

## 自己結合型距離センサの 光ファイバを用いた自己補正に関する研究

### Study on Self-Correction of Self-Coupled Distance Sensor Using Fiber

竹内 伸隆<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Nobutaka TAKEUCHI , Norio TUDA , Jun YAMADA

Abstract : A compact distance sensor based on self-coupling effect of semiconductor laser has been developed. The distance sensor is composed of only a laser diode and a lens. But the operating wavelength of semiconductor laser varies with the surrounding temperature and the injection current. Then the method of self-correction using Michelson interferometer which always monitors the change of operating wavelength is studied. Using a fiber, the interferometer is separated from the sensor head to miniaturize the sensor head. As a result, the fluctuation for temperature change of 10 to 30°C decreases from 4.4% to 0.5%. It is possible to measure a distance without an affect of surrounding temperature by the self-correction.

#### 1. はじめに

半導体レーザは、他のレーザと比較して小型・軽量という利点のみならず、高利得・高効率であることや、注入電流によりレーザ光の周波数や出力を制御でき、変調が可能である等の特徴をもつ。このような特徴を活かして、物体の形状測定、距離測定、回転速度測定などの計測分野へも応用が広がるようになった。例として工場内の生産ラインにおいて距離、外形、形状センサとして多く使用されるようになってきた。

現在、工場では生産ラインのオートメーション化が急速に進み、ロボットの使用が数多く見られるようになってきている。このような工場の自動化に伴い、ロボットの目となる高性能、小型で安価な距離センサの需要が高まってきている。そこで、小型、非接触、高精度で測定が可能であるといった特徴をもつ半導体レーザを利用して、距離センサを試作した。

従来、レーザ光を用いた粗面に対する距離測定には、三角測量法が実用化されている<sup>1)</sup>。この測定方法では短距離においては高精度の測定が可能であり、距離分解能をマイクロ単位まで可能にしている。しかし、測定可能範囲が非常に狭い範囲に限定されてしまい、対象物までの測定距離が制限される。また、マイケルソン光学系を用いて半導体レーザの周波数変調により生じるビートの測定から距離を求める方法もある。この方法は、三角測

量法より測定距離が長く、精度も良いが、光学系が複雑になってしまう問題がある。

そこで、半導体レーザの自己結合効果を利用した距離センサに関する研究が行われてきた<sup>2) 3)</sup>。つまり従来、レーザ光が半導体レーザに戻ってきたときに戻り光ノイズとして扱われ、極力現れないようにしていた現象を積極的に利用することで、距離を測定しようとするものである。これは測定対象物に対する散乱光と出力光の干渉を利用するので、粗面に対する距離測定も可能である。また、フォトダイオード内蔵半導体レーザ単体で発光、干渉、受光を兼ねることができるので外部干渉光学系が大幅に簡略化できる。このためセンサ部が、半導体レーザとレンズのみの構造となることから非常に小型となり、三角測量法より広い範囲の距離測定が可能である。

しかし、自己結合効果を利用して距離測定を行うとき、注入電流や周囲の温度によって半導体レーザの発振波長が変化するため、距離測定の精度に大きな影響を及ぼす。そこで、マイケルソン干渉計を用いて常に発振波長を監視しながら自己補正を行うことで、周囲温度の影響が少ない距離測定が可能となる<sup>3)</sup>。

本研究では、センサ部の小型化とマイケルソン干渉計から得られる基準周波数の精度向上を目指している。しかし、干渉計の光路差を伸ばして、基準周波数の精度を向上させようとする、センサの構造が大きくなり、小型化に反してしまう。そこで、以前の研究ではセンサ部・自己補正部一体型であった構造を、光ファイバを用いることにより切り離し、センサ部を独立させた。そして、センサ部とは別の場所に設置したマイケルソン干渉計で干渉波を得ることとし、そのときの補正特性を検討した。

<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)

