

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560164

研究課題名（和文）汎用的な利用が可能な稠密地震観測網の開発研究

研究課題名（英文）Study of the dense seismic observation system for generic use

研究代表者

酒井 慎一（Sakai, Shin'ichi）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：00251455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：地域ごとの揺れの不均質を知るために、小型軽量で安価な地震観測システムの開発研究を行った。揺れは、地盤構造や建築物等の違いによって異なり、被害に違いが生じていた。このような差を考慮することで、きめ細かな減災対策や救援計画の実現に寄与するような情報を提供する装置の開発を目的とした。特に大地震発生時には調査が困難であるため、現地の状態を的確に捉えて、それを必要とする被災者と救援を行う行政にいち早く伝えることが大事である。そのような、劣悪な環境においても稼働して、その後の復旧・復興に役立てられる基礎情報の提供を目指した地震計の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：The dense seismic observation system for generic use was studied. The sensor of which this system composed must be small, right, and cheap. Something suitable was chosen by the condition from the various sensors, and we try to observe then at the same time for comparison. This sensor is decided to place in an electric power outlet and fix. Data transmission by radio communication was examined for huge data collection.

研究分野：固体地球科学

キーワード：簡易型地震計 小型軽量安価 稠密地震観測網 プラグ型地震計 近距離無線通信

## 1. 研究開始当初の背景

2011年の大震災以降、様々な防災対策の見直しが行われてきた。いかに多くの人の命を助けられるかが最も重視される観点であり、地震発生後に起きる津波や火災等の様々な事象から身を守るためには、いち早く避難することが重要である。さらに、地震の揺れや津波などから逃れて生き延びた多くの人々にとって、自分たちの住居や地域の道路等がどの程度損傷を受けているのかを知り、このまま避難を続けるべきか自宅へ戻るべきか等をいち早く決めることが、その後の生活をスムーズにする秘訣である。

そのためには、建築や地盤等に関する専門家に被害状況を判定してもらう必要がある。余震の揺れによる倒壊が免れない被災建築にそのまま留まることの危険だけでなく、生活再建の第一歩である役場への罹災届を迅速に提出することにも、建築物の被災度判定を行う必要がある。そのため、被災度判定は、大地震直後には大きな需要が生じることになる。しかし、被災地域は広大で、膨大な数の被害住宅があるにもかかわらず、被災判定を行うことのできる専門家の数は限られている。専門家の調査を避難所で延々と待たなければいけないことにより、被災者たちの生活環境は悪化し、健康を害してしまうかもしれないし、避難所運営や避難者支援への行政の負荷を高めることになってしまう。

## 2. 研究の目的

そこで、地震時の揺れの情報を自動的に得ることで、建物の健全度の判断の助けとなるものとして新たな地震計を開発したいと考えた。あらかじめ観測機器を建物内の要所に設置しておけば、地震時の揺れを知ることができ、その揺れの観測値から建物がどのような力を受け

たのかが推定でき、その結果、どの程度の損傷が予想されるかの目安が得られるのではと考えたからである。あらかじめ地震計が設置されていれば、その地震計の測定値を見ることによって、専門的な知識を持たない一般の人々でも、ある程度の判定を下すことができるようになる。そして、専門家の調査を待たずに、復旧・復興につながるステップにいち早く進めることができ、総合的な災害の軽減に資するものの一つになるのではと期待した。

ただし、地震計は高価で手軽に購入できるものではなく、その設置には多少の工事や労力が必要である。さらに、そのデータを収集するシステムを構築し、得られた記録から建物の健全度を判定する解析手法も確立しなければならない。そこで、まずは、簡単に設置できる地震計の調査と開発を行った。多くの一般家庭にも設置できるような安価で小型のセンサーを調査し、比較検討を行って、その問題点を抽出した。

## 3. 研究の方法

ここで開発する地震計は、広く一般の家庭に設置されることが肝要であるため、まず、一般への普及が可能になるための条件を考えてみた。少なくとも小型で安価な地震計が必要である。しかも、設置が簡単で、特殊な工事が無く、電力供給やデータ収集に手間がかからないことも大切である。その上で、地震時に得られた観測値から、一般の人々でも判定できるようなものに変換する手法とそれを表示するシステム等が必要になってくる。

