

箱根芦ノ湖の水温変化と湖水循環

横山尚秀*、柳内志保子**

神奈川県温泉地学研究所

Thermal Stratification and Vertical Circulation of Lake Ashi Inferred from
Vertical Temperature Profiles and Dissolved Oxygen

by

Takahide YOKOYAMA and Shihoko YANAGIUCHI

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

Thermal stratification and vertical circulation of Lake Ashi were studied by distribution of water temperature and dissolved oxygen from July, 1977 to September, 1978. During the period from May to December, a thermocline at the depth from 8m to 21m below the surface was observed in vertical temperature profile. The amount of dissolved oxygen in surface layer which varied between 110% to 80% showed good circulation of lake water. The oxygen in the layer below the thermocline was from 90% to 10%. From January to March, the temperature gradient from surface to bottom were disappeared and the dissolved oxygen in deep layer increased considerably. Based on a classification of circulation stages, the temperature behavior of Lake Ashi was divided into 4 terms illustrated in Fig. 8.

はじめに

箱根芦ノ湖は箱根カルデラ内に形成された堰止湖である。湖は中央火口丘の神山、駒ヶ岳と、新期外輪山の屏風山、古期外輪山の三国山やそれに連なる山々によって囲まれている（図1）。湖は北西から南東に細長く伸び、南側の主湖盆と北側の副湖盆とで構成されている。湖面の標高は725m、最大深度43m、面積6.9km²である。湖北端の湖尻から早川が流れるが、現在流出口の水門は閉ざされている。このため湖水の流出は深良用水に限られている。

* 神奈川県温泉地学研究所 足柄下郡箱根町湯本997 〒250-03
 ** 厚木保健所 厚木市水引2-3-1 〒243
 神奈川県温泉地学研究所研究報告 第18巻 第2号 65-72, 1987.

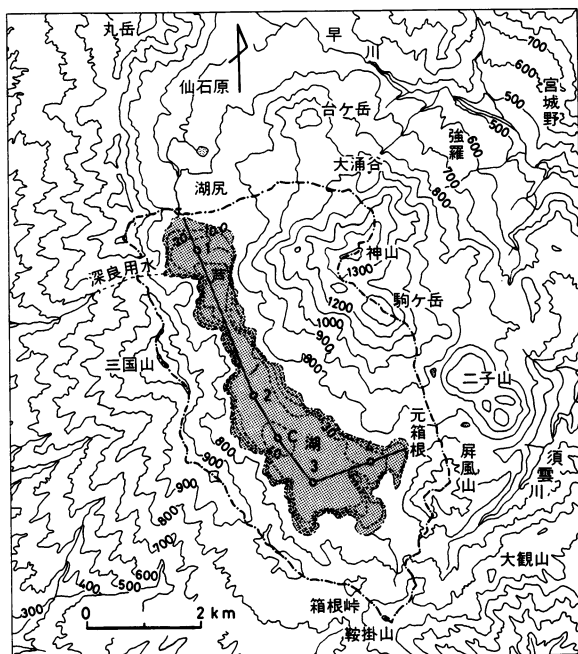


図1 調査地域（番号を付した白丸は観測地点）

を行った。

調査の結果、熱帯湖として特徴づけられる芦ノ湖の水温深度別変化、変水層の形成と消滅、湖水の循環について明らかにすることが出来た。

湖水の水収支

箱根は伊豆半島から続く多雨地域である。芦ノ湖付近の年間降水量は2,500～3,000mmで、平地の約1.6倍とかなり多い。湖に流入する河川はいずれも流域が狭く、湖に寄与する割合は小さい。箱根町(1970)によれば湖から河川に流出する水量の約90%は湖底湧出水によって賄われている。

芦ノ湖から早川に流出する水門が閉ざされているため、芦ノ湖から直接流出する水路は深良用水だけである。用水として流出する水量は6～9月の灌漑期に約20万 m^3 /日、非灌漑期に約9万 m^3 /日である(箱根町 1970)。湖面からの蒸発量は912mm/年と算定されている(Yamamoto et al., 1972)。芦ノ湖の水位は降水及び湖底から湧出する地下水等の涵養量と、蒸発、深良用水流出量及び湖尻から仙石原へ地下水流出する水量とのバランスで決定される。昭和52～53年の湖面の水位変化は図2のとおりであった。

