

移動体におけるキネマティック GPS/GLONASS の有効性の評価

奥田 邦晴*・巽 重夫**・高木 直樹***
本村紘治郎*・鎌野 忠**・富賀見清彦**

The Evaluation of the Effectiveness on the Onboard Positioning by Kinematic GPS/GLONASS

Kuniharu Okuda*, Shigeo Tatsumi**, Naoki Takagi***
Kojiro Motomura*, Tadashi Kamano** and Kiyohiko Fukami**

Abstract

The number of the satellite which can be used for the positioning increases when GPS was developed by America and GLONASS by Russia are received at the same time. Therefore, the improvement of the positioning accuracy and availability are being expected.

The research result of GPS/GLONASS by the point positioning and the differential positioning are reported until now. However, there is few that of the kinematic positioning by the onboard.

Accordingly, the authors carried out the experiment of the kinematic positioning by a ship and a car using the equipment which can receive the GPS satellite and the GLONASS at the same time. Then we analyzed the effectiveness of the kinematic GPS/GLONASS.

As a result, there was little effectiveness by using GLONASS in common, as there was nothing to cover the radio wave of the satellite on the sea area. However, in the land area with a large number of buildings, the time when the positioning was impossible decreased by increase of satellites. In addition, there sometimes had an effect on the positioning accuracy because of the satellite allocation of GLONASS. Therefore, it came to the conclusion that there was a large effectiveness by using GLONASS in common.

1. まえがき

GPS (Global Positioning System) は、今や船舶、航空機、車輛の測位のみならず、セキュリティ、徘徊老人の居場所、視覚障害者用道案内、農林水産業など各分野での応用へと発展している。応用開発する際にまず最初に考慮されるのが測位精度である。測位精度が低いとカーナビゲーションでよく知られているように平行に走っている道路の乗り移り現象などが生じる。そのため、測位精度の向上を目的として DGPS (Differential GPS) が使われるようになった。DGPS では 5 ~ 6 m の精度 (95% 確率誤差円の半径) で求めることができるが、それ以上の測位精度が必要な分野や研究ではキネマティック GPS が使われている。基準局と利用者局間の距離 (基線長) や受信機器の種類にもよるが、基線長が 10km

程度以内では数 cm のオーダーで位置を求めることができる。

測位誤差の 1 つの原因として、衛星の配置状態がある。現在 GPS 衛星は 28 機回っており、利用者局では多いときには 10 機以上が測位に使用できる。この使用衛星の数が多ければ、幾何学的な衛星の配置状態が良くなることもあり、そのときは測位精度が向上する。

一方、ロシアでは GPS と同じ様なシステムとして GLONASS (Global Navigation Satellite System) がある。GLONASS の衛星は現在 6 機程度しか利用できないが、GPS と GLONASS を同時に使用して衛星の数を増やし、測位精度と有効性を向上しようとする試みが行われている。実際に GPS と GLONASS が同時に受信できる機器も数年前から現れている。

しかし、その測位精度と有効性の測位結果は一般に多

* 水産大学校海洋生産管理学科

** 水産大学校練習船耕洋丸

*** 信州大学工学部社会開発工学科

くは公表⁽¹²⁾されていない。特にキネマティック方式による測位精度結果⁽³⁾は少ないし、この方式による移動体の解析結果はあまりない。

そこで、移動体(利用者局)によるキネマティックGPS(以下KGPSと略す)とキネマティックGPS/GLONASS(以下KGPS/GLONASSと略す)の測位実験を行い、KGPSとKGPS/GLONASSの測位結果を比較することによってその有効性を解析し考察した。その結果、移動体におけるKGPS/GLONASSの有効性が明らかとなり、航行中の船舶の船体姿勢の解明などに役立つことが分かった。

2. キネマティック GPS/GLONASS の測位原理

キネマティック方式における測位原理の概略を述べる。Fig. 1 に示すように既知の固定点に設置された基準局の受信機で4機以上の衛星からの搬送波位相積算値等を測定する。同時に利用者局でも同じ衛星からの搬送波位相積算値等を測定する。基準局で測定したこれらのデータを利用者局に伝送し、利用者局のデータと比較計算することで利用者局の三次元位置を求めている。衛星からの搬送波位相の測定値分解能は、L1波帯の波長19cmの1

/100の程度であるので、数cmの高精度な相対位置を決定できる⁽⁴⁾。なお、ここでは測位計算式は割愛することとする。

3. 測位実験及び解析方法

3.1 測位実験

キネマティック方式の測位は、2.の項の測位原理で述べたように基準局が必要である。また、測位原理からみて基準局はなるべく利用者局に近い方が良いので実験場所である利用者局から10km以内に設置した。

測位実験は計4回行ったので、その実験期日、場所等をTable 1に表す。また、Fig. 2に基準局のアンテナ設置状況の一例、Fig. 3に利用者局である移動体のアンテナ設置状況の一例を示す。なお、4回目の船舶における実験は右舷側に取り付けた受信機を基準局とし、左舷側に取り付けた受信機の位置は右舷側に対してのベクトルを求める相対測位の方法とした。

測位システムの構成は、基準局、利用者局ともアンテナ、受信機、及びパソコンよりなる。衛星から受信したRAWデータは、基準局、利用者局とも1秒ごとにRS232Cを介してパソコンに蓄えた。基準局から利用者局へ

