連続測定用ブロックゲージ干渉計

桜井 好正* 清野 昭一*

Block Gauge Interferometer for Routine Measurement

Yoshimasa SAKURAI, Shoichi SEINO

Described in this paper is a block gauge interferometer for the routine measurement of industrial master block gauges up to 250 mm in length, which deals with fifteen gauges in one operation.

The interferometer utilizes the Michelson interference system, which has movable glass wedges in its optical paths of the splitted beams for measuring the fringe fractions. The block gauges and a vacuum cell are set on a rotatable table and may be brought in turn to the field of view by rotating the table. The vacuum cell is used for measuring the refractive index of the air and the table may be exchanged for another one prepared for following measurement.

Many experiments show that the amplitude of periodic change of gauge temperature caused by the variation of room temperature is less than 0.002 deg. which corresponds to the length variation of 0.005 μm in maximum measurable length of 250 mm.

1. はじめに

現在、ブロックゲージの検査機関や製造工場などで広く使われているブロックゲージ干渉計は、100 mm より短いゲージを 0.01~0.02 μm の精度で測定する能力をもち、精度の点ではすでにじゅう分である。しかしながら最近、科学技術の進歩にともなう、測定の効率化、測定対象の長尺化が要求されるようになってきた。過去において製作された干渉計は、これらの要求にこたえるだけの性能を持っていないし、また熟練者によらなければ高い精度がえられないという欠点を持っている。

最近製品化されたブロックゲージ干渉計の中には、これらの欠点を部分的に改善したもの¹⁾はあるが、総ての点で満足すべき性能を持ったものは見あたらないように思われる。筆者は先年、新しい構想のもとに、250 mm までのブロックゲージを連続的に測定できるような干渉計を試作し、その構造、機能および性能の一部についてすでに簡単に報告²⁾したが、諸性能、とくに温度特性に関する実験が完了したので、あらためてここに詳細に報告する。

2. 理研形干渉計の性能

光波干渉法でブロックゲージを測定する場合、測定能

率をおとす最大の原因は、ゲージの温度を安定するための放置時間である。そこでまず理研形干渉計³⁾を用いて、測定作業時間の分析を試みた。この干渉計は図 1 に示すような外観をしている。干渉光学系は厚さ約 10 mm の鋳鉄製の箱の中に納められ、またブロックゲージもその下部に 1 コずつ装着されるようになっている。その周囲にはとくに断熱材を用いていない。

表 1 はこの干渉計を用いて 100 mm までの各種の長さのブロックゲージを、0.01~0.02 μm の精度で測定する

図 1 理研形干渉計

* 正会員 計量研究所

表 1 理研形干渉計による測定時間 (1 コあたり)

ゲージの長さ (mm)	0~10	10~25	25~100
測定準備, 読取り, 計算時間 (min)	20	25	25
温度ならし時間 (min)	20	60	180
合 計	40	85	205

ときの作業時間をしらべた結果である。この表から測定準備, 読取り, 計算のための時間はゲージの長さにはほとんど無関係であるが, 温度ならしのための放置時間は, ゲージが長くなるにつれて次第に長くなり, 25mm 以上では測定時間の大部分を占めるようになることがわかる。したがって測定能率をあげるには, 放置時間を短縮することが必要で, それ以外の時間を切りつめてもあまり効果がないことがわかる。すなわち測定準備, 読取り, 計算時間の点では, 大部分のブロックゲージ干渉計が採用している合致法より, 最近電子工学の進歩とともに急速に開発された計数法⁹⁾の方が能率的であるとされているが, どちらの方法を採用しても全体の測定時間にはあまり影響がないものと思われる。計数法では原理上ブロックゲージを測定端子ではさむ方法が使われるが, 端子とゲージ面の機械的な接触の部分にいろいろな誤差の原因が含まれることが予想されるので, 精度の高いブロックゲージ干渉計には合致法を使うべきものと考えられる。なお市販の干渉計は性能上理研形と類似のものが多く, これらでは表 1 とほぼ同じ結果がえられるものと思われる。

