

時系列 PIV を用いた狭隘円管群内熱流動構造の解明

Investigation of Thermal-Fluid Flow Structure Using Time Series PIV among Gap of Circular Cylinder

80816809 根岸知広 (Tomohiro Negishi)

Supervisor : 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 結論

近年、地球温暖化などの環境問題への注目が高まるにつれ、原子力発電への期待は加速度的に増加している。中でも、高速増殖炉(FBR)はエネルギーセキュリティの観点から非常に大きな注目を集め、その完成が待ち望まれる技術である。しかし、FBR で用いられるマイナーアクチド(MA)を含有する核燃料は、自然発熱を起こすことから燃料被覆管の変形や破損を伴い、FBR の組立時には燃料棒集合体の適切な冷却システムが求められている。この冷却システムは、燃料棒集合体内の温度分布や最高温度を予測できる解析ツールの完成が目標とされ、精度の高い解析の為に実験的な流動場の解明が必要不可欠となる。

そこで、実際のFBRにおいて構成される pitch-to-diameter 比(円管群の密集具合を示す指標)が1.1、スーパーシングワイヤが螺旋状に巻かれているという超狭隘かつ複雑な流れ場に適用可能な計測システムを構築し、熱流動場の解明を目的とする。

2. 実験装置及び実験条件

図1に実験装置の概略図を、図2に試験領域の拡大図を示す。開放型風洞に置かれた光学ガラス製のチャンネル(W117×D200 mm²)に、円管(D=53 mm)が58.5 mm ピッチで配置される。上流側の円管内にヒータを導入し、ヒータ表面温度を300, 400, 500 K の3条件に設定した。また、FBR において螺旋状に巻かれるワイヤを2-D モデル化するため、円管にはガラス製ワイヤ(d=5.3 mm)を水平に取り付け、その取り付け角度 θ は円管頂部より0, 30, 60 deg.に変化させた。本実験流路に対しブロウで流れを起こし、入口流速 V_0 は、0.3, 0.5, 1.0 m/s の3条件で実験を行った。本研究においては、流入速度を一定に保った定常状態における試験と、定常状態からブロウを停止し流入速度を減衰させた非定常試験の2つの試験を実施した。

図3にPIVシステム構成図を示す。撮像には、CMOSカメラ(FASTCAM SA1.1 : Photoron)を、フレームレート5 kHz(非定常試験:125Hz)で用いた。照明は、Nd-YLF レーザ(DM10_527_DUAL, Photonics Industry Inc.)をダブルパルス(流入速度に応じ、パルス間隔60, 40, 20, 10 μ s)で使用した。これを光ファイバによって円管内に導入し、凸レンズ、シリンドリカルレンズ、直角プリズムを介してシート状にして狭隘部を照射した。この送光システムの開発により、ガラス円管による散乱光の影響が軽減することに成功した。図4に、測定領域側面からレーザを直接照射した画像(a)、及び光ファイバを用いた本照射システムによる画像(b)の比較を示した。画像(b)において散乱光の影響が軽減されている様子が確認される。

図5に熱電対温度計測位置を示す。熱電対(Type-T, 線径100 μ m)は、直径1 mm のステンレス製プローブに取り付けることにより、円管群狭隘部、円管1頂部より3, 8, 13 mm の位置に、バンドル上部円管2-3中央より14.6 mm 間隔で配置した。また、熱電対はレーザシートから奥行10 mm の位置に置かれている。

3. 実験結果及び考察

3.1 定常加熱試験 図6ワイヤ角30 deg., 流入速度0.3 m/s における平均流速分布を示す(4096 画像平均)。ワイヤ角30 deg.で

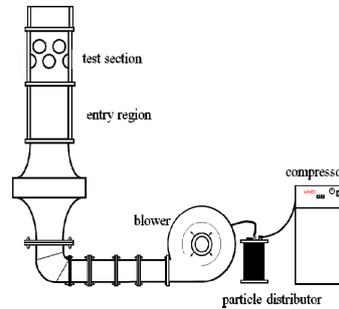


Fig. 1 Experimental apparatus.

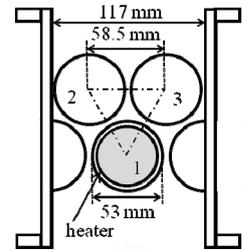


Fig. 2 Test section.

