

フォーカス 26 <第 34 回>：成果事例クローズアップ（九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク）

ウエハレベルパッケージング可能な超小型高精度マイクロレーザー変位センサ

九州大学・工学研究院 澤田廉士，井口宗久，竹下俊弘

北九州産業学術推進機構 安藤秀幸，檜和田 徹



図1 九州大学・工学研究院（左から）澤田，井口，竹下



図2 北九州産業学術推進機構 支援業務担当者
（上段左から 吉塚，植田，安田，西浜，および下段左から 2 人おいて 檜和田，安藤）

1. はじめに

Si 基板に二次元に複数個，モノリシックに集積したフォトダイオード（PD）とその基板上にボンディングした面発光レーザ（VCSEL）から構成される超小型変位センサ（サイズ：1.3 × 1.3 × 1.3mm）を開発した [1][2][3]。

開発しているセンサはレーザ光を VCSEL より照射し，被測定面で反射した光の強度変化を PD により検出して，

被測定面の変位や傾きを区別して測定を行う．使用用途としては被測定面の変位，二次元の傾き算出，及び表面形状の凹凸の測定が期待される [4]。

Si 基板に PD をモノリシックに集積する必要があることから実験室レベルでの製作は困難である．そこで，半導体・MEMS 試作設備を保有する北九州産業学術推進機構に依頼し，PD アレイ基板を製作，PD アレイチップへの VCSEL 搭載と配線は研究室保有の「高精度ボンディング装置」と「ワイヤボンダ」を使用することで試作を進めた。

図1と図2に支援依頼元と支援に携わったメンバーを示す。

2. (財) 北九州産業学術推進機構の紹介

当財団は北九州学術研究都市において，北九州学術研

* 問い合わせ：
九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク
財団法人 北九州産業学術推進機構（FAIS）
ナノテクネットワーク MEMS 解析測定支援事業
〒 808-0135 北九州市若松区ひびきの 2-1
電話：093-695-3111
E-mail：micronano@ksrp.or.jp

究都市の一体的運営，産学連携の促進，総合的半導体製造拠点の形成，各種プロジェクトの推進，北九州 TLO の運営等を担っている。

北九州学術研究都市内の 2 施設（半導体・MEMS の試作設備を持つ共同研究開発センターおよび電子顕微鏡，各種分析装置を有する北九州市立大学計測分析センター）を利用して，ナノテクノロジー・ネットワーク事業に参画している。

当財団では次の区分のいずれかに該当するテーマの支援を行っている。

- (1) 半導体デバイス製造技術—半導体デバイス製造技術を基盤とした超微細加工技術
- (2) マイクロナノシステム—化学的・生物学的機能を発現させるためのマイクロナノシステム
- (3) セルエレクトロニクス（Cell Electronics）—半導体デバイス製造技術，マイクロナノシステム，電子情報技術を統合一体化した技術



図 3 共同研究開発センターの外観

これまでの代表的支援例として「生体の味覚情報処理機構を規範とした化学物質の濃度検出センサ」，「マイクロパターンニング技術を利用した細胞チップの構築」，「濡れ性制御による機能性伝熱面の最適化研究」，「進行波電界下でマイクロ粒子に生じる力とその電極形状による影響」などが挙げられる。本テーマは，半導体デバイス製造技術を基盤としたものである。

図 3 は共同研究開発センターの外観，図 4 は試作室を示す。表 1 には主要な装置を示す。

表 1 主要設備

酸化・拡散炉	酸化膜形成・イオン拡散
プラズマ CVD	酸化膜・窒化膜堆積
イオン注入装置	p 型、n 型領域形成
レーザービーム描画装置	レチクル製作・ウエハ直描
コータ・ディベロッパ	レジスト塗布、現像
ステッパー	レジストパターン形成、位置合せ
デバイス特性測定装置	デバイスの各種特性測定
電子顕微鏡	30kV、30 万倍、分解能 3nm



図 4 試料室 上からケミカルプロセス室，イエロールーム，組立・測定室

3. マイクロレーザー変位センサについて

図5は今回開発したセンサの測定原理の概念図である。内側のフォトダイオードA1 (PD - A1) からA4 (PD - A4) と外側のフォトダイオードB1 (PD - B1) からB4 (PD - B4) の中心に面発光レーザ (VCSEL) を配置し、VCSEL から法線方向へ向けてガウシアンビームが射出される。このガウシアンビームは、センサ外部もミラーで反射され、センサ部へ戻る。本センサが検出するのは外部ミラーとセンサの距離、もしくは外部ミラーのセンサ基板に対する回転角である。ミラーによって反射されセンサに戻ってきた光の一部は、PD の光検出部に入射し、

