

# 強化地域高精度三次元測量御殿場地区レフラクション試験観測

実施期間 平成14年度  
測地部機動観測課 大滝 三夫

## 1. はじめに

水準測量は、地殻上下変動の様相を把握する有効な手段の一つであり、常に観測データの質的な向上が求められる。100年以上にわたる水準測量の歴史は、誤差との闘いの歴史でもあった。とくにレフラクション誤差は、現在でも世界的に大きな課題になっている。

日本では、レフラクション誤差対策として、視準距離を短くし、標尺の下方を讀定しないように作業規程等で規定している。しかし、この誤差は、観測方法によって小さくできるが、完全に除去することはできない。また、あまり視準距離を短くすると測点数が増えて作業効率が悪くなり、測点毎の器械誤差や観測誤差も累積する。もう一つの対策は、観測比高に補正する方法である。レフラクション誤差の計算には、近似式がよく用いられるが、この補正を実際に採用した国は少なく、日本でも行われた経験がない。その理由として、1) 式の妥当性に疑問があったこと、2) 1測点毎に複雑な気象状況等について、克明に記録するのは困難かつ非効率的であること、3) 式は、地表付近の気温勾配を一様なものと想定したもので、複雑な周辺環境が気温勾配にどう影響するのかについては、まだ解明されていないこと、等が挙げられる。

機動観測課では、平成12、13年度に実施した水準測量作業結果をもとにレフラクション誤差を計算し、環閉合差や変動量への影響を調査・解析した。また、平成14年9月には、御殿場地区において強化地域高精度三次元測量・レフラクション試験観測作業（以下「試験観測作業」という）を実施した。本論では、この調査・解析および試験観測結果を報告するとともに、これらから考察したレフラクション誤差の補正方法と当面の誤差対策を提案し、今後の水準測量のさらなる精度向上に貢献する。

## 2. 研究内容

### 2.1 調査・解析結果

傾斜地における水準測量では、図1に示すように視準線の高さが前視と後視で異なる。太陽の放射熱の影響で地面に近づくほど気温が上昇し、光の屈折も大きくなるため、光路屈折量 $R_1$ 、 $R_2$ は等しくならない。この差がレフラクション誤差で、2点間の観測高低差にそのまま影響する。なお、レフラクション誤差 $R$ の計算には、式がよく用いられる。

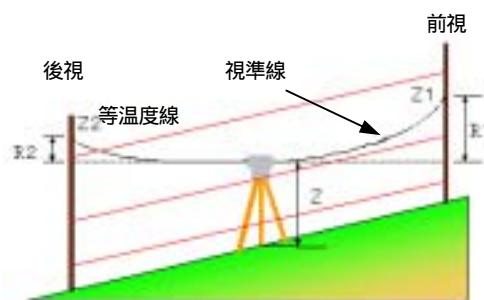


図1 傾斜地における光路屈折

$$R(\text{mm}) = - a \times 10^{-5} \times S^2 \times t \times h \dots\dots\dots$$

ただし、 $S$ ；視準距離 $m$   $h$ ；観測高低差 $m$   $t$ ；地上50cmと250cmの気温差( )  
 $a$ ；気温，気圧による変数。気温15，気圧750mmHgの時，6.45である（計算式省略）

今回の調査・解析では、国土地理院が平成12、13年度に第9回全国改測作業（1996年～）の一環として実施した中部山岳地域の高精度三次元測量結果を用いて、式によりレフラクション誤差を計算し、環閉合差や変動量に与える影響を調査した。なお、気温差  $t$  は、昭和57、58年度に測地第三課が実施した試験観測作業の結果を用い、気温毎に想定した。

最初に、測量結果から環閉合差を計算すると、7つの環のうち、5つの環で許容範囲を超過し、環閉合差から計算した標準偏差は3.10mmであった。次に、海岸沿いの平坦な路線を除く路線のレフラクション誤差を計算すると、掛川市から下諏訪町に至る路線では8.2mm、小千谷市から長野市を通過して松本市に至る路線では6.6mmに達し、その他の路線でも1.0mmを超える。これを観測高低差に補正して環閉合差を求めると、許容範囲を超過した環は1つだけで、標準偏差は2.27mmとかなり小さくなった。

さらに、レフラクション誤差が変動量や変動状況に及ぼす影響について調査した。図2は、高崎市から小千谷市に至る水準路線の、レフラクション補正前と補正後の変動量を比較したものである。観測は、平成5年7～9月及び13年8～9月に実施されたもので、どちらも夏季の観測であるが、平均気温は4℃、平均視準距離は7m異なる。この温度、最大視準距離の差がレフラクション誤差の差になり、変動量に影響した。図2を見ると、三国峠付近の変動が明らかに異なる。

