

LPWA を活用した簡易地震計の開発に関する研究

東田光裕¹ 増田貴大¹

概要: 数十年以内の発生が危惧されている南海トラフ巨大地震などの自然災害に対して、災害発生後の初動対応は極めて重要である。初動対応の迅速化には適切な状況把握が必要不可欠であるが、現在の震度計の設置数は十分とは言えない。一方で従来の地震計は一般の家庭に設置するには高価であり現実的ではない。本稿では LPWA (Low Power Wide Area) を利用したリアルタイムデータ通信機能を備えた小型で安価な簡易地震計の開発について述べる。

A Study of Low-cost Seismometer using LPWA

MITSUHIRO HIGASHIDA¹ TAKAHIRO MASUDA¹

1. 論文フォーマットについて

数十年以内の発生が危惧されている南海トラフ巨大地震などの自然災害に対して、災害発生後の初動対応は極めて重要である。特に地震災害において震度情報は、初動対応の判断材料として多くの防災関係機関で利用されており、地震防災上欠かすことのできない重要な情報である。震度情報は、気象庁をはじめ防災科学技術研究所や地方教協団体が全国に設置している 4,372 か所の震度観測装置（地震計）から送られてくる情報をもとに気象庁が発表している [1]。地震計が近くにない場所の震度は、近くの観測点で計測された震度と観測点からの距離から推定を行っている。設置密度の高いところでも装置間の距離が数キロ、遠いところになると数十キロにもなり推定による誤差も大きく特定の場所の震度を正確に知ることは難しい。また、地震による揺れの大きさは地下構造や地形によって局所的に変化するため近隣の観測データと必ず一致するとは限らないといった問題もある。このような問題を解決するためにはできるだけ高密度に地震計を設置する必要があるが、従来の地震計では設置コストや管理コストが高く現実的でない。

そのため簡易地震計の開発がおこなわれている。例えば、地震発生時の建物の揺れを計測してリアルタイムに演算した震度を表示するシステムが開発されているが価格が数十万円とまだまだ安価とは言えない [2]。また、数万円とコストを抑えかつ通信機能をもった簡易地震計の研究 [3] も行われているが、通信機能を具備しているものの扱うデータ量を極力抑えるため気象庁が公開している加速度データを用いた計測震度の算出方法 [4] ではなく最大加速度から震度を推定する方法を採用しているなど、通信機能を備えかつ一定時間蓄積した加速度データを処理する機能を備えた安価な装置の開発は行われていない。

今後、気象庁・防災科学技術研究所・地方公共団体が管理する地震計に加え、各家屋に通信機能を持った安価な簡易地震計を設置することが可能になれば家屋単位で高密度な震度情報が収集できるようになる。そして、収集した震度情報から詳細な状況把握・被害推定が行われ迅速な初動対応につながると考える。本稿では通信機能に省電力でかつ広域の通信が可能な LPWA (Low Power Wide Area) を利用した安価な簡易地震計の開発を行うとともに、測定精度の評価や通信機能の検証を行った。

2. 簡易地震計の概要

2.1 観測システムの構成

震度を測定するセンサに MEMS (Micro Electro Mechanical System) 型加速度センサを用いた。千円程度と安価であり多くの機器に利用されている。制御部および通信部には低コストと低消費電力を兼ねた開発環境等が豊富なデバイスを選定した。今回試作した簡易地震計には加速度センサのほか、ジャイロ、方位、温度、湿度を測定するセンサも搭載した。通信方式には低速ではあるが低消費電力で広域伝送が可能な LPWA の通信規格一つである LoRaWAN 方式を選定した。試作した機器の構成を表 1 に、イメージを図 1 に示す。

表 1 試作した機器の構成

項目	製品型番
LoRaWANモジュール	B-L072Z-LRWAN1
加速度センサ	MPU9250
温湿度センサ	BME280
給電方式	USB

¹ 西日本電信電話株式会社
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE WEST CORPORATION

