

昭和62年度課題研究報文

# 摩周湖の水収支と周辺湧水に関する研究

日本大学文理学部応用地学科 陸水学研究室

5290005 内田 豊

# 目 次

	ページ
まえがき	1
1. はじめに	3
2. 調査地概要	4
2-1. 摩周湖概況	4
2-2. 摩周火山と摩周湖の生成	4
2-3. 地質	5
2-4. 理化学的性質	5
3. 研究方法	6
3-1. 水収支	6
3-2. 湧水調査	6
3-3. 流出率	7
4. 結果・考察	8
4-1. 長期の水収支	8
4-2. 湧水の流量	10
4-3. 湧水の水質	12
4-4. 流出率解析	17
4-5. 滲出水と湧水の関係	20
5. まとめ	21
謝辞	22
参考文献	23
図・表・目次	

## まえがき

ビシュッ！ メンカクシの放った矢は空を切り裂いて熊の急所に突き刺さった。続いて第二矢！ しかし熊は怯まずに突進してくる。メンカクシはひらりと身を交して熊の背中に跨がり、腰の短刀を素早く抜き去るやいなや拳も通れと貫いた。手負いの熊は吼り狂い、摩周の頂きを踏み外して遥か眼下の摩周湖へ影をかすめて転がり落ちていった。この日、マシウ（現代のカムイヌプリ山）の頂きで年老いた豪熊と対決した釧路の酋長メンカクシは一代一度の功業を水泡に帰してなるものかと、礫々たる岩角に手を掛け、蔓にすがり、かろうじて湖岸に降りたったものの熊の姿は跡形もなかった。名誉を喪失したメンカクシは傷心の日々を送っていた。ところが摩周湖の南方三里程のところにもヌウという沼があり（現在の西別川鮭・鱒ふ化場）、西別川の水源地となっているがこの西別川の下流のニシベツブトというところにメンカクシの射止めた熊が流れついた。その証拠は熊の身に帯びた二筋の矢に印されたメンカクシの標であった。このとき初めて土人達はかの摩周湖が地中を潜り三里を隔てヌウに達しているのだと知ったのである。

これはアイヌの神話ではない。安政三年に厚岸に来ていた大内餘庵という医者が当時釧路地方にあった出来事の見聞を書き集めた『東蝦夷夜話』に記された実話で、摩周湖と西別川の湧泉の関係についての記録としては最初のものといえる。まさか熊がゴロゴロと転がるような巨大な横穴が開いているとは思えないが、西別川湧泉の豊富な水量や裏摩周展望台北6.2kmにある神の子池（摩周湖観光の穴場！）の不思議な色合いを見ているとどうやら摩周湖の水がもれているというのは本当らしい。それではそれを証明する方法はないだろうか？摩周湖の水だなんてなんともステキじゃないか！

現代の水文学者が使うメンカクシの熊といえばアイソトープを大量に流すのが手頃であろう。しかし世界一美しい神の湖にそんなものは絶対に入れたくないし、許されないことである。10年前に筆者が摩周を訪れたときに裏摩周展望台へむかう林道で出迎えてくれたエゾリスも道路の舗装によって姿を消した。神の子池林道の整備計画も進みつつある。自然愛護論をするつもりはないが、苦勞して頂きに辿り着いたときに眼下に広がる摩周湖の蒼さはまた格別である。秘境は遠くからそっと見守りたい。そして凡人の近付けぬ超越した存在であってほしい。しかし学問的興味とはまた別物であって、霧のベールに包まれたものならその向こう側を覗いてみたいものである。なるべく湖には触れずに科学の力でその謎に迫ることは出来ないだろうか？

本研究はそんな願いを込めて大自然と摩周湖をこよなく愛する筆者が、そしてやがては水文学とは無縁の社会へと巣立つ筆者が、学生時代の総決算として、純粹に学問的興味を追い続けることができる時代のフィナーレとして、あらん限りの力を投入した作品である。

科学的手法によるメンカクシの熊とは何であったか……。

## 摩周湖の水収支と周辺湧水に関する研究

### a b s t r a c t

内田 豊

北海道の摩周湖の周辺には多くの湧水が散在している。これらの湧水の起源は摩周湖の滲出水であるといわれているが両者の定量的・定性的な関係は一切不明である。

本研究ではこの関係を明らかにするために、まず現在国立公害研究所で行われている摩周湖の研究に最新の水位変動記録を付加して、長期的な水収支の検討を行った。続いて湧水の流量・水質調査、流出率解析などを行いそれぞれの関係を考察した。

その結果、摩周湖の湖水は降水量の減少に対応して低下を続けていること、滲出量は降水量に対応し、年間 $23.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上であること、湧水は摩周湖の北部と南部に集中しており計 $2.20 \text{ m}^3 / \text{sec}$ であること、その水質は一定であること、最大湧泉の西別川の流出高は常に一定で、年流出率は3.2、基底流出量は $1.52 \text{ m}^3 / \text{sec}$ であること、滲出水が湧水として湧出するまでのタイムラグは3～5ヶ月であることなどが明らかになった。

## 1. はじめに

“神秘の湖”、“霧の摩周湖”として知られる摩周湖は世界一の透明度（41.6m 1931年測定）を誇る湖である。また、この湖は環境汚染がきわめて少なく、陸水域バックグラウンドモニタリングステーションとして日本最適の湖である。（国立公害研究所研究報告 第58号，1984）<sup>1)</sup>

