

汎用端末の内蔵センサー群を活用した即時被害把握システムの開発*

東北大学大学院災害制御研究センター 岡元 徹
東北大学大学院災害制御研究センター 柴山明寛
東北大学大学院災害制御研究センター 大野 晋

1. はじめに

地震直後に迅速かつ早期に被害状況の把握を行うことが、2次災害の軽減及び早期の復旧復興に繋がることは周知のことである。そのための一つの方法として、気象庁が発表する計測震度の情報がある。全国に約4200点¹⁾もの計測震度の観測点が整備されているが、市区町村の総数から換算した場合、一行政区あたり約2点から3点の観測点しかなく、個別の地点に対しては大まかな被害把握しかできないのが実情である。この問題を解決する方法として、面的な地震動推定例えば²⁾³⁾やさらなる高密度の観測網⁴⁾の整備が考えられる。しかし、面的な地震動推定に関しては、精度の良い補間には高密度かつ高精度な地盤情報が必要なことが指摘されている⁵⁾面的な地震動推定は現状では簡易推定が主であり、新たな強震計の設置は莫大な費用がかかる。地震観測点を埋める方法として、簡易加速度センサーを用いた地震動把握の研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾や地震動把握とともにカメラを使用した状況把握を行う研究がなされている¹⁰⁾。これらの研究では、端末に内蔵もしくは接続された加速度センサーを利用し、そこで計測された情報をクライアント・サーバ方式(ユニキャスト)で集約する方法が取られている。しかし、この方式は、接続する端末数に従ってサーバへの負荷が高くなる問題、サーバ又はネットワーク経路が地震等の影響による障害を受けた場合に情報を集約することができなくなる問題がある。対応策としては、システムの冗長化が可能であるがコストが高くなる。そこで本研究では、複数の端末に一斉に送信が可能なマルチキャスト方式を用い、汎用端末内に内蔵されているセンサー群を活用した即時被害把握システムの開発を行った。本論では、開発を行った即時被害把握システムの概要について述べ、次に端末内蔵センサーの有用性を確認するための振動実験結果と、誤検知防止判定確認実験結果について述べる。

2 即時被害把握システムの概要と構成

2.1 即時被害把握システムの概要と特徴

本研究で開発した即時被害把握システムは、既存の地震観測網より高密度に地震動及び建物応答を把握するとともに個々の室内被害状況を詳細に把握し、消防隊員等の救援救助を補助し及び効率的に行うためのシステムである。本システムは、2009年に開発したシステム¹¹⁾を発展させたシステムであり、以下の特徴を持っている。

- ①汎用のノート端末に内蔵されている加速度センサーを用いて現在の揺れの測定を行うことが可能。
- ②揺れの情報は、気象庁の計測震度と同様な計算方式で求めた計測震度の値を表示することが可能。
- ③簡易な振動計測装置となり、理科の教育素材等に用いることが可能。
- ④地震発生時には、揺れの情報を一斉に他のパソコンに配信(マルチキャスト)することが可能
- ⑤個々の端末で一斉に配信された揺れの情報は、サーバ等で1カ所に集めるのではなく、個々の端末で集約さ

*Development of Real-Time Disaster Information Collection System Using Terminal Built-in Sensors, Disaster Control Research Center Tohoku University by Tohru Okamoto, Akihiro Shibayama, Susumu Ohno

れ、揺れの情報を一括表示することが可能。

- ⑥地震と地震以外の揺れを判別するために、他の端末からの同時刻に発生した揺れの情報や震源情報 USGS¹²⁾、AQUA¹³⁾、緊急地震速報など¹⁴⁾を利用し、地震と地震以外の揺れを区別することが可能。
- ⑦揺れの計測と連動して周囲の映像と音声を記録し、地震時の室内の被害状況を記録することが可能。
- ⑧ローカルネットワーク環境(閉じられたネットワーク環境、例えば、職場内、学校内など)でも使用が可能。

