

# 技術紹介

## 5 自己保持型MEMS光スイッチ

### Latching MEMS Optical Switch

加藤 嘉睦	Yoshichika Kato	中央研究所	研究開発部	主任
近藤 健治	Kenji Kondo	中央研究所	研究開発部	主任
濱田 義彦	Yoshihiko Hamada	中央研究所	研究開発部	主任
伊巻 理	Osamu Imaki	中央研究所	研究開発部	
森 恵一	Keiichi Mori	中央研究所	研究開発部	シニアマネージャー

**キーワード：** 光スイッチ、MEMS、自己保持、光通信、シリコン

**Keywords :** optical switch, MEMS, latching, optical communication, silicon

### 要 旨

日々増大する通信トラフィック需要を支えるため光通信網の整備が進められていますが、その構築には光信号の経路切替を行う光スイッチが重要な部品として位置付けられています。当社では、MEMS技術を用い慣性センサーなどを開発してきましたが、ここで培った技術を応用し、シンプルな1枚マスクプロセスにより光スイッチングに必要な要素をワンチップ化した高性能、高耐久な光スイッチを開発しました。開発したデバイスは、光学特性、機械的特性とも実フィールドでの使用を前提とした目標仕様を十分に満足し、主要な信頼性試験においても良好な結果を得ています。

### SUMMARY

To support day-by-day increasing communication traffic demand, optical communication networks are being developed. For establishment of the network, optical switch is positioned as an important device to play a role to switch optical signal routes. JAE has been engaged in development of inertial sensors incorporating the MEMS technology. Based on our piled-up technology, we developed a high-performance, high-robust optical switch by integrating elements necessary for optical switching into a single chip by adopting simple single mask process. The device we developed satisfies fully the target specification in both optical and mechanical properties, which was set up for use in real field application. Further, the device shows good performance in major reliability tests.

## 1 まえがき

近年の高度情報化社会において情報通信量は日々増大し、その需要に応えるべく、そのインフラとなる光通信網の整備が世界的規模で進められています。光通信網は光信号の送信、中継、切替、受信等、多くの機能を複合し構築されていますが、それを構築するうえでのキーデバイスの一つとして光スイッチがあります。光スイッチとは、光信号を電気信号に変換することなく光のまま経路切替を行うもので、光通信の高速性、広帯域性を損なうことなくネットワーク化するためには必須のデバイスです。光通信では一本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を重ねて送信する波長多重伝送という方式が採られますが、この波長多重された信号光をネットワークの各ノードにおいて、波長毎に分岐あるいは挿入するための経路切替に光スイッチが用いられます。また、光通信網の冗長性を確保するため、光通信網において障害が発生した場合に、光スイッチにより予備系に切替える、あるいは障害を迂回する経路に切替えるという用途もあります。その他、信号光の監視、計測器用途等、光スイッチの適用範囲は多岐に渡ります。

このような光スイッチに対する要求項目としては、i) 低価格、ii) 低損失、iii) 自己保持型（無電力にて状態を保持する機能）の3要素が現在必須とされています。この実現に向け、当社では慣性センサー開発などで培った MEMS 技術を適用し、低価格、高機能なデバイス開発に取り組みました。MEMS 技術により、ワンチップ内に光のスイッチングに必要な要素（ミラー、ミラー駆動機構、ミラー自己保持機構、ファイバガイド等）を集積化することが可能となり、これは小型・高機能化に寄与するばかりでなく、部品点数の削減、ならびに実装コストの抑制にもつながります。

本報では、今回開発した光スイッチの構造とその作製プロセス、および機構設計について解説し、最後に試作したデバイスの評価結果を報告します。

## 2 開発目標

本MEMS光スイッチの目標仕様を表1に示します。現在、機械式と呼ばれる、電磁リレーに類似の機構部に光学部品を実装したタイプの光スイッチが実用化されていますが、本MEMS光スイッチは、実フィールドへの適用を想定しそれらと同等の光学特性を実現し、かつ、将来の多チャンネル化を見据えたワンチップ化による小型設計、および単結晶Siの優れた材料特性を活かした、高耐久、高信頼なデバイス開発を目指すものです。

表1 目標仕様

波長範囲	1510 ～ 1610 [nm]
挿入損失	< 1.0 [dB] (コネクタ込み)
波長依存性	< 0.15 [dB]
偏波依存性	< 0.10 [dB]
クロストーク	< -60 [dB]
反射減衰量	> 40 [dB] (コネクタ込み)
切替時間	< 1 [ms]
自己保持型 (耐衝撃性)	> 50 [G]
切替寿命	> $1 \times 10^9$ [回]

## 3 スイッチング原理

本光スイッチのスイッチング原理を図1に示します。入力ポートとなる光ファイバの正面には出力ポート1となる光ファイバが、また、直角方向には出力ポート2となる光ファイバが、それぞれ空間を隔てた状態で設置されています。本光スイッチではこの空間にミラー（紙面に垂直な反射側壁）を抜き挿しすることにより、つまり、図中の（a）と（b）の状態を切替えることにより光信号経路のスイッチングを行います。

