



## 光波干渉応用技術 9

## 変位・距離・速度測定用干渉計

松本 弘一

計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1984年8月6日受理)

## Interferometry 9

Interferometers for Measuring Displacement,  
Distance and Velocity

Hirokazu MATSUMOTO

National Research Laboratory of Metrology,  
1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

## 1. はじめに

光波干渉による干渉縞は、目盛間隔が細かくて正確なものさしと考えることができるので、高分解・高精度な測定のために多くの分野において利用されている。このような精密測定を行なうには、干渉縞の端数(位相)を高精度で求めることが要求されるが、この位相の測定法は応用分野と関連して多くの方法が開発されてきている(表1)。被測定長さが数 mm 以下の場合には、スペクトル幅の狭い光源はそれほど要求されないし、また、被測定物の温度補正などもそれほど問題とならない。しかしながら、光電検出するためには、光量が重要である。幸いにして、レーザーはエネルギー密度が十分に高く、指向性がよいので、このような干渉計の光源として優れている。また、最近の光検出素子の進展とあいまって、SN 比のよい信号が得られるようになり、高分解測定が可能となっている。いま、零位法によって干渉縞信号の位相を求める場合を考えると、位相の測定誤差  $\delta\phi$  は簡単に次式によって与えられる<sup>1)</sup>。

$$\delta\phi = N/S \quad (1)$$

ここで、 $S$  は信号の大きさであり、 $N$  は雑音の大きさである。したがって、位相を1%の精度で求めるためには、SN 比が16以上でなければならない。

一方、被測定長さが数十 mm 以上になると、上記の

ような干渉縞の位相測定だけでなく、単一モードで安定性のよいレーザー光源が必要になると同時に、被測定物の温度や空気の屈折率の測定などが重要になってくる。このため、多種の安定化レーザーが開発されている<sup>2)</sup>。

ドップラー速度計においては、出力の大きな単一モードレーザーが光源として要求され、また、発生されたビート信号の処理が重要となる。

ここでは、実際に使う立場に立って、変位・距離・速度を測定するための干渉法に関して解説する。

## 2. 変位の測定

## 2.1 肉眼による測定

干渉縞の位相を肉眼で測定するのは簡便であることからしばしば利用されている。この方法は訓練すれば、自然放射光のように、かなり弱い光を光源として用いた場合でも高精度に位相を測定できる。いま、図1(a)に示すマイケルソン型干渉計において、試料のA面とB面による干渉縞を接眼鏡の視野内に同時に形成させる。このとき、 $b/a$  の値を目測あるいはものさしを用いて求めることによって、A面とB面の間隔が  $(b/a)(\lambda/2)$  ( $\lambda$ : 光源の波長) により決定される。試料の反射率が高い場合は、くり返し干渉によって鋭い干渉縞を形成させ、位相を高分解に求めることができる。このような干渉を行なうには、図1(b)に示されるフィゾー型干渉計がよく使

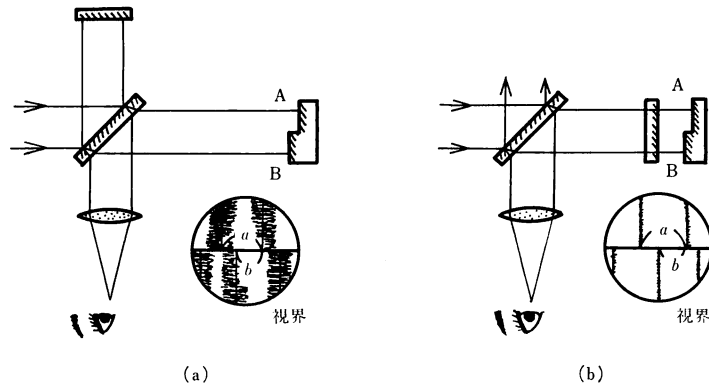


図1 干渉計の例  
(a) マイケルソン型, (b) フィゾー型.

表1 干渉縞の位相の測定法

(1) 肉眼
(2) 走査型干渉計
(3) 位相ロック型干渉計
(4) ヘテロダイン干渉計
(5) 波長可変型干渉計
(6) $\pi/2$ 位相差型干渉計

干渉縞の1フリンジの移動は、光学くさびの約 0.5 mm の移動に相当するので、くさびの移動量から干渉縞の位相を高精度に求めることができる。この場合、光学くさびの透過波面精度は十分よいものでなければならぬ。トランスレータートしては電歪素子 (PZT) もしばしば用いられる。この場合、図 2(b)に示すように参照鏡を PZT に取り付け、PZT に電圧を加えることによって、干渉縞が移動される。この場合、PZT の変位は、電圧に対して数 % の非線形性を有するので、高精度な測定を行なうためには補正を行なうか、代りに電磁ホーンなどを用いるのがよい。

2.2 走査型干渉計による測定

干渉縞の位相を迅速に精度よく測定するには、光電的に測定するほうが有利である。図 3(a)に示すように、PZT にのこぎり波信号を加えることによって参照鏡を掃引する。A と B の面に関する干渉縞をプリズムによって分離した後、それぞれ別々に検出し、チャートレコーダーなどによって記録する (図 3(b))。A と B の位相は、次式によって求められる。

$$\phi = \sin^{-1} \{ [2I - (I_{max} + I_{min})] / (I_{max} - I_{min}) \} \quad (2)$$

