

# 自己結合効果を用いた 微小振動センサに関する研究

## Study on Small Vibration Sensor Using Self-Coupled Effect

川出 寿彦<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Toshihiko KAWAIDE , Norio TUDA , Jun YAMADA

**Abstract** : Small vibration sensors using laser interferometer have been developed. But there are some disadvantages, for example, weakness for external vibration, difficulty for optical alignment, etc. These disadvantages are improved making use of self-coupling effect of semiconductor laser, because this sensor is composed of only a laser diode and a lens. When a small vibration less than halfwave length of laser is measured, it is needed a reference signal. The reference signal is generated by moving the sensor head quickly. The vibration amplitude is detected from ratio of output signal to reference one. This sensor can detect small vibration with minimum amplitude of 20nm and average dispersion error is below 2 percent.

### 1. はじめに

レーザは計測において革命的であるといわれる。<sup>(1)</sup> これは、半導体レーザが計測分野において従来の光源に比べて単色性、可干渉性、指向性、収束性など優れた特徴を持つためである。レーザが光産業の主役として活躍するようになって以来、光通信、光情報処理、レーザ加工、レーザ医療から、家庭用のレーザディスクに至るまで応用され人間生活に密着している。特に情報エレクトロニクス分野においては光通信、光ディスク、コンパクトディスクなどの最先端技術の製品に直接貢献するだけでなく、その基盤技術や各種計測器にも幅広く使われている。現在では、半導体レーザは光計測の各分野において光強度、位相、周波数を利用する多くの光センサに利用されている。

レーザによる距離測定には短距離において高精度の測定が出来る三角測量法や、マイケルソン干渉計、半導体レーザの自己結合効果を利用した距離計も研究されている。自己結合効果は対象物による散乱光と出力光の干渉を利用するもので、粗面に対する測定も可能であり、センサ部が小型化され、外部光学系が不要になる。<sup>(2)</sup>

近年、工場においてシステムの小型、精密化に伴い半導体素子の集積化も進み、半導体製造工程などではより精密性が求められるようになった。<sup>(3)</sup> そのため、これまでのようにレーザの半波長以下の微小振動が無視できなくなり、その検出の必要性が高まってきている。微小変位の検出

法としては電気的方法(抵抗法、電磁誘導法、容量法)、光学的方法(光てこ、光グリッド、光干渉法、光センサ法)などがある。非接触による、微小振動検出の代表的なものとしては光干渉計を用いたものがある。しかし、光学系が複雑で高価である、光軸調整が困難である、外部振動に対して弱いなどの欠点がある。

本研究では、半導体レーザの自己結合効果を用いてレーザの半波長以下の微小振動を検出する。これは、レーザの戻り光を利用して振動検出を行うものである。そのためセンサ部が半導体レーザと集光レンズのみで構成でき、測定装置の小型化が可能となり、センサ部が一体型で構成できるので外部光学系が不要となり外部振動に対しても強いセンサとなる。また、ターゲットの振動が大ききときには半波長以上振動する部分の振幅がそろうため、これを基準として振動の測定が可能である。しかし、レーザの半波長以下の振動検出をする際には基準となるものが無い。したがって、測定時には対象物の振動を人為的に大きく変化させることで、基準を作らなくてはならない。そのため位相がそろわない、時間変化による振幅が異なる、などの問題がある。そこで本研究では、半波長以下の微小振動を検出する場合には、センサ部を二重構造にし、センサ部を半波長以上高速で動かすことでレーザーターゲット間の距離を変化させ、基準となる信号を作り、微小振動を検出する方法を新たに提案しその特性を検討した。

