

水準測量におけるレフラクション誤差の影響 Influence of Errors by Refraction on Precise Leveling

測地部 大滝三夫
Geodetic Department Mitsuo OHTAKI

要 旨

水準測量の環閉合差や変動量に与えるレフラクション誤差の影響について、国土地理院が平成 12, 13 年度に実施した富士山南東地域の高精度三次元測量（以下「水準測量」という）、及び中部山岳地域の水準測量作業の観測結果をもとに調査・解析した。

調査・解析では、観測手簿の視準距離、観測比高及び気温を用い、1 測点毎にレフラクション誤差を計算し、累計して水準路線毎のレフラクション誤差を求めた。この計算結果を観測比高に補正し、環閉合差や変動量に与える影響を調査すると、環閉合差の許容範囲を超過していた環の多くは、許容範囲内に入り、変動量は大きく変わることがわかった。

また、国土地理院は、平成 14 年 9 月、静岡県御殿場市から三島市に至る水準路線でレフラクション試験観測作業を実施した。これらの調査・解析及び試験観測作業の結果をもとに、水準測量におけるレフラクション誤差の大きさを推定し、今後のレフラクション誤差対策について考察した。

1. はじめに

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る。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。レフラクション誤差は、傾斜に比例するため、傾斜のある水準路線では累積して大きな量になる。

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、標尺の下方を読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することはできるが、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。

もう一つのレフラクション誤差対策は、観測比高に補正する方法である。レフラクション誤差を求めるためには、近似式(2)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) 近似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や周辺環境について、克明に記録するのは困難かつ非効率的であること、3) 近似式は、地表付近の気温勾配をある程度一様なものと想定したものであり、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。

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。国土地理院は、この間、自動レベルや電子レベルを導入し、各機器の特性を考慮した観測手法、許容範囲を設定するとともに、水準儀日覆、標尺鉛直センサーやセラミック製標尺台等を開発してきた。その結果、最近の水準測量では、図-1 及び表-1 に示すように良質な観測データが得られている。

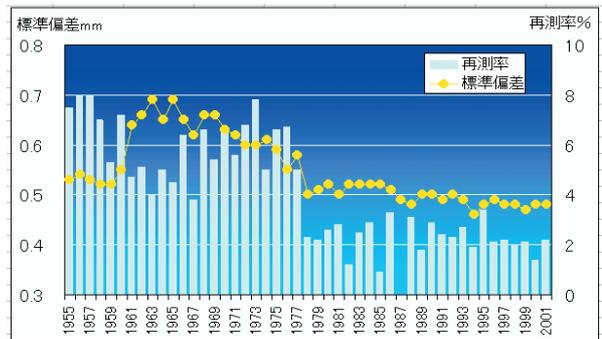


図-1 水準測量の標準偏差及び再測率の推移

表-1 全国改測毎の環閉合差による標準偏差

回数	観測期間 (年)	環の数	標準偏差
第1回	1883～1912	74	2.57 mm/km
第2回	1923～1943	44	1.65
第3回	1947～1961	51	2.16
第4回	1961～1968	65	2.14
第5回	1969～1975	53	1.70
第6回	1975～1981	61	1.38
第7回	1981～1987	57	1.54
第8回	1985～1996	63	1.51

いま、水準測量における誤差の中で最大の課題は、レフラクション誤差対策である。そこで、平成 12, 13 年度に実施した水準測量作業結果をもとに、環閉合差や変動量への影響を調査した。また、平成 14 年 9 月に試験観測作業を実施してレフラクション誤差の量を推定し、これらから効率的な誤差対策を考察した。

本論では、この調査・解析及び試験観測結果を報告するとともに、新たなレフラクション誤差対策を提案し、今後の水準測量のさらなる質的向上に寄与する。

2. レフラクション誤差の概要

傾斜地における水準測量では、図-2に示すように視準線の高さが後視と前視で異なるために、光路屈折は非対称となり観測比高への影響はかなり大きい。

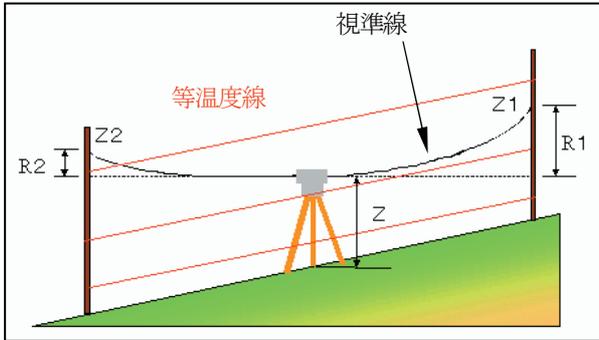


図-2 傾斜地における光路屈折

光は、屈折率の小さい物質から大きい物質へ進む場合には、屈折率の大きい物質側に方向が曲げられる。空気の屈折率nは、近似的に(1)式で表される。ここで、 $P=760\text{ mmHg}$, $t=20^\circ\text{C}$, $dP/dh=0.1\text{ mmHg/m}$ として高さ屈折率、気温の関係を調べると、気温が高さ1mの増加に対して 0.038°C 以上上昇した場合、屈折率nは減少する。

$$n = 1 + \frac{0.0002923}{1 + 0.00368t} \cdot \frac{P}{760} \quad (1)$$

ただし、P ; 気圧 t ; 気温

地表付近の気温勾配は、日中は太陽からの放射熱により地面の温度が空気の温度より高くなるので、気温は高さの増加とともに減少する。つまり、地面に近づくほど気温が上昇し、屈折率は減少する。従って、傾斜地で水準測量を

行えば、視準線は図-2に示すように前上がりになり、R1, R2だけ標尺目盛の読取値が大きくなる。2点間の観測比高 Δh に及ぼす量Rの計算には、近似式(2)がよく用いられる。

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

ただし、S ; 視準距離m Δh ; 観測比高m

Δt ; 地上50cmと250cmの気温差($^\circ\text{C}$)

a ; 気温、気圧によって僅かに変わる。気温 15°C 、気圧 750mmHg の時、6.45である(計算式省略)。

R1, R2の量は、屈折率の鉛直分布で変わるが、屈折率を直接測定することはできない。そこで気温勾配を調べ、(1)式で屈折率を求めてR1, R2を計算することになる。気温勾配を表す式は、(3)の式が一般的である。

$$t = a + b \cdot Z^\circ \quad (3)$$

(3)式のa, b, cは定数で、3つ以上の高さで温度を測定すれば求められる。今回の解析では、昭和57年から58年にかけて国土地理院が茨城県八郷町で実施した「水準測量レフラクション試験観測作業」で得られた定数を用いた。

