

ロジスティック理論と密度管理

— その展開過程 —

宇都宮大 農 内 藤 健 司

1 はじめに

筆者は、林分密度管理図に関する論文を、断片的にはなく、時間を追ってその発展過程を理解しなければならないと、常日頃考えていたが、今回、東京大学森林経理学研究室において、この問題に関するゼミが行なわれ、それに参加する機会を得た。その内容は、1953年の、言わゆる大阪市大グループによる一連の研究から現在に至るまでに発表された関連論文を可能な限り集め、整理・検討することであった。それらの論文は、質・量において龐大なものであり、その概要を要約することは困難である。ここに、私自身の整理のため、とりあえず林分密度管理図が発表されるまでの研究の発展過程について、私見も混じえて、取りまとめた。

章の構成は、「ロジスティック理論」が発表されるまでの論文を中心とした第2章と、それ以後の林学分野における論文を中心とした第3章という構成にした。また、引用文献の記載順序は、発表された年代順にすることを原則とした。

ゼミをとおして、箕輪光博博士をはじめ、ゼミ参加者の各位には、貴重な指導、助言、資料の提供をうけた。また、平田種男博士、南雲秀次郎博士には、本報をまとめるにあたり、貴重な指導と助言を得た。深く感謝する次第である。

2 ロジスティック理論を中心として

密度と生長に関する研究は、昔から林学において、重要な研究課題の1つであった。しかし、それらの研究は、例えば、平均胸高直径と本数密度といったような一面的な現象のとらえ方をしており、生長に関する他の要因も同時的にとらえた、システムティックな研究としては、吉良をはじめとした大阪市大グループの一連の研究が、最初であったと言えよう。

1953年以來、吉良らは、「高等植物の種内競争」(Intraspecific competition among higher plants)というテーマで、一連の論文を発表した。(1), (2), (4), (5) (7), (8), (9), (10) (14), (18), (24)。

吉良ら(1)は、その第1報において大豆等の実験結果から、植物の平均個体重 w と植栽密度 ρ の間に、(1)式のような巾乗関係が認められる事を指摘した。

$$w\rho^a = K \quad \text{or} \quad w = K s^a \quad (1)$$

ここに、 a , K は、生育段階(growth stage)に依存する定数とし、 s は1個体当りの平均利用可能空

間を表わすものとした。また、 $Y = w\rho$ とおくと、 Y は単位面積当りの収量を表わすもので、(1)式は(2)式のように変形される。

$$Y\rho^{a-1} = K \quad (2)$$

吉良らは、(1)、(2)式のような経験則を、それぞれ、競争密度効果 (Competition-Density Effect、以後 C-D効果と省略)、収量密度効果 (Yield-Density Effect、以後 Y-D効果と省略)と呼んだ。 a は、個体の空間利用率を表わすもので、競争密度指数 (C-D index)と名称された。また、(1)、(2)式は、平均個体重のみならず、個体の部分重についても成立する事が、実験的に確認されると報告されている。C-D効果、Y-D効果は、一連の研究の第Ⅱ報(2)において、それぞれ、競争密度効果則、収量密度効果則と名称されている。

生嶋ら(4)は、一連の研究の第Ⅲ報において、ウキクサの実験等から、平均個体重の生長を表現するものとして、ロジスティック曲線を提案し、それによってC-D効果、Y-D効果が説明されることを指摘した。C-D効果、Y-D効果は、ある時間における植栽密度方向の変化について考えられたものであるが、ロジスティック曲線は、ある植栽密度における平均個体重の時間方向の変化を考えたもので、両者は対比されよう。

これらの研究は、林学分野においても注目され、佐藤・中村・扇田、四手井らによって関連した報告がなされている。

佐藤ら(3)は、13年生アカマツ人工林の調査結果を分析し、現実本数密度と平均個体重及び部分重の間に、巾乗関係式が認められることを指摘した。この中で佐藤らは、吉良らのC-D効果の巾乗式についても言及し、それは林学で REINEKE 式と呼ばれているものと同様、両対数グラフで直線となる1つの巾乗関係式であると指摘した。

また、四手井(6)は、林業試験場の収穫表試験林の調査資料等を分析し、林分の生長においてもC-D効果則と同様の関係が認められる事を明らかにした。この論文の中で注目すべき点は、等平均樹高という一種の時間概念が提案された事であり、地位に関係なく林分平均樹高の等しい林分において、平均幹材積と現実本数密度の間に、C-D効果則と同様の関係が認められる事を四手井は指摘した。さらに、各林分平均樹高階毎に、競争開始時の平均幹材積と現実本数密度を表わす点を連ねると、両対数グラフ上で傾き-2となる直線関係(以後 $v-n$ 線と省略)が認められ、また競争開始時の平均幹材積と平均樹高のあいだにも傾き3となる直線関係(以後 $v-h$ 線と省略)が認められる事を指摘した。 $v-n$ 線と $v-h$ 線から v を消去すれば、両対数グラフ上で傾き $-3/2$ をもつ h と n の直線関係式が導ける事を示し、四手井はこの線を「競争開始時の樹高密度線、 $h-n$ 線」と名付けた。