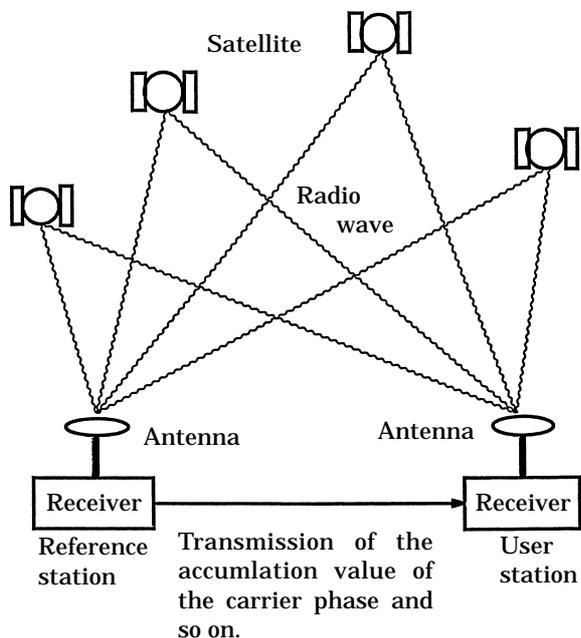


Fig. 1 The schematic illustration of the positioning principle.



Fig. 2 An example of the antenna establishment conditions of the reference station.

Table 1 The specifications of the positioning experiment.

実験期日	時間(J.S.T)	移動体	測位場所	基準局位置	データ取得方法
2000.1.21	13:42 - 14:17	車輛	山口県下関市内	34°04'08.8"N, 130°53'33.8"E	RAWデータ
2001.3.15	14:08 - 16:53	車輛	長野県松本市内	36°12'56.3"N, 137°56'41.6"E	RAWデータ
2001.3.19	09:41 - 09:52	船舶	広島県広島湾内	34°21'16.3"N, 132°28'05.9"E	RAWデータ
2001.8.7, 8	14:00 - 14:30	船舶	日本海	右舷側受信機位置(相対測位)	RAWデータ



Fig. 3 An example of the antenna establishment conditions of the user station.

のデータ伝送は行わず、後処理による測位計算方式とした。

使用した受信機は、基準局、利用者局とも GPS と GLONASS が同時受信できる GG-24 (Ashtech 製) である。この受信機は GPS が 12 チャンネル、GLONASS が 12 チャンネルの計 24 チャンネルを持っており、単独測位の他にリアルタイムでディファレンシャル測位とキネマティック測位が可能である。また、オフラインで後処理測位計算を行うことができ、そのための RAW データを取得することができる。受信機マニュアルの性能では KGPS/GLONASS で 2 cm となっているが、測位条件は明記していない。一般的に最も条件の良い数時間分の固定点での統計処理結果と考えられる。基線長別に 1 日単位で行った測位精度の解析は筆者らが報告⁽³⁾している。

3.2 解析方法

実験により基準局、利用者局のパソコンに蓄えられた RAW データは、後処理計算用ソフトを使って測位計算をするために使った。測位計算結果項目は、測位時間、緯度、経度、基準局からの相対緯度及び経度方向距離、高さ、使用衛星数、DOP (幾何学的精度低下率) 等である。

後処理による測位計算方法は、同じデータを使って KGPS や KGPS/GLONASS の測位計算を行うことができ、同じ条件で両者の測位精度や有効性の比較を行うことができる長所がある。また 2 つ以上の異なる測位方式でも利用者局の受信機は 1 台でよいことになる。

本論では、水平方向の測位結果の有効性を論じるために、基準局からの相対距離、GPS 及び GLONASS の使用衛星数、衛星の配置状態、測位精度、測位率等を解析した。

4. 結果及び考察

4.1 下関地区車輛走行実験

車輛による走行実験の軌跡を Fig. 4 (KGPS 測位結果) 及び Fig. 5 (KGPS/GLONASS 測位結果) に示す。この軌跡は下関市街を走行したもので、走行開始から 40 分間位のものである。軌跡の中で途切れているところは測位できなかった場所である。KGPS の方が KGPS/GLONASS より測位できなかった場所が多くなっている。走行中の数分間の軌跡を拡大した図が Fig. 6 である。KGPS と KGPS/GLONASS の 1 秒ごとの走行軌跡を南北方向にシフトさせて描いてある。これによると両方法とも同じ場所で数秒間測位できていないが、その時間は KGPS/GLONASS の方が少ない。それ故 GLONASS を共用することで同一場所で測位できなかった時間が減少したことが分かる。この時は建物の側を走行しており、いくつかの衛星からの電波が受信できなかったことが考えられる。

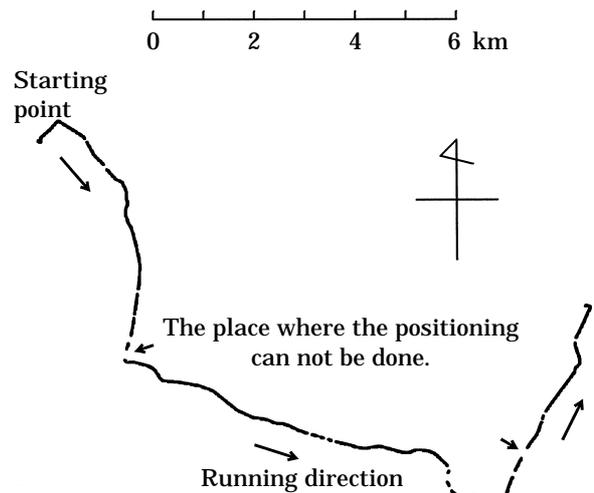


Fig. 4 Running trace by KGPS at Shimonoseki area.