## 2. 測定原理

### 2.1 自己結合効果

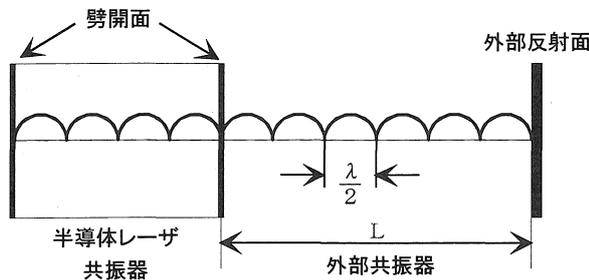


図1 複合共振器モデル

半導体レーザー（以下 LD）の特徴の一つは、外部共振器を用いずに半導体結晶の劈開面の平行性を共振器としていることである。しかしその反面、劈開面における光の反射率は約 32%と低く、透過率が高いため、自ら発したレーザーの出力光が外部反射面に当たることで散乱光の一部が劈開面を透過して活性領域内に戻り易くなる。この戻り光と出力光との干渉により、動作が不安定となり雑音（戻り光ノイズ）を生じる。この戻り光ノイズによる LD の特性変化は、出力光に対する相対的な光量が  $10^{-6}$  程度と極めてわずかであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LD の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力の増加となるためである。この現象は、これまで各種の応用技術に際して雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を自己結合効果として積極的に利用することにより距離測定に応用した。この効果を用いることにより、センサ部が LD とレンズのみの構造となり小型化が可能となる。また、わずかな戻り光でも顕著に効果が現れるため、対象物が粗面であっても距離測定が可能である。

本距離計における測定原理である自己結合効果を説明するために複合共振器モデルを図 1 に示す。LD から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 の劈開面を透過して活性領域内に戻ると、LD からの出力光と戻り光が干渉を起こす。このとき、発振波長を  $\lambda$ 、LD の劈開面から外部反射面までの距離を  $L$  とすると共振条件

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n : \text{整数})$$

を満たすとき両者の光は強めあい、光出力がわずかに増加する。これを自己結合効果と言ひ、この効果を利用して距離測定に応用している。

### 2.2 自己補正方法

LD は周囲の温度変化で容易に発振波長が変化してしまう。この変化は、同じ距離を測定していたのにもかかわらず、自己結合効果によって得られた測定値に誤差をもたらす。これでは正確な距離を知ることはできないので、発振波長の変化による誤差を打ち消すための基準が必要となる。この基準を作るために、レーザー光の一部をマイケルソン干渉計に取り込み、その干渉波を利用した。これを基準として距離測定を行うので、この干渉計から得られる周波数を基準周波数と呼ぶ。そして、自己結合効果によって得られた周波数と基準周波数の比を求めることで、周囲の温度による発振波長の変化に依存しない距離測定が可能となる。

