

## 特別講演

# 伊豆半島の地下温度構造の研究

東北工業技術試験所 角 清 愛

### 1. はじめに

地下温度構造を知ることは地熱系を推定する為の第1歩である。しかし広い範囲にわたって地下温度データを取得することは経費の点から非常にむづかしい。所がここに述べる伊豆半島は温泉分布がわが国でも最も密であり、しかも首都圏に近い為全域にわたって温泉井が掘削されているので、面積1,400km<sup>2</sup>のほぼ全域に地下温度データが分布している。このことに着目した地質調査所の温泉研究グループは昭和44～51年に地下温度データの収集を行ない、これによって伊豆半島の地熱系を考察した<sup>1)</sup>。本講演はその解説である。したがってオリジナルデータについては原論文を参照していただきたい。

本稿を執筆するにあたり共同研究者の久久保太治氏、山田富三博士、共同研究者でありかつ原稿を校閲していただいた中村久由博士、発表の機会を与えられた学会御当局に深く感謝いたします。またこの研究の基礎となった地下温度データの蓄積をもたらした静岡県各保健所御当局の適切な行政努力に敬意を表し、御協力をたまわったことに対しあらためて御礼を申し上げます。

### 2. 従来の研究

伊豆半島で地下温度構造を研究した論文は多い。しかしその大部分は温度湧出地周辺の地下温度分布から湧出のメカニズムを論じている。熱海<sup>1),8),16)</sup>、長岡<sup>7),12),14)</sup>、修善寺<sup>13)</sup>、伊東<sup>2)</sup>、下賀茂<sup>12)</sup>における諸研究がその例で、研究対象地域の面積は5km<sup>2</sup>程度である。ただ熱海—網代地域の研究<sup>10)</sup>のみは約50km<sup>2</sup>の比較的広い地域の地下温度構造から湧出地域のみならず天水下降地域をも指摘している。

### 3. 地下温度データの概要

この研究には238の温泉井から得られた756の地下温度データが利用されている。その内訳は孔底温度238、途中温度518である。このうち孔底温度は掘削泥水による冷却からの回復が早いので真の地下温度に近いといわれている。これに引きかえ途中温度はもしそれが温度井竣工後の温度検層によって得られたものであれば、回復途上の値であり一般に真の地下温度より低いのであるが、今回のデータは検層温度ではなく、掘削途中の“孔底”温度であるのでそれぞれの深度における地下温度とみなしてさしつかえないのである。

温度井の数、平均深度および地下温度データの数の地域別表を第1表に示す。データの収集作業は昭和44、47および51年に行なっているので最近10年間のデータは含まれていない。238井の深度の総延長は117kmにも及ぶ。掘削費をかりに1mにつき数万円とすると全経費は数10億円のオー

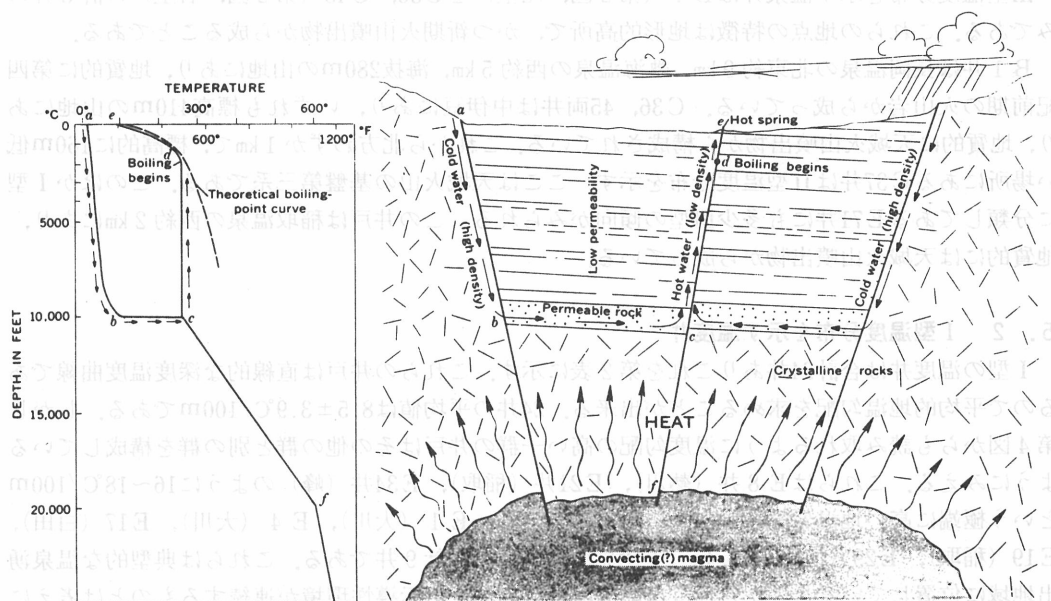
データとなり、これが一つの探査プロジェクトとすると相当大がかりのものとなる。これだけのデータの蓄積と可能にしたのは温泉開発事業者に対して地下温度データの報告を義務づけている温泉行政のたまものである。

