

### 3 高精度 GNSS による測位精度の検証

#### 3.1 開放地における測位精度

東京東北部三等三角点（二ノ橋）において、2周波GNSS（DG-PRO1RWS）、CLAS対応GNSS（QZR-SP）による計測を行い、三角点の基準点成果と比較し、上空が開けた解放地における測位精度を検証した。その結果、三角点からの水平誤差は2周波受信機で63cm、CLAS受信機で4cmであり（表3.1.1、図3.1.1）、上空が開けた場所であれば、それぞれセンチメートル級、サブメートル級の測位精度を得られることが確認された。なお、各測位方式で5分間連続計測による測位座標の「揺らぎ」を見ると（図3.1.2）、CLAS受信機の変動範囲が狭く、安定して正確度が高いことがわかる。



測位精度検証地点（江東区二ノ橋）

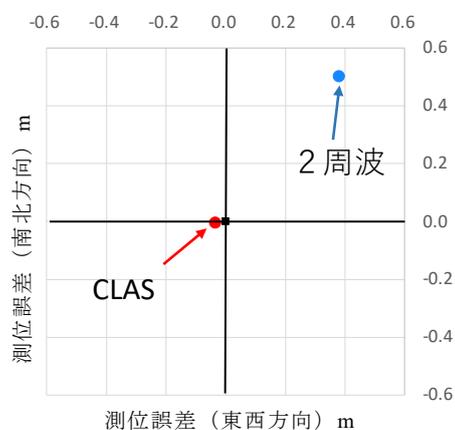


図 3.1.1 開放地での測位精度の検証  
約 10 秒間の平均測位誤差を示す。  
三角点位置を座標 (0, 0) とした。

表 3.1.1 機種別の測位誤差

機 種	東西方向 (m)	南北方向 (m)	水平距離 (m)
2周波 GNSS	0.379	0.501	0.63
CLAS 対応 GNSS	-0.036	-0.006	0.04

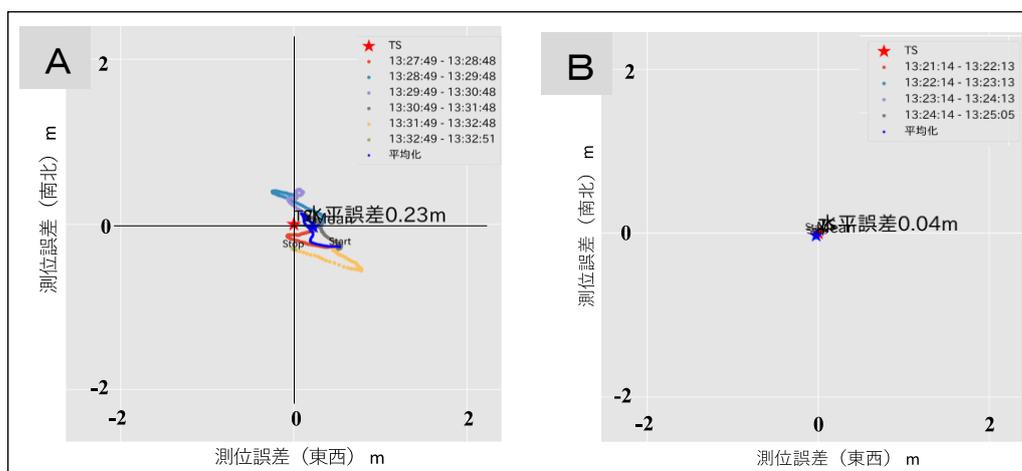


図 3.1.2 検証地点（三角点）における測位座標の軌跡

三角点を原点とし、5分間連続計測した1分経過後の測位座標の「揺らぎ」を示す。

A : 2周波 GNSS      B : CLAS 対応 GNSS

## 3.2 森林調査における測位精度

森林における GNSS 計測の測位精度を検証するため、特定の測点で得られる測位座標の安定性（経時的な変化）を確認するとともに、既知の測位座標（真値）に対する誤差の大きさを確認する必要がある。そのため、森林内における測位精度の評価として、以下の計測方法で精度検証を行った。

- 1) 主要測点における計測座標の水平誤差の経時変化（5 分間）の分析  
連続計測して得られるデータ（GNSS 受信機から測位結果として出力されるデータ）を分析して経時的な水平誤差の変動を分析する。検証区域Iの主要測点で、5 分間の連続計測で得られる測位座標から水平誤差を算出・分析した。
- 2) 全測点における計測座標（約 10 秒間の 10 回計測平均座標）の水平誤差の分析
  - ① 単独測位・SBAS・CLAS
  - ② ネットワーク型 RTK
  - ③ 無線 RTK
- 3) 主要測点においてPPK（後処理キネマティック）処理した座標の水平誤差の分析  
約 15 分間のデータを後処理ソフトを用いて解析した。

### 3.2.1 測位座標および水平誤差の経時的安定性

測位座標は、衛星信号の受信状況や衛星配置等によって時々刻々変化する。また測点の地形や林況の影響も受けると考えられる。そのため、森林で GNSS 測量を行う際は、測点に立った後しばらく間をおいて、衛星からの受信状況が安定してから測位を行うことが推奨されている。實際上、どの程度の待機時間が必要であるか実情を把握し、GNSS 測位座標の安定性を理解しておく必要がある。

そこで、測位座標の変動状況を把握するため、検証区域I（114 林班）の 34 測点のうち、谷底や尾根など、特徴的な微地形の 5 測点（表 3.2.1、図 3.2.1）を対象に、5 分間の連続計測を行い、水平誤差（トータルステーションの測量座標を真値とする）の変動を分析した。

