

特 別 講 演

地下における熱水の流動に関する最近の研究

九州大学工学部 湯原 浩 三

1. 緒 言

温泉水の起源は何か、温泉水は地下のどこをどの様に流れて湧出して来るのか、また、どうして温泉は温かく、いろいろな物質を溶かしているのか。このような問題に対しては古来多くの人々によって研究され論じられて来た。温泉水の地下における流動に関する研究の展開をごく大ざっぱにたどってみたのが第1表である。20世紀の初めにIcelandの温泉について温泉水の地下の流れについて論じられたのが、この問題に関する研究の始まりといわれている。以来アメリカや日本においてごく少数の研究者によって研究が続けられて来たが、温泉に対する社会的ニーズの低さから、それらの研究は決して華々しいものとは云えなかつた。特に日本の研究者の成果は世界的には今でも殆んど知られていないといえるかもしれない。

温泉水の地下における流動に関する研究が一躍脚光を浴びるようになったのはNew Zealandに於て地熱発電に関する研究が集中的に行われる様になって来てからである。

1950年代にはWairakeiにおいて多くのデータから地下の温度分布図がつけられ、これから地下循環流が推定され、それを説明するものとして大規模熱対流の概念が生れた。そしてこれを定量的に取扱うためnumerical modeling techniquesが導入された。

1960年代には世界の多くの地域での地熱開発に関連したデータが蓄積され、それに対して地下

第1表 地熱流体(温泉水)の地下における流動に関する研究の展開

1906	Von Knebel	Icelandの温泉の湧出に関する地下の流れの研究
1910	Thorkelsson	
1913	Ingersoll & Zobel	温泉の熱源に関する研究
1920代	Allen & Day	The GeyserやYellowstone等の水の起源の研究
1930代	野満, 瀬野	別府温泉の浅所流動に関する研究
"	福富	伊豆諸温泉の物理的研究
1941	瀬野	温泉水の深所循環説
1942	Einarsson	
1951	Badvarsson	温泉の流動による熱輸送
1950代	New Zealand	大規模熱対流の概念
1960代	福富	地下水起源の温泉
"	多くの研究者	pressure transient analysisの応用
1970代	多くの研究者	geothermal reservoir engineering — 地熱開発 (reservoir model simulation)

水学で用いられている pressure transient analysis や petroleum reservoir engineering で用いられている解析手法の応用が試みられた。

1970年代には Geothermal reservoir engineering が自然科学の独立した分野として浮び上って来た。そして温泉の地下における流動に関する研究も academic な研究から、実際の工学の分野に拡って来つつある。そして、その中には reservoir modeling, convection system, reservoir simulation, well behavior などが含まれている。geothermal reservoir engineering は現在発展途上の技術であって、理論的研究や各地の地熱開発によって得られた多くのデータ解析の急速な進歩によって次の数年間で技術的に確立されたものとなるであろう。Geothermal reservoir engineering は当然地下水や石油の貯留層についての経験に大きくよっている。しかし、地熱貯留層はそれらとははっきりした相異があり、それらよりは一般により複雑である。

地熱貯留層に対する最近の考え方は次のとおりである (Grant et al., 1982)。

- 1) 地熱流体は多くの場合、割れ目の発達した岩体中にある。
- 2) 地熱貯留層は垂直方向に大きな拡がりを持っている。
- 3) 地熱貯留層の中には、完全な蓋がなくて、地熱流体が自由に地表へ流れ出ることのできるものが多い。
- 4) 地熱貯留層の大きさはよく知られていない場合が多いが、その中心には高温流体の核があり、そのまわりに低温の流体がある。
- 5) 質量の輸送と共に熱量の輸送が重要な意味を持つ。地熱開発は流体の生産というよりもむしろ熱の生産である。

2. Geothermal system の概念的モデル

Geothermal system に対して概念的に考えられているモデルは大別して conductive system と convective system に分けられる。前者には地殻熱流量によってできる温泉や高温岩体が含まれる。後者は更に liquid dominated と vapor dominated に分けられ、それぞれの中に多くのモデルが考えられている。

