



Title	高性能林業機械化の推移と展望に関する研究
Author(s)	尾張, 敏章; OWARI, Toshiaki
Citation	北海道大学 演習林研究報告, 58(2), 11-62
Issue Date	2001-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21474
Type	departmental bulletin paper
File Information	58(2)_P11-60.pdf



高性能林業機械化の推移と展望に関する研究*

尾張 敏章¹

A study on the development of highly mechanized forestry
by
Toshiaki OWARI¹

要 旨

本論文では、高性能林業機械化の発展経過を叙述的に明らかにするとともに、将来の発展動向を定量的に予測することにより、今後の機械化発展に向けた課題について検討した。はじめに、北海道における高性能林業機械化の発展過程について検討し、技術革新に対する林業事業体の主体的行動の重要性、および技術革新への対応が受動的、追従的とならざるを得ない行政の限界を指摘した。また、わが国における高性能林業機械保有台数、および北海道における高性能林業機械作業システムに関して、それぞれ普及過程の将来予測を行った。予測に用いた手法は、前者が成長曲線モデルへのあてはめ、後者がシステムダイナミクスモデルによるシミュレーションである。予測結果をもとに、今後の機械化推進施策はハードの導入促進から機械利用の効率化へと転換を図るべきこと、今後は全機械化作業システムの普及拡大が必要であることを指摘した。また、デルファイ法を用いた技術予測の結果から、長期的な展望のもとでは、高性能林業機械を含む様々な技術革新が進むと期待された。

キーワード：高性能林業機械化，技術予測，成長曲線モデル，システムダイナミクスモデル，デルファイ法

2001年2月28日受理, Received February 28, 2001.

1：北海道大学大学院農学研究科環境資源学専攻森林管理保全学講座，札幌市北区北9西9，060-8589

Research Group of Forest Management and Conservation, Division of Environmental Resources, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9, Nishi 9, Kitaku, Sapporo, 060-8589

* 本論文は「東京大学審査学位論文」(2000年)である。

目 次

- I 結 論
 - 1. 研究の背景
 - 2. 研究目的
 - 3. 研究方法
- II 高性能林業機械化の発展過程
 - 北海道を対象として—
 - 1. 高性能林業機械保有台数の推移
 - 2. 北海道における高性能林業機械化の発展過程
 - 2.1 黎明期(1982~1987年度)
 - 2.1.1 高性能林業機械の導入状況
 - 2.1.2 技術的条件
 - 2.1.3 経営的条件
 - 2.1.4 政策的条件
 - 2.2 拡大期(1988~1990年度)
 - 2.2.1 高性能林業機械の導入状況
 - 2.2.2 技術的条件
 - 2.2.3 経営的条件
 - 2.2.4 政策的条件
 - 2.3 安定期(1991年度~現在)
 - 2.3.1 高性能林業機械の導入状況
 - 2.3.2 技術的条件
 - 2.3.3 経営的条件
 - 2.3.4 政策的条件
 - 3. 小 括
- III 成長曲線モデルによる高性能林業機械の普及予測
 - 1. 高性能林業機械の普及過程と成長曲線
 - 2. 資料と方法
 - 2.1 予測に用いた資料
 - 2.2 成長曲線モデル
 - 3. 予測結果
 - 3.1 総保有台数
 - 3.1.1 Logistic 曲線モデル
 - 3.1.2 Gompertz 曲線モデル
 - 3.1.3 AIC によるモデル選択
 - 3.2 機種別台数
 - 3.3 地域別台数
 - 3.4 保有形態別台数
 - 4. 小 括
- IV 高性能林業機械作業システムの普及シミュレーション
 - 1. System Dynamics によるモデリング
 - 2. 普及モデルの構築
- 2.1 モデルの前提
- 2.2 普及モデル
- 3. 普及過程のシミュレーション分析
 - 3.1 1997年度以前の普及過程
 - 3.1.1 条件設定
 - 3.1.2 シミュレーション結果
 - 3.2 1998年度以降の普及予測
 - 3.2.1 条件設定
 - 3.2.2 シミュレーション結果
- 4. 小 括
- V 採算性を考慮した高性能林業機械作業システムの必要事業規模
 - 1. 高性能林業機械作業の採算性分析
 - 2. 対象と方法
 - 2.1 調査事業の概要
 - 2.2 研究方法
 - 3. 結果と考察
 - 3.1 事業の収益および費用
 - 3.2 収益・費用のモデル化
 - 3.3 最小利用規模の試算
 - 3.4 感度分析
 - 4. 小 括
- VI 林業生産技術の将来予測
 - 1. デルファイ法による技術予測
 - 2. 対象と方法
 - 2.1 技術予測課題の設定
 - 2.2 技術予測調査
 - 3. 調査結果
 - 3.1 技術予測課題の設定
 - 3.1.1 機械分野
 - 3.1.2 作業分野
 - 3.1.3 労働および林道分野
 - 3.2 技術予測調査
 - 3.2.1 回答者数および属性
 - 3.2.2 重要度および実現予測時期
 - 3.2.3 実現に向けた政策手段
 - 4. 小 括
- VII 結 論
- 謝 辞
- 引用文献
- 摘 要
- Summary

I 緒 論

1. 研究の背景

わが国において高性能林業機械化が注目され始めたのは、1980年代後半のことである。それまでの約20年間、わが国の素材生産作業システムには大きな変化がなかった。伐倒・造材工程にはチェーンソーが、集材工程には緩傾斜地でトラクタ、急傾斜地で集材機が主に用いられ、林業機械といえば小形で軽量、安価であることが当然とされていた。欧米で開発された高価であるが多機能、高能率の林業用大形機械（高性能林業機械）の登場は、そうした常識をまさに打ち破るものであった。

ここで、高性能林業機械の定義について、本論文では林野庁による定義に従い、素材生産用の大形機械であるフェラーバンチャ、スキップ、プロセッサ、フォワーダ、ハーベスタおよびタワーヤーダ（注1）の総称とする。機械の性能に基づいた厳密な定義ではないが、林業分野では慣用として、これら6機種のことを高性能林業機械と呼んでいる。

木材価格の低迷や労賃の高騰、人工林資源の成熟化といった状況のもと、高性能林業機械の導入は労働生産性の向上や生産コストの低減、就労条件の改善に有効であるとの認識が広まった。1991年には「高性能林業機械化促進基本方針」が策定され、高性能林業機械化の推進は林業政策の重要課題として位置付けられた。補助事業など積極的な施策展開の効果もあって、高性能林業機械は素材生産の現場へと急速に浸透し、1998年度末時点で約2,000台が保有されるまでになっている。

しかし、高性能林業機械の普及が進む一方で、導入された機械の多くは稼働率が低い状態にある。高性能林業機械の導入促進には成果を上げてきた林業行政も、この問題に対しては決定的な対策を打ち出せないでいる。高性能林業機械化の取り組みが行き詰まりをみせるなかで、高性能林業機械化に対する関心自体も徐々に薄れつつあるのが現状である。

2. 研究目的

高性能林業機械化は、わが国の林業生産技術におけるイノベーション（技術革新）の一形態であり、林業経営を根本的に変革する可能性を有している。高性能林業機械化によって労働生産性の向上や生産コストの削減が達成されるならば、林業収益性の改善によ

て森林所有者の伐採意欲が喚起され、林業生産活動の活発化へとつながる。その結果、素材生産量は増加し、規模拡大の効果によって収益性は一層改善される。高性能林業機械化の意義は、第一にこのような好循環の契機となり得る点に見出される。

高性能林業機械化の効用は、個別経営の改善にとどまらない。木質資源の有効利用という観点からも、重要な役割を担っている。わが国は、国土面積の67%に相当する広大な森林を有し、また1千万haある人工林の多くが成熟期を迎えつつある。年間1億 m^3 以上と膨大な木材を消費しているわが国が、豊かな森林資源に恵まれているにも関わらず、木材需要の8割以上を諸外国の資源に依存している。人口の急増や経済活動の拡大などにより、世界の木材消費量は長期的に増加するとの見通しも示されているなかで、わが国のこうした状況は国際的に容認されるはずがない。自国の木質資源を有効に利用することはわが国の責務であり、その実現のためにも高性能林業機械化による林業生産技術の革新は不可欠である。

高性能林業機械化の適正な発展を促進するために、現在、より有効な方策を講じることが必要となっている。そこで本論文では、高性能林業機械化の推移と展望を明らかにし、今後の高性能林業機械化の発展に向けた取り組みに対して明確な方向付けを与えることを目的とする。過去における高性能林業機械化の発展経過をふまえて、将来の発展状況を数量的に予測することにより、現状での課題を明らかにする。

3. 研究方法

はじめに、全国に先駆けて高性能林業機械が導入された北海道を対象として、高性能林業機械化の発展過程を叙述的に明らかにする。北海道の高性能林業機械化については、これまでに、駒木（1999）、尾張ら（1995）、尾張（1999）、嶋瀬（1995）、嶋瀬ら（1997）らとその現状について報告している。II章では、これら既存の研究成果や各種の統計資料を用いながら、高性能林業機械化の発展段階について時期区分を行い、各段階における高性能林業機械の導入状況を記述する。同時に、高性能林業機械化の発展にかかわる技術的、経営的、政策的条件について言及する。

続く2つの章では、II章の結果をふまえながら、将来における高性能林業機械化の発展過程を定量的に予測する。III章では、高性能林業機械の保有台数推移について予測を行う。わが国における高性能林業機械

の所要台数について、仁多見(1993)は、機械の生産能力が最大限発揮されるとの前提のもとで、840～1,260台と試算している。また南方(1999)は、国産材供給量の増大なども考慮し、3,250～14,700台と試算している。ただし両者とも、素材生産量の総計と機械1台あたりの事業量について、実績値をもとに試算する方法をとっている。一方、産業における新技術の採用や耐久消費財の普及過程は、S字型の成長曲線により近似的に表せることが知られている(Makridakis et al., 1995; 佐藤, 1984)。そこで、代表的な成長曲線であるLogistic曲線とGompertz曲線を高性能林業機械保有台数の実績値にあてはめることにより、今後の台数推移を予測する。さらに、機種別、地域別、保有形態別の保有台数推移についても予測を行い、今後の高性能林業機械の普及動向をより詳しく検討する。

IV章では、高性能林業機械作業システムの普及シミュレーションを行う。これまで、高性能林業機械化の発展要因に基づくモデルを構築することにより、発展過程の解析を行った例は報告されていない。そこで、II章で述べる高性能林業機械の普及要因をもとに、北海道における高性能林業機械作業システムの普及過程をSystem Dynamicsによりモデル化する。素材生産事業量と労働者数の推移について実績値から推定し、これまでの普及過程をシミュレーションによって再現する。さらに、将来の普及状況についてシミュレーションによる予測を行う。

V章では、III章とIV章の予測結果を受け、採算性を考慮した高性能林業機械作業システムの必要事業規模について検討する。1992年に実施されたアンケート調査(林業機械化推進研究会編, 1993)によれば、高性能林業機械の導入に必要な年間事業量として、3,000㎡(フェラーバンチャ)、5,000㎡(プロセッサ)といった回答が示されている。しかし、採算上必要となる事業規模について、実証事例をもとに定量的に検討した例は報告されていない。そこで、東京大学北海道演習林で行われたハーベスタ・フォワーダ作業システムの調査事例をもとに、収益と費用が一致するときの年間事業量(最小利用規模)を算出する。また、収益や費用を左右する変数によって感度分析を行い、各因子が最小利用規模に及ぼす影響を明らかにする。

VI章では、高性能林業機械を含む様々な林業生産技術の将来展望について予測を行う。専門家を対象としたアンケート調査により、21世紀に実現が期待される林業生産技術の具体的課題を抽出する。また、デル

ファイ法を用いたアンケート調査により、実現が期待される技術課題について、各々の重要度と実現予測時期を定量的に明らかにする。さらに、技術課題の実現のために有効な政策手段について、調査結果をもとに検討する。

最後にVII章において、高性能林業機械化の推移と展望を結論として述べるとともに、高性能林業機械化のさらなる発展に向けた取り組みの方向性について提言を行う。

注1) 各機種の説明はそれぞれ以下のとおりである。

- ・フェラーバンチャ(伐倒機)
立木を伐倒し、そのまま掴んで集材に便利な場所へ集積するという2工程を行う機械。
- ・スキッド(牽引集材車両)
全木材または全幹材をけん引集材する林業用トラックの総称。クローラ式とホイール式がある。
- ・プロセッサ(造材機)
林道上や土場において、全木集材された材の枝払い、玉切りを行う機械。
- ・ハーベスタ(伐倒造材機)
伐倒、枝払い、玉切り、および集材しやすいように玉切りした材の集積を一貫して行う機械。
- ・フォワーダ(積載集材車両)
林内に集積された短幹材を林道端の土場まで積載集材する車両系機械の総称。
- ・タワーヤード(タワー付き集材機)
架線の架設撤去が手軽にできる人工支柱を装備し、自走またはけん引することのできる集材機。

II 高性能林業機械化の発展過程

—北海道を対象として—

1. 高性能林業機械保有台数の推移

図-2.1は、北海道における高性能林業機械台数(機種別保有台数および年間増加台数)の推移を示したものである。1980年代初めに最初の高性能林業機械が導入されてから、しばらくの間はほとんど普及が進まなかった。1987年度末の高性能林業機械保有台数は、わずか5台にとどまっている。

導入が本格化したのは1988年度以降のことである。とりわけ、1989～1990年度の間には保有台数が急増した。この2年間で85台もの増加がみられ、1990年度末の保有台数は100台に達している。保有台数が最も多かっ

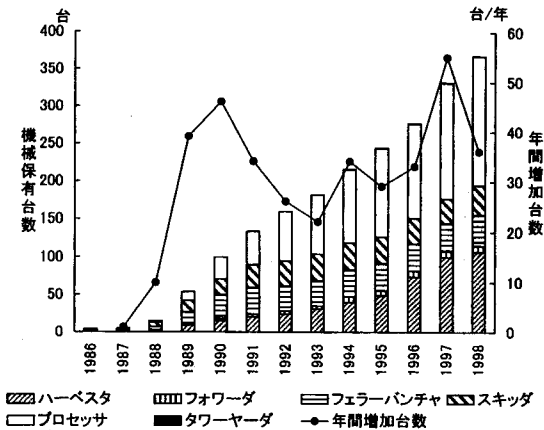


図-2.1 北海道における高性能林業機械台数の推移
資料：北海道水産林務部資料より作成。

た機種はフェラーバンチャ（32台）であり、スキッド（21台）の保有比率も比較的高かった。

1990年代に入ってから保有台数は一貫して増加傾向で推移し、1998年度末時点で保有台数は369台となっている。しかし1991年度以降、高性能林業機械台数の推移に関して2つの大きな変化が生じている。第一に、年間増加台数が突如減少に転じたことである。減少傾向は1993年度までの3年間続き、その後は導入の多かった1997年度を除いてほぼ横ばいに推移している。第二に、導入機種に変化が現れた。1991年度以降、フェラーバンチャやスキッド、フォワーダの導入はほとんどみられなくなり、プロセッサやハーベスタが急速に普及していった。1998年度末時点では、プロセッサの保有台数は173台と最も多く、次いでハーベスタの107台となっている。現在保有されている高性能林業機械の約4分の3、1995年度以降に導入された機械の9割以上がプロセッサとハーベスタである。

以上の推移から、北海道における高性能林業機械化の画期としては、機械の普及が本格化した1988年度、および導入の傾向が量的、質的に変化した1991年度が挙げられる。そこで以下では、北海道における高性能林業機械化の発展過程について、黎明期（1982～1987年度）、拡大期（1988～1990年度）、安定期（1991年度～現在）に分けて言及する。

2. 北海道における高性能林業機械化の発展過程

2.1 黎明期（1982～1987年度）

2.1.1 高性能林業機械の導入状況

北海道の素材生産の現場に高性能林業機械が初め

て登場したのは、1982年のことである。導入主体は釧路支庁管内白糠町の素材生産事業体・遠藤林業、導入機種はフィンランド・Lokomo社製の小形ハーベスタ、MAKERI 33Tであった（北海道林道協会、1990；木幡、1999）。ハーベスタは特に枝払い作業において高い生産能力を発揮し、当時の林業関係者を驚かせた。しかし、急傾斜地に十分対応できないことや、枝払い時に樹皮剥けが生じるといった理由から、本格的に普及するまでには至らなかった。

このほか、1987年度までに5台の高性能林業機械（ハーベスタ2台、スキッド3台）が導入された。しかし、この当時はまだ国産機械が生産されておらず、導入された高性能林業機械は全て外国から輸入されていた。

2.1.2 技術的条件

遠藤林業らによる高性能林業機械の導入は、欧米で林業の機械化が進んでいたからこそ実現できたといえる。北米と北欧の各国では、1960年代から1970年代にかけて、わが国の高性能林業機械に相当する様々な大形機械の開発・普及が急速に進んだ。現在のフェラーバンチャの原型となる伐倒用機械は、1950年代後半から北米で開発が始まった。同時にスキッドの開発も進み、北米では1968年以降、いわゆるフェラーバンチャ・システム（フェラーバンチャによる伐倒、スキッドによる全木集材）が普及するようになった。また、北欧では1970年代に入って、プロセッサの普及が始まった。現在わが国でも数多く導入されているシングルグリップ・ハーベスタは、1978年に初めて開発された。これを契機に、北欧型短幹集材システム（ハーベスタによる伐倒・枝払い・玉切り、フォワーダによる集材）が急速に普及した（Drushka et al., 1997）。

欧米の機械化林業は、1960年代から1970年代にかけてわが国でも紹介されており、また実際の機械による作業試験も多数行われた（上飯坂、1974；中村、1965；小山田ら、1978a；1978b；鈴木、1968；高田、1970a；1970b；北海道林業機械化協会、1978；伊藤、1980；南方、1981a；1981b；1981c）。しかし、素材生産業の関係者が高性能林業機械を目にする機会はほとんどなかった。

2.1.3 経営的条件

欧米における機械化進展の状況から、1970年代には高性能林業機械の導入が技術的に可能であったと思

われる。しかし、1973年のオイル・ショックを契機として、北海道の素材生産業は深刻な縮小過程にあった。経営的にも厳しく、将来の見通しも得られないなかで、実績もない高性能林業機械に多額の投資をする素材生産事業体は皆無であったと考えられる。

一方、1980年代に入って、素材生産業の経営環境は徐々に安定を取り戻した。1970年代後半に1,200~1,300万 m^3 /年で推移していた木材需要量が、1980年代初めには1,100万 m^3 /年にまで減少した(図-2.2)。

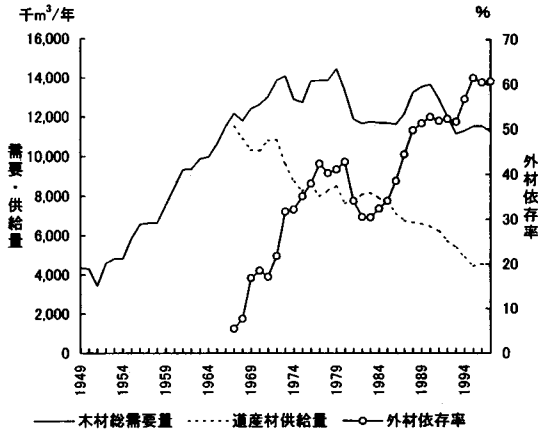


図-2.2 北海道における木材需給の推移
資料：北海道林業統計より作成。

しかし同時に、一時は40%を上回った外材依存率が30%程度にまで落ち込んだ。この結果、木材伐採量の減少傾向は800万 m^3 台で下げ止まりを見せた(図-2.3)。

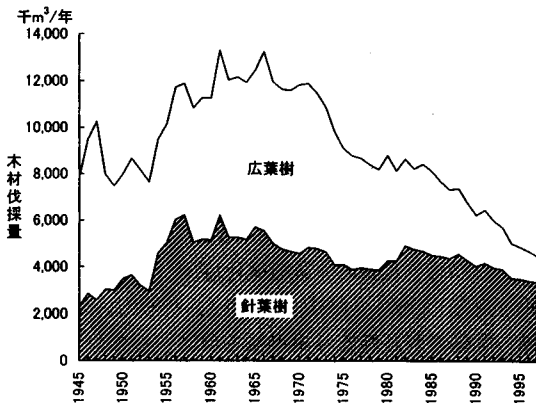


図-2.3 北海道における木材伐採量の推移
資料：図-2.2に同じ。

さらに、素材生産事業体数の減少傾向にも歯止めがかかった(図-2.4)。

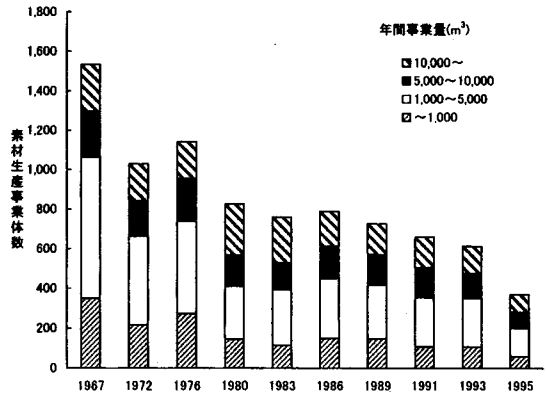


図-2.4 北海道における素材生産事業体数の推移
資料：北海道山林史戦後編，北海道の林産業より作成。

伐採量を増加させた原因の一つが、人工林資源の成熟化であった。北海道では戦後の拡大造林期、カラマツ、トドマツを中心とした人工林が大規模に造成された。北海道におけるカラマツの主間伐別伐採量の推移をみると(図-2.5)、間伐事業量は1977年度に30万 m^3 であったのが、1980年度に65万 m^3 、1984年度に90万 m^3 と急増している(和ら、1998)。

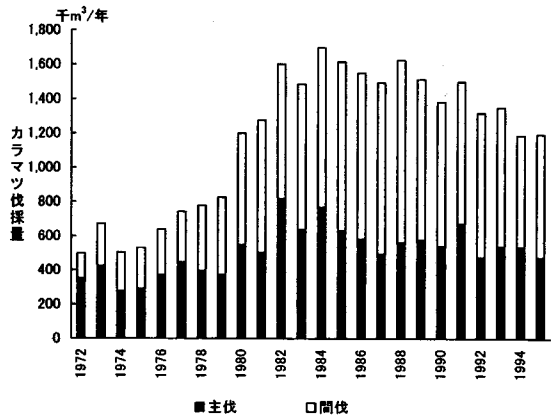


図-2.5 北海道におけるカラマツ伐採量の推移
資料：和ら(1998)より引用。

またこの時期、オイル・ショックを契機とした物価上昇に伴い、素材生産業の人件費が高騰した。北海道における伐出業の1日あたり平均賃金(図-2.6)は、1973年度に4,806円であったのが、1978年度には

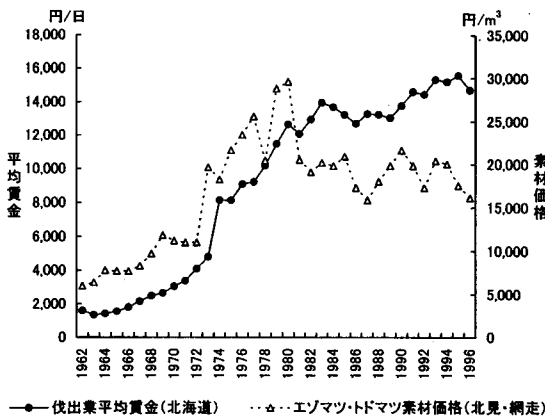


図-2.6 北海道における伐出労働賃金と素材価格の推移

資料：林業統計要覧，北海道林業統計より作成。

1万円を超え（10,191円），1983年度には13,973円にまで達している。

さらに，エゾマツ・トドマツの素材価格（28cm，3.65m，品等込）をみると，1980年度に29,600円/m³であったのが，1981年度以降の景気後退に伴う木材需要減により，20,500円/m³にまで下落した。その後も大きな価格上昇はみられず，ほぼ横ばいで推移した。この結果，素材生産事業の採算性は悪化の一途をたどった。

北海道の素材生産業は，1980年代に入って事業の量的安定を確保するものの，質的な変化に直面した。それまで大部分を占めていた天然林生産事業が減少し，人工林生産事業，特に間伐事業の比率が増加するようになった。人工林間伐事業は生産材に占める小径木の比率が高く，労働生産性，素材価格ともに天然林生産に比べて低い。ただでさえ収益性が悪化したところに，人件費の高騰と素材価格の低迷が追い討ちをかけた。

こうした状況のもとで，素材生産業は生産コストの削減を真剣に模索する必要に迫られた。一部の素材生産事業者による高性能林業機械導入も，そうした危機意識の一端が表面化したものと考えられる。

2.1.4 政策的条件

林業行政が高性能林業機械に注目し始めたのは1980年代半ばである。北海道では，遠藤林業の取り組みを後追いするように検討が始まっている。この当時，行政は高性能林業機械化の推進に対してそれほど積極的ではなかった。

林野庁は1984年度から，「高効率森林施業システム開発普及推進事業」を制度化した。この事業は，機械の選択・組み合わせと路網整備とを一体化した効率的な作業システムを開発し，その普及推進を図ることを目的としていた（北海道林務部，1988）。北海道林務部はこの事業を受け，1985年に遠藤林業のハーベスタを借用し，カラマツ人工林間伐を対象とした作業システムの実証試験を行った（木幡，1986；油津，1987）。

また1986年度には，機械化推進を担当する行政組織として，北海道林務部造林課に林業機械係が新設された。さらに1987年度には，高性能林業機械に対する初めての補助事業（林業機械化普及推進事業）が導入された。

一方，高性能林業機械化に対する関心は全国的にも高まりつつあった。1986年度の林業白書において，高性能林業機械が初めて紹介された（林野庁，1987）。さらに，翌1987年度の白書では，「林業技術のルネサンスを目指して」と副題され，高性能林業機械が大きく取り上げられた。同書では，高性能林業機械の導入が素材生産の低コスト化や若年労働力の新規参入のためにきわめて重要と述べられている（林野庁，1988）。

2.2 拡大期（1988～1990年度）

2.2.1 高性能林業機械の導入状況

1988年度以降，高性能林業機械化に取り組む事業者は急速に増えていった。なかでも特に積極的であったのが，紙パルプ企業の大手2社，王子製紙と山陽国策パルプ（現，日本製紙）のグループであった。

