

## 榛名湖および周辺地域の水文環境に関する地理学的研究 水温・水質鉛直分布の季節変化を中心に -

山口 香織 (法政大・地理・学)

火山地帯は主に多孔質の岩石類により構成されており、浸透能力や保水能力に優れていて、地表水や地下水等の水文現象及び生活・農業用水等の水利用に対し、特異な水文環境を作っている。榛名山はカルデラ内に火口原湖榛名湖を控えた複式成層火山で、榛名湖は観光地・漁場・水源として群馬県内で重要な位置づけにある。また本湖では、1999～2000年にかけての結氷期間が非常に短かった。結氷期間や状態を左右する気温、降雨、風向、風速などの要因は、山体全体にも影響を及ぼすと考えられる。本研究では、榛名湖及び榛名山体の水文環境と、その変化を把握することを目的とする。

キーワード：湖水循環・湧水・水温躍層・結氷現象

### はじめに

日本は世界有数の火山国であり、国内各地には数多くの火山が分布している。火山地域は、主に多孔質の岩石類によって構成されているために、浸透能力や保水能力に優れていて、地表水や地下水等の水文現象および生活用水や農業用水等の水利用に対して特異な水文環境を形作っている。山本(1970)は、特に溶岩と火山砕屑物とが互層になっている成層火山でカルデラを有するものが地下水の涵養能力に優れていることを指摘している。

群馬県の代表的な火山の一つである榛名山は、そのカルデラ内に火口原湖榛名湖を控えている複式成層火山である。また、榛名富士と榛名湖を中心とする榛名山頂部には、スポーツを始めとする観光レクリエーション施設に富んでおり、春から秋にかけては、湖上で楽しめる手こぎボートやペダルボートなどの人気が高い。冬季に湖面が結氷すると、スケートやワカザギ釣りが人気を呼ぶ。特にワカザギ釣りは、群馬県の重要な水産資源となっている。榛名湖は湖面を行楽の場として提供するだけでなく、夏季には湖水を灌漑用水として放水している。榛名湖は

観光地・漁場・水源として重要な位置づけにあり、水産資源として有効に活用するには、多面的に追求することが望ましい。この地域における先行研究としては、矢嶋(1948)の榛名山東南麓の地下水位および流動についての研究や、佐藤ほか(1977)の榛名湖の水収支についての研究などが挙げられる。矢嶋によると、榛名山の裾野の発達には東南斜面に顕著で、その上部は地下水が浸透し、高度150m付近で湧出して放射谷の水源をなしているという。佐藤らは、榛名湖は地下水によって涵養されているとし、短期間のものと経年的な水収支とを取り上げて水収支計算を行い、地下水流入量を求めた。火山体に特有な水収支・地下水循環を考える上で、湖沼や湧水・河川をあわせて考察することは有効である。佐藤らは榛名湖における地下水流入量を求めたが、精度の高い水収支を算定するには至っていない。榛名湖は、佐藤らが言うように、地下水で涵養されていると言えるが、同時に湖底からの流出水により、榛名山自体の涵養源ともなっていると考えられる。また、1999年は例年になく結氷期間が短く水循環になんらかの変化が予想され、近年の温暖化と関連してい

る可能性も考えられる。結氷の期間や状態を左右するものは、気温・降雨・風向・風速など様々な原因が考えられるが、それらが作り出す環境は、榛名山だけではなく、榛名山全体に影響をもたらすと考えられる。

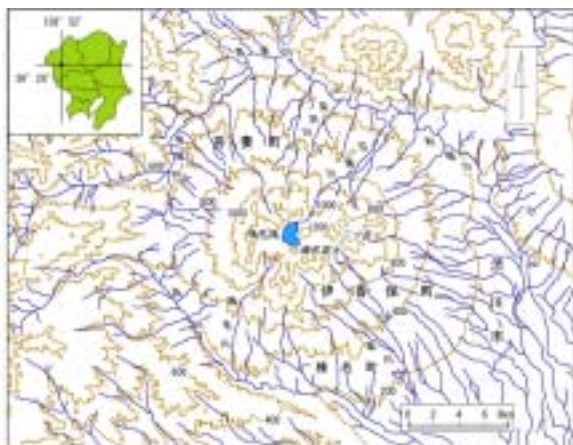
榛名山および榛名湖の水循環に関しては、未だに解明されていないことが多いが、これまでに述べてきたように、水循環を明らかにすることには非常に価値がある。

筆者は、榛名湖において1999年9月から2001年11月にかけて、計21回の観測を行った。また、榛名山の湧水・河川の観測を2000年6月から2001年8月にかけて、計4回行った。その結果をふまえ、榛名山および榛名湖の水文環境を考察する上のステップとして本研究をすすめる。

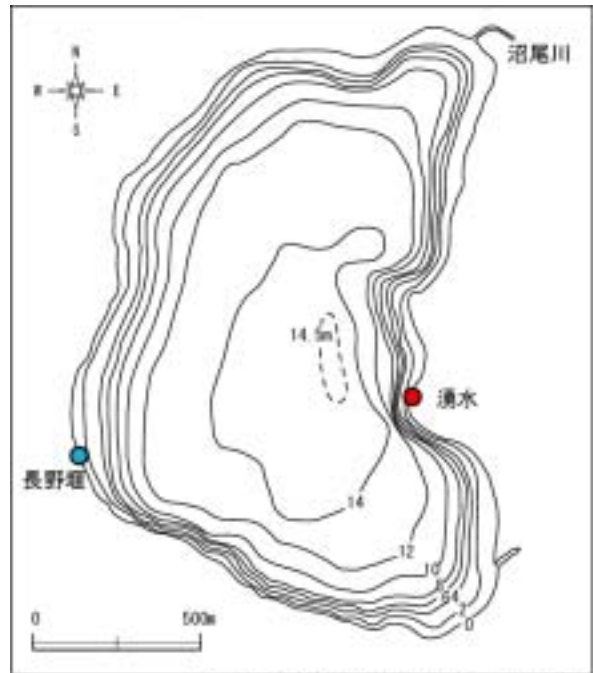
## 地域概略

### 1. 地形

榛名山は、直径およそ22kmの複合成層火山であり、山頂部は、1,300~1,400mの外輪山が1,100mばかりの火口原を囲み、中央火口丘とともに大起伏の山地を形成している(第1図)。外側の斜面は500m以上がほぼ中起伏の山地となっており、浸食谷が発達している。ただし相馬ヶ原では700m近くまで山麓斜面が這いあがっている。400~500mのところには小起伏の山地があり、400m以下に広い山麓面とそ



第1図 地域概略 (1:25,000地形図より作成)



(茨川水産試験所より入手した資料をもとに作成)

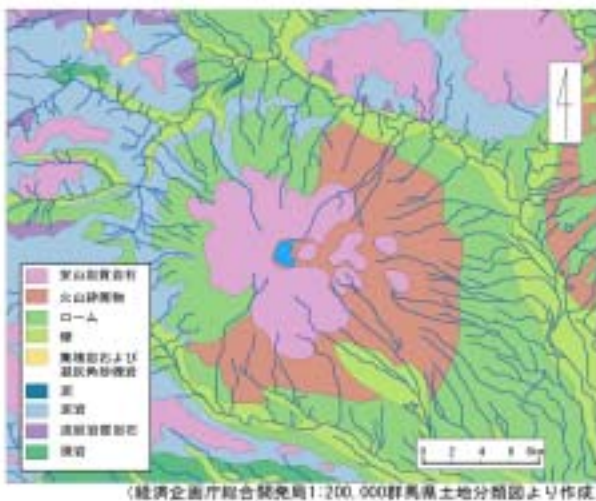
第2図 榛名湖の湖盆形態

それに続く約200m以下の下位段丘面が広がる。利根川・吾妻川・白川・車川・烏川沿いには、谷底平野が細長く分布し、その両側には狭小な各種の段丘がある。

榛名湖は、榛名山のカルデラ内にある火口原湖で、北緯36°20′、東経138°52′に立地し、水面標高1,084m、周囲4.8km、最大水深14.5m、湖面積1.15km<sup>2</sup>である(第2図)。また、温帯湖に属し、冬季には結氷する。湖盆形態は、水深10mまでは急傾斜をなし、それ以深はゆるやかな湖底平原となる。榛名湖は恒常的な流入河川を持たず、湖岸に点在する湧泉によって涵養されていると考えられている(佐藤ほかなど)。流出河川としては、沼尾川と長野堰(人工の灌漑水門)が挙げられる。1930年代には、排水の流入による富栄養化が見られたが、1981年から終末下水処理場が稼働し(内山ほか,1988)、それ以降は湖水への排水の流入はないとされている。終末処理場から出される排水は、長野堰から放水され、榛名川へと流れる。