したがって本湖において基礎的な湖沼学的研究を行うことには重要な意義があるが、過去における摩周湖研究は透明度に主点をおいたものがほとんどであった。これは“世界一”の摩周湖の透明度低下に関する社会的関心の高さによるものと、湖岸で気象観測が行われていないために、正確な気象状況が把握できないことが原因である。環境庁報告（1979）<sup>2)</sup>にはこれまでの研究成果がよくまとめられており、湖盆形態、気象状況、水温、水質、生物および透明度等の概況が明らかにされている。

近年、国立公害研究所が摩周湖湖岸に自記水位計を設置したことにより水収支を組むことが可能となった。堀内・安部らの報告（1982，83，87）<sup>3) 4) 5)</sup>によると、降水量をP，集水域からの流入量をI，湖面からの蒸発量をE，湖底からの滲出量をO，水位変動量を $\Delta H$ とすれば摩周湖の水収支は

$$\Delta H = P - E - O + I$$

で示され、地下滲出量（O）は最大 $0.75 \text{ m}^3 / \text{s}$ （1年間に約1200mm）と推定された。

摩周湖の周辺には多くの湧泉が散在しており、それらの起源が先に述べた摩周湖からの滲出水であると考えられているが両者の関係を定量的・定性的に論じた研究は無い。そこで本研究では堀内・安部らの報告をもとに、過去6年間の水位変動記録から摩周湖の長期的な水収支を再検討し、同時に周辺湧水と摩周湖の滲出水との関係を解明することを目的とする。

## 2. 調査地概要

### 2-1. 摩周湖概況

摩周湖は、北海道東部の北緯  $43^{\circ} 31'55''$  -  $43^{\circ} 36'15''$ 、東経  $144^{\circ} 30'37''$  -  $144^{\circ} 34'31''$  の間に位置し、湖央のカムイシュ島は北緯  $43^{\circ} 34'36''$ 、東経  $144^{\circ} 31'51''$  にある。

本湖は、その湖面が集水域の約60%を占め、流入河川・流出河川のない *See page Lake* である。湖面を勾配25~40%の急斜面なカルデラ壁が取り巻き、南東部はカムイヌプリの険しい山体で湖を埋めている。湖面標高は351m、周囲のカルデラ壁との比高は150~300mである。湖盆の形はほぼ円形で湖岸線の長さは20.0km、最大深度212.0m、平均深度137m、湖水容量2.75km<sup>3</sup> である。

本湖の特色は表面積19.6km<sup>2</sup> に対し、集水面積が32.4km<sup>2</sup> と非常に小さいことである。

表面流出水のない本湖の水位変化については、2m程の低下があった(1953)とされるが、1986年の調査(安部ら)<sup>5)</sup> で1982年から1986年の間に1.15mの低下が認められた。しかし、大局的にはほぼ一定の水位を保っていると言われている。

### 2-2. 摩周火山と摩周湖の生成

摩周湖の生成は屈斜路カルデラの形成から始まる。

- ①約3万年前、屈斜路火山が陥没し、東西径約26km、南北径約20kmのほぼ円形の屈斜路カルデラが形成された。
- ②約12000年前、屈斜路カルデラの東壁を破って摩周火山が噴出した。
- ③約7000年前、摩周火山は多量の軽石流(Maf)を噴出して大きく陥没し、東西径約6km、南北径約7.5kmのほぼ円形の摩周カルデラが形成された。
- ④カルデラ内の西北西-東南東方向の構造弱線上にカムイシュ火山(5000~4000年前)、カムイヌプリ(2000~500年前)が噴出した。
- ⑤カムイヌプリが軽石を噴出し、大きな火口を開いた。(数百年前)

こうして形成された摩周カルデラ内に徐々に水がたまり、現在の摩周湖の形となったのは約1500～1000年前とされている。<sup>2) 6) 9)</sup>

### 2-3. 地質

摩周湖周辺の地質は、古期の屈斜路火山の噴出物から摩周火山の噴出物までで、カルデラ壁には熔結凝灰岩、軽石流を基盤として溶岩流がみられる。溶岩流は摩周火山の山体を形成した輝石安山岩が主体である。Fig. 1に地質調査所の地質図を示した。これらの地層は比較的透水性と考えられるが、中でも火山灰質砂層(Ks)と、摩周火山の溶岩(Ma-1)や屈斜路熔結凝灰岩(Kw)との間、または、熔結凝灰岩中に摩周湖からの滲出水が考えられると岡崎(1973)<sup>6)</sup>は指摘している。

### 2-4. 理化学的性質

国立公害研究所の調査<sup>1)</sup>によると、摩周湖は非常に水質の変動が少なく、主要成分については全深度にわたって一定の濃度を示している。本研究では表層30cmで採水した湖水を滲出水と同等の水質として扱っているが、以上の点から問題はないと考えられる。

### 3. 研究方法

#### 3-1. 水収支

流入および流出河川のない摩周湖では、湖に入る水としては、地下水流入、また降雨時には直接湖面に降る降水量と、湖の周りの流域からの表面流出による流入とがある。一方湖から出る水としては湖面からの蒸発と地下水流出がある。