3. レフラクション誤差の計算と解析

3.1 富士山南東地域のレフラクション誤差

国土地理院は、平成12年10月頃から富士山東部で低周波地震が活発化したことに関連して、平成13年度に富士山南東地域で水準測量作業を実施した。作業地域は、図-3に示すとおりである。図に示す水準路線(以下「路線」という。)のうち、路線番号を付した路線のレフラクション誤差を計算し、観測比高に補正して環閉合差や変動量への影響を調査した。

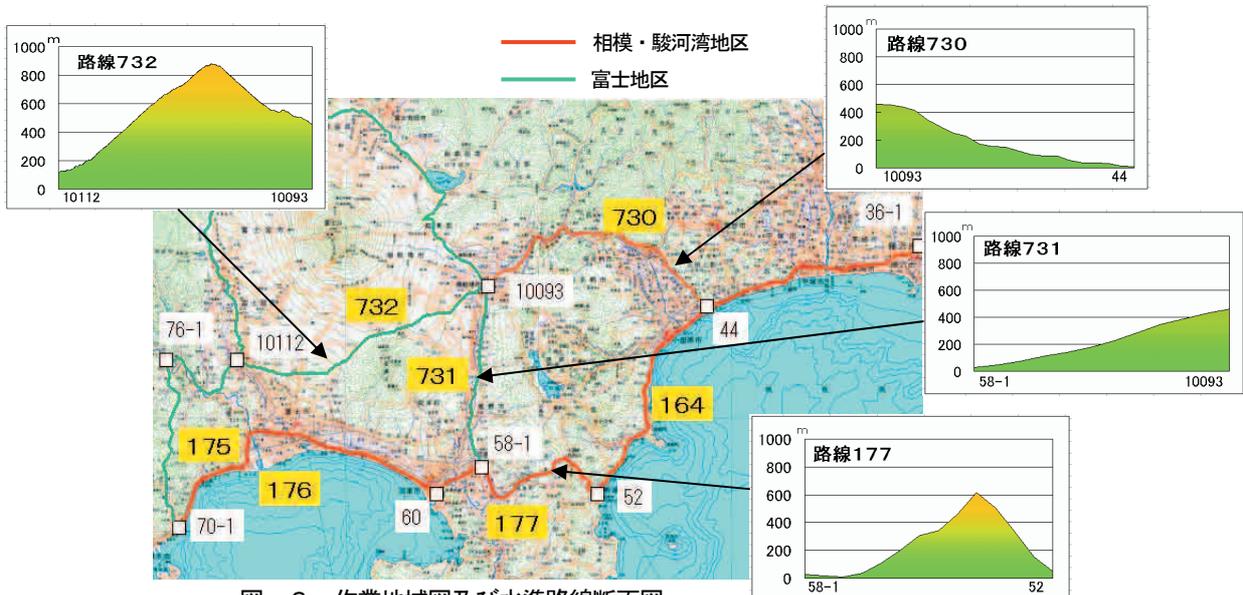


図-3 作業地域図及び水準路線断面図

3. 1. 1 水準路線の特徴

作業地域は、富士山南東側の山麓に位置する。小田原市から国道1号線沿いに富士市まで通じる路線は、熱海峠付近を除きほぼ平坦である。それ以外の路線は、富士山に向かって緩やかな上り坂になっている。とくに路線730、731は、図-3の路線断面図に示すように、全国的にも珍しい、緩やかな一定傾斜の路線である。こういう路線は、レフラクションの影響を受けやすい。

路線732は、富士宮市と御殿場市を結ぶ路線で、十里木高原付近を境に両方向に急傾斜な下り坂になる。路線177は熱海から急傾斜で上り、熱海峠を越えて三島市に緩やかに下る。このように起伏のある路線の場合、レフラクション誤差は正、負で相殺されるため、路線全体では累積しない。しかし、観測点が増えるため器械誤差や観測誤差が累積しやすい。



写真-1 水準路線731 (御殿場市)

3. 1. 2 水準測量作業の概要

主な路線の作業概要を、表-2に示す。

路線730の観測は、70%にあたる26kmをウルトNA3003(電子レベル)を使用し、最大視準距離25mで実施している。

表-2 主な路線の作業概要

路線番号	観測年月	距離km	観測機器	平均温度℃ 視準距離m
730	H13.9 ~11	38.1	ウルト N3 NA3003	20℃ 18m 電子レベル
731	H13.6	22.1	ツイス NI002	22℃ 29m 自動レベル
731	H14.1 ~2	22.1	ツイス DINI	9℃ 29m 電子レベル
732	H13.6	38.8	ツイス NI002	19℃ 20m 自動レベル
175	H13.6	24.1	ツイス NI002	25℃ 21m 自動レベル
177	H13.10 ~11	27.6	ウルト N3	19℃ 18m

路線731は、半数以上の測点が視準距離40mで観測しているため、平均視準距離は最も長い。また、同路線では、夏と冬の2回観測を実施している。平均視準距離は変わらないが平均気温は13℃異なる。

路線732、177は、峠や高原を越える起伏のある路線で、平均視準距離は短い。路線175は、緩やかな傾斜であるが、カーブが多いため視準距離は短い。ただ、晴れの日が多く、平均気温は高い。

なお、全路線の中で、電子レベルを使用したのは、730の一部と、731の冬の観測だけである。

3. 1. 3 観測結果の解析

水準測量作業の観測結果を用いて計算した環閉合差は、図-4のとおりである。なお、環閉合差の許容範囲は $1.5\sqrt{S}$ (Sは距離 km) で、単位はmmである。

路線731は、夏と冬の2回観測を実施しているため、夏の観測値による環閉合差を●、冬の観測値による環閉合差を●で表した。環閉合差の赤字は、許容範囲を超過していることを表す。計算結果を見ると、夏の観測値で計算した環閉合差では、環Ⅲだけ許容範囲内に入る。冬の観測値を使うと、閉合差は環Ⅰ、Ⅱとも小さくなるが、環Ⅱは許容範囲内に入らない。

