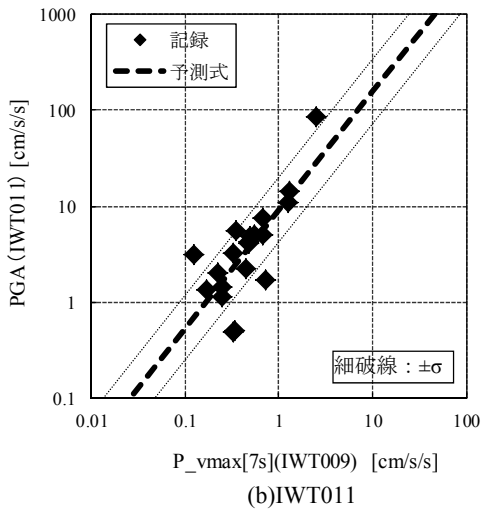
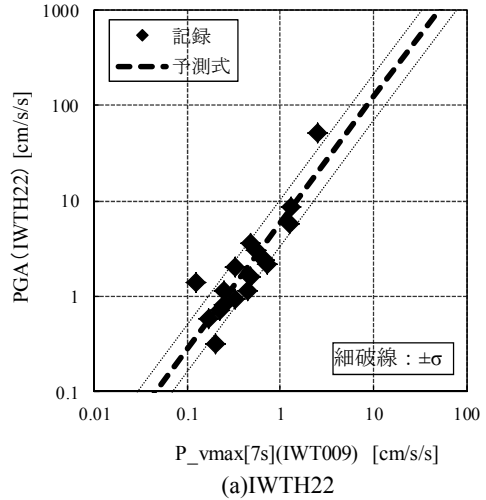


Fig. 4 回帰分析の結果
Result of Regression Analysis

Table 2 予測式の推定誤差
Error of an Estimate Equation

予測対象	IWTH22	IWT011
	PGA	PGA
基準	最大加速度	最大加速度
P_vmax[7s]	0.24	0.34

の伝搬経路特性が既知だとし、前線観測点のP波の地盤増幅 $G_{p,1}$ および予測観測点のS波の地盤増幅 $G_{s,2}$ が既知だとすると、前線観測点のP波の振幅値 $O_{p,1}$ と予測観測点のS波の振幅値 $O_{s,2}$ は、P波とS波の震源特性の比を含む係数をCとした(3)式のような関係になると考えられる。

$$O_{s,2} = \frac{S_s}{S_p} \times C \times O_{p,1} \quad (3)$$

(Cは、既知の値を表す)

しかし、本検討で用いる地震のデータに関して、Mが大きいものは2005/8/16(M7.2)しかなく、この地震とそれ以外の地震とで観測された地震動の差が非常に大いため、

(3)のような関係として回帰するとうまく回帰できず推定誤差が大きくなってしまふ可能性がある。よって、本検討ではWu and Kanamori¹⁶⁾と同様に常用対数を用いて予測式を作成することとした。

3.2 最大加速度 (PGA) の予測式の作成

前線観測点のP波初動部分の7秒間の加速度の最大値 $P_vmax[7s]$ と、予測観測点の全波形のPGA (水平2成分の最大加速度の大きい方) とから回帰分析により以下の予測式

$$\text{Log}_{10}(\text{PGA}) = a * \text{Log}_{10}(P_vmax[7s]) + b \pm \sigma \quad (4)$$

(a,bは回帰係数, σ は推定誤差を表す)

を作成した。Fig.4に、それぞれの観測点における回帰の状況を示す (細破線は $\pm\sigma$ を示す)。Table 2に回帰結果の推定誤差を示す。地盤条件の良いIWTH22に比べ低地に位置するIWT011の推定誤差が大きいが分かる。

P波部分の時間をできる限り長い時間とした方が精度は上がるが、その分余裕時間が少なくなることやS波が混在する可能性を考慮した上で、ここではP波初動部分の7秒間を用いている。なお、前線観測点において、P波到達からS波到達までは概ね10秒程度であることを確認している¹⁷⁾。

