

電子レベルを用いた精密水準測量

Precise Leveling for Digital Level

測 地 部 豊田友夫
Geodetic Department Tomoo TOYODA

要旨

水準測量は、様々な条件下でレベルを正確に水平に整置し、標尺の目盛を正確に読み取ることによって高低差を得る技術であり、熟練の技術を要してきた。電子レベルは、これまでの目読みのレベルに置き換わる第2世代のレベルであり、地上測量分野においては純粋な技術面からみてGPSによる革命と並び称されるものである。

1. はじめに

国土地理院では、1992年から精密水準測量に電子レベルを導入してその性能、精度、技術的な課題等について検討を重ねてきた。ここでは、電子レベルの歴史から始まり、現状の精度や課題等これまで技術報告書によって述べた内容に、新たな実験結果等を含めて報告する。

2. 電子レベルの歴史

1970年代の電子技術の急激な開発によるレーザー技術の発展にともなって、自動的な高さの測定の1つの方法として、位置センサーを用いた回転レーザーレベルが作られた。現在、主として土木工事に利用されている。

1990年にウィルド社（現ライカ社）がNA2000を発表して、現在のような自動的な高さの測定方法が確立した。2つの方法は、アクティブ法とパッシブ法という名称でも区分されている。

- ・アクティブ法：目標点に高さの情報を感知する検出器（位置センサー）を使用し、レーザーダイオードを光源とする機器を使用
- ・パッシブ法：自然光で照明される標尺のバーコード目盛をレベルのCCDで自動計測（受信）

今日のような電子レベル研究の先駆者は、ドイツ国ボン大学のツェッチェ教授で、1966年に特別なマークを持つ標尺を測定して、距離の関数としての高さをデジタル表示させることに成功した。その後15年間は電子レベルの開発は行われなかったが、今日のビデオカメラに組み込まれているいわゆるCCD技術の導入により、望遠鏡の画像面の標尺画像をデジタル情報に変換することが可能となった。これが現状の電子レベルである。

3. 電子レベルの基本原則

現在の電子レベルの共通（ライカ社、ツアイス社、ト

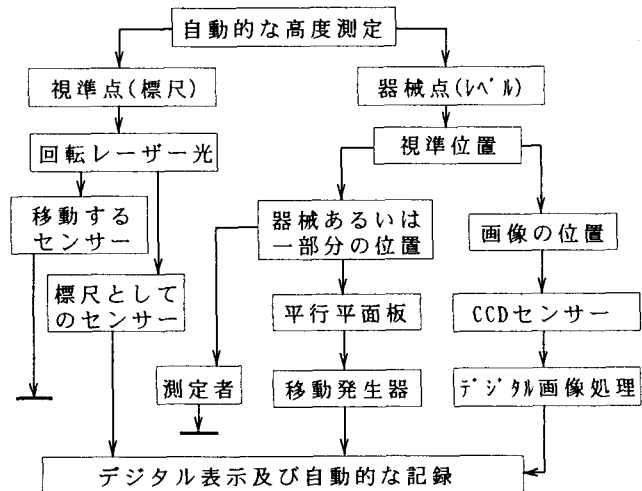


図-1 自動的な高さ測定の系統

プコン社、ソキア社）の特徴は、デジタルカメラと自動レベルの組み合わせとなっていることである。この原理により望遠鏡から得られた標尺の画像は、一方では接眼レンズを通して観測者へ、他方ではCCDセンサーへと2つの画像面へ導かれている。

各社の標尺のバーコードと電子レベル内の画像処理工程は、それぞれ次のように異なっている。

- ・相関処理……………ライカ社
- ・定量的な位置測定法……………ツアイス社
- ・位相測定法……………トプコン社
- ・測定距離によって上記3方法を変換するあるいは、ミックスする……………ソキア社

（ソキア社の電子レベルは、精密水準測量タイプでないため後述はしない）

3.1 ライカ社の電子レベル

1990年に最初の電子レベルとして発表されたNA2000は、バーコード標尺の画像を、2次元相関をベースとして画像処理している。

標尺像は対物レンズからコンペンセータを経由して、ビームスプリッターで可視光線と赤外線に分けられ、可視光は接眼レンズをとおして観測者に、赤外線はCCDラインセンサー（ディテクター・ダイオード・アレイ）上へ投影される。

赤外線に対して敏感に反応するアレイは、長さ6.5 mmで、256個の感光性フォトダイオード（ピクセル）が、25 μ m間隔に配列されている。

CCD上に投影されたシグナルは、電子レベルで既知の情報（高さが0～4.05mと距離は1.8～100mの測定範囲で50,000個）に相関換算されて、標尺までの距離と高さとしてデジタル表示される。

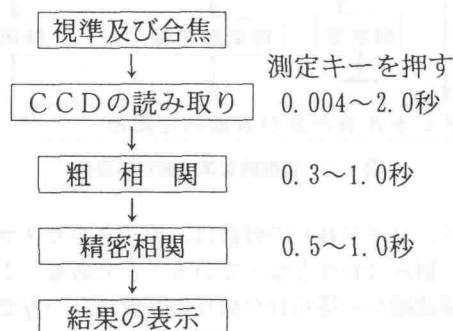
また、換算処理速度を向上させるため、合焦レンズの移動量（ピント調整）を、合焦用エンコーダーで読み取り、粗相関での係数計算の約80%を減らしている。

デジタル測定の手順は、次の4つの段階に分けられる。

- ・視準と合焦
- ・デジタル測定の開始
- ・粗相関
- ・精密相関

普通のレベルと同様に、整準→視準→合焦→測定開始の順序で行う。

測定開始を行う（測定キーを押す）と、合焦位置を決定し、自動補正装置の監視を行う。



信号の強さ（像の明暗）から解析時間が決まり、像を評価し、記憶する。この後、粗相関で近似距離をもとに概略の高さ、像の大きさを決定する。これに約1秒要する。

さらに精密相関では、電子的にデジタル化された測定信号として8ビット相関され、位置と大きさを決める。

キャリブレーション定数を使って、マイクロプロセッサが最終的な標尺の高さと標尺までの距離を、CCD上のコード像の正確な位置と大きさを基に求める。これに要する時間は最長で約1秒である。

