

デジタルレベルの測定精度について

竹田豊太郎*†・小山悦郎*

About the Measurement Accuracy of the Leica Digital Level

Toyotaro TAKEDA*† and Etsuro KOYAMA*

Abstract

In this report, the digital level is referred to a level that aims at bar-code staff and reads the height of that collimation axis automatically. We go back to the measurement principle of a digital level, and examine the reading accuracy. Hereafter, as long as there is no notice in particular, we treat the digital level NA3000 and staff GPCL3 manufactured by Leica.

When using a digital level, we most worry about whether a level recognizes a staff scale correctly or not. Moreover, we also want to know the measurement accuracy. In this case, the quantity which must be grasped at least is the minimum resolution of a reading, and proportional relation between a reading and a staff scale.

The results of our examination mostly confirm the characteristic of specifications given by Leica. The resolution of measured value was decided as 20 micrometers or less at the maximum. Furthermore, the error of linearity was presumed to be about 20 micrometers over 3 m staff.

Since the stability and setting accuracy of horizontal axis are the basic performance of a level, we made those examinations of Leica digital level in the second half part of the report.

Key words : Digital level, Minimum resolution, Accuracy for digital reading, Stability of aiming axis

はじめに

ここに議論するデジタルレベルとは、バーコード標尺を視準してその視準軸の高さを自動的に読み取る水準儀を指す。私達がこの方式の水準儀を実際に使い始めたのは、雲仙岳の地殻変動を対象とした1993年の測定であった。この時得られた測定値から、その測定精度に着目した包括的な事柄については1998年の地震研究所職員研修会ですでに紹介した(竹田・小山, 1998)。ここでは、デジタルレベルの測定原理に立ち返りその読み取り精度について吟味する。以下、特に断りがない限りデジタルレベルにはLeica社製NA3000、標尺には同GPCL3を使用して測定したデータに基づいての記述である。なお、水準測量において長期間の測定精度を左右する要因は使用する水準標尺の安定性であり、この追跡結果は報告済みである(竹田・小山, 2003, 2004)。

Leica社製の最新モデルはDNA3である。この機種はNA3000に比べ演算処理スピードの向上が計られソフトウェアにも有用なものも多く搭載されているが、読み取りの原理は同じでありその測定精度もほぼ同程度であることを確認している。この計測用ソフトウェアの良し悪しが測定フィールドでの作業効率と最終的な測定精度を左右しているのも事実であるが、題目を逸脱するのでここでは言及しない。

デジタルレベルを使用するに当たり、一番不安でありかつ知りたいことは、レベルが標尺目盛りを正常に認識するか、またその精度はどの程度かということである。それには、読み取りの最小分解能と標尺目盛りとの比例関係(以下は“直線性”と略記)は最低限把握しなければならない要素である。また、手動読み取りの機器と同様、水平視準軸の安定性とその設定精度がレベルの基本性能の一つであるので、杭打ち法で検定・追跡した結果についても報告する。

レベルの測定原理

デジタルレベルによるバーコード標尺目盛りの読み取り原理はおおよそ以下の様なものである。一言でいえば、目

2005年8月22日受付, 2005年11月7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.

盛りの読み取りは、レベルに映った標尺像とレベルにあらかじめ記憶している標尺像のデータとを比較して決定している、ということである。この場合、バーコード標尺の目盛りは標尺全体にわたりランダムに描かれているため、レベルの視準軸の高さを特定できるわけである。

レベルで標尺を視準してフォーカスを合わせると、標尺のバーコード像が撮像素子上に像を結ぶことになる。この状態で測定ボタンを押すと、撮像素子からビデオ信号が出力され、その情報がメモリーに転送される。次に、この撮影された標尺情報とレベルのROMに蓄えられている標尺(数値)情報との比較から標尺測定値が決定される。ただし、視準距離によって撮像素子上の像の大きさが変化するので単純に比較はできず、視準距離と高さ読み取り値に関する二次元の相関処理を行い、その係数分布が最大となる位置をサーチして、レベルから標尺までの距離と視準軸の標尺目盛りを同時決定している。

ただし、この相関係数の計算範囲を標尺全体に適用したのでは、その計算は膨大となり計算時間は実用の範囲を超えてしまうため、実際の計算は粗と密の2段階に分けて行われる。また、焦点調節レバーの回転角の情報は、この処理時間の短縮を図る目的で、視準距離の一次情報として利用される。実際の測定時間は4秒前後であるが、投影された目盛り像が不鮮明であったり擬似的な映像が混じっていたり陽炎などによって像の揺らぎが生じている場合などはその限りでなく、その程度によって処理時間は徐々に長くなり、係数分布の先鋭度が設定値を超える最悪の場合は測定不能の結果となる。

なお、目盛りサーチの間隔や再計算時のアルゴリズム等に関する説明は、私達の議論には直接関係しないのでその詳細は省略する。

30 cm 検定用標尺

私達の目標はレベルと標尺の位置関係とレベルの測定値との関係を明らかにすることであるが、その検定装置には一工夫必要であることが分かった。測定は、実際の測定時と同じように、レベルは水平に設置し標尺を鉛直線に沿って移動させて行うことが前提である。測量で使用する標尺の長さは3mであるから、この測定でも3mの範囲が対象となる。

まず、上に述べたように、レベルを固定し標尺を移動させる場合である。この場合は、3m長の標尺を3m移動させる上下の空間が必要となり、都合上下6m以上の空間を屋内で確保しなければならない。次に、標尺を固定してレベルを上下に移動させる方法が考えられる。標尺は実際に使用している3m長を想定しているため、レベルを鉛直線上に移動させる3m以上の可動装置とその移動量を計測する測定器が必要となる。この場合、可動装置(レール等)



