

■ 解 説 ■

新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツールについて (I)

—資源探査 Artificial Intelligence—

New Support Tools for Mineral and Energy Exploration. Part I : Artificial Intelligence



菅野 強\*  
Tsuyoshi Sugano

1 はじめに

西暦二千年の地球文明社会を迎えようとする私達は、幸いにも、幾多幾年にわたる過去人類文明の莫大な所産は無論のこと、ひたすら拡大の一途を辿ってきた20世紀後半の秀れたハードをベースにその高度文明社会において豊かな物質生活を営んでいる。その生活には天然鉱物をはじめ多くの資源エネルギーも大きく貢献しており、豊かで平和であればある程その多大の恩恵への感謝心と、その将来・未来・如來への展望を欠いてはならないことは、今更言うまでもないが、繰り返して述べておきたい<sup>1)</sup>。全世界的にみて全鉱種の半分は現行の社会経済体系が今後とも維持・拡大していかならば、すでに21世紀初頭にはその埋蔵鉱量が枯渇してしまうだろうとするカストロフィスト的予測、広大な地球が包含する資源を利用するには高度技術発展さえあれば充分であろうとするコーニコピアン的予測、さらにはその中間的予測と、いずれにせよ真の予測をふまえてどうするかが肝要であろう。例えば、Skinner の提唱するバイモーダルあるいはマルチモーダルな分布といわゆるモノモーダルな分布のいずれの品位—鉱物資源評価量関係モデルにおいても技術進歩・社会要請と鉱石のカットオフ品位・定量的資源長期予測との深いかかわりが理解されよう。そして当然のことながらその限界線は次世代を待たずとも現在既に、例えば、より低品位鉱床・より小規模油田へと、移動せざるを得ない状況に到達しているのである。

目を米合衆国に向けると、鉱物・エネルギーのポテンシャルが強く資源開発環境が良好なこの国での近年の探査アクティビティは比較的高い水準にある<sup>3)4)</sup>。

表1は、連邦政府関係の合衆国地質調査所(USGS)や国立科学財団(NSF)と、他の政府関係の合衆国鉱山局、

表1 USGSとNSFの鉱物資源探査関係研究への予算(100万ドル)例<sup>a)</sup> MMAJ(1985)<sup>5)</sup>

予 算	1978 年 会計年度	1981 年 会計年度 の推定
米国地質調査所		
米国大陸部資源評価計画 (CUSMAP)	\$ 4.9	\$ 4.8
アラスカ鉱物資源評価計画 (AMRAP)	\$ 4.5	\$ 4.2
ウィルダネス・ランド	\$ 6.2	\$ 8.6
資源情報・解析 <sup>b)</sup>	\$ 4.0	\$ 4.2
評価技術の開発 <sup>c)</sup>	\$ 9.6	\$ 9.8
USGSの鉱物資源関係全研究費	\$29.2	\$31.6
国立科学財団(NSF)		
地球科学関係		
鉱床学	\$ 0.1	\$ 0.3
地球物理探査	\$ 0.3	\$ 0.05
地球科学探査	\$ 0.5	\$ 0.9
基礎研究		
深部鉱物資源 (探査及びソリューション・マイニング)	\$ 1.2	\$ 0
NSFの鉱物資源関係全研究費	\$ 2.1	\$ 1.25
USGS及びNSFの鉱物資源関係全研究費	\$31.3	\$32.85

- a) この表に関する情報は J. Hower(NSF及びイリノイ大学), P. R. Brett(NSF), J. S. Dickey(NSF), P. B. Barton, Jr.(USGS), B. A. Morgan(USGS)及び J. J. Hemley(USGS)により提供された。
- b) 資源情報・解析計画は、1978年に鉱種研究(190万ドル)と鉱床情報(210万ドル)に分割された。
- c) 評価技術の開発計画は、1978年に探査/評価技術(430万ドル)と資源プロセス計画(530万ドル)に分割された。

エネルギー省 (DOE), 国立海洋気象局 (NOAA) およびスミソニアン研究所などにおける資源評価に関連する基礎研究のアクティビティを示した例である<sup>5)</sup>。このような米国とは格段の差のある資源小国日本がお高高度先進国として歩みつけようとするならば、資源産出国ならびに先進諸国における鉱物・エネルギー資源の探査開発技術の研究・応用開発においても、諸

