

令和4年度  
収穫調査へのリモートセンシング技術  
の導入検証等委託事業  
報告書

令和5年3月

林野庁



# 目 次

<b>1</b>	<b>事業の背景、目的、内容</b> .....	<b>1</b>
1.1	事業の背景と目的.....	1
1.2	事業の内容.....	2
1.2.1	検討委員会の設置・運営.....	2
1.2.2	高精度 GNSS 受信機による周囲実測の精度検証.....	2
1.2.3	計測手順の整理、マニュアルの作成.....	2
1.3	実施体制と検討委員会.....	3
1.3.1	実施体制.....	3
1.3.2	検討委員会.....	3
1.4	検証条件の設定.....	5
1.4.1	検証機種を選定.....	5
1.4.2	検証する測位方式を選定.....	5
1.4.3	本事業で用いた機種と測位方式.....	6
1.4.4	検証区域設定の考え方.....	8
<b>2</b>	<b>検証区域の設定</b> .....	<b>9</b>
2.1	検証区域の概況.....	10
2.1.1	検証区域Ⅰ（中木山国有林 114 林班へ <sub>1</sub> , へ <sub>3</sub> 小班）の概況.....	10
2.1.2	検証区域Ⅱ（大平 156 林班に 1 小班）の概況.....	12
<b>3</b>	<b>高精度 GNSS による測位精度の検証</b> .....	<b>14</b>
3.1	開放地における測位精度.....	14
3.2	森林調査における測位精度.....	15
3.2.1	測位座標および水平誤差の経時的安定性.....	15
3.2.2	全測点における計測座標の精度.....	18
3.2.3	全測点の計測座標の正確度.....	20
3.2.4	後処理キネマティック（PPK）測位による水平誤差.....	22
<b>4</b>	<b>森林調査における計測面積の精度検証</b> .....	<b>23</b>
4.1	GNSS 計測による面積誤差率の評価.....	23
4.1.1	単独測位・SBAS・CLAS.....	24
4.1.2	ネットワーク型 RTK.....	25
4.1.3	無線 RTK.....	25
4.2	数値実験による GNSS 計測の面積精度評価.....	26
<b>5</b>	<b>検証結果のまとめと考察</b> .....	<b>28</b>
5.1	高精度 GNSS 受信機による計測座標の精度.....	28
5.2	高精度 GNSS 受信機による計測面積の精度.....	30

6	周囲実測の効率化に向けた検討 .....	32
7	GNSS 受信機による周囲実測の功程 .....	33
8	収穫調査における高精度 GNSS 活用の手引き .....	34
	参考文献 .....	35
	用語説明 .....	36
	<b>巻末資料</b> .....	<b>37</b>
	巻末資料（1）検証地の林況等：検証区域Ⅰ 中木山国有林 114 林班 .....	38
	巻末資料（2）検証地の林況等：検証区域Ⅱ 大平国有林 156 林班 .....	40
	巻末資料（3）水平誤差の時系列変化および軌跡 .....	42
	巻末資料（4）全測点における水平誤差 .....	47
	巻末資料（5）機種別・測位方式別の測位誤差の分布 .....	57
	巻末資料（6）機種別・測位方式別の面積精度の検証（区域対比図） .....	61

# 1 事業の背景、目的、内容

---

## 1.1 事業の背景と目的

国有林野事業においては、人工林資源の充実を背景として、国産材の安定供給体制の構築に貢献するため、地域の需要に対応しながら立木販売や間伐等の森林整備の結果得られる素材の販売により国有林材の安定的な供給を進めていくこととしており、今後、収穫調査量も増大していく見込みとなっている。

収穫調査は、国有林における立木の販売等に向けて区域の標示と実測、立木の樹種、本数、材積、品質等の計測・調査を行うものであり、調査の公正性・客観性を担保しつつ、ICT機器を用いたリモートセンシング技術を活用し、その効率化・省力化を図っていくことが課題となっている。

ICT機器を用いたリモートセンシング技術の導入については、これまでも UAV 空撮画像の活用や地上型 3D レーザスキャナ等を用いた立木調査の精度検証等を行い、これらの技術を活用した調査手法の導入の検討を進めているところである。

