

長伐期施業に対応した長崎県ヒノキ人工林管理基準の作成

前田 一

キーワード：ヒノキ，長伐期施業，林分密度管理図，地位指数曲線

Management standard for Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plantations applied to long-term management in Nagasaki prefecture.

Hajime MAEDA

目次

| | |
|--------------------|----|
| 1. はじめに | 54 |
| 2. 林分密度管理図の調製 | 54 |
| 1) 資料の整理 | 54 |
| 2) 異常資料の棄却 | 55 |
| 3) 林分構成因子間の関係式の再計算 | 55 |
| 4) 収量密度効果の逆数式の計算 | 56 |
| 5) 逐次近似法による係数の決定 | 57 |
| 6) 各種曲線の算出 | 57 |
| 7) 推定精度 | 60 |
| 3. 地位指数曲線の調製 | 61 |
| 1) 資料の吟味 | 61 |
| 2) 地位の決定 | 61 |
| 4. 摘要 | 63 |
| 5. 引用文献 | 63 |
| Summary | 64 |

1. はじめに

長崎県（以下「本県」）民有林におけるヒノキ人工林面積は、約 60 千 ha と森林面積の約 27% を占めている。¹⁾ これらの大部分は戦後の積極的な造林施策を背景としており、その齢級構成の中心は 8 齢級前後に集中し、蓄積も充実してきている。

一方で、木材価格の長期低迷等に象徴される近年の森林・林業を取り巻く社会情勢の悪化に伴い、本県の人工林では主伐が控えられつつある。また、長伐期施業では、短伐期施業と比較して材質や育林経費等の点で有利であると言われている。このように本県においても適地では長伐期施業も選択肢の一つとすることが求められている。

しかしながら、この長伐期化に対応する本県独自の人工林管理基準が存在せず、昭和 59 年度に作成した長崎県ヒノキ林分密度管理図²⁾および長崎県人工林林分材積表³⁾の構成数値を適用してきた。

林分密度管理図とは植物の密度と成長法則や保育形式の解析を基礎として、同齢・単純・単層林の密度管理を検討するために作成された図表である^{4,5,6)}。また、人工林林分材積表で用いられている地位指数曲線とは林地の生産力を示す級区分の概念であり、最も用いられる指標として樹高成長がある。樹高成長は林地の生産力を比較的鋭敏に反映し、立木度

の大小に影響されることなく、さらに樹高の測定作業は容易であることから、地位推定に最も広く利用されている。

しかし、最多密度曲線を越える林分の存在が報告され⁷⁾、過去調査が困難であった高齢林のデータが収集されたことから、長伐期に適応する新たな管理基準の作成が全国的に進められている^{8,9,10,11)}。長伐期の目安は標準的な伐期齢の 2 倍程度と言われており、このような長伐期を対象とした森林の取扱いを長伐期施業と呼んでいる。本県ヒノキの標準的な伐期齢が 40 年であることから、本県の長伐期施業に対する管理基準には 80 年以上の伐期に対応する必要がある。

ところが、本県の現行基準^{3,4)}を調製したデータには高齢林分が少なく、長伐期施業への適応が困難と考えられる¹²⁾。そこで本研究では、高齢林分のデータを新たに加え、林分密度管理図および地位指数曲線を調製し、長伐期施業に対応した人工林管理基準を作成する。

本研究を遂行するにあたり、(独)森林総合研究所九州支所の近藤洋史博士、鹿児島県熊毛支庁（元鹿児島県林業試験場）の長濱孝行氏には、各種理論や解析方法について大変有益なご助言を頂いた。また、長崎県の普及指導員には現地調査にご協力いただいた。ここに記して深謝の意を表する。

1

2. 林分密度管理図の調製

1) 資料の整理

林分密度管理図の調製資料には、当センター、長崎県林政課および関係地方機関による県内一円のヒノキ人工林における現地調査資料 321 点を使用した。その中で、新たに実施した調査対象は、県内の各地域に分布する高齢級の人工林（60 年生以上）において、同齢単純林で健全な生育をしており、間伐が行われてから 5 年以上経過した林分を選定した。調査本数が 30 本以上になるように任意の調査

区を設定し、林齢、胸高直径、樹高、ha 当たり成立本数について測定した。林分密度管理図に示される各曲線式は最小二乗法により求められるので、スギ人工林林分密度管理図説明書¹³⁾およびヒノキ人工林林分密度管理図説明書¹⁴⁾に基づき、特定の主林木平均樹高階・ha 当たり本数階に偏った点数を考慮し、各階に含まれるデータが 11 点以下になるように確認したところ、収集データすべてが使用可能であった。これら各調査資料の結果を用いて、

各林分別に主林木平均樹高, ha 当たりの本数, ha 当たりの幹材積, ha 当たりの胸高断面積合計, 林分平均胸高直径, 林分平均樹高を計算した. 幹材積の算出にあたっては, 立木幹材積表¹⁵⁾を用いた. なお, 今回使用した資料における林齢の範囲は 12~118 年生である.

2) 異常資料の棄却

321 点のデータについては, 以下に示す林分構成因子間の相互関係により吟味した

・林分形状高と主林木平均樹高, 林分密度との関係

$$HF = a_1 + a_2 \times Ht + \frac{a_3 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (1)$$

・平均胸高直径と断面積平均直径, 林分密度との関係

$$\bar{d} = b_1 + b_2 \times \bar{d}g + b_3 \sqrt{N} \times Ht \quad (2)$$

・平均樹高と主林木平均樹高, 林分密度との関係

$$H = c_1 + c_2 \times Ht + \frac{c_3 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (3)$$

・平均単木材積と主林木平均樹高, 林分密度との関係

$$\log v = d_1 + d_2 \times \log Ht + d_3 \times \log N \quad (4)$$

ここで, HF は林分形状高, Ht は主林木平均樹高, N は ha 当たり本数, \bar{d} は平均胸高直径, $\bar{d}g$ は断面積平均直径, H は平均樹高, v は単木平均幹材積, a_i, b_i, c_i, d_i は算出される定数である.

これらの関係式において, 各因子による推定値と実測値の残差を残差標準偏差で除した値が t 分布表の 1% 値を超える調査地を異常資料として棄却することとした.

なお, 今回の各回帰式における残差標準偏差 S は次式で算出した.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - P - 1}}$$

ただし, y_i : 実測値, \bar{y}_i : 回帰式による推定値, N : 資料数, P : 回帰式の変数の数

(1)~(4) 式にデータを代入し重回帰式で解いた結果, 次の (5)~(8) 式が得られた. 各式

に付した R^2 および S はそれぞれ, 重相関係数, 残差標準偏差を示す.

