日本の地熱資源の評価

小 川 克 郎（地質調査所）

小川克郎 1938年生れ.
地球物理学専攻. 特に地熱資源探査及び評価に関する研究の広汎な分野で活躍している. 当時地質調査所地殻熱部地殻熱物性課長.
現 地殻熱部長 理学博士.

きょうは日本における地熱資源の評価についてお話しするわけですが 地熱系の機構とか それをどう探鉱するかという技術 或はその資源の評価の技術についてはまだ非常に未熟であり 未発達なところが多いといえるかと思います.

したがって21世紀において地熱資源がエネルギー資源としてどのような役割りを果たすかというようなことについては まだまだわからないことが多いわけで私達も目下勉強中といえましょう. そこで今日は私達がいま勉強していること 特に将来の地熱資源に向けて 何を考え 何をやっているかというようなことをご紹介してみたいと思います.

また 地表に温泉 地獄 噴気といったさまざまな徴候があるところで探鉱をし 開発をしてきたという経緯があります. つまり温泉のような地表付近の情報に基づいて今までの資源評価がなされてきたということができます.

1980年代 あるいは今後10年 20年というスパンでは対象とする地熱資源はおそらく深くなっていくだろう—

1. 日本の地熱資源評価の現状

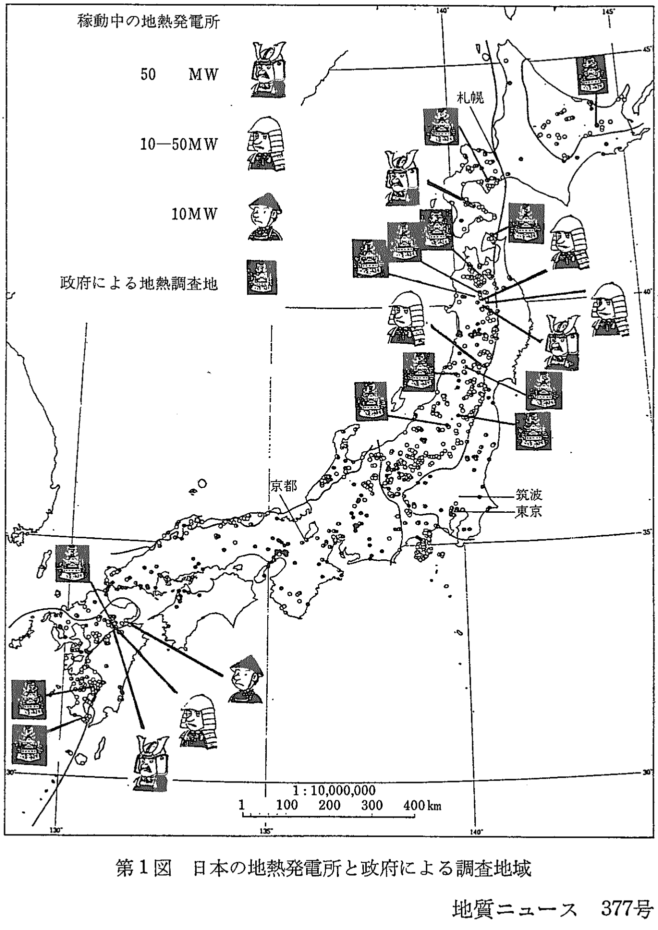
第1図は日本の現在稼動している地熱発電所を人間の顔のマークで示しています. 5万キロクラス 1万～5万キロクラス 1万キロ以下に分けてあります.

そのほかに城のマークは 日本の政府が現在さまざまな形で調査をしている地熱地域です. 大体十数カ所以上の地点で調査を行っております. 第1表は日本の発電量を示しています. トータルで約22万キロ 215メガワットというのが現状です.

1990年あるいは21世紀には これを10倍くらいにふやして 数百万キロワットの地熱発電にしたいというのがわれわれの希望であり 同時に日本政府の希望でもあります. それに向けて今われわれはさまざまな努力をしているわけです.

第2表は 日本の地熱の資源の状況を 1970年代までと 1980年代から21世紀に向けてという二つのカテゴリーに分けて 個条書きにしたものです.

まず1970年代までですが 従来の日本の地熱発電所を上のカテゴリーで分類しますと 比較的浅い（2kmよりも浅い）資源を利用しているといえます.



第1図 日本の地熱発電所と政府による調査地域

第1表　稼動中の地熱発電所

発電所名	県　名	発電施設容量(MW)	発電開始時期
松　川	岩　手	22.0	1966.10年月
大　岳	大　分	12.5	1967.10
大　沼	秋　田	10.0	1974. 6
鬼　首	宮　城	12.5	1975. 3
八丁原	大　分	55.0	1977. 6
葛根田	岩　手	50.0	1978. 5
杉乃井	大　分	3.0	1981. 8
森	北海道	50.0	1982.11

合計 215.0

第2表　日本の地熱資源　過去と将来

～1970年代	1980年代～
浅部（＜2km）資源	深部（＞2km）資源
強い地表徴候	弱～非地表徴候
地表情報に基づく資源評価	広域・深部情報に基づく資源評価
	1）全国地熱資源総合調査（1980～）
	2）豊肥プロジェクト（1978～）
	3）地熱情報データベースシステム（1980～）

