

## 文献資料と毎木調査によるスギ人工林間伐前後における流域葉量推定手法について

齋藤武史(森林総研)・金子智紀・和田寛(秋田県農林水産技術センター森林技術センター)・大原偉樹(森林総研関西)

**要旨:** 森林群落の葉量を推定する手法のひとつとして、サンプル木を伐採して実測した葉量から相対成長式を作成し、対象林分の毎木調査結果に適用して林分葉量を推定する手法(アロメトリ法)がある。アロメトリ法は実測値に基づいた信頼性の高い林分葉量推定手法であるが、個体スケールの大きい森林群落ではサンプル木の実測に多大な労力と経費が必要のため、実行が困難な場合が多い。本研究では、林分構造の類似したスギ林分において「林分分離」(相対成長式が林分毎に異なる現象)が小さいと考えられることに着目し、既存の文献に公表されているスギ林分の測定結果の中から相対成長式が適用可能な51林分(423サンプル木)について解析を行い、胸高断面積合計×平均樹高を指標に林分構造の類似した9林分群に分け、林分群別に相対成長式を求めて統合アロメトリ式系を作成した。得られた統合アロメトリ式系でサンプル木の葉量を推定したところ、個別林分の相対成長式を適用した場合に近い推定結果が得られた。以上の結果をもとに、秋田県大館市のスギ人工林で行った毎木調査結果に本研究の統合アロメトリ式系を適用し、間伐前後の流域葉量の変化を推定、考察した。

**キーワード:** スギ, 葉量, 文献資料, 毎木調査, 統合アロメトリ式系

## I はじめに

森林群落の葉量を推定する手法のひとつとして、サンプル木を伐採して実測した葉量から相対成長式を作成し、対象林分の毎木調査結果に適用して林分葉量を推定する手法(アロメトリ法)がある。アロメトリ法は、実測値に基づいた信頼性の高い林分葉量の推定手法として古くから多くの林分に適用され(7, 11, 12)、日本のスギ林についても先人の努力によって多くの測定が行われ、結果が公表されている(6, 8, 9, 10, 15, 19)。しかしながら、この方法を個体スケールの大きい森林群落に適用する場合には、サンプル木の実測に多大な労力と経費が必要であり、また伐倒調査による林分破壊を伴うために、多くの研究現場では測定の実行が困難なことが多い。そのため、多くの樹種や林分に共通の相対成長式が適用できる広葉樹類等の場合においては、いくつかの林分で得られた測定結果から汎用相対成長式を作成し、当該地域の多くの林分に適用する提案がなされている(3)。ところが、スギの人工林については、相対成長式が林分毎に異なる「林分分離」と呼ばれる現象が顕著に認められるため(15, 19)、特定の林分から得られた式を他の林分に当てはめるのは適当ではない(11)と言われている。本研究では、葉量における相対成長関係が、林分の生育段階や密度、競争関係などの林分構造の違

いによって変化するといわれている(11, 12, 19)ことに着目し、これらの林分構造が類似したスギ林分の間では「林分分離」が小さいものと考えて、既存の文献に公表された資料を基に、林分構造が類似した林分群毎に相対成長式を作成し、これらを統合して汎用的な相対成長式系(統合アロメトリ式系)を作成する。そして、得られた統合アロメトリ式系でサンプル木の葉量を推定し、個別林分のサンプル木から求めた相対成長式を適用した場合に近い推定結果が得られるか検討した。さらに、秋田県大館市のスギ人工林で行った毎木調査の結果に本研究で作成した統合アロメトリ式系を適用し、間伐前後の流域葉量の変化を推定し、考察した。

## II 調査地と方法

**1. 調査林分の概況** 本研究では、秋田県大館市長坂地内(北緯40度16分、東経140度24分、標高90~170m)に位置するスギ人工林を対象に、林分のスギの葉量(乾物重 ton/ha)を推定した。当該林分は上の沢(6.55ha)、中ノ沢(7.52ha)、下の沢(6.50ha)の3流域からなる森林水文試験地(5)で、上の沢と中ノ沢には1963年、下の沢には1970年にスギが植栽され、上の沢と下ノ沢では2007年にそれぞれスギの本数間伐率45.2%、44.4%の間伐実施が行われた。間伐前の2005年には間伐対象木、2007年には残存木の毎木調査

