

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740301

研究課題名(和文) 光ファイバ変位計と精密機械工作を応用した高精度微気圧計の開発

研究課題名(英文) Development of a novel microbarograph realized with an optical transducer and precise mechanics

研究代表者

高森 昭光 (TAKAMORI, Akiteru)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00372425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地震や津波、雪崩などによって生じるインフラソニック波の観測や、重力や地球ひずみの精密観測データの補正など、固体地球研究の様々な分野で気圧の稠密観測の重要性が高まり、それに適した低コストで高分解能の気圧計が求められている。本研究では、ヒステリシスの生じない成型ベローズとその変形を読み取るための光ファイバセンサーを組み合わせる新方式を採用することによって微気圧計に必要な技術開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to enable studies on infrasonic waves induced by earthquakes, tsunamis and avalanches, as well as to improve corrections to the precise observations of Earth's gravity and deformations, direct observations of atmospheric pressure with dense microbarographs are becoming crucial in many fields of solid Earth science. The device optimized for such purposes has been developed in this study. The design of the new microbarograph includes a hysteresis-free formed bellow and non-contact optical fiber transducer to achieve required resolution within a reasonable manufacturing cost.

研究分野：固体地球科学

キーワード：微気圧計 インフラソニック波 光ファイバセンサー

1. 研究開始当初の背景

地球表面を覆う大気と固体地球とは、様々に相互作用していることが、近年の重力・ひずみ・地震や地球回転の精密観測を通じて明らかとなっている。

たとえば、地震や火山の噴火に伴う地表の運動によって大気中に低周波(約20 Hz以下)の音波であるインフラソニック波が放出されることが知られており、微気圧計を用いて実際に観測されてもいる(Watada, et al., GRL, 2006)。これまでの地動観測に基づく地震や火山爆発現象の定量化に加え、従来困難であった地表付近の急激な地殻変動や爆発現象の定量化へ道が開けつつある(Watada, JFM, 2009)。特に、気圧の観測点を多数・稠密に展開してインフラソニック波を捉えることができれば、データを相互補完して精度の高い情報を得られるだけでなく、伝達経路にある大気に関する物理量(密度や気温など)の面的分布を取り出せる可能性もあり、将来的には気象学への応用も考えられる。

このように、音波、すなわち局所的な気圧変動はそれ自体が固体地球物理学、気象学的に意義深い観測量である一方、他の観測において深刻な「雑音」となることもある。一例として地球重力の精密観測が挙げられる。これは、地球の固有自由振動による重力加速度変動を観測することにより地球内部構造を解明することを目的とした研究である。このような重力変化はきわめて小さいが、超伝導重力計を用いて非常に高い精度の観測が実現されている(Courtier, Phys. Earth Planet. Inter, 2000など)。この観測において、重力計周辺の大気分布が変化すると、大気による上方への重力(万有引力)の分布が変化し、地球変形による重力変化に対する雑音となる。現状では重力観測点で気圧計を用いて観測した気圧変化をもとに大気密度変化に伴う重力変動を推定して、超伝導重力計のデータから取り除くという補正が行われている。しかし、補正の精度は不十分であり、観測にとって最大の制限要因となっている。この問題を克服するためには、重力の観測点1箇所だけではなくその周辺で稠密に精度の高い気圧観測網を展開してより詳細な気圧データを得ることが必要だと考えられている。他の例としては、研究代表者らが行っているレーザー干渉計を用いた精密ひずみ観測がある。この観測において地球自由振動を直接捉えることには成功しているが、大気の荷重変化の影響を補正する必要がある。これもひずみ計周辺の複数の点での局地的な大気圧変動を観測することによってより有効な補正を行うことが可能であると考えられる。

以上のように、気圧の多点稠密観測を行うことは、地震の多点観測がそうであったように、地球科学に本質的な発展をもたらす可能性がある。また、2011年東北沖巨大地震に伴う津波によって引き起こされる気圧変動が

