卓越した流向をもつ流れ場の三次元解析

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
電源開発（株）　正員○合田　佳弘

1．まえがき；主流方向に卓越した流向をもつ表層密度噴流を対象に、二次元の記憶容量・演算で三次元解析を行うことを試みる。本解析法はPartankar－Spalding[1]により提案された手法を密度効果を考慮できるように改良したものである。

2．研究の背景；表層密度噴流の拡がりを予測するモデルは、通常、連行係数あるいは渦動粘性係数といった乱れ項の表現に主眼が置かれ、密度噴流特有の圧力効果はほとんど考慮されていない。ところが著者等が行った水表面の可視化実験においては、密度差の増加にともなって、接近流速が急増し、形成・遷移領域へ向かうような連行形態を示すことが確認されている。[2]このような現象を忠実に説明するには、モデル中で密度差をexplicitに表現することが必須である。その表現方法としては、密度差に基づく圧力勾配、長さスケールとしては微少な水面勾配、成層効果による乱れの抑制等が考えられる。本報では、そのうち圧力勾配を考慮した解析を試みる。

3．基礎方程式の諸仮定；基礎方程式は、連続、運動ならびに浮力束Bに関する拡散方程式であり、定常な三次元空間を考える。基礎方程式の誘導に際しては、(1)鉛直方向の加速度は小さく、静水圧近似が可能である、(2)流れ場は主流方向に卓越した流向を有しており境界層近似が適用でき、この方向の乱れ輸送は無視できる、(3)密度差は小さくブーシネの近似が適用できる、(4)乱れ輸送項は単純に渦動粘性、拡散係数の概念を用いて、断面内一様分布とする、を仮定している。従属変数は流速U、V、W、圧力Pおよび$B=\frac{\Delta\rho}{\rho_a}g$
ここでρ_a：周囲密度、$\Delta\rho$：放流束との密度差である。

4．密度効果の表現手法；静水圧仮定により、密度分布は鉛直方向に積分することによって圧力に変換される。また$z=\infty$において圧力勾配を零とおけば(1)式のようになる。

$$\frac{\partial P}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\int_z^\infty B\cdot dz \qquad \text{ここで}\quad x_i=x,y \qquad (1)$$

本来、浮力存在下では、それに伴う水面上昇が生じ、物理的には過剰静水圧として作用することになる。(1)式の表現には水面上昇量ζの項は含まれていない。本質的にはζを解析中で考慮すべきであるが、鉛直方向に静水圧仮定を用いているため、(1)式のような表現にならざるを得ない。この問題と関連して、一般に水表面の境界条件として表層の鉛直方向流速$W_s=0$と与える方法がとられているが、水面上昇量の空間的変化に伴う圧力勾配を考慮する場合、水表面でのW_s流速場においても考慮されるべきである。そこで本解析では水表面のW_sの存在を許すために、この境界条件をfreeにして解くことにした。またこのため、解析過程で鉛直界面におけるW_eの既知量が必要となるが、これは成層安定効果による

Akira MUROTA, Keiji NAKATSUJI and Yoshihiro GOHDA

運行速度の抑制という形で表現し、Ellison-Turnerの実験式に基づいて断面リチャードソン数の関数で W_e を定義した。

4. 解析アルゴリズムの概要；図1に本解析に用いたアルゴリズムの流れ図を示す。この方法は、圧力場が容易に推定できることが必要であり、通常上流断面の値を用いて近似的に解かれる。主流方向には、全断面平均圧力 $\bar{P}$ を用いて $\partial\bar{P}/\partial x$ で連結し、断面内の計算では、各節点での圧力Pを求めている。まず、運動方程式を解き $\bar{U}$、$\bar{V}$ を求めた後、連続方程式を満足するように $\bar{W}$ 流速場が決定される。特徴としては、流程方向の断面ごとに逐次積分を行うことにより解を得る手法であり、繰り返し演算の必要がないことである。用いた有限差分手法は、千鳥型格子で、格子数20×20、1流下方向ステップの演算時間は5秒程度であった。

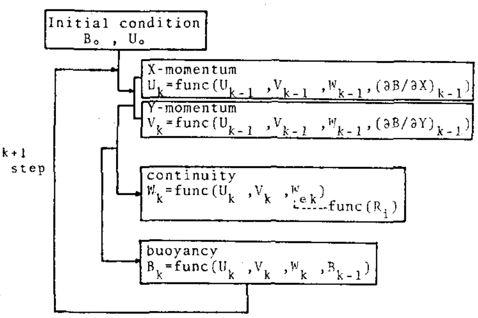

図1　解析アルゴリズムの概要

5. 数値解の特性について；計算条件として、初期流速分布ならびに浮力分布はガウス分布を、格子の拡がり率は0.22を与えた。数値実験諸量は $\bar{U}_{max}$ = 9.08 cm/sec、$\Delta\delta$=0.001、渦動粘性係数 ε=0.3とした。図2に表層での流速ならびに浮力の水平方向分布を示す。なお数値解の特性を把握する上で、無次元表示はしていない。流程方向平均流速 $\bar{U}_s$ と浮力 B_s は相似形を満足する形では拡がっておらず、噴流端で凸にはらむ傾向を有している。これは境界条件をDirichlet型のみで与えたためと考えられる。水平方向流速 $\bar{V}_s$ は $\partial\bar{P}/\partial y$ の直接の効果により、外向きの拡がり流速が顕著に現われている。鉛直方向流速 $\bar{W}_s$ は初期条件の矛盾のため、最初は大きな流速が出現するが、計算が安定したと推定できる20step以後で鉛直上向きの流速が現われる。しかしながら、予想以上に大きい W_s の出現は、一方的に鉛直界面での境界条件が効きすぎている結果であり、水表面における境界条件が何らかの形で考慮されなければならないことを示している。また渦動粘性係数の評価、格子の拡がり率等の細かな問題は残されているものの、本解析の目的である圧力勾配の影響が、直接的に $\bar{V}$ 流速場で再現されたことは有益である。さらにより精度高く、水面上昇量をも考慮した形で解析中に圧力効果を組み込むためには、鉛直方向の運動方程式を解く必要がある。しかし、三次元の基礎方程式を完全な形で解くことは、複雑かつ実用的ではなく、本手法を水表面条件が考慮される形に改良する方が望ましいと思われる。

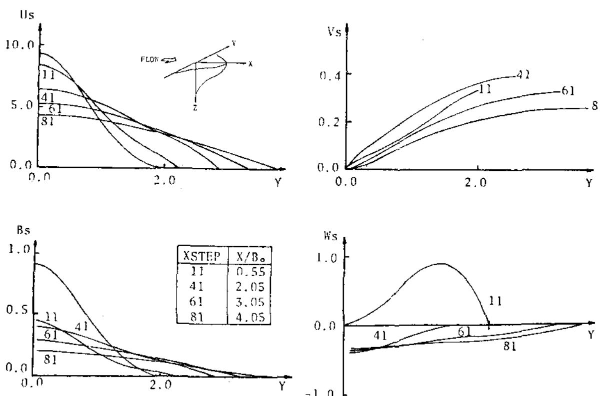

図2　表層の流速・浮力の水平方向分布

参考文献：　(1) Partankar-Spalding (1970)　　(2) 中辻・室田・合田　第34回年講