

# 林学における統計的手法

内藤 健司<sup>†</sup>

( 受付 2002 年 10 月 16 日 ; 改訂 2003 年 3 月 7 日 )

## 要 旨

第 2 次世界大戦後から 1980 年代までの林学・林業における統計的手法の応用や発展についてその概要を述べた。第 2 次世界大戦後の林業分野、特に森林計測分野では、森林調査への標本調査法や分散分析法の応用が盛んであった。特に 1950 年代後半における全国森林資源サンプリング調査が統計数理研究所職員の協力を得て行われたことは画期的なことであった。1955 年から 1979 年にかけて点密度による森林蓄積調査法が林学分野で発展し、多くの日本人林学者により林学分野で発案された統計的な計測手法として確立された。また、1960 年前後に鈴木によって提案された減反率による木材生産予測法は従来の法正林の概念を拡張するものであり、その手法は現在でも民有林の木材生産予測に使われるなど現場での貢献度が高い。1965 年に統計数理研究所の職員と林学関係の研究者や実務者により林業統計研究会が設立され、サンプリングの問題、ピッターリッヒ法による森林調査の問題、コンピュータの林業への応用などについて活発な議論が行われ、その成果は講習会や著作などを通して社会へ還元された。今後、森林科学の分野で更に必要とされる統計数理学的な手法は、市場価値をもたない環境財としての森林の評価手法、住民参加や多様な価値観を持つ人々の合意形成に必要な情報公開の技術と手法であろう。

キーワード：森林資源調査，数量化法，ポイント・サンプリング，減反率。

## 1. はじめに

木梨(1979)によれば、フィッシャーやゴセットに始まる近代統計学的手法は第 2 次世界大戦中に寺崎博士や中山教授によって林業への応用が試みられていたが、近代統計学的手法が爆発的に林業分野に取り入れられたのは第 2 次世界大戦後のことであった。本稿では第 2 次世界大戦後の林学・林業、特に森林調査・森林計画分野における統計的手法の応用と研究を中心にその大筋の流れを概観する。

## 2. 第 2 次世界大戦後から 1960 年までの研究動向と統計数理

木梨(1978)は 1950 年代に各種の学術雑誌や業界誌などにおいて森林調査法などに関する研究発表を活発に行い、森林標本調査の実務的入門書として『推計学を基とした測樹学』(木梨(1954))を著すなど、推測統計学の林学・林業分野への普及と教育に積極的に貢献した。その著書の中で木梨は非線形関数に対する最小二乗法(デミングの最小二乗法)についても触れ、樹高曲線を例としてその計算実例を示しているが、電子計算機を自由に使えなかったこの時代にデミングの最小二乗法を解かり易く説明している。この頃の時代背景としては、林(1993)が述べ

<sup>†</sup> 宇都宮大学 農学部森林科学科：〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350 番地; naito@cc.utsunomiya-u.ac.jp

ているように、日本で初めての大規模全国調査である「日本人の読み書き能力調査」や、1953年から1954年にかけて林野庁が実施した全国森林資源調査(全国3000スポット調査)がある。この全国森林資源調査は組織だった大規模な蓄積調査としては日本で初めてのものであり、調査の設計・実行・集計は、松下嘉米男、林知己夫、石田正次といった統計数理研究所員の指導と協力を得て行われた。この研究調査は1957年の森林法改正に伴った「森林資源全国サンプリング調査」の実施という具体的な成果を生むことになった。

一方、近藤(1959)は『林業技術のための推計学入門』を著し、木梨(1954)と同じく標本調査論に基づいた森林調査法についても述べているが、特に実験計画法の理論と応用について詳しく説明し、林業作業の標準功程調査への分散・共分散分析の適用例などを示した。

更に西沢(1959)は『森林測定法』の中で、具体的な林業での適用例を示しながら森林標本調査法や成長予測法の理論と実際について解かり易く説明し、世界における大規模な森林調査の実例を紹介した。この本は学生や実務者用の教科書あるいは普及書として大きな役割を果たした。

