

半導体レーザーの自己結合効果を用いた
微小振動センサに関する研究

目 次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	5
1.3	本論文の概要	6
第2章	微小振動センサの原理	9
2.1	半導体レーザ	9
2.1.1	半導体レーザの基本原理	9
2.1.2	半導体レーザの基本構造	10
2.1.3	半導体レーザの特徴	12
2.1.4	半導体レーザの基本特性	12
2.2	半導体レーザの自己結合効果	14
2.3	微小振動振幅と光出力の関係	16
2.4	微小振動振幅の算出方法	19
2.4.1	半波長以上の振動振幅算出方法	19
2.4.2	半波長未満の振動振幅算出方法	20
2.4.3	正弦波補正による振動振幅算出方法	22
第3章	実験装置	25
3.1	手動式の実験装置	25
3.1.1	センサ部	26
3.1.2	センサ駆動部	27
3.1.3	圧電素子	27
3.1.4	センサ駆動回路	30
3.1.5	ターゲット駆動回路	30
3.1.6	半導体レーザ駆動回路	31
3.1.7	センサ出力検出回路	31
3.2	自動式の実験装置	32
3.2.1	マイクロコンピュータ H8/3048 の概要	34
3.2.2	マイクロコンピュータを用いたセンサ駆動回路	36
3.2.3	マイクロコンピュータを用いた	

センサ出力検出回路	37
3.2.4 マイクロコンピュータのプログラム処理	37
第4章 実験結果及び考察	41
4.1 手動式の実験結果	41
4.1.1 半波長以上の実験結果	41
4.1.2 半波長未満の実験結果	42
4.2 自動式の実験結果	47
第5章 総括	54
5.1 本論文のまとめ	54
5.2 将来の展望	55
謝辞	58
外部発表リスト	59

第1章 序論

1.1 本研究の背景

およそ半世紀前の 1960 年に、メイマンがルビーを使用して初めてのレーザー発振[1]に成功して以来、固体、液体、ガスなどの媒質を利用して、色々なレーザーが開発されてきた。それらに伴い、レーザーを用いた様々な新しい技術が生み出され、その結果、光エレクトロニクスの分野が急速に発展している。その応用は光通信、コンパクトディスク、電子機器、加工機器、計測機器、医療機器、エネルギーなどの分野にも広がっている。

特に半導体レーザーは、他のレーザーと比較して小型、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ー光の周波数や出力を制御でき、変調が可能であるなどの特徴を持っている。このような特徴を活かして、すでに実用化されている応用分野として光通信技術、光情報記録技術、レーザープリンタ技術などがある。また、前述した分野以外にも、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てきた。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。

このように光エレクトロニクス分野が発展する中で、生産工程の自動化や省力化のため、小型で高感度なセンサに対する需要が強まっている。特に、半導体素子の集積化が進むにつれ、回路の線幅が数十 nm までに達するような半導体集積回路の細線化やフォトニクス結晶、MEMS などのナノ技術の進歩に伴い、これらの製品を大量に製造する過程において予期せぬ振動が発生すると品質が低下するので、これまでのようにレーザーの発振波長の半波長より短い 10nm 程度の微小振動が無視できなくなり、常に微小振動を監視するセンサが必要になってくる。

微小振動や変位の検出方法としては、電気的方法（抵抗法、電磁誘導法、容量法）、光学的方法（光てこ、幾何学的方法[2]、光干渉法[2]）、超音波法などがある。抵抗法は歪み ($\Delta L/L$) を 10^{-6} 程度の感度で測定するもので、最も汎用的なのは金属線歪みゲージである。これは、被測定物に貼り付け

たゲージが被測定物の歪みによる張力により、その抵抗が変化し、その変化量から歪みを評価するもので、特に半導体ゲージはピエゾ抵抗効果を持ち、金属線より2桁高く、応答周波数は10MHz程度まで使用できるが、接触式である。精度の高い容量法は、向かい合った二つの平面電極で構成された空気コンデンサの容量が、わずかな電極間距離の変化に対しては線形的に変化することを応用した変位測定法であるが、平面の金属表面以外の測定には向かない。光では、わずかな変位を鏡で拡大し、変位を測定する方法であるが、装置が大きくなる。幾何学的方法による計測は、光学式三角測距法がある。レーザ光をターゲット表面へ斜めに照射すると、レーザ光はその表面で拡散反射する。この拡散反射光の一部を受光レンズに通して光位置検出素子（PSD）上に焦点を結ばせると、検出距離によって焦点が光位置検出素子上を移動するので、その移動距離から変位を測定する方法である。しかし、測定限界は、2 μm 程度である。

次に、光干渉法は確立された技術であり、ターゲットの変位、速度、振動、距離などを測定するために、製造現場や研究室などで広くもちいられている。これは、機械工具の制御、形状測定、振動測定などに応用されている。この技術は、レーザ光を使用したレンズ、プリズム、鏡などの光学系装置で構成され、同一波長の2光線間の光路差が半波長の整数倍になるときに干渉光強度が強弱を繰り返すので、変位測定においては、変位量を使用光波長のオーダーで計測することが可能であり、半波長以下の変位量をnm程度まで検知することができる。光干渉法による計測には、ホモダイン干渉法、光ヘテロダイン干渉法、共焦点ファブリ-ペロー干渉計[3]、時間差干渉法[4]などがある。代表的な2光線方式のマイケルソン干渉計は、レーザ光をプローブ光と参照光の二つに分け、ターゲットで反射散乱したプローブ光と参照光を重ねあわせて干渉させ、その干渉強度の変化から変位や振動を測定する方法である。次に、光ヘテロダイン干渉法は、光周波数の異なる二つのレーザ光を用意し、一方をプローブ光としてターゲット表面で反射散乱させ、その反射散乱光ともう一方の周波数変調を受けた参照光とを干渉させ、その周波数差のビート信号の位相変位をもとのキャリア信号の周波数を基準として測定し、その値から変位を求める方法である。これは、主に低周波の機械振動の非接触計測に用いられる。そして、共焦

点ファブリ - ペロー干涉計は、反射率 90～99%の反射鏡を対向させた構造になっており、その反射鏡の間をレーザ光が多重反射すると、きわめて狭帯域の光バンドパスフィルタとして働く。この反射鏡の間隔を調節することにより、透過する光周波数を調節することができる。超音波領域の振動の検出には、レーザ光が 50%程度透過するようにすれば、ドップラー効果によるプローブ光の周波数変調が透過光量の変化として得られるので、その変化から変位を求める方法である。時間差干涉法は、ターゲット表面でレーザ光を反射させた後、そのビームを二つに分け、一方の光路長を大きく取り、重ね合わせる。その二つのビーム間に時間差を与えると、干涉光の強度変化が、振動変位の時間微分、すなわち振動速度に比例するので、その変化から変位を求める方法である。しかし、この方法は、光学系が大きくなる欠点がある。このようないくつかの光干涉法による計測があげられるが、これらは光学系の調整が困難で、外部振動に弱く、大型で高価である。

これらの光干涉法が確立されてまもなく、ターゲットで反射散乱したレーザ光の一部を再びレーザの共振器内に戻り光として戻すことによって、元のレーザ光の周波数や振幅に変化を与える新しい技術が現れた。これは、自己結合干涉法、自己混合干涉法または誘導変調干涉法などと呼ばれるものである。レーザから発振されたレーザ光がターゲットで反射散乱し、その一部がレーザの共振器内に戻ってくるまでの間、レーザ光は精度の良い検出器の役割をする。この原理が最初に実証されたのは、ガスレーザを使用して、ターゲットが移動するときに発生するドップラーシフトを検出したことであった[5]。更に技術革新をもたらしたのが、半導体レーザによるこの自己結合効果を使用した干涉法である[6,7]。安価に手に入れることができるファブリ - ペロー型半導体レーザによる自己結合効果を利用した非接触型のセンサの応用が 1986 年から科学文献に表れるようになり[7,8]、速度計[9-11]、振動計[12-14]、距離計[15-18]が研究されてきた。速度計の研究では、レーザドップラー速度計と呼ばれているドップラー効果を利用したセンサ[7]や波長領域が赤から近赤外の半導体レーザを使用して移動する鏡、スピーカの振動膜[10]、流体[11]などの速度を計測するセンサなどが研究されてきた。振動計の研究では、周波数変調したレーザ光をター

ゲットに照射し、センサの出力から振動振幅と振動周波数を計測するセンサ[12]や、レーザドップラー速度計を利用して振動振幅などを計測するセンサ[14]などが研究されてきた。距離計の研究では、三角波変調の代わりに正弦波信号で変調をかけたもの[15]、マイケルソン干渉計を用いて基準を持つことにより温度特性が小さいセンサ[17]、ファブリーペロー型 LD の代わりにモードホップが起きにくい VCSEL を用いモードホップによる誤差の少ないセンサ[18]などが研究されてきた。それは、半導体レーザによる自己結合効果を使用した干渉法の利点に次のようなものがあるからである[19]。

- (1) 外部干渉系が無いいため、構造が簡単になり、安価で小型の装置となる。
- (2) 半導体レーザ内蔵のフォトダイオードを使用して、信号を検出するので、外部受光器を必要としない。
- (3) この干渉法はコヒーレント光による検出のため、センサ感度が非常に高い。
- (4) 光が拡散しやすい粗いターゲット表面でも、この干渉法が確実に使用できる。
- (5) ターゲットの変化に対する情報がレーザ光によって運ばれ、またレーザ光のどの部分からでも、その情報を得ることができる。

半導体レーザの自己結合効果を利用したこの干渉法は、このように多くの利点を持つが、上で述べたこれらの振動計は使用する半導体レーザの発振波長の半波長以上の振動振幅に対してのみ精度の良い検出ができる。つまり、これらのセンサは数百 nm 以下の振動振幅に対しては、精度の良い測定ができない。それは、センサの出力信号が、ターゲットの振動振幅によって変化するだけでなく、ターゲットで反射する戻り光量の変化によっても変化するからである。そこで、これらの問題を解決するために、ターゲットの反射率やレーザ光の入射角などによる戻り光量の変化に関係なく微小振動振幅と振動周波数を測定できるように、基準信号を持った小型で構造が簡単なセンサシステムに関する研究を行った。

1.2 本研究の目的

ナノ技術の進歩に伴い、半導体集積回路、フォトニクス結晶、MEMS などの製品を大量に製造する過程において、品質の維持やコスト削減のために 10nm 程度の微小振動を常に監視するセンサが必要とされる。そこで、本研究は製造過程で発生するターゲットの振動周波数が数 kHz 以下で振動振幅が数 nm 以下の微小振動を非接触で検出できるセンサの開発を目標とした。

このセンサは、前節の半導体レーザによる自己結合効果を使用した干渉法の利点もあわせ持ち、半導体レーザの発振部と検出部が一体型のため、外部干渉系が無く、外部振動に強いものとなる。また、発光、干渉、検出を半導体レーザと半導体レーザ内蔵のフォトダイオードのみで行うため、小型で構造が簡単で安価なものとなる。ターゲットの振動が大きい時には半波長以上振動する部分の出力振幅が揃うため、これを基準として振動振幅の測定が可能であるが、ターゲットがレーザの発振波長の半波長以下の微小振動をする時、その振動はターゲットの入力信号と同じ周期の振動をするので、出力信号の変化の原因が、ターゲットの反射率やレーザの入射角などの変化による戻り光量の違いであるのか、ターゲット自身の振動振幅の変化であるのかが分からないため、正確な振動検出ができない。そこで本研究では、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とターゲット間の距離を意図的に変化させ、基準となる信号を作りだした。この基準信号とセンサ出力信号を比較することによって、ターゲットの振動振幅を求めた。また、干渉波形は正弦波関数であるので基準信号に対してどの位置で振動しているかによって出力信号の大きさが変化する。そこで、センサ部とターゲット間の距離を変化させ、センサ出力信号が基準信号に対して中心で振動するように調整し、センサ感度が最大時の出力信号を得るようにした。また、これらの基準信号発生とセンサ感度最大時の出力検出は、手動式による方法とマイクロコンピュータを利用した自動式による方法の両方で行い、自動式の優位性を評価した。

よって、本論文では、半導体レーザの自己結合効果を用いた微小振動センサを考案し、基準信号によってターゲットからの戻り光量に関係なくタ

ターゲットの振動が 0.5kHz から 3.0kHz の間で、最小約 3nm までの微小振動振幅とターゲットの振動周波数を測定できるセンサシステムの成果について述べる。

1.3 本論文の概要

第 1 章の序論では、光エレクトロニクスやナノ技術などについて触れ、微小振動計の種類や特徴など本研究の背景について言及し、本研究のセンサシステムの特徴や必要性など本研究の目的を述べる。

第 2 章の微小振動センサの原理では、本研究に用いた半導体レーザの原理、特徴及び特性について述べ、本研究の測定原理である半導体レーザの自己結合効果と振動振幅値の測定方法及びセンサ感度の調整方法などの微小振動センサの原理について述べる。

第 3 章の実験装置では、ターゲットの微小振動測定を手動式で行った場合と自動式で行った場合のそれぞれの実験装置と測定方法について述べ、更に自動式の特徴についても言及する。

第 4 章の実験結果と考察では、手動式と自動式による振動振幅測定結果と考察を述べ、手動式においては、ターゲットが半導体レーザの半波長以上と半波長未満の振動をしているときの振動振幅の測定結果と考察を述べる。また、微小振動センサの周波数依存性と色依存性についても述べる。更に、自動式においては、ターゲットの振動が半波長未満のときの振動振幅測定結果と考察を述べ、手動式と同じく本センサの周波数依存性と色依存性についても同様に述べる。また、それらの測定結果の検証をするために、静電容量式変位計でターゲットの振動振幅を測定した結果との比較を述べる。

第 5 章の総括では、手動式と自動式の測定結果の概略を述べ、それらを比較することによって、自動式の微小振動センサの優位性を述べる。また、将来展望では、本研究の微小振動センサの改善点などを述べる。

参考文献

- [1] T. H. Maiman : Stimulated optical radiation in ruby, *Nature* 187, pp. 493-494, 1960
- [2] 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 1993
- [3] J. P. Monchalin : Optical detection of Ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Perot interferometry, *Appl. Phys. Lett.* 47 No. 1, pp. 14-17, 1985
- [4] R. J. Emrich : *Methods of Experimental Physics, Vol. 18 Fluid Dynamics Part B*, Academic Press, pp. 606-610, 1981
- [5] J. M. Rudd : A laser Doppler velocimeter employing the laser as a mixer-oscillator, *J. Phys. E, Sci. Instrum.* 1, pp. 723-726, 1968
- [6] S. Donati : Laser interferometry by induced modulation of the cavity field, *J. Appl. Phys.* 49, pp. 495-497, 1978
- [7] S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida and M. Sumi : Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode, *Appl. Opt.* 25, pp. 1417-1419, 1986
- [8] G. Beheim and K. Fritsch : Range finding using frequency modulated laser diode, *Appl. Opt.* 25, pp. 1439-1442, 1986
- [9] P. J. Groot, G. M. Gallatin, and S. H. Macomber : Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode, *Appl. Opt. Vol. 27, No. 21*, pp. 4475-4480, 1988
- [10] L. Krehut, J. Hast, E. Alarousu, and R. Myllyla : Low cost velocity sensor based on the self-mixing effect in a laser diode, *Opto-Electronics Rev. Vol. 11, No. 4*, pp. 313-319, 2003
- [11] S. Sudo, Y. Miyasaka, K. Kamikariya, K. Nemoto, and K. Otsuka : Detection of small particles in fluid flow using a self-mixing laser, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45, pp. 8135-8145, 2006
- [12] T. Gharbi, A. Courteville and A. Chebbour : Backscatter-modulated laser diode for low-frequency small-amplitude vibration measurement, *Appl. Opt. Vol. 36*, pp. 8233-8237, 1997

- [13] G. Giuliani, S. Donati, and L. Monti : Self-mixing laser diode vibrometer with wide dynamic range, Proc. SPIE Vol. 4827, pp. 353-362, 2002
- [14] L. Scalise : Self-mixing feedback laser Doppler vibrometry, Proc. SPIE Vol. 4827, pp. 374-384, 2002
- [15] 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ーの自己結合効果を利用した距離計 電気学会論文誌 C Vol. 117, No. 7, pp. 954-961, 1997
- [16] G. Mourat, N. Servagent and T. Bosch : Distance measurements using the self-mixing effect in a 3-electrode DBR laser diode, Opt. Eng. 39, pp. 738-743, 2000
- [17] 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 C Vol. 121, No. 12, pp. 1819-1824, 2001
- [18] 坂本明紀・津田紀生・山田諄 : 面発光レーザーを用いた自己結合型距離計の特性 電気学会論文誌 C Vol. 126, No. 12, pp. 1454-1459, 2007
- [19] G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati and T. Bosh : Laser diode self-mixing technique for sensing applications, J. Opt. A, Pure Appl. Opt. 4, pp. S283-S294, 2002

第2章 微小振動センサの原理

本章では測定に用いた半導体レーザの原理[1]や特徴[1]及び特性[2]を紹介し、測定原理である半導体レーザの自己結合効果と振動振幅値の測定方法及びセンサ感度の調整について述べる。

2.1 半導体レーザ

2.1.1 半導体レーザの基本原理

半導体レーザは、半導体中の電子の光学遷移による光子の誘導放出を利用した光波の発振器及び増幅器である。

原子や分子中の電子のエネルギーは、離散的な値をとりエネルギー準位を構成する。図 2.1(a)に示すように、エネルギー差が E の 2 つの準位の上の準位が電子に占有されていて下の準位が占有されていないとき、 h をプランクの定数として

$$\begin{aligned} E &= \hbar\omega \\ \hbar &= h/2\pi \end{aligned} \quad (2.1)$$

を満たす角周波数 ω の光が入射すると、光強度に比例する単位時間当たりの確率で電子は下の準位に遷移し、入射光と同じモードすなわち同じ周波

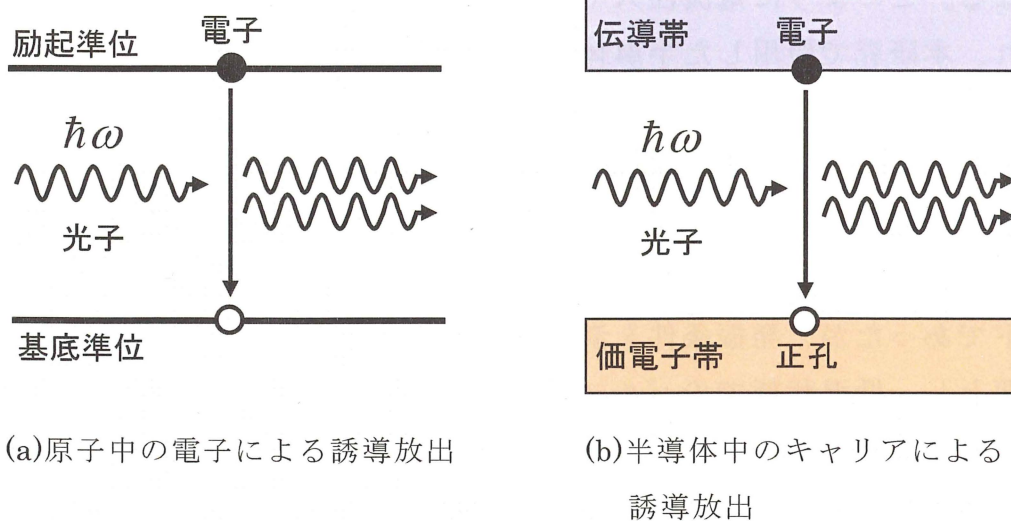


図 2.1 電子の光学遷移による光子の誘導放出概念図

数で同じ進行方向の光子が放出される。これが原子中の誘導放出である。半導体中の電子のエネルギー準位は離散的ではなくバンド構造を形成するが、図 2.1(b)のように伝導帯に多数の電子があり、価電子帯に多くの正孔があるとき、バンドギャップエネルギー E_g よりわずかに大きな E に対して式(2.1)を満たす光が入射すると電子遷移と光子の放出が起きる。これが半導体中の誘導放出である。また、入射光がないときでも光子の放出がある自然放出もある。一方、電子が下の準位を占有していて上の準位が占有されていないときは、光入射により逆の電子遷移と光子の吸収が起きる。量子論によれば、この誘導放出と吸収の確率は等しい値である。多数の電子を含む系を考えると、熱平衡状態では、電子のエネルギー分布はフェルミ-ディラック分布に従い、高い準位を占める電子の数は低い準位のそれより少ないので、全体としては光が吸収される。しかし、系をエネルギー供給で励起し反転分布を実現すれば、正味の光子放出がなされ光が増幅される。

