

## 熱水混合モデルによる湯河原温泉の化学成分の研究

栗屋 徹\*、平野富雄\*\*、石坂信之\*\*、大木靖衛\*\*

神奈川県温泉地学研究所

Annual Variation of Chemical Composition of the Yugawara Thermal Waters  
and its Interpretation by a Mixing Model

by

Toru AWAYA, Tomio HIRANO, Nobuyuki ISHIZAKA and Yasue OKI

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

Annual variation of chemical composition of the Yugawara thermal waters is described. The water table, chemical composition and temperature of thermal water have been changing year by year due to overdischarge. In the thermal waters at the Fudotaki area, temperature and dissolved materials are increased associated with lowering water level, but in the waters at the Onsenba area, temperature and dissolved materials are decreased with lowering water level. A mixing model for thermal water with high temperature deep thermal brine and cold ground water is applied to explain the annual variation of chemical composition and temperature. The thermal water at the Fudodaki area is high in ratio of the high temperature deep thermal brine and the water at the Onsenba area is high in ratio of the cold ground water.

---

\* 神奈川県環境部水質保全課 神奈川県中区日本大通り 1

\*\* 神奈川県温泉地学研究所 神奈川県箱根町湯本997 〒250-03  
神奈川県温泉地学研究所報告、第18巻、第2号、47-64、1987.

## はじめに

湯河原温泉は半径1 kmの円内に100本以上の源泉が密集している。温泉の総揚湯量は約7,000 l/min (10,000m<sup>3</sup>/day) に達しており、過剰揚湯のために著しい水位低下が起きている(大山ら、1974、1982、1984、杉山ら、1980)。湯河原温泉の温度や化学成分などの経年変化を整理すると、源泉位置や水位の状況によってそれぞれ異なった変化をすることがわかった。水位低下の著しい不動滝地区の温泉は、温度が上昇し蒸発残留物(Resid)が増加している。しかし、水位低下が緩やかな温泉場地区の温泉は、温度が低下し蒸発残留物が減少している。この理由を解釈する為に Oki et al.(1977) が作成した湯河原の地温分布図や Cl/SO<sub>4</sub> 図および Fournier (1981) の化学成分温度計などを利用して、湯河原温泉の熱水混合モデルを作成し考察した。

## 謝 辞

小田原保健所温泉課川上伍良課長、滝本 浩主査、石井義明主任技師、環境衛生課 迫 茂樹主査には現地調査に協力して頂き、また温泉の温度、揚湯量等の貴重な資料を提供して頂いた。湯河原町公営事業課および源泉所有者には温泉の採取にあたって便宜をはかって頂いた。温泉地学研究所研究部長平賀士郎博士は調査が円滑にすすむよう配慮してくださった。大山正雄主任研究員には湯河原温泉の水位について教えていただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。なお、この調査は神奈川県温泉地学研究所温泉等研究調査費によった。

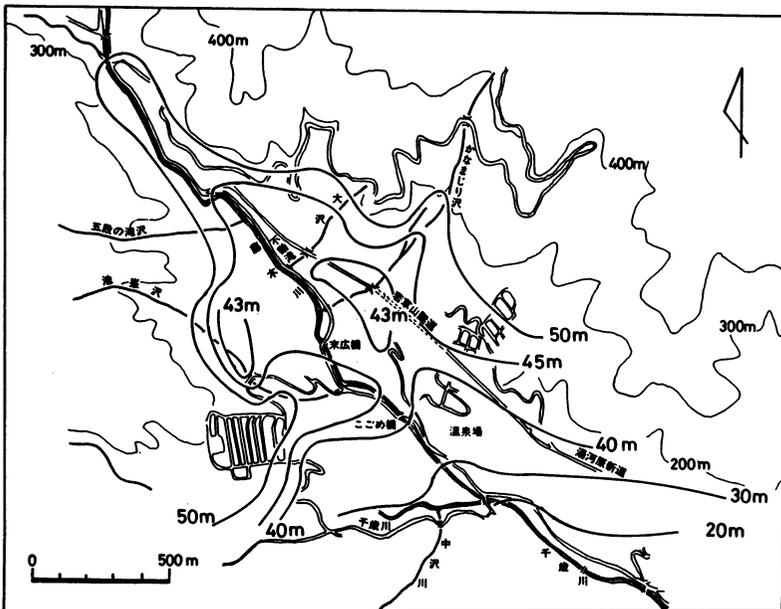
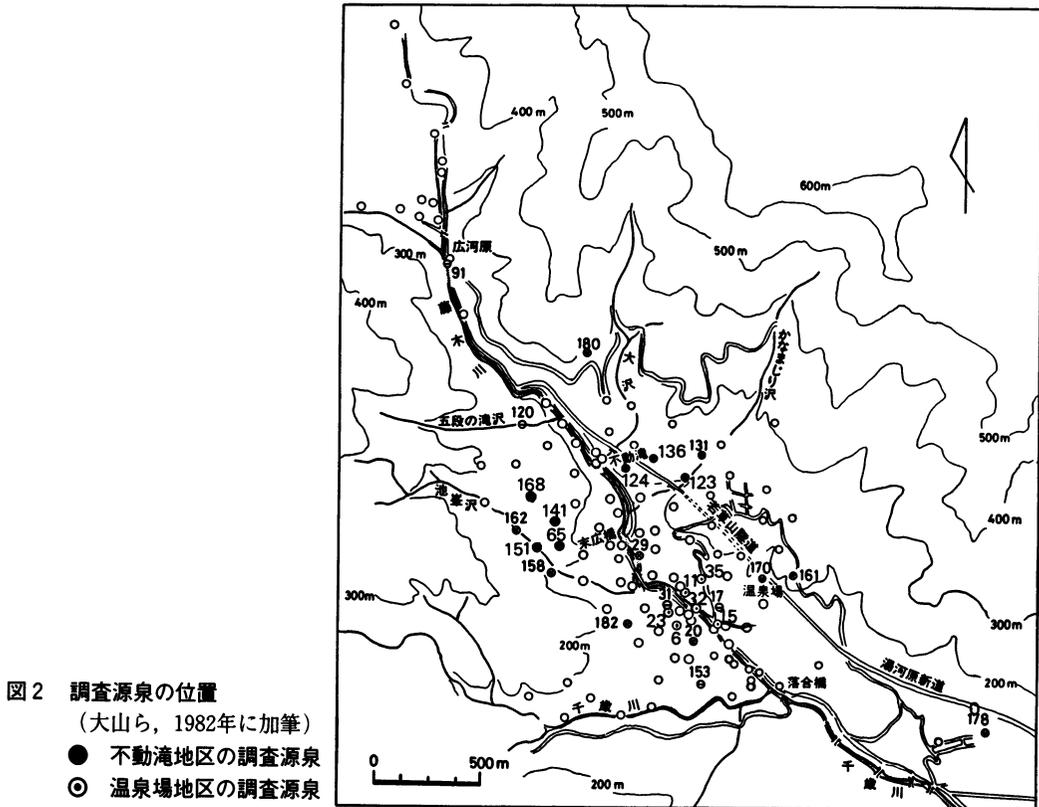


図1 湯河原温泉の水頭分布図  
(昭和56年、  
大山ら、1982)



