

## 温排水拡散の簡易解法の研究

## STUDY ON SIMPLE ANALYSIS FOR WARM WATER DIFFUSION

北 松 治 男\*  
By Haruo KITAMATSU

## 1. 序 論

原子力や火力地点の計画にあたっては、放水設備の位置や設計によって温排水がどのように拡散するかがあらかじめわかると経済設計に役立つ。

一方、温排水の水温低減効果は、放水密度フルード数の大小に従い噴流への周囲水の連行を主とする場合から渦動拡散による場合へと移行し、特徴的な水温低下傾向がみられる。これを噴流型・中間型・渦動拡散型の 3 型に分類すると、噴流型の放水口では、放水口施設と拡散の関係はある程度明確となっているが、渦動拡散型ないし中間型の放水口では、簡単に拡散区域を放水口設計と関連づけて予測する方法は公表されていない。

そこで、本論文は、放水施設の選定に役立てることを意図し、その優劣を定量化できる、放水諸元や地点特性を含んだ簡易解法を求めようとした。

ここで基本とした拡散式は簡易なものであるが、拡散モデルの構成要素をできるだけ実証的な手法で決定するよう心懸け、解法を体系づけた。そのため、算定される拡散面積は実用上、十分な精度があり、目的にかなうものと考えられる。

## 2. 水温の低減型

温排水放出後、流芯に沿う水温を追跡すると、距離  $r$  と上昇温  $T$  の低下傾向に著しい地点差があることがわかる。

八戸火力の放水口は、水深 6 m の護岸に開口する径 3 m、ピッチ 4.2 m の 2 本の放水管から、放水速度 1 m/s で放水している。放水口天端は低水位より 0.5 m 下がっているが、本質的には表層噴流型に分類される。図-1 は、上昇温の距離低減を示したもので、実測値は

上に凹の噴流型の水温低下を示している。図中、渦動拡散理論として示したものは、電力中央研究所の平面 2 次元数値シミュレーション解析に基づく汎用図表<sup>2)</sup>に、放水量と上昇水温を入力したものである。また、表層噴流理論として示したものは、Shirazi-Davis の計算図表<sup>4)</sup>に、放水量と上昇水温のほか、放水口の縦横形状比、放水密度フルード数を入力して求めたものである。

発電所 01 は、汀線より汀線方向に放水している。放水速度は約 3 m/s であるが、水深が小さく噴流連行効果がみられず、図-2 に示すように水温低下は緩やかで渦動拡散型である。これらの発電所の放水諸元は表-4 のとおりである。

種々の発電所の例を分類してみると、上の 2 者とその中間に位置する種々の放水例がある。水浅が浅いケースや、閉鎖性海域を経て開放海域へ出るなどの特殊な事情

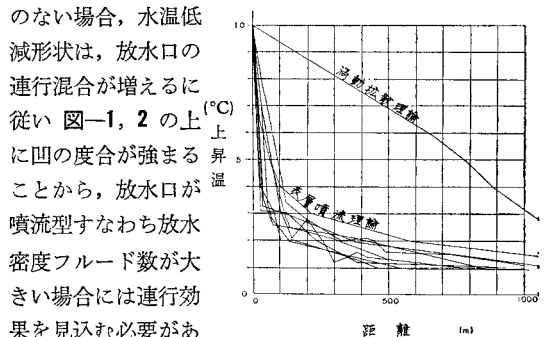


図-1 表層噴流（八戸火力）

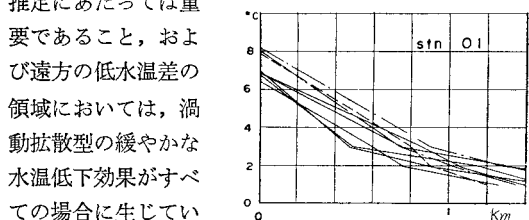


図-2 汀線放水

ることがいえる。

\* 正会員 東北電力(株)土木部調査役

### 3. 拡散モデルの考え方

既設の、必ずしも噴流型を意識していない放水口でも連行効果が存在することがわかったので、何らかの形でこれを評価することが必要と考えられた。また、気象や海象をあまり簡単に扱わずと予測精度が下がってくるから、なるべく物理的な意味を明確にしてそれらを取り入れることが望まれる。

以上の考えから、拡散モデルを次のように展開した。

- ① 水平渦動拡散を主現象としてとらえる。
- ② 潮流は短期間往復流とみて、水平渦動拡散係数に反映する。したがって潮流による周期的な拡散型の揺らぎは取り扱わないで、モデルでは平均的な扱いをしたことになる。
- ③ 水平渦動拡散係数の季節特性を分析して、季節によって拡散係数を変える工夫をする。
- ④ また、大気との熱収支を考慮する。
- ⑤ 短期間の海象変動を象徴する要因として風速を選り、大気熱収支係数および鉛直渦動拡散係数に反映する。また、吹送流による形状の揺らぎは無視する。
- ⑥ 温排水の層厚と噴流連行による流量の膨らみを放水口の条件から決定する。
- ⑦ 流量の膨らみにより、放水条件が仮想的に低温大流量になっているものとして、渦動拡散式の適用を図る。
- ⑧ 以上を骨子として、扇型拡散場を考えることとした。温排水実測の拡散形は、かなりの大小があるが、場の流れによるひずみの大きい場合を除外して、数回の測定を平均的あるいは包絡的にみれば、放水口から角度をもって同心円状に広がるとみなせると考えた。予測においては拡散係数を導入して、時間平均的な立場に立っているのだから、扇形に広がるとの仮定は無理のないもの

表一 拡散モデルの構成要素と主因子の関係

	放水量	上昇温	表層厚	水平拡散係数	鉛直拡散係数	大気熱収支項
時				○季節 ○	○風速	○季節 ○風速
乱れ				○		
流れ	○連行		○連行	○潮汐		
湾形				○海城		
放水	○	○連行	○連行			

表二 2, 3 の数理モデルとの特性比較

特性 拡散モデル	解析手法	時系列解析	地形	場の流れ	大気熱収支	渦動拡散		噴流連行	風応力の効果
						水平	鉛直		
Stolzenbach-Adams and Harleman	積分法	—	—	○	○	—	—	○	—
Shirazi-Davis (EPA)	積分法	—	—	○	○	—	—	○	—
電中研(平面)	数値解析	○	○	○	○	—	—	—	—
本方法	半経験式	—	—	—	○	○	○	○	—

と思う。これによって拡散モデルは著しく簡易化される。この拡散モデルの構成要素と現象を支配する主因子の関係は表一のようにになっている。また、従来の 2, 3 の数理モデルとの相違点を表二に示した。