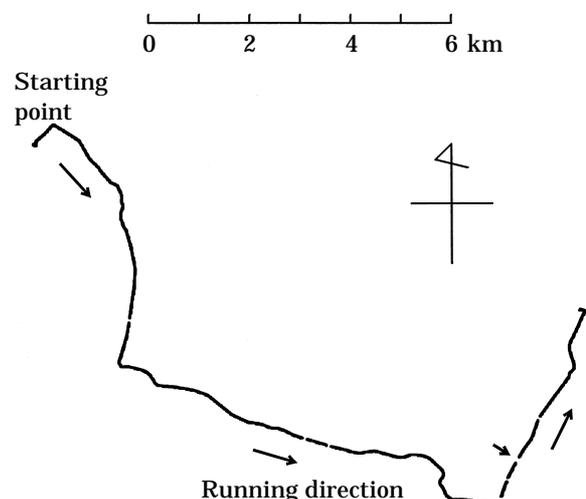


Fig. 5 Running trace by KGPS/GLONASS at Shimonoseki area.

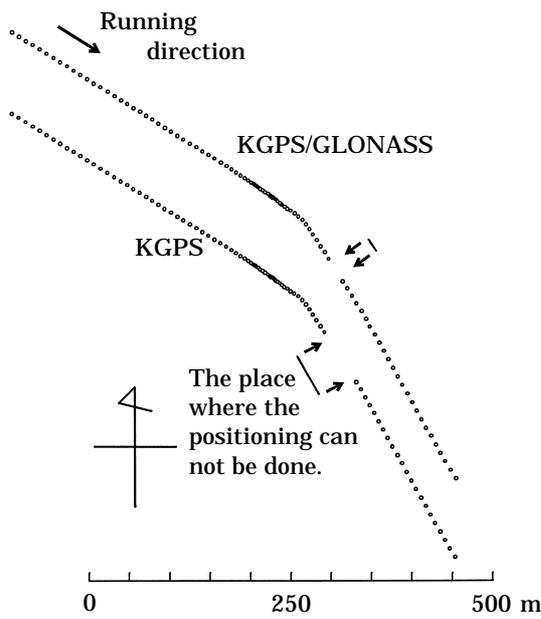


Fig. 6 A part of the enlarged scale of the running trace figure. (Shimonoseki 13:45 ~ 13:47)

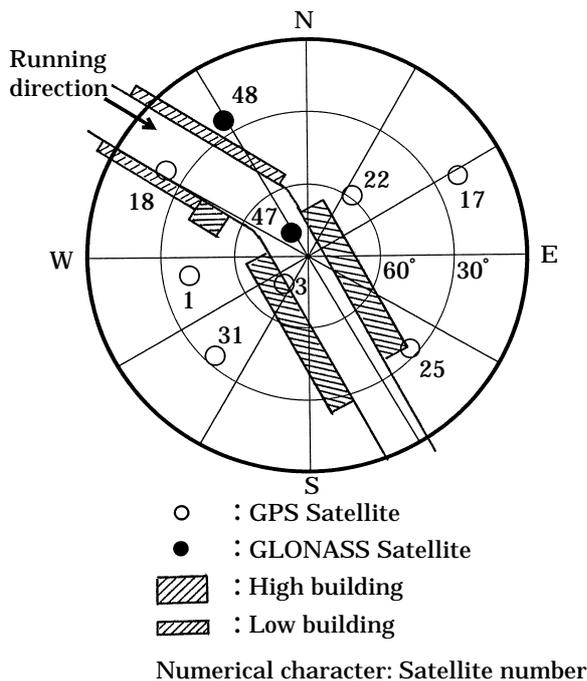


Fig. 7 Satellite allocation and running situation. (Shimonoseki 13:46)

その時間 (13時46分) の車輛から見た衛星配置図と周囲の建築物の概略状況図を Fig. 7 に示す。KGPS では車輛の進行方向左側の建物のために受信できない GPS 衛星が 2 機、また右側にも低仰角の GPS 衛星が 2 機あって建物の陰になり受信可能な衛星の数が減っている。従って測位が不可能になった。それに対して、KGPS/GLONASS では、車輛の後方に 2 機ある GLONASS 衛星を利用することにより受信可能な衛星が増え、測位不

可能な時間が減った。

このことにより、GPS 衛星と GLONASS 衛星を共用すると利用できる衛星が増加し、測位不可能な時間が減少するという有効性が見い出された。

全測位時間は 1 秒ごとに 2396 秒間であるが、そのうち KGPS で測位できた回数は 2162、また KGPS/GLONASS で測位できた回数は 2309 であり、測位率はそれぞれ 90.2%、96.4% となる。KGPS/GLONASS は KGPS の約 1.1 倍の測位率となった。測位できなかった原因は、前述の建物の他、高架下、歩道橋下等を通じた時に衛星からの電波が遮蔽されたためである。

衛星利用数は、KGPS が平均 6.0 機 (標準偏差 : 1.0 機)、最大で 8 機、最小で 4 機であった。また KGPS/GLONASS の方は平均 8.5 機 (: 1.3 機)、最大で 11 機、最小で 4 機であった。平均の利用衛星数の差は 2.5 機 (: 0.6 機) であった。両方法において同時間に同じ衛星数で測位する場面があるが、必ずしも同じ衛星で測位しているとは限らなかった。これは測位が途切れたすぐ後で生じており、受信が不安定なためであると考えられる。また、同じ衛星で測位しても両方法で測位結果が異なっていた。これは automobile のパラメータで測位計算処理を行っており、その前の位置によって左右されるフィルター処理がプログラムに組み込まれているためと考えられる。

