

# キネマティックGPSの広域利用における測位精度特性

奥田邦晴<sup>1†</sup>・永井 裕<sup>2</sup>・川崎潤二<sup>1</sup>・酒出昌寿<sup>1</sup>

## Characteristics of the Measurement Accuracy on Wide Area Utility by Kinematic GPS

Kuniharu Okuda<sup>1†</sup>, Yutaka Nagai<sup>2</sup>, Junji Kawasaki<sup>1</sup> and Masatoshi Sakaide<sup>1</sup>

**Abstract** : As the baseline length of Kinematic GPS (KGPS) becomes longer, the measurement accuracy deteriorates affected by the delay of radio wave propagation. In this case, the measurement accuracy improves by 2 frequencies process. However, it has not clarified the characteristics of the measurement accuracy practiced throughout the year by the long baseline length. Therefore, the authors analyzed a possibility of wide area utility of KGPS comparing the conditions of the electron density in the ionosphere with the measurement accuracy. As a result, this analysis demonstrated that even for the 320 km baseline length, the measurement accuracy of 10 cm or less could be obtained in the horizontal position.

**Key words** : Kinematic GPS, Wide area utility, 2 frequencies process, Accuracy, Ship motion

### まえがき

GPSを使った応用分野は近年非常に多くなっている。その中でも数cmの高い測位精度が要求される分野については、キネマティックの手法（以下、KGPSと言う）が用いられている。KGPSは基準局からの補正情報を使って利用者局の測位精度を向上させる手法で、基準局から約10kmの基線の範囲内であれば、数cmの高精度で測位することができる。基線長がそれ以上長くなると、一般には電波伝搬経路が基準局と利用者局で異なるため、電離層による遅延が生じ測位精度が劣化する<sup>1)</sup>。そのため、長い基線長では2つの周波数を利用すれば高い精度を保つことができるとされている<sup>2)</sup>。しかし、電離層の電子密度は、季節、時間、場所、太陽活動などで異なり、年間を通じての測位精度との関係はあまり報告されていない。そこで、今回、基線長を約320kmまでとり、1周波処理と2周波処理の測位精度の比較を1年間通して解析することによって、KGPSの広域利用における精度について考察した。その結果、2

周波処理型のKGPSでは、基線長が300km位でも数十cmの測位精度で位置を求めることができることが分かった。これにより、2周波処理型のKGPSは、基準局（陸上）から遠く離れた海上でも高精度の位置を求めることができ、例えば、魚礁形状と魚群の増集効果などの評価を行う際の位置確認に利用できることが実証されたので報告する。

### 2周波処理による電離層遅延量の測定

電波は電離層で屈折され、その屈折率は電子密度と電波の周波数によって変化し、進行速度が遅くなる。この量が電離層遅延量 $D_{ion}$ であり、次式によって表されている<sup>3)</sup>。

$$D_{ion} = (40.3/f^2) TEC \quad [m] \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $f$ : 周波数

TEC: Total Electron Content, 自由電子の総数  
[ $1 \times 10^{16}/m^2$ ]

(1)式より2つの周波数を利用すれば、TECを計算することができる。すなわち、周波数 $f_1$ による擬似距離(衛

2006年12月14日受付, Received December 14, 2006.

<sup>1</sup>水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)

<sup>2</sup>水産大学校水産学研究科生 (Graduate student, National Fisheries University)

<sup>†</sup>別刷り請求先 (Corresponding author): okuda@fish-u.ac.jp

星と受信機との距離の測定値)  $PR_1$ 、周波数  $f_1$  による擬似距離を  $PR_2$  とすると、次式で表される。

$$TEC = (PR_1 - PR_2) / (40.3/f_1^2 - 40.3/f_2^2) \cdots (2)$$

(2) 式を (1) に代入することにより遅延量  $D_{ion}$  を測定することができるので、一般的にこの値を使って補正をする。今回の解析にはこの手法を取り入れている。

## データ取得及び解析方法

国土地理院は、日本全国の電子基準点で受信された2周波のGPSのRAW (加工されていない) データをインターネットで公開している。そこで、下関の電子基準点を基準局と設定し、その他10カ所の電子基準点を利用者局として、RAWデータを毎月はじめに30秒間ごと24時間分を1年間にわたってダウンロードした。期間は2005年5月から2006年4月までである。データを取得した電子基準点の相対的位置をFig. 1に示す。座標の中心が下関の電子基準点で、ここを基準局とし、①から⑩の電子基準点を利用者局とした。なお、電波の電離層遅延状況による測位精度を把握する目的で、利用者局の①から⑤は経度方向に、⑥から⑩は

ほぼ緯度方向に設定した。

また、年間の測位精度の定性的な傾向を推察するために、独立行政法人情報通信研究機構電離圏世界資料センターが公開している日本上空の電離層における電子密度の月平均の状況図をダウンロードした。期間は2000年と2005年の2年間である。これらのデータを基に、1周波処理と2周波処理の測位結果を比較し、月別、昼夜間別の測位精度特性を基線長別に解析し、KGPSの広域利用を考察した。