\* 京都大学工学部資源工学科  
〒606 京都市左京区吉田本町

外国に勝る日本独自の先端技術の涵養に努める必要があり、それは資源ナショナリズムの傾向が強まっていく今後の資源外交上においても大きな要素となろう。

しかるに、現在日本の鉱物資源エネルギーについての課題は、1つには、ハイテクノロジーの一端を支えるレアメタル資源の供給構造とその備蓄のための国内外の探査開発・技術開発、非鉄金属ベースメタル資源の長期的安定供給確保のための継続性のある内外の探査開発、そしてウラン資源・マンガン団塊・海底熱水鉱床等深海底鉱物資源等の探査開発の推進である。もう1つのエネルギー資源に関しては、日本は衆知の如く国内エネルギー資源に乏しくホルムズ依存度の高さに象徴されるように先進国のなかでも脆弱な供給構造しか有していない。昨今の世界的石油供給安定で、エネルギー事情が多少軟化しているとは言え、持続的安定供給を要する石油エネルギーと、電源多様化のペース格にされようとしているが循環構造・立地問題を抱えた20世紀の遺産原子力エネルギーをはじめとしてクリーン太陽エネルギーに至る多様なエネルギー供給構造育成のなかで、経済性が高く液化・ガス化等先進技術進展により世代をつなぐ役割をするかも知れないエネルギーとして、有望で貴重な自国埋蔵等石炭エネルギー資源の見直しや、新エネルギーの1つとしての浅部・深部ジオサーマルエネルギー資源の探査開発も、平穩時にこそなお一層の着実な歩みが必要であろう。

新しい鉱物・エネルギー資源探査技術としても、グローバルな立場からの米国NASAランドサット5号(1984)の高分解能(地上分解能30m)セマティックマッパーTMセンサによる画像の利用や、仏国SPOTより幾分遅れるが日本が進めている1990年打上げ予定の地球資源衛星(ERS-1)などにおけるリモートセンシング技術をはじめ、陸海洋における新探査技術によるリージョナルな立場での広域・精密探査技術に至るまで、幅広い技術研究応用開発が展開されていることは、よく知られている通りである。本文では、まず新しい資源探査支援ツール研究開発の国際的アクティビティを概観する一指標として、SEG(米国地球物理探査学会)およびEAEG(欧州物理探査協会)における研究論文・研究活動のなかのとくに鉱物資源探査に関連の深い電磁気探査技術開発のアクティビティの例をとり挙げ、現在および今後の国際的研究周辺環境を述べ、今回の主題である新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツール Artificial Intelligenceとその周辺に関して、日本の第5世代コンピュータ構想の中核とな

っているアーティフィシャル・インテリジェンス AI(人工知能)テクノロジー気運に対抗、底力を見せ始めた米国における近年のAI先導的実証例となった新鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTORを中心に、極く一部であるがその一端について触れさせて頂く。したがって、広範一般的な解説ではなく、現在国際的アクティビティのなかで注目すべきものをキーワード的に抽出した解説となっており、新世代資源探査研究開発アクティビティを志向する1つの視点への何万分の1かの参考資料とでもなれば、極めて浅学非才の筆者として望外の喜びとするところである。なお、今回の解説は、文献1)および2)をベースにしており、省略は同文献にゆずる。

## 2. 新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツール研究開発の国際的アクティビティ

国際的レベルでの新しい探査先端技術研究開発のアクティビティを展望する1つの指標となるSEG(Society of Exploration Geophysicists)とEAEG(European Association of Exploration Geophysics)がそれぞれの活動において刊行しているGeophysics(Monthly)、Geophysical Prospecting(Bimonthly)のここ13年間(1973~1985)に掲載された研究論文について、とくに鉱物資源探査に関連の深い電磁気探査技術研究開発のアクティビティをとり挙げ、Palacky(1983)<sup>6)</sup>の方法により調査を行った。開催地を全米拠点とする(例えばWashington(1985)、Houston(1986)、Las Vegas(1983))国際SEG学会Annual Meetingは、多くの国からのメンバー・オブザーバーなど関心のある学者・研究者・技術者をはじめ関係者の参加をみて研究発表・シンポジウム・ワークショップは無論のこと、全米の探査関連機関を中心とするExhibitionも一堂に集めて開催され注目に値する。さらに最近、Geophysicsにはコンプリメンタリー版EDGE(Monthly)、Geophysical Prospectingにも同様FIRST BREAK(Monthly)がそれぞれ加わり、最新探査技術情報を提供する一方、Geophysics過去25年間の秀逸28論文をSpecial Issue(Vol. 50, Nov. (1985))<sup>7)</sup>として掲載するなど、一段と活発な活動を見せ始めている。ちなみに、SEGメンバーは、筆者がActive Memberとして加わった1975年から10年間の推移をみても、全米は無論、鉱物資源国・燃料資源国から日本のような資源輸入国に至るまで、その数に着実な増加が見られる。そして今後は情報入手が豊かにな