#### 4. 地下温度分布と地熱系との関係

地熱系は熱伝導系と熱水対流系とに2大別される<sup>17)</sup>。更に熱水対流系は浸透部と湧出部とに分けられ両者は一つのペアを構成する。このような地熱系における地温分布の特徴は White の古典的熱水対流系モデル(第1図)<sup>15)</sup>によく表現されている。熱水対流系の浸透部の深度温度の関係は第1図の左の図の a b c 曲線のように温度勾配が浅所で小さく深所で大きい。すなわち比重の大

第1表 研究に利用した温泉井の数・平均深度および温度データの数

温泉井No.	保健所	市町村	温泉井の数			温泉井の平均深度(m)	温度データの数		
			孔底温度の	孔底および途中温度	計		孔底温度	途中温度	計
A1~A72	熱海	熱海市・伊東市	72	0	72	545	72	0	72
B1~B20	三島	韮山町・長岡町・大仁町の一部	5	15	20	505	20	76	96
C1~C46	修善寺	修善寺町・天城湯ヶ島町・中伊豆町・土肥町・大仁町の一部	37	9	46	514	46	59	105
D1~D29	松崎	松崎町・西伊豆町の一部	15	14	29	485	29	82	111
E1~E71	下田	東伊豆町・河津町・下田市・南伊豆町・西伊豆町の一部	17	54	71	425	71	301	372
計			146	92	238	493	238	518	756



第1図 White, D.E.<sup>15)</sup>による熱水対流系モデル

きい冷たい地表水が割れ目に沿って急速に下降し、深部で結晶質基盤に到達した所で熱い岩石との熱交換によって温度が急上昇する。一方湧出部はc d e曲線のように逆に浅所の温度勾配が大きく、深所で小さい。これは比重の小さい熱水が急上昇して、浅所で熱交換・気化等で冷却することによる。一方、熱伝導系は岩石の熱伝導率が一定である限り直線的となり、たとえば第1図のc fのようになる。この図では熱水対流系の底の部分となっているが、熱水対流系の蓋の部分(帽岩)に現われることもあるし、熱水対流系と全く無関係に存在することもある。伊豆半島における熱伝導系はこの3つのケースの後2者に近いと考えられる。最後のケースでは熱源は地球深部に求められ、その熱流は地殻熱流量と呼ばれる。

現実には上記の様な理想的な系は存在しないから、以下本文で温度構造によって分類する場合、次のように“卓越”の形容詞を付し、またローマ数字による略号を用いることとする。

熱伝導卓越型(地域)…………… I型(地域)

熱水対流卓越型(地域)湧出型(地域)…… II型(地域)

浸透型(地域)…… III型(地域)

## 5. 垂直井における一次元温度分布

伊豆半島全域の地下温度構造を推定するにあたり、238井が1,400km<sup>2</sup>に均等に分布していれば、井戸分布は2.5km×2.5kmメッシュとなり、内挿も容易であるが、実際には井戸の偏在は著しく、場所によっては10km×10kmの空白域さえある。これに対し一本の垂直井の一次元温度分布は、途中温度データのある92井に610データがあるから、平均深度500mとして75mに1データがあることになり、内挿の信頼性は高い。このことからまず、92井の深度温度曲線(第2図、第3図)からI、IIおよびIII型の区分を試みた。

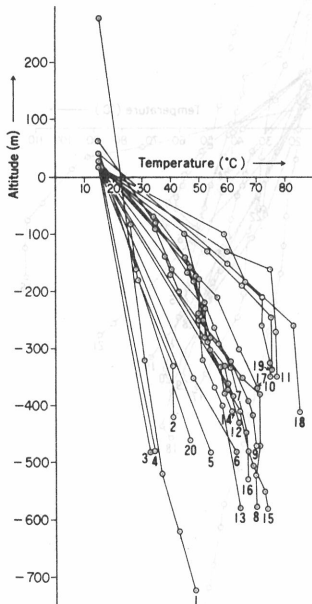
### 5. 1 III型温度分布を示す温泉井

III型温度分布を示す温泉井はB 1(第2図、左上)とC36、C45(第2図、右上)の計3井のみである。これらの地点の特徴は地形の高所で、かつ新期火山噴出物から成ることである。

