

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

奥田邦晴[†], 川崎潤二, 酒出昌寿

The Evaluation of Kinematic GPS/GLONASS when the Radio Wave is masked

Kuniharu Okuda[†], Jyunji Kawasaki and Masatoshi Sakaide

Abstract : When we measure the rolling and pitching such as fishing boats by GPS, it is necessary to set up at least 4 antennas. However, in most cases, around the antennas there are structures cut off the radio wave from the satellites. Therefore, we experiment the double use of GPS and GLONASS. The analysis was set up in an angle of elevation which cuts off the radio wave. As a result, when GLONASS was used together, the measurement result shows high accuracy even the elevation mask 25°. Consequently, it proves this method effective.

Key words : Kinematic GPS/GLONASS, Radio wave, Elevation mask, Accuracy, Ship motion

はじめに

船体の挙動計測にキネマティックGPS (Global Positioning System) を用いれば、時刻、位置、速力の情報のほかに、Pitch (縦揺), Yaw (船首揺), Roll (横揺), Heave (上下揺), Sway (左右揺), Surge (前後揺) の姿勢情報が得られるばかりでなく、潮汐などの情報も同時に得ることができる。これらの測定には、通常4本のアンテナが使われ、その上空には衛星からの電波を遮る構造物がないことが望ましい。しかし、船舶では、アンテナ設置付近に意外と構造物が多い。特に、漁船や小型船に設置するときには、アンテナの上空にケーブルやマストなどの構造物が多く、アンテナを設置する場所も困難な場合が多い。それ故、衛星からの電波が遮られることが頻発する。陸上のビルの谷間では衛星からの電波が遮られるため天頂付近にGPSの補間用として準天頂衛星を打ち上げることが日本で進められている。また、ロシアではGPSと同じような機能を有するGLONASS (Global Navigation Satellite System) が打ち上げられており、GPSと併用することで衛星の数が増えるこ

とを利用し、電波の遮蔽構造物がある場合の測位回数の増加や測位精度など、複合測位に与える影響の研究がなされている¹⁻⁴⁾。このGLONASS衛星は2012年には24機の衛星全部が打ち上げられる予定となっている。そこで、今回、現状での複合測位の精度の効果を把握するために、GPSとGLONASSの併用による複合キネマティック測位を行い、衛星からの電波が遮蔽されることに伴う測位の有効性について、電波のマスク仰角を設定して解析を行った。その結果、GLONASSを併用すると地平圏から設定したマスク仰角はGPSだけの測位のときより10°位高く、25°位でも測位精度を保っていることが分かった。

GLONASS衛星について

GPSとGLONASSの主な仕様の比較をTable 1に表す。この表を基に主に測位状況に関することを次に述べる。GPSとGLONASSの運用上の衛星数は、基本的にはどちらもTable 1に表すように24機であり、GPSは1995年に完全運用段階となって今では広く利用されている。現在は衛星の

Table 1. The outline of GPS and GLONASS

Item	GPS	GLONASS
Number of satellite	24+3(spare)	24
Number of orbit	6	3
Period	11h 58m	11h 15m
Altitude of orbit	20183 km	19100 km
Frequency (L1)	1575.42 MHz	1602+k × 0.5625 MHz
(L2)	1227.60 MHz	1246+k × 0.4375 MHz
		k:Channel number

性能向上のための更新を進めており、31機の衛星が測位に利用（2008年5月現在）されている。これに対して、GLONASSは1996年頃には24機が打ち上がっていたがすぐに減少した。その後、衛星の打ち上げは時々あったが、2008年からは衛星の打ち上げを順次再開し、2012年には24機の全衛星が揃って利用できるという情報があるが、実験を行った2007年5月時点では12機(2008年5月現在では10機)が利用できるのみである。GPSの衛星周期は1日に約4分ずつ遅れ、24時間観測すればほぼすべての衛星配置状態における測位結果が得られるので、24時間の測位状況を観測すれば、或る時刻における測位精度があらかじめ推定し易い。これに対して、GLONASSは現状では日々の時刻による配置がかなり異なっており、GPSと併用したときの或る時刻における測位精度の推定は、GPSとGLONASSの衛星軌道暦から求められる衛星の配置状態からしか推算できない。GLONASS衛星は今後新型に更新する計画があり、衛星などのハード的なシステムの精度が上がることになれば、GPSとGLONASS併用による複合測位の精度向上につながるものと考えられる。

