

# キネマティックGPSの動揺時における傾斜角度の測定誤差について

奥田邦晴<sup>1†</sup>, 川崎潤二<sup>1</sup>, 酒出昌寿<sup>1</sup>

## On the Measurement Error of the Angle of Inclination by Kinematic GPS when a Ship Rolls

Kuniharu Okuda<sup>1†</sup>, Jyunji Kawasaki<sup>1</sup> and Masatoshi Sakaide<sup>1</sup>

**Abstract** : The authors have analyzed the measurement accuracy of the angle of inclination using kinematic GPS in order to measure pitch and roll of a small ship. These analyses are mostly of the standstill state, and there are few that practically analyze the measurement accuracy of the angle of inclination in pitching and rolling state, because it is unable to acquire the precise rolling value when a ship, means an antenna, rolls. Therefore, we made an equipment with the motor which inclines the arm installed an antenna periodically. And the angle of inclination was acquired by kinematic GPS using this equipment. However, as the angle of inclination of the equipment itself was illegible, an approximate value to the truth value was calculated from an angle of inclination acquired by GPS. An error of inclination when an antenna rolled was the reduction of the approximate value from the angle of inclination acquired by GPS. This technique enables to analyze more in detail the tendency of measurement error of an angle of inclination. As a result, when rolling became fast, the errors of the angle of inclination increased.

**Key words** : Kinematic GPS, Measurement accuracy, Angle of inclination, Ship motion

### まえがき

GPSから得られる位置や時間情報などは、応用分野にとって根幹となる情報である。海上での利用は位置そのものを利用するほかに、例えばAIS (Automatic Identification System) やSTNS (Self Trawl & Navigation System) などに組み込まれてシステムの中の一つの情報として重要な部分を占めている。また、各センサーから得られる測定値の時間をGPS時間とするなどGPSから得られる時間情報もシステムを構築する上で重要な要素となっている。

GPS単体の応用としては、数cmの精度で測定できるキネマティック手法による船舶の動揺測定や離着岸時の挙動測定などがある。これらの情報は傾斜測定器、ジャイロ、レーザーなどのセンサーからも得られるが、GPS単体ですべての情報を得ることができれば、各センサーから得られ

る測定値の時間のずれが生じなくなるという大きな利点がある。

これまで筆者らはGPSを小型漁船の動揺および挙動測定に用いるために、GPSを使って船体の傾斜角度測定の精度について解析<sup>1-3)</sup>してきた。しかし、多くは静止状態での解析であり、実際に利用する際に起こる船体が動揺しているときの傾斜角度の測定精度の解析は少ない。それは船体の動揺時、すなわちアンテナが動揺している時の正確な動揺値が得られないためである。そこで、今回、モーターによってアンテナを取り付けるアームを一定の周期で傾斜させる機器（以下、傾斜器という）を利用して、キネマティックGPSで傾斜角度を求めた。しかし、傾斜器本体の正確な傾斜角度が分からないので、求めた傾斜角度から真値に対する近似値を計算し、その値をキネマティックGPSで求めた傾斜角度から減ずることによって、アンテナが傾

2009年10月5日受付. Received October 5, 2009.

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

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

斜動揺しているときの傾斜角度誤差とした。この手法によって、実際に応用する際のより詳細な傾斜角度の測定誤差傾向が解析できたのでその報告をする。

### 実験および解析方法

実験は2008年9月27日に水産大学校三学科共用実験棟屋上にて行った。アンテナを動揺させる傾斜器および実験写真をFig. 1に示す。傾斜器の上部にあるアームの両端にアンテナを取り付ける。下部にあるモーターを回すことにより軸が上下運動をし、軸の一端に取り付けられているアームが上下運動をする構造になっている。モーターの回転数は装置の中央にある制御函で設定する。回転数は3種類とした。