図 1. 30 cm 検定用標尺

バーコード標尺(厚さ1mm, 幅25mm, 長さ300mm)はその上端部をアルミ製の保持・保護板に一点で固定している。下端は勿論フリーとなっている。この図には、全10本のうち4本が写っている。

に求められる直線性の精度は高くなければならず、現実にはその補正装置も必要となる。

上記いずれの可動方式でも、条件を満足する空間の確保と高精度な可動装置の構築は困難と判断した。

私達は簡便的に以下の方法で対応することとした。3m長の標尺を分割し、それを任意の固定支柱のフックに順次架け替えを繰り返す方法である。この方法でも標尺の上下移動を擬似的に再現することが可能だからである。図1には3m長の標尺を切断・分割して作製した検定用標尺を示す。

この図には3m長を10等分してできた10本の30cm標尺のうち4本が写っている。分割された30cm長の標尺(インバル製目盛り部)は約35cm長のアルミ製の保護板に一点で固定した。その上端部に設けた吊り下げ用の穴には、支柱フックとの接触の安定性を図る目的で(最適とはいえないが)ボールベアリングを利用している。ここに、標尺をフックにかけた時に、その標尺の上下中心軸が鉛直線と一致していることが必要条件となる。検定は、この30cm標尺10本で1本の3m標尺を模擬的に再構築しているとの前提で測定を行うことになるからである。左右のバランスは設計段階で解決できたが、前後関係のバランスは、製作過程の最終段階で標尺下部に取り付けたバランスサーで調整した。図1に示した標尺は、このバランスサーに使用する重りを取り外した状態である。

これら30cm検定標尺をフックに吊り下げたとき、それ

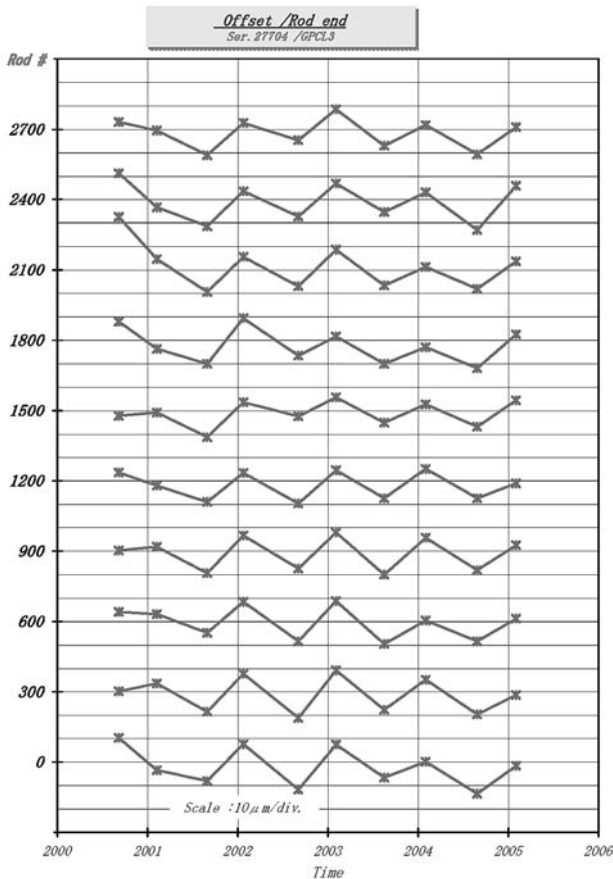


図 2. 30 cm 検定用標尺の Offset 値の変化
10 本（#0, #300, #600, …#2700）の 30 cm 標尺それぞれの Offset 値の変化分のみを上下方向に配列表示した。上下方向の一目盛りは $10\mu\text{m}$ である。各標尺に規則的変動を生じさせている主な要因は、測定時の温度である（本文参照）。

を 3 m 標尺の移動量に換算するには、フックが支柱に接触する位置の目盛り値が判明していなければならない。この値すなわち、30 cm 検定用標尺の Offset 値（端度差）は、通常行っている標尺の目盛り検定と同様な方法・精度で決定した（竹田・小山, 2004）。この Offset 値の精度は少なくともレベルの読み取り精度に比べて数段高いことが不可欠となる。この Offset 値の測定は、通常の測定用標尺の検定期間にあわせ 2000 年から行っている。図 2 は、この 30 cm 検定用標尺 10 本に対する Offset 値の変遷を示したものである。

図 2 では、Offset の数値そのものは表示しておらず、単位目盛りを $10\mu\text{m}$ とする測定値の変動成分のみを示している。図 2 に見られる規則正しい周期的な変動は、検定時の室温を反映した結果であり Offset 値それ自体が変化しているわけではない。年 2 回の測定は 1 月と 8 月に定期的に行っており、その間にはおよそ 20°C の温度差が存在する。ここに、30 cm 標尺とアルミ製 35 cm 保護板との結合部から振下げ用の穴までの長さが 25 mm であることから、アルミの線膨張係数を約 2.3×10^{-5} と仮定して、その

変動幅は $12\mu\text{m}$ 前後と計算できる。図に見られる Offset の変動幅はこの大きさとほぼ調和的である。

なお、2000 年 8 月と 2001 年 1 月の測定では、目盛りを視準する顕微鏡の十字線の取り扱いに不備のあることが測定後に判明したので、Offset の決定から除外した。

