小型 RTK-GNSS キットを用いた植栽個体の地理座標測位の精度の評価とその応用 —林木育種における個体管理にむけて—

松 永 孝 治^{*, **, 1}・武津英太郎^{*, **, 1}・入 江 博 樹²

試験地に植栽した苗木の正確な地理座標と苗木の遺伝的系統情報を簡易に得るため、安価な RTK-GNSS キット C94-M8P と QR コードラベルを用いたマッピング方法を考案・試行した。二つの試験地で GNSS 測位を行い、近隣の電子基準点データを用いた後処理キネマティック解析と RTK-GNSS を組み合わせて、約 90 本の苗木の地理座標を反復測定した。反復測定間の標準偏差は水平方向で平均 2.6~6.0 cm、鉛直方向で平均 3.6~12.5 cm となり、高い精度で測位できた。また、一方の試験地において、2 周波 GNSS 受信機とトータルステーションを用いて推定した地理座標を真の地理座標の値として、C94-M8P を用いて推定した地理座標との差を求めたところ、水平方向で 6.4 cm、鉛直方向で 11.3 cm となり C94-M8P で測定した地理座標は正確度も高いことが確認された。各苗木に個体識別番号を QR コード化したラベルを取り付けることで、自動認識によって遺伝的系統情報を取得しつつ、同時に地理座標を取得した場合、個体あたりの測定時間は約 13~21 秒となり実際の林木育種の試験地の配置図作成に活用できると考えられた。

キーワード：マルチ GNSS、後処理キネマティック測位、リアルタイムキネマティック測位、系統管理、自動認識

Koji Matsunaga, ^{*, **, 1} Eitaro Fukatsu, ^{*, **, 1} Hiroki Irie² (2020) Evaluation of Geographical Coordinate Positioning Accuracy for Planted Seedlings with a Simple RTK-GNSS Kit and Its Application for Individual Tree Management in Forest Tree Breeding. J Jpn For Soc 102: 254-262 To obtain the precise geographic coordinates and genetic line information of seedlings planted in the genetic test site for tree breeding, we developed a simple mapping method using an RKT-GNSS kit, C94-M8P application board, and individual seedling labels with a QR code. In the two test sites, we estimated the geographic coordinates of ca. 90 seedlings three times using a C94-M8P GNSS kit with post-processing kinematics analysis and real-time kinematic GNSS. The average standard deviations of replications were 2.6-6.0 cm for horizontal coordinates and 3.6-12.5 cm for vertical coordinates, indicating a high precision of measurements. To evaluate the accuracy of the method, we compared the geographic coordinates estimated using the C94-M8P and geographic coordinates measured as a true value using a dual-frequency GNSS receiver and a Total Station at one test site. The differences of the coordinates were 6.4 cm and 11.3 cm in horizontal and vertical coordinates, respectively. This suggests that the geographic coordinates estimated by the C94-M8P are very accurate. When we obtained individual identification codes of 90 seedlings from their QR code label using QR code reader and simultaneously obtained the geographical coordinates using the C94-M8P, the time required to obtain a measurement was 13-21 seconds per seedling. These results suggest that the new method is efficient and can be applied to real operations in forest tree breeding.

Key words: multi GNSS, GPS, post-processing kinematic positioning, real time kinematic, pedigree management, automatic identification and data capture

I. は じ め に

林木育種では長期間継続して調査対象木（以下、個体）の特性評価を行うため、試験地等における個体の位置情報と遺伝的系統情報の正確な記録が重要である。通常、林木育種分野における試験地は設定時に横方向（行）と縦方向（列）に整列させた植栽位置に苗木を植え付け、各個体の位置情報を行番号と列番号で管理していることが多い。しかし、この位置情報の管理方法には課題がある。実際の試験地内の地形は起伏に富み、尾根や谷、伐採時の作業道、切株、伐採木の枝条、岩等が不規則に配置されているため、苗木を整列させて植栽することが難しい場合もある。そのような場合、図面上では各個体の位置は単純な行列で表現されるが、実際の相対位置を正確に反映していないため、後の個体の追跡が困難となり、管理や調査に不具合が生じ得る。このような問題に対応するためにコンパス等で放射

法による測量を行い、各苗木の相対位置を得る場合もあるが、時間的・人的資源の制約からすべての試験地において行えるわけではない。また、近年林木育種分野において、個体の位置情報、遺伝系統情報および地理情報システム（GIS）から得られた環境データを組み合わせて解析し、林内の様々な微小環境を考慮した系統の評価や各微小環境に適した系統を抽出する試み等が行われている（農林水産省農林水産技術会議事務局 2017）。この技術開発においては、地理座標（緯度経度および高度）を介して環境データを各個体と結びつけるため、個体の位置情報が地理座標として正確に得られていること、それが各個体の遺伝的系統情報と正確に結びついていることが重要であり、それらの情報を正確に効率的に記録する手法が必要である。

任意の地点の地理座標を得るために、米国の GPS 衛星をはじめとした複数の測位衛星を利用したマルチ GNSS（Global Navigation Satellite System, 全地球航法衛星システ

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: makoji@affrc.go.jp

**この論文に対する貢献が等しい。

¹ 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター九州育種場 〒861-1102 熊本県合志市須屋 2320-5（Forest Research and Management Organization, Forestry and Forest Product Research Institute, Forest Tree Breeding Center, Kyushu Regional Breeding Office, 2320-5 Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan）

² 国立熊本高等専門学校建築社会デザイン工学科 〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627（Department of Architecture and Civil Engineering, National Institute of Technology, Kumamoto College, 2627 Hirayamashinmachi, Yatsushiro, Kumamoto 866-8501, Japan）
（2020 年 1 月 9 日受付；2020 年 6 月 9 日受理）

ム)が航空機や船舶の測位、測量、カーナビゲーションシステムやスマートフォンの地図アプリ等で広く利用されている(中川 2015)。農業分野では精密なGNSS測位機能と自動操舵補助システムを持つ農業用機械が販売されている(ニコン・トリンプル 2019)。森林分野では施業対象林分の面積の推定や作業道の設計と管理、目的地へのナビゲーション等を目的としてGNSS測位が適用されてきた(全国林業改良普及協会 2011;松岡ら 2018)。