Takeshi SAITO (For. and Forest Prod. Res. Inst.(FFPRI), 1 Matsunosato Tsukuba 305-8687), Tomonori KANEKO, Satoru WADA (Institute of Forestry, Akita Prefecture Agriculture, Forestry and Fisheries Res. Center), Hideki OOHARA (Kansai Research Center, FFPRI)

Foliage biomass estimation of Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations before and after thinning operation in 3 close catchment areas based on the measurement and literature data

(胸高直径3cm以上の全立木の胸高直径の測定とサンプル木の樹高の測定)を実施し、それぞれ平均樹高、平均胸高直径、林分密度、胸高断面積合計を測定した。間伐対象木の測定後、残存木の測定までの間には、間伐施業をはさんで約2年の遅れがあったが、本研究ではこの2回の測定結果を合計することにより、間伐前のスギ林分の林分構造を復元し、葉量の推定を行った。

2. 文献資料の収集 既存の文献資料の中から、スギ林の葉量(単位面積当たりの乾物重量)、林分構造(平均胸高直径、平均樹高、林齢、林分密度など)、および葉量を推定するために伐倒したサンプル木の個別別の測定値(胸高直径、樹高、葉乾重)が公表されている文献(1, 2, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 18)を収集し、それらの中からサンプル木の葉量(個体当たりの乾物重量)について有意性の高い相対成長式(分散分析により、1%水準で帰帰係数が有意となる相対成長式)が得られた51林分(423サンプル木)の測定資料について、林分構造と相対成長式との関係を解析した。

3. 相対成長式に使用したパラメータ 本研究では、サンプル木の葉量について、式(1)に示す相対成長式を適用して解析を行った。

$$\log WL = b \log BAs - a \quad (1)$$

ここで、WL:葉乾重(kg)、BAs:サンプル木の胸高断面積( $\text{cm}^2$ )、a、bは相対成長式の係数である。相対成長式の目的変数には、多くの文献で使用されている葉乾重(スギの緑葉部分の乾物重)を用いた。相対成長式の説明変数については、文献によって胸高直径(7, 9, 11)、胸高断面積(15)、 $D^2H$ (6)、樹幹乾重(10)などさまざまな測定要素が用いられているが、本研究では、一般的な毎木調査において全ての個体について測定される胸高直径から直接的に計算が可能であり、かつ林分の地上部現存量との関係が深い(1, 14)とされている胸高断面積を使用した。

### III 結果と考察

#### 1. 林分群の分割に使用する林分構造要素の選定

本研究では、まず、林分の構造を表す要素として多くの文献資料に記載されている平均胸高直径(DBH:cm)、平均樹高(H:m)、林齢(年)、林分密度(本/ha)、胸高断面積合計(BA: $\text{m}^2/\text{ha}$ )およびこれらの要素を組み合わせると算定した相対幹距(Sr:%)、胸高断面積合計×平均樹高(BA・H: $\text{m}^3/\text{ha}$ )の7つの林分構造要素について、これらの各要素が各林分毎のサンプル木から求めた相対成長式の「林分分離」に及ぼす影響についての検討を行った。

これらの林分構造要素が相対成長式による葉量推定

結果に及ぼす影響は複雑であり、一次式や重回帰式の適用による解析が困難であったので、本研究では最初に、全51林分を7つの林分構造要素それぞれについて、値の小さい順に3つの林分毎に17林分群に分割層化し、それぞれの林分群毎に統合相対成長式を作成して各林分群のサンプル木の葉量を推定し、実測値(文献公表値)との比較を行った。その結果、表-1(A)に示すようにBAおよびBA・Hで分割層化した場合には実測値と推定値との相関が高く、推定誤差の目安となる実測値と推定値との間の平均二乗偏差(RMS)が小さいことが明らかになった。この結果から、これら2つの要素が近似した林分の間では、サンプル木の測定結果を統合して相対成長式を作成しても、「林分分離」の影響が比較的小さいものと考えた。なお、BAおよびBA・Hの2要素の間では、推定誤差の差違は比較的小さかった。

