



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	有珠山2000年噴火によって形成された池沼の水収支・化学成分収支
Author(s)	知北, 和久; CHIKITA, A, Kazuhisa; 西村, 裕一 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 269-283
Issue Date	2004-03-15
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.67.269">https://doi.org/10.14943/gbhu.67.269</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14349">https://hdl.handle.net/2115/14349</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p269-283.pdf



## 有珠山 2000 年噴火によって形成された池沼の水収支・化学成分収支

知北 和久

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

西村 裕一

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

福山 龍次・野口 泉

北海道環境科学研究センター

(2003 年 12 月 22 日受理)

## Hydrological and Chemical Budgets in Ponds Produced by the 2000 Eruption of Usu Volcano

Kazuhisa A. CHIKITA

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Yuichi NISHIMURA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Ryuji FUKUYAMA and Izumi NOGUCHI

Hokkaido Institute of Environmental Sciences

(Received December 22, 2003)

Hydrological and chemical budgets of two closed ponds, produced by the 2000 eruption of Usu Volcano, Hokkaido, are estimated by monitoring water level, water temperature, electric conductivity and meteorology, and by analyzing the chemistry of pond water. The two ponds, Izumi Pond and N-19 Crater Pond, were produced by the diastrophism by the upwelling of magma and in a sequence of eruptive activities, respectively. The chemistry of pond water is different from that of Toya-ko hot spring before the eruption, showing the peculiarity of a hydrothermal system for the 2000 eruption. The hydrological and chemical budgets in Izumi Pond estimated the groundwater output at  $0.00485 \text{ m}^3/\text{s}$  for a high-water period of 11 to 21 October 2002, and at  $0.00328 \text{ m}^3/\text{s}$  for a ice-covered, low-water period of 22 to 24 December, 2002, while the two budgets in N-19 Crater Pond gave the groundwater output of  $0.000101 \text{ m}^3/\text{s}$ . These values are larger by one order of magnitude than the evaporation and groundwater input. The hydrological adjustment of the two ponds for rainfalls is thus performed by the groundwater output.

## I. はじめに

2000年3月31日に23年ぶりに噴火を開始した北海道・有珠山は、噴火活動と共にマグマ貫入に伴う地殻変動を引き起こした。特に国道230号線が走る西山北西麓の火口群周辺では、最大65mもの隆起によって噴火以前より比高の高い分水界がほぼ同じ位置に形成され(廣瀬・田近, 2000), 結果として流域内の湧水・雨水を集めた閉塞型の「泉池」ができあがった(Fig. 1参照)。本論文の目的は、泉池と新火口池の水収支と化学成分収支から、(1)両池に対する地下水涵養量および地下水流出量を定量的に求めること、また、(2)2000年噴火に関する地下熱水系と両池との地球化学的関連を定量的にさぐることである。

火山体地下水流動の研究は、これまで、主に富士山や利尻岳など現在活動が活発でないか停止している火山を中心に行われてきた(たとえば、山口, 1975)。最近では、北海道の有珠山やアトサヌプリ(硫黄山)、および長崎県・雲仙普賢岳のような活火山体における地下熱水系の研究が、地球物理学的・地球化学的手法により盛んに行われてきている(たとえば、有珠山に関して、大島・松島, 1999, 秋田ほか, 2001; アトサヌプリに関して、佐藤, 2000; 雲仙普賢岳に関して、大沢ほか, 2002, 安原ほか, 2002)。

ここでは、有珠山における熱水流動系研究の一環として、有珠山2000年噴火によって形成された泉池と新火口のN-19にできた池(以後、“N-19火口池”と呼ぶ)における水収支と化学成分収支を、2002年における池沼の水質・水位と周辺の気象に関する長期観測から評価することとする。

## II. 流域と池の底面形状の特徴および観測方法

Fig. 1に、泉池の流域と新火口の位置を示す。泉池の湛水域を含む流域面積は $1.475 \times 10^6 \text{m}^2$ で、流域の西山北西麓にはN-B火口、N-C火口、および今回対象のN-19火口を含む。2002年10月3日14時~17時の無降雨時に、泉池の汀線・水深の測量を実施した。Fig. 2に、測量の結果得られた等深線図と観測点の位置を示す。結果として、池の中央部と南部に水深の極大がある底面形状を示し、最大水深は中央部で4.72mであった。このときの湛水面積は、 $1.86 \times 10^4 \text{m}^2$ である。2000年12月結氷期には、北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターを中心に泉池で発破による人工地震探査を実施しており、この最大水深点が発破の中心であった可能性がある。なお、A地点において、2002年5月15日~2003年2月26日の期間に泉池の水位・電導度・水温のモニタリングを実施した。なお、水位は圧力式水位計(米国Global Water社製WL14型: 測定精度 $\pm 1.2 \text{cm}$ )により1時間間隔で、電導度・水温は自記式電導度計(アレック電子KK製MDS-CT型: 測定精度, 電導度 $\pm 10 \text{mS/m}$ , 水温 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )により20分間隔で連続測定した。また、池の蒸発量と直接降雨量を評価するため、B地点で気温・湿度・雨量、C地点で風速・風向を連続観測した。なお、風速計は旧消防署建物屋上(10月3日付けで泉池水面から11.54m高)に取り付けた。

N-19火口池での長期観測は、2002年4月25日~10月3日に実施した。なお、池の等深線図を

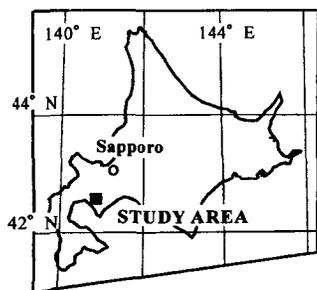
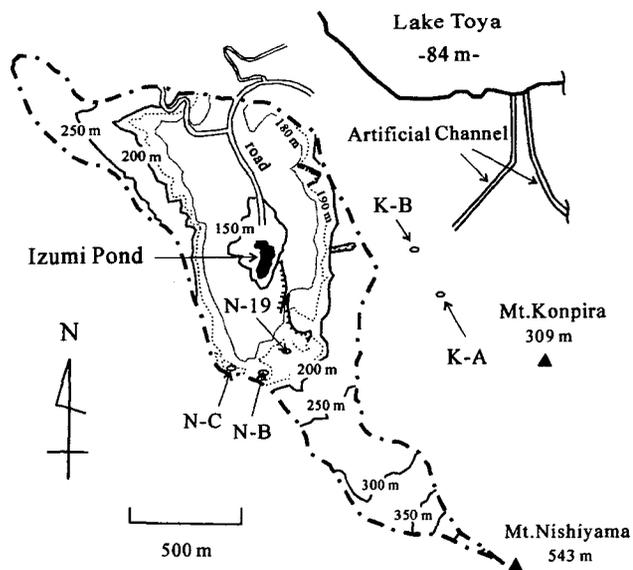


Fig. 1. Locations of the study area in Hokkaido, and Izumi Pond and N-19 Crater Pond in the drainage basin of Izumi Pond. The water divide is shown by a thick, dotted-dashed line. Locations of new craters, K-A, K-B, N-B and N-C, produced by the 2000 eruption of Usu Volcano, are also shown. The “artificial channels”, connected to Lake Toya, are channels for mudflows constructed after the 1977 eruption of Usu Volcano.

