

森林内外での多機種 GPS 受信機による測位比較

小林裕之^{*1}・矢田 豊²・茶 弥 俊一³・小神野和貴³
野上由美子³・鳥本秀幸³

小林裕之・矢田 豊・茶弥俊一・小神野和貴・野上由美子・鳥本秀幸：森林内外での多機種 GPS 受信機による測位比較 日林誌 83：135～142, 2001 単独, DGPS, 干渉と測位方式の異なる五つの GPS 受信機の比較試験を, 地形遮蔽の影響がない平坦林内の樹冠下 4 カ所と林外 1 カ所で行った。単独測位機種は林内でも安定した測位が可能で, 5 分間の平均水平測位精度は 15.4～48.6 m であった。DGPS 機種は船舶航行用の補正情報を内陸部の林内でも受信することができ, 1.1～7.3 m の測位精度を示した。干渉測位機種は林内ではフィックス解は得られず, また測位自体も不安定となるが, フロート解が得られた場合の精度は DGPS 機種よりも高く, 0.1～5.1 m の測位精度を示した。DGPS, 干渉測位機種とも, 胸高断面積合計の増加に伴って測位誤差が増加することがわかった。また, 1 m 内外の測位誤差を評価するには, GIS ソフトウェアの測地系変換では精度が足りず, 別の変換ソフトウェアを使用する必要があることもわかった。森林管理業務では, 単独機種と DGPS 機種とを, その携帯性や精度を考慮して使い分けるべきであると考えられる。

キーワード：干渉測位, GPS, 単独測位, DGPS, 林内

Kobayashi, H., Yada, Y., Chachin, T., Okano, K., Nogami, Y., and Torimoto, H.: Evaluation of GPS Receivers' Performance Inside and Outside Forests. J. Jpn. For. Soc. 83: 135~142, 2001 Five GPS receivers with point, differential and carrier phase positioning systems were tested. The test was done at four under canopy sites in flat forests without terrain effect and one extra-forest site. The point positioning receiver was stable even inside forests and its mean horizontal positional accuracy of 5 min was 15.4~48.6 m. The differential GPS receivers successfully received real time DGPS correction broadcast from marine radio beacons and their accuracy were 1.1~7.3 m. The carrier phase receivers could not get fixed solutions and were not stable inside forests, but their accuracy of float solutions were 0.1~5.1 m, better than those of the differential receivers. The accuracy of both differential and carrier phase receivers decreased with increasing basal area. It was found that the accuracy of datum conversion, which the GIS software had, was not precise enough and it was necessary to use other conversion software to evaluate approximately 1 m accuracy. Selective usage of point positioning and differential GPS receivers is suggested for forest management.

Key words: carrier phase positioning, differential GPS, GPS, point positioning, under canopy

I. はじめに

GPS 測位の種類には, 単独測位, DGPS, 干渉測位の三つがある。

単独測位 (一点測位, point positioning) は, 一般開放されている C/A コードを 1 台の受信機で観測する方式で, 得られる精度は 100 m 程度である。DGPS (差動 GPS, トランスロケーション方式, コードディファレンシャル方式, differential GPS, C/A code differential GPS, code DGPS) は, 一般的に C/A コードのみを利用し, 参照点と未知点の二カ所で同時に単独測位を行って共通誤差を相殺する方式で, 精度は数 m 程度である。また, 干渉測位 (GPS 測量, carrier phase positioning, carrier phase differential GPS, carrier phase DGPS) は, 搬送波位相積算回路の付いた受信機で, 参照点と未知点の 2 カ所で同時に搬送波を観測し, その位相差から 2 地点間の基線ベクトルを求める方式で, 精度は数 cm 程度である。

これまで GPS は, 葉の落ちた森の中では受信強度が低下するものの, 何とか測位可能であるが, 葉の茂った森の

中では受信強度の低下が著しく, ほとんど測位不能である (土屋・辻, 1997) といわれてきた。しかしながら, 1993 年末に GPS 衛星 24 個すべての打上げが完了し, 完全運用状態になったこと, 受信機の小型・軽量・低価格化や, 多チャンネル・高性能化が進んだことなどの理由により, 最近では, 森林内での測位を目的とした研究も行われるようになった。

国内の森林地帯で測位を行った例としては, 露木ら (1993), 露木 (1994), 長谷川ら (1998) がある。露木ら (1993) は, 東京大学北海道演習林の林内や林道端において, 2 種類の単独測位受信機を用いた測定結果として, 1992 年 9 月測定時の平均水平誤差が 100.1 m, 45.7 m, 1993 年 2 月測定時のそれが 49.7 m, 43.9 m であったと報告している。露木 (1994) は, 同地において, DGPS および干渉測位方式での測定も行い, ギャップのある森林では DGPS 方式の測位が可能であり, その精度は水平誤差 3.0 m であるとし, また, 天頂付近のみ開空していた地点や全くの林内では, 衛星補足を十分な継続時間行うことができず, 干渉測位には失敗したと報告している。長谷

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: kobayasi@fes.pref.toyama.jp

¹ 富山県林業技術センター林業試験場 (930-1362 富山県中新川郡立山町吉峰 3)

Forestry Division, Toyama Forestry and Forest Products Research Institute, Tateyama, Toyama 930-1362, Japan.