ここで、 $I_{max}$  と  $I_{min}$  は、それぞれ干渉縞信号の極大と極小であり、 $I$  はある時刻における信号の値である。A と B に対する値を同時刻において読むならば、A と B の信号の位相差が  $\Delta\phi = \phi_A - \phi_B$  によって求められる。この方式によれば PZT の非線形性が解消される<sup>3)</sup>。

2.3 位相ロック型干渉計による測定

図 4 に示すように参照鏡を PZT に取り付けておき、干渉縞を光電検出する。得られる信号を増幅した後、PZT に加えると、干渉計を干渉縞の適当な位相のところにロックすることができる。試料が  $dI$  だけ変位する

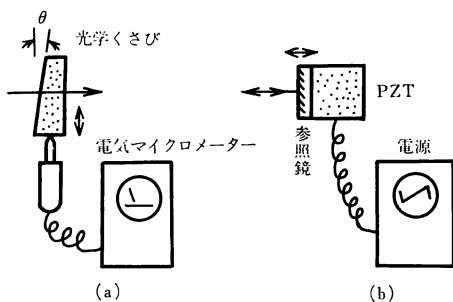


図2 トランスレータの例  
(a) 光学くさび, (b) 電歪素子 (PZT).

われる。

このような干渉縞の位相をさらに精度よく測定するためには、トランスレータを用いて干渉縞を移動させるのがよい。たとえば、干渉計の参照光路にくさび角のついた光学ガラス板を挿入し、光軸の断面方向にこれを動かすと干渉縞を移動させることができる (図 2(a))。干渉縞がクロスヘアと一致するときの光学くさびの位置を電気マイクロメーターでモニターしておき、隣の干渉縞がクロスヘアと一致するまでくさびを動かせば、干渉縞の位相が求められる。この際、くさび角  $\theta$  を 1 mrad、屈折率を 1.5 として波長を  $0.5 \mu\text{m}$  とすれば、

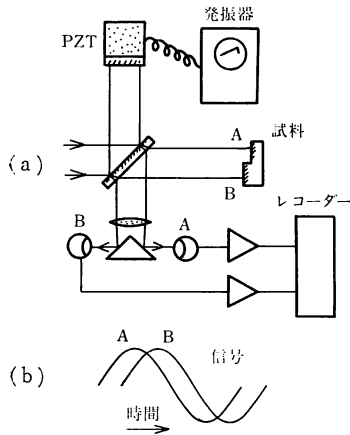


図 3 走査型干渉計

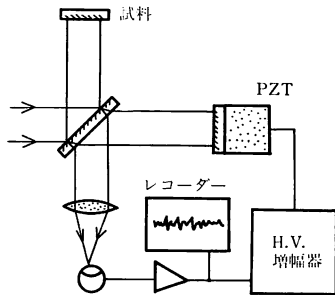


図 4 位相ロック型干渉計

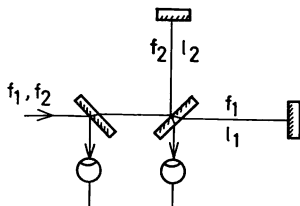


図 5 ヘテロダイン干渉計

と干渉縞信号の強度が変わり、電気信号が変化するので、PZT に加えられる電圧が変化します。したがって、PZT に加わる電圧を測定することによって試料の変位を動的に求めることができる<sup>4)</sup>。この方法は零位法であるので、光源の強度変動によらないで、高精度に位相を測定することができる。

2.4 ヘテロダイン干渉計による測定

いま、図 5 に示すように  $f_i (i=1, 2)$  の周波数の光による 2 光束干渉について考えると、干渉計の反射鏡から戻ってくる光波はそれぞれ、

$$E_i = A_i \exp \{-2\pi j(f_i t + l_i / \lambda_i)\} \quad (3)$$

と表わされるので、検出される干渉縞の強度は、

$$I = |E_1 + E_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos [2\pi \{(f_1 - f_2)t + (l_1 - l_2) / \lambda_2 + l_1(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)\}] \quad (4)$$

となる。ここで、 $A_i$  は光の振幅であり、 $l_i$  は光路長である。この信号と  $f_1$  と  $f_2$  のビート (うなり) 信号の位相を比較すれば、 $l_1$  または  $l_2$  の変位量が求められる。このような測定法は、光电検出される信号のうちのビート信号に関係する交流成分だけを利用するので、干渉縞の鮮明度や光源の強度に依存しない特長をもち、位相を高分解に測定できる。さらに、感度を上げるには、非線形増幅器によって発生される高調波信号の位相を求めればよい<sup>5)</sup>。

2.5 波長可変型干渉計による測定

光路差  $l$  の干渉計において、干渉縞の位相が一定になるように波長を  $\Delta\lambda$  だけ変えることができれば、試料の変位  $\Delta l$  を  $\Delta l \lambda / \Delta\lambda$  によって求められる<sup>6)</sup>。  $\Delta\lambda$  を、固定周波数の光源とのビート法によって測定すれば、変位  $\Delta l$  を高分解に決定できる。