測温調査結果

毎月1回の頻度で芦ノ湖の5ヶ所の水温(全層、1 m間隔)を測定した。測点No. 1～4は県調査地

芦ノ湖は水資源はもとより、観光的価値の維持、水質汚濁防止等の面から関心が持たれており、湖の循環機構、熱収支等湖沼学的特徴を把握しておく事が重要である。芦ノ湖の研究が行われたのは古く、田中(1903、1906、1908)や神奈川県(1934)がある。その後、水質汚濁関係の総合的調査が箱根町によってまとめられたほか(箱根町 1970)、神奈川県による定期的水質調査が行われている(神奈川県 1972～1985、浅田ほか 1978、藤波ほか 1978)。しかし、水温に関する調査は測定精度が粗く、基礎的資料である変水層(水温躍層)等の詳細な記載が充分行われていない。そこで、詳細な水温調査と上下方向の湖水循環の把握のため、昭和52年7月から昭和53年9月までの1年余りの間、毎月1回の頻度で湖水の測温調査

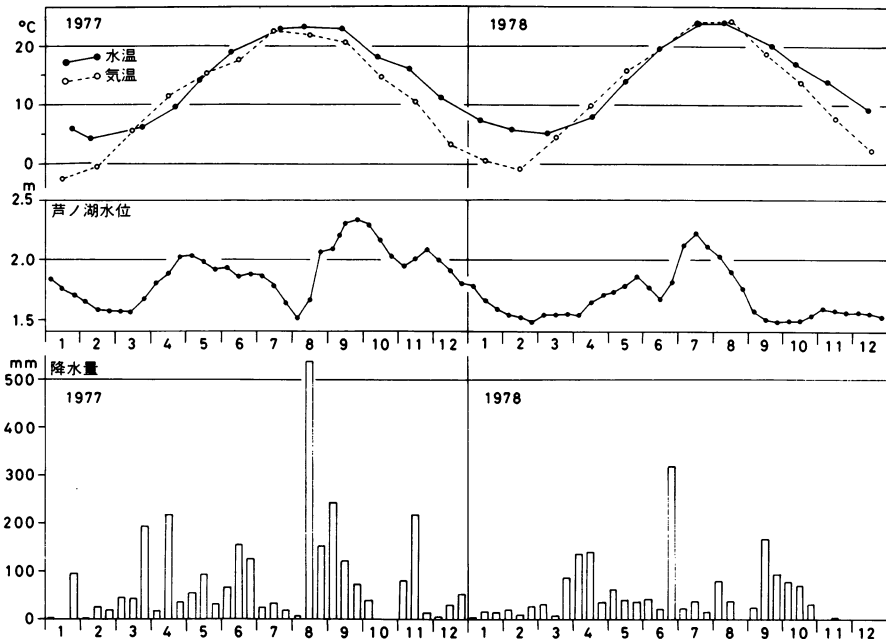


図2 芦ノ湖表面の水温と湖面水位の変動（下段は旬別降水量）

点と同じで、調査は県水質汚濁調査船に同乗して行った。

湖水の水温構造を把握するため、観測結果の内から湖水温度が高い時期の昭和52年9月と、水温の低い時期の昭和53年3月を選び水温分布を断面図に表すと図3のとおりになった。図3によれば、9月には湖全域にわたって一様な水温構造が観測され、湖水の水温成層が良く表れている。温度分布を詳しく見ると、湖北部（No.1）で変水層

の位置が僅かに深く、最深部には8℃以下の冷水が停滞している。一方、3月の湖水は全層が冷却している。水温は湖北部（No.1）で表層が6℃と僅かに高いが、全般の温度は5.4～5.6℃で、温度差が1℃以下とほぼ均一な温度分布である。

