

レーザ測長システムの開発

落合 誠士^{*1)}・岡本 炳人^{*2)}・西原 一寛^{*3)}・近松 良知^{*4)}・中原 裕二^{*5)}

1. はじめに

科学技術の歴史を計測という一面からみると、長さを精密に測るということに大きな努力が払われてきた。今日でもこの問題は古くて新しいテーマであり、高度化した科学技術にとって超精密測長は益々重要となっている。

われわれが長さを測る最も手軽な方法としては、物差を用い目盛を読取ることであり、この基本の目盛を付ける手段と、読取る手段について種々考案されてきたが測定精度に限界がある。そこで光の波長を目盛単位として用いればより精密に測定できると考えられ積極的にこの応用を推し進め考案されたものがレーザ干渉計である。

この干渉計は、近年単に長さを精密に測るということだけでなく、その情報は移動物体の超精密位置制御に用いられており、その具現化のためにレーザ測長システムが導入されはじめている。

当社では、制御系に組込める「超精密センサシステム」の開発を目指しており、今回光波干渉を用いたMG-1000形レーザ測長システムの開発を終えた。本システムは簡単かつ高精度測定が可能で、生産現場は勿論のこと研究開発関係に於ても威力を発揮できる計測器であり、この原理および概要を紹介する。

2. MG-1000開発の狙い

長さを測る手段として一般に使われているものとしては、光リニアスケール、磁気スケールなどがある。これらのスケールは、使用環境が悪く高い測定精度の要求されない領域では多く用いられているが、取扱い上の問題で測定長さは2~3m程度である。また、中には分解能の高いものもあるが、精度は決して良いとは云えない。事実、これらのスケールの校正にはレーザ測長システムが用いられている。これら測長器の測定長さとの測定精度の関係をもとめたのが図1である。図に示すように、リ

ニアスケールや磁気スケールで測定できない領域をフォローできるのがレーザ測長システムであり、高精度な標準長さ計測器として普及段階にあるが、残念なことに輸入品に頼っているのが実状である。当社が計測分野を手掛けるにあたり重視した点は、

- (1) レーザ測長システムの心臓部となる周波数安定化 He-Ne レーザの自社開発。
- (2) 標準長さ計測器として信頼度の高いシステムの開発。
- (3) 自動計測システムへの応用を可能とする1軸の制御用センサとしての開発。

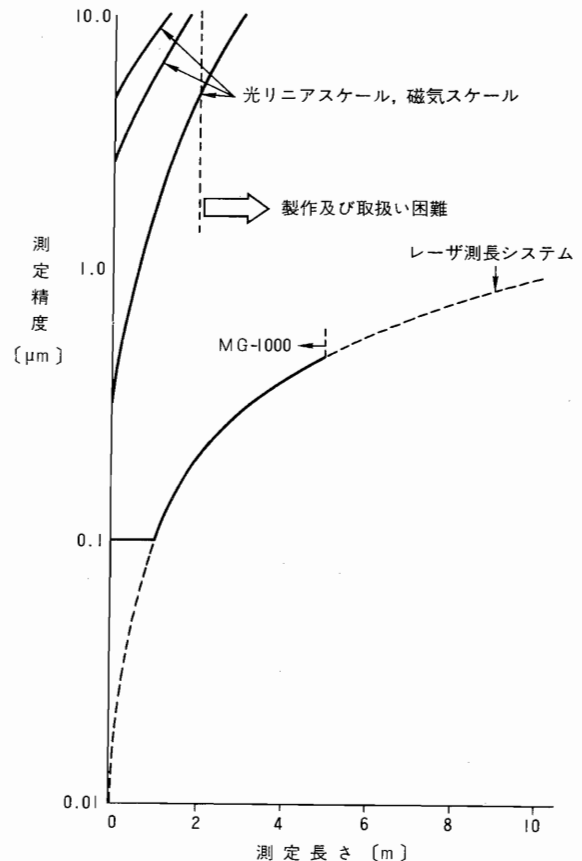


図1. 各種測長器 測定長さとの測定精度

*1) 研究部 計測制御第一グループ担当部長
 *2) 研究部 レーザ測長担当課長
 *3) 研究部 レーザ測長担当グループ
 *4) 同上
 *5) 同上

- (4) ディスプレイユニットに CRT を採用，対話式設定法を取り入れるなどマンマシンインターフェイスを考慮。
 - (5) デジタルスケールの精度領域を超えた，ローコストで量産性の良いシステムの開発。
- などが挙げられる。

3. 干渉測長システムの原理^{1) 2)}

3.1 マイケルソンの干渉計

本システムの光学基本原理は，図 2 に示すマイケルソンの干渉計である。光源から出射した光は，半透鏡で参照光と測定光に分けそれらが反射鏡で反射し，再び半透鏡上で重なり合うことにより干渉縞（以下フリンジと記す）が生じる。

ここで参照光を，

$$a_1 \cos \omega t \tag{1}$$

測定光を，

$$a_2 \cos \left(\omega t \pm \frac{2\pi}{\lambda} 2x \right) \tag{2}$$

ただし， x : 移動量
 λ : 波長

とすると，フリンジの振幅は，

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \left(-\frac{2\pi}{\lambda} 2x \right) \tag{3}$$

で表される。これは，測定光側の反射鏡が図 2 に於て左右に $\lambda/2$ 移動するとフリンジの強度が 1 周期変化することを示している。この強度変化の回数を計数すれば，反

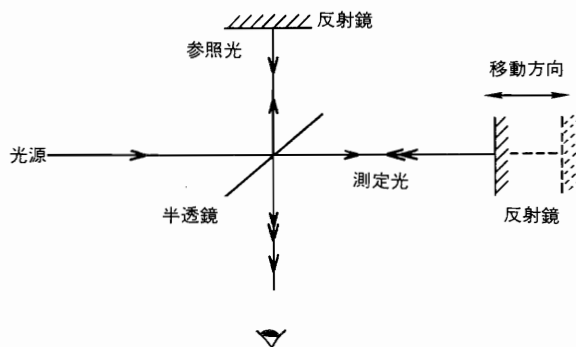


図 2 マイケルソン干渉計

射鏡の移動量が測定できる。ただし，フリンジの計数はできても反射鏡の移動方向の判別ができないので，移動時の振動による累積誤差が生じる。この問題点を解決するため本システムでは，以下に述べる偏光成分間位相差干渉法を採用した。

3.2 偏光成分間位相差干渉法

本システムの光学構成を 図 3 に示す。周波数安定化レーザより出射された光は，直線偏光であり，その偏光角を 45° に設定する。光の進行方向と入射平面の法線を含む面内に振動する成分を P 偏光，これと垂直な面内に振動する成分を S 偏光とし，各偏光成分の振幅を $2a_s$ $2a_p$ ，とすると出射の各成分 A_p ， A_s は，

$$A_p = a_p \cdot \cos \omega t \tag{4}$$

$$A_s = a_s \cdot \cos \omega t \tag{5}$$

で示す式で表され，独立かつ位相のそろった 2 つの光であるとみなすことができる。

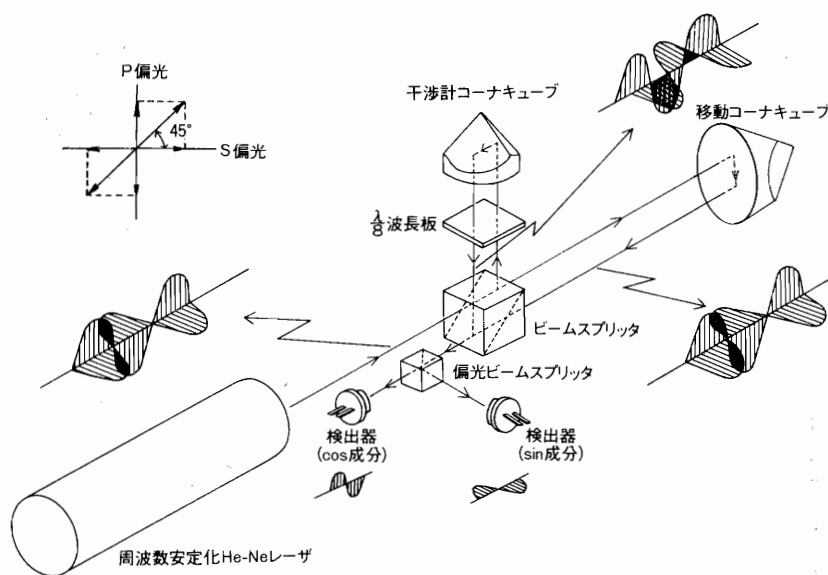


図 3 MG-1000レーザ測長システム光学構成

ビームスプリッタに入射した光は、2方向に振幅分割され一方は移動コーナキューブ側へ、もう一方は干渉計コーナキューブへ向う。

基本のマイケルソン干渉計では、フリンジを観測しても位相のそろった光であるため移動コーナキューブの移動方向が判別できない。そこで光の偏光成分間に位相差を付ければ判別することができる。干渉計コーナキューブに向った光は、図3に示すように反射し戻ってくる間に $\lambda/8$ 波長板を2回透過し $\pi/2$ 位相差が生じ、

$$A_p^I = a_p \cos \omega t \quad (6)$$

$$A_s^I = a_s \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

となる。また、移動コーナキューブから戻ってくる光は移動量を x とすると、

$$A_p^m = a_p \cos(\omega t \pm \varphi) \quad (8)$$

$$A_s^m = a_s \cos(\omega t \pm \varphi) \quad (9)$$

ただし、 λ : 光の波長

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2x$$

で表される。これらの光を再びビームスプリッタで重ね合わせフリンジを生成させ、各成分を U_p 、 U_s とすると、

$$U_s^2 = a_p^2 + a_s^2 + 2a_p a_s \cos(\pm \varphi) \quad (10)$$

$$U_p^2 = a_p^2 + a_s^2 + 2a_p a_s \cos(\pm \varphi - \frac{\pi}{2}) \quad (11)$$

