解 説

新しい探査評価支援エキスパートシステムの課題

——資源探査における AI エキスパートシステム成功例を中心として——

菅 野 強*

The Problem of New Knowledge-Based Expert Systems
for Exploration and Evaluation——Using example of AI PROSPECTOR system research
in mineral and energy resources exploration——

Tsuyoshi SUGANO

1. はじめに

日本においては、新世代コンピュータ技術開発機構 ICOT が、1992 年を目標に第 5 世代コンピュータ FGCS (Fifth Generation Computer System) 構想を打ち立て、Artificial Intelligence^{*1} 向きのハード、ソフトウェアの研究開発推進 (例えば、通産省 FGCS 研究開発 1986 年度予算 45 億円) に入っていることは、よく知られて久しい。既に、米国では、マイクロエレクトロニクス・コンピュータテクノロジー共同研究開発組織 MCC をはじめとする巨大プロジェクト推進体制を次々と整えている。MCC の成果は、今後 500 を超えるコンピュータ関連組織へ還元して、次期 6~10 年間先進 AI 応用開発に役立てられる予定である。EC でも、欧州情報工学研究開発戦略 ESPRIT (European Strategic Program for Research and Development in Information Technology) を、英国がマン・マシン・インターフェイスやネットワークまでを含む Alvey 計画を進めていることなども広く知られている通りである。このような新しいコンピュータテクノロジーの進展とともに、その圧倒的能力を保証する高密度良質の新しい情報^{*2}・知識の獲得が、新しい 1 つの課題となる時代を迎えている。

本稿は、こういった状況を背景として、鉱物・エネルギー資源のみならず、水資源なども含めた資源評価や開発から、地盤・岩盤評価、建設・エンジニアリング、防災・自然災害予測、自然環境認識、そして放射性物質の地層処分や地下水環境汚染など多種多様な環境保全に至る問題との関わりにおいても、その役割が支援と呼ぶにふさわしい探査評価支援ツール・支援システムに関し、1983 年頃を境に急展開をみせ始めた 1 つのアクティビティ¹⁾²⁾³⁾について触れさせていただくものである。はじめに、国際的アクティビティの極く一端について概説し、つぎに今回の主題に関して、資源探査におけるエキスパートシステム成功例 PROSPECTOR を中心に、極めて基本的な事項について解説させていただく。なお、前述のような分野のなかで、エキスパートシステムの開発例は、第 3 章でも述べるように、極く少なく、殆どの分野において、今後の開発が期待されているのが現状である。

目を米合衆国に向けると、資源のポテンシャルもかなり高く、環境も比較的良好で、開発・建設から自然環境認識・国土環境保全に至るまで均衡のとれた努力を傾注しているこの国での近年の探査・評価・研究アクティビティは低い水準ではない⁴⁾。一方、日本においても、近年の多様な技術を背景に、国内陸域や経済水域を含めた周辺海域における地質や、水・エネルギー・鉱物資源などの探査・評価に関する基礎的調査研究、自然災害ならびに放射性廃棄物の地層処分を一例とする予知・監視を含めた地質探査評価は勿論のこと、優れた情報処理技術

* 京都大学工学部資源工学科

*¹ 人工知能*² ここでの情報とは、ある物事の事情についての知らせのみならず、解析結果のようにそれを通して何らかの知識が得られるようなものも含む。

の函養,そして国際協力などと,幅広い努力がなされている。無論,米国に比べて,国土・資源・環境に差のある日本でのとらえ方は同様ではないが,タイムラグをもって展開される探査・評価・研究アクティビティが少なからずあるというのも事実である。米国のみならず,国際的により広い見地から,今後の一要素となるかも知れないマイルストーンに対しては,フレキシビリティのあるとらえ方も必要かと思われる。なお,本稿は,広範な解説というより,むしろキーワード的な解説となっており,応用地質分野における新しい探査評価技術を志向する1つの視点への何万分の1かの参考資料とでもなれば,幸いである。文献 1) および 3) をベースに説明させていただいた。

2. 新しい探査評価支援ツール・支援システム研究開発の国際的アクティビティ

2.1 国際的にみた研究開発要素別のアクティビティ

アクティビティを展望する際の1つの指標となる国際地球物理学会 SEG (Society of Exploration Geophysicists) と,欧州物理探査協会 EAEG (European Association of Exploration Geophysicists) が,それぞれ刊行している Geophysics (Monthly), Geophysical Prospecting (Bimonthly) の13年間(1973~1985)に掲載された研究論文について,とくに電磁気探査技術の研究開発のアクティビティをとり挙げ,Palacky (1983)の方法⁵⁾によ

り調査を行った。図-1は,調査件数691件からなるアクティビティの一例である。圧倒的にフォワードモデリング,インバージョン^{*3}および結果解釈のソフトウェアに関するアクティビティが高い。これは,探査・評価の成否がいかに解析・解釈ソフトウェアの進歩と深い関わりがあるかを示す1つの証拠であろう。また,先端を進むソフトウェアについては,研究関係機関等でその多くを(開発途上の各種未熟ソフトウェアが,内在する問題点を解決すべく,実用に供されテストをくりかえし,その達成度向上に努めていることも含めて)ノウハウとしていくかがうなづけようし,またそれらの公開に関する検討が行われるようになるのも当然である。今後,探査解析・結果解釈や予測・評価・開発意思決定などのソフトウェアの開発がますます重要となり,何階層にもわたる膨大な情報・知識による知識データベース構築およびAIエキスパートシステム開発なども高度の位置づけになっていくであろう。

2.2 国際的にみたくつかの新しいキーアクティビティ

表-1は,2.1節において国際的レベルでのアクティビティを考慮し,新しい探査・評価支援ツールとして成熟,あるいは今後も活性が期待でき,ますます進展すると思われるいくつかの要素の一例である。1つは,自然電磁場の利用に対して人工制御信号源 CS (Controlled Source) を基盤とし,高度マイクロプロセッサや高感度センサなど優れたハードに支えられた新しい電磁気探査支援ツールで,ソフトの充実とあいまって早期完成が期待できる分野である。高分解能探査解析を目指す制御信

図-1 Geophysics (SEG), Geophysical Prospecting (EAEG) にみる新しい電磁気探査支援ツールの研究開発要素別アクティビティ Palacky (1983)・Sugano (1985)¹⁾