したがって、Offset 値を測定時の温度の関数であるとするれば、その決定精度は数 μm 程度と評価できる。

測定装置の概要

レベルの分解能と直線性の検定は、前節で述べた 30 cm 検定用標尺を支柱に吊り下げ、同じ床面上に設置したレベルでその標尺を視準することで行う。

図 3 は、30 cm 検定用標尺を支柱（板）のフックに吊り下げた状態を示している。フックには、繰り返しの使用による再現性の低下を回避するという標尺の穴部と同様の理由で、超鋼であるマイクロメータのスピンドル部（円柱）を利用した。検定にあたっては、これら 10 本の標尺を順次支柱に付け替えることとなるが、その取り扱いは慎重であるべきで、特にこの部分へのチリやゴミの付着には神経を使った。また、保存時におけるかびの発生を防止することを含め、このフック周辺への素手での接触は極力避けるよう注意した。

なお、図 3 に示したように、最小分解能の検定を可能にするため、フックを含む支柱全体を上下ステージに載せて移動・調整可能な設計とした。なお、その移動量はインターフェロメータで正確に計測できる。

一方、検定対象であるレベルは、検定用標尺を固定した床面と同一床面にアンカーボルトで固定した金属性の設置台に取り付けられる。図 4 は、浅間火山観測所の資料室内に展開したレベル検定の全体像を示している。同資料室の床面の強度は、測定者の移動等による測定系への影響は無視できる程度に堅牢であることが確かめられている。

また、レベルの性能として、その視準距離による依存性を把握することも重要で、視準距離で 2 m, 4 m 及び 8 m の位置にレベルの設置台を設けた。図 4 にはそのうち 2 m と 4 m 位置の設置台が写っている。さらに長い視準距離も必要であるが、部屋の空スペースの関係で設置できなかった。ただし、30 cm 検定用標尺で測定可能な最長視準距離は 11–13 m の範囲であった。直線性の検定において、測定データ数を増やすため、すなわちレベルの読み取り位置を多くするために切断する検定用標尺の長さを短くすると、測定可能な視準距離が短くなり、逆に視準距離の検定範囲が狭くなるという関係になり、両立はできない。

図 4 には測定時間を節約するため 2 台のレベルを同時に検定している様子が写っている。また、標尺には適度な照明装置も必要である。野外での測定でもたまたま起きることであるが、ハレーションが生じないよう照明の角度を微



図 3. 30 cm 検定用標尺の設置状況

水準標尺の検定装置（竹田・小山，2004）の基礎部を利用して設計したレベル検定装置である。装置には、図 1 に示した 30 cm 検定用標尺が吊り下げられている。30 cm 標尺の下端にはバランサーが取り付けられている。上下稼動ステージの操作はマイクロメータで行う。その移動量は直接マイクロメータの目盛りからも読み取れるが、別途インターフェロメータで計測している。

妙に調整することが大切である。この種の照明には間接・面照明が理想的である。

読み取り精度

私達はレベルによる標尺の読み取り精度に関して、前にも述べたようにその最小分解能及び標尺目盛り値と読み取り値の直線性に注目した。

まず、分解能を推定するため行った検定例を図 5 に示す。

検定は、上下可動ステージで 30 cm 検定用標尺を上下に移動させ、そのときのレベルの読み取り値とインターフェロメータで計測したその移動値を記録して行った。移動ステップは $10\mu\text{m}$ で移動範囲を $500\mu\text{m}$ としたのでデータのサンプル数は 50 となる。測定は測定系の安定性を検証するため往復で行っているが、復路の測定は 10 ステップ単位ごと間引いて行った。なお、単位サンプル当りの測定数は 10 であり、図 5 にはその平均値を示した。

図 5 は、標尺の移動量とレベルの読み取り値の 1:1 の直線関係からの偏差値を示している。視準距離は 2m（測定可能な最短視準距離は 1.8m）である。測定点は理想的には“0”の水平直線上に分布するはずである。測定分解能

の評価は、隣り合う測定点間におけるギャップ（飛び）を基準とするのが一般的であろう。図 5 からその最大のギャップが $10\mu\text{m}$ 程度と読み取れるから、測定分解能も $10\mu\text{m}$ 程度かそれ以下と推定できる。

また、図 5 には、上で述べたより大きい両振幅 $30\mu\text{m}$ 周期 $250\mu\text{m}$ の変動が読み取れる。この変動は視準距離が短いため、結果としてレベルの視野が小さく相関処理計算を行っている範囲が標尺目盛り数単位（目盛り描画の基本単位は 2.025mm ）に限定されたことにより、測定の対象となった目盛りの描画精度を強く受けた結果と推定される。その証拠に、図 6 を見ていただきたい。これは、読み取りの目盛り位置を変えただけで、その他の測定条件は図 5 と全く同じである。ただ、図 6 の変動パターンとその大きさは、図 5 のそれと大きく異なっている。

この例でも明らかなように、視準する目盛り位置の違いによって異なった変動を示すことが明確となった。これ以外に行った数回の同種の測定でも、この事実は裏付けられている。また、図 5 の例が最大の変動を示している例であることも判明した。このことから、この変動もすべて分解能に組み入れて解釈すれば、分解能は片振幅で $15\mu\text{m}$ 程度



図 4. レベルの性能検定の様子

この写真はレベルの分解能と直線性を検定している時の機器の全体配置を示している。正面奥には図3で示した30 cm 検定用標尺が、手前には被検定用レベル2台が金属製の設置台に載っている。床面はオレンジ色のタイルで覆われているが、標尺とレベルの設置台はその両方ともコンクリート床面に直接埋め込んだアンカーボルトから立ち上がっている。

