



高精度・高速の緊急地震速報を目指して -気象庁観測網とHi-netの統合処理-

山田真澄¹⁾、溜渕功史²⁾、Stephen Wu³⁾

- 1) 正会員 京都大学防災研究所、助教 Ph.D.
e-mail : masumi@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp
2) 気象庁地震火山部 学士
e-mail : k_tamaribuchi@met.kishou.go.jp
3) カリフォルニア工科大学 Ph.D.
e-mail : stewu@caltech.edu

要 約

現在、気象庁が用いている緊急地震速報の処理には、気象庁の観測網を利用する処理と、Hi-netのデータを用いた着未着法の2つの処理系統がある。これらは独立して行われ、それぞれ計算結果を比較して緊急地震速報に使用している。本研究では、より高精度、高速の緊急地震速報を実現するため、気象庁観測網とHi-netの統合処理を検討する。我々は、Hi-net速度計に帰納的な方法で機械補正及びハイパスフィルタ処理を行い、気象庁の機械式地震計の応答と揃えた。また、Hi-net速度計が飽和する問題についても検証し、震央距離10km、深さ10kmの場合マグニチュード5.2程度まではP波が飽和せず使用可能である事を示した。Hi-netの地震計データは、適切なフィルタ処理により気象庁の地震計データと併用することが可能である。2つの観測網の統合処理によって、内陸部では平均3.6秒ほど警報発表時間が向上する。

キーワード： 緊急地震速報、気象庁、地震計の飽和、Hi-net、強震動

1. はじめに

緊急地震速報は、地震の揺れが伝わる前に地震の発生を市民に知らせ、避難行動を促すリアルタイム警報システムである。現在、気象庁が用いている緊急地震速報の処理には、気象庁の地震計を利用する処理と、防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）のデータを用いた着未着法の2つの処理系統がある。これらは独立して行われ、最終的にそれぞれの手法による震源推定結果を比較して、緊急地震速報を発表している¹⁾。

東北地方太平洋沖地震直後、地震活動が非常に活発になり、前の地震の後続波でトリガが困難になったり、複数の地震が同時に発生したりして多くの誤報が発表された^{2,3)}。2011年3月～4月の2ヶ月間に発表された一般向けの緊急地震速報71事例のうち、警報対象地域の1つでも震度2以下であった場合は47事例、そのうち警報対象地域のすべてで震度2以下であった場合は21事例に上った。その主要な原因は、複数の地震を分離できなかったためと報告されている^{4,5)}。Hi-netと気象庁の観測網のデータを統合して処理すれば、地震観測点の密度が上がり空間的分解能が高くなるため、緊急地震速報の速度・精度を向上

させることができる。

データの統合処理にあたって、これまでに大きな障壁となっていたのは地震計特性が違う事である。Hi-netは高感度速度計を使用しており、長周期側の応答が小さくなったり、大振幅で振り切れる可能性がある⁶⁾。気象庁の観測網は加速度計、速度計、広帯域地震計を備えているが、緊急地震速報に利用しているのは加速度計のデータであり、大振幅でも振り切れる可能性は少ない^{7,8)}。

そこで本研究では、緊急地震速報に利用するためにリアルタイムでも使用可能な方法で地震計特性を補正し、Hi-net速度計と気象庁観測網の加速度計から求められるマグニチュードにどれぐらいの差があるのかを検証する。さらに、統合処理を行うアルゴリズム構築に利用するために、速度計と加速度計に同じトリガ基準を適用し、期待される誤差を明らかにする。また、統合処理によってどれぐらい緊急地震速報の高速化につながるかを検討したので報告する。

2. データ

本研究では、現在気象庁の緊急地震速報システムで利用されている観測網の加速度計200点（以下、気象庁加速度計と呼ぶ）、および防災科学技術研究所が運用するHi-netの短周期速度計700点（以下、Hi-net速度計と呼ぶ）の、2011年3月9日から2011年4月30日までの53日間の連続波形記録を使用した。その期間に発生した地震のうち、震度4以上を観測した地震を対象とした。ただし、直前の大地震によって記録が乱れているデータを除き、付表に示す合計171個の地震の波形記録を利用した。解析の対象期間は、地震発生時刻の1～2分前の正分（00秒の時刻）から強震動部分を含む5分間とし、解析の対象データは、Hi-netと気象庁観測網の記録の得られている観測点のうち、震源距離の近い順に40点とする。精度の検証には気象庁の検測データと一元化震源カタログを利用した。すべての地震のカタログマグニチュードは、気象庁マグニチュード（ただし、東北地方太平洋沖地震については、変位マグニチュード8.4）を使用しており、観測記録から求めたマグニチュードは緊急地震速報に利用する全相マグニチュードを使用している^{1,9,10)}。

3. 手法

3.1 気象庁加速度波形の処理

マグニチュードを求めるために、気象庁加速度計の記録を変位に変換する。それぞれの成分ごとにハイパスフィルタ処理と時刻歴での2階積分を行い、変位に変換した後、ベクトル合成を行い3成分合成変位を算出する。フィルタ処理の際には、緊急地震速報に利用されるフィルタ¹¹⁾と同じものを利用した。このフィルタは、6秒の固有周期(T_0)と0.55の減衰定数(h)をもつ地震計（機械式1倍強震計）の特性を再現するように設計されており、加速度波形を固有周期6秒、減衰定数0.55の1質点系に入力し、応答加速度を2階積分したもの（変位）と同等の特性を持つ。時系列で*i*ステップにおける入力波形を x_i 、出力波形を y_i とすると、このフィルタは以下のように表現される。

$$y_i = G_0(x_i + a_1x_{i-1} + a_2x_{i-2}) - b_1y_{i-1} - b_2y_{i-2} \quad (1)$$

ここで、 G_0 はゲインファクタ、 a_0, a_1, b_1, b_2 はフィルタ係数であり、それぞれ以下の値を用いる。

$$\begin{aligned} G_0 &= (\Delta t / 2)^2 / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\ a_1 &= 2 \\ a_2 &= 1 \\ b_1 &= (-2 + 2\omega_0^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\ b_2 &= (1 - 2h\omega_0 + \omega_0^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $\omega_0 = \tan(\pi\Delta t / T_0)$ 、 $h=0.55$ 、 $T_0=6$ である。

3.2 Hi-net速度波形の処理

Hi-net速度計は1秒の固有周期(減衰定数0.707)を持ち、それより長周期側の入力では応答が減少する。つまり、長周期側の記録は過小評価になっている。また、振幅が大きくなるとデータが飽和する特性もある¹²⁾。そこで、ここでは帰納的な方法で地震計特性の補正とフィルタリングを行い、この処理が振幅にどのような影響を与えるかの評価を行った。

まず、Hi-net速度波形記録にハイパスフィルタを適用し、時刻歴で一階積分した後、地震計特性の補正を行った。しかし、気象庁の加速度波形記録と同じハイパスフィルタを用いた場合、地震計特性の補正によって長周期側のノイズが大きく持ち上げられるために、長周期成分が大きく乱れた波形となることがあった(図1参照)。リアルタイム処理でこのような乱れを防ぐため、最初に別のハイパスフィルタ処理をして長周期ノイズを除去した。このハイパスフィルタ処理には固有周期12秒、減衰定数0.707の1質点系応答と同じ特性をもつフィルタ(a)を適用した。その後、(b)加速度と同じハイパスフィルタの適用+一階積分、および(c)地震計特性の補正という3つの帰納的処理を行った。

