

トルコ共和国アフィオン地熱地帯の熱水系

阪口圭一¹⁾・菊地恒夫¹⁾

1. はじめに

筆者らは1991年9月から12月にかけての3か月間、国際協力事業団の短期派遣専門家としてトルコ共和国エネルギー天然資源省鉱物資源調査総局(MTAと略称されている)に滞在し、トルコ中西部のアフィオン(Afyon)地熱地域の調査解析を中心とした技術協力・指導を行った。本稿ではアフィオン地域の熱水系の概要と筆者らが行った熱水の流動解析シミュレーションについて紹介する。現地調査と熱水系モデル作成は主に阪口が、熱水流動シミュレーションは菊地が担当した。

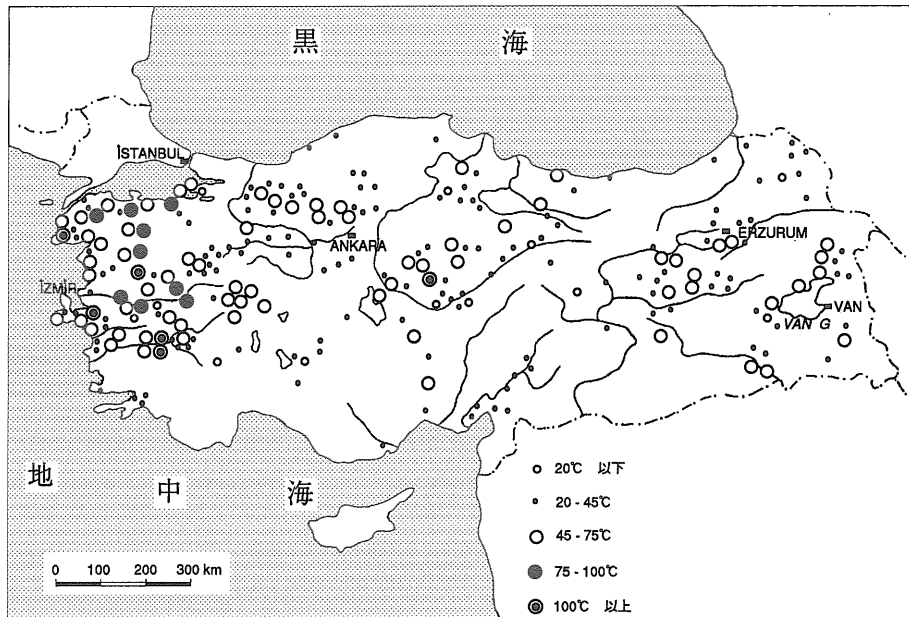
2. トルコの地熱資源

トルコに地熱資源があると聞いて驚く読者も多い

のではないだろうか。トルコと温泉や火山とはイメージがつかないかもしれない。しかし、トルコ(アナトリア地域)には温泉が数多くあり(第1図)、中にはローマ時代から利用されているという由緒正しい温泉まである。また西部のクズルデレ(Kızıldere)には発電容量2万kWの地熱発電所もある(口絵参照)。

トルコの地熱資源の全体像や最近の地熱開発状況については河田・太田(1975)、長谷(1986)、イタリア・トルコ・フランス地熱調査団(1987)、玉生(1991)などに詳しく紹介されているのでここでは簡単に述べる。トルコの地熱資源は大きくは以下の3タイプに分類できる。(第2図)

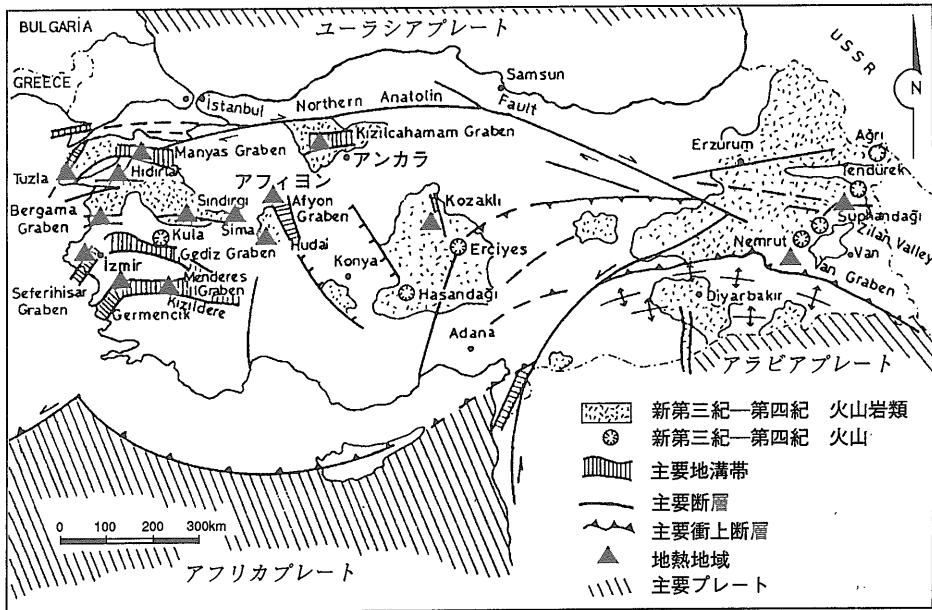
1) 中部から東部アナトリアの火山性地熱資源。第三紀後期から第四紀の火山に伴う地熱資源で、噴気・温泉などの地表兆候は乏しい。現在のところあ



第1図 トルコの温泉分布(Erentoz and Ternek, 1968原図)。

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード:トルコ, 温泉, 地熱資源, 熱水流動シミュレーション



第2図 トルコの地熱資源とテクトニクス(Şimşek, 1985原図)。

まり調査が進んでいない。茂野(1991)が詳しい事例紹介と総括をしている。

2) 北アナトリア断層沿いの地熱資源。中一低エンタルピーの地熱資源で、MTAがここ数年来調査を行い、現在その地熱資源としてのポテンシャルの総括を行っている。

3) 西部アナトリアの地壘地溝に伴う地熱資源。高温温泉などの地表兆候も活発で、発電所があり、従来より地熱資源の利用や開発調査も精力的に行なわれている。

トルコでは基盤岩として石灰岩や大理石などの炭酸塩岩が発達し、多くの地熱地域で主要な貯留層母岩となっている。そのため地熱地帯にはトラバーチン(炭酸塩鉱物沈澱物)が発達していることが多い。観光地として有名なパムッカレ(Pamukkale)はその代表的な例である(口絵参照)。しかし、地熱開発においてはスケール付着による坑井の減衰が大きな問題となっている(Şimşek and Demir, 1991)。

トルコでは温泉も普通の風呂もひっくるめてハمام(hamam)という。トルコの伝統的なハمامの建物は写真1のような丸い屋根が特徴で、温泉を示す地図記号(日本の♨にあたる)はこの屋根の形もとにしている(第3図など)。温泉を利用した伝統的なハمامの様子は浴場と隣接する簡単な宿泊施設

