

# 究極の地熱資源量評価

大久保泰邦<sup>1)</sup>・村田泰章<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

表題に“究極の”という形容を付けたのは、誇張もあるが、ここで一番述べたい著者らの主張も含まれている。資源量を算出するためには地下の様子を3次元的に定量的に知る必要がある。しかし、複雑な地下を単純な数式や有限のデータで記述することはできない。そこで、有限のデータと有限の知識で演繹的に地下の様子を推定することを試みる。この時に資源量は確率や期待値で与えられる。資源量の値が正しい確率は、データ量や知識が少なれば小さいであろう。データ量と知識が増加すれば正解率も増加するが、データを管理するシステムと、知識を有機的に結びつけるシステムが必要になる。前者はデータベースシステムであり、後者はエキスパートシステムである。2つのシステムを1つにした資源量評価システムが巨大になれば資源に係わるものばかりでなく、さまざまな地下の様子を記述することができる。すなわち、データベース+エキスパートシステムは地球科学の諸問題を演繹的に推定する究極のシステムであると主張する。

4章では日本地熱学会誌に掲載された「地熱資源量評価の新しい試み—八甲田地熱地域における資源量評価—」(大久保他, 1990)に示されているおよその考え方について述べた。本稿ではその論文にもり込めなかった内容を加えて、地熱資源量評価の新しい試みについて述べる。

## 2. 地熱資源量とは?

日本の地熱資源評価作業はこれまで何度か行われている。いくつかの例を上げれば、地質調査所による1957年評価(地質調査所, 1957)、日本地熱調査会による1970年評価(日本地熱調査会, 1970)、産業技術審議会地熱分科会による1974年評価(産業技術審議会エネルギー技術特別部会, 1974)、地質調査所による1977評価(通産省サンシャイン計

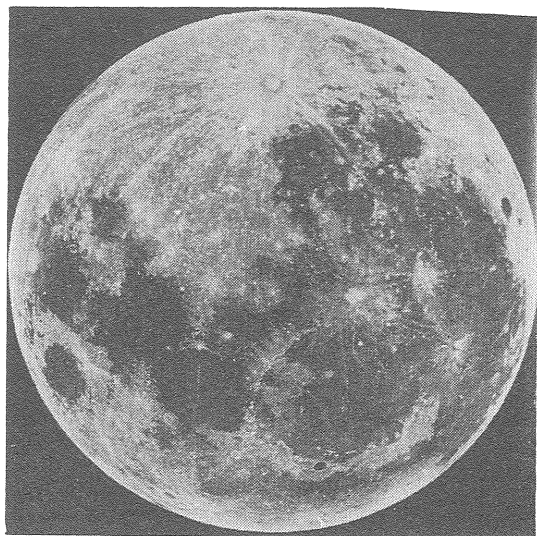
画推進本部・地質調査所, 1977)、金原他(1986)による1984年評価、宮崎他(1986, 1987)による1985年評価である。これらの資源評価の目的は日本全土を対象として各地熱地帯の資源量を算出し、最終的には日本の総地熱資源量を算出するものであった。

行政の立場からは、これらの資源量とは、おそらく地熱資源開発の有効度の指標として行政に反映させる重要な資料となるものであろう。上述の資源量評価ではさまざまな値の資源量を算出している。答えが異なるのは、利用したデータ、前提となる仮定、資源量の定義、評価手法などが異なるためと考えられる。とにもかくにもこれらの数字は当時の地熱資源開発政策に大きな影響を与えたはずである。言い換えればこれらの数字は行政サイドの資源量であるといえる。

ところで地熱開発会社(以下ディベロッパと呼ぶことにする)にとって資源量とは何か。ディベロッパにとって日本全土でいくら地熱資源量があるといっても何の役に立たないであろう。端的に言えば、どこそこにボーリングを何メートル掘れば、何リットルの熱水あるいは蒸気が出てくるかということが資源量だと言われることであろう。地熱発電所設立に伴う初期投資は比較的大額で、その反面この頃石油が安くなったために、元を取り返すまでの年数が増えてしまった。そのため、開発前に資源量だけでなく、安定した発電量をどのくらいのコストで何年間維持できるかということも重要になってきた。ディベロッパにとってはこれも含めて資源量であるといえる。この様に行政サイドの資源量の考え方とディベロッパサイドの資源量の考え方には大きなギャップがある中で、研究サイドでは何をすべきか。著者らはこう考える。“資源量”はどちらかに意味がありどちらかに意味がないものであるとしても、そのもととなる“データ”は両者にとって意味がある。そこで資源量評価のもとになったデータは明確に記述すべきである。また評価手法はそのままだこにでも適用できるわけではないが、考え