² 石川県林業試験場 Ishikawa Pref. For. Exp. Stn., Tsurugi, Ishikawa 920-2114

³ DX アンテナ (株)GPS 事業部 GPS Division, DX Antenna Co., Ltd., Shinjuku, Tokyo 160-0022

川ら (1998) は、京都大学和歌山演習林において、林道基準点および、一部に樹高 15~20 m のヒノキ人工林と樹高 5 m 程度の広葉樹林を含む林地境界を DGPS 方式で測定し、平均水平誤差が 2.9 m であったとしている。

一方、海外の森林内で実際に測位を行った例としては、Deckert and Bolstad (1996), Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) などがある。Deckert and Bolstad (1996) は、典型的な合州国東部の森林における DGPS 測位の平均誤差が、落葉樹林、針葉樹林内で、それぞれ 3.1 m, 4.4 m であったとしている。Næsset (1999) は、ノルウェー南東部の森林において実験を行い、DGPS 方式の平均水平誤差が 1.2~3.7 m, フロート解のときの干渉測位による平均水平誤差が 0.8~2.3 m であったと報告している。また、Næsset *et al.* (2000) は、同地において、GPS だけを使用した場合と、GPS および GLONASS (The Russian Global Navigation Satellite System) の両方を使用した場合のフロート解の干渉測位結果として、平均水平誤差がそれぞれ 0.2~5.7 m, 0.1~2.9 m であったとしている。

最近の国内における GPS を取り巻く環境の変化で特筆すべきものとしては、1999 年の海上保安庁による DGPS ビーコン局の整備完了があげられる。これは、日本の沿岸や島などに設置された 27 カ所の基準点における GPS 測位誤差を中波無線局から時々刻々放送し、未知点における測位誤差を 10 m 以下にまで向上させるというシステムであり、サービス自体は無料で提供されるものである。本来は船舶航行用で、その有効範囲は各 DGPS 局から 200 km

以内の海上ということになってはいるが、もし陸域でもこのシステムが利用可能であれば、ユーザ側は GPS 受信機とビーコン受信機を 1 組用意するだけで、基準局を設置することなしに数 m 程度の測位精度が期待できる。立木ら (2000) は、この海上保安庁の DGPS システムを使用した林道線形のデジタル化などを試み、長瀬ら (2000) は、京都府立大学大枝演習林内外の地況・林況が異なる 4 地点において観測を行い、測位精度は地況・林況を問わず 6 m 以内であったとしている。

既往の国内研究では、樹冠遮蔽と地形遮蔽の影響を分離した測位精度検証が不十分であること、海外研究では単独測位方式との比較が行われていないこと、海上保安庁の DGPS システムは林内での使用事例がまだ少ないこと、などの理由により、測位方式が異なる複数の受信機を用いた樹冠下での GPS 測位精度の比較は十分意義があると考えられる。そこで本研究では、測位方式が異なる 5 種類の受信システムを同時に使用し、林相が異なる 4 林分と森林外の計 5 地点で測位を行い、今後の森林管理業務等における実用性について比較検討を行った。

II. 方 法

実験は、1999 年 11 月 10, 11 日に、富山県林業技術センター林業試験場構内で行った。今回使用した機種を表-1 に示す。調査地最寄りの DGPS ビーコン局は能登半島沖の舳倉島にあり、その距離は約 140 km である。測点の概要を表-2 に、各測点の全天写真を図-1~5 に示す。測点 G1 から G4 を設置した林分はすべて平坦地にあり、地形

表-1. 使用した機種

	メーカー またはブランド	受信機	チャン ネル数	仰角マスク	測位方式	ビーコン局 の選択	開空間での期待精度
機種 1	Garmin	GPS II PLUS	12	固定 (非公開)	単独	—	100 m
機種 2 (GPS 受信機) (ビーコン受信機)	Garmin CSI	GPS II PLUS SBX-2	12	固定 (非公開)	DGPS (海上保安庁ビーコン局使用)	自動	10 m
機種 3	Ashtech	BR 2 G	12	規定値 (5°)	DGPS (海上保安庁ビーコン局使用)	自動	1~2 m
機種 4 (移動局) (基地局)	NovAtel Ashtech	RT-20 Z-Surveyor	12	規定値 (10°) 規定値 (10°)	干渉 (1 周波後処理キネマティック)	—	1~2 cm (測位時間による)
機種 5 (移動局) (基地局)	Ashtech Ashtech	Z-Surveyor Z-Surveyor	12	規定値 (10°) 規定値 (10°)	干渉 (2 周波後処理キネマティック)	—	1~2 cm (測位時間による)

表-2. 測点の概要

	林相など	地形	林齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	立木密度 (本/ha)	胸高断面積合計 (m ² /ha)	開空度* (%)
G0	林外 (三角点)	屋根部	—	—	—	—	—	23
G1	コナラ	平坦地	66	28	20	450	27.7	37
G2	スギ密	平坦地	12	12	9	4,800	54.3	14
G3	スギ疎	平坦地	31	24	14	1,400	63.3	23
G4	ケヤキ	平坦地	8	7	7	4,000	15.4	27

