液体金属における円管内強制対流熱伝達の数値解析

Computational Study of Forced Convection Heat Transfer for Heating of Liquid Metal in a Circular Tube

*畑幸一[1]，福田勝哉[1]，増崎貴[2]

[1]神戸大海事，[2]核融合研

核融合炉における液体金属を用いたブランケット冷却、液体金属による高熱流束エネルギー変換、液体金属冷却高速炉における熱流動の運転・安全の向上等に関する液体金属伝熱流動の基礎研究として、液体金属ナトリウムにおける円管発熱体内の強制対流熱伝達の理論解析を行い、強制対流熱伝達を支配する伝導底層厚さ、無次元伝導底層厚さを明らかにし円管発熱体内高温液体金属の一般的強制対流熱伝達表示式を導出する。

キーワード：液体金属、円管、強制対流熱伝達

1. 緒言　実験データ(1)に基づく強制対流下の垂直同心二重円管内液体金属ナトリウムの層流熱伝達における伝導底層厚さを計測し、低ペクレ数域における円管内液体金属ナトリウムの強制対流熱伝達を熱流体解析コードを用い数値解析した結果について報告する。

2. 数値解析　数値解析は、環状流路試験部(d=7.6mm、L=52mm、d_{out}=14.3mm、L_{ts}=1003.4mm、L_e=308mm、L_{ex}=643.4mm)、2 種類の円管試験部(水力相当直径 $d_H=(d_{out}-d)$=6.7mm、熱的相当直径 $d_e=(d_{out}^2-d^2)/d$=19.307mm、L=52mm、L_{ts}=1003.4mm、L_e=308mm、L_{ex}=643.4mm)において、入口液温 T_{in}=583.68K、流速 u=0.0852m/s、熱流束 q=0.9771×10^{6}W/m^2 で行われた。ペクレ数 Pe は、水力相当直径、熱的相当直径においてそれぞれ Pe=8.78、24.95 である。境界適合格子による 1/6 モデルの環状流路、水力及び熱的相当直径の円管試験部の計算メッシュ(19,6,197)、(13,6,197)、(29,6,197)の概略図を x-y-z (r-θ-z)座標系に対する面上図 1(a)、(b)、(c)に示す。発熱体に接するセル巾$(\Delta r)_{out}$ には 0.4 mm を与え、緑色で示す格子面が流入 inlet、流出 outlet 境界面である。

3. 結果・考察　代表例として、環状流路試験部で行われた d=7.6mm、L=52mm、d_{out}=14.3mm の同心二重円管発熱体で、T_{in}=583.68K、u=0.0852m/s、q=0.9971×10^{6}W/m^2 に対する実験計測した層流熱伝達の発熱体局所外表面温度(T_s △)、発熱体入口及び出口液温(T_{in}, T_{out} ●)、発熱体入口出口液温から内挿直線補間した局所液温(T_f ○)を温度 T と試験部長さ Z の面上図 2 に示す。発熱体局所外表面温度△、局所液温○は加熱長さが長く成る程直線的に高く成る。局所液温○はそれぞれの加熱長さで発熱体局所外表面温度にほぼ平行して低い。発熱体局所外表面温度、局所長さの平均液温の数値解析結果を青実線、青一点鎖線で示す。発熱体局所外表面温度、局所長さの平均液温の数値解析結果は、実験結果の発熱体局所外表面温度、計測した発熱体入口及び出口液温(T_{in}, T_{out})を直線補間した局所液温とほぼ一致し、発熱体局所外表面温度の上昇割合は、局所長さの平均液温の上昇割合とほぼ同様である。次に、円管発熱体において、水力相当直径で T_{in}=583.68K、u=0.0852m/s、q=0.9971×10^{6}W/m^2 に対する数値解析結果で d_H=6.7mm、L=52mm の円管発熱体発熱体局所内表面温度、局所長さの平均液温を赤実線、赤一点鎖線で示す。発熱体局所内表面温度、局所長さの平均液温の上昇割合は二重円管発熱体に比較して 2.70 倍で非常に大きい。熱的相当直径 d_e=19.3mm、L=52mm の円管発熱体で T_{in}=583.68K、u=0.0852m/s、q=0.9971×10^{6}W/m^2 に対する数値解析結果で発熱体局所内表面温度、局所長さの平均液温も緑実線、緑一点鎖線で示す。発熱体局所内表面温度、局所長さの平均液温の上昇割合は二重円管発熱体より 1.21 倍大きいがほぼ類似である(2)。

