2001年　３月
APA No. 78-1
財団法人 日本測量調査技術協会

RTK-GPSを利用した応用測量への活用に関する研究

田　内　浩　司

１．はじめに

建設省国土地理院が作成した「平成6年度GPS測量の標準化に関する研究作業（２）報告書」では、以下のように記されている。『キネマティック測量の大きな特徴は、観測作業時の機動性にある。しかし受信時のノイズによる影響（細かな揺らぎ）や、２０～３０分程度の周期で見られる基線ベクトル成分の変動（大きな揺らぎ）の影響により、数秒程度の観測では観測結果（基線ベクトル成分）が安定しないことが明らかになった』とある。キネマティック測量を行う上での絶対条件は、固定局・移動局ともに同一の衛星でかつ最低限４つの衛星からの電波を受信しなければならない。更に観測中及び移動中にサイクルスリップがあってはならないことである。従って、実際の作業ではとても厄介で取り扱いにくいものになっていた。このような事情もあって開発されたのが、基地局から発信する観測データを通信装置を用いて移動局で受信しながら観測するRTK-GPS測量である。従来のキネマティック測量と異なり、移動局において受信機を整置したその位置をリアルタイムで知ることができるものである。GPS測量技術である航空機等の測位システムOTF（On The Fly）を用いる事でサイクルスリップが発生した場合も、その場において整数値バイアスの確定ができ、観測が再開できるメリットがある。

RTKは、GPS測量におけるスタティック法とトータルステーションによる多角測量の優れた部分を兼ね備えた特徴を持ち効率的、経済的な測量を行うことができる。

現在においては、これまでの検証実験・実験データ及び報告書等を基にRTKの測量技術は進歩し、更に、測量機器の改良により、よりよい結果を得られる様になった。

平成12年６月には、「RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル」が建設省国土地理院により制定され、実用段階に移行された。今回の研究期間と偶然リンクするが、本研究ではRTK-GPS測量で「測設が可能である」事に注目し、実用化にむけての検証実験を実施したので報告する。

２．実験観測

2.1　観測概要

GPS測量（スタティック・短縮スタティック法等）の観測には、より良い精度を保つ為に時間帯にある程度の制約がある。応用測量（路線測量）に関してはより良い精度を保つ事は必要であるが、作業効率面で観測が時間にあまり左右されたくない測量工種でもある。そこでRTK-GPS測量を、今後の実務（路線測量）にどのように取入れていけば良いのかを今回の実験「測設が可能である」を基に考え、次のような項目を考察する。

①測設作業が１日を通してほぼ同精度（許容範囲内）の成果を取得出来るのか。

②電子基準点から測設作業の場所（距離）が変化しても、同じような精度（許容範囲内）の成果が取得出来るのか。

③時間帯の変化及び電子基準点からの距離の変化が観測値にどのような影響をあたえるのか。

今回の研究は、「RTK-GPSを利用する公共測量作業マ

ニュアル」を参考にして実験を行った。

2.2　観測日・場所

観測日　平成12年６月30日　（午前９時～午後６時まで）
　　７月３日　（午前９時～午後６時まで）
　　７月５日　（午前９時～午後６時まで）

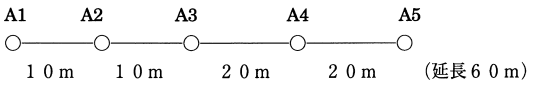
観測場所（添付図）
（地形：平地）

A地点	電子基準点より	約100m
（地理院周辺）	DMCA無線局より	約13.5km
B地点	電子基準点より	約5km
（高岡比較基線場付近）	DMCA無線局より	約10km
C地点	電子基準点より	約10km
	DMCA無線局より	約11km

2.3　観測方法

１）観測方針

各観測地点において約10mと20mの間隔の測点を設けて、そのポイントにてRTK-GPS測量を実施する。　　作業人員　１人

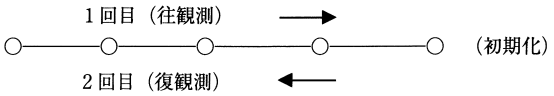


２）観測条件

・観測衛星数５個以上、仰角15度以上
・観測データ取得間隔は１秒
・観測回数はFIX解を得てから10エポック以上

３）観測方法

①１時間置きに１セット観測を９時間（９回）観測を実施する。１回目の観測（往観測）終了後に初期化を行い、続いて２回目の観測（復観測）を行う。
１回目の観測で、現地にて測設点として判断したポイントを座標データで取得する。
２回目の観測は、１回目の観測と同ポイントを座標データで取得する。



②B地点（５km）、C地点（10km）でも上記と同じ観測手順にて実施する。

2.4　使用機器

今回使用したRTK-GPS一式、DMCA無線の仕様は下記のとおりである。

RTK移動局

①受信機	Trimble	4700・２周波受信（RTK仕様） ２周波による解析内臓
②アンテナ	Trimble	22020-00 CompactL1/L2
③データコレクター	Trimble	TSC1（RTK仕様）
③アンテナポール		
④DMCA無線器+アンテナ		三菱FM-507G02形

