

# 水準標尺の定数とその測定について

竹田豊太郎\*†・小山悦郎\*

## Rod Constant Measurement of Levelling Staff

Toyotaro TAKEDA\*† and Etsuro KOYAMA\*

### Abstract

Our main aim of observations is to detect a crustal deformation caused by a volcanic activity. We need more precise measurement because height difference is so large in volcanic field. In levelling survey, it is very important to examine the secular change of the rod constants under wide environmental conditions.

We developed a measurement system to examine the rod constants using interferometer in 1993. The rod constants have been measured repeatedly since 1994 by using this system for our levelling staves. The unusual change of the graduation has not been detected until now since then. This measurement system is surveyed and examined in this paper.

A circular bubble level is used to install the levelling staves vertically. We also achieved some improvements to this circular bubble level. We introduce briefly this result in this paper.

*Key words* : Levelling staff, Rod constants, Interferometer, Circular bubble level

### はじめに

水準標尺の検定は、社団法人日本測量協会に依頼するのが一般的である。同協会が発行する検定証は、その検定等級に応じた精度を2年間保証すると共に、公共測量における法的なお墨付きを与えている。

私達は、1991年にバーコード方式の標尺と水準儀を導入した。しかし、その時点において測量協会では、この形式の標尺に対応する検定体制が未整備であった。このことで、私達が継続してきた水準測定の中絶は許されないのので、上記検定を自前で実施すべく、簡易な標尺定数の測定装置を製作することにした。ただ、種々の制約から装置の製作とその調整に時間を費やし、結局まともな検定値の取得が可能になったのは1994年からである。

以下に、上の過程で製作した標尺定数の測定装置と、これまでに得られた検定結果の概略を紹介する。合わせて、標尺を鉛直に設置するために使用する円形気泡レベルの傾斜感度と取り扱い上での留意点について述べる。なお、本稿

内容の抜粋はすでに報告済みである(竹田・小山, 2003)。

### 標尺定数

私達は、測定しようとする水準標尺の定数(補正係数)を以下のように定義する。

水準標尺の補正、すなわち水準測量で得られた高さ測定値(Hmeas)の補正量(Hcorr)は、

$$H_{corr} = H_{meas}(aT + b) + c$$

と表せる。

ここに

a : Thermal expansion coefficient

b : Rod const. (Secular change)

c : Rod end offset

である。

温度による補正係数は標尺温度(T)の一次関数(aT+b)として取り扱い、その単位は(ppm)である。すなわち、aは温度変化に伴う目盛りロッド(材質は通常インバールである)の線膨張係数を示しており、bは標尺の経年変化を示す数値である。また、cは標尺の端度差すなわち標尺目盛りの原点“0”と実際の標尺底面との偏差を示しており、長さ単位で表す。

私達の測定では、上記した3つの定数(a, b, c)を半年間

2004年8月23日受付, 2004年10月20日受理.

† toyotaro@eri.u-tokyo.ac.jp

\* 東京大学地震研究所技術部総合観測室.

\* Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo.

隔で測定・追跡している。

一方、測量協会の検定書では、1℃毎の補正係数を、ある温度範囲で表にした形式で提供される。ここで提示される数値は、常温（約20℃）近傍で標尺定数（ $aT+b$ ）を測定し、不変とみなした膨張係数（ $b$ ）（メーカー提供値）を用いて算出した値である。協会の検定では、膨張係数（ $a$ ）と端度差（ $c$ ）に対する直接の測定は行っていない。

これら3定数が確定していれば、（ $b$ ）だけが確定している場合に比べ同じ測定で得られる情報が多くなり、かつ使用する標尺の選択範囲が広がるという利点がある。すなわち、測定路線両端の基準点以外に、測量時に標尺を設置した全点でその高さを決定することが可能となる。このことは、同じ作業量でより多くの情報の取得が可能であることを意味している。また一般的に、測量は定数の似通った2本の標尺を一組として測定し、その標尺補正は2本の定数の平均値を使って計算される。3定数が確定していれば、この制約には拘束されず標尺の組み合わせは任意となり、極端な場合は全く違った標尺の組み合わせでも測定は可能となる。

なお、端度差（ $c$ ）は上に述べたようにその絶対値を知ることもちろん大切であるが、それ以前にその変化量を監視することもまた重要である。すなわち、インバール目盛り部と標尺底盤との固着の安定性を監視する一指標に利用できるからである。もちろん、この結合関係が安定していない場合（一般にその可能性は小さい）は、測定結果に飛びが生ずるなど、信頼性の低い結果しか得られない。

### 測定装置の設計

標尺定数の測定は、レーザー干渉測長器で標尺の目盛り間隔を連続測定し、その目盛りの数値と測定長を比較する方法で行った。私達が設計した測定装置とその測定方法の概略を述べると次のようになる。

当初、以下のような測定方法を考えた。まず、検定標尺を床面に設置した直線状のレール上を水平移動できるように設定する。次に、標尺の目盛りを視準するための視準鏡を床面に固定する。測定は、標尺を移動しながら全ての目盛りに対し視準し、その時の標尺の移動量を同じ床面に設置したレーザー干渉測長器で測定・記録して行う。またこの測定と同時並行して、測定室内の空気の3要素（気温、気圧、湿度）を測定する。この測定は、標尺温度の確定と干渉計で得た測定長を補正するのに不可欠である。

私達が測定対象とした標尺の長さは3mであるため、上に述べた測定方法をそのまま実現しようとするれば、検定装置を設置するのに最低でも6mの移動空間が必要となる。現実的には、その前後に1m程度の余裕が必要であり、結果として最短でも8mほどの長さを占有することになる。このような直線空間を確保するのは現実には難しいので、

上に述べた方法とは逆に、標尺を固定し視準鏡を移動する方式を採用した。結果として、約5m長の土台を床面に固定し、その上に設置した有効長3.6mのレールを利用して視準鏡を移動させる設計とした。この場合、測定者は視準鏡の操作のため目盛りに沿って移動を繰り返さなければならない。

上記の測定装置の設置場所としては、床面の基礎が安定しておりかつ人の出入りが少ない部屋が望ましい。その場所として、浅間火山観測所の資料室の西端のスペースを選定した。この部屋は空調などによる積極的な温度管理も行っていないので、標尺定数の測定はもとより保管するスペースとしても最適と判断した。かつ、その室温は外気温度の年周変化に連動して、数℃から20数℃の変化を示すことが分かっており、標尺の線膨張係数（ $a$ ）は逆にこのゆるやかな温度変化を利用して決定している。

