

GPSとレーザーレベルを用いた空港沈下 測量システムに関する研究

重松 文治¹・野口 仁志²・清水 英範³

¹正会員 五洋建設(株) 技術研究所 建設生産グループ 課長 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

²工修 関西国際空港(株) 空港設計部 情報システム課 課長 (〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地)

³正会員 工博 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

海上埋立空港の沈下測量は航空機の安全運航や舗装施設の維持管理のために重要な作業である。しかしながら、現状の測量作業においては、オートレベルやトータルステーションを用いて空港外の安定した水準点からもりかえ作業を繰り返しながら測量しているために時間を要するなどの課題がある。GPSは直接測点の位置と高さを求めることができるため、もりかえ作業が不要になり測量時間の短縮と省力化が可能である。しかし、GPSによるリアルタイム測量の結果は大きく変動しているため、沈下測量に必要な精度を得るためには静止して長時間測量を行い平均する必要がある。本研究ではこの課題を解決し測量作業の効率化を図ることを目的にGPSとレーザーレベルと組み合わせ、移動しながら正確な高さ情報が得られる新たな空港沈下測量システムを開発した。

Key Words :RTK-GPS, Laser Level, Height measurement

1. はじめに

人工の超軟弱地盤上に構築された東京国際空港沖合い展開部においては、運用開始後10年で最大1.5m程度の沈下が予想されている¹⁾。そのため、空港全体の沈下性状を把握するための地盤動態調査と滑走路やエプロンの排水問題から一定の平坦性を確保するための水準測量を1年に1回、約2カ月の期間で実施している。これらの作業は航空機の離発着のない夜間に行われているが、今後、空港が24時間運用されることから測量時間の大幅な短縮が必要とされている。現在、東京国際空港では空港外の水準点から空港内の基準となる水準点までの測量は2級水準測量、空港内の沈下測量は3級水準測量で実施している²⁾³⁾。これらの測量作業にはオートレベルやトータルステーションを用いている。しかし、一度に測量できる範囲が狭いことによる空港内施設の測量作業の増大、および多数の測点への移動などに時間を要することなどの課題がある。

本研究では沈下測量作業の効率化を図ることを目的として、RTK-GPS (Real Time Kinematic - Global Positioning System)方式とレーザーレベルを組

み合わせた新しい沈下測量システム(以下「統合システム」という)を開発した。この統合システムはRTK-GPS方式が有するリアルタイム性と広域性、レーザーレベルが有する近距離での高精度と追尾性などを利用したものである。

本稿ではまず、RTK-GPS方式とレーザーレベルの特性を踏まえた上で、これらの統合システムの設計方法について解説する。そして、提案する統合システムの精度、作業効率について従来方式と比較検討する。

2. RTK-GPS方式の概要

(1) RTK-GPS方式の種類と精度

GPS方式は要求精度により方式の選択ができ、そのうえ測点間の視認が不要で、一度に測量できる範囲も広いことから様々な分野で利用されている。一般的に高精度が要求される基準点測量にはスタティック方式、移動体や迅速な測量が要求される工事測量などにはリアルタイムに測量結果が得られるRTK-GPS方式が用いられている。RTK-GPS方式は、図-1に示すように衛星から受信した搬

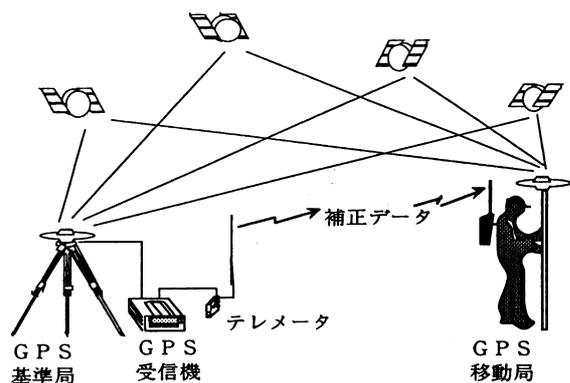


図-1 RTK-GPS方式の概念図

送波位相やコード情報を処理し、その補正データを移動局へ送信するGPS基準局と、基準局から送信された補正データ⁹⁾とGPS衛星からのデータで測点の位置を求めるGPS移動局から構成される⁹⁾。

RTK-GPS方式の高さの精度⁹⁾を以下に示す。

$$\sigma = \pm (20\text{mm} + 2\text{ppm} \times S) \quad (1)$$

σ : 精度

ppm : 10^{-6}

S : 基線長 km (GPS基準局とGPS移動局間)