表 3.2.1 連続計測を実施した検証区域 I の 5 測点

測点番号	位置
BP	緩斜面下部
13	主谷底部
19	尾根北
22	中腹南
43	緩斜面南

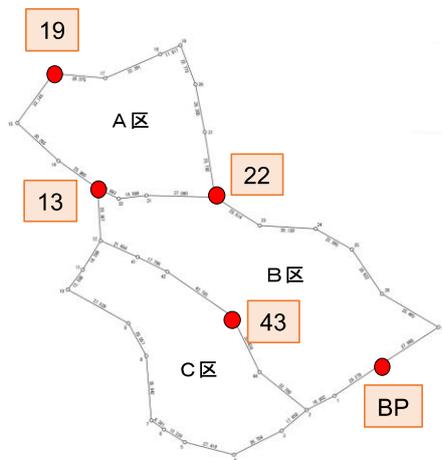


図 3.2.1 連続計測のために設定した 5 測点  
検証区域 I の 5 測点（BP, 13, 19, 22, 43）で  
5 分間連続計測を実施した。

2周波GNSS(DG-PRO1RWS)とCLAS対応GNSS(QZR-SP)で連続計測して得られた平均座標の水平誤差について、約5分間の経時変化を図3.2.2～図3.2.3に示した。

2周波GNSS(緑)、CLAS対応GNSS(紫)とも計測開始から約1分間は安定しない傾向が見られた。

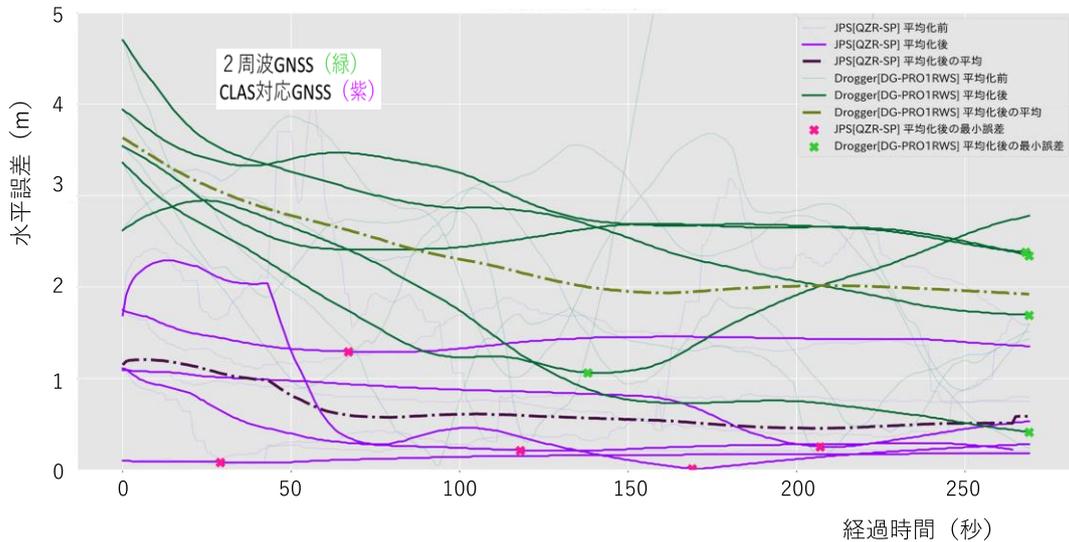


図 3.2.2 水平誤差の時系列変化

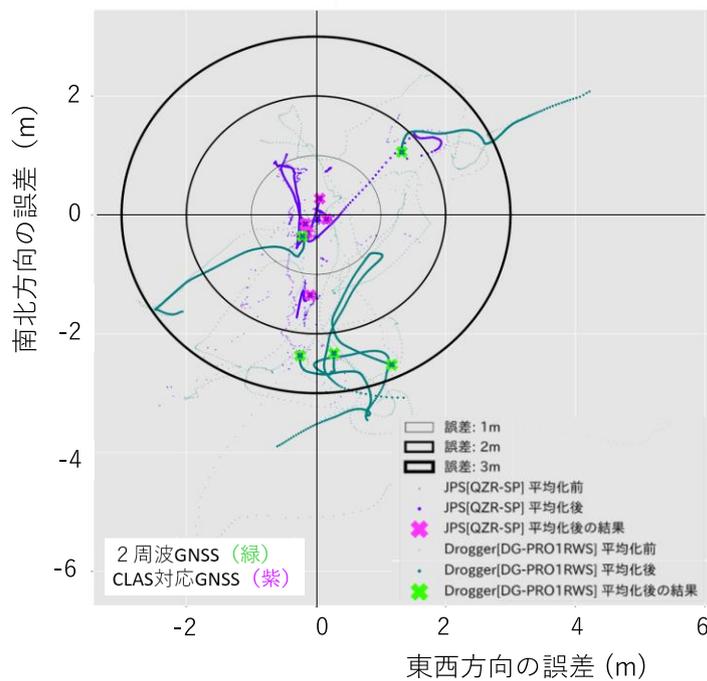


図 3.2.3 水平誤差の軌跡

5測点 (BP, 13, 19, 22, 43) の各測点において、水平誤差の経時変化ならびに真値を中心とする測位座標の軌跡を得ており、その結果を巻末資料(3)に掲載した。

主要5測点において、5分間連続計測データから、1分経過後以降のデータの平均座標とトータルステーションで計測した座標値（TS座標値：真値と仮定）の水平誤差を表3.2.2と図3.2.4に示す。