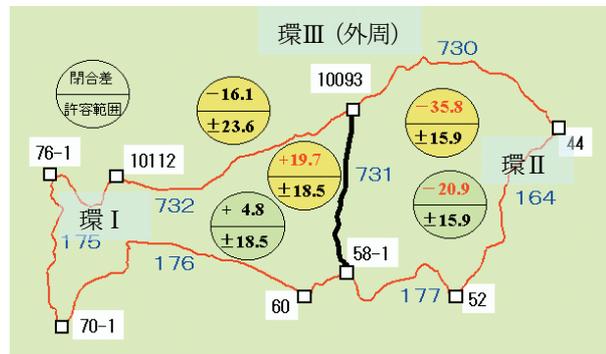


図-4 観測結果による環閉合差

次に、路線731の2回の観測を比較すると、図-5のようになる。全ての鎖部で冬の観測比高の方が大きいため、全体では累積して14.9mmの差になった。

この差の要因は、鎖部毎にほぼ様な累積状況から、定量的な観測誤差や器械誤差に加え、レフラクション誤差の影響があると考えられる。

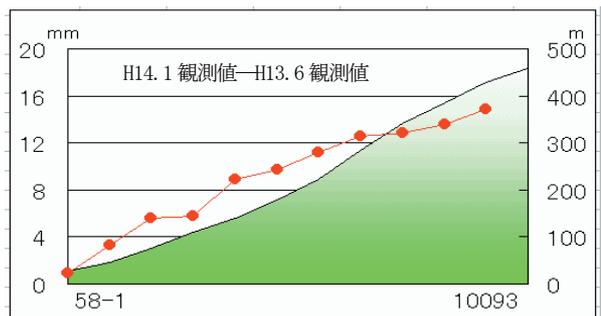


図-5 2回の観測結果の比較 (路線731)

3. 1. 4 レフラクション誤差の計算

レフラクション誤差の計算は、図-3の作業地域図に示す路線のうち、殆ど傾斜のない路線176を除く全ての路線について行った。

計算では、近似式(2)を用い、1測点毎の観測比高及び視準距離は、観測手簿から抽出した。また、測定気温は、観測時に測定した気温を1鎖部毎に平均した値を用い、各測定気温における気温差(50-250 cm)は、次に示す方法で想定した。

(1) 地上50 cmと250 cmの気温差の想定

レフラクション誤差の計算で重要なことは、気温勾配の決め方である。理想的なのは、気温勾配を1測点毎に測定することであるが、現在の水準測量では、気温勾配の測定を行っていない。そこで、今回の計算では、昭和57、58に国土地理院が実施した試験観測の結果(表-3)を用い、各測定気温における気温差を想定した。なお、曇の時の気温差は、晴れの時の1/2として求めた。気温差の想定結果は、表-4に示すとおりで、細部については比例配分した。

表-3 試験観測結果(昭和57、58年)

測定気温	天候	気温勾配を表す式
30℃	晴	$t = 26.2 + 3.4 \cdot Z^{-0.33}$
30℃	曇	$t = 28.0 + 1.8 \cdot Z^{-0.33}$
10℃	晴	$t = 8.87 + 0.78 \cdot Z^{-0.51}$

表-4 気温差(50-250 cm)の想定

		観測時の測定気温 ℃					
		10	15	20	25	30	35
想定気 温差 ℃	晴	0.6	0.9	1.2	1.4	1.8	2.2
	曇	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1

(2) レフラクション誤差の計算結果

路線毎の計算結果は、表-5のとおりである。

路線731の夏の観測は、視準距離が長く気温も高いため、レフラクション誤差は25.7mmで最も大きい。気温の低い冬の観測は、誤差が半分になる。路線730は、731と同じように緩傾斜の路線であるが、視準距離を短くして観測したため、レフラクション誤差は小さい。路線732や177は、急な上りと下りの傾斜が混在した路線のため、全体では誤差が小さい。

表-5 路線毎のレフラクション誤差

路線番号と方向	レフラクション誤差 mm
730 44→10093	+ 4.6
731 58-1→10093	+ 25.7(夏) + 13.1(冬)
732 10112→10093	+ 2.6
164 44→ 52	- 0.2
177 52→ 58-1	- 3.1
175 70-1→ 76-1	+ 4.3

3. 1. 5 環閉合差及び変動量への影響

(1) 環閉合差への影響

計算されたレフラクション誤差を観測比高に補正し、環閉合差を計算すると、図-6のようになる。レフラクション誤差を補正する前の環閉合差(図-4)と比較すると、環I、IIとも閉合差が小さくなる。しかし、環IIは、冬の観測値(●)を使うと許容範囲内に入るものの、夏の観測値(●)では許容範囲を超過する。環IIに関係する路線に、レフラクション以外の誤差が累積していると考えられる。

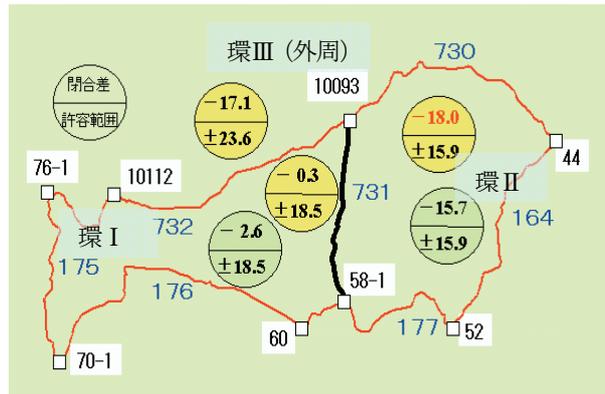


図-6 レフラクション誤差補正後の環閉合差

(2) 変動量への影響

2回の観測比高に、各々のレフラクション誤差を補正し変動量を求めると、レフラクション誤差が全く同じでない限り、補正前の変動量とは異なってくる。

例えば、路線731の場合、夏と冬の観測におけるレフラクション誤差を比較すると、12.6mmの差がある。この差が、変動量に影響してくる。

路線全体のレフラクション誤差が小さくても、変動量に影響する場合がある。図-7は、路線732におけるレフラクション誤差の累積状況を表したものである。路線全体のレフラクション誤差は2.6mmと小さいが、十里木高原付近では、7mm近い誤差が累積している。このように、起伏のある路線では、出発点と最も比高差のある所でレフラクション誤差の累積が最大になる。この累積が2回の観測で異なると、変動量に影響する。

なお、レフラクション誤差の変動量への影響については、次節で詳しく報告する。

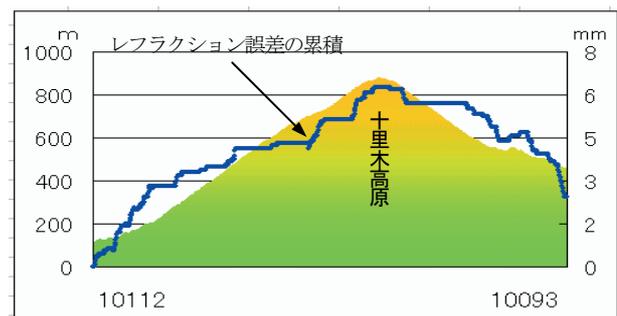


図-7 レフラクション誤差の累積(路線732)

3. 2 中部山岳地域のレフラクション誤差

国土地理院は、平成 12, 13 年度に、第 9 回全国改測作業 (1996 年～) の一環として中部山岳地域の水準測量を実施した。路線の全体図を、図-8 に示す。一部の路線を除き、路線間の比高は 500m 前後あり、とくに路線 187 は野麦峠を越える路線で、「お助け小屋」前にある水準点は、日本一標高が高い (1,672m)。

