採鉱法選定のためのエキスパートシステム*

大久保 誠介¹ 山 富 二 郎¹ 西 松 裕 一²

An Expert System for Selecting Mining Method

by Seisuke OKUBO¹, Jiro YAMATOMI¹ and Yuichi NISHIMATSU¹

1. Department of Geosystem Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

In 1992, the committee with financial aid by PNC was founded to develop a selecting method or an expert system for mine design and development. At first, various mining methods were surveyed and distinctive features of them were examined and discussed. A relatively simple selecting method or chart for an appropriate mining method (system A) was proposed in the previous study.

In this study, an advanced system for mine designing and development are discussed and system B is finally proposed. Additional data of mines are collected and a series of test-runs are carried out. The suggested or selected mining method by the system B, in most cases, coincides with the actual one. The developed system provided with a glossary, annotation and knowledge base concerning mining methods, design and development, is considered to be helpful for a student / novice and to promote mutual understanding among established mining engineers. The main result of the committee are compiled and recorded in CD-ROM.

KEY WORDS: Mining Method, Selection Method, Rock Mass Classification, Expert System

1. は じ め に

資源・素材学会は動力炉・核燃料開発事業団の委託を受け、1992年度に採鉱設計支援システムの開発委員会を組織し、鉱山開発計画の策定と採鉱システムの設計に供することのできるエキスパートシステムの開発に取り掛かった(資源・素材学会, 1992)。委員会には、鉱山の開発・操業を長年手がけた鉱山技術者(エキスパート)と鉱山学・採鉱学に関する学識経験者が参加しており、活発な討議と意見交換を繰り返して、このエキスパートシステムを検討・開発した。なお、ここでいうエキスパートシステムとは、熟練した技術者や専門家が持つ知識とノウハウを集積した計算機上のシステムを指す。この意味で採鉱法選定のためのエキスパートシステムと呼び得るものを目指して本研究は進められた。既報(大久保・山富, 2000)で、1992～1995年度にわたる4年間の検討結果(資源・素材学会, 1992, 1993, 1994, 1995)を採鉱法選定表の形に整理して報告した。その後も引き続き上記委員会で検討を加えてできたエキスパートシステムについて本稿で報告するが、このエキスパートシステムには、改訂した採鉱法選定表に加えて、採鉱法の説明、採鉱法の留意点、用語集、知識ベース、鉱山データが含まれる(資源・素材学会, 1995, 1996, 1997, 1998)。

現状を見ると、1980年代後半の円高ショックと鉱産物価格の低迷により、国内鉱山は打撃を受けて閉山が相次ぎ、経験豊かな採鉱技術者が職場を去り、貴重な経験と知識が整理されずにいる。このように、わが国の鉱山業界を取り巻く情勢には、かつてない

ほどに厳しいものがあるが、資源が持つ重要性が今後減退するとは考えられず、わが国の産業と市民生活は海外からの資源供給への依存をますます強めるであろう。したがって、国内鉱山の衰退による経験者の離散や経験者の高齢化が進む現在、専門家に取って代わりうるエキスパートシステムの開発は急務と考えることができる。複雑で不確実な自然条件を相手とし、変化が激しいために先行きを読むことが困難である経済条件のもとで、採鉱設計と開発・操業の経験を積んだ鉱山技術者の知識がエキスパートシステムとして結実することになれば、後継者の育成のみならず、わが国の資源開発にも大いに貢献するはずである。また、海外からの資源調達や海外プロジェクトの評価と投資の意志決定にも極めて有効と思われる。

ここに紹介する採鉱法選定のためのエキスパートシステムは、採鉱設計という大きな枠組みの一部あるいは入り口と考えるべきものであるが、採鉱学を専門としない技術者や実務家も使い得るエキスパートシステムを目指した。しかし、以下のことが主な理由で、それには限界があった。

(1) 鉱床とその母岩の性状・地質学的特長は個々に異なり千差万別である。しかも、自然条件に基づく要因のみならず、技術的要因・経済的要因さらには環境に与える影響も考慮して、採鉱法が選択され、採鉱システムの設計が行われる。

(2) 採鉱法選定が最初に検討されるのが、開発にも着手していない企業化調査段階であり、このときには、採鉱データの精度にも限りがある、採鉱法選定に必要な最小限の地質条件がやっと明らかにされた程度であることが珍しくない。したがって、利用できる情報とデータの信頼度は不十分であることが多いので、あまり細かな要因までを考慮して、採鉱法を選定しても意味を持たない場合があり得る。

それゆえ、限られたデータから採鉱法を選ぶ簡素なシステムを目指すことにした。したがって、これから紹介するシステムは複

* 2000年4月20日受付 6月1日受理

1. 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 工博 東京大学名誉教授

[著者連絡先] FAX 03-5841-7035 (東大・地球システム)

E-mail: ttokubo@geosys.tu-tokyo.ac.jp

キーワード: 採鉱法, 選定法, 岩盤分類, エキスパートシステム

雑で多岐にわたる要因が関係する採鉱法選定過程のいわば最初の一里塚にすぎないものと考えられ、このシステムだけで採鉱法選定の作業が終わるわけではない。本格的な開発の意志決定あるいは採鉱計画の立案には、もっと多くの情報と豊富な経験を要するので、本システムは、鉱山を開発するか否かを調査する企業化調査(Feasibility Study: 以下ではF/Sとする)の初期段階(一次F/SあるいはPre F/Sと呼ばれる段階)で使われることを想定している。また、開発したエキスパートシステムは、鉱山開発や操業の経験を持たない技術者・実務家が、採鉱法選定に必要な要件が何であるか、それが採鉱システムと開発プロジェクトの成否にどのような影響を与えるかを理解するのに役立つであろう。さらには、採鉱法そのものを理解するという教育的効果も期待できると考える。