### 水位低下と溶存成分の経年変化調査源泉

図1は大山ら(1982)が作成した温泉の水頭分布図である。湯河原温泉は全域で水位低下が平均0.8~1m/年の割合で進行している。不動滝地区の水位低下は0.8~1.5m/年と著しく、図1の43m水頭線で示されるように水頭がすり鉢状に落込んでいる。また、温泉場地区の水位低下は0.3~0.5m/年で水頭勾配がなだらかである。経年変化を調査した源泉は、水位低下の著しい不動滝地区の源泉7本(YG 65, 123, 124, 136, 141, 151, 168)と、水位低下の緩やかな温泉場地区の源泉6本(YG 6, 11, 15, 23, 32, 35)である。図2は調査源泉の位置を示す。表1は調査源泉の深さ、水位などを示す。不動滝地区の源泉は標高195~270m、深さ375~624m、静水位は149~255mで深く、揚湯装置の動力は7.5~15kwと大きい。温泉場地区の源泉は標高110~139m、深さ259~300m、静水位は67~100mで、動力は2.2~7.5kwと小さい。

### 湯河原温泉の泉質分布

湯河原温泉の泉質はNaCl卓越型の温泉とCaSO<sub>4</sub>卓越型の温泉およびそれらの派生型の温泉がある(大木ら、1963)。また、海岸近くの宮下地区には強食塩泉が分布している。多くの温泉はNaCl型と

表1 経年変化調査源泉

不動滝地区の源泉						温泉場地区の源泉					
源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	動力 (kW)	静水位 (m)	水位測定日 (昭和年月日)	源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	動力 (kW)	静水位 (m)	水位測定日 (昭和年月日)
YG 65	216	564	7.5(AP)	176.6	60. 5.	YG 6	119	268	5.5(AP)	67.0	52.
123	195	399	7.5(AP)	149.0	57. 5.	11	113	277	7.5(AP)	76.0	60. 3.
124	210	375	7.5(AP)	168.0	60. 5.	15	110	273	3.7(AP)	—	
136	234	624	7.5(AP)	191.0	60. 5.	23	117	259	3.7(AP)	71.4	59. 5.
141	239	550	11. (AP)	206.0	60. 5.	32	112	300	2.2(AP)	71.5	56. 3.11.
151	196	500	11. (AP)	159.3	60. 6.	35	139	297	3.7(AP)	99.9	59. 5.
168	270	600	15. (AP)	255.4	60. 7.						

(AP) : エアーリフトポンプ

表2 湯河原温泉の代表的な泉質の源泉

NaCl卓越型 (Cl <sup>-</sup> > 1,000ppm)						CaSO <sub>4</sub> 卓越型 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> > 1,000ppm)						強食塩泉					
源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	動力 (kW)	静水位 (m)	水位測定日 (昭和年月日)	源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	動力 (kW)	静水位 (m)	水位測定日 (昭和年月日)	源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	動力 (kW)	静水位 (m)	水位測定日 (昭和年月日)
YG 75	232	700	15. (AP)	190.0	58. 4.26.	YG 77	250	273	7.5(AP)	—		YG138	5	784	7.5(AP)	2.0	56.12.26.
120	232	356	7.5(AP)	185.5	57.	150	244	322	7.5(AP)	162.4	58. 5.25.	140	15	690	7.5(AP)	20.3	57.
125	235	487	7.5(AP)	197.0	60. 5.	54	137	377	7.5(AP)	95.8	58. 9. 1.	172	5	794	7.5(AP)	5.0	50. 5.
128	276	600	15. (AP)	292.8	57.	155	184	651	11. (AP)	136.0	60. 3.	177	22	877	11. (AP)	13.8	54. 4.28.
175	245	499	15. (AP)	189.0	58. 7.27.	157	210	570	11. (AP)	184.5	59.11.						
						182	190	752	11. (AP)	157.3	56. 4.27.						

(AP) : エアーリフトポンプ

CaSO<sub>4</sub>型の混合した泉質である。表2はNaCl卓越型で塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)1,000ppm以上の源泉(蒸発残留物(Resid)2,560~3,300ppm)、CaSO<sub>4</sub>卓越型で硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)1,000ppm以上の源泉(Resid 1,540~2,000ppm)および強食塩泉の源泉(Resid 36,000~36,700ppm)の深さ、水位等を示す。表3はその源泉の化学成分を示す。

NaCl卓越型の温泉は不動滝地区に集中しており、温度は80℃以上でCl/SO<sub>4</sub>比が約3、Na/Ca比が約4である。湯河原温泉の地下深部の熱水(原熱水とよぶ)の温度やCl<sup>-</sup>濃度の推定はこのNaCl卓越型温泉の分析値をもちいておこなった。CaSO<sub>4</sub>卓越型の温泉は、広河原地区及び藤木橋地区に多く、約50℃で、Cl/SO<sub>4</sub>比が約0.01、Na/Ca比が約0.06である。強食塩泉は海水起源の温泉で塩分濃度が高く、岩石と反応して海水とは著しく組成が異なっている。

### 不動滝地区の温泉

Oki et al. (1977)は湯河原の地温分布図(後述、図16)を作成して、不動滝付近の地温が最も高く、温泉活動の中心である事を示した。また、温泉水のCl/SO<sub>4</sub>比と地温分布を関連づけて、Cl/SO<sub>4</sub>比の大きい所ほど地温が高く、Cl/SO<sub>4</sub>比が小さい所ほど地温が低いことを示した。不動滝地区の温泉の泉質

表3 湯河原温泉の代表的な泉質の化学成分

泉 質	源 泉	採 水 日 (昭和年月日)	温 度 (℃)	揚湯量 (ℓ/min)	pH	蒸発残留物	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	I.S. (×0.001)
NaCl卓越型 (Cl <sup>-</sup> >1000ppm)	YG 75	60. 6.13.	83.4	81.	8.1	3140	796.	49.2	0.657	220.	1270.	517.	49.4	134.	58.1
	YG120	60. 5.27.	88.6	105.	8.3	3300	878.	64.3	0.777	237.	1390.	538.	51.4	158.	63.0
	YG125	60. 5.24.	80.4	119.	8.1	2560	711.	48.1	0.959	161.	1120.	377.	61.3	138.	48.3
	YG128	60. 5.31.	85.5	110.	8.0	3260	900.	54.7	0.662	221.	1330.	526.	54.0	142.	61.5
	YG175	60. 5.31.	84.2	76.	8.0	3170	866.	57.6	0.804	212.	1370.	443.	48.8	145.	59.2
CaSO <sub>4</sub> 卓越型 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >1000ppm)	YG 77	60. 6. 4.	42.2	31.	7.4	1540	10.3	0.286	0.812	408.	12.1	1030.	48.8	44.8	42.7
	YG150	60. 6. 4.	46.0	33.	7.8	1780	21.9	1.06	1.16	459.	14.2	1100.	68.5	37.1	47.1
	YG 54	60. 4.26.	48.4	50.	7.2	1610	24.7	0.661	0.225	410.	10.2	1110.	28.3	40.5	44.6
	YG155	60. 4.26.	51.8	100.	7.5	2000	35.1	1.51	0.261	515.	6.75	1350.	27.7	47.6	55.0
	YG157	60. 4.26.	56.5	89.	7.4	1680	30.5	1.40	0.134	427.	6.78	1150.	27.7	49.5	46.2
	YG182	60. 6.10.	59.9	55.	7.7	1710	89.7	2.76	0.045	375.	16.5	1110.	23.7	56.0	44.2
強食塩泉	YG138	60. 4.24.	38.5	116.	7.8	36000	10300.	256.	1340.	766.	19000.	2620.	167.	88.6	699.
	YG140	60. 4.24.	30.6	89.	7.7	36100	9070.	131.	1160.	1780.	18200.	2710.	105.	83.4	697.
	YG172	60. 6.10.	34.6	204.	7.6	36700	9950.	249.	1220.	1210.	19100.	2660.	160.	84.0	706.
	YG177	60. 4.24.	36.3	230.	7.7	36100	9520.	272.	1120.	1580.	18300.	2830.	156.	118.	700.