実験および解析方法

最近のGLONASSが利用できる衛星の配置状態やキネマティック手法⁵⁾によるGPSとの複合測位の精度を知る必要から、実験は24時間連続測位を3回行った。期日は、2007年5月12日12時から13日12時まで、14日12時から15日12時まで、および15日12時から16日12時までである。実験場所は、水産大学校実験棟屋上で基準局のアンテナ位置は34° 04.' 147227 N, 130° 53.' 570713 Eである。周囲には、仰角5°～15°程度の子や構造物があり、これが実験場所の周囲環境における電波のマスク仰角となっている。

衛星からの生のデータ（RAWデータ）は、受信機（Ashtec製、GG-24）を介してパーソナルコンピュータに2秒間隔で貯えた。貯えたデータは後処理用ソフトウェア

（GraphMove）に入力し、全周囲のマスク仰角を5°, 15°, 25°, 35°, 45° に設定し、基準となるアンテナ（基準局）から測位する側のアンテナ（利用者局）までのベクトル計算をキネマティックで行った。なお、自然環境による電波のマスクはそのまま計算に反映されることになる。また、実験時における基準局から利用者局までの距離（基線長）の設定は、約1mから6mまで1mごととした。これは基線の長さに伴う測位精度も同時に考察するためである。実験の一例をFig. 1に示す。片方のアンテナを基準局とし、もう一方のアンテナを利用者局としており、このアンテナ間のベクトルを計算した。

結果および考察

GPSとGLONASS衛星の配置

実験期日中におけるGPSとGLONASS衛星の配置状態をFig. 2, Fig. 3およびFig. 4に示す。実験ごとの24時間の衛星配置の軌跡を示すと分かりにくくなるので、これらの図は一例として5月12日、14日および15日の日本標準時の12時の衛星配置を示している。中心が天頂で、地平圏から30度ごとの仰角を同心円で示してある。また、図中においてプロットの横に示してある数字は衛星番号である。これらの図を比較すると、GPSの衛星配置は、日に4分ずつずれるだけなのであまり変化はないが、GLONASSの衛星配置は全衛星が打ち上げられておらず、またTable 1で表した衛星周期であるため、日によってかなり変化していることが分かる。GPSとGLONASSを併用して測位するとすれば、例えばFig. 2ではNo.18のGLONASS衛星は方位約225度、仰角約20度にあつて、GPS衛星の補完に役立つが、No. 3のGLONASS衛星はNo. 8のGPS衛星とほぼ同じ方位、仰角に存在するためGPS衛星の補完にはあまり役立たないということが分かる。単独測位における測位精度はGLONASSの方が約6倍GPSよりも劣るという報告⁶⁾があるが、キネマティックのアルゴリズムでは単独測位にお

