

仙石原湿原の地下水調査
— 文化財指定地周辺 —

栗屋 徹, 平野富雄, 荻野喜作

神奈川県温泉研究所*

Chemical Composition of Groundwaters in Sengoku-bara Moor, Hakone

by

Tōru AWAYA, Tomio HIRANO and Kisaku OGINO

Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

The groundwaters of the Sengoku-bara area are chemically classified into two groups. Waters restricted in volcanic ash layer are rich in sulfate (20.3~48.8 ppm), whereas those in the moor deposit are poor in sulfate (<1.~8.20 ppm) and rich in bicarbonate (40.6~187. ppm). The groundwater of the moor is supplied by meteoric water mostly derived from the slope of the lava dome called Daigatake, which is covered by volcanic ash. When the groundwaters from the volcanic layers predominating in sulfate come to contact with moor deposit, they become to be rich in bicarbonate associated with decreasing of sulfate. The partial pressure of CO₂ in the groundwater system is calculated to be from 10^{-2.78} to 10^{-1.42} atm, being relatively high in the moor deposit than in the volcanic ash layers.

*神奈川県箱根町湯本997 〒250-03

神奈川県温泉研究所報告 第8巻, 第3号, 105—114, 1977

はじめに

箱根仙石原には湿原植物の群落があり、昭和9年この一部が文化財指定地となって保護された。最近、仙石原地域でも開発が進み、人工的な自然破壊がめだつようになった。湿原の環境も以前とくらべ急速に変わってきている。すなわち、地下水位の低下や水質の変化、土砂の流入等の現象がみられるようになった。

昭和51年度から県農政部自然保護課によって、この湿原の環境保全を目的とした調査がすすめられた。私達はこの調査の一環として湿原の水質調査を行なった。この報告書は文化財指定地周辺の地下水の水位および水質についてまとめたものである。

謝辞

この調査を行なうにあたって次の方々にお世話になった。

旭丘高等学校の松浦正郎氏、箱根小学校の勝俣孝一校長、箱根町の信濃一男元教育長、沢地 弘氏、県衛生研究所の綿貫知彦氏、地下水位を測定して頂いた県箱根自然公園管理事務所の田中光課長、森川武進氏、有益なご助言を頂いた温泉研究所の大木靖衛所長、平賀士郎温泉地質科長、地質資料を見せて頂いた小鷹滋郎氏、現地調査に協力された小沢 清氏、横山尚秀氏、守矢正則氏。

上記の方々に厚くお礼申し上げる。なお、この調査は県農政部自然保護対策費によった。

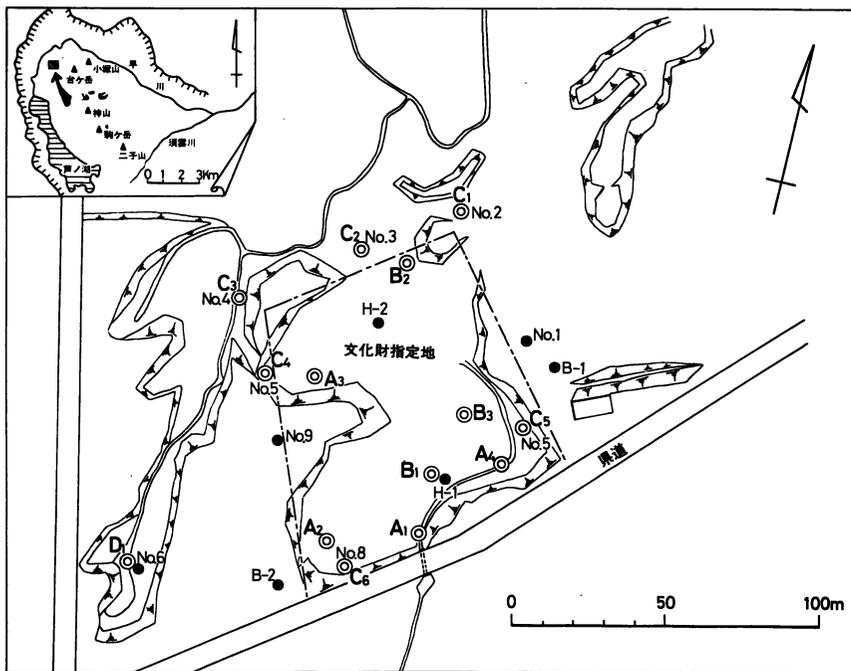


図1 地下水位観測孔および採水位置
(黒丸は地下水位観測孔、二重丸は採水位置)