ちなみにライカ社のバーコード標尺は、疑似乱数を用いたコード・パターンで、各目盛幅は、2.025mmのn倍に設定されている（図-2参照）。

国土地理院では、1992年から試験的にNA3000を導入して測定を繰り返してきた。これにより、次の3つの改良を実施してNA3003として1級認定（国土地理院測量機器性能基準（以下性能基準））した。（1992/7/20）

- (1) 温度センサーを組み込み、温度変化による視準線の変位をプログラム上で安定化させた。（各器械毎に、-20～60℃の範囲において、20℃ごとに視準線の傾

きを測定し、線形的に求めた温度補正量を内部温度に合わせて生データに補正する）

- (2) コンペンセータを微振動の影響が少ない位置に微調整した。
- (3) データコレクターから測定開始の指示を行うことにより、測定ボタンを押すことによる器械の揺れを解消するとともに、リアルタイム（タイムラグ0秒）と、そのまま1.2秒のタイムラグ方式の選択を可能にした。

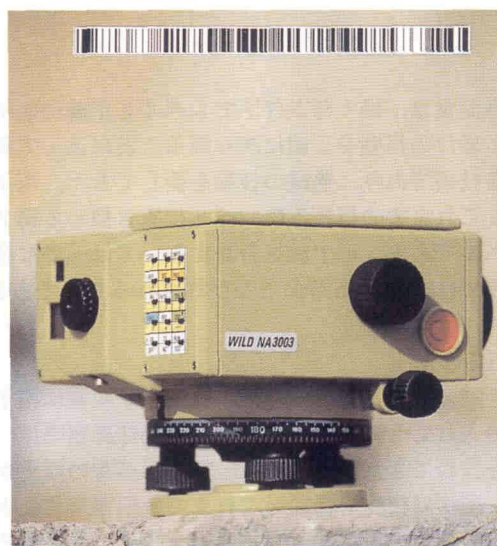


写真-1 ライカ社 NA3003

3.2 ツアイス社の電子レベル

ツアイス社のDiNi11/21は、可視光線を使用して測定を行っている。

望遠鏡視野に入ったバーコード目盛の一部が、CCDラインセンサー上のイメージ情報としてA/D変換され数値の分析を行う。

DiNi11/21は、標尺との距離に関係なく30cm部分が連続して視準領域にあれば測定可能となる。

バーコードは、他の2社に比べると白（または黄）黒区分の目盛数が少なく、8ビット情報となる2cmの間隔（インターバル）で数値をコード化していて、最もシンプルな2進コードとなっている。

DiNi11/21は、高さの測定を行うために標準コードと近距離コードという2種類のバーコードを使っている。標準コードは、測定レンジが3～100mの範囲、近距離コードは1.5～4mの範囲で使用する。標準/近距離コードは、どちらも視準した高さを直接読みとることが出来る仮のコードとなっている。

標準コードの8ビット（16cm）情報は、白/黒の幅を1ビット（2cm）を基本にHigh(1)とLow(0)に区分されている。Highは2cmを白または黒一色で塗り、Lowは2cmを白/黒で2分割している。

実際のバーコード・パターンは、図-2のようになっている。

標尺上のバーコードは、CCDに投影されて明暗（白黒）情報となる。この明暗情報（アナログ信号）は、エッジの検出を行った上でA/D変換器を通してデジタル信号に変えられ、内部のRAMに記憶される。

内部に記憶されたデジタルデータは、幾つかの論理フィルターを通して内部に記憶されている基本パターン（8ビットを1バイトとしたグループで3m標尺では19個、4m標尺では25個）と比較される。

比較方法は、記憶された1ビット目がHighかLowにより、対象となる基本パターンを選び、2ビット目以降を比較する。該当するパターンがない場合は、記憶データを1ビットずらして、同様の手順で比較を行う。

比較した結果、基本パターンと合致することがわかれば、下から何番目のパターンと合致したかがわかる。つまり、下から何cmの位置にあるパターン（n番目×16cm）かがわかる。

仮に10番目とすれば、144～160cmの範囲となる。更に、基本パターンの何ビット目に視準線が有るかにより範囲を限定できる。これによって粗測定が完了する。この比較を行うためには、CCD上に30cm（15ビット）の標尺が投影されている必要がある。逆に言えば30cmが見えていれば、比較に必要な1バイト分のデータが完全な形（連続して）で含まれることになる。

粗測定が終了した時点で精測定を行う。このときはすでに、CCD上に投影された各ビットは、標尺の下から何番目のビットであるかがわかっている。したがって、測定に使用した30cm幅のすべてのビット間隔での値を計算し、それら全部の平均を求める。

距離測定は、CCD上に投影されたエッジの明確なビット（正確な2cm）を数え、このビットに対応するピクセルの数（一定の大きさ、間隔で整列）を数えることによって求める。



写真-2 ツアイス社 DiNi11

3.3 トプコン社の電子レベル

トプコン社の電子レベルは、自動レベルAT-G2の光学系を基に、ハーフミラーで分割された標尺像がCCDによって画像処理されている。CCDは、1つの大きさが11μmでラインセンサーの役割をなしている。

トプコン社のDL101/102のバーコード標尺(図-2)は、A、B、Rの3種類のコード・パターンを使用している。A、Bパターンは高さを求めるために配置されていて、その位相差は、 2π を越えないように周期的に選択されている。このA、Bパターンの位相差を測定することにより標尺の高さが測定される。もう1つのRパターンは、レファレンスパターンと呼ばれ、決まった形をしており、外乱光の変動に対応するため、A、Bパターンの順番付けに使用されている。

基本的にはすでに述べたようにA、Bパターンの位相差の測定により高さを求めるが、1/100mmの高精度の分解能を求めるには、各パターンが等ピッチに配置されていることによる周波数（クロック）を利用した方がより高精度になるため、この周波数の位相を求め1ピッチ内（目盛幅10mm内）の高精度な高さを得る。

本体内部の信号処理の流れは次のようになる。

- (1) CCD上の標尺パターン像を電気信号に変える。
- (2) フーリエ変換を行いクロック信号の周波数、位相差を求める。
- (3) 周波数、位相差を基に水平距離、10mm以内の高さを求める（精計算）。
- (4) A、Bパターンの位相を求め高さの概略値を求める。（粗計算）
- (5) 高さの概略値と精密値の桁合わせを行い、正確な標尺の高さを求める。