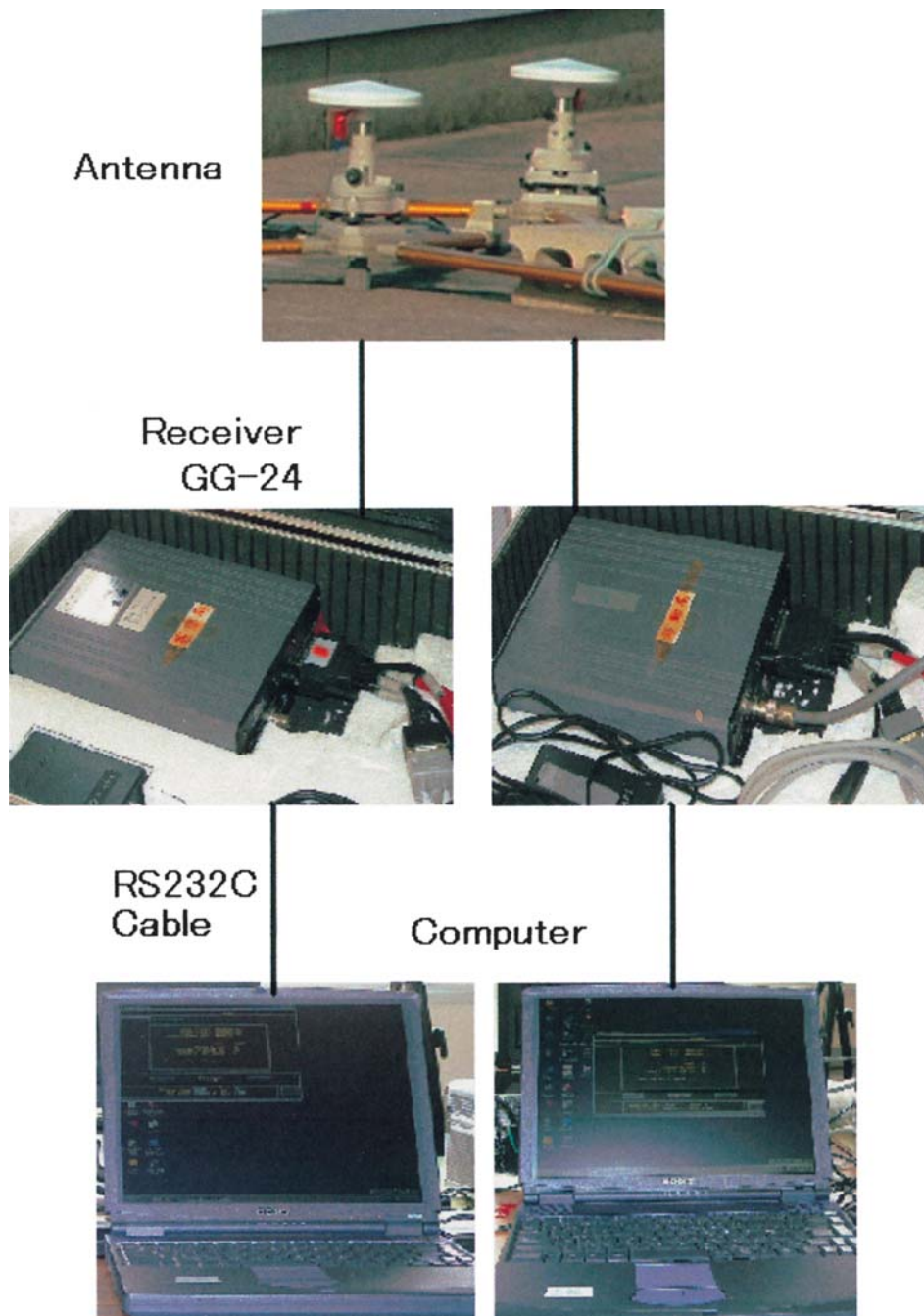


Fig. 1 . Composition of the experiment.

る誤差要因の影響はあまり現れない。なお、精度が良くなる配置の衛星だけを使って測位計算する方法があるが、電波受信状態などの影響もあって、必ずしもそれが測位精度の向上につながっていないことがある。筆者らの今までの解析では、測位計算の処理過程では使用衛星数の多い方が統計的には測位精度の向上となっていたので、本論文では、受信データがそろっている衛星全部を使って測位計算を行い、複合測位の評価を解析することとした。

衛星からの電波がマスクされたときの測位

1) 測位に使用された衛星数

衛星からの電波を仰角別にマスクしたとき、測位に使用された衛星数を受信開始（2007年5月12日12:00）から24時間分を秒単位で時系列的に示した図がFig. 5およびFig. 6である。基線長は約2mで、Fig. 5がGPSだけの測位するとき、またFig. 6はGPSとGLONASSを併用した測位するときの衛星数を示している。マスク仰角が高くなるにした

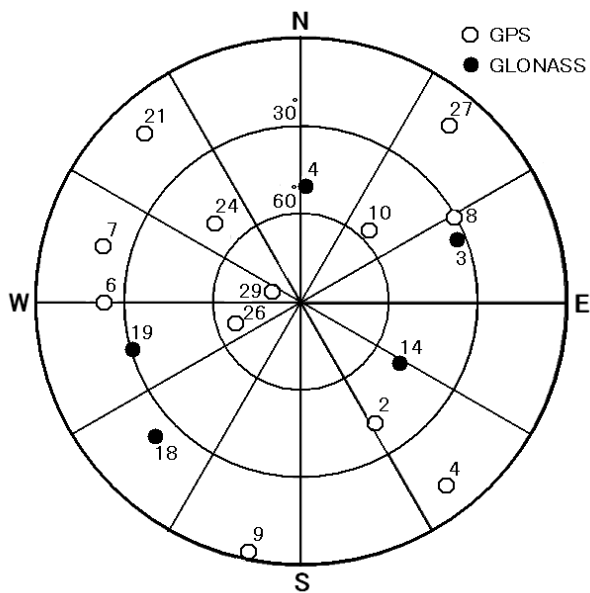


Fig. 2 . The satellite location. (May 12 12 : 00, 2007)

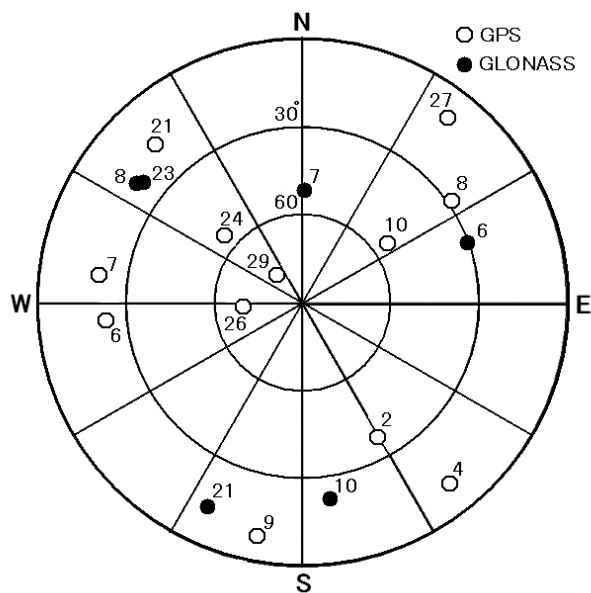


Fig. 4 . The satellite location. (May 15 12 : 00, 2007)