以上述べた様に、林学分野においても、C-D効果則と関連した研究が発表されているが、注意しなくてはならない点がある。それは、吉良らの論文における「密度」は、常に植栽密度が考えられており、「平均個体重」も植栽密度を用いて計算されている事である。一方、佐藤らや四手井の論文における密度

は枯損によってその値を減少させている現実本数密度である。吉良らの報告(1)によると、大豆の実験では、徐々に枯死が生ずることはなく、枯死するときは、一度にほとんど全部が枯れたとされている。その様な場合には、植栽本数密度と現実本数密度を区別する必要がないのかもしれないが、林学においては、徐々に枯死が生じるという事は、一般に認められている事実であり、植栽本数密度と現実本数密度は、明確に区別されなければならない。

林学におけるこの様な研究成果は、吉良らの研究にも影響を与えた。吉良ら(7)は、一連の研究の第V報の中で、佐藤ら(3)の論文を引用し、自己間引きをしている林分の現実本数密度 ρ とその平均個体重のあいだにも、(1)式と同時にC-D効果の巾乗関係式が成立するためには、現実本数密度 ρ と植栽本数密度 ρ_0 のあいだに、(3)式のような巾乗式が成立している事が必要であることを示した。

$$\rho^{a-1} = \rho_0^{b-1} \times C \quad (3)$$

ここで、 a 、 b は密度としてそれぞれ現実本数密度、植栽本数密度を用いたときのC-D indexを表わし、 C は定数とする。

さらに、平均部分重 x と平均個体重 w との間に、(4)式のような相対生長則(alometry)を仮定すると(1)、(4)式より(5)式が導かれ、部分重についてもC-D効果則の成立する事を示した。

$$x = Mw^m \quad (4)$$

$$x\rho^b = K_x \quad (5)$$

ここに、 M 、 m 、 b 、 K_x は定数とする。

また、この報告の中で、吉良らは四手井の論文(6)を引用し(四手井の論文の中に、引用された文章を見出す事はできなかったが)、『Reineke式とC-D効果式は同じものである。』という佐藤らの指摘(3)は次の2点で誤っている事を指摘している。

- i) REINEKE式の本数密度は、full densityであるのに対し、C-D効果則のそれは、full densityではない。
- ii) REINEKE式は、林齢・地位に関係なく、同一樹種において認められる平均断面直径と本数密度の関係式であるのに対し、C-D効果則は環境条件、林齢が同じである林分の、平均個体重と本数密度の関係を表わすものである。

この指摘は正しいと考えられるが、2つの点で疑問がある。full densityは、本数概念なのか蓄積概念であるのか。また、REINEKE式は14の樹種を調べた結果、slash pineとshortleaf pineを除く12樹種において、等しい傾きをもつとされ(28)、林齢・地位のみならず樹種にも関係なく等しい傾きをもつとされているのではないだろうか。

穂積ら(8)は、一連の研究の第VI報において、密度以外の生長要因が競争に及ぼす影響について報告している。この中で、C-D indexの値について注目すべき指摘がなされている。それは、生長要因の供給

量をいろいろ変化させても、ある生育段階以後の C - D index の値は、ほぼ 1 に近い値をとり、生長要因のレベルが同一であれば、「植栽本数密度」に関係なく、単位面積当りの収量はほぼ一定になる事を指摘し、これを「最終収量一定則」と名称した。

篠崎・吉良 (9) は、一連の研究の第Ⅶ報において、従来研究成果を体系化するものとして、「ロジスティック理論」を発表した。この報告において、従来巾乗式で表わされていた C - D 効果式、Y - D 効果式は逆数式で表現されている。逆数式は、両対数グラフ上で巾乗式の様な直線関係を表わさないで、逆数式の場合の C - D index は、Compensation Point (無生長の植栽密度) における逆数式の微係数として定義された。ロジスティック理論の詳細については、上記報告にゆずることにして、ここではその要点を述べることにする。