### 測定装置の構成

図1に、実際に製作した標尺定数の測定装置の概観を示した。ここでは、この図をもとに測定装置の構成についてその概略を紹介する。

はじめに、測定装置全体の基礎土台として、断面300×300mm長さ4,800mmのH形鋼をコンクリート床面にアンカーボルトで固定した。この土台上面の長手方向の両端に、長さ3.6mのレールを取り付けた2本のH形鋼（100×100×3,800L）を配した。この2本のH形鋼は、基礎土台としたH形鋼に300mm間隔で固定したボルトを使用して固定した。2本のレールの間隔および水平度と直線度の最終微調整は、このボルトを利用して行う設計となっている。測定しようとする標尺は、この2本のレールの中間の下方に設置する。標尺目盛りを視準するための視準鏡を載せた観測移動架台（以後は台車と呼ぶ）は4個のスライドユニット（車輪）を介して2本のレール上を左右に移動する。この台車（220×420×20D）には上記した視準鏡のほか、台車の移動量を測定するための反射鏡（レトロリフレクター）と傾斜量を測定するための気泡管傾斜計および標尺目盛りの視準位置を照明するための光源を搭載している。

測定の基準点となる干渉計は、レールの左端近くの100mm H形鋼に固定した。レーザー光源ユニットは干渉計のさらに左側、基礎土台H形鋼の左端上に設けた専用設置台にセットした。光源ユニットから発射したレーザー光が干渉計を通過し台車の反射鏡で反射して同光源ユニットの受光口に正確に戻ってこなければ長さ測定ができない。このことを実現するには、設計上干渉計と反射鏡の位置関係がすでに固定しているので、光源ユニットからのレーザー光の発射口の位置と向きが調整できなければならない。したがって、レーザー光源ユニットの専用設置台は上下、左右への移動および傾斜（回転）が可能でなければならない。

それを微調整する機構も必要となる。

検定室内の気温、湿度それに気圧を別途観測する必要がある。実際の測定では、視準鏡を操作する人と、その時の測定長および気象要素を測定記録する人の2名で行っている。

なお、図1に示した測定装置の全体設計、各構成部品の調達、組み立ておよびその調整は全て自前で行った。また、調達不能な台車と光源ユニット専用設置台の製作にかかる金属加工も自分たちで行い、経費の削減を図った。いずれにせよ、手本となる適当な装置が見当たらなかったため、製作・設置・調整・測定などあらゆる局面で試行錯誤的な工夫が必要であった。

以下は、この測定装置の構成要素ごとのやや詳しい記述である。

### 1. レールと台車

レールとスライドユニットに相当する部分は、それが一對となった部品が市販されており、日本トムソン(株)のリニアウェイ H-LWHSG20 を使用した。レールは1本1.2mを3本つなぎ合わせ、3.6mの長さを確保した。このレールとスライドユニットの直線性や動きの滑らかさは申し分ないが、私達の行ったレールの設置精度が低いことと台車の工作精度が低いことが相まって、組み立て当初は台車

のスムーズな移動が不可能な状態であった。2本のレールの平行度と直線度の調整を繰り返し行ったが、なかなか満足のいく結果が得られなかった。最終的には、台車とスライドユニットの結合部分に逃げ(スプリングワッシャとボルト)を作ることで解決するほか無かった。設置当初、強引に台車を移動させて測定したところ、台車自体に歪が生じ、結果として測定値に微妙な乱れが生じてしまった。この可動部分は、単に部品を組み合わせるだけでは満足する機能を果たし得ず、製作過程で最も神経と時間を使ってしまった機構である。

結局、台車のスムーズな動きを阻害した最大の要因はレールを2本使用したことであった。リニアウェイに多少大型のものを用意し、1本のレールで設計するのも一つの選択肢であった。

なお、干渉計から発射されたレーザー光が測定器に戻らなければ長さ測定そのものが不可能になることはすでに指摘した。このレーザー光路の調整に関連して台車の動きに要求される精度はここで述べた台車の動きをスムーズにするために必要な精度より低く、その調整は比較的容易であった。

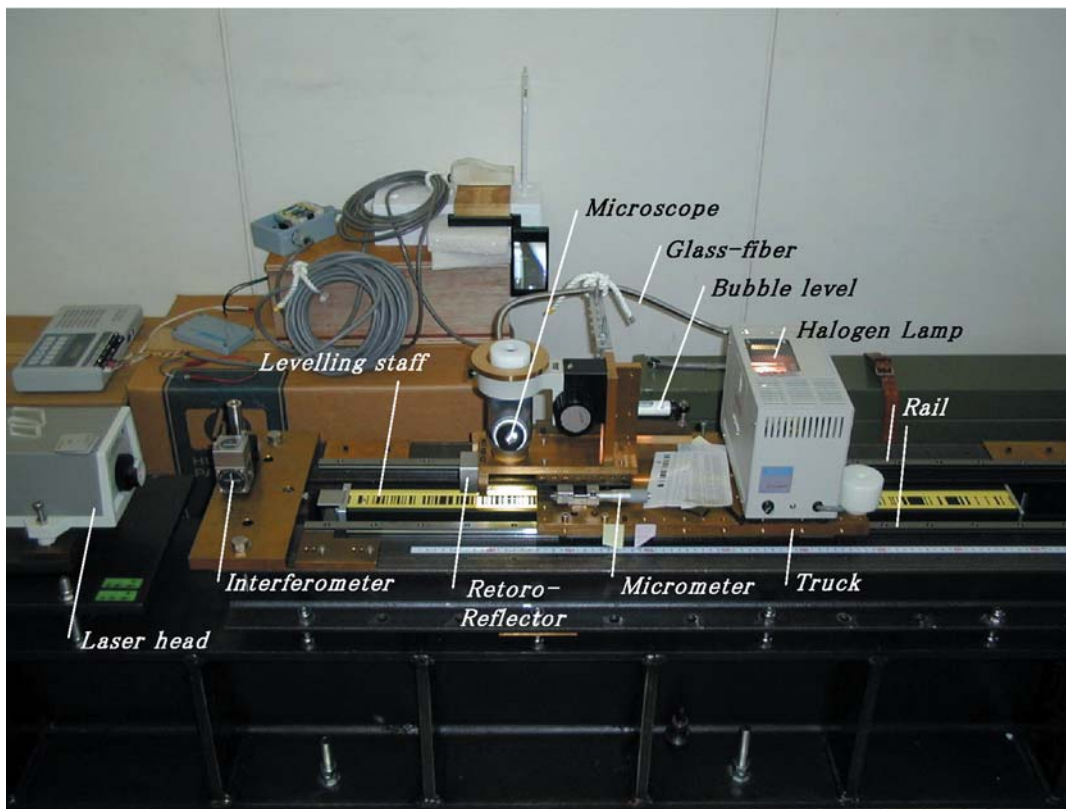


図1. 標尺定数の測定装置

写真は測定装置の主要部であり測定対象は90cmのバーコード標尺になっている。測定台は写真の右端よりさらに2m程伸び、3m長の標尺が測定可能。インターフェロメーターの表示部は図左に外れた位置で、測定台とは別のテーブルに載せてある。インターフェロメーターの上方奥に写っているのは室内温度と湿度をモニターする通風箱とデータロガー。