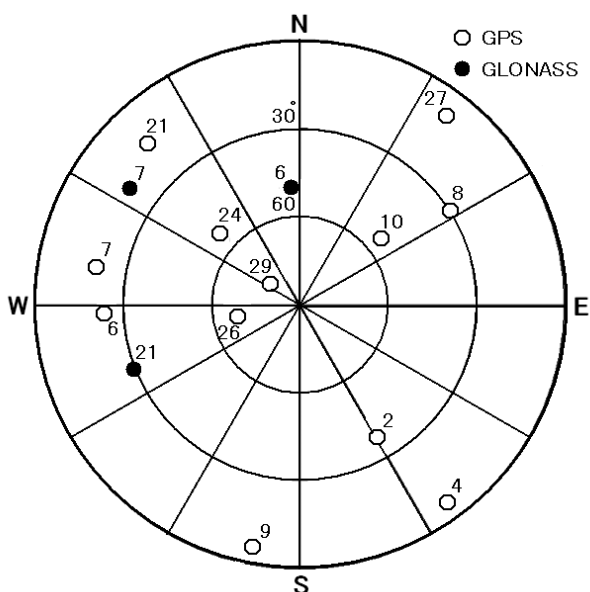


Fig. 3 The satellite location. (May 14 12 : 00, 2007)

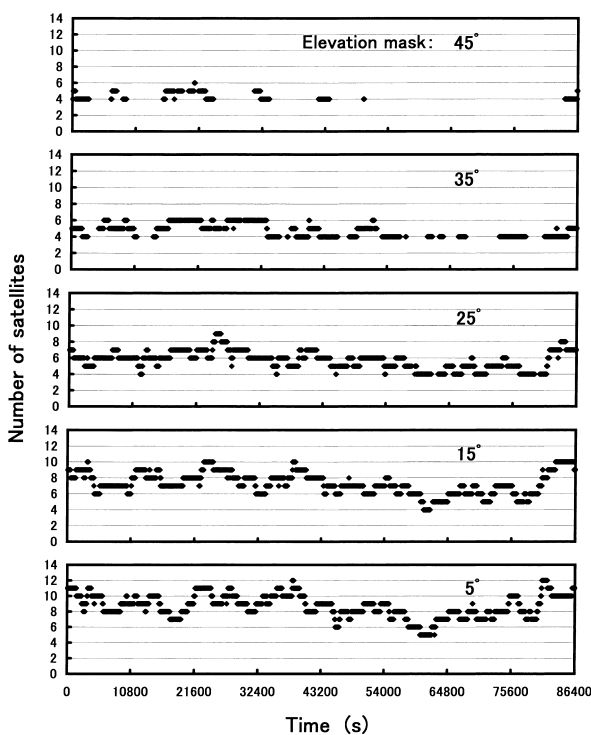


Fig. 5 . The number of satellites captured by GPS by the mask elevation. (May 12 12 : 00~May 13 12 : 00, 2007)

がって測位できなくなる時間帯が増加している。測位できない時間帯は、4機以上からの電波が受信できない、衛星配置状態が悪化、測位計算の過程で未知数の解を求めることができないなどが原因である。Table 2 はマスク仰角別に24時間で測位できた回数を表している。キネマティックとしての測位精度を考えなければ、GLONASSを併用するとGPSだけの測位の時よりマスク仰角35°で25%、45°で81%も測位回数が増加している。単独測位では効果的な測位方法となる。一例として、Fig. 5 およびFig. 6 の図から

判断して、GPSだけでは測位できないが、GLONASSを併用すると測位ができているときの衛星配置状態をFig. 7 に示す。この図は受信開始から1時間経ったときのマスク仰角が35°の図で、No. 4 と14のGLONASS衛星がGPS衛星の補完となり測位ができた。GPS衛星は4機あるが、衛星配

