

## 短 報

## スギ人工林の間伐と光環境 (II)

## 林床相対照度の推定法\*

橋 本 良 二\*\*

## I. はじめに

林木が健全で旺盛に生長するには、間伐を実施し、その受光状態を改善する必要がある。林分の生長状態や生産の目標などに応じ、さまざまな間伐がなされるが、間伐後の受光状態は、同じ間伐量でも、間伐木の選び方で異なると考えられる。

前報(2)では、林床相対照度より樹冠を構成する全器官の平均表面相対照度  $R_{\text{surface}}$  を導き、間伐による立木の受光状態の変化を把握するうえで、 $R_{\text{surface}}$  が有用であると述べた。もし、ある間伐を実施したときの林床相対照度が推定できるならば、同一林分で種々の間伐案を立て、各間伐案に従う立木の受光状態の変化を  $R_{\text{surface}}$  を通じて比較できる。そこで、本報では、林分構造の基本的要素と考えられる樹冠配置、樹冠形、樹冠における枝葉の量などから、林床相対照度を推定する方法について検討した。

## II. 研究方法

## 1. 林分の調査と間伐

岩手県滝沢村岩手大学農学部附属滝沢演習林のスギ22年生林分を対象とした。林分の概要を表-1に示す。この地方のスギ林としては生長の良いほうで、収量比数は一般林分密度管理図で0.9である。

約35m×40mの調査区を設け、各立木の位置を測量し、胸高直径、樹高、樹冠半径を調査したあと、本数率で34%の間伐を実施した(2)。間伐は、樹型級にこだわらず均一な立木配置になるように選木(機械的間伐)し、1983年8月に行った。選木したものを4回に分けて切り、そのつど、林床の12か所に設けた1.8m×3.6mの光測定区で相対照度を測定した。なお、間伐木については、伐倒後、枝下高を測り、胸高直径との関係を明らかにし、他の立木の枝下高の推定に供した。

## 2. 樹冠の調査とその結果

立木の樹冠形、枝葉の量などを、20本の木で調べた。伐倒後、樹冠部分を1mごとに切り離し、地面に垂直に

立て、幹から分岐する一次枝の先端から樹心までの長さ(水平距離)を測定した。同時に、先端位置の地上高を測定した。この測定は、樹冠形を定めるうえで重要な一次枝のみを対象とした。一次枝は、主軸部( $B_1$ )、通導組織が明らかに木化している枝部( $B_2$ )、いくらか木化している枝部( $B_3$ )、葉部( $L$ )の4部分に分け、表面積を調べた。また、地上高0.3, 1, 2, ... mの幹の直径を測り、樹幹形についても調べた。

スギ樹冠は、回転体とみなすことができ、林分閉鎖後では円すい体もしくは放物体状の上部樹冠と円柱体状の下部樹冠とからなる(5~7)。一般に、上部は陽樹冠、下部は陰樹冠とよばれる。図-1は、1本の試料木について、一次枝の先端から樹心までの水平距離 $r$ を、先端の地上高 $h$ との関係でプロットしたものである。本林分では、放物体状の陽樹冠の下に円柱体状の陰樹冠が発達している。

試料木の樹冠形は、以下の要領で定める。樹冠の全器官表面積の垂直分布において(表-2)、最大値を示す樹冠層を目安にして、その層を含む上の部分を陽樹冠、下の部分を陰樹冠とする。そして、陰樹冠に含まれる一次枝の $r$ を平均し、それを陰樹冠(円柱体)の半径 $R_i$ とする。陽樹冠(放物体)の縦断面形を表わす放物線は、樹高を $H_i$ (m)、全器官表面積が最大になるまでの高さを $HM_i$ (m)とおくと、

$$r^2 = \alpha_i(h - H_i) \quad (h \geq HM_i) \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \quad \alpha_i = \frac{R_i^2}{HM_i - H_i}$$

となる。試料木以外の立木については、 $\alpha_i$ は、 $H_i$ 、 $R_i$ および枝下高 $HB_i$ (m)の実測値を用い、次式で与えられる(重相関係数0.59、危険率5%で有意)。

$$\alpha_i = -2.8713 + 2.1516 R_i - 0.3512(H_i - HB_i) \quad (2)$$

スギ樹冠は幹を軸とする回転体とみなせるので(6)、上記のように樹冠形が与えられれば、陽樹冠は放物体として、陰樹冠は円柱体として、各体積が求まる。そこで、樹冠の全器官表面積を樹冠の体積で除したものを全器官表面積密度とよぶ。全器官表面積密度は、陽樹冠