るであろう資源国中国に対しても、交流の進捗状況によってはその及ぼす影響は大きくなると思われる。なお、今回の調査件数は691件である。

2.1 国際的電磁気探査支援ツール研究開発要素別アクティビティ

図-1は新しい電磁気探査技術の研究開発要素別にみた国際的アクティビティを示している<sup>1)</sup>。圧倒的にフォワードモデリング、インバージョンおよびデータ解釈(Interpretation)についてのソフトウェアに関するアクティビティが高い。これは探査の成否がいかにかに解析・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つの指標であろう。また先端を進む価値の高いソフトウェアが研究関係機関で多くをノウハウとしているかがうなずけようし、今後も探査解析・解釈・評価・開発意志決定ソフトウェア開発がますます重要となり、膨大豊富な情報内容によるデータベースDB構築そしてAIテクノロジーに包含されたエキスパートシステムES開発も高度の位置づけになっていくであろう。探査DB構築の種類としては、USGSの鉱物資源データシステムMRDS (Mineral Resources Data System)(現在合衆国 64,000 例, 海外 5,400 例)や、合衆国エネルギー省(DOE)のウラン燃料資源評価データベースNURE(National Uranium Resource Evaluation)(開発費, 約\$ 75,000,000)のような国家的情報例から、北米・ソ連および東欧共産圏を除く140カ国以上にまたがる石油・ガス・石炭・堆積ベーズン探査データベースGEOCAT(Petroconsultants

Ltd.)のような国際商用情報例に至るまで、大小多岐にわたる。

そして改めて述べるまでもないが、現在、新しいコンピュータテクノロジーの流れは、従来の超高速高精度計算志向型と、人間の知的活動のアナローを計算の原理とする高度推論志向型の2つに大別される。FORTRAN文化に代表され、アルゴリズムイコールプログラムのHOW型の前者に対し、後者は、MIT Mc Carthy(1960)作成の人工知能言語LISP (LISt Processor), そしてMarseille大学Colmerauer(1973)によって作成され、ハンガリー・英国ならびに日本ICOTで定着しつつあるPROLOG(PRO gramming in LOG ic)のような論理型プログラム言語や、コンピュータとの通信手段をグラフィック (マルチウインドウ)、マウスといった従来にないものを用いてサポートしようとするSmalltalk, そしてINTERLISP, COMMON LISPと言った、オブジェクト指向あるいはその機能を有する言語利用による、知識ベースプラス推論機構がプログラムの主体となるWHAT型の新しい計算機分野である。前者では、超高速機C RAY-1の出現に端を発し、ローレンスリバモア国立研究所C RAY-2(1.2 GFLOPS)導入(1985)等のように、続々と巨大超高速計算処理が可能となって<sup>8)</sup>、従来到底到達し得なかった問題の解決に大きな威力を発揮しつつあるスーパーコンピュータ新時代を迎えた。日本においてもS810/20(東大), VP200,100(京大, 名大), SX-1(東北大, 阪大)の例を挙げるまでもなく各種ベクトル計算機導入や、スーパーコンピュータ超高速画像処理システム「韋駄天(いだてん)」開発、そして後者の、より上位レベルの知識処理言語MANDARA「曼陀羅(まんだら)」開発をはじめとするFGCSプロジェクト進行、MITのAI研究所開発シンボリックLISPマシンあるいはDECマシン、さらには大型汎用マシンにバックエンド・プロセッサを付加、ES構築ツールを利用するTSS処理の人工知能専用プロセッサ利用など幾多幾種にわたる周辺環境によって、従来追究できなかったツール、過去になかった全く新しいツール、パイオニアのユニークな技術などの研究開発アクティビティに目ざましい加速が期待できる素地が熟成しつつある。

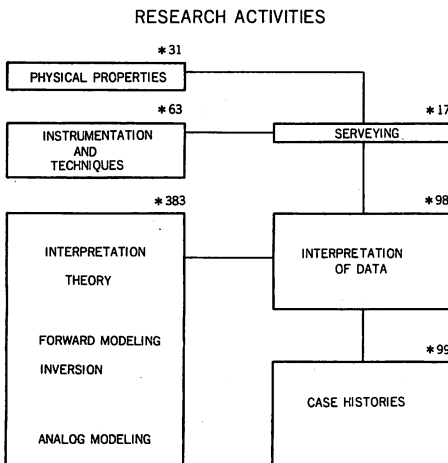


図-1 Geophysics (SEG), Geophysical Prospecting (EAEG)にみる新しい鉱物・エネルギー資源電磁気探査支援ツールの研究開発要素別アクティビティ Palacky(1983)・Sugano(1985)<sup>1)</sup>

2.2 国際的にみたくつかの新しいアクティビティ

表2は、国際的レベルでのアクティビティを考慮し新鉱物・エネルギー資源探査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ます進展すると思

表2 鉱物・エネルギー資源探査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 CSAMT  
PEM (3-D CSTEM)  
MMR (MOSES, SENSITIVITY)  
MMAR  
TDSIP (TIME CONSTANT, CHARGEABILITY, FREQUENCY DEPENDENCE)  
RWA (POROSITY)  
NMR (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