### 2. 測定原理

#### 2.1 自己結合効果

半導体レーザ(以後LDと記す)の特徴の一つに、自己

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院 工学研究科

電気電子工学専攻 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

結合効果がある。これは外部に別の共振器がない状態でも、LD 自身の劈開面を共振器として利用することで光を増幅させることができる。しかし、LD の劈開面での光の反射率はおよそ 30%と低いために LD から発振したレーザー光が外部の障害物に当たり、反射散乱した光の一部が劈開面を透過して LD の内部に戻ってしまう。この戻り光と LD の出力光が干渉を起こし、出力が増加し動作が不安定になる。これは、戻り光ノイズと呼ばれるもので LD の出力光に対する光量がわずかであっても LD の出力に変化が出る。実際にフーリエ変換による相対雑音強度は 2GHz 程度以下では -110dB/Hz にまで達する。なぜなら、LD の出力光と戻り光がある条件を満たしたときには LD の両面からなる共振器によって干渉した光が増幅されることで出力光が増加する。光ディスク、光通信システムでは用途にもよるがデジタル系で -120dB/Hz、アナログ系では -140dB/Hz 程度以下の相対雑音強度が要求される。ゆえに、何らかの雑音抑制対策が必要とされるが、本研究では、今まで雑音として扱われてきたこの戻り光ノイズを積極的に利用することで微小振動検出に応用することを目的とした。この効果により、センサ部分は半導体レーザーと集光レンズのみで構成できるために測定装置全体が小型化でき、外部干渉計が不要になるので、外部振動に対しても強い光学干渉計が出来る。また、出力光に対する戻り光の量がわずかであっても変化が生じるという利点もある。本距離計における測定原理である自己結合効果を図 1 に示した複合共振器モデルを用いて説明する。LD の劈開面 A と B で共振条件を満たし発振されたレーザー光は外部反射面（測定対象物）に照射され散乱する。その散乱光の一部が LD の劈開面 B を透過して LD 内に戻り、LD からの出力光と戻り光が干渉を起こす。そして発振波長を  $\lambda$ 、LD の劈開面から外部反射面までの距離を  $L$  とすると式(2-1)で表される共振条件を満たすとき両者の光は強めあい、光出力はわずかに増加する。

$$L = \frac{\lambda}{2} \times n \quad \text{式 (2-1)}$$

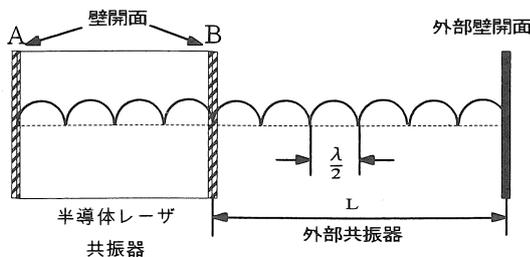


図 1 複合共振器モデル

## 2. 2 半波長以上の測定方法

ターゲットの振動が半波長以上のときは、図 2 のように入力信号の半波長ごとに干渉波形が得られ、その変位の大きいところでは密に、変位の小さいところでは粗に

なるために振動が検出できる。干渉波形は入力電圧の山、もしくは谷になる部分で、センサの出力信号が折り返され、この間を一周期とする。振動振幅が半波長以上の時には、半波長を基準とする山の数を数え、折り返された部分については干渉波形の振幅が一定であるためこの振幅を基準として折り返された部分の振幅と比較することで、全体の波数を決定する。この方法を用いて半波長以上の振動振幅を測定する。

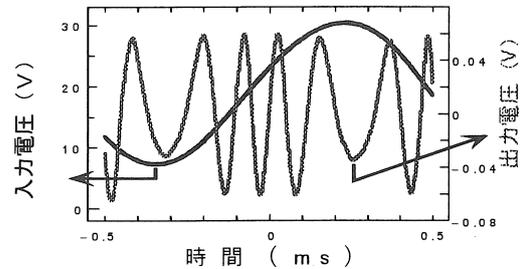


図 2 半波長以上の干渉波形

## 2. 3 半波長以下の測定方法

ターゲットの振動が半波長以下のときは、図 3 のようにセンサの出力信号は入力信号と同じ位相、もしくは逆位相を持ち、かつ同じ周期の振動を示すために半波長以下の振動振幅の検出は困難なものとなる。これは、測定対象の反射率やその振動によって戻り光量が違うためにセンサの出力信号の振幅の変化が、振動振幅そのものの変化であるのか、戻り光量の変化であるのかが分からないためである。そのため、半波長下の振動を検出する場合には比較対象として基準となる信号が必要となる。本研究では、まず、ターゲットの振動を人為的に大きく変化させることで基準となるものを作り、その振幅とセンサ出力信号の振幅を比較した。しかし、精度がよくなかったため、センサ部のみを高速で半波長以上動かすことで基準となる信号を作り、この振幅とセンサ出力信号の振幅の比較で振動を検出した。