### 4. 水平方向拡散係数

#### (1) 分析の方針

各サイトで行われている定点連続流速観測データを分類して、サイト間、あるいは海域別の大小とか季節変化との関係などの拡散係数の特性を明らかとする。特に、拡散予測にあつては、拡散スケールが未知であるので、距離スケールとともに漸変する水平方向拡散係数を設定するのが望ましいので、そのような整理を行った。

#### (2) 分析方法

定点連続流速観測記録から、着目する時間スケール以上の長周期流速変動を除去したのち、G.I. Taylor の定理を用いて、その時間スケールに応じた水平方向拡散係数値を決定することができる。

東北各地の沿岸数 km での実測データを集め、1 地点 2~8 測点で、15~30 日間の連続観測を 1 ケースとして、8 地点で季節ごと 46 ケースの記録から、各ケースごとに 12, 24, 36, 48 時間のタイムスケールの拡散係数を算定した。この拡散係数をいったん  $K_r = a_1 t^m$  の形に整理する。ここに、 $K_r$  : 汀線方向拡散係数 ( $m^2/s$ )、 $t$  : 時間スケール (s) である。地点と時期を代表する拡散係数を、最小自乗法により決定した。さらに、拡散渦の時間スケール  $t$  と距離スケール  $r$  の関係を海洋での染料拡散実験の結果から<sup>5)</sup>

$$r = 0.3118 t^{1.17} \times 10^{-2} \text{ (単位: m, s)}$$

または

$$t = 138.67 r^{0.8547}$$

として、 $K_r = a_1 t^m = (a_1 \times 138.67^m) r^{(0.8547m)} = ar^n$  ここに  $a = a_1 \times 138.67^m$ 、 $n = 0.8547m$  のように  $K_r = ar^n$  の形に変換した。なお、後記する拡散式では、場の流れのない場合の放水口からの距離を  $r$  とし、それを渦スケールとする拡散係数  $K = ar^n$  をとるのが妥当と考えることとした。

#### (3) 分析の結果

算定された拡散係数の一例を図三に示した。また  $a$  と  $n$  は図四に示すように、片対数グラフで直線となり、両者の関係は

$$a = 4.7482 \times 0.001613^n \dots \dots (1)$$

(単位: m, s)

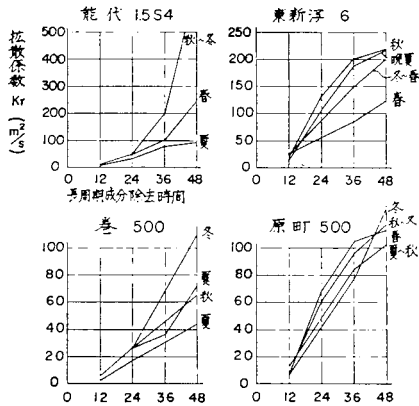


図-3 拡散係数の測定例

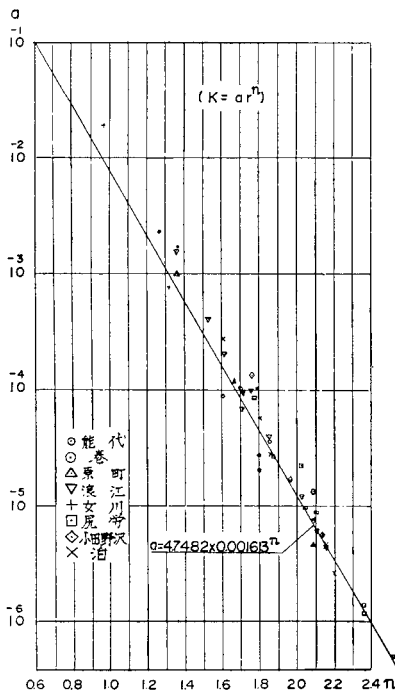


図-4 沿岸域の  $\alpha$  と  $n$  の関係

と表わされる。

また、拡散係数の季節変動を知るため、 $n$  の値を地点ごとに図-5 に示した。

(4) 考 察

実測データから算定した水平拡散係数  $K_r = ar^n$  の値は距離または時間スケールとともに漸増し多数の海域で、時期を異にする拡散係数の  $a$  と  $n$  を式(1)で示すことができた。

また、 $n$  の値は、静穏な湾内地点の女川の 0.69 から本州東北端の尻労の冬季の 2.52 までの広範囲の値が得られたが、平均的には 1.6 程度であり、4/3 以下の場合

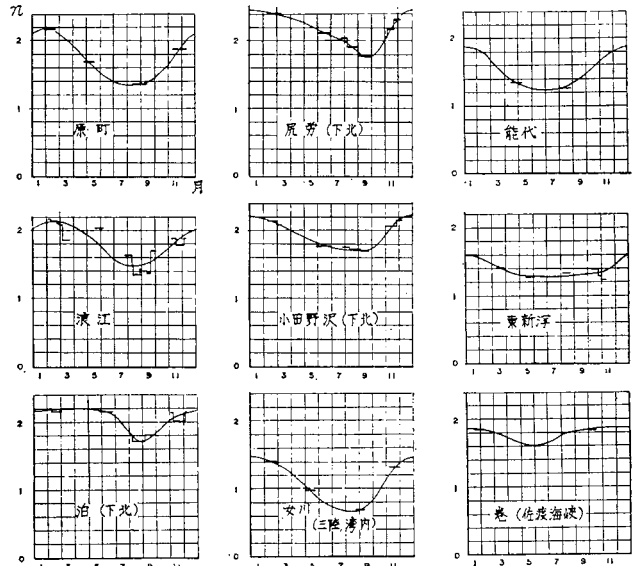


図-5 拡散係数を  $K = ar^n$  と示したときの  $n$  の季節変動図

は少ない。水深 50 m 未満の沿岸域で、時間スケールが 12~48 時間の範囲では、陸岸の影響を強く受けるので、必ずしも 4/3 乗則に適合するとはいえないようである。在来公表された値は Orlob 4/3, 樋口 4/3, 大久保 1.1, 堀口 1.44~1.50, 熊谷・西村 1.5~1.8, など<sup>9)</sup>があるが、いずれも本論文のデータの範囲内となっている。