3.3 東北地方太平洋沖地震の余震による検証

Fig.2の範囲内で発生した東北地方太平洋沖地震の余震 (2011年7月14日まで) および本震の記録を用いて、3.2節で作成した予測式の精度の検証を行う。Fig.5に検証に用いた地震の震央 (余震のみ) を示す。IWTH22の予測式と観測値との比較をFig.6に示す。予測式の推定誤差よりややばらつくものの予測式を中心として分布していることが確認できる。中でも、余震の中でも大きな振幅が観測された 2011/4/7の地震については精度良く予測できていることが確認できる。一方、本震については、Fig.6に示すように過小評価してしまう結果となっている。これは、本震が、断層面が非常に大きく破壊開始から終了までの時間がかかることに加えて、井出¹⁸⁾が示しているように破壊開始から時間とともに複雑に破壊領域が変わっていくことなどで、前線のP波立ち上がりから7秒間だけでは、強震動を放出する破壊領域からのP波を捕らえられず、過小評価してしまっているものだと考えられる。

3.4 前線観測点のS波の情報を用いた予測式の改良

3.3節の東北地方太平洋沖地震の本震を用いた検証を受け予測式の改良を行う。前線観測点のS波到達以降の最大加速度を用いて予測観測点のS波の最大加速度を予測する式を作成した。この予測式を最大値が更新されるごとに用いることで、主要な破壊領域での地震動を考慮することができるようになるため、予測の精度向上が期待できる。Fig.7に、予測式と観測値との比較を示す。本震および余震記録において精度の向上が確認できる。

一方で、この予測式を用いることは前線観測点でS波

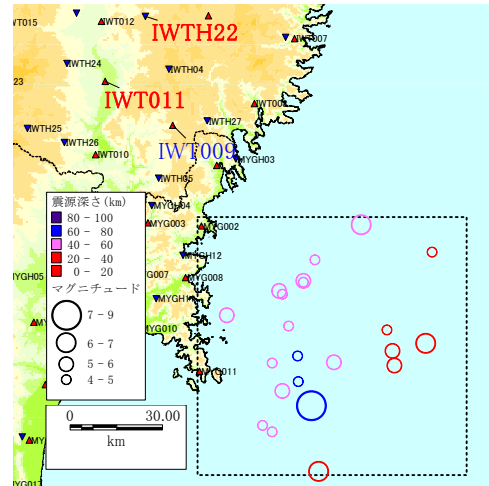


Fig. 5 検証に用いた地震の震央位置
The Position of Epicenters for Verification

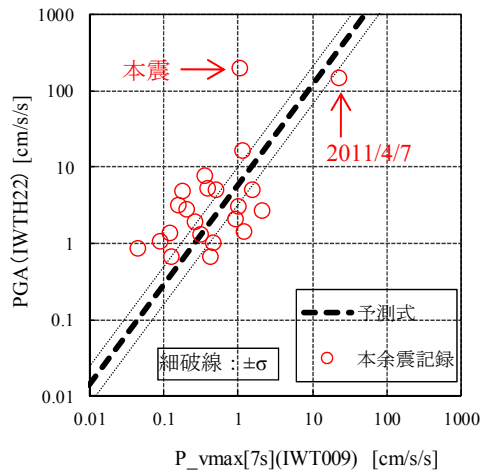


Fig. 6 予測式と観測値の比較 (IWTH22)
Comparison of Estimate Equation and Observed Values

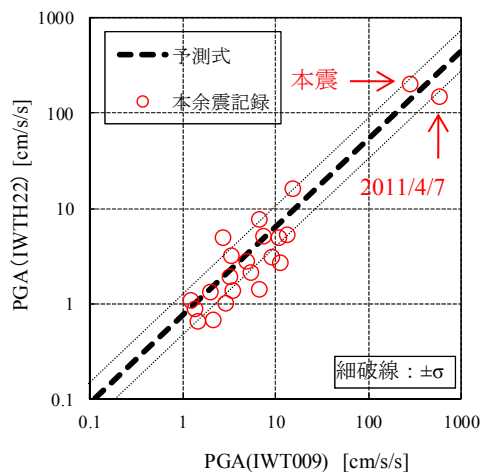


Fig. 7 改良した予測式と観測値の比較 (IWTH22)
(前線観測点のS波の情報を用いた予測式)
Comparison of Improved Estimate Equation and Observed Values (Use Max Value of S-wave on Front Site)