水平誤差は2周波GNSS受信機で平均1.92m(0.42m～2.78m)、CLAS対応GNSS受信機で平均0.47m(0.18m～1.35m)であり、連続計測平均座標ではCLAS対応GNSS受信機の精度が2周波GNSS受信機を上回った。

表 3.2.2 5分間連続計測による平均座標の正確度（TS座標値との水平誤差）

(単位：m)

機 種	測点 BP	測点 13	測点 19	測点 22	測点 43	平均
	主谷下部	谷底	尾根北	尾根中腹	緩斜面	
2周波 GNSS DG-PRO1	2.34	2.78	1.69	2.38	0.42	1.92
CLAS 対応 GNSS QZR-SP	0.33	0.28	0.18	1.35	0.22	0.47

注：5分間連続計測データ(NMEA)から、1分経過以降のデータの平均座標を求め、TS座標(真値)との水平誤差の平均値を算出した。

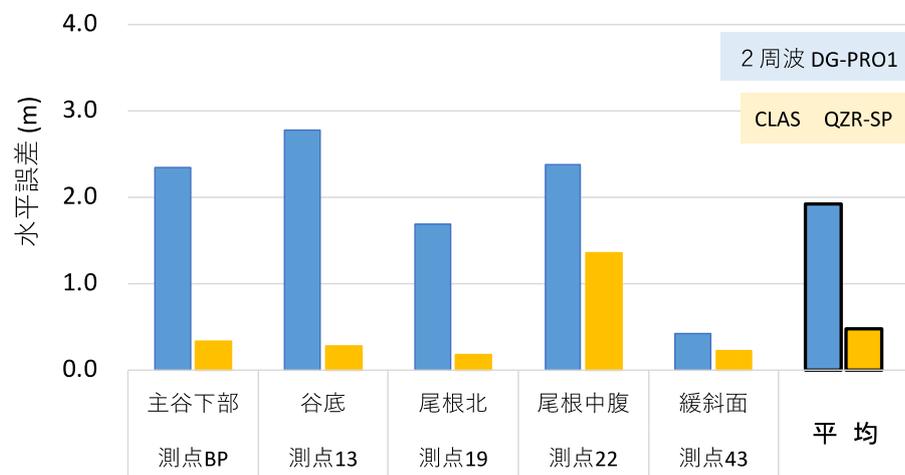


図 3.2.4 5分間連続計測による平均座標の正確度（TS座標値との水平誤差）  
表 3.2.2 を図化したものである。

### 3.2.2 全測点における計測座標の精度

114 林班の検証区域 I（34 測点）と 156 林班の検証区域 II（28 測点）において、以下の GNSS 計測方法<sup>\*</sup>（以下「通常の GNSS 計測方法」という。）計測を行い、得られた計測座標とトータルステーションによる計測座標値（TS 座標値：真値と仮定）との水平誤差を分析した。その結果は、次のとおり。

※計測方法

各測点到着後約 1 分間経過後に計測を開始し、携帯端末画面の現在地の揺れ、PDOP、2DRMS 値が小さくなったタイミングで 10 秒ほど計測し平均座標（10 回平均値）を取得した。CLAS や RTK では fix 値が得られない場合でも約 3 分を目途に平均座標（10 回平均値）を取得した。

① 単独測位・SBAS・CLAS

2 周波：検証区域 I で平均 1.82m(0.05～6.20m)、検証区域 II で平均 2.14m(0.27～6.36m)  
 CLAS 対応：検証区域 I で平均 2.03m(0.20～6.73m)、検証区域 II で平均 1.69m(0.19～6.19m)

1 周波：検証区域 I で平均 3.20m(0.11～10.59m)、検証区域 II で平均 3.93m(0.60～12.35m)

② ネットワーク型 RTK

2 周波：検証区域 I で平均 0.47m(0.01～2.90m)、検証区域 II で平均 1.42m(0.04～5.82m)

③ 無線 RTK

2 周波：検証区域 I で平均 1.31m(0.33～3.78m)、検証区域 II で平均 2.20m(0.48～4.04m)

