

距離標準比較基線場のトレーサビリティの体系・標準化について About a System and Standardization of Traceability on Distance Standard Baseline

測地部 野神 憩・都筑三千夫¹

Geodetic Department Kei NOGAMI and Michio TSUZUKU

要 旨

国土地理院では、光波測距儀（EDM）の検定場として基線場を維持管理しているが、計量法における計量標準供給度（トレーサビリティ）との繋がりが確立されていない。そのため、計量法で確立されている国家計量標準（国際標準）との繋がりを持ち、ISO9000 で要求されている「国家標準との間に公的に有効な関係を持つ認定された装置を用いて校正、調整する」ことを実現し、測量行政機関として、検定機器等のトレーサビリティ体系を確立する必要性がある。

このため、独立行政法人産業技術総合研究所の実用標準器で校正された光波測距儀（EDM）を国土地理院の標準機とし、これを用いて、他の EDM、GPS 測量機及び基線場のトレーサビリティの確立を目指している。

本研究では、国家計量標準に定められている『長さ』に基づき、屋内で校正された EDM (Leica TCA2003) を用いて、屋外で観測された値が、測量・土木分野における基準距離として、どこまで同様の精度として取扱うことが妥当であるのか、国土地理院の距離標準比較基線場（約 1 km）にトレースするための方法ならびに測定精度、不確かさについて調査を実施した。併せて EDM による観測値が GPS 観測値にトレース可能であるのか調査したものである。

1. はじめに

EDM の校正は現在、独立行政法人産業技術総合研究所（以下、「産総研」という。）はじめ JCSS 登録認定機関において屋内において行われている。そこで、加算定数と機械定数という校正値が求められるようになった。この校正値に対しては不確かさ（uncertainty）と呼ばれる定量的な値が付与されている。不確かさは測定値のばらつきはもちろん、測定を行なう環境や技術力など測定に関わる全てを考慮した値として求められるものである。

産総研における EDM の屋内校正は、気象測定装置が密に配置された地下トンネル状の施設内で、温度、湿度、気圧、CO₂ 濃度の変化が極めて少ない環境において行われている。そこで得られた校正値は、校正を行った長さ（200m）以内において国家計量標準にトレースされた標準により校正されたことを示すものである。

本研究では、計量法に基づき屋内で校正された EDM が屋外の観測においても、同様の精度として取り扱うことが妥当であるのか、また屋内から屋外への繋がりと測定距離の延長（距離の拡大）について検討する。EDM 観測と同時に GPS による観測を行い、GPS へのトレース方法についても検討を行った。

EDM 観測は 1 日を通して行い、複数日に亘り数百回の測定を繰り返した。EDM の性能を気象条件、設置誤差、繰り返し測定等から、測定に関する不確かさを求めた。また、GPS 観測は EDM とほぼ同じ時刻に観測し、その結果を比較する方法を用いて検討した。

2. 距離標準比較基線場と基線長測定の現状

本研究で使用したのは国土地理院距離標準比較基線場（通称：高岡基線場）である。土浦市高岡にある自転車専用道路脇に設置されており、1 km の直線上に数十～数百 m 間隔で端点が 10 点（No. 1, No. 2, ~No.10）設置されている（写真-1, 図-1）。端点の構造は、ステンレス製の円柱（ピラー）で、地下数 m の深さまで打ち込まれており安定している。また、EDM を据える架台は、繰り返し観測を行う際に設置誤差が生じないように工夫も施されている。No. 1 ~No.10 の基線長は 1030.011 m であり、全ての端点が直線上になるように配置されている。

基線場とは、基本測量及び公共測量に使用する EDM や GPS 測量機の性能及び動作の確認を行う施設と定義されている。従来、基線場の改測においては、EDM は KERN 社製 ME5000 を使用し、温度・湿度は 0.2°C 以下の測定が可能なもの、気圧計は 1 hPa 以下、周波数カウンターは 1 Hz の周波数を読定できるものを用いることとされていた。検定機器等のトレーサビリティ体系構築を目指すためには、改測に使用する機器は国家計量標準との関連を明確にする必要があるが、ME5000 は国土地理院のレーザー干渉計を介して国家標準である「よう素安定化 He-Ne レーザー」とトレースをとることはできるが、産総研の光波距離計との直接校正が出来ない。そのため、この部分については過去の実績やメーカーの公称精度を信頼しているに過ぎなかった。

本研究で使用している EDM (Leica TCA2003) は、市販されている汎用 EDM のなかで最高精度とされている。公称精度は ME5000 よりは低いが、1 測定に要する時間が約 2 秒という速さや、設置の容易さのメ