分析値の単位はppm, I.S. はイオン強度である。

表4 不動滝地区の調

源 泉	採 水 日 (昭和 年月日)	温 度 (℃)	揚湯量 (ℓ/min)	pH	蒸 発 残留物	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
YG- 65	* 31. 10.	54. 0	-	8. 0	834	94. 0	8. 50	0. 500
	47. 4. 24.	48. 5	14.	8. 2	1020	108.	7. 22	0. 860
	48. 4. 18.	46. 0	12.	8. 20	-	-	-	0. 810
	49. 9. 28.	77. 8	31.	8. 2	2010	505.	25. 9	0. 560
	55. 5. 1.	73. 1	33.	8. 4	2000	508.	24. 5	0. 400
	59. 5. 31.	78. 0	24.	-	2090	461.	29. 7	0. 327
	60. 6. 3.	79. 2	26.	8. 4	2050	532.	25. 1	0. 369
YG-123	* 33. 9.	59. 9	76.	-	1340	264.	-	0. 380
	47. 4. 28.	54. 0	28.	-	1470	240.	-	0. 440
	48. 5. 21.	57. 5	47.	8. 58	1620	-	-	0. 510
	57. 3. 12.	56. 7	64.	8. 0	1660	422.	12. 2	0. 480
	60. 5. 24.	55. 8	23.	8. 3	1660	358.	12. 2	0. 413
YG-124	* 33. 9.	61. 2	-	8. 0	1490	425.	22. 5	0. 380
	37. 2. 13.	62. 2	-	8. 7	1800**	450.	26. 6	1. 06
	47. 5. 19.	68. 5	89.	8. 3	2170	546.	32. 8	0. 520
	48. 4. 25.	68. 9	87.	8. 40	-	-	-	0. 530
	55. 5. 9.	72. 0	93.	8. 0	2180	564.	31. 4	0. 540
	60. 6. 6.	74. 6	101.	8. 5	2110	578.	33. 6	0. 491
YG-136	37. 7. 10.	64. 5	122.	8. 2	1800	399.	17. 2	0. 240
	47. 5. 19.	79. 4	72.	8. 1	2390	594.	27. 4	0. 390
	48. 4. 25.	76. 0	71.	8. 47	2100	-	-	0. 560
	55. 5. 9.	80. 7	87.	7. 8	2280	590.	26. 8	0. 370
	60. 6. 6.	82. 1	96.	8. 3	2260	618.	29. 9	0. 358
YG-141	38. 9. 13.	82. 2	115.	-	1990	504.	-	0. 720
	47. 5. 24.	82. 5	40.	-	2020	-	-	0. 330
	48. 5. 14.	81. 2	72.	8. 53	1950	-	-	0. 510
	56. 5. 13.	73. 5	107.	7. 4	1590	363.	20. 3	1. 50
	60. 5. 20.	85. 5	92.	8. 4	1920	467.	25. 7	0. 437
YG-151	39. 11. 13.	89. 0	157.	8. 5	1790	458.	27. 7	-
	47. 5. 10.	86. 8	127.	8. 4	1820	443.	27. 0	0. 850
	48. 5. 23.	87. 5	150.	8. 64	1960	-	-	-
	52. 2. 14.	83. 5	-	8. 41	1930	503.	29. 6	0. 320
	55. 4. 21.	87. 2	146.	7. 9	1900	518.	25. 0	0. 590
	59. 6. 7.	88. 1	140.	-	1960	541.	30. 4	0. 277
	60. 6. 10.	87. 9	144.	8. 5	1880	509.	25. 8	0. 312
YG-168	45. 3. 4.	83. 5	78.	-	1850	488.	-	0. 270
	47. 5. 24.	82. 0	64.	-	1820	-	-	0. 370
	48. 5. 14	88. 0	81.	8. 55	1880	442.	24. 1	0. 300
	52. 2. 14.	75. 8	81.	-	1600	363.	-	0. 690
	59. 6. 7.	80. 8	65.	-	1870	404.	30. 5	0. 333
	60. 7. 5.	87. 7	62.	8. 3	1810	474.	27. 3	0. 479

分析値の単位は ppm, I.S. はイオン強度である。

\*印は中央温泉研究所による分析値。

\*\*印は総溶存量から換算した。

## 査源泉の化学成分

Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	電導度 ( $\mu$ s/cm)	I.S. (x0.001)	Na/Ca (wt/wt)	Cl/SO <sub>4</sub> (wt/wt)	Ca/Mg (wt/wt)
109.	14.2	427.	59.4	80.6	-	17.2	0.862	0.033	218.
183.	137.	487.	56.5	50.2	1280	24.1	0.590	0.281	213.
-	-	-	52.6	45.0	1160	-	-	-	-
170.	645.	513.	47.6	149.	-	40.0	2.97	1.26	304.
174.	650.	645.	62.4	148.	-	43.1	2.92	1.01	435.
183.	701.	516.	58.4	151.	-	40.7	2.52	1.36	560.
164.	671.	587.	51.4	138.	2800	42.2	3.24	1.14	444.
160.	537.	195.	45.0	-	-	25.7	1.65	2.75	421.
162.	491.	269.	67.6	-	2060	26.4	1.48	1.83	368.
-	-	-	64.3	70.1	2430	-	-	-	-
146.	639.	308.	57.0	68.7	-	32.6	2.89	2.07	304.
160.	553.	393.	65.2	81.5	2160	32.5	2.24	1.41	387.
111.	646.	232.	89.4	127.	-	29.8	3.83	2.78	292.
125.	722.	292.	74.1	91.7	-	33.4	3.60	2.47	118.
146.	770.	427.	93.9	136.	3130	40.1	3.74	1.80	281.
-	-	-	84.2	138.	3130	-	-	-	-
137.	729.	481.	82.4	148.	-	40.5	4.12	1.52	254.
149.	713.	539.	76.4	128.	2960	42.3	3.88	1.32	303.
157.	693.	291.	79.7	68.4	-	33.2	2.54	2.38	654.
167.	869.	482.	50.8	139.	3390	44.3	3.56	1.80	428.
-	-	-	50.4	130.	3100	-	-	-	-
144.	804.	554.	52.4	147.	-	43.7	4.10	1.45	389.
156.	775.	560.	50.1	125.	3050	44.7	3.96	1.38	436.
161.	688.	444.	92.4	-	-	38.7	3.13	1.55	224.
158.	681.	-	44.1	-	2830	17.9	-	-	479.
-	-	-	45.4	146.	2760	-	-	-	-
94.0	512.	328.	53.1	119.	-	27.4	3.86	1.56	62.7
157.	670.	533.	47.4	146.	2750	39.3	2.97	1.26	359.
149.	631.	443.	49.0	139.	-	36.3	3.07	1.42	-
142.	594.	443.	64.0	138.	2700	35.3	3.12	1.34	167.
-	-	-	53.2	158.	2800	-	-	-	-
143.	661.	-	49.2	167.	-	28.2	3.52	-	447.
124.	631.	596.	58.1	160.	-	39.6	4.18	1.06	210.
115.	708.	462.	62.2	158.	-	38.0	4.70	1.53	415.
143.	623.	522.	52.7	141.	2690	38.7	3.56	1.19	458.
125.	666.	426.	45.9	-	-	35.5	3.90	1.56	463.
131.	587.	-	65.2	-	2570	15.4	-	-	354.
133.	634.	425.	51.5	163.	2750	34.8	3.32	1.49	443.
157.	544.	-	64.0	132.	-	24.0	2.31	-	228.
167.	617.	431.	65.9	162.	-	35.8	2.42	1.43	502.
131.	623.	476.	52.7	149.	2590	36.4	3.62	1.31	273.