王子製紙は，社有林での生産性向上を目的に，人工林間伐作業の機械化を進めた（山口，1991a；1991b）。北海道の人工林と林相が比較的似たスウェーデンを対象に現地調査を行った結果，伐倒から枝払い，玉切りまでを一台で処理できるハーベスタが有効であるとの認識に至った。そして，林業機械メーカーのイワフジ工業と提携して，クローラ式のエクスカベータにテレスコピック・ブームとハーベスタ・ヘッド（Valmet 935）を装着した機械を開発した（山口，1991b）。さらに，北欧諸国と同様の短幹集材システムを実現するため，林業機械メーカーの及川自動車と共同で国産フォワーダを開発した（速水ら，1991）。この間，王子グループが機械開発に投じた費用は2億円にのぼった（山口，1992）。

旭川市に工場を持つ山陽国策パルプもまた，原料材の安定供給の見地から機械化の推進に取り組んだ。

山陽国策パルプの系列事業体のなかで、機械化推進の中心的役割を担ったのが三津橋産業であった。同社が取り組んだのは、天然林における素材生産作業の機械化であった。北欧や北米の作業現場を視察した結果、カナダ西海岸の作業システム（フェラーバンチャによる伐倒とスキッダによる全木集材、デリマによる造材）が天然林択伐には有効であるとの結論に達し、その導入を決定した（嶋瀬，1994）。三津橋産業グループは1991年までに、あわせて19台（ヘッドのみ3台を含む）の高性能林業機械を導入しており（全国林業労働力育成センター編，1992），その大部分を天然林での素材生産作業に適用した。取得に要した費用は、総額で4億5千万円を超えた。

王子製紙と三津橋産業が取り組んだのは、いずれも高性能林業機械のシステム導入と呼ばれるものであった。これは、機械を単体で用いるのではなく、複数機種を組み合わせる（システム化する）ことにより、素材生産作業の全工程に高性能林業機械を適用するものである。同様の作業システム（全機械化作業システム）は、ほかにも住友林業（紋別市）や佐藤林業（北見市）などが採用した。

ただ、全機械化作業システムの導入には少なくとも5,000万円以上の初期投資が必要であった。そのため、導入はごく一部の大規模事業体だけに限られており、事業体の多くは高性能林業機械を単体で導入していた。北海道林務部が1990年度に実施したアンケート調査（注1）の結果によれば、1989年度までに高性能林業機械を導入した事業体の76%（25事業体）が、機械を単体で保有している。

2.2.2 技術的条件

高性能林業機械の機構や性能などに関して、この時期に目立った進展はなかった。普及が急速に進んだ背景には、欧米の機械化林業に対する認知の広がりがあったと考えられる。

1988年9月、カナダ・ケベック州で開催される世界林業機械展（DEMO'88）に向けて、北海道内の林業関係者を中心とした産学官計117名の大規模な視察団が編成された（北海道林業改良普及協会，1989）。参加者はこの機械展において、フェラーバンチャやスキッダなど、さまざまな素材生産用大形機械が稼働する作業現場を目の当たりにした。

この視察団派遣を契機に、高性能林業機械化の気運は一気に高まりをみせた。さらに1989年10月、道内

初の高性能林業機械展示会「北海道林業機械フェア」が早来町内の道有林で開催された。この展示会には国内外の林業機械メーカー9社が参加し、高性能林業機械10台を含む23台の機械が出展された。そして、素材生産業や国・道有林、機械メーカー、大学の関係者など、道内外から718名もの見学者が集まった。

また、1989年頃から国産の高性能林業機械が登場したことで、普及に弾みがついた。北海道に導入された高性能林業機械のうち国産機械の比率を年度別にみると（図-2.7），1988年度には4分の1に過ぎなかったものが、翌1989年度に56%、1990年度には76%と急速に増加している。国産機械の価格は、外国製と比べてかなり安価であり、投資負担を軽減することができた。また、高性能林業機械は機構が複雑なだけに故障が多く、外国製機械では部品調達に数ヶ月を要することもあった。その点、国内の林業機械メーカーは故障時の対応も素早く、安心して導入することができた。なお、林業機械メーカーによる販売促進活動も、高性能林業機械の認知を広げることに貢献していたと考えられる。

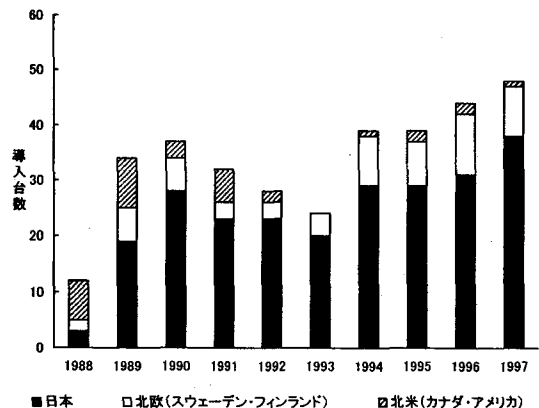


図-2.7 高性能林業機械の生産国別導入台数の推移
資料：北海道水産林務部資料より作成。
注：1997年度末に保有されている高性能機械の導入年度別台数を示している。

2.2.3 経営的条件

紙パルプ関連の大手企業が高性能林業機械化に取り組んだ要因として、原料材の海外依存体制がまだ定着していなかったことが挙げられる。当時は、北海道の木材供給に占める外材比率が急上昇した時期であった。1985年度の外材供給比率は34%であったのが、1989年度までに50%を上回るまでになった（前出図-2.2）。しかしこの時点では、原料材の調達先を海外に

依存し過ぎることに対して否定的な意見も多かった。そのため、この時期はまだ国内林業の合理化に対して積極的であったと考えられる。

ところで、外材依存率の上昇は、1985年のプラザ合意を契機に急速に進行した円高が大きく影響していた。円の対ドル為替レートの推移をみると（図-2.8）、1985年前半に1ドル250円前後であったのが、翌1986年初めには1ドル200円を割り、1988年には120円台に達している。円の価値は1988年までの3年間で、実に2倍となった。この円高は外材の流入をもたらしたと同時に、外国製機械の輸入価格をも引き下げ、高性能林業機械を導入しやすい環境を形成したものと想像される。

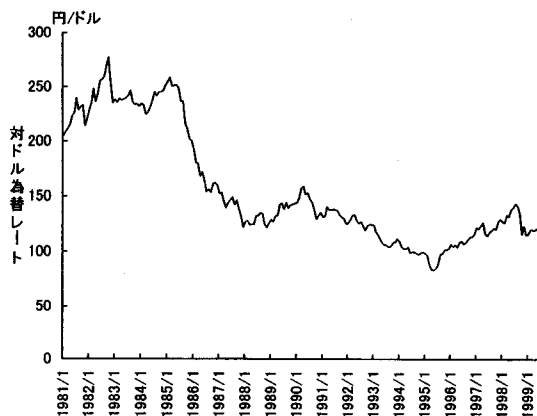


図-2.8 円の対ドル為替レートの推移（東京外国為替市場）
資料：日本銀行ホームページ
(<http://www.boj.or.jp/>)より作成。

さらに、当時の経済情勢、すなわちバブル経済による好景気の到来も、高性能林業機械の導入を後押しした。当時は消費者の購買意欲が高く、北海道の木材需要量は1988年度から1990年度までの3年間、1,300万㎡/年を上回る高い水準にあった（前出図-2.2）。また、紙パルプ産業の業種別株価指数をみると（図-2.9）、1985年には月別最高値が600台で横ばいに推移していたのが、翌1986年以降急激に上昇し、1989年12月29日にはピーク値（2,244）に達している。こうした状況が企業の投資意欲を増大させ、高性能林業機械の導入にもつながったものと考えられる。

中小規模の素材生産事業体による高性能林業機械の導入も、やはりバブル景気によって影響を受けたと考えるべきである。この時期、需要の増大により木材

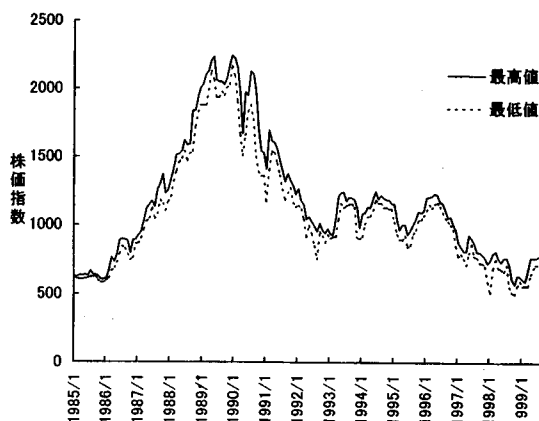


図-2.9 業種別株価指数（パルプ・紙）の推移
資料：東京証券取引所ホームページ
(<http://www.tse.or.jp/>)より作成。
注：基準日（1968年1月4日）の株価指数を100とする。

価格も上昇した。1987年度に15,840円/㎡まで落ち込んだエゾマツ・トドマツ素材価格は、翌1988年度から上昇基調に転じ、1990年度には21,600円/㎡となった（前出図-2.6）。同じ時期の労働単価はほぼ横ばいに推移しており、採算的に厳しい経営状況は幾分緩和されていた。金融機関からの融資も受けやすい環境にあり、機械の導入が可能な事業体は多かったものと推察される。

また、先に述べた外材比率の上昇は、素材生産業に強い危機感を抱かせた。木材需要が高水準にあったにもかかわらず、外材依存率の上昇によって相殺され、年間木材伐採量は600万㎡台にまで落ち込んだ（前出

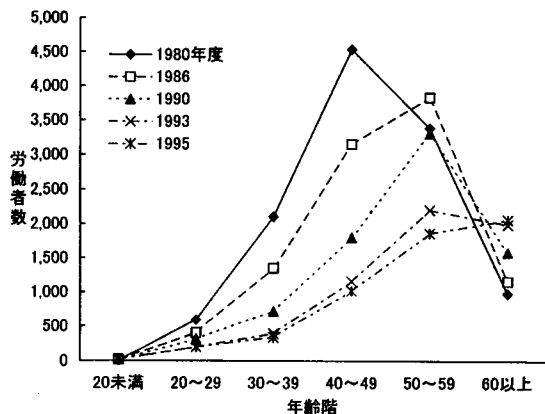


図-2.10 北海道における年齢階別林業労働者数の推移
資料：北海道林業労働実態調査報告書より作成。
注：臨時労働者を除く。

図-2.3)。外材と対抗していくためにはコスト削減が不可避であり、その有力な手段として高性能林業機械の導入が進められたと考えられる。

労働者の減少・高齢化が進行していたことも、高性能林業機械の導入を促した。1986年度に9,941人であった林業労働者が、4年後の1990年度には7,763人と20%以上も減少した。またこのうち、50歳以上の高齢労働者が63% (4,901人) に達していた (図-2.10)。生産コスト低減とともに、労働力問題への対応もまた、高性能林業機械を導入する主な動機であったと考えられる。

2.2.4 政策的条件

1980年代の終わり頃から、行政による高性能林業機械化推進の取り組みが本格化した。1987年策定の北海道新長期総合計画では、基本構想として「国産材時代をひらくたくましい林業」が掲げられ、国際競争力の高い木材産業、生産性の高い林業の構築が基本計画の目標として示された。この計画に基づき、1988年度から道費単独事業である「林内作業効率化総合対策事業」がスタートした。この事業により、林業関係者と

学識経験者からなる林内作業効率化推進委員会が設置され、北海道における高性能林業機械化の総合的な方向づけがなされた (林内作業効率化推進委員会, 1990)。

1989年には、北海道立林業試験場に機械作業科が新設された。翌1990年には同試験場に高性能林業機械が導入され、作業技術や施業方法に関して実証的な調査研究が進められた (北海道林業機械化推進協議会監修, 1995)。

高性能林業機械の導入に対する補助事業が増えるのもこの時期であった。北海道では、1987年度実施の「林業機械化普及推進事業」から始まり、1989年度には道費単独の「高性能林業機械導入促進事業」が実施されるなど、積極的な施策展開が行われた (表-2.1)。

表-2.2は、補助事業を受けて導入された高性能林業機械の台数推移を示したものである。1988年度以前の導入台数は4台と少なかったが、1989年度に12台、1990年度は22台と急速に増加した。1990年度末時点で保有されている高性能林業機械の約4割 (37台) が、何らかの補助事業を受けて導入されていた。

機械導入に対する補助事業の他にも、機械化推進に関連した施策が多数講じられた。1990～1992年度に

表-2.1 高性能林業機械の導入に対する補助事業 (1987～1990年度)

事業名	実施年度	内 容	実 施 主 体	導 入 機 械
林業機械化普及推進事業 (国補)	1987～1991	利子助成 (3.5%)	音威子府林産企業協同組合 (1987年度)	ハーベスタ (Lokomo750H, フィンランド), スキッド (Timberjack450A, カナダ)
素材供給基地整備パイロット事業 (国補)	1988	補助率 1/3	幌加内製材林産協同組合	フェラーバンチャ (Timco2520, カナダ), スキッド (Timberjack450A)
基幹作業道等整備事業 (国補)	1987～	補助率 45/100	士別森林組合 (1989年度) 豊頃地区林業協同組合 (1990年度)	フェラーバンチャ (モバークM13, アメリカ) フェラーバンチャ (TM-50, 玉置)
高性能林業機械導入促進事業 (道単)	1989	補助率 1/3	日胆林業機械利用協同組合 紋別林業機械利用協同組合	ハーベスタ (Valmet935, スウェーデン), フォワード (RMP-6WD, 及川) ハーベスタ (TOHR987S, ノルウェー), フォワード (NOKKA JOKER, フィンランド)
地域材流通加工システム高度化事業 (国補)	1989	補助率 1/3	津別地区林業協同組合	ハーベスタ (AFM60LAKO, フィンランド)
素材生産業体質強化事業 (国補)	1989～1990	利子助成 (2.65%)	音威子府林産企業協同組合 (1989年度) 興津組 (1989年度) 旭産業 (1989年度) 竹之内林業所 (1990年度) 北都物産 (1990年度)	フェラーバンチャ (Timco2520), スキッド (Timberjack480B) フェラーバンチャ (TM-50) プロセッサ (GP-30A) フェラーバンチャ (TM-50) フェラーバンチャ (TM-50)
同上	同上	補助率 1/3	釧路林業機械利用協同組合 (1990年度) 厚岸木材工業協同組合 (1990年度)	フェラーバンチャ (TM-50), スキッド (ESKO82, アメリカ), プロセッサ (GP-30A, イワフジ) ハーベスタ (TM-50), スキッド (SK-30, 玉置)
国産材産地体制整備事業	1990～1997	補助率 1/3	旭川地方素材生産事業協同組合 (1990年度)	フェラーバンチャ (TM-40), フェラーバンチャ (Valmet992/993)
林業山村活性化林業構造改善事業 (国補)	1990～	補助率 4/10	津別地区林業協同組合 (1990年度)	ハーベスタ (KAISERX4, スウェーデン), プロセッサ (GP-30A), スキッド (CAT518, 三菱)
林業構造改善事業 (国補)	(1964～)	融 資	赤坂木材 (1990年度)	プロセッサ (ヴィメックTP5-40, スウェーデン)
林業改善資金	1989～	無利子融資 (取得費用の80%)	2 事業体 (1989年度) 8 事業体 (1990年度)	

資料：北海道林業機械化推進協議会資料、北海道林務部資料、北海道林業施策概要より作成。

注) 国補=国費補助, 道単=道費単独補助

表-2.2 補助事業により導入された高性能林業機械
(1987~1990年度)

	1987	1988	1989	1990	計
計	2	2	11	22	37
(機種別)					
ハーベスタ	1		3	3	7
フォワーダ			2		2
フェラーパンチャ		1	3	8	12
スキッダ	1	1	1	3	6
プロセッサ			2	8	10
(事業種別)					
直接補助		2	6	11	19
利子助成	2		4	2	8
融資			9	9	11

資料：尾張（1995）より作成。
原資料：北海道林務部資料。

実施された「素材生産業近代化推進事業」（道費単独）では、素材生産の近代化に向けた指針について検討が行われた。また、1990年度実施の「高性能林業機械オペレータ等養成事業」では、高性能林業機械に対応できるオペレータの養成が取り組まれた。さらに1989年、北海道林業経営協議会内に林業機械化部会が設置され、機械化の一層の推進に向けた検討が2年間にわたって行われた（北海道林業機械化推進協議会監修，1995）。

2.3 安定期（1991年度～現在）

2.3.1 高性能林業機械の導入状況

1991年以降、高性能林業機械の年間増加台数は減少に転じたが、その後も普及は着実に広がっている。図-2.11は、北海道における高性能林業機械保有事業体数の推移について、素材生産事業体数、素材生産量とともに示したものである。素材生産量の減少に伴い事業体数も減少傾向にあるなかで、高性能林業機械を保有する事業体は増加を続けており、1997年度末には238事業体に達している。この値にはグラップルソーのみ保有する事業体も含まれているが、高性能林業機械の導入が採算的に難しいであろう年間事業量5,000㎡未満の事業体が全体の54%を占める（北海道水産林務部，1998）ことから、事業規模の比較的大きな事業体の間には高性能林業機械がかなりの程度浸透しているものと推察される。

ただ、1991年を境として高性能林業機械の導入形態に変化が生じた。1990年度においては、高性能林業機械保有台数が前年度に比べ46台増加したのに対し、

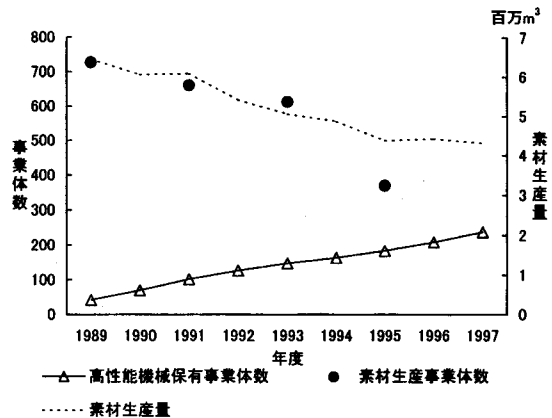


図-2.11 北海道における高性能林業機械保有事業体数の推移

資料：北海道林業統計，北海道水産林務部資料より作成。

注1) 保有される高性能林業機械にはグラップルソーを含む。

注2) 1995年度の素材生産事業体数は1989~1993年度と調査方法が異なるため、単純な比較はできない。

機械保有事業体数は28事業体の増加にとどまった（図-2.12）。これは、高性能林業機械を複数導入する事業体が多かったことを意味する。一方、1991年度から1993年度の3年間は、保有台数の増加と保有事業体数の増加がほぼ一致しており、高性能林業機械の単体導入がほとんどを占めていたと考えられる。

さらに、各年度に高性能林業機械を導入した事業体の数を全機械化、半機械化の作業システム別にみる

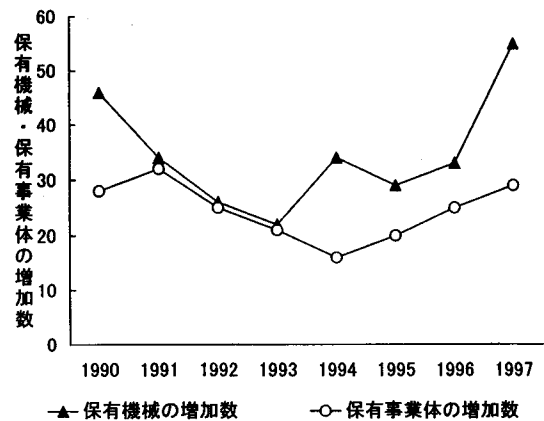


図-2.12 高性能林業機械の年間増加台数および保有事業体増加数の推移（北海道）

資料：図-2.11に同じ。

注：保有される高性能林業機械にはグラップルソーを含む。

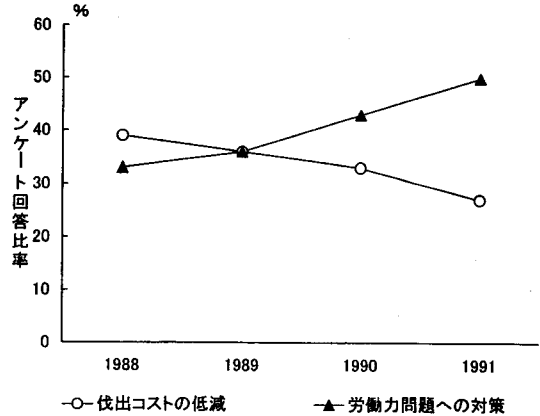
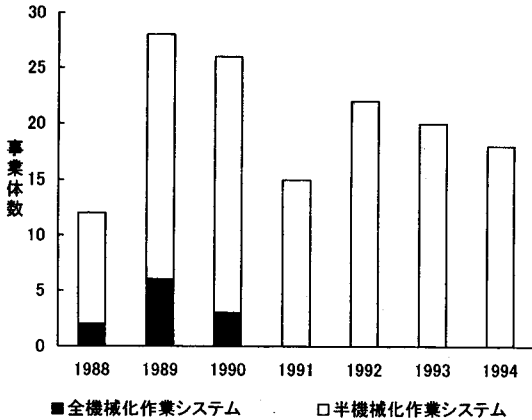


図-2.13 北海道における高性能林業機械導入事業体数の作業システム別推移
資料：嶋瀬（1997）より作成。

図-2.14 高性能林業機械の導入目的の推移
資料：図-2.13に同じ。

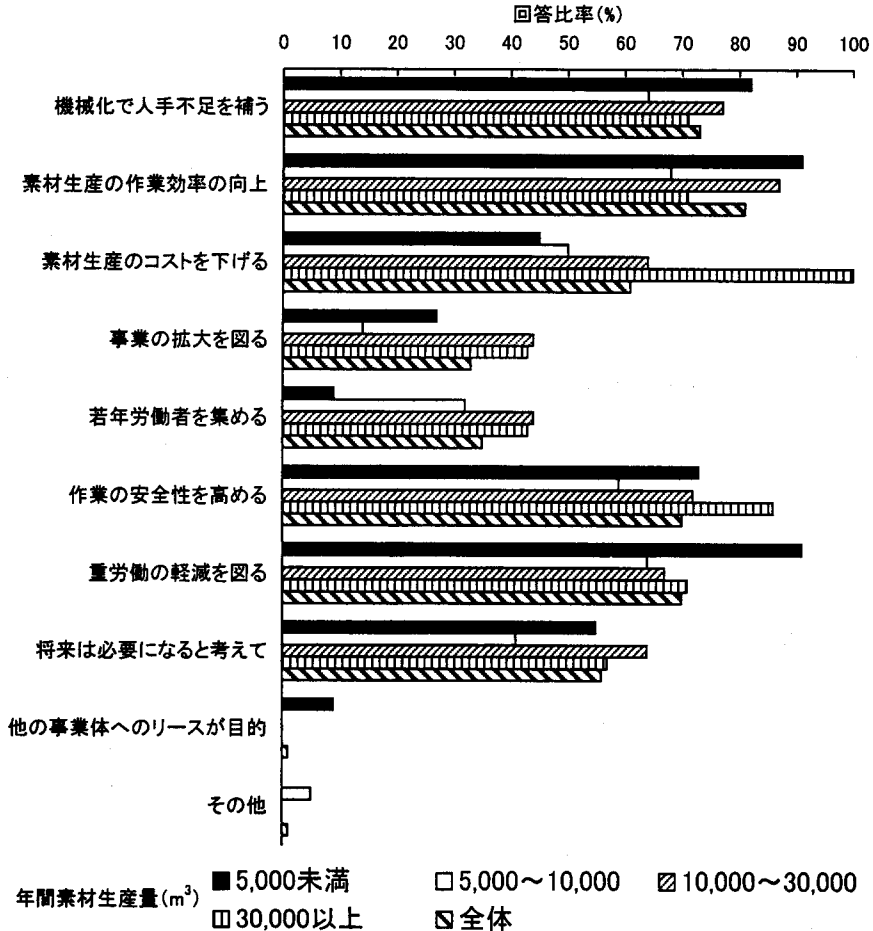


図-2.15 高性能林業機械の導入目的 (1997年度, 生産規模別)
資料：駒木（1999）より作成。

と（図-2.13），1990年度以前は全機械化作業システムを採用した事業体の一部にみられていたのに対して，1991～1994年度は全てが半機械化作業システム（一部の工程を高性能林業機械によって処理する作業システム）であった（嶋瀬ら，1997）。

先に述べたように，1991年度以降に導入された高性能林業機械は，プロセッサとハーベスタが大多数を占めている。両機種に共通するのは，土場での枝払い，玉切り作業に適用可能な点である。このため，ほとんどの事業体はプロセッサやハーベスタを単体で導入し，それを造材工程でのみ使用する半機械化作業システムを採用していると考えられる。

なお，1994年度以降は，機械保有台数の増加が保有事業体数の増加をかなり上回っている。しかしこの間，集材用の高性能林業機械（スキップおよびフォワーダ）がほとんど導入されていない。このため，事業体が採用したのは全機械化システムではなく，半機械化システムの作業セットを複数導入したものと推察される。

高性能林業機械の導入目的については，労働力不足への対応が主になりつつある。図-2.14は，高性能林業機械を保有する事業体の導入目的を，導入年度別に比較したものである（嶋瀬ら，1997）。これによれば，1988年度時点では「伐出コストの低減」を目的に導入した事業体が多かったのに対して，1990年度以降は「労働力問題への対策」を挙げた事業体の方が多くなっている。また，最近の調査結果（駒木，1999）によれば，導入の目的として「人手不足を補う」や「作業効率の向上」を挙げる回答が多かったのに対し，

「コストを下げる」としたのは，年間事業量30,000㎡以上の大規模事業体で多かったものの，全体としては前二者ほど多くはない（図-2.15）。

一方，導入された高性能林業機械の多くは，稼働率が低い状態にある。1996年度における高性能林業機械の稼働率（年間の事業日数に占める高性能林業機械の実働日数）をみると（図-2.16），6割以上の機械が稼働率70%以下となっており，稼働率50%以下の機械も36%を占める。機種別では，フェラーバンチャの稼働率が最も低く，89%の機械が稼働率7割以下となっている（駒木，1999）。

2.3.2 技術的条件

高性能林業機械の普及とともに，利用上の様々な問題点が浮上している。こうした認識の広がりには，高性能林業機械の導入を躊躇させる要因の一つになったと考えられる。

1997年度に行われたアンケート調査の結果によれば（駒木，1999），高性能林業機械導入上の問題点として「事業量の確保が困難」を挙げた事業体が58%で最も多い（図-2.17）。その他にも，「稼働可能な作業現場の確保が困難」（51%），「伐採ロットが小さい」（38%），「機械の購入資金がない」（28%），「作業現場までの移動経費がかかる」（27%），「機械補修に時間と経費がかかる」（26%）といった回答結果になっている。