以上に述べた標本調査法の森林調査への応用といった事柄とは別に、森林調査法に関する独創的で画期的な方法が、オーストリアの森林官 Bitterlich(1947)によってこの時代に発表された。この方法はピッターリッヒ法と後に呼ばれることになるが、調査に際して林内にコンパスなどで標本地を設定する必要がなく、林内でランダムにとられた点を中心として周囲の全ての立木の胸高直径を一定の水平角で視準し、直径がその水平角からはみ出す立木の本数の平均値を一定整数倍することによって、単位面積(ha)当りの胸高断面積合計値( $m^2$ )を推定する方法である。この方法は Grosenbaugh(1952)によって統計学的な解釈が与えられ、Grosenbaughの論文を木梨(1952)が日本へ紹介してから多くの日本人林学者によってピッターリッヒ法が発展することになる。平田(1955)は一定の垂直角で周囲全ての立木の樹高を視準し、樹高がその垂直角からはみ出す本数の平均値を算出することによって、林分平均樹高を推定する方法(H-Messungあるいは平田法)を見出し、鈴木・平田(1958)は『測樹学新論抄』の中でピッターリッヒ法の詳しい検討を行っている。平田(1955)の論文発表から上野(1979)の論文まで、多くの日本人林学者を中心としたピッターリッヒ法と関連した計測理論が展開されるが、その詳しい内容は以下の章で触れる。

戦後の混乱期を経て1955年前後より日本の経済復興が始まるが、木材需要量は国内供給量を大きく上回り、物価上昇の元凶と目された木材価格の上昇を抑えるために国有林は木材の増伐を余儀なくされることになる。米などの単年生農作物と違い林木の生育期間は、数十年、場合によっては百年を越す長期にわたるので、急激な木材増伐要求へ簡単に対応することには大変な困難が伴った。その一方では1951年、1955年、1957年と度重なる森林法の改正によって森林計画制度環境が徐々に整えられ、国民の木材需要に応えるために数々の国有林経営改善策が講じられたが、全国森林資源調査、立地級区分調査(林地生産力の数量化)などが1950年代後半から1960年代にかけての重要な研究課題であった。

### 3. 1960年代の研究動向と統計数理

#### 3.1 林業統計研究会の設立

1960年代は時の総理大臣、池田隼人の「国民所得倍增計画」、東名高速道路開設、東海道新幹線開設、東京オリンピック開催といった言葉に見られるように、高度経済成長を象徴する時代である。森林法は1962年、1964年と更に改正を重ねられ、1964年に制定された林業基本法の成立により、国有林・民有林を統一した「林産物の需要等に関する長期見通し」ならびに「全国森林計画」を上位計画とする森林計画制度の枠組みが完成することになる。それらの動きに伴った林業統計に関する様々な研究活動の高まりの中で、「林学・林業における統計利用の発展と普及をはかるために各研究者間の連絡を図り、利用者に対する援助を行うこと」を目的と

した林業統計研究会(後に森林計画学会と改称)が、統計数理研究所の林知己夫、石田正次と林学関係の大友栄松、黒岩菊郎、高田和彦、平田種男、中島巖、西沢正久らと呼ばけ人として1965年8月に設立された。毎月第1金曜日に定期的開催される研究会、毎年4月の学会と夏休み中に行われるシンポジウムや現地調査、統計的手法の普及を目的とした林業統計講習会(1966年8月:統計数理研究所)などの目覚ましい研究活動が展開された。林業統計研究会設立直後の活発な活動については多くの雑誌に記録・報告されているが、1965年8月から1988年7月までの林業統計研究会の活動概要(シンポジウムのテーマ、講演者、演題など)については内藤(1989)の記録を参照されたい。以下にそれらの活動の中からいくつかの重要事項について述べる。