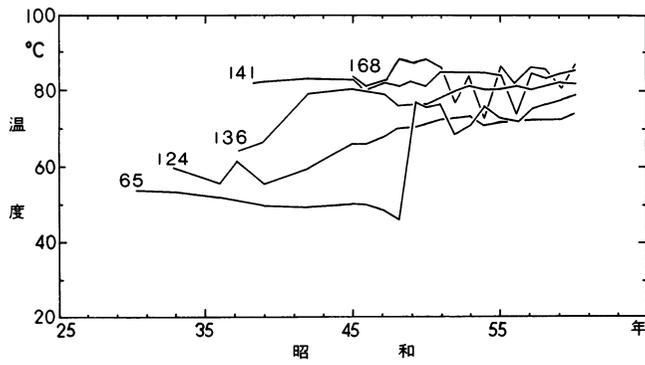


図3 不動滝地区の温泉の温度の経年変化

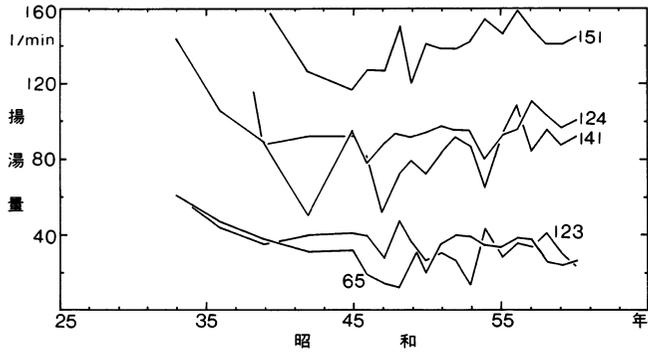


図4 不動滝地区の温泉の揚湯量の経年変化

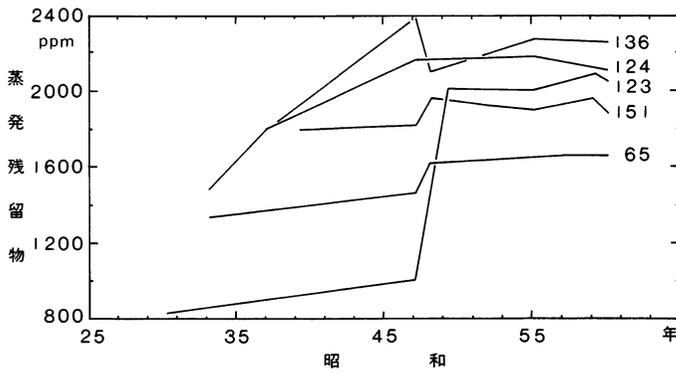


図5 不動滝地区の温泉の蒸発残留物の経年変化

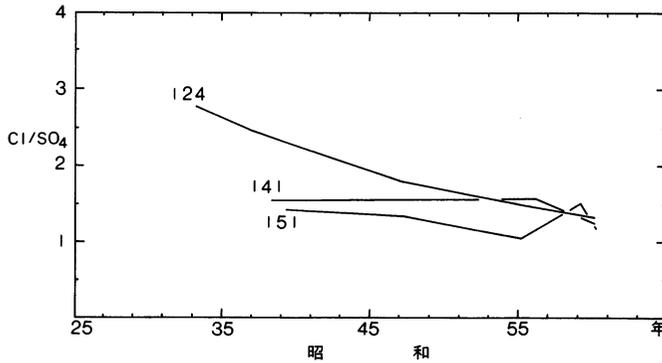


図6 不動滝地区の温泉のCl/SO<sub>4</sub>比の経年変化 (ppm/ppm比)

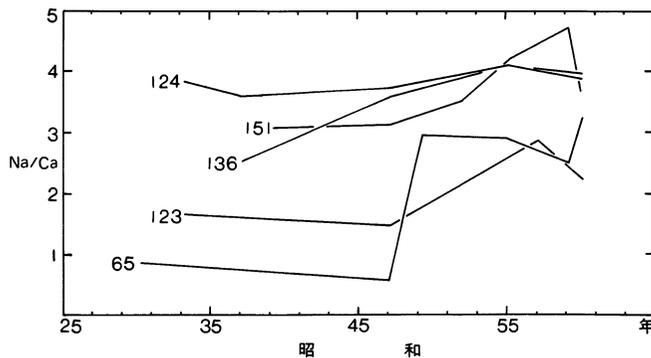


図7 不動滝地区の温泉のNa/Ca比の経年変化 (ppm/ppm比)

はNaCl型である。表4は不動滝地区の調査源泉7本の化学成分を示す。図3～7は温度、揚湯量、蒸発残留物、主要陰イオンのCl/SO<sub>4</sub>比、主要陽イオンのNa/Ca比の経年変化を示す。この地区で調査した7源泉は約30年間に温度が60℃から70℃へ約10℃上昇し、蒸発残留物は1,600ppmから2,000ppmへ約20%増加している。揚湯量は初期に比べ減少しているが、最近は一定または増加傾向にある。Cl/SO<sub>4</sub>比は3から1へ低下し、Na/Ca比は3から4にやや上昇し、泉質はNaCl型からNa<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>型に移行している。温度が上昇し、成分が増加するのは地表から浸透する水の割合が少なく、温泉にしめる地下深部の熱水の比率が増加している為であろう。

### 温泉場地区の温泉

温泉場地区は、明治時代の後半から発展した古い温泉場で、当時は藤木川の河原に温泉が湧出していたという(平野ら1974、大山ら1974)。温泉はNaCl型とCaSO<sub>4</sub>型の混合した泉質である。表5は温泉場地区の源泉6本の化学成分を示す。図8～12は温度、揚湯量、蒸発残留物、Cl/SO<sub>4</sub>比、Na/Ca比の経年変化を示す。この地区の温泉は約30年間で温度は60℃から40℃へ約20℃低下し、揚湯量は10～20 l/min減少し、蒸発残留物は800ppmから500ppmへ約40%減少している。Cl/SO<sub>4</sub>比は2から1へ低下し、Na/Ca比も4から3へ低下して、泉質はNaCl型からCaSO<sub>4</sub>型に移行している。これらの温泉の温度が低下し化学成分が減少するのは、浸透していく過程でCaSO<sub>4</sub>に富むようになった地表水のしめる割合が多くなっている為であろう。

### 化学成分温度計

Fournier (1981) は熱水の化学成分から地下深部の温度を推定する幾つかの方法を化学成分温度計(Geothermometer)としてまとめている。以下に、主な化学成分温度計の計算方法を示す。ここでは、シリカ、ナトリウム、カリウム、カルシウムの濃度(ppm)をそれぞれH<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(温泉水の表示方式)、Na, K, Caで示す。

$$(1) \text{ シリカ(蒸気損失なし)法} \quad T(^{\circ}\text{C}) = 1309 / (5.19 - 0.7693 \log(\text{H}_2\text{SiO}_3)) - 273.15$$

$$(2) \text{ シリカ(蒸気損失最大)法} \quad T(^{\circ}\text{C}) = 1522 / (5.75 - 0.7693 \log(\text{H}_2\text{SiO}_3)) - 273.15$$

$$(3) \text{ Na/K法} \quad T(^{\circ}\text{C}) = 1217 / (\log(\text{Na} / \text{K}) + 1.483) - 273.15$$

$$(4) \text{ Na-K-Ca法} \quad T(^{\circ}\text{C}) = 1647 / (\log(\text{Na} / \text{K}) + \beta [\log(\text{Ca}^{0.5} / \text{Na}) + 2.06]) + 2.47 - 273.15$$