ある植栽密度における平均個体重の時間方向の変化を ρ 断面、ある時間における平均個体重の植栽密度方向の変化を t 断面と呼ぶことにしよう。

篠崎らは、ロジスティック曲線の生長係数と植栽時における平均個体重 w_0 は、植栽密度に関係なく一定と仮定した。また、最終収量一定則を仮定しそのときの単位面積当りの収量 Y は、やはり植栽密度に依存しないものと仮定した。ここで、 ρ 断面において平均個体重の生長がロジスティック曲線に従う事を仮定すれば、 t 断面において C - D 効果、Y - D 効果の逆数式が論理的に導かれる事を示し、逆に、 t 断面において C - D 効果、Y - D 効果の逆数式を仮定すれば、 ρ 断面においてロジスティック曲線が論理的に導ける事を篠崎らは示した。

ここで注意しなくてはならない事は、逆数式を導く過程で、 $\partial \rho / \partial t = 0$ が前提となっている事である。 ρ が植栽本数密度を表わすものであれば、この前提は成立するが、 ρ を現実本数密度と考えると、この前提は成立せず、逆数式の様な簡単な形で t 断面における C - D 効果式を得る事はできない。その意味で、任意の時点での密度に植栽本数密度を用いるという発想は、ロジスティック理論を展開する上で必然的な事であったものと考えられるが、同時に現実との対応において苦労した点であったものと想像される。

さらに第Ⅶ報において篠崎らは、逆数式での C - D 効果式は、巾乗式のそれに比べて無競争の状態をも表現できる点で優れているとし、逆数式はその係数の値にかかわらず、両対数グラフ上でその物理的形を変えない事を指摘した。この性質については、一連の研究の第Ⅹ報 (18) で詳しく報告されている。

さらに、個体密度を植栽本数密度 ρ_0 で考えても現実本数密度 ρ で考えても、(6)、(7)式で示される C - D 効果の逆数式が同時に成立するためには、(8)式で示される関係式の成立する事が要求される事を示した。

$$\frac{1}{w'} = A' \rho_0 + B' \quad (6)$$

$$\frac{1}{w} = A \rho + B \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \varepsilon \quad (8)$$

ここで、 A' 、 B' 、 A 、 B は時間に依存する定数とし、 w' 、 w は ρ_0 、 ρ に対する平均個体重を表わすも

のとし、 $\epsilon = (A' - A) / B$ とする。

さらに、相対生長則 (allometry) に対して、巾乗式での C - D 効果式はその形を保存したが、逆数式での C - D 効果式の場合は、(4)式の指数部 m が 1 以外のときには、もはやその形を保存できなくなる事も指摘した。このことは、部分重に対して C - D 効果の逆数式を用いるとき、充分留意しなければならない点である。また、(8)式が成立するという事は、現実本数密度減少曲線を規定する事になるということをし、我々は注意するべきであろう。

吉良ら (13) は、1957 年の「みやま」にそれまでの研究成果の概要を紹介しながら、C - D 効果則、Y - D 効果則の農林業への応用について述べている。この報告において注意すべき点は、「 $3/2$ 乗則」が新しく提案されていることであろう。オオアレチノギクの調査結果を示しながら、自然に観察される植物においては、ある平均個体重に対して、現実本数密度の上限値が存在することを示し、簡単な「幾何学的モデル」を用いてその関係式を導き、「 $3/2$ 乗則」と名付けた。「 $3/2$ 乗則」は、両対数グラフ上で傾き $-3/2$ をもつ直線関係を示すが、実際の林分の資料でこの傾きの値を求めてみると、樹種によって異った値をとり、直線の傾きがその樹種の特性を表わすという意味においてこの巾乗関係式を「林分密度の特性曲線」と名付けた。

また、両対数グラフ上で、この林分密度の特性曲線の内側に、それと平行に引かれた直線を「平均管理曲線」と名付け、この平均管理曲線と C - D 効果の巾乗式を用いることによって、林分密度管理の経路を説明できる事を示した。

この報告において、もう 1 点留意すべきは、「 $3/2$ 乗則」、REINEKE 式と四手井の $v - n$ 線の比較である。

吉良らは、現実個体密度、平均個体重、1 個体当りの平均占有面積をそれぞれ、 ρ 、 w 、 s で表わし、 $s \propto w^{2/3}$ という仮定をおくと、 $s = 1/\rho$ という関係式から (9)式が導かれることを示した。ここに K_w は定数である。

$$w = K_w \rho^{-3/2} \quad \text{or} \quad \ln w = -\frac{3}{2} \ln \rho + \ln K_w \quad (9)$$

