

平成30年6月7日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12481

研究課題名(和文) オープンコントロール・クリスタルを用いた長期安定性を有する加速度・傾斜計の開発

研究課題名(英文) Development of an accelerometer to observe vibration and inclination using oven controlled crystal oscillator

研究代表者

盛川 仁 (Morikawa, Hitoshi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：60273463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：実用化されている水晶振動子を用いた加速度センサは振り子を用いた加速度センサとは異なり、小型であっても原理的に高感度で加速度の変化を測定可能である。このことに着目して加速度振動や傾斜、重力の測定を一台でカバーできるセンサーのための要素技術を開発した。傾斜や重力のような静的、高感度、高分解能が要求される物理量の測定では水晶振動子の温度特性の影響が支配的であることを明らかにした。そのうえで、出力される加速度値に対する温度補正アルゴリズムを開発し、温度補正によって重力まで測定可能であることを実観測を通して示した。

研究成果の概要(英文)：An accelerometer has been developed using crystal oscillator and it has very high sensitivity and accuracy in principle. This means that we can observe vibration, inclination, and gravity using only one sensor. However, the output data of acceleration is contaminated by fluctuation of temperature. We developed an algorithm to correct the affect by temperature and applied it to gravity data which was obtained in a real field. The corrected data can be applicable for basic gravity survey and the results suggested that more accuracy can be realized through a DOCX (double oven crystal oscillator) type system.

研究分野：地震工学

キーワード：水晶振動子 加速度計 地震動

1. 研究開始当初の背景

地震や豪雨などの自然災害に際して、重要な社会基盤施設がどのような状態にあるかを正しく知ることは、災害発生後に被災者の救助等の初動体制の確立において極めて重要である。また、高度成長期に作られた多くの構造物が耐用年数に近づいており、これらの施設がどのような状態にあって、経年劣化などの影響を受けているかどうかについても多くの関心が払われるようになってきている。このような背景のもとで、社会基盤施設の常時モニタリングの必要性が高まっており、それとともに安価で高性能、かつ長期安定性を有するセンサーの開発が急務となっている。

申請者らは世界最高クラスのセンサー密度をもつ地震動の高密度地震観測(Goto et al., 2012) や鉄道高架橋の実構造物における長期にわたる連続観測に基づく構造物の動特性の同定(Tang et al., 2014) などの研究を行ってきた。従来はこのような長期間の高密度観測は国内外によらずほとんど例がなく、観測システムのハード、ソフトに関するノウハウは十分ではなかった。しかし、観測を実施する過程で、高密度地震観測網の重要性はもとより地震計の長周期特性やコスト、長期安定性などが精度上の問題となることを知るに至った。

一方、盛土などの土構造物の地震時あるいは降雨時の挙動について十分な観測事実が蓄積されておらず、どのようにして災害(被害)に至るのかについては未解明の部分も少なくない。これは、土構造物に常時モニター用のセンサーが十分に置かれていないだけでなく、傾斜と震動という異なる物理現象を効率よく測定できないことも理由の一つであろう。特に傾斜はセンサーの長期安定性が実現されなければ、土構造物の傾斜の変動なのかセンサーのドリフトなのか区別がつかない、という観測を行う上での本質的な問題を抱えている。

2014年、水晶振動子を用いた加速度センサーが初めて実用化され、有感地震のようなある程度大きな震動の測定や傾斜の測定に利用できるようになった。しかし、微小レベルの震動についてはセンサーそのものの感度はあっても(1) デジタル化する過程で十分な分解能を得ることができない、(2) 温度の影響を大きく受ける、(3) 水晶の長期ドリフトの影響を受ける、(4) 接着剤などの樹脂材料の温度ヒステリシスの影響を受ける、などの問題によって十分な精度が得られないことも明らかとなってきた。そこで温度の影響を避けるために水晶をオープンに入れて温度安定性を高めたセンサーの開発が急務となっている。

<参考文献>

Goto et al. (2012), *Seismological Research Letters*, 83(5), 2012, pp.765-774.