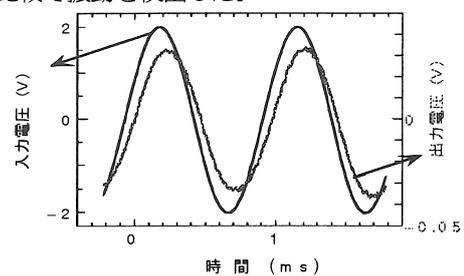


図 3 半波長以下の干渉波形

## 3. 測定システム

本研究で試作した微小振動検出の実験装置構成図を図 4 に示す。実験装置は、半導体レーザーと集光レンズで構成されるセンサ部、ターゲットの振動振幅が半波長以下のときにセンサ部を高速で動かすことの出来るセンサ駆動用圧電素子を固定する部分、及びターゲットからなり、長さ 12cm、幅 4cm の板に取り付けた。

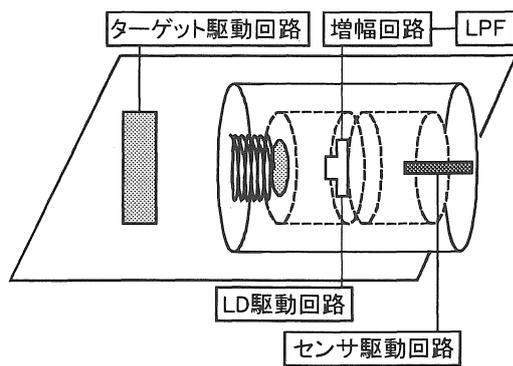


図4 実験装置構成図

### 3. 1 センサ部

本研究に使用した半導体レーザーは SHARP 株式会社製、LT024MD0、発振波長 780nm、出力 15mW (最大出力 20mW)、フォトダイオード内蔵型のもので、しきい電流は静特性より 58mA である。集光レンズには、直径及び焦点距離がともに 10mm であるものを使用し、これらを直径 15mm、長さ 20mm のアルミ製円筒に収めた。集光レンズにより、レーザー光は 20mm 先に集光させた。フォトダイオードからの出力信号には、ノイズを抑えるためにシールド線を用いた。

### 3. 2 センサ駆動部

本研究では、半導体レーザーと集光レンズから構成される内部円筒を、ターゲットの振動が半波長以下のときに使用するセンサ駆動用圧電素子をその後方に、直径 10mm、長さ 5mm のバネを前方に挿入し、前後より固定した。これらを、直径 25mm、長さ 50mm の外部円筒に収める二重構造にすることで、ターゲットの振動が半波長以下の時にはセンサ部のみを高速で動かすことで、レーザー-ターゲット間の距離を半波長以上動かし基準信号を作った。また、内部円筒の外形は 15.15mm、外部円筒内径が 15.55mm、内部円筒の長さが 20.20mm であるので円筒のクリアランスは内部円筒と外部円筒の間隙角を  $\theta$  とすれば、最大の触れ角は  $\theta = \tan^{-1}(0.4/20.20) = 1.134^\circ$  となる。

### 3. 3 ターゲット

本実験で被検体として用いたターゲットは TOKIN 製 ASB170C801NP0 で、直流バイアスを加えた 1kHz 程度の正弦波信号を加えて振動させた。正弦波信号の振幅はターゲットが半波長以下の振動をする数百 mV より、ある程度の振動をする 40V 程度まで加えた。圧電素子の反射端は金属製であるが、この表面に白、黒、赤、緑の色紙をはり、反射光量を変えて測定した。