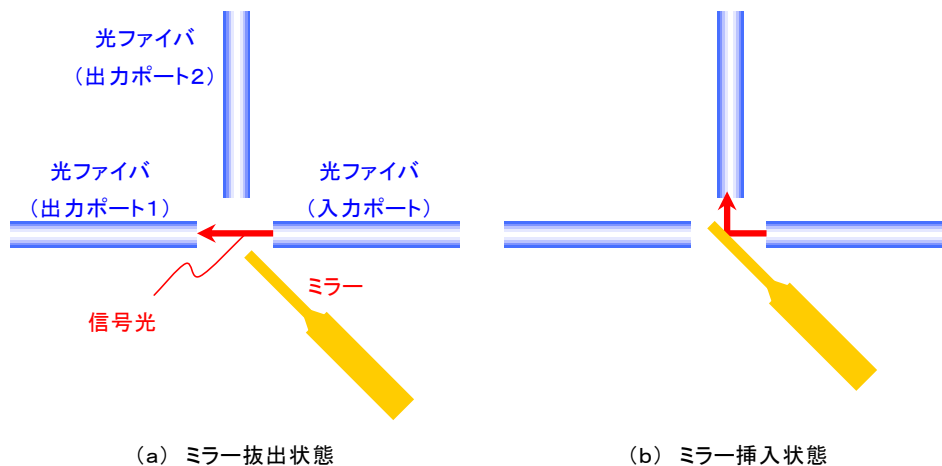


図1 スイッチング原理説明図

## 4 素子構造

図 2 に素子構造を示します。図中、青または黄で示した部分はグレーで示した基板部分から、垂直に隆起した構造となっており、この上部構造の側壁を利用し、ファイバガイドを形成しています。ファイバガイドの交差部にはミラーがあり、このミラーはロッドを介して、駆動力を発生する櫛歯電極、および可動機構全体を支える 4 本のヒンジと一体化されています。このような立体構造は、SOI (Silicon on insulator) 基板表面にフォトリソグラフィ技術 (1 枚マスク) により保護パターンを形成し、そのパターンをもとに上部単結晶シリコン層を ICP-RIE (誘導結合プラズマによる反応性イオンエッチング) により垂直エッチング加工したものです。

光ファイバを X 状配置とし 1 回反射構造としたのは、ミラー反射回数を最小限に留めることにより、ミラー反射面での散乱損失、偏波依存損失を低減することを目的としています。また、反射角度を  $90^\circ$  とすることでワーキングディスタンス (ファイバ端面間距離) を最小としています。これはファイバのミスアライメントに起因する損失を低減することを目的としています。なお、ファイバ先端は空間伝播光の結合損失を最小にし、反射減衰量を最大にするように設計されています。

可動機構を支える 4 本のヒンジは湾曲した形状を有しています。これは Bistable と称される座屈を伴うヒンジの形状反転メカニズムを応用することによって、ミラーの位置を 2 値制御することを意図した構造です。

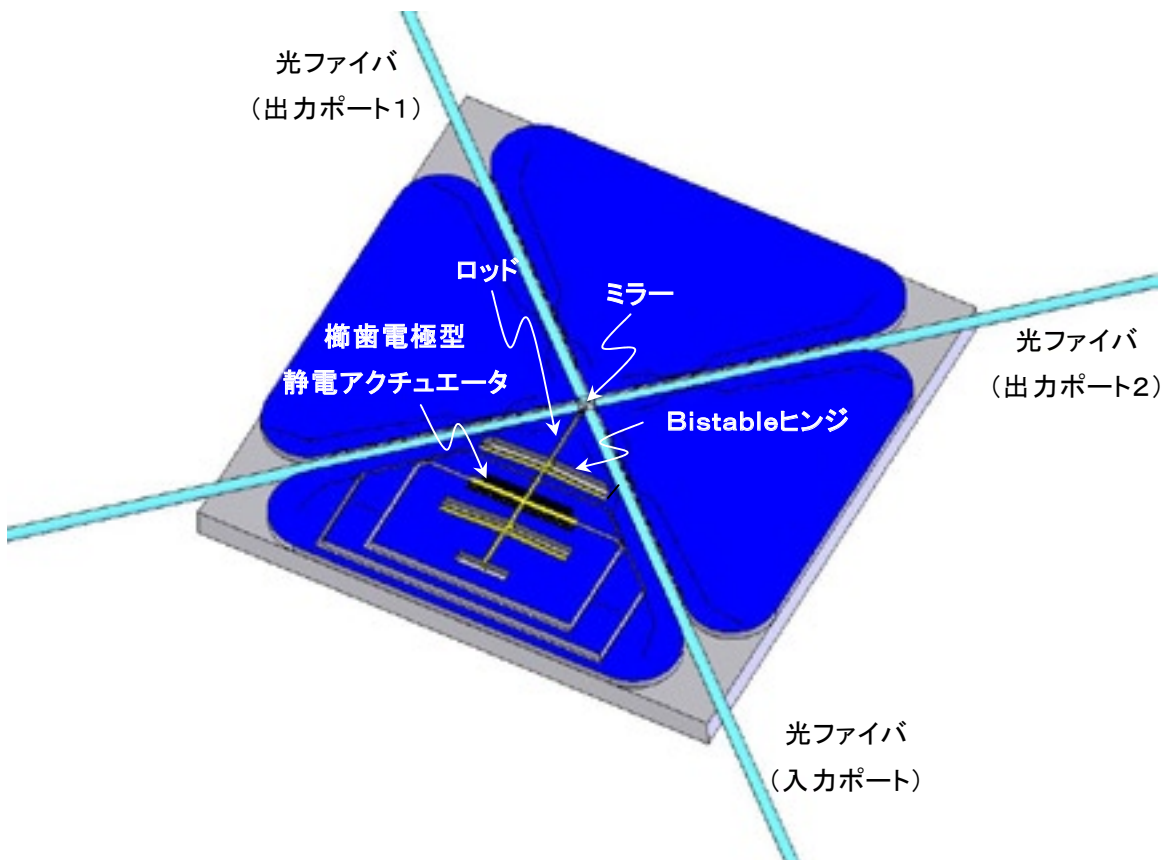


図 2 光スイッチ素子構造

## 5 素子設計

### 5.1 光学設計

光学パラメータの決定に際しては、ガウシアンビーム光学系に基づき計算を行い、この光学系を特徴付けるビームウェストにおけるスポットサイズの設定は、作製誤差に起因する結合損失が最小となるよう決定しました。このビームウェストをもとにファイバ先端の光学パラメータを決め、そして十分な光学特性が得られるよう（特にクロストークの確保に留意して）ミラーのストローク（可動距離）を決定しました。