今回、この地域の観測結果を用いてレフラクション誤差を計算した。また、計算結果を観測比高に補正して、環閉合差や変動量への影響を調査した。

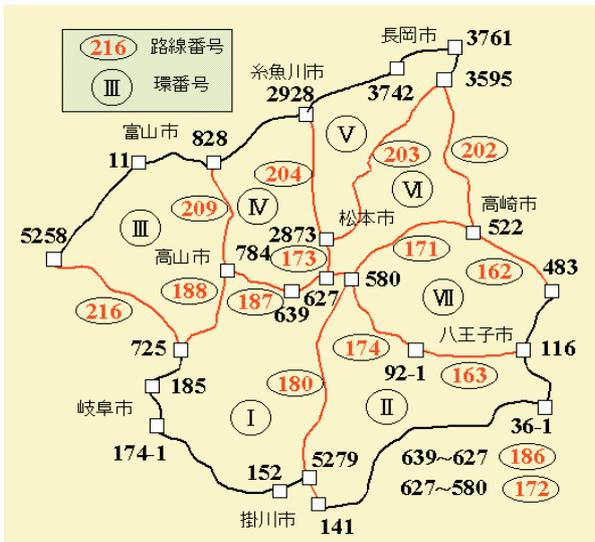


図-8 中部山岳地域の水準路線図

(2) 環閉合差の計算結果

第 9 回全国改測作業結果を用い、図-8 の環 I から環 VII の環閉合差を計算した結果を、図-9 に示す。7 つの環のうち、5 つの環で許容範囲を超過した。

この地域は日本アルプス山岳地帯で、路線には、一部の路線を除いて大きな起伏がある。そのため測点数が増え、観測誤差や器械誤差、レフラクション誤差等が累積したと考えられる。

また、この地域の観測は、平成 12, 13 年の 2 年間で実施している。環閉合差に、地殻変動や地盤変動等が影響したとは考えにくい。

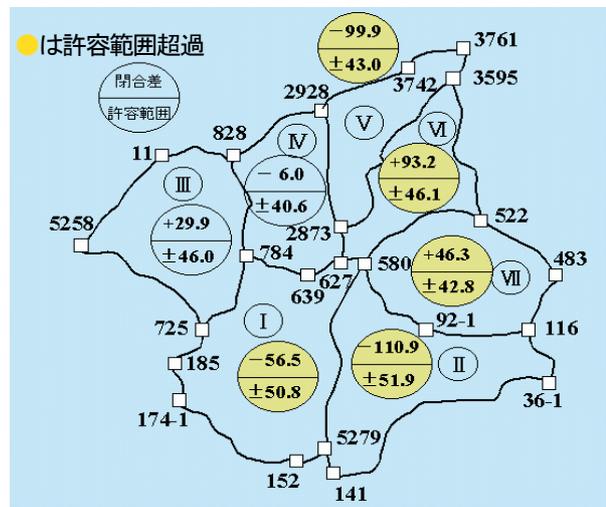


図-9 第 9 回全国改測作業結果による環閉合差

3. 2. 1 観測結果から求めた環閉合差

(1) 環閉合差と観測期間

国土地理院が、明治以来 9 回にわたって実施してきた水準測量の全国改測作業の観測結果を用い、図-8 に示す路線で組成される環の閉合差を計算した。全ての環が、9 回のうち半数近く許容範囲を超過している。

水準測量で、水準点間の往復差に含まれる誤差は、純粋な観測誤差、器械誤差等が主体であるが、環閉合差には、地殻変動、地盤変動、季節・重力等による影響が上積みされる。それは、一つの環を観測するのにある程度の期間がかかるためである。例えば、第 8 回全国改測作業 (1985～1996 年) では、1 つの環を観測するのに平均 2～3 年かかり、3 年以上かかった環もあった。そこで、2 年以内で観測された環と 3 年以上かかって観測された環に分けて、環閉合差による標準偏差を計算すると、表-6 のようになる。標準偏差は、2 年以内で観測された環の方がかなり小さい。

表-6 環閉合差による標準偏差

環の種類	環の数	標準偏差
2年以内で観測	19	1.14 mm / km
3年以上で観測	26	1.64
全体	45	1.45

3. 2. 2 レフラクション誤差の計算

レフラクション誤差の計算は、図-8 の路線番号を付した赤色の路線について行った。ただし、路線 162, 163 の一部は公共測量作業のため、計算を省略した。

計算は、富士山南東地域のレフラクション誤差の計算と同じ方法で行った (「3. 1. 4 レフラクション誤差の計算」参照)。観測路線毎の計算結果を表-7 に示す。

表-7 観測路線毎のレフラクション誤差

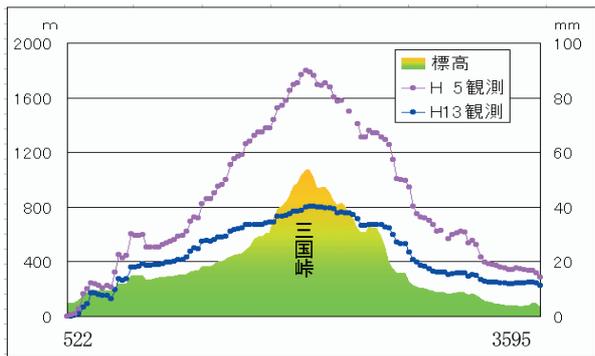
路線番号と方向	レフラクション誤差
162 522→483	- 2.2 mm
163 174 580→116	-16.5
171 580→522	-16.5
172 186 580→639	+ 1.2
173 627→2873	-24.0
180 580→141	-81.9
187 639→784	- 4.7
188 725→784	+36.1
202 522→3595	+11.3
203 3595→2873	+65.7
204 2873→2928	- 8.9
209 784→828	-54.4
216 725→5258	-14.6

表一八は、平成5年、13年に実施された水準測量作業の概要である。観測はほぼ同じ時期に行われているが、平均気温は4℃、平均視準距離は7m異なる。平均視準距離に大きな差があるのは、平成5年は最大視準距離50m、平成13年は電子レベルを使用して最大視準距離40mで観測を実施しているためである。

表一八 観測の概要 (路線202)

