

昭和61年10月

原 著

## 温泉における多変量解析の応用 —温泉群の比較ならびに源泉の経年変化について—

岩手県衛生研究所

菅原 恒有, 斎藤 憲光, 吉田 篤

(1985年9月30日受付, 1986年7月19日受理)

### Practical Application of Multivariate Analysis to Hot Spa Groups

Tsuneari SUGAWARA, Norimitsu SAITOH and Atsushi YOSHIDA

Iwate Institute of Public Health

#### Abstract

To classify the hot spa at the similar group and to observe the secular change of each source, the principal component analysis was applied to them by selecting eight chemical compositions. And satisfactory results were obtained through computing the data of five groups (i.e. Kintaichi, Ohshuku, Tsunagi, Dai-Hanamaki and Yuguchi) in Iwate Prefecture.

By calculating the principal component score on orthogonal coordinates, it was investigated on the 95% tolerance ellipses of all groups, then it was observed to the variation in it's scores of two groups (i.e. Yuguchi and Getoh).

As this analysis was summarizing the many chemical compositions, it was more useful than comparing the each chemical composition.

#### 1. はじめに

火山国の我が国は世界有数の温泉国で、源泉の数も多く全国各地に湧出し、また泉質は多様性に富み湧出量も豊富である。従って温泉の利用は観光的利用から農業的利用、工業的利用および医療保健的利用と各方面に及んでいる。このような温泉の多面的利用に対し温泉に関する研究もまた盛んで、源泉成分などの環境化学的な分野から医治効能の医学的な分野、さらに地質、地表水の地下循環機構など地球化学的な分野に至るまで、その対象は広範多岐にわたっている。しかし我々が日常接するのは化学成分の測定業務からみた温泉像であり、そのため温泉の研究観察は化学成分の比較が中心になる。これまで岩手県において温泉群の比較観察をした例としては、斎藤ら<sup>1)</sup>の台・花巻と繋の両温泉群を比較した報告があり、また同一温泉群の源泉の経年変化を観察した例は、金田一、鶯宿、繋、台・花巻及び夏油の諸温泉群について数種の項目を比較した佐藤ら<sup>2)~7)</sup>の諸報告がある。

一般に温泉の化学成分の研究観察は、個々の測定値あるいは測定値の平均値などの比較、また

三角座標で化学成分の構成比率を観察するのが通例で、一部の化学成分を対象にする場合が多い。これに対し温泉の多項目成分を総合的な指標で表し観察した例は少ないが、綿抜ら<sup>8)</sup>は濃度相関マトリックスを利用した多成分の解析方法を提唱し、草津温泉、万代鉱温泉等について化学成分を比較し、その湧出機構の推定をしている。これに対し川本ら<sup>9)、10)</sup>は、下呂温泉群ならびに奥飛騨温泉について濃度相関マトリックスによる解析を行い、その検討結果を詳細に報告している。

岩手県の温泉は一般に蒸発残留物は少なく、蒸発残留物の多い温泉は夏油、須川など一部の温泉に過ぎない。現行の鉱泉分析法指針による療養泉の分類では、蒸発残留物が1g/kg未満の温泉は総て単純温泉とされているが、化学成分の量あるいは構成比率などは個々の源泉で異なり、単純温泉といえども、それぞれの特徴ある温泉像を持っているものと考えられる。我々は多変量解析により、温泉の化学成分の総合的な指標化を検討し、岩手県の温泉について主成分分析による解析を試み、その一部は第34回日本温泉科学会総会において報告<sup>11)</sup>したところであるが、その後高松ら<sup>12)</sup>による主成分分析を応用した報告が見られる。主成分分析による温泉群の類別あるいは源泉の経年変化について観察し、我々が検討した結果その有用性を認めたので報告する。

## 2. 資 料

本県の温泉は図1にみられるとおおり金田一温泉を唯一の例外として、そのほとんどが県西部の奥羽山脈に沿って位置し、温泉地は約70地区、源泉は約180ヶ所あり、泉質は単純温泉が最も多く全体の48%を占め、次いで単純硫黄温泉が23%となっている。岩手県は昭和51年から3ヶ年計画で県下66地区(173源泉)の実態調査を実施したが、その測定結果は佐藤ら<sup>1)~4)</sup>により既に報告されており、今回この報告の一部を資料として利用した。温泉群の比較類別は、源泉がまとまっている金田一温泉群をはじめ、鶯宿、繫、台・花巻および湯口の5温泉群(以下地名に付した温泉群の呼称は省略する。)の54源泉を、また源泉の経年比較は湯口ならびに夏油の、それぞれ12源泉を対象にした。

## 3. 研究方法

研究方法は温泉の化学成分を変数として、主成分分析により温泉群の類別、ならびに同一温泉群内における源泉の経年変化について解析を試みた。変数は最初に泉温、pHおよび化学成分など15項目について検討し、陽イオンからNaとCa、陰イオンからCl、F、SO<sub>4</sub>およびHCO<sub>3</sub>、さらに遊離成分からH<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>およびHBO<sub>2</sub>の合計8化学成分を選択した。主成分分析に利用した5温泉群の測定値は表1に示した。

主成分分析は、 $p$ 個の互いに相関のある変数を、互いに独立な(相関のない) $p$ 個の合成変数—これを主成分と呼ぶ—に変換する。新しく得られた独立な $p$ 個の合成変数のうち、その持つ情報をできるだけ集約するように、少数の $m$ 個( $\leq p$ )の合成変数を選ぶことを目的としている。

主成分分析には、データをそのまま用いて分散・共分散行列から計算する方法と、相関行列から計算する方法がある。相関行列はもとのデータを平均0、分散1に標準化したときの分散・共分散行列に等しい。また主成分分析の結果は、変数の測定単位の違い、あるいは同じ測定単位であってもオーダーの違いによっても左右される。ある変数の分散が他より大きければ、その変数の情報の割合が大きくなり、主成分分析の結果にそれが反映される。しかし分散の大きさと変数の重要度が常に一致するとは限らない。従ってもとの変数を平均0、分散1に標準化して、測定値の変数の尺度依存性をなくし、相関行列から出発して主成分分析を行う方が妥当な場合が多