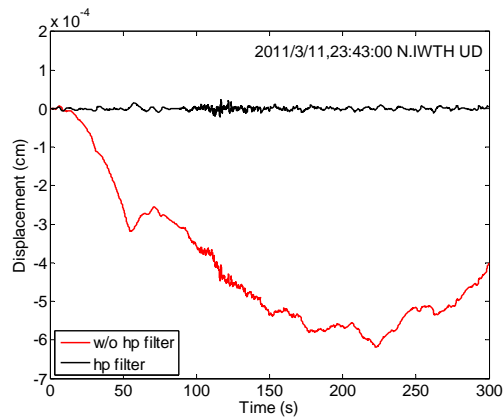


図1 ハイパスフィルタを1回だけ適用したHi-netの波形(赤線)と2回適用したHi-netの波形(黒線)

(a) 周期12秒のハイパスフィルタ

固有周期12秒、減衰定数0.707の1質点系応答と同じ特性をもつハイパスフィルタを適用する。このフィルタは(1)式に以下のパラメータを使用することにより表現される。

$$\begin{aligned}
 G_0 &= 1 / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\
 a_1 &= -2 \\
 a_2 &= 1 \\
 b_1 &= (-2 + 2\omega_0^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\
 b_2 &= (1 - 2h\omega_0 + \omega^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2)
 \end{aligned} \tag{3}$$

ただし、 $\omega_0 = \tan(\pi\Delta t / T_0)$ 、 $h=0.707$ 、 $T_0=12$ である。

(b) ハイパスフィルタ+一階積分

固有周期6秒、減衰定数0.55の1質点系応答と同じ特性をもつハイパスフィルタを適用し、応答を一階積分して変位に変換する。このフィルタは(1)式に以下のパラメータを使用することにより表現される。

$$\begin{aligned}
 G_0 &= (\Delta t / 2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\
 a_1 &= 0 \\
 a_2 &= -1 \\
 b_1 &= (-2 + 2\omega_0^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2) \\
 b_2 &= (1 - 2h\omega_0 + \omega^2) / (1 + 2h\omega_0 + \omega_0^2)
 \end{aligned} \tag{4}$$

ただし、 $\omega_0 = \tan(\pi\Delta t / T_0)$ 、 $h=0.55$ 、 $T_0=6$ である。

(c) 地震計特性の補正

地震計特性の補正には、Zhu¹³⁾の手法を利用し、リカーシブフィルタによる補正を行った。このフィルタは(1)式に以下のパラメータを使用することにより表現される。

$$\begin{aligned}
 G_0 &= 1 + 2h\omega_0\Delta t + \omega_0^2\Delta t^2 \\
 a_1 &= (-2 - 2h\omega_0\Delta t) / (1 + 2h\omega_0\Delta t + \omega_0^2\Delta t^2) \\
 a_2 &= 1 / (1 + 2h\omega_0\Delta t + \omega_0^2\Delta t^2) \\
 b_1 &= 2 \\
 b_2 &= -1
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ただし、 $\omega_0 = 2\pi / T_0$ 、 $h=0.707$ 、 $T_0=1$ である。

Hi-netの速度波形記録に適用したフィルタ(式(3)+(4))と、気象庁の加速度波形記録に適用したフィルタ特性の違いを図2に示す。周期10秒以上では両者の違いが大きくなるが、それ以外は概ね一致している。このフィルタ特性の違いの影響については4.2節で考察する。

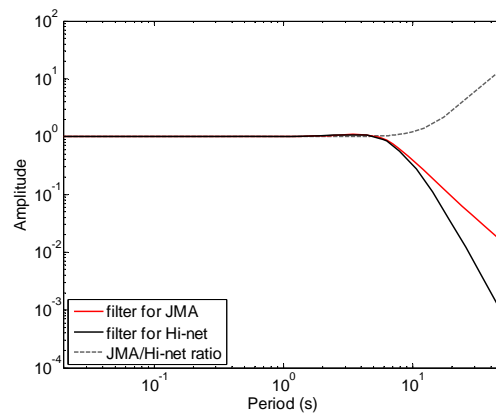


図2 気象庁加速度記録とHi-net速度記録に適用したフィルタ特性の違い。灰色の点線はフィルタの振幅比を示す

3.3 トリガ情報の取得

緊急地震速報を発表するためには、精度のよいトリガ情報と振幅情報が必要である。トリガ時刻を検知する手法は様々な手法が提案されている¹⁴⁾が、ここでは簡便のためAllen¹⁵⁾の手法を応用した手法を用いた。

(a) 加速度波形 (Hi-netの場合は一階微分波形) を入力として、Allen¹⁵⁾のcharacteristic function ($E(t) = f(t)^2 + (c_2 f'(t))^2$) のSTA/LTA比を計算する。ただし、

$f(t)$ = 加速度波形

$c_1=0.955682$ (DCオフセットを取り除くフィルタ係数) ,

$c_2=0.02$ (加速度と加速度の微分の割合) ,

$c_3=0.021934$ (STAを計算するためのフィルタ係数) ,

$c_4=0.000227$ (LTAを計算するためのフィルタ係数) ,

$c_5=15.0$ (トリガ基準)

とする。

(b) トリガ条件は、STA/LTA比が c_5 を超えることとする。 c_5 を超えた場合は地震波を検知したと判断し、その時刻から3秒前まで遡り、STA/LTA比が5を越えた時点をもP波の検出時刻とする。3秒間遡っても5以下の時間が見つからない時は、3秒前の時刻をP波の検出時刻とする。

(c) トリガ後10秒間は再トリガしない。

(d) トリガ後10秒経過した後にトリガ条件を満たした場合は、以下の条件を満たした場合にトリガする。

STA/LTA比が直近のトリガから10秒間のcharacteristic functionの最大値を超えた場合、あるいはSTA/LTA比が一旦1以下に下がった後急激に増加（1秒間に1から30以上まで）した場合。

(e) 最後のトリガから60秒経過し、かつSTA/LTA比が5以下になった場合、再トリガが可能となる。

以上のパラメータは気象庁のトリガ処理に使われている値を参考にし、試行錯誤によって求めた。Allenの手法は個別の地震記録のトリガ検出を対象としており、本研究のデータセットに適用すると多くのノイズが含まれていた。従って、変位振幅の下限値を加えて検知条件を厳しくするとともに、複数観測点のトリガを条件に加えてノイズによるイベント検出を取り除いた。