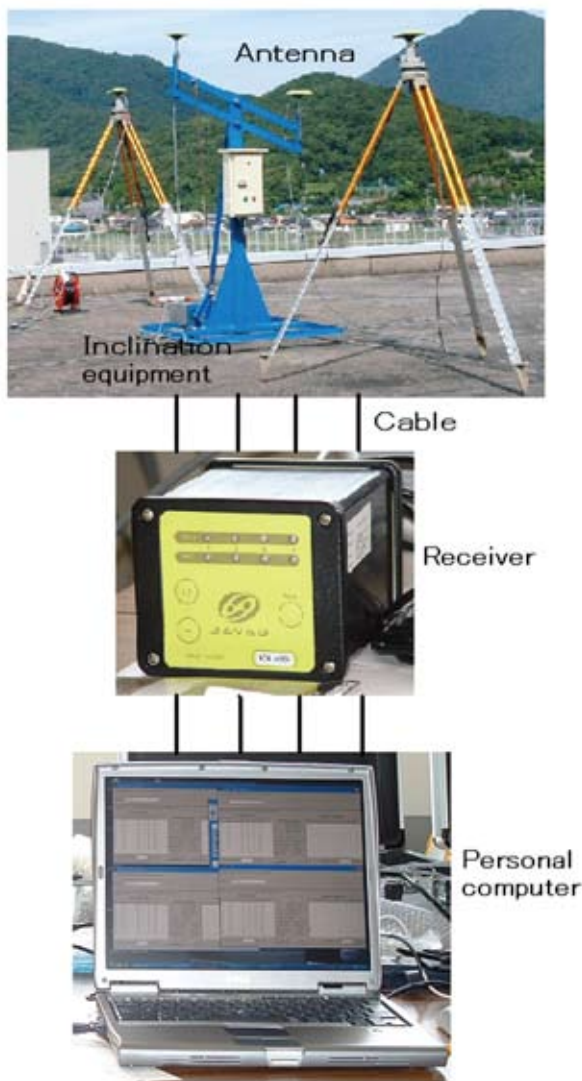


Fig. 1. Composition of the experiment.

Fig. 1に示すように傾斜器に取り付けた2本のアンテナと固定した三脚に取り付けた2本のアンテナの計4本のアンテナを、1筐体に4枚の受信基板が収められた受信機に接続し、衛星からの電波を各アンテナから同時受信する。傾斜器のアーム（アーム長：0.9m）と2台の三脚を結んだ線（約4m）はほぼ十字になっている。4本のアンテナで受信した衛星からの生情報（RAWデータ）は1台のパソコンに4つのファイルとして蓄えられる。最小受信間隔は0.1秒で、使用した受信機は、Gyro-4である。

得られたRAWデータをキネマティック後処理用解析ソフト（Graph Move）に入力して、時間、PDOP（Position Dilution of Precision：衛星配置による幾何学的精度低下率）、基準となるアンテナからのベクトル、動揺速度、使用衛星数等を計算した。ここで、基準となるアンテナは、固定したアンテナの一方、また動揺しているアンテナの一方として、それぞれ固定方向および動揺方向のアンテナのベクトルを求めた。これらの計算結果から船舶の動揺の一つである縦揺れ（または横揺れに相当）と見なした傾斜角度を計算して、アンテナが動揺する時の測定誤差を解析した。

### 結果および考察

#### アンテナ静止時の傾斜角度測定誤差

Fig. 2に示すようにアンテナが静止しているときの測定時間中の傾斜角度をTable 1に表す。静止した傾斜角度の測定はFig. 1で示したように三脚に取り付けた2本のアンテナを使用している。この角度の算出は船舶上では縦揺れまたは横揺れの角度に相当する。表では、傾斜角度の平均と標準偏差、またその平均の傾斜角度をほぼ真の値として

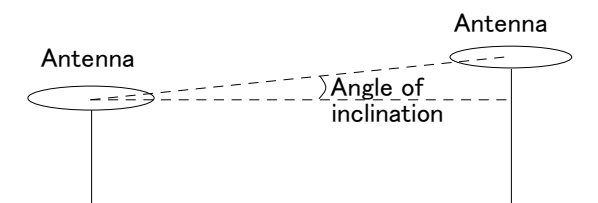


Fig. 2. The schematic view of the angle of inclination.

