

# スマートフォンとインターネットクラウドを活用した広域被災度判定システムの開発

代表研究者

林 和宏

千葉大学 大学院工学研究院建築学コース 准教授

## 1 背景・目的

わが国では、国土全域をカバーする地震観測網（K-NET や KiK-net<sup>1)</sup>）が構築されており、数千台の地震計によって全国の地震発生状況をリアルタイムトレースしている。当該情報は、(国研)防災科学技術研究所に集約された後、気象庁等に転送され、緊急地震速報や被災地の状況判断等に利用されている。我が国の地震観測網は、世界随一の規模・精度を誇っているが、それでも1台の地震計がカバーする範囲は数十km四方になる。

1995年の阪神淡路大震災、2016年の熊本地震、2018年の大阪北部地震など、都市部に大きな被害をもたらした直下型地震の場合、甚大被害は「震災の帯」と呼ばれる断層直上の地域（幅1km、長さ十km程度の範囲）に集中している。震災の帯や被害程度の即時同定は、災害復旧・復興に向けた初動活動において極めて有益であることが過去の地震災害の教訓から得られている。現状の地震観測網では、どの地域に強い揺れが発生したかは特定できるが、震災の帯の具体的な位置（広がり）を同定するには観測密度が決定的に不足している。震災の帯を同定するには、最低でも1台の地震計がカバーする範囲を数km四方にしなければならないが、そのために必要となる地震計の台数は現状の500倍程度で、税金原資の現状観測網拡張による対応は事実上不可能である。国土全域をカバーする規模の地震観測網には巨額の設備投資が必要であるが、人口が集中する都市部に限定した高密度観測網であれば、遥かに安価で構築することが可能となった。これは、①無線通信インターネット環境の普及、②MEMS型センサを内蔵していることから地震計の代用として用いることが可能なスマートフォンの存在、③大手企業が提供する安価なデータストレージ・クラウドコンピューティングサービスなど、近年のICT、IoT技術の発展によるものである。

民需によって観測網を構築・維持しようとする場合、各地震計を設置する個人や企業が、直接的に当該地震計設置による利益を得られるスキームを立てられるかがカギとなる。本研究では、地震計の代用として安価なスマートフォンを建物内に設置し、地震観測記録を即時インターネットクラウドにアップロードするソフトウェアを開発・無料配布する。クラウドでは、集められた観測記録から、建物ごとの損傷程度や継続使用の可否を自動判定するシステムを構築し、クラウドコンピューティングによって管理運用させる。建物の損傷推定には、詳細な観測記録分析とシミュレーション解析が必要となるため、汎用スマートフォン程度の演算能力では不十分である。地震計（スマートフォン）をICTによってインターネットクラウドと結びつけることは、演算能力に関する制約を取り払う必須条件である。

被災後の建物残存耐震性（危険性）については、同じくICTを利用（メール等）して建物所有者・管理者に通知する。これが、地震計（スマートフォン）の設置費用を負担する個人や企業の利益となる。その上で、観測された全地震記録から、被災地域の詳細な揺れの分布や建物被災度を評価し、インターネットクラウド上で一元的に管理・共有するシステムを構築することで、被災地域全体の減災にも貢献できる。

## 2 研究概要と成果

本研究では、①建物損傷度即時診断システムの開発 と、②ICT活用型地震情報統合・共有システムの構築 の2課題を設定する。

### ① 建物損傷度即時診断システムの開発

スマートフォンは、モーションセンサとしてMEMS加速度計が内蔵されており、これが地震計としての役割を果たす。さらに、CPU、メモリ、バッテリー、ICT端子も備えており、価格は地震計より遥かに安価である。研究では、戸建て住宅の屋内に専用アプリをインストールしたスマートフォンを設置し、そこで得られる地震記録から建物の損傷状況評価する手法を開発する。なお、対象建物の設定は、我が国の建物の90%以上が戸建て住宅であることによる。研究は、①-1 木造住宅の地震損傷と観測記録の関連付け、