### 5.2 ヒンジ設計

本光スイッチでは、ミラーの2値状態を自己保持するために Bistable と称される湾曲した梁の座屈現象を応用しています。その概念図を図3に示します。同図では、アーチ状に湾曲した梁の頂点に荷重を加えていくと、ある臨界点を超えた時に梁が自発的に形状反転して第2安定状態にスナップする様子が示されています。このメカニズムに立脚したヒンジ設計を行うため、有限要素法による非線形構造解析を行いました。

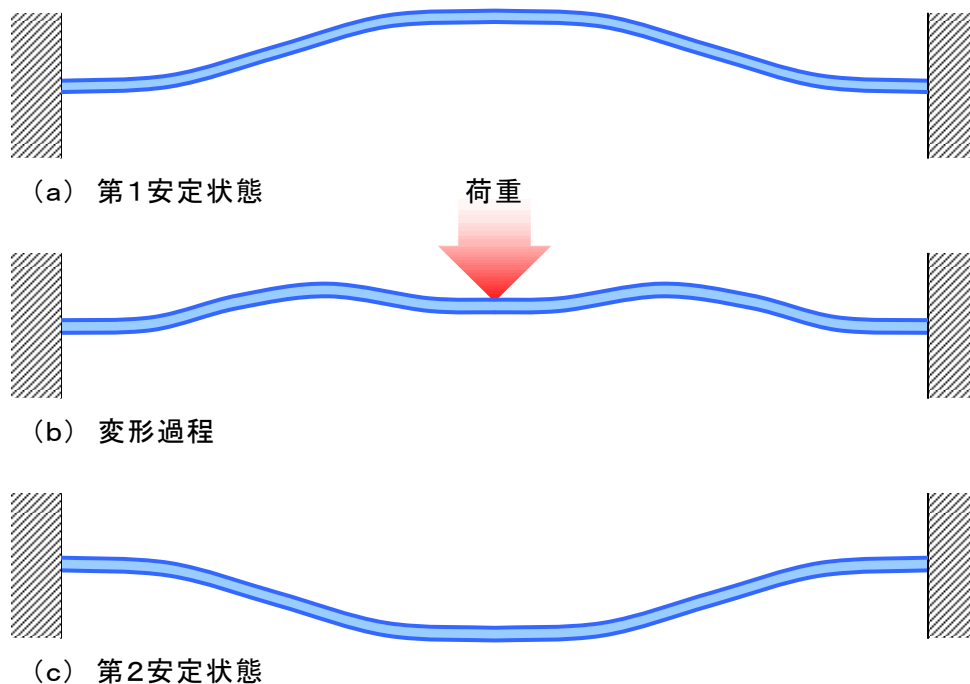


図3 Bistable ヒンジの座屈現象

図 4 において、初期形状（変位 = 0）が第 1 安定状態と定義されます。変位が極微小な領域ではヒンジからの反力は線形な応答を示しますが、座屈荷重で極大値を迎えた後は、変位を増大するにつれ反力は低下し、0 点（ $y=0$  のライン）を切った後は外力を加えなくとも自発的に第 2 安定状態にスナップします。ここで自己保持機能を決定するヒンジ部の構造寸法は、次の 2 条件によって規定されます。

- ① 第 1、第 2 安定状態のいずれか大きい方の自己保持力が、アクチュエータの最大静電力よりも小さいこと、
- ② 第 1、第 2 安定状態のいずれか小さい方の自己保持力が保証すべき衝撃力（50G）よりも大きいこと、

本光スイッチでは、第 1 と第 2 安定状態の自己保持力が等しくなるよう設計を行いました。これは、上記構造寸法の許容マージンを最も拡大できる最適解の一つと言えます。