スタティック方式の高さ精度⁹⁾⁷⁰⁾を以下に示す。

$$\sigma = \pm (10\text{mm} + 1\text{ppm} \times S) \quad (2)$$

(2) 平均時間と基線長の違いによる高さ精度

RTK-GPS方式はリアルタイムで測量データが得られるため、空港のように多くの測点がある測量に適している。しかし、リアルタイムデータは変動がありそのままでは沈下測量に必要な精度は得られない。RTK-GPS方式の高さデータの特性を調べるため、RTK-GPS方式を基線長2.5kmの地点に静止した状態で8時間の連続測量を行った結果を図-2に示す。RTK-GPS方式の測量値は約±20~30mm変動していることがわかる。この変動は電離層や対流圏、マルチパスなどの影響によって発生するもので白色雑音⁹⁾と周期性をもった成分を合成したものと考えられる。白色雑音は正規分布であるから、平均処理することによって変動を小さくすることができる。

そこで、平均時間と精度との関係を調べるため、8時間の測量データの平均値を最確値とみなし、t時間(t=0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8(h))ごとの平均処理を行い、t時間の平均値と最確値との残差を求め

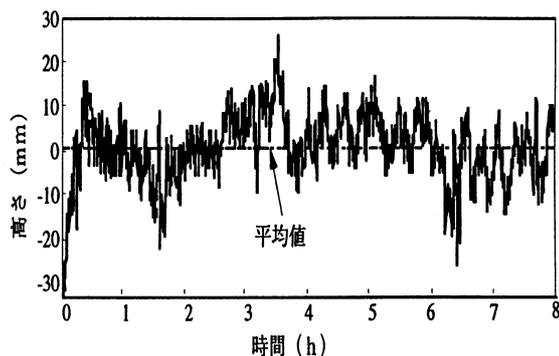


図-2 RTK-GPS方式の高さ観測値の変動

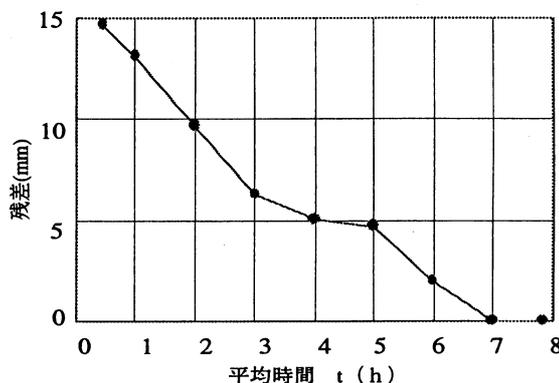


図-3 平均処理時間と高さ精度の関係 (基線長2.5km)

た。その結果を図-3に示す。平均処理時間が長くなるにつれ残差が減少し、2時間以上の平均処理を行うことで最確値との差異は10mm以内、4時間以上の平均処理で5mm以内になることがわかった。周期性の変動成分については、FFT (Fast Fourier Transformation)⁹⁾解析によって変動周期の主成分を求め、その周期、もしくは周期のn倍の時間で平均処理することで周期性の変動を小さくすることができる。図-4から、変動周期の主成分は160 μ Hzであり、周期は約2時間に相当する。

次に、RTK-GPS方式の基線長と平均処理時間と精度との関係を実験によって求めた。基線長を2.5km, 6.0km, 9.5kmとし、それぞれ8時間の連続測量を3日間行った。各基線長ごと全データの平均を最確値として、測量データの中から2時間および4時間ごとの平均処理を行い、各平均値と最確値との差を求め、標準偏差を算出した。その結果を図-8の③と④に示す。そして、最小二乗法を用いて標準偏差の線形近似直線を求め以下の結果を得た。

