

温泉化学の最近の話題から

——温泉の枯渇現象と化学成分の変化——

(財)中央温泉研究所

甘露寺 泰 雄

Recent Study on the Chemistry of Hot Springs

—— The Change of Chemical Components and the Deterioration of Hot Spring Resources ——

Yasuo KANROJI

Hot Spring Reserch Center

1. ま え が き

温泉はもともと自然のままの湧出を利用したのが始まりであるが、温泉地の発展に伴う温泉需要の増大から掘さくが始まり、その数や深度が増大し、源泉分布地域が拡大してゆき、その間に動力による採取が行われるようになる。枯渇現象というのは、温泉のこのような湧出採取状況の変化に伴って起きる温泉水位(水頭)の低下を指している。それに伴って、例えば源泉相互間の影響、1井当り湧出量の減少、泉温の低下、化学成分の変化といった諸現象が起きることが知られている。

地球物理学的にみた枯渇現象については、福富による一連の研究¹⁻³⁾があり、また資源保護と適正利用の観点から環境庁による研究成果⁴⁾が報告されている。演者はこれら研究調査に参画すると共に、本邦の多くの温泉について枯渇現象による成分変化を検討してきた。

本報告は、これら研究成果を中心に、枯渇現象と化学成分の変化について代表的な例をあげ、特徴的な現象の紹介を試みた。

2. 枯渇現象とは

1つの温泉地で源泉に管をつぎたして、温泉の湧出、あるいは揚湯を長時間停止したとき、湧出管内の水位が停止した状態を想定し、これを完全静止水頭面と呼んでおく。この状態から数個の温泉を湧出させると、湧出口の周辺部で水頭の低下が局部的に起こる。このとき、湧出量が大いほど水頭の低下は大きくなる。温泉の開発が進行して温泉の湧出量(採取量)が増大し、湧出口周辺での水頭低下の範囲が拡大して既設の源泉に及べば、これは「影響」と呼ばれる現象であり、開発に伴ってその影響が重なり合って温泉地全体の水頭面の低下、すなわち温泉水圧の低下が顕著になったものが「枯渇」と呼ばれる現象である。したがって枯渇現象は広く解釈すれば温泉の開発につれて必然的に起こってくる現象である。

このことから、各温泉地でみられる枯渇現象の進行は、自然湧出泉と動力揚湯泉の数の比、さらには湧出量の比で大ざっぱに把握できる。環境庁の統計資料をつかって、いくつかの県を例に、利用泉を対象として自然湧出泉/動力揚湯泉の数の比率の推移を示したのがFig.1*である。すなわち、同比は、昭和32年(1957)年頃をピークとして、それ以前までが増大、以後が減少を示し、その減少の度合は昭和32年から40年(1957~1965年)にかけてやや著しく、その後は鈍化している。これは、温泉開発が進行し始めた昭和20年代の後半から源泉数や採取量が増大し、当初は自然湧出であったものが動力揚湯になり、恐らくわが国の経済成長の発展が延びた期間に同比率は急減し、それ以後は資源保護対策の普及や、低成長時代の反映で比率の低下が鈍化してきたものと思われる。このことは、後述する温泉の成分変化を追跡する上で大変参考となる現象として注目したい。

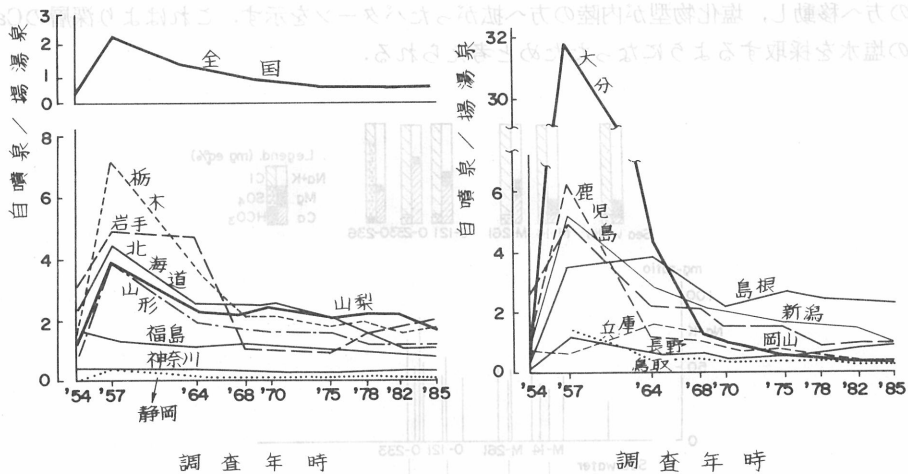


Fig.1 本邦における自噴泉と揚湯泉の比率の推移(利用源泉について集計)

3. 枯渇現象と成分変化

温泉水の温度、湧出量、化学成分含量などは一定不変のものではなく、自然現象、例えば火山活動、地震、潮汐、降雨雪などによって変化することが知られている。また河川や湖沼の近くではその水位によっても変化する。したがって、自然現象としての枯渇も存在するが、この報告では、人為的要因つまり温泉水の汲み過ぎが関係する枯渇現象を対象としている。その場合の代表的な例は、海岸地域で起きる海水や塩水の浸入による“塩水化”と、内陸地域にみられる“地下水化、淡水化”と呼ばれる現象である。塩水化はしばしば地下水化、淡水化を伴うこともある。まず最初に塩水化の例から記述する。

3-1 塩水化の例 —— 伊東温泉 ——

福富⁹⁾、吉川¹⁰⁾、益子^{11, 12, 14)}、著者など^{13, 15)}による報告や資料⁸⁾が往時よりよく保存されており、経年変動を追求するのに好適である。

Fig.2は、1972年時の分析資料¹⁴⁾から、海岸から内陸にむかってNE-SW方向の断面図を作り、深度と化学組成の分布を示したものである。海岸から内陸にむかって源泉の深度が増しており、海岸側はNa-Cl型とCa-Cl型の塩化物泉、内陸にはNa-SO₄型の単純温泉が分布してい

* この図は既報^{5, 6)}に最近の資料⁷⁾を加えて作成した。

る。Cl⁻の分布から塩水は内陸の方向にくさび状に食いこんでいること、塩化物型では内陸ほどCa-rich、かつNa/K比が大きくなっている¹⁵⁾。同温泉は最近の同位体比の解析から海水とその地域のmeteoric-waterの混合系といわれている¹⁶⁾。Fig.2に示したCa-rich、Na/K比が大きくなっている現象は、深層の塩水ほど停滞性の性格をもち、地層中の粘土鉱物類が海水の変質に関係していると推定された¹⁵⁾。温泉水の総採取量の変化をTable.1に示す。総採取量は1930年代から増大し、1960年頃ピークを示す。1950年代から動力揚湯が増加し始める。この間に深度と化学成分がどのように変わったかを示したのがFig.3¹³⁾である。1936年代は自然湧出で深度もさほど深くなく、Cl⁻含量5g/l程度が濃度の高い方であり、Ca-Cl型は海岸に1井のみであった。1952年時では深度が全体的に深くなり、Cl⁻8g/l程度のものが現れてくる。Ca-Cl型はみられない。1972年時では海岸から内陸に向かって深度が深くなり、Cl⁻も10g/l程度が現れている。塩化物型と硫酸塩型の境界は内陸の方へ移動し、塩化物型が内陸の方へ広がったパターンを示す。これはより深層のCa-richタイプの塩水を採取するようになったためと考えられる。