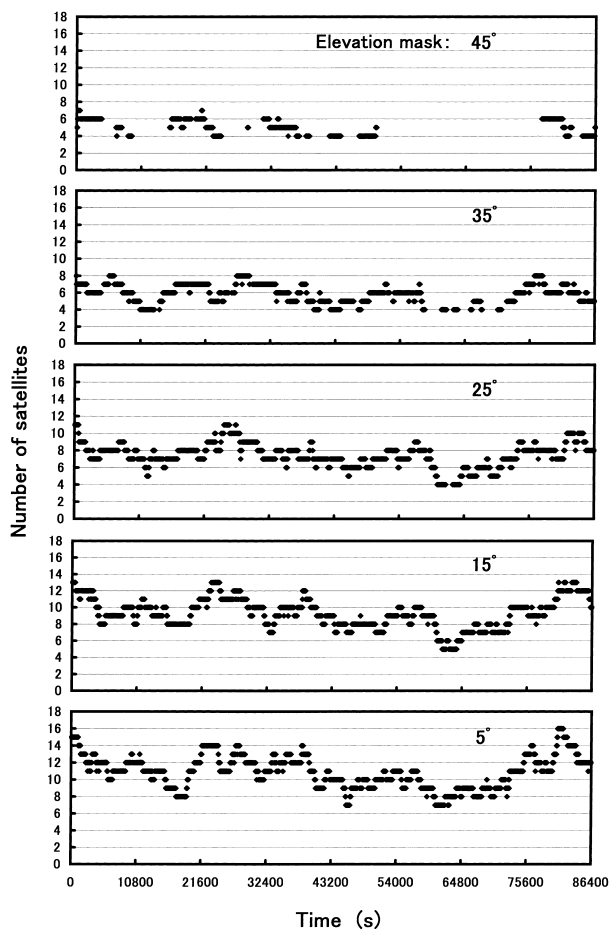


Fig. 6. The number of satellites captured by GPS and GLONASS by the mask elevation. (May 12 12:00 ~ May 13 12:00, 2007)

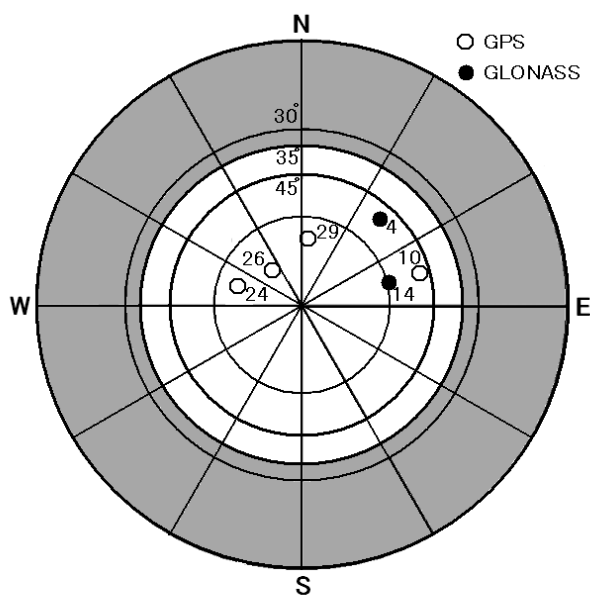


Fig. 7. The satellite location of the elevation of 35 degrees and up. (May 15 13:00, 2007)

Table 2. Number of data

Process type	Elevation mask (deg.)	Number of data
GPS	5	43200
	15	42984
	25	41864
	35	29338
GPS + GLONASS	45	9051
	5	43187
	15	43189
	25	42624
GLONASS	35	36586
	45	16374

置状態が受信点から見て北に片寄っており、キネマティックの計算過程では測位解を求めることができなくなった。ところが、GLONASS衛星を2機受信できたことで、データ数が増え測位解が得られたものと考えられる。しかし、この2機も受信点から見て北側に片寄っているため、良好な測位精度は期待できない。ちなみに、このときのPDOP (position dilution of precision: 衛星配置状態による測位精度低下率) は9.3、ベクトル長は201.3cmとなり、実測の199.4cmとは約1.8cmの差がある。

2) マスク別測位精度

前項で若干触れたが、測位精度は衛星配置状態によって異なることはよく知られている。すなわち、PDOPで測位精度がある程度評価できる。

今回実験した基線長が約2mのときのPDOPの時系列図をFig. 8およびFig. 9に示す。Fig. 8はGPSだけの測位の時、またFig. 9はGPSとGLONASSを併用したときの複合測位で、Fig. 5とFig. 6の測位計算に使用した衛星数と対応している。複合測位の方がGPSだけの時と比較してPDOPが小さくなっている場合が多い。ただし、衛星数が少ないからといって必ずしもPDOPが大きくなるのではなく、受信点から見て衛星の配置が片寄っているか、あるいは全天にわたって配置されているかでPDOPは変わる。当然、衛星が全天にわたって配置されているときPDOPは小さくなり測位精度は良くなっていく。衛星情報は事前に受信できるので、衛星配置によって測位精度が悪くなる時間帯があらかじめつかめる。

