

エキスパートシステムによる林道開設工事における施工機械の選択

酒井 徹朗・楊 筱琴

Studies on Expert System for a selection of machines
on a forest road construction

Tetsuro SAKAI and Xiaoqin YANG

要 旨

林道開設工事における機械施工の合理的設計を行うため、作業環境条件に合致した掘削方法の選択を行うプロトタイプのエキスパートシステムを構築した。このシステムは後向き推論を行う154のプロダクショナルルールからなる知識ベースと二つの外部プログラムからなる。

システムには二つの特徴がある。ひとつは掘削機械の選択において曖昧さを含んだ定性的な判断を、ファジィ理論にもとづくメンバーシップ関数により定量化し、好適度として表現していることである。好適度の計算は、地形傾斜・幅員・硬岩切取量・土砂切取り割合・軟岩Ⅰ切取り割合の5因子でそれぞれ行い、それらを総合して全体としての選択の基準とした。

他のひとつは運搬捨土作業の最適化を行うため、シミュレーションの手法を用いている点である。作業のシミュレーションにより、積込み機械と運搬機械の組合せから合理的な使用ダンプトラック台数を決定した。その際、掘削機械と積込み機械の工期の整合性を保つため、最適化の指標として積込み機械の合理的な稼働率を用いた。

またシステムは利用者の意志決定支援を行うものであるという観点で構築した。そのため推論過程において多くの中間結論を設定し、利用者に判断材料としてその結果を提供すると共に、利用者の判断を入力するようにした。

は じ め に

近年各種産業分野において、人工知能技術を用いたエキスパートシステムの研究が急速に行われている。エキスパートシステムとは問題領域の専門家の知識を利用して、専門家と同程度のレベルの問題解決を目標とするシステムである。技術の細分化・専門化が進むと共に技術者の減少・高齢化が顕著な林業分野において、今まで培われてきた各種の林業技術や専門知識の継承・蓄積は急務である。エキスパートシステムのような知識ベースを元にした問題解決や意志決定支援システムの応用は、その対策の一つの方向をあたえる。しかし、林学林業分野におけるエキスパートシステムの適用に関する研究はまだ緒についたばかりでその報告例は極めて少ない¹⁾。そこで林道の開設作業における合理的な作業計画を行うためのプロトタイプのエキスパートシステムを構築しその有用性について考察してみた。林道開設作業では、作業条件に合致した適切な工

種・作業機械の組合せ・作業手順・人員や機械の使用計画等を求める必要がある。ここでは特に土工作業における施工機械の選択について検討したので報告する。

システムの考え方

(1) システムの概要

林道開設に伴う設計計画問題を大別すると、全体路線の計画及び配置・個別路線の設計や開設作業の合理化・開設後の維持管理計画がある。当然のことながらこれらの問題は一連の流れとしてシステム化される必要がある。ここでは開設作業の合理化を目標に、施工管理、特に設計積算時における土工工種の選定を行う作業を対象にした。これは設計・積算・施工管理といった部分のサブシステムとして位置づけられる。

施工機械の選定は土質や作業地の地形条件、土工数量作業期間といった各種の因子によって、作業機械の適応性・経済性を総合的に検討して決定される。本システムは作業現場の土工条件に合致した掘削作業機械の選定を行うことを目標としている。そのため従来の設計者が機械の選定の際に用いた知識を、プロダクション型の知識表現で表し、エキスパートシステムの推論のための知識ベースとした。プロダクション型知識表現は一般に次のように表現され、プロダクションルールと呼ばれる²⁾。

IF 条件 THEN 推論／結論

この表現方法は論理関係が明白で理解し易い。

また、システムの構築に当たっては、現在開発しうるエキスパートシステムは完全に自動化された選択システムにはならないとの前提に立ち、設計者の意志決定支援を担うものであるとの立場でおこなった。というのはシステムが設計積算に際して広範に利用されるためには、一般に普及し利用されているパソコンで動くシステムが有用であると考えからである。そこでとくに設計者とシステムとの対話に重点をおいた。そのため、最終結論まで一気に推論を行わず、いくつかの中間結論を設定した。システムは推論過程において中間結論に達する毎にその結果を表示し設計者の判断を導入し、推論を進めるようにした。

