

6.7. 光ファイバセンサを用いた衛星のスマート 熱構造の開発

三菱電機 株式会社

関根 一史 氏



第12回試験技術ワークショップ

2014/12/11

光ファイバセンサを用いた衛星のスマート熱構造の開発

世古博巳、○関根一史、宮下雅大、竹谷元、田中好和
(三菱電機株式会社)

三菱電機株式会社

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.



発表内容

1. 研究開発の背景
2. スマート熱構造により期待される効果
3. 光ファイバセンサについて
4. スマート熱構造の実現性検証
 - 温度/ひずみセンサ
 - 供試体
 - センサ性能評価
5. まとめ

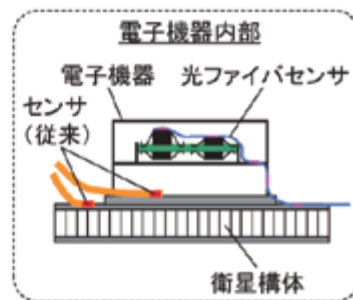
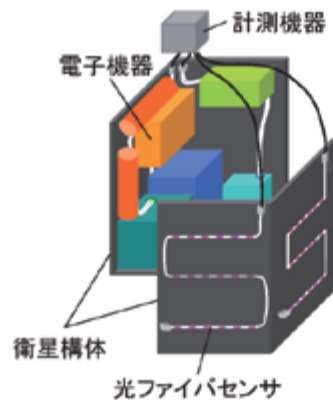
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 1



研究開発の背景(1)

宇宙機開発において、最小の費用にて最大の成果を実現する工夫を極めていくことが重要であり、信頼性向上、低コスト化、高性能化が図れる新たな基盤技術とその適用に関わる仕組み作りが必要

ブレークスルーとして、**光ファイバセンサを一体化した「スマート熱構造」**技術開発を提案(光ファイバセンサ:小型軽量な温度/ひずみセンサ)



温度/ひずみセンシング機能を有するスマートな構造・電子機器

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 2



研究開発の背景(2)

スマート熱構造の効果

- 高密度・高精度計測データを取得して、従来の熱/構造解析技術をブラッシュアップ、熱/構造設計の信頼性向上
- 地上試験での大規模なセンサ脱着工程を削減して、工期短縮及び人件費削減により低コスト化
- 従来の衛星コンポーネントにセンサを一体化して高付加価値を創出、コンポーネントの高性能化

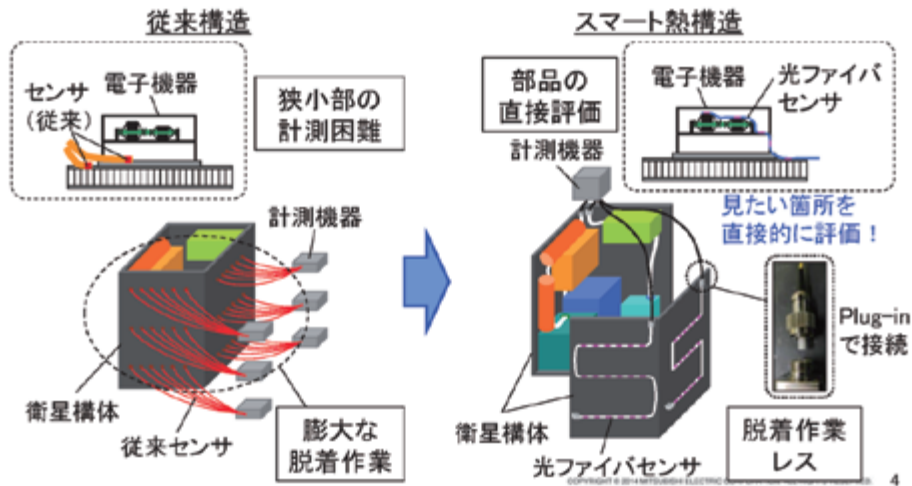
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 3



スマート熱構造により期待される効果(1)

■従来技術ベースの改善

1. 電子機器内部の狭小部計測による評価レベルの向上
2. 地上試験での計測センサの脱着工程削減による工期短縮・費用削減



スマート熱構造により期待される効果(2)