拡散係数  $K_r = ar^n$  の  $n$  の変動を示す図-5 からは下記の興味ある事実がわかった。

- ① すべての地点で、 $n$  は夏季に小さく冬季に大きい季節変動を示している。
- ② 年変動は 2 割程度あるようにみえる。
- ③ 日本海側では、春から夏に小さいが、太平洋側では夏に向かってだんだん小さくなっている点がやや異なる。
- ④ 日本海側外洋に比し、太平洋側外洋がやや大きい。
- ⑤ 太平洋側では、南部の福島海岸より、北部下北海岸の方が大きい。
- ⑥ 湾内、南三陸の女川湾では著しく小さいが、外海と同様の季節変動がみられる。
- ⑦ これらの拡散係数の特徴から、海域類型や季節別に拡散係数の  $n$  を設定すれば、
- ⑧ 開放性海域で潮流が強い海域では、夏から冬に対応して、 $n = 1.8 \sim 2.2$
- ⑨ 開放性海域では  $n = 1.6 \sim 2.0$
- ⑩ ゆるい閉鎖性海域では  $n = 1.4 \sim 1.8$
- ⑪ 閉鎖性海域では  $n = 1.0 \sim 1.4$ , 極端な場合 0.7 程度が妥当と考えられる。

なお、流速計は、サボニアスローター型のベルゲンモ

デルIVを使用している。この流速計が波による振動成分に対しても値を示すことから、特に、荒海期に過大な値を与える可能性があるので、 $n$ の大きい方の値については吟味を要するかもしれない。

5. 鉛直方向拡散係数

(1) 分析の方針

鉛直方向の渦動拡散は、水温勾配が小さい低温域では有力な水温低下原因であり、風波等の影響下では、さらに重視すべきものと考えられる。

温排水実測の水温縦断形から、鉛直方向拡散係数を略算し、さらに、風速が大きい場合に計算で割増しすることで、鉛直方向拡散係数を決定する方針とした。

(2) 垂直安定度による鉛直方向渦動拡散係数の略値

拡散区域内の代表点の水温鉛直分布から、躍層面の垂直安定度  $\epsilon$  を求め、さらに、鉛直拡散係数  $K_z$  の略値を下記により求めた。

$$\epsilon = \frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} \right), K_z = \frac{10^{-6} \epsilon}{\epsilon} \quad (\text{単位: cm, s}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\rho$  : 比重  $\approx 1.025$ ,  $d\rho \approx 0.0003 \cdot \Delta T$ ,  $\Delta T$  : 区間

表-3 鉛直渦動拡散係数の計算

年 月 日	地 点	$\Delta T$ (°C)	$dz$ (cm)	$K_z$ (cm <sup>2</sup> /s)
46. 8. 10	新 仙 台 $L=500\text{m}$ 点	10	800	0.28
		2	100	0.17
		0.6	100	0.57
46. 10. 4		0.7	100	0.49
		0.5	100	0.69
46. 12. 10		1.0	100	0.34
		0.2	100	1.72
46. 12. 20		0.5	100	0.69
		4.0	100	0.09
47. 10. 26	東 新 潟 $L=300\text{m}$	3.0	40	0.05
46. 8. 12	$L=300\text{m}$ $L=1000\text{m}$	1.5	100	0.23
		2.0	100	0.17
46. 8. 13	$L=400\text{m}$	2.0	100	0.17
47. 8. 23	$L=400\text{m}$	1.3	100	0.27
47. 8. 29		2.0	100	0.17
46. 12. 14		1.0	50	0.17
46. 12. 15		0.5	50	0.34
47. 3. 8		1.0	50	0.17
47. 3. 23	$L=700\text{m}$	1.0	20	0.07
46. 3. 12	$L=300\text{m}$	2.6	100	0.13
47. 8. 23	$L=400\text{m}$	1.8	100	0.19
46. 8. 18	$L=700\text{m}$	1.5	50	0.11
46. 10. 10	$L=300\text{m}$ $L=400\text{m}$ $L=800\text{m}$ $L=100\text{m}$	1.1	100	0.31
		2.9	100	0.12
		2.3	100	0.15
		2.5	50	0.07
平均 値				0.31

$4z$  間の水温差 (°C),  $z$  : 水深 (cm)

表-3 のように、今回調査対象とした海域の温排水拡散区域内の鉛直渦動拡散係数は、平均的には  $3 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s 程度とみてよいようである。同表中の  $L$  は、放水口からの距離を示している。温排水層と下層水の境界の水温勾配は必ずしも大きくなく、むしろ、スムーズに、ゆるい勾配で下層水温に漸移している。

(3) 鉛直方向拡散係数の算定

鉛直方向の拡散係数は、風によって影響を受ける。風速  $U$  (m/s) で、リチャードソン数  $R_i$  のとき、鉛直渦動拡散係数  $K_z$  (m<sup>2</sup>/s) は、Munk Anderson<sup>7)</sup> によると  $K_z = K_0(1 + \delta R_i)^{-3/2}$ ,  $\delta = 3.33$  と示される。ここで拡散海域の  $\delta R_i \gg 1$  なので、 $K_z = K_0(\delta R_i)^{-3/2}$  と近似し、さらに、拡散係数に  $R_i$  によらない最低値があることを考慮し、型式を次式により表現する。

$$K_z = K_1 + K_0(\delta \cdot R_i)^{-3/2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $K_1$  : 風のないときの鉛直渦動拡散係数,  $K_0$  : 風速  $U$  における均質海水中の鉛直渦動拡散係数で

$$K_0 = 1.02 \times 10^{-4} U^3 \quad (\text{単位: m}^2/\text{s}, U \text{ は m/s})$$

である<sup>7)</sup>。ここで、リチャードソン数は次の考えによった。

海面に作用する応力  $\tau'$  は、CGS 単位で

$$\tau' = 0.8 \times 10^4 \rho_a U^2 = 8 \times 1.025 \times 10^{-3} U^2 = 10^{-2} U^2$$

ここに、 $\rho_a$  : 空気の密度  $= 1.025 \times 10^{-3}$ ,  $U$  : m/s 単位, 表面流速  $u_0$  は

$$u_0 = \tau' / \sqrt{2 K_0 \rho \omega \sin \phi} \\ = 10^{-2} U^2 / \sqrt{2 \times 1.02 \times U^3 \times 1.025 \times 7.27 \times 10^{-5} \sin 42^\circ} \\ = 0.99 U^{1/2} (\text{cgs}) = 10^{-2} U^{1/2} (\text{m/s})$$

ここに、 $\rho$  : 水の密度  $= 1.025$ ,  $\omega$  : 地球自転の角速度  $= 7.27 \times 10^{-5}$  rad/s,  $\phi$  : 緯度  $= 42^\circ$  とした。