①-2 提案診断システムの動作検証実験 の2項目を定める。

## ② ICT活用型地震情報統合・共有システムの構築

スマートフォンで観測された地震波形は、その全てがICTを活用することでインターネットクラウドに集約・統合される。本課題では、被災地域全体の詳細情報として更なる付加価値を見出すべく、集約された地震波形群から地域の詳細な震度分布や、地区別の建物被災度を演算・共有するシステムを構築する。これら全てはクラウドコンピューティングが担う機構を想定し、計算結果を被災地域のステークホルダーらがICT活用により情報共有する。

### 2-1 建物損傷度即時診断システムの開発

#### (1) 木造住宅の地震損傷と観測記録の関連付け

(国関)防災科学技術研究所が所管する世界最大の振動破壊実験施設「E-ディフェンス」で実施された3階建て木造住宅加振実験に関して、加振時の住宅各階の地震応答記録と、加振前後の構造物微動記録を取りまとめた。写真1に示すように、木造住宅試験体は軸組構造のA棟と、枠組構造のB棟の2棟からなる。実験における加振波は、ホワイトノイズ(WN)波、JMA神戸波、JR鷹取波の3種類(いずれも3軸)で、計26波を入力した。加振順序と入力倍率は表1に示す通りで、地震波加振の前後にWN加振(最大加速度50gal程度)を実施し、試験体の振動特性の変化を検討する。地震波加振は、JMA神戸波とJR鷹取波の25%、50%、100%を段階的に入力して、試験体の損傷を徐々に進展させている。表1中に、各加振で試験体住宅1階に生じた最大層間変形角を併記する。写真2に、実験で試験体に生じた損傷を示す。実験の詳細は、参考文献2)を参照されたい。

図1は、実験における木造住宅1次固有振動数低下率-経験最大層間変形角 $SD_{max}$ 関係評価式の比較を示す。図は、縦軸に1次固有振動数低下率を、横軸に経験最大層間変形角 $SD_{max}$ をとる。図中の破線と実線は、参考文献3)を参考として次式に基づく両試験体の1次固有振動数の変動を示す。

$$\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 = \frac{1}{1 + (SD_{max}/SD_{0.5m})^\alpha} \quad (1)$$

実験結果に基づけば、式中の $SD_{0.5m}$ の値はA棟軸組試験体が0.03、B棟枠組試験体が0.07であった。また、 $\alpha$ の値はA棟軸組試験体で1.1、B棟枠組試験体で0.9と同定した。以上のように、本研究課題では、実大振動実験の結果を基に、木造住宅の地震損傷と観測された地震波記録を関連付ける手法を示した。

#### (2) 提案診断システムの動作検証実験

2020年度に開発した地震観測用スマホ「クラウド地震計」(図2、現在はGoogle Playで公開中<sup>4)</sup>)を用いて、実大建物振動破壊実験で地震応答加速度記録を取得した。図3に、実験で得られた加速度記録を示す。スマートフォンの地震記録は、概ねリファレンス用MEMS地震計と同じ履歴を描いている。図4は、図3の加速度記録のフーリエスペクトルである。0.5~5Hzの領域では、スマートフォンのスペクトル形状が、概ねリファレンス用MEMS地震計と一致している。これに対し、0.5Hz以下の低周波数域では、スペクトルがリファレンス地震計と完全には一致しなかった。

