

宇宙エネルギー利用システムの研究(A Study of the Space Energy Utilization)

大型柔軟宇宙構造物の研究
Research on Large-Scale, Flexible Space Structures

システム評価技術グループ 武市昇
 システム誘導技術グループ 上野浩史、関口毅
 Space Systems Evaluation Engineering Group, Noboru Takeichi
 Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group,
 Hiroshi Ueno and Takeishi Sekiguchi

Abstract

Results of research on large-scale, flexible space structures are reported. In this study, it is aimed to develop a lightweight inflatable structure by applying the thermoplastic composite. An inflatable tube is manufactured using a newly developed bundle of the thermoplastic composite. Through some experiments, the feasibility of its stowing, development, and rigidization are demonstrated. An innovative control system is also developed for the structural control of large and flexible structures. To accommodate the structural vibration of a very long period, the control system uses the fiber Bragg grating to measure the strain of the structure, and the piezo actuators to cancel the structural deformation. Architectures of distributed control systems are also discussed. Through experiments, the effectiveness of the control system is clearly demonstrated. Because these are promising fundamental technologies for the future spacecraft, it is important to continue the research and development and to have opportunities of space demonstration in the near future.

1. はじめに

JAXAが中心となって組織している「宇宙太陽発電システム検討委員会（座長：京都大学松本教授）」、「宇宙レーザーによるエネルギー利用システム検討委員会（座長：中井阪大名誉教授）」ではIGW級の実用の宇宙エネルギー利用システム（いわゆる太陽発電衛星、SSPS：Space Solar Power System）を実現することを念頭に、そのシステム概念の検討、要素技術の検討を行っている。SSPSは超大型の宇宙構造物であり、その実現のためには大型柔軟宇宙構造物に関する要素技術の研究開発が必須である。本稿では、平成15年度に実施した大型柔軟宇宙構造物の要素技術に関する研究成果として、インフレータブル構造および大型柔軟構造物の制振技術について報告する。

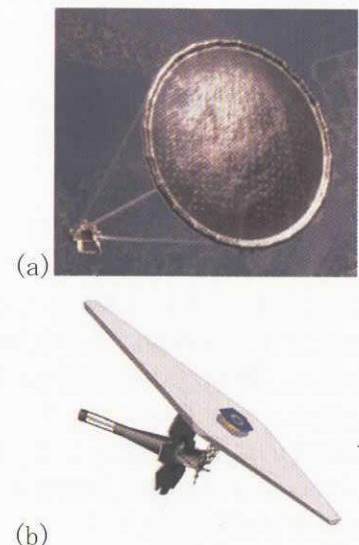
2. インフレータブル構造

2.1. 概要

インフレータブル構造とは、気密性を有する袋状の構造物に気体を導入して展開することにより実現される展開構造物であり、軽量、低コストで宇宙構造物を実現できる技術として期待されている。その用途としては、大型アンテナ（Fig. 1a）、太陽電池パドル、集光鏡、サンシールド（Fig. 1b）などが考えられている¹。大型の構造物であるためデブリの衝突などが避けられないので、内圧を長期間維持することがほぼ不可能であるものと予測される。したがって、内圧を失ってもその形状を維持することができるよう、インフレータブル構造の展開後に何らかの手段により硬化することが必要である。

2.2. インフレータブルの硬化法比較

ここでは、これまでに提案されている硬化方法をまとめ、それと比較して本研究で用いる硬化方法の利点を示す。硬化方法は、まず充填硬化と膜面効果の二通りに大別される。充填硬化とは、



(a) Antenna: IAE,
 (b) Sunshield: NGST

インフレータブル構造の内部にウレタン樹脂などを封入し、発泡および硬化を化学反応で行う手段である。これにより展開および硬化のための付属装置を簡易に実現できる他、外部からエネルギーを与える必要が無いという特長がある。一方で、複雑な形状や内容積の大きい大型の構造物への適用は困難であると考えられる。膜面硬化とは、インフレータブル構造の膜面のみを硬化する方法であり、構造物が大きくなるほど硬化させる面積が相対的に小さくなるので、大型の構造物に適した硬化方法であると考えられる。本研究では、インフレータブル構造の大型宇宙構造物への適用を念頭に置いているので、後者の膜面硬化を採用することとした。

