

流れ場における深層放流温排水の挙動解析 Behaviour of Cooling Water at Submerged Discharge in the Flow

三菱重工業㈱高砂研究所 正員 吉井 総介

1. まえがき

発電所の温排水は、従来、開水路で海の表層部へ放流されるのが一般的であったが、最近、周囲冷海水との混合を大きくして、温度低下を増大させることを目的として、海面下の深い処で放流されることが多くなってきた。一般に、この放流手法を深層放流というが、混合効果の増大その他の理由により高速（通常2～3 m/s）で放流されることが多い。

この深層放流された場合の温排水ブルームの軌跡、希釈特性などの挙動は、温排水の放流条件、場の流れ条件などの多くの変数の影響を受けて複雑であるが、かなり以前から興味あるテーマとして取扱われ、実験調査あるいは理論解析による数多くの研究成果が報告されている（1～6）。ところが、これらの多くの報告を総括して検討してみると、幾つかの問題点、あるいは、未解明点が残されており、実際に深層放流手法の仕様を定めようとするときなど、困惑することも多い。特に、その中でも、比較的、基本的といえる次の3点については、解あるいは統一的な見解が与えられる必要がある。

- (1) 温排水ブルームの希釈に関する研究は数多くあるが、流速低下のデータはAbraham⁽¹⁾の報告を除いてはない。我国では小型船舶の航行、大型船の接岸などの点から、温排水の流速低下は大きな検討課題である。
- (2) 流れの中での温排水の挙動を対象とした場合、発表されている個々の研究データの間に、かなりのバラツキがみられる。
- (3) 海域の流れの中へ、三次元的に貫入するタイプのCross Flowとしての温排水ブルームの挙動については、報告例が殆どない。

筆者は、これらの諸問題について、実用的な解を求めることを目的とし、温排水ブルームの平均的な挙動を求める理論モデルを作り、その解析を行なってみた。この理論の特色は、ブルームの抗力係数を導入することなく、運動量保存則を用いており、静止水中からCross Flowに至るまでのブルーム挙動を解析できる点にある。

本論文は、この理論モデルの内容と、その解析結果の既往の研究データとの比較について詳しく述べるものであるが、更に、解析結果の汎用化の為に整理パラメータの選定についても検討を行なっている。

2. 理論モデルと解析

2.1 理論モデル

温排水は、図1に示すように、座標軸の原点から単一の円孔ノズルで放流されるものとし、水面、水底などの境界影響はないものとする。図1で、x軸、y軸は水平面内にとり、z軸は鉛直真上方向が正となるように配置されている。今、海域の流れはy軸の正方向に向っているものとし、温排水は水平面（x-y面）より上方に角度 α の方向、および、海域の流れ方向に直角な鉛直面（x-z面）に対し、角度 θ_0 の方向に向けて放流されるものとする。この理論モデルでは、ブルームをコア領域と発達領域に分けて、質量保存則、連続の式と運動量保存則を用いて解析を行なう。

2.1.1 発達領域の解析

(1) 質量保存則

$$d \int_A u c dA = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに, u, c : ブルーム内の流速および濃度

A : ブルーム内断面積

(2) 連続の式

$$d \int_A u dA = Q' ds \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, Q' : ブルーム進行量

s : ブルーム中心軸に沿う距離

(3) ブルーム軸方向の運動量保存則

これは, 進行される周囲水, ブルーム自身の運動量, および, 浮力のバランスを考えて, 次式で与えられる。

$$d \int_A \rho u^2 dA = d \left(\int_A \rho u dA \right) \cdot u_a \sin \theta \cos \beta \\ + d \left\{ g \int_0^s ds \int_A (\rho_a - \rho) dA \right\} \sin \beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, u_a : 周囲水の流速値

ρ_a : 周囲水の密度

ρ : ブルーム内の任意点の密度

g : 重力加速度

β : ブルーム進行方向と水平面との角度

θ : $\left\{ \begin{array}{l} \text{ブルーム中心軸を } x-y \text{ 面に投影した} \\ \text{とき, ブルーム進行方向と } x \text{ 軸の間の} \\ \text{角度} \end{array} \right.$

(4) ブルーム軸に直角方向の運動量保存則

(a) θ 方向

$$\left(\int_A \rho u^2 dA \right) \frac{d\theta}{ds} = u_a \cos \theta \frac{d}{ds} \left(\int_A \rho u dA \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(b) β 方向

$$\left(\int_A \rho u^2 dA \right) \frac{d\beta}{ds} = -u_a \sin \theta \cdot \sin \beta \frac{d}{ds} \left(\int_A \rho u dA \right) \\ + \frac{d}{ds} \left\{ g \int_0^s ds \int_A (\rho_a - \rho) dA \right\} \cos \beta \quad \dots\dots\dots (5)$$