GNSSを用いた測位は、利用する搬送波の種類によりいくつかの方式に分けられる。市販のハンディタイプのGNSS受信器等で利用されているL1波を用いた一周波の単独測位方式は、上空が開けている状態であっても数m~数十m程度の誤差を持つことが知られている(中川 2015)。林木育種の試験地の場合、植栽木の密度は、ha当たり3,000本とする場合が多く、苗木の植栽間隔は1.8mとなる。つまり、一周波GNSS受信機の単独測位方式では苗木各個体の相対位置の測定には精度が不十分である。

より精度の高い測位方式の一つとしてキネマティック測位と呼ばれる手法がある。この測位方式は2台のGNSS受信機を用いて2カ所で同時に単独測位を行い、それぞれで受信した搬送波位相を計測して、行路差を求めることで、2カ所の相対的な位置を数cm以下の誤差で測定する(Misra and Enge 2010;岡本 2019)。その際に、一方の受信機を地理座標が既知である点(基準局)に設置しておくことで、位置情報が未知の点(移動局)の正確な地理座標を得ることができる。国土地理院がGNSS受信機を設置している電子基準点を基準局として用いることも可能で、その場合、移動局で得られた連続測位データと、web上で公開されている電子基準点の受信データから、移動局の地理座標を高い精度で計測することができる。この方法を後処理キネマティック(PPK: Post Processing Kinematic)測位と呼ぶ。また、基準局と移動局の間で通信状態を維持して基準局に対する移動局の相対位置を高い精度でリアルタイムに得る手法はリアルタイムキネマティック(RTK: Real Time Kinematic)測位と呼ばれる。従来、リアルタイムキネマティック測位が可能な機器は高価であり、機器の使用に専門的な知識が必要であること等から林木育種分野における適用例はなかった。しかしながら、近年安価なGNSS受信機が多数開発・販売され(Jackson *et al.* 2018)、更に2台のGNSS受信機間の通信機能が一体化した、RTK-GNSS測位が可能なキットが安価に販売されている(u-blox 2017;入江 2018)。

林木育種分野の試験地設定において、個体の位置情報の取り扱いだけでなく、遺伝系統情報の取り扱いにも課題がある。従来の方法は、まず苗畑で各苗木に系統名を表示したラベルを取り付けておき、試験地にランダムに植栽した後、ラベル上の系統情報を目視で読み取り、紙野帳上の該当箇所に手書きで系統名を記録し、パソコンでデータベースソフト等へ手入力して格納してきた。この方法は、現在位置の錯誤による個体間違い、目視による読み取りの間違い、紙野帳への記録間違い、パソコンへの入力ミス等の多くのヒューマンエラーが生じる可能性がある。近年林木育

種分野では系統間違いを減らす観点から、RFIDタグ・2次元バーコード等による苗木・樹木のラベリングとRFIDリーダー・バーコードリーダーと携帯型電子端末を組み合わせた自動認識を活用した系統管理に取り組み始めている(渡辺ら 2010;小野ら 2012a, 2012b;松永ら 2015)。我々はその一環として、試験地に植栽する苗木にも系統情報等をQRコード化したラベルを付与して、遺伝系統情報の取り扱い精度を向上させる試みを始めている。苗木の系統情報は、その位置情報と同じように各苗木の植栽位置を順番に移動しながら得るため、系統情報と位置情報を同時に精度よく取得することができれば、正確な植栽配置図を効率的に作成できると考えた。

本研究では、安価に利用可能となったRTK-GNSS測位キットを用いて、植栽した苗木の地理座標を測定し、その精度を検証した。また、QRコードの読み取りによる遺伝系統情報の取得と高精度GNSS測位を連動させることで、地理座標に基づく植栽配置図の作成方法を構築し、その有効性を検討した。

II. 材料と方法

1. 調査地

測位精度を検証するために、平坦で周囲に遮蔽物が少なくGNSS信号の受信に好適な環境と考えられる熊本県合志市にある森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター九州育種場内のスギ植栽地(以下、場内試験地)および、実際の林地に設置された試験地の一例として熊本県山鹿市の茂田井国有林内に設定したスギ植栽地(以下、場外試験地)を調査地とした(図-1(a)、陰影起伏図(国土地理院)(<https://maps.gsi.go.jp/>)を加工して作成)。場内試験地は北緯32.8834東経130.7350、標高約85m程度に位置し、ほぼ平坦で、前生樹を皆伐後、2017年の春からスギさし木1年生苗木を1.8mあるいは2.4m間隔で植栽・保存していた。場外試験地は北緯33.1118、東経130.8043、標高約600mに位置し、北向きの斜度およそ10~20°の皆伐跡地に2018年3月に第2世代精英樹のクローン検定を目的として1年生スギさし木苗木を1.8m間隔で植栽していた。これらの試験地に植栽した各苗木には、個体識別が可能な番号をQRコードとして表記したラベル(図-2)をあらかじめ苗畑で取り付けておいた。

場内試験地および場外試験地において試験地が見渡せる位置に基準点(以下、試験地基準点)をそれぞれ設置した。その後、各試験地において、約30本の苗木からなる調査区画を3カ所ずつ設けた。また、各試験地の上空の状況を記録するため、全天写真撮影カメラ(Opto Canopy180,大成ファインケミカル株式会社、東京)で写真を撮影し、全天写真解析ソフトCanopOn2 Ver.2.03c(Takenaka 2009)を用いて開空度を算出した。

2. 各個体の地理座標の取得

各苗木個体の地理座標の取得は以下の2段階の手順で行った。まず、各試験地の試験地基準点のPPK測位を行い、次に試験地基準点を基準局とした各植栽苗木個体のRTK測位を行った。RTK測位は基準局に対する移動局の距離・

図-1. 試験地および電子基準点の位置と試験地における全天写真

(a) 試験地と電子基準点の位置, (b) 場内試験地の全天写真および (c) 場外試験地の全天写真。(a) ○と●は場内試験地と場外試験地, △と▲は電子基準点熊本と電子基準点鹿本をそれぞれ示す。(b) および (c) はそれぞれの試験地基準点で撮影。