キーワード: 地熱, 資源量, モンテカルロ法

1) 地質調査所地殻物理部  
2) “ 地質情報センター



第1図 月はすでに死んだ星である(上)が、地球は現在も生きている(下)。この事が地球内部を複雑にし、われわれを悩ませる原因の一つとなっている。

方は利用できる。そこで評価手法についても明確に記述すべきであると考え。すなわち、ここでもう一度著者らの考えであることを強調するが、研究サイドにとって資源量評価における資源量の値よりもむしろ、そのもととなるデータとアプローチの仕方が重要になると考える。

### 3. 資源量評価は天気予報

著者らは資源量評価は天気予報と同じであると考え

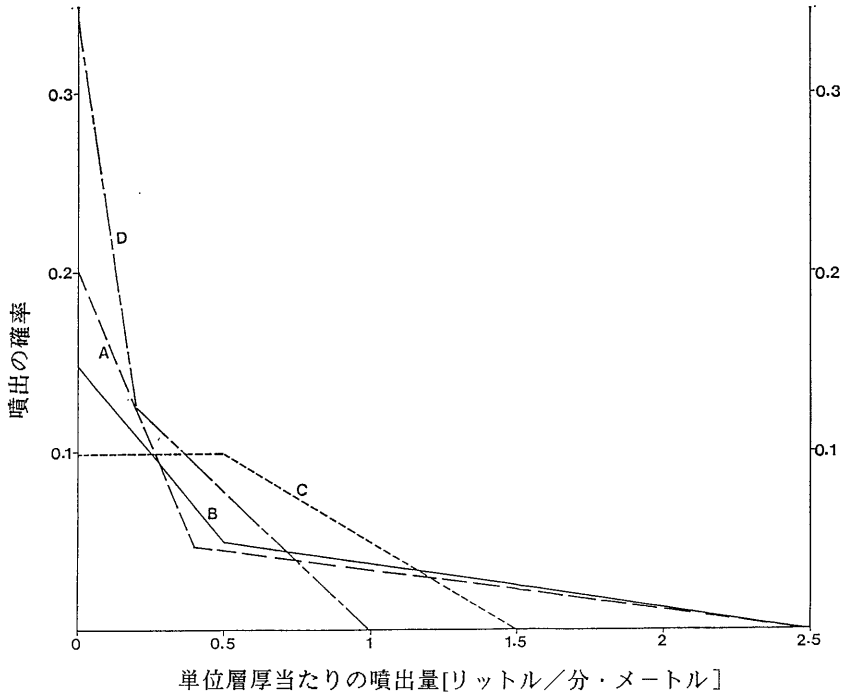
る。この理由を以下に述べることにする。

「月や他の惑星のことはよくわかっていても、地下のことはわからない。」と良くいわれる。なぜか？天体の動きや月の構造は比較的単純で、そのためいくつかの数式で近似することができるが、地球はそうはいかないからである。おそらく天体は真空中を動く単純なモデルで近似でき、月はマントル対流をその程多くは繰り返すことなくすでに死んだ星であるが、地球は今もマントル対流を繰り返す生きた星であるからだろう(第1図)。もしかしたら月の温度構造は  $T = f(z)$  ( $T$ は温度,  $z$ は深度,  $f$ は単純な関数) で表わせるかもしれない。ところが地球は違う。地下の温度を単純な数式で記述することはできず、極端にいえば  $(x, y, z)$  で与えられる3次元の全ての点を観測値で表わさねばならないであろう。もし温度がダイナミックに変動するのであれば時間の項が必要になる。すなわち地球を記述しようとすれば無限の観測データが必要になる。

