

# GPSを用いた超長基線位置計測の実施とその評価

黒台昌弘<sup>1</sup>・野海博之<sup>2</sup>・中村健蔵<sup>2</sup>・大林成行<sup>3</sup>・笠博義<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) ハザマ土木事業総本部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>2</sup>理博 文部省高エネルギー加速器研究機構(〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京理科大学理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>4</sup>正会員 工博 ハザマ土木事業総本部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

本報告は、約250kmも離れた施設間の相対的な位置計測を行うためにGPSを用いて超長基線位置計測を行った成果をとりまとめたものである。基線長の長い位置計測は、現在国土地理院が整備を進めている電子基準点網が完成した時点で建設分野でもその利用が期待されている技術の1つである。本報告は、既存の要素技術を組み合わせた超長基線位置計測を実施し、その結果を評価したものであり、この方法を文部省高エネルギー加速器研究機構のニュートリノ発射実験施設建設に適用し、その後実施された素粒子実験によってもその計測結果の正確さが確認されたものである。これまでに例のない超長基線位置計測の一事例として、建設分野における新しいGPSの適用方法を示すとともに多くの技術的示唆や有益な情報を与えるものと確信している。

**Key Words:** GPS, long-baseline positioning, construction works, neutrino experiment

## 1. はじめに

我が国でGPSの利用が始まってから10余年が経過し、3次元位置を高精度に把握できるという特徴から測地学を初め、建設・測量分野といった幅広い分野での適用が進んでいる。さらに、この技術は従来の測量方法とは異なり、測点間の見通しが不要であり、一定の受信条件(例えば、衛星数が必要十分であり、かつ、天空に偏らない状態)が整えば、測点間距離に制限がない、すなわち、直接、長距離間の位置計測が可能となるという大きな特長がある。

こういった特長を活かした長距離間の位置計測は、測地分野では測地網の整備として度々実施されてきたが<sup>1)</sup>、建設工事に「直接」関わる100kmを超えるような超長基線のGPS測量は、筆者らの知る限り、わずかな実施例が見られるのみである<sup>2)</sup>。施設の計画や設計の段階で、しかも従来の測量技術との組み合わせではないGPS単独での実測は他にこれまでのところ報告されていない。

このような状況の中、文部省高エネルギー加速器研究機構では、約250kmも離れた2つの実験施設を利用する素粒子実験を推進している。この実験では、図-1.1のようにニュートリノと呼ばれる素粒子を茨城県つくば市から岐阜県神岡町の実験施設に向けて発射する方向を正確に設定することが重要課題となっており、実験施設の計画・設計にあたっては、つ

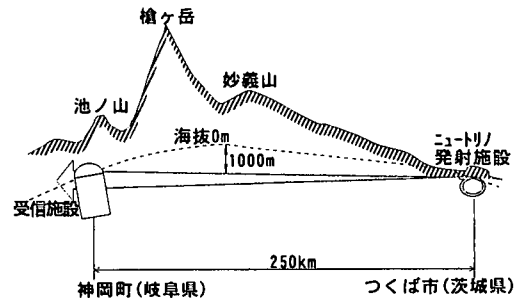


図-1.1 計測対象施設の位置図

くば地区と神岡地区にある実験施設間の相対的な位置関係を高い精度で求める必要があった。

本報告では、実験施設の建設工事を目的に、これまで前例のない超長基線位置計測に適した計測方法に対して、既存の要素技術を組み合わせた新しい計測方法を検討するとともに、その方法を用いて計測を行った結果とその評価についてとりまとめている。また、この結果に基づいて実施された素粒子実験では、ニュートリノが250km離れた受信施設に到達したことが確認されており<sup>3)</sup>、このことはこの計測結果の信頼性を示したものである。

現在、建設省国土地理院が全国的に整備を進めている電子基準点網が完成すると、長基線測量の普及が飛躍的に向上するものと期待されている。このような中において、本報告の内容は建設分野に新しい

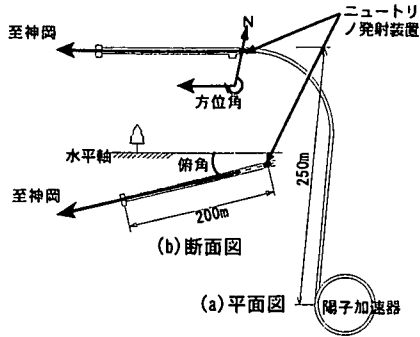


図-2.1 発射方向の設定(つくば地区概要図)

