

# 地球重力場計測のための衛星間測位用レーザー干渉計シミュレータの開発

## Development of a Ground Simulator of a Satellite-to-Satellite Interferometry for the Earth's Gravity Field Determination

長野重夫<sup>1</sup>, 國森裕生<sup>1</sup>, 細川瑞彦<sup>1</sup>, 吉野泰造<sup>1</sup>, 川村静児<sup>2</sup>, 佐藤孝<sup>3</sup>, 大河正志<sup>3</sup>.

S. Nagano<sup>1</sup>, H. Kunimori<sup>1</sup>, M. Hosokawa<sup>1</sup>, T. Yoshino<sup>1</sup>, S. Kawamura<sup>2</sup>, T. Sato<sup>3</sup>  
and M. Ohkawa<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, National Institute of Information and Communications Technology

<sup>2</sup> 国立天文台, Spacetime Astronomy Section, National Astronomical Observatory

<sup>3</sup> 新潟大工, Faculty of Engineering, Niigata University

E-mail: nagano@nict.go.jp

### Abstract

A satellite gravity mission is proposed to monitor the Earth's environment in Japan. In the mission, a satellite-to-satellite laser interferometer (SSI) will be employed to amplify the gravitational signal by measuring the relative velocity of twin satellite in the low earth orbit. The maximum range-rate we must measure is predicted to be 0.1 m/s, whereas the required sensitivity is 10 nm/s in the measurement band of  $10^{-2} \sim 1$  Hz to detect the changes in the geoid with millimeter-level accuracy. We are developing a ground simulator to study the feasibility of the SSI for the future mission.

## 1 衛星重力ミッション

大気、海洋、固体地球内の質量分布変動は、時間変化する地球重力場となって現れる。そのような重力場の精密観測によって、測地学、固体地球物理学、海洋学はもとより、陸水学、氷床・雪氷学、気象学など多岐にわたる分野で著しい発展が期待されている。

衛星重力ミッションの原理は、地球重力場中で自由落下する衛星の軌道を計測することで、重力場信号を検出するものである。エネルギー保存則から、地球軌道を周回する衛星のエネルギー変動成分は速度変動  $\Delta v$  の2次以上の項を無視すると  $v_0 \Delta v - T' = 0$  となる。[1] ここで、 $v_0$  は衛星の平均速度、 $T'$  は乱れポテンシャルと呼ばれ、ラプラス方程式から

$$T'(r, \theta, \phi) = \frac{GM}{R} \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l A_{lm} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1)$$

になることが導かれる。ここで、 $r, \theta, \phi$  は衛星の座標、 $G, M, R$  はそれぞれ万有引力定数、地球質量、地球半径を表している。 $Y_{lm}$  は球面調和関数、 $A_{lm}$  は展開係数である。これより、衛星の軌道高度が高く、重力場が短波長になるにつれて  $T'$  は小さくなり、検出困難になることが分かる。そこで、実際の衛星重力ミッションでは高度 250 km ~ 500 km 程度の低軌道が選ばれ、周回する衛星の位置を GPS を用いて連続決定することで重力場信号を取得する。ただし、そのような低軌道では大気摩擦などの影響を無視できないため、衛星に高感度加速度計を搭載したり、ドラッグフリー技術を採用するなどして非重力場成分を分離しなければならない。[2]

海外では、いくつかの重力ミッションがすでに開始されている。[3, 4, 5] GRACE は NASA(米) と DLR(独) の共同計画であり、同一軌道上を周回する双子の低軌道衛星の位置を決定すると同時に、衛星間の相対速度をマイクロ波で連続計測することで、空間波長 300 km までの重力場を従来のモデルより 100 倍以上よい精度で求めることが可能である。しかしながら、地球温暖化などのグローバルな地球環境変動を長期モニターするためにも、さらに高精度な重力場観測が望まれている。日本ではレーザー光を用いることで衛星間の測位精度を GRACE より 2 桁向上させて mm 精度のジオイド変化を検出できる小型で安価な衛星による独自の重力ミッションの実現が急務であると考えられている。[6]