構築したエキスパートシステムにおける推論手順の概略は次のとおりである。

1. 切土量、盛土量、掘削にともなう飛散率等より土工数量を決定する。
2. 土質別土工量、地形傾斜、幅員等より望ましい掘削機械を推定する。
3. 掘削作業を行う機械を指定し、その作業能率を計算する。
4. 計算された掘削作業の工期に満足すれば次の運搬捨土工期の検討に行く。
もし満足できなければ掘削機械の指定からやり直す。
5. 運搬捨土条件から捨土工期をシミュレーションにより求める。
6. 最適なダンプ台数を決定し、土工作業の工期を計算する。

(2) 望ましい掘削機械の選定

土工機械の選定に当たっては、現場条件・機械の性能などを十分に考慮する必要がある。とくに掘削作業にあっては土質、土量、地形、運搬距離などの条件を基にその選定を行わなければならない。選定の対象となる掘削機械の組合せは次の10とおりを考えた。ブルドーザ、ショベルドーザ、バックホウ、リッパ付きブルドーザ、ショベルドーザとブルドーザ、バックホウとブルドーザ、バックホウとブレーカ、ブレーカと火薬の併用、バックホウと火薬の併用、ショベルドーザと火薬の併用である。なお機械の規格としてはブルドーザは 11T, 15T, 21T, ショベルドー

ザは 1.3 m^3 , 1.8 m^3 , バックホウは 0.35 m^3 , 0.45 m^3 , 0.6 m^3 , ブレーカは 1300 kg , 1600 kg とした。

施工機械の選定にあたっては2つの推論方法が考えられる。ひとつにはある現場条件下では決して選択されないことが明らかなもの。あるいは逆に必ずそれらの中から選択されることが明かであるものを、整理分類し系統だった推論をする方法である。例えば、硬岩や中硬岩といった硬い岩質の切取り作業においてショベルドーザやブルドーザだけを用いることはない。その際には火薬の併用やブレーカの使用などが条件となるといった場合である。このように明確な条件の推論はプロダクシオンルールで比較的容易にできる。この場合だと、「もし、岩石切取りがあるならば、掘削機としてショベルドーザは用いない」、といったルールを適用する。

他の考え方は、「もし、幅員が狭く旋回が困難である場合にはショベルドーザの積み込みは不適である」といった条件で推論を行う場合である。この場合、具体的な幅員の値によりショベルドーザの使用が現場に適しているかどうかははっきりしているわけではなく曖昧で定性的である。つまりある幅員以下では不適、それ以上では好適ときっぱりと断定することが不合理な場合である。このような曖昧さを含む定性的な条件は意外と多く、地形傾斜や土質条件についてもいえる。設計者による実際の選定にあたっては、経験と感で曖昧さを残して判定している。ところでプロダクシオンルールでは推論結果や条件の確からしさを表現する方法として確信度と呼ばれる値がある。確信度は -1.0 から $+1.0$ の値をとり、 $+1.0$ に近いほど推論結果がはっきりと肯定的であり、 -1.0 に近いほど否定的であり、 0.0 付近だと曖昧であるとされている。一般に結論／推論の確信度は条件の確信度により計算される。条件の確信度は前もってルール作成時に与えるが、推論過程において確信度を数値として直接与えることができる。そこで本システムでは、曖昧さを含む推論にあってはその曖昧さの程度を確信度に反映させることで、推論を合理的に展開するようにした。曖昧さを扱う理論としてファジィ理論³⁾がある。それは「掘削機として適している」といったような定性的な概念が持つ不確かさを扱う理論である。ここではその理論に基づき、ある条件因子においてある機械が掘削機として適していると判定される程度を定量化するため、メンバシップ関数を導入した。メンバシップ関数は 0.0 — 1.0 の間の実数値で表わされる。1 に近いほどその概念に属する程度が高いことを、すなわちここでは掘削機械として適していることを、逆に 0 に近いほど不適であることを意味する。そこでこのようにメンバシップ関数によって定量化された掘削機械としての適合度合を、以後ここでは好適度と呼ぶ。(1)式は林道幅員 (w) を因子としたショベルドーザとバックホウを掘削作業に用いる好適度を表すメンバシップ関数 (f_i 及び f_b) の例である。