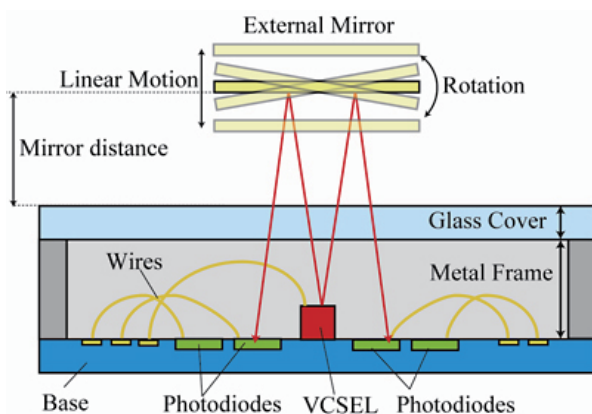


図5 センサ

信号として検出される。ミラーがセンサに対して線形移動を行えば、PD の光検出面上のビームスポットの大きさが変化し、ミラーがセンサに対して回転移動を行えば、光検出面上のビームスポットの形状が変化する。この線形・回転移動に伴う PD 出力の変化を読み取ることで、測長および回転角の検出を行う。

3.1 直線変位検出

PD - A1 から PD - A4 までのフォトダイオードが受け取る光強度を $PA1, PA2, PA3, PA4$, PD - B1 から PD - B4 までのフォトダイオードが受け取る光強度を $PB1, PB2, PB3, PB4$ とすると次式で定義される S_{dispi} と S_{dispo} の値が線形移動検出の出力信号である。

$$S_{dispi} = PA1 + PA2 + PA3 + PA4 \quad (1)$$

$$S_{dispo} = PB1 + PB2 + PB3 + PB4 \quad (2)$$

図6に光強度とセンサと外部ミラー間距離の関係を示す。また、図7に外部ミラーが傾いた時の光強度とセンサと外部ミラー間距離の関係を示す。解析結果より S_{dispi} , S_{dispo} ともにピーク値をもつことがわかる。このピーク値の前後の直線部分をそれぞれ Front Slope, Back Slope とする。