リットがある。この TCA2003 は産総研で校正可能であり、国家標準のよう素安定化 He-Ne レーザーと繋がりをもつことが出来る。



写真-1 距離標準比較基線場

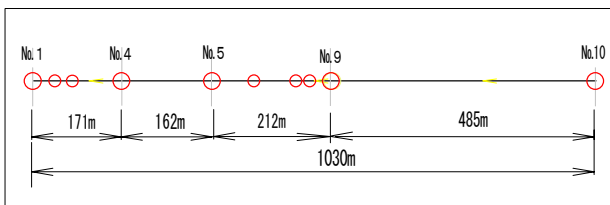


図-1 高岡基線場 端点配置概略図

3. 気象測定についての検討

EDM の測定値は、光路上の空気中の屈折率によって大きく変動する。空気中の屈折率を求めるためには EDM が発するレーザーの波長から群屈折率を求め、そして測定時の気象要素を測定して屈折率を算出しなければならない。温度、湿度、気圧の変動がすべて影響するのが屈折率であるので、屈折率の変動とばらつき的大小が測定値に影響を与える。国際的な標準の式は Barrell&Sears 式を用いるのが一般的である。以下にその式を示す。

$$n_g = 1 + \left(287.6115 + \frac{3 \times 1.62887}{\lambda^2} + \frac{5 \times 0.01360}{\lambda^4} \right) \times 10^{-4}$$

$$n = 1 + \left(n_g^{-1} \times \frac{(1 + \alpha T)}{(1 + \alpha t)} \times \frac{P}{760} - \left(0.055 \times \frac{e}{(1 + \alpha T)} + 1 + \alpha T \right) \right) \times 10^{-6}$$

n_g : 群速度に対する屈折率 n : 屈折率

P : 大気圧 (hPa) t : 気温 (°C)

e : 水蒸気圧 (mm Hg) α : $1/273.15$

T : 機器が標準とする温度

Leica(TCA2003) 標準群屈折率 : 1.0002817

基本的には上記の式から屈折率を求めるが、各測量機器メーカーは、上式をもとに自社製品の標準状態からの差を気象補正式として算出している。本研究の補正式はメーカー推奨の式を用いた。

光路上の屈折率 (n) は光路上全体での屈折率であり、正確には

$$n = \frac{1}{S} \int_0^S n ds$$

でなければならないが、全光路長の気象測定を行うのは、不可能である。そこで、同基線場における気象測定装置設置台数を検討するため、2004年8月にNo.1~No.10の距離をEDMで測定し、温湿度計をNo.1~No.10までの距離標準比較基線場の光路長を10箇所に分割し約100m間隔の11箇所に、光路に近い高さ約2mの位置で計測を行った。温度計・湿度計は一体型となっており、使用した11個は全て校正を受けている。測定した気象データをもとにどのように補正することが有効かを検討した。光路上11点での補正距離と器械点・反射点での補正距離との較差を比較して11箇所の気象要素で補正した値と、No.1, No.10の2箇所で補正した場合の距離差は最大で1mm以内であった。

この実験結果と基線場の立地条件の良さから判断して、温度計、湿度計は器械点と反射点の2点間の平均値を使用し、No.1とNo.10の高低差が約1.5mであることから、気圧計は器械点のみに設置することとした。

4. 観測

本研究における EDM 観測は、2004年冬季、2005年秋季と時節を変えて行った。各年とも4日間にわたり観測を行った(表-1)。

観測方法は、EDM (Leica TCA2003) を用いて、校正時と同程度の200mまでの距離にトレースを行い、次に200mの2倍である400m程度に拡大し、順次1000m程度まで延長する方法とした。

観測は10測定を1組とし、それが3回の計30測定を1セットの観測とした。観測は、午前11時頃から日没前後まで約1時間の間隔で1日あたり5セット行った。セット間は30分以上間隔を開けるようにした(表-2)。

EDM による10測定の平均値に気象要素(10測定の最初と最後の2回測定)の平均を用いて気象補正を行い、校正値である機械定数と距離に乗じる比例定数を補正したものをを用いた。

EDM は直射日光や風を遮るため、観測時には天幕で覆った。またピラーへの設置には常に同じ基準台やピラー接続ピンを用いるとともに、その向きや設

置高を同一にするなど設置誤差を出来るだけ少なくするように配慮した。更に個人差をも考慮し、同一人による設置作業と観測を行うなど注意を払った。

気象補正のための気温、気圧、湿度の測定は、10測定のうち最初と最後に測定された平均値を用いて EDM の観測値に補正をした。気象要素は校正された温湿度計、気圧計を用い、器械点と反射点において測定を行った。

屋外の基線場は、屋内に比べて気象の変化、測定における設置誤差など観測に際して不確定要素が多い。そのため不確かさの評価については、機器設置による個人差、気象測定器の信頼度、校正値に含まれる不確かさを見積った。

また、TCA2003 観測の前に ME5000 の観測を行って、その値は参照値として利用する。観測は3回測定を1セットとし、2セットの計6回の測定を行った(表-3)。

一方、GPS による観測は、500m、1000mの距離で EDM 観測を行った同時時間帯に静止観測を行い、EDM による結果との比較を行った。GPS 受信機は Trimble5700 で GPS アンテナは、Trimble Choke Ring Antenna を使用し、解析時間(1~6時間)、使用暦、サンプリング間隔、使用周波数(L1, L1&L2)、基線解析ソフトウェアの種々の違いについて比較検討を行った。GPS の観測前後に比較用に TCA2003 の観測を30分間隔で行った(表-4, 5)。

