 総 説

森林・林業へのエキスパートシステム適用の現状と問題点 *

西 川 匡 英 **

I. はじめに

著者は先に「森林科学」に、林業生産の基本データの採取法¹⁾と題して森林・林業分野での情報化の問題を取り上げてデータの採取の時代から、知識獲得の時代へ移行していくであろうことを述べた。一般企業や農業分野ではいち早く情報化に対応して人工知能、エキスパートシステムの研究、実用化の試みを行っている。一方わが国の林業部門では、この方面の研究は、樹木名検索システム²⁾、搬出、作業日程計画³⁾などに適用され始めているが、先進諸外国に比べ遅れているようである。たまたま1988年10月オーストリアのウィーンで、森林経営意思決定のための人工知能と成長モデルに関して国際集会が行われた。まだプロトタイプのものが多い印象を受けたが、森林・林業の分野でかなり熱心に取り組まれていることがわかった。

著者のもう一つの関心は、情報化やエキスパートシステムの導入の流れを従来の技術論ではどのように整理したらよいかということであった。かつて盛んに行われた技術論論争では、情報の問題はほとんど取り扱われなかったため、林業における情報化は着実に進んでいるにもかかわらず、情報問題への対応に進展がみられない。そこでまず、森林・林業へのエキスパートシステム導入の現状と問題点を整理し、今後の情報問題とくに、エキスパートシステム研究の方向を明らかにしたい。方法としては先進諸外国の森林・林業への適用の現状について専門家に照会し、ご送付頂いた資料を分析することに主眼をおいた。なお小論は、第32回林業統計研究会春期シンポジウム「システム収穫表—エキスパートシステムとしての林分の成長モデル」において発表した内容に加筆したものである。

II. 森林・林業におけるエキスパートシステム適用の技術論的考察

戦後林業の生産力を高める立場からの技術論や収益性を追求する立場からの経営技術論をめぐって論争があった。いずれにしても基本は労働手段体系説を採るか、意識的適用説を採るかであった。労働手段体系説では技術の水準や内容は機械、容器などの労働手段、材料などの労働対象、

* Kyoei NISHIKAWA: Problems on the applications of expert sytem to forestry

** 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, P.O.Box 16, Tsukuba Norin Kenkyu Danchinai, Ibaraki, 305 Japan

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

および労働力の三者の結びつきによって規定され、このいずれに力点に移るかは生産力と生産関係の内部矛盾によって歴史的に表れるとした。一方武谷⁴⁾は技術とは人間実践（生産的实践）における客観的法則性の意識的適用であると規定した。

林業分野ではこれらの技術論に準拠し、林業技術発展の解明に一定の成果が得られた。半田⁵⁾は森林を容器的労働手段とみなし、林業の生産構造の展開過程を明らかにした。また大金⁶⁾は森林（土地と林木の合体したもの）を装置的労働手段であると位置づけ、更新技術は農業でいう土地改良投資であるとし、伐出と更新技術をバランスよく発展させるための生産技術や経営技術のあり方を実証的に示した。

その後技術論論争は影を潜めたが、近年における多様な森林施業の重視、林業への情報システムや高性能伐出機械の導入は、新たな技術論の必要性を感じさせるものがある。従来の技術論では労働生産性の向上が目標であったと思われるが、あまり重要視されなかったものに「情報」の役割がある。一般企業においては高度情報化社会の到来は経営や生産における情報の位置を大きく変えた。例えば、梅棹忠夫は「情報の文明学」⁷⁾、「情報の考現学」⁸⁾で農業から工業へ、さらに情報産業へと移りつつあることを説き、工業社会はいわば労働の時代であり、エネルギーの時代であったが、情報社会は新しい価値基準、例えば、シャノンの負のエントロピーなどが確立するかも知れないと述べている。

また「工業だけでない。農業もまた、情報の時代にはいって大発展を遂げた。例えば、天気予報や環境要因のコントロールによって農業の生産物は大幅に増加した。単に量的な変化だけではない。農業生産物は感覚的担荷体となったのである。今日において農業生産物はすでに食料でない。それは食品として、味、香り、形など多様な情報を満載した情報産業品なのである。」とも述べている。

このようにみえてくると、情報処理技術は労働手段の体系で説明するより意識的適用説に基づく方が説明しやすい。およそ技術は客観的諸法則性を経験や勘によって、あるいは調査分析によって科学的に明らかにし、それを意識的に適用して得られた手段の体系である。ここでは必ずしも機械などの労働手段のみに注意しているわけではない。（もっとも半田は人間の労働には、自然過程を解明し再編成し所轄管理する知的エネルギーの集中（管理労働）と、個々の作業を遂行する肉体エネルギーの集中（作業労働）との両面があるが、自然力依存段階から自然力制御段階に進むにつれてとりわけ前者の意味が大きくなると述べているし、大金は「技術は新しい生産関係のもとで、発展した生産技術に規定されたところの再編された経営技術へと発展するが、これが労働力による労働手段の規制の段階であるといえよう。すなわちこれは労働手段の自動化の段階であり、人間の知的労働力の労働手段への大幅な移行を意味しており、いわゆるこれが直接的生産力への科学の転化の段階であり、同時に「制御」が再び矛盾の主要な側面を形成する段階である」と述べており、それぞれ人間の知的労働の重要性を指摘しているのは注目される。）

