

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21580175

研究課題名（和文） 広葉樹林地帯における成長量の空間分布の予測

研究課題名（英文） Predicting the spatial distribution of growth in hardwood forest areas

研究代表者

龍原 哲 (TATSUHARA SATOSHI)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：40227103

研究成果の概要（和文）：本研究では、広葉樹が中心となって分布する森林地帯を対象として森林の成長量を空間的に把握するための手法、特に回帰方法について検討した。単木バイオマスを推定する式を求めるために、一般化非線形回帰が有用であることを示した。一般化非線形回帰で求めた林分材積－バイオマスの関係式によって精度よく林分バイオマスを推定できることを示した。空間変動を考慮に入れて林分材積を推定するためには地理的加重回帰が有用であることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study examined methods, especially regression methods, used to estimate the spatial distribution of growth in forest areas where hardwoods dominated. Generalized non-linear regression proved to be useful for developing equations to represent individual tree biomass. The stand biomass could be estimated accurately using a stand volume - biomass model developed using generalized non-linear regression. Geographically weighted regression proved to be useful for predicting the spatial distribution of stand volume.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学、森林科学

キーワード：回帰モデル、広葉樹、バイオマス、林分材積

1. 研究開始当初の背景

COP3（第3回気候変動枠組条約締約国会議）で京都議定書を議決して以来、二酸化炭素排出量削減問題の中で森林による二酸化炭素量吸収量の算定が問題になっており、森林が有する二酸化炭素吸収機能をより詳細に評価したり、二酸化炭素吸収機能を発揮させるための持続可能な森林経営の手法が求められるようになった。京都議定書で二酸化炭素吸収量の算定の対象となっている森林

はARD（新規植林、再植林、森林減少）に相当する林分や適切な森林経営が行われた林分に限定されている。天然林が日本の森林の6割を占め、その大部分は広葉樹林であるが、広葉樹林はスギやヒノキなど針葉樹の人工林に比べて京都議定書におけるRMU（吸収源活動による吸収量）として算定される割合が低い。しかし、広葉樹林の中には現在でも成長を継続している森林もあると考えられる。

わが国においては針葉樹人工林が木材生産の中心となっているため、針葉樹林の動態や成長予測手法に関する研究が多く行われてきた。そのため針葉樹人工林に関してはこれまでの研究をもとに二酸化炭素量吸収量の推定を行うのは比較的容易といえる。他方、広葉樹林に関しては針葉樹林ほど、このような研究は行われていない。

2. 研究の目的

本研究では山岳地域に広域に渡って分布する広葉樹林を中心とする森林地帯を対象として、森林による二酸化炭素吸収量のもとになるバイオマス成長量、材積成長量の空間分布を推定するための手法を検討する。特定の林分のバイオマスを詳細に推定するためには、林分内の立木の胸高直径等を測定し、それをもとに立木のバイオマスを計算し、全立木について積算する。一方、大面積に渡ってバイオマスを推定する場合、詳細に調査した林分のバイオマスをもとに林分単位に推定するほうが現実的である。そこで、本研究ではバイオマス推定値の精度に大きな影響を与える回帰法に着目し、次の3項目について重点的に研究した。

(1) 単木バイオマスの推定

林分のバイオマスや炭素蓄積を推定する際、立木の胸高直径や樹高と立木各部分のバイオマスとの間で求めた関係式を各立木に適用する。そのため、バイオマスや炭素蓄積を推定するためには、バイオマスデータから関係式のパラメータを正確に推定することが重要である。そこで、比較的少数のバイオマスデータから相対成長式のパラメータを推定する場合の、線形回帰と非線形回帰の利用について検討した。

(2) 林分バイオマスの推定

林分バイオマスは上記のように単木のバイオマスを積算して求めるが、胸高断面積や林分材積など林分属性値だけがデータとして残っている場合には、林分属性値から直接林分バイオマスを推定する必要がある。そのため、できるだけ少ない林分属性値を用いて林分バイオマスの推定する手法について検討した。

(3) 林分材積の空間変動

林分材積は重回帰モデルや他の通常重回帰モデルを用いることによって、他の林分変数から推定することができる。しかし、重回帰モデルでは対象地全体を対象としたパラメータしか推定できないため、林分変数の空間変動を示すことができない。そこで、林分材積を樹齢と胸高断面積に関連させる線形モデルを定式化し、重回帰と地理的加重回帰を用いてデータを解析した。