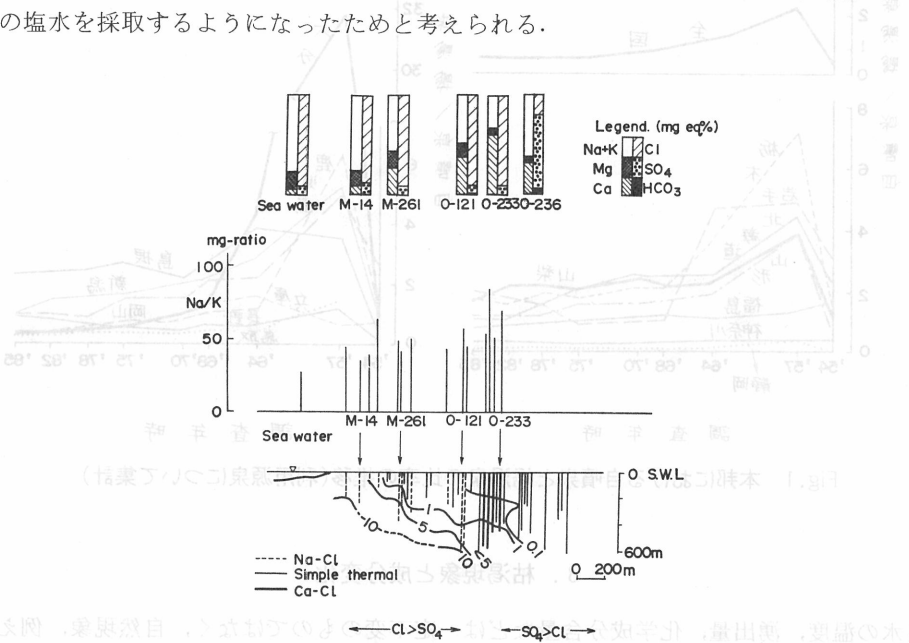


Fig.2 伊東温泉における海岸からの距離と深度に対応する化学組成、Na/K比及び泉質の変化

Table. 1 伊東温泉における総採取量の経年変化

年度	総採取量(m ³ /min)	備考
1931	7.57	自然湧出
'37	16.1	↓
'45	25.5	
'50	26.7	自然湧出+動力揚湯
'57	32.5	↓
'60	32.8	
'64	32.5	動力揚湯
'68	31.9	↓
'72	31.4	
'76	29.9	
'80	28.7	
'85	26.8	

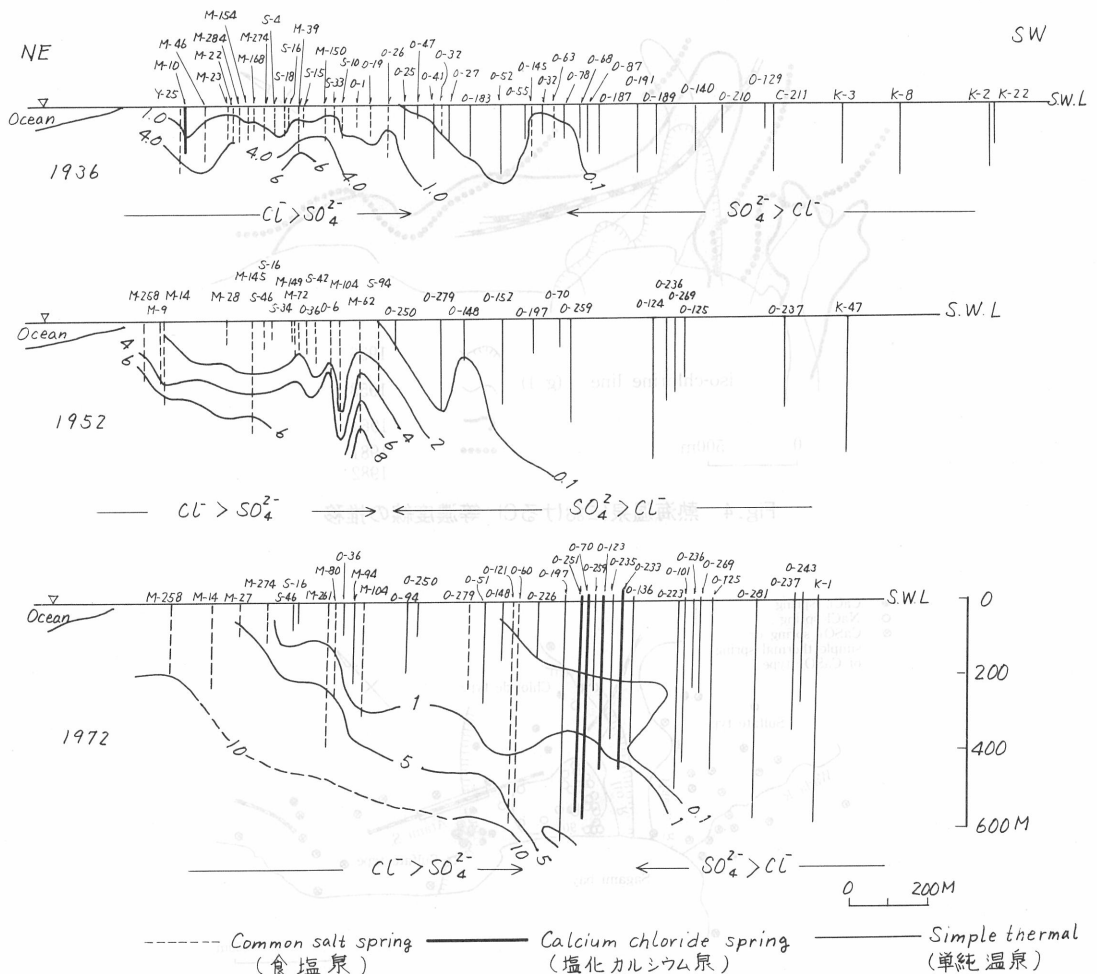


Fig.3 伊東温泉におけるCl 含量(垂直分布)の変化

3-2 塩水化と地下温泉貯留層の温度変化 —— 熱海温泉 ——

福富¹⁷⁾, 湯原¹⁸⁾, 中村ら¹⁹⁾, 鮫島ら²⁰⁾, 永野ら²¹⁾, 大木ら²²⁾の諸報告及び中央温泉研究所報告²³⁾, 県衛研の分析値, 県医務課の資料⁸⁾などが既存する。

熱海では有名な大湯間欠泉の噴出回数²⁴⁾の減少, 関東大地震の影響などがあって, 掘さく自噴泉の水頭低下, さく井数の増加などを経て枯渇現象が進行してゆく。掘さく井は1900年代の初め11ヶ, 1920年末30ヶ, 1936年180ヶ, 1970年およそ400ヶ, 1985年436ヶと増大し, 温泉採取量は1935年3~4 m³/min から1955年19.3m³/min と増大し, それ以降17~19m³/min の範囲で上下している。水位の方も1955~1970年間に確実に低下していることが報告²⁰⁾されている。

化学成分については, Cl⁻ の等濃度線(1g/l)の変化(1936¹⁷⁾, '53¹⁸⁾, '64¹⁹⁾及び'81・82²³⁾年)を検討してみると, Fig.4に示したように, 1g/l以上の高濃度地域が1953年頃までは比較的狭い範囲に限られていたが1964年時ではかなり拡大されている。つぎに化学組成を塩化物型と硫酸型に大別してその推移をみると, 1936年時¹⁷⁾では塩化物型が伊豆山の海岸側と, 熱海駅の南から糸川にかけての地域に限られ(Fig.5), 周辺部にかなり広く硫酸塩型の温泉が分布し, またCa-Cl型の塩化物泉もわずかであった。最近の1981・82年時²³⁾では分布パターンが大きく変わり, Fig.6

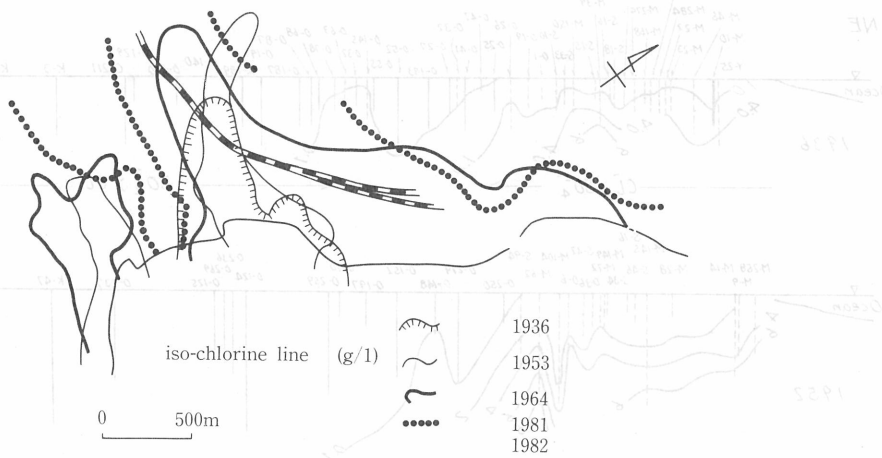
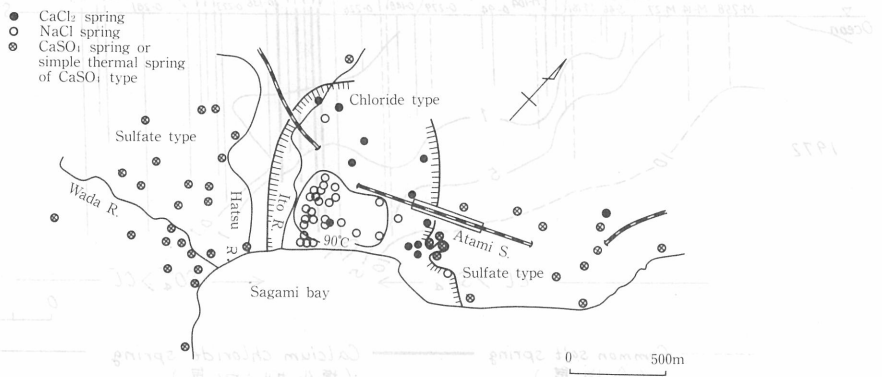