なお、測位計算ソフトはGrafMovを使用した。

## 結果及び考察

### 年間の電離層の状況

電離層における電子密度の月平均の状況図からTECを読み取り、緯度別、月別TECを時系列で示した図がFig. 2およびFig. 3である。Fig. 2は月ごとの日本上空の電離層における電子密度状況を示している。この図は月平均のTECを1年間を通して見た図である。縦軸に電子密度、横軸に時刻(日本時間)をとり、2005年の月平均の状況を緯度別(北緯30度~35度)に示している。ほぼ6時から18時にか

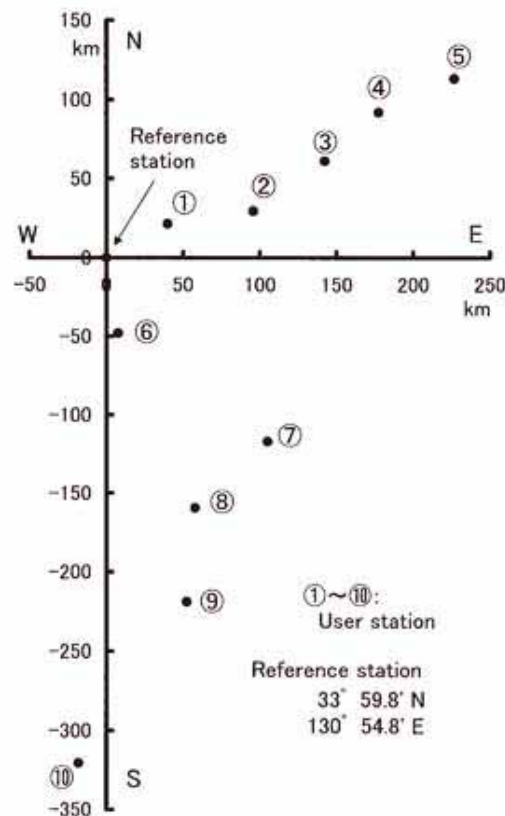


Fig. 1. Relative positions of the user station.

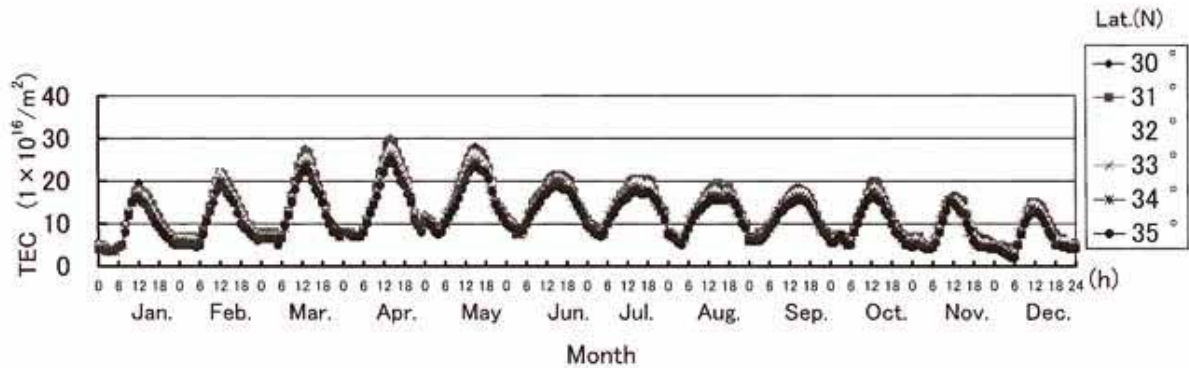


Fig. 2 . Electron density by the latitude in 2005.