われるいくつかの要素をまとめた例で、1つは、自然電磁場利用の限界を打破する人工制御信号源(Controlled Source)を基盤とする新しい電磁気探査支援ツールで、高度マイクロプロセッサ、高感度センサなど優れたハードのフォローにサポートされた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・高感度探査解析を旨とする3-D CSAMT, MMRや地質鉱床物性モデル志向のTDSIPやリザーバ探査物性モデル志向のツールなどはそのアクティビティの活性化は必至である。もう1つは、スーパーコンピュータ、FGCSなどを背景とした新しいコンピュータテクノロジーを基盤とする鉱物・エネルギー資源探査 Artificial Intelligence 人工知能(AI) など新資源探査支援ツールの育成・確立である。その国際地球資源物理探査基礎研究分野における萌芽としても、1980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ける Hollister ら(1983)<sup>13)</sup> による鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTOR や、Smith(1983)によるディップ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および Roth(1983)によるエキスパートシステム構築例などや、同 Annual Meeting Washington(1985)での地球物理探査コンピュータシステムに関するワークショップにおける Thadani(1985)による AI LISP ワークステーション、Thomas(1985)による結果解釈ワークステーションおよび Dasgupta(1985)による結果解釈グラフィックシステムなどが挙げられる。また、

EAEG Annual Meeting でも Farr ら(1985) による石油エネルギー資源探査エキスパートシステム、Horvath(1985)による知識ベースを用いた新サイズミックデータ解析エキスパートシステム、および Payre ら(1985)<sup>14)</sup> による仏国海洋サイズミック探査支援ツール DIAPASON などがあいついで発表され、今までにない新しいツール研究開発分野として注目すべきニューアクティビティが出てきている。僅か3・4年前には1-D, 2-D 探査技術が頻りに議論・利用されていたことを鑑みれば、資源探査人工衛星情報も包含した大規模地質鉱床物性モデル、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、大規模高分解能3-D インバージョンや、3-D コンピュータグラフィックス(CG), CT, そして資源探査 DB および高密度大規模容量知識ベースを加味した鉱物・エネルギー資源探査エキスパートシステム、インタラクティブ インテグレイティド探査解釈支援ツールといった資源探査 Artificial Intelligence AI などに象徴される新世代コンピュータエキスプロレーション(New Generation Computer Exploration) というべき技術が21世紀に向けて、さらには1990年代を待たずに開花する徴候を見せる日も近いであろう。

## 3. 新しい資源探査 Artificial Intelligence

—米国における AI テクノロジーの先導的成果実証例となった新鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTOR とその周辺—

## 3.1 Artificial Intelligence 研究環境周辺

日本においては ICOT (新世代コンピュータ技術開発機構) 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、アーティフィシアルインテリジェンス (AI) 向きのハード、ソフトウェア技術の研究開発環境推進に入っていることは衆知の通りである<sup>11)</sup>。しかるに、この構想が米国・欧州に与えた刺激は計り知れなく、米国ではすぐさま日本の目標を対抗モデルとして導入、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 (テキサス州オースチン) をはじめ、CIS など巨大プロジェクト推進体制をスタートさせている。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、次期6～10年間先進 AI 応用開発に役立てられる予定であり、EC でも欧州情報通信開発戦略 ESPRIT (European Strategic Program for Research and Development in Information Technology)、英国が貿易・産業省 Alvey プログラムと、それぞれ対抗プロジェクトを発足させていることもよく知られているところである。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、現在からみれば Toy の世界に近かった、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)) が世に出て、その助走期間初期を経た AI 研究は今日のスーパーコンピュータ、FGCS を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、最近のエキスパートシステムのあいつぐ成功で、冷めた目で見たとしても、その信頼性を回復したと言えよう。

### 3.2 Artificial Intelligence 鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTOR

ここで説明する鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTOR は、AI が研究対象の域を出て巨大な高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) が極めて高い評価を与えた例である。スタンフォード国際ナショナル AI センター (SRI) が USGS と NSF の援助を受けて鉱物資源探査分野で起ってくる診断問題を解決するために開発 (30人・年以上<sup>15)</sup>) 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、ユーザとして資源地質探査学の専門的理解力を有しているが調査結果の評価時に専門家の援助を望むような探鉱有望地域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・学者を想定して、その助言プログラムソフトウェアが作成されている。専門家達が蓄積した大量の

知識・情報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・フォーミュラ化と、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探査解釈・評価・判断を実行する AI モデリングプログラムである。真、偽、またはある確率をもって真とみなせるように定められた数多くの言明がこの推論ネットワークの節点 (Nodes) に対応する、言わばアナログ方式知識表現となっている。PROSPECTOR は主導権混在型システム (Mixed-Initiative System) でユーザが探鉱有望地域についての知識情報を自発的に入力して、自発入力空間とモデル空間との照合、インタラクティブにゴール仮説選定、トップレベルの仮説の評価を繰り返し、高確率の最良モデルに対応するゴール空間を選択するシステムである。知識ベースには鉱物資源生成モデル (Genetic, Conceptual Model)、経験モデル (Empirical Model)、探査モデル (Exploration Model) およびプロセスモデル (Process Model) などのモデルが考えられるが、あらゆる角度から作成・テストを実行したプロスペクトスケールあるいはリージョナルスケールの鉱物資源探査モデルを組込む。初期知識移植 (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、鉱物資源の種別、断層位置、資源電磁気探査知識情報などをユーザが入力することで開始、既にバンキングされている膨大なソフトウェアおよびデータとの照合、数多くの鉱脈モデルの想定、判断・評価のためのデータ・情報・知識の逐一処理をアナログ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解釈、最適技優先の逆向きチェイン方式推論コントロール戦略が適用されている。