上で示したような問題が生じる原因の一つは，高性能林業機械の技術的制約，すなわち機械を適用できる事業が限定されてしまうことにある。図-2.18は，高性能林業機械を適用可能な事業の比率について示したものである（北海道造林協会，1997）。天然林生産事業については，択伐，皆伐とも全体の1割程度にしかな適用することができない。人工林生産事業については間伐が約6割，皆伐では約8割と比率は高いものの，全ての事業に適用できるわけではないことがわかる。

導入機種がプロセッサとハーベスタに集中するようになったのも，両機種がより多くの事業に適用可能であるためと考えられる。高性能林業機械のうち，フェラーバンチャやスキップ，フォワーダについては，林内での作業に用いられる。しかし，事業地が急傾斜である場合，これらの機械は使用できない。一方，プロセッサは土場での枝払い，玉切り作業に用いられるものであり，地形の制約を受けることはほとんどない。ハーベスタも，土場でプロセッサとして用いることが

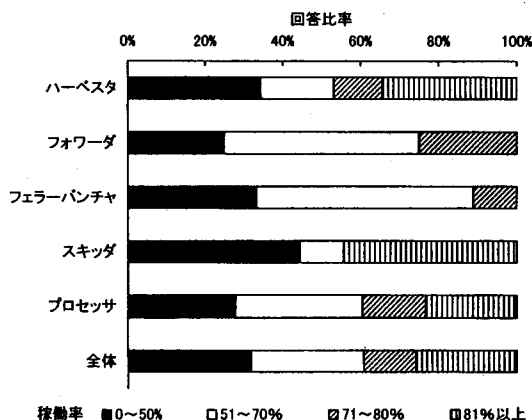


図-2.16 高性能林業機械の稼働率（1997年度）
 資料：図-2.15に同じ。
 注）稼働率＝高性能機械の実働日数／年間事業日数。

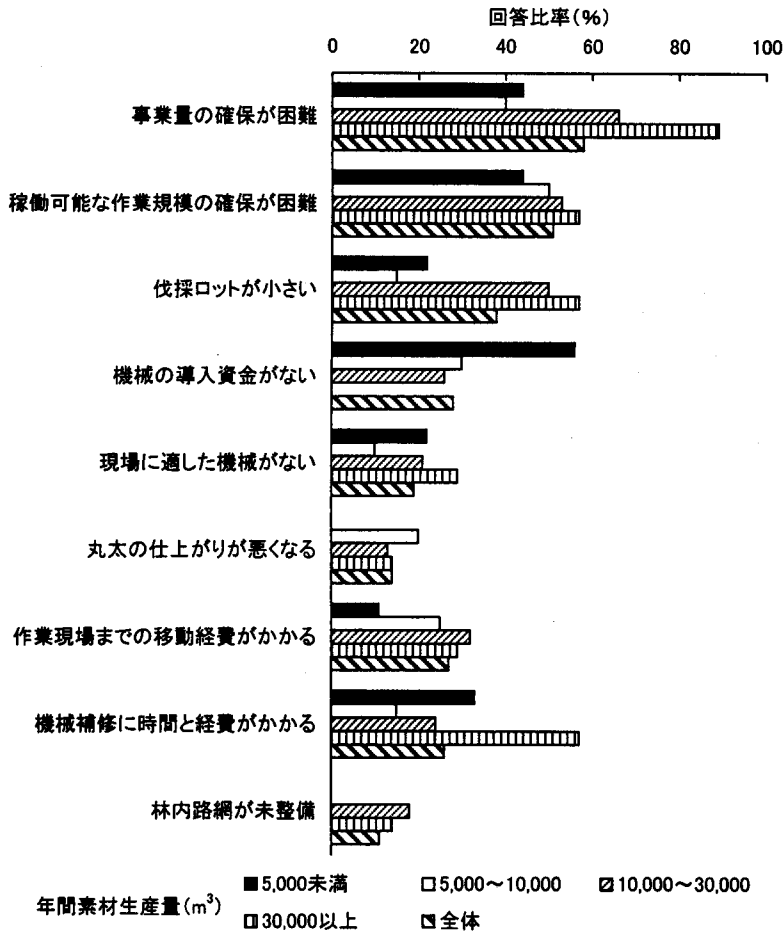


図-2.17 高性能林業機械導入上の問題点 (1997年度)
資料: 図-2.15に同じ。

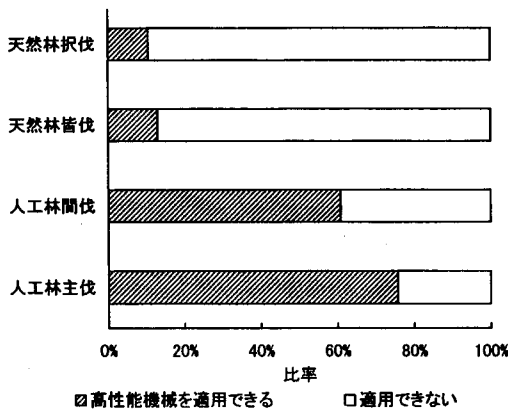


図-2.18 高性能林業機械を適用可能な事業の比率
資料: 北海道造林協会 (1997) より作成。
注) アンケート調査に回答があった205事業体の集計値。

できる。さらに、枝払い工程は素材生産作業のなかで最も作業時間を要する部分であり、これを省力化できることは事業者にとって大きなメリットとなる。素材生産事業者は一般に、高性能林業機械作業に適した事業地だけを選んで事業を行うことは許されないため、汎用性が高い機種のみを導入可能であると推察される。

一方、天然林においては、高性能林業機械による作業が森林環境に悪影響を及ぼす危険性も指摘されている。大里らは北海道の天然林を対象に、フェラーバンチャ (Timbco2520) とグラップルスキッド (Timberjack480B) による材積伐採率54%の択伐作業と全木集材作業が、林地、残存木、天然更新、植生などに与える影響について継続調査を行った。その結果、次の諸点が明らかとなっている (大里ら, 1996) ; ① 残存木本数の54%に何らかの損傷が生じ、地表面積の

56%が攪乱された。②小径木は致命的損傷となる確率が高く、中・大径木では部分的損傷にとどまることが多い。③伐採木からの距離が近いほど損傷を受ける確率が高い。④伐採4年後に健全な状態にある樹木は伐採前の蓄積の14%に過ぎず、30%は枯死したか衰弱した状態にある。⑤伐出に伴う地表攪乱は、ダケカンバの更新には効果が期待されるが、針葉樹の後継木確保のためには不十分である。

2.3.3 経営的条件

1991年頃から、紙パルプ大手企業が高性能林業機械化の推進に対して徐々に消極的になっていく。この原因は、バブル経済の崩壊にあるものと考えられる。1990年秋以降、紙パルプ産業の株価は一気に暴落し、株価指数は1990年9月に月別最高値が2,000を割った（前出図-2.9）。翌1991年1月には1410.59、1993年1月には938.44と、わずか2年半でピーク時の半分以下になった。

また、景気の後退は消費を冷え込ませ、木材需要も大きく減少した。1991年度には1,300万 m^3 /年を割り、1993年度には1,120万 m^3 /年となった（前出図-2.2）。一方で、円高はその後も進行した（前出図-2.8）。1990年12月には1ドル135円であったのが、125円（1991年12月）、119円（1992年12月）、111円（1993年12月）と次第に上昇し、1994年6月にはついに100円を下回る値をつけた。

経営環境の悪化と円高のさらなる進行は、紙パルプ企業の目を一層海外へと向けさせた。各社は海外植林にも力を入れるなどして、海外からの原料安定確保を目指した。その結果、木材供給に占める外材依存率はさらに上昇し、1995年度には6割を超えるまでになった（前出図-2.2）。国内においては、製材背板チップや古紙の利用率を高める一方で、高性能林業機械化に関する取り組みは投資効率（山口ら、1988）の面から縮小させる傾向にある。

素材生産業にとっても、不況は経営に大きな打撃を与え、高性能林業機械への積極的な投資を難しくしている。需要不振と外材輸入の増加により林業生産活動は停滞し、年間木材伐採量はさらに減少を続けた。1995年度には500万 m^3 を割り（485.9万 m^3 ）、1997年度に446.8万 m^3 となった（前出図-2.3）。また、それまで上向きに推移していた素材価格も、1991年度以後は下落ないしは横ばいとなった（前出図-2.6）。一方で労働賃金は漸増傾向で推移した結果、素材生産業の事業採

算性は悪化しているものと推察される。

一方で、林業労働力の減少・高齢化はさらに進行しており、高性能林業機械の導入による生産性向上が不可避となっている。1993年度における北海道の林業労働者数は5,990人で、1990年度からさらに20%以上減少した。さらに、50歳以上の高齢労働者が7割を超えた（前出図-2.10）。1995年度の林業労働者数は5,521人であり、この年ついに60歳以上の労働者数が年齢階別で最多となった。

2.3.4 政策的条件

機械化の気運が全国的にも高まりを見せた1991年、森林法の一部改正が行われた。このなかで、全国森林計画に「森林施業の合理化に関する事項」、地域森林計画に「森林施業の共同化その他森林施業の合理化に関する事項」、市町村森林整備計画に「機械の導入の促進に関する事項」が新たに追加された。これを受けて同年9月、「高性能林業機械化促進基本方針」が農林水産大臣により策定された。これによって、高性能林業機械化の推進は林業政策における大きな柱の一つとしてその裏づけがなされた（林業機械化推進研究会編、1993）。

一方、北海道独自の基本方針策定についても検討が行われた。先に述べた北海道林業経営協議会・林業機械化部会からの提言を受け、1992年6月に北海道林業機械化推進協議会が設置された。この協議会において、林業機械の開発改良、林業機械作業マニュアルの作成などが3年間にわたって議論された。

同じく1992年度には、北海道林業機械化推進協議会のなかに機械化方針策定部会と林業機械開発・改良部会の2つの部会が設置され、北海道の機械化の進むべき基本的な方向が検討された。さらに1993年には、北海道の高性能林業機械化の基本的な指針・目標となる「北海道高性能林業機械化基本方針」が策定された（北海道林務部、1993）。

この方針には、2004年を展望した高性能林業機械作業システムの目標労働生産性とそのシェアが示されている。これによれば、高性能林業機械型（全機械化作業システム）が13.1 m^3 /人・日でシェア40%、準高性能林業機械型（半機械化作業システム）が8.8 m^3 /人・日でシェア50%、改良在来型が5.0 m^3 /人・日でシェア10%となっている。方針策定時の労働生産性4.7 m^3 に対して、2004年度までに全体で9.3 m^3 /人・日とすることが目標とされている。

この基本方針をふまえ、北海道ではこれまで多数の機械化推進関連施策が講じられてきた(表-2.3)。施策内容は主に、①機械導入に対する補助、②オペレータの養成、③各種協議会等の開催などが挙げられる。なかでも、補助事業は高性能林業機械の普及に大きく影響を及ぼしたと考えられる。直接補助や無利子融資など、何らかの補助を受けて導入された高性能林業機械は、1998年度末時点で全体の約4割、140台(注2)となっている。

さらに近年では、高性能林業機械の効率的利用を進めるため、機械のリース・レンタル事業の推進に向けた取り組みが行われている。1996年に施行された林野三法の一つ、「林業労働力の確保の促進に関する法律」を受けて設立された北海道森林整備担い手支援センターは、高性能林業機械のリース・レンタル制度導入に向け、素材生産事業体の意向調査を実施するなど検討を進めてきた。その結果、北海道ではセンターが自ら高性能林業機械を保有して直接リース・レンタルを行うのではなく、遊休機械などの情報収集・発信を行うことで、既に導入されている機械を有効に活用できるように調整していくという方向性が示されている(北海道造林協会、1997)。

3. 小括

北海道の高性能林業機械化は、一部の素材生産事業体が外国製機械を輸入することから始まった。1988年頃からは紙パルプ企業など大規模事業体が、コスト低減を主な目的に全機械化作業システムの導入を進めた。さらに国産機械が登場した1989年以降は、半機械化作業システムが中小規模の事業体を中心に普及した。しかし1991年以降、全機械化作業システムの導入はみられなくなり、半機械化作業システムのみが採用されるようになった。これと同時に、労働力問題対策として高性能林業機械を導入する事業体が増えていった。

黎明期においては、欧米における機械化の進展が高性能林業機械の導入を可能にした。しかし、素材生産事業体の間で、高性能林業機械に対する認知はまだ十分進んでいなかった(技術的条件)。事業対象の質的变化、すなわち人工林間伐事業の増大や、素材価格の低迷と労働賃金の高騰に伴う採算性の悪化は、素材生産事業体に労働生産性を向上させる必然性を付与した(経営的条件)。一方、行政による機械化推進の取り組みは、この当時まだ本格化していない(政策的条件)。

拡大期においては、欧米の林業視察や機械展示会の開催が、高性能林業機械に対する認知を急速に広げた。さらに、安価な国産機械の登場が高性能林業機械

表-2.3 北海道における高性能林業機械化関連施策(1991~1997年度)

事業名	実施年度						
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
林業機械化普及推進事業	○						
林内作業効率化対策事業	○						
素材生産近代化推進事業	○						
高性能林業機械オペレータ養成等推進事業	○	○	○	○	○		
林業事業体体質強化対策事業	○	○	○	○	○	○	
基幹作業道等整備事業	○	○	○	○	○	○	
林業構造改善対策事業	○	○	○	○	○	○	○
高性能林業機械化促進対策事業		○	○	○	○		
素材生産経営近代化事業			○	○	○		
地域林業担い手確保対策事業			○	○		○	
高性能林業機械システムアドバイザー養成事業					○	○	
国産材産地体制整備事業					○		
林業機械技術者確保事業					○	○	
林業機械作業担い手啓発事業					○	○	
森林整備対策事業(高能率機械導入事業)					○	○	
新作業システムオペレータ育成事業						○	○
新作業システムオペレータ活用事業						○	○
木材流通合理化特別対策事業						○	○
林業機械作業担い手確保事業							○
北海道林業体力アップ事業							○
流域総合間伐対策事業(高能率機械導入事業)							○
高性能林業機械リース・レンタル制度導入検討調査事業							○

資料：北海道林業施策概要より作成。

の普及に拍車をかけた（技術的条件）。高性能林業機械化の推進においてリーダーシップを発揮したのは、紙パルプ産業の大手企業であった。彼らにそうした行動をとらせたのは、外材への過度の依存に対する不安感とともに、当時の経済情勢、円高の進行とパブル経済による好景気であった。中小の素材生産事業者もまた、外材依存率の上昇や林業労働力の減少・高齢化に対する危機感から、高性能林業機械の導入を進めた（経営的条件）。このとき、行政は補助事業をはじめとする機械化推進施策を積極的に講じることで、高性能林業機械の導入を支援した（政策的条件）。

安定期においては、高性能林業機械の問題点に対する認識が事業者の間に広まっていった。その結果、事業者は高性能林業機械導入の是非および機種選択について慎重に考えるようになった（技術的条件）。パブル経済の崩壊に伴う景気の後退と円高のさらなる進行は、紙パルプ企業に原料の海外依存を一層強めさせ、結果として高性能林業機械化に対する関心を急速に失わせることにつながった。素材生産業においては、不況による木材需要の減少と素材価格の低迷によって採算性が悪化し、高性能林業機械への投資が経営的に厳しいものとなった。一方で、林業労働力の減少・高齢化がさらに深刻化し、高性能林業機械を導入せざるを得ない状況に追い込まれた（経営的条件）。行政は高性能林業機械化推進に向けた基本方針を打ち出し、補助事業やオペレータ養成事業など多数の推進施策を講じた。これらが結果的には、高性能林業機械の普及を下支えするかたちとなった（政策的条件）。

高性能林業機械の普及に対して、各条件がいかなる状態にあったかを示したのが表-2.4である。拡大期の3年間は、全ての条件、なかでも技術的と経営的の両条件が、高性能林業機械を導入するのに良好であったと考えられる。一方、黎明期においては、政策的条件がまだ十分高性能林業機械化に対応していなかった。また、安定期においては技術的条件が普及を停滞させたと考えられる。各時期における技術的、経営的、政策的条件の状態により、高性能林業機械化の展開は大きく左右されることが、以上の分析からうかがえる。

注1) 高性能林業機械を導入して1年以上経過した35の事業者を対象に実施され、33事業者（回収率94%）から回答を得ている。

注2) 北海道水産林務部調べによる。

表-2.4 高性能林業機械の普及に対する各条件の影響度

時 期 区 分	技術的条件	経営的条件	政策的条件
黎明期（1982～1987年度）	+	+	0
拡大期（1988～1990年度）	++	++	+
安定期（1991年度～現在）	0	+	++

注) ++:非常に強い, +:やや強い, 0:影響なし。

Ⅲ 成長曲線モデルによる高性能林業機械の普及予測

1. 高性能林業機械の普及過程と成長曲線

Ⅱ章で述べたように、高性能林業機械は最初の導入後しばらくは普及が進まなかった。1980年代末以降、高性能林業機械に対する認知の広がりとともに、当時の経営的・政策的条件によって導入台数が急増した。現時点では、高性能林業機械が既に多くの素材生産事業者によって保有されている（Ⅱ章図-2.11）。このことは、新たに高性能林業機械が導入される余地が小さいことを意味する。高性能林業機械台数の増加傾向が今後も維持されるとは考えにくく、徐々に収束に向かうことが想定される。

以上のような高性能林業機械の普及過程は、時間を横軸としたS字型の曲線（成長曲線）と同様の推移をたどると考えられる。成長曲線はもともと、生物の成長現象や人口の増加過程に対して用いられたものであるが、新技術の普及過程にもよく適合することが知られており、需要予測などに利用されている（OR事典編集委員会編、1975）。また、Samsetも「不連続進化の法則」において、森林作業技術の発展過程（労働生産性の上昇）をS字型曲線により表している（加藤、1967）。

Rogers（1981）は、イノベーションの採用時期に大きな個人差がある点をふまえて、「ある個人が、その社会システムにおける他のメンバーと比較して、新アイデアを採用する速さの程度」を個人の革新度と定義し、採用時期によって採用者を分類する「技術革新の普及理論」を提唱している。図-3.1は、この理論に基づく採用者のカテゴリー区分を示したものである。新技術の導入段階では、革新者と呼ばれる少数の人々のみがそれを採用する。その新技術が満足のいくものであれば、早期採用者と呼ばれる人々が採用を開始する。そして市場での認知と価格低下が進むにつれて、前期多数採用者と呼ばれる多数の人々が採用を開始し

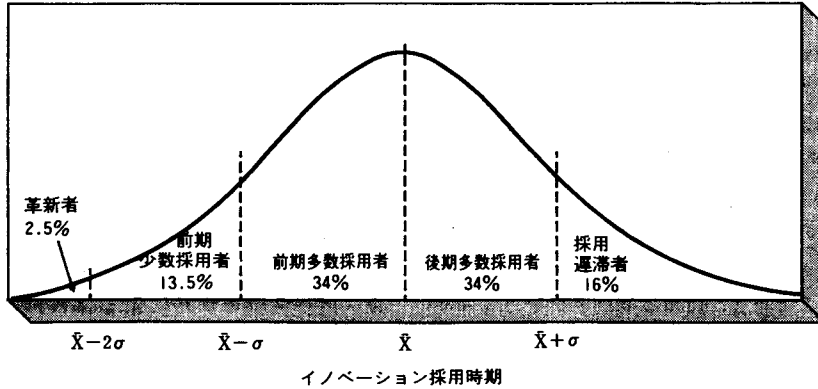


図-3.1 革新度をもとにした採用者カテゴリー
資料：Rogers (1981)

ていく。しかし、潜在的な新規購入者の数が減少するのに伴い、採用者の数も収束していく。

このような採用者の分布は一般に、時間の経過を横軸としたつり鐘型の曲線になることが見出されている。さらにこの分布を累積的に示せば、S字型の成長曲線となる。こうした採用者分布の傾向は、一般には経験的に妥当性を持つものとして説明されており、多くの技術的發展や耐久消費財の普及過程に成長曲線がよく適合することが知られている (Makridakis et al., 1995)。また、採用者分布の正規性は、「普及効果」によって理論的にも説明されている。普及効果とは、イノベーションの採用 (不採用)、またはイノベーションに関する知識率が増加した結果、社会システム内の

個人の採用 (不採用) に対する影響が累積的に増加する度合いのことである。イノベーションを最初に採用した人が、同じ社会システムに属する他の2人にそれを伝達する。さらにその2人が、それぞれ他の2人にそのイノベーションを伝達する。このとき、採用者の分布は2項展開をたどる分布となり、この関数はつり鐘型曲線 (正規曲線) を描く。

2. 資料と方法

2.1 予測に用いた資料

予測のために使用した資料は、1988～1997年度におけるわが国の高性能林業機械保有台数である。各年度末における台数の推移を図-3.2に示す。高性能林業機械の保有台数は、1988年度末にはわずか23台であったのが、7年後の1995年度末には1千台を超え (1,243台)、1997年度末時点で1,727台と急増している。年間増加台数も導入初期から直線的な伸びを示し、1993年度には200台/年を上回るまでになった。しかしそれ以降、増加台数はほぼ横ばいに推移している。

図-3.3は、機械台数の推移を機種別、地域別、保有形態別にそれぞれ示したものである。機種別では、特にプロセッサの普及が顕著である。1997年度末には672台が保有されており、高性能林業機械全体の39%を占めている。次いで多いのが、フォワーダ (330台、19%) とハーベスタ (326台、19%) の2機種である。なかでもハーベスタは、1993年度以降急速に普及している。一方フェラーバンチャは、1995年度末の51台をピークとして、保有台数は減少傾向にある。

地域別では、地形が比較的緩やかな北海道から普及が始まっている。1990年度末における保有台数167

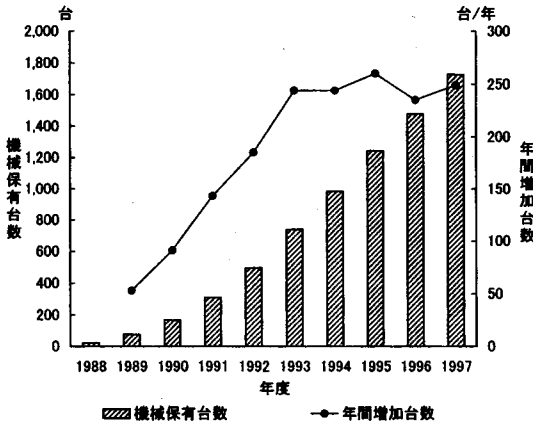


図-3.2 高性能林業機械保有台数の推移 (1988～1997年度)
資料) 林野庁調べによる。

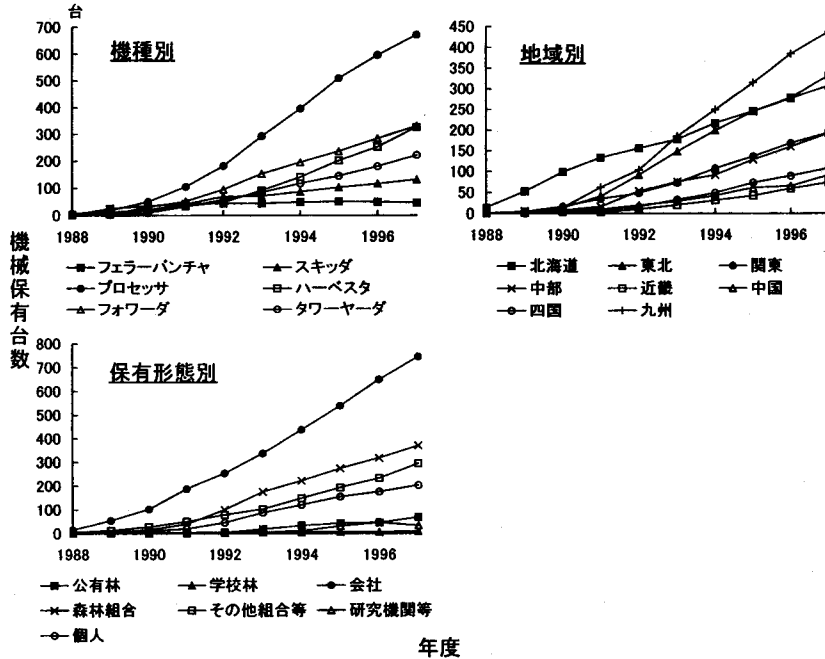


図-3.3 高性能林業機械保有台数の機種別・地域別・保有形態別推移
資料) 図-3.2に同じ。

台のうち、およそ6割(99台)が北海道であった。その後、他地域でも普及が進み、1997年度には北海道のシェアがおおよそ2割(331台)にまで低下している。現時点で保有台数が最も多いのは九州である。1991年の台風被害を契機に普及が進み、1993年度末には北海道の保有台数を上回った。1997年度末の保有台数は約4分の1の437台となっている。また、東北の保有台数も306台と比較的多い。

保有形態別では、会社が一貫して多数を占めている。1997年度末の保有台数は746台で、全体の43%となっている。次いで多いのが森林組合の370台(21%)である。また近年は、その他組合等(林業労働力確保支援センターや事業協同組合など)の保有比率が増加する傾向にあり、1997年度末には295台(17%)となっている。

2.2 成長曲線モデル

成長曲線にもいくつかの種類が存在する。本論文では、技術予測によく利用されている成長曲線である2つの曲線式(Logistic曲線とGompertz曲線)を取り上げる。Porter et al. (1991)によれば、Logistic曲線(同文献ではFisher-Pry曲線となっているが、曲線式は同様である)とGompertz曲線が

“Trend analysis in technology forecasting”の“Two key growth models”と考えられている。

Logistic曲線とGompertz曲線による予測モデルを、それぞれ(1)式と(2)式に示す。両モデルとも時間 t (年)を独立変数とし、機械の保有台数 y (台)を従属変数とした。 a, b, c はパラメータ、 t_0 は保有台数データの開始年を表す。両曲線とも、パラメータ a は保有台数の飽和水準を表す。また b と c は、それぞれ曲線の位置および形状を決定するパラメータである(Porter et al., 1991)。Logistic曲線モデルは保有台数が大きくなるほどその増加率が小さくなることを、Gompertz曲線モデルは保有台数の増加率が時間とともに幾何級数的に減少していくことをそれぞれ想定している。

$$y = a / (1 + b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0))) \quad (1)$$

$$y = a \cdot \exp(-b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0))) \quad (2)$$

両曲線モデルへのあてはめには非線形回帰分析(Bates et al., 1988)を用いた。パラメータの推定は、最小2乗法(Gauss-Newton法)と最尤法の2種類の方法に拠った。最小2乗法では推定値の信頼区間を、最尤法ではモデルの最大対数尤度を、それぞれ算出し