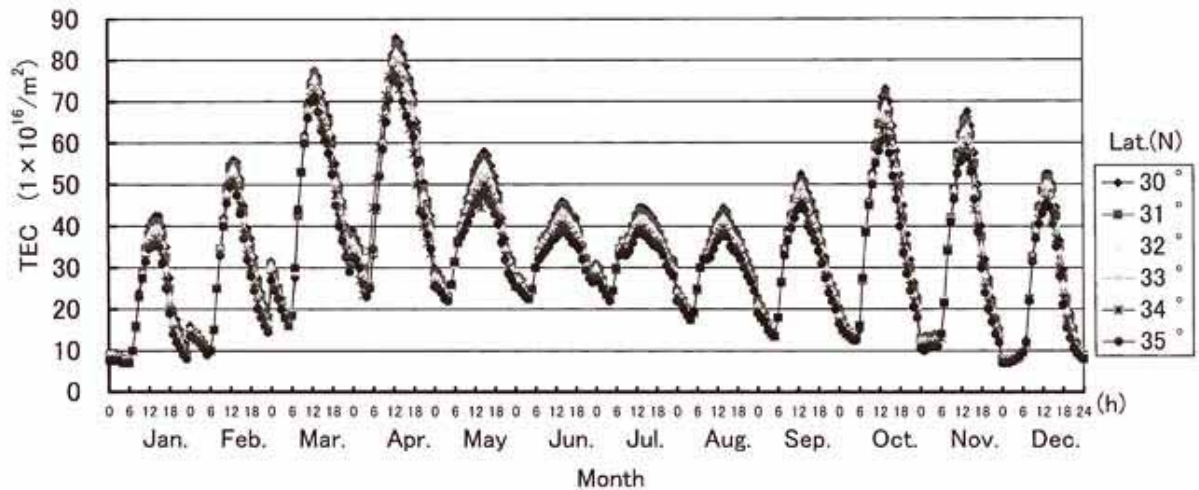


Fig. 3 . Electron density by the latitude in 2000.

けて、電子密度が増加していることが分かる。これは、日出とともに電子密度が増加し、日没とともに減少していることを裏付けている。また、この解析の中で最も低緯度である緯度30度の電子密度は、他の緯度より若干増加している傾向にある。この傾向は1年間を通して見られる。これらはいずれも太陽の照射時間と照射角度に関係する。すなわち、照射時間が長いほど、また照射角度が高くなるほど電子密度は増加する。季節で見ると冬から春にかけてTECが増加している傾向にある。電離層における電波伝搬遅延量は、この電子密度が増加すればするほど多くなる。GPSの測位計算は日本上空から地球中心角度で約75°の範囲で高度約2万kmの衛星から発射された電波を使用しているので、広範囲な電子密度状況を把握する必要がある。しかし、広範囲のデータ取得は困難であるので、ここでは参考資料として取得できた日本上空の例を示している。なお、南方の低仰角から伝搬するときには電波伝搬遅延量は大きくなることが、奥田により解析されている<sup>1)</sup>。

また、この状況は年によって異なり、太陽の活動状況等が影響する。Fig. 3はFig. 2と同様に2000年の電子密度状況を示している。2000年と2005年のTECの量を比較すると、2000年のTECははかり多くなっていることが分かる。これにより電波の電離層遅延量は年によって異なっていることが分かり、これがGPSの単独測位の精度に影響することとなる。なお、2000年は太陽の黒点活動状況の11年サイクルにおける極大期に相当する。

1周波処理では、モデル式により電離層遅延量を推定して補正を行っているが、2周波処理では、(1)および(2)式により直接このTECを測定しているので、測位精度の向上効果がより良く現れることになる。

**取得データ数**

毎月取得したRAWデータを使用して測位計算を行った結果、Table 1に表す測位数を得た。利用者局⑨では8月、また⑩では12月にRAWデータが取得できなかった。また、

Table 1. Number of received data

Used Station	Baseline Length (km)	Distinction	Month											
			2005/May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	2006/Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
①	45.258	Daytime	1440	1433	1435	1438	1436	1440	1439	1436	1437	1438	1426	1437
		Night	1391	1440	1433	1438	1438	1437	1439	1438	1436	1440	1435	1438
		Total	2831	2873	2868	2876	2874	2877	2878	2874	2873	2878	2861	2875
②	100.228	Daytime	1439	1436	1437	1438	1431	1436	1438	1431	1431	1434	1423	1426
		Night	1387	1439	1428	1433	1435	1436	1435	1436	1439	1436	1436	1437
		Total	2826	2875	2865	2871	2866	2871	2874	2866	2867	2873	2859	2863
③	154.890	Daytime	1438	1436	1438	1438	1433	1438	1438	1437	1428	1433	1419	1430
		Night	1388	1440	1437	1437	1436	1434	1437	1434	1436	1438	1436	1439
		Total	2826	2876	2875	2875	2869	2872	2875	2871	2864	2871	2855	2869
④	199.801	Daytime	1440	1433	1436	1438	1436	1440	1438	1434	1436	1430	1416	1427
		Night	1391	1436	1436	1438	1438	1437	1439	1436	1436	1439	1434	1438
		Total	2831	2869	2872	2876	2874	2877	2877	2870	2872	2869	2850	2865
⑤	253.397	Daytime	1440	1436	1438	1438	1433	1440	1439	1436	1438	1428	1413	1424
		Night	1391	1440	1437	1436	1436	1437	1439	1438	1437	1440	1431	1440
		Total	2831	2876	2875	2874	2869	2877	2878	2874	2875	2868	2844	2864
⑥	48.494	Daytime	1440	1435	1435	1437	1434	1439	1437	1436	1438	1440	1428	1438
		Night	1391	1439	1435	1436	1435	1435	1437	1438	1437	1440	1434	1435
		Total	2831	2874	2870	2873	2869	2874	2874	2874	2875	2880	2862	2873
⑦	157.386	Daytime	1080	1433	1437	1434	1430	1438	1438	1433	1438	1433	1420	1428
		Night	676	1440	1433	1435	1437	1433	1436	1436	1434	1436	1431	1439
		Total	1756	2873	2870	2869	2867	2871	2874	2869	2872	2869	2851	2867
⑧	169.685	Daytime	1429	1435	1431	1437	1436	1438	1438	1430	1392	1434	1413	1430
		Night	1376	1440	1432	1435	1419	1414	1427	1437	1434	1435	1435	1439
		Total	2805	2875	2863	2872	2855	2852	2865	2867	2826	2869	2848	2869
⑨	225.083	Daytime	1440	1433	1437	0	1434	1438	1439	1435	1438	1440	1426	1440
		Night	1388	1437	1435	0	1437	1437	1437	1437	1436	1438	1434	1440
		Total	2828	2870	2872	0	2871	2875	2876	2872	2874	2878	2860	2880
⑩	321.007	Daytime	275	1436	1438	171	1435	1440	1439	0	1436	1439	1429	1438
		Night	0	1439	1434	0	1438	1437	1439	0	1431	1437	1434	1439
		Total	275	2875	2872	171	2873	2877	2878	0	2867	2876	2863	2877