表3は、エキスパートシステム PROSPECTOR が実行したセッションの一部抜粋の例である。表4は、言明数541、ルール数327で構成された5個の地質鉱床探査モデルからなる PROSPECTOR 初期の知識ベースである<sup>16)</sup>。その後、モデル数12個、言明数1566、ルール数1065 (言明数1683、ルール数1370の23個のリージョナルスケールモデルも付加) へと拡大を計り<sup>17)</sup> (表5は、June, 1983時点公表のものであるが、さらに、モデル数15個、それぞれのモデルにつき、言明数200以上、ルール数150以上と成長)、試錐位置決定モデル3個も内蔵させている。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

表3 エキスパートシステム PROSPECTORのセッションの例 Duda & Reboh(1984)<sup>17)</sup>

The following questions are intended to establish the nature of the petrotectonic setting. (These questions will not be pursued unless a positive answer is given to the next question.)

1.—To what degree do you believe that the target area is in a continental-margin mobile belt? 4

2.—Do you know the age of the continental-margin mobile belt? WHY  
The vast majority of porphyry copper deposits are younger than 200 million years. Major age groups include:

1. An older group of 200 to 150 m.y. (million year) porphyries in British Columbia;
2. An important younger group of 70 to 50 m.y. deposits in the Mid-East. British Columbia (Skeena Arch), and Arizona-New Mexico-Sonora (Laramide) copper province;
3. The major belt of 60 to 4 m.y. deposits in the Andes of Argentina, Chile, Peru, Ecuador, and Columbia.

Although some major deposits in the western U.S. do not fit the above groupings, either in terms of age or location, they are all younger than 250 m.y. Known porphyry deposits of Paleozoic age (e.g., in the Appalachians and East Australia) constitute a minor fraction of present resources. Hercynian (late Carboniferous) occurrences in the Kazakhstan, USSR, may include some major deposits.

2.—Do you know the age of the continental-margin mobile belt? YES

3.—What is the age of the continental-margin mobile belt? CRETACEOUS  
= 136 - 65 million years. What is your confidence in this estimate? 4

⋮

I suspect that (\* there is a Type-A porphyry copper deposit) (2.65)  
There are several favorable factors, in order of importance:

1. the petrotectonic setting is favorable for a type-A porphyry copper deposit 3.626
2. there is a favorable regional environment for a type-A porphyry copper deposit 1.866
3. there is a favorable intrusive system for a type-A porphyry copper deposit 2.607  
\*\*dominating factor\*\*

There are two positive factors with neutral effect that, if negative, could have been significant, in order of importance:

4. You were sure that there are granitic, calc-alkaline intrusives in the region 5.0
5. You were sure that the target (or prospect) lies in or near an intrusive system 5.0

For which of the above do you wish to see additional information? ...

表4 PROSPECTOR初期の知識ベース  
Barr & Feigenbaum(1982)<sup>16)</sup>

Size of Knowledge Base of Five PROSPECTOR Models		
Model	Number of assertions	Number of rules
Koroko-type massive sulfide	39	34
Mississippi-Valley-type lead/zinc	28	20
Type A porphyry copper	187	91
Komatiitic nickel sulfide	75	49
Roll-front sandstone uranium	212	133
Total	541	327

成立)~5(状況成立)までの確信度を表わす確実度係数 (Certainty Factor)が付されている。表3のような WHYや, HOW他数多くの解説命令が使えたり, 最適モデルを確認するための不足知識情報の指示・入力, 割り込み新知識情報・データの入力および旧知識情報・データ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サポートするかしないかなどの点を考慮して計算される。

このようにして, 第一次世界大戦時に Pardee(1918) (USGS)によってその存在が確信されて以来60年間

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100マイル南のカリフォルニア州 Menlo Parkのコンピュータ AIワークステーションの画面に浮び上らせた<sup>18)</sup>。今回の実証実験では蓄積されてきた既存の地質・地球物理・地球化学的探査知識情報をういており, このなかの優先的探査知識情報は, 地質鉱床接触部・断層・構造・磁気異常・電気IP異常などの有無に関する情報ならびに地球化学的異常と, 熱水変質帯情報とであった。とくに hidroサーマルゾーン情報入力ではカリ含有ゾーン知識情報が効果的な働きをしているように見受けられる。無論, PROSPECTOR予測前の鉱床存在情報は既知情報として与えられている。図-2は, PROSPECTORが初回のAI先導的実証実験成功例となった画面出力の一例<sup>19)</sup>で, Artificial Intelligence 応用開発分野における歴史的画像と言えよう。画像は濃集したフードタイプ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。PROSPECTOR 予測前の鉱床存在空白地帯に, PROSPECTOR出力画像が新鉱脈有望地帯を浮き彫りにし