摩周湖における気象状況については、観測していないためにデータはない。そこで本研究では湖心から南西約12 kmに位置する弟子屈（標高100 m）の気温、降水量のデータを用いた。蒸発量に関してはB r o i dの蒸発散の式を用いた。

$$E. EVAP = 17.5 \times (SAT. VAP - VAP) \times 0.1 \quad N = 7.5$$

$$SAT. VAP = 100 \times VAP / HUMIDITY \quad N = 0.013$$

$$E. EVAP : \text{可能蒸発散量(mm/month)} \quad SAT. VAP : \text{飽和蒸気圧(0.1mb)}$$

$$VAP : \text{蒸気圧(0.1mb)} \quad HUMIDITY : \text{湿度(\%)}$$

蒸気圧と湿度は釧路のデータを補正して利用した。

水位変動量は1981年6月12日から1987年5月22日までの自記水位計の記録を用いた。

#### 3-2. 湧水調査

摩周湖の湖水と周辺湧水との関係を知るために1987年8月3日～10日に湧水調査を実施した。対象は摩周湖周辺の湧泉及び、その源流が湧水と考えられる河川（湖面標高351 m以下の高度から湧出するもの、または年間を通して流量・水温が一定など）21ポイントと摩周湖である。調査ポイントをFig. 2に示す。現地において流量、水温、EC、pHを測定し、同時にサンプリングを行い研究室に持ち帰り分析をした。原子吸光法によってNa, K, Mg, Caを、イオンクロマトアナライザーによってCl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>を、4.3BX法によりアルカリ度（HCO<sub>3</sub>）を求めた。



### 3-3. 流出率

摩周湖周辺湧泉のなかで最大規模のものとして湖の南方約9 kmに西別川の水産ふ化場（海拔220 m ; Fig. 2のポイント11）がある。この水産ふ化場を源流とする西別川の2カ所の観測所で建設省北海道開発局土木部河川課が調査した流量の記録を基に西別川の流出率を求めた。観測所は水産ふ化場から2.8 kmの川上郡標茶町虹別原野68線（観測所名：25号）と、33 kmの野付郡別海町中西別（観測所名：中西別）である。尚、入手できた記録は1972年～74年、1979年～84年で、降水量は計根別の記録を使用した。

## 4. 結果・考察

### 4-1. 長期の水収支

摩周湖の水収支については先に述べた通り堀内・安部らによる詳細な報告があり、その最新の報告<sup>5)</sup>では1982年6月～1986年5月のデータが記載されている。本項ではその継続に当る現時点での最新データ(1986年6月～1987年5月)を付加し、摩周湖の滲出水と周辺湧水の関連を探るという目的のために短期の水収支については触れず、長期的な水収支についてのみ考察を行った。

#### 4-1-1. 水位変動

1982年6月～1987年5月の自記水位計の記録による水位変動の推移を Fig. 5 に示す。1983年3月～10月と1985年5月～7月は水位計が故障したために未観測である。1986年6月までの観測期間中に最大1.15mの水位低下があったが今回、さらに水位低下が観測され、1987年5月は観測史上最低の標高349.99mを記録し、水位計の測れる最低限界を越えてしまった。1982年6月～1983年5月を最初の1年とすると1987年5月までの5年間の降水量の推移は、983,862,713,1168,627 mm/year となっており、水位は降水量の減少に対応して低下を続けている。

#### 4-1-2. Seepage Lake の水収支

本湖の水収支は次の式で示される。

$$\Delta H = P - E + I + G_i - G_o$$

$\Delta H$  : 水位変動量                       $I$  : 集水域からの流入量

$P$  : 降水量                                 $G_i$  : 地下水流入量

$E$  : 湖面からの蒸発量                 $G_o$  : 地下水滲出量

単位は湖面積当たりの高さ (mm) で示す。流入量 ( $I$ ) は

$$I \text{ (mm)} = \frac{12.8\text{km}^2 \text{ (湖をのぞく集水域)}}{19.6\text{km}^2 \text{ (湖の面積)}} \times (P - E)$$

である。

ここで、 $G_i - G_o$ は実測が不可能であるから水収支式に他の項目を代入した残差として求めるが、本湖のように流出口がないにもかかわらず水位が一定な *Seepage Lake* では全流入量に相当する値を地下水滲出で担っていると考えられるので  $G_i - G_o$  は一括して地下水滲出 (O) と考える。したがって

$$\Delta H = P - E + I - O$$

となる。この式を用いて最近1年間の1986年6月から1987年5月までの水収支をグラフ化したものが Fig. 6 である。図を見ると9月には160mmの降水があり水位が35mm上昇したが、それに伴って152mmの滲出が起これ、その結果10月には74mmの水位低下となった。以降、 $P + I$  を  $E + O$  が上回り水位は下降を続けている。

#### 4-1-3. 地下滲出量

上記の水収支式から地下滲出量 (O) は

$$O = P - E + I - \Delta H$$

で求められる。地下滲出量と降水量の5年間の経月変化を Fig. 7 に示す。地下滲出量と降水量はよく対応しており、滲出量がある程度降水量を上回ると水位は低下する。1年間で平均1181mm (月平均98mm,  $0.734 \text{ m}^3 / \text{s}$ ) の滲出があり、夏に多く冬は少ない。本湖の滲出と降水の関係について堀内ら<sup>4)</sup> は