半導体での反転分布は、価電子帯の電子を伝導帯に励起して多数の電子・正孔対を形成することで実現される。これは、光照射や電子ビーム照射によっても実現されるが、実用的なレーザデバイスを実現する上で最も有効な方法は、半導体で PN 接合を形成し、これに順方向電流を流して接合近傍の空乏層内にエネルギーの高い少数キャリアを注入することである。P 型領域では、少数キャリアである電子が N 型領域から注入されると電気的中性条件を満たすために、多数キャリアである正孔も増加して、励起状態になる。このように電流注入で励起する半導体レーザは注入型レーザと呼ばれ、本研究で使用した半導体レーザである。

2.1.2 半導体レーザの基本構造

本研究に使用した半導体レーザの基本構造を説明する。最初に発振が実現された注入型レーザは、単一の結晶材料 GaAs からなる PN 接合のダイオードであったが、発振条件を満たすために非常に大きな密度の注入電流を必要とし、低温状態でのパルス発振に限られていた。その後、室温連続発振をはじめ実用的な性能が得られようになったのが、ダブルヘテロ構造の半導体レーザである。その概略の構造を図 2.2 に示す。ダブルヘテロ構造はレーザ活性材料である GaAs を厚さ 100nm 程度の薄い層とし、これ

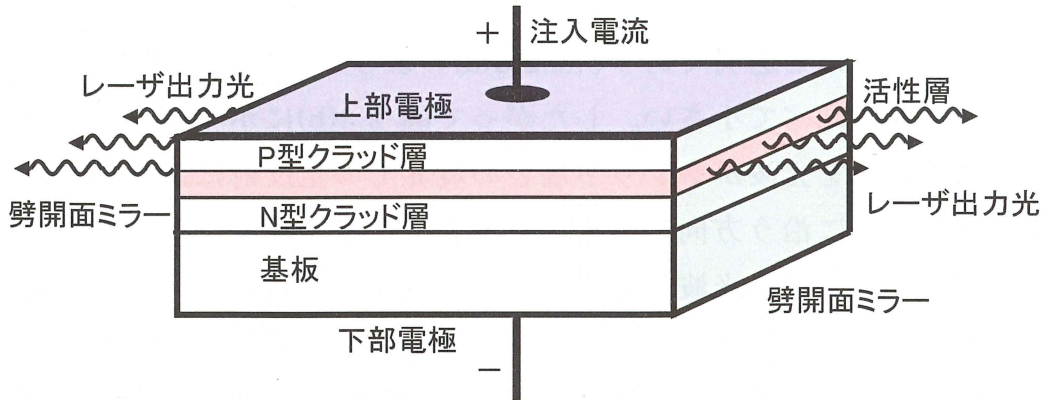


図 2.2 ダブルヘテロ構造注入型半導体レーザの構造

よりバンドギャップエネルギーの大きな AlGaAs の層で挟んだ 2 重の異種材料間接合を持つ構造であり、GaAs 基板上の多層結晶成長で製作される。

GaAs 層は活性層、AlGaAs 層はグラッド層で、両側のグラッド層は、それぞれ P 型と N 型にドーピングされている。

このようなダブルヘテロ構造は、レーザ動作に必要な電流の低減にきわめて有効な 2 つの機能を持っている。第 1 の機能は、キャリアの閉じ込めである。バンドギャップエネルギーの違いにより電子に対するポテンシャルの障壁が形成されるので、注入されたキャリアは接合から離れて拡散することなく活性層内に高密度に閉じ込められる。このため比較的小さな密度の注入電流で光増幅に必要な反転分布が得られる。第 2 の機能は、光導波路としての機能である。ク

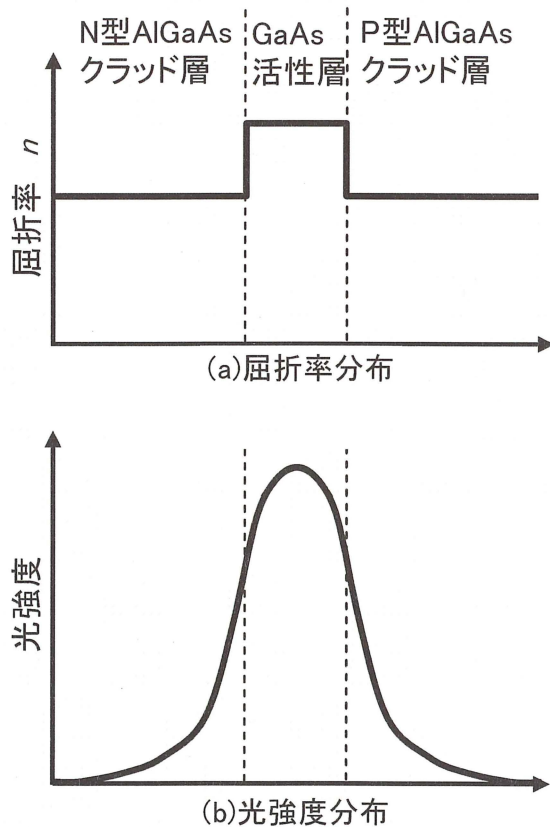


図 2.3 ダブルヘテロ構造半導体レーザにおけるキャリアと光波の閉じ込め

ラッド層はバンドギャップエネルギーが大きいので活性層で増幅される波長の光に対して殆ど透明であり、図 2.3(a)のようにクラッド層の屈折率は、活性層のそれと比べて小さい。したがって図 2.3(b)に示すように屈折率の大きな活性層内を光波がクラッド層との境界での全反射により閉じ込められて、活性層面に沿う方向に伝搬する導波モードとなる。屈折率が一樣なバルク半導体内では、光波は回折により発散するが、ダブルヘテロ構造内の導波モードは、増幅利得が生じている $1\ \mu\text{m}$ 以下の薄い活性層内と近傍を数 $100\ \mu\text{m}$ 以上の長い距離に渡って伝搬するので、非常に有効な光増幅がなされる。

2.1.3 半導体レーザーの特徴

半導体レーザーは、レーザー光の特徴である単色性、集光性、指向性、可干渉性などの他に、次のような特徴を持つ。

- ① 小型・軽量である。
- ② 高効率である。
- ③ 長寿命、高信頼性である。
- ④ 直接電流変調が可能である。
- ⑤ 劈開面を共振器とすることができる。
- ⑥ 発振波長は、可視光から遠赤外に及ぶ。
- ⑦ 温度・圧力・電流及び電界などにより周波数や出力を制御できる。

本研究では、特に①、⑤の特徴を利用して、外部干渉系を持たない小型の微小振動センサを開発した。

2.1.4 半導体レーザーの基本特性

(1) 順方向電流－光出力特性

半導体レーザーに順方向電流を流していくと、ある電流値を超えたときに半導体レーザーは急激に光出力が増大する。この電流値を閾値電流 I_{th} と呼び、自然発光域から誘導放出域に変わる境となる。図 2.4 のように、この閾値電流を超えた領域においては、その光出力は半導体レーザーの順方向電流に比例して増加する。光出力は I_{th} を境に急激に増大し、素子はレーザー発振の状態になる。室温での閾値電流は $10\text{mA}\sim 100\text{mA}$ の範囲であるもの

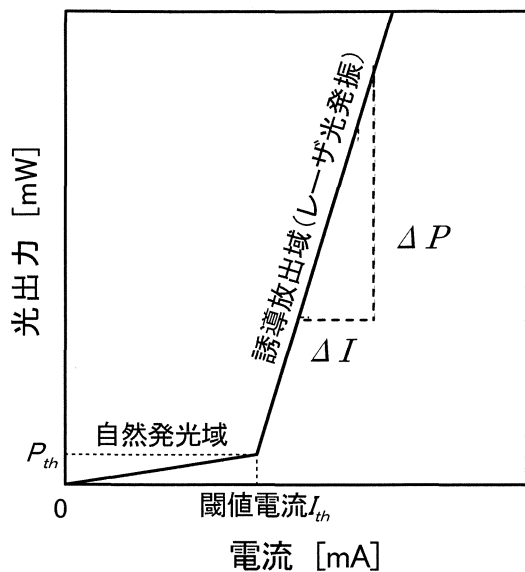


図 2.4 半導体レーザの静特性

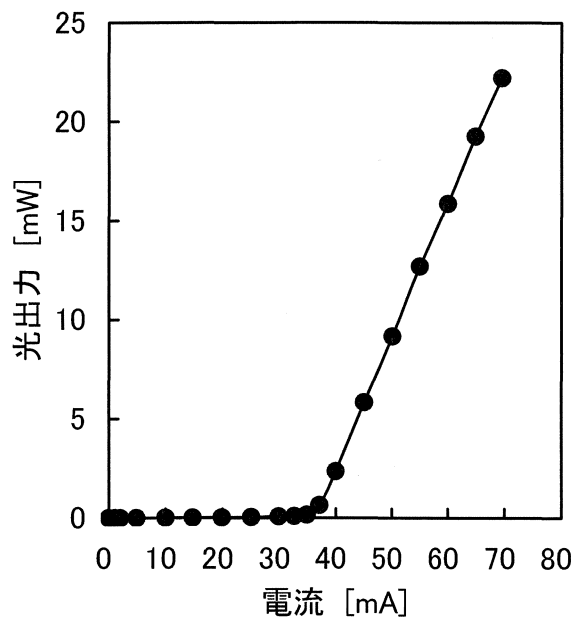


図 2.5 HL7859MG の静特性

が多い。本研究で使用した HITACHI 製半導体レーザ HL7859MG の閾値電流は、図 2.5 に示すように 35mA である。図 2.4 で示すように、誘導放出域での電流の増加分を ΔI 、それに対する光出力の増加分を ΔP とすると、順方向電流－光出力特性の傾き

$$\eta_D = \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (2.2)$$

は微分効率(スロープ効率) η_D となり、閾値電流が低く微分効率が高いほど優れた素子となる。本研究で使用した HL7859MG の微分効率は約 0.7W/A である。微分効率が高い素子ほど、わずかなサージ電流で破壊しやすいので注意を要する。本研究では、順方向電流 55mA、光出力 12mW で HL7859MG を動作させた。

(2) 発振波長の温度依存性

半導体レーザの一定駆動電流時における発振波長の温度依存性は、図 2.6 (a) のようになる。緩やかな勾配部分における温度依存性は主として活性領域内の屈折率の温度依存性によるもので、変化率 $0.05\text{nm}/^\circ\text{C} \sim 0.08\text{nm}/^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0.8 \sim 1.3\mu\text{m}$) の割合で波長が変化する。また、縦の破線

で示されている縦モードの飛びは禁制帯幅の変化（利得が最大となる波長の温度変化）によるもので、その変化率は $0.2\text{nm}/^\circ\text{C} \sim 0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0.8 \sim 1.3\mu\text{m}$) の程度である。半導体レーザの発振波長のこのような温度依存性は、他のレーザと比べて大きい。また、活性領域内の温度は周囲温度だけでなく半導体レーザの駆動電流によっても変化するので、半導体レーザを使用するに当たっては常にこれらを考慮に入れる必要がある。本研究で使用した半導体レーザの温度依存性を図 2.6(b)に示す。光出力 P_0 は 20mW である。図(b)から分かるように、発振波長は異なるが図(a)と同様な変化を示している。本研究では温度依存性によって、発振波長がなるべく変化しないように、室温や駆動電流を一定にした。

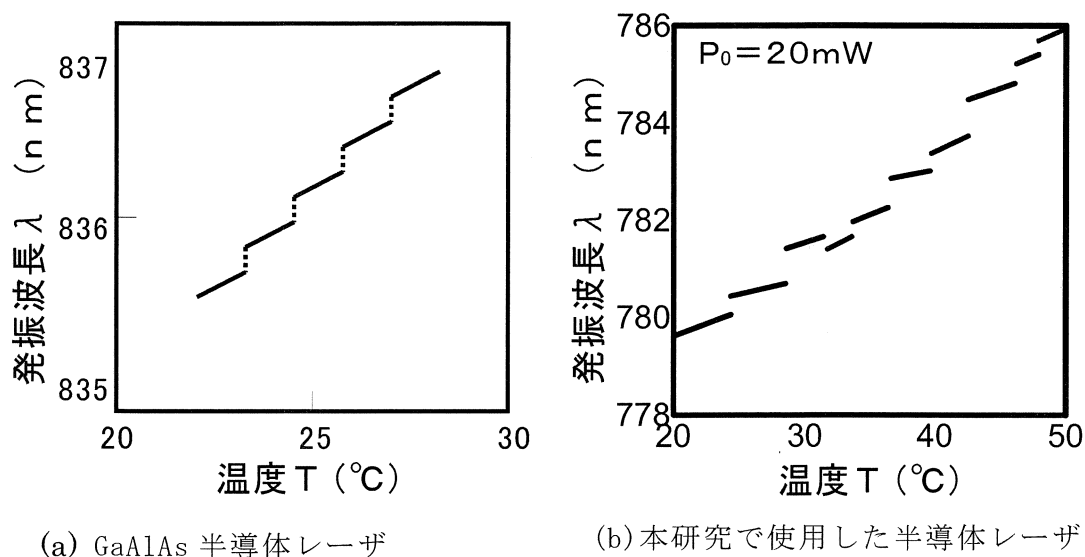


図 2.6 半導体レーザの発振波長の温度依存

2.2 半導体レーザの自己結合効果

半導体レーザの特徴の一つは、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、劈開面における光の反射率は約 30%と低く、逆に透過率が高いため、自ら発振したレーザの出力光が外部の反射面に当たり散乱光の一部が戻り光となって劈開面を透過して活性領域内に戻ることになる。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、出力に雑音（戻り光ノイズ）を生じる。この戻り光ノイズによる半導体レーザの出力変化は、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[3]。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、半導体レーザ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変化となるためである。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微小振動測定に応用した。この自己結合効果を用いることにより、センサ部が半導体レーザと集光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自己結合効果が現れるため、対象物が粗面であっても、また金属表面以外でも微小振動測定が可能である。

本研究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[3]を図 2.7 に示す。半導体レーザから発振されたレーザ光は外部反射面（測定対象物）に照射され反射散乱する。その散乱光の一部が半導体レーザの劈開面を透過して活性領域内に戻る。この時、活性領域内のレーザ光と戻り光が活性領域内で干渉を起こし、レーザ出力がわずかに増減する。このレーザ出力がわずかに増減する現象を自己結合効果という。レーザ出力が最も増加するのは、半導体レーザの出射面と外部反射面との距離 L と半導体レーザの発振波長 λ との関係から、式(2.3)の共振条件を満たした時である。 n は定在波数(整数)である。

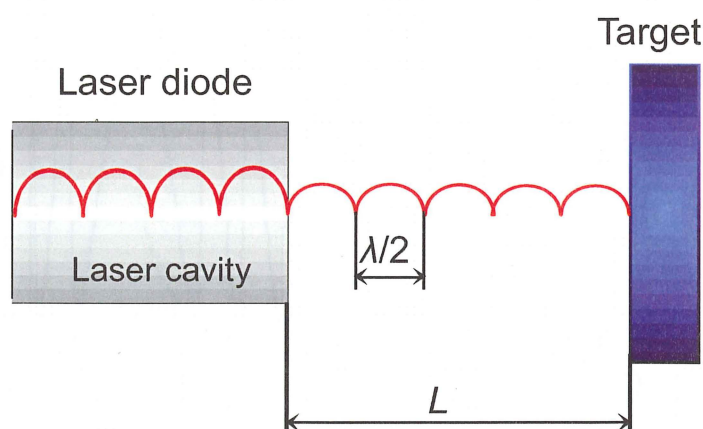


図 2.7 複合共振器モデル

$$L = \frac{\lambda}{2} \times n \quad (2.3)$$

この自己結合効果を微小振動測定に利用した。

2.3 微小振動振幅と光出力の関係

ここでは、センサ部の半導体レーザ内蔵のフォトダイオードにより検出される干渉波形とターゲットの振動振幅の関係について述べる。まず、ターゲットの振動が、半導体レーザの発振波長の半波長以上の振動をしているときの入力信号と出力信号の観測波形を図 2.8 に示す。図 2.8 の上段に示す入力信号はターゲットを振動させるための正弦波信号であり、ターゲットはこの入力信号に比例して振動する。また、下段に示す出力信号はセンサ部のフォトダイオードにより検出される信号である。図 2.8 から分かるように、入力信号の半波長毎に出力の干渉波形が得られ、入力信号の変位が大きいところでは密に、変位の小さいところでは粗になり、破線の楕円で囲まれた密の部分にはターゲットが半波長以上振動したことを表している。この 1 波が半導体レーザの 1/2 波長の変位を示している。この破線で

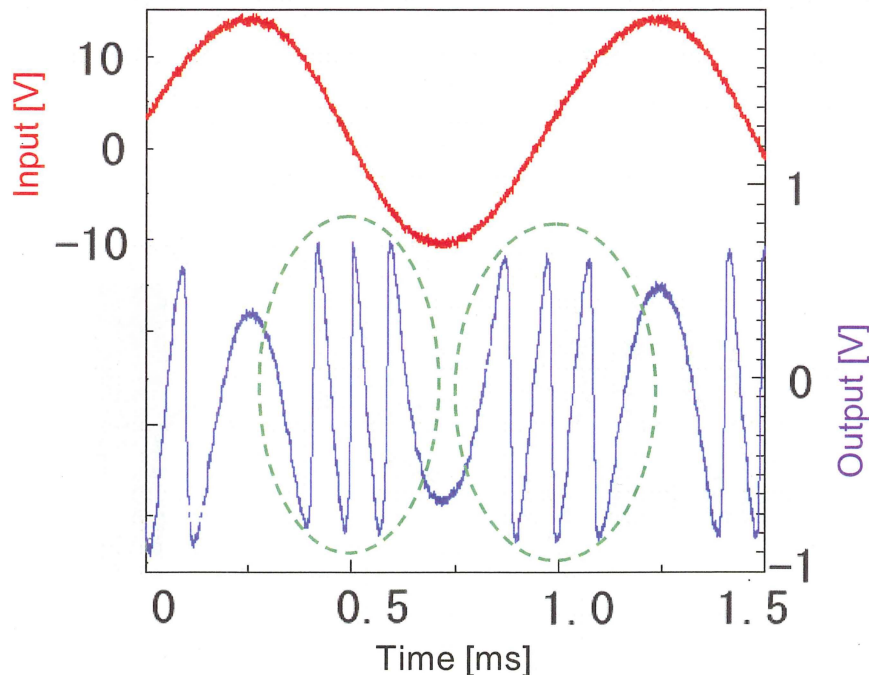


図 2.8 半導体レーザの半波長以上の振動時における入出力観測波形

囲まれている一定振幅部分の波が基準となるので、この一定振幅部分の波数とその両側の山と谷で折り返している半端な端数を加えることによって、ターゲットの振動振幅値を算出する事ができる。

次に、ターゲットの振動が半導体レーザの発振波長の半波長未満の振動をしているときの入力信号と出力信号の観測波形を図 2.9 に 2 例示す。図 2.9 の上下段とも、センサの出力信号はターゲットの入力信号と同じ周期の振動を示し、半波長以上の時のような比較対象が無い干渉波形となり、ターゲットの振動振幅の検出は困難なものとなる。それは、出力信号が変化しても、ターゲット自身の振動振幅の変化なのか、それともターゲットの反射率やレーザ光の入射角などによる戻り光量の変化なのか分からないためである。半波長未満の振動振幅を検出する際には、基準となる比較対象が必要となる。そこで、本研究ではセンサ部を意図的に半波長以上動かすことにより、ターゲットが半波長以上振動した時に発生する図 2.8 の破