## 2. レーザー干渉測長器

レーザー干渉測長器には、Hewlett Packard HP5528 レーザー測定システムを採用した。このシステムの特徴は、干渉計は測定器（光源）とは分離して外部に設置する仕様で、機器内部の熱源等による干渉計への影響を受けにくい設計となっており、測定の安定性に寄与している。レーザーにはHe-Ne ガスレーザー（波長 639 nm）が使用され、長さ測定の分解能は  $0.01\mu\text{m}$  である。

このレーザー干渉測長システムは、各種の情報を入力しその結果を表示する表示器（電源を含む）、光源（レーザー管と受光部を含む）、干渉計それに反射鏡（レトロリフレクター）の4部分から構成されている。表示器と光源はケーブルでつながれる。ただし、表示器は測定装置とは別の台に載せてあり、図1には写っていない。

測定長は測定室（レーザー光の通路）の気温、湿度および大気圧で補正される。この測定長の精度は、測定器の機能が正常である限り最終的にこれら気象要素の測定精度に依存する。このことについては、標尺目盛りの温度の把握とも関連して、後で改めて言及する。

## 3. 視準鏡

標尺目盛りの視準は、まず目標とする目盛りが視準鏡の視野の中に入るまで台車を手で操作し、その後の最終微調整はマイクロメーターを利用する方式で行っている。すなわち、台車の上にマイクロメーター付き平行移動テーブルを取り付け、そのテーブルに視準鏡と長さ測定用の反射鏡を固定している。

視準鏡には旋盤に使用する芯出し顕微鏡を利用した。選択した機種はニコン社製芯出し顕微鏡 S2 であり、倍率は 20 である。顕微鏡のレチクルには同心円のパターンを使用した。

一般に、標尺目盛りには幅があり、機種によってその幅に大小があるのみならずその境界の描画性も一定していない場合が多い。したがって目盛りのどの部分を視準するかによって測定値が異なってくることも想定される。たとえば、1 cm 間隔の目盛りの標尺を利用して水準測定を行う場合、目盛り全体をひとつの指標として認識することであり、極端に言えば目盛りの幅は同じである必要はない。この例に倣って検定測定の視準においても、レチクルの同心円状パターンに目盛り幅とほぼ同じ大きさの円を選択し、目盛り全体の中心線をイメージして視準するという方針で行った。

ただし、バーコード標尺の目盛りの場合、水準儀は目盛りのパターンを判断して測定する原理となっており、明らかに 1 cm 目盛りとはその認識の仕方が異なっている。この場合の定数測定においては、全パターンを測定するのが理想であるが、その数が多く現実的でないので任意数のサンプリングを行い、全パターンの描画精度を評価すること

とした。なお、その視準位置と視準方法は 1 cm 目盛りのそれを踏襲した。

視準鏡は、焦点調整のため上下に移動できるよう設計している。ただし、測定途中にこの調整を行うと目盛り位置で数  $\mu\text{m}$  のブレが生じることが判明し、以後は測定途中での調整は厳禁とした。このブレは移動機構の遊び（ガタ）に起因していることは確かであり、その大きさの程度はともあれ不可避な現象である。測定方法から判断して、測定途中でのこの調整は不要のほうであるが、まま不用意に調整してしまうことが問題である。なお、端度差の測定では一般に視準面の高さが違うため、常にこの種の不都合が生じてしまう。端度差の測定については後節で取り上げる。

## 4. 目盛りの照明

視準鏡の下方に設置した標尺目盛りには天井の照明は直接に届かず、視準目盛り周辺を照らす独自の照明が必要であった。しかも、天井の照明それ自体は室内温度を一定に保つ目的で測定作業に必要な最低限の点燈にとどめているため、室内は明るいという環境にない。ここに、一般のスポット照明を使用した場合はその熱線によって照明部分の温度が上昇しインバー目盛りに温度ムラを生じさせ、測定の本質を損なう結果となる。

照明した目盛り部分の昇温を避けるため、熱線カットフィルターを有する光源として NPI(株) 社製のコールドスポット PCLE-NA を別途用意した。この照明装置は光源としてハロゲンランプを使用し、近赤外の反射・吸収フィルターを透過後コンデンサでグラスファイバーに導く構造となっている。

標尺目盛りへの照明は全目盛りに対し同じ方向・角度から行うのが理想的であり、上述の光源をそのまま台車に載せることでこのことを実現している。視準精度は、目盛りとレチクルの形と大きさ、および照明の明るさと角度などで左右される。これら要素の設定は微妙であり、結局試行錯誤の繰り返しで決定するほか無かった。

## 5. ピッチングの補正

レーザーの光軸と標尺の目盛りの軸線とは、一致するのが望ましいわけであるが、現実的には平行になるよう設定することになる。私達の測定系では、測定する標尺により若干の違いはあるがこの軸間の距離は 50 mm 前後である。視準鏡の移動に伴う台車のピッチングによって、本来目盛り軸線と直角な関係であるべき視準軸が偏位することになり測定値に誤差が生じる。すなわち、干渉計での測定長は変わらないが、視準鏡の視準軸が傾き、結果として測定長に狂いが生ずることとなる。なお、このピッチングと同様、台車のローリングやヨーイングによる測定長への影響も考えられるが、無視できる大きさと判明した。

そのピッチングの大きさは、300 mm H 鋼に固定したボルトを利用して、その補正機構との兼ね合いで  $\pm 50\mu\text{Rad}$

の範囲内に調整した。この調整後に残ったピッチングによる測定誤差は、最終的に視準鏡に取り付けた気泡管レベルで台車のピッチング量を測定して補正する設計とした。気泡管レベルの感度 ( $5\mu\text{ Rad/Grad.}$ ) と目盛り読み取りの分解能 ( $1/5$  目盛り) から計算すると、この補正精度は測定距離換算で  $0.5\mu\text{m}$  と見積もられる。

ここに使用した気泡管レベルは、三栄測量器(株)の水準傾斜計から流用したレベルである。ただし、この気泡管レベルの円弧部分の製作精度が低いため、泡の左右目盛りで感度が微妙に異なっていることが測定途中で判明した。参考のため、この気泡管レベルに対する傾斜感度の追跡結果を図2に示した。