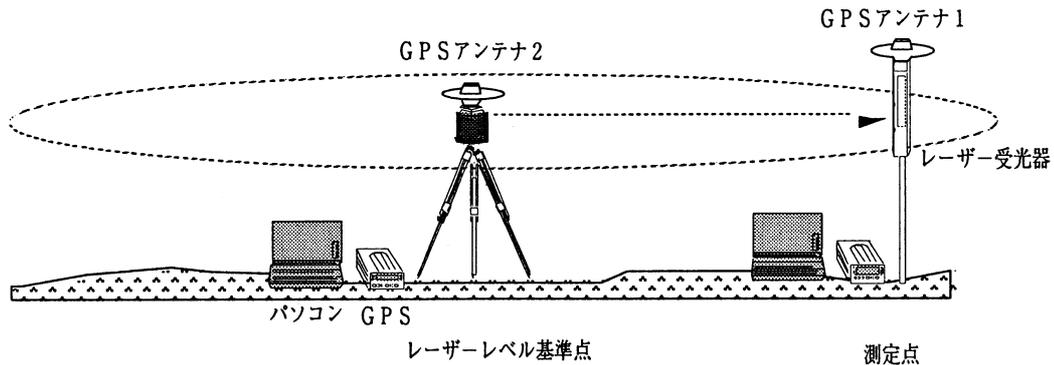


図-5 統合システムによる空港沈下測量システム概念図

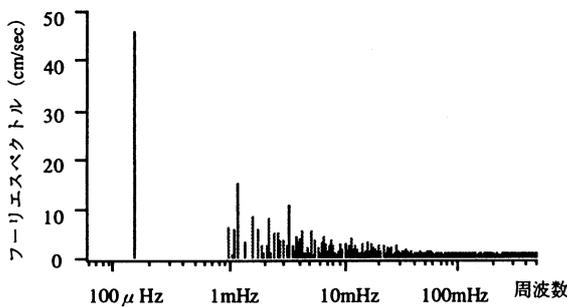


図-4 FFTによる周期性の変動成分の解析結果

$$\sigma_2 = \pm (8\text{mm} + 1\text{ppm} \times S) \quad (3)$$

$$\sigma_4 = \pm (6\text{mm} + 1\text{ppm} \times S)$$

σ_2 : 2時間の平均処理の精度
 σ_4 : 4時間の平均処理の精度

3. 統合システムの基本設計

(1) RTK-GPSと光学方式の組み合わせ検討

RTK-GPS方式の高さ精度は、平均処理を行うことで向上することが確認できた。しかし空港内の膨大な測点のすべてを長時間静止して連続測量を行うことは時間的制約から不可能である。そこで、一度に測量できる範囲は狭いが瞬時に正確に測量できるといった特長を有する光学方式に着目し、RTK-GPS方式と光学方式を組み合わせる方法について検討した。

RTK-GPS方式との組み合わせに最も適した光学方式を選定するため、各種光学方式の特徴と精度を調査する実験を行った。実験に用いた機器は、電子レベル、オートレベル、レーザーレベルの3種である。ここでレーザーレベルとは、回転レーザー式を意味する。

なお本実験で用いた光学測量機器のカタログ精度は、電子レベルは1kmの往復標準偏差1.0mm、オートレベルは1kmの往復標準偏差±2.0mm、レーザーレベルの水平精度は±10" (±2.5mm/50m) である。これらの光学測量機器について1回のもりかえ(標尺距離)を50mとして片道距離1kmの往復の較差を求めた結果、電子レベルは0mm、オートレベルは4mm、レーザーレベルは10mmの結果が得られた。従って、電子レベルはカタログの精度が得られ、オートレベルはカタログの精度より2mm劣り、レーザーレベルに関しては、次式の誤差伝搬の法則により1kmの精度は約15mmとなることから、ほぼカタログの性能が確認できた。

$$\sigma = \sqrt{(2.5)^2 \text{mm} \times n} = 15\text{mm} \quad (4)$$

σ : 1kmにおける精度
 n : 1kmの往復もりかえ数40回

水準測量における各等級の精度²⁾は1級水準は $2.5\text{mm}\sqrt{S}$ 、2級水準は $5.0\text{mm}\sqrt{S}$ 、3級水準は $10.0\text{mm}\sqrt{S}$ である。(S:測量距離(片道)km)

従って、電子レベルは1級水準測量、オートレベルは2級水準測量、レーザーレベルは3級水準測量相当の精度を有していることが確認できた。

RTK-GPS方式との組み合わせにおいて最適な光学方式としては、電子レベルが最も高精度であるが、手動操作を基本としたものであり自動化が難しい。それに対してレーザーレベルは精度は劣るが、図-5に示すようにレーザー発光器から回転レーザー光を水平に発射して水平基準面を形成し、測点でそのレーザー光を受光した高さを自動的に読取りコンピュータに出力する。そのため追尾の必要性が

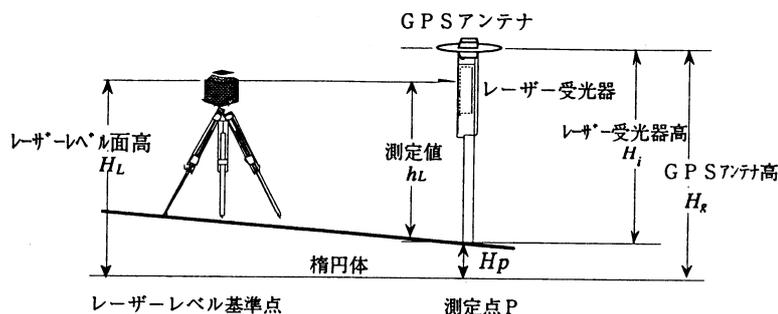


図-6 レーザーレベル基準点高の算出原理

なく測定の自動化が可能であることから、レーザーレベルと組み合わせた統合システムを検討することとした。

統合システムを開発する課程で最初に基本となった原理を図-5に示す。まずRTK-GPSを2台とレーザーレベルを組み合わせたシステムを検討した。レーザーレベルはレーザーレベル基準点から測定点との比高を正確に求めることができる。しかし位置を求めることはできないため、レーザー受光器上にRTK-GPSアンテナ1を取り付けることで位置も同時に求めることが可能となる。レーザーレベル基準点の標高はレーザーレベル上にRTK-GPSアンテナ2を上に取り付け長時間測量を行うことで高精度に求められる。

しかし、この方法ではRTK-GPSをレーザーレベル上とレーザー受光器上と2台必要とするため経済性に劣る。また、1台のRTK-GPSを先にレーザーレベル上に設置し正確な標高を求めた後、レーザー受光器上へ移す方法も考えられるが、レーザーレベルの高さを正確に求めるためには長時間の測量が必要であり操作性と効率が悪い。