■新付加価値の創造

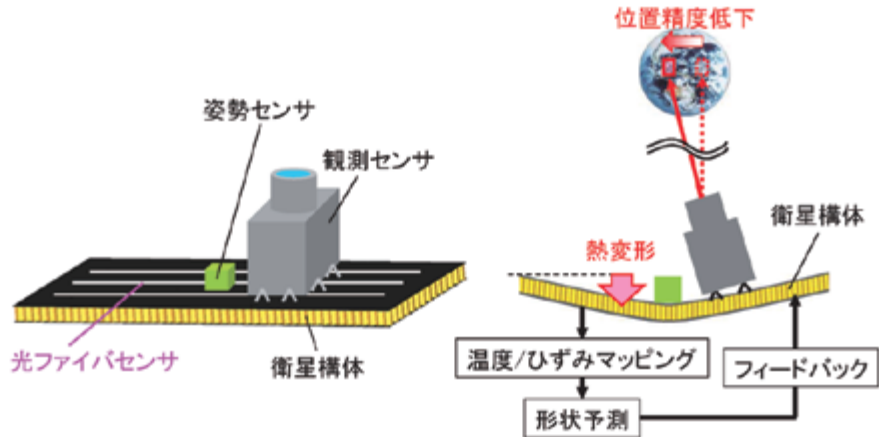
1. 指向性要求機器・支持構造の温度/ひずみマッピングによる熱変形評価とフィードバックによる機器の性能向上(☆)
2. 電磁干渉環境下での温度/ひずみ評価
3. 推葉タンクの残推葉量推定(☆)
4. 複合材料構造体の成形時から使用末期までのライフサイクルモニタリングによる限界設計の実現(☆)
5. ヒートパイブ温度分布の直接計測による熱制御系の精度向上



スマート熱構造により期待される効果(3)

1. 指向性要求機器・支持構造の温度/ひずみマッピングによる熱変形評価とフィードバックによる機器の性能向上

支持構造の温度/ひずみ分布を高密度・高精度に計測して熱変形を予測、フィードバック(熱制御、画像補正など)による観測精度の向上が可能



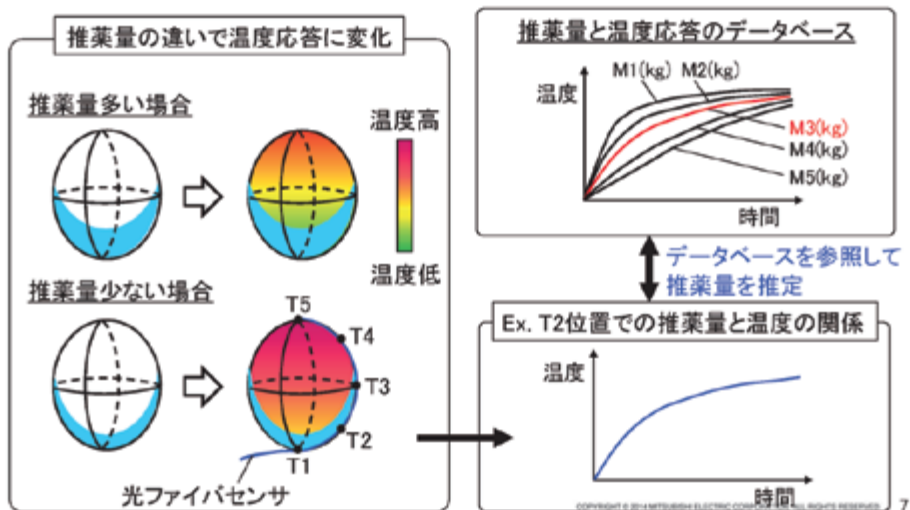
6



スマート熱構造により期待される効果(4)