$\beta = 4/3$ として $T < 100^{\circ}\text{C}$ なら、 $\beta = 1/3$ で計算しなおす。

(5) CaSO<sub>4</sub>法 Marshall et al. (1968) は硬石膏(CaSO<sub>4</sub>)の溶解度を測定して、30～200℃においてイオン強度(I)の関数  $I^{0.5} / (1 + 1.6 I^{0.5})$  に対する、カルシウムイオン(Ca)と硫酸イオン(SO<sub>4</sub>)のモル濃度の積K'spの関係を示した(図13)。この図から地下温度を推定する方法をCaSO<sub>4</sub>法という。

これらの方法は直接地下の温度が測れない場合に化学成分から地下温度を推定できるので便利である。表6は湯河原温泉の地下深部における温度を化学成分から計算した値を示す。

表5 温泉場地区の調査

源泉	採水日 (昭和 年月日)	温度 (°C)	揚湯量 (ℓ/min)	pH	蒸発残 留物	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
YG-6	*35. 4.	61.6	64.	8.6	665	160.	9.50	0.080
	37. 2.13.	57.4	-	9.1	549**	144.	7.40	0.240
	45. 6.17.	48.9	47.	8.4	363	101.	4.68	0.120
	47. 5.17.	49.0	59.	8.2	430	119.	6.12	0.150
	48. 5. 9.	48.0	60.	8.4	369	97.6	5.38	0.160
	50. 7.28.	47.8	63.	8.3	398	107.	5.60	0.140
	56. 5.28.	39.4	51.	7.6	296	74.2	4.20	0.097
	58. 4.26.	39.5	50.	8.0	367	100.	4.43	0.131
	59. 5.21.	39.3	43.	-	340	58.1	4.62	0.124
	60. 5.17.	38.7	40.	8.2	282	53.9	2.92	0.171
YG-11	*29. 7.	80.0	79.	8.0	1550	365.	23.0	2.00
	37. 2.13.	68.5	-	9.0	1010**	188.	13.8	1.06
	47. 5.17.	68.0	29.	8.1	1060	-	-	0.230
	48. 5. 9.	62.5	21.	8.44	819	-	-	0.210
	56. 5.28.	66.0	39.	7.6	835	212.	10.7	0.137
	59. 5.21.	64.0	32.	-	858	185.	13.3	0.158
	60. 5.17.	63.2	33.	8.8	692	126.	6.22	0.189
	60.10.14.	59.8	40.	8.5	590	155.	7.62	0.601
YG-15	*29. 7.	50.8	-	7.9	896	180.	10.0	2.00
	37. 2.13.	34.3	-	8.9	310**	91.0	4.86	0.240
	47. 4.24.	33.9	11.	8.2	281	77.0	2.66	0.100
	54. 4.16.	32.5	10.	7.7	280	77.6	2.52	0.130
	59. 5. 7.	31.3	7.	8.0	270	70.9	2.87	0.112
	60. 4.23.	27.0	8.	7.3	231	60.1	1.91	0.130
YG-23	*29. 7.	57.0	55.	8.2	708	140.	8.50	0.800
	37. 2.13.	53.3	-	8.8	687**	193.	9.28	0.480
	47. 5.17.	48.2	25.	8.2	675	160.	6.86	0.180
	48. 5. 9.	43.0	18.	8.27	-	-	-	0.100
	56. 5.28.	40.8	16.	7.5	487	107.	7.40	0.075
	59. 5.21.	42.1	23.	-	630	131.	8.11	0.124
	60. 5.17.	40.8	21.	8.1	540	105.	5.08	0.162
YG-32	*29. 7.	77.5	79.	8.1	1410	342.	21.0	0.500
	37. 2.13.	70.1	-	9.1	1050**	294.	11.5	0.240
	47. 4.25.	64.0	72.	8.5	953	-	-	0.150
	48. 4.23.	63.0	76.	8.58	912	-	-	0.130
	56. 4.27.	62.6	75.	7.6	1050	235.	12.5	0.137
	59. 5.11.	62.0	70.	8.2	1080	273.	13.7	0.169
	60. 5. 7.	60.2	67.	8.1	1000	169.	8.79	0.206
	60. 9. 5.	61.8	77.	8.2	1010	262.	11.9	0.178
YG-35	*30.10.	65.5	-	7.7	1920	475.	25.5	1.50
	37. 2.13.	69.6	-	8.7	1250**	358.	17.2	1.06
	47. 5.17.	53.0	14.	8.4	787	209.	10.2	1.74
	48. 5. 9.	52.5	20.	8.23	-	-	-	2.05
	56. 5.28.	46.7	15.	7.5	586	125.	8.10	2.33
	59. 5.21.	45.3	13.	-	803	186.	14.2	2.17
	60. 5.16.	38.7	12.	8.0	521	82.0	4.85	3.03

分析値の単位は ppm, I.S. はイオン強度である。

\*印は中央温泉研究所による分析値。

\*\*印は総溶存量から換算した。

## 源泉の化学成分

Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	電導度 ( $\mu$ S/cm)	I. S. (X0.001)	Na/Ca (wt/wt)	Cl/SO <sub>4</sub> (wt/wt)	Ca/Mg (wt/wt)
46.3	190.	136.	106.	46.8	-	12.3	3.46	1.40	579.
33.4	151.	127.	86.3	-	-	10.4	4.31	1.19	139.
25.9	89.4	87.4	90.6	27.6	-	7.38	3.90	1.02	216.
31.9	110.	115.	88.8	35.6	657	8.94	3.73	0.957	213.
26.1	82.8	85.6	89.7	36.1	588	7.19	3.74	0.967	163.
27.7	92.9	94.1	88.8	39.8	-	7.79	3.86	0.987	198.
24.0	49.8	30.7	89.4	30.9	-	4.95	3.09	1.62	247.
36.4	74.7	85.6	92.3	26.6	-	7.65	2.75	0.873	278.
31.5	64.0	68.0	88.5	29.3	-	5.95	1.84	0.941	254.
28.2	52.0	79.6	87.0	30.0	448	5.75	1.91	0.653	165.
151.	556.	301.	72.5	170.	-	30.7	2.42	1.85	75.5
74.2	322.	238.	92.7	66.5	-	18.3	2.53	1.35	70.0
75.9	329.	-	70.7	87.8	1550	9.03	-	-	330.
-	-	-	78.7	80.6	1240	-	-	-	-
47.0	229.	254.	82.9	76.0	-	16.3	4.51	0.902	343.
68.3	242.	202.	77.9	70.1	-	15.9	2.71	1.20	432.
37.6	152.	156.	85.0	60.6	856	10.8	3.35	0.974	199.
45.6	167.	161.	69.9	51.6	984	12.2	3.40	1.04	75.9
102.	294.	171.	82.5	187.	-	17.7	1.76	1.72	51.0
21.0	69.0	38.4	85.0	-	-	5.58	4.33	1.80	87.5
19.8	72.5	61.6	79.4	27.3	446	5.66	3.89	1.18	198.
16.7	57.7	57.8	82.3	29.2	-	5.26	4.65	0.998	128.
21.1	47.1	54.5	87.9	28.2	-	5.15	3.36	0.864	188.
16.9	43.0	58.6	84.4	29.8	364	4.71	3.56	0.734	130.
46.0	181.	114.	92.1	106.	-	11.2	3.04	1.59	57.5
48.5	202.	158.	76.0	-	-	13.5	3.98	1.28	101.
53.8	201.	166.	82.0	52.0	1020	13.2	2.97	1.21	299.
-	-	-	86.4	41.4	723	-	-	-	-
32.1	104.	119.	86.8	41.3	-	8.68	3.33	0.874	428.
51.2	152.	140.	85.4	47.6	-	11.3	2.56	1.09	413.
45.0	133.	149.	81.7	45.8	781	10.3	2.33	0.893	278.
112.	451.	314.	73.7	-	-	26.8	3.05	1.44	224.
84.2	331.	244.	85.7	-	-	21.2	3.49	1.36	351.
69.3	279.	-	83.3	66.1	1440	8.09	-	-	462.
-	-	-	88.6	46.5	1290	-	-	-	-
62.6	295.	258.	86.2	80.7	-	18.6	3.75	1.14	457.
84.7	316.	269.	84.8	81.4	-	21.1	3.22	1.17	501.
78.5	302.	248.	83.7	75.8	1470	17.9	2.15	1.22	381.
82.1	290.	302.	86.2	53.6	1490	21.2	3.19	0.960	461.
115.	746.	240.	124.	109.	-	33.1	4.13	3.11	76.7
81.0	494.	231.	70.8	-	-	24.5	4.42	2.14	76.4
43.3	258.	176.	81.4	77.3	1220	14.9	4.83	1.47	24.9
-	-	-	72.6	77.0	1170	-	-	-	-
35.5	146.	140.	84.2	58.2	-	10.4	3.52	1.04	15.2
52.5	241.	173.	82.9	68.0	-	14.7	3.54	1.39	24.2
42.0	133.	117.	76.4	59.4	743	9.14	1.95	1.14	13.9