## 2 日本の衛星重力ミッション計画

現在、日本で提案されている衛星重力ミッションでは、2 台の衛星は高度 450 km の軌道を周回し、衛星間距離は 50 km になる (図 1)。この周回軌道における衛星間の最大相対速度は 10 cm/s になると予想されており、その速度変化をレーザー干渉計を用いて 10 nm/s ( $\sim 10^{-2} \sim 1$  Hz) の精度で測定することが要求される。このときレーザー光が受けるドップラーシフトは最大 200 kHz に達する。このような重力ミッションの実現を目指した基礎技術として、(1) 衛星間測位、(2) 衛星搭載型加速度計、(3) 衛星軌道決定精度の向上、(4) 観測ミッションの物理設計が、科学技術振興調整費の「精密衛星測位による地球環境監視技術」の開発プロジェクトの中で開始されている。

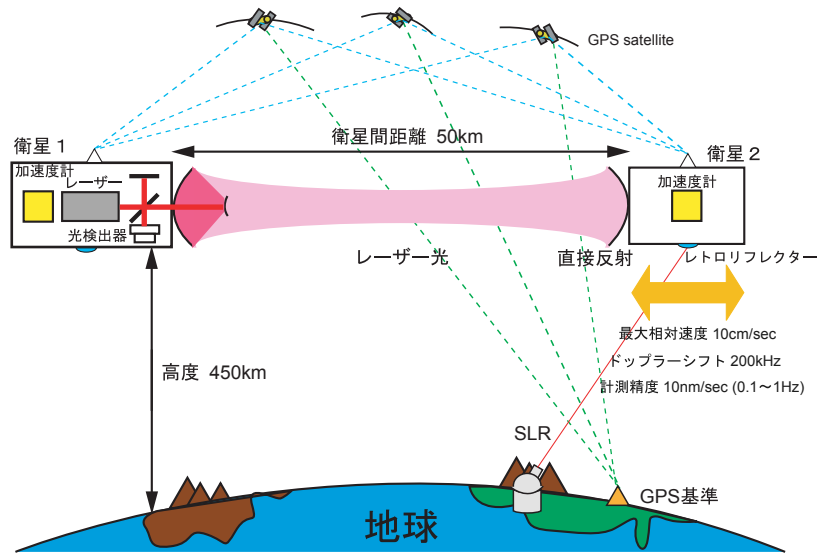


Figure 1: レーザー干渉計方式の地球重力場計測システム。

### 3 地上シミュレータ

(i) 光干渉を用いた測距、(ii) レーザー周波数安定化、(iii) 衛星姿勢制御 の研究は衛星間測位技術に密接に関係しており、その確立に必要な不可欠である。これらを研究を行うとともに、その結果を復元された重力場信号の精度で評価することを最終目的として、我々は図 2 に示すような衛星間レーザー干渉計の地上シミュレータを開発している。この地上シミュレータは、安定化レーザーシステム、計測システムと姿勢制御システムから構成されている。以下に各システムへの要求とデザインを説明する。

#### 3.1 安定化レーザーシステム

衛星重力ミッションの光源は単一周波数発振、TEM<sub>00</sub> モード、直線偏光、高効率、長寿命であることが要求される。また、宇宙空間での動作も考慮されていなければならない。そこで、地上シミュレータでは波長 1064nm、出力 200 mW の半導体レーザー励起モノリシック型 Nd:YAG レーザー (NPRO, Innolight: Mephisto 200 NE) を採用した。[7]

