

速報

熊本県甲佐町に植栽したスギ交配家系11年生林の地上部バイオマスの推定*¹酒井佳美*²・金谷整一*²・松井由佳里*³・稲垣昌宏*²・松本麻子*⁴

酒井佳美・金谷整一・松井由佳里・稲垣昌宏・松本麻子：熊本県甲佐町に植栽したスギ交配家系11年生林の地上部バイオマスの推定
九州森林研究 70：109－112, 2017 森林生態系の物質循環における基礎情報として森林の地上部バイオマスは、世界各地で測定し、データが蓄積され広く活用されている。筆者らは熊本県甲佐町でスギ交配家系11年生林分での伐倒調査をおこない、バイオマス推定式を作成しその推定精度評価をおこなった。調査対象林分の胸高直径の平均値±SEは14.8±0.1 cm、樹高が11.89±0.05 mであった。調査対象木10本の胸高直径、樹高、生枝下高、樹冠長を測定し、バイオマスは幹、葉枝、および、全重量として幹と葉枝を合計した乾燥重量を測定した。幹と葉枝のバイオマスには $W = a D^b H^c$ (W :重量, D :胸高直径, H :樹高, a, b, c :係数)による推定値は実測値とほぼ1:1の関係を示し、推定評価指標の数値も他のモデルよりも良く、推定式として適切であると考えられた。葉枝については、樹高のかわりに樹冠長を使用するとより精度が良くなることが示された。全重量は、部位別に推定した方が精度は良いと考えられた。同じ推定モデルで作成されたスギの31年生の幹バイオマス推定式の係数を比較すると、胸高直径と樹高にかかる相対成長係数の b と c が異なっており、樹齢とともに係数が変化することが示された。

キーワード：バイオマス推定、相対成長式、樹冠長

I. はじめに

森林の地上部バイオマスは、森林生態系の炭素循環における基礎情報として必須の情報であり、世界各地で測定されている。地上部バイオマスは、対象とした林分において調査木の幹、枝、葉の乾燥重量や、胸高直径や樹高などの測定値をもとにして相対成長関係 ($y = ax^b$) による推定式を作成し推定する。より精度の高いバイオマス推定を目指し、樹種や森林のタイプなどによって、使用するパラメーターや推定式の改変が提案されている。一方、これらのバイオマス推定式は任意の調査林分に対して作成されており、他の林分へ適用すると多大な推定誤差を生じることになる。そこで、近年では広域で利用可能なバイオマス推定式の作成を目指し、多様な地域、樹種等のバイオマス調査データを既存のデータも含めて収集し包括的に解析する試みもおこなわれている (Hosoda and Iehara, 2010; Ishihara *et al.*, 2015 など)。Hosoda and Iehara (2010) は、同齢林のスギ、ヒノキ、カラマツ人工林のバイオマスデータを広域から収集し、樹種毎にバイオマス推定式を作成し、その推定精度を評価し、最適な推定式を示している。筆者らはスギ交配家系11年生林分での伐採調査をおこなう機会に恵まれた。そこで、伐採調査によって得られた調査個体の測定データを元にして、Hosoda and Iehara (2010) を参考にして地上部バイオマス推定式を作成し、その推定精度の評価結果を得たので報告する。

II. 調査方法

(1) 調査地

試験地は熊本県上益城郡甲佐町の舞の原試験展示林内の平成17年4月に植栽されたスギ林である。0.21 haの試験地内に、スギ交配家系を443本と林縁にシャカイン97本を植栽し、植栽密度3000本 ha⁻¹とした。試験地は3つに分けられ(1B, 2B, 3B)、それぞれスギ交配家系150個体を3反復として植栽している(図1)。

(2) バイオマス調査

調査地において、2015年11月に全ての植栽木を伐採した。スギ交配家系は418本であった。スギ交配家系の全ての胸高直径(cm)、樹高(m)、生枝下高(m)を測定した。全ての伐採木の概況を表1に示した。胸高直径(cm)、樹高(m)、生枝下高(m)、および、樹高と生枝下高の差分を樹冠長(m)として頻度分布を図2に示した。

1Bの伐採木の中から10本の調査対象木を選抜した。胸高直径(cm)、樹高(m)、生枝下高(m)を測定し、樹冠長(m)を



図1 調査林分の概略図

*¹ Sakai, Y., Kanetani, S., Matsui, Y., Inagaki, M. and Matsumoto, A.