た。

最小2乗法によるパラメータ推定では、残差平方和およびパラメータ推定値の収束基準をともに 10^{-8} とした。また、パラメータ a の初期値は、保有台数の実績値のうち最大である1997年度を上回る値に設定した。また b 、 c の初期値については、 a の初期値と t_0 、 t_{0+1} 年度における保有台数実績を各式に代入することにより推定した (SPSS Inc., 1993)。また、最尤法によるパラメータ推定では、パラメータの最小2乗推定値を初期値とした (縄田, 1997)。

モデル選択の規準にはAIC (Akaike Information Criterion, 赤池の情報量規準) を用いた (Akaike, 1973; 坂元ら, 1983)。AIC は以下の式で表される。

$$AIC = -2 \cdot \log L + 2 \cdot k \quad (3)$$

$\log L$: 最大対数尤度 k : 自由パラメータ数

AIC が最小となるモデル (最小 AIC 推定値, MAICE) を最適モデルと判断する。AIC は、モデルの真の確率分布に対する近似の良さを測るための規準である Kullback-Leibler 情報量によって説明できる。AIC は自己回帰モデルの次数決定に有効であることが知られているほか、統計モデル一般の評価選択にも利用が可能である (尾崎ら, 1998)。

なお本論文では、林木成長論で扱われている Mitscherlich 曲線 ((4)式) および Richards 成長関数 ((5)式) の適用可能性についても事前に検討を行った。

$$y = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0))) \quad (4)$$

$$y = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0)))^{1/(1-m)} \quad (5)$$

※ a 、 b 、 c 、 m はそれぞれ、曲線式のパラメータを表す。

まず、変曲点のない Mitscherlich 曲線は、技術革新の普及理論における初期の低い普及速度を表現できないため、検討から除外した。また、Richards 成長関数については、全国の高性能林業機械保有台数データにより非線形回帰分析を行ったところ、保有台数の飽和水準であるパラメータ a が3,089 (Gompertz 曲線2,900), AICが69.51 (同69.26) という結果であった。パラメータが4つと多いことで、AICはGompertz 曲線よりもわずかに大きくなった。また、データの数が少ないため、初期値により解の収束が不安定になっ

た (Logistic 曲線と Gompertz 曲線については、初期値を多少動かしても安定した解が得られている)。以上の点を考慮し、本論文では Richards 成長関数を検討から除外した。

なお、分析を行うにあたり、北海道大学大型計算機センターの汎用サーバ Sun Ultra Enterprise 4000 (Solaris 2.5.1) および統計解析ソフトウェア SAS Release 6.12 for Unix を使用した。

3. 予測結果

3.1 総保有台数

3.1.1 Logistic 曲線モデル

(1)式により回帰分析を行った結果、以下の曲線式が得られた。最小2乗法と最尤法の両結果において、パラメータの推定値は一致した。

$$y = 2032.52 / (1 + 30.8965 \cdot \exp(-0.5612 \cdot (t - 1988)))$$

(6)

$$r^2 = 0.9980$$

(6)式より、保有台数の飽和水準 (パラメータ a) は約2,000台と推定された。最小2乗法による飽和水準の漸近95%信頼区間は、約1,820~2,250台であった。1997年度末以降の保有台数増加は、100~500台にとどまると予測されている。回帰式の決定係数 r^2 が大きき、実績値の傾向をよく表しているといえる。図-3.4は(6)式による保有台数の予測値について、今後約10年間 (2008年度まで) の推移を示したものである。本モデルによれば、2000年度末に保有台数は1,960台

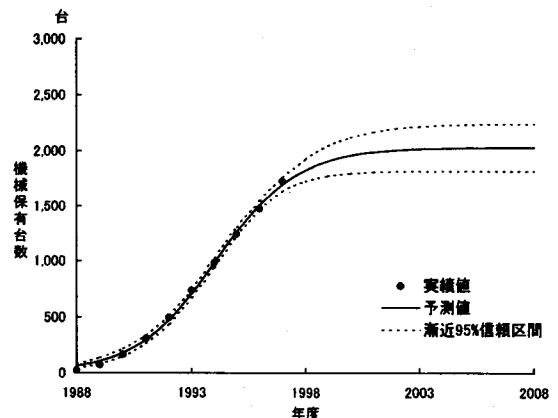


図-3.4 Logistic曲線モデルによる高性能林業機械保有台数の推移予測 (全国)

(1,800~2,120台)となり、2000年代半ばにはほぼ飽和水準に達する。21世紀に入ると、保有台数の伸びは頭打ちとなることが予測されている。

3.1.2 Gompertz 曲線モデル

(2)式による回帰分析の結果、以下の曲線式が得られた。最小2乗法、最尤法ともにパラメータの推定値は一致した。

$$y = 2900.03 \cdot \exp(-4.6369 \cdot \exp(-0.2426 \cdot (t-1988)))$$

(7)

$$r^2 = 0.9999$$

(7)式より、保有台数の飽和水準は約2,900台（漸近95%信頼区間：約2,750~3,050台）と推定された。これは、Logistic曲線モデルによる予測値の約1.4倍に相当する。1997年度末以降の台数増加は1,000~

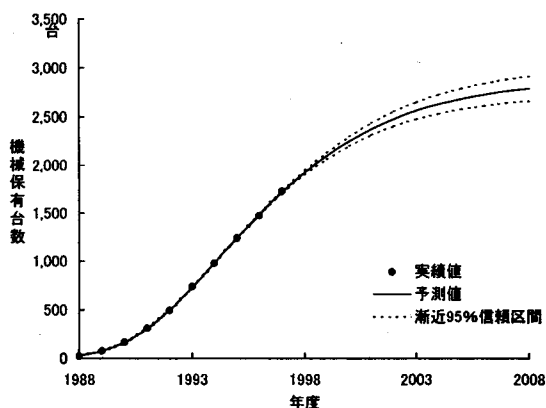


図-3.5 Gompertz曲線モデルによる高性能林業機械保有台数の推移予測（全国）

1,300台と予測されている。本モデルも回帰式の決定係数がきわめて大きく、実績値の傾向をよく表している。図-3.5は(7)式により予測された保有台数の推移を示したものである。本モデルによれば、2000年度末の保有台数は2,250台（2,200~2,300台）、2008年度末には2,800台（2,670~2,920台）となる。Logistic曲線モデルとは異なり、21世紀に入っても保有台数は緩やかに増加を続けると予測されている。

3.1.3 AICによるモデル選択

パラメータの最尤推定の結果、Logistic曲線モデル((6)式)の最大対数尤度は-46.74であった。この値と自由パラメータ数(k=3)を(3)式に代入することにより、(6)式のAICは99.49と計算される。一方、Gompertz曲線モデル((7)式)の最大対数尤度は-31.63、AICは69.26である。従って、MAICEであるGompertz曲線モデルが、より適合度の高いモデルとして選択される。

3.2 機種別台数

6つの機種のうち、保有台数が減少傾向にあるフェラーバンチャについては既に飽和水準に達したと考え、残りの5機種について予測を行う。表-3.1は、両曲線モデルによる各機種のパラメータ推定値とAICを示したものである。パラメータ推定値は、最小2乗法と最尤法とで一致している。AICの値は、Logistic曲線モデルが64.4~76.1であるのに対して、Gompertz曲線モデルは55.7~64.7となっており、全ての機種においてGompertz曲線モデルがMAICEとなっている。

図-3.6は、Gompertz曲線モデルによる保有台数の推移予測をそれぞれ示したものである。いずれの

表-3.1 両曲線モデルのパラメータ推定値とAIC（機種別）

機種	t ₀	Logistic曲線モデル				Gompertz曲線モデル			
		パラメータ推定値			AIC	パラメータ推定値			AIC
		a	b	c		a	b	c	
スキッド	1988	139.83(109.69-169.97)	12.07	0.52	69.06	165.75(115.73-215.78)	3.21	0.28	64.73
プロセッサ	1988	742.19(696.10-788.28)	43.89	0.66	76.09	948.67(889.95-1007.40)	5.60	0.31	61.18
ハーベスタ	1988	460.81(379.12-542.50)	71.43	0.57	64.42	1034.75(469.41-1600.09)	6.05	0.18	63.68
フォワーダ	1989	368.02(307.53-428.51)	18.42	0.60	70.19	470.94(380.36-561.51)	3.80	0.29	60.54
タワーヤーダ	1989	274.31(199.37-349.24)	22.55	0.55	64.46	404.97(253.84-556.10)	4.10	0.24	55.72

注：パラメータaにおける括弧内の数値は、最小2乗法により推定された漸近95%信頼区間を表す。

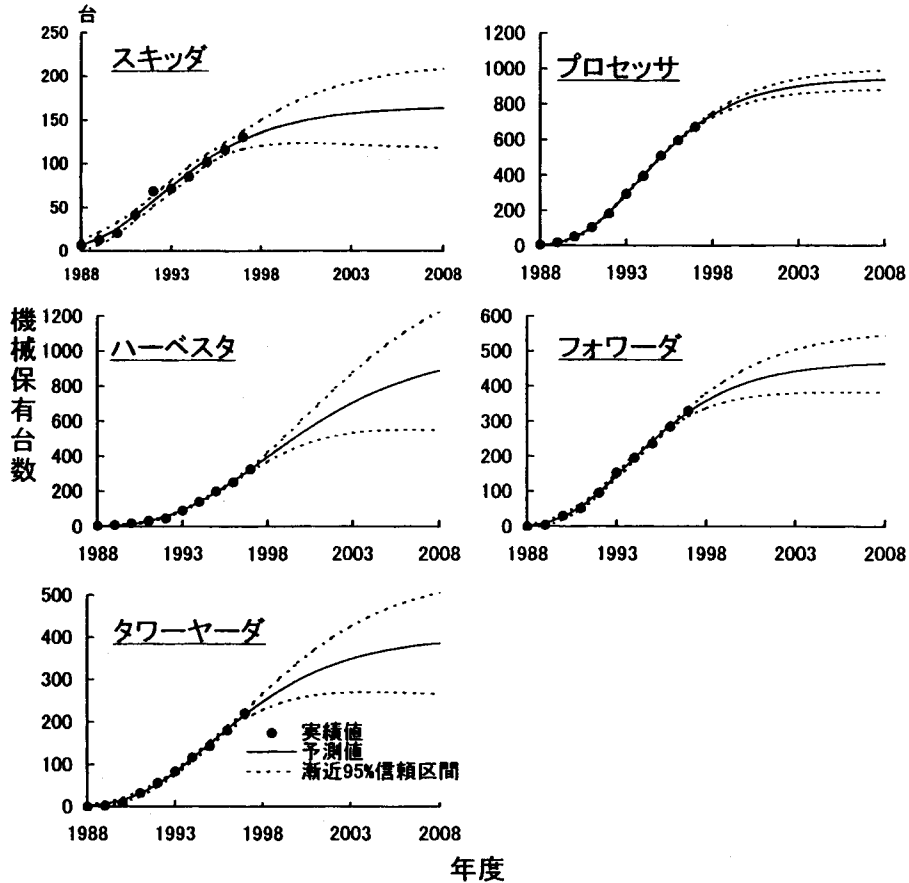


図-3.6 Gompertz曲線モデルによる機種別高性能林業機械台数の推移予測

機種とも、予測値は実績値の傾向によく適合している。他の機種が2000年代後半にはほぼ飽和水準に達するなかで、ハーベスタだけはさらに増加を続けると予測されている。ハーベスタ保有台数の飽和水準は約1,030台であり、プロセッサの約950台よりも大きい。ハーベスタの保有台数がプロセッサを上回るのは2010年代初めとなっている。ただし、ハーベスタにおける飽和水準の漸近95%信頼区間(470~1,600台)は、他機種に比べて幅が大きく、将来の保有台数推移について不確実性の高いことが示されている。また、タワーヤーダについても、さらに200台程度(30~340台)の増加が見込まれている。一方、スキッダやフォワーダの保有台数は、今後大きな伸びが期待できないと予測されている。

3.3 地域別台数

8地域のうち、「関東・中部」と「近畿・四国・

中国」については、地域ごとの保有台数が少なく、台数推移の傾向が類似していることから、保有台数の合計により予測を行った。表-3.2は、両曲線モデルによるパラメータの推定値およびAICを地域ごとに示したものである。パラメータ推定値は、最小2乗法と最尤法とで一致している。AICの値は、Logistic曲線モデルが64.2~88.2であるのに対して、Gompertz曲線モデルは41.2~84.5となっており、全ての機種においてGompertz曲線モデルがMAICEとなっている。

図-3.7は、Gompertz曲線モデルによる保有台数の推移予測をそれぞれ示したものである。北海道の飽和水準は約500台(210~800台)であり、保有台数の伸びは緩やかに収束に向かうとの予測結果となっている。「関東・中部」と「近畿・中国・四国」については、今後さらに保有台数が増加すると予測されており、飽和水準はそれぞれ690台(590~800台)、560台(390~720台)となっている。一方、東北(飽和水準

表-3.2 両曲線モデルのパラメータ推定値とAIC（地域別）

地 域	t ₀	Logistic曲線モデル			AIC	Gompertz曲線モデル			AIC
		パラメータ推定値				パラメータ推定値			
		a	b	c		a	b	c	
北海道	1988	399.41(238.76-560.05)	7.89	0.38	88.16	504.93(212.13-797.72)	2.62	0.19	84.45
東北	1988	314.08(288.98-339.18)	28.37	0.78	64.73	357.47(344.06-370.87)	4.96	0.43	41.20
関東・中部	1988	465.21(401.63-528.79)	42.55	0.58	72.48	690.97(585.96-795.98)	5.26	0.24	57.32
近畿・中国・四国	1988	337.88(287.08-388.68)	76.48	0.63	64.16	558.08(391.23-724.93)	6.45	0.24	58.41
九州	1988	479.88(423.59-536.18)	56.83	0.69	79.88	605.38(534.19-676.57)	6.43	0.33	65.55

注：表-3.1に同じ。

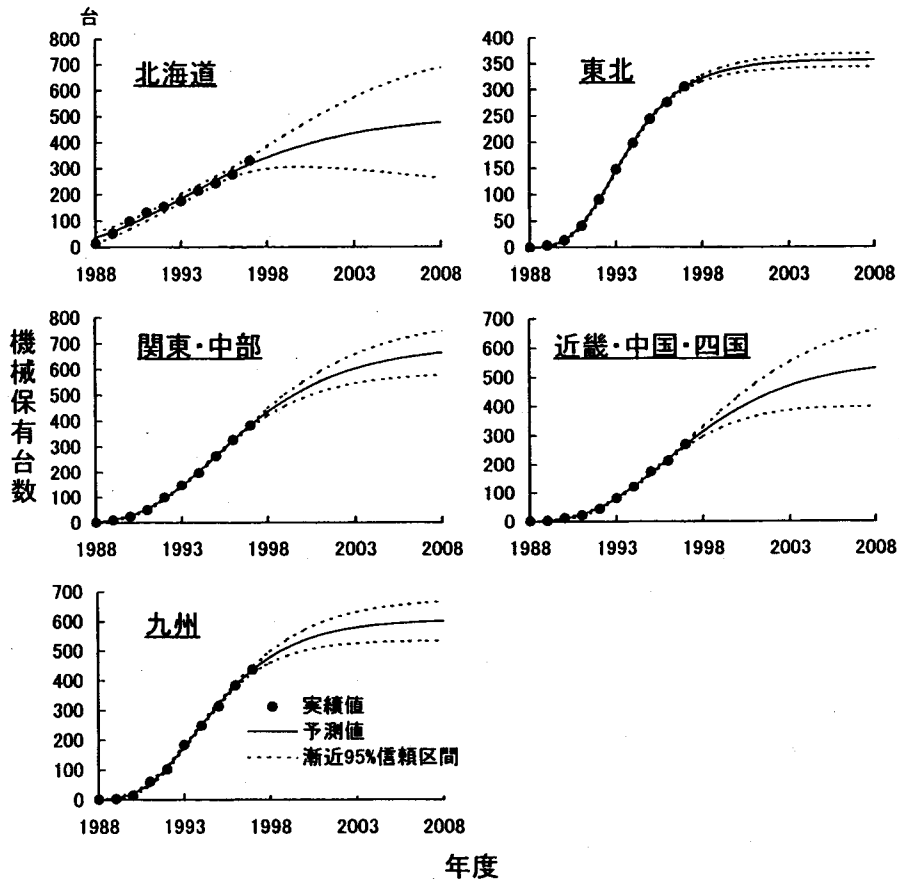


図-3.7 Gompertz曲線モデルによる地域別高性能林業機械台数の推移予測

340~370台)と九州(同530~680台)については、いずれも2000年代初めには増加傾向に歯止めがかかると予測されている。

3.4 保有形態別台数

保有形態別では、保有台数の多い会社、森林組合、その他組合および個人の4つについて予測を行った。

表-3.3は、両曲線モデルによるパラメータの推定値およびAICを示したものである。パラメータ推定値は、最小2乗法と最尤法とで一致している。AICの値は、Logistic曲線モデルが63.4~88.3であるのに対して、Gompertz曲線モデルは54.8~75.9となっており、全ての保有形態においてGompertz曲線モデルがMAICEとなっている。

表-3.3 両曲線モデルのパラメータ推定値とAIC (保有形態別)

保有形態	t ₀	Logistic曲線モデル			AIC	Gompertz曲線モデル			AIC
		パラメータ推定値				パラメータ推定値			
		a	b	c		a	b	c	
会社	1988	929.12(773.65-1084.59)			88.30	1386.24(1102.01-1670.47)			75.91
森林組合	1989	383.42(325.56-441.29)			76.25	448.51(374.49-522.53)			67.34
その他組合等	1988	428.26(318.06-538.46)			68.48	907.58(479.23-1335.93)			59.62
個人	1988	211.29(192.67-229.90)			63.35	250.30(222.99-277.61)			54.83

注：表-3.1に同じ。

図-3.8は、Gompertz 曲線モデルによる保有台数の推移予測を保有形態別に示したものである。会社とその他組合については、今後さらに増加すると予測されており、飽和水準はそれぞれ1,390台（1,100～1,670台）、910台（480～1,340台）となっている。一方、森林組合（飽和水準370～520台）と個人（同220～280台）については、保有台数の増加が頭打ちになると予測されている。

4. 小括

AICによるモデル選択の結果、高性能林業機械の普及過程を表す成長曲線としては、いずれの場合もGompertz 曲線が妥当であると考えられた。Logistic 曲線モデルによれば、今後保有台数の伸びはほとんど期待できないということになるが、これは現実的といえない。直観的に考えても、飽和水準へと緩やかに収束していくGompertz 曲線モデルを採用するのが妥当である。

Gompertz 曲線モデルを用いた非線形回帰分析により、将来における高性能林業機械総保有台数の飽和水準は約2,900±150台と予測された。分析によって得られた曲線式によれば、1994年度が曲線の変曲点（約1,070台）となっている。このことはつまり、現時点では既に変曲点を過ぎており、保有台数の増加率は小さくなる一方であることを意味する。北海道を対象とした予測結果も同様の傾向を示しており、今後は高性能林業機械台数の顕著な増加は見込めないと考えられる。

機種別、地域別、保有形態別の検討からは、高性能林業機械の属性により普及の動向も異なることが予測された。機種別では、ハーベスタの増加傾向が顕著であった。欧米の林業先進国における機械化の発展過程をみても、導入機種が高機能化していくという予測

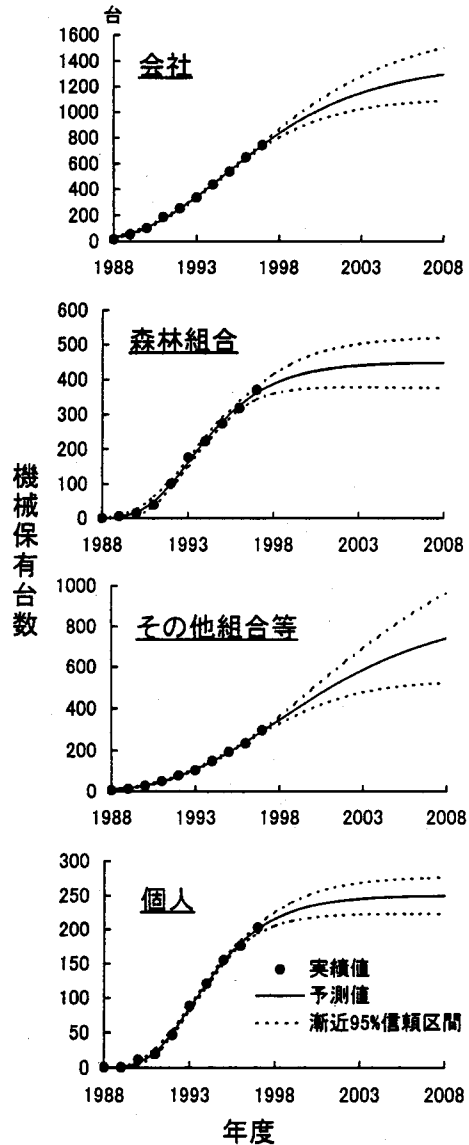


図-3.8 Gompertz曲線モデルによる保有形態別高性能林業機械台数の推移予測

結果は妥当である。地域別では、「関東・中部」および「近畿・中国・四国」における保有台数の増加が予測された。前出の図-3.3で示したように、これらの地域は北海道や九州に比べ、高性能林業機械の導入が遅れて始まっている。そのため、まだ新規に導入する余地が比較的多く残されていると推察される。保有形態別では、会社とともにその他組合での増加が予測された。現在、各都道府県で高性能林業機械のリース・レンタル体制が整備されつつあり、林業労働力確保支援センターなどの保有がさらに増えることは十分見込まれる。

IV 高性能林業機械作業システムの普及シミュレーション

1. System Dynamics によるモデリング

前章で扱った成長曲線モデルによる普及予測は、技術予測手法の中でも直接的方法に分類されている (Porter et al., 1991)。これは、技術を取り巻く諸条件との相関を考慮せず、実績値のトレンドをもとに直接予測を行うものである。しかしII章で述べたように、高性能林業機械化の発展過程は、実際にはその時々の技術的、経営的、政策的諸条件によって大きく影響を受けている。そこで本章では、高性能林業機械化の発展動向をより厳密に検討するため、発展にかかわる諸要因との因果関係を考慮したモデルを構築する。

システムの因果関係を扱う有効なモデリング手法の一つとして、System Dynamics (小玉, 1982; 島田, 1994) が知られている。System Dynamics (以下SDとする) は、1957年にMITのJ. W. Forresterが創始したIndustrial Dynamics (以下IDとする) の手法を発展させたものであり、システムの動的特性およびシステム内の各種要因の相互関連を分析することを目的としている。

Forresterは、企業組織における動的挙動の原因の一つとして、温度調節のために使用されるサーモスタットのようなフィードバック関係が存在すると考え、IDを考案した。IDは当初、需要予測など経営上の数多くの問題に適用されていた。それが1969年に都市問題へと応用され、地域社会の環境保全問題にも適用可能であることが示された。以後、IDはSDと呼ばれるようになり今日に至っている。

SDの基本的な特徴は、世の中のあらゆるシステムを情報フィードバックシステムとしてとらえる点に

ある。例えば、屋根に設置された省エネルギー用の温水器からお湯を浴槽に流し込む状況を考える。浴槽の底から一定の高さのところまでお湯が注がれたら、バルブを操作してお湯の流れを止めようとする。意思決定者、すなわちバルブの操作者は、水面を常に注視しながらバルブを操作する。最初お湯は勢いよく流れ込むが、水面が予定された高さに近づくにつれてバルブは急速に閉じられる。

この例のように、我々は現実の状態を観察することによって情報を収集し、その情報をもとに意思決定を行う。その結果行動が起こされ、現実の世界に働きかけて現実の状態を変化させる。現実の世界が変化すれば、そこからまた新しい情報が発生するという因果関係のループ構造になっている。

SDでは、このようなループ構造をDYNAMO方程式により記述する。現実の状態(上の例では水面の高さ)は、レベルと呼ばれる状態変数によって表わされる。レベルからの情報が、レイトと呼ばれる意思決定関数(バルブ操作者)に影響を及ぼす。レイトは行動に相当するフロー(お湯の流れ)をレベルに送り込み、レベルの状態を変化させる。

2. 普及モデルの構築

2.1 モデルの前提

高性能林業機械化の目的の一つとして、生産コストの削減が挙げられている(北海道林務部, 1993)。しかし、II章の図-2.16で示したように、導入された高性能林業機械の多くは稼働率が低い。高性能林業機械の生産能力が十分に発揮できない状況のもとでは、コスト低減を主たる目的として高性能林業機械作業システムを採用する素材生産事業体は数少ないと考えられる。

一方、減少・高齢化が著しい林業労働力問題への対応もまた、高性能林業機械化の目的の一つとされている(生井, 1993)。高性能林業機械導入事業体を対象としたアンケート調査の結果(II章図-2.15)によれば、労働力不足への対応や作業効率の向上を高性能林業機械の導入目的とする回答が数多くみられる。素材生産を担う労働者の数は減少を続けており、事業を継続するためには労働生産性を向上していかざるを得ない状況にある。

このため、以下で構築するモデルにおいては、高性能林業機械作業システムの主たる普及要因を、労働力の減少に伴う労働生産性向上の必要性であると仮定

した。そして、高性能林業機械作業システムの普及過程に関して、次のようなフィードバックループを想定した。素材生産事業量と労働者数の時間的な変化、とりわけ労働者の減少によって、事業実行に必要な労働生産性（必要労働生産性）が増大する。その結果、素材生産作業システムの労働生産性の平均値（平均労働生産性）との間にギャップを生ずる。このギャップを調整するために、事業実行をより高効率な高性能林業機械作業システムへと移行させる。その結果、高性能林業機械作業システムによる生産比率が増加し、平均労働生産性が向上する。

2.2 普及モデル

素材生産作業システムの構成にも様々なかたちが見られるが、以下に示すモデルではそれらを、従来式作業システム（従来型）、半機械化作業システム（半機械化型）、全機械化作業システム（全機械化型）の3種類に区分する。北海道の素材生産作業を対象としたとき、従来型はチェーンソーによる伐倒造材、トラクタによる集材の作業システムが想定される。半機械化型は、作業工程の一部を高性能林業機械により処理する作業システムを指し、プロセッサの単体導入などが該当する。全機械化型は、全ての作業工程を高性能林業機械により処理する作業システムであり、ハーベスタとフォワーダの組み合わせなどが該当する。