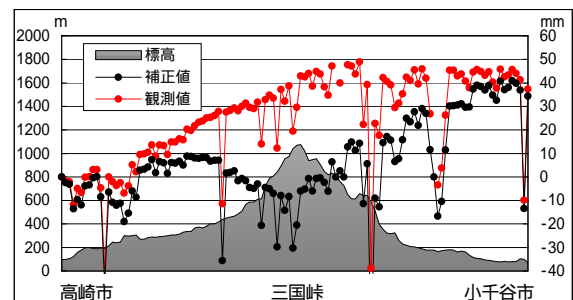


図2 レフラクション補正前、後の変動

## 2.2 試験観測作業

試験観測作業の目的は、試験観測の観測値からレフラクション誤差を正確に推定し、式で求めたレフラクション誤差と比較・検討して計算方法の妥当性を評価すること、さらに水準測量における効率的で、合理的なレフラクション誤差の補正方法を導き出すことである。



図3 路線断面図 写真1 気温測定

作業は、静岡県三島市から御殿場市に向かって同一傾斜（2%）で緩やかに上る、ほぼ南北の路線（水準路線番号731）で実施した。路線の長さは2.2kmである。観測は電子レベルを2台使用し、一方の電子レベルでは最大視準距離15mで、もう一方の電子レベルでは最大視準距離40mで実施した。また、40mの観測と並行して、独自に制作した気温測定装置より気温勾配を測定した。気温勾配の測定は、号標尺（復観測では号標尺）の1～2m後方で1測点毎に行い、地表面から50、100、160、250cmの高さの気温及び天候、道路状況、標尺の直射、日陰の区別等を記録した。なお、2組の観測は、気象条件等に差が出ないように、同じ区間は出来るだけ同じ日に観測した。












## 3. 得られた成果

### 3.1 レフラクション誤差の計算結果

試験観測作業の結果を用い、2つの方法でレフラクション誤差を計算した。まず、最大視準距離40mと15mの観測高低差の差から、1鎖部毎に往観測と復観測に分けて計算した。往復平均した計算結果を、表1の「観測高低差」欄に示す。この計算の場合、1)15mの観測ではレフラクション誤差がない、2)観測誤差や器械誤差の累積は、40mと15mの観測で差がない、の2点を前提条件とした。しかし、観測結果から、往復差による標準偏差及び再測率を計算すると、40m観測では0.43mm、0%であるのに対

し、15m観測では0.56mm、11%であった。15mの観測では、観測所要時間が1測点平均で1分55秒とかなり早い上に、測点数は40m観測と比較して2倍以上であり、1測点の僅かな観測誤差等が累積した可能性がある。したがって前提条件2)は、成り立たなかったことになる。

表1 レフラクション誤差の計算結果（計算結果の「-」は逆転現象）

点名	天候	距離 km	観測比高		レフラクション誤差の計算結果	
			40m	15m	観測高低差	測定気温差
58-1						
10073		2.281	18.5432	18.5430	-0.2 mm	0.1mm
10072		1.955	30.1215	30.1225	1.0	1.0
10071		2.248	35.6112	35.6116	0.4	1.3
10070		1.578	29.9167	29.9168	0.1	0.3
10069		1.993	37.4480	37.4486	0.6	0.5
10068		1.769	44.7676	44.7678	0.2	0.9
10067		2.097	60.5372	60.5378	0.6	0.6
10066		2.249	58.7631	58.7638	0.7	1.2
10065		1.805	43.5816	43.5828	1.2	1.2
10064		2.270	43.1740	43.1755	1.5	1.7
10093		1.910	29.7055	29.7058	0.3	1.2
合計=					6.6	10.0

次に、最大視準距離40mにおける観測高低差と、気温勾配測定で得られた1測点毎の気温差（50～250cm）を用い、近似式によりレフラクション誤差を計算した。計算は、往観測と復観測に分けて1測点毎に行い、各鎖部に往復平均したものを表1の「測定気温差」欄に示した。

図4は、測定気温差から求めたレフラクション誤差と、観測高低差から求めたレフラクション誤差を1鎖部毎に比較したグラフで、ほぼ同じ結果になった鎖部もあるが、大きくかけ離れた鎖部もあり、結果的に、路線全体では表1に示すように、2つの計算結果に少し差が生じた。これは、15mの観測における観測誤差等の累積が大きな要因と考えられる。また、測定気温差から求めたレフラクション誤差は、複雑で変化に富んだ気温勾配を1測点毎に厳密に測定した結果を用い、かつレフラクションの理論に最も忠実従って求めたもので、観測高低差から求めたレフラクション誤差と比較して信頼性が高いと言える。

