スギ精英樹クローンにおける炭素貯蔵量の選抜効果の試算

田村 明^{*1}・栗延 晋²・武津英太郎²・飯塚和也³

田村 明・栗延 晋・武津英太郎・飯塚和也：スギ精英樹クローンにおける炭素貯蔵量の選抜効果の試算 日林誌 88：15~20, 2006 スギ精英樹クローンについて、幹材中の炭素貯蔵量に関係する樹高、胸高直径、容積密度および炭素含有率の改良効果を試算した。樹高と胸高直径の遺伝相関は0.96と高く、樹高を改良することで胸高直径も十分改良できることが示唆された。容積密度の遺伝率は0.78と高く、成長形質と同程度の改良効果が望めるが、炭素含有率は変異が小さいため（変動係数0.3%）、大きな改良効果は期待できないと考えられた。選抜形質に樹高と容積密度の2形質を用い、各形質の経済的加重付け値を変動させ、炭素貯蔵量の改良効果が最大になる選抜指数式を求めた結果、指数式は $I = 2.8 \times \text{樹高} + 18.87 \times \text{容積密度}$ であった。上位38%のクローンを選抜し、さし木による普及を想定すれば、樹幹中の炭素貯蔵量は選抜前の集団平均値と比べて21.4%向上することが予測された。選抜されたクローンは、容積密度よりも樹高に加重付けされる傾向にあった。

キーワード：クローン、スギ、選抜指数、炭素貯蔵量、地球温暖化防止

Tamura, A., Kurinobu, S., Fukatsu, E., and Iizuka, K.: An Investigation on the Allocation of Selection Weight on Growth and Wood Basic Density to Maximize Carbon Storage in the Stem of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plus-tree Clones. J. Jpn. For. Soc. 88: 15~20, 2006 An optimum allocation of selection weight on the traits that were related to carbon storage in the stem of sugi was investigated to establish criteria for choosing plus tree clones suitable for carbon storage. The traits examined in this study were tree height, diameter at breast height (DBH), basic density, and carbon content per unit weight. In the case of single trait selection, the selection for tree height would bring about a good amount of gain in both tree height and DBH due to strong genetic correlation. Relative gain in carbon content, though the heritability was high, was negligibly small due to its very low coefficient of variation. Selection for basic density would bring about comparable genetic gain, while it resulted in negative responses in growth traits. An optimum allocation of selection weight for tree height and basic density in selection index was examined by changing their economic weight step by step so as to maximize the expected carbon storage potential of the selected population under the standard selection intensity: selection for the top 38% clones. The carbon storage potential was found to be maximized when the index was $I = 2.8 \times (\text{Tree height}) + 18.87 \times (\text{Basic density})$ where the increase in the selected population was 21.4% greater than the population mean. Clones with high index value tended to put more weight on tree height than on basic density.

Key words: carbon storage, clone, global warming prevention, index selection, sugi

I. はじめに

近年、地球的規模の温暖化が問題となっており、大気中の二酸化炭素濃度の上昇がその要因の一つとされている。そのため、各方面から対策が進められており、その一環として林木育種の分野においても炭素固定能の高い品種の開発が進められている。一方、日本の主要な造林樹種であるスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) は、古くから建築用材、家具材他に広く利用されてきており、現在でも最大の造林面積と蓄積を有している。そこで、スギの中から炭素固定能の高い品種を開発し、これを造林に用いるのなら、我が国の森林の炭素貯蔵量を増大させるとともに、木造住宅等に保持される炭素の量を増大できる可能性がある。

樹幹の木部として固定される炭素量は、幹材積、容積密

度および炭素含有率の積で表すことができる。炭素固定能が高いクローンを選抜する方法として、幹材積、容積密度および炭素含有率の積（総炭素量）が高いクローンを選ぶ方法がある。しかし、この方法は各形質の遺伝性の差異を無視した表現型のみによる選抜であるため、3者の積である総炭素量が高いクローンを選抜しても、その結果は遺伝子型値を十分に反映しているとはいえない。

一方、複数形質を改良する方法として、順繰り選抜法、足切り選抜法および選抜指数法があるが、各形質の遺伝性と形質間の反応を考慮した選抜指数法が最も改良効果が高く、柔軟性に富むとされている (Hazel, 1942)。家畜育種の分野では、選抜指数法は複数形質の改良を行って選抜集団の経済的改良量を最大にすることに利用されている (Hazel, 1943)。

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: akirat@affrc.go.jp

¹ (独)林木育種センター北海道育種場 (069-0836 江別市文京台緑町561-1)

Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Incorporated Administrative Agency, 561-1 Bunkyo-dai-midori-machi, Ebetsu 069-0836, Japan.