$$\begin{aligned}
 f_i &= 0.0 & w < 3.0 \\
 &= (w-3)/2 & 3.0 < w < 5.0 \\
 &= 1.0 & 5.0 < w \\
 f_b &= 1.0 & w < 5.0 \\
 &= 10/(15-w) & 5.0 < w
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここでは好適度のメンバシップ関数としてショベルドーザでは1次関数を、バックホウでは双曲線関数を用いた。メンバシップ関数の形は条件因子によって様々な関数が考えられる。関数形の決定にあたっては実際の事例などを参考にする必要がある。掘削機械の選定にあたっての好適度の計算では、幅員のほかに地形傾斜、岩石切取り量、砂や転石などの掘削が容易な土砂の切取量の割合、軟岩 I の切取り量に占める割合の5因子を判定因子として用いた。これらの5因子による総合化された好適度は各因子毎に計算された好適度の最小値とした。複数の因子による好適度の結果の総合化は、ここで用いたような最小値をとる方法のほかに、最大値をとる方法、加重

平均や単純平均による方法などがある。判定に用いる因子相互間の関連を考慮して選択する必要がある。メンバシップ関数によって求められた好適度は0.0—1.0の値をとるため、確信度（-1.0—+1.0）に反映させ推論で用いるためには線形変換する必要がある。

(3) 運搬捨土の最適化について

運搬捨土作業の最適化は積込み機械と運搬機械の合理的な組合せにより決定される。この場合更に考慮しなければならないことは、積込み機が掘削機として併用されているか否かということである。積込み機械が掘削機械としても併用される場合、積込み機械として利用される比率は掘削工期と最大積込み能力の整合性から求められる。また、掘削機械と積込み機械が異なる場合は積込み機械の能力を最大限活用する方向で検討される。そこで積込み機械が積込み機として働く稼働率（待ち時間などを除く積込み実作業時間の全作業時間に対する割合）を運搬捨土の最適化を行うための指標とした。

積込み機としての稼働率は、1台のダンプトラックの積込みに要する時間（積込みサイクル時間）、ダンプトラックによる運搬捨土に要する時間（運搬サイクル時間）、運搬に用いられるダンプトラックの台数に左右される。そこで、次のような運搬捨土作業のシミュレーションモデルを作成し、それらの因子間の関係性を求めるとともにエキスパートシステムのシミュレーションモデルとして用いた。

作成したモデル⁴⁾では、積込み機械は1台とし、積込みは空のダンプトラックの到着順に行うものとした。また積込が終了して次のダンプトラックの積込を開始するまで待ち時間を見込んだ。これは積込個所に次のダンプトラックが後進で進入してくる時間を意味する。積込サイクル時間（秒）及び各ダンプトラックの運搬サイクル時間（秒）はそれぞれ正規分布するものと仮定した。個々の値は基準値として入力した各々のサイクル時間と標準偏差をパラメータとして、乱数により求めた。積込み機が指定されたシミュレーション時間を越えて積込を終了した時点を作業終了時とした。モデルは積込み機械の積込み作業に費やした時間とダンプトラックを待つ時間、ダンプトラックの積込み待ち時間と運搬捨土作業時間、運搬捨土量等を結果として出力する。