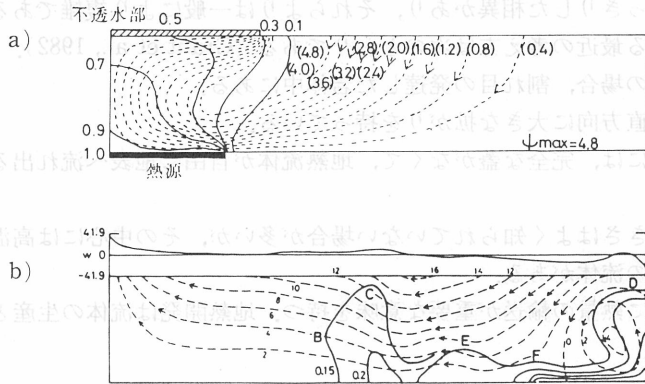
2-1 深所循環モデル

天水起源の水が割れ目を通して深さ 2 ~ 6 km まで浸み込み、マグマ的な熱源で加熱されて上昇して来る。このような割れ目はカルデラや graben に伴う割れ目である。多量の熱を運び出すためには循環水はマグマと近く接しなければならないだけでなく、マグマ自身も対流していなければならない。なぜなら大量の熱を供給するためには、その表面でかなりの厚さのマグマが固化しなければならなく、マグマ溜りの大きさとして Wairakei では 10^4 km^3 が必要と推定された。しかし、このような大きさは Wairakei field の下には考えられない。したがってマグマ溜りそれ自身も対流していて頂上部は溶けた状態を保っていなければならないことになる。地下水に接したマグマが固化すると熱応力によって割れ目ができ、循環水はその中に入り冷却を続ける。固化前線がマグマの中へ入るにつれて循環水はそれについて行き、水とマグマの間の距離は常に短く保たれる。

このようなモデルでは流体の深所への circulation は fault zone に限られるが、カルデラ底には割れ目の多い層があって、そこで対流がおこっている。

2-2 熱水貯留層内の熱対流

permeable な層 (貯留層) が厚く地表にまで達していると、熱対流の上昇部に地熱地域が出現する。貯留層の厚さ、熱源の大きさ、温度、上面の不透水層の有無、ポテンシャル流の有無等によって対流の様相が変り、地下の温度分布、地表からの放熱の位置と量が決まる。例えば第1図に示す様に貯留層上面の一部分に不透水層があれば、その端に湧出量と放熱量の集中域ができる。またポテンシャル流が適当な大きさのときには熱源部で成長した対流要素がポテンシャル流に乗って次々と下流へ運ばれて、帯水層浅部には高温部と低温部が隣り合って出現する。この様な単純な対流モデルでも実際の地熱現象を或程度説明することができる。

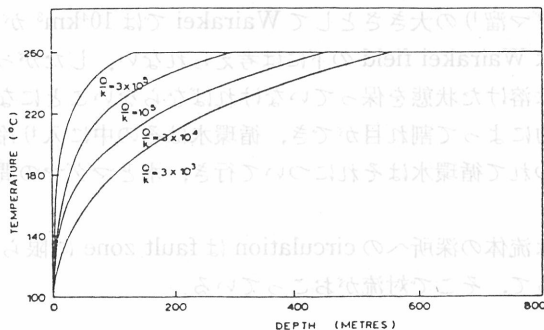


第1図 対流モデルにおける等温線(実線)と流線(破線)の分布

- a) 上面に部分的な不透水層がある場合 (秋林他, 1981)
- b) ポテンシャル流がある場合 (由佐, 1983)

2-3 BPD モデル

対流によって上昇する途中で沸騰がおこると、それ以後では2相流となる。この時の温度は第2図に示す様に沸騰レベルの下で一定、それより上では飽和温度である。圧力は静水圧プラス上昇流に起因する動圧であるが一般に後者は前者の10%以下で、これを無視するとBPD (boiling-point-for-depths) 近似を得る。すなわちこのときの圧力分布は、温度が至る所その場所の圧力に対する飽和温度であるような static column の圧力分布である。蒸気の乾き度の分布は、相対透水係数に左右される。この値を仮定すれば1つの分布が与えら