## 3. 測定システム

### 3.1 測定システム

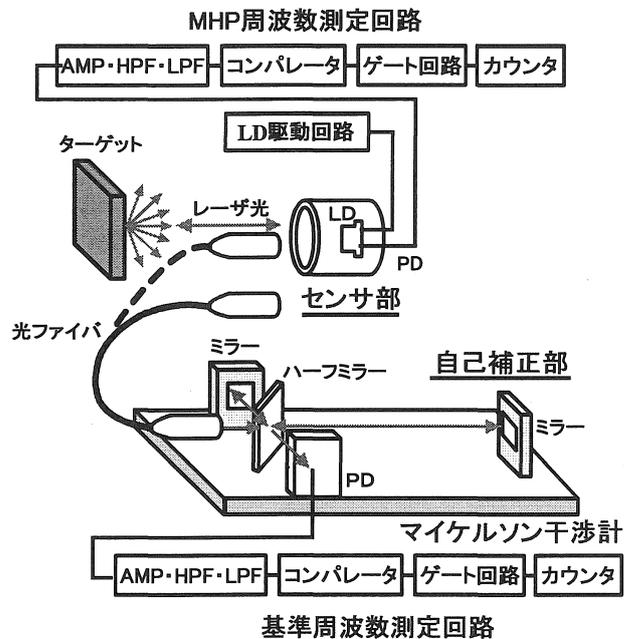


図2 測定システム

測定システムを図 2 に示す。本研究において試作した装置は、半導体レーザーとレンズからなるセンサ部とマイケルソン干渉計による自己補正部から構成されている。

センサ部では出力 10mW、発振波長 780nm の LD（シャープ株式会社製 LT024MD）を使用し、1kHz で三角波変調をかけて発振させる。それを直径 14.5mm、焦点距離 15.0mm のレンズで 1m 先に集光させ、ターゲットに照射する。レーザー光はターゲットで散乱し、その一部が活性領域内に戻る。そして自己結合効果によって得られた信号を内蔵フォトダイオード（以下 PD）によって検出する。この信号は微弱なので増幅し、整形してパルスを得る。このパルスをモードホップパルス（以下 MHP）と呼び、設定したゲート内のパルス数とゲート時間より、ターゲットまでの距離に比例した周波数を得る。

この時の周波数を MHP 周波数として用いる。

しかし、LD は注入電流や周囲の温度変化等の影響によって、発振波長が変化するので MHP が変動し、測定に誤差を生じる。この誤差を補正するために光ファイバを用いてレーザ光の一部を取り出し、マイケルソン干渉計で干渉をさせ、PD で検出する。この干渉波形も MHP 周波数を得た時と同様の処理を行い、パルスに整形し、周波数を測定する。これを基準周波数とする。

マイケルソン干渉計の光路差は一定なので、この基準周波数の変化分が、LD の発振波長の変化分となる。そこで MHP 周波数と基準周波数の比をとることで、発振波長が変化しても誤差の少ない距離測定が可能となる。

### 3. 2 自己補正部

センサ部の小型化を目指すために、以前の研究では、センサ部・自己補正部一体となっていた構造を、光ファイバを用いることにより分離させ、センサ部を独立させた。そして自己補正部であるマイケルソン干渉計を外側にある回路ボックスの中に設置することで、補正を行うこととした。このとき用いた光ファイバは、コア径 50  $\mu\text{m}$ 、クラッド径 125  $\mu\text{m}$  の石英系グレーデッドインデックス・マルチモードファイバである。

センサ部前方に直径 5.0mm、焦点距離 12.3mm の両凸レンズを設置し、そこからレーザ光の一部を光ファイバに入射する。そして光ファイバの出射側では、直径 5.0mm、焦点距離 6.4mm の両凸レンズで光を平行にし、回路ボックス内のマイケルソン干渉計に取り込む。干渉計に取り込まれた光はハーフミラーにより二分され、それぞれ異なった光路を進み、蒸着ミラーで全反射して再びハーフミラーで結合される。この結合した光を PD で検出し、干渉波を得る。2つの光路長を 6cm、2cm と設定したときの光路差は 4cm となる。また、自己補正部の大きさは、縦 75mm、横 180mm であり、ハーフミラーは角度を変化させられる構造とし、2つのミラーはミラーフォルダーに設置することで光路を微調整することができる。

### 3. 3 測定装置

測定装置は、電源装置、変調波発生装置、LD 駆動回路、増幅回路、フィルタ回路、信号波形整形回路、ゲート回路、カウンタからなる。

自己結合効果によって得られた信号は、1mV 程度と非常に微小であり、ノイズの与える影響は非常に大きい。そこで信号レベルが微小である回路の初段では、低雑音負帰還増幅回路を使用した。この回路は、汎用の OP アンプを用いたものよりも 10~20dB も雑音を低くすることができる特徴を持っている。また、抵抗で発生する熱雑音を小さくするために、インピーダンスを低くして回路を低雑音化した。この後、微分回路を 2 回通すことで変調波である三角波成分を落とし、高周波ノイズを取り

除くためにフィルタに通し、コンパレータでパルスに整形する。そして、設定したゲート内に入るパルス数とゲート時間から MHP 周波数を求めた。回路に用いた抵抗、コンデンサ、トランジスタ、オペアンプ等の素子には、低ノイズで温度特性の良いものを使用し、抵抗には金属皮膜抵抗、コンデンサにはポリプロピレンコンデンサ、タンタルコンデンサを使用した。また、それぞれの素子の配置、配線や装置のシールドにも配慮した。

