

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340127

研究課題名（和文） 神岡山頂における気圧観測 3次元気圧データによる精密重力補正

研究課題名（英文） Meteorological Observations at Mt. Ikenoyama, Kamioka  
- A 3-D Barometric Correction for Superconducting Gravimetry

研究代表者

今西 祐一（IMANISHI YUICHI）

東京大学・海洋研究所・助教

研究者番号：30260516

研究成果の概要：

スーパーカミオカンデで知られる神岡鉱山の真上にあたる池ノ山（標高1369m）の山頂付近に、高精度な気圧計を設置して連続観測を行った。地下に置かれた超伝導重力計による精密重力観測におよぼす大気の影響を、精度よく補正するためである。山の上と下で測られた気圧データにもとづき、大気の鉛直構造を考慮に入れてモデリングを行うことが、周期数時間といった短周期帯域における重力の残差を小さくするのに有効であることがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	8,100,000	2,430,000	10,530,000

研究分野：測地学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：超伝導重力計・気圧・神岡

## 1. 研究開始当初の背景

岐阜県神岡の鉱山トンネル内に設置された超伝導重力計は、安定した環境により非常に高い品質の記録を生産し続けており、その解析によって、たとえば地球の流体核の浮力振動といった、未知の現象に起因する信号が検出されることが期待されている。こうした試みにとっての最大の障害は、大気の影響である。大気は、自身の質量による万有引力と、荷重による土地の変形を通して、重力の観測値に影響を及ぼしている。大気の質量分布はたえず変化しており、それによって重力加速

度に最大で10 $\mu$ Gal程度の変化を生じる。

この効果は、従来、重力観測点に置かれた気圧計の記録を用いて補正するのがふつうであった。観測点の直上の大気のコラムを考えれば、気圧変化と重力変化とはほぼ比例することがわかり、その係数（アドミッタンス）は観測点に固有の定数のように扱うことができたからである。しかし、重力スペクトルのより微細な構造が議論されるようになるにつれて、こうした補正法では不十分と考えられるようになってきた。それは、第一に、直上の大気だけでなく周辺の（厳密に言えば全球の）大気による寄与があるため、第二に、

アドミッタンスは大気温度やスケールハイトに依存し、季節的にも一日のうちでも変化しているためである。

この問題に対して、全球大気の数値モデルを用い、重力への影響を解析的に計算する試みがなされている。この方法は、周期5日程度以上の帯域においてはノイズレベルの低減に一定の成功を収めているが、大気モデルの時間・空間分解能の制約から、より短い周期帯域においてはまだ実用的とはなっていない。流体核の浮力振動の周期は数時間程度と考えられており、このいわゆるサブサイクリック帯域での高精度の補正は、グローバルモデルからは当分できそうもない。

とくに短周期帯域では、観測される重力に大きな影響を与えるのは、せいぜい観測点周辺の数程度程度の範囲であることから、観測点の周辺に気圧計を多数配置し、面的な気圧分布の変化を実際に測ってしまうという試みも行われ始めている。日本でも、岐阜県神岡と長野県松代という2つの重力観測点が比較的接近していることを利用して、それらを取り囲むような形で、ローカルな気圧観測ネットワークが構築されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のようなローカルな気圧観測ネットワークを、3次元に拡張することである。大気のアドミッタンスは、大気の水平構造だけでなく、鉛直構造にも依存する。大気は、鉛直方向には近似的に静水圧平衡にあると考えられるが、日射などにより駆動される山谷風などの局所的な現象によって気圧の鉛直勾配が常時変化している。鉛直勾配はアドミッタンスに直接影響するため、重力の補正にとっては重要なパラメータとなる。これを推定するには、上空の気圧を測ればよいが、そのような観測はふつうの場所では困難である。ところが神岡の場合は、それが可能となるような特殊な状況がある。神岡の超伝導重力計観測点は、山腹をほぼ水平にくりぬくトンネルの奥にあり、池ノ山という山(標高1369m)の頂上のほぼ真下約1,000mの位置にある。重力計観測室においても気圧を記録しているが、これはトンネルのレベルにおける平均的な気圧に等しいと考えられる。そこで、山頂における気圧を測れば、上下に約1,000m離れた2地点での気圧が得られ、そこから局所的な鉛直勾配を直接推定できるであろうという考えである。そもそも、実際に重力に影響するのは山の斜面の上方に位置する空気なのであり、その意味でも山頂の気圧を測った方がより直感的・直接的である。

観測点周辺の大気圧の2次元的な分布がわかり、さらに鉛直勾配の実測値を用いて3

次元的な分布がわかれば、それらから局所的な大気重力への影響をこれまで以上に正確に推定することができ、数時間から数分程度に至る短周期帯域でのノイズリダクションに格段の進歩が得られることが期待される。