2.6  $\pi/2$  位相差型干渉計による測定

$\pi/2$  だけ位相の異なる 2 種類の干渉縞を利用することによって、方向のわからない大きな変位量を高分解に測定することができる。このような  $\pi/2$  だけ位相の異なる信号を発生させるには、表 2 のような方法がある。干渉縞パターンを利用する方法は、視野内に数本程度の干渉縞を形成させておき、 $\pi/2$  だけ異なる領域を検出するので簡単であるが外乱の影響を受けやすい。位相板は光学結晶を用いて位相を  $\pi/4$  (往復で  $\pi/2$ ) だけ位相を遅らせたり進めたりするものである。光学系とは、コーナーキューブや非誘電体半透鏡などでの反射の際生じる位相の変化を利用する方法である<sup>7)</sup>。

以上の方法は、干渉計の視野を波面分割するのに対し、位相変調法と偏光法は振幅分割する。位相変調法は、干渉縞を周波数  $f$  で位相変調し、 $f$  と  $2f$  の交流成分の信号を取り出す。これらの信号の振幅はサイン波とコサイン波になっているので、 $\pi/2$  だけ位相の異なる信号が得られる<sup>8)</sup>。偏光法は、偏光ビームスプリッタに

表 2  $\pi/2$  位相差のおもな発生法

- (1) 干渉縞パターン法
- (2) 位相板法
- (3) 光学系法
- (4) 位相変調法
- (5) 偏光法

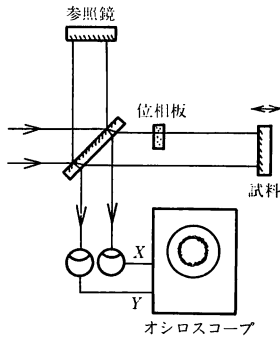


図6 干渉縞計数型干渉計

よってP成分とS成分を選び出し、 $\pi/2$ だけ位相の異なる信号を作成する<sup>9)</sup>。これらの方法は空間的に同一領域の光を利用しているので比較的大気のゆらぎなどの影響が小さい。

図6は位相板を用いた干渉計の例である。光电検出される2種類の信号をオシロスコープの水平軸(X軸)と垂直軸(Y軸)に入れると、 $X=\sin\phi$ と $Y=\cos\phi$ より、 $X^2+Y^2=1$ となるので、ブラウン管上で $\phi$ の増減に従って円形のリサージュ波形が得られる。輝点の位置の角度を測定することによって $\phi$ が高分解に求められる。この場合、輝点が右回りに進めば、 $\phi$ が大きくなる方向である。

### 3. 距離の測定

干渉測長法には、大きく分けて干渉縞計数法と合致法の2種類がある。干渉縞計数法は単一波長の光源でよく測定が比較的容易であるが、被測定長さに対応する移動台とベッドが必要である。1m程度の長さを測定するにはベッドの変形が問題となるので、かなり大がかりなベッドが要求される。他方、合致法は干渉縞を数フリンジだけ走査すればよいので装置が簡単であるが、多波長の光源が必要である。1m程度の長さを測定するには、波長安定度が十分によい光源でもって、干渉縞の位相を精度よく測定しなければならない。合成波長法では、この要求される位相測定の精度が緩和される。

#### 3.1 合致法

いま、波長 $\lambda_i(i=1\sim 3)$ の光源による干渉を考えると、干渉方程式は次式で与えられる。

$$2l=(m_i+\varepsilon_i)\lambda_i \quad (i=1\sim 3) \quad (5)$$

ここで、 $m_i$ は自然数、 $\varepsilon_i$ は端数である。 $\varepsilon_i$ が2.2節で示した方法によって求められる。 $l$ の概略値(ブロックゲージにおいては呼び寸法 $l_0$ と呼ばれる)がわかっておれば、

$$2l_0=(m_{0i}+\varepsilon_{0i})\lambda_i \quad (i=1\sim 3) \quad (6)$$

が得られる。ここで、 $m_{0i}$ は自然数、 $\varepsilon_{0i}$ は端数である。(5)と(6)式から、

$$2(l-l_0)=\{(m_i-m_{0i})+(\varepsilon_i-\varepsilon_{0i})\}\lambda_i \quad (7)$$

が導かれる。 $l-l_0(\equiv l')$ は小さいので $m_i-m_{0i}(\equiv m_i')$ も小さく、(7)式は微小寸法に対する方程式と等価になる。

$$2l'=(m_i'+\varepsilon_i')\lambda_i \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_i'=\varepsilon_i-\varepsilon_{0i}$ であり、測定によって求められる。 $m_i'$ は小さな整数であるので、(8)式を満足する $m_i'$ が一義的に決まり、 $l'$ も決定される<sup>10)</sup>。この様子を模式的に表わすと図7のようになる。つまり、各波長に対応する目盛間隔を有するものさしを用いてある基準から $\varepsilon_i'$ を目盛り、次に $\varepsilon_i'$ を基準にして同じものさしで目盛を書くと、あるところでこれらの目盛が一直線に並ぶ。このときの、 $m_i'$ を読めば(8)式より $l'$ がわかり、結局、 $l$ が $l_0+l'$ より求められる。

