

放送軌道情報の時間変化が基線に与える影響について†

河合晃司*

EFFECT OF THE EPOCH CHANGES OF GPS BROADCAST EPHEMERIS ON BASELINE LENGTH OBSERVATION †

Koji Kawai

Abstract

Orbital error of Global Positioning System (GPS) satellites is one of the greatest error sources of GPS positioning. GPS broadcast ephemerides are generally updated every 1 hour for Block I satellites and every 2 hours for Block II satellites. Results of relative positioning by GPS depend on epoch of ephemeris of GPS satellites used in the analysis. The difference of satellite position among various epochs of broadcast ephemeris were computed in order to estimate the influence on accuracy of relative positioning.

The summary of the result is as follow : positions of GPS satellites calculated from continuous series of broadcast ephemerides are different. This difference is small when positioning time is near from two epochs. The difference is hundreds of meters, when positioning time is several hours far from two epochs. Results of baseline length are different by this continuous series of broadcast ephemerides. This can not be ignored for 0.1ppm accuracy surveying.

1. はじめに

GPSは人工衛星を用いた新しい測位システムである。GPSの位相測位による基線解析では、短期繰返し精度が1ppmを切るような観測結果が報告されており、その精度目標も0.1ppmとなってきた。このGPSの位相測位による基線ベクトルの解析にはまだ精密軌道情報は一般的には使われておらず、放送軌道情報が使われている。GPSの放送軌道情報の更新は時々ずれることがあるものの、ブロックI衛星については1時間、ブロックII衛星については2時間の間隔であることが放送軌道情報の発表番号及び元期を見ることによってわかる。しかし、通常の6~8時間の観測では、GPSの軌道情報が観測期間中に数回更新されているにもかかわらず、観測期間中に得る軌道情報はただ一つだけである。精密な軌道情報が得られない限り、基線ベクトルの解析のためにはこのある時刻に得た唯一の放送軌道情報が用いられている。観測期間中に更新されている放送軌道情報についての考慮は通常加えられていない。そのため、GPS受信機が取得した放送軌道情報はある期間の観測の解析に最適ではない場合がありうる。最近の観測では観測時間をいくつかのセッションに分割して観測されることがあるが、解析の際に用いる放送軌道情報の選択は分割された

† Received 15th January 1991

* 航法測地課衛星測地室 : Satellite Geodesy Office,

Geodesy and Geophysics Division

セッションの数だけである。

今回このGPSの1または2時間間隔で更新される連続したいくつかの放送軌道情報を用い、放送軌道情報の変化が基線長測定に与える影響を調べてみた。また各衛星の軌道情報からその衛星の位置を求め、軌道情報による衛星の位置の基線長測定に与える影響についても考察を加えた。

2. セッションを細かく区切り収集した放送軌道情報を用いて基線解析を行なった結果

衛星の位置の不正確さが位相測位の基線ベクトルに与える影響は一般に次の式によってその目安とされている。

$$\delta L = (L/\rho) \delta s \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 δL : 衛星の位置誤差が基線ベクトルに与える影響

L : 基線の長さ

ρ : 衛星から測点までの距離

δs : 衛星の位置誤差

ただし(1)式はある一つの衛星によって基線が決定される場合の単純化されたモデルでかんがえられている。(1)式でしめされるとおり基線ベクトルの影響量は衛星の位置誤差及び基線の長さに比例している。この式において L を100km、 ρ を20,000km、衛星の位置誤差 δs を20mとすると δL は0.1mつまりちょうど1ppmとなる。逆に言うと100kmの基線で1ppmの精度を出したければ衛星の位置が20mで決っていなければならないことになる。さらに、同基線で0.1ppmの精度を実現するためには衛星の位置が2mで決まらなければならない。

今回、まず隣り合った元期の放送軌道情報から衛星の位置を求めその位置の差を求めてみた。解析に用いたデータは海上保安庁水路部の伊豆大島及び真鶴のGPSのテレメーター観測点及び同日に行われた名古屋、静岡及び高山のデータである。観測は1990年2月16日に行った。大島—真鶴の観測時間は10時47分から15時00分(JST)までの4時間13分間である。

また、これとは別に同日の9時00分から30分刻みの観測計画を12個組み、15時00分までGPSの放送軌道情報を取得した。観測点は文京区弥生の東京大学地震研究所屋上の固定点(弥生C)である。また、弥生C点において前日と翌日にも数時間程度の観測を行い放送軌道情報を取得した。

衛星番号16番の衛星(以下SV16と記す、他の衛星も同じ)に関しては観測期間中に得られた全発表番号、SV12及びSV17に関してはある隣り合った発表番号について位置を求めた。