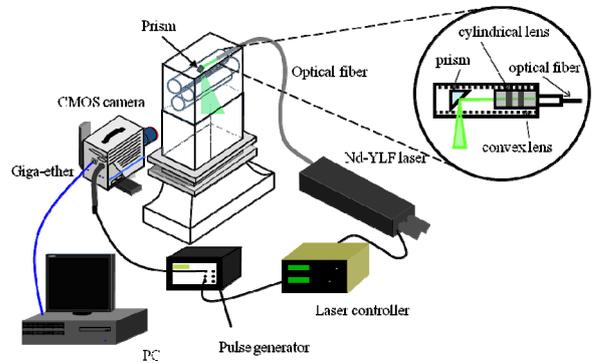
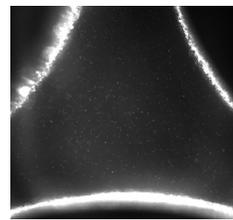
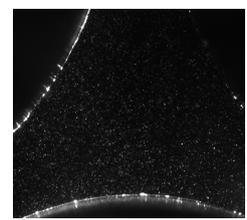


Fig. 3 Schematic of PIV system.



a.) Illuminated by side wall



b.) Illuminated by optical fiber

Fig. 4 Comparison of captured images.

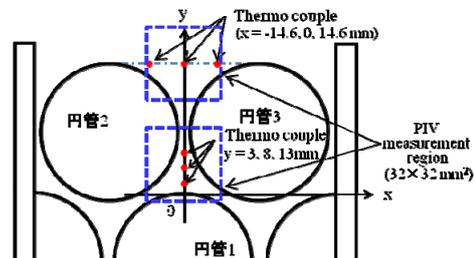


Fig. 5 Thermo-couples configuration.

は、ワイヤが円管1-3の間を塞ぐことにより主流が円管2側においてのみ観察され、非常に大きな死水領域を形成する。また、加熱の影響により主流は加速され、500 K 時においては300 K 時に比べ、15%程度の加速が確認された。

図7, 8にワイヤ角30, 60deg. ($V_0 = 0.3$ m/s)における乱流エネルギー分布を示す。乱流エネルギー k は式(1)によって示される。

$$k = (u^2 + v^2) / 2 \quad (1)$$

ここで、 u' 、 v' はそれぞれ x 方向変動速度、 y 方向変動速度を表す。図 6 では主流と死水領域の境界付近においてせん断層が確認され、この境界付近において乱流エネルギーは高い値を示す。また図 7 より、ワイヤ角 30deg. では 400 K において極大を取り、500 K では減少していく様子が確認できる。一方、60 deg. においては円管 2、3 に沿って流れる主流が合流する付近において極大を示し、ヒータ温度の上昇と共に減少する。これは、円管 1 後方に発達する死水領域が浮力の影響により拡大することで、主流の剥離を抑制するためであると考えられる。

乱流エネルギー輸送方程式の生成項(P_k)は式(2)に示すように、垂直応力に起因するもの($P_{k,normal}$)、せん断応力に起因するもの($P_{k,shear}$)の 2 成分に分けられる。図 9 に、 $y=11$ mm 面において、いずれの成分が支配的であるかを示した。(ワイヤ無し、流入速度 0.3m/s, ヒータ表面温度 300K)

$$P_k = \underbrace{(-u^2 \frac{\partial U}{\partial x} - v^2 \frac{\partial U}{\partial y})}_{P_{k,normal}} - \underbrace{(\langle uv \rangle (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}))}_{P_{k,shear}} \quad (2)$$

図 9 より、乱流エネルギー輸送方程式の生成項(P_k)は死水領域と主流の境界付近において高い値を示し、そのうち垂直応力による生成が支配的であることが確認された。一般的なチャンネル流や円管群構造内の流れ^[1]においては、せん断応力による生成が支配的となることが知られており、 p/d 比約 1.1 の狭隘円管群構造における流動場の特徴が確認された。

3.2 CFD

図 10 に乱流モデル($k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, RSM)の比較の為、ワイヤ角 30deg., 流入速度 $V_0 = 1.0$ m/s における平均流速分布を示す。RNG $k-\epsilon$ と RSM においては主流と死水領域間の速度勾配が適切に再現できているが、 $k-\epsilon$ モデルにおいてはこの特徴を再現できていないことが確認された。

3.3 非定常加熱試験

図 11 に、 $y=0, 16.4$ mm における熱電対の時系列温度変化と、 $y=50$ mm 面において最高速度を示す x 座標の変化を示した。この結果より、時刻の経過とともに主流は、円管 3 近傍を離れ、大きく立ち上がっていることが分かる。また、この主流の立ち上がりに伴い熱電対($y=0$ mm)は温度の上昇を示し、一方、 $y=16.4$ mm に配置された熱電対は温度が低下していることがわかる。これらの結果より、熱流束が主流により輸送されている様子が確認された。

