

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246016

研究課題名（和文） 自由落下型重力勾配計の開発

研究課題名（英文） Research on free-fall gravity gradiometer

研究代表者

黒田 和明（KURODA KAZUAKI）

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：00242165

研究成果の概要（和文）：飛行体等に搭載して広範囲を高感度で短時間に計測できる重力勾配計の開発を行った。開発した装置は、約70cmの高低差をもつ2つの落下体を投上げて自由落下させ、その間の距離変化をレーザー干渉計で精密に計測するもので、高速の繰返し計測を実現する投上げ機構の有効性、マイクロガルレベルの感度分解能を確認した。この研究成果は、今後の省電力化とコンパクト化等実用化のための開発研究と合わせ、資源探査や地球物理学研究での運用へ大きく道を開くものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed a free-fall laser interferometer measuring gravity gradient to survey large area with high sensitivity using aircrafts. In the developed prototype apparatus, the displacement between two objects with about 70cm height difference is measured by a laser interferometer. We have confirmed the high speed data taking and sensitivity of micro Gal level. This research result opens a practical application to minerals and petroleum survey and geophysical research.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2009年度	20,200,000	6,060,000	26,260,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
総計	32,800,000	9,840,000	42,640,000

研究分野：工学

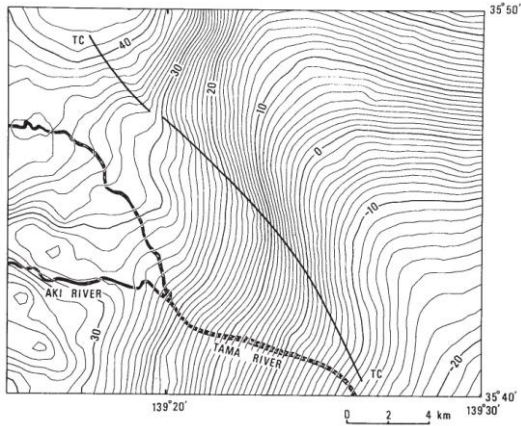
科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：物理計測・制御、可搬型重力勾配計、自由落下型レーザー干渉計

1. 研究開始当初の背景

広範囲の重力の変化を能率良く計るため、船、飛行機やヘリコプターなどの飛行体を用いた探査が行われるが、広く使われている重力計は船や飛行体の上下運動の加速度も同時に計測してしまうため、船や飛行体の精密な加速度値を別に計測する必要があり、現状で最もよい計測精度は重力値で50マイクロガル（1ガル=1cm/s²）程度と言われている。

もし、計測精度が1桁以上改善されると、地下や海底の地中に眠る資源探査の能率が向上し、地殻に潜む危険な活断層の探査にも有効な活用が期待できる。例えば、次ページ左上に示す図は、1500点の重力測定点に国土地理院による約200点の測定値を加えて得られた東京都西部と埼玉県西部（立川断層）の重力異常のマップ（<http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/kaihou40>）



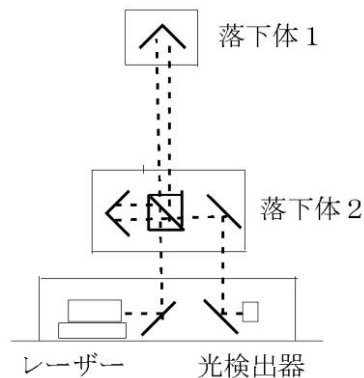
/03_17. pdf) であるが、太い等高線間隔が 10 ミリガル (10^{-4}m/s^2) であり、水平のスケールからすると重力の勾配の大きい所では 5 マイクロガル/m に達していることが分かる。活断層による重力異常もこのレベルである。地上の計測では、移動に要する時間と重力計の設置に要する時間、計測の時間を加味すると 1 地点の測定には 1 時間は要したと考えられ、上図を得るのに年の単位の時間がかかったことは容易に想像できる。この計測に代わって、広範囲の重力の変化を能率良く計るため、船、飛行機やヘリコプターなどの飛翔体を用いた探査が行われるのであるが、従来の重力計では計測精度に限界がある。

2. 研究の目的

資源探査や地下断層の調査のために利用できる可搬型重力勾配の計測精度を従来のものに比べ 1 桁以上高め、重力の勾配として 1 マイクロガル/m の精度を達成見込みの技術を具現するプロトタイプ装置を試作して実証する。1 点の計測につき、その繰返時間の目標は 20 秒を目標とする。

3. 研究の方法

提案する計測法は、資源探査等で要求される重力値が絶対値ではなく重力の変化(勾配)であることに着目し、飛翔体等の運動が計測に影響を及ぼさない形で精密に重力の勾配を計測する。下図に示すように、自由に落下する物体の相対速度をレーザー干渉計

