

原著論文

可搬型 Scanning Lidar によるスギ林の バイオマス推定における誤差評価

Error Estimation about the Biomass of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) Woods Measured by a Portable Scanning Lidar

浦野 豊、大政謙次

Yutaka Urano and Kenji Omasa

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences

1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

ABSTRACT

In this study, forty 60-year-old Japanese Cedars (*Cryptomeria japonica*) at a study area of about 400 m² were measured to estimate the tree position, the diameter at breast height (DBH) and the biomass using a portable scanning lidar with a high spatial resolution.

As a result, 31 (78%) out of 40 trees were measured from one point, and the rest of tree positions were measured from 3 points including the first point mentioned. The DBH for each tree was estimated with a RMSE (Root Mean Square Error) of 6.1 mm when compared with ground-truth tape measurements. Then, the stem-biomass (carbon weight) was calculated by an existing quadratic equation ($R^2 = 0.843$) using estimated DBH. The RMSE between the estimated stem-biomass and the stem-biomass evaluated based on a timber volume formula using the DBH was found to be 11.5 kgC/tree.

Then the whole biomass (carbon weight including stems, branches, foliage and roots) of each tree was estimated by using existing quadratic equations ($R^2 = 0.843$ for stem and $R^2 = 0.792$ for branch, leaf and root) based on the relationship between the DBH and the biomass. Furthermore, estimation reliability according to the number of measured trees was examined by choosing trees by changing the degrees of the lidar. Results showed that the biomass per square meter was estimated with an error of about 12%, 5% and 3% in the case of 10 (25%), 20 (50%) and 30 (75%) measured trees respectively.

Key words : Biomass, Diameter at breast height (DBH), Portable scanning lidar,
Timber volume formula, Tree position

1. はじめに

スギは日本の森林を代表する樹種の一つであり、古くから主要材木としての役割を担ってきた。国土面積の約67%である森林面積のうち、スギ林は約18%を占めており (Cannell et al., 1982)、特に造林面積 (人工林) におい

て約44%を占め、日本ではもっとも多い樹種である (稲村ら, 2001)。また、スギは成長速度と単位面積あたりの材積量で、国内で2番目の主要樹種であるヒノキをはるかに凌いでおり、40年生として比較した場合、ヒノキの1.4~2.2倍もの成長速度がある (稲村ら, 2001)。このように、バイオマス蓄積能力において、スギは国内の森林で重要な

役割を担っている。

スギ林等の森林バイオマスを求める方法として、林業分野では慣習的に幹材積を用いてきた。幹材積は胸高直径と樹高より材積式あるいは材積表を用いて求められ(武田, 1978)、その数値は幹材の体積をあらわす。この幹材積に密度を掛けることにより生重量、また、全乾比重を掛けることにより乾燥重量が求まる。さらに、乾燥重量に、木部の主な構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンなどの分子式による炭素比率を掛けると、炭素重量が求まる。樹木の含有炭素量を求めることは、地球温暖化問題についての京都議定書における森林の炭素蓄積の評価に有用である(山形ら, 2001)。