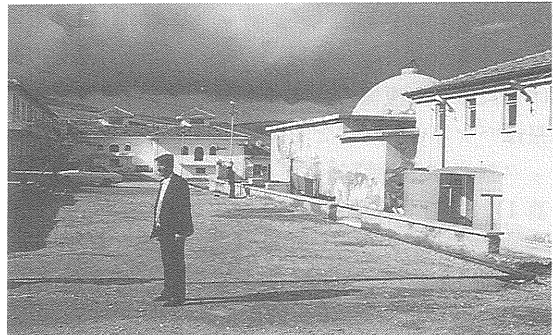


写真1 ゲジェック温泉。奥の丸屋根が風呂場と隣りに宿泊用の建物がある、典型的なハمامの風景。

というものであるが、最近では、特に大都市の近くでは、温水プールなどを備えた温泉リゾートホテルが増えつつある。トルコはイラン、イラクという産油国に接しているが石油資源は少ない。そのかわりと言っていいものか温泉は豊富で、中東の産油国からは大勢の人がトルコの温泉を訪れるそうである。残念ながら石油と温泉では同じ液体でも経済的価値は大変違っているが。

3. アフィオン地熱地域

アフィオン市は首都のアンカラから約250 km 西

南西の内陸部に位置する(第2図)．標高約1000 m, 人口約10万人の都市で, この地方の中心都市である．地熱地域はアフィヨンの市街地の北西約15 kmのところであり, 北西—南東に伸びるアフィヨングラーベンの北西隅に位置している．前に述べた地熱資源のタイプでいうと, 西アナトリアの地壘地溝型の地熱資源に含まれる．位置的には地壘地溝型資源の最も東側の地熱地域である．

第3図にアフィオン地域の地質図を示す．この地域の地質は, 古生代の雲母片岩と大理石を基盤とし, それを不整合におおう鮮新世(一部中新世?)の湖成堆積岩(砂岩, 泥岩, 石灰岩など), 玄武岩, 安山岩質集塊岩からなる．湖成堆積物と玄武岩, 安山岩質集塊岩とは指交関係にある．トルコの地熱地域の常として, アフィオン地域にもトラバーチンの沈澱が見られる．特に北側のウユズ(Uyuzu)温泉付近には長さ1 km にわたって最大30 m 以上の厚いトラバーチンのテラスが発達している(写真2)．

温泉の分布は基盤岩の山を境として, 南東側のエメール(Ömer)温泉, ゲジェック(Gecek)温泉と北西側のウユズ(Uyuz)温泉, クズク(Kızık)温泉に分けられる．南東側のエメール・ゲジェック地区の温泉はハمام(温泉場)として利用されている．ゲジェック温泉は伝統的なハمامの趣を残しているが(写真1), エメール温泉には伝統的なハمامのほかに

アフィオン市によってリゾート用の宿泊施設, 温水プール, グリーンハウスが建設されている(写真3)．一方, 山の北西側では温泉の利用は進んでいない．ウユズ温泉は軍の施設で浴用に利用されているが, クズク温泉の方は付近の住民の洗濯場所となっているだけで温泉としては利用されていない．軍の施設が近くにあるせいであろうか, 温泉の泉温も高く, 大規模なトラバーチンが存在するのに, 温泉地化学調査や坑井調査などは行われていない．

エメール・ゲジェック地区では1970年以來MTAによって11本の坑井が掘削されている(第1表, 第5図)．ほとんどは地熱資源探査というより温泉開発を目的として掘削されたもので, アフィヨ

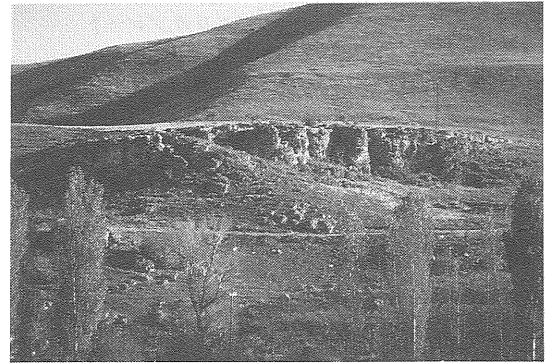
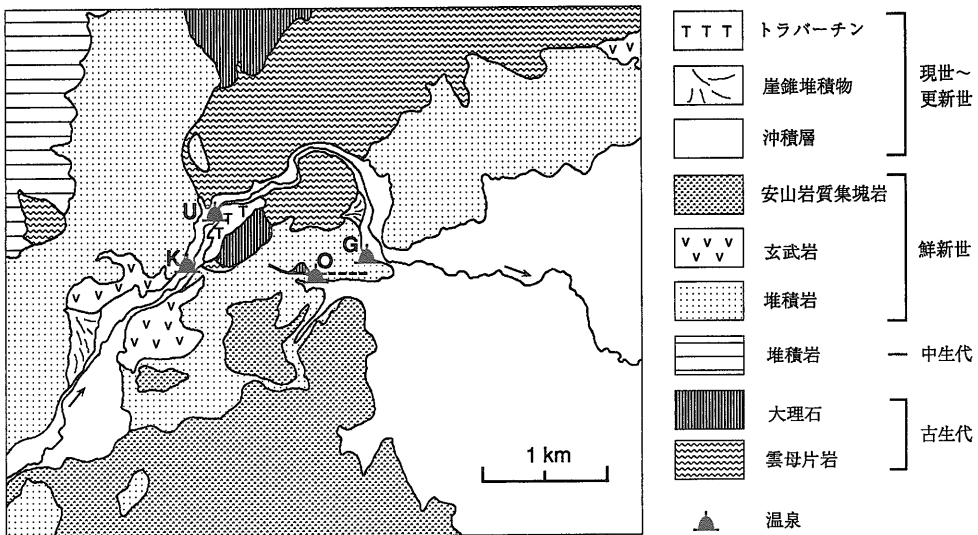


写真2 ウユズ温泉近くのトラバーチンのテラス．



第3図 アフィオン地域の地質図 (Metin et al., 1987原図を一部修正)．

Ö:エメール温泉, G:ゲジェック温泉, U:ウユズ温泉, K:クズク温泉



写真3 エメール温泉全景。右側が昔からのハمامで左側にアフィオン市が作った近代的な宿泊施設や温水プールがある。

第1表 アフィオン地域の坑井。熱水の温度と流量は掘削直後のデータ。

坑井名	掘削年	深度 (m)	熱水温度 (°C)	流量 (l/sec)
R-240	1970	120	92	40
R-260	1970-71	166	92	20
AF-1	1974	905	98	20
AF-3	1974-75	250.63	97	110
AF-4	1982	125.7	95	80
AF-5	1982	207.4	79	15
AF-6	1982-83	211.4	92	10
AF-7	1983	210	93	5-6
AF-8	1983-84	250	91	5-10
AF-9	1990	320	49.5	17
AF-10	1990	318	96	100