\* Ryoji HASHIMOTO: Thinnings and light conditions in a sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation (II) A method of estimating relative light intensity on the forest floor

\*\* 岩手大学農学部 Fac. of Agric., Iwate Univ., Morioka 020

表-1. 調査林分の概要  
General description of the sample plot

Stand age (yr)	Plot area (ha)	Slope exposure	Slope inclination (°)	Average DBH (cm)	Average tree height (m)	Average clear length (m)	Stand density (No. ha <sup>-1</sup> )
22	0.137	ESE	10	13.7	12.7	6.9	2,700

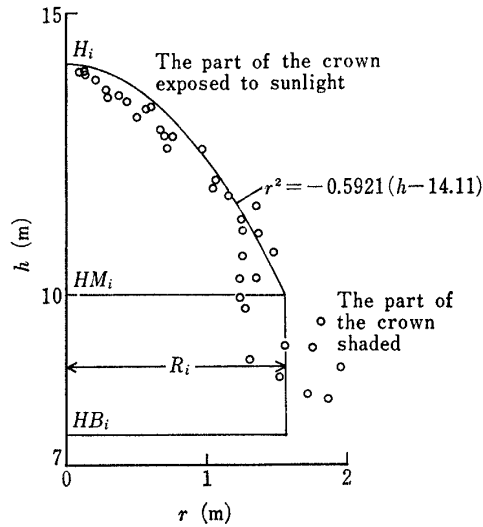


図-1. 樹冠形の例  
An example of crown form

White dots represent distances from the stem center to the tips of branches.

$H_i$ , tree height (=14.11);  $HM_i$ , height to the bottom of the upper parabolic-shaped part of the crown (= 10.00);  $HB_i$ , height to the bottom of the crown (= 7.52);  $R_i$ , radius of the lower cylindrical-shaped part of the crown (=1.56)

で高く、陽樹冠では(3)式で(重相関係数 0.75, 危険率 0.5% で有意), 陰樹冠では(4)式で(重相関係数 0.67, 危険率 1% で有意) 示される。

$$DH_i = 6.3141 + 0.4862 DBH_i - 6.5667 R_i \quad (\text{m}^2 \text{m}^{-3}) \quad (3)$$

$$DC_i = 2.1266 + 0.2297 DBH_i - 2.4069 R_i \quad (\text{m}^2 \text{m}^{-3}) \quad (4)$$

ここで、 $DH_i$  と  $DC_i$  は、それぞれ陽樹冠と陰樹冠の全器官表面積密度であり、 $DBH_i$  は、幹の胸高直径である。

### 3. 林分における樹冠配置

樹冠が放物体の陽樹冠と円柱体の陰樹冠からなるとすると、各曲面の方程式は、空間の座標系 ( $xyz$  座標系) を使い、以下のように表わされる(9)。陽樹冠は、

$$\frac{(x-a_i)^2}{p^2} + \frac{(y-b_i)^2}{p^2} = 2q(z-c_i) \quad (ZM_i \leq z \leq c_i) \quad (5)$$

となる。ここで、 $a_i, b_i, c_i$  は、各立木の樹冠頂端  $P_i$  の  $x, y, z$  座標である。 $2p^2q$  は、放物体の形状を表わす係数であり、(1)式の  $\alpha_i$  がこれに相当する ( $2p^2q$

表-2. 樹冠を構成する各器官の表面積の測定例  
An example of the surface area of each component forming a crown

Height (m)	Area(m <sup>2</sup> )					Total
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	L	Stem	
The part of the crown exposed to sunlight						
13~14.11	0.03	0.02	0.12	1.31	0.04	1.52
12~13	0.25	0.16	0.93	9.83	0.10	11.27
11~12	0.39	0.26	1.49	15.83	0.18	18.13
10~11	0.94	0.43	2.49	26.35	0.21	30.42
The part of the crown shaded						
9~10	0.58	0.24	1.39	14.67	0.25	17.13
8~9	0.76	0.20	1.13	11.98	0.28	14.35
7.52~8	0.21	0.06	0.33	3.45	0.15	4.20

B<sub>1</sub>, primary branches coming from the stem; B<sub>2</sub>, branches whose axes are lignified; B<sub>3</sub>, branches whose axes are partly lignified; L, leaves