3. 研究の方法

(1) 単木バイオマスの推定

新潟県佐渡市においてミズナラが優占する落葉広葉樹二次林内に4箇所の区画を設置した。4つの区画の外側から31本の試料木を伐採した。各試料木は幹、枝、葉に分離し、各部の乾燥重量を求めた。そのうち、10本の試料木については、さらに根系を掘り出し、根の乾燥重量も求めた。

バイオマスの推定によく用いられる次の3つの式を立木の各部分に当てはめた。

$$y = a D^b \quad (1)$$

$$y = a (D^2 H)^b \quad (2)$$

$$y = a D^b H^c \quad (3)$$

ただし、 y は各部分のバイオマス、 D は胸高直径、 H は樹高、 a 、 b 、 c はパラメータ

その際、①測定値に重みを付けない非線形回帰、②測定値の冪乗として表される重みを測定値に付ける一般化非線形回帰、③測定値の対数に対数変換された式を当てはめる対数線形回帰、の3種類の最小二乗法を適用した。関数を $y = f(x)$ 、誤差項を ε_i 、誤差項の分散を $\text{var}(\varepsilon_i)$ で表すと、3種類の回帰モデルはそれぞれ、式(4)~(6)のように表される。

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, \text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 \quad (4)$$

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, \text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 [f(x_i)]^{2\theta} \quad (5)$$

$$\ln(y_i) = \ln[f(x_i)] + \ln(\varepsilon_i), \text{var}[\ln(\varepsilon_i)] = \sigma^2 \quad (6)$$

予測値の精度と偏りを求めて回帰モデルの間で誤差を比較した。

また、最も適合度の良かった相対成長式を4区画の立木データに適用して林分バイオマスを推定し、回帰モデルの間で推定値の比較を行った。

(2) 林分バイオマスの推定

インドネシア、ジャワ中部にあるチーク人工林内にモデル作成用の区画を755箇所、モデル検証用の区画39箇所を設置した。各区画で調査を行い、バイオマス、林齢、平均樹高、平方平均直径、胸高断面積合計、立木本数、林分材積の情報を得た。モデル作成用のデータを用いて、一般化線形回帰および一般化非線形回帰により林分材積-バイオマス、胸高断面積合計-バイオマス、林齢-バイオマス、林齢・胸高断面積合計-バイオマスの4種類のバイオマス推定式のパラメータを求めた。

$$W = a + b V \quad (7)$$

$$W = a V^b \quad (8)$$

$$W = a + b G \quad (9)$$

$$W = a G^b \quad (10)$$

$$W = a + b \ln A \quad (11)$$

$$W = A / (a + bA) \quad (12)$$

$$W = a \exp(b/A) \quad (13)$$

$$W = a (1 - \exp(-A/b)) \quad (14)$$

$$W = a + bA + cG \quad (15)$$

$$W = a A^b G^c \quad (16)$$

ただし、 W は林分バイオマス、 V は林分材積、 G は胸高断面積、 A は林齢、 a 、 b 、 c はパラメータ。

推定式の適用結果からこれらの推定式の適合度を比較した。更に、モデル検証用のデータを用いてこれらの推定式の精度と偏りを求めて誤差を比較した。

(3) 林分材積の空間変動

インドネシア、ボゴールにあるアカシア・マンギウム人工林内に約 200m間隔で 247 個の円区画を設置した。各区画で調査を行い、林齢、林分材積、胸高断面積の情報を得た。また、区画の中心の位置座標を得た。林分材積を樹齢と胸高断面積に関連させる線形モデルを定式化し、重回帰と地理的加重重回帰を用いてデータを解析した。重回帰と地理的加重重回帰はそれぞれ式(17)、(18)のように表される。

$$y_i = a + b x_{1i} + c x_{2i} + \varepsilon_i \quad (17)$$

$$y_i = a_{(ui,vi)} + b_{(ui,vi)} x_{1i} + c_{(ui,vi)} x_{2i} + \varepsilon_i \quad (18)$$

ただし、 y_i は林分材積、 x_{1i} は林齢、 x_{2i} は胸高断面積合計を表す。 a 、 b 、 c はパラメータ、 ε_i は誤差項、 (ui,vi) は区画の中心の位置座標

