



写真 2・1・10 講演中の大木靖衛氏

箱根火山の熱源となっている地下深部のマグマ溜まりの規模や深さはまだ明らかになっていない。箱根火山の地震観測によれば、深さ 5 km より深い部分に火山性地震が発生していないことから、マグマ溜まりの上端は深さ 4 ～ 5 km 以下と考えられている。マグマから分離して神山の火道を通って上昇する高温高圧の水蒸気には、食塩や珪酸をガス相として含んでいる (White, 1957; Sourirajan and Kennedy, 1962)。この水蒸気が中央火口丘の基底部付近を西から東に流れる深層地下水 (第Ⅱ帯の重炭酸塩硫酸塩泉) に混入して高温の塩化物泉をつくっている。このため、カルデラの東側だけに塩化物泉 (第Ⅲ帯) が湧出し、塩化物泉を混入している混合泉 (第Ⅳ帯) が分布することになる。比重の重い食塩は高温高圧ならばガス相として存在できるが、上昇によって圧力が低下すると液相 (温泉) にとどまってしまう。比重の軽い硫化水素はさらに上昇し、大涌谷や早雲山の噴気地帯で火山ガスとなって噴出し、第Ⅰ帯の酸性硫酸泉を形成する。

大木・平野による箱根温泉の成因モデルは、後に火山性温泉の模式ともなった。大木靖衛所長 (写真 2・1・10) はさらに箱根の温泉や火山性蒸気の利用の問題等に取り組み、箱根温泉の発展に貢献したことにより、1978 (昭和53) 年に箱根町褒賞を授賞した。

2 温泉保護対策調査 (1967年～現在)

2・1 箱根温泉

箱根火山は表面上、平静な装いを見せているが、まぎれもない活火山で、深部では今も活動している。マグマ溜まりから火道を通して運ばれる総熱量は、温泉と噴気地帯の放熱量を算出すると $3.3 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ である（大木ら、1981）。この熱量は1年で $4.4 \times 10^{22} \text{ erg}$ となり、マグニチュード7の地震2個分/年に相当する大変なエネルギー量である。総熱量の53%が温泉として運び出されていることから、箱根の温泉は人々に豊かな恵みを与えるのみならず、自然災害の保護にもなっているといえる。

ところで、箱根の地震は標高1,000m～500mの範囲に集中していることから、地下深部から上昇してきた熱水の一種の沸騰現象であると考えられる。上昇してくる熱水量が増大した時は、群発地震の発生と温泉温度を著しく上昇させるのであろう。深部からの熱水上昇量が1966（昭和41）年の群発地震の2倍以上に増えていれば、水蒸気爆発の可能性も考えられ、箱根火山の常時監視の必要性が改めて示された。

温泉による火山観測は神山を取り巻く各温泉の温度、水位、湧出量、および、噴気地帯の温度について1967（昭和42）年から開始した。広田 茂研究員（現小田原保健所）は週一回、箱根カルデラ内を一周して、観測機器の維持管理と観測を担当した。その記録は貴重な財産として研究所に残された。この調査は、箱根の温泉が全域で涸渇化の傾向に向かっている事をも明きらかにし、温泉湧出機構調査として今日まで継続している。

箱根火山の温泉は中央火口丘の成層火山神山と基盤岩に胚胎し、中央火口丘の溶岩円頂丘と古期・新期の両外輪山に存在しない。したがって、温泉の産状は中央火口丘の層状泉と基盤岩の裂カ泉とに2分される。中央火口丘の温泉は主に神山東斜面で湧出し、基盤岩の温泉は神山東麓の早川沿いと新期外輪山湯坂山南麓の須雲川沿い（湯本）で湧出している。

2・1・1 神山東斜面の温泉

2・1・1・1 神山東斜面の温泉の湧出機構

中央火口丘の基底部で形成された高温の塩化物泉（第Ⅲ帯）は神山東斜面で、北東、東、南東の三方向に分かれている（図2・1・8）。東に向かった流れは早川右岸で木賀湧泉群を、南東の流れが新期外輪山の断層涯（カルデラ壁）に沿う蛇骨川の両岸（主に右岸）で蛇骨湧泉群を形成している。これらの湧泉水はいずれも中央火口丘形成の初期に噴出した神山泥流堆積物の上部から湧出している。

大木ら（1968）は温度検層によって、強羅駅付近で深さ200～250mに厚さ10～45mの温泉滞水層を、深さ350～400mに厚さ10mの温泉滞水層を見出し、上位を強羅第一温泉滞水層、下位を強羅第二温泉滞水層と命名した（図2・1・10）。強羅第一温泉滞水層は神山溶岩の基底部とその下位にある神山泥流堆積物の境界付近に、強羅第二温泉滞水層は外輪山溶岩類と基盤の早川凝灰角礫岩の境界部に胚胎していると考えた。

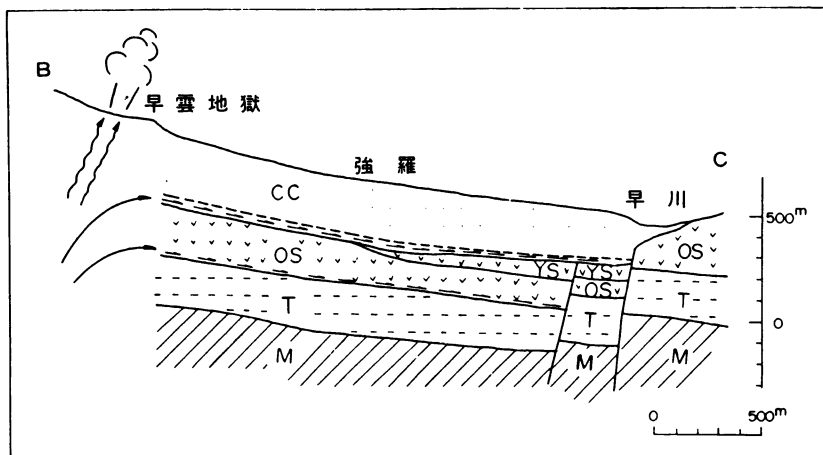


図2・1・10 箱根強羅の地質断面（大木ら、1968）

M：湯ヶ島層群、T：早川凝灰角礫岩、OS：古期外輪山溶岩類、YS：新期外輪山溶岩、CC：中央火口丘溶岩（神山溶岩）

図2・1・11は早雲山噴気地帯から箱根登山ケーブルに沿った浅層の地下水（上部の2つの水頭）と深層の温泉（下位水頭）の水頭断面である（大山ら、1985）。早雲山駅から強羅駅までは高温（70～90℃）の塩化物泉が、強羅駅から早川にかけて低温（30～60℃）の混合泉が揚湯されている。泉温と泉質の変化する強羅駅付近は浅層地下水と温泉の水面が一致する地点である。したがって、混合泉は塩化物泉と地下水とが混合したものとみなせる。