膜面硬化の方法には、加熱硬化・冷却硬化・紫外線硬化・湿気硬化・溶剤揮散硬化などが研究されている¹。これらのうち、湿気硬化および溶剤揮散硬化では、製造から打ち上げまでの保存が困難であるという欠点があり、紫外線硬化では、表面は硬化されるものの内部までは紫外線が届かないため均一な硬化が困難であるという欠点がある。一方、加熱硬化および冷却硬化では供給電力により硬化を制御できるため、展開確認後に硬化を開始することができ、高い信頼性を確保することができるという特長がある。加熱硬化は、熱硬化樹脂をインフレータブル構造の膜面に用い、展開後に通電するなど何らかの手段により加熱し硬化する方法である。しかし、熱硬化樹脂は折り畳みが困難であり、高い収納効率を確保することが困難である。さらに、常温では数日間しか保存できないという欠点もある。冷却硬化は、膜面に熱可塑樹脂を用い、展開確認後に加熱し熱可塑樹脂を融解し繊維に含浸させ、冷却後に複合材として機能させる硬化方法である。熱可塑樹脂は小さく折りたたむことが可能であり、常温で長期間の保存が可能である。しかし、熱可塑樹脂が融解するだけの高温になるまで加熱する必要があるという欠点がある。

2.3. 本研究の目的

平成15年度の研究では、インフレータブル構造の膜面に保存性の良い熱可塑複合材を用い、それを制御性の良い通電加熱により硬化することとし、ニクロム線からなるヒータと熱可塑複合材を同時に織り込んだ繊維を用いることとした。これによりヒータの加熱効率および熱可塑複合材への熱伝導効率を向上させ、熱可塑複合材の欠点である高温加熱の必要性をより少ない電力で満たすことができるものと考えられる。さらに、複合材繊維の部分にのみ必要最小限度のヒータを配置することができるだけでなく、複合材繊維の大きさや膜面内での配置を任意に変更できるようになるので、軽量化を実現できるものと考えられる。

2.4. 成果と今後の予定

研究では新たに熱可塑複合材およびニクロム線からなる繊維を開発し、それを編むことによりチューブ形状を形成した (Fig. 2)。それにフィルムからなる内装・および外装を装着し、収納性および気体封入による展開性を確認した。また、展開後に通電加熱し、問題なく冷却硬化が実現できることを確認した。展開硬化後のインフレータブルチューブをFig. 3に示す。平成16年度は、本研究の成果の延長として、最適化されたグリッド構造を持つインフレータブル構造を開発することにより、さらなる軽量化を実現する予定である。