5測点の記録から湖心（C地点）を代表地点として選び、その温度変化を図4（昭和52年分）、図5（昭和53年分）に示した。湖は夏から冬に向かって放熱し、冷却する。この期間の水温垂直分布が図4である。また、春から夏にかけて気温

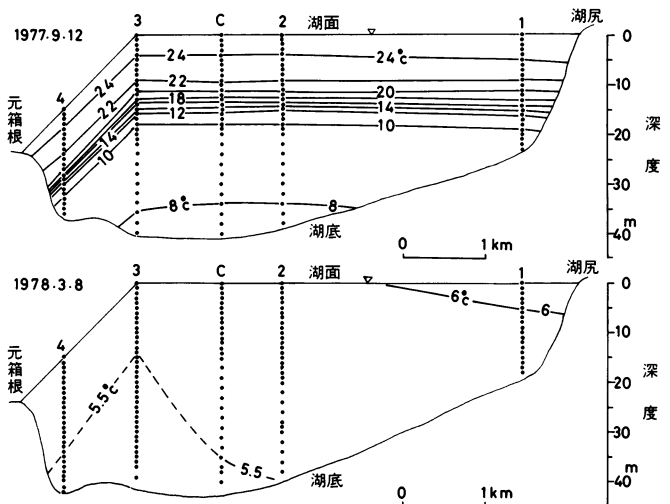


図3 湖水の水温分布（断面 昭和52年9月、昭和53年3月）

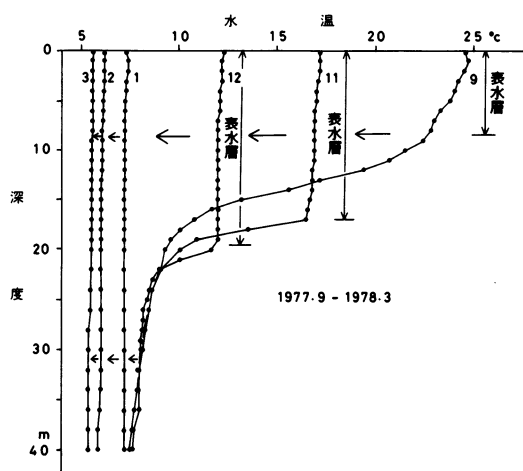


図4 冷却期の湖水温度変化（観測地点C）

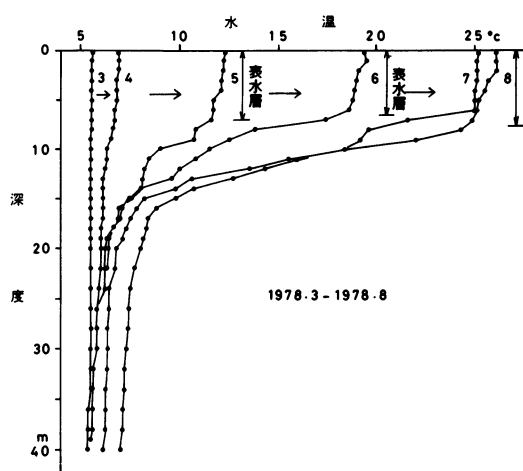


図5 温度上昇期の湖水温度変化（観測地点C）

上昇と共に湖水が温まる時期の水温分布が図5である。

図4によれば、9月には変水層が深度9 mから19 mに認められる。その後、表水層は湖水の冷却と共に厚くなり、変水層は次第に薄くなる。水温の低下は変水層が存在する12月までその上側の表水層に認められる。更に冷却が進むと全層にわたり温度差が無くなって変水層が消滅する。1～3月の水温は浅層から深層まで殆ど均一である。水温は1月が7.6℃で3月には6.0℃まで低下している。なお、10～2月の湖面温度は図2に示したように気温より高い。