地下水位の測定

文化財指定地周辺の地下水の供給源を探るために、地質調査用に掘られた深さ数 m のハンドオーガーによる9本の孔井は塩ビ管を埋込んで水位測定用に仕上げた(図1)。孔壁は直径75mmの塩ビ管で、地下に埋没された部分は3cm間隔に径3.5mmに穿孔したストレーナーである。

表1 孔内水位測定値 (昭和51年12月27日)

観測孔	パイプ天端高(m)	地盤高(A)(m)	水位標高(B)(m)	(A)-(B)(m)	観測孔	パイプ天端高(m)	地盤高(A)(m)	水位標高(B)(m)	(A)-(B)(m)
B-1	658.108	657.850	655.318	2.532	No.5	655.470	655.258	655.160	0.098
B-2	660.080	659.590	657.862	1.728	No.6	656.969	656.650	656.635	0.015
No.1	657.784	657.423	655.260	2.163	No.7	656.153	655.743	655.757	-0.014
No.2	654.985	654.937	654.267	0.670	No.8	657.720	657.435	657.277	0.158
No.3	655.438	654.855	654.710	0.145	No.9	658.380	658.135	656.790	1.345
No.4	655.005	654.732	654.671	0.061					

(箱根自然公園管理事務所測定)

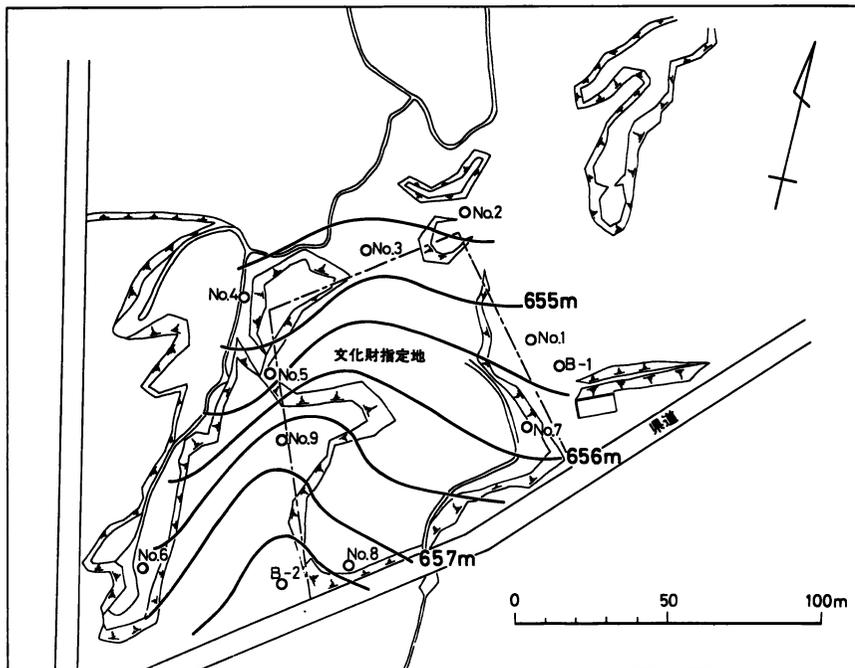


図2 地下水位等高線図 (昭和51年12月17日測定)

湿原の堆積物は粘土あるいはシルト質が多く水の透水性が良くないため、井戸完成後に水位はすぐに安定しなかった(小鷹ら1977)。したがって、地下水位の等高線をえがく資料として箱根自然公園管理事務所測定資料の内から孔内水凍結前の昭和51年12月27日のものを利用した。深さ20mのボーリング孔(B-1, B-2)の水位も資料の中に加えた(表1)。