機種別・測位方式別の全測点における計測座標の水平誤差の最小値、最大値、平均値を図 3.2.5 および表 3.2.3 に示す。

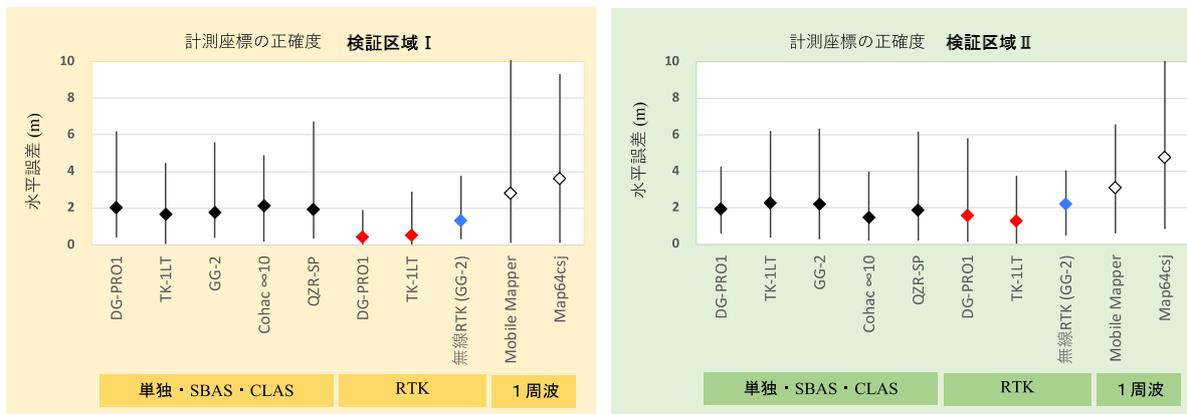


図 3.2.5 機種別の計測座標正確度（TS 座標値との水平誤差）

（線の下端が最小誤差、上端が最大誤差、◇が平均誤差である）

表 3.2.3 計測座標の正確度（TS 座標値との水平誤差）～機種別

測位方式	機種名	検証区域Ⅰ（114林班）			検証区域Ⅱ（156林班）		
		最小	最大	平均	最小	最大	平均
①単独測位・SBAS・CLAS	DG-PRO1	0.42	6.20	2.04	0.61	4.25	1.94
	TK-1LT	0.05	4.47	1.66	0.36	6.21	2.27
	GG-2	0.39	5.58	1.76	0.27	6.36	2.21
	Cohac ∞10	0.20	4.91	2.12	0.19	3.99	1.49
	QZR-SP	0.35	6.73	1.94	0.22	6.19	1.88
②ネットワーク型RTK	DG-PRO1	0.01	1.92	0.41	0.14	5.82	1.56
	TK-1LT	0.01	2.90	0.52	0.04	3.75	1.28
③無線RTK	無線RTK (GG-2)	0.33	3.78	1.31	0.48	4.04	2.20
(比較用) 1周波GNSS	Mobile Mapper	0.11	10.59	2.80	0.60	6.57	3.10
	Map64csj	0.12	9.31	3.60	0.82	12.35	4.76

次に、通常の GNSS 計測方法で得られた主要 5 測点の座標の水平誤差について、2 周波 GNSS 受信機と CLAS 対応 GNSS 受信機で比較した結果を図 3.2.6 の B に示す。

図 3.2.6 の A と B を比較するとわかるように、一定時間の連続計測の平均座標を算出することにより、CLAS 対応受信機では測位精度の向上が見られた。2 周波受信機についても同様に精度向上が認められる測点もあるが、測点によって必ずしも精度向上となっていない場合もある。本事業では、検証区域が 2 林分のみであり地域性や林況による影響が考えられるほか、GNSS 計測の季節あるいは計測時間帯などによる衛星配置も影響すると考えられる。

A：5分連続計測平均座標の水平誤差（図 3.2.4 を再掲）

B：通常の GNSS 計測方法で得られた測位座標の水平誤差

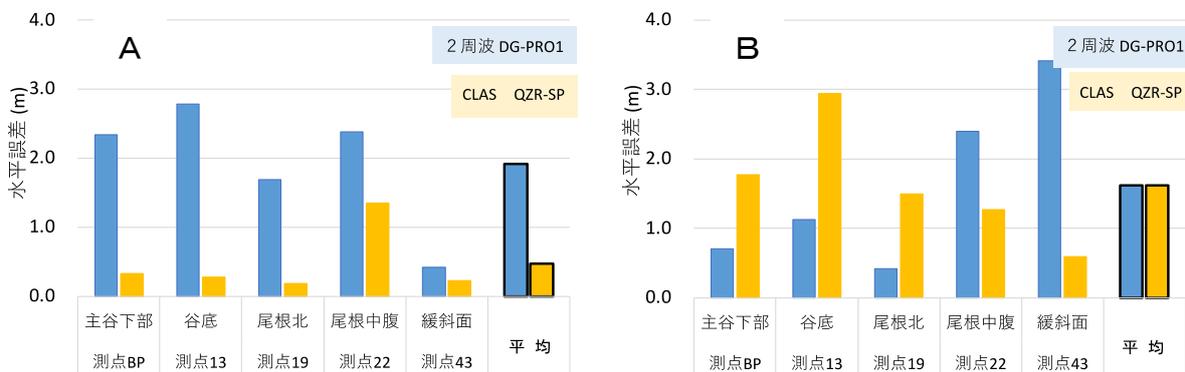


図 3.2.6 平均座標値の水平誤差

### 3.2.3 全測点の計測座標の正確度

検証区域ⅠおよびⅡでトータルステーションによる測量で得られた座標値（測位方式に応じて今期座標等に変換）を真値と仮定して、各測位方式、各受信機の測位座標と真値との水平誤差（X座標、Y座標、真値からの水平距離）を算出した。以下、(1)～(3)には、計測結果の一部の図を例示し、すべての図については巻末資料（4）に掲載した。

#### (1) 単独測位・SBAS・CLAS

##### 【計測方法】

測点到着後1分ほど経過してから計測を開始、座標の揺れや指標値を確認しつつ計測（10回平均値を採用）した（通常の計測方法）。

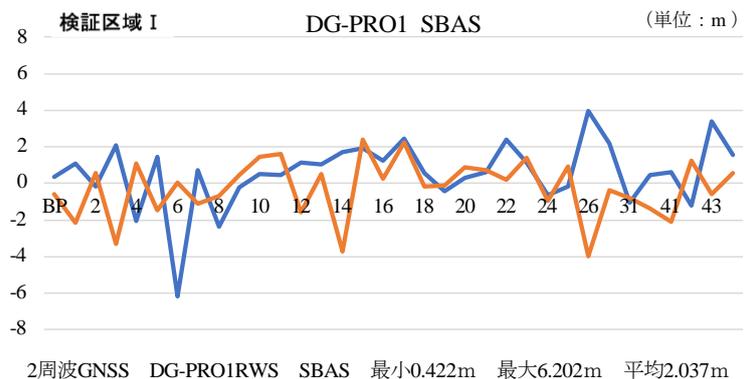


図 3.2.7 DG-PRO1 SBAS

横軸は測点番号、— X座標、— Y座標

#### (2) ネットワーク型 RTK

##### 【計測方法】

ネットワーク型 RTK は、携帯電話会社の高精度位置情報サービスによる電子基準点データ（元期座標）からの補正情報をインターネットを通じて利用しながら測位を実施した。測点到着後1分ほど経過してから計測を開始、座標の揺れや指標値等を確認しつつ計測（10回平均値を採用）した。