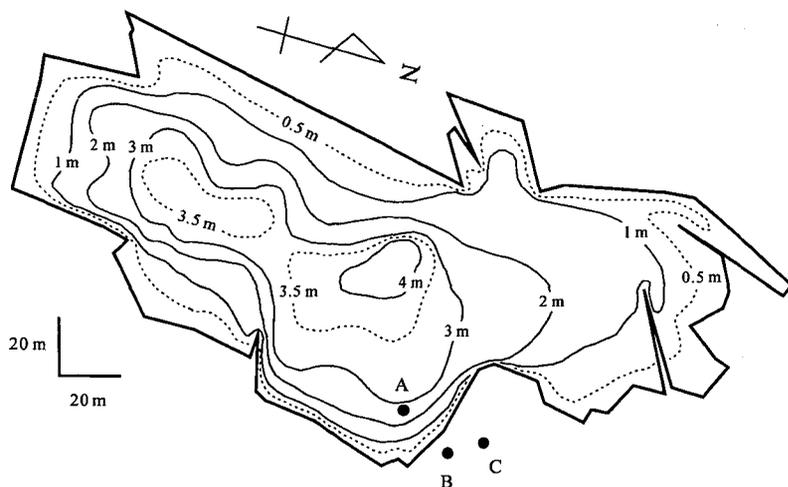
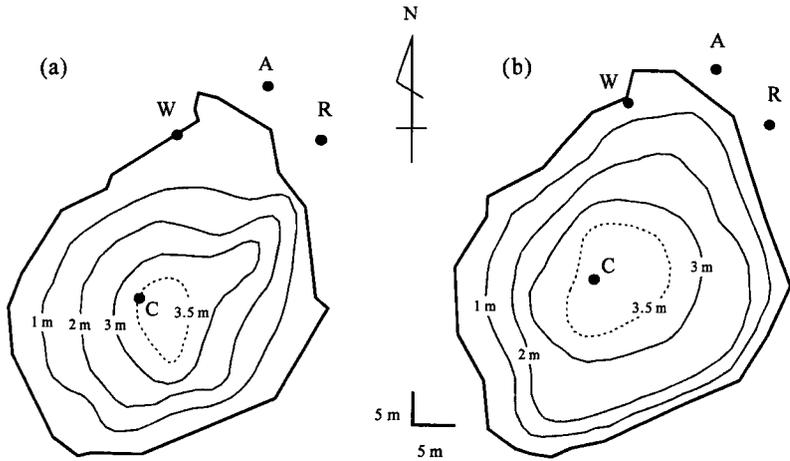


Fig. 2. Bathymetry of Izumi Pond, obtained on 3 October 2002, and location of observation sites, A (water level, electric conductivity and water temperature), B (rainfall, air temperature and relative humidity) and C (wind velocity).



**Fig. 3.** Bathymetry of N-19 Crater Pond, obtained on (a) 26 April 2002 and (b) 3 October 2002, and location of observation sites, W (water level), C (electric conductivity and water temperature), R (rainfall) and A (wind velocity, air temperature and relative humidity).

求めるため、ゴムボートを用いて2002年4月26日13:30~15:00と10月3日10:05~11:30の無降雨時に現地測量を実施した。Fig. 3に、この測量で得たN-19火口池の等深線図と観測地点を示す。池底形状はいわゆる「お椀型」で、10月3日の水位は4月26日より0.687m高いため汀線拡大が見てとれる。なお、湛水面積は4月26日で $1.38 \times 10^3 \text{m}^2$ 、10月3日で $1.61 \times 10^3 \text{m}^2$ である。また、底面形状の違いから、この間の降雨による土砂流入により、特に池底の中心や北東部で埋積作用が起こっていることがわかる。泉池と同様の測器を用いて、W地点で池の水位、A地点で気温・湿度・風速、R地点で雨量、C地点の池底上0.4mで池の電導度・水温を連続測定した。風速計の位置は、4月26日で水面から2.723m高、10月3日で1.936m高である。Fig. 4は、4月26日における現地の様子を示す。Fig. 3との比較から、池の東岸に侵食ガリが発達しており、降雨時には地表流による土砂侵食がさかんで、これによる土砂供給が池の堆積を促進させていることが判断される。なお、N-19火口池流域とその周辺は、筆者らのX線分析・粒度分析によるとモンモリロナイトやカオリナイトなどの粘土鉱物を含む粘着性の高い微細な難透水性の堆積物から成る。これが地表流による侵食ガリを発達させる要因である。

なお、気温・湿度については現地でのアスマン通風乾湿計による測定値から回帰曲線を作成し、両池の連続データを補正した。また自記式電導度計については、温度については基準温度計、電導度についてはTOA社製電導度計を用いて検定曲線を作り、得られた連続値を補正した。また、観測期間中、随時汀線付近で池水を採取し、イオンクロマトグラフィを用いて試水の溶存化学成分( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ 濃度)を調べた。 $\text{HCO}_3^-$ 濃度については、 $\text{pH} = 4.8$ 溶液のアルカリ度を測定し、 $\text{CaCO}_3$ 量に変換して求めた。

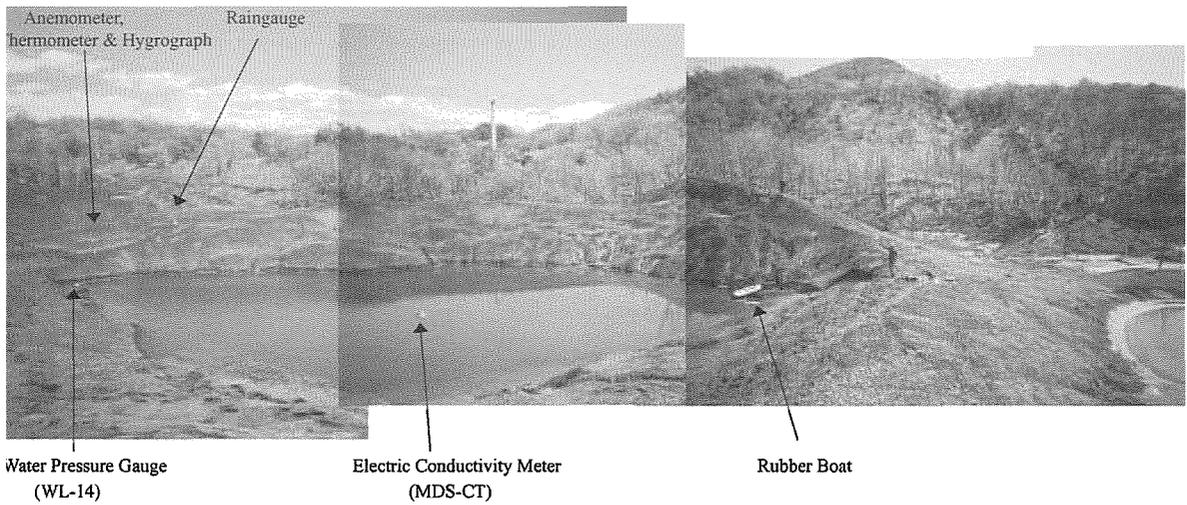


Fig. 4. Photograph of N-19 Crater Pond and its surrounding. Location of observation sites, W, C, R and A is shown. An electric conductivity meter, MDS-CT is fixed by mooring a sandbag-buoy system at midpoint (site C) with a rubber boat.