2. エキスパートシステムの狙いと概要

2・1 目標の設定

既報(大久保・山富, 2000)で報告したのは、いわば中間報告である。その後さらに検討を進めた結果、次のような目標を設定し、成果を1枚のCD-ROMにまとめることにした。

- (1) 鉱山で働いたことがなくとも工学的な基礎知識を持つ技術者が、採鉱法を選定するときの一助となるものを作成する。
- (2) 主として資源系の大学院生の採鉱法に対する理解を深めることができるものを作成する。
- (3) 成果物は、鉱山技術者の意見交換の場となりえるように配慮する。
- (4) 将来にわたって、データと知識の保存ができるように配慮する。

この内(1)は最初からの目標であり再確認したにすぎない。(2)～(4)も最初からある程度念頭においていたが、前半の検討では(2)～(4)まで配慮する余裕がなかった。そこで、後半の目標として、これらを追加することにした。(1)～(4)の目標を満たすために、採鉱法の説明、留意点、用語集、知識ベース、鉱山データを追加するのが適当だと判断した。各項目の主たる対象をまとめると表1のようになる。また、既報で発表した採鉱選定表についても見直しをした。

2・2 概要

見通しをよくするために、ここでは、表1に示した項目について簡単に説明することにする。

(1) 採鉱法選定表と計算機プログラム 既報で提案した採鉱法選定表(以下A案と称する)からの変更点について説明する。前にも述べたようにA案はポイント制を採用しており、好適な条件が多いほど点数が高くなる。このポイント制は、他分野でも採用されることが多く、主として学術経験者の勧めにより採用された。こうしてでき上がったA案もある程度満足できるものであったと考える。しかしながら、長年鉱山で経験を積んできた技術者

には、ポイント制に対して違和感があるとの意見があった。その意見を集約すると次のようになる。

○ 採鉱法の選定に当たって致命的な条件がある。これに×をつけ、×が一つでもあればその採鉱法を候補としないとした方が、より合理的な選定表と考えられる。

○ 付帯条件により可否がきまる場合が多い。この場合には、△をつけておいて、注釈(採鉱法の留意点)をつけるのがよい。そうすることによって、より正確な判断ができるとともに、学生たちの勉学の助けとなりやすい。

そこで、上記の意見を汲んだ採鉱法選定表B案を新たに開発することにした。その詳細については3.で述べることにする。

(2) 採鉱法の説明 CD-ROM1枚ですべての情報を盛り込むのは無理かもしれないが、主として一般の技術者のために簡単な採鉱法の説明をつけておくのが親切であろう。そこで、学部講義程度の説明をつけることにした。また、採鉱法の説明には図が欠かせないと思われたので、かなりの数の図を収めることにした。

(3) 採鉱法の留意点 今後鉱山関係の仕事につこうとする大学院生や経験の浅い鉱山技術者に、種々の留意点を伝えることを目的とする。そこで2つの様式で留意点を示すことにした。

○ 採鉱法ごとに、留意点をまとめた文章をつける。

○ さらに、採鉱法選定表における△の箇所を中心に、簡単な留意事項を示す。

(4) 用語集 ある程度用語の説明を付すことにした。ただし、時間的な制約があったので、網羅的なものは狙わないことにして、CD-ROMに収めた文章中に出てくる単語で、通常の辞書には出てこないものを選び、これらに簡単な説明を加えることにした。

(5) 知識ベース 採鉱法選定表に盛り込めるのは、鉱山技術者の持つ知識のうちでも比較的整理された部分である。そこで、知識ごとに文章を中心とした形で、知識を収集・整理しようとの試みを1994年度より開始した。知識には1番から順に通し番号をつけ、1番から74番までを収録した。その一端は既に発表している(採鉱設計支援システム開発委員会, 1996)。知識ベースには、鉱山技術者の貴重な生の声が入っており、鉱山技術者間の意見や情報交換の場になりえると考ええる。また、一般技術者や大学院生なども、ある程度勉強が進んだならば読みこなせると考える。

(6) 鉱山データ 既報では23鉱山のデータ収集を行った。これらのデータを見直し、今回提案する採鉱法選定表とそれを具体化した計算機プログラムに対応するデータ形式にまとめた。さらに、既報で欠如していた同和鉱業(株)関連の7鉱山とAkuta鉱山のデータを収集し、今回提案した採鉱法選定表に対応するデータ形式にまとめた。

3. 採鉱法選定表

3・1 基本的な考え方

ここで紹介する採鉱法選定表B案は、鉱床を取り巻く自然条件を主体に採鉱法選定を行う。この採鉱法選定表では、最適な採鉱法を選ぶことよりも、与えられた自然条件の下で実行可能な候補を複数選びだし、選んだ採鉱法を採用した場合に考えなければならない事項を指摘することに主眼をおいている。すなわち、採鉱法選定には、自然条件以外に技術的要因や経済的要因、さらには環境に対する影響や現地の法規制なども影響するが、自然条件を改変することは不可能であるので、まず、自然条件を考慮して複数の候補を選ぶ。ここまでの、ここに紹介する採鉱法選定表とそれを具体化した計算機プログラムの役割である。

実際の採鉱法選定のプロセスはさらに続いて、技術的要因・経

表1 エキスパートシステムを構成する項目と主たる対象

	採鉱法選定表 と計算機 プログラム	採鉱法 の説明	採鉱法の 留意点	用語集	知 識 ベース	鉱 山 データ
一般技術者	○	○		○		
大学院生	○		○	○		
鉱山技術者					○	
保存					○	○