で表される。これらP成分とS成分のフリンジは、偏光ビームスプリッタを用いそれぞれ独立のフリンジとして取出すことができ、検出器で電気信号に変換すると信号の周期は図4に示すような関係になる。移動コーナキューブが干渉計から遠ざかる場合(正方向)は、検出器①から $\cos \varphi$ の信号が得られ、検出器②から $-\sin \varphi$ の信号が得られる。また、移動コーナキューブが干渉計に近づく場合(逆方向)は、各検出器から先程とは逆位相関係の信号が得られる。この位相差の逆転を利用して移動方向の判別を行う。

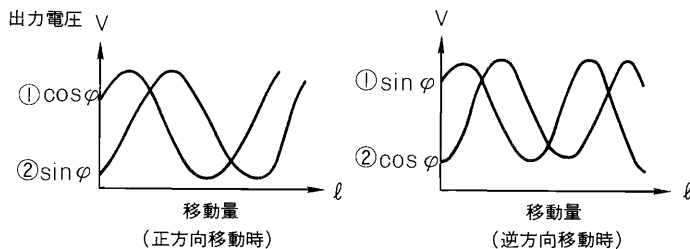


図4 移動コーナキューブの移動方向による出力信号の関係

4. 技術的な課題

レーザ測長システムは、前に述べた原理に基づいており、目標とした計測システムを構成するために、レーザ波長の安定性、精度および分解能の向上、設置されるシステム環境の問題、システム使用上の問題などさまざまな技術的課題を検討した。

4.1 周波数安定化レーザ

He-Neレーザは、その単色性および可干渉性のよきから種々の計測に用いられているが、一般に使用されているHe-Neレーザの利得曲線の幅は、図5に示すように1~2GHz程度であり、レーザの共振器長に応じて数本の縦モードが現われる。このモードは、周囲の温度変化やレーザ自身の発熱により共振器長が変動すると発振周波数が利得曲線内で変化する。このため、数十cm以上の干渉測長を 1×10^{-7} 以上の精度で行うにはレーザ発振周波数の安定性と再現性が重要になる³⁾。安定化の方法にはさまざまなものがあり、本システムに於てはシンプルなヒータコントロール方式を採用した。

ここで述べた複数本の縦モードは、互いに直交した直線偏光となっている。共振器長が25cm以下のレーザに於て発振光を2つの直線偏光に分割し、それぞれの偏光の強度を観測すると、周波数の変化に伴って強度比も利得曲線にそって周期的に変化する。したがって、偏光の強度比が一定となるよう共振器の長さを制御すれば、結果として周波数の安定化したレーザ光が得られる。本システムに採用している周波数安定化He-Neレーザの波長は、1983年10月パリで開催された第17回国際度量衡委員会の可決内容に基づいており、その定義は「1メートルは、光が真空中を $1/299792458$ 秒間に進む行程に等しい長さ」である。この定義の具現化の方法として、飽和吸収による周波数安定化レーザが提案され、それに用いる吸収分子ガス2種類、また、その飽和吸収スペクトル成分5種類が決定された。この中のヨウ素を用いた安定化He-Neレーザを、周波数標準器として採用することにした。^{4) 5)}

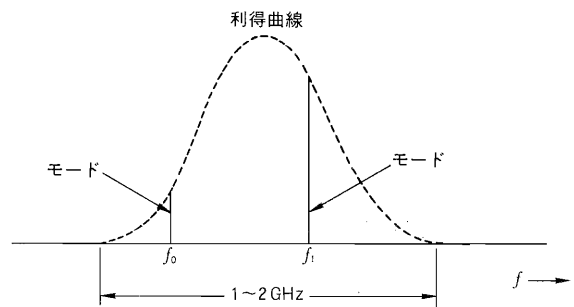


図5 利得曲線と縦モード周波数の位置

〔ヨウ素安定化 He-Ne レーザの仕様〕

$$f = 473\ 612\ 214.8 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 632\ 991\ 398.1 \text{ nm}$$

$$\text{正確度 } \pm 1 \times 10^{-9}$$

$$\text{安定度 } 1.2 \times 10^{-10}$$

なお、これは $^{127}\text{I}_2$ の飽和吸収スペクトルの成分 i を基準にした値である。

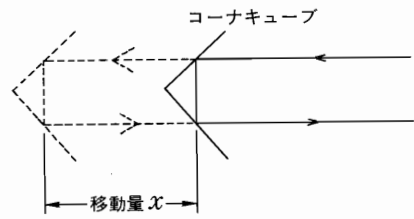


図 6 コーナキューブ移動による光路の関係

4.2 高分解能化

干渉測長の原理で長さを測定するには、フリンジの数にレーザの波長を乗算すれば距離が求まる。マイケルソン干渉計の場合、図 6 に示すように移動量 x に対し光路が $2x$ となるため測定距離は、

$$x = \frac{\lambda}{2} N \tag{12}$$

ただし、 N ：フリンジ数

で求められ測定分解能は、

$$\frac{\lambda}{2} \div \frac{0.633 \mu\text{m}}{2} \div 0.316 \mu\text{m} \tag{13}$$

が得られる。しかし、超精密測長システムとして、基本性能の $0.1 \mu\text{m}$ 精度を満足させるには $0.05 \mu\text{m}$ 以下の最小分解能が必要である。それゆえ、図 7 に示すように検出器で得られた信号①と②を用い、電気的に 8 分割して、

$$\frac{\lambda}{2} \times \frac{1}{8} \div \frac{0.633 \mu\text{m}}{16} \div 0.04 \mu\text{m} \tag{14}$$

の分解能を目標とした。

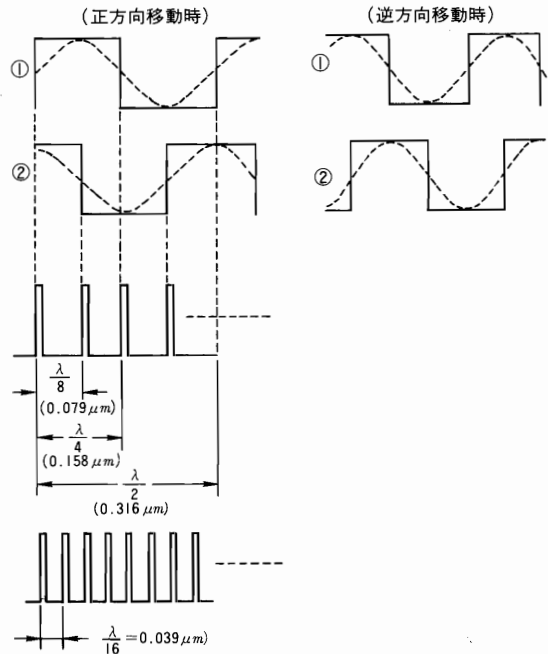


図 7 受光信号の細分化とパルス信号化

4.3 高速応答性の改善

レーザ測長システムの測定対象は、移動物体の直線運動量であるので早い移動速度に対する応答性の改善が要望されていた。

フリンジは高速移動時に於ても正確に生成されるが、これを電気信号に変換しフリンジ分割する電子回路技術が重要となる。特に周波数特性と、信号伝送路での S/N の改善である。また、測定対象物体の運動モードによる信号処理も注意しなければならない。つまり急激な移動開始や停止、および、測定系の振動による微小な往復運動など非定常的な運動モードに於ても安定した測定が求められる。

本システムでは、 20 m/min 以上の高速応答性が得られる独自回路を検討した。

4.4 環境上の問題

使用上での問題は、別の項で述べるので詳細を省くが、サブミクロン測定を行うには測定環境の整備が注意深く求められる。つまり恒圧、恒温、恒湿、除振対策が重要となる。

4.4.1 大気中に於る光速補正^{3) 4) 5)}

レーザ測長システムは、通常大気中で使用されるが、ここで屈折率と波長の関係を考えてみると、真空中に於る光速は一定であり、真空中での光の波長 λ_0 は、

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \tag{15}$$

ただし、 f ：レーザの発振周波数

c ：真空中に於る光速

$$299792458 \text{ m/s}$$

で表される。光は伝播する媒質により、その速度が真空中に比して遅くなる。これは見掛け上波長が短くなることを意味する。この波長変化の割合を屈折率 (n) という。屈折率と波長との関係式は、