(f) 変位が10秒以内に50 μ mを超えたものを有効トリガとする。

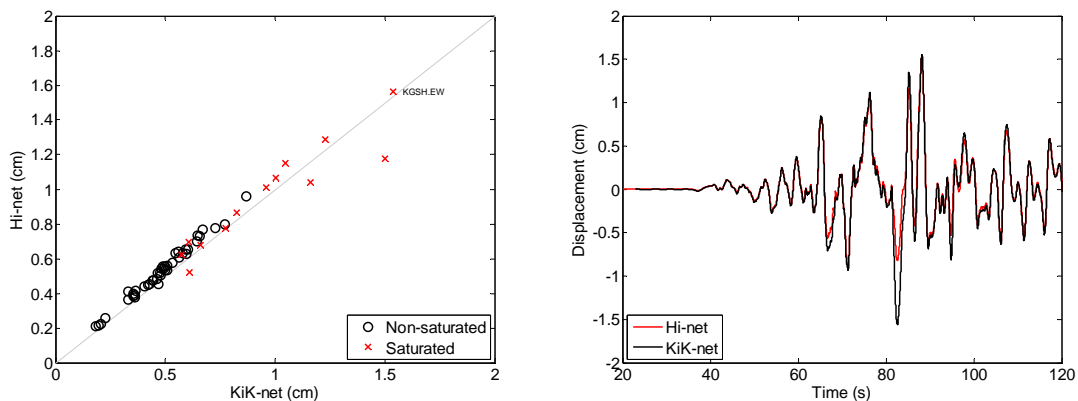
(g) 最初にトリガした観測点を第一トリガ観測点とする。第一トリガ観測点に近い5観測点のうち、2点がトリガした場合は地震と判定する。同一地震と判定する時間差は、(観測点間距離/P波速度)以下とする。最も近い観測点が120km以上の場合は、島嶼部の観測点と仮定し、第一トリガ観測点に最も近い1観測点が観測点間距離/P波速度の時間差以内でトリガした場合は地震と判定する。

4. 結果

4.1 Hi-net速度計の飽和の影響

Hi-net速度計は、広ダイナミックレンジのA/D変換器を採用しており、観測波形が一定値で頭打ちになるような明らかな飽和状態を示していなくても、振り子の振動の限界値に達している可能性があり、正確に飽和状態を識別することは困難である¹²⁾。汐見ら¹²⁾は、Hi-netのセンサーの飽和状態を簡易的に判別するために積分波形の振幅を利用することを提案しており、積分波形の最大振幅が水平動成分の場合0.09cm以上、上下動成分の場合0.15cm以上の波形については、異常である可能性が高いとしている。ここでは、汐見らの判別式を利用し、飽和した波形と飽和していない波形の振幅値の比較を行った。

Hi-net観測点には、通常KiK-net観測点が併設されており、加速度計の強震記録も得られている。ここでは、地震活動が比較的低く処理が容易な2011年3月9日に起こったM7.2の地震について、両方の観測点で共通して記録が得られていて、震源距離の近い順に28観測点を対象として、波形の比較を行った。KiK-netの加速度記録には、気象庁加速度計に使用したフィルタと同じ処理を行った。Hi-net観測点には、3.2節のフィルタ(b)と(c)を適用し、同じフィルタ特性になるようにした。図3(a)に水平2方向の各成分の振幅値の比較を示す。このうち赤印で示した点は、波形を目で見て精査することにより飽和が確認されたデータである。飽和した記録のうち、振幅が顕著に過小評価となったのは3点程度であった。図3(b)は観測点KGSHのEW成分の変位波形の比較である。66秒と82秒の部分は、Hi-net地震計が飽和した影響を受けて過小評価になっているが、飽和した部分以外は概ね長周期成分を精度よく復元できている¹⁶⁾。



(a) 最大振幅値

(b) KGSH観測点EW成分の変位波形

図3 Hi-net速度記録とKiK-net加速度記録の比較

次に、すべての地震記録について、飽和しているものと飽和していないもののグループに分け、推定される全相マグニチュード（以下、マグニチュードと呼ぶ）の比較を行った。飽和の判定には水平2成分を利用し、速度記録を一階積分したものが2成分とも0.09cm以下に収まっているものは飽和していない観測記録、水平成分のどちらかが0.12cmを超えたものを飽和している観測記録とした。上下成分に関しては、水平成分よりも飽和までに余裕があるのでここでは検討から省いた。変位マグニチュードの距離減衰式によると、震央距離10km、深さ10kmの地震の場合、最大変位が0.09cmとなるのは、P波マグニチュードで5.2、全相マグニチュードで4.6に相当する。深さ10kmにおける変位波形が0.09cmに達する震央距離とマグニチュードの関係を図4に示す。

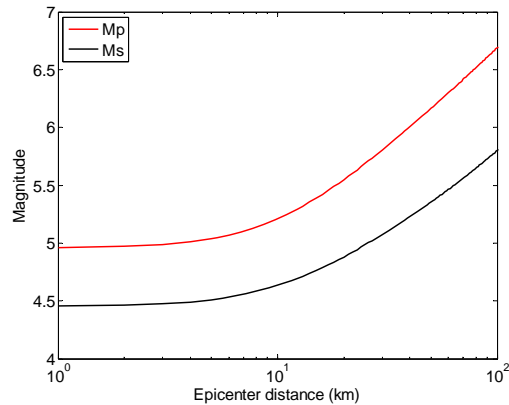
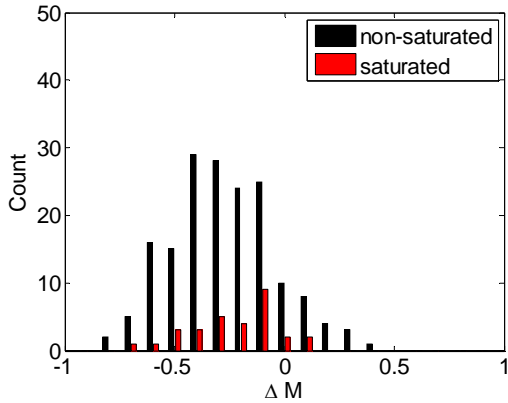


図4 変位波形が0.09cmとなるマグニチュード(P波・全相)と震源距離の関係(深さ10km)

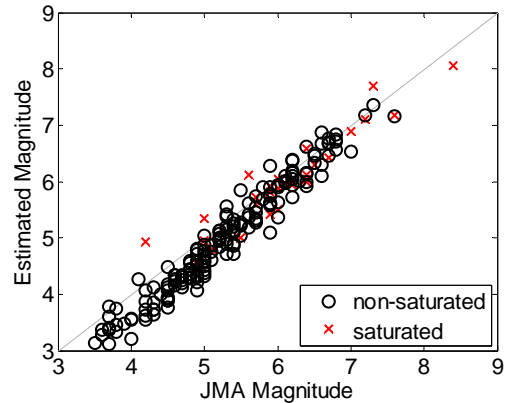
各地震記録のP波到達時刻からP-S時間の4倍の期間を対象として最大変位振幅を算出した。それぞれの最大変位振幅を距離減衰式¹⁷⁾に代入し、マグニチュードを求めた。さらに、各地震において、各グループのマグニチュードの中央値をその地震のマグニチュードの代表値とした。飽和していない記録から求めたマグニチュード（以下、通常マグニチュードと呼ぶ）は東北地方太平洋沖地震を除いた170地震で得られたが、飽和しているマグニチュード（以下、飽和マグニチュードと呼ぶ）が得られたのは30地震のみである。