図2は文化財指定地付近の水位等高線をしめす。これによると地下水は台ヶ岳方面から山麓に沿って流下してくることが明らかである。

そして、指定地の周縁ではローム中の地下水が湿原の低地に流出している。

湿原の水質

採水 文化財指定地内における湿原植物群落の調査は以前にも勝俣孝一(1975)により行なわれている(図3)。これにもとづき指定地内の採水位置をきめた。さらに指定地周辺の地下水も採水し、計14箇所を採水した(図1)。

A₁~₄の試料は湧水で、B₁~₃の試料は表流水である。C₁~₆の試料は水位観測孔内の泥水で、これをミリポアフィルターで濾過して分析した。D₁は文化財指定地西部のローム台地を越えた低地に流れる小川の水である。

分析方法 pHは現地における比色法と実験室におけるpHメーターの値をのせた。蒸発残留物は180°Cで秤量、K⁺(カリウムイオン)、Na⁺(ナトリウムイオン)、Mg²⁺(マグネシウムイオン)、Mn²⁺(マンガンイオン)は原子吸光光度法、Ca²⁺(カルシウムイオン)はEDTA滴定、Fe²⁺(鉄イオン)はオーフェナントロリン比色法、Cl⁻(塩素イオン)はチオシアン酸水銀比色法、SO₄²⁻(硫酸イオン)はトリウム-モリン比色法、 ΣHCO_3^- (総炭酸= $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)は塩酸滴定、NO₃⁻(硝酸イオン)はブルシン比色法、H₂PO₄⁻(リン酸イオン)はモリブデン酸-SnCl₂(塩化第一錫)比色法、 $\Sigma\text{H}_4\text{SiO}_4$ (総ケイ酸)はモリブデンブルーの比色法、COD(化学的酸素消費量)は硫酸酸性KMnO₄(過マンガン酸カリウム)-5分間直火による滴定法で求めた。

結果

分析結果は表2にしめす。昭和50年11月27日の測定では、水温は表流水(8.4~11.2°C)よりも湧水(11.3~15.0°C)の方がいくらか高い。pHは6~7で、尾瀬の湿原のpH4~5(堀1975)にくらべてやや高い。

仙石原湿原の地下水の水温とpH、Pco₂(炭酸ガス分圧)との関係を図4にしめす。すなわち湧水のpHはPco₂によって決まるのであるが、これが地上に出て表面を流れると冬季は水温が低下し、湧出後の時間の経過につれてPco₂が減少するのでpHが上昇する。pHは湿原内の水を表流水と地層水(湧水)に分ける目安となる。

仙石原湿原の地下水の総溶存量は87.2~239.7ppmで、中でも ΣHCO_3^- と $\Sigma\text{H}_4\text{SiO}_4$ の比率が高い。湿原の地下水の陽イオン比(モル百分率)はCa²⁺、Mg²⁺、K⁺+Na⁺がほとんど同じ比率である

