

水面熱損失係数と平衡水温—温排水問題に関連して—

大 西 外 明*

1. はじめに

原子力・火力発電所における温排水問題は、自然環境保全との関連から広く社会的関心を集めつつある。わが国では、発電所からの冷却水を海へ放流している例がほとんどである。この温排水の拡散は、その排出場所が海のような巨大な水域である場合、温排水そのものが有する乱れ特性と海域に存在する大小の乱れ特性により生じる混合希釈により大きく支配されるのではあるが、排出された熱は最終的には大気中へ拡散される以上、水面における大気と水塊との間に生じる熱エネルギー交換のメカニズムを明確にしておくことは不可欠である。また将来、冷却池や冷却塔によるクローズドサイクルを用いて環境水域への排熱を極度に制限しようとする場合が必要となることも予想される。このような場合、水面における熱エネルギー交換現象の理解がさらに重要となろう。アメリカ合衆国では、冷却水の取放水場所を河川、湖に求める例が多いこと、また、温排水の処理方法として冷却池、冷却塔、開水路などを用いる例もあることから、この問題については地道な研究が進められている。とくに Edinger ら¹⁾ は平衡温度と水面熱損失係数の概念を提案し、水面における熱エネルギー交換現象の取扱いを簡便化することに貢献している。以下に、平衡温度と水面熱損失係数の概念を紹介し、参考に資したい。

2. 水面における熱エネルギー交換

発電所から温排水を受けた水域の水温分布は、放流水域を静水と考えると、2つの主要なプロセスにより支配される。その一つは、放水口近傍における冷水の連行による混合希釈であり、第二のプロセスは、水面における大気との熱エネルギーの交換である（放流水域が自然の海のように、静水域ではなくて大小の乱れを含んでいる場合、以上の2つのプロセスのほか、海水中の乱れによる熱拡散プロセスも入ってくる）。温排水とともに、静水域へ放出された熱は、そのほとんどすべての部分は最終的には水面から大気中へ放散されるのであるが、放水

口近傍では混合希釈の効果が卓越する。これに対して、放水口から離れた水面部では、大気への熱放出の効果が増加してくる。

いま、水面における熱エネルギー交換を考えるにあたり、問題を単純化するため、対象とする水塊は十分に混合され、その内部の水温は一律であると仮定する。比較的水深の大きな自然水域では、鉛直方向水温分布は一律ではないが水深が小さな場合には、ほぼ均一な水温分布になると考えられる。また、自然の水温分布が一律でなくても表層部に温水を放流すると温度成層が形成され、躍層面より上層での水温はほぼ一律となることが知られている。このことから、上記の仮定は妥当なものといえよう。さて、容積 $V(\text{m}^3)$ の水塊中に含まれる熱量に注目すると、熱量保存の関係から次式がなりたつ。

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \frac{dH}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- V : 水の容量 (m^3), ρ : 水の密度 (kg/m^3),
- C_p : 水の比熱 ($\text{joule}/\text{kg}^\circ\text{C}$), t : 時間 (day),
- T : 水温 ($^\circ\text{C}$), H : 温排水中の熱量 (joule)

いま、単位面積の水面における単位時間当りの交換熱量を $\Delta Q \left(= \frac{1}{A} \frac{dH}{dt}; A = \text{水面積} \right)$ とすると

$$\Delta Q = \dot{H}_r - (\dot{H}_{br} + \dot{H}_e + \dot{H}_c) \dots\dots\dots (2)$$

と表わすことができる。

ここに

- \dot{H}_r : 太陽および大気からの輻射熱量 ($\text{joule}/\text{day} \cdot \text{m}^2$)
- \dot{H}_{br} : 水塊から大気への逆輻射熱量 ($\text{joule}/\text{day} \cdot \text{m}^2$)
- \dot{H}_e : 水面における蒸発凝縮による熱交換量 ($\text{joule}/\text{day} \cdot \text{m}^2$)
- \dot{H}_c : 水面における伝導による熱交換量 ($\text{joule}/\text{day} \cdot \text{m}^2$)

水は、ほとんど完全に黒い物体として輻射を受けるものと考え、式(2)中の \dot{H}_{br} はステファン・ボルツマンの法則から次式であらわされる。

$$\dot{H}_{br} = 0.97 \sigma (T_s + 273)^4 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 σ はステファン・ボルツマン常数 ($= 1.367 \times 10^{-12} \text{ cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^\circ\text{K}^4$), T_s は水温 ($^\circ\text{C}$) である。

