

# 高感度微小傾斜角検出器の性能評価及び 微小傾斜角発生装置の改良に関する研究

材料・化学系（材料物性工学科） 音喜多 賢二

## 1 緒言

最近の先端的な精密生産技術、例えば半導体集積回路技術においてはnmオーダーで正確に切削や研磨などの精密加工を施さなければ製品としての価値は失われる。そのため機械自身の精度向上はもちろんであるが、機械の設置環境が加工精度に大きく影響することになり、これらの環境を監視する必要性に迫られている。傾斜角測定はこの環境維持の要素の一つであり重要な位置を占めている。

本研究室ではこの傾斜角センサを小型軽量で、任意方向の微小傾斜角を高感度にしかも高速で安定に検出できるセンサの開発を目的としている。これまでの研究成果により $10^{-6}$ [rad]程度の傾斜角の検出が可能となっている。しかし検出器の性能が校正装置に接近したために、新型の校正装置が開発された。本研究ではこの新型校正装置を用いて検出器の検定を行った。またこの両装置は一度も組み合わせた応用例がないため、性能評価方法の確立も必要である。

## 2 傾斜角検出装置

図1に微小傾斜角検出装置の構成を示す。装置全体の大きさは検出器が $100 \times 100 \times 200$ [mm]傾斜テーブルは $200 \times 200 \times 10$ [mm]である。傾斜角検出原理は物体系の法線軸に光線を用いた光軸を利用し、これを水平面に入射させ、この反射光の軸の物体系から見た移動量を測定することにより傾斜角が検出される。

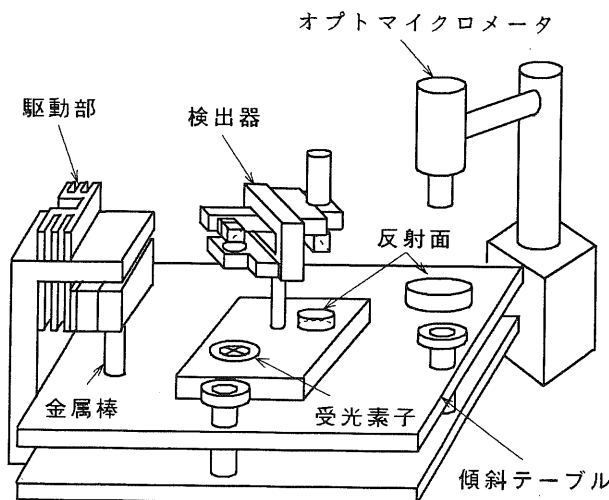


図1 傾斜角発生装置の構成

検出器の構成は光源の半導体レーザー、受光素子の4分割フォトダイオード(QPD)となっている。集光レンズの焦点距離を長くすることで検出感度の向上を図れるが、反面装置が大型化する。本検出器は検出感度を向上させ、且つ小型でコンパクトとなるように、光源から発せられたレーザー光を2回折り曲げた構造となっている。QPDには図2に示すように光束の移動量を検出することによって、傾斜角に対するデータを取得する。QPDの大きさは直径約1[mm]で4つの受光素子全てにスポット像が照射していなければ検出は不可能である。従って検出可能範囲はスポット像の直径に左右される。

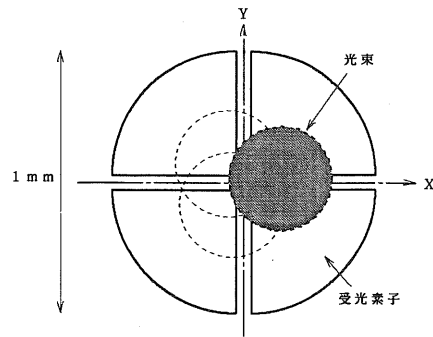


図2 4分割フォトダイオード(QPD)

校正装置である微小傾斜角発生装置は中心を1点で支持した傾斜テーブルがあり、その一端に金属の熱膨張を利用して変位を与えることによって傾斜角を得るものである。傾斜テーブルはスプリングで支えられており、その結果水平に保持されている。この傾斜テーブル端部にスプリングの弾性力に打ち勝つ力で変位を与えれば、テーブルは傾斜することになる。熱の供給源はペルチェ素子を用い、金属棒は2枚のアルミブロックで挟み固定している。ペルチェ素子によって供給された熱はアルミブロックを通して金属棒を加熱冷却するしくみとなっている。変位測定は発生した傾斜テーブルの変位を対向する位置に置かれたオプトマイクロメータで測定する。