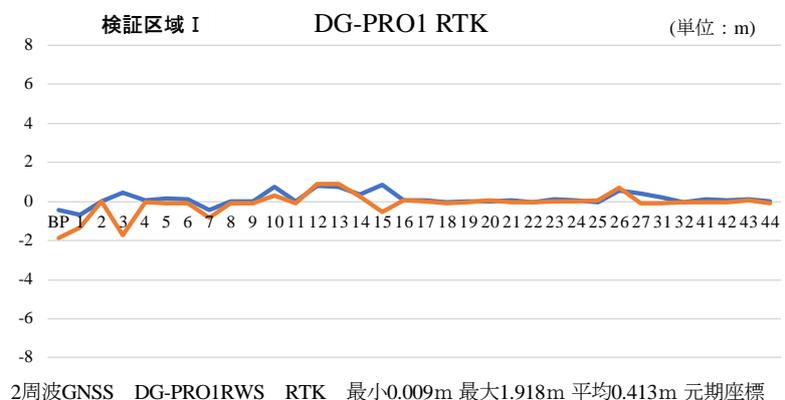


図 3.2.8 DG-PRO1 RTK

横軸は測点番号、— X座標、— Y座標

### (3) 無線 RTK

#### 【計測方法】

無線 RTK は、現地の比較的開空度の高い道沿い等に基準局として GG-2 (1 台) を置き、単独測位・SBAS で計測した今期座標を基準座標とした。移動局は無線で基準局と通信して RTK 測位ができることを確認した。

基準局設置から約 3 分後に、移動局は最初の測点へ移動、測点到着後 1 分ほど経過してから計測を開始し、座標の揺れや指標値等を確認しつつ計測 (10 回平均値を採用) した。



図 3.2.9 道沿いに設置した基準局

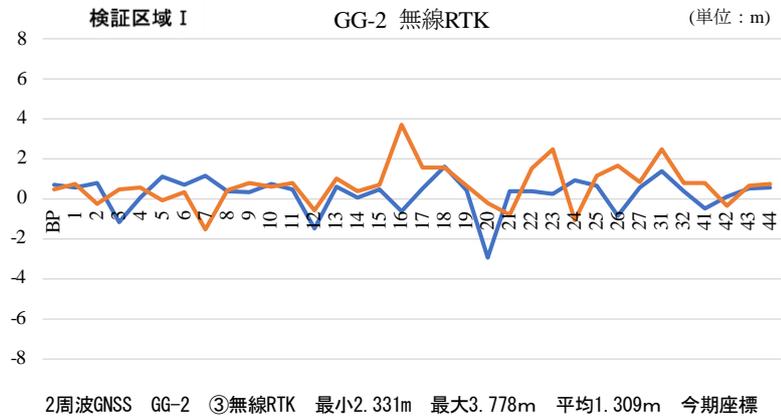


図 3.2.10 GG-2 無線 RTK  
横軸は測点番号、— X 座標、— Y 座標

次に、それぞれの検証区域における全測点のトータルステーション計測座標値を 0 とし GNSS 計測の水平誤差を XY 座標で表した図の一部を図 3.2.11 に例示し、すべての図については巻末資料 (5) に掲載した。

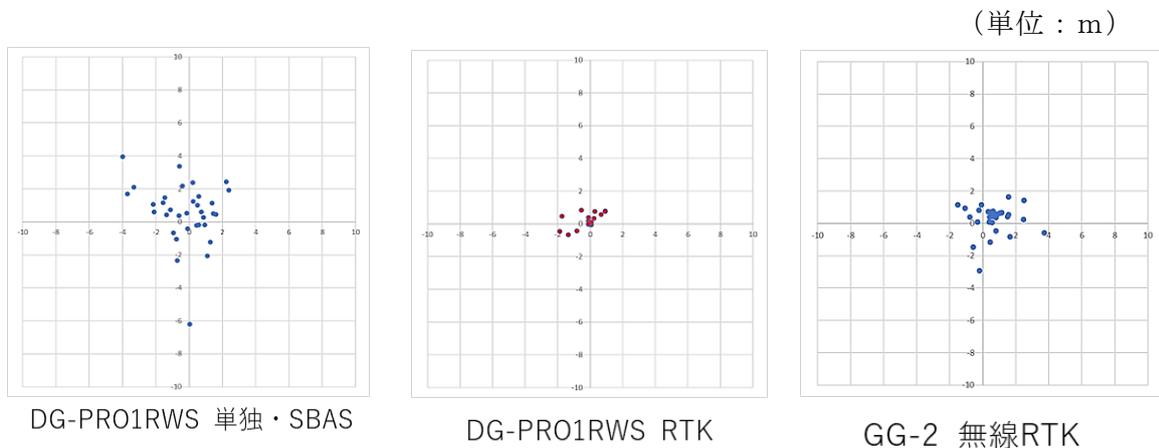


図 3.2.11 全測点における計測座標の水平誤差(検証区域 I)の例  
34 測点のトータルステーション計測座標を 0 とし、GNSS 計測座標を図示した。

### 3.2.4 後処理キネマティック（PPK）測位による水平誤差

検証区域 I に設置した基準局での連続計測（約 100 分）と並行して移動局（各測点）で主要 5 測点を 15 分計測し RAW データを取得した。電子基準点との後処理補正により現地基準局の座標を算出し現地基準局との後処理補正により移動局（各測点）の座標を取得した。