3. 試作された干渉計の構造, 機能

図 2 および図 3 に干渉計本体の縦断面および横断面を示す。理研形や Kösters の干渉計と同様に 2 光線干渉が用いられている。A はコンデンサで, 右方の光源ランプからの光をスリット B に集光する。このスリットとレンズ C はコリメータを形成し, 分光プ

リズム D に平行光線を送る。スリット B の部分は取りはずせるようになっていて, 大きさの違ったスリットと交換することができる。分光プリズムは紙面に垂直な軸のまわりに回転し, 測定に使用するスペクトル線を選択できるようになっている。分光された平行光線はビームスプリッタ E によって 2 つに分けられ, その 1 つは光学楔 F を通過し, 参照面 G に向かう。さらに G で垂直に反射した後, もとの光路を逆行し, E にもどる。E で 2 分された他の光は, 光学楔 H を通過した後ブロックゲージの

図 2 ブロックゲージ干渉計断面図 (I)

図 3 ブロックゲージ干渉計断面図 (II)

上面およびその下面に密着したベースプレート面に向かい、そこで垂直に反射し、もとの光路を逆行する。この光線はビームスプリッタEで参照面からもどった光と合一して干渉する。干渉した光の一部はレンズJを通り、反射鏡Kで直角にまげられる。レンズJの焦点面には、測定に使わないスペクトル線を除くためのスリットLがある。干渉じまはこのスリットを通して観測される。レンズJの直前には細い十字線が張られていて、干渉じまと重なって視野にあらわれる。

測定能率を向上するには、放置時間を短縮すればよいことはすでにのべたとおりである。この干渉計では、円板状の回転台の上に多数のブロックゲージを装着して同時に温度ならしをし、円板をその面に垂直な軸のまわりに回転し、ゲージを順次干渉光学系に導いて測定する構造を採用し、ゲージ1コあたりの放置時間の短縮をはかった。ベースプレートを鋼製の大きな円板状のブロックとし、その上に多数のゲージを放射状に密着する方式はすでに使われているが²⁾、この方式では100 mmより長いゲージの密着作業にかなりの熟練が必要である。この干渉計では測定できる最大長さを250 mmとしたので、ゲージごとに別個のベースプレートを用い、経験の少ない人でも容易に密着できるようにしている。回転台上にはベースプレートを密着したブロックゲージが放射状に並べられる。この回転台は外部のハンドルの操作で基台上を回転する。また外部のつまみの操作で基台の微細な傾き調整ができる。なお回転台は基台から簡単に取りはずしができるので、あらかじめゲージを載せて測定準備をととのえた他の回転台と入れ換えることができる。

0.01~0.02 μm の測定精度をうるには、視野にあらわれるゲージ面上の干渉じまとベースプレート面上の干渉じまのくい違いを、しま幅の数十分の一の精度で測定することが必要である。従来の干渉計ではこの測定に(a)目測、(b)測微顕微鏡、(c)空気圧を変えて実効光学長を変化させ、干渉じまの合致位置から読取する方法、(d)光学的方法で実効光路長を変え、干渉じまを移動させてくい違いを読取する方法などが用いられているが、(a)~(c)は読取りに熟練を要したり、計算がはな雑であったり、あるいは装置が複雑化する欠点がある。(d)にはこのような欠点はないが、すでに実用化されている平行平面ガラスを回転する方法は、回転角と干渉じまの移動とが直線関係にならない欠点があるので、この装置では楔を平行移動する方式を用いている。