蒸発による放熱量 \dot{H}_e については多くの式が報告され

* 正会員 工博 電源開発(株)原子力室

ているが、その多くは次の一般形で表わすことができる。

$$\dot{H}_e = (a + bw)(e_s - e_a) \dots \dots \dots (5)$$

ここに

a, b : 各実験式により異なる係数

w : 風速 (m/sec)

e_a : 水面のすぐ上の大気蒸気圧 (mmHg)

e_s : 水面の飽和蒸気圧 (mmHg) であり、水面温度 T_s により決ってくる。 \dot{H}_c については Bowen ratio を B とすると

$$B = \dot{H}_c / \dot{H}_e \dots \dots \dots (6)$$

と表わすことができる。この Bowen ratio は、次式により与えられる。

$$B = \frac{C'(T_s - T_a)}{e_s - e_a} \cdot \frac{p}{760} \dots \dots \dots (7)$$

ここに

T_a : 大気温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_s : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 p : 大気圧 (mmHg)、 C' : 実験により定まる常数

式 (6)、(7)、(5) より

$$\dot{H}_c = C(a + bw)(T_s - T_a) \dots \dots \dots (8)$$

ただし $C = C' \frac{p}{760}$ である。

式 (4)、(5)、(8) を式 (2) に代入すると

$$\Delta Q = \dot{H}_r - \{0.97 \sigma (T_s + 273)^4 + (a + bw)(e_s - e_a) + C(a + bw)(T_s - T_a)\} \dots \dots \dots (9)$$

3. 水面熱損失係数と平衡水温

式 (9) より $dH/dt (= A \Delta Q)$ を計算し、式 (1) に代入すれば水面での熱エネルギー交換に起因する水温変化を求めることができる。しかし、式 (9) はその構成が複雑なため、その取扱いは必ずしも容易ではない。そのため、Edinger and Geyer¹⁾ は、式 (9) の代わりに次式の関係を用いることを提案している。

$$\Delta Q = -K(T_s - E) \dots \dots \dots (10)$$

K は水面熱損失係数 (water surface heat exchange coefficient, joule/m² $^{\circ}\text{C}$)、 E は平衡水温 (equilibrium temperature, $^{\circ}\text{C}$) とよばれる。

平衡水温は水面で生じる水と空気との間の熱エネルギーの出入りの差引きが、与えられた気象条件に対して 0 になるときの水温であり、これを直接に測定することはできない。 $T_s > E$ のときには、熱は水から大気中へ放出されて水温は低下し、逆に $T_s < E$ のときには水温は上昇することになる。平衡水温 E に相当する飽和水蒸気圧を e_E とすると、式 (9) で $T_s = E$ 、 $e_s = e_E$ とおいて

$$\dot{H}_r = \{0.97 \sigma (E + 273)^4 + (a + bw)(e_E - e_a) + C(a + bw)(E - T_a)\} \dots \dots \dots (11)$$

を得る。

式 (9) と式 (11) の差をとると

$$\Delta Q = -[0.97 \sigma \{(T_s + 273)^4 - (E + 273)^4\} + (a + bw)(e_s - e_E) + C(a + bw)(T_s - E)] \dots \dots \dots (12)$$

ここで

$$(e_s - e_E) = \beta_1 (T_s - E) \dots \dots \dots (13)$$

と仮定する。ここに、 β_1 : 比例常数 (mmHg/ $^{\circ}\text{C}$) である。

式 (12) に式 (13) を代入し、さらに右辺の第一項、第二項を展開し、第一次の部分だけをとると

$$\Delta Q = -\{79 \times 10^6 \sigma + \beta_1 (a + bw) + C(a + bw)\} (T_s - E) \dots \dots \dots (14)$$

式 (10)、(14) から

$$K = 79 \times 10^6 \sigma + \beta_1 (a + bw) + C(a + bw) \dots (15)$$

式 (15) からわかるように、水面熱損失係数 K は風速 (w)、 β_1 、および C の大きさにより支配される。 β_1 は水温 (T_s)、平衡温度 (E)、蒸気圧 (e_s, e_E) の関数、 C もまた大気蒸気圧の関数である。