2.2 システムの処理の流れについて

本システムでは、個々の端末同士で震度情報の配信・受信の処理が行われるが、システムの処理をわかりやすくするために配信側の端末と受信側の端末の 2 つに分けて説明する。まず、前提条件として、本システムを導入する際もしくは端末を別の場所に移動させた際は、端末設置場所の位置情報(緯度経度及び建物階数)の登録を行うものとし、各端末の時刻については 検出時刻を基にした同一震源の地震動判定(後述)に影響する大幅なずれがないことをシステムの前提としている。また、地震以外の要因(端末の持ち上げや端末が置いてある机に過度の衝撃が加わった等)によって振動を検知することもあるため、振動情報を端末間で相互にやり取りすることで地震の揺れと地震以外の揺れを区別する機能を設けた。この機能のため、検出した振動情報それぞれに信頼度情報という数値情報を導入した。なお、この信頼度情報の初期値は 0 である。

システムの処理の流れを図 1 に示す。

まず、配信側の端末では、常時加速度センサーで取得される揺れの計測を行い、成分毎の最新 15 秒間の平均を算出し、これを加速度の基線とする。次に、ある一定の閾値(端末毎に設定可能)を超えた合成加速度を取得すると加速度データ、画像および音声の記録が行われる。また、表示画面上に毎秒毎に気象庁の計測震度の算出方式に合わせた震度値が表示される。この振動が地震によるものなのか、そうでないかを判断するために外部震源情報から震源情報を入手する。同時に、他の端末に検出した振動情報(端末 ID(端末毎に生成した固有 ID)、端末の位置情報、震度情報、加速度検出時刻等)をマルチキャストで配信を行なう。

次に、受信側の端末群はそれぞれにおいて、同一震源の地震動判定を行ない、判定結果が否となる受信端末のみが信頼度情報を -1 としてマルチキャストで応答する。

最初の配信端末は、他の受信側の端末群の信頼度情報(-1)を受信した場合は、該当する振動情報の信頼度を 1 減ずる。同時に、他の端末から配信された地震動情報のうち、同一震源の地震動と判断できる情報があれば、自分が検出した振動情報の信頼度を 1 加える。これらを一定数総合した結果、信頼度が正となり地震動であると判断した場合、マルチキャストで全端末に再配信する。地震動と判断できない場合、自端末の地震カタログの振動情報を更新する。

再配信された信頼度情報を受信した端末群は、受信した情報を地震情報として地震カタログに登録する。

なお、信頼度の合算に関しては、配信端末の近くに端末が少なく、遠方の端末が多いと、局所的な地震に対応できないことから配信端末と受信端末との物理距離に閾値を設けることができ、距離は任意に設定することができる。

・同一震源の地震動判定方法

配信端末と受信端末との物理距離から P 波、S 波の地震動の伝達時間を計算し、配信端末側の振動検出時刻に地震動の伝達時間を足し引きし、その時間内に受信端末側が振動を検出したか否かで信頼度の判定を行う。