### 2. 地質

榛名山の活動は、山頂カルデラの形成を境として、外輪山の形成された古期活動と、中央火口丘、寄生火山の形成された新时期活動とに分けられ、その活動は約 30 万年前にまでさかのぼる(佐藤ほか)榛名山の形成年代は、2.4 万年前とされているが、現在の形になったのは、「榛名二ツ岳渋川テフラ」の噴火のあとの 6 世紀末のことである(五味, 1980)。榛名山の地質は、安山岩質岩石、火山碎屑物、ローム、集塊岩および凝灰角礫岩、礫の 5 つに分類することができる(第 3 図)。急峻な山頂部を除くと、榛名山のほとんど全斜面が火山碎屑物に覆われている。



第 3 図 榛名山の地質

### 3. 水系

外輪山の山頂近くに榛名川・白川・車川・沼尾などが源を発し、侵食谷を刻んでいる。沼尾川は榛名湖からの流出河川である。南東に流れる牛王川や染谷川などは、源が 400m くらいで、その上方に広い山麓面が分布している。相馬ヶ原扇状地には降雨時のみ流水のある涸れ谷はあるが、恒常的河川はない(有吉, 1980)。南東麓一帯には 300~350m の高度に湧水帯があり、群馬用水はこれよりやや低いところをこれに平行して通っている。群馬用水の水は 380~400m くらいのところにある数カ所の貯水池に揚水され、広い山麓面のほぼ全域が用水に恵まれるようになった。

### 研究方法

始めに、榛名湖を含んだ榛名山の水循環と榛名湖の特徴を、結氷期間を鍵にしてつかむために、湖沼としての榛名湖の位置づけを見た。次に、榛名湖の結氷期間や状態を考察した。さらに、各種水文データを入手して解析を進めつつ、現地で観測を行って得たデータとをあわせて検討した。

#### 1. 日本の湖沼の中での榛名湖の位置づけ

田中(1992)の湖沼一覧表より、わが国の湖沼を成因別に分類し、それぞれの類型ごとの特徴および榛名湖の位置づけを把握した。また、湖沼を結氷するものとししないものとに分類し、緯度・経度・標高・湖面積・最大水深と結氷との関係を考察した。

#### 2. 既存水文資料の入手および整理

##### (1) 榛名湖の水質について

群馬県庁より入手した、公共水域水質測定結果(1989~1999)より、湖の表層における COD・BOD・pH・D<sub>0</sub>・電導度を抽出し、それぞれの経年的・季節的变化を見た。また、1991~93 年にかけては、水深 0・2・4・8・12m における鉛直データがあるので、それについても考察する。

##### (2) 榛名湖からの取水について

榛名湖からは、沼尾川と長野堰より、取水している。特に、長野堰からは、夏季に灌漑用水を放水し、これが湖の水位に大きく影響する。渋川土地改良事務所より入手した、岡崎伝承伝説伝記文書岡崎用水土地改良区史、岡崎地区畑かん用水確保調査委託業務報告書より、榛名湖における取水の現況をまとめる。

##### (3) 榛名湖の結氷について

1989~1999 年の 11 年間分の結氷データ(県立榛名公園管理員が継続的に記録したものを)を群馬県庁より入手し、これとアメダスの 1991~2000 年 4 月までの気温(中之条)と降水量(榛名湖)データとを併せて考察した。榛名湖における気温のデータは、限られた期間のものしか入手できなかったため、中

之条のデータとの比較を行った。また、赤城大沼における結氷の記録についても、考察した。

### 3. 観測結果の解析

#### (1) 榛名湖の観測

榛名湖の湖心における観測を、1999年9月7日、10月29日、11月19日、12月18日、2000年1月7日、4月9日、6月2日、8月12日、12月3日、2001年4月19日、8月8日、9月23日、29日、10月5日、12日、19日、26日、11月2日、8日、17日、25日の計21回行った。観測項目は、水温、電導度、pH、RpH、採水である。各項目の測定に使用した器材は、水温および電導度については、EST-3型電機水質計第809号((株)東邦電探)、pHは比色管、採水には、自転車ポンプを改造した自作の採水器を使用した。持ちかえったサンプル水は、実験室にてイオンクロマトグラフによる主要イオン濃度の測定を行い、また、滴定法を用いてpH4.8アルカリ度を測定した。イオンクロマトグラフの測定には、パーソナルイオンアナライザPIA-1000((株)島津製作所)を、pHの測定には、MP125pH METER(Mettler-Toledo(USA))を使用した。2001年9月29日~11月25日にかけては、湖面を縦断する形で6点観測地点を設け、湖心にて表層より0、3、6、9、12m、底の採水を行った。2001年10月19日~11月25日にかけては、湖心の水深2、6、10.5、13.5mにそれぞれ自記録計を設置し、主に水温を記録した。

#### (2) 榛名山の湧水・河川の観測

榛名山周辺の湧水・河川水の観測を、2000年6月2日、8月12日、12月3日、2001年4月19日の計4回行った。榛名湖における観測と同様に、水温、電導度、pH、RpH、の測定を行い、採水したサンプル水は、実験室にてイオンクロマトグラフによる主要イオン濃度の測定を行った。

## 結果と考察

### 1. 日本の湖沼の中での榛名湖の位置づけ

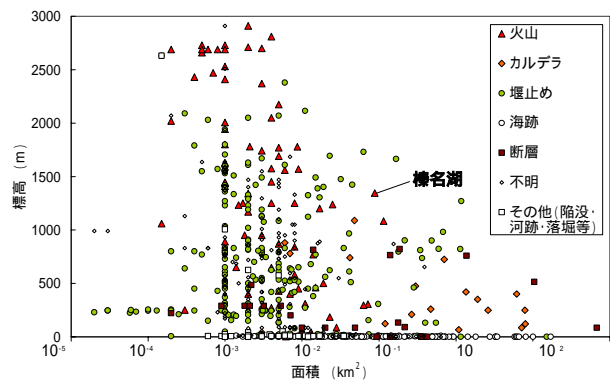
湖沼の成因はさまざまであり、それは、湖の各種の特性と深い関係を持つ。すなわち、火山性の湖であれば、その分布は火山の分布と一致するし、内湾が漂砂によって閉鎖された海跡湖は海岸部の低標高地に分布し、その形状は内湾や潟の特性をとどめている。このような成因によって規定される各種の物理的特性は、その湖沼の化学的特性(水質)を強く規定すると考えられる。つまり、同一の成因や湖沼型に属する湖沼群は、他のグループとは異なった特性をもつことが予想される。

わが国の多くの湖沼は火山活動によってできている(鈴木, 1994)。その数は、865湖沼、その面積の合計は2438.687 km<sup>2</sup>であり、これは日本の国土総



田中正明(1992)『日本湖沼誌』をもとに作成

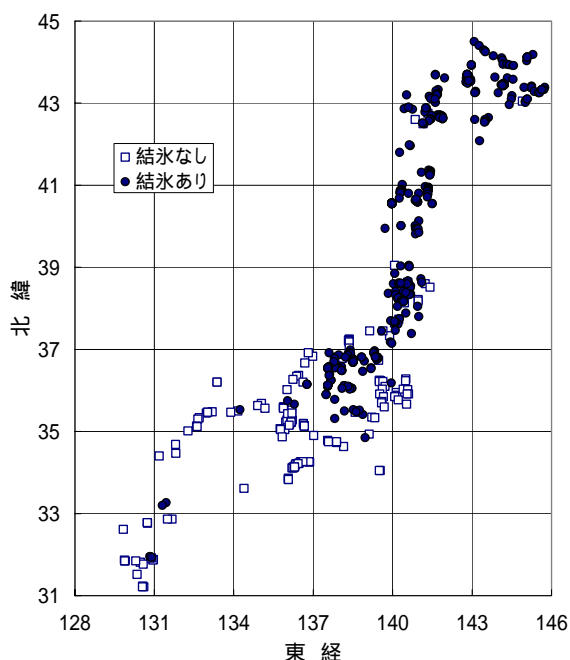
第4図 日本の主な火山性湖沼の分布



田中正明(1992)『日本湖沼誌』をもとに作成

第5図 成因別に分けた日本の湖沼の面積と標高の関係





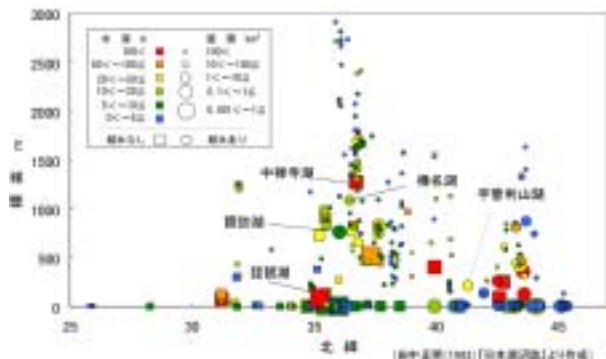
(田中正明(1992)『日本湖沼誌』をもとに作成)