Daytime : 06:00~18:00  
Night : 18:00~06:00

利用者局⑩の5月と8月では昼間のみしか測位できず、その数もそれぞれ1.4時間分、2.3時間分と少ない。したがって、これらの利用者局の月では統計的に測位精度を把握するには不十分であった。これらはいずれも受信機に起因するものである。

年間の測位精度

一例として、時系列で見た1周波及び2周波処理の基線長253km（利用者局⑤）の24時間測位分布をFig. 4およびFig. 5に示す。これらの図は5月のx, y, z方向の測位分布図である。図に示すようにx, y, z方向とも時刻による一見周期的な測位分布の傾向が生じているが、GPSの測位誤差は周期的な要素はほとんど無く、長時間で見ればランダムな誤差として扱われている。そこで、x, y, z方向の測位精度を標準偏差で表すこととして、基準局からほぼ等間隔に経度方向に設定した利用者局①から⑤の年間の測位精度の平均値を基線長別に表すとTable 2のようになる。2周波処理の方が1周波処理に比べて1/3から1/10程度精度は良くなり、基線長が長くなるにつれてその比率は高くなっている。特に、精度の低下が大きいz方向で向上率が良くなっている。これらの測位精度を基線長別に1年間を通して示した図がFig. 6およびFig. 7である。Fig. 6は1周波処理、またFig. 7は2周波処理でx, y, z方向別に示している。なお、図中の①から⑤はFig. 1に示す利用者

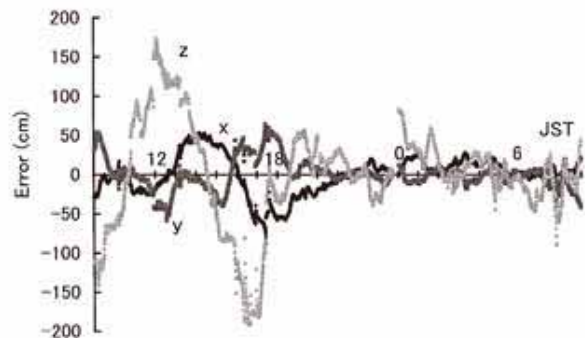


Fig. 4. Measurement consequence at the user station ⑤, 1 frequency process. (May, 2005)

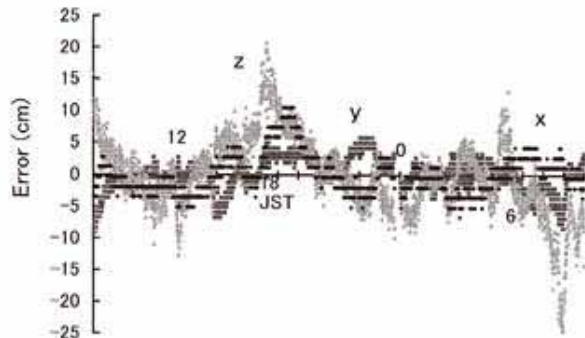


Fig. 5. Measurement consequence at the user station ⑤, 2 frequencies process. (May, 2005)

Table 2. Measurement accuracy in May, 2005

Used station number	Frequency process type	Standard deviation (cm)		
		x	y	z
①	1	5.4	5.1	13.0
	2	1.4	1.5	3.1
②	1	11.4	10.2	27.6
	2	2.1	1.8	4.6
③	1	15.5	15.0	40.0
	2	2.2	2.3	5.2
④	1	20.3	17.6	51.5
	2	2.8	2.3	6.2
⑤	1	24.4	19.5	65.2
	2	3.1	2.6	6.0