Fig. 4 熱海温泉におけるCl⁻等濃度線の推移



*福富の報告から著者が推定 (泉誌 33巻)

Fig. 5 熱海温泉における塩化物型と硫酸塩型の分布* (1936年)

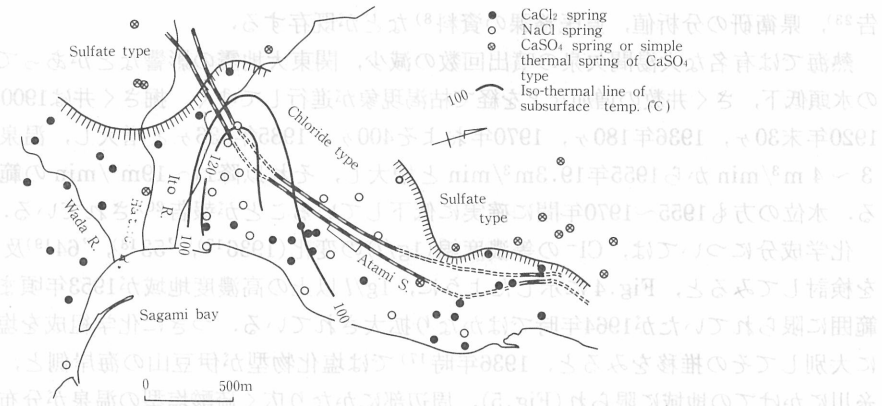


Fig. 6 熱海温泉における塩化物型と硫酸塩型の分布(1981年, 1982年)

に示したように、海岸側はすべて塩化物型に変わり、硫酸塩型は内陸側に限られて残存している。またこの塩化物型のなかで、熱海駅と糸川の間の高温部はNa-Cl型であるが、比較的低温部はほとんどがCa-Cl型である。

一方温泉については、例えば90℃以上の高温泉の数は1936年に24ヶ(80井のうち)、1953・54年19ヶ(60井のうち)、1982年20ヶ(322井のうち)でさほど変わっていないが、95℃以上では1936年21ヶに対して1982年2ヶとなり減少を示している。1968年以降、県の資料⁸⁾の解析結果では、Table.2に示したように泉温や湧出量が特に減少しているとはいえない²³⁾。

つぎに90℃以上の高温泉を対象として、地下の温泉貯留層の温度と化学成分の変化を追跡してみた。Fig.7には化学温度計*の計算値およびCl⁻含量、Ca²⁺ m.val % (何れも平均値)を対比のために示してある。これから地下温度は1950年以降はそれ以前に比して低下していること、Cl⁻含量は1920年以前²⁷⁾は高く、1930~60年代は低く、以後再び高くなる。Ca²⁺のm.val %は1960年以降は高い値を示すことがわかった。90℃以上の高温泉がこのような変化を示す現象は次のように解釈される。1920年前後大湯間欠泉が活動していた時代は殆どが自然湧出泉で、Cl⁻含量の比較的高いNa-Cl泉で占められていた。関東大地震以後源泉の増加や動力揚湯が盛んになり、1936年頃では90℃以上の源泉24ヶのうち12ヶ所がサクションを用いていることが福富の報告¹⁷⁾から判明している。すなわち1930年頃から地下水や周辺の低濃度の温泉水の混入によって高温泉のCl⁻濃度が低下し、1920年以前の高濃度泉が若干低濃度化したのではなかろうか。ここで深度の推移をみると、1936年時¹⁷⁾では90℃以上の高温泉は0~50mと浅く、周辺部でもおよそ250~300mであったが、1964・65年¹⁹⁾ではこれより100~150m深くなっている。このことから熱海全体として深度が深くなると共に総採取量が増大し、自然湧出泉が少なくなり、より深層の塩分含量の高いCa-richタイプの塩化物泉を採取するようになってきた。このような変化が高温泉にも及び、Fig.7に示したようにCl⁻濃度が一旦低下したのち上昇し、Ca²⁺ m.val %の増加、地下温泉貯留層の温度低下となって現れたものと思われる。なお熱海では1960年以降は増掘は殆ど行われていないにもかかわらず多くの源泉でCl⁻濃度の増加が観測²³⁾されているが、この場合Ca²⁺のm.val %は必ずしも増加をしていない。したがって、今後も化学組成におけるCa-richがつづくかどうかについては全く不明である。海水の直接浸入ないし変質度合の少ない塩水あるいは地下水の混入が起これば逆にCaが少なくなることもあり得よう。

3-3 採取量のコントロールと塩水化の抑制効果

前述したように、海岸地域の温泉では採取量の増大によって塩水化が起こる。それでは採取量を少なくしたら塩水化はどうなるかといった問題が起こる。これについて小浜温泉(長崎県)で製塩用熱源として大量の温泉を採取したところ泉温の低下を伴う塩水化が起きたが、製塩廃止と共に塩水化が退化し、泉質がもとにもどりつつあることが報告²⁸⁾されている。

ここでは演者が報告した浅虫^{4, 29, 30)}と最近調査された土肥³¹⁻³²⁾を述べる。前者は集中管理システムの導入によって採取量が少なくてすむようになったことによる塩水化の退化、後者は温泉水の採取量はさほど変わらないが、近くの鉱山が閉山になったため、坑道内湧水のくみ上げが止まり、温泉水位が回復すると共に、本来の泉質に復帰した例で、共に温泉資源の質的保全という意味で大変貴重な例ということができよう。

* Na-K-Ca法²⁴⁾、CaSO₄法²⁵⁾、SiO₂法²⁶⁾を用いた。

Table. 2 熱海、伊豆山温泉湧出状況の変遷²³⁾

(泉温、湧出量両測定値が既存するものを集計、()は泉資料*)

年度(昭和)	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
試料数	295 (302)	268	277 (293)	262	255 (299)	239	256 (285)	260 (290)	269 (293)	280 (300)	283 (301)	271 (296)	280 (301)	277 (302)	313 (301)
平均泉温 (℃)	65.7 (64.4)	64.6	65.2 (65.2)	66.1	64.4 (64.9)	65.1	64.8 (64.8)	64.8 (64.9)	65.0 (65.0)	65.7 (65.6)	66.1 (66.2)	66.8 (66.9)	65.8 (66.5)	65.7 (65.4)	64.5 (66.0)
総湧出量 (l/min)	20,109 (20,395)	17,105	16,904 (16,971)	16,695	16,944 (16,114)	14,954	16,375 (16,375)	18,154 (18,020)	17,920 (17,964)	17,954 (18,008)	19,481 (19,401)	17,873 (17,741)	17,563 (17,160)	17,782 (17,740)	19,703 (17,468)
1井当りの湧出量 (l/min)	68.2 (69.1)	63.8	61.0 (61.0)	63.7	66.5 (62.9)	62.6	64.0 (64.0)	69.8 (70.1)	66.6 (66.8)	64.1 (64.5)	68.8 (68.8)	66.0 (66.0)	62.7 (62.4)	64.2 (64.3)	62.9 (64.2)
場湯総馬力数 (HP)	3,175 (3,117)	3,053	3,243 (3,023)	3,208	3,233 (3,100)	3,105	2,980 (2,980)	3,125 (3,102)	3,228 (3,080)	3,475 (3,175)	3,565 (3,195)	3,460 (3,163)	3,655 (3,243)	3,655 (3,260)	3,655 (3,255)

* 静岡県衛生部、静岡県温泉協会、温泉実態調査報告書(昭和57年2月1日現在)