次に、測定の限界について考えよう。 $\lambda_1=0.63\mu\text{m}$ と $\lambda_2=0.51\mu\text{m}$ の光源を用いて $l=200\text{mm}$ の寸法を測定する場合、

$$2l=(m+\Delta m_i+\varepsilon_i)\lambda_i \quad (i=1,2) \quad (9)$$

が得られる。ここで、 $m$ は大きな自然数、 $\Delta m_i$ は小さな整数である。(9)式より、

$$m=\{(\Delta m_2+\varepsilon_2)\lambda_2-(\Delta m_1+\varepsilon_1)\lambda_1\}/(\lambda_1-\lambda_2) \quad (10)$$

が導かれ、 $m$ の誤差は次のように近似される<sup>11)</sup>。

$$\delta m \approx \sqrt{2} \delta \varepsilon \{ \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2) \} \quad (11)$$

ここで、 $\delta \varepsilon_1 = \delta \varepsilon_2 = \delta \varepsilon$ である。一義的に、 $m$ が決まるためには、 $|\delta m| < 1/2$ でなければならないので、 $\delta \varepsilon < (\lambda_1 - \lambda_2) / 2\sqrt{2} \lambda_1 = 1/15$ となり、干渉縞の端数を $0.02\mu\text{m}$ 以上の精度ですなわち $1 \times 10^{-7}$ 以上の精度で測定しなければならない。このためには、光源の波長精度および被測定物の表面精度も、これにみあうものでなければならない。

このように、合致法を用いて200mm以上の寸法を測定するには、非常にきびしい条件が生じる。このため、波長の長い光源を用いることが考えられる。 $\lambda_1=0.63\mu\text{m}$

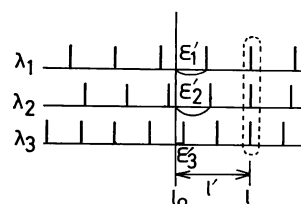


図7 合致法の模式図

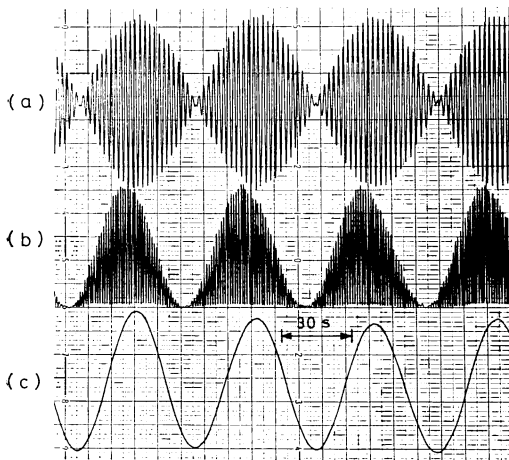


図 8 擬似ビート信号 (He-Xe レーザーの  $3.51 \mu\text{m}$  線と  $3.37 \mu\text{m}$  線より得られた)

と  $\lambda_2 = 0.51 \mu\text{m}$  の 2 波長で測定することは、 $\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) \approx 2.7 \mu\text{m}$  より、 $2.7 \mu\text{m}$  の赤外線光源として測定することと等価である<sup>3)</sup>。しかしながら、 $2.7 \mu\text{m}$  の波長だけで長さを測定するには、あらかじめ、 $\lambda/4 = 0.7 \mu\text{m}$  まで別の方法で測定しなければならない。これは 1m 以上の寸法においては容易でない。このため、合成波長法が採用される。つまり、2 波長を同時に干渉計に入射させ、同一の検出器で検出しておき、干渉縞を掃引すると、擬似ビート信号 (図 8 (a)) が得られる<sup>12)</sup>。この信号を 2 乗した後 (同図 (b)), ローパスフィルターによって高周波成分を除去すると、同図 (c) に示すように元の波長よりはるかに長い波長の光源によると等価な干渉縞信号が得られる。この信号を用いれば、合致をとる必要がないので、能率のよい寸法測定が可能である。

### 3.2 干渉計数法

干渉計の一方の反射鏡を直線平行運動する移動台上に配置しておき、干渉縞を光電検出して得られる強弱の信号をカウンターで計数すると、移動台の移動量つまり長さを測定することができる。この場合、反射鏡として図 9 に示すようなコーナーキューブが用いられる。このキューブは直交する 3 面をもつ四面体のプリズムであり、移動鏡が少々横振れしても入射光線を正しく元の方に反射する。レンズの焦点の位置に平面鏡を配置したキャッツアイも同様の機能をもっている。干渉計数の感度をあげたり、干渉縞の移動方向を知るために、干渉縞信号は図 10 に示すように処理される。検出された正弦波信号の A と B は、A' と B' のように矩形波信号に変えられた後、a のように微分される。そして、B' と a は加算される。このとき、点線の方向に進む信号はある

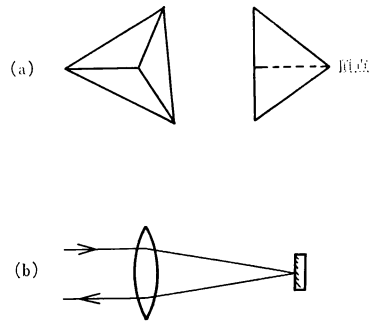


図 9 反 射 鏡  
(a) コーナーキューブ, (b) キャッツアイ.