### 3.2 数量化法の林学・林業への適用

数量化法については1950年以降、林知己夫らによって多くの論文が発表されており、林(1993)によれば、刑務所における仮釈放制度への数量化法の応用などが検討されていた。その一方、渡邊(2002)によれば、1957年の森林法改正に伴った全国森林計画の実効性をあげるために林野庁は立地級区分(林地の生産力と地理的立地条件を総合的に評価したもの)の必要性を感じていた。行政側の要求に応える形で林業試験場の西沢(他1965)は数量化法(I類)による地位指数(上層木林分平均樹高)の推定法についての論文を発表し、林野庁職員であった渡邊は1961年に農林省林業試験場測定研究室に赴いて数量化理論と立地級区分調査法を研究した。その結果は1965年の立地級区分調査要綱として結実する。この間、林業統計研究会創立直前のメンバーによる自主的な研究会活動や林業統計研究会設立後における研究会活動は林学研究へ大きく貢献した。

### 3.3 減反率と木材生産予測

この時代における林学・林業の研究活動と統計学との関連を記述するに際し、重要事項の一つとして鈴木太七の減反率理論がある。この減反率という概念は国際会議での研究発表でもGentan probabilityと表現されるほど国際的に広く知られており、先にも述べた全国森林計画における民有林の木材生産量予測に今でも用いられている。

林業では植林されてからの年数とその森林の林齢と呼び、5年単位で分類された林齢を年齢と呼び、植林された森林がある林齢で伐採される確率を減反率と呼んでいる。全国の森林は林齢に応じていずれかの年齢に分類され、一つの年齢ベクトルを形成する。時間の経過に伴って変化する年齢ベクトルの様子は年齢遷移行列によって記述可能であるが、この年齢遷移行列は減反率から求めることができる。鈴木(1959)は「遷移確率行列による収穫予定」と題する論文を始めとしてこれ以降数多くの一連の論文を発表し、初期の年齢ベクトルの数値に関係なく任意の年齢遷移確率に対して安定した極限年齢ベクトル(不動点)が存在することを示した。これは従来の(狭義の)法正林概念を拡張したものと言える。この減反率を用いた生産予測法については、鈴木(1961, 1963, 1979)が研究報告書あるいは著書としてまとめているので参照されたい。

### 3.4 ビッターリッヒ法の更なる展開

Bitterlich(1947)による胸高断面積合計推定法にしても平田(1955)による林分平均樹高推定法にしても、最終的には林分蓄積量を推定することが最終目的であった。北村(1962)はビッターリッヒ法を更に発展させ、一致高和なる概念を用いて林分蓄積量を直接推定する方法を提案した。北村は林内の全ての樹幹を水平方向に一定倍拡大した拡大樹幹を想定し、林内でランダムにとられたポイントから垂直に立てられた直線とこれらの拡大樹幹が交わる点の地上高の総和に、樹幹の拡大率によって決まる定数を乗じることによって、簡単に単位面積(ha)当りの立木幹材積合計量が求められることを示した。平田、北村らによるビッターリッヒ法の発展は多く

の森林計測関係の林学者の興味を引いた。また、林学分野で考え出されたユニークなピッターリッヒ法の原理は統計数理学者の興味を引くところとなり、その後、林業統計研究会のシンポジウムなどの現場での実証研究活動を通して活発に議論されることになる。日本人によるピッターリッヒ法に関するこれらの研究活動はその後一段落するかに見えたが、1970年代後半から1980年代前半にかけて再び活発化することになる。