定数測定の時節によって、この気泡管レベルの温度も約

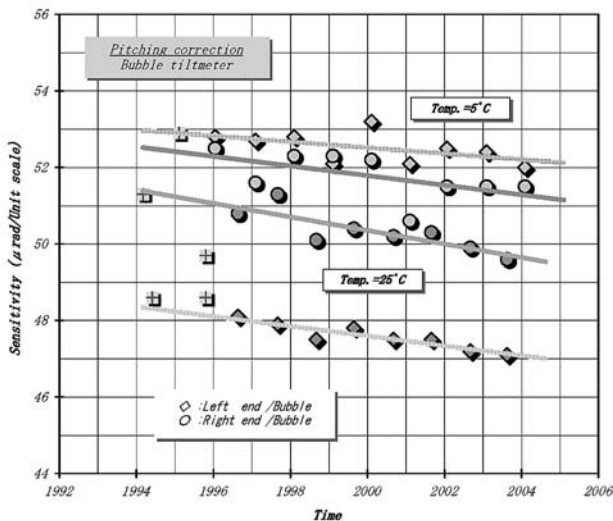


図2. 台車の傾斜(ピッチング)を測定する気泡管レベルの傾斜感度  
気泡管レベルには泡の左右両端を測定する2つの目盛りが存在。傾斜感度は測定温度にも依存するため、それらに対応する4つの変動成分を示した。

$25^{\circ}\text{C}$ か $5^{\circ}\text{C}$ のどちらかとなっている。図には示していないが、この温度変化に伴って泡の長さも違っており、測定感度の違いはこの泡の大きさも影響していることが確かめられた。私達はこの読み取り目盛りの違いによって生ずる矛盾を解消するため、1996年の測定期から測定に使用する目盛りに目印をつけ、同一目盛りの使用に限定する処置をとった。

ただし、測定感度を  $10\mu\text{ Rad}$  間違えて(目盛りを取り違えて)補正を行った場合でも、測定長さへの影響は約  $0.5\mu\text{m}$  と計算され、目盛り視準による誤差と比較して  $1/4$  程度である。

## 標尺定数の測定

干渉計による台車の移動量の測定は一つの日盛りに対し視準と測定をそれぞれ5回繰り返し、ピッチング補正用の泡レベルを1回読み取って次の目盛りに移動するという手順で行った。ただし、測定の信頼性を高めるため必ず往復測定を行っている。この往復測定の間、測定している標尺に触れるなどは厳禁である。その安全のため標尺底盤は干渉計を固定したと同じ部材(100 mm H形鋼)に固定したマグネットに作用させて、長さ測定の基準を確保している。

3 m 長の水準標尺に対する読み取り数は原則 30 (Sampling) とした。1 cm 間隔の日盛りを有する標尺では 10 cm 間隔で 30 個の測定を行うことになる。バーコードの標尺に対しても、等間隔にはならないがこれと同等な 30 個の測定日盛りをあらかじめ定めて読み取りを繰り返している。一本の標尺の測定に要する時間は約 1 時間である。ただし、1 cm 目盛りの標尺には一本の標尺に左右 2 系統の日盛りが描かれており、2 倍の測定時間を要する。

なお、一つの標尺の全日盛りに対する測定を最低 1 回は行っている。これは日盛り描画(刻印)の精度を点検・確認するのが主な目的である。と同時に、継続する測定に対して採用したサンプリング数が適切な値であるかの確認に利用している。3 m 長 1 cm 目盛りの標尺の場合、全日盛りの数は 1 標尺につき約 600 個弱であり、その測定時間は 4 時間程となる。この数を毎回計測するのは実用的でなく、その  $1/10$  のサンプリングで測定を継続している。測定対象とした水準標尺において、日盛り全体から求めた定数とこのサンプリングしたデータから求めた定数に有意な違いは認められない。

バーコードの標尺では、1 cm 目盛りの標尺とは測定原理上その日盛りの持つ意味合いが異なっているので、上と同じ基準は成り立たない。バーコード標尺には、1 mm 幅の黒色の部分が全部で 175 個あり、測定の単純化と簡素化を図るため、便宜上この 175 個の測定をもって全ての日盛りの測定とみなすことにした。通常の測定では、約 10 cm 間隔でサンプリングした 1 mm 幅の黒色部 30 個を測定している。このことは、1 cm 目盛りの標尺に対する日盛りの視準方法をそのまま適用したためであり、それ以上の理由はない。

## 端度差の測定

端度差(c)の測定を行うには“0”目盛りを視準しなければならない。ただし、実際の“0”目盛りはインバール標尺上の目盛りと同一面内に存在せず、それとは垂直面の関係にある標尺底盤に設定されている。したがって、“0”目盛り以外の目盛りに対する測定を単純に延長して測定(視準)することはできず、なんらかの工夫が必要となる。

これには、標尺底盤に磁気を持たせた補助ゲージを密着させ、これと最も近い標尺目盛りとの間を測定することで対処した。補助ゲージの厚みは既知であるので、結果として“0”目盛りを含む測定目盛り間の長さが確定する。この場合、補助ゲージの視準面（側面）はインバール目盛り面と同じ高さになるよう密着させることが重要である。前にも述べたように、焦点調整に伴う視準軸のブレを回避するためである。また、“0”目盛りとインバール面上の目盛りとではターゲットの形が異なるので、レチクルと視準位置に矛盾が起きないように細心の注意を払う必要がある。たとえばレチクルの目盛り幅を無視した、すなわちレチクルを目標に近づける方向を一定とせず両方向からの視準調整を混在させて測定する、などは無意識のうちに陥りやすい過ちであった。

なお、端度差定数(c)は、この測定で標尺目盛りと関連付けて決定される値であるが、定数(a)と(b)の決定過程には適用しない。

### 線膨張係数と温度

標尺定数を決定する過程では温度の測定は非常に重要である。前述したように、標尺の補正係数は温度の関数であり、この場合の温度とは厳密には標尺目盛り（インバール）の温度を指している。私達の測定では、以下の環境が実現されていることを条件に、これを室内温度で代用することとした。

測定前の室内温度は、数週間前から徐々に目標温度に誘導する。夏季の目標温度は25℃、冬季のそれは5℃であり、人為的かつ急激なコントロールは極力避ける。むしろ人為的な関与は、換気扇をどちら向きで回転させるか停止するか、また天井の照明のON-OFF程度にとどめて温度が安定するようにすることである。数日前からは、室内に設置したファン(φ300mmの扇風機)を稼働させ、室内の空気を十分な量で循環させることで標尺を含む室内の全内容物が同じ温度とみなせる環境を目指している。目標温度に近づけることを優先した室温コントロールは好ましくなく、もちろん測定中の急激な温度変化は厳禁である。幸い、室内の空間容量は6×18×2m Hと大きく、主な内容物は地震記録を記録した紙類であり、その熱容量も加わり室温はなかなか変化しないことも好条件である。

図3に、2003年8月測定時における室内空気の気温・湿度・気圧の連続記録の例を示した。

この時の定数測定は8月18日と19日の日中に実施している。測定時に認められる室温と湿度の乱れは照明の点灯と測定者の入室に伴う変化であり、現測定系では避けられない。参考のため、最下端に外気温度の変化を示したが、天候不順と冷夏のため例年より数℃低めに推移している。