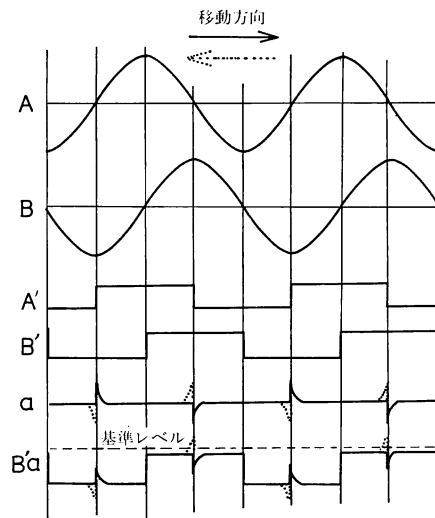


図 10 干渉縞信号の処理

レベルを越えているのに対し、実線の方向に進む信号は越えていないので、干渉縞の移動方向が判定される<sup>13)</sup>。また、このようにして干渉縞が等分割され、感度も上げられる。

この方法に類似するが、原理がまったく異なった方法を採用しているのが HP 社製の干渉計である (図 11)<sup>14)</sup>。この干渉計は、使いやすいことから、多くの分野において長さや角度の測定に利用されている。光源は  $0.63 \mu\text{m}$  He-Ne レーザーであり、ゼーマン効果によって周波数が  $1.8 \text{ MHz}$  だけ異なる右回り円偏光と左回り円偏光となっている。レーザー周波数の安定化は二つの周波数 ( $f_1$  と  $f_2$ ) の強度が等しくなるようにレーザー共振器長を熱的に制御することによって行なわれる。左右円偏光は  $\lambda/4$  板によって、お互いに直交する直線偏光となり、偏光ビームスプリッターによって分離される。それぞれのビームは別々のコーナーキューブに向かい、それらか

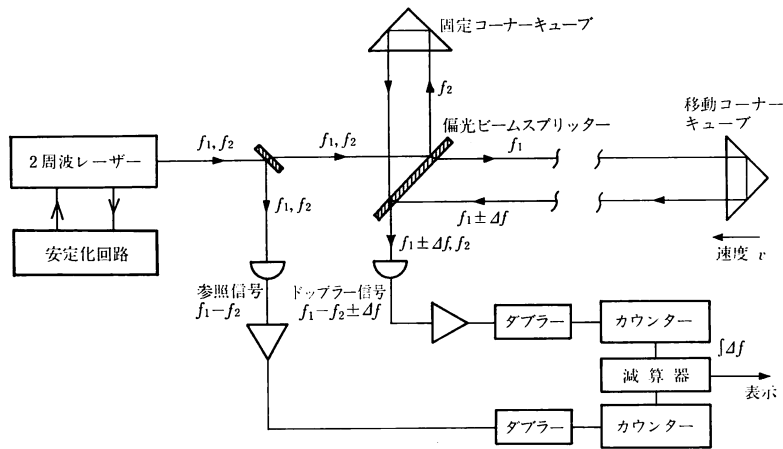


図 11 2周波レーザー干渉計

らの反射光が干渉し、ビート信号が得られる。このとき、移動コーナークューブが速度  $v$  で移動すると、 $f_1$  のビームはドップラー偏移を受けて  $f_1 \pm \Delta f (\equiv 2vf_1/c)$  となり、ビート周波数は、 $(f_1 - f_2) \pm \Delta f$  となる。ここで、 $c$  は光速である。これから  $(f_1 - f_2)$  を差し引けば  $\Delta f$  のみが残る。時間  $t$  で長さ  $l$  を動くとする、計数されるカウント数は  $2vtf_1/c = 2l/\lambda$  と表わされるので、普通の干渉と等価になる。この光源はスペクトル幅が狭いので、大気のゆらぎの影響をおさえると、数十 m の長さの測定が可能である。

干渉縞計数法を応用したものに、標準尺測定装置がある。標準尺は、H型断面の金属角材に、幅が約  $4 \mu\text{m}$  の目盛線が  $1 \text{mm}$  ごとに刻まれたものであり、全長は  $1 \text{m}$  と  $0.5 \text{m}$  のものが工業計測における標準器としてよく使われている。この目盛線間隔を光の波長を単位として校正することによって、標準尺を精度よく使用できる。このような測定装置では、移動台の姿勢変化による測定誤差をおさえるため、図 12 に示す光学系が採用されている。(a) はアッペの原理を利用した光学系<sup>15)</sup>であり、標準尺とコーナークューブが測定方向において一直線上にあるように移動台の上に配置される。そして、移動台の走行に伴って発生する目盛線信号の間に計数する干渉縞の数によって、標準尺の目盛間隔が校正される。(b) は Eppenstein の原理を利用した光学系<sup>16)</sup>である。コーナークューブの頂点と標準尺の目盛面との長さが対物レンズの焦点距離に等しくなるように、移動台上にコーナークューブと対物レンズが配置されている。つまり、前者においては標準尺が動くのに対し、後者では光電顕微鏡が移動する。このような装置による測定精度