GPSの適用方法として有用な情報を与えてくれるものと確信している。なお、本文では、これまでの長基線計測と区別する意味で“超長基線位置計測”という用語を用いることとした。

## 2. 超長基線位置計測技術の検討

### (1) 位置計測の概要

ニュートリノを受信施設に到達させるためには、図-2.1のように発射装置から神岡町に向けた基線の方位角と俯角を何らかの方法で決定する必要がある。便宜的な方法としては、地図上で方位角を決定し、地球の球面を考慮して各々の標高値から俯角を概略決定する方法が考えられる。しかし、こうした地形図による方法は地形図が地球の形状を厳密に表現しているときのみ可能であり、しかもその計測精度を検証することは極めて困難である。

そこで、本報告では、実験施設間の相対的な位置を計測し、その結果からニュートリノの発射方向を算定する方法に着目している。具体的には、その発射方向の精度が素粒子実験に及ぼす影響を最低限にするために、施設間の位置計測精度が基線長の $10^{-5}$  (250kmに対して2.5m)と設定されている<sup>4)</sup>ことから、本報告ではこの精度を満足し、その精度検証が可能な位置計測方法を検討することとした。

なお、素粒子実験における位置計測の場合、あくまでも任意の座標系における実験施設間の位置関係を求めることになる。したがって、一般に建設工事で使用される公共測量網に準じた測量を行う必要性はないといったことが非常に重要なポイントとなる。

また、本文では「ある点の位置を決定する」ことを表す用語として、任意の測点間の相対的な位置を求めるという意味で用いる場合には「計測」を、公共測量や工事測量に基づいた座標値を求める場合につい

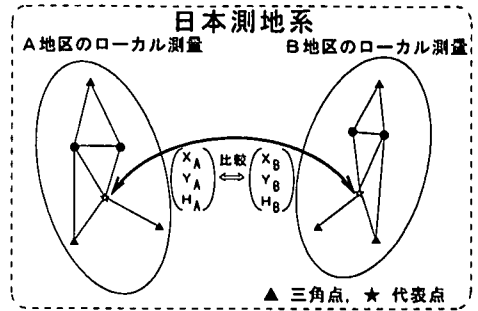


図-2.2 一般的に考えられる相対位置計測の概念図

表-2.1 現行の測地系の問題点

測地網	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 明治時代に制定されたものが基準</li> <li>・ 全国同時網平均計算の結果ではない</li> <li>・ 離れた地域では網平均計算上「整合性のない」計算結果となる懸念がある</li> </ul>
水準網	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 山岳地域での水準測量の精度劣化 (ジオイドと重力異常の問題)</li> <li>・ 地震等の地殻変動による隣接地域との成果のずれ</li> <li>・ 高低網平均計算の方法</li> </ul>

ては慣用語である「測量」を用いて区別している。

### (2) 超長基線位置計測技術の現状と問題点

約250kmも離れた実験施設間の位置関係を計測する技術としては、以降に示す2種類の計測方法が考えられる。本節では、この2つの計測方法についての現状と問題点を整理し、ここで対象としている、超長基線位置計測に最も適当な計測技術を検討する。

#### a) 間接的な位置計測方法

長距離間の位置計測を行う場合、通常は、全国的に整備されている測地網を利用することが考えられる。これは、今回の計測の場合、図-2.2のように、つくば市と神岡町の両地区において、各々別途、三角点等を基準にした測量を行って、相対位置計測の対象となる測点の座標値を同一座標系の値として得るものである。我が国の場合、「日本測地系」がこの座標系に相当するが、国土地理院へのヒアリングの結果、現行の測地系には表-2.1に示すような測地網の運用管理上の問題があることがわかった。すなわち、現状の日本測地系をベースとした相対位置の計測は、個々の地域で使用する三角点や水準点の設置精度に大きく左右されると同時に、比較する作業地域が離れるほど累積誤差的な要因が増大するため、長距離間の相対的な位置計測において、単純な座標値間の比較による相対位置の決定方法では計測結果の信頼性の面で問題があるものと考えられる。