パラメータの推定値と適合度検定統計量によって重回帰モデルと地理的加重重回帰モデルを比較した。

4. 研究成果

(1) 単木バイオマスの推定

ほとんどの場合に関して重み無し非線形回帰モデルや対数線型回帰モデルより一般化非線形回帰モデルのほうが若干小さい誤差を示した。枝バイオマスと葉バイオマスはいずれも回帰式の周りの変動が大きかったが、一般化非線形回帰法の重みと測定値の関係を表す冪乗式の θ の値が異なっていた。枝バイオマスの場合のように θ の値が大きい場合、対数線型回帰法が一般化非線形回帰法より若干誤差が小さくなった。

根バイオマスの場合は式(1)が、それ以外の場合は式(2)が最も適合度が良かった。そこで、これらの式を用いて4区画の林分バイオマスを推定した。その結果、幹バイオマスの場合には回帰モデル間の違いはわずかしかなかったが、枝バイオマスや葉バイオマスの場合には回帰モデルによって林分バイオマスの推定値に大きな違いが出る可能性があることが示された。

立木各部のバイオマスを推定する際には従来から対数線形回帰モデルが一般に用いられているが、一般化非線形回帰モデルを用いることにより誤差のより小さいバイオマス推定式を求めることが可能となった。

(2) 林分バイオマスの推定

林分材積-バイオマス式はいずれも良好

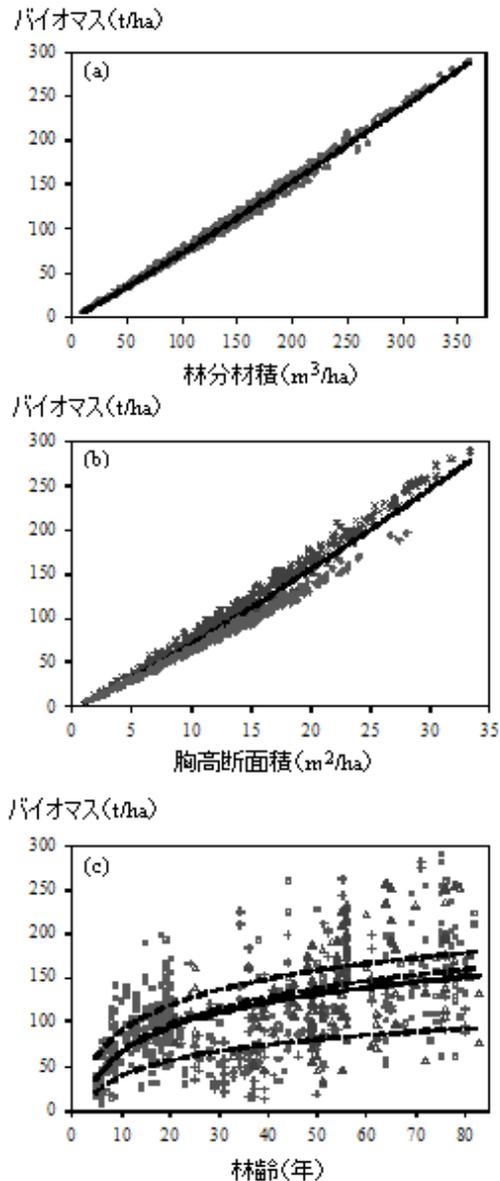


図1 チーク林における林分バイオマスと(a)林分材積、(b)胸高断面積、(c)林齢の散布図

(b)において◆は若齢林、×は壮齢林を示す。(c)において+は地位下、□は地位中、△は地位上を示す。実線は全地位のデータに対して当てはめた曲線、破線はそれぞれ各地位のデータのみに対して当てはめた曲線を示す。

な結果を示したが、式(7)より式(8)のほうが適合度、誤差ともに小さかった(図1(a)、(b))。胸高断面積合計-バイオマス式は林分材積-バイオマス式よりは不正確であったが、式(9)より式(10)のほうが適合度、誤差ともに小さかった。林齢-バイオマス式は変動が大きいため良好な結果は得られなかった(図1(c))。林齢・胸高断面積合計-バイオマス式はいずれも良好な結果を示したが、