### 3 校正装置の改良

校正装置は現段階では非常に不安定であるため検出器の検定が不可能である。従って校正装置を改良する必要がある。まず傾斜テーブルの応答を比較する前に、駆動部単体における動特性を検討する必要がある。図3に駆動部単体における金属棒の動特性を示す。

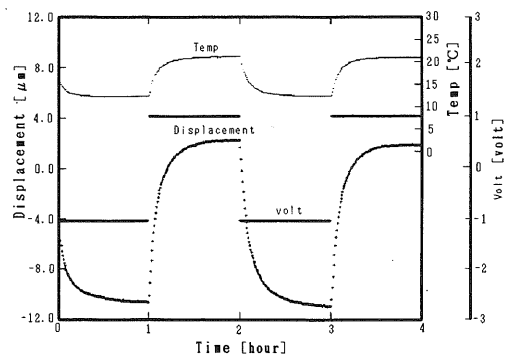


図3 金属棒単体の動特性

図3より金属棒はほぼ一次遅れ系のステップ応答で近似できる滑らかな応答であり、また変位は温度に追従していることがわかる。次に取付台の改良について述べる。

校正装置は傾斜テーブルと駆動部を取付台によって固定している。しかし従来の取付台は固定部分が金属棒であることから、供給された熱が取付台にも熱伝導していたため、結果的に熱膨張させる金属棒に熱が十分伝わらなかった。従ってこの取付台の固定部分を熱伝導とは無関係な放熱板へと改良した。図4に旧型取付台、及び図5に新型取付台を示す。

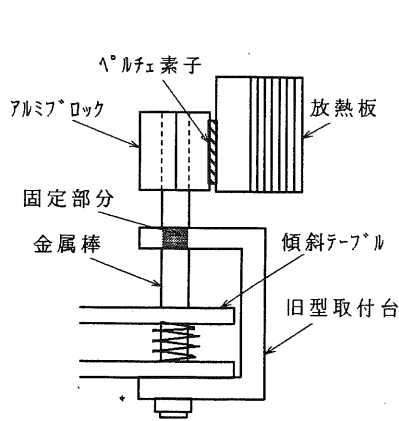


図4 旧型取付台

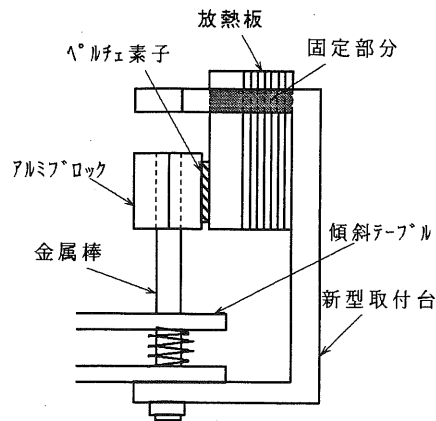


図5 新型取付台

それぞれの取付台を用いて実際に傾斜テーブルの応答を比較する。図6は旧型取付台を用いた傾斜テーブルの応答であり、図7は新型取付台を用いた傾斜テーブルの応答である。旧型取付台は複雑な応答を示しているのに対し、新型取付台はほぼ一次遅れ系のステップ応答で近似できる滑らかな応答となっている。以上のことから取付台の改良によって安定した測定が可能となった。