3. 推進タンクの残推進量推定

推進タンクの温度分布を高密度に計測して残推進量の推定技術を向上、燃料マージンの削減による軽量化・低コスト化が可能

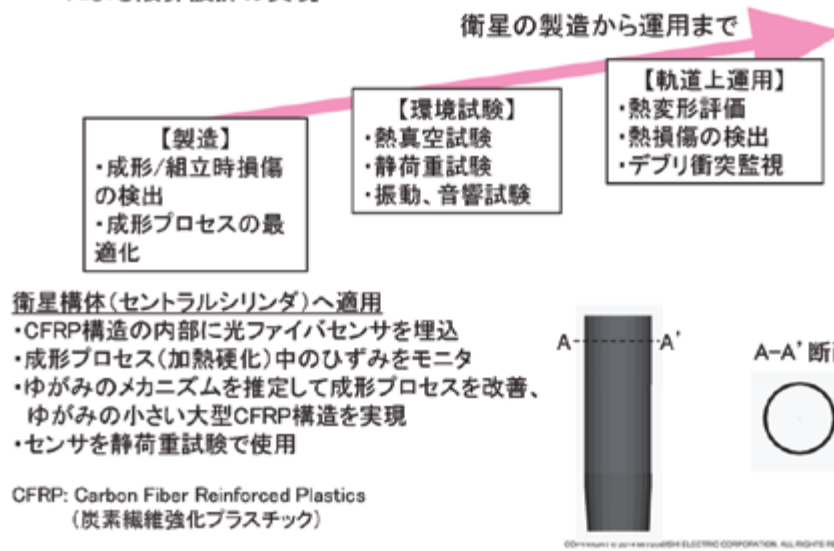


7



スマート熱構造により期待される効果(5)

4. 複合材料構造体の成形時から使用末期までのライフサイクルモニタリングによる限界設計の実現



光ファイバセンサの適用事例／開発動向

【土木・建築分野】

- ・コンクリート構造物の建設段階から維持管理段階までの健全性監視に使用

【航空機分野】

- ・航空機の複合材構造の健全性診断技術の開発が進行中

【宇宙機分野】

- ・電子回路基板、衛星構造体の温度計測技術の開発が進行中(欧州)



開発内容紹介


Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 10



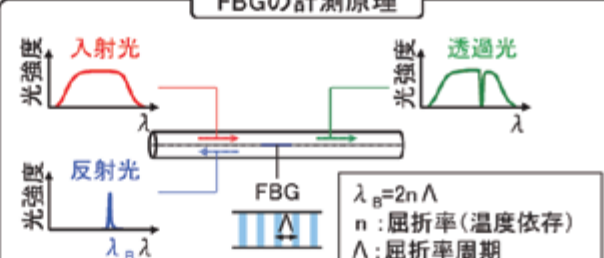
光ファイバセンサについて(1)

特長

- (1) 小型・軽量
(φ0.25mm)
- (2) 耐電磁ノイズ性
- (3) 高い熱絶縁性
- (4) 多点センサ
- (5) 多機能センサ
(温度、ひずみ)



FBGの計測原理

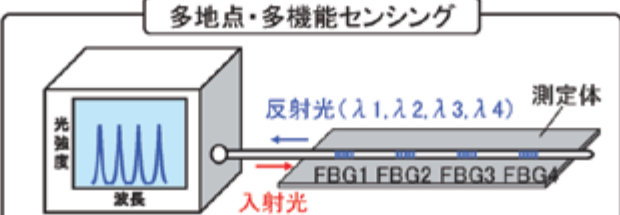


$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

n : 屈折率 (温度依存)
 Λ : 屈折率周期 (温度、ひずみ依存)

FBG: Fiber Bragg Grating

多地点・多機能センシング



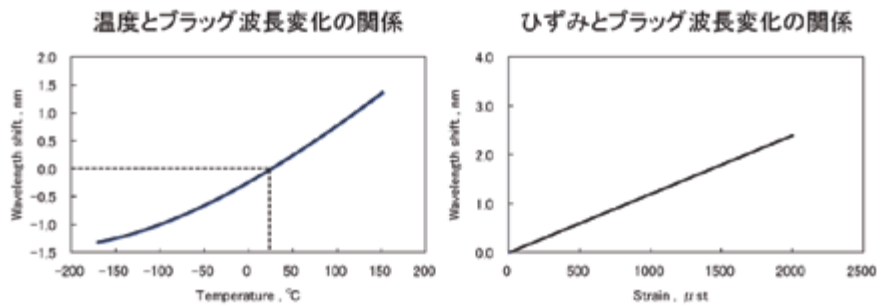
Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 11