このうち、GNSS 受信機を用いて人工衛星から位置情報を取得して収穫調査の区域を計測する方法については、山地の森林内という環境下での、従来の受信機の計測精度のバラつき（1m～10m 強）を踏まえ、これまで、「測定面積は原則として 1ha 以上」等の条件下で使用することとしているが、最近になり、新しい高精度 GNSS 受信機が比較的安価に利用できるようになった。

高精度 GNSS 受信機は、2 周波以上の電波を利用することで人工衛星からの電波が電離層を通過する際に生じる誤差の補正情報を受信し、あるいは、電子基準点からの補正情報を準天頂衛星「みちびき」を通じて受信することにより、上空が十分開けた場所では計測精度が大きく向上することが明らかになっている。

今後は、これらの高精度 GNSS 受信機を収穫調査においても活用していくことが期待されるが、上空が樹木に覆われ地形による制約もある山地の森林内での計測精度等に関するデータは未だ少ない現状にある。

このため、本事業では、収穫調査へのリモートセンシング技術のさらなる導入を進める観点から、高精度 GNSS 受信機を用いた森林内での区域計測の位置や面積の精度を検証するとともに、計測の方式や手順を整理し、これらを活用していくためのマニュアルの作成等を行うことを目的とした。

## 1.2 事業の内容

---

### 1.2.1 検討委員会の設置・運営

学識経験者等による検討委員会を設置し、事業内容について指導及び助言を受けた。委員については、森林計測、森林経営計画及び GNSS 測量等に関する学識経験者等の 5 名で構成し、検討委員会を令和 4 年 10 月及び令和 5 年 2 月に開催した。

### 1.2.2 高精度 GNSS 受信機による周囲実測の精度検証

#### (1) 検証条件の設定

高精度 GNSS 受信機による周囲実測の検証について、「検証機種」、「検証方法」、「検証箇所」の考え方を整理し、検討委員会における検討を踏まえて実施した。

#### (2) 精度検証

精度検証は、i) GNSS 受信機で計測した座標値の正確度、ii) 計測した面積の正確度について、既知の基準点からトータルステーションにより計測した座標値や面積を真値と仮定して実施した。

検証区域は、面積規模、立木密度、地形等の変化を含むように設定した。

#### (3) 周囲実測の効率化に向けた検討

精度検証等を行った計測手法について、国有林の作業環境等を考慮して作業効率、導入コストなどを総合的に検討し収穫調査への導入に適した手法等を提案した。

#### (4) 高精度 GNSS 受信機による周囲実測の功程の整理

周囲実測の効率化に向けた検討を行うため、検証箇所において測位方式毎の測位に要した時間等を取りまとめ、測位方式の区分毎に計測に要した功程を取りまとめ比較整理した。

### 1.2.3 計測手順の整理、マニュアルの作成

収穫調査への導入に適した手法等について、計測手順を整理し、森林管理局署の職員等を対象とした「収穫調査における高精度 GNSS 活用の手引き」を作成するとともに、オンライン説明会を開催した。

#### (参考) 高精度 GNSS とは

2018 年 11 月、準天頂衛星「みちびき」による高精度な測位信号の送信サービスが開始された。みちびきから送られる複数周波の信号 (L1,L2) を受信することで、測位信号が電離層を通過する際の誤差が補正される。「2 周波 GNSS 受信機」は、上空が開けた場所ではサブメータ級の精度が期待され、造林地の計測などで使用され始めている。

2020 年 11 月末には国内の電子基準点からの補正信号を「みちびき」で送信 (L6) する「センチメータ級測位補強サービス (CLAS)」の本格運用が開始され、山地の通信圏外であっても、上空が十分開けた場所では測位精度の飛躍的な向上が期待される。

他方、GNSS 受信機による測位は、上空が十分に開けていない場所や電波を反射する障害物がある場所では、誤差が大きくなりやすい。山地の森林では、樹木や地形による開空率の制約や電波の反射など受信環境の制約があり、測位精度の検証が課題となっている。