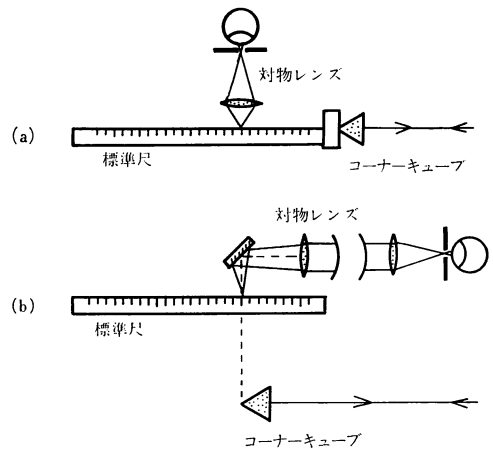


図 12 標準尺測定用干渉計

(a) Abbe の原理, (b) Eppenstein の原理.

は、測定中の空気の屈折率と標準尺の温度の測定精度に依存し、 $1 \text{m}$  の標準尺で  $0.1 \mu\text{m}$  以上の精度が実現されている。

### 3.3 誤差要因

このような干渉法によって、 $10^{-7}$  に達する精度で測定するためには次にあげる要因が重要である。

#### 3.3.1 大気のゆらぎ

光路の長い干渉計においては、大気による光の強度ゆらぎと位相ゆらぎが重要である。なぜなら、干渉縞の乱れが  $\lambda/4$  になると干渉縞を計数できなくなるからである。合致法においては、この条件が  $\lambda/50$  となりさらにきびしくなる。このため、干渉計は断熱のよいカバーによって覆われる。

### 3.3.2 温度

物体は熱膨張係数を有しているので、温度の補正が必要である。一般に、工業標準器は 20°C で使用されるので、 $\alpha(20^\circ\text{C}-t)l$  によって測定値が補正される。ここで、 $\alpha$  は熱膨張係数、 $t$  は温度、そして、 $l$  は被測定長さである。 $10^{-7}$  の精度で補正するためには 0.01°C よりよい精度で  $t$  を求めることが必要である。

### 3.3.3 回折

干渉計におけるビームの大きさが小さい場合に、回折によって干渉縞の位相がシフトするので補正が必要である。ビームの強度分布がガウス型であれば、シフト量は  $(\lambda/2\pi\omega)^2 l$  によって与えられる<sup>17)</sup>。ここで、 $\lambda$  は光の波長、 $l$  は被測定長さ、そして、 $\omega$  はビームの強度が中心部分の  $1/e$  になる点の作る円の半径である。一様強度分布の場合には、位相のシフト量はさらに大きくなるが、 $10^{-7}$  の精度の場合には、ビーム径が数 mm 以上であればこの補正を無視してよい。

### 3.3.4 光学系の調整

被測定物と干渉計のビームの方向が  $\theta$  だけずれていると、測定値は  $\theta^2 l/2$  だけ短くなる (コサインエラーと呼ばれる)。したがって  $10^{-7}$  以上の精度で長さを求めるためには、 $\theta$  を  $5 \times 10^{-4}$  rad 以内にすか、 $\theta$  を測定して補正しなければならない。

また、自然放射光を光源として用いる場合、光量を多くするため比較的大きなサイズのスリットやピンホールが用いられる。したがって、拡がりのある光源による干渉となり、補正が要求される<sup>18)</sup>。補正式は簡単に次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} & \text{(スリットの場合)} \\ & \{(a^2 + b^2)/f\} l/24 \quad (a, b: \text{辺の長さ}) \\ & \text{(ピンホールの場合)} \\ & (r/f)^2 l/4 \quad (r: \text{円の半径}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで、 $f$  はコリメーターレンズの焦点距離、 $l$  は被測定長さである。しかしながら、光源がレーザーの場合にはビームを十分小さく集光できるので、この補正は無視してよい。

### 3.3.5 空気の屈折率

空気の屈折率は室温付近においても  $10^{-5}$  程度変化するので、補正が必要である。精度よく補正するためには、図 13 に示す真空セルを用いて空気の屈折率を求めるのがよい。図では、フィゾー型の干渉計を利用して、A と B の光路の間の干渉縞の位相差が測定され、空気の屈折率が求められる。簡単に補正するには、空気の分散式を利用して気象条件より補正值を求めることができ

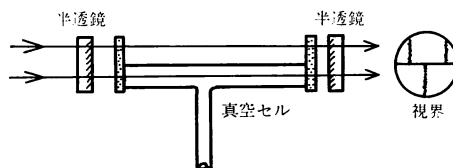


図 13 フィゾー型屈折率計

る。気圧 101325 Pa、気温 15°C、そして CO<sub>2</sub> の含有率 0.03% の空気に対する分散式としては次のエドレンの式がよく用いられている<sup>19,20)</sup>。

$$(n-1)_s \times 10^8 = 8342.13 + 2406030(130 - \sigma^2)^{-1} + 15997(38.9 - \sigma^2)^{-1} \quad (13)$$