RTK基準局（国土地理院構内）
電子基準点　　つくば1:NO.92110

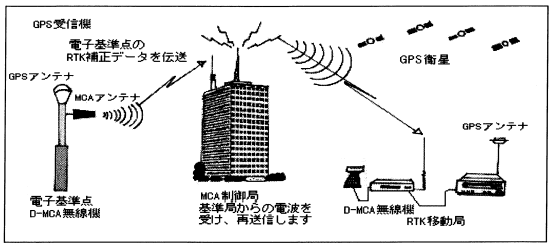
無線器：制御局
つくば第２（筑波山山頂）：通信可能エリア　半径70km

DMCA無線の主要緒元

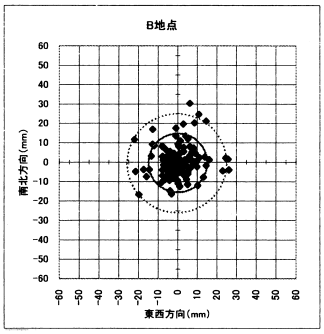
	デジタル方式
周波数帯	1.5GHz
送信電力	制御局　40W以下
指令局	指令局　2W以下
移動局	移動局　2W以下
変調方式	M16QAM（時分割多重）
通信方式	２チャンネル単信及び複信
広域接続	可

連続通信時間（月曜日～土曜日）、日曜日は終日５分

0:00～7:00	５分	7:00～9:00	３分
9:00～17:00	２分	17:00～19:00	３分
19:00～24:00	５分		



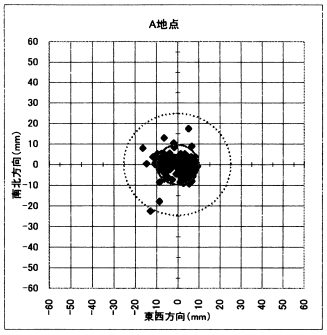
デジタルMCA無線によるRTK-GPSシステム構成



半径　15mmの円
(円に収まる観測点数＝84%)

標準偏差　0.008m(南北方向)
標準偏差　0.008m(東西方向)

図2

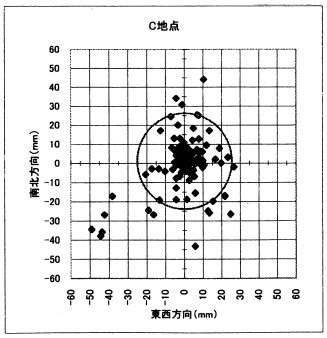


観測の平均値を南北、東西方向＝0として
座標値の偏位を表す

半径　10mmの円(破線円の半径25mm)
(円に収まる観測点数＝85%)

標準偏差　0.005m(南北方向)
標準偏差　0.006m(東西方向)

図1　観測の平均値を南北、東西方向=0として座標値の変位を示す



半径　25mmの円
(円に収まる観測点数＝84%)

標準偏差　0.014m(南北方向)
標準偏差　0.012m(東西方向)

図3

3．観測結果

3.1　観測データの精度比較

今回の観測データを基に座標値の分布を図1～図3に示す。

この少量の観測データで統計的な評価をすることは難しいが、電子基準点より観測地点が遠くなるに伴い、標準偏差が大きくなることが図に表れている。

3.2　測設におけるセット間較差の精度比較

今回の目的の1つに「測設作業が1日通してほぼ同精度（許容範囲内）の成果を取得出来るのか」を取り上げたので、測設のセット間較差を距離別に比較した。観測の許容範囲を南北、東西方向に各±20mmと設定した時、Aの観測地点では、全ての時間帯において許容範囲内の結果となった（表1）。しかし、観測地点が5km・10kmと電子基準点から遠ざかると許容範囲をオーバーする時間帯が増える傾向にある(表2，3)。C地点（10km）では南北方向で最大較差43mm、東西方向で49mmの較差があった。更にある特定の時間帯が共通して精度が悪い状況になっている。目的を達成できているのは、電子基準点から約100mのA地点だけである。また、許容範囲をオーバーした原因については考察にてふれる。

較差が時間の経過によってどのように変化するのかを見やすくする為に、図4～図9に時系列と南北・東西方向のセット間較差を軸にとり示す。

3.3　点間距離の精度比較

目的の2つ目「電子基準点から測設作業の場所（距離）が変化しても、同じような精度（許容範囲内）の成果が取得出来るのか。」を観測場所（観測距離）別に点間距離で精度比較をした。

点間距離を、許容範囲20m未満は±10mm以内、20m以上S/2000以内とした時は、A地点に比べてB地点及びC地点は許容範囲を越える時間帯が多くなる傾向がある。20m未満での点間距離はA地点で平均

表1　セット間較差（A地点：100m）

単位：mm

測　点		9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	
A.1	南北方向	1	14	1	−6	−18	0	−3	−2	−5	
	東西方向	−6	1	−6	−2	−12	0	−7	0	4	
A2	南北方向	7	7	−3	−4	−5	−3	−4	2	2	
	東西方向	−9	3	−2	−4	−12	−2	−1	2	1	
A3	南北方向	2	−3	−4	−4	−13	4	−5	−7	0	
	東西方向	−1	−5	6	−4	−9	−5	2	−4	−1	
A4	南北方向	7	2	−7	2	−3	−2	−7	5	2	
	東西方向	0	−2	0	−1	0	1	−1	−2	−2	
A5	南北方向	−3	−4	2	4	−5	3	−2	−13	−1	
	東西方向	−1	−3	0	−5	−4	0	1	4	−1	標準偏差
平均値	南北方向	3	3	−2	−2	−9	0	−4	−3	0	5
	東西方向	−3	−1	0	−3	−7	−1	−1	0	0	4