表-1 資源地質環境分野に対する探査評価支援ツール研究開発におけるいくつかの新しいアクティビティの例

SOME NEW ACTIVITIES	
CONTROLLED SOURCE ELECTRICAL, MAGNETOMETRIC, MAGNETOTELLURIC AND ELECTROMAGNETIC METHODS	
3-D CSANT	
PEM (3-D CSTEM)	
MMA (MOSSES, HIP, SENSITIVITY)	
MMA	
TOSIP (TIME CONSTANT, CHARGEABILITY, FREQUENCY DEPENDENCE)	
AWA (IPROPOSIT)	
NMA (PERMEABILITY)	
LARGE PHYSICAL PROPERTY MODEL	
ARTIFICIAL INTELLIGENCE, NEW COMPUTER EXPLORATION	
3-D HIGH DENSITY FORWARD MODELING (SUPERCOMPUTER)	
HIGH RESOLUTION INVERSION	
3-D CG	
CT	
DB	
REINTERPRETATION (REVALUATION)	
EXPLORATION MODEL (PROSPECT-SCALE, REGIONAL-SCALE)	
LARGE KNOWLEDGE BASE	
AI (EXPERT SYSTEM PROSPECTOR)	
EXPLORATION DECISION SUPPORT SYSTEM (DSS)	
EXPLORATION SUPERSIMULATOR	

*3 順解析 (Forward Modeling) に対して逆解析 (Inversion)。逆問題の解決。

号源地磁気地電流法 3-D CSAMT, 流電磁比抵抗法 MMR, Mise-à-la-Masse 比抵抗法 MMAR や, 地質モデル・資源環境汚染物性モデルなど⁶⁾ 探査対象代替モデル志向のスペクトル IP 法 SIP (比抵抗, 充電率, 周波数依存), リザーバ物性モデル志向の見掛地層水比抵抗法 RWA (孔隙率)⁷⁾ や, 磁気共鳴法 NMR (浸透率) などのアクティビティの活性化は注目される。もう一つは, 高速高精度計算志向型システムも取り込み, FGCS などを背景とする新しいコンピュータテクノロジーを基盤とした探査評価 AI・情報処理技術など新・探査評価支援ツール・システムの育成・確立である。その国際的にみた地球物理探査に関する基礎研究分野での 1 つの萌芽としても, 1983 年を境に研究の急展開をみせ, SEG Artificial Intelligence エキスパートシステム研究シンポジウムにおいての Hollister ら (1983)¹³⁾ による鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTOR をはじめ, Smith (1983) によるディブメータ解釈エキスパートシステム, Schwartz (1983) による探査データベース構築, Roth (1983) によるエキスパートシステム構築例, 同 Annual Meeting Washington での Thomas (1985) による結果解釈ワークステーション, Dasgupta (1985) による結果解釈グラフィックシステムおよび同 Houston (1986) でのパターン認識と AI に関するセッションなどが挙げられる。また, EAEG においても, Hatton (1984)¹²⁾ による地球物理探査専門家のためのデータベースとエキスパートシステムについてのレビューをはじめ, Nelson ら (1986) によるインタラクティブ断層探査結果解釈, Farr ら (1985)¹⁴⁾ による地質探査結果解釈エキスパートシステム, Brouwer (1986) によるサイスマック探査結果解釈エキスパートシステム, Payre ら (1985) による仏国海洋サイスマック探査支援ツール DIAPASON や, Palaz (1986) による AI エキスパートシステム探査などがある。いつい提出され, 今までにない新しい支援ツール・支援システムの研究開発分野として注目すべきアクティビティが出てきている。僅か 3, 4 年前に頻繁に議論・利用されていた 1-D, 2-D 探査技術にとどまらない大規模資源地質環境物性モデル, ベクトルプロセッサベースの超高速高密度 3-D フォワードモデリング, 高密度高分解能 3-D インバージョンや, 高性能ミニコン・マイクロコンピュータ併用高機能グラフィック端末などによる 3-D コンピュータグラフィックス (探査結果解釈および地質情報解析支援 3-D CG), 探査支援ジオトモグラフィ CT (Computerized Tomography), そして既存の探査支援データベースの活用および高密度大規模容量知識ベ

ースに基づく資源および地質環境分野に対する探査評価支援エキスパートシステム, インタラクティブインテグレイテッド^{*4)} 探査結果解釈支援ツールといった要素を取り込んだ新・探査評価支援 AI など, 新世代コンピュータ探査評価^{*5)} と言うべき技術の研究開発に加速が期待されよう。

3. 新しい探査評価支援エキスパートシステムの例題

3.1 エキスパートシステムとは

近年, 日本においても, 新計算機環境の充実に符号したこの分野の著しい知識普及とともに, 数多くの文献・事例などが見受けられるようになった。そして資源探査評価のみならず地盤・岩盤はじめ地質環境の探査評価, 建設・エンジニアリング, 防災・環境保全などの分野においても, 既存データベースのエキスパートシステム化など到来技術の AI 化をはじめ, エキスパートシステム研究開発への関心が高まりつつあり¹¹⁾¹⁰⁾¹¹⁾, その検討が必至となっている。この 3.1 節では, エキスパートシステムの実例の説明に入る前に, 「エキスパートシステムとは何か」について, 簡単に補足する。

一般ユーザは, 時として, 詳しい専門知識を持たない分野のことについて, 解釈・判断および意思決定をしなければならないときがある。そのための 1 つの方法としては, 経験知識 (Heuristics) やデータ, 理論・文献知識, ノウハウなどが豊かな優れた専門家に相談することである。しかし, そのような環境は常に十分であるとは限らない。そのような場合, 専門分野における知識・知恵をコンピュータに入れておき, 問題解決時に, 端末機から専門知識を引き出すことによって, 専門家の判断と同等の支援を受けることのできるシステムを作っておけば, という発想が出てくる。この発想を具体化したものを, 一般に, 「専門家システム」, 「コンサルティングシステム」とも言われるエキスパートシステム (知識ベースを持っていることを強調して知識型エキスパートシステム (Knowledge-Based System) あるいはもう少し一般に知識ベースシステム) とされている。すなわち, エキスパートシステムとは, 対象分野の専門家 (Expert) などから獲得された専門知識を利用して推論を行い, コンブライケイトな問題を, 専門家と同程度の解決能力で処理するプログラムをいい, 要約すると, (1) 対象領域の専門知識の利用, (2) 信頼できる専門家や文献などから獲得さ

*4 対話形式統合型の。

*5 新しいコンピュータを核とする探査結果や地質情報の解析・解釈・評価。

れた専門知識, (3) 専門家でなければ解釈できないような問題を対象とする, (4) 専門家の問題解決能力と同程度の達成度を有する, といったポイントが挙げられている。このような研究は, 歴史的には, 既にスタンフォード大学の Feigenbaum ら (1965) によって始められていたが, 実用化・産業化に向い始めたのは, 1980 年代に入ってからで, 知識工学 (Knowledge Engineering) として AI 研究を応用面から見直したことも大きなきっかけとなっている。また, 代替エキスパートという考え方に対応する利用技術や一般ユーザの場合もさることながら, 専門教育の支援, さらに専門家自身の実行過程のなかで, 繰り返し労力の削減・見過しの防止をはじめ, エキスパートシステムの情報処理能力をもって補助手段とする, つまり支援をさせるツールとして利用する意義も極めて高いと思われる²⁾³⁾。

