

復水器冷却水の再循環について

Recirculation of Condenser Cooling Water

斎藤 良造* 徳永 賢治*
Ryozô Saitô Kenji Tokunaga

内 容 梗 概

火力発電所の計画上、しばしば復水器冷却水の再循環が問題になるが、この問題の解析について公刊されているものは少ない。筆者らもこの問題に遭遇し、解析を試み、実際の運転状態とも比較検討することができたので、その検討結果を紹介したものである。

冷却水の再循環が問題になるのは、主として次の三つの場合である。すなわち、(a) 冷却池の場合、(b) 小湾の場合、(c) 感潮域河川の場合である。この問題の解析は、冷却水の最終安定取水温度を求めるものであるが、本文では冷却池での熱平衡解析を基本として、それに熱冷水の二重層の応用、あるいは感潮域河川の水塊の移動速度などについて検討した。

1. 緒 言

火力発電所建設の立地条件として、必要十分な冷却水の確保が、重要な問題の一つであることはいうまでもないことである。火力発電所の新設あるいは増設の計画に当たって検討すべき冷却水の問題としては、水温・水量・水質などがある。

水温と水量とは、互いに関連のある問題であって、冷却水として利用可能な水量が必要水量に対して十分でない場合とか、冷却水の取放水口の位置が適切でない場合には、放水口から放出された高温水が、大気に十分熱を放散しないまま、取水口に再循環 (Short Circulation) し、適当な冷却水温を確保できなくなる。大量の復水器冷却水を必要とする大容量火力発電所の急増により、立地条件を完全に満足できるような建設地点を得ることが、次第に困難になると予想され、冷却水再循環の問題の解析がさらに必要になってくるものと考えられる。筆者らは、小湾内に取放水口を設けた場合、および感潮域河川に取放水口を設けた場合の冷却水再循環について、最近2、3の発電所で検討し、実際の運転状態とも比較できたので、本文でそれを紹介する。

冷却水再循環の解析は、冷却水の最終安定取水温度を求めることに帰するが、これには取放水口間の水面上の熱平衡と水の流動状態とを解析する必要がある。熱平衡の問題は、ある程度一般的問題として取り扱うことができるが、水の流動については、水域の特殊性を十分は握する必要がある、できるかぎり水域を実測検討すべきである。本文では冷却池での熱平衡の解析を基本問題として取り扱い、それに熱冷水の二重層の応用、あるいは感潮域河川の水塊の移動について検討した。

なお、冷却水の計画には、水質の問題、海生物付着の問題あるいは、漁業保証上の問題なども検討する必要がある、これらは取放水口の位置選定の問題と密接な関連があり、それぞれ単独に取り扱われることは少ないが、本文では再循環の問題のうち、特に最終安定取水温度の検討のみをとりあげた。

2. 冷却水の再循環

冷却水の再循環が問題になる場合を次の三つの場合に分類して考えることができる。

- (a) 冷却池の場合
- (b) 小湾の場合
- (c) 感潮域河川の場合

である。以下、(a) 冷却池の場合では、熱平衡の問題を取り扱い、

(b) 小湾の場合、および(c) 感潮域河川の場合では、それぞれ水の流動の特殊性について検討することとする。

2.1 冷却池の場合

冷却水再循環現象において、冷却池は最も典型的な場合である。小湾あるいは河川における冷却水再循環現象も冷却池における解析方法を応用して解決することができる。

発電所運転時における冷却池の最終安定取水温度を求めるには、冷却池へはいってくる入熱と冷却池からでていく出熱との熱平衡を考えればよい。これらを列挙すると次のとおりである。

冷却池への入熱

- (1) 復水器から放出される熱量
- (2) 太陽からの放射熱(水平面日射量)
- (3) 冷却池への流入水によって持ち込まれる熱量

冷却池からの出熱

- (4) 冷却池水面からの蒸発熱
- (5) 冷却池水面から大気への伝達熱
- (6) 冷却池水面から大気への逆放射熱
- (7) 冷却池からの流出水によって持ち去られる熱量

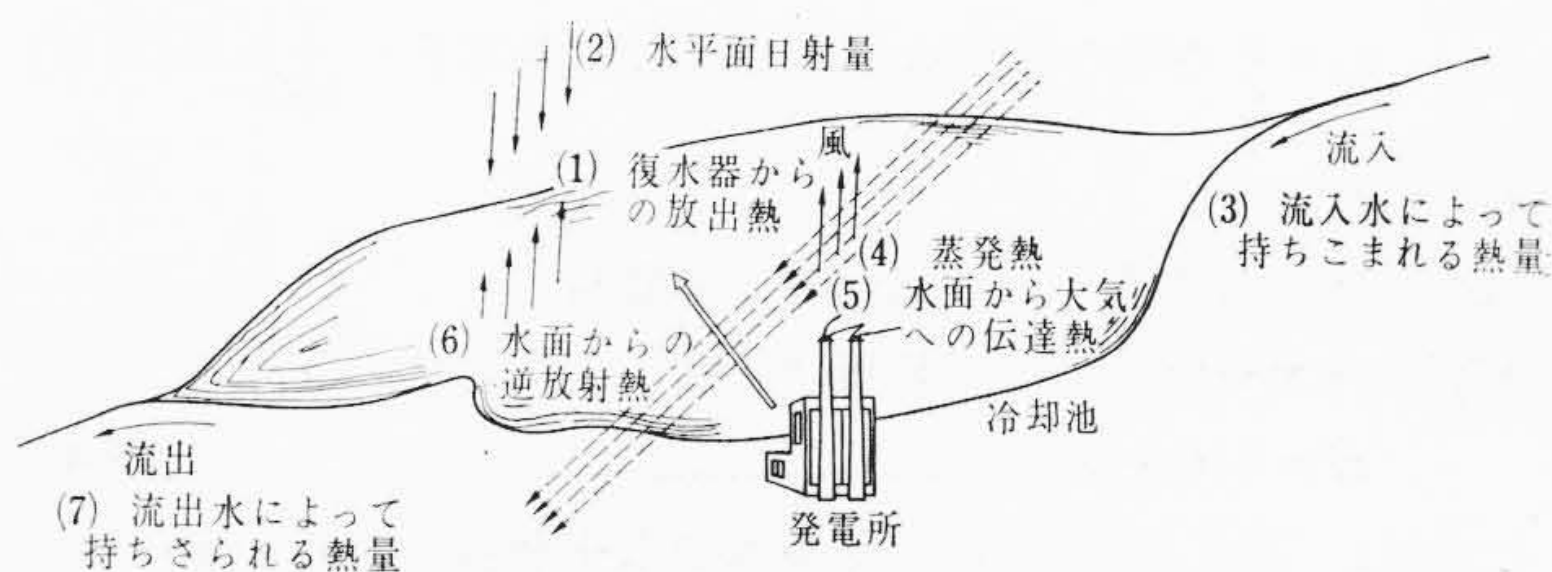
第1図はこれらの入熱、出熱を図解したものである。冷却池における入熱と出熱の熱平衡は、発電所の負荷、気象条件あるいは昼夜の変化などによってかなり変化するものであって、完全な平衡状態に達することはほとんどないが、ある程度の長い時間を平均して考えてみるならば、ほぼ熱平衡が成り立っていると考えてよい。したがって入熱および出熱の個々の値を求めることができるならば、それらの熱平衡を考えることにより冷却池の最終安定取水温度を求めることができる。以下上記各項目について検討する。