### 3. 4 測定回路

センサ部で検出した信号はとても微弱なので、増幅回路により増幅させたが、ノイズの影響を抑えるため、初

段には負帰還増幅回路を用いた。その後、トランジスタ増幅回路を通し、高周波ノイズをとるためにフィルタを通した。ターゲットの振動が半波長以下のときは、センサ駆動用回路によりレーザー-ターゲット間の距離を半波長以上変化させる。まず、F・G からターゲット駆動回路と負帰還回路に信号を入れた。これにより、ターゲットとセンサ駆動用圧電素子を同期させた。この信号を負帰還増幅回路により、F・G からの入力信号を約 300 倍に増幅させた。これは、後段の同期回路では 2V を基準に H レベル、L レベルで区別するため、F・G からの小さい入力信号を増幅させる役割を持つ。その後、前段の負帰還増幅回路により増幅した正弦波信号を半波整流し方形波に変換する。この方形波を四つの NAND 素子を通すことでパルス幅を変化させる。しかし、これだけでは  $10^{-4}$ s のパルス幅をもつ方形波には出来ないため、別の NAND 素子によりパルス幅を  $10^{-4}$ s 程度にした。研究の後半では、この方形波を二分の一分周回路を二度通過させることで入力信号の四周期に一度の割合のパルスを作った。同期回路により作ったパルスをトランジスタにより三角波に微分し、増幅させた。圧電素子はコンデンサのように充電するため、トランジスタにより二相信号回路を作り、電流増幅したあと正相波形をプラス側、逆相波形をマイナス側につなぐことにより放電させた。最後に、圧電素子にかかっている正弦波電圧をコンデンサで切り、固定抵抗と可変抵抗で調整可能な直流バイアス電圧をかけた。これは、出力信号が二つの信号の干渉波形であるため、センサには感度があるので出来る限り感度の大きいところで測定が可能であるようにするためである。

## 4. 測定結果

### 4. 1 センサ感度観測波形

振動振幅が半波長以下のときの観測波形を図 5 に示す。これは、同程度の入力電圧に対する二つの半波長以下の観測波形であるが、これを見ると、ターゲットに同じ入力電圧を加えた場合でもその出力電圧の幅は大きく異なり、この場合では二倍程度の違いが見られた。これは、レーザー-ターゲット間の距離が変化するとセンサの感度が大きく変わってしまうためである。干渉波形が正弦波関数であるために、位相差が  $0$  または  $180^\circ$  付近の感度の大きな所で振動しているのか、 $\pm 90^\circ$  付近の感度の小さな所で振動しているのかの違いであると思われる。このため、半波長以下の微小振動を検出する場合には感度が一番大きなところで測定しなければ正確な測定は出来ない。本研究では、センサ感度の違いによるセンサ出力信号のばらつきを抑えるために、センサ駆動用圧電素子に直流バイアスを加え、レーザー-ターゲット間の距離を手動で調節した。

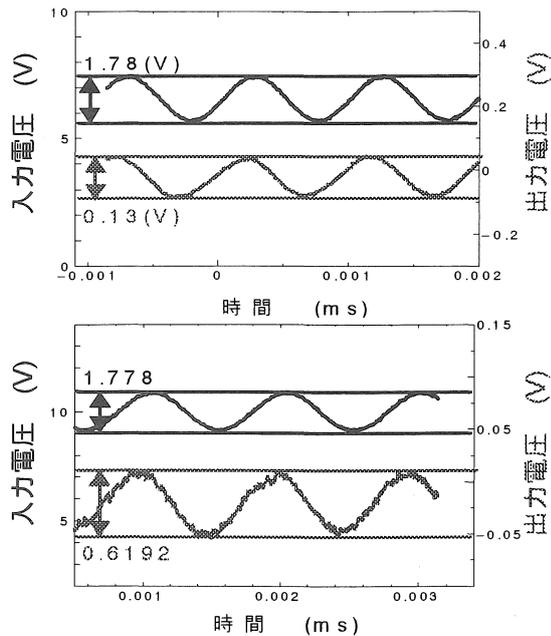


図5 センサの感度

4. 2 基準信号観測波形

図6は振動振幅が半波長下のときに、基準信号とセンサ出力信号を同時に観測した場合の観測波形である。最初は、入力信号の各周期に基準信号を作り出したが、圧電素子による基準信号には残留振動があるので、半波長以下の振動検出をする場合に、センサ出力信号にその影響が出てしまった。そこで、その影響を減らすため入力信号の4周期に1度の割合で振動させることで、残留振動の影響の少ないところでの測定を行った。