さて, エキスパートシステムの構造については, 一般的に, つぎのような部分が構成要素として挙げられる。(1) 専門知識を蓄積しておく部分 (知識ベースあるいは知識データベースともいう), (2) 知識ベースに記憶された知識を用いて推論・判断・解釈を行う部分 (推論機構あるいは推論エンジン), (3) 関連情報・知識を収集・獲得する部分 (知識獲得), (4) ユーザがエキスパートシステムと対話をしながら交渉をもつ部分 (ユーザインターフェイス), であり, この中で, エキスパートシステムの本体と言われる部分は, (1) の知識ベースと (2) の推論機構である。(3) の知識獲得は, エキスパートシステムの外部で行われる事象・規則など専門知識の収集・抽出機能である。(4) については, マン・マシン・インターフェイスをユーザにとって使いやすいようにする機能をシステムの中に内蔵する。推論などの実際の作業では, システム動作中に一時的に用いる短期記憶をワーキングメモリとして利用しながら実行される。さらに詳細には, この構造にはシステム形成の手法によって違いがある。例えば, プロダクションシステムでは, 知識ベースはルールの集合, 推論機構はルール適用のための手続きの集合, 短期記憶はワーキングメモリに対応する。フレームシステムでは, 知識ベースと推論機能の区別はそれほど明瞭ではない。つぎに, エキスパートシステムを構築するにあたっては, 開発の初期から完全なシステムが得られるのはまれであり, プロトタイプから順次成長していく過程をとるような部門に, むしろ向いているとも考えられる。この際の重要な付加機能として, 知識ベースの内容を参照し, 追加・修正, 知識の不備の発見などを行う知識ベースエディタ, そして, システム挙動を調べる

手段としての, システムの推論過程の説明を行う推論説明機能などが必要となる。

推論機構としては, 速さ, 推論方式が制御できること, 推論過程が理解しやすいことなどが要件として挙げられる。前向き推論方式 (Forward Reasoning) では, データベースを初期状態として出発し, 導かれる結論・ゴール状態について知識を適用しながら推論する。データ駆動型, 事象駆動型, ボトムアップ型ともいう。後向き (逆向き) 方式 (Backward Reasoning) では, ゴール状態から出発し, 関連する情報・知識によって, 仮説またはサブゴールを作り, これをくり返して最終的に仮説を満足する状態にあるか否かを検証していく。目的駆動型, 予期駆動型, ゴール指向型, トップダウン型ともいう。一般に, 後向き方式の方が速いが, 目標とする解釈結果の解の数が多い場合には, 検証に時間をとる。両方向方式 (Bidirectional Reasoning) 混合型は, データベースから前向き推論で仮説を設定し, 後向き推論で検証する方式や, ゴールおよび初期状態から同時に推論する方式で, 双向型ともいう。つぎに, 多くの知識のうち, 知識利用法を知識の形で表現したり, 知識ベースのなかの共通の特定の性質を記述して知識獲得の助けとするような知識, すなわちメタ知識 (Meta Knowledge) も重要な役割を果たす。また, これら多くの知識をコンピュータ処理可能な形式で記述するために, 色々の知識表現法が考えられる。IF-THEN ルールで表現するプロダクションシステム, 知識を事象の相互関係のネットワークとして表現する意味ネットワーク, Minsky (1975) の提唱した理論で, ひとまとめのデータの枠組みの中で事象の相互関係を組み立てて知識を表現するフレームシステム, 操作されるべき対象をまず表現しそれをいかに操作するか, 対象の相互関係を表現するオブジェクト指向システム, そして多義性・不完全性・不確実性・ファジィ性 (Fussy) などあいまい性のある知識を表現する主観的ベイズの方法 (Subjective Bayesian) など種々である。

こういった要素などをふまえて構築されるエキスパートシステムは, 多くの部門で注目され, 試験的にも数多くのシステム構築・AI 化が試みられているが, 現在までに発表されたシステムの中で, 現実に実用化されたものは極めて数少なく, まさにこれからの新しい分野である。

3.2 米国における AI の先導的成功例となった鉱物資源探査評価支援エキスパートシステム PROSPECTOR

今後, 試験的規模から実用規模まで, 多様な探査対象

に対する研究開発の一要素となろう探査評価支援エキスパートシステムのモデルの一例としてのこの AI システムは、初期ターゲットを鉱物資源と周辺地質環境に照準したものであり、AI が研究対象の域を出て巨大な付加価値を有することを示した先導的実証例とも言えるもので、MIT の Davis ら (1984) が高い評価を与えた例である¹⁾。スタンフォードリサーチインターナショナル SRI が、USGS と NSF の援助を受けて、鉱物資源探査関連分野で起ってくる診断問題を解決するために開発したこのコンピュータ支援型コンサルテーションシステムは、ユーザとして、探査結果の解釈・評価時に専門家の援助を望むような探査対象の初期調査を行う資源地質探査専門関係の技術者・研究者などを想定して、その助言プログラムが作成されている。専門家達が蓄積した大量の情報・知識を、推論ネットワーク (Inference Network) データ構造として、コンピュータソフトウェアへの書き込み・定式化加工と、地質鉱床探査に関する膨大なデータ入力骨格となって構築された資源地質環境の探査解析・結果解釈・評価・判断を実行する AI プログラムである。真、またはある確率をもって真とみなせる言わば確からしい数多くの言明 (Assertion) が、この推論ネットワークの節点 (Nodes) に対応する知識表現 (Knowledge Representation) となっている。PROSPECTOR は主導権混在型システム (Mixed-Initiative System) で、ユーザが、探査対象あるいはその周辺地域についての探査支援情報・知識を、自発的に入力 (Volunteer Information and Knowledge) して、自発入力空間とモデル空間との照合を行い、インタラクティブにゴール仮説を選定し、トップレベルの仮説の評価を繰り返して、高確率の最良モデルに対応するゴール空間を選定するシステムである。知識ベースには、あらゆる角度から作成しテストを実行した探鉱スケール (Prospect-Scale) あるいは広域スケール (Regional-Scale) の資源地質環境探査モデルを組込む。初期の知識移植 (Transfer of Expertise) に関しては前述の Hollister (1983) の寄与するところが大きい。