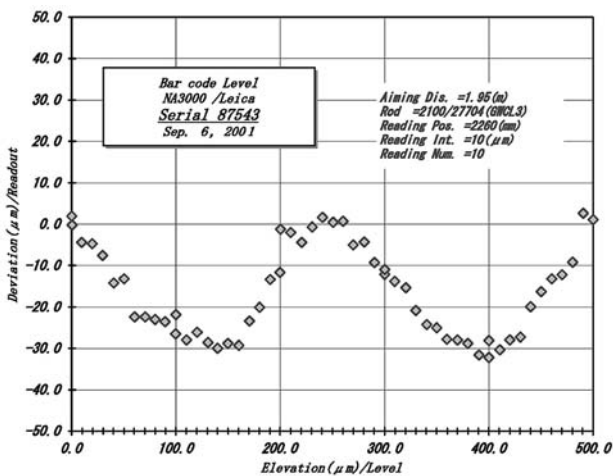


図 5. 分解能の測定 (視準距離 2 m) 例その 1
 検定用標尺を 10 μ m ステップで 500 μ m 移動した時、その移動量とレベルの読み取り値の直線近似からの偏差を描いている。縦方向の一目盛りは 10 μ m である。この周期的な変動パターンは、視準距離が短い場合にのみ出現する。

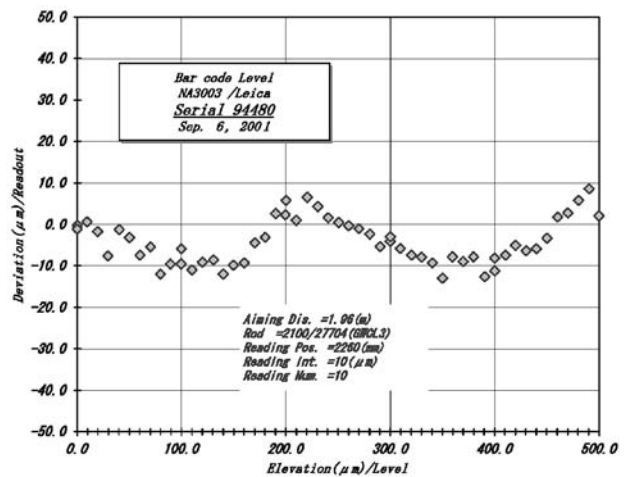


図 6. 分解能の測定 (視準距離 2 m) 例その 2
 測定条件は図 5 と同じであるが、視準する目盛りの位置がわずかに違っている。

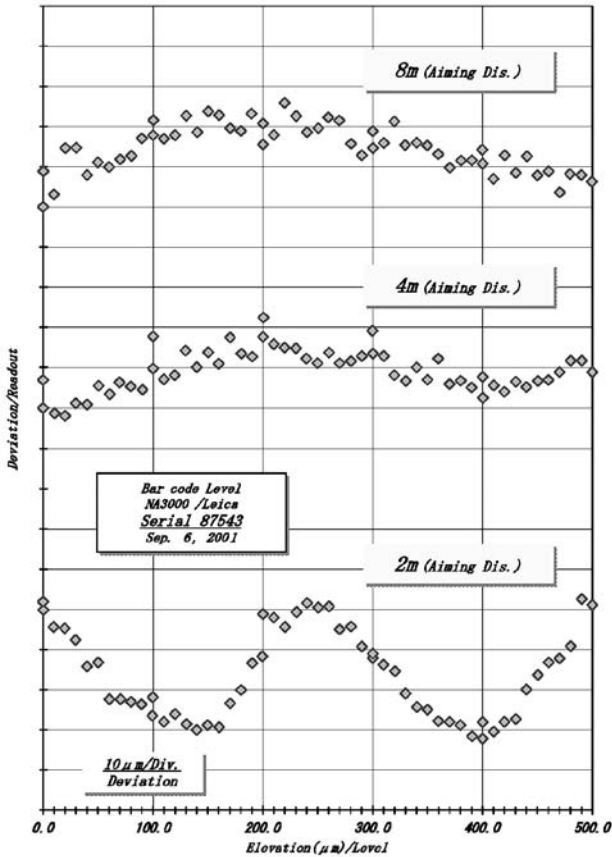


図 7. 分解能の距離依存性の検証

視準距離は下から順に 2m, 4m そして 8m である。作図の基本的なパラメータは図 5 と図 6 に同じ。縦方向の一目盛りは $10\mu\text{m}$ である。一般に、視準距離が長くなるにつれて測定値の分布が広がる、すなわち分解能が低下すると想定されるが、この図からはその傾向は認められない。

と推定される。

次に、この分解能の距離依存性を検証するため、視準距離 4m と 8m で得られた測定結果を、2m の測定結果である図 5 の内容も含め同じ形式で示したのが図 7 である。この図 7 を見ただけでは、分解能の距離依存性を特定することは難しい。ここでは示していないが、数回実施した距離依存性に関する検定結果を総合しても、この視準距離の範囲では少なくとも視準距離が長くなるにつれて分解能が低下するという傾向は認められず、距離の依存性を確認することは不可能であった。ただし、視準距離 2m の変動に顕著な、上記した振幅 $30\mu\text{m}$ 周期 $250\mu\text{m}$ の変動を取り除けば、視準距離の増加に伴って分解能も大きくなる傾向が見えてくる。しかしながら、実際の測定値に上記の操作を正確に当てはめることは不可能なので、実用性は乏しい。

上記した分解能の検定とは別に、視準距離と測定値の分布から視準距離と分解能との関係を類推できるかもしれない。図 8 はその様子を示した測定例である。測定は一点(任意の視準距離)で 20 回行い、図 8 はその標準偏差と視