図-1 MISとDSSの関係（ザーレンマ L. 1989より）

森林に関連づけていえば、水土保持やレクリエーション利用に適した森林の施業技術、野生生物の管理技術などは、それらの目的のために客観的諸法則を意識的に適用する技術と見なすことができる。情報は上記の中で法則を見いだすとき、あるいは法則を適用するとき、さらにそれらの結果についてモニタリングや評価をするときになくてはならないものとなった。一般企業では情報の整備、処理能力が企業存続の大きな条件とさえなっている。

情報化とコンピュータの発達には生産に必要なデータや情報を処理する高度なシステムを発展させた。組織内で計算とデータ処理に責任を持つ経営情報システムMIS（Management Information System）は、企業経営者の意思決定に必要な情報を広範に集め、提供するための仕組みとして1970年代の始めに導入された。しかしデータまたは情報が真に経営の意思決定に役立つためには知識として体系化されなければならない。

この意思決定の支援システムDSS（Decision Support System）とデータ、MISとの関係をザーレンマ Lの論文⁹⁾より引用したものが図-1である。単なるデータから情報の処理システムとしてのMIS、経営の意思決定のために集約された知識の体系としてのDSSと発展していることが理解できよう。

林業でも情報のシステム化は、行政機関や企業などで行われているが、MISの段階のものがほとんどであろう。これに対してエキスパートシステムは労働手段、労働対象に働きかけ生産を体系化する人間（専門家）の知識や経験を重要視している。この過程を実行する際、専門家の知識

図-2 エキスパートシステムの構造

をまねるコンピュータの媒介者としての知識工学者の登場は情報化社会の一つの特徴である。

E. ファイゲンバウム¹⁰⁾によれば、知識工学者は二つのことをしなければならないという。一つは専門家に自分の知っていることを明瞭に表現させること、もう一つはこの知識をコンピュータにコード化することである。知識工学者は教科書やマニュアルを読むことによって、初歩的な知識を身につけることができるが、インタビューすることによってより確かな知識を得ることができる。インタビューによって専門家から引き出さなければならない知識には二つのタイプがある。一つは専門家が使っている特定の事実（タスク・ドメインの知識）やヒューリスティックな知識である。ヒューリスティックな知識は経験的で、判断的な作業知識である。これらで知識ベースを構成する。もう一つはもう少し間接的なものである。専門家がどのように知識を扱っているか、つまり彼の思考過程を理解しなければならない。この情報はエキスパートシステムの推論エンジンを設計する基礎となる（図-2）¹⁰⁾。以上のように、エキスパートシステムは知識ベースと推論エンジンより成ることが大きな特徴の一つといえよう。

知識は問題解決のためにコンピュータ上ではっきりした形で表されねばならない（知識表現）。よく使われるものに「プロダクションルール」があり、IF節（もし～何ならば、）とTHEN節（～である）から成っている。専門家の思考過程を示す推論を行うことは、このIF-THENルールを結び合わせる（連鎖）ことに関連している。もし連鎖がある状態から出発して結論（たぶん遠く離れている）へと向けて動くのであれば、この方法は前向き推論とよばれる。

結論（たとえば目標やゴール）は分かっているが、その結論へいく道筋が分かっている場合、後向きに推論することが要求され、「後向き推論」という。これらの方法は推論エンジンと呼ばれるプログラムの基本単位に組み込まれる。

ここで前向き推論と後向き推論について簡単な例で説明しておこう。

R 1	IF	(Xは体毛をもつ)	THEN (Xは哺乳動物である)
R 2	IF	(Xは授乳する)	THEN (Xは哺乳動物である)
R 3	IF	(Xは哺乳動物である)	
		(Xは鋭い歯をもつ)	
		(Xは鋭い爪をもつ)	THEN (Xは肉食動物である)
R 4	IF	(Xは哺乳動物である)	
		(Xは蹄をもつ)	THEN (Xは有蹄動物である)
R 5	IF	(Xは肉食動物である)	
		(Xの体の色は黄褐色である)	
		(Xは黒い縞をもつ)	THEN (Xはトラである)
R 6	IF	(Xは肉食動物である)	
		(Xの体の色は黄褐色である)	
		(Xは黒い斑点をもつ)	THEN (Xはチータである)

図-3 プロダクションルールの例

図-3に示すR 1からR 6までのルールを考える。これはエキスパートシステム入門¹¹⁾に掲載されているWINSTONの人工知能の例を簡略化したものである。まず前向き推論から説明しよう。

実行方式は

- 1, 初期の事実ベースをFACTSとよぶ。
- 2, R 1から始めてルールを先頭から順に調べて、条件文がすべて成立するルールを捜す。
- 3, そのようなルールがないなら停止する。
- 4, ルールが見つかったとき（ルール番号をR (i) とする), その結論文をFACTSに加え、2へ行く。見つからないときは5へ行く。
- 5, R (i + 1) からR 6までのルールを先頭から順に2と同様にして調べる。
- 6, 使えるルールがないなら停止する。