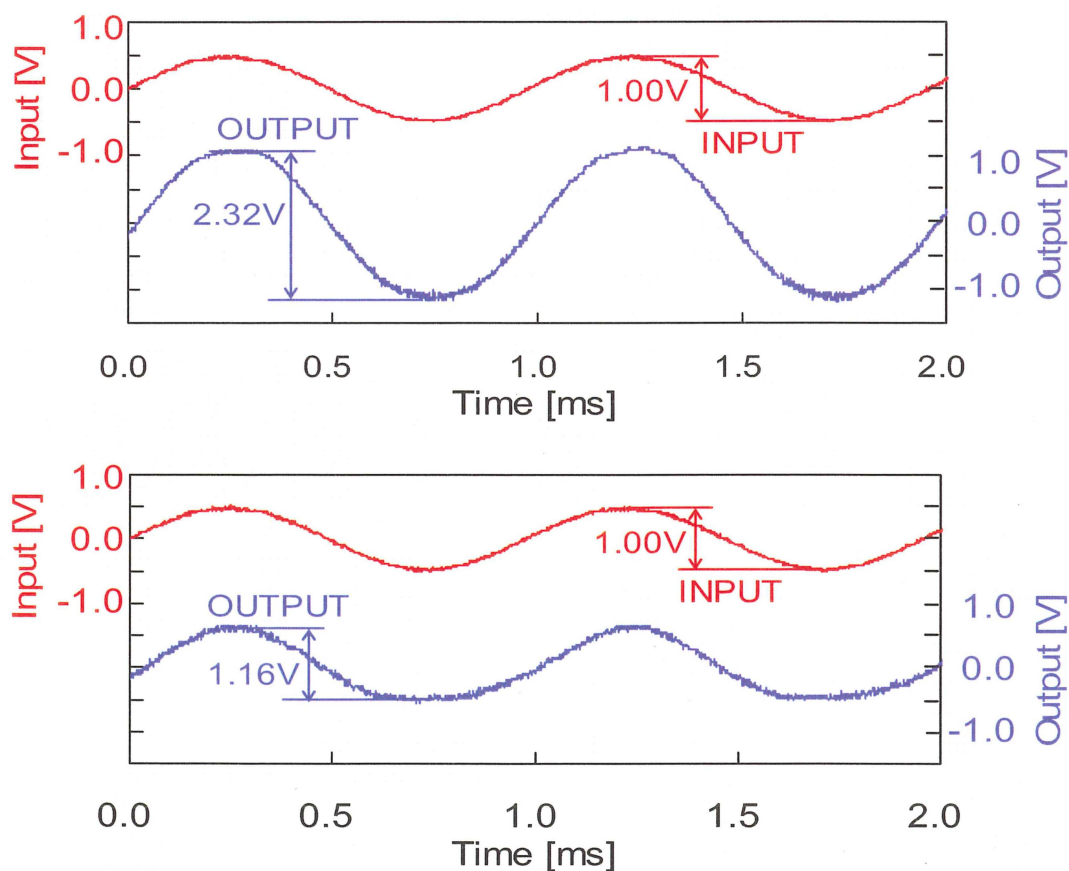


図 2.9 半導体レーザの半波長未満の振動時における入出力観測波形

線の楕円で囲まれた部分と同じ基準信号を作り出した。これによって、レーザの入射角やターゲットの反射率などに関係なく、振動振幅値の算出が可能となる。

更に、図 2.9 の上下段の入出力波形は、ターゲットの入力信号が同じ時の干渉波形であるが、図から分かるように、出力電圧の大きさに違いが生じている。この場合、2 倍の違いがある。これは、センサとターゲット間の距離によってセンサの感度が変化するためである。図 2.10 に示すように、干渉波形が正弦波関数であるため、位相差が 0° または 180° 付近のような最も変化の大きいところでターゲットが振動しているのか、位相差が 90° 付近のような波形の折り返し部分である変化の小さいところでターゲットが振動しているのかの違いによるものである。よって、半波長未満の微小振動を正確に測定するためには、センサ感度が常に最大の位置で測定しなければならない。そこで本研究では、センサとターゲット間の距離を変化させ、センサ感度が最大になった時の出力信号を得るようにした。

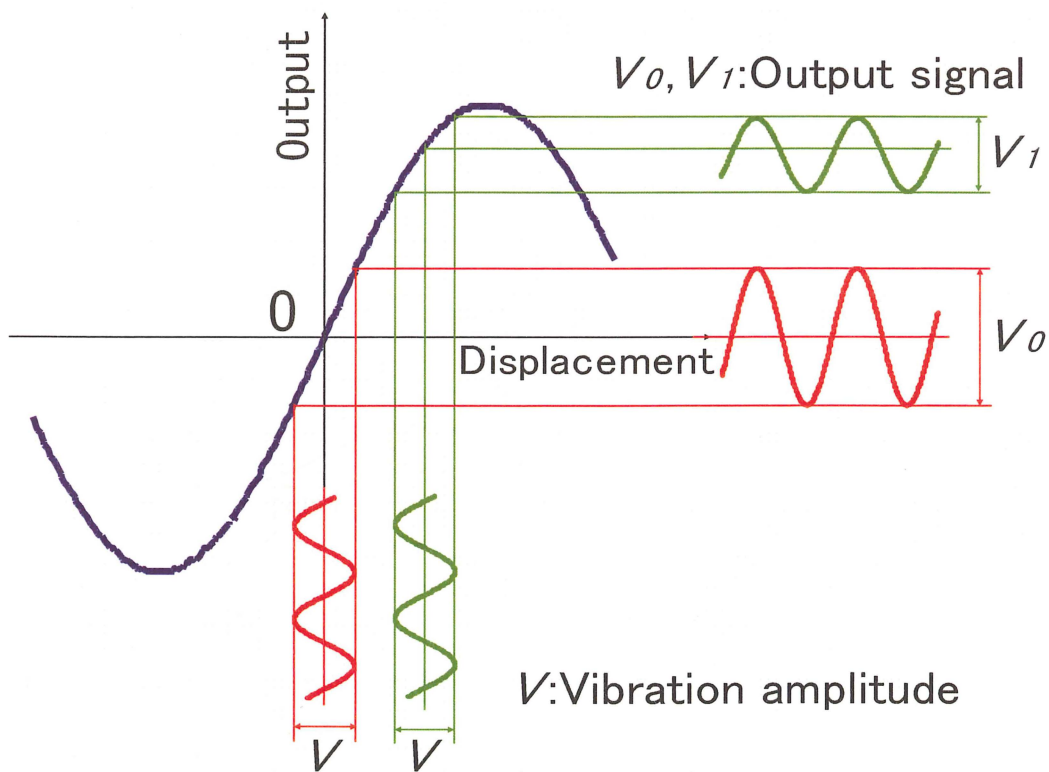


図 2.10 同じ振動振幅に対して異なる出力波形が現れる理由

2.4 微小振動振幅の算出方法

ここでは、ターゲットの振動振幅が半導体レーザの半波長以上のときと半波長未満のときの振動振幅算出方法について述べる。手動式による振動振幅測定と自動式による振動振幅測定では、基準信号の振幅を得るためにセンサに印加する入力信号波形が異なるのみで、算出方法は全く同様なので、手動式と自動式の算出方法の区別はここではしない。更に、より正確に振動振幅を算出できる正弦波補正についても述べる。

2.4.1 半波長以上の振動振幅算出方法

ターゲットの振動振幅が半波長以上のときの振動振幅算出方法について述べる。図 2.11 のように赤色で示されているターゲットの圧電素子に印加される入力信号の半波長毎に出力の干渉波形が得られ、入力信号の変位が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。入力信号の谷から山、又は山から谷がターゲットの振動振幅となり、その振動が半導体レーザの半波長以上（図 2.11 の場合、およそ半波長の 3 倍）の振幅で振動すると、ほぼ一定振幅の信号部分が幾つか現れる。この一定振幅の大きさを A とし、この部分の波を基準とすることで、ターゲットの振動振幅を求

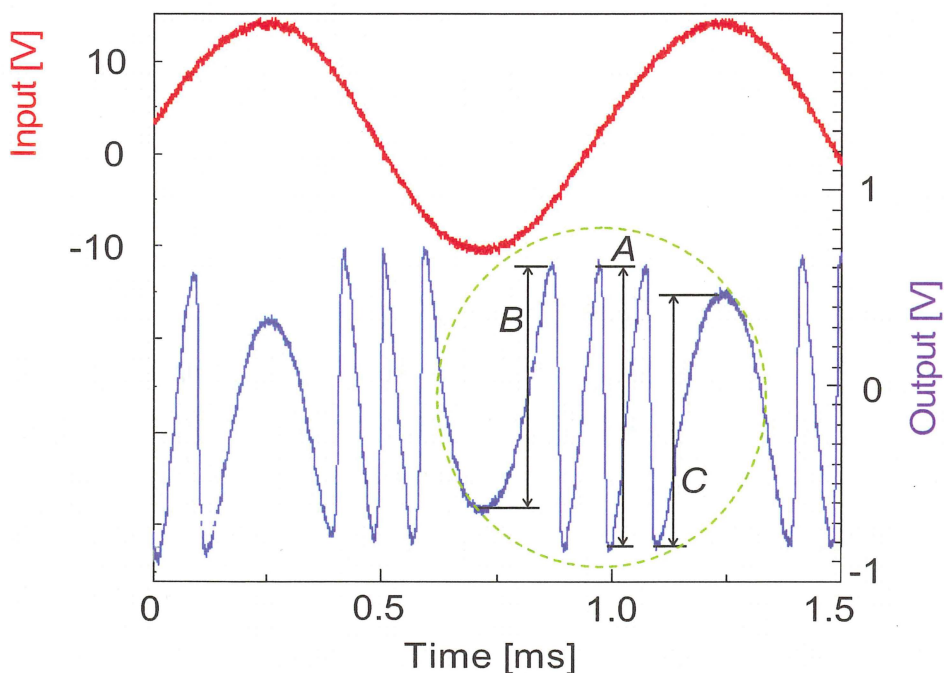


図 2.11 半導体レーザの半波長以上の振動振幅算出方法

めることができる。Aの部分、半導体レーザの1/2波長を表しているの
で、緑の破線内でAの部分と同じ干渉波形の波数 χ を数え、折り返された
部分については、基準の振幅Aと折り返された部分の振幅BとCとを比
較することでそれぞれの波数 χ_1 と χ_2 を求める。そして全体の波数を求め、
その波数と半導体レーザの半波長の積で振動振幅値Xが求まる。

$$X = (\chi + \chi_1 + \chi_2) \times \frac{\lambda}{2}$$

$$\chi_1 = \frac{B}{A} \times \frac{1}{2} \quad \chi_2 = \frac{C}{A} \times \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

測定振動振幅値を評価するに当たり、次のように偏差を求めた。まず、
ターゲットの振動振幅値は、14回の振動振幅測定を行い、その内のXの最
大値と最小値から数えて各2つずつを除外し、残りを $X_1 \sim X_{10}$ とし、式(2.5)
によりその平均値 \bar{X} とした。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^{n=10} X_n}{10} \quad (2.5)$$

次に、測定振動振幅値Xと振動振幅値の平均 \bar{X} の差の絶対値をばらつき誤
差 α とし、

$$\alpha = |X - \bar{X}| \quad (2.6)$$

偏差 β をばらつき誤差の平均 $\bar{\alpha}$ と振動振幅値の平均 \bar{X} の百分率で表した。

$$\beta = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{X}} \times 100 \quad (2.7)$$

2.4.2 半波長未満の振動振幅算出方法

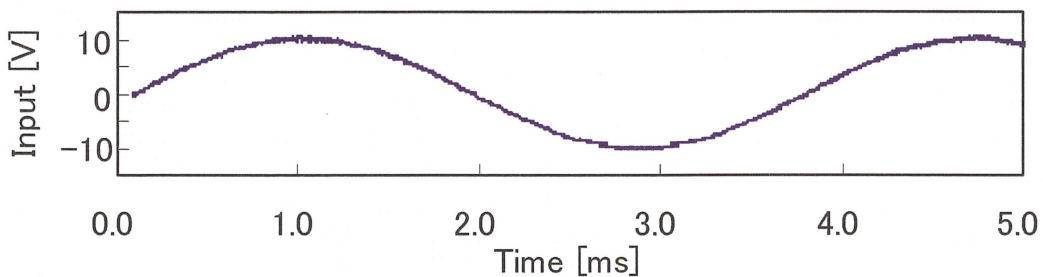
次に、ターゲットの振動振幅が半波長未満のときの振動振幅算出方法に
ついて述べる。図 2.12 は手動式によるセンサの各信号波形である。図
2.12(b)の基準信号を得るために、センサ駆動用圧電素子に図 2.12(a)の正
弦波電圧を印加し意図的にセンサ部を振動させ、ターゲットが半波長以上
振動するときと同じ基準となる振動振幅値Aを得る。この振動振幅値Aと
図 2.13のセンサ出力から得られる干渉波形の振幅Bとを比較することで、
半波長以上の振動振幅測定における波数に相当する値が求まる。そして、

半波長以上の振動振幅測定の場合は、干渉波形の1周期で振動振幅が $\lambda/2$ となるが、この場合は半周期であるため、 $\lambda/4$ を掛けて振動振幅値 Y が求まる。

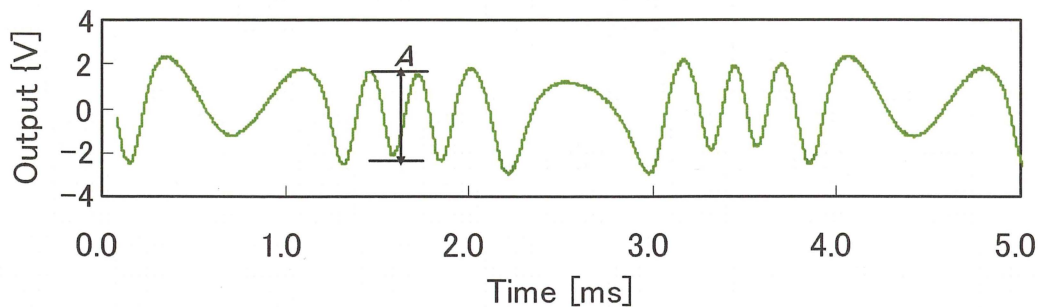
$$Y = \frac{B}{A} \times \frac{\lambda}{4} \quad (2.8)$$

ばらつき誤差と偏差は半波長以上の測定方法と同様にして求めることができる。

また、自動式によるセンサの各信号は図 2.14 のようになり、センサ駆動用圧電素子に印加する信号は、図 2.14(a) に示すようなパルス波である。手動式の場合、センサ駆動用圧電素子に印加する信号はファンクションジェネレータの出力信号を利用しているが、自動式の場合は、マイクロコンピュータと増幅回路で発生させた信号を使用して、意図的にセンサ部を高速で半波長以上動かしている。図 2.14(b) に示すように、ターゲットが半波長以上振動するときと同じ基準となる振動振幅値 A を得るので、手動式と同様にターゲットの振動振幅値などを求めることができる。



(a) センサ駆動用入力電圧



(b) 基準信号

図 2.12 手動式によるセンサの各信号波形

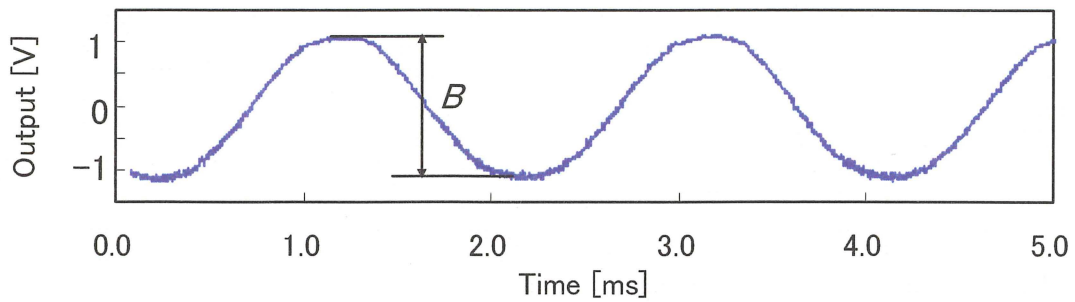
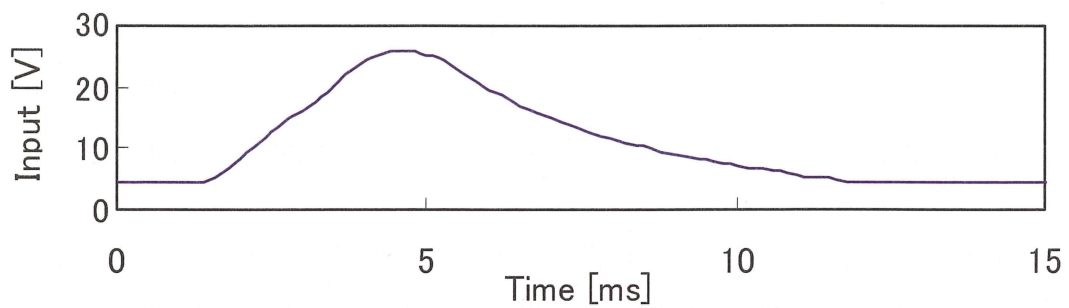
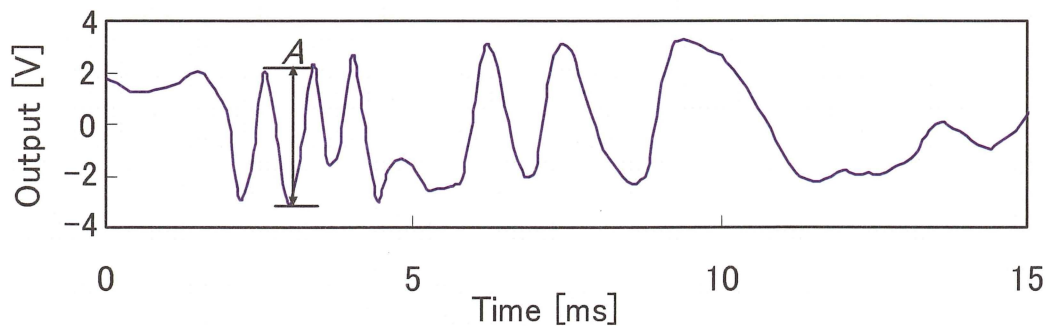


図 2.13 センサ出力信号波形



(a)センサ駆動用入力電圧



(b)基準信号

図 2.14 自動式によるセンサの各信号波形

2.4.3 正弦波補正による振動振幅算出方法

前項目によるターゲットの振動振幅算出は、図 2.15 で示したように干渉波形を三角波で近似して出力振幅比を算出する最も簡便な方法であるが、干渉波形は正弦波的に変化するので干渉波形の位相角から算出するより正確な方法を述べる。図 2.15 より基準信号の出力振幅を A 、干渉波形の出力

振幅を B 、ターゲットの変位による干渉波形の振動中心からの位相角を θ とすると、干渉波形は正弦波的に変化するので

$$B = A \sin \theta \quad (2.9)$$

と表される。図 2.8 で説明したように、基準信号の 1 波は、半導体レーザの発振波長の $1/2$ 波長を示しているので、ターゲットの振動振幅値 Y' は、式(2.10)のようになる。

$$Y' = \frac{2\theta}{\pi} \times \frac{\lambda}{4} \quad (2.10)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{B}{A}$$

研究当初は、前項目で述べたようにターゲットの振動振幅の算出を基準振幅 A と干渉波形の振幅 B との出力振幅比から求めていたが、広い範囲で正確に振動振幅値を測定するためには正弦波補正をする必要がある。従って、第 4 章の実験結果は特に断りがない場合以外は、全て正弦波補正でデータを処理したものである。