表2　セット間較差（B地点：5km）

測　点		9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	
B.1	南北方向	6	−5	7	8	−24	1	8	4	1	
	東西方向	−3	14	16	−18	−28	−5	−1	4	0	
B.2	南北方向	30	5	−1	−1	−3	4	−4	6	2	
	東西方向	10	14	30	−24	−21	−12	−3	−7	−9	
B3	南北方向	13	20	0	−3	1	2	−1	−3	5	
	東西方向	−10	5	23	−14	−15	0	−4	0	−8	
B4	南北方向	7	6	0	14	−5	−4	3	10	14	
	東西方向	9	5	34	−3	−11	0	−6	1	1	
B5	南北方向	−1	7	−1	1	−8	−1	−1	24	6	
	東西方向	6	10	12	−7	−6	−2	−3	5	−3	標準偏差
平均値	南北方向	11	7	1	4	−8	0	1	8	6	7
	東西方向	2	10	23	−13	−16	−4	−3	1	−4	9

表3　セット間較差（C地点：10km）

単位：mm

測　点		9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	
C1	南北方向	−19	12		11	−41	−4	−4	−23	−19	
	東西方向	16	−14		−6	−46	−1	−19	5	8	
C2	南北方向	−4	15		7	−43	−4	−24	−11	−22	
	東西方向	26	−8		−8	−43	−4	−17	22	11	
C3	南北方向	8	19		9	−34	−5	−28	−17	−24	
	東西方向	11	−8		−4	−47	3	−19	−4	−25	
C4	南北方向	3	29		2	−34	−1	−14	−3	−27	
	東西方向	10	−5		−2	−49	−5	−7	4	22	
C5	南北方向	−5	24		−5	−13	3	−15	10	−23	
	東西方向	14	4		0	−28	4	1	9	14	標準偏差
平均値	南北方向	−3	20		5	−33	−2	−17	−9	−23	13
	東西方向	15	−6		−4	−43	−1	−12	7	6	14