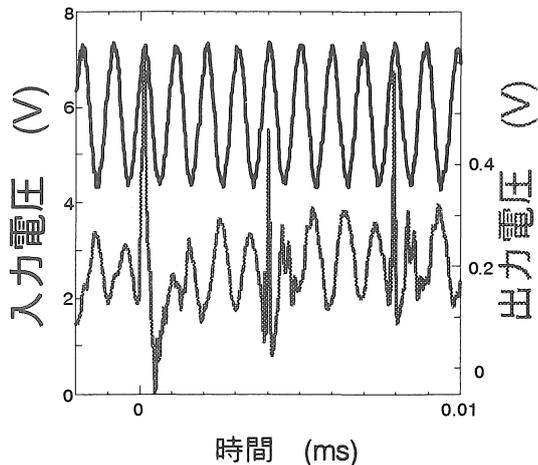


図6 基準信号観測波形

4. 3 振幅の比較による振動検出

4. 3. 1 入力電圧 - 平均振動振幅値

周波数 1kHz におけるターゲットへの入力電圧に対する平均振動振幅値の測定結果を図7に示す。この結果は入力電圧が半波長以下のものからターゲットの振動が大きくなる電圧まで加えたときの結果である。これを見ると入力電圧が大きいときはターゲットの種類にかかわらず、その振動は入力電圧にほぼ比例していることが分かる。しかし半波長以下の振動においては、重なって

見にくいものの、比例関係のグラフよりは少ない振動値であるように見える。

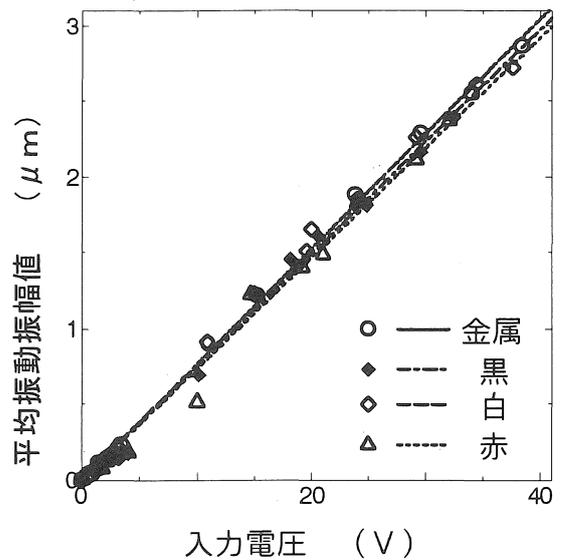


図7 入力電圧 - 平均振動振幅値

4. 3. 2 入力電圧 - 平均ばらつき誤差

ターゲットへの平均振動振幅値に対する平均ばらつき誤差の測定結果を図8に示す。測定データは各測定に対して十数回測定した結果の平均からのばらつき平均を取った。これを見るとターゲットの種類にかかわらずターゲットの振動振幅が大きいところでは誤差はほぼ一定であることが分かり、実際に  $0.8\mu\text{m}$  付近より大きい振動に対しては、およそ 1% 程度の誤差になった。一方、入力電圧が低くなり、特にターゲットの振動が半波長以下の振動である  $0.4\mu\text{m}$  付近に近づくにつれて急激に誤差が大きくなっていき、実際に最大で 5~6% 程度と大きくなった。このように振動振幅が半波長以下の時に誤差が大きくなってしまったのは時間的な原因が考えられる。これは、半波長以下の振動を測定する際に半波長以上のときのように基準とするものが無かったため、ターゲットへの入力電圧を半波長以上振動するところまで変化させ、その振幅を基準とした。