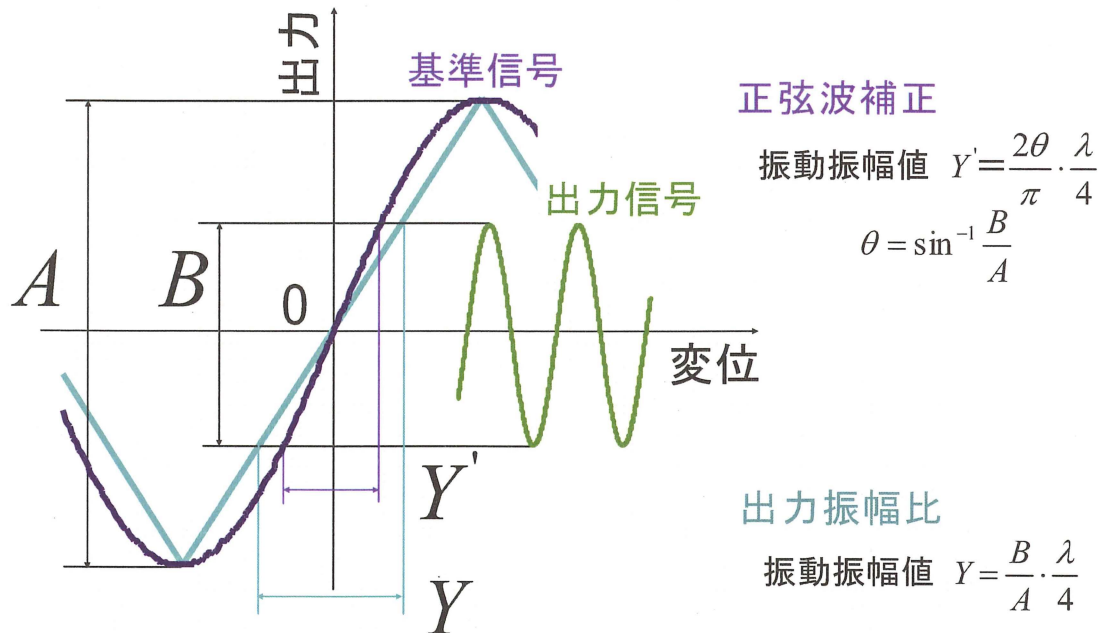


図 2.15 正弦波補正による半波長未満の振動振幅算出方法

参考文献

- [1] 栖原敏明：半導体レーザの基礎 共立出版株式会社 1998
- [2] 山口一郎・角田義人：半導体レーザと光計測 学会出版センター
1992
- [3] 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 C Vol. 117,
No.7, pp. 954-961, 1997

第 3 章 実験装置

本章では、ターゲットの微小振動測定を手動式で行った場合と自動式で行った場合のそれぞれについて、実験装置と測定方法について述べ、自動式の特徴についても言及する。

3.1 手動式の実験装置

手動式による微小振動検出に用いた実験装置の概略図を図 3.1 に示す。実験装置は、半導体レーザ(LD)と集光レンズのみで構成されているセンサ部、センサ部を動かすためのセンサ駆動回路と発振器、出力信号を検出するための電子回路とオシロスコープ、そしてターゲットから成っている。これらを長さ 180mm、幅 40mm のアルミ板の上に固定させ、実験を行った。

半導体レーザを連続発振させ、レンズで 20mm 先のターゲットに集光させ、ターゲットに対して垂直に照射させた。ターゲットからの戻り光と半

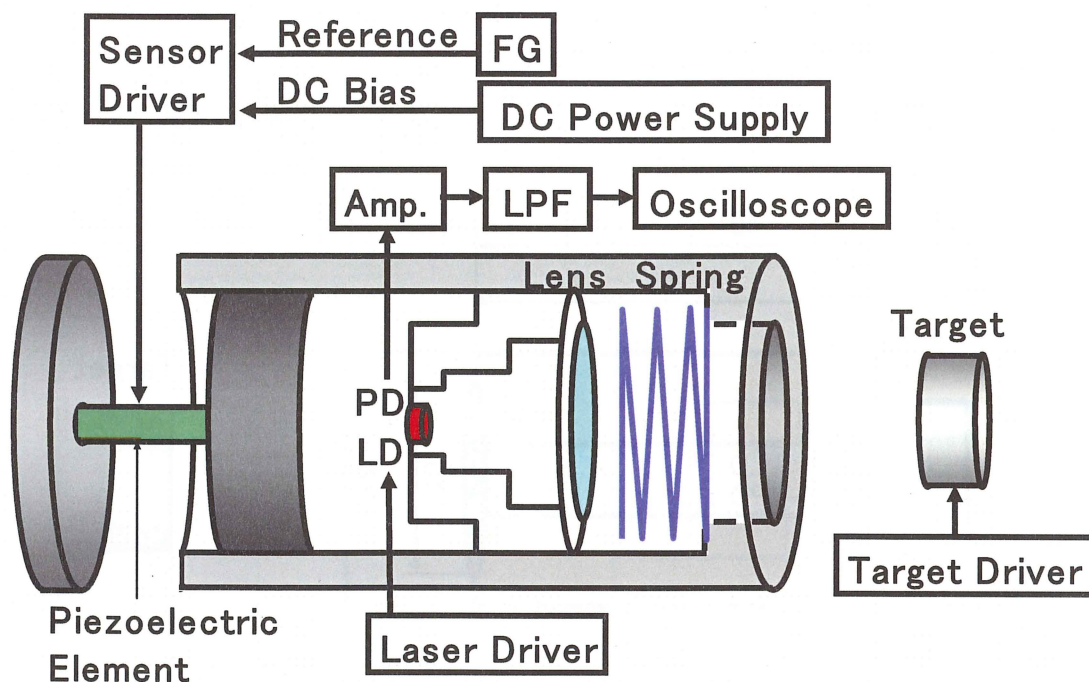


図 3.1 手動式の微小振動測定用実験装置

導体レーザの活性領域内のレーザ光との自己結合効果によって発生した干渉光を半導体レーザ内蔵のフォトダイオード(PD)で検出した。検出信号は、非常に小さいので増幅回路で信号を増幅させ、高周波雑音を除去するために、アクティブローパスフィルタを通して、オシロスコープで観察した。また、ターゲットの微小振動振幅値を算出するために、センサ駆動用圧電素子に正弦波電圧を印加し、センサ部を半波長以上動かして基準信号を発生させたり、センサ感度が最大になるように直流電圧を印加して最大出力信号を検出したりした。

これらの各装置の詳細を以降に述べる。

3.1.1 センサ部

試作したセンサ部の断面図を図 3.2 に示す。センサ部はフォトダイオードを内蔵した半導体レーザと集光レンズのみで構成されており、これらを直径 14mm、長さ 40mm の真鍮製円筒に収めた。使用した半導体レーザは、波長 780nm の HITACHI 製 HL7859MG である。半導体レーザを出力 12mW で連続発振させ、直径 10mm、焦点距離 10mm のレンズで 20mm 先のターゲットに集光させた。半導体レーザ内蔵のフォトダイオードからの出力信号を検出回路に送るための信号線は、シールド線を用いた。それによって、外部からの雑音を最小限に抑えた。

図 3.2 に示した集光レンズとターゲット間の集光距離 b は式 (3.1) から

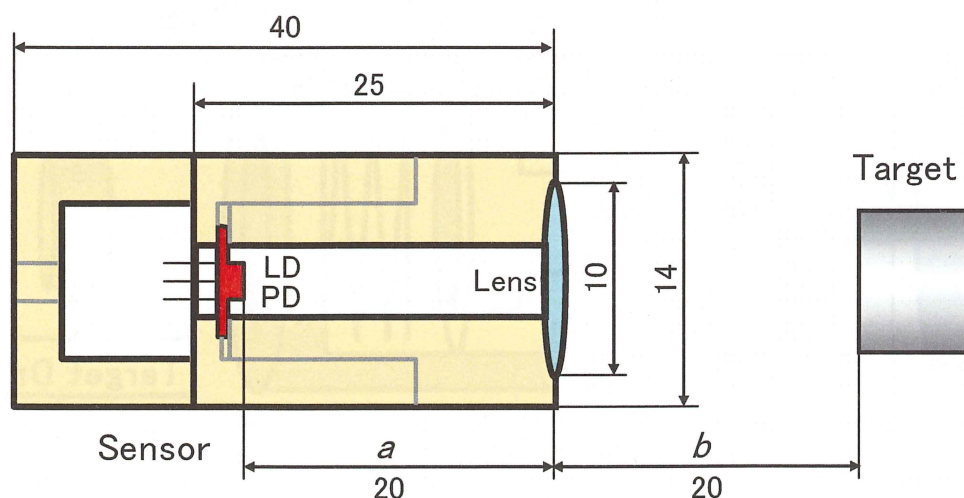


図 3.2 センサ部の断面図

求められ、集光レンズの焦点距離 f が 10mm で、半導体レーザと集光レンズ間の距離 a が 20mm であるので、集光距離は 20mm となる。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

3.1.2 センサ駆動部

本実験では、半導体レーザと集光レンズのみで構成されるセンサ部を、図 3.3 の外側の薄い茶色で示される直径 26mm、長さ 65mm の真鍮製の外部円筒に収める二重構造とした。また、センサ部の前方には直径 14mm、長さ 10mm のバネを設け、後方にはセンサ駆動用の圧電素子を配置し、センサ部とターゲット間の距離を変化できるようにした。これによって、センサ駆動用圧電素子に正弦波電圧を印加し、センサ部を意図的に半波長以上動かして基準信号を発生させたり、センサ感度が最大になるように直流電圧を印加して最大出力信号を検出したりした。

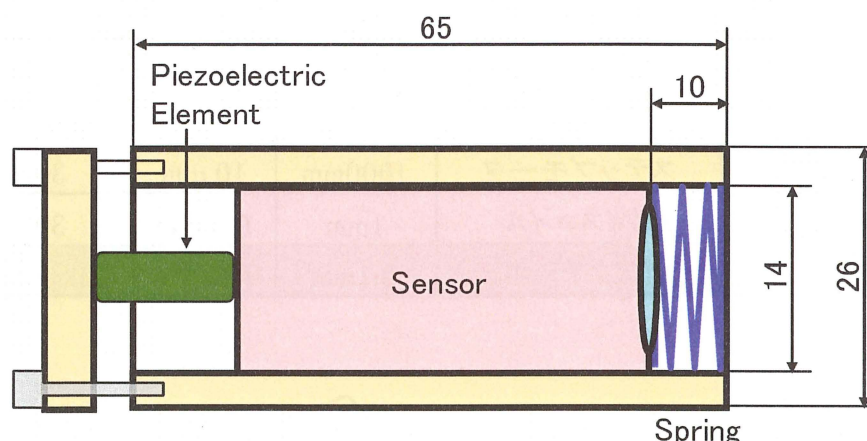


図 3.3 センサ駆動部の断面図

3.1.3 圧電素子[1][2]

アクチュエータは、何らかの稼動エネルギーを機械的な変位あるいは応力に変換するトランスデューサとして使用するが、それらを変位制御素子としてまとめたものを表 3.1 に示す。本研究では、変位精度として nm のオーダーが必要であり、また応答速度として数 kHz 以上必要であるため、表 2.1 中の圧電アクチュエータを使用した。本研究で用いた圧電素子は、TOKIN 製積層圧電アクチュエータを使用しており、圧電セラミック材料を用いている。圧電セラミック材料は PZT ($\text{PbZbO}_3\text{-PbTiO}_3$) を主成分とする、複合ペロブスカイト型複合酸化物である。また、圧電セラミックは

図 3.4①に示すように多結晶体であり、電界を一度も印加していない処女状態においては、個々の結晶粒の内部は分極方向が異なるいくつかの分域に分かれていて、この状態では全体として分極が相殺され、外部に現れていない。この圧電セラミックに電界 E を加えると図 3.4②に示すように結晶粒内部の分極方向が電界方向にそろって分極し、同時に結晶粒の長さが電界方向に伸びる。次に電界を取り除くと元の処女状態には戻らず、図 3.4

表 3.1 変位制御素子

駆動源	名称	変位レンジ	変位精度	発生力	応答速度
空気圧式	空気圧モータ	回転	±	5kgm	10s
	空気圧シリンダ	100mm	100 μ m	10-2kg/mm ²	10s
油圧式	油圧モータ	回転	±	10kgm	1s
	油圧シリンダ	1000mm	10 μ m	10kg/mm ²	1s
電気式	ACサーボモータ	回転	±	3kgm	100ms
	DCサーボモータ	回転	±	20kgm	10ms
	ステップモータ	1000mm	10 μ m	30kg	100ms
	ボイスコイル	1mm	0.1 μ m	30kg	1ms
	圧電アクチュエータ	0.1mm	0.01 μ m	3kg/mm ²	0.1ms

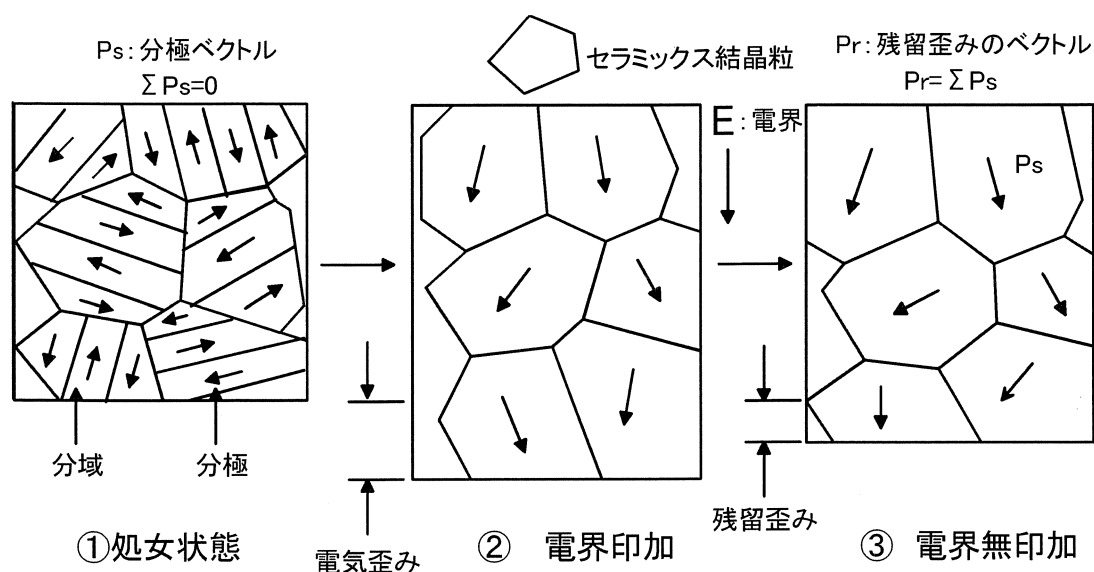


図 3.4 圧電アクチュエータの挙動

③に示すようにやや分極した状態にとどまり、残留歪みとなる。この一連の動作を行った分極処理後は、同一方向の電界を加えたり取り除いたりすると圧電セラミックは往復動作をし、その動作は直線性ではなく図 3.5 に示すようなヒステリシスを伴う特性となる。

本研究で用いたターゲットは、TOKIN 製の金属封入型圧電素子 ASB170C801NP0 である。レーザ光が照射されるターゲット表面部分は、金属面である。また、ターゲットの色別特性を見るために、この金属面にアクリル樹脂を塗布した。ターゲットを微小振動させるために、この圧電素子に 0.5kHz から 3.0kHz 程度の正弦波信号を入力して駆動させた。駆動するにあたり入力電圧は、ターゲットが半波長未満の振動をする数十 mV から、半波長以上の振動をする数十 V までとした。

また、本研究で使用したセンサ駆動用圧電素子 (図 3.3 参照) は、TOKIN 製の AE0203D16 である。この圧電素子は外部が樹脂で覆われている。これは、圧電素子の自己共振周波数がターゲットで用いた金属型よりも高い周波数となっている。そのため、金属型よりも高速で駆動させることができ、また、軽量であるため、本実験での基準信号を作り出すためのセンサ駆動用圧電素子として用いた。センサ駆動用圧電セラミックには、振幅 20V 程度の正弦波交流、またはパルス電圧としてピーク電圧 22V 程度、そして

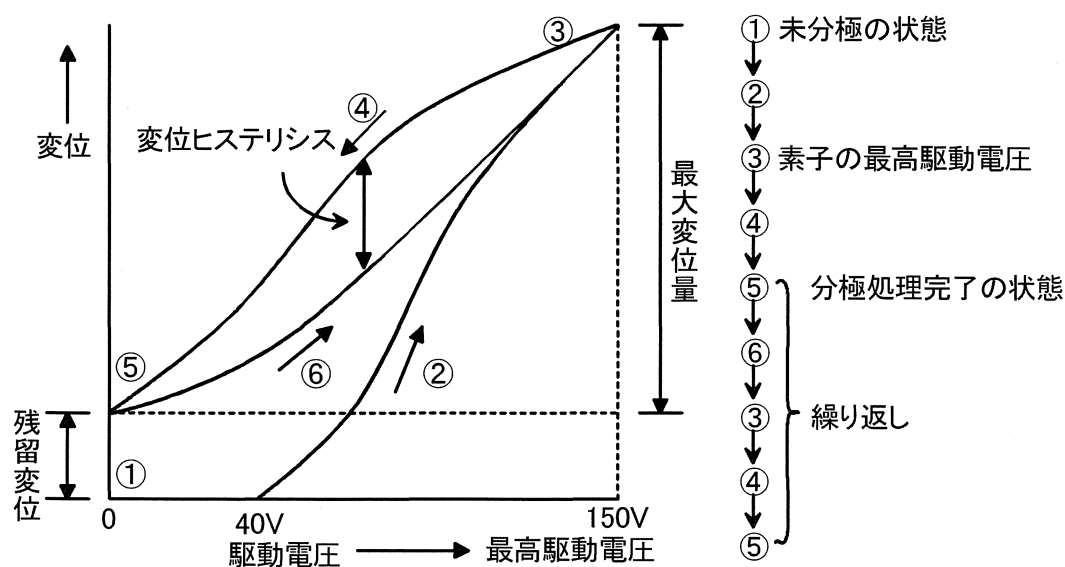


図 3.5 圧電アクチュエータのヒステリシス特性

バイアス電圧として 0~13V 程度の直流電圧を印加した。

3.1.4 センサ駆動回路

ターゲットが半波長以上振動したときと同様な基準信号を得るために、センサ駆動用圧電素子に振幅 20V 程度の正弦波交流電圧を印加する必要がある。図 3.6 に示すように、ファンクションジェネレータからの信号を最初に雑音の

少ないオペアンプの電圧増幅回路で増幅し、次にトランジスタで電力増幅を行い、図 2.12(a)の正弦波信号を圧電素子に印加した。これによって、図 2.12(b)のセンサ出力を得た。

センサ感度が最大時の出力信号を得るために、センサ駆動用圧電素子にバイアス電圧として 0~13V 程度の直流電圧を印加する必要がある。ここでは、直流安定化電源を使用し、図 3.6 のセンサ駆動用圧電素子と電力増幅回路の間に切り替えスイッチを設け、直接センサ駆動用圧電素子に直流電圧を印加した。これによって、図 2.13 の最大センサ出力を得た。

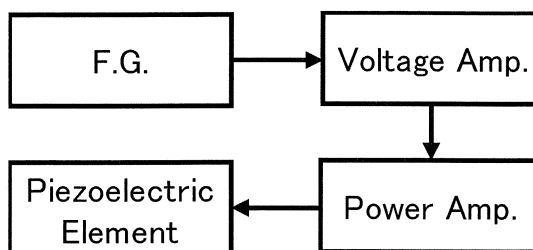


図 3.6 センサ駆動回路のブロック図

3.1.5 ターゲット駆動回路

ターゲットを微小振動させるため、図 3.7 に示すように、ファンクションジェネレータにより 0.5kHz から 3kHz 程度の正弦波信号を発生させ、トランジスタ 2SC1212 をダーリントン接続した電力増幅回路で、その信号を電力増幅させ、ターゲットに数十 mV から数十 V 程度の交流電圧