次に、BAおよびBA・Hで分割層化した17の林分群について、それぞれ当該林分を除いた残りの2林分のサンプル木の測定値から相対成長式を作成して当該林分の葉量を推定し、実測値との比較を行った。すなわち、伐倒サンプル木の測定結果がない林分に汎用的な相対成長式を適用する場合を想定して、当該林分のサンプル木の測定値を除外した上で、BAおよびBA・Hの2要素で分割層化した場合の推定結果の誤差について比較、検討を行った。その結果、表-1(B)に示すようにBAによる分割層化を行った場合には、実測値と推定値との相関が著しく低下し、平均二乗偏差が著しく増大することが示された。このような推定誤差が生じる原因としては、BAで分割層化する場合には平均樹高の差違を考慮しないので、BA・Hで分割層化する場合と比べて、平均樹高が異なるために葉量に差違のある林分が同じ林分群内に分類されることが多いためであろうと考えた。この結果から、BAによる分割層化を行う方法は、BA・Hによる分割層化を行う方法と比べて、伐倒サンプル木の測定結果がない林分に汎用的な相対成長式を適用する場合には、推定誤差が大きくなる危険性が高いものと考えた。

以上の結果より、本研究では文献資料の51林分についてBA・Hを指標として分割層化を行い、それぞれの林分群毎にサンプル木の測定結果を統合して相対成長式を作成し、全林分群の値の分布範囲に適用可能な連続した統合アロメトリ式系を作成することとした。

2. 林分群の分割数の検討と統合アロメトリ式系の作成 林分群の分割数が増すと、林分群毎に統合して作成した相対成長式では「林分分離」の影響が低減し、個別林分から求めた相対成長式に近づく。そのため、サン

ル木についての葉量の推定精度は向上する。しかし一方、林分群を構成する林分の数が増えるので、当該林分を除いた残りの林分を用いて作成した相対成長式から求めた葉量の推定結果についてはバラツキが増大し、外挿を前提とした汎用的な相対成長式として利用する場合には、安定した結果が得られなくなる。本研究では、これらの点を勘案して、BA・Hを指標として51林分を分割層化する場合の適当な分割数についての検討を行った。今回解析対象とした51林分のBA・Hは15.84m<sup>3</sup>/haから2089.63m<sup>3</sup>/haまでの範囲に分布していたが、一様には分布していなかったため機械的に等分割はせず、クラスター分析(ユークリッド距離を用いたウォード法による解析)の手法(4)を適用してBA・Hが近似した林分群毎にクラスター分けし、分割数と統合相対成長式の推定精度との関係について検討した。その結果、分割数の増大とともに林分群別に統合した相対成長式の推定精度は向上し、分割数が3, 6, 9と増大するに伴い推定値と実測値との平均二乗偏差は5.94, 4.53, 4.31と減少した。しかし、分割数が10を越えると、当該林分を除いた残りの林分を用いて作成した相対成長式から求めた葉量の推定精度が著しく低下し、平均二乗偏差が7.70(分割数10, 当該林分を除く)となった。

以上の結果から、本研究ではBA・Hを指標に、全51林分を林分構造の類似した9林分群に分割し、林分群別に相対成長式を求めることとし、表-2に示す統合アロメトリ式系を作成した。

**3. 統合アロメトリ式系によるサンプル木の葉量の推定**  
本研究で作成した統合アロメトリ式系による葉量の推定精度を検証するため、文献資料から収集した全51林分の423サンプル木について、葉量(個体当たりの乾物重量)を統合アロメトリ式系を適用して推定し、実測値と推定値との関係を、個別林分から求めた相対成長式を適用して推定した結果および全サンプル木を統合して求めた相対成長式を適用して推定した結果と比較した。その結果、図-1に示すように、本研究で作成した統合アロメトリ式系を適用した推定結果はRMS=4.32で、個別林分から求めた相対成長式を適用して推定した結果(RMS=3.38)に近く、全サンプル木を統合して求めた相対成長式を適用して推定した結果(RMS=5.68)に比べて「林分分離」の影響が小さいことが示された。

**4. スギ人工林における毎木調査結果への適用** 本研究で作成した統合アロメトリ式系を適用して、秋田県大館市長坂地内に位置するスギ人工林の葉量(乾物重ton/ha)を推定した。推定結果は表-3に示す通りで、間伐前の各林分におけるスギの推定葉量(乾重)は、