2つのグループから得られたマグニチュードと気象庁マグニチュードの差分を図5(a)に示す。通常マグニチュードは、飽和マグニチュードと比較して、ほとんど差は現れなかった。飽和マグニチュードは過小評価になっていないばかりか、実際には平均値が0.04程度大きくなっていった。これは、図5(b)に見られるように、一部の小さい地震で飽和マグニチュードが過度に大きくなったためである。M4~5程度の小さい地震で振り切れたのは、震源直上の観測点が近地項の影響で大振幅を観測したためであり、この近地項は距離減衰式と比べて大きくなる傾向がある¹⁸⁾。つまり、距離減衰式の表現の限界によるものであり、飽和による影響とは異なる。なお、通常マグニチュードが小さい地震で気象庁マグニチュードよりも過小評価になっているのは、気象庁マグニチュードが小さい地震で速度マグニチュードを採用しているためである。

以上のように、飽和した地震記録は、振り切れた部分に関しては過小評価となるが、振り切れてない部分に関しては使用可能であり、変位振幅の下限値を求める事ができる。また、振幅の過小評価についても、距離減衰式のばらつき⁹⁾に比べると十分に小さい。従って、以下の解析では飽和した記録を区別せずに解析を行う。



(a) 気象庁マグニチュードとの差分のヒストグラム

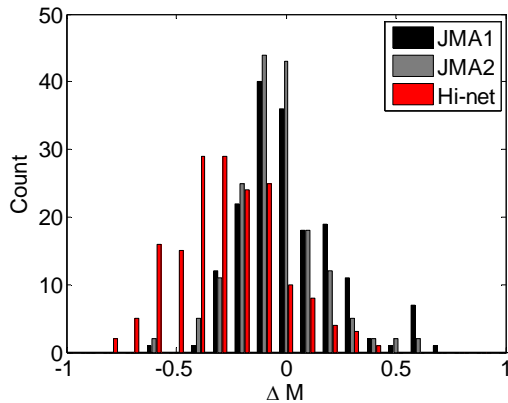


(b) 気象庁マグニチュードとの比較

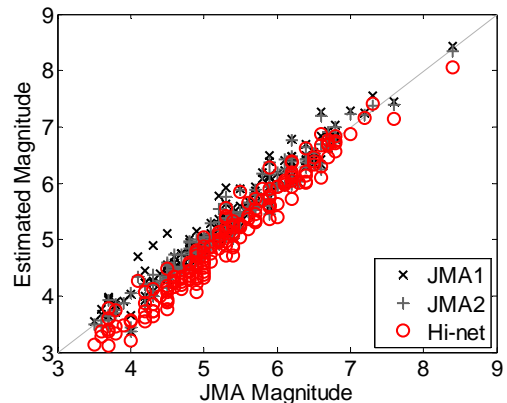
図5 Hi-netの飽和した記録と、飽和していない記録から求めたマグニチュードの比較

4.2 マグニチュード計算の精度

3章で補正したHi-net速度記録と気象庁加速度記録から、地震ごとにマグニチュードを算出し比較を行った。得られたマグニチュードと気象庁マグニチュードの差分を図6に示す。加速度計から求めたマグニチュード（黒色、JMA1）の差分の平均値は0.01、標準偏差は0.22、速度計から求めたマグニチュード（赤色）の差分の平均値は-0.27、標準偏差は0.23であった。加速度計から求めたマグニチュードは、元々の気象庁マグニチュードを求めたものと同じ観測網なので残差はほぼない。速度計から求めたマグニチュードは、気象庁マグニチュードよりも過小評価となった。



(a) 気象庁マグニチュードとの差分のヒストグラム



(b) 気象庁マグニチュードとの比較

図6 気象庁加速度計とHi-net速度計から求めたマグニチュードの比較

この過小評価の原因を調べるために、全く同じ特性のフィルタを適用して比較を行った。具体的には、気象庁加速度計から求めた変位記録に、速度計に適用したのと同じ3.2節の(a)のフィルタを適用し、マグニチュードを再計算した。再計算後の加速度計から求めたマグニチュード（灰色、JMA2）の差分の平均値は-0.04、標準偏差は0.19である。平均値はわずかに減少するが、速度計から求めたマグニチュードの差分とは大きく異なっている。この違いは、フィルタの影響ではなく、表層地盤増幅の違いに起因すると考えられる。気象庁の地震計は表層地盤の上に設置されているのに対し、Hi-netの地震計は100m以上の深度のボアホール内に設置されている。ボアホールの深さは観測点によって異なるが、概ね工学的基盤に達するまで掘削されている。つまり、地震動が基盤から地表面に到達する間の増幅が、両者の違いに反映されていると考えられる。なお、距離減衰式によると、気象庁加速度記録とHi-net速度記録から求めたマグニチュードの差分0.28は、変位振幅で1.8倍相当に換算される。

Hi-netと気象庁観測点の表層地盤増幅の違いは、速度マグニチュードの式には反映されている。速度

マグニチュードには地震計設置条件補正項があり、地表の場合は0、Hi-netの場合は0.43が与えられている。Hi-net観測点からマグニチュードを推定するためには、同じように距離減衰式の補正項としてマグニチュードの差分を与えることが望ましい。

4.3 トリガの精度

3.3節の手法で波形記録を処理し、トリガを検出した。地震と考えられる有効トリガは3817個であった。このトリガの時刻精度を確認するために、気象庁の検測データと共通して得られている1893個の観測記録について比較を行った。気象庁の検測データは、地震発生後に人間が1つずつ目で確認してトリガ時刻を決めているため、自動処理と比較してよい精度を持っていると考えられる。ここでは、気象庁の検測データを真値と仮定して、残差を計算した。図7に残差のヒストグラムを示す。92%のデータが、残差1秒以下に収まっている。標準偏差は1.83秒であった。残差のヒストグラムが正側に偏っているのは、ゆっくりと立ち上がる地震において、自動処理による相の検出が遅れているためである。ゆっくりと立ち上がる地震ではトリガ基準値を超えるのが遅れがちであり、気象庁の検測時間よりも遅くなる傾向がある。また、非常に大きな残差をもつデータが一部存在するが、波形を精査した結果、S波や連続して発生した別の地震を検出していたことが原因であることが分かった。本研究で検討した手法では、非常に簡易で一般的な手法であるものの、92%のデータで1秒以下の誤差という精度を示すことができた。