## 3. 研究の方法

### (1) 予備調査

申請に先立ち、観測機器を設置するための地点を選定するため、池ノ山頂上付近の現地調査を行った。山頂直下の一帯はかつて鉱山の採掘地があったところで、鉱石を採掘したあとの「ずり」が広範囲に展開している。そのような地帯の一角に、比較的平坦で気圧観測に適切と思われる場所を見つけることができた。この場所は、トンネル内の重力計から見て、北北東方向に約500m、高度差約1,000mの位置にあたる。現場へ至る道は相当な悪路で危険を伴うが、この場所の近くでは、名古屋大学と京都大学のグループがGPS観測を行っており、作業の安全のために協力体制をとることとなった。

### (2) 当初の観測計画

東京大学地震研究所によって開発された、野外用高精度気圧連続観測システムAPDL-1000Sを導入し、簡易的な観測小屋を建設してその中に設置することとした。小屋を建てるのは、現地は冬期の積雪が非常に多く、その荷重による装置の損傷を防ぐためである。

観測地点候補地は、国有林からわずかにはずれ、長棟地区の共有地である。地権者に内容を説明し、土地の使用許可を得た。

### (3) 観測装置の準備

APDL-1000Sは、装置の命とも目される高精度クロックが入手できなくなっていることが判明した。そのため、急遽メーカーと相談してクロックの代替品を使用することにした。この結果、製品価格が大幅に下がった反面、消費電力が増加することとなった。このため、エアアルカリ電池の消耗が早くなった。また、あとでわかったことだが、時刻精度は従来品よりもかなり悪くなった。

### (4) 装置の動作試験

導入されたAPDL-1000Sを用い、東京大学海洋研究所において試験観測を行った。その結果、動作全体としては良好であるものの、微小なステップ状ノイズが混入していることがわかった。このノイズの原因は不明である。このノイズの大きさは1Pa程度であり、山頂観測に重大な影響を与えるものではないが、データの解釈において課題を残した。

### (5) 災害による計画の変更

山頂観測の実施のための準備を進めている最中に、観測地点へ通じる林道で大規模な

土砂崩れが発生し、通行止めになる事態が発生した。復旧のめどがまったく立たないという役所の説明をきいて、もう一本の別の林道を使うこととした。このルートは大幅に遠回りであるうえに危険な道であり、山中での作業時間の確保において制約を受けることになった。また、重機を運搬することが不可能になったため、観測小屋の建設を断念せざるを得なくなった。

#### (6) 観測の開始

以上のようなさまざまな問題が発生したため、当初計画したものはかなり異なる形とはなったが、2006年10月に APDL-1000S を山頂に設置し、観測を開始した。気圧および温度のサンプリングレートは 1Hz とした。

#### (7) 気象観測装置（補助）の設置

市販の気象観測パッケージである HOBO Weather Station を同じ場所に設置した。主な目的は山頂における雨量を測定することであったが、APDL-1000S とは独立に気圧と温度を記録する意味もあった。ただしサンプリング間隔は 5 分であった。これにはその後、日射センサーを追加した。

#### (8) 山麓観測点の設置

山頂観測点のデータと直接比較すべき山麓のデータを取得するため、トンネルの入口付近の神岡鉱山事務所に気圧計を設置し、収録を開始した。

#### (9) 装置の稼働状況

山頂に装置を設置したのち、観測点には、毎年 2 度にわたって点検に訪れた。林道の状況は相変わらず不安定であったが、土砂崩れの箇所は補修されて通行可能になった。APDL-1000S は、バッテリー切れになることもなく正常にデータを記録していたが、クロックのずれが設計値よりやや大きく、データ処理のうえで面倒な問題を残した。2007 年から 2008 年のシーズンは降雪が多く、なだれもしくは荷重のために大気圧ポートが変形するなどの損害をこうむったが、当初心配したような、装置ごと流失するという事態にはならなかった。補助的に設置した HOBO Weather Station も予想以上に良好な記録を生産していたが、一部のセンサーには誤動作も見られた。いっぽう、山麓観測点は設置状況に加えて機器の調子が悪く、全体的にあまり満足いくデータが得られなかった。

#### (10) 周辺観測点の保守

神岡および松代の周辺に展開した 8 カ所の気圧観測点を定期的に巡回し、機器の点検を行った。残念ながら、主として記録用パソコンの不調のため、データ取得の歩留まりはつねに良くない状態が続いた。