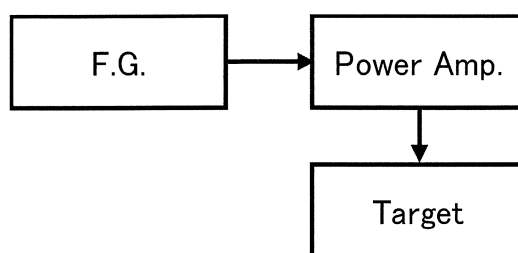


図 3.7 ターゲット駆動回路のブロック図

を印加した。また、圧電素子は正相でのみ駆動するので、ベース電圧を調整し、信号が歪まないよう出力させた。また、駆動回路出力側の抵抗部分には、一般的な 1/4W 規格の抵抗を使用すると定格を越えるので、10W

まで耐えられるセメント抵抗を使用した。圧電素子の変位量は入力電圧にほぼ比例するので、ファンクションジェネレータの出力を可変することによって、ターゲットの振動振幅値を調整した。

3.1.6 半導体レーザー駆動回路

半導体レーザーは、定電流回路により連続発振させた。定電流回路は、図 3.8 に示すようにツェナーダイオードやオペアンプなどを使用した閉回路型で、高い安定度を持たせた。そして、定電流回路内

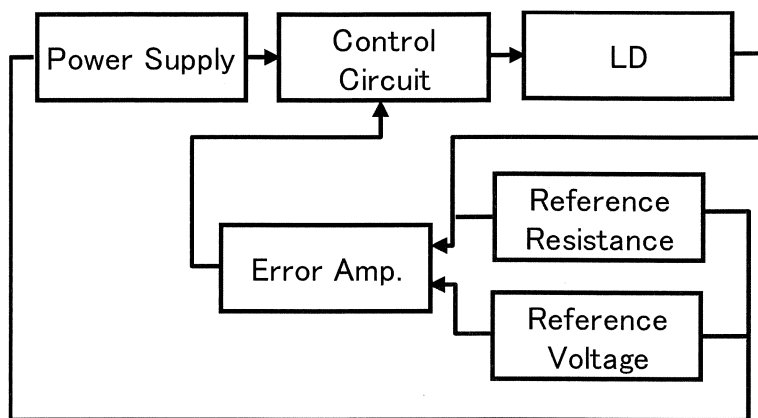


図 3.8 半導体レーザー駆動回路のブロック図

の標準抵抗を一部可変抵抗にすることによって、半導体レーザーに流す電流値を決めた。また、出力側のトランジスタで電流増幅させることによって、出力インピーダンスを小さくしている。

本実験で使用した半導体レーザーの閾値は、図 2.5 の静特性より約 35mA であり、半導体レーザーを順方向電流約 55mA、光出力 12mW で連続発振させた。ターゲットの微小振動を検出するのにレーザーの戻り光を利用するので、無変調発振による直流成分のみで使用した。

3.1.7 センサ出力検出回路

出力センサのフォトダイオードから得られる出力信号は、約 1mV から 10mV 程度と微弱であり、数十 MHz 程度の雑音に埋もれている。

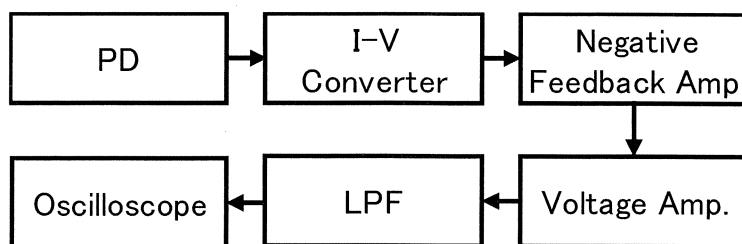


図 3.9 センサ出力検出回路のブロック図

そこで、この微弱な出力信号を増幅させるための、低ノイズで高利得な回路を試作した。その回路のブロック図を図 3.9 に示す。まず回路の初段にはフォトダイオードから得られる出力電流を電圧に変換するための I-V 変換回路を組み込み、出力信号を電圧に変換した。

次に増幅回路により出力電圧を増幅させた。この増幅回路には高入力インピーダンスで低ノイズである FET 型負帰還増幅器回路を使用した。この回路は通常のトランジスタ増幅回路に比べ、入力インピーダンスを 10～100 倍程度高く設定でき、また汎用オペアンプを用いたものよりも 10～20dB もの雑音を抑えることができる。また、回路内の抵抗で発生する熱雑音を小さくするために、出力インピーダンスを低くする必要がある。そこで、負帰還増幅回路の出力段にエミッタ・フォロワを追加することで出力を安定させた。

次に、負帰還増幅回路の出力電圧をオシロスコープで観察できるように、40dB 程度の増幅度を持った電圧増幅回路で信号を増幅させた。

そして、電圧増幅した信号に入り込んだ高周波雑音を取り除くために、その信号を LPF に通し波形整形した。この LPF は高速オペアンプを使用したアクティブフィルタで、遮断周波数を 10kHz に設定している。更に、これを二段接続にして 2 次フィルタとし、10kHz 以上の雑音成分を確実に取り除くようにした。センサ出力検出回路全体の増幅度は、約 50dB である。

これらの回路は、すべて銅板から回路基板を起したもので、雑音が極力入り込まないようにするために、銅箔部分は配線以外、全面グランドに接続した銅箔で覆われている。さらに回路をグランドに接続した金属ボックス内に収めることでシールド化させ、外部雑音の影響を極力受けにくくした。

3.2 自動式の実験装置

3.1 節の手動式実験装置では、ターゲットの振動が半導体レーザの半波長未満の微小振動をするとき、基準信号を得るためにファンクションジェネレータからの正弦波信号をセンサ駆動用圧電素子に印加し、その時の

基準信号出力をオシロスコープで読み取っていた。この基準信号出力は、かなり不安定で、時間と共に変動する。そのため、一定の基準信号出力を得るには、かなりの熟練を必要とする。また、センサの感度を最大にするための感度調整を手動で行ってきたが、この手動による感度調整は、かなりの精度を必要とし、最高感度点は非常に不安定で、安定した測定が困難であった。そこで、基準信号の発生と読み取り、そして最大出力信号を得るための最大感度検出と読み取りをマイクロコンピュータによって自動化することで、測定精度の向上を目指した。

この節では、手動式と異なる基準信号の発生と読み取り、そして同じく最大感度検出と読み取りについての実験装置と自動化のためにマイクロコンピュータで行った処理について述べる。

図 3.10 に自動式による微小振動検出に用いた実験装置の概略図を示す。センサ部、センサ駆動用及びターゲット用圧電素子は、手動式の実験装置と同じものを使用した。センサ部からターゲットに向け垂直に照射したレーザの戻り光が、センサ部内の半導体レーザの活性領域において干渉を起こし、フォトダイオードにより干渉信号が検出される。この信号は手動式の実験装置で検出される微小な信号と同じものである。手動式の場合は、この出力信号を増幅させ LPF に通して高周波雑音を除去し、その信号をオ

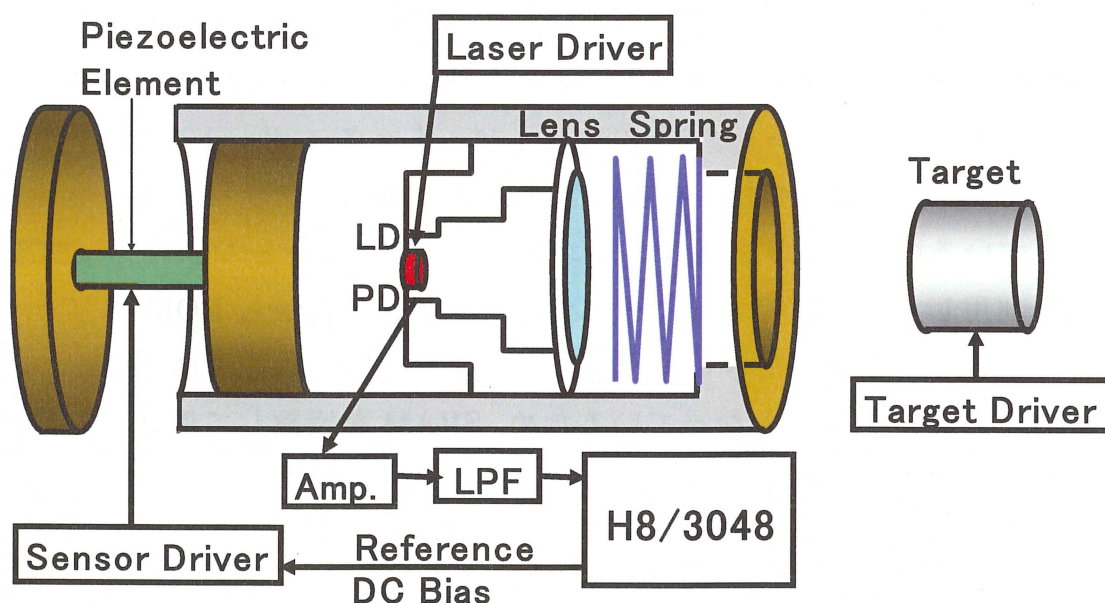


図 3.10 自動式の微小振動測定用実験装置

シロスコープにより波形観測した。自動式の場合は、出力信号をオシロスコープで観察せずに、マイクロコンピュータ処理で出力信号の山と谷を検出し、最大出力振幅を求め、液晶表示装置に表示させた。また、ターゲットが半導体レーザの半波長未満の微小振動をするとき、2.3 節の微小振動振幅と光出力の関係で述べたように、基準信号が必要となる。それを得るためには、センサ駆動部を高速で駆動できるようにすればよいので、マイクロコンピュータと電力増幅回路で基準信号を発生させた。また、センサの最大感度時の出力を得るためには、センサ駆動部をゆっくり駆動させればよいので、マイクロコンピュータによる基準信号発生と同じ装置を使用した。基準信号の発生とセンサ感度最大時の出力信号の発生は、マイクロコンピュータの処理の違いによって発生させている。

これらの各装置や動作の詳細を以降に述べる。

3.2.1 マイクロコンピュータ H8/3048 の概要

本研究に用いたマイクロコンピュータは Renesas Technology 製 H8/3048 である。H8/3048 の主な機能[3]を示したブロック図を図 3.11 に示す。H8/3048 は、1 個のパッケージ（約 15mm×15mm）に 128KB の ROM（フラッシュメモリ）、4KB の RAM、各種タイマ機能、A/D - D/A コンバータ、通信機能などを搭載した動作クロック 16MHz のシングルチップマイクロコンピュータである。ピン数は 100 本であるが、1 本のピンを複数の用途に切り替えて使用するようになっている。入力/出力用のポートは、8 ビット×7 ポート、7・6・5・4 ビット×各 1 ポートの計 11 ポートを備えている。ROM は、電气的に書き換え可能なフラッシュメモリを搭載しているため、シリアルコミュニケーションインターフェース (SCI) 機能を利用して、本研究ではパーソナルコンピュータから ROM にプログラムを書き込むことができるようにした。また、初期状態では ROM への書き込みは最大 100 回となっているため、SRAM を増設して何度でも書き込みができるようにした。

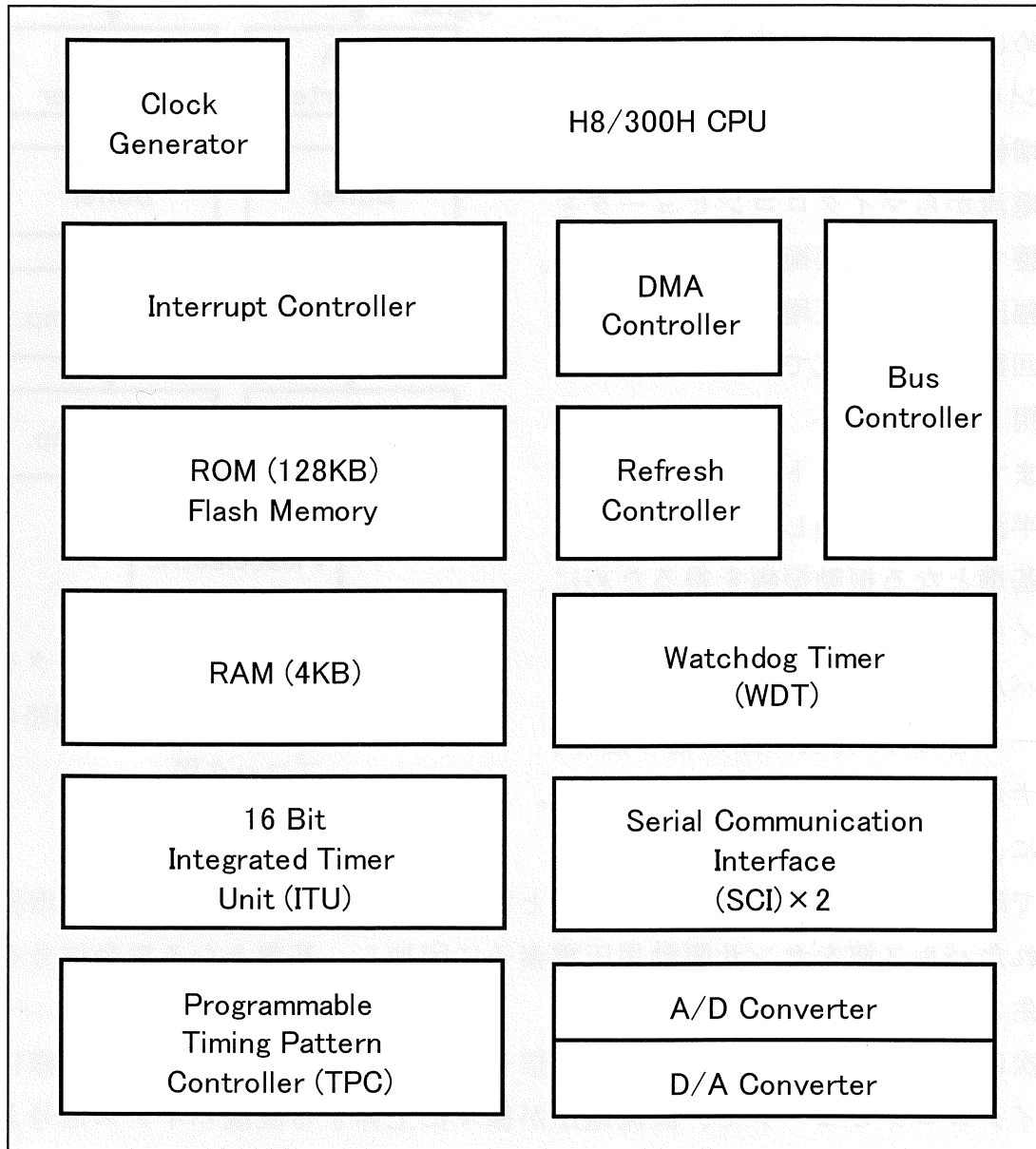


図 3.11 H8/3048 の主な機能

3.2.2 マイクロコンピュータを用いたセンサ駆動回路

マイクロコンピュータを用いたセンサ駆動回路のブロック図を図 3.12 に示す。センサ部を駆動させるために必要となる回路は、マイクロコンピュータの D/A 変換出力を電力増幅させるための増幅回路部と、逆電流からマイクロコンピュータを保護するための緩衝回路だけである。増幅回路部の電圧増幅回路と電力増幅回路は、手動式で使用したものを利用した。

まず、ターゲットが半導体レーザの半波長以上振動したときに発生する基準となる振動振幅を得るために、マイクロコンピュータでガウス関数のパルス波となるようなデジタルデータを D/A 変換回路に送り込み、アナログ量のパルス波を発生させた。更に、このパルス波でセンサ部を高速で駆動できるように電圧増幅回路と電力増幅回路で増幅した。この増幅されたパルス波をセンサ駆動用圧電素子に印加し、基準となる振動信号を発生させた。

次に、センサ感度が最大時の出力信号を得るために、基準信号と同様にマイクロコンピュータで、直流電圧が徐々に上昇する直流バイアス信号となるようなデジタルデータを D/A 変換回路に送り込み、アナログ量の直流バイアス信号を発生させた。更に、この直流バイアス信号でセンサ部を半波長以上確実に駆動できるように基準信号の場合と同じように、この直流バイアス信号を増幅した。この増幅された直流バイアス信号をセンサ駆動用圧電素子に印加し、最大出力信号が発生するようにした。

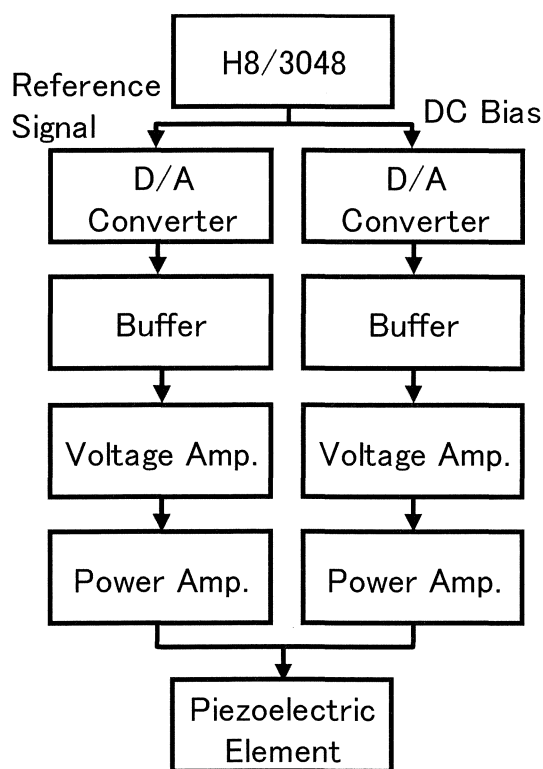


図 3.12 マイクロコンピュータを用いたセンサ駆動回路のブロック図

3.2.3 マイクロコンピュータを用いたセンサ出力検出回路

マイクロコンピュータを用いたセンサ出力検出回路のブロック図を図 3.13 に示す。ここでは、手動式のセンサ出力検出回路で利用した回路をそのまま利用し、LPF の後にリミッタ回路、LPF、A/D 変換回路、そしてマ

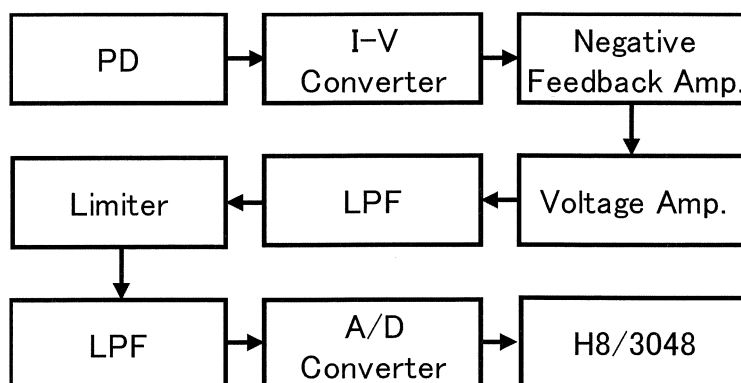


図 3.13 マイクロコンピュータを用いたセンサ出力検出回路のブロック図

イクロコンピュータ H8/3048 を接続した。この A/D 変換回路やマイクロコンピュータは使用電圧が 5V なので、5V を超える信号を A/D 変換回路やマイクロコンピュータに入力すると、A/D 変換回路やマイクロコンピュータが破壊されるので、検出信号が 5V を超えないように、ツェナーダイオードを使用したリミッタ回路を検出回路に挿入した。リミッタ回路の後には、更に前段の LPF と同じ遮断周波数 10kHz のオペアンプを用いた 1 次のアクティブローパスフィルタを挿入した。その後、A/D 変換回路で検出信号をデジタル量に変換し、半波長未満の振動振幅を算出する時の基準となる振動振幅値やセンサ感度が最大時の出力振幅値をマイクロコンピュータで処理し求めた。そして、基準となる振動振幅値と最大出力振幅値を比較することによって、ターゲットの微小振動振幅値をマイクロコンピュータで算出した。また、マイクロコンピュータが最大出力振幅値を検出した時の山と谷からターゲットの振動周波数をマイクロコンピュータによって算出した。これらの微小振動振幅値と振動周波数は、液晶表示させた。