このように、幹材積を求めることは森林バイオマスを求める方法として有効であるが、そのパラメーターとなる胸高直径と樹高の計測は、立木については通常現場で巻尺、輪尺、デンドロメーター、クリノメーター等を用いて行われる(大隅編, 1995, 日本林業技術協会編, 1998)。その計測作業は一般に多大な時間と労力を必要とし、特に、デンドロメーター、クリノメーターについては熟練技術も必要とされ、計測数値の個人差も発生しがちである。これらの点を克服するために、リモートセンシング技術を利用して、遠隔で森林を計測する手法の開発が進められている。たとえば、航空機に Scanning Lidar (以下、“SL”と略す)を搭載して上空から森林を計測する方法がある(Nilson, 1996, Flood et al., 1997, Naesset, 1997, 大政ら, 2000, Harding et al., 2001, 林ら, 2001, 沼田ら, 2001, Omasa et al., 2003)。最近、大政ら(2000)は、高空間分解能のヘリコプター搭載のSLを用いて、樹冠高を、RMSE (Root Mean Square Error)が19 cmの精度で正確に計測した。また、航空機からのSLデータに基づき、個々の樹木のバイオマスを推定した(Omasa et al., 2003)。このような上空からの計測ではground truthを確認する意味で、地上調査が同時に行われる。そこで、最近では精度の高い可搬型SLを地上に設置して樹木を計測する試みが行われている(大政ら, 2002)。最近、大政ら(2002)は可搬型SLを用いてカラマツの胸高直径を計測し、個々の樹木位置のマッピングとバイオマス(生重量、乾物重量、炭素重量)の推定を行い、精度の良い結果を得た。これらの方法により、根を含まない地上部のバイオマスの推定値が得られた。このカラマツ林は40年生ということもあり、幹の樹幹表面には凹凸が少なく、胸高直径を高い精度で計測できた。しかし、凹凸がある他樹種の推定誤差についての検討はなされていなかった。また、複数地点からのデータを用いて樹林マッピング、胸高直径、根を含めたバイオマスの検討はなされていなかった。

そこで、本研究では、樹幹表面に凹凸の多い60年生のスギを対象として、可搬型SLを用いて合計3地点から計測し、胸高直径の推定、樹林マッピング、そして根を含めたバイオマスの推定を行った。

2. 対象地域と方法

2.1 対象地域

対象地域として、青森県上北郡野辺地町にあるJR東北本線野辺地駅南側に植林されている野辺地駅防雪林(スギ(*Cryptomeria japonica*)人工林・樹齢約60年)内の約400 m²の区画を選び、可搬型SLによる計測を2001年10月中旬に実施した。

なお、調査対象区画の林床植物はほぼすべて刈り取られ、地面はほぼ平坦であった。

2.2 計測装置および計測方法

計測は、調査対象区画に可搬型SL(RIEGL社 LPM-25HA)を設置して行った。この可搬型SLの性能は、計測範囲が2 m~60 m、計測の距離精度が±8 mm、水平、垂直方向の角度位置読み取り精度が±0.009度であった。また、樹幹計測の精度をあげるために、樹幹へのレーザーの到達度が高くなるラストパルスモードで計測した。SLの計測設定ではファーストパルスモードからラストパルスモードを選択でき、前者は至近の反射光を優先する計測、後者は最遠の反射光を優先する計測である。本研究では手前の小枝等を無視して最遠の樹幹表面の反射光を計測するためにラストパルスモードを選択した。その際のレーザーのフットプリントは30 m離れた地点で直径約30 mmであった。

この可搬型SLを用い、野辺地駅防雪林のスギ林(樹齢約60年)を対象として計測を行った。その際、可搬型SLの設置位置は、できるだけ多くの樹木が認識できる場所を1地点(A点とする)を選び、設置位置を中心として、水平および垂直方向の角度範囲をスキャンし、距離画像データを得た。また、A点からの計測の死角を補うために、さらに2地点(B点およびC点とする)から計測を行った。なお、計測の際には、調査対象区画に基準点を設定し、A、B、C点とさらに1か所、合計4か所から可搬型SLでその基準点を計測することにより、地面の傾斜の状態を確認した。

また、可搬型SLによる計測誤差を検証するために、その計測終了後、巻尺を用いて計測対象範囲に存在するすべてのスギの胸高直径を実測した。

2.3 樹林マッピングと胸高直径の推定方法

可搬型SLによって計測された距離データから、大政ら(2002)の方法によって、樹林マッピングと胸高直径の推定を行った。ただし、本研究では、対象とするスギの胸高

(地上から1.2 m) の計測が可能であったので、計測データから、直接、胸高直径を求めた。

2.4 バイオマスの推定方法

2.4.1 可搬型SLの計測によるバイオマスの推定方法

スギのバイオマスと胸高直径の関係式を求めるために、Cannell (1982) および武田 (1978) の実測データを用いた。式 (1) と式 (2) はそれぞれを変形した関係式である。これらの式に、2.3 で推定した胸高直径を代入し、スギ1本毎の幹のバイオマスおよび枝と葉と根のバイオマスを推定した。

$$C_{stem} = 0.0119 (0.0587 \times DBH + 1.04)^{2.9696} \quad (R^2 = 0.843) \quad (1)$$

$$C_{BFR} = 0.0075 (0.0587 \times DBH + 1.04)^{2.9516} \quad (R^2 = 0.792) \quad (2)$$