光ファイバセンサについて(2)

課題

温度とひずみの両方に感度をもつFBGセンサを、測定精度を低下させることなく、衛星構造／機器に実装する技術の開発



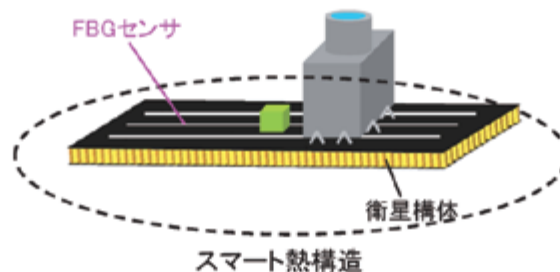
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 12



スマート熱構造の実現性検証

スマート熱構造の実現性検証を目的とし、

- 温度センサ/ひずみセンサの基本構成を確立
- スマート熱構造の供試体を設計製作してセンサの性能を検証



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 13

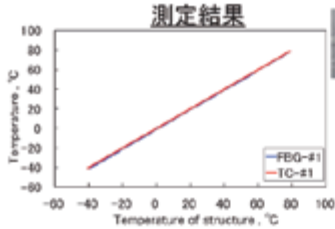
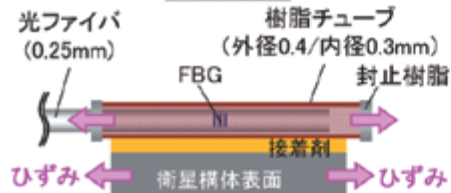


センサの基本構成

温度センサ

- 樹脂チューブ被覆型のFBG温度センサを開発、ひずみの影響を排除
- 温度の計測分解能0.5°Cを実現

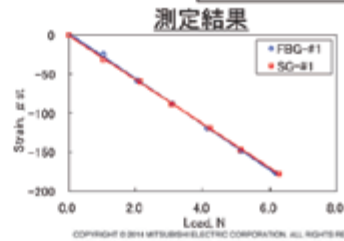
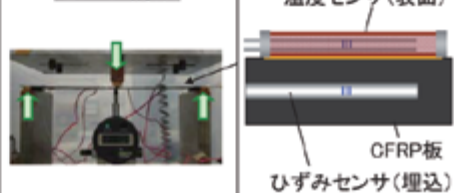
センサ構成



ひずみセンサ

- 温度センサと組み合わせることにより、温度の影響を補正
- ひずみの計測精度10 μ stを実現

センサ構成

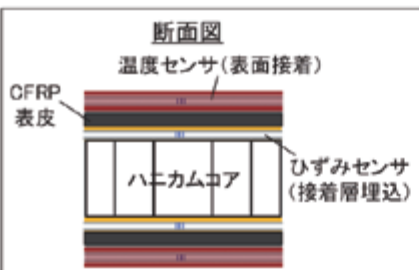
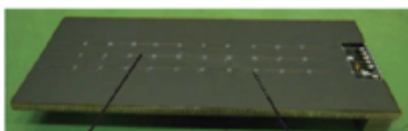


Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 14

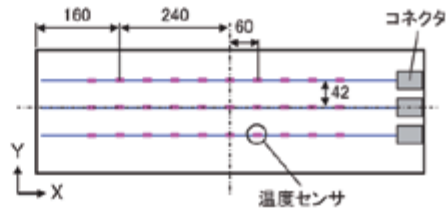


供試体

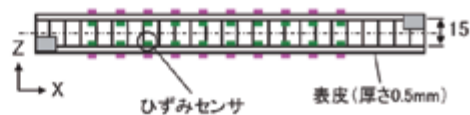
- 800mm × 300mmサイズのスマート熱構造供試体を試作
- 温度センサ60点(表面)、ひずみセンサ60点(埋込)の計120点のセンサを実装



FBG位置(上面図)



FBG位置(側面図)