春から夏に向けて湖水が温められると水温は一気に上昇する。図5によれば、水温上昇は深度8

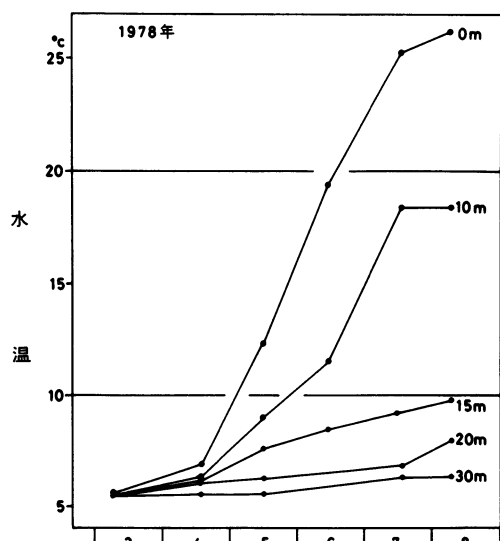


図6 深度別湖水温度の上昇状況（観測地点C）

mより浅い部分で著しい。水温の急上昇に伴って9 m付近に変水層が形成される。5月に深度9 m付近に認められた変水層は6月には6～16 mまで成長している。7月の水温分布によると、変水層が深度6～8 mと10～15 mの2ヶ所に認められる。吉村（1937）によれば、浅い変水層は2次変水層、下位の変水層が主変水層である。

水温上昇の様子を深度別に表すと図6のとおりである。グラフによれば、深度0 mと10 mの上昇勾配が急で、表水層の温度変化は13～20℃と大きい。湖面の温度は、図2にも示したように、4～8月の間は気温に似た変化をしている。しかし、深水層20 mより深い湖水の温度変化は約2℃と小幅である。

水温変化と湖水循環

湖北部（No.1）と湖央部（No.2）について、水温測定結果と水質調査年報により昭和52、53年の2年間にわたる水温深度別変化分布（イソプレット）を図7に描けば、前述の温度変化と湖水循環を2年間にわたり連続的に把握することが出来る。

図7に描かれた1～3月の等温線分布によると、5℃、6℃の等温線は湖面から湖底までほぼ垂直に描かれている。この等温線は全循環期の水温分布を示している。全層均一温度のため湖水の密度差が無くなり、湖水は不安定で循環し易い。風が吹くと湖水全層に互る循環が生じ易い。昭和53年1月の調査時には前日の強風のため湖水の循環が発生し、濁った湖面を観察することが出来た。循環期である1～3月の湖は循環を何度も繰り返しながら3月まで水温を低下させる。しかし、湖水の温度は4℃以下に下らない。

4月から8月半ばまでは停滞期で、表水層、変水層が形成され、水温成層が明確である。表水層の層厚は約5mで、4～5月に水温上昇が著しい。変水層は図中に破線（網目部分）で表現されるように、5～12月の間深度10m付近に形成される。一方、深水層の水温はあまり上昇せず、7、8月でも約8℃である。8月半ばから12月までは部分循環期である。表水層の水温は毎月3～4℃の割合で低下する。表水層は循環性が良く、湖面で冷えた水が循環し一様に冷却する。表水層の冷却が進むと変水層は消滅し、芦ノ湖は再び循環期に入っていく。

以上に述べたように、芦ノ湖は1年1回の周期で循環期が訪れる全循環湖である。湖水温度変化から1年間の湖水循環状況を時期区分すると図8のとおりになる。1～3月が全循環期、4月が半停滞期、5～7月が完全停滞期、8～12月が部分循環期である。