標尺までの水平距離は、DiNi11と同様にスタジア測量で求める。

DL101/102は、他の電子レベルと異なりコンペンセータの制動に磁気が使われている。（NA3003も日本



写真-3 トプコン社 DL-101

以外ではマグネットダンパーの器械が販売されている。）
 なお、マグネットダンパーについては、後述する。

4. 各社のバーコード標尺のパターン

ライカ、ツアイス、トプコン各社の電子レベルは、それぞれ独自のバーコード・パターンを有しており、同じメーカーの標尺でないと測定できない。図-2は、3社のバーコード・パターンの模式図である。

4.1 ライカ社のバーコード・パターン

白（黄）黒の幅は、すべてが2.025mm（4.05mm / 2000）の整数倍（ n 倍）になっている。白黒のそれぞれの幅（ $n \times 2.025\text{mm}$ ）の n は疑似乱数的なもので、距離が1.8~100m（インバール製では最大60m）の範囲で相関処理（観測者の目の代わりをするディテクターダイオード・アレイで標尺のバーコードを識別し、電子レベルが記憶している標尺全体のバーコード・パターンと比較する）が可能となっている。

4.2 ツアイス社のバーコード・パターン

白黒の幅は、基本的に1, 2cmになっていて、このインターバルをA/D変換して数値化する。実際に必要な視準領域は16cm分で、図の場合は、01001100（下から）のコード情報となり、これから高さを捜し出す。ツアイス社の電子レベルは、定量的な位置の測定法を用いている。

注）図は、8ビットパターンのみを表示している。

4.3 トプコン社のバーコード・パターン

図のようにR, A, Bの3つのパターンが繰り返されている。Rパターンは、リファレンス・パターンと呼ばれ同じ形をしていて、A, Bパターンを識別するために使われている。A, Bパターンは、わずかに違った周期で幅を変化させるパルス変調方式を採用（標尺全体を見れば明暗の変化がわかる）している。トプコン社の電子レベルは、A, B信号の位相差（わずかな周期の違い）から高さを求めている。

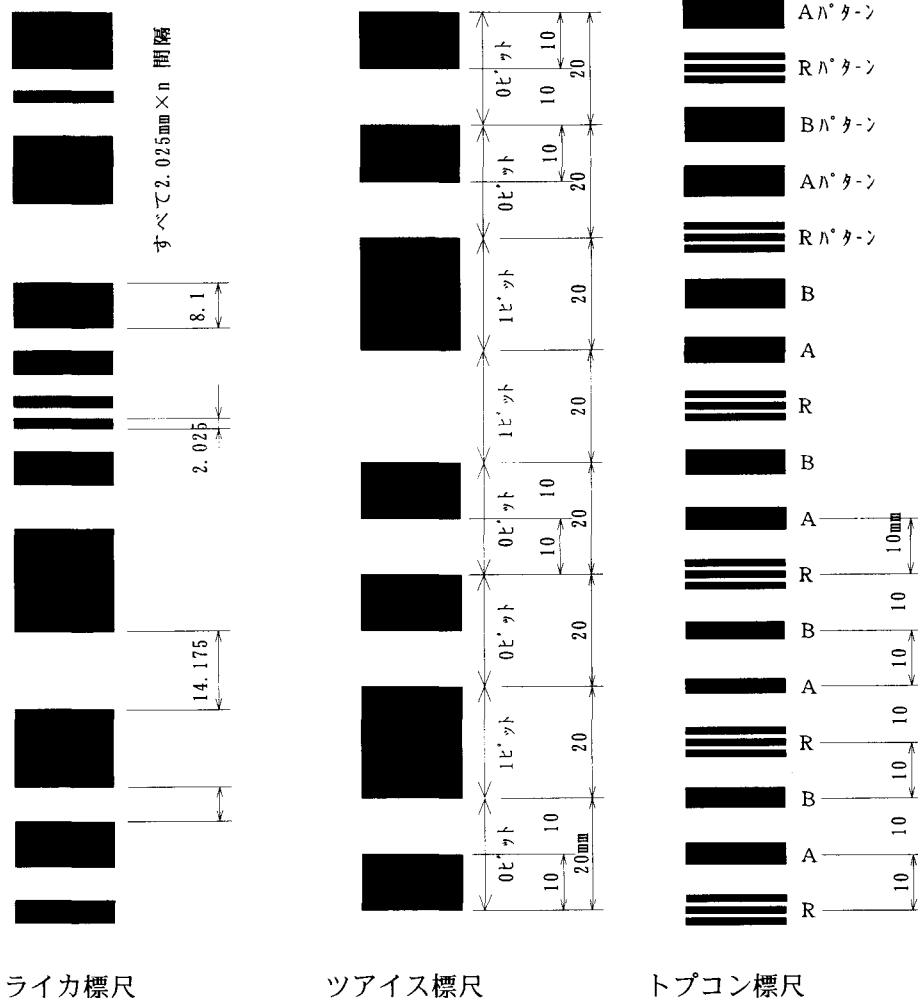


図-2 各社のバーコード標尺

5. 自動レベルの特性

3社の電子レベルは、いずれも自動レベルとCCDカメラを組み合わせた測量器であり、測量器の基本的な構造から言えば振り子式のコンペンセータ機構（自動補正装置または、自動補償装置）を有するレベルである。

5.1 コンペンセータ

電子レベルは、内部にあるプリズムなどによって分けられた標尺の像が、一方は接眼レンズに、一方は電子レベルの電子の目とも言べきCCDラインセンサーに取り込まれて、高さや距離をデジタル表示する自動レベルである。また、自動レベルは、コンペンセータ機構によって水平な視準線を得ているレベルである。