### 3.5 『新しい林業統計』の出版

1960年代の主要な研究テーマをいくつか紹介してきたが、1965年8月に設立された林業統計研究会の研究会活動は日本各地で頻繁に開催され、その間の報告や議論の量は膨大なものであった。これらの活発な討議が一部会員だけの話題として消え去ってしまうことを惜しんだ黒岩らは、林業統計研究会の名前で『新しい林業統計』(黒岩他 1968)を出版し、その間の研究活動の結果を広く一般に紹介・普及した。その内容は6章構成であり、第1章サンプリングの問題では大友栄松がピッターリッヒ法、林知己夫が動く母集団に対するサンプリング調査について、第2章測定誤差と統計分析では、石田正次が標本誤差における非標本誤差、高田和彦が測定誤差の問題、林知己夫が測定誤差を処理する統計的方法について、第3章では高田和彦が林業と電子計算機について、第4章では大友栄松が林地生産力の数量化について、第5章では近藤正巳が林業における実験計画について、第6章では木梨謙吉、中島巖、大友栄松がそれぞれアメリカ北東部、スウェーデン、東独における森林調査法についてそれぞれ当時の最先端の研究成果を解説している。これらの内容からも当時の林業統計研究会の活動内容が推測される。林知己夫の動く母集団の大きさの推定という研究テーマは、その後、佐渡島における野兎の生息数調査に発展して野兎研究会の発足につながることになる。また、1960年代の大学や研究機関を中心とした大型電子計算機の利用は林野行政の現場にも広がりを見せ、シミュレーション手法によるピッターリッヒ法の検証や天然林の成長予測、森林計画への線形計画法の応用、膨大な量にのぼる森林簿(森林調査記録)の維持管理や森林資源データ・ベースの問題が議論されるようになる。

## 4. 1970年代の研究動向と統計数理

70年安保闘争に向けた学生運動の高まりを背景とし、東京大学医学部という一学部に発生した学生処分問題は、時計台(安田講堂)にたてこもる医学生への強制排除を目的とした機動隊学内導入(1967年6月)を直接のきっかけとして全学的紛争へと発展した。私学の学費値上げと大学運営上の失態とも絡んで大学紛争は全国的広がりを見せ、1970年代初期の大学における研究教育活動は停滞した。

1960年代後半から1970年代前半にかけて大学は混乱の時代であったが、地方自治体レベルでは電子計算機が使用されるようになり、林業におけるコンピュータリゼーション、林分成長の数学モデル、森林の公益的機能といったテーマが議論されていた。そのような状況の中でも、大隈らは単木の測定から林分調査まで広範に記述した学生向けの教科書、『森林計測学』(大隈他 1971)を著している。この著書にはピッターリッヒ法による森林調査や樹幹形に関する当時の研究成果が詳しく述べられている。

従来使われてきた林分収穫表は平均値レベルでの成長量予測であり、林木個体に注目した直径分布まで言及する研究が増えるにつれて、Weibull分布関数などの林学分野への応用研究が目立つようになった。

先にも述べたが、1970年代後半になって、既に完成されたかのように思われていたピッターリッヒ法による林分蓄積調査法に関する画期的な論文が箕輪(1976)、上野(1979)によって次々と発表された。箕輪(1976)は林内にランダムにとられた点の周囲の立木を、あるいはランダム

な線分上から一定方向の立木を、一定仰角で視準したときの視線と樹幹の交わる点を切断点、切断点の地上高を切断高、切断点における樹幹の直径を切断径と定義し、切断径の二乗和の期待値を推定することによって林分材積が求まることを示した。この理論の背景には連続型確率変数とみなせる切断高の確率密度関数を導くという過程が裏に存在し、北村の一致高和法と比較すれば、北村法では一定水平角に基づく一致高を測定し、箕輪法では一定仰角に基づく切断径を測定するという対照性がある。しかしながらピッターリッヒ法の特徴を統計学的視点から見れば、一定の基準(角度)を対象木が満たすか満たさないかによって1または0の値をとる離散型確率変数とその確率関数から林分材積あるいは林分特性値を直接推定するという点にある。地形条件の厳しい森林調査において計測が簡単であることの実用上の意義は大きい。その意味では Bitterlich, 平田, Strand, 北村, 箕輪にしても、間接的に林分材積を推定するか、あるいは一致高や切断径という連続型の変数を測定しなければならないという点で実用性や理論的な美しさ(一貫性)に欠ける点があると言える。上野の考えた方法(上野法)では北村法における一致高の実測を必要としない。すなわち林分内の最大樹高を下回らない適当な上限値と0との間の値をとる一様乱数と一致高を比較することにより、乱数が一致高より小さいときには1、大きいときには0という離散型の確率変数を考えることによって、上野は一致高和の期待値を計算した。林地面上をランダムに動き回っていた点を乱数を用いる事によって空中に浮かすことに成功した上野法は、ピッターリッヒ法の特徴を活かしたまま直接林分材積を推定する方法である。その究極の方法を求めて思索してきた多くの研究者にとって、一様乱数を持ち込むという上野の発想はまさにコロブスの卵の発想であったが、Bitterlich の論文発表以来、その理論の発展に多くの日本人林学者が貢献してきたことは同時代に生きる一人の日本人として誇りに思うものである。