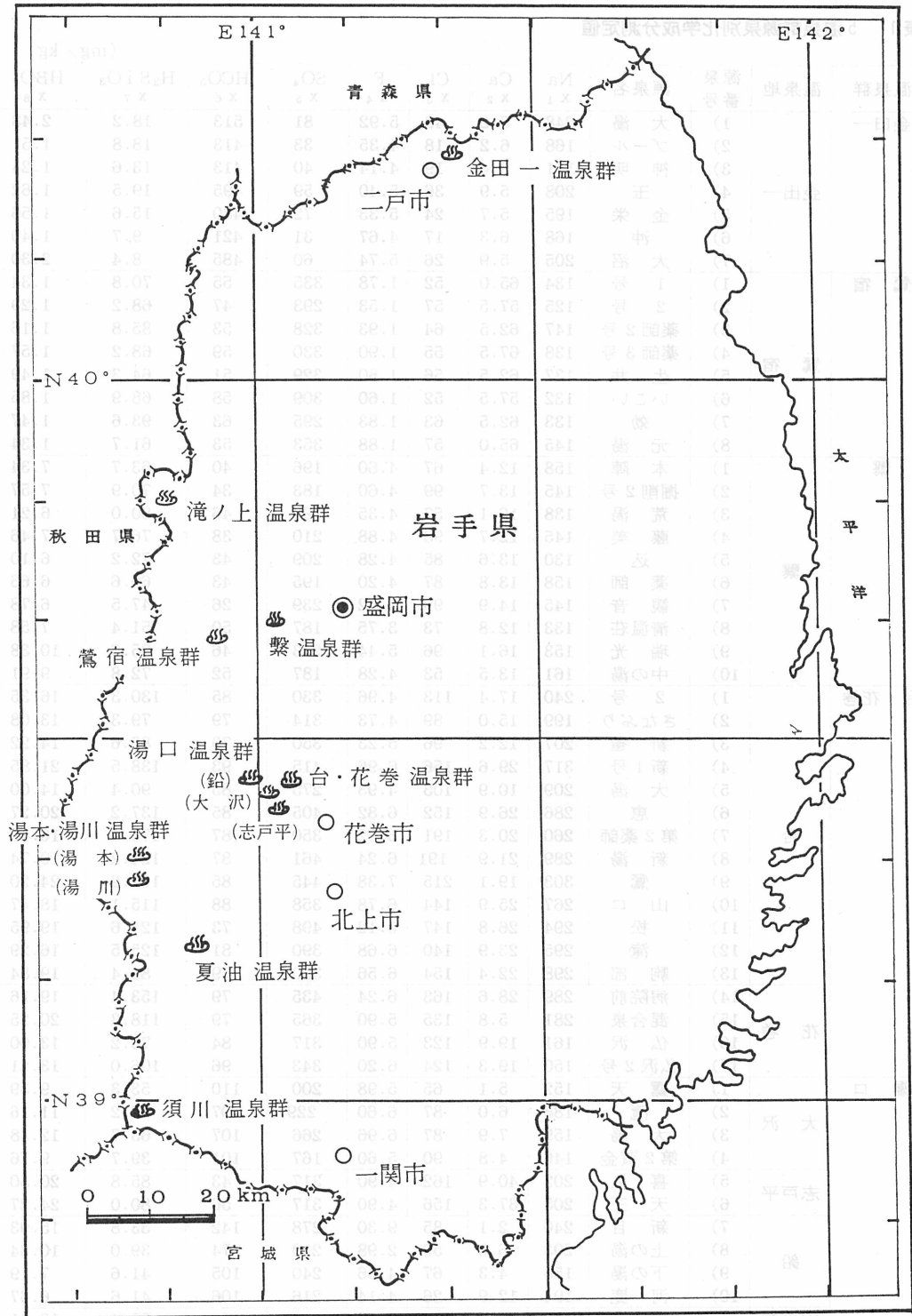


図1 岩手県主要温泉所在地

表1 5温泉群源泉別化学成分測定値

温泉群	温泉地	源泉番号	源泉名	(mg/kg)								
				Na x <sub>1</sub>	Ca x <sub>2</sub>	Cl x <sub>3</sub>	F x <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub> x <sub>5</sub>	HCO <sub>3</sub> x <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> x <sub>7</sub>	HBO <sub>2</sub> x <sub>8</sub>	
金田一	金出一	1)	大湯	248	6.2	49	5.92	81	513	18.2	2.43	
		2)	プール	168	6.2	18	4.35	33	413	18.8	1.51	
		3)	神明	161	3.4	19	4.14	40	413	13.6	1.24	
		4)	玉	208	5.9	36	5.40	59	495	19.5	1.62	
		5)	金栄	195	5.7	24	5.33	72	480	15.6	1.56	
		6)	沖	168	6.3	17	4.67	31	421	9.7	1.40	
		7)	大沼	205	5.9	26	5.74	60	485	8.4	2.30	
鷺宿	鷺宿	1)	1号	134	65.0	52	1.78	335	55	70.8	1.34	
		2)	2号	125	57.5	57	1.53	293	47	68.2	1.29	
		3)	薬師2号	147	62.5	64	1.93	328	53	85.8	1.16	
		4)	薬師3号	138	67.5	55	1.90	330	59	68.2	1.57	
		5)	生井	137	62.5	56	1.80	329	51	64.3	1.49	
		6)	いこい	132	57.5	52	1.60	309	58	68.9	1.85	
		7)	効	133	62.5	63	1.83	295	63	93.6	1.47	
		8)	元湯	145	65.0	57	1.88	353	53	61.7	1.34	
繫	繫	1)	本陣	158	12.4	67	4.60	196	40	63.7	7.34	
		2)	掘削2号	145	13.7	99	4.60	183	34	70.9	7.57	
		3)	荒湯	138	16.1	57	4.35	190	46	80.0	6.21	
		4)	藤美	145	12.7	98	4.88	210	38	76.7	7.46	
		5)	込	130	13.6	85	4.28	209	43	72.2	6.10	
		6)	薬師	158	13.8	87	4.20	195	43	69.6	6.66	
		7)	観音	145	14.9	99	5.72	239	26	47.5	6.78	
		8)	清温荘	133	12.8	73	3.75	187	50	51.4	7.58	
		9)	瑞光	153	16.1	96	5.44	243	46	95.6	10.38	
		10)	中の湯	161	13.5	53	4.28	187	52	72.8	9.91	
台・花巻	台	1)	2号	240	17.4	113	4.96	330	85	130.3	16.35	
		2)	さなぶり	199	15.0	89	4.73	314	79	79.3	13.08	
		3)	新雀	207	12.2	96	5.23	350	79	82.6	14.22	
		4)	新1号	317	29.6	156	6.96	415	93	138.5	21.85	
		5)	大湯	209	10.9	103	4.93	275	85	90.4	14.00	
		6)	恵	286	26.9	152	6.82	405	85	137.2	20.27	
		7)	第2薬師	260	20.3	191	6.02	350	87	178.1	16.19	
		8)	新湯	289	21.9	191	6.24	461	87	124.2	19.74	
		9)	鷺	303	19.1	215	7.38	445	85	161.2	24.20	
		10)	山口	267	25.9	144	6.78	358	88	115.1	18.47	
		11)	松	294	26.8	147	6.12	498	73	121.6	19.95	
		12)	滝	295	23.9	140	6.68	390	81	125.5	16.29	
		13)	駒部	298	22.4	154	6.56	380	79	88.4	19.84	
	花巻	花巻	14)	病院前	289	28.6	163	6.24	435	79	153.4	19.16
			15)	混合泉	281	5.8	135	5.90	365	79	118.3	20.25
			16)	仏沢	161	19.9	123	5.90	317	84	70.2	13.00
			17)	仏沢2号	150	19.3	124	6.20	343	96	106.0	13.21
湯口	大沢	1)	露天	152	5.1	65	5.98	200	110	53.3	9.39	
		2)	滝	188	6.0	87	6.60	229	107	72.2	11.16	
		3)	大湯	159	7.9	87	6.96	266	107	63.7	12.38	
		4)	第2黄金	146	4.8	90	5.60	167	101	39.7	9.76	
	志戸平	5)	喜久	202	40.9	162	4.90	317	43	85.8	20.50	
		6)	天王	205	37.3	156	4.90	317	56	80.0	24.27	
	鉛	鉛	7)	新目	240	2.1	85	9.30	278	142	33.8	15.93
			8)	上の湯	293	6.3	50	2.98	210	74	39.0	10.34
			9)	下の湯	158	4.3	67	4.56	240	105	41.6	7.19
			10)	河の鹿	194	12.9	26	4.14	216	106	41.6	6.67
	山の神 高倉	山の神 高倉	11)	東和	206	1.5	152	8.48	253	154	38.4	12.41
			12)	夢	209	1.5	82	9.50	250	142	35.8	15.31