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

この推論制御方式を用いて図-3の例を考えてみよう。

まず、システムを起動させるためFACTSが必要であるから、FACTSを
 (動物は体毛をもつ), (動物は鋭い歯をもつ), (動物は鋭い爪をもつ),
 (動物の体の色は黄褐色である), (動物は黒い斑点をもつ)
 としよう。

- 1, R 1ではXを動物と考えると、条件部は成功する。結論部の(動物は哺乳動物である)はFACTSの中にないのでFACTSへ加える。
- 2, 再びR 1からルールを実行するが、結論部はFACTSにあるので失敗しR 2を調べる。
 (Xは授乳する)はFACTSにないため失敗。
- 3, R 3の三つの条件部はFACTSにあるため、(Xは肉食動物である)がFACTSへ加えられる。
- 4, R 4, R 5は失敗。
- 5, R 6では条件部がすべて成立し、かつ(動物はチータである)は新しい事柄であるから、FACTSに加えられる。
- 6, R 1から再び実行するが、R 6まですべて失敗し、停止する。

つぎに後向き推論を説明しよう。後向き推論では目標になる課題を設定し、ルールの結論部にこの目標と一致する記述が含まれているようなルールを捜し出し、条件部が成立すれば目標は成立する。成立しなければ、その条件部と同じ内容をもつルールを捜すというようにルールを逆向きに使う。

簡単な例を挙げよう。目標を(動物はトラである)が正しいかどうかを調べることにする。ここでもあらかじめ分かっていることを

(動物は鋭い歯をもつ), (動物の体の色は黄褐色である), (動物は黒い縞をもつ),
 (動物は体毛をもつ), (動物は鋭い爪を持つ) とする。

目標(動物はトラである)と結論部が一致するのはR 5である。このR 5の条件部の三つのうち、(動物の体の色は黄褐色である)と(動物は黒い縞をもつ)はFACTSの中にあるから、(動物は肉食動物である)を捜しに行く。これと一致する結論部をもつルールはR 3である。R 3の条件部のうち(動物は鋭い歯をもつ)と(動物は鋭い爪をもつ)はFACTSの中にある。従ってR 3の条件部の最初の(動物は哺乳動物である)が目標になる。ルールを調べるとR 1, R 2が結論部にもつが、ルール番号の順にルールを適用するという競合解消により、条件部に(動物は体毛をもつ)をもつR 1が選ばれる。(動物は体毛をもつ)がFACTSにあるためR 1は成功する。

前向き、後向き推論は前者が計画型のエキスパートシステムで、後者が診断型のエキスパートシステムと言われているように、利用の目的が異なる。従って、実際の利用に当たっては専門家がどのような推論をしているかを見極める必要があろう。

知識表現法としては、上に述べたプロダクションルールのほかに述語論理、セマンティックネット、フレーム、黑板、オブジェクト指向などがある。フレームなどの例は後述するが、いずれにしても知識をなんらかの記号などの形式的表現で表すため、欠落する情報もあり制限はあろう。しかし推論はこの知識表現法によって、推論の構造を変えていかねばならない。

以上まとめると、エキスパートシステム導入は、生産活動における人間（専門家）の知識の体系化、すなわち知識の獲得、知識の表現、知識のベース化の方法、推論の方法に従来の技術論で取り扱われたものに比べ著しい特色がある。従って本論では特にこの点から森林・林業へエキスパートシステム導入にともなう問題点を明らかにしてみよう。

III. 森林・林業へのエキスパートシステム導入の実態と問題点

エキスパートシステムを以上のようにいわゆる「客観的法則性の意識的適用」による技術の高度に発展したものと位置づけ、人間（専門家）の生産的実践における知識を総合化したものとする、その森林・林業における適用の可能性は次のようになる。

一般企業では購買、生産、販売の各過程での適用が考えられるが、林業の場合、現在はほとんど生産の過程での適用の例が多い。いま仮に生産の過程を伐出と更新の過程に分けると、伐出過程では伐出機械の選択、林道開設の最適化、伐出作業スケジュール、伐出作業のCAIシステム¹²⁾などが伐出作業の専門家の経験や知識をルール化できる領域である。更新は保育、保護方法も含めて考えると、更新樹種の選択、更新方法の選択、間伐など施業方法の選択、病虫害の予防・診断、森林火災の予防などが考えられる。

H. M. ラウシャーら¹³⁾の調査によれば、世界の林業部門におけるエキスパートシステムの利用は施業・成長と収穫（27%）、森林火災管理（18%）、病虫害管理（16%）、土壌・立地・環境（14%）、土地利用計画（12%）、伐出・生産（7%）、その他（6%）となっている。

また一般の経営技術は、購買管理、労務管理・人事管理、生産管理、販売管理、財務管理、事務管理、全般的管理の諸技術に分けられるが、それぞれの分野で最大の利益獲得を目指して経営技術が体系化される。

一般企業で各分野ごとにエキスパートシステム導入によってより一層の収益の向上が図られる。エキスパートシステムの代表的なテキストブックと言われる「エキスパートカンパニー」¹⁴⁾によれば、その利用状況は内部手続きの経費削減、問題解決のスピードアップ、会社のノウハウ、その専門的知識の伝承、品質と一貫性の改善、基本的な商売のやり方の変更、新しい製品や営業路線からの新しい収益、革新の刺激などである。