Table 1. The angle of inclination by the static measurement

Measured time	Angle of inclination		Error of angle of inclination	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
4187.4 s	0.53°	0.07°	0.06°	0.04°

測定値との差（誤差に相当）をとり、その平均と標準偏差を表している。測定時間は約70分間で短いため、標準偏差は小さくなっている。24時間観測すればさらに高精度が得られるが、今回はアンテナ動揺中の解析を行った関係で測定時間は短くなった。因みに奥田らの報告<sup>2)</sup>では24時間の傾斜角度の標準偏差は基線長（アンテナ間距離）4 mで $0.16^\circ$ となっている。

傾斜角度と傾斜周期

Fig. 3はアンテナが動揺しているときの各実験における傾斜角度の一部を時系列で示している。縦軸が傾斜角度で最大傾斜角度は約29度である。データのサンプリング間隔が0.1秒ごとなので、傾斜周期が速くなるにつれて最大傾斜角度を示すことが難しくなっている。アンテナを傾斜させるためのモーターはほぼ一定の回転をしているので、この図では、一見正確に一定の周期で動揺しているように見える。しかし、1周期ごとに比較すると傾斜周期は僅かながら変動し、また1/2周期ごとの時間も僅かながら変動していた。周期の平均値をとると約8.3、5.4及び3.2秒となっ

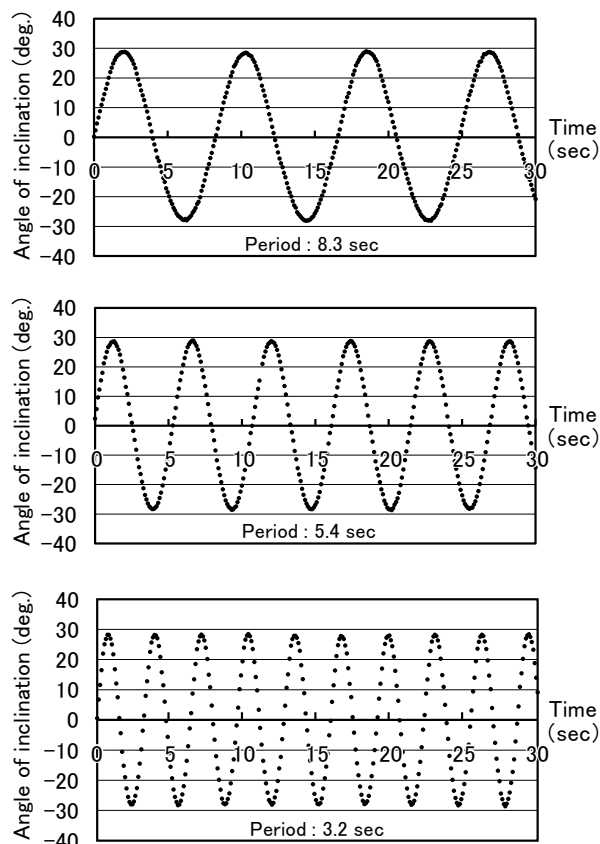


Fig. 3. The angle of inclination by the time series.