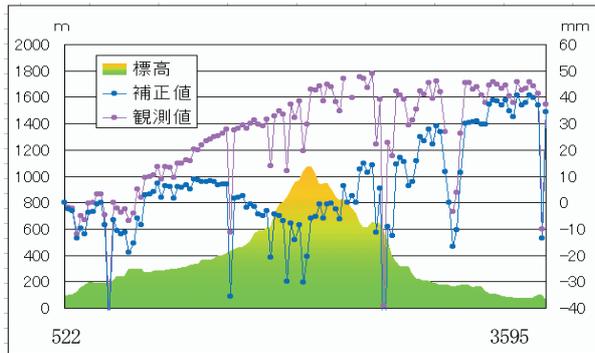
	観測時期	使用器械	平均値	
			気温	視準距離
平成5年	7~9月	ウルト N3	27℃	34m
平成13年	8~9月	アイス DINI	23℃	27m

図一四は、2回の観測結果から求めた、各々のレフラクション誤差の累積状況である。路線全体の誤差はほぼ同じであるが、最も標高の高い三国峠付近では、50mmの差がある。これは、2回の観測の気温、視準距離の差から生じたものである。



図一四 レフラクション誤差の累積 (路線202)

次に、各々のレフラクション誤差を観測比高に補正し、水準点522を基準とした変動量を求めた。図一五は、レフラクション誤差補正前、後の変動状況をグラフに表したものである。2つを比較すると、三国峠付近の変動が明らかに異なるが、どちらが地盤変動を正確に捉えているのかは、断定できない。



図一五 補正前、後の変動グラフ (路線202)

(2) 路線216 (水準点725~5258)

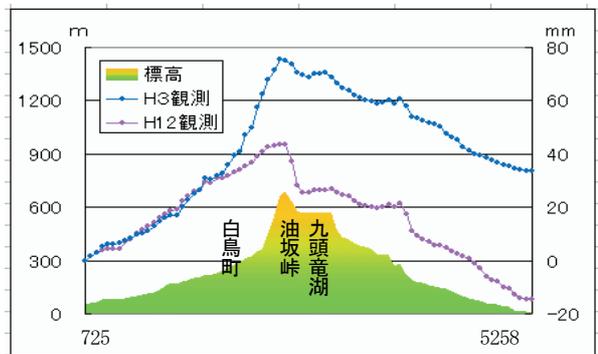
路線216は、岐阜県関市から、白鳥町、油坂峠(標高750m)、

九頭竜湖を通り、福井市に通じる路線である。この路線で平成3年と12年に実施された水準測量の観測結果を用いてレフラクション誤差を計算し、各々の観測比高に補正して、補正前と補正後の変動量を比較した。

表一九 観測の概要 (路線216)

	観測時期	使用器械	平均値	
			気温	視準距離
平成3年	6~7月	ウルト N3	28℃	37m
平成12年	7~8月	アイス Ni002	23℃	37m

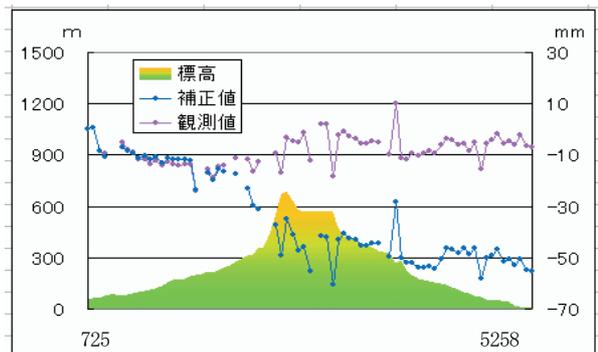
まず、2回の観測を比較すると、平均視準距離は同じであるが、平均気温は5℃の差がある。とくに、白鳥町から油坂峠までの傾斜のある区間で、平成3年の観測は35℃を超える猛暑の中で行われており、平均気温は平成12年の観測時に比べて8℃も高い。



図一六 レフラクション誤差の累積 (路線216)

図一六は、2回の観測結果から求めた、各々のレフラクション誤差の累積状況である。白鳥町から油坂峠までの区間における気温差が、レフラクション誤差の差となり、そのまま路線全体の差(50mm)になった。

次に、各々のレフラクション誤差を観測比高に補正し、水準点725を基準とした変動量を求めた。図一七は、レフラクション誤差補正前、後の変動状況をグラフに表したものである。2つを比較すると、補正前は目立った変動はないが、補正後は、水準点5258に向かってほぼ一定傾斜の沈下になる。



図一七 補正前、後の変動グラフ (路線216)

(3) 御前崎の変動

毎年4回繰り返し実施されている御前崎地区水準測量作業のうち、平成12年度以降の観測結果を用い、水準点140-1～2595間のレフラクション誤差を計算した。計算結果を観測比高に補正し、水準点2595と2601の変動を調査した。



図-18 御前崎の路線図及び断面図

路線は、水準点間の比高が20m前後の所が3鎖部あるものの、全体的には、断面図に示すとおり平坦な路線である。従って、レフラクション誤差は小さく、路線全体の累積は、平成12年4月観測時の2.7mmが最も大きい。また、南向き傾斜の下端部にあたる水準点2601では、夏期の観測時には4～5mm累積する。詳細な地盤変動を調査する御前崎の水準測量では、こうした僅かなレフラクション誤差でも季節変動等に微妙に影響することから、軽視することはできない。

水準点2595, 2601におけるレフラクション誤差の補正前、後の変動を、図-19, 20に示す。水準点2595は、レフラクション誤差を補正しても、変動状況はあまり変わらない。また、水準点2601は、レフラクション誤差を補正すると冬期の沈下現象が消え、季節変動は殆どなくなる。

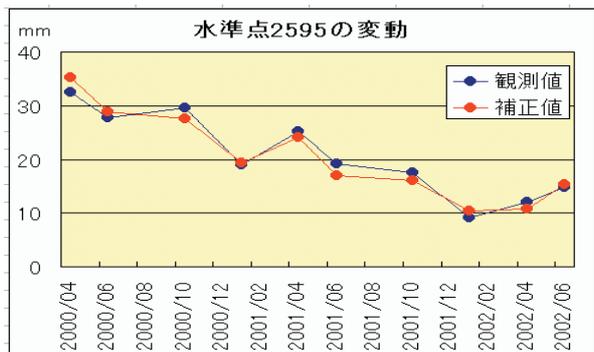


図-19 水準点2595の変動 (不動点140-1)

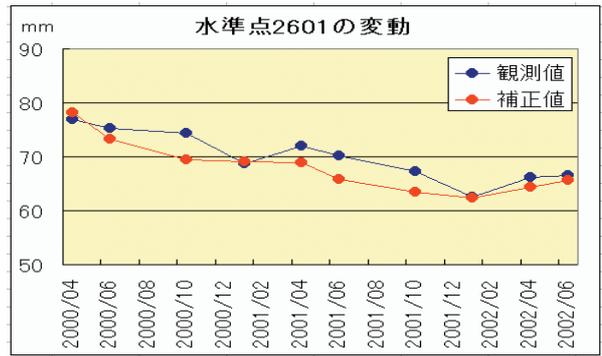


図-20 水準点2601の変動 (不動点140-1)