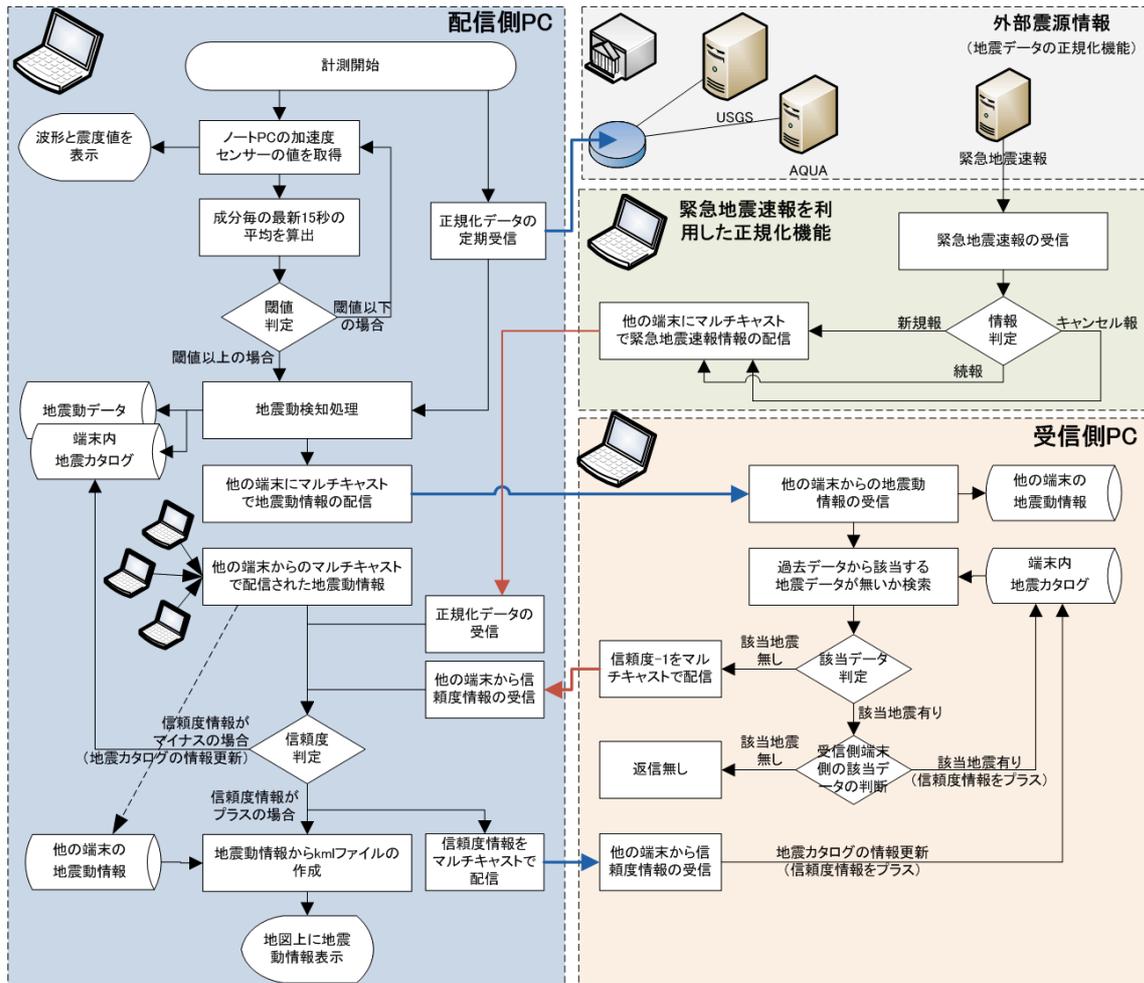


図1 システムの処理の流れ

3 性能試験および実証実験

本システムの有用性を検証するために、端末に内蔵されている加速度センサーの性能試験及び振動時の端末の挙動確認試験、マルチキャストの配信実験の3つの試験を行った。まず、加速度センサーの性能試験に関しては、センサー自体の性能を確認することが目的である。次に端末の挙動確認試験に関しては、一般的な利用と同様な設置状況でどの程度の振動計測が可能であるかを検証するための実験である。最後のマルチキャストの配信実験に関しては、マルチキャストの配信確認及び誤検知防止機能の確認を行った。

3.1 加速度センサーの性能試験

端末に内蔵されている加速度センサーの性能の確認を行うために、一軸の振動台(株式会社サンエス SSV-125)を用いて性能実験を行った。実験に用いた地震動は、El Centro 地震の NS 波を用いた。端末に内蔵された加速度センサーと比較するために、共和電業社 AS-2GB の加速度センサーを振動台につけてリファレンスとして用いた。実験では、Lenovo 社端末(Thinkpad X61T)とApple 社端末(MacBook MB466J/A)を用い、加振時は、端末を振動台面に固定し、端末のディスプレイを開いた状態で行った。サンプリングレートは、Lenovo 社端末は 50Hz, Apple 社端末は 100Hz とし、共和電業社 AS-2GB は 100Hz とした。計測した加速度の値は、Lenovo 社端末, Apple 社端末から取得した計測値(count)にそれぞれ一定倍率(Lenovo 社端末:8.2, Apple 社端末:3.84)を掛けることで物理量

(cm/s²)に変換した。この倍率(較正值)は、1Hz から 15Hz の正弦波で加振した結果が、Lenovo 社、Apple 社ともに AS-2GB に対して周波数によらず一定値であることを確認して、機種別に設定した。