Tadaki(13)が日本各地のスギ林分の測定結果をとりまとめた葉量の範囲17~23 ton/haの中庸程度の値であった。間伐施業の結果、上の沢、下の沢のスギの葉量はそれぞれ16.6, 15.6 ton/haに減少し、間伐施業を行わなかった中ノ沢の葉量よりも少なくなった。間伐による葉量の減少率は上の沢、下の沢それぞれ26.5%, 24.3%で、いずれも本数間伐率よりも小さく、胸高断面積合計の減少率に近い値であった。これは、今回の間伐が下層間伐的に行われ、着葉量の小さい木から優先して伐採されたことを示すものと考えた。

#### IV おわりに

本研究では、既存の文献に公表されているスギ林分の測定資料を収集、整理して、スギ立木の葉量(乾重)を推定するための統合アロメトリ式系を作成した。その結果、分割層化した複数の林分群にそれぞれ相対成長式を適用することにより、個別の林分から求めた相対成長式による推定結果に近い推定値を得ることが出来た。作成した統合アロメトリ式系をスギ人工林における毎木調査結果に適用したところ、間伐施業にともなう林分葉量変化の傾向を定量的に示すことができた。

本研究は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト(課題名:水流出に及ぼす間伐影響と長期変動の評価手法の開発)の一環として実施した。

#### 引用文献

- (1)安藤貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美(1968)スギ林の保育形式に関する研究. 林試研報 209:1-76.
- (2)原田洗・佐藤久男・堀田庸・蜂屋欣二・只木良也(1972)スギ壮齢林の養分含有量に関する研究. 林試研報 249:17-74.
- (3)平塚基志・山ノ下麻木乃・森川靖(2010)熱帯地域の造林地におけるバイオマス推定のための汎用相対成長式の提案. 海外の森林と林業 77:48-53.
- (4)株式会社社会情報サービス(2006)統計解析アドインソフト エクセル統計 2006. CD-ROM版, 株式会社社会情報サービス, 東京.
- (5)金子智紀・武田響一・野口正二・大原偉樹・藤枝基久(2010)積雪地帯の近接したスギ人工林3小流域における流出特性の比較. 日林誌 92:208-216
- (6)川辺三郎・安藤信(1988)冷温帯下部天然生林の更新技術V—スギ天然生林の林分構造と現存量—. 京大演報 60:67-76
- (7)KITTREDGE, J. (1944) Estimation of the amount of foliage of trees and stands. J.Forestry 42:905-912.
- (8)根岸賢一郎・鈴木誠・佐倉詔夫・丹下健・鈴木貞夫・

- 斯波義宏(1988)スギ幼齡林における地上部現存量の経年変化. 東大演報 78:31-57.
- (9)西村武二・吉川賢・池本彰夫・永森通雄・安藤貴(1992)高齢スギ人工林の現存量と成長経過(2)岩手大学滝沢演習林 89年生スギ林の場合. 高知大演報 19:83-97.
- (10)齋藤秀樹・山田勇・四手井綱英(1972)高立木密度のスギ幼齡林の物質生産量に関する若干の検討. 京大演報 44:121-140.
- (11)佐藤大七郎(1962)林分の葉の推定法についての考察. 日林誌 44:267-272.
- (12)只木良也(1963)森林の生産構造に関する研究(IV)林分および単木の葉量についての若干の考察. 日林誌 45:249-256.
- (13)TADAKI, Y.(1966) Some discussions on the leaf biomass of forest stand and trees. Bul.Gov.For.Exp.Stn.

- 184:135-161.
- (14)只木良也・尾方信夫・長友安男(1965)九州スギ林の物質生産力. 林試研報 173:45-66
- (15)只木良也・尾方信夫・長友安男(1967)森林の生産構造に関する研究XI サシキスギと実生スギの28年生造林地の物質生産力. 林試研報 199:47-65.
- (16)丹下健(1995)スギ造林木の成長に関する生態生理学的研究. 東大演報 93:65-145.
- (17)丹下健・鈴木誠・鈴木保(1990)立地条件の異なる83年生スギ人工林の枝および葉現存量. 日生態会誌 40:179-186.
- (18)丹下健・山中征夫・鈴木誠(1987)スギ老齡人工林の生長と現存量. 演習林 25:243-259.
- (19)四大学および信大合同調査班(1966)森林の生産力に関する研究第III報 スギ人工林の物質生産について. 63pp., 日本林業技術協会, 東京.