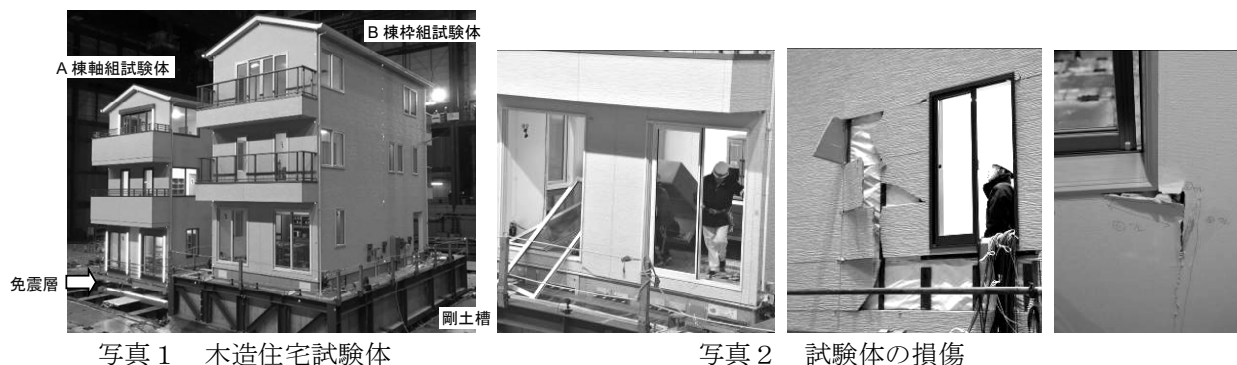


表 1 E-ディフェンス振動台実験概要

加振日	加振番号	加振波	最大入力加速度 (gal)				震度	A 棟軸組試験体(rad)		B 棟柱組試験体(rad)	
			X (長辺)	Y (短辺)	Z (上下)	基礎固 定条件		1階最大層間変形角 短辺方向	長辺方向	基礎固 定条件	1階最大層間変形角 短辺方向
1月31日	1	WN	46	54	45	4	-	-	-	-	
	2	JMA25%	221	190	87	5強	1/1111	1/1250	1/385	1/667	
	3	WN	45	53	46	4	-	-	-	-	
	4	JMA50%	515	424	194	6強	1/909	1/833	1/139	1/208	
	5	WN	45	58	49	4	-	-	-	-	
	6	鷹取 25%	187	179	38	5強	1/1250	1/1250	1/294	1/714	
	7	WN	43	57	47	4	-	-	-	-	
	8	鷹取 50%	410	416	90	6強	1/588	1/769	1/123	1/213	
	9	WN	43	57	45	4	-	-	-	-	
2月1日	10	WN	43	52	46	4	-	-	-	-	
	11	JMA100%	1443	1102	415	7	1/400	1/588	1/39	1/78	
	12	WN	46	54	49	4	-	-	-	-	
	13	鷹取 100%	962	919	256	7	1/313	1/400	1/54	1/76	
2月7日	14	WN	42	54	53	4	-	-	-	-	
	15	WN	44	46	48	4	-	-	-	-	
	16	JMA25%	222	190	78	5強	1/526	1/769	1/222	1/256	
	17	WN	47	46	49	4	-	-	-	-	
	18	JMA50%	506	428	182	6強	1/128	1/145	1/103	1/112	
	19	WN	41	50	46	4	-	-	-	-	
	20	JMA100%	1434	1068	417	7	1/49	1/27	1/58	1/79	
2月12日	21	WN	43	46	49	4	-	-	-	-	
	22	鷹取 100%	995	954	246	7	1/36	1/19	1/54	1/67	
	23	WN	43	45	46	4	-	-	-	-	
2月12日	24	WN	44	57	49	4	基礎 固定	-	-	-	
	25	JMA100%	1441	1102	416	7	基礎 固定 (補修)	1/22	1/13	1/12	1/16
	26	WN	46	53	48	4	-	-	-	-	

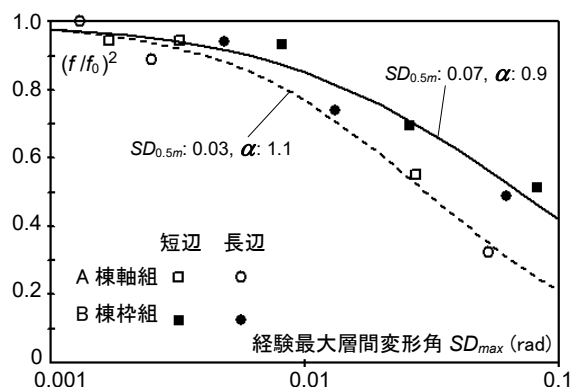


図 1 経験最大層間変形角と 1 次固有振動数変動の関係

図 5 は、図 3 の加速度記録の積分から求めた速度時刻歴と変位時刻歴である。図 5(a)の速度時刻歴については、スマートフォンの履歴は概ねリファレンス用地震計と一致している。一方、図 5(b)の変位時刻歴では、特に変位が大きくなる前後で履歴が一致しておらず、リファレンス用地震計の記録を過大もしくは過小評価している。図 5(c)は、加速度記録の積分時に、0.1~50Hz でフィルタリング処理した変位時刻歴である。こちらでは、スマートフォンの履歴が概ねリファレンス用地震計と一致している。