——もちろん浅い所の開発も続けられるわけですが——と想像されます．

すなわち　地表徴候が弱い所　あるいはほとんどないような場所で地熱資源の開発が行われてゆくであろうといえます．

したがって資源評価も　主に広域かつ深い情報に基づいてなされなければならないという新しい状況が具体的に出て来ております．

こういう新しい状況においてわれわれは幾つかのことをやっていますけれども　ここでは三つのプロジェクトについてふれておきます．

一番目は Nation-Wide Geothermal Resources Survey 日本語では「全国地熱資源総合調査」といわれています．　これは広域かつ非常に深い所の情報を用いて資源評価をしようという目的で　1980年に始められたプロジェクトです．　実施は NEDO (New Energy Development Organization—新エネルギー総合開発機構）が担当しています．

二番目は豊肥プロジェクトです．　九州の真ん中の豊肥地域でやっている調査です．　従来発見されていない深部地熱資源が本当にあるのかどうかということ　あるとしたらどういう形態であるかというようなことを調べるための調査です．　これは日本中をやるというわけではなく一ケ所に腰を据えて詳細な調査をしているものです．

三番目はこういう多くの調査プロジェクトで入手される地熱情報を有効に利用する目的で1980年に着手した Geothermal Infomaton Database System（地熱情報データベースシステム）です．

このほかにもさまざまなプロジェクトがありますが　この三つのプロジェクトは　広域かつ深部の地熱資源をはっきりと意識して開始されました．

後で　全国地熱資源総合調査で得られたデータによる資源評価について述べますが　その前に　従来実施されてきた資源評価について簡単にレヴューをしておきます．

第3表は　温度　第四紀火山　放熱量といったわりあい浅いところの情報に基づいて日本でなされた資源評価を総括したものです．　1970年から77年にかけて　地熱調査会及び地質調査所でさまざまなアセスメントがされています．　ここでは資源量をメガワットE（発電量）で表現してあります．　4000万キロワットあるいは2000万キロワットといった比較的良く知られている．　数字はこの時出されたものです．

ここで用いられた循環水法　マグマ残存熱量法　変質帯面積法　放熱量法　包蔵水量法はいずれも何らかの地表の情報を用いた資源評価の方法であります．　これらがなされた時代には　広域・深部の地熱情報がほとんどなく　三次元的情報よりも二次元的情報に頼った評価がなされたということを強調しておきます．

地質調査所では1980年に最初の地熱資源評価図とも言える「日本地熱資源賦存地域分布図（1/200万)」を公表しましたが　これは特に温泉徴候や第四紀火山というような比較的浅い地表付近の情報に基づいて作られたものです（図省略)．　こういう情報を　常に新しい　より信頼性の高いものにかえていくことが　地質調査所等の国の機関の役割であると考えています．

第3表　日本における地熱資源評価

年度	対象地域数	対象面積 Km²	発電量 MWe	方　法	
1970 a		全日本	40,000	循環水量法	日本地熱調査会
1970 b		〃	20,000	マグマ残存熱量法	〃
1977 a	26	122	7,300	熱水変質面積法	地質調査所
1977 b	30	(10,000)	26,580	放熱量法	〃
1977 c	6	8,800	20,000	包蔵水量法	〃

2. 全国地熱資源総合調査に基づく資源評価

本調査は第Ⅰ期の1980年～1983年と1984年～1986年までの第Ⅱ期に分かれています．　第Ⅰ期については全国規模で日本列島全体をカバーする形で行われました．リモートセンシング法　キュリー点法及び重力法　それからデータベースがここにくっついているという形になっています．　第4表には　手法と地熱について　主にどういった情報を抽出したいかという目的が書いてあります．

1984年度から水地化学　火山岩年代測定　地熱地質　物理探査　特に比抵抗法と微小地震観測及び熱流量調査といった方法をつけ加えて　新たに――これは全国規模ではありませんけれども――日本の重要な地域について地表調査を進めています．

こうした調査の結果をまとめて資源評価図をつくっていく予定であります．

第2図は1980年から1983年に行われた全国地熱資源総合調査第1期の内容の概略を示したものであります．リモートセンシング　キュリー点　重力の三つの調査を主体にし　そのほかに　すでに非常に膨大な地下情報が蓄積されていますけれども　そういうものを加えて　地熱有望地域地熱資源基本図といったものをつくることが目的でした．　NEDO（新エネルギー総合開発機構）と地質調査所で協力して　サンシャイン計画のもとで進められました．

この三つの調査法は非常に限られたデータであって　これで十分な資源評価ができるわけではありません．

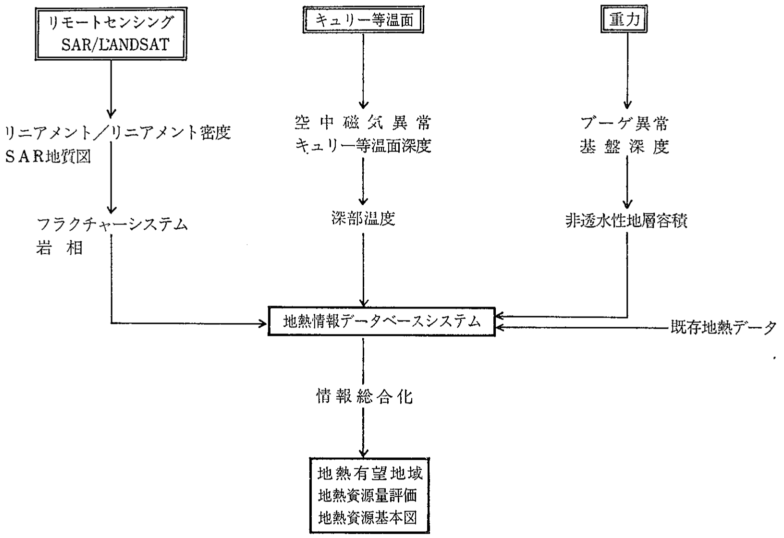
第4表　全国地熱資源総合調査における研究手法とその目的

第1次　1980—1983	
1）リモートセンシング（SAR, LANDSAT）	線構造
2）キュリー等温面	深部温度
3）重　力	基盤深度
4）地熱情報データベース	データの有効利用
第2次　1984—1986	
5）水地化学	貯留層温度・性質
6）火山岩年代	火山岩の熱評価
7）地熱地質	地質構造
8）比抵抗（MT法）	貯留層領域
9）微小地表	〃
10）熱流量	熱収支
11）精密重力	基盤深度
12）地熱情報データベース（継続）	データの有効利用