従来型、半機械化型、全機械化型の労働生産性（ $m^3/人 \cdot 日$ ）を、それぞれ P_c 、 P_s 、 P_f とする。また、各作業システムにより事業を行う労働者数（ $人 \cdot 日$ ）の比率を、それぞれ r_c 、 r_s 、 r_f とする。いずれの作業システムも労働生産性は一定と考えれば、平均労働生産性 P_a は次式のように表される。

$$P_a = r_c \cdot P_c + r_s \cdot P_s + r_f \cdot P_f \quad (r_c + r_s + r_f = 1)$$

一方、年間素材生産事業量を V （ m^3 ）、延べ労働者数を W （ $人 \cdot 日$ ）とする。このとき、必要労働生産性を P_r とすれば、以下の関係が成り立つ。

$$P_r = V/W$$

労働生産性の向上を目的とした労働者数比率の移行は、従来型→半機械化型→全機械化型と段階的に行われるものとする。従来型から半機械化型へ移行させる労働者数比率を x_1 、半機械化型から全機械化型へ移

行させる労働者数比率を x_2 とし、移行後の平均労働生産性を P'_a としたとき、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} P'_a &= P_c(r_c - x_1) + P_s(r_s + x_1 - x_2) + P_f(r_f + x_2) \\ &= P_a + x_1(P_s - P_c) + x_2(P_f - P_s) \\ &= P_r \\ \therefore P_r - P_a &= x_1(P_s - P_c) + x_2(P_f - P_s) \end{aligned}$$

上で示した等式の左辺は、必要労働生産性と平均労働生産性との間のギャップを表している。右辺の各項はそれぞれ r_c 、 r_s の大きさに応じて定まると考えれば、ギャップ調整のために移行が必要な労働者数比率は、

$$\begin{aligned} P_r - P_a &= \{r_c / (r_c + r_s)\} \cdot (P_r - P_a) \\ &\quad + \{r_s / (r_c + r_s)\} \cdot (P_r - P_a) \end{aligned}$$

より、

$$\begin{aligned} x_1(P_s - P_c) &= \{r_c / (r_c + r_s)\} \cdot (P_r - P_a) \\ x_2(P_f - P_s) &= \{r_s / (r_c + r_s)\} \cdot (P_r - P_a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore x_1 &= \{r_c / (r_c + r_s)\} \cdot \{(P_r - P_a) / (P_s - P_c)\} \\ x_2 &= \{r_s / (r_c + r_s)\} \cdot \{(P_r - P_a) / (P_f - P_s)\} \end{aligned}$$

以上をモデルの基本構造として、高性能林業機械作業システムの普及過程を図-4.1のようにモデル化した。本モデルは主として北海道を対象に構築されたものであり、SDのフローダイアグラムによって書かれている。

延べ労働者数を算出する際は、就労形態の違いを考慮した。長期雇用である常用労働者の数（ $人$ ）と平均就労日数（ $日$ ）を、それぞれ W_p 、 O_p とする。同様に、短期雇用の臨時労働者は W_t 、 O_t とする。このとき、延べ労働者数は次式により算出される。

$$W = W_p \cdot O_p + W_t \cdot O_t$$

従来型、半機械化型、全機械化型の各作業システムにおける労働者数比率は、それぞれ次式に従って変化する。ここで、 t は時間（年）、 dt はシミュレーションの時間間隔を表している。

$$r_c(t) = r_c(t-dt) + (-x_1) \cdot dt$$

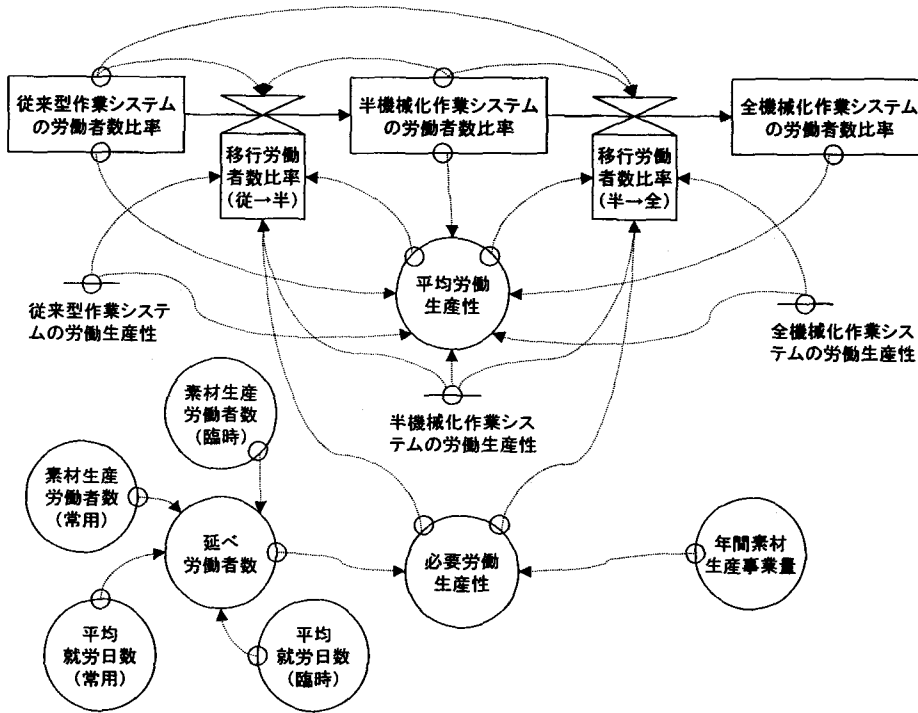


図-4.1 高性能林業機械作業システムの普及モデル

$$r_s(t) = r_s(t-dt) + (x_1 - x_2) \cdot dt$$

$$r_f(t) = r_f(t-dt) + (x_2) \cdot dt$$

3. 普及過程のシミュレーション分析

3.1 1997年度以前の普及過程

3.1.1 条件設定

各作業システムの労働生産性については、北海道林務部（現、北海道水産林務部）が示している目標値（北海道林務部，1993）を採用した。従来型（ r_c ）が $4.7\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{日}$ ，半機械化型（ r_s ）が $8.8\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{日}$ ，全機械化型（ r_f ）が $13.1\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{日}$ である。これらの数値は、実際の作業観測結果に基づいて設定されている。

年間素材生産事業量（ V ）には、北海道における素材生産量の実績値（図-4.2）を用いた。素材生産量は1985年度まで600万 m^3 を超えていたが、その後は漸減傾向で推移し、1997年度には384万 m^3 となっている。

素材生産に従事した延べ労働者数（ W ）についても、これまでの実績値を採用した。林業労働者全体の傾向と同様、素材生産労働者数も減少が進んでおり、1997年度は3千人を下回るまでになっている（表-

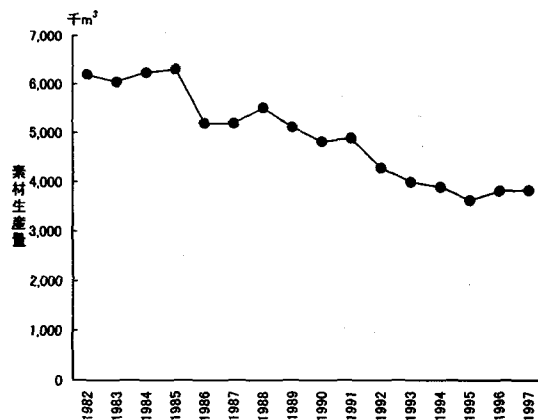


図-4.2 北海道における素材生産量の推移（一般民営生産）
資料：北海道林業統計より作成。

4.1). 就労形態別では、特に臨時労働者の減少が顕著である。なお、1980年度と1986年度の素材生産労働者数については資料がないため、両年度の林業労働者数と1990年度の素材生産労働者数比率（45%）から推定した。図-4.3は、シミュレーションの際に与えた素材生産労働者数の推移である。調査されていない年度

表-4.1 北海道における林業労働者数の推移

年度	林業労働者数			素材生産労働者数*		
	計	常用	臨時	計	常用	臨時
1980	19,431	11,631	7,800	8,744	5,234	3,510
1986	13,640	9,941	3,699	6,138	4,473	1,665
1990	11,113	7,763	3,350	4,996	3,822	1,174
1993	8,411	5,990	2,421	3,400	2,637	763
1995	7,711	5,521	2,190	3,224	2,485	739
1997	6,447	4,914	1,533	2,717	2,190	527

資料：林業労働実態調査報告書より作成。

* 1980, 1986年は推定値。

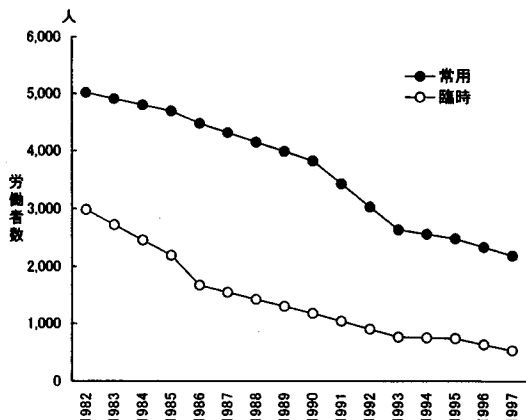


図-4.3 北海道における素材生産労働者の推移
注：推定値を含む。

の労働者数については、均等に減少していったものと仮定した。

素材生産労働者の平均就労日数のうち、常用労働者については就労日数別の労働者数推移から推定した。表-4.2より、就労日数カテゴリーの各々について平均値を想定し、労働者数で重み付けすることによって全体の平均就労日数を算出した。常用労働者の平均就労日数は、いずれの年度も200日程度となっている。臨時労働者については、事業量が多くなる冬期間(12～3月)に月25日就労すると想定し、平均就労日数を100日とした。図-4.4は、シミュレーションの際に与えた平均就労日数の推移を示したものである。なお、常用労働者における1993年度以前の平均就労日数は、1993年度と同様であると仮定した。

3.2 シミュレーション結果

シミュレーションの開始時点は、北海道で初めて高性能林業機械が導入された1982年度とした。初期状

表-4.2 就労日数別素材生産労働者数(常用)の推移

年度	就労日数(各カテゴリーの想定平均値)					計	平均就労日数の推定値
	~119日(100日)	120~149(130)	150~179(160)	180~209(195)	210~(230)		
1993	202	153	260	450	1,572	2,637	201
1995	120	120	217	419	1,609	2,485	207
1997	129	125	123	409	1,404	2,190	206

資料：表-4.1に同じ。

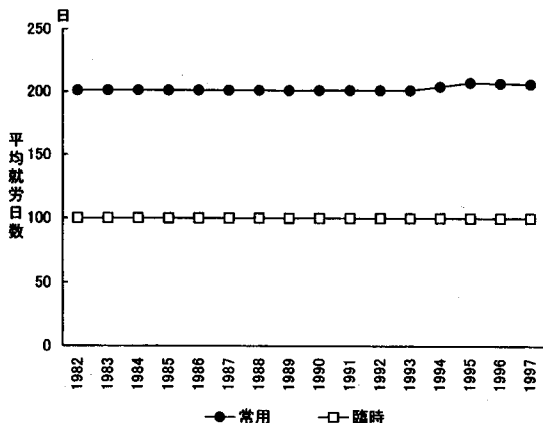


図-4.4 北海道における素材生産労働者の平均就労日数(推定)

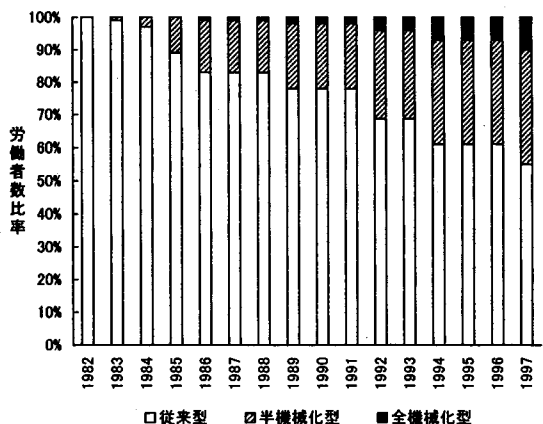


図-4.5 作業システム別の労働者数比率推移に関するシミュレーション結果(1982~1997年度)

態においては、素材生産労働者の全てが従来型で事業を行っていたと考える。シミュレーションの時間間隔は1年とした。分析に使用したソフトウェアは、STELLA Research 5.1.1 for Windowsである。

シミュレーションによって得られた各作業システムの労働者数比率の推移を図-4.5に示す。1983年度以降、素材生産事業量の減少を上回る勢いで労働者数が減少した。事業実行に必要な労働生産性を確保するため、まず半機械化型の普及が進み、1985年度には労働者数比率が10%を超えるまでになっている。また1980年代後半以降、少しずつではあるが全機械化型の普及も進んでいる。1990年度における各作業システムの労働者数比率は、従来型が78%、半機械化型が20%、全機械化型が2%である。さらに1997年度時点においては、従来型55%、半機械化型35%、全機械化型10%となっており、半機械化型と全機械化型を合わせた高性能林業機械作業システムの労働者数比率がほぼ半数にまで達している。

以上の結果は、北海道における高性能林業機械の導入状況(Ⅱ章図-2.1および図-2.13)とほぼ一致しており、また高性能林業機械作業に従事する労働者に長期雇用が多いと考えられることから、実際の傾向をよく表していると考えられる。ただ、シミュレーションでは半機械化型が1980年代半ばから急速に普及しているが、実際に普及が本格化したのは1980年代末からであり、この点が実態とやや異なっている。この原因としては、高性能林業機械への認知が不十分であったこと、国産の高性能林業機械がまだ登場していなかったこと、当時の経営的条件が普及を促進するほどには良好でなかったことなどが挙げられる。当時の素材生産事業においては、高性能林業機械を導入するかわりに、雇用の長期化などによって労働力不足への対応がなされていたと想像される。

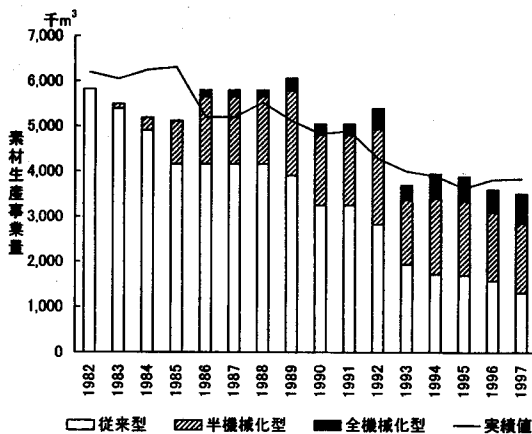


図-4.6 作業システム別の素材生産事業量推移に關するシミュレーション結果(1982~1997年度)

図-4.6は、各作業システムによる素材生産事業量の推移を実績値とともに示したものである。ここで、作業システムごとの事業量 (V_c, V_s, V_f) は次式により算出した。

$$V_c = r_c \cdot W \cdot P_c$$

$$V_s = r_s \cdot W \cdot P_s$$

$$V_f = r_f \cdot W \cdot P_f$$

各作業システムによる事業量の合計値をみると、年度によって多少の誤差があるものの、おおむね実績値と一致している。1980年代末以降の傾向として、従来型による事業量が著しく減少している一方、半機械化型はほぼ横ばい、全機械化型は微増となっている。1990年度における各作業システムの事業量は、従来型が325万m³(事業量全体の64%)、半機械化型が156万m³(31%)、全機械化型が23万m³(5%)である。また、1997年度時点では、従来型130万m³(37%)、半機械化型155万m³(44%)、全機械化型66万m³(19%)となっている。高性能林業機械作業システムの労働者数比率は増加傾向であるにもかかわらず、事業量の伸びはほとんどみられない。これは、素材生産作業における平均労働生産性の向上が、高性能林業機械作業システムによる事業量の増加によってなされたというよりも、むしろ従来型による事業量が急減した結果として実現されたことを意味する。高性能林業機械の保有台数は増加傾向にあることから、高性能林業機械作業システム1セットあたりの事業量はかえって減少していたことを示唆する結果となっている。

3.2 1998年度以降の普及予測

3.2.1 条件設定

必要労働生産性 (P) を決定する因子である素材生産事業量 (V) と延べ労働者数 (W) の値は、いずれも林業経営をめぐる様々な条件により大きく左右されると考えられる。両者の推移に関する厳密な予測には、林業経営全般を対象としたモデルによる検討が別途必要であるが、本論文では想定される一つのケースとして、これまでと同様の傾向で減少が続く状況を考える。

減少傾向を表すモデルはいくつか考えられるが、ここでは1年間の減少比率が常に一定であると仮定し、指数曲線モデルを用いることにする。素材生産事業量と労働者数(常用および臨時)について、それぞれ前

項で設定した1982~1997年度の数值により指数回帰を行い、1998年度以降の推移を想定した。

図-4.7は、素材生産事業量の推移について示したものである。指数曲線モデルによる回帰式は以下のとおりとなった。

$$V = 6771800e^{-0.0392(t-1981)} \quad r^2 = 0.9229$$

上の回帰式で想定した事業量の年減少率は約3.8%である。回帰式の決定係数が大きく、実績値への適合度は高いといえる。2000年度の事業量は322万㎡、2007年度には244万㎡と、徐々に減少していく状況を想定している。

図-4.8は、素材生産労働者数の推移を示したも

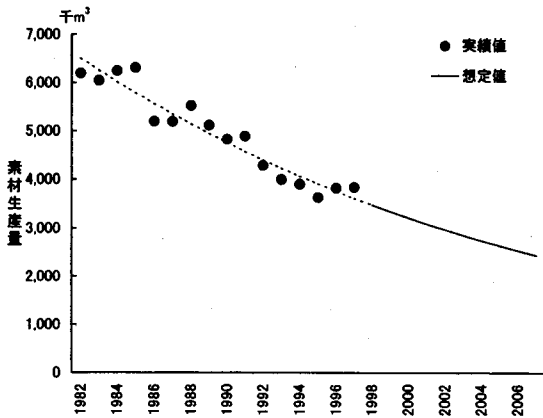


図-4.7 素材生産事業量推移の想定

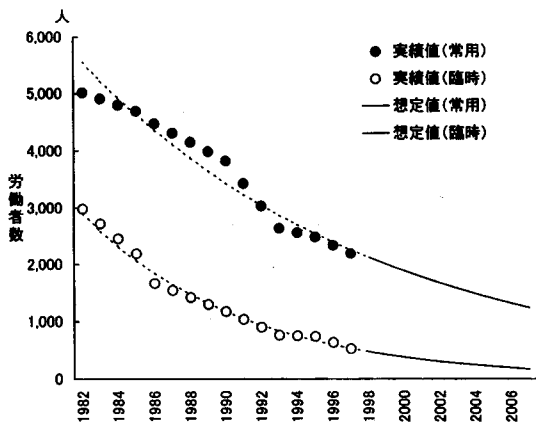


図-4.8 素材生産労働者数推移の想定
注) 実績値には推定値を含む。

のである。常用労働者と臨時労働者のそれぞれについて、回帰式は以下に示すとおりとなった。

$$W_p = 5894.1e^{-0.0600(t-1981)} \quad r^2 = 0.9555$$

$$W_t = 3251.1e^{-0.1132(t-1981)} \quad r^2 = 0.9884$$

上式で想定した労働者数の年減少率は常用が約5.8%、臨時が約10.7%である。いずれも回帰式の決定係数が大きく、実績値（一部推定値を含む）への適合度は高い。常用労働者と臨時労働者は、それぞれ2000年度に約1,890人と約380人、2007年度に約1,240人と約170人に減少していく状況を想定している。

なお、素材生産労働者の平均就労日数、および各作業システムの労働生産性については、1997年度と同じ値で推移するものとした。

3.2.2 シミュレーション結果

図-4.9は、作業システムごとの労働者数比率について示したものである。1998~2001年度の4年間は各作業システムの労働者数比率に変化がなく、従来型45%、半機械化型39%、全機械化型16%で推移すると予測されている。これは、この期間において必要労働生産性と平均労働生産性とのギャップが生じない状況を想定したためである。2002年度以降については、労働力の減少によって労働生産性の向上が再び必要となり、高性能林業機械作業システムの労働者数比率が高まっていく。ただし、労働者比率が増加するのは全機械化型のみであり、半機械化型は横ばいに推移する。

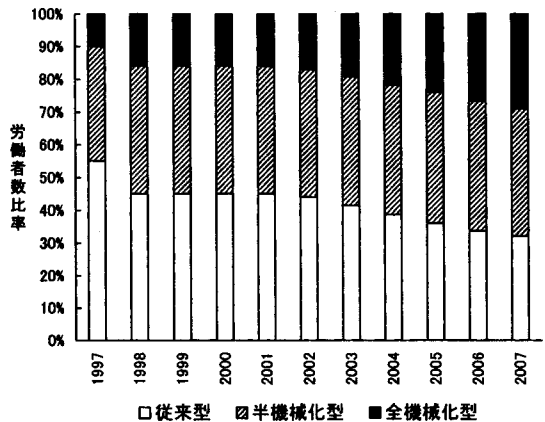


図-4.9 作業システム別の労働者数比率推移に関するシミュレーション結果 (1997~2007年度)

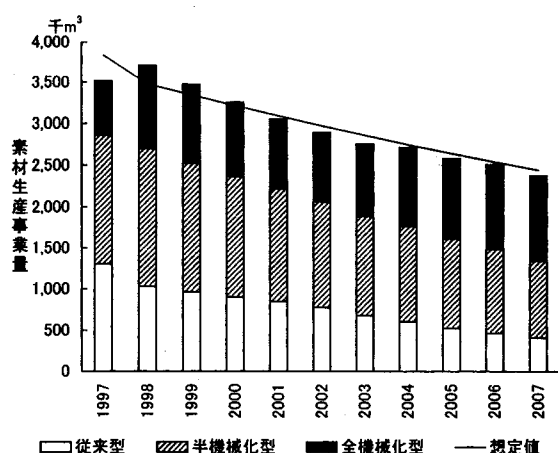


図-4.10 作業システム別の素材生産事業量推移に関するシミュレーション結果(1997～2007年度)

この期間における労働生産性向上は、全機械化型の比率増により達成されるとの予測結果が示されている。2007年度における各作業システムの労働者数比率は、従来型32%、半機械化型39%、全機械化型29%である。

次に、各作業システムによる素材生産事業量の推移を図-4.10に示す。従来型と半機械化型の両作業システムについては、1998年度から2007年度までの10年間、事業量は一貫して減少すると予測されている。半機械化型における事業量確保が、今後一層困難になることを示唆する結果となっている。全機械化型については、2002年度までは同様に減少傾向となるが、それ以降は増加に転ずる。2007年度における各作業システムの事業量は、従来型41万m³ (17%)、半機械化型93万m³ (39%)、全機械化型103万m³ (43%)であり、全機械化型が最も多くなると予測される。

4. 小括

労働生産性向上の必要性から高性能林業機械作業システムが普及するとの前提により、普及過程に関するSDモデルを構築した。素材生産事業量と労働者数の実績値をもとにシミュレーションを行ったところ、過去における高性能林業機械作業システムの普及過程をおおむね再現することができた。このことは、北海道における高性能林業機械化の主な発展要因が林業労働力問題への対応にあったことを表している。

これまでの普及過程に関するシミュレーションでは、素材生産作業における平均労働生産性の向上が、主に半機械化型作業システムの普及によって実現され

てきた様子を示すことができた。一方で、素材生産量が減少傾向で推移してきたために、半機械化型の事業量が近年ほとんど増えていないとの結果が得られた。高性能林業機械導入台数の増加により作業システム1セットあたりの平均事業量は減少しているものと推察され、稼働率が低迷する大きな要因になっていると考えられる。

将来の普及動向に関するシミュレーションでは、素材生産事業量と労働者数の年減少率がこれまでと同様に推移した場合、平均労働生産性のさらなる向上が必要となり、全機械化型の普及により達成されるとの予測結果が得られた。素材生産事業量と労働者数の推移については、考えられる一つの状況を想定してシミュレーションを行ったため、厳密な普及予測は今後の課題である。しかし今回の予測結果は、労働者の減少傾向が今後も変わらなければ、素材生産量を維持するために平均労働生産性を一層向上させる必要があることを示している。一方、全機械化型作業システムについては、技術的制約から適用可能な事業が限られている。ただし、半機械化型の普及だけでは平均労働生産性の向上にも限界がある。労働者の減少が進む一方で労働生産性が向上しなければ、素材生産量の急減も避けられない。林業生産活動を維持するためにも、今後は全機械化型の普及に向けた取り組みが不可欠である。

V 採算性を考慮した高性能林業機械作業システムの必要事業規模

1. 高性能林業機械作業の採算性分析

高性能林業機械を導入する上で、最も大きな問題となっているのが事業量の確保である(II章図-2.17)。特に、初期投資が高額となる全機械化作業システムにおいては、その採算性が在来作業よりも事業量に左右されるものと考えられる。作業システムの導入が経営的に成立する条件として、採算性を確保できるだけの事業量を確保する必要がある。

素材生産作業の費用計算にはこれまで、機械損料が多く用いられてきた。しかし、損料計算のために使われている積算因子(梅田ら, 1982)をみると、主な林業用機械の年間供用日数は240～270日となっている。高性能林業機械の稼働率が低い現状において、この算出根拠を適用することは必ずしも実態を表さない。

採算性分析では一般に、費用を生産にかかわらず固定的に発生する費用(固定費)と生産に伴い可変的

に発生する費用（変動費）に区分して考える（千住ら、1994）。この方法を用いて損益分岐点を算出することにより、採算上必要な最小限の事業規模を定量的に示すことが可能となる。

2. 対象と方法

2.1 調査事業の概要

調査対象とした人工林間伐事業は、1995年10月に東京大学北海道演習林で行われた。本事業は、富良野地区製材林産協同組合が同演習林の立木を購入し、事業実行者の住友林業(株)に生産を請け負うかたちで実施された。事業総日数は16日で、移動、段取りなどを除く実質的な作業日数は13日であった。対象面積は3.58ha、蓄積は376m³/haで、林地の傾斜度は4～16度である。樹種はトドマツ（2.56ha）、カラマツ・ストロブマツ（1.02ha）で、いずれも植栽後約40年が経過している。間伐方法は前者が2伐3残の列状（間伐率40%）、後者は定性（同25%）であり、立木伐採材積は対象区域全体で325.61m³（0.28m³/本）である。

作業システムは、ハーベスタ（TOHR987S）による伐倒、枝払い、玉切り、フォワーダ（NOKKA JOKER）による集材、選別、積積みである。同システムの作業員数は2名である。平均集材距離は250m（70～430m）であった。なお、作業では集材路の作設に一部ブルドーザを使用した。