エキスパートシステム PROSPECTOR の典型的なセッションは、鉱物資源など資源環境の種別、断層位置、地質環境の電磁気探査情報などをユーザが入力することで開始し、既に知識ベースとして蓄積されている膨大なソフトウェアおよびデータとの照合を行い、数多くの鉱脈モデル・資源地質環境モデルの想定、判断・評価のための情報・知識の逐一処理をアナロジーが成り立つ限界になるまで実行する。いわゆるボトムアップ型のデータ結果解釈および最適な選択肢優先の逆向きチェイン方式

図-2 PROSPECTOR システムのフレームワーク形成における特徴 Waterman (1986)¹⁵⁾

図-3 PROSPECTOR 用語の分類一例 Waterman (1986)¹⁵⁾

図-4 ネットワーク表現による PROSPECTOR 言明の簡単な例 Johnson & Keravnov (1985)¹⁶⁾

推論コントロール戦略が適用されている。

図-2 は、PROSPECTOR システムの骨格形式の特徴を示したものである¹⁵⁾。図-3 は、モデル構成のための用語分類の例で、資源地質環境を構成する物質の鉱物・岩石および年代・構造のそれぞれ要素別の配列である。つぎに、ネットワーク表現をとる PROSPECTOR 言明の極めて簡単な一例 A, “a rhyolite plug is present” を図-4 に示すと、この場合、言明 A の 3 つの言明要素 A₁, A₂, A₃

- (A₁) there exists a physical entity E₁;
 (A₂) the composition of E₁ is “rhyolite”;
 (A₃) the form of E₁ is “plug”.

から、合成言明 (A), “A₁ AND A₂ AND A₃” が AND 結合のみのネットワーク表現として得られる¹⁶⁾。

PROSPECTOR システムの中核となる知識ベースは、当初言明数 541, ルール数 327 による 5 個の探鉱スケールモデルでスタートした。その後順次成長を続け、PC, VCPM, HPM^{*6} などの試錐位置選定 DSS (Drilling Site Selection) モデルも付加して、言明数 1566, ルール数 1065 による 12 個の探鉱スケールモデル、そして現在それぞれのモデルに言明数 200, ルール数 150 をもつ 15 個の探鉱スケールモデルへと拡大しており、地域資源環境評価研究のために開発した広域スケールモデル 23 個も内蔵させ、充実を計っている。表-2 は、PROSPECTOR 知識ベースが内蔵する広域スケールモデルの例を示した

表-2 PROSPECTOR の知識ベース (広域スケールモデルの例) Duda & Reboh (1984)¹⁷⁾

Name	Description	Nodes	Rules
TCHD	Carbonate-Hosted Epigenetic (Cu/Pb-Zn(Ag), Tintic Type	71	57
MCHD	Carbonated-Hosted Epigenetic (Cu/Pb-Zn(Ag), Manto-Type	70	56
CSPBZN	Carbonate-Hosted Stratabound Lead-Zinc	57	37
SAVCHD	Southern Appalachian Valley Carbonate-Hosted Zinc	79	78
RCD	Dolomite-Hosted Copper (Ruby Creek)	53	39
RFU	Roll-Front Uranium	185	169
RWSSU	Western-States Sandstone Uranium	205	152
SPB	Sandstone-Hosted Lead	35	32
RMBSD	Restricted Marine Basin Shale-Hosted Cu-Pb-Zn (Ag,U,V)	38	26
SMRSD	Shallow Marine Rift Shale-Hosted	47	39
LSED	Lacustrine or Cutoff Marine Basin Shale-Hosted Evaporate (+ oil shale)	35	34
GT	Graywacke/Turbidite Zn-Cu-Pb(Hg, Fe, S)	53	31
FEF	Iron Formation	41	39
FES	Iron Stone	27	21
AP	Ancient (Tertiary and older) Placer Au-U(Th)	34	33
MP	Modern (Quaternary) Placer Au-Th-Diamond	32	31
CMSD	Cyprus-type Massive Sulfide	68	65
SMSD	Superior-Type Massive Sulfide	104	73
EBAG	Epithermal Bulk Silver	51	46
PCD	Porphyry Copper	200	135
SMD1	Granite Porphyry Molybdenite (Stockwork Molybdenum, Type 1)	90	85
SMD2	Quartz Monzonite Porphyry Molybdenite (Stockwork Molybdenum, Type 2)	39	27
SKW	Tungsten Skarn	69	65
Totals:	23 Regional-Scale Models	1683	1370

*6 Porphyry Copper, Porphyry Molybdenum Vertical-Cylinder Type, Porphyry Molybdenum Hood Type のアクロニウム。

ものである¹⁷⁾。

この PROSPECTOR システムにおけるルールの一例を表-3 に示す。図-5 のような資源環境の地質鉱床モデルの一部分に対する推論ネットワークの形成において記

表-3 PROSPECTOR システムにおけるルールの一例 Waterman (1986)¹⁵⁾

- [1] IF: The igneous rocks in the region have a fine to medium grain size
 THEN: They have a porphyritic texture (0,5).
 [2] IF: The igneous rocks in the region have a fine to medium grain size
 THEN: They have a texture suggestive of a hypabyssal regional environment (2,0.000001).
 [3] IF: The igneous rocks in the region have a fine to medium grain size and they have a porphyritic texture
 THEN: They have a texture suggestive of a hypabyssal regional environment (100,0.000001).
 [4] IF: The igneous rocks in the region have a texture suggestive of a hypabyssal regional environment
 THEN: The region is a hypabyssal regional environment (65,0.01).
 [5] IF: The igneous rocks in the region have a morphology suggestive of a hypabyssal regional environment
 THEN: The region is a hypabyssal regional environment (300,0.0001).
 [6] IF: The region is a hypabyssal regional environment
 THEN: The region has a favorable level of erosion (200,0.0002).
 [7] IF: Coeval volcanic rocks are present in the region
 THEN: The region has a favorable level of erosion (800,1).

図-5 資源地質環境モデルの一部分に対する推論ネットワーク Duda & Reboh (1984)¹⁷⁾

表-4 PROSPECTOR コマンドの一例 Hart, Duda & Einaudi (1978)¹⁸⁾

?	Prints a rephrased version of the question, often with additional comments or suggestions.
WHY	Prints the reason that PROSPECTOR asked the question.
SUMMARIZE	Prints a summary of the conclusions at this point in the consultation.
VOL	Lets you volunteer information to PROSPECTOR.
CHANGE	Lets you change your answer to a previous question.
COMMENT	Lets you type comments that will appear in your transcript file. (Two consecutive carriage returns will end the comment.)
WAIT	Interrupts the session to allow modification of the program. (Should be used by qualified users only.)
QUIT	Terminates execution of the program.
HELP	Prints this explanation.