表2 指定地周辺の地下水の水質

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *	C ₄ *	C ₅ *	C ₆ *	D ₁
区分	湧水	//	//	//	表流水	//	//	観測孔	//	//	//	//	//	小河川
採水日	50.11.27	//	//	//	//	//	//	51.9.20	//	//	//	//	//	//
水温(℃)	12.4	15.0	14.7	11.3	11.2	8.9	8.4							16.3
pH〔現地, 比色法〕	5.9		5.7	6.1	6.8	6.6	6.4						5.9	6.5
pH〔メーター〕	6.20	6.00	5.95	6.57	6.96	6.83	6.80	6.15	6.40	6.15	6.04	6.54	6.32	7.21
蒸発残留物(ppm)	71.4	144.	76.1	68.7	123.	99.0	86.9	79.1	83.1	58.9	65.2	86.9	114.	168.
K ⁺ (ppm)	0.85	1.52	0.60	0.71	1.75	1.52	1.30	0.75	0.60	0.15	0.52	0.15	1.30	1.45
Na ⁺ (//)	3.83	6.31	3.60	3.33	5.57	5.21	4.87	4.67	4.06	4.27	3.72	4.43	6.05	6.47
Ca ²⁺ (//)	8.73	18.8	8.57	7.71	14.9	11.3	10.5	9.55	8.35	6.13	5.10	11.4	18.0	18.2
Mg ²⁺ (//)	4.10	5.71	2.60	3.07	5.13	4.82	4.40	3.73	8.58	3.20	2.46	11.8	5.94	5.52
Fe ²⁺ (//)	0.23	0.07	0.20	1.22	0.37	0.92	0.64							
Mn ²⁺ (//)	0.05	<0.01	<0.01	0.15	0.05	0.11	0.02	<0.01	1.32	0.51	<0.01	0.87	<0.01	<0.01
Cl ⁻ (//)	2.20	6.40	2.20	2.12	6.24	5.24	4.68	1.60	2.08	1.80	2.20	2.32	4.60	6.52
SO ₄ ²⁻ (//)	4.40	34.1	8.20	3.90	28.0	23.8	20.7	5.65	<1.	<1.	<1.	<1.	20.3	48.8
ΣHCO ₃ ⁻ (//)	51.0	51.1	40.6	44.3	43.8	36.6	39.0	58.9	187.	47.2	41.4	105.	71.1	40.7
NO ₃ ⁻ (//)	0.71	0.64	0.13	0.30	0.19	0.30	0.51	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.44	0.96
H ₂ PO ₄ ⁻ (//)	0.003	<0.001	0.003	0.003	0.009	0.003	0.016	0.003	0.003	0.006	0.013	0.006	<0.001	0.025
ΣH ₄ SiO ₄ (//)	38.5	54.2	43.9	20.3	42.0	37.4	23.3	51.0	27.2	39.0	49.7	34.8	66.2	78.8
COD(//)	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	0.1	0.1	<0.05	<0.05	0.5	0.1	0.7	0.5	0.2	0.2
total	114.6	178.9	110.6	87.2	148.1	127.3	109.9	135.9	239.7	102.4	105.8	171.3	194.1	207.6
log Pco ₂ (atm)	-1.95	-1.85	-1.95	-2.31	-2.57	-2.61	-2.56	-1.84	-1.42	-1.94	-1.94	-1.71	-1.79	-2.78
I〔イオン強度〕	2.3× 10 ⁻³	4.9× 10 ⁻³	2.1× 10 ⁻³	2.0× 10 ⁻³	4.1× 10 ⁻³	3.4× 10 ⁻³	3.2× 10 ⁻³	2.5× 10 ⁻³	3.9× 10 ⁻³	1.7× 10 ⁻³	1.4× 10 ⁻³	4.2× 10 ⁻³	4.5× 10 ⁻³	5.4× 10 ⁻³

