

電子レベルの器械特性に起因する水準測量誤差の調査

Research of Leveling Error caused by mechanical characteristic of Electronic Level

測地部 澤田正典
Geodetic Department Masanori SAWADA

要 旨

水準測量における季節的な誤差要因の発生メカニズムを探る調査研究を実施したところ、電子レベルの温度特性、コンペンセータのヒステリシス特性、そして水準測量用三脚の直射日光による変形等に起因するこれまでに未発見の偶然誤差及び系統誤差の存在を確認したので報告する。

1. 水準測量と誤差

水準測量は高低差を測定するために行う、世界的に長い歴史を持つ測量技術である。日本国においては明治時代に近代的な水準測量を導入し、測量機器及び測量方法の改善を進めながら、現在においても当時の手法を引き継いだ形の水準測量を行っている。水準測量の原理は単純であり、高低差を測定したい二つの地点のそれぞれに水準測量用標尺を垂直に立て、その中間にレベルを設置し、同一の水平線上に位置するそれぞれの水準測量用標尺の目盛を読定することで高低差を求めている。水準測量用標尺をひとつずつ交互に目的の方向へ向かって移動させながら同様の読定作業を積み重ねれば、任意の距離だけ離れた二つの地点間の高低差を高精度に測定できる。

水準測量の原理は単純明解ではあるが、二つの地点間の距離が離れるほどに観測回数が増えるため、観測環境において極めて僅かな誤差要因が潜んでい

たとしても、誤差が累積することで最終的な測量成果に対し大きな影響をもたらすという警戒すべき特徴がある。

近年における宇宙測位技術と同様に、水準測量技術の改善の歴史とは、未発見の誤差要因の推理と特定、対策実施の歴史である。水準測量技術においてはこのプロセスが国内外を問わず百年以上の長期にわたって継続されていることから、現在においても高低差の測定手段として世界的に使用されている。

2. 季節的な要因をもつ水準測量誤差の疑い

測地部においては静岡県御前崎地区において年間複数回の精密基盤傾動測量、つまり一等水準測量よりもさらに厳しい精度基準を設定した高精度な水準測量を実施している。この測量成果においてはかねてより季節的な地殻の上下変動が長期的に観測されており(図-1)、それが実際の地殻変動である可能性はあるが、未発見の測量誤差である疑いも捨てきれず、測量成果をもとに学術的研究を進める場合において課題を抱えている。仮に季節的な地殻の上下変動が実在するとなれば測地学等幅広い学術分野を対象とした重要な新発見となり得るが、これまでに認められた季節的な変動の振幅は測量方法の改善や新しい測量機器の導入と同期して縮小していく傾向もあり、なんらかの未発見の測量誤差に起因する可能

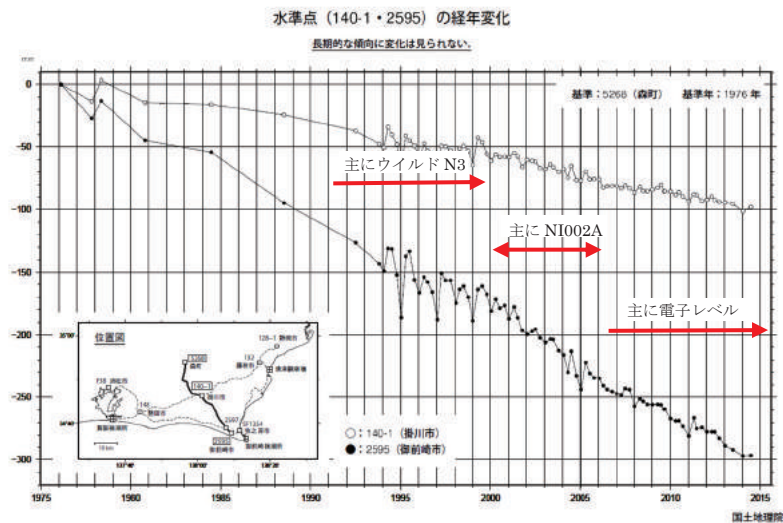


図-1 御前崎地区の水準測量結果に見られる周期的な上下変動の様子
(第 204 回地震予知連絡会国土地理院資料に一部注記追加)

性も疑われた。

水準測量技術における誤差要因の発見と改善の歴史は、近年普及した宇宙測位技術などと比較すると非常に長く、未発見の測量誤差要因を新しく発見して証明するにあたっては困難が予想されたが、観測成果に対する信頼性を客観的に示す必要に迫られたことや、測量学上における貢献も見込まれたことから、測量作業を実施して観測データを研究者等へ提供する立場にある測地部としては、未発見の測量誤差の存在も含めて原因を調査することにした。

平成 21 年度以降、測地部機動観測課において、季節的な特徴を持つ誤差要因のうちの一つの候補として、水準測量作業中に発生する水準測量用標尺への直射日光の片照りという問題に着目し、太陽の高度角、水平角の季節的な変化に伴って、どの程度の測量誤差が発生するのかについて御前崎地区において試験観測を実施し定量化を試みた。結果、季節的な測量誤差が発生する事実を確認したが、線膨張係数が極めて小さいスーパーインバール合金で作られた水準測量用標尺においては、片照りが発生した場合においても測量誤差への影響が小さく限定されることが明らかになり、御前崎地区における水準測量成果に見られる季節的な変動量を説明するためには量的な面で難しいことがわかった。この結果を受けて、さらに別の測量誤差要因の究明を目的とした調査研究を進めることになり、平成 23 年度までの主に測量作業方法や水準測量用標尺を対象とした究明に続いて、平成 24 年度以降は電子レベルの器械特性と水準測量用三脚を調査対象に加えた。

3. 未発見の水準測量誤差の探索

3.1 温度特性

電子レベルは高精度な光学機器と精密な機械構造を内蔵した高精度な電子機器であり、ブラックボックスとしての性質が非常に強く、器械内部の構造については、ごく概念的な内容までしか知ることができない。従って、電子レベルにおける器械特性の調査は、非常に手掛かりが少ない中で始めることになった。電子レベルにおける器械特性の調査の手掛かりとなったのは、平成 22 年度以前に発見された、電子レベルのパワーオンドリフトという現象であった。これは、ソキア(現トプコン)社製電子レベル SDLIX において、電源投入以降数時間の間、わずかながら視準線の傾斜が進行し続ける現象である。SDLIX においては使用中、電子回路と電子部品に電流が流れることでジュール熱が発生するので、その熱によって器械内部の部品がごくかすかに変形することで視準線が変動するメカニズムが推測されている。もし本当にジュール熱によって器械内部に熱的な不均衡が現れ、光学系部品や電子部品及びそれらの固定部

品等に力学的なひずみが現れて部品形状の変形や固定位置の変化が生じ、結果としてわずかながらも視準線の変動という現象に至るメカニズムが存在するのであれば、ジュール熱以外の熱源においても、同様の視準線の変動が起こり得ることになる。このことから、水準測量作業中における日中の気温変化によって、電子レベルにおける視準線の変動が発生している可能性が考えられた。これは電子レベルが抱える器械特性のうち温度特性と呼べるものである。

3.2 コンペンセータのヒステリシス特性

精密基盤傾動測量で使用される電子レベルにはコンペンセータという光学部品が搭載されている。コンペンセータには反射プリズムと一体となった振り子が内蔵され、この振り子の静止位置が重力にしたがって変化し、振り子が静止したときには必ず視準線と水平線が一致する仕組みになっている。コンペンセータはその機械的な構造から、ヒステリシス特性という、測量誤差につながるおそれのある性質を持っていることが知られている。振り子の支点部分は機械的な軸と軸受けで構成されているため、振り子に対しては重力だけでなく、振り子の運動方向とは逆方向に摩擦力が働く。またコンペンセータには振り子が静止しやすくなるように振り子の運動エネルギーを吸収する制動機が組み込まれているが、この制動機によっても振り子には運動方向と逆方向の力が働く。このようにコンペンセータの振り子においては、重力の働きに対して逆方向に作用する幾つかの力が働くメカニズムを持っているため、結果としてヒステリシス特性が生じる。コンペンセータの制動機の性能に左右される要素はあるが、視準線が水平線に近づくほどに重力の働きと比較して他の力の作用の比率が次第に大きくなると想像されるので、ヒステリシス特性もより顕著に現れるおそれがある。

ヒステリシス特性によって、視準線は水平線と一致しにくくなる。コンペンセータに対して十分に静的な環境と時間が与えられるならば、視準線と水平線は確実に一致するので、測量誤差は発生しない。しかし、水準測量の現場においては振動条件、時間制限ともに大変厳しい環境に置かれるので、視準線と水平線が完全に一致することは少ない。

コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差は、水準測量作業において、観測前に整準ねじを用いてレベルの円形気泡管を調整するときが発生する測量誤差と考えられてきた。各測点において三脚とレベルを設置する際、レベルの水平を得るために整準ねじを操作するが、このときレベルが傾斜変化するのでコンペンセータのヒステリシス特性が現れて、視準線と水平線が一時的にかい離する。この現象は整準ねじを操作する場合に避けることがで

きず、わずかながら測量誤差を生じさせる。これをゼロにすることは現実的に難しいため、かわりに各測点における整準ねじの操作手順を水準測量作業規程第21条運用基準3(12)に明記し、測点ごとに測量誤差の発生方向は逆に、大きさはおおむね同一になるように整準ねじを操作して、偶数回の測点においては測量誤差同士が打ち消し合って、理論的には測量誤差がほぼゼロとみなせるように工夫することで対応してきた。

ところが、コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差は、整準ねじの操作に伴って発生するものだけでは済まない可能性がある。なぜなら整準ねじの操作以外の要因でもレベルが傾斜する場合が考えられるからである。

3.3 水準測量用三脚の天板の時間的な傾斜変化

水準測量用三脚は線膨張係数が $2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 程度とごく小さい良質の木材で作られている。水準測量用三脚における脚の長さは 1.5m 前後であり、温度変化によって脚材に伸縮が発生した場合でも 1°C 当たり $3\mu\text{m}$ 程度の大きさであっては、水準測量における高低差の測定分解能である $0.1\sim 1.0\text{mm}$ という大きさと比較して十分に小さく、測量誤差要因にはなり得ないとの考え方があった。ここでは、水準測量用三脚における天板の傾斜変化に対する懸念は見落とされていたようだ。

水準測量用三脚の天板とは、三脚の頂上部においてレベルを固定するために作られた平面状の台のことである。天板の大きさ及び形状はまちまちであるが、大体、一辺が $10\sim 15\text{cm}$ 程度の丸みを帯びた三角形か、もしくはその程度の直径を持つ円形をして

いる。水準測量作業中に直射日光が水準測量用三脚に照射した場合、日なた側の脚材は暖められ、日陰側の脚材は冷却されるが、このとき仮に日なた側の脚材の温度が 1°C 上昇し、日陰側の脚材の温度が 1°C 低下した場合、天板において日なた側の端が $3\mu\text{m}$ 程度浮き上がり、日陰側の端が $3\mu\text{m}$ 程度沈み込む計算になる。これは角度にして $10''$ 前後の傾斜変化となる。脚材は温度変化によって伸縮するだけでなく、1本の脚材においても日なた側と日陰側の温度差が生じることで反り返るように変形する作用も働くだらうから、天板の傾斜変化量はさらに大きくなるおそれがある。

このような直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化と、コンペンセータのヒステリシス特性の二つが組み合わさることで、水準測量において測量誤差が発生している可能性がある(図-2)。この測量誤差は水準測量用三脚に対する直射日光の照射条件によって変化し、太陽に向かって沈み込む方向に発生する測量誤差となる。太陽の方角と高度は季節的な変化を伴うが水準路線の方向成分は季節によって変化しない。このことから、季節に依存した系統的な測量誤差が発生している疑いがある。

4. 水準測量誤差の検証

4.1 温度特性

電子レベルの視準線は、電子レベルの温度変化に伴って変動する可能性が考えられた。視準線は水平線と一致しない場合は測量誤差の原因になるため、通常は不等距離法(くい打ち法)を用いて視準線と水平線が等しくなるように調整してから実際の水準