一方、定数測定における長さ測定の基準は、干渉計で使

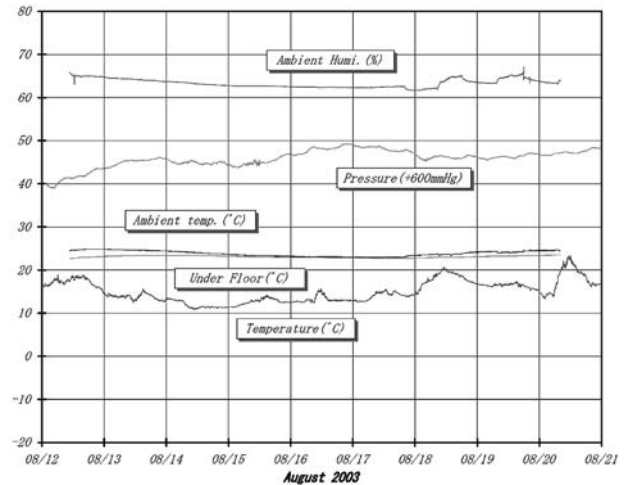


図3. 2003年8月測定時前後の室内の気温、湿度、大気圧の連続モニター記録  
参考のため外気温度もプロット。定数測定日は8月18日と19日。

用しているレーザー光の波長である。言うまでも無く、このレーザー光の波長（速度）は気温、気圧それに湿度の関数である。この視点からも、測定室内におけるこれら上記3要素の正確な把握は必要不可欠である。私達は測定前後を含む連続観測と測定中の手動観測の2段階でこれらのデータ収集を行い、その信頼性はもとより不慮の故障に備えている。

レーザー干渉計での測定長で1ppmの精度を確保するには、気温で1℃、気圧で3hPa、相対湿度で20%以上の測定精度が要求される。これら気象要素の測定には、これより一桁上の精度を有する機器を使用している。

以上述べたことから、気象要素の測定精度が標尺定数の決定精度を左右するといっても過言ではない。

これに関連して、野外で行った水準測量に対する標尺補正について参考のため次のことを指摘しておきたい。この場合は測定時の気温をもとに標尺補正を行うのが一般的である。ただし、野外で測定された気温と実際の標尺の温度とは気象条件によっては極端に異なることもしばしば起こり得る。日射が強く無風に近い場合などは、定数検定で決定した補正係数が正確であってもこの温度乖離に伴う誤差は残ってしまう。

### 測定精度

干渉計による長さ測定の総合精度は約0.3ppmを維持していると思われる。定数決定精度を規定する要素は、レーザー光の屈折率補正と測定系の不具合からの補正が主なものであり、その概略は前節及び“測定装置の5”節等ですでに述べた。

一方、目盛りの視準時に生じる（目盛りとの合致、すなわち読み取りの）測定誤差は±2μm前後であった。これは

目盛り自体の描画性に起因しており、視準の方法等に起因する誤差はそれより小さい。視準鏡の倍率 20 は、逆にこのことを考慮して決定している。つまり、視準鏡の倍率を高くして目盛りの特定した 1 点を視準するのであれば、測定精度を高くすることは可能である。しかし、このことは必ずしも測定の趣旨に沿った対策とは言えない。

標尺定数の決定精度の目標は、 $(aT+b)$  で  $\pm 1 \text{ ppm}$ 、 $(c)$  で  $\pm 10 \mu\text{m}$  であった。測定諸量の精度から判断すると、この目標は十分満足していると判断される。ただし、定数  $(aT+b)$  については標尺温度の把握の難しさ、 $(c)$  については目盛り視準の不確定さなどのため、その精度は低下していることは確かである。このことから、測定当初からの全測定値に対する決定精度は目標より 2 倍程度低いと推定される。

## 測定結果

検定を実施した標尺は、現在使用中を中止した標尺を含めて数種類 10 数本になる。ここでは代表的な例として、1994

年から測定が継続しているバーコード標尺 Leica GPCL3 の一組 Ser. 9018 と 9103 で得られた 3 定数の変動の様子を図 4 に示した。

前にも述べたように、定数  $(a)$  と  $(b)$  は年 2 回 (夏と冬) の測定値から導き出している。同図には、参考のためメーカー提供の定数 (1991 年) もプロットした。

図から明らかなように、端度差  $(c)$  は  $\pm 20 \mu\text{m}$ 、補正定数  $(b)$  は  $\pm 2 \text{ ppm}$ 、線膨張係数は  $(a)$  は  $\pm 0.1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  の範囲にあり、明らかな経年変化は認められず標尺はおおむね安定的に推移していると判断される。ただし、定数  $(a)$  と  $(b)$  の変動には年度ごとに系統的な乱れが認められる。この変動は標尺温度と室温との違いに原因があると考えられる。私達の測定では線膨張係数を決定する温度範囲は  $20^\circ\text{C}$  であり、標尺温度が  $1^\circ\text{C}$  違えば定数  $(a)$  は  $0.5 \text{ ppm}$  の違いとなる。変動の様子から判断すると、冬季の標尺温度 (約  $5^\circ\text{C}$ ) の同定に同程度の狂いがあったと推定される。いずれにせよ、夏季の測定でもその大きさはともかく標尺温度の把握違いが起きているはずであるから、標尺や測定装置の

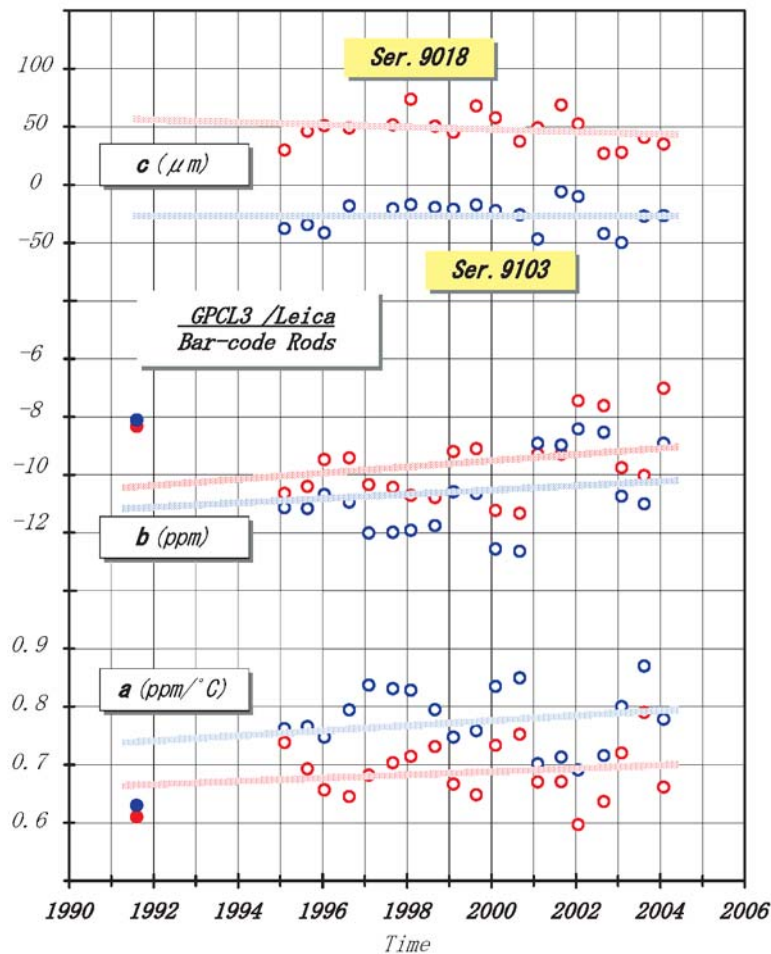


図 4. 標尺定数  $(a, b, c)$  の測定例  
バーコード標尺 GPCL3 (Leica) の Ser. 9018 と 9103 に依る。1991 年のプロットはメーカーからの提供値であるが、ここに  $(c)$  の値は存在しない。