レーザー周波数雑音は干渉計の非対称性と結合して偽の重力場信号として現れるため、十分に抑圧されなければならない。目標速度感度  $\delta v$  を達成するのに、要求される周波数安定度  $\delta \nu$  は、

$$\delta \nu = \nu_0 \frac{\delta v}{2\pi f L} \quad (2)$$

で与えられる。ここで  $\nu_0$  はレーザー周波数、 $L$  はレーザー干渉計の静的なアーム長差、 $f$  はフーリエ周波数である。この式から、要求される安定度は  $90 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} (@0.1 \text{ Hz})$  となり、アラン分散では  $\sim 10^{-13}$  の安定度になる。このような安定度を達成するために、パウンド・ドレーパー・ホール (PDH) 法を採用した。[8] 周波数基準となるファブリー・ペロー (FP) 共振器のフィネスは 114346、フリースペクトラルレンジは 1.5 GHz である (Research Electro-Optics: ULE-100)。この FP 共振器のスペーサには超低膨張ガラスが使用されており、環境の温度揺らぎによる共振器長変化を低減している。さらに、共振器は多重熱シールドで覆われ、真空中に配置される。PDH 法で得られた制御信号は NPRO の PZT 端子と温調端子にフィードバックされ、レーザー周波数を変調することで FP 共振器の共振周波数にロックする。

#### 3.2 計測システム

計測システムでは、要求される速度感度と測定レンジを達成できる測距方法の開発を行うと同時に、衛星間の相対速度変化でレーザー光に生じるドップラーシフトを擬似信号として発生させて、重力場復元の実験的なシミュレーションが行える必要がある。これらを考慮して、両腕に音響光学偏向器 (AOD) を装備したマッハ・ツェンダー干渉計を採用した。干渉計の片腕にある AOD 2 (Brimrose: TEM-80-2-1064) でレーザー光に周波数変調を加えて、擬似ドップラーシフトを生成し、信号注入シミュレーションを行う。AOD 透過光には周波数変調に比例する角度揺れも生じるが、球面鏡で反射させて AOD をもう一度透過させることで、その影響をキャンセルしている。一方、干渉計の出力ポートに置かれた 4 分割光検出器 (QPD 1, QPD 2) からの差動信号をもう片腕の AOD 1 にフィードバックすることで、干渉光の位相を一定に保つように制御することができる。このとき、AOD 1 へのフィードバック信号を直接モニターすることで、注入信号が簡単に復元できるように設計されている。[9]

様々な雑音干渉計の非対称性と結合して干渉計出力に現れることが予測される。そのような雑音の速度感度への影響を調査を行うために、干渉計の片腕に偏光保持シングルモード光ファイバーを導入して人工的な

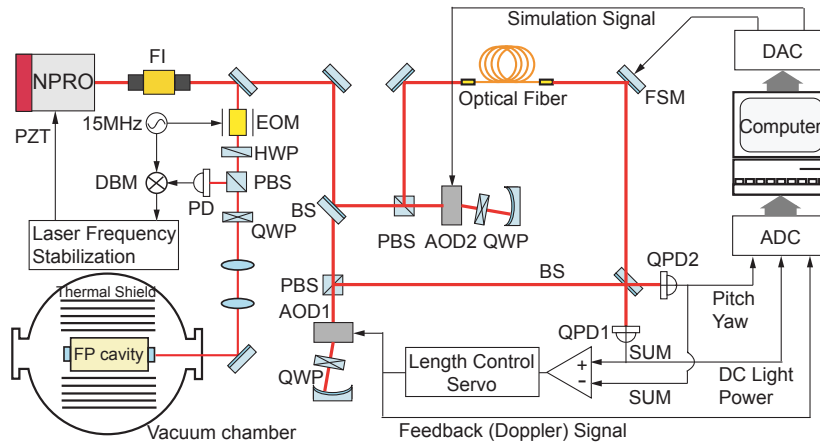


Figure 2: 衛星間測位レーザー干渉計の地上シミュレータ。

光路長差を実現している。ただし、光ファイバーの熱膨張による長さ変動を考慮して、ファイバー長は 1 km としている。

重力場復元シミュレーションの擬似信号発生には、LabVIEW で書かれたソフトウェアで制御されているマルチファンクション DAQ ボード (National Instruments: PCI-6052E) を使用している。[10] アナログ信号波形が最大サンプリング周波数 333 kHz・16 bit 分解能の AD コンバータで生成される。また、重力場復元の精度評価を行うために AOD1 へのフィードバック信号を最大サンプリング周波数 333 kHz・16 bit 分解能の DA コンバータを通して計算機に長時間記録できるように設計されている。