ここで、 C_{stem} はスギの幹のバイオマス (kgC)、 C_{BFR} はスギの枝、葉、根の合計バイオマス (kgC)、 DBH は胸高直径 (mm) である。なお、Cannell のデータは乾物重量表示であったので、この乾物重量に木部の主な構成成分であるリグニン、セルロース、ヘミセルロースなどの分子式による炭素比率0.45 (高橋, 1974) を掛けることにより炭素重量表示に変換した。なお、本研究において全バイオマスとは、幹、葉、枝、根すべてを合計した炭素重量 (kgC) とする。

2.4.2 胸高直径の実測値から幹材積を求める方法

幹材積を求めるには以下の材積式を用いる (武田, 1978, 辻, 1998)。

$$\log v = \bar{5}.794481 + 1.778137 \log d + 1.086571 \log h \quad (22 \leq d \leq 40) \quad (3)$$

$$\log v = \bar{4}.145934 + 1.616131 \log d + 1.026974 \log h \quad (42 \leq d) \quad (4)$$

ここで v は幹材積 (m^3) すなわち幹の体積、 d は巻尺で計測された胸高直径 (cm)、 h は樹高 (m) である。ここで、樹高 h は胸高直径と相関関係があり (武田, 1978)、胸高直径の式 (5) に置き換えることができる。

$$h = 0.0587 d + 4.04 \quad (R^2 = 0.758) \quad (5)$$

また、式 (3) は胸高直径が 22 ~ 40 cm (2 cm 単位で切り捨て) の範囲の時、式 (4) は胸高直径が 42 cm 以上 (同) の時に用いる。なお、(3) (4) 式中の定数項整数部上部に

あるバーは慣用的に計算尺により材積式を求めるための昭和30年代頃の表記法 (武田, 1978) で、たとえば $\bar{5}.794481$ の場合、 v を求める際、式は $10^5 + 10^{-0.794481}$ と展開する。

以上のようにして求めた幹材積に全乾比重 0.35 を掛けると乾物重量が求まり、その乾物重量に 0.45 を掛けてバイオマス (kgC) に変換した (高橋, 1974)。

2.4.3 誤差評価

可搬型SLの計測データから推定された胸高直径から求めたスギ1本毎の幹のバイオマス (2.4.1 参照) と、巻尺による胸高直径の実測値を材積式に代入して得られた幹材積より求めたスギ1本毎の幹のバイオマス (2.4.2 参照) とを比較し、誤差評価を行った。

次に、計測対象区画に存在するすべてのスギの胸高直径を巻尺で実測し、式 (1) および式 (2) により計測対象区画全体の幹のバイオマスを算出し、単位面積あたりのバイオマスに換算した。

そして、3地点に設置した可搬型SLで計測したスギの胸高直径を2.3の方法で推定し、式 (1) および式 (2) より、スギ1本毎の全バイオマスを算出した。さらに、A点に設置した可搬型SLのスキャン角を変えることにより計測するスギの本数を変え、それぞれの全バイオマス合計を求めた。そして、計測対象区画に存在するすべてのスギの本数との比例計算により、計測対象区画すべてのスギの全バイオマスを推定し、単位面積あたりの全バイオマスを換算し、その誤差評価を行った。これは、本研究で計測対象としたようなスギ林で、その何割の胸高直径を計測できれば、ある一定面積の森林の単位面積当たりのバイオマスが推定できるかどうかを評価するための基礎データを得ることを目的とするためである。