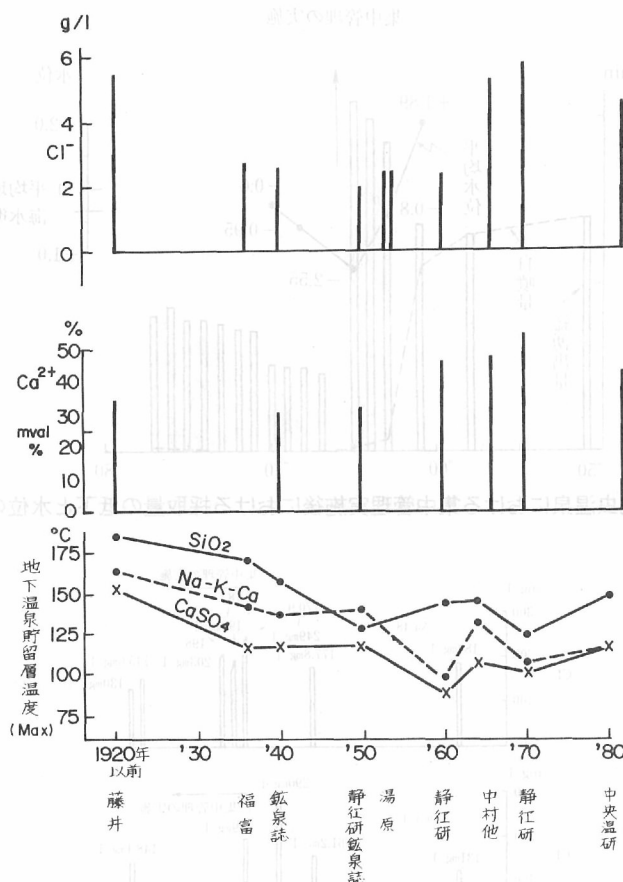


Fig. 7 熱海温泉Cl⁻含量, Ca m. val %及び地下温度 (泉温90℃以上の温泉について計算, 平均値)

浅虫温泉について

1910年代はに主力源泉8, 泉温61.5~79℃, 自然湧出で湧出量120l/min以上, 泉質は硫酸塩泉であった. その後掘さくによる開発が進展し, 1944年頃にはさく井総数126ヶに達した. 1950年代に動力揚湯が行われ, 1951年に総採取量1420l/min, 1965年2177l/minと増加した(Fig. 8).

その少し前県衛生研の調査によって塩水化が著しく進展していること, 水位や泉温の低下も指摘³³⁾された. 1967年に集中管理による給湯が行われ, 総採取量500l/min, 1977年には800l/minを少し上まわる程度, つまり塩水化が最も進展した時期のおよそ半分以下に採取量を少なくしたところ, 各源泉で何れも急速なCl⁻濃度の低下がみられ, 塩水化が退化し, 泉質がもとに復帰した^{4, 6)}. これをCl⁻含量の変化としてとらえたものがFig. 9である. つまり総採取量がピークに達した1965年前後がCl⁻が最も高く, 採取量が少なくなるとともにもどっている. Cl⁻の増加は海水の浸入によるが, その場合海水は単純に温泉水と混合しているのではなく, 地層を通過する過程においてNa⁺, 特にK⁺, Mg²⁺が著しく地層に吸着(恐らく粘土鉱物による)され, Ca²⁺が溶出するような交換反応が介在すると推定されている³⁰⁾.

浅虫ではその後塩水化はきかれぬ. ちなみに1980年の県衛研の分析値³⁴⁾をみても, 主力源泉は62~72℃, Cl⁻含量は162.7~199.3 mg/l, SO₄²⁻含量380~470mg/lで, 泉質はNa・Ca-SO₄・Cl泉である.

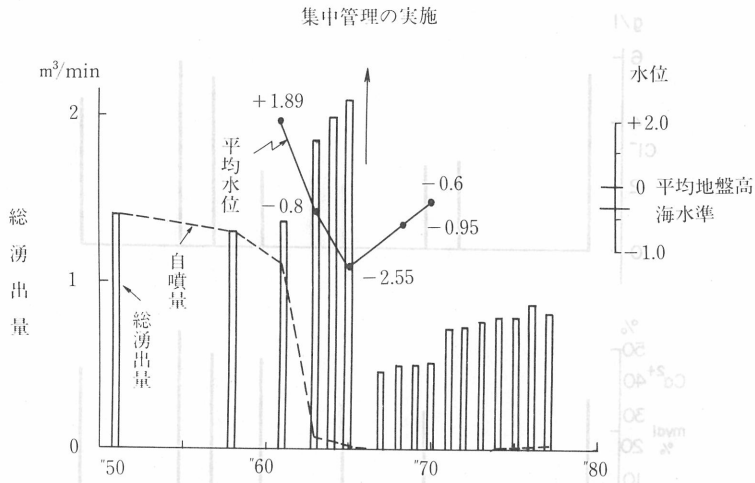


Fig. 8 浅虫温泉における集中管理実施後における採取量の低下と水位の回復⁶⁾

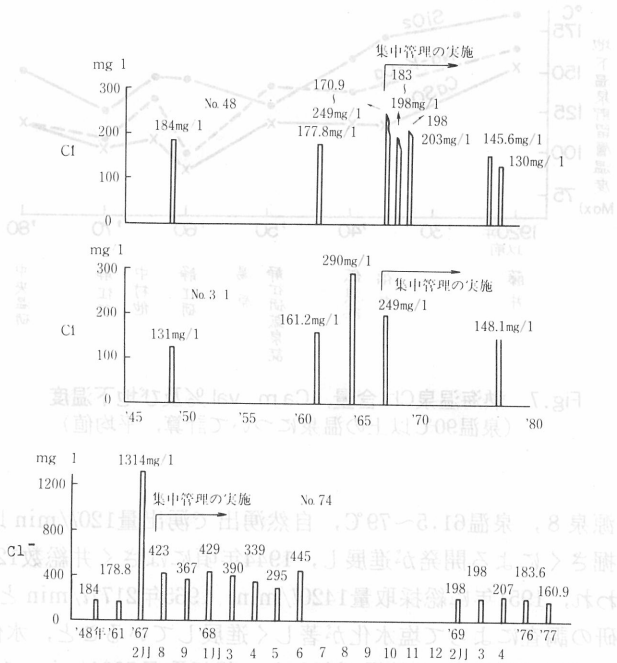


Fig. 9 浅虫温泉の集中管理実施前後のCl⁻の変化⁶⁾

集中管理を実施するまでは採取量の増大に伴って塩水化の進展がみられたが、実施後は塩水化の進展も止み、泉質がもともどりつつあることがCl⁻の変化よりわかる。

土肥温泉について

1920年以前の資料³⁵⁾では、蒸発残留物1.3~1.7g/l、Ca²⁺、SO₄²⁻を主要成分とする硫酸塩泉で、泉温43~60℃、温泉は市街地に自然湧出していた。土肥金山の開発に伴って坑道内での大量の湧水(微温水、温泉水を含む)の汲み上げによって市街地の温泉の水位が低下し自噴は停止した。そこで坑道内に湧出する比較的高温の温泉の揚湯利用が始まった。1950年代、当時北進一脈と称する主要鉱区からの温泉水は、Cl⁻: 734.4、SO₄²⁻: 609.1mg/lでCa-Cl型であったことが判明

している³⁶⁾。1965年以降閉山に伴って新しく5本の掘さく井が誕生し、53~61℃、総量2490l/minの温泉の揚湯に成功した。深度は300~600m、1969年の分析では5本のうち4本がCa-Cl型、このうち最も海岸側の山の神泉がCl含量が最も高く、内陸側の水口洞泉はむかし自噴していた時代と同じCaSO₄泉であった³¹⁾。1969年時の温泉水位は海拔-40~-80mであったが、その後閉山による湧水汲み上げ停止で水位は上昇、1976年時は海拔+10~+30mとなった³²⁾。このように水位が上昇すると本来のCaSO₄泉の勢力が復活し、Fig. 10に示すように、山の神、水口、中村、水口洞といった主力源泉でCl⁻の減少が現れてきた³⁷⁾。1985年現在では山の神のみ塩化物泉で他はCa-SO₄泉となっている。

土肥の海岸側の比較的深層に賦存するCa-Cl型の温泉は、熱海や伊東と同じように海水が変質したものと考えられる。1969年以後の分析値を使ってCaSO₄温度計で地下温泉貯留層の温度を求めると平均68℃となり、この地域の掘さく深400m付近の孔底温度66℃とほぼ一致する。つまりCa²⁺とSO₄²⁻はanhydriteを介して平衡関係にあると推定³¹⁾されている。