2.2 研究方法

はじめに、調査事業の収益と費用を明らかにする。ここで、実際には立木の購入と間伐事業の実行が別々の業者によって行われているが、本論文では事業実行者が自ら立木を購入して事業を行う状況を想定し、収益は素材の売却収入とする。費用は立木購入、素材生産、運材に要した各費用とし、事業実行者が収益を得るまでに要した全費用を対象とする。

次に、調査結果をもとに収益および費用をモデル化し、作業システムの最小利用規模を算出する。ここで、最小利用規模とは、収益と費用が一致する年間事業量のことを指す（北海道農政部農業改良課、1993）。費用の算定基礎は、事業実行者が使用するものに準ずる。

さらに、経営条件により多様な状況が想定される因子として、作業による1日あたり出材量（単位出材量）、平均素材単価、機械購入補助率の3つを取り上

げ、最小利用規模の感度分析を行う。なお、本論文では作業システムの利用規模を検討対象としているため、機械ごとの区分は行わない。

3. 結果と考察

3.1 事業の収益および費用

事業による出材状況と売却結果を表-5.1に示す。総出材量は261.042m³で、歩留まり率は80%であった。トドマツの材種は径級で区分され、18～30cmが一般材、12～16cmが小丸太、11cm未満がパルプ材であった。カラマツ（11～36cm）は全部が一般材、その他はほぼ全てがパルプ材であった。一般材と小丸太の素材単価は径級で異なり、トドマツ一般材が12,600～14,400円/m³、同小丸太8,280～11,520円/m³、カラマツ一般材7,920～12,240円/m³であった。

事業に要した各費用を表-5.2に示す。減価償却費は定額法で算定し、その基礎は機械価格約6,000万円（ハーベスタ4,000万円、フォワーダ2,000万円）、耐用年数6年、残存価格率10%である。また、機械購入補助金（補助率25%）が機械価格から差し引かれている。保険費は機械の動産保険を指し、比較的大規模の修理などに当てられる。資本利子は機械購入のための借入金利息であり、年利率3.5%で計算した。表中で

表-5.1 調査事業の出材・処分結果

樹種	材種	本数	材積(m ³)	金額(円)	平均素材単価(円/m ³)
トドマツ	一般	117	23.299	302,547	12,985
トドマツ	小丸太	1,025	96.869	1,037,357	10,709
カラマツ	一般	41	9.964	116,133	11,655
針葉樹	パルプ	-	120.450	1,082,840	8,990
広葉樹	パルプ	-	10.460	94,908	9,073
計			261.042	2,633,785	10,090

表-5.2 調査事業に要した費用

区 分	費用(円)	単 価	単 位
減価償却費	-	6,332,964	円/年
保険費	-	1,350,000	円/年
資本利子	-	787,500	円/年
立木費	123,660	380	円/m ³
運材費	612,220	2,345	円/m ³
人件費	509,088	31,818	円/日
修繕費	164,074	12,621	円/日
燃料・油脂費	152,202	11,708	円/日
機械移送費	260,000		
ブルドーザ利用費	82,400		
出張関連費	263,700		

はこの金額が小さくなっているが、これは借入金の返済がかなり進んでいることによる。立木費は、事業実行業者（調査事業では立木購入業者）が事業物件の立木購入に要した費用である。運材費は山土場から製材（パルプ）工場までの素材運搬に要した費用で、作業は運送業者に外注されている。人件費は労災保険料込みで月額35万円/人で、月平均就労日数22日から事業総日数分に換算した値である。修繕費は事業期間中修理に要した費用で、主にチェーンソーや油圧ホースの破損によるものである。燃料・油脂費は、軽油やオイル類の消費にともなう費用である。

その他、ブルドーザの使用や、本事業が遠隔地からの出張であったことから、機械移送やオペレータの出張・宿泊のために費用を要した。これらは、今回の事業のため臨時に発生した費用であり、以下のモデルには含めない。

3.2 収益・費用のモデル化

収益 (R) は、単位出材量 (PR)、作業日数 (OD)、素材単価 (UT) の積で表す。

$$R = PR \cdot OD \cdot UT \quad (1)$$

費用 (C) は、固定費 (CF) と変動費 (CV) に区分する (2式)。固定費は、減価償却費 (DP, 定額法により算定)、保険費 (IS, 一定額)、資本利子 (IT, 年平均額 (Sundberg and Silversides, 1988)) の合計とする (3式)。ここで、機械価格 (OM) から購入補助率 (SS) 分を引いたものを機械購入価格 (DM) とする (5式)。

$$C = CF + CV \quad (2)$$

$$CF = DP \cdot IS \cdot IT \quad (3)$$

$$DP = (DM - OM \cdot SV) / ML \quad (4)$$

$$DM = OM \cdot (1 - SS) \quad (5)$$

$$IT = RI \cdot \{DM \cdot (ML + 1) + OM \cdot SV \cdot (ML - 1)\} / (2 \cdot ML) \quad (6)$$

ML: 耐用年数 SV: 残存価格率 RI: 資本利子率

変動費は、立木費 (TE)、人件費 (PE)、修繕費 (RE)、燃料費 (FE)、運材費 (HE) の合計とする。立木費と運材費は素材生産量に、それ以外は作業日数に比例すると考える。立木費は歩留まり率 (RY) を

考慮する。また人件費は、経営分析では一般に固定費に分類されるが (和井内, 1982)、作業員は作業システム非稼働の場合も他業務に従事すると考えられる。そこで、本モデルでは実際の労働投入量を反映させるべく、人件費を変動費として扱うことにする。

$$CV = (TE / RY + HE) \cdot PR \cdot OD + (PE + RE + FE) \cdot OD \quad (7)$$

3.3 最小利用規模の試算

表-5.3は、調査結果をもとに以下の計算のために設定した定数値である。これらは住友林業への聞き取りにより、おおむね平均的であると考えられた。ここでは、調査時の単位出材量 (20.1m³/日) と、住友林業の事業実績による平均出材量 (13.0m³/日) の2つの場合について最小利用規模を試算する。素材単価は調査時の10,090円/m³とし、機械購入補助率は25%とした。

計算の結果、20.1m³/日の場合は最小利用規模が1,978m³/年となった。これは年間作業日数で98日/年に相当する。一方13.0m³/日では、3,001m³/年、231日/年であった。両結果から、事業の採算性が単位出材量に大きく影響されることがわかる。また住友林業によれば、現時点では事業の採算性確保が難しいとのことであるが、後者の結果は経営的に厳しい同社の状況をよく表現している。

3.4 感度分析

ここでは、事業体や事業地の条件により大きく異なる因子で、事業の採算性に与える影響も大きい単位出材量、平均素材単価、機械購入補助率の3つについ

表-5.3 計算に使用した定数

記号	項目	定数値	単位
OM	機械価格	60,000,000	円
SV	残存価格率	0.1	-
ML	耐用年数	6	年
IS	保険費	1,350,000	円/年
RI	資本利子率	0.035	-
TE	立木費	380	円/m ³
RY	歩留まり率	0.8	-
HE	運材費	2,345	円/m ³
PE	人件費	31,818	円/日
RE	修繕費	12,621	円/日
FE	燃料・油脂費	11,708	円/日

て、表-5.3で示した定数値をもとに検討する。

はじめに単位出材量を変えた場合の最小利用規模を図-5.1に示す。単位出材量が20 m^3 /日以上ならば最小利用規模は2,000 m^3 /年程度となり、出材量が小さくなるにつれて、最小規模は急激に増大する。出材量が10 m^3 /日になると、もはや採算性の確保が不可能であることがわかる。

図-5.2は、素材単価を変化させた場合の最小利用規模を単位出材量別に示したものである。素材単価が13,000 $\text{円}/\text{m}^3$ の場合、出材量が15 m^3 /日以上であれば最小利用規模は1,500 m^3 /年程度となる。しかし素材単価が低くなるに従い、その値は増大する。最小規模の変動は、単位出材量が小さいほど顕著である。なお、本分析では立木単価を一定として費用計算を行ったが、実際には素材単価の増減により立木単価も変動することが想定される。間伐事業においては多くの場

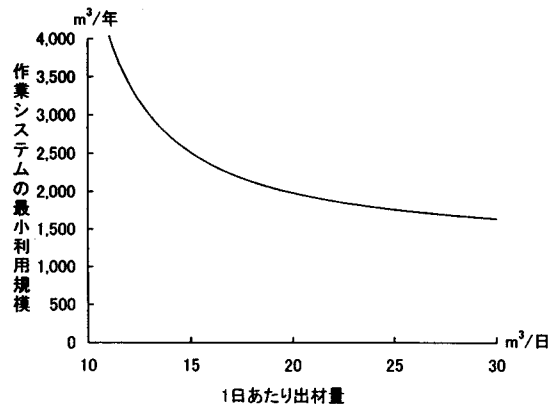


図-5.1 単位出材量による最小利用規模の変化

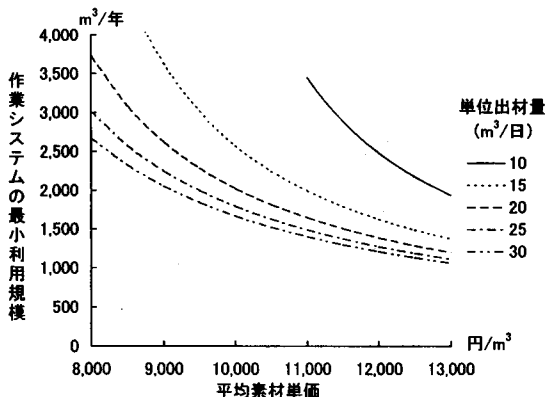


図-5.2 素材価格による最小利用規模の変化

合立木単価が小さく、分析結果に及ぼす影響は小さいと考えられるが、厳密には両因子の相関を考慮したモデルを構築する必要がある。

次に、機械購入補助率を変えたときの最小利用規模を図-5.3に示した。出材量が15~30 m^3 /日の場合、補助率10%につき最小規模をおおむね200~300 m^3 /年低減させる（すなわち、より少ない事業量であっても採算性を確保できる）効果がある。しかしさらに出材量が小さくなると、補助率を高くしても採算性の確保は難しいことを示している。

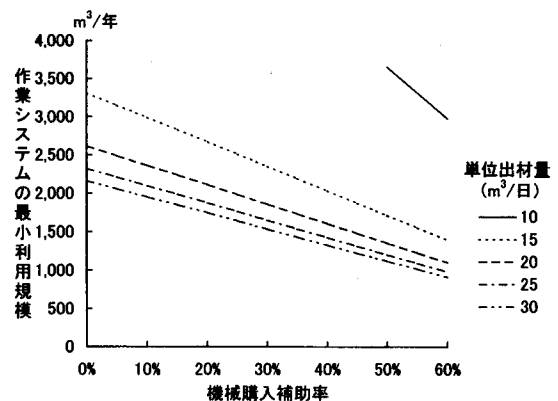


図-5.3 機械購入補助率による最小利用規模の変化

4. 小括

採算性分析の結果により、調査対象としたハーベスタ・フォワーダ作業システムの導入には、年間2,000~3,000 m^3 程度の事業量確保が必要であると考えられた。また、感度分析の結果からは、単位出材量や素材単価が低水準にあるとき、機械購入補助率よりも採算性への影響が大きいと類推された。これは、機械化促進の方策を講じる際考慮すべき点である。素材価格の上昇については現状では望みが薄いものの、立木費や運材費への助成により同様の効果が期待できる。すなわち、素材の運搬経費を1 m^3 あたり400 円 補助した場合（北海道林材新聞、1996年2月23日付）、住友林業の1994年度における平均の単位出材量実績13.0 m^3 /日から、最小利用規模約2,640 m^3 /年、作業日数203日/年となる。これは機械購入補助率を10%上乗せした場合にほぼ相当する。今後はこうした補助事業のあり方についても検討されるべきである。

VI 林業生産技術の将来展望—デルファイ法による技術予測—

1. デルファイ法による技術予測

Ⅲ章およびⅣ章では、高性能林業機械の普及にかかわる将来展望について、予測結果をもとに検討してきた。一方、高性能林業機械自体の機構や性能もまた、将来的には大きく発展すると考えられる。また、本論文の冒頭でも述べたように、高性能林業機械は林業生産技術におけるイノベーションの一つであり、今後は高性能林業機械以外の様々な林業生産技術についても、技術的な発展が期待される。

将来の技術動向に関する予測手法としては、デルファイ法がよく知られている。デルファイ法による最初の実験は、1948年にRAND研究所のHelmerらによって行われた。この手法が広く知られるようになったのは、1963年に公表されてからである(Dalkey and Helmer, 1963)。

Dalkey(1969)は、心理学者の研究をふまえながら、対面方式の議論がもつ深刻な問題として次の点を指摘している；①グループ内の意見は、最も多く発言する人、または最も権威のある人によって大きく影響を受ける。②グループにおける議論は、問題の解決よりも個人やグループの利害に向けられる。③グループから受ける圧力が、個人の判断を歪める。

デルファイ法は、以上の問題点から生じる回答のバイアスを最小化することを目的に開発された。この手法の大きな特徴は、次の3点である；①匿名による回答、②応答の反復と結果のフィードバック、③回答の統計的集約。

デルファイ法では、グループ(専門家集団)に対して技術課題の実現予測時期などをアンケート方式により質問する。同一内容のアンケート調査をくり返し行い、2回目以降の調査では前回調査の集計結果を回答者にフィードバックする。回答者は全体の意見の傾向を見ながら、回答を修正することができる。回答に自信のない回答者は、多数意見に賛同すると考えられる。この過程により、回答者の意見の収れんを図り、中間的な回答を実現予測時期とする。

デルファイ法はこれまで、各種計画や政策分析、長期予測において膨大な適用事例が報告されている(Gupta et al., 1996)。わが国においては、科学技術庁が1971年以来約5年ごとに実施している技術予測調査(科学技術政策研究所ら, 1997)が、デルファイ法

の適用例として最もよく知られる。また、環境に対する欲求の分析(未来工学研究所, 1973)や、企業の情報化技術(日本経済調査協議会, 1985)、データベースのネットワーク化技術(日本データ通信協会, 1980)、農業技術(農業技術展望研究会, 1996)の将来予測などにも、デルファイ法が適用されている。

2. 対象と方法

2.1 技術予測課題の設定

デルファイ法による技術予測調査の実施に先立ち、技術予測課題の設定を目的とした予備的なアンケート調査(予備調査)を実施した。実施期間は1998年9月である。林業生産技術の専門家と思われる者の中から80名を調査対象者として抽出し、アンケート調査票を郵送した。調査対象者の職種別内訳は、大学21名、国公立研究機関23名、機械メーカー15名、林業事業者16名、その他(関連団体など)5名となっている。調査対象者の選定にあたっては、職種や年齢がなるべく偏らないように配慮した。

アンケート調査では、現在から2030年頃までの間にどのような林業生産技術の実現が期待されるかについて、自由回答方式で質問した。ここで、林業生産技術の分野を機械、作業、労働、林道に4区分し、分野ごとに技術課題を回答するようにした。また、技術課題の具体例として23の課題案を回答者に提示し、これらに対する意見も求めた。課題案は、森林利用学における既存の研究報告などを参考にして作成した。

2.2 技術予測調査

1998年10月から12月にかけて、計2回のアンケート調査を実施した。調査対象者は、予備調査の対象とした林業生産技術の専門家80名のうち、辞退者1名(林業事業者)を除いた79名である。

本調査では、林業生産技術にかかわる37の技術予測課題(後述)を対象とした。課題の技術的段階については、「開発される(試作第1号が完成するなど、技術面で一定の目標が達成されること)」、「実用化される(経済的にめどがついて実際に用いられること)」、「普及する(実用化されたものが広く一般に使用されること)」の3つのキーワードで明示した。また、課題の実現場所は日本国内を想定しており、調査時点以後約30年の間に世界的な規模での戦争、経済社会を覆す規模の天変地異などは起こらないものとした。なお、本調査の実施に際しては、科学技術庁による技術予測

調査（科学技術政策研究所ら，1997）の方法を参考にした。

アンケートでは以下の調査項目を設定し，各技術予測課題について回答を求めた；①当該課題の研究開発を推進することの重要度，②当該課題の実現予測時期，③当該課題の実現に向けて研究開発を促進していく上で，効果が大きいと考えられる政策手段。表-6.1は，各調査項目の選択肢を示したものである。回答の際は，選択肢の中からそれぞれ一つを回答するものとした。なお，各課題に対する回答者の専門度もあわせて質問を行い，専門的知識のない課題は回答できないようにした。

重要度の回答結果は，各カテゴリーに重みづけした重要度指数を下式で定義し，各課題について算出した。

表-6.1 技術予測調査の調査項目およびカテゴリー区分

(重要度)	
①大	；非常に重要な課題である。
②中	；重要な課題である。
③小	；多少重要な課題である。
④なし	；重要な課題ではない。
(実現予測時期)	
①	1998年～2005年の間に実現する。
②	2006年～2010年の間に実現する。
③	2011年～2015年の間に実現する。
④	2016年～2020年の間に実現する。
⑤	2021年～2025年の間に実現する。
⑥	2026年～2030年の間に実現する。
⑦	2031年以降に実現する。
⑧	実現しない。
⑨	わからない。
(実現に向けた政策手段)	
①	人材養成；研究者，技術者および研究支援者の養成，確保
②	人的交流；産学官の人的交流，異分野間の協力等の促進制度の拡充
③	研究資金；行政が負担する技術開発・研究資金の拡充
④	基盤整備；路網，通信設備，地理データ等の基盤整備
⑤	負担軽減；技術導入に伴う負担軽減措置の拡充（補助金，低利融資等）
⑥	規制整備；関連する規制の整備（緩和，強化，新設，廃止）
⑦	その他

$$\text{重要度指数} = (100 \cdot N_h + 50 \cdot N_m + 25 \cdot N_l) / N$$

N_h ：重要度「大」回答者数， N_m ：重要度「中」回答者数， N_l ：重要度「小」回答者数， N ：重要度総回答者数

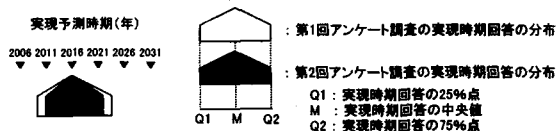


図-6.1 実現予測時期のデータ形式

また，実現予測時期の回答結果は，図-6.1にあるような五角形で表した。五角形の頂点（M）は，回答全体の中央値である。また，五角形の幅（Q1とQ2の距離）は，実現すると予測した回答者のうち，中間的な半数の回答者による実現時期の分布を示している。この幅が小さいとき，回答者の意見に強いコンセンサスがあるとみることができる。

3. 調査結果

3.1 技術予測課題の設定

3.1.1 機械分野

表-6.2は，予備調査の結果をもとに設定した機械分野の技術予測課題（14課題）である。技術予測課題の選定においては，技術内容の重要性や一般性を考慮するとともに，複数の回答者から提案のあった課題を優先して採用した。また，23の課題案については，複数の回答者が不要と回答した課題案のみを不採用とし，残りの課題は回答者の意見をもとに適宜修正を加えた。

アンケート調査では，技術予測課題として採用した以外にも多数の技術課題が提案された。そのうちの主なものを表-6.3に示す。機械分野の提案課題数は74で，4分野中最も多かった。提案の多かったものとしては，ハイブリッド・マシンや造林用多工程機械など，機能を複合化した機械に関するもの（7課題），機械本体や搬器，ワイヤーロープに用いる軽量・高強度な材料（6課題），地拵え・下刈りなど造林用自走式機械（6課題），チェーンソー・刈払機などの電動化（4課題），機械操作・作業の無人化（4課題），搬器のリモコン操作とワンマン集材（4課題）などがあつた。ハーベスタやプロセッサなど既存大型機械の高機能化が提案された一方で，パーソナル・ムーバや腐朽判定機械など，新たな小型機械の開発に関する提案もあつた。なかには，ゴキブリ型刈払機や架線式植付機械といったユニークな課題もみられた。一方で，軽トラク用のアタッチメントなど既に普及した機械への簡易な機能付加に関する技術課題も提案された。

表-6.2 森林利用技術予測調査の予測課題（機械分野，14課題）

1. 小形で軽量の移動式林内枝払い機械が普及する。
2. 人工知能と各種センサを備えた自走式機械が開発され、収穫・搬出作業の無人化技術が実現する。
3. *耕耘・除草・植付けなどの複合作業を行う多工程造林機械が開発される。
4. *小形で大容量のバッテリーが開発され、チェーンソーや刈払機、枝打機の電動化が実現する。
5. *タワーヤーダとプロセッサのハイブリッド・マシン（複合機械）が普及する。
6. 地拵えとポット苗の植付けが可能な自走式植付機械が実用化される。
7. *苗木と他植生との判別が可能なセンサを備えた自走式下刈り機械が実用化される。
8. *急傾斜地での作業が可能な自走式地拵え機械が実用化される。
9. 脚式歩行型の森林作業用ベース・マシンが実用化される。
10. ハーベスタとフォワーダのハイブリッド・マシン（複合機械）が実用化される。
11. *木材収穫と森林撫育の作業を組み合わせた多機能機械が実用化される。
12. *軽量で高強度の新素材で作られたロープがワイヤーロープに代わって普及する。
13. 小形で高性能・高出力のハーベスタが緩傾斜地の間伐作業に普及する。
14. *アルミやチタン合金など、軽量・高強度の金属材料で作られた搬器が普及する。

注) *はアンケート調査で提案された課題。その他は著者らが作成した課題（アンケートでの意見を参考に適宜修正した）。

表-6.3 アンケート調査で提案された主な技術課題（機械分野）

- 車格に比較して安定性が高く、作業半径の大きい関節部接地式森林作業機械が実用化される。
- 広葉樹の伐倒・枝払い・玉切り処理が可能なハーベスタ・ヘッドが開発される。
- フールブーフ、フェールセーフ機能を装備したハーベスタやプロセッサが開発される。
- 姿勢制御が可能な（Self-leveling）ハーベスタ・運搬車が実用化される。
- 曲がり材を判別可能なハーベスタやプロセッサが普及する。
- 高品質材の処理が可能なプロセッサ・ヘッドが普及する。
- 水圧式のソーが普及する。
- 立木・伐根・転石等の自走障害物を検知・回避しながら、事前に位置情報の入った伐採対象木まで接近できる車輛系伐木機械が開発される。
- マルチングと直播造林をドッキングし、地拵え・マット敷設・小穴あけ・種子播きを同時に行う造林用プロセッサが開発される。
- ゴキブリ型自走カッター（刈払機）が開発される（育林木と刈払草木本をセンサで見分けて斜面を走行しながら刈り払いするロボット。小型軽量、ゴキブリのように平べったくスマートで表裏どちら向きでも同じ性能を持つ）。
- タワーヤーダを利用した造林作業システムが実用化される（インターロック機能を利用し、搬器の部分に苗の植付け可能なシステムを開発）。
- Tri-Track Moverが実用化する。
- 植生上を走行しても、植生に損傷を与えないくらい低踏圧の足回り装置が開発される。
- 数10mの範囲を連射打込み式ポット苗植込み機械が開発される。
- 下層植生の繁茂の著しい更新地の耕耘用に、海外から導入されたスポット・スカリファイアが普及する。
- 森林用原動機付自転車普及し、それに合わせた規格の歩道が整備される。
- 林内の移動をスピーディーに行うパーソナル・ムーバ（1人乗り）が開発される。
- 伐倒前に腐朽や病気等が判定できる携帯式機械が開発される。
- 太陽エネルギーや風力等の自然エネルギーを利用した小型バッテリー駆動による可搬式林業機械が実用化される。
- プロセッサ作業で発生した枝条のチップ化による林地への養分還元技術が実用化される。
- オガ屑・枝葉等をエネルギーとした発電装置が普及する。
- ジョイスティック操作による集材機が普及する。
- 軽トラック（4WD）の車体を利用した集材用ウインチや小型のタワーヤーダ等のアタッチメントが普及する。

注) 技術予測調査の予測課題としたものを除く。

3.1.2 作業分野

表-6.4は作業分野の技術予測課題（13課題）を示したものである。また、これ以外に提案された主な技術課題を表-6.5に示す。作業分野については26の技術課題が提案された。提案課題のなかでは、GISやGPSの技術を応用した課題が最も多かった（5課題）。

また、マルチングや除草剤の利用など、下刈り作業の省力化技術に関する提案も目立った（3課題）。その他、林地残材等のバイオマスの利用、環境影響評価手法（LCA）の普及、山元と木材需要者との情報ネットワーク構築などが課題として挙げられた。

3.1.3 労働および林道分野

労働分野（5課題）および林道分野（5課題）の技術予測課題をまとめて表-6.6に示す。また、表-6.7は両分野について他に提案された主な技術課題を示したものである。労働分野の提案課題数は11で、4分野中最も少なかった。安全性や快適性の向上を目的とした林業用作業服の提案が多くみられた（4課題）。また、乗用モノレールやリフレッシュカーなど、ハードの普及の提案がなされる一方、作業マニュアルやメンタルロードの評価法など、ソフト面の普及に関する提案もみられた。

林道分野には16の課題が提案された。路面排水に関する課題が最も多く（4課題）提案された。また、

表-6.4 森林利用技術予測調査の予測課題（作業分野，13課題）

-
15. *搬器の遠隔操作（リモコン）が可能となり、ワンマン架線集材が普及する。
 16. 低利用広葉樹やササ、林地残材等の未利用資源の効率的な収集と育成の技術が実用化され、エネルギー・経済バランスのとれた森林バイオマスの持続的利用システムが実現する。
 17. *植付け時のマルチング（地表被覆）手法が普及し、下刈り作業の省力化が実現する。
 18. 森林作業に伴う環境インパクト（林木の成長と材質、土壌浸食、河川の水質・水量、動植物を含めた生態系）の事前予測・評価法が普及する。
 19. 高性能林業機械化に対応した事業量の安定供給システムが普及する。
 20. 携帯電話やGPS（衛星測位システム）を利用した森林内情報通信システムが普及する。
 21. *GIS（地理情報システム）やリモート・センシング技術を利用した収穫・搬出計画法が普及する。
 22. *GPS（衛星測位システム）を利用した平面型架線集材の自動化技術が実用化される。
 23. *タワーヤードを用いた非皆伐作業方法が確立され、軽架線集材が普及する。
 24. 森林の持つ環境保全機能を定量的に評価する手法が確立され、機能を維持しながら木質資源の収穫を行う管理技術が普及する。
 25. *運材トラックにコンピュータ・携帯電話・ナビゲーションシステムを備えた効率的な集荷・輸送システムが普及する。
 26. *機械植付けを前提としたコンテナ育苗が普及する。
 27. 環境負荷の小さい生分解性潤滑油・作動油が普及する。
-