これら 4 つの重回帰式に対する各林分の吟味結果から, 合計 59 点を異常資料として検出し棄却した.

$$HF = 0.72599 + 0.36928 \times Ht + \frac{0.18698 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.93675, S = 0.5644$$

$$\bar{d} = -0.36736 + 0.95321 \times \bar{d}g + 0.27518 \sqrt{N} \times Ht \quad (6)$$

$$R^2 = 0.98502, S = 0.9952$$

$$H = 0.96385 + 0.91019 \times Ht - \frac{0.07637 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.97658, S = 0.7561$$

$$\log v = -2.12827 + 2.22789 \times \log Ht - 0.34296 \times \log N \quad (8)$$

$$R^2 = 0.95108, S = 0.1061$$

表 1 異常値棄却後のデータの概要

| 項目 | データ範囲 |
|-------------------|----------|
| 林分数 | 262 |
| 林 齢 (年生) | 12~118 |
| 平均樹高 (m) | 3.7~26.8 |
| 平均胸高直径 (cm) | 5.8~49.0 |
| ha 当たり成立本数 (本/ha) | 200~5235 |

3) 林分構成因子間の関係式の再計算

異常資料の棄却後のデータ 262 点を用い (表 1, 表 2), 林分構成因子間の関係式を再計算し, 以下の 4 式を得た.

$$HF = 0.77456 + 0.37679 \times Ht + \frac{0.14103 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.97554, S = 0.3536$$

$$\bar{d} = -0.24654 + 0.96241 \times \bar{d}g + 0.17609 \sqrt{N} \times Ht \quad (10)$$

$$R^2 = 0.99495, S = 0.5778$$

$$H = 0.77348 + 0.9007 \times Ht - \frac{0.01842 \sqrt{N} \times Ht}{100} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.98857, S = 0.5399$$

$$\log v = -1.98156 + 2.19346 \times \log Ht - 0.37601 \times \log N \quad (12)$$

$$R^2 = 0.96970, S = 0.0871$$

表2 主林木平均樹高, ha 当たり本数別調査地一覧表

| ha 当たり本数 | 主林木平均樹高 (m) | | | | | | | | | | | | 計 | |
|---------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|-----|
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | | 28 |
| 0 ~ 200 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | | 3 |
| 201 ~ 400 | | | | | | 1 | | | | 2 | 2 | 4 | | 9 |
| 401 ~ 600 | | | | | | | | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 17 |
| 601 ~ 800 | | | 1 | | 1 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 | 1 | 24 |
| 801 ~ 1,000 | | | | 1 | 4 | 2 | 4 | 9 | 4 | 1 | 3 | 1 | | 29 |
| 1,001 ~ 1,200 | | | | 2 | 5 | 3 | 10 | 4 | 5 | 1 | | | | 30 |
| 1,201 ~ 1,400 | | | 1 | 1 | 4 | 9 | 6 | 4 | | | | | | 25 |
| 1,401 ~ 1,600 | | | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 2 | | | | | | 16 |
| 1,601 ~ 1,800 | | | | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | | | | | | 14 |
| 1,801 ~ 2,000 | | | 1 | 3 | 2 | 3 | | 1 | | | | | | 10 |
| 2,001 ~ 2,200 | | | 2 | 2 | 3 | 2 | | | | | | | | 9 |
| 2,201 ~ 2,400 | | | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 7 |
| 2,401 ~ 2,600 | | 2 | 5 | 4 | 1 | | | | | | | | | 12 |
| 2,601 ~ 2,800 | 2 | 1 | 1 | 7 | | 1 | | | | | | | | 12 |
| 2,801 ~ 3,000 | | 6 | 1 | 2 | 2 | | | | | | | | | 11 |
| 3,001 ~ 3,200 | 3 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | | | 7 |
| 3,201 ~ 3,400 | | 2 | 3 | 3 | | | | | | | | | | 8 |
| 3,401 ~ 3,600 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | | 4 |
| 3,601 ~ 3,800 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | 5 |
| 3,801 ~ 4,000 | 1 | 1 | | 1 | | | | | | | | | | 3 |
| 4,001 ~ 4,200 | | | | 1 | | | | | | | | | | 1 |
| 4,201 ~ 4,400 | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 4,401 ~ 4,600 | | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 3 |
| 4,601 ~ 5,000 | | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 5,001 ~ 5,200 | | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 計 | 9 | 17 | 25 | 36 | 30 | 34 | 31 | 30 | 16 | 10 | 13 | 9 | 2 | 262 |

4) 収量密度効果の逆数式の計算

林分密度管理図の等平均樹高曲線は, ha 当たりの本数と幹材積の関係式(13)で示され, 収量密度効果の逆数式と呼ばれる。

$$\frac{1}{V} = A + \frac{B}{N} \tag{13}$$

また, 単木レベルで見ると(14)式で示され, 競争密度効果の逆数式と呼ばれる。

$$\frac{1}{v} = A \times N + B \tag{14}$$

ここで, V は ha 当たり幹材積, v は単木幹材積, N は ha 当たり本数である。なお, A, B はデータから次式によって計算できる。

$$A = \frac{\sum V \times \sum v^2 - \sum v \times \sum v \times V}{\sum V^2 \times \sum v^2 - (\sum v \times V)^2} \tag{15}$$

$$B = \frac{\sum V^2 \times \sum v - \sum V \times \sum V \times v}{\sum V^2 \times \sum v^2 - (\sum v \times V)^2} \tag{16}$$

この A, B は生育段階によって異なり, 主林木平均樹高 Ht との関係式が(16)(17)式によって示されることが知られている¹⁶⁾。

$$A = b_1 \times Ht^{b_2} \tag{17}$$

$$B = b_3 \times Ht^{b_4} \tag{18}$$

そこで, 資料を 2m 樹高階毎に分け, 各樹高階毎に(15), (16)式で各樹高階別の A, B を求める。ここでは, 式の特性上, データ数が3点以下の樹高階は削除した。

次に, 各樹高階の代表樹高と A, B との関係式を(17), (18)式において最小二乗法で求め, $b_1 \sim b_4$ の初期値を決定する。このとき, A, B の少なくとも一方が0または負の値を示す4m, 6m, 28m は除外した。こうして次の初期値を得た。

$$b_1 = 0.36029, \quad b_2 = -2.14851, \\ b_3 = 438.59617, \quad b_4 = -1.91613$$

また, (17), (18)式を(14)式に代入すると,

$$\frac{1}{v} = b_1 \times Ht^{b_2} \times N + b_3 \times Ht^{b_4} \tag{19}$$

あるいは

$$v = (b_1 \times Ht^{b_2} \times N + b_3 \times Ht^{b_4})^{-1} \tag{20}$$

とおくことができる。ここで, (20)式の両辺に N を乗すると,

$$V = (b_1 \times Ht^{b_2} + b_3 \times Ht^{b_4} / N)^{-1} \quad (21)$$

とおくことができ、これは収量密度効果の逆数式(13)の逆数をとった形と等しくなる。

5) 逐次近似法による係数の決定

収量密度効果の逆数式を表す(21)式の各係数 $b_1 \sim b_4$ は、前出のとおり主林木平均樹高の各階層に分けられた A, B から計算されたもので、各林分の資料にあてはめて算出されたものではない。