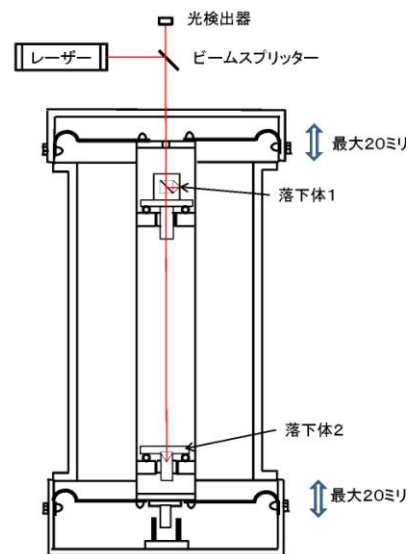


を用いて精密に計測する。本研究では、試作器の設計・製作を行い、計測テストを繰り返して各部の改良を重ねる。基本要素ご

とに列挙すると、超高真空装置の設計と試作、精密形状落下体の設計と試作、落下体リリース機構および復元機構の設計と試作、干渉計の光学設計と試作、計測の制御方式の設計と試作、以上を統合した計測システムの組み上げとなる。最後に、1 トン程度の質量による重力勾配を用いて、この計測システムによるテストデータの取得を行い、データ解析手法を確立する。この段階までで初期目標の計測精度到達を確認する。

4. 研究成果

当初の計画では単純な自由落下を予定していたが、本研究遂行中に新たな投上げ方法メカニズムを思い付き、急遽、この方法を取り入れる変更を行った(特許出願)。投上げ方式では、真空度への要求が緩やかになることと上下運動の高さを小さくできるメリット、ならびに信号波形の周波数を抑えることができ、信号処理上の有利性が得られるなどの長所がある。投上げ・落下装置の試作品を真空中で動作させ、投上げられた物体の回転角速度が目標の 20mrad/s 以下とすることができるとは、平面鏡の投げ上げテストにより確認できた。また、投上げの繰返し速度を 1 Hz より十分速くできることが分かった。下図は、レーザー光の導入経路も合わせて示した投上げ機構のイラストである。計画段階では、レーザー光は下から真上に導入する方式であったが、新しい投上げ機構の導入により、上から真下に導入する方法に変更した。投上げの際の物体が鉛直でない方向に投げ出されたり、回転の角速度をもって投出されると計測誤差が大きくなるため、可能な限り鉛直かつ、まっすぐに投出す必要がある。また、機械的なガタつきのある機構は精密な干渉信号にノイズを加え精密な調整を困難にするため、投上げのためのスライド機構は板ばねの弾性を用いた構造になっている。



2つの落下体は、放射状の3本のV字型溝をもち、投げ上げ機構のそれぞれの台座に埋め込んだ3個のモリブデン球により、幾何学的に動かないように支持される構造をとる。また、投げ上げ時に、落下体に角運動量を与えないように、モリブデン球とV字型溝とが接触する位置を結ぶ平面上に落下体の重心が来るように製作した。回転角速度がある場合でも、各落下体に埋め込まれたコーナーキューブプリズムの光学中心と落下体の重心が一致していれば、誤差が発生しないため、各部の密度・形状を精密に設計し、測定した重心位置と光学中心のずれが1ミリ以内に収まっていることを確認している。投げ上げの高さ距離は2cmに届かず、投げ上げられて着地するまでの時間はせいぜい0.1秒程度であるが、このような短時間に取得されたデータでも、目標の分解能を出せることを示すために、このレーザー光の波面の進行を計算機シミュレーションで追跡する方法により、達成可能であることを確認した。このシミュレーションでは、レーザー波面の曲率が2つの落下体の位置で異なることの効果が検証でき、落下体の水平運動による誤差、レーザー光軸が落下の鉛直軸からずれていることによる誤差等を計算し、装置の設計に反映させた。

この投げ上げ機構を装着した重力勾配計プロトタイプの外観写真を下に示す。このプロトタイプを用いた計測は、2つの段階を経て行った。第一段階は、投げ上げ装置に正弦波状の駆動電圧を加えることにより、連続的に落下体を投げ上げて行った。正弦波の周波数は約7Hzであり、落下体が自由に浮いて飛んでいる時間は120ミリ秒程度である。この時に得られた観測値は、1マイクロガルレベルの