Table 3に電波のマスク別に使用衛星数、PDOP、および基準局と利用者局間のベクトルの24時間分の平均値と標準偏差を表す。ここで、ベクトルの標準偏差は精度を表していることになる。GLONASSを併用すると平均して1~2

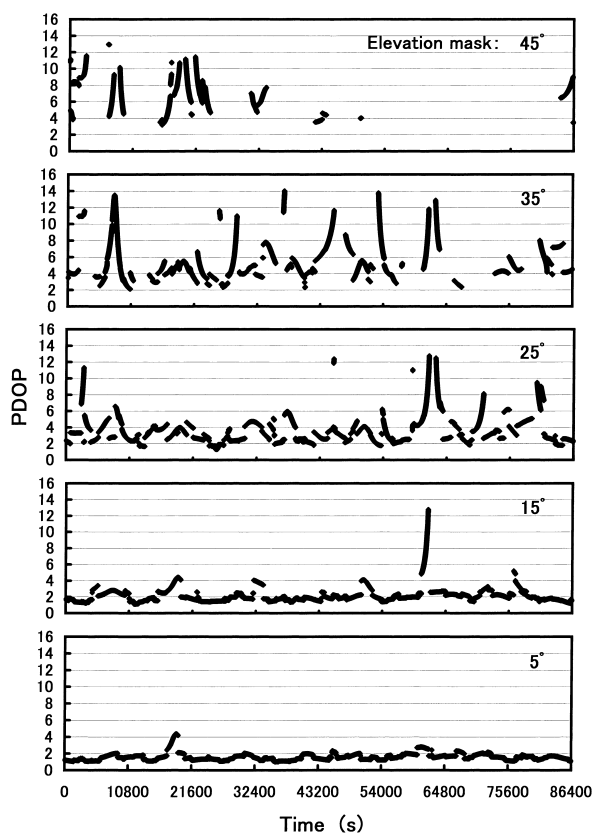


Fig. 8. PDOP measured by GPS by the mask elevation. (May 12 12:00~May 13 12:00, 2007)

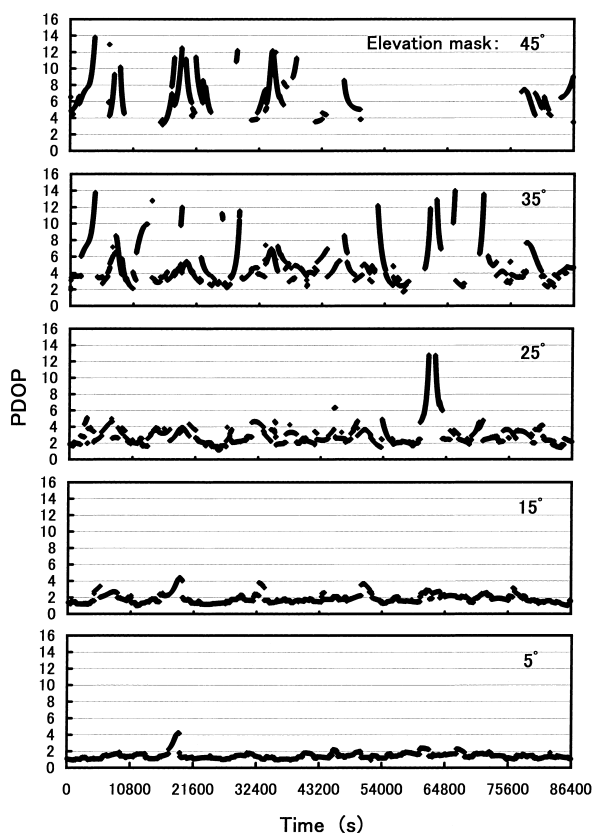


Fig. 9. PDOP measured by GPS and GLONASS by the mask elevation. (May 12 12:00~May 13 12:00, 2007)

Table 3. The average and the standard deviation of the number of satellites, PDOP and vector

Process type	Elevation mask (deg.)	Number of satellites		PDOP		Vector	
		Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average (cm)	Standard deviation (cm)
GPS	5	8.7	1.47	1.60	0.460	199.3	0.49
	15	7.3	1.37	2.17	0.911	199.3	0.62
	25	5.8	1.08	3.47	1.457	200.2	1.75
	35	4.8	0.80	5.16	2.111	205.9	10.91
	45	4.4	0.51	6.58	2.044	208.9	9.51
GPS + GLONASS	5	10.9	1.93	1.45	0.409	199.4	0.39
	15	9.3	1.79	1.87	0.583	199.4	0.55
	25	7.5	1.38	2.91	1.167	199.5	0.69
	35	5.9	1.09	4.67	1.949	200.6	7.42
	45	5.1	0.87	6.50	2.024	217.5	46.38