図-2. 個体識別番号を QR コード化したラベル

ラベル左上の4字のアルファベットと5桁の数字が個体識別番号。この個体識別番号を QR コード化してラベル上に印刷した。

角度を高い精度で求める方法であるが、基準局として用いた試験地基準点の地理座標が正確でなければ得られた移動局の地理座標も不正確となる。そこで、各試験地の試験地基準点を PPK 測位し、また試験地基準点を基準局とした RTK 測位によって各苗木の植栽個所の地理座標を得た。本研究ではこの様な測位方式を以下 PPK+RTK 測位と表現する。

各試験地において試験地基準点および約 90 本の植栽個体について PPK+RTK 測位を同一の日に 3 回、それぞれ実施した。得られた地理座標について、標高値は直接、緯度経度値は平面直角座標系 (EPSG: 2444) に変換し、反復間の水平方向・鉛直方向の標準偏差をメートル単位で求め、これを精度の指標とした。以下に詳細な方法を示す。

1) 試験地基準点の PPK 測位用データの取得

各試験地に設置した試験地基準点において、C94-M8P-4 (u-blox, Thalwil, Switzerland (機種末尾の 4 は日本対応の機種であることを示す。以下、C94-M8P)) に含まれる GNSS 受信機 1 台による単独連続測位を行った。C94-M8P は 2 台の GNSS 受信機で構成されており、各 GNSS 受信機は 1 周波 GNSS 受信機モジュール、920 MHz を利用する UHF 通信モジュール、1 周波 GNSS アンテナおよび通信モジュール用 UHF アンテナで構成される。GNSS アンテナは水準器で確認して鉛直に設置した測量用の紅白ボールの先端に取り付け、アンテナ高は 1.9 m とした。GNSS 受信機は Windows PC に接続し、給電を行うとともに、ソフトウェア u-center 18.05.02 (u-blox, Thalwil, Switzerland) を用いて受信の設定を行い、米国の GPS、ロシアの GLONASS の衛星情報と航法データを毎秒記録した (図-3(a))。緯度経度は分の小数点以下 5 桁で記録され、これは平面直角座標系 (CSII) 上では東西方向の最小単位約 1.5 cm、南北方向の最小単位約 1.8 cm であった。また標高データはデフォ

ルトの 10 cm 単位で記録した。

PPK 解析における基準局として、国土地理院が設置している電子基準点を用いた。場内試験地は直線距離で 5.2 km の位置にある「熊本」(局番号 950465)、場外試験地は 12.5 km の位置にある「鹿本」(局番号 960700) を利用した。国土地理院の「電子基準点データ提供サービス」より、観測ファイル、衛星軌道情報ファイルおよび PCV 補正データをそれぞれ取得した。また、「基準点成果等閲覧サービス」から、各電子基準点の緯度・経度・楕円体高を取得した (内山 2018)。各試験地基準点で得た GNSS 情報が含まれる u-blox 社独自のバイナリファイル (UBX ファイル) を RTK-GNSS 解析用のプログラムライブラリ RTKLIB (高須ら 2007; Takasu 2013) 内のファイル変換アプリケーション RTKCONV を用いて観測情報 (RINEX ファイル) と衛星軌道情報ファイルに変換した。

2) 試験地基準点の PPK 測位

電子基準点を基準局、試験地基準点を移動局として、RTKLIB に含まれる RTKPOST を用いて PPK 解析を行った。解析条件は Positioning Mode: [Static], Filter type: [Forward] とした。一般に仰角が低い位置に存在する衛星からの信号は電離層遅延やマルチパスによって測位精度の低下を引き起こすこと、仰角が高い位置に存在する衛星のみを利用した場合は衛星数の不足や衛星配置の偏りによって、測位精度が低下することが知られている (測位衛星技術株式会社 2016)。ここでは、斜面や林分など周囲に遮蔽物がある林地において、衛星仰角マスクの値が測位精度に及ぼす影響を検討するため、Elevation Mask (設定された仰角以下の衛星を解析から除外するための設定) (以下、衛星仰角マスク) は [10°] から [50°] あるいは [55°] まで複数の値を用いた。SNR MASK は [35 dBHz], Integer Ambiguity Res は [Fix and Hold], 基準局のアンテナタイプは PCV ファイルから自動選択とした。その他のパラメータはデフォルト値とした。

PPK 解析の結果得られる地理座標は、Float 解もしくは Fix 解として得られる。PPK や RTK 等のキネマティック測位では、搬送波の位相差のみを計測するため、衛星と受信点との距離を求めるには波数の推定が必要である。受信している全ての衛星の電波の波数の推定が整数値で得られ

る場合が Fix 解となり、波数が整数値にならない場合は Float 解となる。Fix 解は、受信環境や測位条件が良い場合に得られることが多いため、測位精度の良さの目安となる。1 秒ごとに出力される PPK 解析結果から、試験地基準点の地理座標の推定値を以下に示す基準により Fix 解の最適値、中央値あるいは Float 解の中央値として求めた。

PPK 解析によって Fix 解が得られた場合のうち、整数値バイアスの決定の評価指標である ratio factor で 999.9 (ソフトウェア上の最大値) が得られた場合にはその最後の地理座標を最適値とした。また ratio factor が 999.9 であった際の地理座標について x , y , z 軸のそれぞれについて中央値を求め、Fix 解の中央値とした。Fix 解が得られたが ratio factor が 999.9 に達しなかった場合は ratio factor が最大をとった際の地理座標を最適値とし、すべての Fix 解の地理座標に対しての中央値を求めて、Fix 解の中央値とした。Fix 解が得られなかった場合は、Float 解の最後 10% の地理座標について中央値を求め、Float 解の中央値とした。また Fix 解が得られた場合でも、Fix 解の比率が 10% に満たなかった場合には Float 解の中央値も求めた。

3) 試験地基準点を基準局とした各苗木の RTK 測位

試験地基準点を基準局とした RTK 測位を行うため C94-M8P の GNSS 受信機 1 台を試験地基準点に設置し、基準局とした。また、もう 1 台の GNSS 受信機を各苗木の植栽位置上を移動する移動局とした。基準局の受信の設定は上述の PPK 測位と同様である。基準局の UHF アンテナは高さ約 1.0 m の位置で固定した (図-3(a))。また、地理座標の設定は [Survey-In] モードとした。このモードでは、基準局の単独測位による地理座標が一定の範囲に収まった場合に、以後基準局の地理座標をその時点での値に固定する。RTK 測位は基準局の地理座標の固定後に始まり、UHF アンテナを通して基準局から移動局に測位情報が送られ、基準局の地理座標と基線解析により得られた距離と方向から移動局の地理座標が計算され、移動局の GNSS 受信機から出力される。基準局は記録開始後、調査終了まで無人で放置した。

