三浦貯水池における水温年変化について

田 中 治 雄*

On the Annual Temperature Change of Impounded
Water at the Miura Reservoir

by Haruo Tanaka

Abstract

In this paper the writer studied the annual temperature change of impounded water at the Miura reservoir, Nagano prefecture, for purpose of power generation.

Though the change of impounded water in a natural lake had been precisely studied by late Dr. S. Yoshimura, the change of impounded water at an artificial reservoir has not been clear. So, he first intended to study a correspondence about an annual temperature change of water between a natural lake and an artificial reservoir.

The limnological appreciation is thought to be as follows. Although a reservoir gives rise to a larger fluctuation of a water surface, its annual change of impounded water shows a considerable correspondence with that of a natural lake. That is to say, in summer the temperature gradient toward the bottom becomes a direct stratification and in winter it turns to a inverse stratification.

The obvious difference in comparison with a case of a natural lake is found out by a thin or lacking of a epilimnion, which covers a surface of water and shows a higher temperature, and temperature of deep part of reservoir is always higher than 4°C in summer. The another difference is the fact in winter that cold water showing about 1.2°C goes down to a deep part.

* 電力中央研究所, 技術研究所

1965. 3月8日受理

1. 序

三浦貯水池は、木曾川の支流、王滝川の最上流に位置する人工貯水池であつて、池の要項は次の通りである。

池の水位 (m)	湛水面積 (m^2)	2,780,000
常時満水位 1,302.10	利用水深 (m)	45.0
最高水位 1,302.10	全容量 (m^3)	56,400,000
最低水位 1,257.10	有効容量 (m^3)	55,800,000

この貯水池の水温の年変化を、ダム湛水開始の日（昭17.10.8）より、翌年9月末日までの約1ケ年間にわたつて測定し、その結果をまとめ、ダムのデフレクション測定結果の解析のための一資料とした。

このような人工湖沼における水温の年変化を測定することにより、発電などによる人為的に行なう水位調節のために、貯水池の水温が季節と共にいかに変化するかを知ることができたので、やや古い資料ではあるが、とりまとめてここに報告する次第である。

2. 測定方法および資料の取扱い

水温の測定は、中央气象台検定付 $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ 目盛の転とう寒暖計を散弾式木枠あるいは全枠入りとして使用した。

測定に当つては、異常水温層の発見に努めるために、表面より5mまでは1m置き、5m～10mは5m置き、10mより湖底までは10m置きとし、湖底の温度はかならず測定することとした。

測定は毎日午前10時1回とし、ダムの上流5mで旧河心に最も近い所、すなわち最深部において測定することを標準とした。しかし、湛水前の陸地（河床および河岸）にあつた工事前仮設備材料、風とう木、枯れ枝などが浮上してダムの上流に集積し、観測用の舟を乗り入れることができないため、やむを得ず観測位置を変更した場合もあり、はなはだしい時は、ダムから80mも上流で測定した。また、冬期結水の初期には、湖岸から離れた所では氷が薄く、歩行に危険があつたため、湖岸に近い場所で測定した。

測定箇所の平面的位置は表-1および図-1に示す通りである。

いろいろな事情のため4～5月および7月が欠測となつてゐるが、昭和19年度においては4～5月に表面水温および気温を測定した資料があり、7月も同年度の測定資料（深水層の水温も測定）があるので、欠測期間中についてはこれらの資料を使用した。

以下、この報文においては、全月にわたつて観測したものにあつては1日、10日、30日の3回の資料を採用し、欠測のある月にあつては、適当に10日～5日間隔の資料を用い、さらに月1～2回のもものは観測した日のもののみを用いた。

