

Title: 森林内におけるマッピング用およびコンシューマ用GNSS受信機の測位精度

Positioning accuracy of mapping- and consumer-grade global navigation
satellite system (GNSS) receivers in a forest environment

Author: 遠國正樹・尾張敏章・平田雅和・鈴木祐紀・高橋功一・笠原久臣・芝野博文

Masaki TOKUNI, Toshiaki OWARI, Masakazu HIRATA, Masanori SUZUKI,
Koichi TAKAHASHI, Hisatomi KASAHARA, Hirofumi SHIBANO,

Additional information(追加情報) :

この論文は以下のように出版されましたが、その後、以下のように修正した点があります。

東京大学農学部演習林報告 134 号、2016 年 2 月、29-40 頁

書誌情報の修正

修正 1 29 頁 誤：東京大学農学部演習林報告，134，29-40（2015）

正：東京大学農学部演習林報告，134，29-40（2016）

修正 2 31、33、35、37、39 頁

誤 : Bull. Univ. of Tokyo For, 134, 29-40(2015)

正 : Bull. Univ. of Tokyo For, 134, 29-40(2016)

森林内におけるマッピング用および コンシューマ用 GNSS 受信機の測位精度

遠國正樹^{*1}・尾張敏章^{*1}・平田雅和^{*2}・鈴木祐紀^{*3}・高橋功一^{*4}・
笠原久臣^{*1}・芝野博文^{*2}

Positioning accuracy of mapping- and consumer-grade global navigation satellite system (GNSS) receivers in a forest environment

Masaki TOKUNI^{*1}, Toshiaki OWARI^{*1}, Masakazu HIRATA^{*2}, Masanori SUZUKI^{*3},
Koichi TAKAHASHI^{*4}, Hisatomi KASAHARA^{*1}, Hirofumi SHIBANO^{*2}

はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System: 全地球航法衛星システム) とは、人工衛星からの信号を受信して地球上の位置を測位する技術のうち、全世界で利用が可能なシステムを指す (露木, 2014)。米国の GPS のほか、ロシアの GLONASS, 中国の北斗 (BeiDou), EU の Galileo などがある。複数の GNSS を併用することによって、これまで GPS 衛星の捕捉が難しかった北向き斜面や谷部、林冠が閉鎖した森林内での衛星受信数の増加と測位精度の向上が期待されている (露木, 2014; 吉村, 2011)。

現在森林内で使われている GNSS 受信機は、その価格帯と測位精度により、測量用 (survey-grade), マッピング用 (mapping-grade), コンシューマ用 (consumer-grade) の3つに区分される (WING, 2008)。このうち、マッピング用 GNSS 受信機は、価格が 1,000~12,000 米ドル (12~140 万円) で、条件が良ければ誤差 1 m 以内の測位もでき、森林内を移動しながら調査するのに適した仕様 (寸法, 重量, 防水性, 耐衝撃性など) を持つ。一方、コンシューマ用 GNSS 受信機は、マッピング用に比べて測位精度はやや劣るものの、価格が 1,000 米ドル (12 万円) 以下と手頃であり、野外レクリエーション用としても広く普及している。

森林内における GNSS 受信機の測位精度に関して、北米など国外では近年においても、マッピング用 (EDSON and WING, 2012; FRANK and WING, 2013; 2014; WING and FRANK, 2011), コンシューマ用 (ABDI *et al.*, 2012; BETTINGER and FEI, 2010; BETTINGER and MERY, 2012; UCAR *et al.*, 2014; UNGER *et al.*, 2013; WING, 2011) とともに多くの事例研究がある。一方、国内において 2010 年以降に報告された GNSS 測位精度の評価事例は、著者ら (OWARI *et al.*, 2011; 遠國ら, 2013; 2014) のほか、

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林

The University of Tokyo Hokkaido Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*2 元東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林

The former University of Tokyo Hokkaido Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*3 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林千葉演習林

The University of Tokyo Chiba Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*4 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所

Ecophysiology Research Institute, The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

KITAHARA *et al.* (2010), BASTOS *et al.* (2013) など少数にとどまる。GNSS の技術は日進月歩であり、受信機の機種によって測位精度は変わってくるかもしれない。各機種の森林内における測位精度をよく理解したうえで、実際の森林計画・管理に利用していく必要がある。

そこで本研究では、2013 年 4 月時点で最新式のマッピング用 GNSS 受信機とコンシューマ用 GNSS 受信機各 1 機種を対象として、夏季と冬季の森林内において測位試験を行った。各受信機による測位成果の誤差水準を明らかにするとともに、立地条件や季節、測位方法、誤差補正方法の違いが測位精度に及ぼす影響について検討した。