3.2.4 マイクロコンピュータのプログラム処理

本研究で利用したマイクロコンピュータのプログラム処理内容について述べる。マイクロコンピュータ H8/3048 のプログラムを開発する際に利用できるソフトウェアは、アセンブラ言語、C 言語などであるが、効率よく

開発するために C 言語を用いて開発した。また、C 言語から機械語に翻訳するコンパイラとして、本研究ではシームレスにプログラム開発を進めるために、H8 マイコンの開発元と一緒である Renesas Technology 製の総合開発環境 High-performance Embedded Workshop (HEW) を使用した。

マイクロコンピュータ内で行われる微小振動測定処理の流れをフローチャートとして図 3.14 に示す。微小振動測定の大きな流れとして 2 つある。1 つは基準信号の発生で、残留振動を抑えるためにパルス形状が図 2.14(a)に示すような滑らかな信号をマイクロコンピュータによって発生させる。まず基準信号用入力データを D/A 変換する。変換されたアナログ電圧を電力増幅してセンサ駆動用圧電素子に加える。それによってセンサで発生した出力を増幅し、マイクロコンピュータで A/D 変換する。これらを設定値 800 回繰り返す、毎回その A/D 変換された出力振幅値を記憶する。つまり、図 2.14(a)の基準信号用の入力信号を発生させる為に 800 回の D/A 変換で波形成形しながら、同時に、その 1 回毎に基準となるセンサ出力信号の一部を A/D 変換しながら読み取り、最終の 800 回で図 2.14(b)の基準信号を全て読み取っている。上記入力データの D/A 変換からセンサ出力の

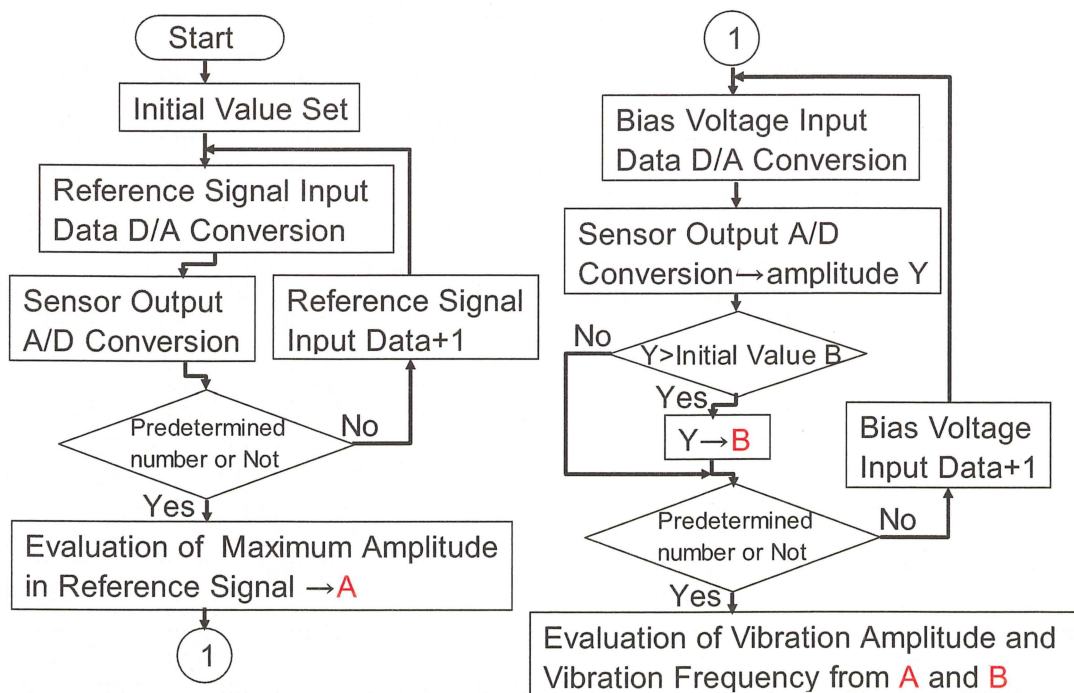


図 3.14 微小振動測定プログラムのフローチャート

A/D 変換までの 1 回の処理が約 $14\mu\text{s}$ であるため、上記設定回数 800 回を繰り返すことによって、図 2.14(a)の基準信号発生用の入力信号、半値幅約 5ms 、最大値約 25V がセンサ駆動用圧電素子に印加されたことになる。そして、記憶した出力振幅値の中から基準信号振幅値となる最大出力振幅値 A を求める。

次に 2 つ目の大きな流れは、直流バイアス信号の発生である。直流バイアス用入力データを同じく D/A 変換し、アナログ電圧を電力増幅してセンサ駆動用圧電素子に加える。その時センサ出力に発生した干渉信号を A/D 変換し出力振幅値を求め、以前のセンサ出力振幅値と比較し大きい値を選択する。これらを設定値 253 回繰り返すことによって、センサ感度が最大時の出力振幅値 B を求める。つまり、センサ部を駆動させるための圧電素子に 0V から約 13V まで徐々に増加する直流バイアス信号を印加し、センサ部を半波長以上ゆっくり移動させながら 253 回分の図 2.9 で示されるような出力信号を読み取り、その中から最大出力振幅値 B を選び出す。そして、先程の基準信号振幅値となる出力振幅値 A とこの最大出力振幅値 B を比較することによってターゲットの振動振幅値を求める。

先程の基準信号振幅値となる出力振幅値 A やセンサ感度最大時の最大出力振幅値 B は、出力信号の勾配が正から負、又は負から正へと変わる山と谷の値を読み取り、その差から振幅値を求めている。よって、それらの山と谷を読み取った時の時間の間隔から、計算によりターゲットの振動周波数を求めている。

こうして得られたターゲットの振動振幅値と振動周波数は、H8/3048 に取り付けた 16 文字 2 行の液晶表示装置により表示した。また、ターゲットの振動振幅値が正確に測定されているかどうかを判断するためのデータとして、最大出力信号の振幅値と基準信号の振幅値を同時に表示した。液晶表示装置にデータを表示させた後、これらの処理と表示を約 30 秒毎に繰り返し行った。

参考文献

- [1] 内野研二：圧電／電歪アクチュエータ 森北出版株式会社 1986
- [2] TOKIN：圧電アクチュエータ使用ガイド【1】、【2】 TOKIN 1997
- [3] 堀桂太郎：H8 マイコン入門 東京電機大学出版局 2006

第4章 実験結果及び考察

本章では、手動式と自動式の測定結果を述べる。手動式においては、ターゲットが半導体レーザの半波長以上と半波長未満の振動をしているときの振動振幅の測定結果と、自己結合型微小振動センサの周波数依存性と色依存性について述べる。次に、自動式においては、ターゲットの振動が半波長未満のときの振動振幅測定結果と、手動式と同じく本センサの周波数依存性と色依存性について述べる。また、それらの結果の検証をするために、静電容量式変位計で振動振幅を測定した結果との比較を述べる。

4.1 手動式の実験結果

4.1.1 半波長以上の実験結果

ターゲットが半導体レーザの半波長以上の振動をしているときの測定結果を図4.1に示す。図4.1は、金属表面のターゲットに加えた振動周波数が1.0kHzの入力電圧に対するターゲットの振動振幅の測定結果である。微小振動振幅の算出方法で説明した波数と正弦波補正によって求めた振動振幅は、入力電圧に比例していることが分かる。ターゲットが半導体レーザの半波長以上の振動をしているときは、センサの出力電圧の大きさでなく、波数から振動振幅値を求めるため、戻り光量によらず正確に振動振幅値を求めることができる。

前述したターゲットの振動周波数が1.0kHzの時の測定振動振幅に対する偏

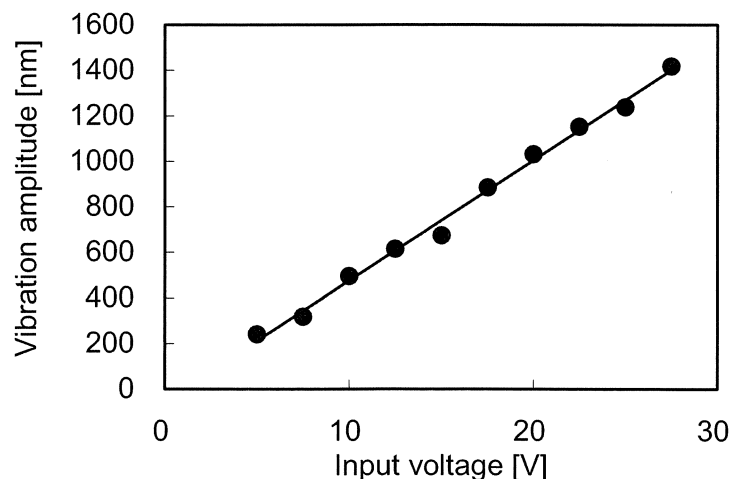


図4.1 半波長以上における入力電圧対振動振幅値
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

差を図 4.2 に示す。偏差は、微小振動振幅の算出方法で説明した方法で求めたものである。図 4.2 から分かるように、ターゲットの振動が半波長以上では、ターゲットの振動振幅の大きさにかかわらず、1%前後の一定の偏差となる。偏差が小さく一定となっているのは、ターゲットの振動振幅を半導体レーザの半波長に当たる基準振幅の波数を求めることによって算出しているからである。ゆえに、ターゲットの振動が半波長以上の測定では、問題なく振動振幅を求めることができる。

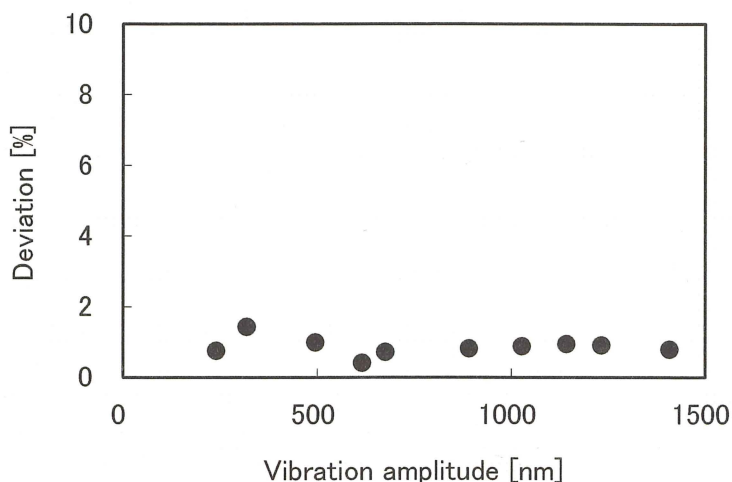


図 4.2 半波長以上における振動振幅値対偏差
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

4.1.2 半波長未満の実験結果

ターゲットが半導体レーザの発振波長の半波長未満の振動をしているときの測定結果を図 4.3 に示す。図 4.3 は、金属表面のターゲットに加えた振動周波数が 3.0kHz の入力電圧に対するターゲットの振動振幅の測定結果で、振動振幅をセンサ出力の振幅比で

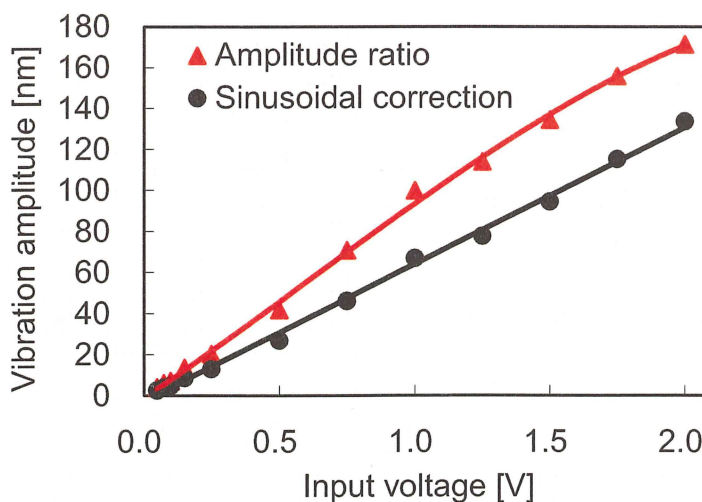


図 4.3 ターゲットの測定振動振幅の比較
(ターゲットの振動周波数：3.0 kHz)

求めた結果と正弦波補正で求めた結果をそれぞれ示した。上段がセンサ出力の振幅比から求めた振動振幅で、下段が正弦波補正による振動振幅である。振幅比から求めた振動振幅は $1/4$ 波長に近づくと正弦波補正の結果に近づくが、 $1/4$ 波長以下では常に正弦波補正の結果より大きくなった。これは正弦波の谷と山を三角波の谷と山に置き換えたので、斜辺の傾きは正弦波の中心付近の傾きより小さいためである。従って、広い範囲で正確に振動振幅値を測定するためには正弦波補正の必要がある。正弦波補正による振動振幅は入力電圧に比例し、本実験では、最小で約 5nm までの微小振動が測定できた。これは、半導体レーザの発振波長の約 $1/150$ 倍に相当する。しかし、ターゲットの振動が 5nm 以下になると、センサ出力振幅が雑音振幅レベルに近づいてくるため、測定が困難となる。測定回路の S/N 比を改善することによって、更にターゲットの振動振幅を正確に測定できると思われる。また、図 4.4 はターゲットに 1.0kHz の振動周波数を印加したときの、半波長未満と半波長以上の入力電圧に対する振動振幅を示しているが、図に示すように、正弦波補正による半波長未満の振動振幅は、図 4.1 で示した半波長以上の振動振幅と傾きが同じ同一直線につながる。よって、本論文の第 4 章実験結果の測定振動振幅値は全てこの正弦波補正によって求めたものである。

次に、ターゲットの振動周波数が 3.0kHz の時の測定振動振幅に対する偏差を図 4.5 に示す。偏差は、半波長以上のおきと同様に、微小振動振幅の算出方法で説明した方法で求めたものである。図 4.5 から分かるように、ターゲットの

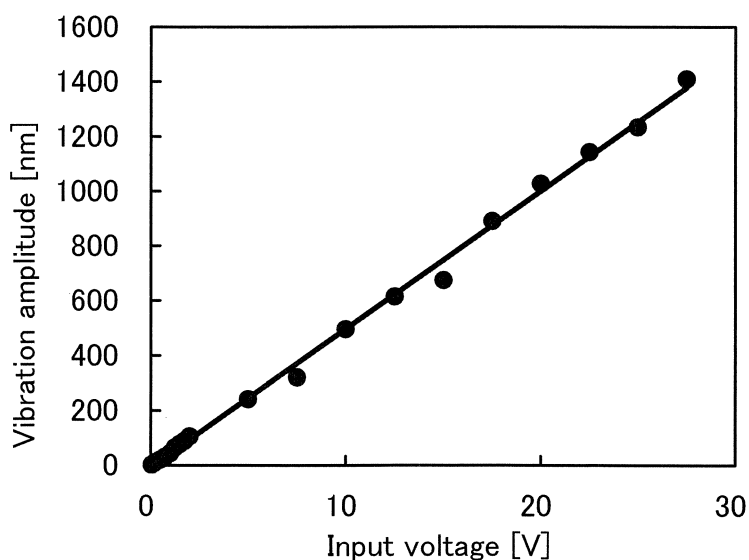


図 4.4 半波長未満と半波長以上における
入力電圧対振動振幅値
(ターゲットの振動周波数： 1.0kHz)

振動振幅が 50nm 以上では、振動振幅の大きさに関係なく 3%前後の一定の偏差となる。振動振幅が 50nm 以下では、振動振幅が小さくなるに従って偏差が 10%前後まで徐々に大きくなり、振動振幅のばらつき誤差が大きくなる。これは、振動振幅が 50nm 以

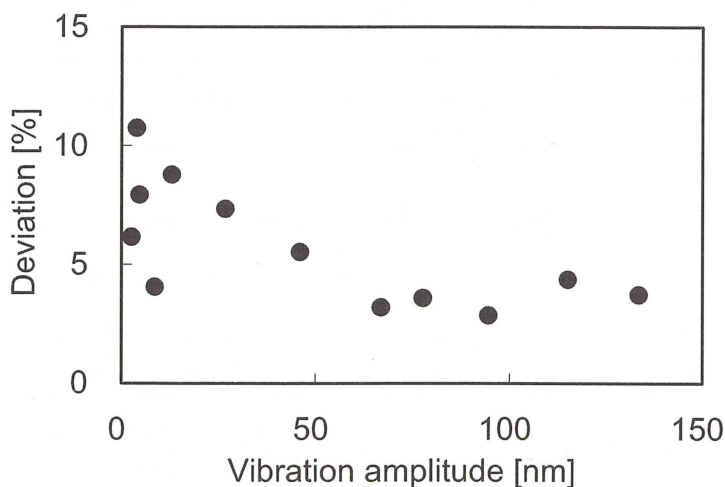


図 4.5 半波長未満における振動振幅値対偏差
(ターゲットの振動周波数：3.0kHz)

下では、干渉波形が小さくなり、雑音の影響が大きくなるためと考えられる。また、非常に不安定なセンサの最大感度時の出力振幅を手動で読み取っているため、振動振幅値のばらつき誤差が全体的に大きめに表れている。

次に、ターゲットの振動周波数を 0.5kHz から 3.0kHz まで変化させたときのレーザセンサの周波数依存性を図 4.6 に示す。この図から分かるよ

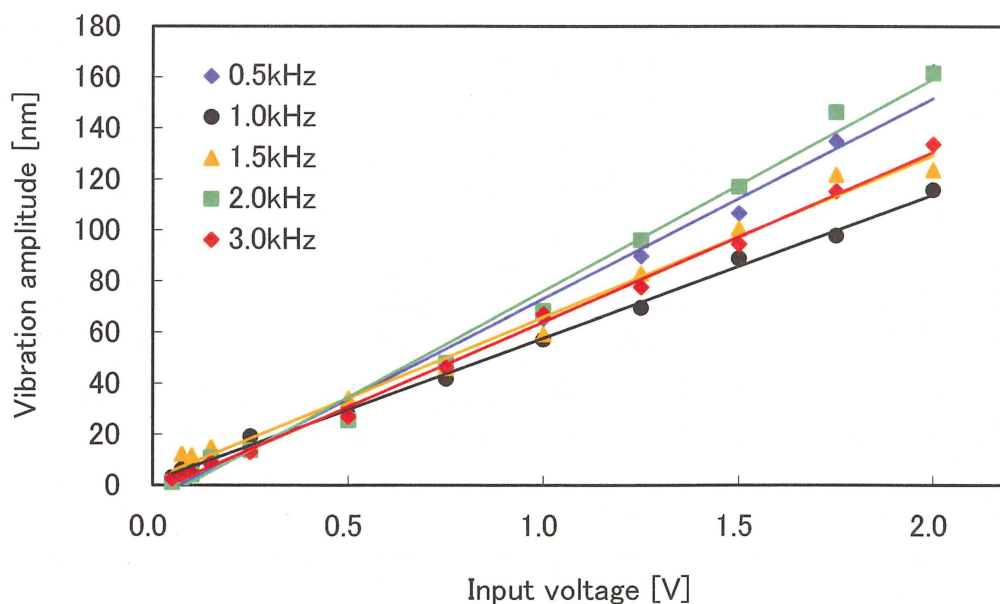


図 4.6 金属表面における周波数依存性

うに、図 4.3 で示した正弦波補正の振動振幅と同様に、各周波数で入力電圧と振動振幅が比例していることが分かる。また、0.5kHz から 3.0kHz の間では、約 5nm までの微小振動が測定できている。しかし、各周波数間で入力電圧に対する振動振幅の直線の傾きに差が出ている。これは、基準となる振動振幅やセンサの最大感度時の出力振幅が不安定であるため、手動では常に同じ位置の値を読み取ることが困難であるために発生する誤差と思われる。各周波数における振動振幅に対する偏差は、図 4.5 の 3.0kHz における偏差と同様な傾向を示し、各周波数とも振動振幅が 30nm 前後を境にして、以上では偏差が約 2~7%程度になり、以下では振動振幅が小さくなるに従って偏差が 13%前後まで徐々に大きくなった。誤差はあるものの、ターゲットの振動周波数に関係なく、振動振幅を測定できることが分かった。更に誤差が少なくなるような安定した振動振幅測定をするためには、自動測定が必要となる。