このことから、(21)式に個々の林分の Ht と N を代入して V を推定すれば、誤差が考えられる。そこで、個々の林分データをあてはめるために、最小二乗法によって係数を算出することとした。この場合、(21)式は非線形と呼ばれる数式であり、通常回帰モデルによる係数算出は不可能となる。

このような非線形モデルに対する数値解法はいろいろな方法¹⁷⁾が発表されているが、真辺¹⁸⁾は逆数式の改良について、安藤¹⁶⁾の方法に改良を加え、D. W. Marquardt¹⁹⁾の逐次近似法を用いている。今回は同法に準じ、株式会社ライトストーン²⁰⁾の Origin Version 7. 5J の非線形曲線フィット機能を利用した。この機能では、Levenberg-Marquardt 法に基づいて各パラメータが求められる。前項で求めた $b_1 \sim b_4$ の値を初期値として、(21)式による推定材積と実測材積との重み付き残差平方和が最小となるように $b_1 \sim b_4$ を定めた。ここで、計算手順については長濱²¹⁾に従い、重み ω と、その算出に必要な(12)式を変換したものを以下に示した。

$$\omega = (0.44948 \times v^{-0.87858} \times 10^{0.19097 \times \bar{v}} \times N)^{-2} \quad (22)$$

$$v = 0.010434 \times Ht^{2.19346} \times N^{-0.37601} \quad (23)$$

ここで、 \bar{v} は(20)式で得られる推定平均幹材積であるから、重み ω はそれぞれの主林木平均樹高と ha 当たり本数から計算できる。

Levenberg-Marquardt 法により、72 回のステップで反復が終了し、次の各係数及び重み付き残差平方和を得た。

$$b_1 = 0.05239, \quad b_2 = -1.4063,$$

$$b_3 = 5274.04184, \quad b_4 = -2.88096,$$

$$\Sigma \omega ss = 23.872$$

こうして得られた係数を(21)式に当てはめ、最終的な収量密度効果の逆数式は次式となった。

$$V = (0.05239 \times Ht^{-1.4063} + \frac{5274.04184 \times Ht^{-2.88096}}{N})^{-1} \quad (24)$$

6) 各種曲線の算出

(1) 等平均樹高曲線

収量密度効果の逆数式である(24)式を用いて、与えられた上層樹高 Ht に対する ha 当たり本数 N と ha 当たり幹材積 V の関係をもとめることができる。

(2) 競争比数と限界競争比数

(14)式において N を 0 に漸近させると、 $1/v = B$ となり、 $v = 1/B$ は競争密度効果を示す等平均樹高曲線上で、無競争状態の幹材積を示す。ここで競争比数を R_c とおき、

$$R_c = v_{R_c} / (1/B) = v_{R_c} \times B \quad (25)$$

と定義すると、 R_c はある等平均樹高曲線上の無競争状態の幹材積とその線上にある N_{R_c} のときの幹材積 v_{R_c} との比率を示している。

逆数式(24)の括弧内第 2 項と ha 当たり幹材積 $V = v \times N$ から、調査地毎の競争比数は次式で求められる。

$$R_c = b_3 Ht^{b_4} \times V / N \quad (26)$$

R_c : 競争比数, V : (24)式による推定幹材積

R_c は競争の強さに応じて、理論的には 1 から無限小まで変化する。林木相互間に競争のないときは 1 で、競争が強くなるに従い、その値は小さくなる。

しかし、単純林においては、現実には自己間引きが起こるため、生育段階に応じた上限の密度がある¹⁷⁾。これらのことから、現実林分においては R_c には一定の限界が存在する。このときの競争比数を限界競争比数 R_f とおく。

本報において取り扱った林分データから R_f の値を(26)式より算出すると、 $R_f = 0.3934$ が得られた。この値を利用して後述の収量比数曲線、等平均直径曲線や自然枯死線が算出される。

(3) 最多密度曲線

十分な密度をもった個体群の密度を N と平均個体重 w との間にみられるこの関係は、草本植物など高等植物の間でも広く認められており²²⁾,

$$w = K \times N^a \quad (27)$$

K, a : 常数
により示され、吉良ら²²⁾は a の値が種に関係なく、ほぼ $1.5=3/2$ で一定であることから、この関係を自然の同種群落の個体密度に関する $3/2$ 乗則、または単に乗則とよんだ。この $3/2$ 乗則と同様な関係は十分な密度をもった林分の密度 N と、平均幹材積 v または単位面積当たりの幹材積 V の間にもよく成り立つことが知られている²²⁾。すなわち、

$$V = K \times N^a \quad (28)$$

または

$$V = K \times N^{1+a} \quad (29)$$

K, a : 常数

幹材積のこの関係は樹種毎に密度に対する特性を表すものとして只木・四手井^{23, 24, 25)}により、自然間引線、full density curve、幹材積に関する $3/2$ 乗則などとも呼ばれているが、四手井²⁶⁾により最多密度曲線と呼ばれ、現在ではこの呼び名が一般的になっている。

さて、(14) (17) (18) (25) 式の相互関係から、あらゆる生育段階における密度効果線上である一定の競争比数をもつ幹材積と密度の関係が導ける。

密度効果線上で競争比数 Rc のときの平均幹材積を v_{Rc} 、そのときの密度を N_{Rc} とすると、(14) (25) 式から、

$$N_{Rc} = \frac{B}{A} \times \left(\frac{1}{Rc} - 1 \right) \quad (30)$$

(30) 式の A, B に (17) (18) 式を代入し、

$$N_{Rc} = \frac{(1-Rc)}{Rc} \times \frac{b_3}{b_1} \times Ht^{(b_1-b_2)} \quad (31)$$

(18) (25) 式から

$$Ht = \left(\frac{Rc}{v_{Rc} \times b_3} \right)^{\frac{1}{b_1}} \quad (32)$$

(31) (32) 式から v_{Rc} について解くと

$$v_{Rc} = K_2 \times N_{Rc}^{K_1} \quad (33)$$

$$K_1 = \frac{b_4}{b_2 - b_4} \quad K_2 = \frac{Rc}{b_3} \times \left(\frac{Rc}{1-Rc} \times \frac{b_1}{b_3} \right)^{\frac{b_2}{b_2-b_4}}$$

(33) 式は (28) 式と同形であり、 $Rc=Rf$ とおくことによって、最多密度曲線を密度効果曲線との関連において導くことができる。安藤¹⁶⁾はこの関係式を等競争比数曲線と名付けた。また (31) 式も同様に $Rc=Rf$ とおくことによって、樹高に応じた最多密度を求めることができる。

競争比数は競争密度効果における強さを示す尺度であった。従って、等競争比数曲線は $V=v \times N$ との関係から収量密度効果においては

$$V_{Rc} = K_2 \times N_{Rc}^{K_1'} \quad (34)$$

$$K_1' = \frac{b_2}{b_2 - b_4} \quad K_2 = \frac{Rc}{b_3} \times \left(\frac{Rc}{1-Rc} \times \frac{b_1}{b_3} \right)^{\frac{b_2}{b_2-b_4}}$$

