

II-245 非等温同軸二重管噴流の乱流計測とその数値解析

（財）電力中央研究所 牛島 省、田中伸和、守屋祥一

1. はじめに 高速増殖炉の炉心から噴出する冷却材は、その噴出箇所により温度が大きく異なっており、この冷却材が完全に混合しないまま衝突する炉心上部機構の下部構造物では、冷却材の温度変動に起因する熱疲労が生ずる¹⁾。本研究は、このような噴出流の熱流動特性を基礎的な面から検討し、その評価手法を開発することを目的として行ったものである。

2. 実験 実験水槽を図1に示す。冷・温水タンクより送られた一定温度の温水と冷水は、図中の各チャンバー内で整流された後、同軸二重管の内管と外管にそれぞれ分かれて流入し、ノズル上端より上方に向かって噴出する。二重管噴流は、実験水槽の内部にあるアクリル容器内に形成される。流速測定は、光源にArイオンレーザー、処理系統にDISA55N23周波数トラッカーを利用したLDVシステムにより行った。非等温水流中へのLDVシステムの適用性に関しては、著者らは既報²⁾中で、Mizushimaら³⁾の方法を用いて検討を加えたが、本実験では、流体の屈折率の変化の影響は既報の場合と比較して小さいと判断し、温度変動の効果に関する補正は省略した。温度計測にはシース外径0.25mmのCA熱電対を用いた。これらの計測のサンプリング周波数は200Hz、計測時間は120秒である。ノズル上端付近の流況の概念図と本報中で用いる記号を図2に示す。本報で対象とした実験ケースは、表1に示した条件に従うものである。

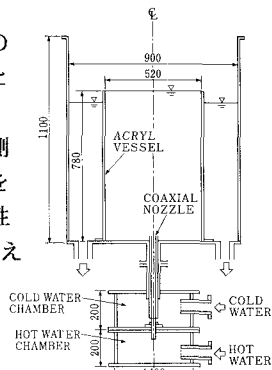


図1 実験水槽

3. 数値解析 本研究では、円筒座標系の下で数値解析を行うため、基礎方程式をまず一般的な直交曲線座標系へ変換した。ここで用いた解析モデルは、レイノルズ応力や乱流熱流束に関する輸送方程式を含む高次乱流モデルであり、主としてLaunder^{4), 5)}により提案されたものを基礎としたものである。基礎方程式系のうち、主要なものを以下に示す。

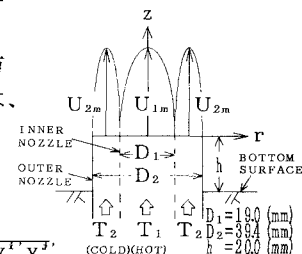


図2 流況の概念図

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{v}^i \bar{v}^j + \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^i \bar{v}^j = P^{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\epsilon} + C_k g^{kk} \nabla_k \left(\frac{k^2}{\epsilon} \nabla_k \bar{v}^i \bar{v}^j \right) + \nu g^{kk} \nabla_k \nabla_k \bar{v}^i \bar{v}^j - C_{1r} \frac{\epsilon}{k} (\bar{v}^i \bar{v}^j - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\epsilon}) - C_2 (P^{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\epsilon}) \quad \text{---(1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{v}^i \bar{T}^j + \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^i \bar{T}^j = -\bar{v}^i \bar{v}^k \nabla_k \bar{T}^j - \bar{v}^k \bar{T}^j \nabla_k \bar{v}^i - \beta F^i \bar{T}^j - C_{1T} \frac{\epsilon}{k} \bar{v}^i \bar{T}^j - C_{2T} (-\bar{v}^k \bar{T}^j \nabla_k \bar{v}^i - \beta F^i \bar{T}^j) + \nabla_k \left\{ (C_F \frac{k^2}{\epsilon} + \alpha) g^{kk} \nabla_k \bar{v}^i \bar{T}^j \right\} \quad \text{---(2)}$$

$$\frac{\partial \bar{T}^j}{\partial t} + \bar{v}^k \nabla_k \bar{T}^j = -2 \bar{v}^k \bar{T}^j \nabla_k \bar{T}^j - 2 \epsilon_{\theta} + g^{kk} \nabla_k (C_{TT} \frac{k^2}{\epsilon} \nabla_k \bar{T}^j + \alpha \nabla_k \bar{T}^j) \quad \text{---(3)}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{v}^k \nabla_k \epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (-\bar{v}^i \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^i) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + g^{jj} \nabla_j \left\{ (C_{\epsilon} \frac{k^2}{\epsilon} + \nu) \nabla_j \epsilon \right\} \quad \text{---(4)}$$

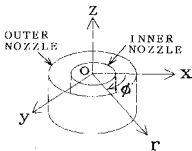


図3 座標系

$$\text{ここに、} P^{ij} = -(\bar{v}^i \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^j + \bar{v}^j \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^i) - \beta (F^i \bar{v}^j \bar{T}^j + F^j \bar{v}^i \bar{T}^i) \quad \text{---(5)}$$

$$P = -\bar{v}^j \bar{v}^k \nabla_k \bar{v}^j - \beta F^k \bar{v}^k \bar{T}^j \quad \text{---(6), } \epsilon_{\theta} = \frac{1}{C_T} \frac{\epsilon}{k} \bar{T}^j \quad \text{---(7)}$$

である。上式中で、 $\bar{v}^i$ 、 $\bar{v}_i$ は流速ベクトルの反変および共変成分、 F^i は外力ベクトルの反変成分であり、 g^{ij} は基本テンソルの反変成分、 ∇_j は共変微分である。また、 ν 、 α 、 β 、 T_s はそれぞれ動粘性係数、熱拡散係数、体積膨張係数、基準温度である。