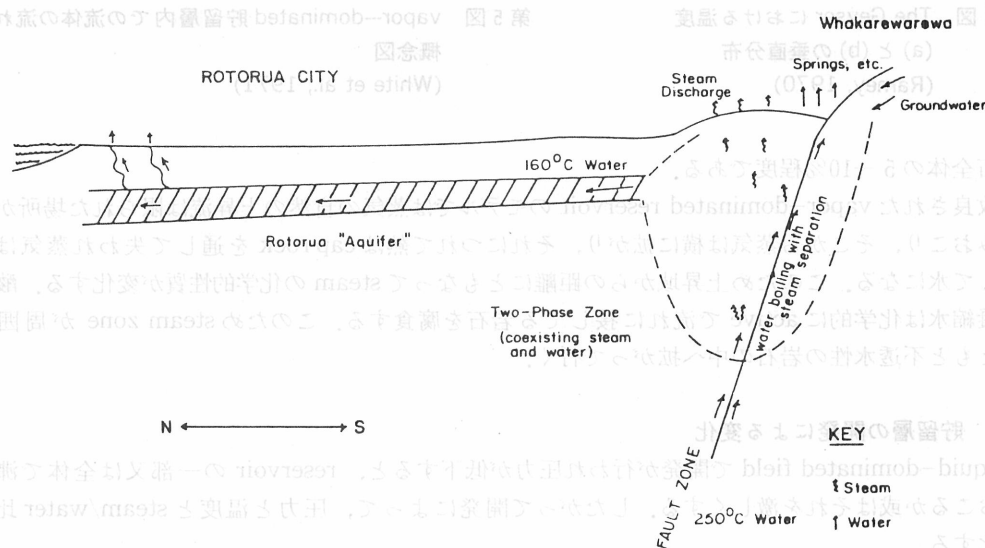


第2図 BPD モデルにおける温度の垂直分布 (Donaldson, 1967)

れるが、BPD 近似が成立するという事は逆に boiling zone 中に動き得る steam が少ないことを暗示している。

2-4 横方向への流れのある場合

現実の地熱地域では地形や地質構造の影響によって横方向の流れがある。Rotorua では第3図のように Whakarewarewa の断層帯を上昇して来て熱水と地下水が混合して側方へ流れ出していると考えられている。Krafra では下部に two-phase zone, 上部に約 200°C の liquid zone がある。流れの方向は上部では化学組成で、下部では非凝縮ガスによって trace された。上部 zone 中の 1 つの level での等圧線と等温線と H₂/H₂S の等値線を見ると、下部から上昇して来た流体が横方向に流動するにつれてガスが次第に少なくなっていくことがよくわかる (Stefansson, 1981)。

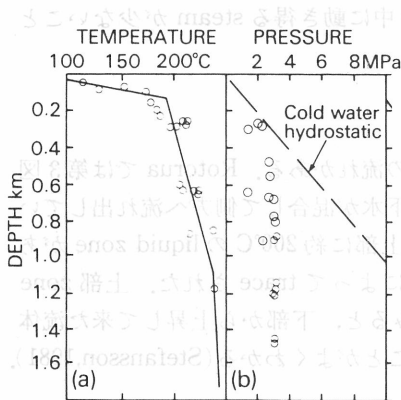


第3図 Rotorua—Whakarewarewa 地熱貯留層の概念モデル (Donaldson et al., 1981)

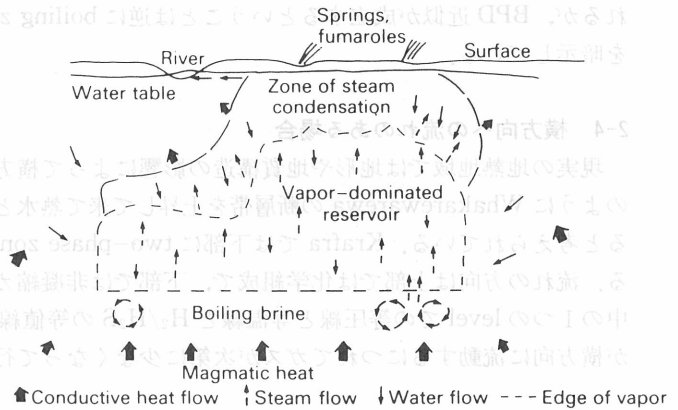
2-5 蒸気貯留層モデル

vapour dominated system の 1 つの代表である The Geysier では第4図のように地表近くで温度は直線的に急に上昇する。これは vertical な fluid flow のないこと、すなわち reservoir が cap されていることを示している。次に深くなるにつれて温度と圧力はゆっくりと増加する。しかし圧力は hydrostatic よりずっと小さい。これは reservoir のまわりに low-permeability の barriers があって reservoir の外の地下水と直接につながっていないことを示している。