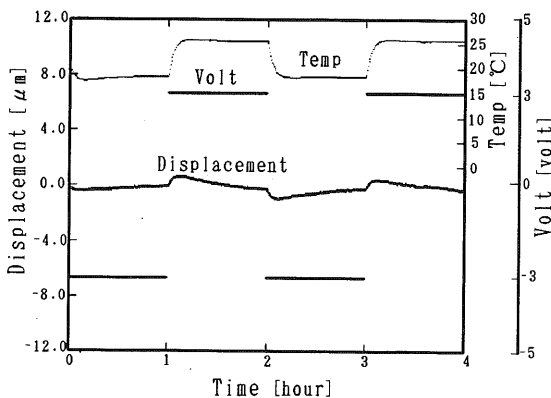


図6 旧型取付台の傾斜テーブルの応答

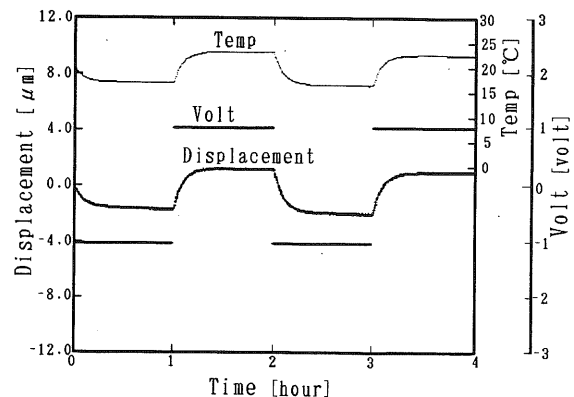


図7 新型取付台の傾斜テーブルの応答

#### 4 性能評価と考察

校正装置は金属の熱膨張を利用していることから、サンプリング周期によって金属棒の変位量が異なる。従ってサンプリング周期の差による分解能の比較を行い、また現段階での最高分解能を検定する。性能評価は測定初期段階の直線部分の範囲において30個のサンプリングによって行う。ここで傾斜角発生装置が変位を発生する際に金属棒が傾斜テーブルに喰い込み若干の弾性変形を起こすため、測定開始直後は非直線性になる。従って性能評価は弾性変化が終わり安定する測定開始1分後から行うことにする。

QPDは検出器周囲の明るさの変化に敏感に反応するので周囲の明るさの変動による検出誤差を抑えるために装置全体を暗箱で覆って測定を行った。また熱膨張を利用しているため装置周囲の環境温度が急激に変化する場所やそのような時間帯は避け、装置の周囲の温度が安定した状態で行う。電圧変動周期は15分、供給電圧は±3[V]とし、測定時間は30分とする。まず初めにサンプリング周期10秒で性能試験を行う。図8は経過時間に対するQPDの応答、図9は経過時間に対するオプトマイクロメータの応答、図10はQPDとオプトマイクロメータとの関係、図11はQPDによる応答の測定初期段階の拡大である。

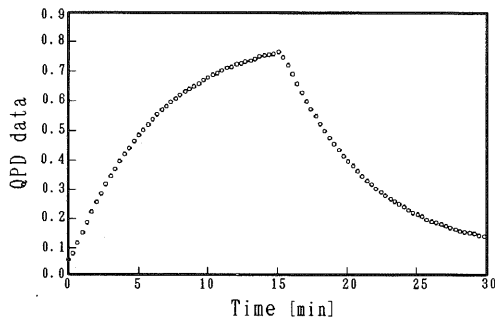


図8 サンプリング周期10秒のQPDによる応答

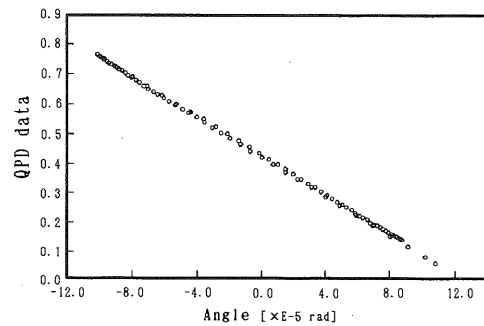


図10 サンプリング周期10秒のQPDとオプトマイクロメータとの関係

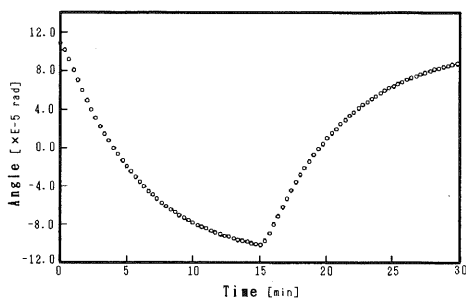


図9 サンプリング周期10秒のオプトマイクロメータによる応答

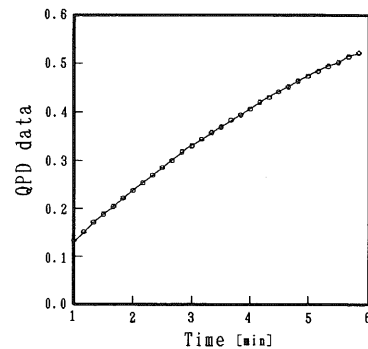


図11 サンプリング周期10秒のQPDによる測定初期段階の拡大

図8及び図9を見るとQPDとオプトマイクロメータによる傾斜テーブルの応答はほぼ一次遅れ系で近似できる滑らかな応答で安定した測定が行われている。図10は傾斜テーブルの往復関係が一致していることから安定した測定が行われているものと断定できる。ここで検出器の性能を評価するが、評価方法は測定初期段階の直線部分において内挿を用いる。直線部分を拡大した図11においてこの範囲のオプトマイクロメータの値から内挿を用いた結果、分解能は $3.88e-6$  [rad]である。図11の測定初期段階がほぼ直線であれば内挿によって得られた分解能が保証できるが、この場合はほぼ直線であり求められた感度は保証できる。

同様にサンプリング周期2秒において性能試験を行う。図12は経過時間に対するQPDの応答、図13は経過時間に対するオプトマイクロメータの応答、図14はQPDとオプトマイクロメータの関係、図15はQPDによる応答の測定初期段階の拡大である。同様に内挿を用いた結果、分解能は $1.08e-6$  [rad]であった。以上の結果からサンプリング周期が短い程高分解能な性能評価が可能であるといえる。