ここで、 $\sigma$  は  $\mu\text{m}$  を単位とする波長の逆数である。気象の補正式は、

$$(n-1)_{\text{pr}} = (n-1)_s \times 1.041258 \times 10^{-5} P / (1 + 0.003671t) - f(4.292 - 3.43 \times 10^{-2} \sigma^2) \times 10^{-10} \quad (14)$$

で与えられる。ここで、 $P$  は気圧 (Pa)、 $t$  は気温 (°C) として  $f$  は水蒸気圧 (Pa) である。 $10^{-7}$  以上の精度で補正するためには、気圧、気温そして水蒸気圧をそれぞれ 40Pa、0.1°C、250Pa 以上の精度で求めることが必要である。

## 4. 速度の測定

### 4.1 周波数偏移

光は運動している粒子、あるいは物体によって散乱されると、ドップラー効果によってその周波数は偏移を受けるので、この周波数偏移を測定すれば、粒子や物体の速度がわかる。この方法は、測定できる速度範囲が広く、時間的応答性も高いうえに、流れを乱さずに測定できる特長をもっている<sup>21,22)</sup>。いま、周波数  $f$  の光が方位ベクトル  $S_1$  と  $S_2$  で入射し、それぞれ速度  $V$  で運動している粒子によって方位ベクトル  $S_3$  の方向に散乱される場合を考える (図 14) と、周波数偏移は

$$\Delta f_i = \lambda(S_3 - S_i) \cdot V \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

によって与えられる。これらの散乱光を重ね合わせると、ビート周波数  $\Delta f = |f_1 - f_2|$  が観測される。したが

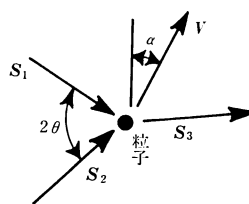


図 14 光学系

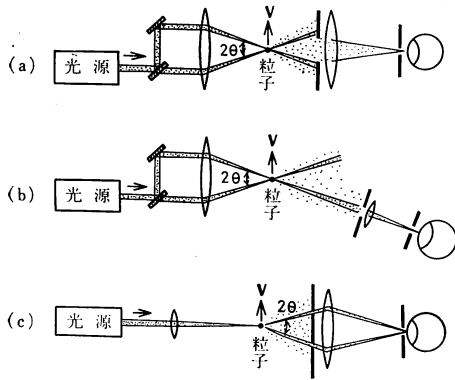


図 15 ドップラー流速計

(a) 差動型法, (b) 参照光法,  
(c) 単一ビーム型法.

って、偏移周波数は、次式のようになる。

$$\Delta f = \{(2v \cos \alpha) / \lambda\} \sin \theta \quad (16)$$

ここで、 $\alpha$  は  $(S_1 - S_2)$  の方向と  $V$  の方向のなす角である。

#### 4.2 光学系の種類

このような速度計としては、大きく分けて図 15 に示す光学系が利用されている。差動型法では、レーザー光はビームスプリッターで分割された後、集光レンズを用いて物体あるいは粒子に集光させる。集光点領域からの散乱光をレンズで集光して、検出器に入れる。この系は、一体化すれば、外乱の影響を受けにくいので、比較的多く利用されている。参照光法では、参照光と散乱光の光路が完全に分離されているので、光学系に周波数シフターなどを配置するのが容易である。また、参照光として広がりのない単一周波数で強い光を利用できるので、 $SN$  比のよいビート信号を発生させるのに都合がよい。単一ビーム型法では、レーザー光は単一ビームで入射し、二方向の散乱光のみをレンズで集光して、検出される。この場合、周波数偏移は入射光の方位ベクトルに依存しないので、入射光の光学調整が容易である。

#### 4.3 信号の処理

実際に、ビート周波数を測定し、速度を決定するにはいろいろな工夫が必要である。第 1 は、(16) 式からわかるように、光学系の配置から決まる角度を正しく調整しておくことである。第 2 は、ビート信号を発生させる領域を小さくすると空間的分解能が向上するが、ビート信号が拡がりを持ち、速度の決定精度が悪くなることである。第 3 は、参照光とプローブ光として同じ周波数の光を用いた場合、直流信号（ペダスタル）とドップラー信

号の分離が困難であることである。このため、参照光の周波数が移動回折格子やブラッグセルを用いて偏移される。または、ゼーマン効果を利用した 2 周波数レーザーが用いられる。このようにして、ドップラー信号を高い周波数にすることによって、直流信号から分離されるだけでなく、速度の正負も判定される。

ドップラー信号を解析するには 3 種類の方法がある。一つめは、バンドパスフィルター群からなる周波数分析器を利用する方法である。この方法は、ドップラー信号を階段状の信号と混合し、順次、バンドパスフィルターに入れて分析するので、データの平均化によって  $SN$  比をあげることができる。二つめは、周波数トラッカーを利用する方法であり、電圧制御発振器の周波数をドップラー周波数と一致するように制御するので、流速の瞬時値がわかる。三つめは、周波数カウンターによってドップラー周波数を直接計数する方法である。 $SN$  比のよい信号が要求されるが、広い周波数範囲において速度の瞬時値がわかる。