局の意味で、以下同様である。

Fig. 6では、x, y, z方向別とも7月から8月の夏に測位精度が悪くなり、9月から4月ごろまでは一定した測位精度となっている。GPSの測位原理が衛星から受信点までの距離を測定することから、z方向に誤差は大きくなる。キネマティック手法においてもz方向の測位精度が悪く、x, y方向のはほぼ倍程度になっている。また、基線長別では測位精度が悪くなる夏場はその特徴があまり現れていないが、その他の月は短い基線長ほど測位精度は良くなっている。各月1日分のデータなので、当日の電子密度状況によるところが大きい。測位精度の傾向はFig. 2およびFig. 3の月別TECの傾向とは必ずしも一致していない。すなわち、TECが多い3-5月よりも6-8月の方が測位精度は

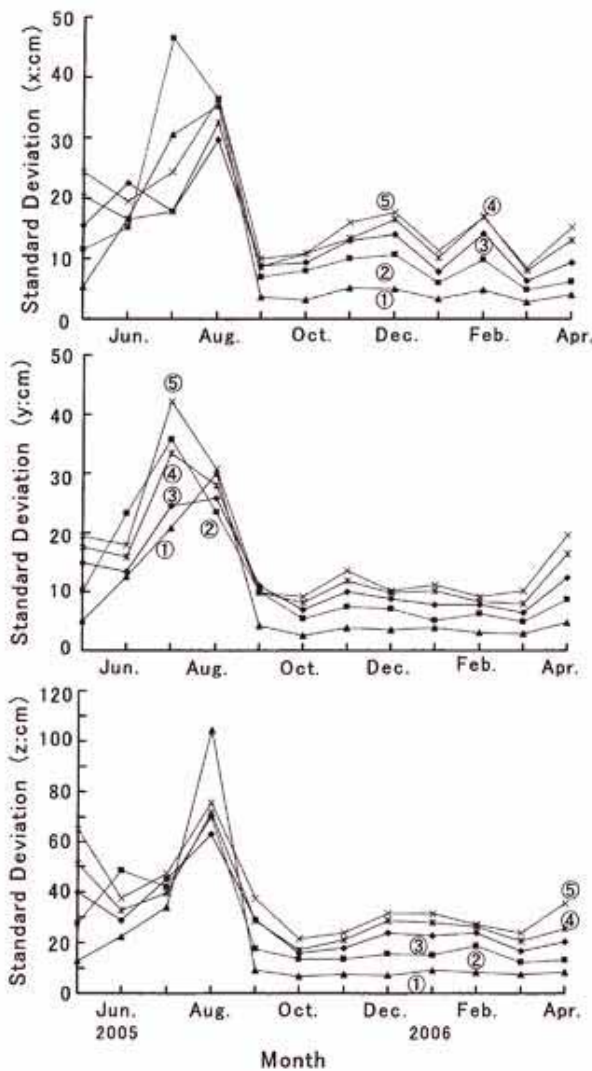


Fig. 6. Measurement Accuracy by the axes, 1 frequency process.

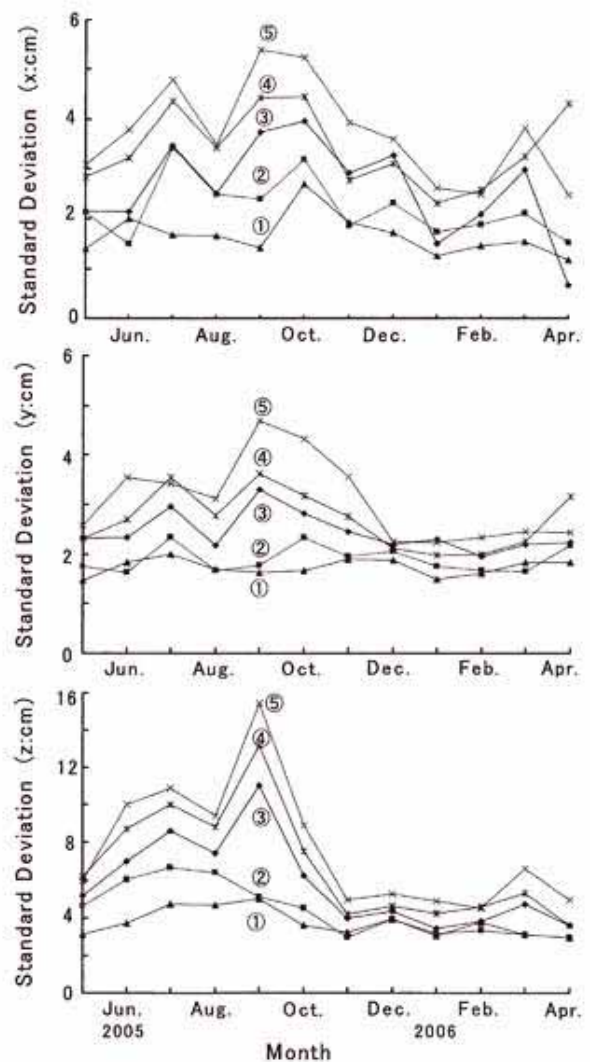


Fig. 7. Measurement Accuracy by the axes, 2 frequencies process.