経済的要因や環境に与える影響などを考慮して、候補の見直しを行い、ふさわしくないものを候補リストから除く。最後に、残った採鉱法について、大まかな採鉱プランを作ってコスト計算を行う。操業コストと必要な設備投資が決まれば、カットオフ品位が定まり、採掘可能な鉱量が決まるので、経済性を比較して最適な採鉱法を選ぶ。またこのとき、スパン長さ・必要な支保量・切羽の主要諸元と配置・ケーバリティ特性・露天掘採掘の際のピット傾斜角等を見積もって、岩盤制御あるいは操業に著しい影響を与える問題点が発見されたならば、選ばれた採鉱法の見直しを行う。このような手順における初歩的な部分は“採鉱法の留意点”として、また高度なノウハウは“知識ベース”としてCD-ROM中に可能な限り収めた。

3・2 採鉱法選定条件

初期段階(Pre F / S)の採鉱法選定を想定しているのので、表2の採鉱法選定表B案に示すように鉱床が持っている自然条件を中心に選定条件を選んだ。なお、鉱床がいくつかの鉱体から構成されている場合には、一つ一つの鉱体ごとに選定条件をチェックし、採鉱法選定を行うものとする。

(1) 鉱床の形状(塊状かそれとも脈状・層状か) A案と同様である。

(2) 鉱床の傾斜と厚さ 鉱床の形状が脈状・層状であるものについて適用する。A案では、傾斜をまず4段階にわけて、傾斜ごとに厚さでわけた。すなわち、傾斜と厚さの組み合わせを選定条件とした。B案では、傾斜と厚さを独立した選定条件とした。すなわち、傾斜6段階と厚さ7段階を独立に扱った。このように、B案において、細かい判定区分を設けた理由は、より細かな判定が可能であり、しかも、採鉱法の適否がA案で示したよりも微妙に影響を受ける条件について細かくして、選択の精度向上を図った。このように分類が細かくなったので、A案で採用していた鉱床傾斜と厚さの2段階判定をやめて、B案では、傾斜と厚さを独立した並列の判定条件とした。

(3) 単一鉱体の規模 A案では鉱床の規模を、300万t以下、300～1,500万t、1,500～15,000万t、15,000万t以上の4段階に

わけた。鉱床が単一の鉱体のみから構成されていることもあるが、複数の鉱体によって構成されている場合が多いので、採鉱法選定は鉱体ごとに行われるべきであるという立場を明確にした。そのためB案では、採鉱法選定が単一の鉱体ごとに行われることを前提としている。したがって、B案の採鉱法選定表では、単一鉱体の規模により30万t以下、30～100万t、100～300万t、300～1,000万t、1,000～3,000万t、3,000万t以上の6段階にわけた。

(4) 鉱石価値 A案では品位で、1t当たり10,000円以下、10,000～30,000円、30,000円以上の3段階にわけた。すなわち、A案では、t当たりの経済価値をもって判定していたが、B案では、単に高い、中位、低い定性的な3段階表示とした。多くの鉱石は複数の有用金属・鉱物を含んでいるので、経済価値が異なる金属・鉱物の品位(含有量)だけから評価するのは困難な場合がある。また、可採率・ズリ混入率によって鉱石価値が変化したり、現地の労務費等によって鉱石が持つ経済的価値が変化したりするので、定量的な判断が困難であると考え、低い・中位・高いの中から定性的に選ぶことにした。

(5) 鉱床の位置 A案と同様に、100m以下、100～500m、500m以上とした。

(6) 鉱床の力学的特性 電力中央研究所の岩盤分類(吉中ら、1989)を使用する。A案では、 C_H^+ 、 C_H^- 、 C_M 、 C_L 、Dの5段階であったが、範囲を広げるためにAとBを加えるとともに、判別の難しい C_H^+ と C_H^- の区別をやめてA、B、 C_H 、 C_M 、 C_L 、Dの6段階とした。

(7) 母岩の力学的特性 鉱床の力学的特性と同様とした。

3・3 採鉱法の分類

B案では、以下の10種の採鉱法についてその適用性を示す。A案との相違は、Shortwall miningが無くなっただけである。Shortwall miningは、初期段階の採鉱法選定ではLongwall Miningとほとんど変わらないとして、Longwall Miningの中に含めて考えることにした。

- (1) Open Pit Mining (露天掘採鉱法) OP と略記
- (2) Room and Pillar Mining (ルームアンドピラー法) RP

表2 採鉱法選定表(B案)

採 鉱 法	塊 状	鉱 床 の 形 状										単一鉱体の規模					鉱石価値			鉱床の位置 (深さ)			鉱床の力学的特性						母岩の力学的特性								
		偏 平 (脈状・層状)																																			
		傾 斜				厚 さ																															
		0°	30°	60°	90°	1 m 以 下	1 〜 2 m	2 〜 3 m	3 〜 5 m	5 〜 10 m	10 〜 20 m	20 m 以 上	30 万 t 以 下	30 〜 100 万 t	100 〜 300 万 t	300 〜 1000 万 t	1000 〜 3000 万 t	3000 万 t 以 上	低 い	中 位	高 い	100 m 以 下	100 〜 500 m	500 m 以 上	A	B	C _H	C _M	C _L	D	A	B	C _H	C _M	C _L	D	
Open Pit Mining	○	○	○	○	△	△	△	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Room & Pillar min.	△	○	△	△	×	×	×	△	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	△	△	△	△
Sublevel Stoping	○	△	△	△	△	○	×	△	△	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	△	×	×	○	○	○	△	×	×		
Overhand Cut & Fill Stop.	○	×	×	△	△	○	△	△	○	○	△	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	×	○	○	○	△	×	×			
Underhand Cut & Fill Stop.	○	×	×	△	○	○	△	○	○	△	△	△	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	△	○	○	
Shrinkage Stop.	△	×	×	×	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	○	×	○	×	△	○	×	△	△	△	○	○	△	△	×	○	○	○	△	×	×	×	
Stull Stop.	×	×	×	△	△	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	△	×	×	△	○	△	△	△	△	○	○	△	△	×	○	○	○	△	×	×	×	
Block Caving	○	△	△	△	△	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
Sublevel Caving	○	×	×	×	△	○	×	×	×	△	△	○	△	○	○	○	○	○	×	○	○	△	△	△	○	○	○	△	×	×	△	○	△	×	×		
Long wall Mining	×	○	○	△	△	△	△	△	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	×	