で与えられる。従って、(34) 式において $Rc=Rf$ とおくことによって、最多密度曲線が得られる。この式に各係数を代入し、

$$V_{Rf} = 1032602914 \times N_{Rf}^{-0.9536}$$

または

$$\log V_{Rf} = 6.013933 - 0.9536 \times \log N_{Rf} \quad (35)$$

が得られる。

一方、(31) 式において同様に計算すると

$$N_{Rc} = K_4 \times Ht^{K_3} \quad (36)$$

$$K_1 = b_4 - b_2 \quad K_2 = \frac{1-Rc}{Rc} \times \frac{b_3}{b_1}$$

この式も $Rc=Rf$ とおき各係数を代入すると、任意の上層樹高に対する最多密度曲線が計算できる (37) 式となる。

$$N_{Rf} = 1552124841 \times Ht_{Rf}^{-1.47466}$$

または

$$\log N_{Rf} = 5.190927 - 1.47466 \times \log Ht \quad (37)$$

現行基準と比較すると ha 当たり本数 3,000 本付近で時計回りに回転し、低密度時の ha 当たり材積が増加することを示している (図 1)。

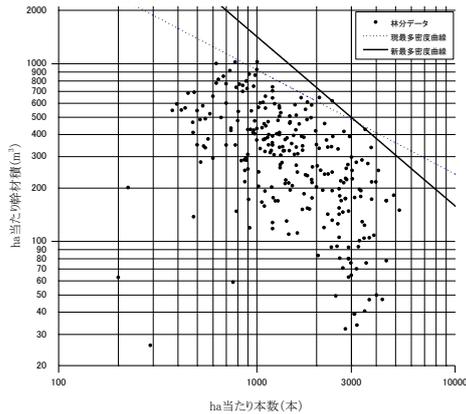


図1 最多密度曲線の比較

(4) 収量比数と収量比数曲線

現実的な林分では最多密度曲線よりかなり低い密度で管理されており、最多密度曲線に接近すると風雪害や病害が発生ししやすい¹⁷⁾。このような林分の密度管理の問題を検討するため、只木・四手井²⁵⁾は同一等平均樹高曲線上の最多密度に対する本数比率、すなわち相対密度を用いた。相対密度は最多密度曲線からの隔たりを示す尺度の一つであるが、以下に示す最多密度曲線上の幹材積に対する材積比率、すなわち収量比数も同様に最多密度曲線からの隔たりを示すことができ、また、幹材積と直接結びついていることから、収穫量などを検討する際にはより都合がよいものと言える¹⁷⁾。

ここで、ある生育段階における競争比数 R_c 時点の幹材積を V_{Rc} とすると、そのときの最多密度時の幹材積 V_{Rf} に対する割合が収量比数 R_y であることから、

$$R_y = \frac{V_{Rc}}{V_{Rf}} \quad (38)$$

で示され、 R_y と R_c の一般的な関係は、

$$R_y = \frac{(1 - R_c)}{(1 - R_f)}$$

$$\text{または } R_c = 1 - (1 - R_f) \times R_y \quad (39)$$

と導けることから、(39)式を(34)式に代入し計算すると、

$$V_{Ry} = K_2 \times N_{Ry}^{K_1} \quad \text{または}$$

$$\log V_{Ry} = \log K_2 + K_1 \log N_{Ry} \quad (40)$$

$$K_2' = \frac{(1 - R_f) \times R_y}{b_1} \times \left(\frac{1 - (1 - R_f) \times R_y}{(1 - R_f) \times R_y} \times \frac{b_1}{b_3} \right)^{\frac{b_2}{b_2 - b_1}}$$

が得られ、これによって任意の収量比数 R_y のときの幹材積と本数の関係を表すことができる。この関係式によって描画される曲線群が等収量比数曲線である。

また、このときの本数は任意樹高により(36)式から

$$N_{Ry} = K_4 \times Ht^{K_3} \quad \text{または}$$

$$\log N_{Ry} = \log K_4 + K_3 \times \log Ht \quad (41)$$

$$K_4' = \frac{(1 - R_f) \times R_y}{1 - (1 - R_f) \times R_y} \times \frac{b_3}{b_1}$$

で表すことができる。表3に各収量比数に対応する係数を示す。

表3 各収量比数別の係数

| R_y | K_1' | $\log K_2$ | K_3 | $\log K_4'$ |
|-------|----------|------------|----------|-------------|
| 1.00 | -0.95364 | 6.01393 | -1.47466 | 5.19093 |
| 0.95 | -0.95364 | 5.93966 | -1.47466 | 5.13640 |
| 0.90 | -0.95364 | 5.86515 | -1.47466 | 5.08290 |
| 0.85 | -0.95364 | 5.78988 | -1.47466 | 5.02999 |
| 0.80 | -0.95364 | 5.71329 | -1.47466 | 4.97729 |
| 0.75 | -0.95364 | 5.63482 | -1.47466 | 4.92440 |
| 0.70 | -0.95364 | 5.55386 | -1.47466 | 4.87092 |
| 0.65 | -0.95364 | 5.46970 | -1.47466 | 4.81642 |
| 0.60 | -0.95364 | 5.38156 | -1.47466 | 4.76044 |
| 0.55 | -0.95364 | 5.28844 | -1.47466 | 4.70242 |
| 0.50 | -0.95364 | 5.18914 | -1.47466 | 4.64170 |
| 0.45 | -0.95364 | 5.08210 | -1.47466 | 4.57744 |
| 0.40 | -0.95364 | 4.96524 | -1.47466 | 4.50854 |

(5) 等平均直径曲線

収量比数、主林木平均樹高および平均直径の関係式は明示できないことから、与えられた平均直径と収量比数で対応する本数との幹材積の計算については以下のように行った。

ここで、断面積合計 G 、断面積平均直径 D_g とおくと次式が成り立つ。

$$G = \frac{V}{HF} \quad (42)$$

$$\bar{D}_g = \frac{200 \times G}{\pi \times N} \quad (43)$$

このことから、平均直径の設定値 D_{hat} と収量比数 R_y の組み合わせごとに、任意の主林木平均樹高値 Ht として(41)式から求められる ha 当たり本数を用いて、(40)式でその幹材積

を算出する。この値を(9)式で求められる林分形状高を用いて(42)式によりha当たりの断面積を求め、(43)式から断面積平均直径を算出する。この D_g を(10)式に代入し平均直径 D を算出する。 $D - \hat{D} \leq 1.0 \times 10^{-7}$ になるまで H_t の数値を調整する。

こうして得られるのは、設定した直径値における各収量比数毎の ha 当たり本数と ha 当たり幹材積であり、この点を結ぶことにより等平均直径曲線を表すことができる。