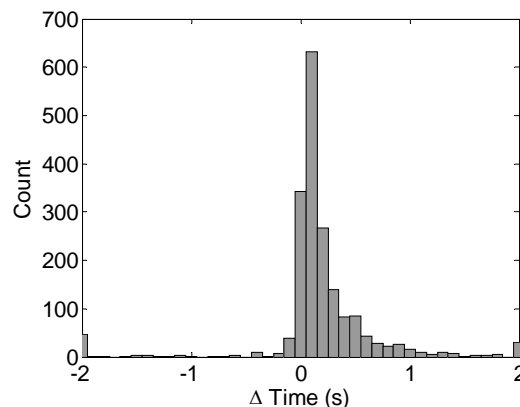


図7 トリガ時刻の差（本研究での検測時間－気象庁検測時間）

4.4 警報発表時間の改善

緊急地震速報は、1秒でも早く警報を発表することが重要である。Hi-netと気象庁観測網を統合して処理することにより、どの程度警報発表時間を短縮できるか比較した。検討には、図8に示した日本本土と周辺海域を対象とする。この領域を0.1°刻みのグリッドで区切り、それぞれの格子点上の深さ10kmにおいて地震が発生したとして、震源から最も近い観測点までのP波伝播時間（最短P波伝播時間）を調べた。格子点数は20062点である。P波の伝播時間の計算にはIASP91速度構造モデルを利用した。

気象庁観測網、Hi-net、気象庁観測網とHi-net、の3種類の観測網を用いた時の最短P波伝播時間の分布を図9に示す。Hi-netの観測網は、沖縄などの島嶼部にほとんどないことから、海域での検知能力が悪くP波検知までに50秒以上かかる震源域が存在する。一方、内陸では密度が高いことから、3秒以内にP波を検知できる地域は気象庁観測網の2倍以上である。気象庁観測網とHi-netを統合すれば、両者の長所を併せ持つことができる。図8に各地域で地震が発生した時の気象庁観測網と統合観測網の最短P波伝播時間の差を示す。差が大きい地域ほど、Hi-net観測点を統合する価値が大きくなる。海域ではほとんど統合効果が見られなかったが、内陸部では気象庁観測点周辺を除くほとんどの地域で最短P波伝播時間が短くなった。統合処理を行う事によって、内陸部では平均1.6秒程度早く予報を出すことが可能となる。一般向けの緊急地震速報（警報）は2点以上のトリガが得られると出されるため、2点目の観測点がトリガする時間も重要である。気象庁観測網のみと比較して、観測網の統合により、震源から2番目に近い観測点までのP波伝播時間も平均3.6秒短くなった。

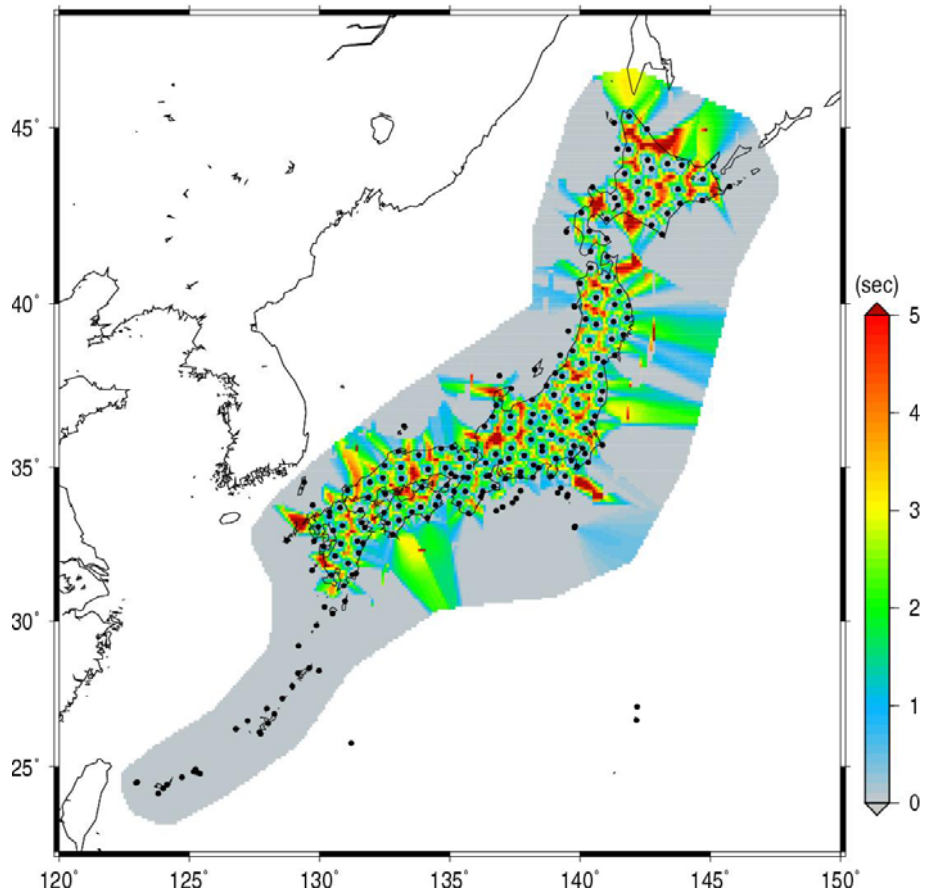
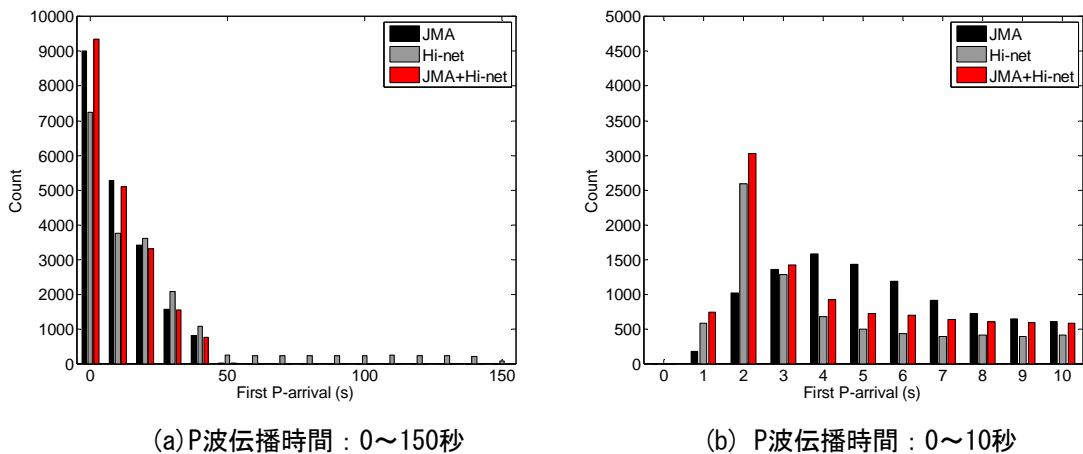


図8 各地域で地震が発生した時の気象庁観測網と統合観測網の最短P波伝播時間の差（秒）。黒丸は気象庁の観測点



(a) P波伝播時間：0～150秒

(b) P波伝播時間：0～10秒

図9 3種類の観測網から求めた最短P波伝播時間の比較

5. まとめ

本研究では、より高精度、高速の緊急地震速報を実現するため、気象庁観測網とHi-netの統合処理を検討した。リアルタイムでも使用可能な方法で地震計特性を補正し、Hi-net速度計と気象庁観測網の加速度計から求められるマグニチュードにどれぐらいの差があるのかを検証した。