### III. 結果と討論

#### 1. 水位・水質変動と気象条件

Fig. 5 は、泉池と N-19 火口池における水位と時間雨量の変化を示す。泉池は 2002 年 5 月 15 日～10 月 31 日、N-19 火口池は 4 月 26 日～10 月 3 日の期間の記録である。泉池では、6 月 11 日～7 月 11 日の期間に水位低下によって水位計センサーが大気中に露出したため、この期間の水位は欠測である。2002 年 7 月～8 月は台風の襲来でまとまった雨が降り(泉池で 7 月 6 日 16:00～7 月

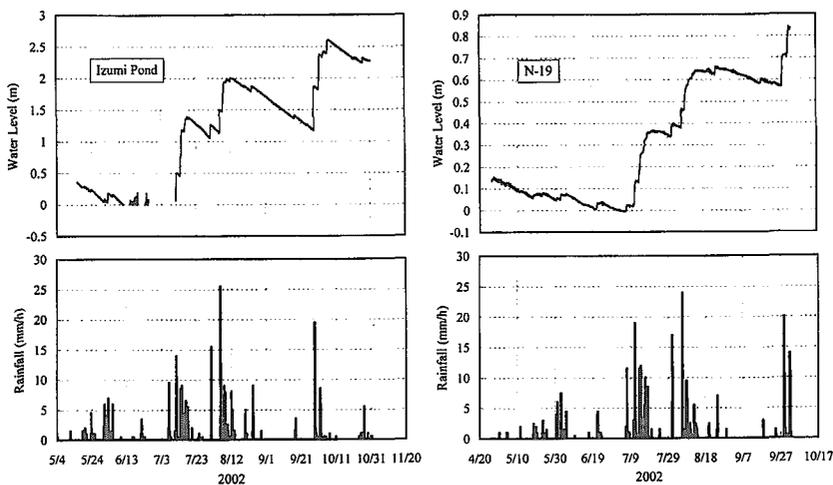


Fig. 5. Temporal variations of water level and rainfalls at Izumi Pond and N-19 Crater Pond in 2002.

20日12:00で192 mm, 7月31日06:00~8月13日18:00で207.5 mm), 結果として泉池で2 m以上, N-19 火口池で約0.65 mの水位上昇がみられた。降雨の有無に対する水位の応答は両池で異なり, 泉池では増減が急激で変化が直線的であるのに対し, N-19 火口池は応答が緩慢である。泉池で無降雨時に水位低下が急激であることは, N-19 火口池に比べ地下水流出の寄与が大きいことを示唆する。他方, N-19 火口池の水位低下が緩慢であることは, 水収支における地下水流出の寄与が小さいと判断される。同池の底部は, 周囲からの土砂供給により周辺と同じ粘着性の

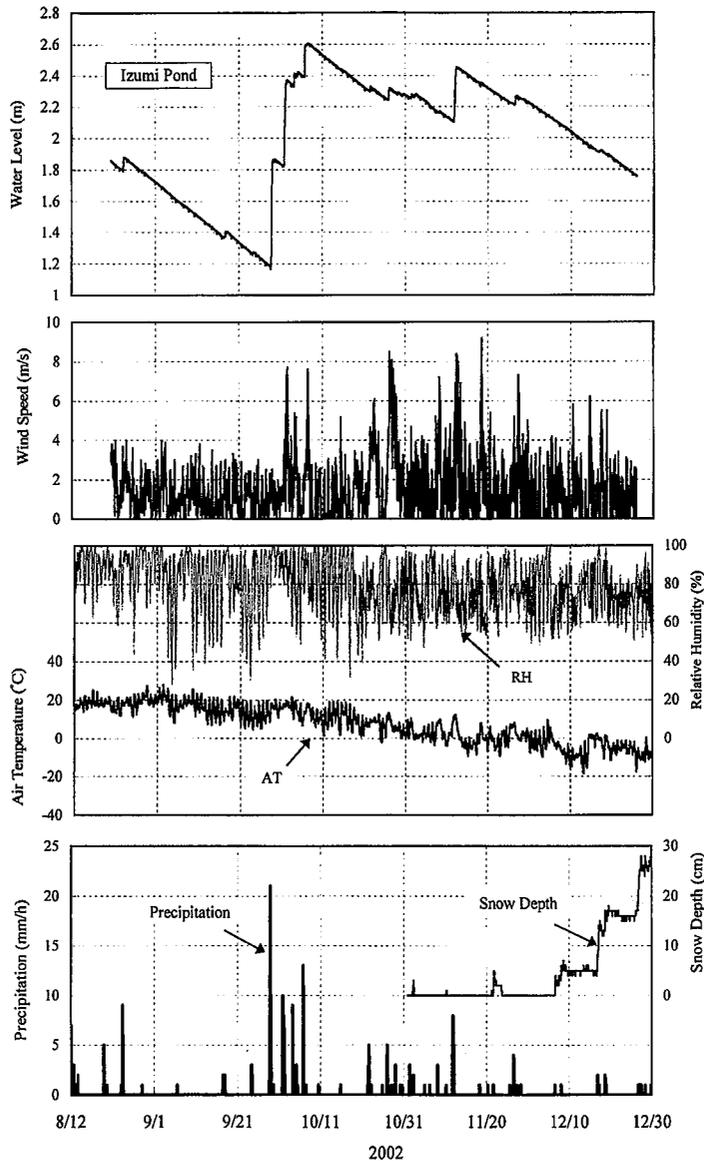


Fig. 6. Temporal variations of water level and meteorology at Izumi Pond in August to December 2002. Rainfall and snow depth were recorded at the AMeDAS station near the shore of Lake Toya. AT: air temperature, RH: relative humidity.