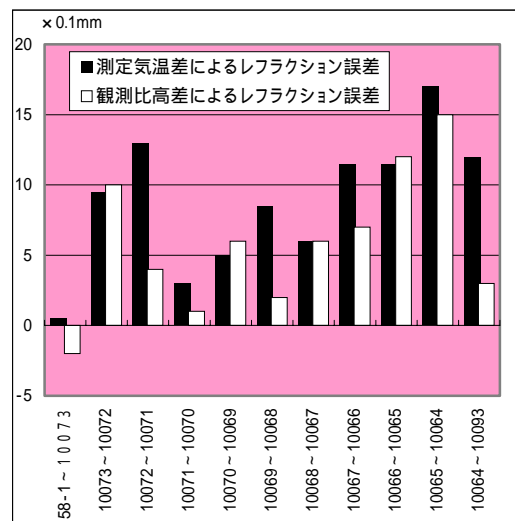


図4 レフラクション誤差の比較

### 3.2 レフラクション誤差の補正方法

#### 1) 補正方法の概要

この間の解析・調査および試験観測作業の結果から、レフラクション誤差を補正する方法を考察した。レフラクション誤差の補正方法の概要は、次のとおりである。

- ) 号標尺に気温差測定装置を取り付け、1測点毎に地上50～250cm間の気温差を測定する。
- ) 気温差の固定間平均値を用い、式により固定間における各測点のレフラクション誤差を計算する。
- ) 計算されたレフラクション誤差を、固定間の観測高低差に補正する。

2) 気温差の測定

レフラクション誤差を計算する時に最も重要な気温差は、図6に示すような気温差測定装置を、号標尺裏面の2カ所に堅固に取り付け、1測点毎に測定する。測定は、各測点での観測高低差の観測が終了した直後に行い、測定したデータは記録計に集録する。また、固定点や水準点では、気温差測定終了後に固定間の平均値を計算する。この時、50cmと250cmにおける平均気温の固定間の平均値を計算する。

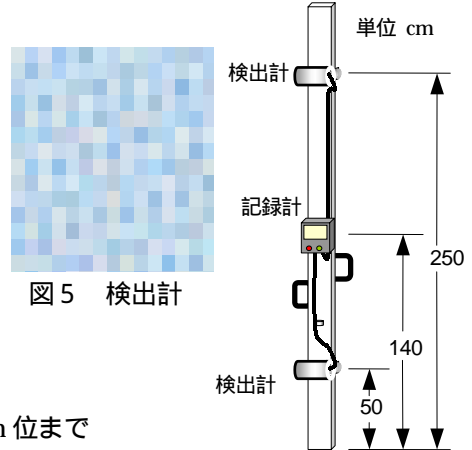


図5 検出計

図6 気温差測定装置

3) レフラクション誤差の計算方法

レフラクション誤差の計算は、式により1測点毎に0.1mm位まで計算(端数は切り捨て)し、水準点間で累計する。観測高低差への補正は、往、復観測毎に行う。なお、式のaは、式により計算する。

$$a = \frac{1}{2} \times \frac{d}{Z_2^c - Z_1^c} \times \left\{ \frac{1}{c+1} \times (Z_1^{c+1} - Z_2^{c+1}) + \frac{(Z_1 + Z_2)}{2} \times (Z_2 - Z_1) \right\} \dots\dots\dots$$

ただし、 $Z_1$ ; 50 cm (下側検出器の高さ)       $Z_2$ ; 250 cm (上側検出器の高さ)

$c$ ; -1/3       $d$ ;  $d = -10^{-6} \times \{0.933 - 0.0064 \times (T - 20)\} \times P / 760$

$T$ ; 50cm と 250cm との平均気温を固定間で平均した値 ( )

$P$ ; 気圧 影響が小さいため 750 mmHg で一定とする。

3.3 当面のレフラクション誤差対策

水準測量におけるレフラクション誤差の補正が施行されるまでの当面の誤差対策として、以下の2点が考えられる。これによって、レフラクション誤差は、計算上40~60%減少する。

最大視準距離を30mとする。

最低標尺読定値を次のとおりとする。

- ・ 標尺台使用時は40cmとする。
- ・ 水準点及び固定点においては50cmとする。

4. 結論

試験観測作業前に行った調査・解析で、傾斜のある水準路線においてはレフラクション誤差の累積量が大きく、環閉合差や変動量にかなり影響することが分かった。また、試験観測作業では、1測点毎に厳密に測定した気温勾配を用いることによって、正確なレフラクション誤差を推定できることが確認できた。

本論では、現段階でのレフラクション補正方法と、当面の誤差対策について考察した結果を報告した。レフラクション誤差の補正は、世界でも例の少ない画期的なことであるだけでなく、実用化できれば、水準測量の大幅な精度向上が期待できる。しかし、レフラクション誤差の補正を実用化するためには、効率的な気温勾配測定装置を開発するとともに、気温勾配が逆転する厳冬期など様々な気象条件下での試験観測を行い、式の妥当性を結論付けるか、または新たに合理的な計算方法を導き出す必要がある。

引用文献または参考文献

中堀義郎(1988): 精密水準測量、現代測量学第4巻 測地測量、299-351、日本測量協会