①主として6月～9月までの降水が湖の水位上昇をもたらし、それ以外の期間の降水は湖水中にはほとんど止まらない。

②滲出は降水に伴う水位上昇に引き続く急速な滲出と、長期に渡る緩やかな滲出 (1～5mm/d) の二つに分けられ、さらに後者はある水位以上のときの比較的速やかな滲出と、それ以下の水位でのより遅い滲出の二つに分けられる。

と述べている。

さて、このグラフの絶対量の信頼性であるが、地下滲出量 (O) は他の項目  $\Delta H$ ,  $P$ ,

E, I に実測値, あるいは推定値を代入した残差として求めたのであるからこれらの項目の値が違えば当然地下滲出量 (O) の値も違ってくる。△H は実測値なので問題はないが、降水量 (P) および集水域からの流入量 (I) は標高 100 m の弟子屈での観測値 (P) と P からの計算値なので標高 500 ~ 700 m の山中にある本湖ではもっと降水量が多いはずである。麓の弟子屈ではよく晴れていても山頂では“霧の摩周湖”であったというケースはかなり多い。また蒸発量について、環境庁報告<sup>2)</sup>によると弟子屈観測所と比較して本湖の気温は 2.5℃ ~ 4℃ 低いと推定され、また高い鍋一筒状壁に囲まれているために熱の発散が少ないと見られている。したがって実際の摩周湖では弟子屈観測所よりも P, I が多く E が少ないために、滲出量はもっと多いであろう。よって、このグラフは相対的な変化は変わらないが、絶対量はもっと増加すると考えられる。

## 4-2. 湧水の流量

### 4-2-1. 湧水の分布

湧水調査は、摩周湖周辺のほぼ全体を網羅した。河川における調査は、源流である湧泉に到達することが困難なため、できるだけ上流の河川で実施した。尚、源流が摩周湖湖面標高の 351 m 以上にある河川や、調査の結果、涸れ谷であった元湧泉などは摩周湖からの滲出水の可能性がないために省略した。今回の調査からもれた湧泉は絶無とはいえないが、調査結果の大勢に変わりはないと思われる。

Fig. 2 を見てわかることは、湧水は摩周湖の北部 (No.3~10) と南部 (No.11~21) に集中していることである。Fig. 3 (湖盆図) の A-A', B-B' 方向に切った断面図と、湧水の高度関係を示したものが Fig. 4 (a), C-C' 方向に切った地質断面図が Fig. 4 (b) である。これらの図から北部湧水群 (No.3~10) は湖面から 10 ~ 90 m の間に、南部湧水群 (No.11~21) は湖面から 110 ~ 210 m の間にあり、北高南低の形態で分布している。東部に湧水は無く、西部には 2 ヲ所 (No.1,2) 認められた。

#### 4-2-2. 流量

Table. 1 に流量調査の結果を示す。調査は8月上旬の1回限りであるが、各地点とも年間を通して流量は一定と言われているのでこの値を代表としても大局的な水収支に影響はないと思われる。

流量が最大の湧泉は西別川の水産ふ化場 (No.11) で、 $1.5 \text{ m}^3 / \text{sec}$  以上の被圧水で、摩周湖周辺全湧水量の約70%に相当する。西別川については4-4項で詳しく述べる。以下、ポンベツ川 (No.14) , 神の子池 (No.10) と続く。

標高と流出量の関係を Fig. 8 に示したが、この図から湧水の所在地点の標高と流出量とは無関係であることがわかる。

全湧水の流量の合計は  $2.20 \text{ m}^3 / \text{sec}$  で、摩周湖の地下滲出量  $0.73 \text{ m}^3 / \text{sec}$  の約3倍となり、摩周湖からの滲出水の説明に十分な量となる。

一般に、第四紀にできた火山の多くはすぐれた透水性を備えていて、有力な水源涵養体であることは広く知られている。山本はその研究<sup>13)</sup> で山体の水文学的区分を行い、山体を水のあり方、涵養機構から

- I 山頂涵養帯 (無水域)
- II 山腹涵養帯 (乏水域)
- III 山麓湧泉帯 (豊水域)

に分類し、山麓湧泉帯には豊富に湧泉が存在し、湧泉を源に持つ不断河川や湖沼が多いことを指摘している。しかし摩周湖周辺湧水の場合、山体である摩周火山の大部分が陥没によって失われ、山体を構成しているのはわずかにカルデラ壁の部分のみであり、本来地下水貯留の場となる部分を摩周湖の湖盆が占めているとさえ言える。しかも湧水が存在するのは山腹涵養帯なので、一般的な火山性湧水とは違う涵養機構が作用していると考えられる。

したがって摩周湖周辺湧水を涵養しているのはカルデラ壁の貯留する地下水以外に、摩周湖からの滲出水が大きく影響していると考えても間違いないだろう。

### 4-3. 湧水の水質

摩周湖の滲出水が湧水であることを証明する最も有効な手段は、摩周湖の湖水に特徴的な指標となる物質を湧水中に見出すことである。しかし国立公害研究所の報告<sup>1)</sup>によると摩周湖は、主要成分以外の濃度は世界に例がないほど低く、また主要成分濃度も概して低く特徴的な成分は見当たらない。

そこで本項では主要成分について摩周湖と湧水の分析データを比較・検討したところ、湧水の地域的な相違がかなりはっきりしていること、しかしながら元は全て摩周湖の湖水であった可能性が高いことなどが明らかになった。以下に、それらの知見について述べる。