$$n_0 \lambda_0 = n \lambda \tag{16}$$

ただし、 n_0 ：真空の屈折率

λ ：測定媒質中の波長

n ：測定媒質の屈折率

で表される。真空中の屈折率 n_0 は 1 であるから (16) 式に代入すると、

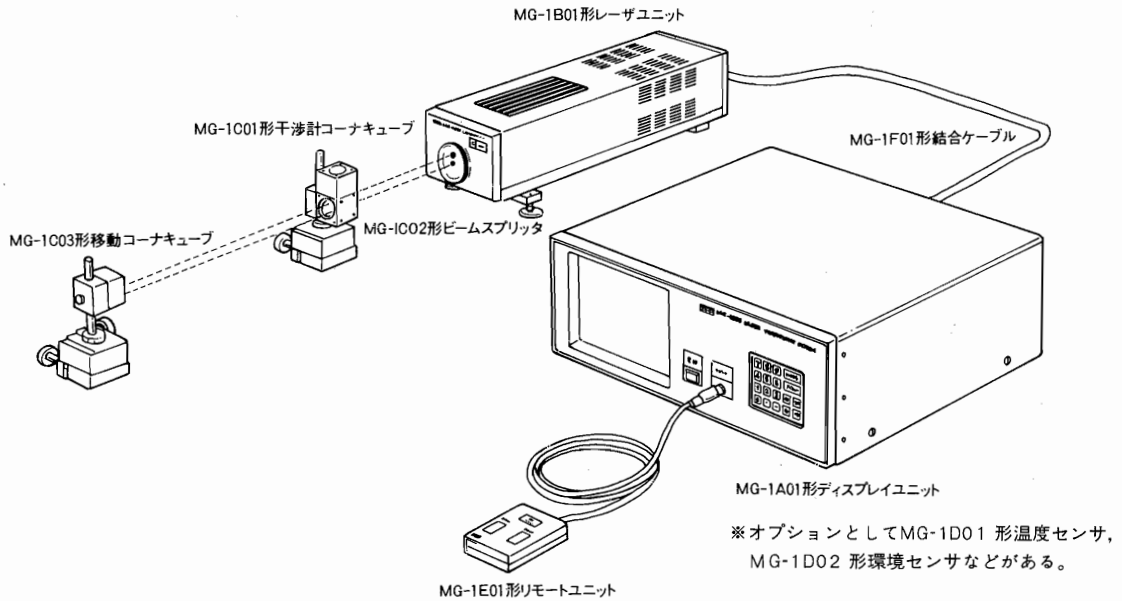


図8 MG-1000 基本システム構成

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (17)$$

になり、 n を求めれば測定基準となる波長 λ の補正を行うことができる。

本システムで使用しているHe-Neレーザの波長の場合、この屈折率 n を与える式は、

$$\begin{aligned} (n-1) \times 10^6 &= 0.3836392 \times P \\ &\times \left[\frac{1 + 10^{-6} \times P(0.817 - 0.0133T)}{1 + 0.0036610 \times T} \right] \\ &- 5.6083433 f_0 \cdot H \times 10^{-4} \quad (18) \end{aligned}$$

ただし、 P ：気圧 (mmHg)
 T ：気温 (°C)
 f_0 ：飽和水蒸気圧 (mmHg)
 H ：相対湿度 (%)

で示される。^{6) 7)}つまり空气中を伝播する光速度は、その気圧、気温、相対湿度によって変化することを表している。

4.4.2 波長補正機能

通常測定環境では、「測定光路を真空に保つ」のは困難である。測定環境を整備して、計測値を変化させる要因を一定に保つことは不可能に近い。即ち、レーザ測長システムは、測定される場所の環境変化があることを前提とし、環境センサからのサンプリングデータを収集する機能、そのデータに基づいて定時的に処理された波長値を用い測定データを生成、波長補正演算する機能を標準的に必要とする。

5. レーザ測長システムの実際

レーザ測長システムを実現するための狙いや、技術課題の検討を通して、それが具備すべき条件を明らかにし、システムの構築作業を進めた。以下に、その具体的システム構成及び製品仕様、そして開発のポイントを順を追って述べる。

5.1 基本システムの構成

基本システムは、図8に示すような、干渉計を含む光学ユニット、レーザユニット、および、ディスプレイユニットなどで構成されている。

光学系については、先にも述べているので、ここではレーザユニットとディスプレイユニットについて話を進める。

レーザユニットには、周波数安定化レーザ、レーザ投受光光学部、光電変換部、およびフリンジ処理回路などレーザに関係するすべての機能を集約している。ここで生成されたフリンジ信号は、ディスプレイユニットへケーブル伝送される。電源は熱的影響を最小限に押えるため、ディスプレイユニットから供給した。

ディスプレイユニットは、計測処理部と入出力処理部からなっている。計測処理部は、フリンジ分割回路、方向判別回路、フリンジカウンタ、波長補正演算器、および、環境センサとのインターフェースなど計測情報を処理するすべての機能を集約している。また入出力処理部はマンマシン機能を効率化するためのCRTディスプレイとキーボードスイッチや外部との通信インターフェースなどで構成した。

これらの関係を図9にブロック図で示す。

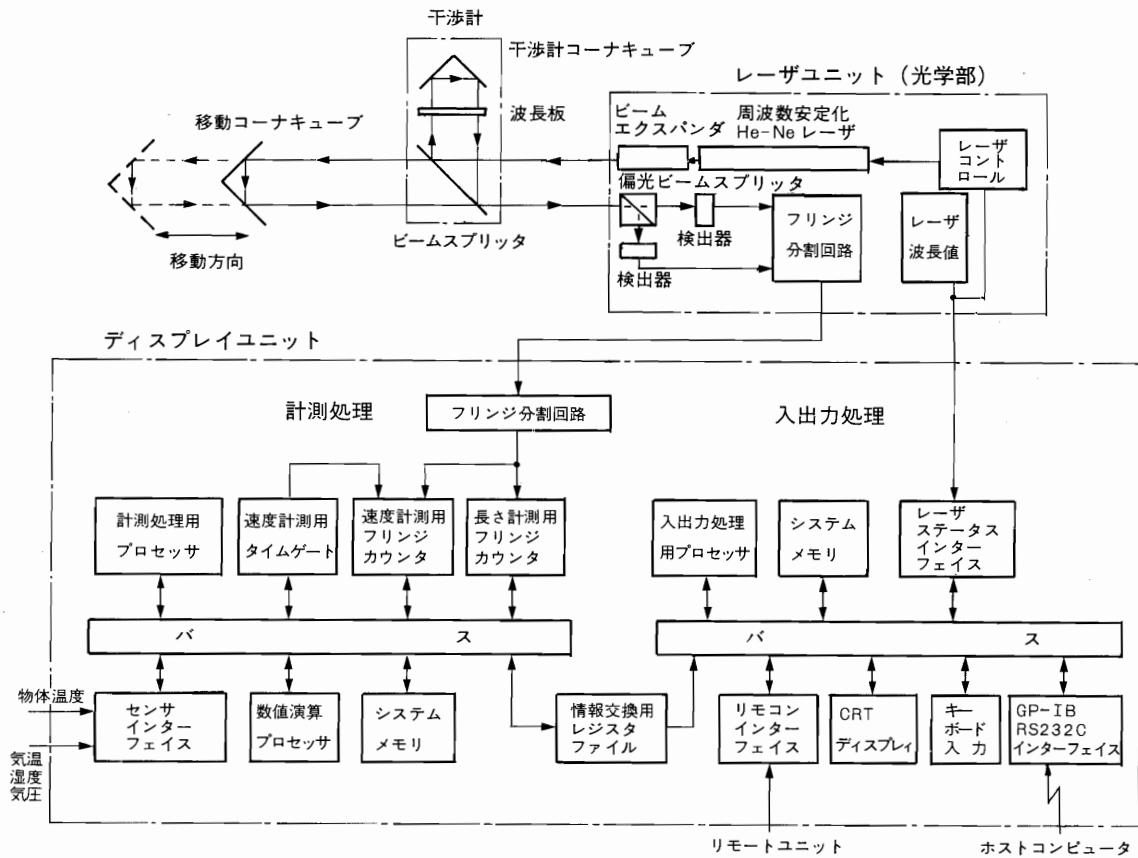


図9 MG-1000レーザ測長システムブロック図

5.2 製品仕様

本システムの製品仕様は一般性能仕様、ディスプレイユニット仕様、レーザユニット仕様に分け表1~3に示す。

5.3 レーザユニット開発のポイント

レーザユニットは、測定精度を決定する要素を含む重要な機能を持っているため設計に際し特に留意した点を以下に述べる。

5.3.1 レーザの安定度と周波数校正

本システムに使用しているレーザの原理図を図10に示す。出射光は、偏光ビームスプリッタでそれぞれの偏光成分に分割され検出器で電圧に変換される。その電圧量を適当な値に増幅し、ヒータに流す電流量を制御して共振器長さを制御している。しかし、周囲の環境変化により検出器の感度や回路系の特性が変動し、安定度を高く保つことが困難となる。そこでレーザ発振周波数の長期安定性およびその再現性を得るため、補正回路を用いそれらの向上を図っている。

レーザ単体の安定度を評価するには、先に述べたように共振器長が $\lambda/2$ 変化すると偏光の強度と発振周波数が周期的に変化するので、その制御時の強度変化量を非制御時のそれで割ってやればよい。さらに制御回路系の

表1 一般性能仕様

基本測定項目	1軸の長さ、速度の同時および単独測定	
測定原理	偏光成分間位相差干渉法	
測定範囲	長さ：最大5m 速度：最大21m/min	
測定分解能	長さ：0.04 μm ($\lambda/16$) 速度：0.1mm/min	
測定精度	長さ： ± 0.1 ppm (ただしレーザ光の波長補正が正確な時) 速度： $\pm 0.1\%$	
アップデートレート	長さ、速度同時測定の場合：40ms 長さ、速度単独測定の場合：20ms	
動作温度範囲	0~40°C (ただし測定中における周囲温度変化は $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内とする)	
動作湿度範囲	10~95% (ただし結露しないこと)	
ケーブルの長さ	レーザユニット→ディスプレイユニット間	5m
	ディスプレイユニット電源ケーブル	:2.5m
使用電源	AC100V $\pm 10\%$ (50/60Hz)	
消費電力および重量 (約)	MG-1A01 : 200VA	16kg
	MG-1B01 : (32W)	8.5kg
	MG-1C01 : —	285g
	MG-1C02 : —	245g
	MG-1C03 : —	260g

表2 レーザユニット仕様

使用レーザ	単一周波数安定化He-Neレーザ
チューニング方式	ヒータコントロール方式
ウォームアップ時間	15分以内
真空中の波長	632.991 nm
最大出力	1 mW
レーザビーム径	7mm ϕ