* 開空度は全天写真の空の部分の単純な比率。

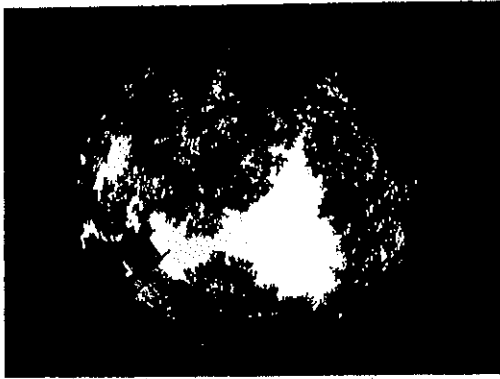


図-1. 測点 G0 の全天写真

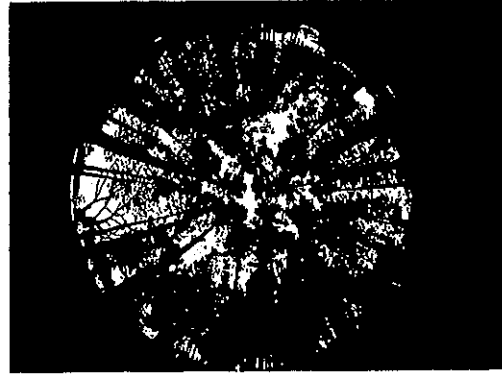


図-4. 測点 G3 の全天写真

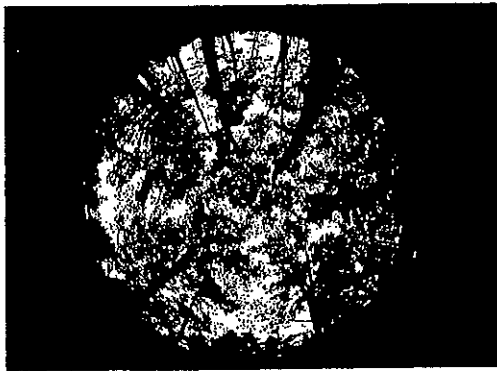


図-2. 測点 G1 の全天写真

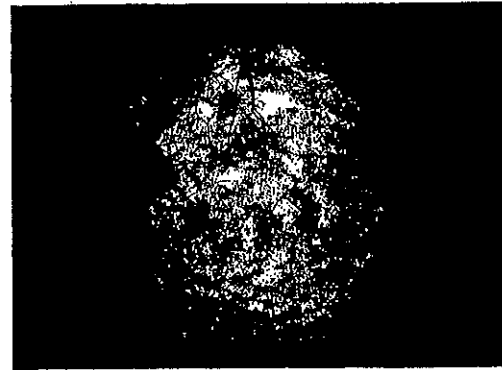


図-5. 測点 G4 の全天写真

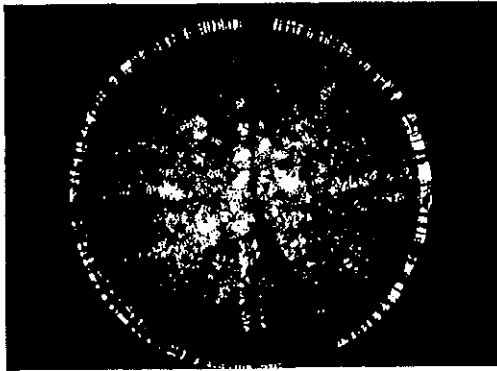


図-3. 測点 G2 の全天写真

による衛星遮蔽の影響はほとんど受けないと考えられた。また、実験日の広葉樹林は紅葉の初期段階であった。なお、事前に衛星配置を調べることはしなかった。

11月10日に、まず干渉測位用の基地局を上空の開けた構内の芝地に設け、機種3により約3時間連続測位し、その平均値をもって基準位置とした。観測は2回行った。1回目の観測は11月11日の午前10時過ぎから、測点G2、G3、G4、G1、G0の順に各測点10分間ずつを目途に、2回目の観測は同日の午後2時過ぎより、同じ順番で20分間ずつを目途に行った。測位は、各測点上に立てた測量用三脚に、腕の長さ50cmの十文字型アンテナ設

置用ステーを固定し、その4端点の東に機種2、西に機種4、南に機種3、北に機種5のアンテナを配置し、また、アンテナ一体型の機種1についてはステー中央部に受信機を設置して行った。各受信機のアンテナ高は地上から約1.5mであった。なお、測位はすべてWGS84測地系で行う予定であったが、機種2のG2での1回目だけは東京測地系で取得してしまった。

機種1から機種3までの観測データは、NMEA 0183フォーマットを用いて2秒間隔で、機種4,5のそれは、受信機用ソフトウェアを用いて1秒間隔でノートパソコンに収集した。また、後処理キネマティック解析にはAshtechのWinPrismソフトウェアを用いた。機種1から機種3までのデータファイルからは、GGAおよびGSAセンテンスを切り出し、また、機種4,5の解析結果ファイルはそのまま、Excel, dBASE形式を経由し、GISソフトウェア(TNTmips)に取り込み、緯度経度ポイントデータとした。なお、取り込みにあたっては、データ取得時の測地系をそのまま指定した。