#### 5. おわりに

以上、変位・距離・速度を測定するための干渉計について概略的に解説した。紙数が限られているけれども、測定の目的を整理し、干渉計を理解するうえで参考になると思い、干渉測定だけでなく、最終の測定値を得るための種々の補正要因に関しても簡単にふれた。このような測定の高効率化、高精度化に大きく寄与したのは、紛れもなく干渉性のよい、エネルギー密度の高いそして指向性のよいレーザーの出現であった。いまでは、干渉計測といえば、レーザー応用を指すところとなり、干渉計測は多くの分野において欠かせないものとなっている。しかしながら、正しく干渉計が使われていなかったり、必要以上の経費をかけて干渉計を製作している場合がときどき見受けられる。このような意味で、この稿がご参考になれば幸いである。

#### 文 献

- 1) O. J. Raymond: Limiting fringe pointing precision in a scanning two-beam interferometer. *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1140.
- 2) H. Matsumoto: Recent [interferometric measurements using stabilized lasers. *Precis. Eng.*, **6** (1984) 88.
- 3) H. Matsumoto: Length measurement of gauge blocks using a 3.39  $\mu\text{m}$  He-Ne laser interferometer. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19** (1980) 713.
- 4) J. Shamir: Compact interferometer for accurate determination of optical constants of thin films. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **9** (1976) 499.



- 5) 高崎 宏, 梅田倫弘: 周波数通倍による光波干渉位相差の拡大測定. 光学, **9** (1980) 238.
- 6) S.F. Jacobs and D. Shough: Thermal expansion uniformity of Heraeus-Amersil TO8E fused silica. Appl. Opt., **20** (1981) 3461.
- 7) E. R. Peck: Polarization properties of corner reflectors and cavities. J. Opt. Soc. Am., **52** (1962) 253.
- 8) 川崎春水, 村本 裕: レーザーによる干渉測長. 機械の研究, **20** (1968) 720.
- 9) M. J. Downs and K.W. Raine: An unmodulated bi-directional fringe-counting interferometer system for measuring displacement. Precis. Eng., **1** (1979) 85.
- 10) 桜井好正: 光波干渉の応用測定 (日刊工業新聞社, 東京, 1958) p. 21.
- 11) H. Matsumoto: Infrared He-Xe laser interferometry for measuring length. Appl. Opt., **20** (1981) 231.
- 12) H. Matsumoto and S. Seino: Infrared two-wavelength interferometry for measuring long length. Ann. CIRP, **31** (1982) 401.
- 13) F. H. Branin, Jr.: A bidirectional electronic counter for use in optical interferometry. J. Opt. Soc. Am., **43** (1953) 839.
- 14) L. J. Wuerz and R. C. Quenelle: Laser interferometer system for metrology and machine tool applications. Precis. Eng., **5** (1983) 111.
- 15) K. E. Gilliland, H. D. Cook, K. D. Mielenz and R. B. Stephens: Use of a laser for length measurement by fringe counting. Metrologia, **2** (1966) 95.
- 16) H. Matsumoto, S. Seino and Y. Sakurai: Automatic recording laser interferometer for line standards up to 2 m. Metrologia, **16** (1980) 169.
- 17) K. Dorenwendt und G. Bönsch: Über den Einfluß der Beugung auf die interferentielle Längenmessung. Metrologia, **12** (1976) 57.
- 18) C. F. Bruce: Obliquity effects in interferometry. Opt. Acta, **4** (1957) 127.
- 19) B. Edlén: The refractive index of air. Metrologia, **2** (1966) 71.
- 20) H. Matsumoto: The refractive index of moist air in the 3- $\mu$ m region. Metrologia, **18** (1982) 49.
- 21) 三品博達, 朝倉利光: 光ヘテロダイン検出法の計測への応用—ドップラー速度計を中心に—. 応用物理, **42** (1973) 560.
- 22) 内田茂男: レーザー流速計応用技術. 機械の研究, **32** (1980) 19.

#### 講義 『光波干渉応用技術』

- 1 「光波干渉計測原論」(諸隈 肇) 12巻1号 pp. 45~52.
- 2 「コヒーレンスと光学部品検査用干渉計」(諸隈 肇) 12巻2号 pp. 117~127.
- 3 「粗面干渉技術」(山口一郎) 12巻4号 pp. 306~316.
- 4 「モアレ干渉法」(横関俊介) 12巻6号 pp. 501~509.
- 5 「サブフリンジ干渉計測基礎論」(武田光夫) 13巻1号 pp. 55~65.
- 6 「光ファイバ干渉計測」(今井正明・大塚喜弘) 13巻2号 pp. 153~162.
- 7 「干渉分光法」(吉原邦夫) 13巻3号 pp. 230~237.
- 8 「二周波直交偏光干渉法」(高崎 宏) 13巻5号 pp. 421~428.