図-6に今回開発したRTK-GPS1台とレーザーレベルを組み合わせた方式の原理を示す。本システムはレーザーレベル基準点の標高をレーザー受光器上に取り付けたRTK-GPSアンテナより得ようとするものである。レーザーレベルの精度がRTK-GPS方式に比較して高精度であることから図-6に示すようにレーザー受光器上に取り付けたRTK-GPSアンテナより得られた高さをレーザーレベルを介して式(5)によりレーザーレベル基準点の高さに変換することができる。

$$H_L = H_g - H_i + h_L \quad (5)$$

H_L : レーザーレベル基準面の高さ

H_g : レーザー受光器上GPSアンテナの測量値

h_L : レーザー受光器の測量値

H_i : レーザー受光器の長さ

つまりレーザーレベル上にRTK-GPSアンテナを設置したのと同じ効果が得られる。この値はこれまで述べたようにRTK-GPS方式の高さの変動を含んでいるため次式に示す平均処理を行う。

$$\overline{H_L} = (1/n) \sum_{i=1}^n H_{Li} \quad (6)$$

n : サンプル回数

このようにして、レーザー受光器上に取り付けられたRTK-GPS1台で測点を移動しながらレーザーレベルの高さを高精度で測量することが可能となる。レーザーレベル基準点の標高が求めれば、次に、測点Pの高さ H_p はレーザーレベル面の高さ H_L とレーザー受光器の測量値 h_L から次式によって求めることができる。

$$H_p = H_L - h_L \quad (7)$$

(2) レーザーレベルの高さ精度の検証

これまでのRTK-GPS方式の精度検証は静止状態で行った結果である。統合システムのようにRTK-GPSを移動しながらレーザーレベル基準点へ変換し集めた結果が静止状態での精度と同等であることを検証する必要がある。図-7に精度検証に用いた実験システムを示す。基準点に設置したレーザーレベル上のRTK-GPSアンテナ2で静止測

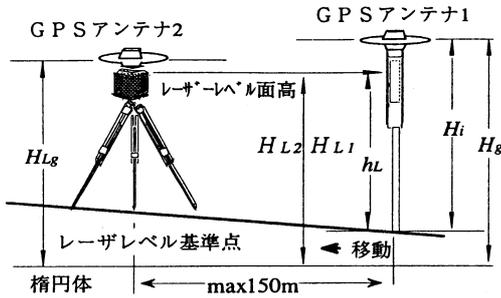


図-7 レーザーレベルの高さ精度の確認方法

量により求めたレーザーレベル高さ HL_2 の平均値と、GPSアンテナ1を取り付けたレーザー受光器を移動させながら連続測量して求めたレーザーレベル基準局の高さ HL_1 の平均値がそれぞれ等しいことを確認した。実験はRTK-GPSアンテナ1を取り付けたレーザー受光器をレーザーレベル基準局から半径150m以内の範囲で4時間移動させながら測量した。その結果、静止したレーザーレベル上のRTK-GPSアンテナ2との差は5mmであった。図-3の結果から静止測量によるRTK-GPS方式の4時間平均の残差5mmと同等であるとみなせる。以上から、RTK-GPSアンテナを移動させてもレーザーレベル基準局の高さを静止状態と同じ精度で測量できることが確認できた。

4. 統合システムと従来方式の精度検討

(1) RTK-GPSと水準測量との精度比較方法

RTK-GPS方式と従来水準測量との精度比較は統計的手法と実験の2通りの方法があるが、本研究では統計的手法を用いた。RTK-GPS方式の精度は標準偏差で、水準測量の精度は通常往復の較差で表示されているため、水準測量の精度を標準偏差に変換する必要がある。以下、その方法について述べる。

水準測量において、 n 回の測量を行った場合、最確値の標準偏差の推定値 m_0 は、ある測量値の残差を v_i とすれば、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}} \quad (8)$$

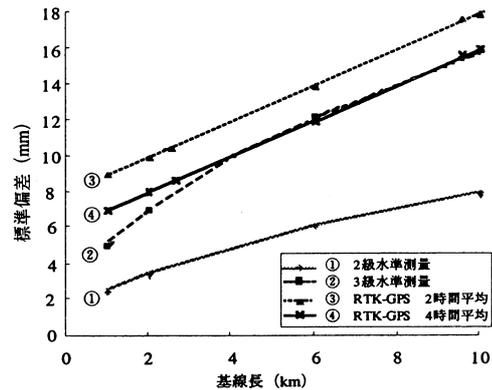


図-8 基線長と比高の標準偏差の比較

ここで、 $[*]$ はガウスの総和記号を示し、

$$[vv] = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 \quad \text{である。}$$