＊11時は初期化の段階で30分以上の間FIX解を得られなかったので中止した。

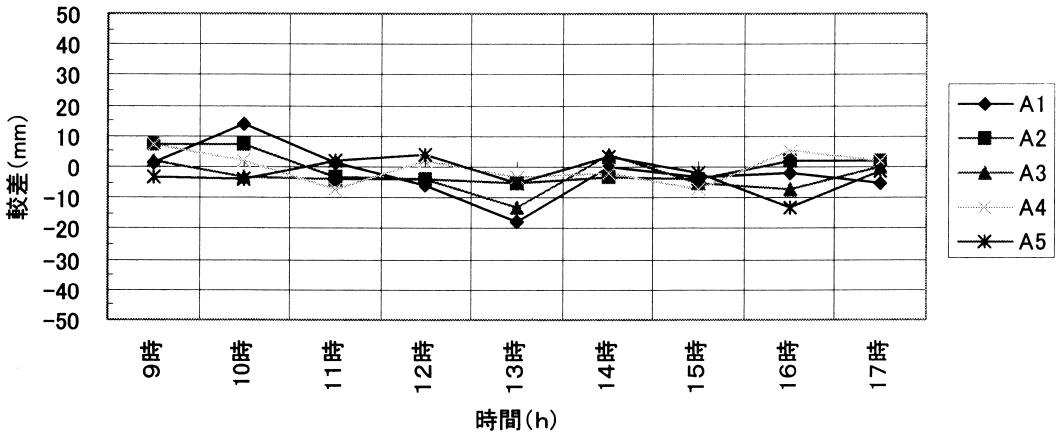


図4　A地点（南北方向）

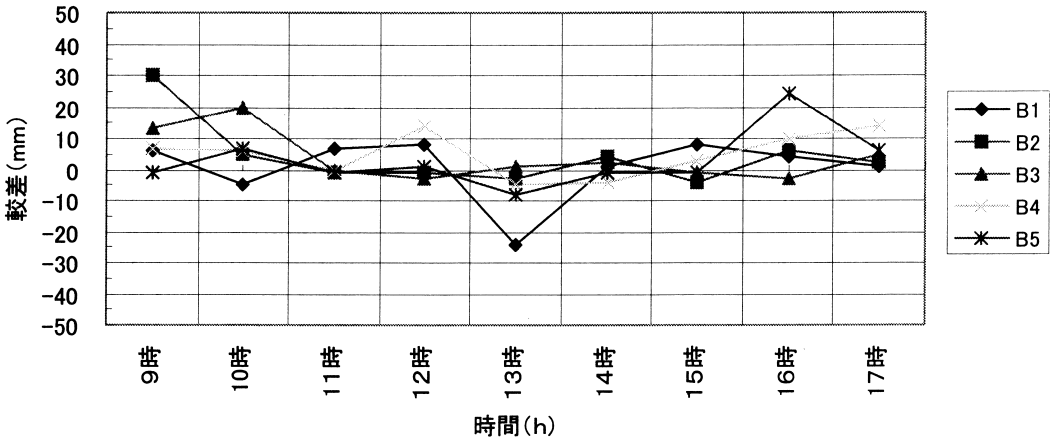


図5　B地点（南北方向）

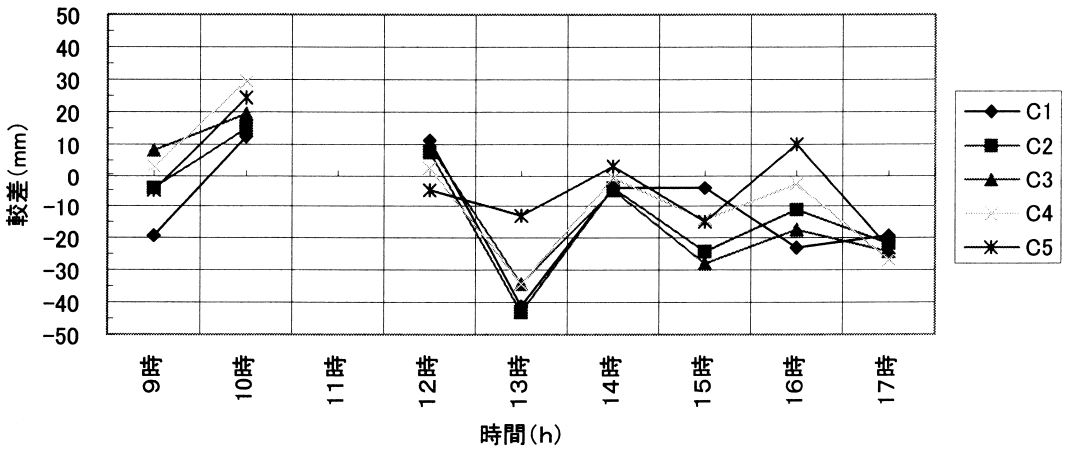


図6　C地点（南北方向）

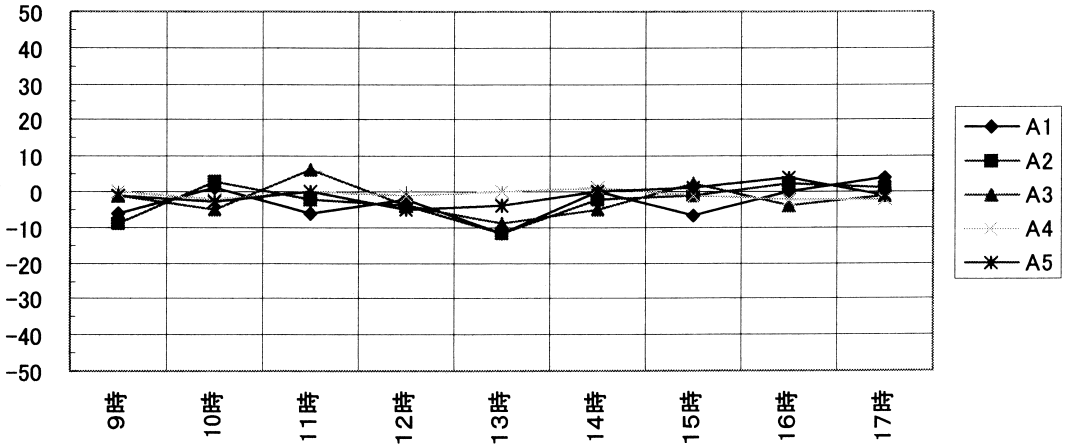


図7　A地点（東西方向）

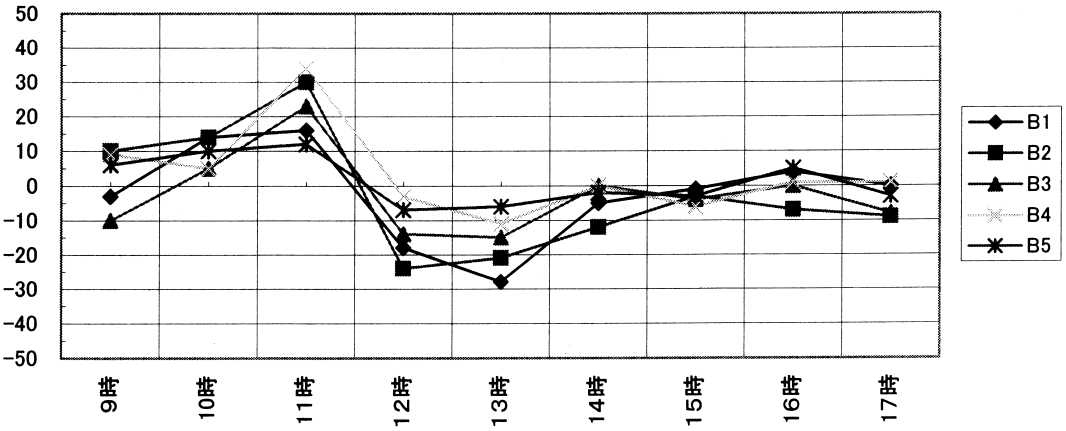


図8　B地点（東西方向）

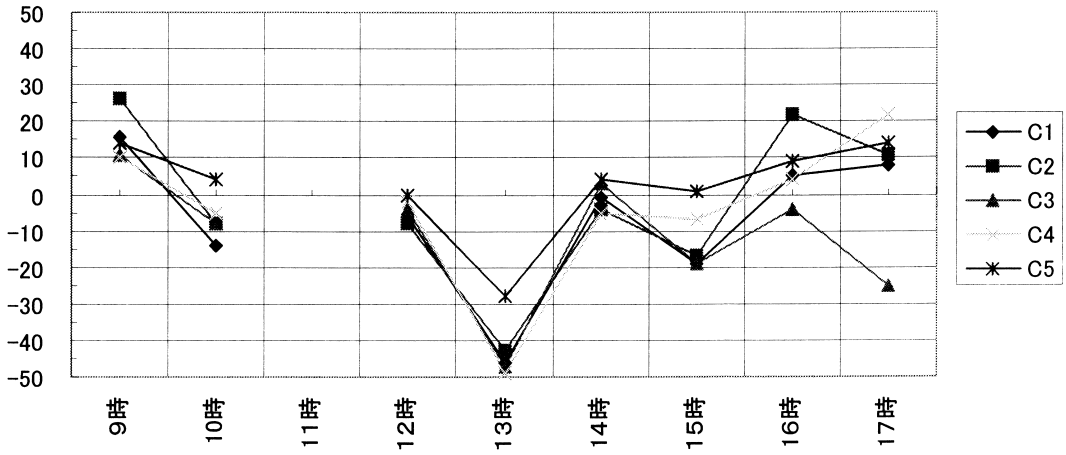


図9　C地点（東西方向）

表4

12時台の観測　単位:m　　A地点

	計算値	観測値	差	許容範囲
A.1～A.2	10.002	10.009	0.007	±0.010
A.2～A.3	10.005	10.007	0.002	±0.010
A.3～A.4	19.994	19.985	−0.009	±0.010
A.4～A.5	19.997	20.002	0.005	±0.010
A.2～A.4	29.999	29.992	−0.007	±0.015
A.1～A.5	59.999	60.003	0.004	±0.030

＊計算値は観測値の平均を代用

表5

12時台の観測　単位:m　　B地点

	計算値	観測値	差	許容範囲
B1～B2	10.004	10.007	0.003	±0.010
B2～B3	9.998	9.998	0.000	±0.010
B3～B4	20.005	20.004	−0.001	±0.010
B4～B5	20.000	20.004	0.004	±0.010
B2～B4	30.003	30.002	−0.001	±0.015
B1～B5	60.008	60.012	0.004	±0.030

表6

12時台の観測　　C地点

	計算値	観測値	差	許容範囲
C1～C2	10.000	10.010	0.010	±0.010
C2～C3	10.001	9.996	−0.005	±0.010
C3～C4	20.007	20.018	0.011	±0.010
C4～C5	19.991	19.998	0.007	±0.010
C2～C4	30.007	30.013	0.006	±0.015
C1～C5	59.988	60.012	0.024	±0.030

値との最大較差は15mm、B地点で21mm、C地点で20mmであり、観測距離にあまり影響されないが、観測距離が長くなると観測データのばらつき具合が大きくなるので許容範囲を越える点間が増えてくる。また、往復差の比較時のような特定の時間帯が共通して精度が悪い傾向は見られない。