1967（昭和42）年に発見された異常高温は、次第に下流へと波及していた。図2・1・12は蛇骨湧泉

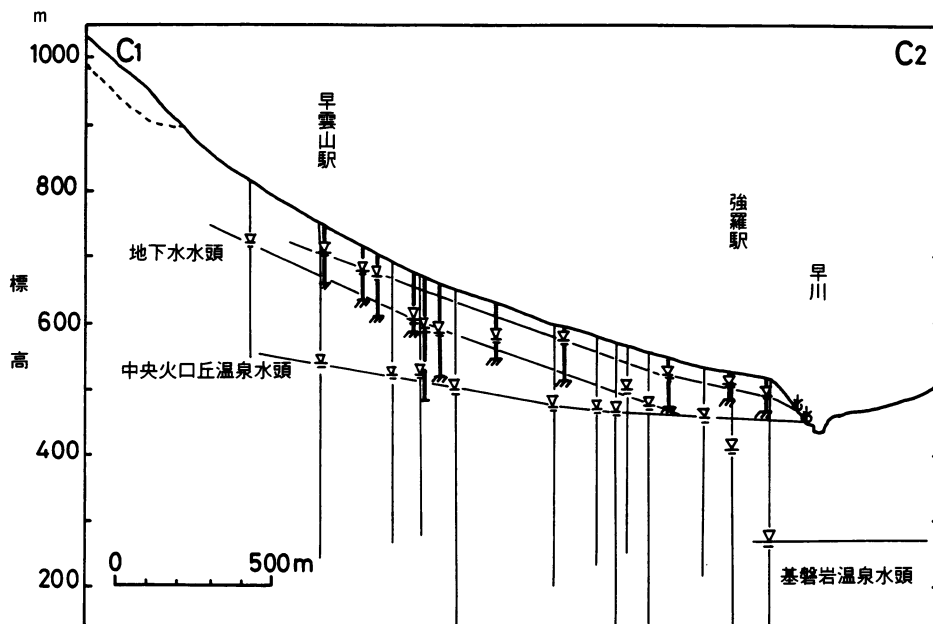


図2・1・11 箱根強羅の水頭断面（大山ら、1985） 強羅駅より上流で高温泉（塩化物泉）、下流で低温泉（混合泉）

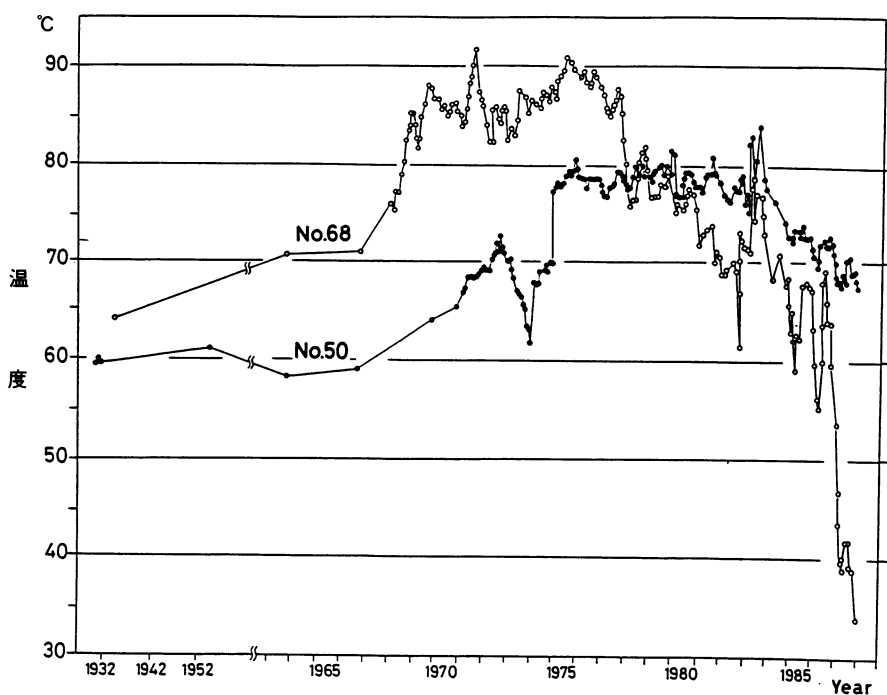


図 2・1・12 箱根蛇骨湧泉の温度の経年変化 1968年末頃から異常高温発生

群の先端の温泉第68号(図のNo. 68)とさらに450m離れている末端の温泉第50号(No. 50)での温度の経年変化である。両湧泉の温度は1930(昭和5)年代初期から異常高温が現れるまではほぼ安定していた。温度上昇は、自然湧泉温泉第68号では強羅の宮城野第50号(掘削井)よりも約1.5年後の1968(昭和43)年末に、温泉第50号(湧泉)では温泉第68号(湧泉)よりも約4年遅れて現れた。この時間差から、塩化物泉は神山東斜面の滞水層中を0.3~2.2m/日の速度で流動していると推定される(大山ら、1985)。

平野富雄ら(1977)は蛇骨湧泉の分布する蛇骨川の峡谷で河川流量と水質を測定し、蛇骨湧泉の湧出量2,500ℓ/minの内、700ℓ/minが利用され、1,800ℓ/minが谷壁と河床から蛇骨川に流出していることを明らかにした。この湧出量は東斜面での総湧出量の約27%に相当する。

2・1・1・2 蛇骨温泉の経年変化

蛇骨湧泉での高温状態は約9年間続いた(図2・1・12)。第68号の温度は1978(昭和53)年頃から低下し、1983(昭和58)年に異常高温前の70℃前後に戻った。温度は1987(昭和62)年になると急激に低下し、1988(昭和63)年には35℃以下まで下がってしまった。平野富雄ら(1988)によれば、塩素イオンは1969(昭和44)年が1,160ppm、1986(昭和61)年が347ppmと経年的に減少(約50ppm/年)である。また、湧出量は異常高温の時も経年的に減少していた。

神山の東麓では1949(昭和24)年から1975(昭和50)年の間に159源泉が新たに開発され、温泉採取量が1958(昭和33)年の3,700ℓ/minから9,300ℓ/minに増加した。中央火口丘の温泉水位は、1960

(昭和35)年から1980(昭和55)年に神山東麓中央部で0.3~0.5m/年、山麓周辺部で0.7m/年も経年的に低下している(大山ら、1985)。蛇骨湧泉の涸渇化は、上流における温泉の過剰採取によるものである。

2・1・2 神山東麓の基盤岩温泉

2・1・2・1 基盤岩温泉の湧出機構調査

中央火口丘の温泉湧出機構は強羅の温泉異常高温の発生を契機として概要が明らかになった。一方、基盤岩の割れ目系から湧出する温泉の湧出機構については、まだ未解決である。そこで基盤岩中に胚胎する温泉の状況を明らかにするために、ボーリングをとまなう調査が行われた(写真2・1・11)。

ボーリング地点は神山東麓を流れる早川左岸(標高356m)が選ばれた。早川の河床には基盤岩が露出している。ボーリング工事は利根工事株式会社が請負い、1972(昭和47)年1月~同年3月末に行った。掘さく深度は300mである。地質は、地表~10mが崖錐堆積物、10~69mが早川凝灰角礫岩、69~300mが湯ヶ島層群からなっている。孔底温度は82℃である。温泉は湯ヶ島層群に胚胎していた。主要な亀裂は294~298mである。孔内静水位は掘さく深度110mまで地表下6m付近であったが、以後、急激に低下して73m前後で安定した。揚水試験では、揚湯量120ℓ/minで、76.7℃、透水量係数



写真2・1・11 久野観測井
深度300m掘さく工事(1972年)
箱根火山の基盤岩温泉の調査孔

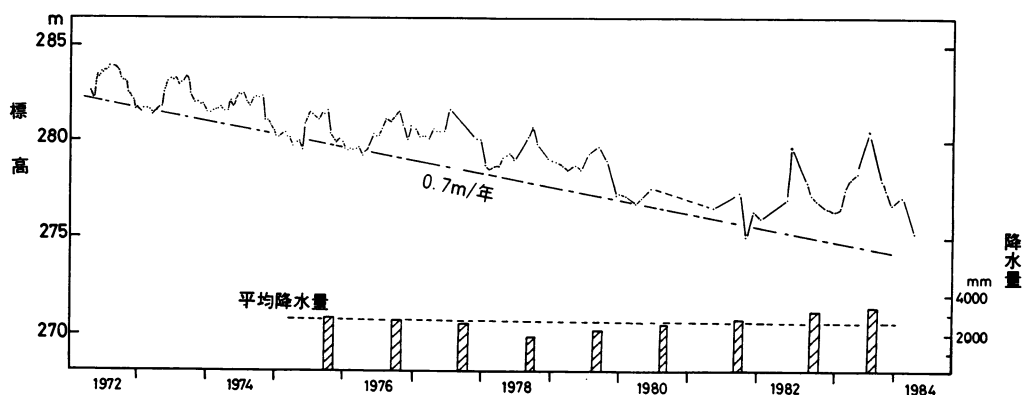


図 2・1・13 箱根久野観測井の水頭の経年変化（大山ら、1985） 基盤岩の温泉水位は経年的に低下

$2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ を示した。また、揚湯は、中央火口丘の末端の涯下から自然湧出している中央火口丘温泉への影響は認められなかったが、本孔井から早川に沿って下流約210mに位置し、基盤岩の温泉を揚湯している源泉には影響を与えることがわかった（小鷹ら、1972）。

本孔井は引き続き温泉観測井として利用された。孔井の位置は箱根カルデラ内であるが、地番は小田原市久野であるので、久野観測井と呼んでいる。

2・1・2・2 基盤岩温泉の経年変化

図 2・1・13は久野観測井の静水位の経年変化である。水位は年間 2 ～ 4 m の季節変動を示しながら、経年的に0.7m/年の速度で低下をしている。この水位の低下速度は、早川沿いの基盤岩から揚湯している源泉も同様である。

2・1・3 神山北西斜面の姥子温泉

2・1・3・1 姥子温泉の湧出機構

強羅の異常高温問題で研究所員が全員で調査に取り組んでいた最中の1967（昭和42）年9月18日、姥子温泉の元箱根第4号泉所有者の西村秀一氏から姥子温泉の保護に関する御願書が県衛生部に提出された。姥子温泉は神山の北西斜面の中腹に位置し、神山山崩れ堆積物の間から自然湧出している。泉温は38～49℃、pH 2～3で硫酸イオンを多量に含んでいる。姥子温泉の歴史は平安時代の末、1055（天喜3）年まで遡ることができる。足柄山の金太郎が眼を患った時、この温泉で治したという伝説があり、眼に良い温泉と言われてきた。現在では、姥子温泉が箱根に残っている唯一の湯治場でもある。この温泉は降水の多くなる3～4月に自然湧出が始まり、11月頃に湧出が止まるサイクルを毎年繰り返している。降水量の多い夏期には3,000 l/minも湧出していたのが、1967（昭和42）年の夏には涸れてしまった。