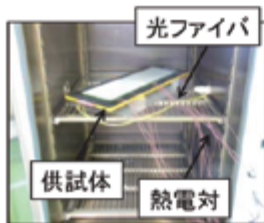


Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 15

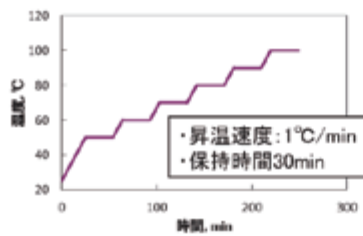


センサ性能評価(1)

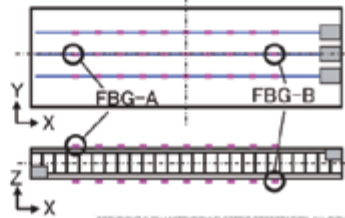
・恒温槽で熱環境試験を実施して温度センサの性能を評価



試験条件(温度プロフィール)



温度比較したセンサ
近傍の熱電対と比較



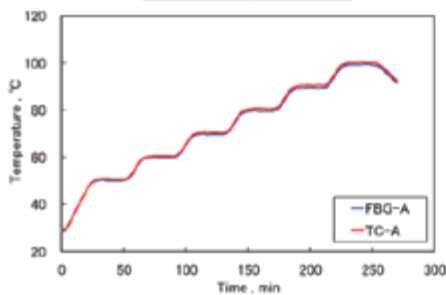
Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 16



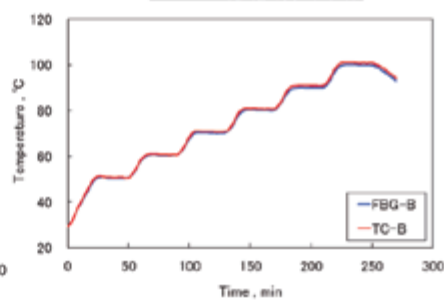
センサ性能評価(2)

・FBG温度センサと熱電対との差は1°C以内であり、ほぼ同等の精度で計測可能

FBG-A(供試体上面)



FBG-B(供試体下面)



温度 (°C)	FBG-TC (°C)	温度 (°C)	FBG-TC (°C)
50	-0.6	80	-1.0
60	-0.6	90	-1.0
70	-0.8	100	-0.9

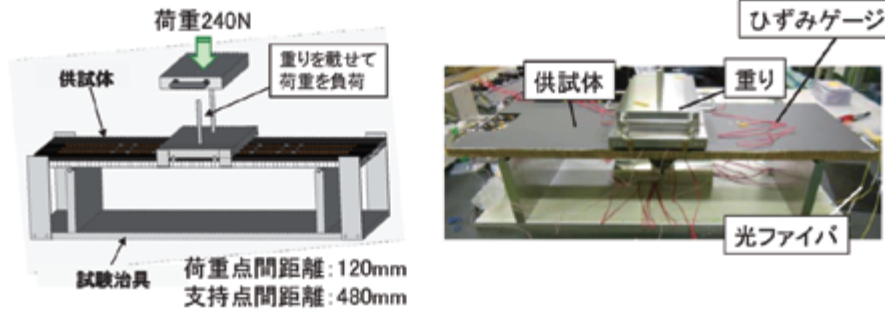
温度 (°C)	FBG-TC (°C)	温度 (°C)	FBG-TC (°C)
50	-0.2	80	-0.8
60	-0.3	90	-0.9
70	-0.5	100	-0.8

17

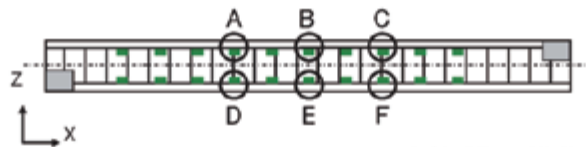


センサ性能評価(3)