## 1.3 実施体制と検討委員会

### 1.3.1 実施体制

本事業は一般財団法人日本森林林業振興会に委託して実施した。  
事業実施体制は、表 1-1 のとおりである。

表 1.1 実施体制

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">             総括責任者 中村 毅 (本部)           </div>				
担当事項	調査設計・分析	UAV撮影画像解析	トータル ステーション測量	GNSS計測
担当者 (所属)	坂井 敏純 (本部) 黒木慶次郎 (本部) 千葉 幸弘 (本部) 高野 一隆 (本部) 永野 慎吾 (青森)	高嶋 伸二 (前橋) 藤原 敏栄 (本部)	竹谷 幸久 (青森) 後藤 良寛 (秋田) 青山 和史 (青森)	坂井 敏純 (本部) 黒木慶次郎 (本部) 千葉 幸弘 (本部) 浪岡 保男 (本部) 藤原 敏栄 (本部) 高野 一隆 (本部) 若林 潤 (前橋)

### 1.3.2 検討委員会

本事業の実施に当たっては「令和4年度収穫調査へのリモートセンシング技術の導入検証等検討委員会」(以下「検討委員会」という。)を設置し、技術的指導及び助言を受け、検証方法、検証結果の分析評価を行った。委員には、森林計測、森林経営計画及びGNSS測量等に関する学識経験者を含む。

#### (1) 検討委員会委員

表 1.2 検討委員会委員

氏名	所属
沢田 治雄	公益財団法人 国際緑化推進センター 理事長
瀧 誠志郎	森林総合研究所 林業工学研究領域 収穫システム研究室 主任研究員
松岡 真如	三重大学大学院 工学研究室 准教授
古川 邦明	岐阜県立森林文化アカデミー森林技術開発・支援センター兼森林研究所
平川 素行	元 会計検査院 審議官

## (2) 検討委員会における検討事項

本格的な調査に着手する前に第1回検討委員会を開催して、調査方法や留意点等について専門的な見地から検討を行った。また、事業成果が見通されてきた時点で第2回検討委員会を開催し、調査結果の分析やとりまとめ方針等について検討を行った。検討委員会における具体的な検討内容は以下のとおりである。

表 1.3 検討委員会における検討事項

回数	開催時期	主な検討内容
第1回	令和4年10月13日	<ul style="list-style-type: none"><li>・全体計画及びスケジュール、実施体制等</li><li>・検証箇所の選定</li><li>・検証方法（測位方式）の選定</li><li>・精度の検証方法等</li></ul>
第2回	令和5年2月2日	<ul style="list-style-type: none"><li>・調査結果の分析結果と評価</li><li>・計測手順、計測手引きの内容</li><li>・報告書のとりまとめ方針等</li></ul>

(検討委員会における主な意見等)

### 【第1回】

- ・リモートセンシング技術の導入を進めていくうえでGNSS受信機の活用は重要。調査結果からGNSSメーカーに森林・林業におけるニーズが伝えられるとよい。
- ・高精度のGNSS受信機への期待が大きい中で、森林内での計測精度を示すデータは未だ少ない。CLAS方式の森林内での計測精度なども新しい知見になる。
- ・平地の上空が開けた場所で計測して精度を検証し、次に山地の森林内で計測して精度の違いを比較するとよい。
- ・検証を進めていく中で、どのような条件の場合に誤差が出やすくなるか等の分析ができるとうい。
- ・森林調査の現場で用いることを考えると、短時間で良い精度が出る測位方法が期待される。

等

### 【第2回】

- ・今回の調査結果を見ると、2周波以上のGNSS受信機は従来の受信機に比べて森林内でも精度が向上しており、興味深いデータが得られたと思う。
- ・114林班と156林班でネットワーク型RTK等の精度向上の程度が異なった原因をどう見るべきか、立木の高さや太さの違いが影響するのか等は引き続き検証が必要。
- ・GNSS計測の精度管理について、どのように考えるのか。例えば誤差率の基準があればよいとも思うが、森林内で行う通常のGNSS計測では真値の座標はわからないため誤差率の把握が難しい。
- ・本事業で行ったような計測精度の検証を常に行うのは難しいだろうが、事例を積み重ねて収穫調査でも活用できるようになるとよい。
- ・本事業で得られたデータや知見は、民有林で高精度GNSSを活用していくうえでも非常に参考になる。