12時台の観測結果を表4～6に観測地点別に抜粋して表示し、残りは、文末資料にて記載する。

観測時間における点間距離の変位を時間の経過を軸に図10～12にてグラフ化した。

4．考察

4.1　観測値に与える影響

RTK-GPS測量は従来のGPS測量と同様に多くの誤差要因が考えられる。その誤差要因が観測値に与える影響を次の項目について考察した。なお、誤差要因と

点間距離（10m）

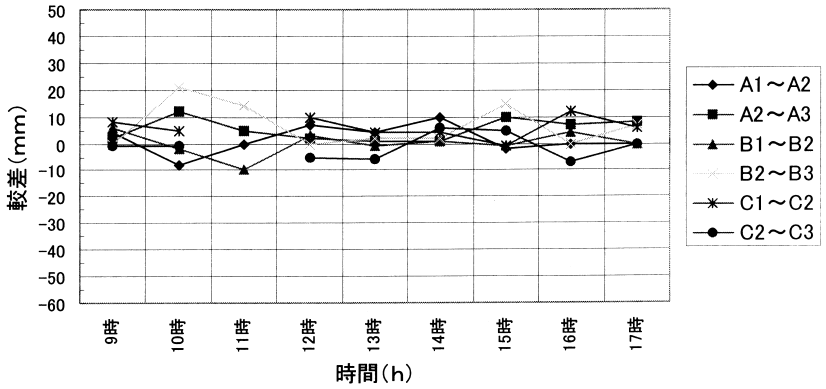


図10

点間距離（20m）

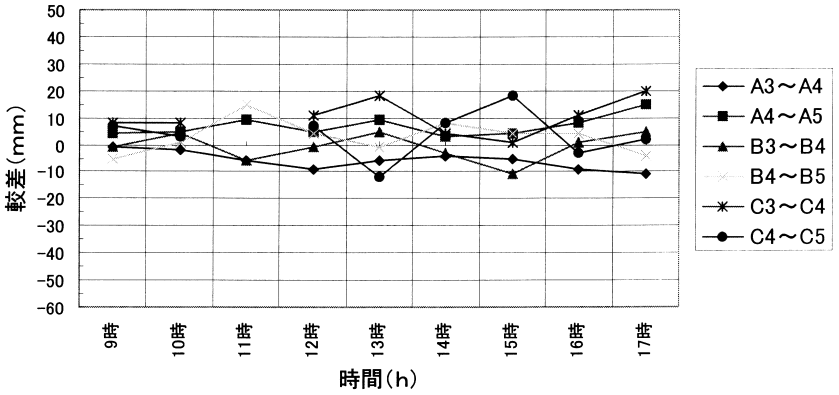


図11

点間距離（20m以上）

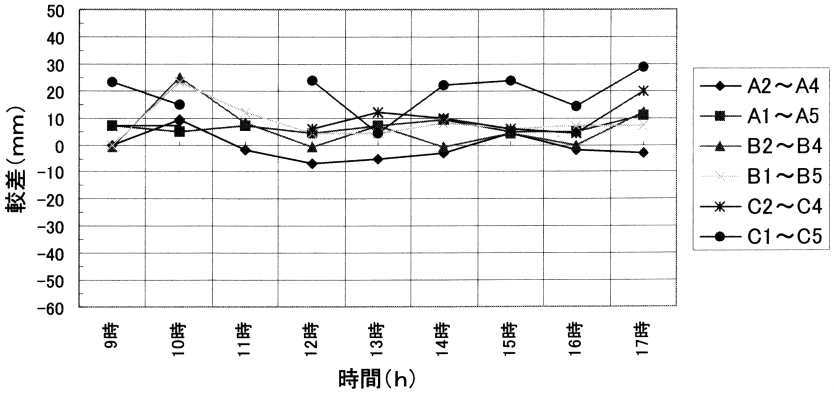


図12

して今回は考察を控え、参考程度にふれた項目もある。

①アンテナポールのブレによる影響

・アンテナポールのブレによる影響を軽減する為に、2本の支え棒を使用して極力ブレないように努めた。

②アンテナの方位に依存する影響

・すべての観測点において、アンテナの方位を北方向に統一した。

③アンテナポール付の円形気泡管及びポールの鉛直性の不良による影響

・観測日毎に点検を実施した。

④マルチパスの影響

・実験場所を極力、マルチパスの少ない所を選点した。

⑤GPS衛星の配置による影響

⑥衛星の昇降（受信衛星の切替り）による影響

・「RTK-GPS測量ではGPS衛星が地平線や地物からの昇降（出没）で、受信するGPS衛星が切替り、この時に測量精度が劣化する現象が発生することが確認されている。測量精度は、GPS衛星の増減で低下（PDOP値）し、この影響量は、観測距離が長いほど大きく、短いほど少ない。（平成11年　飯村）」との検証結果があるが、今回の実験観測では仰角の15°付近での衛星の昇降が受信する衛星に含まれていなかったため、精度劣化の現象が確認出来なかった。

⑦太陽活動による影響

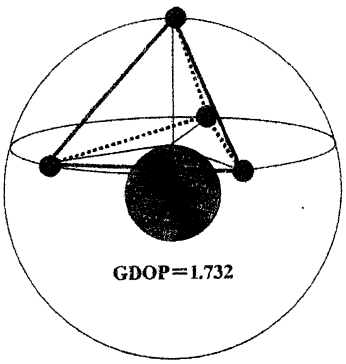
・近年は電離層に影響を与える太陽活動が最大期であり、昼間の観測は夜に比べて観測値に影響を与えるので、数秒の観測値にも何らかの影響があると思われる。しかしその影響を究明するのは、むずかしいので磁気嵐の状態を確認するにどどめた。いずれの観測日も静想期で、影響は少ないように思われる。

⑧電離層及び対流圏による遅延影響

電離層及び対流圏による影響は、誤差要因に含まれるが不明瞭な点が数多くあり考察まで至らなかった。

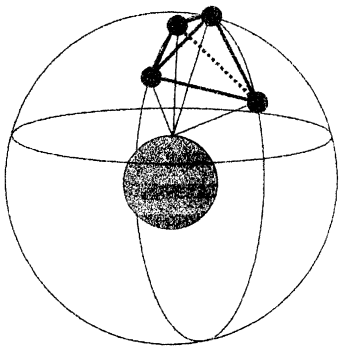
今回の結果から注目した誤差要因は、GPS衛星の配置による影響についてである。DOP（Dilution of Precision：衛星の配置を表す指標）は４つの衛星で構成される四面体の体積と密接な関係をもっている。今、天頂に1個の衛星があり、他の3個の衛星が同じ高度圏上に互いに方位角を120度ずつ隔ててある場合のGDOP（Geometrical Dilution of Precision）を考える。

３個の衛星が水平線上（仰角0°）にある場合に、四面体の体積が最大になりGDOPは最小値になる（図13）。逆に四面体の体積が小さくなる、すなわち同一平面に衛星が並んでしまうような状態（図14）では、DOPの値は急激に大きくなり、測位精度は大きく低下する。通常、観測衛星数が多いほどDOPの値は小さくなり測位精度は向上する。衛星数が5個以上の場合は、その中の４個の衛星の組み合わせ毎にDOP値を計算し、最小値を取ることになる。HDOP