また、弥生Cで取得した12個の放送軌道情報を用いて大島—真鶴、名古屋—高山、名古屋—静岡の3本の基線解析を行い解析結果を比較した。なお、解析に用いたソフトウェアはTrimble社のTrimbl(VERSION 89.036MB)である。解析にはそれぞれfiducial pointを与えて解析した。

今回の観測では取得された放送軌道情報は2月16日に伊豆大島で1つ、真鶴で1つ、弥生で12である。伊豆大島で取得された放送軌道情報は40010470.ephである。この軌道情報名は、Trimbleの受信機から得られたファイルのファイル名をそのまま用いている。このファイル名の最初の4桁は観測点の番号を、次の3桁は年初からの通日を表わしている。次の1桁はセッション番号である。最後の拡張子のephはこのファイルが軌道情報のファイルであることを示している。弥生で取得された放送軌道情報は10050470.ephから1005047b.ephである。セッション番号は1桁なので10~11番目はa,bとした。なお、各ファイルの最初の1005は弥生の測点番号であり、4001は伊豆大島の測点番号である。

弥生で取得した放送軌道情報の各衛星の軌道情報の発表番号をTable-1に示す。また、Table-1には伊

豆大島でとれた軌道情報の発表番号も併記した。なお、ここで示した衛星は観測期間中に見えていた衛星である。実際の放送軌道情報には、見えていなかった衛星も含め全ての利用可能な衛星の軌道情報が含まれている。

1) 異なった軌道情報による衛星の位置の差

ここで得られた軌道情報の中でSV16, SV12及びSV17に関して衛星の位置及び発表番号ごとの位置の差を求めた。その結果を以下に述べる。

Table 1 Transition of ephemeris issue number

衛星番号	1 2 個の軌道情報の発表番号(1005047*. eph)												40010470. ephの発表番号
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	
3	175	215	216	216	226	226	226	226	226	232	232		216
6	35	52	53	53	54	54	55	55	56	56	56		53
9	37	59	54	54	55	55	56	56	57	57	58		54
12	43	91	91	91	87	87	88	88	89	89	89		87
16	36	37	37	37	32	32	32	32	33	33	33		37
17	110	136	136	136	134	134	134	134	135	135	135		134
19	95	120	120	120	120	120	120	120	119	119	119		119

なおFig-1.01~Fig-1.07は2月16日の13時を中心とする前後12時間つまり、2月16日の1時から2月17日の1時までの値をプロットしたものである。また、Fig-2.01~Fig-2.07は観測期間中の値をプロットしたものである。また各図に下向き矢印で軌道情報の元期の時刻を示した。ただし、元期の時刻が範囲外のものに関しては省略した。

SV16の位置を求めた軌道情報は時間順に発表番号36, 37, 32, 33番である。発表番号は37番の次の番号がさかのぼっているが、理由は不明である。各放送軌道情報の発表時刻は2時間間隔である。元期の前後約半日及び観測期間中における衛星の位置の差に関して以下に述べる。

SV16の発表番号36番と37番軌道情報を使って計算した時々刻々の衛星の位置の差は数時間で400m以上となっている (Fig-1.03)。同様に37番と32番の差は約半日で100m強である (Fig-1.04)。32番と33番の差は

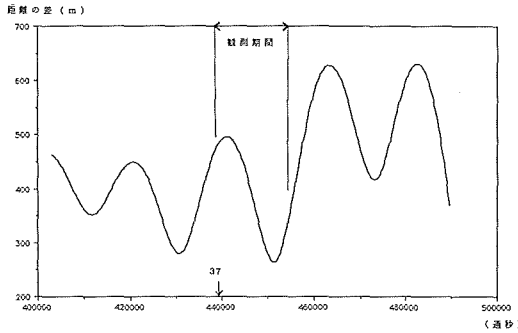


Figure 1.01 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 10050460. eph and 40010470. eph (1 day)

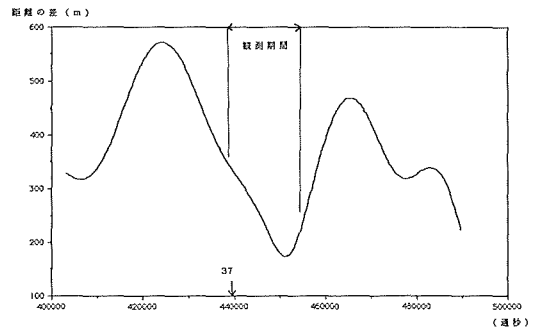


Figure 1.02 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 40010470. eph and 10050480. eph (1 day)

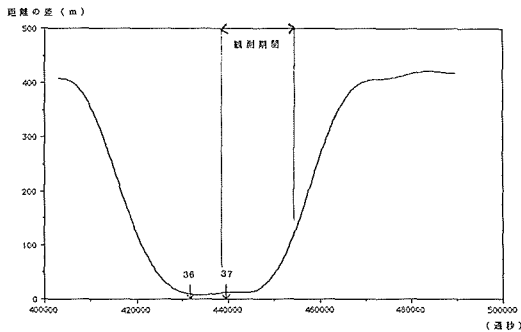


Figure 1.03 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 10050470. eph and 10050471. eph (1 day)