た。Fig. 4は1周期分を周期ごとに拡大した例である。この図でははっきりとは分かり難いが、 $1/100^\circ$ の単位での測定をした場合、計算結果に誤差が含まれていること、また傾斜の立ち上がり時間が正確につかめないことを示している。

以上より、求めた傾斜角度に誤差が含まれていること、またモーターとアームに取り付けた軸の上下運動が定常的でないことが考えられた。

傾斜角度および傾斜速度の誤差の算出方法

前項で述べたように傾斜器の正確な傾斜角度や傾斜周期が正確に分からないので、キネマティックGPSによるアンテナ動揺中の傾斜誤差が求められない。そこで、ほぼ正確な傾斜角度として、キネマティックGPSによる傾斜角度の平均値を求めることとし、それを近似曲線で代用することとした。1周期分の傾斜状態を見ると、傾斜速度は傾斜角度が0度のときに最も速くて、最大傾斜角度になるにつれて遅くなり、最大傾斜角度を過ぎると逆に徐々に速くなる。この傾向は1/2周期ごとに繰り返される。そこで、

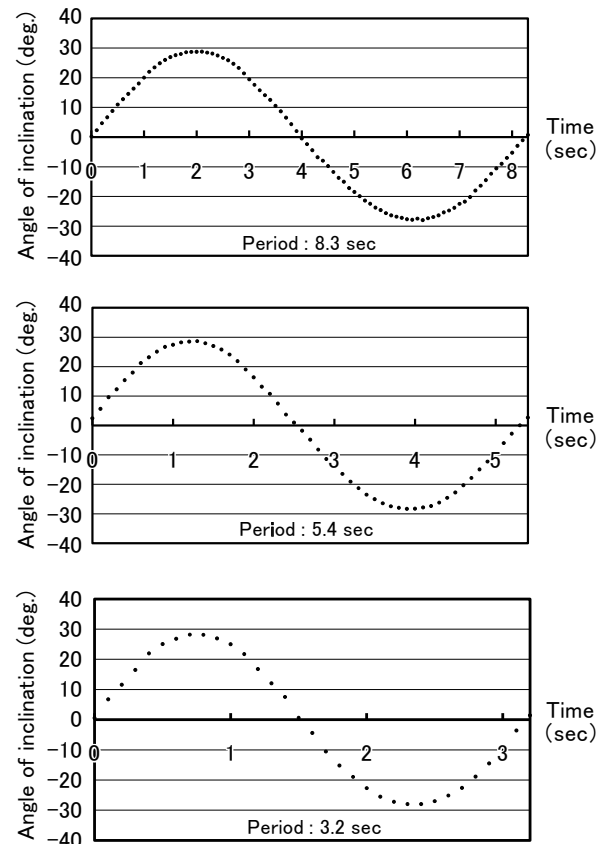


Fig. 4. The angle of inclination for one period.

1/2周期分の近似曲線を求め、この近似曲線から得られる傾斜角度および傾斜速度をほぼ正確な値として実測データからの差をとり、その差を誤差とした。なお、傾斜角度および傾斜の速さはその動きからそれぞれ4次式および3次式の近似曲線とした。Fig.5およびFig.6に一例として1/2周期分の傾斜角度および傾斜速度の近似曲線を示す。周期が速くなるにつれて、当然のことながら1/2周期分の実測データ量が少なくなっている。このことは正確な近似曲線を求めるときにやや影響する虞があるが、誤差の量的確認を行う上では問題ないと考えられる。傾斜角度の誤差並びに傾斜速度の誤差を求めるときには、0.1秒ごとに近似曲線から求めた値とキネマティック手法によって求めた実測データの値との差をとった。

#### アンテナ動揺時の傾斜角度の誤差と傾斜速度

Fig.7は20周期分の傾斜角度の誤差と傾斜速度の関係を図示してある。特にこれらの間には顕著な関係は見られないが、ほぼ最大傾斜速度の1/2辺りに傾斜角度の誤差の境目となるような傾向が見られる。このことは傾斜周期が速くなるほど次第にはっきりとしている。そこで、最大傾斜