モデルを用いてシミュレーションにより、積込みサイクル時間・運搬サイクル時間・積込み機の稼働率・使用ダンプトラック台数の関係式を求めた。その際用いた条件因子は次のとおりである。平均積込みサイクル時間は100秒から1,000秒まで1000秒単位で変化させた。平均運搬サイクル時間を300秒から2,400秒まで300秒毎に変化させた。また使用するダンプトラックの台数は1台から10台まで変化させた。なお運搬サイクル時間の標準偏差はその平均時間の10%とし、最大90秒を越えないものとし、作業時間は3時間30分（12,600秒）とした。各条件下において10回の試行を行い、その平均をもとめ各条件下での運搬捨土工期とした。以上のシミュレーション結果を用いて、積込み機械の稼働率（ p ）と積込みサイクル（ s_1 ）・運搬サイクル（ s_2 ）・使用ダンプ台数（ n ）の回帰式として(2)式が求められた。

$$p = -1.14 * n^2 + (17.07 - 0.00288 * s_1 + 0.001754 * s_2) * n + 10.53 + 0.1669 * s_1 + 0.03489 * s_2 - 0.0001361 * s_1^2 + 0.0000013 * s_2^2 + 0.0000218 * s_1 * s_2 \quad (r=0.90) \quad (2)$$

エキスパートシステムにおいては、使用する積込み機械の機種・規格、ダンプトラックの大きさ、運搬捨土の土質・単位重量等から標準工期としての積込みサイクル時間を求める。また運搬サイクル時間は運搬距離の影響を強く受ける。そこで運搬サイクル時間（ s_2 ）は調査結果をもとにして得られた回帰式(3)を用いて、運搬距離（ d ）より回帰した。

$$s_2 = 0.36 * d + 660 \quad (r=0.94) \quad (3)$$

指標とする積込み機械としての稼働率は、掘削機械と積込み機械が異なる場合は(4)式で、掘削

機械と同一の場合は(5)式から求められる。

$$\text{稼働率}(\%) = \text{平均掘削工期} / \text{最大積込み能力} \quad (4)$$

$$\text{稼働率}(\%) = \text{平均掘削工期} / (\text{平均掘削工期} + \text{最大積込み能力}) \quad (5)$$

但し最大積込能力 = $3600 / \text{積込みサイクル時間} \times \text{バケット容量} \times \text{効率}$

$$\text{稼働率} < 100$$

なお平均掘削工期は土質別に求めた標準工期を、土質別の切り取り量で加重平均したものである。稼働率は100%を越えないが、計算手法上実際の計算では指標とする稼働率の値は最大90%とした。というのはダンプ台数の増加と共に、積込み機械の稼働率は増加するが、ダンプ台数がある台数以上になると、稼働率が100%近くなり変化しなくなるためである。指標としての積込み機としての稼働率、積込みサイクル時間、運搬サイクル時間を決定し、(2)式を n について解けば、指標とする稼働率の値を満たすダンプトラック台数が求められる。ダンプ台数は当然のことながら整数値であるためその近傍に最適値がある。そこでエキスパートシステムでは(2)式で計算されたダンプ台数を初期値として各サイクル時間と共にモデルの条件値として入力し、運搬捨て工期及び積込み機械の稼働率をシミュレーションにて求める。得られた結果を検討し、ダンプ台数を増減することにより、期待する積込み機械の稼働率を満たす最適な台数を決定する。その際必要ならば使用するダンプトラックの規格を変更することも可能である。計算結果はファイルに保存され、必要に応じ参照することができる。設計者は比較検討しながら運搬捨て工期を決定できる。

計 算 例

本システムはエキスパートシステム構築ツール「PAI100」によって16ビットのパソコン(NEC PC9801)上に構築した。システムは154のプロダクションルールからなる知識ベースと2つの外部プログラムからなる。外部プログラムはメンバシップ関数の計算と運搬捨て作業のシミュレーションを行うもので、フォートランで記述され実行形式で登録されている。なおここで用いた工期などは林道必携⁵⁾に記載してある値に準拠している。効率は土質別にその切り取り量で加重平均し、現場条件による割増しなどは行っていない。運転経費などの経費算定となる数値は、およそその値を実行時に入力した。

図1は土工数量を表示したものである。土質別の切り取り量及び盛土量や飛散率を入力した後表示される。開設現場の土質は切り取り量の百分率を確信度として表現している。なお、土質区分は