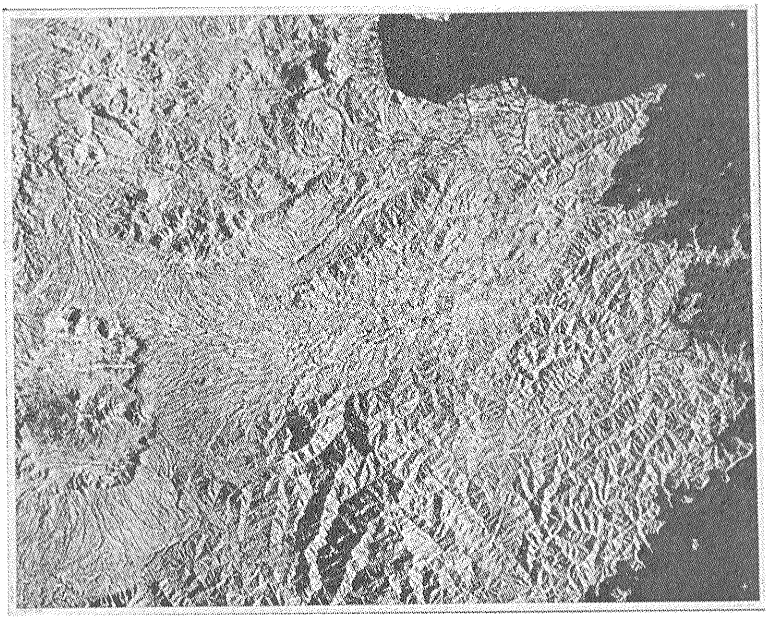
しかしながら　資源評価というのは常にその時点でのデータを最大限に使ってやっていくということが重要で　データが足りないからできないということではありません．　この三つの限られたデータから何とかして結果を出してゆこうという努力を NEDO と地質調査所でしております．

全国地熱資源総合調査の結果を　九州を一つの例としてお話ししてみたいと思います．　九州には　阿蘇　霧島　桜島　雲仙といった活動的な火山があります．

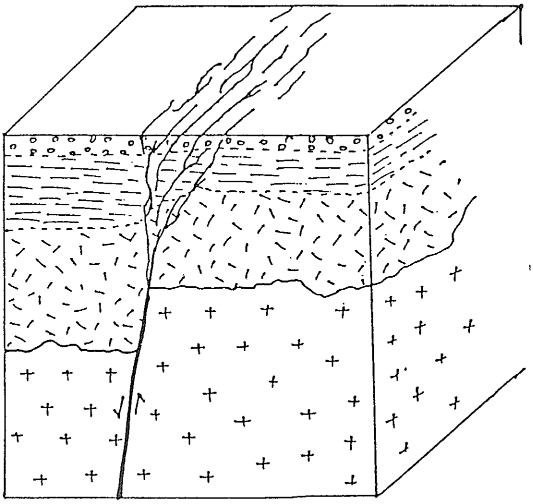
地熱地帯は　こういう活動的な火山と関係が深く　九州中部では　阿蘇の東北の豊肥といわれる地熱地帯もその一つであり　八丁原及び　大岳地熱発電所がすでに稼



第2図
全国地熱資源総合調査第Ⅰ期（1980—1983）の概念



第3図　九州大分の合成開口レーダ画像（NEDO 提供）



第4図　深部断裂と地表地質現象（リモートセンシング解析モデル）（地質調査所　山口　靖氏提供）

動しています.

九州南部では桜島　霧島　開聞岳が活動的です.　この付近は現在政府によるさまざまな調査が進められていますが　まだ発電には結びついていません.

第3図は合成開口レーダー（SAR：マイクロ波レーダ）の写真です.　SAR は雲とか植生といった地質情報の検出には妨害になるものが消去できて　地質そのものがかなり出てくるといわれているリモートセンシングの一つの方法です.　この方法で全国をカバーいたしました.

このレーダーの画像には非常にさまざまな地質学的な情報が入っております.　それを解析して　画像の情報を地熱の情報にどのように置きかえていくかをわれわれは考えてきました.

第4図は地質のモデルですがマイクロ波レーダーで知り得るのは地表の情報です.　画像上にあらわれるものはあくまでも地表の情報ですけれども　場合によっては地下の深い所の構造を反映している場合があります.

たとえば地下に断層あるいは割れ目系があると　それが地表に一群の割れ目のグループとして反映される場合があることをこの図は示しており　地表の情報から地下におけるフラクチャー（割れ目系）の存在が推定できる可能性があるといえます.