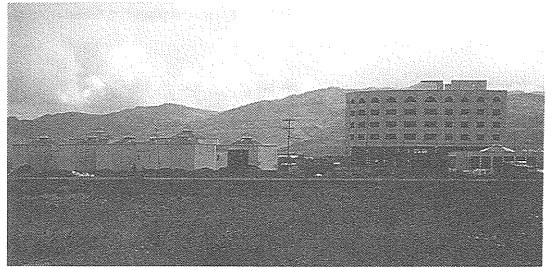


写真4 建設中の温泉リゾートホテル。AF-9号井はこのホテルのために掘削された。

ン市や企業・個人の所有となっている。11本の坑井のうち現在使用されているのは2本だけで、AF-4号井がゲジェック温泉に湯を供給し、AF-7号井からエメール温泉に給湯されている。AF-9号井は現在建設中の温泉ホテルへの給湯のために掘削され、待機中である(写真4)。エメール温泉では、AF-7号井からの熱水を熱交換器に通して温泉、温水プール、宿泊施設の暖房、グリーンハウスに給湯している。エメール・ゲジェック地区においても熱水からのスケール沈澱は大きな問題である(写真5)。現在給湯に利用されているAF-4号井とAF-7号井はいずれも坑井の口元でスケール防止剤を注入している。エメール温泉では現在利用している地上の熱交換器を使う前には坑井内熱交換器を試験的に利用していたこともある。

アフィオン地域の坑井から得られた熱水の分析値を第2表に示す。中性のCl-HCO³型の熱水である。熱水の温度は、最も西側のAF-5号井で79°C、



写真5 AF-1号井。口元がスケールによってすっかり覆われてしまっている。

南に外れたAF-9号井で50°Cとやや低いものの、その他の坑井では91—98°Cの温度が得られている。シリカ温度計(石英)では100—140°Cを示す。

4. アフィオン地域の地熱系モデル

第2表 アフィオン地域の坑井の主要溶存化学組成とシリカ温度計(石英)。

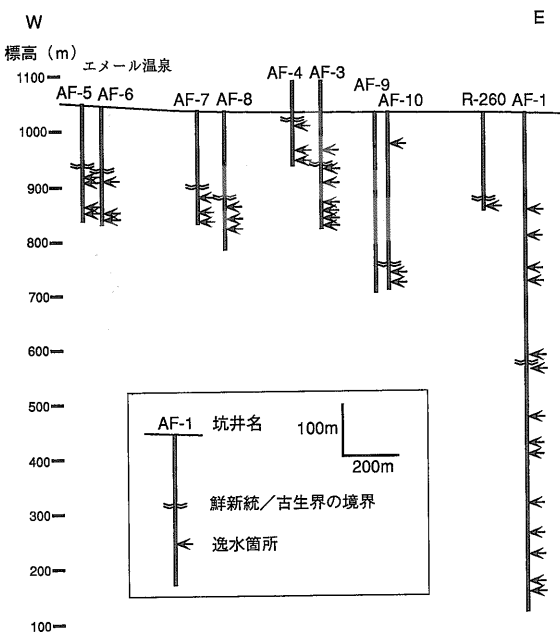
坑井名 文献	AF-1 *5	AF-3 *1	AF-4 *5	AF-5 *5	AF-6 *3	AF-7 *2	AF-9 *6	AF-10 *4
pH	7.02	8.3	7.2	7.1	7.4	7.6	6.48	7.7
(mg/l)								
Cl ⁻	1681.85	1780	2007	1795	1744	1790	900	1814
SO ₄ ²⁻	458.82	497.09	461	463	532	551	425	496
HCO ₃ ⁻	1131.55	866.45	775	811	540	615	1000	665
Na ⁺	1480	1525	1600	1565	1600	1700	900	1440
K ⁺	110	110	115	117	200	160	16	108
Ca ²⁺	110	59.12	20	17	28	48	124	35
Mg ²⁺	17.27	15.2	17	21	20	17	51	12
SiO ₂	64.5	88	83	54	79	116	120	103
B	11.36	11.9	8.8	8.8	7.3	7.7	4.0	8.4
As	0.32	1.3	1.4	0.85	3.4	1.52	0.17	0.54
Li ⁺			2.8	2.8	2.8	2.8	1.3	2.2
total Al							<0.1	
total Fe	1.18		0	0	0	0	0.1	
T.D.S.	4702	4688	4656	4716	5072	4544	2800	4366
T Q(adia) (°C)	114	128	125	107	123	141	143	135
T Q(cond) (°C)	114	130	127	106	124	146	148	139

*1 Erisen(1978); *2 Erisen et al.(1984); *3 Erisen et al.(1985); *4 Kalkan and Uzel(1990); *5 MTA(1990); *6 Tamgaç et al.(1990).

第4図はアフィオン地域の坑井の地質と逸水箇所をエメール温泉を通る東西断面に投影したものである。主な逸水箇所は基盤の雲母片岩・大理石内と一部基盤岩と鮮新統の境界付近であり、これからアフィオン地域の主要な貯留層は基盤の結晶片岩と大理石中の断裂であり、鮮新統はキャップロックとなっていることがわかる。基盤岩まで達していない

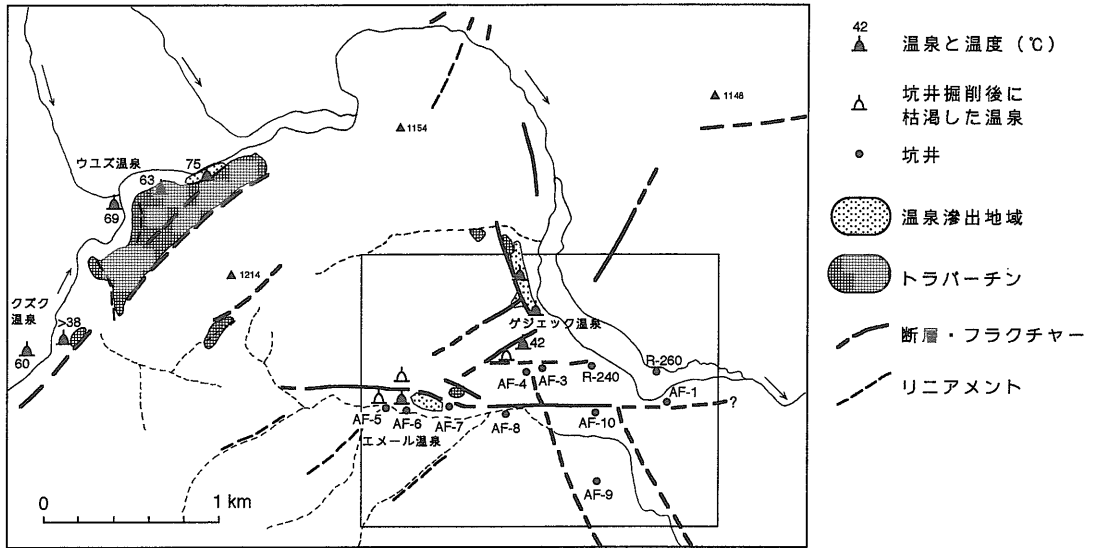
AF-9号井で熱水の温度が他の坑井に比べて著しく低く、溶存成分量が少ないこともこれを裏付けている。