直接的な温度測定を行うことで検証しなければならない。なお、メーカー提供の定数は  $40^{\circ}\text{C}$  ( $-10^{\circ}\text{C}$  から  $30^{\circ}\text{C}$ ) の温度変化から測定された数値であり、私達の定数との差はこの標尺温度の変動幅の違いによって生じている可能性も否定できない。

“標尺定数”の節で指摘したように、水準測量では、一般に通常2本の標尺を1組にして使用し、その補正も2本の平均値を用いて計算される。これを踏まえ、図4からも明らかなようにメーカーからは定数の似通った標尺を一組にして出荷されている。

図5は、測定期ごとの測定目盛り30個に対する直線近似からの偏差の変動を示した一例である。

図5にはバーコード標尺 Leica GPCL3 Ser. 9103 の偏差を示している。この偏差は、理想的な等間隔目盛りからの偏差、すなわち目盛りの描画精度を示しており、図からはその値が数  $\mu\text{m}$  程度であることが判る。私達はこの形式の図を測定した全ての標尺で作成し、標尺の目盛り診断の指標としている。すなわち、その偏差の大きさを確認するのはもちろんであるが、2次元の変動パターンから、各測定間に起こった目盛りの傷や不用意な外力で生じたかもしれない部分的な歪の検出に利用している。また逆説的な意味で、定数測定時における測定誤りやデータ処理過程での誤りの検出にも役立っている。

図6には、私達が1975年以降浅間火山の水準測量で使用してきた代表的な3m標尺の3本について、その目盛り描画の精度を示した。ここでは、各目盛りの直線近似からの偏差分布を示している。標尺によって、測定年次も異

なっているが、この偏差分布とは独立なので明記していない。

図6から明らかなように、上段、中段、下段と目盛り描画精度が格段に向上している。偶然の結果かもしれないが、その製造年度は Zeiss が1960年代、Wild が1980年代、Leica が1990年代である。標尺により、その描画方法が異なっていることも確かであろう。Zeiss 標尺の目盛りは、ほぼ規則正しい1mパターンの繰り返しを示しており、その目盛りは1mの定規ないしローラー等を基準として描いたと推定できる。

### 測量協会での検定

2000年10月、一对の標尺の検定を日本測量協会(JAS)に依頼した。私達が求めた検定値と比較・検討し、測定の信頼性を確認するのが主な目的である。測量協会の検定装置は標尺を可動する方式であり、目盛りの視準と読み取りは自動で実施される。ただ、干渉計を使用した測定の原理は私達のシステムとほぼ同じであった。

図7に、標尺 GPCL3 Ser. 27636 に対し測量協会提供の検定値(JAS)と私達が測定した検定値(ERI)を比較した様子を示す。前図と同様図7も目盛り値と長さ測定値との差の直線近似からの残差分布を示しており、縦軸のスケールは1目盛りが  $20\mu\text{m}$  である。同図には参考のため、標尺購入時にメーカー(Leica)から提供された分布図(1996)を転記した。ただしその値は印刷物から読み取ったデータであり、必ずしも正確ではない。

三者の分布の傾向はおおむね一致していると認められる

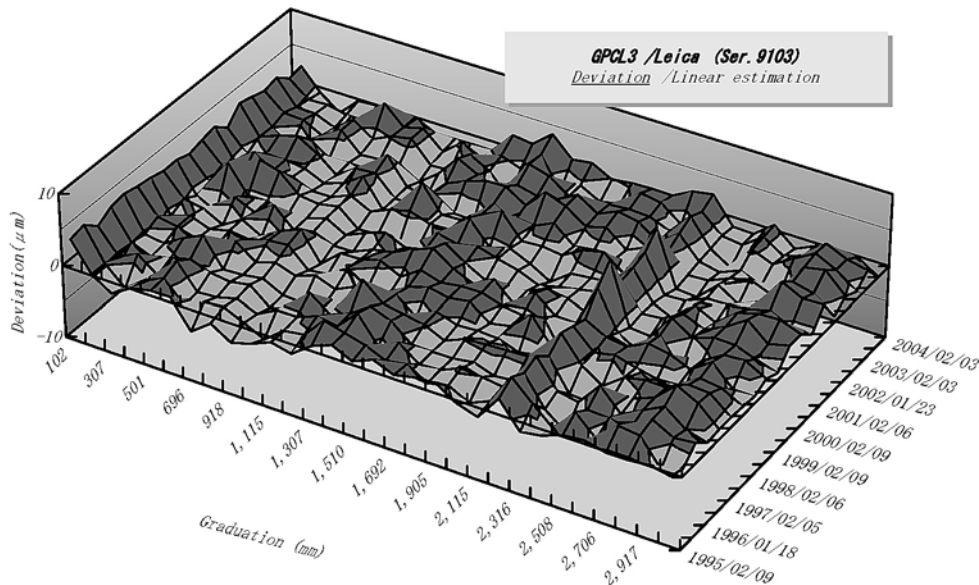


図5. 標尺の30目盛りに対する直線近似からの偏差の時間分布  
バーコード標尺 GPCL Ser. 9103 に対する変動例。この変動パターンから標尺目盛りは数  $\mu\text{m}$  の範囲で安定的に推移している様子が分かる。