い。本報告においては、表1にみられるように変数間のオーダーに100倍の差があるので、相関行列から出発して主成分分析を行った。

次にp変数、n組のデータで、相関行列から出発する主成分分析の計算手順を略述する。

変数p個のデータで、相関係数をr、相関行列をR、lを係数 $l_{1i}$ の列ベクトル、 $\lambda$ を相関行列Rの固有値とすると次式が成立する。

$$Rl = \lambda l, \quad l \neq 0$$

書き換えれば

$$\begin{vmatrix}
 r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\
 r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\
 \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
 r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp}
 \end{vmatrix}
 \begin{vmatrix}
 l_{11} \\
 l_{12} \\
 \cdots \\
 l_{1p}
 \end{vmatrix}
 = \lambda_1
 \begin{vmatrix}
 l_{11} \\
 l_{12} \\
 \cdots \\
 l_{1p}
 \end{vmatrix}$$

となり、これから主成分の係数 $l_{1i}$ が得られる。lを固有ベクトルと呼び、各々の固有値 $\lambda_k$  ( $k=1, 2, \dots, p$ ) に対応した固有ベクトルlが得られる。

固有値には、いろいろな性質があるが、そのうち重要なものは次のとおりである。

1) 相関行列Rからp個の固有値とそれぞれに対応するp組の固有ベクトルが得られる。

2) 固有値 $\lambda_k$  ( $k=1, 2, \dots, p$ ) の合計はpである。

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k + \cdots + \lambda_p = p$$

3) 主成分 $Z_k$ の分散は、固有値 $\lambda_k$ に等しい。

4) 主成分 $Z_k$ の分散が、総分散に対する割合は寄与率と呼ばれ、 $\lambda_k/p$ で表される。いまpより小さいm個の主成分が抽出されたとすれば、m個の主成分の寄与率の和は累積寄与率と呼ばれるが、次式で与えられる。

$$\lambda_1/p + \lambda_2/p + \cdots + \lambda_m/p = (\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_m)/p$$

累積寄与率は、m個の主成分により、もとの変数 $x_i$ に含まれる情報量の何パーセント確保できたかを示している。

5) 第k主成分の $Z_k$ ともとの変数 $x_i$ との相関は次式で与えられ、この相関関係を因子負荷量という。

$$r(Z_k, x_i) = \sqrt{\lambda_k} l_{ki}$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, p)$$

6) 第k主成分の $Z_k$ の値は次式で与えられる。

$$Z_{kj} = l_{k1} x_{1j}^* + l_{k2} x_{2j}^* + \cdots + l_{kp} x_{pj}^*$$

$$(i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, n)$$

ここで $x_{ij}^*$ は標準化された測定値で次式で与えられる。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{S_i}$$

$\bar{x}_i$ は第i変数の平均、 $S_i$ は標準偏差。

主成分スコアは $Z_k$ の式に標準化された測定値 $x_{ij}^*$ を代入して得られる。

一般に相関行列の数値計算は困難で、 $p > 3$ の場合は電子計算機によらなければならない。本研究では Olivetti 社 P-6060 型コンピュータならびに同社の多変量解析プログラムを利用した。なお主成分分析についての詳細は成書<sup>13-15</sup>を参考にされたい。

また主成分分析で得られる主成分は変数の数だけ求められるが、合成変数である主成分の数は多くとっても意味がないので、通常は累積寄与率80%を目標に主成分の数を決める。また相関行列から出発した場合は固有値  $\lambda > 1$  を示す主成分を採用するのがよいといわれている(16), (17)。

なお各温泉群における源泉の集中度合いを観察するため、統計楕円の一つである95%棄却楕円を描いた。95%棄却楕円は5%の危険率で、2変量の標本を棄却できるかどうかを判断する場合に利用され、1変量の棄却限界に相当するものである。統計楕円は2変量管理図によく応用されているが、その計算手順はかなり複雑なので詳細は成書(18), (19)を参考にされたい。

## 4. 解析結果

### 4-1 5温泉群(54源泉)の主成分分析

最初に5温泉群の8化学成分の統計量を求め、温泉群間の平均値の差の検定(Welch)の結果とともに表2に示した。表2をみると、1%の危険率で化学成分濃度の高い温泉群は、Naは台・花巻、Caは鶯宿、Clは台・花巻、 $SO_4$ は台・花巻と鶯宿、 $HCO_3$ は金田一、 $H_2SiO_3$ は台・花巻さらに $HBO_2$ は湯口となっているほか、5%の危険率で濃度が高いのは $HBO_2$ の台・花巻がある。また濃度が1%の危険率で有意に低い温泉群は、Clは金田一、Fは鶯宿、 $SO_4$ は金田一、 $HCO_3$ は鶯宿と繫、 $H_2SiO_3$ は金田一であり、また5%の危険率で濃度が低い温泉群は、Naが鶯宿、 $SO_4$ が繫となっている。なお参考までに蒸発残留物を比較すると蒸発残留物の多い台・花巻が1%の危険率で有意、少ない金田一が5%の危険率で有意と認められた。総体的に台・花巻は各化学成分の濃度が高く、金田一は $HCO_3$ を除いて濃度が低い。

次に金田一、鶯宿、繫、台・花巻および湯口の5温泉群(54源泉)について主成分分析を試み、求められた各主成分の固有値、寄与率ならびに累積寄与率を表3に示した。表3においては第2主成分までとれば累積寄与率が80%に達するが、本報告では一応第3主成分まで検討した。さらに各主成分について化学成分ごとの固有ベクトルと因子負荷量を表4に、また第1主成分(以下 $Z_1$ と略す。)、第2主成分(以下 $Z_2$ と略す。 )及び第3主成分(以下 $Z_3$ と略す。 )における変数と因子負荷量の関係を図2に示した。図2をみると $Z_1$ で正の高い因子負荷量を示す化学成分はCl,  $SO_4$ ,  $HBO_2$ ,  $H_2SiO_3$ およびNaで、負の高い因子負荷量を示す化学成分は $HCO_3$ である。

表2 5温泉群の化学成分(算術平均と標準偏差)