最近では vapor-dominated reservoir の中には少量の水が存在しているという考えが受け入れられている。すなわち、第5図に示す White (1971) のモデルでは reservoir の底には、マグマによって加熱され対流し沸騰している brine があり、そこから出て来た蒸気は reservoir 中を上方へ流れ、その大部分は impermeable cap rock のために reservoir の頂上で止まり fluid は凝縮水として brine の方へ戻る。上昇する蒸気と下降する水の質量が等しければ、蒸気の体積流量は水のそれに比してはるかに大きい。すなわち pore space の大部分を蒸気が占め、水はその残りを占めており、圧力の垂直分布は蒸気によって支配されている。しかし含水率があまり小さいと水は動かないから、水が丁度動くような含水率を持っていないと推定されなければならない。推定された含水率は



第4図 The Geyser における温度 (a) と (b) の垂直分布 (Ramey, 1970)



第5図 vapor-dominated 貯留層内での流体の流れの概念図 (White et al., 1971)

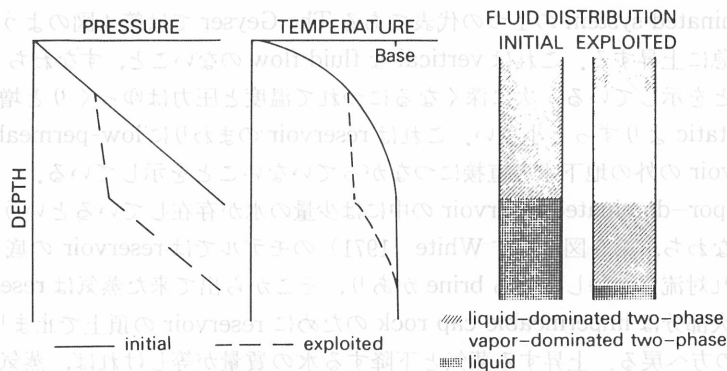
岩石全体の5-10%程度である。

改良された vapor-dominated reservoir のモデルでは蒸気の自然の上昇流は限られた場所からのみおこり、そこから蒸気は横に拡がり、それにつれて熱は cap rock を通して失われ蒸気は凝縮して水になる。このため上昇域からの距離にもなって steam の化学的性質が変化する。酸性の凝縮水は化学的に active で流れに接している岩石を腐食する。このため steam zone が周囲のもとと不透水性の岩石の中へ拡がって行く。

2-6 貯留層の開発による変化

liquid-dominated field で開発が行われ圧力が低下すると、reservoir の一部又は全体で沸騰がおこるか或はそれを激しくする。したがって開発によって、圧力と温度と steam/water 比が変化する。

この様な現象を説明するモデルには simplest lumped-parameter モデルと steam-cap モデルの2つがある。第1のモデルは reservoir 全体に一様に蒸気と水の混合物が含まれているとする



第6図 liquid-dominated 貯留層で開発によって steam cap ができる場合の概念図 (Bolton, 1970; Grant et al, 1982)

もので重力の項を無視したことになる。第2のモデルでは蒸気と水が重力によって分離し、それぞれが集まって水の層の上に蒸気の層が乗っていると仮定する(第6図)。この仮定は vertical permeability と沸騰層の垂直的な拡りに依存している。すなわち vertical permeability が大きく、沸騰が狭い範囲でおこると急速な分離がおこる。逆に vertical permeability が小さく、沸騰が広い範囲でおこると分離はおくれるであろう。

vapor-dominated field は蒸気と動かない水を含む層と、その上にある凝結した層と、深部にある boiling-brine とからなる。開発に伴って局所的に dry な過熱域ができ、それが周辺に拡がって行く。下の boiling layer からは蒸気の供給があり、上の凝結層からも蒸気と水が供給される。