表5 PROSPECTORの知識ベース (June, 1983) Duda & Reboh(1984)<sup>17)</sup>

Name	Description	Nodes	Rules
MSD	Massive Sulfide Deposit, Kuroko Type	39	34
MVTD	Mississippi-Valley-Type Lead-Zinc	28	20
PCDA	Near-Continental-Margin Porphyry Copper, Yerrington type	186	104
PCDB	Near-Continental-Margin Porphyry Copper, Cerro de Pasco Type	200	157
PCDC	Near-Continental-Margin Porphyry Copper, Island-Arc Type	159	116
KNSD	Komatiitic-Type Nickel Sulfide	127	72
WSSU	Western States Sandstone Uranium	200	148
ECSU	Epigenetic Carbonaceous Sandstone Uranium	197	153
LCU	Lacustrine Carbonaceous Uranium	164	111
PCDSS	Porphyry Copper Drilling Site Selection	133	60
VCPMDSS	Porphyry Molybdenum Drilling Site Selection, Vertical-Cylinder Type	57	42
HPMDSS	Porphyry Molybdenum Drilling Site Selection, Hood Type	76	48
Totals:	12 Prospect-Scale Models	1566	1065

た、出力画像はフードタイプ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PROSPECTOR画像をもとに継続的な試錐検証が行われた(図-3は試錐検証情報(1982)である<sup>18)</sup>。)その結果、PROSPECTORの威力への評価はますます高まった。今回の推定に際しては強いてその弱点をあげれば鉱床の拡がり完全に包絡していないことであろう。これは既存探査データ・知識情報を利用したこと起因していると判断される。

3.3 PROSPECTORの評価

新鉱物資源探査エキスパートシステムPROSPECTORは、医療診断支援ツールとしてのエキスパート

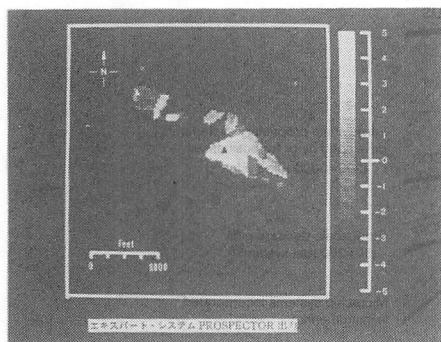


図-2 斑岩モリブデン鉱化帯探査におけるPROSPECTORのグラフィック画面出力例 Harmon & King (1985)<sup>19)</sup>

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的症例を正確に診断することのできる内科用CADUCEUS (Pittsburg 大学開発INTERNISTを改良発展, NIHのバックアップのもとに実用試験を行い, TSS応答速度ではやや遅いが専門利用にはほぼ完全なパフォーマンスを保証)などと同様、豊富なヒューリスティクス(Heuristics)を背景に、AI 3大資源の1つを満たし、さらに鉱物・エネルギー資源分野での時間尺度か

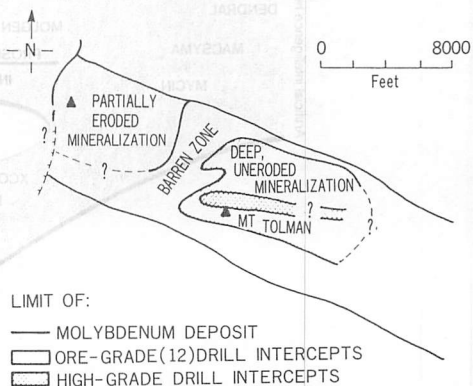


図-3 PROSPECTOR実証実験Washington 東部 Tolmanにおける試錐検証情報 Campbell, Hollister, Duda & Hart (1982)<sup>18)</sup>

らみてゆとりのある時間資源という第2のAI資源も兼ね備えているだけに、まさにAIテクノロジーの極めて自然な応用であろう。

米国でのAI応用研究開発は、MIT, SRI(逸材PROSPECTOR, 水資源問題コンサルタントシステムHYDRO開発), TI(AIリサーチシステム石油リザーバ開発用DRILLING ADVISOR(250ルール程度, Xerox 1100マシンワークステーション画像出力), 石油探査サイシ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(エキスパートシステムDIPMETER ADVISORは利用範囲が限定されるが実用テスト進行中, スタンフォード大学と共同開発石油試掘データ解析エキスパートシステムLOGINも試験中), 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。