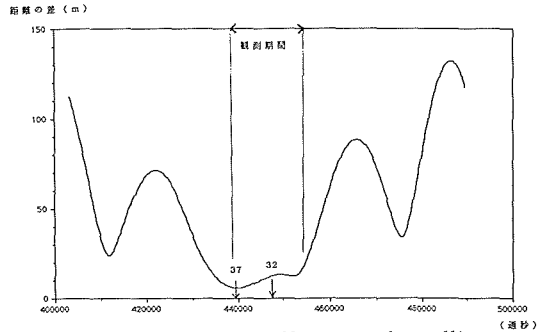


Figure 1.04 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 10050471. eph and 10050474. eph (1 day)

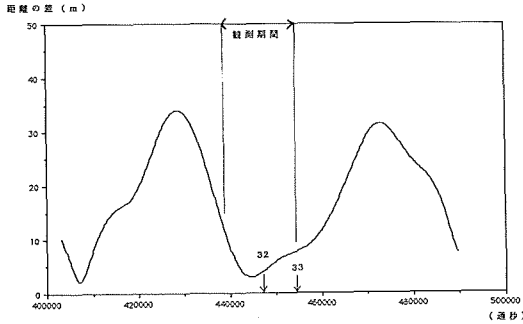


Figure 1.05 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 10050474.eph and 10050478.eph (1 day)

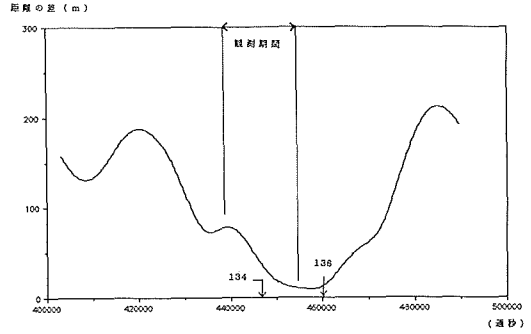


Figure 1.06 Distance difference of satellite SV17's position calculated by 10050474.eph and 10050475.eph (1 day)

最大で35m程度である (Fig-1.05)。

観測期間中では36番と37番の差は、最小でも10m以上、最大で約100mとなる。平均は約32mである。36番の元期の時刻は観測期間の約2時間前であり、37番の元期は観測期間開始直後である (Fig-2.03)。37番と32番の差はおおむね10mである。平均も約10m。32番の元期は観測期間のほぼ中央である (Fig-2.04)。32番と33番の差はほぼ10m以内に収まっている。平均は約6mと小さい。33番の元期は観測の終了時刻と一致している (Fig-2.05)。なお、伊豆大島で位相データとともに取得した軌道情報は37番である。またSV16に関しては37番と前日に取れた発表番号222番 (24時間前) と59番 (22時間後) の差を37番の元期の前後半日にわたって同様に求めてみた。222番、59番ともに差は数百mで波打っている。222番の差は平均約390mで、59番は平均約246mである (Fig-1.01, Fig-1.02, Fig-2.01, Fig-2.02)。

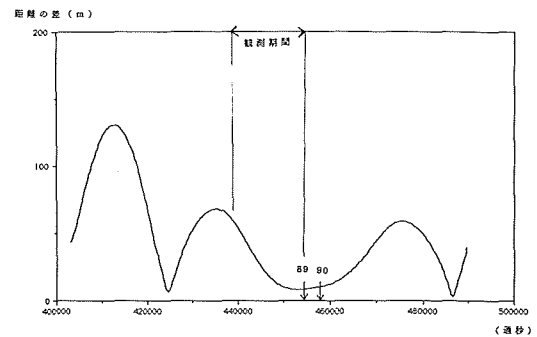


Figure 1.07 Distance difference of satellite SV12's position calculated by 1005047a.eph and 1005047b.eph (1 day)

SV17に関しては発表番号136番と134番の位置を求めた。この2つの差は半日で最大200m程度である (Fig-1.06)。観測期間中の134番と136番の差は20m~80mである。平均は約44mである (Fig-2.06)。134番は観

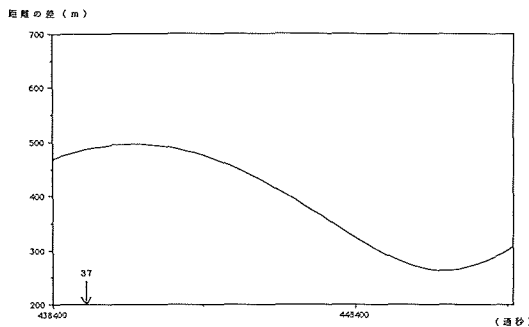


Figure 2.01 Difference of satellite SV16's position calculated by 10050460.eph and 10050470.eph (duration of observation)