温排水層と下層の間の流速  $u_0$  と水温  $T$  の変化が層厚  $h$  の間に存在すを考えると、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_0}{h} = \frac{10^{-2} U^{1/2}}{h}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0.0003 \frac{T}{h} \quad \text{などにおけるので、}$$

$$R_i = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) / \left\{ \frac{1}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} = 28.7 \frac{Th}{U} = 170/U$$

となる。温排水は、放水温  $7^\circ\text{C}$  が常用されていて、 $1^\circ\text{C}$  に水温が低下するまでの拡散を予想する場合がほとんどであり、また、通常の緩速放水では温排水層厚が  $3\text{m}$  程度となる場合が多いので、上式において代表的な値として  $T = 2^\circ\text{C}$ ,  $h = 3\text{m}$  としている。したがって、式 (3) に諸値を代入すれば、鉛直渦動拡散係数は、次のようになる。

$$K_z = 0.3 \times 10^{-4} + 7.57 \times 10^{-5} U^{4.5} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式 (4) から、 $3\text{m/s}$  以下の弱風では風の影響は無視で

きる程度であるが、5m/s を超える強風時には、かなりの影響があると考えられる。

(4) 考察

温排水実測によると垂直方向の水温勾配はかなり緩やかであり、放水海域での鉛直拡散係数はこれをベースとして  $K_z \approx 0.3 \text{ cm}^2/\text{s}$  を最小値とした。

成書によると  $K_z$  の大きさは、海の上層の混合層で  $10 \sim 100 (\text{cm}^2/\text{s})$ 、躍層など成層の強い所  $0.01 \sim 1 (\text{cm}^2/\text{s})$ 、海底境界層やエスチャリー  $1 \sim 10 (\text{cm}^2/\text{s})$  などとされており、 $0.3 (\text{cm}^2/\text{s})$  の値は中庸を得たものと判断される。

6. 大気熱収支と鉛直方向の熱量移動

大気と海面間の熱損失を  $H_e = A_0 + A_1 T$  とおいて、水温比例項を大気熱収支係数  $A_1$  とすると、

$$A_1 = \alpha + bU \dots \dots \dots (5)$$

と示すことができる<sup>5)</sup>。係数  $\alpha, b$  は、電中研のノモグラム<sup>2)</sup> により決定できるが、水温  $t_W$  をパラメーターとして、2次式で数式表示すると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 3.7 \times 10^{-9} t_W^2 + 2.3 \times 10^{-8} t_W + 4.1 \times 10^{-6} \\ b &= 2.3 \times 10^{-9} t_W^2 + 6.3 \times 10^{-9} t_W + 1.45 \times 10^{-6} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

$A_1$  の単位は  $\text{t} \cdot \text{cal}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}$  である。

大気熱収支も、前章で述べた鉛直拡散も、ともに面積  $S$  から水温上昇に比例して熱を奪うので両者を一諸にして次のごとく取り扱うことができる。

放水口から流量  $Q$ 、上昇温  $T_0$  で放出されているとき、区域  $S$  の表面から大気へ逃げる熱量は  $SA_1 T_m$ 、表層から下層への鉛直渦動拡散による熱量の流れは  $SK_z T_m/h_d$  と示すことができるので、この両者による熱量損失を、便宜上、放水水温  $T_0$  が  $4T$  だけ低下したに等しいと考えることとすれば、見かけの  $T_0$  の低下  $4T$  は、

$$\begin{aligned} \Delta T &= SA_1 T_m / Q + SK_z T_m / (h_d Q) \\ &= (A_1 + K_z/h_d) (0.2 T_0 + 0.8 T) S / Q \dots (7) \end{aligned}$$

ここに、 $T_m$  : 拡散面積  $S$  内で上昇温が  $T_0$  から  $T$  まで下がる時、 $S$  内の熱収支が合う代表水温で、次記の根拠により、 $T_m = 0.2 T_0 + 0.8 T$  とした。放水口からの距離  $\hat{R} = r/r_1$ 、水温  $\hat{T} = T/T_0$  とそれぞれ無次元表示し、水温低減の関係を 8. の所論に従い

$$\hat{R} = \left\{ \frac{\ln(1 - \hat{T}_1)}{\ln(1 - \hat{T})} \right\}^{1/n}$$

と仮定すると、面積  $S$  内の鉛直熱収支を等しくする平均水温  $\hat{T}_m$  は、

$$\hat{T}_m = \frac{\int \hat{T} dS}{S} = \frac{\int \hat{T} \hat{R} d\hat{R}}{1/2} = \frac{\sum \hat{T} \hat{R} \Delta \hat{R}}{1/2} = T_m / T_0$$

この結果を  $T_m = mT_0$ 。あるいは  $T_m = m'(T_0 - T) + T = m'T_0 + (1 - m')T$  と整理する。温排水の代表的な条件として、 $T_0 = 7^\circ\text{C}$  から  $T_1 = 1^\circ\text{C}$  まで拡散する場合の  $m, m'$  を、 $n = 1.6 \sim 2.0$  として計算すると、

$$\begin{aligned} m &= 0.312 \sim 0.336 \approx 0.3 \\ m' &= 0.200 \sim 0.225 \approx 0.2 \end{aligned}$$

と略値が決定された。 $m$  を使う方が簡易であるが、 $m'$  の方が式型に合理性があると考えられる。

7. 温排水層厚

(1) 算定の方針

放水流速がかなりあって、放水口付近で相当の連行を生じる場合を内部跳水現象とし、そうでない場合を塩水くさびを生じるとみて層厚を決定することとした。このフローを 図-6 に従って説明すると、① の入力条件から ② の放水密度フルード数  $F_{do} > 1$  のとき ③ で2次元内部跳水計算により層厚  $h_d$  を計算する。④ ⑤ は放水口形状比  $A = B/h_0$  による側方希釈の効果を算定するもので ⑥ で修正係数  $r$  を乗じる。⑦ で前面水深  $h_b$  をこえないことを確認し、必要があれば ⑧ で修正する。一方、② で  $F_{do} < 1$  のときは ⑥ で塩水くさびの計算により層厚  $h_d$  を決定するものである。