表-1 水温測定位置明細表

測定年月日 自 至	ダムブロック	ダムより上流 への距離 (m)	測定年月日 自 至	ダムブロック	ダムより上流 への距離 (m)
10. 9~12. 7	1 2	5 ~ 8 0	8. 1~8. 6	1 3	7
12. 8~ 2.14	5	5	8. 7	1 3	5
2.15~ 3.18	1 3	1 5	8.18	1 5	1 0
6. 1	1 2	1 0	8.20	1 5	1 0
6. 2	1 3	2 0	8.22~8.24	1 5	1 0
6. 3~ 6. 4	1 2	1 5 ~ 2 0	8.29	1 5	3
6. 5~ 6.10	1 4	1 0 ~ 1 5	8.31	1 5	3
6.11~ 6.12	1 2	1 0 ~ 2 0	9.12	1 5	1 5
6.13~ 6.19	1 4	1 0 ~ 2 0	9.18	1 5	1 5
6.21	1 2	1 5	9.22.	1 5	1 0
6.25	1 4	2 0	9.29		
6.26~ 6.27	1 3	2 0 ~ 3 0			
6.28	1 2	4 0			

註：測定年月日については欠測日を除いてある

図-1 三浦ダム平面図

3. 研究の方針

自然湖沼の水温鉛直分布，水温年変化などについては，Pfenninger，吉村信吉らの研究によつて明瞭となつた部分が多いが，人工湖沼の水温に関する調査資料はあまりないので，まず自然湖沼におけるもの⁽¹⁾と比較することを主眼目とした。

4. 三浦貯水池と自然湖沼における表面水温の年変化の対比

(1) 自然湖沼の表面水温の年変化

表面水温は 4℃以下の時期を除いては湖水所在地の気温と著しい差異はないが，年較差は気温のそれよりも小さいのが普通である。（表-2参照）。

表-2 自然湖沼の水温と気温（いずれも月平均）

湖 名	標 高 (m)	測 定 年	水 温 (℃)			気 温 (℃)		
			最 高	最 低	較 差	最 高	最 低	較 差
中 禪 寺 湖	1,271	1918	21.7	1.8	19.9	18.8	-8.2	27.0
野 尻 湖	654	1915~16	26.4	4.8	21.6	25.8	1.1	24.7
青 木 湖	822	"	25.4	4.1	21.3	23.0	-0.9	23.9
中 綱 湖	825	"	26.0	3.3	22.7	23.7	-1.9	24.7
諏 訪 湖	759	"	23.0	2.0	21.0	21.0	-5.0	26.0

（吉村）

つぎに水温の年変化を見ると，図-2に示すように，春には気温よりも低く，夏から冬にかけては気温よりも高くなつてゐる。

(2) 三浦貯水池の表面水温の年変化

表面水温について自然湖沼と較べると，水温の較差は標高のほぼ同じ自然湖沼よりも高くなつてゐる。

（表-3）。

図-2 大正7年中禪寺湖の水温気温の変化
（吉村原図）

表-3 三浦貯水池の水温と気温（いずれも月平均）

標 高 (m)	測 定 年	水 温 (℃)			気 温 (℃)		
		最 高	最 低	較 差	最 高	最 低	較 差
1,302	1942~43	24.1	1.0	23.0	22.2	-4.9	27.1

水温の年変化も図-3に示すように自然湖沼の場合とほぼ同じであり、水温は春には気温よりも低く、夏から冬にかけては気温より高くなっている。ただ1月に水温が気温よりも低くなっているが、これは、この年の1月の気温が例年より著しく高かったことに起因していると考えられる。

図-3 三浦貯水池気温、表面水温年変化対照表

Forel は湖水を表面水温の年変化からつぎの3つに分類した。

熱帯湖：年中水温 4°C 以上の湖水

温帯湖：最高 4°C 以上，最低 4°C 以下の湖水

寒帯湖：年中 4°C 以下の湖水

三浦貯水池では表面水温の最高は 4°C 以上であり，最低は 4°C 以下であるので，温帯湖に属する。温帯湖は我国のほとんど全部にわたって存在するものである。

5. 三浦貯水池と自然湖沼における夏季水温鉛直分布の対比

(1) 自然湖沼

夏季の水温鉛直分布はつぎの三部分から成立っている。(図-4)。

表水層(表層)：表面から $5 \sim 20\text{m}$ で水温鉛直傾度は少なく，ほとんど等温層をなす。

水温躍層：水深 $5 \sim 20\text{m}$ に発達するもので，水温鉛直傾度は平均 1m について 2°C 位で最大 $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$ である。躍層は，対流や擾動が著しく弱まる限界である。