注）表-6.2に同じ。

表-6.5 アンケート調査で提案された主な技術課題（作業分野）

-
- ・GISや高度解像度衛星写真を利用した持続的な森林利用のための意思決定支援シミュレーション・システムが開発される。
 - ・単木管理による木材生産（森林資源管理）システムが普及する。
 - ・作業方法（皆伐・択伐など）の選択や、機械の開発時において、環境負荷を予想するためのLCA（Life Cycle Assessment）手法が普及する。
 - ・間伐作業にハーベスタを導入するための列状間伐が普及する。
 - ・樹木生育速度の制御法が開発される。
 - ・環境に悪影響を及ぼすことのない除草剤が普及し、下刈りがいらなくなる。
 - ・間伐リング（仮称）等、自然力（木の太り）を利用した間伐技術が開発される。
 - ・ササや枝条のコンポスト化技術が普及する。
 - ・山林関係者と電力・石油などエネルギー業界とのネットワークが構築され、搬点にバイオマス発電所やバイオマス収集所などが普及する。
 - ・森林所有者や伐採者と、製材所・市場・設計事務所・建設住宅会社などの間で価格需給などの情報交換が可能なネットワークが普及する。
 - ・プロセッサの材積計算が信頼できるものとなり、携帯電話によるデータ送信により、即時で材の取り引きがなされる商取引が普及する。
-

注）表-6.3に同じ。

表-6.6 森林利用技術予測調査の予測課題（労働・林道分野、各5課題）

(労働分野)	
28.	暑熱環境下での下刈り作業において衣服内気候を緩和する林業用作業服が普及する。
29.	林業機械シミュレータを利用したオペレータの養成・教育が普及する。
30.	高齢者・未経験者でも操作が簡単な林業機械用マニピュレータが普及する。
31.	*高い身体防護機能を持つ林業用作業服が普及する。
32.	*都市住民による森林労働ボランティアのための作業マニュアルが普及する。
(林道分野)	
33.	*環境負荷の小さい近自然型林道施工法が普及する。
34.	*林道施工に排水性舗装（表層と路盤の間に不透水な基層を置き、雨水を側溝へ排水する）が普及する。
35.	GIS（地理情報システム）を利用した林道の評価・管理法が普及する。
36.	*景観評価手法を取り入れた林道設計が普及する。
37.	GIS（地理情報システム）を利用した森林基盤整備計画法が普及する。

注）表-6.2に同じ。

低環境負荷的林道施工にかかわる課題も多く（3課題）みられた。その他、歩道のような簡易な路網の整備や、林道作設機械などハードの開発が提案された。

3.2 技術予測調査

3.2.1 回答者数および属性

技術予測調査の回答者数およびその属性を表-6.8に示す。第1回調査には50名から回答があり、回答率は63%であった。第2回調査はこの50名を対象として行い、45名から回答を得た（回答率90%）。専門度「なし」の回答者を除いた各課題の回答者数の平均は、第1回調査が36.4名、第2回調査が33.8名であった。

回答者の性別は、第1回調査の1名を除く全員が男性であった。年齢は40歳代が約4分の1を、50歳以上がおおよそ半数をそれぞれ占める一方、30歳代以下の若年層が2割以下と少なかった。職業については、大学や国公立研究機関が6割近くを占め、残りの4割が機械メーカーや林業などであった。また、研究・開発の従事者が約3分の2を占めた。専門度について全課題の平均をみると、専門度小（課題に関連した専門的

表-6.7 アンケート調査で提案された主な技術課題（労働・林道分野）

(労働分野)	
•	途上国向けの森林作業マニュアルが普及する。
•	森林作業におけるメンタルロードの評価法が普及する。
•	森林作業用の軽量、快適な作業靴が普及する。
•	乗用モノレール網が普及し、高齢者の作業現場までの到着が楽になる。
•	暑熱環境を休憩で緩和するリフレッシュカーが普及する。
(林道分野)	
•	透水性舗装、長寿命舗装など、一般道路で開発された舗装技術が高規格林道にも普及する。
•	簡易歩道作設機が開発され、高密度林内歩道網での森林管理作業が行なわれる。
•	林道建設用専用機械が実用化される。
•	管理道（歩道程度から2m幅くらいまで）の整備計画が普及する。
•	尾根近くを平行に通る、開けた尾根の先端部に広い土場（ヘリポートも含めて）を持つ林道が普及する。

注）表-6.3に同じ。

表-6.8 技術予測調査の回答者数および属性

項目	カテゴリー	単位：人，%			
		第1回調査		第2回調査	
		人数	比率	人数	比率
性別	男	49	98	45	100
	女	1	2	0	0
年齢	20歳代	3	6	1	2
	30歳代	6	12	7	16
	40歳代	14	28	12	27
	50歳代	12	24	11	24
	60歳代	11	22	11	24
	70歳代以上	4	8	3	7
所属	大学	17	34	15	33
	国公立研究機関	11	22	11	24
	機械メーカー	9	18	8	18
	林業（会社、個人）	8	16	6	13
	その他	5	10	5	11
職種	研究・開発に従事	32	64	30	67
	上記以外	18	36	15	33
専門度の平均	大	-	13	-	12
	中	-	28	-	23
	小	-	59	-	65
	計	50	100	45	100

な文献を読んだり、専門家の話を聞いたりしたことがある)が半数以上を占め、専門度大(現在当該課題に関連した研究・業務に従事している)および専門度中(過去に当該課題に関連した研究・業務に従事したことがある)は相対的に少なかった。

3.2.2 重要度および実現予測時期

(1) 機械分野

図-6.2は、機械分野の各課題について重要度指数と実現予測時期を示したものである。重要度指数(第2回調査における値)の平均値は56.6であった。「小形ハーベスタの普及」(78.8)は、他の課題と比較してきわめて高い重要度が与えられた。これ

課題番号	課題	重要度指数	実現予測時期						実現しない	わからない
			2006	2011	2016	2021	2026	2031		
1	小形で軽量の移動式林内枝払い機械が普及する。	52.0	■						5%	10%
2	人工知能と各種センサを備えた自走式機械が開発され、収穫・搬出作業の無人化技術が実現する。	45.7			■	■			11	3
3	耕耘・除草・植付けなどの複合作業を行う多工程造林機械が開発される。	56.4			■				3	3
4	小形で高容量のバッテリーが開発され、チェーンソーや刈払機、枝打機の電動化が実現する。	53.3	■						0	10
5	タワーヤーダとプロセッサのハイブリッド・マシン(複合機械)が普及する。	54.3	■						6	3
6	地植えとポット苗の植付けが可能な自走式植付機械が実用化される。	63.6	■						0	0
7	苗木と他植生との判別が可能なセンサを備えた自走式下刈り機械が実用化される。	55.1			■	■			6	9
8	急傾斜地での作業が可能な自走式地植え機械が実用化される。	59.0			■	■			8	8
9	脚式歩行型の森林作業用ベース・マシンが実用化される。	55.3			■	■			5	3
10	ハーベスタとフォワーダのハイブリッド・マシン(複合機械)が実用化される。	46.6	■						0	0
11	木材収穫と森林撫育の作業を組み合わせた多機能機械が実用化される。	45.0			■	■			10	16
12	軽量で高強度の新素材で作られたロープがワイヤーロープに代わって普及する。	66.9	■						3	8
13	小形で高性能・高出力のハーベスタが緩傾斜地の間伐作業に普及する。	78.8	■						0	3
14	アルミやチタン合金など、軽量・高強度の金属材料で作られた搬器が普及する。	60.8	■						0	17

図-6.2 技術予測課題の重要度と実現予測時期(機械分野)

より、機械分野においては小形機械の開発・普及（酒井，1998）が重視されていると考えることができる。このほかにも、「新素材ロープの普及」（66.9）や「自走式植付機械の実用化」（63.6）などで高い重要度が与えられた。

実現予測年（第2回調査における回答の中央値）については、14課題のうち10課題が2015年以前となった。「タワーヤーダとプロセッサのハイブリッド・マシンの普及」（2009年）は、他の課題に比べて

予測時期の幅が特に小さく、回答者の意見の一致がみられた。「収穫・搬出作業の無人化技術の開発」（2021年）は、今回設定した技術課題のなかで実現予測年が最も遅く、また「苗木を判別可能な自走式下刈り機械の実用化」や「脚式歩行型ベース・マシンの実用化」なども遅れて実現することが予測された。これらの課題は、いずれも予測時期の幅が大きく、重要度指数が平均以下となっている。このことから、技術開発に長期を要する課題は、実現時期に

課題番号	課題	重要度指数	実現予測時期							実現しない	わからない
			2006	2011	2016	2021	2026	2031			
			[House icon indicating prediction period]								
15	搬器の遠隔操作(リモコン)が可能となり、ワンマン架線集材が普及する。	66.0	[House icon]							0%	0%
16	低利用広葉樹やササ、林地残材等の未利用資源の効率的な収集と育成の技術が実用化され、エネルギー・経済バランスのとれた森林バイオマスの持続的利用システムが実現する。	68.0	[House icon]							0	6
17	植付け時のマルチング(地表被覆)手法が普及し、下刈り作業の省力化が実現する。	57.8	[House icon]							0	3
18	森林作業に伴う環境インパクト(林木の成長と材質、土壌浸食、河川の水質・水量、動植物を含めた生態系)の事前予測・評価法が普及する。	84.7	[House icon]							0	0
19	高性能林業機械化に対応した事業量の安定供給システムが普及する。	82.9	[House icon]							0	5
20	携帯電話やGPS(衛星測位システム)を利用した森林内情報通信システムが普及する。	66.2	[House icon]							0	0
21	GIS(地理情報システム)やリモート・センシング技術を利用した収穫・搬出計画法が普及する。	71.8	[House icon]							0	0
22	GPS(衛星測位システム)を利用した平面型架線集材の自動化技術が実用化される。	38.9	[House icon]							14	11
23	タワーヤーダを用いた非皆伐作業方法が確立され、軽架線集材が普及する。	82.7	[House icon]							0	5
24	森林の持つ環境保全機能を定量的に評価する手法が確立され、機能を維持しながら木質資源の収穫を行う管理技術が普及する。	86.7	[House icon]							0	3
25	運材トラックにコンピュータ・携帯電話・ナビゲーションシステムを備えた効率的な集荷・輸送システムが普及する。	40.2	[House icon]							3	6
26	機械植付けを前提としたコンテナ育苗が普及する。	46.8	[House icon]							0	13
27	環境負荷の小さい生分解性潤滑油・作動油が普及する。	55.3	[House icon]							0	6

図-6.3 技術予測課題の重要度と実現予測時期（作業分野）

について専門家間の意見が多様である一方で、重要度が低く評価される傾向のあることがうかがえる。なお、「収穫・搬出作業の無人化技術の開発」と「収穫と撫育を組み合わせた機械の実用化」の2課題は、回答者の1割が実現しないと回答しており、実現の可能性を疑問視する意見も強い。

(2) 作業分野

作業分野の調査結果を図-6.3に示す。重要度指数の平均は65.2であり、他の分野と比べて大きな値となった。きわめて高い重要度（重要度指数80以上）が与えられた課題は、次の4つであった；「森林の環境保全機能を維持可能な収穫管理技術の普及」（86.7）、「森林作業に伴う環境インパクトの事前予測・評価法の普及」（84.7）、「高性能林業機械への事業安定供給システムの普及」（82.9）、「タワーヤダを用いた非皆伐作業の普及」（82.7）。前の2つはいずれも、環境保全を志向した技術である。森林環境に配慮した作業技術の確立（猪内, 1996）が、作業分野における重要課題と認識されている。残る2つの課題については、どちらも高性能林業機械化の大きな問題点として指摘されている（尾張ら, 1997；後藤, 1997）。林業経営の問題解決に直ちに貢献するような技術もまた、重要度が高いと考えられている。これら以外にも、「GISを用いた収穫・搬出計画法の普及」（71.8）や「森林バイオマスの育成・収集技術の実用化」（68.0）などで重要度が高くなっ

ている。

実現時期については、2014年までにすべての課題が実現すると予測された。最も早期に実現すると予測された課題は、「タワーヤダを用いた非皆伐作業の普及」（2007年）であった。反対に、最も遅れて実現すると予測されたのは「森林バイオマスの育成・収集技術の実用化」（2014年）であった。「ワンマン架線集材の普及」（2008年）は予測時期の幅が小さく、回答者の意見に強いコンセンサスがみられた。一方、「平面型架線集材の自動化技術の実用化」は、実現しないとの回答が14%を占め、重要度指数も低い値（38.9）にとどまった。

(3) 労働分野

図-6.4は、労働分野の調査結果を示したものである。重要度指数の平均は55.6であった。重要度指数を課題別にみると、「高い身体防護機能を持つ作業服の普及」が75.0と高い値を示したものの、その他は平均以下であった。これより、労働分野においては安全性の向上に寄与するような技術課題が重要視されていることがわかる。

実現予測年は、いずれの課題も比較的早い時期となった。なかでも、「森林ボランティア向けの作業マニュアルの普及」が最も早く（2007年）実現することが予測された。一方、最も遅れて実現すると予測された課題は、「林業機械用マニピュレータの普及」（2011年）であった。また、2009年に実現する

課題番号	課題	重要度指数	実現予測時期						実現しない	わからない
			2006	2011	2016	2021	2026	2031		
28	暑熱環境下での下刈り作業において衣服内気候を緩和する林業用作業服が普及する。	48.3	▲	▲	▲	▲	▲	▲	10%	7%
29	林業機械シミュレータを利用したオペレータの養成・教育が普及する。	52.6	▲	▲	▲	▲	▲	▲	3	3
30	高齢者・未経験者でも操作が簡単な林業機械用マニピュレータが普及する。	53.8	▲	▲	▲	▲	▲	▲	3	0
31	高い身体防護機能を持つ林業用作業服が普及する。	75.0	▲	▲	▲	▲	▲	▲	3	3
32	都市住民による森林労働ボランティアのための作業マニュアルが普及する。	48.4	▲	▲	▲	▲	▲	▲	0	3

図-6.4 技術予測課題の重要度と実現予測時期（労働分野）

課題番号	課題	重要度指数	実現予測時期						実現しない	わからない
			2006	2011	2016	2021	2026	2031		
			[House icon]							
33	環境負荷の小さい近自然型林道施工法が普及する。	86.4	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	0%	3%
34	林道施工に排水性舗装（表層と路盤の間に不透水な基層を置き、雨水を側溝へ排水する）が普及する。	47.3	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	0	14
35	GIS（地理情報システム）を利用した林道の評価・管理法が普及する。	55.2	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	0	7
36	景観評価手法を取り入れた林道設計が普及する。	43.0	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	0	9
37	GIS（地理情報システム）を利用した森林基盤整備計画画法が普及する。	58.9	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	[House icon]	0	3

図-6.5 技術予測課題の重要度と実現予測時期（林道分野）

と予測された「高い身体防護機能を持つ作業服の普及」は、予測時期に強いコンセンサスがみられた。なお、「衣服内気候を緩和する作業服の普及」については、実現しないとする回答が1割を占めた。

(4) 林道分野

林道分野の調査結果を図-6.5に示す。重要度指数の平均は58.1であった。「近自然型林道施工法の普及」の指数値は86.4であり、他の課題に比べて非常に高い重要度が与えられた。このことから、林道分野においても作業分野と同様、森林環境の保全を志向した技術の確立が重要視されていると考えられる。一方で、「排水性舗装の普及」(47.3)や「景観評価を取り入れた林道設計の普及」(43.0)では、重要度指数が小さくなっている。

実現予測年は、いずれの課題もほぼ同じ時期(2008~2010年)となった。予測時期の幅も概して小さく、回答のコンセンサスは良好といえる。また、課題の実現に否定的な回答がみられず、いずれの課題も実現すると考えられている。

3.2.3 実現に向けた政策手段

図-6.6は、「技術予測課題の実現に向けた有効な政策手段」の各選択肢に対する平均回答比率を分野別に示したものである。37の技術予測課題全体の平均回答比率では、選択肢の中で「行政が負担する技術開発・研究資金の拡充」(研究資金)が最も高く、50.5%

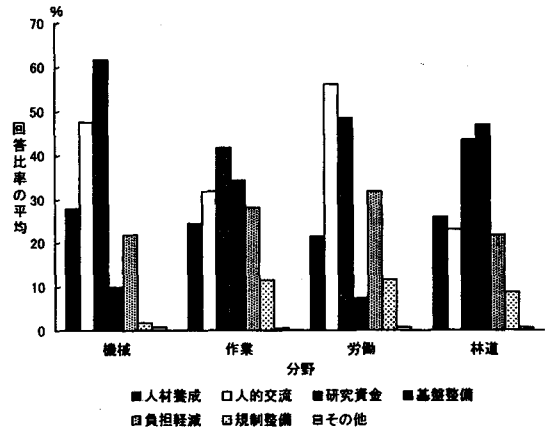


図-6.6 技術予測課題の実現に向けた有効な政策手段

となっている。次いで高いのは、「産学官の人的交流、異分野間の協力等の促進制度の拡充」(人的交流)の39.9%である。「関連する規制の整備」(規制整備)の回答比率は7.4%で、今回設定した政策手段のなかでは最も低い。その他、「研究者、技術者および研究支援者の養成・確保」(人材養成)(25.6%)、「技術導入に伴う負担軽減措置の拡充」(負担軽減)(25.4%)、「路網、通信設備、地理データ等の基盤整備」(基盤整備)(23.2%)の回答比率となっている。

分野別にみると、機械分野では「研究資金」の回答比率(61.8%)が特に高いほか、「人的交流」(47.5%)も比較的高い値を示している。作業分野に

においても、「研究資金」の回答比率(41.9%)が最も高いものの、他の分野に比べて選択肢間の回答比率の差が小さくなっている。また、労働分野では「人的交流」(56.2%)において、林道分野では「基盤整備」(47.1%)において、それぞれ回答比率が最も高くなっている。

4. 小括

アイデアのないところに新たな技術は生まれないとすれば、調査結果は将来の林業生産技術に関する一つの方向を示しているといえる。調査対象とした課題のうち、重要度指数の上位3課題は、いずれも環境保全を志向した技術であった。また、わが国の林業経営が早急に必要としている2つの技術課題が、これらに次ぐ高い重要度を示した。このほか、小形機械の開発や労働安全性向上のための技術にも高い重要度が与えられた。以上の結果は、林業生産技術の研究開発を進めていく上で考慮されるべき点である。

実現時期については、調査課題の9割が2015年までに実現すると予測された。今後十数年の間に、様々な新しい林業生産技術の普及・実用化が期待できるといえる。一方、複雑な機構を持つ機械の開発には長期間を要するとの見通しが示された。今後これら課題の実現に向けた研究開発を進めると同時に、既存機械の改良や機能付加など短期的な技術開発も平行して行うことが重要である。

さらに、林業生産技術の振興に向けた方策として、とりわけ技術開発・研究に対する資金的な支援、および産学官の人的交流や異分野間協力が必要であるとの結果が示された。技術開発を今後促進していく上で、以上の点を考慮した政策の遂行が望まれる。

なお、予備調査結果の全般的な傾向として、研究者からの提案が新機械の開発をはじめとする中長期的な技術開発課題であった一方、事業者からは現行機械への機能付加など短期的な技術課題が提案された。今後の技術開発にあたっては両者とも重要であり、研究サイドと現場サイドの意思疎通を図っていくことが必要である。また、アンケートの回答のなかで、21世紀における森林管理のあるべき姿を見据えた上で、その実現に必要な技術は何かを考えることが必要と指摘する記述が多くみられた。この問題に取り組むためには、森林・林業関係者間での幅広い議論が不可欠であり、今後の課題である。

Ⅶ 結論

北海道における高性能林業機械化は、一部の素材生産事業体による自主的な取り組み(外国製機械の輸入)から始まった。円の価値が低かった当時、実績もない高性能林業機械の導入は大きな経営リスクを伴うものだったと想像される。そのリスクを承知で新技術を採用する革新的な事業体があったからこそ、高性能林業機械化はスタートをきることができた。素材生産業の内部からこうした行動が起きなければ、行政が高性能林業機械化の推進に乗り出すこともなかったに違いない。このことは、林業生産技術のイノベーションにおいて、技術の導入主体が能動的に行動することの重要性を示すとともに、イノベーションに対しては受動的、追隨的にならざるを得ない行政の限界をも表している。

高性能林業機械化の発展動向に対しては、その時々技術的、経営的、政策的条件が強い影響を及ぼしていた。なかでも、景気動向や為替変動といった経済情勢の変化による影響が顕著であった。北海道における高性能林業機械の普及拡大は、バブル景気と円高という当時の経済情勢のもとで、紙パルプ企業が導入を強力に推し進めたことが契機となった。もし、バブルの崩壊があと数年早かったならば、高性能林業機械化の発展は大幅に遅れていたに違いない。戦後の北海道におけるチェーンソーとトラクタ、および九州における高性能林業機械は、いずれも台風という自然災害を契機として普及が進んだ。北海道における高性能林業機械化の発展は、そうした自然的偶然がなかったかわりに、経済的偶然が契機となった。このことから、わが国における林業生産技術のイノベーションには、常に何らかの偶然的事象が必要であるとも考えられる。

高性能林業機械の保有台数は、発展過程の各段階で普及の速度が異なるものの、一貫して増加傾向で推移してきた。現時点では既に、多数の素材生産事業体によって高性能林業機械が保有されている。しかし、こうした普及の広がりとは一方で、新たに導入する余地を狭める方向にも働くと考えられる。成長曲線モデルを用いた普及予測(Ⅲ章)では、高性能林業機械の保有台数が一定の飽和水準に収束していく様子が数量的にも示された。保有台数の飛躍的増加が期待できない状況のもとでは、高性能林業機械化の質的側面、すなわち既に導入された機械をいかに活用していくかが重要となる。

多くの高性能林業機械は、稼働率が低い状態にある。SDモデルによる普及シミュレーション（IV章）では、高性能林業機械作業システムの事業比率が近年上昇したにも関わらず、事業量自体はほとんど増えていなかったとの結果が得られた。高性能林業機械の保有台数は増加傾向にあることから、事業量の確保が一層困難となっていると考えられる。こうした状況のもとで、高性能林業機械の導入推進施策を継続することは、機械の過剰導入を招き、機械利用の効率化を妨げることも想定される。今後は、十分な事業量の確保を通じた稼働率の向上に対して、政策的にも一層取り組んでいくことが求められる。

他方、林業労働者の減少・高齢化の進行を考えたとき、高性能林業機械化のさらなる発展は必要不可欠となっている。IV章のシミュレーションでは、半機械化作業システムが既にかんがりの比率で普及しているため、全機械化作業システムの普及によって労働生産性を向上させ、一定量の素材生産量を維持していくとの予測結果が得られた。しかし現実には、全機械化作業システムの普及があまり進んでおらず、今後の普及に関しても予測結果のようにはならない可能性がある。労働者の減少傾向が続く一方で、高性能林業機械化の発展が停滞することになれば、近い将来素材生産量が激減するという事態も避けられない。林業生産活動を維持し、木質資源の持続的利用を図っていくためにも、今後は全機械化作業システムの普及拡大に向けた取り組みが重要である。

全機械化作業システムの普及が進まない主な要因としては、初期投資が高額である一方で、適用可能な事業地の少ないことが挙げられる。普及を促進するための方策としては、機械購入補助やリース・レンタルなどの方法によって初期投資負担を軽減することに加え、採算的に必要な規模以上の事業量を供給していくことが考えられる。V章で得られた最小利用規模の値は、対象としたハーベスタ・フォワード作業システムを導入する際、最低限確保されるべき事業量を示したものである。各作業システムの最小利用規模に応じた事業量を安定的に供給される地域的体制の構築が、全機械化作業システム普及の必要条件となるだろう。

さて、長期的な展望のもとでは、高性能林業機械をはじめとする様々な林業生産技術について、さらなるイノベーションが進むと考えられる。VI章では、将来的に実現が期待される林業生産技術の具体的な課題を、実現予測時期とともに示すことができた。また、今後

の技術開発の方向性として、森林環境の保全が一つのキーワードになると考えられた。予測された技術課題の具体化に向けて、技術開発資金の拡充など政策的な開発支援が一層求められる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたって、多くの方々にお世話になった。ここに記して、心より感謝申し上げる。

東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター秩父演習林の仁多見俊夫助教授、および同研究科森林科学専攻森林利用学研究室の小林洋司教授には、終始多大なるご指導ご支援を賜った。仁多見先生は、著者が東京大学大学院博士課程に在学中の指導教官であり、同先生の厳しくも暖かなご指導によって本論文を書き上げることができた。小林先生には論文審査の過程で多大な労をとっていただいたとともに、同先生の論文全体に対する適切なご指摘によって本論文の論旨を一層明瞭にすることができた。なお、本論文のVI章は両先生との共同研究の成果である。森林利用学研究室の酒井秀夫助教授には、草稿の段階から何度も論文に目を通していただき、的確なご指導ご助言をいただいた。科学の森教育研究センター千葉演習林の山本博一教授と同センター北海道演習林の大橋邦夫教授には、激務の最中にもかかわらず論文審査をお引き受けいただき、数々の有意義なご指摘を賜った。森林利用学研究室の有賀一広助手には、論文審査の事務手続き等でご助力いただいた。このほか、全てのお名前を挙げることはできないが、森林利用学研究室、科学の森研究センター研究部、および同センター北海道演習林の教官、技官、事務官、非常勤職員、学生、大学院生の諸氏にはたいへんお世話になった。

北海道大学農学部附属演習林の湊克之・元助教授には、著者がまだ学生の時に数々の現地調査に同行させていただき、高性能林業機械化の問題に関心を持つきっかけを与えていただいた。また、同大学大学院農学研究科環境資源学専攻森林管理保全学講座森林施業計画学分野の和孝雄・元教授、小鹿勝利助教授には、日々の業務において著者の論文執筆にご配慮いただいた。さらに、同分野の菅野高穂・元助教授や歴代の事務職員、学生、大学院生の諸氏からは多大なご支援をいただいた。

森林総合研究所の嶋瀬拓也氏、同研究所北海道支所の駒木貴彰氏の研究からは、北海道の高性能林業機

械化に関して数々の貴重な知見を賜った。北海道水産林務部の方々には、本論文で引用した資料を収集する上でご便宜を図っていただいた。V章で使用したデータについては、住友林業フォレストサービス(株)北海道事業所の山口茂之・元所長から格別のご協力を賜った。また、VI章のアンケート調査は、多くの回答者のご協力によってはじめて実現したものである。さらに、著者がこれまで出会った多くの素材生産事業者の方々には、現場の実態に関して率直なお話を聞かせていただき、自らの問題意識を醸成する上で重要な役割を果たした。

