

2次元重力噴流のシミュレーション

東北工業大学建設システム工学科 学生会員○伊藤 麻衣子, 正会員 新井 信一

1. はじめに

発電所、工場などの大規模施設から放出される多量の排水は、放出水域とは異なる温度を持つため放出水域内に密度成層を形成しやすく、赤潮、青潮の原因となりやすい。このような現象を起こさないために、温冷排水を積極的に混合することが望ましい。そのためには、温冷排水の放出後の挙動を正しく把握する必要がある。冷水が放流された場合のこの海水の挙動の特徴を捉えることが可能かを調べるためSIMPLE法¹⁾でのシミュレーションを試み、流速分布などの理論解²⁾との比較を行った。最終的には3次元で計算を実施する必要があるが、ここでは前段階として2次元で扱った。

2. 計算方法

熱や流体の現象を扱う場合に知りたい物理量は、温度、速度、濃度などで、これらを求める場合には、化学種の保存式、運動方程式、質量保存式を考慮することが必要となる。これらの式を変形、整理すると一般形保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

を得る。ここに、 div : 発散、 Γ : 拡散係数、 grad : 勾配、 ϕ : 従属変数、 S : 生成項である。

対象領域を長方形のスタッガード格子に区切り、一般形保存式(1)を離散化すると最終的に、(2)の形の式を得る。

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (2)$$

a と b はそれぞれの項の係数で、ここではその詳細な説明を省略するが、添え字の p は、格子中心点の値で、また E, W, N, S は、それぞれ格子4辺での値であることを意味し、速度成分は格子境界上で、圧力と温度は、格子中心点で定義されている。離散化式(2)を全領域に使用することで、速度 u, v , 圧力、温度を求めることが出来る。プログラムは、文献¹⁾に沿って作成した。

3. 計算結果

(1) 自由噴流

図1に自由噴流の計算例の流速ベクトル図を示す。東、西、北の境界が開放の条件で、南境界は壁である。南境界の中央から北の方向に放出された状態である。噴流計算の条件は、レイノルズ数 (Re) = 3000、反復計算回数は100とし、層流の定常計算である。流速分布は、当初、計算領域の西と東を壁に囲まれたコの字状の流域で南の奥から

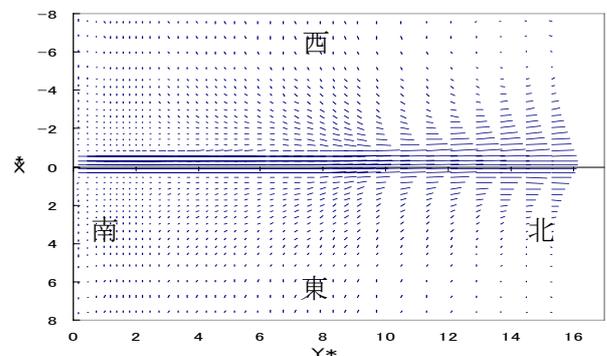


図1 3方向開放境界の自由噴流

開放口に向けて噴流する場合を計算してみた。噴流は左右対称な流速分布が理想的であるが、壁に噴流が引き寄せられ、渦が形成されたりした。図1に示すように東、西を開条件にすると噴流はようやく直進する。その結果、左右対称な流速分布となった。計算の精度を調べるために流速分布を調べたところ図2と図3を得た。比較にあたり速度は u_{\max} で、また、幅方向の距離は半値幅で無次元化してある。図2は $x^*=15.3$ における分布で、3方向開放の場合は理論分布形²⁾と良く一致するが、東、西壁のある場合は、北境界よりの流入があるため、流速分布の裾が負となる特徴を示している。図3は $Re=3000$ と 1000 を比較したものであるがほとんど同じ形になり、違いは見られないといえる。

キーワード SIMPLE法、自由噴流、重力噴流、流速分布、流量

連絡先 住所：宮城県仙台市太白区八木山香澄町35番1号 東北工業大学工学部建設システム工学科新井研究室

電話：022-305-3540

また、図4は噴流軸に沿った流量増加、すなわち連行量の様子を見たものであるが、これも Re による差はほとんどみられない。ただし、北境界付近では、連行量が低下しており、計算が正常に行われているとはいえないことが見てくる。

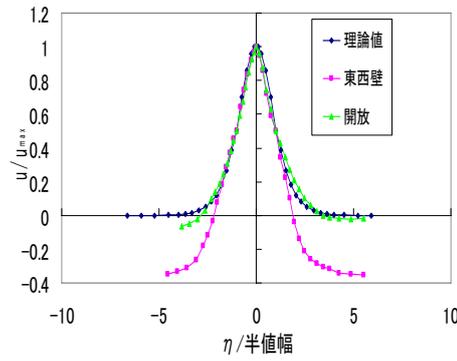


図2 流速分布の比較 (東西壁有と比較)