科学のアプローチの仕方は、特殊な事象を観測し、それを一般化する帰納法である。しかし、地球科学ではほとんどが特殊な事象であって一般的な法則が余りないため、帰納法的アプローチには限界があるともいえる。特に資源探査の様に地殻中ごく小規模の現象を相手にする場合は帰納法的アプローチは無力であるといえる。

さて、天気予報とは一体何か。昨日の天気は「晴の確率80%」とか、「雨の確率80%だから傘をお持ち下さい。」といった具合である。大気の動きは、気圧、大気温度、海流、海水温度、日照量、人間活動などさまざまな要素で変化し、複雑な動きをする。地下の複雑さ程ではないかもしれないが、わずかな数式で全地球の全ての大気の動きを記述することはできない。天気予報では人工衛星のデータや気圧のデータなどを蓄積し、時々刻々変わる天気を観測して経験を積み、データと経験から将来の天気を予想する。これは言わば演繹的なアプローチである。予想した天気は100%正しい訳ではないので、確率で与えられる。

資源探査においても同様に、データを収集し有望だと判断した場所にボーリングを行い、経験を積んで次の有望地域を捜すというものである。そこで有望地域なるものは確率と期待値で表わすことができるはずである。しかし、天気予報と決定的に異なるのは、天気予報では毎日の予報の成否がすぐにはわかってしまい、そのため経験が非常に多いのに対し、資源探査ではそれに比べ経験が少ないということである。もちろん天気予報の場合も十年以上の周期の気象の変化についての経験は少ないであろうから、数10年後の長期予報の当たる確率は小さい値になるであろう。資源探査の場合、ボーリングによっ



第2図 噴出量モデル。A, B, C, Dの4層に分けて、それぞれの噴出量の確率を定義している。例えばA層に関して単位層厚当たりの噴出量が0.5リットル/分・メートルである確率は約4.5%である。

て資源が当たる確率は10%とか5%とか非常に小さい値になるであろう。つまり「当たらない。」といった方が間違いないのである。この確率に引き上げるのはデータを蓄積し、経験を積むことである。

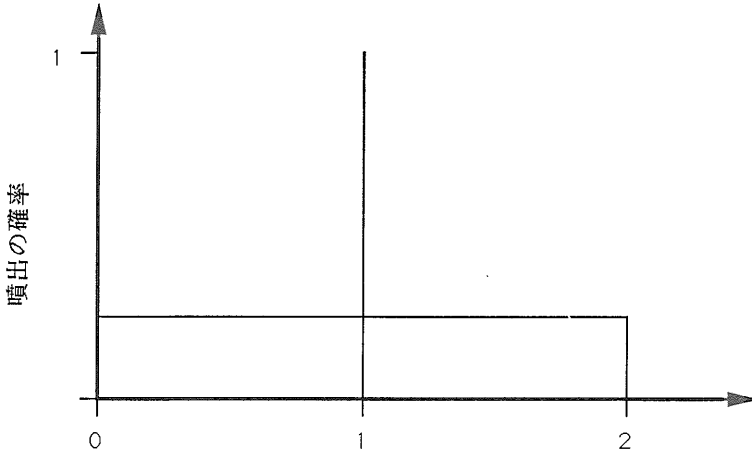
著者らが主張する資源量評価とは、データと経験から資源量を演繹的に推定し、確率あるいは期待値で表わそうとするものである。この考え方で行く資源量評価システムが進化していけば、データ部分がデータベースとなり、経験部がエキスパートシステムとなろう。すなわち著者らの目的とする資源量評価システムはデータベースを含んだエキスパートシステムである。

#### 4. モンテカルロ法による資源量評価

サイコロ賭博では、賭け率とかサイコロの癖、胴元の癖などいくつもの要素が絡んでいる。それぞれの要素が確率分布として定量的に分かっていても期待値を計算するのは厄介である。モンテカルロ法は頭の中で何度かさいころを振ってみて(乱数を発生させて)儲かった、損をしたを繰り返して、いい加減のところまでやめて儲かった、あるいは損をした額から期待値を推定する方法である。資源探査の場合サイコロを振ることはボーリングを掘ることに相当する。資源量を決める要素とそれら