現在、電子レベルは、ライカ、ツアイス、トプコン、ソキアの4社のものがあるが、いわゆるコンペンセータは、吊り下げ式（振り子式）のものである。

現在、1級認定されている自動レベルは、カールツァイス・イエナ社のNi002（同Ni002Aを含む）だけで、他の自動レベルについては認定されていない。

Ni002は、平行平面鏡をコンペンセータ（回転振り子式反射鏡）として用い、観測者が強制的に平行平面鏡を回転させて、両面から得た測定値の平均値で高低差を求めるという方法で、コンペンセータに起因するヒステリシス誤差（後述）を解消していた。このため吊り下げ式コンペンセータ機構を有する機種とはいえ、他の機種とは別物と判断される自動レベルである。

一口に吊り下げ式のコンペンセータと言っても、プリズムなどを何本の、どのような線形物（例えば、ツアイス社は磷青銅のテープ）で、どのような形式（例えば、4本のたすき状）に吊してあるか、同じ機種は同じ性能（コンペンセータの再現性が均一か、ヒステリシス誤差の量は同一か）を有するかなど不明な点はまだ多いと言える。

5.2 コンペンセータの特性と整準方法

自動レベルは、コンペンセータ機構を有するために完全な水平状態に置かれていなくても、ある程度の範囲以内に整準してあるだけで、水平な視準線（焦点鏡クロスヘアの中心に結像）が得られることになっている。しかし、真の水平状態にはできなく、また、円形気泡管が完全な中央にあっても、コンペンセータの完全な水平状態と一致するとは限らない。したがって誤差が現れることになる。この誤差は、視準方向によって異なり、コンペンセータを台形に吊り下げている場合の補正特性は、理論的にグラフで表すと、パラボラ型（お椀型と鍋蓋型を含む）と直線型を含む曲線になると言われている。

図-3のように常に後視で整準すると、気泡の微小な

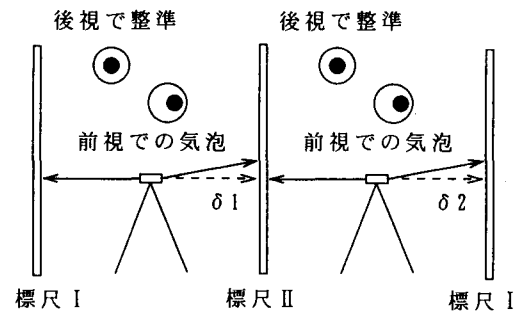


図-3 常に後視で整準

移動による誤差が累積（ $\delta 1 + \delta 2 + \delta 3 + \dots + \delta n$ ）することになる。

パラボラ型、直線型のいずれにしても、実際の観測では後前視の視準に際して円形気泡管の気泡が全く移動しないとはいえないので、図-4のように特定の標尺に望遠鏡を向けて気泡を中央に導く整準方法を行い誤差を解消（打ち消しあう）することが重要である。

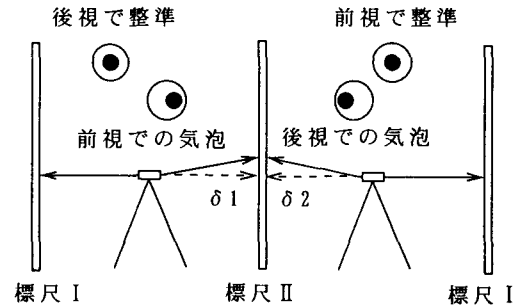


図-4 特定の標尺で整準

前視で気泡を中央にあわせて、後視に望遠鏡を向けたときに、気泡がずれているからと言って、気泡をあわせ直してはならない。気になるならもう一度前視に望遠鏡を向けてから整準することが重要である。

こうしたことから、円形気泡管の点検・調整は、入念に行うよう心がけておく必要がある。

また、レベルの整準に際しては、後述するヒステリシス誤差を考慮した整準方法とあわせて実施するべきである。

5.3 コンペンセータの作動テスト

写真-4の傾斜計を使用してコンペンセータの再現性をテストすると、使われているコンペンセータの特性がパラボラ型なのか、直線型なのかがわかる。また、コンペンセータの信頼度もはかれる。

図-5は、傾斜計を用いて前後左右に0.86分毎に、約12分傾斜させた結果のグラフである。ここでは、一部のサンプルしか記載できないが、このテスト結果からみるとほとんどのレベルが直線型であることがわかった。



写真-4 傾斜計を使用したコンペンセータのテスト

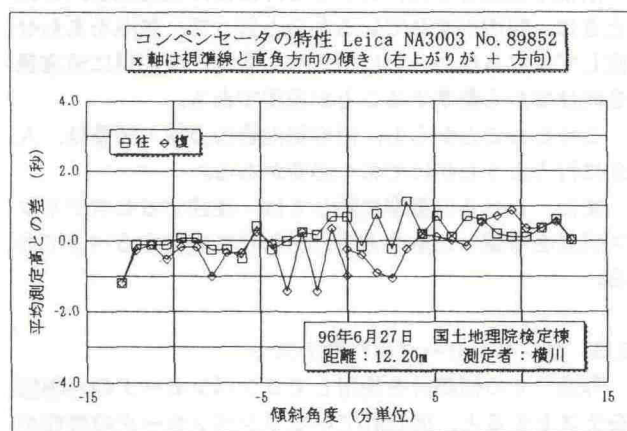
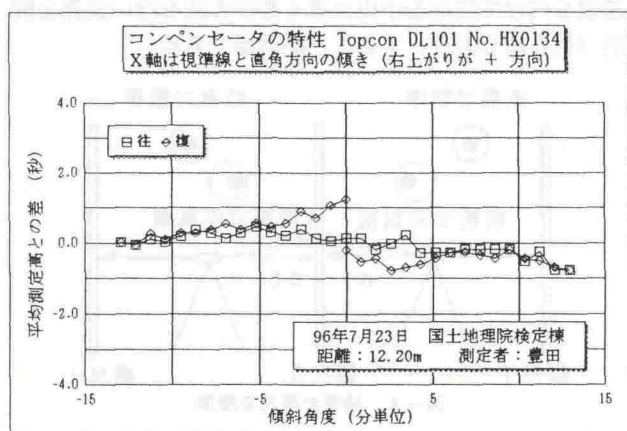