4. 結論

ワイヤを取り付けた p/d 比 1.1 の狭隘で複雑な円管群構造内の流れに対し、PIV と熱電対による速度・温度場計測システムを構築し、熱流動場の解明を行った。

流れ場はワイヤ角の影響を大きく受け、ワイヤ角 0, 60deg. においては温度の上昇に伴い乱流エネルギーは減少し、30deg. においては 400K で極大を示す。また、乱流エネルギー輸送方程式の生成項は、垂直応力による生成が支配的となり、 p/d 比 1.1 の狭隘円管群構造における特徴的な現象が確認された。

非定常試験においては、温度場の速度場への依存性が明らかとなり、バンドル上部における主流の立ち上がりとともに、熱量が輸送されていく様子が確認された。

CFD においては、 $k-\epsilon$ モデルでは狭隘部に発生する速度勾配を適切に再現できないことが明らかとなった。

参考文献

[1] Paul, et.al. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, **29** (2008), pp.387-414

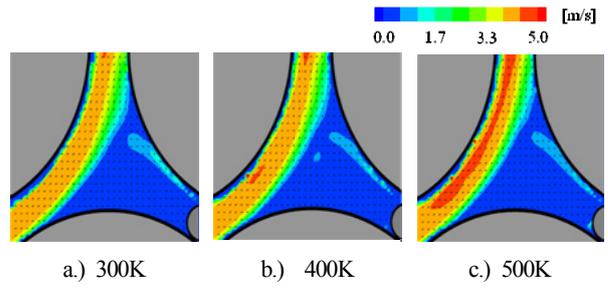


Fig. 6 Average velocity distribution ($\theta=30\text{deg.}$, $V_0=0.3\text{m/s}$).

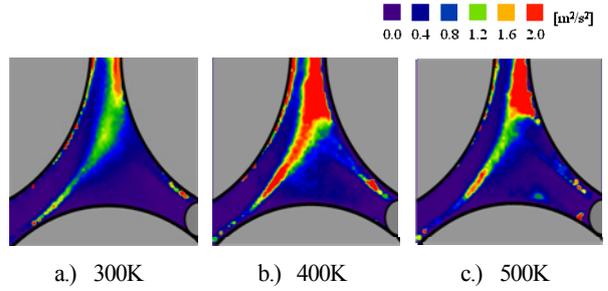


Fig. 7 Turbulence energy distribution ($\theta=30\text{deg.}$, $V_0=0.3\text{m/s}$).

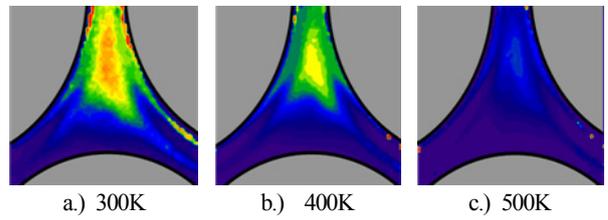


Fig. 8 Turbulence energy distribution ($\theta=60\text{deg.}$, $V_0=0.3\text{m/s}$).

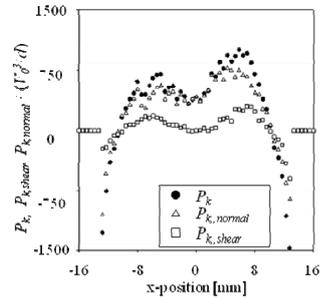


Fig. 9 Turbulence energy production.

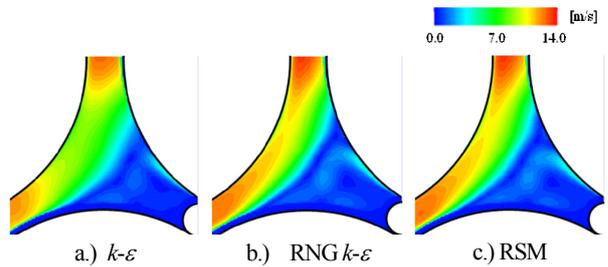


Fig. 10 Comparison of turbulence model ($V_0=1.0$ m/s).

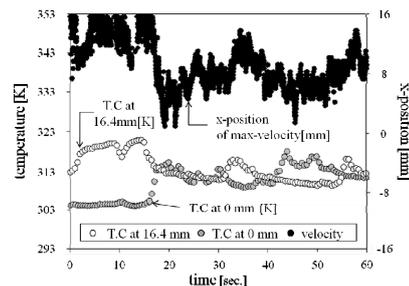


Fig. 11 Time-series velocity and temperature fluctuation.