3. 結果及び考察

3.1 計測結果と樹林マッピング

計測対象区画において可搬型SLを用いてスギ林をA点から計測した結果をFig.1に示す。図では、可搬型SLからの距離がグレースケールで表現されている。画像における視野は、装置の設置位置を中心に、縦方向が約100°、横方向が約80°であった。これはスギ林の幹足から梢端までをすべて計測する画角であるが、計測時間は約90分であった。しかし、胸高直径のみを計測する場合、同じスギ林では縦方向の画角が余裕をみても約6°あれば充分である。そして、そのときの計測時間は約8分である。装置の設置位置は、できるだけ多くのスギが認識できるA点を選んだが、計測対象区画内におけるすべてのスギ40本のうち9本は、手前のスギの陰になり、胸高直径を推定でき

るデータを取得できなかった。そこで、さらにB点およびC点から計測を行い、A点からの計測で死角となり計測できなかった9本の計測を行った。

また調査対象区画に基準点を設定し、A、B、C点とともにさらに1か所、合計4か所の地点から可搬型SLでその基準点を計測した結果、調査対象区画の地面はほぼ水平であることを確認した。

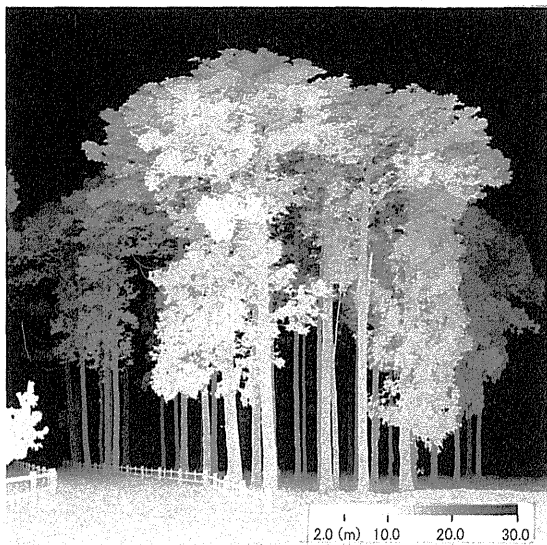


Fig. 1 Ranging image measured by the portable scanning lidar.

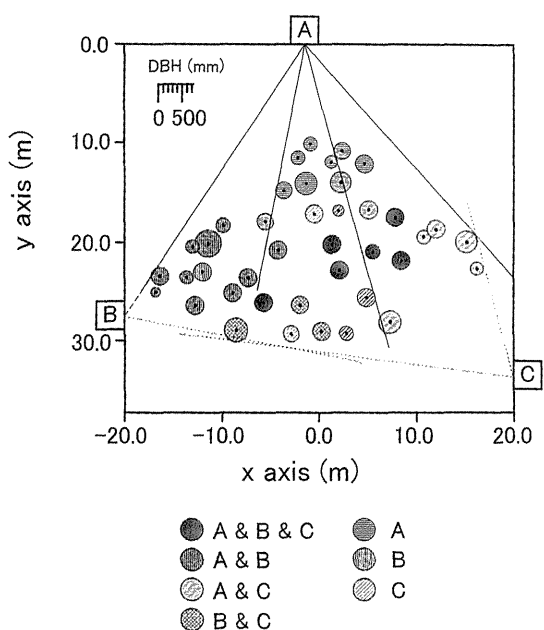


Fig. 2 Tree position map of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) woods estimated from the range data measured by the portable scanning lidar set at 3 points, A, B and C.
 ○: The diameter of each circle shows the DBH (mm) of each tree.
 •: Estimated tree center
 A, B and C: the portable scanning lidar set points.
 Lines: Scanning lidar measurement angle.