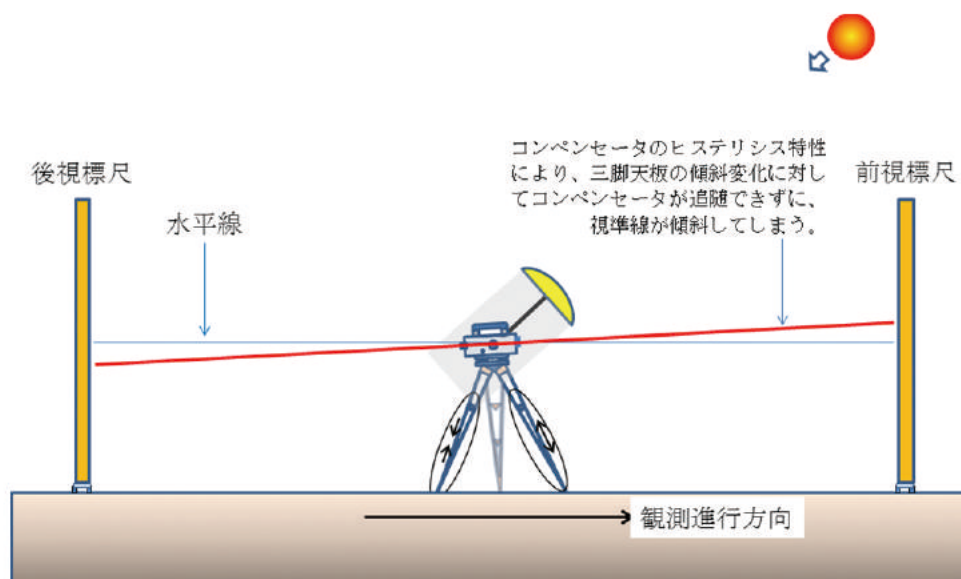


図-2 直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化とコンペンセータのヒステリシス特性が複合して発生する測量誤差のメカニズム

測定の観測を行うことで、測量誤差の発生を防いでいる。ところが、もし水準測量作業中に日中の気温変化の影響を受けて視準線が変動してしまう場合、調整がなされていた場合においても視準線誤差が発生することになる。水準測量の観測時においては、基本的にレベルと後視標尺との間の距離と、レベルと前視標尺との間の距離の差が 1m 以内の範囲で一致することを確認してから観測を行うように定められているので、視準線の変動が直ちに制御不能な測量誤差となる可能性は低いが、水準測量作業規程第 20 条運用基準 4 においては視準線誤差の発生を抑える目的で視準線と水平線との較差の許容範囲を定めており、角度に換算すると $2.06''$ (30m あたり 0.3mm) を許容範囲としている。

4.1.1 温度特性の試験観測

電子レベルを対象とした温度特性の試験観測については前例が存在しないため、観測方法の策定から始めることになった。また、既存の施設を活用することで試験観測にかかるコストを最小限に抑える方針で臨んだ。

観測目的としては、

- 1) 電子レベルの視準線が、外気温の変動等による器械温度の変化に伴って変動するような現象が、実際に発生するかどうかを確認すること。
- 2) 1)が確認された場合、水準測量の誤差要因となっているかどうか調査すること。
- 3) 季節変化に伴う温度帯の違いによって、1), 2)が影響を受けるかどうか調査すること。

以上、三つの目的を立てることとした。

試験観測の対象とした電子レベルは、精密基盤傾動測量において使用されている電子レベルのうち、ニュースーパーインバール水準標尺が使用可能なツァイス社製「DiNi12」「DiNi0.3」及びソキア（現トプコン）社製「SDL1X」の三つの機種とした。また水準測量用標尺はツァイス社製「LD13」とソキア（現



写真-1 温度特性試験地（天文棟付近）

トプコン）社製「BIS30A」を用いた。どちらの水準測量用標尺も線膨張係数が $1.0\text{ppm}/^\circ\text{C}$ を大きく下回るインバールテープ部を持つ、温度変化の影響を受けにくい性能を持っている。

電子レベルの温度変化に伴う視準線の変動を、電子レベルにおける水準標尺の読定値という形で測定・記録する方法を選んだ場合、温度特性以外の要因で水準標尺の読定値が変動する要素を排除できるかどうかが重要になる。そのため、電子レベル及び水準標尺の設置面における局所的な上下変動や、視準線に加わるレフレクション誤差の影響等を排除もしくは分離できることが必要になる。このような条件を満たすだけの観測方法が適用可能な場所を国土地理院の構内において探したところ、天文棟の玄関付近において良好な観測地を見つけることができた（写真-1）。

天文棟の玄関は頑丈なコンクリートでできた階段の上であり、玄関の床面は地面から 1.5m 程度の高さに位置している。玄関の床面には複数台の電子レベルを設置できるだけの十分なスペースがある。そして玄関から 25m 及び 35m ほど離れた地点それぞれにコンクリート製の基礎があり、どちらも複数の水準標尺を同時に設置できる。また電子レベルを設置する玄関周辺と、水準標尺を設置するコンクリート製基礎との間には、レフレクション誤差の原因となるような、長く続くなだらかな傾斜地形が存在しない（図-3）。

このような観測地の条件に加えて、

- 1) それぞれの季節において、ほぼ同様の天候条件下における複数日の試験観測を行う。
- 2) 観測日単位で、電子レベル及び水準標尺の設置位置についてローテーションを行う。
- 3) 各機種の電子レベルにおいて、基本的には同一機種における複数台の同時観測を行う。
- 4) 水準標尺はそれぞれの機種に対応したものを 1 本ずつ設置する。
- 5) 同一機種においては、複数台の電子レベルで同じ水準標尺を観測する。

これらの観測上の工夫を追加することで、電子レベルの温度特性を対象とした試験観測を行うために

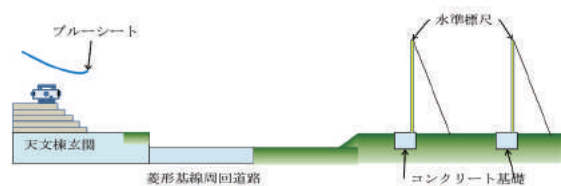


図-3 観測地断面図



写真-2 電子レベルの設置状況



写真-3 水準測量用標尺の設置状況

必要十分な条件を満たすことにした。

試験観測時における電子レベル(写真-2)及び水準測量用標尺(写真-3)の設置状況を示す。天文棟の玄関の床面に金属製の強固な基台を設置し、その基台に電子レベルを取り付けた。温度センサを用いて電子レベル本体の温度変化と周辺の気温の簡易なモニタリングを行った。水準測量用標尺のインバールテープ部には、望遠鏡の視野に含まれない位置において温度センサを取付けて、インバールテープ温度のモニタリングを行った。データ取得後に、インバールテープ温度の変化に伴う観測値への影響を算出したところ、水準測量用標尺の種類を問わず、全期間を通して最大でも $14\mu\text{m}$ 程度の上下変動量にとどまることが確認された。後ほど示すが、電子レベ

ルの温度特性に起因すると見られる標尺読定値の変動量はミリ単位に及んだため、インバールテープ温度の変化が測定値にもたらした影響は観測結果を評価する上で問題にならないほど小さいことがわかった。

試験観測の開始・終了時刻は、実際的水準測量の作業時間帯にあわせて朝の7時頃から日没時刻頃までとした。電子レベル本体の電源投入操作は機種を問わず、すべて観測開始10分前に行った。SDL1Xはオートフォーカス機能を持っており、実際的水準測量作業においてはこの機能を用いて観測を行うことがメーカーから推奨されている。そのため、この試験観測においてもオートフォーカス機能をオンにした。DiNi12及びDiNi0.3においては、手動による

表-1 温度特性試験観測日および観測条件の一覧表

観測日	観測開始 ・終了時刻	器械～標尺 間距離	備考	図番号
2012/5/21	7:00~18:00	25m	DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測, 一部欠測あり	図-4
2012/5/23	7:00~18:00	25m	DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測, 一部欠測あり	
2012/5/24	7:00~18:00	25m	DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測	図-5
2012/7/27	7:00~18:00	25m	DiNi0.3を1台, DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測, 一部欠測あり	図-6
2012/7/30	7:00~18:00	35m	DiNi0.3を1台, DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測, SDL1X_100001に一時的に直射日光照射	図-7
2012/7/31	7:00~18:00	35m	DiNi0.3を1台, DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測, VLBI32mアンテナ高頻度稼働による観測地の振動大	
2012/8/1	7:00~18:00	35m	DiNi0.3を1台, DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測	
2012/8/3	7:00~18:00	25m	DiNi0.3を1台, DiNi12を3台, SDL1Xを3台で観測	図-8
2012/12/17	7:00~16:30	35m	DiNi12を3台, SDL1Xを2台で観測	図-9
2012/12/18	7:00~16:30	35m	DiNi12を3台, SDL1Xを1台で観測	図-10
2013/1/31	7:00~16:30	35m	DiNi12を1台, SDL1Xを3台で観測	図-11
2013/2/1	7:00~16:30	35m	DiNi12を1台, SDL1Xを3台で観測	図-12
2013/2/12	7:00~16:30	35m	DiNi12を2台, SDL1Xを2台で観測	

ピント合わせを行うので、観測開始前に十分に水準測量用標尺のインバルテープ部に対してピント合わせを済ませてから、その状態のまま試験観測を継続した。観測中は電子レベルと基台設置床面全体を対象に、直射日光を防ぐ目的でブルーシートによる覆いを設けた。そして基本的には30秒に1回の間隔で、電子レベルによる水準測量用標尺の連続観測を行った。

連続観測の操作は、電子レベルとパソコンをシリアルケーブルで直結し、パソコンから測定コマンドを電子レベルに送り、電子レベルから返される測定データをパソコン内部にログングする方法で行った。1台のパソコンで同時に合計7台の電子レベルをコントロールできたので、それぞれの観測データは時刻同期が得られている。

試験観測の実施時期としては、当初は春、夏、秋、冬の4期を予定していたが、他の測量作業による器械の運用スケジュールとの不整合や器械本体の故障による修理等により、試験観測に必要な電子レベルが確保できない期間が発生したため、結果として春期(5月末)、夏期(7月末~8月上旬)、冬期(12月末)、厳冬期(1月末~2月中旬)において試験観測を実施した。それぞれの観測日及び観測条件(表-1)と、電子レ