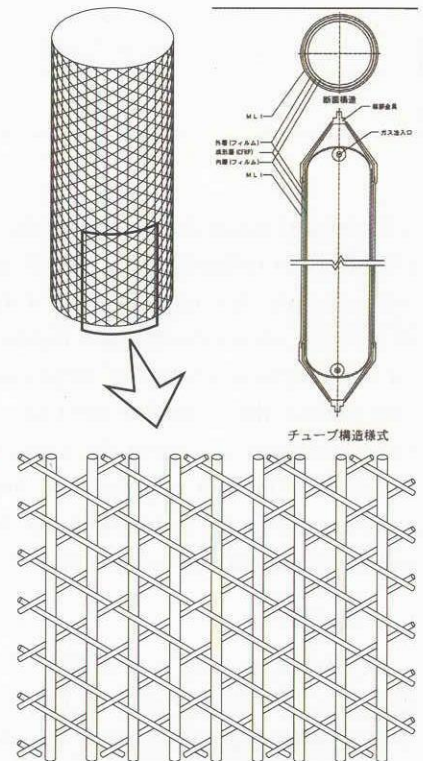


Fig. 2 Description of Inflatable Tube

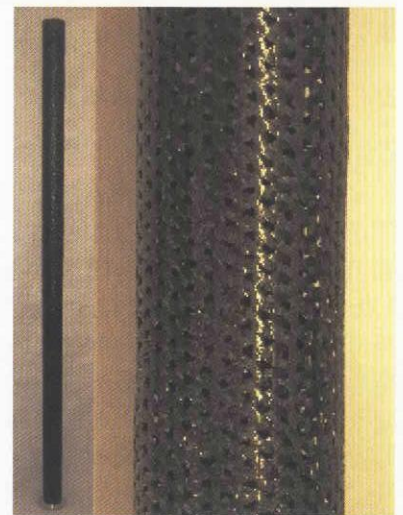


Fig. 3 Rigidized Inflatable Tube

3. 大型柔軟構造制振技術

3.1. 概要

SSPSのような超大型の宇宙構造物では、必然的に非常に長周期の固有振動を生じる。また太陽光輻射圧や重力傾斜力、姿勢制御力などの外乱の影響で形状に変形が生じることも避けられない。このような長周期振動や外乱による形状変形は、SSPSにおいてはその集光効率やそれによる発電効率の劣化の原因となったり、構造の損傷を引き起こしたりするなどの恐れがあるため望ましくない。このような大型柔軟宇宙構造物に生じる長周期振動や形状変形を制御する方法として、対象物にアクチュエータを取り付け、振動の位相に対応したアクチュエータ制御を行なうことにより振動を抑制する能動制振制御方式の適用を提案し、その制振システムに関する検討および実験による検証を行なったのでここに報告する。

3.2. 能動制振システム

3.2.1. ハードウェアの検討

能動制振システムの構築に必要な主な機器とその役割を以下に示す。

- ・センサ：対象物の振動を検知し、信号を制御装置へ送信する
- ・制御装置：センサ信号を制御信号へ変換・制御信号をアクチュエータへ送信する
- ・アクチュエータ：制御信号を受信し、対象物の振動を制御する

以上の各構成機器について検討を行なった。

検知すべき振動の固有周波数が極めて低くなると、速度・加速度を観測するセンサ（ピエゾ、加速度計等）を用いることができなくなると考えられる。一方構造の変位は、振動の固有周波数によらず計測できる。そこで、光ファイバーを用いて変位を観測することにより振動を計測することを提案した。光ファイバセンサの原理をFig. 4に示す。光ファイバにあらかじめ周期的な刻みを入れておけば、歪みが生じた際にそこでの反射光の波長が変化するので歪みセンサとして用いることができる。光ファイバセンサは直径125 μm 、約0.1g/mの超小型・軽量センサである。光ファイバは非磁性・絶縁・熱絶縁といった特性を有するため、高電界環境下、電磁ノイズ下、極低温環境下といった厳しい環境下でも問題なく使用できるといった特長を持つ。また光ファイバの特長を生かした長距離の伝送が可能であり、1本のファイバに多数のゲージを切ることにより、容易にネットワーク化が行なえるといった特長も持つ。センサ製造技術は既に確立され、人工衛星のヘルスマニタリング用センサ等への応用研究も行なわれており、実績も豊富である。

光ファイバセンサの原理をFig. 4に示す。

光ファイバにあらかじめ周期的な刻みを入れておけば、歪みが生じた際にそこでの反射光の波長が変化するので歪みセンサとして用いることができる。光ファイバセンサは直径125 μm 、約0.1g/mの超小型・軽量センサである。光ファイバは非磁性・絶縁・熱絶縁といった特性を有するため、高電界環境下、電磁ノイズ下、極低温環境下といった厳しい環境下でも問題なく使用できるといった特長を持つ。また光ファイバの特長を生かした長距離の伝送が可能であり、1本のファイバに多数のゲージを切ることにより、容易にネットワーク化が行なえるといった特長も持つ。センサ製造技術は既に確立され、人工衛星のヘルスマニタリング用センサ等への応用研究も行なわれており、実績も豊富である。

アクチュエータとしては圧電素子を利用できる。長所としては以下の点が挙げられる。

- ・対象物への取り付け作業が容易（接着剤を使用）
- ・寸法に対する出力が大きい
- ・一枚数グラムと非常に軽量
- ・ピエゾセラミックスをカプトンフィルムでコーティングしてあるため、損傷に強い
- ・耐放射線試験、熱サイクル試験、脱ガス試験をクリアしており、宇宙環境で使用可能