- (3) Sublevel Stopping (サブレベルストーピング法) SL
- (4) Overhand Cut & Fill Stopping (上向充填採掘法) OC
- (5) Underhand Cut & Fill Stopping (下向充填採掘法) UC
- (6) Shrinkage Stopping (シュリンケージ法) SR
- (7) Stull Stopping (打柱採掘法) ST
- (8) Block Caving (ブロックケービング法) BC
- (9) Sublevel Caving (サブレベルケービング法) SC
- (10) Longwall Mining (長壁式採鉱法) LW

採鉱法選定表を具体化した計算機プログラムのヘルプメニューを開くことによって、これら 10 種の採鉱法についての解説を読むことができるようにした。

数多く存在する採鉱法から、上記 10 種を選択したので、10 種の採鉱法に多少のバリエーションないし幅を持たせる必要があるし、境界領域に入る採鉱法も現実存在する。その代表例の一つが、VCR (Vertical Crater Retreat) 法であるが、VCR 法には、サブレベルストーピング法やシュリンケージ法に共通した特長を見ることができる。ここでは、VCR 法が長孔穿孔を取り入れた大規模鉱床の採掘に適した採鉱法であることを重視して、サブレベルストーピング法に分類することにした。

発破あるいは機械の掘さく力を使って露天で採掘を行うものを露天掘採鉱法として選定の対象とすることにした。海外の露天掘金属鉱山に見られるようなピットを形成するものはもちろん、石炭の露天掘 (Open Cast Mining)、日本の露天掘石灰石鉱山・碎石事業所に見ることができる山肌をベンチ状に採掘して、ピットを形成しないものも露天掘採鉱法と見なし、採鉱法表を作成した。

建築用石材の露天掘は特殊なものであるから、選定対象から外した。また、砂鉱床特有の採鉱法である Placer Mining あるいは Alluvial Mining と呼ばれる採鉱法を使った砂金・砂鉄の採取が古くから行われており、現在も、砂鉱床中のダイヤモンド・錫・チタン・プラチナ等の採取に世界中で広くその例を見ることができる。しかし、砂鉱床採鉱法は砂鉱床の特殊な性質、すなわち、砂礫層中に存在しているため掘削しやすく、比重差を利用した選別も容易であることなどを利用しているので選定対象から外した。岩塩や硫黄鉱床にボアホールを掘さくし、水や熱水を注入して回収するボアホールマイニング (Borehole Mining)、水や生物・化学溶液の物理化学的作用により有用鉱物を溶出させるリーチング法 (Leaching) などのソリューションマイニング (Solution Mining) も、対象とする鉱床の特性に強く依存し、代替手法がほとんど存在しないと考えられるので、これらの採鉱法は選定対象から外すことにした。

3・4 採鉱法選定プログラム中の○×△の意味

採鉱法選定表では、採鉱法と選定条件の一つ一つの組み合わせに○△×印が与えられているが、○印は適した組み合わせ、×印は適した組み合わせでないことを意味し、いくつかの選定条件の内一つでも×印と認定されると、他の選定条件に合格していても、その採鉱法を採用してはならないということの意味している。最後に△印は、△印が付いた選定条件だけでは該当する採鉱法が、適用できると無条件で結論するものではなく、逆に否定するものでもないとした。△印をつけた場合を具体的に述べると次のようになる。

(1) 初期段階 (Pre F / S) では判断が難しく、より詳細な地質情報・操業条件が付け加わることにより、○とも×ともなる可能性がある場合。

(2) 経済的な条件や周辺環境への影響など、選定条件以外の条件が判定に大きな影響を持っていると考えられる場合。

(3) 基本的な採鉱法に適切な変更を加えることにより適用可

能となる余地が残されている場合。

(4) ケービング法の力学特性のように定説がかたまっていない場合。

採鉱法選定表において△印が付いたものには、マウスをマス目に当ててダブルクリックすることにより、なぜ△印と判定されたかの理由説明が表示される。したがって、△印が付いた採鉱法は、他の条件次第で適とも不適ともなる可能性を持っている。採鉱法選定表ないし計算機プログラムの使用者は、理由説明を理解して、当該採鉱法の適用に当たって問題となる点を吟味し、検討を加える必要がある。なお、計算機プログラムを使用することによって、×印の付かない複数の採鉱法が選ばれるはずである。これらのなかで△印の少ない採鉱法がもっとも適した採鉱法であることを意味するものではないことを、あらためて強調しておく。

4. エキスパートシステムの使用方法と使用例

4・1 エキスパートシステムの使用方法

プログラム化に当たって、まず開発環境について議論したが、検討の後、現在もっとも多く使用されている環境が望ましいと考え、計算機は IBM-AT 互換機で、OS は Windows95 としたが、他機種、他の OS でも問題ないと考える。プログラム言語は、開発担当者の好みに従って Pascal の一種である Delphi としたが、C や Basic を採用したとしても問題ないと考える。記録媒体は、必要な記録容量 (約 25 メガバイト) と普遍性から CD-ROM を中心とした。でき上がった CD-ROM 内のファイルの構成は、表 3 のようになっている。