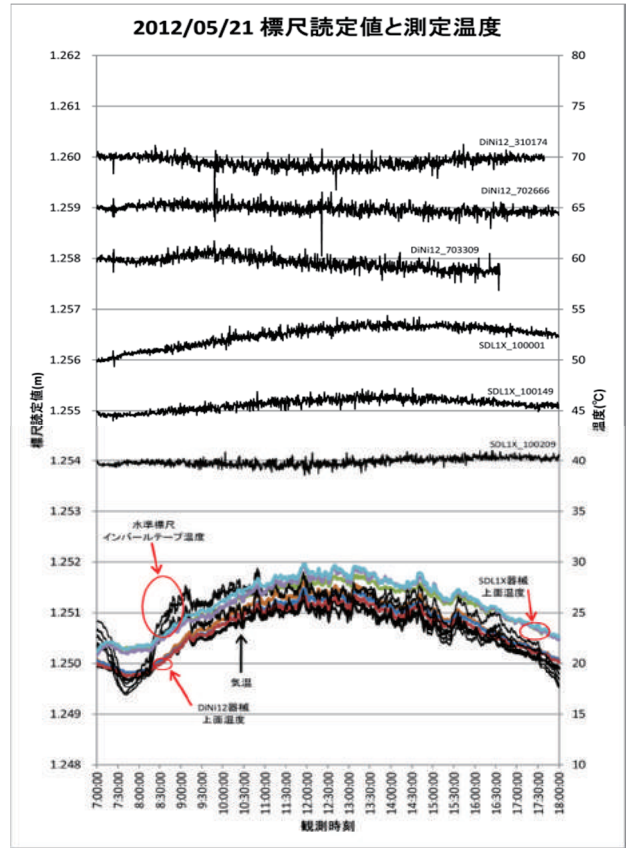


図-4 2012/05/21 の観測データ

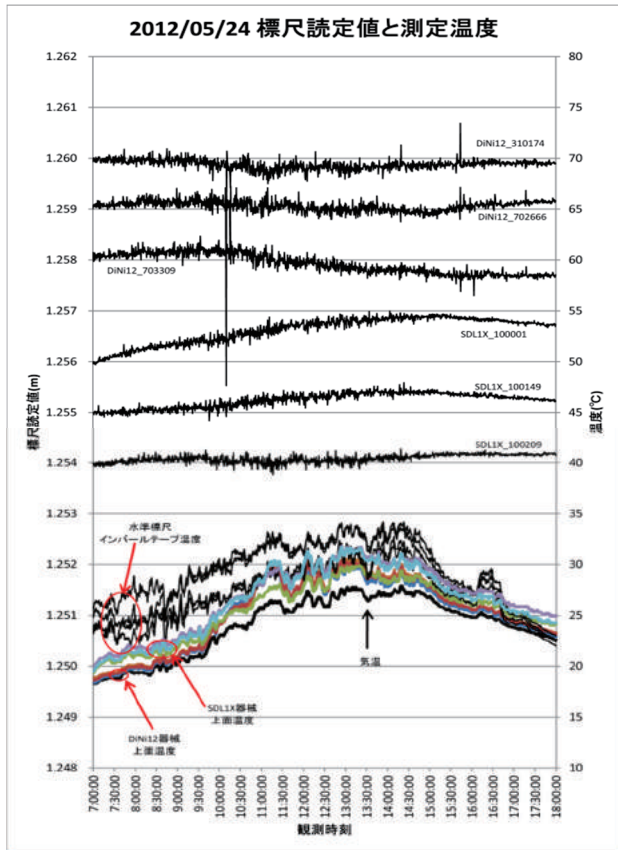


図-5 2012/05/24 の観測データ

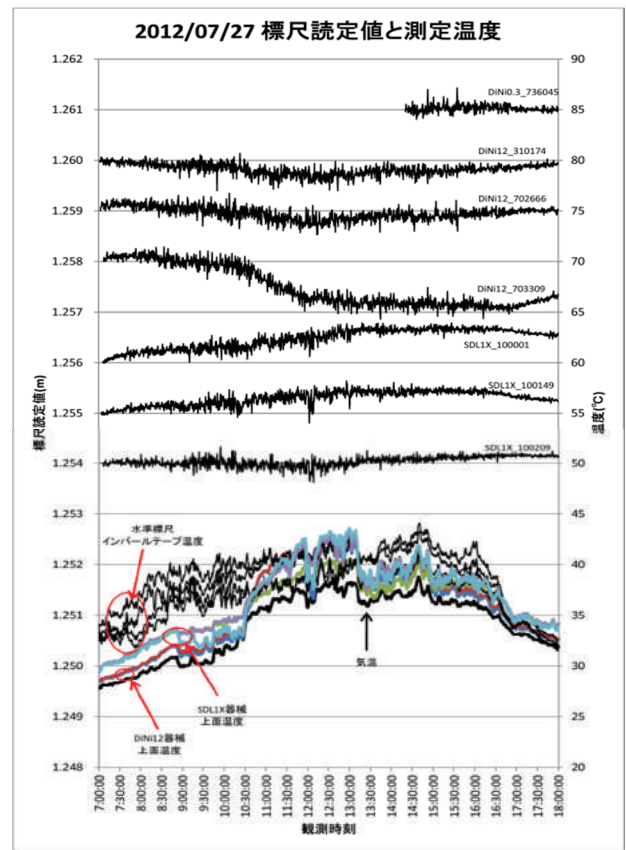


図-6 2012/07/27 の観測データ

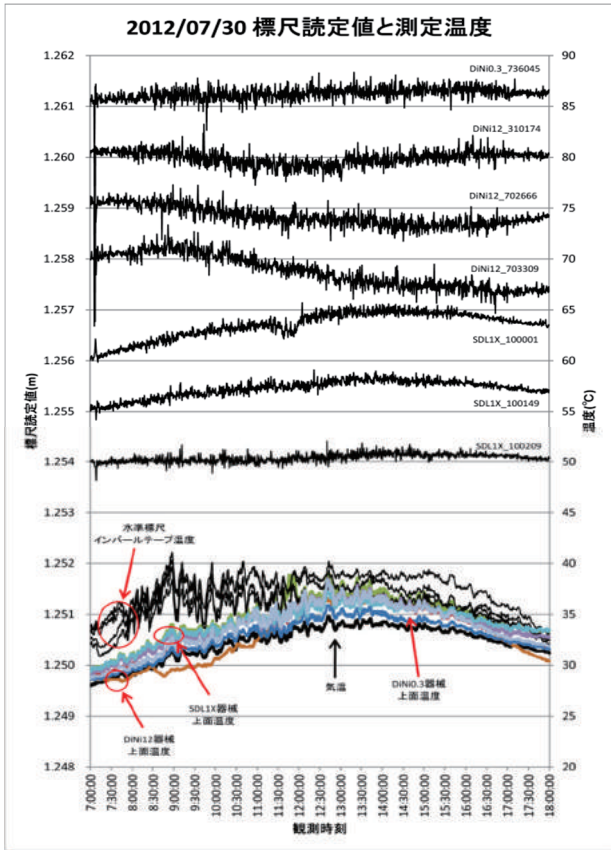


図-7 2012/07/30 の観測データ

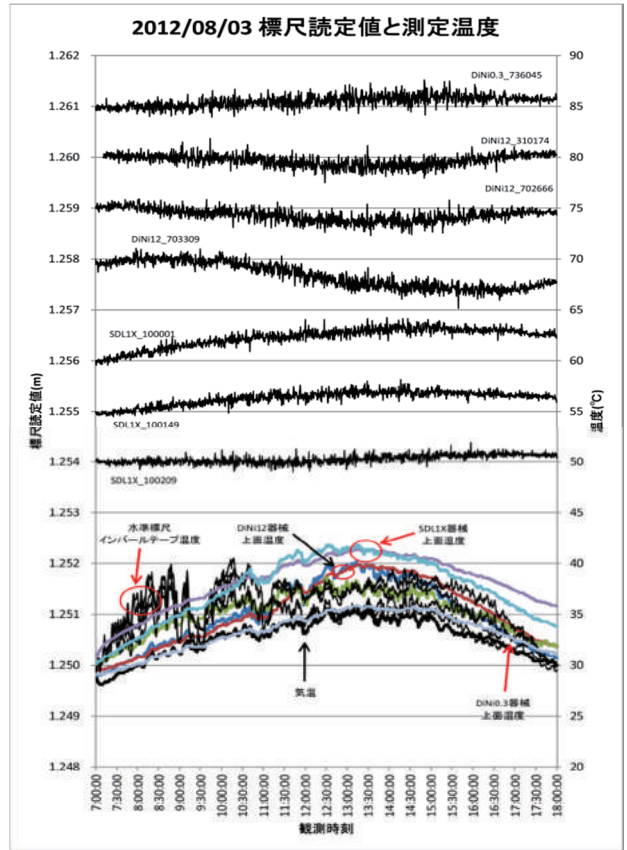


図-8 2012/08/03 の観測データ

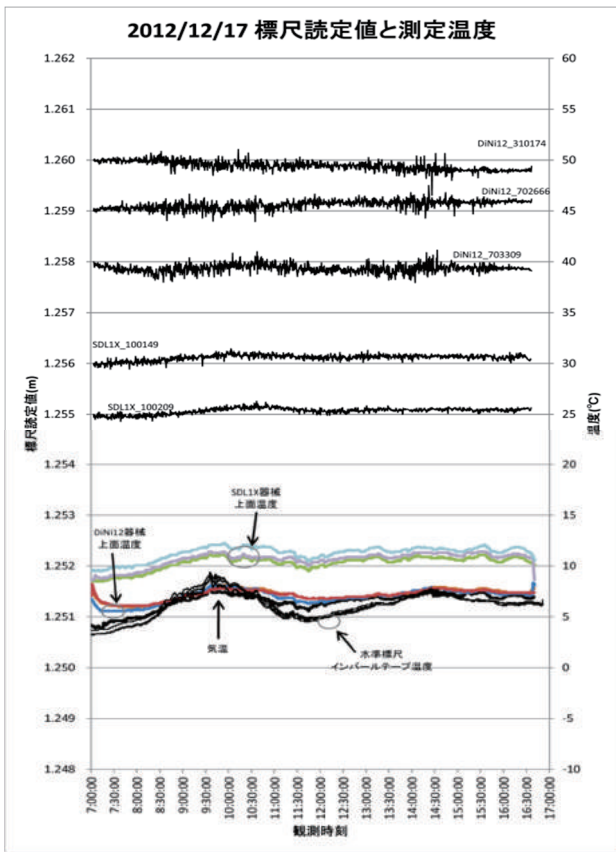


図-9 2012/12/17 の観測データ

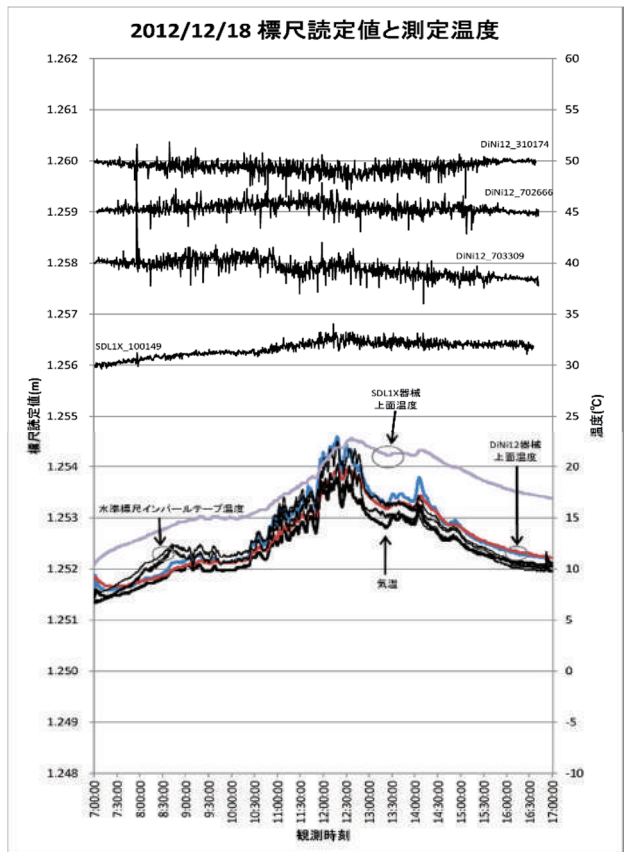


図-10 2012/12/18 の観測データ

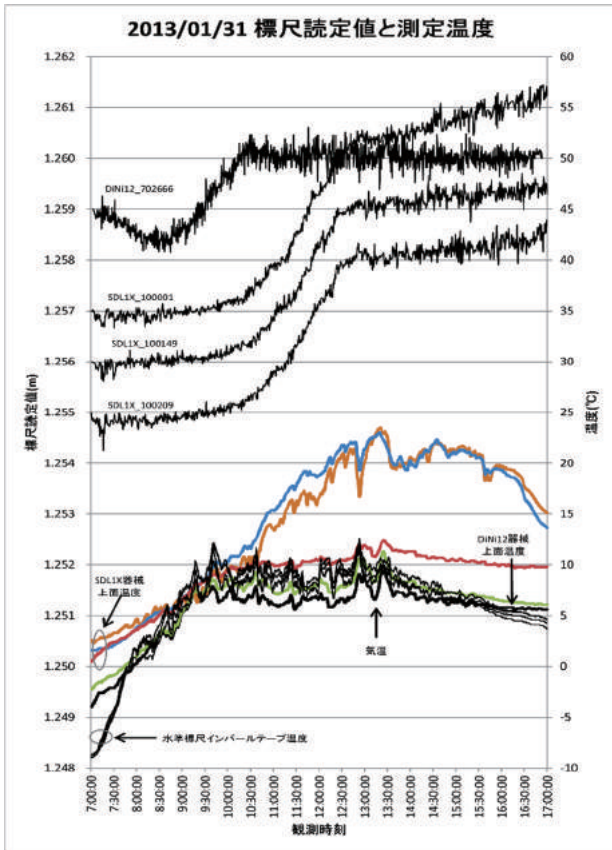


図-11 2013/01/31 の観測データ

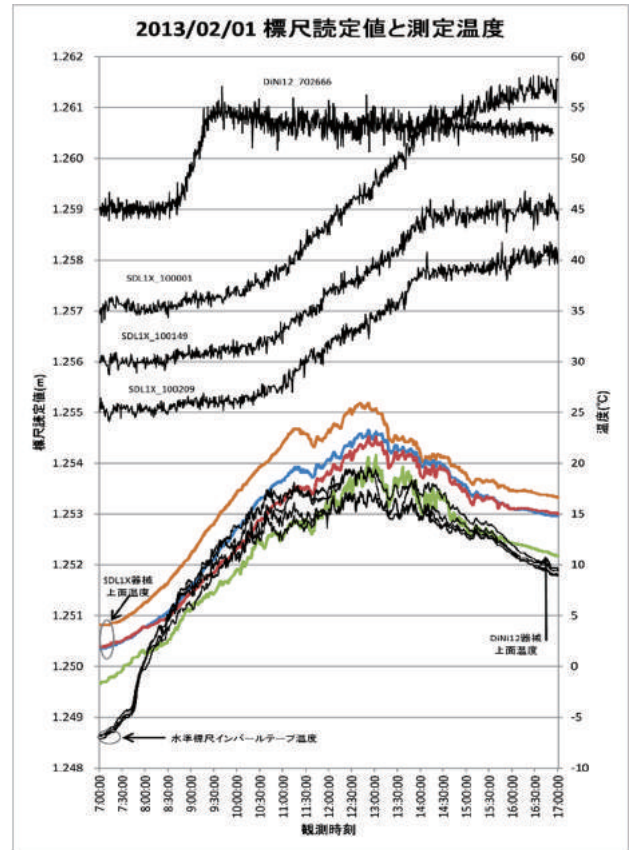


図-12 2013/02/01 の観測データ

ベルによる水準測量用標尺の連続観測結果のうち各期における代表的な観測日のグラフについて示す(図-4)～(図-12)。

試験観測中、想定より早いバッテリーの消耗や、パソコンと電子レベル間のシリアル通信において発生したハングアップ等により、一部、観測データの欠測が発生した。また観測中は雲の動き等により日照環境が頻繁に変化することがあり、気温や標尺温度において極端な変動が記録されることがあった。