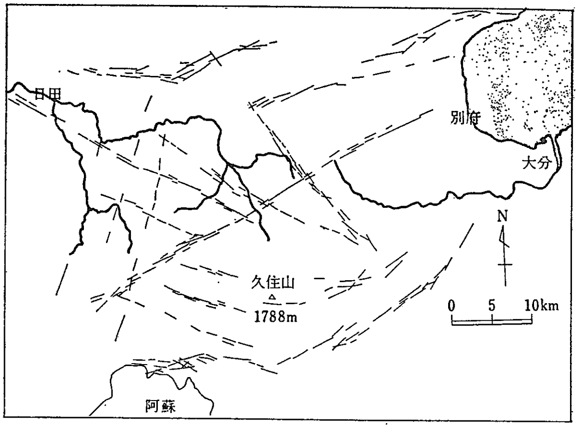
地熱系は　現在では主にフラクチャーを通して熱水が動くというパターンであるといわれています.　したがって地下のフラクチャーを検出することが　地熱の評価や探鉱に対して一定の役割りを持っています.

第5図は地質調査所の山口靖氏が　第3図を使って特に長く続くフラクチャー群——リニアメント群と呼びますが——だけを抽出したものです.

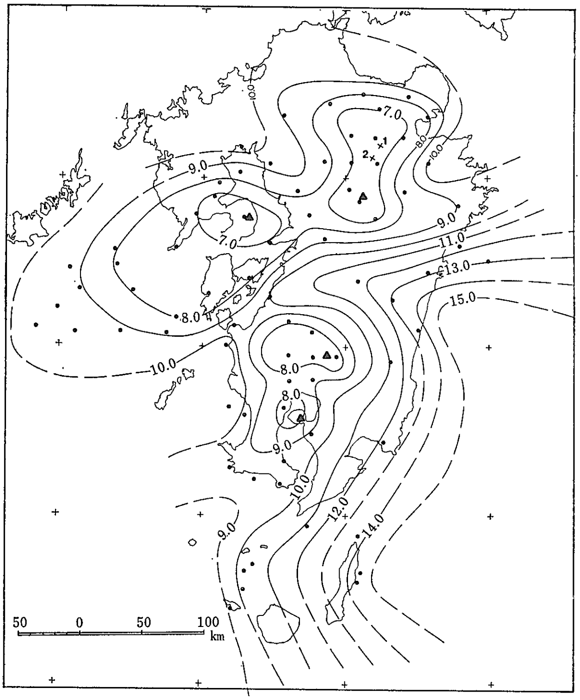
多分長いものは　地下のかなり深い所の構造を反映しているであろうという推測がつくわけで　深部情報を抽出している可能性があります.

図の右上が別府で左下が阿蘇　その間が豊肥の地熱地帯といわれる地域です.

たとえば別府から阿蘇の北部へつづくリニアメント群は　一部北東部と南西部で確認された活断層ではありましたが　中間ではその存在は知られていませんでした.　マイクロ波のデータから　非常に広域かつ深部の構造の



第5図　別府—阿蘇地域レーダーリニアメント
（連続性のあるリニアメント群）

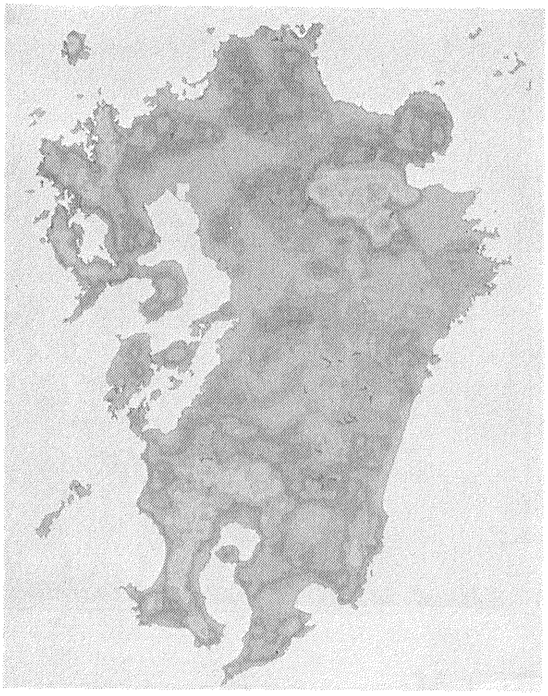


第7図　九州のキュリー等温面深度分布図

存在が始めて指摘されたわけであります.

もちろんリモートセンシングのデータだけで探鉱方針を決めるということはあり得ませんが　その他の熱や構造に関する情報と合わせたときに　このデータは　今後の探鉱に役立つ情報であります.

ただこれを資源評価にどう使っていくかは非常にむずかしい問題でありまして　技術的にまだ結論が出ていません.　一つの可能性として　リニアメントの密度が地



第6図　九州のリニアメント密度分布図（濃い部分ほどリニアメント密度が高い）

下におけるフラクチャーの密度という量に近似的に置きかえられるのではないかという仮定を設けます.　ある単位面積あたりのリニアメントの長さを数量化し近似的にフラクチャー密度という量にかえます.

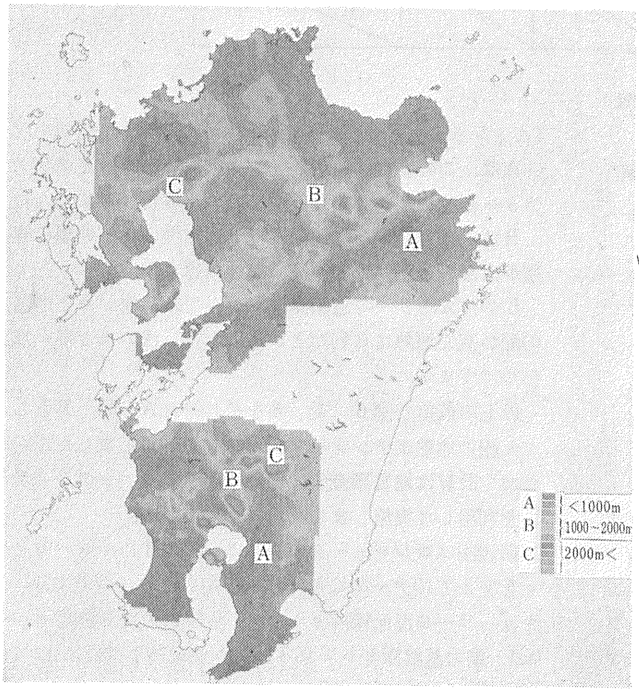
第6図は九州全体のリニアメント密度をコンピュータで表示したものです（原図はカラー).　白色系はフラクチャー密度が高いところです.　この図面では豊肥　霧島　薩南といった新しい地熱地帯　第四紀の火山活動が非常に活発なところがリニアメント密度が高くなっております. これについては地質学的ないろんな議論があるところです.　ともあれ　これが資源評価の第一のデータとなります.