- (1) 復水器から放出される熱量

復水器から冷却水に与えられ、冷却池に放出される熱量は、機器製造者より与えられる。

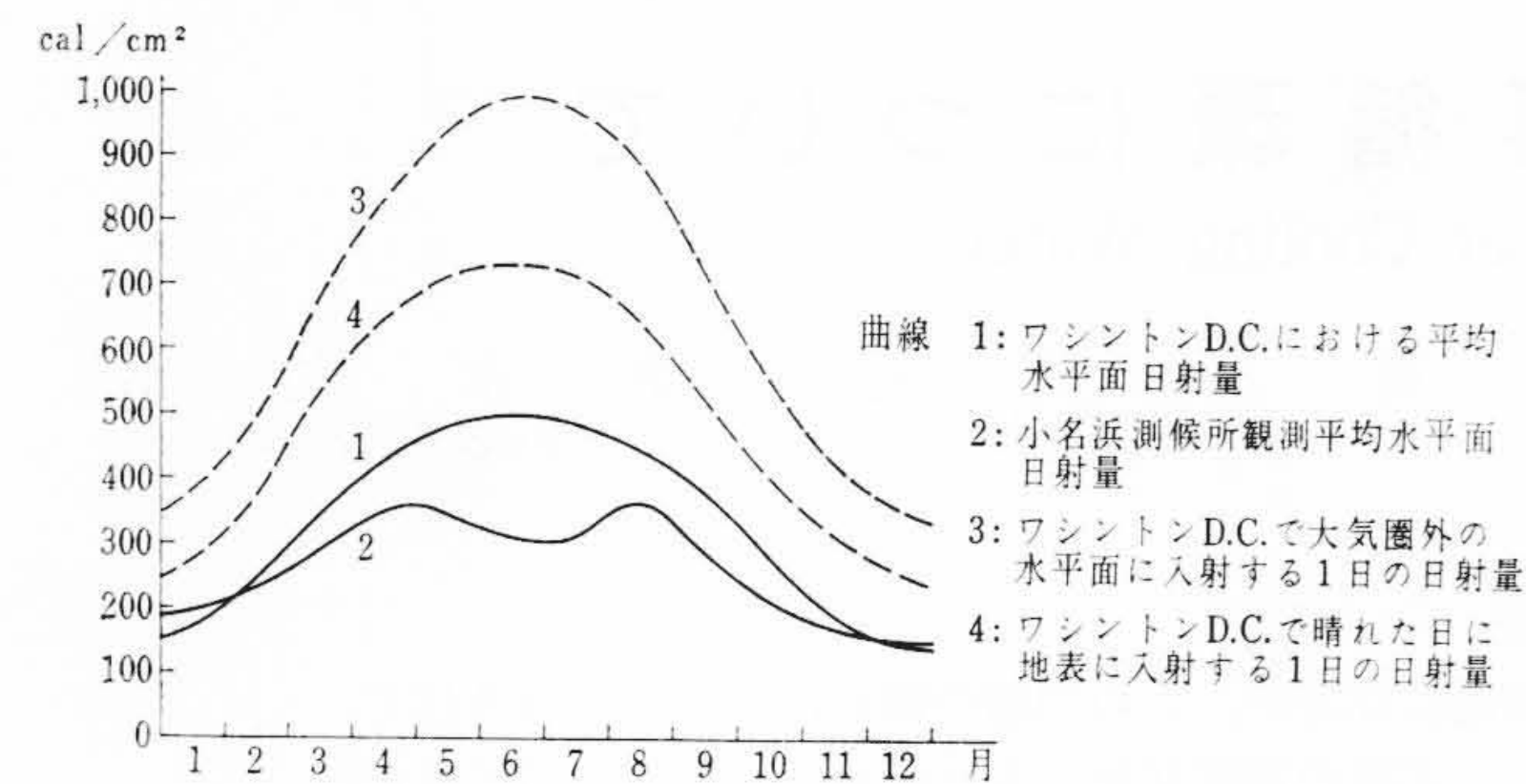
また、すでに運転中の発電所で運転記録のある場合には、次式によって求めることもできる。

$$Q = L \times R(\eta_b - \eta_t) \dots \dots \dots (1)$$



第1図 冷却池の熱平衡説明図

* 日立製作所電機事業部火力計画部



第2図 日 射 量 の 年 変 化

第1表 水 の 飽 和 蒸 気 圧 (mmHg)

℃	0℃	1℃	2℃	3℃	4℃	5℃	6℃	7℃	8℃	9℃
0℃	4.58	4.92	5.29	5.68	6.09	6.54	7.01	7.51	8.04	8.60
10℃	9.21	9.83	10.52	11.23	11.99	12.79	13.63	14.53	15.48	16.48
20℃	17.54	18.64	19.83	21.07	22.38	23.76	25.21	26.74	28.35	30.04
30℃	31.82	33.70	35.66	37.75	39.90	42.18	44.56	47.07	49.67	52.44
40℃	55.32	58.34	61.50	64.80	68.26	71.88	75.65	79.60	83.71	88.08