その結果、トータルステーションで計測した座標値と PPK で計測した座標値の水平誤差は平均 1.39m (0.66~3.55m)であった。

【機種：DG-PRO1RWS 解析ソフト：Drogger Processor】

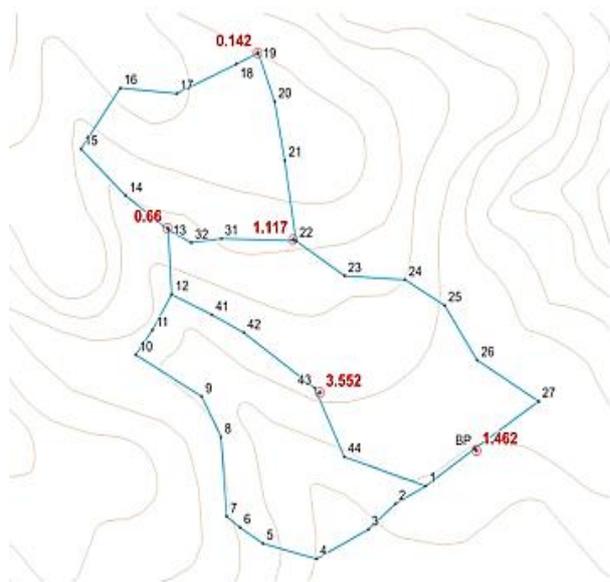


表 3.2.4 PPK で得られた座標の水平誤差

測点番号	地形	水平誤差 (m)
BP	緩斜面下部	1.462
13	主谷底部	0.660
19	尾根北	0.142
22	中腹	1.117
43	緩斜面	3.552
平均誤差		1.387

図 3.2.12 主要 5 測点の位置

## 4 森林調査における計測面積の精度検証

---

区域面積の精度評価の指標として、いわゆる「コンパス測量」では閉合誤差（閉塞公差）が用いられるが、GNSS 計測では計測される座標から区域面積が計算されるため閉合誤差が使えず、代替指標として、面積誤差（あるいは面積誤差率）を測量精度の評価として用いることができる（松岡 2018）。

そこで本事業では、**検証区域 I**（114 林班、34 測点）および**検証区域 II**（156 林班、28 測点）において、トータルステーションで計測した面積を真値と仮定して、通常の GNSS 計測（18 ページ参照）で得られた区域面積から、**面積誤差率**を比較分析して、計測精度を評価することとした。

面積誤差率の比較分析にあたっては、対象区域の面積の広さ、区域の形状、測点間隔等が、面積誤差率に影響を及ぼすことを考慮し、検証区域 I および II をそれぞれ 3 つに分割した区画の面積を算出・比較した。（図 2.4 及び図 2.9 参照）

また面積の大小や区域形状の違いが面積誤差率に及ぼす影響を、より一般化して評価するため、測点ごとの計測座標が持つ測位誤差の大きさをランダムに変化させる数値実験（モンテカルロシミュレーション）により、面積精度の評価を行った。

### 4.1 GNSS 計測による面積誤差率の評価

検証区域 I および II において、トータルステーションで計測した面積（TS 計測面積）を 100%と仮定し、機種別・測位方式別に GNSS で計測した区域面積の比率（%）を表 4.1.1 に示す。計測区域の対比図は巻末資料（6）に掲載した。

表 4.1.1 計測面積の正確度（TS 計測面積との比率）～機種別

（単位：％）

測位方式	機種名	検証区域Ⅰ（114 林班）				検証区域Ⅱ（156 林班）			
		全区 Ⅰ	A 区	B 区	C 区	全区 Ⅱ	D 区	E 区	F 区
		2.21ha	0.58ha	0.99ha	0.64ha	1.95ha	0.54ha	0.90ha	0.51ha
①単独測位・SBAS・ CLAS	DG-PRO1	99.28	98.67	100.71	97.64	100.55	101.33	99.28	101.97
	TK-1LT	98.35	96.31	100.48	96.92	101.32	102.21	99.80	102.87
	GG-2	98.04	95.69	98.38	99.63	100.34	99.80	99.94	99.23
	Cohac ∞10	97.59	96.63	97.22	99.03	100.93	100.48	100.00	103.05
	QZR-SP	100.53	99.27	100.80	98.00	99.24	100.70	99.21	97.70
②ネットワーク型 RTK	DG-PRO1	100.28	100.39	100.28	100.19	100.85	101.68	100.03	100.41
	TK-1LT	99.86	98.24	99.76	100.32	99.72	102.77	97.65	99.86
③無線 RTK	GG-2	100.13	102.41	98.90	99.97	99.31	96.81	100.22	100.35
[比較用] 1 周波 GNSS	モバイルマッパー50	98.36	96.07	100.06	97.88	100.30	96.27	101.02	102.95
	Map64csj	100.88	101.49	99.44	102.55	104.70	102.65	108.82	99.83

以下、測位方式ごとの面積誤差率を整理した。

#### 4.1.1 単独測位・SBAS・CLAS

通常の GNSS 計測方法の面積誤差は概ね 2%以内。ただし小面積や細長い区域では 3～4%になる場合（18 件のうち 3 件）があった。比較用の 1 周波 GNSS では誤差率の最大値が 4～8%になる場合があった。