本プログラムでは選定条件 (採鉱条件) を与えることによって、各採鉱法の適合性を知ることができる。前述のように、ここでいう選定条件とは主として鉱床を取り巻く自然条件を指す。このほか、それぞれの採鉱法、および採鉱法における留意点が必要に応じて得られるようになっている。また、それぞれの採鉱法に置いて採鉱条件がどのような影響を持つかの説明も与えるようにした。コンパイル済みの計算機プログラム (b. exe) を起動させると採鉱選定表 (B 案) と書かれたメインフォームが画面に表示される (図 1)。メインフォームは、選定表、条件入力部、鉱山名入力欄、および結果表示やリセットなどのボタンよりなっている。

採鉱法選定表は、チャート式に採鉱法を決定するための表であり、左端部には 10 種類の各採鉱法名が表記されている。この採鉱法名の表記された箇所 (ラベル) をクリックすると、「採鉱法の説明」ボタンと「留意点」ボタンからなる入力用窓 (ダイアログ) が表示される。それぞれのボタンをクリックすると採鉱法、および採鉱における留意点を説明する文章および画像が表示される。画像は「Next」ボタンと「Back」ボタンをクリックすることにより図番を前後に操作できるので、テキストと対応させながら見ることができる。例として、図 2(a) に Open Pit Mining 法の説明の一部を示す。図 2(b) には、Open Pit Mining 法で鉱床の傾斜が 60° 以上の部分の留意点を示す。これらを読んでわからない用語があった場合には、ヘルプをクリックすると、図 2(c) のようにあいいうえお順にならんだ用語集が現れる。

表の上部には採鉱法を選定するための条件 (鉱床の形状・単一鉱体の規模・鉱石価値・鉱床の位置・鉱床の力学的特性・母岩の力学的特性) がそれぞれ表示される。これらの条件をクリックすると、それぞれの条件の意味、およびその条件が採鉱にどのような制約を与えるか等の説明文が表示される。表の中央部には○・△・×と表記された箇所がある。これらは、対応する採鉱法が適用するかどうかを示したもので、クリックするとコメントが表示される。

表 3 CD-ROM 内のファイルの構成

各種テキストファイル用フォルダ
各種画像データ用フォルダ
ヘルプファイル本体
ヘルプ・プロジェクト・ファイル
ヘルプ・コンテンツ・ファイル
実行プログラム (これをクリックして下さい)

計算機プログラムを起動した時点で、メインフォームには表の条件に対応して、塊状・単一鉱体の規模・鉱石価値・鉱床の位置(深さ)・鉱床の力学的特性・母岩の力学的特性の6つが表示される。ただし、「塊状」の「No」欄をチェックすると傾斜・厚さの2つが新たに表示される。

メインフォームの左下にある鉱山名記入ボックスは、採鉱法選定の対象鉱山の名称を記入するテキストボックスで、選定結果をファイルに保存する場合、鉱山名がそのままファイル名になる。条件入力部の対応する箇所をクリックした後、結果表示ボタンをクリックすると選定結果が表記される。なお、リセットボタンで、いつでも起動時の状態に戻る。

以下に採鉱法を選定するための本プログラムの標準的な使用手順を示す。

① 鉱山名記入ボックスをクリックし対象となる鉱山名を記入する。

② 条件入力部の該当する条件をクリックする。鉱床の形状において塊状である場合は「塊状」の「Yes」欄をクリックし、ついで他の5つの条件をチェックする。鉱床の形状が塊状でなく層状である場合は、「塊状」の「No」欄をチェックすると新たに「傾斜」と「厚さ」の条件入力部が現れるので、該当する条件をクリックする。

③ 結果表示ボタンをクリックする。選定表の各部の色が青と赤に変わる。採鉱法名が青色に変わることは、与えられた条件下で該当する採鉱法が適当であることを示している。採鉱法名が赤色に変わることは、与えられた条件下では該当する採鉱法が不適であることを示している。選定の結果、採鉱法名が赤色に変化した場合、与えた条件の内どの条件によって該当の採鉱法が不適と判断されたかがわかるように、該当する×印が赤色に変化する。

④ ファイルに保存する。それぞれの鉱山の選定結果を保存したい場合、データをテキストとして保存することができる。保存方法は、通常のエディタと同じである。

4・2 使用例

表4に使用結果をまとめて示す。表中の○, ×, △は、実際の採鉱法に対して、当該鉱山の条件がそれぞれ好適, 不適, 条件付きで適当であったかを示している。いくつかの鉱山で、同一の選定条件に複数の○, ×, △がついているが、これはその鉱山の条件の変動幅が大きくて、複数の段階にわたっていることを意味する。各鉱山における結果をかいつまんで述べると次のようになる。

表4に示す佐々連では、可能性のある採鉱法として SL, OC,

図1 メインフォーム

1) オープンピット・マイニング法 (Open Pit Mining)—— 鉱床が地表に露出しているか、あるいは地表近くのごく浅い位置に存在する場合には、表土や鉱床上部の被覆岩盤を除去して(剥土:Stripping)、地表から採掘が行われる。オープンピット・マイニング法は Fig. 5.1a に示すように、鉱体とその周辺岩盤をつつあるいは複数の水平なスライスに分割し、地表から鉱体深部に向かって採掘を進める。その結果、鉱床はベンチ(Bench)と称する階段を持った増鉢状に採掘される。大規模な金属鉱床にオープンピット・マイニング法が適用されたときには、Fig. 5.1a に描かれるような、数多くのベンチを持った巨大な窪地(オープンピット:Open Pit)が生まれる。ピットの斜面が安定であるためには、ピットの深部ほどベンチの曲率半径は小さくなるので、ピットは倒立円錐あるいは逆ピラミッド(Inverted Cone/Pyramid)状の外観を呈する。アメリカ合衆国西部の露天掘炭坑に見られるように、鉱床が浅く、被り(Overburden)が薄い場合(15~45m)には、一段のベンチ(Single Bench)で採掘が間に合う場合もある。また、日本の石灰石鉱山に見られるように、鉱体が山塊中に賦存する場合には山頂ないしは山腹から採掘が始まり、階段状のベンチを作って上部から下部に向かって採掘が進んでも、ピットを形成しない。オープンピット・マイニング法と掘さく方式は同じであってもピットを作らないので、“オープンカット法”あるいは“階段採鉱法 (Bench-Cut Mining)”と呼ぶ。