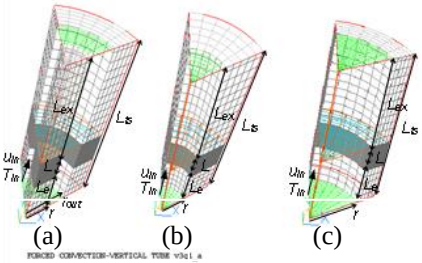

図 1

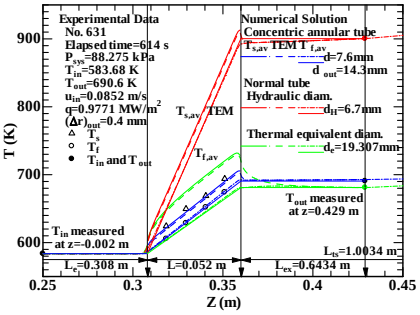

図 2

同心二重円管発熱体で、水力相当直径及び熱的相当直径に対する数値解析結果を図 3 の Nu と Pe の面上に△及び□で示す。水力相当直径の $Nu_{av,d}$△は実験結果及び従来の数値解析結果○とほぼ一致する。熱的相当直径の $Nu_{av,Ate}$□は Nu と Pe 共に△より 2.88 倍大きい。円管発熱体の水力相当直径及び熱的相当直径に対する数値解析結果を図 3 の面上に△及び□で示す。水力相当直径において円管発熱体の $Nu_{av,H}$(=4.43)△は、Pe=8.92 で二重円管発熱体の $Nu_{av,d}$(=6.528)△より 32.14%小さい。熱的相当直径において円管発熱体の $Nu_{av,te}$(=5.429)□は、Pe=25.07 で二重円管発熱体の $Nu_{av,Ate}$(=18.81)□より 71.14%小さい。円管内強制対流熱伝達を数値解析した結果は、T と Z の関係においては熱的相当直径に対する解析結果の方が二重円管発熱体の解析結果とより類似な傾向を示すが、Nu と Pe の関係においては水力相当直径の解析結果の方がより合理的である。広範囲の熱流束において水力相当直径に対する円管内強制対流熱伝達の数値解析を行い、高温液体金属中の円管発熱体の一般的強制対流熱伝達表示式 $Nu_{av,H}$ を二重円管発熱体の $Nu_{av,d}$ の比として次式を導出する(2)。

$$Nu_{av,H}/Nu_{av,d} = 0.675 \qquad (1)$$

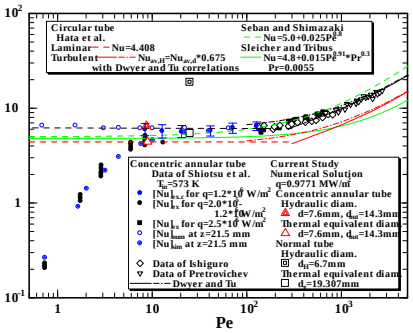

図 3

4. 結論　水力相当直径における円管発熱体の発熱体局所内表面温度、局所長さの平均液温の上昇割合は二重円管発熱体に比較して 2.70 倍大きく、$Nu_{av,H}$(=4.43)は、Pe=8.92 において二重円管発熱体の $Nu_{av,d}$(=6.528)より 32.14%小さい。高温液体金属中の円管発熱体の一般的強制対流熱伝達表示式 $Nu_{av,H}$ を二重円管発熱体の $Nu_{av,d}$ の比として式(1)を導出する。

参考文献　(1) Shiotsu, M., et al., NURETH-6, **2**, pp. 1292-1301, 1993.
(2) Hata, K., et al., NUTHOS-11 N11A0011, pp. 1-13, 2016.

*Koichi Hata[1], Katsuya Fukuda[1] and Suguru Masuzaki [2]
[1]GSMS, Kobe Univ., [2] National Institute for Fusion Science