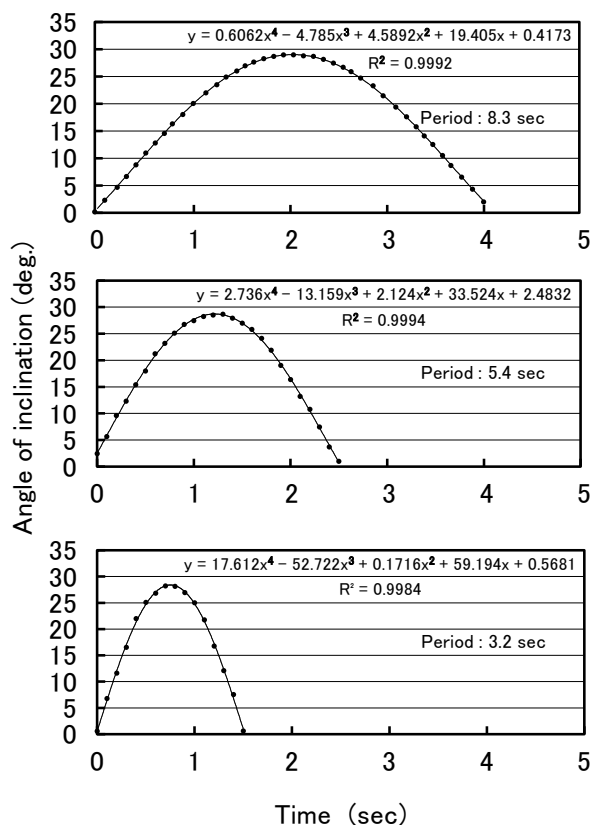


Fig. 5. The approximate curve of the angle of inclination.

速度のほぼ1/2をしきい値として傾斜角度の誤差をまとめた表がTable2である。この表によると明らかに傾斜速度の速いところと遅いところでは傾斜角度の誤差の傾向が異なっている。すなわち、どの周期においても傾斜速度の遅いところよりも速いところの方が傾斜角度の平均誤差と標準偏差は大きくなっている。また、Table2では各周期別の解析時間内のアンテナ静止時における誤差も表している。アンテナ静止時と比較して動揺時は約4倍から6倍程度の誤差が生じている。

つぎに、傾斜角度の誤差と傾斜速度の誤差の関係を示した図がFig.8である。傾斜周期が8.3および5.4秒のときには相関はないものの、傾斜周期が速くなるにつれて相関の傾向が現れると推察される。このことは、さらに周期別のデータ量を増やして検証する必要がある。

#### アンテナ動揺時のPDOP

測位精度を表す指標にPDOPがある。この値は衛星配置によって計算され、衛星が片寄った配置であれば大きくなり、測定精度が悪くなることを表す。また、受信している衛星の組合せが変わるとき、すなわちPDOPが変化するとき測定値が変位することがよくある。そこで、アンテナ静止時と動揺時におけるPDOPを比較した。Table3はアンテナ動揺時と静止時のPDOPを周期別に表してある。静止

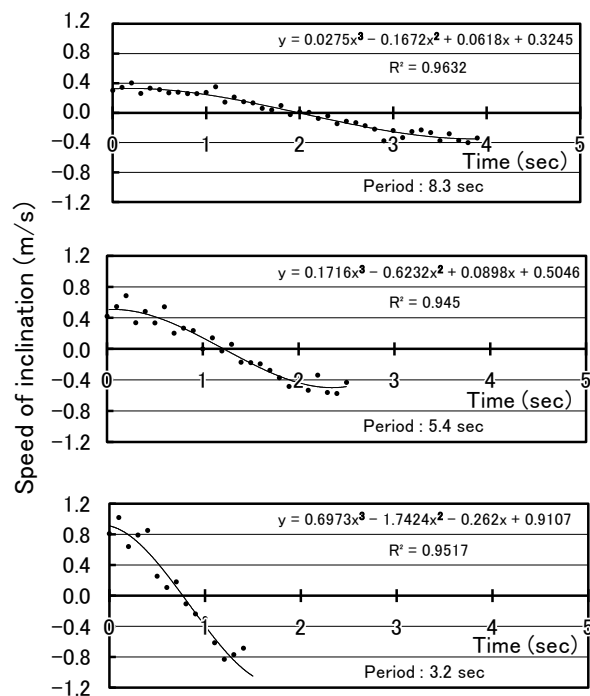


Fig. 6. The approximate curve of the speed of inclination.