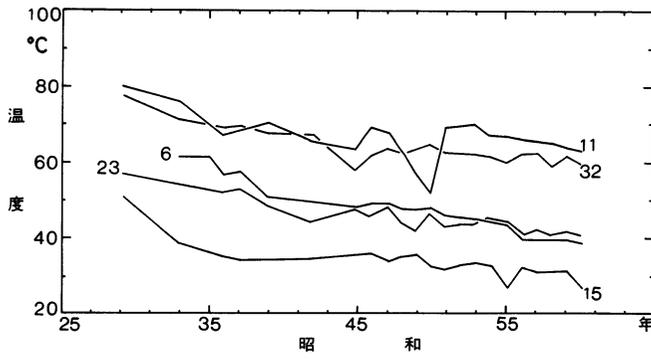


図8 温泉場地区の温泉の温度の経年変化

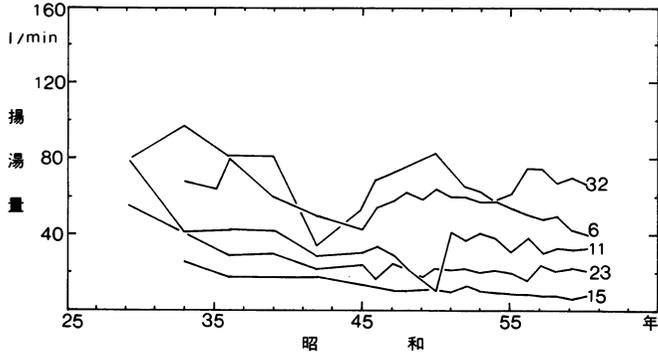


図9 温泉場地区の温泉の揚湯量の経年変化

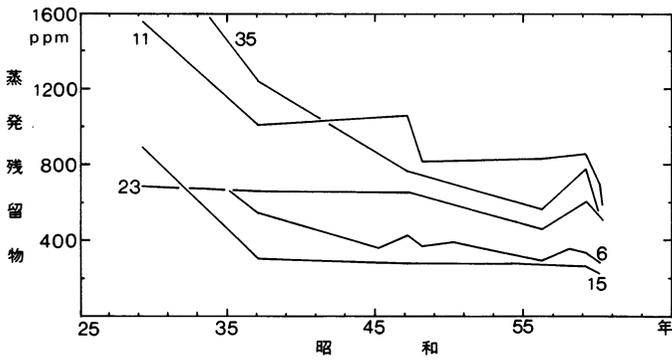


図10 温泉場地区の温泉の蒸発残留物の経年変化

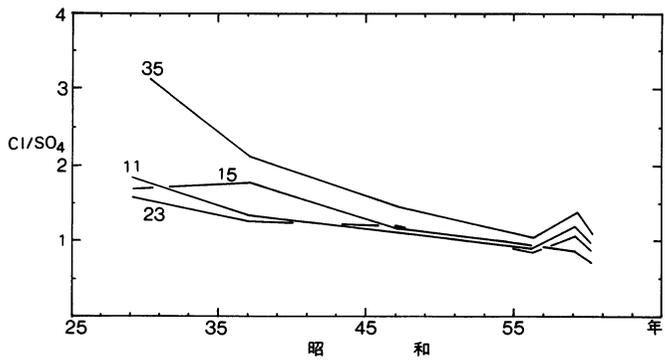


図11 温泉場地区の温泉の Cl/SO<sub>4</sub> 比の経年変化 (ppm/ppm 比)

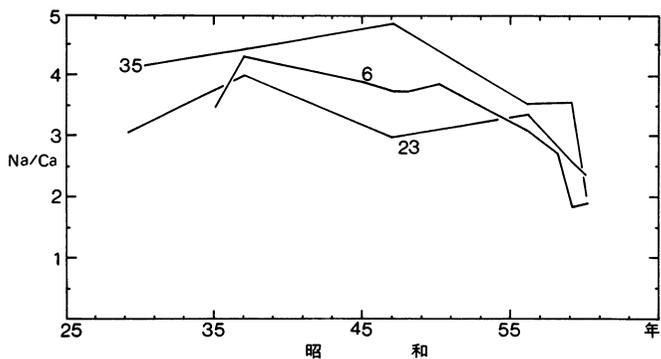


図12 温泉場地区の温泉の Na/Ca 比の経年変化 (ppm/ppm 比)

Oki et al. (1977) の地温分布図 (後述、図16) はボーリング孔の地温を直接測定して得られたものであり、これと比べるとシリカ (蒸気損失なし) 法が最も良く合っている。シリカ (蒸気損失最大) 法は激しい沸騰泉の場合に用いるもので、湯河原温泉には適用できない。Na/K 法は  $\text{CaCO}_3$  が析出する場合は高めの計算値が出る。Na-K-Ca 法はシリカ法と近い値が出る。 $\text{CaSO}_4$  法は  $\text{CaSO}_4$  卓越型の温泉において良く合っているが、温泉場地区の温泉のように  $\text{CaSO}_4$  に不飽和な場合は、温度が極端に高めになる。

### 湯河原温泉の地下深部熱水の温度と $\text{Cl}^-$ (塩素イオン) 濃度の推定

湯河原の NaCl 卓越型温泉と地表水のシリカ (珪酸、 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ) の溶存量とシリカの溶解度曲線 (Truesdell and Fournier, 1977) をもちいて、この地熱地帯の地下深部の熱水 (原熱水) の温度を推定することができる (Fournier, 1981)。この方法による地下温度の推定は熱水などのエンタルピー (熱含量) をもとにして行うべきだが、温度  $200^\circ\text{C}$  程度まではエンタルピーを温度におきかえてもほとんど同じであるので、以下の推定は温度でおこなった。図14はシリカの溶解度曲線である。曲線 a は石英 (quartz) の溶解度で蒸気損失なしの場合、b は蒸気損失最大の場合、c は非晶質シリカ (amorphous silica) の溶解度である。湯河原地熱地帯のボーリングコア中の熱水変質鉱物には石英が共存しており (Oki et