深水層：躍層の下部は水温鉛直傾度を減じ，湖底までほとんど等温となる。深い温帯湖の深水層は最大密度になる 4°C 付近の寒冷な水で満たされている。

上層部程水温が高く，下層部程水温が低い水温鉛直分布を正列成層という。

(2) 三浦貯水池(図-5)

表水層は非常に不明瞭である。観測の結果，これが明らかにあらわれたのは，表-4に示すように主

図-4 青木湖に於ける冬季及び夏季水温分布 (吉村原図)

図-5 三浦貯水池における年中水温鉛直分布

図-6 木崎湖、菅沼、三浦貯水池水深30mの位置における水温年変化比較表

として6月であり，8月および9月には合わせて2回程度である。その厚さも比較的薄く2～5mであつて，自然湖沼のものよりも浅くなつてゐる。

表水層のできる原因は，気温が高く，無風状態の時に表面水が著しく温められ，その水が湖流や，夜間の冷却あるいは蒸発によつて対流を生じ，これが下の水と混合して等温に近くなる。そして，日中にはまた温められて表面水の水温が高くなり，再び対流を生じて下の水と混合するために生ずるものであるから，湖水の表面が乱される程，表水層は厚くなる。

三浦貯水池では表水層をほとんど欠き，躍層が表面水に接しているが，その理由は，放流によつて生ずる表面水流（人工湖流）の流速が，表水層を作るのに十分なほどゆるやかでないことに起因するのではないと思われる。

とくに，水温測定箇所が取水塔の近くであつたために，この傾向は一層著しかつたものと思われる。それゆゑ，測定箇所をダム前面よりかなり上流に選べば，あるいは表水層がもう少し完全にあらわれたかも知れない。

水温躍層は比較的明瞭である。その上限は，上述の通りほとんど表面であるが，下層は深さ最大20mに達している。水温鉛直傾度は $0.35\sim 1.61^{\circ}\text{C}/\text{m}$ で，自然湖沼の平均 $2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ に較べて小さい。躍層の水温傾度が自然湖沼のものより小さいのは，躍層内の対流や擾動が自然湖沼に較べて著しいことを暗示するものである。

躍層の下部は次第に水温傾度を減じ，湖底までほとんど等温となる。その温度は深い自然湖沼では，最大密度となる 4°C になるが，三浦貯水池では水深60m，すなわち，池がほとんど満水の場合でも水温は $5.7\sim 6.0^{\circ}\text{C}$ を示している。また，水深30mの位置での水温の年変化を，菅沼および木崎湖と比較したもので（図-6），自然湖沼が年間を通じて 1°C 程度であるのに反して 7°C 以上の差がある。このことは深水層においても放流の影響によつて対流および擾動作用があることを示している。

このように，放流の影響を受けつつも，三浦貯水池では夏季において正列成層を保ち，自然湖沼とほぼ同じ水温鉛直分布をもっていることは注意すべきことである。

表-4 三浦貯水池の表水層

月 日	厚さ(m)	月 日	厚さ(m)
6 2	2	6 16	1
3	2	19	2
4	2	21	3
5	3	25	3
7	4	26	3
8	3	27	2
11	3	28	4
12	2	9 22	5
13	5	29	10
14	2		