いま、ある2点間の往復1回ずつの水準測量における往復差から精度を求めることを考える。往復の距離が同じであるとし、往復差を d とすれば、測量比高の残差平方和は次式となる。

$$[vv] = \frac{d^2}{2} \quad (9)$$

一方、測量回数 $n=2$ であるから標準偏差の推定値 m_0 は次式のようになる。

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{d^2}{4}} \quad (10)$$

次に、式(10)を用いて2級、3級の水準測量の視準距離と標準偏差の関係を調べる。

2級水準測量の往復差の制限値は $\pm 5\text{mm}\sqrt{S}$ である。したがって、最確値の標準偏差は次式で与えられる。

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{(5\text{mm}\sqrt{S})^2}{4}} = \pm 2.5\text{mm}\sqrt{S} \quad (11)$$

また、3級の水準測量の往復差の制限値は $\pm 10\text{mm}\sqrt{S}$ であるから、同様に最確値の標準偏差は次式のようになる。

$$m_0 = \pm 5\text{mm}\sqrt{S} \quad (12)$$

図-8の①と②に式(11)と式(12)から求めた2級、3級水準測量の各基線長における標準偏差を③と④にRTK-GPS方式の2時間と4時間平均の精度を示す。

これらの結果をもとにRTK-GPS方式と、2

級, 3級水準測量の標準偏差を比較し以下の結果を得た.

①RTK-GPS方式の2時間平均の精度は, 図-8からわかるように, 3級水準測量より悪い.

②RTK-GPS方式の平均処理時間4時間の精度は図-8から4~9kmの範囲で与えられる.

$$(6mm + 1S) \leq 5mm\sqrt{S} \quad (13)$$

$$4 \leq S \leq 9km$$

これは, 3級水準測量相当であるといえる.

(2) 空港における本システムと水準測量の精度比較

東京国際空港において, 現行の水準測量の方法と統合システムの運用方法と, それぞれの精度検証について説明する.

現行の空港内施設の維持管理のための沈下測量は, 図-9に示すように外部の水準点Aより2級水準測量で求めた空港内のB点と, B点を用いて3級水準測量により約2km間隔で水準点C, D点などを設けている. この水準点を用いて, 沈下測量エリアの近くに仮B.M.を設け, この仮B.M.を用いて測点の測量を行っている. 現行の沈下測量方式の最大誤差を求める. 空港外の既知点Aから最も遠方の測点P3における標準偏差は次式のようになる.

$$m_0 = \pm\sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2} = \pm 9.7mm \quad (14)$$

$$m_1 = \pm 2.5mm\sqrt{3} : (A-B)$$

$$m_2 = \pm 5.0mm\sqrt{2} : (B-C)$$

$$m_2 = \pm 5.0mm\sqrt{2} : (C-B.M.)$$

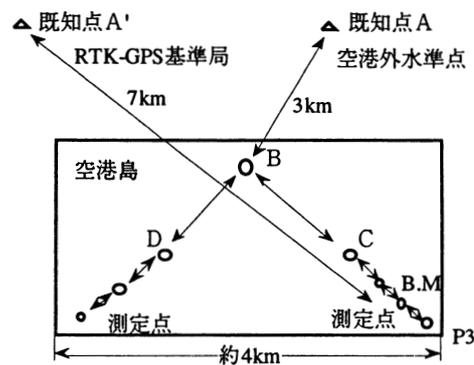
$$m_4 = \pm 5.0mm\sqrt{0.5} : (B.M.-測点)$$

($m_1 \sim m_4$: 2級, 3級水準測量の標準偏差)

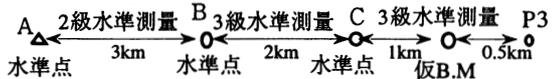
次に, この現行方法の精度と統合システムの精度比較を行う. 統合システムの適用においては高さの基準をRTK-GPS方式の結果を用いる方法だけでなく, 現行方式の水準測量で求めた空港内の水準点を用いる方法がある.

a) 空港内の水準点を用いる方法と精度

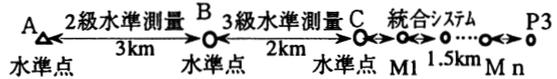
近くに安定した水準点が得られる場合には, それを利用した方が精度が良い. その方法と精度について図-9の空港の例を用いて説明する. 最も遠方の測点P3を統合システムで測量する場合, レーザーレベル基準点の高さに現行の水準点Cの高さを用いたときの標準偏差を求める. 水準点Cから最大1.5km離れた測点P3をレーザーレベルを用いて測量するには,



現行の測量方法



a) 水準点を用いる統合システム



b) RTK-GPSの高さを用いる統合システム



図-9 空港内施設の沈下測量の方法

レーザーレベルの測量距離が片側150m, 両側で300mのためレーザーレベル基準局のりかえ作業が約5回必要となる. ただし, レーザーレベルの精度は前後独立していると考えられるため計算上のりかえ数を10とした. したがって標準偏差は次式のようになる.