#### 5. 1980年代の研究動向と統計数理

1980年代に入りパーソナル・コンピュータが爆発的に普及し、若い会員を中心として林分成長の数学モデルが研究されるようになり、成長関数や分布関数として複雑な非線形関数が多用されるようになってきた。フィールド・データによる理論の検証段階で非線形関数のパラメータを計算する必要が生じ、デミングの最小二乗法などの計算がパソコンなどを用いることにより容易に行われる時代になった。

一方、1970年代前半から比較的自由に利用することが可能となった人工衛星による地球観測資料の林学・林業への応用研究が、やはりパソコンの普及によって促進されたのもこの時代からである。多くの波長帯の観測資料から成るリモートセンシング・データを主成分分析法によってより少ない有用な合成データに変換したり、数次のモーメントを計算することによって画像のきめなどを解析するといった多変量解析法の応用は、林学分野のみならず様々な分野で多用されるようになったのも、安価で高性能なパソコンの普及と無縁ではない。

また、地球環境に対する世界的な関心が高まり、環境経済学という新しい学問分野が出現し、市場価値をもたない環境財の経済評価を支払い意志額(WTP)のアンケート調査を用いて解析する方法なども現れてきた。アンケート資料の客観性を保証する調査方法や支払い意志額の分布を決定する(支払い意志額の期待値を求める)方法などで、まだまだ新しい統計知識が必要とされている。

#### 6. おわりに

1990年代以降の研究動向と統計数理についての記述には、文献調査などの時間が更に必要となるのでここでは省略した。これまで社会の関心事や新しい学問の要求に対応する形で、様々

な統計学の概念や手法が考え出されてきた。林学(森林科学)の分野においてもここで述べたように社会のニーズに対応するよう様々な形で統計学が応用されてきた。最近の国際的な関心事は地球環境の保全と人権の尊重といえる。その中で、森林計画については、持続可能な森林管理、森林計画への住民参加、森林資源の多様化した利活用、森林生態系の保全という多くの課題を抱えている。このような課題に対し、21世紀の林学(森林科学)が必要とする統計手法には、更に住民参加や多民族間での合意形成に必要な情報公開の技術と手法の開発が必要となると思われる。

今回の特集企画の原稿を草稿中に、元統計数理研究所所長であり林業統計研究会の初代会長でもあった林知己夫先生の訃報が突然届いた。本稿の草案作成の過程で林業統計研究会の創設・発展に対する林先生の偉大な貢献に改めて感謝の念を抱かされていた最中での突然の訃報、余りの偶然さに驚きと深い悲しみを禁じ得ない。林先生のご冥福を心からお祈りすると共に、林業統計の更なる発展を通して、森林計画学会に対する林先生の貢献とご好意に報いたいと思う。