日経¹⁵⁾が最近日本企業でのエキスパートシステムの利用状況の調査を行っているが、販売サービス、設計・生産などの分野で診断、計画、設計、制御のための支援システムとしている例がほとんどである。診断型が依然として多いが計画型のものが増えているという。

また日経の別の調査¹⁶⁾によれば、環境問題へのエキスパートシステムへの応用は今後成長が期

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

待されるという。現在世界の環境問題に関連するエキスパートシステムは150以上あると推定されるが、これらは、二つのカテゴリに分類できる。一つは政府規則の遵守や環境破壊のチェックのためのシステム、もう一つは、資源管理とエネルギー節減のためのシステムである。ドイツ環境庁の環境情報支援システム（EMIS）は国の環境状態を記録・分析し緊急時に意思決定の支援を行う。またアメリカ合衆国のOASISは農産物生産地域支援や国立公園保護を目的に水道局が開発中のものである。

上記の経営技術面のみからの林業への応用はまだ少ないようである。ただ生産管理や全般的な計画技術では応用例も多く、とくに森林の総合的利用を目指した計画の策定や広い意味での環境計画に当たっては、専門家の知識を利用することが期待できる。アメリカ合衆国では「天然資源管理のための人工知能の応用」という雑誌が発行されているほどである。

本論ではとくに施業計画と成長モデルおよび森林の資源管理についてエキスパートシステムの適用の現状と問題点について述べてみよう。

施業計画と成長モデルに関して、先の分類からいえば、まず施業計画では更新樹種や更新方法の選択、間伐など施業方法の選択が中心課題となるが、これは一般企業でいえば生産の核となる工場のレイアウト、生産や在庫の管理に匹敵しよう。成長モデルに関連しては、森林の成長機構そのものの解明・モデル化へのエキスパートシステムの応用がある。次に上記の更新、施業方法の選択、施業計画の中での成長モデルの組み込み、その他一般的資源管理の中での成長モデルの組み込みが考えられる。

いずれにしてもこれらは成長モデルの応用に活路を与えるものとなっている。成長のモデル化だけでは生産計画や生産予測に役だてることができないためである。森林の資源管理では環境保全やレクリエーションなどを含めた総合的な利用を取り扱うので、専門家の知識を活用するエキスパートシステムの導入の可能性がより一層高いといえてよい。

ここでまずエキスパートシステムの成長モデルへの応用を考えてみよう。

Ⅳ．成長モデルへのエキスパートシステム適用の現状と問題点

成長モデルへのエキスパートシステム適用は次のようなタイプに分けられよう。一つは樹木あるいは、林分への成長モデルの当てはめに際し、モデル式の選択、パラメータの決定などに専門家の知識を利用することである。例えば、樹木個体、林分へのゴンベルツ、ミッチャーリッヒなど各種成長曲線の当てはめは、成長式の性質が異なるため、ある程度の成長式への習熟と経験が必要である。式の選定、パラメータの決定などの過程で専門家の知識をエキスパートシステムとして体系づけることは可能であろう。このような簡単なものと知識の獲得は比較的容易で2、3の専門家に聞く程度でよいであろう。二つ目として単木、林分間あるいは、樹種間別の成長機構の解明へのモデルの応用がある。このような複雑な成長機構のモデリングのためには、フレームなどの知識表現に工夫を凝らしたオブジェクト指向のモデルにすることが大きな特色となって

図－4 成長モデル（CROWN）の構成要素の相互関係（ローレンツ L. ら，1989より）

いる。例えば、樹木の成長モデルCROWN¹⁷⁾では樹冠、葉層、樹冠、根系、樹木、環境、土壌を含めた生態的モデルとなっており、それぞれパラメータ、変量、方程式ばかりでなく、各要素間を関連づけるルールが存在する（図－4）。

モデルの各要素はオブジェクトと称し、各オブジェクトは必要な情報を備えている。そして各要素の関係は階層状に位置づけられる。これらの各要素は例えば、樹木→スプルース樹木→スプルース樹木1というように、上位、下位の関係を用いてより具体的に特殊化し関連づけていく。そしてその過程である性質（例えば、方程式、ルール、パラメータ、値などの属性）が継承されるか（インヘリタンス）などがモデル表現として検討される（図－5）。

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

図-5 成長モデルCROWNの階層とレベル (ローレンツ L. ら, 1989より)

ここで知識表現に関連して、AI入門¹⁰⁾の定義を引用してフレームについて説明してみよう。ミンスキーは「構造化された知識の利用」という考えを示した。これが現在エキスパートシステムによく使われているフレームの起源と言われている。人間は物体や場所、状況などに関する多量の情報を自分の経験に基づいて構造化し、知識として記憶している。