第6図 湖沼の緯度・経度と結氷の有無

面積の0.645%にあたる。その分布は北海道および東北に偏っている。(第4図)。

湖沼を成因別に分類すると、それぞれの成因ごとに分布している標高や面積に特徴が見られる(第5図)。榛名湖の属する火口原湖に突いていえば、標高約100mから3,000m付近まで広く分布し、湖面積は小さいものが多い。それに対し、同じ火山性湖沼であるカルデラ湖は、せいぜい1,000mまでに分布し、100km<sup>2</sup>もの湖面積をもつものも見られる。

次に湖沼群を結氷の有無で分類すると、湖沼の位

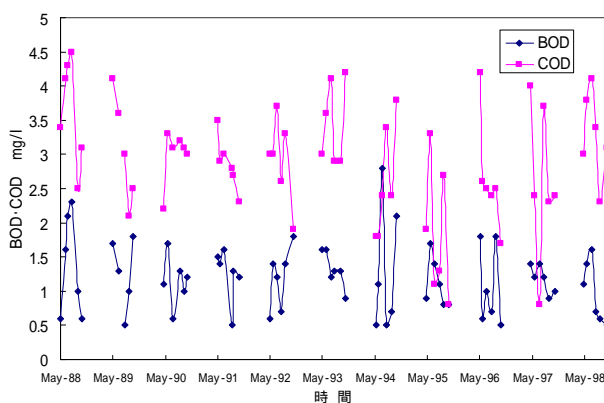


第7図 湖沼の緯度・標高・面積・最大水深と結氷の有無の関係

置する緯度と経度が結氷の有無に大きく関わってることがわかる(第6図)。それに加えて、標高、湖面積と最大水深も結氷にきいてくる。(第7図)。榛名湖は標高1,084m、湖面積1.15km<sup>2</sup>であることから、結氷するかしないかの境界線上に位置すると言える。

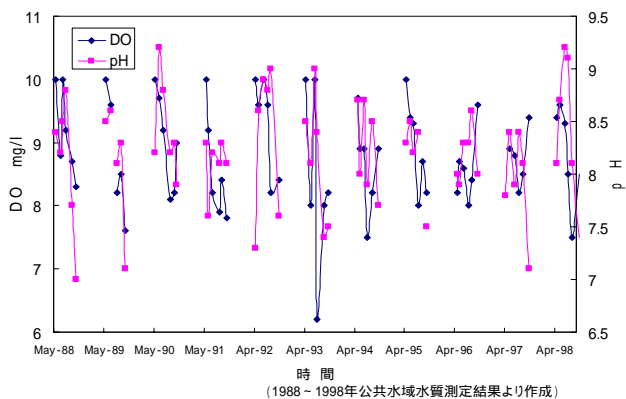
## 2. 榛名湖の水質について

榛名湖の表層における水質の季節的・経年的変化を、BOD・COD・pH・DOから考察する。BOD・CODともに、値の季節変化は大きいですが、経年的には目立った変化はなく(第8図)。現在の水質は安定していると言える。同様にpH・DOについて見ると(第9図)、pHの値が最低が7.0、最高が9.2と、非常に幅の大きいことに気付く。また、アルカリ性に強く傾いている。BOD・COD・pH・DOのそれぞれの季節変化を見ると(第10図)、pHはおもに5月から上昇していき、6~8月にピークを迎え、減少していくという



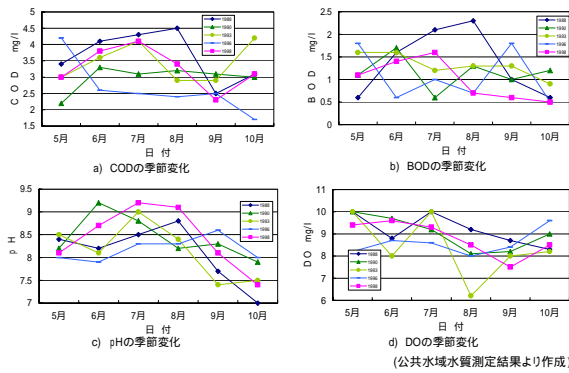
(1988~1998年公共水域水質測定結果より作成)

第8図 COD・BODの経年変化



(1988~1998年公共水域水質測定結果より作成)

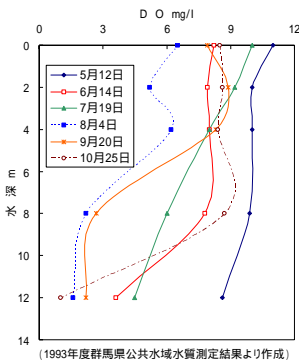
第9図 溶存酸素とpHの経年変化



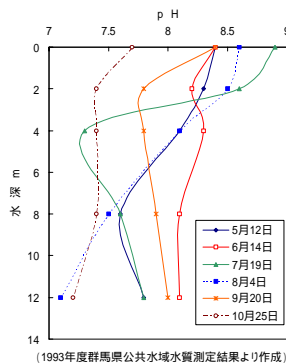
第10図 5月～10月にかけての水質の変化傾向が見られる。

これは、夏季にプランクトンが活発に活動し、それによる二酸化炭素の減少によるものと考えられる。

次に、pH・DOの鉛直分布を考察する。pHについては、前述したように季節変化が伺えるが、5月の表層から水深2mまでの値は、6月のそれよりも高い値となっている(第11図)。8月については、表層



第11図 溶存酸素の鉛直分布(5～10月)



第12図 pHの鉛直分布(5～10月)

では8.6であるが、底層では7.1と底層における値の減少が目立つ。8月のDOの鉛直分布を見ると、底層で値が減少していることから、これは、湖底における酸素の欠乏によって、湖底堆積物から重炭酸塩が溶解し、湖水がアルカリ性に傾くためであろう。夏季の湖底において溶存酸素が0を指していたことは、佐藤ほかによっても報告されている。榛名湖では湖底におけるDOの減少が著しく、特に8・9月では1mg/lを下回ることが確認できる。これは、本湖におけるプランクトンの炭酸同化作用が活発である

ことを示す。

### 3. 榛名湖からの取水について

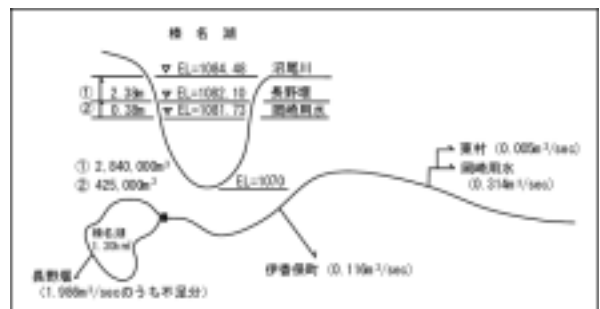
榛名湖は2つ流出口を持っている。一つは流出河川である沼尾川、もう一つは、長野堰という水門である。沼尾川からは、伊香保水道、東村水道、岡崎用水、下流農業用水が取水されている(第1表)。取水量は、半旬期ごとに細かく規定されていることがわかる。

一方の長野堰からは、夏季に灌漑用水を放水している。榛名湖からの取水の計画は、次のようである。榛名湖の水位が1,070～1,081.73mの間は、取水は行われず、水を榛名湖に貯水する。1,081.73～1,082.10mの間は、岡崎用水、伊香保町水道、東村水道、榛名湖貯水として使用される。1,082.10～1,084.48mの間は、岡崎用水、長野堰、伊香保町、東村、榛名湖貯水に使われる。榛名湖の水位が1,084.48mを超えた分は、無効放流となって沼尾川に流出する(第13図)。

これらの記録により、榛名湖からの取水量が明確となり、榛名湖の水収支を考える上で、有効となってくるであろう。2001年8月8日の時点では、長野堰からの取水が行われており、沼尾川からの見かけ

第1表 榛名湖からの取水の現況

榛名湖水道 (m <sup>3</sup> /sec)	0.003 (年間 383千m <sup>3</sup> )						年間容量 (千m <sup>3</sup> )
	7月1半旬	7月2半旬	7月3半旬	7月4半旬	7月5半旬	7月6半旬	
長野堰	0.385	0.256	0.939	1.622	1.986	0.186	2,338
沼尾川放流量 (m <sup>3</sup> /sec)	1月1半旬～ 2月6半旬	3月1半旬～ 4月6半旬	5月1半旬～ 6月4半旬	6月5半旬～ 9月5半旬	9月6半旬～ 2月6半旬	有効量 (千m <sup>3</sup> )	無効量 (千m <sup>3</sup> )
	0.995	0.076	0.161	0.16	0.13	4,025	0
沼尾川からの取水 (千m <sup>3</sup> )	伊香保水道	1,829					
	東村水道	158					
	岡崎用水	4,839					
	下流農業用水	1,001					
計	7,614						