表3 ディスプレイユニット仕様

表 示	C R T
表 示 内 容	測定長さと速度及び測定条件を同時測定表示
長 さ	最大表示桁数 10桁 単位は μm 、mm、inchの切替可能
速 度	最大表示 21000.0mm/min
環 境	気圧入力範囲 685~785mmHg
	温度入力範囲 0~40°C
	湿度入力範囲 0~100%
(注)環境の各値は手動にてキー入力可能。 センサを使用すると湿度以外は自動計測となる。	
長さプリセット	-99999.99999~+99999.99999mm
平均化のためのサンプリング回数	1~50回
物 体 温 度	入 力 数 3入力
	入力温度範囲 0~50°C
(注)この値は手動にてキー入力可能。 センサを使用すると自動計測となる。	
方 向	コーナキューブの移動方向により、土に設定可能

(注)ディスプレイユニットの通信形態は「GP-IB」と「RS 232C」の2方式がある。

ドリフトなども考慮した安定度評価を行う場合は、より高安定な周波数安定化レーザとビートを取りその変動を測定すればよい。図11は、本システムに採用しているレーザの偏光の強度変化を記録した例である。左側の変動が大きく現われているのは、共振器長の熱膨長に伴う変化を示しており、制御に入ると1分間以内に安定状態になることが分る。

さて、この周波数安定化レーザの周波数の校正とその安定度の測定には、ヨウ素安定化 He-Ne レーザを用いることはすでに述べたが、わが国に於てこのレーザを保有しているのは通産省工業技術院計量研究所と北海道大学工学部田中敬一教授の研究室などである。

このため、当社に於る周波数標準器は、水晶発振器安定化 He-Ne レーザを特別に開発し、田中研究室のヨウ素安定化 He-Ne レーザと比較した。その結果このレーザの安定度は、 10^{-9} オーダと高安定であり測定データを図12に示す。そこで、この水晶発振安定化 He-Ne レーザを

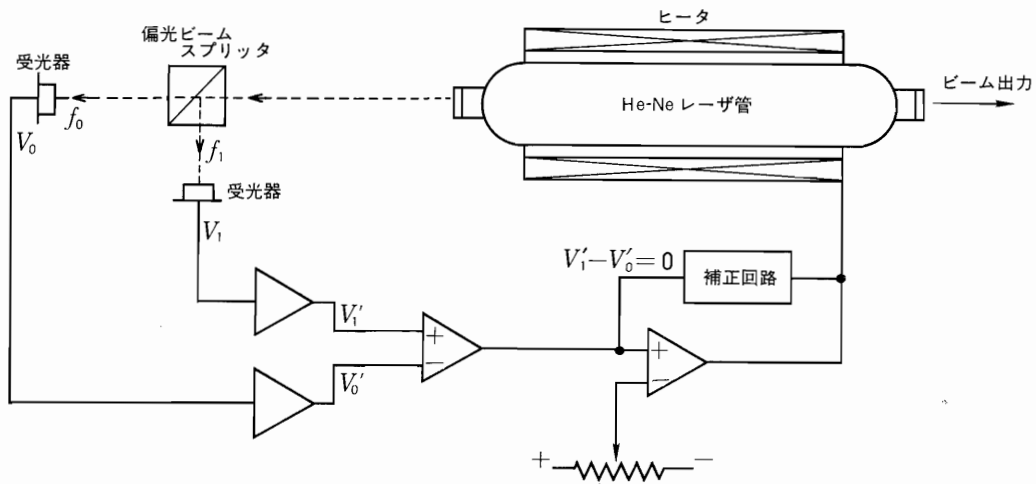


図10 周波数安定化レーザ原理図

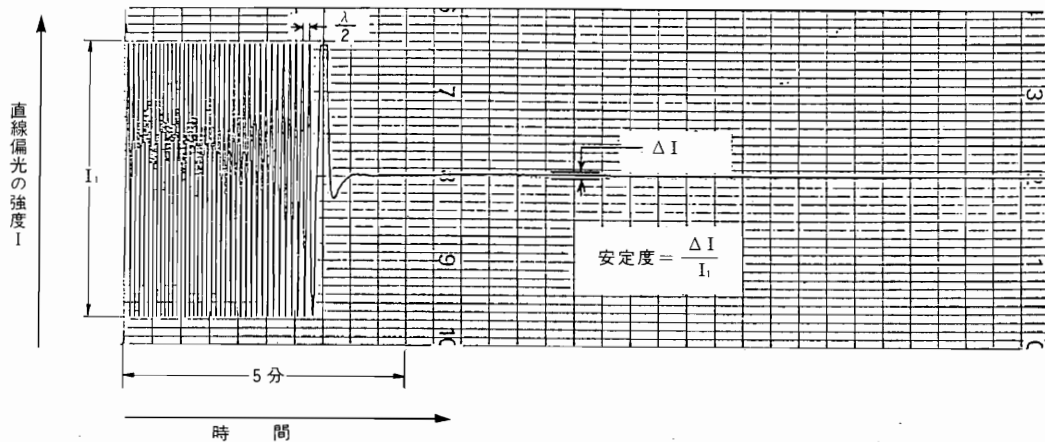


図11 レーザ安定前後の偏光強度記録例(受光器の出力)

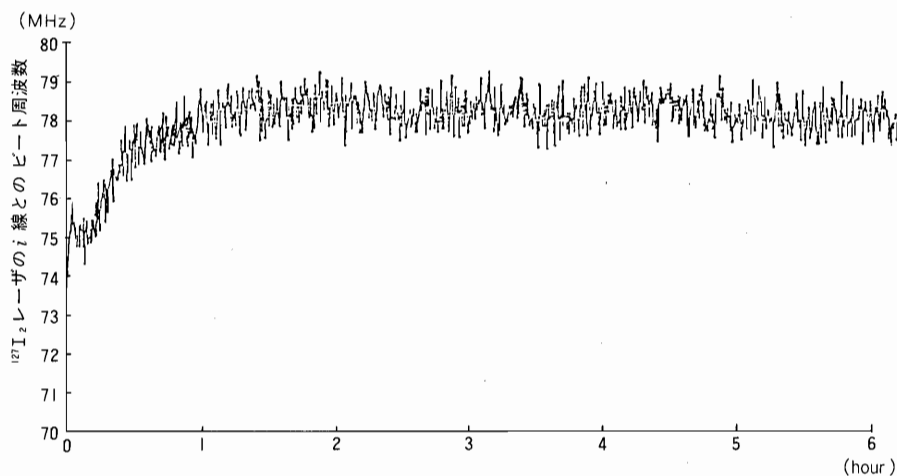


図12 水晶発振子安定化He-Ne レーザの安定度測定結果
(安定動作直後からの測定)

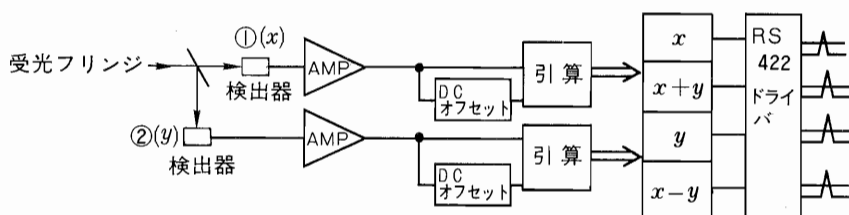


図13 フリンジ処理回路のブロック図

本システムのレーザの周波数の校正および安定度測定に用い、その安定度が 1×10^{-7} より良い結果であることを確認している。

5.3.2 光学系の適性化⁹⁾

レーザ測長システムの光軸調整を行う場合は、ビーム径が小さいと調整が難かしくなる。しかし、光が空気中を伝播するとき空気のゆらぎがあると、フリンジパターンのコントラストが低下するのでビーム径を無やみに拡げることはできない。本システムでは、出射ビーム径をビームエキスパンダで7mmφに拡大し目標測定距離5m以内でのゆらぎによる影響を押え、光軸調整を容易に、かつビームの平行度を保つようその適性化を図った。

受光穴に戻ってくるフリンジは、偏光ビームスプリッタで分割され検出器で電気信号に変換されるので、この偏光ビームスプリッタの性能が電気信号の S/N を決定するため消光比の高い光学部品を採用した。

5.3.3 フリンジ信号の処理

図13に示す検出器①(x)、②(y)で変換された電気信号は、直流オフセット成分を差引き交流成分として取り出される。このxおよびyには90°の位相差がついており、それぞれの周期は $\lambda/2$ に対応していることは先に述べたとおりである。本回路ではさらに $x+y$ 、 $x-y$ の演算を行い4つの矩形波を生成しその相互の位相差は45°で

あり、この信号をディスプレイユニット側へ伝送している。

5.3.4 ユニットの互換性

He-Neレーザの発振周波数は、そのレーザ媒質であるNeの性状、種類によって個々に異った値をとり、中心周波数に比べ数十～数百MHz程度の分散が生じる。これはたとえ利得曲線のピークにモードがたつよう周波数制御を行っても、その波長の絶対値がレーザごとに数十～数百fm異なることを意味している。それ故、干渉測定に於て測定値を計算する時にこのレーザの波長を用いるが、この処理はディスプレイユニット側で行うためレーザユニット間に互換性がなくなる。

この問題を解決するために本システムでは、周波数安定化レーザの発振周波数の測定を個々に行い、それぞれ個有の値を書込んだメモリ回路をレーザユニット内部に設けた。レーザの予熱中にこの値は、ディスプレイユニット側へ送られる。