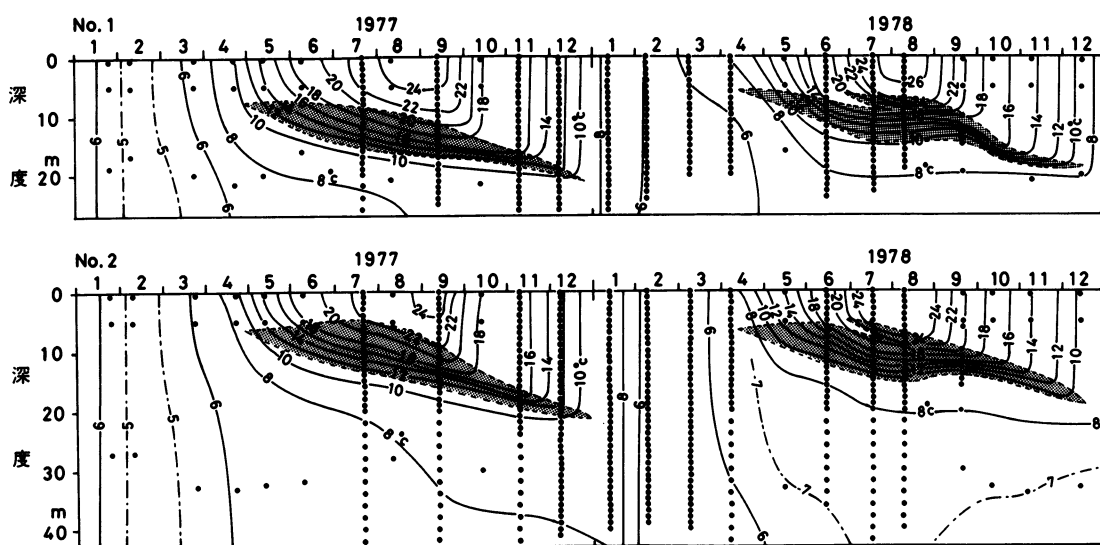


図7 観測地点1、2の水温の深度別変化分布（昭和52年～昭和53年 網目は変水層を示す）

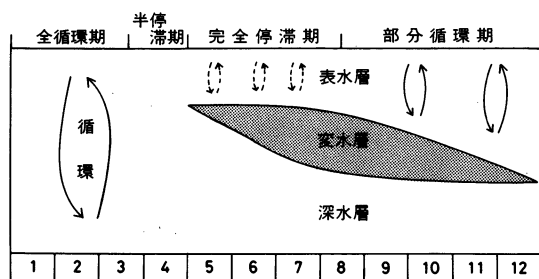


図8 湖水の循環期区分

湖水循環と溶存酸素量

湖水の循環は溶存酸素量とその飽和度（空気中酸素の溶解度）で追跡出来る。湖心（C地点）では深度0 m、5 m、10 m、20 m、30 m、40 mで採水を行っている。湖心を例にとれば昭和52年1月～昭和53年2月までの溶存酸素量（mg/ℓ、高度補正）と飽和度（%）及び水温変化は図9に示すとおりであった。

表水層及び相当層である深度0 mと5 mの溶存酸素量は7.9～11.5mg/ℓの間で変化している。溶存酸素は昭和52年3月に最高値11.5mg/ℓを、昭和52年8月と昭和53年1月に7.8 mg/ℓを観測している。年間の変動を見ると、3月の深度20 m、30 mの溶存酸素量は凡11mg/ℓであったが、変水層が形成される4月以降次第に減少する。変水層の形成により湖水循環は表水層に限られる。このため表水層から酸素供給が絶たれ、深水層の溶存酸素は次第に消費されてゆく。11月、12月には湖底の溶存酸素濃度は1 mg/ℓ以下まで低下している。1月になって変水層が消滅して全層の循環が生じると、混合により深水層の低濃度域は消滅した。低濃度水との混合のため溶存酸素量は一時的に低下し、濃度は7.6～8.0mg/ℓとなった。1～3月の全循環期になると表層から酸素を多く含んだ湖水が循環し、溶存酸素濃度は再び増加する。

飽和溶存酸素量の飽和度によると、深度0～10 mの浅い所が3～7月と8月に100 %以上の過飽和となっている。表層は8月及び10～12月も80 %以上で年間を通して飽和度が高い。深度30 m、40 mでは3月に90 %台であった飽和度が9月に50 %を切り、11月に10 %以下まで減少している。そして、昭和53年1月に全層循環が生じると飽和度の高い表水層と飽和度の低い深水層が混合し、飽和度は一時的に減少し80 %を切った。70 %台に低下した飽和度は湖面から酸素の供給を受け再び高くなる。