日中の温度変化が大きくなることを狙って、基本的に晴れの日が多くなるように天候を選んで試験観測を行ったつもりではあるが、観測開始後に天候が変化することがあったため、気象条件は一定していない。また地震等による振動が加わった時間帯においては標尺読定値において極端なパルス状のノイズが発生している。試験観測においては、ほとんど同じ高さに設置した複数台の電子レベルにおいて同一の水準測量用標尺を視準して観測したことにより、どの電子レベルからも、大体同じ数値の標尺読定値が出力された。これらの標尺読定値を一つのグラフに表示する目的で電子レベル毎に一定の大きさのオフセットを与えている。この数値操作によって標尺読定値に現れた視準線の変動の様子は変化しない。

4.1.2 試験観測結果の評価

得られた観測結果をもとに考察を進めるにあたり、まずは、ここで示された標尺読定値の変動の中に電子レベル設置地点もしくは水準測量用標尺設置地点における局所的な上下変動が含まれているのかどうかについて検討する。

はじめに、日単位で設置位置を入れ替えながら同じ季節における複数日間の観測を行って得られた標尺読定値において、同一の電子レベルにおける標尺読定値を日単位で比較したところ、どの観測日の標尺読定値においても温度変化に伴う同様の標尺読定値の変動がみられたこと、そして、標尺読定値の変動パターンが電子レベルの個体によって大きく異なることが確認された。これにより、電子レベル設置地点における局所的な上下変動は存在しないか、もしくは存在したとしても、温度変化に伴う標尺読定値の変動量と比べて十分に小さいと判断した。

次に、一本の水準測量用標尺観測を同一機種の複数台の電子レベルによって同時観測する方法をとったので、仮に水準測量用標尺設置地点において局所的な上下変動が存在した場合は、その変動量がすべての電子レベルの観測データにおいて全く同時かつ同じ大きさで観測されるはずである。加えて観測日ごとに、二つのメーカーの電子レベルそれぞれに対

応する水準測量用標尺の設置地点を入れ替えたので、もし水準測量用標尺設置地点において局所的な上下変動が存在した場合には、観測日ごとにメーカー単位で交互に一律の上下変動が観測されるはずである。幸いにしてそのような傾向を持つ標尺読定値は確認されなかったことから、水準測量用標尺設置地点における局所的な上下変動についても存在しないか、もしくは存在したとしても、温度変化に伴う標尺読定値の変動量と比べて十分に小さいと判断した。

レフラクション誤差の混入に対する懸念についても、観測地における地形から考えてレフラクション誤差が発生する可能性は小さいと判断した。また、同時観測を行った複数台の電子レベルにおいて、空中における視準線の経路がほとんど同一であることから、仮にレフラクション誤差が発生した場合でも、同一観測日において異なる電子レベルによって測定された標尺読定値同士を相対的に評価する場合は、レフラクション誤差の影響を無視できると判断した。

以上により、(図-4)～(図-12)によって示す標尺読定値の変動は、電子レベルにおける温度特性に起因する視準線の変動が観測されたものと判断する。

視準線の変動は、電子レベルの内部において視準線が傾斜もしくは上下変動することで発生していると考えられる。2012年7月27日(図-6)及び2012年7月30日(図-7)に得られた観測結果を比較すると、前者の方が気温の変動幅は大きい、標尺読定値の変動幅は後者の方が全体を通して大きくなっている様子がみえる。前者においては器械～標尺間距離が25mであるのに対して、後者においては35mと長くなっている。視準線の傾斜によって標尺読定値に変動が現れるとすれば、距離が長くなるほど変動量は増幅されるはずである。電子レベルの内部において発生している現象は、基本的には視準線の傾斜であろう。ただ、上下変動が全く存在しないことが確認できているわけでもない。このことは、今後さらに誤差発生メカニズムを高精度に究明していく場合に備えて、念のため覚えておく必要があるかもしれない。

視準線の変動量は、日中における温度変化の幅が広がるほどに大きくなる様子がとらえられている。電子レベルの個体によっては温度特性の安定している様子が観測されているものがあつたが、機種単位で確認できるまでには至っていない。また同一機種であっても個体差が大きいことには注意を要する。そして、観測された視準線の変動を角度に換算したときに、水準測量作業規程第20条運用基準4の定める許容範囲である $2.06''$ (30mあたり0.3mm)という範囲に収まるような電子レベルは少ないことがわかった。個体によっては、視準線の傾斜角度は $5''$ を超える様子である。特に厳冬期においては $10''$ を

大きく超える視準線の傾斜変化が観測された。水準測量作業規程で定められた制限値に基づいて、今まで理論的に推測してきた視準線誤差よりも大きな誤差が、実際的水準測量においては発生していた可能性がある。また、温度変化に伴って視準線が変動するという事は、水準測量作業において不等距離法(くい打ち法)を用いた電子レベルの点検調整を実施して、視準線と水平線が一致するように調整した場合においても、気温の変化に合わせて電子レベル本体の温度が変化すれば、たやすく視準線が傾斜してしまうことを意味している。結局、点検調整作業を実施するときの気温次第で、点検調整の結果が制限値に収まる場合もあれば制限値を超える場合もあるということである。このような状況は、これまでの水準測量における精度管理においては想定していなかったことである。

電子レベルの温度変化に伴う視準線の変動は、現時点においてはDiNi12、SDLIXの二つの機種において、個体に依存したかたちで確認されている。DiNi0.3においては温度変化に影響されない、非常に安定した視準線が得られていることがうかがえるが、そのかわり夏期の観測データのみであること、また試験観測に使用できた器械は1台のみであることから、DiNi0.3という機種全般における全季節を通した特徴とまでは判断できない。

水準測量における視準線誤差は、分類としては偶然誤差に入ると考えられており、また測量作業における観測時には、レベルと後視標尺との間の距離及びレベルと前視標尺との間の距離それぞれの差が1m以内の範囲で一致させることが義務づけられていることから、電子レベルにおける温度特性に起因する視準線の変動が発生していた場合においても、ただちに水準測量作業における決定的な精度劣化へとつながる懸念は幸いにして小さいが、水準測量における偶然誤差の発生要因になっている可能性は大きい。

電子レベルは複雑かつ高精度な光学部品、器械部品、電子部品から構成されている。特殊な金属を除いてほとんどの素材は温度の変化により膨張と収縮を発生させるため、電子レベルに限らず精密観測機器がある程度の温度特性を持つこと自体は避けがたいと思われる。将来的には電子レベルの性能向上に伴い、この誤差要因に対する懸念が解消されていく期待はあるが、それまでの間は運用面における工夫といった形で、必要に応じて対応することになりそうである。

特別に高精度を要求される水準測量を実施する場合、使用する電子レベルの個体を持つ温度特性を事前に把握しておく意味は大きい。水準測量の作業期間中において視準線の点検調整を行う際、その季節

における日中の視準線の変動パターンにおいて、最も視準線が安定かつ平均的な位置にある時間帯を狙って点検調整を実施することで、水準測量作業において発生する視準線誤差の発生を抑えやすくなるとともに、点検調整作業の効率化も図れるだろう。

電子レベルの個体によっては、温度変化に伴う視準線の変動が特に小さい様子がうかがえた。水準測量を行う際、観測精度に対する要求が特に高い場合は、このような個体を選んで使用することも工夫として考えられる。

4.2 コンペンセータのヒステリシス特性

コンペンセータのヒステリシス特性が水準測量における誤差要因となる可能性については、アナログ式のオートレベルの登場にあわせて指摘され、この誤差要因の発生メカニズムに対する理論的な推測に基づいて、誤差を最小限に抑えるための水準測量における整準ねじの操作方法が定められた。ただし、さらに踏み込んでこの器械特性の直接的な計測を行うことまでは技術的に実現が難しかった様子である。

コンペンセータのヒステリシス特性に限ったことではないが、一般的にレベルの器械特性を検出、定量化する試みには数多くの観測データの取得が必要となる。レベルから測定される標尺読定値には、十分に外的な騒乱要因が取り除かれた環境下においても、ある程度の大きさのばらつきが含まれる。このばらつきがノイズとなるので、器械特性もしくは特定対象とする誤差要因によって発生する変化量が小さい場合、シグナル・ノイズ比が悪化しやすいのでノイズから信号を分離することが次第に難しくなる。コンペンセータのヒステリシス特性のように、ばらつきよりもはるかに小さい微弱な信号を検出するためには、観測データの数を大きく増やす必要にせまられる。幸い、電子レベルを対象とした試験観測においては観測作業を自動化しやすいため観測データを増やすことが容易であり、微弱な信号を検出する目的において有利である。観測作業の自動化は、手動操作と比較してノイズの混入を低減できる効果も期待できる。

コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差は、水準測量の観測時において器械設置作業中の整準ねじの操作に伴い発生することが想定されてきたが、直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化によっても発生することが懸念される。この測量誤差の存在を直接的に証明するための試験観測方法としては、直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化と同等の傾斜変化を電子レベルに対して人為的に加えながら観測データを取得する方法が考えられる。

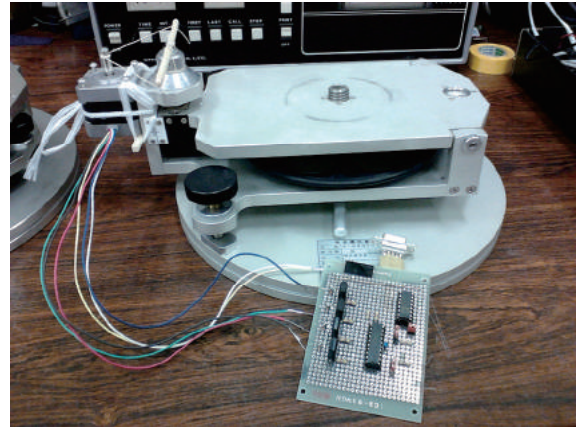


写真-4 電子レベル自動傾動装置

コンペンセータには反射プリズムと一体となった一軸の振り子が組み込まれている。この振り子は電子レベルに仰角方向、もしくは伏角方向どちらかの傾斜変化が加わったときに、その傾斜変化とは反対の方向に動くことで、視準線と水平線を一致させるように機能する。

コンペンセータのヒステリシス特性は、基本的には振り子が動くときに発生する器械特性であるから、試験観測において電子レベルに与える傾斜変化も仰角方向もしくは伏角方向を中心に考えて良いと判断し、まずはそのような目的にあった試験観測環境を構築することにした。

ただし、コンペンセータのヒステリシス特性については定量化へ向けた試みが始まったばかりであるから、仰角方向や伏角方向の傾斜変化に限らず、電子レベルを右側もしくは左側へと傾ける方向に傾斜変化が加わったときに、コンペンセータのヒステリシス特性が影響を受ける可能性について排除されたわけではない。また構造から考えてコンペンセータのヒステリシス特性が外的な振動の周期や強度もしくは器械温度によって変化する可能性についても警戒を要する。今後、試験観測を更に充実させていくことも検討している。

4.2.1 電子レベル自動傾動装置の構築

直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化は、試験的に測定した実測値や三脚の脚部の温度変化の記録から推理して、角度にして1分間あたり数°～数十°程度の大きさが見積もられた。試験観測においては、このような小さな傾斜変化を電子レベルに対して連続的に与える必要がある。

観測中の電子レベル本体に対して機械的に正確な傾斜変化を与える装置として、傾動台という装置がある。傾動台には傾動ねじが備わっており、これを

回転させると電子レベルに仰角方向もしくは伏角方向の微小な傾斜変化を与えることができる。この傾動ねじを一定の速度で一定の時間だけ手動で動かすことは非常に難しかったため、傾動台にステッピングモーターを設置し、ステッピングモーターの回転力を傾動ねじに伝える構造を追加し、ステッピングモーターの回転方向と回転速度をパソコンから自動制御する電気回路を組み込んだ「電子レベル自動傾動装置」(写真-4)を構築した。電子レベルに対する自動観測の操作も同じパソコンから行うことで、どちらの操作もパソコンの時計を基準に同期できる仕組みとした。