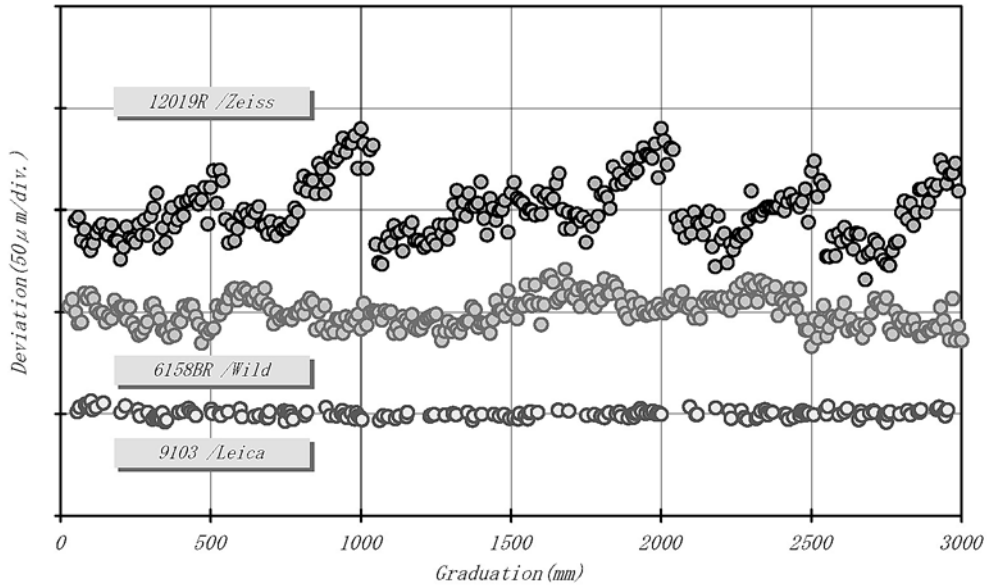


図 6. 1975 年以降における浅間火山水準測量時に使用した標尺の目盛り描画精度  
縦軸 1 目盛りは 50 $\mu$ m. 標尺は上から製造年代順 (本文参照) に並べてある.

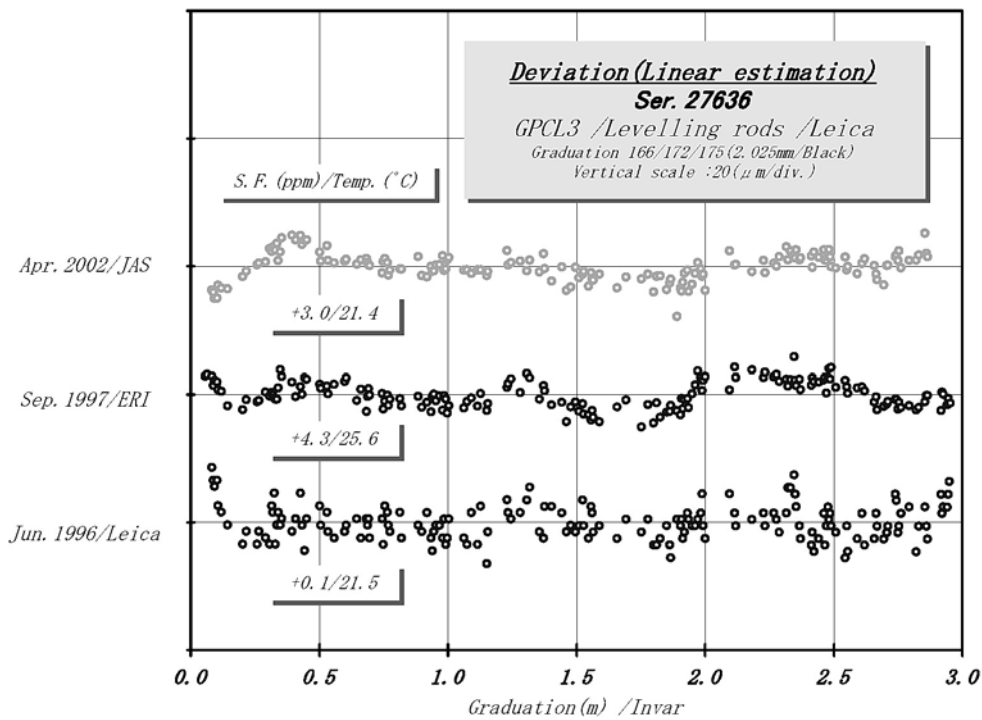


図 7. 3 機関の水準標尺 (GPCL3 Ser. 27636) 測定値の比較  
直線近似からの偏差の分布で示した. 測定時期は機関により異なるが, 目盛り相互の関係は変化がないと仮定.

が, 標尺の両端付近の値は明らかに異なっている. これらのデータ間には次のような測定上の相違があることも関係しているかもしれない. まず測量協会のデータでは, 標尺両端でそれぞれ数個の測定は意図的に行っていない. また, 3 測定値は目盛りの視準方法やその位置が異なり, さ

らにはその測定時期も異なっている.

なお, これらの詳細な比較を行うにはその測定に関する具体的データに乏しく, かつ本稿の趣旨を逸脱するので省略するが, この図から私達の測定値が信頼できるものであることが分かる.

## 円形気泡レベル

水準標尺の裏面には円形気泡レベルが取り付けられており、実際の測量で標尺を鉛直に立てるために利用する唯一の指標となっている。この円形気泡レベルは3定数とは直接関係するものではないが、水準測量の実際ではその精度を左右する非常に大切な要素である。かつ、標尺の特性として3定数以外で把握すべき要素はこの特性のみであるので、以下にその安定性の維持に関する私達の取り組みについて簡単に紹介する。

標尺に付属しているメーカー提供の円形気泡レベルの特徴を列挙すると以下の3点に整理できる。

- 1) 円形気泡レベルは標尺から着脱可能な設計である
- 2) レベルの調整機構が4点支持の場合が多い
- 3) レベルの傾斜感度が一般に低い

円形気泡レベルは、標尺の搬送や収納ケースへの格納を容易にするため着脱可能な設計となっている。したがって、その取り扱い時の不注意などにより、標尺との接触部にガタが生じやすいのが難点である。私達はこのことが原因で測定を失敗した経験があり、それ以降、円形気泡レベルを標尺に固定することで対処している。

また、円形気泡レベルの調整方法を4点支持から3点支持のレベルに交換した。すなわち、4点支持機構のレベルでも、時間をかけて慎重に行えばその安定性に問題は生じないのだが、いかんせんその調整が微妙だからである。それに比べ、板バネと組にした3点調整機構のレベルは調整自体が簡単であり、ガタが生じ難いという特徴がある。

メーカー提供の円形気泡レベルの傾斜感度（気泡1mmの動きに対応する傾斜量で示す）は3-10(mRad/mm Run)の範囲に分布する。使用実績のある標尺についてその感度の測定結果を表1にまとめた。また、これらのレベルについて、傾斜感度の温度による依存性は5°Cと25°Cでの測定からおおよそ0.1(mRad/mm Run)程度あることを確認している。

たとえば、極端な場合として5mRadの傾斜があった場合、標尺の補正量は約13ppmとなる。これは、高低差100mの区間を測定した場合、1.3mmの補正をしなければならないことに相当し、無視できる大きさではない。従って、

表 1. 水準標尺で使用した円形気泡管レベルの傾斜感度  
GDF22はWild社の整準台に使用されているレベル

Maker Type	◆ Sensitivity /Circular level /Rods			
	Zeiss L1	Wild GPLE3	Zeiss GPCL3	Wild GDF22*
Range (mRad/mmRun)	5.5 -12.4	2.4 -2.6	2.7 -3.1	1.2 -1.3