(2) 内部跳水を生じる場合

温排水の幅は、放水口で有限の値をもち、放水後流速の大きい間は拡散幅がそれほど広がらず滞筋を生じて一様幅に近い形で推移し、その後、流速を失うと渦動拡散

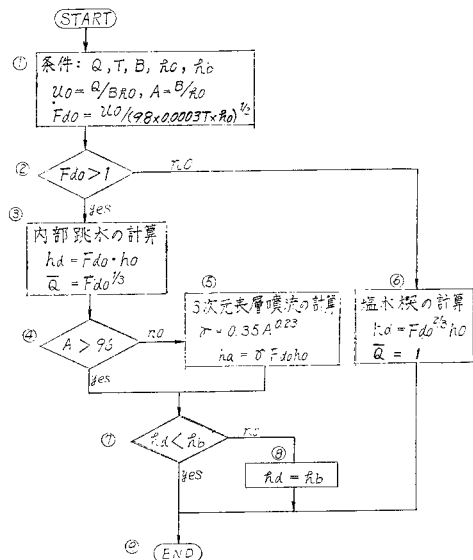


図-6 層厚決定のフロー図

が卓越して急速に幅が広がっていく。このような現象観によると、全域に渦動拡散を主体とする扇型拡散場の仮定を適用するとしても、一様幅の鉛直二次元内部跳水を基本として層厚や流量の膨らみを求め、それを扇形中心点の仮定放水条件として与えるのが現実的であると考

え、以下の展開を図った。

$F_{d0} > 1$  の場合、放水と周辺水の界面が内部跳水によって急激に変化し、この間に強い乱れと 2 層間の混合がみられ、その下流側は安定した 2 層流となると考えられる。これを、数学的便宜から、いったん、二次元現象として解析する。早川によると<sup>9)</sup>、

$$2F_{d0}^2 = \frac{H_2[(1-\epsilon)(\bar{Q}-\epsilon) - (H_d-\epsilon)^2 + 4\beta_2 F_{d0}^2(\bar{Q}-1)^2\{\bar{Q}(H_d-\epsilon) + (\bar{Q}-\epsilon)H_2\} / \{H_2(H_d+2H_2-1)\} - 4\epsilon F_{d0}^2\bar{Q}(\bar{Q}-1)^4\beta_2^4 / \{H_2^2(H_d-2H_2-1)^2\}]}{(\bar{Q}-\epsilon)[\beta_2(\bar{Q}-1)^2 + \beta_1 H_2^2(\bar{Q}-\epsilon)^2(2H_2+H_d-1) / \{(H_d-\epsilon)H_2(2H_2+H_d-1)\} - 2\epsilon F_{d0}^2(\bar{Q}-1)^2\beta_2] - \beta_0(1-\epsilon)H_2} \dots\dots\dots(8)$$

ここに

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= q_1/q_0, H_1 = h_1/h_0 \approx h_d/h_0 = H_d, H_2 = h_2/h_0 \\ \epsilon &= \Delta\rho/\rho_2 \approx 0.0003 T_0, \Delta\rho = \rho_2 - \rho_0 \\ F_{d0} &= q_0 / (\epsilon g h_0^3)^{1/2} \end{aligned}$$

$\beta$  は運動量補正係数、 $\rho$  は平均密度、 $h$  は水深、 $q$  は単位幅当たり流量で、添字 0, 1, 2 は、それぞれ上流側上層、下流側上層および下流側下層の値を示している。

温排水を対象とした場合  $\epsilon$  が小さい。加えて  $H_2$  が十分大きいとして簡略化すると

$$2F_{d0}^2 = (\bar{Q} - H_d^2) / \{\bar{Q}(\beta_1 \bar{Q}^2 / H_d - \beta_0)\} \dots\dots(9)$$

ここで  $\beta_1 = 1$  とし、さらに連行による流量の膨らみを無視し  $\bar{Q} = 1$  とすると、次式となる。

$$H_d = (-1 + \sqrt{1 + 8F_{d0}^2}) / 2 \dots\dots\dots(10)$$

式(9)において、内部跳水後の下流断面の温水層の平均的な密度フルード数  $F_{d1} = q\bar{Q} / \sqrt{g(\epsilon/\bar{Q})h_1^3} = 1$  となると考え、 $H_d = h_1/h_0 = F_{d0}^{2/3} \bar{Q}$  の関係を代入すると、

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q} &= (2F_{d0}^2 + 1) / (3F_{d0}^{4/3}) \\ H_d &= (2F_{d0}^2 + 1) / (3F_{d0}^{2/3}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

となる。さらに、通常の温排水では、 $F_{d0} \approx 2 \sim 10$  の場合が多いとみて式(11)の近似式を

$$H_d = F_{d0}^{1.09} \approx F_{d0}, \bar{Q} \approx F_{d0}^{1/3} \dots\dots\dots(12)$$

とした。式(8)から式

(12)に至る簡易化の誤差をみるため 図-7 を示した。 $F_{d0}$  が小さいうちは  $F_{d0}^{1.09}$  として大差のない値を得ることがわかる。放水口付近の希釈混合が地形の影響で減殺されやすく、また、上式の誘導が  $H_2$  を十分大きいと考えていることなどから、わずかではあるが連行効果を控えめに  $F_{d0}^{1.09}$  を  $F_{d0}^{1.0}$  とし安全を見込むこととした。

次に、実際の放水口の幅  $B$  と高さ  $h_0$  の比  $A = B/h_0$  は有限の値であり、温排水塊は側方からも希釈されるため層厚は鉛直二次元の計算より薄くなると考えられる。そこで実用範囲の値として  $F_{d0} = 2 \sim 10, A = 1 \sim 15$  につ

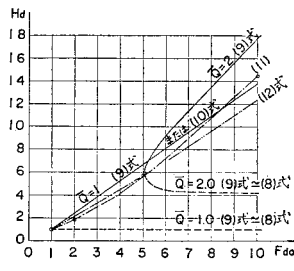


図-7 内部跳水の  $H_d \sim F_{d0}$  関係図

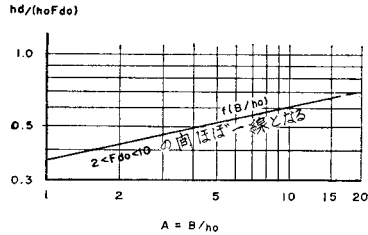


図-8 放水口形状比  $B/h_0$  と表層厚  $h_d$  の関係

いて、三次元表層噴流理論による Shirazi-Davis の汎用計算図表<sup>1)</sup>を用いて温排水層厚比  $H_d = h_d/h_0$  を求め、さらに式(12)に対する補正係数  $r$  を求めると、図-8 のようになり、近似式で示せば

$$\left. \begin{aligned} r &= 0.35 A^{0.23} \\ \text{ただし} \\ r &< 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

式(13)は  $A > 96$  となると  $r > 1$  となるので、その場合は  $r = 1$  とする。最終的には(12)を(13)で補正して

$$\left. \begin{aligned} h_d &= r F_{d0} h_0 = 0.35 A^{0.23} F_{d0} h_0 \\ \text{ただし} \\ h_d &< F_{d0} h_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

