

三次元表層密度噴流の流動に及ぼす鉛直方向渦動粘性・拡散係数について

大阪大学工学部 正 員 室田 明 大阪大学工学部 正 員 中辻 啓二
大阪大学大学院 学生員 ○許 再寧 電源開発(株) 小池 重一

1. まえがき

表層密度噴流の三次元数値モデルにおいて、運動量、物質スカラー量の乱流輸送は一般に乱流粘性、乱流拡散の概念を用いて表現される。また、密度差に原因する成層安定効果は流れの安定度の増加に伴う鉛直方向乱流輸送係数の減少という形で評価される。しかしながら、鉛直方向乱流輸送係数の決定は確立されておらず、経験的な判断に委ねられているのが現状である。また、安定度を示す局所勾配型リチャードソン数と鉛直方向乱流輸送係数の関係も水理実験や野外観測に基づいて数多く提案されているものの、その妥当性について検証した例は少ない。そこで、成層安定効果を示す成層化関数と鉛直方向乱流輸送係数が三次元表層密度噴流の流動や拡散過程に及ぼす影響を数値実験によって検討したので報告する。三次元数値モデルは第32回水講で発表したものと同じである。

2. 成層化関数について

表層放流された水束が放流口から離れるに伴い、浮力流束が運動量流束に比べて勝ってくる。つまり、その流動は表層噴流から表層ブリュムへと遷移する。この過程で、密度差に原因する浮力が鉛直方向乱れの抑制(成層安定効果)という形で作用する。鉛直下方への拡がりを抑制された放流水束は、当然の結果として水平方向に拡がる。流れの安定度が増すと、鉛直方向渦動粘性・拡散係数 ϵ_z, K_z が減少し、また乱流シュミット数が増加することはよく知られている。これらの係数の減少は局所的な流れの安定度を示す勾配型リチャードソン数 Ri の関数として表現されるのが一般的である。水理実験や屋外観測で作られたそれらの関数式の代表的なものを表-1と図-1に示す。

表-1 成層化関数の一例

3. 数値実験の内容

計算領域は x 方向に2300mm, y 方向に800mm, z 方向に40mm とし、離散化間隔は $\Delta x=10\sim360$ mm, $\Delta y=2.5\sim200$ mm, $\Delta z=0.5\sim5$ mmの不等間隔格子網(31 Δx *22 Δy *23 Δz)を用いた。放流口条件として、流速 $U_0=2$ m/s, 放流口半幅 $B_0=5$ mm, 放流口水深 $H_0=2$ mm, 放流水と周囲水の密度偏差 $\Delta \rho_0=0.0032$ t/m³とした。放流口密度フルード数 $Fd_0=U_0/\sqrt{\epsilon g \Delta \rho_0}$ は5.35である。水平方向ならびに鉛直方向渦動粘性係数として軸対称噴流で用いられる $\epsilon_j=0.0256*b_{1/2}*u_c$ ($b_{1/2}$: 半値半幅 u_c : 中心軸上流速)の値を採用した。鉛直方向乱流輸送係数は前節で説明した成層化関数を用いて浮力効果を表現する。実施した数値実験は表-2に示す成層化関数を変えた3ケース、鉛直方向渦動粘性係数を変えた2ケースである。

表-2 実験条件

RUN	鉛直方向渦動粘性係数	鉛直方向乱流シュミット数
MM	$\epsilon_j \propto \text{Eq. (V-1)}$	Eq. (D-1)
WK	$\epsilon_j \propto \text{Eq. (V-2)}$	Eq. (D-2)
WM	$\epsilon_j \propto \text{Eq. (V-2)}$	$\text{Eq. (D-1)}/\text{Eq. (V-1)}$
WM-1	$0.1 * \epsilon_j \propto \text{Eq. (V-2)}$	$\text{Eq. (D-1)}/\text{Eq. (V-1)}$
WM-2	$0.01 * \epsilon_j \propto \text{Eq. (V-2)}$	$\text{Eq. (D-1)}/\text{Eq. (V-1)}$