= $\alpha_i$ )。  $ZM_i$  は、陽樹冠底部の  $z$  座標である。一方、陰樹冠は、次式で示される。

$$(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2 = R_i^2 \quad (ZB_i \leq z < ZM_i) \quad (6)$$

ここで、 $R_i$  は陰樹冠半径、 $ZB_i$  は樹冠底部の  $z$  座標である。林分の樹冠配置は、以上のようにして定まる。

### III. 林床相対照度の推定

スギ人工林では、各立木の枝下高はだいたいそろるので、林分における光減衰は、林冠部分と林冠下の部分とに分けられる。林床の一定面積の光測定面(光測定区)における散光条件下の平均相対照度を  $R_{f\text{floor}}$  とおくと、 $R_{f\text{floor}}$  は次式で表わされる。

$$R_{f\text{floor}} = RC_{f\text{floor}} \cdot RT_{f\text{floor}} \quad (7)$$

右辺の  $RC_{f\text{floor}}$  は、林冠のみに遮光される場合の光測定面の平均相対照度、 $RT_{f\text{floor}}$  は、林冠下の各立木の幹のみに遮光される場合の光測定面の平均相対照度である。

雲が厚くおった空では、天空のある位置の明るさ(放射量)  $B(\theta)$  は、次式で表わされる(8)。

$$B(\theta) = \frac{1}{3} B_0 (1 + 2 \cos \theta) \quad (\text{W m}^{-2} \text{steradian}^{-1}) \quad (8)$$

ここで、 $B_0$  は、天頂の明るさである。 $\theta$  は、天空のある位置の方向が天頂方向となす角度であり、その位置から地上に入射する光の入射角は  $\theta$  に等しい。山地の森林では入射角の大きい光は周囲の山に遮られる場合が多

い。天空から入射する光の方位角を  $\delta$  とおき、各方位における天空光の最大入射角 (2) を  $\theta'(\delta)$  で表わすと、散光下における林分上の放射フラックス密度  $FL_0'$  は、(8) 式を用いて、次式で与えられる (1, 2)。

$$FL_0' = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'(\delta)} B(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\delta \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (9)$$

このような散光条件下で、林床に向かう光は、各立木の樹冠下の幹のみに遮られるとする。ある方位角と入射角をもつ光が、林床の光測定面に向かう際、光測定面上に幹の影が生じる。前報では、この影面積の割合を  $r_{\text{shade}}(\delta, \theta)$  とおき、光測定面の放射フラックス密度を次式で計算した。

$$FL_s' = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'(\delta)} B(\theta) \{1 - r_{\text{shade}}(\delta, \theta)\} \cos \theta \sin \theta d\theta d\delta \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (10)$$

$FL_s'/FL_0'$  は、天空からの光が各立木の樹冠下の幹のみに遮光される場合の光測定面の平均相対照度に相当するので、

$$RT_{\text{floor}} = \frac{FL_s'}{FL_0'} \quad (11)$$

となる。

同じ散光下で、林床に向かう光は、林冠のみに遮られるとする。方位角  $\delta$ 、入射角  $\theta$  の光が、林床の光測定面上の点  $Q_j (j=1 \sim N_p)$  に向かうとし、林分上の放射フラックス密度を  $fl_0(\delta, \theta)$ 、林床の放射フラックス密度を  $fl_j(\delta, \theta)$  とおき、 $fl_j(\delta, \theta)/fl_0(\delta, \theta)$  を  $RLI_j(\delta, \theta)$  で表わす (図-2)。 $Q_j$  における散光下の放射フラックス密度  $FL_j'$  は、(9) 式に  $RLI_j(\delta, \theta)$  を導入して、次のように書ける。

$$FL_j' = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'(\delta)} B(\theta) RLI_j(\delta, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\delta \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (12)$$

$FL_j'/FL_0'$  は、散光下において林冠のみに遮光される場合の  $Q_j$  における相対照度に相当する。したがって、何らかの方法で  $RLI_j(\delta, \theta)$  が与えられれば、光測定面における平均相対照度  $RC_{\text{floor}}$  は求まる。

$$RC_{\text{floor}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} (FL_j'/FL_0')}{N_p} \quad (13)$$

