2000年　８月
APA No.76-1
財団法人 日本測量調査技術協会

GPS ＋GLONASS による測位精度の向上

藤　井　陽一郎

１．はじめに

人工衛星利用の測位システムとしては、米国が開発したGPSと並んで旧ソ連の開発したGLONASS（GLObal NAvigation Satellite System）がある。現在、GPSとGLONASSとともに受信できる受信機の開発も進み、国際的にGPSとGLONASSの併用によって衛星測位の精度・信頼度・安定性を向上させようとの機運がたかまってきている。国際民間航空機構（ICAO, International Civil Aviation Organisation）の推進する全地球衛星航法システム（GNSS, Global Navigation Satellite System）では当初よりGPSとともにGLONASSの利用が検討されてきた。国際GPSサービス事業（IGS, International GPS Service for Geodynamics）では、1998年９月より12月まで国際的なGLONASS観測のキャンペーンを行ない、GLONASS利用の環境を促進した。GLONASSとGPS併用の際には、GLONASSの依拠している測地系PZ-90はGPSの測地系WGS-84とは異なっているので、PZ-90のWGS-84への変換が必要であるが、この変換パラメーターの確定を始め、暦の改善も推進されて、IGSはGPSと同じようなサービスを行うことを検討している。こうして宇宙測位はGPS＋GLONASSの時代へと進展していくことが考えられる。

本稿ではGLONASSの技術的な解説と最近日本でなされた研究の内容を紹介したい。

２．GLONASS の概要

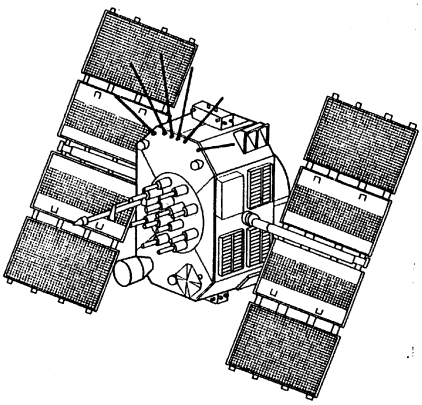
GLONASSのシステムはGPSと同じような衛星利用測位システムである。GPSでは６つの軌道に３個（予備を入れると４個）の衛星が配置されているが、GLONASSでは３つの軌道に計24個の衛星が配置されることとなっていて、1996年１月、24個の衛星の配備が完成した。図１にGPSのNAVSTER衛星とともにGLONASSの衛星を示す。しかしGLONASS衛星の寿命は短く、1997年９月１日には16個となってしまい、1994年以前の衛星は廃止となった。GPSとGLONASSとでそれぞれ21個以上配置されるとなると、7.5度以上の高度角で最小８個は見え、99%の世界の利用者は10個が見える。50%の世界の利用者には14個が見える。

表１にGPSとGLONASSのシステムの比較をまとめて示す。最大の違いは衛星よりの送信周波数L_1とL_2の違いであって、GPSでは一定であるが、GLONASSでは衛星番号によって異なることである。

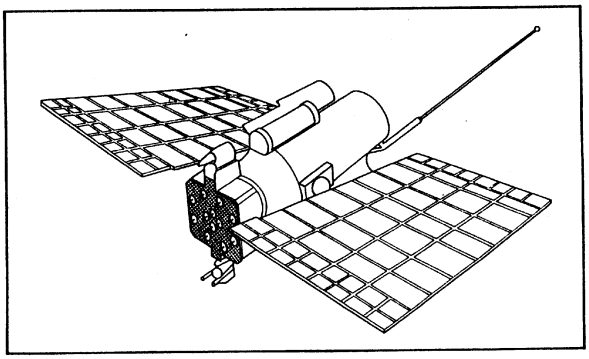
こういう異なるシステムのGPSとGLONASSの総合利用は極めて有用である。

３．GPS とGLONASS の準拠座標系の相互変換

GPSとGLONASSはハードウエアが異なっているとともに、準拠枠も異なっている。GPSはWGS-84であり、GLONASSは「地球1990のパラメーター（ロシアではPE-90またはPZ-90といわれている）」である。WGS-84の定義もPZ-90の前身のSGS-85の定義も同じようなもので、要するに地心座標系である。しかし、両者間の座標変換パラメーターが必要である。相互変換パラメーターを定めるには、両方の準拠枠で観測した観測点が必要である。こうして決定した変換のパラメーターについていくつかの試算の結果が発表となっている。