第7図は九州地方で地質調査所と NEDO が行った調査の結果を編集した空中磁気異常図に基づいてキュリー点深度を求め　その等温面深度を等高線で示したものです.　等高線の数字はキュリー等温面深度（単位：km）で　キュリー等温面は岩石の磁性が消失する温度（560～580°C）に対応する深度を示すものです.　キュリー等温面深度を地下の温度勾配に置きかえることができます.　等温面深度の浅いところは温度勾配が高い所に相当します.

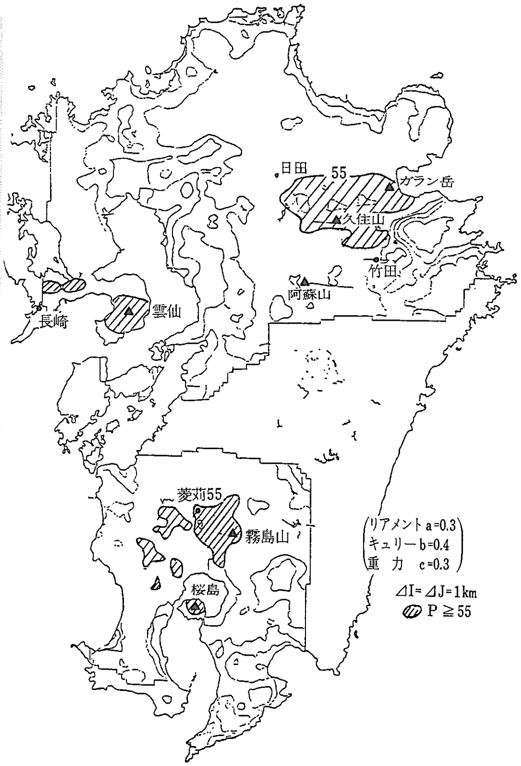
九州では中北部・南部がキュリー等温面深度が浅く地温勾配が高くなっています.　これが資源評価の第二の

P（I，J）＝A（I，J）×a＋B（I，J）×b＋C（I，J）×C
P：地熱ポテンシャルの得点　（0～100）
A：リニアメント密度得点　（0～100）
B：重力基盤得点　（0～100）
C：キュリー等温面深度得点　（0～100）
a，b，c：A，B，Cに対応するウエイト　（0～1）
但し　a＋b＋c＝1
（I，J）：座標格子

第9図　ウエイトファンクション法



第8図　九州の重力基盤深変分布図



第10図　九州の評価関数法の一例（ケース1）

データです．

第三番目が重力データです．　重力の異常は地下構造を反映していますが　正確には地下の構造情報としては取扱えませんので　重力基盤という量に置きかえる必要があります．　これで初めて地下の構造に関する情報という形になります．

第8図は高密度の地層　特に基盤岩類が地表から何キロの所に存在するかを示した図面で　この図面をつくるためには坑井や地表地質のデータ等他のデータも用いています．（原図はカラー）

Cで表示した黒色及びその周辺部が高密度の基盤が深い所（2000～4000m以上）　Aで示した所は浅い所（1000m以浅）という情報を示しております．　これが資源評価の第三のデータです．

たかだか三つのデータしかない状況で　資源評価を行うのは非常に冒険といえますが　資源評価は常にその時点での入手可能なデータに基づいて行われるべきものでデータがまだ充分でないと考えると永遠にできないわけです．

そういう意味でこの三つのデータ（もちろん坑井データ等のサイドデータも若干は使いますけれども）だけから地熱資源ポテンシャリティーを出す方法（第9図）を試みました．　この方法はウエイト・ファンクション法と呼ばれ　石油や金属の資源評価では過去に使われています．

しかし現在は　volumetric method（容積法）などに変

第5表　地熱有望地域評価基準の一覧表

	熱源		貯留	構造	断裂系
	キュリー点深度	第四紀後期火山岩分布	重力基盤深度	地質・温泉	リニアメント密度
火山性熱水対流系地域	10km以浅	5km以内 または 火山性陥没内	1.5km 以深 または 小規模隆起帯	42℃ 以上の温泉あり	a. 密度大で温泉あり b. 密度大で温泉なし c. 密度小
深層熱水系地域	12km以浅		1.5km 以深	古第三紀以降の地層分布	
高温可能性地域	8km以浅				

第6表　火山性熱水対流系地域　深層熱水系地域　高温可能性地域の深度による賦存可能性

		キュリー点深度(km) 8	10	12
浅部(0～1.5km)	火山性熱水対流系地域	○	○	—
	高温可能性地域	○	—	—
深部(1.5km～)	火山性熱水対流系地域	○	○	—
	高温可能性地域	○	—	—
	深層熱水系地域	○	○	○