高い粘土鉱物を含む難透水性の堆積物からなるため、水収支における地下水流出寄与も小さいことが予想される。

Fig. 6 は、2002 年 8 月 12 日～12 月 29 日における泉池の A 地点での水位、C 地点での風速、B 地点での気温・湿度、および洞爺湖畔アメダス地点における降水量と積雪深を示す。前述のように、池の水位変化は降雨の有無に敏感に反応し、この期間では 9 月 28 日 15:00～29 日 2:00 の降雨（総雨量 81 mm）に対し水位は約 1.4 m 上昇した。また、降雨後の水位低下率は、ほぼ一定で推移した。なお、12 月 6 日 15 時からの降雪が根雪となり、12 月 21 日には A 地点で結氷が始まった。この結氷開始は、A 地点で設置水深が異なる 2 台の自記式電導度計 MDS-CT 型（製造番

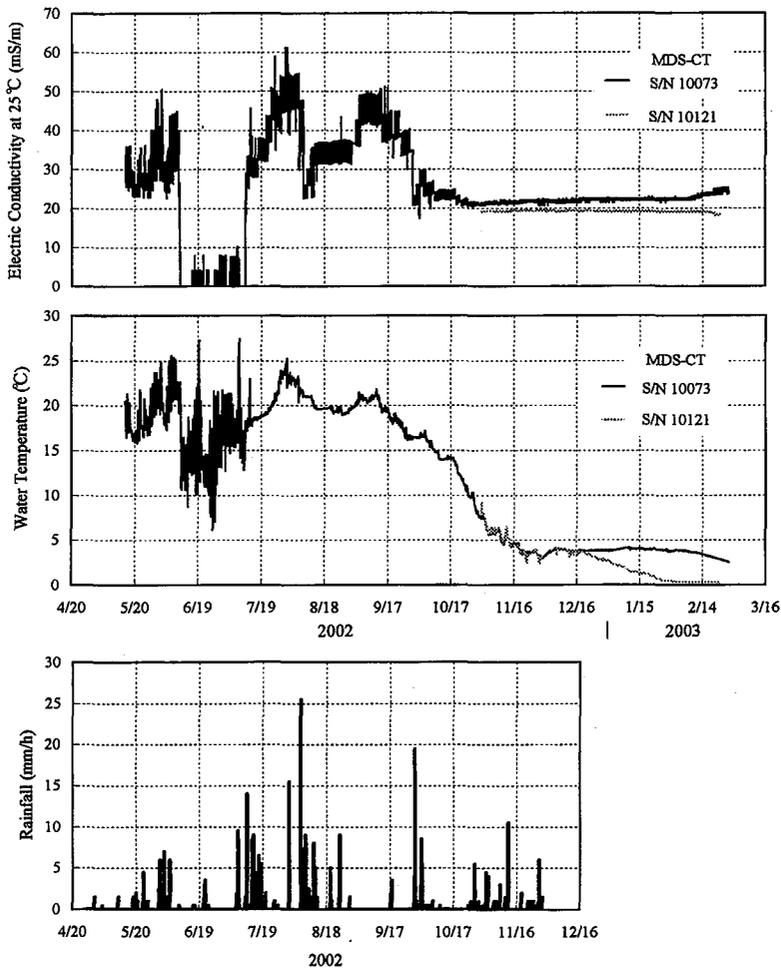


Fig. 7. Temporal variations of hourly rainfalls, and electric conductivity at 25 °C (EC25) and water temperature at Izumi Pond in May 2002 to February 2003, obtained by a self-recording electric conductivity meter (MDS-CT of serial no. 10073). The other conductivity meter (MDS-CT of serial no. 10121) started to measure EC25 and water temperature on 31 October at a depth of ca. 0.2 m. The rainfalls occurred until a snowfall started on 6 December 2002.

号 10073 と 10121) の記録から判断される (Fig. 7). この 2 台の水深差は約 40 cm で, 12 月 21 日前までは 2 点の水温はほぼ同値であった. このことから, 12 月 21 日以前は風と冷却による池水の混合がさかんであることがわかる. つまり, 12 月 21 日まで水面は開水状態であった. しかし, 同日以後水温差がみとめられるようになり, 水温成層化が進んでいる. これは, 水面結氷により風による混合が抑制されてきたことを示す. また, EC 25 (25°C における電導度) も若干ではあるが, より深い位置にある No. 10073 で 12 月 21 日頃から増加している. さらに浅い位置の No. 10121 は, 2003 年 1 月 31 日 1 : 00 から温度はほぼ 0°C の一定値となり, この時点で下方への氷の成長前線がこの計器の温度センサーに達していたことがわかる. なお, 2003 年 2 月 27 日のデータ回収時, No. 10121 は計器全体が透明氷に封じられた状態で発見された. このときの泉池 A 地点での

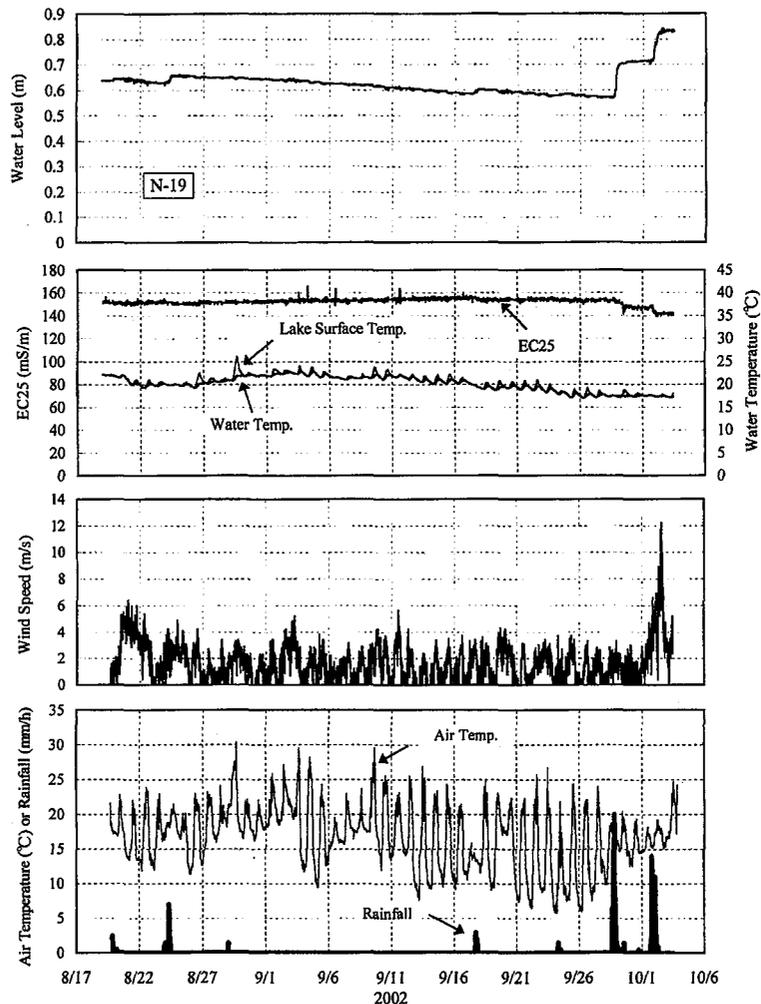


Fig. 8. Temporal variations of water level, electric conductivity at 25 °C (EC25), water temperature at two water depths, and meteorology at N-19 Crater Pond in August to October 2002.