調査地および方法

1) 調査地の概況

調査は 2013 年の 4 月 22 日 (冬季) と 8 月 22 日 (夏季) に東京大学北海道演習林 13 林班 AB 小班で行った (43° 17' N, 142° 36' E, 標高 590~730 m)。既報 (遠國ら, 2013) で設定した 2 つの調査区 (図-1) を用いて、立地条件 (地形および上空の林冠状態) が測位精度に及ぼす影響を検討した。平坦・開放区は傾斜度 5° 未満の平坦地であって上空が疎開しており、測位条件は良好である。傾斜・閉鎖区は傾斜度 30° の北向き斜面に位置し、林冠 (常緑針葉樹または落葉広葉樹) が閉鎖しており、GNSS 測位には厳しい条件である。各調査区には測点を 10 点ずつ設けた。測点間の間隔は 20~77 m, 全長はいずれも約 400 m である (遠國ら, 2013)。

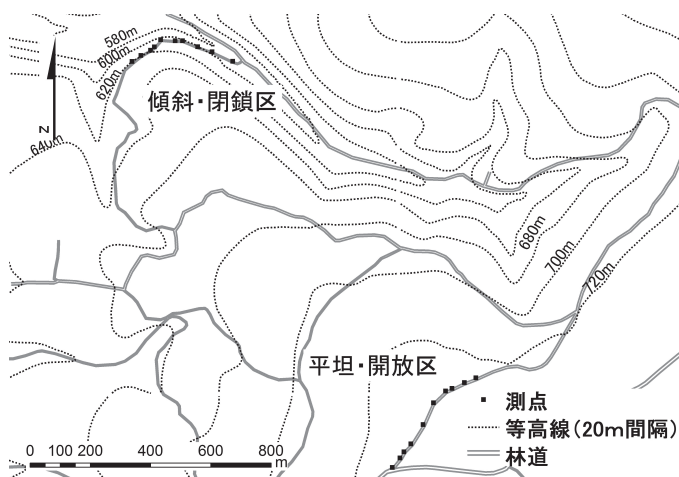


図-1 調査地における測点の位置

Fig.1. Location of measurement points in the study site.

夏季は両調査区で測位試験を行った。冬季は積雪により調査区間の移動をとまう試験実施が困難だったため、傾斜・閉鎖区のみを対象とした。各測点で撮影した全天写真、および全天写真解析プログラム CanopOn 2 (竹中, 2009) を用いて算出した測点上の林冠開空率を図-2 に示す。夏季における林冠開空率は、平坦・開放区 (平均: 38.4%) が傾斜・閉鎖区 (8.3%) に比べて有意に大きかった ($p < 0.001$, マン・ホイットニーの U 検定)。また、傾斜・閉鎖区における林冠開空率は、冬季 (26.0%) が夏季よりも有意に大きかった ($p < 0.001$)。

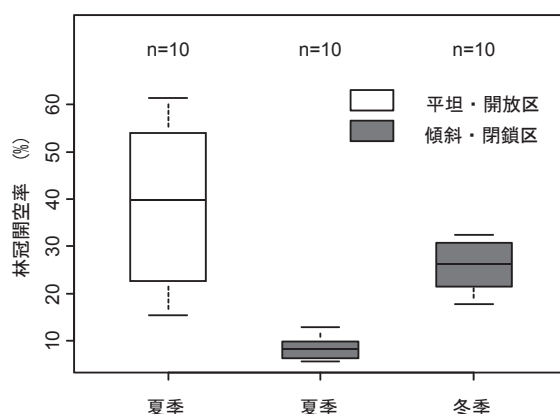


図-2 立地条件および季節別の林冠開空率

Fig.2. Canopy openness above measurement points by site condition and season.

2) 調査方法

本調査に用いたマッピング用 GNSS 受信機は Trimble 社の Pro シリーズ 6H (P 機)、コンシューマ用 GNSS 受信機は Garmin 社の GPSMAP 62SCJ (C 機) である。P 機はデータコレクタに Unitech 社の PA690 を、ソフトウェアに Trimble 社の TerraSync を使用した。両機種の主な仕様を表-1 に示す。いずれも GPS 衛星の受信と MSAS (運輸多目的衛星用航法補強システム) による測位誤差のリアルタイム補正が行える。P 機は GLONASS 衛星の受信、およびコード波によるディファレンシャル (コード DGNSS) または搬送波 (フロート解) による後処理補正 (搬送波フロート) も可能である。さらに、Trimble Floodlight (衛星影域低減処理技術) が搭載されており、衛星の可用性と測位精度の向上が図られている。C 機は日本が運用する QZSS (準天頂衛星システム) の衛星受信が可能である。

表-1 本調査に用いた GNSS 受信機の主な仕様

Table 1. Specification of GNSS receivers used in this study.