Tang et al. (2014), 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, 2014. 12, pp.518-522.

2. 研究の目的

本研究は、振動加速度と傾斜を、さらには可能であれば重力をもひとつのセンサーだけで長期間にわたって安定して測定可能なセンサーの開発を目的としている。このため、従来の振り子を用いた加速度センサーとはまったく異なる原理によって加速度の変化を測定可能な水晶振動子を用いる。さらに、センサー性能にとってもっとも重要な温度安定性を確実なものとするために、オープン内で水晶を厳密に温度管理するオープンコントロール・クリスタル(OCX) 型とすることで性能の劇的な向上とコストの大幅な圧縮を実現しようとするものである。

3. 研究の方法

水晶振動子の固有振動数が加速度(重力)に依存することを利用した新しい振動センサーを開発する。原理的には極めて広帯域、広ダイナミックレンジのセンサーを作ることができる。しかし、温度や経年変化によって固有振動数がドリフトするため、安定して高精度の出力を得ることができるよう、水晶の振動周波数を高精度に検出するための周波数カウンタの精度の検証、温度変化によるドリフトを極小化し、かつ製造工程での温度校正のためのコストを省くために水晶振動子をオープンに入れて温度管理するオープンコントロール(OCX) 型のセンサーを新たに開発した。センサーの性能試験には、センサーを観測システムとしてアッセンブルしたうえで、安定した温度環境のトンネル内、既存の地震観測網、重力や傾斜等の測定が行える新たな環境等の異なるフィールドに装置を設置して実証試験を実施し、観測装置としてのオーバーオール性能を検証した。

4. 研究成果

本研究の開始当初に実用化されたばかりのセンサー(以下、現行品と呼ぶ)を用いて、その特性を検証した。トンネル内にセンサーを設置して長期安定性の検証を行った。特に、センサーが強い温度特性を持つため、温度変化による応答の変化を調べると共に、恒温槽にセンサーを入れて、安定した温度のもとで測定を続けた。また、測定の実施にあたっては、データロガーや電源システム等の周辺装置を作成しシステムとしてのトータル性能評価を行った。

この結果、長期安定性についても問題なく、2~3年程度のオーダーでは問題なく動作していることを確認した。また、非常に高価な加速度センサーと比較して、ノイズレベルはいくぶん劣るものの、一般的なMEMSと比較して十分に高い性能を有していること、温度特性が加速度の測定精度に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

水晶振動子は、水晶振動子の固有振動数をカウンタで数えてデシメーションフィルタで処理した後の値を出力している。したがっ

て、当初、デシメーションフィルタの性能が重要であると考えてデシメーションフィルタの改良を実施することを計画していた。しかしトンネル内での測定結果の検討から、温度の影響が特に大きく、デシメーションフィルタについては現行のアルゴリズムでも、温度の影響に比べれば十分な性能であることがわかった。そのため、実験をとおして温度とセンサー出力の関係を明らかにし、温度の影響を取り除く手法について検討した。その結果、センサ用水晶とカウンタ用水晶の両者の温度特性の影響を個別に取り除く必要があることが明らかとなり、それには Hilbert-Huang変換が有効であることを明らかにした。

温度が大きく変動する屋外での検証を行うにあたって温度管理を行うことができる魔法瓶を作成し、そのなかにセンサーを入れて疑似的にOCX型として動作可能なセンサーを作成した。そのうえで実際に屋外で観測をおこなって性能試験を行った。最も高い分解能と温度安定性が必要となる重力測定のパフォーマンスを行うことで傾斜の測定における性能は十分に検証可能であるため、性能試験にあたっては構造物（高架橋梁）の振動や重力値などを測定した。水晶振動子を重力計として用いる際には相対重力値の測定を行い、既知の絶対重力値との比較からセンサの重力計としての測定精度を明らかにし、温度特性を同定のうえ補正関係を作成することで重力計としての実用可能性を示した。その一方で、より高い精度での測定にはOCX型よりもより温度安定性の高いDOCX（ダブルオープンコントロールクリスタル）型とすることが望まれることを明らかにした。