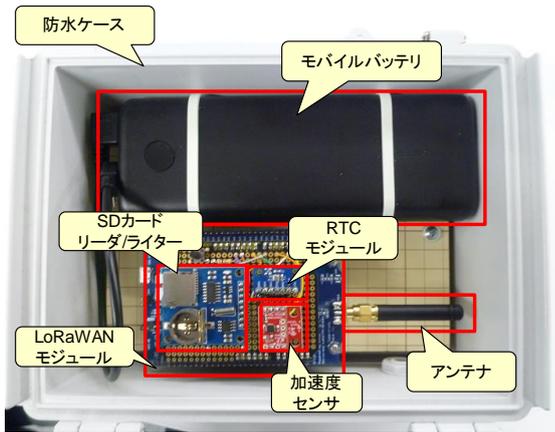


図1 試作機器のイメージ

2.2 性能評価実験の概要

実際の測定に利用されている地震計と今回試作した簡易地震計の精度評価を行った。なお、参考実験で用いた地震計と簡易地震計の主な仕様を表2、3に示す。実験は、2018年1月24日に東京工業大学に協力いただき、図2のように従来の地震計1台と簡易地震計4台を台車に乗せ、地震計のx軸方向に1分間手で揺らし加速度データを取得した。

表2 地震計の仕様

販売会社	白山工業株式会社
測定CH	3CH
形式分解能	24bit
サンプリング周波数	100Hz、200Hz、1KHz ※今回は100Hzで測定
価格	2百万円程度

表3 簡易地震計の仕様

販売会社	InvenSense
測定CH	3CH
形式分解能	16bit
サンプリング周波数	100Hz
価格	千円程度



図2 実験の様子

実験では7種類の異なる揺らし方で振動させその波形を取得した。取得した簡易地震計の波形を図3に示す。

最初に、Wave3の0~10秒の従来の地震計(図4)と簡易地震計の波形(図5)を比較したところ、簡易地震計の値が全体的に小さくなっていることが分かった。さらにすべての波形について波の一番高い部分(最大加速度)を比較したところ全体的に小さくなっていることが確認できた(表4)。

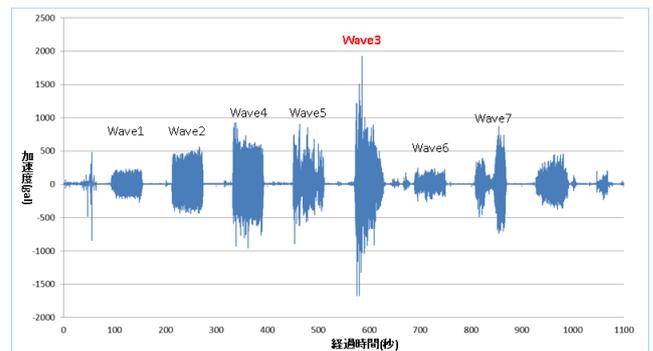


図3 取得した7種類の波形(従来の地震計)

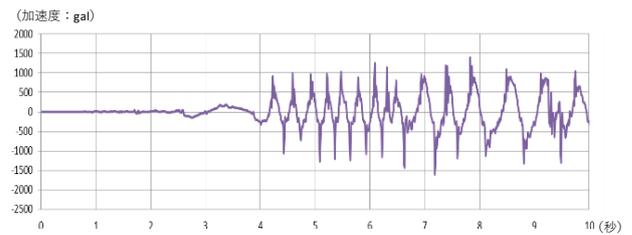


図4 従来の地震計の波形(Wave3)

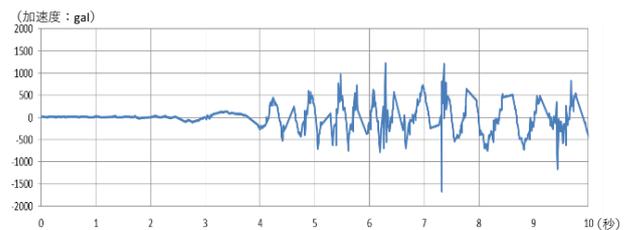


図5 簡易地震計の波形(Wave3)

表4 最大加速度の比較結果(Wave1から7)

	地震計	簡易地震計	誤差(gal)	誤差(%)
Wave1	272.15	271.62	-0.53	0%
Wave2	690.32	566.65	-123.67	-22%
Wave3	1998.08	1928.35	-69.73	-4%
Wave4	1074.94	951.7	-123.24	-13%
Wave5	1308.37	906.44	-401.93	-44%
Wave6	350.83	260.55	-90.28	-35%
Wave7	1019.75	876.46	-143.29	-16%