#### (11) 観測の終了

研究期間の最終年度である 2008 年、山が降雪をみる前の 10 月に、山頂観測点の APDL-1000S を撤収し、現場の原状回復を行

った。つごう約 2 年間の連続観測を実施したことになるが、次の機会が得られるまで、ここでいったん終了となる。

## 4. 研究成果

### (1) 大気鉛直構造の推定と重力補正

山頂および山麓における観測から得られた気圧計データを用いて、大気鉛直構造を考慮にいれた重力補正を試みた。山麓のデータのうち、トンネル内(重力計室)の気圧は、作業などによる人工的な擾乱が大きく、精密な解析には使用しにくい時間帯が多い。いっぽう、トンネル入口付近(神岡鉱山事務所)のデータは、時刻精度が悪いことに加えて、欠測の期間が非常に多い。そのため、十分な解析に使えるデータはそれほど多くない。山頂の気圧と山麓の気圧とを比較すると、その比は静水圧的な値から系統的にずれ、日変化および季節変化を示す。これは、日射によって駆動される局所的な大気循環の影響が表れていることを意味する。

図 1 に、いくつかの方法によって気圧補正を行った場合の、重力データを示す。青は山麓だけの気圧データ、赤は山頂だけのデータを用い、それぞれ単独のアドミッタンスで補正を行った場合である。いっぽう、緑は、気圧鉛直勾配をデータから推定し、大気 3 次元構造を推定して数値積分によって引力を計算したものである。その際、山地の地形は考慮に入れているが、荷重による地面の変形の効果はとりいれていない。まだ不十分であるとはいえ、鉛直構造を考慮したほうが、系統的に残差が小さくなっていることがわかる。このような短周期帯域での重力観測値の変化は、これまでその原因がよくわかっていなかったが、今後このようなモデルをさらに追求していくことにより、じつはほとんどすべてが大気に原因があることが判明するかもしれないと考えている。

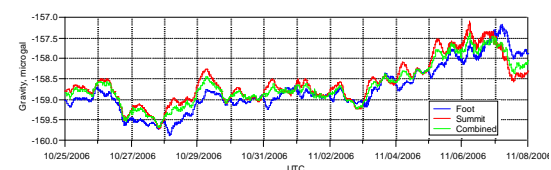


図 1：気圧観測データによる重力補正の例。

### (2) 周辺気圧観測点のデータ

重力観測点の周辺に展開した気圧計の記録を使って、ローカルな 2 次元モデルを作って補正する試みも行った。これにはいくつかの問題点があった。第一に、観測点の数が不十分であった(事実上一人で維持するには 8 カ所が限度であった)。第二に、収録システムの不具合などによるデータの欠測が多く、面的に十分にカバーできていない期間が

多かった。第三に、使用した気圧計の多くが温度補償のされていないものであったが、温度の並行観測をすべての地点で行うことはできなかった。同じような気圧観測ネットワークの試みはヨーロッパでも行われているが、やはりさまざまな問題のため成果が上がっていないことが報告されている。

気圧観測点の一つに、大町エネルギー博物館がある。ここは、神岡と松代のほぼ中間点ということで選ばれた。図2は、神岡と大町(直線距離にして約46km)で得られた気圧データの coherence を計算したものである。これを見ると、いまターゲットにしようとしている周期1時間から数時間程度の帯域での coherence が意外に低いことがわかる。こうした大気の相関距離を考慮し、今より2倍程度密度の高い気象観測網を作ることが必要である。

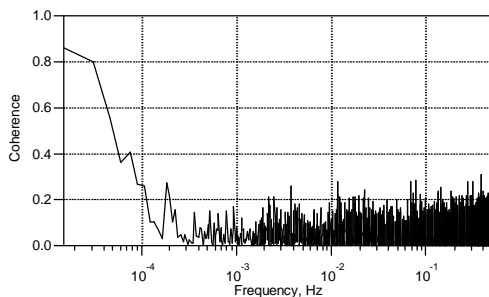


図2：神岡と大町の気圧の coherence。

### (3) 非平衡開放系としての鉱山トンネル

神岡鉱山のトンネルは、池ノ山の内部に多くの通路が縦横に掘られた複雑な構造をなしている。その一部は縦方向に伸び、約500m上のレベルで地上に出ている。このため、夏は上方の通気口から外気が入って下方から吹き出し、逆に冬は下方から風が吹き込んで上方から吹き出すという、いわゆる風穴(ふうけつ)と同様の現象が起きている。坑口での風速は、3-5m/s程度である。

このような効果のため、トンネル内の気圧は、同じ高さの外部における気圧に比べて、夏は高くなり、冬は低くなる。実際に測ってみると、坑内(重力計室)と坑口(神岡鉱業事務所)における気圧の差は、季節的な変化が現れ、その振幅は100Pa程度にもおよぶことがわかった。これほど大きな気圧勾配は、粘性流体の定常流や気象学でいう重力流などでは定量的には説明できない。いま3次元的な気圧データを用いて精密な重力補正をしようとしているときに、このような気圧勾配の存在は、モデルを構築するうえでの前提条件を無効にするおそれがある。