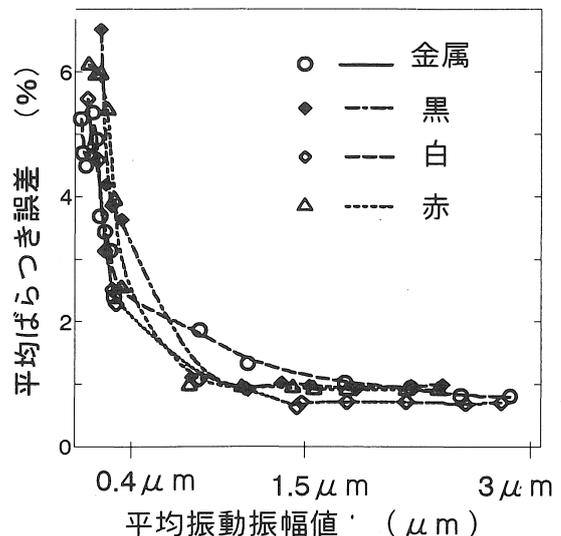


図8 平均振動振幅値 - 平均ばらつき誤差

このように、半波長以下の測定においては各測定時に入力電圧をターゲットが半波長以上振動するレベルまで人為的に上げて、その振幅を基準信号の代わりとして用いた。これにより、振幅の比較は出来るものの、ターゲットが半波長以上振動するようにその位相がそろわなかったことと、基準とする振幅が常に変化してしまったために誤差が大きく出たものと思われる。各測定データの誤差としては、センサの感度を調整しなかったこと、ターゲットの振動を大きく変化させたことで、基準となる信号にばらつきが生じたことが考えられる。

4. 4 基準信号による振動検出

4. 4. 1 入力電圧 - 平均振動振幅値

ターゲットへの入力電圧が半波長以下の微小振動のとき基準信号を用いて測定した場合の入力電圧に対する平均振動振幅値の測定結果を図9に示す。グラフにおける(有)、(無)は、センサ感度の調整を行ったか行わなかったかの表示である。グラフより、振動振幅が小さいところではかなりのばらつきが見られたものの、基準信号を用いることで最小では半波長の40分の1である10nm程度までの微小振動が検出できた。この結果における直線は金属反射においてレーザーターゲット間の距離を調整して感度が最大になるように調整した場合のもので、それに対して金属反射で無作為に測定した場合、そしてターゲット表面に白紙を張ってレーザー光を反射させた場合の測定結果を測定点だけで表示した。ターゲットの振動は、その入力電圧にほぼ比例していることが分かるが、各測定にばらつきが見られた。また、金属表面での反射においてセンサの感度を調整した場合に比べて他の三つはかなりのばらつきが見られ、感度の調整のみでは測定のばらつきは抑えられないことが分かった。

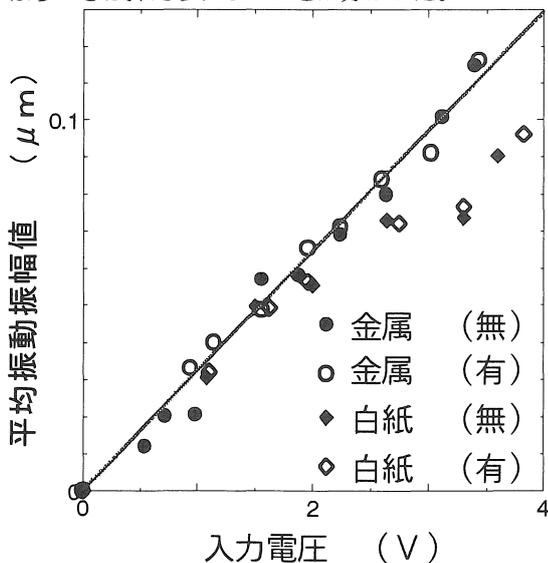


図9 入力電圧 - 平均振動振幅値

この原因としては、センサの感度を調整した場合に比べて、調整しない場合は測定時にセンサ出力信号の大きさ

にばらつきがあったことが考えられる。また、金属表面での反射に比べて白紙表面での反射における振動振幅値の違いは、ターゲットからの戻り光量が減少したことにより全体に振動振幅が小さく検出されてしまったものと思われる。しかし、反射率が異なることで戻り光量が変化しても、自分で基準信号を持つため振動振幅値が小さい所でも測定が出来たものと思われる。

4. 4. 2 平均振動振幅値 - 平均ばらつき誤差

基準信号を用いて二つの信号を同時に測定した場合の平均振動振幅値に対する平均ばらつき誤差の測定結果を図10に示す。グラフにおいて、実線は直流バイアスを加えることで、センサ感度を最大にして測定したものである。これは、出力信号の干渉波形が正弦波関数であるため、ターゲットの振動している位置の違いでセンサ出力信号の振幅が異なるので、同じ振幅で測定するためである。一方、破線はセンサの感度調整をしなかった場合の測定結果である。両方の測定結果からセンサ感度を調整した場合のほうが感度を調整せずに測定した場合に比べて誤差は軽減されたことがわかる。