Edinger らは、 e_E と E の間に linear な関係が成り立つものと仮定して、式 (11) から K と E を試算法により求める方法を提案しているが、その手順はややわずらわしい (詳細は文献 1) を参照のこと)。しかし、熱エネルギー交換現象は式 (10) のように表示することにより、形式的に著しく単純化される。

4. K の簡便表示

Dingham²⁾ は、 E の代わりに気温 T_a を用いて K を求めることを考え、次式により水面における熱エネルギー交換を表わすことを試みている。

$$\Delta Q = H_r - \{Q_0 + K(T_s - T_a)\} \dots \dots \dots (16)$$

ここに、 H_r は太陽・大気による単位面積、単位時間当りの輻射熱量、 Q_0 は H_r と同じ単位を有し輻射熱量以外の気象条件により決ってくる項である。式 (16) は、輻射熱量を除く単位時間、単位面積当りの水面での熱エネルギーの交換は、与えられた気象条件に対し、 $(T_s - T_a)$ の一次関数として表わされるものと仮定している。この仮定の妥当性を確かめるために、Dingham は表-1 の条件について、前出の Edinger らの方法と比較を行ったが、表-1、図-1 に示すように、よい一致が認められる。また、Dingham は表-1 の条件について Q_0 および K は、それぞれ次式により与えられることを示している。

① 快晴時:

$$Q_0 (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day}) = 105 + 23 v_a \dots \dots \dots (17a)$$

$$K (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day}^{\circ}\text{C}) = 35 + 4.2 v_a \dots \dots \dots (17b)$$

表-1 Edinger et al 法と Dingman 法との比較に用いた気象条件と結果

気候条件	風速 (m/sec)	気温 (°C)	湿度 (%)	太陽輻射量 (Cal/cm ² day)	平衡温度 E (°C)	
					Dingman 法	Edinger et al 法
Clear	1	-5	50	85	-6.1	-9.0
Clear	3.35	24	26	1400	48.7	35.9
Clear	0.66	17.9	50	560	29.5	31.0
Clear	2	10	20	1000	29.5	23.7
Cloudy	1	-5	100	85	-1.4	-7.0
Cloudy	3.35	24	70	1000	43.9	34.7
Cloudy	0.66	17.9	90	560	33.5	34.0
Cloudy	2	10	60	1000	32.8	26.0
Clear	0.5	-10	50	100	-10.4	-12.9
Cloudy	0.5	-20	100	80	-16.2	-21.2
Clear	0	-30	100	100	-30.1	-29.1
Clear	3	0	50	200	0.5	-1.4
Cloudy	1.5	5	100	200	10.9	6.6
Clear	5	10	50	500	15.0	11.6
Cloudy	5	10	100	100	12.1	9.0
Clear	0	15	60	500	26.3	31.6
Cloudy	1	15	70	200	21.3	15.1
Clear	2	15	80	1000	34.5	31.9
Cloudy	3	20	90	500	30.7	26.2
Cloudy	4	20	100	200	24.3	21.4

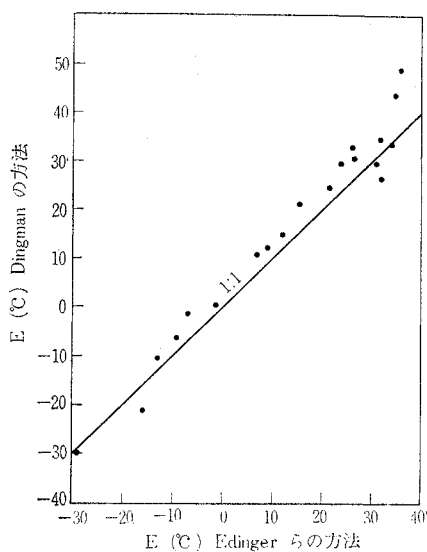


図-1 Dingman と Edinger の方法の比較

② 曇天時:

$$Q_0(\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day}) = -73 + 9.1 v_a \dots\dots(17c)$$

$$K(\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{°C}) = 37 + 4.6 v_a \dots\dots(17d)$$

ここに、 v_a (m/sec) は風速である。上の関係式からも推測がつくように、水面における熱エネルギー交換に關連する多くの要素のうち、風速はとくに大きな影響を及ぼす。

5. 模型試験による K および E の算定³⁾

式 (1), (10) から、 $dH/dt = A \Delta Q$ であることを考

慮すると

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = -KA(T_s - E) \dots\dots(18)$$