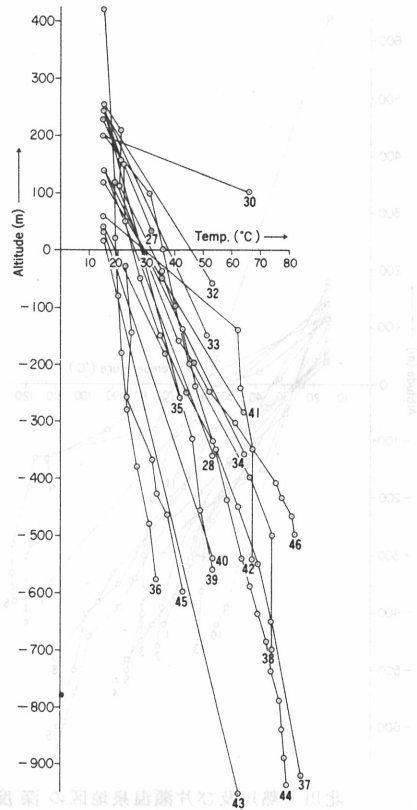
B 1井は長岡温泉の北東約9km、熱海温泉の西約5km、海拔280mの山地にあり、地質的に第四紀前期の火山岩から成っている。C36、45両井は中伊豆にあり、いずれも標高410mの山地にあり、地質的に天城火山噴出物から構成されている。これから北方わずか1kmで、標高的に160m低い場所にあるC37井はII型温度分布を示す。ここは天城火山の基盤第三系である。このほかI型に分類してあるE71井にも多少III型の傾向がみられる。この井戸は稲取温泉の西約2kmにあり、地質的には天城火山噴出物から成っている。

### 5. 2 I型温度分布を示す温度井

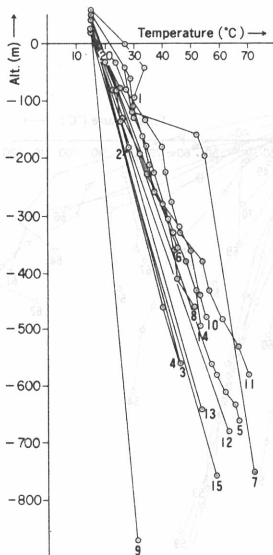
I型の温度井は合計24井ありこれを第2表に示す。これらの井戸は直線的な深度温度曲線であるので平均的地温勾配を求めることが出来る。24井の平均値は $8.5 \pm 3.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ である。しかし第4図からも読み取れるように温度勾配の高い一群の井戸はその他の群と別の群を構成しているように見える。これらはE 8井(熱川)、E21井(稲取)、E34井(峰)のように $16 \sim 18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ という極端に高い地温勾配を示すものを始めとして、E 1(大川)、E 4(大川)、E17(白田)、E19(稲取)、E29(河津)、C46(中伊豆)の各井など計9井である。これらは典型的な温泉湧出地域に位置していることからみて、更に深部に向って熱伝導性環境が連続するものとは考えにくく、むしろ熱水対流卓越地域の帽岩的部分の可能性が強い。結局これら9井を除いた15井が伊



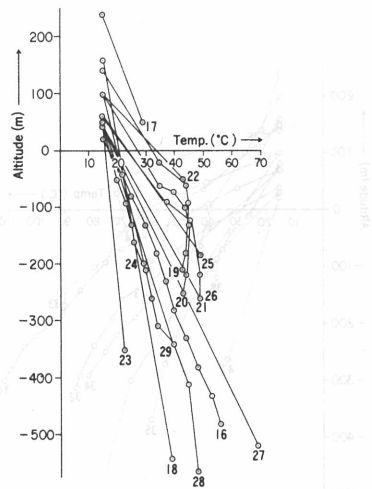
畑・湯塚・四日町及び長岡温泉地区の温泉井の深度—温度曲線。数字は温泉井番号, 記号Bは省略