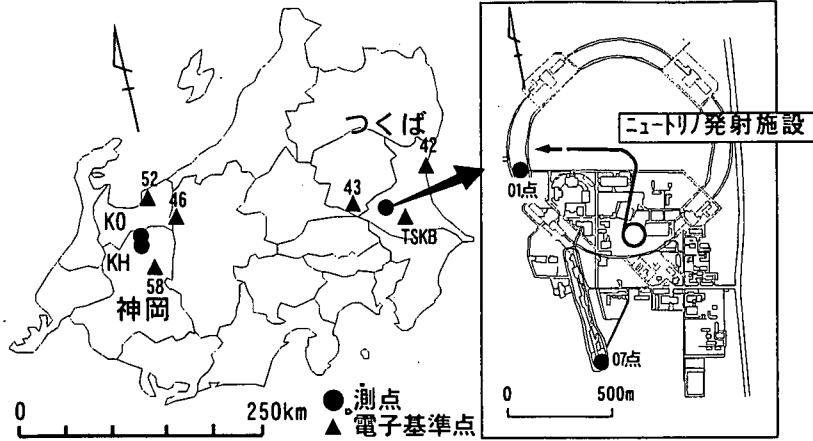


図-3.1 測点配置

### b) 直接的な位置計測方法

直接的に2点間の位置関係を把握する方法としては、GPSのような宇宙測地技術の適用が考えられる。測地学の分野では、VLBI(超長基線電波干渉法)やSLR(人工衛星レーザ測距法)といった方法があるが、これらの技術は計測精度が優れている反面、大型の固定装置や学術的なデータ解析技術を用いた作業となるため、専門機関以外での使用が難しいのが現状である<sup>6)</sup>。

一方、GPSは地球全体を1つの座標系としたWGS-84(World Geodetic System 1984)座標系上で運行管理されているものであり、2地点間の位置関係を直接把握する方法としては非常に効率的な方法である。また、GPSは既に建設工事においていくつもの実績があるように、その運用にあたっては汎用的な要素が多く、利便性の面からもこの方法は有効な技術の1つであるものと判断できる。

### (3) 位置計測技術の選定

以上の検討から、超長基線位置計測技術に必要とされる条件は次のようにまとめることができる。

- a) 任意のしかも同一の座標系を利用
- b) 数mの位置精度での計測が可能
- c) 長距離離れた地域の位置関係の直接計測が可能
- d) 汎用的な技術を利用した効率的な作業が可能

そして、これらの条件を満たす計測技術として、その技術的な特長からGPSを用いることが適切であると結論した。ただし、建設分野において、250kmもの超長基線の位置計測にGPSを適用した実施例がないことから、上述の条件に対して計測の特徴を考慮した作業を検討し、計測結果の評価においてはデータ解析方法の信頼性と計測結果の妥当性の2つの面からクロスチェックを行う必要がある。

### 3. GPSを用いた超長基線位置計測<sup>6)</sup>

#### (1) 標準的なデータ解析手法による位置計測

GPSを用いた位置計測では、解析の基準となる測点を1点設置すれば、その位置に対するもう1点の相対的な位置を求めることができる。本報告では、非常に単純なこの概念に沿った方法によって計測を行った。ここで対象とするような超長基線の位置計測にGPSを適用する場合は、従来、測地学等で実施されている長基線の位置決めに対応した高精度なデータ解析手法が適用されてきた。しかし、この手法は学術的要素が強く、現状では専門的な知識を必要とするプログラム群を準備する必要があり、利用面において汎用性に欠ける面がある。こうした状況に加えて本報告では建設分野においても将来的に電子基準点等に基づく超長基線を対象とした位置計測の機会が増えてくることを想定し、計測作業全般の汎用性を重視して、GPSデータの標準的な解析方法である「公共測量作業規程」<sup>7)</sup>と「精密測地網高度基準点測量作業規程(案)」<sup>8)</sup>に準拠した方法(以降、標準解析手法とする)による計測を行うこととした。

また、一般的に複数の計測方法によって得られた結果(座標値)を定量的に比較する場合、座標調整計算した前後の補正値を比較することや、同一の基準点(座標既知点)を用いて対象測点の座標値を比較する等の方法が考えられる。しかし、本報告では、得られた結果の評価を簡単にするために、計算の過程で得られる各種統計値ではなく、神岡地区の代表測点(KH点)の座標値に注目した評価を行うこととした。

#### a) 計測概要

測点配置を図-3.1に示す。神岡地区がKH点とK0点、つくば地区が07点と01点の計4点である。本来ならば、ニュートリノ実験施設近辺に測点を設ける

表-3.1 計測条件

項目	内容
受信機	2周波汎用受信機
データ処理	公共測量作業規定に準ずる
軌道暦	放送暦
受信時刻	1995.11.17 Aセッション: 6時~12時 Bセッション: 13時~19時
与点情報	07点(上沢) (四等三角点)