3.2.2. 分散制御方式

制御方式としては、大きく分類して集中制御と分散制御の二種類が挙げられる。それぞれの制御概要をFig. 5に示す。集中制御方式とは、構造物の制御を一台の大規模制御装置で行なう方式である。一台の制御装置に構造物の形状の情報が全て入力されるため、局所的な振動・形状制御に留まらず、全体形状の制御も的確に行えるという特長を持つ。しかし、構造全体の形状情報を全て処理するため処理情報量が非常に大きくなり、振動情報を受けてから制御信号を発信するまでに要する時間が

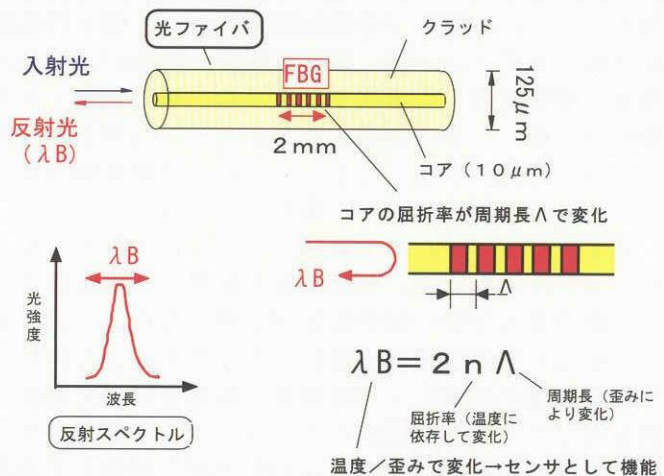


Fig. 4 Fiber Bragg Grating Sensor

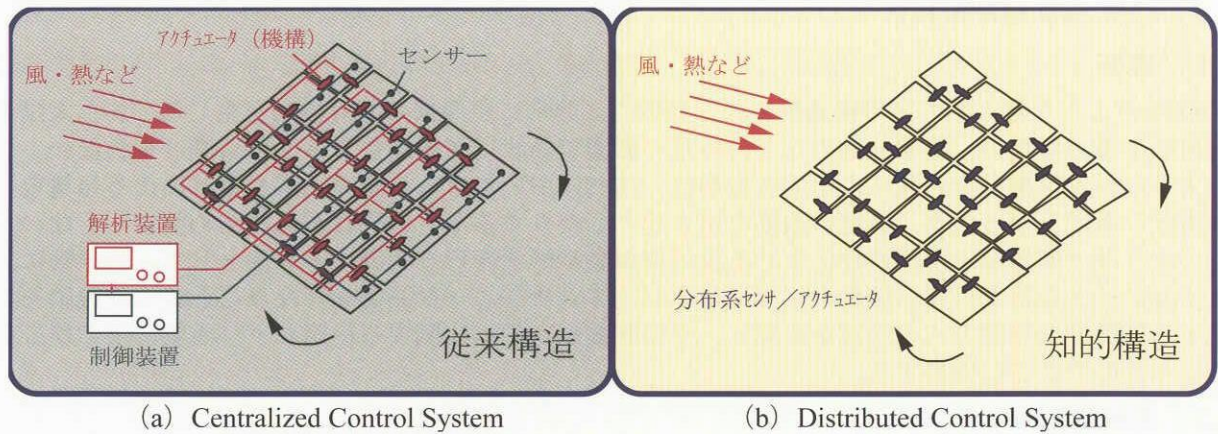


Fig. 5 Control System Architecture

長い、制御装置が一台のため信頼性が低い、冗長系の作製にも多大なコストが必要、といった欠点がある。これに対して分散制御方式とは、個々の構造モジュールもしくは複数のモジュールから構成されるセグメント毎に制御装置を設けモジュール/セグメント単位で制御を行なう方式である。複数の制御装置から構成されるため、制御装置一台あたりの負担が小さい、制御装置の小型化・軽量化が可能、一台の制御装置が止まっても局所的な影響で済むため信頼性の高い冗長設計が可能、といった特長がある。しかし、一口に分散制御方式と言っても、制御を適用する範囲や制御方法によって、その形式は大きく異なってくる。