分解能を持つことが確認できている。2つの落下体の高度差70cmから重力勾配はおよそ210マイクロガルと見積もられ、測定値は誤差の範囲でこれと一致した。

第2段階での計測は、この第1段階での計測で判明した種々の問題を解決しようとするものである。第一に、投げ上げの繰り返し回数は目標の20秒をはるかに上回る0.12秒にできたが、数か月にわたる開発実験中に各落下体のV字型溝に損傷が発生した。この段階で用いた落下体は、投げ上げ機構を駆動するために用いるボイスコイル型アクチュエーターの漏えい磁場による影響を受けないように、加工性セラミックで製作している。V字型溝に損傷があると投げ上げにふらつきが生じてまっすぐな投げ上げに支障を来すことが分かっているため、これらの落下体は以後の計測には使用できなくなった。これは、V字型溝部分を保護する金属膜をコーティングするとかの表面の靱性を増す加工法を適用することで解決可能であり、実用化の際の課題を提起している。期間と予算が限られている本研究では、当面の措置として、予備的に製作した同じセラミック製の落下体を投げ上げ頻度を下げて用いることとし、投げ上げ機構の上下動を単純な正弦波ではなく、受け止める際のショックを小さくするよう、駆動波形を工夫し、単発で投げ上げを行うようにした。なお、投げ上げ頻度を下げることにより、ボイスコイルアクチュエーターの発熱を減らすことができ、真空度の悪化を避けることも可能となった。第一段階の測定時には、ボイスコイルアクチュエーターは超高真空対応にはなっておらず、計測時の真空度悪化は一つの問題であった。第2段階での変更は、新たな問題も引き起こした。それは、連続で干渉信号がチェックできなくなったため、測定前のレーザー干渉計の調整に大変手間取るようになったことである。能率的な調整手法の確立は今後の課題である。

投げ上げ機構の駆動とデータ取得とは、携帯用のパソコンに装着したDA変換器とAD変換器を用いて、パソコンに指示した計測シーケンスに基づいて自動で行うようになっている。取得したデータは、計測終了後、まとめて解析して重力勾配の値に変換した。計測と同時にリアルタイムで重力勾配の値に変換するソフトウェアは今後の開発課題である。

当初の最終目標であった、1トン程度の質量による重力勾配を計測することは、この報告書をまとめている時点でまだ終了していないが、1個20kgの鉛ブロック40個を重力勾配計の真下に敷き詰め、前後で起こる重力勾配の変化を計測中である。

ここで開発した重力勾配計のプロトタイプは、従来のばね秤タイプの重力計に比べ、

電力を消費する大仰な精密装置であるが、ばねのドリフト誤差を含まないことにより、校正の必要性が皆無であるため、長時間の定点観測などで安定的に使用でき、リモート観測も可能である。世界的にもこのような目的で使用できる重力勾配計は類を見ない。従って、この重力勾配計の出現によって新たに開かれる観測の分野が生まれる可能性がある。つまり、人里離れた地上の観測所やその周辺を移動して計測を行う地球物理学の観測に適用できる。このため、京都大学の研究グループと協力して阿蘇観測所で火山マグマ移動の観測のために応用する準備を進めている。

現在のプロトタイプ重力勾配計装置は、電力消費の問題と高さ方向に長い構造が災いして、商用ベースの航空機搭載テストが困難であることが分かっており、改良が必要であるが、いずれも技術的に解決可能なものである。本研究は、今後の省電力化とコンパクト化等実用化のための開発研究と合わせ、広範囲を高速でサーベイする必要のある資源探査や地球物理学研究での運用へ大きく道を開くものである。

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 7 件)

1. 潮見幸江、レーザー干渉計型重力勾配計の阿蘇火山における適用試験、日本地球惑星科学連合大会、2012年5月24日、幕張メッセ
2. 潮見幸江、自由落下型重力勾配計の開発 (III)、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 17 日、弘前大学
3. 潮見幸江、運搬体搭載用精密重力勾配計の開発、日本地球惑星科学連合大会、2011 年 5 月 23 日、幕張メッセ
4. 潮見幸江、自由落下型重力勾配計の開発 (II)、日本物理学会第 66 回年次大会、つくば (東日本大震災のため中止。概要集の提出と詳細資料のオンライン公開で発表が成立したものとみなされる)
5. 潮見幸江、自由落下型重力勾配計の開発 (I)、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 14 日、九州工業大学
6. 潮見幸江、Development of a precise on-board gravity gradiometer、The 19th international conference on general relativity and gravitation、2010 年 7 月 5 日、メキシコシティ
7. 潮見幸江、重力波検出技術を応用した精密重力勾配計の開発、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：重力勾配計自由落下体操作機構

発明者：黒田和明・潮見幸江

権利者：東京大学

種類：特許

番号：61/361067

出願年月日：2010 年 7 月 2 日

国内外の別：アメリカ合衆国

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 和明 (KURODA KAZUAKI)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：00242165

(2) 研究分担者

寺田 聡一 (TELADA SOICHI)

産業総合技術研究所・計測標準・研究員

研究者番号：30357545

(3) 連携研究者

西村 純 (JUN NISHIMURA)

JAXA 宇宙科学研究所・名誉教授

研究者番号：40013619

(4) 研究協力者

潮見 幸江 (SHIOMI SACHIE)

京都大学大学院・理学研究科・機関研究員

研究者番号：60584266