同時刻に測位できた KGPS/GLONASS に対する KGPS の平均緯度方向の差は -0.05m (: 0.54m)、平均経度方向の差は -0.36m (: 0.36m) であった。また KGPS の PDOP (衛星配置による幾何学的測位精度低下率) の平均は 2.23 (: 1.02)、KGPS/GLONASS のそれは 1.68 (: 0.75) であり、使用衛星数の多い KGPS/GLONASS の方が良くなっている。従って、測位精度の点から見れば、KGPS/GLONASS の方が良くなっているものと考えられる。

以上の結果から見ると、利用者局の周囲状況で異なるが、一般的に考えられているように、GLONASS を共用することによって衛星が増加され、それに伴う測位精度及び測位率の有効性がほぼ定量的に明らかになった。

4.2 松本地区車輛走行実験

4.1 の項と同様に松本地区における車輛走行実験の軌跡を Fig. 8 (KGPS 測位結果) 及び Fig. 9 (KGPS/GLONASS 測位結果) に示す。この軌跡は基線長が約 7 km 以内で走行しており走行開始から約 2 時間 45 分位のものである。随所で車を停めて測位をしたので軌跡の長さの割には実験時間がかかっている。松本地区の測位実験では建物の多い地区 (図のほぼ東側部分) と田園が広がる地区 (図のほぼ西側部分) を走行したので、地区によって KGPS と KGPS/GLONASS との測位率に大きな差が生じている。全測位時間の KGPS の測位率は 72.3%、KGPS/GLONASS は 89.4% であり、KGPS/GLO-

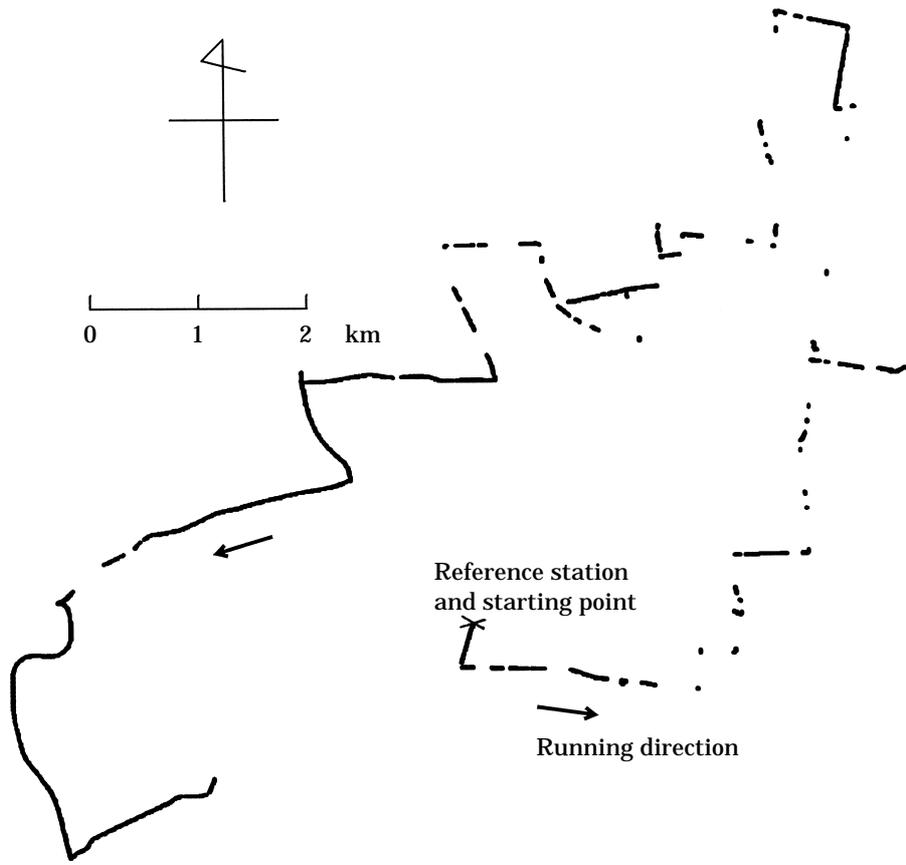


Fig. 8 Running trace by KGPS at Matsumoto area.