表-1 観測スケジュール

月日	天候	最高気温(℃)	最低気温(℃)	作業内容
2004年度の観測				
12月11日	晴れ	17.1	4.3	ME5000, TCA2003による No.4→No.5, No.4→No.1 方向観
12月14日	晴れ	10.0	1.9	ME5000, TCA2003による No.5→No.9, No.5→No.1 方向観
12月17日	晴れ	12.3	3.1	ME5000, TCA2003による No.9→No.10, No.9→No.1 方向観
1月8日	晴れ	7.9	-2.8	ME5000, TCA2003による No.1→No.10方向観測
2005年度の観測				
10月11日	曇り	21.3	16.5	TCA2003による No.4→No.5, No.4→No.1 方向観
10月12日	晴れ	22.0	14.5	ME5000, TCA2003による No.5→No.9, No.5→No.1 方向観
10月13日	晴れ	22.4	10.3	ME5000, TCA2003による No.9→No.10, No.9→No.1 方向観
10月14日	晴れ	24.7	13.1	TCA2003による No.1→No.10方向観測
10月15日	曇り	24.6	18.2	GPS, TCA2003の1時間観測
10月16日	雨	20.2	16.5	GPS, TCA2003の3時間観測
10月18日	雨	16.6	13.9	GPS, TCA2003の6時間観測
10月19日	曇り	17.6	12.2	GPS, TCA2003の3時間観測
10月20日	晴れ	22.1	10.0	GPS, TCA2003の1時間観測
10月21日	晴れ	21.2	12.6	ME5000による No.4→No.5, No.4→No.1 方向観

※ 最高最低気温は(社)日本気象協会より

表-2 EDM(TCA2003)測定回数

方向	観測日	観測時間	総測定回数
2004年度の観測			
No.4→No.5	12月11日	12:00-16:35	5 SET=150測定
No.4→No.1		12:13-16:50	5 SET=150測定
No.5→No.9	12月14日	12:00-16:47	5 SET=150測定
No.5→No.1		12:11-16:47	5 SET=150測定
No.9→No.10	12月17日	12:00-16:35	5 SET=150測定
No.9→No.1		12:12-16:50	5 SET=150測定
No.1→No.10	1月8日	12:12-16:45	5 SET=150測定
2005年度の観測			
No.4→No.5	10月11日	11:30-16:35	5 SET=150測定
No.4→No.1		11:42-16:45	5 SET=150測定
No.5→No.9	10月12日	11:00-16:35	5 SET=150測定
No.5→No.1		11:11-16:46	5 SET=150測定
No.9→No.10	10月13日	11:00-16:35	5 SET=150測定
No.9→No.1		11:12-16:47	5 SET=150測定
No.1→No.10	10月14日	11:00-16:35	5 SET=150測定

表-3 EDM(ME5000)測定回数

観測日	方向	観測時間	総測定回数
2004年度の観測			
12月11日	No.4→No.5	11:00-11:15	2 SET=6測定
	No.4→No.1	11:20-11:40	2 SET=6測定
12月14日	No.5→No.9	10:50-11:05	2 SET=6測定
	No.5→No.1	11:08-11:25	2 SET=6測定
12月17日	No.9→No.10	10:40-11:05	2 SET=6測定
	No.9→No.1	11:00-11:25	2 SET=6測定
1月8日	No.1→No.10	11:00-11:20	2 SET=6測定
2005年度の観測			
10月11日	No.4→No.5	9:40-9:55	2 SET=6測定
	No.4→No.1	10:00-10:15	2 SET=6測定
10月12日	No.5→No.9	10:00-10:15	2 SET=6測定
	No.5→No.1	10:20-10:35	2 SET=6測定
10月13日	No.9→No.10	10:00-10:15	2 SET=6測定
	No.9→No.1	10:17-10:30	2 SET=6測定
10月14日	No.1→No.10	10:00-10:15	2 SET=6測定

表-4 EDM(TCA2003)測定回数 (EDM・GPS 交互観測時)

観測日	方向	観測時間	総測定回数
10月15日	No.1→No.10	11:30-12:35	10測定×3回×3SET=90測定
	No.1→No.10	16:00-17:05	10測定×3回×3SET=90測定
10月16日	No.1→No.10	14:00-17:05	10測定×3回×7SET=210測定
10月18日	No.1→No.10	11:00-17:05	10測定×3回×13SET=390測定
10月19日	No.1→No.10	9:30-12:35	10測定×3回×7SET=210測定
10月20日	No.9→No.10	9:42-9:47	10測定×3回×1SET=30測定
	No.9→No.10	14:30-14:35	10測定×3回×1SET=30測定
	No.9→No.1	9:30-9:35	10測定×3回×1SET=30測定
	No.9→No.1	14:41-14:46	10測定×3回×1SET=30測定

表-5 GPS 観測時間 (EDM・GPS 交互観測時)

観測日	セッション名	基線	観測時間(UTC)	解析時間
10月15日	288A	No.1→No.10	0:30-1:30	1時間
	288C	No.1→No.10	5:00-6:00	
10月16日	289A	No.1→No.9→No.10	0:30-3:30	3時間
10月18日	291A	No.1→No.9→No.10	2:00-8:00	6時間
10月19日	292B	No.1→No.9→No.10	5:00-8:00	3時間
10月20日	293A	No.1→No.9→No.10	3:00-4:00	1時間
	293B	No.1→No.9→No.10	6:10-7:10	

5. EDM 観測結果

EDM による観測結果を表-6~13, 図-2~8に示す。

200m以内の区間 (No.4→No.5, No.4→No.1) では、時節を変えた TCA2003 の観測には非常に高い再

現性を見せた。激しい気象変動にも気象補正は完全に行われているものと考えられる。この区間距離においては時間帯を選ばずに観測ができる。SD値でも0.2mmであり屋内で校正された機器での屋外観測でのトレースは可能であると思われる。