項目	マッピング用 (P 機)	民生用 (C 機)
メーカー	Trimble	Garmin
機種	Pro シリーズ 6H	GPSMAP 62SCJ
寸法 (cm)	13.8 x 20.4	6.0 x 15.5 x 3.6
重量 (g)	1040	216
受信可能衛星		
GPS	○	○
GLONASS	○	×
QZSS	×	○
誤差補正機能		
リアルタイム (MSAS)	○	○
後処理 (コード波または搬送波)	○	×

測位試験は P 機 2 台と C 機 1 台を用いて行った。P 機は受信機の GNSS 設定を「スマート設定」(利用可能な全ての GNSS 衛星情報を使用し、測位精度ができる限り高くなるように使用する衛星の組み合わせを自動的に決定する設定)とした。Trimble Floodlight は MSAS によるリアルタイム補正ができない場合にのみ有効となるように設定した。また、後処理補正には GLONASS にも対応している 2 つの電子基準点(富良野、南富良野)の観測データを使用し、GNSS データ後処理ソフトウェアの GPS Pathfinder Office ver. 5.40 (Trimble 社)を用いた。

調査当日は、調査対象とした全ての測点で 3 回(夏季)または 4 回(冬季)繰り返して測位を行った。各測点での測位時間は、P 機において測位時間が測位精度に及ぼす影響を調べるため、1 台(P1 機)を 30 秒/点とし、もう 1 台(P2 機)を 15 秒/点とした。C 機の測位時間は 30 秒/点とした。測位データは 1 秒間隔で取得し、各受信機の機能により平均化処理を行った。C 機の GNSS 衛星受信数は、測位終了時点で受信機の画面に表示された衛星数を記録した。なお、全ての受信機で受信条件がほぼ同一となるように、測点杭の真上に測量用ポールを鉛直に立て、その先端部(地上高 1.8 m)に受信機(アンテナ)を固定して測位した。

3) 分析方法

測位精度の評価は、各測点での測位誤差を算出し、測位条件ごとの平均誤差を比較することで行った。測位誤差の計算式は以下のとおりである(及川ら, 2008)。

$$d = \sqrt{(X_{true} - X)^2 + (Y_{true} - Y)^2}$$

d : 測位誤差 (m)

X, Y : GNSS 受信機による X, Y 座標

X_{true}, Y_{true} : 真値の X, Y 座標

各測点の真値座標は、高精度 GNSS 受信機の ProMark100 (Ashtech 社)を用いたスタティック測量により決定した(遠國ら, 2013)。基線解析ソフトウェア (GNSS Solution) により算出された測位誤差の推定値は、平均 2.1 cm (最小 0.0~最大 8.1 cm) であった。

測位条件の違いが測位誤差に及ぼす影響を一般化線形混合モデル (GLMM) により分析した。①立地条件または季節、②測位方法、③両因子間の交互作用、の 3 つを固定効果とし、AIC によるモデル選択を行った。いずれも時間的、空間的な疑似反復の影響を考慮して測定回と測点をランダム効果とし(久保, 2012)、応答変数(測位誤差)は正規分布に従うと仮定した。分析には統計分析ソフトウェアの R 3.2.1 (R CORE TEAM, 2014) と lmerTest, multcomp パッケージを使用した。また、P 機の測位誤差を後処理補正の前後で比較した。分析は t 検定(平均)と F 検定(分散)によって行い、MS Excel 用統計解析アドインソフトウェアのエクセル統計 2012 (社会情報サービス社)を使用した。

結果

1) 衛星受信数とMSAS補正成功率

本調査における全ての測位 ($n = 300$) で衛星信号の受信および位置座標の取得を行うことができた。立地条件別, 季節別, 測位方法別の衛星受信数と MSAS 補正成功率を表-2 に示す。GPS 衛星の受信数は, 夏季においては平坦・開放区でいずれの測位方法とも平均 8 個以上と多く, 傾斜・閉鎖区ではそれよりも 1~2 個減少した。冬季の傾斜・閉鎖区では受信数がさらに減って平均 5~7 個であった。P 機における GLONASS 衛星の受信数は平均 5 個程度であり, 立地条件や季節による受信数の差は小さかった。また, C 機の QZSS 衛星受信率は平坦・開放区で約 9 割と多く, 傾斜・閉鎖区では季節によらずほぼ 5 割であった。MSAS による補正成功率は, 平坦・開放区ではいずれの測位方法とも 100% であったが, 傾斜・閉鎖区では夏季, 冬季とも全体の半数以下にとどまった。なお, P1 機と P2 機はいずれも全ての測位で後処理補正を行うことができた。各々の補正方法別比率は, 搬送波が全測位の 49% と 38%, コード DGNSS が 51% と 62% であった。

表-2 立地条件, 季節, 測位方法別の GPS, GLONASS 衛星受信数 (平均個数) と QZSS 衛星受信率 (%), MSAS 補正成功率 (%)

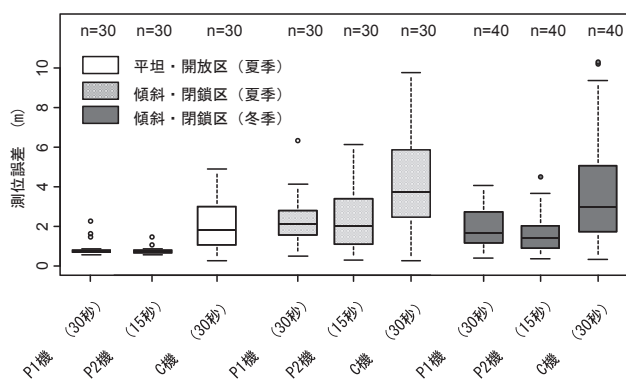
Table 2. GPS, GLONASS and QZSS satellite signal reception and MSAS correction rate by site condition, season, and receiver setting.