以上を総括すれば、スマートフォンのような簡易デバイスは、ある程度地震計の代用として用いることができる性能を有している。ただし、加速度記録を積分して変位時刻歴を評価する場合は、適切なフィルタリング処理が必要である。

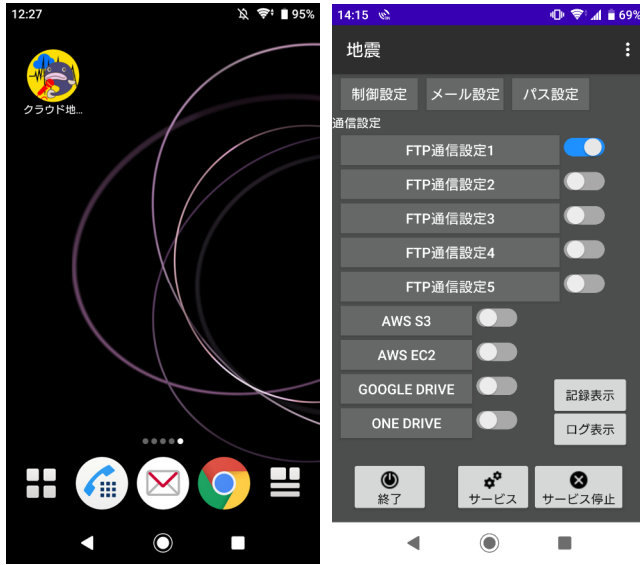


図2 スマホ地震計アプリ<sup>4)</sup>

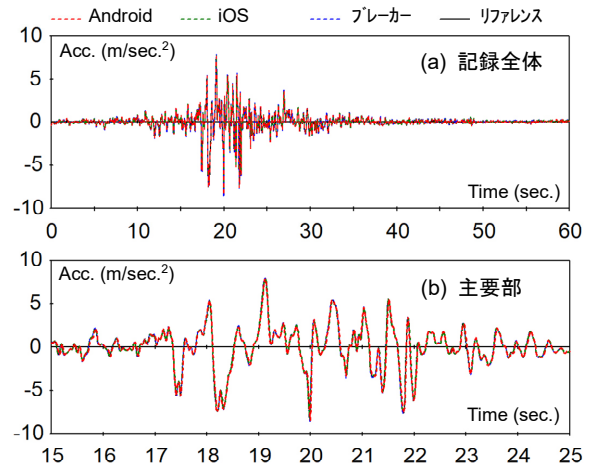


図3 告示波 100%加振加速度時刻歴

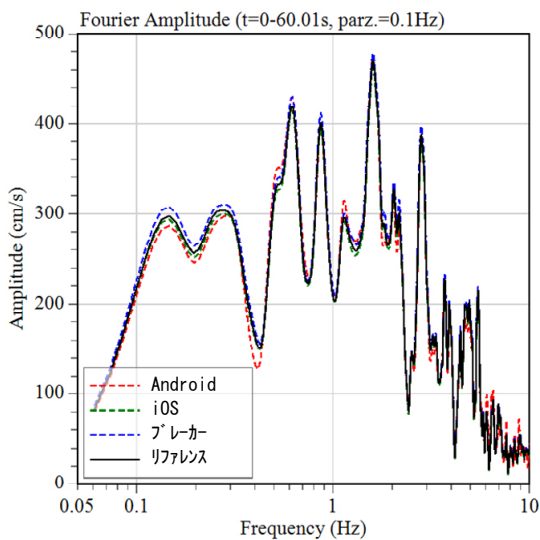


図4 告示波 100%加振加速度時刻歴

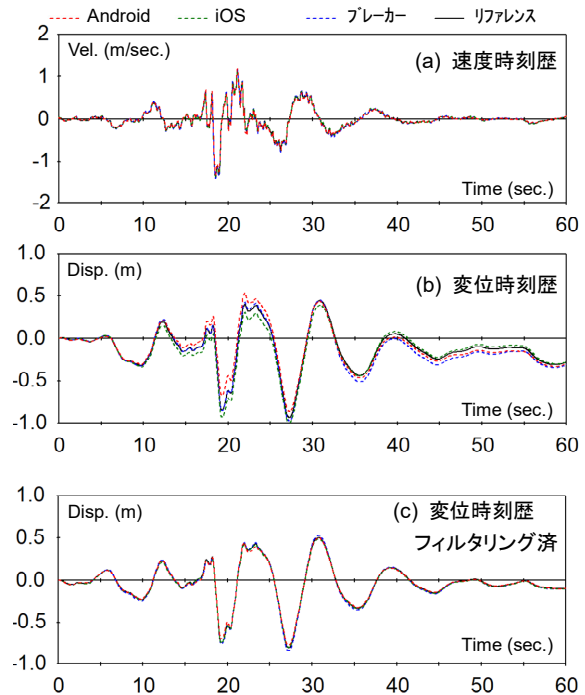


図5 加速度積分による速度と変位

## 2-2 ICT 活用型地震情報統合・共有システムの構築

①のシステム（スマホアプリ）で収集した地震データを統合・共有するインターネットクラウドシステムを試作、運用した。ここでは、AWS（アマゾン・ウェブ・サービス）が提供するクラウドコンピューティングサービス EC2 とデータストレージサービス S3 を利用した。研究では、まず、①-2 の振動台実験で得られたデータをリアルタイムに当該インターネットクラウドシステムに転送し、関係者間で必要情報の共有を確認した。次にそれを受けて、愛知県豊橋市を対象地区と設定し、巨大地震災害が発生した場合の広域被災度分布推定を行った。図6は、南海トラフ地震が発生した場合の、市内被災度分布推定例である。ここでは、GIS データをしてとりまとめられている都市計画基礎調査<sup>5)</sup>を基に、GIS250m メッシュ単位の建