Schematic view of a Block II GPS satellite



GLONASS spacecraft

図1　（左）NAVSTER 衛星（右）GLONASS 衛星

表1　GPS とGLONASS の比較

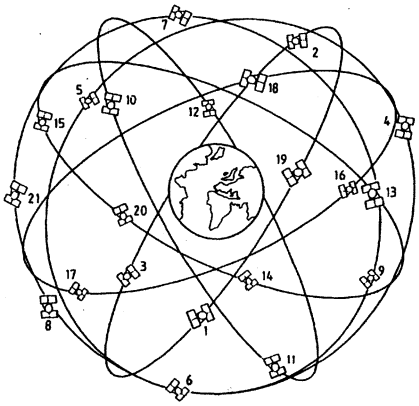
	GPS	GLONASS
衛星数	24	24
軌道面の数	6	3
軌道面傾斜角	55度	65.8度
軌道半径	26,560km	25,510km
周期	11時間58分	11時間16分
高度	約20,000km	約19,300km
衛星送信	L_1=1575.42MHz	L_1=(1602+0.5625n)MHz n=1,2,....,24
周波数	L_2=1227.6 MHz	L2=(1246+0.4375n)MHz n=12,....,24
コード	C/A(L_1):1.023MHz	C/A(L_1):0.51MHz
	P(L_1とL_2):10.23MHZ	P(L_1とL_2):5.1MHZ
準拠測地系	WGS-34	PZ-90
システム時刻系	UTC(USNO)	UTC(SU)
測位精度	水平100m　垂直140m (99.7%確率)	水平60m　垂直75m (99.7%確率)

P.N.Misra, R.I.Abbot, E.Bayliss（1994）は、当初の座標系 SGS-85（u, v, w）より WGS84（x, y, z）への変換を決定するために、SGS-85による位置が決定されている GLONASS 衛星の追跡観測を行って WGS84による位置決定を行った。1991～1992年間にわたり３回の実験をし、１回の実験は10～20日間にまたがった。最小二乗法により

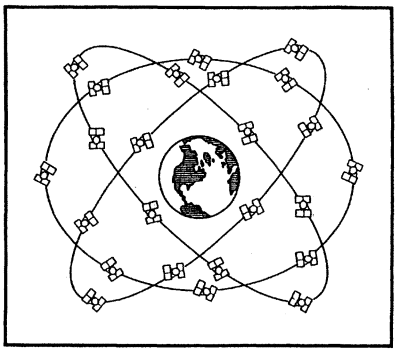
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -3x10^{-6} & 0 \\ 3x10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{SGS-85}$$

のごとく決めた。ただしこれは精度が悪い。

その後、ミュンヘンの測地・航法研究所；FAF 大学の応用測地学研究所；DLR-DFD リモートセンシ



The Global Positioning System (GPS), 21 satellites configuration



GLONASS satellite configuration

図２　（左）GPS のNAVSTER 衛星の配置（右）GLONASS の衛星の配置

ングなど三つの機関は、新しいパラメーターを得るために、ヨーロッパの WGS84（ITRF）の座標値の分かっているところでの GLONASS の観測を1995年11月に計画した。５台の3 S Navigation R-100-12-101 GPS/GLONASS 受信機が利用された。これは20チャンネルの２周波受信機である。観測は1996年５月15日より５月20日にかけて行われた。解析ではまず PZ-90での単独測位結果を出した。三つの機関による結果の差は１～２mであった。これより変換パラメーターは

平行移動	x	2.133m
	y	1.860m
	z	-1.076m
回転	ω_x	-0.021″
	ω_y	0.096″
	ω_z	-0.318″
尺度	μ	$-1.27 \cdot 10^{-7}$

となった。x, y 軸の回りの回転は有意ではない。それでもう一度４パラメーターを仮定して

平行移動	X	-0.401m
	y	0.283m
	z	0.100m
回転	ω_z	-0.378″

となった。基線解析結果からも変換パラメーターを出した。これは

回転	ω_x	-0.002″
	ω_y	0.085″
	ω_z	-0.296″
尺度	μ	$-5.308 \cdot 10^{-7}$

となった。結局は総合して

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} 1 & -1.6\times10^{-6} & 0 \\ 1.6\times10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{PZ-90}$$

