

R T K - G P S の高さ精度向上に関する研究・開発

重松 文治* 真鍋 匠*

要 旨

R T K - G P S (Real Time Kinematic-Global Positioning System)の測位精度は平面位置 (X , Y) に比較して高さ (Z)成分が劣っており、高さ測量に適用するには測量データに含まれる変動分を除去し、精度向上を図る必要がある。そこで、実験、データ解析によって精度向上方法について研究した。そして精度の改善方法としてG P S と他の測量機器を組み合わせた方法を検討し、精度検証を行い、次の結果が得られた。

R T K - G P S 測位の誤差要因を明らかにした。

R T K - G P S の測位結果は平均処理することによって精度が向上する。

R T K - G P S とレーザレベルを組み合わせた高さ測位システムを考案し、作業効率を図りながら、従来の3級水準測量相当の精度が得られる見通しがたった。

1 . まえがき

現在、多くの分野でG P S 測位は利用されており、その用途は今後ますます広がっていくものと考えられる。特にR T K - G P S 測位はリアルタイムに移動体の位置を連続測量できるため、現在盛んに利用されている。しかし、R T K - G P S 測位は平面位置精度に比較し高さ精度が劣り、そのまま測量に用いることができない。そこで、下記の事項について研究した。

①R T K - G P S 測位の原理を踏まえた上で、平面測位の精度に比較し高さ精度が低い原因について調査を行う。

A実験、データ解析によって精度向上方法について研究する。

B精度の改善方法としてR T K - G P S 測位とレーザレベルを組み合わせた方法を研究し、その精度について評価する。

本稿ではこれらの成果について述べる。

2 . G P S の概要

まず、G P S の概要¹⁾²⁾³⁾について述べる。

G P S 測位の基本原理は衛星から送られてくる電波をG P S 受信機で受信することによって衛星からの距離を算出し、同時に衛星から送られてくる位置情報をもとにG P S 受信機の位置を計算するものである。

原理や精度の違いによってG P S の測位方式は単独測位と相対測位の2種類に分類される。代表的な各種測位方式とその特徴を表 - 1 に示す。単独測位はカーナビゲーションシステムや船舶の航法支援用として現在最も

多く用いられている。しかしS A や電離層の遅延誤差などの影響を受けるため精度は数10m と悪い。

誤差を取り除く方法として相対測位があり、そのなかで代表的な方式としてコード位相DGPS 測位方式と干渉測位方式がある。両者の違いは、前者は単独測位と同様にC / A (Clear ane acquisition) コード等を利用し、後者は搬送波位相を利用している点である。このため、前者はコードの周期(300km)を測位のものさしとしているため精度は数m であるが、後者は電波の波長(19 c m)を利用し、その位相を検出することで数cm の精度を確保している。干渉測位はスタティック測位とR T K - G P S 測位の2通りに分類される。

以下にこれら2種類の方式について概要を述べる。

(1) スタティック測位

スタティック測位はG P S 測位方式のなかでは最も精度が良く、座標既知点に基準局を設置し、各測定点でG P S を1時間静止(短縮スタティックは15分)した状態で観測データを収録し、後処理ソフトウェアによって基線解析等を行い、各測定点の座標値を決定する方式である

(2) R T K - G P S 測位

R T K - G P S 測位⁴⁾は座標既知点において衛星から受信した搬送波位相やコード情報を処理し、その補正データを送信するG P S 基準局(以下「基準局」という)と、基準局から送信されたデータとG P S 衛星から直接得られたデータから自身の位置をリアルタイムで計算するG P S 移動局(以下「移動局」という)から構成される。R T K - G P S 測位の概念図を図 - 1 に示す。

* 技術研究所

3. RTK-GPS測位の原理と精度の調査

ここでは、RTK-GPS測位の原理と測定誤差の要因について説明する。

3.1 RTK-GPS測位の原理

RTK-GPS測位は、衛星から送られてくる搬送波の波長19cmをものさしとして利用することで距離測定を行う。図-2に搬送波位相方法による基線長の求め方を示す。この方法はR1とR2の距離の差から基準となる点の基準局と未知点である移動局間の距離（基線長）を求めるものである。このとき、基準局と移動局が同時に同じ衛星からの電波を受信することを前提としている。この方法で求められるのはGPS受信機間の相対位