$$m_0 = \pm\sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 \times n} = \pm 9.5mm \quad (15)$$

$$m_1 = \pm 2.5mm\sqrt{3} : (A-B)$$

$$m_2 = \pm 5.0mm\sqrt{2} : (B-C)$$

$$m_3 = \pm 1.5mm : \text{レーザーレベル150mの実験精度}$$

$$n = 10 : \text{レーザーレベルりかえ数}$$

となり, 現行の水準測量の精度とほぼ同じである. しかし, レーザーレベル受光器を車輛に搭載するなどの手法によって測量の高速化が可能である.

b) RTK-GPS方式の高さを用いる方法

2章で述べたように, 統合システムにおいてレーザーレベルの基準高をRTK-GPS方式により求める場合には測量時間が4時間必要である. しかし, 実際の測量ではレーザーレベルの基準局を中心とした, 半径140m (10mの重なりを考慮) の内円を10mの測量間隔で測量したときの測量時間は, 実験結果から約1時間であった, そのため残り3時間が無駄な時間となる. そこで図-10に示すように, a, b, c, dの隣接するエリア間に共通点Mを設け, 各エ

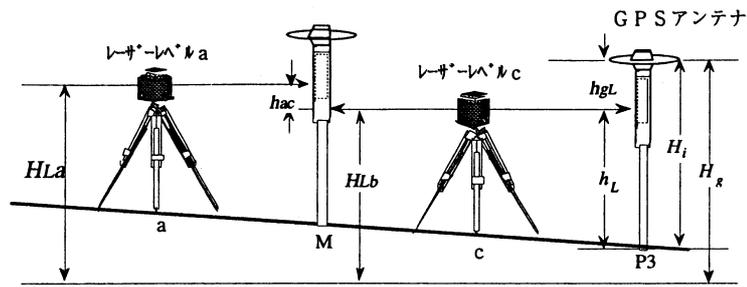


図-11 統合システムによる共通点を用いた沈下測量の概念図

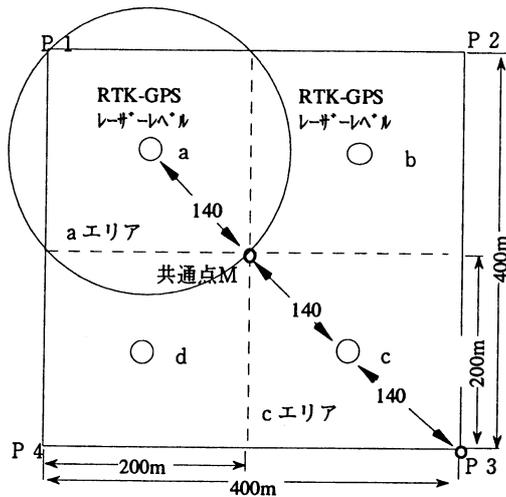


図-10 統合システムの1回の測量処理範囲

リアごとのデータを結合することによって4時間分の連続データとして取り扱うことができるようにする。その方法について図-11を用いて説明する。

RTK-GPS基準局から最も離れ、かつレーザーレベルaから最も離れたP3点で測量したRTK-GPS方式による高さをレーザーレベルcを介してレーザーレベルa点に次式を用いて導き平均化する。

$$\overline{HLa} = \frac{1}{n} \sum (Hg - hgL + hac) \quad (16)$$

n: 測量回数

このようにして複数のエリアのデータを合計し平均化することで高精度にレーザーレベルa点の高さを求めることが可能である。この方法による精度について検討する。まず、a点における標準偏差Maは次式のようになる。

$$Ma = \pm \sqrt{Gp^2 + m_1^2 \times n} = \pm 13.2\text{mm} \quad (17)$$

ここで $Gp = 6\text{mm} + 1\text{ppm} \times S$: RTK-GPSの精度
($S = 7\text{km}$: RTK-GPS基線長)

$m_1 = \pm 1.4\text{mm}$: レーザーレベル140mの実験値

$n = 3$: レーザーレベルのもりかえ数

以後、このようにして求めたレーザーレベルa点の高さを基準として、各測点を測量する。

この結果、測点P3の標準偏差MP3は次式のようになる。

$$MP3 = \pm \sqrt{Ma^2 + m_1^2 \times n} = \pm 13.4\text{mm} \quad (18)$$

これは、現行の水準測量の精度にはおよばない。しかし、空港内の水準点も仮B.Mも不要であることから、作業効率が良く省力化が図れる。そのため、埋め立て初期のように沈下が大い場合には利用可能であると思われる。

5. 東京国際空港を対象とした適用実験

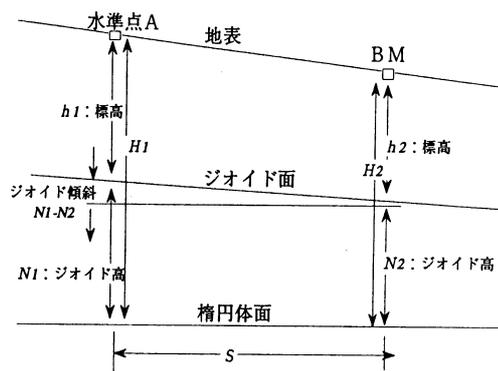
(1) 東京国際空港での実験結果

本実験の目的は、空港土木施設の維持管理のための沈下測量に統合システムを適用して精度および効率を明らかにすることである。実験は1998年3月に東京国際空港の駐機場において実施した。RTK-GPS基準局は川崎の補正情報サービス⁴⁾を用いた。