また、マイケルソン干渉計で得られた信号も、MHP 周波数を求めたときと同様の処理を行い、基準周波数を求めた。

## 4. 測定結果

### 4. 1 MHP 周波数測定結果

#### 4. 1. 1 距離測定範囲

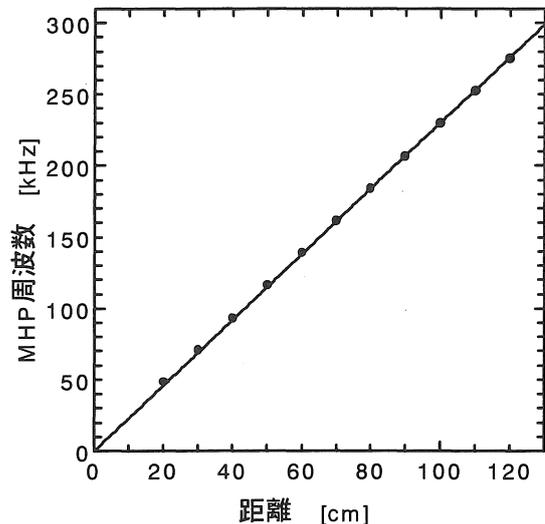


図3 距離-MHP 周波数特性

温度 24.9℃、駆動電流 79.5mA、周波数 1kHz、振幅 800mV、オフセット 1.0V で三角波変調し、集光距離を 100cm に設定したときの距離-MHP 周波数の測定結果を図 3 に示す。この測定のターゲットには、白い普通紙を用いて測定を行った。

図中の直線は 10 回の測定値の平均を二乗近似法により直線近似したものであり、これを較正曲線と呼ぶこととする。図より距離と MHP 周波数が比例関係にあることがわかる。このことより、MHP 周波数を測定することでターゲットまでの距離を測定することができる。また、このときの距離範囲は 20~120cm である。120cm 以上で測定が不可能な原因は、LD からターゲットまでの距離が遠くなるに従って光出力は小さくなるからであり、この距離以上だと光が十分に戻らないためである。

また、20cm 以下で測定が不可能な原因は、レーザ光を 100cm 先に集光したので、LD の活性領域内への戻り光量が極わずかとなるためである。

4. 1. 2 変調波振幅-MHP 周波数測定

ターゲットまでの距離を 70 cm 一定とし、温度を 10℃、20℃、30℃と変化させたときの三角波変調振幅 820mV から 980mV までの変化に対する MHP 周波数を図 4 に示す。変調波振幅が増加するに従い MHP 周波数も増加する。変調波振幅を増加させると LD に注入される電流の変化が大きくなる。このため、発振波長の変化量も大きくなるので、共振条件を満たす波長が増え MHP 周波数が増加する。変調波振幅 820mV から 980mV における変動率は 16.5% となった。また、温度上昇に伴い MHP 周波数が増加している。これは、温度が高くなるに従い、LD の変調効率が大きくなるためだと考えられる。温度 10~30℃における変動率は、4.4% となった。

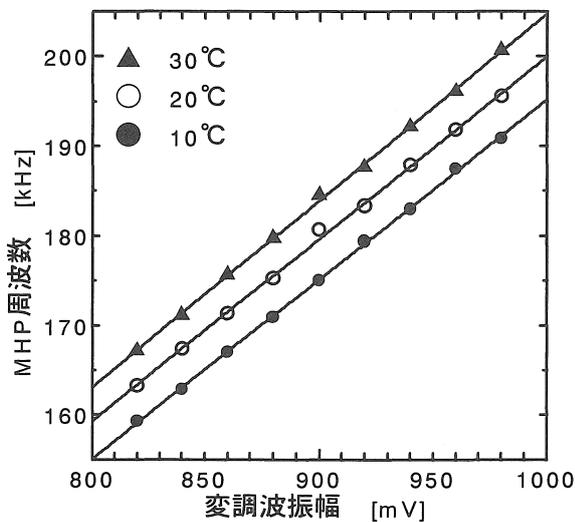


図 4 変調波振幅-MHP 周波数特性

4. 2 基準周波数測定

MHP 周波数は、注入電流や周囲の温度等による LD の変調効率の変化の影響によって、その測定値は大きく変動する。そこで、マイケルソン干渉計を利用して常に一定距離における干渉波を測定することで、発振波長の変化分を検出し、補正を行った。マイケルソン干渉計の光路差は 4cm と 7cm のときで測定を行った。また、センサ部の小型化を目指すために、光ファイバを用いてレーザー光の一部を取り出し、マイケルソン干渉計で干渉波を得る方法を用いた。