III. 結 果

1. 測位の安定性

森林内という厳しい状況でのGPS測位では、安定して測位ができるかどうかことが重要である。そこで、各観測データを、位置情報が取得できたかどうかという視点から分析

した結果を表-3に示す。全測点、全観測時間帯で安定した測位が可能であったのは機種1,2であり、機種3では全欠測と一部欠測がそれぞれ一度ずつ生じた。干渉測位方式の機種4では一部欠測が一度生じ、機種5では一部欠測と全欠測が頻繁に生じた。ただし、機種3のG2における1回目の観測は、実験日初回のものであり、機器の接続不良の可能性もある。干渉測位で得られる基線解には、波数不確定を実数値として推定したフロート解と、それを整数化したフィックス解の二種類がある。波数不確定の整数化によって精度は格段に上がる(土屋・辻, 1999)のであるが、今回の干渉測位機種でフィックス解が得られたのは機種5の林外(G0)での1回目だけであり、林内(G1~G4)ではフィックス解は全く得られなかった。

2. 測位の精度

測位データの水平誤差を計算するため、各測点、各観測回において、全欠測機種を除くすべての機種で位置情報が得られた時間帯のうち、後半の5分間分をまず切り出した。機種5のG0での1回目観測のフィックス解はこの切り出し時間帯に含まれていた。その後、各緯度経度値を、GISソフトウェア内で東京測地系平面直角座標系のX, Y座標値に変換した。なお、測点G1からG4のX, Y座標の真値としては、建設省公共測量作業規定に準拠した、外部測量業者による4級基準点測量成果を使用した。また、同一測量業者による、G0および隣接する二つの三角点間でのGPS測量の結果に整合性があったことから、今回使用した三等三角点「析津」が位置ずれを起こしている可能性はないと判断し、国土地理院が基準点成果として公表しているX, Y座標をG0の真値として採用した。こうして求めたX, Y座標値をもとに水平誤差を計算したところ、フィックス解が得られたにもかかわらず、機種5のG0での1回目の観測において、3m以上の誤差が出ていることがわかった。また、フロート解の場合を含めた機種4,5の測位点をGISソフトウェア上でプロットしたところ、ほぼ全ての測点において測位点が南東方向にずれるという傾向が認められた。今回使用したGISソフトウェアは、WGS 84測地系と東京測地系との座標変換に、準拠楕円体原点の平行移動量である三つのパラメータを使用す

る方法を採用しているが、このような素朴な変換による変換精度は1~10m程度になる(土屋・辻, 1999)という指摘がある。そこで、前述基準点成果の緯度経度をWGS 84系の緯度経度に変換し、その値をGISソフトウェアによって東京測地系平面直角座標系のX, Y座標に変換したものと、基準点成果で公表されているX, Y座標との比較を行った(図-6)。なお、東京測地系からWGS 84系への変換は、現在入手可能なもので最も精度が高いと考えられ、日本測地系の歪みを考慮して、約21,000個の変換パラメータを用いているので、変換誤差が1m以下に抑えられている(日本測量協会, 1998)、国土地理院開発の座標変換プログラム(TKY 2 WGS Ver. 3.5)を使用した。

この図からは、GPSによるWGS 84系での測位結果がG0三角点にぴったり合っているも、その結果をGISソフトウェアによって東京測地系に変換すると、その測位点は三角点から南に約3.2m、東に約1.8mずれてプロットされてしまうことがわかる。この南東方向へのずれは、機種4,5の測位点プロットと整合性があったため、この数値(X方向:+3.156m, Y方向:-1.787m)を全測点での補正量とし、更に観測時のアンテナのオフセット量(=0.5m)を考慮し、水平誤差を計算し直した。なお、唯一東京測地系で測位を行った機種2のG2での1回目については、受信機内部での測地系変換方法が公開されていないので、他の測位結果と同様の補正量を与えた。

観測1回目の測位誤差は、機種1の林外で31.8m、林内で27.0~33.9m、機種2の林外で2.8m、林内で2.7~7.3m、機種3の林外で2.3m、林内で1.1~4.0m、機種4の林外で1.7m(フロート解)、林内で0.1~3.4m(フロート解)、機種5の林外で0.2m(フィックス解)、林内で0.2~1.1m(フロート解)であった(表-4)。また、観測2回目の測位誤差は、機種1の林外で55.6m、林内で15.4~48.6m、機種2の林外で3.0m、林内で3.0~21.7m、機種3の林外で2.0m、林内で1.5~6.6m、機種4の林外で0.2m(フロート解)、林内で0.1~1.0m(フロート解)、機種5の林外で0.1m(フロート解)、林内で0.3~5.1m(フロート解)であっ

表-3. 位置情報の取得結果

	機種1	機種2	機種3	機種4	機種5
G0	1回目 ○	○	○	○ (F)	△ (I)
	2回目 ○	○	○	○ (F)	○ (F)
G1	1回目 ○	○	○	○ (F)	×
	2回目 ○	○	○	○ (F)	×
G2	1回目 ○	○	×	△ (F)	○ (F)
	2回目 ○	○	○	○ (F)	△ (F)
G3	1回目 ○	○	○	○ (F)	×
	2回目 ○	○	○	○ (F)	△ (F)
G4	1回目 ○	○	○	○ (F)	△ (F)
	2回目 ○	○	△	○ (F)	○ (F)