りつつあります．　第9図でPは資源ポテンシャリティーで0点から100点まで．　Aはリニアメント密度　Bは重力基盤深度　Cはキューリー等温面深度のポテンシャリティー評価度です．　a　b　cがウェート・ファンクションです．　0から1までの間の値をとります(a＋b＋c＝1)．　I　Jは各グリットの座標です．

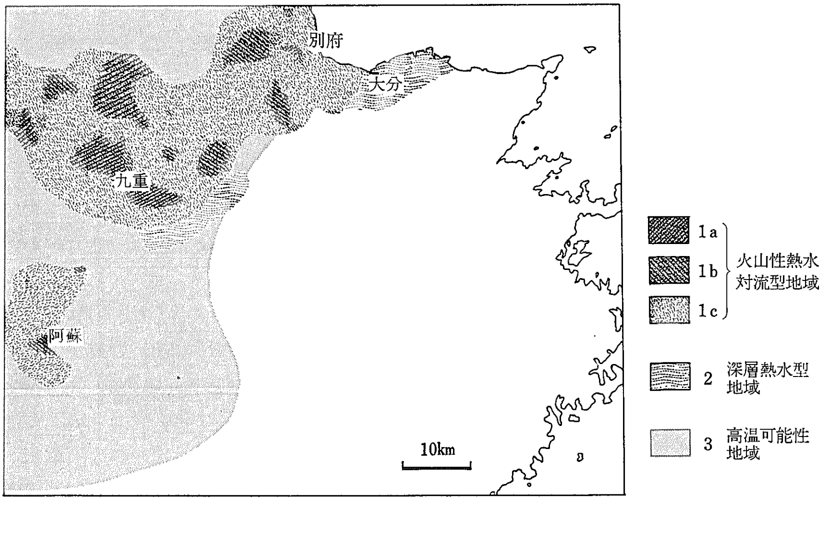
Aは　この場合はリニアメント密度が高いほどフラクチャー密度が高いという仮定で高い点数をつけます．

Bは　重力基盤深度は深いほど透水性のある地層の容積が大きいということで高い点をつけます．

Cのキューリー等温面深度については　浅いほど地温勾配が高く地熱に有利だということで　浅いほど高い点をつけてます．

以上の仮定で図6　7　8をそれぞれA　C　Bとして九州の地熱ポテンシャリティーPを計算しました．なお　計算は地質調査所の地熱情報データベースシステムを利用して実施しました．

第10図はコンピュータの出力の一例です．　a　b　cを変えて10ケースぐらい計算したものの一つです．キューリー等温面深度c＝0.3　リニアメント密度a＝0.4　重力基盤深度b＝0.3というウェートづけにして



第11図　全国地熱資源総合調査データによる地熱資源賦存形態分類例(大分)

あります．　こういったウエイトをつける合理性がこの方法ではあまり明快ではありません．

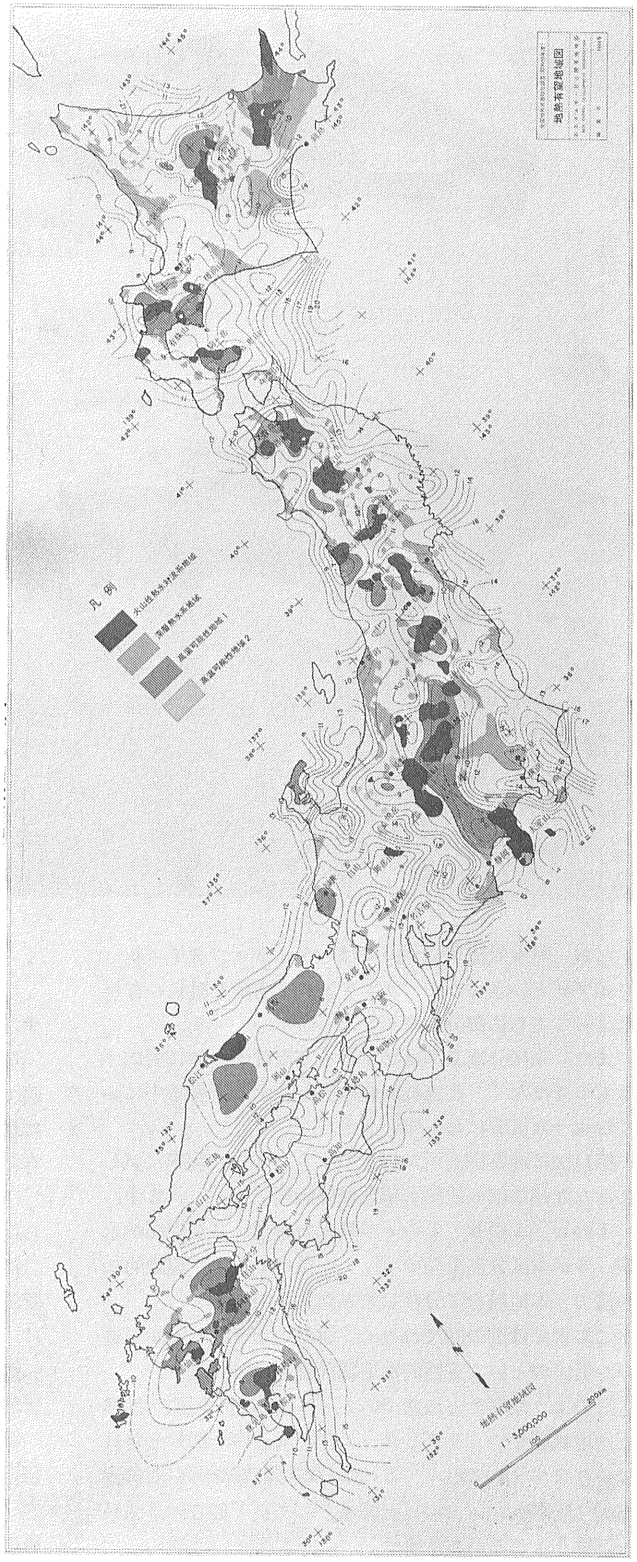
しかしながらこの場合には　いろいろのウエイトをかえて　既存の地熱地帯が高い得点を得るような　即ち一般に説明できるようなパラメーターを選ぶという　一種の試行錯誤の方法を採用しています．　網目の所が得点の高い所です．