² (独)林木育種センター (319-1301 日立市十王町伊師 3809-1)

Forest Tree Breeding Center, Incorporated Administrative Agency, 3809-1 Ishi, Juocho, Hitachi 319-1301, Japan.

³ 宇都宮大学附属演習林 (321-8505 宇都宮市峰町 350)

Utsunomiya University Forests, 350 Minemachi, Utsunomiya 321-8505, Japan.

(2005年6月1日受付; 2005年9月15日受理)

表-1. 試験地の概要

Description of test stand used in this study.

Test stand	Established year	Age of collection	Location	Total clones	Individuals	Initial density
Ibaraki	1974	1999	Ibaraki, Hitachi	15	101	3500
Fukushima	1974	2002	Fukushima, Yamatsuri	42	235	3000

通常、選抜指数法は各形質の経済的重み値を仮定して集団の改良量を向上させる方法であるが、本報では各形質の経済的重み付け値を変化させ、炭素貯蔵量の改良効果が最大になる選抜指数式を求めた。また幹材積、容積密度および炭素含有率の積（総炭素量）によって選抜した場合の改良効果と選抜指数法による結果を比較し、その有効性を検討した。

II. 材料および方法

1. 材 料

供試林分は福島県矢祭町と茨城県日立市に設定されたスギ精英樹の次代検定林である（表-1）。これらの2検定林は3反復を持つ乱塊法で設定されている。材料採取時の林齢は矢祭町の次代検定林が26年、日立市の検定林が29年である。両検定林から合計47クローン336個体を選定し、個体ごとに樹高、胸高直径、容積密度および炭素含有率の4形質を測定した。樹高は伐倒前にパーテックスII（Haglof社製）を用いて0.1m単位で測定した。胸高直径は直径巻尺を用いて1mm単位で測定した。伐倒後、地上高1.2m部位から厚さ10cmの円盤を採取し、円盤の短径方向について髓から2方向の心材と辺材から、それぞれ直方体の試験体（接線方向の長さ3cm×軸方向の長さ4cm×放射方向の長さ10cm）を作製した（図-1）。各試験体について、3方向各3カ所、計9カ所の寸法をデジタルノギスを使用して0.01mm単位で測長し、生材状態の体積を推定した。試験体を送風乾燥機の中で、100~105℃で恒量に達するまで乾燥して全乾重量を測定し、全乾重量を生材状態の体積で除すことにより各試験体の容積密度を求めた。また個体ごとに次式（1）で加重平均した値を個体の容積密度（ Bd ）とした。

$$Bd = (Bd_{\text{heart}} \times A_{\text{heart}} + Bd_{\text{sap}} \times A_{\text{sap}}) / (A_{\text{heart}} + A_{\text{sap}}) \quad (1)$$

ここで、 Bd ：個体の容積密度（ g/cm^3 ）， Bd_{heart} ：心材の容積密度（ g/cm^3 ）， Bd_{sap} ：辺材の容積密度（ g/cm^3 ）， A_{heart} ：心材面積（ cm^2 ）， A_{sap} ：辺材面積（ cm^2 ）である。

試験体の炭素含有率は前報（田村ら，2005）と同じ方法で測定した。試験体ごとに5mgの全乾状態の木粉を作成し、これを元素分析装置（エレメンタル社製 vario EL）にかけることによって炭素含有率を得た。なお元素分析装置の分析精度は絶対標準偏差で $\pm 0.1\%$ である。木粉はサイクロンサンプルミル粉砕機（静岡精機社製 CSM-F1）で作製した。木粉の全乾重量は電子天秤（METTLER社製 MT5）によって、 $1\mu\text{g}$ 単位で測定した。炭素含有率（ C ）は木粉の全乾重量に対する炭素重量の比を百分率で表し

図-1. 試験体の作製方法

Method of specimen preparation.