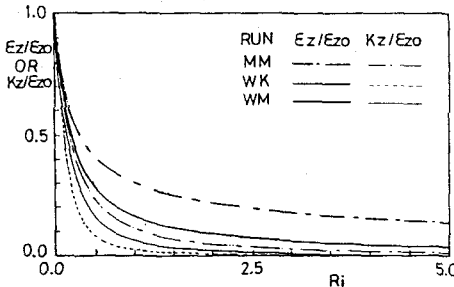


図-1 ϵ_z および K_z と Ri との関係

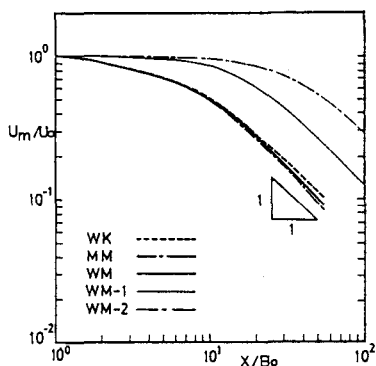


図-2 流速の流下方向逓減特性

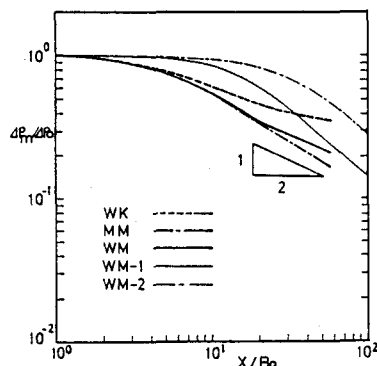


図-3 密度偏差の流下方向逓減特性

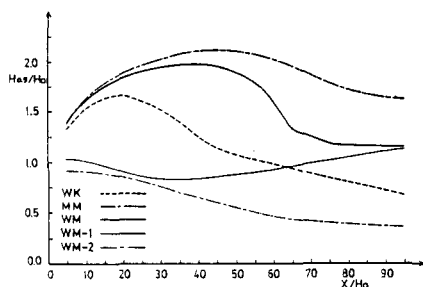


図-4 鉛直方向拡がり幅の流下方向変化

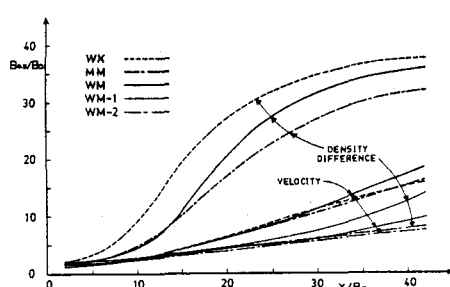


図-5 横方向拡がり幅の流下方向変化

4. 計算結果及び考察

図-2, 3は中心軸上の表層流速・表層密度差の流下方向逓減特性を示す。無次元表示は慣例に従った。両逓減特性に及ぼす鉛直方向渦動粘性係数 ϵ_z の大きさの影響が最も顕著に現れている。つまり、 ϵ_z の値の減少とともに逓減し始める位置は流速・密度差ともに流下方向に移行する。 ϵ_z の減少が直接的に鉛直方向の乱れ強度を減少させ、鉛直下方への拡がりを抑制することから、この傾向は当然の結果であるが、放流口近傍から逓減が始まると報告する多くの実験結果とは矛盾する。成層化関数の違いは流速の逓減には殆ど影響を与えないが、密度差の逓減則には違いをもたらす。実験で得られた逓減則 $(-1/2乗則)$ と比較すれば、Run WMの結果が比較的良好一致を示している。

図-4, 5は鉛直方向・水平方向の拡がりを比較するために半値半幅の流下方向変化を比較した。図-2, 3に見られたように、 ϵ_z の値の減少が表層厚の拡がりを抑制するとともに、水平方向への拡がりも抑制するのが特徴である。つまり、鉛直下方への拡がりを拘束された放流水束は横方向へ拡がらず、流下方向に移流される傾向を示す。一方、 ϵ_z を軸対称噴流の実験値 ϵ_s に選んだ計算では、「放流水束の表層厚が放流口近傍まで増加し、流下に伴い成層効果を受けて次第に減少する」という実験結果をうまく再現している。しかし、成層化関数の影響は微妙である。 $Fd_0=5.35$ では、最終表層厚 $H_{0.5}/H_0$ の値が $1.2 \sim 2.4$ に近づくという実験事実と照らしあわせると、Run WMが妥当であろう。流速分布の水平方向への拡がりに対する成層化関数の影響はあまり認められない。

5. 結論

従来、数値計算においては鉛直乱流輸送係数は成層効果を考慮して水平方向のそれよりも3.4桁小さい値が採用されているが、表層密度噴流の計算には適切でないことが分った。また、成層化関数として ϵ_z/ϵ_{z0} に対してはWebbの提案式が、 K_z/ϵ_z に対してはMunk-Andersonの式が妥当であることが分った。後者の妥当性はWestらのOuse河口の実測においても確認されている。