表-3.2 解析結果の評価指標

指標	内容	評価基準
1	データ棄却率 サイクルスリップ等の不良 データ発生程度	30%以下 (0%に近い方がよい)
2	SOLUTION 基線解析結果の確定 指標(Fix, Float)	Fixが良い
3	RATIO (パイプ決定比)	95%以上(経験値) (100%に近い方がよい)
4	RMS(標準偏差)	短基線: 小さい方がよい 長基線(≥100km): 0.20m以下

べきであるが、神岡地区では実験施設自体が土盛り約1000mの坑内にあること、また、その坑口周辺には樹木等の受信障害物が多数存在すること、つくば地区でも測点周辺が樹木等で被われた状態であることから、作業効率を考慮した上で、上空視界が十分確保でき、作業時間帯に制約を受けない箇所を測点設置場所として選定した。そのために、これらの測点位置と実験施設の基準位置の関係については、従来から行われている測量方法を用いて把握することとした。計測条件を表-3.1に示す。

## b) 計測結果

### ① データ解析の前提条件

本データ解析では、4つの測点を「07点, KH点, K0点」と「01点, KH点, K0点」の2つの組に分け、07点, 01点を各々の組の基準点とし、2周波のGPSデータを基に長基線部分のみを解析する方法を採用した。このような方法を採用した理由は次の通りである。

一般に数10km以上もの超長基線のデータ処理では、GPSデータが電離層を通過するとき生じた時間遅れによる解析誤差を効果的に取り除くために、L1帯, L2帯と呼ばれる2つの周波数帯のGPSデータを用いた解析が行われる。一方、1km程度の短い基線ではこの2周波データを用いることによって逆に解析精度を劣化させることがあるため、L1帯の1周波のデータが用いられる<sup>9)</sup>。ここでは、01-KH基線のような250kmもの超長基線部分と、K0-KH基線のような1km以下の短基線部分が混在しているため、2周波データによる解析を全基線で実施した場合、短基線部分の解析精度が劣化することが予想される。したがって、ここでは長基線部分のみの解析とした。

表-3.3 3点のデータを用いた基線解析結果

始点	終点	セッション	RMS(m)	RATIO	SOLUTION	データ棄却率(%)	評価	
							長基線評価: 基準による	短基線評価: 基準による
07	K0	A	0.144	--	Float	1	○	×
		B	0.031	83.98	Fix	1	○	△
07	KH	A	0.144	--	Float	1	○	×
		B	0.032	50.36	Fix	1	○	×
01	K0	A	0.035	94.47	Fix	0	○	○
		B	0.029	89.23	Fix	1	○	△
01	KH	A	0.035	96.08	Fix	1	○	◎
		B	0.032	61.98	Fix	1	○	×

表-3.4 KH点座標値(公共座標第7系)

	X	Y	H
KH点	33571.330	12959.794	565.064

### ② データ解析結果の評価

短基線(10km程度)におけるGPSデータの処理結果を評価する場合は、一般的に表-3.2に示す4つの指標を用いて上段から順に検討を進める。また、長基線を対象とした場合には、特にRMSに注目した評価が行われる<sup>9)</sup>。本報告では、このような評価指標を参考にして、表-3.3に示した解析結果を以下に示した。

- ・100km以上の基線でのRMSの基準値(0.20(m)以下)を、すべての基線で満足している。
- ・データ棄却率はどの基線も0~1%であり、サイクルスリップ(GPSデータの受信中断)が解析に及ぼす影響は少ない。
- ・2つの基線で、SOLUTIONがFloatであるが、その他はFixとなっており、解析結果が確定している。
- ・RATIOが100%となるものはないが、95%程度のものが2基線ある。

このように、短基線データ解析で一般的に用いられる評価指標を用いて評価した場合、処理結果の半分についての評価が悪くなっているが、長基線データ解析における評価基準を適用した場合、すべての基線で制限を満足しているという結果が得られた。

A, Bセッションの結果の良否について、RMSとともに長基線評価基準を満足しているため、両者の差を論じることはできない。ただし、RATIOについては、Aセッションの方に満足すべき基線がある。A, Bセッションの結果の評価については後述するが、ここで計測したデータから判断すれば、Aセッションの「01-KH基線」が最も信頼性が高い基線であると判断できる。このようにして求めた神岡地区の代表測点であるKH点の座標値を公共座標第7系の数値に変換して表-3.4に示す。