4.2.2 試験観測の方法

試験観測地はレーザー測距検定棟とした。室温はおおむね 20 度前後で一定に保たれている。建物の内部には、建物の構造体から独立したコンクリート製の基礎を持つピラーが多数設置されており、この基礎やピラーの上に設置した観測機器においては位置的安定が保たれる。試験観測に用いた電子レベル自動傾動装置及び水準測量用標尺はそれぞれピラー上及び、そのコンクリート基礎上に設置した(図-13)。電子レベルと水準測量用標尺の間の距離はほぼ 40m (実際は 39.6m) とした。40m という距離は、精密基盤傾動測量におけるレベルから水準測量用標尺までの距離の上限である。

試験観測は電子レベルに対して仰角負荷もしくは伏角負荷を与えている状態と、電子レベルを完全に静止させている状態を交互に繰り返しながら連続観測を行う方法で実施した。つまり、

- 1) 60 秒間の「傾斜変化なし」
- 2) 90 秒間の「仰角方向の傾斜変化」
- 3) 60 秒間の「傾斜変化なし」
- 4) 90 秒間の「伏角方向の傾斜変化」

という合計 300 秒間 (5 分間) のセット観測を繰

り返した。また、傾斜変化速度のパターンは、

- 1) 0" /分
- 2) 3" /分
- 3) 6" /分
- 4) 9" /分
- 5) 12" /分

の 5 パターンとし、一つのパターンにおいて約 8 時間、90 セット前後の連続観測を実施した。観測間隔は 15 秒間である。ここで、1) 0" /分は電子レベルを静止させたままの状態を観測したことを意味している。この観測データは傾斜変化を加えたときに得られた観測データとの比較対象を目的として確保したものである。また、どの傾斜変化速度のパターンにおいても仰角方向、伏角方向のそれぞれに同じ大きさの傾斜変化速度を与えている。

試験観測は平成 25 年 6 月 26 日から平成 26 年 1 月 10 日までの、のべ 35 日間ほど行った。外的な振動の条件を可能な範囲でそろえる目的で、すべて構内にある VLBI32m アンテナが停止している時に観測を実施した。

4.2.3 試験観測データの分析と評価

得られた試験観測データに対する分析方法として、次に述べるような計算手順を用いた。

まず、セット開始直後の先頭 60 秒間の「傾斜変化なし」の間に測定された標尺読定値と、セット開始後 150 秒後から 60 秒間の「傾斜変化なし」の間に観測された標尺読定値すべてについての平均値 A を算出する。この二つの「傾斜変化なし」期間に挟まれて 90 秒間の「仰角方向の傾斜変化」期間が存在するので、その 90 秒間に観測された標尺読定値の平均値 B も算出する。こうして算出した二つの平均値について「平均値 B - 平均値 A」として差を求めた値を、「仰角方向の傾斜変化」を受けているときに電子レベルで発生する測量誤差 C と考えることにした。

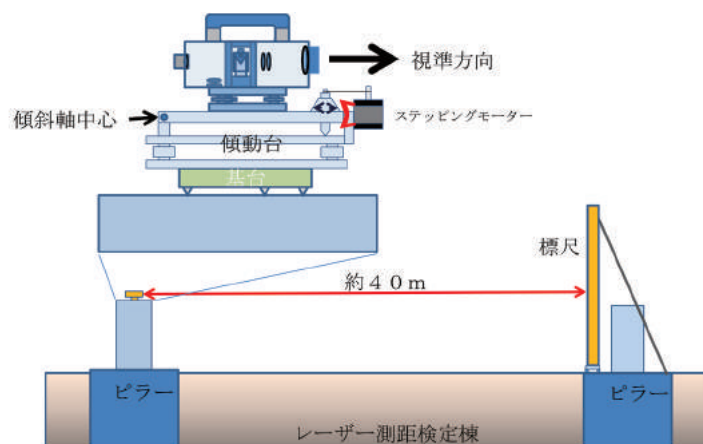


図-13 コンペンセータのヒステリシス特性計測試験観測模式図

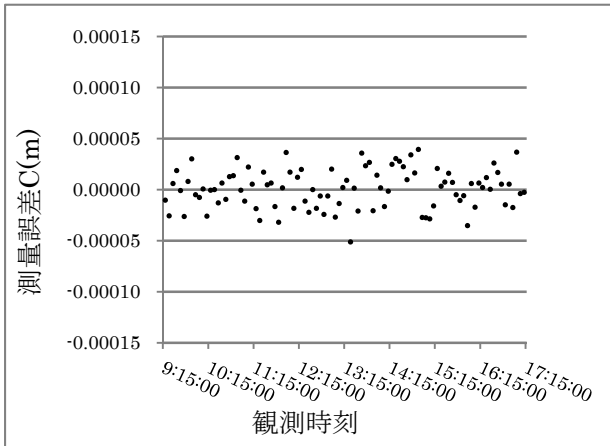


図-14 DiNi12(SN702666)へ9"/分の仰角方向の傾斜変化速度の負荷を与えたときの測量誤差Cの値

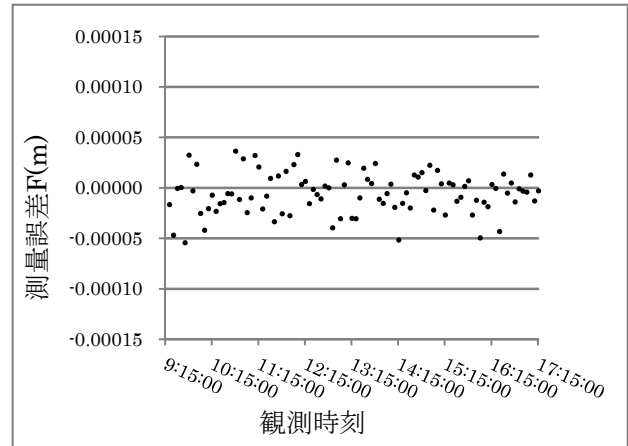


図-15 DiNi12(SN702666)へ9"/分の伏角方向の傾斜変化速度の負荷を与えたときの測量誤差Fの値

次に、セット開始後150秒後から60秒間の「傾斜変化なし」の間に観測された標尺読定値と、次のセットの開始直後の先頭60秒間の「傾斜変化なし」の間に測定された標尺読定値すべてについての平均値Dを算出する。この二つの「傾斜変化なし」期間に挟まれて90秒間の「伏角方向の傾斜変化」期間が存在するので、その90秒間に観測された標尺読定値の平均値Eも算出する。こうして算出した二つの平均値について「平均値E-平均値D」として差を求めた値を、「伏角方向の傾斜変化」を受けているときに電子レベルで発生する測量誤差Fと考えることにした。

なお、「傾斜変化なし」と「仰角方向の傾斜変化」もしくは「伏角方向の傾斜変化」の切り替わりのタイミングである、セット開始後0秒、60秒、150秒、210秒の各々の時点で得られた標尺読定値についてはすべて、計算対象から除外した。

もしコンペンセータのヒステリシス特性によって測量誤差が発生するならば、測量誤差Cはつねにプラスの値になると予想され、測量誤差Fはつねにマイナスの値になると予想される。だが、実際には元々の観測データのばらつきが検出対象となる測量誤差Cや測量誤差Fの値と比較して大きいため、個別のセットの結果だけを見ても測量誤差の存在はノイズの中に隠れてしまい全くわからない。そこで、なるべく多くのセット観測を行って測量誤差C及び測量誤差Fの標本数を増やし、標本の全体傾向から測量誤差の存在に対して判断を行うことにした。実際の試験観測結果に対して上記の計算処理を行った結果得られた測量誤差C及び測量誤差Fのグラフを示す(図-14)(図-15)。

検出された測量誤差は、ばらつきと比較すると非常に微弱である。(図-14)では一見するだけでは測

量誤差Cの値がプラス方向に偏っていることがはっきりしない結果となっているが、(図-15)では測量誤差Fの値がマイナス方向に偏っている様子が比較的認めやすい結果が得られている。このように仰角方向の傾斜変化を与えたとき、伏角方向の傾斜変化を与えた時のそれぞれの測量誤差を比較したとき、その大きさが一致しないケースは他の個体の観測結果においても確認された。コンペンセータのヒステリシス特性自体に仰角方向と伏角方向で異なる個体が存在する可能性が考えられる。

セット単位で測量誤差C及び測量誤差Fとして算出された値の、全セット分の単純平均の値を元にして、

$$\begin{aligned} & \{ \text{測量誤差Cの全セット平均値} \} \\ & - \{ \text{測量誤差Fの全セット平均値} \} \\ & = \text{コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差} \end{aligned}$$

という形で測量誤差を算出することにした。

電子レベルにおける観測については幾つかの消去不能なノイズ要因があるため、試験観測で得られた標尺読定値には、これから存在を証明しようとしているコンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差の大きさと比べて、かなり大きなばらつきが含まれている。このばらつきが、完全にホワイトノイズの性質を持っているならば、上式により算出された測量誤差の値をそのまま信用することが可能と考えられるが、本当にホワイトノイズだけで満たされているかどうか、現実には確認が難しく、系統的に発生するノイズ等が原因で算出された値をあたかも測量誤差であるかのように誤解するおそれがある。そこで、ノイズとの切り分けを行うため、電子レベルを固定したまま傾斜変化を与えずに観測したデータを用いて同様の計算処理を施し得られた集計

表-2 コンペンセータのヒステリシス特性に起因して発生した測量誤差

器械 SN	傾斜変化 速度	① (μm)	② (μm)	③ (μm)	④ (μm)	⑤ (μm)	⑥ (μm)
SDL1X 100001	3" /分	-3.64	36.47	-4.95	37.16	1.31	1.35
	6" /分	-0.17	39.42	-6.27	35.40	6.10	
	9" /分	9.19	37.77	-8.67	41.03	17.86	
	12" /分	-3.19	45.03	-15.64	37.56	12.45	
SDL1X 100149	3" /分	-0.73	16.35	0.14	14.06	-0.87	1.69
	6" /分	0.03	11.43	-2.32	11.45	2.35	
	9" /分	4.30	11.55	-3.90	10.63	8.20	
	12" /分	3.31	9.03	-7.46	8.86	10.77	
SDL1X 100209	3" /分	0.28	13.57	-0.14	14.01	0.42	1.45
	6" /分	1.77	10.47	-3.55	9.51	5.32	
	9" /分	3.86	10.82	-8.69	11.47	12.55	
	12" /分	2.68	12.50	-11.47	11.69	14.15	
DiNi12 310172	3" /分	-2.34	14.60	-0.48	15.10	-1.86	5.30
	6" /分	-1.45	15.95	6.96	106.50	-8.41	
	9" /分	0.83	12.48	-4.44	12.24	5.27	
	12" /分	4.94	11.19	-4.21	12.23	9.15	
DiNi12 702666	3" /分	1.34	12.16	0.31	11.22	1.03	0.91
	6" /分	0.66	9.60	-1.09	10.90	1.75	
	9" /分	0.73	19.05	-5.46	20.07	6.19	
	12" /分	6.56	14.85	-1.34	15.33	7.90	
DiNi12 703309	3" /分	-0.39	11.88	-1.28	11.55	0.89	1.75
	6" /分	2.01	14.80	-0.94	15.98	2.95	
	9" /分	3.08	11.21	-1.26	11.33	4.34	
	12" /分	5.28	12.99	-3.73	11.44	9.01	
DiNi0.3 730676	3" /分	0.12	12.92	3.79	16.65	-3.67	1.40
	6" /分	-3.06	14.22	-1.90	16.88	-1.16	
	9" /分	2.42	11.89	-0.45	11.75	2.87	
	12" /分	4.48	12.55	-1.01	12.77	5.49	
①		測量誤差Cの値の、全セット分の単純平均値.					
②		測量誤差Cの値の、全セット分の標準偏差の値.					
③		測量誤差Fの値の、全セット分の単純平均値.					
④		測量誤差Fの値の、全セット分の標準偏差の値.					
⑤		コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差の値. 「①-③」の解.					
⑥		ノイズのみに起因しながらも偶然に測量誤差であるかのように算出された値のうち、もっとも大きな絶対値を示した数値. これより小さな絶対値を持つ⑤の値はノイズに起因する値と区別できない.					