3. Reservoir simulation

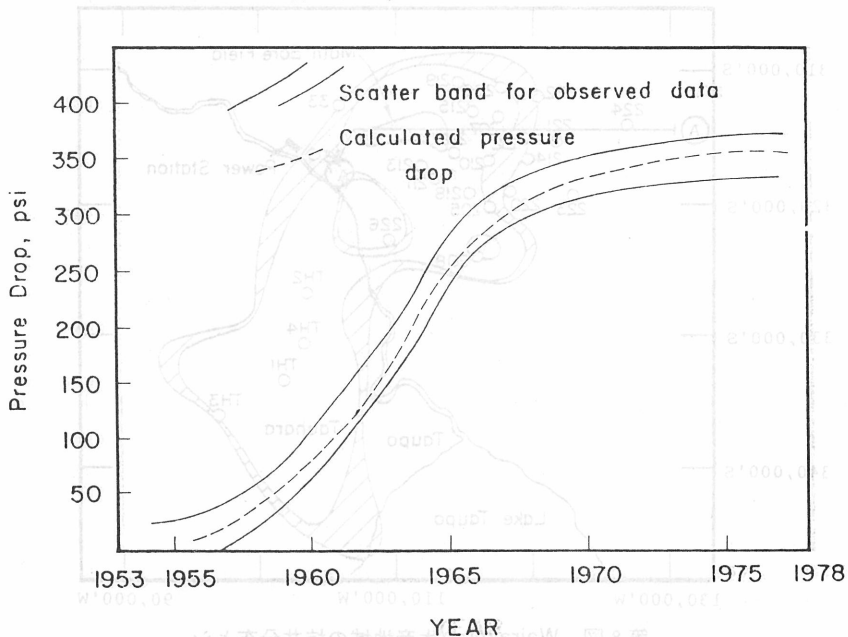
reservoir simulation は geothermal reservoir の history-matching を行い、将来の挙動を予測する目的で行われる。その手順は、およそ次のようなものである。

- 1) モデルの作成
- 2) initial state の仮定
- 3) fluid production に対する応答の計算
- 4) history matching
- 5) 将来予測

Wairakei で行われた多くの simulation のうち2, 3の例を示す。

3-1 予備的次元 simulation

reservoir の主要地域では挙動、特に圧力の時間に伴う低下がほとんど一様であったので予備的計算として次元の simulation が行われた。



第7図 Wairakei の次元のシミュレーションによる RL-900feet レベルの圧力低下の経年変化 (Pritchett et al. 1980)

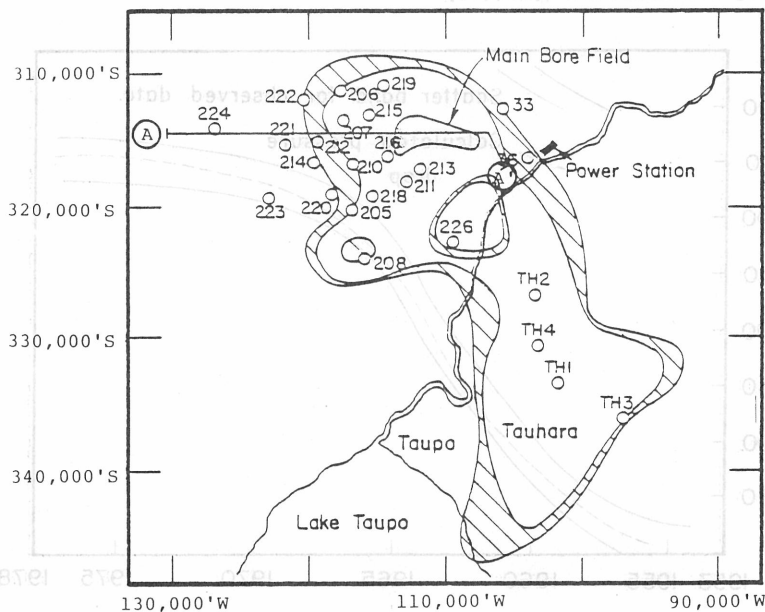
ここでは深さ2,850mまでを22のgridに分割し観測値にもとづいた初期条件と境界条件を与え、開発に伴う貯留層圧力と噴出エンタルピーの変化を計算し、これと観測値の間はかなり良好な一致を得た(第7図)。この計算によって多くのkey parametersを決めることができ、次の二次元simulationに役立てた。