移動局は GNSS 受信機による各苗木の位置情報の計測者と苗木の個体識別番号の記録者の二名一組で運用した。移動局の GNSS アンテナは測量用の紅白ボールの先端、高さ 2.0 m の位置に取り付けた。移動局の GNSS 受信機はシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi, Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK) に接続し、給電を行うと同時に毎秒出力される地理座標データ (NMEA) をテキストファイルとして連続記録した。シングルボードコンピュータはモバイルバッテリーで給電した。移動局の受信機と UHF アンテナは高さ約 1.2 m の位置で固定した (図-3(b))。

C94-M8P は RTK 測位において Fix 解が得られている場合は移動局の受信モジュールの LED ランプが点灯、Float 解が得られている場合には点滅する。本実験中はこの LED ランプはほぼ点灯しており Fix 状態であったが、点滅に切り替わり、Float 状態になった場合は再点灯するまで待機して、再点灯後調査を再開した。

図-3. C94-M8P を用いて自作した基準局および移動局

(a) 基準局、(b) 移動局。図中の矢印は GNSS 受信機本体と UHF アンテナの位置を示す。

4) RTK の移動局における苗木の遺伝系統情報の取得

各苗木の個体識別番号はラベル上の QR コードを二次元バーコードリーダー (JBR300, JC Square INC., Seoul, Republic of Korea) を用いて読み取ることで、Bluetooth 接続した電子端末 (ipod touch, Apple Inc., Cupertino, CA) 内のアプリケーション FileMaker Go 18 (Clariss International Inc., Santa Clara, CA) の電子ファイルに記録した。この電子ファイルは事前に市販のデータベースソフト FileMaker Pro 18 Advanced (Clariss International Inc., Santa Clara, CA) でデータの入力時に入力時刻を同時に記録するように作成しておいた。位置情報の計測者が移動局のポールを測定苗木の真横に水準器で鉛直を確認して設置した状態で、個体識別番号の記録者が苗木のラベルの QR コードを読み取ることにより、QR コード上の情報とその入力時刻を同時に記録した。

5) 各苗木の地理座標の算出と配置図の作成

FileMaker Go 18 ファイルに保存された個体識別番号と Raspberry pi に保存された地理座標データ (NMEA) を、個体識別番号の読み取り時刻と NMEA に記録された GNSS 時刻に基づいて結合した。今回、試験地基準点に設置した基準局は [Survey-in] モードとしたため、RTK 測位時に移動局から出力される地理座標には一周波の単独測位による基準局の地理座標の誤差が加わっている。そのため、移動局で試験地基準点の地理座標を取得しておき、PPK 測位で補正された基準点の地理座標と移動局で測定した基準点の地理座標の差分を移動局で測定した各苗木の地理座標に加え、各苗木の PPK+RTK 測位による地理座標の値とした。なお、各反復における試験地基準点の地理座標の値は後述の解析結果 (表-1, 2) を参考として、Fix 解が得られ、かつ補足衛星数が多い、[20°] に衛星仰角マスクを設定して PPK 解析した値を用いた。各試験地の基準点および各苗木の各反復の地理座標を統計パッケージ R で重ねて描画した。

表-1. 場内試験地における試験地基準点の PPK 解析結果

Elevation Mask (度)	反復数	平均補足 衛星数	Fix 解の 比率 (平均値)	Ratio Factor が 最大値になった 比率 (平均値)	Ratio Factor の 最大値 (平均値)	東西方向の標準偏差 (m)			南北方向の標準偏差 (m)			鉛直方向の標準偏差 (m)		
						Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)	Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)	Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)
10	3	10.9	0.542	0.183	820.6	0.009	0.009	—	0.01	0.01	—	0.015	0.014	—
15	3	10.9	0.542	0.183	820.6	0.009	0.009	—	0.01	0.01	—	0.015	0.014	—
20	3	10.2	0.576	0.204	860.8	0.010	0.010	—	0.007	0.007	—	0.013	0.012	—
25	3	9.4	0.590	0.358	999.9	0.011	0.011	—	0.009	0.007	—	0.012	0.015	—
30	3	9.0	0.575	0.401	999.9	0.012	0.012	—	0.005	0.004	—	0.002	0.006	—
35	3	8.0	0.564	0.458	999.9	0.010	0.009	—	0.006	0.004	—	0.014	0.015	—
40	3	7.1	0.575	0.504	999.9	0.008	0.007	—	0.008	0.004	—	0.012	0.015	—
45	3	6.2	0.550	0.503	999.9	0.006	0.006	—	0.008	0.006	—	0.008	0.007	—
50	3	4.7	0.743	0.564	999.9	2.676	2.965	—	1.635	1.371	—	3.243	4.216	—

表-2. 場外試験地における試験地基準点の PPK 解析結果

Elevation Mask (度)	反復数	平均補足 衛星数	Fix 解の 比率 (平均値)	Ratio Factor が 最大値になった 比率 (平均値)	Ratio Factor の 最大値 (平均値)	東西方向の標準偏差 (m)			南北方向の標準偏差 (m)			鉛直方向の標準偏差 (m)		
						Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)	Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)	Fix 解 (最適値)	Fix 解 (中央値)	Float 解 (中央値)
10	3	11.0	0.044	0.001	340.5	—	—	0.076	—	—	0.036	—	—	0.074
15	3	10.9	0.045	0.001	340.5	—	—	0.076	—	—	0.036	—	—	0.074
20	3	10.8	0.049	0.001	341.8	0.003	0.002	0.084	0.004	0.006	0.018	0.003	0.013	0.043
25	3	10.4	0.050	0.001	348.2	0.003	0.002	0.076	0.005	0.004	0.019	0.007	0.007	0.047
30	3	9.4	0.064	0.009	345.6	0.003	0.003	0.074	0.003	0.003	0.024	0.004	0.002	0.053
35	3	8.5	0.086	0.028	365.2	0.010	0.010	0.048	0.008	0.013	0.013	0.006	0.005	0.019
40	3	7.4	0.296	0.146	700.9	0.495	0.479	—	0.097	0.089	—	0.505	0.451	—
45	3	7.1	0.098	0.054	767.7	0.803	0.806	0.676	1.106	1.109	0.873	1.299	1.306	1.088
50	3	6.3	0.621	0.517	999.9	1.066	1.076	—	1.166	1.142	—	1.409	1.418	—
55	3	4.2	0.836	0.655	999.9	1.028	0.959	—	0.569	0.550	—	3.122	3.191	—