(3) 放水密度フルード数  $F_{d0} < 1$  の場合

断面平均値から算定した密度フルード数が<sup>2)</sup>、放水口で  $F_{d0} < 1$  となる場合は、下層水が塩水くさびとなり、放水端で  $F_{d0} = 1$  となるような水深  $h_{oc}$  をとると考えれば、

$$\left. \begin{aligned} h_d &= h_{oc} = q_0^{2/3} / (g\epsilon)^{1/3} = F_{d0}^{2/3} h_0 \\ \bar{Q} &= Q_1 / Q = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

(4) 層厚の計算と実測の対比

多数の実測と水理実験について<sup>1), 2), 5), 8) ~ 15)</sup>、図-6 による層厚の計算値を 図-9 に比較し、ほぼ満足できることを確かめた。

なお、汀線放水をしている 01, 05 地点の層厚実測<sup>9)</sup> などから判断すると、放水量  $Q$  が数  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  と比較的に少ない場合放水口より  $r = 5Q$  程度前面の水深を  $h_0$  と

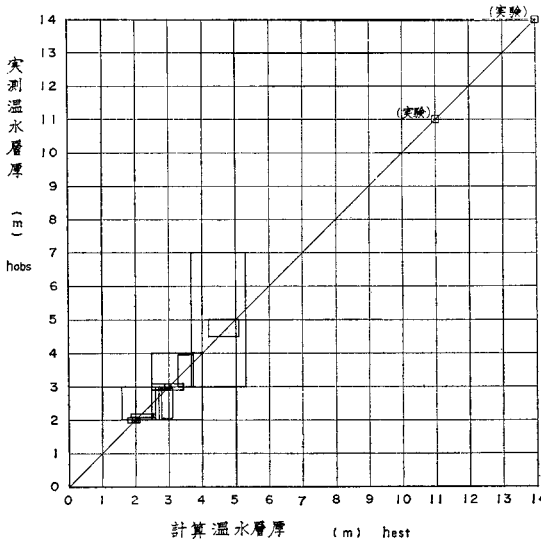


図-9 実測と計算層厚の比較図

考えてよいと思われる。

### 8. 簡易拡散方程式の誘導

#### (1) 拡散方程式の誘導

図-10 に示すように、放水口から扇形に角度  $\theta$  で広がる拡散場を考える。

温排水は、中心点から放出され、半径方向に等厚で広がり、半径方向に渦動拡散と移流を、上下方向に大気熱収支と鉛直渦動拡散作用を受け、熱量収支を保っている。なお、放水口で周辺水の連行を生じる場合は、それを加味した流量と上昇温を原点に与えて、式の近似的な適用を図る考えである。

$h_d$ : 表層厚,  $r$ : 半径方向距離,  $K_r$ : 半径方向拡散係数,  $\theta$ : 広がり角度,  $Q$ : 中心点への付加流量,  $T_0$ : 中心点の上昇温,  $T$ :  $r$  点の上昇温,  $S$ : 水温上昇  $T_0$  から  $T$  までの拡散面積,  $\Delta T$ : 面積  $S$  から、鉛直方向への放熱量に相当する見かけの放水上昇温低下, などとおけば、拡散方程式は扇形部分全体の熱量バランスから

$$r\theta h_d K_r \frac{dT}{dr} - QT + QT_s = 0$$

$$K_r = ar^n$$

$$T_s = T_0 - \Delta T$$

これを解くと

$$\left. \begin{aligned} r &= \left\{ \frac{Q}{\theta h_d a n} \ln \frac{T_s}{T_s - T} \right\}^{1/n} \\ S &= \frac{\theta^{1-2/n}}{2} \left\{ \frac{Q}{h_d a n} \ln \frac{T_s}{T_s - T} \right\}^{2/n} \end{aligned} \right\} \dots (16)$$

ここで、 $T/T_s \ll 1$  のとき

$$\ln \left\{ \frac{T_s - T}{T_s} \right\} = \ln(1 - T/T_s) \approx -T/T_s$$

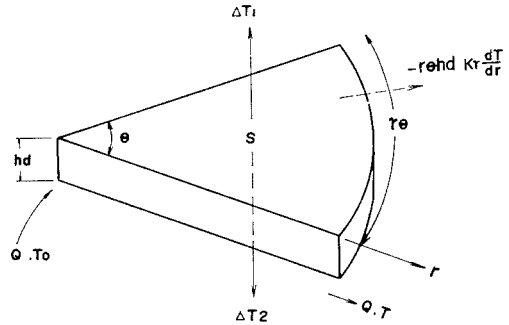


図-10 拡散モデル図

の関係を用いて式型を単純化すると

$$r = \left\{ \frac{QT_s}{\theta h_d a n T} \right\}^{1/n}, \quad S = \frac{\theta^{1-2/n}}{2} \left\{ \frac{QT_s}{h_d a n T} \right\}^{2/n} \dots (17)$$

となる。簡易化の誤差として 20% を認めるとすれば、

$$T_s = 7^\circ\text{C} \text{ のとき } T \leq 2.66^\circ\text{C}$$

$$T = 1^\circ\text{C} \text{ のとき } T_s \geq 2.63^\circ\text{C}$$

すなわち、通常の放水で  $2.66^\circ\text{C}$  以上の高温領域を求めるとか、希釈放水や噴流連行の結果、放水上昇温が  $2.63^\circ\text{C}$  以下となる場合の  $1^\circ\text{C}$  領域の計算等には、式 (17) は誤差が大きいので、式 (16) によるべきである。ここで、 $T_s = T_0 - \Delta T$  の  $\Delta T$  は  $S$  の関数として式 (7) で示されるので、数値計算にあたっては逐次近似により解くことが必要となる。

これを前章までの入力決定手法とあわせ、簡易解法と略称することとした。

#### (2) 簡易解法の計算例

この簡易解法の入力は、 $Q, T_0, B, h_0, U, t_w, n, h_b$ ,  $\theta$  などであり、その計算例を以下に示す。発電所は外洋に面し、 $Q=19.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_0=5.8^\circ\text{C}$ , 季節は夏である。

##### a) 表層厚の決定

放水口は幅  $B=10.0 \text{ m}$ , 高さ  $h_0=1.50 \text{ m}$ , 放水密度フルード数  $F_{d0}=7.9$  で表層厚は、 $h_d = F_{d0} h_0 = 7.9 \times 1.5 \leq h_b = 1.80$ , 前面水深  $h_b$  (放水口前面  $5Q=95 \text{ m}$  の水深とした) に制限され、図-6 のフロー ⑧ により  $h_d=1.8 \text{ m}$  とする。