放流水域では、混合が十分に進んでいるものと仮定すると、 $T_s = T$ である。また、 $V = Ad$ (d : 平均水深) であるから

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{K(t)}{\rho C_p d} [T(t) - E(t)] \dots\dots(19)$$

K, T, E はともに時間 t とともに変化するので、式 (19) では、これらの変数を時間の関数として表わしてある。このことは、対象としている地点の気象条件は、時間とともに変化することから考えて当然である。

(1) $E(t), K(t)$ の第一近似

いま、水温の異なった2種類の水塊を考え、これらの水が、同一の気象条件にさらされている場合を考えてみる。この場合、 $K(t)$ は正確には水温が異なれば、それぞれ異なった値をとるのであるが、近似的にこれらを一定とする。つまり気象条件が同一ならば、水温が異なっても、 $K(t)$ は変わらないものとする。そうすると、式 (19) から温かい方の水と冷たい方の水に対して、次の関係式が成り立つ。

① 温かい方の水:

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{K_1(t)}{\rho C_p d} [T_w(t) - E(t)] \dots\dots(20)$$

② 冷たい方の水:

$$\frac{dT_c}{dt} = -\frac{K_1(t)}{\rho C_p d} [T_c(t) - E(t)] \dots\dots(21)$$

ここに、 $K_1(t)$ は $K(t)$ の第一近似を、また、添字、 w, c はそれぞれ温かい水と冷たい水を表わす。式 (20) と式 (21) から

$$K_1 = -\frac{\rho C_p d}{\Delta t} \ln \left[\frac{T_w(t_2) - T_c(t_2)}{T_w(t_1) - T_c(t_1)} \right] \dots\dots(22a)$$

$$E_1 = \frac{T_c(t_2) - T_c(t_1) \exp\left(-\frac{K \Delta t}{\rho C_p d}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{K \Delta t}{\rho C_p d}\right)} \dots\dots(22b)$$

式 (21), (22a, b) の K_1, E_1 は時間 $\Delta t = t_2 - t_1$ の間の平均値を表わす。水温 T_w, T_c を測定すると、式 (21) より K_1 がまとまり、さらに、式 (22) から E_1 が計算できる。

(2) $K(t), E(t)$ の第二近似

第一近似では、 K, E は気象条件が与えられた場合に

表-2 K および E の第1近似と第2近似の比較 (文献3) より)

試験番号	熱損失係数 (Watts/m ² °C)		温 度 (°C)					風 速 (m/sec)	太陽輻射熱 (Watts/m ²)
	K ₁	K ₂	E ₁	E ₂	\bar{T}_w	\bar{T}_c	\bar{T}_d^*		
20	15.3	15.1	18.3	15.9	24.5	14.4	11.7	0	—
21	13.2	13.4	20.0	20.6	23.8	13.9	12.2	0	—
24	21.1	19.8	19.4	19.4	23.3	18.9	12.2	0	—
平均	16.3	16.0	19.4	19.4	24.4	15.5	12.2	0	—

注: *印 \bar{T}_d : 露点温度.

表-3 Pittsburg 発電所での E, K の測定結果 (文献3) より)