置である。したがって、座標を求めるためには座標既知点（基準点）を必要とする。

次に衛星と受信機間の距離Rを求める方法について説明する。図-3と下記に距離Rに含まれる電波の波の数と位相の関係を示す。

距離Rは次式で表される。

$$R = N \cdot \lambda + (\Delta \phi) / 2\pi + C d T + C d t \quad (1)$$

N : 整数値バイアス

λ : 波長

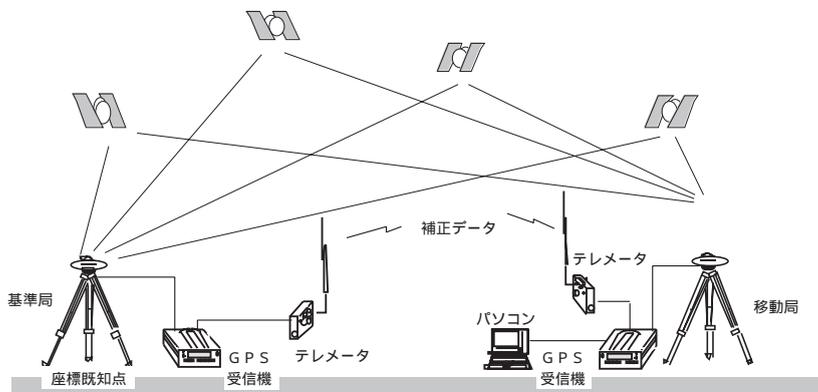


図-1 RTK-GPS測位の概念図

表-1 測位方式とその特徴

測位方式	仕様 精度と基線長		特徴	
	精度	基線長 km	長所	短所
スタティック測位	位置 ±(5mm+1ppm × D) 高さ ±(10mm+1ppm × D)	数10~ 数100	・GPSの中で最も高精度 ・固定局が見通せない 場合でも測定可能	・測定に時間がかかる ・後処理が必要
RTK-GPS測位	位置 ±(10mm+2ppm × D) 高さ ±(20mm+2ppm × D)	10	・リアルタイムである ・固定局が見通せない 場合でも測定可能	・テレメータが必要 ・初期設定が必要 ・サイクルスリップがある
コード位相 D-GPS測位	高精度方式で0.5~1m 汎用は2~3m	200	・使用可能範囲が広い ・初期設定不要 ・サイクルスリップがない	・テレメータが必要
単独測位	位置 約30m	全域	・使用可能範囲が広い ・初期設定不要 ・サイクルスリップがない ・固定局が不要	・精度が悪い