第5図は空中写真判読、地表地質調査、坑井地質データ、比抵抗調査データをもとに作成したアフィオン地熱地域の断層分布である。空中写真による観察では、エメール・ゲジェック地域およびウユズ・クズク地域は周辺に比べて断層やリニアメントの分布密度が大きい、エメール・ゲジェック地域ではE-W方向、NE-SW方向のリニアメントが明瞭で、NW-SE方向のリニアメントがこれに続く。ウユズ・クズク地域ではNE-SW方向のリニアメントが卓越している。地表の地質調査では、鮮新統の作る地形が緩やかなこともあり、明瞭な断層露頭を確認できる場所はあまり多くない。源泉の直線的な配列や、温泉が湿地状に滲出している場所の伸びの方向から断層が推定された。この断層分布は次に述べる熱水流動シミュレーションにおいて、地層の透水性分布の初期モデル(第6図)を与える際に利用された。



第4図 エメール温泉を通る東西方向の断面に投影した坑井の地質と逸水箇所。

アフィオン地域の坑井はすべて被圧されており、坑口の標高に坑口圧に相当する水柱の高さを加えた高度、すなわち水位面高度、の分布はAF-3号井とAF-10号井で高い(第3表)。湧出温度や化学組成にはあまり明瞭な水平変化は見られないが、やはりAF-3, 4, 7, 10号井がやや高温を示す。エメール温泉の西側にも明瞭な断層はあるのに地表兆候が無



第5図 エメール・ゲシエック地熱地域の温泉、坑井、断層。図中の枠は熱水流動シミュレーションを実施したグリッドの範囲。

いこと、坑井掘削後に西側でやや標高の高いところの温泉が涸れてしまったことなどから、熱水の上昇の中心はAF-3, 4, 7, 10号井のあたりであり、上昇してきた熱水は断層に沿って周囲に拡がっていくものと考えられる。

北側のウユズ・クズク温泉とのつながりについて興味を持たれるところであるが、残念ながら北側の温泉についてはほとんど調査が行われていないので、現在のところ手掛かりが無い。エメール・ゲシエック地区の温泉が坑井掘削後に枯渇や減衰することが多いのに対して、聞き取り調査では北側の地域には枯渇や減衰は無いらしいので、浅い部分での連絡は無いのかもしれない。

エメール・ゲシエック地熱系の熱源については不明な点が多い。これは西アナトリアの地壘地溝型の地熱地域の一般的特徴である(玉生, 1991)。付近には熱源となるような新しい火山活動は無く、鮮新世の玄武岩は熱源となるには古すぎると考えられ、また規模も小さい。Tezcan (1979)はアフィオン地域で4.0 HFUという高い地殻熱流量を報告しており、エメール・ゲシエック地域に断層系が発達していることと考え合わせると、この地域の熱源は、特定のマグマ溜りなどではなく高い地下温度勾配と深部までの地下水循環に求められるのかもしれない。

5. 熱水流動シミュレーション

地質調査や空中写真の判読から推定されたアフィオン地域のフラクチャー分布及び透水係数分布を基に同地域の地下水位をシミュレーション計算により求めた。得られた計算結果は同地域に掘削された坑井のうち、AF-1, R-260, AF-3, AF-7, AF-10の坑口圧を地下水位に変換した値と比較した。

5.1 使用したプログラム

シミュレーション計算に使用したプログラムは、Kinzelbach (1986)のSAM6-2.BASである。このプログラムでは、まずモデル地域を複数の長方形の微小体で分割する。微小体の厚さは帯水層の飽和帯の厚さである。次に各微小体の中心である節点に透水量係数、初期水頭、貯留係数の値を与える。すなわち1個の節点が各微小体全体を代表する。また揚水(涵養)の位置及び量などのパラメータを指定し、一定時間または定常状態に達したときの地下水位を差分法を用いて計算する。なお、透水量係数は、地層中における水の流れ易さを表す係数である透水量係数に帯水層の飽和帯の厚さをかけたもの、貯留係数は水頭が単位量だけ増加した場合に、単位断面積と高さmを有する帯水層内の鉛直土中の中に、圧縮性によって新たに貯えられる水量を表す(キンツェルバッハ, 1990)。透水量係数の単位はm/s

で、貯留係数は無次元である。

5.2 コントロール・データ

前述したようにアフィオン地域のいくつかの坑井では、流量と坑口圧が測定されている。その結果を第3表に示す。ここに示した坑口圧を、各坑井における水位に変換できる。第3表には変換した水位も合わせて示してある。これらの水位は標高1023.1 mを基準とした値である。なお、1023.1 mはAF-1号井の坑口の標高である。以後これらの水位を観測水位という。

5.3 モデル及び計算方法

計算を行なうモデル地域として、左下の座標がY=75.50, X=101.85, 右上の座標がY=77.50, X=103.35 (トルコの地形図の表記法による)の地域を選んだ。第4図の四角い枠で囲んだ部分がそれに当たる。この枠を横20, 縦15の正方形(厚さも考慮すれば直方体)に分割した。次にその正方形の中心を節点とし、左上の節点が(1,1), 右下の節点が(20,15)となるように番号づけた。節点の間隔は100 mである。

次に、地質調査の結果得られたフラクチャー分布に従って、この地域の透水係数分布を3つに大別

した。1つは非常に透水係数が低い地域、これはフラクチャーが存在しない地域に当たる。2つ目は、やや透水係数が高い地域、これは小規模なフラクチャーが存在する地域である。3つ目は、透水係数が高い地域で、大規模なフラクチャーが存在する地域である。第6図に大別した結果を示す。最初の行および列に示した数字が、各々XおよびY方向の節点番号である。