4. 2. 1 光路差 4cm の変調波振幅-基準周波数

温度 10℃、20℃、30℃と変化させ、三角波変調振幅を変化させたときの光路差 4cm の基準周波数を図 5 に示す。光路差 4cm のマイケルソン干渉計から得られる基準周波数は、半周期に干渉波が 3 つ、または 4 つ現れる。三角波の頂上付近では、高周波の影響や干渉波による変動があるので、その付近を除くようにゲートを作る。そのゲート内で得られた 1 個、または 2 個のパルスから、

基準周波数を測定した。

図より、変調波振幅を増加すると、変動があるものの基準周波数も増加する傾向がみられる。20℃では、較正曲線からのズレの平均は 0.7% となった。このようなバラツキがみられる原因として、変調波振幅が小さいときは、半周期で得られるパルス数は、ほぼ 1 つと少ないのでバラツキ誤差が大きくなったと考えられる。

変調波振幅が 960mV または 980mV のバラツキは、多モードの影響があると考えられる。このことより、変調波振幅は 900mV 付近で測定を行うことが適当だと考えられる。

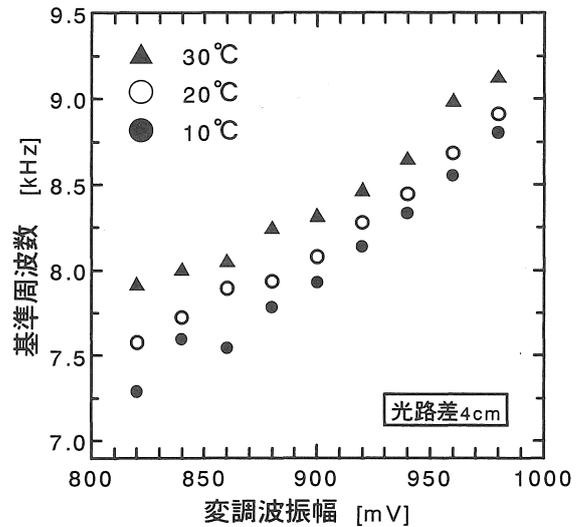


図 5 光路差 4cm の変調波振幅-基準周波数

4. 2. 2 光路差 7cm の変調波振幅-基準周波数

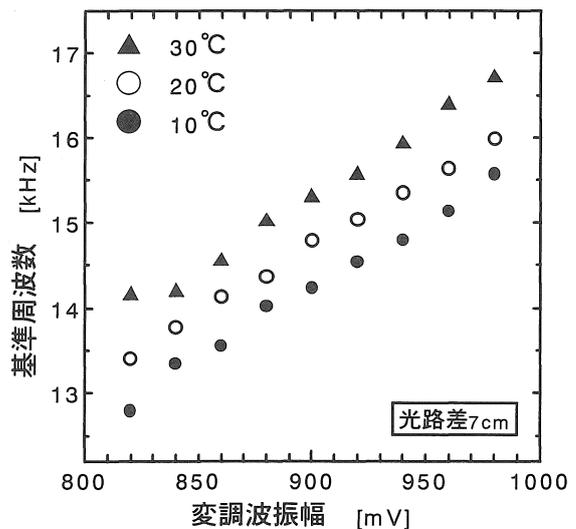


図 6 光路差 7cm の変調波振幅-基準周波数

光路差 7cm のときの変調波振幅に対する基準周波数を図 6 に示す。光路差 4cm のときと比較するとバラツキが少ないことが分かる。20℃では、較正曲線からのズレの平均は 0.2% となった。このようにバラツキを抑えら