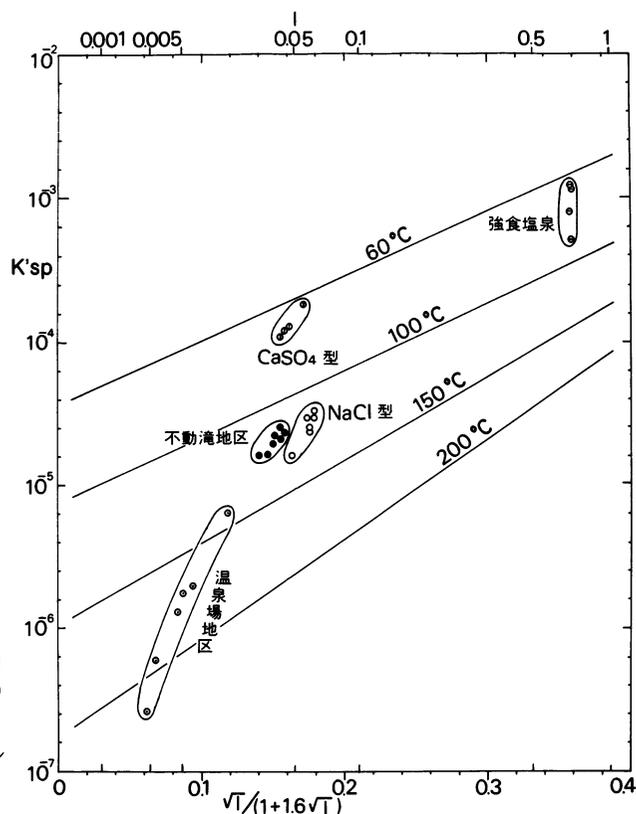


図13 イオン強度と  $\text{CaSO}_4$  の溶解度積 ( $K'sp$ ,  $60^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ) の関係図 (Marshall, et al. (1986) に湯河原温泉の値をプロットした。I はイオン強度を示す。)

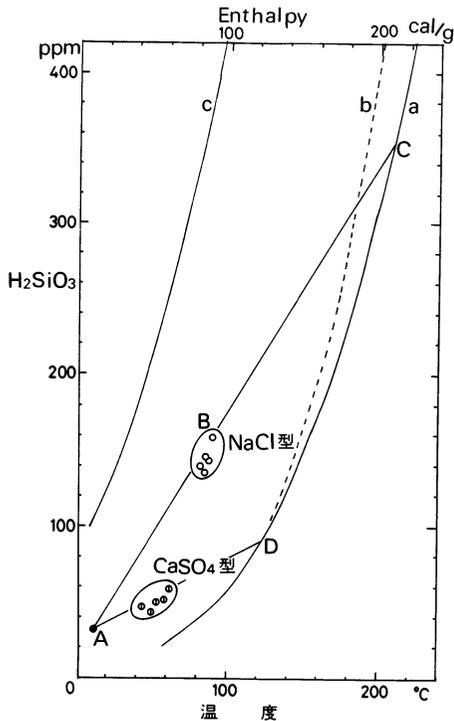


図14 シリカの溶解度 (Truesdell et al. 1977による)

- a : 石英 (蒸気損失なしの場合)
- b : 石英 (蒸気損失最大の場合)
- c : 非晶質シリカ
- A : 地表水
- C : 地下深部熱水の推定温度

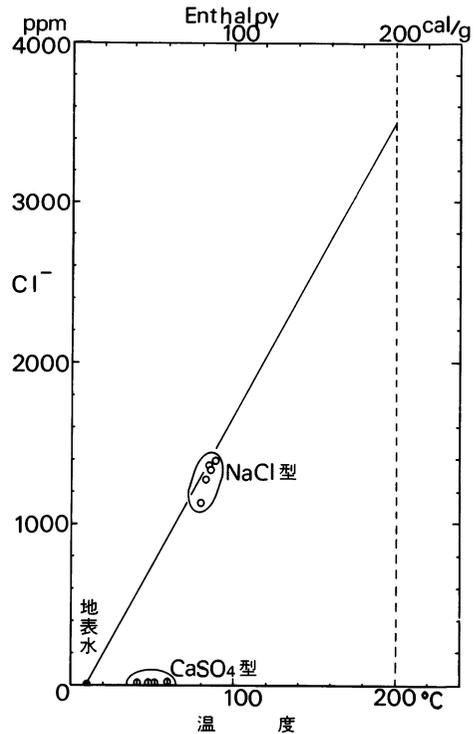


図15 地下深部熱水のCl<sup>-</sup> (塩素イオン) 濃度の推定  
地表水とNaCl型温泉を結ぶ線が、地下深部熱水の推定温度200℃を切る点がCl<sup>-</sup>濃度を示す。

al.1977,Hirano,1986)、激しい沸騰泉はないので曲線 a を用いるのがよい。湯河原の NaCl 卓越型の温泉 (B) と、地表水 (A) を結んだ直線の延長がシリカの溶解度曲線 a を切る点 (C) が、地下深部熱水 (原熱水) の推定温度を示す。地下深部熱水 (原熱水) の温度は 200℃、H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 濃度は 340ppm となる。図 15 により地下深部熱水 (原熱水) の Cl<sup>-</sup> (塩素イオン) 濃度を推定すると、Cl<sup>-</sup> は 3500ppm になる。表 7 はこの推定に用いた湯河原の地表水の化学成分を示す。この地表水は地下に浸透する過程で、岩石と反応して CaSO<sub>4</sub> に富むようになる。

湯河原温泉の熱水混合モデル

Oki et al. (1977) の地温分布図 (図16) とシリカ (蒸気損失なし) 法による温泉の推定温度 (表 8) をもとにして地下深部熱水 (原熱水) と地表水の混合割合を求めた。不動滝付近の NaCl 卓越型の温泉は地下深部において約150℃と推定される。この温泉 (b) が地下深部熱水 (原熱水、a、200℃) と地表水 (g,12℃) の混合によってできるとすると、温泉 (b) は地下深部熱水 (原熱水、a) 73%と地表水 (g) 27%の混合割合となる。経年変化を調査した不動滝地区の温泉の場合は地下深所におけ

表 6 化学成分による地下温度の推定

(単位:℃)

不動滝地区の調査源泉						温泉場地区の調査源泉						NaCl卓越型						CaSO <sub>4</sub> 卓越型						強食塩泉					
源泉	SiO <sub>2</sub> 法(I)	SiO <sub>2</sub> 法(II)	Na/K法	Na-K-Ca法	CaSO <sub>4</sub> 法	源泉	SiO <sub>2</sub> 法(I)	SiO <sub>2</sub> 法(II)	Na/K法	Na-K-Ca法	CaSO <sub>4</sub> 法	源泉	SiO <sub>2</sub> 法(I)	SiO <sub>2</sub> 法(II)	Na/K法	Na-K-Ca法	CaSO <sub>4</sub> 法	源泉	SiO <sub>2</sub> 法(I)	SiO <sub>2</sub> 法(II)	Na/K法	Na-K-Ca法	CaSO <sub>4</sub> 法	源泉	SiO <sub>2</sub> 法(I)	SiO <sub>2</sub> 法(II)	Na/K法	Na-K-Ca法	CaSO <sub>4</sub> 法
YG 65	141	136	160	145	120	YG 6	69	74	130	47	190	YG 75	139	134	179	162	120	YG 77	85	88	81	69	70	YG138	117	115	121	149	90
YG123	113	112	139	125	120	YG 11	94	96	122	76	170	YG120	148	142	192	171	120	YG150	77	81	121	95	70	YG140	114	113	93	117	60
YG124	136	132	175	156	120	YG 15	69	74	90	46	220	YG125	141	136	186	167	130	YG 54	81	84	79	77	70	YG172	114	113	121	145	80
YG136	135	131	162	148	120	YG 23	86	89	121	60	170	YG128	142	137	178	163	120	YG155	88	90	112	96	60	YG177	132	128	129	148	70
YG141	144	138	171	150	120	YG 32	94	96	116	84	140	YG175	143	138	184	167	120	YG157	89	92	117	98	70						
YG151	142	137	165	148	120	YG 35	98	99	137	58	180							YG182	95	97	88	97	70						
YG168	145	139	174	154	120																								