悪くなっている。Fig. 7の2周波処理の結果を見ても、電離層による電波遅延が余り取り除けていないと判断される月(9月)があることから、電離層による電波遅延だけでなく他の要因、例えば大気圏による遅延やノイズなどがあるのではないかと推測される。

以上のことから、使用受信機や測位計算ソフトウェアにもよるが、基準局から250kmあたりでも、2周波を使用すると2次元位置を10cm程度の測位精度で求めることができ、測位対象(例えば魚礁設置における魚群網集の評価等)によっては非常に有効であることが分かった。

### 基線が緯度方向にある場合の測位精度

電離層の電子密度の量は、低緯度になるにつれて増加する。この項では、Fig. 1の⑥から⑩のように緯度方向に利用者局を設定した場合の測位精度について述べる。取得したRAWデータの日時は、いずれも経度方向に利用者局(①~⑤)を設定した日時と同じである。

比較のために1周波処理の3次元の測位精度をFig. 8(利用者局①から⑤)とFig. 9(利用者局⑥から⑩)に示

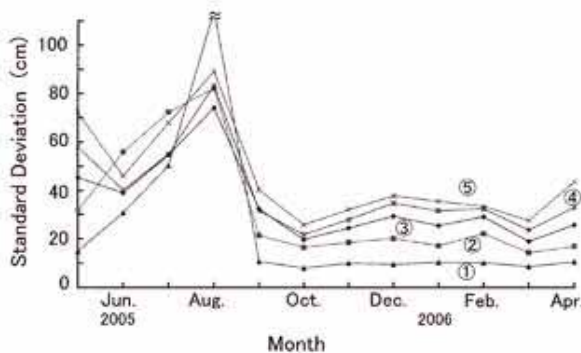


Fig. 8. Measurement Accuracy of 3 dimensions, 1 frequency process. (User station ①~⑤)

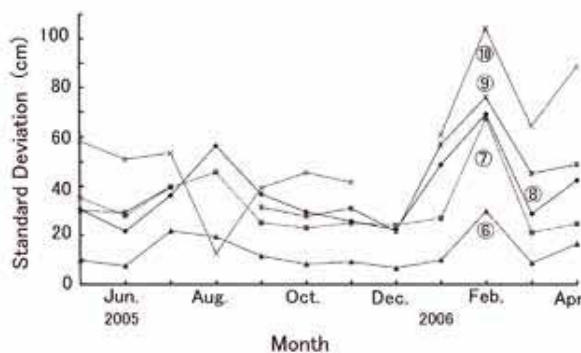


Fig. 9. Measurement Accuracy of 3 dimensions, 1 frequency process. (User station ⑥~⑩)

す。利用者局⑩では5月と8月にRAWデータの取得量が少なかったため、測位精度の傾向があまり現れていない。両図とも基線長が長くなれば測位精度が劣化する傾向は表れているが、年間を通しての傾向は似ていない。Fig. 10(利用者局①から⑤)およびFig. 11(利用者局⑥から⑩)は2周波処理の3次元測位精度である。これらの図も測位精度は向上しているものの1周波処理と同じことが言える。

利用者局が基準局から見て経度方向にあるか緯度方向にあるかで測位精度の傾向が異なる原因として、次のことが考えられる。衛星からの電波の伝搬経路、すなわち高緯度を經由した電波か、低緯度を經由した電波かで電波遅延の量が異なる。この場合、2波処理で電離層における電波遅延が補正できれば問題はないが、1波処理では補正が十分でなくなる。今回の解析の場合は、電波の反射、また測位精度に与える影響は小さいけれども地域的な大気中の電波伝搬状態、さらにはノイズなども測位精度に影響したものと考えられる。Fig. 9やFig. 11において、ほぼ基線長が似かよっている⑦(157km)や⑧(170km)では年間の測位精度傾向がほぼ同じであることから、地域的な電波伝搬状

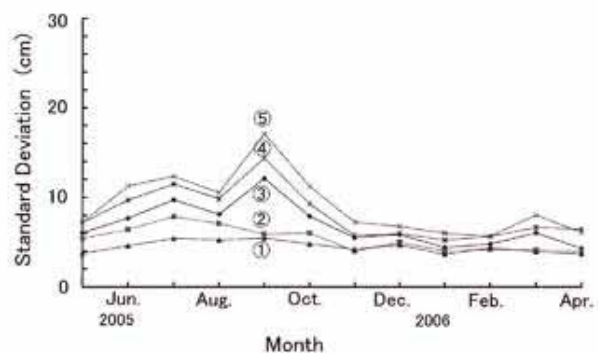


Fig. 10. Measurement Accuracy of 3 dimensions, 2 frequencies process. (User station ①~⑤)