Table. 2 に分析データを示す。主要成分の単位はmg当量である。

#### 4-3-1. 水温

今回の調査は日程の都合上、流量測定とサンプリングが主目的で、水温の測定は補助的に行ったので測定時刻、気温、天気がそろっていない。そのため Table. 2 の値で水温を比較するには多少無理がある。しかし測定条件の違いを割り引いて考えても、北部湧水群 (No.3~10) が 6.0~8.1 °C、南部湧水群 (No.11~21) が 6.8~15.1°C と、標高が高く、山中にある北部湧水群の方が水温が低そうである。

#### 4-3-2. pH

湧水の pH は No.19 を除き 6.25~6.75 の範囲にある。摩周湖の pH は 7.35 で湧水よりもやや高めである。No.16~18 (磯分内川水系) で pH が低下する原因として地質的要因—泥炭土の影響がある。泥炭土は未分解の植物の遺骸により成り、これにより生じる腐蝕酸 (フミン酸) が影響を及ぼす。また、No.19 (仁多川) の pH が 7.50 とやや高い原因として、地質因子—塩基性物質 (Ca, Mg 等) を多く含む土壌を疏下するため、あるいは畑地、牧草地に散布した土壌改良剤 (消灰石等) が溶出するためなどがあげられる。<sup>14)</sup>

しかし、いずれにしても変化の幅が小さく、問題になるほどの差異ではないと思われる。

#### 4-3-3. 電気伝導度

電気伝導度について、現地測定値と実験室における測定値とでは2~28・/cmの開きがあるが現地測定値には欠測箇所が多いので実験室における測定値を採用することにする。

北部湧水群 (No.3~10) の電気伝導度は48.3~55.5・/cmで、かなり安定している。一方、南部湧水群 (No.11~21) 及び西部湧水 (No.1,2) はややバラツキがあるが全般的には日本の河川の平均値110・/cm及び摩周湖の117・/cmよりも低い。

摩周湖よりも高い値をとるNo.2 (美留和 香橋) とNo.11 (西別川水産ふ化場) では、人為的な影響が考えられる。No.2は調査地の中では最も人口が密集し、鉄道や自動車道に面している。No.11は水産ふ化場で使用する栄養塩類等が地中に浸透して地下水に溶出していると思われる。同様の理由がNo.1 (美留和 水産ふ化場) についても言える。

#### 4-3-4. 主要成分

##### ①Hexa Diagram

Table.2の主要成分を見て興味深いのは、摩周湖・湧水共に火山性であるにもかかわらず、SO<sub>4</sub>濃度は高くないことである。また、上述のNo.1,2,11以外の湧水はほとんど全ての成分が摩周湖の成分濃度よりも低い。

湧水を摩周湖と比較し、地域的傾向を見るために主要成分濃度をレーダーチャートにのせてHexa Diagramを作製したところ、

- I. 北部湧水群 (No.3~10)
- II. 西別川・磯分内川水系 (No.12~18)
- III. 人為的影響が見られるグループ (No.1,2,11)
- IV. 仁多川水系 (No.19~21)

の4つのグループに分類できた。Fig.9にHexa Diagramを示す。単位はmg当量で.....は摩周湖である。

Iのグループ (No.3~10) は全体的に摩周湖の枠の中におさまり、極めて良く一致している。滲出水にカルデラ壁の地下水が混入し、希釈されたものと見られる。

IIのグループ (No.12~18) は $\text{SO}_4$ を除く6成分が0~2me/・ずつ増加している。したがってHexa Diagramの外形はIをわずかに拡大した形態をとる。

III (No.1,2,11) は他のいずれにも属さない、人為的影響が見られるグループで、その特徴は他の湧水よりもかなり濃度が高いことであり、 $\text{SO}_4$  (Iの3~11倍),  $\text{Na}+\text{K}$  (Iの1.6~2.7倍),  $\text{Mg}$  (同、2~3倍) などが顕著である。

IVのグループ (No.19~21) はIのグループとほとんど変わらないが、 $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ がそれぞれ0.4~2.7me/・, 0~0.4me/・ずつ増加している。

このように、かなり細かく分類すると以上のようになるが、Hexa Diagramの形態は全ての湧水及び摩周湖が同一種のものが見られる。

## ②主要成分構成比

溶存無機成分濃度の値は絶対的なものであるから、滲出水に地下水などの他の水が混入すれば希釈されて濃度は低くなる。しかし各成分の構成比は相対的なものなので、特定の成分が供給されたり科学的作用を受けたりしない限り変化しないはずである。そこでレーダーチャートに主要成分構成比をのせてFig.10を作成し摩周湖と比較・検討すると、Hexa Diagramで行った4つのグループ分けが一層明確になった。尚、レーダーチャートは視覚上見やすくなるように軸の長さ、目盛りの間隔などを適当に調節してある。単位は4.3 BX ( $\text{HCO}_3$ ),  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}$ が陰イオン中の%、 $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}+\text{K}$ が陽イオン中の%である。

Iのグループ (No.3~10) は摩周湖の六角形を上下に押しつぶしたか、または $\text{Cl}$ 方向に引っ張ったような形をとり摩周湖に対して $\text{SO}_4$ ,  $\text{Mg}$ が減少、 $\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}$ が増加している。

IIのグループ (No.12~18) は上から押しつぶしたような形で、 $\text{SO}_4$ が減少、 $\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}$ が増加している。