千葉県で観測された例(Arai, et al., GRL, 2011)もある。したがって、特に強い地震動を伴わないいわゆる「津波地震」に対する防災につながる可能性もある。それにもかかわらず、現状ではそのような取り組みはほとんど行われていない。理由としては、気圧は比較的空間代表性の高い物理量であると考えられたため低密度の観測網で十分だと判断されていたこと、上記のような現象・問題はひずみや重力の観測手法が高度化することによってはじめて顕在化してきたことなどがあげられる。また、現実問題として、多点での稠密観測に適した気圧計が存在しないということも無視できない事実である。たとえば、インフラソニック波の観測には0.01 Pa程度、超伝導重力計のデータ補正には0.1 Pa程度の気圧分解能が要求される。従来の気圧計で保証される分解能は0.1 Pa程度なので、インフラソニック波の精密観測には不足しているのに加え、非常に高価であるため多点展開に用いるのは非現実的である。また、重力観測にあたっては1ヶ月程度のオーダーでの安定性(低ドリフト性)が要求されるが、現在入手可能な気圧計でこのような性能は実証されていない。

2. 研究の目的

前項で述べたように、固体地球の研究において、高精度な気圧の多点観測の重要性が高まっているため、それに適した気圧計の技術開発をすることが本研究の目的である。市販の高精度気圧計で実現されているような分解能を実現できる、より簡素(低コスト)で運用の容易な気圧計に必要な技術の研究開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的である高性能・低コストの気圧計を実現するために、ペローズ型の気圧計に必要な技術開発し、気圧計を試作する。試作機と参照用の市販気圧計との比較観測を行うことによって総合的な性能評価を行う。

高精度の気圧観測に適したペローズ型の気圧計では、内部を真空にした参照ペローズが気圧変化に伴い変形する量から気圧を測定する。従って、気圧計の分解能や安定性は、変形読み取り用の変位センサーの性能とペローズの機械的特性によって決定される。従来の気圧計では変位センサーとして差動トランスや水晶発振素子が用いられてきた。どちらの方式でも0.1 Pa程度の分解能は達成可能であるが、差動トランスには擾乱によるがたつきなどがあり長期の運用には不向きである。一方、後者ではペローズに水晶発振素子を固く取り付けのため、気圧応答に水晶発振素子の非線形性(ヒステリシス)が悪影響を与え、長期的に確度が保証できない。また、水晶発振方式は高価である。よって、従

来の気圧計は長期間・多地点での観測には適していない。また、インフラソニック波の精密観測に必要な 0.01 Pa の分解能を保証する製品は市場に存在しない。

一方、研究代表者が研究開発した光ファイバを用いた変位計（光ファイバセンサー）は傾斜計や地震計といった観測機器への組み込みを目的にしたもので、長期安定度や分解能を高める工夫をしてある。水晶発振素子などと異なり、光センサーは完全非接触でベローズ変形を観測できるので気圧への応答を妨げない。また、安価に製造できる。加えて、予備実験として実際にベローズ変形を同種の光センサーで 1 週間程度測定して市販の高精度気圧計と比較した結果、全期間に渡る分解能と安定度の両面で高精度気圧計と同程度以上の性能を有し、インフラソニック波の周波数帯域では 0.01 Pa の分解能を達成していることを確認できたので、光ファイバセンサーは気圧計に用いる変位センサーとして従来方式よりも優れているという結論に至った（図 1）。

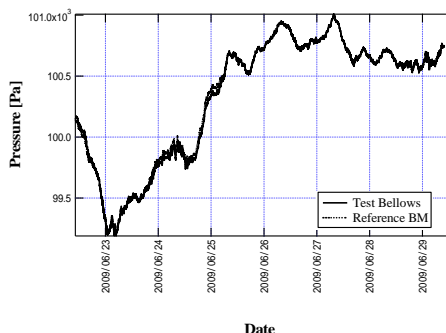


図 1：予備実験結果

本研究で当初計画した気圧計の模式図を図 2 に示す。ベローズは蛇腹構造をした金属筒であり、鉛直方向にバネとして機能して大気圧を支える。従って、内部を真空に保ったベローズを大気中に設置すると、大気圧の変化に伴って上下に伸び縮みするので、その高さの変化を変位センサーで測定すれば大気圧を測定することができる。従来はベローズの変形量を測定するのに差動トランスや水晶発振素子が用いられてきたが、今回開発した気圧計では研究代表者が研究開発した光ファイバセンサーを用いることとした。光ファイバセンサーでは、測定対象に取り付けた鏡にファイバを通した光を投射して、反射光を再びファイバで集光してその強度を測定する。適切に配置すると、反射光強度はセンサーと対象物の距離に比例するので、光強度から対象物の位置を知ることができる。当初は真空中にセンサーを配置することによって、鏡の経年劣化や光ファイバの温度変形を抑制して大気中で確認した長期安定度(1 nm オーダー、0.1 Pa の圧力変化に相当)よりも良い安定性を実現すること、機械アンプを用いた変形量の増幅を目指したが、これについては後述するように変更を余儀なくされた。