以上のように、溶存酸素量は湖水循環を良く表している。水温はその温度変化が熱伝導によるものか、循環によるものか決定的なデータといえない。両者を併せて検討すれば湖水循環の様子を詳しく把握することが出来る。

おわりに

芦ノ湖の水温と溶存酸素量を1年余りの間調査した。水温及び溶存酸素の変化と湖水循環について調査結果をまとめると次のとおりになる。

（1）芦ノ湖の水温は表層で冬期に大凡5℃まで低下し、夏期に25℃位まで上昇する。深層の水温変化は小幅で、夏期に水温は8℃まで上昇する。

（2）変水層は5月頃から12月までの間認められた。変水層の深度は5～8月に6～16 mで、8月以降深度は次第に深くなり、その厚みは薄くなる。

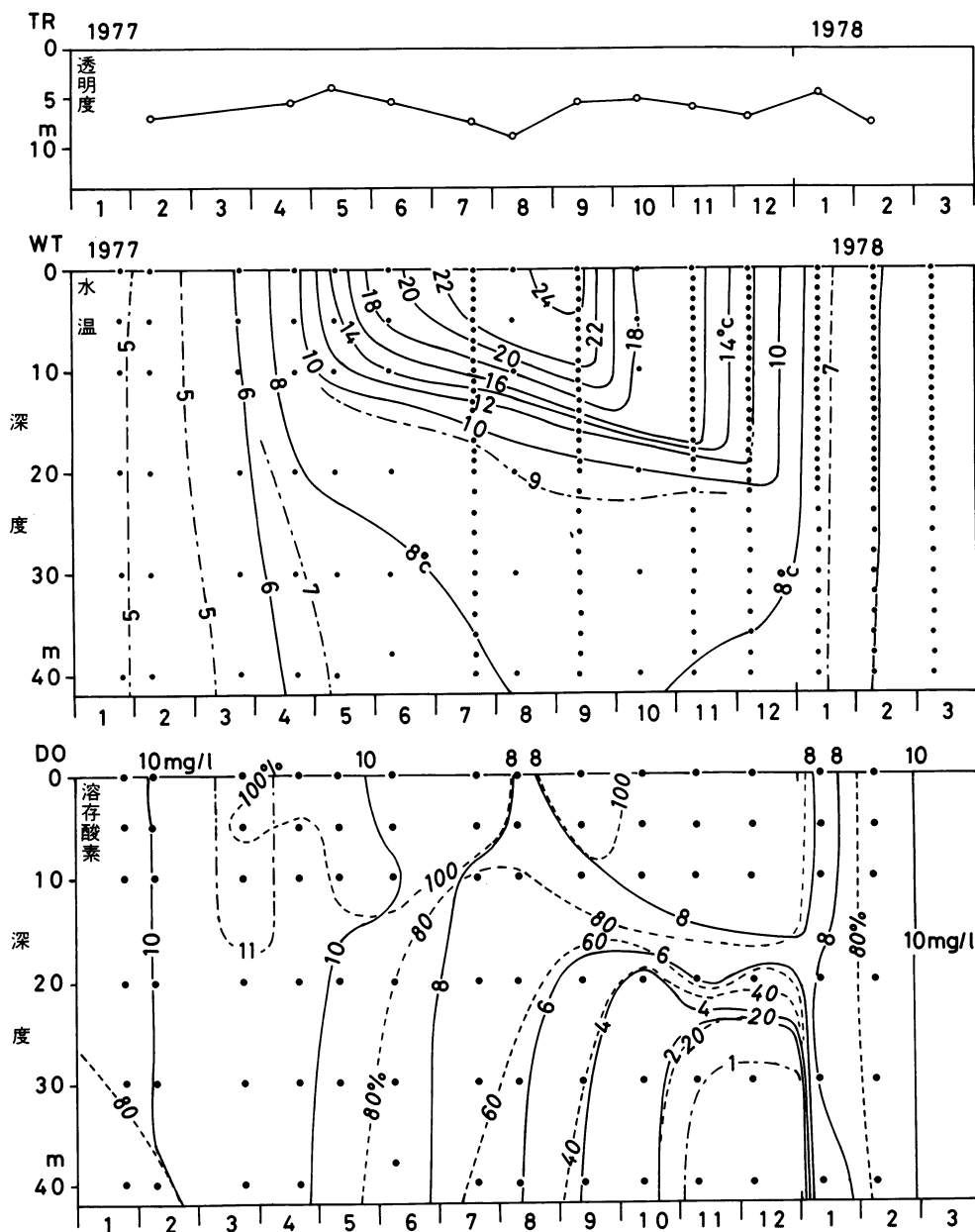


図9 溶存酸素量と水温の深度別変化分布（観測地点C）

(3) 湖は年1回循環期を迎える。1～3月が全循環期、4月が半停滞期、5～7月が完全停滞期、8～12月が部分循環期に相当する。

(4) 溶存酸素量は $0.6 \sim 11.5 \text{ mg/l}$ の範囲で変化した。飽和度は5～110%であった。

(5) 溶存酸素量が湖水の循環及び停滞の状況を裏付けて変化する様子が観測された。

以上のように、芦ノ湖の水温変化と上下方向の湖水循環について明らかにすることが出来た。湖水循環機構は湖の水質汚濁に密接な関係が有り、更に詳しい調査が必要である。これからは湖の湖沼学的情報を蓄積させ、湖全体の流動と循環機構、水収支、熱収支等について調査を進めることが重要である。

謝辞

本調査結果をまとめるにあたりにあたり、県環境部水質保全課専任技幹福原健一氏には調査の便宜をはかって頂いた。小田原保健所試験室及び衛生課の方々、温泉地学研究所専門研究員平野富雄博士には現地調査で協力して頂いた。温泉地学研究所長大木靖衛博士をはじめ職員の方々には調査結果について検討して頂いた。以上の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 浅田忠昌、東村純一、阿久津如生、浅井照明、藤波利喜雄、柳内志保子、高野博道、春日真純（1982）、昭和52年度芦ノ湖水質調査結果について（その1）、神奈川県公衆衛生学会講演要旨