土肥・湯ヶ島及び中伊豆地区の深度—温度曲線。数字は温泉井番号, 記号Cは省略



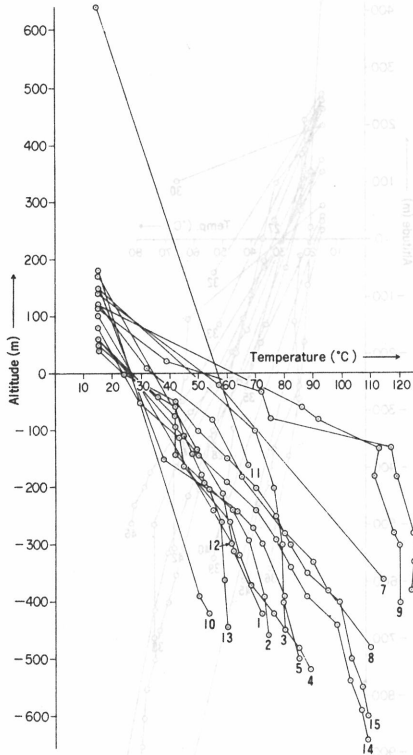
宇久須・堂ヶ島及び松崎地区の深度—温度曲線。数字は温泉井番号, 記号Dは省略



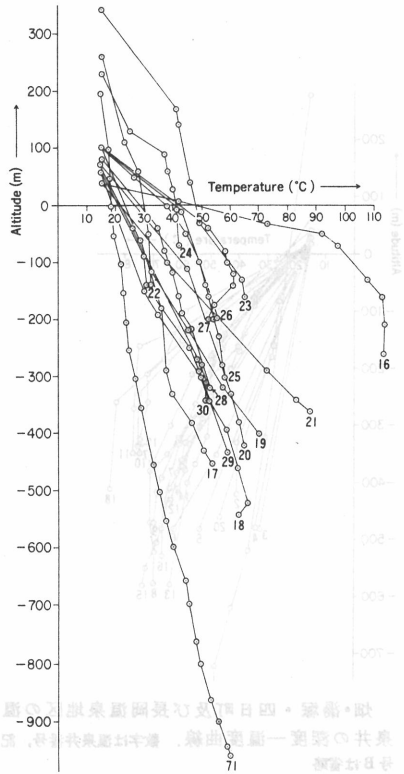
松崎・雲見及び大沢地区の深度—温度曲線。数字は温泉井番号, 記号Dは省略

第2図 深度温度曲線その1<sup>11)</sup>—三島・修善寺および松崎保健所管内

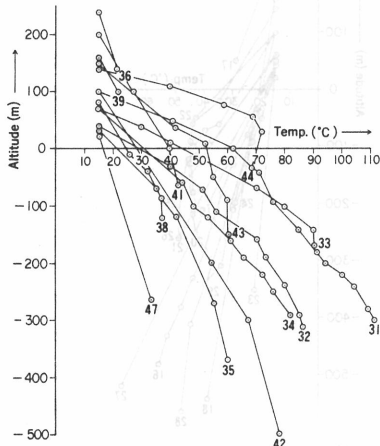




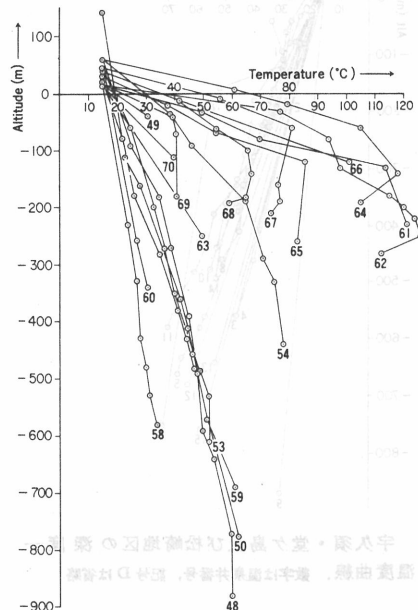
北川・熱川及び片瀬温泉地区の深度—温度曲線。数字は温泉井番号，記号Eは省略



片瀬温泉・稲取温泉及び河津温泉地区の深度—温度曲線。数字は温泉井番号，記号Eは省略



峰及び蓮台寺地区の温泉井の深度—温度曲線。数字は温泉井番号，記号Eは省略



下賀茂温泉地区の温泉井の深度—温度曲線。数字は温泉井番号，記号Eは省略

第2表 直線的地温分布 (I型) を示す温泉井の地温勾配<sup>11)</sup>

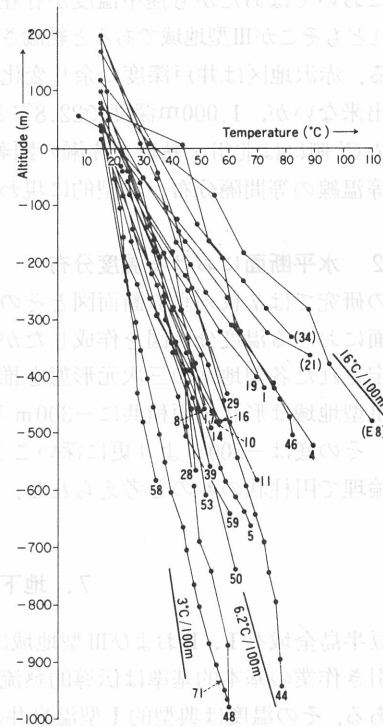
温泉井 No.	T (°C)	Z <sub>1</sub> (m)	Z <sub>2</sub> (m)	ΔT/ΔZ (°C/100m)
C39*	53	40	-560	6.3
D5*	67	40	-660	7.4
D8*	51	40	-460	7.2
D10*	55	20	-480	8.0
D11*	70	20	-625	8.5
D14*	53	20	-493	7.5
D16*	56	20	-480	8.2
D28*	48	40	-564	5.5
E1	72	170	-430	9.5
E4	89	80	-520	12.3
E8	110	120	-480	15.8
E17	54	60	-460	7.5
E19	70	100	-400	11.0
E21	88	40	-360	18.2
E29	59	60	-440	8.8
E34	82	70	-325	16.9
E48*	60	60	-982	4.3
E50*	62	60	-740	5.9
E53*	52	40	-610	5.7
E58*	34	20	-583	3.2
E59*	61	60	-648	6.6
C44*	79	260	-940	5.3
C46	82	200	-500	9.6
E71*	60	190	-960	3.9
平均				8.5
* 印の平均				6.2