(6) 自然枯死線

植栽本数 N_0 から始まる林分は間伐などの人為的な本数調整が加わらなければ、成長過程に応じて本数が減少し、最終的には最多密度曲線上をたどっていくことになる。植栽本数 N_0 に対する自然枯死線は平均幹材積 v の関数

$$V = (0.05239 \times H_t^{-1.4063} \times N + 5274.04184 \times H_t^{-2.88096})^{-1} \quad (44)$$

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} - \frac{v}{K_5 \times N_0^{(K_1+1)}} \quad (45)$$

で表すことができ、このとき

$$K_5 = \frac{K_1 \times Rf}{b_3} \times \left(\frac{Rf}{1-Rf} \times \frac{b_1}{b_3} \right)^{K_1} \times \left(\frac{b_2}{b_4} \right)^{K_1+1}$$

である。各係数を代入し、求める植栽本数の自然枯死線は(46)式となる。

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} - \frac{v}{-3.997604 \times N_0^{(-0.9536)}} \quad (46)$$

(7) 林分密度管理図の作成

両対数軸の林分密度管理図(図2)に各曲線を示した(本報末尾)。

7) 推定精度

安藤¹⁶⁾は調製した林分密度管理図について、推定精度の検討を加えている。そこで本研究

で調製した林分密度管理図に対しても、推定精度の検定を行った。これは各調査資料の ha 当たり幹材積の実測値 V と、本密度管理図の(24)式により推定される ha 当たり幹材積の推定値 \hat{V} との誤差率を求め、その値が許容誤差率以内にあるかどうか統計的に検定するものである^{13,14)}。具体的には、(47)式により許容誤差率 E の χ^2 値を求め、危険率 5% の χ^2 の $\chi^2_{(0.05)}$ 値を(48)式で計算し²⁷⁾、両者の有意差を検定した。

$$\chi^2 = \frac{1}{E} \sum \left(\frac{\bar{v}}{v} - 1 \right)^2 \quad (47)$$

$$\chi^2_{0.05[v]} = \frac{1}{2} \left(t_{0.10[\infty]} + \sqrt{2N-1} \right)^2 \quad (48)$$

ここで、 N は資料数、 v は自由度、 E は許容誤差率 20%、 $t_{0.05[\infty]}$ はスチューデントの t 分布の棄却値を示す。

その結果、それぞれの値は

$$\chi^2 = 289.63$$

$$t_{0.05[\infty]} = 300.75$$

であった。一方、現在本県で使用している長崎県ヒノキ人工林林分密度管理図の χ^2 値は 329.17 で有意差があることが示された。このことから、既存の基準では長崎県内のヒノキ人工林に対応できておらず、新しい林分密度管理図が有効であることが明らかとなった。

次に、全資料を用いて ha 当たり幹材積と平均直径の推定精度および誤差率を計算した(表4、表5)。既存の基準と比較すると、ha 当たり幹材積は推定精度および誤差率の分布範囲が改善された。しかし、平均直径については既存の基準と大きな差は認められなかった。

表4 ha 当たり幹材積, 平均直径の推定精度

| | ha 当たり幹材積 | | 平均直径 | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| | 改訂版 | 従来版 | 改訂版 | 従来版 |
| 標準偏差 | 76.06 | 85.37 | 2.89 | 2.82 |
| 許容誤差の最小値 | 70.85 | 79.53 | 2.69 | 2.62 |
| 許容誤差率の最小値 | 19.63% | 20.92% | 12.91% | 11.97% |
| 百分率標準誤差 | 21.15% | 22.55% | 13.91% | 12.89% |
| 変動係数 | 22.27% | 25.00% | 14.01% | 13.65% |

表5 ha 当たり幹材積，平均直径の誤差率の分布

| 誤差率 範囲(%) | ha当たり幹材積 | | | | 平均直径 | | | | |
|--------------|----------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| | 改訂版 | | 従来版 | | 改訂版 | | 従来版 | | |
| | 調査地数 | 百分比 | 調査地数 | 百分比 | 調査地数 | 百分比 | 調査地数 | 百分比 | |
| ～ | -50 | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% |
| -50～ | -40 | 1 | 0.38% | 3 | 1.15% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% |
| -40～ | -30 | 14 | 5.73% | 15 | 6.11% | 3 | 1.15% | 4 | 1.53% |
| -30～ | -20 | 32 | 12.21% | 32 | 12.21% | 26 | 9.92% | 20 | 8.02% |
| -20～ | -10 | 39 | 14.89% | 41 | 15.65% | 59 | 22.90% | 54 | 20.61% |
| -10～ | 0 | 43 | 16.41% | 53 | 20.23% | 80 | 30.53% | 101 | 38.55% |
| 0～ | 10 | 50 | 19.08% | 45 | 17.18% | 62 | 23.66% | 53 | 20.23% |
| 10～ | 20 | 39 | 14.89% | 27 | 10.31% | 21 | 8.40% | 20 | 8.02% |
| 20～ | 30 | 17 | 6.49% | 16 | 6.11% | 8 | 3.05% | 7 | 2.67% |
| 30～ | 40 | 15 | 5.73% | 17 | 6.49% | 1 | 0.38% | 1 | 0.38% |
| 40～ | 50 | 6 | 2.29% | 5 | 1.91% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% |
| 50～ | | 4 | 1.91% | 6 | 2.67% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% |
| 計 | | 260 | 100% | 260 | 100% | 260 | 100% | 260 | 100% |

3. 地位指数曲線の調製

1) 資料の吟味

林分密度管理図は，主林木平均樹高と ha 当たり本数を説明変数とし，その他の林分構成因子の数値を決定している．一方，地位指数曲線については，その説明変数が林齢となることから，資料の吟味方法が前段とは異なる．すべての調査データ 321 点について，長濱⁹⁾の方法を用いて資料の吟味を行った結果，260 点のデータを用いることとした．

2) 地位の決定

260 点の林分データを用いて林齢 T と主林木平均樹高 Ht の関係から地位区分を行った．分布の中心線を決定するために，植物の成長関数として利用頻度の高い Mitscherlich, Logistic, Gompertz, Richards 関数^{28,29)}の 4 つの式を用いた．これらの関数式の当てはめた結果が以下の通りである(図3)．ここでも前出の株式会社ライトストーン²³⁾の Origin Version7.5J の非線形曲線フィット機能を利用した．

Mitscherlich 式

$$Ht = 42.0068 \times (1 - \exp(-0.03428 - 0.00823 \times T))$$

$$R^2 = 0.75055$$

Logistic 式

$$Ht = \frac{26.15225}{1 + \exp(1.625442 - 0.03851 \times T)}$$

$$R^2 = 0.72165$$

Gompertz 式

$$Ht = 29.30136 \times \exp(-\exp(0.76353 - 0.02347 \times T))$$

$$R^2 = 0.75063$$

Richards 式

(収束せず)