図2および3において、光学楔FおよびHはマイクロメータねじにより、外部から光軸に直角方向に移動できるようにになっている。光学楔は移動方向に角度がついて

いるので、移動により実効的な光路長が変化し、視野の干渉じまは平行移動する。参照面側の光路中にそう入された光学楔Fの移動量は、外部のつまみの目盛板で読取ることができる。干渉じまのくい違いを測定するには、まず楔Fの目盛を0に合わせ、つぎにベースプレート上の平行干渉じまの1つが十字の縦線と重なり合うように、基台の傾きと楔Hとを調整する。つぎにゲージ面上にあらわれる干渉じまが十字の縦線に重なり合うまで楔Fのつまみを回転し、その目盛を読む。あらかじめ1しまの移動に相当する目盛間隔を読んでおけば、それらの比から干渉じまのくい違いをしま数の端数として求めることができる。

図4 ブロックゲージ干渉計外観図

図5 干渉計内に装置されたブロックゲージ

回転台には15コのブロックゲージとともに、空気の屈折率を測定するための真空そうが載せられる。気温、気圧、水蒸気圧などを個々に測定し、計算式から空気の屈折率を求める方法は、現在最も広く用いられているものであるが、測定に時間がかかることと計器の精度管理のはん雑さがこの方法の欠点である。真空そうを用いて光波干渉法で直接測定する方法は、精度がよく、また測定操作もブロックゲージの測定と全く同じで簡単であるが、そのために特に干渉光学系を用意する必要があるもので、いままで長いブロックゲージを測るとき以外使われたことがない。しかし、回転台を使う場合は、ブロックゲージのうちの1コを真空そうと取り換えるだけで容易に後者の方法を使うことができる。

なおゲージの長さに応じて参照面Gを入射光線方向に移動し、ゲージ面上にあらわれる干渉じまとベースプレート面上の干渉じまの鮮明度を同じにすることができるようになっている。その送りの案内は参照面がどの位置に移動しても必要な精度内で平行を保つように作られているので、前もって調整をしておけば、移動ごとに調整し直す必要はない。

図4および図5はこの干渉計の外観およびゲージの装着部分を示している。干渉計本体の壁および扉は、間に断熱材をはさんだ二重壁になっている。さらに回転台上のブロックゲージはプラスチックの円筒で熱遮断されている。温度特性については項を改めてのべる。

光源には He, Kr および Hg 198 (あるいは Cd) ランプが用いられる。これらは1つの光源装置に組みこまれ、プリズムの回転によりランプの選択ができるようになっている。

4. 温度特性

ブロックゲージの熱膨張係数は 1×10^{-5} 程度であるから、100 mm より長いゲージを $0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ の精度で測定するには、ゲージ自体の温度を 0.01 deg あるいはそれ以上の精度で測定することが必要である。通常このような測定には熱電対が使われる。熱電対の1つの接点をゲージの側面にはりつけ、他の接点を室温付近の温度に保たれた恒温そうに入れ、その温度と起電力とを測ることによってゲージの温度を知るのである。この場合重要なことは、恒温そうの温度と熱起電力の測定がじゅう分な精度で行なわれることと、熱電対の接点の温度がブロックゲージの温度によく追従するように、干渉計内の温度変化を小さくすることである。また、干渉計に持ち込むときのブロックゲージの温度は通常干渉計内の温度と異なるから、温度が平衡するまで放置する必要がある。

したがって冷却速度を大きくすることが、測定能率をあげるうえに必要な条件となってくる。

干渉計にこのような温度特性を与えるには、断熱壁を用いて外部との熱交換を遮断し、さらに内部に熱容量の大きな物体を置き、ブロックゲージをその上にならべてゲージと物体との熱交換をよくしてやればよいことは容易に考えられる。したがって干渉計を製作する際には、必要な温度特性がえられるように断熱材の厚さや物体の大きさを何らかの方法で計算し、それを取りつけるように設計すればよいわけである。しかしながら、一般にこのような系における伝導や対流による熱の流れはきわめて複雑で、定量的な解析はもとより、定性的な性質に関する一般的な議論も、あまり試みられていないようである。したがってこの場合、すでに製品となっているものを参考にして適当に壁の厚さなどの諸元をきめ、それにもとづいて作られたものの性能を調べるという、きわめてこそくな方法に頼らざるをえなくなる。調べた結果が満足すべきものであれば、ブロックゲージ干渉計としてはじゅう分であろうが、このような設計方法は現状ではやむをえないとしても決して好ましいものではない。ここでは設計方法の改善の資料をうるために、温度特性を通常の方法だけでなく、普通の恒温室では起こりえないような極端な条件も与え、やや立入って調べてみた。