温泉群	金田一(7)	鶯宿(8)	繫(10)	台・花巻(17)	湯口(12)
Na	193±31	136±7-*	146±11	256±52**	196±42
Ca	5.6±1.0	62.5±7.1**	13.9±1.3	20.3±6.6	10.9±13.6
Cl	27.0±11.7-**	57.0±4.5	81.4±17.7	143.3±34.5**	92.4±42.9
F	5.08±0.69	1.78±0.14-**	4.61±0.60	6.10±0.76	6.16±2.08
$SO_4$	54±19-**	322±21**	204±22-*	378±59**	245±45
$HCO_3$	460±43**	54.9±5.0-**	41.8±7.7-**	83.8±5.7	103.9±33.5
$H_2SiO_3$	14.3±4.4-**	72.7±11.1	70.0±13.8	118.8±30.2**	52.1±18.6
$HBO_2$	1.72±0.46	1.44±0.21	7.60±1.45	17.65±3.40*	12.94±5.27**
Residue	499±75-*	651±28	592±61	915±150**	639±125

平均値の差の検定(Welch)

\*\* 1%有意

\* 5%有意

表3 各主成分の固有値と寄与率

(5温泉群54源泉)

	第1主成分 Z <sub>1</sub>	第2主成分 Z <sub>2</sub>	第3主成分 Z <sub>3</sub>
固有値	4.294	2.341	0.670
寄与率(%)	53.68	29.26	8.37
累積寄与率(%)		82.94	91.31

Z<sub>2</sub>で正の高い因子負荷量を示す化学成分はCaとSO<sub>4</sub>で、負の高い因子負荷量を示す化学成分はFとHCO<sub>3</sub>である。Z<sub>3</sub>では正の高い因子負荷量を示す化学成分はHCO<sub>3</sub>とNaで、負の高い因子負荷量はみられない。

また主成分分析で得られた合成変数すなわち主成分は、主成分スコア(以下スコア

と略す。)として数量化される。スコアは各主成分について表4の固有ベクトルに、標準化された測定値を乗じたものの和として求められるが、その計算式は表5に示した。

全温泉群の各源泉毎にZ<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>およびZ<sub>3</sub>のスコアを求め、(Z<sub>1</sub>:Z<sub>2</sub>)ならびに(Z<sub>1</sub>:Z<sub>3</sub>)の直交座標にプロットした。また各温泉群毎に源泉の集中の度合いを観察するため、(Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>)ならびに(Z<sub>1</sub>, Z<sub>3</sub>)のスコアから95%棄却楕円(以下楕円と略す。)を計算し、スコアと同一座標上にそれぞれ楕円を描いて図3に示した。

表2, 図2を参考にして図3を観察すると、Z<sub>1</sub>スコアで正を示したのは台・花巻の全源泉と湯口の5源泉で、これは正の因子負荷量を示す化学成分Cl, HBO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>およびSO<sub>4</sub>の濃度が高いためであり、これらの濃度が低い金田一の各源泉は大きく負を示している。また鶯宿、繋および湯口の一部も負を示しているが、これはClとHBO<sub>2</sub>の濃度が低いためである。

Z<sub>2</sub>スコアで正を示したのは鶯宿で、これは正の高い因子負荷量を示すCaの濃度が高く、負の高い因子負荷量を示すFとHCO<sub>3</sub>の濃度が低いためである。また金田一の全源泉と湯口の3源泉は、HCO<sub>3</sub>の濃度が高いためZ<sub>2</sub>スコアは負を示している。Z<sub>3</sub>スコアで正を示しているのは金田一の全源泉と台・花巻の大部分の源泉で、これはHCO<sub>3</sub>とCaの濃度が高いためであり、鶯宿の全源泉が正を示しているのはNaの濃度は低いがCaの濃度が群を抜いて高いためである。繋の全源泉のZ<sub>3</sub>スコアが負を示しているのはCaの濃度が低いためである。

図3をまとめると特徴ある温泉群は、Z<sub>1</sub>では各化学成分の濃度が高い台・花巻は正のスコアを示し、それと対照的に各化学成分の濃度が低い金田一は負のスコアを示している。Z<sub>2</sub>ではCa濃度の高い鶯宿と、HCO<sub>3</sub>の濃度が高い金田一と湯口の3源泉がそれぞれ特異な位置を占めている。またZ<sub>3</sub>ではHCO<sub>3</sub>の濃度の高い金田一が目立っている。

表4 化学成分の固有ベクトルと因子負荷量(5温泉群54源泉)

	第1主成分 Z <sub>1</sub>		第2主成分 Z <sub>2</sub>		第3主成分 Z <sub>3</sub>	
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量
(x <sub>1</sub> )Na	0.343	0.711	-0.289	-0.442	0.573	0.469
(x <sub>2</sub> )Ca	0.031	0.064	0.581	0.889	0.414	0.339
(x <sub>3</sub> )Cl	0.457	0.947	-0.003	-0.005	-0.061	-0.050
(x <sub>4</sub> )F	0.236	0.489	-0.515	-0.788	-0.215	-0.176
(x <sub>5</sub> )SO <sub>4</sub>	0.416	0.862	0.274	0.419	0.103	0.084
(x <sub>6</sub> )HCO <sub>3</sub>	-0.260	-0.539	-0.404	-0.618	0.643	0.526
(x <sub>7</sub> )H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0.421	0.872	0.186	0.284	0.107	0.087
(x <sub>8</sub> )HBO <sub>2</sub>	0.444	0.920	-0.179	-0.274	-0.116	-0.095

表5 5温泉群(54源泉)の主成分スコア計算式

$$Z_1 = 0.343x_1^* + 0.031x_2^* + 0.457x_3^* + 0.236x_4^* + 0.416x_5^* - 0.26x_6^* + 0.421x_7^* + 0.444x_8^*$$

$$Z_2 = -0.289x_1^* + 0.581x_2^* - 0.003x_3^* - 0.515x_4^* + 0.274x_5^* - 0.404x_6^* + 0.186x_7^* - 0.179x_8^*$$

$$Z_3 = 0.573x_1^* + 0.414x_2^* - 0.061x_3^* - 0.215x_4^* + 0.103x_5^* + 0.643x_6^* + 0.107x_7^* - 0.116x_8^*$$

$$x_i^* = (x_i - \bar{x}_i) / \sigma, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p$$