* ミリポアフィルターでろ過後分析

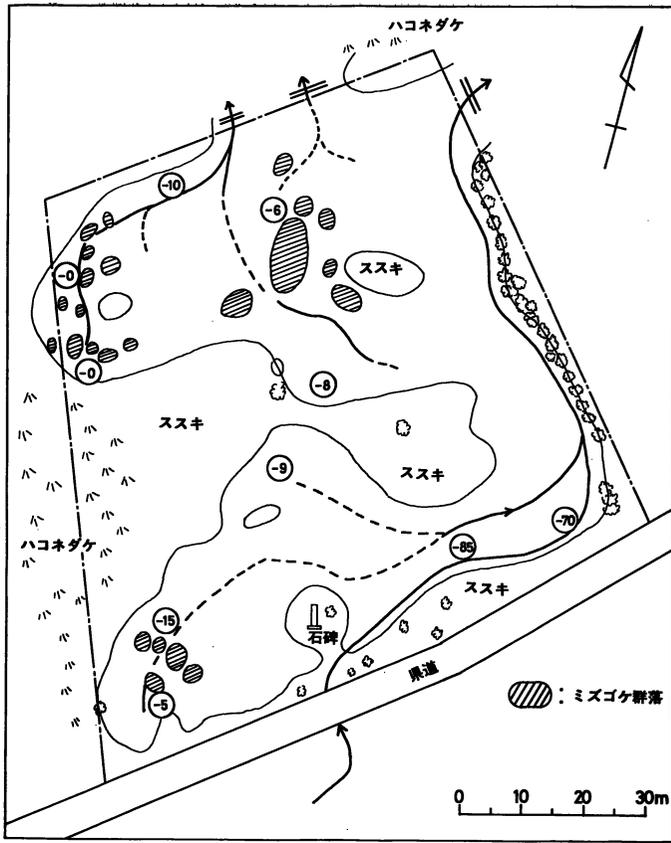


図3 仙石原湿原植物群落, 水位の調査 勝俣孝一 (1975)
昭和50年8月10日 水位 (数字は地表下のcm数)

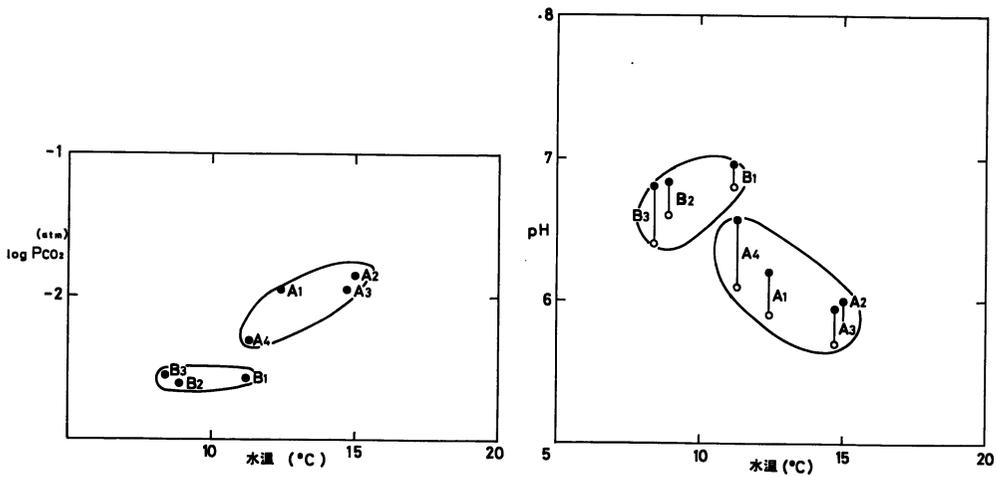


図4 水温とpH, PCO₂との関係
A1~4 湧水, B1~3 表流水

(図5)。C₂、C₅の試料はMg²⁺に富み、これらは ΣHCO_3^- が多く(187, 105ppm)、Mn²⁺も多い(1.32, 0.87ppm)。陰イオン比(モル百分率)では ΣHCO_3^- の比率がほとんど50%以上を占める(図6)。湿原内の地下水は表層地質の黒色腐植土から炭酸物質が供給されるので ΣHCO_3^- が多く含まれる。D₁は指定地西部のローム台地(第1層)を刻む小川の水であり、ローム層のSO₄²⁻に富む水質を反映している。しかし、湿原ではその表層の土壤中にとりこまれている有機物質にSO₄²⁻を含む水が浸みこみ、土壌細菌のはたらきを受け、SO₄²⁻はS²⁻に還元され、それに見合う ΣHCO_3^- を発生させるのである。