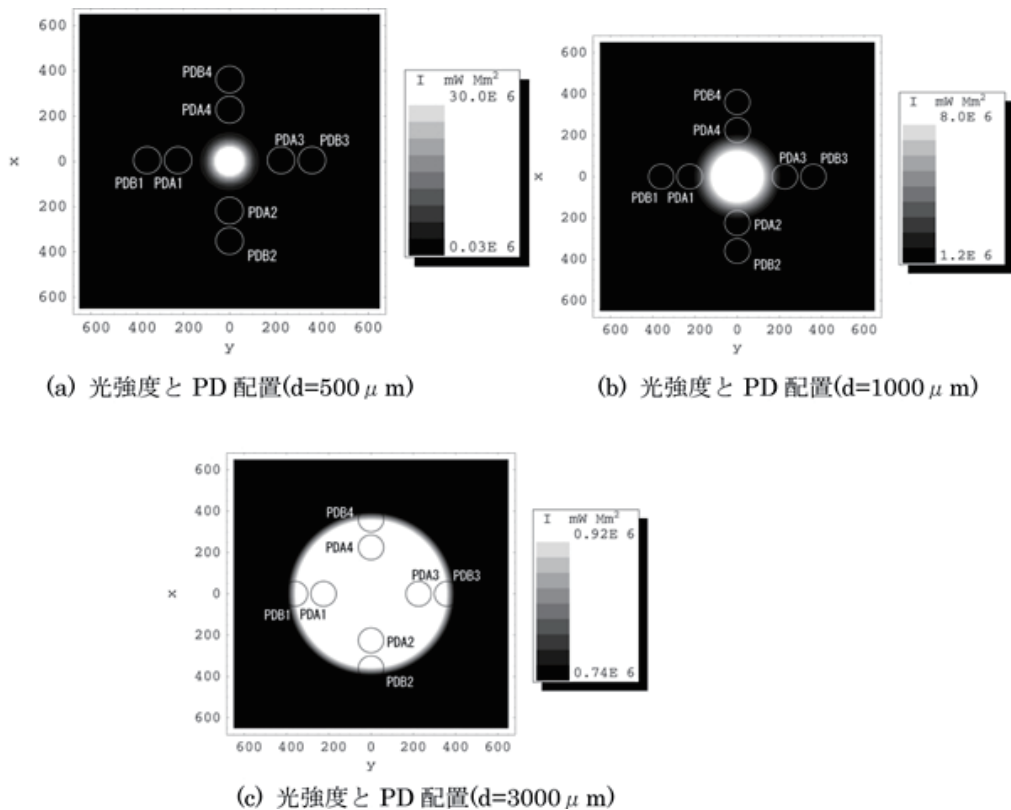


図6 光強度とセンサと外部ミラー間距離の関係

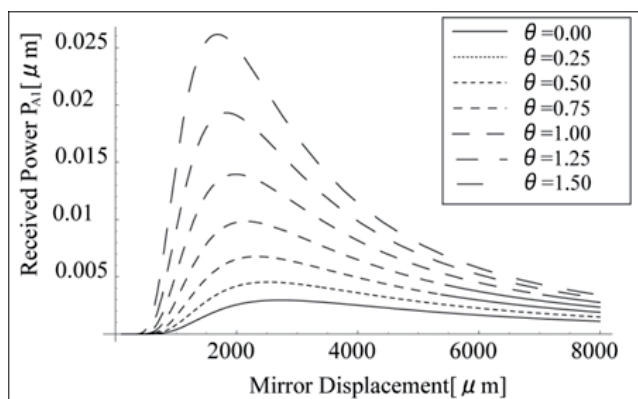


図7 線形変位信号 S_{dispi}

3.2 回転移動検出

回転検出は、ミラーの傾きによって各フォトダイオードの出力信号に差が生じることを利用したものである。そのため、ミラーが傾いた場合、センサに戻ってくる反射光のビームスポットは変形し、光強度の最大値を示す位置がセンサの中心部から逸れてくる。ビーム断面の強度分布はガウス分布に従うため、ビームの中心に近いほど光強度は強くなる。そのため、ミラーが傾き距離が近くなったフォトダイオードはより大きな光強度を受け取ることとなり、逆に遠ざかったフォトダイオードはビームスポットから離れるのでより小さい光強度しか受け取れなくなる。このことを利用に、回転角検出に役立てた。

今回開発したセンサは、 $\pm 3^\circ$ 程度の回転角検出を想定して設計している。そのため回転によって光源に近づくことによる出力信号の増加割合と、回転によってビーム中心軸が近づくことによる出力信号の増加の割合を比較すると後者のほうが格段に大きい。そのため、ミラーが傾いた方向のフォトダイオードの出力信号が大きくなる。

複数個のフォトダイオードを持つことを利用し、x軸まわりの回転については、 $S_{\text{rotx-r}}$, $S_{\text{rotx-c}}$, $S_{\text{rotx-l}}$, y軸まわりの回転については、 $S_{\text{roty-r}}$, $S_{\text{roty-c}}$, $S_{\text{roty-l}}$ を回転角出力信号として次式で定義した。

$$S_{\text{rotx-r}} = \frac{P_{A1} - P_{B2}}{P_{A1} + P_{B2}}, S_{\text{rotx-c}} = \frac{P_{A1} - P_{A3}}{P_{A1} + P_{A3}}, S_{\text{rotx-l}} = \frac{P_{A3} - P_{B1}}{P_{A3} + P_{B1}} \quad (3)$$

回転角センサとしての特性に関する計算結果を示す。まずミラーの回転によるビームスポットの変化を調べた(図8)。ミラーの回転角 θ が、 0° , 1° , 2° のそれぞれの場合について光強度分布 $I'(x', y')$ の等高線を描いた。ミラーとセンサの距離をパラメータとして、回転信号を計算してみると、図9のようになる。ミラーの回転角 θ に対して、 $PA1$, $PA3$ を数値積分により計算し、式(3)に従って信号を求めた。