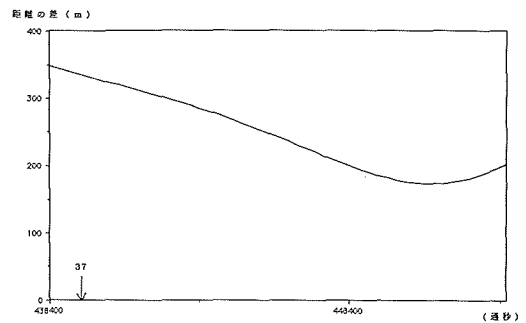


Figure 2.02 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 40010470.eph and 10050480.eph (duration of observation)

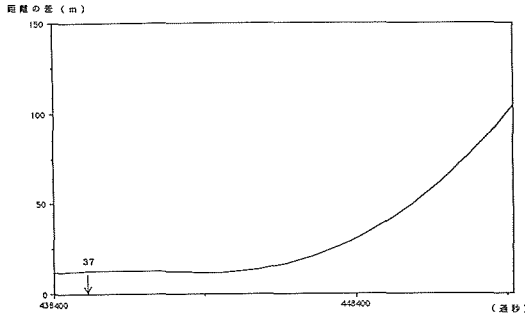


Figure 2.03 Distance difference of satellite SV17's position calculated by 10050470.eph and 10050471.eph (duration of observation)

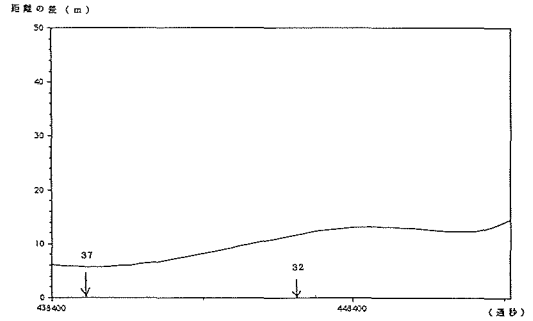


Figure 2.04 Distance difference of satellite SV12's position calculated by 10050471.eph and 10050474.eph (duration of observation)

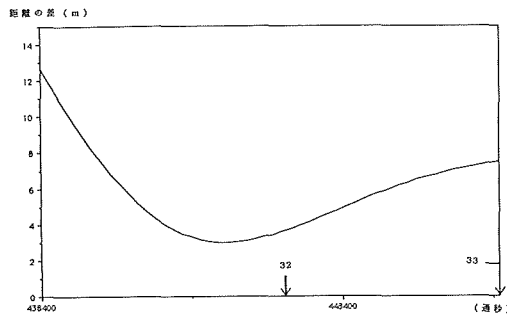


Figure 2.05 Distance difference of satellite SV16's position calculated by 10050474.eph and 10050478.eph (duration of observation)

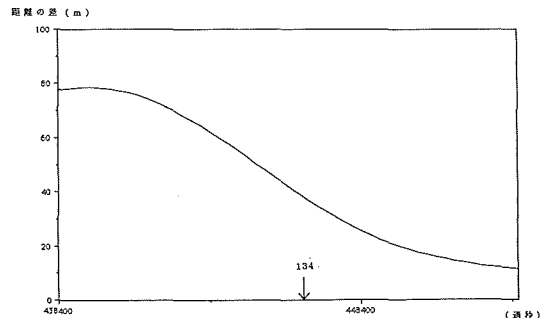


Figure 2.06 Distance difference of satellite SV17's position calculated by 10050474.eph and 10050475.eph (duration of observation)

測期間のほぼ中央であるが、136番は終了後(2時間後)である。また、伊豆大島で位相データの観測とともに134番の軌道情報が取れている。

SV12に関しては発表番号89番と90番の位置を求めた。この2つの差は半日で最大140m程度である (Fig-1.07)。観測期間の89番と90番の差は10m~60mである。平均は約26mである (Fig-2.07)。89番は観測終了時刻で、90番はその1時間後である。また伊豆大島で位相データの観測とともに87番の軌道情報が取れている。

SV12, SV17及びSV16の36番と37番の観測期間中の差は平均数十mと大きめである。元期付近では双方とも10m内外となる。

これらより、発表番号の異なる軌道情報による衛星の位置に関して次の事が読取れる。発表番号が一つ異なった軌道情報の衛星の位置の距離は元期付近で概ね数m~数十mであり、元期が約一日異なった軌道情報の衛星位置の距離は概ね数百mである。距離の差は双方の元期付近では数m~数十mである。しかし元期を離れるにしたがい急激に位置の差が大きくなる。また、位置の差は発表番号によって、あるいは衛星によ