気象庁観測網とHi-netを統合処理するにあたって、大きな懸念であった地震計特性の違いに関しては、

適切なフィルタ処理をすることによりほぼ同等の特性に補正することが可能である。また、Hi-net速度計が飽和する問題についても検証し、震央距離10km、深さ10kmの場合マグニチュード5.2程度まではP波が飽和せず使用可能である事を示した。それ以上の地震動に対しては飽和の可能性があるが、変位振幅から求めたマグニチュードの誤差はそれほど大きくないため、他の観測網の記録が得られていない時には実用上有効な情報を含んでいると言える。

統合処理を行うアルゴリズム構築に利用するために、速度計と加速度計にAllen¹⁵⁾の手法を応用したトリガ基準を適用し、地震記録のトリガ検知を行った。開発した手法は、気象庁の検測値と比較して、92%のデータで1秒以下の誤差という精度を示した。

本論で示したように、適切な処理を行えばHi-netの地震計データもJMAの地震計データと併用することが可能である。Hi-netの地震計は気象庁の2倍以上の密度があり、地震の早期検知のために極めて重要な情報を含んでいる。地震発生直後の情報が少ない時には、Hi-netの地震計の記録もマグニチュード推定に利用し、時間が経過してデータが集まってきた時には、飽和の可能性がない気象庁のデータからマグニチュードを推定するのが現実的であろう。

なお、将来的にはKiK-netのリアルタイム化および緊急地震速報への利用が検討されている。KiK-netとHi-netの地震計はほぼ同じ場所に置かれているので、本研究で指摘した、警報発表時間の検討結果はKiK-netにも適用可能である。

謝 辞

過去の震源分布及び処理結果の比較には、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、独立行政法人海洋研究開発機構及び気象庁の地震波形を気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した一元化震源を使用しました。図の作成にはWessel and Smith¹⁹⁾のGeneric Mapping Toolを使用しました。本研究は、最先端・次世代研究開発支援プログラムの助成を受けています。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 溜淵功史, 山田真澄, S. Wu: 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, 地震 2 輯, 第 67 巻 2 号, 2014 (印刷中) .
- 2) Sagiya, T., H. Kanamori, Y. Yagi, M. Yamada, J. Mori: Rebuilding seismology, Nature, Vol.473, 2011, pp. 146-148.
- 3) Hoshiya, M., K. Iwakiri, N. Hayashimoto, T. Shimoyama, K. Hirano, Y. Yamada, Y. Ishigaki, H. Kikuta: Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0)-Earthquake Early Warning and observed seismic intensity, Earth Planets and Space, Vol.63, No.7, 2011, pp. 547.
- 4) 気象庁: 緊急地震速報評価・改善検討会 (第 4 回) , <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eew-hyoka/04/index.html>, 2013, (参照 2014 年 5 月).
- 5) 気象庁: 緊急地震速報の発表状況, http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nc/pub_hist/index.html, 2013, (参照 2014 年 5 月).
- 6) 汐見勝彦, 小原一成, 笠原慶司: Hi-net 観測波形の特性—KiK-net 強震波形との比較—, 日本地球惑星科学連合予稿集, Vol.Ss-P005, 2001.
- 7) 原田智史: 多機能型地震観測装置の概要, 験震時報, Vol.70, No.1, 2007, pp.73-81.
- 8) 気象庁: 緊急地震速報のしくみ, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nc/shikumi/shikumi.html>, 2013, (参照 2014 年 5 月).
- 9) 気象庁: 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会 (第 2 回) , <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eew-hyoka/t02/index.html>, 2010, (参照 2014 年 5 月).
- 10) 気象庁: 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会 (第 4 回) , <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eew-hyoka/t04/index.html>, 2012, (参照 2014 年 5 月).
- 11) 勝間田明男: 機械式地震計の周波数特性を持つ再帰型デジタルフィルター 験震時報, Vol.71, 2008,

pp. 1-4.

- 12) 汐見勝彦, 小原一成, 笠原敬司: 防災科研 Hi-net 地震計の飽和とその簡易判定, 地震 2 輯, Vol.57, No.4, 2005, pp. 451-461.
- 13) Zhu, L.: Recovering permanent displacements from seismic records of the June 9, 1994 Bolivia deep earthquake, Geophysical Research Letters, Vol.30, No.14, 2003, doi:10.1029/2003GL017302.
- 14) Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kamimura, Y. Fujinawa: An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.2, 2005, pp.708-718.
- 15) Allen, R.: Automatic earthquake recognition and timing from single traces, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.68, No.5, 1978, pp.1521-1532.
- 16) Maeda, T., K. Obara, T. Furumura, T. Saito: Interference of long-period seismic wavefield observed by the dense Hi-net array in Japan, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.116, No.B10, 2011, B10303.
- 17) Kamigaichi, O.: JMA earthquake early warning, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.4, No.3, 2004, pp.134-137.
- 18) Aki, K, P Richards: Quantitative seismology: University Science Books, 2009.
- 19) Wessel, P., W.H.F. Smith: Free software helps map and display data, Eos, Vol.72, No.441, 1991, pp.445-446.

(受理 : 2014年4月1日)

(掲載決定 : 2014年6月3日)

Faster and More Accurate Earthquake Early Warning System

- Combination of Velocity and Acceleration-type seismometers -

YAMADA Masumi ¹⁾, TAMARIBUCHI Koji ²⁾ and WU Stephen ³⁾

1) Member, Assistant Professor, DPRI, Kyoto University, Ph.D.

2) Japan Meteorological Agency, B.S.

3) California Institute of Technology, Ph.D.

ABSTRACT

Current Japanese earthquake early warning system uses data from two seismic networks: Japan Meteorological Agency (JMA) accelerometer network and high sensitive velocity-type seismometer network (Hi-net). These two datasets are processed in the different scheme and the results are merged to issue a warning. Combining these two datasets and processing in the same framework should improve the accuracy and speed of the warning. In this study, we tried to develop a method to use these two dataset in the same framework. We applied time-domain recursive filters to correct instrumental response of Hi-net sensors and adjust them to the response of mechanical seismometers. We evaluated the saturation of the Hi-net data with the data in 2 month after the Tohoku earthquake, and found the variation due to the saturation was smaller than the variation of attenuation relationship. Therefore, the Hi-net data includes important information when other data are not available yet. Speed of the warning improved by 3.6 seconds in the average for the inland earthquake by combining these two networks.