《土工数量一覧》					
切り取り土砂量	2,674 m ³	飛散率	15 %	盛土量	604 m ³
内訳	砂 285				
粘性土	0	土砂	949 m ³	捨て土量	1,669 m ³
礫	475		35 %		
転石	189			運搬距離	2,000 m
軟岩Ⅰ	1,418	軟岩Ⅰ	1,418 m ³		
軟岩Ⅱ	307		53 %		
中硬岩	0	岩石	307 m ³		
硬岩Ⅰ	0		11 %		
硬岩Ⅱ	0				
開設現場の土質は					
(21.01)	軟岩Ⅰである。	(確信度 = +0.53)			
(21.02)	礫まじり土である。	(確信度 = +0.18)			
(21.03)	砂質土である。	(確信度 = +0.11)			
(21.04)	軟岩Ⅱである。	(確信度 = +0.11)			
(21.05)	転石まじり土である。	(確信度 = +0.07)			

図1 土工数量表示例

A example of an intermediate display
(a volume of earthwork)

《中間結論 望ましい掘削機械》	
望ましい掘削は	
(1.01) ブレカと火薬併用による作業である。	(確信度 = +1.00)
(1.02) バックホウと火薬併用による作業である。	(確信度 = +1.00)
(1.03) ショベルドーザと火薬併用による作業である。	(確信度 = +1.00)
(1.04) ブレカとバックホウによる作業である。	(確信度 = +0.92)
開設現場の土質は	
(2.01) 軟岩Ⅰである。	(確信度 = +0.53)
・総切り取り量 5,674 m ³ ・盛土量 604 m ³ ・捨て土量 1,669 m ³	
・運搬距離 2,000 m ・地形傾斜 30 度 ・林道幅員 5.0 m	
以上の結果を参考にして、掘削方法の選択を行って下さい。	

図2 中間結論の例(望ましい掘削機械)

A example of a intermediate
conclusion
(an expected machine combination)

土砂（砂質・粘性・礫・転石）・軟岩Ⅰ・岩石（軟岩Ⅱ・中硬岩・硬岩Ⅰ・硬岩Ⅱ）に大別してある。

図2は望ましい掘削機械の選択のための推論の中間結論を表示したものである。確信度はさきに述べたメンバシップ関数の結果から得られたものである。確信度は+1.0に近いほどエキスパートシステムによる推論で推奨される掘削機械である。設計者はこの結果を参考にして掘削機械の選択を行う。

図3は指定された掘削機械での掘削集土工程の結論である。掘削工程・所要時間・掘削経費が表示されている。掘削経費は掘削機械1時間当りの運転経費をシステムの要求にしたがって入力し、所要時間に乗じたものである。なおこの時点で所要時間が負の数であれば、掘削機械の選択が岩質と不適合であることを意味しており、自動的に再選択のループにはいる。もし結果が思わしくなく不満足で掘削機械の変更を行いたいならば、次のステップでシステムが結果に満足しているか否かの問いを発するので、それに対し「再選択を行う」と答える。

図4は運搬捨土のシミュレーションの結果を表示したものである。積込み機の稼働率が期待稼働率の上下5%以内に収まるまでダンプ台数の増減を行う。この際ダンプトラックの大きさの変更も可能である。なお最新のシミュレーション結果は最大5回分までファイルに保存されており、随時検索可能である。ファイル状況の数字はダンプ台数*1000+積載量を示している。

図5は最終結論を示している。作業経費・工程・日数などの総計が示されている。

《掘削集土工程》			
掘削機として			
(1.02) バックホウをもちいる。	(確信度=+1.00)		
(1.02) ブレーカをもちいる。	(確信度=+1.00)		
ブルドーザの機種は			
(2.01) 使用しない	(確信度=+1.00)		
バックホウの機種は			
(4.01) 0.6 m ³	(確信度=+1.00)		
ブレーカの機種は			
(5.01) 1300 km	(確信度=+1.00)		
積込機械は			
(6.01) バックホウを使用する。	(確信度=+1.00)		
掘削集土工程	切取土量	所要時間	掘削経費
土 砂	31.7 m ³ /hr	949 m ³	285千円
軟岩Ⅰ	12.2 m ³ /hr	1,418 m ³	1,512千円
岩 石	9.8 m ³ /hr	307 m ³	407千円
合 計	18.8 m ³ /hr	2,674 m ³	2,203千円
(7 hr/day)			
* もし作業時間の項に負の数があれば、掘削方法の選択に誤りがあります。f.10を押すと、再度掘削方法の選択に戻ります。			