表-5 エキスパートシステム PROSPECTOR のセッションの例 Waterman (1986)¹⁵⁾

1:	THERE ARE DIKES (Dike) (5)
2:	THERE ARE CRETACEOUS DIORITES (Cretaceous diorites) (5)
3:	THERE IS PROBABLY SYENODIORITE (Monzonite) (3)
4:	THERE MIGHT BE SOME QUARTZ MONZONITE (Quartz-monzonite) (2)
.....	
13:	DONE
.....	
<hr/>	
I am considering the possibility of a ("Type-A porphyry copper deposit—PCDA) in the target area.	
<hr/>	
.....	
.....	
.....	
28:	To what degree do you believe that: ("There are volcanic rocks in the region contemporaneous with the intrusive system, i.e., coeval volcanic rocks)? WHY
I am trying to establish the depth environment in your area. The presence of coeval volcanic rocks is good evidence for the right level of exposure. The target (PCDA) would in general lie below the level of (at a greater depth than) a coeval volcanic pile.	
28:	To what degree do you believe that: ("There are volcanic rocks in the region contemporaneous with the intrusive system, i.e., coeval volcanic rocks)? 3
.....	
33:	To what degree do you believe that: ("There is granodiorite in the intrusive system)? 3
.....	
.....	
<hr/>	
On a scale from -5 to 5, my certainty in (PCDA) is now: 1.683.	
In summary, the following have been observed:	
The major favorable conclusions were	
Right regional environment (3.576)	
Right petro-tectonic setting (3.333)	
Right PCDA intrusive system. (1.683)	
The first four encouraging observations were	
There is a granite intrusive system	
in the region (5.0)	
The continental margin mobile belt	
contains granitic intrusives (5.0)	
The belt contains metamorphosed late	
Paleozoic to early Mesozoic eugeosynclinal	
volcanic and sedimentary rocks (5.0)	
There are altered looking rocks. (5.0)	
There were many other encouraging observations;	
do you want to see more? NO	
I cannot do any more with this hypothesis;	
do you want to pursue another one? QUIT	

わす 確実度係数 (Certainty Factor) が付されている。表-4 に示すコマンド一例¹⁸⁾ のような WHY や, HOW 他数多くの解説命令が随時使えたり, 最適モデルを実現するための不足情報の指示・入力, 割り込み新情報の入力および旧情報のデリートが自由であり, 常時解釈・評価が要求できる機能となっている。トップレベルの評価値は, 証拠の確実度, 照合の性質, ルール追跡によりそれらの証拠が仮説を支持するかしないかなどの点を考慮して計算される。表-5 は, PROSPECTOR システムの実行したセッション例であり, ユーザ入力部分をボールドタイプで示す。

3.3 PROSPECTOR 実証実験例

このようにして*7, 第一次世界大戦時に USGS の Pardee (1918) によってその存在が確信されて以来, 60 年間数 100 回にわたる試掘失敗を繰り返していたワシントン州東部 Tolman に最終的価値が \$ 100,000,000 を超えるであろうモリブデン大鉱脈を, 現地から数百マイル南のカリフォルニア州 Menlo Park のコンピュータワークステーションの画面に浮び上らせた。Pardee (1912) が, Rosenkranz・Miller とともに調査し, USGS Bulletin (1918) に報告した Tolman を含む Sanpoil 地域の地質図では鉱床空白地帯であった¹⁾ 地域で行った今回の実証実験では, その後蓄積されてきた既存の地質・地球物理・地球化学的探査情報を活用した。実証実験時の鉱床存在既存情報はもとより, 優先的探査情報として, 地質鉱床接触部・断層・IP 異常を含む電磁気異常などの有無に関する情報ならびに地球化学的異常情報と, 熱水変質帯情報を入力した。とくに, ハイドロサーマルゾーン情報入力に際しては, そのうちカリ含有ゾーン情報が効果的な働きをしている。図-6 は, PROSPECTOR が初回の AI 先導の実証実験成功例となった画面出力の一例で, AI 応用における歴史的画像と言えよう¹⁾。画像は濃集したずきん状のフードタイプ (Hood Type) 斑岩モリブデン鉱脈の有望度合を, -5~5 の輝度表示でスキャンしたものである。Pardee や 60 年後の鉱床存在情報において, 鉱床存在空白地帯であった資源環境地域に, PROSPECTOR 出力画像が, 新しい鉱脈有望地帯を浮き彫りにした。図-6 の出力画像は, フードタイプ鉱床モデルをホールドして, 2 つの分離した鉱床を指示したもので, その後, この PROSPECTOR 画像をもとに, 継続的な試錐検証が行われている。その結果, PROSPEC-

入したルール番号が表-3 のそれに対応する。つぎつぎと生成されるプロダクションルールとしての全ての言明は -5 (状況不成立)~5 (状況成立) までの確信度を表

*7 実証実験地には, Mount Tolman の他に, Hudson Bay Mountain, Smoke Mountain などが選ばれた (SRI プロジェクト 8172)。

図-6 斑岩モリブデン鉱化帯探査における PROSPECTOR のグラフィック画面出力例 Harmon & King (1985)²¹⁾

図-7 PROSPECTOR 実証実験 Washington 東部 Tolman における 試錐検証情報 Campbell, Hollister, Duda & Hart (1982)²⁰⁾

TOR の評価はますます高まった。

4. 探査評価支援エキスパートシステムの評価と課題

4.1 PROSPECTOR の評価

Mining Engineering (1984)²²⁾ や Science (1982)²⁰⁾ を引用するまでもなく、新しい探査評価支援ツール・支援システムとして AI エキスパートシステム研究開発は、PROSPECTOR の成功をふまえて、各種システムの AI 化をはじめとする本格的アクティビティが高まる気配を見せ始めている。すでに、USGS では次世代資源地質環境探査支援ツール AI のベースの 1 つともなり、PROSPECTOR より入力出力がスマートで、マイクロコンピュータ実行のモデル数 60 の μ PROSPECTOR を開発、実用試験を重ね達成度の向上に努めてきている。AI 進展は極めて急加速となろう。それゆえ、その果す役割の特徴と課題をよく認識しておく必要がある。

今回の PROSPECTOR 推定例において、強いてその弱点をあげれば、周辺地質における鉱床の拡がりを完全に包絡していないことであろう。これは過去および実験時の探査情報を利用したこと起因していると判断される。図-7 は、PROSPECTOR 実証実験地域における試錐検証情報である²⁰⁾。

PROSPECTOR エキスパートシステムの開発 (30 人以上) は、医療診断支援ツールとしてのエキスパートシステム HELP (CDC 開発, 15 年間 \$ 30,000,000) や、およそ 700 疾患, 100,000 アソシエーションをベースに膨大な医学知識を有し、コンプリケートな試験の症例を