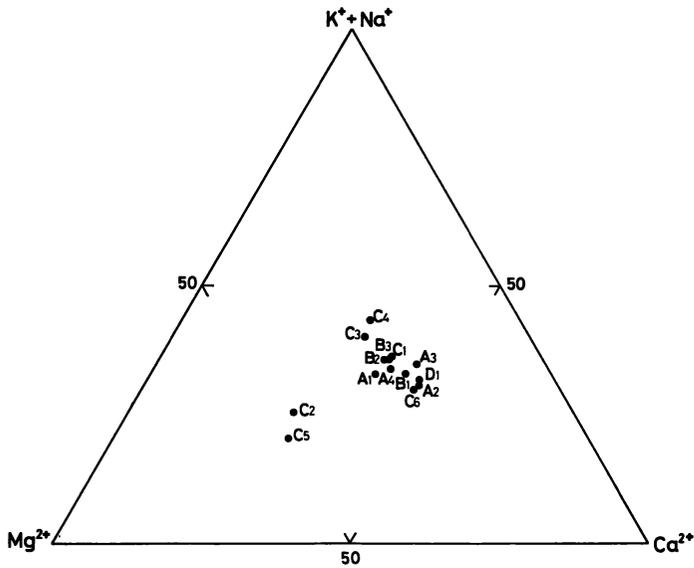


図5 地下水の陽イオン比
(モル百分率)

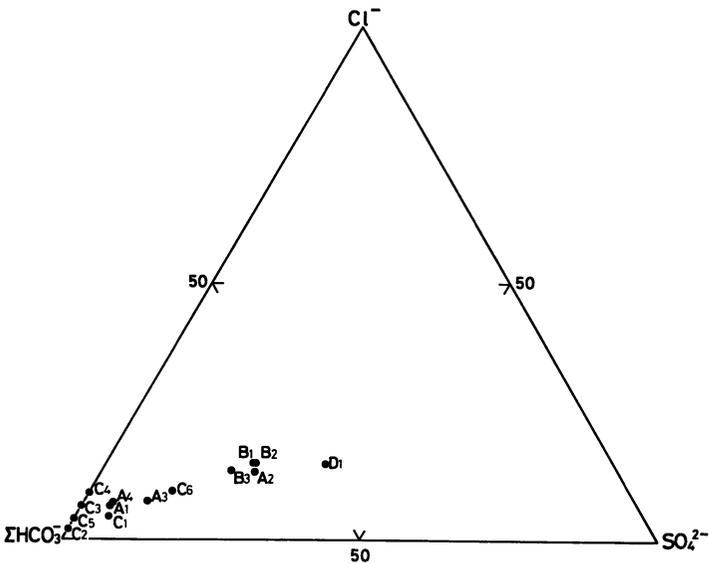


図6 地下水の陰イオン比
(モル百分率)

pHと炭酸ガス分圧 (Pco₂)

湿原の地下水のpHはPco₂によって定められている。地下水のPco₂は炭酸物質の溶存量とpHによって次のように求められる。

(i) pH<5.5のとき、すなわち [H₂CO₃] が卓越のとき。

$$\log P_{CO_2} = \log [H_2CO_3] + pK_p$$

$$[H_2CO_3] = mH_2CO_3 \cdot \gamma H_2CO_3 \quad (\gamma H_2CO_3 \cong 1)$$

ここに [] は活量, mはモル濃度, γ は活量係数, K_p は炭酸ガスの水に対する溶解度定数をしめす。

(ii) 7.5<pH<9.2のとき、すなわち [HCO₃⁻] が卓越のとき。

$$\log P_{CO_2} = -pH + \log [HCO_3^-] + pK_1 + pK_p$$

$$[HCO_3^-] = mHCO_3^- \cdot \gamma HCO_3^-$$

$$\gamma HCO_3^- = 0.93 \sim 0.96 \quad (\text{イオン強度より求める})$$

(iii) pH>11.5のとき、すなわち [CO₃²⁻] が卓越のとき。

$$\log P_{CO_2} = -2pH + \log [CO_3^{2-}] + pK_1 + pK_2 + pK_p$$

ここにK₁, K₂は炭酸の解離定数である。

pK₁, pK₂, pK_pの定数は温度により変化する。HELGESON (1969) によれば表3にしめす通りである。

湿原の地下水はpH6~7で(i)と(ii)の中間にあり、そのPco₂は総炭酸(ΣHCO₃⁻)をmH₂CO₃とmHCO₃⁻にわりふって計算し、(i)および(ii)の大きい値を採用した。