(9)式が「 $3/2$ 乗則」と呼ばれる式であるが、平均胸高直径、平均樹高をそれぞれ d 、 h で表わし、 d 、 h と w のあいだに、それぞれ、 $d \propto w^{1/3}$ 、 $h \propto w^{1/3}$ という仮定をもうけると、(10)、(11)式が導かれる事も指摘した。ここに、 K_d 、 K_h は定数とする。

$$d = K_d \rho^{-1/2} \quad (10)$$

$$h = K_h \rho^{-1/2} \quad (11)$$

また、四手井 (6) は、等平均樹高断面において、競争開始時の平均幹材積 v と現実個体密度 ρ と林分平均樹高 h の間に、(12)、(13)式が経験的に認められるとし、両式から v を消去して (14)式を導いた。ここに、 K_1

K_2, K_3 は定数とする。

$$v = K_1 \rho^{-2} \quad (12)$$

$$v = K_2 h^3 \quad (13)$$

$$\rho = K_3 h^{-\frac{3}{2}} \quad (14)$$

一方, REINEKE (28) は, 自然に観察される林分において, ある平均胸高断面直径 $d_{\bar{g}}$ に対して, 最大の本数密度 ρ を両対数グラフ上にプロットすると, (15) 式のような関係式が認められることを指摘した。

$$\ln \rho = -1.605 \ln d_{\bar{g}} + \ln K \quad (15)$$

ここに, K は樹種に依存する定数で, 直線の傾きは, 樹種に関係なくほぼ一定と考えてよいとした。

吉良ら (13) は, 「3/2 乗則」, REINEKE 式, 四手井の「 $v-n$ 線」を, 次元をそろえて比較するために, w と v の間には比重一定と考えて $v \propto w$ を仮定し, v と $d_{\bar{g}}$ の間には, $v \propto d_{\bar{g}}^3$ を仮定して, 「3/2 乗則」, REINEKE 式を, それぞれ (16), (17) 式の様に変形した。また, (12) 式において両辺自然対数をとると, 四手井の「 $v-n$ 線」は, (18) 式のように書ける。ここに, K_1, K_2, K_3 は定数である。

$$\ln v = -1.5 \ln \rho + K_1 \quad (16)$$

$$\ln v = -1.87 \ln \rho + K_2 \quad (17)$$

$$\ln v = -2.0 \ln \rho + K_3 \quad (18)$$

吉良らは, REINEKE, 四手井の用いた資料を引用し, それらの一部の資料は, 「3/2 乗則」に従って考える事ができると指摘し, $\ln v - \ln \rho$ 直線の傾きは, 一定の値をとるのではなく, 陽樹的性質の強い樹種では, 「3/2 乗則」がそのままあてはまり, 陰樹的な樹種においては傾きが 3/2 より大きくなる傾向が認められると指摘した。

しかし, 前述の 3 者の式は, 異った stage で論じられたものである事を, 我々は明確に認識するべきであろう。「3/2 乗則」と REINEKE 式は, ある平均量に対する最多個体密度を論じている点において共通性を有するが, $w, d_{\bar{g}}$ という次元の違った変量に関するもので, いくつかの仮定のもとに次元をそろえて比較しても, (16), (17) 式にみられるように異った傾きをもつ。また, 四手井の「 $v-n$ 線」は「競争開始時における v と ρ の関係」を論じたものである。吉良らは, 「四手井の $v-n$ 線と 3/2 乗則はほぼ同じものである」と述べているが, 林業経営の立場から考えると, 四手井の「 $v-n$ 線」は, 林分密度管理の下限値を示し, 「3/2 乗則」と REINEKE 式は, 林分密度管理の上限値を示すものと理解されよう。

(3) 林学における密度管理図の展開

大阪市大グループによって発表された一連の研究は、林学分野においても大いに注目を集め、林分密度管理の問題として多くの研究成果が発表された。そして、それらのほとんどの論文において、個体密度には現実本数密度が用いられ、平均個体重の替りに部分重（多くは平均幹材積）が用いられている点には、留意すべきであろう。

林業試験場の坂口ら(11)は、アカマツ天然生幼齡林分調査資料を解析し、本数密度と林分の生長量とのあいだに、吉良たちの法則がかなうか、又、それが林業上どのような意味をもっているかについて考察した。その結果、林木の場合でも吉良たちが述べた「植栽密度と個体の競争又は収量とに関する法則」（巾乗法則）の例外ではないとした。さらに、林業上の意味として、林木の競争開始の密度や収量一定を仮定した場合の密度管理と生産材の質との関係についても言及し、「林木では、主伐までの長い期間、間伐などにより本数密度が変化するので、このような複雑な場合に量的関係がどうなるかについては、資料不足で論議できない。」と結論した。