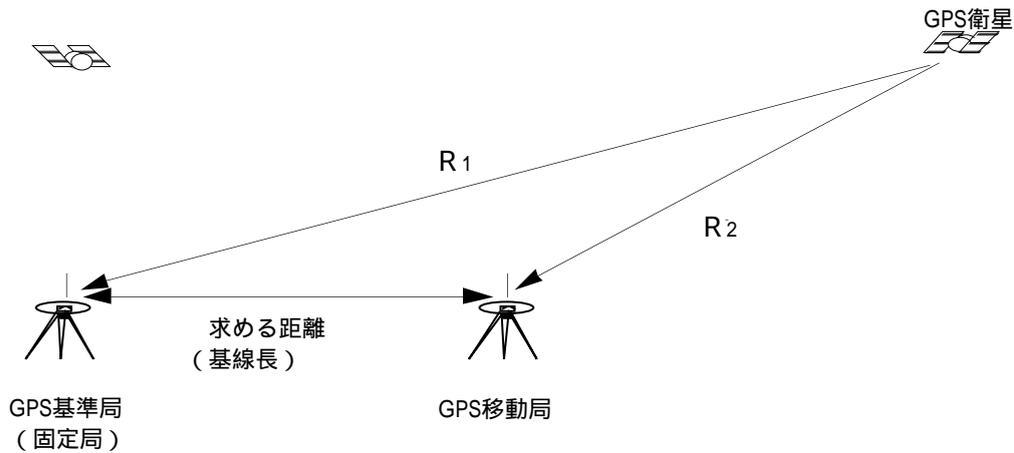


図 - 2 搬送波測位における基線長の求め方

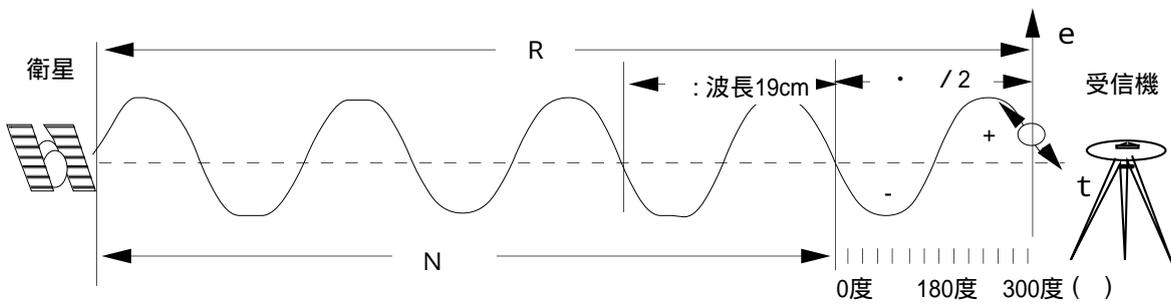


図 - 3 搬送波の整数値バイアスと位相

- :位相
- C :電波伝播速度
- d T :衛星の時計誤差
- d t :受信機の時計誤差

このRの中に含まれる電波の波の数(整数値バイアス)を求めることを初期化という。

3.2 RTK-GPS測位の誤差要因

(1) GPS衛星の配置による誤差

測定に使用する衛星がどの位置にあるかによって、測定点の測位誤差が異なる。

GPS測位は最低4個の衛星からの情報(位置、高さ、時間)により測位点を決定する。その際、衛星を頂点とする四面体の体積をできるだけ大きくとるのが望ましく、そのためには、2個(または1個)の衛星は比較的高高度に、残りの衛星は低高度に位置するのが理想的である。しかし、測距精度の観点からは、電波の大気圏通過距離が長くなる低高度の衛星位置は決して良い条件であるとは言えない。また、GPS衛星は水平方向には平等に配置しているが、垂直方向は水平線より下の衛星が見えなくなるため、均等に配置されていない。そのため、一般に

GPS測位は水平方向より高さ方向の精度が劣る傾向にある。

(2) 時計誤差・受信機の雑音

相対測位は、単独測位と違い複数の点で受信を行い、各測定点に共通な誤差要因の影響を相殺することによって、基線の測位精度の向上を図っている。しかし、基線長の影響によって相殺できないものがある。一方、相殺できるものには、受信機の雑音による位相測定値のばらつきと、各受信機でばらばらに起こるサイクルスリップの修正失敗による位相測定値の誤認がある。これらは本質的に同一の誤差要因と考えてよく、二重位相差という処理によって完全に相殺される。

(3) 衛星軌道誤差

基線が長くなるに従って誤差が相殺できなくなるのは、衛星位置の誤差、および電波伝搬経路の媒質による伝搬遅延の影響が大きくなるからである。これに対しては特別な補正が必要になってくる。

衛星の軌道誤差は

$$\pm (0.5 \sim 2\text{ppm}) \times \text{基線長} = \frac{\text{衛星の位置誤差} \times \text{基線長}}{\text{衛星までの距離}}$$

と表すことができる。

図 - 4 に示すように、衛星の位置にの誤差があったとする。仮に、衛星は基線中央の垂直上方にあって行路差 0 の場合とする。行路差 0 は仮想的な観測事実であるから、既知点、未知点、衛星を結ぶ二等辺三角形は少し傾く。図から分かるように、未知点の位置は衛星位置誤差によって B から B' に変わったように見える。基線長を d とすると、

$$BB' = d \cdot \frac{\Delta}{D} \quad (2)$$

ここで、 Δ : 衛星から測定点までの相対位置ベクトル
 D : 衛星位置誤差 とする。

の関係が得られる。

衛星の位置誤差は、
 航法メッセージによるとき 10m
 精密歴によるとき 1m
 程度といわれている。衛星までの距離を 20000km とすると、
 衛星の位置誤差 ÷ 衛星までの距離 = 0.5ppm (航法メッセージ)
 = 0.05ppm (精密歴)