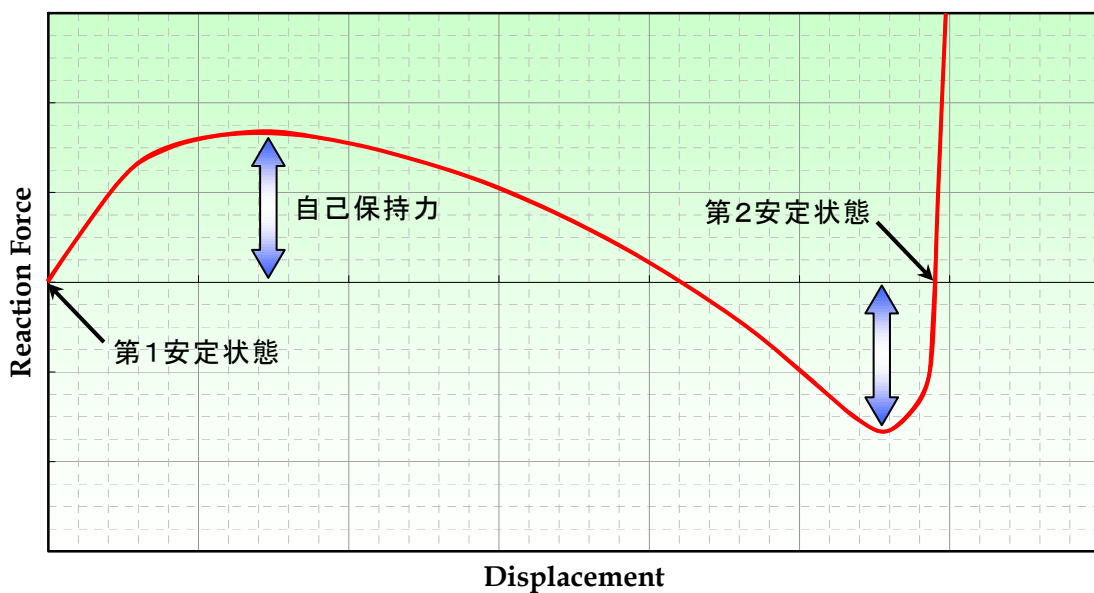


図 4 Bistable ヒンジの変位－反力特性

### 5.3 アクチュエータ設計

図 5 に櫛歯型静電駆動アクチュエータの設計を行う際の基本単位となる櫛歯電極構造ユニット・セルを示します。同図に示すように、櫛歯電極構造では、①櫛歯先端部に働く可動電極の変位  $x$  に大きく依存する静電力と、②櫛歯側壁間に働く  $x$  に依存しない静電力の、作用の異なる 2 種類の静電力を考慮する必要があります。両者を考慮したトータルの静電力  $F_{es}$  は次式のように表すことができます。

$$F_{es}(x) = \epsilon_0 N h \left\{ \frac{w}{(s-x)^2} + \frac{1}{g} \right\} V^2$$

ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $N$  は櫛歯数（ペアの数）、 $h$  は電極の構造高さ、 $w$  は櫛歯の幅、 $s$  は櫛歯先端から対向する電極までの初期間隔、 $g$  は櫛歯の側壁間隔、 $V$  は駆動電圧です。

上式を基に求めた静電力が先の自己保持力より大きく、かつ、可動機構の慣性力（櫛歯電極設計に大きく依存）が 50G 作用時においても自己保持力を超えないよう櫛歯電極の各パラメータを設計しました。

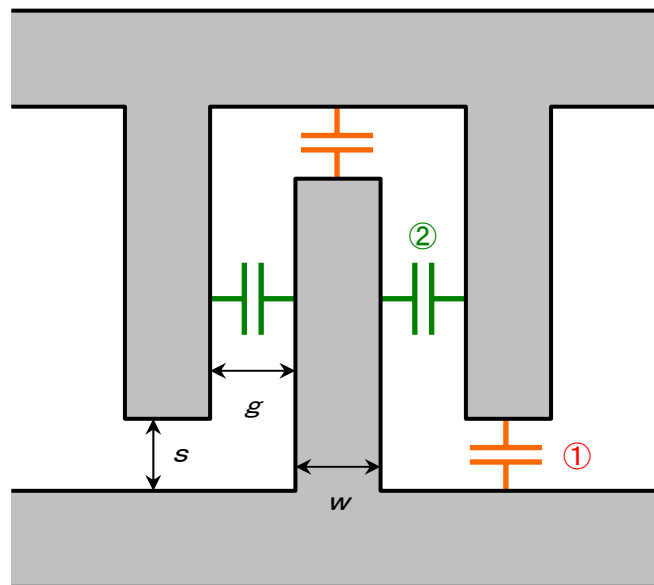


図 5 櫛歯電極構造のユニット・セル

なお、本設計の光スイッチにおける切替時間（ここでは、駆動電圧を印加してから、他方の安定状態に至るまでの時間と定義）は、次のように見積もることができます。静電力  $F_{es}$  からヒンジ反力  $F_h$  を差し引いた力が可動電極を加速する力として働くため、切替時間  $t$  は静電力を発生せしめる駆動電圧に著しく依存します。仮に、ミラーが第 1 安定状態から第 2 安定状態に至るまでの間、一定電圧が素子に印加されたとすると、切替時間  $t$  は以下の式で表すことができます。

$$t = \sqrt{\frac{m}{2}} \int_0^l \frac{dx}{\sqrt{\int_0^x \{F_{es}(x) - F_h(x)\} dx}}$$

ここで、 $m$  は可動電極の等価質量、 $l$  は第 1 安定状態から第 2 安定状態までの距離、 $x$  は可動電極の変位です。上式より、本光スイッチの切替時間はおおよそ  $250 \mu\text{s}$  と見積もられます。

## 6 結果

### 6.1 光学特性

図 6～9 に光学測定結果の一例を示します。また、サンプルの光学特性の平均値 (11 台) を表 2 に示します。

表 2 光学測定結果 (波長範囲内最悪値の平均)

	目標仕様	出力ポート 1	出力ポート 2
挿入損失	< 1.0 dB	0.58 dB	0.62 dB
波長依存性	< 0.15 dB	0.047 dB	0.043 dB
偏波依存性	< 0.10 dB	0.024 dB	0.057 dB
クロストーク	< -60 dB	-84.4 dB	-72.0 dB
反射減衰量	> 40 dB	53.3 dB	51.9 dB