表-6 PROSPECTOR 知識獲得システム KAS の環境汚染物質流出問題への適用セッション例 Hayse-Roth, Waterman & Lenat (1983)²³⁾

```

-----
Only one goal has been considered so far: my certainty in
1. The best strategy is to backtrack through the drain system to the
   source is now 3.88
Do you wish to see additional information? (YES)
-----
I suspect that
1 - (* The best strategy is to backtrack through the drain system to
   the source) (3.88)

There are two favorable factors:
1. A visible liquid pollutant is flowing steadily in the river 3.0
2. You were sure that the flowing pollutant is entering the river from
   a known drain pipe 5.0      ** dominating factor **

There is one factor that has not yet been considered:
3. Do you have (or can you get) a map of the storm drain system
   from which the pollutant is entering the river 0.0

For which of the above do you wish to see additional information? (1)
-----
On a scale from -5 to .5, my certainty that
1.1 - (* a visible liquid pollutant is flowing steadily in the river)
      is now 3.0

There are several favorable factors:
1. You were sure that the pollutant in the river is a liquid 5.0
2. You were sure that the pollutant is flowing steadily (as
   opposed to stopped for long periods of time) 4.0
3. You suspected that the pollutant in the river is clearly
   visible 3.0      ** limiting factor **

For which of the above do you wish to see additional information?
(NONE)
-----
5 - Do you have (or can you get) a map of the storm drain system from
   which the pollutant is entering the river? (YES)

Changing the certainty of (* The best strategy is to backtrack through
the drain system to the source) from 3.83 to 4.68
-----
I suspect that
H - (* The best strategy is to backtrack through the drain system to
the source) (4.68)
Do you wish to see additional information? (NO)
-----

```

正確に診断することのできる内科用 CADUCEUS (ピッ
バーグ大学開発 INTERNIST を改良発展, NIH のパッ
クアップのもとに実用試験を行い, TSS 応答速度ではや

図-8 HYDRO による探査評価対象代替定数決定のための推論ネットワークの一部 Waterman (1986)¹⁵⁾

や遅いが、専門利用にはほぼ完全な達成度を保証) などと同様、豊富な経験知識を背景に、AI 3大資源の1つを満たし、さらに資源地質環境分野での時間尺度からみてゆとりのある時間資源という第2の AI 資源を兼ね備えているだけに、まさに AI テクノロジー・知識工学の極めて自然な応用であろう。

研究初期からの流れを見ると、PROSPECTOR エキスパートシステムは、広域資源評価における鉱物資源探査支援専門家システム、言わば AI 鉱山師ともいべき代替エキスパートとして開発されたが、その成熟とともに、資源地質環境探査評価の試錐位置選定および数値情報も取り込んだシミュレーションの機能も有するようになった。既述のように、インタラクティブなコンサルテーションモードの利用による資源評価のみならず、表-6にみる環境汚染物質の流出問題 KAS 解析や、図-8に示されるような数値情報を処理する拡張ネットワークから

なる PROSPECTOR ベースの探査対象代替定数決定システム HYDRO¹⁵⁾ も併用して、モデルシミュレーションを実行するなど機能が拡大されている。

4.2 情報・知識獲得

PROSPECTOR に象徴される AI エキスパートシステム実証例は資源環境探査評価に対し1つの将来を示唆したが、情報プロセッサである AI プログラムが不備であれば当然生成される言明、解釈評価結果の出力画像の確実度は低くなる。モデル獲得手段としても、優れたハードによるデータの提供と質の高い探査情報・知識によるモデルの修正・更新を怠らないことが肝要である。PROSPECTOR は、そのなかに、知識獲得システム KAS (Knowledge Acquisition System) を設け、知識更新機能を付加させ、実行能力のレベルアップを計っている。PROSPECTOR や HYDRO ベースの KAS では、情報・知識を外形ではなく、内容で修正できるネットワ

図-9 知識獲得・移植・加工過程の形態 Hayse-Roth, Waterman & Lenat (1983)²³⁾

ークエディタがその中核となって、エキスパートの目を通した知識源 KS (Knowledge Sources) の利用が効果的に行える。成熟した探査評価支援エキスパートシステムでは、質の高い高密度情報・知識の獲得手段ならびに大規模知識ベースが、KSS (Knowledge Sharing System) の基礎ともなり、重要な役割を果たす。図-9 のような基本例²³⁾を参考にするまでもなく、もろくない知識ベースの作成、とりわけ探査評価目的によって広域調査から精密探査、さらには試錐探査まで選択できる多種選択性段階型の何階層にも分けられる探査・解析・解釈・評価のそれぞれのレベルでの情報・知識が必要となる。例えば、より下位の精密なレベルに属する比抵抗電気探査逆解析にみる、いわゆる超高速高精度計算志向型領域の数値シミュレーション解析情報や図形情報・多次元画像情報の取り込み・結合など、解析・解釈・評価情報の多角化である。そしてその入出力フォーマットなどと、これから検討されるべき課題が多々あり、今後それぞれのレベルからみた着実な研究開発推進が必要となろう。

4.3 知識表現

探査評価支援エキスパートシステムにおける知識表現としては、前述の方式を含め色々考えられる。ここでは、PROSPECTOR 構築のバックボーンともなったプロダクションシステム PS (Production System) を一例として挙げる。いわゆる節点-枝形式の意味ネットワーク (Semantic Network) 知識表現法と同様に、条件-行動 (IF~THEN) 対のプロダクションルールの集合から成るルールベースと、データあるいはメモリとしての文脈 (Context) データ構造 (作業記憶 (Working Memory)), そしてシステムの動作を制御する推論機構インタプリタ (Interpreter) の3つの部分から成る PS は、循環動作すなわち照合 (Matching)、競合解消 (Conflict Resolution)、行動 (Action) の3つのフェーズを繰り返す、AI システムのルールベースの構築・拡張 (修正を含む) を行うので、知識を獲得しつつ大規模な知識ベースを構築し得るという長所を持っている。この PS の特長のモジュール性は、確かに、大規模ルールベース構築に重要

である反面、その強力なモジュール性と一様性がプログラムの実行効率を悪くするおそれもある。また、PS がより大型化しかつ複雑になるにつれて、効率向上のためにルールベースと文脈いずれもが、PROSPECTOR の意味ネットワークのように、より一層複雑なデータ構造をとるようになるだろう。