四手井ら(12)は、いわゆる「北山林業」を調査対象とし、強度枝打ち林分における本数密度と林分の生長との関係を論じている。その報告では、強度の生枝打ちを実行すると自然枯死がほとんど生じなくなり、REINEKEの言う full density をこえた高立木密度を永く維持でき、同一平均樹高で比較すると、普通施業林に比べてはるかに大きい林分生産量をもつ事を指摘した。しかし、ここで示されている両対数グラフ上に描かれた最大密度の線（REINEKE式と想像される）が、どの様にして描かれたものか不明であり、もし、REINEKE式を描いたものとするならば、それが直線ではなく曲線である事の意味も又不明である。

只木・四手井(15)は、日林誌上に発表した論文で、苗畑での苗木を用いた間伐試験をもとに、「間伐のやり方」（選木方法）と主・間伐合計量との間に、どの様な関係が存在するかを検討した。この中で只木らは、「自然間引線（natural thinning line）」という概念を提案している。自然間引線とは、森林が満度な密度（full density）に達したとき、任意の立木本数に対して示し得る個体の最大値を示したものであり、一般に(19)式で示されるとした。ここに w は、平均個体重（単木材積）、 ρ は立木密度、 K 、 a は樹種によって決まる定数であり、 a は普通 $3/2 \sim 2$ の値をとるとした。

$$w = K \rho^{-a} \quad (19)$$

さらに、現実林分の本数減少は、植栽直後からこの自然間引線にのらず、自然間引線に至るまでの過程が存在し、その過程には何らかの法則性の存在する事を同論文において暗示した。

この論文で言う「自然間引線」は、平均材積、平均個体重、平均断面積直径という次元の差はあるが、吉良らの「特性曲線」、REINEKE式と本質的に同一のものと考えられる。

坂口(17)は、「間伐の本質に関する研究」の中で、C-D indexに言及している。坂口はその論文の中で、佐藤ら(3)のアカマツの資料を引用し、立木密度と幹・枝の材積との間のC-D indexに相当する値を計算すると約1.03となり、収量一定が成立していると考えても良いとした。さらに、「一般の施業林

林で取り扱われる立木密度の範囲内で、密度の違いによって収量に差がないということになれば間伐の問題は、目的とする形質の材を最大かつ短期間に得られる過程を研究する事になる。」と指摘した。

篠崎・吉良(18)は、一連の研究の第X報において、C-D定規の理論とその応用について述べている。C-D効果の逆数式は、その係数A、Bの値が変化しても、両対数グラフ上で平行移動するだけであり、その形と大きさを変えない。この事は、両対数グラフの目盛に対応したC-D定規を作っておけば、様々なA、Bの値に対してC-D定規をグラフ上で平行移動することにより、その曲線を描けることを意味しさらに、篠崎らはこの定規を裏返ししたり回転したりして8通りに使いわけられる事を指摘した。

1962年、只木・四手井(19)は、「林木の競争に関する研究第Ⅲ報」を日林誌上に発表した。第Ⅱ報(15)は、選木方法の違いが林木の生長に与える影響を調べたものであったのに対し、第Ⅲ報は、総間伐本数を一定とし、間伐時期及び回数の違いが林木の生長にどんな影響を与えるかを検討したものである。

本論文で注目すべき結論が2つある。1つは現存量に関する事で、試験終期において、現実本数密度、幹重現存量という点で処理区と無間伐区との間には、かなりの差が認められたが、処理区間にはあまり差が認められなかった、という点である。2番目の点としては、林冠の閉鎖を破らない程度の間伐であれば間伐の実行時期と回数によらず、主・間伐合計量の差は認められないとした事である。

我々は、本論文における実験が、同一地位、同一植栽密度の小型若齢林分に対し、同一総間伐本数で、間伐の時期と回数のみが異なるものであった事、又、選木方法は機械的(random?)に行なわれた事に充分注意を払う必要がある。

また、只木らは無間伐区の立木密度と平均幹重量の間に、 $3/2$ 乗則が成立しているとしてその中乗関係式を求め、それを「full density curve」と呼んだ。これは、第Ⅱ報(15)における「natural thinning line」と同義のものと考えられるが、どの様にしてこの中乗式の定数を求めたのかは不明である。

1962年10月、安藤・坂口・成田・佐藤(20)は、アカマツ天然性除伐試験林の生育過程と相対生長について論じた。従来の林学における研究には、ある時間断面での様々な林分間の関係を論じたものが多く同一林分の時系列資料の解析が必要であるとし、そこでは、本数密度と林齢が相対生長にどのような影響を与えるかについて検討した。ただし、この論文で取り扱われた相対生長は標本木という単木単位での話であり、「林分の平均個体の相対生長については、資料の調整が充分でないので、今回はふれない」としている。ロジスティック理論は、平均個体重という平均量に関するものである事を、我々は常に注意する必要がある。