3. 観測データの取得時間が PPK 測位の精度に及ぼす影響の検討

PPK 解析は GNSS の観測データの取得時間が短いとその測位精度が低下することが知られているため（例えば、小林ら 2001）、C94-M8P を用いた PPK 解析に必要な観測データの取得時間を以下の方法で検討した。場内試験地の基準点について、異なる日時に 4 回、C94-M8P を用いて一時間の単独測位を行い、解析に用いる観測データの時間を 10 分間から 60 分間まで 5 分刻みで変化させて、上述の方法で PPK 解析を行い、4 回の反復間の標準偏差を求めた。その際に、上述の理由から衛星仰角マスクは [20°] に固定した。ここでは各反復によってデータの時間と Fix 解が得られる割合の関係が大きく異なったため、4 回の反復すべてにおいて Fix 解が得られた場合、最大の ratio factor における地理座標を Fix 解の最適値（ratio factor の最大値が 999.9 の場合は最後の 999.9 の地理座標）、また得られた Fix 解の中の xyz 軸方向それぞれの中央値を求めて Fix 解の中央値として、その反復間の標準偏差を求めた。Fix 解が得られない反復が一つでもあった場合は Float 解の中央値について反復間の標準偏差を求めた（J-Stage 電子付録付表-1）。

4. 従来手法との比較

PPK+RTK 測位と従来の測位手法の間で測位精度の比較を行うために、簡易測量機器による植栽苗木の相対位置の測定およびハンディタイプの GNSS 受信機を用いた 1 周波単独測位による地理座標の測定を行った。

1) 簡易測量による相対位置の測定

場内試験地において、距離・方位角・傾斜角を測定でき

るレーザー距離計（TruPulse360, Laser Technology, Inc., Centennial, CO）を用いて各植栽苗木の相対位置の測定を行った。試験地基準点において測定者の目の高さに合わせて測定器を一脚上に設置した後、RTK 測位に用いた約 90 個体の脇において同じ高さに設置した反射板の中央を測定した。その際、測定器と反射板に取り付けた水準器で鉛直を確認した。測定した距離・方位角・傾斜角より、各個体の相対位置を算出した。約 90 個体の各 1 回の測定を 1 反復とし、3 回の反復測定を行った。

2) 1 周波単独 GNSS 測位

場内試験地において、ハンディタイプの GNSS 受信機（GPSMAP 64scJ, Garmin, Olathe, KS）を用いて RTK 測位に用いた約 90 個体の 1 周波単独測位を行った。アンテナを鉛直上方向にして測量用ポールの高さ 1.8 m の位置に GNSS 受信機を固定し、水準器で鉛直を確認して測定した。約 90 個体各 1 回の測定を 1 反復とし、3 回の反復測定を行った。得られた緯度・経度・標高は上述の PPK+RTK と同様に処理して m 単位で標準偏差を求めた。

3) 統計解析

測位方法の違いが測位精度のばらつきに及ぼす影響を明らかにするため、場内試験地で行った PPK+RTK 測位、簡易測量機器による測位および 1 周波単独 GNSS 測位により得た地理座標の反復間の標準偏差に対してクラスカル・ウォリス検定とダン検定による多重比較を行った。解析には Statistix9（Analytical Software, Tallahassee, FL）を用いた。

5. 正確度の評価

場内試験地の基準点において、より短時間で高い精度で

測位を行うことのできる測量用2周波GNSS受信機（DELTA-G2T, JAVAD, San Jose, CA）に測位誤差要因となるマルチパスを低減するチョークリングアンテナ（701941 Rev.B, Ashtech）を接続して約2時間取得したデータをPPK解析して基準点の地理座標を求め、基準点の真の地理座標とした。C94-M8Pを用いたPPK解析により得られた地理座標と真の地理座標との差を求め、試験地基準点の推定値の正確度の指標とした。また植栽苗木について推定した地理座標の正確度を確認するため、場内試験地の基準点にトータルステーション（TSS-200GS, エス・ティ・エス株式会社, 名古屋）（以下, TS）を設置して、三つの調査区画の周囲4個体, 計12個体への水平角, 鉛直角, 水平距離を測定し、各個体の地理座標を算出した。TSによって測位した地理座標を真の値としてPPK+RTK測位で得られた12個体の苗の地理座標との差を正確度の指標とした。なお, TSは相対位置を測定するもので、地理座標は得られない。ここでは任意の1個体の地理座標を前述の2周波GNSS受信機およびPPK解析により求め、試験地基準点からその個体への方位角を算出した。試験地基準点の真の地理座標と算出された方位角を用いてTSにより測定した12個体の位置を地理座標に変換した。

地理座標の計算は統計パッケージRでsfライブラリを用い、距離の計算は平面直角座標系（CSII）上で行った。

III. 結 果

1. 試験地基準点のPPK測位の精度

場内および場外試験地の試験地基準点における開空度はそれぞれ85.4%と63.6%であった（図-1(b), (c)）。表-1および表-2に、場内および場外試験地の試験地基準点のPPK解析の概略を示した。測定時間は各反復においてRTKによる約90個体の苗木の測位に要した時間と同じ時間としたため、場内試験地で20・19・17分間であり、場外試験地で38・30・23分間であった。

場内試験地では、試行したすべての衛星仰角マスクにおいてFix解が得られた（表-1）。Fix解が得られる比率は[10°]から[45°]では5から6割の間の値をとり、[50°]では7割を超え最も高かった。また、整数値バイアスの決定の評価指標であるratio factorが最大値をとる割合も[50°]のときが最も高かった。地理座標の標準偏差は[10°]から[45°]では鉛直・水平方向共に2 cm以下と非常に小さな値であったが、[50°]の場合は鉛直方向で約3 m, 水平方向で約2~3 mと非常に大きかった。また信号を受信した衛星数（平均補足衛星数）は衛星仰角マスクが大きくなるに伴い減少した。