Fig.2は、可搬型SLデータから得られた樹林マッピングの結果である。図では最初に可搬型SLを設置したA点(0, 0)を原点とし、A点からの計測の死角を補うために計測した2地点をB、C点とした。そして、計測データから調査対象区画に存在する40本すべてのスギの相対位置(中心部)と胸高直径を推定し、円で表示した。なお、A地点からの計測結果では、可搬型SLからそれぞれのスギまでの距離は約10~29mに分布していた。

3.2 胸高直径の推定と誤差評価

可搬型SLによる計測データから40本のスギ1本毎の胸高直径を推定すると25.1 cmから53.5 cmまで(平均37.5 cm、標準偏差7.1 cm)分布していた。次に、可搬型SLの計測データによる胸高直径の推定誤差を検証するために、計測終了後、巻尺を用いて計測対象区画に存在する40本すべてのスギの胸高直径を実測した。この誤差検証の結果がFig.3である。

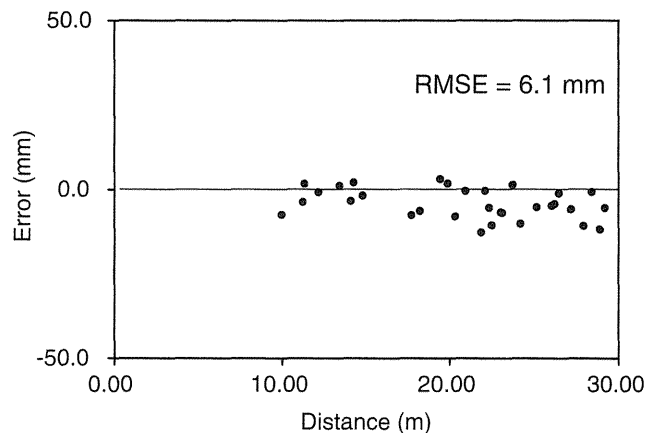


Fig. 3 Relationship between the error of estimated DBH and the distance from the portable scanning lidar.

このように、可搬型SLからの距離が約10~29mのスギを計測したが、誤差は距離には依存しなかった。誤差がややマイナスに偏っているのは、可搬型SLでの計測値が巻尺による実測より小さいことを示している。この主な原因として、スギ樹幹表面の凹凸が考えられる。すなわち、スギの胸高直径を巻尺で計測する場合、凹凸の凸部に沿って円周を計測することになるが、精度の高い可搬型SLでは幹の凹部まで忠実に計測されるので、幹の円形はSLデータの凹部の計測値(点群)で推定される。このためSLによる胸高直径の推定は、幹の凹部で形作られた円周から求められたものになる。この差がマイナス誤差にあらわれたものと考えられる。この誤差をRMSEで評価すると6.1 mmであり、大政ら(2002)によるカラマツ林の計測誤差であるRMSE 7.3 mmよりも良い結果となった。ここ

で、使用した可搬型 SL の精度が $\pm 8 \text{ mm}$ であるため、計測誤差は計測器の精度限界以内であったといえる。大政ら (2002) によるカラマツの計測結果が本研究よりも精度がやや劣った理由は、カラマツ林が見通しのきかない自然状態の林で、対象樹種の計測可能な任意の高さでの樹幹直径から地上 1.2 m の高さの胸高直径を推定したときに誤差が生じたためであると考えられる。一方、本研究では直接胸高直径が計測できたため、幹表皮の凹凸が比較的激しい 60 年生のスギを対象としたにもかかわらず、大政ら (2002) による研究よりも誤差が少なかったと推察できる。

3.3 個体あたりの幹バイオマスの推定と誤差評価

可搬型 SL による計測データから推定された胸高直径を式 (1) に代入して求めたスギ 1 本毎の幹のバイオマスと、巻尺による胸高直径の実測値を式 (3) または式 (4) および式 (5) に代入して得られた幹材積より求めたスギ 1 本毎の幹のバイオマスとを比較し、誤差評価を行った。材積式は、林業分野で慣習的に用いられてきたスギ等の幹の体積 (幹材積) を求める方法で、この幹材積は商取引等で信頼する数値とみなされている。したがって、2.4.2 の方法で材積式より得られた幹材積から求めたスギ 1 本毎の幹のバイオマスを、可搬型 SL による計測データから推定された胸高直径を式 (1) に代入して求めたスギ 1 本毎の幹のバイオマスとを比較することにより、その信頼性を評価することができる。その結果が Fig.4 で、幹のバイオマスの推定 RMSE は 11.5 kgC であった。