まず、モジュール単位制御方式について説明する。モジュール単位で制御を行なう場合、全てのモジュール間結合部に制御装置を配置し、結合部ごとに制御を行なうため、モジュール間結合部数と同数の膨大な数の制御装置が必要となる。一方、受信するセンサ信号および発信する制御信号が共に少なく制御装置間の情報のやり取りも少ないため制御ロジックが非常に単純になり、結果として制御装置の軽量化・処理時間の短縮といった特長につながる。また、各モジュール間結合部で制御を行なうため、一箇所のモジュールに不具合が生じても周囲のモジュールに影響を及ぼすことはなく信頼性が高い、ケーブルの引き回しが短くて済む、等の特長もあわせ持つ。しかし、制御装置の数量が膨大になるので必要電力が増加し、さらに制御構造物の全体形状情報を得ることができないため、変形を局所的に相殺するだけの簡単な形状制御は行なえるが複雑な形状制御には対応できないといった欠点も伴う。

次に、複数のモジュールから構成されるセグメントを制御する方式について説明する。セグメント単位で制御を行なう場合、セグメント毎に制御装置を配置するため、モジュール単位制御方式ほどではないが受信するセンサ信号および発信する制御信号が共に少なく、制御ロジックも単純であり、処理時間も集中制御方式と比較して早いと予想される。また一箇所のセグメントに不具合が生じても周囲のセグメントに影響を及ぼすことが無いので信頼性が高く、ケーブルの引き回しが短くて済む等の特長を持つ。さらにモジュール単位制御方式ほど制御装置の数量が多くならないため、必要電力もモジュール単位制御方式よりは抑えられる。セグメント単位で制御を行なう際に懸念される問題として、局所的な形状制御は成功しても、セグメント間の制御ができないため、結果として全体形状制御が行なえないという問題がある。この問題を解決する方法として、分散制御方式の上位にさらに制御装置を設置する階層制御方式や、セグメント同士をオーバーラップさせる方式が挙げられる。階層制御方式とは、各制御装置の上位にさらに制御装置を設け局所的な振動・形状の制御は下位の制御装置で、全体形状の制御は最上位の制御装置で行なう方式のことである。大規模な制御系を構築する際によく使用される方式であるが、集中制御方式と同様に、最上位の制御装置に不具合が生じた場合システム全体に影響を及ぼしてしまうという欠点が挙げられる。セグメント同士をオーバーラップさせる方式とは、セグメント外周のモジュールを隣接するセグメント間で共有することにより、セグメント境界の情報を入手し制御する方式のことである。セグメント間の変形情報の処理が可能のため、結果的に構造物の全体形状を制御できるといった特長を持つ。この方式では、分散制御の特徴を有したまま、局所的な形状制御だけでなく全体形状制御も可能なため、大型宇宙構造物の形状制御により適していると考えられる。

3.3. 実験による検証

3.3.1. 実験の概要

光ファイバをセンサとして使用した能動制振システムの実証、及び0.1Hzオーダーの超長周期振動制御に対する能動制振システムの有効性検証を行なうことを目的としてデモンストレータを作製した。本試作・評価により光ファイバをセンサとして使用した能動制振システムの有効性・実現性を確認した後に、オーバーラップされた分散制御システムの実証など、実用へ向けたさらなる課題を超えていくことになる。デモンストレータの概要をFig. 6、7に示す。実験項目としては以下の二項目が挙げられる。

- ・光ファイバを歪センサとして使用した、フィードバック制御システムの構築
 - ・ piezo素子 (QUICKPACK²) を用いた一次元方向の長周期振動 (0.1Hz程度) の制御
- 以下、それぞれについて報告する。