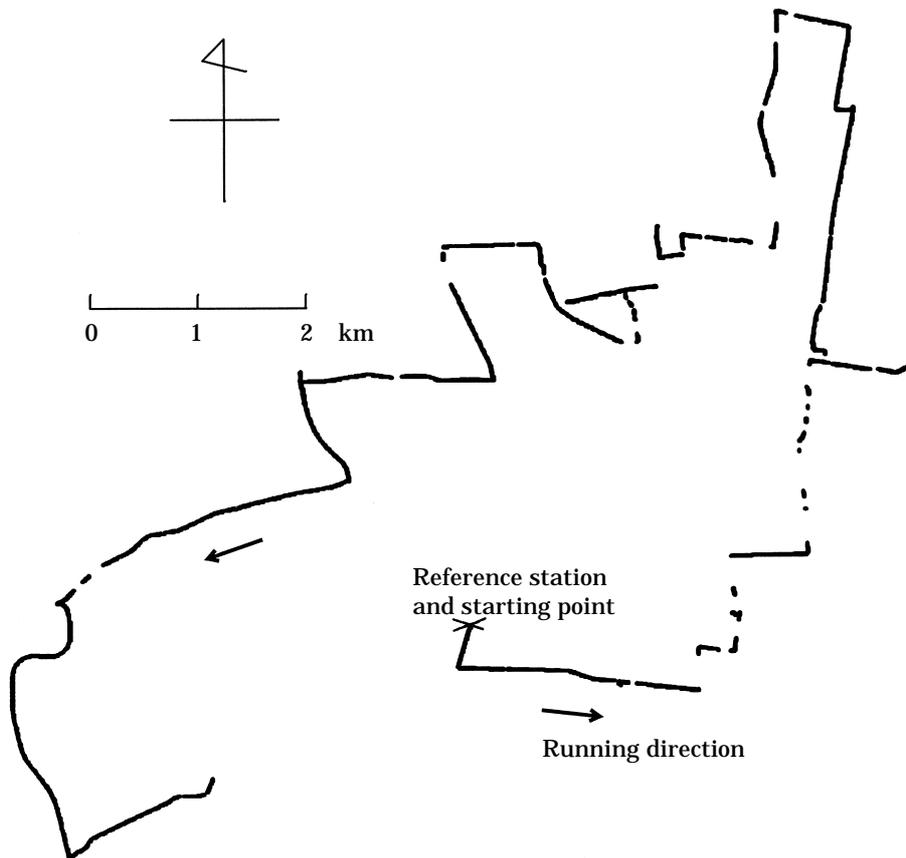


Fig. 9 Running trace by KGPS/GLONASS at Matsumoto area .

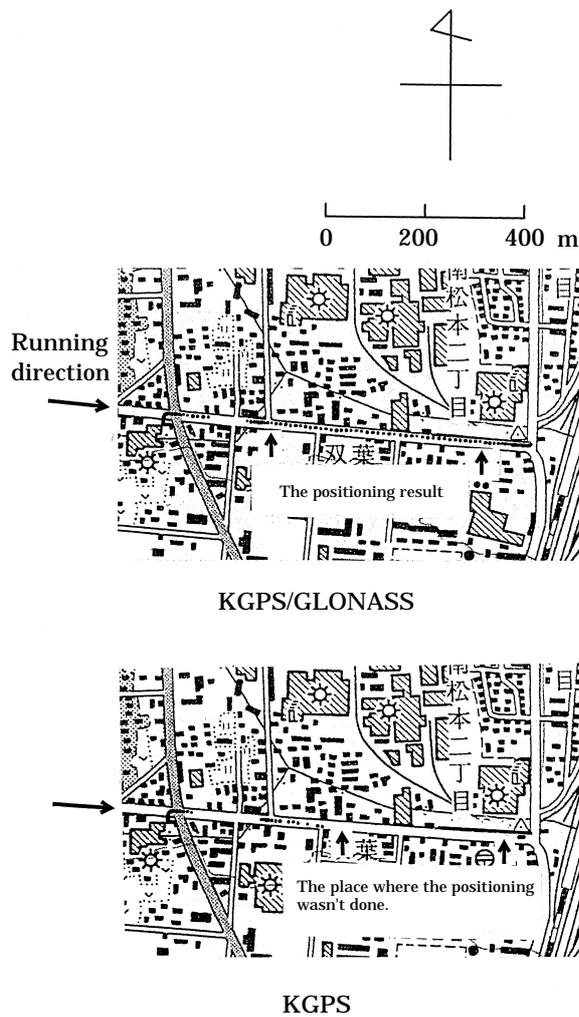


Fig. 10 A part of the enlarged scale of the running trace figure. (Matsumoto 14:24 ~ 14:28)

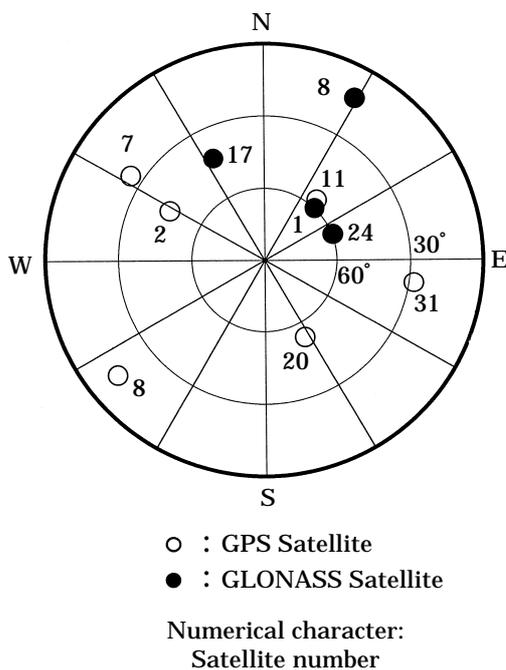


Fig. 11 Satellite allocation. (Matsumoto 14:15)

NASS は KGPS の約1.2倍の測位率となっている。車を停めて測位した時間を除くと、走行時の両方法の測位率はもう少し悪くなる。

一例として建物が密集して KGPS では測位できなかったが KGPS/GLONASS では測位できたときの走行軌跡の拡大図を Fig. 10 に示す。また、この走行時刻付近の衛星配置図を Fig. 11 に示す。衛星の仰角や建物の配置から見ると GPS では使用できる衛星が 2, 11, 及び20番衛星の3機だけで他の衛星からの電波は建物に遮蔽されたため測位ができなかった。しかし、GLONASS は 1, 17, 及び24番衛星からの電波が使用でき、GPS と GLONASS の衛星を合わせて計6機で測位が行われていた。

同じ時刻に測位できた KGPS と KGPS/GLONASS の使用衛星数の差の平均は3.0機 (: 0.8機) であり、最大で5機の差があった。KGPS の使用衛星数は平均で6.0機 (: 1.0機), 最大8機, 最小4機であり、KGPS/GLONASS のそれはそれぞれ9.0機 (: 1.4機), 11機, 5機であった。また、PDOP は KGPS の平均が2.26 (: 1.08), KGPS/GLONASS は1.64 (: 0.62) であった。このことは使用衛星数が多い KGPS/GLONASS の方が平均して衛星配置状態が良くなっていることを示している。