### 3.3 姿勢制御システム

衛星姿勢変動は衛星間をリンクしているビームに角度揺らぎを生じさせ、送信用テレスコープの表面粗さと結合して偽重力場信号となって現れる。要求されるビーム角度揺れ  $\delta\theta$  は

$$\delta\theta = \left(\frac{2\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{1}{dD^2\theta_{dc} f}, \quad (3)$$

から計算できる。[11, 12] ここで、 $\lambda$  はレーザー波長、 $d$  はテレスコープの表面粗さ、 $D$  はミラー直径、 $\theta_{dc}$  はビームの RMS 角度揺らぎ、 $f$  はフーリエ周波数である。 $d = \lambda/10$ 、 $D = 10$  cm、 $\theta_{dc} = 10^{-5}$  rad<sub>rms</sub> を仮定すると、要求される角度揺らぎは  $\delta\theta = 4.3 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$  となり、このような角度揺らぎを達成するには衛星の姿勢制御が不可欠となる。

地上では振動や温度などの宇宙環境の再現が困難であることを考慮して、本研究においては姿勢制御信号の取得研究に重点を置くこととした。制御信号は wave-front sensing 法を用いて取得される。ビーム角度揺れは基本モードへの高次モードの混合とみなすことができるため、基準ビームと干渉させることで QPD の水平/垂直セグメントのペアに強度の異なる干渉縞を形成させることができる。このとき、各セグメントペアには干渉縞強度に比例した光電流が流れるので、それらの差は制御信号として使用できる。得られた信号が実際にアライメント制御に使えることを確認するために、ファースト・ステアリングミラー (FSM, Newport: FSM-200) にフィードバックして、ビームの角度揺れを実際に抑圧する。

## 4 シミュレータ開発の現状

### 4.1 安定化レーザーシステム

安定化レーザーシステムの誤差信号から評価された相対周波数雑音スペクトルを図 3 に示す。フーリエ周波数 1 Hz 以下で周波数雑音は  $0.1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下である。このときの制御系のユニティゲイン周波数は 45 kHz、位相余裕は 30 度であった。PZT ループと温調ループのクロスオーバー周波数は 20 mHz である。光検出器への入射光量 0.2 mW、変調指数 0.165 rad から、対応するショット雑音レベルは  $1.5 \times 10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  と計算される。[13]

要求される干渉計感度を実現する上で重要となるのは絶対周波数安定度である。そこで、絶対周波数安定度を評価するためにフェムト秒モードロックレーザーとのビート測定を行った。[14] 図 4 に測定されたアラン分散を示す。フェムト秒モードロックレーザーは安定化レーザーシステムよりも十分に高い安定度を持つことが確認されており、測定結果は安定化レーザーシステムに依存する。周波数安定化によって、アラン分散で  $9 \times 10^{-13}$  (@5s) を達成した。これはフリーラン時と比較すると約 3 桁の安定度向上である。また、図 4 から FP 共振器の配置されている真空槽内の圧力に依存して、周波数安定度が変化することが分かる。これから、真空度を高くして断熱効果を向上させることで、温度揺らぎによる光共振器長の変化を減少させることができ、さらなる安定度向上が期待できる。