PROSPECTORに象徴されるArtificial Intelligence 実証例は鉱物・エネルギー資源探査に対し素晴らしい将来を示唆したが, 情報プロセッサであるAIモデリングプログラムが不備であれば当然生成される言明, 解釈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高度ハードによるデータのフォローと高密度ハイソフトウェアに基づく質の高い探査知識情報によるモデルのリバイズを怠らないことが肝要であろう。PROSPECTORは, そのなかに情報知識獲得システムKASをフォロー, 知識更新機能を付加させ実行能力レベルアップを計っている。KASでは新知識情報を外形ではなく内容で修正できるネットワークエディタがその中核となって, 時機を得た知識源(Knowledge Source)利用が効果的に行える。成熟した資源探査エキスパートシステムではとくに高密度情報知識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, 重要な役割を果す。もろくない知識ベース作成と入出力フォーマットに関しても現在未検討の余地が多々あり, 次世代に向けたこの揺籃期にしかと育むために, なお一層着実地道な研究開発推進が望まれよう。

4. 資源探査 Artificial Intelligenceの発展と課題

“Artificial intelligence modeling programs will have a significant impact on future mineral exploration.”, Babcock(1984), Mining Engineering, Vol.36, No.12<sup>22)</sup>や, Science(1982)に掲載した論文を引用するまでもなく, 将来の新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツールとしてのArtificial Intelligence(AI人工知能)研究開発は, PROSPECT

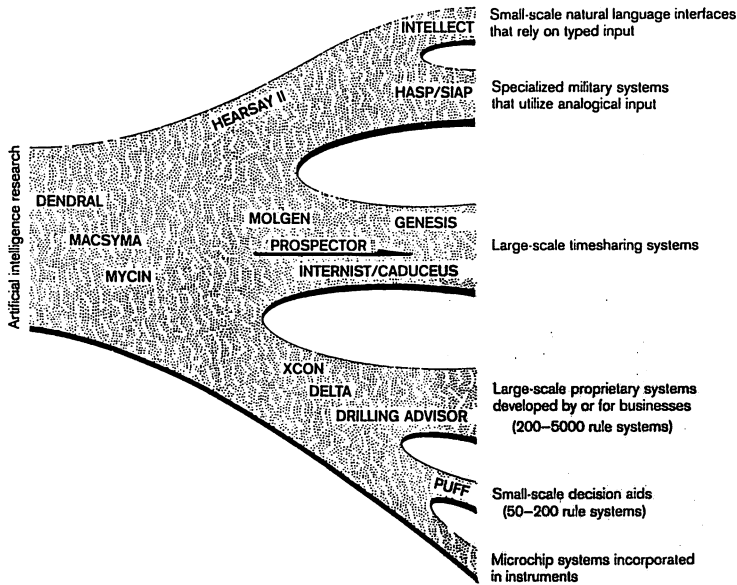


図-4 現存する米国知識エキスパートシステムによる Artificial Intelligence 応用開発進化の予測と PROSPECTORの位置づけ Harmon & King (1985)<sup>19)</sup>



表6 新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツール・システム Artificial Intelligence環境の1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

ORの成功をふまえて、国際的にもそのニューアクティビティが急速に高まる気配を見せ始めてきている。すでに USGSでは、次世代新・資源探査支援ツール Artificial Intelligenceとしてモデル数60のmu P R OSPECTORを開発、実用試験を重ねパフォーマンスの向上に努めている。先進AI進展は極めて急加速である。それゆえ、その果す役割の典型的な特徴と課題となる焦点をよく認識しておく必要がある。紙面の関係で省略は既述の文献2), 別の機会にゆずるとして、ここではAI進展方向と近未来AI環境についてのみ、簡単に触れておきたい。図-4は現存する米国知識エキスパートシステムによる Artificial Intelligence 応用開発進化の予測を示したもので、その進展の前兆的波頭の到来が1986~7年頃、本格的な波頭の到来が1992~6年頃と予測されているが、現実はこちらをはるかに上回る展開をみせるであろう。表6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・資源探査支援ツール Artificial Intelligence 環境の1例を示したものである。

## 5. おわりに

地球外未知資源への探求の萌芽時代に入った現代ではあるが、なお数知れぬ埋れた地球内未知資源に対して、未来を拓く新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツールとして今後の一つのキーアクティビティとなりつつある資源探査 Artificial Intelligenceについて、AI先導的実証例の鉱物資源探査エキスパートシステム PROSPECTORを中心に、21世紀を迎えんとする現代コンピュータ研究開発に裏打ちされた環境を

ふまえてその国際的資源探査技術レベルおよび周辺の説明を行った。米国においては、Boem(1976)<sup>26)</sup>が既に予測していた道を歩んできたように、ハイクオリティソフトウェアの果す役割は先進技術分野で急伸の過程を辿っている。AI志向への傾斜が強まる一方であろう。日本においても、現代経済低成長期に必然的に起きたソフト志向からその成熟した高級なソフトウェア文化の上にもまた新しいハード志向へと、流れは繰り返し進展していくのであろうが、米国とのタイムラグを計算に入れたとしても、超高速ベクトルプロセッサやAIテクノロジー時代を背景として天然資源エネルギー分野におけるソフトウェア新知識情報の蓄積も極めて重要度の高い国家的事業の1つとして扱えられるであろう。ただ、いかなる先端あるいは先進科学技術の進歩があろうともハードウェアやソフトウェアの進歩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、自然への畏怖の念は断じて忘れてはならない。