測位方法	測位時間	夏季								冬季			
		平坦・開放区				傾斜・閉鎖区				傾斜・閉鎖区			
		GPS	GLONASS	QZSS	MSAS	GPS	GLONASS	QZSS	MSAS	GPS	GLONASS	QZSS	MSAS
P1 機	30 秒	8.4 (1.3)	5.3 (1.2)	-	100.0	6.6 (0.8)	4.6 (0.9)	-	6.7	5.2 (0.8)	5.3 (0.8)	-	40.0
P2 機	15 秒	8.3 (1.7)	5.1 (1.0)	-	100.0	6.1 (1.0)	4.5 (0.8)	-	20.0	5.1 (0.7)	5.1 (0.7)	-	17.5
C 機	30 秒	9.9 (0.2)	-	86.7	100.0	8.6 (1.1)	-	50.0	46.7	7.3 (1.0)	-	45.0	0.0

注) 括弧内の数値は衛星受信数の標準偏差を表す。

2) 立地条件と季節, 測位方法による測位精度の比較

測位誤差を立地条件別, 季節別, 測位方法別に示したのが図-3 である。夏季における立地条件間の比較では, いずれの測位方法においても傾斜・閉鎖区の方が平坦・開放区よりも測位誤差は大きくなる傾向にあった。測位方法別では, P1 機と P2 機の測位誤差 (後処理補正後) はどちらも C 機に比べて小さく, 平坦・開放区では全体の 92% (55/60) で誤差 1 m 未満であった。傾斜・閉鎖区では精度が低下したものの, 77% (46/60) の測位が誤差 3 m 以内に収まった。C 機では, 平坦・開放区における最大測位誤差が 4.9 m であったのに対して, 傾斜・閉鎖区では誤差 9~10 m の測点もあり, 測位成果の信頼性が低下した。



図－3 立地条件、季節および測位方法別の測位誤差

Fig.3. Positioning errors by site condition, season and receiver setting.

立地条件と測位方法、両因子間の交互作用を固定効果として、夏季における測位誤差をGLMMにより推定した結果を表－3に示す。AICが最小のモデルとして、立地条件と測位方法の2因子が選択され、両因子間の交互作用は選ばれなかった。平坦・開放区におけるC機の測位誤差(切片の推定値)は約2.4 mと推定された。立地条件による測位誤差の比較では、平坦・開放区と傾斜・閉鎖区との間に有意な差が認められ($p < 0.001$)、後者におけるC機の測位誤差は約4.0 m (+1.7 m)と推定された。測位方法別では、P1機とP2機の測位誤差がC機に比べて小さくなり、平坦・開放区においてはいずれも約0.7 m (−1.6 m, −1.7 m)と推定された。測位方法間で多重比較を行った結果、P1機とP2機の測位誤差の推定値は、どちらもC機に比べて有意に小さかった(Tukey法, $p < 0.001$)。一方、P1機とP2機との間には有意な差が認められなかった($p = 0.99$)。

傾斜・閉鎖区における季節間の比較では、夏季と冬季との間に顕著な違いは認められなかった(図－3)。P1機とP2機は冬季においてもC機に比べて高精度であり、85% (68/80)の測位が誤

表－3 立地条件と測位方法が夏季の測位誤差に及ぼす影響のGLMM分析結果

Table 3. Results of an analysis for the effects of site condition and receiver setting on positioning error in summer using a generalized linear mixed model.

因子	水準	推定値	標準誤差	t値	p値
(切片)		2.3733	0.2238	10.606	<0.001
立地条件	平坦・開放区	－	－	－	－
	傾斜・閉鎖区	1.6700	0.2549	6.553	<0.001
測位方法	C機	－	－	－	－
	P1機	−1.6445	0.2298	−7.157	<0.001
	P2機	−1.6718	0.2298	−7.276	<0.001

注) $n = 180$, $AIC = 619.8$ 。各推定値は平坦・開放区のC機に対する値を示す。AICによるモデル選択の結果、両因子間の交互作用は選択されなかった。

差 3 m 未満であった。C 機の測位精度は冬季でも夏季とほぼ同様の傾向を示したが、冬季には最大測位誤差が 20 m 以上の測点もあり、測位成果の信頼性は夏季に比べて低下した。