の要素の関係の仕方、要素の確率分布がわかれば、モンテカルロ法によってボーリングを実際に掘らなくても確率や期待値はわかる。

ここで地熱資源量評価の新しい試みについて説明する。対象地域は八甲田地熱地域である。第2図は地熱の3要素である熱、水、構造のうちの水の情報である噴出量モデルである。A, B, C, Dの4つの層に分けて、それぞれの層の噴出量モデルを作成している。単位層厚当たりの噴出量0.1リットル/分・メートルきざみで確率を定義してあり、噴出量の軸方向に確率を積分すると1となる。このモデルは八甲田地熱地域の17本のボーリングの逸水データより逸水量モデルを作成し、過去の噴出試験結果から逸水量：噴出量は1：1のオーダーであることをもとに作成した。ここで4つの層とは、A層が溶岩類、B層が堆積岩類、C層が貫入岩類、D層が主に先第三系である。噴出量の確率分布がそれぞれの層で異なるのは、著者らの保有する逸水データが示唆するところによる。読者の多くが、わずかに17本の逸水データから噴出量モデルを推定することには無理があるといわれていることであろう。その通りである。ここでは保有しているデータから正直にモデルを作成した。現在の段階ではこれが精一杯である。データが増えればモデルが変わるかもしれないし、4つの層では差が無く、別の区分の仕方が



単位層厚当たりの噴出量[リットル/分・メートル]

第3図 単位層厚当たりの噴出量1リットル/分・メートルである場合と、0～2リットル/分・メートルの間の確率が一定の場合の噴出量モデル。噴出量の期待値はどちらも1リットル/分・メートルであるが、前者の場合1リットル/分・メートルの確率は100%，後者の場合、1リットル/分・メートル以上の噴出量が得られる確率は50%である。

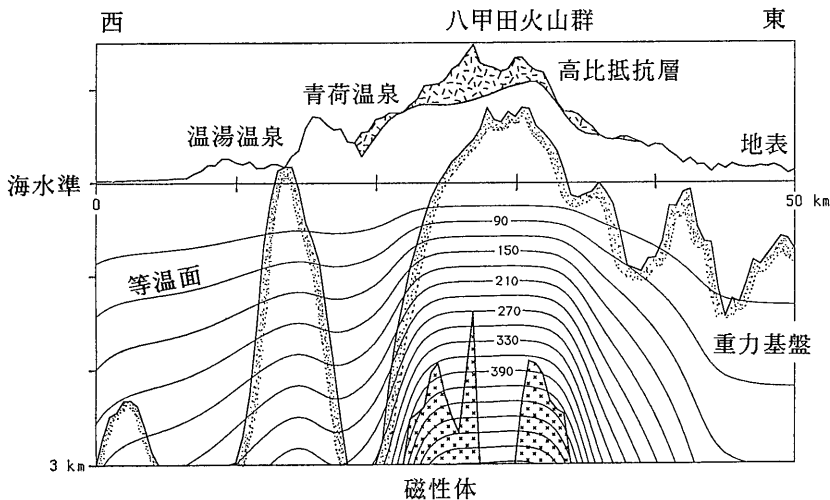
良いのかも知れない。

ここでボーリングが成功する確率を考えてみよう。第3図に示すようにA層が1リットル/分・メートルの噴出量である確率100%である場合と、0から2リットル/分・メートルまで確率が等しい場合を比較する。前者の場合、噴出量の期待値は当然1リットル/分・メートルである。また後者の場合も期待値は1リットル/分・メートルである。どこが違うかという点、前者の場合1リットル/分・メートルである確率は100%であるのに対し、後者は1リットル/分・メートル以上である確率は50%である。この事からボーリングが成功するかしないかの確率は、資源量を決定する要素の確率分布に依存す