: Aboveground biomass estimation of 11-year trees of *Cryptomeria japonica* at Kumamoto prefecture in Kyushu Island.

*² 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan.

*³ 熊本県天草広域本部 Amakusa wide area headquarters, Kumamoto 863-0013, Japan.

*⁴ 森林総合研究所 For. & Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan.

計算した。スギの地上部は幹と葉枝に切り分けた。本調査では葉と枝を合わせ葉枝とした。幹は1-2 mに玉切りして生重量を測定した。全ての玉切り個体から円板を採取した。円板を乾燥させて乾燥係数を求め玉切り個体の乾燥重量を算出し、幹1本分の玉切り個体の数値を合算して乾燥重量(kg)とした。葉枝は個体1本分の全量の生重量を測定し、一部を乾燥させて乾燥係数を求めた。葉枝の生重量に乾燥係数を掛け合わせて乾燥重量を算出した。本試験地では枯死枝の枝打ちがおこなわれたので、枯死枝は測定対象としなかった。バイオマス調査対象木の概況を表2に、個体ごとの数値をAppendixに示した。

(3) 統計

バイオマスの推定に使用したモデルは、スギの31年生林において個体レベルでのバイオマス推定のための推定式を比較したHosoda and Iehara (2010)を参考にして、以下の4つのモデルを使用することとした。

$$W = a D^b \quad \text{(Model 1)}$$

$$W = a (D^2 H)^b \quad \text{(Model 2)}$$

$$W = a D^b H^c \quad \text{(Model 3)}$$

$$W = (D^2 H) / (a + bD) \quad \text{(Model 4)}$$

Wは重量であり、 W_s を幹重量、 W_{lb} を葉枝重量、 W_{all} を全重量とした。Dは胸高直径、Hは高さであり樹高を使用した。

葉枝重量に関しては、Model 2とModel 3では、樹高の代わりに生枝下高(H_{branch})と、樹高と生枝下高の差分である樹冠長(L_{crown})を使用した下記のモデルを用いた推定値の比較もおこなった。

$$W_{lb} = a (D^2 H_{branch})^b \quad \text{(Model 2-b)}$$

$$W_{lb} = a D^b H_{branch}^c \quad \text{(Model 3-b)}$$

$$W_{lb} = a (D^2 L_{crown})^b \quad \text{(Model 2-c)}$$

$$W_{lb} = a D^b L_{crown}^c \quad \text{(Model 3-c)}$$

なお、a, b, cは係数である。

推定式の評価には、推定精度の指標となるRMSE (root mean square error), 推定値の不変性の指標としてBias (mean bias), モデルとデータの当てはまりの指標であるFI (fit index), そして赤池情報量基準のAIC (Akaike's information criterion)を使用した。算出方法を下記に示す。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n}$$

$$\overline{Bias} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n$$

$$FI = 1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

$$AIC = n \log \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n \right\} + 2p$$

$y_i, \hat{y}_i,$ および \bar{y}_i は、順に実測値, 推定値, そして実測値の平均値である。 n はサンプルサイズ、 p は使用したパラメーターの数を示す。

統計解析にはR ver. 3.3.2 (R Development Core Team, 2016)を使用した。モデルの近似にはnlmeパッケージ (Ver. 3.1-128)の非線形最小二乗法gnlsを使用した。