尚, ここでは, 温排水ブルームの温度低下を, (1)式に示したように, 濃度 c という無次元数で表示しているが, これはノズル出口で1, 無限遠で0という値を持ち, 次式で定義される。

$$c \equiv \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a - \rho_0} \approx \frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, ρ_0 : ノズル出口の温排水密度

T_0, T, T_a : ノズル出口, ブルーム内の任意点及び周囲水の水温

ブルームの発達領域では, 流速, 濃度が次式に示すガウス型の分布に従うものとする。

$$u = u_m \exp \left\{ -\left(\frac{r}{b} \right)^2 \right\} + u_a \sin \theta \cos \beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$c = c_m \exp \left\{ -\mu \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

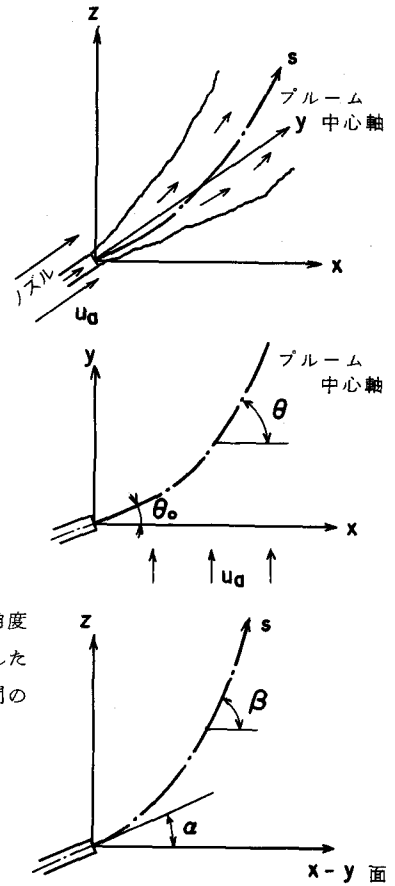


図1 記号図

ここに, u_m, c_m : ブルーム中心軸上の流速および濃度

μ, b : 分布常数およびブルームの特性長

また, (2)式に示したブルーム連行量 Q' は, 連行速度 E を用いると, 一般に次式で表わされる。

$$Q' = 2\pi b \cdot E \quad \text{..... (9)}$$

連行速度 E を定量化するには, 種々の表現方法があるが, ここでは, Hoult⁽⁴⁾ の示す次式を用いる。

$$E = E_1 u_m + E_2 |u_a \sin \theta \sin \beta| \quad \text{..... (10)}$$

ここに, E_1, E_2 : 常数で, Hoult によれば, $E_1 \cong 0.08$, $E_2 \cong 0.424$ である。

ここで, (7)(8)(9)式を用いて, (1)~(6)式を変形すると, 以下の諸式を得る。

$$\frac{d}{dS} (\tilde{U}_m B^2) = 2B \left(E_1 U_m + E_2 \frac{|\sin \theta \sin \beta|}{K} \right) \quad \text{..... (11)}$$

$$C_m B^2 \left(\frac{U_m}{1+\mu} + \frac{\sin \theta \cos \beta}{\mu K} \right) = \frac{1}{4} \quad \text{..... (12)}$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dS} (\tilde{U}_m^2 B^2) = \frac{\sin \theta \cdot \cos \beta}{K} \frac{d}{dS} (\tilde{U}_m B^2) + \frac{1}{F_0^2} \frac{C_m}{\mu} B^2 \sin \beta \quad \text{..... (13)}$$

$$\tilde{U}_m^2 B^2 \frac{d\theta}{dS} = \frac{2}{K} \cos \theta \frac{d}{dS} (\tilde{U}_m B^2) \quad \text{..... (14)}$$

$$\frac{1}{2} \tilde{U}_m^2 B^2 \frac{d\beta}{dS} = - \frac{\sin \theta \sin \beta}{K} \frac{d}{dS} (\tilde{U}_m B^2) + \frac{1}{F_0^2} \frac{C_m}{\mu} B^2 \cos \beta \quad \text{..... (15)}$$

$$\text{ここに, } F_0 \equiv u_0 / \sqrt{\frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} g D} \quad \text{..... (16)}$$

$$\tilde{U}_m \equiv U_m + 2 \sin \theta \cos \beta / K \quad \text{..... (17)}$$

$$U_m \equiv \frac{u_m}{u_0}, B \equiv \frac{b}{D}, K \equiv \frac{u_0}{u_a}, S \equiv \frac{s}{D}, C_m \equiv \frac{c_m}{c_0}$$