4. レフラクション試験観測

国土地理院は、平成14年9月に、御殿場地区の強化地域高精度三次元測量・レフラクションの試験観測作業（以下「試験観測作業」という）を実施した。試験観測は、最大視準距離40mと15mで行い、40mの観測と並行してレフラクション測定作業を実施した。

試験観測作業の目的は、観測結果を用いてレフラクション誤差を正確に推定し、第3節で述べたレフラクション誤差の計算・解析結果を検証すること、さらに、レフラクション誤差対策を含めた効率的で、高精度な水準測量の観測方法を考察することである。

4. 1 作業の概要

4. 1. 1 作業地域

作業地域は、静岡県三島市から御殿場市に通じるほぼ南北の路線で、御殿場市（北方）に向かって同一傾斜（2%）で緩やかに上る。路線の周辺は、市街地（8km）を除くと田畑に囲まれた田園地帯である。



図-21 試験観測作業地域図及び観測路線

4. 1. 2 試験観測作業

試験観測作業は、電子レベルのツアイスDINIを2台使用し、最大視準距離40mと15mで実施した。2組の観測は、出来るだけ同時観測で実施するようにしたが、観測所要時間に大きな差があるため、鎖部によっては観測日が異なることもあった。

2組の観測実施状況を比較すると、表-10 のようになる。15mの観測は、当初の予想以上に測点数が多く、40mの観測と比較すると2倍以上である。観測所要時間は、1測点平均1分55秒で、かなり早い。

表-10 往復測点数と観測所要時間

	測点数 (往復) 全路線	観測所要時間 (片道)	
		1 鎖部 平均	1 測点 平均
最大視準距離 40m	784	99 分	2分47 秒
最大視準距離 15m	1608	140 分	1分55 秒

また、観測精度を比較すると、表-11 のようになる。15mの観測では、各測点における較差大による再読定は殆どないが、40mの観測と比較して1km当たりの標準偏差、I-IIの累積、再測率ともやや大きい。その原因として、15mの観測では1測点の観測時間があまりにも早く、測点数も多いため、1測点毎に発生した僅かな観測誤差や器械誤差が累積したと考えられる。しかし、その誤差の詳細は特定できていない。

表-11 観測の精度

	再測率 %	標準偏差 mm / km	I-II 累積 mm
最大視準距離 40m	0	0.43	+ 7.8
最大視準距離 15m	11	0.56	+ 12.9

4. 1. 3 レフラクション測定作業

レフラクション測定作業は、最大視準距離40mによる観測のII号標尺(復観測ではI号標尺)の1~2m後方で、1測点毎に実施した。測定、記録した項目は、次のとおりである。

- 1) 天候(雲量0~10)
- 2) 道路状況
- 3) 気温勾配(地上から50, 100, 160, 250 cm)
- 4) 太陽光の直射, 日陰等



写真-2 温度計センサー



写真-3 温度計記録部

気温勾配測定は、センサーが2本ついた温度計を、3mのポールに2台取り付け付けた装置を使用して実施した。測定時には、風向きや日射しの方向を考慮するとともに、生け垣や建物から少し離れること、出来るだけ鉛直にたてて移

動すること、等に注意した。

なお、温度計は佐藤計量器製作所社製の記憶計SK-L200Tで、器差検定は試験観測作業前に行った。また、観測前には10分程度の余熱時間をとった。



写真-4 気温勾配測定①



写真-5 気温勾配測定②

気温勾配測定結果によると、晴と曇、日陰と日向では、かなり異なった気温勾配になる。50~250 cmの気温差で見ると、曇の日は、晴れの日の2/3で、日陰の時は、日向の時より2~6℃低くなる。図-22は、気温勾配測定結果から求めた日向、日陰(9月4日)、曇の日(9月7日)の気温勾配を、グラフにしたものである。日陰と曇の日でも、僅かに異なった気温勾配になり、地上高50cm以下になると、天候や気温に関わらず急勾配な分布に変わる。

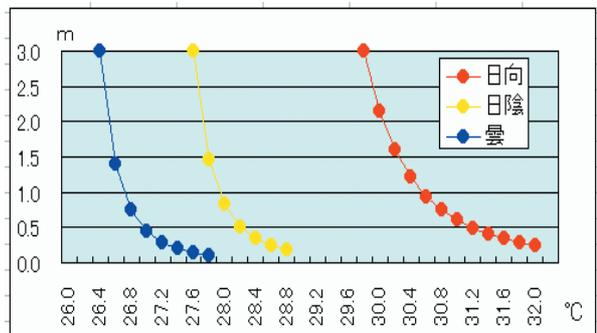


図-22 気温勾配グラフ

- 日向 (地上高160cmの気温30℃) $t = 28.1 + 2.4 \cdot Z^{-0.33}$
- 日陰 (地上高160cmの気温28℃) $t = 25.7 + 1.0 \cdot Z^{-0.33}$
- 曇 (地上高160cmの気温27℃) $t = 27.0 + 1.1 \cdot Z^{-0.33}$

また、気温勾配は、建物や生け垣等の近くでは、風が遮られ屋根の輻射熱の影響も受けて複雑な分布を示す。時には、上方の気温の方が高い、気温勾配の逆転現象も起こる。写真-4のように低い生け垣だけの時は、下方の気温が高くなり、上方との気温差がかなり大きくなる。また、写真-5のように全体的に風通しの良い所では、安定した気温勾配になる。このように気温勾配は、天候や気温だけでなく、周辺環境の僅かな変化にも左右される。

なお、道路の舗装状況や風の強弱は、気温勾配にあまり影響しなかった。

4. 2 レフラクション誤差の計算

レフラクション誤差は、次の3つの方法で計算した。

- 1) 40mと15mの観測比高の差
- 2) 40mの観測比高、測定気温差を用い、近似式(2)より計算
- 3) 40mの観測比高、想定気温差を用い、近似式(2)より計算

各々の計算結果を、表-12に示すとともに、計算の概要、解析結果を計算方法別に報告する。

4. 2. 1 観測比高差による計算

最大視準距離40mと15mの観測比高の差から、1鎖部毎にレフラクション誤差の往復平均値を計算した結果を、表-12の「観測比高差」の欄に示す。

計算では、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つを前提条件にした。

しかし、15mの観測は、1測点の観測時間があまりにも早く、測点数も多かったため、1測点の僅かな誤差が累積したと考えられる。累積した1鎖部毎の誤差は、40mの(ノ)