季節と測位方法、両因子間の交互作用を固定効果として、傾斜・閉鎖区における測位誤差を GLMM により推定した結果を表-4 に示す。AIC が最小のモデルとして測位方法のみが選択され、季節および交互作用は選ばれなかった。C 機の測位誤差（切片の推定値）は季節によらず約 4.6 m と推定された。一方、P1 機と P2 機の測位誤差は、いずれも C 機に比べて有意に小さく（ $p < 0.001$ ）、約 1.9~2.1 m（-2.7~-2.5 m）であった。P1 機と P2 機との間に有意な差は検出されなかった（ $p = 0.89$ ）。

表-4 季節と測位方法が傾斜・閉鎖区での測位誤差に及ぼす影響の GLMM 分析結果

Table 4. Results of an analysis for the effects of season and receiver setting on positioning error at a sloping and closed-canopy site using a generalized linear mixed model.

因子	水準	推定値	標準誤差	t 値	p 値
(切片)		4.5564	0.3454	13.190	<0.001
測位方法	C 機	-	-	-	-
	P1 機	-2.4567	0.4638	-5.297	<0.001
	P2 機	-2.6703	0.4638	-5.758	<0.001

注) $n = 210$, AIC = 1034.7. 各推定値は夏季の C 機に対する値を示す。AIC によるモデル選択の結果、季節および両因子間の交互作用は選択されなかった。

3) 誤差補正方法による測位精度の比較

P1 機と P2 機について、後処理補正の前後における測位誤差（平均と標準偏差）を立地条件別、季節別に示したのが表-5 である。冬季の傾斜・閉鎖区においては、両機とも後処理補正後に平均測位誤差は有意に小さくなり（ $p < 0.001$ ）、測位誤差の分散もまた有意に減少した（ $p < 0.05$ ）。夏季の平坦・開放区では、測位誤差の分散は後処理補正後に有意に小さくなった（ $p < 0.001$ ）。一方、平均測位誤差の差は有意ではなかった。夏季の傾斜・閉鎖区においては、測位誤差の平均、分散ともに有意な差は認められなかった。なお、後処理補正後の平均測位誤差を補正方法（コード DGNS, 搬送波フロート）により比較したところ、全ての機種、立地条件、季節において有意な差は検出されなかった。

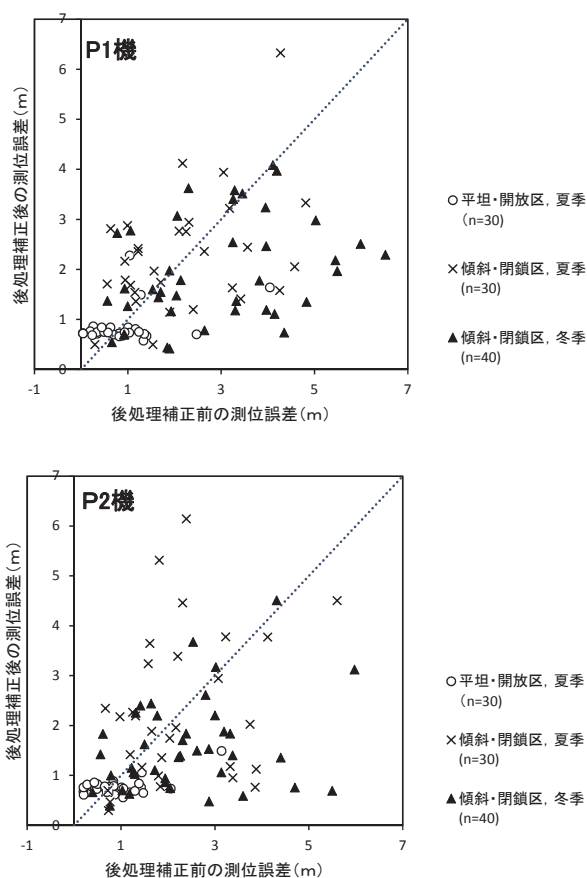
後処理補正前後の測位誤差を散布図で示したのが図-4 である。夏季の平坦・開放区においては、後処理補正後に測位誤差が小さくなった測位は、P1 機で全体の 50%（15/30）、P2 機で 53%（16/30）であった。両機とも後処理補正前の測位誤差は 0.2~1.4 m の範囲に多く分布しているのに対して、後処理補正後の測位誤差は 0.7~0.8 m の範囲に集中していた。夏季の傾斜・閉鎖区で後処理補正後に誤差が減少した測位は、P2 機が 57%（17/30）であった一方、P1 機は 33%（10/30）にとどまった。冬季の傾斜・閉鎖区においては、P1 機と P2 機のいずれも、全体の 70%（28/40）で後処理補正後に測位誤差が減少した。後処理補正前には 13~23% の測位で誤差が 4 m 以上あったのに対して、後処理補正後にはほぼ全ての測位が誤差 4 m 以内に収まった。

表－5 P1 機と P2 機における後処理補正前後の平均測位誤差 (m)

Table 5. Mean positioning errors of receiver setting P1 and P2 before/after post processing correction (m).