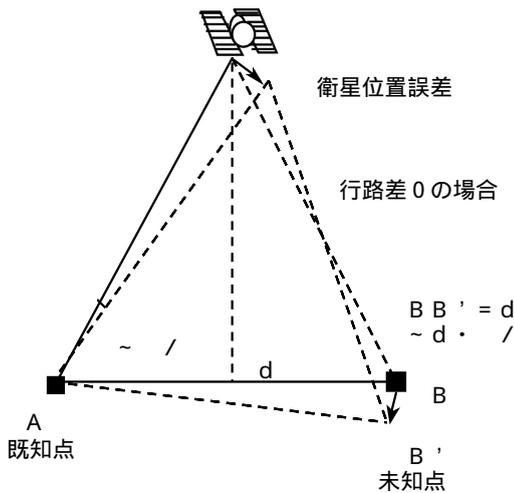


図 - 4 衛星位置誤差の影響

となる。つまり衛星軌道による影響は、基線が長くなるにつれ大きくなるため、高精度な測量を行うには基線長を十分に考慮しなければならない。特に RTK-GPS 測位の場合には、基線長が 10Km を越えると初期化ができないことがある。

(4) 電離層、対流圏の影響による誤差

次に、電波伝搬経路の媒質による伝搬遅延の影響について述べる。

一般に大気とは、電離層と対流圏の双方をいう。大気の状態は地域や時刻、季節によって変わるため、遅延量も様々である。しかし、測定点間の距離が短い場合には、

大気の状態は似通っているため、前述の二重位相差処理によって大気遅延はかなり相殺され、無視できるものと期待できる。しかし、10km を越える長い基線になると何らかの補正が必要となる。

電離層遅延については、2 周波数で観測した位相データを組み合わせることではほぼ完全な補正ができる。対流圏遅延については現在、決定的な方法はないが、標準大気を仮定したモデル(理論)式で計算するか、もしくは未知数として座標と一緒に推定してしまうのが普通である。

4. RTK-GPS 測位の精度検証、精度向上対策

4.1 距離と精度の関係

RTK-GPS 測位と従来型光学式測量機器の距離(基線長)と精度の関係を図 - 5 に示す。GPS は従来型光学式水準測量機器に対し、基線長が約 1km 以上の遠距離において高精度な測量が可能であるという特長を持つことがわかる。

4.2 平均処理時間と精度の関係

RTK-GPS 測位の高さの公称精度は、 $\pm 20\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ である。

RTK-GPS 測位はリアルタイムに測量結果を出力するため、瞬時の測量値は図 - 6 に示すように常に変動している。したがって、RTK-GPS 測位を水準測量に適用するには別途精度向上対策が必要になる。図 - 6 は基線長約 2.5 km において、RTK-GPS 測位を静止した状態で 8 時間連続測量した結果である。この変動している測量値の精度を向上させるには、長周期の 1 周期分の時間において平均処理することによって可能になると思われる。