図-5 コンペンセータの特性

6. ヒステリシス誤差

レベルを整準するとき、あるいは望遠鏡を180度回転させて後前視の標尺を測定するとき、ほとんどの自動レベルのコンペンセータは、その作動範囲内で揺すられて傾く。傾いても整準すれば、あるいはしばらくすれば、地球重力の方向（鉛直方向）に向くはずであるが完全に

は鉛直方向に戻りきらない。この戻りきらない差（図-6, 図-7, 図-8の点線）をヒステリシス誤差という。

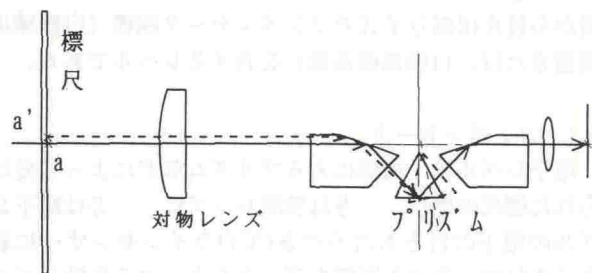


図-6 ヒステリシス誤差

図-6では、コンペンセータ機構としてのプリズムが傾いているため、本来標尺のa点を読まなければならないレベルの視準線が、a'点を視準することになる。

このヒステリシス誤差の大きさや方向（プラス、マイナス）を見つけることは難しく、したがって水準点間で、あるいは測量区間全体での累積は見積もりも難しいといえる。

6.1 ヒステリシス誤差の測定

ヒステリシス誤差の大きさや累積量を調べるのは難しいが、各社のレベルについてヒステリシス誤差の累積調査を行った。

方法は、1本の標尺を固定して、ある一定間隔（20～30秒毎）で1視準1測定を望遠鏡を回転させながら行う。

回転方向は、左右交互に、右回りのみ、あるいは左回りのみで行った。

この実験から望遠鏡回転の遠心力に起因するヒステリシス誤差は、3機種とも検出できなかった。

回転を早く行うなどのさらなるテストが必要かもしれない。

また、ある測量会社が電子レベルで観測を行ったところ、ベテランの技術者が観測するよりも、新人が行った方が再測が少なく、結果的には観測時間も短かったという話があった。

おそらく、水準測量に慣れた観測者が、新人に観測の手本を示すために行った模範演技が、観測が早過ぎてダンパーによる制動が完全に行われないうちに測定ボタンを押したことに原因があると考えられる。

これもヒステリシス誤差の1種といえる。

6.2 ヒステリシス誤差と整準方法

図-7に見るような整準時のコンペンセータの傾きの方向と、後視観測後に前視を視準するために望遠鏡を回転させたとき（遠心力によりコンペンセータが傾く）のコンペンセータの傾きの方向は、同じと考えられる（大きさは不明）。

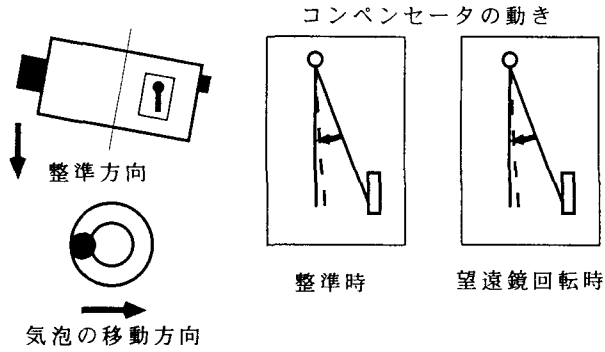


図-7 ヒステリシス誤差-2

逆に図-8のような整準方法では、望遠鏡回転による遠心力の作用と反対方向にコンペンセータがおかれることになる。

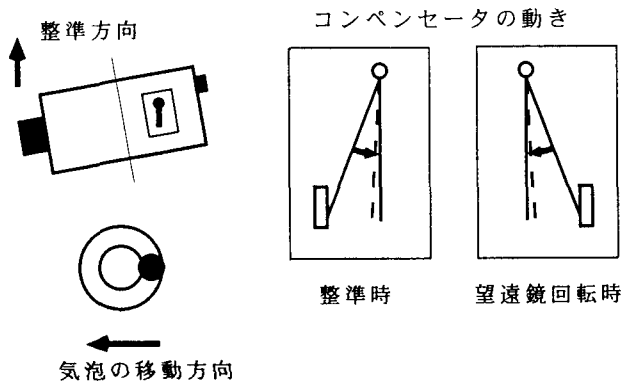


図-8 ヒステリシス誤差-3

2つの図から判断すれば、図-7の方法が同じ方向へコンペンセータが残留するので好ましいと考える。つまり、コンペンセータのヒステリシス誤差が、その量が不明なことから消去できないものとするならば、後視、前視の観測で打ち消すように作用する整準方法を採用すべきである。

したがって、整準する前に望遠鏡対物レンズ側を常に同じ標尺に向けて（前述）、加えて、対物レンズ側を接眼レンズ側より高めに置き整準する方法を採用することが自動レベルの視準線誤差をより小さくすることになる。

すべての自動レベルがこのようなコンペンセータのヒステリシス誤差を有するとは限らないが、ライカ社、ツアイス社もこの整準方法を精密水準測量において薦めている。この方法は、作業規程（案）にも記載している。

また、このような整準方法を採用しないならば、1回目の後視測定前に、前視に1度望遠鏡を向けて望遠鏡を回してから行うのも1つの方法といえる。

7. 制動装置（ダンパー）

自動レベルのコンペンセータ機構が重力を利用する振り子方式であるならば、その振り子体の振れを速やかに正常位置に静止させるための制動装置も重要である。

コンペンセータの動きは、振り子の固有周期と制動装置の強さの関係で決まる。一般的にコンペンセータのもどりが速く、しかも、小さな振動に強いことが望ましいが、制動装置が強すぎるとコンペンセータの静止までに時間が長くなり、弱すぎると小さな振動が残るので、このバランスが難しいと言われている。