機程度当日の実験では増加している。また、当然のことながらマスク仰角が高くなるにつれて使用衛星数が減ってきており、それにしたがってPDOPは大きくなり、測位精度の劣化がうかがえる。これは、GPSのみの場合もGLONASSを併用した場合も同様である。基準局と利用者局の実測の

値は199.4cmであったので、マスク仰角が低いほど実測とほぼ同値となり測位精度も良くなっている。これは、マスク仰角が高いと受信点から見て片寄った方向の衛星や仰角の高い衛星ばかりで測位計算を行うことになって、測位精度が劣化したためである。

縦揺れ（横揺れ）の測定精度

キネマティックを応用した測定として船体の挙動を把握し、水深補正などの応用分野に用いることが考えられる。その挙動情報のうち、縦揺れ（横揺れ）の測定精度について述べる。なお、縦揺れも横揺れも計算方法は同じなので、以下、縦揺れとして表す。また、Table 3のベクトルの標準偏差から見て、マスク仰角はGPSだけでは15°以下、GLONASSを併用すると25°以下が今回の結果では望ましい。したがって、ここではマスク仰角が5°、15°および25°についての解析結果について検討する。なお、解析は基線長が実測で199.4cmの場合である。

縦揺れは $\tan^{-1} \{z/(x^2+y^2)^{1/2}\}$ で計算するため、 x 、 y で計算される二次元の値 $((x^2+y^2)^{1/2})$ と z の値の精度が縦揺れ精度に影響する。そこで、それらの標準偏差をTable 4に表す。ここで、 x 、 y 、 z は片方のアンテナを基準局としてもう一方の利用者局のアンテナまでのベクトル値である。二次元の標準偏差は、マスク仰角15°の場合、

GPSだけでもGLONASSを併用しても0.6cmであるが、それに比べて z の標準偏差はそれぞれ1.0cm、1.1cmと大きい。その結果、縦揺れの標準偏差は両者とも0.3°程度となっている。マスク仰角25°になると、GPSだけでは縦揺れの標準偏差は1.3°と急に劣化するが、GLONASSを併用すると0.4°となり、許容される精度を0.5°以内とすれば、精度は保たれていることになる。GPSのみの場合、二次元の標準偏差も劣化するが z の標準偏差が4.6cmと大きく劣化していることが起因している。なお、 x 、 y だけで計算できる船首揺れの標準偏差はGPSのマスク仰角が25°の場合を除いて0.1°程度で良好であった。

また、基線長が長くなると精度は原理的に上がる⁷⁾が、マスク仰角を5°として、基線長が約5mではGPSだけの測位は縦揺れが0.07°、船首揺れが0.04°となり、GLONASSを併用するとそれぞれ0.06°、0.03°となった。今回行ったマスク仰角が5°のときのこれらの実験結果をFig.10およびFig.11に示す。Fig.10は縦揺れ、またFig.11は船首

Table 4. Measurement Accuracy

Process type	Elevation mask (deg.)	$(x^2+y^2)^{1/2}$ (cm)	Standard deviation		
			z (cm)	Pitching (deg.)	Yawing (deg.)
GPS	5	0.5	0.8	0.2	0.1
	15	0.6	1.0	0.3	0.1
	25	1.7	4.6	1.3	0.4
GPS + GLONASS	5	0.4	1.1	0.3	0.1
	15	0.6	1.1	0.3	0.1
	25	0.7	1.3	0.4	0.1

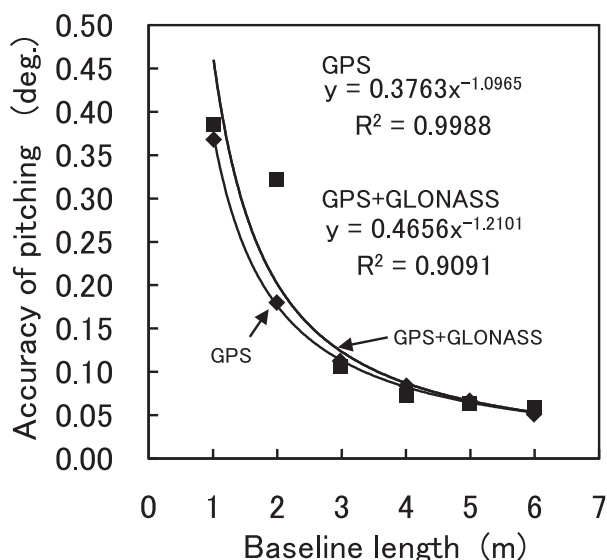


Fig.10. The accuracy of pitching by the baseline length.