3-2 垂直断面二次元 simulation

主要なbore fieldを横切る東西方向の垂直断面A-A'(第8図)についてsimulationが行われた。Wairakeiに於ては生産に対する応答は面的にほぼ一樣であるので断面の選び方はそれほど重要ではない。上述の予備的simulationの結果を参考にしてparameterが決められた。

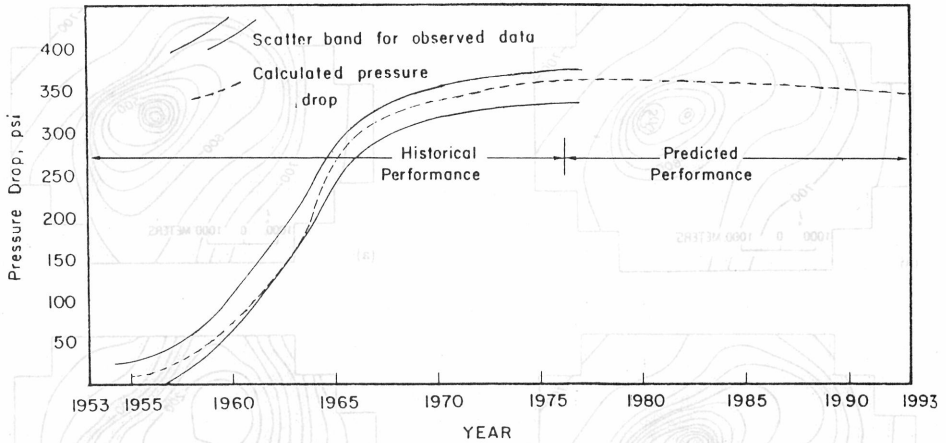
境界条件、初期条件は次のようにとられた。

- 1) 実際の地形と圧力のデーターを考慮して地下水位を定めた。
 - 2) 最下層には大きな水平方向のpermeabilityを持った仮想的な層を考えた。これは局所的な圧力低下に従ってrechargeを与えるためのものである。
 - 3) 試行錯誤によって適当なrelative permeabilityを選んだ。
 - 4) 質量のrechargeまたはdischargeは地表の圧力と大気の圧力の差で行われる。
 - 5) 熱は基準温度との差に比例して放出される。
 - 6) 開発前の底面からのrechargeと地表からのdischargeを与えた。
 - 7) 開発がはじまるとシステムの側面から境界の圧力の低下に比例する流体の流入がある。
 - 8) システムの底面からの流入は開発前の量と圧力低下に比例する量の和である。
- 計算結果はmain fieldでの観測値と比較された。圧力低下、産出流体のエンタルピーは第9図、第10図に示すように共にかかなりよく一致した。更に計算によって1993年までの予測が行われたが、システムは幾分冷却するが圧力はほぼ一定に保たれるという結果が得られた。

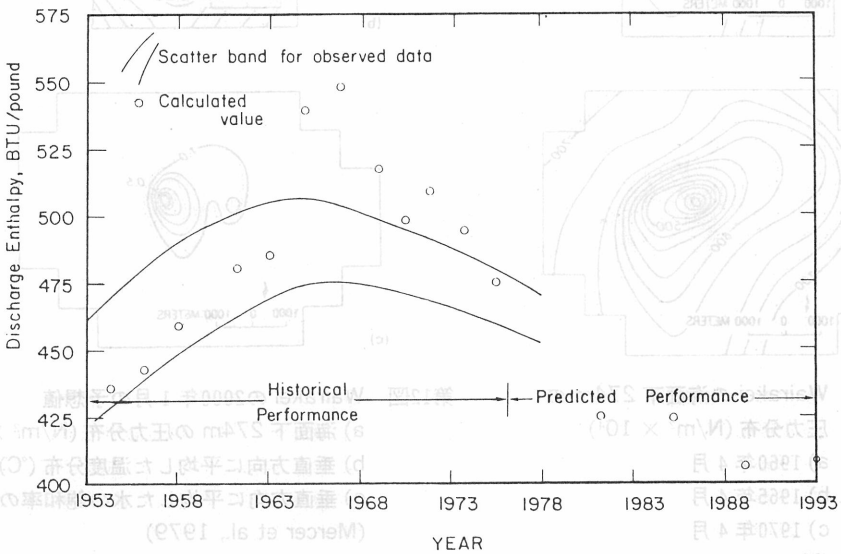


第8図 Wairakeiの生産地域の坑井分布とシ

ミュレーションを行った断面AA'(Pritchett et al., 1980)