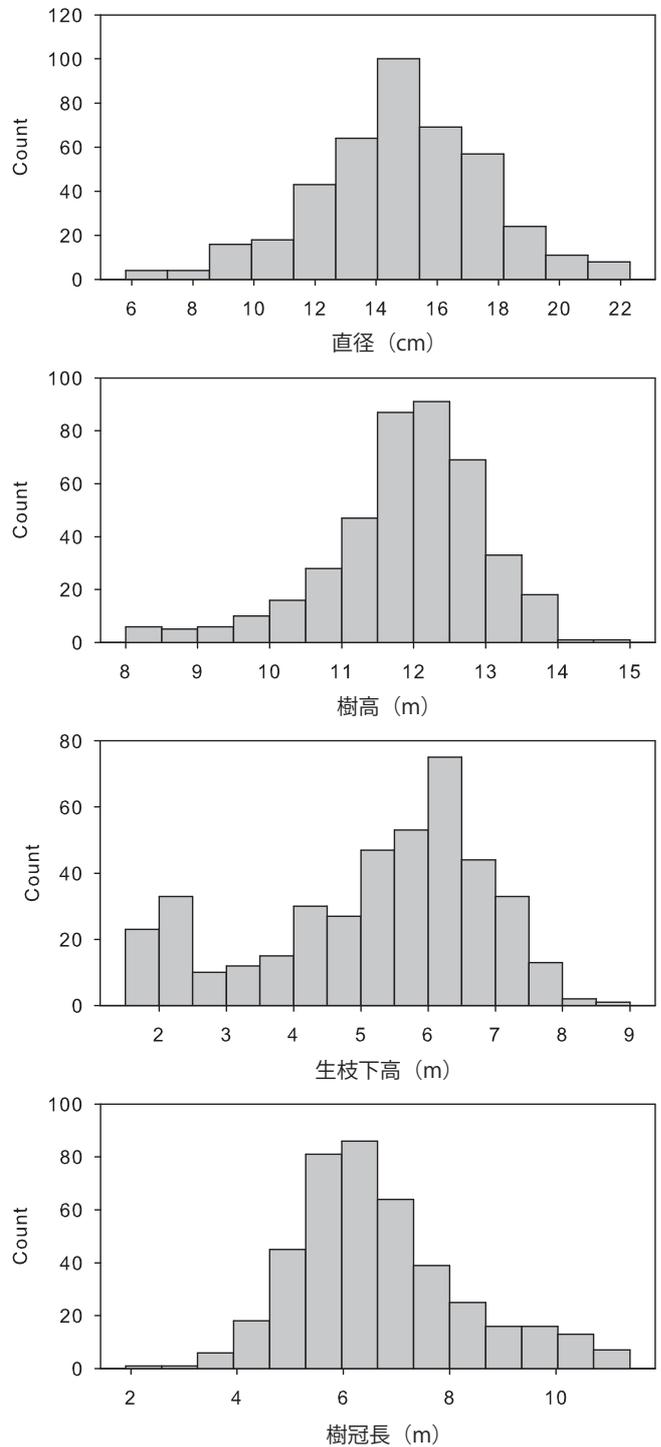


図2 調査林分のスギ交配家系11年生林の胸高直径, 樹高, 生枝下高, および樹冠長の頻度分布 (n = 418)

Ⅲ. 結果

(1) 調査林分のスギ個体の胸高直径と樹高, 生枝下高, および樹冠長

スギ交配家系11年生林の418個体の胸高直径の平均値 ± SEは14.8 ± 0.1 cm, 樹高が11.89 ± 0.05 m, 生枝下高が5.21 ± 0.08 m, 樹冠長が6.68 ± 0.08 mとなった(表1)。全個体の胸高直径, 樹高および樹冠長の頻度分布は一山型であったが、

生枝下高は6.0-6.5 mのピークとは別の1.5-2.5 mのピークが存在した(図2)。調査対象木のそれぞれの平均値は、林分での平均値に概ね近い値であった(表2)。

表1 調査林分のスギ交配家系11年生の胸高直径、樹高、生枝下高、および樹冠高の平均値(n=418)

| | 胸高直径 D (cm) | 樹高 H (m) | 生枝下高 H_{branch} (m) | 樹冠長 L_{crown} (m) |
|------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 平均 | 14.8 | 11.89 | 5.21 | 6.68 |
| 標準誤差 | 0.1 | 0.05 | 0.08 | 0.08 |
| 中央値 | 14.9 | 12.03 | 5.62 | 6.44 |
| 最小 | 5.8 | 8.05 | 1.72 | 1.90 |
| 最大 | 22.3 | 14.55 | 8.51 | 11.39 |