（1）全区域面積 検証区域Ⅰ=2.21ha、検証区域Ⅱ=1.95ha に対する面積誤差率

2 周波： 検証区域Ⅰで 0.72～1.96%、検証区域Ⅱで 0.34～1.32%

CLAS： 検証区域Ⅰで 0.53～2.41%、検証区域Ⅱで 0.76～0.93%

1 周波： 検証区域Ⅰで 0.88～1.64%、検証区域Ⅱで 0.30～4.70%

（2）分割区面積（6 区（A 区～F 区）0.51～0.99ha）に対する面積誤差率

2 周波：計測事例 18 件の面積誤差率の平均 1.57%（0.06～4.31%）

1%未満 8 件、1%台 4 件、2%台 3 件、3%台 2 件、4%台 1 件であった。

CLAS：計測事例 12 件の面積誤差率の平均 1.50%（0.00～3.37%）

1%未満 7 件、2%台 3 件、3%台 2 件であった。

1 周波：面積誤差率の平均 2.50%（0.06～8.82%）

#### 4.1.2 ネットワーク型 RTK

面積誤差率は概ね 1 % 以内であった。ただし小面積や細長い区域では 2 % 台になる場合 (12 件のうち 2 件) があった。

#### 4.1.3 無線 RTK

面積誤差率は概ね 1 % 以内であった。ただし小面積や細長い区域では 2 ~ 3 % になる場合 (6 件のうち 2 件) があった。

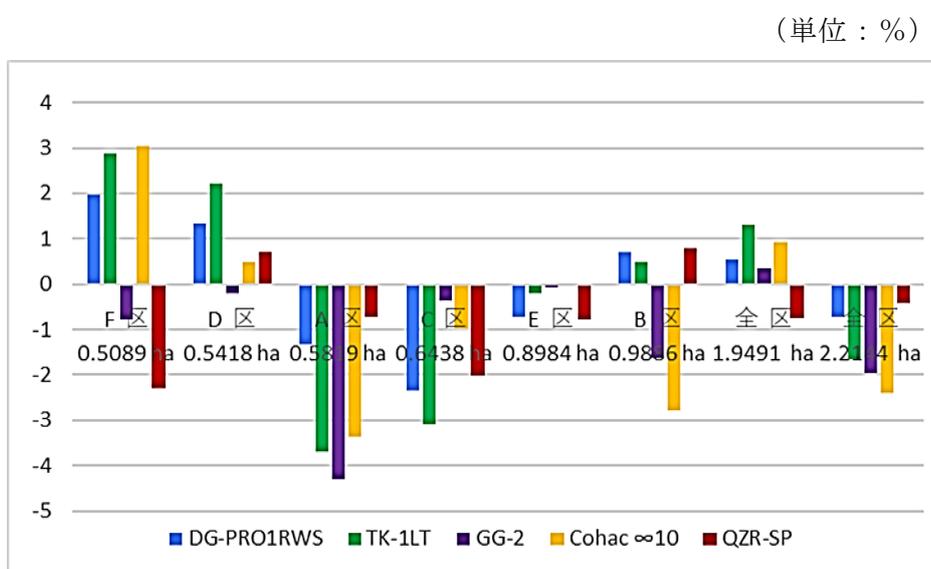


図 4.1.1 面積誤差率 (単独測位・SBAS・CLAS)

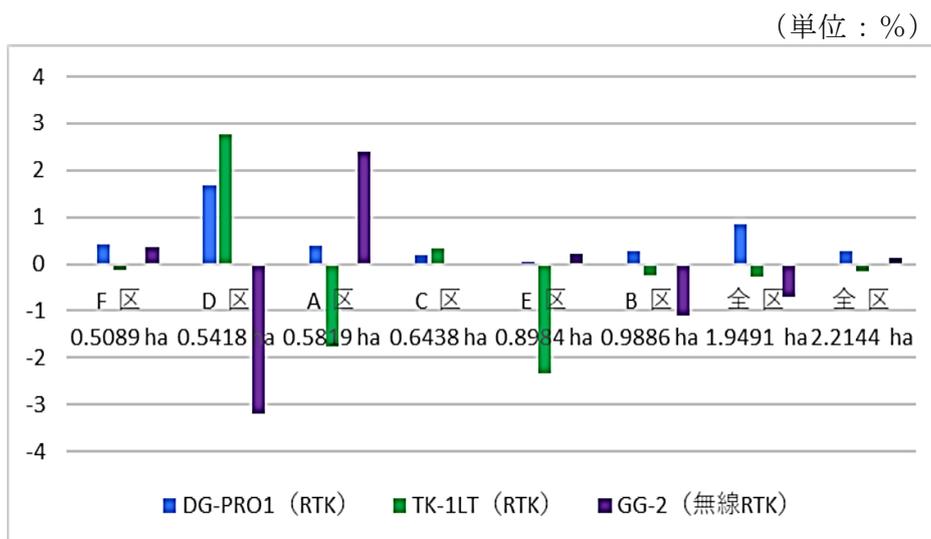
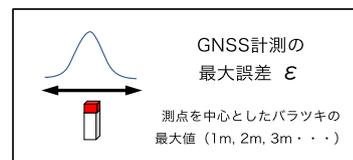


図 4.1.2 面積誤差率 (ネットワーク型 RTK、無線 RTK)

## 4.2 数値実験による GNSS 計測の面積精度評価

GNSS 計測の精度は、計測時間帯や季節による衛星配置の違い、あるいは計測地点の地形条件等によって、不規則に変化する。GNSS 受信機で同じ測点を繰り返し計測すると、計測誤差が大きい場合や小さい場合があります。そこで、こうした不規則な計測誤差がランダムに生じると仮定して、そうした測点ごとの誤差が面積計算にどのように影響するか、モンテカルロ法による数値実験を行った。