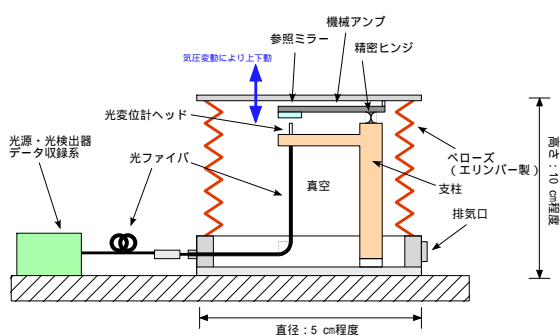


図 2：気圧計の概念図

ベローズの変形を機械アンプで増幅し、光ファイバセンサーで測定する。ベローズの大きさは直径約 5 cm、高さ 10 cm 程度、気圧計本体の重量は 500 g 以下。ベローズ内部は真空に保たれる。

4．研究成果

先述の通り当初は光ファイバセンサーのヘッドを参照ベローズ内部に配置する計画であった。安価な溶接ベローズ（金属リングを溶接によって連結して蛇腹部分を構成する）の使用を計画していたが、調査を進めるうちにそれでは気圧変化に伴う変形にわずかなヒステリシスが発生するため参照ベローズとしては適さない事が明らかとなった。これを解決するには、蛇腹を一体形成した成型ベローズを使用する必要があるが、一般的に成型ベローズは高価であり、特に光ファイバセンサーと機械アンプを組み込める程度の大きさのものを製作するには研究予算が不足する事が明らかとなった。また、低コスト化も本研究の主要な課題なので、設計を変更して小型の形成ベローズを用いる事にした（図 3）。材料についても、計画当初はエリンパー等、弾性特性の温度依存性が低い金属を用いる予定であったが、加工性の問題から形成ベローズの製作が困難である事が判明した。このため光ファイバセンサーはステンレス製のベローズの外部に配置して、小型化のために当初計画していた機械アンプも省略するよう設計を変更した上で試作を行った。変更後の気圧計試作機は図 4 に示す通りである。なお、当初計画よりも気圧計本体を小型化できた点は設計変更に伴う利点である。



図 3：小型成型ベローズ（直径約 6 mm）

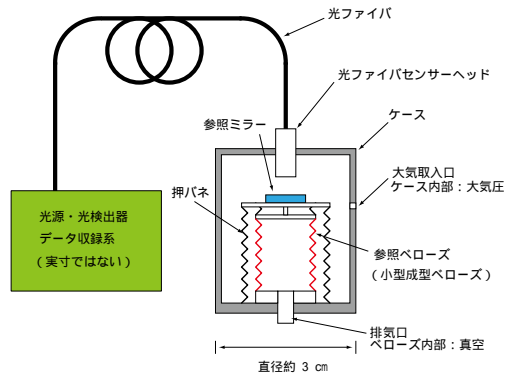


図 4：設計変更後の気圧計の構成

他方で、光ファイバセンサーの性能を評価するため、これを用いて振り子変位の長期観測を行った。振り子の変位は地面の傾斜によって変化するので、同一箇所に設置した水管傾斜計の記録と比較することによって、センサーの分解能を推定することができる。その結果、長期にわたり 0.1 nm 程度の分解能を安定して維持できることが明らかとなり、長期の気圧観測に適したセンサーであることが確認できた（気圧計としての安定性は参照ベローズの気圧応答にも依存する）。

当初予見できなかったベローズのヒステリシスの問題解決を通して、結果的にはより小型で低コストな気圧計を設計開発するという成果を得た。

なお、設計変更などに伴う開発期間の延長によって研究期間内に長期観測による性能の検証を完了するには至らなかったが、製作した気圧計試作機と市販の高性能気圧計（Paroscientific 社 6000-16B）との比較観測を行い、長期の性能評価を継続する予定である。

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）

〔学会発表〕（計 1 件）

1. 高森昭光，光ファイバ変位計を用いた高精度微気圧計の開発，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，2013 年 5 月 24 日，幕張メッセ（千葉県千葉市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高森 昭光 (TAKAMORI, Akiteru)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00372425