測位方法	測位時間	夏季				冬季	
		平坦・開放区		傾斜・閉鎖区		傾斜・閉鎖区	
		補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
P1 機	30 秒	0.92 (0.76)	0.84 (0.34)	2.17 (1.26)	2.29 (1.15)	2.90 (1.59)	1.96 (1.03)
P2 機	15 秒	0.94 (0.63)	0.77 (0.16)	2.22 (1.20)	2.30 (1.49)	2.37 (1.32)	1.58 (0.91)

注) 括弧内の数値は標準偏差を表す。



図－4 P1 機と P2 機における後処理補正前後の測位誤差の関係

Fig.4. Relationship between positioning errors before and after post processing correction for receiver setting P1 and P2.

考察

測位試験の結果から、マッピング用 GNSS 受信機である P 機の測位誤差は、北向き斜面で林冠下の厳しい測位条件であっても、季節によらず平均 2 m 程度、最大 4 m 程度（後処理補正後）であり、高い精度の位置座標を安定して得られることが示された。遠國ら（2014）は本研究と同じ調査地において、別のマッピング用 GNSS 受信機（GeoXH, Trimble 社）を対象に測位試験を行い、後処理補正後の測位誤差が平均 2 m 以内、最大 3~4 m であったと報告している。また、EDSON and WING（2012）が米国オレゴン州で行った測位試験の結果では、GeoXH と ProXH（いずれも Trimble 社）の平均測位誤差（後処理補正後）は 2.6~3.5 m の範囲にあった。機種や測位条件が異なるため一概にはいえないが、いずれの結果も測位誤差はほぼ同程度の水準にあることから、森林内においてマッピング用 GNSS 受信機に期待される測位精度を概ね表しているものと考えられる。

一方、コンシューマ用 GNSS 受信機である C 機については、北向き斜面の林冠下における測位の平均誤差が約 4 m、最大誤差は夏季が約 10 m、冬季が 20 m 以上であった。遠國ら（2014）が C 機と同じシリーズの GNSS 受信機（GPSMAP 62s, Garmin 社）を対象に行った測位試験の結果も本研究とほぼ同様であり、夏季は C 機と同程度の測位誤差（平均 4.3 m、最大約 10 m）であったが、冬季には平均 8.6 m、最大 20 m 以上と精度が低下した。また、WING（2011）は米国オレゴン州の森林内で測位試験を行い、GPSMAP 62（Garmin 社）の平均測位誤差（測位時間：60 秒/点）が 50~60 年生成熟林で 4.9 m、50~60 年生若齢林で 7.9 m であったと報告している。コンシューマ用 GNSS 受信機はマッピング用受信機に比べて、森林内における測位誤差が大きくなるとともに、測位条件によっては精度が不安定化する可能性を示唆している。

立地条件による測位精度の比較では、GNSS 受信機の種類によらず、測位誤差は傾斜・閉鎖区において平坦・開放区よりも有意に増大（+1.7 m）した（表-3）。遠國ら（2013）が本研究と同じ調査地で行った測位試験でも結果はほぼ同様であり、両区の誤差は約 1.6 m であった。これらの結果は、GNSS 受信機の測位精度が森林内においてどの程度低下するかを概ね表していると考えられる。本研究における傾斜・閉鎖区は北向き斜面に位置し、林冠開空率も低かったため、地形や樹木によって衛星信号が遮断され、測位誤差が大きくなったものと推察される（遠國ら、2013）。

季節に関しては、夏季と冬季との間で測位誤差に有意な差は認められず（表-4）、遠國ら（2014）と同じ結果となった。季節による測位精度の違いについて、夏季の方が誤差は小さいとした報告（TACHIKI *et al.*, 2005）や、冬季の方が小さいとした報告（OWARI *et al.*, 2009）もあり、統一した見解は得られていない。本研究では、冬季の落葉が精度改善のプラス要因として働いた（OWARI *et al.*, 2009）一方、冬季におけるより少ない GPS 衛星受信数がマイナス要因となり（TACHIKI *et al.*, 2005）、効果が相殺されて有意な差を検出できなかった可能性がある。なお、P 機の測位誤差は冬季でも比較的安定していたことから、GLONASS 衛星の受信によって、GPS 衛星の受信が厳しい条件下でも十分な衛星受信数の確保が可能となり、測位精度の維持に寄与したと推察される。

P 機における測位時間の比較では、30 秒/点（P1 機）と 15 秒/点（P2 機）の間に有意な差は見られなかった（表-3, 4）。FRANK and WING（2014）はマッピング用 GNSS 受信機の測位時間として 30 秒/点を推奨しているが、15 秒/点に短縮しても顕著な精度劣化は生じない可能性が示唆