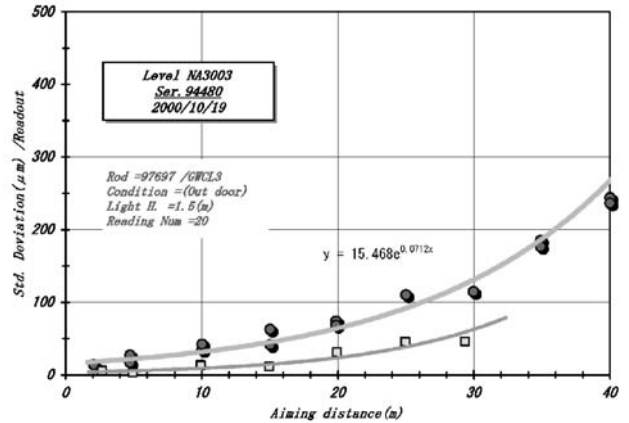


図 8. 測定誤差と視準距離との関係

この図は図 5 から図 7 までと異なり、標尺を固定して視準距離を変化させた時の測定値の誤差を示している。一つのプロットは 20 個の測定からなっている。上部のデータは野外での、下部のデータは屋内での測定例である。両者の違いは大気の揺らぎの違いから来ている。

視準距離の関係をプロットしたものである。ここに上段の丸印は野外での測定値、下段の四角印は屋内での測定値を示している。視準距離が 10m 以上になると空気の揺らぎの影響が無視できなくなり、純粋に分解能だけを評価することが難しくなる。ただし、フィールドで実際に測定を実施するに当たり、視準距離の選択基準の指標としての利用価値は高い。特に、陽炎の多い日中の測定では、目標とする測定精度に応じて、その視準距離を臨機応変に変えて(制限して)いる。

次に、標尺の目盛り値とレベルの読み取り値の関係(直線性)についてその測定結果を紹介する。測定は、前項で述べたように 10 本の 30 cm 検定用標尺を固定したフックに架け替えて、レベルの測定を繰り返すことで行った。図 9 はその関係をプロットした検定例(視準距離は 2m)であり、その関係は 1:1 の比例関係でなければならず、測定値を結ぶ線は当然原点を通る 45 度の直線となるはずである。図 9 に示した長さスケールで見ている限り、その直線からのずれは見出せない。

図 9 を元にして、そのデータの 1:1 の比例関係からの残差を、標尺の目盛り値を横軸にして示したのが図 10 である。ここに、縦軸の一目盛りは $20\mu\text{m}$ である。また、同じ標尺目盛りに対し測定が 2 つ存在するのは、検定系全体の安定性を確認するため往復の測定を実施していることによる。往復の測定値は重なっている場合が多い。図 10 から、残差の範囲が $10\mu\text{m}$ 程度であり、上記した分解能の大きさから判断しても申し分のない結果であることが判る。

図 10 には直線近似の線も描かれているが、その傾動は測定数が増えると異なってくるのが、視準位置をずらして行った検定の結果から確かめられている。この事実から

も、この検定の精度を高めるためには測定間隔をもっと密にするのが望ましいわけであるが、測定装置の制約上10点となっていることはすでに述べた。いずれにせよ、標尺全体の多数点での追跡は測定時間的にも不利なので、測定点は限定的な数とならざるを得ない。

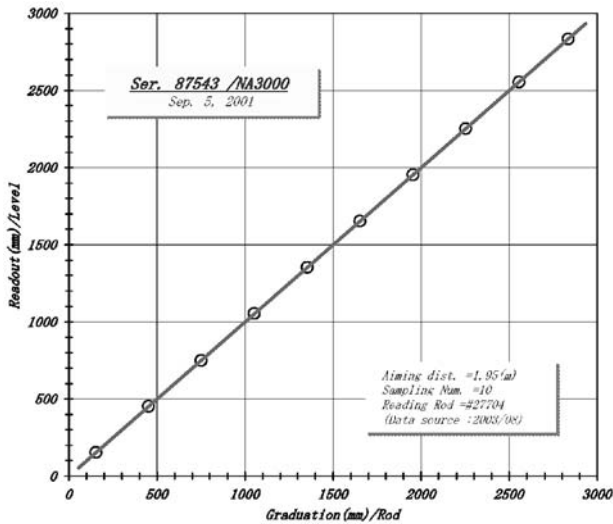


図 9. 標尺目盛りと測定値との関係
30 cm 検定用標尺 10 本を用いて得られた、標尺目盛り値とレベルの読み取り値の比例関係を示している。この場合の視準距離は 2m であるが、さらに 4m、8m と変化させても、このスケールで見る限り 1:1 の比例関係は変わらない。

この直線性の検定でも、視準距離の違いによる影響を評価するため、分解能の検定時と同様に、4m と 8m での測定を実施した。その検定例を図 11 に示した。

図 11 から、視準距離が大きくなると残差の分布範囲も大きくなる傾向が判る。同種の検定はこのほかにも数回試みており、その過程でも図 11 と同様な傾向が認められた。それらの結果も参照してまとめると、残差の分布範囲は、視準距離 2m で 10 μ m、4m で 15 μ m そして 8m で 20 μ m 前後と推定できる。

なお、レベルの読み取り値は相関処理の結果であり、この原理を素直に解釈すれば、測定値のばらつきは標尺目盛りと撮像素子の両方のゆがみに関係することは確かである。ここでは簡単のため、標尺の目盛に関する揺らぎは無く正確無比との前提で話を進めた。標尺そのものの検定結果からその目盛りのバラツキがレベルの読み取り精度と同程度かそれ以下であることが想定されていたからである。

実際に、標尺の目盛り精度は $\pm 5\mu$ m 程度と計測されている(竹田・小山, 2004)。参考のため、その標尺目盛りの測定例を図 12 に示した。

視準軸の設定精度

デジタルレベルの読み取り精度として、読み取りの分解能および目盛り値と読み取り値の直線性について前節で吟味した。これは、手動読み取りで人間が判断して処理していた過程のうち、デジタルレベルで置き換わった機能に相