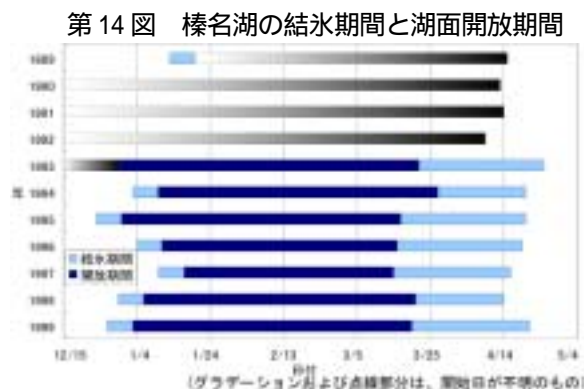
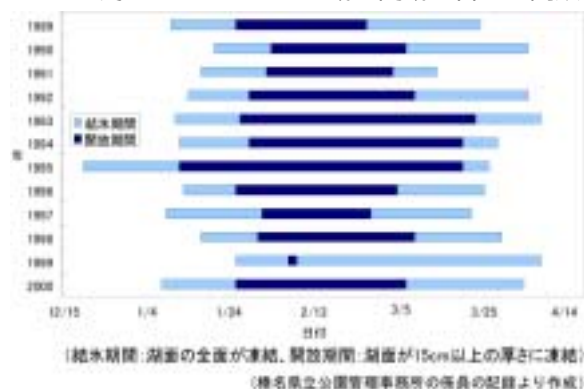
第13図 榛名湖からの取水経路

上の表面流出は全くなかったが、水門から湖水の流出が確認できた。8月8日には、湖水位が平常の観測時よりも50cmほど低下していたために、普段なら水面下で確認できない湧水の湧出点が、湖の東方の湖岸において確認された。湧水が湖の中で、密度流として存在していたとしたら、夏季における表層の流れの変化とともに、今後の研究として興味深い。

4. 結氷について

(1) 結氷期間

1989～1999年までの榛名湖の結氷および氷上の開放期間を表したものが、第14図である。ここで言う結氷期間とは、湖面が全面結氷した日から全面解氷する日までの期間のことである。(ただし、最終的に全面結氷とならなかった場合、その最大に凍結し最初の日を結氷日とする。1999年は、湖面の3/4が最大凍結面積であったので、その最初の日を結氷日としている)。氷上の開放期間とは、湖上で行われるワカサギ釣りおよびスケート場の開場の日から閉鎖



の日までの期間である。これは氷が15cm以上の厚さにならないと開放されない。

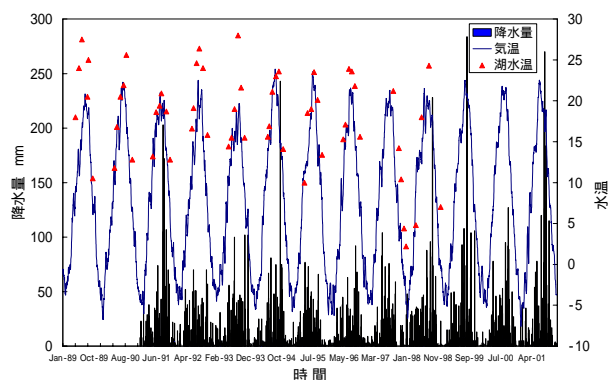
この期間の中で特徴的なものは、1991年の結氷期間が短いこと、1995年の結氷期間・湖面開放期間がともに長く、開始が早く、終了が遅いことと、1999年の開放期間が極端に短く、結氷の開始・終了が遅いことである。

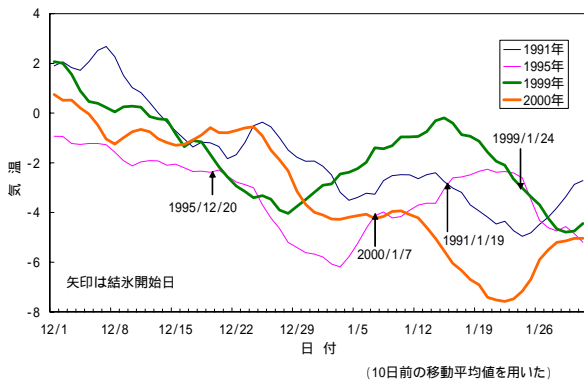
同じように、赤城大沼について見てみる(第15図)。大沼では、1990～93年の結氷開始、または開放期間が記録されていない。1991・1999年は榛名湖では結氷状態があまり良くなかったが、大沼ではそのような結果は現れていない。

(2) 結氷と気温・降水量との関係

結氷の期間や時期を決める要素としては、気温・日射・風向・風速・降水量などとさまざまな気候因子が関わってくるが、それらが結果として湖水温に影響し、結氷を左右するものと考えられる。本論文では、そのなかでも気温と降水量に着目した。ここでは、1991年～2000年4月までのアメダスデータの中の条(気温)と榛名山(降水量)の、気温については日平均を、降水量については日合計データを利用した。榛名山では気温データを記録していないので、榛名山に隣接する中之条・沼田・前橋のデータを比較したところ、3地点ともよい対応を示したので、最も近い中之条の気温を採用し、榛名山との標高差から遞減率を用いて榛名山の気温を割り出した。

まず、気温から見ると(第16図)、年間の低気温

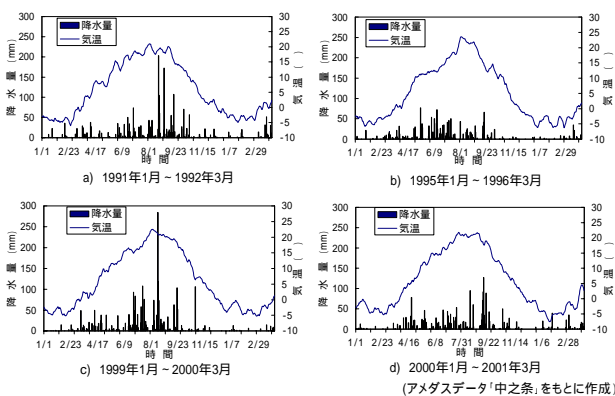




第 17 図 結氷期直前の気温変化

のピークはあまりばらつきが見られないが、最高気温は年ごとに差が見られる。さらに細かく、結氷にいたる直前の12~1月の気温変化を見る。ここでは、10日前の移動平均値に変換した。結氷期間の短かった1999年は比較的高い値を示しているのに対し、結氷の良く発達した1995・2000年は低い値であり、結氷期直前に気温が深い落ち込みを見せていることがわかる(第17図)。

湖水の受熱量を左右する、もう一つの要素が降水である。夏季に大量の降水があった場合、集水域の小さい榛名湖の地形的立地を考えると、表面流出量はわずかであり、湖の熱収支にさほどの影響はないかもしれないが、降雨が地下水となり時間差をもって湖内に流入するとしたら、湖の熱バランスを乱す可能性は大いにある。その視点から見ると、91年と99年は夏季の気温のピーク時に降水量が多い(第18図)。逆に96年などは、夏季の降水量が極めて少ない。しかし、一般に大量の降雨が流入した場合、湖



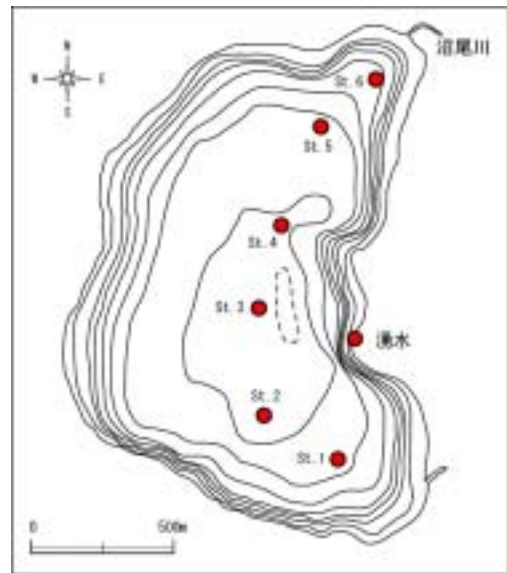
第 18 図 気温と降水量の季節変化

水は冷却されると考えられるので、この場合は、降雨の表面流出ではなく、一旦地下に浸透した地下水が湖へと流出しているのであると考えられる。

### 5. 榛名湖の観測結果

榛名湖の観測は、1999年9月7日、10月29日、11月19日、12月18日、2000年1月7日、4月9日、6月2日、8月12日、12月3日、2001年4月19日、8月8日、9月23日、29日、10月5日、12日、19日、26日、11月2日、8日、17日、25日の計21回行った。2001年9月29日~11月25日にかけては、湖面を縦断する形で6地点と、湧水が1点の合計7点観測地点を設け(第19図)、湖心にて表層より0, 3, 6, 9, 12m, 底の採水を行った。2001年10月19日~11月25日にかけては、湖心の水深2, 6, 10.5, 13.5mにそれぞれ自記録計を設置し、主に水温を記録した。