200m～600mの区間(No.5→No.9, No.5→No.1, No.9→No.10, No.9→No.1)では観測年度により1.0mm前後の差が見られる。また1日を通して長さの減少傾向が見られ、この区間距離では完全な気象補正は行われていないと思われる。SD値も1mmで観測を行うためには1日の中でどの時間帯が確からしいか

見極めるが必要になる。

1000m付近(No.1→No.10)では、観測年度により3.0mm程度の差が見られる。また1日を通しての長さの減少傾向はより顕著に現れる。1日の測定値でどの時間帯が確からしいか判断は難しい。SDも2mmに達してTCA2003の観測では1000m以上の長さは確からしい値を求めることは非常に困難であると思われる。

2005年度は、2004年度に比べ、長距離においての基線値は全体的に長くなっている。すなわち気温の高い時期と低い時期との差がある。

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	161.5321	161.5321	0.0000
最大値	161.5323	161.5325	
最小値	161.5319	161.5319	
最大値-最小値	0.0004	0.0006	
標準偏差(SD)	0.0001387	0.000223	

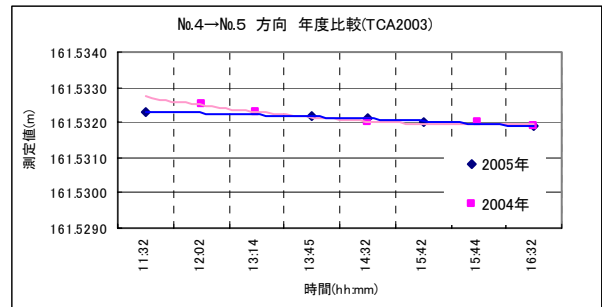


表-6 図-2 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.4→No.5)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	171.3859	171.3859	0.0000
最大値	171.3860	171.3861	
最小値	171.3856	171.3857	
最大値-最小値	0.0004	0.0004	
標準偏差(SD)	0.0001242	0.0001457	

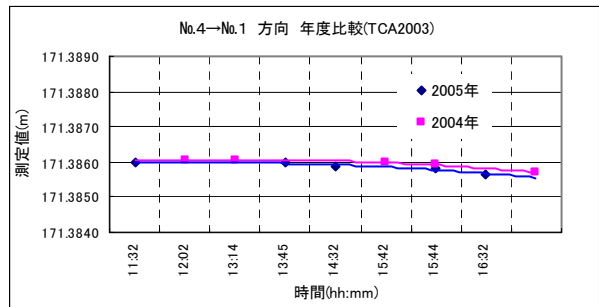


表-7 図-3 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.4→No.1)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	212.0913	212.0904	0.0009
最大値	212.0914	212.0909	
最小値	212.0912	212.0898	
最大値-最小値	0.0002	0.0011	
標準偏差(SD)	0.0000775	0.0003262	

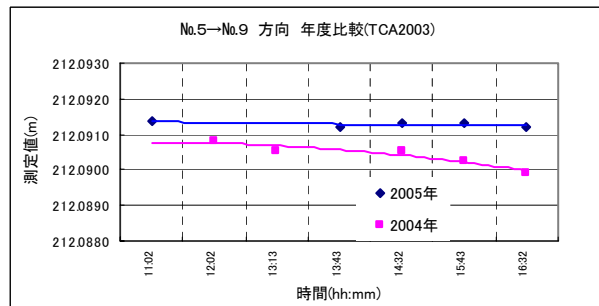


表-8 図-4 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.5→No.9)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	332.9176	332.9168	0.0008
最大値	332.9180	332.9172	
最小値	332.9174	332.9162	
最大値-最小値	0.0006	0.001	
標準偏差(SD)	0.0002264	0.0003602	

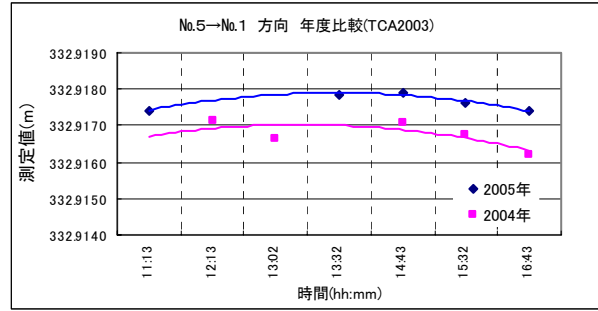


表-9 図-5 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.5→No.1)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	485.0044	485.0033	0.0011
最大値	485.0056	485.0043	
最小値	485.0036	485.0018	
最大値-最小値	0.002	0.0025	
標準偏差(SD)	0.0006435	0.0008271	

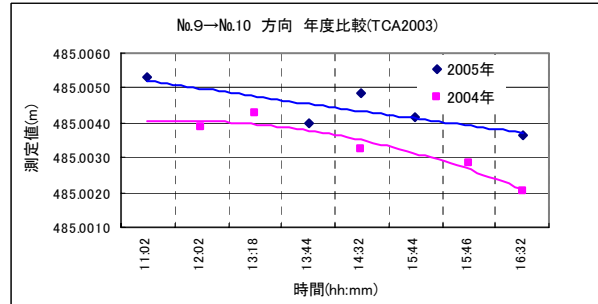


表-10 図-6 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.9→No.10)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	545.0087	545.0075	0.0012
最大値	545.0094	545.0083	
最小値	545.0075	545.0063	
最大値-最小値	0.0019	0.0020	
標準偏差(SD)	0.0006413	0.0006908	