される。測位時間の短縮によって、精度を維持しながら作業効率を高めることが可能と考えられる。

誤差補正方法に関しては、後処理補正後に測位誤差の平均、分散が有意に小さくなった場合と、有意な差が認められなかった場合とが混在した（表－5）。EDSON and WING（2012）もまた、後処理補正を行っても平均測位誤差は低減しない場合があったと報告している。本研究では、後処理補正後に誤差がかえって大きくなった測位も比較的多かった一方、誤差が4 m 以上となるような測位は顕著に減少した（図－4）。マッピング用 GNSS 受信機における後処理補正の実行は、個々の測位成果の精度を高める効果よりも、最大測位誤差の低減を通じて測位精度の安定性に寄与する効果の方が大きい可能性が示唆される。

おわりに

本研究により、一事例ではあるが、森林内におけるマッピング用およびコンシューマ用 GNSS 受信機の測位精度を示すことができた。森林計画・管理においては、測位成果の利用目的と許容精度に応じて、それぞれの受信機を使い分けことが大切である。なお、コンシューマ用 GNSS 受信機での測位時に平均化処理を行わず、瞬間値を記録した場合は、精度がさらに低下する可能性もあり（尾張ら, 2015）、森林内での使用にあたっては注意が必要である。

マッピング用 GNSS 受信機については、精度を維持しながら測位時間の短縮や後処理補正の省略を行える可能性も示唆された。東京大学北海道演習林では、本研究の結果を踏まえつつ、森林内における GNSS 測位の精度管理とさらなる作業効率化を進めていく予定である。また、高精度の測位をリアルタイムで行えるネットワーク型 RTK-GPS（VRS 方式）の利用可能性と森林内での測位精度についても今後明らかにしていきたいと考えている。

要旨

GNSS（全地球航法衛星システム）は、人工衛星からの信号を受信して地球上の位置を測位可能な世界的規模のシステムである。本研究では、2013 年 4 月時点で最新式のマッピング用 GNSS 受信機（Trimble Pro シリーズ 6H）とコンシューマ用 GNSS 受信機（Garmin GPSMAP 62 SCJ）を対象として、東京大学北海道演習林内で夏季と冬季に測位試験を行い、異なる条件下での測位精度を明らかにした。測位試験の結果、マッピング用 GNSS 受信機は北向き斜面の林冠下においても季節によらず高い精度で安定して測位でき、測位誤差は平均約 2 m、最大約 4 m であった。一方、コンシューマ用 GNSS 受信機の測位精度は相対的に低くかつ不安定であり、測位誤差は平均約 4 m、最大 10～20 m 以上となった。両タイプの GNSS 受信機とも、測位誤差は平坦・開放区よりも傾斜・閉鎖区で有意に増大したが、夏季と冬季との間で有意な差は認められなかった。マッピング用 GNSS 受信機については、測位時間を 15 秒 / 点に短縮しても顕著な精度劣化は生じず、また後処理補正の実行により、最大測位誤差の低減を通じて測位精度の安定性向上が図られる可能性が示唆された。