SiO<sub>2</sub>法(I): 蒸気損失なし

SiO<sub>2</sub>法(II): 蒸気損失最大

表 7 湯河原地熱地帯の地表水の化学成分

番号	採水場所	採水日 (昭和年月日)	温度 (℃)	pH	蒸発残留物	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
R 2	じょうがお上	56. 6. 4.	13.5	7.4	141	4.75	0.490	3.66	15.8	4.28	46.8	47.3	37.5
R 3	あけじ沢上	56. 6. 4.	13.6	7.3	74	4.02	0.810	1.48	7.24	3.60	10.8	46.0	38.7
R25	ほりき沢	56. 9.29.	14.5	7.1	114	4.58	1.00	3.19	14.0	5.21	36.9	42.1	31.5
R32	あけじ沢	56. 9.29.	13.7	7.2	75	4.24	1.42	1.38	7.45	4.03	2.00	47.3	39.6
S 2	ほりき沢	57. 1.27.	6.6	7.2	124	4.94	0.426	3.84	22.5	5.88	41.0	42.2	28.8
S 4	あけじ沢	57. 1.27.	8.7	7.2	75	4.68	0.781	1.46	8.63	2.46	2.04	42.2	40.8

分析値の単位は ppm.

地下深部における推定値

種類	昭和60年頃				昭和40年頃	
	T(°C)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	混合率	T(°C)	混合率
a 地下深部熱水	200	3,500	2,200	地下深部熱水	200	地下深部熱水
b NaCl卓越型	150	1,300	830	27%	—	—
c 不動滝地区の源泉	137	660	510	66%	112	53%
d 温泉場地区の源泉	84	140	120	38%	108	51%
e CaSO <sub>4</sub> 卓越型	70	10	40	62%	—	—
f 強食塩泉	—	19,000	9,700	—	—	—
g 地表水	12	4	5	—	—	—
h 海水	—	20,000	11,000	—	—	—

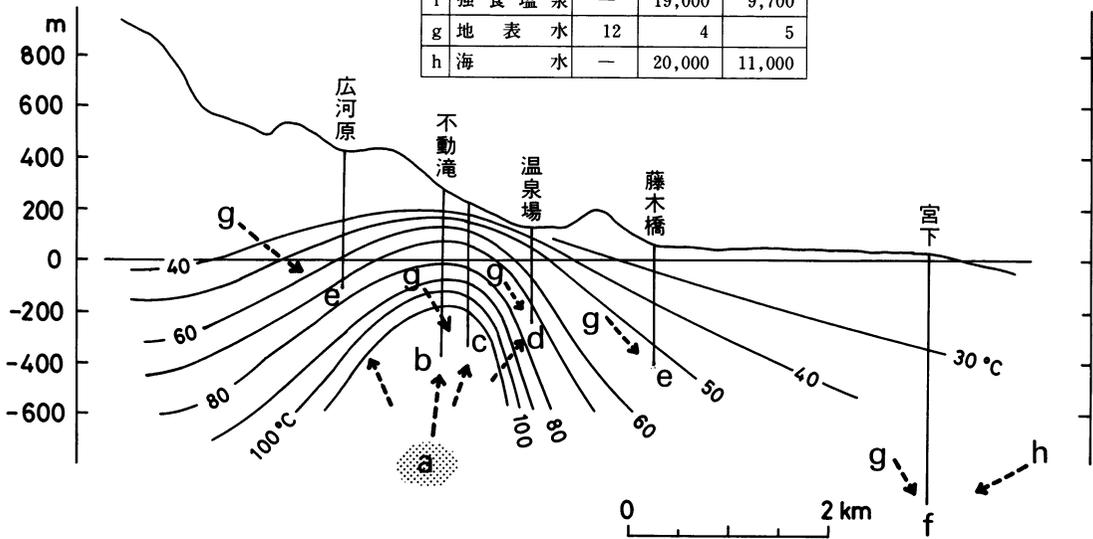


図16 湯河原温泉の熱水混合モデル (Oki et al. 1977に加筆)

不動滝地区の調査源泉は地下深部熱水の比率が高く、温泉場地区の調査源泉は地表水の比率が高い。

る温度が昭和40年頃は平均112°Cで、地下深部熱水（原熱水）53%、地表水47%、また昭和60年は平均137°Cで地下深部熱水（原熱水）66%、地表水34%の混合率となる。温泉場地区の温泉は地下深所において昭和40年頃は平均約108°C、地下深部熱水（原熱水）51%、地表水49%の割合に、昭和60年は平均84°Cで、地下深部熱水（原熱水）38%、地表水62%の混合率となる。不動滝地区の温泉は地下深部熱水（原熱水）の混入率が増加しているため、しだいに温度が上昇し、成分も増加するのである。温泉場地区の温泉は地表水の混入率が多いので温度低下や溶存成分の減少が著しい。

まとめ

湯河原温泉の成分の経年変化を、不動滝付近の源泉7本と温泉場付近の源泉6本について調査した。不動滝付近の温泉は温度が上昇し、化学成分が増加している。また、温泉場付近の温泉は温度が低下し、成分が減少している。この違いを解釈するために化学成分温度計の一つ、シリカ（蒸気損失なし）法を用いて、地下温度を推定した。温泉水が地下深部熱水（原熱水）と地表水の混合による熱水混合

モデルにより、不動滝地区と温泉場地区の化学成分と温度の経年変化の違いを説明した。

### 参考文献

- 栗屋 徹、平野富雄、鈴木孝雄(1974) 湯河原温泉の温泉沈積物、神奈川温研報告、第5巻、第2号、67-80.
- Fournier,R.O.(1981) Application of water geothermal exploration and reservoir engineering, Geothermal Systems; Principles and Case Histories, John Wiley & Sons Ltd.
- 平野富雄、大山正雄、栗屋 徹、大木靖衛(1976) 湯河原温泉の地下水位低下と温泉の冷地下水化、神奈川温研報告、第7巻、第2号、53-68.
- HIRANO T.(1986) Hydrothermal alteration of volcanic rocks in the Hakone and northern Izu geothermal areas. Bull. Hot Springs Res. Inst., Vol.17, No.3, 1-94.
- Marshall W.L. and R. Slusher (1968) Aqueous systems at high temperature, solubility to 200°C of calcium sulfate and its hydrates in sea water and saline water concentrates and temperature concentration limits, J. Chem. and Engin. Data, Vol.13, No.1, 83-93.
- 大木靖衛、荻野喜作、長塚綾子、広田 茂、小椋藤幸、高橋惣一、杉本光夫(1963) 湯河原温泉調査報告、神奈川温研報告、第1号、1-40.
- Oki Y., T. HIRANO and T. SUZUKI (1977) Hydrothermal metamorphism and vein minerals of the Yugawara geothermal area, Japan, Bull. Hot Springs Res. Inst., Vol.8, No.2, 81-94.
- 大山正雄、大木靖衛(1974) 湯河原温泉の水位の変遷、神奈川温研報告、第6巻、第1号、31-47.
- 大山正雄(1976) 湯河原温泉の水位と湧出地域の透水性、神奈川温研報告、第7巻、第2号、69-84.
- 杉山茂夫、大山正雄(1980) 湯河原温泉における温泉水位の連続観測、昭和53年～55年、神奈川温地研報告、第12巻、第2号、35-42,1980.
- Truesdell,A.H. and R.O.Fournier(1977) Procedure for estimating the temperature of a hot water component in a mixed water using a plot of dissolved silica vs enthalpy, J.Res.U.S.Geological Survey,Vol.5,No.1,49-52.



写真1 不動滝地区の源泉 (YG-70, 露木4号井)

写真2 温泉場地区の源泉 (YG-7, 伊豆屋源泉)