ここに、 Q ： 復水器から冷却水に与えられる熱量 (kcal/h)
 L ： 月平均発電所負荷 (kW)
 R ： 月平均発電所熱消費率 (kcal/kWh)
 η_b ： 月平均発電所ボイラ効率 (%)
 η_t ： 月平均タービンプラント熱効率 (%)

(2) 太陽からの放射熱(水平面日射量)

ここでいう太陽からの放射熱とは、水平面日射量（または全日射量ともいう）のことであって、太陽日射量が途中の大気によって減衰して地表に到達する直達日射量のほかに、空からの散乱光を加えたものである。第2図にアメリカのワシントン D. C. で測定された水平面日射量および小名浜測候所観測の水平面日射量を示す。参考のためワシントン D. C. で大気外の水平面が受ける太陽放射量をも示す。

(3) 冷却池への流入水によって持ちこまれる熱量。

上流より冷却池に流入する河川の水量と水温から容易に求められる。後の式のためこれを q_1 としておく。

(4) 冷却池水面からの蒸発熱

冷却池から大気への放散熱量のうちもっとも大きなものは、冷却池水面から大気への蒸発熱であって、これは次式によって求めることができる。

$$E=k(e_a-e_w) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E ： 冷却池水面から大気への蒸発熱 (cal/cm²・s)
 k ： 水面から大気への蒸発係数 (cal/cm²・mmHg・s)
 e_a ： 空気中の水蒸気圧 (mmHg)
 e_w ： 水面の飽和水蒸気圧 (mmHg)

蒸発係数 k は風速によってきまる値で、一般に $4.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-4}$ くらいの値である。水面の飽和水蒸気圧 e_w は、水面の温度から第1表によって求めることができる。また、相対湿度 $f(\%)$ がわかれば、空気中の水蒸気圧 e_a は

$$e_a=\text{その時の気温における飽和水蒸気圧} \times \frac{f}{100} \dots\dots (3)$$

で求められる。

(5) 冷却池水面から大気への伝達熱量

水面から大気中への伝達熱量は次式によって求められる。

$$H=h(\theta_a-\theta_w) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 H ： 水面から大気中への伝達熱量 (cal/cm²・s)
 h ： 水面から大気中への熱伝達係数 (cal/cm²・s・℃)

θ_a ： 冷却池表面の水温 (℃)

θ_w ： 気 温 (℃)

ここで空気と水との系には Lewis の関係式

$$\frac{h}{l}=C_H \dots\dots\dots (5)$$

が成り立つ。

ここに、 l ： 水蒸気圧の差に基づく物質移動係数

C_H ： 空気の湿潤比熱

さらに水蒸気圧の差に基づく物質移動係数 l と水面から大気への蒸発係数 k との間には次の関係がある。

$$l \times (\text{蒸発熱}) = k \dots\dots\dots (6)$$

(5), (6) 式より

$$\frac{k}{h} \doteq 2.0 \text{ (}^\circ\text{C/mmHg)} \dots\dots\dots (7)$$

なる関係が得られる。

k, h の値は従来多くの実験、実測により、種々の実験式が求められている^{(1)~(4)}。一例として Rohwer, Fort Collins, Colo⁽¹⁾ らによって求められた k を与える式を示す。

$$k=2.31 \times 10^{-4} \times (1.0+0.6V) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 V ： 冷却池上の風速 (m/s)

である。

(6) 冷却池水面から大気への逆放射熱

池や湖の水面とか、地表および大気中の水蒸気や炭酸ガスが放射し、大気が吸収する赤外放射を総称して大気放射というが、ここでは冷却池水面からの大気放射量について考える。

イギリスの Brunt 氏は、空が晴れている場合の測定結果を次の実験式にまとめた。

$$R_0=\sigma T_0^4(1-a-b\sqrt{e_a}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 R_0 ： 冷却池水面から大気への逆放射熱 (cal/cm²・min)

T_0 ： 水面の温度を絶対温度で表したもの (deg)

σ ： 水面から大気への放射係数

$$\sigma=8.17 \times 10^{-11} \text{ (cal/cm}^2\cdot\text{min}\cdot\text{deg}^4)$$

e_a ： 水面付近の水蒸気圧 (mb)

$$a, b: \text{定数} \begin{cases} a=0.52 \\ b=0.065 \end{cases}$$

雲は赤外放射に対してはほとんど完全黒体とみなされるので、曇っている場合の逆放射は弱められる。Ångström 氏は曇っている場合の逆放射は

$$R=(1-cm)R_0 \dots\dots\dots (10)$$

で与えられるとした。

ここに、 R ： 曇っている場合の冷却池水面から大気への逆放射熱 (cal/cm²・min)

R_0 ： (9) 式に曇った状態での T_0, e_a を用いて求められる値

m ： 雲 量

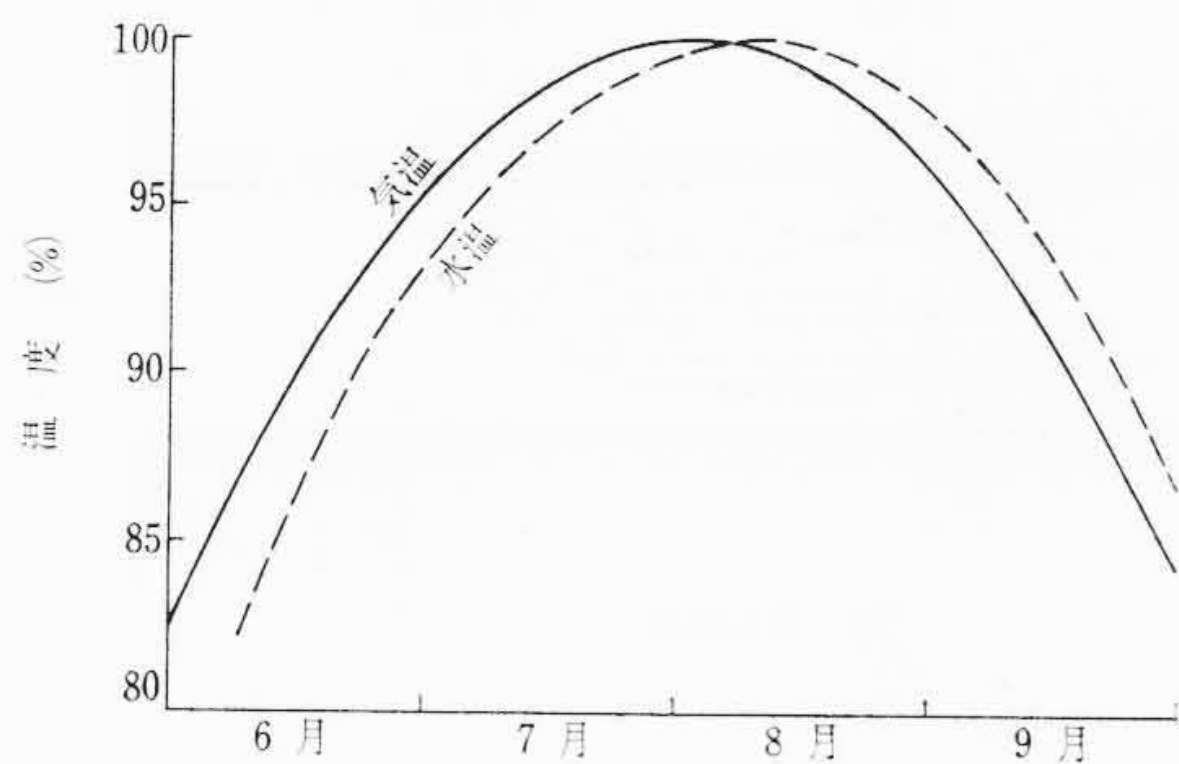
$$\begin{cases} \text{全天が曇っているとき} \dots\dots\dots m=1 \\ \text{雲 の な い と き} \dots\dots\dots m=0 \end{cases}$$