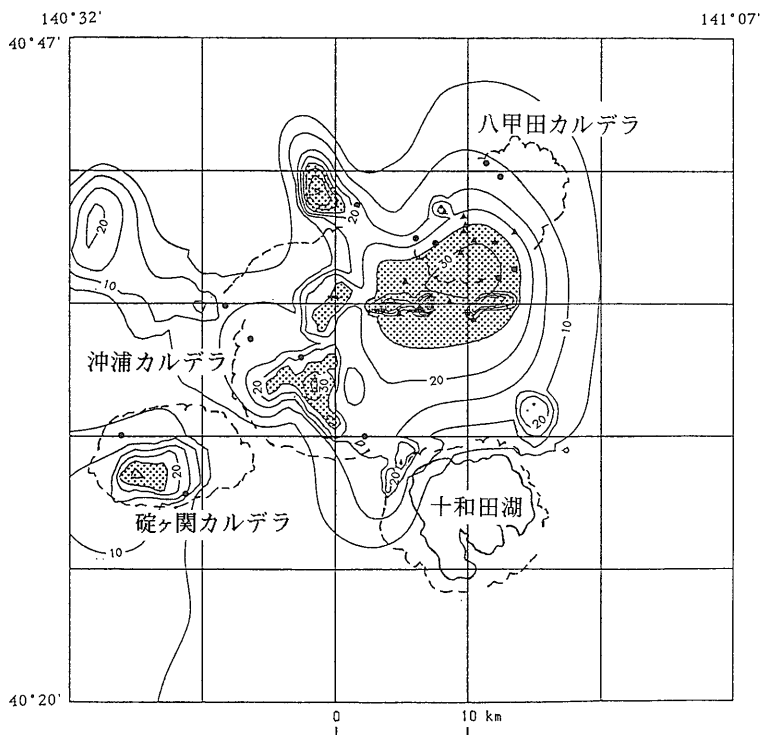
ることがわかる。成功する確率を上げるためには、要素の確率分布が狭い範囲に分布する、あるいは一義的に決められれば良い。データが増加するに従い、要素の確率分布が狭くなったり、新しい要素が発見されるかもしれない。

第4図は地熱の3要素のうち熱と構造に関する情報を断面図に示したものである。熱に関しては99孔のボーリングデータより、構造に関してはMT法、重力、磁気データの解析より求めたものである。これらのデータと前述の噴出量モデルがデータベースに相当する。

以上のデータより下式に示す単純な式で発電量を計算した。



第4図 熱分布モデルと構造モデルの東西断面図。熱分布モデルは99孔の温度検層データより、構造モデルは、MT法、重力、磁気データの解析より求めた。等温面の単位は℃。



第5図  
高温熱水対流型資源の発電量の期待値分布図。150℃以上の温度を有する熱水を発電に変換する場合の資源を高温熱水対流型資源と定義した。コンタの単位は100kWで、間隔は500kWである。八甲田火山群周辺で最高値5,000kW以上の値を示した。黒三角は八甲田火山群の山頂の、黒丸は温泉の位置を示す。

$$\begin{aligned} \text{発電量}(x, y) = & \text{発電効率} \times \\ & \{ (\text{温度勾配}(x, y) \times \text{A層の中心深度}(x, y) \\ & - \text{基準温度}) \\ & \times (\text{A層の層厚}(x, y) \times \text{A層の単位層厚当りの噴出量(乱数)}) \\ & + (\text{温度勾配}(x, y) \times \text{B層の中心深度}(x, y) \dots \\ & + \dots \\ & + \dots \text{D層の単位層厚当りの噴出量(乱数)} \} \end{aligned}$$