表2 調査対象木の胸高直径、樹高、生枝下高、および樹冠長の平均値(n=10)

| | 胸高直径 D (cm) | 樹高 H (m) | 生枝下高 H_{branch} (m) | 樹冠長 L_{crown} (m) |
|------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 平均 | 14.6 | 11.80 | 4.49 | 7.30 |
| 標準誤差 | 1.0 | 0.31 | 0.38 | 0.60 |
| 中央値 | 14.8 | 11.68 | 4.75 | 7.50 |
| 最小 | 8.7 | 10.30 | 1.92 | 4.87 |
| 最大 | 19.5 | 13.31 | 6.10 | 11.28 |

(2) 幹、葉枝、および全量バイオマスの推定

幹、葉枝、全量について Model 1-4 を使用したバイオマス推定値から得られた4つの指標で推定に適切なモデルを検討した(表3)。幹バイオマスはいずれのモデルにおいても、葉枝や全量のバイオマスに比べて、RMSEが低く、かつ、他の指標もモデル間での差が小さく精度良く推定された。その中でも、Model 3はRMSEが最も低く、より精度良く推定可能な推定式であった。葉枝バイオマスでは、高さに樹高を使用した場合にはRMSEが3.5 kg程度となり、幹よりも推定誤差が大きく、FIも低くなった。Model 2と3において、高さを生枝下高、あるいは樹冠長にして推定をおこなったところ、Model 3でのRMSEが低くなった(Model 3-b, 3-c)。特に樹冠長を使用した場合(Model 3-c)に推定精度が改善され、FIとAICも改善された。全重量の場合には、いずれのモデルでもRMSEが4.5 kg程度になり他の指標もモデル間での差は小さかった。しかし、全量のRMSEよりも、幹と葉枝のバイオマスをそれぞれ最良のモデル(Model 3, Model 3-c)で個別に推定した際のRMSEの合計値の方が低く、バイオマス推定式は部位別に作成した方が推定精度は良かった。

IV. 考察

スギ11年生の地上部バイオマスの推定に Model 3 である $W=aD^bH^c$ を使用した推定値は実測値とほぼ1:1の直線上に重なり(図3)、推定の評価指標の数値も他のモデルよりも良く、推定式として適切であると考えられた。スギ31年生124林分を使用した地上部バイオマスの推定においても本モデルの優位性が示されており(Hosoda and Iehara, 2010)、スギのバイオマス推定には適したモデルであると考えられた。葉枝バイオマスには、樹

表3 Model 1-4による、幹、葉枝、および全量バイオマス推定の評価

| 部位 | 高さの種類 ¹⁾ | Model | RMSE (kg) | Bias (kg) | FI | AIC |
|----|---------------------|-------|-------------|------------------|-------------|--------------|
| 幹 | 樹高 | 1 | 1.92 | 3.89E-16 | 0.98 | 47.13 |
| | 樹高 | 2 | 1.61 | -1.09E-04 | 0.98 | 43.95 |
| | 樹高 | 3 | 1.54 | -2.02E-03 | 0.98 | 45.15 |
| | 樹高 | 4 | 1.56 | 9.08E-04 | 0.98 | 43.31 |
| 葉枝 | 樹高 | 1 | 3.44 | 2.79E-04 | 0.83 | 56.47 |
| | 樹高 | 2 | 3.61 | 3.87E-05 | 0.81 | 57.00 |
| | 生枝下高 | 2-b | 8.18 | -1.00E-06 | 0.03 | 76.98 |
| | 樹冠長 | 2-c | 2.07 | 8.00E-07 | 0.94 | 46.46 |
| | 樹高 | 3 | 3.32 | 3.20E-06 | 0.84 | 58.37 |
| | 生枝下高 | 3-b | 1.82 | -4.69E-04 | 0.95 | 48.25 |
| | 樹冠長 | 3-c | 1.50 | -3.99E-05 | 0.97 | 43.41 |
| | 樹高 | 4 | 3.50 | 5.10E-06 | 0.82 | 56.63 |
| 全量 | 樹高 | 1 | 4.51 | -6.60E-03 | 0.95 | 63.93 |
| | 樹高 | 2 | 4.59 | -6.59E-03 | 0.95 | 63.59 |
| | 樹高 | 3 | 4.56 | -6.59E-03 | 0.95 | 65.58 |
| | 樹高 | 4 | 4.67 | -6.55E-03 | 0.95 | 63.81 |