5.4 ディスプレイユニット開発のポイント

ディスプレイユニットは、実質的な測長情報の処理とすべてのマンマシン機能を統括するものである。設計にあたり留意した点を以下に述べる。

5.4.1 リアルタイム計測の実現

レーザ測長システムは、長さ測定、演算、表示、通信

などすべての項目に於て、リアルタイム処理性の確保が重要なポイントとなる。

計測部に於ては、レーザユニットから伝送されたフリッジ信号を8分割し高速カウンタへ入力する。ここで得られたデータは波長の関数であるため、環境データで補正された正確な波長を高速に乘じなければならない。この波長もまた、使用環境の状態変化をリアルタイムに捕え高速で補正計算しなければならない。

また、入出力部では測長データのほか環境データもリアルタイムで表示しなければならない。

このような多項目に亘る処理のリアルタイム性を確保し高速演算を行わせるため、計測処理と入出力処理の個々にプロセッサを配置し、特に数値演算の多い計測処理部には数値演算専用のコプロセッサを配備した。これら3個のプロセッサは、同時並列で実行される分散形マルチプロセッサを構成している。

つまり、計測処理部は、生成した測長データを即刻レジスタファイルを経由して入出力処理部へ引渡し、再び次の計測処理に移る。一方、引渡されたデータは、入出力処理部で加工処理が施され、CRTディスプレイや通信インターフェイス上へ出力される。このように2個のプロセッサを専門的に、かつサイクリックにオーバーラップ処理をさせることによって処理速度の改善を図った。

5.4.2 高分解能パルスの生成

目標とする $0.1\mu\text{m}$ 精度、 $0.04\mu\text{m}$ 分解能を実現するには、先にも述べたように光学的に得られた $\lambda/2$ のフリッジ信号をさらに電子回路で8分割することが必要である。これはレーザユニットから伝送される $\lambda/2$ 周期の 45° 位相差を持つ4相パルスに論理的演算を施し、 $\lambda/16$ の単位パルスを生成している。また、この回路の周辺機能として、コーナキューブの移動方向を判別する回路も併せ持たせるようにした。

この単位パルスと方向判別信号を次段の可逆計数回路へ入力することによって、未補正の測長データが得られる。

5.4.3 高精度演算による波長補正

レーザ測長システムは、周囲環境の変化に従って波長を逐次的に補正する機能が必要である。

波長補正は、十数回の浮動小数点四則演算と数回のテーブルルックアップを行わねばならず、またこの要求される演算精度も10桁以上を必要とする。このことからIEEE規格に準拠する64ビット浮動小数点演算プロセッサを採用し、処理の高精度化、高速化を実現した。

5.4.4 レーザユニットとの通信

通常レーザユニットは、測長対象に近接して配置され

るが、ディスプレイユニットは、その近辺に設置されるとは限らない。しかも、レーザユニットとディスプレイユニット間は、高速高帯域のフリッジ信号が伝送される。この伝送品質は、測長精度に直接影響を与えるためRS422伝送方式を取り入れS/N改善に努めた。また、前述したように個々の周波数安定化レーザが持つ固有波長を読込む回路や、レーザ自身の動作状態を常に監視する回路なども装備した。

5.4.5 システム化対応

レーザ測長システムは、さまざまな分野で多様な使い方がされ、他の測定システムや制御システムと組合せてシステム構築を行うことも多いと思われる。この配慮から測定データを他のシステムへ伝送したり、あるいは、設定データを他のシステムから制御できるように計測標準バスであるGP-IBインターフェイス、または、汎用シリアル通信インターフェイスとしてRS232Cのいずれかを装備できるようにした。

5.4.6 マンマシン機能の充実

レーザ測長システムは、測定前の準備、測定中、測定終了後の3段階で操作が行われ、各操作とも多項目の設定や指示が必要となる。これらの操作を分りやすく、容易に行えるよう次の点に留意した。

- (1) CRTディスプレイを搭載し、測定データを測定時点での環境条件とともに画面表示し見やすくした。また、単位変換や桁数の変更も容易に行えるようにするなど操作性の向上に努めた。測定中の画面を図14に示す。
- (2) 各種設定に於ては、各設定ごとの画面を用意し、その設定もメニュー選択による対話方式によって行えるようにした。
- (3) 光学系のアライメント（光軸合せ調整）を、短時間で終了させるような支援機能を用意した。画面からの指示手順で、画面上に表示された光学系の調整度合を示す棒グラフを見ながら調整すれば、おおむねアライメント作業を完了させることができる。
- (4) エラー表示は、エラーメッセージとともに可能な限りエラー要因を併記し、ユーザの迅速な対処が行えるように配慮した。

5.4.7 シンプルなソフトウェア

レーザ測長システムのソフトウェア体系は、図15に示すようなプログラムルーチンで構成されている。ここには、モニタプログラムと呼ばれるような全体を統括するソフトウェアは存在しない。これは何よりもオンラインでリアルタイムな測定を行わなければならない、ソフトウェアによるオーバーヘッドタイムを最小限に留めたいと

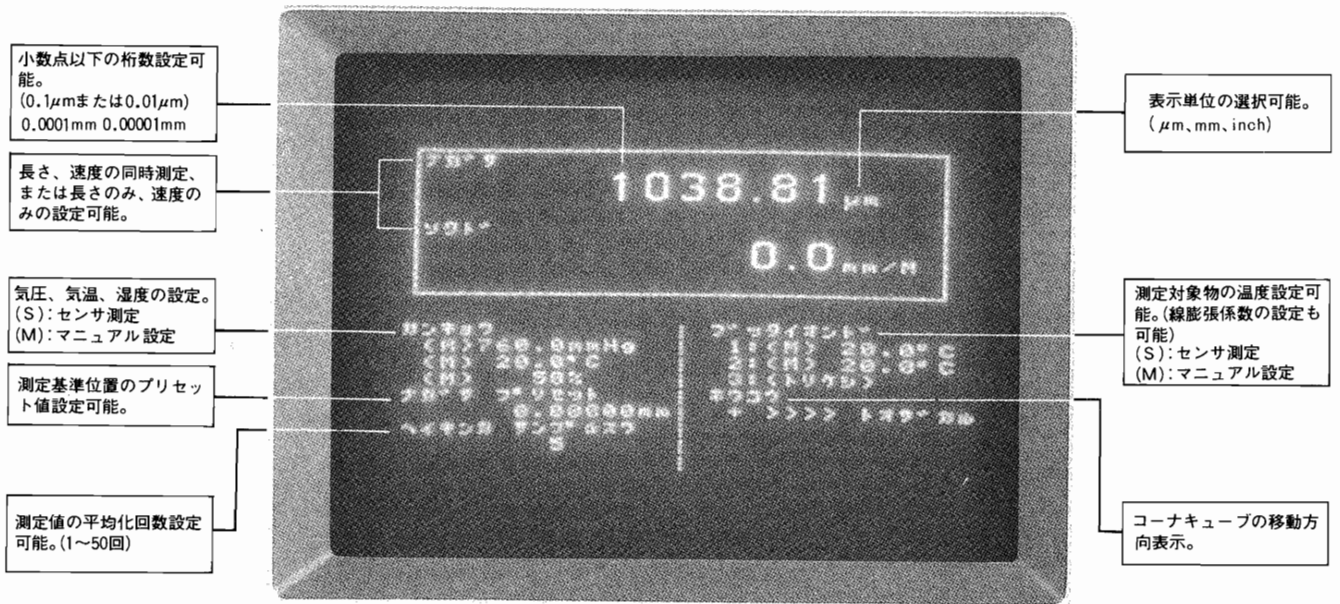


図 14 CRT ディスプレイ測定中の標準画面

願った結果である。したがって、各プログラムの起動は、実行中のプログラムから起動をかける場合や、定時的に起動される場合、および直接ハードウェアから起動される場合があり、これらはインターラプトルーチンに於てて協調動作を行う構成をとっている。

作成されたソフトウェアは、計測処理用のものとディスプレイコンソール制御を含む入出力処理用のものに大別される。計測処理は、計数されたフリッジ数にスケールファクタを乗じて長さの単位変換や速度変換をする測定処理と、定時的にサンプリングされる環境センサからのセンサ情報を読み込み波長を補正する補正処理よりなっている。入出力処理は、マンマシン機能を実現させる画面処理、GP-IB や RS232C の通信を制御する通信処理、および各種エラーを一括して扱うエラー処理からなっている。

また、本システムはマルチプロセッサ構成をとっており、2つのプロセッサを結合するためのソフトウェアが存在する。両者の情報交換は、中間に介在するレジスタファイルをメールアドレスと見立てて互いに伝えたい情報を書込んだ後、相手先のプロセッサに対して割り込みを発生させその意志を伝える方式をとった。これらは、セマフォシーケンスに従って統制され、お互いにデッドロックに陥らないようになっている。