キーワード：森林測量・GNSS 受信機・測位時間・測位誤差・後処理補正

引用文献

- ABDI, E., SISAKHT, S. R., GOUSHBOR, L., SOUFI, H. (2012) Accuracy assessment of GPS and surveying technique in forest road mapping. *Ann. For. Res.* 55:309-317.
- BASTOS, A. S., HASEGAWA, H., YOSHIMURA, T. (2013) GPS accuracy in using antenna pole under tree canopies and usability of Signal Interruption Probability (SIP) for accuracy estimation. *J. Jpn. For. Eng. Soc.* 28 (3) :181-186.
- BETTINGER, P., FEI, S. (2010) One year's experience with a recreation-grade GPS receiver. *MCFNS* 2:153-160.
- BETTINGER, P., MERRY, K. (2012) Static horizontal positions determined with a consumer-grade GNSS receiver: one assessment of the number of fixes necessary. *Croat. J. For. Eng.* 33:149-157.
- EDSON, C., WING, M. G. (2012) Tree location measurement accuracy with a mapping-grade GPS receiver under forest canopy. *For. Sci.* 58:567-576.
- FRANK, J., WING, M. G. (2013) Differential GPS effectiveness in measuring area and perimeter in forested settings. *Meas. Sci. Tech.* 24:105801 (11pp) .
- FRANK, J., WING, M. G. (2014) Balancing horizontal accuracy and data collection efficiency with mapping-grade GPS receivers. *Forestry* 87:389-397.
- KITAHARA, F., MIZOUE, N., KAJISA, T., MURAKAMI, T., YOSHIDA, S. (2010) Positional accuracy of National Forest Inventory plots in Japan, *J. For. Plann.* 15:73-79.
- 久保拓也 (2012) データ解析のための統計モデリング入門 . 267 pp., 岩波書店, 東京 .
- 及川希・笠原久臣・尾張敏章 (2008) 東京大学北海道演習林における GPS 測位精度の評価 . *日林北支論* 56:107-109.
- 尾張敏章・江口由典・宅間隆二・岡村行治・福岡哲・木村徳志・辰巳晋一 (2015) 択伐天然林の更新を補助するための精密植栽技術の開発 (予報) . *北森研* 63: 81-84.
- OWARI, T., KASAHARA, H., OIKAWA, N., FUKUOKA, S. (2009) Seasonal variation of global positioning system (GPS) accuracy within the Tokyo University Forest in Hokkaido. *Bull. Tokyo Univ. For.*, 120:19-28.
- OWARI, T., KIMURA, N., SHIMIZUME, M., TAKUMA, R., NAKAGAWA, Y., TOOKUNI, M. (2011) Using Global Positioning System (GPS) technology for tree marking in a natural forest under a single-tree selection system. *FORMATH* 10:105-121.
- R CORE TEAM (2014) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- 立木靖之・吉村哲彦・長谷川尚史・酒井徹朗・尾張敏章・三田友規・中村太士 (2004) 森林における歩行時の GPS 測位精度評価 . *日林誌* 86:5-11.
- TACHIKI, Y., YOSHIMURA, T., HASEGAWA, H., MITA, T., SAKAI, T., NAKAMURA, F. (2005) GPS positioning accuracy while walking under forest canopy in summer and winter seasons. *J. Jpn. For. Eng. Soc.* 20:23-28.
- 竹中明夫 (2009) CanopOn2. <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/> (アクセス日: 2014 年 12 月 14 日)
- 遠國正樹・平田雅和・鈴木祐紀・高橋功一・尾張敏章 (2013) 森林内におけるハンディGNSS 受信機の測位精度. *北森研* 61:117-120.
- 遠國正樹・尾張敏章・平田雅和・鈴木祐紀・高橋功一・笠原久臣・芝野博文 (2014) 森林内におけるハンディGNSS 受信機の測位精度－冬季と夏季の比較－. *北森研* 62:29-31.
- 露木聡 (2014) GNSS. (森林リモートセンシング第4版－基礎から応用まで－. 加藤正人編, 日本林業調査会, 東京) . 84-97.
- UCAR, Z., BETTINGER, P., WEAVER, S., MERRY, K. L., FAW, K. (2014) Dynamic accuracy of recreation-grade GPS receivers in oak-hickory forests. *Forestry* 87:504-511.
- UNGER, D. R., HUNG, I. K., ZHANG, Y., PARKER, J., KULHAVY, D. L., COBLE, D. W. (2013) Accuracy assessment of perimeter and area calculations using consumer-grade Global Positioning System (GPS) units in Southern forests, *South. J. Appl. For.* 37:208-215.
- WING, M. G. (2008) Keeping pace with global positioning system technology in the forest. *J. For.* 106:332-338.
- WING, M. G. (2011) Consumer-grade GPS receiver measurement accuracy in varying forest conditions. *Res. J. For.* 5:78-88.
- WING, M. G., FRANK, J. (2011) Vertical measurement accuracy and reliability of mapping-grade GPS receivers. *Comput. Electron. Agric.* 78:188-194.

吉村哲彦 (2011) 林業 GPS の現状と発展の方向 . (続・林業 GPS 徹底活用術 応用編 . 全国林業改良普及協会編 , 全国林業改良普及協会 , 東京) . 122-130.

(2014 年 12 月 26 日受付)

(2015 年 7 月 15 日受理)

Summary

Global navigation satellite system (GNSS) is a worldwide system that enables pinpointing geographic locations anywhere using satellite signals. In this study, field tests with two GNSS receivers, the mapping grade Trimble Pro series 6H and the consumer-grade Garmin GPSMAP 62 SCJ, both of which were the latest models as of April 2013, were conducted at the University of Tokyo Hokkaido Forest in summer and winter in order to examine the positioning accuracy under different survey conditions. The mapping-grade GNSS receiver exhibited high and stable positioning accuracy regardless of the season even under the forest canopy of a north-facing slope, having mean and maximum positioning errors of around 2 m and 4 m, respectively. The positioning accuracy of the consumer-grade GNSS receiver was relatively low and unstable (approximately 4 m error on average and more than 10-20 m at maximum) . The positioning errors on a sloping and canopy-closed site were significantly greater than those on a flat and open site, while no significant difference was observed between summer and winter. For the mapping-grade GNSS receiver, the effect of shortening observation time to 15 sec. on positioning accuracy was not obvious, and implementing post-processing data correction probably increases the stability of positioning accuracy through the reduction of the maximum positioning error.

Keywords: Forest survey, GNSS receiver, Observation time, Positioning error, Post-processing correction