## (2) データ解析方法の評価

一般的に、計測誤差のうち統計に従う部分に関しては、計測を繰り返すことによって把握することは可能である。しかし、現実の計測作業を考えた場合、十分な統計処理ができるだけの計測回数を確保するには、多くの場合、経済的あるいは時間的制約により、多大な困難が伴うであろうことは容易に予想ができる。今回の計測においてもこういった制約があったことから、全く別の解析手法との比較により、前節の計測結果の評価を行うこととした。具体的には、測地分野で利用される長基線データ解析に対応した高精度の位置計測方法（以降、超長基線解析手法とする）を用い、前節の検討と計測条件を同じにして作業を行った。

ここで、表-3.5に前節で実施した標準解析手法と本節で実施する超長基線解析手法の特徴を示す。一般に超長基線解析手法では、衛星の軌道に影響を及ぼす太陽や月に関するパラメータ、より正確なGPS衛星の軌道情報、GPSデータの伝搬遅延の原因となる大気条件を設定することによって高精度な解析ができることがわかっている<sup>10)</sup>。このように、この解析方法は特殊な解析技術と専門情報を必要とすることと解析結果の公平性を確保する意味で、国土地理院に協力を依頼した。

### a) 計測概要

本計測は標準解析手法を用いた結果との比較を目的としているため、計測の対象となる測点やデータ受信条件（データ受信時間等）を同一とし、その測点の正確な座標値（最確値）を得るために、現行の測地系に基づかない電子基準点のデータを基準にした解析を行った。測点配置を図-3.1に示すが、使用した電子基準点は、神岡地区では46, 52, 58の3点、つくば地区では42, 43, TSKB(国土地理院内)の3点、合計6点である。また、相対位置を計測する測点として01点とKH点を選点して、合計8点のデータを用いて01-KH間の長基線データ解析を実行した。本計測の条件を表-3.6に示す。

### b) 計測結果

超長基線解析手法による位置計測結果の信頼性を検討するため、表-3.7にKH点の3次元座標の標準偏差を示す。2つのセッション間の3成分の較差は各々2~3mmであり、処理結果の再現性が確認できると同時に、Aセッションの方が標準偏差の数値が小さいことがわかる。このことは、標準解析手法による位置計測においても、AセッションがBセッションより良好な結果を示した傾向と合致する。

次に、標準解析手法の計測結果の信頼性を評価す

表-3.5 標準解析手法と超長基線解析手法の特徴

	標準解析	超長基線解析
公称精度	$250\text{km} \times 10^{-6}$ =250mm	$250\text{km} \times 10^{-8}$ =2.5mm
衛星軌道暦	放送暦	精密暦
データ取得時間	~6h	~24h
大気条件	標準大気モデル	各測点で任意に設定
その他の解析パラメータ	-	暦(太陽, 月) 地軸振動情報 7桁位相情報

表-3.6 超長基線解析手法の計測条件

項目	内容
受信機	2周波汎用受信機
データ処理	学術利用される長基線データ解析
軌道暦	精密暦
受信時刻	1995.11.17 Aセッション: 6時~12時 Bセッション: 13時~19時
与点情報	電子基準点 (つくば3点) (神岡3点)

表-3.7 KH点のxyz成分の標準偏差の比較 (WGS-84座標系)

測点	セッション	標準偏差(m)
KH	A	$\begin{matrix} 0.007 \\ 0.008 \\ 0.006 \end{matrix}$
	B	$\begin{matrix} 0.010 \\ 0.008 \\ 0.009 \end{matrix}$
セッション間較差 (A-B)		$\begin{matrix} -0.003 \\ -0.003 \\ -0.003 \end{matrix}$

表-3.8 KH点座標値の比較(公共座標第7系)

解析方法	X	Y	H
長基線	33571.211	12959.775	565.033
標準	33571.330	12959.794	565.064
較差	0.119	0.019	0.031

るために2つの解析手法で求められた座標値の比較を行った。表-3.8にその結果を示す。GPSを初めとする測量計算においては、基準点網が正三角形や正方形に近い形状である程、XYH成分の調整量はバランスがとれ、全体的な測量精度も一般的に高い。こういった観点からすると、本報告における標準解析手法と超長基線解析手法の測点配置(網形状)は共に東西(Y方向)に広い形状をしており、特に標準解析手法の網形状は東西に対して南北(X方向)の長さが短いため、調整計算による較差はX成分の方がY成分より大きくなりやすい。表-3.8はX座標の較差がY, H座標よりも極端に大きくなっており、これを裏付けているものとなっている。本報告における超長基線位置計測では、選点から成果を得るま