6. 三浦貯水池と自然湖沼における冬季水温鉛直分布の対比

(1) 自然湖沼

自然湖沼の冬季における水温鉛直分布はよくわかつていない。しかし，上層ほど冷たく，下層ほど4

℃に近い(このような成層を逆列成層という)。結氷する小さい湖では結氷するまでの時間が短かいので、その間、深層まで擾動による冷却は行なわれず、表面が氷でおおわれると、著しい擾動は行なわれなくなるので、湖底温度は4℃付近である。氷に接する水の温度は0℃ではなく普通は2~3℃であつて、これは氷の直下が日射によつて温められることによるのである。湖底の温度は、かならずしも4℃ではなく、それより高いことがあるが、これは恐らく、暖季中に泥土の中に蓄積した熱の放散によるものと考えられる。

(2) 三浦貯水池

三浦貯水池でも冬季においては水温は上層ほど冷たく、逆列成層をなしている。(図-7)。

昭和17年には12月8日に結氷したが、その後も下層の水温は4℃ではなく、12月8日に4℃を示した後は、翌年1月2日の最低水温(1℃)までは、どんどん冷却されている。そしてそれ以後上昇を始めて2月20日に、漸く4~5℃に回復している。

冬季に下層の水が1℃まで下る現象は、自然湖沼では結氷まで長い時間を要する大きい湖にその例を見ることができる。このような湖では、擾動が著しく働いて水温の鉛直傾度を打消すためである。この貯水池では、12月4日の水温4℃の時期より結氷までわずか4日間であり、その後も水温の低下が続いている。その理由は、貯水池が一度に結氷したのではなく、最初はその周辺部に薄氷が張りつめ、それが中央部へ向つて次第に発展して行つたので、その間には、水位の変動が相当あつたことから見て、結氷の速度は自然湖沼の場合よりはるかに遅かつたと考えられる。それゆえ、表面の寒冷な気温に触れた低温の水が、対流によつて下層に移動し、下層の水温を低下させたのであろう。そして1月2日以降は広範囲に結氷したために、たとえ水位の変動による擾乱作用はあつたとしても、表面が氷殻で覆れつくした結果として著しい擾乱が行なわれなくなり、図-7に示すような逆列成層をなしたのと考えられる。成層状態が明瞭でない所があるのは、温度差の少ない時に放流による擾乱の影響が強く現われたためと思われる。

つぎに、もう1つ自然湖沼と異なる点は、氷の下水温が自然湖沼の場合よりも非常に低いことである。氷の下水温測定はむずかしいもので、測定点の位置について疑問はあるが、この測定の結果によると、この場所の水もたえず擾動を受けるため、自然湖沼の場合とは2~3℃の差異があり、最低0℃の値となつている。

7. 三浦貯水池と自然湖沼における水温年変化の比較

(1) 自然湖沼

自然湖沼(温帯湖)における水温年変化について Pfenninger はこれをつぎの6つに分類した。

(a) 夏期停滞期

表面水温が4℃から年間の最高に至る期間である。表層がたえず受熱してあたためられる時期である

図-7 三浦貯水池冬季水温分布図

から、表層ほど密度が小さく、水温鉛直分布は安定で停滞または成層状態となる。本州では大体4～8月の間である。

(b) 夏季部分循環期

表面水温が年間の最高から夏季の湖底水温($> 4^{\circ}\text{C}$)まで冷却される期間で、気温の低下に伴い、面から放熱が行なわれて対流を起し、それが次第に深層におよび、最終的に湖底の水温と同温になる。

本州では大体8～11月の間である。

(c) 秋季全循環期

表面水温が秋季の最高湖底水温($> 4^{\circ}\text{C}$)より、 4°C まで冷却される期間で、本州では11～12月頃である。

(d) 冬季停滞期

表面水温が 4°C から年間の最低温度まで冷却される期間である。 4°C 以下では水は密度を減ずるので下層ほど密度は大きく、停滞状態となる。本州では大体12～1月である。