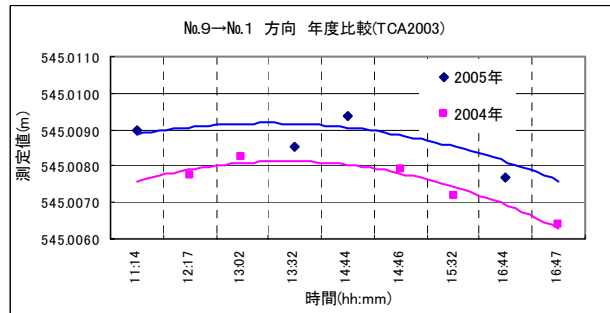


表-11 図-7 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.9→No.1)

表-12 EDM (TCA2003) 観測結果 (No.1→No.10)

年度	2005年(m)	2004年(m)	'05年と'04年の差
平均値	1030.0138	1030.0111	0.0027
最大値	1030.0169	1030.0125	
最小値	1030.0116	1030.0094	
最大値-最小値	0.0053	0.0031	
標準偏差(SD)	0.0017718	0.0011637	

表-13 EDM (TCA2003, ME5000) 観測結果

方向	年度	TCA2003(m)	ME5000(m)
4→5	2005年	161.5321	161.5314
	2004年	161.5321	161.5322
4→1	2005年	171.3859	171.3864
	2004年	171.3859	171.3869
5→9	2005年	212.0913	212.0912
	2004年	212.0904	212.0903
5→1	2005年	332.9176	332.9174
	2004年	332.9168	332.9176
9→10	2005年	485.0044	485.0048
	2004年	485.0033	485.0042
9→1	2005年	545.0087	545.0098
	2004年	545.0075	545.0072
1→10	2005年	1030.0138	1030.0155
	2004年	1030.0111	1030.0120

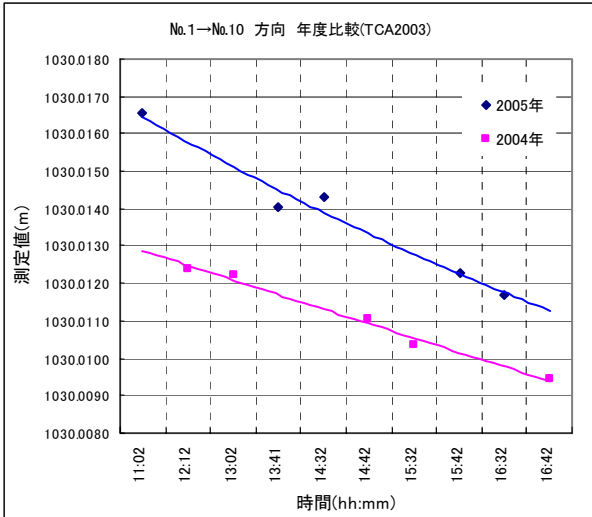


図-8 EDM (TCA2003) 観測結果 (No. 1 →No.10)

6. EDM 観測とその不確かさの算出

6. 1 誤差と不確かさ

測定には誤差が含まれる。その『誤差(error)』というのは測定値と真値との差であり、真値がわからなければ、個々の測定値の誤差はわからない。『不確かさ(uncertainty)』という表現は真値がわからなくても測定された値の信頼度(または測定の疑わしき)がどのくらいかを数字で表したものである。個々の測定器の標準不確かさを各々算出して全てを見積もったものを合成標準不確かさとよぶ。

6. 2 気象補正と定数補正

当該基線場の高低差や植生・地物等の立地条件の良さから判断して、温度計、湿度計は器械点と反射点の2点間で測定するものとし、気圧計は機械点のみに設置した。気象補正式はメーカー推奨の式(下記)を用い、これによって求めた補正值に対して距離に準じる比例定数と器械とミラーの中心位置のズレである機械特性とも言える機械定数を補正することによってDを求める。比例定数と機械定数は校正された値を使用する。

TCA2003 気象補正式(単位 ppm)

$$\textcircled{1} \quad 281.78 - \left(\frac{0.29066 \times P}{1 + \frac{T}{273.15}} - \frac{4.126 \times 10^{-4} \times h}{1 + \frac{T}{273.15}} \right) \times 10^x$$

$$X = \frac{7.5 \times T}{237.3 + T} + 0.7857$$

T: 温度(°C) P: 気圧(hpa) h: 湿度(%)

$$\textcircled{2} \quad D = (1 + (D' \times \text{気象補正} \angle D)) \times \text{比例定数} + \text{機械定数}$$

6. 3 測定における標準不確かさと合成標準不確かさ

気象補正はP(気圧), T(温度), h(湿度)で空気中の屈折率を補正する。これを不確かさの成分として表しu(P), u(T), u(h)とおく。また気象補正を行った値に校正值である比例定数を乗する。この定数の不確かさの成分でu(S)とする。機械定数も同様に成分としてu(a)とする。これらの要因以外では繰り返し測定の不確かさ u(Rp)と機械設置の不確かさ u(m), 周波数変動の不確かさ u(f)とおく。ただし周波数変動においては本観測では測定不能のため省略している。

観測値Dを関数で表すとD=f(P T h S)である。(P T h S a Rp mは不確かさのx成分)