ターゲット表面にアクリル塗料を塗り、色を変化させた時の入力電圧に対する振動振幅を図 4.7 に示す。ターゲットの振動周波数は、1.0kHz である。各色においてターゲットの入力電圧と振動振幅が比例し、各プロット点がほぼ一直線上に並んでいることが分かる。また、各色における測定振動振幅に対する偏差を調べた結果、各色とも振動振幅が 30nm 前後を境にして、以上では偏差が 1~5%内の値となり、以下では振動振幅が小さくなるに従って偏差が 10%前後まで徐々に大きくなり、図 4.5 の金属表面のターゲットと同様な傾向

を示した。よってターゲット表面の色に関係なく、即ち戻り光量に関係なく微小振動を測定できることが分かった。ターゲット表面の色が白と黒とでは、同じ入力電圧に対しセンサ出力信号は最大で 4 倍程度異なっていたが、

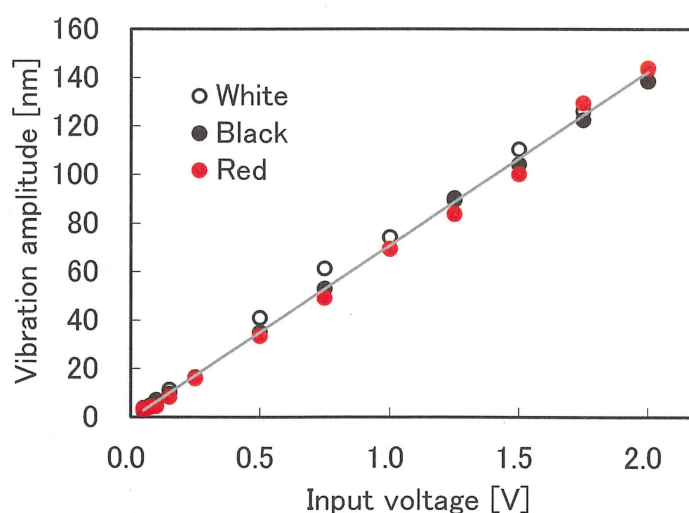


図 4.7 振動周波数 1.0kHz における色依存性

本センサで測定した振動振幅は 30%以内の違いであった。このように、センサ出力信号を基準信号で補正しなければ微小振動振幅を正確に測定できないことが分かった。

また、色毎にターゲットの振動周波数を 0.5kHz から 3.0kHz まで変化させて振動振幅を測定した結果、ターゲットの入力電圧に対する振動振幅の直線の傾きが、各色において、ほぼ同じような傾きとなった。

次に、金属表面のターゲットに周波数 1.0kHz の入力電圧を印加したときの振動振幅を、本実験のレーザーセンサと静電容量式変位計で測定した結果を図 4.8 に示す。静電容量式変位計は IWATSU 製の非接触変位計 ST-3571A を用いた。静電容量式変位計の感度は $0.4\text{V}/\mu\text{m}$ で、分解能は 1.0kHz において 5nm である。静電容量式変位計によるターゲットの振動振幅は、レーザーセンサと同様に 14 回の振動振幅測定を行い、その内の最大値と最小値から数えて各 2 つずつを除外し、残り 10 回の平

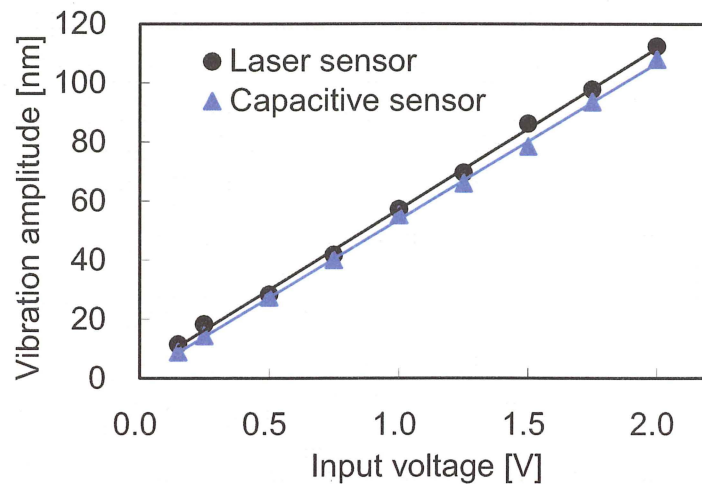


図 4.8 本実験で使用したレーザーセンサと静電容量式変位計との比較
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

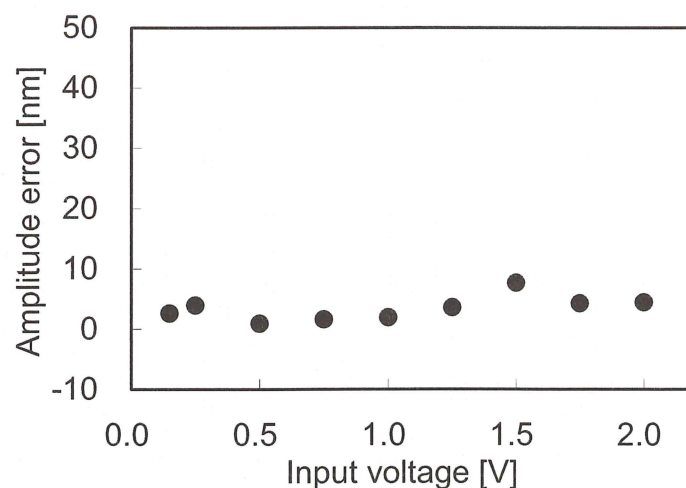


図 4.9 レーザセンサの振動振幅誤差
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

均値とした。図 4.8 から分かるように、レーザセンサと静電容量式変位計の入力電圧に対する振動振幅の両直線の傾きは、ほぼ同じ値となる。更に、静電容量式変位計で測定した振動振幅を真値として、レーザセンサで測定した振動振幅の誤差を求めた結果を図 4.9 に示す。ターゲットの振動振幅が約 10nm から 110nm 全体に渡り、誤差がほぼ 5nm 以内である。これは静電容量式変位計の分解能が 1.0kHz で 5nm である事を考慮すると、両センサの測定結果がほぼ一致していると言える。

以上より、この手動式微小振動センサはある程度精度良く微小振動を測定できることが分かった。しかし、基準信号を測定してから最高感度で振動振幅を測定するまでに時間がかかり時間的に変化する振動を正確に測定できない。また、非常に不安定な最高感度点を得るためのバイアス調整を手動で行っているため、精度良い測定には熟練を要するなどの欠点がある。これらの欠点を改善するためには、自動で基準信号や最高感度時の出力信号を測定する必要がある。

4.2 自動式の実験結果

自動式によるターゲットの振動振幅測定は、半導体レーザの半波長未満の測定を対象としているので、以下はターゲットの振動が半波長未満の結果である。

先ず、最初に示す図 4.10 は、金属表面のターゲットに加えた振動周波数が 1.0kHz の入力電圧に対するターゲットの振動振幅の測定結果である。ターゲットの振動振幅値は、ターゲットの入力電圧に比例していることが分かる。本実験では、最小で約 3nm までの微小振動が測定できた。これは、半導体レーザの発振波長の約 1/250 倍に相当し、前述の手動測定によって得られた最小の振動振幅値、約 5nm の 1/2 倍程度に当たる。本実験では、ターゲットの振動振幅が数 nm 以下になると、センサ出力振幅が雑音振幅レベルに近づいてくるため、測定が困難となるが、測定回路の S/N 比を改善することによって、更に手動式よりターゲットの振動振幅を正確に測定できると思われる。

ターゲットの振動周波数が 1.0kHz の時の測定振動振幅値に対する偏差

を図 4.11 に示す。偏差は、手動測定で求めた方法と同じである。図 4.11 から分かるように、ターゲットの振動振幅値が 25nm 以上では、振動振幅値の大きさに関係なく 2%前後の一定の偏差となり、安定した測定ができています。一方、振動振幅値が 25nm 以下では、偏差が 10%前後まで急激に大きくなり、振動振幅値のばらつき誤差が大きくなる。振動振幅値が 25nm 以下では、干渉波形が小さくなり、雑音の影響が大きくなるためと考えられる。しかし、自動式振動振幅値の偏差は手動式の偏差である図 4.5 と比べ、

特に振動振幅値 25nm 以上では小さく、自動式の方が安定して測定できることが分かる。

金属表面のターゲットで 0.5kHz から 3.0kHz まで振動周波数を変化した時の入力電圧に対する振動振幅値の測定結果を図 4.12 に示す。ターゲットの振動振幅値は、各周波数において入力電圧に比例し、各プロット点が

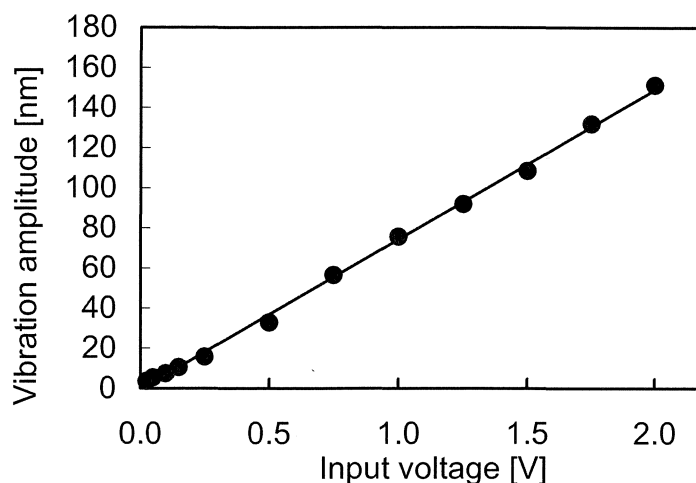


図 4.10 半波長未満における入力電圧対振動振幅値
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

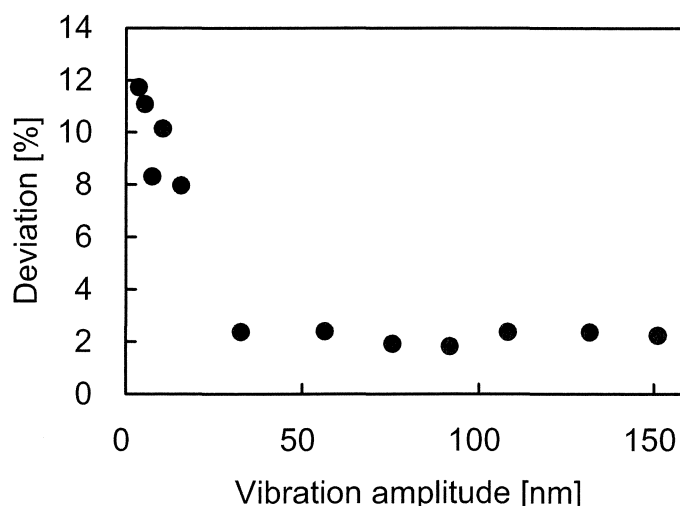


図 4.11 半波長未満における振動振幅値対偏差
(ターゲットの振動周波数：1.0kHz)

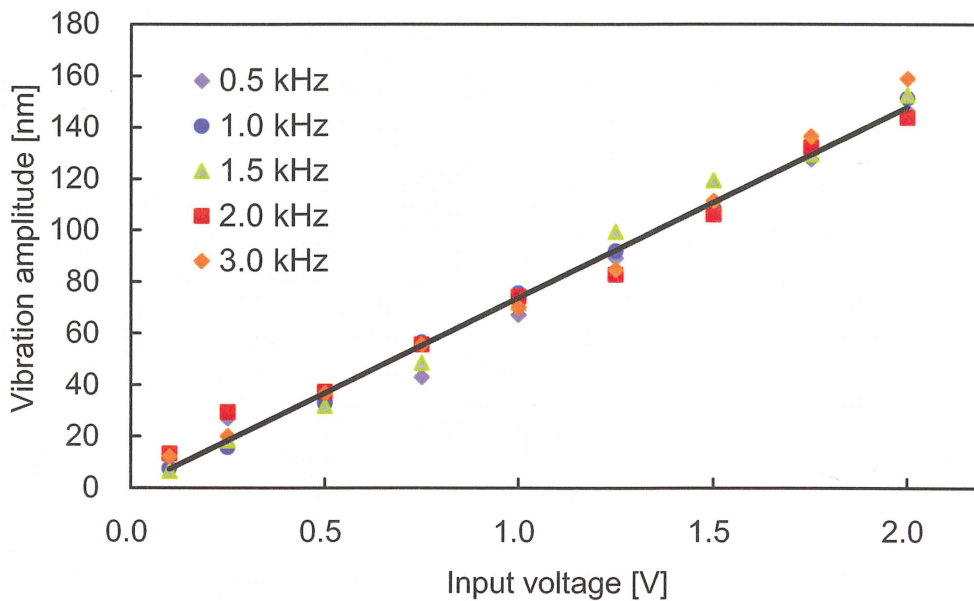


図 4.12 金属表面における周波数依存性

ほぼ一直線上に並んでいることが分かる。この結果は、手動式の周波数性である図 4.6 と比較して誤差が少なく、自動式の方が安定した測定ができることが分かる。また、各周波数における測定振動振幅値に対する偏差を調べた結果、各周波数とも振動振幅値が 25nm を境にして、以上では 2% 前後、以下では 10% 前後の偏差となり、1.0kHz の図 4.11 の偏差と同様な傾向を示した。ターゲットの振動振幅値が 25nm 以下では偏差が大きいため、多少ばらつきが大きくなったが、ターゲットの振動周波数に関係なく微小振動を測定できることが分かる。ターゲットの振動周波数が 0.5kHz 未満になると、出力信号のサンプル取り込み時間がターゲットの振動周期より短くなるため、測定不可能となるが、サンプル取り込み時間を長くすれば、更に低い振動周波数の微小振動を測定できると思われる。また、3.0kHz を超えると、A/D 変換の速度が不十分で信号の最大値を正確に検出できず誤差が増加するが、サンプリング周波数が高い A/D 変換器を使用すれば、更に高い振動周波数の微小振動を測定できると思われる。

ターゲット表面にアクリル塗料を塗り、色を変化させた時の入力電圧に対する振動振幅を図 4.13 に示す。ターゲットの振動周波数は、1.0kHz である。各色においてターゲットの入力電圧と振動振幅が比例し、各プロッ

ト点がほぼ一直線上に並んでいることが分かる。ここでは、反射率が最も高い白、又は近赤外レーザに近い赤と反射率が最も悪い黒の結果を示したが、その他の色として、色の12色環に沿って一つおきに黄橙、黄緑、青緑、

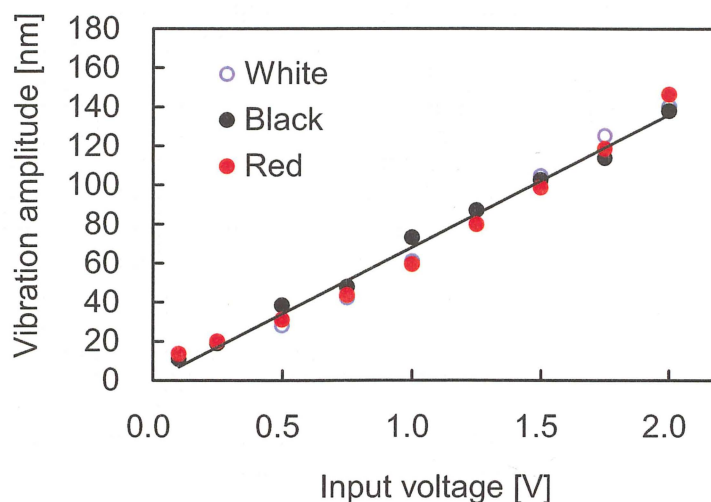


図 4.13 振動周波数 1.0kHz における色依存性

青、紫と振動振幅を測定した結果、色の違いによることなく図 4.13 に示すような同様な結果を得ることができた。また、各色においてターゲットの振動周波数を 0.5kHz から 3.0kHz まで変化させた時の周波数依存性を調べた結果、図 4.12 の金属表面のターゲットと同様に各周波数で入力電圧と振動振幅が、ほぼ同じ傾きで比例していた。各色における測定振動振幅値に対する偏差を調べた結果、各色とも振動振幅値が 25nm を境にして、以上では 2%前後、以下では 10%前後の偏差となり、図 4.11 の金属表面のターゲットと同様な傾向を示した。よってターゲット表面の色に関係なく微小振動を測定できることが分かった。ターゲット表面の色が白と黒では、同じ入力電圧に対しセンサ出力信号は最大 2 倍程度異なっていたが、本センサで測定した振動振幅値の違いは 10%以内であった。このように、センサ出力信号を基準信号で補正しなければ微小振動振幅を正確に測定できないことが分かった。

次に本研究のレーザセンサと静電容量式の変位計でターゲットの振動が 3.0kHz のときの振動振幅を測定した結果を図 4.14 に示す。静電容量式変位計は、手動式で使用した IWATSU の ST-3571A である。レーザセンサと変位計の入力電圧に対する振動振幅の両直線の傾きは、ほぼ同じ値となり、よく一致していることが分かる。また、ターゲットの振動周波数を 0.5kHz から 3.0kHz 間で変化させ、同様に両センサで振動振幅を比較したところ、各周波数においても、入力電圧に対する振動振幅の両直線の傾き

は、同様な傾向が見られた。また、静電容量式変位計で測定した振動振幅値を真値として、レーザセンサで測定した振動振幅値の誤差を図 4.15 に示す。測定範囲全体に渡り、振動振幅の誤差がほぼ 5nm 以内であることが分かる。また、これは手動式と静電容量式とを比較した時より、振動振幅の誤差が 1/2 程度まで減少し、自動式の精度が良いことが分かる。よって、両センサの測定結果がよく一致していることが分かる。

このようなことから、ターゲット表面の色や振動周波数に依存することなく、手動式より自動式の微小振動センサで精度良く微小振動を測定できることが分かった。

出力信号の山と谷との時間からマイクロコンピュータで求めたターゲットの振動周波数とターゲットに加えた振動周波数との関係を図 4.16 に示す。また、測定した振動周波数の偏差も同時に図 4.16 に示す。ターゲットの表面は白色である。測定した振動周波数値は、0.5V の入力電圧において

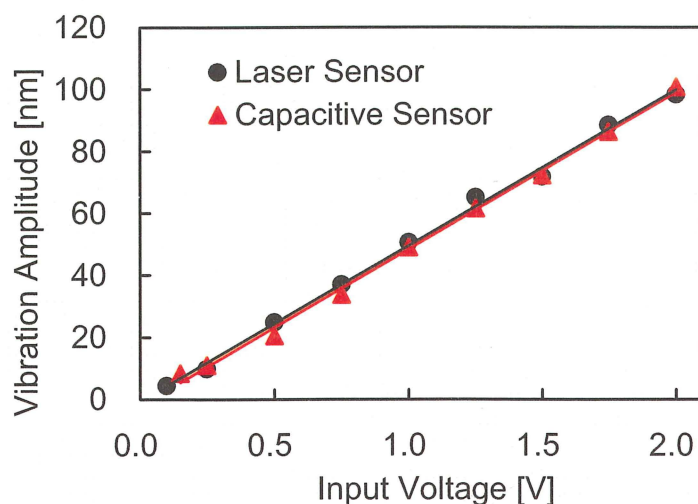


図 4.14 本実験で使用したレーザセンサと静電容量式変位計との比較
(ターゲットの振動周波数：3.0kHz)