髓を中心に2方向について、心材と辺材で分割し、4個の直方体の試験体を作製したことを示した。

た。各個体の炭素含有率（ C ）も式（2）と同様に、心材と辺材の面積による加重平均値として求めた。

次に個体当りの幹材中の炭素貯蔵量は以下の式（2）で推定した。

$$\text{個体当りの幹材中の炭素貯蔵量 (kg)} = Sv \times Bd \times C \times 10 \quad (2)$$

ここで、 Sv ：樹高と胸高直径を用い立木幹材積表（日本林業調査会，1970）から推定した幹材積（ m^3 ）である。なお、各検定林の材積式を表-2に示した。また、 Bd ：個体当りの容積密度（ g/cm^3 ）， C ：個体当りの炭素含有率（ $\%$ ）である。

2. 線型モデルとパラメータの推定

分散・共分散分析の統計解析には農林水産研究計算・情報センターの科学技術計算システムの統計解析ソフト SAS の General Linear Model プロシジャを利用した。前提条件として各個体の測定値が以下の線型モデル式（3）に従うとして分散・共分散分析した。すなわち、各個体の測定値はクローン、検定林、検定林内反復、クローンと検定林の交互作用、および検定林内の試験誤差の五つの要因が影響するとした。

$$y_{ijkl} = \mu + s_j + sr_{k(j)} + c_i + cs_{ij} + csr_{k(i)} + \epsilon_{ijkl} \quad (3)$$

ここで、 y_{ijkl} ：個体測定値， μ ：母集団の平均値， s_j ：検定林 j の効果， $sr_{k(j)}$ ：検定林 j の反復 k の効果， c_i ：クローン i の効果， cs_{ij} ：クローン i と検定林 j の交互作用， $csr_{k(i)}$ ：クローン i と検定林 j の反復 k との交互作用， ϵ_{ijkl} ： y_{ijkl} に伴う誤差である。

クローン、クローン×検定林の交互作用、クローン×反復の交互作用、誤差における分散と共分散成分は平均平方の期待値から推定した。

個体レベルの反復率（ H^2 ）は次式（4）で推定した。

$$H^2 = \sigma_c^2 / (\sigma_c^2 + \sigma_{cs}^2 + \sigma_{cb}^2 + \sigma_e^2) \quad (4)$$

表-2. 各試験地における材積式
Volume equation on each test stand.

Test stand	Range of DBH (cm)	Volume equation ^{a)}
Fukushima	4~10	$\log v = 5.8769 + 1.7454 \times \log d + 1.0140 \times \log h$
	12~20	$\log v = 5.73504 + 1.83346 \times \log d + 1.06569 \times \log h$
	22~30	$\log v = 5.71514 + 1.74357 \times \log d + 1.17719 \times \log h$
	32~40	$\log v = 5.82956 + 1.76381 \times \log d + 1.06412 \times \log h$
Ibaraki	4~10	$\log v = 1.753904 \times \log d + 1.040853 \times \log h - 4.172632$
	12~30	$\log v = 1.849344 \times \log d + 1.008086 \times \log h - 4.219069$
	32~40	$\log v = 1.944187 \times \log d + 0.894801 \times \log h - 4.211821$

^{a)} v , d , and h in volume equation show volume, DBH and tree height.

ここで, σ_c^2 : クローン分散, σ_{cs}^2 : クローンと検定林の交互作用分散, σ_{cb}^2 : クローンと反復の交互作用分散, σ_e^2 : 誤差分散である。

形質 x と形質 y との遺伝相関 ($r_{gx,y}$) は次式 (5) で求めた。

$$r_{gx,y} = \text{cov}_c(x, y) / (\sigma_{cx}^2 \cdot \sigma_{cy}^2)^{1/2} \quad (5)$$

ここで, $\text{cov}_c(x, y)$: 形質 x と y のクローン共分散, σ_{cx}^2 : 形質 x のクローン分散, σ_{cy}^2 : 形質 y のクローン分散である。

林木の場合, 次代検定によって精英樹クローンを選び直す場合は, クローン平均値が表現型値となる。形質 x のクローン平均値の分散 ($\sigma_{P(x)}^2$) は以下の式 (6) で算出した。

$$\sigma_{P(x)}^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{cs}^2/s + \sigma_{cb}^2/sb + \sigma_e^2/sbn \quad (6)$$