場外試験地では、[10°]から[15°]の衛星仰角マスクではFix解が得られない反復があったが、[20°]以上ではすべての反復でFix解が得られた（表-2）。衛星仰角マスクを大きくするにつれてFix解の比率は上昇する傾向があった。[40°]のときに特異的にFix解の比率が上昇したが、その要因は不明であった。Fix解が得られた[20°]から[35°]における標準偏差は2 cm以下となった。[40°]では標準偏差は鉛直・東西方向に50 cm程度となり、[45°]

以上では多くの場合1 m以上となった。[10°]から[15°]においてFloat解の中央値の標準偏差は10 cm以下であった。場内試験地と同様に、衛星仰角マスクが大きくなるに従い、平均補足衛星数は減少した。

場内・場外試験地ともに、Fix解の最適値と中央値についてその標準偏差は同様な値であった。また、衛星仰角マスクが[40°]より低い場合はFix解の中央値の標準偏差は常にFloat解の中央値の標準偏差以下の値となった（表-2）。

2. RTK測位による試験地内の植栽個体の地理座標の推定精度

RTK測位により推定された場内試験地と場外試験地の苗木の植栽位置が行と列の両方向に整列している様子が確認できたため、それらの植栽位置を概ね精度よく推定できたと思われる（図-4(a), (b)）。場内試験地の各個体の地理座標の3回の反復間の標準偏差は、水平方向は最大9.6 cm, 鉛直方向は最大16.5 cmであった（図-5(a)）。場外試験地における水平方向の標準偏差は最大で21.5 cm, 鉛直方向は最大で23.8 cmとなり（図-5(b)）、最大値でみると場内試験よりも大きな値となった（表-3）。一方で、平均値でみると場外試験地の標準偏差は場内試験の値よりも小さな値を示した。場外試験地では、多くの個体はほぼ同じ位置に推定されたが、一部の個体において反復間でずれが生じていた（図-4(b), 図-5(b)）。

各試験地において、約90個体のRTK測位に要した時間は上述した試験地基準点のPPK解析に用いた計測データの計測時間に等しい。場内試験地の測位では平均約19分間、個体当たり約13秒、場外試験地では平均約30分間、個体当たり約21秒の時間を要した。

3. 観測データの取得時間がPPK測位の精度に及ぼす影響

場内試験地の基準点について異なる日時に4回反復測定したデータについて、PPK解析に用いる観測データの時間を変化させた結果、短いものでは15分間のデータでFix解が得られた反復があり、長いものではFix解を得るために30分間以上のデータが必要な反復があった（J-Stage電子付録付表-1）。25分間までにFix解が得られなかった反復はFix解が得られた場合でもその比率は低かった。10分間から25分間のデータの解析においてFloat解の中央値に対して求めた標準偏差は最大で水平方向の30 cm程度であった。30分間以上ではすべての反復でFix解が得られ、その標準偏差は最大で東西方向の2.2 cmであった。解析に用いるデータの時間が30分間から60分間に長くなった場合、南北方向と鉛直方向の標準偏差は小さくなる傾向がみられたが、東西方向の標準偏差に明瞭な縮小の傾向はみられなかった。

4. 従来の手法との精度の比較

簡易測量による位置情報の標準偏差は、水平方向に平均約11 cm, 鉛直方向に平均約9 cmであった（表-3）。一方、ハンディGNSSを使った1周波単独測位では水平方向に平均約60 cm, 鉛直方向に平均約1.2 mとなった（図-6(b)）。クラスカル・ウォリス検定の結果は場内試験地において実施した三つの測位方法の違いによって位置情報の標準偏差の平均値が有意に異なることを示した（水平方向：クラスカ

図-4. 各試験地において PPK+RTK 測位した植栽苗の位置図

(a) 場内試験地, (b) 場外試験地。C94-M8P を用いて測位。3 回の反復測定を重ねてプロットした。□は試験地基準点を示す。等高線の間隔は 2 m。場内試験地は平坦であるため、等高線を示していない。場内試験地の三つの調査区域の角の 4 個体の中にプロットされた●はトータルステーションにより測量された個体位置を示す。場内試験地の矢印はトータルステーションで測量した個体の一例を示す。場外試験地の矢印は反復間で地理座標の標準偏差が大きかった個体の例を示す。

図-5. PPK+RTK 測位による各苗木個体の地理座標の精度

(a) 場内植栽地, (b) 場外植栽地。C94-M8P を用いて測位。個体毎に算出した 3 回の反復測定の標準偏差の頻度を示した。

図-6. 場内試験地における PPK+RTK 測位とハンディ GNSS 受信機による 1 周波単独測位による地理座標の精度

(a) PPK+RTK 測位, (b) ハンディ GNSS 測位。(a) は図-5 (a) と同じデータであるが、1 周波単独測位の横軸 (標準偏差) に合わせて、0.0~2.0 m の範囲で示した。

表-3. 場内試験地および場外試験地に植栽された苗木の RTK および従来手法による地理座標の測位精度

試験地	測位方法	測位器機	測定本数	標準偏差の平均±S. D. (最小値, 最大値) (m)	
				水平方向 ¹⁾	鉛直方向 ¹⁾
場内	PPK+RTK	C94-M8P	87	0.060 ± 0.013 (0.032, 0.096) ^a	0.125 ± 0.019 (0.068, 0.165) ^b
場内	簡易測量	TruPulse360	87	0.112 ± 0.041 (0.037, 0.222) ^b	0.088 ± 0.052 (0.018, 0.203) ^a
場内	1 周波単独測位	GPSMAP 64scJ	87	0.614 ± 0.164 (0.328, 0.988) ^c	1.217 ± 0.394 (0.315, 1.879) ^c
場外	PPK+RTK	C94-M8P	87	0.026 ± 0.037 (0.004, 0.215)	0.036 ± 0.045 (0.000, 0.238)

¹⁾異なる文字のついた平均値は互いに有意に異なる (クラスカルウォリス検定およびダン検定, $\alpha=0.05$)。

ル・ウォリス統計量=208.2, P 値<0.001; 鉛直方向: クラスカル・ウォリス統計量=182.8, P 値<0.001)。またダン検定による多重比較 ($\alpha=0.05$) によって水平方向では PPK+RTK, 簡易測量, ハンディ GNSS の順に, 鉛直方向では簡易測量, PPK+RTK, ハンディ GNSS の順に位置情報の標準偏差が有意に大きくなることが示された (表-3)。