・曲げ試験を実施してひずみセンサの性能を評価



ひずみ比較したセンサ
近傍のひずみゲージと比較

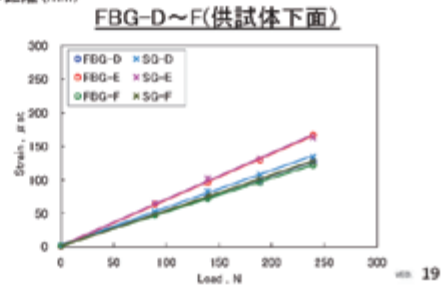
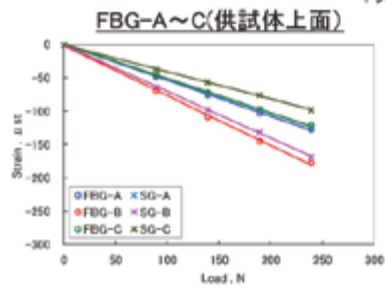
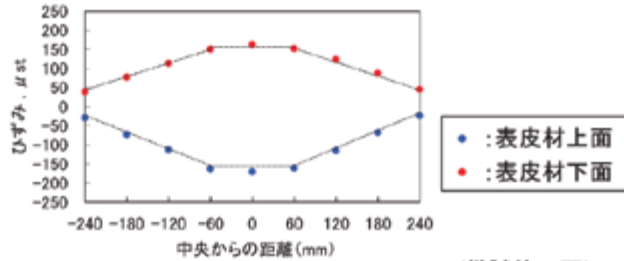


Copyright © 2014 Mitsubishi Electric Corporation. All rights reserved. 18



センサ性能評価(4)

- ・四点曲げによるひずみの分布の確認
- ・FBGひずみセンサを用いて、ひずみゲージとほぼ同等のひずみ計測が可能





まとめ

宇宙機の信頼性向上、低コスト化、高性能化が図れる新たな基盤技術とその適用に関わる仕組み作りのブレークスルーとして、光ファイバセンサを一体化した「スマート熱構造」技術開発を提案した。

スマート熱構造の実現性検証を目的とし、温度センサ/ひずみセンサの基本構成を確立、計120点のセンサを備えたスマート熱構造の供試体を設計製造し、従来センサレベルのセンサ計測精度を確認した。

今後は、地上試験への実用化に向けて、衛星構造/機器への実装及び計測精度の検証を行い、適用に関わる標準化を進める予定。

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED. 20



質疑応答

質問者① JAXA イプシロンロケットプロジェクトチーム 宇井様

質問が二点ある。一点目は、実験装置についてで、構想では軌道上の評価もできるシステムを検討しているが、今回の評価をした際の実験装置では16ページに示されているように、既存の大きいスペクトルアナライザ等を使用している。これらを搭載品とすることの用途は立っているのか、課題が残っているのかということをお願いしたい。二点目は測定可能な温度とひずみの範囲について、私はロケットを担当しているが、ひずみと温度を同時に分布的に測定できることは、ロケットの研究をより効率的に進める上で大切になると思っている。そのためには、温度とひずみの測定範囲が大事になるが、現在どの程度の測定範囲を想定しているか。

発表者

一点目については、計測機器を軌道上で使えるかの用途は調査中である。まずは地上試験で使うことから始めたいと考えている。将来的に軌道上で使える機器を開発したいと考えている。

二点目については、温度は我々の方でも -170°C ～ $+180^{\circ}\text{C}$ くらいの範囲で評価していて、論文では10Kから測定しているものもある。高温は 200°C を超える温度ではセンシングの劣化が始まるので 180°C が限界と考えている。ひずみは構造に実装した時に、どこまで構造と一体化して動いてくれるかに依存する。先に実装している接着剤の部分で剥離すると測定できなくなる。通常のエポキシ系接着剤では $2000\mu\text{st}$ くらいまでは問題なく測定できる。

質問者② JAXA 環境試験技術センター 施様

質問が二点ある。一点目はひずみをベースとして測定するが、周波数応答特性はどれくらいまで測定できるかという点。二点目はひずみと温度の校正をどのようにしているかという点について教えていただきたい。

発表者

一点目については応答特性はセンサに関しては光でやりとりしているため無視できる。そのため計測装置のサンプリング速度に依存する。私の知っている限り100kHzの製品が光計測機器メーカーから出ている。しかし、カタログ上確認しただけで、まだ使用したことはない。データの校正は温度に関しては、温度変化に対する波長の変化量が物性値として決まっているので、校正時の温度を基準として、そこからの変化量として算出している。そのため校正時には別の温度センサが必要となる。通常はコントロールしやすい室温付近を基準として使っている。ひずみについても波長の変化量からひずみを求めている