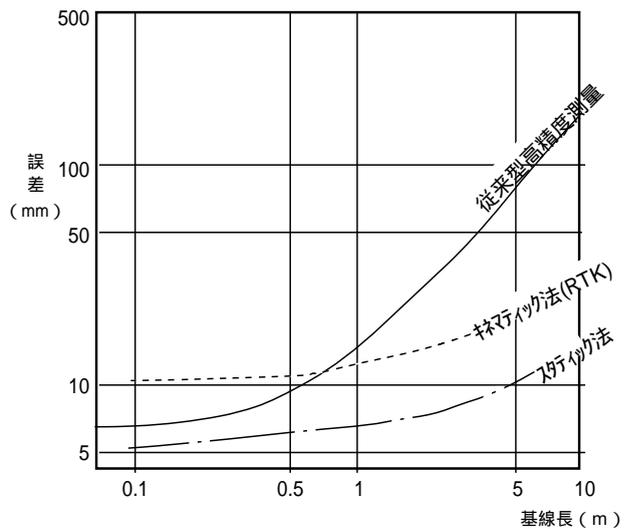


図 - 5 距離と高さ精度の関係

そこで、図 - 6 に示す測量値を F F T (Fast Fourier Transformation) 解析した結果 (図 - 7) 周波数 158.587 μ Hz、周期 105 分の成分が最も多く含まれていることが分かった。このことから、1 周期 (105 分) の計測時間での測量値を平均処理することによって能率良く精度向上を図ることができると考えられる。当然のことであるが、平均処理する時間が長いほど、より真値に近づくことが図 - 8 より分かる。

5 . R T K - G P S 測位の沈下測量への適用
R T K - G P S 測位単体では高さ管理に必要とされる精度が得られないため、レーザーレベルと統合したシステムを考案した。本システムは図 - 9 に示すように、R T K - G P S を用いて高さと位置を求め、レーザーレベルを中心として半径約 100m の相対的な高低差を求めることによって高精度かつ効率的な沈下測量を実現するものである。システムの概念図を図 - 9 に示す。

5 . 1 統合システムの原理
基準点にレーザーレベルを設置して回転するレーザー光による水平基準面を作り、その面との相対高さを測定

点に設置したレーザー受光器で測量する。このとき、測定点の位置を G P S 受信機アンテナ 1 を用いて測量することで三次元測量が可能になる。レーザーレベルの測定値から標高を求めるには、基準となるレーザーレベルの標高を測定する必要がある。

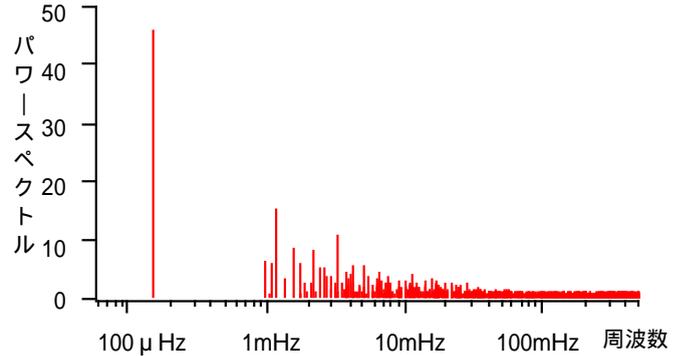


図 - 7 F F T 解析結果

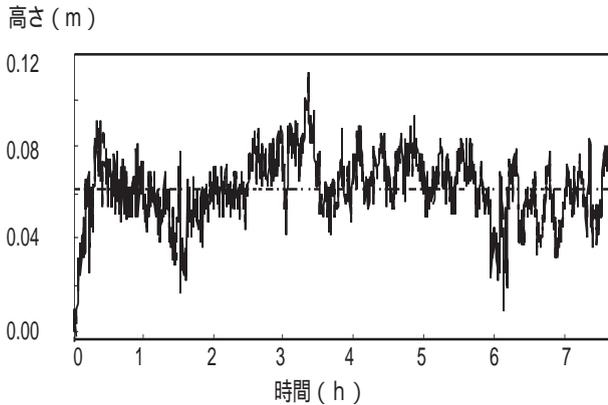


図 - 6 R T K - G P S 測位の高さ測量値の変動

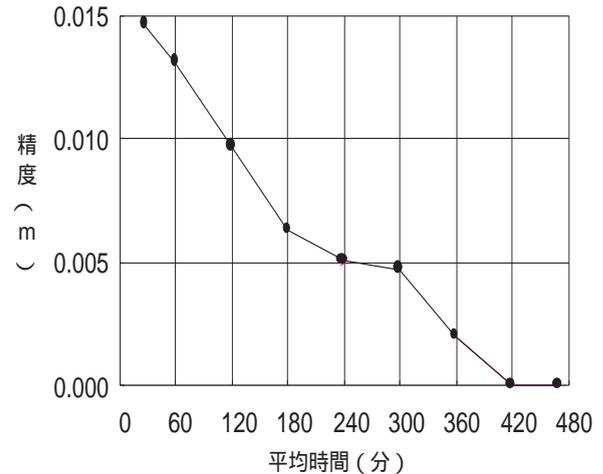


図 - 8 平均処理時間と高さ精度の関係 (基線長 2.5km)