先ほどのデータベースを使えば試行錯誤の計算が非常に簡単にできます．　ウエイトがａ＝0.3　ｂ＝0.3　ｃ＝0.4 の場合に　豊肥の地熱地帯　霧島　桜島の地熱地帯　雲仙の地熱地帯が高い得点を得ております．

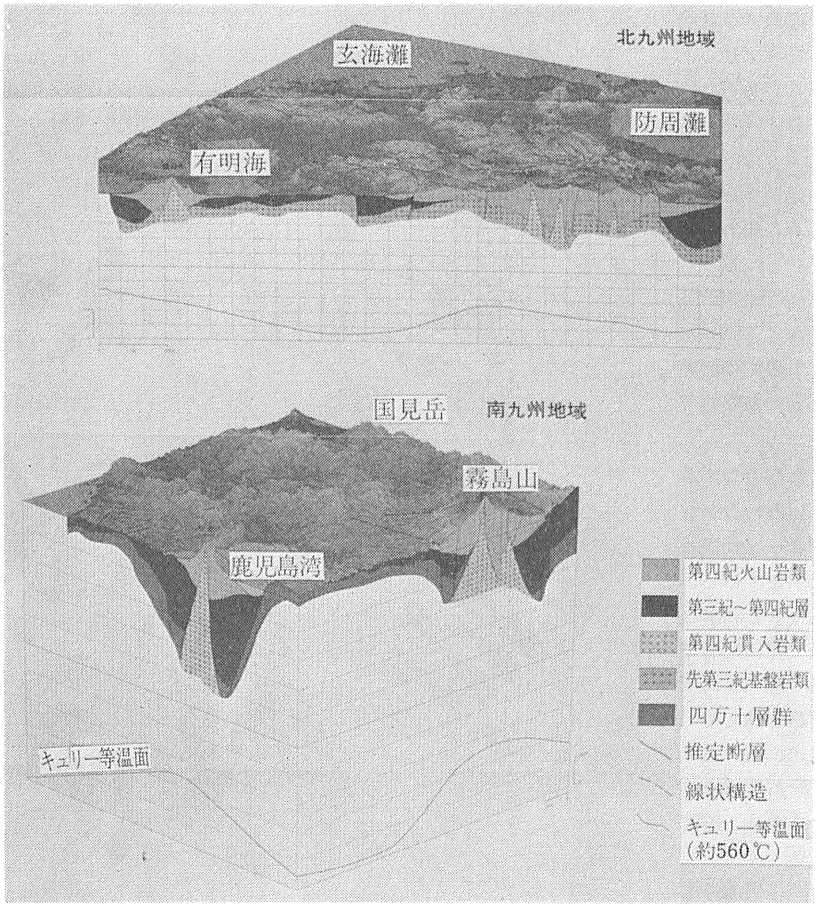
第10図はコンピュータで計算したものですがコンピュータで計算することにはいろいろな意味での限界があります．　特にパターン認識的な方法はコンピュータではなかなかむずかしい面があります．　そこでコンピュータを利用した方法で試行錯誤をして　その後実際に地熱有望地域を選びだすときの評価基準では　ウエイト・ファンクションにパターン認識を加えてマニュアルの方法を採用しました（第５表　第６表）．　ここでは地熱資源の要素を貯留構造　熱源　断裂系の三つに分類しています．　貯留構造に関する情報としては重力基盤（km 単位）です．　地質　温泉も貯留層あるいは構造に関する情報として　ここに入れてあります．

熱源に関する情報としては　キュリー等温面深度のデータと　百万年よりも若い火山岩を入れてあります．　断裂系としては　リニアメント密度しかデータがありません．　この五つのデータから　全国規模で地熱有望地域を抽出しました．　主に使ったデータは　重力法　キュリー点法　合成開口レーダー法　地質図及び温泉データですが　その他坑井データなども部分的には使っています．

地熱資源の型としては熱水対流型（特に火山活動に関与するような熱水対流系）と低・中温深部熱水型　及び未区分高温型（高温可能性地域）に区分してあります．　以上三つのタイプに分類し　おのおのの重力基盤深度が 1.5 km よりも深く　あるいは基盤が局部的に隆起しているような所に近く　かつ温泉の温度が 42°C 以上あるといった基準をもうけ　それらの and や or をとり地熱有望地域を抽出してみました．



第12図　地熱有望地域図（NEDO 編集）



第13図　地熱有望地域断面モデル
九州の例（NEDO 提供）

なお　熱水対流型については　タイプａ　タイプｂ　タイプｃというように　リニアメント密度と温泉の有無によってさらに細分しました．

また　未区分高温型は必ずしも高温乾燥岩体に対応するものではなく　高温乾燥岩体型と熱水対流型を中にふくむような区分になっています．

第11図は地質調査所が以上のような前提で実際に試してみた九州中部の地熱有望地域評価例を示しています．

１のａ　１のｂ　１のｃが熱水対流型　２が深層熱水型　３が未区分高温型です．　一種のパターン認識的な方法で　本地域を区分けしてみたものです．

ここまでは量の話ではなく　資源のポテンシャルが高いか低いかという定性的な地域評価の話です．

このような考え方に基づいて　NEDO が全国の地熱有望地域図をつくりました　ここではその一部分をお目にかけます（第12図）．　これは日本地熱資源賦存地域分布図（地質調査所，1980）と結果として良く似ていますが一部違うところがあります．