c ： 雲の高さによって異なる定数で Ångström によれば第2表の値をとる。

ここで水面からの逆放射に日照による水面入射熱量（水平面日射量）を同時に考えると、放射によって大気に放散する正味熱量は、

第2表 c の 値

雲 の 高 さ (km)	1.5	3	7
c	0.86	0.75	0.20



第3図 気温と水温の季節変化

次式によって求められる。

$$R_n = R - (1 - \alpha) I \quad (11)$$

ここに、 R_n : 放射による水面から大気への正味の放散熱量

I : 日照による入射熱量(水平面日射量)

α : 水平面反射熱量比 ≈ 0.02

(7) 冷却池からの流出水によって持ち去られる熱量

冷却池より下流に流出する河川の水量と水温から求められる。冷却池の場合、流出水量と流入水量はほぼ等しいと考えてよい。後に出てくる式のためにこれを q_2 であらわすことにする。

(8) 冷却池の熱平衡

冷却池の熱平衡は上記の各入熱と出熱の熱平衡で求められる。すなわち

$$Q + (1 - \alpha) I + q_1 = E + H + R + q_2 \quad (12)$$

の成立する取水温度が安定取水温度になる。この熱平衡式を解くには、熱放散にあずかる水面の有効面積を求める必要があるが、これは冷却池の大きさと取放水口の位置の関連から適当にきめねばならない。一般に冷却池で取放水する発電所が、経済的に運転できるために必要な冷却面積は、kW 当たり $5 \sim 8 \text{ m}^2$ と言われている。

また、これらの解析のため、気温と水温の関係をしておく必要があるが、第3図はそれらの季節的变化を示した一例である。自然のままの海水、河川あるいは湖水などの水温は大気の状態によって左右されるものであるが、水温と周囲の空気温度との差は年間を通じて一般に $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の間にはいっている。第3図からわかるように、水温の変化は空気の温度変化よりわずかに遅れる傾向にある。

2.2 小湾の場合

小湾に取放水口を設けた場合に生ずる冷却水の再循環現象の解析は、次の二つのことを求めねばならない。

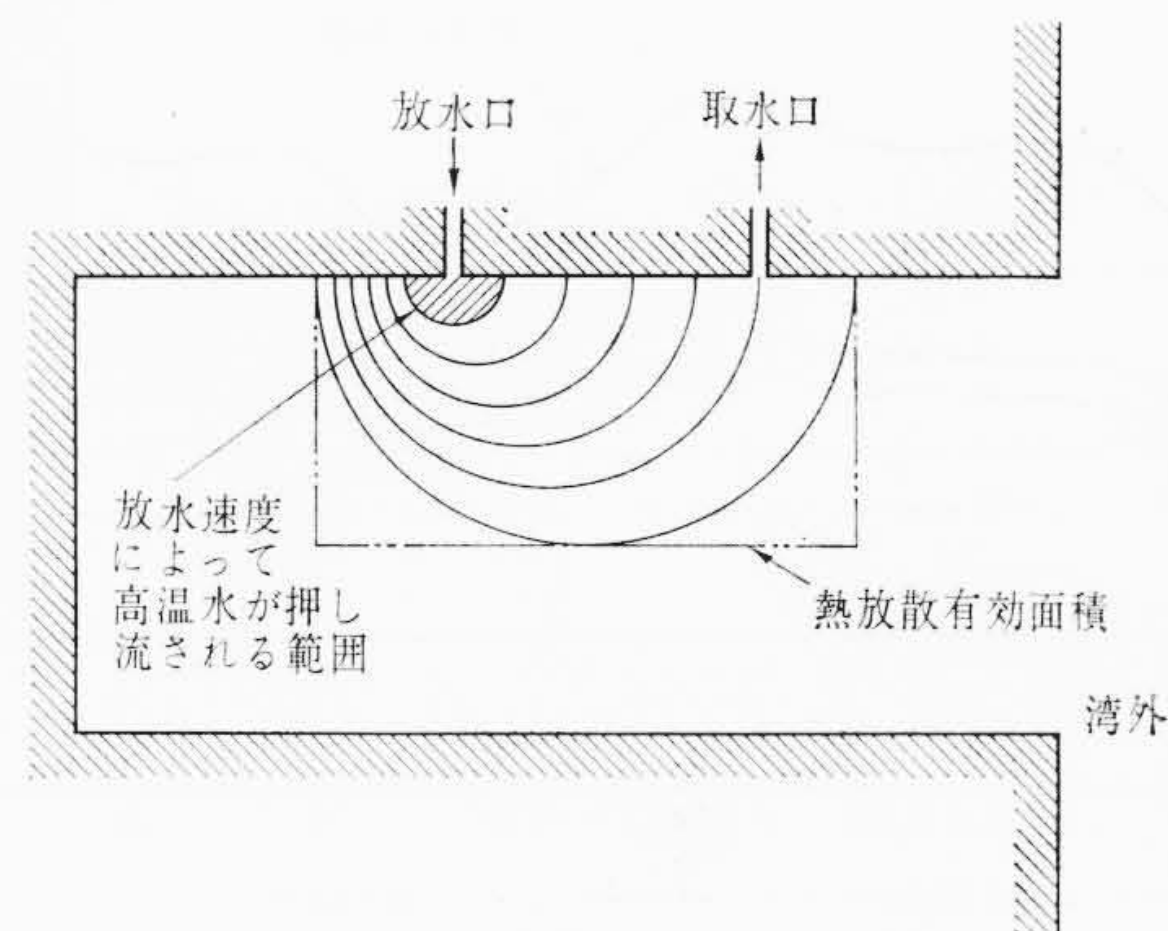
- (1) 放水口を出た冷却水が再び取水口に達するまでの時間。
- (2) 放水口を出た冷却水が、再び取水口に達するまでに放散する熱量。