表-1. 各林分構造要素について, 3つの林分毎に17林分群に分割層化して求めた相対成長式によるスギ立木の葉量の推定値と実測値との関係

表-1(A) 各群別に全サンプル木の測定値から相対成長式を作成して葉量を推定			
林分構造要素	資料林分の値域	決定係数( $r^2$ )	平均二乗偏差
平均胸高直径(DBH:cm)	2.6 - 42.3	0.8487	5.1346
平均樹高(H:m)	3.7 - 26.3	0.8520	5.0828
林齢(年)	9 - 89	0.8772	4.6223
林分密度(本/ha)	458 - 42600	0.8829	4.5236
胸高断面積合計(BA:m <sup>2</sup> /ha)	4.3 - 81.9	0.9051	4.0541
相対幹距(Sr:%)	9.1 - 69.8	0.8794	4.5716
BA・H(m <sup>3</sup> /ha)	15.8 - 2089.6	0.8966	4.2377

表-1(B) 群別に当該林分を除いた残りのサンプル木の測定値から相対成長式を作成して葉量を推定			
林分構造要素	決定係数( $r^2$ )	平均二乗偏差	
胸高断面積合計(BA:m <sup>2</sup> /ha)	0.6596	9.7926	
BA・H(m <sup>3</sup> /ha)	0.8258	6.4368	

表-2. スギ立木の葉量推定に使用した統合アロメトリ式系

対象立木を含むスギ林分の胸高断面積合計×平均樹高 (m <sup>3</sup> /ha)	葉量推定に適用した相対成長式の係数	
	a	b
15.8 ~ 167.7	1.07975	1.01658
167.8 ~ 349.8	1.46542	1.14864
349.9 ~ 501.6	1.57417	1.14695
501.7 ~ 626.2	1.50231	1.06458
626.3 ~ 849.9	1.59967	1.07588
850.0 ~ 1261.4	2.32349	1.32773
1261.5 ~ 1565.7	2.75721	1.43197
1565.8 ~ 1891.1	1.90271	1.11275
1891.2 ~ 2089.6	2.73189	1.32203

但し, スギ立木の葉量は下式により推定した。  
 $\log WZ = b \log BA \cdot H - a$   
 ここで, WZ:葉乾重(kg), BA・H:対象木の胸高断面積(cm<sup>2</sup>), a, bは相対成長式の係数である。

表-3. 秋田県大館市のスギ人工林(3つの森林水文試験流域)における間伐施業にともなう林分葉量の変化

流域名		立木密度	胸高断面積合計	スギ葉量	間伐率	間伐率	間伐率
		(本/ha)	(BA:m <sup>2</sup> /ha)	(乾重:ton/ha)	(本数:%)	(BA:%)	(葉量:%)
上の沢	間伐前	1273	35.5	22.6			
	間伐後	698	25.5	16.6	45.2	28.2	26.5
中の沢	無間伐	1243	38.8	17.7			
下の沢	間伐前	2027	27.9	20.6			
	間伐後	1127	20.6	15.6	44.4	26.2	24.3

注)間伐前の林分構造については, 間伐後(2007年)の残存木の測定結果と間伐前(2005年)の間伐予定木の測定結果とを合計および平均することにより, 復元し, 推定した。

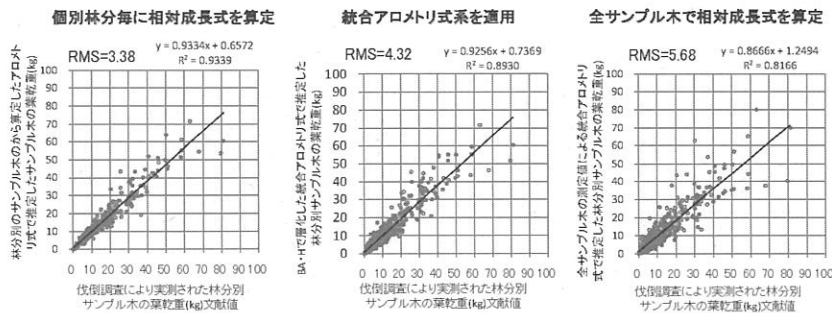


図-1. スギのサンプル木の葉量実測値(文献資料)と相対成長式による推定値