1965（昭和40）年に姥子湧泉の周辺で深いボーリング孔（元箱根18号）が掘削され、温泉の採取に



写真 2・1・12 姥子湧泉の流出量、四角堰（ノッチ）で測定中の広田茂氏（1979年 5月）
自然湧出する場所は中央奥の浴室内

成功した。その後、多数の源泉が掘削され、工事中の孔井を含めると1968（昭和43）年には15源泉数にもなっていた。最初の温泉井が掘削された時、姥子湧泉への影響が懸念された。小田原保健所温泉課は調査を行ったが、湧出量が降水に著しく影響されるため相互関係を判定することができなかった。温泉研究所は1967（昭和42）年10月の須川豊県衛生部長の命により姥子温泉調査を実施することにな

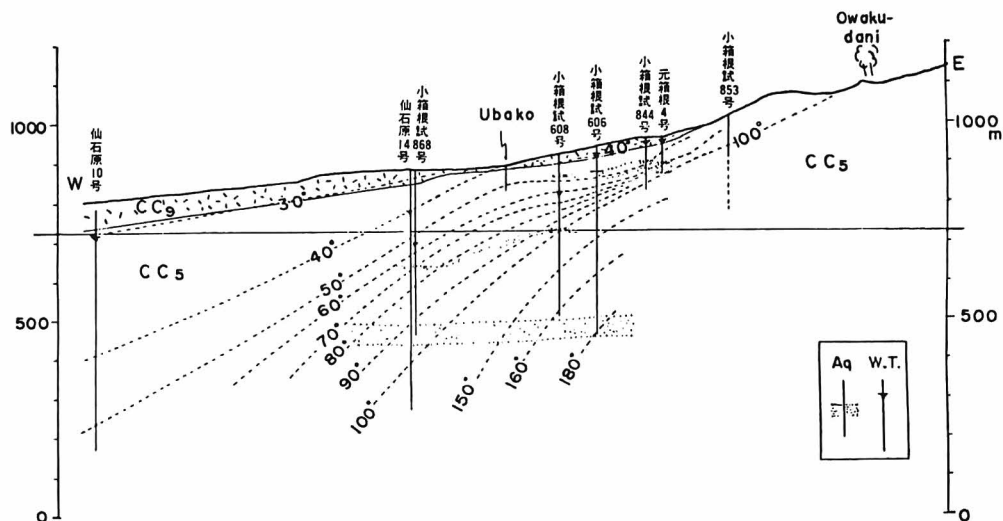


図 2・1・14 箱根姥子地域の地質断面（大木ら、1969） 姥子湧泉水は神山山崩れ堆積物から湧出
W.T.: 温泉水位、Aq: 主要温泉滞水層、Cc₅: 神山山崩堆積物

った。

調査はまず、自然湧出量を測定するためのノッチを取り付けることから始まった（写真 2・1・12）。この湧泉は10日間の積算降水量が80～120mmに達すると、その6日後から湧出を始めていた。ボーリング資料から作成した地質断面図（図 2・1・14）によれば、大涌谷から姥子にかけては浅・深2層の

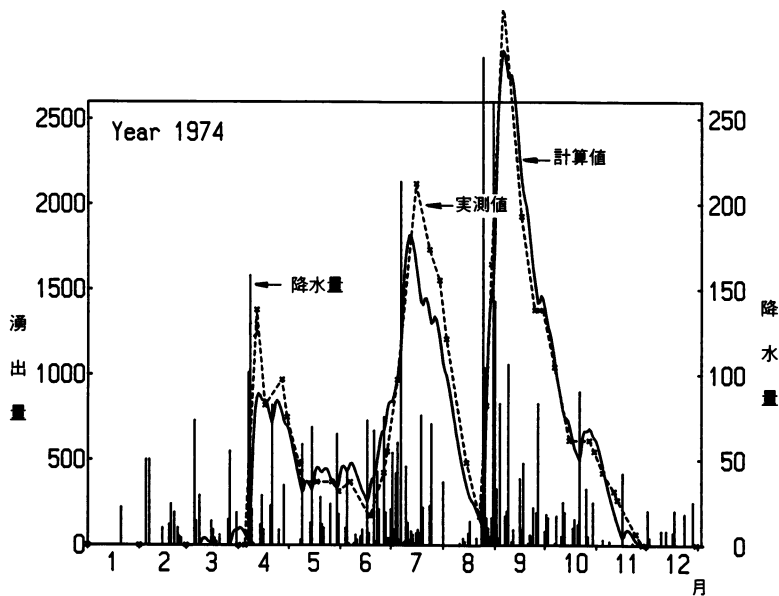


図 2・1・15 箱根姥子湧泉の湧出量と降水量との関係（大山ら、1991）湧出量は降水に敏感に反応
点線：実測値、
実線：計算値、
縦実線：降水量

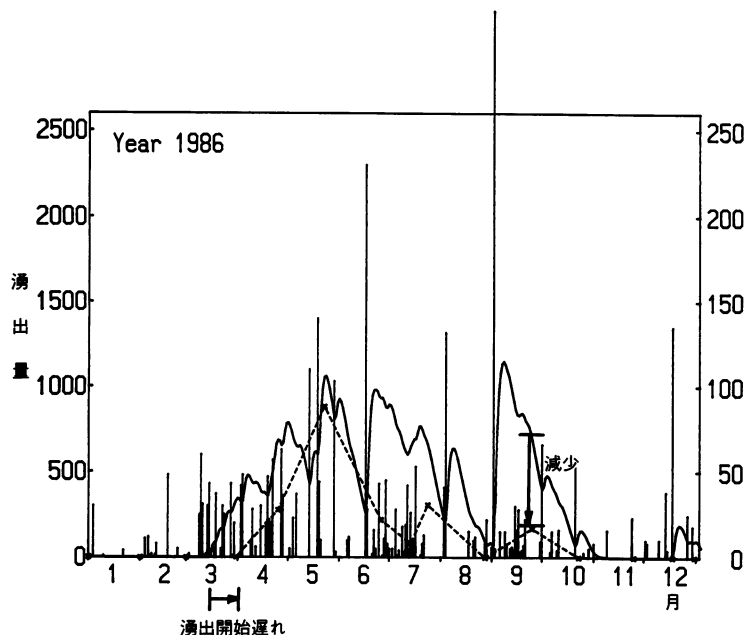


図 2・1・16 箱根姥子湧泉の経年変化（大山ら、1991）周辺地域の温泉開発で湧出量減少
点線：実測値、
実線：計算値、
縦実線：降水量

主要な温泉滞水層を認めることができる。浅層の温泉は山崩れ堆積物中に胚胎され、大涌谷方面から姥子に向かって流下している。姥子湧泉より大涌谷側に掘さくされた元箱根第18号など深度の浅い源泉は、浅層温泉滞水層の温泉を揚湯している。元箱根第18号は揚湯していない時でも、浅層の温泉層から下位の温泉層に温泉が流下している。元箱根第28号、仙石原第17号などはケーシング工事が不十分で、いずれも浅層の温泉層から深層の温泉層に温泉が流下していた。

姥子付近に孔井を掘削する場合には、深さ50～100m（山崩れ堆積物の厚さ）の間の水止め工事を十分に行う必要と、姥子湧泉より標高の高い地点での浅層温泉採取は、湧泉に影響を与えるので好ましくないと指摘した。この調査結果は1969（昭和44）年8月15日の第139回温泉審議会で報告され、姥子の自然湧泉を保護するために、姥子湧泉の周囲を温泉保護地域にした。

2・1・3・2 姥子湧泉の経年変化

新規源泉による姥子湧泉への影響は定性的には考えられていた。しかし、姥子湧泉の湧出量は図2・1・15に示されるように降水に敏感に反応するため、新規源泉との相互関係を特定できなかった。そこで、タンクモデルによる湧出量の数値シミュレーションが試みられた（大山ら、1991）。数値解析によれば、姥子湧泉は、地下に浸透した新しい降水量の80～90%に相当する量を降水後2～3月で湧出してしまふ。このため、湧泉は降水量の著しく少なくなる12月から3月にかけて渇水状態になることが明らかになった。次に、姥子湧泉の過去20年間の湧出状況が数値シミュレーションで検討された。その結果、湧出量は経年的に低下し、湧出開始時期も遅れていることがわかった（図2・1・16）。また、渇水化の原因は湧泉の上流に位置する源泉井による温泉と地下水の採取によることが定量的に明らかにされた。

2・1・4 湯本・塔ノ澤温泉

2・1・4・1 温泉の湧出機構

湯本・塔ノ澤温泉は、早川と須雲川が合流する箱根カルデラの東部に位置し、基盤岩の割れ目から湧出している（写真2・1・13）。早川と須雲川に挟まれた平頂山地は、新期外輪山である。この新期外輪山は東端から温泉を湧出しているので湯坂山と呼ばれている。湯本温泉は738（天平10）年に釈浄定坊が発見したと伝えられている。その温泉は総湯（湯本第9号）であると推定される。釈浄定坊による発見の年代は、箱根温泉の歴史で最も古いことから、総湯が箱根温泉の発祥ともいえる。