以下、 $RLI_j(\delta, \theta)$  を決定する方法について検討し、 $RC_{\text{floor}}$  と  $RT_{\text{floor}}$  の計算結果より、(7) 式に従って、 $R_{\text{floor}}$  を推定する。

### 1. LAMBERT-BEER の法則の適用

ある方位角と入射角をもつ光が林分上から林床の光測定面上のある点に向かう際、各立木の樹冠どうしの隙間を通過して、直接に林床に達する場合もあるが、多くは何

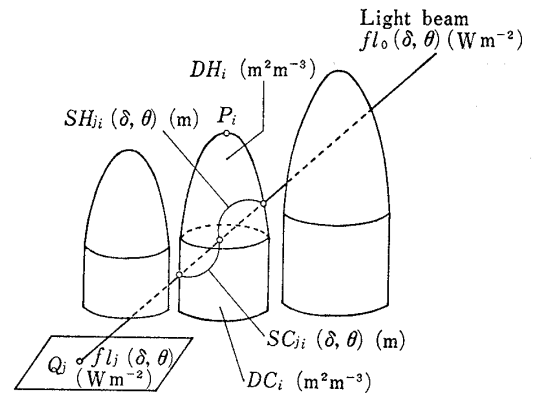


図-2. 林冠における光減衰  
Light dimination within canopies  
 $RLI_j(\delta, \theta) = fl_j(\delta, \theta)/fl_0(\delta, \theta)$

本かの立木の樹冠内を通過する。樹冠の枝葉などによる光減衰に、LAMBERT-BEER の法則を適用するとして、光が十分薄い樹冠層を通過することに減衰すると考えれば、 $RLI_j(\delta, \theta)$  は (14) 式または (14)' 式で表わされる (3)。

$$RLI_j(\delta, \theta) = \exp\{-k \cos \theta F_j(\delta, \theta)\} \quad (14)$$

$$RLI_j(\delta, \theta) = \exp\{-k' F_j(\delta, \theta)\} \quad (14)'$$

ただし、

$$F_j(\delta, \theta) = \sum_{i=1}^{N_t} \{SH_{ji}(\delta, \theta) DH_i + SC_{ji}(\delta, \theta) DC_i\} \quad (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$$

$F_j(\delta, \theta)$  は、光が各立木の樹冠を通過する距離とその樹冠の全器官表面積密度の積を、陽樹冠と陰樹冠を区別して積算したもので、 $SH_{ji}(\delta, \theta)$ 、 $SC_{ji}(\delta, \theta)$  は、それぞれ各立木の陽樹冠および陰樹冠を通過する距離、 $DH_i$ 、 $DC_i$  は、陽樹冠および陰樹冠の全器官表面積密度である (図-2)。 $N_t$  は、調査区の立木本数である。

(14)、(14)' 式の  $k$ 、 $k'$  は、それぞれ光減衰係数であり、 $k' = k \cos \theta$  の関係にある。全光下における直射光の減衰係数を調べた研究 (3, 4) より、 $k$  は  $\theta$  により大きく変化すると考えられるが、 $k'$  は  $\theta$  による変化は小さいと考えられる。したがって、光減衰係数を任意に与えて照度を推定する場合、(14)' 式のほうが扱いやすい。なお、急傾斜地の林分など、特殊な場合を除けば、樹冠における枝葉の着生は、樹冠のどの方向でも一様とみなせるので、 $\delta$  による光減衰係数の変化は考慮しなくてもよいと考えられる。

$Q_j$  (図-2) の座標を  $(d_j, e_j, f_j)$  とすると、林分上から  $Q_j$  に向かう光は、次式で示され (9)、

$$\frac{x-d_j}{\sin \delta \sin \theta} = \frac{y-e_j}{\cos \delta \sin \theta} = \frac{z-f_j}{\cos \theta} \quad (15)$$

各立木の樹冠を通過する距離  $SH_{ji}(\delta, \theta)$ 、 $SC_{ji}(\delta, \theta)$  は、(15) 式と (5) 式、あるいは (15) 式と (6) 式の連立