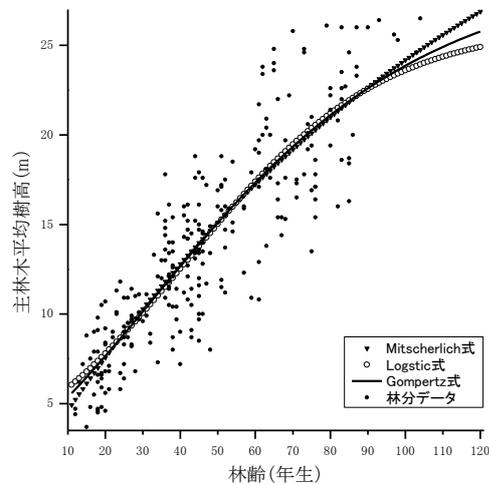


図3 成長関数への当てはめ結果

この結果から，地位指数曲線の中心は R² が最も高かった Gompertz 式に決定した(以下，「分布中心線」)．

続いて，分布の範囲を決定するが，分布の

中心曲線は任意の林齢に対する期待値であることから、階級別に期待値に対する実測データのばらつきを標準偏差で算出し、林齢に対する主林木平均樹高の標準偏差の関数式を導いた。算出式は以下のとおりである（以下、「標準偏差曲線」）。

$$\sigma H_t = 3.67197 - 3.40927 \times 0.97421^t \quad R^2 = 0.8466$$

中心線からの分布範囲は $2 \times \sigma$ で設定し、その範囲内を 5 等分して地位区分を行った。従って、地位Ⅲ等地の中心線が分布中心曲線で示され、地位Ⅰ等地、地位Ⅴ等地については分布中心曲線 ± 1.6 標準偏差曲線で、地位Ⅱ等地、地位Ⅳ等地については分布中心曲線 ± 0.8 標準偏差曲線で示した（図 4）。

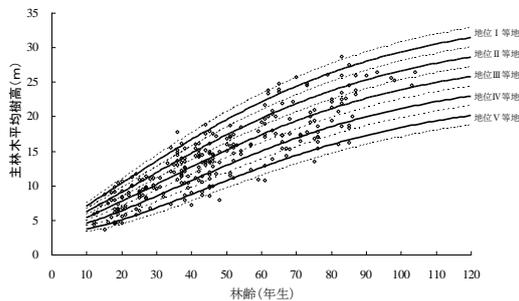


図 4 地位区分に関する曲線群

また、基準林齢を 40 年とした場合、地位指数曲線は図 5 のように示すことができる。図中の SI は地位指数を示しており、その表示範

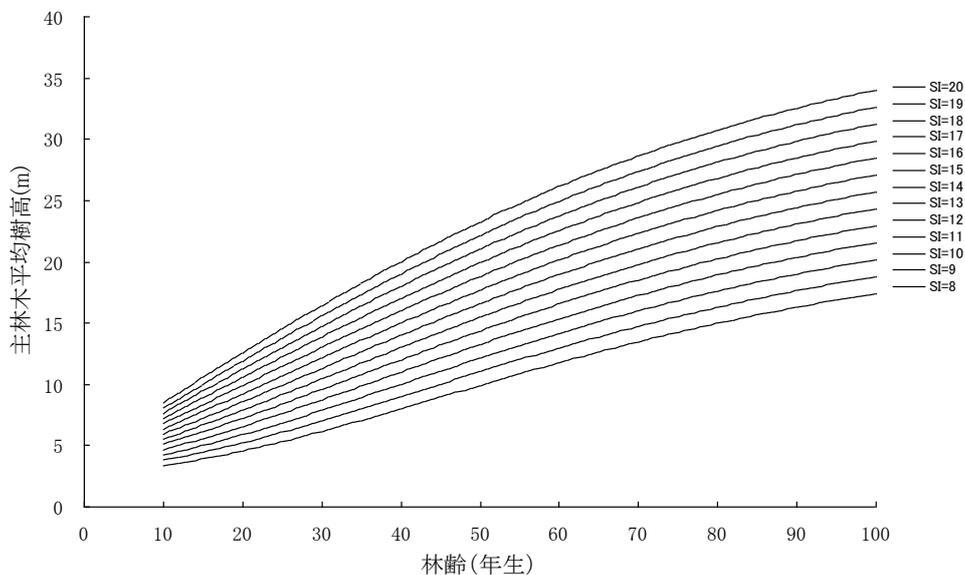


図 5 地位指数曲線群

囲は 8~20 である。その算出式は

$$H = H_x + (SI - H_{40}) \times \frac{\sigma_x}{\sigma_{40}}$$

で示される。ただし、 H は地位指数 SI に対応する曲線上の x 年における主林木平均樹高の値、 H_x , H_{40} はそれぞれガイドカーブ上の x 年、基準年 (40 年) における主林木平均樹高の標準偏差である³⁰⁾。この図から、各林齢に対応する主林木平均樹高の値から、地位指数が読み取れる。

さて、地位指数曲線について、既存資料³⁾と数値比較してみると（図 6）、地位Ⅰ、地位Ⅱ、地位Ⅲにおいて、50 年生前後までは下方修正され、それ以降は上方修正された。地位Ⅳと地位Ⅴでは 45 年前後までは下方修正され、それ以降は上方修正された。基準林齢を 40 年とした場合、各地位の増減は、地位Ⅰで -1.96m 、地位Ⅱで -1.75m 、地位Ⅲで -1.24m 、地位Ⅳで -0.84m 、地位Ⅴで -0.33m となった。

本県のヒノキ人工林の標準的な伐期齢は 40 年である。長伐期施業が標準的な伐期齢の 2 倍の伐期と言われていることから、その伐期齢は 80 年となる。現行基準の地位指数曲線と比較すると 80 年生においても樹高成長の著しい低下は認められなかった。このことから、長伐期施業の対象となる高齢林においても樹高成長が期待できることが示唆された。