今日、湯本・塔ノ澤温泉は湧泉から深度1,100mの源泉、多くが深度300～600mの源泉から湧出している。小田原保健所の1990（平成元）年の調査によれば、総湧出量は5,603ℓ/minである。その平均温度は51.9℃であるから、総熱量は $0.48 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ で、箱根火山の総放熱量 $3.3 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ の約14%を占めている。

湯本・塔ノ澤温泉の泉質は平野富雄ら（1972）によって4群に分類された（図2・1・17）。須雲川



写真 2・1・13 箱根湯本温泉地、早川（中央）と須雲川（左）の合流点（1991年 3月）

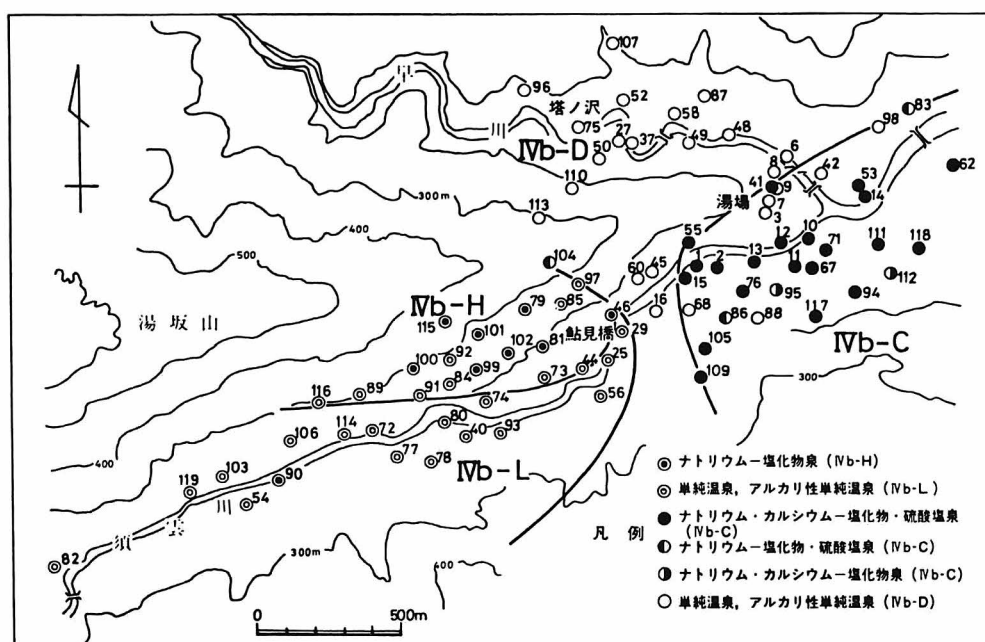


図 2・1・17 湯本・塔ノ沢温泉の泉質分布（平野ら、1972） 泉質は 4 帯に分類できる

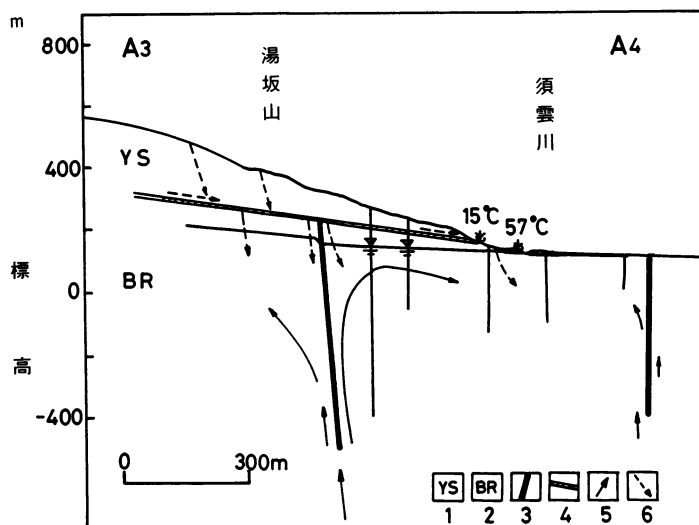


図 2・1・18 湯本の湧出機構
(小鷹ら、1972)

1：新期外輪山溶岩、2：
基盤岩類、3：断層、4：
礫層（滞水層）、5：高温
の温泉、6：地下水

上流の新期外輪山湯坂山側は高温で NaCl に富む温泉（Ⅳb-H 群）である。早川と須雲川合流点付近から須雲川上流には、比較的溫度が低く、NaCl と CaSO₄ に富み、溶存物質の多い温泉（Ⅳb-C 群）がある。早川沿いの塔ノ澤温泉はⅣb-C 群に地下水の混入した温泉（Ⅳb-D）である。須雲川沿いはⅣb-H 群に地下水の混入した温泉（Ⅳb-L 群）である。

小鷹滋郎ら（1972）の調査によれば、等温線と等水位線は西高東低で、高温の NaCl に富む温泉（Ⅳb-H 群）の湧出地域から早川と須雲川合流点に向かって低くなっている。温泉の温度は須雲川上流の湯坂山側が 60～70℃、須雲川沿いが 40～60℃、早川と須雲川合流点付近が 40～60℃、塔ノ澤が 40～60℃である。透水量係数は、高温の NaCl に富む温泉が湧出する早川凝灰角礫岩地域で $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、早川と須雲川沿いの須雲川安山岩類地域で $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ のオーダーである。須雲川安山岩類の分布地域は早川凝灰角礫岩分布地域よりも透水性がよいことを明らかにした。そこで、図 2・1・18 の湧出機構モデルが提案された。高温の NaCl に富む温泉が早川と須雲川合流点から須雲川上流 1,000m に存在する断層の割れ目系を地下深部から上昇している。その高温の温泉は新期外輪山溶岩と基盤岩との間にある礫層と河川からの地下水の供給を受けながら東に流動し、温泉としての量を増やしている。透水性のよい須雲川安山岩類地域は一種の貯湯槽の役割をはたしていると考えた。大山ら（1988）は湯坂山横穴湧泉を 1974（昭和 49）年～1987（昭和 62）年にかけて調査し、温度と Cl⁻ 濃度が春の降水で湧出量の増加と共に上昇した後、低下する（図 2・1・19）ことから、図 2・1・20 の深部熱水と浅層地下水との混合モデルを示した。

2・1・4・2 湯本・塔ノ澤温泉の経年変化

1886（明治 19）年に発行された日本鉱泉誌によると、湯本では総湯、塔ノ澤では 9 源泉が記載され

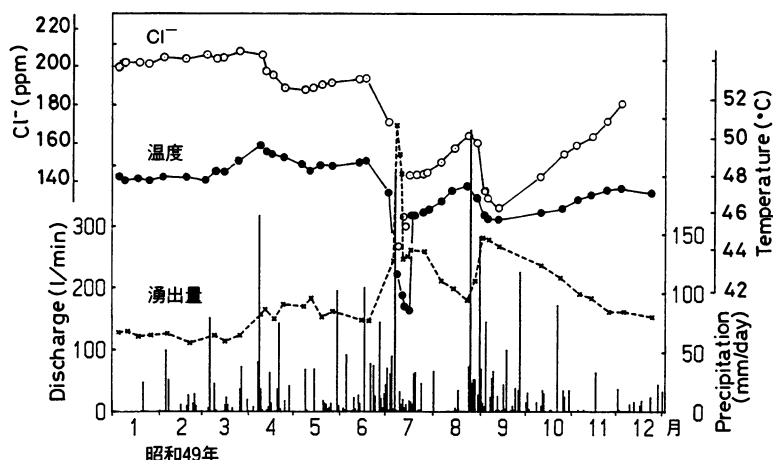


図2・1・19 湧出量、温度、 Cl^- のハイドログラフ（大山ら、1988）

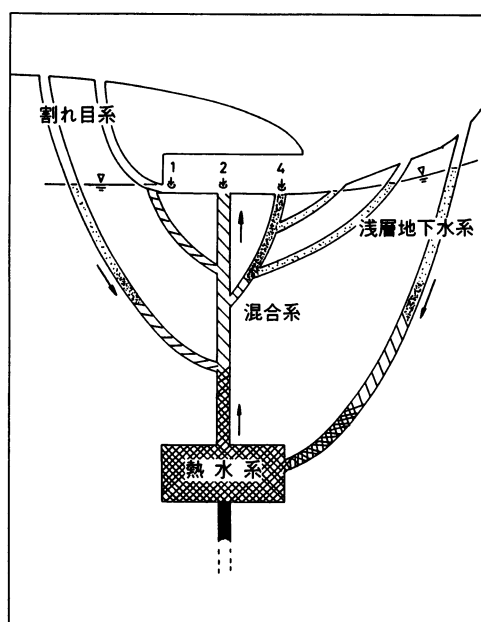


図2・1・20 湧泉の湧出機構（大山ら、1988）

ている。それらは全て湯坂山東端の自然湧泉である。温泉の採取方法は、明治30年代後半に横穴湧泉の開発、1928（昭和3）年に縦孔の掘さくによる自噴泉、1933（昭和8）年に渦巻ポンプによる揚湯、昭和14年にエアリフト・ポンプ、1989（平成元）年に水中ポンプへと変遷した。温泉量は、1930（昭和5）年の約17源泉、1,630 l/min から1980（昭和55）年の105源泉、5,600 l/min に達している。温泉採取量の増大は多くの自然湧泉を枯渇させたり、自噴の停止をもたらした。ボーリング孔（竖孔井）の温泉も経年的に水位の低下、溶存量の減少、温度の低下が生じている。新しい技術の出現は大量の温泉を採取する事ことを可能にする反面、温泉資源の衰退を引き起こしている。