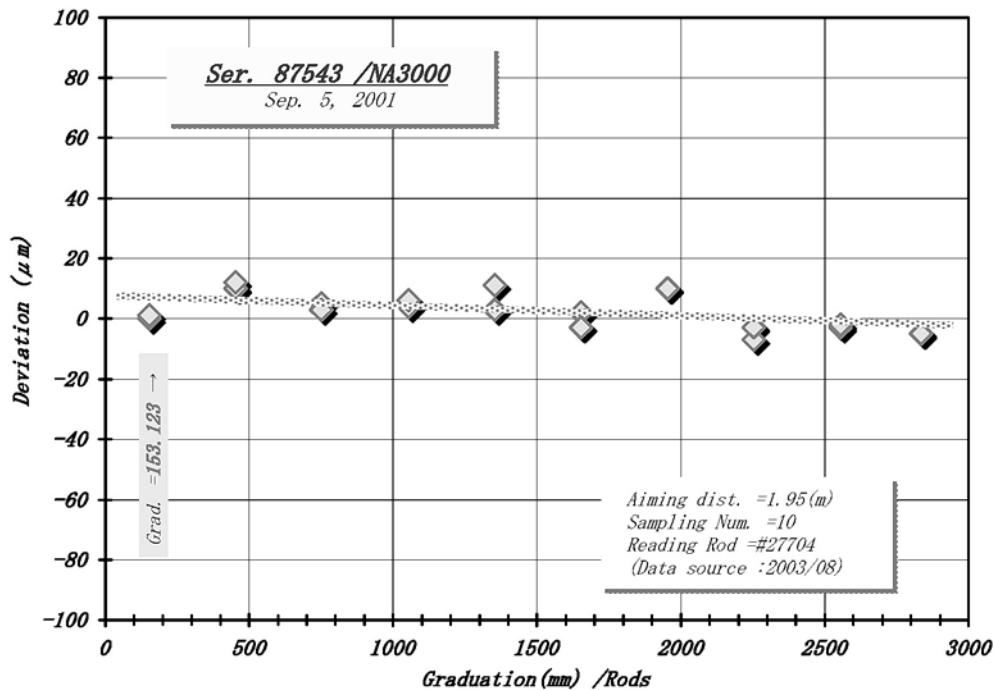


図 10. 標尺目盛りと測定値の比例関係からの残差
図 9 に示したデータの直線近似から求まる残差を、標尺目盛りを横軸にしてプロットした。測定の信頼性を評価するため往復測定を行っているので、標尺一目盛りに対して読みが 2 つ存在する。

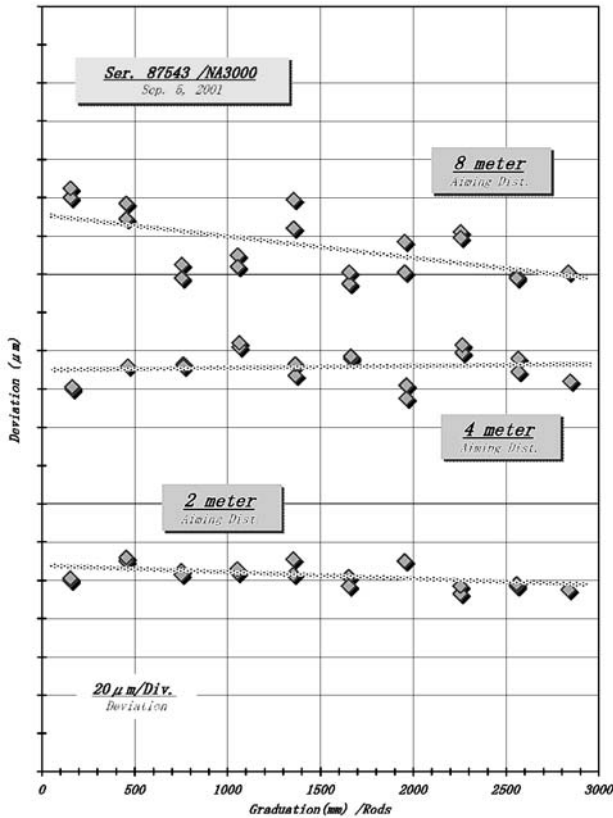


図 11. 直線性の距離依存性の検証

図 10 と同じ様式で描いた視準距離をパラメータとする残差分布。下段は図 10 と全く同じもので視準距離が 2 m の場合、中段が 4 m そして上段が 8 m の場合である。視準距離が増すにつれ残差の分布範囲が大きくなっている。

当している。したがって、上に述べた標尺の読み取りに関するレベルの性能はバーコード標尺を使用する測定に特有な要素といえるが、水準儀の測定精度を左右する基本要素は水平視準軸の安定性であることに変わりはない。

私達は、長期間にわたる水平視準軸の安定性を評価するため、デジタルレベルを含む全ての水準儀について杭打ち法 (Peg test) による測定を繰り返してきた。この方法は視準軸の設定精度 (後記の約 $\pm 2\mu\text{rad}$) を基準にして、視準軸の傾きそのものを野外で測る方法である。すなわち、任意距離に固定的に配置した 2 本の標尺を、被検定用のレベルを使用して、標尺の中心と標尺線上の任意の (不等距離) 点で視準し、それら測定値の差から視準軸の傾き決めることができる。

デジタルレベルについての検定例を図 13 に示した。図 13 には測定キャンペーンの前後 (一週間前後の場合が多い) に測定された値を横軸を時間軸にしてプロットしている。図 13 からは、測定値は徐々に小さくなる傾向にあるが、その変動幅は $\pm 20\mu\text{rad}$ 程度であり安定的に推移していると判断される。