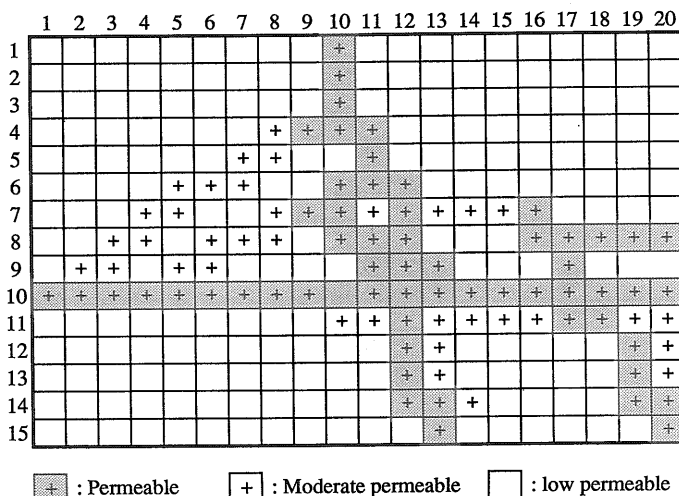
次にアフィオン地域の帯水層の性質について検討した。この地域の帯水層は、坑井の温度検層から判断して、蒸気—熱水の2相状態ではない。これはKinzelbachのプログラムを使用する必要条件である。また、帯水層は第3表に示したように、坑口圧が1より大きく被圧されている。

熱水の流動はある方向だけが流れやすいことが無く、isotropicであると仮定した。これは同地域が北西—南東及び北東—南西方向のフラクチャーの交点にあたり、領域内に多くのフラクチャーが存在するため、地質学的な観点から見れば等方的であると推定したからである。ただし、今回使用したプログラムは基本的には多孔質な帯水層を想定したものであり、より精密な解析のためにはフラクチャーを考

坑井名	流量(l/m)	坑口圧(kg/cm ²)	標高(m)	変換した水位(m)	測定日
AF-1	20	3.9	1023.08	39	74年7月
R-260	18	3.9	1026.19	42.11	71年1月
AF-3	60	2.4	1064.61	65.53	75年1月
AF-7	11	3.2	1041.85	50.77	83年11月
AF-10	100	7.8	1027.62	82.54	90年7月
AF-10	100	3.1	1027.62	35.54	91年

第3表

アフィオン地域の坑井で測定された坑口圧と流量。坑口圧から水位も計算してある。



第6図

推定したアフィオン地域の透水係数分布。

慮したシミュレーションを行なう必要がある。

今回の計算では、帯水層のタイプ(被圧か、等方か)、熱水の生産が行なわれている節点位置とその量、熱水の供給(recharge)が行なわれる節点位置、貯留係数の分布等のパラメータをまず与え、これらのパラメータは計算の過程で変えなかった。

しかし、初期水頭、透水量係数、recharge量はまず適当な値を与えておき、それにより計算された水位と観測水位を比較し、その結果を見て、これらのパラメータを少し変えるという試行錯誤を繰り返し、最も良さそうな値を求めた。ただし、透水量係数は第6図に示した様な大局的な分布は変えていない。計算した水位は、これ以上変化が起きない定常状態のものである。

1つ問題点は、第3表に示したようにAF-10号井では非常に短い期間で坑口圧が大幅に変動してい

る点である。実際にこのような変動が生じたのかもしれないし、あるいは測定の誤りと言うことも考えられるが、原因については明確にできなかった。そこで、2つのデータについて各々シミュレーション計算を実施することにした。便宜上、最初の測定データを基にしたものをモデルA、2番目のデータをモデルBとした。

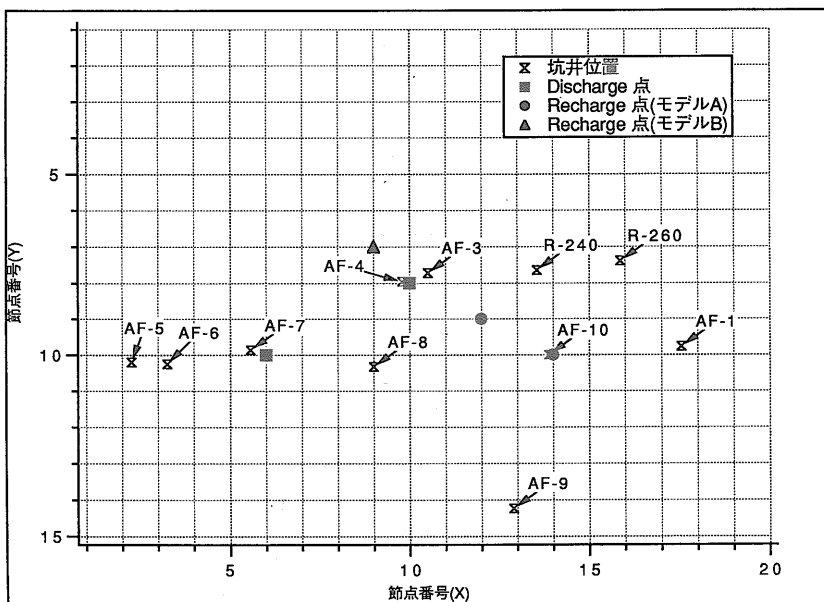
5.3.1 モデルA

本モデルの計算パラメータを第4表に示す。主要なパラメータについて説明すると、帯水層のタイプは被圧、等方である。計算領域内ではAF-4、AF-7の2つの坑井から熱水が生産(discharge)されている。実際の坑井位置と節点位置は一致しないので、坑井に最も近い節点で熱水の生産が行なわれると仮定し、それを(x,y)=(10,8), (6,10)の節点(discharge点)とした。これらの坑井の詳しい生産

パラメータ	モデルA			モデルB		
	被圧	等方		被圧	等方	
帯水層のタイプ						
X方向の節点数	20			20		
Y方向の節点数	15			15		
X方向の節点間隔	100			100		
Y方向の節点間隔	100			100		
dis(re)chargesの数	4			3		
dis(re)chargeの座標及び量(m ³ /s)	10	8	-0.06	10	8	-0.06
(Discharge<0, Recharge>0)	6	10	-0.01	6	10	-0.01
	14	10	5.8	9	7	6.8
	12	9	0.8			

第4表

モデルAおよびBの計算パラメータ。



第7図

モデルの節点と坑井位置、discharge及びrecharge点の位置関係。

履歴がないので、生産量は各々 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ と仮定した。これらのパラメータは最初に与え、計算過程で変更はしない。

次に水が計算量域内に流入する節点(recharge点)を2点仮定し、その位置は(14,10), (12,9)で、recharge量は $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。このrecharge点では水が計算領域内に供給されていると仮定している。recharge点をこの位置においては、AF-3, AF-10で観測された坑口圧と温度が周囲の坑井に比べて高いためである。節点と坑井位置、discharge及びrecharge点の関係を第7図に示した。

初期水位は次の5つの節点を除き50 mと仮定した。5つの節点の位置と水位は以下のとおりである。これらの節点では水位はこの値から変化しない。

- (20,8) : 25 m
- (1,10) : 35 m
- (20,10) : 20 m
- (13,15) : 35 m

(20,15) : 35 m

これらの節点は第6図に示したように、計算領域の最も外側の透水係数の大きい部分である。

第8a図には透水量係数分布を示した。厳密に言えば透水量係数と透水係数は違う量であるが、今回の解析では、帯水層の厚さは計算量域内で一定と仮定しているので、ほぼ同じものと考えて差しつかえない。仮定した値は、