そこで、まず、既存の振動センサー(MEMS)を調査し、その性能や価格等の比較を行った。いくつかのセンサーを購入して、部屋の中での比較観測を行ったり実際の野外観測を行ったりして、検討を進めた。さらに、設置方法や電力供給方

法、データ収集方法等の仕様に関する調査を行い、どのような形状が望ましいのか検討を行った。ここでも、様々な方法が考えられ、実際に比較実験を行って比較してみた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 地震計固定方法の検討

まず、どのような設置形態が良いか色々検討した。最終的には、どこにでもある電力コンセントを利用して、それに挿すこととした（今後はプラグ型地震計と呼ぶ）。このプラグ型地震計の中身は、基盤に組み込んだ小さなコンデンサーを利用して、加速度を測定する MEMS センサーで、電力コンセントに差し込むことで電力の供給を受けて連続稼働する。壁のコンセントに挿すことで固定されるため、新たな設置工場の必要がなく、地震時の大きな揺れでも簡単には外れず、建物そのものの揺れを計測できると考えられる。さらに、センサーからの出力が加速度値であるため、地震時の揺れが収まった後の三軸の値から、鉛直下向き方向が推定できる。それによれば、壁がどの程度傾いているか（すなわち建物の傾斜）を知ることにつながり、専門的な測定をせずに、建物の損傷度を測る重要な情報の一つになる。低消費電力のセンサーを導入すれば、小さな電池を組み込むだけで、大地震時の停電の際にもある程度の時間は計測可能である。小さな液晶パネルもしくは LED ランプを取り付けることで、地震時の計測震度相当値を表示させることができるため、一般への展開が容易になるのではと思われる。

電力コンセントを利用することには、まだ多くの利点がある。電力コンセントなので、当然、電力の供給が確保されている。揺れを感じるセンサーとして安価で小型なものを選択すれば、生活の支障にならないで、どこにでも設置できる。電力コンセントは、建物内外の多くの場所に存在するため、設置場所に困らない。このため、一般への展開がしやすくなり、多くの地点での揺れを直接測定するこ

とができ、飛躍的に高密度な地震観測網が実現する。その結果、ひとつの建物内に多数の観測機器が設置可能になるため、建物のねじれ振動や回転運動等の情報も得ることができ、より高度な解析に使用できるデータを得ることが可能になる。そこから建物の健全度を見積もることが可能である。これまでの健全度判定は、専門家による立ち入り検査によってなされていたが、すぐその場で知ることが可能になる。その結果、避難継続もしくは利用可能かどうかを迅速に知らせることができ、その後の復旧・復興計画の策定に大いに役立つ情報となる。

##### (2) データ伝送方法の検討

揺れの情報を現地の機器に蓄積することは容易であるが、そこに行き行って回収しない限り情報は得られない。そこで、無線通信システムを組み込むことができれば、迅速な情報収集に役立つ。大地震発生時は、建物が崩壊や火災の危険があり、現地調査が困難であるが、内蔵された電池で稼働する無線通信があれば、センターに居ながら目的の地点の情報をリアルタイムで知ることができる。地震計だけでなく、温度計や煙感知器等のセンサーも取り付け可能にすれば、総合的に判断を下すことができるようになり、その後の避難誘導や救援体制の確立に大いに役立つ情報収集手段になりうる。

現地の被災者にとってラジオやテレビから放送される情報が大事であるが、大地震発生直後にもっとも必要な情報は、今いる地点とその周辺の被災状況である。その地点の揺れを知るためには、その地点で測るの必要があり、このシステムはそれを実現することを目標とした。となりに設置されたプラグ型地震計との無線通信が可能になれば、近所の情報（建築物や道路の崩壊状況、火災状況等）が得られる。逆に、現地では知れない情報（例えば、津波避難情報、大雨洪水警報等）を、センター側から配信す