制動装置は主に、空気制動方式と磁気制動方式のものがある。

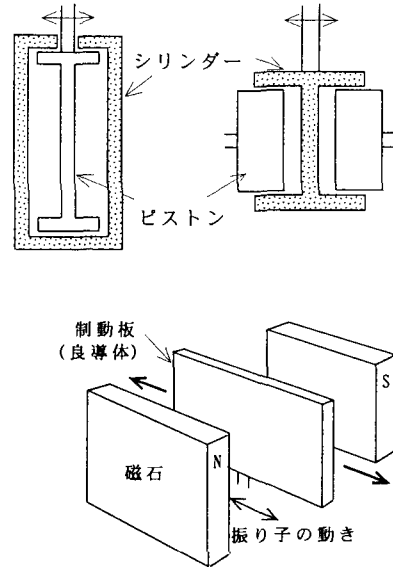


図-9 空気制動（上）、磁気制動（下）方式

7.1 空気制動（エアダンパー）方式

ピストンかシリンダーのいずれかをコンペンセータの振り子体に固定し、ピストンとシリンダーの隙間から空気が出入りし、その空気の抵抗で振り子を制動する方式である。図-9の上の左側は、DiNi11の制動装置の模式図である。

現在、1級認定を受けている自動レベルは、すべてエアダンパーを使用している。

7.2 磁気制動（マグネットダンパー）方式

固定部に永久磁石（N、S極）を置き、その隙間を良導体（銅、銀、アルミニウム等）で造られた非磁性の制動板を磁石にさわることなく前後するように振り子に取り付けた構造になっている。

フレミングの左手の法則により、磁界の間（N S極）を導体が動くとき導体に電流を生じ、その電流が導体を逆に動かすことにより制動する。

マグネットダンパーを使用している自動レベルは、現在2、3級レベルに多く、コンペンセータ全体を構造的にみれば、エアダンパーに比べて製造が容易（品質管理上）と聞く。しかし、国土地理院では、マグネットダ

ンパーの使用を控えていた。

それは、1つには、地球磁場や直流磁場(鉄道沿線等)、交流磁場(発電所等)等での水準測量でどのような結果が得られるのか、もう1つは、空気中の磁気をおびた砂塵などが、本体のフレームの隙間から内部に入り込んだ場合、制動装置の作動を狂わせたりしないかの疑問に答えるデータが無いためである。

このような問題が解決されない以上、マグネットダンパーの機構を有するレベルの使用には踏み切ることができない状況であった。

このことは、エアーダンパーの機構を利用したコンペンセータであっても、コンペンセータの吊り材として磁気に反応する金属を使用しているとしたら、前述のような結果を生むので注意を要する。

7.3 マグネットダンパーのテスト

測量機器等が通常の観測状況で受ける環境磁場は、地球磁場と人工磁場に大別される(地球磁場は、約0.5ガウスである)。また、人工磁場は、直流磁場と交流磁場に大別される。

(1) 地球磁場

地球磁場は、広く一般に認識されているもので、精密機器を作成する場合は、地球磁場の影響で測定のパラッキが認められる器械はそもそも実用に耐えない。したがって、そのような器械は、製品化されないと考える。

(2) 直流磁場

一般の電気鉄道で多くの在来線、私鉄などの近くでは、この影響を受ける可能性がある。

(3) 交流磁場

発電所、変電所、送電線、大規模工場、交流電気鉄道(新幹線)などがあげられる。

送電線の下などでは、磁場の影響を受けやすいと想像するが、送電時によるロスが極力低く押さえられていることから、この影響は小さいと考えられる。このことは、発電所、変電所でも同様といえる。

(4) 測定結果(図-10参照)