国土地理院発行 数値地図200000(地図画像)を加筆修正  
図-3.2 測点配置

での作業を効率的に実施することを念頭においているため、このような測点配置を選択せざるを得なかったが、今後、こういった位置計測の実用化を考える場合には、網形状と位置精度との関係についても検討を行う必要がある。

以上のような課題を考慮した上で、表-3.8を考察すると、次のようなことがいえる。すなわち、XYHのうち最大の較差を示しているものはX座標値であり、その値は約12cmである。これは基線長250kmに対して $10^{-7}$ のオーダーであり、要求精度を満足していることがわかる。また、両手法による解析結果が非常に近接した値を示していることと前述の超長基線解析手法の信頼性を確認したことを考え合わせると、標準解析手法についても計測結果の信頼性が認められるものと考えられる。

### (3) 現地測量との整合性の確認

ここまで検討してきた標準解析手法はつくば市に位置する測点を基準にした相対位置計測であり、超長基線解析手法は電子基準点に基づく位置計測であり、共に現行の測地系とは異なるWGS-84座標系上で計測結果を議論している。前述のように実験施設の建設においては日本測地系での座標値を得る必要がないとしているが、本節では長基線GPSデータを用いた標準解析手法による位置計測結果の信頼性を

表-3.9 現地測量の計測条件

項目	内容
受信機	2周波汎用受信機
データ処理	公共測量作業規定に準ずる
軌道暦	放送暦
受信時刻	1995.12.8 11時~13k時
与点情報	西小学校、関取、坪野 (四等三角点)

表-3.10 現地測量における基線解析結果

始点	終点	基線長(m)	RMS(m)	RATIO	SOLUTION	データ棄却率
坪野	西小	17645.121	0.014	100.00	Fix	3
KH	西小	14529.047	0.011	100.00	Fix	2
関取	西小	3314.051	0.008	100.00	Fix	2
坪野	関取	14347.485	0.012	100.00	Fix	1
KH	関取	12641.852	0.009	100.00	Fix	0
坪野	KH	12546.963	0.009	100.00	Fix	0(0)

複数の方法で検証するため、日本測地系を基準とした現地測量結果との整合性を確認することとした。

#### a) 計測概要

測点配置を図-3.2に示す。与点として既設の国家基準点を利用することを考えたが、実際の計測ではよくあるように、計測範囲が山岳地帯であることから、樹木等が影響してGPSデータが効率よく受信できる与点を選点できなかった。したがって、与点が南方に偏った網形状となっている。本来であれば「公共測量作業規程」に定められている網を組むべきであるが、本測量では、計測精度確保の観点から以下のようなデータ解析上の工夫をして、3次元網平均計算によりKH点の座標値を決定した。本計測の条件を表-3.9に示す。

通常3次元網平均計算では、GPSと従来測量の各々の標高方向の基準面が異なることによって生じる鉛直線の偏差を推定する演算を行う。本測量では、与点の配置の問題と前述で指摘した山岳地域の三角点の標高値の精度の問題から正確な補正が困難であると考えられ、この補正によりかえって位置精度が劣化する恐れもあるために、鉛直線偏差を推定しない計算方法によって、KH点の座標値を得ている。

#### b) 計測結果

まず、基線解析結果を表-3.10に示す。この結果について、表-3.2の指標を基準にして各基線を評価すると、すべての指標においてどの基線とも十分な精度でデータ解析ができていていることが判る。

次に、3次元網平均計算とGPSの標準解析手法によって得られたKH点の座標値を表-3.11に示す。

真値が特定できない条件において精度を議論することは困難であるが、実用上は何等かの方法でこれを検討する必要がある。本報告では、同一の測点を

表-3.11 KH点座標値の比較(公共座標第7系)

位置計測方法	X	Y	H
現地測量	33571.144	12959.478	564.036
標準解析手法	33571.330	12959.794	565.064
較差	0.186	0.316	-1.028

複数の方法で計測することによって、計測結果の信頼性や整合性が確認できると考えている。そこで、3つの計測方法のうち「公共測量作業規程」に準じた現地測量の結果を最も確からしい値であると仮定した場合には、標準解析手法による結果との平面的な較差は平均で約25cmとなり、これは基線長250kmに対して10<sup>-6</sup>の精度で計測できていることを示している。

標高値については、平面座標以上の較差が見られるが、この原因としては後述するように水準網の整合性やジオイドの問題等が考えられる。いずれにしても、3つの座標値は共にニュートリノ実験で求められている精度(2.5m)を満足する値となっている。