この二つは、さきに記した冷却池の場合も当然問題になるものではあるが、熱平衡のみを論ずる意味で、あえて取りあげなかったものである。冷却水が放水口より取水口に達するまでの時間を求めるために、水の流動について検討する必要があるが、放水口から放出された冷却水は次の二つの過程を経て取水口に再循環される。

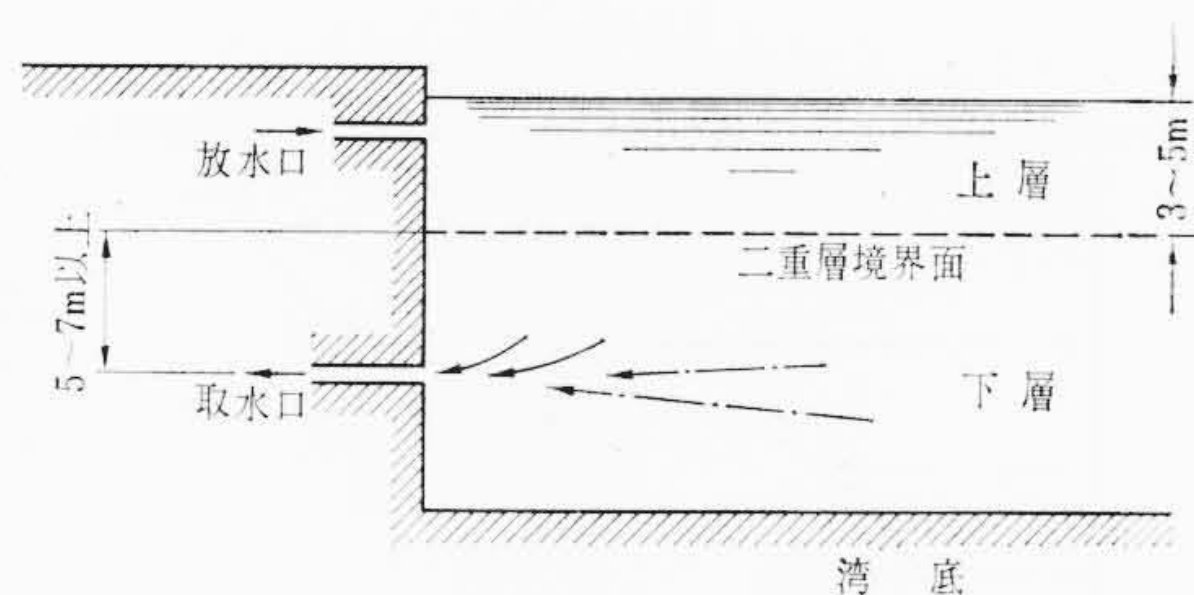
- (1) 放水口からある距離までは、高温水がそのまま放水の速度によって押し流されていく。
- (2) それから先は、拡散作用、波の影響、潮の干満などによって次第に放水口から離れていく。

第4図は放出された放水の広がっていく様子の概略を図示したものである。

放散熱量を求めるには、小湾において冷却水の再循環に関与している熱放散有効面積を推定し、その水面を一つの冷却池水面と仮定して計算する。このとき、冷却池と異なる点は潮汐による影響である。冷却池と考えた部分の海水は、その外の海水と潮汐の干満の作



第4図 小湾における冷却水再循環図



第5図 二重層説明図

用で絶えず入れかわっている事実を考慮しなければならない。

熱放散水面は、放水口を出た放水が取水口に再循環されるときの流れおよび水温の等温線より推定することができる。第4図のような場合、熱放散有効面積は図の一点鎖線で囲まれる海水面と考えることができる。

小湾における冷却水の再循環を防止するため、取放水口間の水平距離を離すことも考えられ、概略の目安として $200 \sim 300 \text{ m}$ 離せばよいとも言われている。しかし、再循環の防止を水平距離のみで行なうことは、必ずしも経済的でない場合もあり、湾の深さが十分であれば垂直距離をある程度離すことによって、再循環を容易に防止できることもある。幅 $400 \sim 500 \text{ m}$ 程度の狭い湾内とか比較的深い湖などにおいては、下層の水温は上層の水温より 2°C 程度低温になり、いわゆる二重層を形成しているのが普通である。この上層高温水の厚さは、一般に $3 \sim 5 \text{ m}$ 前後になる。実際の上層および下層それぞれの温度は、湾の広さ、深さ、気象条件などに左右されるものである。