最後に今回の特集企画は私達にとってこの上ない喜びであり、統計数理の編集委員会をはじめこのような企画に携われた関係各位に対して心からの感謝を捧げたい。

## 参 考 文 献

- Bitterlich, W. (1947) Die Winkelzahlmessung, *Allgemeine Forst-und Holzwirtschaftliche Zeitung*, **58**, 94-96.
- Grosenbaugh, L. R. (1952) Plotless timber estimates—New, fast, easy, *Journal of Forestry*, **50**, 28-31.
- 林知己夫 (1993) 石田正次さんの学問, 『石田正次～遺稿と思い出～』(石田真理 編), 198-209, 私費出版.
- 平田種男 (1955) Bitterlich 法による樹高の推定, 日本林学会誌, **37**, 479-480.
- 木梨謙吉 (1952) 新しい林分材積の測定法——可変プロット半径法による新しい確実な容易な方法, 林業経済, **5**, 28-31.
- 木梨謙吉 (1954) 『推計学を基とした測樹学』, 朝倉書店, 東京.
- 木梨謙吉 (1978) 『森林調査詳説』, 農林出版, 東京.
- 木梨謙吉 (1979) 林業統計研究会の歩みと将来, 林業統計研究会誌, **4**, 1-6.
- 北村昌美 (1962) 一致高和による林分材積の推定について, 第 73 回日本林学会大会講演集, 64-67.
- 近藤正巳 (1959) 『林業技術のための推計学入門』, 養賢堂, 東京.
- 黒岩菊郎, 石田正次, 大友栄松, 木梨謙吉, 近藤正巳, 高田和彦, 中島 巖, 林知己夫 (1968) 『新しい林業統計』(林業統計研究会 編), 日本林業協会, 東京.
- 箕輪光博 (1976) 上部直径にもとづく林分材積の推定, 日本林学会誌, **58**, 112-115.
- 内藤健司 (1989) 林業統計研究会の活動記録, 林業統計研究会誌, **14**, 184-197.
- 西沢正久 (1959) 『森林測定法』, 地球出版, 東京.
- 西沢正久, 真下育久, 川端幸蔵 (1965) 数値化による地位指数の推定法, 林業試験場報告, **176**, 1-54.
- 大隈眞一, 北村昌美, 菅原 聡, 大内幸雄, 梶原幹弘, 今永正明 (1971) 『森林計測学』, 養賢堂, 東京.
- 鈴木太七 (1959) 遷移確率行列による収穫予定, 日本林学会関東支部大会研究発表集, 36-38.
- 鈴木太七 (1961) 木材の生産予測について, 科学技術庁資源局資料第 45 号, 1-113.
- 鈴木太七 (1963) 木材の生産予測について(II), 科学技術庁資源局資料第 53 号, 1-54.
- 鈴木太七 (1979) 『森林経理学』, 朝倉書店, 東京.
- 鈴木太七, 平田種男 (1958) 『測樹学新論抄』, 日本林業調査会, 東京.
- 上野洋二郎 (1979) 林分材積推定の新しい方法(I), 日本林学会誌, **61**, 346-348.
- 渡邊定元 (2002) 昭和 37 年改正森林計画制度, 会報(森林計画研究会), **401**, 3-4.

## Statistical Method in Forest Mensuration and Management Research

Kenji Naito

(Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Utsunomiya University)

This paper overviews the application and development of statistical methods in forest research in Japan from the end of World War II to the 1980s. Just after World War II, the sampling theory and ANOVA were often applied to the forest inventory. In the late 1950s, the first nation-wide forest resource inventory was compiled by the research staff of the Institute of Statistical Mathematics. Since Bitterlich W. proposed a very simple, fast, easy method for estimating forest stand volume in 1947, many Japanese researchers in forest biometrics modified it from 1955 to 1979. The theory of Bitterlich's method follows statistical theory, although it was developed through practical forestry works. The Gentan probability theory proposed by Dr. Suzuki T. around 1960 is also an important aspect in forest planning, because it generalized the concept of the normal forest and has been used in Japan for the nation-wide prediction of timber supply from private forests. In August 1965, the Japan Association for Forestry Statistics was established to develop and provide statistical methods for Japanese forestry research and practice. Many topics on the sampling method, Bitterlich's method and the application of computers to forestry research were discussed during the meeting of the association with forestry practitioners. A new statistical method and concepts requested in the 21st century may deal with an evaluation method for non-market products related to forests, and a system for a wide range of information needed for public involvement or participation into forest resource management.