※波長範囲:1510～1630nm

今回開発した光スイッチは、全ての光学評価項目において目標仕様を十分に満足する結果を得ました。図 6～8 では 10 回の繰り返し切替後の測定結果を重ねてプロットしていますが、非常に再現性が良いことがわかります。図 6 に示す挿入損失の 10 回切替による最大損失差は 0.017dB と極めて小さい値となっています。さらに、 $1.2 \times 10^9$  回切替後 (目標切替寿命:  $1.0 \times 10^9$ ) の測定においても最大損失差 0.096dB という結果を得ており、再現性のみならず MEMS 光スイッチの優れた機械的耐久性が確認されました。

偏波依存性については、十分に仕様を満足していますが、出力ポート間に有意な性能差が見られました (表 2)。これはミラー反射に起因するものですが、理想的な反射面に対して見積もられる偏波依存損失よりも差が大きく、ミラー表面状態の不完全性によるものと推察しています。

ミラーストロークを決める上で指標としたクロストークについては、目標仕様 -60dB に対し、両ポートとも -70dB 以下であり十分に満足すべき結果を得ました。また、反射減衰量においても目標を 10dB 以上上回る良好な値を得ました。

上述のサンプル 11 台に対し、恒温・恒湿試験 (Telcordia1221:85℃、85%Rh、2000 時間) を実施した結果を表 3 に示します。暴露後の全てのサンプルにおいて各項目とも目標仕様を満足し、変動量も十分小さいことを確認しました。また、5 サンプルに対しヒートサイクル試験 (Telcordia1221:-40～85℃、1500 サイクル) を実施し、同様に良好な結果を得ました。

表 3 恒温・恒湿試験後の光学測定結果 (波長範囲内最悪値の平均)

	目標仕様	出力ポート 1	出力ポート 2
挿入損失	< 1.0 dB	0.52 dB	0.56 dB
波長依存性	< 0.15 dB	0.043 dB	0.046 dB
偏波依存性	< 0.10 dB	0.016 dB	0.066 dB
クロストーク	< -60 dB	-86.5 dB	-74.7 dB
反射減衰量	> 40 dB	55.2 dB	52.6 dB