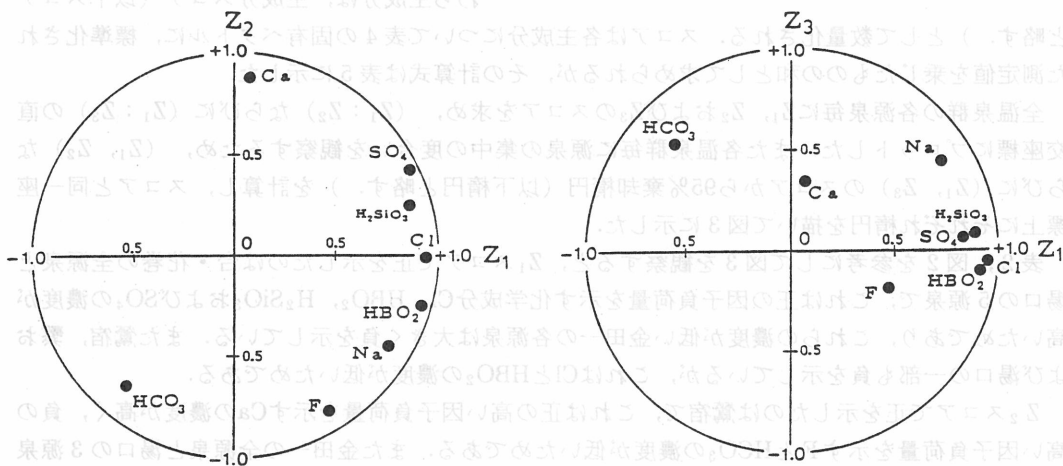
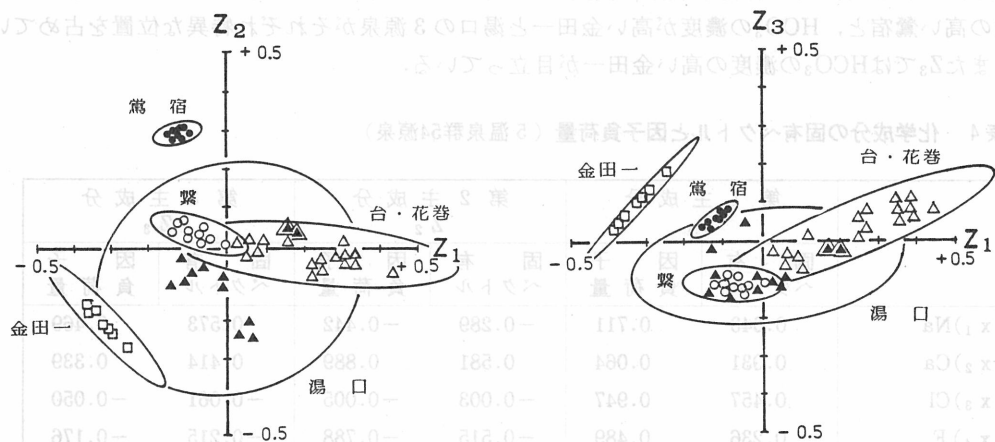


図2 5温泉群の主成分と因子負荷量



楕円は95%棄却楕円

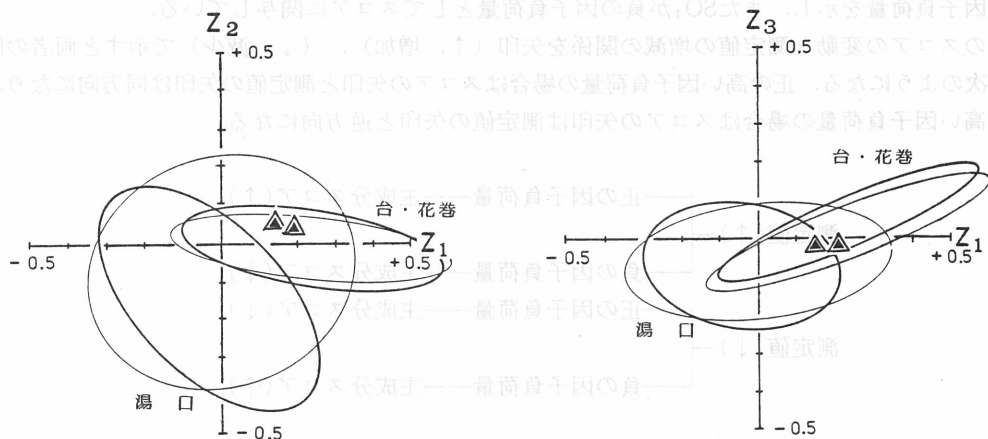
図3 温泉群別主成分スコア散布図

また各温泉群の楕円の大小はスコアの集中の度合いを示し、地域における源泉の広がりに関係しているが、金田一、鶯宿及び繫はそれぞれ個々に集中し、明確に他と区別されている。台・花巻の楕円は $Z_1$ の座標軸に平行し、一部が繫の楕円と重複しているものの、楕円長軸の角度も異なり両温泉群は区別される。これに対し湯口の各源泉のスコアは、広い範囲に散って楕円も大きく、他の温泉群と交錯している。この湯口は、豊沢川に沿って6 Kmにわたり点在する志戸平、大沢および鉛などの小温泉地を便宜上まとめたもので、他の温泉群のように源泉が地区に集中していないためと考えられる。なお湯口の二重三角印(▲)の2源泉は志戸平温泉であるが、台・花巻のスコアに近いスコアを示しているため、この2源泉を台・花巻に加え、湯口から除いて楕円を再計算し図4に示したが、 $(Z_1:Z_2)$  および  $(Z_1:Z_3)$  の両座標でみられるとおり、台・花巻に2源泉を加えて計算した楕円が、前の楕円とほとんど差がみられないのに対し、2源泉を除いた湯口は $(Z_1:Z_2)$ の座標で楕円の大きさが $1/3$ になり、また長軸の角度が大きく変化している。この湯口の2源泉の化学成分は同温泉群の他の源泉の化学成分と異なり、台・花巻の各源泉に近い泉質を持っているものと考えられる。ちなみに志戸平温泉は台・花巻の南西約5 Km、湯口温泉群の入り口にあり、志戸平は標高約170mで台・花巻より30m低く、両温泉の間には標高500m前後の丘陵が横たわっている。

以上のように主成分分析は、それぞれの単純温泉を特徴づけて類別することができる。また楕円で表した各源泉のスコア集中の度合いは、源泉の類似性を示唆するもので、図3で判断する限り、楕円の大きさからみて鶯宿と繫の両温泉群は、それぞれ同一源泉の可能性が濃い。なお湯口の2源泉は、湯口のなかで異質な存在で台・花巻と泉質の類似性を示したことは興味深い。

4-2 源泉の経年変化の観察

最初に主成分分析に利用した化学成分について、以前の測定値(以下前回測定値と略す)と今回の一斉調査の測定値(以下今回測定値と略す)の統計量を求め、平均値の差の検定(Welch)結果とともに表6に示した。各化学成分の平均値を見ると、湯口は前回測定値と今回測定値のそ



— 台・花巻に湯口の2源泉(▲)を加え、湯口から2源泉を減らした95%棄却楕円  
 — 台・花巻と湯口のものとの95%棄却楕円

図4 台・花巻と湯口両温泉群の再計算95%棄却楕円

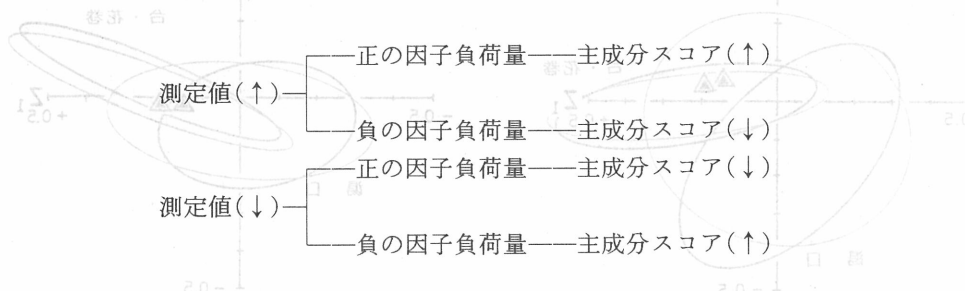
それぞれの平均値の間に有意な差を示した化学成分はみられないが、夏油ではCaが減少し、 $H_2SiO_3$ が増加しており共に1%の危険率で有意と認められた。