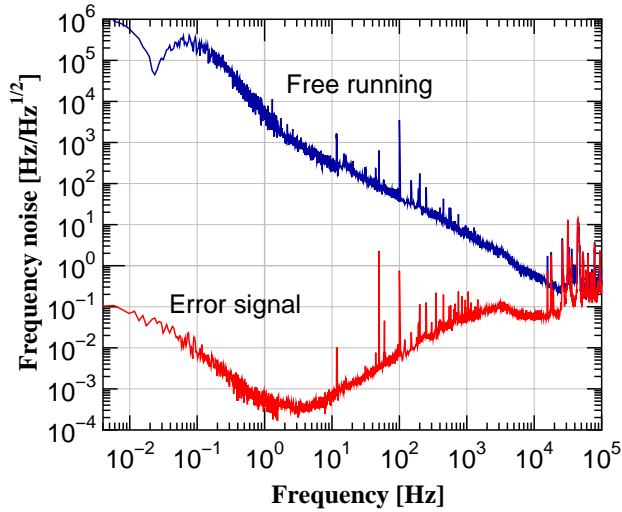


Figure 3: 安定化レーザーの相対周波数雑音スペクトル。上線はフリーラン時、下線は誤差信号評価の安定度。

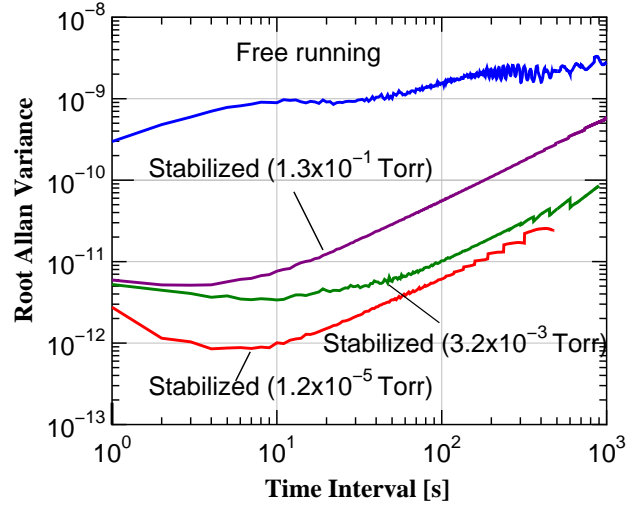


Figure 4: アラン分散による周波数安定度。

## 4.2 計測システム

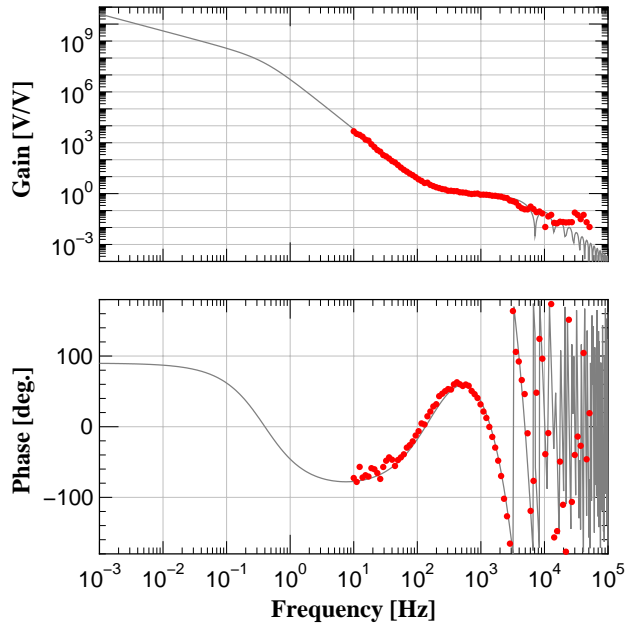


Figure 5: オープンループ伝達関数。実線は計算値、点は測定値を表している。

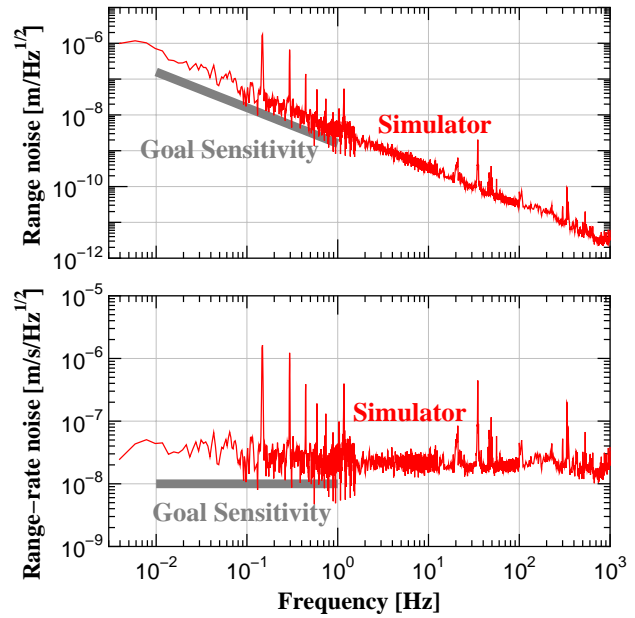


Figure 6: 地上シミュレータの速度感度スペクトル。上図:変位感度スペクトル、下図:速度感度スペクトル。

計測システムでは、これまでに AOD を用いて干渉計フリッジのロックに成功している。図 5 に制御系のオープンループ伝達関数を示す。ユニティゲイン周波数は 1 kHz、位相余裕は 20 度である。AOD へのフィードバック信号を換算して得られた干渉計の速度感度スペクトルを図 6 に示す。10<sup>-2</sup> Hz ~ 1 Hz の周波数帯域で 40 nm/s/√Hz の感度を達成している。