れた原因は、三角変調波の半周期に現れる干渉波の数が、光路差 4cm と比べると 2 倍程度、増えたためである。そのため、変調波振幅が小さいときでも、設定したゲート内で得られるパルス数は 4 個または 5 個となったためにバラツキ誤差が軽減できたと考えられる。

#### 4. 3 補正結果

##### 4. 3. 1 光路差 4cm の変調波振幅－補正值特性

ターゲットまでの距離を 70cm 一定としたときの MHP 周波数と基準周波数の比をとった補正值を図 7 に示す。温度 20℃において補正をする前の MHP 周波数の振幅、820mV から 980mV に対する変動率は 16.5%となったが、補正をすることで 5.6%と軽減できた。しかし、変調波振幅 920mV 以外では、温度によってバラツキが見られる。このバラツキは基準周波数によるものが大きく、4. 2. 1 で述べた理由により誤差が増えたと考えられる。以上より、変調波振幅は 920mV が最適な値だと言える。しかし、変調波振幅が大きすぎるとモードホップ時の多モード発振の影響を受けやすいので、できるかぎり振幅を小さくし精度の良い補正を行えるようにすることが望ましい。

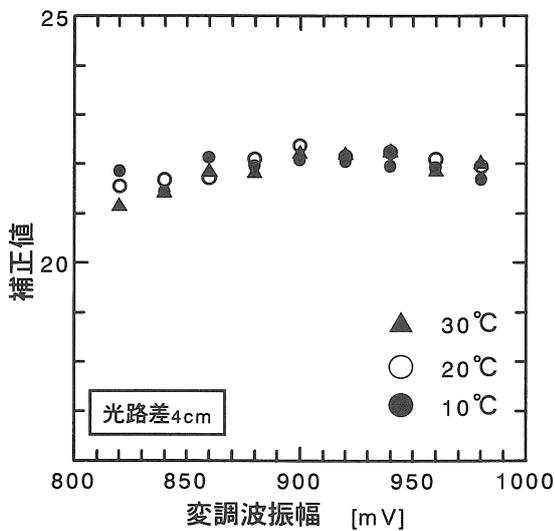


図 7 光路差 4cm の変調波振幅－補正值

##### 4. 3. 2 光路差 4cm の温度－補正值特性

距離 70cm 一定とし、変調波振幅を 920mV としたときの温度 10℃、20℃、30℃に対する補正值を図 8 に示す。補正をする前の変動率は 4. 1. 2 に示したように 4.4%となったが、補正後は 0.5%となり、最適な変調振幅値で補正を行うと、変動が軽減されることが分かる。よって、温度による発振環境の影響が少ない補正值を得ることができる。

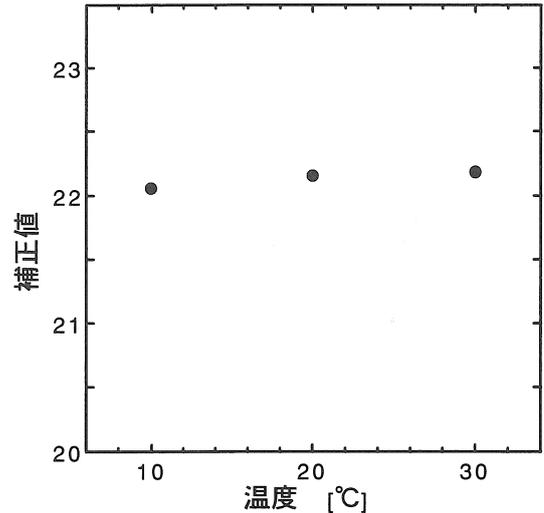


図 8 温度－補正值特性

##### 4. 3. 2 光路差 7cm の変調波振幅－補正值特性

ターゲットまでの距離を 70cm 一定としたときの変調波振幅に対する補正值を図 9 に示す。温度 20℃における補正值の変調波振幅 820mV から 980mV までの変動率は、1.2%となった。光路差 4cm のときの補正值と比較すると、変動率は小さくなった。これは、パルス数が増加したためだと考えられる。また、10℃から 30℃までの変動率は、変調波振幅 840mV のとき、最小の 1.2%となった。