GPSによって得られる高さは楕円体高である。一方、水準測量の測量値は、標高、すなわち東京湾平均海面を陸地へ延長したジオイド面を基準としている。従って、従来の水準測量と同じ基準とするためには、GPSから得られた楕円体高をジオイド面からの高さに変換しなければならない。そのためには楕円体高とジオイド面との差であるジオイド高を求める必要がある、その方法について説明する。標

表一 G P Sと水準測量による測量結果 (単位:m)

測点	水準点 (No.10-1)	仮 BM	ジオイド差
RTK-GPS高 (WGS-84)	42.072	40.230	—
標高 水準測量	6.959	5.121	—
ジオイド高 H-h	35.113	35.109	0.004



図一12 ジオイド高とジオイド傾斜の関係



写真一1 東京国際空港での測量の状況

高の分かっている水準点上でGPS測量を行うことにより次式で示すジオイド高が求まる。

$$N = H - h \quad (19)$$

N: ジオイド高

H: GPSによる高さ測量値

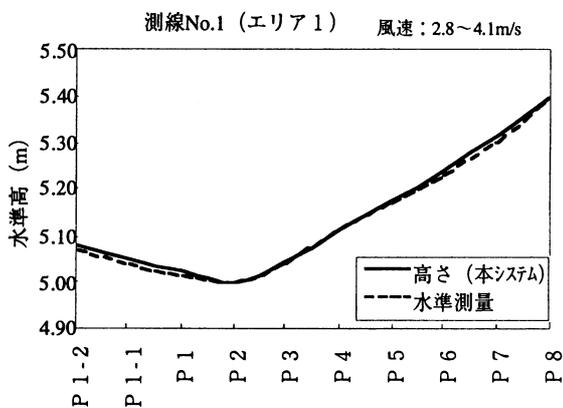
h: 水準測量による標高

また、離れた水準点のそれぞれでジオイド高N1, N2を求めれば、その差がジオイド傾斜となる。図一12にジオイド高とジオイド傾斜の関係を測量結果を表一1に示す。東京国際空港付近のジオイド高は約35.1mあることがわかった。

500mの距離におけるジオイド差は4mmでありこれはRTK-GPS方式の誤差範囲であることから、統合システムにおいて400mの範囲であればジオイド傾斜は考慮しなくても良いことがわかる。

図一13に統合システムによる沈下測量結果と、従来の水準測量による沈下測量結果を示す。今回はRTK-GPS方式で求めた高さを水準点と同じ高さに補正した。沈下測量結果の傾向としては、いずれもよく一致している。写真一1に統合システムの測量状

図一13 統合システムと従来方式の沈下測量結果



図一13 統合システムと従来方式の沈下測量結果

況を示す。

(2) 共通点の閉合差

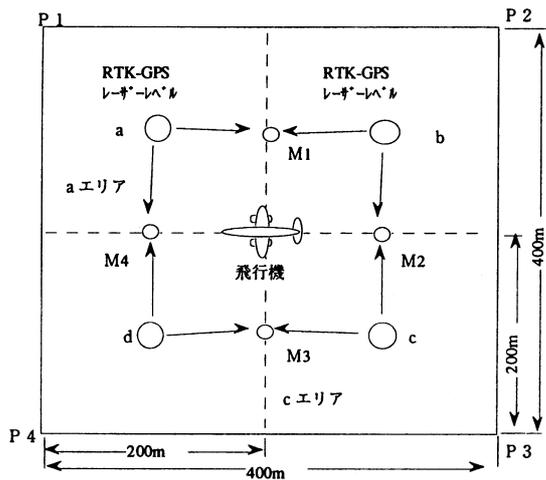
駐機場やエプロンは測量中に飛行機が駐機していることがあり場所によっては構造物などにより、共通点Mを4エリアの中心へ置けない事がある。そのような場合の補正方法について説明する。図一14に示す4つの測量エリアを順に隣接エリア間の共通点を設け、閉合による補正方法を行う。図中のa~dは、各エリアのレーザーレベル設置位置で、a→b→c→d→aの順序で移動する。h1~h4はレーザーレベル間高低差で、隣接するエリアの共通点M1~M4を両エリアからレーザーレベルで測量した高さの差である。共通点が複数ある場合、その平均値を高低差とする。S1~S4は各エリアに設置したレーザーレベル間の距離で、レーザーレベル上に設置したGPSによって算出する。高さの基準をレーザーレベルaにとり、レーザーレベルb~dの最確値(H02~H04)を導く。以上の処理を行い、閉合差を各点に配分する