ここで, s : 検定林数, b : 反復数, n : 反復当りの個体数である。なおクローン平均値は検定林数 (s)=2, 反復数 (b)=3, 反復当りの個体数 (n)=1, 計6本の調査によって得られる値とした。

クローン平均値の反復率 (h^2) は次式 (8) で推定した。

$$h^2 = \sigma_c^2 / \sigma_{P(x)}^2 \quad (7)$$

形質間の表現型相関 ($r_{Px,y}$) は次式 (8) で求めた。

$$r_{Px,y} = \text{cov}_P(x, y) / (\sigma_{P(x)}^2 \cdot \sigma_{P(y)}^2)^{1/2} \quad (8)$$

ここで, $\text{cov}_P(x, y)$ は, 形質 x と y のクローン平均値の表現型共分散であり, 式 (6) の右辺の4要因について, それぞれ形質 x と形質 y の共分散成分を推定し, 式 (6) に入れ替えて算出した。 σ_{Px}^2 : 形質 x のクローン平均値の表現型分散, σ_{Py}^2 : 形質 y のクローン平均値の表現型分散である。

3. 単形質で選抜した場合の他形質の反応

形質 x で選抜した場合の形質 y の遺伝獲得量 (ΔG_y) は, 以下の公式 (9) で推定した (Falconer, 1993)。

$$\Delta G_y = i \times \sigma_{P(y)} \times h_x \times h_y \times r_{gx,y} \quad (9)$$

ここで, i : 形質 y におけるクローン平均値の表現型標準偏差に相当する選抜強度 (上位38%の選択に相当する), $\sigma_{P(y)}$: 形質 y のクローン平均値の表現型標準偏差, h_x : 形質 x のクローン平均値の反復率の平方根, h_y : 形

質 y のクローン平均値の反復率の平方根, $r_{gx,y}$: 形質間の遺伝相関係数である。

4. 炭素貯蔵量を直接選抜した場合の改良効果の試算

式 (2) から求めた幹材中の炭素貯蔵量を解析データに用い, 次式 (10) を用いて炭素貯蔵量の遺伝獲得量 (ΔG_s) を試算した。

$$\Delta G_s = i \times \sigma_{P(s)} \times h_s^2 \quad (10)$$

ここで, i : クローン平均値の表現型標準偏差に相当する選抜強度 (上位38%の選択), $\sigma_{P(s)}$: クローン平均値の表現型標準偏差, h_s^2 : クローン平均値の反復率である。

炭素貯蔵量の母集団の平均値 (μ_s) は次式 (11) で推定した。この式で算出された値は1本当りの幹材に貯蔵された炭素重量 (kg) を表す。

$$\mu_s = \mu_{sv} \times \mu_{BD} \times \mu_c \times 10 \quad (11)$$

ここで, μ_{sv} : 樹高と胸高直径の全クローン平均値を用いて, 立木幹材積表 (日本林業調査会, 1970) から推定した幹材積 (m^3), μ_{BD} : 容積密度の全クローン平均値 (g/cm^3), μ_c : 炭素含有率の全クローン平均値 (%) である。

選抜後の集団平均値は $\mu_s + \Delta G_s$ とし, 改良効果は母集団の平均値に対する選抜後の集団平均値と母集団の平均値との差の比を百分率で表した。

5. 選抜指数法で多形質を選抜した場合の炭素貯蔵量の改良効果の試算

選抜指数法による各形質の遺伝獲得量 (ΔG_m) は, 公式 (12) を用いて計算した (White and Hodge, 1989)。

$$\Delta G_m = C' \cdot b / (b' \cdot P \cdot b)^{1/2} \quad (12)$$

ここで, C : クローン分散共分散行列, P : クローン平均値の表現型分散共分散行列, b : 各形質の表現型値に与える重み付け係数の列ベクトルであり, 選抜指数式における各形質の係数である。なお b は次式 (13) から算出した (White and Hodge, 1989)。

$$b = P^{-1} \cdot G \cdot a \quad (13)$$

ここで, G : クローン分散共分散行列, a : 経済的重み値の列ベクトルで, その要素は選抜を行う形質の表現型標準偏差の逆数とした。このことにより各形質の重み付け係数は, その各形質の分散の大小に関わらず, 表現型標準偏