試験番号	熱損失係数 (Watts/m ² °C)		温 度 (°C)					風 速 (m/sec)	太陽輻射熱 (Watts/m ²)
	K ₁	K ₂	E ₁	E ₂	\bar{T}_w	\bar{T}_c	\bar{T}_d		
1	45.5	39.6	10.6	10.0	17.8	15.6	3.9	6.25	41.65
2	91.5	85.2	21.1	21.1	26.7	18.9	4.4	6.25	247.6
3	68.1	58.3	16.6	16.1	21.6	19.5	-3.3	6.25	247.6
4	56.3	48.0	18.9	18.3	22.8	20.5	-2.2	4.47	329.3
5	62.0	51.0	17.8	17.8	26.7	19.5	1.7	5.37	392.2
6	35.8	30.9	19.5	19.5	22.8	18.9	5.0	1.79	162.0
7	46.2	35.6	30.6	32.2	31.1	22.2	3.9	3.58	753.9
8	36.6	31.2	32.2	35.6	22.2	15.6	3.9	3.58	753.9
9	42.0	33.3	30.6	34.9	31.1	15.6	3.9	3.58	753.9
10	36.4	29.7	15.6	18.9	28.9	23.9	5.0	2.24	0
11	41.0	37.3	16.7	16.1	24.5	24.5	5.6	2.24	0
12	33.1	28.8	21.1	21.1	25.6	18.9	3.3	2.69	154.6
13	62.0	50.5	27.8	28.9	27.8	22.8	1.7	7.60	710.7
14	44.8	38.2	31.1	30.0	23.3	17.8	1.7	8.05	681.3
15	53.3	45.1	28.3	29.5	27.8	18.9	1.7	8.05	667.7
16	51.5	44.4	20.0	18.9	27.2	22.8	-1.7	4.47	8.8
17	50.4	47.0	17.8	17.2	20.0	15.6	-1.7	7.60	3.4
18	52.6	48.2	17.8	17.2	21.1	18.5	-1.1	8.05	1.7
19	47.0	33.3	25.5	25.5	27.8	17.2	-1.7	8.95	766.6
20	50.3	41.0	26.1	32.8	23.4	16.1	-1.1	8.95	752.0
21	50.3	36.1	26.1	27.8	27.8	16.1	-1.1	8.95	752.0
22	49.0	43.5	12.2	16.7	22.8	17.2	-1.1	7.15	8.8
23	36.8	34.9	10.0	10.0	17.2	11.7	-1.7	7.15	7.7
24	40.3	36.3	10.6	10.6	20.6	11.7	-1.7	7.60	55.3
25	57.5	55.6	21.1	21.7	30.0	22.2	3.4	5.82	43.9
26	62.5	60.3	20.5	21.1	30.0	22.2	3.4	5.82	43.9
27	83.5	71.3	27.2	27.8	27.8	22.8	3.9	7.15	809.6
28	55.6	49.3	30.0	31.1	23.3	18.9	3.9	7.15	797.8
29	71.5	60.0	23.3	28.9	23.3	19.5	7.5	7.60	773.8
30	63.5	54.3	16.7	16.1	25.6	20.0	2.2	5.66	147.2
31	46.2	43.0	14.4	14.4	19.4	13.9	1.7	5.36	105.2
32	58.0	53.0	13.9	13.9	22.8	13.9	1.1	5.36	73.6
33	44.1	41.5	14.4	14.4	22.8	13.9	1.1	5.82	22.8
34	45.8	43.0	14.4	14.4	22.8	13.9	1.1	5.82	22.8
35	80.3	66.0	25.5	25.5	33.3	24.4	-0.56	9.40	765.7
36	53.1	47.7	27.2	33.9	21.1	16.1	-0.56	9.40	765.7
37	82.5	68.6	25.5	26.1	27.1	18.3	0.56	9.85	776.4
38	83.0	75.2	19.5	15.5	19.5	12.2	-2.2	9.85	0
39	49.5	46.7	12.2	12.2	78.4	13.9	-2.2	10.30	0
40	70.8	65.6	18.3	18.3	21.1	13.9	-1.7	9.85	0
平均値	54.7	48.0	20.0	20.0	24.4	17.2	1.1	6.7	335.1

は、水温に無関係であると仮定した。しかし、実際には、水温が異なると K, E は異なった値をとる。いま

$$\Delta K = K_w(t) - K_c(t) \dots\dots\dots(23)$$

$$\Delta E = E_w(t) - E_c(t) \dots\dots\dots(24)$$

とし、 $\Delta K, \Delta E$ は $\Delta t = t_2 - t_1$ の間で一定であるとす
る。

$$K_c = \frac{-\rho C_p d}{\Delta t} \ln \left\{ \frac{T_c(t_2) - T_w(t_2) + \Delta E}{T_c(t_1) - E_c - [T_w(t_1) - E_c - \Delta E] \exp \left[\frac{-(\Delta K)(\Delta t)}{\rho C_p d} \right]} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

$$E_c = \frac{T_c(t_2) - T_c(t_1) \exp \left(\frac{-K_c \Delta t}{\rho C_p d} \right)}{1 - \exp \left(\frac{-K_c \Delta t}{\rho C_p d} \right)} \dots\dots\dots(28)$$

式(27), (28)より K_c, E_c を求めると、式(23), (24)から、 K_w, E_w が求められる。この場合、 $\Delta K, \Delta E$ を定めることが必要であるが、Hindley らは、Brady⁴⁾ の実験式を用いて、試算によりこれを計算している(詳細は文献 3)を参照されたい)。