等

## 1.4 検証条件の設定

---

森林内における GNSS 計測であることを念頭に、林内における衛星信号の受信状況やインターネット等の通信環境を踏まえ、現地作業の効率性と実用可能性を検討する必要がある。このため、第1回検討委員会での検討を経て検証する機種や測位方式を選定し、その有効性を確認することを基本に、以下のとおり検証を実施することとした。

### 1.4.1 検証機種の選定

本事業で用いる高精度GNSS受信機の機種については以下の観点を考慮して選定した。

- 1) 測位精度の向上が期待される2周波以上使用可能なマルチGNSS受信機から複数の機種候補を選定する。
  - ① 2周波GNSS受信機  
上空が開けた場所ではサブメータ級の精度が期待され、造林地の計測等ではすでに活用されている。
  - ② CLAS対応受信機  
センチメートル級測位補強サービス(CLAS)の対応受信機で、山間地の通信圏外であっても上空が十分開けている場所では測位精度の飛躍的な向上が期待される。
- 2) 導入コストを考慮し、最新機種で数十万円程度までの価格帯の機種候補を選定する。
- 3) 山間地での森林調査ならびに作業環境に配慮し、操作性や可搬性に優れた機種候補を選定する。

### 1.4.2 検証する測位方式の選定

本事業で用いるGNSS測位方式については、以下の観点を考慮して選定した。

- 1) 調査林分の条件（インターネット圏外・圏内）に応じた測位方式の候補を選定する。
  - <インターネット圏外で使える方式>
    - ・ 単独測位・SBAS・CLAS
    - ・ PPK（後処理補正）
    - ・ 無線 RTK
  - <インターネット圏内で使える方式>
    - ・ ネットワーク型 RTK
- 2) 導入コストや利用のしやすさを考慮して選定する。
  - ・ RTK を行う場合、恒久的な固定局や通信設備を要しない方法を検討する。
  - ・ 森林内で森林管理局署職員等が測定することを考慮し、比較的簡易に操作・測定できる方式を中心に検討する。

### 1.4.3 本事業で用いた機種と測位方式

本事業で用いる GNSS 受信機、調査林分の条件（インターネット圏外・圏内）に応じた測位方式を選定し、これらを検証することとした。具体的には以下のとおりである。

#### 1) インターネット圏外で使える測位方式

- ① 単独測位・SBAS・CLAS → 全機種で実施（受信機 1 台）
- ② PPK 測位 → 1 機種で実施（受信機 2 台）
- ③ 無線 RTK 測位 → 無線対応 1 機種で実施（受信機 2 台）

#### 2) インターネット圏内で使える測位方式

- ネットワーク型 RTK → 2 機種で実施した。（受信機 1 台）

表 1.4 検証に使用した測位方式と GNSS 機種

機 種	機能の特性	インターネット圏外			インターネット圏内
		単独測位 SBAS/CLAS	PPK	無線 RTK	ネットワーク型 RTK
【高精度 GNSS】					
DG-PRO1	2 周波 GNSS	○	○		○
TK-1LT	2 周波 GNSS	○			○
GG-2	2 周波 GNSS	○		○	
Cohac ∞ Ten	CLAS 対応 GNSS	○			
QZR-SP	CLAS 対応 GNSS	○			
【比較用 GNSS】					
モバイルマップパー50	1 周波 GNSS	○			
Map64csj	1 周波 GNSS	○			



図 1.5 GNSS 受信機による測位  
高さ約 2m のポール先端にアンテナを取り付け、各測点で一定時間計測を行う。



図 1.6 精度検証に用いた GNSS 受信機

右から順に

2 周波 GNSS 受信機

DG-PRO 1 (ビズステーション社製)

TK-1 LT (竹谷商事社製)

GG-2 (ギョロマン社製)

CLAS 対応 GNSS 受信機

Cohac ∞ 10 (コア社製)

QZR-SP (JPS 社製)

【本事業で用いた測位方式の説明】

(1) 単独測位・SBAS・CLAS

① 単独測位～SBAS (2 周波 GNSS 受信機等)

2 周波 GNSS 受信機で測位を行うと、単独測位から SBAS へと自動的に移行する。SBAS(Satellite-Based Augmentation System)は静止衛星の補強信号を用いて測位誤差を補正するシステムの総称であり、既知点の座標の測位誤差から観測点の測位座標の誤差を補正する方法 (DGPS 測位) の一つである。