El Centro 地震の NS 波で加振した結果を図2, 図3に示す。まず、加速度波形に関しては、両端末共に良く表現されているが、Lenovo 社端末に関しては、各波のピーク加速度が数～数十 gal 程度低い値となっている。これはサンプリングレートが低いため、各波のピーク値が取れていないためと思われる。次に、フーリエスペクトルに関しては、両端末共に、高周波領域で AS-2GB と異なる傾向があるが、計測震度算出のフィルター処理¹⁵⁾の範囲の周波数 0.5Hz から 10Hz 程度のスペクトルの一致は概ね良好であり、震度算出に利用するには十分な精度があると考えられる。本地震動で得られた一軸で求めた計測震度相当の値は、AS-2GB が 5.1, Lenovo 社端末が 5.2, Apple 社端末が 5.1 であった。また、その他の地震記録でも同様な結果が得られた。

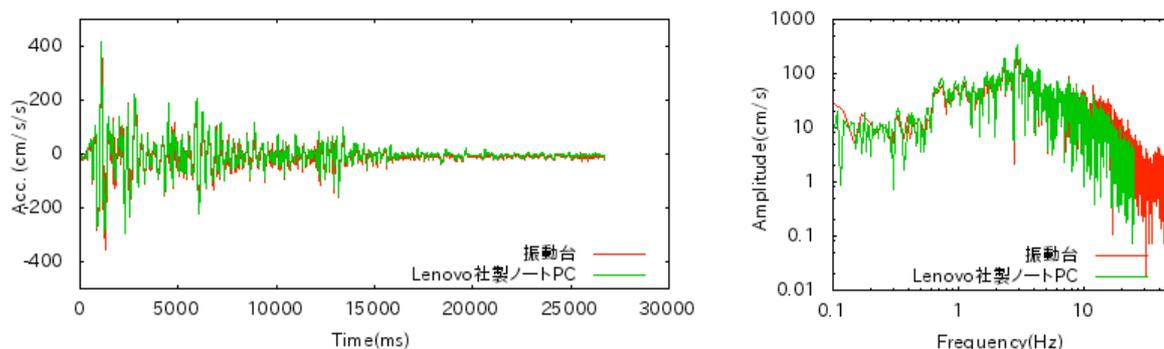


図2 Lenovo 社製端末を El Centro 地震の NS 波で加振した結果 (左: 加速度波形, 右: スペクトル)

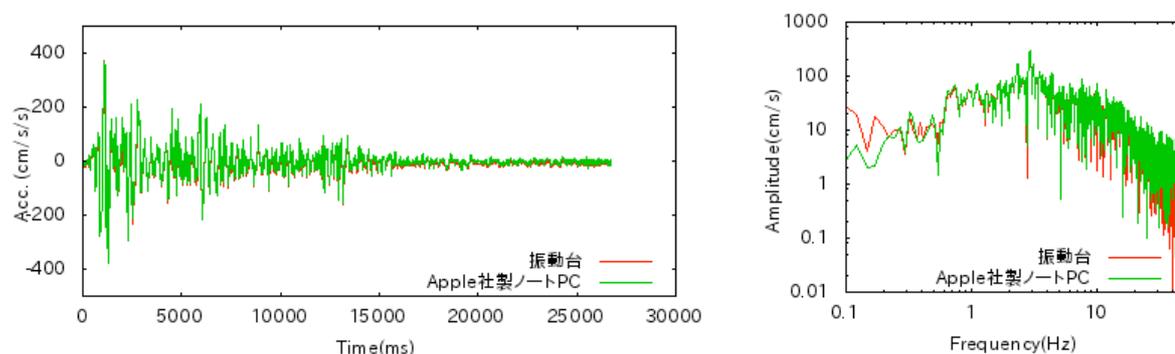


図3 Apple 社製端末を El Centro 地震の NS 波で加振した結果 (左: 加速度波形, 右: スペクトル)

3.2 振動時の端末の挙動確認試験

前述の試験では、端末内蔵の加速度センサー単体の性能確認試験のために固定した状態で計測を行った。本実験においては、一般利用時と同じ状況下でどの程度の振動まで計測できるかを検証するために、端末を固定していない状態で振動させた際の挙動の確認を行った。実験は、震度別の挙動を確認するために、El Centro 地震の NS 波の加速度波形に一定倍率を掛け、震度 3 から震度 6 強になるように調整して実験を行った。使用した機材は、上記と同じ機材、同じサンプリングレートで行い、端末を載せる台としてアルミ板と化粧板の 2 種類で行った。比較として端末を固定した状態においても同様な実験を行った。