- 地域 透水量係数 (透水係数)
- 透水係数が小さい地域 : 0.003 m/s (0.0036 md)
- 透水係数がやや大きい地域 : 0.03 m/s (0.036 md)
- 透水係数が大きい地域 : $0.2\text{--}0.3 \text{ m/s}$ ($0.24\text{--}0.36 \text{ md}$)

貯留係数は、上述の5つの節点は 1×10^{20} とし、その他の節点は0とした。5つの節点に非常に大きな値を与えたのは、水がいくらこの節点に流れ込んでも、これらの節点の水位が変わらないようにするためである。即ち、これらの節点から水が計算領域外に流れ出すことを想定している。他の節点で0としたのは、これ以上新たにこの節点に水が蓄えられない状態、即ち定常状態を求めるためである。

a

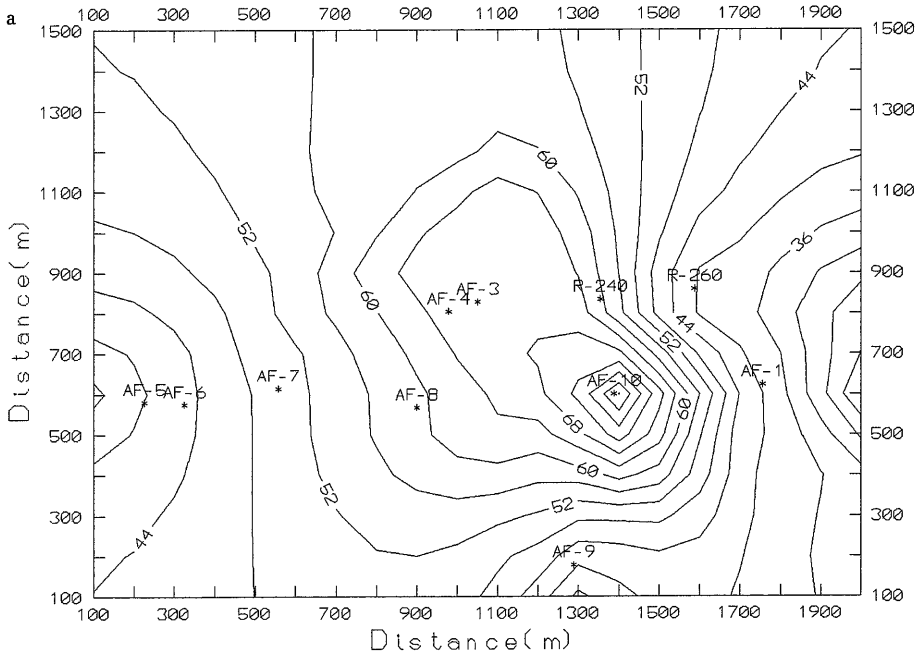
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1										0.3										
2										0.3										
3										0.3	0.3									
4								0.03	0.3	0.3	0.3									
5						0.03	0.03				0.3									
6					0.03	0.03	0.03			0.3	0.3	0.3								
7				0.03	0.03			0.03	0.3	0.3	0.03	0.3				0.3				
8			0.03	0.03		0.03	0.03	0.03		0.3	0.3	0.3	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
9		0.03	0.03		0.03	0.03					0.3	0.3	0.3				0.3			
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
11		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.03	0.03
12													0.3	0.03				0.3	0.3	0.03
13													0.3	0.03					0.3	0.03
14													0.3	0.3	0.03				0.3	0.3
15														0.3						0.3

第8a図
モデルAの透水量係数分布。数値を表示していない透水量係数が小さい地域の値は 0.003 m/s 、透水量係数がやや大きい地域の値は 0.03 m/s 、透水量係数が大きい地域の値は $0.2\text{--}0.3 \text{ m/s}$ である。

b

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1										0.3										
2										0.3										
3										0.3	0.3									
4								0.03	0.3	0.3	0.3									
5							0.03	0.03				0.3								
6					0.03	0.03	0.03			0.3	0.3	0.3								
7				0.03	0.03			0.03	0.3	0.3	0.03	0.3					0.3			
8			0.03	0.03		0.03	0.03	0.03		0.3	0.3	0.3	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
9		0.03	0.03		0.03	0.03					0.3	0.3	0.3				0.3			
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.5	1.5	1.5	1.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
11		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	1.5	1.5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.03	0.03
12												1.5	0.03					0.3	0.3	0.03
13													1.5	0.03					0.3	0.03
14														1.5	1.5	0.03			0.3	0.3
15															1.5					0.3

第8b図
モデルBの透水量係数分布。数値を表示していない透水量係数が小さい地域の値は 0.003 m/s 、透水量係数がやや大きい地域の値は 0.03 m/s 、透水量係数が大きい地域の値は $0.3\text{--}1.5 \text{ m/s}$ である。この値はモデルAに比べて、5倍大きい。



第9a図
モデルAの計算水位をコンター表示したものの。

5.3.2 モデルB

本モデルの計算パラメータを第4表に示す。モデルAと異なるパラメータについて説明する。recharge点は1点とし、その位置は(9,7)の節点で、recharge量は $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。これはこのモデルの場合、測定された坑口圧がAF-3号井で高く、AF-10号井は周囲の坑井に比べて平均的な値だからである。これらの位置関係を第7図に示した。

初期水位はモデルAと同様、次の4つの節点を除き50mと仮定した。4つの節点の位置と水位は以下のとおりである。

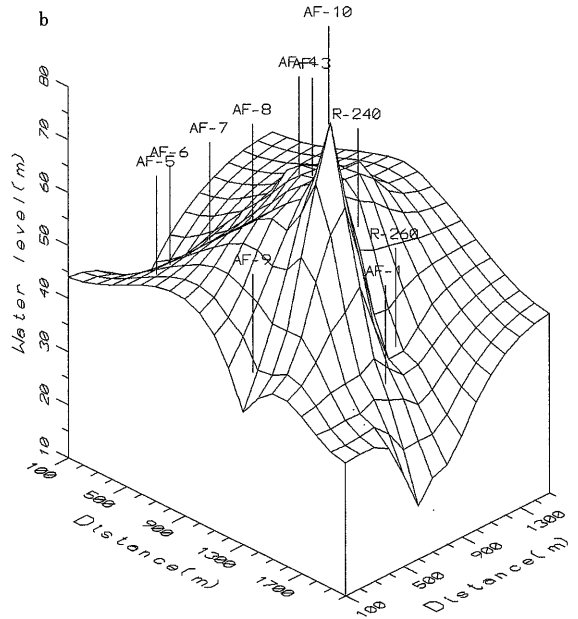
- (20,8) : 40 m
- (20,10) : 43 m
- (13,15) : 10 m
- (20,15) : 25 m