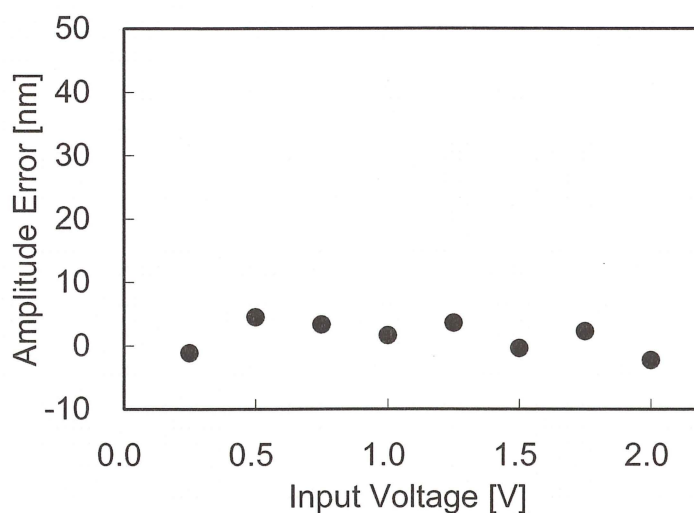


図 4.15 レーザセンサの振動振幅誤差
(ターゲットの振動周波数：3.0kHz)

10 回の測定の平均である。ターゲットに加えた振動周波数は、ターゲットの入力信号をオシロスコープで観察して読み取った。偏差は振動振幅値と同様にして求めた。図 4.16 より、測定した振動周波数と入

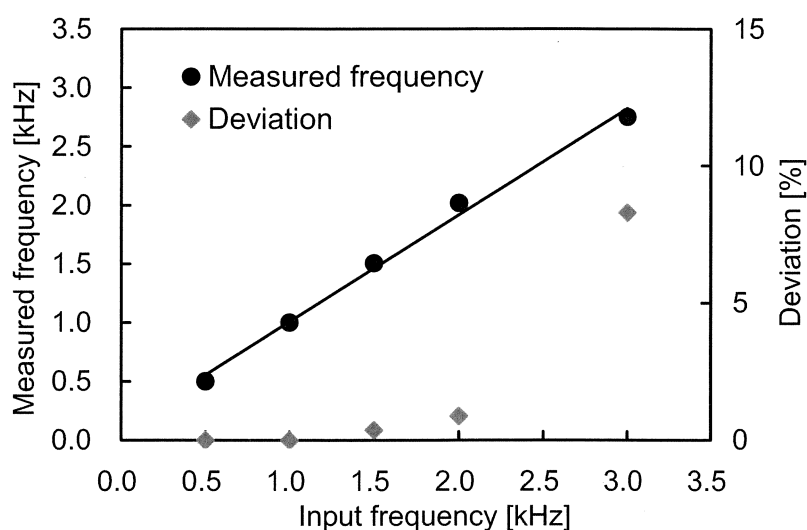


図 4.16 測定振動周波数と偏差
(ターゲットの表面：白色)

力信号の振動周波数が、ほぼ比例していることが分かる。ターゲットの振動周波数が 0.5kHz 未満になると、出力信号のサンプル取り込み時間がターゲットの振動周期より短くなるため、0.5kHz 未満では入力信号の振動周波数より高い値で表示される。サンプル取り込み時間を長くすれば、更に低い振動周波数を測定できると思われる。また、3.0kHz を超えると、A/D 変換の速度が不十分なため、正確に出力信号の谷と山を検出できなくなり、測定される振動周波数の偏差が 10% を超えるようになる。サンプリング周波数が高い A/D 変換器を使用すれば、更に高い振動周波数を測定できると思われる。ターゲットの振動振幅が 25nm 以上では、振動周波数の偏差は図 4.16 に示すように 3.0kHz を除いて 1% 未満になる。ターゲットの振動振幅が 25nm 以下では雑音の影響が大きいため、正確に出力信号の谷と山を検出できなくなり、測定される振動周波数の偏差が 2% から 10% 程度になる。よって、振動周波数が 0.5kHz から 3.0kHz の間で、ターゲットの振動周波数を測定できることが分かった。

以上のことより、ターゲットの振動振幅が半波長未満において、手動式と自動式を比較してみると、手動式でも十分ターゲットの微小振動振幅をターゲットの振動周波数や表面の色に関係なく測定できることが分かったが、自動式では更に、手動式より精度良く効率的に安定してターゲットの

振動振幅を測定できることが分かった。自動式では、手動式の最小微小振動振幅の測定が約 5nm であったのに対して、約 3nm と更に 1/2 程度も微小振動を測定できる。測定振動振幅の偏差においても、手動式の安定測定範囲では約 3% 前後の偏差があるが、自動式の安定測定範囲では、ほぼ 2% 前後の偏差となり、自動式の方は振動振幅のばらつき誤差が手動式より小さくなっている。ターゲットの振動周波数が変化する場合においても、手動式ではターゲットの入力電圧が 2.0V 付近で周波数によって 40nm 程度の差があるが、自動式では 15nm 程度の差であった。ターゲットの表面の色による変化においては、手動式も自動式も大きな差はなかった。また、静電容量式変位計で振動振幅を比較した結果は、静電容量式変位計の分解能である 5nm 以内に手動式も自動式もほぼ入っているが、自動式の方が静電容量式変位計に近い結果が得られ、全体的に振動振幅誤差は小さかった。更に自動式では、ターゲットの振動周波数を自動で読み取ることができ、振動周波数が 3.0kHz では、偏差が若干高いが、生産現場における微小振動の監視用として十分使用できる精度であると思われる。

このようなことから、半導体レーザの自己結合効果を用いた微小振動センサは、従来型のレーザ干渉計に比べて小型で精度良く微小振動を測定でき、更に自動式にすることによって、微小振動振幅と振動周波数を安定的に効率よく測定できることが分かった。

第5章 総括

5.1 本論文のまとめ

これまで戻り光ノイズとして取り除こうとされてきた半導体レーザの自己結合効果を用いて、非接触で半導体レーザの半波長より小さいターゲットの微小振動を測定でき、かつ外部振動に強く、外部干渉系を持たない小型で構造が簡単なセンサを研究した。本研究では、測定原理を検証するための手動式による方法と手動式の欠点となる個人誤差の改善や測定精度の向上を目標に自動式による方法とで研究を行った。自動式では、ターゲットの振動周波数が数kHz以下で振動振幅が数nm以下の微小振動と振動周波数を測定できるようなセンサシステムを研究した。

センサ部を意図的に半導体レーザの半波長以上の距離を高速で動かすことによって、基準振動振幅となる基準信号を発生させ、基準信号とセンサの出力信号を正弦波補正によって比較し、レーザの入射角やターゲットの反射率などに関係なく、ターゲットの微小振動振幅を求めることができた。手動式では、センサ部を移動させるために、ファンクションジェネレータを利用してセンサ駆動用圧電素子に正弦波信号を印加したが、自動式では、装置を簡略化するために、ファンクションジェネレータの代わりに組込型マイクロコンピュータ H8/3048 でパルスを発生させ、その信号を利用してセンサ駆動用圧電素子に正弦波信号を印加した。また、直流バイアス電圧をセンサ駆動用圧電素子に印加し、常にセンサの最大感度位置で微小振動を検出したので、ターゲットの位置に関係なく、センサ感度が高いものとなった。手動式ではターゲット表面の色に関係なく最小約 5nm までの微小振動振幅を測定できたが、最大感度の検出を直流電源の可変抵抗値を変えていくことでバイアス電圧の調整を手動で行ったため、最大感度時の出力が不安定となり出力振幅の読み取りに個人誤差や過失誤差が発生し、偏差が雑音による影響以外にも大きくなった。自動式では、マイクロコンピュータによって常に最大感度の位置で微小振動を検出できるようにセンサ部をゆっくり半波長以上の距離を動かしたので、手動式より正確なセンサ感度最大点を検出でき、ターゲットの振動が 0.5kHz から 3.0kHz の間で、

振動周波数やターゲット表面の色に関係なく半導体レーザの発振波長の約 1/250 倍に相当する最小約 3nm までの微小振動振幅を測定できた。また、ターゲットの振動周波数を出力信号からマイクロコンピュータの処理によって振動振幅と同時に求めたので、オシロスコープから読み取るよりも早く正確な値を求めることができた。よって、当初の目標である振動周波数が数 kHz 以下で振動振幅が数 nm 以下の微小振動を非接触で検出するという目標が達成できた。将来的には、出力信号検出回路の S/N 比を改善することによって、更に小さい微小振動振幅と正確な振動周波数を測定できると思われる。また、マイクロコンピュータによるサンプル取り込み時間を長くしたり、A/D 変換のサンプリング周波数を高くしたりすることによって、ターゲットの測定振動周波数の範囲を拡張できると思われる。

以上のことより、この自動式による微小振動センサシステムは、半導体レーザの自己結合効果を用いて、非接触でターゲットの振動振幅や振動周波数を高精度で自動的に測定できる小型で安価なセンサシステムであると言える。

5.2 将来展望

この自動式による微小振動センサシステムは、非接触でターゲットの振動振幅や振動周波数を高精度で自動的に測定できる小型で安価なセンサシステムであることが分かったが、次のようなことを改良することによって、ターゲットの振動振幅測定の精度を更に向上させたり、ターゲットの振動周波数測定の周波数範囲を更に広くさせたりすることができると思われる。

まずは、出力信号検出回路の S/N 比の改善であるが、本研究で使用した出力信号検出回路は、全て研究室での手作りであるため、雑音対策において限界はあるものの、次のような対策が考えられる。1つは、部品配置や配線方法の見直し、次に、全ての部品において低雑音のものを使用する。また、接地位置の見直しやシールドケースからはみ出ている接続端子部分を完全にシールドケース内に収め、シールド線で各装置を電氣的に結ぶなどが考えられる。

次は、出力信号検出回路中の増幅回路の増幅率を可変できるようにする

ことである。本研究で使用した出力信号検出回路中の増幅回路は、大きなセンサ出力信号が出力信号検出回路に入っても、マイクロコンピュータやA/D変換回路の使用電圧5Vを超えないように増幅率を抑えているので、小さなセンサ出力信号の場合、十分な信号増幅ができない。これは、増幅回路の増幅率を固定しているためである。そこで、増幅回路の前段でセンサ出力信号の振幅を比較回路などで大小を判断し、そのセンサ出力信号に見合った増幅率で増幅させることである。これによって、更に小さい微小振動を検出できるようになるとと思われる。

次に、ターゲットの振動周波数が0.5kHz未満の振動振幅が測定できるようにすることである。本研究では、振動周波数が0.5kHz未満になると、マイクロコンピュータによる出力信号のサンプル取り込み時間がターゲットの振動周期より短くなるため、測定が不可能である。そこで、サンプル取り込み時間を長くすれば、更に低い振動周波数の微小振動を測定できるので、サンプリングレートを遅くして、出力信号の1点1点の振幅を取り込む時間間隔を長くすることである。つまり、センサの出力信号波形から山又は谷が2つ以上存在するかどうかを判断することによって、0.5kHz以上か未満かを判断し、未満であればサンプリングレートを遅くして、ターゲットの振動周期よりサンプル取り込み時間を長くすれば、0.5kHz未満の振動振幅を測定することが可能となる。これは、プログラムのサンプリング部分を改良することによって可能になるとと思われる。この改良によって、低域部分の微小振動を測定できるようになるので、IC回路などの生産過程で発生すると思われる周波数全域にわたって微小振動測定ができると思われる。

以上のように改善すると、ターゲットの振動振幅測定の精度を向上させたり、ターゲットの振動周波数測定の周波数範囲を広くさせたりすることができると思われる。また、この微小振動センサシステムを更に実用的なものにするには、次のようなことが考えられる。

本研究では、センサの最大感度を検出するために、センサ部を半波長以上ゆっくりと移動させて、そのときの最大出力振幅をマイクロコンピュータで求めていた。この処理過程は数秒の時間を要するので、瞬時にターゲットの振動振幅値を求めるには、センサ部を常に最大感度の位置に保持す

るための自動制御をすることである。そのためには、最初に最大感度位置を検出したら、常にその位置の出力振幅と前後の位置の出力振幅とを比較しながら、最大位置に移動することによって、センサの最大感度位置を保持することが可能となる。そこで、マイクロコンピュータの動作クロックを高いものにすることによって、リアルタイムでターゲットの振動振幅値を求めることができると思われる。

また、本研究の自動式による微小振動センサでは、半波長未満の振動振幅を対象としたが、半波長以上でも測定できるようにすれば、特定の製造工程だけでなく、更に広い範囲で利用できると思われる。そのためには、図 2.8 で示したターゲットの入力信号の変位が 0 のところ、つまり、出力信号の折り返し点のところを検出して、その間にいくつの正弦波形があるかをカウントし、更に折り返し点の部分の変位を正弦波補正によって求めれば、全体の振動振幅を正確に求めることができると思われる。そこで、マイクロコンピュータのメモリを増加させることによって、半波長以上の振動振幅を求めることができると思われる。

以上のような点を改良することによって、より充実した微小振動センサが可能になるとと思われる。

謝辞

本研究を行う機会を与えて下さいました愛知工業大学大学院工学研究科博士後期課程電気・材料工学専攻の工学博士山田諄教授には、本研究を始めるに当たり、多くのご助言を頂き、本研究推進のための自信と勇気を与えて下さいました。さらに、研究中には、適切なるご指導を多く頂き、学位論文の執筆までたどり着くことができました。本当にこれらのことに心より感謝いたします。また、同研究室の愛知工業大学大学院工学研究科博士後期課程電気・材料工学専攻の工学博士津田紀生准教授には、マイクロコンピュータやプログラムなどで色々のご指導、ご支援を頂き、更に本論文の副査まで引き受けていただき、深く感謝しています。

本論文の副査を引き受けて下さいました大学院工学研究科博士後期課程電気・材料工学専攻の工学博士内田悦行教授、同専攻の工学博士穂積直裕教授には、同様に適切なるご指導を頂き、誠に感謝しています。

さらに、共に実験、協力をしてくれた平成20年度大学院修了生の大江貴之君、平成19年度学部卒業生の布目正典君、原田雅士君、平成20年度学部卒業生の浅岡賢志君、浅野大輔君、そして現学部4年生の安藤泰生君、溝口敬太君にお礼申し上げます。

最後に、陰ながら支えてくれた妻に感謝の意を表したいと思います。

名和 靖彦

外部発表リスト

I. 学位請求に関する論文等

(1) 学術論文

- [1] Yasuhiko NAWA, Norio TSUDA, Jun YAMADA
Study on Small Vibration Sensor by Self-Coupling Effect of
Semiconductor Laser
The Review of Laser Engineering, Vol. 36, No. APLS Supplemental
Volume, pp. 1250-1253 (2008)
- [2] 名和靖彦, 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微小振動センサ
レーザー研究, Vol. 37, No. 8, pp. 619-623 (2009.8)
- [3] 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合効果を用いた微小振動の自動測定
電気学会論文誌C, Vol. 129, No. 12, pp. 2115-2120 (2009.12)

(2) 国際会議

- [1] Yasuhiko NAWA, Norio TSUDA, Jun YAMADA
Study on Small Vibration Sensor by Self-Coupling Effect of
Semiconductor Laser
The 6th Asia Pacific Laser Symposium, 30Ea4 (2008.1.30)

(3) 口頭発表

- [1] 名和靖彦, 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微小振動センサに関する研究
平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 0-166
(2007.9)
- [2] 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合効果を用いた微小振動センサの周波数依存性
平成 20 年度電気学会全国大会講演論文集, 1-131 (2008.3)

- [3] 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合型微小振動センサの正弦波補正
平成 20 年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会講演論文集, X VIII-1
(2008. 8)
- [4] 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合型微小振動センサの色別特性
平成 20 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 0-321
(2008. 9)
- [5] 名和靖彦, 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微小振動センサ
レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, E3-11p II 05 (2009. 1. 11)
- [6] 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合型微小振動センサの誤差特性
平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 0-128
(2009. 9)

II. その他の論文等

(1) 学術論文

- [1] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
光音響効果と自己結合効果を用いた非破壊内部欠陥検出
電気学会論文誌 C, Vol. 128, No. 12, pp. 1721-1726 (2008. 12)

(2) 口頭発表

- [1] 名和靖彦, 相木国男
超音波素子を用いた波動実験教材
第 53 回応用物理学関連連合講演会, 23a-P2-12 (2006. 3)
- [2] 名和靖彦, 相木国男
周期構造の逆格子と超音波回折実験
第 54 回応用物理学関連連合講演会, 28a-P4-4 (2007. 3)

- [3] 名和靖彦, 相木国男
 超音波を用いたレーダ原理の実験
 第 55 回応用物理学関連連合講演会, 28a-P6-18 (2008.3)
- [4] 名和靖彦, 藤本 裕, 相木国男
 マイクロ波ドップラー速度計教材の製作
 第 56 回応用物理学関連連合講演会, 31a-P9-11 (2009.3)

(3) その他

(3.1) 研究報告など

- [1] 山田 諄, 鈴木 潮, 名和靖彦
 高気圧アルゴンガスターゲットレーザプラズマの研究 I
 愛知工業大学研究報告, Vol. 12B, p. 21 (1977)
- [2] 名和靖彦, 鈴木 潮, 山田 諄
 高気圧アルゴンガスターゲットレーザプラズマの研究 II
 愛知工業大学研究報告, Vol. 13B, p. 11 (1978)
- [3] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
 光音響効果を用いた内部欠陥検出の自動化に関する研究
 愛知工業大学研究報告, Vol. 43, pp. 23-28 (2008.3)
- [4] 名和靖彦, 相木国男
 超音波素子を用いた波動実験教材
 愛知工科大学紀要, Vol. 4, pp. 41-47 (2007.3)
- [5] 名和靖彦, 相木国男
 超音波回折実験への逆格子の応用
 愛知工科大学紀要, Vol. 5, pp. 33-37 (2008.3)
- [6] 杉浦伸明, 石川雄二郎, 名和靖彦, 深田英明, 坂口鋼一
 実習・実験授業支援に向けた教材開発と授業適用の効果に関する研究
 愛知工科大学紀要, Vol. 5, pp. 91-94 (2008.3)
- [7] 名和靖彦, 相木国男
 超音波を用いたレーダ原理の実験
 愛知工科大学紀要, Vol. 6, pp. 49-52 (2009.3)

(3.2) 口頭発表

- [1] 山田 諄, 名和靖彦, 鈴木 潮, 奥田孝美
アルゴンガスターゲットレーザプラズマの膨張機構
日本物理学会春の分科会予稿集, 4p-R-12 (1977. 4. 4)
- [2] 山田 諄, 名和靖彦, 鈴木 潮, 奥田孝美
高気圧アルゴンガスターゲットレーザプラズマの成長機構
日本物理学会第 32 回年会予稿集, 10p-L-9 (1977. 10. 10)
- [3] 山田 諄, 名和靖彦, 鈴木 潮, 奥田孝美
高気圧気体によるルビーレーザ光の吸収
日本物理学会第 33 回年会予稿集, 3a-CB-11 (1978. 4. 3)
- [4] 坂口鋼一, 深田英明, 磯貝正弘, 渡部吉則, 名和靖彦
工学基礎実験の取り組みについて
応用物理学会応用物理教育分科会 物理教育に関するシンポジウム第
18 回, (2007. 2. 17)
- [5] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
光音響効果を用いた内部欠陥検出特性
平成 19 年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会講演論文集, XVIII-1
(2007. 8)
- [6] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
光音響効果を用いた内部欠陥検出の自動化
平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 0-167
(2007. 9)
- [7] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
光音響効果と自己結合効果を用いた内部欠陥の自動計測
レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会, E6-1pIV12 (2008. 2. 1)
- [8] 大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄
自己結合効果を用いた光音響効果による内部欠陥の自動計測
平成 20 年度電気学会全国大会講演論文集, 1-118 (2008. 3)
- [9] 山田浩之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田諄
半導体レーザーを用いた自己結合効果による微小変位センサ
第 9 回レーザー学会中部支部若手研究発表会, 17 (2009. 11. 27)