氷厚は 0.43 m, 氷上積雪は 0.505 m であった。なお, Fig. 7 から, 泉池の電導度は降雨中と降雨後で急激に変化し, 降雨開始により池水の希釈が始まるが, 降雨のピークが過ぎると降雨中でも電導度が上昇することがわかる。この上昇傾向は無降雨時に顕著であるが, 結氷期にはほとんどみられない。また, 9 月 1 日~16 日の期間のように未降雨状態が続くと, 降雨後に電導度は一旦上昇するが, 9 月 6 日頃から電導度が減少する傾向がある。このことは, 初期段階では降雨浸透からの側方浸透流によって池周辺の高濃度地下水が押し出されるが, 後に雨水との混合水の流入によって相対的に濃度の低い地下水が流入することを意味する。なお, 降雨による希釈は, 泉池の東方 68 km において, 2002 年に北海道環境科学研究センターによって得た降水の EC 25 が 1.6~2.6 mS/m で泉池の 1/8 以下であることから判断される。

Fig. 8 は, N-19 火口池における 2002 年 8 月 19 日~10 月 3 日の水位・電導度・水温と気象の変化を示す。電導度 EC 25 は同期間での泉池の 3~4.7 倍の大きさだが, 9 月 28 日 14:00~9 月 29 日 2:00 の間に 74.5 mm の大きな降雨があった場合でも低下はわずかである。また, 無降雨時(例えば, 9 月 1 日~16 日の期間)の場合は水位の下降と共にわずかに増大傾向にある。このように降雨時も電導度が比較的安定しているのは, 池水自身が雨水に比べ高濃度・高密度なため雨水と混合しにくいこと, 無降雨時に電導度が上昇傾向なのは, N-19 火口池底での高濃度地下水の流入が考えられる。なお, Fig. 8 の期間での電導度の測定水深は 3.35~3.60 m である。9 月 11 日~16 日の期間にみられるように, 無降雨期間の風速と気温は日変化し, 日中は海風が卓越する。水位は, 9 月 28 日 15:00~29 日 14:00 の総雨量 78 mm と 10 月 1 日 16:00~2 日 7:00 の総雨量 64 mm の降雨に速やかに反応し, それぞれ約 11 cm, 約 12 cm 上昇した。湛水面積(10 月 3 日で  $1.61 \times 10^3 \text{m}^2$ )と池周囲の流域面積(約  $0.9 \times 10^3 \text{m}^2$ )を考慮すると, 全流域には 9 月 28 日 15:00~29 日 14:00 の 78 mm 降雨で計  $195 \text{m}^3$  の雨水がもたらされ, これを湛水面積で除すると水位は 12 cm 上昇に相当する。同様に, 10 月 1 日 16:00~2 日 7:00 の 64 mm 降雨に対しては 10 cm の水位上昇に相当する。これは, 実際の上昇値とほぼ等しい。このことから, 池周囲の流域内に降った雨水は土壌で浸透・保水されることなく, ほとんど Horton 型地表流の形で同池に流入すると判断される。このことは, N-19 池の流域全体が粘着性の粘土鉱物を含む難透水性堆積物から成ることと調和的である。

## 2. 池水の化学的特性

今回採取した池水についての化学分析結果を Table 1 に, また, 主要な化学成分である  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  のヘキサ・ダイアグラムを Fig. 9 に示す。両池とも洞爺湖温泉に比べイオン濃度は極めて低く(秋田ほか, 2001), 同時期での総イオン濃度を比較すると, 泉池は N-19 火口池の 1/7 程度である。また, pH は 6.66~7.60 の範囲で, 中性または弱アルカリである。Table 1 と Fig. 9 を比較すると, 両池は類似の化学組成をもち, 陽イオンで  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , 陰イオンで  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度が高い。これは, 泉池の水質が周辺の熱水系の影響を受けていることを示唆する。また, 泉池では周囲からの地下水流入を反映して, 土壌起源と思われる  $\text{HCO}_3^-$  の比率が高

い。2000年噴火前の洞爺湖温泉の化学組成（炭酸塩泉や塩化物硫酸塩泉）（秋田ほか，2001）と比べると，N-19火口池の化学的特徴は $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{SO}_4^{2-}$ の組成比が高いことで，これは今回の噴火に伴う熱水系に特徴的な化学組成と判断される。

Table 1でのN-19火口池における10月3日の分析結果について，採水時刻がほぼ同じであるにもかかわらず，汀線付近での濃度が沼中心表層水のものより全イオンで高い値を示している。これは，前述のように底面堆積物を通して高イオン濃度水の流入があることを示唆している。

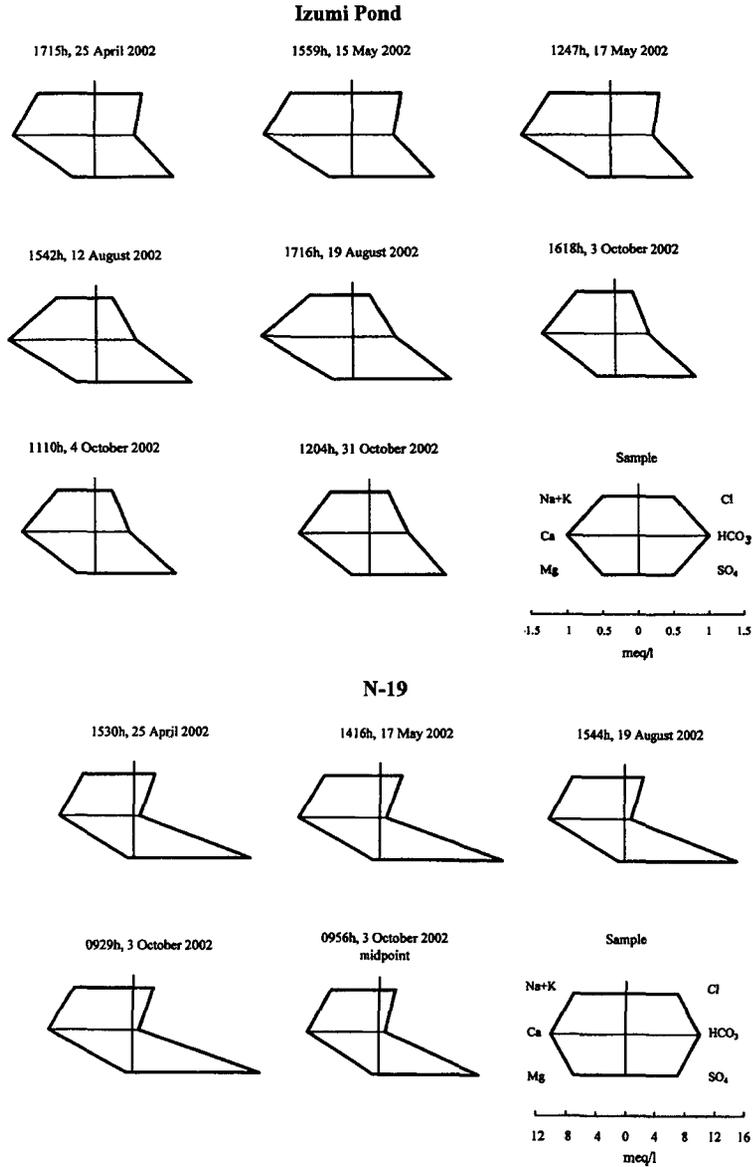


Fig. 9. Hexa-diagrams of the primary cations and anions for Izumi Pond and N-19 Crater Pond in 2002.