5. 正確度の評価

場内試験地の基準点における 2 周波 GNSS の PPK 測位

による地理座標と, C94-M8P による PPK 測位 (衛星仰角マスク = [20°]) による地理座標の差は, 3 回反復の平均で水平方向に 0.91 (s.d.=0.99) cm, 鉛直方向に 7.8 (s.d.=1.2) cm であった。また 2 周波 GNSS 測位と TS により得られた地理座標と, PPK+RTK 測位により得られた 12 個体の地理座標の差の絶対値の平均は, 3 回の反復の平均で水平方向において 6.4 (s.d.=0.74) cm, 鉛直方向において 11.3 (s.d.=10.2) cm となった。

IV. 考 察

本研究では2カ所の試験地において、RTK-GNSSキットC94-M8Pを用いて、PPK解析による試験地基準点の測位を行い、適切なFix解が得られた場合その地理座標の標準偏差は2.1 cm以下であった（表-1：[10°から45°]，表-2：[20°から35°]，J-Stage電子付録付表-1：30分から60分）。各試験地において同キットを用いて約90本の植栽苗木をPPK+RTK方式で測位したところ、その地理座標の標準偏差は水平方向に平均2.6～6.0 cm、鉛直方向に3.6～12.5 cm程度であった。また、場内試験地における苗木12個体の真の地理座標（2周波GNSS受信機とTSにより得た）とC94-M8Pを用いたPPK+RTK測位で得た地理座標の差の絶対値は、水平方向で平均6.4 cm、鉛直方向で平均11.3 cmとなった。これらの結果は苗木の地理座標は高い精度と正確度で推定されていることを示唆する。本研究で得られた精度および正確度は、RTK-GNSS測位が水平方向に2～5 cm程度の誤差を持つとするこれまでの知見（例えば、測位衛星技術株式会社 2016）と概ね一致する。本研究は林地である場外試験地においても皆伐跡地であれば安価な1周波のRTK-GNSSキットを用いてcmレベルの測位精度が得られたことを示す。

1. 地理座標の精度に関係するPPK解析の設定とGNSS情報の観測時間等

場内試験地および場外試験地の試験地基準点のPPK解析において衛星仰角マスクの影響を検討したところ、場内試験地では[50°]において、また場外試験地では[40°]以上において測位精度の低下がみられた。一方、場外試験地では[10°]および[15°]でFix解が得られない場合があった。これらの結果から、その時々衛星配置によって状況は異なると考えられるが、衛星仰角マスク設定はまず[20°]程度から[35°]程度を検討すればよいと考えられた。また、異なる日時に場内試験地の基準点で取得した観測データを解析したところ、早い場合で15分間のデータで、遅い場合で30分間のデータでFix解が得られた。その後、解析に用いたデータの時間が長くなっても、標準偏差は1～2 cm程度で推移した。今回の結果は30分以上データを取得すれば高い精度でPPK解析が行えることを示唆する。今回用いたGNSSキットの受信機は各苗木個体のRTK測位のための基準局として機能すると同時にPPK解析のための観測データを取得することができる。数百～数千個体が植栽される林木育種の試験地ではRTKによる植栽個体の地理座標の測定に30分以上は必要であると考えられることから、基準局のPPK解析用の観測データの取得時間は植栽個体の地理座標の測定と平行して十分に確保できるといえる。

GNSS測位では上空の衛星からの信号しか受信できないために、鉛直方向の精度は水平方向の精度に劣るといわれている。今回の結果において、鉛直方向の標準偏差は水平方向の標準偏差と同程度かより大きい傾向があった。これは、従来の知見と一致するが、この結果の一部は今回の地理座標の記録において、水平方向は1から2 cm程度を単

位とする一方、鉛直方向は10 cmを単位としていたことが関係する可能性があり、設定を変えることにより精度が上昇する可能性がある。

2. 林木育種における個体管理への応用

GNSS測位を利用する場合、その目的に応じて必要となる精度は異なる。例えば農業分野では播種・畝立て・掘取り・除草等の作業は2～3 cm程度、耕耘や牧草刈取りは15～30 cm程度、代かきや肥料散布は20～60 cm程度の精度が必要とされている（ニコン・トリンブル 2019）。林業分野では露木ら（2006）が林道測量や地籍測量では1 m以下の精度、境界測量や森林資源モニタリング調査では数m以下の精度、動植物の生息調査や道案内ではより低い精度でよいことを示している。また、Kaartinenら（2015）は森林内で立木各個体をリモートセンシングデータとリンクするためには1 m程度の精度が必要であるとしている。今回、我々は林木育種のための試験地の設定時における植栽木の個体配置図の作成を目的としていた。試験地における植栽木の間隔が1.8 mであることを考えれば、PPK+RTK測位で得られた精度は十分である。

また、今回C94-M8Pを用いたPPK+RTK測位と苗木のQRコードラベルの自動認識を組み合わせて、ヒューマンエラーの少ない配置図作成手法を構築した。この手法によって、87個体の苗木の位置情報と系統情報を取得するために要した時間は平均25分間（17（最小値）～38（最大値）分間）であり、これは従来行ってきた人の目視と紙野帳を用いた方法と時間的にそれほど差はないと考えられるため、実際の業務に適用できると考えられた。

GNSS測位を苗木の植栽配置図の作成のような業務に適用する際には、短い待機時間で断続的に高精度な地理座標を取得する必要がある。今回用いたRTK-GNSSの他、VRS（Virtual Reference Station）-RTK方式や「みちびき」の補正情報を利用したCLAS（シーラス）がその様な測位方式にあたると考えられる。しかしながら、VRS-RTK方式はスマートフォン等を通じて位置情報の補正データを取得するため（吉村 2011）、林木育種の試験地では通信環境が確保できないために利用できない場合もある。CLASは「みちびき」が発するL6帯の電波を補正情報として使用するため、上空が開けていればどこでも使用することが可能であるが、このL6帯に対応したGNSS受信機は2019年時点では数十万～百万円以上と高価である（岡本 2019）。本論文で用いたC94-M8Pは10万円以下で購入可能であり、設定ソフトのu-centerや解析ソフトRTKLIBはwebから無料でダウンロードすることができるため、コストパフォーマンスに優れている。