Fig. 5.1a 露天掘金属鉱山のオープンピット1)

(a) 採鉱法の説明

Open Pit Mining

傾斜 60° 以上

鉱脈鉱床の場合、鉱床の傾斜が急になる程、剥土比が大きくなる傾向がある。特に鉱脈の厚さが薄い程その傾向が強い。また急傾斜の場合、坑内採掘が有利になることが多いが、地形が凸型の場合には、剥土比が小さくなるので Open Pit Mining の適用範囲は大きくなる。

(b) 留意点 (Open Pit Mining で傾斜 60° 以上)

用語集 (太行)

移行帯: 安定帯と崩落帯の中間に位置する部分で、坑内水の有無、地圧の大きさ、誘導発破等の条件により崩落帯となる区域

浮石: 発破によって生じた亀裂や岩目などによって、坑道や掘場の天盤や側壁から剥離し、落下する恐れのある岩石。

(c) 用語集

図2 採鉱法の説明, 留意点, 用語集の例

SR, LW が選定され、その中に実際の採鉱法の SL が含まれる。なお、SL などの省略記号については 3・3 を参照されたい。A 案では SL, OC, SR, ST が選定され、LW は選定されなかった。B 案の結果によると、LW で△となったのは傾斜の条件であり、ここには、“機械化が困難であるので、経済性の検討が必要。母岩の状況および厚さによっては、水力採掘による SL との比較・検討が必要”との注が表示される。別子筏津では RP と LW が選定され

表4 採鉱法選定表に当てはめた各鉱山のデータ

番号	鉱山名	実際の採鉱法	不適な条件がなく選択された採鉱法(表2による)	塊状	鉱床の形状										単一鉱体の規模					鉱石価値			鉱床の位置(深さ)			鉱床の力学的特性					母岩の力学的特性					
					偏平(脈状・層状)										30万t以下	30万t以上	300万t以下	300万t以上	低い	中位	高い	100m以下	100m以上	500m以上	A	B	C _H	C _M	C _L	D	A	B	C _H	C _M	C _L	D
					傾斜				厚さ																											
					0°	30°	60°	90°	1m以下	1~2m	2~3m	3~5m	5~10m	10~20m																						
1	佐々連	SL	SL, OC, SR, LW					○			△	△					○				○		△									○				
2	別子残津	LW	RP, LW		○				△	○							○				○					○	○						○			
3	八総	OC	OP, OC, UC, LW					○	△	△						○					○							○	△					○	△	
4	別子本山 (東部中深部)	SR	OC, LW					△	△	△	○	○						×	○			△					△						△			
5	別子本山 (深部)	UC	OC, LW					○				○	○					×	○			○						○						○		
6	北見	SR	OP, OC, SR, ST, LW					△	△							○					○		○				○						○			
7	鴻の舞	SR	OP, SL, OC, SR, SC LW					△	△											○		○			○							○				
8	余市 鉱脈	OC	OP, OC, UC, LW						○	△							○					○		○					△						△	
9	余市 黄金山	SR	OP, SL, OC, SR, SC LW						○				○	△			○					○		○			○						○			
10	平瀬	ST	OP, OC, ST, LW						○	○							○					○		○				○						○		
11	藤ヶ谷	RP	OP, RP, SL, OC	△													○	○	○				△	○			○						○			
12	徳舜磐	RP	OP, RP, SL, OC, UC SR, SC	△													○	○	○				○	△					△					△		
13	大江	OC	SL, OC, UC, SR, LW						○				○	○					○			○	○				○						○			
14	鐘打	ST	OP, SL, OC, SR, ST LW						△			○					○	○	○				○		○		○						○			
15	大谷	OC	OP, OC, SR, ST, LW						○		△						○	○	○				○		○		○						○			
16	茂住	OC	OP, RP, SL, OC, SR	○													○	○	○				○		○	○	○						○	○	○	
17	栃洞 その1	SL	OP, RP, SL, OC, SR	○															○	○			○		○							○				
18	栃洞 その2	OC	OP, RP, SL, OC, SR SC	○													○	○	○				○		○		○						○			
19	串木野	OC	OP, SL, OC, SR, SC LW						△	○							○	○	○				○				○						○			
20	Moyeuver	RP	OP, RP, SL, LW		○							○	○								○			○			○							○		
21	Midwest	SL	OP, RP, OC	○													○		○				△	○					×				○			
22	Stanleigh	RP	RP, SL, LW		○								○	○					○	○				△	○		○						○			
23	Key Lake	OP	OP, RP, SL, OC, UC	○														○	○				○	△					○					○		
24	Rabit Lake	OP	OP, RP, SL, OC, UC	○														○	○	○				○	○			○						○		
25	豊羽	SL	SL, OC, LW						○			△	△						○	○			○	△	○	△		○					○			
26	東濃	SW	OP, RP, SL, LW		○								○	○			△	○	○				○				○							○		
27	Akouta	RP	OP, RP, SL, LW		○						△	○	○	○					○			○		○		○							○			
28	榑原	OC	OP, RP, SL, OC	○																△		○		○	○							○				
29	松峰	UC	OP, RP, UC	○															○			○	○									○			○	
30	深沢	UC	OP, RP, OC, UC	○															○			○	○												○	
31	餌釣	UC	OP, RP, OC, UC	○														○				○	○						○						○	
32	内の岱	UC	OP, RP, OC, UC	○															○			○	○						○						○	
33	上向	UC	OP, RP, OC, UC	○															○			○	○						○						○	
34	温川	UC	OP, RP, UC	○														○				○	○												○	