- 新井正（1972）、汎地球的にみた湖沼水温の特性、地理評、Vol.45、No.9、601-615.
- 新井正、西村利栄（1974）、水温論、共立出版.
- 箱根町（1970）、芦ノ湖における水系環境の調査.
- 藤波利喜雄、高橋温子、阿久津如生、浅井照明、小野彰、柳内志保子、高原優子、高野博道、春日真純（1982）、昭和52年度芦ノ湖水質調査結果について（その2）、神奈川県公衆衛生学会講演要旨
- 平野富雄、横山尚秀、大木靖衛、松尾禎士、渡辺修一、柳内志保子（1982）、芦ノ湖の水質と芦ノ湖周辺の地下水の水質、神奈川温地研報告、Vol.13、No.5、55-64.
- 堀内清司（1959）、日本の湖の水温成層の湖沼学的研究、地理評、Vol.32、No.7、24-34.
- 神奈川県（1972-1985）、神奈川県水質調査年報（昭和46-59年度）
- 神奈川県水産試験場（1931-1940）、芦ノ湖基本調査結果、業務報告.
- 近藤純正、渡辺勲（1969）、深い湖の水温鉛直分布と蒸発の季節変化、国立防災センター報告、No.2、75-88.
- 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、No.8・9、37-45.
- 田中阿歌磨（1903）、箱根芦ノ湖特に水温成層の状態及水位の変化に就て、水産、Vol.3、No.2、1-11.
- 田中阿歌磨（1906）、湖沼研究の一例としての箱根芦ノ湖、山岳、Vol.1、No.3、75-88.
- 田中阿歌磨（1908）、湖沼研究の一例としての箱根芦ノ湖、山岳、Vol.3、No.2、116-130.
- Yamamoto, G., B. T. Chein, N. Yasuda and J. Kondo (1972), Evaporation from deep lakes in Japan, 気象集誌、Vol.50、No.5、423-430.
- 吉村信吉（1937）、湖沼学、三省堂.