(e) 冬季部分循環期

表面水温が年間の最低から冬季の最低湖底水温になるまでの期間。

(f) 春季全循環期

表面水温が冬の最低湖底水温から、 4°C まで対流により温められる期間。

以上の分類は Pfenniger が夏半分の湖水温の研究から冬半分について類推したもので、実際にはこのような整然とした分類はできない。吉村信吉によると、とくに結氷する湖水は、結氷後、直ちに水温の低下は止り、冬季停滞期と冬季部分循環期の中間の状態を続け、春に水温が上ると、氷の溶けないうちに 4°C またはそれ以上となり、春季全循環期をいつの間にか過ぎ、冬季部分循環期、春季全循環期の諸期は区別できないとゆうことである。

(2) 三浦貯水池

三浦貯水池の水温年変化を、自然湖沼のものに比較すると、夏季および秋季は比較的よく適合するが、冬季はその対応性が不明瞭である。

(a) 夏季停滞期

表面水温が 4°C になる時期は、4月下旬～5月上旬(推定)で、最高になる時期は8月中旬(13日)である。これは本州の自然湖沼におけるものと時期が等しいので、自然湖沼と同様に、この期間を夏季停滞期とすることができる。

この期間においては流入量および放流量に著しい差があり、その結果水位は表-5のように相当変動している。

表-5 三浦貯水池の水位変動

時 期	水位(標高 m)
4 月 下 旬	1, 2 9 0
6 月 下 旬	1, 3 0 1
8 月 中 旬	1, 2 9 5

しかし、水温の鉛直分布は全体の傾向としては自然湖沼のものによく似ている。

鉛直方向の水温の成層状況には相当著しい不規則が見られる。たとえば、7月下旬～8月上旬頃においては、深水層の冷たい水が水深10m付近まで上昇してきているが、これは恐らく、その前に大量の水を放流したためと思われる。

る。(図-9参照)。

(b) 夏季部分循環期

表面水温が年間の最高に達するのは前述のように8月中旬で、湖底水温にほぼ等しくなるのは11月初旬である。したがって、この期間を本州の自然湖沼と同様に、夏季部分循環期とすることができる。

この時期では湖底の水温は次第に高くなって9月29日に年間最高の 9.6°C に達する。自然湖沼では、深水層の水温が秋の終りに年間の最高となるが、三浦貯水池では、これが9月末である点が多少異なっている。

図-8 三浦貯水池における水温年変化(1942-1943)

図-9 三浦貯水池流入量・放流量曲線

(c) 秋季全循環期

秋季の最高湖底水温が 9.6°C より 4°C まで冷却される期間で、三浦貯水池では、11月初旬より12月初旬(12月4日)までの間である。この期間では水深の深浅による温度差が少なく、したがって水の密度の差が少ないので全層を通じて循環する。本州の自然湖沼においても、この期は大体11~12月の頃とされているが、三浦貯水池でも上述の通り、11~12月の間でこの点においても自然湖沼と一致する。

(d) 冬季停滞期

三浦貯水池で表面水温が 4°C になつたのは12月4日である。そして結氷したのは12月8日であるが、貯水池水位曲線(図-9)にも見られる通り、日々水位は上昇しつつあつたのであるから、貯水池が一度に結氷したとは考えられない。

この参考としてのモスコ・ペロエ湖の観測資料およびそれを紹介している吉村信吉によれば、ペロエ湖の11月~5月の間の水温鉛直分布は図-10のごとくである。すなわち、1928年11月21

図-10 ペロエ湖の水温鉛直分布(11~5月)
(吉村原図)

日には全層 4.5°C であったが、翌 22 日には 13 m の深層は 3.8°C となり、表面水温は 23 日には 2.7°C 、25 日には 2.5°C 、28 日には 1.7°C 、12 月 1 日には 1.3°C となり、12 月 6 日結氷までにすでに 4°C 以下 2.7°C も冷却されていた。それ以後は、むしろ漸次温つている。この間の深層の冷却は振動に基づくものと思われ、このように深層が急に冷却される期間を冬季停滯期中の冬季半停滯期としている。