* OP:Open Pit Min., RP:Room & Pillar Min., SL:Sublevel S., OC:Overhand Cut & Fill S., UC:Underhand Cut & Fill S., SR:Shrinkage S., ST:Stull S., BC:Block Caving, SC:Sublevel Caving, LW:Long wall Min.

る。A 案では RP であった。実際の採鉱法は Short Wall で今回の選定表では LW に含まれるので、B 案は選定に成功し A 案は失敗したと言える。八総では OP, OC, UC, LW が選定された。A 案では、OC, SR, ST が選定された。ここまでの 3 例からもうかがえるように、A 案と比較して B 案の方が採鉱法を少し多めに選定する。そのためあって、B 案では、選定される採鉱法の中に、ほとんどの場合、実際の採鉱法が含まれる。

別子本山（東部中深部）では OC と LW が選定されるが、実際に採用された SR は鉱体の規模が 3,000 万 t 以上のところが×となる。調査してみたところ、別子本山では同一鉱体を種々の方法で掘っており、SR で掘った所は一部とのことであった。この事情を勘案して鉱体の規模を小さくすれば SR も選定されることになる。なお、A 案で選定されたのは、OC, UC, SR, ST であった。別子本山（深部）は別子本山（東部中深部）とほぼ同じである。北見では OP, OC, SR, ST, LW が選定されたが、実際に採用されたのは、SR であった。A 案では、OC, UC, SR, ST が選定された。A 案で選定された UC が、B 案で採用されなかったのは、力学特性の部分で×がついたからである。力学的性質の部分だけは、B 案の選択条件がやや厳しくなっている。鴻の舞では OP, SL, OC, SR, SC, LW が選定されたが、実際に採用されたのは SR であった。A 案では、SL, OC, SR が採択された。余市（鉱脈）では OP, OC, UC, LW が選定された。OP の注釈を読むと、傾斜が大きく厚さが薄いと不利であることがわかり OP は不適とわかる。また、LW も注釈より、この場合には不適とわかる。したがって、注釈を考慮したとすれば OC と UC が残る。実際に採用されたのは OC であった。A 案では OC のみであった。余市（黄金山）では OP, SL, OC, SR, SC, LW が選定される。実際に採用されたのは SR であった。A 案では、OC, UC, SR が選定された。平瀬では OP, OC, ST, LW が選定されたが、実際は ST が使われた。A 案では OC, UC, ST であった。前にも述べたように、B 案では、OP と LW はしばしば選定されるが、逆に UC は力学的条件をきつとしたので A 案より選定されにくい。

表 4 に示す藤ヶ谷では OP, RP, SL, OC が選定されたが、実際は RP であった。A 案では RP と OC が選定された。徳舜暫では OP, RP, SL, OC, UC, SR, SC が選定されたが、実際は RP であった。A 案では OP, RP, OC が選定された。大江では SL, OC, UC, SR, LW が選定されたが、注を見ると LW はかなり難しいことがわかる。すべて○であったのは OC のみであり、実際に採用されたのも OC であった。A 案では、SL, OC, UC, SR, ST が選定された。鐘打では OP, SL, OC, SR, ST, LW が選定されたが、実際は ST であった。A 案では、OC, SR, ST であった。大谷では OP, OC, SR, ST, LW が選定されたが、実際は OC であった。A 案では OC, SR, ST であった。茂住では OP, RP, SL, OC, SR が選定されたが実際は OC であった。A 案では RP, OC, UC であった。栃洞（その 1）では OP, RP, SL, OC, SR が選定されたが、実際は SL であった。A 案では RP, SL, UC であった。栃洞（その 2）では OP, RP, SL, OC, SR, SC が選定されたが、実際は OC であった。A 案では、RP, OC であった。串木野では OP, SL, OC, SR, SC, LW が選定されたが、実際は OC であった。A 案では OC, SR であった。Moyeuver では OP, RP, SL, LW が選定されたが、実際は、RP であった。

表 4 に示す Midwest では OP, RP, OC が選定されたが、実際は、SL であった。A 案では OC, UC であった。A 案も B 案も選定に失敗した唯一の例であり、この点については後ほど触れる。Stanleigh では RP, SL, LW が選定されたが、実際は RP であった。A 案では RP であった。Key Lake では OP, RP, SL, OC, UC が

選定されたが、実際は OP であった。A 案では RP, OC, UC であった。Rabbit Lake では OP, RP, SL, OC, UC が選定されたが、実際は OP であった。A 案では、OP, RP, OC, UC であった。豊羽では SL, OC, LW が選定されたが、実際は SL であった。A 案は OP, SL, OC, UC, ST であった。東濃では OP, RP, SL, LW が選定されたが、実際は SW であった。A 案は RP, SW であった。Akouta では OP, RP, SL, LW が選定されたが、実際は RP であった。今回新たに追加した柵原では OP, RP, SL, OC が選定されたが、実際は OC であった。