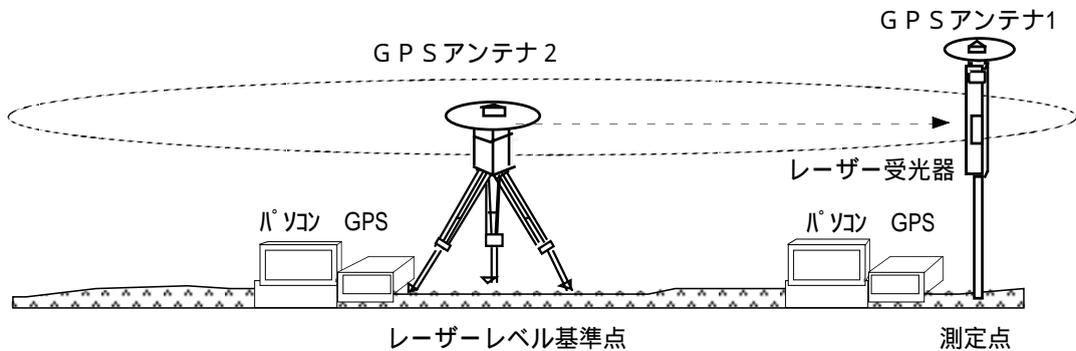


図 - 9 沈下測量システムの概念図

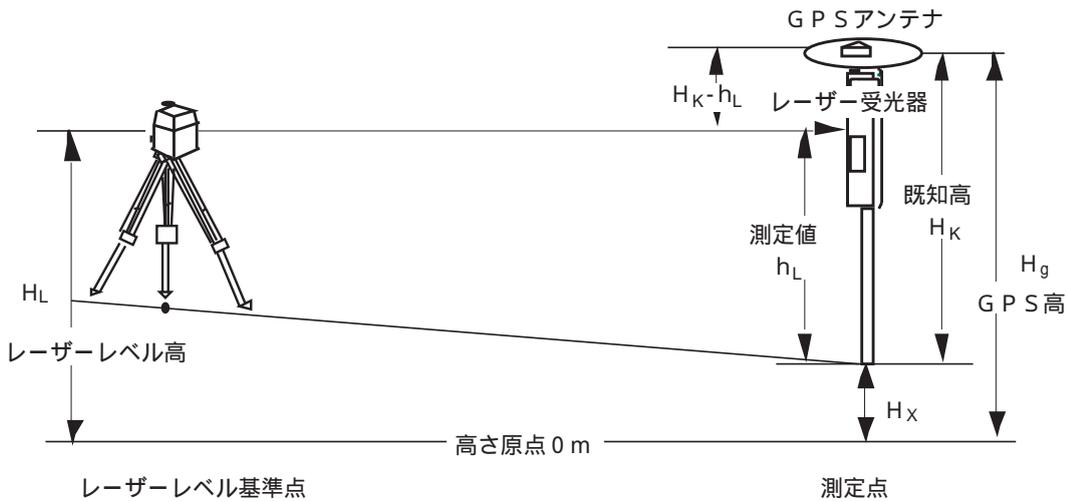


図 - 10 レーザーレベル基準点高の算出原理

その方法として次に述べる方法が考えられる。一つは、レーザーレベル上にGPS受信機アンテナ2を取付けて同時に連続測量を行い標高を求める方法である。

しかし、この方法ではGPS受信機が2台必要であり経済性に劣る問題がある。また、GPS受信機をレーザー受光器とレーザーレベルの上に交互に設置する方法も考えられるが、レーザーレベルの標高を正確に求めるためには約2時間の静止測量が必要であり効率が悪い。