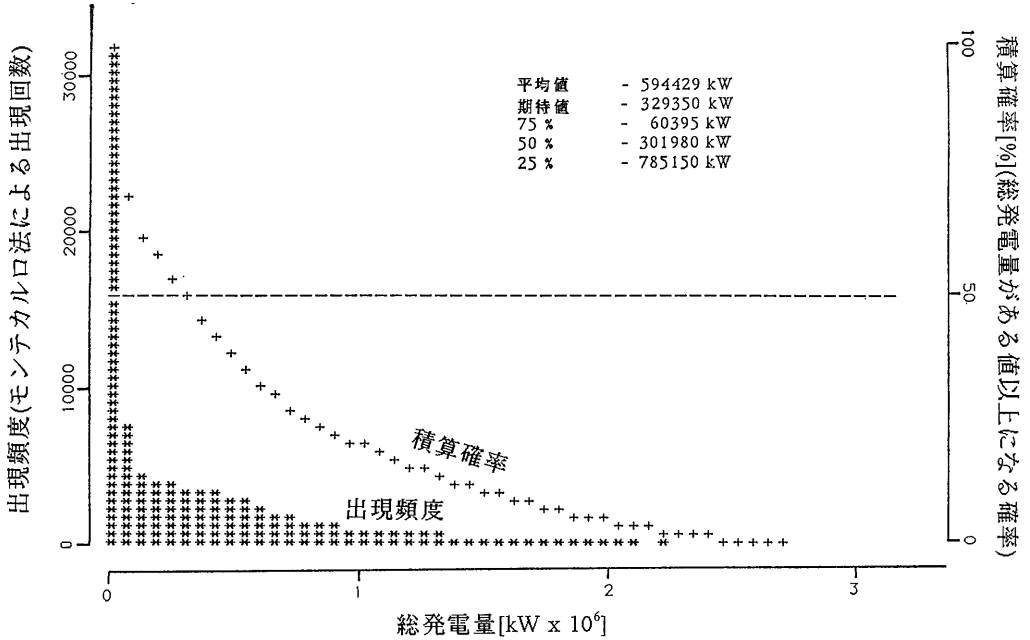
ここで発電量、温度勾配、中心深度、層厚の後に付いている  $(x, y)$  は、ある地表面上の点を表わしている。そこでここで示した発電量とは、ある点にボーリングを1本掘ったときの発電量である。単位層厚当りの噴出量は確率分布で与えられているので乱数を発生させ、モンテカルロ法によって求めることになる。発電量は乱数を発生させた回数だけ求められる。いくつもの発電量から期待値や確率を求めることができる。

第5図は各点で求めた10万個の発電量から期待値を求め、その水平分布を示したものである。2,500kW以上の期待値を示す領域は、八甲田火山群、沖浦カルデラなど数カ所となった。先にも述べた通り、期待値がわかってもボーリングの成功の確率はわからない。そこでモンテカルロ法で得られた10万個の発電量の分布を知る必要がある。第6図は2,500kW以上の発電量を示した点の値

の総和をとり、それぞれの総発電量の出現した回数を表したものである。データ間隔は1km四方である。すなわち1km<sup>2</sup>に1本の井戸を全地点で掘ったときの総資源量の確率分布を示すといってもよい。この図に従えば、八甲田地熱地域は50%の確率で総資源量30万kWとなった。もし1本の井戸をどこか  $(x_1, y_1)$  という点だとする)に掘削する場合の成功の確率を知りたい場合は、第6図の代わりに  $(\text{発電量}(x_1, y_1))$  の確率分布を見るべきである。

### 5. 答えは正しいか？（結語にかえて）

答えは正しいか否かは、データの質・量と、資源量を決定する要素の良否でさまる。八甲田地熱地域の資源量評価の場合、正直に言えばデータの量が少なくやや無理がある。噴出量モデルを決めたデータは全ての人が納得いただける程十分なものではない。また、熱分布のモデルと構造のモデルにもややごまかしがある。なぜなら、熱分布や構造も有限データから推定するのであるから、確率で定義されるべきである。しかし、推定されたモデルがどのくらいの誤差を含んでいるかという経験がほとんどないため、確率で与えたくても与えられないのである。ということは、データや経験が増加すれば答えは変



第6図 2,500kW以上の発電量を示す値の総和の出現頻度と積算確率。八甲田地熱地域全体に1km<sup>2</sup>に1本の割合でボーリングを掘ったときの発電量の総和と考えることができる。この期待値は約33万kWである。また積算確率によれば33万kW以上の発電量が得られる確率は45%である。