次に気象庁が公開している計測震度の算出方法[4] [5]を元に波形ごとの計測震度を求め震度階級の比較を行った。結果、計測震度の誤差が 0.2~0.4 の範囲であることが確認できた (表 5)。また、Wave3 について設置条件の異なる 4 台の簡易地震計の計測震度の比較を行ったところを誤差が 0.2 以下であった (表 6)。

表 5 計測震度の比較結果

	計測震度			震度階級	
	地震計	簡易地震計	誤差	地震計	簡易地震計
Wave1	5.7	5.4	-0.3	6弱	5強
Wave2	6.4	6.1	-0.3	6強	6強
Wave3	6.7	6.5	-0.2	7	7
Wave4	6.6	6.4	-0.2	7	6強
Wave5	6.5	6.3	-0.2	7	6強
Wave6	5.7	5.4	-0.3	6弱	5強
Wave7	6.5	6.1	-0.4	7	6強

表 6 簡易地震計の設置条件による比較結果 (Wave3)

設置条件	計測震度	正位置との誤差	震度階級
正位置	6.5	-	7
縦置き	6.4	-0.1	6強
横置き	6.5	0	7
センサ外だし	6.3	-0.2	6強

2.3 評価結果と考察

表 4, 5 に示す最大加速度および計測震度の検証結果から 7 つすべての振動パターンで地震計より簡易地震計の測定数値が小さく出る傾向があることが分かった。最大加速度の誤差は数%から数十%まで振動パターンによって大きく異なっているが、計測震度では誤差が 0.2 から 0.4 の範囲に収まっており震度階級の分布を把握する目的においては有用であることが確認できた。これは、計測震度は単に最大加速度の大きさで決まるわけではなく揺れの継続時間も考慮した計算式から算出されるためである。今後実用化を進めるにあたり、取得した加速度にフィルタをかけるなどプラス方向に補正することが考えられる。

3. 通信評価

3.1 通信方式の検討

様々な機器がネットワークにつながる IoT 時代において、すでに環境モニタリングやスマートメータのような多数の IoT 端末から情報を収集する用途で LPWA の利用が始まっている。低電力で動作するため乾電池などで数年から数十年

にわたって運用可能な一方で通信速度は数 kbps から数百 kbps 程度と携帯電話システムと比較して低速である。そのためこれまで地震計の通信方式として利用されていない。本研究では LPWA の限られた通信速度の中で震度に関する情報をサーバに送信する方法の検討を行う。今回試作した簡易地震計の仕様からデータ量を計算すると

分解能：16bit

サンプリング周期：100Hz

とした場合、1 秒間に

3 成分 (x y z) : 16bit×3 成分=48bit=6Byte

1 秒間に 100 データ : 6Byte×100=600Byte

のデータが生成されることになる。一方で RAM 上に保存できる実際のデータ容量が 10kByte 程度であり

$10\text{Kbyte} \div 600\text{Byte/s} = 16.6 \text{ (s)}$

程度となり小規模な地震などには対応できるが適応範囲がかなり制約される。また、LPWA の通信速度が数 kbps とした場合一度に送信できるデータ量がかなり小さいためデータ送信に計測時間の 10 倍近くがかかってしまうことになる。このようにハードの制約と通信速度の制約を考えた設計が求められる。そこで簡易地震計のデータ送信について図 6 に示す 3 つの方式を検討した。