結果を判断基準として用いることとした。この観測データは傾斜変化のようなイベントを含んでいないため、どの時刻に観測したデータであっても観測条件が一定であるから、15秒間ずつ位相をずらして同様の計算処理を行うと、ノイズだけが原因で偶然にあたかも測量誤差として算出された値がどの程度の範囲に分布するのか、調べることができた。もし、

傾斜変化を与えた条件下で観測したデータを元に算出された「コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差」の値が、その範囲の中に納まってしまう場合には、「コンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差」の存在を証明するには不十分と判断される。ここでは最終的な判断を誤らぬために、ノイズだけが原因で偶然にあたかも測量誤差

として算出された値のうち、もっとも絶対値の大きな値を判断基準として用いることにした。

以上のような計算処理によって算出された試験観測の分析結果を示す(表-2)。

結果を見ると、基本的には傾斜変化速度が大きくなるにつれて⑤で示した測量誤差の値も大きくなっていく傾向が見える。また①の値がおおむねプラスとなり、③の値がおおむねマイナスになることも、測量誤差発生メカニズムから予想されたとおりの結果が得られた。

②及び④で示した標準偏差の値については若干のばらつきが見られながらも一部を除いて全体的に同じような数値が得られた。これは、いずれの試験観測日における観測データにおいても、おおむね個々の観測値のばらつきが同じ程度であったことを意味している。ただ、幾つか例外的な数値の存在が散見され、②及び④で示した標準偏差の値が著しく大きく算出されたものなども一部含まれており、SDL1X(SN100001)と DiNi12(SN310172)については、試験観測中に外的な振動など想定外の要因が加わった可能性も考えられる。また振動等の要因によってコンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差が影響を受ける可能性も考えられる。

⑥の値については⑤の値と比較して、6"/分以上の傾斜変化速度を与えた場合にはおおむね、十分に小さな値が得られたことから、測量誤差の存在は確認できたと判断している。

4.2.4 実際の水準測量における誤差の大きさ

電子レベルの個体によって差が見られるが、十分に静的な環境下にある場合には、6"/分以上の傾斜変化速度が加わった場合、電子レベルにおけるコンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差が少しずつ発生し始めることがわかった。

⑤で表示されている測量誤差の値は、器械～標尺間距離が40mであるときの大きさであり、

$$1000\text{m} \div (40\text{m} \times 2) = 12.5 \text{ 測点}$$

と単純に計算するならば、⑤の値に12.5の数値を乗じたものが、1kmあたりの水準測量の片道観測において発生する、コンペンセータのヒステリシス特性に起因する系統的な測量誤差となる。

ただし、電子レベルの個体及び傾斜変化速度によって⑤の値が異なるだけでなく、直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化の大きさ次第で、最終的に水準測量において発生する測量誤差が試算されるため、⑤の値が明らかになっただけでは、まだ実際の水準測量で発生している測量誤差まで試算できない。外的な振動の大きさや器械の温度によって⑤の値が変わる可能性も考えられる。

コンペンセータのヒステリシス特性は解明への手がかりをようやくつかんだ段階にすぎず、全体像はこれから把握していくことになる。

4.3 水準測量用三脚の天板の時間的な傾斜変化

直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化の測定に着手した。この試験観測では極めて小さな傾斜変化を測定対象としたため、高精度な傾斜センサを用いて観測を行った。この傾斜センサの取り扱いには精度確保のために必要となる幾つかの注意点を要したので、実際の水準測量における水準測量用三脚の操作を完全に再現することが困難であったことから、近似的に測量作業時の環境を再現した条件下における試験観測を行った。

4.3.1 傾斜センサ(チルトセンサ)

直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化量は、三脚の脚材に用いられている材木の線膨張係数等から推測して、角度にして1"を超える大きさに達する可能性は十分に高いと判断し、安定して1"程度の精度で傾斜角を測定できる性能を持つ傾斜センサを選定した。

試験観測に用いた高精度な傾斜センサはJewell Instruments社の提供するTuff Tilt S P/N 98033-02である。この傾斜センサのスペックを示す(表-3)。

Tuff Tilt S P/N 98033-02は直方体の形状と平らな底面を持っており、水準測量用三脚の天板上に置くことで傾斜変化を測定できる。この傾斜センサは静的環境下においては非常に安定した傾斜角の数値が出力されるが、測定誤差につながる、データシートには記載されていない、非常に注意を要する器械特性が潜んでいた。

水準測量作業時においては水準測量用三脚の設置

表-3 Tuff Tilt S P/N 98033-02のスペック

項目	値
測定可能な角度の範囲	±3°
傾斜角測定値最小分解能	0.36"
傾斜角測定値の再現性	1.08"
傾斜角測定値の温度特性	±0.72"/°C
出力値	X軸傾斜角度, Y軸傾斜角度, 器械内部温度
最小サンプリング間隔	0.1秒
サンプリング時刻誤差	0.15秒
サイズ(mm)	120×80×60
本体重量	0.6kg
インターフェース	RS232 ケーブル

時に脚の踏み込みという動作を行う。これは脚先端にある石突きという金属製の爪を足で強く踏み込んで、三脚設置地点の地面（アスファルト面やコンクリート面）に食い込ませることで、観測作業中における三脚の沈み込みが発生することを防ぐために行う動作である。この踏み込むときの衝撃が傾斜センサに加わった場合、傾斜角の出力値において非常に大きなノイズが発生した。ノイズの継続時間は1分間を超える場合があった。

この器械特性は実際に試験観測を試みたときに初めて明らかとなり、水準測量用三脚の天板に傾斜センサを完全に固定した状態では、有効な傾斜角測定値を記録できなかった。やむをえず、傾斜センサを水準測量用三脚の天板に完全に固定せず、三脚の移動、反転、設置の動作を行うときには天板から傾斜センサを取り除き、一通りの動作が済んだ後に再び天板上に傾斜センサを設置して、鉛のおもりを乗せてから傾斜角の測定を行う方法をとった。このようにすると、傾斜センサ設置時の僅かな振動によってノイズが生じた場合でも、その継続時間がかなり短く抑えられ有効な測定値を得られることがわかった。

4.3.2 試験観測の方法

直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化の計測を目的とした試験観測は、平成26年度に国土地理院構内にある天文棟（図-16）、菱形量計基線北西端点（図-17）、同北東端点（図-18）の周辺で実施した。複数箇所で行ったのは季節と時間帯によって直射日光の得られる場所が変わるためである。また観測装置に必要な外部電源が確保できる場所を選定した。夏期の観測は天文棟近辺で観測し、冬期の観測の早朝は菱形量計基線北西端点近辺、日中は天文棟近辺、夕方は同北

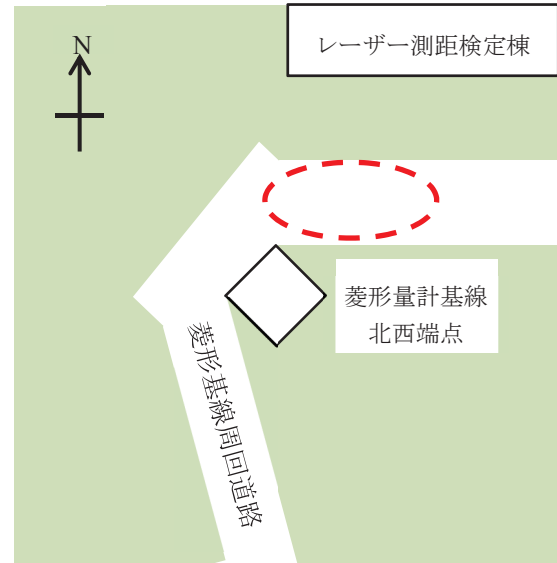


図-17 水準測量用三脚の傾斜変化量計測試験観測地。赤い点線の領域内で実施。

東端点近辺で観測した。

観測時間帯は午前7時から日の入りまでを対象としたが、観測中に天候の変化に伴い雲が太陽光線を遮断もしくは減衰させることが多く、1日だけでは日中の全時間帯をカバーした試験観測を行うことが難しかった。そこで太陽光線の強度をモニタリングしながら同一時期に複数日の試験観測を行い、安定した日照強度が得られた時間帯の試験観測データを集めて日中の全時間帯をカバーすることにした。

試験観測では1本のライカ社製水準測量用三脚を試験対象とした。そのため試験観測結果における季節的な差については測定対象とすることができたが、三脚の個体差等については今後調査を進めていく段階である。

実際の水準測量の場合、水準測量用三脚は測点ご

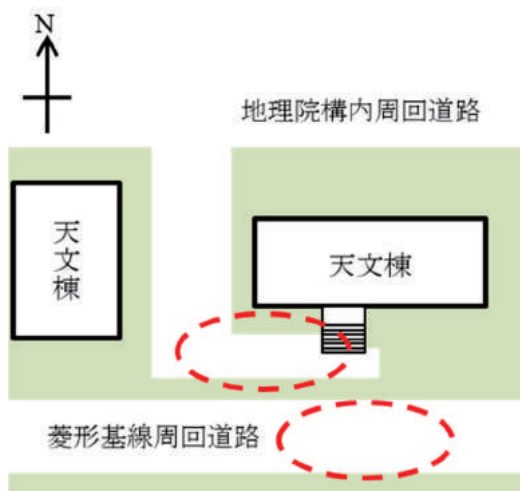


図-16 水準測量用三脚の傾斜変化量計測試験観測地。赤い点線の領域内で実施。



図-18 水準測量用三脚の傾斜変化量計測試験観測地。赤い点線の領域内で実施。

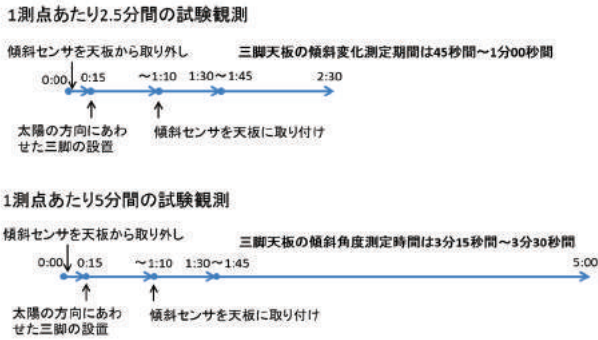


図-19 試験観測における観測セット内の三脚操作のタイムテーブル.

とに運搬と設置が行われ、設置するときの三脚の向きは測点ごとに進行方向に対して半回転する。1測点あたり最短でも三脚の移動に1分、三脚設置に30秒程度の時間を必要とし、視通状況や道路状況によっては観測開始までの時間が更に長くなる。試験観測を行うに当たり、可能な限り実際の水準測量の観測作業を忠実に再現したいところではあるが、傾斜角度の測定に用いる傾斜センサの器械特性の制限を受けたので、やむを得ず近似的な三脚の操作を行って天板の傾斜変化を測定した。そして1測点あたりの動作に要する時間を2.5分間及び5分間の2つとした(図-19)。

水準測量作業においては、太陽の方位角に対する水準測量用三脚の設置方向が測点ごとに变化するが、おおむね水準路線の方向成分と太陽の日周運動に依存する傾向にある。水準測量成果に季節的な変動が見られる御前崎地区の場合、水準路線の方向成分は北西-南東方向であるが、日本全国を対象とした場合、水準路線は一通りの方向成分を持つ。そこで、試験観測では一通りの水準路線に適用できる調査結

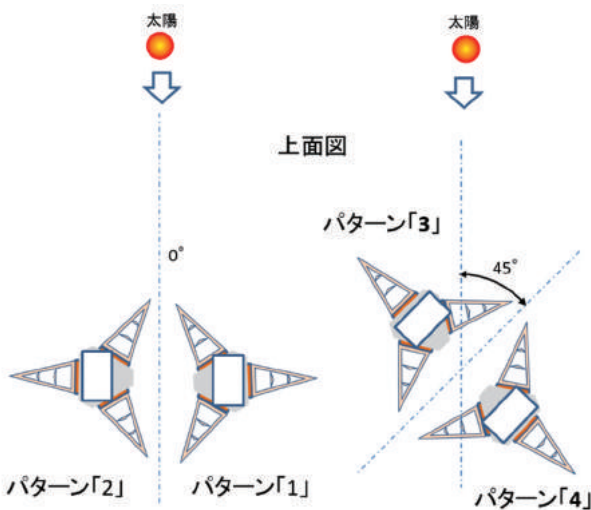


図-20 試験観測時における水準測量用三脚の太陽に対する設置パターン

果を得るため、太陽の日周変動に合わせて三脚の向きも連動させ、太陽方位に対する三脚の向きは0度及び45度の2つのパターンにして、それぞれのパターンで三脚の半回転の操作を行った(図-21)。