差当りの相対的重み付けは一定として算出される。

炭素貯蔵量の母集団の平均値は式 (11) で求めた値とした。選抜後の集団平均値は次式 (14) で推定した。

$$\begin{aligned} & \text{選抜後の炭素貯蔵量の集団平均値} \\ & = (\mu_{SV} + \Delta G_{SV}) \times (\mu_{BD} + \Delta G_{BD}) \times (\mu_C + \Delta G_C) \times 10 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 ΔG_{SV} ：幹材積の遺伝獲得量、 ΔG_{BD} ：容積密度の遺伝獲得量、 ΔG_C ：炭素含有率の遺伝獲得量である。式 (14) で用いられた各形質の遺伝獲得量は、選抜指数の標準偏差を選抜強度とする改良量で、上位 38% のクローンを選抜した場合に相当する。最後に各形質の経済的重み値を逐次増加させて、幹材中の炭素貯蔵量の改良効果の変化を調べ、最も改良効果が高かったときの指数式を求めた。なお炭素貯蔵量の改良効果は次式 (15) で求めた。

$$\begin{aligned} & \text{炭素貯蔵量の改良効果} \\ & = (\text{選抜後の集団平均値} - \text{母集団の平均値}) / \\ & \quad \text{母集団の平均値} \times 100 \end{aligned} \quad (15)$$

III. 結果と考察

1. 各種パラメータ

表-3 に各形質の全クローン平均値と変異幅を示した。ばらつきの程度を示す変動係数は樹高 12.3%，胸高直径 14.6%，容積密度 7.7% および炭素含有率 0.3% であった。炭素含有率の変異は他の形質の変異と比較して無視できるほどに小さい。

表-4 に各形質の個体レベルの反復率と、形質間の表現型相関係数および遺伝相関係数を示した。なお遺伝相関係数と表現型相関は式 (4) と (5) でそれぞれ算出した。樹高と胸高直径の反復率はそれぞれ 0.37, 0.29 であり、樹高の方が高いが、いずれもそれほど高い値ではなかった。またこれらの反復率は既報 (林野庁, 1992) の結果と同様であった。容積密度の反復率は 0.78 と 4 形質の中で最も高く、既報 (藤澤, 1998; 林野庁, 1992; 蓬田ら, 1992) の結果より高かった。炭素含有率の反復率は 0.41 であった。炭素含有率の遺伝性は成長形質より高いが、容積密度より低い傾向にあった。

表-3. 各形質の平均値と変異
Mean value and variation for each trait.

Traits	Mean value ^{a)}	Range of variation		C.V. ^{d)} (%)
		Minimum ^{b)} value	Maximum ^{c)} value	
Tree height (m)	14.5	11.2	17.7	12.3
DBH (cm)	17.8	12.9	22.9	14.6
Basic density (g/cm ³)	0.29	0.25	0.36	7.7
Carbon content (%)	51.7	51.4	52.1	0.3

^{a)} Mean value are average of least square estimates of all clones;

^{b)} Minimum value in the least square estimates of all clones; ^{c)} Maximum value in the least square estimates of all clones; ^{d)} Coefficient of variance.

樹高と胸高直径の間には、表現型相関および遺伝相関ともに顕著な正の相関がみられた。肥大成長量と容積密度は互いに独立した形質 (藤澤ら, 1989), あるいは負の相関があるとされている (平川ら, 2003; 栗延, 1991)。今回の調査では表現型相関および遺伝相関ともに負の相関関係がみられた。古賀は品種によっては肥大成長の影響が容積密度に大きく影響するものと小さいものがあるとしている (古賀ら, 1990)。また、未成熟材と成熟材とで区分した場合、年輪幅と容積密度の関係は、未成熟材では相関がほとんどなく、成熟材では弱い負の相関関係があることが報告されている (加納, 1960, 1961; 矢沢・深沢, 1958; 深沢, 1967)。一方、成熟材では、年輪幅と容積密度の関係が顕著でなくなる事例も報告されている (藤澤ら, 1989; 見尾ら, 1985)。肥大成長量と容積密度の関係は樹齢、供試材料によって変動すると考えられる。樹高と容積密度の間には負の相関関係がみられたが、胸高直径ほど顕著でなかった。丹原の報告でも表現型相関および遺伝相関ともに有意でなかったとしており (丹原・小玉, 2002), 今回の結果と併せ、樹高と容積密度の両形質がともに優れたクローンを選抜できる可能性が示唆された。炭素含有率と他形質の遺伝相関は大きくなかったが、成長形質との表現型相関で弱度の正の関係がみられた。炭素含有率と成長形質との間には遺伝相関よりも大きな正の環境相関があり、環境要因が 2 形質に影響することが示唆された。