以上のことから、標準解析手法による位置計測の結果と現地測量の結果は、要求されている位置精度の制限内で、整合性があるものと判断できる。

#### (4) 超長基線位置計測方法の評価

本報告では、GPS長基線データの標準解析手法および超長基線解析手法による直接計測と神岡地区における三角点を利用した現地測量の、3種類の位置計測を行った。標準解析手法による解析結果の信頼性の評価については前述のとおりであるが、ここでは3つの解析方法を総合して評価してみる。

3種類の位置計測結果のうち、標高値について図-3.3に示す。なお、参考値として、KH点近隣の三角点から求めた間接水準測量値を表示している。まず、この図において、計測の結果得られた標高値を2つのグループに区分できることがわかる。すなわち、「つくば地区」の測点を基準にした直接超長基線計測である「標準解析手法」と「長基線解析手法」によるものと、三角点を基準にした「神岡地区」内でのGPS測量や間接水準測量によるものである。さらに特徴的なこととして、前者の直接計測の結果と後者の現地測量の結果との間に約0.9mの較差が認められる。このような差が生じた理由としては、前述した三角点の標高値の整合性に関連するものに加えて、GPSの計測精度とGPSと従来測量を同時に利用する場合に必ず問題となるジオイドの影響の3つの要因が考えられるが、本報告では後述するような考察結果から、標高値の整合性とジオイドの問題が大きな要因であると考えている。

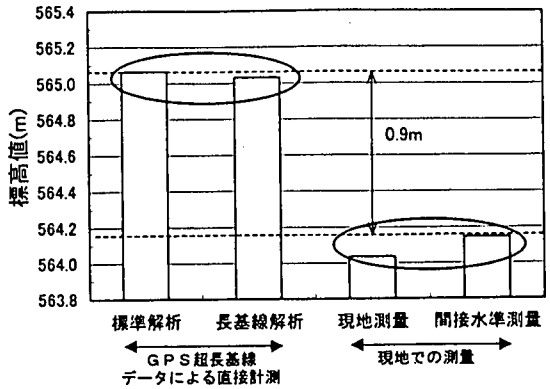


図-3.3 位置計測結果の評価

一般に、標準解析手法を用いた位置計測精度については、以下のような式で表現される<sup>11)</sup>。

$$\text{平面位置} \pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D \text{ (km)}) \quad (1)$$

$$\text{鉛直位置} \pm (10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D \text{ (km)}) \quad (2)$$

(但し、D: 基線長)

したがって、本報告のように基線長を約250kmとした場合、平面位置精度は255mm、鉛直位置精度は260mmとなり、理論上、3次元座標各成分の計測精度に大きな差がないものと考えられる。しかし、平面的には表-3.11のように理論上の精度がほぼ確保できていることに対して、鉛直位置精度については約4倍もの較差が現れており、これは計測そのものの精度以外の点に原因があるものと考えられる。

一方、一連の計測作業においては、国土地理院発行の座標変換プログラム「TKY2WGS<sup>13)</sup>」を用いて、従来より問題となっている座標系の違いによるジオイドに対する補正量の誤差を最小限にしている。しかし、このような対応方法を採用しても、近隣の測点間ではジオイドに対する補正量が近い値を示すため、ジオイドの影響が座標値比較の結果に反映されないことになる。一方、遠く離れた2点間を対象とする場合は、各点のジオイド補正量が異なるばかりでなく、大きな差が生じている可能性がある。したがって、本報告のようにGPSで得られた結果と従来測量の結果とを比較する場合は、ジオイドの影響を考慮しておく必要がある。

以上、本報告では、長距離離れた2点間の位置計測方法に対して、現行の測地系に基づかない、GPSを用いて直接位置を計測する方法に着目し、測量分野で比較的短基線の測量に用いられてきた標準的なデータ解析手法を適用した。その結果、計測作業の指針とした「公共測量作業規程」等が定めるデータ解析の制限(3.1第2項②で詳述)を十分満足できることが判明した。また、クロスチェックとして実施

した他の位置計測方法によっても、位置計測精度の正確さ(最大0.9mの較差)が確認できた。

以上のことから、これまで特別な解析環境が必要であった超長基線位置計測においても、ここで対象とした汎用的な解析方法を用いることにより十分計測が可能であることが実証できた。

なお、1999年(平成11年)6月19日、つくばから発射されたニュートリノが岐阜県神岡町の受信施設に到達したことが確認された<sup>3)</sup>。このことから、本実測結果が十分要求精度(基線長に対して $10^{-9}$ の精度(2.5 m))を満足するものであったということもできる。