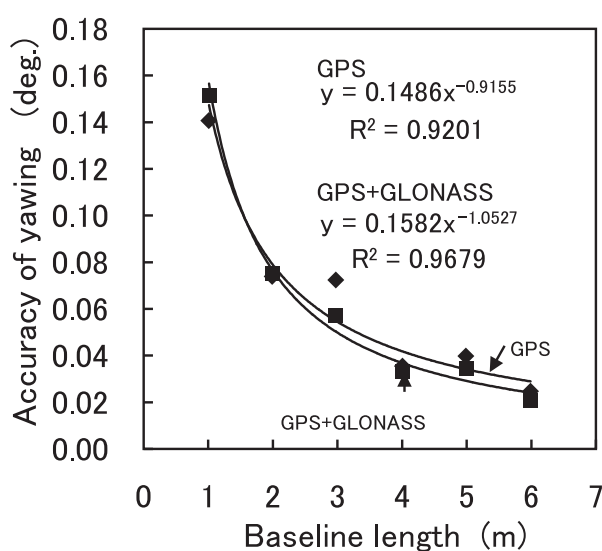


Fig.11. The accuracy of yawing by the baseline length.

揺れの結果で、横軸は基線長、縦軸は精度を示している。通常の使用方法であるマスク仰角が 5° や 10° では、GPSだけのときとGLONASSを併用したときの差はほとんどないと考えられる。

以上のことから考えると、漁船の動揺測定や他のセンサー（例えば音響測深機）の校正に使う場合は、電波がマスクされる仰角はGPSのみでは約 15° 以下、GLONASSを併用すると現状では約 25° 以下になるような場所にアンテナを設置する必要がある、基線長はなるべく長くする方がよい。なお、GLONASS併用については、システムの運用状況によって変わってくるので今回の結果は概略の値と見なし、今後の運用状況で判断する必要がある。

あとがき

GPSとGLONASSの複合測位は、電波の遮蔽が受信点の全周囲に渡って一律にあると仮定すれば、その遮蔽仰角がGPSのみの測位より 10° 位高く 25° 位でも良好な精度の測位ができ、使用衛星数を増やすことの有効性が立証できた。

衛星の数が多くなると、それだけ測位計算するためのデータ量が増加し、精度の向上が期待できると考えられるが、その処理の前に不良なデータを排除すればさらに精度の向上につながることが多い⁸⁾。未だGLONASSのシステムそのものの精度や将来性には不安材料があるがこのシステムを併用するとデータ量は確実に増加する。したがって、衛星からの電波が遮蔽され測位の条件が悪くなる時には、GLONASSの併用は精度をある程度保つための一つの有効な手段となり得る。実際には、今回解析した条件設定のように周囲がすべてマスクされるということは少ないので、GPS以外の衛星を併用して測位すれば、測位精度と

測位回数で大きな効果があると考えられる。

今後、GLONASSの衛星が全て打ち上がって完全運用段階になれば、電波が遮蔽されるような受信条件下においては、測位環境に大きな期待が寄せられるものと考えられる。

文 献

- 1) 山田英輝, 高須知二, 久保信明, 海老沼拓史, 安田明生: GLONASS暦精度の推移とAvailabilityについて. 日本航海学会論文集, 118, 229-235 (2008)
- 2) 神谷 泉, 小白井亮一: 高精度測位技術の現状とその利用分野に関する調査. 国土地理院, 103, 73-80 (2004)
- 3) 奥田邦晴, 巽 重夫, 高木直樹, 本村紘治郎, 鎌野忠, 富賀見清彦: 移動体におけるキネマティックGPS/GLONASSの有効性の評価. 弓削商船高等専門学校紀要, 24, 171-179 (2002)
- 4) 藤井陽一郎: GPS+GLONASSによる測位精度の向上. 財団法人日本測量調査技術協会, 76, 1-7 (2000)
- 5) 例えば, 安田明生: RTK-GPS測位. GPSシンポジウム2001テキスト, 社団法人日本航海学会GPS研究会, 東京, 211-215 (2001)
- 6) Sergey V. Averin: GLONASS System. GPS/GNSSシンポジウム2006テキスト, 社団法人日本航海学会GPS研究会, 東京, 15-22 (2006)
- 7) K. Okuda, J. Kawasaki and K. Motomura: Characteristics of Kinematic GPS Measurement Accuracy over a Short Baseline Length. J Nat Fish Univ, 53, 1-8 (2005)
- 8) 奥田邦晴: NNSS測位精度向上のための受信データ処理方法. 弓削商船高等専門学校紀要, 4, 37-47 (1982)