

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○富田 哲朗  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 五十里 洋行  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

### 1. はじめに

乱流はその性質上、解析が困難であり、特にDNSを行うのでなければなんらかのモデルの導入が必要となる。乱流モデルの代表的なものとして、 $k-\varepsilon$ モデル<sup>1)</sup>が挙げられる。本研究では、 $k-\varepsilon$ モデルを導入した粒子法<sup>2)</sup>により、平面2次元自由噴流計算を行い、本数値モデルの妥当性の検証を行う。

### 2. 数値解析手法

本研究では、高精度化手法を導入したISPH法を用いて計算を行った。また、エネルギー保存性に優れた計算を実現可能にする計算アルゴリズムを導入した<sup>3)</sup>。本研究では、粘性項および $k-\varepsilon$ モデルの拡散項の離散化モデルに着目し、異なる離散化モデルを適用した場合の計算結果を比較する。

### 3. 自由噴流計算

#### (1) 計算条件

計算領域、条件を図-1に示す。計算領域左端の流入域から $Re = 4000$ を満足するように水平に噴流を発生させる。計算領域上下端および右端は開放境界とし、境界を越えた粒子は消去、境界内部で空白域が生じた場合は五十里ら<sup>4)</sup>と同様の方法で粒子を発生させた。また、計測断面での測定に影響が及ばないように、計算領域右端から20Dの範囲で減衰域を設定した。計算粒子の粒径を0.002m、最大時間刻み幅を $2.0 \times 10^{-4}$ sと設定し、計算は60sまで行った。粘性項および $k-\varepsilon$ モデルの拡散項に適用した離散化モデルの組み合わせは表-1のとおりである。

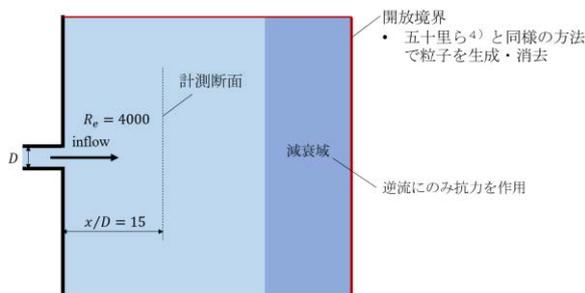


図-1 計算領域

表-1 離散化モデルの組み合わせ

計算ケース (モデルの組み合わせ)		粘性項		
		簡易モデル	従来モデル	修正モデル
k-εモデル拡散項	簡易モデル	ケース1	—	—
	従来モデル	—	ケース2	ケース3

#### (2) 計算結果

各ケースにおける $x$ 方向流速、乱れエネルギー、粒子数密度の分布図の一例を図-2~4に示す。ケース1はケース2, 3と比べて流れ場の特徴の違いが大きいが、ケース2と3には大きな違いは見られなかった。なお、粒子数密度については主流方向の流速が大きい領域において局所的に値の大小が見られるが、流れ場に影響を及ぼすほど基準粒子数密度からの偏差は大きいものではないと考えられる。

次に自由噴流現象の特性の一つである、 $x$ 方向流速の自己相似性について確認した<sup>5)</sup>。図-5に計測断面 $x/D = 10, 15, 20$ の断面における無次元流速分布を示す。グラフから、3ケースとも中心付近では、どの断面の値も自己相似性が強く見られるが、中心から離れるにつれ、ケース1は異なる断面間での差が生じているが、ケース2, 3では中心から離れても断面間での差は非常に小さく自己相似性が強いと言える。

4つの項目((a)時間平均流速、(b)Reynolds応力の $\overline{u'u'}$ 成分、(c)Reynolds応力の $\overline{w'w'}$ 成分、(d)Reynolds応力の $\overline{u'w'}$ 成分)についての比較のグラフを既往の実験結果(GW<sup>6)</sup>およびNO<sup>7)</sup>図-6に示す。計算結果は、 $x/D = 15$ の位置の計測断面における値を示す。(a)についてはすべてのケースで実験値に非常に近い値をとっていることが分かる。(b)については、ケース1に比べて、ケース2, 3が実験値に近い値をとっており、特に、実験値NOに近い値をとることが分かる。(c)ではケース1が局所的に実験値に近い値をとることがあるが、全体的にはケース2, 3の方が近い値を取っており、またグラフの概形も近いことが分

かる。(d)についてはどのケースも実験値と比較すると過小評価となっているが、ケース1よりもケース2, 3で実験値に近い値を取ることが分かる。以上4つの項目を通して、ケース1の計算結果は実験値から大幅に外れ、最も再現性が低くなることが明らかとなったが、離散化モデルのみが異なるケース2およびケース3には大きな差は見られなかった。