観測項目は、水温・電導度・pH・R<sub>p</sub>Hである。その結果を項目別に述べる。

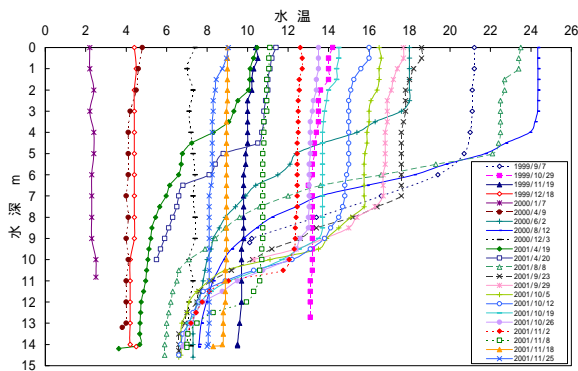


第 19 図 湖面観測地点

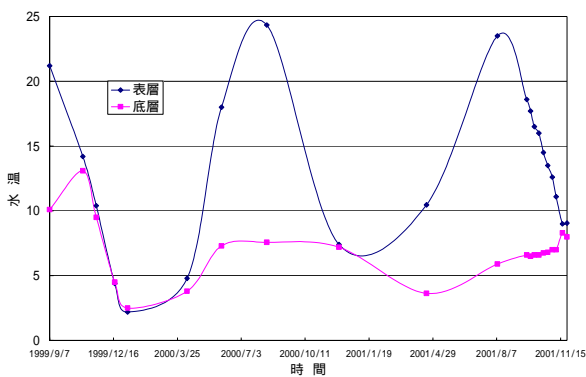
#### (1) 水温

水温は季節変化にともなって、表層の最低が2000年1月7日に2.2℃、最高が2000年の8月12日に24.3℃を記録した(第20図)。底層では、最低



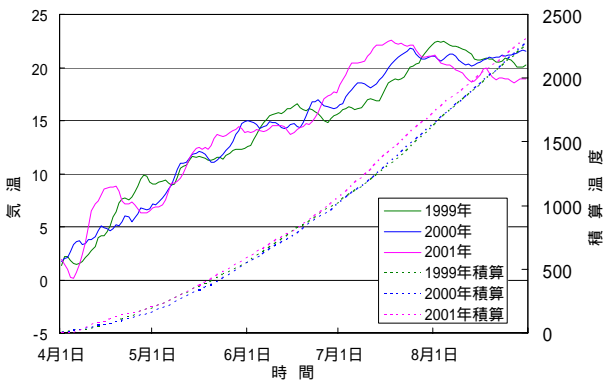


第20図 水温の鉛直分布の季節変化  
(1999年9月7日~2001年11月25日)

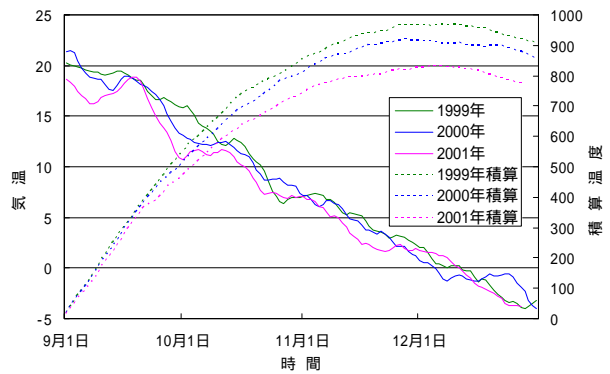


第21図 表層と底層水温の季節変化

が2000年1月7日の2.5℃、最高が1999年10月29日の13.1℃であった。1月7日の時点では、湖面は全面結氷に至っていなかったが、全面結氷の際には水温の逆転現象が起こることが予想されるから、底層における水温の下限は、結氷期直前に確認できると考えられる。また、底層の水温は秋季の循環期に最大を迎えるということがわかる(第21図)。



第22図 受熱期における気温変化



(アメダスデータ「中之条」をもとに作成)

第23図 放熱期における気温変化

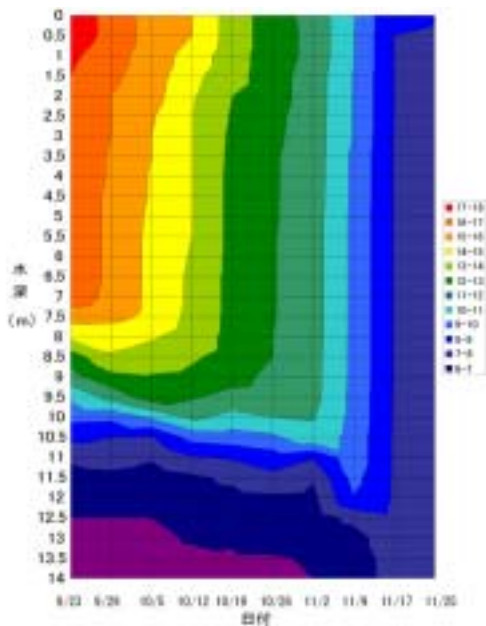
夏季の水温について見ると、2000年8月12日と2001年8月8日には2000年のほうが表層の水温が高く、底層では低い。4~8月を湖の受熱期として考え、毎日の平均気温を積算すると、2000年と2001年とでは、2001年のほうが積算値が大きい(第22図)しかし、最高気温のピークが2001年のほうが10日ほど早いため2001年は観測日にそのピークをとらえられなかったと考えられる。

同じようにして、秋の放熱期を考える。1999年11月19日と2001年11月18日を比較すると、2001年のほうが1℃以上水温が高い(第23図)。気温変化を見ても2001年のほうが低い値を維持しており、11月半ばの積算温度は150℃ほどの差を見せている。

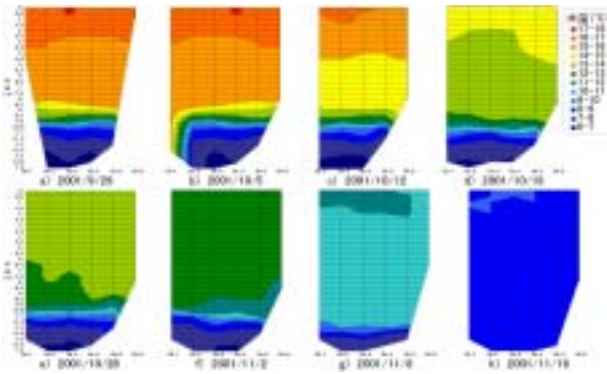
9月29日から11月25日にかけては、水温躍層の変化をとらえるため、週1回の密な観測を行った。その観測結果を第24図に表す。同じく9月29日~11月18日にかけては、湖を縦断する6地点について観測を行った(第25図)。水温躍層については、最小が2001年4月19日の4m、最大が同年11月8日の12.25mに中心点を持つ躍層が確認された。2001年9月23日~11月8日までの間の水温躍層の中心点は、

$$y = Ax^6 - Bx^5 + Cx^4 - Dx^3 + Ex^2 - Fx + G$$

$$(A = 0.0151586125, B = 1.0303251088, C = 29.0466873132, D = 434.9026399258, E = 3648.5344879994, F = 16266.2134129829,$$

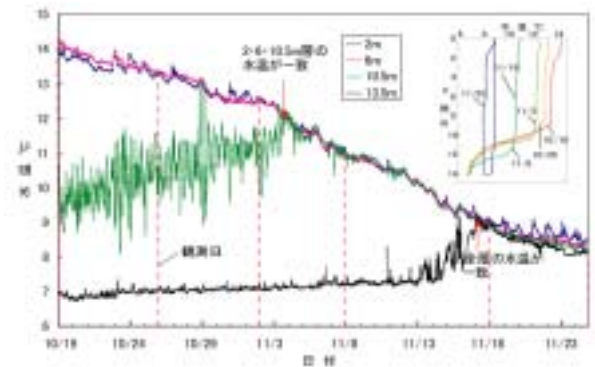


第24図 水温の鉛直分布の変化  
(2001年9月23日～11月25日)



第25図 榛名湖の縦断面における水温変化  
(2001年9月29日～11月18日)