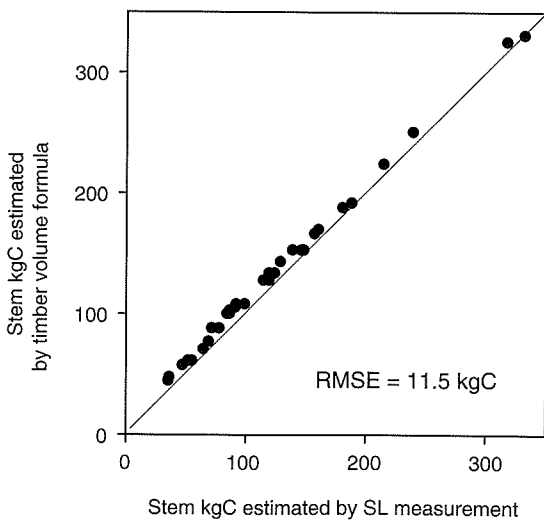


Fig. 4 Relationship between stem kgC estimated by timber volume formula and stem kgC estimated by SL measurement.

3.4 単位面積あたりの全バイオマスの推定と誤差評価

計測対象区画に存在するすべてのスギ 40 本の胸高直径を巻尺で実測し、式 (1) および式 (2) により計測対象区

画全体の全バイオマスと単位面積あたりの全バイオマスを求めた。この結果、スギ 40 本の幹のバイオマスの合計値は $4,996 \text{ kgC}$ 、枝+葉+根のバイオマスの合計値は $3,158 \text{ kgC}$ であった。すなわち全バイオマスは $8,154 \text{ kgC}$ であった。この全バイオマスを単位面積あたりに換算すると 20.4 kgC/m^2 であった。

3 地点から可搬型 SL で計測した結果、計測対象区画に存在するすべてのスギ 40 本の胸高直径が推定できた。これを式 (1)、(2) を用いて換算し、個体毎の全バイオマスを空間分布図として示したものが Fig.5 である。

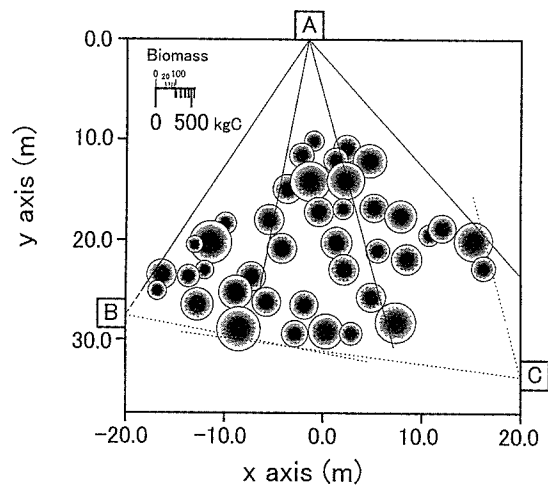


Fig. 5 Total biomass (carbon weight) of each tree shown on tree position map. The diameter of each circle shows the biomass (kgC).

40 本のスギについて、スギ 1 本毎の全バイオマスは 56.1 kgC から 528.2 kgC まで分布していた。Fig.6 に、そのヒストグラムを示す。

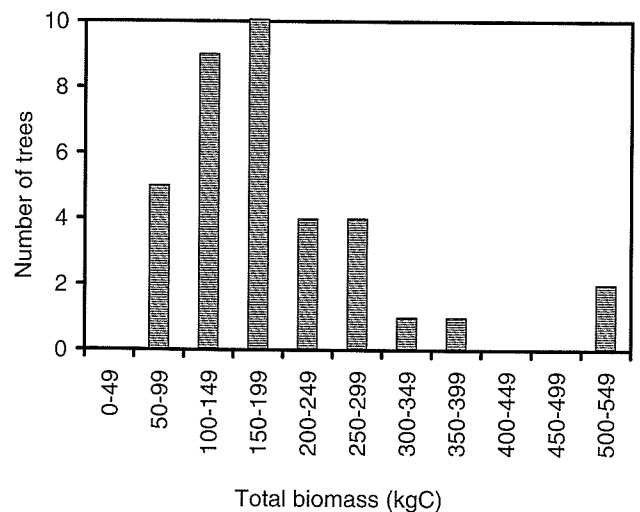


Fig. 6 Histogram of the biomass (carbon weight) at the study site.