IIIのグループ (No.1,2,11) はかなり変形し、 $\text{SO}_4$  (No.11),  $\text{Ca}$  (No.1,2) の増加は著しい。



IVのグループ (No.19 ~21) はIのグループとは逆の方向に引っ張ったような形、すなわち、 $\text{SO}_4$  あるいはMgが減少し、 $\text{HCO}_3$ とCaが増加している。

さて、主要成分構成比は相対的なものであるから、ある成分の値が増加、あるいは減少すれば他の成分の値は相対的に減少、または増加する。すなわち、摩周湖の六角形のある部分を引っ張れば他の部分がへこむということである。IIIのグループを例外とすると、I、II、IVの六角形は全て摩周湖の六角形を少し変形させたものであり、元は同一の摩周湖の六角形であったと考えることができる。すると、II、IVは変形のパターンが似ているので同一の南部湧水群と見なし、北部湧水群 (I) と南部湧水群 (II、IV) を分ける因子は主要成分構成比の中で、摩周湖に対し共通に変化している成分である。Table. 3 (摩周湖に対する各成分のグループ別増加率) でそのような成分を探すと、北部湧水群 (I) に比べ南部湧水群のII、IVは共通してCa、Mgが増加しているのに気付く。つまり南部湧水群はCa、Mgが増加することによって相対的に他の成分の構成比が減少したのである。

このように南部でCa、Mgが増加する原因として地質因子があげられる。Fig. 1を見ると、摩周湖の北部は卓越した石英安山岩質軽石流 ( $\text{Kp}_1$ ) が広範囲に広がる降下軽石および火山灰層 (Mv) に囲まれているのに対し、南部ではMv層が薄く、輝石安山岩質軽石流 (Maf) が卓越している。輝石安山岩は石英安山岩に対し、Mg、Fe、Caに富む。したがってMaf層を滲出水が通れば、あるいはMaf層に貯留された地下水が滲出水に混入すればCa、Mgが増加してもおかしくない。

Mg + Caの全溶存成分に対する比率による北部湧水群と南部湧水群のグループ分けをグラフにすると Fig. 11 のようにまとめられる。

### ③三角Diagram・Key Diagram

主要成分の三角DiagramとKey Diagramを Fig. 12 に示す。三角Diagramで、陽イオンはほぼ1カ所に固まっているが、Ca、Na + Kが約20%散らばっている。陰イオンはClの90%、 $\text{HCO}_3$ の10%上に散らばり、 $\text{SO}_4$ が0~69%と大きく変化している。No.11が水産ふ化場から受ける影響は $\text{SO}_4$ が最も大きいと考えられ

る。

2つの三角DiagramをKey Diagramに集約すると1カ所に固まり、大局的には全て同種のものであることを示している。特徴として $\text{SO}_4 + \text{Cl}$ の割合が非常に高く(約90%)、 $\text{HCO}_3$ の割合が低い(約10%)。No.22(摩周湖)からCa+Mgの割合によって20%の開きがあるのは主要成分構成比での考察を裏付けている。

#### 4-4. 流出率解析

##### 4-4-1. 流出率

『4-2-2.流量』の項でも示した通り西別川の水産ふ化場は摩周湖周辺全湧水量の約70%を湧出する大湧泉である。また、周辺湧水で流量観測が行われたことがあるのは清里水源地、神の子池 (No.8,10:斜里郡清里町観測) で数回あるだけで、経年的な記録は西別川以外に無い。そこで西別川の流量を全湧水量の代表と見なし、過去9年間 (1972~74年, 1979~84年) の流出率を求めて考察を行った。

流出率は、ある集水域で一定期間内に降った降水が地表に出てくる割合を意味し、

$$R = Q / (P \times A)$$

R : 流出率

Q : 流量

P : 降水量

A : 集水域

の式で表される。地表に注いだ雨が地表を流れて集まる表面流出水と、一度地下に浸透したものが地表に出てくる中間流出水を合わせて100%河川に集まれば流出率は1となる。降水高に対する流出高の割合と考えても良い。日本の河川は世界の代表的な河川に比べると流出率はかなり高く0.6~0.9程度で、西別川と同じ釧路土木現業所管内の河川である別保川 (観測所; 別保), 阿寒川 (同; オンネヒラ), 標津川 (同; 俵橋), 庶路川 (同; 新興) の1979~84年の流出率は0.5~1である。

##### 4-4-2. 年別流出率

Fig. 13に西別川の年別流出率を示す。西別川には観測所が2カ所あり、上流の25号 (図のROR 25, 集水面積26.0 km<sup>2</sup>) は実線で、中流の中西別 (図のROR N, 集水面積192.5 km<sup>2</sup>) は破線、一点鎖線は両者の傾向線である。両者とも、常に流出率は1を上回っており、9年平均では25号が3.2, 中西別が1.1である。すなわち25号では降った雨の3.2倍もの水が川に流れ出していることになる。この事実

は、明らかに西別川には降水以外の涵養機構が作用していることを意味し、それが〔カルデラ中の地下水+摩周湖の滲出水〕であると言って良いだろう。また、カルデラ中の地下水も降水によって涵養されているのであるから、降水量を除いた約2倍の水はほとんど全て摩周湖の滲出水ということになる。水産ふ化場から33kmの中西別では集水面積が大きいため降水量の割合が大きくなり流出率は小さくなる。経年的な流出率はほぼ一定である。