人間が物事を理解しようとする際には、それぞれの状況に応じて、この構造化された知識を呼び出し、対象とその知識との間の差異、共通性に注目しながら、その場の認識、理解を深めていく。この知識のかたまりをフレームという。フレームはスロットとスロット値という対のリストからなる。実現値がexplicitに指定されないときのためにデフォルト値（default value暗黙値、例えば、樹木の種類は針葉樹とする）が用意されることもある。スロットには値が満たすべき条件や値の範囲を指定したり、スロットが選ばれた場合に実行すべき処理がある場合は、手続き（procedure）をスロットとすることができる。フレームの例を森林に関連づけて示してみよう。

```

樹 木      フレーム
  上位フレーム      植物
  種 類
    ranges : (針葉樹, 広葉樹)
    default : 針葉樹
  分 布
    ranges : (アジア, 北アメリカ)
    default : (アジア)
  林  齢
    ranges : (1~120年)
    If-needed : (Look at 年輪フレーム)

```

If-needed は手続きを示している。

ここで種類、分布、林齢はスロットで、例えば、種類のrangesの（針葉樹、広葉樹）、defaultの針葉樹はスロット値である。

さらに先の例でいえば、樹木の下位フレームとしてスプルス樹木フレームを考えるとこれもいくつかのスロットをもつ。その際、上位フレームから下位フレームにスロットを継承させることができる。スロットにはこのように値を計算する手続きを付加したり、スロット値として、プロダクションルールを持ったり、オブジェクト指向を取り入れてメッセージに答えるメソッドをスロット値としてもつこともできる。

シミュレーションは、例えばある時期の葉の呼吸量がいづらかを計算する際、一種の命令を出して（メッセージ）、フレームのスロット値やパラメータの変換を実行することにより可能とな

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

図-6 松村の林分成長モデルにおけるフレーム、スロットの例（松村ら，1991より）

る。後述する松村らの林分成長モデル²²⁾では、試験地をフレームとみなし、下位フレーム（インスタンスフレーム）として林齢を、またスロットとして樹種、平均値などを用いている（図-6）。

ここで知識表現としてオブジェクト指向のものをもう一つ挙げてみよう。もともとオブジェクト指向プログラミングは1968年にノールウェイでシミュレーションを目的に開発されたものであり、今後森林、林業分野でも利用されることは多くなると思われる。

フィンランドでは、植林地に害を及ぼすムースの個体数の管理を目的として動物と植生の相互作用モデル¹⁹⁾を開発している。この作用はオブジェクト指向のシミュレーションモデルとなっており、ムースの空間的な行動を表すための地理情報システムをも組み込んでいる。

「ムース」、「ハビタート」と「コンパートメント」はそれぞれオブジェクト指向の階層的モデルとなっている。「ムース」はおす、めすの動物サブクラスをもち、それぞれのサブクラスは年齢、環境における位置などの属性や動く、眠る、食べるのメソッドをもつ。そしてこれらの行動は同じく餌、隠れ場所、休み場所、コミュニケーションなど七つの行動決定のためのルールによって実行されるが、このルール自体がルールクラス、サブクラスに分けられている。「ハビタート」は森林、農地、湖沼のクラスに分けられている。森林の位置を示す「コンパートメント」も松、広葉樹の本数、樹高、材積、面積、隣接のコンパートメントなどの属性情報をインスタンスとして持っている。

これらの動物行動学に基づいたムースと森林の管理のシミュレーションはまだプロトタイプであるが、今後の森林成長モデル研究のタイプのひとつとして示唆に富むものである。このモデルもシェルはIntellicorp社のKEEを用いている。以上の二つの例は知識の表現にとくに力点がある場合の例である。

つぎに三つ目として成長モデルを利用する立場からの問題がある。施業計画や森林経営に森林成長モデルを使用する場合、経営のシナリオ、コンピュータ、施業、森林成長モデルに同時に詳しい専門家はいないであろう。またモデルそのものだけでは無用の長物で、これを利用する知識を必要としよう。例えば、イリノイ大学のtwigs²⁰⁾という成長モデルと経済分析を実行できるシミュレーションモデルがあるが、オーク・ヒッコリ植生タイプの再生や施業については何ら知識は得られない。しかしこのタイプの植生に関しては、多くの各種調査が行われており、これらの過去の調査研究から知識を引き出すことが必要になる（メタ知識またはメタアナリシス）。このようにすることによって、twigsを用いた成長予測はより正確になるだろう。メタ知識¹⁴⁾は問題解決戦略についての知識、能率的にどのように問題を解決するか、複雑な問題を解決するのにどのような段階を計画するか、の知識を表し、エキスパートシステムの重要な部分である。

このようにしてデータベースや成長モデルと経営の実際とを結び付けるものとして、エキスパートシステムを位置づけることができる（図-7）。

いいかえると従来の各種の成長シミュレーションはそれだけでは森林計画などに用いることができず、実用化の段階でのギャップがあり、その活用に問題があった。これを森林計画や成長予測などとリンクするものとして、エキスパートシステムの意味があろう。この三つ目のタイプは知識（とくにヒューリスティックな知識）の獲得、知識のベース化、推論の方法に広く力点が置か

図-7 成長モデル (TWIGS) とエキスパートシステム (ガートナー G. , 1989より)

れている。このタイプの利用は今後も増加することが予想されるため、いくつかの例を挙げてみよう。

H. M. ラウシャーら²¹⁾は、アメリカ合衆国の一定の林齢と地位と蓄積をもったハコヤナギの施業をアドバイスするエキスパートシステムを開発した。成長モデルとストックングチャートにより、林分の推移を表またはグラフで表すことができる。同様のシステムをレッドパインについても作成している。