テストは、直流、交流磁場の人工磁場を想定し行った。

ヘルムホルツコイル(写真-5)を用いて、直流、交流の磁力を変化させ、磁力をかけない場合との差があるかを調査した。

テストを行ったライカ、トプコン2社各2機の製品は、通常の観測におけるパラッキと何ら変化はなく、良好な結果を得た。

(5) まとめ

同様な実験は、ドイツのボン大学ですで行われて(ライカ社NA3003、トプコン社DL-101)おり、その影響は、0.1mm/km以内と実験値が公表されている。

こうしたことから、現在の性能基準(平8年3月)中にある、電子レベル1級は「空気制動」としている摘要については、再検討を行う必要があるといえる。

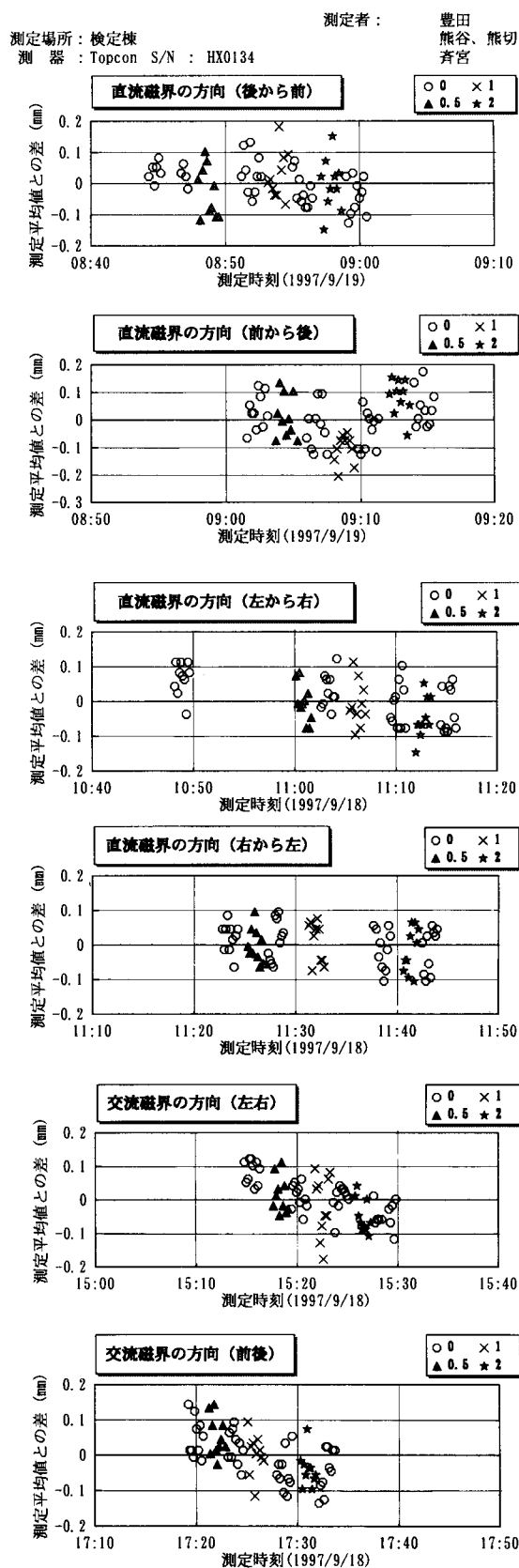


図-10 磁力変化によるレベルのテスト

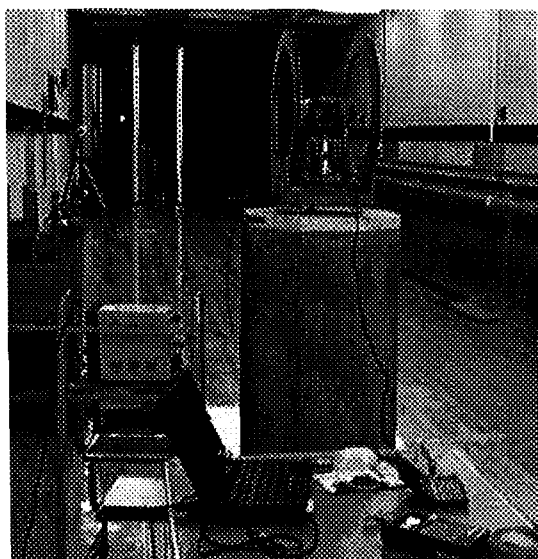


写真-5 ヘルムホルツコイルと電子レベル

7.4 エアーからマグネットへ

NA3003エアダンパー (NA3003-Air) と、NA3003マグネットダンパー (NA3003-Mag) の相違点は、外見からは判断できない。

NA3003-Airは、国土地理院の行う直営作業においては、ツアイス社の、DiNi11 (エアードンパーのみ) と並んで主力のレベルとなっている。

- (1) エアダンパーは、手作業を主要とするその組立に、熟練した技術者を必要とするが、その人材がリタイアしつつあり、その技術の継承も稀薄な現状にある。
- (2) マグネットダンパーの方が作成が容易であり、コンペンセータ全体からみた設定精度の均一化が保ちやすい。

上記理由などからマグネットダンパーの方がエアダンパーに比べて、価格が低く抑えられる。したがって、レベル1台の価格も安い。

以上の事柄は、今後作成されるレベルは、1級のレベルにあってもマグネットダンパーを用いた機種でしか製品化できなくなりつつあるといえる。

8. バーコード標尺の測定条件

電子レベルの望遠鏡視野内における測定に必要な標尺の情報は、機種によって異なるが約70%である。また、標尺の上下端 (3.0m, 0.0m付近) では50%以上の遮蔽でも測定可能である。ある程度の遮蔽は、精度と無関係と報告されているが、視野内で100%の情報が得られるのと70%では、1測定に要する時間が異なるようならば、やはり、情報が多いほど精度が高いと思われる。また、視準線の途中で金網フェンスなどがある場合は測定できても好ましい数値とはいえない。

DiNi11に限れば、実質30cm (1バイト16cmが連続して見えていると想定して) の情報で高さが出せる理論

を用いている。ただし、スタジア法による距離の測定を行っているため、30cm分では、測距の精度は落ちることになる。

8.1 標尺の明暗と背景

電子レベルは、視野内の標尺の光量を器械内部で調整して測定モードに入る。このため図-11のように標尺に陰が生じると光量調整ができなくなってエラー表示をする場合がある。

図-11 (左) のように標尺にはっきりとした明暗がある場合に、最もエラーを発生させ易いのはツアイスである。

図-11(右)のように木陰の斑な明暗に最も弱いのは、トプコンである。

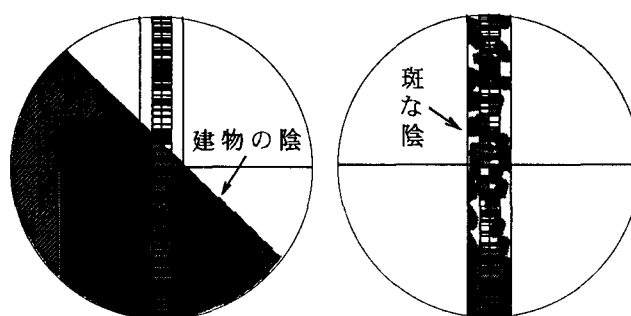


図-11 標尺に陰がある場合

陰とは逆に、図-12のように背景が光っていたり、トンネルの出入り口の逆光、雨上がりや雪解けの濡れた路面、反射板の役目をして

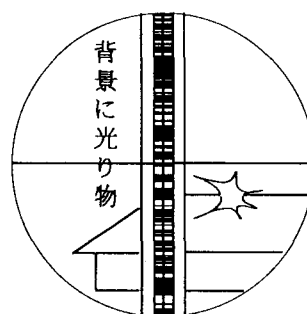


図-12 背景に反射光がある場合

いる道路標識、反射材を縫い込んだ安全服なども光量調整ができなくなるか、あるいは測定はするがその数値が信頼度の低い結果となる。

(メーカー側では、測定結果を表示する限り信頼できるとしている)

8.2 対処方法とその他観測上の注意点

- (1) 傘などを使って視野内の標尺部分すべてを陰の中に入れる。
- (2) 器械を道路の反対側に移動する (トンネルでは有効)。または、標尺を回転させる (60° 程度の回転ならば高さの測定精度には影響しない)。
- (3) 距離を短くするなどして、標尺を電柱の陰などに入れる。

などの対処が考えられる。また、坂道などでは、標尺の上・下端が視野に入る場合、目読みのレベルでも注意しなければならないことであるが、特に下端は、路面の反射熱からくる屈折を考慮しなければならない。

特に電子レベルの場合は、70%の視野率が必要となるので測定される標尺の高さが、測定距離の1/100以下になるような状態はさけるべきである。

電子レベルは、ある程度の振動があっても測定が可能である。したがって、器械が測定するそのことに任せず、測定ボタンを押す時点では、目読みで観測するつもりで望遠鏡を観ることが重要である。