ることが可能になる。そのような情報があれば、どちらの避難経路を選択すべきか、向かうべき避難所が安全であるかどうかを知ることができる。このような仕組みが、すべての生活の場に展開することで、安心・安全な街の実現に近づくとと思われる。

しかし、今回の研究の中では、そこまでの開発はできなかった。現在、携帯電話等で一般的に使われている SIM カードを使用し、FRMA 回線を用いた伝送実験を継続している。ただ、一般回線は災害時には不具合を起こす可能性があるため、そのような時でも利用のできる近距離通信を確立させ、データの収集を行う技術を開発する必要がある。

### (3) 地震研での比較

小型 MEMS センサーを手に入れ、居室のテーブル上や地下地震計室に設置し、比較観測を行った。地震計には様々なものがあるが、ここでは、高性能な高価なものではなく、携帯電話やゲーム機等に組み込まれているような小型で安価な MEMS センサーを調査し、プラグ型地震計に組み込み可能なものを選択した。

いくつかのセンサーを用いて、試作したが、安価で小型なものは、AD 変換時のシステムノイズが大きい。サンプリングレートを上げるとノイズレベルも高くなる。しかし、大振幅が入力されれば、それなりに記録できることが確認された。今回、必要とするセンサーは、建物が損傷する恐れのあるような大きな揺れを観測することが目的であるため、この程度のノイズレベルなら、問題にならないことを確認した。複数の MEMS で同時観測を行ってみたが、若干の機差があるものの大きな違い（倍から半分）は見られなかった。

### (4) 足尾観測点での比較

小型 MEMS センサーを地震研究所観測開発基盤センターの足尾観測点（栃木県日光市足尾）に設置し、約 5 時間の比較

観測を行った。足尾観測点は、関東地方の地震観測点の中では、比較的ノイズレベルが低いため、自然地震による振動の観測を行ったり、地震計のシステムノイズを確認したりするために適している。しかし、今回の観測に用いた MEMS は、そんな低ノイズレベルで観測する必要が無く、大きなシステムノイズであった。そのため、得られたデータの中から自然地震の波形を見つけることは困難であった。

### (5) 鋸山観測所での比較

小型 MEMS センサーを地震研究所観測開発基盤センターの鋸山観測所（千葉県富津市鋸山）に設置し、約 7 日間の連続観測を行った。鋸山観測所には、地殻変動観測用の横坑があり、温度や気圧の変化が少ないため、長周期の変動を調査するために使用されることが多い。

ここでは、ひとつの金属板に複数の MEMS を固定して、長周期の時間変化を見ることにした。やはりノイズレベルが高く、7 日間では顕著な長周期の変動が観測されなかったため、比較することができなかった。長周期の揺れが顕著に現れる高層ビルや長大橋などでの比較観測が必要なのもかもしれない。

### (6) SIM カードを使ったデータ伝送実験

SIM カードを使ってデータを伝送する地震計を試作し、地震研究所地下地震計室に設置して、その観測状況及び問題点の抽出を行った。普段、地震研の地震観測点で使用している地震計と並べて設置し、地震時の波形の違いを調査した。

大きめの振幅（数ガル）が入力されると地震前後の 120 秒間をメモリに蓄え、それを伝送する仕組みにした。地震研の地下室は比較的静かな環境ではあるが、都内であるため車や人の往来等の雑音が入る、ノイズでのトリガが多かった。

トリガ設定レベルを設置場所ごとに設定する必要があることが分かった。

トリガ波形の中には、1割程度、実際の地震動を収録した場合があります、そのような波形を通常の地震計の波形と比較した。その結果、振幅は、だいたい同じくらい（倍から半分程度）であるが、時刻制度が悪く、時刻補正の技術を開発する必要があることがわかった。AD変換のシステムノイズが大きいため、有感地震程度の大振幅が入力しないとトリガがかからなかったが、実際の利用もそのような場合だけであると考えれば、この程度のセンサーで十分なのかもしれない。