試験観測は(図-20)におけるパターン「1」とパターン「2」の繰り返しを30分間、続いてパターン「3」とパターン「4」の繰り返しを30分間と交互に進めた。また30分間のうち最初の20分間は1測点あたり5分間のタイムテーブルに、最後の10分間は1測点あたり2.5分間のタイムテーブルに従って試験観測を行った。そして観測条件を変えた直後の測点の試験観測データは三脚の温度分布が不安定であることを理由に棄却した。

傾斜センサによる傾斜角度の測定は5秒間隔で連続して行った。傾斜センサの温度変化を予防する目的で、特に風の強い場合を除き傾斜センサ本体を囲むようにアルミ蒸着シートによる日除けを取り付けた。直射日光試験観測に用いた水準測量用三脚には、日向側及び日陰側の脚部に合計4つの測温センサを取り付けた。これは、脚部の温度変化と天板の傾斜変化の関係を明らかにするためである。

各セットにおいて傾斜センサ設置後は無人環境で試験観測を行った。実際の水準測量では臨機応変に動く観測手、器械手の体及び日傘によって水準測量用三脚への日照条件が変化するが、その体重移動等が別のノイズを生むおそれがあったので、今回は無人環境とした。

4.3.3 試験観測で得られた結果

水準測量用三脚に取り付けた温度センサ、傾斜センサの位置、傾斜センサの出力値の正負の向き、直射日光によって発生する脚材の変形イメージについて(図-21)に示す。脚部の温度変化に伴う脚部の変形によって、それぞれの測温センサの出力値[1-1], [1-

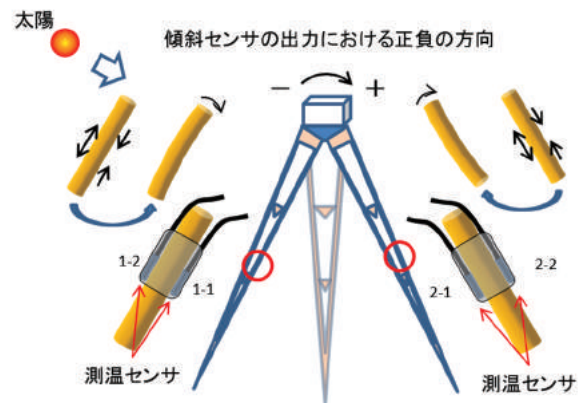


図-21 水準測量用三脚に取り付けた温度センサ、傾斜センサの位置及び傾斜センサの出力値の正負の向き.

2), [2-1], [2-2] と傾斜センサの出力する値には次のような関係が成立することが予想される。

- $[1-2] - [1-1] + [2-1] - [2-2] = A$ とする値「A」を求めたときに、「A」が増加傾向のとき、傾斜センサの値も増加傾向を示し、「A」が減少傾向のとき、傾斜センサの値も減少傾向を示す。
- $[1-2] + [1-1] - [2-1] - [2-2] = B$ とする値「B」を求めたときに、「B」が増加傾向のとき、傾斜センサの値も増加傾向を示し、「B」が減少傾向のとき、傾斜センサの値も減少傾向を示す。

ここで「A」の値の変化は脚部の部材における表と裏の温度差を意味するので、部材が反り返るように変形することで三脚天板を傾斜させる効果をもたらし、「B」の値の変化は日向側の脚部全体の伸張と日陰側の脚部全体の収縮によって三脚天板を傾斜させる効果をもたらすと予想した。

試験観測で得られた結果を示す(図-22)～(図-25)。

グラフは「単位” で示した三脚天板の傾斜角度」(黒線)、「A」の値(緑線)及び「B」の値(黄線)、そして簡易的な照度センサの出力値(オレンジ線)を表示している。

三脚天板の傾斜角度を示す黒い線は、水準測量用三脚が測点ごとに半回転する影響を受けて、傾斜角度が変化する向きも反対方向に交互に入れ替わっている。また、三脚天板の傾斜角度は各測点における観測終了時の値を基準とした相対的な変化量として測点単位で区切って表示している。

照度センサの値は真夏における真昼の太陽光線の光量を受けたときに 10 の値、暗闇のときに 0 の値を示す。

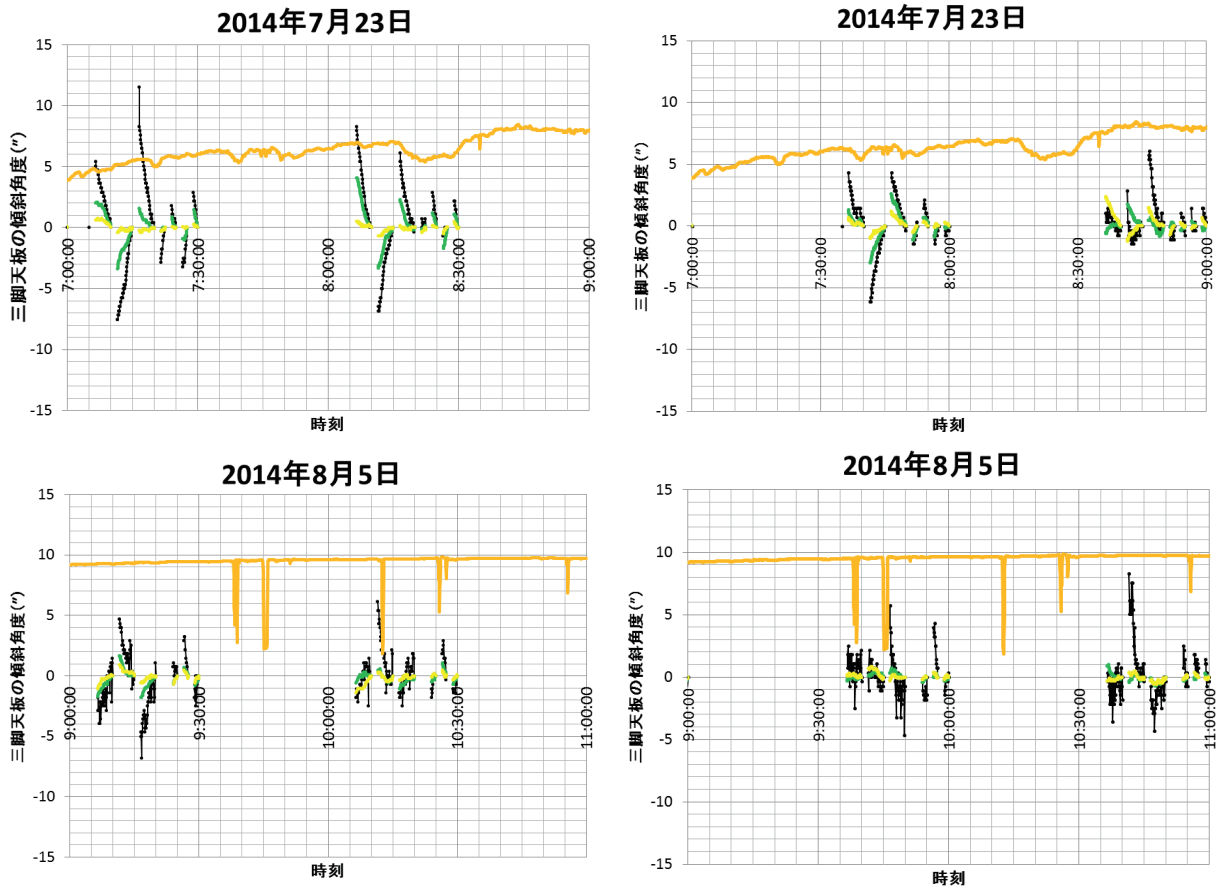


図-22 水準測量用三脚の傾斜変化量計試験観測結果(夏期 7:00～11:00)