¹⁾ Model 1-4において、 H に使用した高さ: 樹高、生枝下高、樹冠長。
・太字は同一部位内で推定指標値が最良であったものを示す。

高よりも樹冠長を使用することでより精度良く推定できることが示された。樹冠長は着葉部分の高さを示していることから樹高と比べて葉量の推定に適していたのだろう。しかし、閉鎖林分では葉量や樹冠長が一定となることが知られている(只木・蜂屋, 1968, 竹内ら, 1997など)。本調査林分は林齢が11年と若かったため、林冠閉鎖してからの期間が短く葉量や樹冠長が一定に達していなかったため、葉枝バイオマスの推定に樹冠長を用いたモデルが適していた可能性がある。林冠閉鎖後の経過年を経た林分においてさらに確認する必要がある。

スギ31年生のバイオマス推定式(Hosoda and Iehara, 2010)を用いて、本調査個体の幹と葉枝バイオマスを推定すると、サイズの大きな個体ほど実測値との誤差が大きくなった(図3)。幹バイオマスの推定式の係数を比較すると、11年生の a , b , c は順に、0.03, 1.38, 1.36であったが(表4)、31年生では、順に0.03, 1.63, 1.15となり、 b と c に差が生じていた。つまり、樹齢とともに胸高直径と樹高にかかる相対成長係数が変化したといえる。より推定精度の高い推定式の作成には林齢にあわせたものであることが望まれる。しかし、現実的にはそれぞれ作成することは困難であり、求められる精度とコストとの兼ね合いで決められるべきであろう。

表4 幹、および葉枝バイオマス推定モデルの係数

| | 幹 | | 葉枝 | | | |
|-----|--------------|------|------------------|------|-------------------|------|
| | Coefficients | SE | 樹高 ¹⁾ | | 樹冠長 ²⁾ | |
| | Coefficients | SE | Coefficients | SE | Coefficients | SE |
| a | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.19 | 0.05 | 0.03 |
| b | 1.38 | 0.28 | 3.19 | 1.55 | 0.94 | 0.41 |
| c | 1.36 | 0.71 | -1.06 | 3.64 | 1.58 | 0.32 |