三浦貯水池でも 10 m 深層の水温の例をとると、1 月 2 日までの間に 2.8°C 下り、1 月 2 日を最低としてふたたび上昇している。(表-6)。

12 月 8 日には結氷しているが、それは湖岸に近い部分で、貯水池が完全に凍つたのは 12 月末頃ではなかつたかと想像される。それ故、12 月 4 日から 1 月 2 日までは前例に徴して冬季半停滯期と見て良いように思われる。1 月 2 日以後において湖水の水温が略々停滯状態に入ることとは、それ以後の三浦貯水池の水温鉛直分布曲線の配列傾向がペロエ湖のそれに酷似していることから相像される。吉村はこのような等温線の分布をとる時期を冬季完全停滯期として分類しているが、三浦貯水池においてもこの時期を冬季完全停滯期と考えてよいであろう。

(e) 冬季部分循環期、春季全循環期

これに相当する時期は欠測されているので不明である。

表-6 三浦貯水池の水深 10 m における水温

月 日	水 温 ($^{\circ}\text{C}$)
12. 4	4.0
" 5	3.5
" 10	3.0
" 15	2.0
" 20	1.5
" 25	1.7
" 30	1.5
1. 2	1.2
" 4	1.6
" 5	2.0

8. む す び

以上のごとく、観測結果を整理して知られることは、三浦貯水池のように満水位 (1,302 m) より約 4.1 m 下 (1,261 m) において放水する型の貯水池では、水位の変動が相当に大きくても、水温の年変化は傾向としては大体自然湖とほぼ等しいことが知られる。すなわち、夏季においては水温の鉛直分布は正列成層を成し、秋季全循環期を境として逆列成層をとり、春季全循環期を境として (此の部分は欠測のため推定) 再び正列成層に復帰するのである。自然湖沼と相違する大きな点は、夏季において、表水層と称される高温な水の層が欠除しているか、あるいは存在していても非常に薄く、水温躍層が直接表面に接していること、および深水層の水も決して 4°C にはならず、それ以上であることである。また、冬季停滯期には 1.2°C のとき寒冷な水が深層にも及んで来るということである。

本稿を終えるに当つて、観測を担当してもらつた元日本発送電会社小倉技師、および観測半ばにして

第二次世界大戦に応召せられ、大陸に戦死せられた故湯上技手に対し深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) 吉 村 信 吉：湖沼学，三省堂（1937）

書 評 理 学 岩 石 辞 典 工 学

この辞典は昭和40年3月31日に白亜書房から発行されたもので、B6版、約340頁である。内容は、事典（岩石の理学・工学関係用語を小項目にて羅列）、要覧（岩石の分類と識別法・有用岩石の化学成分・日本産主要石材要覧・参考文献等）の2部で構成され、巻末に本辞典に収録された各項目や、解説文中の用語等について英和対訳索引がついている。

この辞典の利用については、編者が「岩石学を参考科目として学習する理科ならびに工科の学生、および岩石の一般知識を必要とする採鉱・採石・土木・建築等の技術者を主な対象として適宜選択したものである。」と述べているとおり、岩石学の応用分野で活躍する技術者にとつて便利である。収録項目は岩石学関係が中心になつてゐるのは勿論であるが、土木・建築・土地地質調査法・岩盤変形など岩石工学あるいは土地地質に類する項目が相当含まれている点が本書の特徴となつてゐる。

項目数が多く、内容も複雑多岐にわたるため、それぞれの専門家からみれば、用語の不適當と思われる点や、用語の定義について異論があるなどの点を指摘できよう。しかし、この種の辞典は関係者の間で強く要望されていたもので、また編さん業務が著しい困難性を伴うものであり、本書が小冊子ではあるが新しい試みに一歩ふみ出したものとして注目すべきであろう。（防災センター、西川泰記）

（注）本書の購入を希望される方は、日本応用地質学会事務局あて申し込まれれば（送料当学会負担、定価900円は後払で可）、送本等お世話いたします。