自動レベルにおける視準軸の水平保持機構は、視準軸と器機の水平回転軸の交点にワイヤーで吊るされたプリズムが担っている。ただし、この機構にはストッパーがないため、搬送 (車・航空機等) 時の振動や測定時の動揺ならびに衝撃等をまともに受けることとなる。特に、三脚の踏み込み・固定時の衝撃は特に強く、ダメージを受ける可能性が高い。また、レベルの不使用時の姿勢によっても、プリ

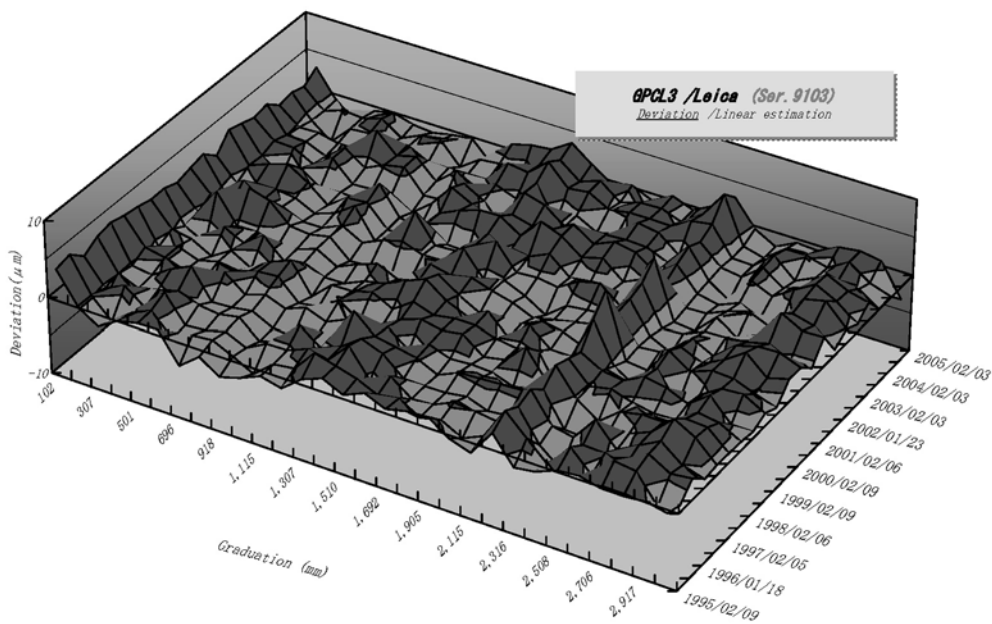


図 12. 水準標尺の目盛り検定結果

標尺目盛りの直線近似からの偏差の時間的分布を示している。標尺はバーコード GPCL3 Ser. 9103 であり、このデータは既報 (竹田・小山, 2004) であるが、それ以降に新しいデータが付け加わったのであらためて紹介した。

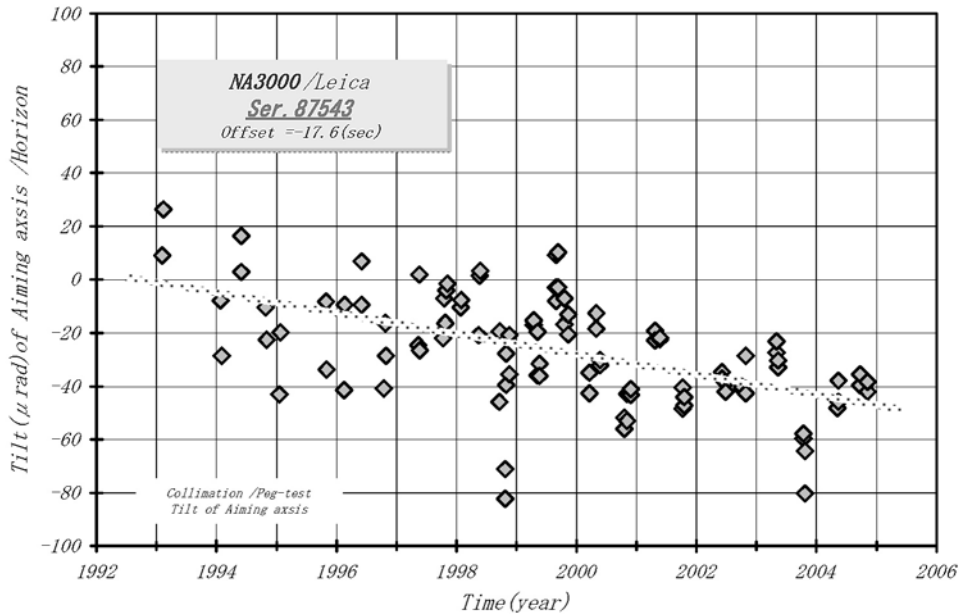


図 13. 視準軸の安定性の追跡結果

デジタルレベル NA3000 Ser. 87543 に対し杭打ち法によって測定された視準軸の傾きに対する追跡結果。上下の目盛りが $20\mu\text{rad}$ である。実際の視準軸の傾きはこれより大きく、測定時にはレベルに Offset 値を入力して使用する。レベルの測定値としては、この Offset 値で補正された結果が表示される。

ズムの吊り機構に不均衡な永久歪を生じさせる危険性が否定できないので、私達は測定時と同じ水平の姿勢でレベルを保管している。上記した $\pm 20\mu\text{rad}$ という大きさは、これらの外力を経験する過程における視準軸の変動幅であることを意味している。