9. 温度と視準線の変化

電子レベルは、従来の目読みレベルと同様に機械的な視準線と電子的な視準線が存在して、目読みレベルに比べて視準線が不安定といわれている。

そこで3機種の電子レベルのテスト(図-13参照)を行った。11時から16時まで5分間隔に3機種のデータを取った。この間の温度変化は約5℃で、標尺までの距離は約15mである。

3機種のうち温度センサーが内蔵されていないのは、トプコンのみであるが、この機種が最も安定している。

このことは、1度だけによるデータ不足なのか、温度センサーの機能が十分に作用していないのか不明な点が多い。今後さらに実験を要すると考えている。

また、この実験は、屋外で行ったもので通常の観測状況に近い。現状から判断されることは、1日の間では、2秒程度の視準線の変化があることを想定して実観測にのぞまなければならないかもしれないことである。

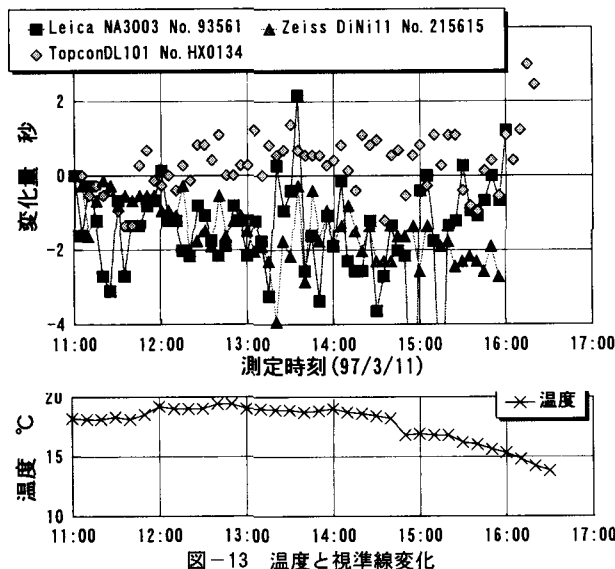


図-13 温度と視準線変化

10. 96年度までの観測精度

電子レベルは、1995年度から国土地理院の作業に本格的に取り入れられてきた。

図-14は、1997年3月までのNA3003による観測精度(標準偏差)と1区間における往復観測の差(正の回数)を表したものである。

データ数は約2,800km, 50地区分で、標準偏差、正の回数とも測量年月の経過とともに右下がりの傾向にある。また、夏場は両者とも高い数値である。

両者の数値が右下がりにってきていることは、セラミックス製の爪の利用にも起因するが、電子レベルを理解し、観測に習熟してきたことが最大の理由と考える。

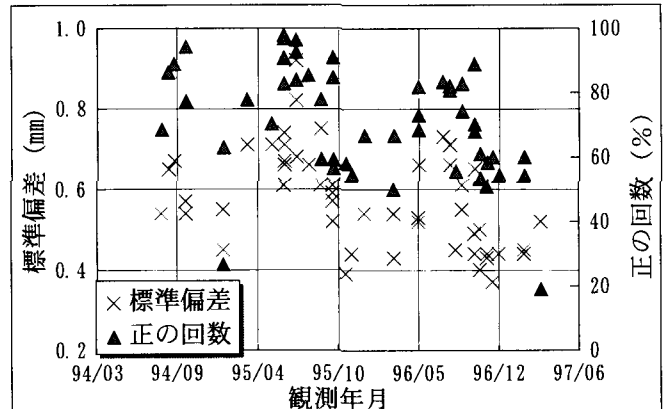


図-14 観測精度の推移

11. 電子レベルの応用

ライカ社をのぞく他の3社の電子レベルは、拡大あるいは縮小されたバーコード標尺が使用可能である。

このことから、拡大バーコード標尺を用いれば、測定可能距離(拡大倍率にもよる)をのぼすことが可能となる。

測地三課では、1997年11、12月に5倍に拡大コピーされたバーコード連続紙を用いて距離約200mの区間の測定を行った。同時に行った直接水準測量との結果から、渡河水準測量などに有効な観測方法の1つであることが検証できた。この実験では、拡大コピーしたバーコード目盛を使用した。バーコード標尺の目盛データはすべて数値化されており、幅広の標尺に目盛を刻むことによって安定した測定が可能となる。

また、要求精度の低い簡易水準測量等にも、応用できる方法である。

今後さらに検証を加え、作業規程に盛り込んでゆく考えである。

12. おわりに

電子レベルは、電子技術の1つの結晶であり、今後さらに改良、応用されていくであろう。あるいは、開発されてからもうすぐ10年を迎える電子レベルに変わり、今までの考えや作業を一新した自動的な高さの計測方法が、もうすぐ発表されるかもしれない。

現在は、いつの時点でもハード的なハイテク変革期であり、ソフト的にみれば測量技術者にとって試練の時期ともいえる。

また、測量機器の検査でみれば、JIS基準からISO基準への変革期でもある。

日本における水準測量は、100余年の歴史を踏まえつつ、使用する機器についても、その使用実績などの十分な経験を基にレンズの有効径まで含めて維持してきた。

ISO基準では、レンズの有効径や解像度などこれまで重要視してきた項目がなくなり、所定の精度確認方法を用いて検査し、目的精度に収まれば使用できる方法に変わる。

今後どのような測量機器が世に出るか不明だが、ISO基準で、いかにこれまでの精度が維持できるか慎重な検討が必要と考える。

参 考 文 献

- H. インゲンサンド（チューリッヒ工科大学）：新しいデジタルレベルの技術とその応用
ライカ社，ツアイス社，トプコン社カタログ
- 川本利一他（1994）：デジタルレベル及びバーコード標尺の性能試験（研究報告）
- 日本測量調査技術協会（1994）：デジタルレベルの観測条件による精度の検証APANo.59-5
- 日本測量調査技術協会（1995）：デジタルレベルの観測条件による性能実験（その2）APANo.62-7
- 豊田友夫（1996）：電子レベルを用いた水準測量（技術報告）
- 豊田友夫（1996）：電子レベルを用いた水準測量その2（技術報告）
- 豊田友夫（1997）：マグネットダンパーを用いた電子レベルの磁力変化（技術報告）