が到達するまで待つ、すなわち予測観測点で予測完了から主要動が到達するまでの余裕時間が少なくなることになる。そのため、P波の情報を使った予測式とS波以降の情報を用いた予測式を余裕時間および精度を勘案しながら予測対象に合わせ使い分けていく必要がある。

4. リアルタイム地震情報を用いた即時予測

4.1 強震モニタ

3章の検討において、あらかじめ予測式を作成することで、前線観測点のリアルタイムな地震情報を用いた地震動予測ができることが分かった。

その予測の基となるリアルタイムの地震観測データについては、防災科学技術研究所により『新しい「強震モニタ」の提供実験（以下、強震モニタ）』¹⁹⁾が行われており(2013/2/28実験終了)、これにより全国に設置された強震計での観測データが1秒間隔で更新され、ほぼリアルタイムに「最大加速度」や「リアルタイム震度」等の情報をインターネットから得られるようになった。この強震モニタの大きな特徴はクライアント側（表示側PC）が数値データを受信し図化できることである。したがって、前線観測点におけるこの数値データおよび前章までの方法により作成した予測式を利用することで、リアルタイムに地震動予測が可能となる。

そこで本章では、前章までとは別の地域において、前章までと同様に予測式を作成し、強震モニタの数値データを利用した即時地震動予測についての検討を行い予測式作成手法の有用性の検証を行った。まず、前線観測点の情報を用いて、予測観測点の地震動の予測を行うために、前線観測点と予測観測点の観測記録から回帰分析を用いて予測式を作成した。次に、その予測式および前線における強震モニタのデータを用いて地震動を予測し、実際の観測記録との比較を行った。

4.2 観測点と使用した観測データについて

予測観測点は、KiK-netのSITH01とし、前線観測点は

GNMH14とした。GNMH14は表層がVs=560m/sと硬質地盤で、予測観測点の北西に位置しており、両観測点の距離は約73kmである(Fig.8)。予測式を作成するために用いた地震をFig.8に示す。2011年の東北地方太平洋沖地震以前に発生し、予測観測点および前線観測点の両方で観測された地震で、M4.5以上かつ前線観測点の方が先に観測を始めているなどの条件を満たした15地震を用いることとした。前章では宮城県沖で発生する地震を予測対象としており、予測式作成のために用いた地震も宮城県沖で発生した地震に限ったが、本検討では地震発生位置は特に限定しなかった。Mは4.5~7.2、震央距離は概ね40~500kmの範囲となった。作成した予測式を用いて、地震動を予測する対象地震を2013/2/25に栃木県北部発生した地震(M6.3)とした。