T: 孔底温度, Z<sub>1</sub>: 井戸元の海拔高度, Z<sub>2</sub>: 孔底の海拔高度

$$\Delta T/\Delta Z \text{ (温度勾配)} = \frac{T-15}{Z_1-Z_2}$$

\* 印の温泉井は伊豆半島南西部等の熱伝導卓越地域

第4図 熱伝導型地温分布 (I型) を示す温泉井の深度温度曲線<sup>11)</sup>



第4図 熱伝導型地温分布 (I型) を示す温泉井の深度温度曲線<sup>11)</sup>

伊豆半島の広域的熱伝導卓越地域を代表するのであろう。それは半島南西部の松崎町を中心に西伊豆町南部, 南伊豆町西部を含む約300km<sup>2</sup>の地域と半島北東部の中伊豆町を中心とする約100km<sup>2</sup>の地域である。15井の地温勾配の平均値は6.2±1.6°C/100mである。

### 5. 3 II型温度分布を示す温泉井

熱水湧出地域を示すII型の温泉井は残りの39井で全体の約40%にのぼる。これは温泉井が既知の温泉湧出地ないしはその周辺で掘削されることが多いためであろう。

## 6. 垂直および水平断面における二次元温度分布

垂直井の一次元温度分布から三次元温度分布に至る途中のプロセスとして, 垂直井をつないだ垂直断面において垂直井相互間を内挿し, 続いて水平断面において垂直断面相互の間をつないだ。

## 6. 1 垂直断面における温度分布

この研究では7枚の垂直断面（断面位置は第6図参照）について温度分布図を作成したが、ここではそのうちの代表的な4枚の断面を第5図に示す。この図からI、IIおよびIII型地域の大よそのひろがりを認識することができる。AA'断面では中央山地のIII型温度分布とこれを挟むA側の熱海、A'側の長岡両温泉のII型温度分布が対照的である。DD'断面ではD側の大室高原地区には途中温度データはないが異った深度の複数の井戸（A59, 61, 63, 64等）が近接しているため、断面図においてはあたかも途中温度が存在するような効果が出ている。結果として地形的標高は低いかれどもそこがIII型地域であると結論される。BC'断面の中央部は大室高原とその南方の赤沢地区である。赤沢地区は井戸深度に余り変化がないのでCA65, 66, 67, 72等）、大室高原のような考察は出来ないが、1,000m深度で22.8℃という異常低温はIII型温度構造によってよく説明できる。これのC'側には北川・熱川・片瀬の顕著なII型地域がみられる。GG'断面ではG'側の松崎町付近に等温線の等間隔分布が典型的に現われI型の特徴をよく表している。