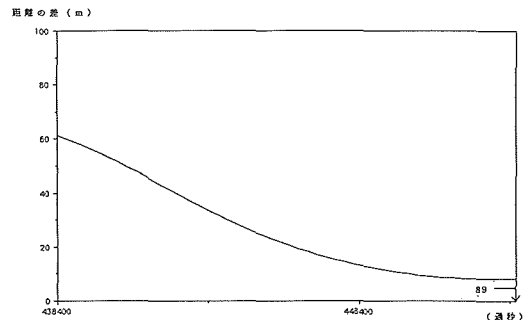


Figure 2.07 Distance difference of satellite SV12's position calculated by 1005047a.eph and 1005047b.eph (duration of observation)

てかなりの差が出来ることがある。

ただし、この方法ではどちらの発表番号の軌道情報がより正しいという事は言えず、あくまで相対的な位置関係に関してしか議論出来ない。

2) 衛星の軌道情報を変えて基線解析を行った結果及び解析結果に対する考察

以下に示すのは軌道情報を変えて基線解析を行った結果である。基線は大島一真鶴及び名古屋一静岡一高山で、そのデータを上記の弥生で得られた12個の軌道情報を用いて解析した。その結果についてTable—2,3,4にそれぞれ示す。また解析結果を軌道情報順に並べ図にしたのがFig—3.01~Fig—3.03である。なお、10050472.ephと10050473.eph, 10050476.ephと10050477.ephそして10050478.ephと10050479.ephは軌道情報の内容が同一のためそれぞれの後者はTable—2,3,4には掲載していない。

Table—2,3,4の内容を説明すると、最初の項は解析に用いた軌道情報のファイル名、2項目は求めた基線長、3項目は標準偏差、4項目は直前の軌道情報を使用して得られる基線長との差、5項目はその差の基線長に対する割合、6項目は通常の軌道情報(40010470.eph)により解析した値との差、7項目はその割合である。なお、大島で得られた軌道情報による大島一真鶴基線の解析結果は基線長47123.7458m, 標準偏差0.0095mである。よって、大島一真鶴基線の1ppmは約4.71cmである。また、Fig—4.01からFig—4.10まではGPS衛星の飛来予定図に観測時間と軌道情報の元基を記入したものである。下向き矢印が元期の時刻を表わしている。この図に関しても内容が同じ軌道情報のものについては除いてある。

まず、解析結果の3項目に着目する。標準偏差が小さければ基線長はより正確であるとは言えないのであ

使用した 放送軌道情報	基線長及び標準偏差		1つ前との差		40010470.ephとの差	
	kisen(m)	sg(m)	dtb(m)	ppm	dt(m)	ppm
10050470.eph	47123.8213	0.0214			0.0755	1.602
10050471.eph	47123.7929	0.0098	0.0284	0.603	0.0471	0.999
10050472.eph	47123.7775	0.0097	0.0154	0.327	0.0317	0.673
10050474.eph	47123.7576	0.0095	0.0199	0.422	0.0118	0.250
10050475.eph	47123.7450	0.0095	0.0126	0.267	-0.0008	0.017
10050476.eph	47123.7498	0.0094	-0.0048	0.102	0.0040	0.085
10050478.eph	47123.7508	0.0094	-0.0010	0.021	0.0050	0.106
1005047a.eph	47123.7538	0.0095	-0.0030	0.064	0.0080	0.170
1005047b.eph	47123.7524	0.0095	0.0014	0.030	0.0066	0.140
10050460.eph	47123.5750	0.0241				
40010470.eph	47123.7458	0.0095				
10050480.eph	47123.5989	0.0141				

Table 2 Variations of slope distance by ephemeris changes at Osima—Manazuru baseline

るが、それでも、ある程度の目安にはなる。この解析結果では最初の10050470.ephの解析結果を除き標準偏差はほぼ0.2ppmになっているトリンプルの受信機は立上げ後の最初の短時間の観測(セッション)では、放送軌道情報の取得がうまくいかないことがあるが、この10050470.ephからもそれがうかがえる。この軌道要素には軌道情報の元期が観測期間中にあるものがないのである。40010470.ephで求めた基線長との差も7.55cm(1.6ppm)と大きい。次の30分で取得された軌道情報10050471.ephによって解析した基線長と40010470.ephによる基線長との差は10050470.ephの解析結果と比べてそれほど大きくない。しかし軌道情報の元期を見ると、解析に利用した7個の衛星のうち最

初めは、大島一真鶴基線の解析結果は基線長47123.7458m, 標準偏差0.0095mである。よって、大島一真鶴基線の1ppmは約4.71cmである。また、Fig—4.01からFig—4.10まではGPS衛星の飛来予定図に観測時間と軌道情報の元基を記入したものである。下向き矢印が元期の時刻を表わしている。この図に関しても内容が同じ軌道情報のものについては除いてある。