第9図 WairakeiのRL-900foot レベルの圧力低下の経年変化と予想値 (Pritchett et al., 1980)

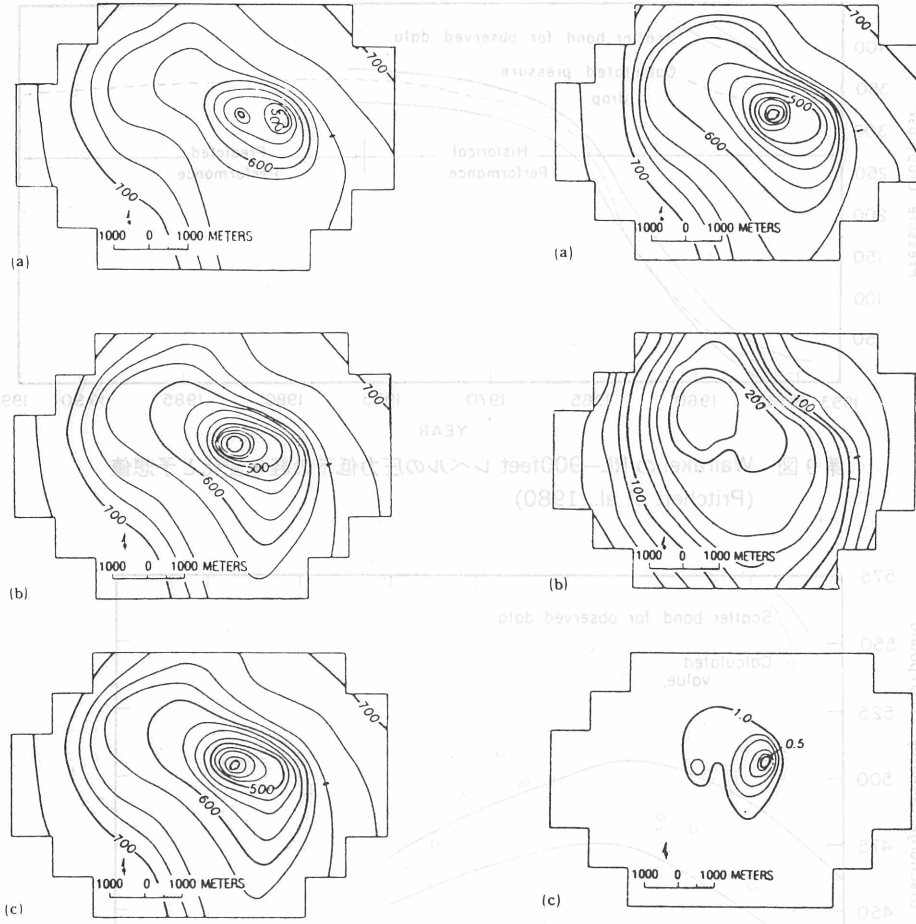


第10図 Wairakeiの discharge enthalpy の経年変化と予想値 (Pritchett et al., 1980)

3-3 擬似三次元 simulation

より精度のよい simulation を行うためには三次元モデルを用いなければならない。それに至る過程の1つとして、擬似三次元 simulation が行われている。これは平面上にとられた各格子子毎に貯留層の層厚について平均した値を用いて二次元として取扱う方法である。simulationの結果の1例として第11図には1960年から1970年にかけての圧力低下が示されているが、これは観測値とよく一致しているといわれている。また第12図に示すように2000年までの予測も行われている。

(1) Bolton, R.S. (1970) The behaviour of the Wairakei geothermal field during exploitation. Vol.3, pp. 1428-1432.
 (2) Donaldson, I.G. (1967) The flow of steam water mixtures through permeable beds. N.Z. J. Sci.