となった［U.Rossbach, H.Habrich, N.Zarraoa (1996)］。

さらに P.N.Misra, R.I.Abbot, E.M.Goposchin（1996）は、1995年９月より1996年３月までの間に得られたデータによりパラメーターを決めなおした。結果は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.5m \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1.9\times10^{-6} & 0 \\ 1.9\times10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{PZ-90}$$

であった。

４．GPS とGPS ＋GLONASS の測位結果比較

現在、GPS とGLONASS の併用により、１点測位での精度はメートルのレベルとなり、搬送波コードをつかた２点測位では10cm を切り、搬送波位相では１cm であるといわれている。ここでは T.Hall, B.Burke, M.Pratt, and P.Misra ; Comparison of GPS and GPS ＋GLONASS positionig performance, Proc. ION GPS-97, 1997, 1543-1550

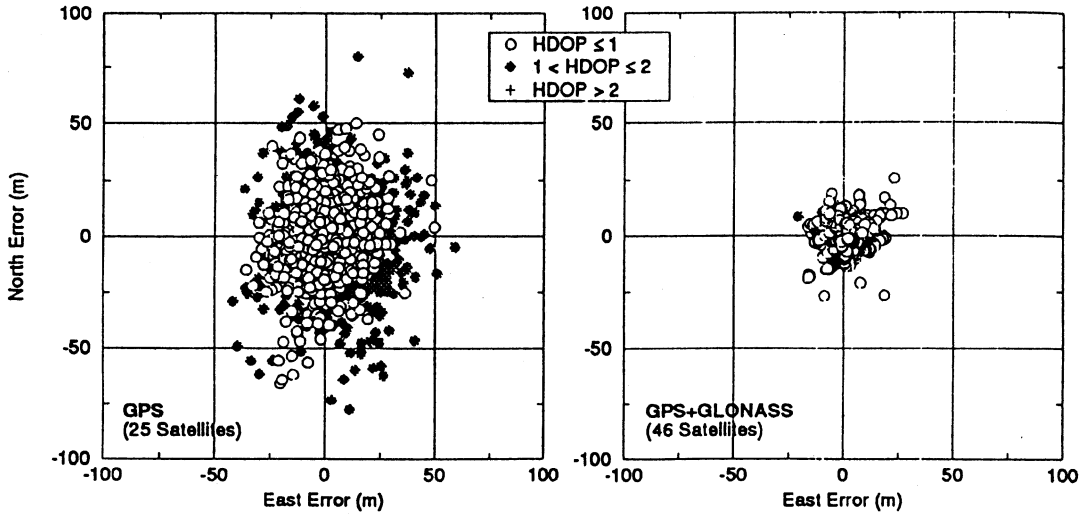


図３　1997年４月５日の観測の GPS **と**GPS ＋GLONASS **による同一点の単独測位による水平位置の誤差**

によって、GPSのみの場合の精度とGPS＋GLONASSの場合の測位精度を比較してみる。データは1997年４月のものである。

１点測位

観測の誤差は、使用した暦、衛星の時計の精度、電離圏・対流圏遅延、マルチパス、受信機の雑音、などに依存し、GPSの場合には、SAの問題もある。図３は、1997年４月５日観測のGPSとGPS＋GLONASSによる同一点の単独測位による水平位置の誤差を示す。受信機はAshtechのGG-24である。WGS-84とPZ-90の間の変換は、Missra et all(1996)による。

GPS＋GLONASSの結果はGPSだけによる場合に比べて数倍よくなっている。図４は水平速度の結果である。同じくGPS＋GLONASSの結果はGPSだけによる場合に比べて数倍よくなっている。

コード利用の時の２点測位

図５はコードを使ったときの相対測位の結果である。

搬送波位相法

この方法では、不確定項の処理がうまくできると、cmの精度が可能であって２周波の受信機ならば１分程度で不確定項が決定できる。この決定のため、GPSやGPS＋GLONASSで、Hwangのカルマンフィルターを使った。２km離れた２点で48時間観測したデーターを使った。図６に不確定項を確定するのにかかる時間を示す。GLONASSが入るとずうっと早くなる。

５．GLONASS の測地的有効性の評価

基線解析を含む測地的な利用の観点からのGLONASSの評価については次の文献がある。

N.Zarraora, W.Mai, E.Sardon, A.Jungstand : Preliminary evaluation of the Russian GLONASS as a potential geodetic tool, Journal of Geodesy, 72, 1998, 356-363.