$G=30129.1852913238$ ) という式で近似できる．ここで  $x$  は水温で， $y$  は水深である．これに水温を代入していくと，水温が  $8.55$  になった時点で，躍層の中心点は  $14.48\text{m}$  となり，榛名湖の最大水深は  $14.6\text{m}$  であることから，これが躍層の下限であると考えられる．11月8日には躍層が確認されたが，翌週の11月17日にはすでに消滅していたため，湖水の循環はこの9日間の間に行われたであろう．自記録計のデータを見ると，11月17日付近で循環が行われたことがわかる(第26図)．一般に湖水の循環は，表層水が冷却され，上部の等温部が循環し，躍層の位置

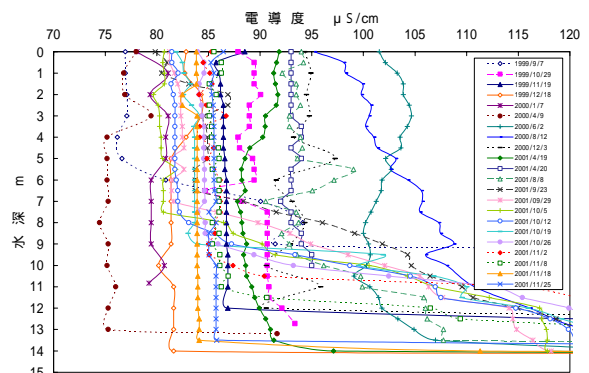


第26図 成層期から循環期に至る水温変化の鉛直分布(2001年10月19日～11月18日)

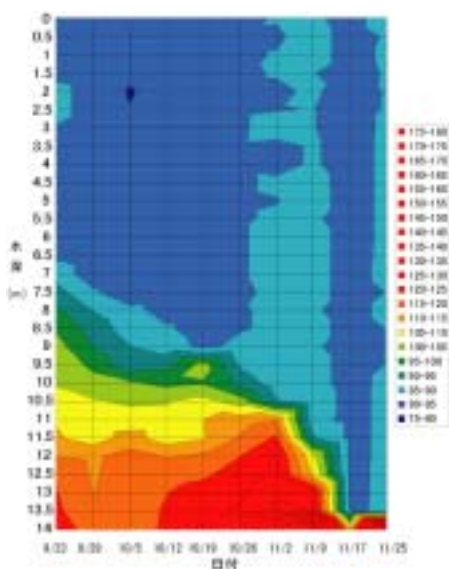
も深くなり，上下の水温差がなくなった時点で循環する，とされている．つまり，湖水が何度になったら循環するというわけではなく，夏季における受熱の量や，雨量，風向・風速などの影響を受け，年によってその時期は異なる．例えば，1999年10月29日には  $13\sim 14$  の間で循環が起こっているが，2001年は  $8\sim 9$  になるまで循環は起こらなかった．循環の仕組みの解明には，まだ様々な角度からの検討が必要である．

#### (2)電導度

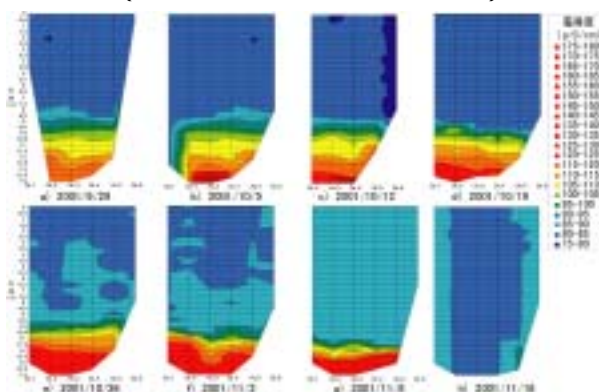
電導度は，表層において，最低が1999年9月7日に  $76.9\mu\text{S}/\text{cm}$ ，最高が2000年6月2日に  $101.6\mu\text{S}/\text{cm}$  が観測された(第27・28・29図)．底層においては，その湖底のヘドロによる電導度の値の上昇が著しく，観測毎の変化の幅が大きいので，ここでは省略する．



第27図 電導度の鉛直分布の季節変化  
(1999年9月7日～2001年11月25日)

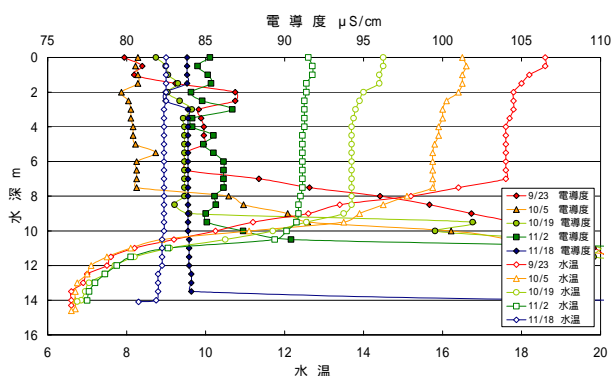


第 28 図 電導度の鉛直分布の変化  
(2001 年 9 月 23 日 ~ 11 月 25 日)



第 25 図 榛名湖の縦断面における電導度変化  
(2001 年 9 月 29 日 ~ 11 月 18 日)

各月の鉛直分布の変化を見ると 2000 年 4 月 9 日, 2001 年 9 月 23 日に水深 2~3m で, また, 1999 年 10 月 29 日, 2000 年 12 月 3 日, 2001 年 8 月 8 日において, 水深 5~6m で, 2000 年 12 月 3 日, 2001 年 10 月 19 日に水深 9~11m において, 値が楔状に変化している。2001 年 8 月 8 日, 9 月 23 日, 10 月 19 日に関して言うと, 値の急変する水深は, 水温躍層の位置と合致している。これらの時期は湖の成層期にあたり, 前述したように, 湖底では酸素が欠乏する。そのため, 酸素と結び付いていた無機イオンが堆積物から溶出する。一般的には, 成層期の湖は成層が強固なために躍層の上部と下部の水の循環は起こり



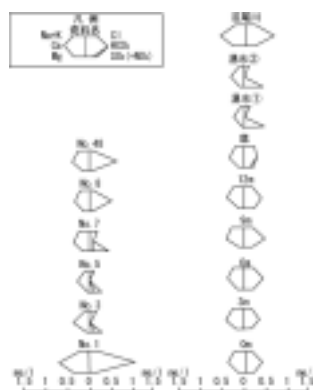
第 30 図 水温躍層と水質躍層の関係

えない。しかし, 湖底の低酸素状態により発生した硫化水素などが, 微小な気泡となって, 躍層下部に溜まり, 躍層の上部へと徐々に浮上している可能性は考えられる。

全体的な傾向としては, 春季から夏季にかけて値が高くなり, 秋季に一旦下降したのちに再び徐々に上昇していく。これは水温の躍層の位置と密接な関係にある(第 30 図)。春季から夏季にかけて, 電導度が上がるのは, 湖底からの無機イオンの溶出によるものであろう。次に, 秋季に値が上がっていくのは, 水温躍層と密接な関係があり, 躍層の水深の低下に伴い, 躍層上部の循環部に, 下層の高濃度な水が混入することによって, 全体の平均値が上昇するからであると考えられる。

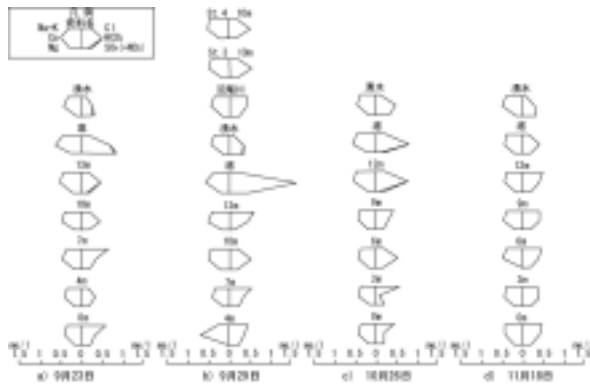
(3) 水質

榛名湖の水質の鉛直変化を見ると, 時期による各層の水質の変化がよくわかる。(第 31・32 図)。榛名

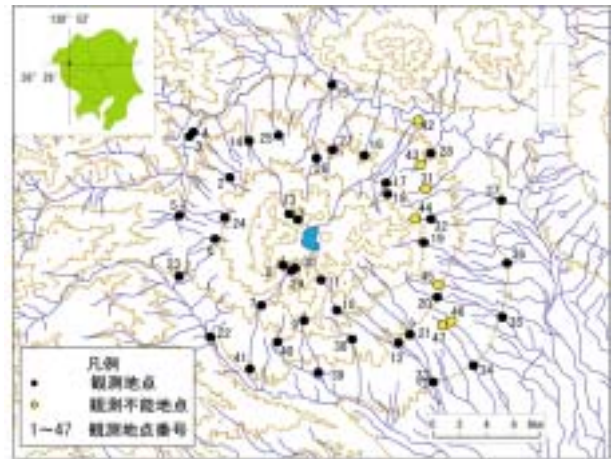


第 31 図 榛名湖および周辺の湧水・河川水の水質  
(2001 年 8 月 8 日)