温度、泉質、水位の経年的変化には規則性のあることが見い出された。小田原保健所温泉課の迫繁樹技師らの協力をえて大山・迫（1987）は1960年から1980年の20年間における温泉水位を整理した。温泉水位は全域で低下しているが、その低下率には次のように地域差があることを明らかにした。須雲川上流の新时期外輪山側にスポット的に2 m/年の地域がある。早川と須雲川合流点付近は0.8 m/年（図2・1・21）、塔ノ澤地域が0.2 m/年である。水位低下の地域差は平野富雄らの泉質分布とその泉質の経年変化の地域差によく一致している。平野

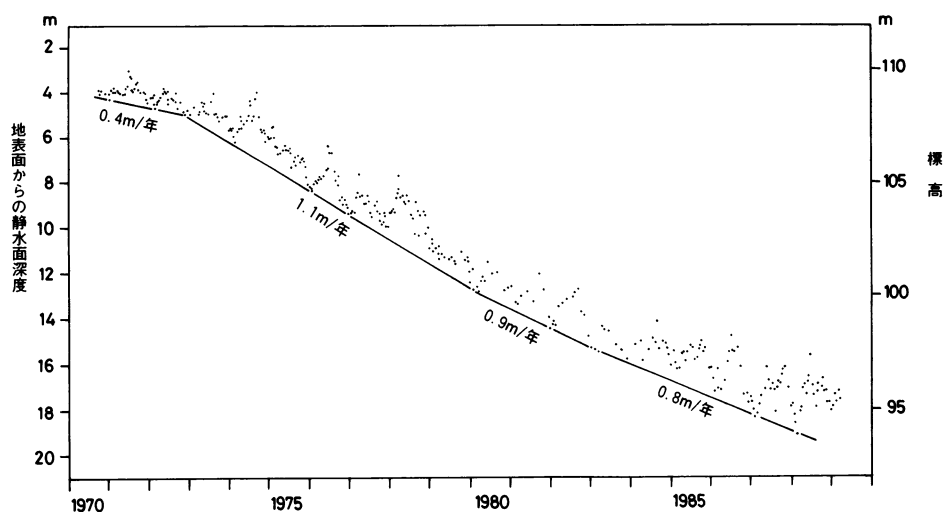


図 2・1・21 湯本の温泉水位の経年変化 (大山、1989)

ら (1972、1986) によれば、大部分の源泉は温度の低下と溶存物質の減少を示しているが、各群がそれぞれ特異な変化を示している。早川と須雲川沿いの温泉ほど、温度低下と溶存量の減少が著しく、河川水とほとんど同じになっているものもある。高温で NaCl に富む温泉 (IVb-H 群) を湧出する地域は泉質が比較的安定している。このことは、温泉水圧が低下しても浅層地下水からの補給が少な

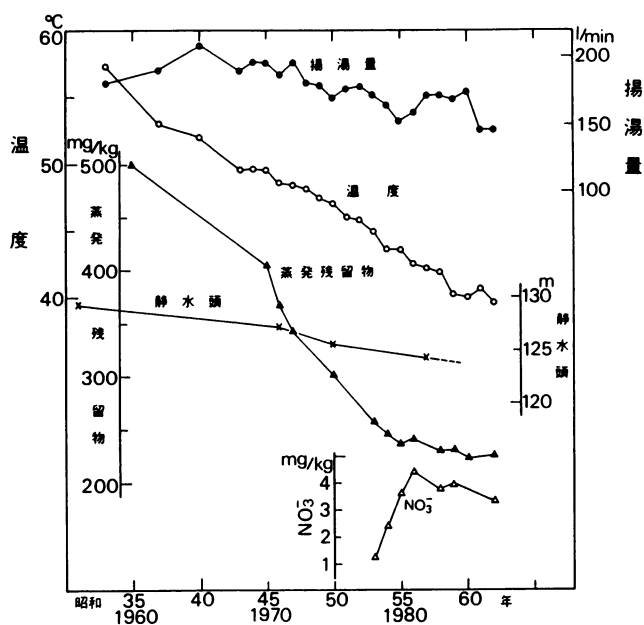


図 2・1・22 塔ノ澤温泉第50号の経年変化 (平野ら、1989)

いので、水位低下が顕著となるのである。これに対し、IVb-H群に地下水の混合した温泉が湧出する地域は透水性がよいので、地下水の補給の増加によって水位低下がIVb-H群地域よりも小さく現れるのであろう（図2・1・22）。

2・2 湯河原温泉

2・2・1 湯河原温泉の湧出機構

大木らはボーリング資料から地温分布を作成した（図2・1・23）。最も高温の地熱地帯は湯河原火山の火道と推定されるカルデラ中心部の不動滝付近である。不動滝付近には89℃の温泉が湧出している。小田原保健所の調査（1990年）によれば、源泉の深度の多くは500m前後であるが、1,100mに達するものもある。総揚湯量は7,207ℓ/min、平均温度は65.6℃である。地下深所から上昇してくる熱量は、 $0.79 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ となり、箱根の約24%に相当する。

温泉場地区の温泉の主要成分は、高温の温泉がNaClとCaSO₄で、低温の温泉がCaSO₄である。Oki et al. (1977) は湯河原温泉のCl⁻/SO₄²⁻の比を計算し、高温地域からの湧出する温泉はCl⁻/SO₄²⁻の比が大きく（1.5～4.1）、地熱地帯周辺部の低温泉ほど低く（0.005～0.1）なることを示した。

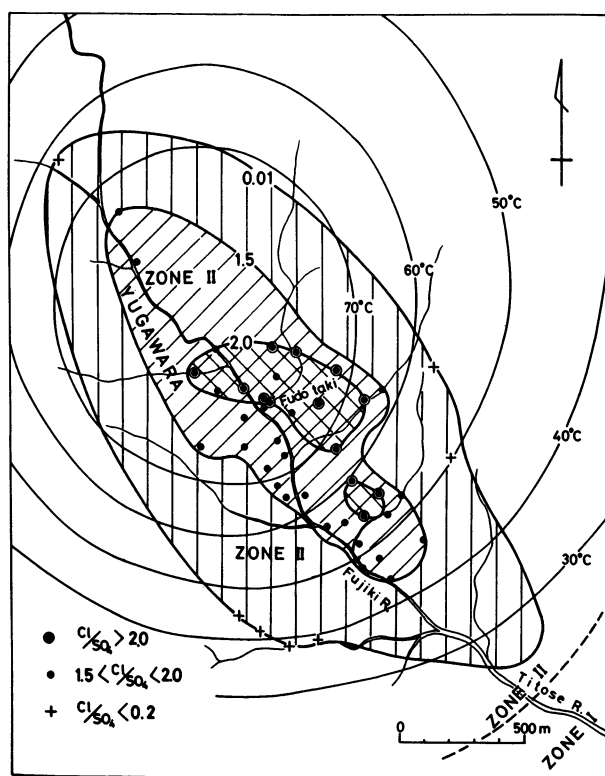


図2・1・23 湯河原地温分布
（Oki et al. 1987）
Cl/SO₄による湯河原温泉の
分帯と海水準面の等温線図



写真 2・1・14 温泉スケール（炭酸カルシウム）落とし(1975年)、1～2月毎に揚湯管を引き上げて掃除

$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ の値は地温分布とおおよそ一致し、藤木川に沿って帯状に分布し、この方向に割れ目系が延びていることを示唆している。また、透水量係数は藤木川沿いで $10^{-4}\text{m}^2/\text{sec}$ のオーダーであり、周辺の山に向かって $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$ と小さくなる（大山、1976）。揚水試験からも藤木川沿いは透水性のよいことを示している。

当地域の温泉の大部分はエアリフト・ポンプで揚湯されているが、揚湯管やエア管に温泉沈澱物（スケール）が付着し、支障をきたしている。スケールは炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）を主成分とするあられ石（aragonite）と方解石（calcite）である。スケールの付着の激しい源泉は、10～20日ごとに鎌やノミ等で削り落とす井戸掃除を行っている（写真 2・1・14）。粟屋 徹ら（1974）は井戸掃除の時にスケールの付着状況を調査した。スケールは高温（ 80°C 以上）で蒸発残留物の多い（2,000ppm以上）源泉ほど激しく付き、低温（ 60°C 以下）で蒸発残留物の少ない（2,000ppm以下）源泉にほとんど付着せず、大木ら（1963）の亀裂帯分布概念図によく一致していることがわかった。