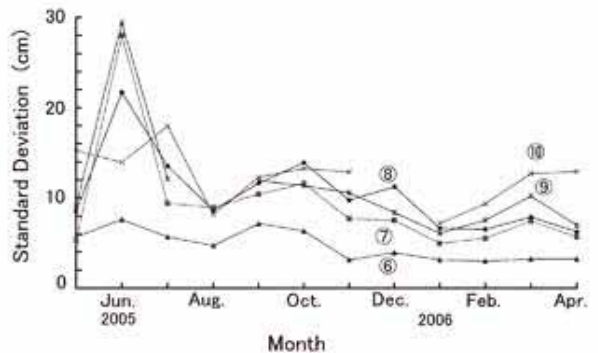


Fig. 11. Measurement Accuracy of 3 dimensions, 2 frequencies process. (User station ⑥~⑩)

態が影響しているのではないかと推察できる。

基線が緯度方向にある場合でも、2周波処理を行えば、経度方向に利用者局があるときと同じように320km程度の基線長でも6月を除けば10cm以内（2次元位置）の測位精度で求めることができた。

### 昼夜別測位精度

Fig. 2 および Fig. 3 に見られるようにTECは夜間より昼間の方が多。そこで、昼間（6時から18時）と夜間（18時から6時）に分類して測位精度の変化を解析した。Fig. 12 は利用者局①から⑤における1周波処理の昼間、また Fig. 13 は夜間の3次元方向の測位精度を示している。夏場を除いては夜間の方が良くなっている傾向がある。

Fig. 14 および Fig. 15 は同様に2周波処理の昼夜別測位精度を示している。1周波処理と同様、夏場を除いては数cm夜間の方が精度は良くなっている。

これらのことから、夏場は電離層の電波遅延だけでなく、他の原因による電波遅延などの影響があるように推測される。

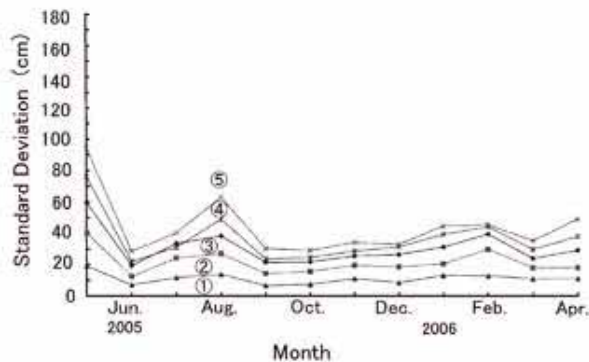


Fig. 12. Measurement Accuracy in the daytime, 1 frequency process. (User station ①~⑤)

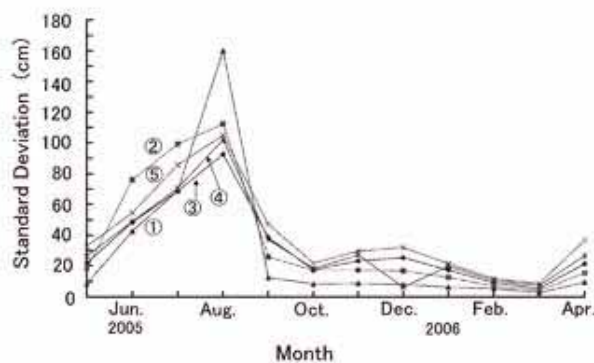


Fig. 13. Measurement Accuracy in the night, 1 frequency process. (User station ①~⑤)

### 基線長別PDOP値と使用衛星数

キネマティック手法による測位は、基準局と利用者局とで視界内にある同じ衛星を使って計算をする。したがって、基準局と利用者局との距離が増すにつれて同時に使用できる衛星の数が減少することになる。Fig. 16は、ほぼ基線長を等間隔に設定した利用者局の①から⑤の1年間のPDOP値（Position Dilution of Precision：衛星配置から見

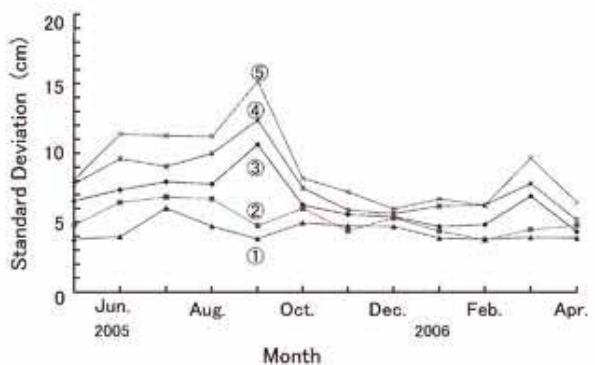


Fig. 14. Measurement Accuracy in the daytime, 2 frequencies process. (User station ①~⑤)