モデルAと比べて、(13,15)の初期水位が低い。その他はやや高めである。また、節点(1,10)は、モデルBでは水位が変化する節点になっている。

第8b図には透水量係数分布を示した。仮定した値は、

- | 地域 | 透水量係数 (透水係数) |
|--------------|---|
| 透水係数が小さい地域 | : 0.003 m/s (0.0036 md) |
| 透水係数がやや大きい地域 | : 0.03 m/s (0.036 md) |
| 透水係数が大きい地域 | : $0.3\text{-}1.5 \text{ m/s}$ ($0.36\text{-}1.8 \text{ md}$) |
- 貯留係数は、上述の4つの節点は 1×10^{20} とし、

1992年8月号

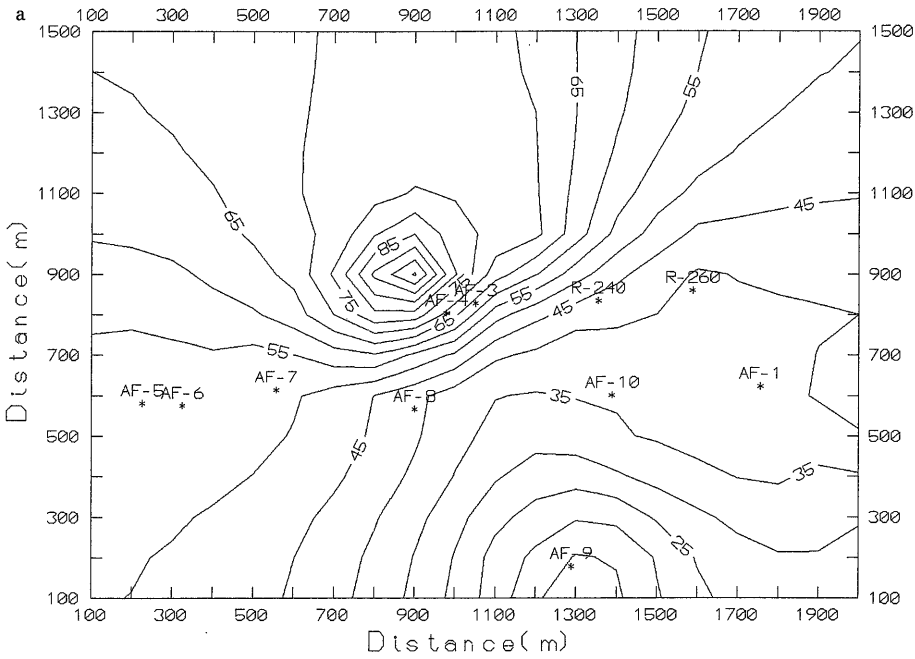


第9b図 a図の鳥瞰図表示。

その他の節点は0とした。

5.4 結果

第9a図には、モデルAの各節点の水位の計算結果のコンター図を、第9b図にはその鳥瞰図を示した。水位は標高1023.1mを0とした値である。水位はAF-10号井付近が最も高く、東に行くにつれ



第10a 図
モデル A の計算水位をコンター表示したものの。

低くなっている．また南側でも多少低くなっている．計算結果と観測水位の概略の違いは

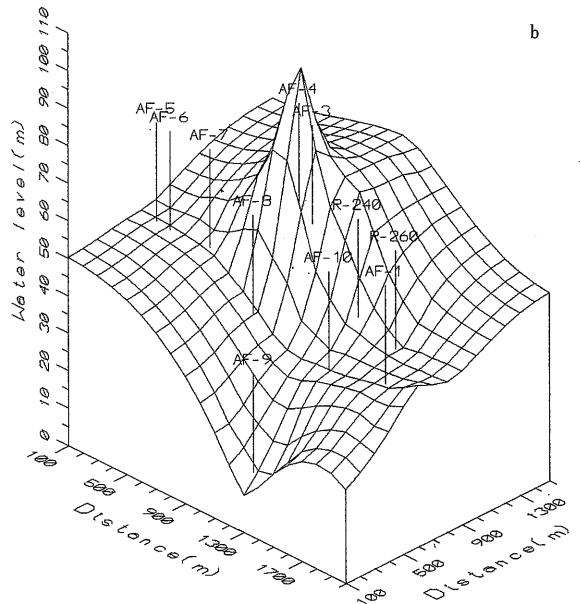
坑井名	観測水位(m)	計算水位(m)	誤差(%)
AF-1	39	40	3
R-260	42.11	40	-5
AF-3	65.53	66	1
AF-7	50.77	50	-2
AF-10	82.54	83	1

同じく、第10a 図にはモデル B の計算水位のコンター、第10b 図にはその鳥瞰図を示した．モデル A との違いは、水位が最も高い部分は AF-3 号井のやや北北西側であり、AF-9 号井付近の水位が最も低い．計算結果と観測水位の概略の違いを以下に示す．

坑井名	観測水位(m)	計算水位(m)	誤差(%)
AF-1	39	37	-5
R-260	42.11	40	-5
AF-3	65.53	65	-1
AF-7	50.77	52	2
AF-10	35.54	36	1

5.5 熱水流動シミュレーションのまとめ

アフィオン地域に掘削された坑井で測定された坑口圧から地下水位を計算し、その値と地質調査の結果得られた透水係数分布を基に2つのモデルを仮



第10b 図 a 図の鳥瞰図表示．

定し、アフィオン地域の地下水位のシミュレーション計算を行なった．

その結果、モデル A では recharge を AF-10 号井付近に仮定すると、観測値と計算水位が最も良く一致することが分かった．このモデルでは大部分の水が東に流れ出す．モデル B では recharge を AF-3 号井付近に仮定すると、観測値と計算値の一致が

最も良い。また、大部分の水は南に向かって流れ出すことが判明した。

ただし、今回求めた結果は決して最終的なものではなく、シミュレーションのやり方を示したものだと考えたほうがよい。なぜなら、アフィオン地域の坑井データが少ないからである。モデルをさらにリファインするためには次のことが考えられる。

1. 温度回復試験を実施すること。温度データは貯留層解析を実施するための基本データである。さらに、比抵抗、音波、密度、中性子などの検層を実施することにより、フラクチャーの位置を知ることができる。
2. recharge や discharge 領域を知るために、ヒートフローの測定を行なうことが有用である。
3. 坑口圧と流量を測定することが必要である。繰り返し測定することがベターである。
4. 透水係数を推定するために岩石のコアの透水係数を測定することは、多少役に立つかも知れない。また、アイソトープを使ったトレーサー試験も有用である。
5. 貯留層の広がりや推定するために、坑井干渉テストや圧力遷移テストは非常に有用である。
6. また、熱水が坑井内に流入している点などで、キャピラリーチューブ・タイプの圧力計で圧力を長期間モニターすることも非常に有用である。