次に源泉の経年変化について湯口と夏油のそれぞれ12源泉を対象に主成分分析を試みた。既に述べたように湯口は離れた小温泉地をまとめた温泉群であり、また夏油は各化学成分の濃度が高く、岩手県で最も蒸発残留物が多い温泉群である。主成分分析は湯口は8変数で、夏油はFの以前の測定値がないのでFを除き7変数で計算した。なお各源泉は以前の測定時期がまちまちであり、一斉調査までの各源泉の経過年数は個々の源泉で異なることになる。

主成分分析は前回と今回の測定値を一括して標準化し、相関行列から出発して得られた各主成分の固有値ならびに寄与率を求め表7に示した。主成分は固有値 $\lambda > 1$ のものをとり第3主成分まで検討し、両温泉群のスコア計算式は表8に示した。スコアは各源泉の前回測定値と今回測定値を一括して求めた標準化された測定値で計算し、湯口と夏油の全源泉を( $Z_1 : Z_2$ )および( $Z_1 : Z_3$ )の直交座標にプロットし図5に示した。図5において、前回測定値によるスコアと今回測定値によるスコアの距離が大きいほど変動が大きく、また距離が小さいほど変動が小さいことになり、湯口の各源泉は $Z_1$ スコアの変動が大きく $Z_2, Z_3$ のスコアは変動が小さい。これに対し夏油の各源泉は $Z_2, Z_3$ スコアの変動が目立ち、とくに $Z_2$ スコアが減少している源泉が多い。これを個々の源泉についてみると、湯口ではNo.6, No.8, No.5, No.10およびNo.12の順で5源泉、また夏油ではNo.11, No.6, No.1, No.2, No.12およびNo.4の順で6源泉の変動が著しい。

各主成分について変数の因子負荷量ならびに前回測定値と今回測定値を表9に示した。表9について湯口の各主成分の因子負荷量をみると、 $Z_1$ で正の高い因子負荷量を示している化学成分は $SO_4$ , Caおよび $H_2SiO_3$ で、負の高い因子負荷量を示している化学成分は $HCO_3$ である。 $Z_2$ ではFが正の高い因子負荷量を示すほか、 $HCO_3, H_2SiO_3$ もスコアに関与している。 $Z_3$ では $HBO_2$ が正の高い因子負荷量を示すほか、Caと $SO_4$ が負の因子負荷量としてスコアに関与している。同様に夏油の各主成分の因子負荷量をみると、 $Z_1$ で正の高い因子負荷量を示している化学成分はCl, NaおよびCaで、負の高い因子負荷量を示す成分はない。 $Z_2$ では $HBO_2$ と $HCO_3$ が正の高い因子負荷量を示しているほか、Naと $SO_4$ が負の因子負荷量を示している。 $Z_3$ では $H_2SiO_3$ が正の高い因子負荷量を示し、また $SO_4$ が負の因子負荷量としてスコアに関与している。

このスコアの変動と測定値の増減の関係を矢印(↑, 増加), (↓, 減少)で示すと両者の関係は次のようになる。正の高い因子負荷量の場合はスコアの矢印と測定値の矢印は同方向になり、負の高い因子負荷量の場合はスコアの矢印は測定値の矢印と逆方向になる。



源泉の変動は図5と表9を対比すればスコアの経年変化が明らかであるが、湯口の「8 上の湯」と「10 河鹿」にみられる $Z_3$ のCaと $SO_4$ 、「12 夢」にみられる $Z_1$ の $HCO_3$ は主成分と測定値の増減が逆になっていること、また夏油の「11 小天狗」にみられる $Z_2, Z_3$ の $SO_4$ 、「4 女」の $SO_4$ も同様主成分と測定値の増減が逆になっていることは、測定値の減少もまたスコアの増減に関与していることを示している。



表6 湯口および夏油の化学成分経年変化 (算術平均と標準偏差)

		(mg/kg)							
		Na	Ca	Cl	F	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	HBO <sub>2</sub>
湯口	前回測定値	211±32	19.7±19.3	85.0±44.9	6.21±1.58	285±68	98.7±24.0	65.4±27.1	11.8±5.1
	今回測定値	196±42	10.9±13.6	92.0±42.9	6.15±2.08	245±45	108.9±33.6	52.1±18.6	12.9±5.3
	t (Welch)	0.984	1.291	0.390	0.079	1.699	0.436	1.964	0.588
夏油	前回測定値	786±104	453±60	1646±197		584±98	555±63	154±36	113±38
	今回測定値	795±93	369±33	1605±189		567±75	497±109	261±70	103±9
	t (Welch)	0.223	4.249**	0.520		0.477	1.595	4.700**	0.887

平均値の差の検定 (Welch)      \*\* 1%有意      \* 5%有意

表7 湯口および夏油の各主成分の固有値と寄与率

	主成分	固有値	寄与率(%)	累積寄与率(%)
湯口	Z <sub>1</sub>	3.4162	42.70	
	Z <sub>2</sub>	1.2505	15.63	58.33
	Z <sub>3</sub>	1.0604	13.26	71.59
夏油	Z <sub>1</sub>	2.4097	34.42	
	Z <sub>2</sub>	1.4546	20.78	55.20
	Z <sub>3</sub>	1.3804	19.72	74.92

表8 湯口および夏油の主成分スコア計算式

$$\begin{aligned}
 & Z_1 = 0.295 x_1^* + 0.45 x_2^* + 0.408 x_3^* - 0.031 x_4^* + 0.462 x_5^* - 0.386 x_6^* + 0.367 x_7^* + 0.214 x_8^* \\
 \text{湯口 } & Z_2 = 0.248 x_1^* - 0.21 x_2^* - 0.142 x_3^* + 0.765 x_4^* + 0.191 x_5^* + 0.352 x_6^* + 0.33 x_7^* + 0.137 x_8^* \\
 & Z_3 = -0.052 x_1^* - 0.383 x_2^* + 0.169 x_3^* - 0.142 x_4^* - 0.247 x_5^* - 0.064 x_6^* + 0.055 x_7^* + 0.857 x_8^* \\
 & Z_1 = 0.504 x_1^* + 0.463 x_2^* + 0.594 x_3^* + 0.351 x_4^* - 0.063 x_5^* - 0.008 x_6^* + 0.224 x_7^* \\
 \text{夏油 } & Z_2 = -0.311 x_1^* + 0.39 x_2^* - 0.032 x_3^* - 0.286 x_4^* + 0.551 x_5^* - 0.185 x_6^* + 0.575 x_7^* \\
 & Z_3 = 0.282 x_1^* - 0.269 x_2^* + 0.245 x_3^* - 0.437 x_4^* + 0.304 x_5^* + 0.707 x_6^* + 0.068 x_7^* \\
 & x_i^* = (x_i - \bar{x}_i) / \sigma, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p
 \end{aligned}$$