3. 個体の形質や環境応答の評価への応用

本論で示した方法により、各個体の植栽位置を地理座標として表現することで、各個体の形質や環境応答の評価において新たな手法の適用が可能となる。例えば、地理情報システム（GIS）の発達により利用可能となった、地理座標に紐づけられた各種環境データに各個体の成長量を関連付けることが可能となり、各遺伝的系統の環境応答に関する解析が容易になる。また、各個体の植栽位置の標高の情

報は、後に上空からの画像等の解析によって樹高成長を評価する際の適切な基準値となりうる。

4. 今後の展望

本研究では比較的条件的の良い植栽地において簡易な RTK-GNSS キットの測位精度を確認し、QR コードラベルを組み合わせて、高い精度と正確度を持つ苗木の植栽配置図の作成方法を構築した。植栽配置図の作成は基本的に伐採跡地で実施するため、上空は開けている場合が多い。しかしながら、伐採地と非伐採地の境界近くでは、GNSS 情報の受信状況が悪化すると考えられる。事業的な運用のためには、より多くの試験地において知見の蓄積が必要となる。

本研究で示した手法は試験地だけでなく都道府県や認定特定増殖事業者等が設定する採種園・採穂園の配置図作成にも適用できる。本手法によってヒューマンエラーによる系統の誤った取り扱いが減り、高い精度の配置図が整備されることで、個体・系統が適切に管理され、育種によって得られた遺伝的な改良効果が造林用種苗に適切に反映される可能性が高まると考えられる。

謝 辞

九州育種場の職員の皆様には本研究の実行にあたり、場内試験地の管理や苗木の準備・植栽等様々な面でご協力頂いた。また九州森林管理局の皆様には場外試験地の管理等において大変お世話になった。この場をお借りしてお礼申し上げる。

引用文献

- 入江博樹 (2018) パソコンレスで 1 cm 測位! 920MHz 無線搭載キット C94-M8P. トランジスタ技術 2018 年 3 月号: 160-172.
- Jackson J, Saborio R, Ghazanfar SA, Gebre-Egziabher D, Davis B (2018) Evaluation of low-cost, centimeter-level accuracy OEM GNSS receivers. Minnesota Department of Transportation Research Services & Library <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/197453> (20190813 閲覧)
- Kaartinen H, Hyypä J, Vastaranta M, Kukko A, Jaakkola A, Yu X, Pyörälä J, Liang X, Liu J, Wang Y, Kaijalainen R, Melkas T, Holopainen M, Hyypä H (2015) Accuracy of Kinematic positioning using global satellite navigation systems under forest canopies. Forests 6: 3218-3236
- 小林裕之・矢田 豊・茶珍俊一・小神野和貴・野上由美子・鳥本秀幸 (2001) 森林内外での多機種の GPS 受信機による測位比較. 日林誌 83: 135-142

- 松永孝治・武津英太郎・竹田宣明・福山友博・大城浩司・澤村高至・松永 順・濱本 光・平尾知士・小野雅子・平岡裕一郎・佐藤新一・栗田 学・渡辺敦史・高橋 誠 (2015) ラベル現地複製システム「ラベルふえる君」. 森林遺伝育種 4: 82-86
- 松岡真如・小野寺栄治・川上利次・高野一隆・木村 稔 (2018) GNSS 測量で得られた面積の精度評価指標. 日林誌 100: 193-200
- Misra P, Enge P (2010) 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機 改訂第 2 版. 測位航法学会誌, 松香堂書
- 中川雅史 (2015) 絵でわかる地図と測量. 講談社
- ニコン・トリンブル (2019) Trimble スマート農業総合カタログ 2019. https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0501_agriculture/sougou_agriculture.pdf (20190815 閲覧)
- 農林水産省農林水産技術会議事務局 (2017) 「森林資源を最適利用するための技術開発—新世代林業種苗を短期間で作出するための技術の開発」. 農林水産省農林水産技術会議事務局研究成果 571
- 岡本 修 (2019) みちびき 4 機体制! 世界最強センチメートル測位サービス. トランジスタ技術 2019 年 2 月号: 41-44
- 小野雅子・栗田祐子・渡辺敦史 (2012a) 適正な系統管理に向けたラベルシステムの高度化. 森林遺伝育種学会第 1 回大会講演要旨集: 22
- 小野雅子・高橋 誠・渡辺敦史 (2012b) IC タグを利用した樹木個体管理システムの開発. 日本森林学会大会発表データベース 123: Pb030
- 測位衛星技術株式会社 (2016) GNSS の基本知識 Version 1.0. 測位衛星技術株式会社 <http://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2016/07/ddd790b4cae745d43594c4f302b14761.pdf> (20190813 参照)
- Takasu T (2013) RTKLIB ver.2.4.2 Manual. http://www.rtklib.com/rtklib_document.htm (20180904 閲覧)
- 高須知二・久保信明・安田明生 (2007) RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価および応用. GPS/GNSS シンポジウム 2007, 2017/11/20-22 東京海洋大学
- Takenaka A (2009) CanopOn 2 (Ver 2.03) takenaka-akio.cool.ne.jp/etc/canopon2/ (20190424 閲覧)
- 露木 聡・李 定洙・Phua MH・平田泰雅 (2006) 森林で GPS をもって有効に使うために—高感度 GPS 受信機の森林内における利用可能性—森林計画誌 40: 283-291
- U-blox (2017) C94-M8P u-blox RTK アプリケーション・ボード・パッケージ <https://www.u-blox.com/ja/product/c94-m8p> (20190813 閲覧)
- 内山庄一郎 (2018) RTKLIB による解析. JGU 夏の学校 2018 in 北海道「UAS (ドローン) 地形計測のさらなる進化 https://hdttopography.github.io/learning/book/GNSS/RTKLIB_uchiama_20180729_v3.s.pdf (20190909 閲覧)
- 渡辺敦史・宮本尚子・高橋 誠・三浦真弘・植田 守 (2010) DNA タイピングと IC タグを利用した新たな系統管理手法. 日本森林学会大会発表データベース 121: 684
- 吉村哲彦 (2011) 林業 GPS の発展過程と現状. (新林業 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). 122-125
- 全国林業改良普及協会 (2011) 続・林業 GPS 徹底活用術 応用編. 全国林業改良普及協会