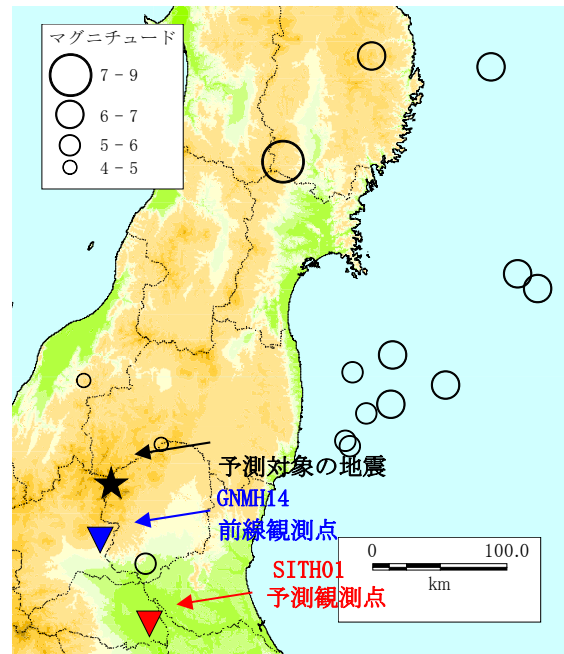


Fig. 8 利用する地震の震央および観測点
The Position of Epicenters and Observations

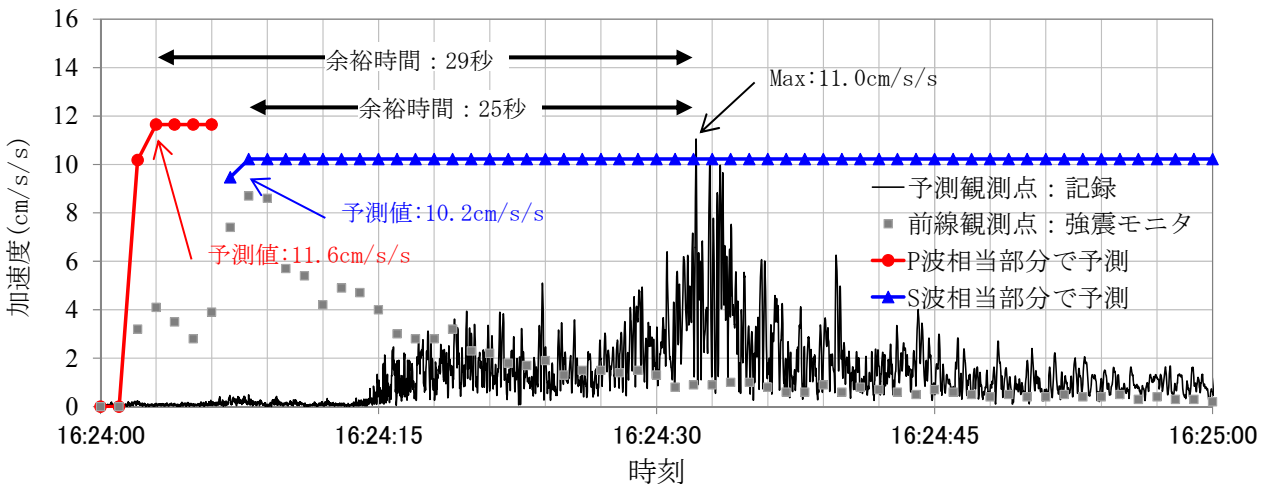


Fig. 9 予測値と観測値の比較
Comparison of Estimate Values and Observed Values

4.3 前線観測点の情報を用いた予測式の作成

予測する地震動は最大加速度とし、予測に用いる前線観測点の情報も最大加速度とした。前述した15地震について、前線観測点においてP波到達からS波到達までの間の最大値(3成分の合成)およびS波到達からの最大値(同上)の2つの指標を基準とし、それらと予測観測点でのS波到達からの最大値(同上)との関係を下式のように対数軸上の直線として回帰分析することで予測式を作成した。ここで、3成分としたのは強震モニタが提供している最大値が3成分だからである。

$$\text{Log}(S\text{波max:予測})=a \times \text{Log}(P\sim S\text{間max:前線})+b \quad (5)$$

$$\text{Log}(S\text{波max:予測})=a \times \text{Log}(S\text{波max:前線})+b \quad (6)$$

4.4 予測結果

前項で作成した予測式および2013/2/25の地震時の前線観測点の強震モニタの最大加速度のデータを用いて、予測観測点の最大加速度を推定した結果をFig.9に示す。

ここでは、前線観測点においてP波とS波とを識別できると仮定し、S波が到達するまでは(5)式を用いて予測し、S波が到達した後は(6)式を用いることとした。また、予測した値が前の時刻の予測値を下回る場合は前の予測値を保持することとした。Fig.9に示すように、予測観測点の最大値が11cm/s/sなのに対し、(5)式を用いた予測式では11.6cm/s/s、(6)式を用いた予測式では10.2cm/s/sと予測できた。また、それぞれ、観測記録で最大値が発現する29秒前および25秒前には予測値が頭打ちしていることが分かる。

以上より、前章で示したように前線観測点と予測観測点の最大加速度の回帰分析から作成した予測式を用いることで、他の地域においても精度良く地震動の大きさを予測できることを示した。また、本検討では、前線観測点のP波部分を利用した予測においても簡易予測としては十分な精度で予測できることを示した。さらに、予測式作成に際しては、同一地域で発生した地震だけを用いなくても精度よく予測できる可能性があることが分かった。