##### b) 鉛直方向熱収支係数の算定

風速  $U=1.2 \text{ m/s}$

鉛直拡散係数

$$K_z = 0.3 \times 10^{-4} + 7.57 \times 10^{-9} U^{4.5} = 0.3 \times 10^{-4} + 7.57 \times 10^{-9} \times 1.2^{4.5} = 0.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

水温  $t_w=25.0^\circ\text{C}$  に対応する大気熱収支係数  $A_1$  は、式 (6) より、

$$A_1 = \alpha + bU = 6.99 \times 10^{-6} + 3.05 \times 10^{-6} \times 1.2 = 1.06 \times 10^{-5}$$

ゆえに

$$\left(\frac{K_z}{h_d} + A_1\right) = \frac{0.3 \times 10^{-4}}{1.8} + 1.06 \times 10^{-5} = 2.73 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

e) 水平拡散係数

夏季の条件として、 $n=1.6$  とする。

$$a = 4.7482 \times 0.001613^n = 1.62 \times 10^{-4}$$

d) 1°C 拡散面積

拡散形の広がり、多くの場合  $\theta=3/4 \sim 5/4$  ていどとみなすことができ、式 (16) によると拡散面積  $S$  は  $\theta^{1-2/n} = 1.07 \sim 0.95$  に比例する。 $S$  を求めるにあたって  $\theta$  はあまりきかないこともあり、ここでは拡散角  $\theta=1$  rad とした。式 (16)、式 (7) に上記の諸数値を代入すれば、

$$S = \frac{\theta^{1-2/n}}{2} \left\{ \frac{Q}{h_{dan}} \ln \frac{T_0 - \Delta T}{T_0 - \Delta T - T} \right\}^{2/n} \times 10^{-6} \text{ (S を km}^2 \text{ 単位とする)}$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \frac{19.1}{1.8 \times 1.62 \times 10^{-4} \times 1.6} \ln \frac{5.8 - \Delta T}{4.8 - \Delta T} \right\}^{1.25}$$

$$\times 10^{-6} = 0.2912 \left/ \left( \ln \frac{5.8 - \Delta T}{4.8 - \Delta T} \right)^{1.25} \right.$$

$$\Delta T = \frac{S}{Q} \left( \frac{K_z}{h_d} + A_1 \right) (0.2 T_0 + 0.8 T)$$

$$= \frac{S}{19.1} \times 2.73 \times 10^{-5} (1.16 + 0.80) \times 10^6$$

$$= 2.80 S$$

第1近似として  $\Delta T = 2.7^\circ\text{C}$  とおくと、

$$S = 0.946, \Delta T = 2.65$$

第2近似として  $\Delta T = 2.68^\circ\text{C}$  とおくと、

$$S = 0.956, \Delta T = 2.68$$

ゆえに、 $S = 0.96 \text{ km}^2$  となった。

この計算では、鉛直収支分が  $T_0 = 5.8^\circ\text{C}$  に対し  $\Delta T = 2.68^\circ\text{C}$  と、わかりやすい形で定量でき、熱量の行方が明確となる。

### 9. 実測や諸解法との対比

#### (1) 簡易解法と実測

簡易解法に従い、上例のごとく実測データを代入し、全国の14発電所90ケースの1°C 拡散面積の観測値  $S_{obs}$  と計算値  $S_{est}$  を表-4、図-11 に比較した。

計算にあたって、拡散係数の  $n$  値は、海域類型と季節に応じ、表-5 のように仮定した。 $n$  の値は4. の考

表-5  $K_r = ar^n$  の  $n$  値の仮定

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I		2.2						1.8		2.0	2.2	
II		2.0	2.0			1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	2.0	2.0
III		1.8						1.4		1.6		1.6
IV	1.4		1.4					1.0				
V			0.7									

海域区分 I は開放性で潮流の強い stn. 06, 08, 12, 13  
 海域区分 II は開放性海域の stn 01, 02, 03, 04, 05, 07  
 海域区分 III は緩い閉鎖性海域の stn. 09, 10  
 海域区分 IV は閉鎖性海域の stn. 11  
 海域区分 V は狭い閉鎖性海域の stn. 14

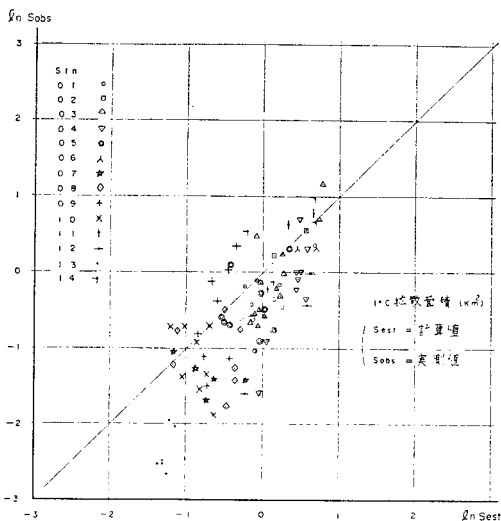
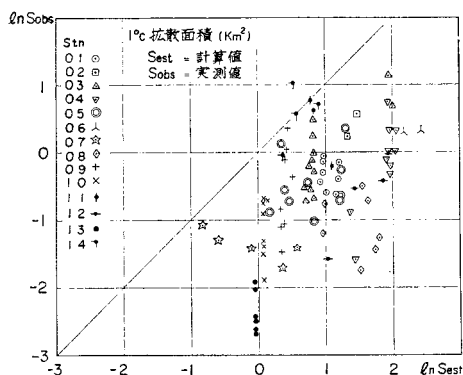