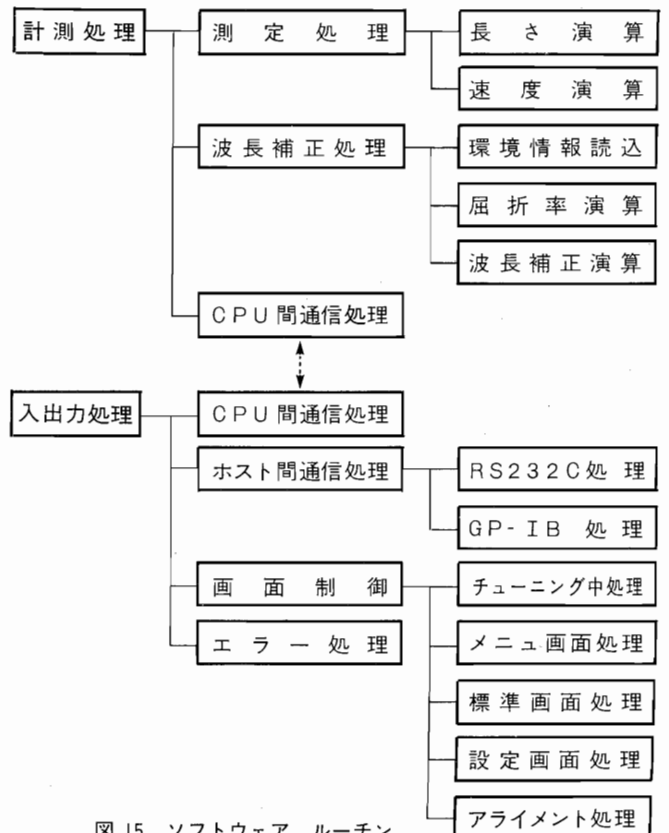
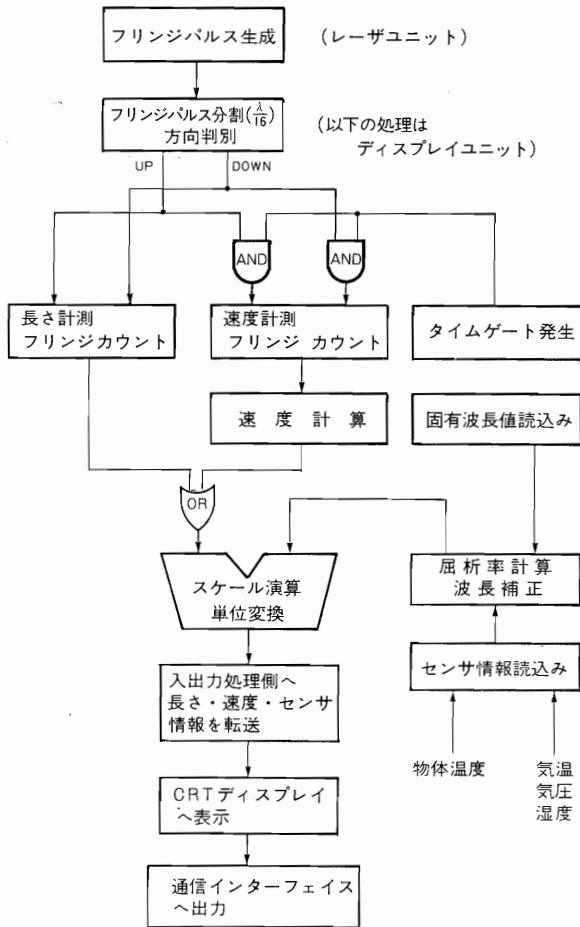


図 15 ソフトウェア ルーチン

5.4.8 測長データの流れ

今までに述べたハードウェアとソフトウェアについて
の話をまとめ、測長データの流れを次に示す。



6. 高精度測定法

6.1 測定の誤差要因

図16は、レーザ測長システム的应用としてマシニングセンタのテーブル移動精度を校正している例である。干渉計は、Y軸移動方向のテーブルにマグネットスタンドで設置し、移動コーナキューブはX軸移動方向のツールチャックにセットしている。

レーザ測長に於て正確な測定をするには、測定誤差となる要因を取り除くことが重要である。その要因をまとめたものを図17に示す⁹⁾。つまり空気の屈折率変化、熱膨張による測定物の長さの変化、測定系の弾性変形に伴う光学位置変動による測定値変化、そして、測定光学系の設置時の誤差などが挙げられこれらを次に説明する。

6.1.1 空気の屈折率変化

空気の屈折率変化による波長の変化は、4.4.1で述べたように補正が可能であり、環境センサによる自動補正や他の計測器で得られた補正値をマニュアルにより入力する方法がとられる。しかし、測定光路が長い場合はその分布にバラツキが生じやすいため、できる限り均一になるよう考慮する必要がある。測定光路付近に計測器などの発熱源を近づけると空気の対流が発生し、正確な補正が難しくなる。対策の一つとして、測定光路をベローズやシートなどで保護すれば誤差を軽減することも可能である。また、最近の報告では、人間が吐出する炭酸ガスの影響も考慮の対象にすべきであるとの考え方もある¹⁰⁾。ただし、測定光路を真空中に設置できればこれらを考慮する必要はない。

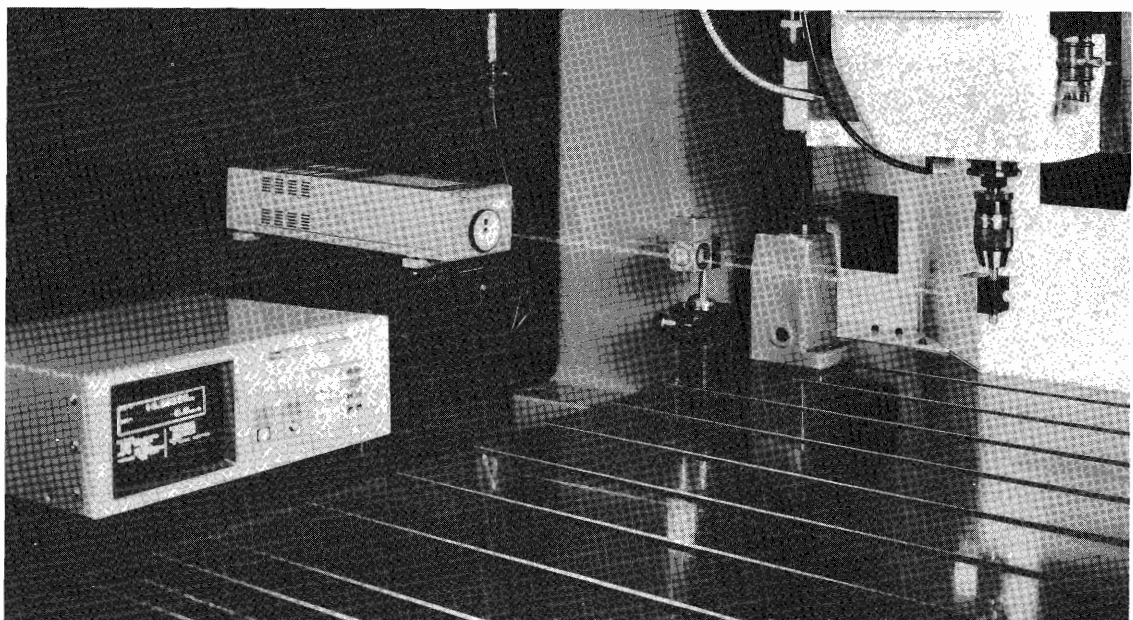


図16 レーザ測長システムを用いたマシニングセンタのテーブル移動精度の校正

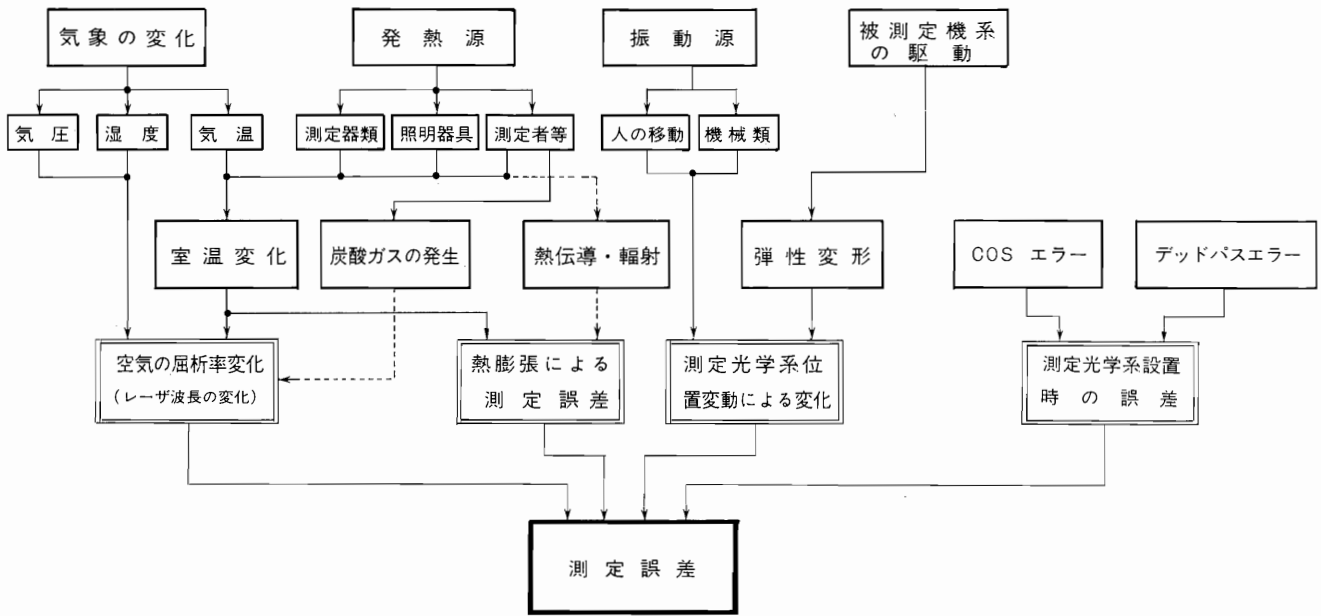


図 17 測定時の誤差要因

6.1.2 測定系の熱膨張¹¹⁾

いかなる材質に於ても物理的熱膨張があるため、測定系全体の熱的な安定を図らなければ被測定物の熱による長さの変化が生じてしまう。

例えば、一般に使用されているブロックゲージに於ても然りであり、JIS 規格 B 7506 ブロックゲージでは、「材料の膨張系数は原則として $(11.5 \pm 1.0) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とする」となっている。つまり、長さ 1m の測定材料であれば、温度が 1℃ 変化すると 11.5 μm の伸び縮みが発生することになる。ブロックゲージを手で持った直後に精密測定をすることは論外であり、測定物の熱平衡とその温度測定ポイントが重要となる。この補正法としては、前述の環境センサと同様に物体温度センサによる自動補正、または、温度値をマニュアルで入力する方法がある。これらは 3箇所の値を取込むことができるが、補正值としてはこの値の平均値で処理されるので、できるだけ熱的安定を図り正確に測定することが必要である。