観測よりも15mの観測の方が、測点数が多い分だけ大きいはずで、2)の前提条件は成り立たない。従って、観測比高差から求めたレフラクション誤差には、この累積の差が含まれている。

4. 2. 2 測定気温差による計算

最大視準距離40mの観測比高と、気温勾配測定で得られた1測点毎の気温差(50-250 cm)を用い、近似式(2)によりレフラクション誤差を計算した。計算は1測点毎に行い、1鎖部毎の往復平均値を表-12の「測定気温差」欄に示す。

これまでは、近似式(2)のaは定数としたが、今回は気温tによる変数とした。ただし、気圧Pは、aに対する影響が小さいため、すべて750mmHgとした。

4. 2. 3 想定気温差による計算

最大視準距離40mの観測比高と、表-4の想定気温差(50-250 cm)を用い、近似式(2)によりレフラクション誤差を計算した。計算結果を表-12の「想定気温差」欄に示す。

表-12 レフラクション誤差の計算結果(「-」は逆転現象 概算標高は40m観測の速報値)

点名	天候	距離 km	観測比高		概算標高 m	レフラクション誤差の計算結果		
			40m	15m		観測比高差	測定気温差	想定気温差
58-1					26.6857			
10073		2.281	18.5432	18.5430	45.2289	-0.2 mm	0.1 mm	0.6 mm
10072		1.955	30.1215	30.1225	75.3517	1.0	1.0	1.7
10071		2.248	35.6112	35.6116	110.9634	0.4	1.3	2.2
10070		1.578	29.9167	29.9168	140.8805	0.1	0.3	0.2
10069		1.993	37.4480	37.4486	178.3294	0.6	0.5	0.2
10068		1.769	44.7676	44.7678	223.0975	0.2	0.9	1.5
10067		2.097	60.5372	60.5378	283.6359	0.6	0.6	1.2
10066		2.249	58.7631	58.7638	342.4003	0.7	1.2	1.5
10065		1.805	43.5816	43.5828	385.9836	1.2	1.2	1.7
10064		2.270	43.1740	43.1755	429.1595	1.5	1.7	1.9
10093		1.910	29.7055	29.7058	458.8650	0.3	1.2	2.2
合計=						6.6	10.0	14.9

4. 3 試験観測結果のまとめ

試験観測作業の結果から求めた各々のレフラクション誤差について、比較検討した。

まず、測定気温差、想定気温差から求めたレフラクション誤差を比較すると、図-23のように、想定気温差から求めたレフラクション誤差の方が少し大きくなる。想定気温差は、同じ場所で連続して測定した気温勾配を用い、しかも地表面付近ではほぼ様な気温勾配と想定したものであるのに対し、測定気温差は、複雑な周辺環境の中を移動しながら1測点毎に測定して得られたものである。2つのレフラクション誤差の差は、この気温差の違いによって生じたものである。

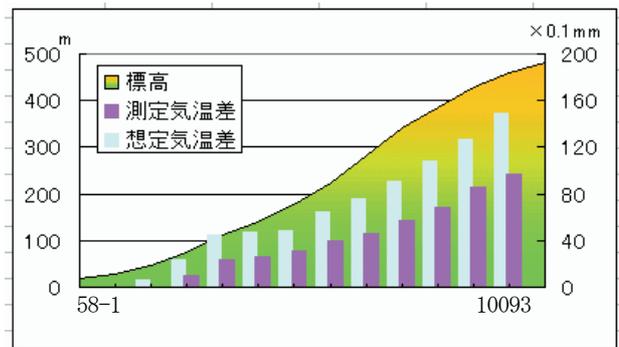


図-23 レフラクション誤差の累積状況1 (測定気温差と想定気温差の比較)

次に、観測比高から求めたレフラクション誤差と、測定気温差から求めたレフラクション誤差を比較した。1鎖部毎に比較したものを図-24に、路線全体の累積状況を比較したものを図-25に示す。鎖部毎に見ると、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る。路線全体では、測定気温差から求めたレフラクション誤差の方が僅かに大きい。各々に差があるのは、15mの観測における観測誤差等の累積が要因の一つと思われる。

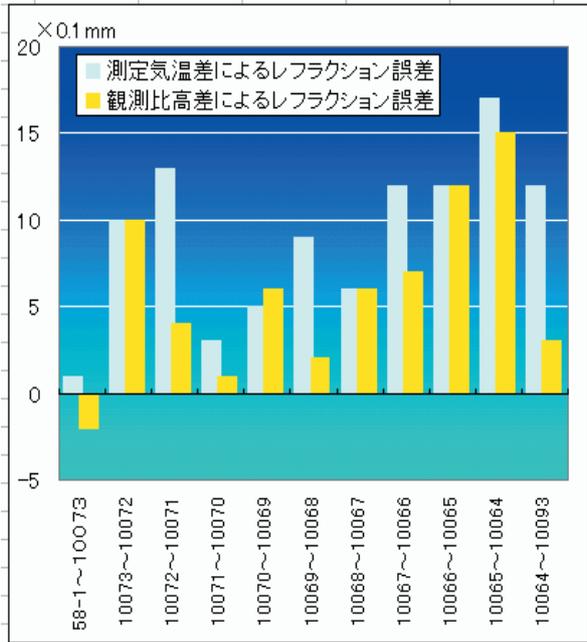


図-24 1鎖部毎のレフラクション誤差の比較

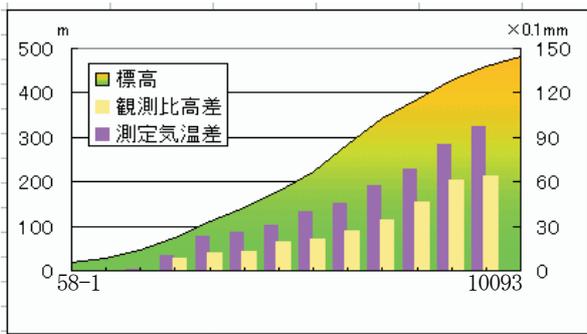


図-25 レフラクション誤差の累積状況2 (観測比高差と測定気温差の比較)

このように、観測比高差から求めたレフラクション誤差には、15m観測における観測誤差が影響し、想定気温差から求めたレフラクション誤差には、実際の気温差との差が影響している。

一方、気温勾配測定では、複雑で変化に富んだ気温勾配を、1測点毎に正確に測定することができた。その気温勾配測定結果から求めた気温差により計算したレフラクション誤差は、レフラクションの理論に最も忠実に従って求めたもので、信頼性は高いと言える。

また、近似式(2)は、厳密に測定された気温勾配を用いることで、正確なレフラクション誤差を計算できる式であることが確認された。しかし、近似式の妥当性を結論付けるには、気温勾配が逆転する厳冬期等、さらに複雑な気象条件下での結果も知る必要がある。