#### 4-4-3. 月別流出率

それでは次にもう少し細かく月別の流出率を見てみよう。9年間の各月の平均流出率を算出し、グラフ化したものがFig. 14で、12月と1月のつながりを見やすくするためにFig. 14をつなげて24ヶ月にし、降水高をのせたものがFig. 15である。

Fig. 14を見ると流出率は2月をピークに下降を続け、10月から再び上昇する。10月から2月までの冬期は河川水中に占める〔カルデラ中の地下水+摩周湖の滲出水〕の割合が高く、2月から10月までは降水の割合がだんだん高くなっていくということである。中西別では6月～10月間に流出率が1を下回り、湧水の影響が見られなくなる。

Fig. 15で、流出率と降水高はたいへんきれいな反比例の関係にあることがわかる。このことから流量は降水高の増減にかかわらず常に一定であることが推定できる。2月に流出率(25号)は最大となり9年平均で8.5である。1984年2月には降水高11mmに対し流量は $66.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ あり、流出率は20という膨大な値になる。

積雪地帯にありがちな4月～6月の雪解け水による流出率の上昇はほとんど見られない(中西別では4月に若干上昇しているがこの地方の雪融けは主に5月からである)。これは冬期の降雪量が少ない上に、湧水量が多いため雪融け水の影響が目立たないせいだろう。なおFig. 15を見ると、一見流出率と降水高は同サイクルの周期曲線を正確に描いているように見えるが、流量が一定である以上流出率と降水高は反比例の関係にあるのだから同一サイクルを描くことは有り得ない。実はこれは降水高の下降のパターンの鏡映である流出率の上昇パターンが、降水高の上昇パターンに酷似しているためにおこった偶然の

イタズラである。図をよく見ると流出率と降水高の上昇期のピークと下降期のピークのタイムラグが4ヶ月ずれていることに気付く。神秘の摩周湖はこんなところでも妖しい幻影を湖面に映し出している。

#### 4-4-4. 基底流出量

次に西別川の基底流出量を求める。流出ハイドログラフで、無降雨期になめらかに流量が減っていく部分を自然逓減曲線と言ひ、最大渇水期の自然逓減曲線の終点を基底流出量と考えることができる。西別川(25号)の最大渇水期である1980年2月~3月の流出ハイドログラフをFig. 16に示す。自然逓減曲線の始点は2月22日で終点は3月25日である。基底流出量は $1.52 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、[カルデラ中の地下水+摩周湖の滲出水]は最大渇水期でも最低 $1.52 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上流出していることになる。

ハイドログラフの立ち上がり部と違い自然逓減曲線のような減水部は、河谷や地下に貯留された水の流出によるものであるから流域条件だけに関係し、同一流域ではかなり一定した逓減特性を示す。Barnesはこの逓減曲線を次の関数で表した。<sup>15)</sup>

$$Q_t = Q_0 K^{-(t-t_0)}$$

$Q_0$  :  $t = t_0$  における流出量

$K$  : 逓減定数

西別川の逓減定数は $Q_0 = 2.04$ の時、 $K = 0.454$ である。

#### 4-4-5. 降水高と流出高の関係

年別および月別の降水高と流出高の関係をそれぞれFig. 17, Fig. 18に示す。流出高は流出量を集水面積で割ったものであるから単位はmmとなり、直接降水高と比較できる。

興味深い点は、年別では降水高の変化に流出高が比較的良く対応しているのに対し、月別では変化の形態は小刻みに対応しているものの、増減の幅が一致していないことである。

すなわち1月から7月まではだいたい降水高の増加量に流出高が応じるが、8月以降は降水高が増加しようと減少しようと流出高は影響されない。また2月から5月までの増加

期に降水高は70mm増えているのに、流出高(25号)は40mmしか増えていない。もっとも、降水高の変動が流出高に反映するにはタイムラグ(ハイレトグラフとハイドログラフのずれの時間)がつきまとうので、このタイムラグをカバーするために3ヶ月の移動平均をとった図がFig. 19である。Fig. 19を見ると流出高は降水高の増減にかかわらず、年間を通してほぼ一定であることが良くわかる。この事実はFig. 15での推定と一致している。

#### 4-5. 滲出水と湧水の関係

西別川の流出量から降水量を差し引いた値が[カルデラ中の地下水+摩周湖の滲出水]量である。仮にこの値[流出量-降水量]を100%摩周湖の滲出水とすると、『4-1-3. 地下滲出量』の項で求めた滲出量の経月変化と[流出量-降水量]の経月変化は、滲出水が地中を通過して湧水として出てくるまでのタイムラグをおいて一致するはずである。そこで両者の観測データがそろっている1982年6月~1984年12月までの経月変化をFig. 20に示した。単位を合わせるために[流出量-降水量]は湖面積当たりの高さで表す(HOR')。図を見ると流出高にはあまり変化がないが、滲出水とHOR'は数ヶ月のズレでほぼ対応している。この事実も摩周湖の滲出水が湧水となっていることを証明している。

細かい変動量を消すためにFig. 20の3ヶ月移動平均をとりFig. 21に示す。両者の上昇期のピークのズレ(82年11月と83年4月, 84年1月と同年4月)と下降期のピークのズレ(84年4月と同年7月)を見ると滲出が起きてから湧出するまでのタイムラグは3~5ヶ月である。