※恒温・恒湿試験:85℃/85% 2000 時間

※波長範囲:1510～1630nm

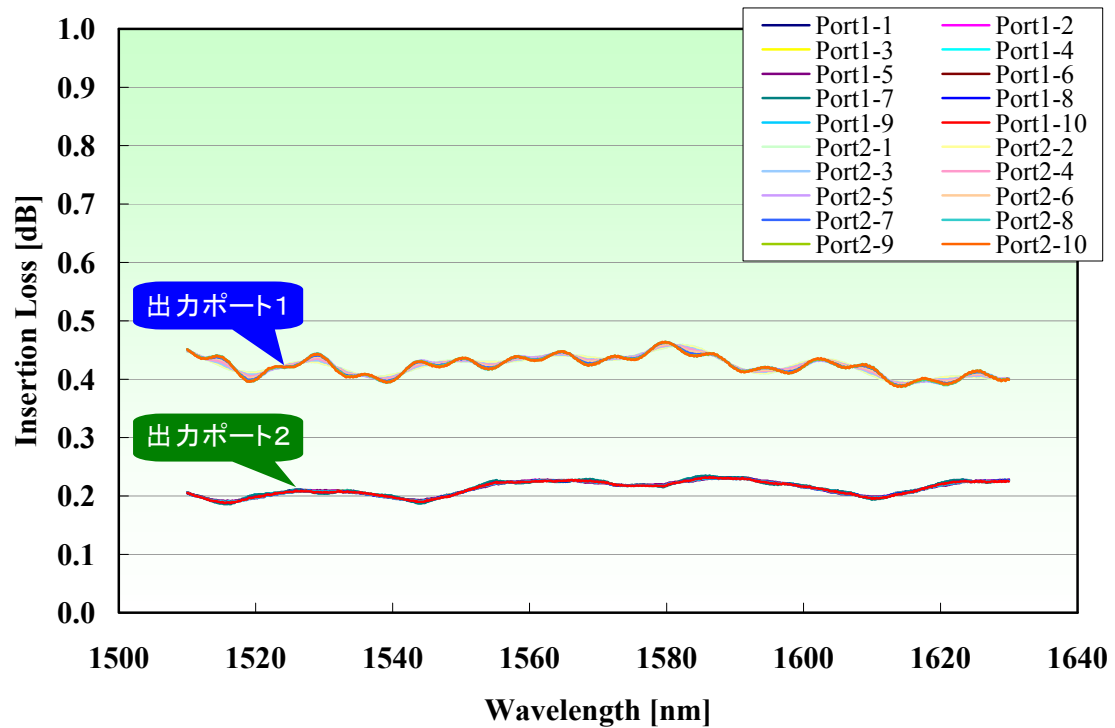


図 6 挿入損失典型例

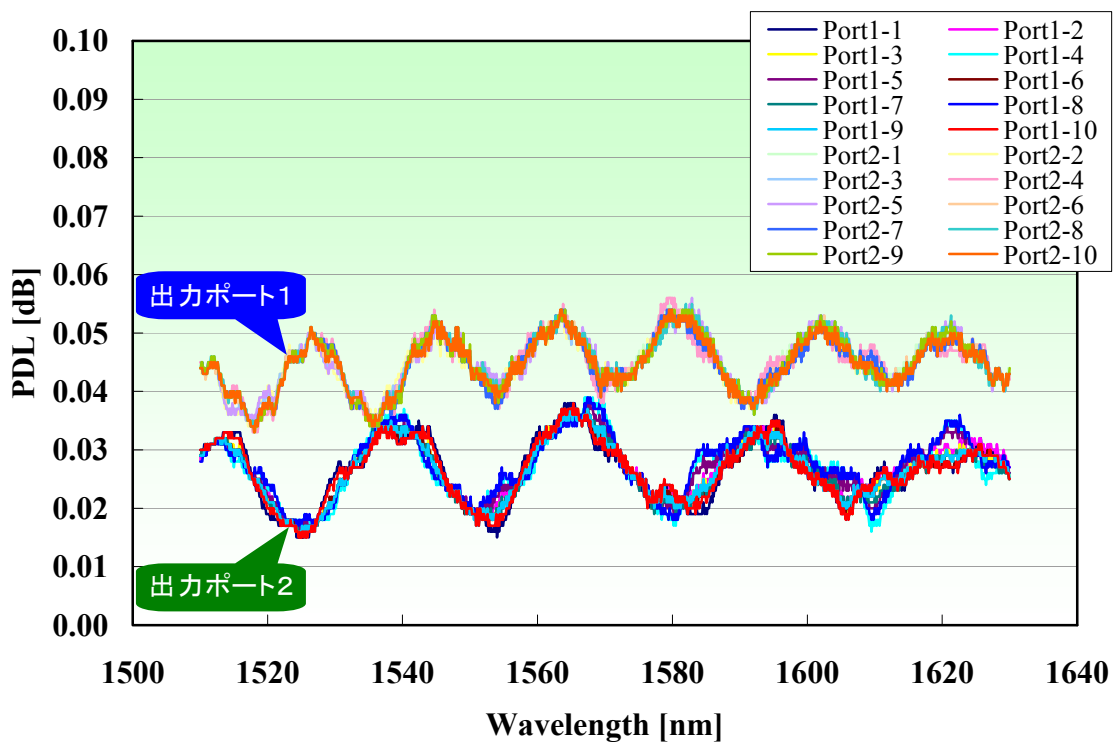


図 7 偏波依存損失典型例

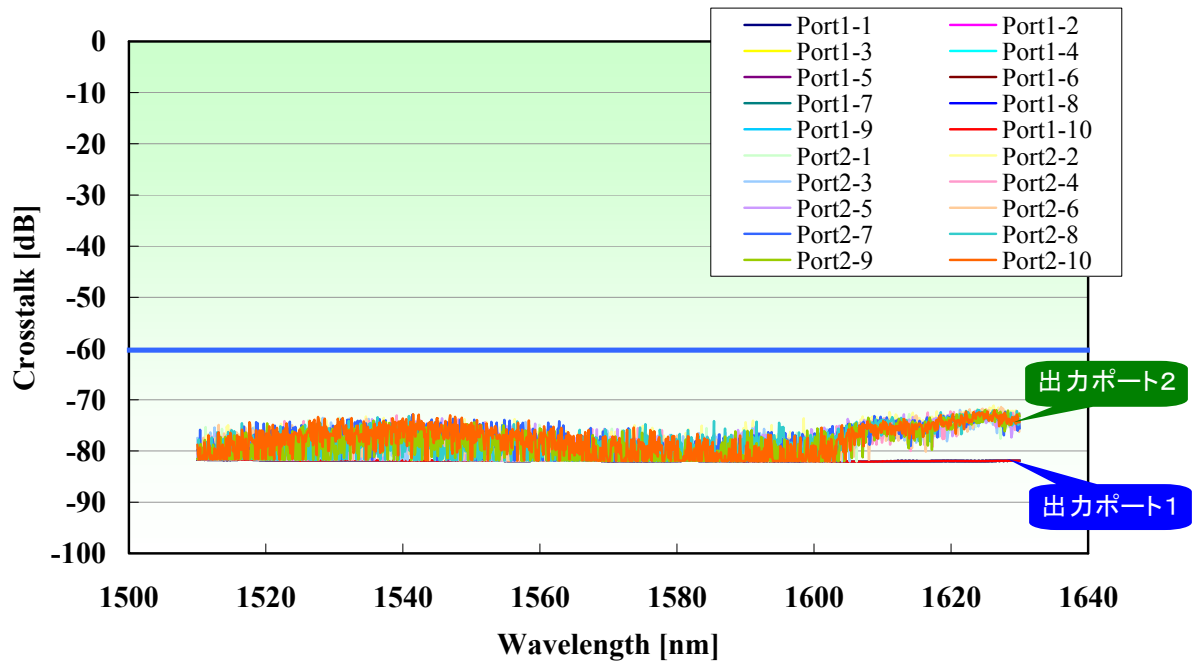


図 8 クロストーク典型例

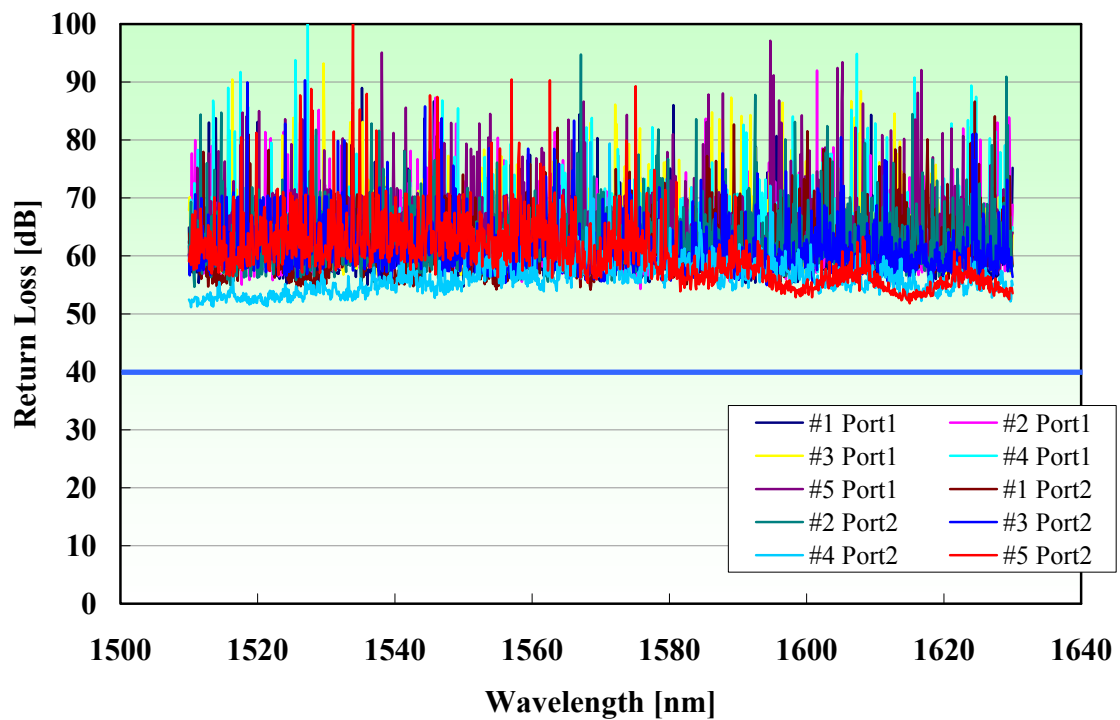


図 9 反射減衰量典型例

## 6.2 機械的特性

図 10 に電圧印加時の光出力の応答を示します。図中青で示したミラー位置（計算値）の変化に追従する形で光出力が変化しており、設計どおりの非常に高速な切替動作を確認しました。光出力の応答がミラー動作に遅れて、しかも急峻な変化を見せるのは、ミラーストロークの中央付近に光線のパワーが集中しているためです。

図 11 は本光スイッチの機構設計において重要な項目である衝撃（50G、10msec）印加時の光出力を観察したものです。直交する 3 軸 6 方向全ての衝撃に対し光出力は全く影響を受けておらず、設計どおりの適正な自己保持力を有していることを確認しました。さらに、破壊に対する強度を確認するため、より強力な衝撃印加（Telcordia1073:200G、1.33msec）を行いました。光学特性を含め光スイッチ機能に何ら損傷のないことを確認しました。同様に振動試験（5～50Hz; 1G、80～500Hz; 3G、50～80Hz; 直線的に変化、3 軸各方向 2 時間 ※ Telcordia63 を近似）においても良好な結果を得ました。