各震度で揺らした実験結果を表 1 に示す。Lenovo 社の端末に関しては、アルミ板で震度 6 弱程度、化粧板で震度 5 強程度から端末が滑り出す結果となった。Apple 社の端末に関しては、Lenovo 社の端末と比べて滑り出す震度

が高くなり、アルミ板で震度6強程度、化粧板で震度6弱程度から滑り出す結果となった。結果の違いについては、両端末共に同じ重量(2kg)であったが、端末の底面のゴム足形状が異なっていたためと思われる。

本実験結果から、端末の形状及び重量によって多少異なるが、端末を固定していない場合では、震度5強程度から端末が滑り出し、入力加速度を正確に計測することが困難であることがわかった。しかしながら、震度5強程度までは正確に計測できること、それ以上の大加速度を計測した場合には端末の落下等の影響によるものと考えられることから震度6弱以上とおおよその判断が可能であり、本論文の主目的である、初動期の災害対応支援や要救助者の救助支援のための大まかな被災場所把握への利用は十分可能と考えられる。

表1 振動時の端末の挙動確認試験結果

| | | 震度3 | | 震度4 | | 震度5弱 | | 震度5強 | | 震度6弱 | | 震度6強 | |
|--------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|
| | | 震度 | PGA | 震度 | PGA | 震度 | PGA | 震度 | PGA | 震度 | PGA | 震度 | PGA |
| 加速度計(AS-2GB) | | 2.9 | 32 | 4.0 | 105 | 4.8 | 256 | 5.3 | 464 | 5.7 | 705 | 6.3 | 1389 |
| Lenovo 社 | アルミ板 | 3.0 | 35 | 4.1 | 118 | 4.9 | 291 | 5.4 | 521 | 5.7 | 504 | 6.1 | 669 |
| | 化粧板 | 3.1 | 35 | 4.1 | 117 | 4.9 | 281 | 5.4 | 379 | 5.6 | 430 | 5.9 | 472 |
| | 固定 | 3.1 | 35 | 4.1 | 110 | 4.9 | 290 | 5.4 | 496 | 5.8 | 750 | 6.4 | 1524 |
| Apple 社 | アルミ板 | 3.0 | 38 | 4.0 | 116 | 4.8 | 261 | 5.3 | 491 | 5.7 | 709 | 6.1 | 892 |
| | 化粧板 | 2.9 | 36 | 4.0 | 108 | 4.8 | 269 | 5.3 | 450 | 5.7 | 530 | 6.1 | 674 |
| | 固定 | 2.9 | 34 | 4.0 | 110 | 4.8 | 271 | 5.3 | 463 | 5.7 | 712 | 6.1 | 1426 |

※赤字は、端末が台上で滑ったと思われる結果。セルを赤で塗りつぶした箇所は、目視で端末が台上で滑ったと判断できたもの。

3.3 マルチキャストによる配信実験

本システムのマルチキャスト方式の通信方法及び誤検知防止機能の有用性を確認するための実験をおこなった。実験では、加速度センサーを内蔵している地震動検知用端末の5台で行った。実験は、1台から順に同時に振動させる台数を増やして行き、誤検知防止機能が正常に動作しているか確認をした。実験結果を表2に示す。1台から順に同時に振動させる台数を増やして行き実験を行い、2.2で述べたシステムの処理の流れの通りに配信が行なわれていることを確認した。また、マルチキャストの配信数が増えるにつれて共有に要する時間も増える結果となった。これは、検知端末への信頼度情報の応答の送信待ち時間を数msから最大5sまでランダムに設けたことによる時間の増加と、検知端末からの信頼度設定通知部分においても送信待ち時間を同様に設けたためである。振動させた台数が4台以降で、共有に要した時間が大きく増加しているのは後者の理由による。振動を検知し

表2 誤検知防止機能の実験結果

| | | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 同時に振動させた台数(検知端末) | 1台 | 2台 | 3台 | 4台 | 5台 |
| 振動させていない台数(未検知端末) | 4台 | 3台 | 2台 | 1台 | 0台 |
| 誤検知判断 | 非地震 | 非地震 | 非地震 | 地震 | 地震 |
| 共有に要した時間 | 4.2sec | 5.4sec | 5.5sec | 10.1sec | 8.3sec |
| 全マルチキャストの配信数 | 5 | 8 | 9 | 12 | 10 |
| 全マルチキャストの配信数の内訳 | | | | | |
| 検知端末から配信数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 検知端末への信頼度情報の応答数 (応答台数×検知端末数) | 4 (4台×1台) | 6 (3台×2台) | 6 (2台×3台) | 4 (1台×4台) | 0 (0台×5台) |
| 検知端末からの信頼度設定通知数 | 0 | 0 | 0 | 4 | 5 |