② 単独測位～SBAS～CLAS (CLAS 対応 GNSS 受信機)

CLAS 対応 GNSS 受信機で測位を行うと、単独測位から SBAS、SBAS から CLAS へと自動的に移行する。CLAS(Centimeter Level Augmentation Service)は日本の「センチメートル級測位補強サービス」のことである。国内電子基準点からの補正情報を準天頂衛星「みちびき」から送信することで、上空が開けた場所での精度はcm級を実現している。

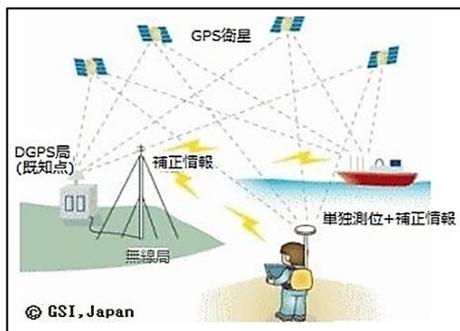


図 1.7 DGPS 測位

出典：GNSS を使用した測量のいろいろ (国土地理院)

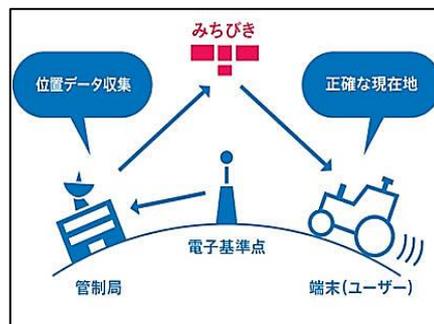


図 1.8 CLAS の概念図

出典：みちびき (準天頂衛星システム) (内閣府)

## (2) PPK 測位

PPK 測位（後処理キネマティック測位）は、GNSS 計測で一定時間記録したデータを後から電子基準点のデータ等を用いて補正する方式である。

## (3) 無線 RTK 測位

RTK(リアルタイムキネマティック)測位とは、移動局と基準局を無線又はインターネットで繋ぎ、移動局において衛星からの信号と基準局からの信号をリアルタイムで解析して観測点の計測精度を高める方式である。

無線 RTK は、移動局と基準局を無線(例：920MHZ、250mW、林内で約 500m 到達)で繋いで精度向上を図る方式である。無線 RTK を実施するには、対応する GNSS 受信機を用いる。出力の大きさに応じて、基準局用受信機について総務省地方総合通信局で「無線局登録」が必要である（電波利用料（例：400 円／年）が発生する）。

## (4) ネットワーク型 RTK 測位

ネットワーク型 RTK 測位とは、移動局の観測点での測位情報について、インターネットで最寄りの電子基準点の測位情報を用いた補正情報等（有料の配信サービス）を受けて精度の向上を図る方式である。インターネット圏内で利用できる。

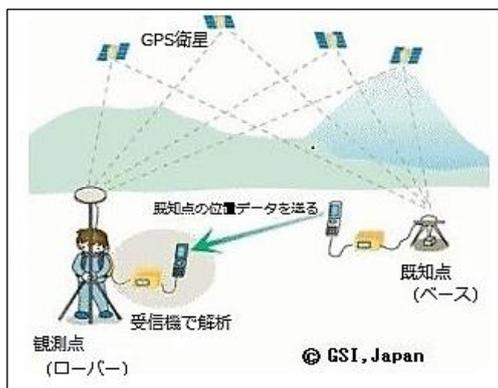


図 1.9 RTK-GPS 測位

出典：国土地理院

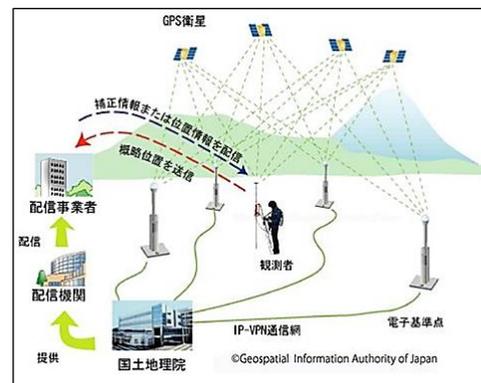


図 1.10 ネットワーク型 RTK-GPS 測位

出典：国土地理院

### 1.4.4 検証区域設定の考え方

本事業で用いた測位方式である上述の「単独測位・SBAS・CLAS」、「PPK」、「無線 RTK」、「位置情報サービスを用いたネットワーク型 RTK」が全て実施可能な場所（インターネット圏内）を検討し、検証区域として設定することとした（詳細は第 2 章参照）。