5. まとめ

宮城県沖で発生した地震を対象に、地域的な即時地震警報システムに用いるために、前線観測点のP波部分の最大加速度と予測観測点の最大加速度とを用いて回帰分析を行い予測式を作成した。次いで、東北地方太平洋沖地震の余震および本震の記録と予測結果との比較を行い、以下のことが分かった。

- 1) 予測式作成に用いた地震と同程度のMの地震については概ね予測式と観測値は整合する。
- 2) 本震は、震源位置、マグニチュードともに予測式の対象外であり、さらに破壊時間が長く破壊形態も複雑であったため、前線観測点のP波部分の情

報を用いた予測では過小評価となる。

- 3) 前線観測点のS波部分の情報を用いることで巨大地震にも対応が可能になる。

また、宮城県沖以外の地域において、予測式を作成し、その予測式と前線観測点で得られる強震モニタのデータとから、リアルタイムな地震動予測を行った。その結果、予測結果と観測値はほぼ整合し、観測最大値が発現するまで30秒弱余裕時間を稼ぐことができた。このことから、本手法は宮城県沖に限らず他の地域でも有効であることが確認できた。

以上のように、前線観測点と予測対象とする観測点の地震記録から回帰分析により予測式を作成することで高精度の予測ができることを示した。また、震源により近い前線観測点の情報を用いることで余裕時間を稼ぐことができることを示した。

謝辞

本検討は、東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター源栄正人教授にご指導いただきました。また、防災科学技術研究所KIK-net、K-NETの地震記録および強震モニタのデータを使用しました。記して、謝意を示します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部(2011)：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11nov_sanriku/sanriku_boso_3_hyoka.pdf, 2011.11
- 2) 地震調査研究推進本部(2014)：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価(第二版)について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/14apr_sagami/index.htm, 2014.04
- 3) 地震調査研究推進本部(2013)：南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm, 2013.05
- 4) 目黒公郎、藤縄幸雄、川上則明、西野哉誉：緊急地震速報導入による社会へのインパクト、緊急地震速報利活用システムに関するシンポジウム, pp.53-59, 2004.09
- 5) 吉岡献太郎：リアルタイム地震防災システムの概要、建築防災, 2006年7月号, pp.22-27, 2006.07
- 6) 気象庁：<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/joho/joho.html>, 2011
- 7) 気象庁：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, 2007.03
- 8) 堀内茂木：緊急地震速報のための即時震源・マグニチュード決定と震度推定、緊急地震速報伝達システムの開発と地震災害の軽減に関するシンポジウム,

- pp.9-17, 2005.10
- 9) 干場充之, 岩切一宏, 大竹和生: 経過時間に応じたP波マグニチュード推定の補正 —緊急地震速報への応用—, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3043-3048, 2010.11
 - 10) 阿部雅史, 神田克久, 宮村正光: 現地地震計による早期地震警報の研究 その1. 観測記録による主要動の強さの推定, 日本建築学会大会学術梗概集, B-2, pp.659-660, 2007.07
 - 11) 廣石恒二, 山本優, 内山泰生, 高木政美: 現地地震計を用いた地震動最大加速度の即時予測手法 (その1) 観測記録に基づく予測式の作成, 日本建築学会大会学術梗概集, B-2, pp.1151-1152, 2013.08
 - 12) 源栄正人, 本間誠, セルダルクユク, フランシスコアレシス: 構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第14巻, 第28号, pp.675-680, 2008.10
 - 13) 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版), http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec_miyagi/hyoka.pdf, 2005.12
 - 14) 佐藤智美・巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp.15-24, 2002.06
 - 15) 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学学会論文集, 第4巻, 第1号, pp.33-52, 2004
 - 16) Yih-Min Wu and Hiroo Kanamori: Rapid Assessment of Damage Potential of Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.95, No.3, pp.1181-1185, 2005.06
 - 17) 萩原由訓, 源栄正人, 野畑有秀: リアルタイム地震観測ネットワークを用いた地震動予測に関する研究—最大加速度の予測—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.823-824, 2010.07
 - 18) 井出哲: 東北沖地震の二面性—浅部のすべり過ぎと深部の高周波震動—, <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/12.html>
 - 19) 青井真, 中村洋光, 功刀卓, 鈴木亘, 藤原広行: 強震モニタと緊急地震速報のコラボレーション, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, p.68, 2012.10