データは該当地の林齢、蓄積などの基本的な林分情報をいれるが、欠損値があれば、推定できるようにになっている。また木材生産、レクリエーションなど森林の管理目的についてのアドバイスやそれに応じた指針、例えば、皆伐、間伐を指定した場合、そのための断面積合計、ha当り本数などを示してくれる。この基礎になっているのが、成長シミュレーションである。ユーザーは次の間伐までの成長、一定の直径を越えるまでの成長、無間伐で伐期までの成長など5つのタイプに分けてシミュレーションを選択できる。皆伐などの伐採方法とそれに伴う更新方法の選択もできるようになっている。

これらのいくつかの分野はモジュールとして、黑板モデルの中に配置され、やり取りができるように設計されている。

松村ら²²⁾はプロトタイプな間伐方法のアドバイスシステムを開発した。固定試験地のスギ林の平均直径にミッチャーリッヒ式をあてはめ、間伐方法ごとの成長予測を行い、収穫表の値と比較しつつ、間伐方法のコンサルティングを行う。さらに間伐の収益を考えた判断を入れる予定であるが、知識の獲得、知識のベース化に工夫を必要としよう。

V. 森林施業計画へのエキスパートシステム適用の現状と問題点

つぎに施業に応用するケースを見てみよう。施業そのものの診断やアドバイスに使われる場合（診断型のエキスパートシステム）と計画の策定に応用される場合（計画型のエキスパートシステム）がある。あるいはその併用型であろう。

施業、施業計画の場合は知識獲得の方法に力点があり、施業マニュアル、専門家とのインタビュー、過去の研究・調査の成果、およびデータベース、アンケート調査（デルファイ法を含めて）などあらゆる手段が考えられる。しかし前述の知識の性質からすると、事実よりヒューリスティックな知識が多い。施業技術は現場で試行錯誤を繰り返し、培われていくことがほとんどだからだ。施業マニュアルを持っているところではそれを中心にエキスパートシステムを作成することもよい考えである。

過去の調査のデータベースから知識を引き出し、施業決定のエキスパートサポートシステムも開発されている。フィンランド²³⁾では林野庁は毎年ラップランドのほぼ10,000haを人工的に更新している。更新はいろいろな環境条件に影響を受け、その良否が決まる。環境条件としては立地のタイプ、地位、樹種、更新方法、標高などのデータとともに、更新の良否を決めるため、更新地ごとに3, 7, 12年間隔で密度、天然更新の比率、優勢木の平均樹高、更新の良否、失敗の原因が調査され、データベース化される。

このデータベースをもとにエキスパートシステムを作成する過程は更新要因の各種統計解析、図表化、解析結果のデータベース、ルール化である。数量化など多変量解析を用いた更新の要因解析はわが国でもよく行われているが、それらを知識としてルール化し、データベース化することはほとんど行われていない。この例では知識の獲得は過去の調査によるデータベースを基礎に、これらの更新データの要因解析、図表化により行われているところが特色である。知識ベースの中の情報はファクトとルールとからなり、分析のデータベース、例えば重回帰式の変数はファクトとして組み込まれている。システムの機能、例えば重回帰式による林分密度の予測はルールによってコントロールされる。

つぎに知識獲得の方法として専門家の知識を活用することに重点がある例を挙げよう。K. L. オーハラ²⁴⁾はアメリカ合衆国北部中央ワシントンのオカノガン国有林の施業診断にエキスパートシステムを導入する試みを行っている。知識ベースは樹種構成、植物群集、林分構成、林分密度、樹病、昆虫害の有無、その他一般林分情報から成り立っている。これらの組合せにより何もしないか、間伐をするか、傘伐を行うか、択伐を行うかを定める決定木（decision tree）を作成している。最初の節点（ノード）は根が腐っているかどうかで、次は昆虫害があるかどうかでノードとなる。そのつぎは林分密度である。間伐などの診断に対してはそれぞれ除間伐、枝条整理などの詳しい手引がアドバイスされる（図-8）。

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

図-8 アメリカ合衆国オカノガン国有林の施業決定システム (オーハラ K. L. , 1989より)

図-9 ガドウの間伐決定木（一般化）（ガドウ K. V. , 1989より）

知識獲得の方法は、個人的な施業の専門家とのインタビュー、森林経営者（施業研究者、地区の施業担当者、エコロジスト、営林署スタッフ）との集団インタビュー、過去の研究や経営の実行成果、著者の経験である。

知識表現はプロダクショナルルールで、推論は前向き推論となっている。前向き推論は一般的には計画型のエキスパートシステムに応用されることが多いが、この場合は広域の樹種群の分類に役立てている例といえよう。開発シェルは、EXSYS社のEXSYSである。