最後に、著者がこれまで論文執筆に専念できたのは、家族の献身的な支えによるところが大きい。この場を借りて、妻・玲子と長女・春佳に深く感謝の意を表したい。

引用文献

- Akaike, H. (1973): Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, Proc. 2nd Intl. Symposium on Information Theory, 267-281, Akademiai Kiado, Budapest
- Bates, D. M. and Watts, D. G. (1988): Nonlinear regression analysis and its applications, 365pp, John Wiley & Sons, New York
- Dalkey, N. and Helmer, O. (1963): An experimental application of the Delphi method to use of experts, Management Science 9, 458-467
- Dalkey, N. (1969): An experimental study of group opinion - the Delphi method, Futures 1: 408-425
- Drushka, K. and Konttinen, H. (1997): Tracks in the forest, 254pp, Timberjack Group Oy, Helsinki
- 後藤純一 (1997): 軽架線集材作業計画のための地形区分(1) - 残存立木の被害と土壌の締め固め -, 森林学誌12(1), 9-18
- Gupta, U. G. and Clarke, R. E. (1996): Theory and Applications of the Delphi Technique: A Bibliography (1975-1994), Technological Forecasting and Social Change 53, 185-211
- 速水 亨・金田康嗣・山口信幸・料所俊文・真下正樹 (1991): 機械化林業への取組み, 182pp, 全国林業改良普及協会, 東京
- 北海道農政部農業改良課 (1993): 北海道における特定高性能農業機械の導入に関する計画, 29pp, 北海道農業機械協会, 北海道
- 北海道林業改良普及協会 (1989): 北海道林業の機械化をめざして - カナダ・北欧の林業を視察して -, 175pp, 北海道林業改良普及協会, 札幌
- 北海道林業機械化協会 (1978): フェラーバンチャ (林内作業車) の作業実験結果, 機械化林業292, 15-31
- 北海道林業機械化推進協議会監修 (1995): 北海道の高性能林業機械化ガイドブック - 機械化を目指す人のために -, 北海道林業機械化協会, 167pp, 札幌
- 北海道林道協会 (1990): 北海道民有林林道の軌跡 - 協会創立40周年記念誌 -, 462pp
- 北海道林務部 (1988): 高能率森林施業システム開発普及推進事業報告書, 58pp
- 北海道林務部 (1993): 北海道高性能林業機械化基本方針 - 北海道の高性能林業機械化に向けて -, 36pp
- 北海道水産林務部 (1998): 北海道の林産業 (平成9年版), 北海道木材林産協同組合連合会, 378pp
- 北海道造林協会 (1997): 高性能林業機械リース・レンタル制度導入検討調査報告書, 23pp
- 伊藤暢夫 (1980): スウェーデン林業機械シンポジウムの概要, 機械化林業316, 56-61
- 科学技術政策研究所・未来工学研究所編 (1997): 2025年の科学技術, 851pp, 未来工学研究所, 東京
- 上飯坂實 (訳) (1974): ワーナー・スファセイ FB-522 フェラー・バンチャ, 機械化林業243, 18-21
- 加藤誠平 (1967): サムセット教授の「不連続進化の法則」についての解説 (後), 機械化林業162, 1-11
- 木幡靖夫 (1986): 間伐用多工程処理機の作業工程, 日林北支論35, 49-51
- 木幡靖夫 (1999): 高性能林業機械による間伐作業, 北海道カラマツ・トドマツ等人工林材対策協議会季報94, 1-39
- 駒木貴彰 (1999): 北海道における高性能林業機械の導入実態と課題, 林業経済研究45, 69-74
- 小玉陽一 (1982): マイコン・ブレーションウェア入門 - BASICによるシステム・ダイナミック -, 270pp, ダイヤモンド社, 東京
- Makridakis, S. and Wheelwright, S. C. (1995): 計画策定と意思決定のための予測手法入門, 431pp, 同友館, 東京
- 南方康 (1981a): カナダ・ヨーロッパの伐出作業(3),

- 機械化林業332, 51-59
- 南方康 (1981b): カナダ・ヨーロッパの伐出作業(4), 機械化林業333, 49-60
- 南方康 (1981c): カナダ・ヨーロッパの伐出作業(5), 機械化林業334, 50-60
- 南方康 (1999): 再び林業の生き残りを目指して, 林業技術683, 2-7
- 未来工学研究所編 (1973): 環境に対する欲求分析: 修正デルファイ法による最終報告書(第1分冊 総論), 90pp, 未来工学研究所, 東京
- 未来工学研究所編 (1973): 環境に対する欲求分析: 修正デルファイ法による最終報告書(第2分冊 各論), 209p, 未来工学研究所, 東京
- 未来工学研究所編 (1973): 環境に対する欲求分析: 修正デルファイ法による最終報告書(第3分冊 資料), 464p, 未来工学研究所, 東京
- 中村英碩 (1965): カナダのチンバー・ハーベスタ, 機械化林業137, 79-80
- 生井郁郎 (1993): 北海道林業機械化考(1)機械化導入の目的と労働力問題一, 北方林業45, 6-9
- 縄田和満 (1997): TSPによる計量経済分析入門, 167pp, 朝倉書店, 東京
- 和孝雄・小鹿勝利・尾張敏章 (1998): 北海道におけるカラマツ林業の動向一統計資料の解析一, 北大演研報55, 97-112
- 日本データ通信協会編 (1980): データベース・ネットワークの将来動向: デルファイ法による, 411pp, 日本データ通信協会, 東京
- 日本経済調査協議会 (1985): 高度情報化社会に関する企業・有識者調査: 「高度情報社会のインパクトに関するデルファイ調査及び高度情報社会実現のために必要とされる計画的誘導手法の研究」報告書, 118pp, 日本経済調査協議会, 東京
- 仁多見俊夫 (1993): スウェーデン林業機械化の現状と展望, 山林1314, 31-38
- 農業技術展望研究会編 (1996): 2005年の農業技術の展望, 132pp, 地球社, 東京
- 大里正一・倉橋昭夫・山本博一・大橋邦夫・仁多見俊夫・小笠原繁男・井口和信・佐々木忠兵衛 (1996): 大形の車両系林業機械が林地に及ぼす影響一北海道の天然林における択伐作業の事例一, 東大演報96, 1-26
- OR事典編集委員会編 (1975): OR事典, 569pp, 日科技連, 東京
- 小山田孝二・田口俊男 (1978a): ドリルフェラー(伐倒機械)の実地試験, 機械化林業290, 25-41
- 小山田孝二・田口俊男 (1978b): T20, TS型ツリーフェラー(伐倒機械)の実地試験, 機械化林業291, 14-25
- 尾張敏章 (1999): 北海道における素材生産事業体と作業機械化の現状, 林業経済606, 29-34
- 尾張敏章・中村昇・仁多見俊夫 (1997): 高性能林業機械化と事業の安定確保に関する研究一北欧諸国の事業供給システム一, 日林論108, 411-412
- 尾張敏章・仁多見俊夫・湊克之 (1995): 北海道における高性能林業機械化一高性能林業機械アンケートの数量化理論3類による分析一, 日林北支論43, 110-112
- 尾崎統・北川源四郎編 (1998): 時系列解析の方法, 185pp, 朝倉書店, 東京
- Porter, A. L. et al. (1991): Forecasting and management of technology, 448pp, John Wiley & Sons, New York
- 林業機械化推進研究会編 (1993): 機械化のデザイン一技術と経営の変革をめざす高性能林業機械化の方法一, 195pp, 全国林業改良普及協会, 東京
- 林内作業効率化推進委員会 (1990): 素材生産のコスト低減をめざして一高性能機械化に関する提言一, 16pp
- 林野庁 (1987): 昭和61年度林業白書, 185pp, 日本林業協会, 東京
- 林野庁 (1988): 昭和62年度林業白書, 209pp, 日本林業協会, 東京
- Rogers, E. M. (1981): 普及学入門, 546pp, 産業能率大学出版部, 東京
- 酒井秀夫 (1998): 間伐に適した林業機械とその使い方, 林業技術673, 28-31
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎 (1983): 情報量統計学, 236pp, 共立出版, 東京
- 佐藤總夫 (1984): 自然の数理と社会の数理一微分方程式で解析するI, 212pp, 日本評論社, 東京
- 千住鎮雄・伏見多美雄 (1994): 新版経済性工学の基礎一意思決定のための経済性分析一, 260pp, 日本能率マネジメントセンター, 東京
- 島田俊郎 (1994): システムダイナミクス入門, 250pp, 日科技連, 東京
- 嶋瀬拓也 (1995): 北海道における高性能林業機械化の現局面と森林所有者の対応, 林業経済研究127,

101-106

- 嶋瀬拓也・湊 克之 (1997): 北海道と九州における高性能林業機械化の現局面, 北大演研報54, 22-86
- 猪内正雄 (1996): 森林作業と森林環境, 森林科学 18, 58
- SPSS Inc. (1993): SPSS Advanced Statistics Release 6. xJ, 222pp, SPSS Inc., Chicago
- Sundberg, U. and Silversides, C. R. (1988): Operational efficiency in forestry, Vol. 1: Analysis, 219 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- 鈴木博之 (1968): ツリーフェラー (伐倒機) の試用, 機械化林業172, 30-33
- 高田長武 (1970a): TF-2型ツリーフェラーの適応試験 (前), 機械化林業198, 7-19
- 高田長武 (1970b): TF-2型ツリーフェラーの適応試験 (後), 機械化林業199, 14-27
- 梅田三樹男・辻 隆道・井上公基 (1982): 標準功程表と立木評価, 140pp, 日本林業調査会, 東京
- 和井内清 (1982): 損益分岐点の実務, 173pp, 日本経済新聞社, 東京
- 山口信幸 (1991a): 林業機械化の必然性とその課題, 日林北支論39, 93-95
- 山口信幸 (1991b): 機械化の問題点とその方向性, 日林北支論39, 194-198
- 山口信幸 (1992): 高性能林業機械による林業経営の向上, 北方林業44, 1-4
- 山口信幸・山崎 智 (1988): カラマツ人工林間伐作業の最適集材方法を求めて, 北方林業40, 1-6
- 油津雄夫 (1987): 伐木造材作業のコスト引き下げと高性能機械導入の可能性, 林業技術543, 7-10
- 全国林業労働力育成センター編 (1992): きりひろく道, 109pp

摘要

わが国では1980年代以降, 高性能林業機械 (フェラーバンチャ, スキッド, プロセッサ, フォワーダ, ハーベスタ, タワーヤードの総称) の導入が進められてきた。林業をめぐる環境が厳しさを増すなかで高性能林業機械化に対する期待が高まり, 1991年には機械化の推進が政策課題として位置付けられた。補助事業を中心とした導入推進施策の効果もあり, 高性能林業機械の普及は急速に広がっている。しかし一方で, 導入された高性能林業機械の多くは稼働率が低い状態に

ある。高性能林業機械化の取り組みが行き詰まりをみせるなかで, 高性能林業機械化に対する関心自体も徐々に薄れつつあるのが現状となっている。

林業生産技術におけるイノベーションの一形態である高性能林業機械化は, 低迷を続ける林業経営を大きく変革する可能性を有している。高性能林業機械化の適正な発展を促進するために, より有効な方を講じることが現在必要となっている。そこで本論文では, 高性能林業機械化の推移と展望を明らかにし, 今後の高性能林業機械化の発展に向けた取り組みに対して明確な方向付けを与えることを目的とした。過去における高性能林業機械化の発展経過をふまえて, 将来の発展状況を数量的に予測することにより, 現状での課題を明らかにした。

II章では, 北海道における高性能林業機械化の発展過程について, 発展にかかわる諸条件とともに叙述的に明らかにした。北海道の高性能林業機械化は, 次の3つの段階で進行していた; ①一部の素材生産事業者による外国製機械の導入 (黎明期), ②紙パルプ企業などによる全機械化作業システムの採用 (拡大期), ③中小事業者を中心とした半機械化作業システムの普及 (安定期)。また, 各段階における技術的, 経営的, 政策的条件は次のとおりであった; ①欧米における機械化の進展, 人工林間伐の増大, 素材価格の低迷と労働賃金の高騰による採算性の悪化, ②高性能林業機械に対する認知の広がり, バブル経済による好景気, 補助事業の積極的導入, ③高性能林業機械化における問題の顕在化, 景気の後退, 労働力の減少・高齢化, 行政による高性能林業機械化の推進。このほか, 高性能林業機械の導入目的に労働力不足への対応を挙げる事業者が多いこと, 導入された高性能林業機械の6割以上が稼働率70%以下と低い状態にあること, 高性能林業機械化における主な問題が事業量確保の困難性であることなどを明らかにした。

III章では, わが国の高性能林業機械保有台数に関する定量的な予測を行った。2つの成長曲線モデル (Logistic 曲線と Gompertz 曲線) を1988~1997年度の高性能林業機械保有台数にあてはめることで, 今後の推移を予測した。両モデルのパラメータ推定には非線形回帰分析を用い, AIC (赤池情報量規準) によってモデルの妥当性を比較評価した。回帰分析の結果, 将来的には保有台数の増加傾向が徐々に収束していくことが示された。保有台数の飽和水準は, Logistic 曲線モデルが2,000台 (漸近95%信頼区間: 1,820~

2,250台), Gompertz 曲線モデルが2,900台(同: 2,750~3,050台)と計算された。AICはGompertz 曲線モデル(69.26)がLogistic 曲線モデル(99.49)よりも小さく、適合度が高いと考えられた。機種別、地域別、保有形態別の保有台数に関する予測結果においても、全てのケースでAICはGompertz 曲線モデルが小さかった。機種別では「ハーベスタ」(飽和水準: 1,030台)、地域別では「関東・中部」(同: 690台)および「近畿・中国・四国」(同: 560台)、保有形態別では「その他組合(林業労働力確保支援センターなど)」(同: 910台)において、それぞれ保有台数が増加するとの予測結果が得られた。

IV章では、高性能林業機械作業システムの普及過程についてシミュレーションを行った。II章の結果から、高性能林業機械作業システムの主要な普及要因を労働力の減少に伴う労働生産性向上の必要性と考え、普及過程をSystem Dynamicsによってモデル化した。モデルでは、素材生産作業システムを従来型、半機械化型、全機械化型の3つに区分した。作業システムの労働生産性、素材生産事業量、労働者数、平均就労日数の各因子について実績値をもとに条件設定を行い、北海道における普及推移をシミュレーションした。その結果、これまでの普及過程として、はじめに半機械化型の普及が進み、その後徐々に全機械化型が普及してきた様子が示された。1997年度における各作業システムの推定労働者数比率(従来型78%, 半機械化型20%, 全機械化型2%), および推定事業量(従来型130万 m^3 , 半機械化型155万 m^3 , 全機械化型66万 m^3)は、実際の状況をほぼ表していると考えられた。シミュレーションの結果から、高性能林業機械作業システムの労働者数比率が上昇した一方で、事業量はほとんど増えていなかったことが示唆された。また、今後の普及過程についてシミュレーションを行った結果、2007年度の推定事業量が従来型41万 m^3 , 半機械化型93万 m^3 , 全機械化型103万 m^3 となり、全機械化型が最も多くなると予測された。

V章では、III章とIV章の予測結果を受け、採算性を考慮した高性能林業機械作業システムの必要事業規模について検討した。東京大学北海道演習林で行われたハーベスタ・フォワーダ作業システムの人工林間伐事業結果をもとに、同作業システムの収益・費用モデルを構築し、収益と費用が一致するときの年間事業量(最小利用規模)を算出した。計算の結果、調査時の1日あたり出材量(20.1 m^3 /日)では最小利用規模が

1,978 m^3 /年(年間作業日数: 98日/年)となった。一方、これまでの事業実績による平均出材量(13.0 m^3 /日)では、最小利用規模は3,001 m^3 /年(同: 231日/年)と計算された。また、作業システムの1日あたり出材量、平均素材単価、機械購入補助率の3つについて感度分析を行い、各因子が最小利用規模に及ぼす影響を明らかにした。出材量については、20 m^3 /日以上ならば最小規模は2,000 m^3 /年程度となるが、量が小さくなるにつれて最小規模は急激に増大した。素材単価については、13,000円/ m^3 の場合、出材量が15 m^3 /日以上であれば最小規模は1,500 m^3 /年程度となるが、素材単価が低くなるに従ってその値は増大した。機械購入補助率については、出材量が15~30 m^3 /日の場合、補助率10%につき最小規模をおおむね200~300 m^3 /年低減させる効果がみられた。

VI章では、高性能林業機械を含む様々な林業生産技術の将来展望について予測を行った。はじめに予備調査として、2030年頃までに実現が期待される技術課題に関してアンケート(自由回答方式)を行った。調査対象者は林業生産技術の専門家80名とした。調査の結果、機械・作業・労働・林業の各分野に対してそれぞれ多数の技術課題が抽出された。次いで、予備調査結果をもとに37の技術予測課題を設定し、デルファイ法によるアンケート調査を2回くり返して実施した。調査対象者は79名であり、回答率は第1回調査が63%(調査対象者: 79名)、第2回調査が90%(同: 50名)であった。調査の結果、各課題に対して重要度と実現予測時期が示された。調査対象とした課題のうち、重要度上位の3課題は、いずれも環境保全を志向した技術であった。実現時期については、調査課題の9割が2015年までに実現すると予測された。さらに、林業生産技術の振興に向けた方策として、技術開発・研究に対する資金的な支援、および産学官の人的交流や異分野間協力が特に必要であるとの結果が示された。

以上の結果をふまえ、VII章では高性能林業機械化の推移と展望に関する結論を述べた。第一に、高性能林業機械化の発展過程に関する検討結果から、林業生産技術のイノベーションに関して以下の3点を特徴として示した; ①イノベーションは技術の導入主体(林業事業体)による能動的行動から始まること、②行政はイノベーションに対して受動的、追隨的に対応せざるを得ないこと、③イノベーションには自然的、経済的な偶然事象が常に伴うと考えられること。第二に、高性能林業機械化の発展状況に関する予測結果をもと

に、さらなる発展に向けた取り組みの方向性について提言を行った。①高性能林業機械台数の飛躍的増加が期待できない現状では、既に導入された機械をいかに活用していくかが重要となること、②高性能林業機械作業システムの事業量確保が一層困難になっていると考えられ、今後の機械化推進施策はハードの導入促進から機械利用の効率化へと転換を図るべきこと、③労働力の減少によってさらなる労働生産性の向上が必要

とされるなかで、今後は全機械化作業システムの普及拡大が必要であること。③を実現するための方策としては、機械購入補助やリース・レンタルによる初期投資負担の軽減、およびV章で算出した最小利用規模以上の事業量の安定供給が考えられた。また、長期的な展望のもとでは、高性能林業機械を含む様々な林業生産技術のさらなるイノベーションが進むと期待された。

Summary

Multi-functional forestry machinery (MFFM), which includes the feller-buncher, skidder, processor, forwarder, harvester, and tower-yarder, has been utilized in Japan since the 1980s. As the business environment of Japan's forestry industry has become increasingly difficult, highly mechanized forestry (HMF) with MFFM has been expected to become an effective measure to break the deadlock. In 1991, the promotion of HMF became one of the major policies to encourage domestic forestry in Japan. The numbers of MFFM have been rapidly increasing, due mainly to government subsidies for introducing them. Yet many of the MFFM introduced are under-utilized. HMF appears played out, and enthusiasm for HMF is slowly ebbing away.

Undoubtedly, HMF is a form of innovation that improves Japan's forestry and gives it a competitive edge in a business situation. Effective measures should, therefore, be taken for the sound development of HMF. In this study the development of HMF was examined in order to set a course for future action. Issues of current concern in HMF emerged from the development process in the past and the results of this study offer quantitative predictions for the future.

Chapter II describes the diffusion process of MFFM in Hokkaido, one of the most advanced HMF regions in Japan. Factors that likely favored its promotion are also discussed. HMF has advanced through the following steps: (1) incunabula - the import of foreign machinery by a small group of logging companies, (2) expansion - the adoption of fully mechanized systems by large paper companies, etc., and (3) stabilization - the spread of semi-mechanized systems to medium or small logging companies. The technical, managerial and policy conditions, respectively, at each stage were: (1) the development of mechanization in foreign countries, the increase of thinning operations, and the deterioration of profitability caused by a fall in the price of timber and a rise in wages; (2) spreading recognition of multi-functional forestry machinery, a boom caused by a bubble economy, and the active introduction of subsidy; and (3) the obvious problems in forestry mechanization, a recession, a decreasing and aging forestry labor force, and promotion of HMF by the government. Many logging companies introduced MFFM to cope with the labor shortage, yet more than 60 percent of the MFFM introduced were used for less than 70 percent of the total workday. In addition, lack of job security was a major problem in HMF.

In Chapter III, the growth of MFFM in Japan is quantitatively predicted using growth-curve models. Logistic and Gompertz-curves were applied to the number of machines during the fiscal year 1988-1997, and the AIC

(Akaike's information criterion) of both models was compared to validate the results. The model parameters were estimated by nonlinear regression analysis (maximum likelihood method). As a result of this estimation, it was shown that the number of machines owned would gradually reach saturation point. The predicted saturation level was 2,000 machines (asymptotic 95% confidence interval: 1,820 - 2,250 machines) by the logistic-curve model, and 2,900 machines (2,750 - 3,050 machines) by the Gompertz-curve model. The Gompertz-curve model was chosen as the more reliable, because the AIC value (69.26) was lower than that of the logistic-curve model (99.49). The number of machines by machine type, region, and ownership was also predicted. The AIC of the Gompertz-curve model was lower in all cases. The Gompertz-curve models suggested the following increases: "harvesters" (saturation level: 1,030 machines) for machine types, "Kanto and Chubu" (690 machines) or "Kinki, Chugoku and Shikoku" (560 machines) for regions, and "other cooperatives" (support centers for the security of forest labor, etc.) (910 machines) for machine utilization by ownership.

Chapter IV describes a simulation of the diffusion of MFFM systems in Hokkaido by the author. The major factor in diffusion was assumed to be that the logging companies had to improve their productivity due to a shortage of labor. The diffusion model was developed using System Dynamics. In this model logging systems were classified into three categories: conventional, semi-mechanized, and fully mechanized. The model included the following factors: the operational productivity of each system, the annual volume of work, the number of workers, and the average number of workdays per year. The simulation was conceived to reproduce the real diffusion process in Hokkaido. Semi-mechanized systems would be widespread at first, then full mechanization would follow. The estimated ratios of the total number of man-days in 1997 was 78% in conventional, 20% in semi-mechanized, and 2% in fully mechanized forestry. The estimated volumes worked were 1,300,000 m³ by conventional means, 1,550,000 m³ by semi-mechanized, and 660,000 m³ by fully mechanized systems. The results implied that although the total number of man-days had risen the relative volume of work performed by MFFM systems had not increased. Diffusion in the future was simulated using the same model, and the estimated work volumes in 2007 were predicted as 410,000 m³ by conventional, 930,000 m³ by semi-mechanized, and 1,030,000 m³ by fully mechanized systems. According to the simulation, fully mechanized systems will be dominant in the near future.

Chapter V discusses the break-even point of MFFM from the viewpoint of profitability. Revenue and cost models for harvester and forwarder systems were developed, based on the results of an actual operation in the Tokyo University Forest, in Hokkaido. Then the break-even point, which here means the work volume when revenue corresponds with cost, was calculated. This showed a break-even point of 1,978 m³ per year when unit production volume was 20.1 m³ per day. On the other hand, it rose to 3,001 m³ annually when the volume was 13.0 m³ daily. Sensitivity analyses were conducted to clarify the influence of three factors: unit production volume per day, average log price, and the allowance for machine purchase. The break-even point was around 2,000 m³ per year when the volume produced was above 20 m³ per day. As the volume produced decreased, the break-even point rapidly increased. With a log price of 13,000 yen per m³ and production volume over 15 m³ per day, the break-even point was about 1,500 m³ per year. As the log price fell, the break-even point rose. With production of 15 - 30 m³ per day, the break-even point would decrease 200 - 300 m³ annually, with a 10% allowance for machine renewal.

Chapter VI describes a technology-forecast survey that was conducted to gain a long-term perspective on the future advancement of forest engineering. A preliminary questionnaire was used to determine the forecast topics. Forest-engineering technology was divided into four categories: machinery, operations, ergonomics, and roads. Within each category, the respondents were asked to state topics of concern that could be addressed, or realized, in Japan by 2030. Once the topics had been prioritized according to importance and generality, 37 were selected for special study.

The main survey was then conducted, using the Delphi method. The results were consolidated through a second questionnaire. Experts with extensive knowledge of forest engineering were selected as the respondents. For the

first part of the survey, questionnaires were sent to 79 respondents, 50 of whom were subsequently sent the second questionnaire. Those who withdrew from the survey were excluded after the first questionnaire. The rates of response were 63% for the first questionnaire and 90% for the second. Based on the results from the second survey, an index of importance was calculated for each topic. The three highest scoring topics (all >80) were related to “environmentally-aware” technology. The respondents predicted that half the topics would be realized by 2010, and 90% by 2015. The respondents were also asked to suggest “Effective measures that the government should adopt for realization” for each topic. Among the choices, “Increase in government funding for research” was the most frequent response (average 50.5%). “Communication between the industrial, academic and government sectors” was chosen in 39.9% of the replies.

Chapter VII concludes the study, with a review of the development of HMF, suggesting that the characteristics of innovation in Japan’s forestry industry, based on the development of HMF in Hokkaido, are that (1) innovation begins with action by the businesses that are the major users of these technologies; (2) government can only promote innovation passively and reactively; and (3) innovation is always accompanied by natural or economic fortuity. Second, ways to promote HMF in the future are proposed. In conclusion, it is noted on the basis of the future developments in MFFM predicted in this study, that it is becoming increasingly important to consider better utilization of the machinery introduced. To increase the relative volume of work done by machines, government policies should be changed from promoting their introduction to accelerating more efficient use. Improved productivity will be needed because of the labor shortage, and fully mechanized systems should be widespread in the near future. Effective measures that would improve productivity are also proposed. Full subsidies and machine leasing would make it possible to reduce the investment for machine renewal. Efficient assignment systems to ensure enough volume of work for MFFM should also be developed. The results in Chapter VI show that we can expect further innovation in MFFM and the other technologies used in Japan’s forestry.

Key words : highly mechanized forestry, technological forecasting, growth-curve model, System Dynamics, the Delphi method