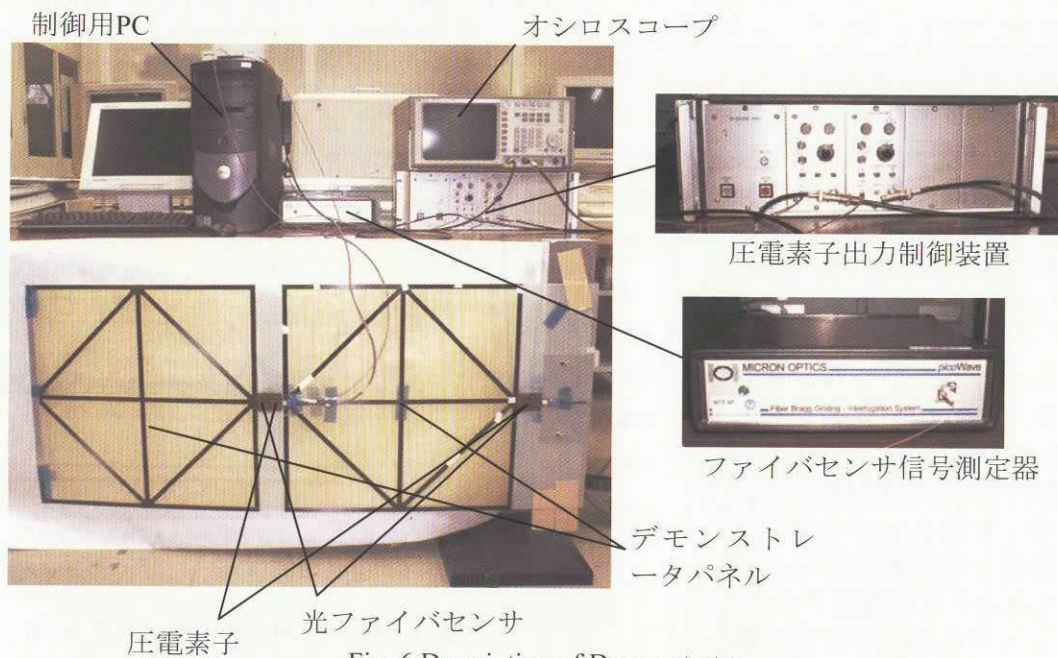


Fig. 6 Description of Demonstrator

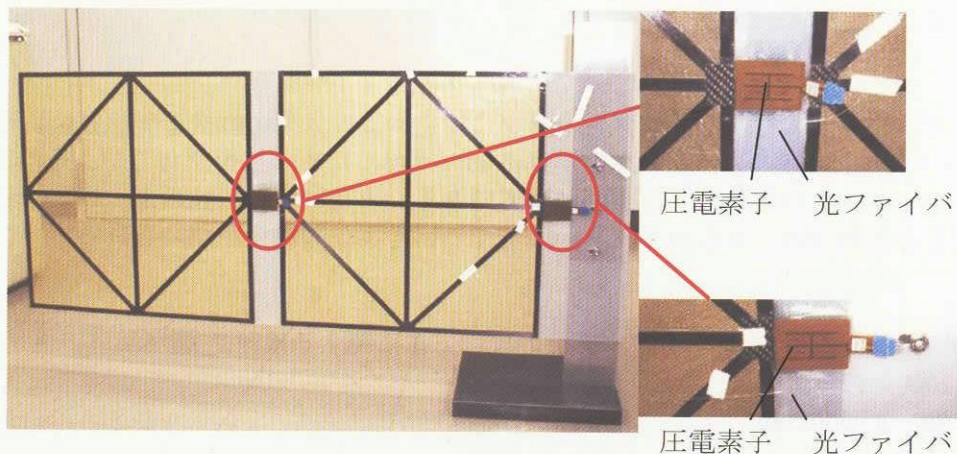


Fig. 7 Sensors and Actuators of Demonstrator

3.3.2. 光ファイバセンサシステム適用の評価

まず、光ファイバをセンサとして適用した能動制振システムの有効性を検証した。検証方法として、既に能動制振において実績のある一次元CFRP片持ち梁デモンストレータを使用して、光ファイバをセンサとして適用した場合の制振効果を確認した。評価結果をFig. 8に示す。この結果から、振動の減衰に対する制御の有無の影響を確認でき、能動制振システムにおける光ファイバセンサの有効性を実証したことになる。