GNSS 受信機の性能や通信環境等によって計測誤差の振れ幅（最大誤差）が異なるため、最大誤差を 1m、2m、3m・・・のように変化させ、各測点における計測誤差をその範囲内でランダムに変化させる（図 4.2.1 参照）計算を 1,000 回繰り返した。



最大誤差  $\epsilon$  の範囲内で、計測値をランダム変動させる面積誤差率の数値実験  
(モンテカルロシミュレーション、反復回数1,000)

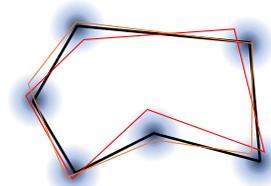


図 4.2.1 計測誤差をランダムに変化させる数値実験のイメージ

### (1) シミュレーション結果の概要

GNSS 計測の最大誤差が 1~10m へと大きくなると、図 4.2.2 に例示したように、対象区域の形状の揺らぎが大きくなり、1000 回繰り返し計算で得られる面積誤差率の出現頻度のバラツキも大きくなる。

当然のことながら GNSS 計測の最大誤差が大きいほど面積誤差率が大きくなる。言い換えると、GNSS 計測の最大計測誤差が大きくても、『運が良ければ』面積誤差が小さくなるかもしれないが、ほとんどの場合、面積誤差は大きくなるはずである。

したがって GNSS 計測の最大誤差が小さくなるように、測位方式や計測環境に十分留意して、各測点を計測する必要がある。

### (2) 区域面積が小さいほど面積誤差率は大きい

GNSS 計測による計測誤差は、各測点の計測で常に生じるものである。調査区域の面積の大小とは無関係であるので、各測点の計測誤差が同じだとすると、区域面積が小さいほど面積誤差率は大きくなる。

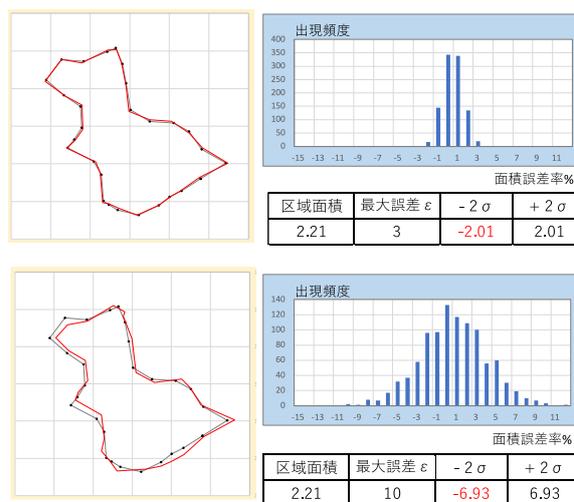


図 4.2.2 1000 回繰り返しで得られる面積誤差率の出現頻度 (例)

上段：GNSS 計測の最大誤差を 3m とした場合  
下段：GNSS 計測の最大誤差を 10m とした場合

検証区域 I（全体面積=2.21ha）を小区画に分割して、GNSS 計測の最大誤差=5m と仮定して数値実験を行った。表 4.2.1 に示すように、計測面積が小さいほど面積誤差率は明らかに大きくなる。したがって、GNSS の計測誤差が同じだとしても、計測面積が小さい場合は面積誤差が大きくなることに注意する必要がある。

表 4.2.1 計測区域面積で変化する面積誤差率

区域面積 (ha)	測点数	最大面積誤差率 (%)	最小面積誤差率 (%)	面積誤差率 (%)
2.21	28	5.16	-5.17	3.20
1.57	23	7.28	-7.55	4.75
0.99	17	9.94	-9.98	6.37
0.64	15	11.98	-10.89	8.05
0.58	12	13.05	-12.35	8.59

GNSS 計測の最大誤差を 5m と仮定して、1000 回繰返し数値実験を行った。

### (3) 対象区域の形状によって面積誤差率が変わる

調査区域の形状によって面積誤差率は変化する。対象区域の形状が細長く、帯状あるいは短冊状の区域では、面積誤差率が大きくなることに注意が必要である。また対象区域に部分的に狭い箇所がある場合も、そうした部分で同様に誤差率が大きくなる。

### (4) 設定する測点間隔による面積誤差率への影響

測点間隔を長くすれば現地作業が効率化されるという発想をしがちであるが、測点間隔を長くすると、図 4.2.3 に示すように面積誤差率は大きくなる。

この数値実験は、区域面積 4ha とした計算結果であるが、区域面積が小さければ、面積誤差率はさらに大きくなる。衛星信号の受信状況が良好でないような林地では、GNSS 計測誤差が 6m や 8m のように大きくなりがちである。区域面積が狭い、形状が細長いといった調査区域では、測点間隔を短くするような配慮が必要である。

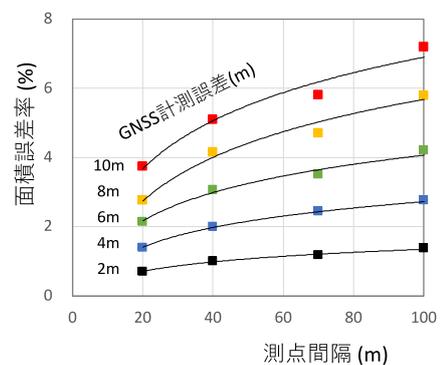


図 4.2.3 測点間隔によって変化する面積誤差率