○, 欠測無し; △, 一部欠測; ×, 全欠測; (F), フロート解; (I), フィックス解。

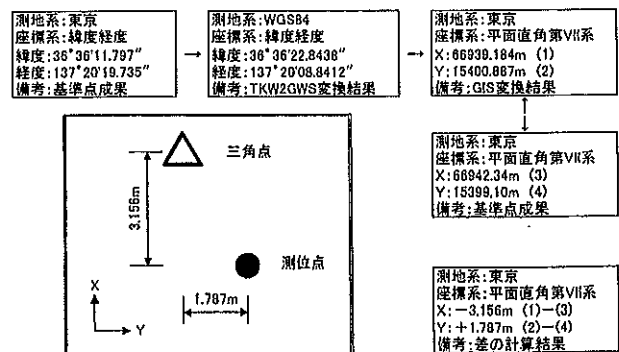


図-6. GISソフトウェアとTKY 2 WGSによる座標変換の比較

表-4. 観測1回目の測位結果

	機種1	機種2	機種3	機種4	機種5
G0 平均誤差 (m)	31.82	2.75	2.31	1.68 (F)	0.19 (I)
標準偏差	3.72	1.20	1.96	0.54	
最大	41.66	5.16	7.57	2.40	
平均衛星数	8.50	8.73	8.47		
平均 PDOP	1.77	1.73	1.96		
データ数	150	150	150	150	
G1 平均誤差 (m)	26.96	3.31	3.33	1.52 (F)	×
標準偏差	7.30	1.87	1.19	0.06	
最大	37.77	6.93	5.48	1.60	
平均衛星数	8.91	8.48	7.63		
平均 PDOP	1.83	1.78	2.00		
データ数	150	150	150	150	
G2 平均誤差 (m)	33.85	5.55	×	0.91 (F)	1.11 (F)
標準偏差	15.00	2.53		0.17	0.34
最大	63.57	9.61		1.35	1.81
平均衛星数	5.79	6.69			
平均 PDOP	2.91	2.75			
データ数	150	150		150	150
G3 平均誤差 (m)	27.17	7.25	4.02	3.38 (F)	×
標準偏差	11.02	3.23	3.00	0.17	
最大	45.81	13.43	13.89	3.58	
平均衛星数	8.35	8.28	7.18		
平均 PDOP	2.19	2.07	3.16		
データ数	150	150	150	150	
G4 平均誤差 (m)	32.45	2.65	1.08	0.13 (F)	0.22 (F)
標準偏差	17.65	1.51	0.63	0.03	0.04
最大	75.15	5.06	3.02	0.18	0.30
平均衛星数	8.28	8.31	7.98		
平均 PDOP	2.51	2.32	2.63		
データ数	150	150	150	150	150

×, 全欠測; (F), フロート解; (I), フィックス解。機種4, 5については、機種1~3に合わせて2秒間隔に間引いてある。

た(表-5)。なお、観測2回目のG1での機種2のデータには、単独測位時間帯が一部含まれていたもので、これを除外し、DGPS時間帯のみを誤差計算に使用した。観測1, 2回目における、機種別、測点別(林内測点は胸高断面積合計の昇順に並べ替え)の測位誤差を図-7, 8にそれぞれ示す。

IV. 考 察

1. 単独測位

1回目, 2回目の観測をまとめると、単独測位の機種1ではその測位誤差が、林外で31.8~55.6m, 林内で15.4~48.6mとなる(表-4, 5)。また、観測1回目では、全測点において概ね30m前後の測位誤差となった(図-7)のに対して、観測2回目では測点間で誤差にばらつきがある(図-8)。G0, G1での誤差が特に大きくなっているが、これはSAの影響によるものと考えられ、単独測位機種においては、測点と測位誤差の間には特にこれといった傾向はみられないといえる。

2. DGPS

機種2の1, 2回目の観測をまとめると、その測位誤差

表-5. 観測2回目の測位結果

	機種1	機種2	機種3	機種4	機種5
G0 平均誤差 (m)	55.60	3.02	1.99	0.17 (F)	0.06 (F)
標準偏差	31.71	1.58	0.92	0.03	0.03
最大	106.11	6.11	4.66	0.24	0.08
平均衛星数	6.84	6.81	7.27		
平均 PDOP	2.83	2.18	1.88		
データ数	150	150	150	150	150
G1 平均誤差 (m)	48.59	21.68	2.29	0.45 (F)	×
標準偏差	16.63	17.73	1.81	0.05	
最大	69.30	89.58	7.82	0.54	
平均衛星数	7.00	3.38	6.98		
平均 PDOP	2.13	2.52	2.12		
データ数	150	128*	150	150	
G2 平均誤差 (m)	31.31	4.25	6.62	1.00 (F)	1.15 (F)
標準偏差	13.05	1.85	3.23	0.42	0.31
最大	53.40	6.79	14.65	1.87	1.80
平均衛星数	6.19	5.87	4.81		
平均 PDOP	3.32	2.23	2.79		
データ数	150	150	150	150	150
G3 平均誤差 (m)	19.88	4.89	5.30	0.78 (F)	5.08 (F)
標準偏差	3.96	2.32	4.42	0.12	4.16
最大	27.48	10.46	21.41	0.94	16.60
平均衛星数	6.67	5.67	4.83		
平均 PDOP	2.73	2.67	4.43		
データ数	150	150	150	150	150
G4 平均誤差 (m)	15.44	2.95	1.48	0.13 (F)	0.26 (F)
標準偏差	2.78	1.51	0.80	0.05	0.04
最大	21.18	5.94	3.20	0.26	0.28
平均衛星数	6.49	6.64	5.42		
平均 PDOP	2.92	2.94	3.66		
データ数	150	150	150	150	150