つぎに間伐のマニュアル、またはそれに類する知識を知識ベース化した例を示そう。これはどちらかというと、知識ベース化と推論の方法に力点がある場合である。

K. V. ガドウ²⁵⁾ は間伐の選木の過程を知識ベース化した。このための一般的な（言葉で書いた）決定木は図-9のとおりである。これを例えば、間伐には早い、間伐手遅れ、間伐適期などをそれぞれ数値化していくと、図-10のようになる。ここでは初回間伐の時期の樹高、最終間伐の時期の樹高、相対幹距、形状比などが判断の基準となっている。例えば、間伐は初回間伐の樹高と最大平均樹高の間でのみ決定される。そしてこれらの値は地位が分かれば推定できるようになっている。いずれにしても間伐の時期、リスクがあるか、林分の状態を問題としているが、この思考の手順はエキスパート（専門家）の頭の中で行われるものである。

ガドウ氏の場合、知識の獲得は研究者としての経験によるものであるが、数式化して基準をも

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

図-10 ガドウ氏の間伐決定木 (具体化) (ガドウ K.V., 1989より)

とめ、判断しているのが特色である。従って、データベースそのものよりは、例えば、初回間伐の樹高を推定する式（地位による推定）を決めるパラメータの値をあらかじめ決めておく必要がある。知識表現はプロダクシヨソルルールで、パスカルを用いている。

西川ら²⁰⁾は収益（純収入があるかどうか）、林分環境（林分構成のよしあし、病虫害、健全性の組合せにより林分環境の程度を表す）、間伐環境（密仕立てかどうかなどの施業方針、現在の林分密度の組合せにより間伐適期、手遅れ、間伐には早いなどの三つの基準を表す）の組合せにより間伐のアドバイスをを行うプロトタイプシステムを作成した。例えば、林分環境が良くて、間伐適期であり、かつ収益があれば、「無条件に間伐を行ってよろしい」とのアドバイスが得られよう。この方法はガドウ氏と同じくアドバイスを与えるタイプであり、あらかじめゴールを設定しておくので後向き推論となる。本格的なものを作るとなると、施業の専門家、山林所有者、行政担当者などの各種専門家にインタビューを行い、知識ベースを作る必要があろう。実用的なエキスパートシステムになればなるほど、専門家の知識の獲得のために、莫大な時間と費用がかかるであろう。

VI. 総合的な森林資源管理へのエキスパートシステムの応用

森林・林業へのエキスパートシステムの応用に当たって、最終的な目標は総合的な森林資源管理への応用であろう。アメリカ合衆国の野生生物生息分析と多目的用途診断システム (CHAMPS)²⁷⁾ は、データベース、モデリング機能、レポート機能を備えたパーソナルコンピュータ用のエキスパートシステムである。森林経営者の意思決定のため大量のデータを格納、検索、表示する機能を持っている。森林情報サブシステム、診断支援システム、目標評価システムの三つのサブシステムを持っているが、森林情報システムは林分レベルの資源データと地理情報、およびアクセス、更新、要約のソフトより成る。診断支援システムは木材生産、野生生物、水資源管理のための知識ベースを主体としたものである。最後の目標評価システムは対象全域の森林資源データの更新のための森林の成長と収穫の予測プログラムである。これにより施業などの計画実行の林分の空間的な配置への影響などを把握することができる。この目標評価システムはゴールを決めるものではなく、経営目標が適当に達成されているかどうかを判断するだけのものである。

この森林の総合的管理では地理情報システム (GIS) は、重要な役割を果たすものとみられるため、GISとエキスパートシステムとの関係について述べてみよう。

R. N. クールソンら²⁸⁾ によると、GISは4つの機能すなわち、地図および属性データを入力するサブシステム、データの格納、検索サブシステム、評価やシミュレーションモデルを含むデータの処理、分析サブシステム、およびレポート機能サブシステムをもっているという。例えば、伐採箇所の指定は、植生の変動、野生生物の生息環境への影響、水資源への影響、魚類への影響、景観レクリエーションへの影響など充分評価した上で行わなければならないが、これらの相互関係の分析は、森林経営、野生生物、森林生態学など多くの専門家の知識を借りなければ成り立たない。伝統的なGISだとこれらの情報の重ね合わせ (オーバーレイ) を行うことを考えるであろう。しかし、伐採にともなう相互関係をどのような仕組みで評価していくか、どの時点で空間的な情報と関連づけるか、すなわち重ね合わせをどこで行うかなどは、さきに述べた各種の専門家の知識を集約した知識ベースに従うのがより安全であろう。このような人工知能によるGIS (Intelligent Geographic Information System, IGIS) はさきに述べた4つの機能のほかに、各情報の相互関係の解釈とGISの有効な利用に導くインターフェース機能を備えている。

さらにオブジェクト指向のプログラミングをとることにより、相互関係のモデリングやシミュレーションによる分析が容易になるであろう。この一連の過程をクールソンのものを一部修正して示すと図-11のようになる。エキスパートシステムのGISにおける役割は、テーマとなる各オブジェクト (植生、水資源などの情報) 内または、オブジェクト間の関係を定義化し、モデル化、または評価するとともに、GISを利用する手順を示すことであるといえる。

さきに示したフィンランドのムースと森林管理のシミュレーションモデルは、GISを組み込んだモデルであるが、今後このような位置情報を取り入れた森林管理の研究は重要になると思われる。

図-11 人工知能とGISの関係 (クールソン R. N. の図を一部修正, 1987より)