使用した 放送軌道情報	基線長及び標準偏差		1つ前との差		40010470.ephとの差	
	kisen(m)	sg(m)	dtb(m)	ppm	dt(m)	ppm
10050470.eph	110656.3338	0.2910			0.3161	2.857
10050471.eph	110656.0988	0.0071	0.0235	2.124	0.0811	0.733
10050472.eph	110656.0805	0.0066	0.0183	0.165	0.0628	0.568
10050474.eph	110656.0200	0.0057	-0.0685	0.619	0.0023	0.021
10050475.eph	110656.0168	0.0053	0.0032	0.029	-0.0009	0.008
10050476.eph	110656.0189	0.0053	-0.0021	0.019	0.0012	0.011
10050478.eph	110656.0202	0.0055	-0.0013	0.012	0.0025	0.023
1005047a.eph	110656.0235	0.0055	-0.0033	0.030	0.0058	0.052
1005047b.eph	110656.0428	0.0057	-0.0193	0.017	0.0251	0.227

Table 3 Variations of slope distance by ephemeris changes at Nagoya—Takayama baseline

使用した 放送軌道情報	基線長及び標準偏差		1つ前との差		40010470.ephとの差	
	kisen(m)	sg(m)	dtb(m)	ppm	dt(m)	ppm
10050470.eph	134989.8081	0.1266			2.5203	18.670
10050471.eph	134987.4827	0.0191	2.3254	17.227	0.1949	1.444
10050472.eph	134987.3579	0.0176	0.1248	0.925	0.0701	0.519
10050474.eph	134987.3574	0.0147	0.0005	0.004	0.0696	0.516
10050475.eph	134987.2895	0.0147	0.0679	0.503	0.0017	0.013
10050476.eph	134987.2926	0.0146	-0.0031	0.023	0.0048	0.036
10050478.eph	134987.2837	0.0146	0.0089	0.066	-0.0041	0.030
1005047a.eph	134987.3403	0.0152	-0.0556	0.412	0.0525	0.389
1005047b.eph	134987.3868	0.0151	-0.0465	0.344	0.0990	0.733

Table 4 Variations of slope distance by ephemeris changes at Nagoya—Sizuoka baseline

初のうち見えていなかった4個の衛星が観測終了時に取られた軌道情報で元期は観測終了時から2時間離れ

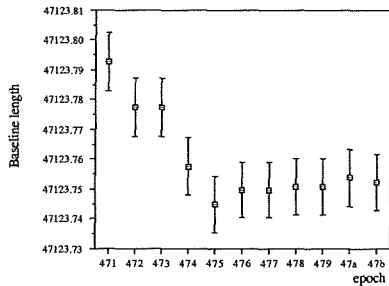


Figure 3.01 Variations of slope distance by ephemeris changes at Osima-Manazuru baseline

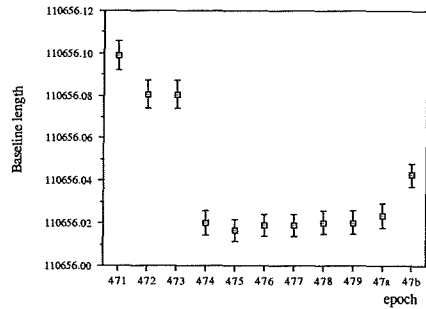


Figure 3.02 Variations of slope distance by ephemeris changes at Nagoya-Takayama baseline

ている。それから10050475.ephまで、30分~1時間間隔で4回放送軌道情報は更新されるが、そこまでの各放送軌道情報間で基線長に1~2cmの差がある。10050475.ephで19番の衛星の元期が観測期間外だが、その他はほぼ観測期間の中央で、また衛星の可視期間のほぼ中央であるものが多い。解析結果の標準偏差はここで0.0095mとほぼ最低となる。40010470.ephと比較しても基線長で1mmと違わない。次の軌道情報では標準偏差はさらに小さく、0.0094mとなる。元期は6, 9, 12の衛星が1時間進み6番は可視期間からはずれてしまっている。基線長は約5mm動いて、40010470.ephとは4mmの差となる。次の軌道情報でも標準偏差は小さいが、軌道情報の元期は3番を除き全て観測終了時刻である。基線長は0.1mmとごくわずか動いている。

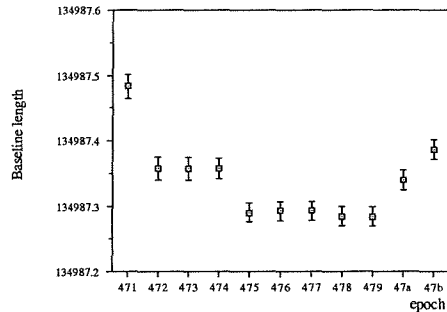


Figure 3.03 Variations of slope distance by ephemeris changes at Nagoya-Sizuoka baseline