3.3.3. 長周期振動の制振評価

次にデモンストレータにより、長周期振動の制振評価を行なった。評価結果をFig. 9に示す。図中、振動波形のところどころに制振効果が現れている箇所を確認できる。この試験結果から、制御により振動が収束するまでの時間が短くなっていることが確認できる。従って、能動制振制御を適用することにより、長周期振動の制御を可能なことが確認できた。

3.4. 成果

能動制振システムの適用検討、さらにデモンストレータを用いた実証試験により、大型柔軟宇宙構造物の振動・形状制御に対する能動制振制御システムの有効性が確認された。制御システムの検討の結果、大型柔軟宇宙構造物の振動・形状制御には、分散型制振システムがその制御ロジックの設計や冗長系の作製が容易であるので有効であると考えられる。また、デモンストレータの試験により、0.1Hz前後の振動制御に対して光ファイバをセンサとして使用した能動制振システムが有効であることが確認できた。この制振システムはさらに低い周波数の振動制御にも適用可能であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、平成15年度に行ったインフレイタブル構造および大型柔軟構造制振技術に関する研究を報告した。いずれもSSPSのような大型宇宙構造物の実現のための技術であるが、その実現の過程では実証ミッションを含む複数の宇宙実証が必要である。またいずれの技術も、いかなる規模の衛星にも適用できる基盤技術であるので、早い段階での宇宙実証の機会が期待される。

参考文献

- [1] 角田, 仙北谷, “宇宙インフレイタブル構造の硬化方法に関する検討,” 第16回宇宙構造材料シンポジウム, 2000年12月5日.
- [2] Mide: <http://www.mide.com/>

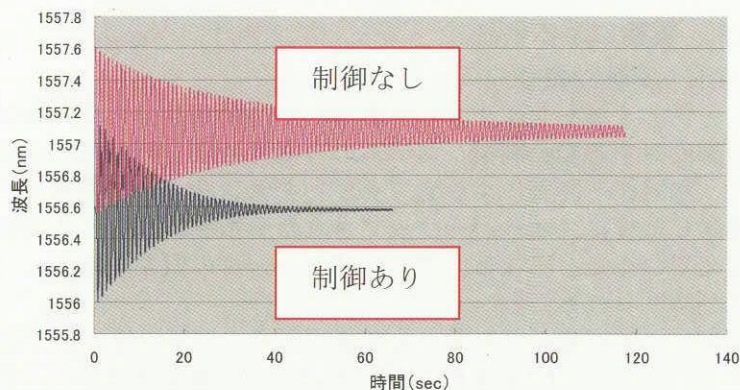


Fig. 8 Experimental Result of Vibration Control using Fiber Bragg Grating Sensor

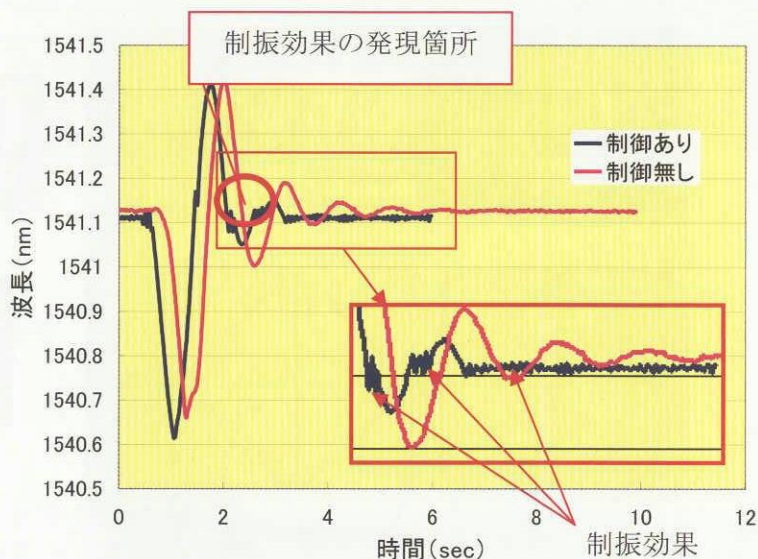


Fig. 9 Experimental Result of Vibration Control by Distributed Control System