熱力学的に考えると、この場合のトンネルは、外部との間で物質とエネルギーのやりとりを持ちながら、粘性散逸や熱伝導などの不可逆過程をとおして一定の安定した構造が

出現している、いわゆる非平衡開放系であると考えられる。そうだとすると、熱平衡の仮定に立脚した流体力学は、この系にはそのまま適用することはできない。このことは、本研究において当初想定したよりも実際の現象はずっと複雑で、問題点が拡散してきたことを意味する。今後より精密な観測によって、トンネル内部の空気の物理学を見直すという方向性が明らかになったことは一つの収穫である。

### 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)

[雑誌論文](計 7 件)

1. Imanishi, Y., High-frequency parasitic modes of superconducting gravimeters, *J. Geodesy*, 83, 455-467, 2009. (査読有)

2. Watada, S., Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time-varying bottom boundary, *J. Fluid Mech.*, 627, 361-377, 2009. (査読有)

3. Mikumo, T., and Watada, S., Acoustic-gravity waves from earthquake sources, in "Infrasound monitoring for atmospheric studies" Le Pichon et al.(eds), Springer, 印刷中(査読有)

4. Mikumo, T., Shibutani, T., Pichon, A. L., Garcés, M., Fee, D., Tsuyuki, T., Watada, S., Morii, W., Low-frequency acoustic-gravity waves from tectonic deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw=9.2), *J. Geophys. Res.*, 113, B12402, doi:10.1029/2008JB0057, 2008. (査読有)

5. Imanishi, Y., Kokubo, K. and Tatehata, H., Effect of underground water on gravity observation at Matsushiro, Japan, *J. Geodynamics*, 41, 221-226, 2006. (査読有)

6. Abe, M., Takemoto, S., Fukuda, Y., Higashi, T., Imanishi, Y., Iwano, S., Ogasawara, S., Kobayashi, Y., Dwipa, S., Kusuma, D.S., Hydrological effects on the superconducting gravimeter observation in Bandung, *J. Geodynamics*, 41, 288-295, 2006. (査読有)

7. Neumeyer, J., Barthelmes, F., Dierks, O., Flechtner, F., Harnisch, M., Harnisch,

J., Hinderer, J., Imanishi, Y., Kroner, C., Meurers, B., Petrovic, S., Reigber, Ch., Schmidt, R., Schwintzer, P., Sun, H. P., Virtanen, H., Combination of temporal gravity variations resulting from superconducting gravimeter (SG) recordings, GRACE satellite observations and global hydrology models, J. Geodesy, 79, 573-585, 2006. (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

1. 今西祐一・田村良明・池田博・大久保修平, 松代および神岡で記録された 2007 年能登半島地震および 2007 年新潟県中越沖地震による重力変化, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 21 日, 東京.

2. 今西祐一・田村良明・池田博・新谷昌人・大橋正健, 超伝導重力計 T016 の支持磁場の再調整について, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 19 日, 東京.

3. Watada, S., Energy flow of acoustic gravity waves from the time-varying bottom boundary in the isothermal atmosphere, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008 年 11 月 25 日, つくば市国際会議場.

4. Imanishi, Y., Surface gravity observation and coseismic gravity changes, ETS2008, 2008 年 9 月 1 日, Jena.

5. 今西祐一, 坑内における気圧観測の問題点について, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 29 日, 東京.

6. 今西祐一, 超伝導重力計の寄生振動について, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 29 日, 東京.

7. 今西祐一・名和一成・池田博・山田功夫・孫文科・大久保修平, 中部日本 SG アレイによって観測された 2006 年 11 月 15 日および 2007 年 1 月 13 日の千島の地震による重力変化, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 24 日, 東京.

8. 今西祐一・綿田辰吾・森井互・田村良明・和田安男, 神岡・池ノ山山頂における気象観測, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 22 日, 東京.

9. 森井互, 地殻変動観測に及ぼす地下水圧の影響, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会,

2007 年 5 月 22 日, 東京.

10. 森井互, 尾上謙介, 中村佳重郎, 大谷文夫, 竹内文朗, 渡辺邦彦, 寺石眞弘, 細善信, 和田安男, 園田保美, 近畿地方とその周辺における地殻変動連続観測, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 22 日, 東京.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

今西 祐一 (IMANISHI YUICHI)  
東京大学・海洋研究所・助教  
研究者番号: 30260516

##### (2) 研究分担者

綿田 辰吾 (WATADA SHINGO)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 30301112

##### (3) 連携研究者

森井 互 (MORII WATARU)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 30221633

田村 良明 (TAMURA YOSHIAKI)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号: 90150002

##### 研究協力者

和田 安男 (WADA YASUO)  
京都大学・防災研究所・職員