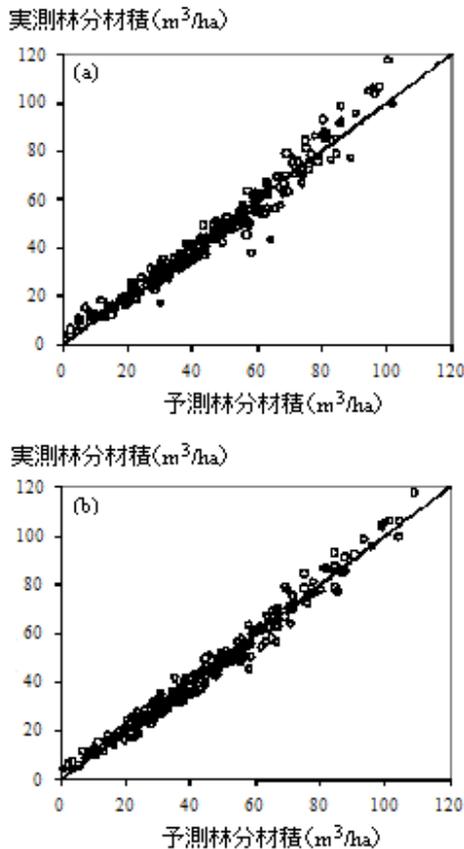


図2 アカシア・マンギウム林における林分材積の予測値と実測値の散布図
(a) 重回帰で予測した場合、(b) 地理的加重重回帰で予測した場合

式(15)より式(16)のほうが適合度、誤差ともに小さかった。

チーク林分バイオマスを推定する上で林分材積-バイオマスのモデルが最も正確であることが示された。林齢・胸高断面積合計-バイオマスのモデルの精度は林分材積-バイオマスのモデルに匹敵したが、林齢-バイオマス、胸高断面積合計-バイオマスのモデルの精度はこれら2つのモデルより低かった。

林分材積がわかれば、高い精度で林分バイオマスを推定できるが、林分材積がわからない場合、林齢と胸高断面積合計の組み合わせからも高い精度で林分バイオマスを推定できる。入手可能な林分情報に応じて、林分バイオマス推定式を選択し、チーク林分バイオマスの推定に用いることが可能となった。

(3) 林分材積の空間変動

重回帰モデルでは林分材積が 12m^3 より少ない林分と 60m^3 より多い林分で推定値が過小となり、その中間の林分材積を持つ林分でも外れ値が見られた。他方、地理的加重重回帰モデルを適用することによって、決定係数は増加したものの、適合度は向上し、誤差が減少

し、全体的に当てはまりが良くなった(図2)。また、パラメータ a 、 b 、 c の値の変動幅は重回帰モデルに比べて地理的加重重回帰モデルのほうが大幅に大きくなり、地理的加重重回帰モデルにより局地的な影響をうまく表現することができたといえる。

地理的加重重回帰モデルは林分材積と樹齢、胸高断面積との関係の空間変動を示すことができるだけでなく、重回帰モデルより予測精度が良いことが示された。地理的加重重回帰モデルのよって、普通の重回帰モデルでは示すことができない林分属性の空間的変動をモデル化することが可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Satoshi Tatsuvara、Comparison of regression methods for fitting allometric equations to biomass of mizunara oak (*Quercus crispula*)、Journal of Forest Planning、査読有、Vol.18、2012、41-52
- ② Tatang Tiryana、Satoshi Tatsuvara、and Norihiko Shiraishi、Empirical models for estimating stand biomass of teak plantations in Java, Indonesia、Journal of Forest Planning、査読有、Vol.16、2011、177-188
- ③ Tatang Tiryana、Satoshi Tatsuvara、and Norihiko Shiraishi、Modeling spatial heterogeneity of stand volume in *Acacia mangium* plantation using geographical weighted regression、森林資源管理と数理モデル、査読有、Vol.9、2010、103-122

[学会発表] (計2件)

- ① 龍原 哲、ミズナラが優占する高齢二次林の成長、第122回日本森林学会大会、2011年3月26日、静岡大学(静岡市)
- ② Tatang Tiryana、Satoshi Tatsuvara、and Norihiko Shiraishi、Empirical models for estimating stand biomass of teak plantations in Java, Indonesia、International conference on Multipurpose Forest Management、2009年9月22日、朱鷺メッセ(新潟市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

龍原 哲 (TATSUHARA SATOSHI)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：40227103