鈴木孝雄ら（1971）は箱根温泉で温泉スケールの CaCO_3 の生成機構について考察を行った。箱根の熱水変質を受けた岩石中に普通に見いだされる方解石と平衡に存在していた熱水は炭酸（ CO_2 ）の分圧約 1 気圧、pH 6 付近にあると算出した。この熱水がエアリフト・ポンプで揚湯されると、 CO_2 分圧が急激に下がるので H^+ が減少し、pH が上昇する。その結果、 CO_3^{2-} は地下においてよりも約 100 倍に達し、Ca と結びついて CaCO_3 の沈澱を生ずると推定した。粟屋らは、スケール付着の激しい源泉で CO_2 分圧 0.5～1.0atm、pH 6.2～6.4、ほとんど付着の見られない源泉で CO_2 分圧 0.003～0.01atm、

pH6.9～7.7であると考えた。地表における pH の実測値が 8 前後、CO₂分圧が大気と平衡にあるとすると0.0003atm である。したがって、泉温の高い源泉ほど地表と地下における pH 値の差が大きくなり、CO₃を多く生成するのでCaCO₃の沈澱が生じやすくなると思われた。

2・2・2 湯河原温泉の経年変化

湯河原温泉は1930（昭和 5）年代後半に自然湧泉や自噴泉が姿を消し、ポンプ揚湯になった。しかし、1950（昭和25）年頃までは停電で揚湯が止まると短時間で水面が上昇し、自噴したと言われている。水位低下が騒がれ始めたのは1956（昭和31）年頃からである。1950年代前半までの静水位は、まだ地表近くにあったと思われる。当時の温泉利用状況は、1953（昭和28）年に利用源泉数が40有余、総揚湯量が20数石といわれている。したがって、1950年代前半の総揚湯量は4,000 ℓ/min 程度である。小田原保健所が調査を始めた1958（昭和33）年には、利用源泉数が58源泉、総揚湯量が5,040 ℓ/min である。温泉利用量の急増が、水位低下を招いたと考えられる。温泉涸渇の危機感は、1950年代には前記したように地質調査所への調査依頼、県温泉審議会委員小林儀一郎博士の調査報告会、温泉研究所設立の働きかけに見られるように高まっていたが、1960年代になると急速に低下した。1960年代には35源泉が新たに掘さくされ、1970（昭和45）年には、総揚湯量が6,360 ℓ/min に増加している。では、温泉涸渇の傾向は無くなったのであろうか。当時の温泉審議会の案件を調べると、より強力な動

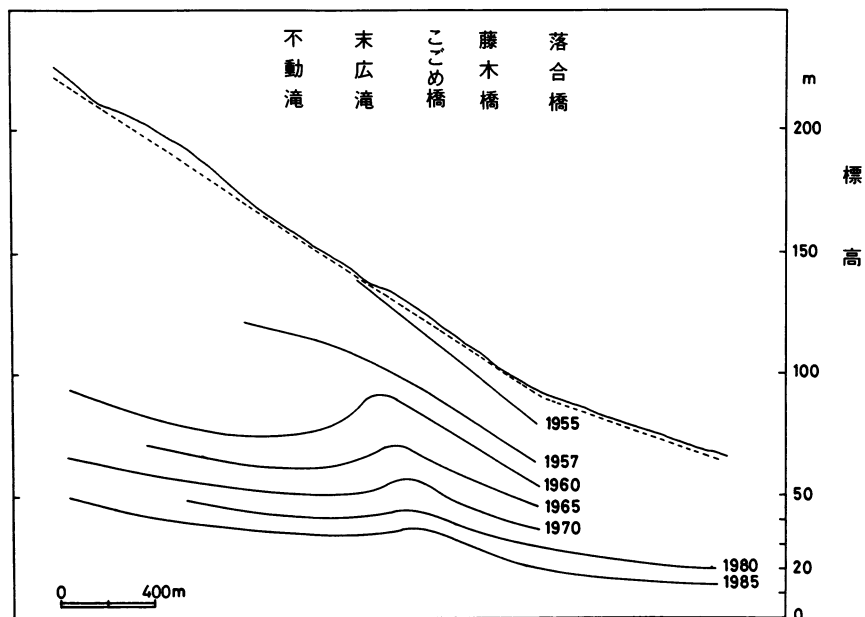


図 2・1・24 湯河原温泉の水頭（大山ら、1991）、水頭は1955～1960（昭和30～35）年に急激に低下開始

力と増掘がたくさん申請されている。

湯河原温泉の水位低下が著しいことは度々いわれていたが、系統的な記録はなかった。大山正雄は井戸業者のメモ等から過去の記録を収集するとともに、各源泉の水位測定を始めた。測定は2週間から数カ月に一回行われる揚湯管の温泉スケール落とし、いわゆる井戸掃除の時をとらえて行った。源泉までは車で行けず、細い山路や急斜面を重さ25kgもある水位測定器を担いで行くこともあった。こうして湯河原温泉の水位分布が出来上がった。なお、水位計は、その後、エア管（内径13mm）の中からも測定のできる装置が開発され、軽量化された。

図2・1・24はその後の調査も加えた藤木川沿いの1955（昭和30）年から1985（昭和60）年にかけての温泉静水位の経年変化である。1950年代前半までの温泉水位は藤木川の河床の近くにあり、河床に沿った勾配を示している。静水位は1955（昭和30）年を境にして全域で低下し始め、2年後の1957（昭和32）年には末広橋で25m、藤木橋付近で15mと年間8～13mも低下している。1960（昭和35）年になると、水位分布は様相を一変していた。水位低下は全般的に起きているが、特に、不動滝付近が著しく、すり鉢状に落ち込んでいる。1957（昭和32）年から1960（昭和35）年までの3年間における水位低下量は、落合橋で15m、不動滝で40m以上である。1960年以降も、周辺の山での温泉開発が盛んに行われるようになり、水位低下地域が拡大している。

1985（昭和60）年の水位は1955（昭和30）年時と比較すると、落合橋付近で50m以上、不動滝で100m以上の低下である。この水位低下量の地域差は、泉質変化の調査研究から温泉を胚胎する地層構造の違いによるものと推定される。70～90℃の温泉が湧出し、温泉活動の中心である不動滝付近の温泉は、

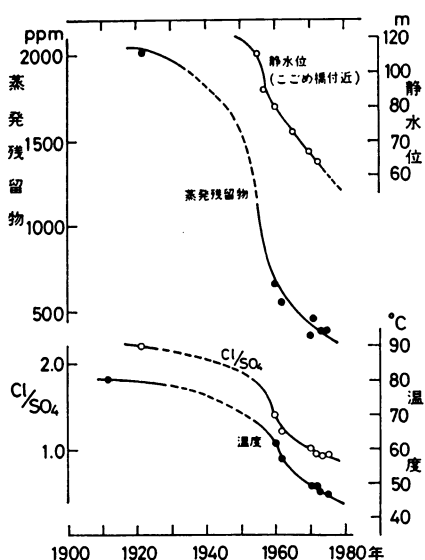


図2・1・25 湯河原第6号泉の溶存物質の経年変化
（平野ら、1976）

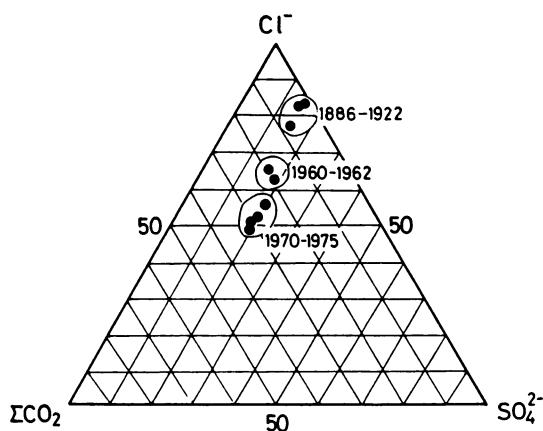


図2・1・26 湯河原第6号泉の陰イオン組成比
（当量比）（平野ら、1976）

温泉水位低下により地下水混入

1955(昭和30)年から1985(昭和60)年の約30年間に於いて、温度と Cl^- 濃度がほぼ一定である。一方、藤木橋付近の温泉は、温度が60℃から40℃に約20℃低下、 Cl^- 濃度が180~700ppmから40~290ppmに減少している(栗屋ら、1987)。例えば、図2・1・25と図2・1・26は藤木橋付近に位置する第6号の泉質変化である(平野ら、1976)。第6号は、炭酸物質に富む浅層地下水が混入して、徐々に Cl^- の少ない地下水型の泉質に変化している。温度は1913(大正2)年の81℃、1960(昭和35)年の61.6℃、1975(昭和50)年の47.8℃と低下している。これらのことから、不動滝付近は緻密な地層で構成されているので、浅層地下水が浸透しにくく、供給を上回る温泉採取による不足分を直接反映するので、著しい低下となるのであろう。藤木橋から下流はかつて自然湧泉のあったように割れ目が多いので、浅層地下水が浸透しやすい。したがって、藤木橋付近は、温泉水位が低下しても浅層地下水によって容易に補給されるので、見かけ上、水位低下が不動滝付近より小さく現れるのであろう。