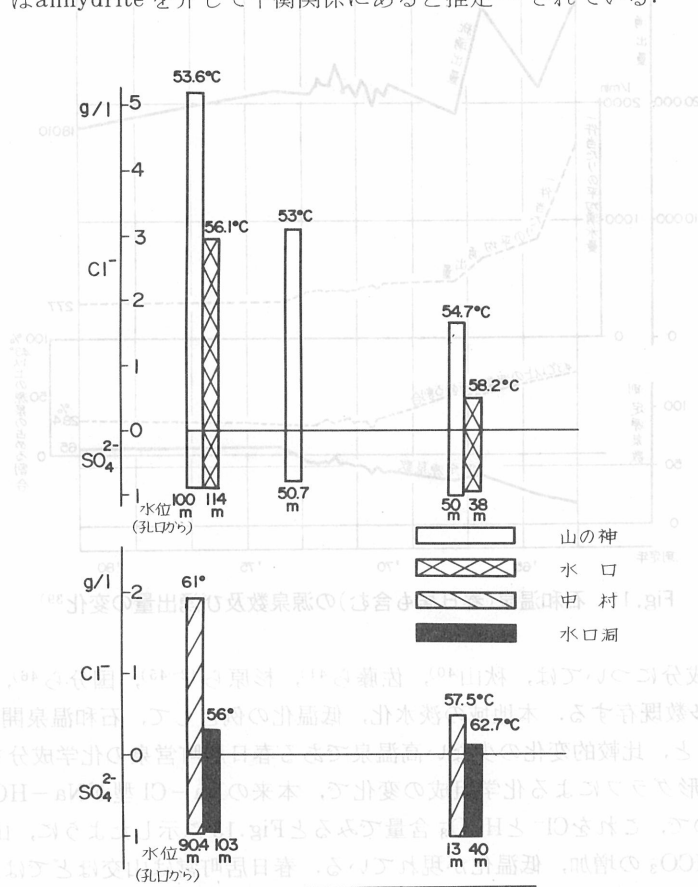


Fig. 10 土肥温泉主要源泉の泉温、水位、Cl⁻及びSO₄²⁻含量

3-4 淡水化、低温化の例

石和・春日居温泉について

この温泉は地下の基盤(花崗閃緑岩という)より湧出した温泉が笛吹川およびその支流によって形成された洪沖積層中の透水性の部分で流動・賦存しているいわゆる被圧層状泉であるという³⁹⁾。

1960年頃までは、この地域ではさく井数9ヶ、北側の1井を除くと深度100m内外、泉温18~33℃の微温泉が湧出していたが、量が $8.5\text{m}^3/\text{min}$ と大量であったので、更に掘り進めば40℃以上の温泉の湧出する可能性が指摘³⁸⁾されていた。1961年1月に146mで46℃、 $5.6\text{m}^3/\text{min}$ が自噴するに至り*、これまで100m内外であった源泉が一斉に増掘され、1962~63年度で200m前後、総数17ヶ、1967年には深度300mになり総数41ヶ所に達した。源泉の分布も、1961年頃は石和町、春日居村の一部に限られていたが、その後東側および笛吹川を越えた一宮町や東側の山梨市でも掘さくが行われ、西側にも発展し、現在では甲府市湯村も含めた大温泉地帯に発展した³⁹⁾。

このように、石和・春日居付近は短期間に新掘、増掘が行われた結果、当初は大量自然湧出した源泉の勢力、つまり温泉水頭・水圧が急激に低下し、掘った割には総湧出量は増加せず、かえってFig.11に示したように減少したが、現在ではほぼ落ちついている。

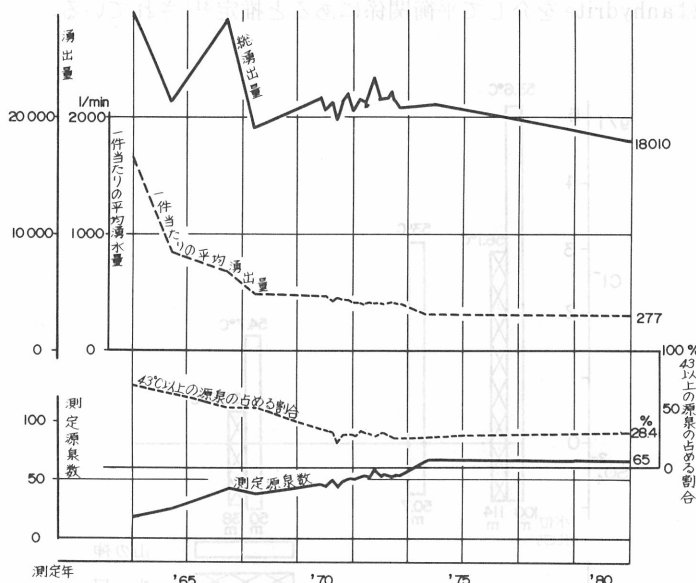


Fig.11 石和温泉(春日居も含む)の源泉数及び湧出量の変化³⁹⁾

本地域の化学成分については、秋山⁴⁰⁾、佐藤ら⁴¹⁾、杉原ら^{42~45)}、国分ら⁴⁶⁾、相川ら⁴⁷⁾の報告や調査結果が多数既存する。本地域の淡水化、低温化の例として、石和温泉開発の端緒となった山梨交通源泉*と、比較的变化の少ない高温泉である春日居町源泉の化学成分を検討**してみる。Fig.12は菱形グラフによる化学組成の変化で、本来のNa-Cl型がNa-HCO₃型に変わる様相を示したもので、これをCl⁻とHCO₃⁻含量でみるとFig.13に示したように、山交源泉ではCl⁻の著しい減少、HCO₃⁻の増加、低温化が現れている。春日居町源泉は山交ほどではないが同じ傾向の変化を示している。変化の度合は山交の方がはるかに著しく、Na-Cl型が低温、低濃度のNa-HCO₃型に変わってしまったのに対し、春日居では濃度は低下しているが組成はNa-Cl型である。この変化で大変特徴的なのはpHの変化で、低温、低濃度化と同時に液性がアルカリ性側に変わっている。これについては相川ら⁴⁷⁾はNa-HCO₃型のアルカリ性の水の寄与を指摘し、この型の微温泉が石和の北東にある花崗岩地域に分布し、恐らく低CO₂分圧下で水と酸性岩との相互作用