また、先に述べたようにこのグラフの滲出量は相対的に増加するはずであるから、滲出量とHOR'の差は相対的にもっと小さくなるであろう。

## 5. まとめ

摩周湖の滲出水と周辺湧水の関係を知るために、長期的な水収支の検討、湧水の流量・水質調査、流出率解析などを行った結果、以下のことが明らかになった。

①摩周湖の水位は降水量の減少に対応して低下を続け、1982年6月～1987年5月の間に最大1.28mの水位低下があった。

②湖水の滲出量は降水量に対応し、年間 $23.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上と推定される。

③湧水は摩周湖の北部（標高260～340m）と南部（標高140～240m）に集中し、標高と湧出量は無関係であるが、合計で $2.20 \text{ m}^3/\text{sec}$ と、山腹にしてはかなりの多い量であり、滲出水が涵養源と考えられる。

④主要成分濃度、主要成分構成比から湧水はI. 北部湧水群、II. 西別川・磯分内川水系、III. 人為的影響がみられるグループ、IV. 仁多川水系の4グループに分類でき、さらに全溶存成分に対する $\text{Mg} + \text{Ca}$ の比率によって、北部湧水群（I）と南部湧水群（II, IV）に分類される。しかし大局的な水質は全ての湧水が摩周湖の湖水と同種のものである。

⑤西別川の水産ふ化場は全湧水量の70%を湧出し、基底流出量は $1.52 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。年流出率は3.2で経年的にはほぼ一定、月別では2月をピークに下降を続け、10月から再び上昇する。流出高は降水高の増減にかかわらずほぼ一定である。

⑥摩周湖の滲出水が湧水として湧出するまでのタイムラグは3～5ヶ月と推定される。

したがって摩周湖の滲出水が周辺湧水の涵養源となっていることは明確である。Fig. 4 (b)を見ると、滲出している場所は湖底ではなく湖盆の側面である。多孔質のKw層中をほぼ水平か、あるいは非常に緩やかな傾斜で滲透してゆくのであろう。

Seepage Lakeの水収支を扱うには様々な問題があるが、特に摩周湖は今回の研究で滲出水と湧水に密接な定量的関係があることが明らかになったので研究意義が深い。今後は精度の高い気象観測を行うことによって、滲出水と湧水の定量的な関係を一層明確なものにし、少しでも霧の中に包まれた摩周湖の謎が解き明かされることを期待する。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、マン・ツー・マンの御指導をいただいた日本大学文理学部陸水学研究室の堀内清司教授に心から謝意を表します。

また、適切な指針と親身の助言を与えて下さった同研究室の田場壤教授と足立和歌子副手に厚く御礼申し上げます。現地調査に当たっては北海道釧路開発局の方、摩周観光センター資料室の種市氏、西別川鮭・ますふ化場の方、日本ドナルドソン・トラウト研究所の大橋氏をはじめ多くの方に貴重な資料を提供していただきました。湧水調査では第四紀学研究室の川鍋伸幸君、データ解析では地球物理学研究室の岡田義紀君、測量学研究室の松本栄君にそれぞれ御協力をいただきました。重ねて心からの御礼を申し上げます。



## 参考文献

- 1) 安部喜也他 (1984) : 陸水域バックグラウンドモニタリングステーションとしての摩周湖. 国立公害研究所研究報告 第58号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 昭和55年~57年度 特別研究総合報告, 45-51.
- 2) 岡崎由夫他 (1979) : 摩周湖の実態と透明度低下の原因究明調査及び管理方針検討報告書. 環境庁 自然保護局 阿寒国立公園管理事務所, 66 p.
- 3) 堀内清司・安部喜也 (1982) : 水収支を中心とした摩周湖の湖沼学的特色. 国立公害研究所研究報告 第36号 別刷, 18 p.
- 4) Horiuchi, S., Y. Ambe and T. Kawai (1985) : Morphological and Hydrological Characteristics of Lake Mashu. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., 79, 45-61.
- 5) Ambe, Y., S. Horiuchi and T. Kawai (1987) : Variation of water balance of Lake Mashu. -----A closed volcanic lake in Japan. Int. Ver. Ang. Limn., Vol23(in press)
- 6) 岡崎由夫 (1973) : 摩周の火山と湖の地質とそのおいたち. 摩周湖及屈斜路湖自然環境調査報告書 弟子屈町教育委員会, 12-19.
- 7) 岡崎由夫 (1967) : 釧路の地質, 220-230.
- 8) 弟子屈町郷土研究会 (1982) : 摩周の地形と植生分布合同調査報告
- 9) 財団法人日本自然保護協会 (1976) : 摩周屈斜路の自然観察, 4-15.
- 10) 更科源蔵 ( ? ) : 弟子屈町史. 弟子屈町役場, 2-13.
- 11) 中尾欣四郎・愛沢行三・大槻栄 (1966) : 倶多楽湖の水収支. 北海道大学 地球物理学研究報告 15号, 21-31.
- 12) 山口久之助 (1972) : 羊蹄山の湧水とその水収支について. 地学雑誌 81. 5, 4-20.
- 13) 山本荘毅 (1970) : 富士山の水文学的研究-火山体の水文学序説-. 地理評 4 3-5, 267-284.
- 14) 社団法人北海道土木協会 (1972~74, 1979~84) : 雨量・水位・流量年表
- 15) 室田明 (1986) : 河川工学. 技報堂出版.
- 16) 堀内清司 (1984) : 湖の水収支. 地球 6-8, 507-513.