表一 補正結果 単位(m)

レーザーレベル	高低差 (h)	距離 (S)	残差	レーザーレベル	最確値 (Ho)
a - b	+0.112	210.072	-0.00130	a	42.621
b - c	+0.325	198.252	-0.00123	b	42.734
c - d	-0.052	201.015	-0.00124	c	43.061
d - a	-0.390	199.580	-0.00123	d	43.010
	閉合差		残差総和		
	-0.005		-0.005		

表一 統合システムと従来方式の作業効率の比較

項目	統合システム		従来方式	
	条件	所用時間 (hr)	条件	所用時間 (hr)
走行時間 (走行距離4km)	時速5km	0.8	時速3km	1.3
測定時間 (400測点)	移動測定	0	停止(1測点30秒)	3.3
測線移動時間 (20測線)	1回1分	0.3	なし	0
合計時間 (hr)		1.2		3.6



(3) 作業効率の比較

測量区域を1辺200mの正方形、測点数400の条件で作業効率を比較した結果を表一3に示す。統合システムの作業効率は従来方式に比べて作業時間で3分の1であることがわかる。

さらに、統合システムでは測量結果が迅速に得られるのに対し、従来方式は測量データのコンピュータ入力や手動によるデータの処理などの作業が必要になる。

6. まとめ

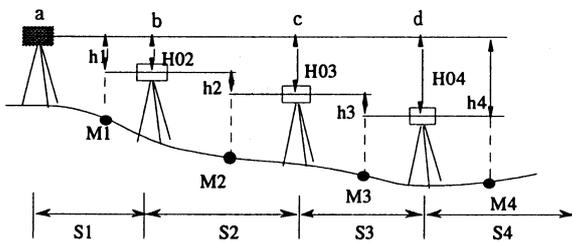
本研究で得られた成果および今後の課題は以下の通りである。

(1) 成果

①基線長4～9kmにおいて4時間平均処理を行うと、3級水準測量相当の精度が得られる。

②空港外のRTK-GPS基準局を用いる統合システムの高さ精度は、現行の水準測量方式を下回る。しかし、仮定条件のもとでの統合システムの作業効率は、従来方式に比べて作業時間で約1/3である。

今後予定されている海上新空港では、当初の沈下は年間数10cmに達する場合もあると予想されている。このような場合には空港島内部の水準点も同時



図一 14 共通点Mを用いたエリア間の閉合差

ことによって精度を向上させることができる。

東京国際空港における測量の補正結果を表一2に示す。今回の測量では、基準レーザーレベルの移動距離は808.9mで閉合差は5mmであった。

に沈下するため、従来の水準測量に比較して多少精度は劣るが空港島外からRTK-GPS方式を用いて直接沈下測量が可能な統合システムは有効であると考えられる。

(2) 課題と対策

①RTK-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行う場合には、RTK-GPS補正情報が必要である。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。

②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を行う予定である。

7. おわりに

本研究では、RTK-GPS方式とレーザーレベルを統合した新しい空港沈下測量システムを考案し、基礎実験および現場実験を通じて精度、作業効率などについて検証した。

今後、空港のみならず埋立地の高さ管理あるいは土地造成工事での土量管理など幅広い用途への適用についても検討する。

謝辞：研究開発にあたり、運輸省を中心とした委員会（GPSを用いた空港土木施設の施工・維持管理の省力化・合理化に関する調査）の方々から多くの技術的な指導を受けた。なお、実規模実験に際しては東京航

空局の東京航空事務所の協力をいただいた。記して感謝する。

参考文献

- 1) 塩見雅樹, 金沢寛, 稲田雅裕, 福田直三: 超軟弱地盤上の空港建設における地盤改良との計画と実際, 土木学会論文集 No.546/VI-32, pp.323-37, 1996.
- 2) 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, pp.153-154, 日本測量協会, 1996.
- 3) 運輸省航空局監修: 空港土木工事共通仕様書, 港湾空港建設技術サービスセンター, 1996.4.
- 4) 重松文治, 古賀浩行, 有場正人, 大場省平: 測量分野におけるデータコミュニケーション, 日本測量協会, 測量 pp18-24, 1998.2
- 5) 日本測地学会: 新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム, 日本測量協会, 第3版, 1993.9.
- 6) 小林敬幸, 保科英明, 古林宋計: GPSを用いた本格的な公共測量, 応用測量論文集 Vol.4, n o1 pp.13-20, 1993.6.
- 7) 井上義雄: 小規模地区に於けるGPS水準測量の精度検証, 応用測量論文集, Vol.4, No.1, pp.29-36 1993.6.
- 8) 鎌田高造: 国土地理院の全国GPS連続測量システム, 測量, pp.62-67 1994.9.
- 9) 茂木晃: 電気電子用語大事典, オーム社, pp.1031, 1992.
- 10) 細野武庸, 井内 登: 基準点測量, 測量叢書1, pp.305-307, 1997.3.

(1998.8.27 受付)