**Table 1.** Electric conductivity at 25°C(EC25), pH and chemical composition of water sampled at Izumi Pond and N-19 Crater Pond.

Site	Date & Time	EC25		Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		(mS/m)	pH	(mg/l)								
Izumi Pond	2002/4/25 17:15	23.60	7.60	14.9	20.3	3.31	2.45	0.20	20.5	46.3	30.0	0.89
	2002/5/15 15:59	24.70	7.37	15.9	21.8	3.42	2.75	0.21	21.6	48.1	31.7	1.48
	2002/5/17 12:47	24.90	7.31	15.9	22.0	3.43	2.75	0.21	21.7	48.5	32.6	0.53
	2002/8/12 15:42	21.70	6.66	9.92	21.8	2.99	2.64	0.13	7.21	56.1	29.8	1.19
	2002/8/19 17:16	22.40	6.87	10.5	22.6	3.09	2.82	0.13	7.69	57.5	32.3	0.67
	2002/10/2 16:12	20.30	6.92	9.81	19.4	2.80	2.80	0.12	7.82	51.8	26.3	0.46
	2002/10/3 16:18	19.41	7.01	9.54	18.1	2.76	2.50	0.12	7.57	47.8	25.6	0.43
	2002/10/4 11:10	19.33	7.01	9.51	18.2	2.78	2.56	0.12	7.46	47.4	25.5	0.55
	2002/10/31 12:04	18.46	7.15	9.38	16.9	2.68	2.49	0.00	8.03	43.2	28.0	0.02
	<i>Mean</i>	21.64	7.10	11.71	20.14	3.03	2.64	0.14	12.17	49.63	29.09	0.69
<i>Standard Deviation</i>	2.41	0.29	2.93	2.06	0.30	0.14	0.07	6.82	4.65	2.85	0.44	
N-19	2002/4/25 15:30	157.3	6.74	137	178	9.35	6.02	2.10	89.2	678	46.4	0.05
	2002/5/17 14:16	163.3	7.02	152	196	9.71	6.34	2.19	92.3	702	48.4	0.56
	2002/8/19 15:44	152.1	7.27	142	183	8.94	6.88	2.08	80.0	659	48.2	0.11
	2002/8/19 16:42	151.1	7.44	126	166	7.96	5.59	1.82	71.2	591	48.1	0.07
	(midpoint) 2002/10/3 9:56	146.1	7.53	131	172	8.32	5.93	1.90	69.3	569	47.0	0.07
2002/10/3 9:29	146.3	7.50	158	204	9.96	7.32	2.29	86.1	738	47.2	0.18	
<i>Mean</i>	152.7	7.25	141	183	9.04	6.34	2.07	81.4	656	47.6	0.17	
<i>Standard Deviation</i>	6.65	0.31	12.2	14.4	0.79	0.64	0.18	9.55	65.04	0.79	0.19	

**Table 2.** Chemistry of rainwater obtained at eastern Tomakomai-city, 68 km east of Izumi Pond. The two ions, Ca<sup>2+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, with “nss” mean those of non seawater source.

Period	Rainfall	EC25	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nss-Ca <sup>2+</sup> nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
	(mm/30 days)		pH	(mS/m)	(mg/l)								
March 1 to 31 May 2002	35.3	5.04	2.6	1.292	4.751	1.222	0.236	0.898	1.811	13.984	2.589	4.553	12.684
1 June to 31 August 2002	87.1	4.97	1.6	0.291	0.647	0.291	0.137	0.575	0.982	8.442	1.043	0.551	7.815
1 September to 30 November 2002	75.3	5.19	2.2	2.126	1.130	1.266	0.136	0.311	3.242	7.483	0.949	0.803	5.343
<i>Weighted Mean</i>		5.06	2.0	1.169	1.564	0.829	0.154	0.532	1.991	9.066	1.283	1.362	7.743

Table 2 と Fig. 10 は, 2002 年 5 月~11 月に泉池の東方 68 km の苫小牧東部で北海道環境科学研究センターによって採取・分析された降水の化学組成を示す。平均濃度で比較すると, 降水の電導度 EC 25 が 1.6~2.6 mS/m で泉池の 1/8 以下であることを反映して, Fig. 10 のイオン種について降水は両池に対して希釈の効果を持つ。しかし, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>については泉池より濃度が高く, また NO<sub>3</sub><sup>-</sup>については両池よりも高い。このように, 降水は全てのイオン種に対して希釈効果があるという訳ではない。

### 3. 池の水収支と化学成分収支

「1.」で示した泉池と N-19 火口池の水文気象条件と「2.」での各試水の化学組成から, 両池に関する水と化学成分の収支を考え, 両池における地下水寄与を議論する。ここでは, 誤差の少ない無降雨期間を収支期間とする。但し, この手法では, 貯水量の変化を求めるときに収支期間の水位変動に対応して Fig. 2, Fig. 3 に示す池の等深線図を内挿して用いる。水位変化が小さい収

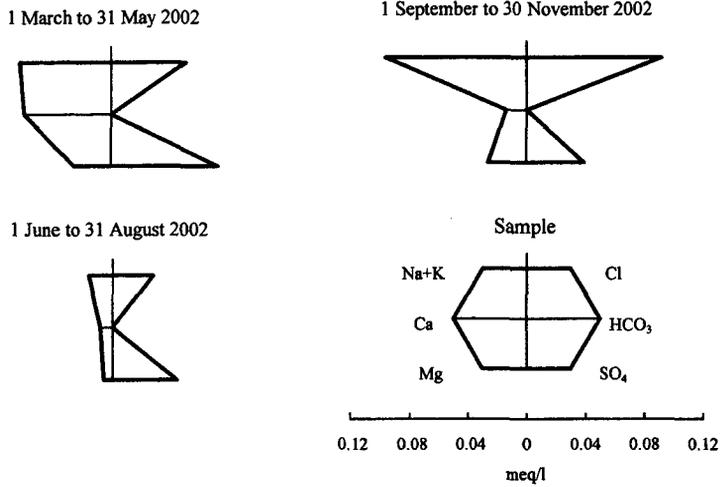


Fig. 10. Hexa-diagrams of the primary cations and anions for rain-water obtained at eastern Tomakomai-city for March to November 2002.