これはドイツのノイストレリッツのドイツ航空研究機構において行われたGLONASS応用の研究の成果である。まずノイストレリッツでGPSとGLONASSの単独測位の結果を比較した。受信機はGLONASS/GPSについては3 S-R101, 1 SDE16などでGPSはアランオスボンSNR-8100、トリンブル4000SSE、アシュテクX12、などである。基線解析には放送暦をつかった。毎日ごとの結果では3 S-R101受信機が優れた安定性を示した。GPS受信機は単独測位では定誤差にさらされていて、GLONASSの定誤差よりも大きい。

測地観測量についても比較した。搬送波の位相測定ではGLONASSの誤差は平均二乗誤差で４mmでGPSの場合の２mmより悪かった。

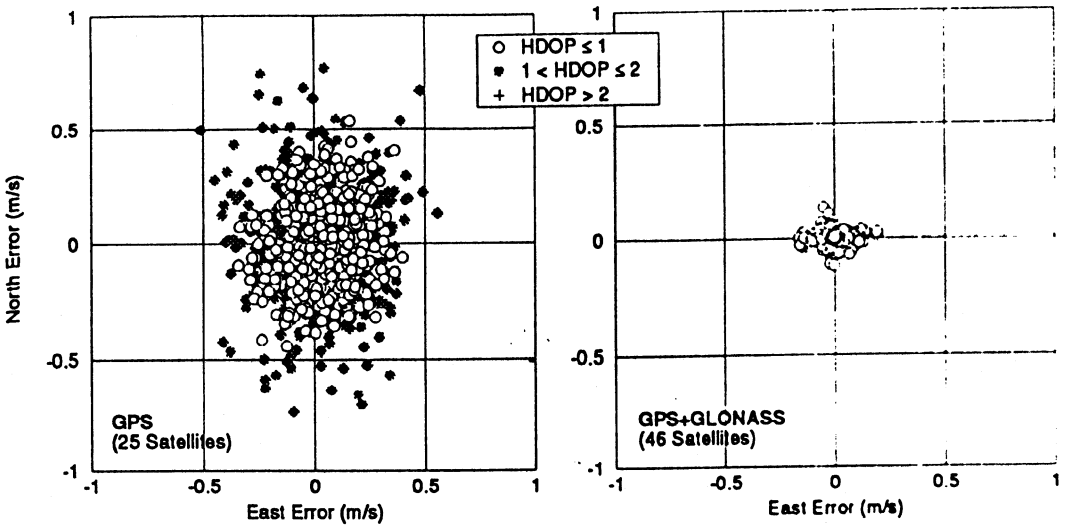


図４　1997年４月５日の観測の GPS **と**GPS ＋GLONASS **による同一点の単独測位による水平位置の誤差**

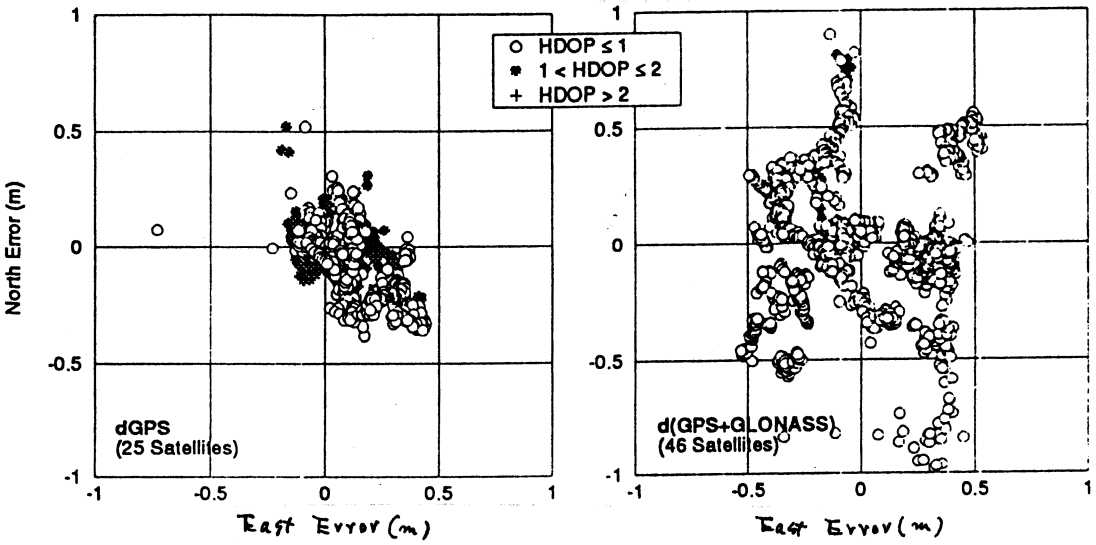


図５　コードを使ったときの相対測位の結果

GLONASS を使うときの一つの重要な問題は暦の精度である。GPS については観測後数日で IGS より精密軌道情報が入る。これは数 cm の精度である。GLONASS についてはこういうサービスがない。しかし GLONASS の放送暦は30分ごとに更新される。GPS は２時間ごとである。GLONASS とGPS について24時間にわたる前衛星の軌道を計算した。座標・速度ともに GLONASS のほうがよい。これは GPS より短い時間に軌道が更新されるからである。