一方、レベルのマニュアルによると視準軸の設定精度は約 $\pm 2\mu\text{rad}$ となっている。これはレベルを一箇所に水平に設定した状態でレベルを鉛直軸の周りに回転させた時の（実際の測定では、レベルの前後に設置した標尺を測定する間に相当する）、光軸の安定性を評価した数値である。この設定精度は本来オートコリメータ等によって室内で測定・確認すべき量である。野外で得られたレベルの測定値をこの検定値の算出に利用する場合は、そこにどうしても大気の影響の要素が入るため、正確な評価は困難となる。

ただし、上記した杭打ち法等による視準軸傾斜の検定時の読み取り値の分布などを参照して、視準軸の設定精度が $\pm 2\mu\text{rad}$ 程度であることを間接的に確認している。

おわりに

今回得られたデジタルレベルの分解能と直線性および視準軸精度について整理すると、以下のように要約できる。

- (1) 分解能
 - a. 理想的な測定環境では $10\mu\text{m}$ 程度である。
 - b. 視準距離が短い場合は、撮像素子の影響が強く出て分解能は低下する。
 - c. 距離の依存性は正確に把握できなかった。

- d. フィールドでの実際の測定における距離依存性に関する有用な情報を得た。
- (2) 標尺目盛りと読み取り値との直線性からのずれ
 - a. 理想的な測定環境では $10\mu\text{m}$ 程度である。
 - b. 距離依存性のデータとして ($10\mu\text{m}/2\text{m}$, $15\mu\text{m}/4\text{m}$, $20\mu\text{m}/8\text{m}$) を得た。
 - c. b 項は指数対数的な距離依存性を暗示しているが、特定には至っていない。
- (3) 視準軸の精度
 - a. 長期間にわたる設定精度は $\pm 20\mu\text{rad}$ 程度である。
 - b. 単一測定ごとの設定精度は $\pm 2\mu\text{rad}$ 程度と推定される。

これらの特性から判断して、レベルの読み取り測定値の最終桁 $10\mu\text{m}$ (1 単位とする) は有効であろうか? 検定で確かめられた測定値の信頼範囲として、1 単位には不確かさが残るが 2 単位を超えることがないことははっきりしている。表示単位が 1 単位ということは、演算処理過程での有効桁は 0.5 単位と想定され、上記測定の有効桁 2 単位との間には 4 倍の開きがあり妥当な設定といえる。

また、直線性の誤差は最悪 $20\mu\text{m}$ であると判断して、視準軸の設定精度 $\pm 2\mu\text{rad}$ は妥当な設定であろうか? たとえば、設定精度 $\pm 2\mu\text{rad}$ を 50 m の視準距離 (実用的な測定範囲では最大と仮定する) で換算した時の高さの決定精度は $\pm 100\mu\text{m}$ となり、これは直線性の誤差 $20\mu\text{m}$ の 5 倍に相当するのでレベル測定系に矛盾は生じないと思われる。

ここで取り上げた機種は Leica NA3000 であるが、後発機種である NA3003 や DNA03 に対しても NA3000 との違いを確認するための検定を行い、分解能その他の基本仕様については同程度であることを確かめている。また、ここで得られたデジタルレベルの性能は、手動レベルの測定精度より優れていることも比較測定で確かめられた。

仕様書では、実際のフィールドにおける路線長 1 km の往復測定値から推定される標準偏差が 0.4 mm となっている。私達の行っている測定路線では、種々の測定条件で異なってくるが、0.1-0.4 mm の範囲というのが実績である。測定精度を左右する条件にはたくさんの要因を指摘できる（小山・竹田，1998）が、そのうち最大でかつ捉えどころのないのが気象条件である（竹田・小山，1998）。

分解能や直線性の検定にあたり、視準途中の大気の揺らぎを完全に排除できないため、特にその距離依存性の特定は非常に難しい。また、視準線設定精度の測定ではオートコリメータ等で確認の必要があるなどもすでに指摘した。

これらの視点から、私達の検定測定の限界も明瞭となった。

繰り返しになるが、上記の測定精度は、あくまでも視準距離が短いなど理想的な環境での性能であり、野外測定では大気の揺らぎその他でその精度は必然的に低下する。ただ、上に述べたレベルの測定精度の検証と追跡の結果は、現実にフィールドでの測定で得られる測定精度の改善に有用な情報を提供し、測定値の信頼性の向上に寄与してきたことも間違いない。私達の水準測量の方向性の一つに、高精度な測定、短い測定線、高頻度の測定という方針があり、ここで得られたレベルの性能と特徴は、測定値の信頼性の

評価はもとより、測定条件の設定や選択等の数値化の根拠となり、かつ適切な裏付けを与えていることも確かである。

最後に、新しいレベルを導入するに当たっては、以下の手順を踏むのが正攻法であるに違いないのであるが、

1. レベルの性能確認と検定
2. 水準標尺の目盛り精度の検定と追跡
3. 測定方法・手順の確立
4. フィールドでの測定

結果として、現実とはまったく逆の手順となってしまった。測定の基礎パラメータが確定していない導入初期の段階では、その測定途中の多くの局面で試行錯誤を繰り返すこととなり、相当無駄な時間を費やしたが、幸いにも基礎的な部分で取り返しのつかないような不都合は生じていない。

謝辞：検定装置の製作と改良にあたり技術開発室の内田正之氏には多岐にわたる協力をいただいた。査読者の渡辺秀文教授と武尾実教授には、本文内容について有益な助言をいただき本稿の改善に役立てることができました。ここに記して深く感謝申し上げます。

文 献

- 竹田豊太郎・小山悦郎，1998，“Bar-code” Level による測定，震研技報，**3**，92-95。
- 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。
- 竹田豊太郎・小山悦郎，2004，水準標尺の定数とその測定について，震研技報，**10**，1-11。