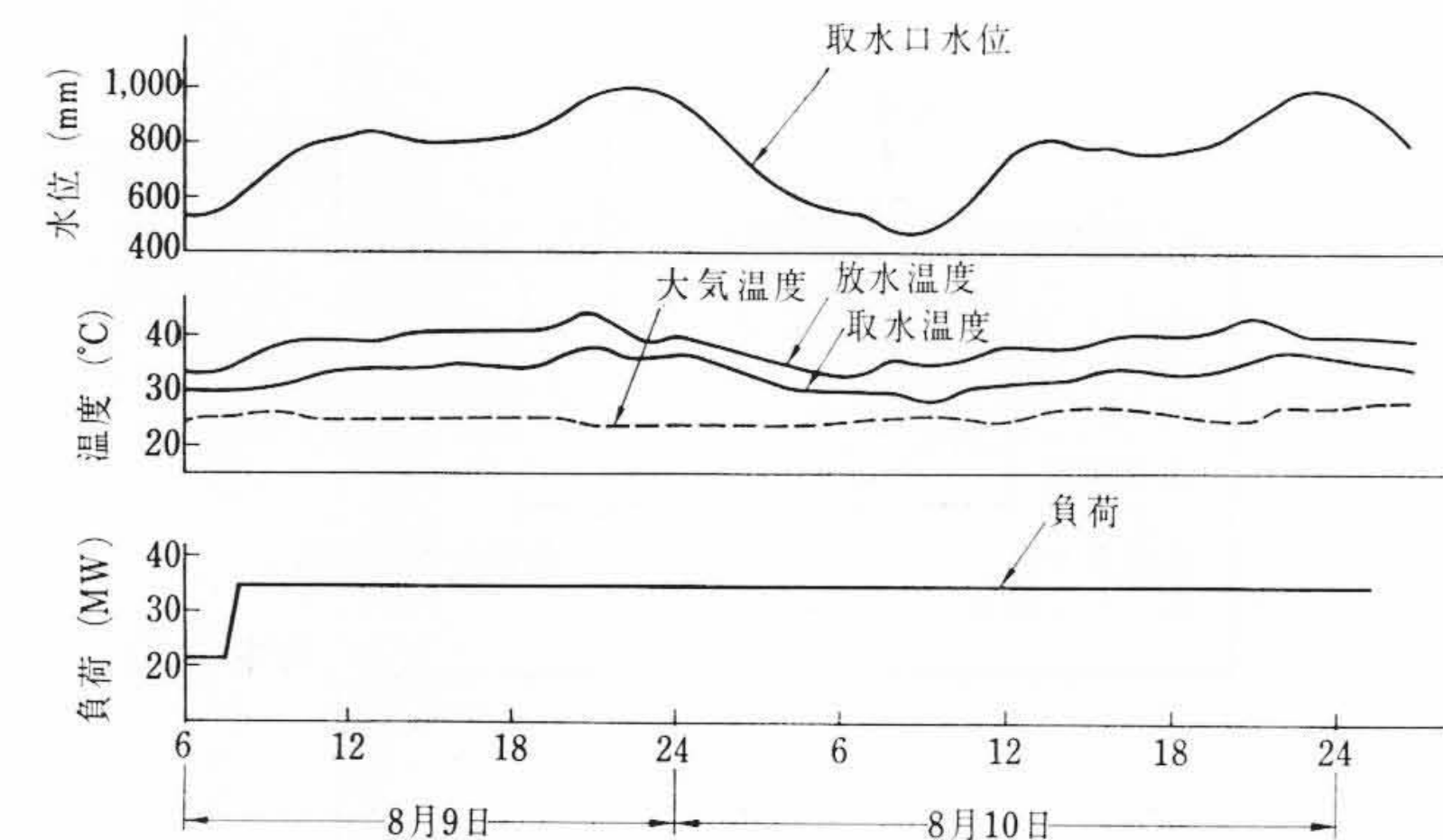
二重層の形成されている小湾から取水する場合に、下層の低温水を上層の高温水と強混合を起こさずに安定に取水できる条件についてはすでに文献にも紹介されているが⁽⁵⁾、一般に第5図に示すとおり上層と下層との境界層から $5 \sim 7 \text{ m}$ 以上深いところに取水口があれば安定に取水できる。

2.3 感潮域河川の場合

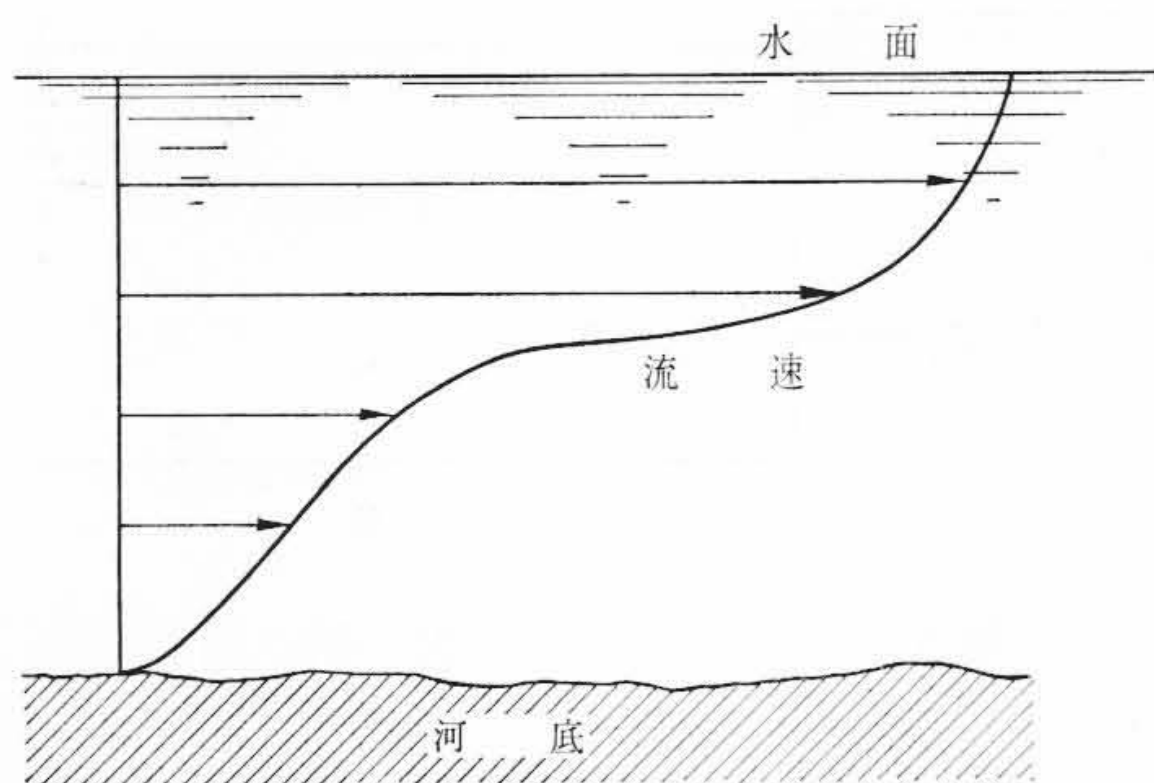
河川において、河口に近い部分は、水位が絶えず干満の影響を受けて敏感に変化する。引き潮時には河の流れは順方向に流れるが、満ち潮時には潮位の増加により逆流量が上流からの流量を上まわり、河流は逆流する。このように河川の河口付近の部分を潮汐の干満に敏感であるという意味で感潮域河川と称する。河水を冷却水として利用する発電所においては、河川が感潮域河川であるか否かによって考え方が根本的に変わってくるのであるが、ここでは特に問題の多い感潮域河川の冷却水再循環について論ずる。