K_c, K_w, E_c, E_w が求められると、 $K(t), E(t)$ の第二近似 K_2, E_2 は

$$K_2 = \frac{K_w + K_c}{2} \dots\dots\dots(29)$$

$$E_2 = \frac{E_w + E_c}{2} \dots\dots\dots(30)$$

となる。

Hindley らは、室内模型実験によって第一近似 (E_1, K_1) と第二近似 (E_2, K_2) の比較を行ったが、その結果は表-2のとおりである。室内実験であるため、太陽輻射熱 H_r はなく、風速も 0 である。また、表-3 は Pittsburg 発電所の現地地で実測したデータから K_1, K_2, E_1, E_2 を求めた結果である。表-2, 3 からわかるように、第一近似と第二近似の差は小さくなく、Hindley らの資料からみる限り、第一近似は十分に使用に供しうるものと思われる。また、模型実験値に比較して、現地データに基づく K の値は一般に大きくなる傾向がある。このことは、温水拡散状態を模型実験で調べようとする場合、注意すべき事項の一つであるので、この点につき若干説明を加えておく。

6. 熱損失係数 K と模型実験相似性

以上では静水域における熱損失係数 K と平衡温度 E につき述べてきた。温水放流を受けた水域では、静水状態ではなくて流れを伴うが、流れがあったとしても、静水域で得られた K, E はそのまま適用しうるであろう。十分に混合が進んだ流れに直角な横断面内の水温が一樣な均等質な流れを考えると、流れ方向の温度勾配は次式

この仮定は、厳密には正しくはないが、第二近似として許容されよう。このように考えると、式(19)から

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{-K_w}{\rho C_p d} [T_w(t) - E_w] \dots\dots\dots(25)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = -\frac{K_c}{\rho C_p d} [T_c(t) - E_c] \dots\dots\dots(26)$$

式(23), (24)を式(25), (26)に代入すると

により表わされる。

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{K(T-E)}{\rho C_p d u} \dots\dots\dots(31)$$

ここに、 x は流れの方向を示す座標、 u は流速、 d は水深である。

いま、あるパラメーターの模型と、実物での縮尺比を $\lambda (< 1)$ とし、添字でもってそのパラメーターを表わすものとする、式(31)より

$$\lambda_T = \lambda_K \lambda_T \lambda_\rho^{-1} \lambda_{C_p}^{-1} \lambda_d^{-1} \lambda_u^{-1} \lambda_x \dots\dots\dots(32)$$

となる。模型と実物とで同じ水を用い、また温度を等しくすると、 $\lambda_\rho = \lambda_{C_p} = 1$ となる。さらに、模型をフルード相似則に従ってつくるものとする $\lambda_u = \lambda_d^{1/2}$ であるから、式(32)は

$$\lambda_K = \lambda_d^{3/2} \lambda_x^{-1} \dots\dots\dots(33 a)$$

または

$$\lambda_x = \lambda_d^{3/2} \lambda_K^{-1} \dots\dots\dots(33 b)$$

もし、 K を模型と実物と等しくとれば $\lambda_K = 1$ 、したがって

$$\lambda_x = \lambda_d^{3/2} \dots\dots\dots(34)$$

模型は式(34)に基づいた“ひずみ模型”を用いることになる。しかし、一般に $\lambda_K \neq 1$ であるので、計画地点の対象気象条件について K を算定し模型実験時における K とから λ_K を求めて、模型の縮尺を定めることが必要となる。

参 考 文 献

- 1) Edinger, J.E. and Geyer, J.C.: "Heat Exchange in Environment", Publication No. 65-902, Edison Electric Institute, New York, June, 1965.
- 2) Dingman, S.L.: Equilibrium Temperatures of Water Surface as Related to Air Temperature and Solar Radiation, Vol. 8, No. 1, Water Resource Research, Feb., 1972.
- 3) Hindley, P.D., and Miner, R.M., : Evaluating Water Surface Heat Exchange Coefficients, Proc. of ASCE., Journal of Hydraulics Div. August, 1972.
- 4) Brady, D.K., Graves, W.L. and Geyer, J.C., : Surface Heat Exchange at Power Plant Cooling Lakes, Publication No. 65-902, Edison Electric Institute, New York, June, 1965.

(1973.7.23・受付)