4. ファブリケーション

開発した変位センサは、PDをモノリシックにSi基板上に作成するため、共同研究開発センターの装置を使い、

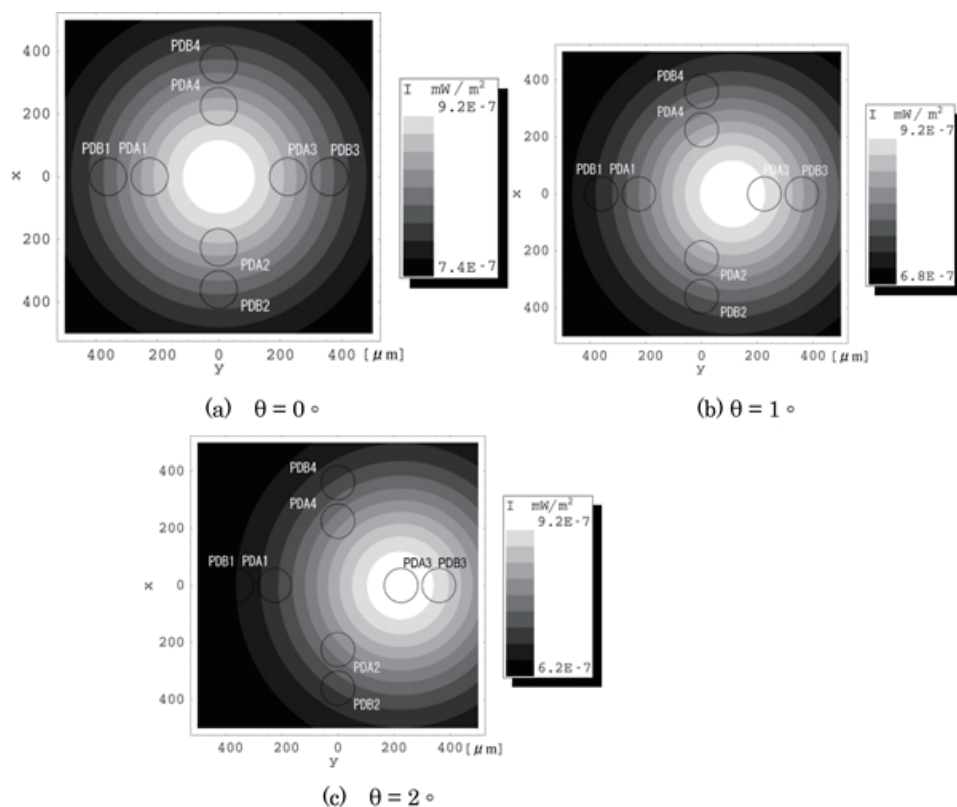


図8 光検出面上での強度分布 $d = 3000\mu\text{m}$ (等高線プロット)