6.1.3 測定系の弾性変形⁹⁾

測定系の弾性変形も測定誤差要因となる。工作機械を例にすれば、ベッド上をテーブルが移動するときテーブルの自重によりベッドが弾性変形を起し、干渉計と移動コーナキューブの位置関係を 2次曲線的に変化させ加工精度が低下する。特に、干渉計をベッド外に設置すると先に述べた自重による変位だけでなく、測定者の移動に伴う床の弾性変形が加わりその影響が大きくなる。この

変形による誤差は、ベッドに干渉計を設置すればほぼ排除することができる。

6.1.4 振動⁹⁾

光学部品の取り付け部の材質や構造にもよるが、被測定系内に組み込まれているモータや、可動機構部より発生する振動、また、外部に設置されている機械類あるいは人の移動によって発生する振動は、直接間接的に測定光路に変化を与えることになる。つまりこの振動は、干渉計と移動コーナキューブ間の距離を変化させるので、測定値が安定せず表示値が読み取れなくなる。平均化処理を行えば数値として読み取ることはできるが、振動による移動量のほぼ中心値を表示するので加工物を切削しているときはその最大値まで加工されてしまう。このため測定系全体を除振することが望ましく、振動源を遠ざけたり、また、なくす工夫も必要となる。

6.1.5 測定光学系設置時の誤差

レーザ測長システムは、干渉計と移動コーナキューブを自由に設置できる便利さがあり、光軸合せの不正確さが測定精度を下げる要因となる。また、測定光路上に於る測定領域の設定時に注意を払い測定精度を高める方法があるので次に述べる。

1) コサインエラー

出射された光の軸上に干渉計と移動コーナキューブを設置し、この光軸上を移動コーナキューブが正

確かに平行移動していれば問題はないが、移動コーナキューブの移動軸（機械軸と称する）と光軸との関係が平行でない場合、移動した真の移動量(l_2)と測定値(l_1)の間に誤差が生じる。これをコサインエラーと称し図18で示すような関係になり真の移動量を式で表すと、

$$l_2 = \frac{l_1}{\cos \theta} \quad (19)$$

となり誤差量 Δl は

$$\Delta l = l_2 - l_1 = l_1 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (20)$$

となる。

光軸調整を行うには、ビームスプリッタで2つの光スポットを重ね合せその具合を目で確認するのでこの光スポットの関係で説明する。光軸と機械軸が合致しているときは、移動コーナキューブを移動させても2つのスポットにずれが生じない。しかし、両軸にずれがあると2つのスポットにずれが生じる。この量を a とすると

$$\frac{1}{\cos \theta} - 1 = \frac{\sqrt{\frac{a^2}{4} + l_1^2}}{l_1} - 1 \quad (21)$$

となり、これが測定精度となる。また測定誤差量は

$$\Delta l = l_1 \left(\frac{\sqrt{\frac{a^2}{4} + l_1^2}}{l_1} - 1 \right) \quad (22)$$

で表され式より分るようにこの値は、測定距離が短くなればなるほど測定に対する誤差の割合が大きくなるので注意を要する。本システムでは、このずれ量の許容量をビーム径の50%に設定しており、この値より大きくなるとエラーとして処理される。

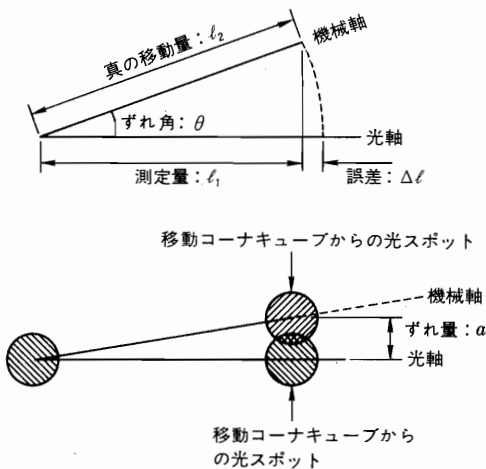


図 18 コサインエラー

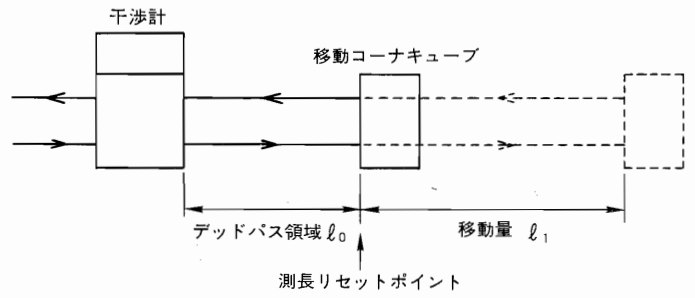


図 19 デッドパスエラー

2) デッドパスエラー

環境変化による測定値の誤差は、補正が可能であることをすでに述べた。しかし、設置を行う際測定光路上に於て測定できない領域を作ってしまうと補正ができなくなる。この測定誤差をデッドパスエラーと云い、図19を用い測定リセットポイントを中心に移動量を測定する例で説明する。測定開始時に於るレーザの波長を λ_0 とし、また、測長リセットポイントから干涉計までの真の距離（デッドパス量と称する）を零とすれば移動コーナキューブを l_1 移動させると測定値は、

$$\frac{2l_1}{\lambda_0} \lambda_0 = l_1 \quad (23)$$

で表わされる。

ここで環境が変化し、波長が $-\Delta\lambda$ (ただし、 $\Delta\lambda < \lambda_0$) 変った場合

$$\frac{2l_1}{\lambda_0 - \Delta\lambda} \lambda_0 = l_1 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \Delta\lambda} \right) \quad (24)$$

と測定値は、 $\lambda_0 / (\lambda_0 - \Delta\lambda)$ だけ大きくなる。そこで波長補正をしていると

$$\frac{2l_1}{\lambda_0 - \Delta\lambda} (\lambda_0 - \Delta\lambda) = l_1 \quad (25)$$

となり正しい真の値が測定される。

次に、デッドパス量が、 l_0 の位置に移動コーナキューブを設置し測長値を零リセットしたのち環境に変化がなければ測定値は零のままである。しかし、環境に変化が生じ波長が $-\Delta\lambda$ 変ると測定値は、

$$\left(\frac{1}{\lambda_0 - \Delta\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) l_0 \lambda_0 \quad (26)$$

で表される値が変化分として出てくる。そこで波長補正を行ったとしても

$$\left(\frac{1}{\lambda_0 - \Delta\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) (\lambda_0 - \Delta\lambda) l_0 \quad (27)$$

となり、波長補正をしていないときの値とほぼ等しい値が残る。つまり移動コーナキューブが動いている領域は補正されるが、それ以外は補正されない。なお、この誤差量は、移動コーナキューブの往復動作速度に比べ、環境の変化が測定値に影響をおよぼさない早さであれば、リセットポイントにくるごとに測長リセットをすればある程度無視できる。しかし、移動コーナキューブの動きが環境変化に対し遅い場合は、測定中にリセットができないのでデッドパスエラーによる誤差量は測定値に含まれてしまう。実用上問題が生じないデッドパス量は、10~20mmである。

6.2 総合測定精度

本システムに使用している周波数安定化He-Neレーザの波長安定性は、0.1ppmの確度を有している。例えば、1000mmの長さを測定した時の測定精度は

$$1000 \text{ mm} (0.1 \times 10^{-6}) = 0.0001 \text{ mm} = 0.1 \text{ } \mu\text{m} \quad (28)$$

となり、0.1 μmの測定誤差が生ずることを表し、5mを測定した場合は0.5 μmの測定精度となる。つまり必要以上に分解能を上げて、精度よく測定できる範囲は狭くなり使用用途は限定される。これを改善するためには、より安定度の高い周波数安定化レーザの開発が必要となる。

6.1で述べたように多くの誤差要因があり、これらの要因を取り除くことでより正確な測定結果が得られる。これらのうち空気の屈折率変化により、屈折率を+0.1ppm変化させる量を求めると表4となる。気圧、気温、湿度の各項目の変化をパラメータにして測定誤差の関係をまとめると図20~22に、また、3つの項目全てをパラメータにした関係を図23に示す。

次に、もう1つの大きな要因である熱膨張による被測定物の変化を、鉄を例に図24に示す。これら屈折率変化と熱膨張を総合的に見ると、図25に示すような関係になる。また、仮りにセンサを用い補正を行ってもセンサ自体の精度が測定精度に影響することになる。例えばオプションの環境センサおよび物体温度センサの測定精度は、それぞれ1.2ppmであるので、さらに高精度な測定器で測定する必要もでてくる。また、これらのセンサを用いても考慮すべき点は、測長エリア内の空気のゆらぎがありセンサ類では、補正しきれない問題も残ってくる。この解決策の1つとして、真空恒温チャンバ内での測定が理想的な測定環境であり、文献によれば地下トンネル内での測定も理想的であると記載されている¹²⁾