物損傷分布をまとめている。検討では、1983年以前に建てられた建物の多い旧市街区や、地盤が弱い川周辺・臨海埋立地区で、多くの建物損傷が発生する可能性が高いことが示されている。

さらに本研究では、課題①-2で開発した地震観測用スマホ「クラウド地震計」をインストールした端末を、災害避難施設として認定されている市内複数の小学校に設置（図7）し、超高密度地震観測網構築に道筋を開いた。

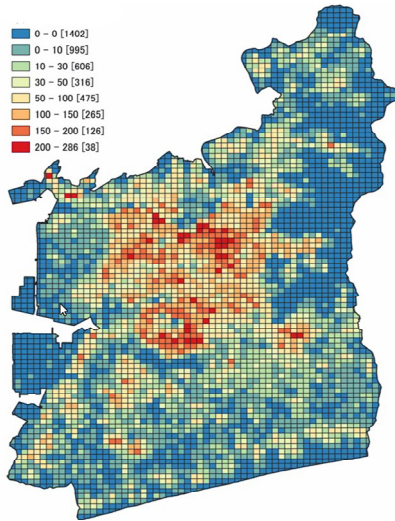


図6 地震被災度分布推定例



図7 豊橋市内の小学校に設置したスマホ地震計

### 3 まとめと今後の展望

本研究は、広域地震被害推定を目標とし、スマートフォンとインターネットクラウドを活用した民需主体の超高密度地震観測網構築に資するシステムの開発を目的とする。研究では、①建物損傷度即時診断システムの開発と、②ICT活用型地震情報統合・共有システムの構築、の2課題を設定した。

研究課題①では、①-1 木造住宅の地震損傷と観測記録の関連付けと、①-2 提案診断システムの動作検証実験の2項目を掲げ、次の結論を得た。研究項目①-1では、実大の木造住宅振動破壊実験の結果を基に、木造住宅の地震損傷と観測された地震波記録を関連付ける手法を示した。研究項目①-2では、地震観測用のスマホアプリ「クラウド地震計」（Google Playで公開中）を用いて、実大建物振動破壊実験で地震応答加速度記録を取得し、その精度や有用性に関する検討を行った。研究課題①の総括としては、スマートフォンを汎用地震計代用として使い、地震時の加速度記録の収集と、その記録から建物損傷度を評価し得ることを明らかにした。