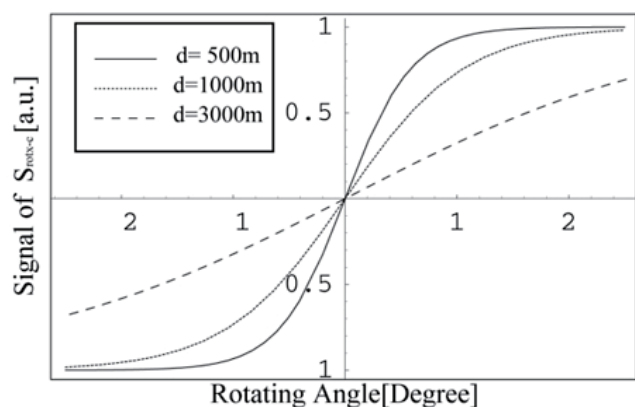


図9 回転角信号 $S_{\text{rotx-c}}$

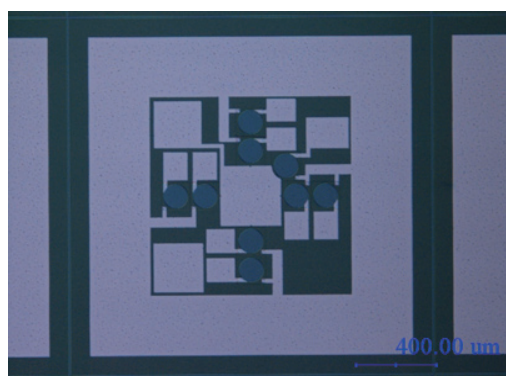


図10 PDアレイパターン図

パターン設計，マスク製作，ウェハ処理を行った。

図10に設計したPDアレイのパターンを示す。

図11にプロセスフローを，図12に最終工程の基板断面を示す．完成したウェハからPDアレイチップを切り出し，VCSELを搭載，配線を取り付けた。

図13は製作したセンサのウェハとVCSELを搭載したチップの拡大写真である。

このPD上で受光するためには，入射光がpアクティブとnウェル層の境界領域までの間で十分入射しなければならない．センサに用いる光源は $0.85\mu\text{m}$ のVCSELである．Si基板上で光が減衰する厚みは，この波長域の減衰係数から $10\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ である．製作したPDの表面から反応層までの厚みは $0.3\mu\text{m}$ であるので十分光を吸収できると考えられる．また，測定物がセンサ表面のカバーガラスから 0.5mm 離れたときにレーザの半値半幅となる光が各PDへ受光することを考え配置した．PDの半径は $60\mu\text{m}$ ，内側のPDの中心はVCSELの中心から $225\mu\text{m}$ のところであり，外側のPDの中心はVCSELの中心から $370\mu\text{m}$ である。

5. 評価実験結果

開発したセンサについて動作実験で信号を得た．実験結果より Front Slope において測定範囲 $100\mu\text{m}$ の時

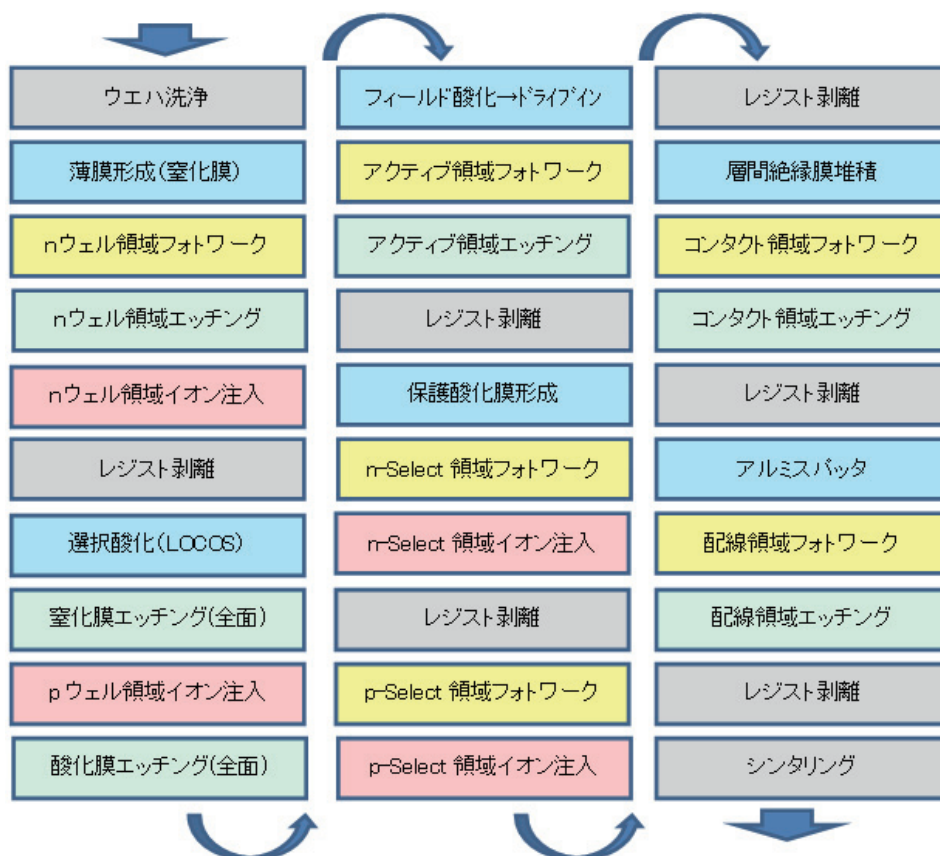


図11 プロセスフロー

リニアリティ 0.33%F.S., Back Slope において測定範囲 300 μm の時リニアリティ 0.49F.S. となった (図 14).

図 15 はセンサとミラーのギャップ d が 2000 μm における, ミラー回転角 θ が -4° , -2° , 0° , 2° , 4° 時の $S_{\text{rotx-r}}$, $S_{\text{rotx-c}}$, $S_{\text{rotx-l}}$ をプロットした図である. 実験結果より d が 2000 μm において $\pm 2.5^\circ$ までの回転角測定が可能であると期待できる.