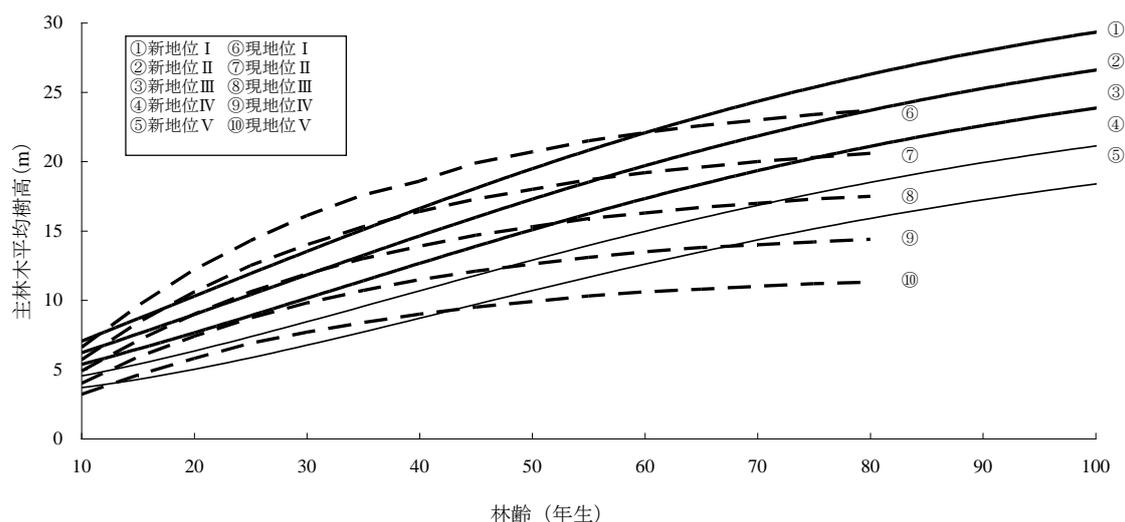


図6 地位区分の比較

4. 摘要

今回、林分密度管理図と地位指数曲線の調製を行った。現行の基準策定より約30年を経過し、不足していた高齢林分データを加えることで、次の変化が認められた。

- 1) 林分密度管理図では最多密度曲線が ha 当たり本数 3,000 本付近で時計回りに回転し、低密度時の ha 当たり幹材積が上方修正された。
- 2) 地位指数曲線では、40～50 年生以降の樹高成長が上方修正され、従来考えられていた長

伐期化による樹高成長の著しい低下は80年生程度までは確認できなかった。

以上の検討により、本研究の結果は、長伐期施業に対応した新たな管理基準として適用可能であると考えられた。しかし、高齢林分のデータ数はまだまだ十分なものとは言えず、精度向上のためには今後も定期的な見直しを行う必要がある。

5. 引用文献

- 1) 長崎県農林部林務課：長崎県の森林・林業統計，pp157. (2009)
- 2) 長崎県：ヒノキ人工林林分密度管理図 (1984)
- 3) 長崎県：人工林林分材積表 (1984)
- 4) 只木良也：林分密度管理図の基礎と応用，日本林業技術協会，東京，126pp. (1969)
- 5) 安藤貴：林分の密度管理，農林出版，東京，126pp. (1982)
- 6) 日本林業技術協会：人工林林分密度管理図，全22巻，東京(1999)
- 7) 近藤洋史：高齢林分調査データの林分密度管理図への適応，日林九支論 51：9-10(1998)
- 8) 長濱孝行・近藤洋史：長伐期施業に対応した鹿児島県スギ人工林収穫予測，日林誌 88(2)：71-78(2006)
- 9) 長濱孝之：長伐期施業に対応した鹿児島県ヒノキ人工林管理基準，鹿児島県林試研報 9：7-25(2006)
- 10) 林野庁：長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発，160pp. (2005)
- 11) 全国林業改良普及協会：長伐期林を解き明かす，189pp. (2006)
- 12) 七里成徳：長崎県におけるヒノキ長伐期施業指針の作成，日林九支研論集 47：297-300(1994)

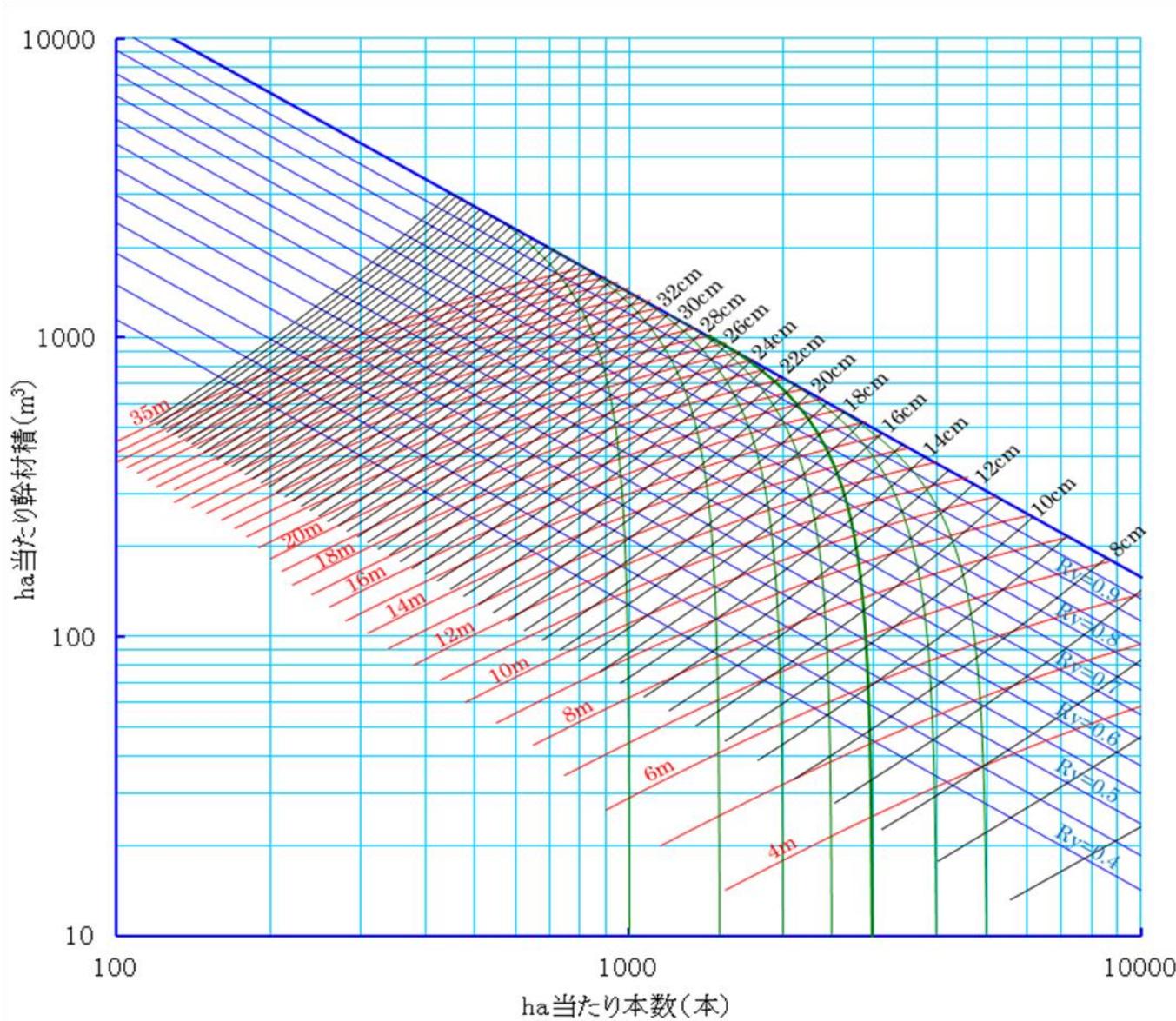
- 13) 林野庁: スギ人工林林分密度管理図説明書—九州地方—(1980)
- 14) 林野庁: ヒノキ人工林林分密度管理図説明書—九州地方—(1982)
- 15) 林野庁: 立木幹材積表西日本編, 日本林業調査会, 東京, 319pp. (1970)
- 16) 安藤貴: 同齢単純林の密度管理に関する生態学的研究, 林試研報, 210: 29-120(1968)
- 17) 柳井晴夫ほか: 多変量解析法, 朝倉書店, 東京, pp59-62(1977)
- 18) 真辺昭: 林分密度管理図の作成, 農林研究計算センターA11(1975)
- 19) D. W. Marquardt: An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. J. Soc. Indust. Appl. Math. Vol. 1 1-2. (1963)
- 20) 株式会社ライトストーン: Origin ユーザーズマニュアル v7.5, 東京, 994pp. (2003)
- 21) 長濱孝行: 鹿児島県におけるスギ人工林林分密度管理図の調製, 鹿児島県林試研報 8: 1-11(2003)
- 22) 吉良龍夫(編): 密度・競争・生産, みやま, 8: 13-24, 9: 9-18, 11, 12: 34-35(1957)
- 23) 只木良也・四手井綱英: 林木の競争に関する研究Ⅱ, スギで仕立てたモデル林分での間伐試験, 日林誌, 41: 341-349(1959)
- 24) 只木良也・四手井綱英: 林木の競争に関する研究Ⅲ, アカマツ幼樹を用いた小型林分での機械的な間伐試験, 日林誌, 44: 129-139(1962)
- 25) 只木良也・四手井綱英: 数量的間伐に関する生態学研究, 京大演報, 34: 1-31(1963)
- 26) 四手井綱英(編): アカマツ林の造成—基礎と実際—, 地球出版, 東京, 326pp. (1963)
- 27) Sokal, R.R. and Rohlf, F.J.: Introduction to Biostatistics. (生物統計学, 藤井宏一訳, 共立出版, 449pp.) (1973)
- 28) 山本充男・安井鉦・秋山郁男: 生長曲線の検討, 島根大学農学部研究報告 16: 48-52(1982)
- 29) 大隅眞一編: 森林計測学講義, 養賢堂, 東京, 278pp. (2001)
- 30) 南雲秀次郎・箕輪光博: 現代林学講義 10 測樹学, 地球社, 東京, 243pp. (1990)