同じ時刻に測位した KGPS/GLONASS に対する KGPS の位置の差は緯度方向の平均で0.01m (: 1.43m), 経度方向のそれは -0.00m (: 0.91m) となって、平均ではほとんど差はない。しかし、標準偏差は大きく、KGPS と KGPS/GLONASS における位置の差の変動は大きかったことになる。これは、KGPS で測位できない時間が頻繁にあったことが原因で、測位が途切れる直前や測位再開時に測位誤差が大きくなるがあったためと判断される。また、PDOP の平均値の差は KGPS/GLONASS の方が0.62程良いことから判断すると、測位精度は KGPS/GLONASS の方が良かったと考えられる。

以上により、電波の遮蔽物が多くあるような場所では、衛星が増加すると、測位精度と測位率の向上に効果があることが明らかとなった。

4.3 湾内における船舶の航走実験

船舶 (プレジャーボート) による航走実験の軌跡の一部を Fig. 12 (KGPS 及び KGPS/GLONASS の測位結果) に示す。この図は KGPS と KGPS/GLONASS の比較のために両者を南北方向にシフトしてプロットしており、両方法の位置の差を表しているのではない。図中の軌跡は航走開始から646秒間のものであるが、測位率は KGPS, KGPS/GLONASS とともに100%であり、両方法の差はまったくない。実験場所が海域なので建物等による電波の遮蔽が無く、また基線長が1.1~2.0km 程度と短いこと、衛星配置が両方法ともあまり差がなかったことによる結果と考えられる。

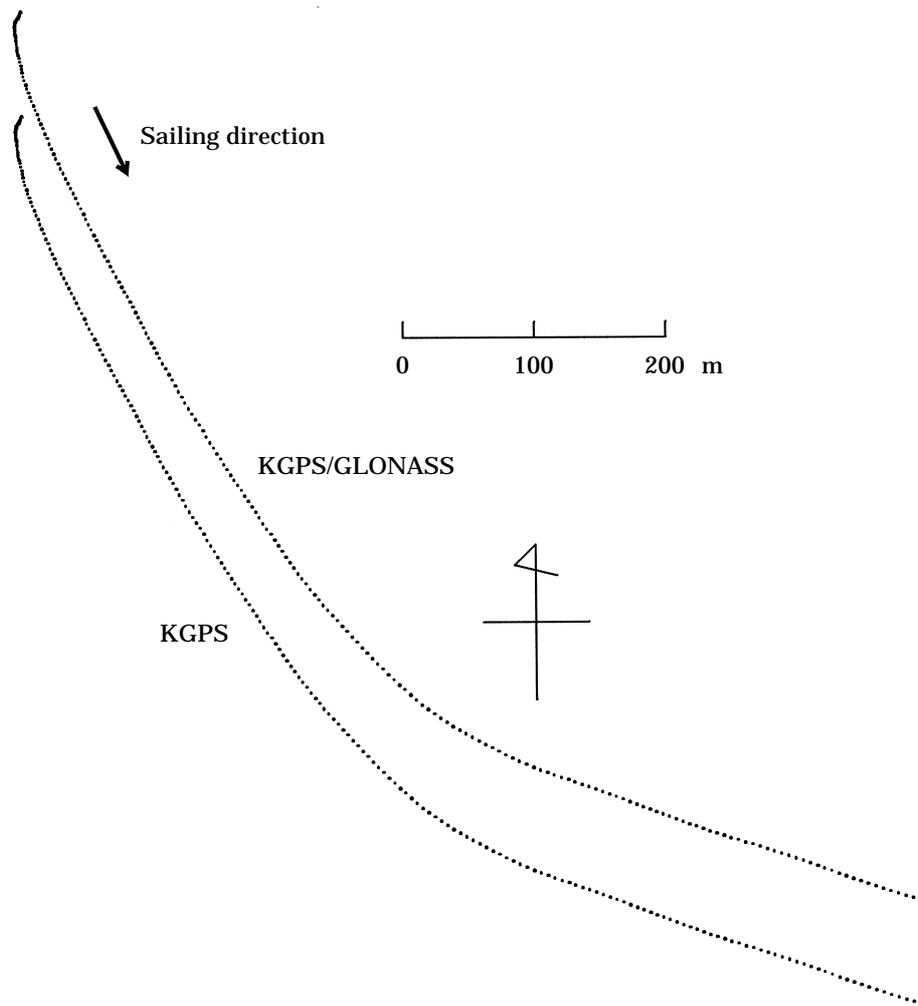


Fig. 12 A part of the navigation trace by the small vessel in Hiroshima bay. (09 : 41 ~ 09 : 52)

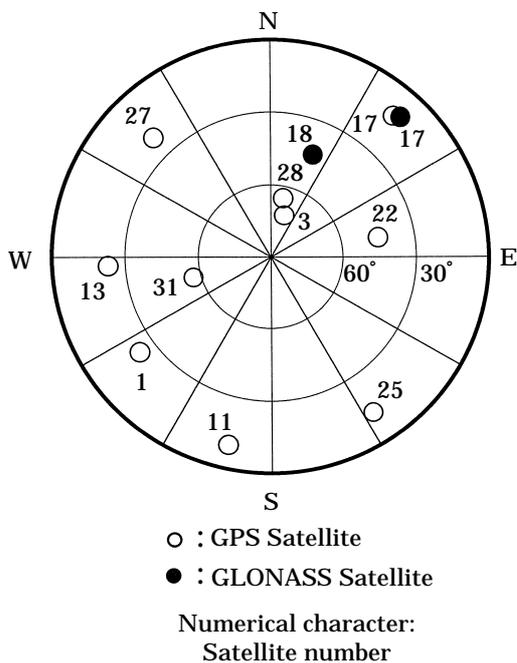


Fig. 13 Satellite allocation. (Hiroshima 09:30)