2001: A SPACE ODESSEY (1968)に近年の技術革命は20年の期間をおいて起るようであるとした Arthur C. Clark (1982)は、2010: ODESSEY TWO「2010年宇宙の旅」を著わした。Artificial Intelligenceの未来像とも言うべき膨大な情報知識の宝庫である HAL9000 (Heuristically-programmed ALgorithmic computer)のような人類支援未来コンピュータがありふれたものになるよりずっと以前に AI、とりわけここに述べてきた新しい資源探査支援 Artificial Intelligenceが経済性のみではない過去と未来を少し異なる観点から見直す端緒となるような機

会を与え、その先進的な貢献もそう遠くない先にするであろうことを付記して、本解説を終らせて頂く。もとより、本文は決して十分なものではなく、説明を省いたところは多い。ただ、このような新しい鉱物・エネルギー資源探査支援ツールを含めた新しい資源探査の今後の在り方についての議論と研究がより活発化する一因となることを期待している。

### 参 考 文 献

- 1) 菅野強; 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(1985), 1~14.
- 2) 菅野強; 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 (1985), 6~15.
- 3) USGS; United States Geological Survey Yearbook (1985), 1~121.
- 4) Emerson, M.E., Ivosevic, S.W.; Current Approach to US Minerals Exploration, Mining Eng.(1984), 345~349.
- 5) MMAJ; 鉱物資源探査技術開発調査報告書, 資料(1985) 金属鉱業事業団, 14~17.
- 6) Palacky, G.J.; Tutorial: Research, Applications and Publications in Electrical and Electromagnetic Methods, Geophysical Prospecting(1983), 861~872.
- 7) SEG; Classics Issue, Geophysics, Vol.50, No.11 Nov.(1985), Society of Exploration Geophysicists, 1797~2277.
- 8) Chen, S.S.; Large-Scale and High-Speed Multi-processor System for Scientific Applications: CR AYX-MP Seives, High-Speed Computation(1984), Springer-Verlag Berlin, 57~67.
- 9) 菅野強; 鉱山評価または探鉱計画への電気探査の利用について, 探査技術を利用する新しい鉱山評価, 地下資源関係学会分科研究会資料(1982), 7~11.
- 10) 菅野強; 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(1984), 1166~1167.
- 11) JIPDEC: 第5世代のコンピュータ・研究開発提案書 (1981), 日本情報処理開発協会, 1~28.
- 12) Winston, P.H.(長尾真, 白井良明訳): 人工知能(1980), 培風館, 1~276.
- 13) Hollister, V.F., Duda, R.O.; Evaluation of Porphyry Molybdenum Type Deposits by the PROSPECTOR Artificial Intelligence Program, SEG Las Vegas (1983), Expanded Abstracts of the Tech. Prog., 226.
- 14) Payre, X. et al; DIAPASON, A Tool to Optimize Marine Seismic Surveys, EAEG Tech. Prog(1985), 144~145.
- 15) Waterman, D.A.; PROSPECTOR: An Expert System at Work, A Guide to Expert Systems(1986), Addison-Wesley P.C., 49~60.
- 16) Barr, A. Feigenbaum, E.A.; The Handbook of Artificial Intelligence Vol.II (1982), William Kaufmann, Inc., Los Altos., 1~403.
- 17) Duda, R.O. and Reboh, R.; AI and Decision Making: The PROSPECTOR Experience, Artificial Intelligence Applications for Business(1984), 111~147.
- 18) Campbell, A.N., Hollister, V.F., Duda, R.O. and Hart, P.E.; Recognition of a Hidden Mineral Deposit by an Artificial Intelligence Program, Science, Vol.217, Sept.(1982), 927~929.
- 19) Harmon, P., King, D; Expert Systems: Artificial Intelligence in Business (1985), John Wiley & Sons Inc., 1~283.
- 20) A McGraw-Hill Publication; Artificial Intelligence is Here, Business Week International Edition, No.28 50~180, July(1984), 52~60.
- 21) Alexander, T.; Why Computers Can't Outthink the Experts, Fortune International, Aug. 20(1984), 99~108.
- 22) Babcock, J.W.; Introduction to Geologic Ore Deposit Modeling, Mining Eng., Vol.36, Dec.(1984), 1631~1636.
- 23) Holtz, H.; Computer Work Stations (1985), Chapman & Hall Ltd. London, 1~302.
- 24) 郵政省ネットワーク化推進懇談会編; 情報通信ネットワークその展開と戦略 (1985), オーム社, 1~266.
- 25) EAEG; Inmarsat Deal Finalised, FIRST BREAK, Vol.3, No.6 (1985), European Association of Exploration Geophysicists, 2.
- 26) Boem, B.W.; Software Engineering, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-25 (1976), 1266~1241.