測定レンジは、現在のところ 0.8 mm/s 以下に制限されているが、電気回路の改良等によって、必要な測定レンジを達成することは十分可能である。感度測定に伴い行われた数時間の連続運転から、システムの長期的な安定度の高さについても確認されている。また、光ファイバー導入前には、地上シミュレータの性能評価として、初歩的な信号注入シミュレーションを行い、注入信号がフィードバック信号中に大きな劣化なしに復元されることを確認している。[9]

## 4.3 姿勢制御システム

図 7 と図 8 に水平、垂直方向のビーム角度揺れスペクトルを示す。アライメント制御を行うことで 10<sup>-2</sup> Hz ~ 1 Hz の周波数帯域において角度揺れが 2 桁以上抑圧されており、wave-front sensing 法で取得された信号が制御に使用できることが確認された。このときの制御帯域は 600 Hz 以上であり、FSM の機械共振で制限されているが測定から分かっている。

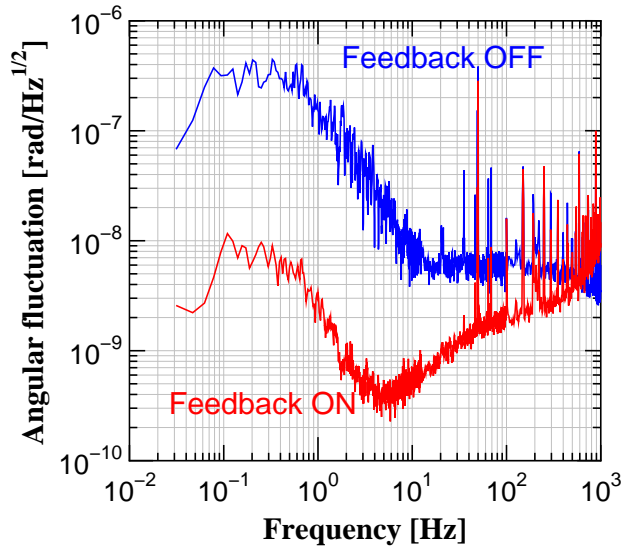


Figure 7: ビームジッタースペクトル (水平). 赤線: 制御時、青線: フリーラン時.