#### (7) 安来市でのデータ伝送観測実験

実際にSIMカードを使ってデータを伝送する地震計を島根県安来市に設置して、その観測状況及び問題点の抽出を行った。低消費電力のAD変換器やデータ伝送装置を取り入れたため、単一乾電池48本で約1年間の観測が可能であった。しかし、実際に野外に設置したところ、仮に下見のときに電波状態が良い場所であっても、時間帯によって状況が不安定になってしまい、予想外にデータ収集に時間のかかる観測点が多数見られた。データ取得方法（現在は、1日に4回）を改善したり、電波の接続方法を変えたりする必要があることがわかった。

野外観測の場合、乾電池やバッテリーで稼働させることが多いため、通信時間を極力減らして省電力化させている。そのことが、却って通信の不安定さを引き起こす原因となっているのかもしれない。今回、検討している地震計は、室内に設置することを標準として考えているため、商用電源が確保されているとして、確実な通信手段を確立した仕組みにすべきなのかもしれない。

#### (8) この地震観測システムの問題点と今後の展開

このような地震計は、広く一般に利用されることを目的としたため、地震観測

に適した良好な環境に設置されるわけではなく、ノイズレベルが低いとはいえ、1点ごとの観測精度は期待できない。したがって、観測されたデータは、多点で稠密であることを活かしたデータ解析手法（計測震度相当値の見積もり、震源決定、発震機構解の推定、応力状態の推定、応力状態の時間変化の推定等）の改良を試みる必要がある。そもそも、都市部での利用を想定しているためノイズレベルが高くなることを覚悟した上で、飛躍的に稠密な観測情報を得ることで、これまでの手法とは異なる手法の開発が必須である。

地震観測において、時刻の精度は最も重要な問題であるが、屋内に設置する場合は、GPS信号を元にした時刻制御を行うことは困難である。電波時計を組み込む技術や電力線から時計の情報を得る技術等の開発を行い、それがプラグ型地震計に組み込み可能かどうかの調査を行う必要がある。

一方で、このような地震計が、多点稠密に設置されることで、様々な情報を得ることができるが、これは建物の健全度判定だけでなく、その他の研究にも応用することができる。例えば、大地震発生後は、震源域周辺で多くの余震が発生するが、多点稠密な地震観測網で収録されたデータは、余震の発震機構解を精度良く求めることに利用される。その発震機構解の分布から、地下の応力分布を推定し、その後の地震発生を予測するための重要な情報になる。一方、地震発生以前の揺れのデータは、その地点の揺れやすさの情報を含んでいる。あらかじめ、地盤および建築物の共振周期がわかっているならば、的確な地盤改良工事で建物の耐震補強を行うことができる。さらに揺れやすさの時間変化を見ることで、建築物の劣化を知ることも可能になる。

仮に、データをリアルタイムに収集することができれば、迅速な救援体制の確

立や消火作業の開始に結び付けられる。無線通信機能を付加すれば、電力線や電話線に不具合が生じた際にも情報を得ることができる。逆に、センター側から避難情報、津波情報、余震情報、火災情報等を現地の被災者に直接伝えることが可能になる。都市部で大地震が発生した際には、同時多発的に様々な事象が発生することが予想されるため、このような地域に密着した情報収集配信システムは、大事なアイテムになるであろう。

一方で、地域では、どのような情報が必要なのか、それがどのように集約されれば役立つのか、それをどのように伝えるべきなのか等、地域の人にとってどんな情報が必要とされるのか、地域の防災担当者等に聞き取り調査を行う必要があった。地震計だけでなく、その他の環境測定機器の調査を行うことは、災害発生後に救難活動をする際にも、どのような被災状況になっているかの把握に役立つかもしれない。災害発生前に想定された防災計画とは異なる事象が発生することが考えられるため、その時点での被災状況を取得しながら救出経路やその優先順位等を臨機応変に変えていく必要がある。

実際に災害が発生した際、現地に行かなくてもさまざまな情報が準リアルタイムで取得できれば、その後の救援や支援活動に大いに役立つに違いない。まだ、地震計の比較観測しかできず、具体的な展開に結びついていないため、更なる観測実験を繰り返し、実用的な地震計に改良する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

なし

[雑誌論文] (計 件)

なし

[学会発表] (計 件)

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 慎一 (Sakai Shin'ichi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：00251455