研究課題②では、①のシステム（スマホアプリ）で収集した地震データを統合・共有するインターネットクラウドシステムを試作・運用した。ここでは、AWS（アマゾン・ウェブ・サービス）が提供するクラウドコンピューティングサービス EC2 とデータストレージサービス S3 を利用し、振動実験で得られた地震データをリアルタイムに当該インターネットクラウドシステムに転送し、関係者間で必要情報の共有できることを確認した。次に、GIS 都市計画基礎調査データおよび超高密度地震観測網から得られるデータ群に基づいて、巨大地震災害発生時の広域被害度分布推定を行った。南海トラフ地震が発生した場合、検討対象地域内の旧市街区や、地盤が弱い川周辺・臨海埋立地区で、多くの建物損傷が発生する可能性が高いことが GIS マップ情報として示され、当該データを関係者間で共有できることを確認した。また、当該システムの基幹となる超高密度地震観測網構築の端緒として、災害避難施設として認定されている市内複数の小学校に設置し、断続的な地震観測を開始した。

現在も、愛知県東部の自治体職員らで構成される「愛知県東三河地域防災協議会」と協働することで、当該観測網の充実と災害発生時の運用体制の確立に向けた取り組みを進めており、本研究の成果を持って今後も当地域の災害レジリエンス向上を図っていく。

## 【参考文献】

- 1) 強震観測網 (K-NET, KiK-net) について : <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin.shtml> (2023.06.24 アクセス)
- 2) 長江拓也, 林和宏ら: 地盤配管設備等の非構造部材を含む 3 階建て住宅の機能を検証する E-ディフェンス実験(首都圏レジリエンスプロジェクト) その 8~22, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.C-1, pp.639-670, 2018.09.
- 3) 西塔純人, 杉野未奈, 林康裕: 常時微動計測による低層住宅の 1 次固有振動数低下率の変形依存性評価 在来木造, 軽量鉄骨造および伝統木造について, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.757, pp.343-350, 2019.03.
- 4) 地震観測用スマホ「クラウド地震計」: [https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.hayashi\\_lab.jishin01](https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.hayashi_lab.jishin01), 2022.8.17, (2023.06.24 アクセス)
- 5) 都市計画基礎調査: <https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/kisotyousa001.html> (2023.06.24 アクセス)

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
実物 3 階建て木造住宅の地震損傷進展と固有振動数変動に関する一考察	日本建築学会構造工学論文集, Vol. 67B pp. 103-111	2021 年 3 月
都市計画基礎調査データを用いた木造住宅の地震被災推定に関する研究	日本地震工学会論文集	(2023 年 6 月 採録決定)
Structural Damage Monitoring for Wooden Houses using Smartphones and Seismic Circuit Breakers	Proc. the International Summit on Civil, Structural and Environmental Engineering (ISCSEE2023)	2023 年 3 月
応答曲面法を用いたモニタリング建物の構造パラメータ最適化	2020 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1056-1057	2020 年 8 月
機械学習を利用した地震記録に基づく建物解析モデルの最適化	2021 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 61-62	2021 年 9 月
スマートフォンを活用した強震波観測	2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 245-246	2022 年 9 月
IDA を用いた木造住宅の損傷確率曲線に関する基礎的検討	2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 393-394	2022 年 9 月
乾燥砂地盤一大径 RC 杭系の数値解析と終局耐力評価法の検討(その 1) 大径 RC 杭の数値解析モデル	2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 463-464	2022 年 9 月
乾燥砂地盤一大径 RC 杭系の数値解析と終局耐力評価法の検討(その 2) 連成系解析モデル	2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 465-466	2022 年 9 月
乾燥砂地盤一大径 RC 杭系の数値解析と終局耐力評価法の検討(その 3) Broms の評価法と数値解析結果の比較	2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 467-468	2022 年 9 月