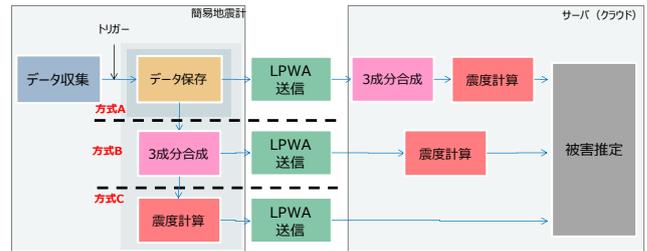


図 6 データ送信の考え方

方式 A は簡易地震計によって取得された加速度データをそのまま送信し受け取ったサーバ側で震度計算をする方式である。簡易地震計には高スペックなハードは必要ないがその分送信データ量が多くなり通信の負担が大きくなるのが特徴である。環境モニタリングなどの温度データや水道やガスメータの検針データなどこの利用が最も多く、限られた数値データを扱う場合に用いられている方式である。方式 B は x y z 方向の 3 成分のデータを合成することで送信するデータ量を 3 分の 1 に削減した方式である。送信と同時に加速度データそのものをサーバで把握できるように震度計算だけでなく様々な用途に活用可能となる。方式 C はすべての処理を簡易地震計で行い計測震度の計算結果のみを送信する方式である。取得した加速度データをサーバにアップロードする場合は、一旦メモリに保存し地震が落ち着いてから時間をかけて送信するなどの方法が考えられる。このようにいずれの方式においてもメリットとデメリットが存在するため、利用目的やハードの制約、通信環境

などを踏まえて決定する必要がある。また計測震度の計算については揺れが収束してから算出するのではなくリアルタイムに計測震度を算出するリアルタイム演算法が提案されている [6]。この計算方法を用いればデータ保存用にメモリを使うことなく計測震度の計算が可能となる。

3.2 評価の実施

試作した簡易地震計を使った通信評価と連続運用試験を2018年3月16日から約2週間行った。NTT西日本の熊本支店管内にある5階建てのビルにGWを設置しそこから約1.1km離れた社宅に簡易地震計を設置した。その時の様子を図7に示す。簡易地震計には温度センサも組み込んでおり設定した値以上の揺れを取得した際に送信する加速度センサの情報とは別に30分に1回、温度(気温)データを定期的に送信するようにしている。



図7 社宅に設置した簡易地震計の様子

3.3 評価結果と考察

今回は加速度センサが取得したデータの送信方式として図6の「方式A」を採用した。その理由は、メモリ容量の制限から長時間の観測データを保存できないためである。例えば、十分なメモリ容量があれば方式Cのように一旦基準値を超えた加速度を検知してから閾値を下回るまでデータを保存し、そのデータをもとにセンサ端末側で計測震度の計算を行い、その結果を送信することが可能であった。

GW側の受信ログを確認した結果、温度・湿度に関するデータ送信については、30分毎に確実に受信できていることが確認できた。加速度データについては、設置期間中に閾値を超えるような地震がなかったため、人為的に揺らすことで加速度データの送信を開始させた。こちらについても、正常に受信が行われていることを確認した。

連続運用時間については、約7日間であった。机上計算で約190時間(約8日)の運用を想定しており若干短かったがほぼ想定通りであった。今回の試作した簡易地震計は汎用的なボードを利用しているため不要な機能も実装されている。今後実用化に向けて機能を絞ることでさらなる省電力化が可能と考える。

4. おわりに

本研究では地震発生時の初動対応の迅速化を目的に家屋単位での設置を目標に安価な簡易地震計の開発を行った。従来の地震計との比較実験を行った結果、相対的に加速度が小さくなる傾向があるものの計測震度を計測するには十分な精度があることを確認した。通信評価では、送信データ量の制約はあるもののLPWA(LoRaWAN方式)を利用して遠隔のGWにデータを送信できることを確認した。

今後の課題として、システム全体の小型化やさらなる省電力化など実用化に向けたハード開発、通信の制約を考慮した機器構成など検討が必要である。

謝辞 地震計の性能評価検証では東京工業大学の松岡教授に計測機器の提供をはじめ全面的にご協力いただいた。通信評価ではNTT西日本熊本支店の社宅の皆様にも場所の提供をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 気象庁: 震度観測点, (オンライン), 入手先 <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/intens-st/index.html>> (参照 2018-05-07).
- [2] 白山工業株式会社: 簡易震度計システム, (オンライン), 入手先 <<http://www.hakusan.co.jp/products/bosai/vissq-lite.shtml>> (参照 2018-05-07).
- [3] 鈴木宏伸: ローコスト地震計による超高密度地震観測に関する研究, 首都大学東京大学院(2015)
- [4] 気象庁: 計測震度の算出方法, (オンライン), 入手先 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sin.do.htm> (参照 2018-05-07).
- [5] 立命館大学理工学部地震工学研究室: 気象庁震度階の計算, (オンライン), 入手先 <<http://www.ritsumeit.ac.jp/se/rv/izuno/software.html>> (参照 2018-05-07).
- [6] 功力卓・青井真・中村洋光・藤原広行・森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 日本地震学会, 地震第2報第60巻243-252.(2008)