## 6. 2 水平断面における温度分布

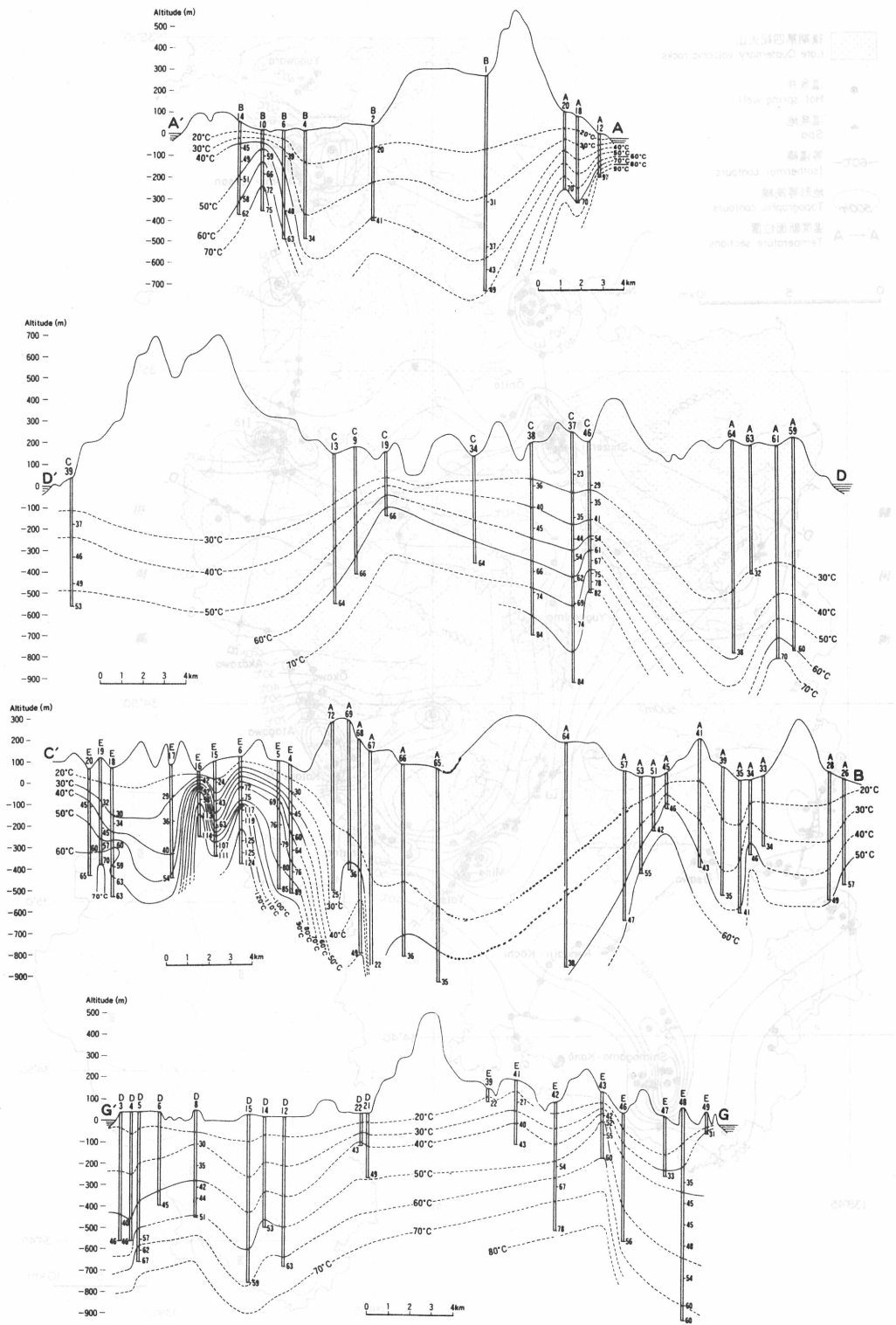
この研究では7枚の垂直断面図とその他の点在データを使用して海拔-300mと-500mとの水平断面における温度分布図を作成したが、ここでは前者を第6図に示す。これによって垂直断面で推定された各型地域の三次元形態を推定することが出来る。たとえば天城火山周辺の10km×15kmのIII型地域は形状・面積共に-300mと-500mとで余り差がなく大きな楕円柱状の形態が推定され、その底は-500mより更に深いことになる。またたとえば長岡の面積約10km<sup>2</sup>のII型地域も同様な論理で円柱状のものと考えられる。