4.1 温度測定装置

ブロックゲージの温度ならびに干渉計内の気温の測定には、6本の銅—コンスタンタン熱電対が用いられた。各熱電対の一方の接点は精密水銀温度計 ($18 \sim 22^\circ \text{C}$, 最小目盛 0.01 deg) の水銀だめの球部にゆるやかに接触しており、他の接点はそれぞれゲージの側面から、干渉計内の適当な位置にとり付けられる。水銀温度計は液状パラフィンを満たした試験管中にそう入されている。両接点からのリード線に発生する熱起電力は、それぞれ6点切換スイッチ、極性変換スイッチを通して感度 $5 \times 10^{-8} \text{ V/mm}$ 程度の反照形検流計で測定される。極性変換スイッチは検流計に与える電圧の極性を切り換えて、スイッチから検流計に至るまでの接点などに発生する寄生起電力を除くためのものである。熱電対の両接点の温度差と起電力の関係をあらかじめ正確に測定しておけば、 $\pm 0.005 \text{ deg}$ の精度がえられる。

熱電対の測定用接点には小さな銅の薄片をはんだ付けして、熱容量は小さく、しかも接触面積が大きくなるようにしてある。ブロックゲージにとり付ける場合は布で裏うちした黄銅製の保持具で側面に固定し、周囲の気温変化の影響を少なくする。

図 6 室温の変化に対する干渉計内の温度変化

4.2 干渉計内の温度変化に及ぼす室温の影響

測定室の周期的な気温変化が、干渉計内の空気温度ならびにブロックゲージの温度に及ぼす影響をしらべた。

図 6 はガラスのベースプレートに密着した、室温よりやや高い温度にあるブロックゲージを回転板上で放熱させたときの室温、干渉計内の空気温度およびゲージの温度を図に示すような各位置で測定した結果を示している。室温変化の振幅は 0.6 deg, 周期は約 1 時間であるが、このときの干渉計内の空気温度の振幅は 0.02 deg となった。また放熱して安定した後のブロックゲージの温度変化は温度測定の精度以内の微小な値となった。したがってブロックゲージ干渉計の性能としては断熱の点ではじゅう分なものをもっていることがわかる。同様な実験を理研形の干渉計で行なった結果では、干渉計内の空気温度の変化の振幅は 0.06 deg であった。すなわちこの干渉計の壁の断熱効果は理研形の 3 倍であることがわかる。

4.3 冷却特性

ブロックゲージは常に回転板上で温度ならしをしてから干渉計に持込むとは限らない。ベースプレートを密着した後、そのまま干渉計内の回転板上に配置し、そこで温度ならしをすることもしばしば起こりうる。そこで放熱についてさらに詳細に考察した。

定常状態における干渉計内の空気温度の変化は、ブロックゲージの温度に測定誤差より小さい変化しか与えない程度に小さいから、これを一定と見なして理論と実験の比較を試みた。

周囲の温度が θ_a であるとき、物体の温度 θ_g は一般につぎの関係であらわされる。

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \frac{\alpha S}{mc} (\theta_a - \theta_g) = \frac{1}{\tau} (\theta_a - \theta_g) \quad (1)$$

図 7 ブロックゲージの冷却曲線

図 8 長さ and 冷却時定数との関係

ここに t は時間, α , S , m および c はそれぞれ物体の熱伝達率, 表面積, 質量および比熱である。また

$$\tau = \frac{mc}{\alpha S} \quad (2)$$

である。 θ_a を一定として (1) を解くと

$$\frac{\theta_g - \theta_a}{\theta_{g0} - \theta_a} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