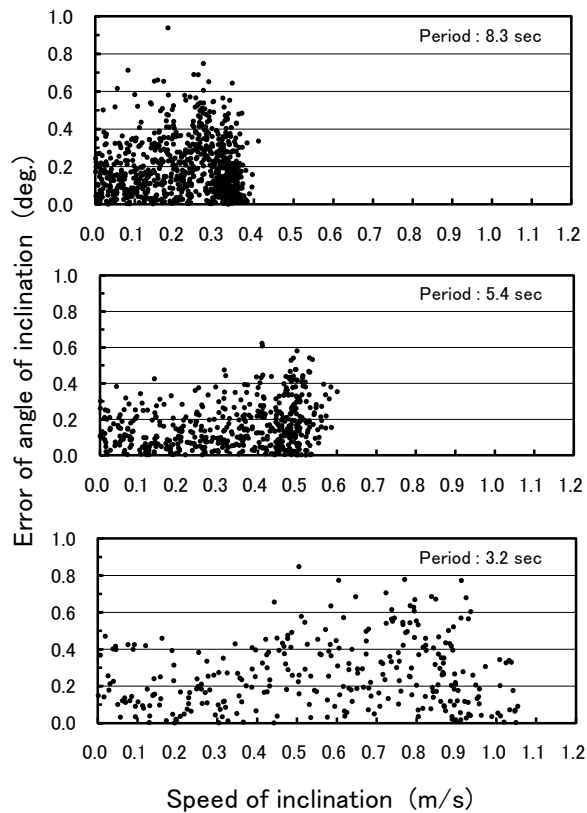


Fig. 7. The error of the angle of inclination and the speed of inclination.

Table 2. The relation between the error of angle of inclination and the speed of inclination

Period(sec)	Speed of inclination	Error of angle of inclination	
		Average (deg.)	Standard deviation (deg.)
8.3	Static	0.05	0.036
	<0.2m/s	0.19	0.148
	>0.2m/s	0.21	0.149
5.4	Static	0.05	0.034
	<0.3m/s	0.12	0.094
	>0.3m/s	0.19	0.136
3.2	Static	0.05	0.038
	<0.5m/s	0.21	0.139
	>0.5m/s	0.30	0.199