測位実験中の KGPS における使用衛星数はすべて10機であった。また KGPS/GLONASS の使用衛星数はすべて12機であり、GLONASS の使用衛星数は2機である。

KGPS の PDOP の平均値は1.22 (: 0.02), また KGPS/GLONASS のそれは1.11 (: 0.02)であった。KGPS/GLONASS に対する KGPS の位置の差は cm の単位では0 cm となった。従って、測位精度についてはほとんど差がなかったことになる。GPS の使用衛星数が10機と多く、その時刻付近の衛星配置状態 (Fig. 13) からみて、GLONASS の衛星が2機増えても PDOP の差は小さく測位精度にはほとんど影響しなかったと考えられる。この結果の場合は、使用衛星数が多い、利用者局が基準局から近い、電波伝搬の影響が少ないなどの好条件が重なったからであると言える。

基線長が長いと、基準局側と利用者局側の電波伝搬の影響の差が大きくなることがあり、その時は衛星増加による測位精度向上の効果が現れることがある。特に測位時間帯によって効果的となることがある⁽³⁾。

4.4 日本海における船舶の航走実験

前項までの実験は、基準局が静的な固定地点であるのに対して、本項は基準局が動的な場所に設置されたときの結果及び考察である。

実験は水産大学校練習船耕洋丸(2,342トン)の右舷側と左舷側に8.09m離して受信機を設置した。右舷側を基準局とし、左舷側の位置を右舷側からのベクトルで表す相対測位の方法を採った。この方法は右舷側のRAWデータが正しいものとして左舷側のベクトルを求めるので、その測位精度は右舷側のRAWデータの精度に依存する。

KGPSとKGPS/GLONASSの測位精度がほとんど変わらない場合の一例として、日本海を南下中(35°36.9'N, 133°05.7'E付近)の8月7日14:00から14:30の30分間の測位結果をTable 2に表す。この表はKGPSとKGPS/GLONASSの測位結果の差を表しており、測位の途切れは無かった。使用衛星数の差は平均して2機ほどKGPS/GLONASSの方が多い。使用衛星数が多い分PDOPも0.3程小さくなっているが、ベクトルの差はX、Y及びZ方向ともほとんど無い。その中でも高さ方向であるZの標準偏差の値が約1cmと大きくなっているのはやはりシステムの測位原理が一因である。また30分間の間でも使用衛星数が変動しているのは、船の構造物によって電波が遮蔽されるためである。

右舷側のアンテナ位置から左舷側のアンテナ位置まで巻き尺による測定を行ったところ8.09mであった。KGPSでの結果は平均で8.089m(±0.73cm)、またKGPS/GLONASSでも8.089m(±0.62cm)となり、測位精度的には非常に良かったことになる。その原因として、基準局と移動局の距離が近かったこと、さらに衛星の配置状態が良かったことなどが挙げられる。

Table 2 Difference between KGPS and KGPS/GLONASS.(2001.8.7 14:00 - 14:30)

データ数: 1800

	平均	標準偏差
X方向の差	0.04cm	0.27cm
Y方向の差	0.02cm	0.23cm
Z方向の差	0.20cm	1.09cm
衛星数の差	2.0	0.2

使用した衛星の数

測位方法	平均	標準偏差	最大数	最小数
KGPS	7.5	0.5	8	6
KGPS/GLONASS	9.5	0.5	10	8

PDOP

測位方法	平均	標準偏差
KGPS	2.4	0.5
KGPS/GLONASS	2.1	0.5

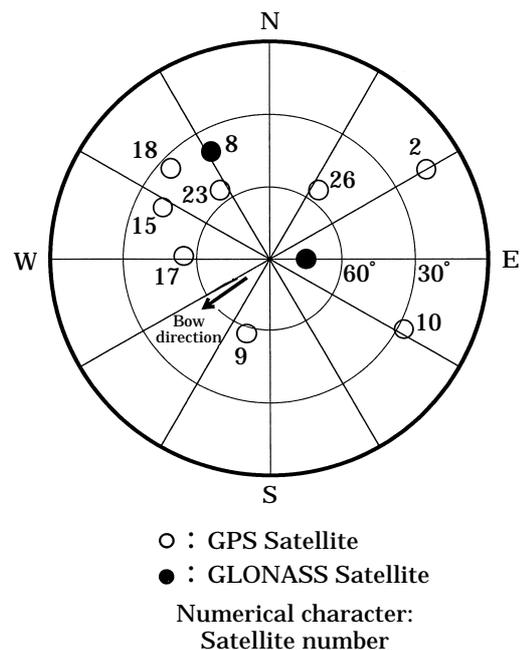


Fig. 14 Satellite allocation. (Sea of Japan 8/7 14:15)

Fig. 14には測位時間中の中心の時間にあたる14:15(日本時間)の衛星配置状態を示す。GLONASS衛星は右舷正横方向に1機、左舷後方高く1機あるが、右舷側の衛星は近くにGPS衛星が数機あり、また左舷側の衛星も30°付近の仰角にGPS衛星が1機あるので、KGPSとKGPS/GLONASSの測位結果の差はほとんど無くなったと考えられる。また、GPSの衛星が全方向に渡って多数受信できたことが、両測位結果の差が無くなったばかりでなく測位精度も良くなった理由と考えられる。