D : ノズル径

$u_0, c_0, \Delta \rho_0$: ノズル出口の温排水の流速, 濃度, 密度差

これら諸式より, 簡単にブルームの挙動を表わす諸変数の値を逐次計算により求めることができる。

2.1.2 コア領域の解析

コア領域の解析で得るべきものは, コア領域の長さ, コア領域出口における流速, 濃度などの変数諸量である。

コア領域の長さについては, Hirst⁽⁶⁾ のまとめた次式を利用することができる。

$$S_e = \frac{1}{6.2} \cdot Se_1 \cdot Se_2 \quad \text{..... (18)}$$

$$\text{ここに, } Se_1 = 6.2 \left(\frac{K + \sin \theta_0 \cos \alpha}{K - \sin \theta_0 \cos \alpha} \right) \sqrt{\frac{K}{K + 1.18 \sin \theta_0 \cos \alpha}} - \frac{14.0}{K} \sqrt{1 - (\sin \theta_0 \cos \alpha)^2} \quad \text{..... (19)}$$

$$Se_2 = \begin{cases} 6.2 & (F_0^2 \geq 40) \\ 3.9 + 0.057 F_0^2 & (40 > F_0^2 \geq 5) \\ 2.08 + 0.43 F_0^2 & (5 > F_0^2 \geq 1) \\ 0 & (1 > F_0^2 \geq 0) \end{cases} \quad \text{..... (20)}$$

Se : コア領域の長さをノズル径 D で無次元化した値

次に、コア出口の諸量を求める方法であるが、これについては、次の2つの仮定をおいた上で、発達領域の場合と同様の式を用いて求める。

$$(a) \quad s = s_e \quad \text{で} \quad u_0 = u_{me} + u_a \sin \theta_e \cos \beta_e \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$(b) \quad s = s_e \quad \text{で、流速、濃度は(7)(8)式で示すガウス分布で、} s = 0 \quad \text{では一様分布とする。}$$

コア出口の諸量を求める算式は次の通りである。尚、添字 e はコア領域出口を示す。

(1) 連続の式

$$\int_A \rho u dA \Big|_{s=s_e} = \rho_0 \frac{\pi}{4} D^2 u_0 + \rho_a \cdot Q'' \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 Q'' : コア領域の連行水量

(2) 質量保存則

$$\int_A u c dA \Big|_{s=s_e} = \frac{\pi}{4} D^2 u_0 c_0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

(3) 鉛直方向の運動量の式

$$\int_A \rho u^2 dA \Big|_{s=s_e} \cdot \sin \beta_e = \rho_0 \frac{\pi}{4} D^2 u_0^2 \sin \alpha + g \int_0^{s_e} ds \int_A (\rho_a - \rho) dA \quad \dots\dots\dots (24)$$

(4) y 方向の運動量の式

$$\int_A \rho u^2 dA \Big|_{s=s_e} \cos \beta_e \sin \theta_e = \rho_0 \frac{\pi}{4} D^2 u_0^2 \cos \alpha \sin \theta_0 + \rho_a Q'' u_a \quad \dots\dots\dots (25)$$

(5) x 方向の運動量の式

$$\int_A \rho u^2 dA \Big|_{s=s_e} \cos \beta_e \cos \theta_e = \rho_0 \frac{\pi}{4} D^2 u_0^2 \cos \alpha \cos \theta_0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

これらの諸式を(7)(8)式などを用いて変形し、前と同様の無次元化を行なうと次式を得る。

$$C_{me} B_e^2 \left(1 - \frac{U_{me}}{1 + \mu}\right) = \frac{\mu}{4} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$2 B_e^2 (2 - U_{me})^2 \sin \beta_e = \sin \alpha + \frac{17}{12} \frac{S_e}{F_0^2} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$2 B_e^2 (2 - U_{me})^2 \cos \beta_e \sin \theta_e = \cos \alpha \cdot \sin \theta_0 - \frac{1}{K} + \frac{4}{K} B_e^2 (2 - U_{me}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$2 B_e^2 (2 - U_{me})^2 \cos \beta_e \cos \theta_e = \cos \alpha \cos \theta_0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