次に同和鉱業系の黒鉱鉱山について述べる。これらの鉱床の形状は、地質学の観点からは層状に分類されるが、鉱山技術者の目から見ると塊状に近いとの結論に至った。そこで、鉱床の形状を塊状としたときの結果を示す。松峰では OP, RP, UC が選定されたが、実際は UC であった。深沢では OP, RP, OC, UC が選定されたが、実際は UC であった。松峰とほぼ同様の結果であったが、OC が追加されたのは力学的条件が深沢の方がよいからである。餌釣、内の岱、上向は深沢と同じく OP, RP, OC, UC が選定され、実際は UC であった。温川では、鉱床と母岩の力学的条件が劣るため、松峰と同じく OP, RP, UC が選定され、実際は UC であった。

以上で述べた結果の内、実際の採鉱法が選定されなかったのは、別子と Midwest であった。よく知られているように、別子鉱山の操業期間は 250 年以上と長く、鉱床（本山）も傾斜延長 2,600 m、水平延長 1,300 m と規模が大きいため、別子鉱床の特性を定めることが難しく、歴史的にも様々な採鉱法が行われてきた。これらが、選定した採鉱法と実際の採鉱法が一致しなかった理由と考えられる。また Midwest 鉱山では、A 案も B 案も選定に失敗した。実際の採鉱法は Jet Boring と呼ばれる採鉱法であったが、これにもっとも近い採鉱法として SL を選んだが、まずこの点において無理があるようである。さらに、放射線防護などのウラン鉱山特

図 3 選択された採鉱法の数の分布

図 4 各採鉱法が選択される百分率

有の選定条件は考慮していないので、選定に失敗したものと考えられる。

図3に、A案の場合と比較しつつ、選択された採鉱法の数の分布を示す。A案は27件、B案は34件のデータに関するものである。A案では、1件のデータに対して3つの採鉱法が選定されることが10回ともっとも多いのに対し、B案では4つの採鉱法が選定されることがもっとも多かった。これからも、B案の特徴がうかがえる。

図4に、どの採鉱法が選ばれやすいかを調べるため、各採鉱法が選択される百分率を示す。まずOPについて見てみる。A案では、全入力データの約10%に対してOPが選定される。OPの選択条件を緩和したB案では、OPが約80%となる。このほかにも、B案の条件が緩和されたため、RP、SL、SC、LWもB案で選定される率が、A案に比べて大幅に増加したのがわかる。これに対し、OC、UC、SRの選択率は、A案とB案とで似ている。STは逆にA案の選定率が大きい。

5. ま と め

採鉱法選定表B案の選定結果は、ほとんどの場合、実際に採用された採鉱法を含むし、長年の経験を積んだ鉱山技術者からみても妥当なものであった。それ故、B案は、初期段階の採鉱法選定法として、実用に供しても大きな問題はないと考える。適用に当たってもっとも大きな問題点の一つとして、データの少ない初期段階において、いかにして正確に選定条件を把握するかがあげられる。たとえば鉱石価値を判断するには、長年の経験に裏付けられた高度で広範囲の知識が必要で、初心者には難しいと感じた。

委員会には長年にわたり鉱山技術者として経験を積んだ委員が多かったので、その知識を「採鉱法の留意点」や「知識ベース」の形でできる限り盛り込む努力をした。しかしながら、エキスパートの持つ知識のほんの一部しか記録に残せなかった可能性がある。すなわち、エキスパートが重要と考える事項は記録として残りやすいが、瑣末なことないし当然のことと考えてエキスパートが語らなかったり記載しなかった事項の中に、実はエキスパートにとっては常識であるような基本的な知識やノウハウが隠されている懸念がある。

最初に開発した採鉱法選定表A案はポイント制で、選定された

採鉱法に優先順位をつける。これに対して、B案は致命的な条件のあるなしをもっとも重くみている。他の分野でもよく使用されるポイント制を採用したA案はどちらかといえば初心者向きであり、「採鉱法の留意点」や「知識ベース」を盛り込んだB案はある程度実用化を目指したものといえる。

1992年度からはじまった一連の研究の成果として、休廃止鉱山のデータを収集したことがあげられる。表4に示したデータは各鉱山をよく知る鉱山技術者により提出されたものであり、時期を逸すればこれだけの精度と確度を持って収集できなかったと考える。

謝辞 採鉱法設計支援システムの開発委員会の長期にわたる研究に当たって多くの方々のお世話になった。特に動力炉・核燃料開発事業団の各位には、適切なご助言をたびたび頂いた。各種データの収集に当たっては、鉱山技術者各位のご協力を頂いた。データ整理とプログラミングには、東京大学工学系研究科斉藤貴英技官と大学院生前野沢郎氏（現在東芝）の労を煩わした。資源・素材学会各位にもお世話になった。ここに記して深く感謝の意を表する。

引用文献

- 大久保誠介・山富二郎(2000): 採鉱法の選定法に関する検討, 資源と素材, Vol. 116, p. 745-750
- Peele, R. (1941): Mining Engineers' Handbook, Section 10, John & Wiley & Sons (New York)
- 採鉱設計支援システム開発委員会(1996): 資源と素材, Vol. 112, p. 518
- 資源・素材学会(1992): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 92-002
- 資源・素材学会(1993): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 93-001
- 資源・素材学会(1994): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 94-001
- 資源・素材学会(1995): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 95-002
- 資源・素材学会(1996): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 96-001
- 資源・素材学会(1997): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 97-002
- 資源・素材学会(1998): 採鉱法設計支援システムの開発, 動力炉・核燃料事業団資料 PNC ZJ7552 98-001
- SME(1973): SME Mining Engineering Handbook, Vol. 1, p. 12-7, AIME (New York)
- 吉中龍之進・桜井春輔・菊地宏吉(1989): 岩盤分類とその適用, 第1章他, 土木工学社(東京)