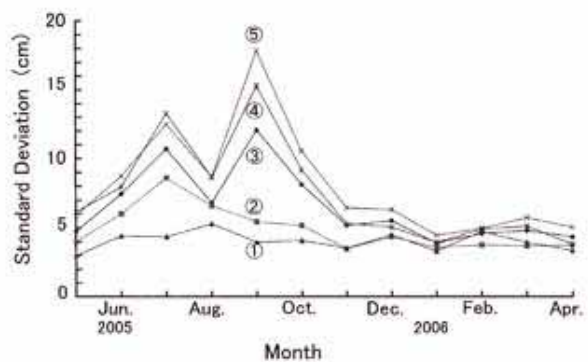


Fig. 15. Measurement Accuracy in the night, 2 frequencies process. (User station ①~⑤)

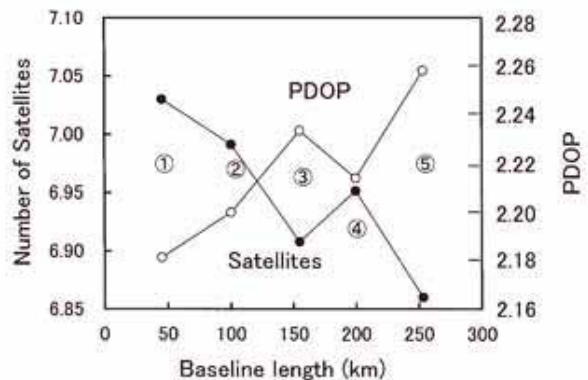


Fig. 16. Annual average of PDOP and the number of captured satellites for each baseline length.

た幾何学的精度低下率)と使用衛星数の平均を示している。基線長が長くなるにつれてわずかではあるが使用衛星数は減少し、PDOP値は高くなっている。通常この程度の差では測位精度の差がはっきりと現れない。しかし、基準局および各利用者局とも同日時の衛星からのデータを使用した解析なので、わずかなPDOP値の増加や使用衛星数の減少が測位精度の劣化となって現れているものとも考えられる。また利用者局ごとのPDOP値の標準偏差は、Fig.16のPDOP値の平均の傾向と同様に基線長が長くなるにつれて大きくなる傾向にあった。これは基線長が長くなると頻繁に使用衛星の組合せが変化することを示しており、その変化時に測位のシフトが見られることがある。このことは測位誤差のばらつきを増す原因になる。なお、④の利用者局において③の局を利用したときより衛星数が多くなりPDOP値が小さくなっているのは、アンテナ設置周辺の地理的な環境が衛星からの電波受信に良かったものと考えられるが、③の利用者局より④の局の方が測位精度は良くなっていなかった。これは上述の測位のシフトの量が原因と考えられる。

以上の原因が組み合わされて、1周波および2周波処理とも基線が長くなるにつれて測位精度が劣化すると考えられる。

### あとがき

海上でキネマティックGPSを利用する場合は、陸上基準局からの基線長が長くなることが多い。今回、2周波を利用すれば、長い基線長でも高い精度で測位ができることがほぼ定量的に把握できた。

基線長が長くなるにつれて測位精度が劣化する原因は、季節、昼夜、および地域的な電子密度状況、さらに使用衛

星数の減少などが挙げられ、それらが複合的に影響して測位精度が劣化する。そのうち2周波を使用することにより電離層の電波遅延の影響がある程度除去でき、今回の解析では、基線長が300km位でも年間を通して10cm(2次元位置、1標準偏差)位の精度で測位できることが分かった。これは、基準局(陸上)から遠く離れた海底や魚礁形状と魚群の増集効果などの調査には十分に活用できる精度であると考えられる。

なお、太陽活動の極大期においても電波遅延補正のためのモデル値は衛星から送信されているので、KGPSの1周波処理、また2周波処理の測位結果は、今回解析した測位精度特性と同様な傾向を示すものと考えられるが、実測を行って確認をする必要がある。

さらに、リアルタイムで測定する場合には、基準局から利用者局に送信するデータの通信手段を別途検討しておくなければならない。

### 文 献

- 1) K.OKUDA, M. MISE, K. MOTOMURA: The Baseline Length Characteristics of the Positioning Accuracy by Kinematic GPS/GLONASS, Fisheries Engineering, 38, No.1, 9-18 (2001)
- 2) 一色 浩, 浪江宏宗: 2周波観測方程式と長基線解, GPSシンポジウム2002, 社団法人日本航海学会GPS研究会, 東京, 213-220 (2002)
- 3) 坂井丈泰: GPS技術入門, 東京電気大学出版局, 東京, 87-89 (2003)
- 4) 奥田邦晴: NNSSにおけるドブラカウントの誤差について, 弓削商船高等専門学校紀要, 6, 1-7 (1984)