## 2 検証区域の設定

GNSS計測の測位精度を検証するためには、前章で述べたように、山間地におけるインターネット環境および測位方式を考慮した上で、様々な測位方式を実施することが可能な検証区域を設定する必要がある。また、収穫調査の区域計測でGNSS機器を使用することを考慮し、検証対象地は主伐期を迎えたスギ人工林で次の点を満たす個所を検討した。

- ① 検証区域は2ha程度のまとまりを有するとともに、分割して小区画を設定できること
- ② 検証区域には、多様な地形や立木密度の異なる個所等を含むこと
- ③ 様々な測位方式を用いたGNSS計測が検証できること

その結果、林野庁関東森林管理局群馬森林管理署管内（安中市内）の国有林を検証区域に設定した（表2.1、図2.1）。

表 2.1 調査対象地

国有林名	林小班	樹種	林齢
中木山	114 へ <sub>1,3</sub>	スギ	54
大平	156 に <sub>1</sub>	スギ	62

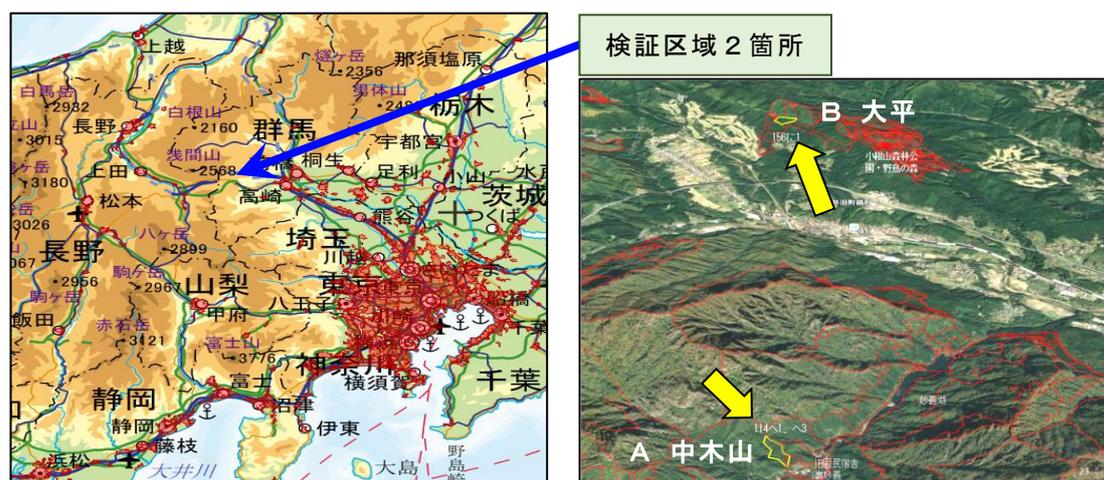


図 2.1 検証区域 2 林分の場所

A : 中木山国有林 114 林班へ<sub>1,3</sub> 小班

B : 大平国有林 156 林班に<sub>1</sub> 小班

## 2.1 検証区域の概況

### 2.1.1 検証区域 I（中木山国有林 114 林班へ<sub>1</sub>、へ<sub>3</sub> 小班）の概況

検証区域 1 は、主伐期を迎えたスギ人工林内（樹高 15～23m）に、立木密度の変化（600 本～1200 本/ha）、地形の変化（谷底、尾根、中腹等）を持たせて設定した。軽井沢の電子基準点から約 9 km の位置にあり、インターネットの圏内である。