4.4 探査評価支援エキスパートシステムの進展予測

米国での AI 応用研究開発は、MIT, SRI (逸材 PROSPECTOR, 水資源評価 コンサルタントシステム HYDRO 開発), TI (AI リーセントシステム石油リザーバ開発用 DRILLING ADVISOR (250 ルール程度, ワークステーション画像出力), 石油探査サイスマックデータ解釈エキスパートプログラム WAVES 開発), ITT, GE, シュランベルジェ (DIPMETER ADVISOR, スタンフォード大学との共同開発石油試掘データ解析エキスパートシステム LOGIN), CSI (油井・石油探査向きシステム EXPLORER 開発), アモコ (油井探査データ解析エキスパートシステム ERAS 開発), そして DEC, IBM など大手 30 社を含む全米ハイテクノロジー・ハイソフトウェア企業と先進大学等研究機関の今日の一大目標となっており、その研究開発アクティビティは目を見はらせるものがある。

具体的課題としては、AI 応用指向の典型的特徴の1つの、いわゆる唯一の正解をめざす伝統的な高速高精度志向型アプローチに対抗した、多くの可能性を秘めた問題解決を抜群の即時処理にて実行しようとする新能力を最大限に活かした、在来機能との結合による新しい探査評価支援エキスパートシステムの構築が挙げられよう。そして、エキスパートシステムに代表される AI 応用が極めて分化した専門分野において恐るべき成功をおさめるのに反し、一般汎用性が高い程その結果はもろくなり失敗する場合が多い、という特徴の逆形利用も重要である。また、複雑な問題の高性能超高速処理を志向する探査評価支援知識ベースの優秀は、高信頼性高密度情報の入力と、既述のコンピュータへの人間専門知識の移植の良否に左右される。したがって、人間の専門家達が、その分野で問題を解くときの経緯によって得た大量の現実世界の知識 (Real-World Knowledge) を、1人の専門家を超える知識レベルにおいて移植する方法、つまり強力に効果的な知識獲得手段を確立することが1つの鍵となる。さらに人間専門家からのみではなく、知識を直接自然から、つまりデータや徴候・示徴・アノマリーから抽出するという自動知識獲得についての研究、そして知識についての知識・メタ知識の移植の研究なども、一段と

図-10 現存する米国エキスパートシステムによる Artificial Intelligence 応用開発進化と PROSPECTOR の位置づけ Harmon & King (1985)²¹⁾

活発に展開されるべきであろう。また、その背後の問題として、情報・知識の欠陥という点も見逃す訳にはいかない³⁾。優秀なエキスパート（専門家）の神髄は、既に少し触れてきたように、膨大な情報蓄積では解決できない極めてコンプリケートな問題から本質を見究める能力、波及する現象を的確に把握する能力、予期せぬ出来事が起きたときに対処できる能力にある。しかるに、付言すれば、現在の多くのエキスパートシステムにおけるルールベースの概念は、専門家が何年もかけて蓄積した知識の単なる1つの例のみの集合である。極限・異常状況に対する問題解決のための因果関係モデルの組込みは、人間本来有する深えんな概念モデルを見つける分野にも関連する。より高度のエキスパートシステム完成のためには、いわゆる認知科学（Cognitive Science）の分野で検討されている人間の認識と推論過程などの研究進展もますます望まれるようになるであろう。

在来技術として貢献してきたいわゆる数値情報・画像情報など莫大な量のソフトウェア資源の活用を念頭に入れた既存および新しいアルゴリズム、コンピュータ資源共同利用ネットワークなど AI 周辺環境、そして代替エキスパート・探査評価支援 AI の効用とその限界予測などについては、ここでは触れていない。AI 進展方向と

表-7 新しい探査評価支援ツール・支援システム
Artificial Intelligence 環境の一例

SOME EXPLORATION INTELLIGENT SUPPORT TOOLS & SYSTEMS IN NEAR FUTURE

HIGH SENSITIVITY FIELD DATA ACQUISITION SYSTEMS
ARTIFICIAL SATELLITE HIGH RESOLUTION IMAGE ANALYSIS

VECTOR PROCESSOR-BASED LARGE HIGH DENSITY FORWARD MODELING
ENHANCED HIGH RESOLUTION INVERSION
3-D CT(CAT), SUPERFAST NMR DETERMINATION (IMAGING)
EXPLORATION 3-D CG(HIGH RESOLUTION COLOR DISPLAY)

EXPLORATION INTELLIGENT HIGH SOFTWARE
SMALL KNOWLEDGE SYSTEMS
INTELLIGENT SMART INSTRUMENT
EXPLORATION LARGE INTEGRATED SOFTWARE
INTELLIGENT SUPERSMART INTERPRETATION WORKSTATION
EXPLORATION INTELLIGENT SUPERSIMULATOR
EXPLORATION VERY LARGE SCALE SUPEREXPERT SYSTEMS (KSS)

COMPUTER COMMUNICATION NETWORKS (LAN, ISDN)
EXPLORATION SOFTWARE COMMUNICATIONS ARTIFICIAL SATELLITE

近未来環境についての、簡単に触れておきたい。図-10は、現存する米国エキスパートシステムによって、AI 応用開発の進化の予測を示したもので、本格的な波頭の到来が6~7年先頃と予測されている²¹⁾が、現実には緩やかな停滞期も含みながらこういった要素の一部を生かした部分的な技術開発が急展開していくであろう。表-7は、このような国際的アクティビティをふまえた近未来における新しい探査評価支援ツール・支援システム AI 環境の一例を示したものである。

5. おわりに

約 20 年前の未熟コンピュータ時代の半信半疑の領域から、70 年代極めて限られた、アポロ 11 号探査月面岩石組成データ解析 LUNAR プログラム (Woods (1973)) などが世に出て、その助走期間初期を経た人工知能 AI 研究は、今日のスーパーコンピュータから、高性能・高機能パソコン・マイクロコンピュータ、そして AI ワークステーションや FGCS などの中核とする新計算機環境の到来により、その実用化への障害が除去され、最近の AI エキスパートシステムなどのあいつぐ成功で、その信頼性を回復しつつある。