左側は三脚設置パターン1と2の繰り返し。右側は三脚設置パターン3と4の繰り返し。

※(図-22)～(図-25)すべて同様。

— 三脚天板の傾斜角度
— 照度
— 「A」値
— 「B」値

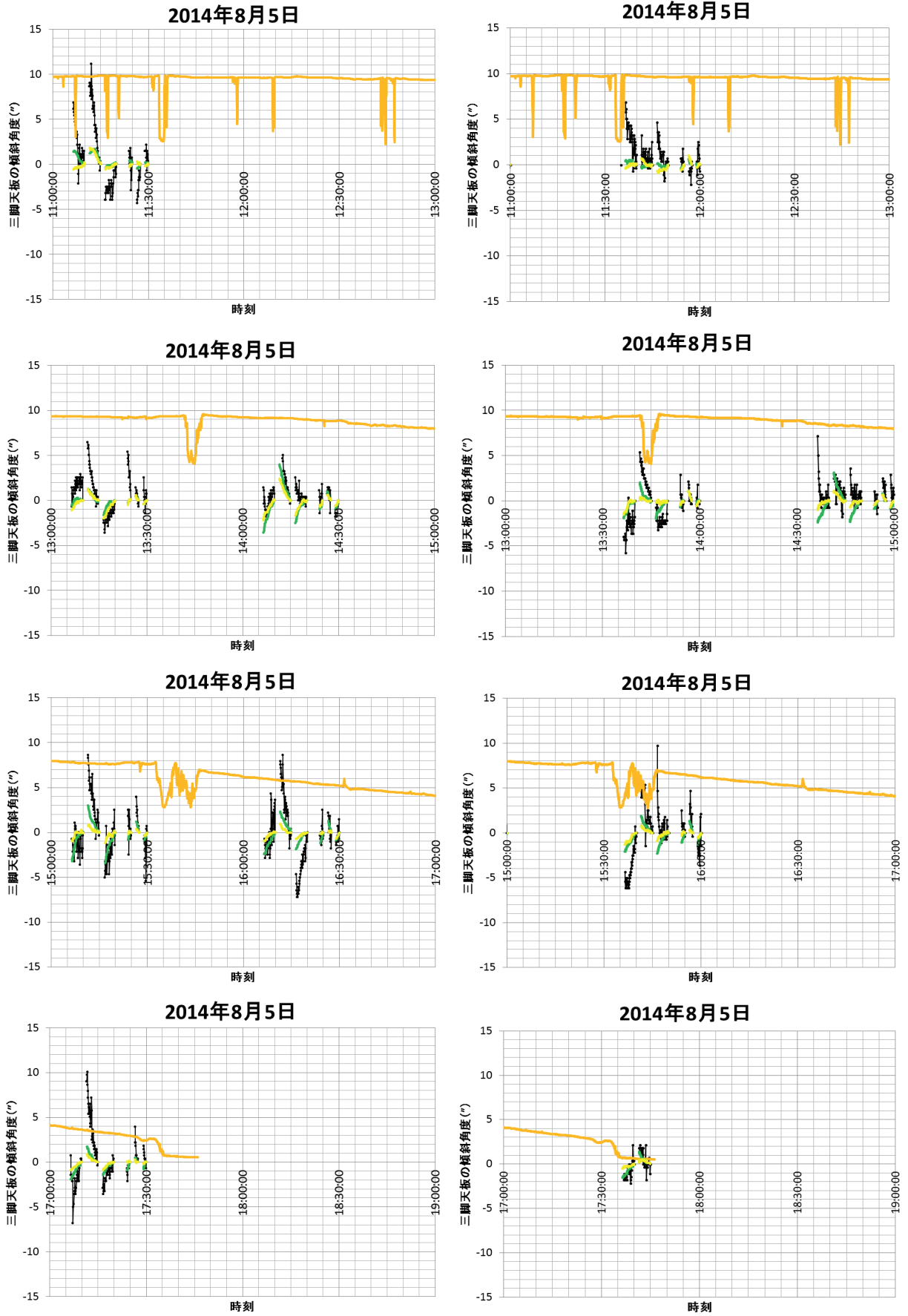


図-23 水準測量用三脚の傾斜変化量計測試験観測結果（夏期 11:00～19:00）

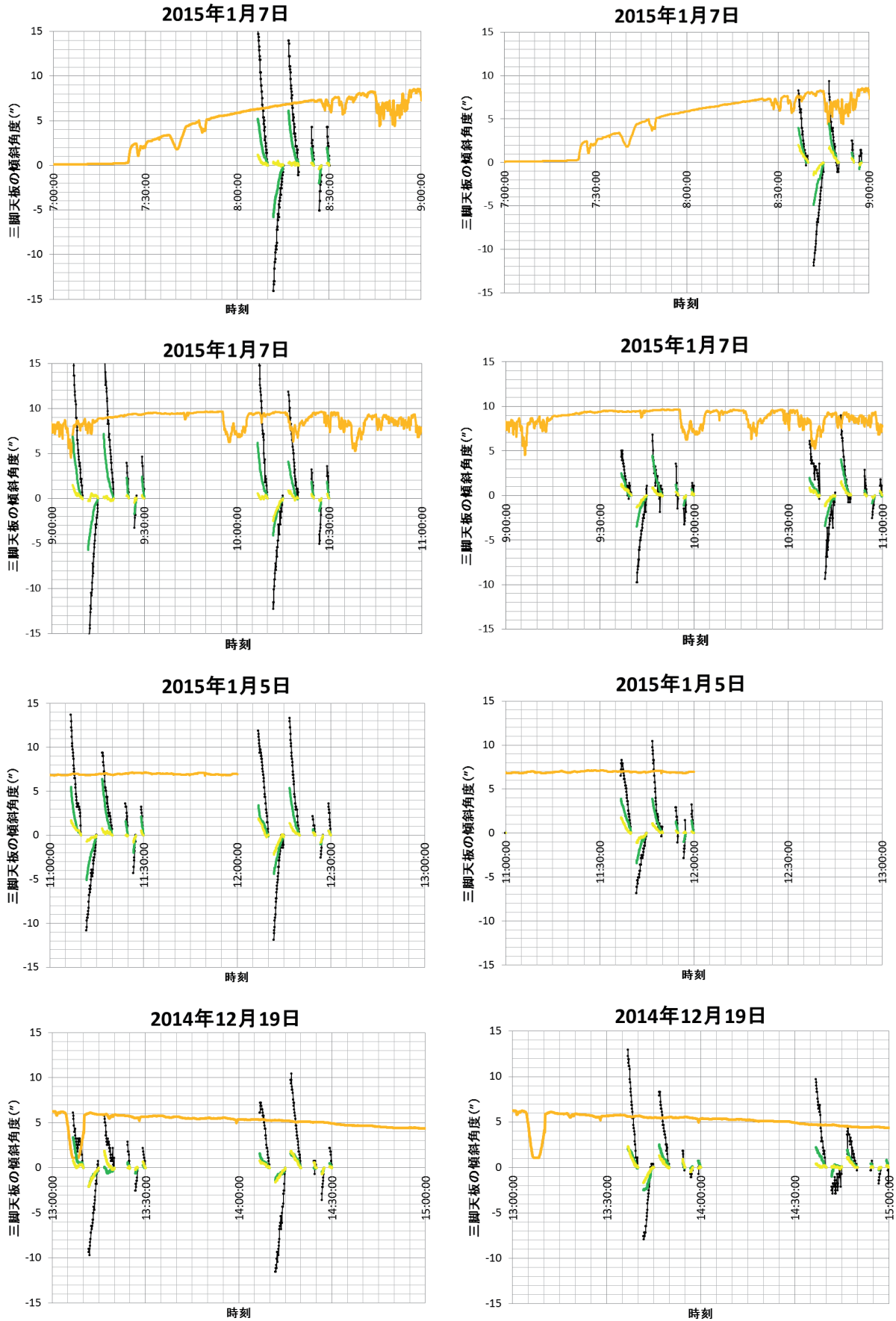


図-24 水準測量用三脚の傾斜変化量計試験観測結果 (冬期 7:00~15:00)

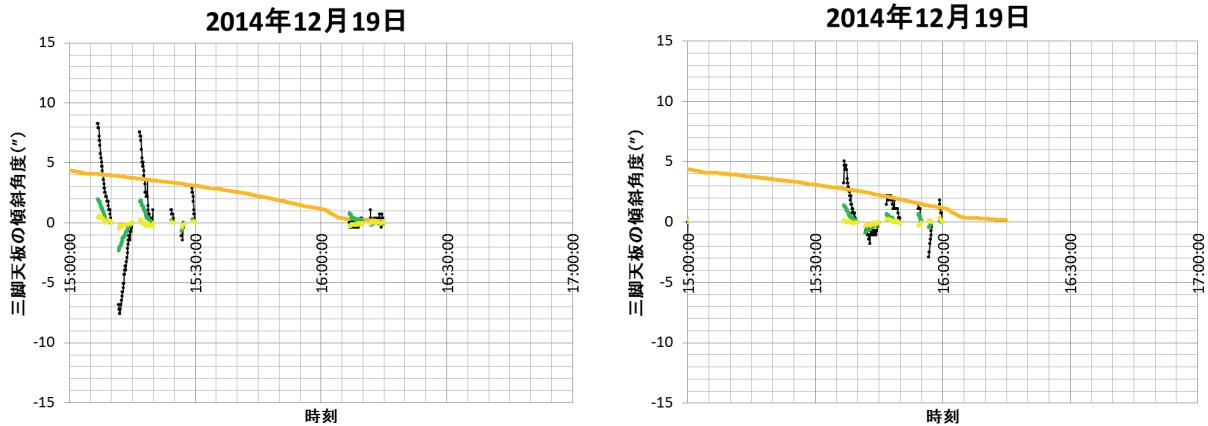


図-25 水準測量用三脚の傾斜変化量計測試験観測結果（冬期 15:00～17:00）

4.3.4 試験観測結果に基づいた考察

試験観測の結果，夏期よりも冬期において著しい脚天板の傾斜変化が発生している様子が捉えられた。電子レベルにおけるコンペンセータのヒステリシス特性の調査結果からは，静的環境下であれば，1分間あたり6"を超える傾斜変化速度が電子レベルに加わる場合に測量誤差が次第に大きくなることがわかっている。

夏期においては傾斜変化が発生した場合でも傾斜変化速度がゆるやかであり，瞬間的にも1分間あたり6"を超える傾斜変化速度が発生することは少ない様子であった。夏期は強い太陽光線によって三脚が高温となるが温度変化は小さく，三脚天板の傾斜角度の変化も小さいことがわかった。

対して冬期においては日中の時間帯全域において三脚天板の傾斜角度の大きな変化が観測され，瞬間的に1分間あたり10"を超える大きな傾斜変化速度が発生する様子も多く捉えられた。冬期においてはコンペンセータのヒステリシス特性に起因する測量誤差が発生しやすいことがわかった。

夏期，冬期ともに，太陽高度は変わっても同時刻における太陽の方位角はほぼ同じである。水準路線の方向成分は季節によって変化しないため，結果として季節的に変動する測量誤差が発生すると考えられる。

夏期，冬期ともに，A及びBのどちらの値も三脚天板の傾斜変化とほぼ同じ位相で変化の様子が捉えられた。直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化は，事前に予想した発生メカニズムで大体説明できそうだ。

水準測量用三脚の天板の時間的な傾斜変化を測定する試験観測は，天候に大きく左右されることに加えて有効な測定値を得るための難易度が高く，今年度は観測日数やサンプル数を増やすことが難しかった。これまでの取り組みにおいて直射日光による水

準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化がコンペンセータのヒステリシス特性と組み合わせさせて季節的な測量誤差となる事実が明らかになったので，次年度以降も観測データを増やして測量誤差の定量化を進めることが望ましい。特に春期，秋期における試験観測の追加と三脚変形特性の個体差調査も充実したいところである。

5. 測量誤差に対する考え方と解決への取り組み

御前崎地区における水準測量成果に見られる季節的な変動は，2006年度以降に電子レベルが導入された後で振幅が縮小しており，主にNI002AやウイルドN3が用いられていた2005年度以前と比較すると振幅の縮小は明らかである。特に最新の電子レベルが使用されるようになった2012年度以降の振幅は非常に小さくなっている。

ウイルドN3はティルティングレベルと呼ばれる種類のアナログレベルであり，コンペンセータを持たない。そのためウイルドN3にはコンペンセータのヒステリシス特性が存在しないが，そのかわり俯仰ねじの手動操作により水平気泡管を基準として視線と水平線の一致を確保する仕組みを持つので，俯仰ねじの操作完了直後から標尺の目盛の読定値を確定するまでの間に発生する三脚天板の傾斜変化が，そのまま水準測量成果に影響を与えていたことは確実である。また水平気泡管内の気泡の動きに液体の粘性抵抗に起因するヒステリシス要因が存在した可能性も濃厚なので，2000年度以前の水準測量成果に対しても，直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化が測量誤差の要因になっていたと考えられる。御前崎地区における水準測量成果に見られる季節的な変動がレベルの器械特性に起因していた可能性は強い。

ただし，これまでに観測された御前崎地区における水準測量成果に見られる季節的な変動のすべてが

測量誤差であることを完全に証明することは難しい。電子レベルの器械特性は個体単位で異なることが明らかであり、過去の水準測量成果から測量誤差だけを分離して補正することが非常に難しい。

しかしながら、御前崎地区における水準測量成果に見られる季節的な変動において測量誤差が関与している可能性を無視し、観測に使用された測量機器等を考慮せずに水準測量成果の測位精度を一律であると仮定して地殻変動の評価を行うことは、当然ながら危険である。それぞれの測量成果に対して個別に測位精度を正しく評価し、地殻変動が検出できている場合には正確な判断を行うことが大切である。

今後の精密基盤傾動測量に使用される電子レベルの機種や個体によっては、直射日光による水準測量用三脚の変形に起因する三脚天板の時間的な傾斜変化と、コンペンセータのヒステリシス特性の二つが組み合わされることで発生する水準測量誤差の発生に伴い、測量成果に季節的な変動の振幅が大きく現れるおそれがある。この測量誤差の問題を根本的に解決するためには、水準測量用三脚の天板における系統的な傾斜変化の発生を防ぐ目的で、水準測量用三脚に直射日光が当たらないように水準測量の観測環境を改善することが求められる。

今後、調査研究を進めて対処法を確立しながら改善案を提案する。

また、電子レベルを含めたオートレベルにおけるコンペンセータのヒステリシス特性は、まだ調査が始まったばかりであり、その特性の全体像を把握するためには追加の試験観測を必要としている。水準測量の高精度化を更に進める目的においては、取り組む価値がある。

6. おわりに

電子レベルが登場して日本国内の基本測量に使用され始めたのは 1990 年代であり、御前崎地区における水準測量に導入されたのは 2006 年以降である。今年が 2015 年であるから、もう少しで 10 年程度の時間が経過する。電子レベルというブラックボックスの器械特性や水準測量の未知の測量誤差の発生メ

カニズムを解明する試みは、水準測量の実際の測位精度を明らかにする試みでもある。得られた測量成果に対して品質保証を与える必要上、今後も必要に応じてこれらを解明する取り組みが要求されるだろう。

高低差の計測に関する技術として干渉 SAR、GNSS、光格子時計が登場してきたが、干渉 SAR、GNSS のような宇宙測位技術の場合、システムの規模が大きいに加え元々が軍事技術であることからブラックボックスとなっている技術領域が広範に存在し、測量誤差の存在に気づくことや、測量誤差の発生メカニズムの解明作業を難しくしている。これらは計測された値の実質精度や実質時間分解能に影響を与える可能性がある。また、光格子時計による高低差計測技術は将来的に重要であるが、現時点では超高真空容器や 2 地点間を直接結ぶ光ファイバー等を必要とする点においてコスト面、運用面の課題が多く、実験室レベルの検証段階である。

測量という経済規模が比較的小さい社会インフラ整備事業に関わるものとしては、その運用コストをなるべく低く抑えることで、社会に与える金銭的負担を軽減した方が良い。宇宙測位技術等の新技術は魅力的な反面、導入と維持管理に関わるコストも相当なものである。特に人工衛星系のシステムの導入・運用コストは元々採算性が度外視されているほどに超高額である。加えて最先端の技術には当然ながら長期安定性の未検証といった不安もつきまとう。精度保証もこれから進めていく段階である。

現在、水準測量を超える精度と信頼性と経済性を持つ高低差計測手段は存在せず、特に 2 地点間の高低差を実測値だけで高精度に確定できる測量技術としては、他に代わるものが見当たらない状況である。

水準測量は、新しく登場してきた測量技術に対して、その測位精度を客観的に評価するための基準としての役割も与えられている。近代以降百年を超える歴史を刻んだ水準測量技術の果たす役割は、今後も引き続き重要とならざるを得ない。

(公開日：平成 27 年 3 月 4 日)

参考文献

- 澤田正典 (2011) : ニュースーパーインバールを使用した試験観測 (第 3 年次), 平成 23 年度調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000071404.pdf> (accessed 27 Jan 2015)
- 澤田正典 (2012) : 水準儀の視準線安定性に関わる諸要素の研究 (第 1 年次), 平成 24 年度調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000081565.pdf> (accessed 27 Jan 2015)
- 澤田正典 (2013) : 水準儀の視準線安定性に関わる諸要素の研究 (第 2 年次), 平成 25 年度調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000092766.pdf> (accessed 27 Jan 2015)