このx成分の不確かさを u(xi)とすると、合成標準不確かさ ucは以下のように示される。

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^2 \cdot u^2(P) + \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2 \cdot u^2(T) + \left(\frac{\partial f}{\partial h}\right)^2 \cdot u^2(h) + \left(\frac{\partial f}{\partial S}\right)^2 \cdot u^2(S) + u^2(a) + u^2(Rp) + u^2(m)}$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = \frac{0.29066}{\left(1 + \frac{T}{273.15}\right)} \times D' \times 10^{-6}$$

$$\frac{\partial f}{\partial T} = \frac{0.29066 \times P}{\left(1 + \frac{\Delta T}{273.15}\right)^2} \times D' \times 10^{-6} \quad (2 \text{項目省略})$$

$$\frac{\partial f}{\partial h} = \frac{4.126 \times 10^{-4}}{\left(1 + \frac{T}{273.15}\right)} \times 10^x \times D' \times 10^{-6}$$

$$X = 7.5 \times \frac{T}{273.3 + T} + 0.7857$$

各観測距離におけるEDMの不確かさを評価するためには、観測に関わった要素の標準不確かさの成分を求めておく必要がある。表-8にはEDM, 気象測定器, 個人差について求めた値を記す。観測における標準不確かさは1日の観測の標準偏差(SD)から求める。

1) 空気屈折率の標準不確かさ

- ① 気圧の標準不確かさ u(P) …校正証明書による
- ② 気温の標準不確かさ u(T) … //
- ③ 湿度の標準不確かさ u(h) … //

2) EDM 標準不確かさ

- ① 比例定数の標準不確かさ u(S) …校正証明書による
- ② 機械定数の標準不確かさ u(a) … //

3) EDM 測定による変動不確かさ

1日の観測値の標準偏差(SD)とする。

4) 機械設置または設置者による変動

EDM及びミラーにおける設置誤差と設置者による変動は機器をピラー上に設置していること、機器の

向きは常に同方向にすること，ピラーとの接続ピンを同一にすることなどで極力排除している．本観測では最大の誤差として $u(m)=0.01\text{ mm}$ として計上する．

これらの成分をもとに各距離における合成標準不確かさを求めた結果が表-9である．表-10は2004年データである．No.4→No.1方向では171.3860mと一致し，200m以内では非常によい再現性を示した．結果，屋外において観測した距離で信頼が保てる限界は200m以内であると思われる．

表-14 標準不確かさ各成分

気象測定器	$u(T)=0.15^\circ\text{C}$ $u(P)=0.05\text{hPa}$ $u(h)=1.25\%$	EDM	$u(S)=0.26\times 10^{-6}$ $u(a)=0.04\text{mm}$
測定	$u(Rp)=SD$ $u(f)=\text{測定不可}$	個人差	$u(p)=0.01\text{mm}$

表-15 各距離における EDM の合成標準不確かさ (2005年)

方向	合成標準不確かさ u_c	距離に対する不確かさ(m)	(mm)
No.4→No.5 (162m)	$u_c=(9.06\times 10^{-14}\times D^2+0.0210\text{mm}^2)^{1/2}$	161.5321 ± 0.00029 包含係数 $K=2$	$\pm 0.29\text{mm}$
No.4→No.1 (171m)	$u_c=(9.07\times 10^{-14}\times D^2+0.0171\text{mm}^2)^{1/2}$	171.3860 ± 0.00026 包含係数 $K=2$	$\pm 0.26\text{mm}$
No.5→No.9 (212m)	$u_c=(9.03\times 10^{-14}\times D^2+0.0076\text{mm}^2)^{1/2}$	212.0914 ± 0.00017 包含係数 $K=2$	$\pm 0.17\text{mm}$
No.5→No.1 (332m)	$u_c=(8.98\times 10^{-14}\times D^2+0.0528\text{mm}^2)^{1/2}$	332.9177 ± 0.00046 包含係数 $K=2$	$\pm 0.46\text{mm}$
No.9→No.10 (485m)	$u_c=(8.97\times 10^{-14}\times D^2+0.4164\text{mm}^2)^{1/2}$	485.0045 ± 0.00129 包含係数 $K=2$	$\pm 1.29\text{mm}$
No.9→No.1 (545m)	$u_c=(8.99\times 10^{-14}\times D^2+0.4126\text{mm}^2)^{1/2}$	545.0089 ± 0.00128 包含係数 $K=2$	$\pm 1.28\text{mm}$
No.1→No.10 (1030m)	$u_c=(8.90\times 10^{-14}\times D^2+3.1381\text{mm}^2)^{1/2}$	1030.0141 ± 0.00354 包含係数 $K=2$	$\pm 3.54\text{mm}$

表-16 各距離における EDM の合成標準不確かさ (2004年)