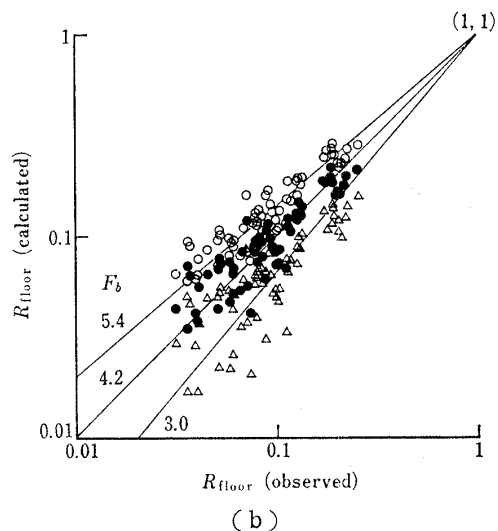
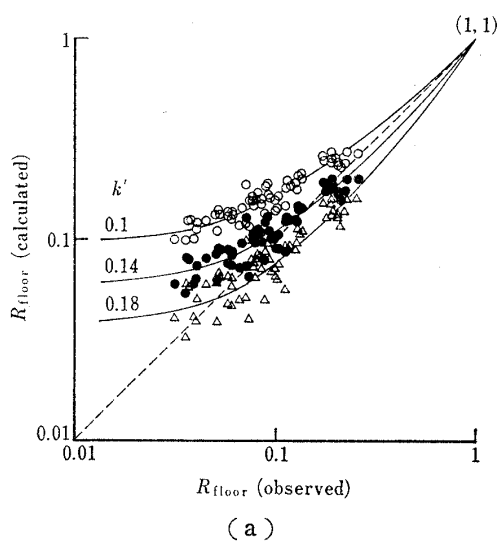


図-3.  $R_{\text{floor}}$  の推定値  
Estimates of  $R_{\text{floor}}$

(a) LAMBERT-BEER の法則を適用 By applying the LAMBERT-BEER law, (b) 境界値法 By a method using the boundary-value of  $F_j(\delta, \theta)$

方程式を解いて得られる。 $RLI_j(\delta, \theta)$  の計算では、光測定面上に 0.3m 間隔で格子状に分布する点を定め ( $Q_j, j=1\sim 72$ ),  $\delta$  と  $\theta$  のきざみ幅をそれぞれ  $\pi/6, \pi/18$  とした。また、 $FL_0'$  および  $FL_j'$  は、数値積分して求めた。

間伐にともなう林床相対照度  $R_{\text{floor}}$  の変化について、推定値と実測値を比較したのが図-3 (a) である。光減衰係数  $k'$  が大きくなるにつれ、推定値は低くなり、 $k'=0.1$  では実測値より高く、 $k'=0.18$  では全体に実測値より低い。また、 $k'$  の範囲が  $0.1 < k' < 0.18$  で、推定値と実測値がよく一致するわけではなく、 $R_{\text{floor}}$  が低くなるにつれ、推定値が実測値を上回る傾向を示す。たとえば、 $k'=0.14$  とすると、 $R_{\text{floor}} > 0.1$  では、各点は、

推定値=実測値の直線にそって落ちるが、 $R_{\text{floor}} < 0.1$  では、推定値は明らかに実測値より高い。したがって、本法では、間伐による林床相対照度の変化を、正確に推定することはできない。

## 2. 別の推定法

スギ林において、林床から天空を見渡して、数本以上の木の樹冠を通して天空がみえるのは、きわめてまれである。林床に達する光の大部分は、各立木の樹冠間隙を通過して直接にはいつてくるもの、あるいは樹冠通過距離の短いものと思われる。そこで、方位角  $\delta$ , 入射角  $\theta$  の光が、光測定面に向かう際、各立木の樹冠通過距離とその樹冠の全器官表面積密度との積の合計値  $F_j(\delta, \theta)$  が、一定値  $F_b$  以上ではまったく林床に到達せず、一定値未満ではすべて到達すると考える。

$$RLI_j(\delta, \theta) = \begin{cases} 0 & (F_j(\delta, \theta) \geq F_b) \\ 1 & (F_j(\delta, \theta) < F_b) \end{cases} \quad (16)$$

この方法 (仮に境界値法と名づける) で推定した林床相対照度  $R_{\text{floor}}$  を、実測値とくらべたのが図-3 (b) である。推定値は、 $F_b$  が大きくなるにつれ高くなり、 $F_b=3.0$  では実測値より低く、 $F_b=5.4$  では反対に高い。推定値と実測値との関係は、両対数軸の図で、(1,1) を通る直線で示され、 $F_b=4.2$  で直線の傾きがほぼ1になる。