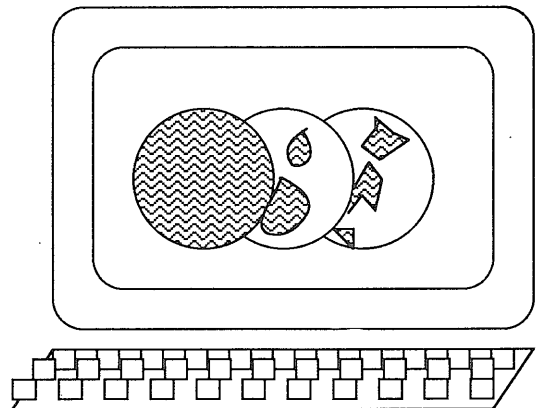
わるのである。そこで、「答は正しいか。」という問いにたいしては「現在著者らが保有しているデータと経験からは正しい。」という答になる。

この様な問いかけはおそらく地球科学のあらゆる分野でなされるであろう。地震予知も資源量評価と同じであると思う。天気予報では明日の雨の確率10%、資源量評価では資源が見つかる可能性10%、地震予知では1カ月以内に地震が起きる可能性10%ということになる。しかし、地震予知の場合、世間に与える影響が余りにも大きくて、確率100%あるいはそれに近い数字でないと世間は許してくれないかもしれない。

ここで示した資源量評価法では、データを定量化し、客観化している。資源量を算出する方法も比較的簡単なアルゴリズムである。そのためデータやアルゴリズムは他人から批判をうけることができ、データやアルゴリズムの修正や追加も容易である。データの修正、追加を繰り返しながら地球科学関係のデータを集大成することによってデータベースができる。またエキスパートシステムを1人の専門家では処理できない程の多種多様な知識の処理と、情報処理を行うものであるとすれば、現在まで得られたあるいは将来得られるであろう知識や経験をまとめ上げることによってエキスパートシステムができて上げると考える。2つのシステムを1つにしたシステム

は地球科学の諸問題を演繹的に確率で予想するシステムとなろう(第7図)。

D・H・メドゥズ他著の「成長の限界」は、人間活動を中心とした地球全体の成長の将来予測に関して1972年に書かれたものである。その中では数10個の要素の因果関係を数式化し、データを定量化して地球全体の様子を



第7図 パソコンに入った地球。データが経験が少ないために初めは地球はぼけているが、データが増え、経験が積みまれ、演繹的に予想することによって地球の姿が鮮明になる。

シミュレーションしている。感心させられたのは1989年頃の地球の予想はほとんど合っているということである。地下の事は複雑でまだまだここまではいかないかもしれないが努力する価値はあると思う。

#### 参考文献

地質調査所 (1957) 日本鉱産誌, VI-a, 水および地熱。207pp.  
金原啓司・阪口圭一・比留川貴・小川健三・西 祐司・山口昇一  
(1986) 透水性地域の精密容積算定手法の研究 (昭和59年度)。昭和59年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書  
深部地熱資源探査技術に関する研究, 287-309。  
メドウズ, D. H.・メドウズ, D. L., ラーンダズ, J.・ベ  
アラランズ三世, W. W. (1972) 成長の限界-ローマ・クラブ  
「人類の危機」レポート-大来佐武郎監訳, 203pp., ダイアモ  
ンド社。  
宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎

(1986) 全国規模地熱資源評価の研究。昭和59・60年度サン  
シャイン計画研究開発成果中間報告書国土地熱資源 評  
価技術に関する研究, 285-297。  
宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎  
(1987) 我が国における地熱資源量評価。物理探査学会第  
76回学術講演会講演論文集, 264-269。  
日本地熱調査会 (1970) 日本の地熱資源。地熱, 別冊, No. 3,  
1-198。  
大久保泰邦・村田泰章・小川康雄・高倉伸一・津 宏治 (1990)  
地熱資源量評価の新しい試み 一八甲田地熱地域における資  
源量評価一。日本地熱学会誌, 12, 23-48。  
産業技術審議会エネルギー技術特別部会 (1974) 新エネルギー  
技術開発の進め方について (分科会報告)。1-410。  
通産省サンシャイン計画推進本部・地質調査所 (1977) 全国地  
熱基礎調査報告書 (昭和48~50年度)。209pp., 日本産業技  
術振興協会。