支期間では、湛水面積一定として貯水量変化を求めると貯水量変化の誤差は比較的大きく、地下水寄与が小さい場合は、この誤差に地下水流入・流出量が含まれる可能性がある。このため、ここで得られる地下水流入・流出量が貯水量変化よりオーダー的に小さい場合は、あくまで第一近似的な値として扱う必要がある。

まず、水収支は一般形として次式で与えられる：

$$\Delta h \cdot A / \Delta t = F \cdot A + R_{in} + G_{in} - R_{out} - G_{out} - E \cdot A \quad (1)$$

ここで、 $\Delta t$ ：対象の収支期間(sec)， $F$ ：降水量(m/s)， $\Delta h$ ： $\Delta t$ 間の水位変化(m)， $G_{in}$ ， $G_{out}$ ：それぞれ地下水流入量・流出量( $m^3/s$ )， $R_{in}$ ， $R_{out}$ ：それぞれ河川流入量・流出量( $m^3/s$ )， $A$ ：湛水面積( $m^2$ )， $E$ ：蒸発量(m/s)，である。泉池とN-19火口池は、流出河川を持たない閉塞池であり、無降雨時には両池とも流入河川を持たないので、(1)式は、

$$\Delta h \cdot A / \Delta t = G_{in} - G_{out} - E \cdot A \quad (2)$$

(1)，(2)式中の水面蒸発量 $E$ は、ここでは次のバルク式で求める(近藤，1998)：

$$E = -\epsilon \rho_a C_{Ez} u_z \{ e_z / (p - e_z) - e_0 / (p - e_0) \} / \rho_w \quad (3)$$

ここで、 $\epsilon$ ：乾燥空気の密度に対する水蒸気密度の比(=0.622)， $\rho_a$ ， $\rho_w$ ：それぞれ空気密度と水の密度( $kg/m^3$ )， $C_{Ez}$ ：水面上 $z$ (m)での潜熱輸送に対する無次元バルク輸送係数， $u_z$ ： $z$ での風速， $e_z$ ， $e_0$ ：それぞれ $z$ での水蒸気圧(Pa)と蒸発面温度での飽和水蒸気圧(Pa)， $p$ ：気圧(Pa)，である。他方、完全結氷期では水面蒸発が無視でき、(2)式は、

$$\Delta h \cdot A / \Delta t = G_{in} - G_{out}. \quad (4)$$

こうして、左辺の貯水量変化率を求めるだけで、正味地下水流入量  $G_{in} - G_{out}$  が得られることになる。この場合、蒸発量算定に含まれる中立大気の設定や誤差が除かれるので、正味地下水流入量  $G_{in} - G_{out}$  の見積もりに対する精度が向上する。

他方、ある溶存化学成分  $M$  の収支式は一般形として、

$$\begin{aligned} \Delta h \cdot A \cdot M_P / \Delta t = & F \cdot A \cdot M_F + R_{in} \cdot M_{Rin} + G_{in} \cdot M_{Gin} \\ & - R_{out} \cdot M_{Rout} - G_{out} \cdot M_{Gout} + S_M \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $M_P$ ,  $M_F$ ,  $M_{Rin}$ ,  $M_{Gin}$ ,  $M_{Rout}$ ,  $M_{Gout}$  は、それぞれ池水、降水、流入河川水、流入地下水、流出河川水、流出地下水の化学成分  $M$  のイオン濃度 (mg/l)、 $S_M$  は沈殿 (負値) や溶出 (正值) に伴う化学成分  $M$  の変化量 (g/s)、である。ただし、ここでは蒸発にともなう化学物質の output はないものとする。水収支と同様に、流出・流入河川のない両池の無降雨時を考えると、

$$\Delta h \cdot A \cdot M_P / \Delta t = G_{in} \cdot M_{Gin} - G_{out} \cdot M_{Gout} + S_M. \quad (6)$$

こうして、無降雨時の水位変化率 ( $\Delta h / \Delta t$ ) と池の各化学成分の濃度  $M_P$ 、および流入地下水濃度  $M_{Gin}$  がわかれば、(6)式と(2)または(4)式との連立によって、未知量  $G_{in}$ ,  $G_{out}$ ,  $S_M$  を求めることができる。

#### 4. 条件とパラメータ値および計算結果

ここでは、無降雨時での両池の全収支期間として、電気伝導度 EC 25 がほぼ一定で化学組成が不変と考える期間を採用する。これに対応するのは、泉池では 2002 年 10 月 11 日～21 日、N-19 火口池では 8 月 30 日～9 月 16 日の期間であり、泉池では蒸発が無視できる結氷期 12 月 22～24 日についても算定する。ここでは、この収支期間に対応して水位の変化率  $\Delta h / \Delta t$  は収支期間の変化から求めることとする。また、湛水面積  $A$  は全収支期間の水位変化から、図 2 と図 3 を用いて求める。ここでの未知量は、地下流入量  $G_{in}$  と地下流出量  $G_{out}$  のほか各イオン種の  $M_{Gin}$ ,  $S_M$  である。そこで水収支のほか、沈殿の影響が比較的小さいイオン種  $\text{Na}^+$  の収支を考える (Chikita et al., 2002 を参照)。つまり、ここでは両池について  $S_M = 0$  (g/s) を仮定し、未知量  $G_{in}$ ,  $G_{out}$  を求めることとする。

収支期間での泉池の  $\text{Na}^+$  濃度について、Fig. 7 での電導度計 MDS-CT (No. 10073) による収支期間の電導度 EC 25 と同じ EC 25 値をもつ採水サンプルの  $\text{Na}^+$  濃度を池水濃度の代表値とする。つまり、ここでは 2002 年 10 月 11 日～21 日と 12 月 22～24 日の期間ではほぼ同じ EC 25 値 ( $\approx 22.4$  mS/m) をとるため、Table 1 より 10.5 mg/l を両池水の  $\text{Na}^+$  濃度とする。他方、両池では大きな降雨時以外近くに表流水は存在せず、このため  $M_{Gin}$  値に対し推測することは現地では難しい。しかし、Fig. 7 で示したように、泉池では結氷期を除くと無降雨に相対的に濃度の高い地下水が流入

していることがわかっている。このため、10月11日～21日の収支期間については、Table 1において  $M_{G_{in}} > 10.5$  mg/l を満たす無降雨時の最大値 15.9 mg/l を与える。また、12月22～24日についての  $M_{G_{in}}$  値は、Fig. 7 からこの期間はほとんど電導度が変わらないため、表層 (No. 10121) の EC 25 値 (=19.0 mS/m) に対応した  $\text{Na}^+$  濃度 9.38 mg/l を Table 1 から与える。