そこで、1台のRTK-GPS受信機が2台の役割を担う方式を新たに考案した。以下にその原理を説明する。

レーザーレベルはRTK-GPS測位に比較して高さ精度が極めて高いため、図-10に示すようにレーザーレベルの高さ H_L はレーザー受光器上に固定したGPSの高さ H_g とレーザーレベルの測定値 h_L から間接的に求めることができる。

$$H_L = H_g - (H_k - h_L) \quad (3)$$

この値はRTK-GPS測位の測定値の変動誤差を含んでいるため測量データを平均化する。

この方法によって、RTK-GPS測位1台で測定点を移動しながらレーザーレベル基準点高を正確に測量する。各測定点の値は、レーザーレベル基準点高から各測定点のレーザーレベル測定値を引くことにより求めることができる。

5.2 統合システムの精度検証

GPS測位方式は出力される測位値が常に変動しているため、精度は標準偏差で表される。これに対し、従来の水準測量の精度を表す指標は往復の較差である。

GPS測量と従来測量の精度を比較するには、それぞ

れの精度を表す指標が違っているため検討が必要である。これらを組み合わせた統合システムにおいて、その精度を検証するためにはこの問題を明らかにする必要がある。

RTK-GPS測位のデータは平均処理することにより精度が向上することがわかった。

距離と精度の関係の検証を行うために、基線長2.5～12.5kmの間に数カ所の測量点を設けて長時間測量し、それぞれ2時間分の測量データの平均値を求めた。

図-11に距離と精度の関係を示す。最小二乗法を用いてデータの線形近似直線を求めると、高さ精度は $8\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$ となる。

仮に、最大基線長を8kmとすると2時間の平均精度 G_h は、

$$G_h = 8\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot 8\text{km} = 16\text{mm}$$

ただし、 $D(m)$: 基線長

となる。

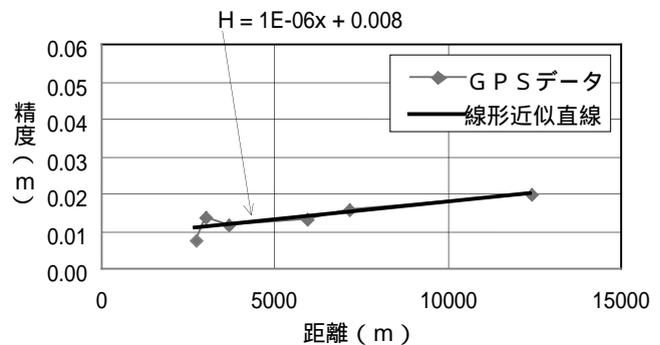


図 - 11 距離と精度の関係

次にレーザーレベルの精度を実験により求めると、レーザーレベル基準局からの距離が100mのとき、標準偏差で2mmの精度であった。

したがって、統合システムの総合精度は標準偏差で表すと、実験結果から次式のようになる。

$$\text{総合精度} = \sqrt{L_h^2 + G_h^2} = \sqrt{(16)^2 + (2)^2} = 16.12\text{mm}$$

L_h : レーザーレベルの精度

G_h : R T K - G P S 測位の精度

このとき、相対標高の総合精度はレーザーレベルと R T K - G P S それぞれの精度を合わせたものであるため、最大で、

$$\sqrt{(L_h^2 + G_h^2)} \times \sqrt{1^2 + 1^2} = 16.12 \times \sqrt{2} = 22.8\text{mm}$$

となることを見込んでおく必要がある。

一方、従来の水準測量の往復の較差を標準偏差に変換するための方法について図 - 1 2 を用いて説明する。

往復の較差の平均を最確値とする。最確値 L_0 は次式で表される。

$$L_0 = \sum_{i=1}^n f_i \times \frac{1}{2} \quad (4)$$

ここに、 f_i : 較差

ゆえに残差平方和 v は次式で表される。

$$v = \sum_{i=1}^n h_i^2 = \left(|h_0| - L_0 \right)^2 + \left(|h_1| - L_0 \right)^2 \quad (5)$$