前の図は主に温泉徴候のような地表徴候に基づいてつくられた地熱資源分布図です．　一方　第12図は広域のしかも深部の情報に基づいてつくられたものであります．

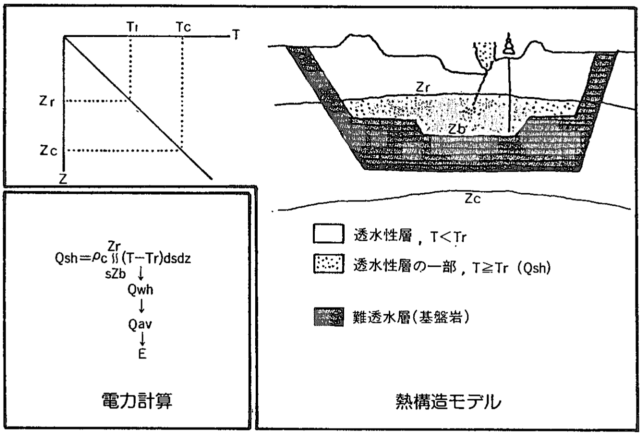
第13図は NEDO が作成した九州を横断する地下断面図です．　上は別府—阿蘇—雲仙と九州中部をほぼ東西に切った断面図です．　このような断面図が全国の地熱有望地域について作られました．

下は南九州で　霧島　桜島を切った断面です．　これらは全国地熱資源総合調査データに基づいてつくられた三次元の構造図です．　こうした三次元構造図を用いて資源の量の評価を行うのが次の段階です．

実は量の評価は現時点では行っていません．　方法の研究を行っているところです．

第14図は定量的資源評価の一つの考え方でありまして発電量を容積法により計算する方法です．　重力法データ　キュリー点データの他に　坑井データ　特に温度検層のデータなども使います．

図の横軸（T）が温度　縦軸（Z）が深度です．　Tc



Qsh：蓄えられた熱　　Qwh：坑口熱量
Qav：作用熱量　　E：発電量
Tr：基準温度　　Tc：キュリー点温度
Zr：Trの深度
Zc：Tcの深度　　<……磁気及び坑井データ
Zb：基盤深度　　<……重力及び坑井データ
S：貯留層面積　　<……地質、SAR及び他のデータ
ρc：岩と水の熱容量

記号の意味

第14図　重力　キュリー点　SAR データによる地熱資源の定量的評価の一方法

がキュリー点温度　これに対応するキュリー点深度がZc です．　Tr は基準温度です．

発電所の末端の出力の温度は 45°C から 50°C くらいですが　たとえば 200°C くらいの貯留層だとしますと 200°C から 45°C までの間の熱落差を仕事（タービンの回転）に使っています．　従って 45°C を基準温度とするのが適当です．

このように Tc　Tr を決めますと Zc　Zr が決まります（図の左上）．　一方地域毎の地下構造を　上の地層を透水性の岩体　下を非透水の岩体であるとして決めます．　その結果　図の右上のような熱構造モデルを得る事ができます．

この透水性岩石の中の貯えられた熱を Qsh とします．　ρc は岩石—水系の密度と比熱です．　ある地表の領域 S について Zr から Zb について T−Tr を積分すると Qsh が得られます．　これを坑口熱量（Qwh）にかえ　更に作用熱量（Qav）にかえ　最後に発電量（E）が得られます．ここで　Zb には重力基盤深度をあてます．　一応基盤を非透水性と仮定しています．　非透水性ではない場合ももちろんあるわけですが巨視的には高密度基盤岩は非透水性だとします．

また　表面の領域Sは　地質データ（特に若い火山岩）リモートセンシングのデータ（特にマイクロ波のデータ）等から求めてゆくことにします．

これだけでのデータでの資源評価はかなりリスキーであるといえますがステージIIの全国地熱資源総合調査（第4表）では　このほかに水地化学データ　地熱地質データ　物理探査データが得られますので　これ等のデータを合わせながら熱量を考えていく予定です．　ここで示した方法は　非常に深くかつ広域的な情報に基づいて熱量が計算されることに特徴があることを強調しておきたいと思います．

言うまでもなく　できるだけ多くの三次元的なデータを用いて資源評価を行うことが好ましくそれにはデータが必ずしも十分そろっていないのが現状ですが　今後多くの調査を加えながらより正確に行うように努力してゆきたいと考えています．

最初にも申しましたように　地熱は歴史が浅く　地熱を担当しているわれわれとしては　石油の評価・探査のように歴史の中でシステム化されてきたものと違って　われわれ自身がシステムを作ってゆく立場に置かれています．

本日のテーマは資源評価であり　現在行われている様ざまの調査プロジェクト　例えば九州で行われている豊肥地熱プロジェクトの話はしませんでしたけれども　豊肥における調査データから地下の深部に貯留層があり得るか　あるとしたらどんなふうなメカニズムになっているか　貯留層をどう探鉱していくか　またどのくらいの資源量になるのか　というような具体的な知恵をわれわれは得つつあります．　そういう知恵に基づいて　より正確に資源評価を行う方法を考えてゆきたいと思っております．