6. おわりに

トルコでは電力用の資源としては水力がまだかなり余裕があるとのことで、地熱資源の利用も発電を第一に考える必要は無く、観光資源としての温泉を含む地熱の直接利用が今後当面の重要な課題となることと考えられる。その多くは本格的な貯留層評価を行う必要も余裕も無い小規模な開発になるであろう。そのような場合には、本稿で紹介したような、必要なデータが比較的簡単に得られ、手法としてはシンプルなモデル計算が役に立つ場面が出てくるであろう。

謝辞：今回のトルコ派遣にあたっては国際協力事業団の方々、特に派遣三課の田中 泉氏に大変お世話になった。また地質調査所国際協力室の方々のお手

ををわずらわせた。現地での研究協力においては MTA エネルギー部 Münire Hüriyaşar 部長、Zeynel Demirel 副部長をはじめとするスタッフの協力をいただいた。特に地熱課長で筆者らのカウンターパートをつとめた Ali Koçak 氏には研究および生活の全般にわたってお世話いただいた。同課の Erdoğan Örmöz, Alev Demir-Bülbül, Bilge Erişen の各氏には資料収集、現地調査同行、研究内容についての議論など色々の点でお世話になった。国際協力事業団長期派遣専門家として MTA で指導しておられる藤井紀之博士には公私にわたってお世話になった。地質調査所地熱部長谷紘和部長、玉生志郎地熱探査課長、茂野 博氏(現在北海道支所)および環境地質部の須藤 茂氏(現在九州地域地質センター)には今回の派遣全般にわたってご指導いただいた。以上の方々から感謝いたします。

引用文献

- Erentoz and Ternek (1968): Le sources thermominerales de la Turquie et l'étude de l'énergie géothermique. Bull. MTA, no. 70, 49-57.
- Erişen, B. (1976): Afyon bölgesi Ömer-Gecek jeotermal alanında yapılan AF-1 ve AF-3 sondajlarına ilişkin kuyu bitirme raporu. MTA Report, 96p. (unpublished)
- Erişen, B., Akbaşlı, A. and Özçelîk, S. (1984): Afyon bölgesi Ömer-Gecek jeotermal alanında yapılan AF-7 ve AF-8 sondajlarının kuyu bitirme raporu. MTA Report, 26p. (unpublished)
- Erişen, B., Akbaşlı, A., Yücel, B. and Güner, A. (1985): Afyon bölgesi Ömer-Gecek jeotermal alanında yapılan AF-4, AF-5 ve AF-6 sondajlarının kuyu bitirme raporu. MTA Report, 48p. (unpublished)
- 長谷紘和(1986):トルコ南西部の地熱—特にクズルデレ(KIZILDERE)の現況。地熱技術, 11, no. 3&4, 49-57.
- イタリア・トルコ・フランス地熱調査団(1987):トルコの地熱開発。地熱, 23, p. 457-480.
- Kalkan, İ. and Uzel, Ö. (1990): Afyon AF-10 (Turunç) sıcaksu sondajı kuyu bitirme ve korunma ananları etüt raporu. MTA Report, 10p. (unpublished)
- 河田清雄・大田良平(1975):トルコの地熱開発。地質ニュース, no. 247, 39-43.
- Kinzelbach, W. (1986): Groundwater modeling, 333p. Elsevier science publishers, Sara Burgerhartstraat, The Netherlands.
- W. キンツェルバッハ(1990):パソコンによる地下水解析, 286p. 森北出版, 東京.
- Metin, S., Genç, S. and Bulut, V. (1987): Afyon ve dolayının jeolojisi. MTA Report, 74p. (unpublished)
- MTA Genel Müdürlüğü (1990): Türkiye'deki sıcaksu, kaplıca ve jeotermal enerji sondajlarına ait kuyu logları ve suların kimyasal analizleri (Ege Börgesi II). MTA Report. (unpublished)

茂野 博(1991):トルコ中央部の地熱系とその概念モデル. 地熱エネルギー, **16**, p. 347-381.

Şimşek, Ş. (1985): Present status and future development of the Denizli-Kizildere geothermal field of Turkey. Geothermal Resources Council Trans., **10**, 203-215.

Şimşek, Ş. and Demir, A. (1991): Reservoir and cap rock characteristics of some geothermal fields in Turkey and encountered problems based on lithology. Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan, **13**, 191-204.

玉生志郎(1990):トルコにおける最近の地熱開発状況. 地熱, **27**, 111-136.

Tamgaç, Ö. F., Kalkan, İ. and Taş, N. (1990): Afyon AF-9

(Oruçoğlu) sıcaksu sondajı kuyu bitirme ve korunma alanları etüt raporu. MTA Report, 10p. (unpublished)

Tezcan, A. K. (1979): Geothermal studies, their present status and contribution to heat flow contouring in Turkey. in CERMAK, V. and RYBACH, L. eds. Terrestrial Heat Flow in Europe, Springer Verlag, 283-292.

SAKAGUCHI Keiichi and KIKUCHI Tsuneo (1992): On the geothermal system of the Afyon area, Turkey.

〈受付: 1992年 5月29日〉

地学と切手

チェッコスロバキア風物誌 2 題

チェッコスロバキア北西部の風物誌 2 題である。カルロビ・バリ (Karlovy Vary, 1956年) 中央ヨーロッパにはハンガリーかチェッコにかけて、いくつかの非火山性温泉が分布するが、これもその一つである。西ボヘミアのテプラ川とエルベ川の支流オブジェ川の合流点にある世界的に有名な温泉・保養地で、ドイツ名ではカールスバートである。これは皇帝カール四世にちなんだもの。北海道登別温泉近くのカルルス温泉もこれから名付けられ

たものである。

鉱泉は43~73°Cで、浴用にもなるが飲用に供えられることが多い。街の中に給湯所が多く、保養客が容器で温泉水をくんで、飲用にしている。ゲート、ベートーベンはじめ有名人が保養に訪れたことで名高い。

ウラニウムの町のヤーキモフ (Jachymov, 1966年)

カルロビ・バリの少し北、エルツゲビルゲ(ボヘミア)の山中のヤーキモフは昔はヨアヒムスタールと言われ、ピッチブレンドが最初に発見され、その後キューリー夫妻によってラジウムがこの鉱山の鉱石から精製された有名な鉱山である。

ヨアヒムスタールには主に雲母片岩・結晶質石灰岩を貫いて多数の鉱脈がある。金属鉱物は銀鉱・ニッケル鉱・コバルト鉱・ビスマス〜ウラン鉱と種類が多い。鉱脈の中は3 cm 位から1 m に達し、まれに2 m と膨れるものもある。ラジウムはピッチブレンドを鉱石とし、1935年にヨアヒムスタールで合計100 g 産出の祝賀会が行われた。(P.Q.)