2. 単形質を選抜した場合の他形質の反応

単形質について選抜差を 1 標準偏差とした場合の改良効果とそれに伴う他形質の間接選抜効果を試算した (図-2)。

胸高直径を直接選抜した場合の胸高直径の改良効果と、樹高を直接選抜した場合の胸高直径の改良効果は同じ +8.4% であった。このことは樹高を主体に選抜すれば胸高直径を直接選抜した場合と同じ改良効果が得られることを示すものである。また胸高直径を直接選抜した場合の容積密度の改良効果は -3.4% であったのに対して、樹高を直接選抜した場合の容積密度の改良効果は -2.4% であった。従って、樹高を直接選抜の方が、容積密度の間接選抜効果の減少が小さいので有利であると考えられた。

容積密度を直接選抜した場合の容積密度の改良効果は 8.0% であった。しかし成長形質の改良効果は負の方向に

表-4. 各形質の遺伝率と形質間の相関
Repeatability of each trait and correlations between traits.

Traits	$H^{2a)}$	Correlations			
		Tree height	DBH	Basic density	Carbon content
Tree height	0.37	—	0.77 ^{b)}	-0.27 ^{b)}	0.35 ^{b)}
DBH	0.29	0.96 ^{c)}	—	-0.36 ^{b)}	0.39 ^{b)}
Basic density	0.78	-0.35 ^{c)}	-0.51 ^{c)}	—	-0.06 ^{b)}
Carbon content	0.41	0.12 ^{c)}	0.11 ^{c)}	-0.11 ^{c)}	—

^{a)} Repeatabilities are calculated by Eq. (4); ^{b)} Phenotypic correlations estimated by Eq. (8) are given on the right hand-side above diagonals;

^{c)} Genetic correlations calculated by Eq. (5) are given on the left hand-side below diagonal.

図-2. 単一形質を選抜した場合の他形質の反応
Correlated response of the other traits when selecting one trait.

樹高、胸高直径、容積密度および炭素含有率のそれぞれの形質で直接選抜した場合の直接選抜効果と、他形質の間接選抜効果を示した。黒い棒は選抜形質の改良効果を表し、白い棒は応答によって試算された改良効果を表す。

A black bar shows the relative gain of selected trait, and white bars show relative gains by the correlated reaction.

反応し、特に胸高直径の改良効果は-5.1%と大きく負の方向に反応した。炭素貯蔵量の改良効果を高めるためには、成長形質と容積密度を同時に向上させることが望ましいが、容積密度と成長形質の間には負の反応があり、特に容積密度と胸高直径の間には大きな負の反応があった。

炭素含有率を直接選抜した場合の改良効果は僅か0.2%であった。炭素含有率自体は高い遺伝性を示すが、変異が小さいため、直接選抜しても、大きな改良効果が望めないと考えられる。また他形質の間接選抜効果も大きくなかった。以上のことから炭素含有率の改良は、炭素貯蔵量の向上への寄与は小さいと考えられる。

3. 炭素貯蔵量で直接選抜した場合の改良効果の試算

炭素貯蔵量で直接選抜した場合の改良効果を試算した。表-5に炭素貯蔵量の全クローン平均値、変異幅、変動係数、個体レベルの反復率および改良効果の試算結果を示す。クローン平均値の変動係数は35.5%と大きく、幹材中の炭素貯蔵量はクローンによって大きな変異があることが示された。個体レベルの反復率は0.29であり、樹高、胸

表-5. 幹材中の炭素貯蔵量の平均値、変異、反復率および改良効果の試算

Mean value, variation, repeatability and relative gain of carbon storage in the stem.