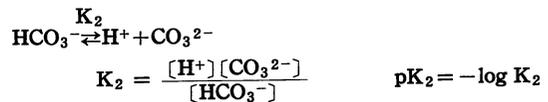
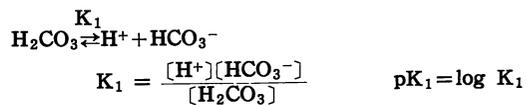
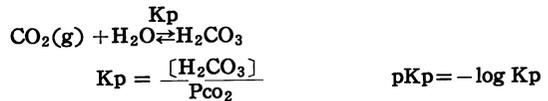
pHとPco₂との関係を図7にしめす。これらの曲線はΣHCO₃⁻=0.5~1.0×10⁻³ mol/ℓ, 全圧1 atm, 0~20℃の平衡曲線である。湿原の地下水をプロットすると図7の曲線によくのっており、平衡状態にあることがわかる。

C₂, C₅の試料はlog Pco₂が高く(-1.42, -1.71 atm), Mn²⁺やFe²⁺も多い。Fe²⁺については試料が泥水でありミリポアフィルターで濾過したため測定できなかったが、濾過後の残渣に水酸化鉄の赤褐色の沈でんが著しく認められた事実から判定できる。

表 3 炭酸の平衡定数

	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃	50℃
pK _p	1.14	1.27	1.40	1.50	1.60	1.70
pK ₁	6.43	6.40	6.35	6.33	6.32	6.32
pK ₂	10.50	10.42	10.35	10.29	10.23	10.20

(HELGESON 1969)



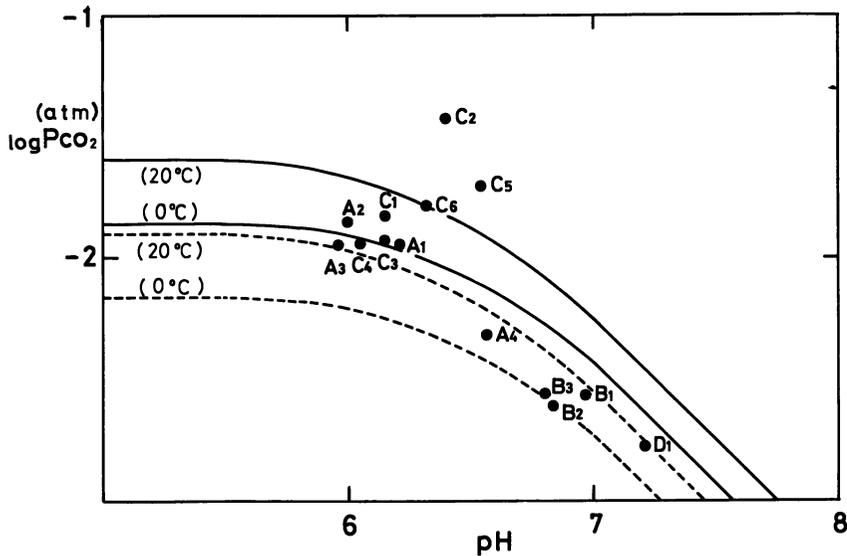


図7 pHとPco₂との関係

全圧 1atm, 実線は $\Sigma\text{HCO}_3^- = 1 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$, 点線は $\Sigma\text{HCO}_3^- = 5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ における平衡曲線

植物の育生に関与する成分

植物の育生にはN(窒素), P(リン), K(カリウム) またはSi(ケイ素) が問題とされる。湿原の地下水に含まれているこれらの成分は表4のとおりである。

試料D₁では, Nは0.22ppmと多い。これが人為的な汚染か, ローム層に由来するものかは今後の検討を要するところである。

Pの溶存量はすべて0.01ppm以下である。CODは溶存している有機物質の目安である。観測孔内の泥水はCODがわずかにあるが, 湧水や表流水は非常に少ない。

湖沼学では富栄養と貧栄養の境界をN0.2ppm, P0.02ppmで分類している(吉村1942)。湿原の地下水はD₁がいくらか窒素が多いが, ほとんど貧栄養に属している。