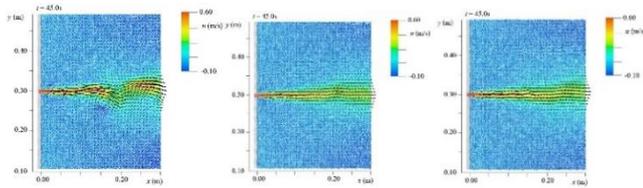


図-2 x方向流速 (左からケース1, 2, 3)

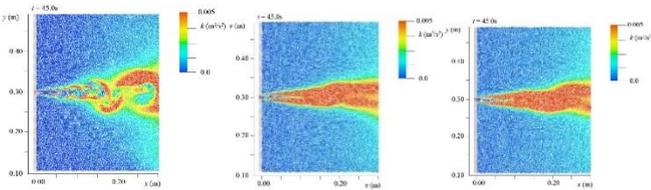


図-3 乱れエネルギー (左からケース1, 2, 3)

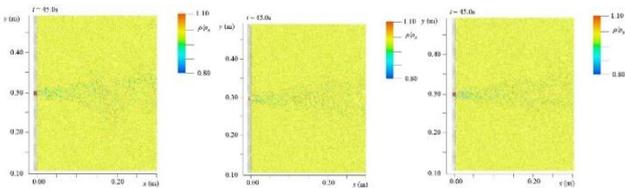


図-4 粒子数密度分布 (左からケース1, 2, 3)

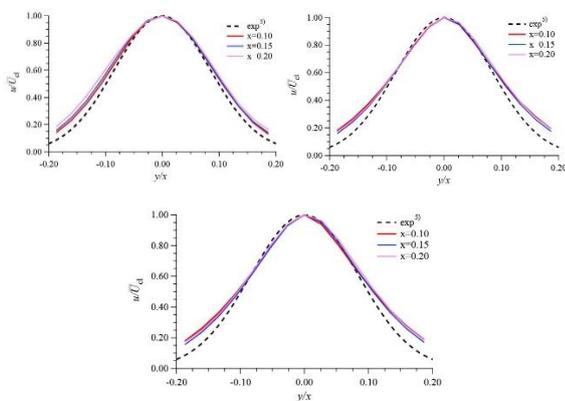


図-5 各ケースの無次元流速分布 (左上からケース1, 2, 3)

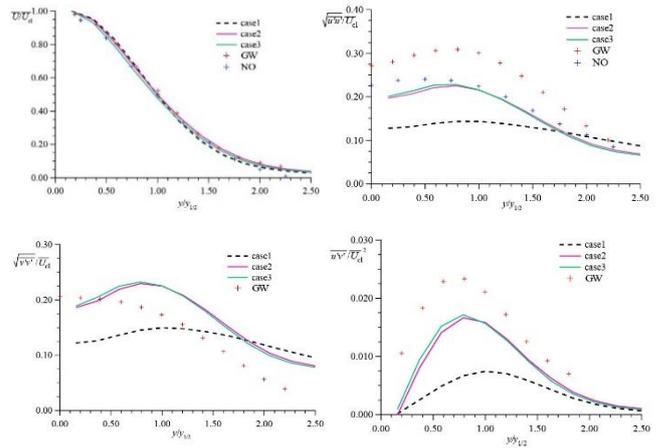


図-6 (a)~(d)の各ケースと実験値との比較

4. おわりに

本研究では、粒子法に基づく $k-\epsilon$ モデルにより自由噴流計算を実施した。 $x$ 方向流速分布に関しては、既往の研究で知られている分布特性を概ね再現できていた。また、粘性項、 $k-\epsilon$ モデルの拡散項の離散化モデルの妥当性の検証を行った。簡易モデルと比較すると、従来モデル、修正モデルでは実験値により近い値をとることが確認できた。一方で、異なる離散化モデルを適用した従来モデルおよび修正モデルにおいては明確な違いは得られなかった。今後の課題として、解像度を変更した場合のモデルの収束性についての確認や、三次元計算の実施も検討したい。

参考文献

- 1) 後藤仁志：流れの方程式，森北出版，551p, 2022.
- 2) 後藤仁志：粒子法－連続体・混相流・粒状体のための計算科学－，森北出版, 289p, 2018.
- 3) 五十里洋行，後藤仁志，脇嶋可成：MPS法におけるエネルギー保存性の改善と不規則波伝播計算への適用性，第78巻，2号，pp.43-48, 2022.
- 4) 五十里洋行，後藤仁志，久岡勇登：粒子法による空間分離型複数解像度計算手法の開発と碎波計算への応用，第69回海岸工学講演会，2022.
- 5) Rajaratnam, N. (野村安正訳)：噴流，森北出版，309p, 1981.
- 6) Gutmark, E., and Wynanski, I., : The planar turbulent jet, J. Fluid Mech. 73(3), , 465–495, 1976.
- 7) Namer, I., and Otugen, M., : Velocity measurements in a plane turbulent air jet at moderate Reynolds numbers, Exp. Fluids 6(6), 387–399, 1988.