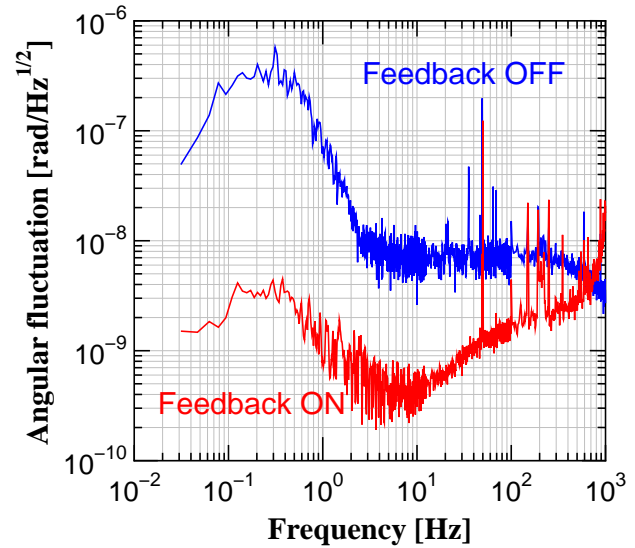


Figure 8: ビームジッタースペクトル (垂直). 赤線: 制御時、青線: フリーラン時.

## 5 まとめと今後の課題

衛星間測位で重要となる要素技術の研究を行うための地上シミュレータが完成している。安定化レーザーシステムは、フェムト秒モードロックレーザーとのビート測定からアラン分散で  $9 \times 10^{-13}$  の安定度を持つことが確認された。計測システムは、AOD を使ってマッハ・ツェンダー干渉計のフリンジロックに成功し、速度感度  $40 \text{ nm/s}/\sqrt{\text{Hz}}$  を達成している。また、初歩的な信号注入実験から、重力場復元のシミュレーションに利用できことが分かった。姿勢制御システムでは、wave-front sensing 法で取得した信号を用いて、アライメント制御を行うことに成功している。今後、衛星軌道解析ソフトウェアで計算されたシミュレーション信号を実際に注入して、復元された信号精度の評価を行う予定である。さらに、将来の重力ミッションにおける衛星間レーザー干渉計の実現可能性の調査に、本研究で得られた結果を役立てていく方針である。

## 謝辞

本研究は文部科学省振興調整費「精密衛星測位による地球環境監視技術の開発」により実施されている。

## References

- [1] F. Wolff, *Direct measurements of the earth's gravitational potential using a satellite pair*, JGR, **74**, 5295 (1969)
- [2] G. Seeber, *Satellite Geodesy* 2nd ed. (Berlin-New York: Walter de Gruyter) 2003.
- [3] C. Reigber, P. Schwintzer, L. Lühr, *The CHAMP geopotential mission*, Boll. Geof. Teor. Appl., **40**, 285 (1999).
- [4] GRACE Team, *GRACE Science and Mission Requirements Document (SMRD)* GRACE327-200 JPL D-15928, 1998.
- [5] R. Rummel, G. Balmio, J. Johannessen, P. Visser, P. Woodworth, *Dedicated gravity field missions - principles and aims*, J. of Geodynamics **33**, 3 (2002).
- [6] Y. Fukuda, T. Otsubo, T. Yoshino and S. Okubo, *A new project of gravity mission studies in Japan presented at IUGG2003*, Sapporo, Japan, 2003.
- [7] T.J. Kane and R.L. Byer, *Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser*, Opt. Lett. **10**, 65 (1985).
- [8] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley, and H. Ward, *Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator*, Appl. Phys. **B 31**, 97 (1983).
- [9] S. Nagano, T. Yoshino, H. Kunimori, M. Hosokawa, S. Kawamura, T. Sato, M. Ohkawa, *Displacement measuring technique for satellite-to-satellite laser interferometer to determine Earth's gravity field*, Meas. Sci. Technol., **15**, 2406 (2004).
- [10] LabVIEW 6.1, National Instruments Corporation, 2002.

- [11] D.I. Robertson, P. McNamara, H. Ward and J. Hough, *Optics for LISA*, *Class. Quantum Grav.*, **14**, 1575 (1997).
- [12] P.L. Bender, J.L. Hall, J. Ye and W.M. Klipstein, *Satellite-satellite laser links for future gravity missions*, *Space Sci. Rev.* **108**, 377 (2003).
- [13] S. Nagano *et al.*, *Development of a multistage laser frequency stabilization for an interferometric gravitational-wave detector* *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 2136 (2002).
- [14] D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, and S.T. Cundiff, *Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis*, *Science* **288**, 635 (2000).