第6図は感潮域河川に取、放水口を有する火力発電所の取、放水温度実測値の一例である。取水温度が取水口水位(したがって潮位)に密接な関係をもっていることがわかる。

河水の流れを巨視的にみると、適当な大きさの水塊がその順序を



第 6 図 感潮域河川の取放水温度の一例

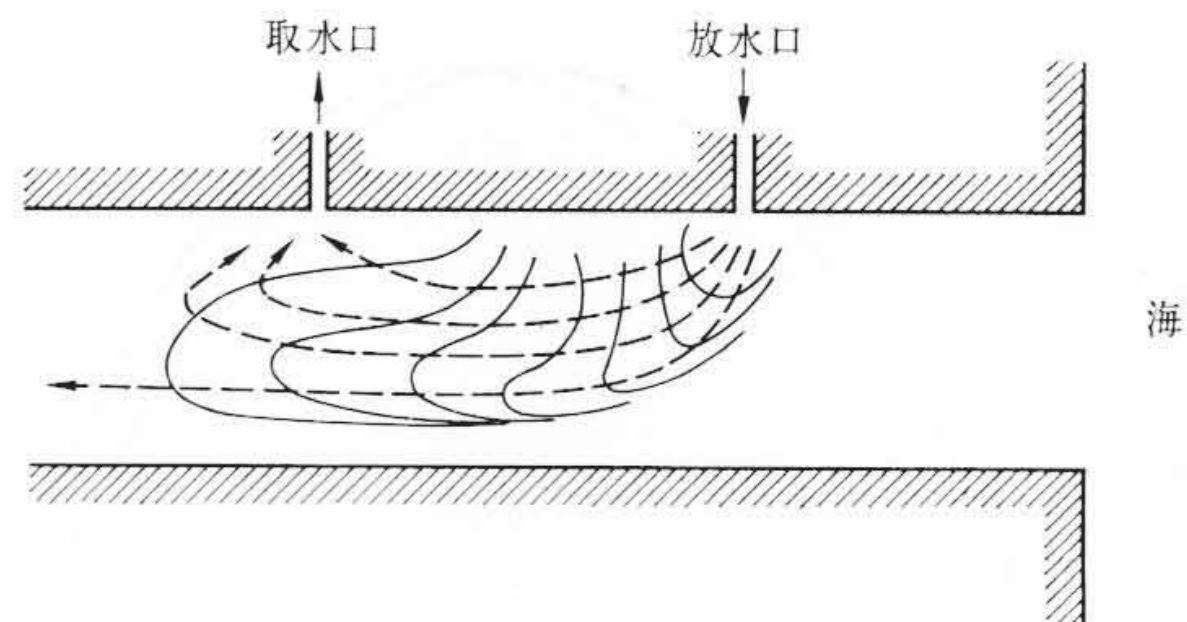


第 7 図 河 水 の 流 速

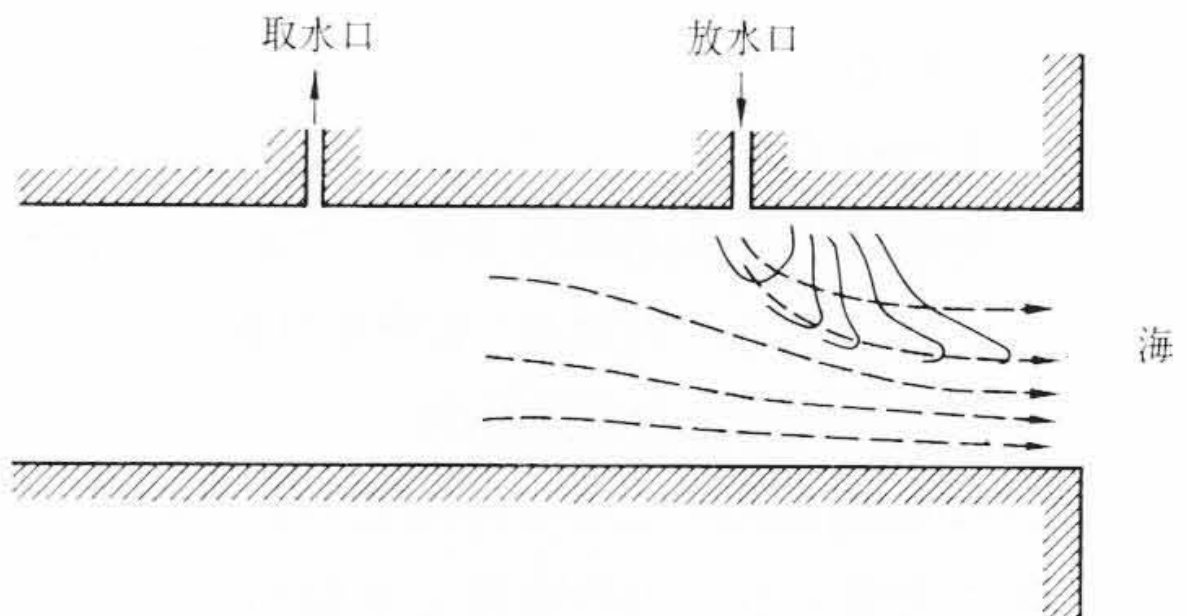
ほとんど変えずに下流へあるいは上流へ移動している。この過程の途中において、多少の乱流拡散作用によりわずかつ水塊の位置が入れかわり混合がなされるわけであるが、感潮域河川においては河流の動きが激しく変動するため、取水温度はほとんど水塊の移動状態によってきまると考えてよい。なお乱流拡散作用を無視して求めた推定取水温度は実際の取水温度よりやや高めになるが、これはいい換えれば安全側にある検討であるといえる。