これらの4式と、最初に仮定した(21)式を無次元した式を用いることにより、コア領域出口の変数諸量を求めることができる。

2.2 計算解の汎用化の為の整理パラメータの検討

2.1 に示した理論を用いて、任意の条件についての計算解を求めることは容易であるが、検討すべき条件数が多い時には面倒であるし、また、計算機の使えない場合もありうる。この様な場合に、汎用化された計算解が図表化されておれば、非常に便利であり、現に、静止水中のブルーム挙動は Abraham⁽¹⁾ の提唱する整理パラメータで見事に整理され、汎用計算図として実用されている。

ここでは、流れのある場合に対して、2.1 に示した理論式を利用し、如何なるパラメータを用いれば、静止水中の場合と同様な汎用計算図を得られるかについて考えてみる。尚、理論式としては、発達領域のそれを対象とする為、ここで検討して得られた汎用図では、ノズル近傍の精度が悪くなると思われる。

今、(13)式に $\cos \beta$ を乗じ、これより(15)式に $\sin \beta$ を乗じたものを減じると、次式を得る。

$$\frac{d}{dS} (\widetilde{U}_m^2 B^2 \cos \beta) = \frac{2}{K} \sin \theta \frac{d}{dS} (\widetilde{U}_m B^2) \quad (31)$$

一般に、ブルームの拡がり巾は、ノズル出口からの距離に比例して大きくなる傾向にあるので、 $B = \eta S$ (η : 比例常数) を仮定し、かつ、(17) 式をも参考にすると、上式より次式を得る。

$$U_m S = \text{func.} \left(\beta, \theta, \frac{S}{F_0}, \frac{F_0}{K} \right) \quad (32)$$

ブルームの軸長 S は座標 x, y, z に関する変数なので、上式の S はこれらで置換えてもよい。また、角度 β, θ は勿論、 α, θ_0 に関する変数である。さらに、(12) 式についても、上と同様の操作を行なうと、 $C_m S$ と $U_m S$ はお互いに関数関係にあることが明らかであるので、結局、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{matrix} U_m S \\ C_m S \end{matrix} \right\} = \text{func.} \left(\alpha, \theta_0, \frac{S}{F_0}, \frac{F_0}{K} \right) \quad (33)$$

上式は、 $U_m S$ あるいは、 $C_m S$ を S/F_0 に対して表示する時、 α, θ_0 、および F_0/K の値をパラメータにとれば、計算結果の集約化による汎用図を得ることができることを意味している。Abraham の解析では、静止水中の水平放流の場合に限定して検討しているため、上式右辺の括弧内が (S/F_0) のみとなっている。

3. 解析結果の検討

3.1 整理パラメータの妥当性

2. に示した理論は電子計算機を用いた単純な逐次計算により解を求めることができるが、まず、2.3 に示した計算解の集約化の考え方の検証を濃度低下について行なった結果を図2に示す。図2は、Cross Flow の条件 ($\alpha = 0, \theta_0 = 0$) で計算されているが、 K/F_0 の同じ値の計算解は、同じ曲線上にはほぼ一致してのことがみてとれる。これより、2.3 での検討内容はコア領域の長さなどの相違による誤差はあるものの、ほぼ実用できるものと考えられる。また、2.3 での検討は $U_m S, C_m S$ のみについて行なっているが、ブルーム軸心の軌跡などについても、(33) 式と同様の関係があることは自明であり、図2と同様の検証も行なった。

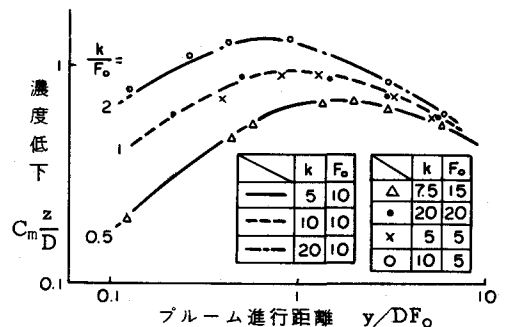


図2 整理パラメータの検証

3.2 既往の研究データとの比較

本論文に示した理論モデルは計算が非常に簡単で、かつ、静止水中から三次元的な Cross Flow に至るまでの広い範囲について計算できることを特徴としている。因みに、本論文の理論モデルの計算可能な範囲を示すと次のようである。

$$\left\{ \begin{array}{l} 90^\circ \geq \theta_0 \geq 0^\circ \\ 90^\circ \geq \alpha \geq -45^\circ \\ K \geq 3 \end{array} \right.$$