×, 全欠測; (F), フロート解; (I), フィックス解。*単独測位時間帯を除外。機種4, 5については、機種1~3に合わせて2秒間隔に間引いてある。

は、林外で2.8~3.0m, 林内で2.7~21.7mとなる(表-4, 5)が、観測2回目のG1での測位誤差だけが異常に大きい(図-8)ことがわかる。G1での1回目, 2回目の観測データのうち、捕捉衛星数, 最終DGPS更新からの経過時間(Age), PDOP値を図-9, 10にそれぞれ示す。通常Ageは、数秒以内ならば十分である(土屋・辻, 1999)といわれているが、1回目では全て0または1秒であるのに対して、2回目では10秒を超えることが頻繁にあったことがわかる。また、記録されていたビーコン局のIDを調べると、調査地最寄りの船倉島局ではない、大陸側の基準局と思われるものが混入していることもわかった。つまり、G1での2回目は、わざわざ遠い基準局のAgeの大きい補正情報による測位結果であり、信頼することができないといえる。この測定を除外すると、機種2の測位誤差は、観測1, 2回目をまとめて、林外で2.8~3.0m, 林内で2.7~7.3m(表-4, 5)となる。機種3の1, 2回目の観測をまとめると、その測位誤差は、林外で2.0~2.3m, 林内で1.1~6.6mとなる(表-4, 5)。

DGPS機種の測位誤差は、Deckert and Bolstad (1996), Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000), 長瀬ら

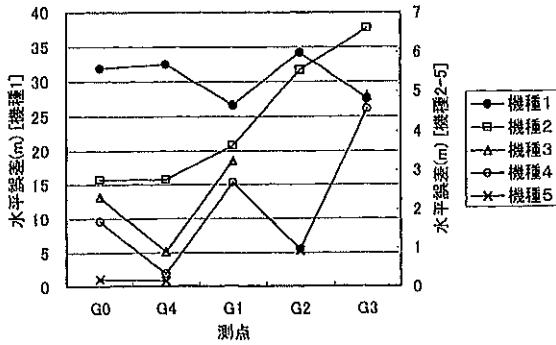


図-7. 観測1回目の平均水平誤差
林内測点 (G1~G4) は胸高断面積合計の昇順に並べ替え。

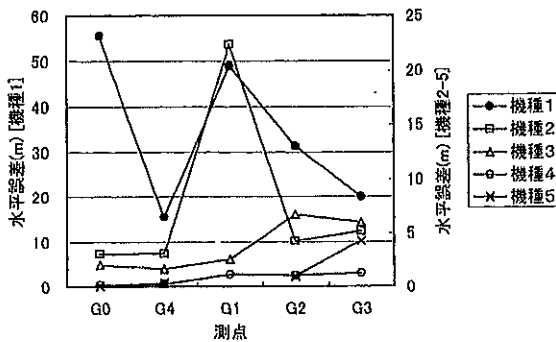


図-8. 観測2回目の平均水平誤差
林内測点 (G1~G4) は胸高断面積合計の昇順に並べ替え。

(2000)の結果とも概ね一致する。また、林内では、胸高断面積合計が大きくなるほど測位誤差も大きくなるという、Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000)と同様の傾向が認められる(図-7, 8)。

3. 干渉測位

機種4の1,2回目の観測をまとめると、その測位誤差は、林外で0.2~1.7m(フロート解)、林内で0.1~3.4m(フロート解)となる(表-4, 5)。また、機種5の1,2回目の観測をまとめると、その測位誤差は、林外で0.1(フロート解)~0.2m(フィックス解)、林内で0.2~5.1m(フロート解)となる(表-4, 5)。

干渉測位機種での林内でのフロート解時の測位誤差は、Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000)の結果と概ね一致し、DGPS機種よりも高い精度を示した。また、胸高断面積合計が大きくなるほど測位誤差も大きくなるという、Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000)と同様の傾向も認められた(図-7, 8)。機種5の林外での1回目でフィックス解が得られたのは、上空の視界に空きがあり(図-1)、サイクルスリップがなかったことによると考えられる。