以上、湯口ならびに夏油の両温泉群について源泉の経年変化を観察したが、5温泉群の主成分分析で湯口の他の源泉と異なった位置を占めていた2源泉が、この主成分分析でも特異な位置を占め、湯口の他の源泉がZ<sub>1</sub>スコアで負を示しているのに対し、この2源泉は正を示している。なお夏油はFを除いた7変数で主成分分析を試みたが、さしたる支障はみられなかった。このように主成分分析による経年変化の観察は、源泉の個々について化学成分の比較あるいは複数源泉の平均値比較などと異なり、温泉群の全源泉の変動を座標上で同時に観察できること、また経年変化の変動を数量化して比較できることなどの点で有用な手法であると考えられる。

表 6 湯口および夏油の主成分化学組成率変化(真値平均と標準偏差)

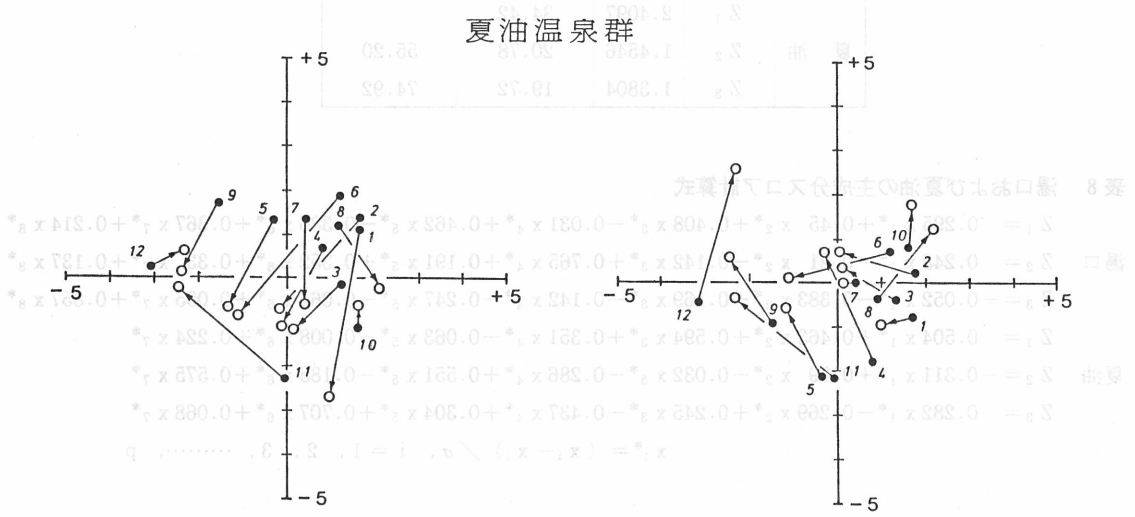
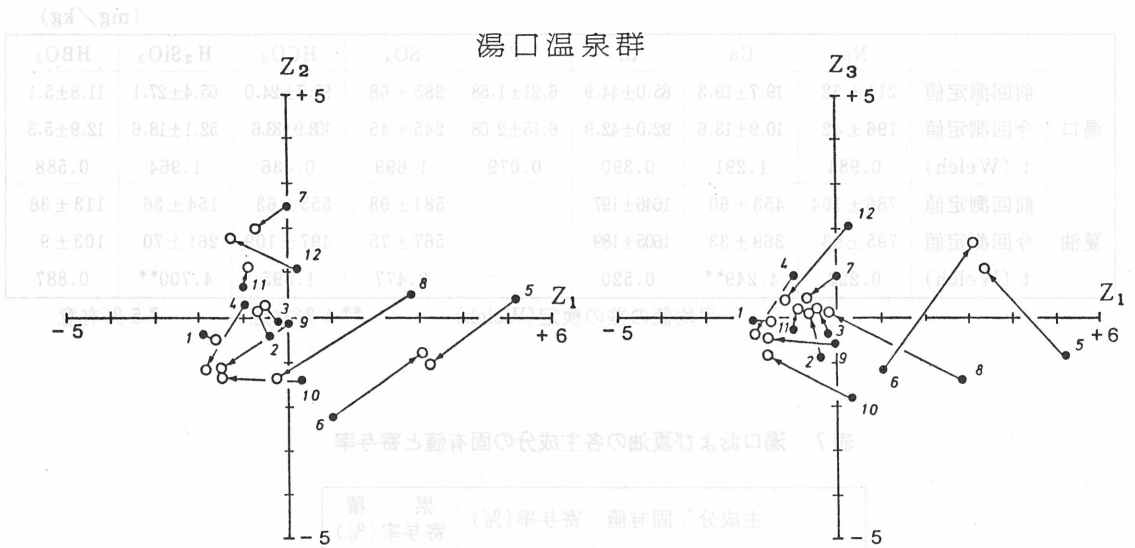


図 5 湯口および夏油の主成分スコア散布図

● 前回測定値 主成分スコア  
○ 今回測定値 主成分スコア

表9 湯口および夏油の測定値経年変化

		Na	Ca	Cl	F	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	HBO <sub>2</sub>	
湯 口 温 泉 群	Z <sub>1</sub>	0.55	0.83	0.75	-0.06	0.85	-0.71	0.68	0.40	
	Z <sub>2</sub>	0.28	-0.23	-0.16	0.86	0.21	0.39	0.37	0.15	
	Z <sub>3</sub>	-0.05	-0.39	0.17	-0.15	-0.25	-0.07	0.06	0.88	
	6. 天王		205	37.3	156	4.9	317	56	80	24.3
			206	42.6	146	4.6	280	69	16	7.8
	8. 上の湯		293	6.3	50	3.0	210	74	39	10.3
			256	35.6	83	5.4	441	87	87	10.5
	5. 喜久		202	40.9	162	4.9	317	43	86	20.5
			275	54.0	195	6.5	399	56	121	13.0
	10. 河鹿		194	12.9	26	4.2	216	106	42	6.7
			190	42.2	82	4.4	295	103	51	5.2
	12. 夢		209	1.5	82	9.5	250	142	36	15.3
		207	0.3	77	9.2	259	65	49	23.8	
夏 油 温 泉 群	Z <sub>1</sub>	0.78	0.72	0.92		0.54	-0.10	-0.01	0.35	
	Z <sub>2</sub>	-0.37	0.47	-0.04		-0.34	0.66	-0.22	0.69	
	Z <sub>3</sub>	0.33	-0.32	0.29		-0.51	0.36	0.83	0.08	
	11. 小天狗		685	335	1358		495	503	186	90
			800	400	1515		749	429	118	50
	6. 亀		760	360	1526		515	446	221	96
			817	499	1752		536	629	212	145
	1. 大湯		835	380	1755		660	203	227	106
			793	538	1796		589	520	170	128
	2. 滝		845	375	1632		570	513	239	97
			824	501	1788		565	526	220	155
	12. 天狗		690	335	1468		418	644	428	102
		687	346	1285		416	607	109	62	
4. 女		785	390	1583		625	470	330	106	
		790	475	1490		778	623	139	114	