Keywords: Earthquake early warning, Japan Meteorological Agency, Saturation of seismograms, Hi-net, Strong motion

付表 使用した地震のリスト。左から通し番号、地震発生の日付、時刻、緯度(度)、経度(度)、深さ(km)、気象庁マグニチュード、最大震度(震度5弱、5強、6弱、6強は5、5.5、6、6.5に対応する)

No.	Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	SI
1	2011/3/9	11:45:13	38.3285	143.2798	8.3	7.3	5
2	2011/3/10	6:24:00	38.1722	143.0448	9.3	6.8	4
3	2011/3/11	14:46:18	38.1035	142.861	23.7	9	7
4	2011/3/11	15:15:34	36.1208	141.2525	42.7	7.6	6.5
5	2011/3/11	15:57:13	35.8187	141.1817	27.5	6.2	4
6	2011/3/11	16:14:57	36.5572	142.0413	0.3	6.8	4
7	2011/3/11	16:29:00	39.0225	142.3112	17.0	6.6	5.5
8	2011/3/11	17:12:06	36.5488	141.3863	32.5	6.6	4
9	2011/3/11	17:19:17	36.1567	141.7157	35.5	6.8	4
10	2011/3/11	17:31:08	37.4675	141.3772	30.7	5.9	4
11	2011/3/11	17:35:22	36.0688	141.1332	37.3	5.2	4
12	2011/3/11	17:40:55	37.424	141.2732	29.9	6	5.5
13	2011/3/11	17:58:08	36.8142	139.462	3.1	4.1	4
14	2011/3/11	18:04:14	36.5507	140.956	16.5	5.3	4
15	2011/3/11	18:19:53	36.5622	140.954	15.3	5	4
16	2011/3/11	19:10:40	39.3342	142.1525	43.8	6.2	4
17	2011/3/11	19:35:37	37.0702	141.3428	49.1	5.1	4
18	2011/3/11	19:58:04	39.017	142.3667	32.2	4.9	4
19	2011/3/11	20:00:53	37.7225	141.73	46.1	5.5	4
20	2011/3/11	20:21:00	35.7948	141.2	38.6	5.6	4
21	2011/3/11	20:31:07	38.1818	140.4895	8.6	5.2	4
22	2011/3/11	20:36:40	39.2302	142.5787	23.6	6.7	5
23	2011/3/11	20:57:14	39.2723	142.3112	28.7	5.3	4
24	2011/3/11	21:13:03	37.2252	142.218	0.3	6.2	4
25	2011/3/11	21:15:42	39.125	142.4053	23.4	5.9	4
26	2011/3/11	21:21:22	37.4822	141.3003	23.2	4.9	4
27	2011/3/11	22:33:31	37.2588	141.0858	33.8	4.5	4
28	2011/3/11	22:47:41	36.9325	141.111	50.2	4.7	4
29	2011/3/11	23:00:37	36.148	140.8792	43.4	5.4	4
30	2011/3/11	23:44:09	36.6453	140.9788	47.3	4.9	4
31	2011/3/12	0:13:12	36.0537	142.0015	22.8	6.7	4
32	2011/3/12	0:24:40	36.8048	139.3113	6.3	4.5	4
33	2011/3/12	2:30:46	37.4118	141.3098	18.3	5	4
34	2011/3/12	2:56:47	37.4758	141.317	29.6	4.4	4
35	2011/3/12	3:44:08	36.8707	141.1545	47.3	5	4
36	2011/3/12	3:59:16	36.986	138.5978	8.4	6.7	6.5
37	2011/3/12	4:08:41	36.2863	140.948	34.7	5.2	4
38	2011/3/12	4:12:45	37.0323	138.6723	12.1	4.3	4
39	2011/3/12	4:24:28	35.7592	141.041	35.1	5.7	4
40	2011/3/12	4:31:56	36.9488	138.5725	0.8	5.9	6
41	2011/3/12	4:44:28	36.9423	138.5972	0.0	4.2	4
42	2011/3/12	4:45:22	37.49	141.666	25.7	5.2	4
43	2011/3/12	4:46:46	40.3942	139.089	3.9	6.4	4
44	2011/3/12	5:42:20	36.9732	138.5905	3.8	5.3	6
45	2011/3/12	6:11:07	36.9408	138.5288	7.0	3.7	4
46	2011/3/12	6:34:22	37.4518	141.3088	22.6	4.8	4
47	2011/3/12	7:01:47	36.939	138.6058	4.0	3.9	4
48	2011/3/12	7:14:05	36.9943	138.6393	9.9	4.2	4
49	2011/3/12	7:18:06	36.969	138.613	7.3	3.8	4
50	2011/3/12	8:11:52	37.1803	140.9737	10.2	4.6	4

No.	Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	SI
51	2011/3/12	8:32:24	36.9345	138.5572	5.1	3.7	4
52	2011/3/12	10:13:56	37.3227	141.2223	30.1	4.9	4
53	2011/3/12	10:42:35	36.9773	138.598	6.3	3.7	4
54	2011/3/12	10:47:13	37.476	142.754	0.0	6.8	4
55	2011/3/12	13:06:09	38.7358	142.1667	0.4	5.3	4
56	2011/3/12	14:55:13	36.9488	138.5598	6.5	4.2	4
57	2011/3/12	15:18:40	39.1582	142.7047	0.4	5.5	4
58	2011/3/12	19:08:02	36.9588	138.5507	5.1	3.6	4
59	2011/3/12	19:53:28	38.998	142.5377	20.5	5.8	4
60	2011/3/12	22:15:42	37.1975	141.4263	40.1	6.2	5
61	2011/3/12	23:34:59	36.9677	138.5682	5.3	3.7	5
62	2011/3/12	23:43:06	39.4703	142.6955	9.3	5.9	4
63	2011/3/13	3:09:14	37.3933	141.2978	28.4	4.5	4
64	2011/3/13	8:24:47	38.012	141.9483	15.2	6.2	5
65	2011/3/13	10:26:02	35.8282	141.9723	11.2	6.6	4
66	2011/3/13	12:32:19	37.0143	138.6693	9.0	3.8	4
67	2011/3/13	23:27:55	36.9672	138.5702	6.3	3.6	4
68	2011/3/14	10:02:39	36.4583	141.1253	31.8	6.2	5
69	2011/3/14	15:12:34	37.8047	142.5877	0.1	6.5	4
70	2011/3/14	15:17:48	37.7243	142.4318	0.0	5.3	4
71	2011/3/14	15:38:52	36.9325	138.5983	4.4	3.5	4
72	2011/3/14	15:52:23	36.955	141.12	51.8	5.2	4
73	2011/3/15	22:27:54	37.5992	142.2985	10.0	6.2	4
74	2011/3/15	22:31:46	35.3095	138.7145	14.3	6.4	6.5
75	2011/3/15	22:40:10	35.3517	138.7278	10.4	4.2	4
76	2011/3/16	3:33:28	35.9787	137.3083	7.0	4	4
77	2011/3/16	12:52:03	35.837	140.9065	10.0	6.1	5
78	2011/3/16	13:14:30	37.5345	141.581	25.3	5.6	4
79	2011/3/16	22:39:03	35.9167	140.44	53.4	5.4	4
80	2011/3/16	23:46:10	38.5377	141.802	54.1	5.3	4
81	2011/3/17	13:13:57	40.1263	142.4115	31.1	5.9	4
82	2011/3/17	21:32:02	35.6302	140.9785	27.9	5.7	4
83	2011/3/17	21:54:54	36.7377	141.3093	47.0	5.7	4
84	2011/3/18	17:01:34	35.8217	141.112	34.6	5.4	4
85	2011/3/19	8:33:00	39.1853	142.421	36.7	5.7	4
86	2011/3/19	18:56:48	36.7837	140.5715	5.4	6.1	5.5
87	2011/3/20	10:30:46	36.9392	141.1773	29.3	5.5	4
88	2011/3/20	21:03:48	39.3443	142.0483	47.8	5.9	4
89	2011/3/21	4:54:20	37.3082	141.1238	29.0	4.6	4
90	2011/3/22	12:38:35	35.2638	141.2373	37.0	5.9	4
91	2011/3/22	16:18:41	37.086	144.248	0.3	6.7	4
92	2011/3/22	18:19:05	37.3158	141.9103	43.0	6.4	4
93	2011/3/22	18:44:25	39.9193	143.661	0.4	6.5	4
94	2011/3/23	0:49:27	39.2227	142.3998	33.7	5.2	4
95	2011/3/23	7:12:29	37.0848	140.7878	7.6	6	5.5
96	2011/3/23	7:34:56	37.0982	140.7958	6.7	5.5	5.5
97	2011/3/23	7:36:31	37.0633	140.7707	7.3	5.8	5
98	2011/3/23	18:55:20	37.111	140.7607	9.0	4.7	5.5
99	2011/3/24	5:32:56	36.2277	140.935	44.7	4.7	4
100	2011/3/24	8:56:49	36.1778	140.0425	51.7	4.8	5
101	2011/3/24	17:20:59	39.0767	142.3577	33.7	6.2	5
102	2011/3/25	20:36:24	38.7292	142.1072	44.7	6.3	4
103	2011/3/26	19:18:35	38.5668	141.8915	49.0	5.2	4
104	2011/3/26	22:33:04	37.0813	140.7687	8.8	3.7	4
105	2011/3/26	23:11:00	36.7253	140.6527	6.6	4.3	4
106	2011/3/27	5:36:02	37.1328	140.8512	6.2	4	4
107	2011/3/28	7:23:57	38.3837	142.3463	31.7	6.5	5
108	2011/3/29	19:54:30	37.4087	142.4697	13.4	6.6	4
109	2011/3/30	22:19:05	36.6498	140.9323	50.0	5	4
110	2011/3/31	16:15:30	38.8723	142.0843	47.4	6.1	5