いずれにしても、水位低下は温泉の量(湧出量)のみならず質(温度、泉質)の価値をも減少させるものである。

箱根・湯河原でも温泉場は自然湧

社

説



温泉枯渇化に総合対策を

箱根の湯河原に位置し、由緒ある温泉である藤木・塔之沢地区で、温泉の枯渇化がすすむことが確実に行進している。県温泉地学研究所の小田原保健所の実地調査によると、源泉の地下水位は年間八十センチメートルの割合で低下を続けており、湯温も減少傾向にある。総熱減も進む傾向である。水位低下の結果、塔之沢では、浅い地層の雨水が源泉に流れ込み、温泉含有成分の稀薄化も顕著になっている。

平成元年調査では、同地区の源泉数は百八あり、計測可能な源泉は八十二。うち、七十九源泉が利用されている。一方、未計測源泉は十六のうち、枯渇源泉は十四に上っている。総熱減量は毎分約五千六百ワット、この四分の一強が温度五度、四度の範囲にあり、五度の下を占めるなど、全体の四割強を占める。源泉深度は深くないが、大半の源泉が圧力を利用して湯をくみ上げるエアー・リフト・ポンプを採用している状況だ。

温泉の枯渇は急激に進むものではないが、さまざまな要因が重なって少ずつ進行し、やがて深刻化する性格のものである。だからこそ、追跡調査が欠かせないわけだが、湯本・塔之沢地区で、

規制強化に踏み切っている。だが、それ以前も、温泉水位の下に止まることができず、根本的な解決が図られていない。実際には、泉質の問題の厄介な性質と同時に難しさがある。なせか、箱根は三十年代後半から四十年代にかけて急速な温泉開発が進み、湯本も大温泉場を発展したが、乱

いたが、いざ一ツ重要なのは「水収支」の考へ方である。温地研の説明では、雨水が地下に浸透し、箱根火山の地熱で温められ地表に湧出するが温泉である。雨水が温泉の源とすれば、無制限な地下水採取はやがて地下水の収支を悪化させ、温泉枯渇につながる、との指摘

は昭和五十年代前半に、こうした現象が一気に顕在化し、温泉量の在り方が問題になった経過がある。枯渇原因を探るため、地元の箱根町は温地研に箱根全山の温泉総合調査を依頼。詳細な研究報告がまとめられ、五十五年四月には県が温地研の指針となる温泉保護対策要綱を全面改定、

細い湯道も温泉枯渇を抱えていることは、当時の温地研報告でも明確に指摘されている。にもかかわらず、経済界側が優先されてきたからだ。源泉は開発者の私利財源であり、掘削技術の高度化がそれを可能にできた。しかし、自然の供給量をオーバーした状態で、変わらぬ温泉量を続けられ

である。しかし、飲料、雑用水として数多くの水井戸が掘削されながら、それだけの量がくみ上げられているのか、十分な資料もない現状である。これは、早急に調査すべきだろう。

町営温泉事業に資力がある湯河原では、循環型の集中管理方式を導入、メーター制による温泉保護対策に乗り出した。箱根とは事情が異なるものの、有限な資源という認識を踏まえた試みは大いに評価されよう。湯本でも温泉統合化がいわれ始めている。ぜひ、前向きな議論を深めてもらいたい。地域全体の利益を考慮する視点こそ重要であらう。県当局も、そうした議論の場づくりなどに指導性を発揮し、合意形成の努力を怠ってはならない。と同時に、科学的な研究成果を温泉行政に生かし、総合的な保護対策が促進されることを要請してきたい。

(神奈川新聞、1991年3月13日)

出の場所を中心に発展してきた。そこでの温泉採取には厳しく制限を課して温泉保護をはかっている。しかし、上記したように、温泉保護は個々の源泉に対するよりも、水収支に基づいた総量規制をしなければ不可能である。また、規制の緩い周辺地域はどむしろ温泉採取を更に厳しくする必要がある。

箱根・湯河原の温泉の涸渇化については、新聞やテレビ等のマスコミでも度々取り上げられた。記者は研究所報告書を丹念に読み、小田原保健所や衛生部環境衛生課にも取材をし、かなり専門的で、核心を突いたことをきわめてわかり易く表現している。多いに見習うことがあった。ところで、過去20年間の新聞等の表題に気付くことは、ほとんど変化がないことである。そして結論は、湯湯規制の強化と科学的な研究成果を温泉行政に生かし、総合的な保護対策を促進する要望である（新聞2・1・2）。私たちはこの要望にも答えるべき仕事をしなければならないと痛感している。

3 箱根・湯河原温泉連続観測（1987年）

温泉地学研究所は衛生部環境衛生課長の依頼により、1971（昭和46）年以来、箱根の湯本と湯河原温泉の水位、温度、泉質の定期的観測を続けてきた。民間の源泉を借りての観測では、長期的な記録の確保と水位や温度の変化を継続して捕らえることが困難で、連続観測を行うことが是非とも必要であった。また、影響試験はこれまでの温度と湧出量のみを対象とすることから、より正確な水位を指標にする方向にあった。しかし、土地や掘さく費用の確保が困難であることによりなかなか実現に至らなかった。連続観測装置の新たな設置は、環境衛生課員の努力によってようやく1987（昭和62）年度での予算化にこぎつけることが出来た。この時の林一雄環境衛生課長の最後の最後まで頑張りにには小野肱一副技幹も感服していた。今回も民間源泉を借用しての観測施設設置による観測となったが、今後は神奈川県所有の観測源泉の設置に努める必要があるだろう。

自動観測装置の設置場所は当初、中川や鶴巻などの温泉地も対象に計画されたが、現在の体制では管理・維持が困難であるため箱根・湯河原のみに限定した。設置の作業は1987（昭和62）年度から始まり、3カ年で以下の7箇所で行うことになった。この内、姥子は自然湧泉の湧出量、他は源泉井内の水位と温度の測定である。なお、温泉連続観測装置設置事業は温泉地学研究所に委託された。

昭和62年度：箱根町湯本、湯河原町温泉場の2箇所	設置予算 4,610,000円
昭和63年度：箱根町二の平、強羅の2箇所	6,386,000円
昭和64年度：箱根町姥子、小田原市久野、湯河原町不動滝の3箇所	7,259,793円
	総計18,255,793円

図2・1・26は観測施設の位置を示し、箱根カルデラ内が5箇所、湯河原カルデラ内が2箇所である。

観測装置の設置の作業は、まず、各地域の温泉状況を代表し得るものであり、しかも使用していない源泉を探すことから始まった。次に、観測源泉の借用の交渉は小田原保健所温泉課にも協力してもらった。

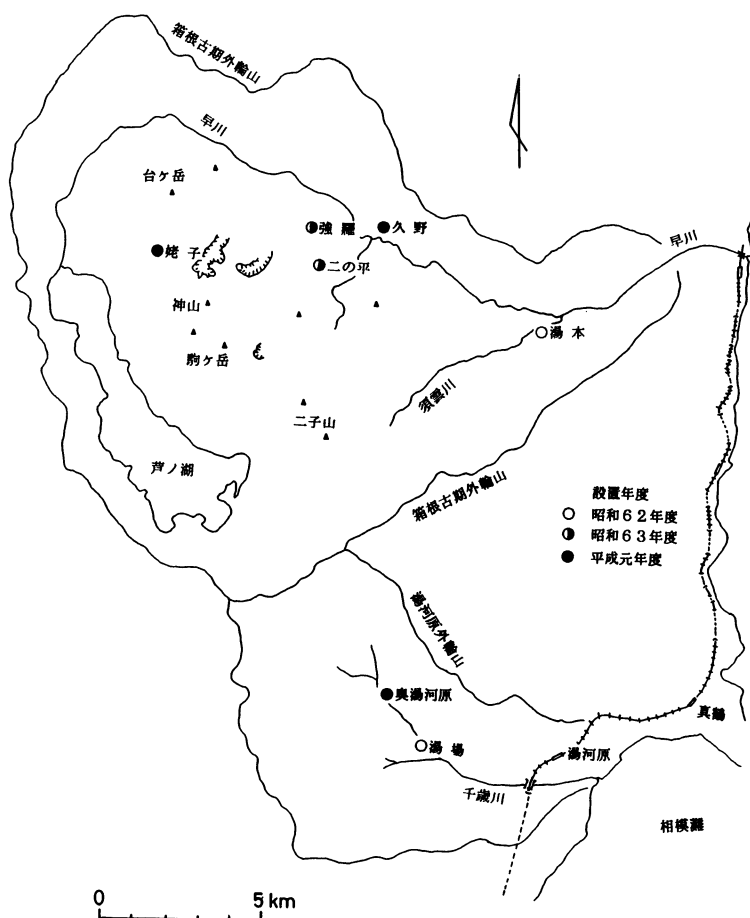


図2・1・27 温泉連続観測装置の配置 (大山ら、1991)