次に、A 点に設置した可搬型 SL のスキャン角を変えることにより、1 本から計測可能最大本数 31 本まで計測本数を変えて計測を行った。Fig.2 には可搬型 SL からみて右側からスキャンする角度の例を、A 地点から伸びる実線で示している。この図の例では、それぞれの実線で示す角度まで可搬型 SL からみて右端からそれぞれ 10 本、20 本、31 本を計測することになるが、このようにして計測したスギの本数毎に、計測対象区画すべて 40 本のスギの全バイオマスを比例計算により推定し、計測対象区画の単位面積あたりの全バイオマスを求めた。そして計測したスギの本数に対する誤差の評価を行った。その結果が Fig.7 である。

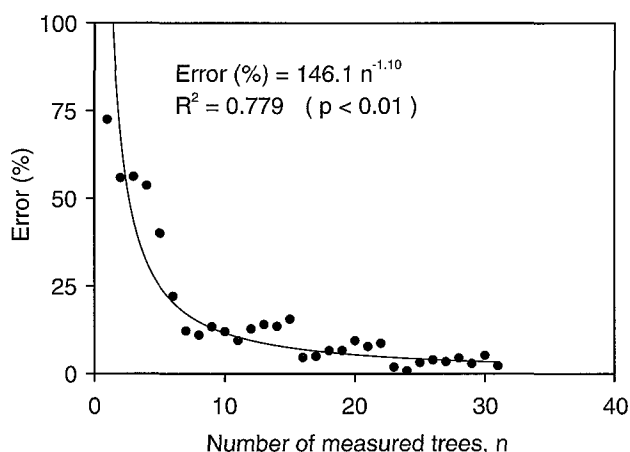


Fig. 7 Relationship between estimation errors and the number of measured trees at the study site.

このように、計測対象区画に存在する 40 本のスギのうち、10 本 (25%) のスギが計測できれば約 12% の誤差、20 本 (50%) が計測できれば約 7% の誤差、そして 30 本 (75%) が計測できれば約 3% の誤差で、単位面積あたりの全バイオマスを推定できることがわかった。

胸高直径および樹林マッピングは通常林業分野で必要とされるデータで、その計測には一般に多大な時間と労力を必要とする。そこで本研究では、可搬型 SL による複数地点からの計測で、樹幹表面に凹凸の多いスギ林すべての胸高直径の推定および樹林マッピングを可搬型 SL の計測精度以下の誤差で実現し、また、材積式を用いた幹材積の誤差評価でその信頼性を実証した。さらに、地球温暖化問題に関する森林の炭素蓄積の評価に用いるための、樹木の含有炭素量の算定に必要な根を含めたバイオマスも求めることができた。そして、計測本数や全本数に対する割合との関係を全バイオマスの推定誤差として明らかにした。

4. おわりに

本研究では、樹幹表面に凹凸のある 60 年生のスギ林を対象として、可搬型 SL を用いて、胸高直径の推定、樹林マッピングおよびバイオマス推定を行った。その結果、1 地点からの計測により計測対象区画約 400 m² の範囲に生育するスギ 40 本中 31 本 (78%) が計測でき、樹林内の個々のスギにおいて、RMSE が 6.1 mm の精度で胸高直径を推定することができた。次に、合計 3 地点からの計測により推定したすべてのスギ 1 本毎の幹のバイオマスと、巻尺による胸高直径の実測値から材積式を用いて求めたスギ 1 本毎の幹のバイオマスを比較し、誤差評価を行った。その結果 RMSE は 11.5 kgC であった。さらに、1 地点から計測可能であった本数のスギの胸高直径から、計測対象区画に存在する 40 本すべてのスギの全バイオマスを推定して、単位面積あたりの全バイオマスを求めた。その誤差評価の結果、10 本 (25%) のスギが計測できれば約 12% の誤差、20 本 (50%) が計測できれば約 7% の誤差、そして 30 本 (75%) が計測できれば約 3% の誤差で、単位面積あたりの全バイオマスを推定できることがわかった。