* 当時、山梨交通源泉、現在いづみ荘源泉。No.225。

** 前記39)、40)、41~45)、46~47)などの分析値を使用。

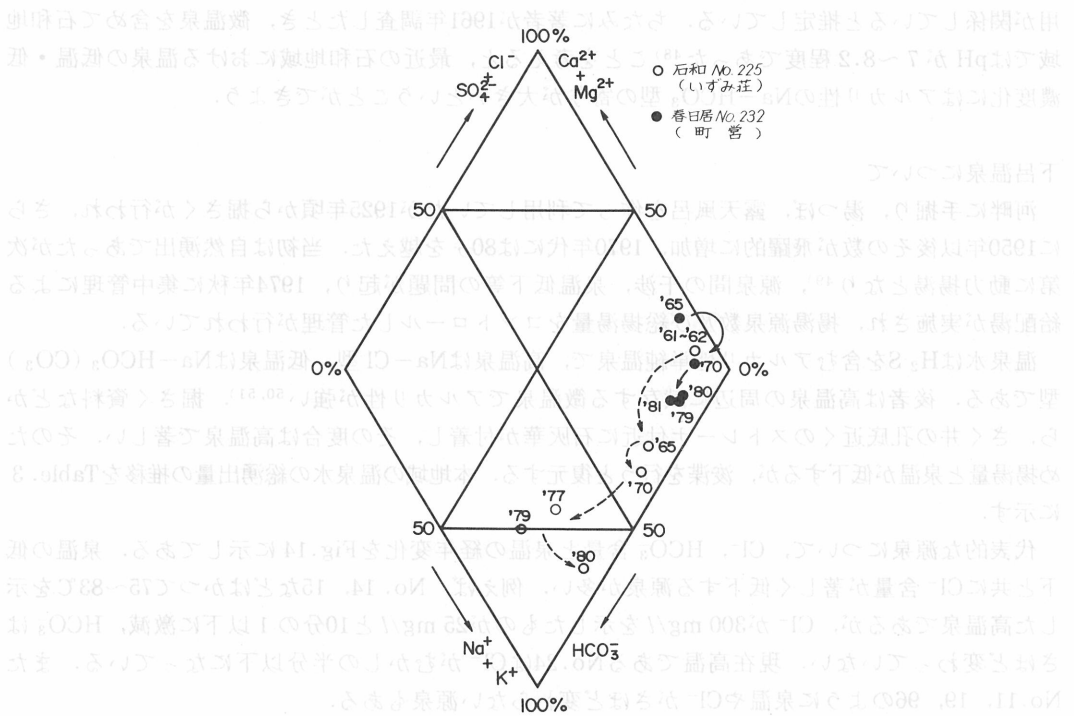


Fig.12 石和温泉の化学組成の経年変化

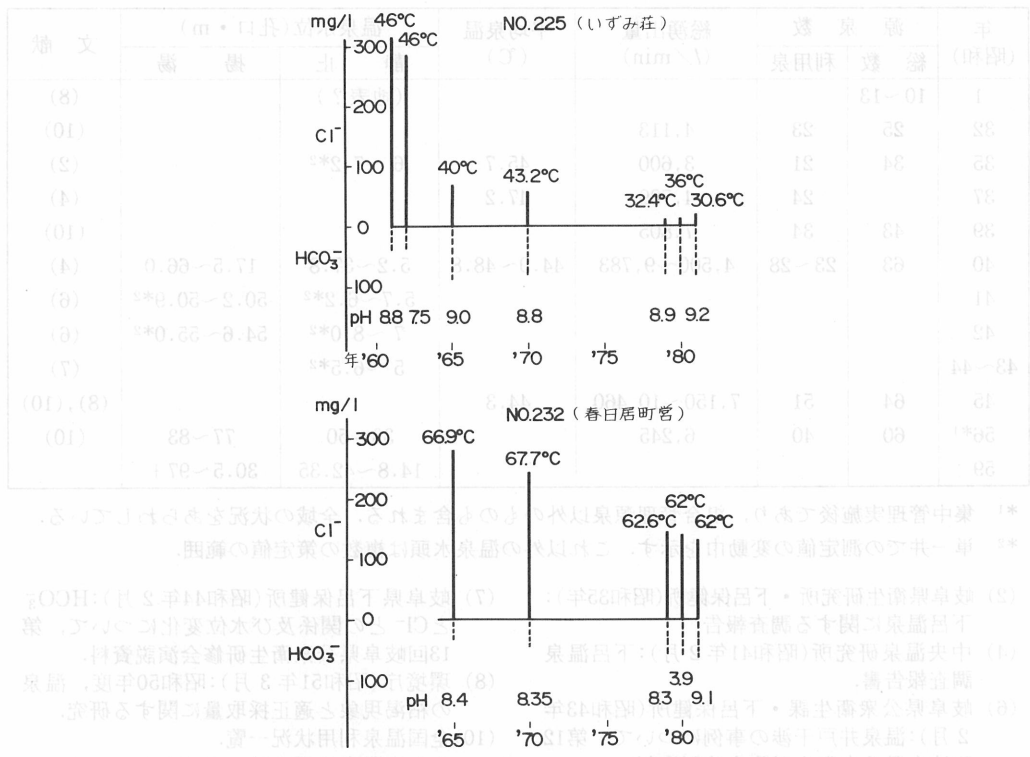


Fig.13 石和・春日居温泉のCl⁻及びHCO₃⁻含量の変化

用が関係していると推定している. ちなみに著者が1961年調査したとき, 微温泉を含めて石和地域ではpHが7~8.2程度であった⁴⁸⁾ことを考えると, 最近の石和地域における温泉の低温・低濃度化にはアルカリ性のNa-HCO₃型の寄与が大きいということができよう.

下呂温泉について

河畔に手掘り, 湯つば, 露天風呂を作って利用していたが1925年頃から掘さくが行われ, さらに1950年以後その数が飛躍的に増加, 1970年代には80ヶを越えた. 当初は自然湧出であったが次第に動力揚湯となり⁴⁹⁾, 源泉間の干渉, 泉温低下等の問題が起り, 1974年秋に集中管理による給配湯が実施され, 揚湯源泉数及び総揚湯量をコントロールした管理が行われている.

温泉水はH₂Sを含むアルカリ性単純温泉で, 高温泉はNa-Cl型, 低温泉はNa-HCO₃(CO₃)型である. 後者は高温泉の周辺に賦存する微温泉でアルカリ性が強い^{50,51)}. 掘さく資料などから, さく井の孔底近くのストレーナ付近に石灰華が付着し, その度合は高温泉で著しい. そのため揚湯量と泉温が低下するが, 浚渫を行うと復元する. 本地域の温泉水の総湧出量の推移をTable. 3に示す.

代表的な源泉について, Cl⁻, HCO₃⁻含量と泉温の経年変化をFig.14に示してある. 泉温の低下と共にCl⁻含量が著しく低下する源泉が多い. 例えば, No. 14, 15などはかつて75~83℃を示した高温泉であるが, Cl⁻が300 mg/lを示したものが25 mg/lと10分の1以下に激減, HCO₃⁻はさほど変わっていない. 現在高温であるNo.24はCl⁻がむかしの半分以下になっている. またNo.11, 19, 96のように泉温やCl⁻がさほど変わらない源泉もある.

Table. 3 下呂温泉における温泉湧出状況の変遷⁵²⁾

年 (昭和)	源泉数		総湧出量 (l/min)	平均泉温 (℃)	温泉水位(孔口・m)		文献
	総数	利用泉			静	止	
1	10~13				(地表?)		(8)
32	25	23	4,113				(10)
35	34	21	3,600	45.7	6~7.2* ²		(2)
37		24	4,789	47.2			(4)
39	43	34	7,805				(10)
40	63	23~28	4,500~9,783	44.9~48.8	5.2~37.8	17.5~66.0	(4)
41					5.7~6.2* ²	50.2~50.9* ²	(6)
42					7~8.0* ²	54.6~55.0* ²	(6)
43~44					5~6.5* ²		(7)
45	64	51	7,150~10,460	44.3			(8),(10)
56* ¹	60	40	6,245		33~50	77~83	(10)
59					14.8~42.35	30.5~97+	

*¹ 集中管理実施後であり, 組合管理源泉以外のものも含まれる. 全域の状況をあらわしている.

*² 単一井での測定値の変動巾を示す. これ以外の温泉水頭は複数の策定値の範囲.

- (2) 岐阜県衛生研究所・下呂保健所(昭和35年): 下呂温泉に関する調査報告. (7) 岐阜県下呂保健所(昭和44年2月):HCO₃⁻とCl⁻との関係及び水位変化について, 第13回岐阜県公衆衛生研修会演説資料.
- (4) 中央温泉研究所(昭和41年2月):下呂温泉調査報告書. (8) 環境庁(昭和51年3月):昭和50年度, 温泉の枯渇現象と適正採取量に関する研究.
- (6) 岐阜県公衆衛生課・下呂保健所(昭和43年2月):温泉井戸干渉の事例について. 第12回回岐阜県公衆衛生研修会演説資料. (10) 全国温泉利用状況一覽. として温泉工学会誌に公表されている.