## 7. 地下温度構造による地域区分

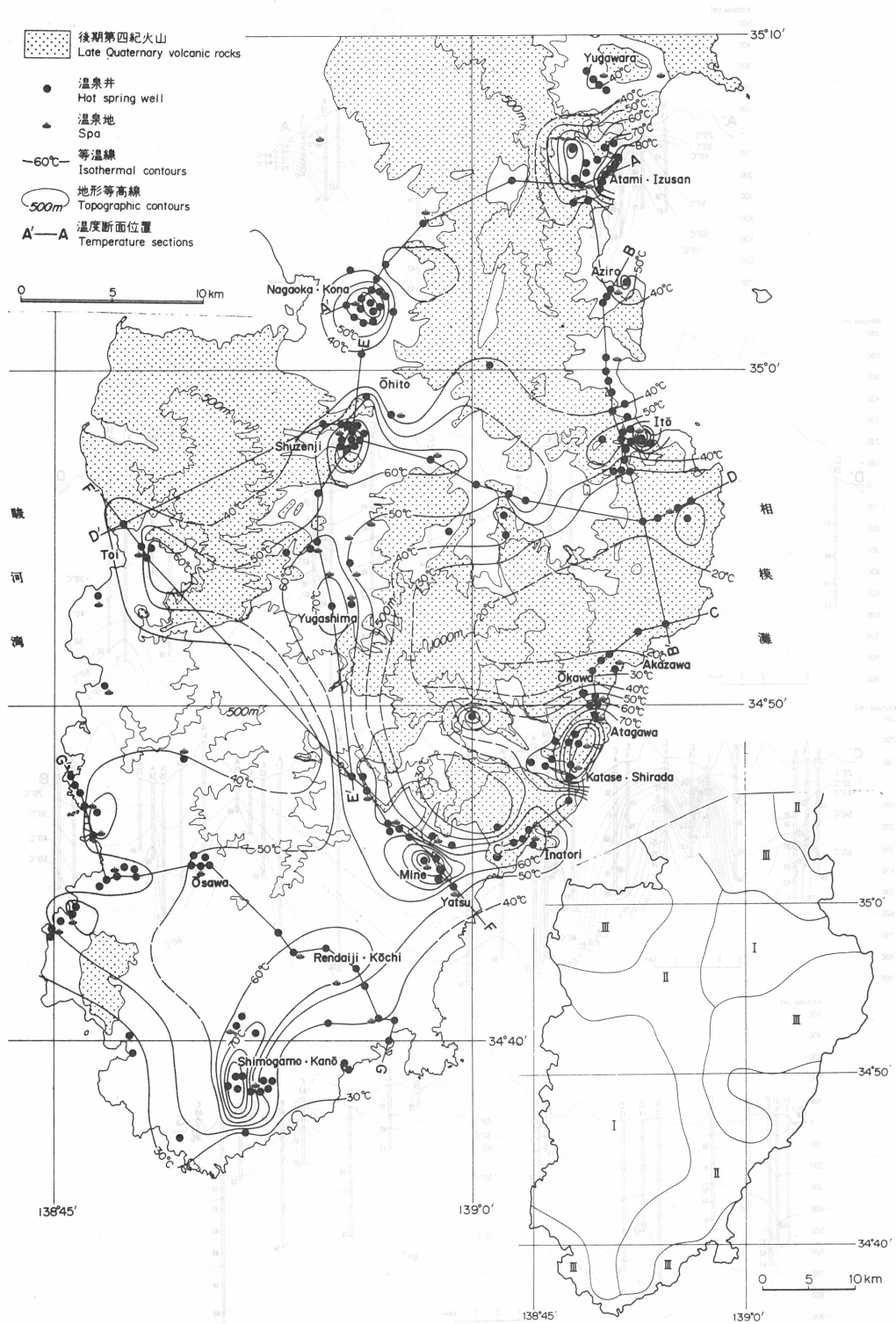
伊豆半島全域をI、IIおよびIII型地域に区分してみた。その結果は第6図の右下に併記してある。線引き作業の基本的基準は伝導的熱流から期待される温度に等しいか、それより高いか、低いである。その温度は典型的I型温泉井の平均地温勾配、6.2℃±/100mから期待される地温である。井戸元の標高は9割以上の井戸が0~200mの間にあるから、地表温度を15℃とすれば、海拔-300mのレベルでは、海岸部で34±5℃、海岸から離れた標高200mの奥地では46±8℃が期待される。線引きはほぼこの温度によって行ったが、I型地域とII型地域との境界のみはこれより少し高い温度を用いる方が自然である。両帯の境界は温度変化の大きい所に線引きしてあり、結果的にその温度は50~60℃となっている。このことは変化のはげしいII型地域内の温度分布の影響が変化の極めて小さいI型地域内の温度分布に“作図上”及んでるのかも知れない。あるいはI型地域の成因にかかわるもっと大きい問題に関係しているのかも知れない。また線引きにあたってはII型地域とIII型地域とはお互いにペアを組んで熱水対流系を構成することも念頭においてある。したがってこのような人為的要素を多分に含みながら作図された地域区分図は線の位置そのものには大きい意味はなく、全体のパターンに意味のある概念図といえよう。

## 8. 地熱系に関する考察

地下温度分布からみて伊豆半島の地熱系は熱伝導卓越地域と熱水対流卓越地域に2大分された。そして後者はさらに湧出地域と浸透地域とに細分された。湧出地域と浸透地域とはたがいにペアをなすようである。たとえば天城山を中心とする10km×15kmの地域とこれを取りまく半円弧状の



第5図 温度断面図<sup>11)</sup> 断面の位置は第6図参照。



第 6 図 海拔=300m における温度分布および概念的な地域区分<sup>11)</sup>

熱川一稲取一峰一湯ヶ野一湯ヶ島の地域とのペア、下田から石室崎にいたる海岸地域と蓮台寺一下賀茂地域とのペア等である。湧出地域と浸透地域との面積比は第6図ではほぼ1:1であるが厳密には湧出地域はII型地域とした中に島状に点在するのであり、一般にいわれているような1:10~100<sup>5)</sup>に近いものと考えられる。

Whiteモデルとの比較では熱水対流の存在というだけのアナロジーであり、断面形状は非常に異ったものであろう。多孔質新期火山から成る山地が主たる浸透地域であるということは高度差によるポテンシャル流<sup>3),18)</sup>の存在を暗示し、また地下構造的にも重力データ<sup>9)</sup>からみると、Whiteモデルとは逆にそこは隆起帯らしいのである。海岸に沿う浸透域と湧出域とのペアについては地球化学的な面からこれと調和するデータが出ている<sup>4)</sup>。この面からのアプローチは今後特に重要であろう。

熱伝導卓越地域において現実に温泉が湧出していることは、火山性でない地球深部からの熱が深部割れ目を通ずる対流によって運び出されていることを示している。このタイプの温泉は高地熱流量で特徴づけられる米国のベースンアンドレンジの温泉<sup>6)</sup>などと比較されよう。

## 9. おわりに

本研究のデータ収集が終了してからすでに10年が経過したが、この10年間の新しいデータの蓄積は著しく、ここに述べた諸図も大巾に改訂されねばならない。一方この10年は日本の各地で地熱開発という立場から広域的地下温度構造が調査研究された時期でもあった。これらは面積的には50~300km<sup>2</sup>で、その成果は現在まとめられつつある。これらとの比較研究も併せて要望される所である。