5. 今後のレフラクション誤差対策

5.1 レフラクション誤差対策の課題

レフラクション誤差対策には、観測比高に補正する方法と、観測手法を改善する方法がある。

観測比高に補正する方法では、合理的な計算方法を確立するとともに、今回の試験観測作業のように、気温勾配を正確に測定する必要がある。建物・生け垣、日陰や日向等の複雑な周辺環境と、気温勾配との関係をモデル化するのは困難だからである。しかし、気温勾配を測定するには、1) 作業の非効率生、2) 効率的かつ実用的な気温勾配測定装置の開発、等の課題がある。

観測手法の改善は、とくに視準距離を短くすることである。今回の試験観測作業で、視準距離を短くし過ぎると測点数が増え、1) 作業効率が悪くなる、2) 観測誤差が累積する、ことが実証された。これは、試験観測作業前の予想を上回るものであった。

このように、2つのレフラクション誤差対策には、それぞれに課題がある。これを踏まえて、今後のレフラクション誤差対策として、1) 早急に、効率的で実用的な気温勾配測定装置の開発を進める、2) 当面の誤差対策として観測手法を改善する、こととした。

5.2 レフラクション誤差対策の具体的な考察

そこで、測点数の増加を最小限にして、レフラクション誤差をできるだけ小さくできる観測手法について、具体的に考察した。

5.2.1 最低標尺読定値

図-22の気温勾配グラフを見ると、気温は、地上高60cm付近を下回ると急激に上昇することがわかる。今回の試験観測結果をもとに、詳しく調べたのが表-13である。表を見ると、気温差は、地上高60cmを下回ると4~5倍になる。現在の水準測量作業では、標尺台を使用しても地上高40cmまで視準しており、レフラクション誤差対策としては不十分である。

表-13 地上高の区間毎の気温差

区間 地上高 cm	晴 気温 30℃		曇 気温 27℃
	日向	日陰	
10~60	2.34℃	1.05℃	0.96℃
60~110	0.53	0.23	0.21
110~160	0.27	0.13	0.11
160~210	0.18	0.08	0.08
210~260	0.13	0.06	0.05

表-14 視準距離及び観測比高毎のレフラクション誤差 (近似式(2)により計算)

視準距離 S 観測比高 Δ h		20 m	25 m	30 m	35 m	40 m
		2.0 m	0.08 mm	0.13 mm	0.19 mm	0.26 mm
1.5 m	気温差 最大値 1.8°C	0.06	0.10	0.14	0.19	0.25
1.0 m		0.04	0.07	0.09	0.13	0.17
0.5 m		0.02	0.03	0.05	0.06	0.08
2.0 m		0.05 mm	0.07 mm	0.11 mm	0.14 mm	0.19 mm
1.5 m	気温差 平均値 1.0°C	0.04	0.05	0.08	0.11	0.14
1.0 m		0.02	0.04	0.05	0.07	0.09
0.5 m		0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

5. 2. 2 最大視準距離

表-14は、今回の気温勾配測定結果から求めた1測点の気温差(50-250 cm)の最大値(1.8°C)と、全測点の平均値(1.0°C)における視準距離、観測比高毎のレフラクション誤差を計算したものである。気温差は、気温が高い日に生け垣等に隣接すると、地面近くの気温が上昇して2°C前後になることもあるが、通常の場合、1.8°Cを超えることは少ない。今回、レフラクション誤差対策を考察するにあたって、レフラクション誤差が0.1 mmを超えない範囲を一つの基準にした。表-14の■の網掛け部分が、0.1 mm以下の範囲である。

視準距離35m以上では、気温差に関わらず1測点の観測比高が1mを超えると、レフラクション誤差は0.1 mmを超える。視準距離25mでは、観測比高が1.5m以内であればレフラクション誤差は0.1 mmに達しないが、あまり視準距離を短くすると、表-10, 11に示すように、作業効率や観測の精度が悪くなる。

視準距離30mでは、気温差1.8°Cの場合に観測比高が1.1 mを超えると、レフラクション誤差は0.1 mに達する。しかし、気温差が1.8°Cになることは少ないし、視準距離30 mでは、1測点の観測比高が1.1 mを超えることは少ない。例えば、最大視準距離25mで行われた水準測量作業(平成13年度相模・駿河湾地区)で、1測点の観測比高が1.1 mを超えたのは全測点の30%で、水準点間の観測比高が10 m未満の平坦な区間では16%ある。以上のことから最大視準距離を30mにした場合、レフラクション誤差は完全に消去できないが、水準点間での累積は小さいと思われる。

5. 3 今後のレフラクション誤差対策

以上の検討結果を踏まえ、強化地域高精度三次元測量における当面のレフラクション誤差対策として、以下の2つが考えられる。

- 1) 最大視準距離を30mとする。(現行40m)
- 2) 最低標尺読定値を次のとおり大きくする。
 - ・標尺台使用時は40 cmとする。(現行30 cm)
 - ・水準点及び固定点の場合は50 cmとする。(現行40 cm)

6. まとめ

今回の調査・解析で、レフラクション誤差は、環閉合差や変動量に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。また、試験観測作業では、複雑な気温勾配を1測点毎に測定してレフラクション誤差を求めると、かなり正確なレフラクション誤差を推定することが出来た。

本論では、当面のレフラクション誤差対策として観測方法の改善を提案した。しかし、本来、レフラクション誤差対策としては、観測比高に補正する方法が望ましいと思われる。観測手法を改善しても、レフラクション誤差は完全に除去できないし、あまり視準距離を短くすると、作業効率が低下し、観測誤差等が累積する可能性があるからである。

今後、レフラクション誤差の補正を実用化するために、様々な気象条件下での試験観測を重ねて合理的な計算方法を導き出すとともに、効率的な気温勾配測定装置の開発を進めていく考えである。

謝 辞

今回の調査・解析及び試験観測作業を進めるにあたって、井上康司氏、箱岩英一氏、今給黎哲朗氏、測地部機動観測課諸氏には、多大なご指導、ご協力を頂いた。以上の方々に心から感謝致します。

参 考 文 献

井上康司 (2000) : 報告書, 水準点の変動について

大滝三夫・中根勝見 (1998) : 水準測量, 東洋書店

大滝三夫 (2002) : 報告書

a. 水準測量におけるレフラクション補正について

b. レフラクション補正と環閉合差

c. 水準測量の精度と許容範囲について

d. 御殿場地区レフラクション測定作業報告

中堀義郎 (1988) : 精密水準測量, 現代測量学第4巻 測地測量①, 299-351, 日本測量協会

測地部測地第三課 (1983) : 報告書, 水準測量レフラクション試験観測作業報告書