新しい探査の考えの下では、地球資源および地質環境全体が未知であるという発想を持ち出すまでもなく、知られていない資源や地質環境があるばかりでなく、知られている資源や地質環境についても十二分にわかっていない。そして、探査評価分野において、支援ツール・支援システムという用語を用いることについては、探査技術があくまでも支援と呼ぶにふさわしい優れたハードおよびソフトウェア (知識ウェアを含む) などからなる多種多様の何段階にもわたるツール・システムの集積による高密度情報・知識型テクノロジーであることに基いている。いずれは、歴史のなかでの評価に委ねられようが、10 数年前までは、一部の先進分野でさえも、AI を説くことは非現実とされた。しかし、その間になされてきた優秀な研究と地道な努力の結果、米国における AI エキスパートシステムをはじめとする目ざましい進展によって、在来コンピュータ技術自体の活性も甦り、今では無視できない存在となっただけでなく、AI 化研究・新情報処理技術開発への様々な分野の意欲と期待は計り知れなく大きい。単にエキスパートシステムのみにとらわれない AI ツール研究周辺環境が成熟し、高速高精度計算志向型のみにとらわれない高級なアルゴリズム下での高度推論処理能力が、専門家の有する直感的ひらめき・人間の有するある種の不可思議情報処理能力をも代行できるとは、思いがたいが、新しい探査評価の優れた支援ツール・支援システム構築と、その周辺環境形成への、国際的な高いレベルの研究・開発の地道な努力も必要とされている現在、研究の最先端を走ることと併行して、後から続く多くのことを考えた広義の情報・知識獲得や、このようなエキスパートシステムの効用について理解を広めることもますます重要となろう。本文は、新しい探査評価支援エキスパートシステムに関し、1 つの成功例から説明したもので、その構築のための資

料には不十分であるが、知識ベースエキスパートシステムを 1 つとする新探査評価支援 Artificial Intelligence の進展を促すために、布石の段階にあるとしている。

ただ、ハードウェアやソフトウェアが進歩するのと同じようにヒューマンウェアの進歩も忘れてはならないし、とくに人間本来有する能力、そして自然への限りない畏怖の念も忘れてはならない。もとより、本文は説明していないところも多く、決して十分なものではない。このような新探査評価支援ツール・支援システム形成に関する議論と研究が、より活発化するきっかけとでもなればと思い解説を試みさせていただいた。

なお、本稿をまとめるにあたり、米国地質調査所 Dr. Donald A. Singer (Menlo Park), Dr. Richard B. McCommon (Reston) からの貴重な資料の提供ならびに教示は、大変参考となった。記して深甚の謝意を表します。また、日頃何かと御助言を賜っている佐々宏一教授 (京都大学) をはじめとし、多くの関係各位に心より厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 菅野 強 (1985): 新・資源探査支援ツール, 月刊地球, Vol. 7, No. 12, 海洋出版, pp. 729-738
- 2) 菅野 強 (1985): 新しい資源探査 Artificial Intelligence とその周辺 (I), 鉱山, Bulletin of Japan Min. Industry Assn., Vol. 38, No. 10, pp. 1-14
- 3) 菅野 強 (1985): 新しい資源探査 Artificial Intelligence とその周辺 (II), 鉱山, Bulletin of Japan Min. Industry Assn., Vol. 38, No. 11, pp. 6-15
- 4) USGS (1985): United State Geological Survey Yearbook, pp. 1-121
- 5) PALACKY, G. J. (1983): Tutorial; Research, applications and publications in electrical and electromagnetic methods, Geophysical Prospecting, Vol. 31, No. 6, pp. 861-872
- 6) 菅野 強 (1986): 地下水資源環境汚染監視への電気探査の利用について, 日本鉱業会誌, 摘録, Vol. 102, No. 1181, pp. 443-444
- 7) 菅野 強 (1984): Madison 石灰岩層および下位岩盤における見掛地層水比抵抗, 孔隙率と地下水温について (モンタナ, ネブラスカ, 北ダコタ, 南ダコタおよびワイオミング州), 日本鉱業会誌, 摘録, Vol. 100, No. 1162, pp. 1166-1167
- 8) YALE, D. P. (1985): Recent advances in rock physics, Geophysics, Vol. 49, No. 11, pp. 1993-2003
- 9) 幾志新吉 (1986): ボーリング柱状図のデータベース化と利用方法, 月刊地球, Vol. 8, No. 2, 海洋出版, pp. 114-118

- 10) 古田 均・King-Sun Fu・James T. P. Yao (1985): 知識工学—エキスパートシステムの構造工学への応用, 土木学会誌, Vol. 70, No. 9, pp. 28-33
- 11) 大野 研・近藤 武 (1986): 土質工学に対するエキスパートシステムの応用, 土と基礎, Vol. 34, No. 7, pp. 61-65
- 12) HATTON, L. (1984): Databases and expert systems, Computer science for geophysicists. Part V, FIRST BREAK, Vol. 2, No. 1, pp. 9-15
- 13) HOLLISTER, V. F., DUDA, R. O. (1983): Evaluation of porphyry molybdenum type deposits by the PROSPECTOR artificial intelligence program, SEG Las Vegas Meeting, Expanded Abstracts of the Tech. Prog., pp. 226
- 14) FARR, J. B., BOLANDER, R. J. (1985): Expert system intelligence amplifiers for geological and geophysical interpretation, EAEG 47th Meeting Budapest, Tech. and Abstracts of Papers, pp. 142-143
- 15) WATERMAN, D. A. (1986): A guide to expert systems, Addison Wesley Pub. Co., pp. 1-403
- 16) JOHNSON, L., KERAVALOV, E. T. (1985): PROSPECTOR, Expert systems technology, Abacus Press London, pp. 43-61
- 17) DUDA, R. O. and REBOH, R. (1984): AI and decision making; The PROSPECTOR experience, Artificial intelligence applications for business, pp. 111-147
- 18) HART, P. E., DUDA, R. O. and EINAUDI, M. T. (1978): PROSPECTOR—A computer-based consultation system for mineral exploration, Mathematical Geology, Vol. 10, No. 5, pp. 589-610
- 19) PARDEE, J. T. (1918): Geology and mineral deposits of the Colville Indian Reservation Washington, USGS Bulletin, No. 677, pp. 1-186
- 20) CAMPBELL, A. N., HOLISTER, V. F., DUDA, R. O., HART, P. E. (1982): Recognition of a hidden mineral deposit by an artificial program, Science, Vol. 217, No. 9, pp. 927-929
- 21) HARMON, P., KING, D. (1985): Expert systems; Artificial intelligence in business, John Wiley & Sons Inc., pp. 1-283
- 22) BABCOCK, J. W. (1984): Introduction to ore deposit modeling, Mining Eng., Vol. 36, No. 12, pp. 1631-1636
- 23) HAYSE-ROTH, F., WATERMAN, D. A., LENAT, D. B. (1983): Building expert systems, Addison-Wesley Pub. Co. Inc., pp. 1-29
- 24) JIPDEC (1981): 第 5 世代のコンピュータ・研究開発提案書, 日本情報処理開発協会, pp. 1-28
- 25) WINSTON, P. H. (長尾真, 白井良明訳) (1980): 人工知能, 培風館, pp. 1-276
- 26) BARR, A. and FEIGENBAUM, E. A. (1982): The handbook of artificial intelligence, Vol. II, William Kaufmann, Inc., Los Altos., pp. 1-403

(昭和 61 年 7 月 18 日受付, 昭和 62 年 1 月 13 日受理)