No.	Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	SI
111	2011/4/1	19:49:44	40.2568	140.364	12.4	5	5.5
112	2011/4/1	20:57:55	39.3363	142.1662	45.2	6	4
113	2011/4/2	4:59:50	38.8765	141.9952	49.3	4.9	4
114	2011/4/2	13:08:07	38.7728	142.0965	41.7	5.2	4
115	2011/4/2	16:55:54	36.207	139.9622	53.6	5	5
116	2011/4/2	23:38:08	37.0965	140.834	6.4	4.8	4
117	2011/4/3	16:38:45	37.6255	141.6503	46.8	5.4	4
118	2011/4/3	21:57:39	37.264	141.4023	48.1	4.6	4
119	2011/4/5	5:43:57	36.3023	140.9153	41.5	4.3	4
120	2011/4/6	21:56:50	36.7348	140.6028	7.2	4.9	4
121	2011/4/6	22:54:51	37.6343	141.5722	45.9	5.3	4
122	2011/4/7	11:40:47	36.5408	140.8912	50.7	4.9	4
123	2011/4/7	23:32:43	38.2042	141.9202	65.9	7.2	6.5
124	2011/4/9	17:02:19	36.2292	140.09	54.5	4.3	4
125	2011/4/9	18:42:20	38.2473	141.8145	58.2	5.4	5
126	2011/4/10	20:22:16	37.0848	140.7675	6.8	3.8	4
127	2011/4/11	6:35:54	36.7415	141.1547	52.7	5.1	4
128	2011/4/11	13:51:45	37.4697	141.324	28.9	5	4
129	2011/4/11	17:16:12	36.9457	140.6727	6.4	7	6
130	2011/4/11	17:26:29	37.0627	140.6232	5.3	5.4	5
131	2011/4/11	17:58:03	37.0248	140.6082	10.0	4.9	4
132	2011/4/11	17:59:45	36.992	140.7315	11.6	4.8	4
133	2011/4/11	18:05:18	36.9887	140.7308	12.4	5.1	4
134	2011/4/11	18:36:20	36.9005	140.6812	8.1	4.8	4
135	2011/4/11	20:42:35	36.9658	140.6348	10.6	5.9	5
136	2011/4/11	22:05:40	37.0195	140.691	11.3	4.7	4
137	2011/4/12	0:57:56	37.0622	140.6533	10.6	5	4
138	2011/4/12	7:26:17	36.8187	138.6057	0.0	5.6	5
139	2011/4/12	8:08:16	35.4817	140.868	26.3	6.4	5
140	2011/4/12	8:48:15	37.0305	140.6925	10.9	4.7	4
141	2011/4/12	14:07:42	37.0525	140.6435	15.1	6.4	6
142	2011/4/12	14:26:33	37.042	140.6517	13.9	4.8	4
143	2011/4/12	14:32:47	37.0987	140.6543	15.5	4	4
144	2011/4/12	16:15:00	36.833	138.5683	0.9	4.6	4
145	2011/4/12	17:48:25	37.0267	140.6895	9.8	4.9	4
146	2011/4/12	19:15:35	37.151	140.8203	10.4	4.5	4
147	2011/4/13	4:37:48	39.3437	142.0647	48.3	5.5	4
148	2011/4/13	10:07:58	36.9152	140.7068	4.5	5.7	5
149	2011/4/14	7:35:50	36.7783	140.5732	8.8	5.1	4
150	2011/4/14	12:08:58	36.9838	140.773	10.8	5.4	4
151	2011/4/16	11:19:32	36.3408	139.9455	78.8	5.9	5.5
152	2011/4/17	0:56:22	37.0228	138.6887	8.0	4.9	5
153	2011/4/17	23:46:52	37.094	140.834	6.6	4.5	4
154	2011/4/18	11:08:14	37.0882	140.6585	8.3	4.2	4
155	2011/4/19	4:14:27	39.6027	140.3872	5.6	4.9	5
156	2011/4/19	21:55:33	40.0772	142.1122	47.7	4.3	4
157	2011/4/19	23:10:20	36.1688	139.8075	53.5	5	4
158	2011/4/19	23:47:08	36.8805	140.8137	8.3	4.5	4
159	2011/4/21	17:18:13	38.321	142.2318	31.3	5.2	4
160	2011/4/21	22:37:02	35.6752	140.6855	46.4	6	5
161	2011/4/22	1:11:17	37.5115	141.452	48.2	5.6	4
162	2011/4/23	0:25:16	37.1695	141.1948	21.4	5.4	5
163	2011/4/23	8:15:27	36.7092	140.6413	4.6	4.5	4
164	2011/4/24	19:09:52	37.0585	140.639	13.5	4.5	4
165	2011/4/25	18:00:19	36.174	141.0262	38.8	5	4
166	2011/4/26	21:12:02	36.086	139.9762	46.3	5	4
167	2011/4/27	19:27:24	36.8203	138.6248	0.4	4.6	4
168	2011/4/28	18:27:47	37.4133	141.7815	43.5	5.7	4
169	2011/4/29	15:54:48	39.3403	142.0637	48.2	4.8	4
170	2011/4/30	14:06:31	36.7595	141.2808	36.9	5.3	4
171	2011/4/30	14:46:59	37.3352	141.2962	32.8	4.5	4