<受付: 1989年10月9日>

### 新刊紹介

## 現生および化石の巣穴—生痕研究序説—

田中啓策<sup>1)</sup>

1989年7月26日発行 131頁

著者 生痕研究グループ

発行所 地学団体研究会

〒171 東京都豊島区南池袋1-8-7 会津天宝物  
ル202 電話 (03) 983-3378

定価 2,500円 (会員) 2,800円 (非会員) 送料 260円

最近, 地学団体研究会から, 専報第35号として「現生  
および化石の巣穴—生痕研究序説—」が刊行された。

本書は, 大森昌衛・歌代動両氏をプロモーターとする  
生痕研究グループが永年蓄積してきた研究成果をとりま  
とめたものである。その構成としては, まず生痕の調査  
研究方法について解説し, 次にで現生の甲殻類の巣穴,  
地層にみられる巣穴の化石を中心に記載と考察を行い,  
最後に今後の課題と問題点にもふれている。

ところで「<sup>せいこん</sup>生痕」という言葉はあまりポピュラーでは  
ない。このものは, 生物の生命・生活現象として堆積物  
の上や中に残されたこん跡であり, それはしばしば化石  
として地層の中に保存された動物の足跡・はい跡, 捕食  
・排せつなど食性に関するこん跡などである。生痕の化  
石は, 地層から産する多彩な化石の中ではいたって見劣  
りするものではあるが, 現地性のためにこれを含む地層  
の堆積環境の要因を解析するのに有効である。

本書は5章からなっている。まず, 第1章「はじめ  
に」では, 生痕研究の現状, 著者である生痕研究グル  
ープによる研究の経緯が紹介されている。

第2章「生痕の調査研究方法」では, とくに福島県相  
馬市松川浦の潮間帯 (干がた) に生息する甲殻類の巣穴を  
例として, 現生生痕の具体的な研究方法 (観察・記載・分  
類) を解説し, また巣穴の石膏標本の作製方法にもふれ  
ている。

第3章「巣穴を作る甲殻類16種の生態と生痕」では,  
甲殻類十脚目 (エビ類・カニ類) について, 松川浦産の11

1) 元所員: 〒192 東京都八王子市北野台3-26-10

種, 沖縄県久米島・石垣島産の5種で計16種を扱ってい  
る。各種の特徴と個体変異, 生息環境 (地形・水質・底質)  
分布と個体群密度, 生態上の特徴とそれにかかわる生痕  
(とくに造巣活動と掘り出し痕, 摂食活動と摂食痕) 巣穴 (石  
膏標本) の形態的特徴について, 詳細な観察・記載にも  
とづく多彩な内容が盛り込まれている。

第4章「魚沼層群の生痕化石群」では, 新潟県下の  
鮮新—更新統魚沼層群から産する生痕化石群を代表する  
筒状の化石巣穴 (サンドパイプ, 砂管) について, 産状の  
記載と形態分類を試み, あわせて現生甲殻類その他の海  
生動物がつくる巣穴の形態や生態との比較, 堆積環境の  
推定に及んでいる。本章では, 前章に記した現生生痕の  
研究成果をふまえて, それを更に化石生痕へと適用・展  
開していった努力が読みとられ, このような試みによっ  
て本書は真骨頂を発揮している。最後に, 識別された7  
つのタイプの化石巣穴それぞれについて, 分類体系上の  
位置を考察し, 英文による記載・学名の提唱を行っている。

第5章「今後の課題と問題点」では, 研究素材 (対  
象とする動物・化石や環境など) の拡充, 研究方法 (標本採  
集・観察・記載など) の開発それぞれの必要性を強調して  
いる。

以上が本書を通読しての要約であるが, 現生と化石の  
生痕を統一的にとらえようとする著者の一貫した主張が  
うかがわれ, また随所にみられる精緻な記述内容は団体  
研究ならではの成果と感じさせられる。ここで紹介した  
生痕研究の事例は, 内容からも, また副題をつけた著者  
の意図からしても, 現生・化石を問わず生痕を研究する  
にあたって指針となり得るものと評価される。生痕のみ  
ならず層序学・堆積学の研究を志し, またたずさわる者  
にとって有用であり, 一読をおすすめしたい。

本書は, 元来, 予約者頒布であるが, 直接地学団体研  
究会から購入できる。