表4 植物の育生に関与する成分

(ppm)

	N	P	K	Si	COD		N	P	K	Si	COD
A ₁	0.16	0.001	0.85	11.2	<0.05	C ₁	<0.01	0.001	0.75	14.9	<0.05
A ₂	0.14	<0.001	1.52	15.8	<0.05	C ₂	<0.01	0.001	0.60	7.95	0.5
A ₃	0.03	0.001	0.60	12.8	<0.05	C ₃	<0.01	0.002	0.15	11.4	0.1
A ₄	0.07	0.001	0.71	5.93	0.1	C ₄	<0.01	0.004	0.52	14.5	0.7
B ₁	0.04	0.003	1.75	12.3	0.1	C ₅	<0.01	0.002	0.15	10.2	0.5
B ₂	0.07	0.001	1.52	10.9	0.1	C ₆	0.10	<0.001	1.30	19.3	0.2
B ₃	0.12	0.005	1.30	6.81	<0.05	D ₁	0.22	0.008	1.45	23.0	0.2

まとめ

仙石原湿原の水質は ΣHCO_3^- に富み、 SO_4^{2-} がほとんどないものと、 ΣHCO_3^- と SO_4^{2-} が比較的多く含まれているものの二種類に分類できる。 SO_4^{2-} の多いものはローム層などの火山堆積物に起因するものであろう。試料D₁はこの例である。湿原内の水は、その水の存在状況によって、 Pco_2 の変化からpHに影響を受けている。湿原内の黒色腐植土中の水は、土壌細菌などの作用により SO_4^{2-} がほとんどなくなり炭酸物質が増加し、 Pco_2 の増加にともないpHが低下する。試料A₃、C₂などはこの水である。湿原内でも表流水となって流れている水は、表面に出てからの時間の経過にともない Pco_2 が減少するのでpHが上昇する。試料B₁などはこの例である。

湿原における地下水のモデルを図8にしめす。降雨が台ヶ岳の斜面を表流して湿原に流入するものと台ヶ岳の斜面に浸透して湿原において湧出するものが混合してさらに早川へ流下していると推定される。

湿原の地下水の栄養塩類はごく少なく、ほとんど貧栄養に分類される。

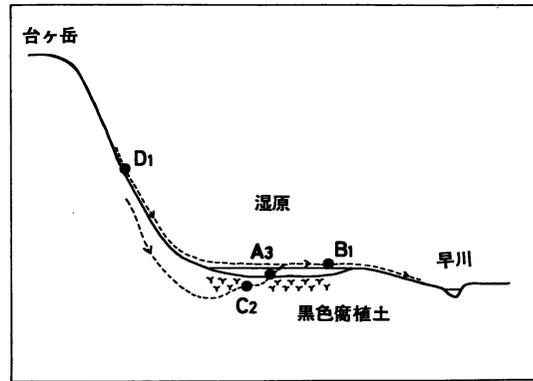


図 8 指定地周辺の地下水モデル

参考文献

- 袴田和夫 (1976), 仙石原のおいたち, 箱根の文化財, 第11号, 2—9, 箱根町教育委員会.
- 箱根町教育委員会 (1976), 仙石原湿原発掘調査報告特集号, 箱根町文化財研究紀要, 第7号, 1—44.
- HELGESON H. C. (1969), Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures, American J. Sci., Vol. 267, 729—804.
- 堀 正一 (1975), 尾瀬の湿原をさぐる, 1—213, 築地書館.
- 勝俣孝一 (1975), 仙石原湿原植物群落, 水位の調査, 箱根町教育委員会.
- 小鷹滋郎, 荻野喜作 (1977), 仙石原湿原環境調査報告書—地質調査の部—, 神奈川温研報告, Vol. 8, No. 3, 95—104.
- 吉村信吉 (1942), 湖沼学, 三省堂.