となり、 τ はゲージの温度と周囲温度との差が最初の温度差 $(\theta_{g0} - \theta_a)$ の $1/e$ ($\div 0.368$) になるまでの時間をあらわす。

図 7 はガラスのベースプレートを用いた各種の長さのブロックゲージを回転板上で放熱させたときの冷却曲線を示している。この曲線は指数関数できわめてよく近似され、(3) を立証している。図 7 から各長さに対する τ をもとめれば図 8 のようになる。

ブロックゲージが空気中のみ放熱するとすれば、ゲージの表面積と質量の比は長さに無関係にほぼ一定と見なせるから、(2) より τ も長さに関係なくほぼ一定になるはずである。またブロックゲージが空気中に放熱せず、ベースプレートを通じて回転板にのみ放熱するものとすれば、ブロックゲージ中の熱伝導はガラス中よりはるかに良く、また放熱面積は一定であるから、 τ は質量すなわちゲージの長さに比例することになる。図 7 の曲線は

この2つの極端な場合の中間にあると考えられ、ゲージが短い範囲では回転台への放熱が主体であるが、長くなるに従って次第に空気中への放熱が支配的になることがわかる。なお長くなると空気の対流がよくなり、空気への熱伝達率が大きくなることが予想されるが、この実験結果からは明らかでない。

温度ならしの所要時間としては、最初の温度差は普通数度以下であるから、 τ が 0.5 時間の場合最初の温度差の約 1/400 となる 3 時間をとればじゅう分であろう。ゲージの温度上昇がとくに大きな場合や、比較的長い寸法の場合は、干渉計外で、回転台上に置かれたゲージに扇風機の風をあてれば、急速に冷却することができる。

4.4 干渉計内気温の周期変化による影響

4.2 節ではブロックゲージの温度の周期変化の振幅を知ることができなかった。そこで他の方法で求めた τ の値から推定してみた。

$$\theta_a = \theta_m + \theta_f \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4)$$

のときの(1)の解をもとめれば、時間がじゅう分経過した後においては

$$\theta_g = \theta_m + \theta_f \cos\beta \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \beta\right) \quad (5)$$

がえられる。ここにおいて

$$\cos\beta = \left\{1 + \left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)^2\right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

である。すなわち干渉計内の気温が振幅 θ_f 、周期 T で変化する場合、ブロックゲージの温度変化の振幅は気温の変化の $\cos\beta$ 倍となり、また β だけ位相がおくれることがわかる。

ただここに注意すべきことは、この場合の τ は 4.3 節でえられた τ とは異なることである。すなわち 4.3 節の場合は回転板、基台および空気の温度が一定であるときのブロックゲージだけの放熱に関する時定数で

あるが、ここで問題になるのは、空気に対しブロックゲージ、回転板および基台が放熱する場合のブロックゲージの時定数でなければならないからである。

この時定数はつぎの方法で求めた。干渉計内の空気の温度が

$$\theta_a = kt \quad (7)$$

のように時間に比例して一様に変化する場合、(1)の解は時間がじゅう分経過した後において

$$\theta_g = \theta_a - k\tau \quad (8)$$

となるから、このような状態でゲージと空気の温度差を測定すれば、条件に合った時定数が算出できるはずである。

空気の温度が上昇する場合と下降する場合のゲージ、ベースプレート、回転台の温度変化が測定された。その 1 例を図 9 に示す。上昇、下降いずれの場合も空気温度

図 9 空気温度降下に対する温度追従

× : 真の温度の時定数, ○ : 熱電対で測られた温度の時定数

図10 干渉計内の空気の温度上昇および降下に対するブロックゲージの温度の時定数

図11 測定中の温度上昇 (測定者 2 名)

との温度差が最も大きいのは回転台の温度であるが、最も小さいものは下降の場合はベースプレートであるが、上昇の場合はゲージ上部の温度である。空気が上下に温度勾配をもっているためであろう。したがって(8)からえられるブロックゲージの時定数は、温度上昇の場合はゲージが長いほど小さく、また下降の場合は短いほど小さくなるはずである。この予想は実験の結果、図10のように裏づけられた。