方向	合成標準不確かさ u_c	距離に対する不確かさ(m)	(mm)
No.4→No.5 (162m)	$u_c=(9.06\times 10^{-14}\times D^2+0.0210\text{mm}^2)^{1/2}$	161.5321 ± 0.00029 包含係数 $K=2$	$\pm 0.29\text{mm}$
No.4→No.1 (171m)	$u_c=(9.07\times 10^{-14}\times D^2+0.0171\text{mm}^2)^{1/2}$	171.3860 ± 0.00026 包含係数 $K=2$	$\pm 0.26\text{mm}$
No.5→No.9 (212m)	$u_c=(9.03\times 10^{-14}\times D^2+0.0076\text{mm}^2)^{1/2}$	212.0914 ± 0.00017 包含係数 $K=2$	$\pm 0.17\text{mm}$
No.5→No.1 (332m)	$u_c=(8.98\times 10^{-14}\times D^2+0.0528\text{mm}^2)^{1/2}$	332.9177 ± 0.00046 包含係数 $K=2$	$\pm 0.46\text{mm}$
No.9→No.10 (485m)	$u_c=(8.97\times 10^{-14}\times D^2+0.4164\text{mm}^2)^{1/2}$	485.0045 ± 0.00129 包含係数 $K=2$	$\pm 1.29\text{mm}$
No.9→No.1 (545m)	$u_c=(8.99\times 10^{-14}\times D^2+0.4126\text{mm}^2)^{1/2}$	545.0089 ± 0.00128 包含係数 $K=2$	$\pm 1.28\text{mm}$
No.1→No.10 (1030m)	$u_c=(8.90\times 10^{-14}\times D^2+3.1381\text{mm}^2)^{1/2}$	1030.0141 ± 0.00354 包含係数 $K=2$	$\pm 3.54\text{mm}$

6. 4 基線長拡大

200m以上の基線については，No.1→No.4間距離とNo.4→No.5間距離を加え，その値にNo.5→No.9間距離を加算し，さらにNo.9→No.10間を加え，No.1→No.10の基線長というように基線長を拡大する手法についても検討した(図-9)．

基線長を拡大するためには距離を加算していくことが必要になり，当該基線場のピラー配置条件から，No.1→No.4間距離とNo.4→No.5間距離を加え，その値にNo.5→No.9間距離を加算し，さらにNo.9→

No.10間を加え基線長の拡大を図る．また本研究では，事前にピラーの標高およびピラー間の夾角を測定し，その結果ピラーのズレは微小であるため，鉛直性と直進性の計算では加算値には影響を及ぼさないことが確認されている．

2005年と2004年の基線長の拡大結果を表-17, 18に示す．500m付近では $\pm 1.0\text{ mm}$ 程度の不確かさであり，ほぼ直接測定と同じ精度である．1000m付近になると $\pm 2.0\text{ mm}$ 以下の不確かさとなり直接測定の約1.3~2.6倍の精度が得られ，距離拡大法で求めた値が精度のよい結果となった．

またNo.4→No.1間(171m)を繰り返して1000mに拡大した場合，仮にそのおのおの不確かさが同精度であったとすると，2005年の不確かさは $\pm 0.66\text{ mm}$ ，2004年で $\pm 0.73\text{ mm}$ となり，不確かさの値はより小さくなり，1mm以内である．結果200mの距離拡大は有効な手段であると考えられる．

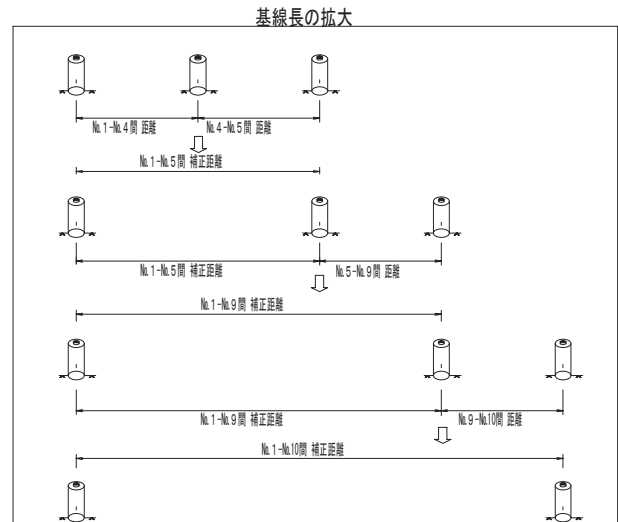


図-9 基線長拡大の方法

表-17 基線長拡大による合成標準不確かさ (2005年)

方向	距離に対する不確かさ(m)	(mm)
No.5→No.1 (332m)	332.9181 ± 0.00039 包含係数 $K=2$	$\pm 0.39\text{mm}$
No.9→No.1 (545m)	545.0095 ± 0.00043 包含係数 $K=2$	$\pm 0.43\text{mm}$
No.1→No.10 (1030m)	1030.0140 ± 0.00136 包含係数 $K=2$	$\pm 1.36\text{mm}$

表-18 基線長拡大による合成標準不確かさ (2004年)

方向	距離に対する不確かさ(m)	(mm)
No.5→No.1 (332m)	332.9181 ± 0.00054 包含係数 $K=2$	$\pm 0.54\text{mm}$
No.9→No.1 (545m)	545.0086 ± 0.00085 包含係数 $K=2$	$\pm 0.85\text{mm}$
No.1→No.10 (1030m)	1030.0120 ± 0.00186 包含係数 $K=2$	$\pm 1.86\text{mm}$

7. GPS 観測

本研究においては、GPS を 1, 3, 6 時間で観測を行い、サンプリング間隔は、15 秒・30 秒で行った。解析ソフトは、数種類の汎用ソフトに加え、精密基線解析ソフトウェア GAMIT (Ver. 10.1) での解析を行い EDM の値との比較を行った。ここでは No. 1 → No. 10 間に絞って結果を報告する。