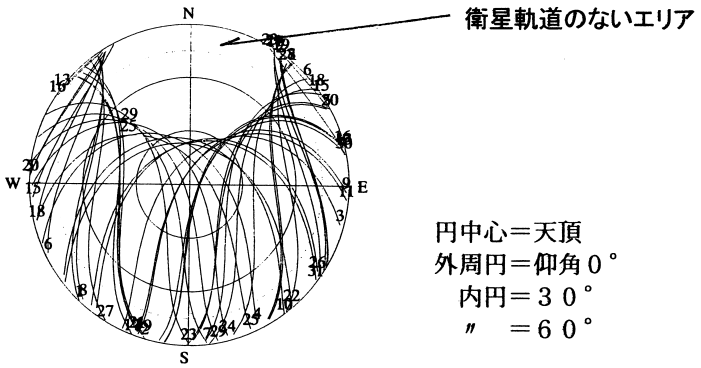
GDOP最小となる衛星配置
天頂1衛星＋3衛星（仰角0°＝水平線上）

図13　GDOPと衛星配置の関係



衛星が全て同一平面上に配位
四面体体積はゼロ

図14　測位精度が低下する衛星配置



２４時間の衛星軌道

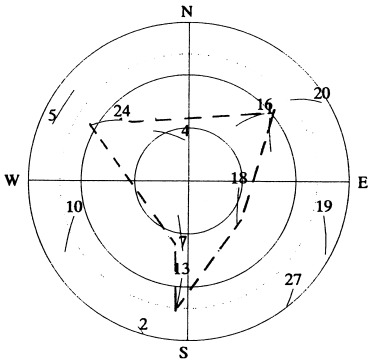
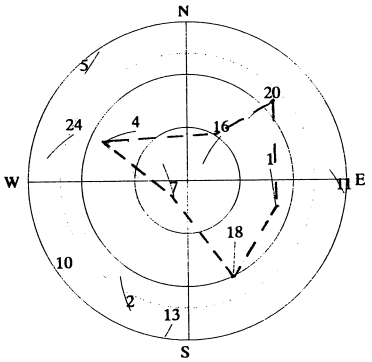
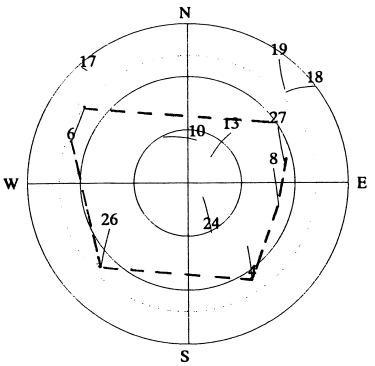
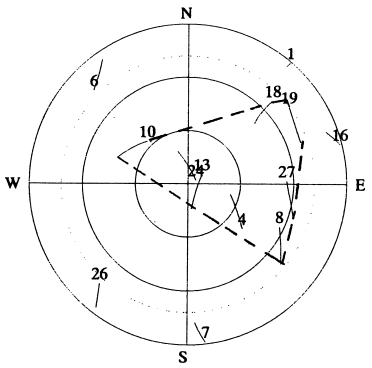
観測精度の良い衛星配置	観測精度の悪い衛星配置
	
観測時間　１１時（受信衛星数７個）	観測時間　１０時（受信衛星数６個）
	
観測時間　１４時（受信衛星数８個）	観測時間　１３時（受信衛星数７個）

図15　観測日の衛星配置図

の値は１から２の間であり、VDOPはHDOPの値より大きくなる。これは、高さ方向の誤差は水平方向の誤差より大きくなることを示している。衛星が水平方向には均等に配置されるのに比較し、

高さ方向は水平線下の衛星を使用することが原理的に不可能であるため精度が劣るのである（2000年佐田)。

今回の実験観測時間の衛星配置状況を調査すると共にPDOPと測設点でのセット間較差の相関関係を検証した。

まず、全ての観測時間帯の衛星配置を調べ、外周を線で結んで見たところ、観測精度
の良い時と悪い時の衛星配置の形にかなりの相違があることがわかった。また衛星数についても精度に大きく影響を与えていない事もわかった。

今回、ある特定の時間帯が共通して精度が悪いと記述したが、共通して言えることは、衛星配置が不均等であり、高緯度衛星が多く見られる。これに対して良好な結果が得られた時は、衛星数が少なくても衛星配置が均等で底辺が広い（衛星仰角が低い）三角形若しくは四方に引かれるような形になっている。図13での衛星配置の形を理想形としたとき、その形により近いものが今回の観測精度にも現れたと想定される。その衛星配置を図15に示す。

また、PDOPと測設点でのセット間較差の相関関係を見てみるとデータ量が少ないのではっきりとした事はいえないが、電子基準点から100m、５km地点まではあまりPDOPとの相関関係は見つからなかった。しかし、10km地点においては、右上がりの相関関係がありそうである。（図16）