4. 精度に影響を与えたもの

測位精度に及ぼす、機種、林分要素、衛星状態の影響を明らかにするために、林内4測点のデータを使用して重回帰分析を行った。機種については、SAの影響を大きく受

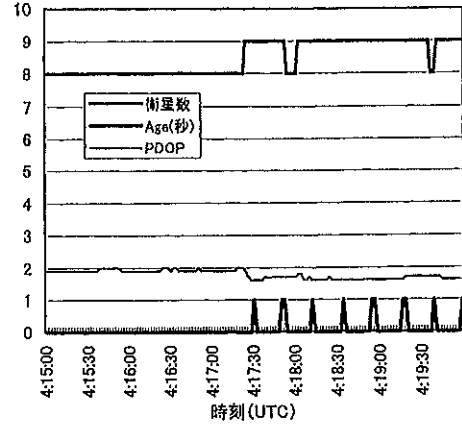


図-9. 測点G1での観測1回目の衛星数, Age, PDOP

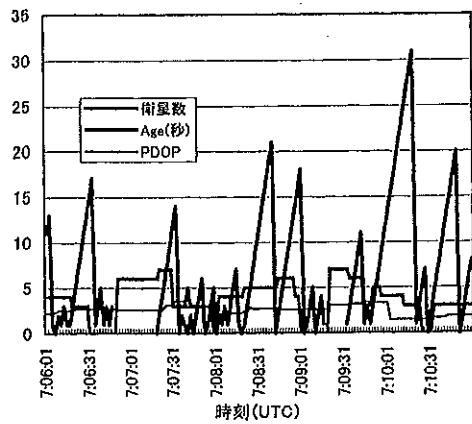


図-10. 測点G1での観測2回目の衛星数, Age, PDOP

け、他機種よりも明らかに測位精度が劣っている機種1をまず除外し、残る4機種に対して3(機種数-1)個のダミー変数(R_2, R_3, R_4)を作成した。林分要素については、常緑樹/落葉樹区分、林齢、樹高、胸高直径、立木密度、胸高断面積合計の間に強い相関がみられたので、これらのうちから胸高断面積合計(G)を説明変数として採用し、また、開空度(OR)も林分要素として採用した。衛星状態については、機種間の差を明確にするために、個々の機種が記録した衛星数やPDOP値ではなく、実験時間帯の開空間での衛星数(NS)、PDOP値($PDOP$)を採用した。計算には、AshtechのMission Plan V 4.1を使用した。なお、船倉島局以外の補正情報が混入していた、観測2回目のG1での機種2データは解析から除外した。目的変数には、測位誤差の自然対数($\ln D$)を採用した。これは、測位誤差の分布が極端なL字型分布となっていたからである。重回帰モデル式を以下に示す。

$$\ln D = a_1 \cdot R_2 + a_2 \cdot R_3 + a_3 \cdot R_4 + a_4 \cdot G + a_5 \cdot OR + a_6 \cdot PDOP + a_7 \cdot NS + b$$

ここで、 D : 測位誤差(m), R_2, R_3, R_4 : 機種別のダミー変数(0または1), G : 胸高断面積合計(m^2/ha), $PDOP$:

表-6. 重回帰分析結果

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	判定
胸高断面積合計 (G)	0.037	0.612	**
受信機 2 (R_2)	1.392	0.498	**
受信機 3 (R_3)	1.027	0.368	**
開空度 (OR)	0.029	0.185	**
受信機 4 (R_4)	-0.319	-0.119	*
PDOP (PDOP)	-0.105	-0.039	*
衛星数 (NS)	0.002	0.002	
定数項 (b)	-2.210		**

変数は、標準偏回帰係数の絶対値の降順に並べ替えてある。
 $r^2=0.658^{**}$, $n=4050$, *有意水準 5%, **有意水準 1%。受信機 2, 受信機 3, 受信機 4 は 3 個で 1 組のダミー変数。
 機種 2 の場合は, (R_2, R_3, R_4)=(1, 0, 0)
 機種 3 の場合は, (R_2, R_3, R_4)=(0, 1, 0)
 機種 4 の場合は, (R_2, R_3, R_4)=(0, 0, 1)
 機種 5 の場合は, (R_2, R_3, R_4)=(0, 0, 0)

開空間での PDOP 値, NS: 開空間での衛星数, $a_1 \sim a_7$: 回帰係数, b: 定数項である。表-6 に重回帰分析の結果を示す。4 林分における 2 回繰り返しの限定された観測ではあるが、標準偏回帰係数が最も大きかったのは胸高断面積合計であり、これが林内での測位精度に大きな影響を与えていたといえる。これは、Næsset (1999), Næsset *et al.* (2000) の結果と同様である。また、機種以外の説明変数が同一の場合には、機種 5 ($R_2=R_3=R_4=0$) と比べ、機種 2 ($R_2=1, R_3=R_4=0$) が標準偏回帰係数で 0.498 だけ測位誤差が大きくなり、機種 3 ($R_3=1, R_2=R_4=0$) が同係数で 0.368 だけ大きくなり、機種 4 ($R_4=1, R_2=R_3=0$) が同係数で 0.119 だけ小さくなることを示しており、機種 2~5 の測位誤差は、機種 4 < 機種 5 < 機種 3 < 機種 2 であったといえる。