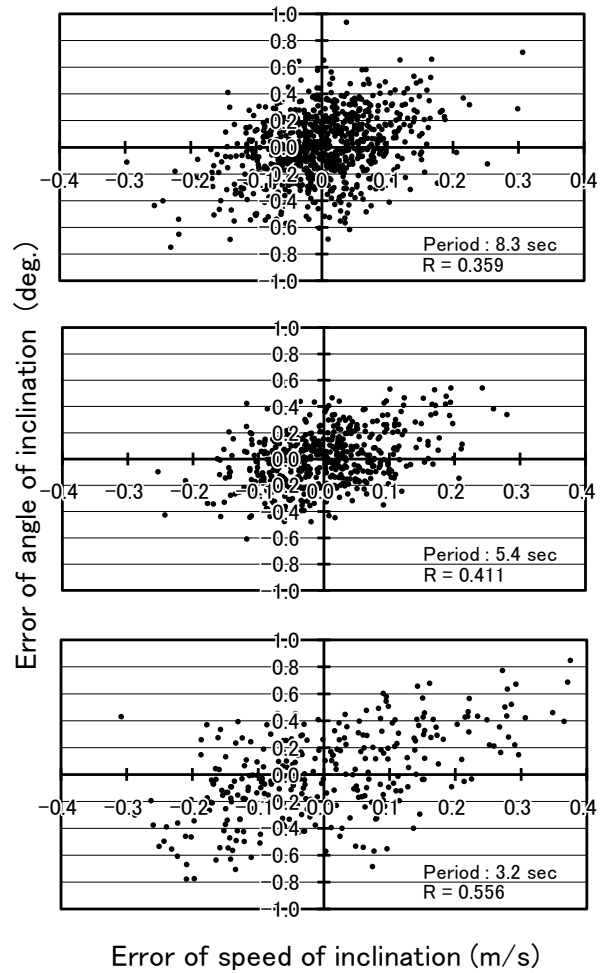


Fig. 8. The error of the angle of inclination and the error of the speed of inclination.

Table 3. The comparison of PDOP

Period(sec)	State of inclination	Average	Standard deviation
8.3	Static	1.52	—
	Rolling	1.93	0.366
5.4	Static	1.18	0.042
	Rolling	1.41	0.160
3.2	Static	1.27	0.017
	Rolling	1.38	0.126

しているときはほとんど衛星の組合せの変化はないが、アンテナが動揺しているときは衛星の組合せの変化が多くなっていることが標準偏差から分かる。また、それに伴いPDOPの平均値も静止時よりやや大きい値となり、測定値の誤差が大きくなることが伺える。一例として、PDOPの変化によって傾斜角度誤差が大きくなった例をTable 4に表す。使用衛星数が7機から8機になり衛星の組合せが変わったことが分かる。それに伴い、PDOPは2.99から1.72になり、傾斜角度誤差は0.94と急に大きくなった。PDOPが良くなっているにもかかわらず、逆に誤差が大きくなるのは、このような衛星の組合せが変わるときに多く見られる。Table 3から分かるように、アンテナが動揺しているときには静止しているときよりも衛星の組合せが頻繁に変化している。このことが傾斜角度の誤差が増加する一因となることがわかった。

**Table 4.** A example of the error of the angle of inclination due to change of PDOP

Time	Error of angle inclination	PDOP	Number of satellites
9/27 02:21:45.6	0.15	2.99	7
45.7	0.11	2.99	7
45.8	0.94	1.72	8
45.9	0.28	1.58	9
46.0	0.21	1.57	9

## あとがき

GPSがほぼ実用段階に入った頃から、航走中は測位誤差が小さいのではないかといったことが言われていた。これは定点観測と違って真の位置との比較が難しいことや、航走中であるため測位点をプロットするディスプレイの縮尺が小さくなり誤差が見た目上分かり難くなっているためと考えられる。今回、本論文で解析したようにアンテナが動揺しているとき、すなわち航走中に相当するときの測定誤差はアンテナが静止しているときよりも約2倍から6倍の平均誤差があり、その一因として衛星の組合せが頻繁に変化しているということが分かった。

これらのことにより、測定誤差の傾向や原因がほぼ把握できたと考えられるが、さらにより多くのデータでの検証が必要と考えている。今後、航走中あるいは動揺中においてキネマティック手法による傾斜角度の測定の際には、本論文の結果が誤差を論ずる上での資料となることのできるであろう。

## 文 献

- 1) 奥田邦晴, 川崎潤二, 酒出昌寿: 電波が遮蔽されるときGPSとGLONASSの複合キネマティック測位の有効性. 水大校研報, 57, 263-270 (2009)
- 2) Okuda K, Kawasaki J, Motomura K: Characteristics of Kinematic GPS Measurement Accuracy over a Short Baseline Length. *J Nat Fish Univ*, 53, 1-8 (2005)
- 3) Okuda K, Minami K, Motomura K, Inoue S, Sakai M: Characteristics of the Measurement Accuracy by the Inclination of Kinematic GPS Antenna. *J Nat Fish Univ*, 54, 55-62 (2006)