図-11 簡易解法と実測の適合度

表-4 実測データと予測値

番号	地点	1°C 拡散	放水量	上昇温	放水幅	放水高	速度	フルード数	風速	前面水深	表層厚 (est)	水温	鉛直拡散係数	熱収支係数	鉛直収支係数	1°C 拡散域 (計算)
No.	Stn.	$S_{obs}$ (km <sup>2</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$T_0$ (°C)	$B$ (m)	$h_0$ (m)	$u_0$ (m/s)	$F_{do}$	$U$ (m/s)	$h_b$ (m)	$h_d$ (m)	$t_w$ (°C)	$K_z$ (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)	$A_1$ (10 <sup>-5</sup> t·cal/m <sup>2</sup> s°C)	$A_1 + K_z/h_d$	$S_{est}$ (km <sup>2</sup> )
1	01	0.70	25.0	6.8	8.0	1.1	2.84	19.2	4.0	3.1	3.1	25.0	0.34	1.92	3.02	1.15
10	02	1.73	24.1	10.6	5.0@4	1.99	0.61	2.6	2.0	2.0	2.0	29.0	0.30	1.50	3.00	1.75
15	03	0.51	21.0	7.1	50.0	3.20	0.131	0.507	6.5	5.0	2.0	24.3	0.64	2.61	4.61	0.85
20	04	1.40	55.3	7.3	35+20	4.4/2	0.458	2.11	1.0	8.5	3.1	12.1	0.30	0.697	1.66	1.79
30	05	1.36	19.1	11.8	10.0	1.5	1.27	5.57	2.0	1.8	1.8	21.7	0.30	0.994	2.66	1.41
38	06	1.36	78.0	7.1	39.0	3.5	0.57	0.18	4.0	8.0	4.5	12.0	0.34	1.23	1.99	1.60
51	08	0.468	42.0	7.0	11.0	2.8	1.36	4.80	3.0	10.0	6.5	23.8	0.31	1.55	2.02	0.74
57	08	0.60	42.0	6.6	11.0	2.4	1.59	7.40	4.65	10.0	9.1	29.0	0.38	2.45	2.86	0.60
66	10	0.393	10.4	8.0	7.5	1.9/2	1.46	9.77	2.5	10.0	5.3	30.0	0.30	1.74	2.31	0.42
75	11	1.86	19.4	7.8	25.0	4.0	0.194	0.640	3.0	12.0	3.0	15.2	0.31	1.15	2.78	1.50
89	14	1.983	15.8	10.1	22.0	4.7	0.153	0.41	3.0	8.0	2.6	12.9	0.31	1.08	2.27	2.04





図—12 新田式と実測の適合度

察を基本としている。

図—11によれば、潮流などの往復流のみられる stn. 06, 08, 12, 13 等の海域では、拡散区域が揺らぎ、時々刻々変化するため実測データのばらつきが大きいようであるが、計算式はかなりよく実測値を説明できていると思う。

(2) 新田式との対比

水産関係で常用されている新田式<sup>11)</sup>は、

$$S = 0.0049(QT_0)^{1.23} \quad (S : \text{km}^2 \text{ 単位}) \dots\dots (18)$$

拡散実測の各ケースについて、1°C 拡散面積  $S_{est}$  と  $S_{obs}$  を図—12 に示した。新田式は、おおむね  $S_{obs} < S_{est}$  で、安全側の結果を与えるが、図上の点のばらつきが大きく、 $Q, T_0$  の2要素で拡散面積を表現することに限界のあることを感じる。

なお、簡易拡散方程式 (17) において、開放海域に通常の緩速放水を行う場合の常識的な値として、 $n=1.6$ ,  $a=1.6 \times 10^{-4}$ ,  $\theta=1$ ,  $h_d=3$  とすると、

$$S = 0.0051\{Q(T_0 - 4T)\}^{1.25} \quad (S : \text{km}^2 \text{ 単位}) \dots\dots (19)$$

となり、新田式 (18) とほとんど同じになる。新田式は河川水の拡散実測によっている。温排水の場合は水温が少し高く、成層安定度が小さいので、大気への蒸発や鉛直渦動拡散を付加できるから、新田式より、その分だけ拡散区域が小さくなるといえるので、簡易解法は新田式をより合理的に改め、汎用式に拡張したものとみることができる。

(3) 考 察

簡易解法では、図—11 に示したように 45° 線沿いに打点されているのが特徴であり、ばらつきも少なく、正しく現象を把握しているといえる。その原因は、現象を

支配する主因子と考えられる放水海域の特性、放水状況および季節などを定量的に反映できたことに帰すべきと思われる。

10. 結 論

- (1) 水平拡散係数を、海域類型別、季節別に、指数表示することができた。
- (2) 鉛直拡散係数を、実測をベースとし、風の影響を加味して決定した。
- (3) 温排水層厚を、放水状況から、内部跳水や塩水くさびと見立てて決定し、実測と矛盾しない結果を得た。
- (4) 簡易拡散方程式を誘導し、上記の入力決定手法とあわせ簡易解法とした。実測値、他の解法と比較し、実用性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 千秋信一ほか：温排水対策総合資料集大成、フジテクノシステム出版部編、p. 350, 351, 376, 378, 1973.
- 2) 和田 明・角湯正剛：温排水拡散予測汎用計算図表の提案、電力中央研究所報告、研究報告 375008, p. 20, 1975.
- 3) 玉井信行：密度流の水利、新体系土木工学 22, 土木学会編、p. 107, 1980.
- 4) Shirazi, M.A. and L.R. Davis : Workbook of thermal plume prediction, Vol. 2, Surface discharge, Environmental Protection Technology Series, EPA-R 2-72-005 b, Project 16130 FHH, E.P.A., Fig. A 1~A 16, 1974.
- 5) 和田 明ほか：沿岸海域における温排水予測手法の適合性に関する研究、電力中央研究所報告、研究報告 73011, p. 49, pp. 47~48, 1974.
- 6) 熊谷幹郎・西村 肇：沿岸における廃水の分散の法則性、第 19 回海岸工学講演会論文集、p. 248, 1972.
- 7) 日高孝次：海流、岩波全書 182, p. 147, 1970.
- 8) 荒木 洋・和田 明：東通原子力発電所の温排水拡散予測、電力中央研究所、依頼報告 382516, p. 84, 1982.
- 9) 荒木 洋・和田 明：能代火力地点の温排水拡散予測、電力中央研究所、依頼報告 380510, p. 75, 1980.
- 10) 東京久栄：秋田火力の温排水拡散実測報告書、東北電力資料、1976.
- 11) 和田 明・片野尚明：発電所冷却水の取放水問題、発電水力 No. 95, p. 19, 1968.
- 12) 東京久栄：秋田火力水温調査報告書(昭 47 年 7 月・昭 48 年 12 月等)、東北電力、1972, 1973.
- 13) 新潟共火：新潟共同火力水温調査報告書(昭 47 年 8 月・昭 47 年 10 月・昭 48 年 5 月・昭 48 年 8 月)、東北電力、1972, 1973.
- 14) 新仙台火力発電所冷却水分布調査委員会：仙台新港周辺海域の海況、並びに新仙台火力発電所から排出される冷却水の拡散分布に関する調査報告書、新仙台火力発電所冷却水分布調査委員会、1972.
- 15) 温排水問題編集委員会：温排水問題、ISU, p. 506, 1973.

(1983.1.26・受付)