第11図 Wairakei の海面下 274m の
 圧力分布 ($N/m^2 \times 10^4$)
 a) 1960年 4月
 b) 1965年 4月
 c) 1970年 4月
 (Mercer et al., 1979)

第12図 Wairakei の2000年 1月の予想値
 a) 海面下 274m の圧力分布 ($N/m^2 \times 10^4$)
 b) 垂直方向に平均した温度分布 ($^{\circ}C$)
 c) 垂直方向に平均した水の飽和率の分布
 (Mercer et al., 1979)

文 献

- 1) 秋林 智・湯原浩三・中原繁隆・田中正三 (1981) 開いた地熱貯留層内の対流に関する研究 (IV) — 貯留層上面に部分的に広がる不透水部の長さの影響 —, 日本地熱学会誌, 3, 101—114
- 2) Allen, E.T., and Day, A.L. (1935) Hot springs of the Yellowstone National Park, Carnegie Inst. of Washington
- 3) Bodvarsson, G. (1951) Report on the Hengill thermal area. J. Eng. Assoc Iceland, 36, 1
- 4) Bolton, R.S. (1970) The behaviour of the Wairakei geothermal field during exploitation UN1 Vol.2 pp, 1426—1439
- 5) Donaldson, I.G. (1967) The flow of steam water mixtures through permeable beds. N.Z. J. Sci.

- 9, 3-23
- 6) Donaldson, I.G., and Grant, M.A. (1981) The development of a conceptual model of the Rotorua-Whakarewarewa geothermal reservoir, N.Z. 51st Annu. Calif. Reg. Meet., SPE-AIME Paper SPE 9923
 - 7) Einarsson, T. (1942) Ueber das Wesen der heissen Quellen Islands, Soc. Sci. Isl., Reykjavik
 - 8) Fukutomi, T. (1937) On the hot springs of Atami, Izu peninsula, Bull. Earth. Res. Inst., 15, 113-133
 - 9) 福富孝治 (1965) 地下水起源の温泉の温度, 北海道大学地球物理学研究報告, 第13号, 53-70
 - 10) Grant, M.A., Donaldson, I.G., and Bixley, P.F. (1982) Geothermal Reservoir Engineering, Academic Press, New York
 - 11) Ingersoll, L. R., and Zobel, O.J. (1913) Mathematical Theory of Heat Conduction, Ginn. Waltham, Massachusetts
 - 12) Mercer, J.W., and Faust, C.R. (1979) Geothermal reservoir simulation. 3. Application of liquid and vapor-dominated modelling techniques to Wairakei, N.Z. Water Resour. Res. 15, 653-671
 - 13) Nomitu, T., and Seno, K. (1939) The Beppu hot springs and the tide, with the effect of the atmospheric pressure, Mem. Coll. Sci. Kyoto Imp. Univ., Ser. A, 22, 403-428
 - 14) Pritchett, J.W., Rice, L.F., and Garg, S.K. (1980) Reservoir Simulation Studies : Wairakei Geothermal Field, New Zealand, LBL-11497, GREMP-11, SSS-R-80-4313
 - 15) Ramey, H. J., Jr. (1970) A Reservoir Engineering Study of the Geyser Geothermal Field, Submitted as evidence, Reich and Reich, petitioners v. Commissioner of Internal Revenue, 52, T. C. No.74
 - 16) 瀬野綿蔵 (1941) 地温のみによる温泉の可能性について, 地球物理, 5, 216-222
 - 17) Stefansson, V. (1981) The Krafla geothermal field, Northeast Iceland, Geothermal Systems (L. Rybach and L.J.P. Muffler, eds.) 273-294
 - 18) Thorkelson, T. (1910) The hot springs of Iceland. K.Dan. Vidensk. Selsk. Skr.
 - 19) Von Knebel, W. (1906) Studien in den Thermengebieten Islands. Naturwiss. Rundsch.
 - 20) White, D.E., Muffler, L.J.P., and Truesdell, A.H. (1971) Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. Econ. Geol. 66, 75-97
 - 21) 由佐悠紀 (1983) 地熱環境下における地下水流動の数値実験, 日本地熱学会誌, 5, 23-38