以上より、マイケルソン干渉計の光路差を伸ばすことで、半周期における干渉波の数が増え、変調波振幅値に対する補正值の変動が抑えられたと考えられる。

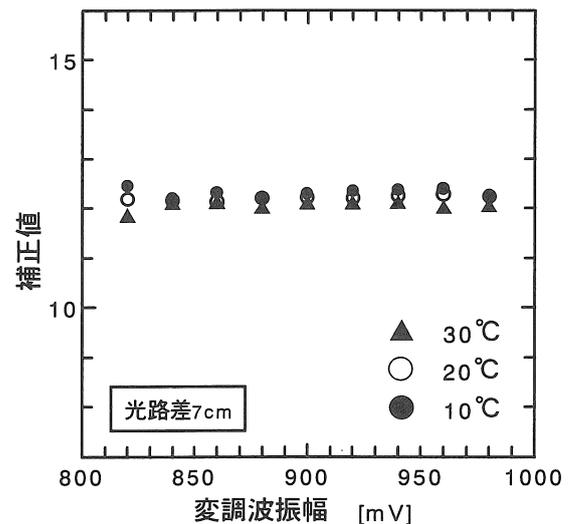


図 9 光路差 7cm の変調波振幅－補正值

#### 5. まとめ

半導体レーザは、外部反射面からの散乱光が戻り光として活性領域内に戻ると出力光と結合し、ノイズを生じするという問題がある。しかし、この現象を自己結合効果として積極的に利用することで、外部反射面までの距離

測定を行った。

LD は注入電流や周囲の温度により発振波長が変化する特徴をもつ。そのため、わずかではあるが変調効率が異なり、自己結合効果によって得られた測定値に誤差を生じてしまう。そこで、光路差一定のマイケルソン干渉計によって LD の発振波長の変化分を常に監視することで自己補正を行う方法をとった。

しかし、基準周波数の精度を向上させようとする、干渉計の光路差を伸ばす必要があり、センサの構造が大型になってしまう。そこで、光ファイバを使用することで、センサ部と干渉計を切り離れた。そして、干渉計を外部にある回路ボックス内に設置することでセンサ部の更なる小型化と、干渉計の光路差を伸ばすことで基準周波数の精度向上を目指した。

光ファイバを用いた干渉計では、様々な方法を試みた。しかし、光出力が小さいといった問題や時間的コヒーレントが保たれなくなるといったことが原因で、干渉波を得ることが難しいと判断し、まず、センサ部の前方でレーザ光を取り入れ、光ファイバを通した後に干渉波を得られるかどうかを確認した。

マイケルソン干渉計の光路差を 4cm 一定としたときでは、三角波の半周期に得られる干渉波が、3 個または 4 個程度となる。この干渉波から得られる基準周波数のバラツキ誤差は大きいものの、補正をすることで、温度に対する変動率は 4.4% から 0.5% に軽減できた。また、光路差 7cm では、干渉波の数が増加したことにより、変調波振幅に対する変動が軽減された。光路差を長くすると、干渉波の数が増加し、バラツキ誤差が軽減できることが分かった。

以上より、光ファイバを通してマイケルソン干渉計で干渉波を得ることで、補正が可能であることが確認され、温度変化により発振波長が変化しても誤差の少ない距離測定が可能となった。

しかし、光ファイバをセンサ部前方に設置したために、MHP 周波数と基準周波数を同時に測定することが困難になる。これを解決し、小型化にするためには新たな方法が必要になる。その一つの提案が、センサ部後方からファイバを設置し測定を行う方法であり、この方法を用いることによって、小型化と精度向上が実現できると考えられる。

#### 参考文献

- 1) レーザ計測ハンドブック編集委員会：レーザ計測ハンドブック、丸善株式会社
- 2) 上田正、山田諄、紫藤進、津田紀生、正弦波変調による半導体レーザの自己結合効果を利用した距離計、電気学会論文誌、Vol.117-C、No.7、pp954-961、1997
- 3) 中尾祐介、津田紀生、山田諄、半導体レーザ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

(受理 平成15年 3月19日)