1996年の春 GLONASS のキャンペーンをヨーロッパ各国の６点で実施した。ノイストレリッツの DLR では二種類のデータ解析をした。単独測位と二重差にわる基線決定とである。結果は満足すべきものであった。

今の GLONASS は９～10年まえの GPS と同じである。しかし GLONASS はGPS のたどった道と同じ

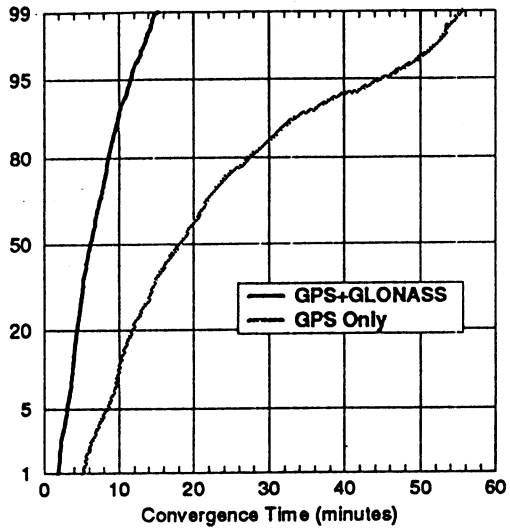


図6　不確定項を確定するのにかかる時間

道をたどってよくなるという期待はもてる。GPS と GLONASS と結合した利益が大きい。IGS もそのサービス業務を GLONASS を含むように予定している。

6．GPS ＋GLONASS の基線解析

日本では、初期の GLONASS の試験的な観測と結果の解析は運輸省の電子航法研究所によって行われ、１点観測に関しては、既に述べた諸外国の観測結果と同じ結論を得ている［新井直樹・伊藤　実・村上篤史、1997；新井直樹、1997］。

1998年10月19日より1999年４月19日までに実施された、国際 GPS サービス事業などの機関による国際 GLONASS 観測のキャンペーンに際しては、日本の電子航法研究所や国土地理院もこれに参加した。電子航法研究所は三鷹で、国土地理院はつくばでの観測であり、ともに受信機は Ashtech Z18、衛星の最小高度角は10秒、サンプリング間隔は30秒で24時間連続観測が実施された。

この観測の結果を利用し、株式会社　日豊では、スウーデンの Spectral Precision 社の日本での代理店と提携して、同社の開発した GeoGenius™ というソフトによって GLONASS 観測結果を利用した基線解析の検討を行ってきた。このソフトの ver.2.0段階より良好な結果を得るに至っている。