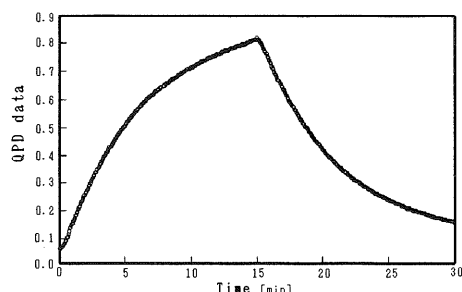


図 1 2 サンプリング周期 2 秒の QPD による応答

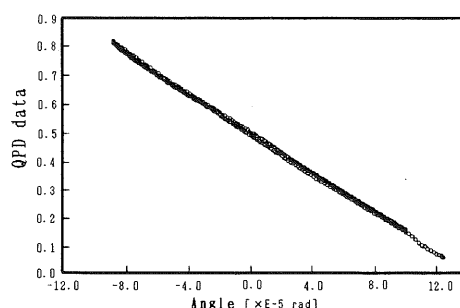


図 1 4 サンプリング周期 2 秒の QPD と オプトマイクロメータの関係

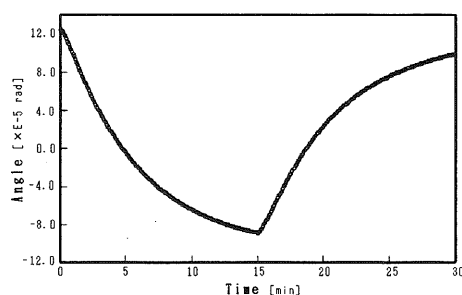


図 1 3 サンプリング周期 2 秒の オプトマイクロメータによる応答

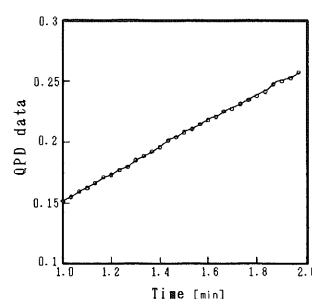


図 1 5 サンプリング周期 2 秒の QPD による測定初期段階の拡大

次に最高分解能を検定した。最高分解能を検定するためには校正装置の最小刻み角度が発生する最小サンプリング周期において測定する必要がある。現段階の最小サンプリング周期はデータの取得に若干時間がかかるため2秒となっている。測定条件等を変更しながら分解能の比較を行った結果を表1に示す。表1から同一サンプリング周期でありながら測定条件

や内挿範囲によって分解能にばらつきが見られる。この理由としては微小な熱膨張を利用しているために、周囲の温度環境にあると思われる。従って安定した状態というのが前提となるが、その中でもできる限り周囲温度の低い方が高い分解能が得られることになる。

検出器と校正装置の性能は接近しているため、校正装置の性能を向上させなければ正確な検出器の検定は不可能となる。校正装置は駆動部の熱伝導部分を熱伝導率の小さい材質に変更することや、測定プログラムをサンプリング周期2秒以下にする等の改良を施すことによって、更に微小な傾斜角の測定が可能であると予想される。

電圧 変動周期[ $\mu$ in]	測定条件	サンプリング 周期[s]	測定時間 [ $\mu$ in]	供給電圧 [volt]	性能評価範囲 [ $\mu$ in]	分解能 [rad]
15		2	30	$\pm 3$	1 ~ 2	1.08e-6
					2 ~ 3	9.32e-7
なし				+3	1 ~ 2	9.74e-7
					2 ~ 3	8.62e-7

表1 各測定条件における分解能の比較

## 5 結論

- 1) 校正装置の傾斜テーブルと駆動部を固定する取付台の改良によって、ペルチェ素子から供給された熱は正確に金属棒に伝わり、安定した測定が可能となった。
- 2) サンプリング周期が短い程高分解能な性能評価が可能である。
- 3) 現段階における最高分解能を検定した結果8.62e-7 [rad]程度の分解能が得られた。
- 4) 分解能は周囲温度環境に大きく影響される。

この研究論文の作成にあたり室蘭工業大学計測システム工学研究室の三品博達教授、相津佳永助教授、湯浅友典助手には研究全般にわたり適切な御指導、御助言を頂き、ここに心より感謝の意を表し深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 高橋 清 他 センサ工学概論 朝倉書店
- 2) 谷口 修 計測工学 第2版 森北出版
- 3) 河西 朝雄 TURBO C初級プログラミング 技術評論社