また、ニュートリノの発射方向角は次のようにして設定している。まず、本計測で決定した01点(つくば地区)とKH点(神岡地区)を各地区の基準点とし、つくば地区では通常のGPS測量を実施して発射装置の位置座標を把握した。神岡地区では、受信施設が山中にあるため、坑口の測点をGPS測量で求めた上で、坑内トラバース測量を実施して受信施設の中心位置の座標を把握した。このようにして求められたニュートリノの受信施設の位置座標から方向角や俯角を求めている。

#### 4. おわりに

GPSの利用については、建設工事と測地分野を区別して取り扱うことが多かったが、本報告ではあえて建設工事でも用いられる標準的なGPSデータの解析方法を、測地分野の範疇と考えられる超長基線の位置計測に対して適用した。その結果、今回の計測においては基線長には関係なく、要求される計測精度に対応したデータ解析方法を選択することによって、非常に汎用性の高い位置計測ができることが明らかになった。昨今は、今回の計測のように、特殊な技術を用いることなく、必要な精度が確保できる経済的かつ効率的な測量作業が要求されるケースも増えており、こうした要求に応える意味でも、本報告の成果は貴重な事例を示すものといえる。

また、本実測が行われている時期には整備中であった電子基準点が、新しい測地網である「測地成果2000」の骨格データとなり、地殻変動の監視といっ

た測地分野を始め、工事測量の基準点として有効に利用されることになっている。こうした面においても本計測は建設工事における電子基準点データを用いた先駆的な事例として、今後の測量方法の新しい形態を示したものとすることができる。

謝辞：本計測を行うに当たり、現地作業では㈱トプコンのご協力を得ました。また、電子基準点を用いた超長基線解析や解析結果の評価においては国土地理院測地観測センター地殻監視課のご協力をいただきました。ここに記してお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 張同耀, 小林敬幸, 矢澤弘行, 藤井陽一郎: GPS超長基線測量に関する研究, A P A, 65-5, pp. 55~62, 1996.
- 2) 神崎正, 戸井田博, 西澤修一: 広がるGPSの建設工事への利用, 土木施工, 36-1, pp. 89~95, 1995.
- 3) 読売新聞朝刊, 1999. 6. 29.
- 4) 西川公一郎: K E K - 神岡間ニュートリノ振動実験, 日本物理学会誌, 第52巻9号, pp. 675-679, 1997.
- 5) 日本測地学会編著: 新訂版GPS, pp. 39~45, 日本測量協会, 1989.
- 6) 笠博義, 黒台昌弘, 吉村和彦, 中村健藏, 野海博之: ニュートリノ発射施設建設におけるGPS長基線測量について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第VI部門, pp. 270-271, 1996.
- 7) 建設大臣官房技術調査室監修: 建設省公共測量作業規程, p. 11, 日本測量協会, 1996.
- 8) 建設省国土地理院: 精密測地網高度基準点測量作業規程(案), p. 15, 日本測量協会, 1995. 5.
- 9) 建設大臣官房技術調査室監修: 建設省公共測量作業規程 解説と運用, p. 90, 日本測量協会, 1996.
- 10) 佐々木正博: 精密測地網高度基準点測量の概要, A P A, 59-2, pp. 7~12, 1994.
- 11) 重松文治: GPSの概要, 測量, 第48巻, 第4号, pp. 55-57, 1998.
- 12) 建設省国土地理院: 座標変換プログラムTKY2WGS, 国土地理院技術資料, B-1-No. 23, 1994.

(1999. 10. 6 受付)



# ESTIMATION OF VERY LONG-BASELINE POSITIONING WITH GPS

Masahiro KURODAI, Hiroyuki NOUMI, Kenzo NAKAMURA,  
Shigeyuki OBAYASHI and Hiroyoshi KASA

This article reports a positioning with GPS from Tsukuba to Kamioka over a distance of 250 km. In the present work, we proposed a GPS positioning for a very long baseline positioning among a several of existing techniques. In fact, the precision of the positioning has been demonstrated in the neutrino experiment (particle-physics experiment) carried out between Tsukuba and Kamioka. The very long-baseline GPS positioning is one of techniques expected to be utilized in civil engineering when GPS continuous observation stations are completed by GSI (Geographical Survey Institute). The present work gives useful technical suggestions and prospects for future applications of long baseline GPS positioning in civil engineering.