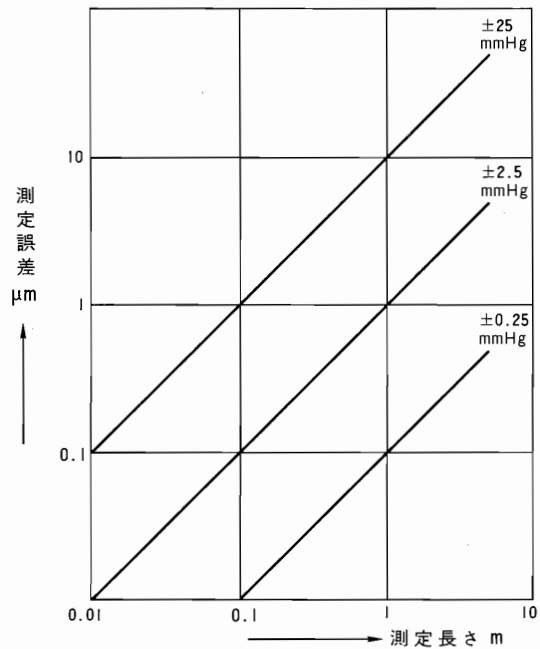


図20 気圧変化のみをパラメータとした測定長さ測定誤差の関係

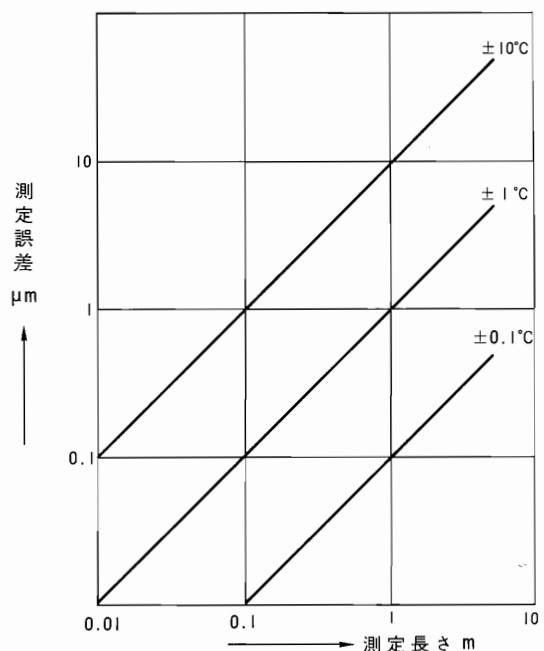


図21 気温変化のみをパラメータとした測定長さ測定誤差の関係

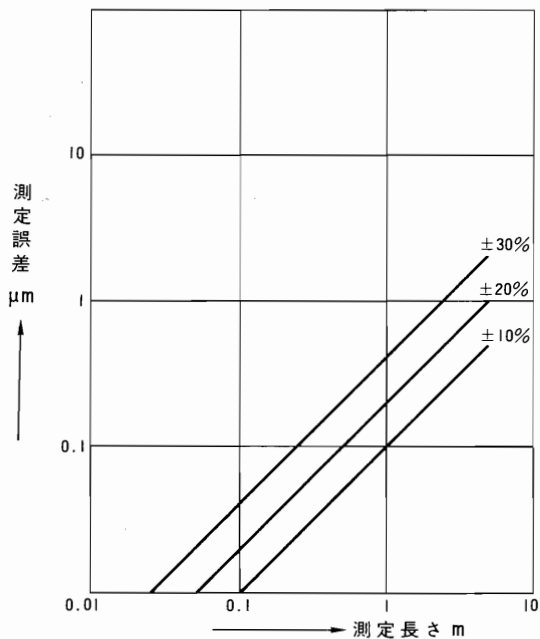


図 22 湿度変化のみをパラメータとした測定長ささと測定誤差の関係

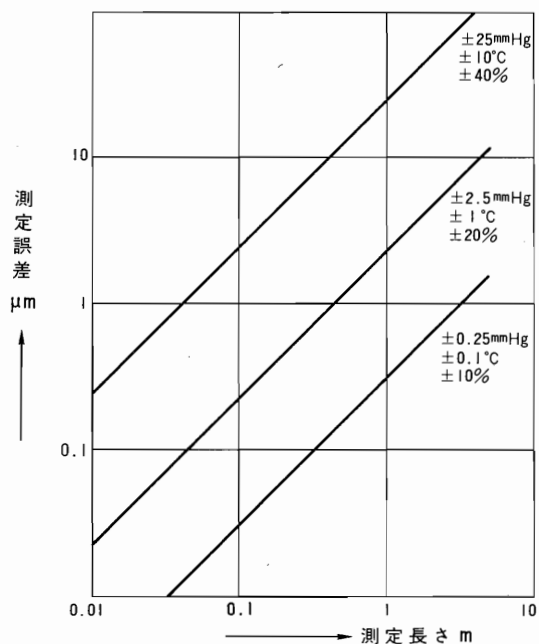


図 23 環境変化（気圧、気温、湿度をパラメータ）による測定長ささと測定誤差の関係

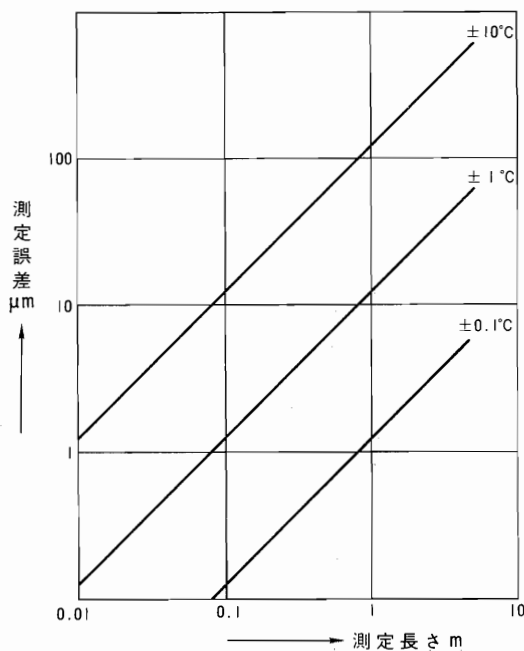


図 24 測定対象物体温度変化による測定誤差
(ベースが鉄の場合：膨張率12ppm/°C)

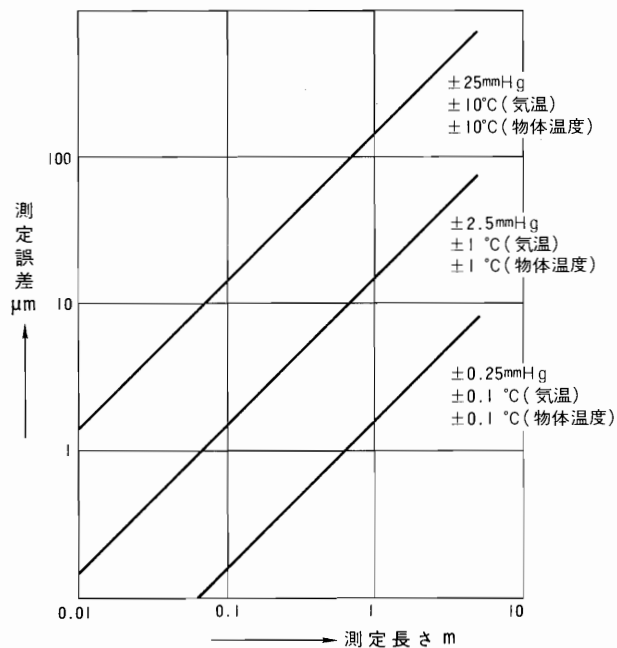


図 25 環境の変化による測定長ささと総合測定誤差の関係
(気圧、気温、物体温度をパラメータただしベースが鉄の場合)

表4 屈折率を0.1 ppm 変化させる気圧, 気温, 相対湿度の量

パラメータ	屈折率を+0.1 ppm 変化させる量
気 圧	0.28 mmHg
気 温	-0.1 °C
相対湿度	-10 %

7. 結 言

レーザ測長システムは、非接触で高精度測定ができ測長範囲も自由に選べる大きな特長がある。その応用分野は多岐にわたっており、より正確に測定するにはレーザ測長システムの原理を充分理解し、また、超精密計測器全般に於る留意点を把握し応用することが重要である。

以上 MG-1000 レーザ測長システムについて述べたが、紙面の関係で説明が充分なされていないことをお詫びする。

おわりに、本システムに使用の周波数安定化レーザの校正についてご協力をいただいた北海道大学工学部田中敬一教授に深謝したい。

参 考 文 献

- 1) 吉原邦夫：物理光学，共立出版
- 2) 小瀬輝次ほか：光工学ハンドブック，朝倉書店
- 3) 田中敬一ほか：レーザの波長安定化と干渉測長，精密機械，43，9，（1974）6.
- 4) 田中敬一：メートルの定義のゆくえ，計測と制御，22，5，（1983）69.
- 5) CGPM/CIPM, Documents Concerning the New Definition of the metre, Metrologia 19, (1983) 163.
- 6) BENGT EDLÉN : The Refractive index of air, Metrologia, Vol2, No.2 (1966) 71.
- 7) W. TYLER ESTLER : High-Accuracy displacement interferometry in air, Appl. Opt. Vol24, No.6 (1985) 808.
- 8) 松本弘一：レーザ干渉測長の最近の話題，センシング技術応用研究会，第47回研究会資料
- 9) 谷村吉久ほか：レーザ干渉測長における誤差要因とその解析，計量研究所報告，27，No.3 (1978) 7.
- 10) 計量研ニュース，Vol34，No6
- 11) 垣野義昭：加工精度に及ぼす熱の影響，機械技術32巻，14号，93.
- 12) 竹本修三ほか：地表に設置されたレーザ伸縮計による土地伸縮変化の観測，測地学会誌第31巻，第4号，295