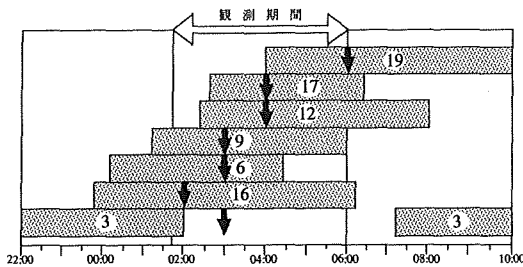


Figure 4.01 Satellite visibility and epoch of ephemeris 40010470.eph (downward arrows shows time of epoch)

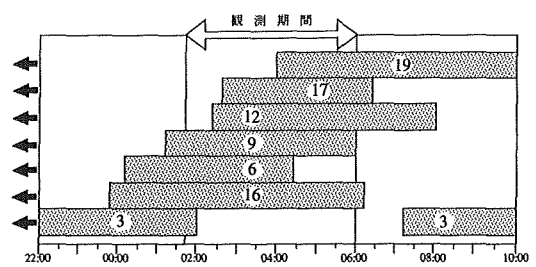


Figure 4.02 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050470.eph (all epochs are out of range)

40010470.ephとの基線長の軌道情報では40010470.ephと基線長の差は4~8mmであり、いずれも0.2ppm以下である。その差は少しずつ広がっているが、差の変化は軌道情報の前半部のとは異なり非常に緩やかである。

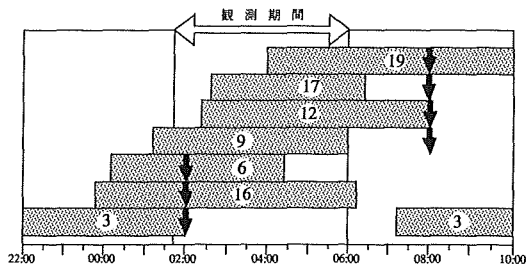


Figure 4.03 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050471.eph (downward arrows shows time of epoch)

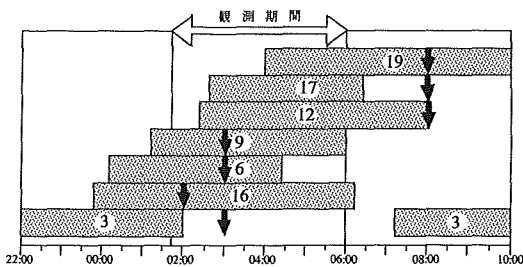


Figure 4.04 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050472.eph (downward arrows shows time of epoch)

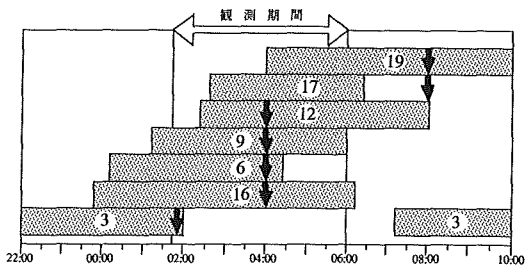


Figure 4.05 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050474.eph (downward arrows shows time of epoch)

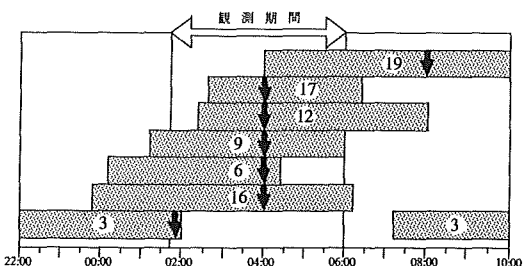


Figure 4.06 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050475.eph (downward arrows shows time of epoch)

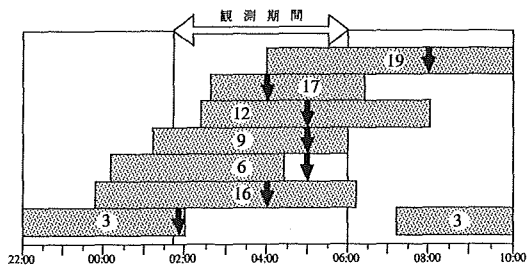


Figure 4.07 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050476.eph (downward arrows shows time of epoch)

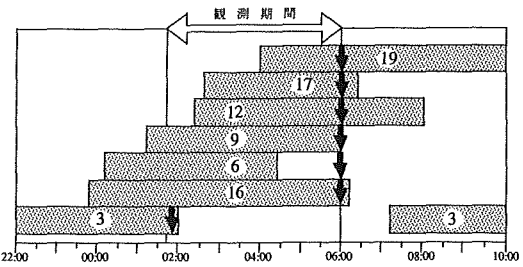


Figure 4.08 Satellite visibility and epoch of ephemeris 10050478.eph (downward arrows shows time of epoch)