安藤らは、結論として「標本木の相対生長関係」の大部分は、本数密度の影響を受けて変化するが、本数密度の差を無視して林齢による影響を考えると本数密度より林齢の影響がはるかに大きいことを指摘した。

1962年12月、安藤(21)は、林試研報において、競争比数(Competition index)、収量比数(Yield index)という概念を提案し、C-D効果の逆数式上の特性値に検討を加え、 $3/2$ 乗則により

示された full density curve に新しい解釈を与え、応用的な意味で競争開始線、自然間引開始線、最大収量に対する収量比数線を提案した。

その内容を要約すれば、以下ようになる。ある時間断面で、平均幹材積 v と現実本数密度 ρ の間に、C-D効果の逆数式が成立するものとし、その逆数式上で $v = K \times v_{max}$ なる平均幹材積をもつ点の座標を (ρ_K, v_K) とすれば、 $v_K = v(K, B)$ 、 $\rho_K = \rho(A, B, K)$ と一般に表現できる。ここに、 A, B は逆数式の係数 K は、1~0の値をとる定数である。もし、 A, B が時間 t あるいは、林分平均樹高 H の巾乗式で表わされるものと仮定すれば、 v_K, ρ_K は、 K と t (又は H) の関数として表現され、 v_K, ρ_K より t (又は H) を消去すれば、 K をパラメーターとする v_K, ρ_K の軌跡、 $f(v_K, \rho_K, K) = 0$ を得る。安藤は、この軌跡が K の値に応じて、両対数グラフ上で平行な直線群になることを示し、 K を「競争指数」と名付けた。自然に観察される林分において、 K は 0 でないある最小値と 1 との間の値をとるものとし、 K がこの最小値をとるとき、 $\rho_K - v_K$ 軌跡は、full density curve を表現するものであるとした。

また、Y-D効果の逆数式上で、full densityに対応する収量の L 倍の収量をもつ点の座標を (ρ_L, Y_L) としたとき、 (ρ_L, Y_L) の軌跡は $\rho_K - v_K$ 軌跡と同様、両対数グラフ上で平行な直線群になる事を示した。 L は収量比数と名称され、 L の値によって競争開始線、自然間引開始線を与えることができるとし、この平行な直線群を収量比数線と呼んだ。

安藤の競争比数、収量比数に基づいた最多密度線、競争開始線へのアプローチは注目されよう。しかし、我々は、いくつかの点で注意をばらう必要がある。本来、ロジスチック理論は、植栽本数密度と「架空」の平均個体重に関して展開された理論であり、C-D効果あるいは、Y-D効果の逆数式が現実本数密度と現実平均個体重の間にも適用可能となるためには、植栽本数密度と現実本数密度の間に、(8)式に示すような関係式の成立する事が前提であり、平均個体重の替りに平均幹材積を用いるためには、両者の間に相対生長則が成立し、かつ、その指数部が 1 であるという事が前提とならねばならない。また、逆数式の係数 A, B が林齢あるいは林分平均樹高の巾乗式で表わされるとすれば、その仮定は林分平均樹高の生長曲線を林令の巾乗式で規定する事になるという点を我々は充分留意しなくてはならない。

1963年1月、只木・四手井(22)は、従来の研究によって得られた「立木密度と幹材生産に関する一般的法則」を応用して、いくつかの本数密度管理の経路を想定し、主伐幹材積収量や主間伐収量合計などについてモデル計算を行った。

計算にあたり、只木らはいくつかの仮定を設定した。i) 現実林分調査資料において、ある平均幹材積に対する最高密度の点を結んで full density curve を概略的に求め、自然間引きはこの曲線上でのみ生じるものとする。ii) 林分平均樹高の等しい調査資料の本数密度と平均幹材積の間には、C-D効果の逆数式と類似の関係が認められ、それを「等平均樹高線」と定義し、ある時間断面における立木密度と平均幹材積の関係の間伐による変化は、等平均樹高線上の変化と一致するものと仮定する。ただし、間伐は幹材積の小なるものより順次行なうこととする。

只木らは、さらに吉良らの「平均管理曲線」と類似の「管理曲線」（後に本数管理基準線(25)と呼ばれる。）という概念をもちこみ、植栽本数、間伐開始時の平均樹高、間伐間隔、間伐本数率、管理曲線などを組み合わせて幾つかの間伐スケジュールを想定した。

このモデル計算の結果「主伐時の幹材積現存量は、主伐時の立木密度が高い程多くなるが、十分な植栽密度で、林分の閉鎖後余り極端に林冠層を疎開することなく間伐を行なえばその主間伐合計量は、間伐の経路に無関係にほぼ一定になる。また、このような条件下では、間伐度の強弱は主間伐合計量に余り大きな影響を及ぼさない。」と結論した。