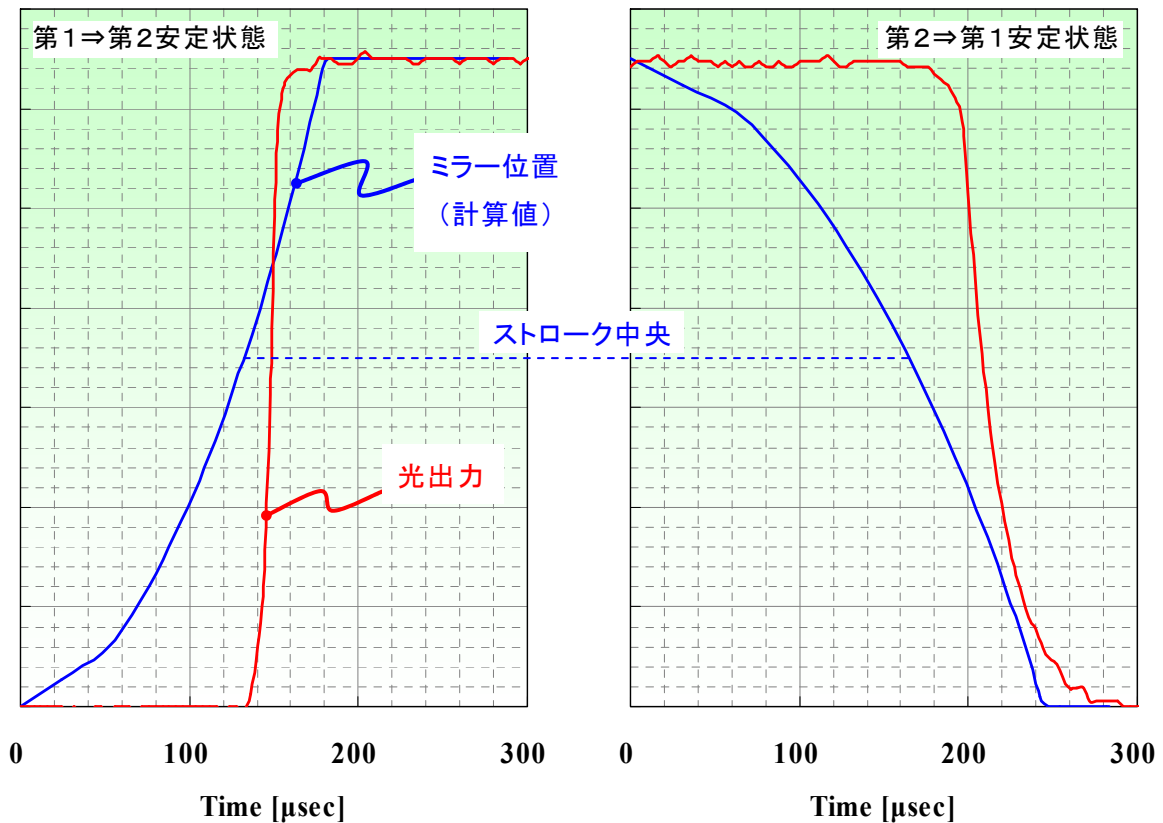


図 10 切替時間測定

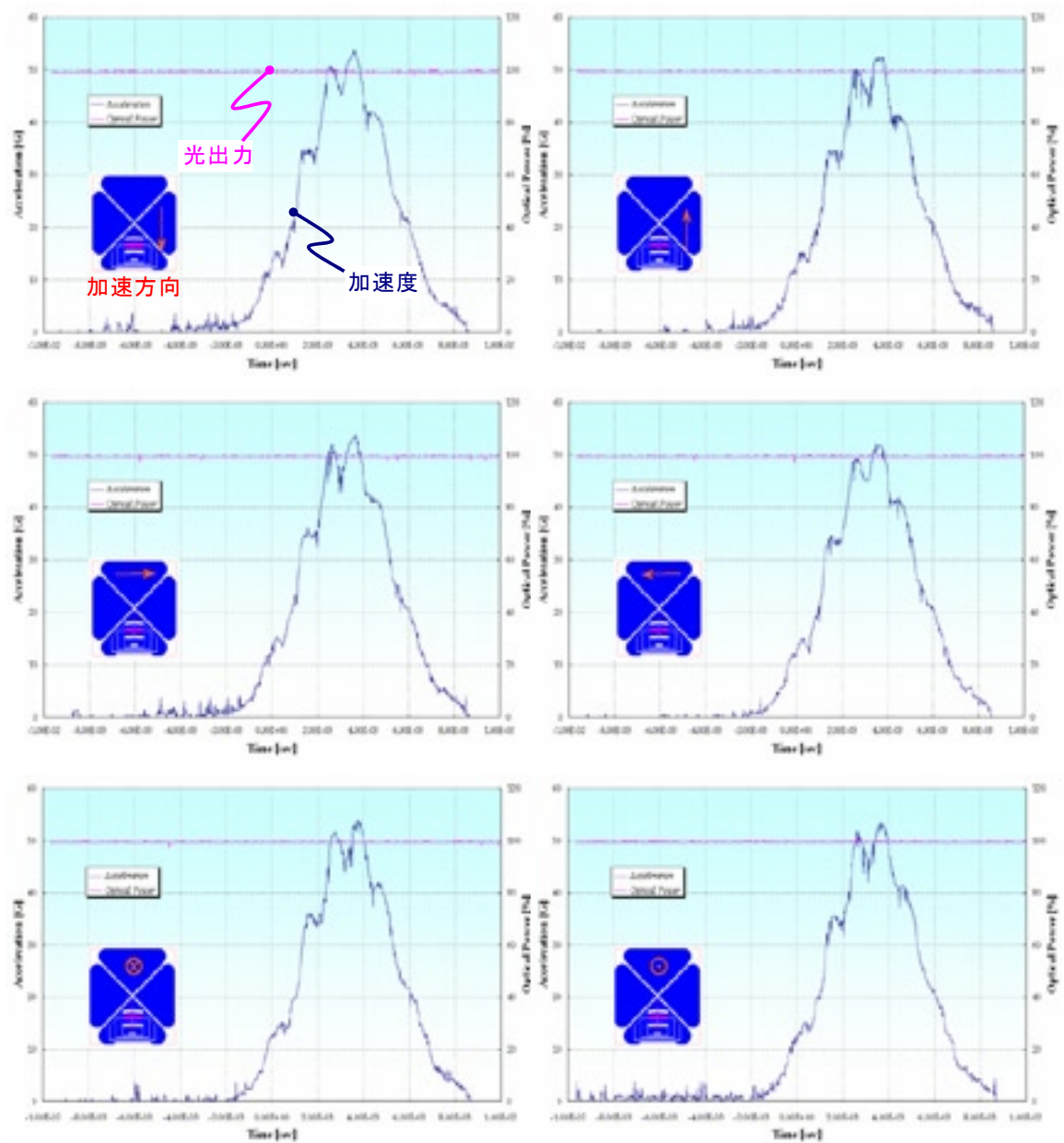


図 11 衝撃試験

## 7 まとめ

航空電子の保有する MEMS 技術を適用し、光ネットワークを構築する上でのキーデバイスとなる光スイッチを開発しました。

MEMS 技術の特長を活かし、光スイッチング機構には、光信号の切替に必要な要素であるミラーとミラー駆動機構、および自己保持機能を実現する Bistable ヒンジ構造、さらにファイバガイド構造を含め、全て 1 チップ内にモノリシックに集積しました。

光学設計では、作製誤差を考慮したビームウェストを設定し、それに基づき機構設計の基準となるミラーストロークを決定しました。そして、機構設計では Bistable ヒンジの反力応答特性とアクチュエータの駆動力に関して解析し、耐衝撃性を考慮して設計しました。作製したサンプルの評価においては、実フィールドへの適用を前提に設定した光学特性ならびに機械的特性の目標仕様を全て満足し、主要な信頼性試験においても良好な結果を得ました。

今後は、今回得られた知見をもとにさらなる高性能化を目指すとともに、MEMS 技術の優位性を高めるべく、小型・多チャンネル化、多機能複合化といった高機能デバイスの開発にも取り組みます。