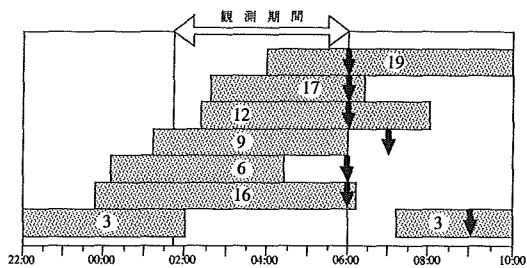


Figure 4.09 Satellite visibility and epoch of ephemeris 1005047a.eph (downward arrows shows time of epoch)

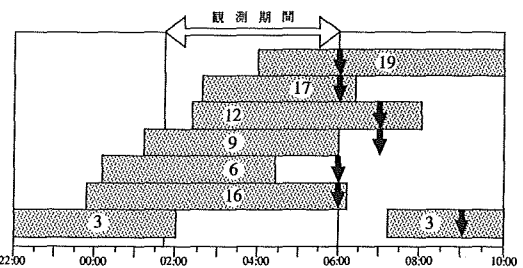


Figure 4.10 Satellite visibility and epoch of ephemeris 1005047b.eph (downward arrows shows time of epoch)

ここで、10050474.ephと10050475.eph及び1005047a.ephと1005047b.ephの組合せに注目してみる。前者の二つの差は0.0126m (0.267ppm)、後者の二つの差は0.0014m (0.030ppm) である。

ところで、前述の通り、10050474.ephと10050475.ephはSV17以外の軌道情報が同一であり、また1005047a.ephと1005047b.ephはSV12以外の軌道情報が同一である。つまり、このひその基線長の差はSV17及びSV12の軌道のずれのみに依存すると考えられる。これらの衛星の軌道の差はSV17に関しては前述の通り観測期間中の平均は約44mで、SV12のそれは、26mである。この値より軌道情報が変わったため基線長に与える影響を(1)式から見積もると、SV17は約10cm (2.1ppm)、SV12は6cm (1.3ppm)となる。しかし、解析の結果はSV17は1.26cm (0.267ppm)、SV12ではさらに小さく0.14cm (0.030ppm) である。

これは、基線長が他の衛星によってかなり固定されてしまい、1つの衛星のみによる基線長のずれは薄められてしまうことが原因と考えられる。また、SV12とSV17で、差の平均はそれほど違ってないが、基線長に与える影響は10倍程の違いとなって表われている。今回はこれについての考察は行わないが、衛星の位置のずれの3成分等を考慮することによってその原因をつきとめることが出来ると思う。

ところで、軌道情報を変えて解析した大島一真鶴、名古屋一高山、名古屋一静岡の3基線共に基線長の変化が似た動きをしていることがわかる。これを緯度、経度、高さ成分に分けて見てみると、特に緯度方向の差の変化が3基線ともほぼ同じである。また経度方向、高さ方向の変化に関しては大島一真鶴、名古屋一静岡が同じ様に変化している。

3. 結 び

GPSは最近測量の分野で注目されている新しい技術である。GPSは測量において今までになかった様々な利点があるが、今のところまだ考慮すべき点を多く含んでいる。

今回はGPSの軌道情報に着目して話を進めたが、本報告に取上げた以外にも解析結果をよくするための要因が数多くある。

これから、GPS衛星数の増加とともにこれらの問題も次第に解決され、日常的に0.1ppmを切るよい結果が得られるようになると思う。

4. 謝 辞

本研究は、科学技術庁が行っている「国立試験研究機関等に従事する研究職員のための国内留学制度」により、平成元年10月～平成2年3月に東京大学地震研究所での国内留学中に行ったものである。本留学にあたって、御尽力頂いた水路部監理課、企画課、航法測地課の担当者各位に厚く御礼申し上げます。また、本留学を御快諾下さり、さらに本稿に有益な御教授を頂きました東京大学地震研究所の村田一郎先生及び本稿の作成に当り有益な示唆を頂き、またデータの提供を受けました名古屋大学理学部地震火山地域観測センターの本股文昭先生に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

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—，日本測地学会編著，(1989)

R.W.King, E.G.Masters, C.Rizos : Surveying with Global Positioning System, (1987)

David wells : GUIDE TO GPS POSITIONING, (1986)

Trimble Navigation, Limited : TRIMVEC GPS SURVEY SOFTWARE USERS MANUAL and TECH-

- NICAL REFERENCE GUIDE : ,Trimble Navigation,Limited, (1988)
B.W.Remondi : GPS Broadcast Orbits Versus Presus Orbits.A Comparison Study, (1989)
G P S 大学連合 : 相模湾周辺における G P S 観測, 一相模湾GPS8812一報告, (1989)