以上の結果、様々な仮定の上にしたモデル計算に基づいたものであるが、秋田地方のスギ間伐試験地の例を示して、B種間伐でもC種間伐でもほぼ特性曲線に平行になるよう管理されているようであり、また間伐前後の立木本数と平均幹材積は、等平均樹高線にほぼ沿っているようで、厳密に小個体から順に除かなくても、通常の間伐の場合には、間伐前後の平均幹材積の変化を競争密度効果線（等平均樹高線）上で検討できる可能性を指摘した。

この論文は、現在使用されている林分密度管理図作成上、大きな影響を与えている。即ち、間伐前後の v と ρ の関係は、等平均樹高線上の移動という形で表現できるとした点であり、しかもその間伐方法（選木方法）は、厳密に小個体から順に除かなくても通常の間伐方法でも良いようであるとした点である。また、ある時点における林分の生長は、植栽密度、過去の間伐経過に関係なくその時点における v と ρ の大きさ及びその林分の平均樹高の生長スピードのみによって決定されるとした点は、留意すべきであろう。

等平均樹高線という発想は、四手井(6)が最初に提案したものであるが、ロジスティック理論における逆数式のように理論的に導かれたものでなく、経験的であり、時間断面におけるC-D効果の逆数式及び地位との関連で、論理的な検討がさらに必要なものと考えられる。

前報(22)にひき続いて、只木(23)は、間伐スケジュールを想定したモデル計算を行った。この論文で注目すべき点は、後に「只木の式」と呼ばれる自然枯死に関する式が提案されていることである。本数密度減少曲線と平均幹材積増加曲線が、時間 t の関数として求まれば、両者から t を消去する事によって自然枯死に関する関係式($v-\rho$ trajectory)が理論的に求まるが、只木は実験式として(20)式を提案した。

$$1/\rho = Av + B \quad (20)$$

これは、篠崎ら(18)のC-D定規のⅥ型である。

1963年12月、依田ら(24)は、一連の研究の第Ⅻ報として、自己間引きの過程に関する論文を発表した。ハツカダイコン、大豆、トウモロコシ、ソバ等の実験により依田らは、次の様な自己間引きに関する知見を得た。i) 植栽密度を減じていくと、自己間引きを起こさない密度が存在する。ii) 自己間引きの起き方は、初めゆっくりと次に激しく、最後は再びゆっくりとなる。iii) 植栽密度に関係なく充分時間が経過すると現実本数密度は、ある一定の値に収束する。

さらに、依田らは植栽本数密度 ρ_0 と現実本数密度 ρ の間には、篠崎らが示唆した逆数線型の(8)式が良

く適合することを確認し、 $1/\epsilon$ が指数曲線的に減じていく事を指摘した。これにひき続いて、 $3/2$ 乗則とC-D効果の逆数式との関係を論じているが、この時点に至って「(8)式の成立を前提として」C-D効果の逆数式は、本数減少をしながら生長する植物に対しても適用される事になった点は、大阪市大グループの一連の論文を読む上で留意すべきであろう。

これまでの研究により、林分密度管理図作成のための下地はほとんどできていた様である。1968年、安藤(27)は断面積等平均樹高線という概念を新しく提案し、幹材積等平均樹高線、最多密度線、収量比数曲線、自然間引き線などと一緒に両対数グラフ上に描く事によって、本数密度管理の指針となる「林分密度管理図」を初めて発表した。

この論文は、吉良らのロジスティック理論の研究以来、林学における関連研究の成果を集大成したものと考えられ、従来の間伐技術(保育形式)にそれなりの根拠を与えるもので、画期的な業績として評価された。しかし、同時に、今まで指摘してきたように、いくつかの問題点も内包している。それらの点についての詳しい検討については、近いうちに機会をとらえて行ないたいと考えている。

(4) おわりに

以上、1953年の吉良らの論文以来、1968年の安藤の論文まで、林分密度管理図の作成されるまでの流れについてその概要をとりまとめた。その間に発表された研究報告は、日林誌、林試研報、大学紀要、演習林報告以外の多くの紙上にも発表されており、今回引用した文献はそれらの一部にすぎない。それゆえ、この報告はずいぶん片寄った内容になった危険性は多分にあると考えている。さらに、論文の誤読も多々あると考えられ、そのような点についての皆様の御指摘、御指導がいただければ有難い事と思います。