ここで、本論文の理論モデルの計算解を既往のデータと比較検討し、その精度を検討してみ

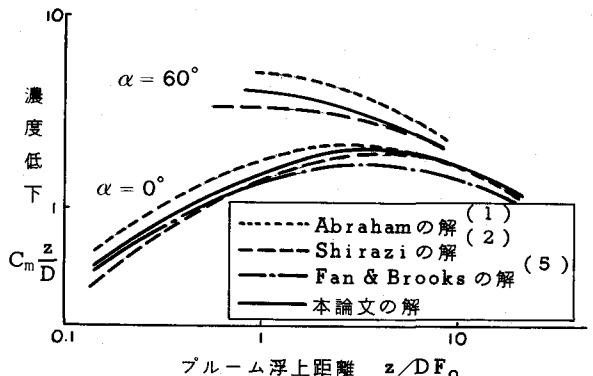


図3 静止水中の場合の既往データとの比較

る。まず、静止水中におけるブルームの濃度低下について比較した結果を図3に示す。Abrahamの計算モデルの濃度低下が小さめであることは以前より認められており、この観点からみると本理論モデルの解は妥当な値を示していると考えてもよいと思われる。

次に、流水中の場合であるが、現在、三次元的なCross Flowについての公表データはないようである。そこで、鉛直真上に温排水を放流する場合について、本モデルの計算解と既往のデータとを、ブルーム軌跡について比較した結果を図4に、濃度低下について比較した結果を図5に示す。一般に、流水中のブルーム挙動の調査報告を相互比較すると、各々のデータの間にバラツキが見られるが、その原因には流水中の乱れの外に、ブルーム内に生ずる渦の影響が考えられている。今、図4をみると、本モデルの計算解は、既往のデータと傾向的には良い一致を示すが、ブルームの浮上が少し早いようである。図5濃度によれば、ブルーム中心の濃度低下は既往のデータと、ほぼ一致していることがわかる。

4. まとめ

本論文では運動量保存則を基に、ブルームを発達領域とコア領域に分けて、その挙動を解析する理論を作り、解析検討を行なった。運動量理論を使う点では、Hirstのモデルも同じであり、本論文のモデルの発達領域の部分はHirstのそれと類似するが、より簡便で使い易い形になっている。また、コア領域を加味しているため、本論文のモデルはノズル出口近傍での解の精度が良くなっている。ただ、本モデルの根本になっているのは、(7)(8)式に示すブルーム内の流速、濃度の分布の対象性であるが、流れの中のブルーム内には、一対の渦の形成が一般に認められており、この点について本モデルは真実を必ずしも表わしていない。Hirstはこれに関し、ブルーム断面を積分することにより、渦の影響を無視できるとしているが、今後、更に検討されるべき問題であろう。また、連行係数についても今後、実験値との検証を進めていく上で、再検討されることが必要と思われる。

参考文献

- 1) Abraham, G. : Horizontal Jets in Stagnant Fluid of Other Density, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, No. HY4, 1965
- 2) Shirazi, M. A. , Davis, L.R. : Workbook of Thermal Plume Predictions, EPA-R2-72-005a
- 3) Chasse, J. P. , Winiarski, L. : Laboratory Experiments of Submerged Discharge in Current, EPA, 1974
- 4) Hoult, D. P. , Weil, J. C. : Turbulent Plume in a Laminar Cross Flow, Atmospheric Environment, Vol. 6, 1972
- 5) Fan, L. N. : Turbulent Buoyant Jets into Stratified or Flowing Ambient Fluids, Report. N.K-H-R-15, CIT, 1967
- 6) Hirst, E. A. : Analysis of Round, Turbulent, Buoyant Jets Discharged to Flowing Stratified Ambients, Report 4685, Oak Ridge National Laboratory, 1971

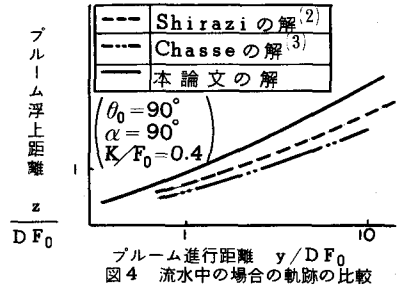


図4 流水中の場合の軌跡の比較

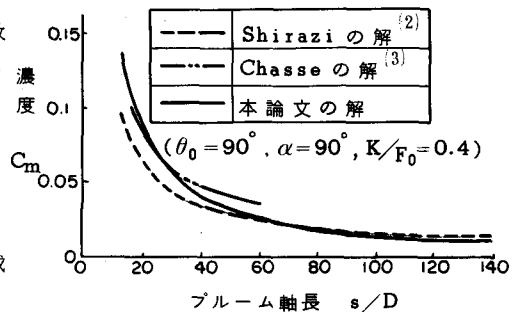


図5 流水中の濃度低下の比較