第32図 成層期から循環期にかけての水質変化  
(2001年3月～11月)



第34図 観測地点

に記す。

(1)水温

観測の結果、季節変化が水温の値に顕著に現れ、また標高が下がるとともに値は上昇するという傾向が見られたことは、以前報告した(山口, 2000)。標高1000m付近では、9～13 の範囲に収まっているが、400m付近では17～21 の値を示す。これは、標高の高い地点のほうが低いものよりも気温が低いこと、また湧水は涵養高度の水温を保持しながら流下していくことから説明できる(第35図)。

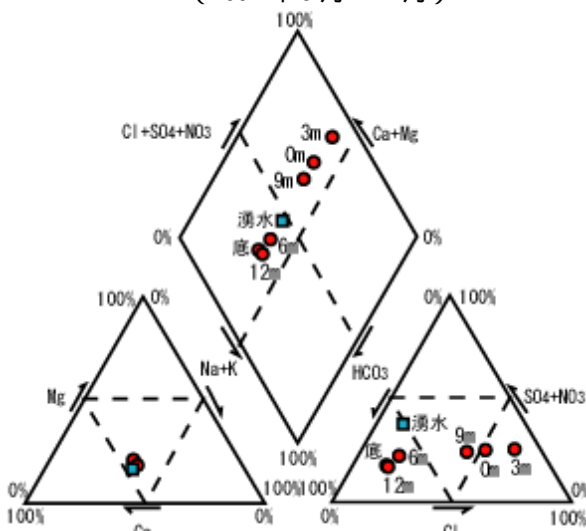
(2)電導度

電導度は水温とは反対に、季節変化の影響をほとんどうけない(山口)が、標高との関係は水温と同様に、標高と反比例の関係にある。これは山頂付近の高度の高い地点は、電導度の低い降雨によって涵養されているからであると思われる。また、標高が下がるとともに集落などが増えるため、人為的な影響も作用していると考えられる。

(3)水質

湧水・河川の観測地点は、山体をまんべんなく網羅している。水温・電導度値のおおまかな傾向については前述したとおりだが、地点によっては以上値を示す地点が存在している。

地点 No.17 と 18 については、伊香保温泉の温泉水が混入しているため、水温・電導度・pH とともに



第33図 水質の鉛直分布の変化

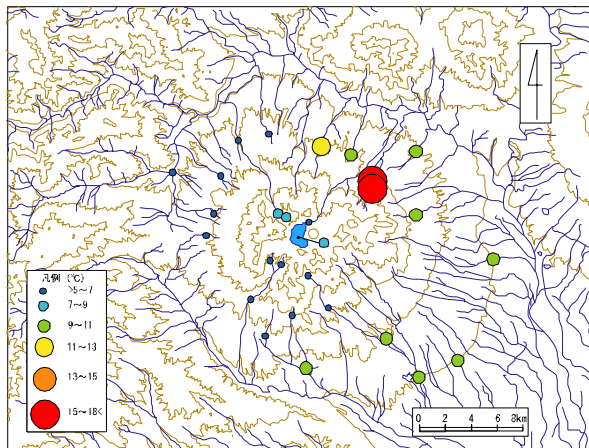
(2001年10月26日)

湖の湖水・湧水は、アルカリ土類非炭酸塩型・アルカリ土類炭酸塩型に属し、湖が地下水によって涵養されていることを示す(第33図)。底層の値が季節の変化とともに減少していくのは、湖が循環期に入ることによる溶存成分の拡散であると考えられる。循環期には、水質が均一になっていることがわかる。湧水と湖水の形は、おおむね似ているが、8月の湧水は、他との形の違いが目立つ。8月の観測日の直前には、大型の台風が群馬県に直撃したため、降水が流出したものだと思われる。

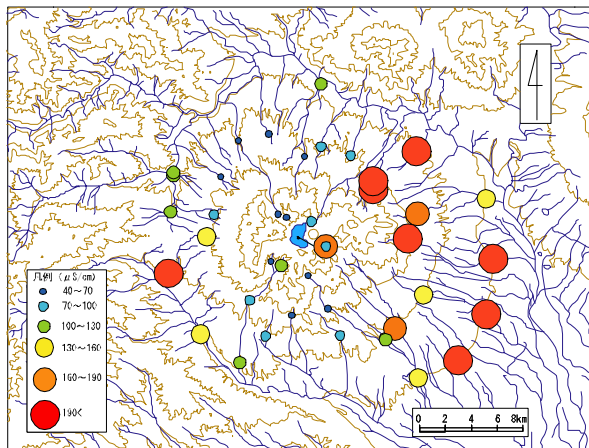
6. 榛名山の湧水・河川水の観測結果

榛名山の湧水・河川の観測は2000年6,8,12月, 2001年の8月の計4回行った。観測地点を第34図

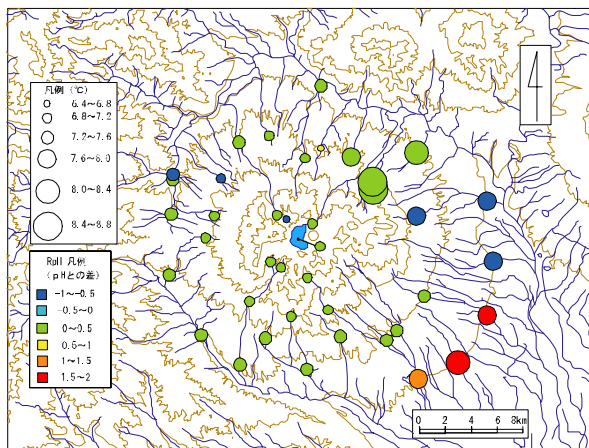




第 35 図 榊名湖および榊名山周辺の湧水・河川水の水温 (2000 年 12 月 3 日)



第 36 図 榊名湖および榊名山周辺の湧水・河川水の電導度 (2000 年 12 月 3 日)

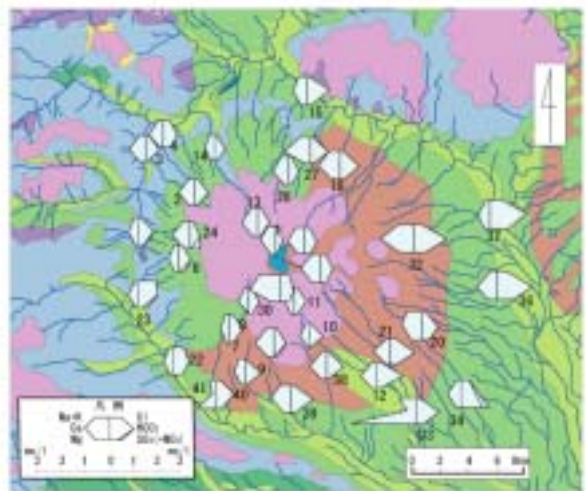


第 37 図 榊名湖および榊名山周辺の湧水・河川水の pH・R pH (2000 年 12 月 3 日)

高い値を示す (第 35・36・37 図)。

水温に関しては No.27 だけが No.17・18 について 18 という高温を示している。電導度について言えば、山麓の北東部から南東部にかけて No.17・18・28・32・34・35・36 などの地点を中心に 190  $\mu$ S/cm 以上の高い値が見られる。

pH・R pH については、やはり No.17・18 が pH8.4 以上と高い値だが、R pH に換算した値を考えると、No.33・34・35 の地点が pH10.0 以上と高い値になる。



第 38 図 榊名湖および榊名山周辺の湧水・河川水の水質と地質 (2000 年 12 月 3 日)

水質分析結果からも No.28 については重碳酸塩の値が突出しており、排水などの人為の影響が考えられる (第 38 図)。地形的に見て、榊名湖からの流出地下水の流入が大いにあるであろうと予測していた No.30 は、水質分析からはそのような結果が得られなかった。

### おわりに

本研究では、以下のことがわかった。

1. 榊名湖の結氷期間・湖面開放期間の経年変化については、ある程度の周期性が伺え、結氷開始直前 12~1 月の気温との関係が見うけられる。1991・1995・1999 年は、異常年であると考えられ、それぞれ結氷日数が 54・93・70 日であり、解氷日数は、29・

65・2日であった。

2. 榛名湖の表層の水温は、最低で2.2℃、最高で24.3℃、底層の最低が2.5℃、最高が13.1℃を記録した。電導度については、表層の最低が76.91  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、最高が101.6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。榛名湖の特徴として、春から夏にかけて、電導度の値が上昇し、秋季に一旦下がった後に再び上昇する傾向があり、これは水温躍層の位置と密接な関係にあることが、観測の結果わかった。