水塊の移動の方向、速度、移動距離などは潮位の変化による海からの逆流流入の量(引き潮時には流出量)および上流からの河水の流入量によって求めることができる。ここに火力発電所を建設した場合には、さらに冷却水の取、放水の影響を考慮して水塊の移動状態を求めなければならない。第 7 図は水塊の深さ方向の速度分布を示したものである。下層の水の速度は河底との摩擦のために上層よりかなり小さくなる。特に引き潮時には河水の速度が大きくなるため上層の水の速度は非常に速くなるが、下層の速度はそれほど大きくならないため上層と下層にかなりの速度差ができる。したがって浅い河川では発電所から高温水の放水がある場合、引き潮時には上層を冷たい河水が流れ下層には高温水がよどんでいるような状態になるため、下層より上層のほうが低温を示す。満ち潮時には河流の速度が比較的遅いため、軽い高温水が上層に分布し、下層のほうが低温になる。

水塊の移動状況を追跡することにより河水を冷却水とした場合の再循環現象を検討することができる。第 8 図は放水口から出た高温水の流線および取放水口付近の水温等温線を示したものである。水塊の移動を追っていくことにより冷却水が放水口から出て取水口に再循環されるまでの時間を求め、取水口から再び取り入れられるま

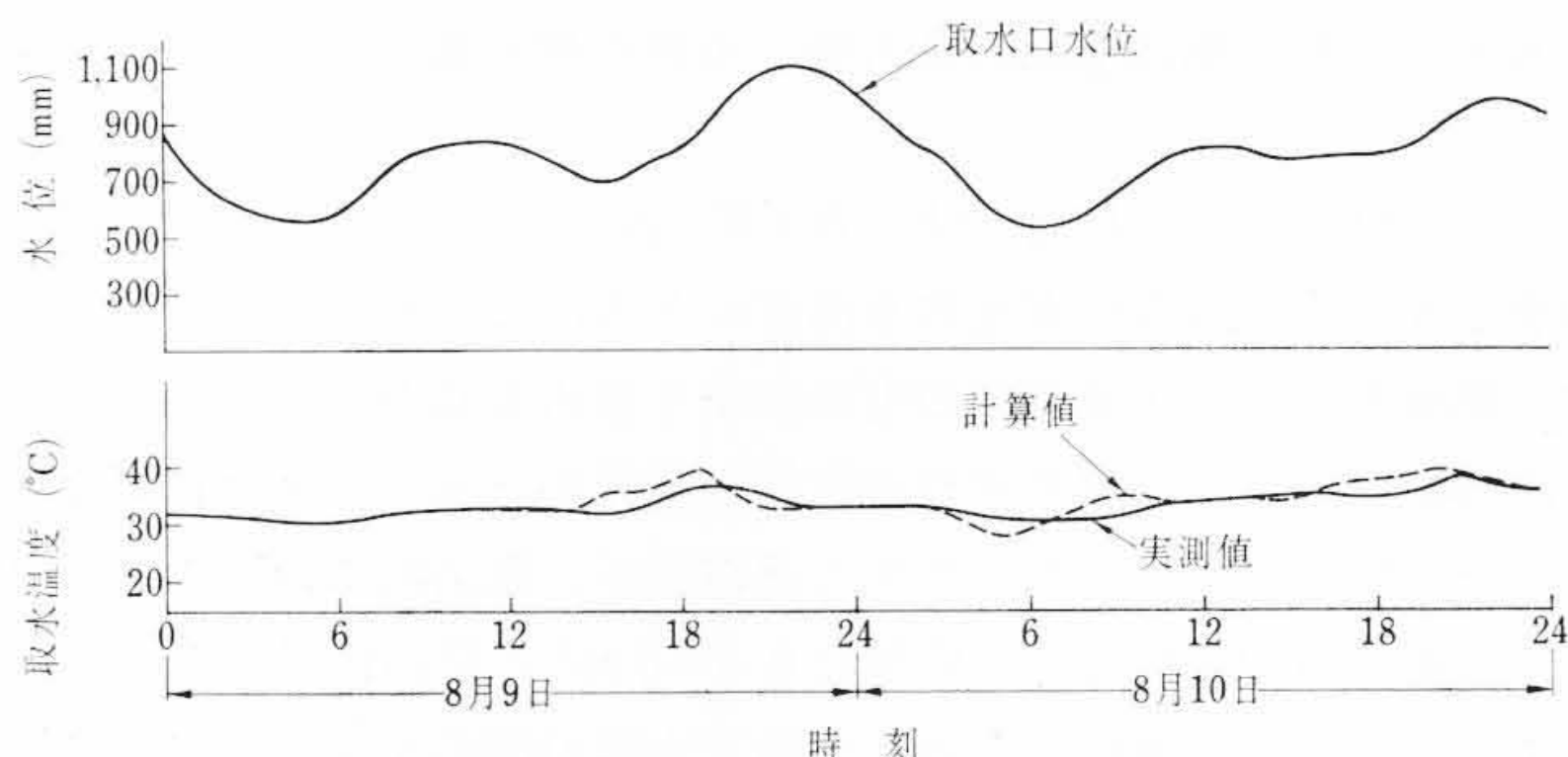


(A) 満ち潮時



(B) 引き潮時

第 8 図 感潮域河川の放水の流線および河水の等温線



第 9 図 感潮域河川取水温度の計算値と実測値との比較

でに大気に放散する熱量は冷却池の場合に述べた方法をそのまま用いる。このようにして求めた取水温度の計算値と実測値との比較を参考のため第 9 図に示した。

3. 結 言

再循環する復水器冷却水の最終安定取水温度を求める方法を、冷却水が放水口より取水口に至る間の熱放散と、水の流動の解析の二つに分け、これを冷却池、小湾および感潮域河川の三つの場合について検討した。冷却水再循環の問題は火力発電所の計画に際し、しばしば遭遇するものであるが、この問題の解析について公刊されている文献が少ないので、あえて筆者らが最近検討した例について発表したものである。大方のご批判をおくぐとともに、より経済的な火力発電所の建設のために本文がいささかでも参考になればこれ以上の喜びはない。

参 考 文 献

- (1) R. F. Throne: Power, 95, 86 (Sep. 1951)
- (2) D. O. Lima: Power, 80 142 (Mar. 1936)
- (3) B. L. Thomas: Chem. Eng. 67, 129 (Aug. 1960)
- (4) Geological Survey Professional Paper 269
- (5) 土木学会誌 (1960 年 3 月)