\* Tribach

円形気泡レベルの測定感度は操作調整可能な範囲で高いに越したことはないわけである。

私達の使用する水準標尺は全て1(mRad/mm Run)の傾斜感度を持つ円形気泡レベルと交換した。ちなみに、1mRadの傾斜に対する補正値は約0.1ppmである。なお、この円形気泡レベルの交換事実についてはすでに報告(竹田・小山, 1998)した。

この円形気泡レベルを実際の標尺に取り付けた様子を図8に示した。

図に示す円形気泡レベルの後方に見える鏡は、このレベルを視準する時に泡の視差を確認するために標尺背面に貼り付けたステンレス製反射鏡である。構造上、レベルの真上から視準することができないからである。また、円形気泡レベル手前のU字形の金属板は、外部から直接手などを触れないようにするために設けた保護板である。

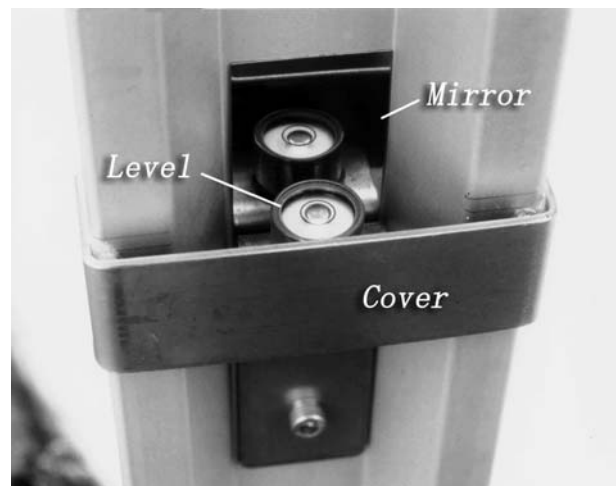


図 8. 水準標尺 (GPCL3/Leica) への円形気泡管レベル (約1.2μRad/mm Run) の固定状況  
このレベルは、標尺を鉛直に設置する唯一の指標である。

この円形気泡レベルと標尺との結合状態の安定性を確認するため、測定キャンペーンの前後には欠かさず検定測定を行っている。この測定を支援するため、水準標尺の側面と背面には目盛りゲージを取り付けた。標尺の傾きは、軒下に吊り下げた振り下げを基準として測定している。図9にその追跡結果の一例を示す。

同図に使用した縦軸は、円形気泡レベルを基準として設置した水準標尺の鉛直線からの傾きを、水準測量で求めた測定標高差に対する補正係数(単位0.1ppm)で示している。図には、バーコード標尺の一对(Ser. 9018/9103)と一緒にプロットした。測定初期には最小測定単位の選択が不統一であることも手伝って補正係数のバラツキが大きいが、最近では0.1ppm以下であり、その安定性も十分であることを実証している。

この補正係数の大きさは、上記した標尺定数のそれに比

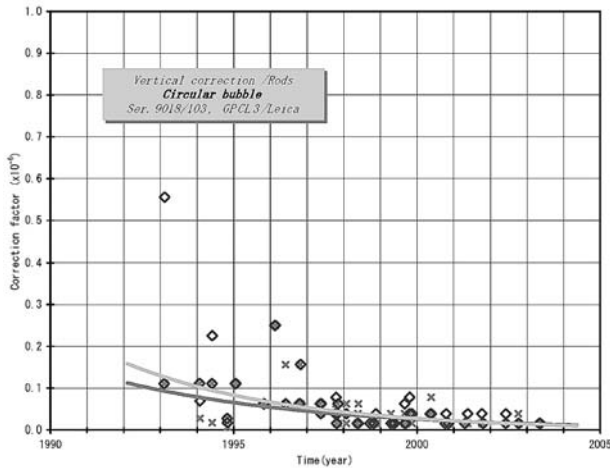


図 9. 円形気泡レベルの安定性を追跡した図  
縦軸はこの偏差が存在する時測定値に与えるべき補正係数。  
一目盛りは 0.1 ppm である。

ペー桁近く小さい。しかしながらこの円形気泡レベルの不備による補正は事実上不可能であり、水準儀の視準線誤差のように測量手順や方法によって軽減できる要素とも異なり常に累積する要素であるから、その取り扱いには細心の注意が要る。

## おわりに

標尺の検定を行う目的は、水準測量の精度と信頼性の向上にある。過去に、検定定数の大きな飛びを経験し、定数検定の誤りなのか定数値が変化したものなのか確定できなかったという苦い経験がある。いくら測定を繰り返しても、物差しが狂っていては対処のしようがない。特に、長い時間をかけて繰り返し測量を行い地殻変動を追跡しようとする場合、上記の問題は測量の価値そのものを失いかねず、測定の基準となる標尺の管理には細心の注意を払うべきである。現在使用中の標尺では、補正定数決定精度 2 ppm 範囲内では安定的に推移していると判断している。

前述したように、測定装置の設計施工は手探り状態で始

めたので、正常稼働まで多くの時間を費やし、その結果として測定開始が遅れてしまった。その間に異常な変化が無かったことは幸いであった。

この定数の決定精度そのものは、標尺温度の把握精度を工夫すれば現在の測定装置でも 0.5 ppm 程度には到達可能である。これに関連して、野外での水準測量では測定時の気温を用いて標尺補正を行っている事実はずでに指摘した。標尺温度の把握の確かさはこの局面でも吟味する必要がある。私達の測量では、測量の両端基準点での測定のみならず標尺設置点の全てにおいて温度測定を実施し、その平均温度を採用している。

測定装置は本来、温度管理の可能なチャンバーに標尺を格納し、自動測定するのが理想である。特に、膨張係数の決定にはより広範囲な温度範囲での測定が望ましいが、私達の測定装置では、測定者もその環境中での作業となっており、事実上不可能である。なお、上記検定装置に駆動装置と視準装置を付加すればもちろん自動測定も可能であるが、測定頻度と費用の視点から今のところその必要性は認められない。なお、干渉計それ自体の信頼性については言及しなかった。一義的にはレーザー管の劣化等による発射レーザー光の波長の変化等が想定されるが、ここでは考慮していない。

謝辞：図 7 に示した日本測量協会の測定データは、検定書とは別に協会のご厚意により提供を頂いたものでここに感謝申し上げる。渡辺秀文教授と鍵山恒臣助教授（現京都大学理学研究科教授）には本文内容とその構成等について有益な助言を頂いた。また、阿部勝征教授と岩崎貴哉教授の査読は本稿の改善に役立ちました。ここに記して感謝します。

## 文 献

- 小山悦郎・竹田豊太郎, 1998, 浅間火山における水準測量方法の工夫とその成果, 震研技報, 4, 1-6.  
竹田豊太郎・小山悦郎, 2003, 水準標尺の定数とその検定について, 東京大学総合技術研究会技術報告集, 8, 69-71.