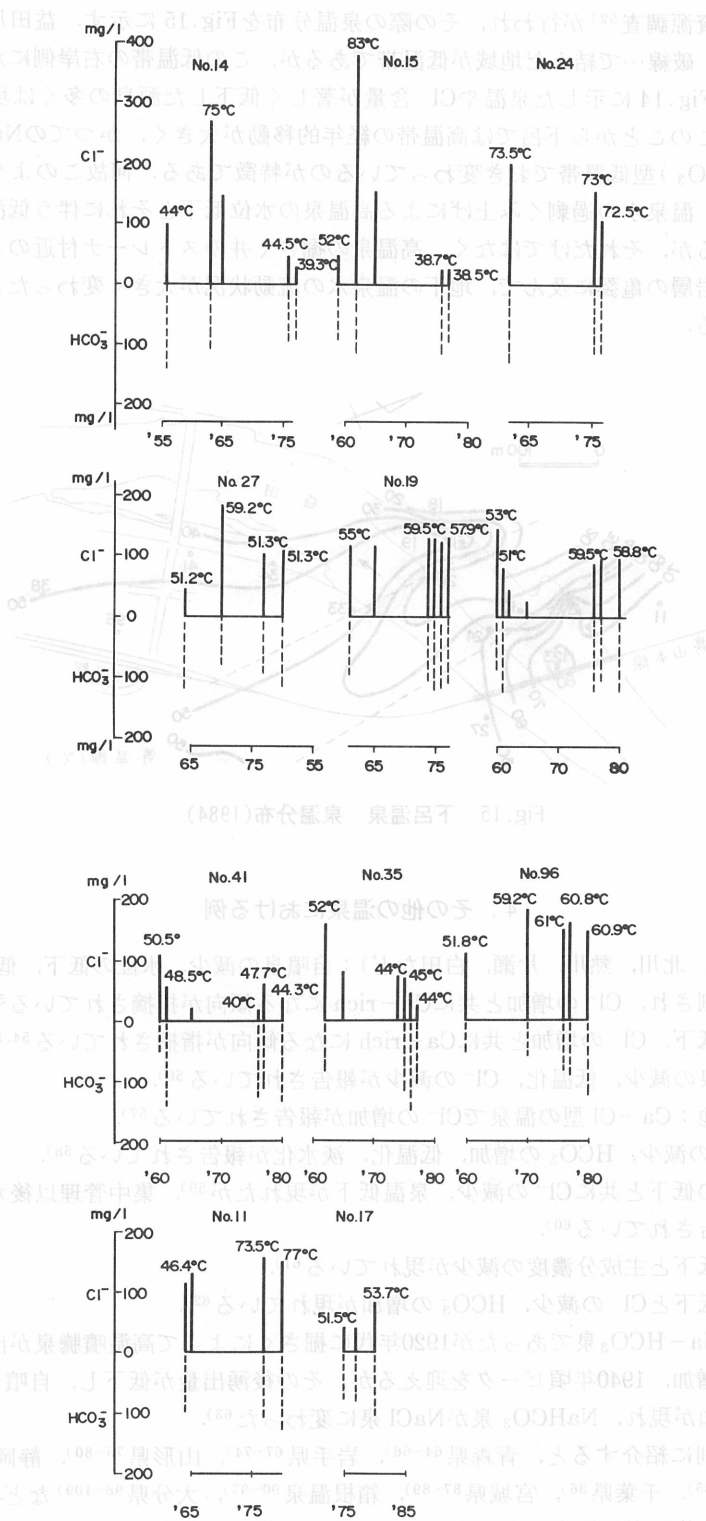


Fig. 14 下呂温泉のCl⁻及びHCO₃⁻含量の変化

1984年に温泉資源調査⁵²⁾が行われ、その際の泉温分布をFig.15に示す。益田川国鉄橋付近に高温帯があり、破線…で結んだ地域が低温帯であるが、この低温帯の右岸側にかつて高温帯があった。つまりFig.14に示した泉温やCl⁻含量が著しく低下した源泉の多くは現在の低温帯に位置している。このことから下呂では高温帯の経年的移動が大きく、かつてのNa-Cl型高温帯がNa-HCO₃(CO₃)型低温帯でおき変わっているのが特徴である。何故このような現象が起きるかについては、温泉水の過剰くみ上げによる高温泉の水位低下とそれに伴う低温泉、地下水の浸入があげられるが、それだけではなく、高温泉の掘さく井のストレーナ付近のスケールによる目づまりが周辺岩層の亀裂に及んで、地下の温泉水の流動状況が大きく変わったことも関係していると考えられる。

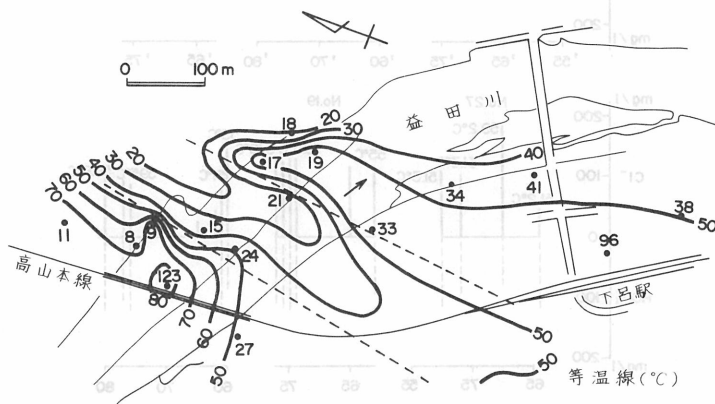


Fig. 15 下呂温泉 泉温分布(1984)

4. その他の温泉における例

熱川周辺(大川, 北川, 熱川, 片瀬, 白田など): 自噴泉の減少, 水位の低下, 低温化, 塩水化, 淡水化などが観測され, Cl⁻の増加と共にCa-richになる傾向が指摘されている^{53, 54}。

稲取: 水位の低下, Cl⁻の増加と共にCa-richになる傾向が指摘されている^{54, 55}。

下賀茂: 自噴泉の減少, 低温化, Cl⁻の減少が報告されている⁵⁶。

雲見, 石部岩地: Ca-Cl型の温泉でCl⁻の増加が報告されている⁵⁷。

湯ヶ島: SO₄²⁻の減少, HCO₃⁻の増加, 低温化, 淡水化が報告されている⁵⁸。

修善寺: 水位の低下と共にCl⁻の減少, 泉温低下が現れたが⁵⁹, 集中管理以後水位の上昇と高温泉の復活が報告されている⁶⁰。

飯坂: 水位の低下と主成分濃度の減少が現れている⁶¹。

芦原: 水位の低下とCl⁻の減少, HCO₃⁻の増加が現れている⁶²。

白浜: かつてNa-HCO₃泉であったが1920年代に掘さくによって高温噴騰泉が出現し, さく井数, 総湧出量が増加, 1940年頃ピークを迎えるが, その後湧出量が低下し, 自噴泉の減少, Cl⁻濃度の著しい増加が現れ, NaHCO₃泉がNaCl泉に変わった⁶³。

その他各地域別に紹介すると, 青森県^{64~66}, 岩手県^{67~74}, 山形県^{75~80}, 静岡県^{81, 82}, 群馬県^{83, 84}, 長崎県⁸⁵, 千葉県⁸⁶, 宮城県^{87~89}, 箱根温泉^{90~97}, 大分県^{98~109})などである。

なお最近, 地球物理学的観点から由佐により, 別府南部域を想定し, 浅層不圧地下水との間に水理的交流(漏れ)のある被圧地下水が開発され, 新たな採水が行われたときの水位低下と補償量

の関係の解析¹⁰⁹⁾及び温泉採取量の増大につれて水位が低下し浅層からの浸透量が増加した場合の成分濃度の変化について巨視的なモデルを使った解析¹¹⁰⁾が報告された。何れも枯渇現象をとらあげる場合の基礎理論として大変参考になる点を付記しておく。

5. ま と め

枯渇現象とは掘さく井の数の増加、採取量の増加に伴って起こる温泉水頭(水圧)の低下をいい、これに伴って自噴泉の減少、低温化、塩水化、淡水化が起こる。

温泉地では自然湧出→掘さく井の数と深度の増加→動力揚湯という経過をたどって枯渇現象が進行してゆく。自然湧出泉と動力揚湯泉の数の比の経年変化をみると、およそ1957年頃にピークが現れ、それ以後やや急激に、その後緩慢に低下し、ここ10数年は大きくは変わっていない。経済成長に伴う開発のテンポや温泉保護対策の浸透がこれらの変化と関連していると思われる。

塩水化の例として伊東を例にあげて説明した。経年的により深層の温泉を採取するようになったことが塩水化として現れ、化学的にはCa-richタイプの塩化物泉を採取するようになった点が特筆される。

塩水化と地下温泉貯留層の温度変化の例として熱海をあげ、経年的にClの一旦減少と増加、Ca-richタイプの塩化物泉の増加、地下温度の低下によって特徴づけられる。

採取量のコントロールと塩水化の抑制効果の例として浅虫と土肥をあげた。前者は集中管理の導入による過剰採取の抑制、後者は近くの鉱山内での地下水・微温泉のくみ上げ停止(閉山による)による温泉水位の上昇が塩水化の抑制に効果的に働いた。

淡水化、低温化の例として、石和は掘さく井の増加による温泉水頭の低下、下呂では温泉採取量の増加と掘さく井のストレーナや亀裂におけるスケールの付着などが関係し、化学組成の変化として、Na-Cl型の高温単純温泉が低温、低濃度のNa-HCO₃(CO₃)型微温泉ないし地下水とおき変わったために起こったと考えた。

最後に関連文献をなるべく多く掲載した。

文 献

- 1) 福富孝治(1966), 北大地球物理報, **15**, 33; (1967), 同報, **17**, 65.
- 2) 福富孝治(1976), 昭50年度環境庁委託研究「温泉の枯渇現象と適正採取量に関する研究」第2章, 5.
- 3) 福富孝治(1978), 昭52年度環境庁委託研究「温泉資源の保護復元化に関する研究」第3章, 109.
- 4) 昭和50年度環境庁委託研究「温泉の枯渇現象と適正採取量に関する研究」及び昭和52年度環境庁委託研究「温泉資源の保護復元化に関する研究」
- 5) 甘露寺泰雄(1978), 温泉科学, **29**, 118.
- 6) 甘露寺泰雄(1983), 地熱, **20**, No. 3 (Ser.78), 166.
- 7) 環境庁昭60年3月末現在, 都道府県別温泉利用状況(59年分), 温泉, **53**, 12月号, 16.
- 8) 静岡県衛生部他, 温泉実態調査報告書, 昭61年2月1日現在.
- 9) 福富孝治他, 地震研 報, **15**, No. 2, 506.
- 10) K.Kikkawa (1954), Tikyubuturi, **9**, No.2, 95.
- 11) 益子安他(1953), 中央温研報, No.1, 178.
- 12) 益子安他(1965), 温泉科学, **15**, No.3/4, 113.