GeoGenius™ver. 2.0による、つくば・三鷹間の67 km の基線の、1999年２月19日、20日の観測の解析結果を表２に示す。

各基線の X, Y, Z 成分とも、GPS ＋GLONASS の解析結果の標準偏差は GPS だけのデータによる場合

表２　GeoGenius™ver2.0 による、つくば・三鷹間基線の1999年２月19日、20日の観測の解析結果

Baseline			GPS only Day of year: 50 (1999)	GPS+GLONASS Day of year: 50 (1999)
From	To	Component		
TSKA	MTKA	DX	＋ 9440. 594m ±0. 7mm	＋ 9440. 534m ±0. 6mm
		DY	＋54196. 591m ±0. 6mm	＋54196. 653m ±0. 6mm
		DZ	－38276. 014m ±0. 7mm	－38275. 945m ±0. 3mm
		Slope Distance	67018. 271m	67018. 272m

Baseline			GPS only Day of year: 51 (1999)	GPS+GLONASS Day of year: 51 (1999)
From	To	Component		
TSKA	MTKA	DX	＋ 9440. 597m ±0. 6mm	＋ 9440. 603m ±0. 4mm
		DY	＋54196. 576m ±0. 5mm	＋54196. 604m ±0. 5mm
		DZ	－38276. 003m ±0. 5mm	－38276. 006m ±0. 3mm
		Slope Distance	67018. 252m	67018. 278m

に比べてより良好であり、0.3〜0.6mm 程度である。なお、観測日ごとの結果のばらつきも GPS だけの場合は19mm あるのに比べ GPS ＋GLONASS では６mm と小さい。今の所基線解析例の数が少ないが、いずれにしても GPS ＋GLONASS の結果は GPS のみの場合に比べ、精度も再現性も高いことが伺えて、GeoGenius™ver. 2.0による解析が実用段階に来ていることを示す。

７．まとめ

GPS と並んで GLONASS という衛星測位システムのあることは知られていたが、その測地的な有効性については必ずしも明確ではなかった。しかしながら、諸外国の研究により GPS とGLONASS の共用による測位は GPS のみによる場合に比べてより精度が高いことが確認された。日本での基線解析の検討でも、各基線の X, Y, Z 成分とも、GPS ＋GLONASS の解析結果の X, Y, Z 成分ともに標準偏差は GPS だけのデータによる場合に比べて良好であり、0.3〜0.6 mm 程度であることが確認できた。なお、観測日ごとの結果のばらつきも、GPS だけの場合は19mm あるのに比べ、GPS ＋GLONASS では６ mm と小さく、いずれにしても GPS ＋GLONASS の結果は GPS のみの場合に比べ、精度も再現性もともに高いことが伺える。GeoGenius™ver. 2.0による基線解析は実用段階に来ていることが確認できる。

GLONASS とGPS との準拠している座標系の相互変換のパラメーター確定、GLONASS の精密暦の提供、などまだ残っている課題もあるが、これらは急速に改善されていくことが保証されており、今や衛星測位は GPS ＋GLONASS の段階に入ったと確認できる。

文献

新井直樹・伊藤　実・村上篤史、GLONASS の現状と測位誤差、電子情報通信学会信学技報 SANE97-35, 1997, 1-8.

新井直樹、GLONASS の現状と GPS との共用、日本航海学会 GPS シンポジュウム97, 1997, 107-118.

Hall, T., B.Burke, M.Pratt, P.Misra : Comparison of GPS and GPS ＋GLONASS positioning performance, *Proc. ION GPS-97,* 1997, 1534-1550.

Hwang, P., R.Brown : GPS navigation ; Combining pseudrange with continuous carrier phase using a Kalman filter, *Navigation,* 37, 1990, 181-196.

Misra, P.N., R.I.Abbot, E.Bayliss : SGS85-WGS84 Transformation, *Manuscr. Geod.*, 19, 1994, 300-308.

Misra, P.N., R.I.Abbot, E.M.Goposchin : Integrated case of GPS and GLONASS ; Transformation between WGS 84 and PZ-90, *Proc. ION GPS-96,* 1996, 307-314.

Rossbach, U., H.Habrich, N.Zarraoa : Transformation parameters beween PZ-90 and WGS84, *Proc. ION GPS-96,* 1996, 299-285.

Zarraora, N., W.Mai, E.Sardon, A.Jungstand : Preliminary evaluation of the Russian GLONASS as a potential geodetic tool, *Journal of Geodesy,* 72, 1998, 356-363.

（株式会社　日豊）