これらの基礎方程式中の係数値を表2に示す。これらのうち、 C_{TT} と C_F はChen^{6), 7)}による値、 C_s は著者らが前報⁷⁾で用いた値であり、その他の係数はLaunder^{4), 5)}によって示された値である。

差分式の導出に際しては、まず微分公式に従い、基礎方程式中のスカラー量、反変ベクトル、そして(1, 1)テンソルといった量の共変微分を

表1 実験条件

扱いやすい形とし、これらに対して図3に示した円筒座標系の基本テンソルあるいはクリストフェルの記号の値を代入して、同座標系における

実験ケース	U_{1m} (m/s)	U_{2m} (m/s)	$\gamma (U_{2m}/U_{1m})$ (-)	U_0 (m/s)	T_1 (℃)	T_2 (℃)
Run-1	0.130	0.263	2.02	0.263	27.8	13.0

3次元の基礎方程式を求めた。

そしてこれらに $\nabla \phi = 0$

$$\text{および } \frac{\partial}{\partial \phi} (\dots) = 0$$

なる2次元性を仮定して、 $r-z$ 2次元場の基礎方程式を求め、これより差分式を導いた。解析方法は既報⁸⁾のものと同様である。

4. 結果の比較検討 図4に実験および数値解析により得られた各断面内の軸方向平均流速の分布を示す。本報で対象とした実験ケースでは、外管最大流速が内管のものより大きいため、外管側の噴流の影響が上方まで残り、そして最終的には中心軸上にピークを有する分布形状となつてゆく傾向が見られるが、数値解析結果はこのような流下に伴う傾向を適切に表現している。また、図5は図4と同じ断面内の平均温度の分布を示すものである。同図に見られるように、解析結果は実験結果とほぼ一致した。

図6(a)~(c)に、温度変動強度の分布を示す。 $z/D_1=3.16$ の断面では、数値解析により得られた分布のピークの位置が実験値と比較して外側へずれているが、温度変動強度の最大値はほぼ一致するものとなった。他の2断面では、解析結果は全般的に実験結果よりやや大きい温度変動強度を示すものとなった。

表2 係数値

C_K	C_{E1}	C_{E2}	C_E	C_1	C_2	C_{1T}	C_{2T}	C_T	C_{TT}	C_T^+
0.09	1.44	1.90	0.15	2.0	0.6	3.2	0.5	0.07	0.13	1.6

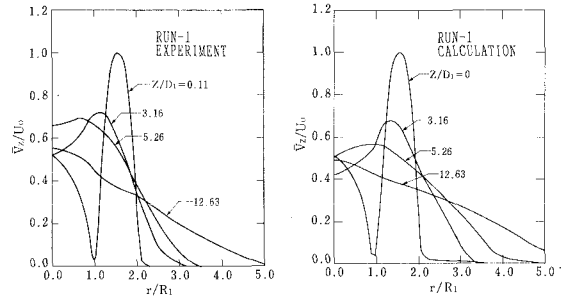


図4 軸方向平均流速分布

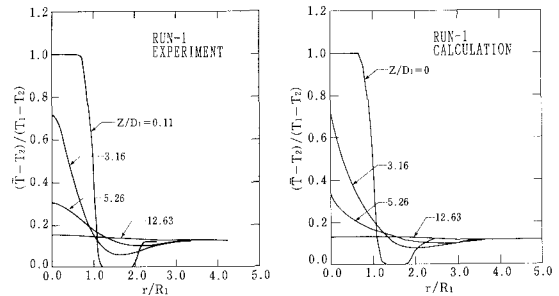


図5 平均温度分布

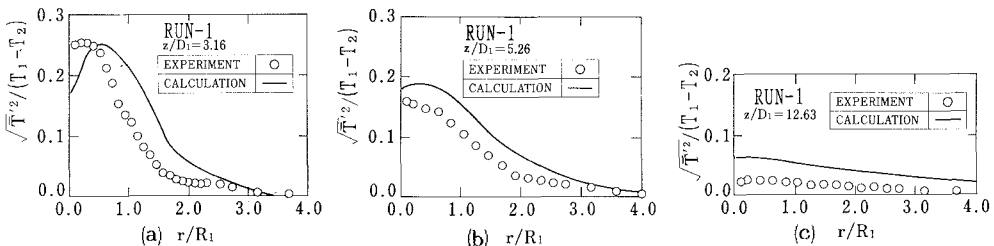


図6 温度変動強度の分布

5. おわりに 以上のような検討の結果、同軸二重管噴流の平均流速分布および平均温度分布に関しては、本研究で用いた手法によりほぼ妥当な予測が行えることが示されたが、温度変動強度の分布に関しては、解析結果と実験結果との相違がやや見られた。今後は、原子炉炉内構造物の熱疲労に関連して重要な特性量となる冷却材の温度変動強度に対してより精度の高い数値解析が行えるよう、乱流量の基礎方程式系等に対する検討を進めてゆく予定である。

《参考文献》

- 1) 守屋、牛島、大島：第32回水理講演会論文集 2) 牛島：電中研研究報告No.U87057
- 3) Mizushima, T. etc. : Proc. R. Soc. Lond. A. 366, 63~79, 1979
- 4) Launder, B. E. etc. : J. Fluid Mech., vol. 68, 1975 5) Launder, B. E. : J. Fluid Mech., vol. 67, 1975
- 6) Chen, C. J. etc. : IAHR 16th Congress, vol. 3, 1975 7) Chen, C. J. : 電力中央研究所講義録
- 8) 牛島、角湯、守屋：第41回年次講演会概要集