使用モデル $W=aD^bH^c$ ¹⁾: H = 樹高, ²⁾: H = 樹冠長

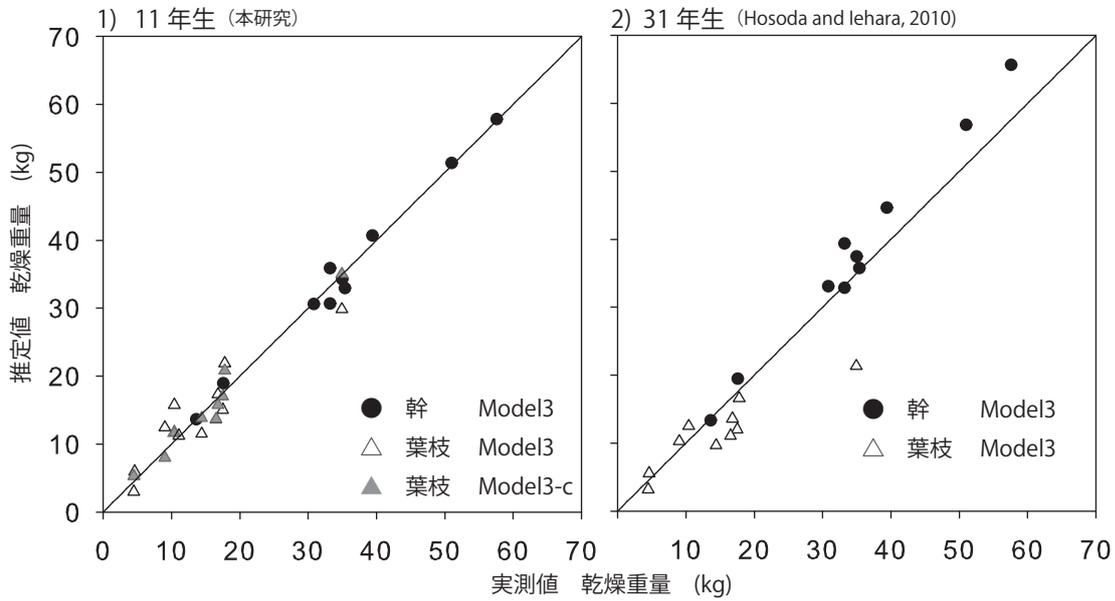


図3 スギ個体の幹重量と葉枝重量の実測値と推定値 1) 本研究, 2) スギ31年生林において得られた推定式 (Hosoda and Iehara, 2010) を使用した本調査対象木の重量推定値

V. 終わりに

スギ11年生の地上部バイオマスの推定モデルを示した。より精度を追求すると樹種や場所、林齢等に制限のある推定モデルとなっていく。地上部バイオマスデータの取得には時間とコストを要するため、必要な精度とのバランスを検討する必要がある。近年の広域で利用可能なバイオマス推定式作成への検討は解決策の1つだと考えられる。本報告では、Appendixとして使用したデータを掲載した。このようなデータの蓄積は今後より重要になると考えられる。

謝辞

本研究は森林総合研究所交付金プロジェクト「有用遺伝子の特定向けたスギ全ゲノム走査」によって実施された。本試験地は津村義彦氏（現 筑波大）と草野僚一氏（現 熊本県菊池地域振興

局）によって設定されたものである。また、調査にあたり熊本県林業研究指導所、ならびに森林総合研究所九州支所に多大な協力をいただいた。サンプル試料測定には阪本由美子氏と作森あかね氏に協力いただいた。ここに記し謝意を示す。

引用文献

Hosoda, K. and Iehara, T. (2010) J For Res 15: 299-306.
 Ishihara, M. *et al.* (2015) Ecol Appl 25: 1433-1446.
 只木良也, 蜂屋欣二 (1968) わかりやすい林業研究解説シリーズ 29 森林生態系とその物質生産, 64 pp, 林業科学技術振興所, 東京.
 R Development Core Team (2016) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, URL:<http://www.R-project.org>
 竹内郁雄ほか (1997) 日林誌 79: 137-142.
 (2016年12月22日受付; 2017年1月12日受理)

Appendix 調査対象木のスギ交配家系11年生の胸高直径, 樹高, 生枝下高, 樹冠長と重量

| No. | 胸高直径 D (cm) | 樹高 H (m) | 生枝下高 H_{branch} (m) | 樹冠長 L_{crown} (m) | 幹重量 W_s (kg) | 葉枝重量 W_{lb} (kg) | 全重量 W_{all} (kg) |
|-----|---------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 8.7 | 10.30 | 4.82 | 5.48 | 13.61 | 4.46 | 18.07 |
| 2 | 10.9 | 10.48 | 5.61 | 4.87 | 17.62 | 4.64 | 22.26 |
| 3 | 13.9 | 11.68 | 4.02 | 7.66 | 33.19 | 14.40 | 47.59 |
| 4 | 14.1 | 11.46 | 6.10 | 5.36 | 30.81 | 9.03 | 39.84 |
| 5 | 14.6 | 11.67 | 4.29 | 7.38 | 35.39 | 16.51 | 51.91 |
| 6 | 15.1 | 11.65 | 3.33 | 8.32 | 35.00 | 17.55 | 52.55 |
| 7 | 15.4 | 11.82 | 5.34 | 6.48 | 33.19 | 10.39 | 43.58 |
| 8 | 16.1 | 12.38 | 4.76 | 7.62 | 39.36 | 16.83 | 56.19 |
| 9 | 17.7 | 13.31 | 4.73 | 8.58 | 51.03 | 17.85 | 68.88 |
| 10 | 19.5 | 13.20 | 1.92 | 11.28 | 57.57 | 34.90 | 92.47 |