Mean value (kg) ^{a)}	29.2
Minimum value (kg) ^{b)}	13.0
Maximum value (kg) ^{c)}	53.2
C.V. (%) ^{d)}	35.5
H ^{2e)}	0.29
Relative gain of carbon storage (%) ^{f)}	18.3

^{a)} Mean value are average of least square estimates of all clones; ^{b)} Minimum value in the least square estimates of all clones; ^{c)} Maximum value in the least square estimates of all clones; ^{d)} Coefficient of variance; ^{e)} Repeatability based on individual value is calculated by Eq. (4). ^{f)} Relative gain is calculated as the ratio of ground means after selection against ground means before selection.

高直径、容積密度および炭素含有率の反復率より小さかった。これは解析データが幹材積と容積密度と炭素含有率の積であるため、各形質の遺伝性が無視され、各形質が一定の重み付けで計算されたためである。次に炭素貯蔵量の改良効果を試算した結果、18.3%であった。すなわち上位38%のクローンを選択することによって、1本当たりの幹材の炭素貯蔵量が集団全体で18.3%向上することが試算された。

4. 多形質を選抜した場合の炭素貯蔵量の改良効果

選抜指数法を用いて、多形質を選抜した場合の炭素貯蔵量の改良効果の試算を試みた。III. 2. では樹高を直接選抜した場合、胸高直径も最大の改良効果が期待でき、胸高直径で選抜した場合に比べて容積密度の負の反応も小さいことが示された。また樹高のクローン特性は胸高直径に比べて植栽密度の影響を受けにくい（明石ら、1987）、植栽密度が異なる検定林でも成長量のクローン特性の把握が可能であると推察される。また、容積密度は改良効果が高く、炭素貯蔵量を向上する上で必要な形質であることが示された。一方、炭素含有率は変異が極めて小さいため、炭素貯蔵量の向上には大きく貢献しないことが明らかにされた。そこで今回は選抜形質に樹高と容積密度の2形質を用い、炭素貯蔵量の改良効果を試算した。

容積密度に対する樹高の経済的重み値の比を逐次増加させて、炭素貯蔵量の改良効果の変化を調べた（図-3）。容積密度と樹高の経済的重み値が同じ場合には、炭素貯蔵量の改良効果は11.1%であった。しかし樹高への重み値を増加させるにつれて改良効果は増加し、経済的重み値の比6で、最大値21.4%を示した。すなわち上位38%のクローンを選択することによって、1本当たりの幹材の炭素貯蔵量が集団全体で21.4%向上することが試算された。幹材積と容積密度と炭素含有率の積で推定した炭素貯蔵量を解析データにした場合の改良効果に比べて、選抜指数法による改良が有効であることが証明された。最大の改良効果を示したときの指数式は、 $I = 2.8 \times \text{樹高} + 18.87 \times \text{容積密度}$ であり、樹高に対する容積密度の重み付け係数の比は6.73であった。標準偏差を選抜強度とする指数値の下限値は2.07であり、指数値2.07以上のクローンを選抜した結果、47

図-3. 樹高/容積密度の経済的重み値の比に対する炭素貯蔵量の改良効果

Relative gain of carbon storage according to the rate of economic weight for Height/Basic density.

容積密度に対する樹高の経済的重み値の比を逐次増加させた場合の幹材中の炭素貯蔵量の改良効果の変化を示した。

図-4. 指数値が高いクローンの選抜
Selection of clone showing high index.

指数値の1標準偏差を選抜強度とした選抜を行う場合、選抜基準値は2.07であり、47クローン中16クローンが基準値を上回った。図中の線は選抜基準線(指数値 $I=2.07$)である。
The line in this figure is a selection standard line; index value=2.07. ● and ○ indicate the selected clones and unselected clones, respectively.