5. 利用法の提案

今回の実験からは、地形遮蔽の影響のない樹冠下において、単独測位機種は安定した測位が行えるが、その精度は 15.4~48.6 m であることがわかった。なお、本実験後の 2000 年 5 月に SA が解除され、良好な条件下での単独測位では 7~15 m の水平精度が期待できる (Garmin Corp., 2000) ようになった。また、DGPS 機種は船舶航行用の補正情報を内陸部でも受信することができ、1.1~7.3 m の精度を示すこと、干渉測位機種はフィックス解が得られず、また測位自体も不安定となるが、フロート解が得られた場合の測位精度は DGPS 機種よりも高く、0.1~5.1 m であること、DGPS, 干渉測位機種とも、胸高断面積合計の増加に伴って測位誤差が増大すること、がわかった。また、1 m 内外の測位誤差を論ずる場合には、GIS ソフトウェアが内蔵している測地系変換プログラムでは精度が足りず、別のプログラムを使用して変換する必要があることもわかった。

森林、林業分野での GPS の利用形態には、1) 予め指定された地点へ到達する際に使用する場合、2) 現地調査を行った地点を後で特定する際に使用する場合、3) 精密測量に使用する場合、の大きく三つが考えられる。以下

に、ケース別の GPS 利用方法について提案する。

1) 指定された地点へ到達する場合

要求精度が 10 m 内外 (SA 解除後) の場合には、今回使用した機種 1 のようなレジャー用ハンディタイプの単独測位受信機を東京測地系に設定しておき、予め目標点の緯度経度をウェイポイントとして入力しておき、ナビゲーション機能を利用して目標点に到達すればよい。要求精度が数 m の場合には、まず単独測位で目標点近くまで到達し、その後 DGPS 測位で微調整すればよいと考えられる。しかしながら、1 m 内外の精度が要求される場合には測地系変換時の誤差が無視できないので、DGPS 受信機を WGS 84 系に設定しておき、ノートパソコンと今回使用した TKY 2 WGS プログラムを使用し、WGS 84 系での測位結果を東京測地系に精密変換し、目標点に到達したかどうかを検証する必要があると思われる。

2) 現地調査位置を後で特定する場合

要求精度が 10 m 内外 (SA 解除後) の場合には、単独測位機種の東京測地系での測位結果をそのまま使用すればよい。要求精度が数 m の場合には、DGPS 機種の東京測地系での緯度経度、補足衛星数、PDOP や Age をログファイルとして持ち帰り、それらの情報を判読し、確からしい測位結果のみを選択して調査位置を決定すればよいと考えられる。1 m 内外の精度が要求される場合には、1) と同様に、WGS 84 系での測位結果を、東京測地系へ精密変換する手順を加える必要があると考える。

3) 精密測量に使用する場合

今回の実験では、平坦林内でもフィックス解が得られなかったため、地形遮蔽の影響がある実際の山地林の樹冠下では、フィックス解はまず期待できないと思われる。現地へ干渉測位機種を 2 台携行し、測位不能あるいはフロート解を覚悟で精密測量を試みることも考えられるが、コスト面を考えるとあまり現実的ではないと筆者らは考える。

なお、本研究では高さ方向の精度検証は行っていない。また、実験は SA 解除前、測地成果 2000 発効前に行われたことを明記しておく。

引用文献

Deckert, C. and Bolstad, P. V. (1996) Forest canopy, terrain, and distance effects on Global Positioning System point accuracy. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 62: 317-321.
 Garmin Corp. (2000) <http://www.garmin.com/support/faqs/2.html>
 長谷川尚史・吉村哲彦・山手規裕・境慎二郎・福田昌史 (1998) 山岳林におけるディファレンシャル GPS の測位精度と手法の検討. *森林学誌* 13: 89-98.
 長瀬 興・吉田剛司・美濃羽靖・田中和博 (2000) 大枝演習林における DGPS 受信状況及び測位精度. *京都府大演報* 44: 27-31.
 Næsset, E. (1999) Point accuracy of combined pseudorange and carrier phase differential GPS under forest canopy. *Can. J. For. Res.* 29: 547-553.
 Næsset, E., Bjerke, T., Øvstedal, O., and Ryan, L. H. (2000) Contributions of differential GPS and GLONASS observations to point accuracy under forest canopies. *Photogram.*

Eng. Remote Sens. 66: 403-407.

日本測量協会 (1998) 座標変換プログラム TKY 2 WGSF for Windows 95 ユーザーズガイド—GPS 測量技術者のためのプログラム取扱説明書—, 9 pp, 日本測量協会, 東京.

立木 靖之・尾張敏章・吉村暢彦・石崎英治 (2000) 林内における
ディファレンシャル GPS の試用事例. 日林北支論 48: 172-174.

土屋 淳・辻 宏道 (1997) 新訂版やさしい GPS 測量. 445 pp, 日本
測量協会, 東京.

土屋 淳・辻 宏道 (1999) 改訂版 GPS 測量測量の基礎. 276 pp, 日

本測量協会, 東京.

露木 聡 (1994) 森林資源調査における GPS 利用の可能性—ディ
ファレンシャル GPS 測位精度の比較—. 森林計画誌 23: 45-58.

露木 聡・増田義昭・小谷英司・山本博一・高田功一 (1993) リ
モートセンシングによる森林資源調査における GPS の有効性
—単独測位結果を使ったトレーニングエリアの抽出—. 日林論
104: 271-274.

(2000年8月1日受付, 2001年3月9日受理)