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）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

松田滋夫, 中仙道和之, 盛川仁, 飯山かほり, 坂井公俊, 水晶振動子による加速度センサーの感度特性に関する一検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.74, No.4, 2018, (印刷中)
坂井公俊, 本山紘希, 室野剛隆, 盛川仁, 荒木正之, 松田滋夫, 浦口尚貴, 高架橋の地震時不同変位計測のための高密度地震観測システムの構築, 土木学会論文集 A1, 査読有, Vol.72, No.1, 2016, pp.107-118
DOI: <https://doi.org/10.2208/jscejsee.72.107>

〔学会発表〕(計 9 件)

松田滋夫, 中仙道和之, 盛川仁, 飯山かほり: 水晶振動子による加速度計の感度

に関する基礎的研究, 物理探査学会 第137回(平成29年度秋季)学術講演会, 2017.11/8-10, 横浜

松田滋夫, 中仙道和之, 盛川仁, 飯山かほり, 水晶振動子による加速度計を用いた重力測定の可能性に関する検討, 日本地震学会秋季大会, 2017.10/25-27, 鹿児島

松田滋夫, 中仙道和之, 盛川仁, 飯山かほり, 坂井公俊, 水晶振動子による加速度センサーの感度特性に関する検討, 第37回地震工学研究発表会 2017.10/11-12, 熊本

盛川仁, 野口竜也, 駒澤正夫, 有村翔也, 田村充宏, 中山圭, 荒木俊, 宮本崇, 飯山かほり, 秦吉弥, 吉見雅行, 香川敬生, 後藤浩之: 益城町市街地における重力探査に基づく重力基盤構造の推定, 平成28年度防災研究所研究発表講演会, 2017.2/21-22, 京都

Hamasaki, S., Iiyama, K., Mitsunaga, H., and Morikawa, H., "A method for modal identification of existing structures using microtremors", 16th World Conference on Earthquake Engineering(国際学会), 2017.1/9-13, Santiago, Chile

飯山かほり, 上野翔太, 山崎義弘, 盛川仁, 坂田弘安, 廣瀬壮一, 後藤浩之: 実被害との対比に基づく木造建物の層剛性モデルの設定, 日本地震学会2016年秋季大会, 2016.10/5-7, 名古屋

Iiyama, K., Yamazaki, Y., Goto, H., Morikawa, H., Sakata, H., and Hirose, S., "Damage analysis of wooden houses subjected to 2011 Tohoku earthquake in Furukawa district, Miyagi, Japan", 5th IASPEI/IAEE Int'l Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion(国際学会), 2016.8/15-17, Taipei

盛川仁, 飯山かほり: 任意形状アレーによる位相速度推定のための一考察, 日本地震学会2015年秋季大会, 2015.10/26-28, 神戸

Mitsunaga, H., Iiyama, K., Morikawa, H., Goto, H., Inatani, M., Hada, K., Ikeda, T., Takaya, T., Kimura, S., Akiyama, R., Sawada, S., "Estimation for velocity structure of shallow sediments using microtremor array observation in Furukawa, Japan", 日本地球惑星科学連合2015年大会(国際学会), 2015.5/24-28, 千葉

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

盛川 仁 (MORIKAWA, Hitoshi)
東京工業大学・環境・社会理工学院・
教授
研究者番号：60273463

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

坂井 公俊 (SAKAI, Kimitoshi)
公益財団法人鉄道総合技術研究所・鉄道
地震工学研究センター・副主任研究員
研究者番号：50450739

(4) 研究協力者

中山道 和之 (NAKASENDO, Kazuyuki)
セイコーエプソン株式会社・センシング
システム事業部

松田 滋夫 (MATSUDA, Shigeo)
クローバテック株式会社・代表取締役社
長