次にGLONASS衛星の増加によって測位精度が維持できた一例を述べる。翌日の8月8日14:00から14:30の測位結果(34°37.5'N, 131°17.4'E付近を北から西に向かって航行)をTable 3に表す。両方法とも測位の途切れはなく、使用衛星の差は平均して約3機ほどでKGPS/GLONASSの方が多い。両受信機間の平均距離はKGPSでは7.919m(±8.49cm)となり約17cmの誤差があるのに対して、KGPS/GLONASSでは8.088m(±0.79cm)で測位精度は非常によい。また、KGPSではX、Y、Z及び距離方向の標準偏差も大きくなり、測位結果に大きな変動があったことがわかる。

Fig. 15にその時の衛星配置(14:15)を示す。前日と受信位置は若干異なるがGPS衛星の配置はほぼ同じなのに対してGLONASS衛星は1機増加している。前日の8番衛星のところに1番衛星が増加し、8番衛星のところに7番衛星が移動し、7番衛星は南東方向に移動している。GPS衛星だけでも精度は保てそうな配置であり、Table 3に表してあるようにPDOPの値は小さくなっている。GLONASS衛星が3機増えるとその値はもっと小さくなり、平均で0.7ほどの差がある。GPS衛星だけの

Table 3 Difference between KGPS and KGPS/GLONASS. (2001 . 8 . 8 14 : 00 - 14 : 30)

データ数 : 1800

	平均	標準偏差
X 方向の差	0.22cm	20.25cm
Y 方向の差	10.54cm	19.91cm
Z 方向の差	4.26cm	11.39cm
衛星数の差	2.9	0.3

使用した衛星の数

測位方法	平均	標準偏差	最大数	最小数
KGPS	8.2	0.5	9	7
KGPS/GLONASS	11.1	0.6	12	9

PDOP

測位方法	平均	標準偏差
KGPS	2.1	0.5
KGPS/GLONASS	1.4	0.2

測位では位置の偏移が時間帯によって生じるのに対して、GLONASS 衛星を加えるとその偏移がなくなったり小さくなったりすることがあることが報告されている⁽³⁾。この例もそのような場合であると考えられる。

このように海上では船の構造物以外には遮蔽する物がないので GPS 衛星が全方向に渡って存在すれば GLONASS 衛星が少々増えても測位結果にはあまり差がない場合と、若干の GLONASS 衛星が加わることによって GPS 衛星だけで測位したときの位置の偏移をおさえる

ことができる場合がある。従って、GLONASS を共用するという事は、遮蔽物によって使用衛星数が減少するのを補充する意味があるということばかりでなく、測位精度を高い方に維持するという効果があることになる。

5. あとがき

一般的な受信方法では、衛星からの電波が遮蔽されると測位が不可能となる。カーナビなどの実用機では、この現象を補う方法として他の周辺機器やソフトを導入したいわゆるハイブリッド的なものとなっている。測位率が向上すれば周辺機器による推定位置の割合が減少し、測位結果の信頼性が増すことになる。そのような意味で、衛星増加による有効性が実測により明らかにされたことは意義あるものとする。

最近では cm オーダーのより高い精度を目指した応用分野 (例えば、車輛の脱輪発見など) が開発されようとしており、このようなときにはキネマティック方式が有効となる。また、海中に設置した物体の再発見などにも応用できる。

応用分野での開発の際、通常言われている測位精度のみを念頭において開発される傾向がある。開発段階においては、測位精度や応用分野への有効性の基礎的研究を十分に行って取り組む必要がある。

本研究は、基礎的研究を積み重ねる意味で重要なものであり、応用分野での開発の際の研究資料となれば幸いである。今後は基礎研究を重ねた上での応用性について実験と考察を進めたいと考えている。

参考文献

- (1) 浪江宏宗 他 : 移動体における DGPS と GPS/GLONASS 単独測位, 日本航海学会論文集101, pp. 297 - 305, 1999 . 9 .
- (2) 新井直樹 : GLONASS の現状と GPS との共用, GPS シンポジウム ' 97, 日本航海学会 GPS 研究会, pp. 107 - 118, 1997 . 11 .
- (3) K. Okuda, M. Mise, K. Motomura and S. Tatsumi : The Base Line Characteristics of the Positioning Accuracy by Kinematic GPS/GLONASS, Fisheries Engineering, vol. 38 No. 1, pp. 9 - 18, 2001 . 7 .
- (4) 土屋淳 他 : やさしい GPS 測量, 社団法人日本測量協会, pp. 276 - 278, 1991 . 10 .

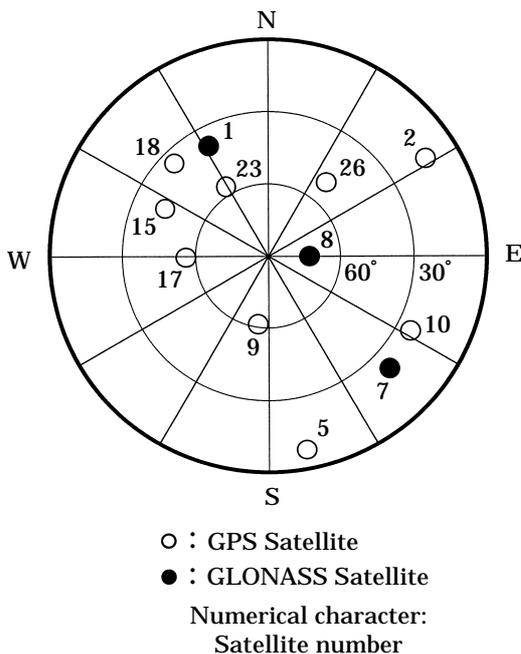


Fig. 15 Satellite allocation. (Sea of Japan 8 / 8 14:15)

