水中放流方式による温排水拡散解析への3次元噴流モデルの適用性

1. 目的

本論分では、水中放流の現象例として発電所から 放出される復水器冷却水(以下,温排水 叫)の拡散現象 に注目する.近年の発電所の増設や集中立地に伴う 排水量の増大による温排水の拡散範囲を、出来うる 限り縮小するため、従来の表層放流方式と比べその 効果が実証されている、水中放流方式による放流施 設が採用されるようになっている.これまで水中放 流の拡散予測は主に水理模型実験に頼らざるを得な かったが、水温上昇範囲が広域となる場合には拡散予 測が困難になるといった等の問題もあった.一方で、3 次元噴流モデルの研究は古くから行われており、環 境アセスメントへの適用が期待されること、また水 理模型実験から得られる結果を考慮し、モデルに含 まれるパラメータを比較的容易に決定することが出 来る等の利点がある.

従って本研究では、3次元噴流モデルにより水中 放流方式の温排水拡散予測解析の計算を行い、その 結果と水理模型実験結果との比較検討を行うことに よって、同モデルの水中放流への適用性を検討する.

2.3次元噴流モデル

2.1 基礎方程式

温排水拡散解析の基礎方程式は、以下の質量、運動量、熱量、塩分の保存式、及び密度式(国際状態方程式)からなる.基礎方程式の導出には、密度変化により発生する体積膨張を浮力に置き換える Boussinesq 近似を仮定している.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_e} \nabla p + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) + \mathbf{f}$$
(2)

| 日本大学大学院 | 学生会員 | ○家塚 | 史仁 |
|---------|------|-----|----|
| 日本大学大学院 | 正会員 | 和田 | 日明 |

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \qquad (3)$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla S = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \qquad (4)$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

 $\rho = \rho(T,S).$ (5)
ここで、 $\mathbf{u} = (u,v,w)$, $\mathbf{f} = (0,0,g(\rho_e - \rho)/\rho_e)$, A:
渦動粘性係数, K: 渦動拡散係数, ρ :密度, ρ_e :
基準密度, T:温度, S:塩分濃度をそれぞれ表す.

2.2 噴流モデル

水中放流による流れは放水口近傍では噴流状態と なる.そこで本モデルでは,噴流域内の渦動粘性及 び渦動拡散係数を水平・鉛直方向共に,それぞれの 場の値に式(6)で計算される値を加えることにより値 を更新する.

$$A = 場の値 + C \times u_{max} \times H$$

K = 場の値 + C × u_max × H (6)

ここで、C(=0.0256)は噴流により加えられる粘性・ 拡散係数を決定する係数. u_{max} は中心軸の流速値、 Hは流速の半値半幅を表す. なお、噴流域の設定は、 中心の流速が放水流速の α (=1/10)倍以上の領域を 噴流域と判断する.

2.3 離散化

基礎方程式の離散化は以下に従う.すなわち,運動方程式,熱・塩分の保存則の式全ての方程式に対して,時間に関しては陽的前進差分,また空間に関しては,移流項に1次風上差分,粘性・拡散項に中心差分を用いる.連続の式(1)の差分化は1次風上差分とする.基礎方程式(1),(2)に関しては SMAC 法を用いて解く.ただし,密度変化は小さいと仮定するから,時間進行で密度を求めるのではなく,式(3),

キーワード 水中放流,温排水,噴流モデル,数値計算 〒102-8251 東京都千代田区五番町 12-5 日本大学大学院総合科学研究科 090-5535-8824 (4)から求めた水温及び塩分濃度から国際状態方程式 (5)を用いて密度を求める.



計算ケースは 2 通り行う. すなわち流速 2m/s(流 量 50m³/s)及び流速 4m/s(流量 100m³/s)とする. その 他の条件は同一であり,放水管の径 D を 2(m),管間 隔を 3D とし,管本数を 8 本とする.環境水温を 15.0(℃),放水温を 22.0(℃)とする.また塩分濃度を 34.5(psu)とする.水中放流方式の温度上昇範囲に関 わる重要な無次元数,内部フルード数は流速 2(m/s) で 11.0, 4(m/s)で 22.0 となる.次に表 1 に計算で用 いた境界条件を示す.

なお,比較データとしての水理模型実験に関して は,(株)東京久栄により行われた.

| 海面 | 流速 | $\partial u / \partial n = \partial v / \partial n = w = 0$ |
|----|----|---|
| | 温度 | $\partial T / \partial n = 0$ |
| | 塩分 | $\partial S / \partial n = 0$ |
| 海底 | 流速 | Non-Slip |
| | 温度 | $\partial T / \partial n = 0$ |
| | 塩分 | $\partial S / \partial n = 0$ |
| 外界 | 流速 | $\partial u / \partial n = \partial v / \partial n = \partial w / \partial n = 0$ |
| | 温度 | 流出: $\partial T / \partial n = 0$, 流入:15.0°C |
| | 塩分 | 流出: $\partial S / \partial n = 0$, 流入:34.5psu |

表1 境界条件

4. 噴流モデルと水理実験モデルとの比較検討

図2及び図3に流速2m/s及び4m/sの鉛直中心断 面での等温線図の比較結果をそれぞれ示す.



5. 結論

本研究では、噴流モデルを用いて水中放流方式に よる温排水拡散解析の計算を行い、水理模型実験と の比較検討によって、水中放流への適用性があるか 否かを検討した.図2及び図3から、温度分布の傾 向は捉えることが出来ているものの、細部は検討の 余地が残る結果となった.

流速 2m/s の場合, 1.0℃上昇域はよく合っている. 2.0℃上昇域は計算, 実験共に水面に浮かび上がるが, 水面到達点は異なる.また 3℃上昇域は,計算の法 が若干浮力の効果が効いている.流速 4m/s の場合, こちらも 1.0℃の上昇域は比較的合っている.2.0℃ 上昇域が水面に到達しない傾向は合っているが,計 算の方は上昇が速い.3.0℃上昇域に関しても同様の 傾向である.

水中放流方式による水温上昇範囲の検討において, 数値計算の妥当性を検討するための資料は,現在, 現地観測データの不足もあり,水理模型実験に頼ら ざるを得ない.水理模型実験結果からのフィードバ ックをもとに,今後,噴流モデルに含まれる粘性係 数や拡散係数といったパラメータの決定を行わなけ ればならないと考える.

参考文献

1) 和田 明, 海洋環境水理学, 丸善出版, 2007.