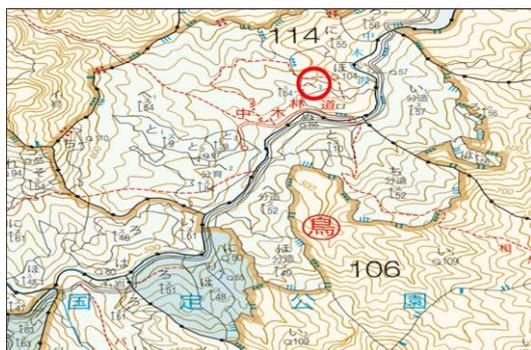


図 2.2 検証地 114 林班スギ 54 年生  
○検証林分の位置



図 2.3 検証地 114 林班の周囲測量  
赤枠はトータルステーションによる測量成果

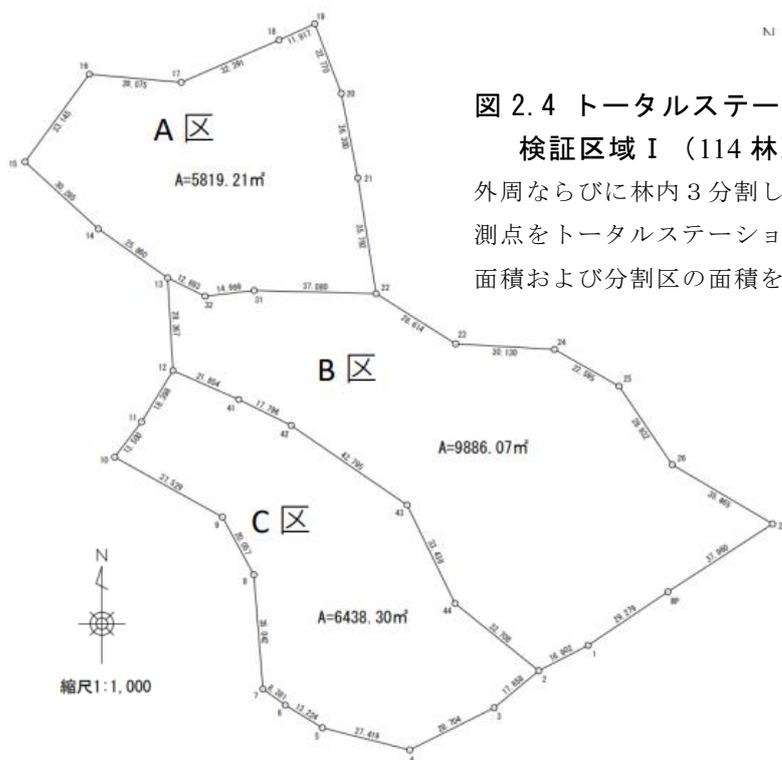


図 2.4 トータルステーションによる  
検証区域 I（114 林班）の測量成果  
外周ならびに林内 3 分割した分割線のすべての測点をトータルステーションで測量した。全体面積および分割区の面積を図中に示した。

全体面積 22143.58 m<sup>2</sup>  
A 区 5819.21 m<sup>2</sup>  
B 区 9886.07 m<sup>2</sup>  
C 区 6438.30 m<sup>2</sup>

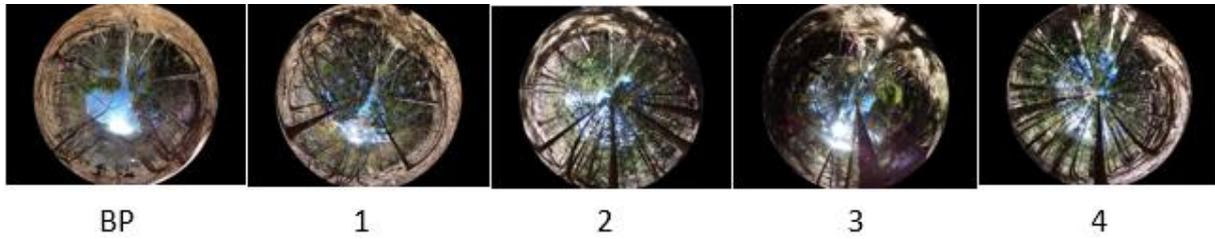


図 2.5 検証区域 I における測点の開空状況  
 上記 5 測点のみ例示したが、全測点 34 箇所撮影した全天空写真を  
 巻末資料（1）に、図 2.5 付図として掲載した。