- 13) Y. Kanroji (1978), Onsen Kagaku, **29**, No. 2, 76.
- 14) 益子安他(1977), 温泉工誌, **12**, No. 1, 9.
- 15) 甘露寺泰雄(1984), 温泉工誌, **18**, No. 2/3, 67.
- 16) O. Matsubaya et al (1973), Geochem. J., **7**, 123.
- 17) T. Fukutomi (1937), Bull Earthquake Res. Inst., **15**, 113.
- 18) K. Yuhara (1961), Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. A., Vol. 29, No. 3, 283.
- 19) H. Nakamura et al (1969), Bull. Geol. Surv. Japan, **20**, 367.
- 20) 鮫島輝彦他(1970), 静大教養研報(自然科学), No. 7, 159; 鮫島輝彦(1970), 熱海伊豆山温泉科学調査報告書.
- 21) 永野隆夫他(1972), 温泉工誌, **8**, No. 3, 135.
- 22) 大木靖衛他(1974), 地熱, **11**, No. 1, 21.
- 23) 中央温泉研究所(1983), 温泉地科学調査報告書, 熱海・伊豆山温泉, 89.
- 24) 水谷義彦他(1975), 火山, **19**, 139.
- 25) W. L. Marshall and R. Slusher (1968), J. Chem. Eng. Data, **13**, 83.
- 26) A. H. Truesdell (1975), Proc. U. N. Symp. Develop. Use, Geothermal Resources, 2nd. San Fransisco, Cali., May 1, 1iii.
- 27) 藤井毅太郎(1924), 地球, **2**, No. 1, 183.
- 28) 寺田精介(1965), 衛生化学, **11**, No. 3, 197.
- 29) 益子安他(1972), 衛生化学, **18**, No. 2, 82.
- 30) 甘露寺泰雄(1972), 衛生化学, **18**, No. 2, 90.
- 31) 甘露寺泰雄(1977), 温泉科学, **27**, No. 4, 134.
- 32) 佐藤幸二他(1982), 温泉科学, **33**, 59.
- 33) 原子昭他(1965), 青森衛研報, No. 6, 1.
- 34) 高橋政教他(1981), 青森衛研報, **18**, 54.
- 35) R. Ishizu (1915), "The Mineral Springs of Japan", Part II, **8**, 82.
- 36) 静岡県衛生部(1957), 静岡県伊豆地方温泉調査報告, 123.
- 37) 中央温泉研究所(1986), 土肥温泉電気探査報告書.
- 38) 安藤武他(1956), 山梨県温泉調査資料集, 154.
- 39) 中央温泉研究所(1982), 温泉資源調査報告書.
- 40) 秋山梯四郎(1964), 日化誌, **85**, No. 10, 606.
- 41) 佐藤幸二他(1968), 温泉科学, **18**, No. 3/4, 125.
- 42) 杉原健(1964), 山梨大学芸研報, **15**, 129.
- 43) 杉原健(1965), 同報, **16**, 124.
- 44) 杉原健(1972), 山梨大学教育研報, **22**, 218.
- 45) 杉原健(1981), 同報, **31**, 27.
- 46) 国分信英他(1976), 電気通信大学報, **26**, No. 1, 78.
- 47) 相川嘉正他(1982), 温泉科学, **33**, No. 2, 69.
- 48) 中央温泉研究所年報, No. 3, 温泉分析表, 99.
- 49) 渡辺周一他, 岐阜薬大紀, **17**, 29.
- 50) 環境庁, 昭和52年度「温泉資源の保護復元化に関する研究」11-15, 45-50, 77-85, 117-122.
- 51) 川本博他(1982), 温泉科学, **23**, No. 1.
- 52) 下呂温泉事業協同組合(1985), 下呂温泉における源泉保護対策と有効利用の究明(昭和59年度活路

開拓調査指導事業).

- 53) 中央温泉研究所(1984), 温泉資源変動調査, 大川, 北川及び熱川温泉.
- 54) 中央温泉研究所(1986), 温泉資源変動調査, 片瀬, 白田及び稲取温泉.
- 55) 海野忠市他(1980), 静岡衛研報, No.23, 85.
- 56) 中央温泉研究所(1985), 温泉資源変動調査, 下賀茂温泉.
- 57) 甘露寺泰雄他(1980), 温泉工誌, **14**, No. 3, 88.
- 58) 益子安他(1976), 同誌, **11**, No. 1, 1.
- 59) 甘露寺泰雄(1975), 同誌, **10**, No. 1, 16.
- 60) 中央温泉研究所(1985), 修善寺温泉需給バランス調査及び集中管理設備改良計画.
- 61) 環境庁, 昭和52年度「温泉資源の保護復元化に関する研究」28.
- 62) 環境庁, 同上, 19.
- 63) Y.Kanroji(1979), 衛生化学, **25**, No. 2, 96, 107.
- 64) 高橋政教他(1981), 青森衛研報, **18**, 33.
- 65) 高橋政教他(1982), 同報, **19**, 28.
- 66) 野村直美他(1984), 同報, **21**, 28.
- 67) 高橋正直他(1966), 岩手衛研年報, **10**, 50.
- 68) 佐藤彰他(1968), 同報, **11**, 65.
- 69) 佐藤彰他(1968), 同報, **12**, 161.
- 70) 佐藤彰他(1976), 同報, **19**, 51.
- 71) 佐藤彰他(1977), 同報, **20**, 70.
- 72) 佐藤彰他(1978), 同報, **21**, 62.
- 73) 佐藤彰他(1979), 同報, **22**, 14.
- 74) 熊谷昭輔他(1983), 同報, **26**, 54.
- 75) 久間木国男他(1974), 山形衛研報, **10**, 58.
- 76) 久間木国男他(1981), 同報, **14**, 43.
- 77) 久間木国男他(1985), 同報, **18**, 9.
- 78) 多田恵子他(1983), 同報, **16**, 48.
- 79) 多田恵子他(1984), 同報, **17**, 39.
- 80) 阿部恵子他(1985), 同報, **18**, 25.
- 81) 海野忠市他(1982), 静岡県衛環センター報, **25**, 45.
- 82) 海野忠市他(1982), 同報, **25**, 49.
- 83) 酒井幸子他(1979), 群馬県温泉協会学術調査研究報, 地学, 1(新治村).
- 84) 酒井幸子他(1981), 同報, 温泉科学, 1(四万沢渡).
- 85) 益田宣弘他(1983), 長崎衛公研報, **25**, 59.
- 86) 小島秀行他(1976), 宮城衛研報, 昭51年度, 105.
- 87) 渡辺淳夫他(1970), 東北学院大工研報, **5**, No. 2, 9.
- 88) 渡辺淳夫他(1975), 東北学院大一般教育論集, **61**, 41.
- 89) 渡辺淳夫他(1975), 東北学院大工研報, **9**, No. 1~2, 61.
- 90) 荻野喜作他(1973), 神奈川温研報, **4**, No. 3, 153.
- 91) 平野富雄他(1976), 同報, **7**, No. 2, 53.
- 92) 平野富雄他(1977), 同報, **8**, No. 2, 51.
- 93) 平野富雄他(1980), 同報, **12**, No. 2, 23.

- 94) 大山正雄他(1982), 同報, **13**, No. 5, 137.
- 95) 杉山茂夫他(1984), 同報, **15**, No. 5, 203.
- 96) 平野富雄他(1986), 同報, **17**, No. 5, 289.
- 97) 石坂信之他(1986), 同報, **17**, No. 5, 309.
- 98) 吉川恭三他(1950), 地球物理, **8**, 2.
- 99) 吉川恭三他(1953), 大分県温調報, **4**, 1.
- 100) 吉川恭三他(1976), 同報, **27**, 25.
- 101) 野田徹郎他(1976), 同報, **27**, 46.
- 102) 吉川恭三他(1977), 同報, **28**, 17.
- 103) 北岡豪一(1978), 同報, **29**, 21.
- 104) 由佐悠紀(1979), 同報, **30**, 10.
- 105) 由佐悠紀(1980), 同報, **31**, 1.
- 106) 野田徹郎他(1981), 同報, **32**, 43.
- 107) 由佐悠紀(1983), 同報, **34**, 18.
- 108) 由佐悠紀他(1984), 同報, **35**, 25.
- 109) 由佐悠紀(1985), 同報, **36**, 21.
- 110) 由佐悠紀(1984), 温泉科学, **34**, No. 2, 45.
- 111) 由佐悠紀(1984), 温泉科学, **34**, No. 3, 92.