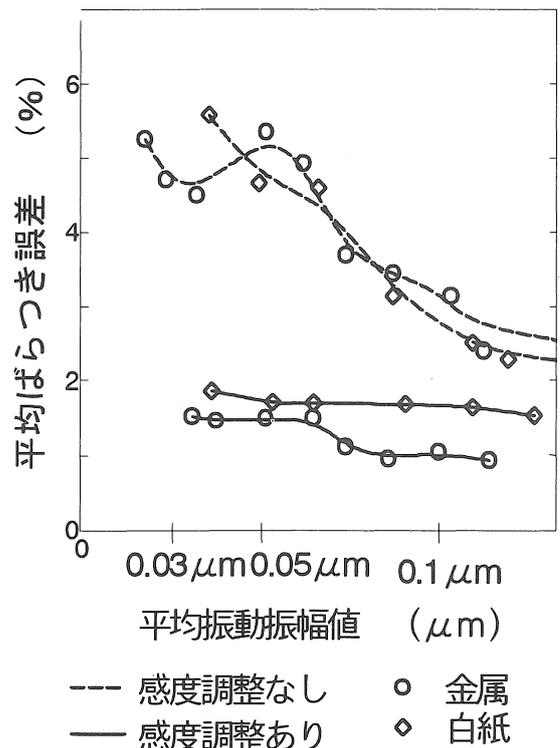


図10 平均振動振幅値 - 平均ばらつき誤差

また、感度を調整して測定した場合はターゲットの種類にかかわらず入力電圧が小さくても誤差はほぼ一定になり、最大で6%程度あった誤差は2%程度と三分の一まで軽減できた。これは基準信号を用いてセンサ感度を調整しなかった場合は各測定の中でも振動振幅の大きさにばらつきがあった状態で測定したため、結果として平均振動振幅値が大きく、もしくは小さくなってしまっ

たことで、ばらつき誤差が大きな値になってしまったと考えられる。これに対して同時に測定し、センサの感度を調整した場合は、本研究では同じ入力電圧において基準信号に振幅の差は出るが、センサ感度の調整により、センサ出力信号との比は変化しないため誤差が減少したものと考えられる。しかし、感度の調整においては必ずしも基準信号に対して中心付近で振動できたとは言え無いことによる誤差が出てしまったと考えられる。

## 5. まとめ

半導体レーザーの自己結合効果を利用し、基準信号を用いて微小信号を検出する方法を提案し、特性を調べたところ、レーザーの半波長以下の微小振動を検出でき、最小で 10nm 程度までの微小振動が検出できた。これ以下の振動については本研究で用いた増幅回路のノイズ成分の大きさとセンサ出力信号の大きさが同程度になってしまったため、測定できなかったと考えられる。また、センサ自身に基準信号があるため、ターゲットの反射率にかかわらず同じ結果が得られた。またセンサ感度の調整を行うことで誤差が大きく軽減できた。

また、センサには感度がある。これは出力信号の干渉波形は正弦波であるため基準信号に対してどの位置で振動するかで出力信号の大きさが変化する。このため、半波長以下の振動振幅の検出ではセンサの感度の大きな

ところで測定できるようにすることを目指し、基準信号に直流バイアスを加えることにより手でその位置を調整できるようにした。結果としては、ばらつき誤差に変化が見られた。第一に、センサの感度を調整しない場合に最大 6%程度あった誤差は、2%程度に軽減できた。第二には、半波長下の振動をする入力電圧においては急激に増加していった誤差がほぼ一定に近い値となった。これは、センサの感度の調整によって測定時のセンサ出力信号の大きさのばらつきが減少したためであると考えられる。

今後の課題は、回路のボックス化、シールド線を用いたもののアースの強化によりノイズを軽減することで、より小さな振動振幅値の検出、感度調整の自動化により、より正確な測定を行うことである。

## 参考文献

- (1) 大澤敏彦、小保方富夫 レーザ計測  
裳華房 1994
- (2) 中尾祐介 津田紀生 山田諄 半導体レーザーの自己結合効果を用いた自己補正型距離計 電気学会論文誌 Vol.121 - C No.12 pp1819 - 1825 Dec.2001
- (3) 内野研二 圧電/電歪アクチュエータ  
森北出版株式会社

(受理 平成15年 3月19日)