た端末の再送はそれぞれの端末毎に最大でも1度のみ行われるため、全体の処理時間はこの待ち時間と送信回数から推定される範囲に収まる。そのため、配信数の増加に伴い共有に要する時間が線形に増加することはない。今後、最適な送信待ち時間を様々な実験から検討する予定である。

4 まとめ

本稿では、サーバを持たずに複数端末間で同時且つ即時に地震動情報の共有を可能にする方法としてマルチキャスト方式の通信方法に着目し、高密度の地震動把握及び個別建物の建物応答、室内被害の把握を目的として、ノートパソコン内蔵加速度センサーとマルチキャストによる即時震度情報収集システムを開発した。ノートパソコン内蔵加速度センサーの採用により、既存端末を利用して安価に震度センサーネットワークを構築することができると共に、マルチキャスト通信の採用により、震災時に冗長性を確保し、また、外部から遮断されたネットワークでも稼働するという利点を持つ。加速度センサーの性能実験及び振動時のノート端末の挙動確認試験、マルチキャストの配信実験から本システムの有用性を示した。

今後に関しては、様々な振動試験を行い、単独の端末による地震動以外の振動の排除方法の検討及び落下による大加速度情報の処理方法について検討する予定である。また、本研究で用いたマルチキャスト方式は、セキュリティ上の問題で利用できないネットワーク環境が存在するため、そのような状況下でも稼働できるようにサーバ・クライアント方式を一部利用し、マルチキャスト方式との併用で様々な環境で利用できるようにする予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、独立行政法人情報通信研究機構の滝澤氏、中川氏にはマルチキャスト通信について技術的なご協力を頂き、安全・安心サポート株式会社に緊急地震速報について技術的なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 平成 22 年版防災白書 : <http://www.bousai.go.jp/hakusho/h22/index.html> (参照 2010/10/01)
- 2) 気象庁 : 推計震度分布図について, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikai/kaisetsu.html> (参照 2010/10/01)
- 3) United States Geological Survey(USGS) : ShakeMaps, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/> (参照 2010/10/01)
- 4) 大野晋, 柴山明寛 : 地盤増幅と地震動の空間相関を考慮した応答スペクトルの分布推定, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, DVD, 2010.11
- 5) 翠川三郎 : 最近の強震計ネットワークについて—阪神大震災以降の動向—, 建築防災 12 月号, pp.12-16, 1996
- 6) Griscom, D. T., SeisMac: Turn your Apple laptop into a self-contained seismograph, Seismological Research Letters, vol.77, pp.731-733, 2007
- 7) Cochran, E.S., J.F. Lawrence, C. Christensen, R. Jakka, The Quake-Catcher Network: Citizen science expanding seismic horizons, Seismological Research Letters, vol.80, no.1, pp.26-30, 2009
- 8) Quake-Catcher Network : <http://qcn.stanford.edu/index.php> (参照 2010/10/01)
- 9) Yure プロジェクト : <http://weathernews.jp/yure/> (参照 2010/09/01)
- 10) Van Den Einde, L.; Wei Deng; Wilson, P.; Elgamal, A.; Hubbard, P.; NEESit MacBook Accelerometer and Video Sensor Platform (iSeismograph) for education and research, Frontiers in Education Conference, 2008. FIE 2008. 38th Annual
- 11) 柴山明寛 : ノートパソコン内蔵の MEMS センサーを利用した早期被害把握システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.239-240, 2009.8
- 12) United States Geological Survey(USGS) : Latest Earthquakes: Feeds & Data, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/catalogs/> (参照 2010/10/01)
- 13) 松村稔, 伊藤善宏, 木村尚紀, 小原一成, 関口渉次, 堀貞喜, 笠原敬司 : 高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発, 地震 2, 59, pp.167-184, 2006
- 14) 気象庁 : 緊急地震速報について, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html> (参照 2010/10/01)
- 15) <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/keisoku.html> (参照 2010/10/01)