観測機種を選定には、記録計の発する音と記録計を収納する保管庫の色にも注意を払う必要があった。初年度の箱根町湯本では、記録計を設置する場所が静かな旅館内であるため静寂を至上命令としていた。記録計は絶えず音を発しているので、その音の程度を確認するため新宿のショールームまで赴いた。打点式記録計の音は20ホン（低いささやき）とはいえ、静寂な旅館では騒音となる。ペン式記録計が5ホン以下で、非常に静かであるので採用された。記録器の保管庫は建物と庭木との調和を図るため茶系統にし、内部に防音板を取り付けた（写真2・1・15、16）。

測定対象の温泉井は、内部口径が75～100mmと小さく、水位が地表から数10m～100m以深に達していたので、水圧式水位計が採用された。この水位計は水深10～20mに設置し、上部の水面変化（水圧変化）を電気信号に換算するものである。水位の読み取りは1cm以下まで可能であった。温度計は深度300～500mの孔底に設置した。感熱部は水深200～400m（20～40気圧）の中に長期間（数年）設置



写真 2・1・15 箱根湯本の温泉連続観測源泉（右）
と観測器機の保管庫（左）

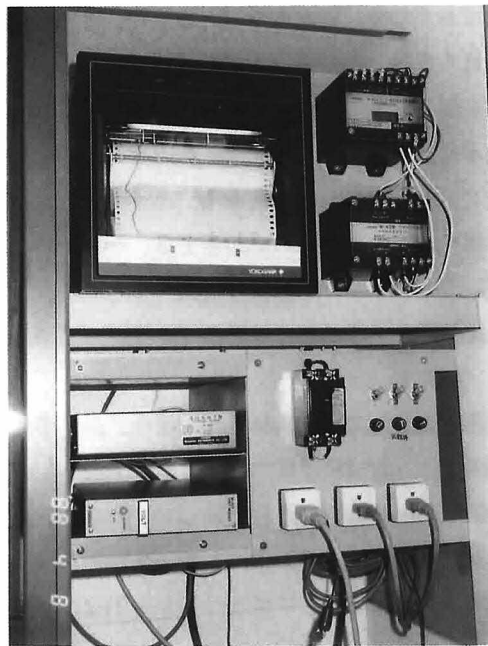


写真 2・1・16 温泉連続観測装置、記録計と
水圧変換器類

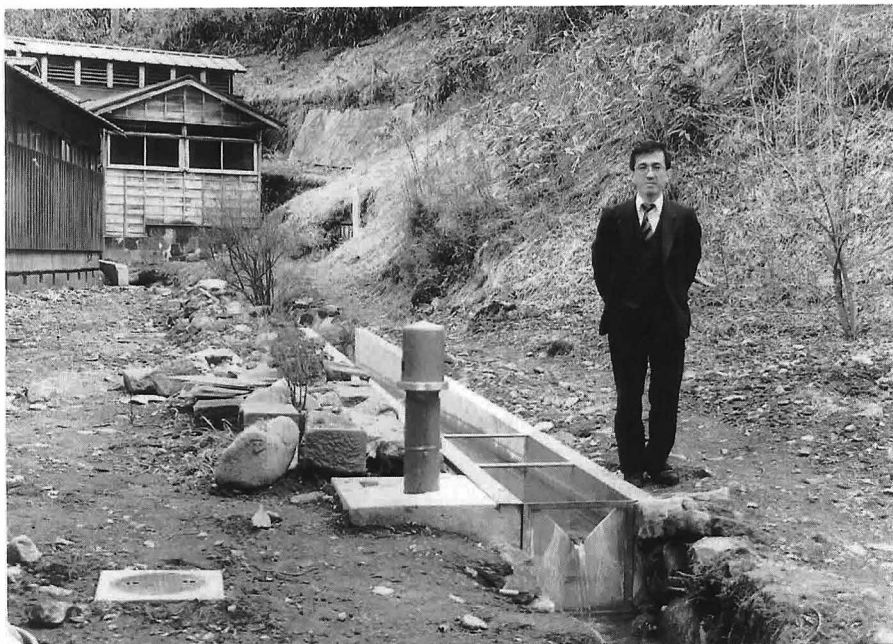


写真 2・1・17 箱根姥子湧泉の流出量測定、水路と水位計（流量換算器）
観測装置設置事業を担当した環境衛生課井口博氏（1991年3月）

しておくので、防水が問題となった。感熱部と3線のケーブルを一体で被覆してあるモード型が防水に最も保適しているとして採用された。感熱部は白金測温抵抗体を用いた。温度は0.1℃まで相対変化を読み取ることができた。

水位と温度のセンサー（感部）を井孔内の温泉中に長期間設置しての連続観測は、あまり例がないので、センサーを納める業者にもテストケースとして関心が持たれた。深度500m（水深420m）、孔底温度90℃の湯河原の第20号では、センサーを設置してからすでに4年を経過した。幸い、いずれの施設でもセンサーは正常に稼働している。

姥子湧泉の湧出量は水路の堰に設けた観測器の検出する水位から換算し、データーログに記録している（写真2・1・17）。

連続測定により、温泉水位には日、週、季節毎にそれぞれ特有の変化をしていることが認められた。

図2・1・27は箱根湯本の1月間の平均としての1日の水位変化を模式的に示したものである。水位は午前7～8時頃に最も上昇して9時頃から低下、再び夕方5時頃に上昇し、6時過ぎから低下している。水位にはこのように1日に周期があり、20～40cm変動することがわかった。図2・1・27から、揚水が午前10時から午後3時と夕方6時から夜中にかけて、そして、平日よりも週末と祭日に最も多く行われていると推定される。この一日の水位の変化は、日中、昼食を兼ねた客が多く訪れている最近の温泉場の状況も示唆していると思われる（写真2・1・18）。

温泉連続観測設置事業は1990（平成2）年から開始した環境衛生課の温泉連続観測事業に受け継が

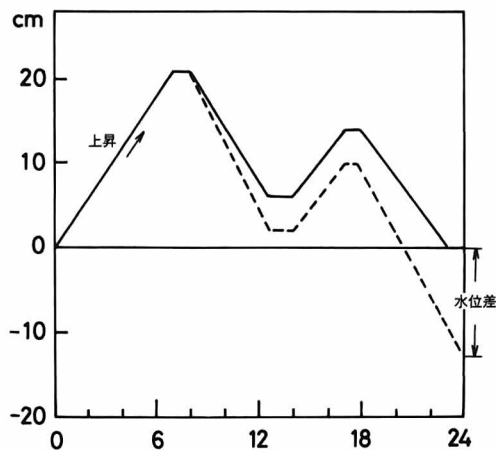


図2・1・28 箱根湯本の水位の変化
（大山ら、1991）



写真2・1・18 箱根湯本温泉場、今も残る
木造三階建て旅館

れた。毎年の調査結果は温泉審議会等に報告し、温泉資源保護行政の推進に役立てることとした。

4 箱根火山噴気地帯の放熱量

4・1 噴気地帯の放熱量調査

中央火口丘神山の山腹には、大涌谷、早雲山、硫黄山の噴気地帯がある。噴気地帯の自然放熱量調査は、国立防災科学技術センター（現在の防災科学技術研究所）が1963（昭和38）年～1965（昭和40）年に温泉地回り調査の一環として行っていた。温泉研究所も箱根火山の全放熱量の試算を契機にして噴気地域の調査を始めた。1970（昭和45）年から、大山らは1 m深度の温度を測定して噴気地帯の地温分布を作成し、放熱量を求めた。大涌谷での調査は、1975（昭和50）年から大涌谷―神山登山道にまで拡大した噴気活動の調査（広田ら、1977）を経て、1980（昭和55）年から小田原土木事務所による大涌谷地回り調査の一環として継続している。1953（昭和28）年に地回りを起こした早雲山噴気地帯での熱量調査は1970（昭和45）年と1980（昭和50）年に行った（写真2・1・19）。馬蹄形の底に分布する早雲山噴気地帯では、オーバーハングしている崖に近ずくと、落石が起きるのではないかと冷や冷やしながら調査が行われた。硫黄山での調査は1972（昭和47）年に、次いで、1979（昭和54）年に廃熱の有効利用研究の一環として工業試験所と共同で行った。



写真2・1・19 箱根早雲山噴気地帯調査（1980年）、1953（昭和28）年の温泉地回り発生付近