3. 榛名湖の循環期は、1999年には10月29日には循環が確認されたが、2001年においては、11月18日まで循環は確認できなかった。また、その際の水温も、1999年は平均13.65℃、2001年は8.65℃と、5℃も違うという結果が得られた。この、循環にいたる時期や水温の差異が、湖水の冷却に影響を与え、結氷の期間や状態を変化させることが考えられるが、循環の時期やプロセスのモデル化の検討が今後必要となってくる。

## 謝 辞

本論文を書くにあたって、多くの方々にご協力いただいた。東崎忠士氏をはじめとする榛名ロッジの方々には、現地での観測に快くご協力していただき、また毎回ボートを貸していただいたご好意に御礼申し上げます。群馬県庁自然環境課公園管理係の五十嵐章人氏、群馬県水産試験場調査係の久下敏宏氏、群馬県渋川土地改良事務所整備課の女屋一之氏には、ご多忙の中資料を提供していただき、感謝の念が絶えない。お忙しい中、水質分析を快く引き受けてくれた濱田浩美先生、そして千葉大学教育学部地学研究室のゼミ生の方々には、心から感謝している。そして、勉強不足の自分に最後まで叱咤激励し、指導していただいた小寺浩二先生には、感謝を申し上げても足りない。最後に、ともに1年間がんばった水ゼミ同志の大八木英夫、加藤弘章、西崎貴子、福地妙子、松本直也に心より御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- アジア航測株式会社(1987): 県営土地改良計画調査付帯村営単独調査、岡崎地区畑かん用水確保調査委託業務報告書。
- 新井正(1999): 諏訪湖の結氷現象とエルニーニョ, 日本地理学会発表要旨集, No. 55. pp. 378-379.
- 新井正・森和紀・高山茂美(1977): 三宅島の陸水について, 日本陸水学会, 38-1, pp. 1-8.
- 新井正(2000): 湖沼表面混合層における垂直流の測定, 地球環境研究, 2, pp. 5-15.
- 新井房夫編(1993): 『火山考古学』, 古今書院, 264p.
- 有吉武夫(1980): 榛名山麓の地誌, 群馬大学地理学会論文集, 8, pp. 1-18.
- 内山征洋・中島右・富沢恒夫・赤岩英夫(1988): 榛名湖の銅( ) 錯化容量, 日本陸水学会, 49-1, pp. 19-25.
- 谷保編(1995): 『岡崎伝承伝説伝記文書 岡崎用水土地改良区史』, 岡崎用水土地改良区, 159p.
- 岡田浩美(1987): 日光西の湖における水収支および循環, 陸水学雑, 48-1, pp. 25-32.
- 小椋和子・落合正宏・河村公隆・福島和夫・塩谷真・山本修一・石渡良志(1985): 榛名湖における水中有機物の初期続成作用( ) セジメントトラップ試料, 浮遊懸濁物および堆積物中の炭素および窒素からみた有機物の鉛直輸送, 日本陸水学会, 46-4, pp. 297-302.
- 久下敏宏・清水延浩・松井資元・薩美賢策(1998): 榛名湖ワカザギ資源調査, 群馬県水産試験所研究報告第4号, pp. 35-44.
- 久下敏宏・中野亜木子・薩美賢策(1997): 漁場環境基礎調査- (榛名湖), 群馬県水産試験所研究報告第3号, pp. 3-7.
- 群馬県: 公共用水域の水質測定結果, 昭和63年度~平成8年度。
- 五味礼夫(1980): 『群馬県の湖沼』, 上毛新聞出版局, pp. 170-183.

- 西條八束(1992):『小宇宙としての湖沼』,大月書店,  
p.197
- 佐倉保夫(1993):温度をトレーサーとした地下水流動の研究,ハイドロロジー23-2, pp.35-45.
- 薩美賢策・林不二雄・堀賢平・村田誠:漁場環境保全基礎調査 榛名湖と赤城大洞湖の水質,群馬県水産試験所研究報告第22号, pp.79-84.
- 佐藤キエ子・武内康二(1996):八丈島,東山火山体における地下水の賦存状況について,日本大学文学部自然科学研究所研究紀要,31, pp.123-129.
- 佐藤芳徳・中川慎治・高野昇・上妻聖二(1977):榛名湖の水文環境,ハイドロロジー,8-9, pp.37-45.
- 佐藤芳徳(1983):中禅寺湖における湖水の混合とトリチウム収支,地理学評論,56-10, pp.667-678.
- 島野安雄(1999):雲仙火山東麓地域における湧水の水文学的研究,文星芸術大学宇都宮文星短期大学,1999年度「文星紀要」,11, pp.3-39.
- 島野安雄(1998):阿蘇カルデラ内における河川水の水文学的研究,宇都宮短期大学,1998年度「文星紀要」,10, pp.3-30.
- 島野安雄・谷口真人・榎根勇(1989):阿蘇西麓台地における地下水温の分布特性について,ハイドロロジー,19-3, pp.155-169.
- 白石芳一(1964):日光湯ノ湖における水産開発のための基礎研究第二報,湯ノ湖の水温,淡水区水産研究所研究報告14-1, pp.45-53.
- 白石芳一・島田武・古田能久(1964):日光湯ノ湖における水産開発のための基礎研究第一報,湯ノ湖の湖盆形態,淡水区水産研究所研究報告,14-1, pp.37-44.
- 鈴木静夫(1994):『水辺の科学』,内田老鶴圃,257p.
- 鈴木裕一(1994):八ヶ岳の湧水および地下水の水温について,ハイドロロジー,24-2, pp.83-91.
- 田中正明(1992):『日本湖沼誌』,名古屋大学出版会, p.530.
- 谷口真人・島野安雄・榎根勇(1989):地下水温を用いた阿蘇西麓大地の地下水流動解析,ハイドロロジー,19-3, pp.171-179.
- 濱田(岡田)浩美(1989):日本国内の閉塞湖の立地条件について,地域研究,29-2, pp.40-46.
- 速水裕一・藤原建紀・坂本亘(1997):琵琶湖北湖における水温鉛直分布の長期連続観測,陸水雑,58, pp.305-316.
- 堀内清司(1959):日本の湖の水温成層の湖沼学的研究,地理学評論,32A-7, pp.374-384.
- 堀内清司(1972):湖水の運動と拡散,地理学評論,45A-2, pp.93-102.
- 堀内清司・安部喜也・小畑浩(1964):木崎湖における湖水の水温と流動について,地理学評論,37-2, pp.25-34.
- 丸井敦尚・安原正也・風早康平・鈴木裕一・島野安雄・高山茂美(1993):南八ヶ岳の水文環境,ハイドロロジー23-2, pp.91-103.
- 丸井敦尚・安原正也・河野忠・佐藤芳徳・垣内正久・檜山哲哉・鈴木裕一・北川光雄(1995):富士山北麓西湖の水質と湖底湧水,ハイドロロジー,25-1, pp.1-12.
- 茂木実・高柳芳夫・吉沢和俱:漁場環境基礎調査-群馬県水産試験所研究報告,第29号 pp.3-5.
- 矢嶋仁吉(1948):榛名山東南麓の地下水,地理学評論,21-7,8, pp.8-15.
- 山本荘毅(1970):富士山の水文学的研究-火山体の水文学序説-,地理学評論,43, pp.267-284.
- 山本荘毅・高村弘毅・樋口政男(1987):阿蘇山周辺湧泉について,ハイドロロジー,17-2, pp.121-135.
- 山本哲也(1992):霞ヶ浦における湖岸・湖底地下水の漏出について,ハイドロロジー,22-2, pp.93-102.
- 吉村信吉(1976):『湖沼学 増補版』,生産技術センター,439p.
- 宮本昇・柴崎達雄・高橋一・畠山昭・山本荘毅(1961):

阿蘇火山西麓台地の水理地質日本の深層地下水  
(第1報), 地質学雑誌, 68-800.

Arai, T and P. PU(1986): A Preliminary Study on the  
Water Temperature and Freezing of Lake Suwa in  
Japan and Shallow Lakes in Eastern China.  
Japanese Jour, Limnology, vol.48, pp.225-230.

Tadashi ARAI(1997): Characteristics of Basin  
Morphology of Lakes in Japan, Jpn, J, Limnol,  
58, pp.231-240.

Susumu TANAKA and Hiroyuki TOMINAGA(1994):  
Seasonal Changes in Water Temperature, pH,  
Dissolved Oxygen and Transparency in a  
Japanese High Mountain Lake, L.Mikuriga-ike,  
Jpn.J, Limnol, 55-1, pp.61-65

Kumiko YAJIMA(1996): Evaluation of Secchi Depth  
in a Shallow Alpine Lake by Principal Component  
Analysis, Jpn, J, Limnol, 57-3, pp.225-233.