クローン中16クローン(上位34%)が、この選抜基準値を上回った(図-4)。これらのクローンは炭素貯蔵量を改良する上で有望なクローンであると考えられる。図から明らかなように、容積密度よりも樹高に重点を置いたクローンが選抜されている。容積密度に対する樹高の経済的重み値の比6以上の領域では、改良効果が微減する傾向にあった。このことは、樹高の重み付けをあまり大きくすると、容積密度が減少し、結果として炭素貯蔵量の改良効果が向上しないことを意味する。

今回は炭素貯蔵量に関係する4形質の反復率、あるいは形質間の相関等の遺伝パラメータを推定した。これらのパラメータを活用することによって他の地域でも、炭素貯蔵量が高いクローンを選抜することが可能である。しかし、各形質の反復率は地域や樹齢によって異なることが知られている(久保田, 2003; 那須, 2004)。また形質間の相関も樹齢, 地域, 集団によって変動する可能性もあることから、改良効果を最大にする指数式は樹齢, 地域, 集団ごとに求める方が望ましい。また今回のデータは比較的若齢時

の結果であるため、更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

最後に関東森林管理局計画第一部森林技術センターの職員皆様には本研究の材料の調査および採取に協力して頂いた。また北海道育種場の職員の方々には貴重な御助言と励ましの言葉を頂いた。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 明石孝輝・川村忠士・河崎久男(1987) スギの幹と枝の諸形質に対する植栽密度とクローンの影響. 日林誌 69: 136-145.
- Falconer, D.S. (1993) 量的遺伝学入門(原書第3版). 546pp, 蒼樹書房, 東京.
- 藤澤義武(1998) 高度木材利用に適合する品質管理型木材生産への林木育種的対応に関する研究. 林育研報 15: 31-107.
- 藤澤義武・市村邦之・八川 久(1989) スギの年輪構造にあたる成長の影響. 日林関東支論 41: 95-98.
- 深沢和三(1967) スギ樹幹内の材質変動に関する研究. 岐阜大農演報 25: 47-128.
- Hazel, L.N. (1942) The efficiency of three method of selection. J. Hered. 33: 393-399.
- Hazel, L.N. (1943) The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics 28: 476-490.
- 平川泰彦・藤澤義武・中田了五・山下香菜(2003) 関東育種基本区から選抜されたスギ精英樹クローンの材質. 森林総研研報 386: 31-41.
- 加納 孟(1960) スギの材質(第1報) 釜淵産スギ. 林試研報 125: 95-119.
- 加納 孟(1961) スギの材質(第2報) 西川産スギ. 林試研報 134: 115-139.
- 古賀信也・小田一幸・堤 壽一(1990) スギ品種内の木材性質のパラツキ. 九大演報 62: 101-113.
- 久保田正裕(2003) 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローンの遺伝パラメータの検討—特性評価に用いた次代検定林の結果から—. 林木育種センター平成14年度年報: 52-53.
- 栗延 晋(1991) 次代検定林における精英樹の材質について. 林木の育種 161: 28-32.
- 見尾貞治・長尾博文・堤 壽一(1985) スギ造林木の生長と容積密度数. 第35回日本木材学会大会研究発表要旨集: p. 373.
- 那須仁弥(2004) 関西育種基本区におけるスギ・ヒノキ次世代品種開発のための遺伝情報の収集—瀬戸内海育種区及び近畿育種区におけるスギさし木とヒノキ実生の次代検定林の遺伝母数の推移—. 材木育種センター平成15年度年報: 80-82.
- 日本林業調査会(1970) 立木幹材積表 東日本編. 333 pp, 日本林業調査会, 東京.
- 林野庁(1992) 精英樹の材質評価手法に関する調査報告書. 115 pp, 林野庁, 東京.
- 田村 明・栗延 晋・千吉良治・宮田増男(1998) 九州育種基本区におけるスギ精英樹の20年次までのさし木検定データを用いた年次間相関の推移と選抜効果の予測. 109回日林論: 357-358.
- 田村 明・藤澤義武・飯塚和也・久保田正裕(2005) スギ精英樹クローンにおける炭素含有率の樹幹内変動. 日林誌 87: 52-57.
- 丹原哲夫・小玉泰義(2002) スギ精英樹の材質特性に関する研究. 岡山林試研報 18: 67-81.
- White, T.L. and Hodge, G.R. (1989) Predicting breeding values with applications in forest tree improvement. 367 pp, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- 矢沢亀吉・深沢和三(1958) 中部地方における人工植栽スギ材の生長状況と理学的性質との関係. 岐阜大農演報 8: 75-83.
- 蓬田英俊・栗延 晋・山口和穂(1992) スギ精英樹のクローン集植における比重の変異について. 日林関東支論 43: 75-76.