図から τ はほぼ 1.5 時間であるから、これと $T=1$ 時間を(6)に代入すれば、 $\cos \beta$ は $1/10$ となる。したがって図 6 の定常状態に達したブロックゲージの温度変化の振幅は、干渉計内の空気温度の変化の振幅の $1/10$ 、すなわち 0.002 deg であることがわかる。

4.5 測定中の温度上昇ならびに温度分布

測定中の温度上昇の原因としては、測定者の体温の影響と光源その他の熱源の影響が大きい。図11は15コのゲージの測定中に見られた温度上昇の実測値を示している。 θ_g の曲線上に示す範囲は、回転台上方約 50 mm の水平方向の気温の分布を示す。約 1.5 時間で気温は 0.17 deg 、ゲージの温度は 0.1 deg の上昇を示すが、水平方向の分布は 0.01 deg 以内に保たれている。したがって 50mm 以下のゲージについては、すべてのゲージの温度を測る必要はなく、数個おきにとって平均すればじゅう分である。しかしながら垂直方向の空気の温度勾配は本質的にさけられず、 0.05 deg にも達することがあるので 100 mm より長いゲージの温度測定には、この点注意が必要である。

なお体温の影響のみによる温度上昇は、上述の数値の半分以下となるので、測定室内の空気の流れと干渉計の配置の關係に留意すれば、熱源の影響を小さくすることは可能である。

4.6 ゲージの真の温度と熱電対の温度との関係

ブロックゲージの温度が変化しつつあるときは、熱電

表 2 試作された干渉計による測定時間 (1 コあたり)

ゲージの長さ (mm)	0~10	10~25	25~250
測定準備, 読取り, 計算時間 (min)	15	15	15
温度ならし時間 (min)	2	4	12
合 計	17	19	27

対にあらわれる温度とゲージの真の温度 (平均温度) との間に差があらわれる。図10でのべられているゲージの真の温度は、ゲージの長さを干渉計で測定し、その結果から温度を逆算したものである。熱電対で測られた時定数と真の温度の時定数の差はどの場合も 0.1 より小さく、図11に示された温度上昇の程度では、熱電対にあらわれる温度をゲージの真の温度とみなして差しつかえないことが、(8)を用いれば簡単な計算で証明される。

5. 測定時間

この干渉計を用いてブロックゲージを測定した結果、1 コあたりの測定時間はほぼ表 2 のようになった。理研形干渉計の場合と比較すると、短いゲージで約 $1/2$ 、長いゲージで $1/4 \sim 1/6$ の時間で測定できることがわかった。

6. 結 び

試作された干渉計は従来のものに劣らない精度をもち、その上数倍の測定能率がえられることがわかった。しかし熟練者でなくとも容易に測定できるという最初のねらいが、はたしてどの程度成功したかは、今後多くの人に利用されてはじめてわかることであろう。なお断熱そう内の温度の動特性について、ある程度の定性的な説明ができた。

この干渉計は株式会社津上製作所で製作された。関係各位に深く感謝の意を表する。(1965, 3月18日受付)

参 考 文 献

- 1) S. P. Poole: Application of Interferometry to the Routine Measurement of Block Gauges, Optics in Metrology, Pergamon Press (1960) 405.
- 2) Y. SAKURAI, S. SEINO: A Gauge Interferometer for the Routine Measurement of Block Gauges up to 250 mm, 1964年 10 月 C. I. R. P 総会提出論文.
- 3) 桜井好正: 光波干渉の応用測定, 日刊工業新聞社, (1958) 47.
- 4) 桜井好正: 干渉縞計数方式による長さの測定について (V), 精密機械, 25巻 9 号 (1959) 451.
- 5) たとえば桜井好正, 山本弘: 光波干渉法による 1 メートルのブロックゲージの測定について, 精密機械, 28巻 4 号 (1962) 208.