N-19 火口池については、Fig. 8 から収支期間 8月30日～9月16日の電導度 EC 25 値 (=153 mS/m) に対応する  $\text{Na}^+$  濃度を池水の代表的な値として、Table 1 より全サンプル平均値 141 mg/l を与える。また、流入地下水の  $\text{Na}^+$  濃度として、高濃度地下水流入を考慮して Table 1 での最大値 158 mg/l を与える。また、流出地下水の  $\text{Na}^+$  濃度としてはこれらの平均値 150 mg/l を与える。

Table 3 は、泉池と N-19 火口池について求められた各収支期間での湛水面積  $A$ 、水面蒸発量  $E$ 、水収支から得られた  $(G_{in} - G_{out})$ 、および  $\text{Na}^+$  収支によって得られた  $G_{in}$  と  $G_{out}$  の値を示す。これから、泉池では水位の高い 10 月で  $G_{out} = 0.00485$  m<sup>3</sup>/s (=291 l/min)、水位の低い結氷期で  $G_{out} = 0.00328$  m<sup>3</sup>/s (=197 l/min) の地下水流出があることがわかる。これらの値は地下流入量や蒸発量より 1 オーダー大きく、泉池では水位変化に対応して地下水流出が調節機能を果たしていることがわかる。また、N-19 池では  $G_{out} = 0.000101$  m<sup>3</sup>/s (=6.06 l/min) であり、泉池と同様、地下流入量や蒸発量より 1 オーダー大きい。これから、N-19 火口池の降雨に対する調節機能は、やはり地下水流出によると判断される。なお、地下流出量を流出高 (m/s) で考えると、N-19 火口池は泉池の約 1/4 である。このことから、N-19 火口池は、観測期間では既に周囲からの透水性の低い火山噴出物による埋積で火口が閉ざされ、地下水流出の低い状態にあったと考えられる。泉池における結氷期の  $G_{in}$  値は、この期間の積雪底面融解を考えると小さすぎると思われるが、今後、この評価には同池近くで行われているライシメーターによる観測結果を考慮する必要がある。なお、両池における蒸発量と地下流入量は同じオーダーであることがわかった。秋期の結果から、泉池は N-19 火口池の約 10 倍の貯留量をもつが、地下水流出は N-19 火口池の 48 倍である。このことから、水の平均滞留時間 (~貯水量/流出量) としては、泉池は N-19 火口池の約 1/5 であると評価される。泉池における大きな地下水流出の原因として、近くに隆起による正断層が多く存在するため、その一部が池底に存在することが考えられる。

**Table 3.** Hydrological and chemical budgets in Izumi Pond and N-19 Crater Pond.  $M_{G_{in}}$  and  $M_{G_{out}}$  are the  $\text{Na}^+$  concentrations for groundwater input and output.

Site	Time Period	$A$ (m <sup>2</sup> )	$E$ (mm/s)	$E \cdot A$ (m <sup>3</sup> /s)	$G_{in} - G_{out}$ (m <sup>3</sup> /s)	$M_{G_{in}}$ (mg/l)	$M_{G_{out}}$ (mg/l)	$S_M$ (g/s)	$G_{in}$ (m <sup>3</sup> /s)	$G_{out}$ (m <sup>3</sup> /s)
Izumi Pond										
	11-21 Oct. 2002	1.915×10 <sup>4</sup>	5.900×10 <sup>-6</sup>	0.000113	-0.00444	15.9	10.5	0	0.00041	0.00485
(ice-covered)	22-24 Dec. 2002	1.480×10 <sup>4</sup>	-	-	-0.00325	9.38	10.5	0	0.00003	0.00328
N-19										
	30 Aug.-16 Sept. 2002	1546	9.011×10 <sup>-6</sup>	1.393×10 <sup>-5</sup>	-0.0000476	158	150	0	5.29×10 <sup>-5</sup>	0.000101

## V. 結論と問題点

2002 年に実施した水文・水質調査から、泉池での地下水寄与は比較的大きく、水面蒸発量の約 43 倍である。これに比べ、N-19 火口池の地下水寄与は小さく蒸発量の約 7 倍であった。しかし、両池とも地下水流出による水位調節機能をもつことがわかった。今回、流入・流出地下水の溶存イオン濃度について、収支期間における電導度 EC 25 の変化から判断した試水の実測値を用いた。今後は、池周辺の温泉水や湧水の化学組成や流域内の土壌水のイオン濃度分布を調べ、また池内の沈殿・溶出による化学変化量を計測することで、地下熱水系の池水への影響や池水の深部熱水系への涵養をより精度よく評価する必要がある。

**謝辞** 野外調査においては、北海道環境科学研究センター・浜原和広氏と川井 治氏、北海道大学大学院理学研究科の陸水循環物理学研究室・梅原信之君をはじめとする学生諸氏にお世話になった。厚く御礼申し上げます。また、(株)北日本ソイル総合研究所・常松 哲博士には、野外調査に際しご援助を賜った。ここに深謝いたします。さらに、気象データの提供にあたり、洞爺村役場および室蘭土木現業所洞爺出張所の方々にご協力いただいた。御礼申し上げます。雨水の化学成分については、北海道環境科学研究センターのホーム・ページ「酸性雨」からデータを受けた。感謝いたします。なお、本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)「火山噴火に伴うカルデラ湖と新生池沼の物質循環の機構に関する研究」(課題番号 13640431; 代表者、知北和久)により実施された。

## 文 献

- 秋田藤夫・常田陽子・浦上晃一, 2001. 北海道洞爺湖温泉の熱水流動系, 温泉科学, **50**, 204-220.
- Chikita, K., M. Nishi and R. Fukuyama, 2003. Hydrological and chemical budgets in a volcanic caldera lake: Lake Kussharo, Hokkaido, Japan, *Journal of Hydrology*, **286** (in press).
- 廣瀬 亘・田近 淳, 2000. 2000 年有珠火山の噴火とその被害, 応用地質, **41**, 150-154.
- 近藤純正, 1998. 水環境の気象学, 朝倉書店, 351 pp.
- 大沢信二・風早康平・安原正也, 2002. 島原半島の温泉・鉱泉の流体地球化学, 温泉科学, **52**, 51-68.
- 大島弘光・松島喜雄, 1999. 有珠山浅部の水環境—既存資料の解析—, 北海道大学地球物理学研究報告, **62**, 79-97.
- 佐藤寛志, 2000. 北海道川湯温泉の熱水流動系, 北海道大学修士論文, 26 pp.
- 山口久之助, 1975. 利尻島の地下水 [IV] —その水収支について—, 地下資源調査所報告, **47**, 1-20.
- 安原正也・風早康平・稲村明彦・河野 忠・大沢信二・由佐悠紀・北岡豪一・星住英夫・角井朝昭・宇都浩三, 2002. 雲仙火山の水理構造, 月刊地球, **24**, 849-857.