4.2　今後の問題点

今後の一番大きな問題点は、観測地点の地形・障害物等にある程度左右されない事である。主に基準点測量（GPS測量）は、選点の段階で地形を克服してきたが、公共測量の場合基準点測量以外は選点等の余地がないので、観測場所の地形状況に左右されてしまう。それゆえRTK-GPS測量の地形による使用制限が今の半分以上クリヤーされれば、活躍の場がふえると考えられる。

２つ目は観測精度で南北方向の精度が東西方向に比べて悪いことである。GPS衛星の軌道は赤道に対して55°の傾きがあるため、高緯度になるほど観測できる衛星が少なくなり、緯度55°以上になると衛星は天頂を通過しなくなる。日本の場合は、北方向の仰角０°から約60°付近までと北方向を中心に東西両方向に約40°のエリアには衛星の軌道がない。この衛星軌道のないエリアの衛星配置を考えたときに反映させると南北方向は東西方向に比べ配置エリアが少ない。この事がDOPに影響を与え、南北方向の精度を落していると考えられる。これを上手く解消する方法が必要である。

５．まとめ

これまでの内容をまとめると、DMCA無線を使用したRTK-GPS測量は電子基準点から、観測距離が数100m以内（作業マニュアル上は500m以内）ならば、測設を実施して行く上で精度的に問題はなく１日を通

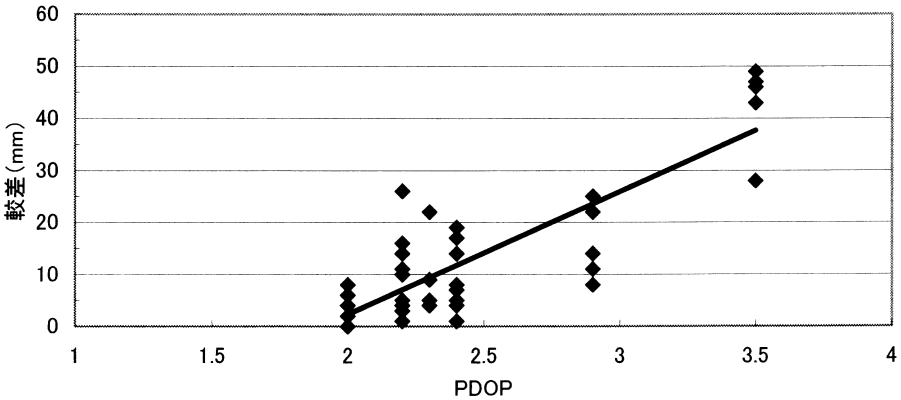


図16　PDOPとセット間較差の相関
相関係数　　南北方向0.76　　東西方向0.82

して観測が可能であり実用性は多いにある。観測距離10kmでは、時間により位置的精度が良い結果と悪い結果があり信頼性に欠ける為､測設の実用性は少ない。観測距離５kmでは、許容範囲を越える観測値が多少あるが測設以外の工種で精度的に今回の観測成果で利用可能な測量もあると思う（例：地形測量　縮尺１:1000、１:500)。RTK-GPSにおいてより良い観測成果を得るために衛星配置とDOPは重要なキーポイントである。

公共測量全般において水平精度±20mm前後、高さの精度を±25mm前後の成果が得られると想定した場合、「RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル」に記載されている全ての工種が実用できるが、測量を実施する地形状況及び観測環境を主に考えた場合、今の段階ではRTK-GPS測量の利用件数はTS（トータルステーション）併用で業務全体の１～３割程度に留まると予想される。今後さらなる技術進歩に期待し、これからは、今回の実験成果を踏まえて、少し違う観点にてRTK-GPSに取り組み利用性の追求を続けて行きたいと思う。

謝　辞

本研究は、平成12年６月１日～８月31日まで「建設省研究所等部外研究員受け入れ規定」（昭和55年４月１日建設省訓第３号８条）に基づいて行った。

最後になりましたが、本研究にあたり、国土地理院測地観測センター西センター長、青木衛星測地課長、板橋専門職、都筑衛星情報係長をはじめとする衛星測地課の皆様には業務多忙中にもかかわらず、貴重な指導・助言及び資料の提供をしていただき、大変おせわになりました。そして、部外研究員受け入れに際して企画部企画調整課及び（財）日本測量調査技術協会の関係各位にご尽力を頂いた皆様にこの場をお借りしましてお礼及び感謝を申しあげます。

参考文献

１）土屋　淳・辻　宏道　：GPS測量の基礎、日本測量協会
２）土屋　淳・辻　宏道　：やさしいGPS測量、日本測量協会
３）土屋　淳・今給黎　哲郎　：GPS測量と基線解析の手引、日本測量協会
４）建設省国土地理院：平成6年度GPS測量の標準化に関する研究作業（２）報告書
５）建設省国土地理院：平成８年度GPS測量の標準化に関する研究作業（３）報告書
６）飯村　友三郎　：RTK-GPS測量を利用する公共測量作業マニュアル（案）の整備について、国土地理院技術資料A・1－No225
７）日本測地学会：GPS・人工衛星による精密測位システム、日本測量協会

（大日コンサルタント株式会社）

観測位置図
A地点
B地点
C地点
基線長 約100m
基線長 約5km
基線長 約10km
基準局
（電子基準点）
縮尺 1:50000

資　料