図 2.6 検証区域 I の微地形および林分概況(114 林班)

全測点 34 箇所の地形や林況を巻末資料（1）に図 2.6 付表として掲載した。

## 2.1.2 検証区域Ⅱ（大平国有林 156 林班に 1 小班）の概況

検証区域Ⅱは、主伐期を迎えたスギ人工林内（樹高 24～30m）に地形の変化（谷底、尾根、中腹等）を持たせて設定した。立木密度は 631 本/ha、軽井沢の電子基準点から約 9 km の位置にあり、インターネットの圏内である。

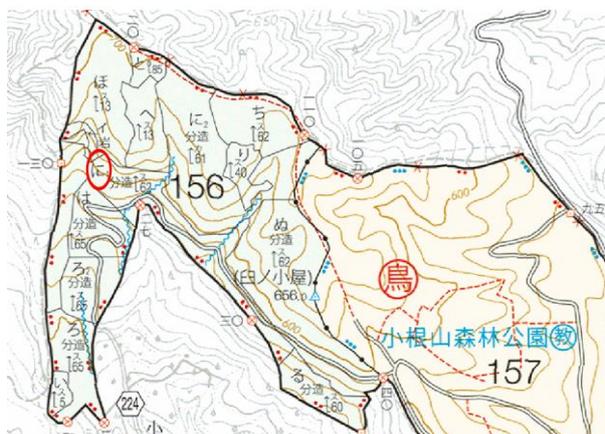


図 2.7 検証林分（スギ 62 年生）の位置  
○ 検証林分



図 2.8 156 林班の検証区域  
トータルステーション測量（赤枠内）

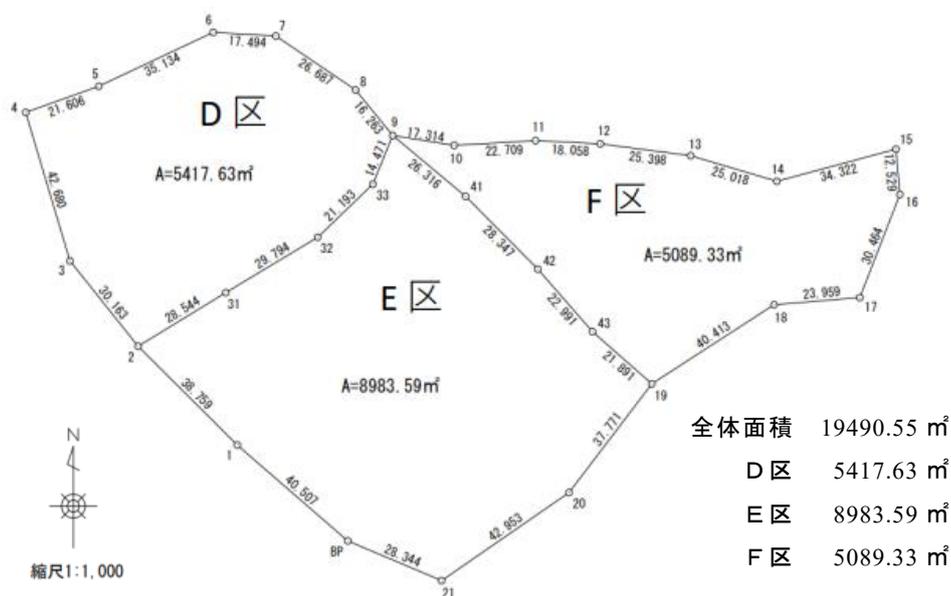


図 2.9 トータルステーションによる検証区域Ⅱ（156 林班）の測量成果  
外周ならびに林内 3 分割した分割線のすべての測点をトータルステーションで測量した。全体面積および分割区の面積を図中に示した。



図 2.10 検証区域Ⅱにおける測点の開空状況

上記 5 測点のみ例示したが、全測点 28 箇所で撮影した全天空写真は巻末資料（2）に、図 2.10 付図として掲載した。



図 2.11 検証区域Ⅱの微地形および林分概況（156 林班）

全測点 28 箇所の地形や林況を巻末資料（1）に図 2.11 付表として掲載した。