汎用ソフト解析においては、1, 2 周波や暦情報（放送暦、精密暦）の使用の違い、また電離層補正の有無、解析エポックを変えて差異を調べた。その結果 No. 1 → No. 10 の基線では電離層補正と解析エポック（15 秒、30 秒解析）では変化が見られなかった。また、周波数と暦の違いによる 4 種類の解析方法を行なった結果、観測時間が 1 時間のスタティック解析結果では 1 周波と 2 周波解析では、差が 1 mm という結果が得られた。3 時間解析、6 時間の汎用ソフトの解析結果ではほぼ同じ結果となった。GPS 観測における基線長は、3 時間以上の解析で基線長は安定していると言える。

汎用ソフトによる GPS による 3 時間以上の観測から求められた基線長は 1030.010m か 1030.011m であり、平均は 1030.010m であった。EDM によって拡大した EDM 基線値との較差は、2005 年で 3 mm、2004 年で 1 mm であった。

一方 GAMIT と汎用ソフトの差では 1 時間解析においては、斜距離で最大較差が 0.8 mm 程度見られるものの、3～6 時間解析ではほぼ同値であった。また南北成分 ΔN 、東西成分 ΔE 、では 1 mm 以内の較差であるが、上下方向では最大 4 mm ほどの違いが見られている。成分での比較ではやや較差を生じている（表-19, 20）。

表-19 GAMIT 解析値 (No. 1-No.10) 基線ベクトル成分

セッション名	時間	ΔN	ΔE	ΔU	斜距離
288A	1h	641.6171	-805.7566	1.4470	1030.0089
288C	1h	641.6186	-805.7586	1.4473	1030.0113
289A	3h	641.6172	-805.7579	1.4481	1030.0100
292B	3h	641.6171	-805.7576	1.4474	1030.0097
291A	6h	641.6182	-805.7575	1.4409	1030.0102
293A	1h	641.6184	-805.7593	1.4485	1030.0118
293B	1h	641.6185	-805.7574	1.4484	1030.0104

表-20 汎用ソフト解析値 (No. 1-No.10) 基線ベクトル成分

セッション名	時間	ΔN	ΔE	ΔU	斜距離
288A	1h	641.617	-805.757	1.451	1030.009
288C	1h	641.618	-805.756	1.449	1030.010
289A	3h	641.617	-805.758	1.447	1030.010
292B	3h	641.617	-805.757	1.449	1030.010
291A	6h	641.617	-805.757	1.451	1030.010
293A	1h	641.617	-805.758	1.450	1030.010
293B	1h	641.618	-805.758	1.449	1030.010

8 考察とまとめ

時節を変えた観測結果から、本研究に使用した EDM (TCA2003) は屋外でも 200m 以内ではトレースできると結論づけられる。EDM の不確かさのもっとも大きな要因である気象変動による誤差も 200m 以内であれば、日中どの時刻で観測した値でも信頼度は高い。また基線長を拡大する方法については、本研究で使用した EDM の場合は観測値 (200m) を加算する方が、直接に観測した値よりも不確かさの値は小さいことが確認された。

従来の基線場改測に用いられてきた ME5000 については、安定度は非常に高いが、再現性は低い結果となった。産総研で校正できないことに加え、調整のできる会社が少ないことから、後継機種が望まれる。

観測に用いる EDM ほか機器の校正間隔は、測量機器の検定有効期間を 1 年と規定していることから、標準基線場の改測間隔は 1 年毎に行うべきである。そのためには標準基線場の改測に用いる機器の校正は毎年 1 回以上、行なうべきであろう。

GPS 観測値は、EDM のよって求められた不確かさをもつ基線長と、十分に小さい較差で合致する。しかしながら GPS による観測では不確かさの値を求めている訳ではないので、実際には GPS の観測値が EDM で求められた基線場の観測値にトレースできたとは言えないことを補足する。

GPS 観測の結果では、3 時間以上のスタティック観測において基線長は非常に安定する。解析ソフトはどの汎用ソフトでも差異は見られなかったが、標準基線場の解析には GAMIT 等の精密基線解析ソフトを用いることが良いであろう。No. 1～No. 10 の解析では、2 周波の使用や暦を変えても差は見られなかったが、このような短距離の基線場では 1 周波を使用し、暦には精密暦を用いることを推奨する。GPS 観測回数は日を変えて最低 2 回行い、衛星配置の違う時間帯でそれぞれ行ない、比較することにより信頼度が上がる。

本研究で使用した気象測定器に関しては、校正機関により不確かさが算出されているが、周波数変化に対しては構造上、測定が不可能なため不確かさを見積もることができないなど、測定に対しての不確かさの要因全てを見積もることが今後の課題となる。

謝 辞

社団法人日本測量協会測量技術センター、平成 16 年度部外研究員の宮寄久氏には大変お世話になりました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

飯塚幸三 監修(1996)：計測における不確かさの表現ガイド，（財）日本規格協会.

今井秀孝 編者(1996)：計測の信頼性評価，（財）日本規格協会.

国土交通省国土地理院(2005)：国土地理院距離比較基線場レーザビリティの体系，標準化に関する調査研究作業報告書.

国土交通省国土地理院(2006)：距離比較基線場レーザビリティの体系・標準化に関する調査研究作業（Ⅱ）報告書.

宮寄久(2004)：野外1 kmにおける光波測距の不確かさの検証，平成16年度国土地理院部外研究員報告書.