VII. おわりに

この小論を書くに当たり、アメリカ合衆国、カナダ、ドイツ、フィンランド、南アフリカ連邦の林業分野で人工知能の応用研究に従事している専門家にその現状について照会し、有益な資料を頂いた。また国内では、各種のエキスパートシステムのシェルを見せて頂いた関連企業、農業分野でのエキスパートシステムの現状についてご説明頂いた農業研究センターの伊藤 稔第6チーム長に御礼申し上げる。

引用文献

- 1) 西川匡英：林業生産の基本データの採取法—真下正樹氏の指摘に答えて。森林科学 1：36～39, 1991
- 2) 小林正吾・倉田和彦・竹内昌子：prologによる樹木名検索システム（1）。99回日林論：769～770, 1988
- 3) 酒井徹朗・ヨナタン ポントゥルーラン・楊 琴：林業におけるエキスパートシステムの適用に関する研究（II）—作業日程計画支援システム—。100回日林論：771～772, 1989
- 4) 武谷三男：弁証法の諸問題。1～190, 理論社, 1954
- 5) 半田良一：林業経営。1～243, 地球出版, 1972
- 6) 大金永治：森林資源の再生に関する施策・経営・技術的研究。45～158, 日本林業調査会, 1991
- 7) 梅棹忠夫：情報の文明学。中央公論 2：152～172, 1988
- 8) ————：情報の考現学。中央公論 3：102～134, 1988
- 9) SAARENMAA, L. : Extracting Forest Regeneration Knowledge out of the Corporate Forest Database into a Silvicultural Expert Support System. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions: 252～259, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting , Austria, 1989
- 10) エドワード, ファイゲンバウム・パメラ, マコーダック・野元陽代訳：エキスパート カンパニイ。59～79, TBSブルタニカ。1988
- 11) 安部憲広・滝寛和：エキスパートシステム入門。26～34, 共立出版, 1986
- 12) 田中利美・福田章史・遠藤利朗：安全教育のためのCAI（1）—伐木造材作業のための試作システム—。100回日林論：769～770 ,1989
- 13) RAUSCHER, H. M. and HACKER, R. : Overview of Artificial Intelligence Application in Natural Resource Management. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions : 202～222, Proceedings of IUFRO S4.01 Meeting, Austria, 1989
- 14) エドワード, ファイゲンバウム・パメラ, マコーダック・野元陽代訳：エキスパート カンパニイ, 367～381, TBSブルタニカ, 1988
- 15) 特別レポート：日本のエキスパートシステムを総ざらいする。日経A I（付録）121：1～43, 1991
- 16) NAIレポート：環境問題へのエキスパートシステム応用が活発化する米国と欧州。日経A I 114：12～17, 1991
- 17) LORENZ, G., UHRMACHER, A., SIMON, K. H. and BOSSEI, H. : Application of Artificial Intelligence Methods to the Presentation and Modelling of Tree Growth. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions : 234～243, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting , Austria, 1989
- 18) 矢田光治：A I 入門。86～92, オーム社, 1987

Jpn. J. For. Plann. 18 '92

- 19) SARENMAA, H., STONE, N.D., FOLSE, L.J., PACKARD, J.M., GRANT, W.E., MAKELA, M.E. and COULSON, R.N. : An Artificial Intelligence Modelling Approach to Simulating Animal/Habitat Interactions. *Ecological Modelling* **44**: 125~141, 1988
- 20) GERTNER, G. : Artificial Intelligence and Forest Growth Simulation Modeling. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions : 244~250, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting, Austria, 1989
- 21) RAUSCHER, H.M., DPERALA, D. and HOST, G.E. : An Aspen Forest Management Advisory System .1~12, Aspen Symposium '89 Proceedings of a Conference, 1989
- 22) MATUMURA, N. and NISHIKAWA, K. : A Prototype Expert System for a Decision Making of Thinning Schedule. 247~250, Proceedings of Integrated Forest Management Information Systems, Japan, 1991
- 23) SARENMAA, L. : Extracting Forest Regeneration Knowledge out of the Corporate Forest Database into a Silvicultural Expert Support System. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions: 251~259, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting, Austria, 1989
- 24) O'HARA, K.L., OLIVER, C.D., PICFORD, S.G.P. and TOWNSLEY, J.J. : A Prototype Expert System for Silvicultural Decision Making on the Okanogan National Forest. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions : 298~307, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting, Austria, 1989
- 25) GADOW K.V. : Rule-based Selection of Thinning Regimes. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions: 222~233, Proceedings of IUFRO S 4.01 Meeting, Austria, 1989
- 26) NISHIKAWA, K. and SHIBAYASHI, T. : Applicability of the Geographic Information System and Expert System to the Thinning Schedule in Japan. Artificial Intelligence and Growth Models Forest Management Decisions : 260~272, Proceedings of IUFRO S4.01 Meeting, Austria, 1989
- 27) RAUSCHER, H.M. and COONEY, T.M. : Using Expert system Technology in a Forestry Application: The CHAMPS Experience. *Journal of Forestry*, March : 14~17, 1986
- 28) COUSON, R.N., JOSEPH FOLSE, L.J. and LOH, D.K. : Artificial Intelligence and Natural Resources Management. *Science* **237**: 262~267, 1987

(1991年11月20日受理)