## 文 献

- 1) Fukutomi, T. (1937) On the hot spring of Atami, Izu Peninsula. Bull. Earthquake Res. Inst., 15, 113-133.
- 2) 福富孝治 (1940) 伊豆伊東温泉に就て (第2報) 地下温度の分布. 地震, 12, 394-403.
- 3) Hanaoka, N. (1980) Numerical model experiment of hydrothermal system - Topographic effects-. Bull. Geol. Surv. Japan, 31, 321-332.
- 4) 水谷義彦・浜砂武聖 (1972) 伊豆下賀茂温泉水の起源. 火山, ser.2, 17, 123-134.
- 5) Muffler, L. J. P. (1973) Geothermal resources. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 820, 251-261.
- 6) Muffler, L. J. P. (1975) Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources, 499-507.
- 7) 中村久由 (1958) 温泉の存在状態と地質構造との関係 (1), 伊豆古奈長岡温泉の熱構造. 温泉科学, 9, 118-123.
- 8) Nakamura, H. Maeda, K. Abe, K., Yamada, T. and Kodai, K. (1969) Remarks on hydrothermal system in Atami hot spring area, Central Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, 20, 367-394.
- 9) 小川健三・須田芳朗・広島俊男・駒沢正夫・馬場健三 (1981) 静岡県伊豆地域等重力線図. 地熱地域等重力線図, 3, 地質調査所.
- 10) 大木靖衛・藤田元一・広田 茂 (1974) 熱海温泉の地下温度構造. 地熱, 11, 21-26.
- 11) 大久保太治・角 清愛・山田管三・中村久由 (1983) 伊豆半島の地下温度構造. 地質調月報, 34,

- 383-412.
- 12) 鮫島輝彦・岩橋 徹・黒田 直 (1968) 伊豆半島の地熱開発に関する基礎調査報告書。静岡県。
- 13) 佐藤幸二 (1959) 伊豆修善寺温泉地域の地質及び温泉。地質学雑誌, 65, 154-164.
- 14) 高橋 保 (1985) 伊豆長岡および韮山における温泉賦存状態と温泉収支。地質学雑誌, 91, 323-339.
- 15) White, D. E. (1968) Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 458-C, 1-109.
- 16) Yuhara, K. (1961) Hydrological study of Atami hot spring. Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto, ser. A, 24, 283-311.
- 17) 湯原浩三 (1984) 地下における熱水の流動に関する最近の研究。温泉科学, 34, 134-143.
- 18) 由佐悠紀 (1983) 地熱環境下における地下水流動の数値実験—ポテンシャル流と熱対流の競合—日本地熱学会誌, 5, 23-38.

おわりに

本報告は、伊豆半島の地熱調査の一環として、伊豆半島の地熱環境を明らかにすることを目的として、伊豆半島の地熱環境を調査したものである。調査の結果、伊豆半島の地熱環境は、長岡と韮山の地熱環境と異なる特徴を示していることが明らかになった。また、伊豆半島の地熱環境は、地質学的な観点から、長岡と韮山の地熱環境と異なる特徴を示していることが明らかになった。以上の調査結果を基に、伊豆半島の地熱環境を評価し、地熱資源の有効利用に向けた取り組みを推進していくことが重要である。

参考文献

- 1) Fukutomi, T. (1937) On the hot spring of Atami, Izu Peninsula. Bull. Earthquake Res. Inst., 15, 113-123.
- 2) 湯原浩三 (1984) 伊豆半島温泉に就て (第2報) 地下温度の分布。地質学雑誌, 90, 394-403.
- 3) Hanaoka, N. (1980) Numerical model experiment of hydrothermal system - Topographic effects - Bull. Geol. Surv. Japan, 31, 321-332.
- 4) 水谷英彦・浜砂昭博 (1979) 伊豆半島温泉の起源。火山, 6, 123-134.
- 5) Matfifer, L. J. P. (1973) Geothermal resources. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 820, 351-361.
- 6) Matfifer, L. J. P. (1975) Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources, 199-207.
- 7) 中村文由 (1958) 温泉の存在状態と地質構造との関係。温泉科学, 8, 118-123.
- 8) Nakamura, H., Maeda, K., Abe, K., Yamada, T. and Kobayashi, K. (1989) Remarks on hydrothermal system in Atami hot spring area. Central Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, 50, 387-394.
- 9) 小川健三・菅田立則・川島俊博・誠久年夫・田邊健二 (1981) 静岡県伊豆半島の地熱環境。地質学雑誌, 87, 351-361.
- 10) 水谷英彦・浜砂昭博 (1974) 伊豆半島温泉の地熱環境調査。地熱学, 11, 21-26.
- 11) 水谷英彦・菅田立則・川島俊博・誠久年夫・田邊健二 (1983) 伊豆半島の地下温度構造。地質学雑誌, 89, 383-394.