6. まとめ

光てこを原理とするセンサを MEMS 技術により大幅に小型化し, 高精度測定が可能な MEMS 変位センサを開発した. このセンサは, 外部ミラーの線形移動と回転角移動の検出が可能である. 従来型の光ファイバを使用するセンサとは異なり, 小さな空間にでも設置をすることができることが特徴である. また, 光干渉を含まない原理であるため, 2 軸の光ビームを干渉させる必要があるレーザ干渉計や回折格子干渉計を原理とするセンサに比べ, 部品点数が少ないためアライメントは比較的容易である.

本センサは, 従来型センサと同等の測定精度を持ち 1/50 の小型化に成功したことになる. なお, 本成果の一部はナノネット事業の利用により得られたものである.

参考文献

- [1] M.Inokuchi, H.Ando M.Kinosita, K.Akase, Eiji Higurashi and R.Sawada, Development of a micro displacement sensor with monolithic-integrated two-dimensionally distributed photodiodes Department of Intelligent Machinery and Systems, Optical MEMS 2009, (Clearwater FL, Aug 17-20, 2009), WP13, pp. 119-120.
- [2] R. Sawada, E. Higurashi, T. Itoh, and M. Tsubamoto, Technical Digest of IEEE/LEOS Summer TopicalMeetings, Optical MEMS '98, July 20-23, Monterey, USA, 1998, pp.47-48.
- [3] T. Ito, R. Sawada, and E. Higurashi, J. Micromech. Microeng. 13 (2003) 942-947
- [4] 澤田廉士, 羽根一博, 日暮栄治, "光マイクロマシン"

(北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター 日下尚司)

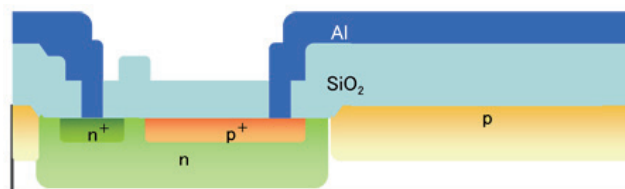


図 12 基板断面

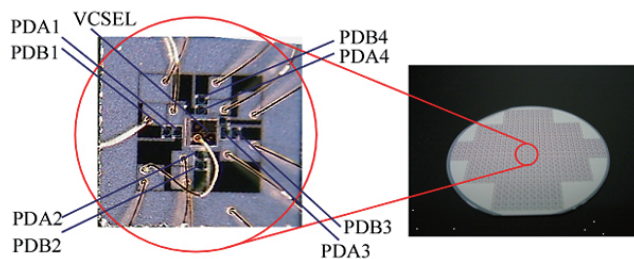


図 13 完成した PD アレイ

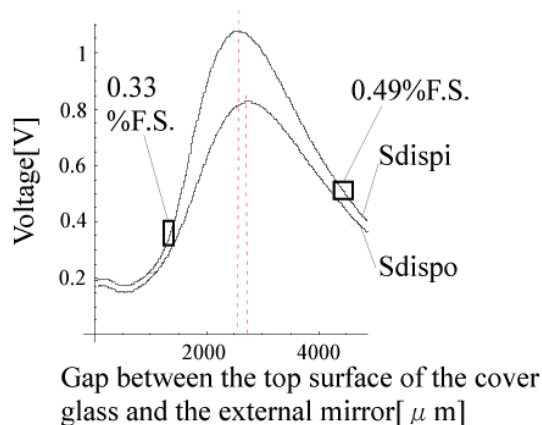


図 14 直線変位実験結果

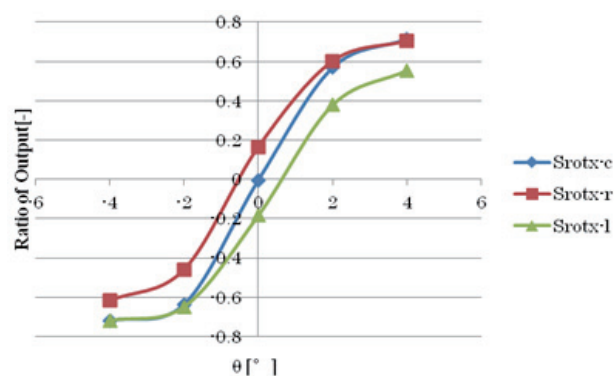


図 15 回転角変位実験結果