今回測定値 / 前回測定値 (mg/kg)

### 5. 考 察

一般に温泉の化学成分は、多様性と相互依存性が共存する複雑な二面性を持っており、たとえ同一温泉地の源泉であっても化学成分の量的な差は勿論のこと、その構成比率もまちまちで必ずしも均一のものではない。

我々は温泉の化学成分の相互依存性に着目し、主成分分析による解析方法を検討したが、主成分分析は多次元の情報をそれぞれ重み付けをして要約し、主成分スコアという合成変数により総合的な評価をする多変量解析法の一手法であり、農学、医学、経済学など各方面で複雑な事象の解析に応用されている。主成分分析は計算に利用した温泉群について、化学成分の相互依存性を反映すると同時に、単純温泉についても源泉の特徴を把握することができる。また温泉群の源泉をそれぞれ総合的な数値で表し、さらに楕円を描くことにより、温泉群のまとめりと、個々の源

泉を同時に比較することが可能である。主成分分析は、温泉の類別、源泉の経年変化の観察にも利用価値が認められるほか、データのなかに混在あるいは潜在している異種集団の発見にも応用できる。このことは、主成分スコアによる源泉の集中度の観察と同時に、新規掘削泉の既存源泉との識別に応用できるものと考えられる。さらに主成分分析による源泉の経年変化の解析は、単に個々の源泉について化学成分を量的に比較するだけでなく、測定値を標準化して求められたスコアは、全源泉の算術平均ならびに標準偏差を投影し、その温泉地の全源泉の量的変動を反映している点が長所と考えられる。

なお源泉の経年変化は、前回の測定から今回の測定までの経過年数は勿論のこと、自然湧出か掘削かの湧出状況、さらに掘削泉の場合には動力利用の有無、あるいは地下構造を含めて温泉地の自然環境の変化など源泉の変動に係わり合いを持つ要因は多い。従って源泉の変動は、これらの要因が複雑に交錯しているものと考えられ、その解析には慎重を要する。今回は主成分分析の応用に重点を置いたので、変動要因の解析については次の機会に譲りたい。

## 6. おわりに

以上、主成分分析により温泉を総合評価し、温泉群の類別と源泉の経年変化の解析について我々が試みた結果を報告した。主成分分析は計算がやや複雑で、その上座標にプロットするため、観察例数に制約を受けるが温泉の個々の化学成分を反映し、総合的に比較観察できる点で優れた方法であることが認められた。また源泉の経年変化の解析では、湯口のように近隣の小温泉地を数箇所まとめた場合でも、十分その目的が達成されること、さらに夏油のように変数を減らした場合でも、解析が可能であることが確かめられた。

この一文が温泉を研究する方々に何等かの参考になれば望外の幸いである。

## 文 献

- 1) 斎藤憲光, 高橋 悟ほか: 岩手県の温泉に関する研究 (第12報), 岩手衛研年報19, 88-106, 1976
- 2) 佐藤 彰, 及川友子ほか: 岩手県の温泉に関する研究 (第11報), 岩手衛研年報19, 51-87, 1976
- 3) 佐藤 彰, 斎藤憲光ほか: 岩手県の温泉に関する研究 (第13報), 岩手衛研年報20, 770-93, 1977
- 4) 佐藤 彰, 斎藤憲光ほか: 岩手県の温泉に関する研究 (第14報), 岩手衛研年報21, 62-82, 1978
- 5) 佐藤 彰, 高橋正直: 岩手県の温泉に関する研究 (第4報), 岩手衛研年報11, 65-70, 1967
- 6) 佐藤 彰, 高橋正直: 岩手県の温泉に関する研究 (第5報), 岩手衛研年報12, 161-166, 1968
- 7) 佐藤 彰, 斎藤憲光ほか: 夏油温泉の微量化学成分について, 温泉科学, 30, 2 (1979)
- 8) 綿貫邦彦, 高野穆一郎: 多成分相関マトリックスを用いる温泉水の相互関係の解析, 温泉科学, 25, 26 (1974)
- 9) 川本 博, 阿部修治ほか: 濃度相関マトリックスによる下呂温泉群の相互関連性の検討, 温泉科学, 33, 1 (1982)
- 10) 川本 博, 阿部修治ほか: 濃度相関マトリックスによる奥飛騨温泉の地球化学的研究, 温泉科学, 34, 1 (1984)
- 11) 斎藤憲光, 菅原恒有: 岩手県内温泉群の化学特性について, 温泉科学, 32, 149, 1982
- 12) 高松信樹, 今橋正征ほか: 海岸型食塩水の主成分分析による分類—伊豆諸島の温泉群についての試み, 温泉科学, 35, 97, 1985

- 13) 河口至商：多変量解析入門 I， p35-60， 森北出版， 1977
- 14) 応用統計ハンドブック編集委員会編（代表者 奥野忠一）：応用統計ハンドブック， p.328-375， 養賢堂， 1978
- 15) 柏木 力：医学統計解析， p.154-159， 朝倉書店， 1979
- 16) M.G.Kendall 著， 奥野忠一， 大橋靖雄共訳：多変量解析， p.29， 培風館， 1981
- 17) 田中 豊， 垂水共之， 脇本和昌：パソコン統計解析ハンドブック（II）多変量解析編， p.163， 共立出版， 1984
- 18) 高橋暁正， 土肥一郎：医学及び生物学研究者のための推計学入門， p.74-79， 医学書院， 1951
- 19) 脇本和昌， 後藤昌司， 松原義弘：多変量グラフ解析法， p.113-117， 朝倉書店， 1979

Classification of Coastal Type Saline Springs by  
Principal Component Analysis

Nobuki TAKAMATSU  
Department of Chemistry, Toho University

Abstract

Saline spring in Izu islands area were classified by principal component analysis. The plots of first versus second principal component score are separated into two main series; one series is the saline waters whose host rocks are andesite or basalt, and the other are rhyolite. The temperature of the hydrothermal system is presumed to be the main reason for the separation of the plots. The principal component analysis can be a useful tool for estimating the genesis of the saline spring waters.

言 語

本論文は、伊豆諸島の海岸型塩水温泉の成因を明らかにするために、主成分分析を用いて、温泉の化学成分を解析した。その結果、第一主成分と第二主成分のスコアプロットから、二つの主要な系列に分けられた。一つは、安山岩または玄武岩の寄主岩を有する塩水温泉であり、もう一つは、流紋岩の寄主岩を有する塩水温泉である。この結果から、水成熱水システムの温度が、温泉の分離の主要な原因であると推定される。主成分分析は、塩水温泉の成因を推定するための有用なツールである。