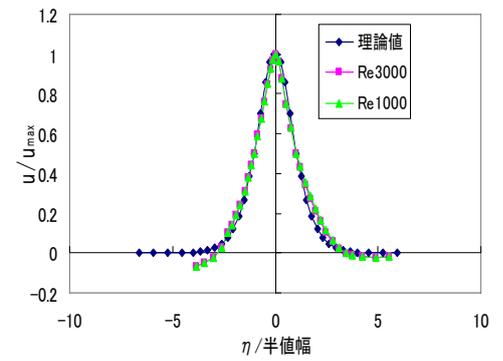


図3 流速分形の比較 (3方向開放時 Re の違い)

(2) 重力噴流

周囲流体に対して冷水などのような密度の高い流体を放出した場合^{3), 4)}を計算し、その結果を図5に示した。東境界は壁としている。グラスホフ数 $=10^6$ 、 $Re=3000$ である。噴流が落下して東の壁にぶつかり、底を這うようにして北の方向へと流れていく。

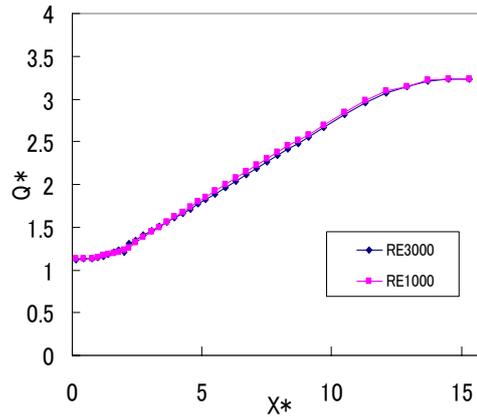


図4 自由噴流の流量

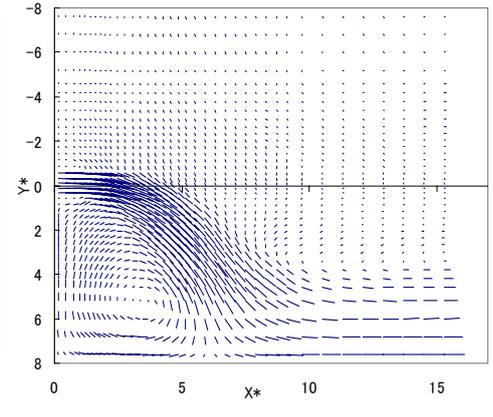


図5 重力噴流

この時、左下の角には大きな渦が形成される。3次元とは異なり、2次元流れのため、この渦は、閉じ込められている。噴流軸に沿った距離 S に直角な断面で求めた流量の変化を調べてみたのが図6である。 $S=6$ 程まで流量が増加するが、その後、減少し、底を這うようになってから再び緩やかに上昇に転じている。この流量の減少は、明らかに、閉じ込められた渦のためである。そこで、目視により、循環領域を定め、それを外した断面で流量を計算してみた。その結果を図6の赤に示す。まだ減少する部分が残るものの実際の連行量を、より正しく示していると思われる。

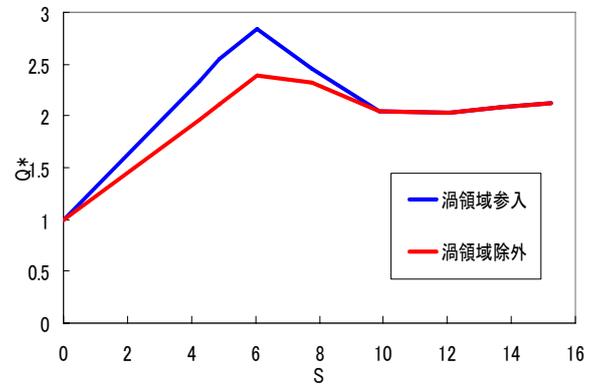


図6 重力噴流の流量

4. おわりに

本研究では、2次元での自由噴流と重力噴流を対象にシミュレーションを行った。その結果、自由噴流では理論値とほぼ等しい流速分布を示し、計算が正常に行われていると判断できるが、一方、連行量でみると開境界付近での結果に疑問が残る。重力噴流では、連行量が閉じ込められた渦の影響で減少する結果となるので、その解釈に注意が必要となることが分かった。

5. 参考文献

- 1) 香月正司・中山顕：熱流動の数値シミュレーションー基礎からプログラムまでー、森北出版、1990
- 2) 土木学会：水理公式集、1971
- 3) 新井信一・長尾昌朋・上岡充男・新井孝法：海底に落下する密度噴流の拡散現象、海洋開発論文集第15巻、1999
- 4) 水野準也・新井信一：海底落下に関する密度噴流の温度拡散に関する基礎的実験、海洋開発論文集第17巻、2001