Summary

In order to develop the original long-term cutting age management standard of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plantations on Nagasaki prefecture, the stand-density diagram and site index curve of Hinoki plantations were re-created.

- 1) On the stand-density diagram, the slope of full density curve was rotated clockwise at 3,000 on number of trees per ha.
- 2) Site index curve was revised up after 40-50 years on stand age, and rate of height growth was not decreased remarkably.

長崎県ヒノキ林分密度管理図



| 凡 例 | |
|-----|---------|
| | 等平均樹高曲線 |
| | 等平均直径曲線 |
| | 等収量比数曲線 |
| | 自然枯死線 |

説 明

- 林分密度管理図の説明
- 適用地域と樹種 長崎県の民有林ヒノキ人工林に適用する。
 - 使用上の注意
 - 等平均樹高曲線は、ある上層樹高における ha 当たり本数と幹材積との関係を示すものであり、等平均直径曲線は、等平均樹高曲線上で平均胸高直径を知るために用いるものである。
 - 上層樹高とは被圧木、枯損木を除いた立木の平均樹高であり、ha 当たり本数、幹材積、平均胸高直径は全生立木の値である。
 - この表から、上層樹高と ha 当たり本数に応じた ha 当たり材積、平均胸高直径などを読み取ることができる。林分密度管理図の説明 1. 適用地域と樹種 長崎県の民有林ヒノキ人工林に適用する。
 - 使用上の注意
 - 等平均樹高曲線は、ある上層樹高における ha 当たり本数と幹材積との関係を示すものであり、等平均直径曲線は、等平均樹高曲線上で平均胸高直径を知るために用いるものである。
 - 上層樹高とは被圧木、枯損木を除いた立木の平均樹高であり、ha 当たり本数、幹材積、平均胸高直径は全生立木の値である。
 - この表から、上層樹高と ha 当たり本数に応じた ha 当たり幹材積、平均胸高直径などを読み取ることができる。なお、ha 当たり幹材積、平均胸高直径などの値は次式で求めることができる。

$$V = (0.05239 \times H^{1.4063} + 5274.04184 \times H^{2.88096} / N)^1 \quad (1)$$

$$HF = 0.77456 + 0.37679 \times Ht + 0.14103 \times N^{0.5} \times Ht / 100 \quad (2)$$

$$G = V / HF \quad (3)$$

$$Dg = 200 \times (G / (\pi \times N))^{0.5} \quad (4)$$

$$D = -0.24654 + 0.96241 \times Dg + 0.17609 \times N^{0.5} \times H / 100 \quad (5)$$

$$Ry = V / V_{Rf} \quad (6)$$

$$V_{Rf} = (0.05239 \times H^{1.4063} + 5274.04184 \times H^{2.88096} / N_{Rf})^1 \quad (7)$$

$$\log N_{Rf} = 5.190927 - 1.47466 \times \log H \quad (8)$$
 V : ha 当たり幹材積 Dg : 断面積平均直径
 H : 上層樹高 D : 平均胸高直径
 N : ha 当たり本数 Ry : 収量比数
 HF : 林分形状高 V_{Rf} : 最多密度における ha 当たり幹材積
 G : ha 当たり断面積 N_{Rf} : 最多密度における ha 当たり本数
 - 3) で求められる幹材積、直径は、与えられた上層樹高と ha 当たり本数についての平均的な値であるから、個々の林分については誤差を伴うことがある。幹材積については±20%以内の誤差率で推定できる。平均胸高直径が ha 当たり断面積が実測されているときは、次式で幹材積と補正すると誤差率は 1/4~1/5 となる。

$$Vc = V \times (\text{実測直径} / \text{推定直径})^2 \quad \text{または} \quad Vc = V \times (\text{実測断面積} / \text{推定断面積})^2$$
 Vc : 補正した幹材積
 V : 林分密度管理図による推定幹材積
 推定断面積は、(3)式で求めるものである。
 - 下層間伐による間伐量は、間伐前の上層樹高と ha 当たり本数に対応する ha 当たり幹材積と、間伐後の ha 当たり幹材積 (間伐率や管理基準として定められた収量比数などから求めた残存本数と間伐前の上層樹高とに対応する材積) の差として求められる。この場合、林分が過密や過疎にならないようにするため、密度管理は収量比数 0.9~0.6 の範囲で行い、1 回の間伐で動かす収量比数は 0.15 以下とする。また、風害などのおそれがあるところでは、形状比 (平均樹高/平均直径) が極端に大きくならないように留意する。
 - 調査対象林分の面積が広く、生育状態 (上層樹高や ha 当たり本数) に違いがある場合には、林相区分を行い、各区分ごとの上層樹高、ha 当たり本数を用いて算出した値に区分面積と全面積との比を重みとして ha 当たり幹材積、平均胸高直径を求めるとよい結果が得られる。

図2 長崎県ヒノキ人工林林分密度管理図