## IV. ま と め

スギ樹冠では、葉は、幹から分岐する一次枝ごとに集中して分布し、一次枝どうしも比較的接近している。また、スギ葉の光透過率は、そうとう小さいと思われる。これらが影響して、林分上から何本かの立木の樹冠を通過して林床に向かう光は、数本以内でほぼ消滅すると考えられる。このような光減衰に対しては、LAMBERT-BEER の法則の適用は好ましくない。この法則によると、照度は、遮光物の増大につれ指数関数的に減少するが、0にはならないからである。LAMBERT-BEER の法則を適用する推定法で、立木密度が高い場合に実際より高めに推定されるのは、このような理由によると思われる。

境界値法では、林分上から林床に向かう光は、 $F_j(\delta, \theta) < F_b$  ではまったく遮られず、 $F_j(\delta, \theta) \geq F_b$  ですべて遮られるとするが、実際には、 $F_j(\delta, \theta) < F_b$  であっても、 $F_j(\delta, \theta)$  が 0 でない限り遮光は起こるし、 $F_j(\delta, \theta) \geq F_b$  で、光はすべて遮られるとは限らない。境界値法では、このような矛盾点はあるが、LAMBERT-BEER の法則の適用における短所が修正され、林床相対照度の推定値は、実測値とよく一致する。間伐による林床相対照度の変化の推定に、境界値法は役に立つと思われる。

## 引用文献

- (1) C.-EDWARDS, D. A. and THORNLEY, J. H. M.: Light interception by an isolated plant—A simple model. *Ann. Bot.* **37**: 919~928, 1973
- (2) 橋本良二: スギ人工林の間伐と光環境 (I) 林床相対照度の変化の検討. *日林誌* **67**: 253~260, 1985
- (3) ———・須崎民雄: スギ人工林の光合成生産機構に関する研究 (I) 林分における光減衰の解析. *日林誌* **64**: 18~26, 1982 a
- (4) ———・—————: 同上 (II) 樹冠を構成する枝や葉の着生状態と光減衰係数. *日林誌* **64**: 266~274, 1982 b
- (5) 橋本良二・須崎民雄: 同上 (III) 樹冠内相対照度. *日林誌* **65**: 327~334, 1983
- (6) 梶原幹弘: スギ同齡林における樹冠の形態と量に関する研究 (I) 樹冠形. *日林誌* **57**: 425~431, 1975
- (7) ———: 同上 (III) 樹冠の形態の生育段階的变化. *日林誌* **58**: 313~320, 1976
- (8) MONTEITH, J. L.: *Principles of environmental physics.* 241 pp, Arnold, London, 1973 (佐伯敏郎監訳: 生物環境物理学. 222 pp, 共立出版, 東京, 1975)
- (9) 矢野健太郎: *立体解析幾何学.* 202 pp, 裳華房, 東京, 1970

(1985年2月14日受理)

## 新刊紹介

## ○杉木

呉 中倫編, iv+584 pp, 写真 27, 図 109, 表 155, 中国林業出版社, 北京, 1984 年, 3.9 元 (約 400 円)

杉木とはコウヨウザンのことであり, スギではない。中国では, コウヨウザンは最も経済的に価値の高い樹種であり, 本書の前書きにはコウヨウザンの造林は 1000 余年の歴史があるから, その間に豊富な技術的経験があり, これをもとに編集したと述べている。内容は 20 章からなり, 総論にはじまり分布, 形態, 生理・生態, 育種, 育苗, 土壌・立地, 植栽方法, 保育, 間伐, 主伐・更新, 病虫害, 材の利用などこの樹種の全般にわたって詳細に記述されている。なかでも興味あるのは, 農作物

との間作技術について 1 章を設けている点である。引用文献は古いものでは 1603 年というものもあるが, 大部分は 1970 年代のものであり, ここ 10 年くらいの間に精力的に集めた研究資料を網羅している。わが国の文献も内容的には, かなり引用しているが, 参考文献としては総括的なテキストや便覧しかのせていない。この樹種の生長量をわが国のスギとくらべた例があるが, これによると両樹種の生長量はほぼ同じくらいである。また技術内容は日本のスギの造林技術に学んでいるところが多い。しかし, 中国の造林学の研究について, その目標や方法の概要をみるうえで貴重な文献であるとともに, 中国南部に分布する主要造林樹種であるコウヨウザンについて植物学的に興味をもっている読者にとっても一読に値する書物といえる。

(古越 隆信)