上記のことから、樹幹表面に凹凸の多い 60 年生のスギを対象としたにもかかわらず、可搬型 SL を用いて、胸高直径と全バイオマスを高い精度で推定できることがわかった。特に、林業分野で慣習的に用いられている材積式を用いた誤差評価でもその推定精度が実証できた。バイオマス推定精度については、特にカーボンシンクに関する推定を行う場合、より高い精度が求められるが、本研究で述べた方法は、従来の巻尺を用いた計測精度と同等の精度を実現できた。計測時間については本研究のように水平角約 80 度の場合、約 8 分という短時間であり、現場での踏査労力を軽減するという点で優れている。また、SL については、今後の技術の進歩に伴い、より高速でより精度の高い計測器の開発が期待される。

引用文献

- 1) Cannell, M.G.R., 1982: World Forest Biomass and Primary Production Data. *Academic Press, London*, 391pp.
- 2) Flood, M. and Gutelius, B. 1997: Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, **63**, 327-366.
- 3) Harding, D.J., Lefsky, M.A., Parker, G.G. and Blair, J.B. 2001: Laser altimeter canopy height profiles: Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests, *Remote Sensing Environment*, **76**, 283-297.

- 4) 林真智・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹, 2001 : リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測, 写真測量とリモートセンシング, **40(3)**, 41-46.
- 5) 稲村達也・中川重年, 2001 : イネとスギ, 岩波書店, 東京, 170pp.
- 6) Naesset, E. 1997: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens*, **52**, 49-56.
- 7) 日本林業技術協会編, 1998 : 森を調べる 50 の方法, 東京書籍, 東京, 239pp.
- 8) Nilson, M. 1996: Estimation tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ*, **56**, 1-7.
- 9) 沼田洋一・田村正行, 2001 : レーザプロファイラによる広域樹高分布の計測手法の研究, 日本測量調査技術協会, **APA No.78-6**, 52-62.
- 10) Omasa, K., Guo Y.Q., Watanuki, K., Yoshimi K. and Akiyama Y. 2003: Accurate Estimation of Forest Carbon Stocks by 3-D Remote Sensing of Individual Trees. *Environment Science and Technology*, **37**, 1198-1201.
- 11) 大政謙次・綿貫憲一, 2000 : ヘリコプター搭載 Scanning Lidar システムによる 3 次元リモートセンシング (II) 樹高とバイオマスの自動推定, 農気・生環合同大会 (2000.8) 宮崎 講演要旨集, 128-129.
- 12) 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司, 2000 : ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の 3 次元リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, **20(4)**, 34-36.
- 13) 大政謙次・浦野豊・小熊宏之・藤沼康実, 2002 : 可搬型 Scanning Lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定: 日本リモートセンシング学会誌, **22(5)**, 550-557.
- 14) 大隅眞一 (編), 1995 : 森林計測学講義, 養賢堂, 東京, 287pp.
- 15) 高橋英一, 1974 : 比較植物栄養学, 養賢堂, 東京, 273 pp.
- 16) 武田英文, 1978 : 業務報告 (昭和 53 年度), 秋田県林業センター, pp.86-88.
- 17) 辻潔, 1998 : 立木幹材積表東日本編, 日本林業調査会, 東京, 176pp.
- 18) 山形与志樹・小熊宏之・土田聡他, 2001 : 京都議定書で評価される吸収源活動のモニタリングと認証に関わるリモートセンシング計測手法の役割, 日本リモートセンシング学会誌, 東京, **21(1)**, 43-57.