図3 中間結論の例（掘削集土工程）

An example of an intermediate conclusion
(productivity of digging work)

《中間結論 シミュレーションの結果》			
<条件>			
運搬距離 2,000 m	ダンプ台数	2台	ファイル状況 F1: 4002.8
運搬時間 1,380 ± 138秒	運搬効率	17 m ³ /hr	F2: 3002.8
積込み時間 745 ± 75秒	運搬経費	624 ¥/m ³	F3: 3005.2
捨土量 1,669 m ³	積込経費	378 ¥/m ³	F4: 2005.2
模擬時間 12,600秒	積込稼働率	69 %	F5: 0.0
積載量 5.2 m ³	期待稼働率	75 %	
バックホウの機種は			
(20.01) 1.6 m ³	(確信度=+1.00)		
ショベルドーザの機種は			
(21.01) 使用しない	(確信度=+1.00)		
ダンプトラックの機種は			
(22.01) 11t	(確信度=+1.00)		

図4 中間結論の例（シミュレーションの結果）
An example of an intermediate conclusion
(a result of simulation)

《掘削捨土作業総計表》			
作業経費	作業工程	作業日数	(1日7時間稼働)
掘削作業 2,203千円	18.5 m ³ /hr	25.4	* 積込み機としての稼働率
捨土作業 1,957千円	17.3 m ³ /hr	13.8	69 %
総 計 4,160千円		25.4	
* 積込み機械と掘削機械が同一の場合は、掘削作業工程は表示値より積込機としての稼働率分だけ減少する。			

図5 最終結論
Final conclusion

お わ り に

作業環境に合致した掘削機械の選択を行うエキスパートシステムを構築した。開設工事費の大半を占める掘削運搬捨土作業の費用及び工程が容易に求められる。実用化に向けては個々の積算体系にあった経費算出に書き直す必要がある。だが、従来のプログラムと異なり、該当するプロダクションルールのみ修正すればよいため汎用性は高いと考える。また、新しい機械や工種の追加についても同様である。しかし現在、このシステムの適用性の検討や問題点の洗い出しは、そ

の検討例が少なく不十分である。実用化に向けては多くの課題が山積していると考えている。もしこのシステムを試してみたい方がおられるなら、適用性と問題点の検討のため喜んで提供したい。

引用文献

- 1) 酒井徹朗：林業におけるエキスパートシステムの応用に関する研究（I），日林論，99，667-668，1988
- 2) 上野晴樹：知識工学入門，208pp. 1985
- 3) 寺野寿郎他：ファジィシステム入門，255pp. 1987
- 4) 楊 筱琴：林道の機械施工に関する研究，京大農学部修士論文，1988
- 5) 林道研究会：林道必携（設計編），399pp. 1986

Résumé

We construct an expert system which supports a selection of construction machines for forest road. The system consists of a knowledge base for an reasoning and two external programs. A knowledge base has 154 production rules for backchain reasoning method. The system has two characteristics symbolized by external programs.

One of them calculates a membership function for a determination of a suitable ratio. In a selection of machine, it is difficult to express a clearly conclusion as "yes or no". Many judgments have a vagueness. Membership function based on Fuzzy theory is very useful in thus case. So, we applied the method for a certainty factor of a production rule calculated by 1-order function or a hyperbola function as equation (1). A suitable ratio cutting and percentage of soft rock cutting is calculated. we use minimum value of them for certainty factor.

Another decides an optimal number of using dump trucks by simulation models for bring-out operation of remainder soil. We consider an optimization of a transport to bring a rate of productive work close to an ideal value. An ideal value is determined by a productivity of digging and moving for a machine combination as equation (4) or (5).