ここで、 s_i は最確値と計測値の差

A、B 地点間で往復の水準測量を行った場合、A から B への測量での高低差を h_0 、B から A への測量での高低差を h_1 とする。

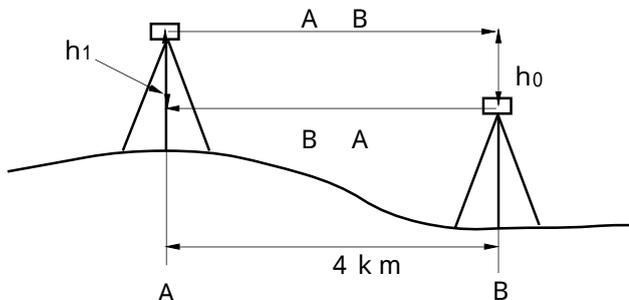


図 - 1 2 水準測量における往復の較差

これより、測定値の不偏分散 δ^2 は次式で表される。

$$\delta^2 = \frac{v}{n - q} \quad (6)$$

ここで、 $n - q$: 自由度

n : 測定回数

q : 未知数の数

最確値 L_0 の不偏分散 δ_0^2 は次式で表される。

$$\delta_0^2 = \frac{v}{n - 1} \quad (7)$$

従来の水準測量における相対標高の標準偏差はこの平方根 δ_0 で表すことができる。これによって、GPS 測量と従来の水準測量の精度は標準偏差によって比較することが可能となる。

空港等の現場を想定して、これらの理論式を用いて統合システムと従来の水準測量との精度検証を行う。

図 - 1 2 に示すように A - B 間を 8km とすると、3 級水準測量ではその較差は

$10\sqrt{s} = 10\sqrt{8} = 28\text{mm}$ となる。いま仮に、

A B + 50mm

B A - 22mm

と、その較差を 28mm とし 3 級水準測量を満たすとする。次に誤差調整を行う。

最確値 L_0 は明らかに A B のとき、

$L_0 = \sum_{i=1}^n f_i = (50+22)/2 = 36\text{mm}$ となるので、残差平方和 v は、

$v = (50 - 36)^2 + (22 - 36)^2 = 14^2 + 14^2 = 392\text{mm}^2$ となる。最確値の不偏分散は

$$\delta^2 = \frac{392}{2 - 1} = 392\text{mm}^2$$

となる。ゆえに、相対標高の標準偏差 δ は 19.8mm となる。

したがって、R T K - G P S 測位とレーザーレベルによる統合システムの 2 地点の相対標高精度は、従来の 3 級水準測量に比較してほぼ同等の精度になることがわかる。

以上の結果から、本システムは移動しながら連続測量が可能のため、埋め立て工事の施工管理や、道路補修管理、盛土の層厚管理、土地造成の高さ管理などの分野への応用も十分可能であるといえる。

6. まとめ

本研究で得られた成果は以下のようにまとめられる。

誤差要因の解明

RTK-GPSの測位値に含まれる誤差の要因について調査した。また、高さ精度が平面位置精度に比較して劣る原因を明らかにした。

精度の向上

RTK-GPSの誤差要因がランダム誤差と考えられるため、データを平均処理することにより精度が向上することを明らかにした。

従来方式との精度比較

統合システムと従来の水準測量の精度を、標準偏差によって比較した。統合システムの精度は従来の3級水準測量とほぼ同等の精度が得られ、埋立地の沈下測量等に実用可能な精度である。

7. 課題と対策

RTK-GPS補正情報サービスの整備

統合システムを用いて人工島などの沈下測量をおこなう場合には、RTK-GPS補正情報が必要である⁴⁾。そのためには安定した地盤上のRTK-GPS基準局の全国的な整備が望まれる。

実験による精度検証

今回は、統計的手法でRTK-GPS方式と水準測量の精度比較を行った。今後、統合システムを空港の沈下測量へ導入後は測量結果を用いた精度評価が必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、運輸省港湾技術研究所に多大なご指導をいただいた。紙面を借りて深謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本測地学会編：新訂版GPS-人工衛星による精密測位システム、(社)日本測量協会、1989
- 2) 日本測地学会編：現代測地学、(社)日本測量協会、1994
- 3) 土屋淳・辻宏道、GPS測量の基礎、(社)日本測量協会、1996
- 4) 重松文治：GPSを利用した高精度海上測位システムの評価と応用、海洋調査技術、第7巻、pp.9～20、1995