引用文献

- (1) Kira, T., Ogawa, H. & Sakazaki, N.: Intraspecific competition among higher plants (I) Competition-Yield-Density interrelationship in regularly dispersed populations. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D4: 1-16, 1953. 10
- (2) Kira, T., Ogawa, H. & Hozumi, K.: Intraspecific competition among higher plants(II) Further discussions on Mitscherlich's law. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D5: 1-7, 1954. 3
- (3) 佐藤大七郎・中村賢太郎・扇田正二: 林分生長論資料(I)立木密度のちがう若いアカマツ林. 東大演報 48: 65~90, 1955. 3
- (4) Ikushima, I., Shinozaki, K. & Kira, T.: Intraspecific competition among higher plants (III) Growth of dachweed, with a theoretical consideration on the C-D effect. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D6: 107-119, 1955. 10

- (5) Hozumi, K., Koyama, H. & Kira, T. : Intraspecific competition among higher plants (IV) A preliminary account on the interaction between adjacent individuals. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D6:121-130, 1955. 10
- (6) 四手井綱英：林分密度の問題。38pp, 日林協, 東京, 1956. 3
- (7) Kira, T., Ogawa, H., Hozumi, K., Koyama, H. & Yoda, K. : Intraspecific competition among higher plants (V) Supplementary notes on the C-D effect. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D7:1-14, 1956. 12
- (8) Hozumi, K., Asahira, T. & Kira, T. : Intraspecific competition among higher plants (VI) Effect of some growth factors on the process of competition. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D7:15-34, 1956. 12
- (9) Shinozaki, K. & Kira, T. : Intraspecific competition among higher plants (VII) Logistic theory of the C-D effect. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D7:35-72, 1956. 12
- (10) Koyama, H. & Kira, T. : Intraspecific competition among higher plants (VIII) Frequency distribution of individual plant weight as affected by the interaction between plants. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D7:73-94, 1956. 12
- (11) 坂口勝美・土井恭次・安藤貴・福田英比古：本数密度からみたアカマツ天然生幼令林分の解析。林試研報93：1～23, 1957. 2
- (12) 四手井綱英・只木良也・根占勝彦・北村敦：強度枝打ちによる個体成長よくせいが林分成長に及ぼす影響。日林講67：226～227, 1957
- (13) 吉良竜夫編：密度・競争・生産, みやま, 大阪営林局, 8, 9, 11・12：13～24, 9～18, 34～45, 1957
- (14) Yoda, K., Kira, T. & Hozumi, K. : Intraspecific competition among higher Plants (IX) Further analysis of the competitive interaction between adjacent individuals. Jour. Inst. Polytech., Osaka City Univ. D8:161-178, 1957. 12
- (15) 只木良也・四手井綱英：林木の競争に関する研究(II)スギ苗で仕立てた模型林分での間伐試験。日林試41：341～349, 1959
- (16) 四大学(北大, 東大, 京大, 大阪市大)合同調査班：森林の生産力に関する研究第1報。北海道主要針葉樹林について。72pp, 国策パルプ工業KK, 東京, 1960. 11
- (17) 坂口勝美：間伐の本質に関する研究。林試研報131：1～95, 1961. 3
- (18) Shinozaki, K. & Kira, T. : Intraspecific competition among higher plants (X) The C-D rule, its theory and practical uses. Jour. Bio., Osaka City Univ. 12:69-82, 1961. 12

- (19) 只木良也・四手井綱英：林分の競争に関する研究(Ⅱ)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. 5
- (20) 安藤貴・坂口勝美・成田忠範・佐藤昭敏：アカマツ天然生除伐試験林の解析第Ⅰ報。林試研報 144:1~30, 1962. 10
- (21) 安藤貴：アカマツ天然生除伐試験林の解析第Ⅱ報，本数密度を中心とした解析。林試研報 147:45~77, 1962. 12
- (22) 只木良也・四手井綱英：数量的間伐に関する生態学的研究。京大演報 34:1~31, 1963. 1
- (23) 只木良也：競争密度効果を基にした幹材積収穫予測。林試研報 154:1~19, 1963
- (24) Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H. & Hozumi, K.: Intraspecific competition among higher plants (XII) Self-thinning in over-crowded pure stands under cultivated and natural conditions. Jour. Bio., Osaka City Univ. 14:107-129, 1963. 12
- (25) 只木良也：競争密度効果式を用いて検討した間伐と幹材積収穫との関係。アカマツの場合，林試研報 166:1~22, 1964. 3
- (26) 安藤貴・峰屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美：スギ林の保育形式に関する研究。林試研報 209:1~76, 1968
- (27) 安藤貴：同齡単純木の密度管理に関する生態学的研究。林試研報 210:1~153, 1968
- (28) Reineke, L. H.: Perfecting a stand-density index for even aged forest. Agr. Res. 46:627-638, 1933