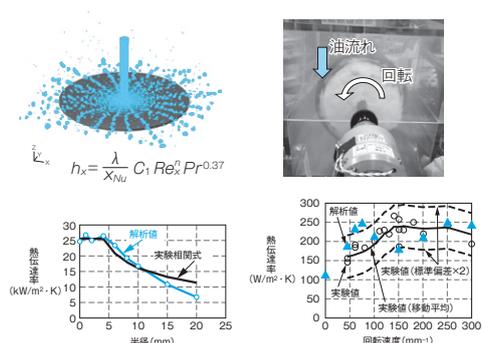


# 油冷モータ熱流体解析に向けた粒子法衝突噴流熱伝達率モデルの開発

佐藤潤一 Jun'ichi Sato  
江尻光良 Mitsuyoshi Ejiri

キーワード 回転機, 油冷, 熱流体解析, 熱伝達率

## 概要



粒子法衝突噴流熱伝達率モデルの構築

回転体油冷実験によるモデル妥当性の確認

高出力高回転コンパクトを目指す回転機の開発では、冷却性能が高い油冷方式が採用されることが多い。特に高温部分に油を吹き付ける油噴流局所冷却方式は、効率の観点から注目される。油噴流局所冷却を用いた製品の開発では、作業の効率化と新しい知見獲得のため熱流体解析が欠かせない。しかし、油噴流局所冷却の熱流体解析は、複雑な液面変形や熱伝達率評価の難しさから精度や計算時間に課題が多い。

そこで、当社では熱流体解析手法の一つである粒子法を用い、油噴流局所冷却の設計検討のための粒子法衝突噴流熱伝達率モデルを開発した。衝突噴流実験相関式との比較を通しモデル構築、回転体油冷実験との比較によってモデルの妥当性を確認した。熱伝達率モデルは、回転体表面の熱伝達率をおおむね再現できることを明らかにした。

## 1 まえがき

近年、電気自動車（EV）モータなど回転機では、高出力高回転コンパクト化が求められ、冷却性能を高めるため高温部へ油を噴射や噴霧する局所冷却技術が積極的に用いられている。そして、局所冷却技術の最適化や高度化設計には、熱流体解析技術が欠かせない。しかし、噴射や噴霧による局所冷却の解析は、自由表面流れと伝熱の複雑さから取り扱いが非常に難しい。

粒子法は、液面の大変形や壁面の移動を容易に扱える流体解析手法で、回転機内の油流れ解析に適している。しかし、粒子法では流体と固体間の伝熱を精度よく算出できないため、回転機内の温度解析への適用が難しかった。

そこで当社では、油冷モータの冷却設計利用を念頭に油衝突噴流局所冷却に対応できる粒子法衝突噴

流熱伝達率モデルを開発した<sup>(1)</sup>。本稿では、そのモデルの概要、検証実験と結果を紹介する。

## 2 粒子法衝突噴流熱伝達率モデルの構築

### 2.1 概要

第1図に衝突噴流<sup>(1)</sup>を示す。平田&森岡<sup>(2)</sup>では、直径 $D$ の円形ノズルから速度 $V_{inj}$ を持った水が距離 $H$ にある壁へ垂直に衝突する噴流に対し、熱伝達率の実験相関式を与えている。この相関式の再現を目指しモデルを構築していく。

ここでは、粒子法の一つであるMPS法<sup>(3)</sup>による流体解析市販ソフトParticleworks 6.2（プロメテック・ソフトウェア株）を用い、開発した熱伝達率モデルをParticleworksのSoftware Development Kitによって実装した。

## 2.2 局所熱伝達率のモデル化

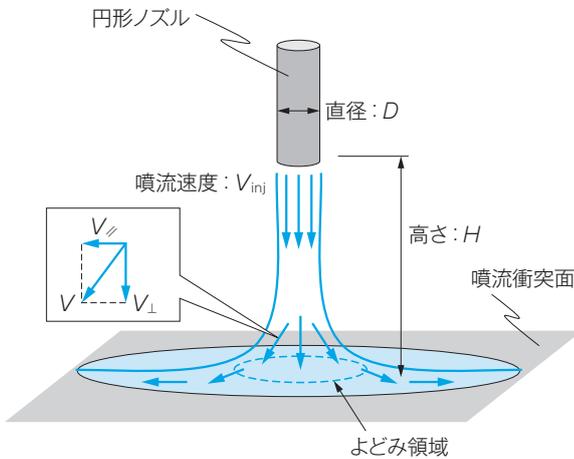
壁面近傍の局所物理量から熱伝達率相関式を通して局所熱伝達率  $h_x$  を算出することを考える。流れに直交する等温円柱の平均ヌセルト数相関式<sup>(4)</sup>をベースにし、算出式を以下とした。

$$Nu_x = \frac{h_x x_{Nu}}{\lambda} = C_1 Re_x^n Pr^{0.37} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $Nu_x$ は局所ヌセルト数、 $\lambda$ と $Pr$ はそれぞれ流体の熱伝導率とプラントル数である。 $x_{Nu}$ は局所ヌセルト数の代表長さで、定義は2.4項で説明する。 $Re_x$ は局所レイノルズ数で、以下のように定義する。

$$Re_x = \frac{V_{Re} x_{Re}}{\nu} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\nu$ は流体の動粘性係数である。 $V_{Re}$ と $x_{Re}$ はそれぞれ局所レイノルズ数の代表速度と代表長さで、こちらも定義は2.4項で説明する。第1表に式(1)における $Re_x$ と $C_1$ 、 $n$ との依存関係を示す。 $C_1$



第1図 衝突噴流<sup>(1)</sup>

衝突噴流の状況を示す。

第1表 式(1)における $Re_x$ と $C_1$ 、 $n$ との依存関係

式(1)における $Re_x$ と $C_1$ 、 $n$ との依存関係を示す。 $\beta_{Re2} \cdot \beta_{Re3}$ は、チューニングパラメータである。

$Re_x$	$C_1$	$n$
1 ~ 40	0.75	0.4
40 ~ 1000	$0.51 \times \beta_{Re2}$	0.5
1000 ~ $2 \times 10^5$	$0.26 \times \beta_{Re3}$	0.6
$2 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$	0.076	0.7

と $n$ は、第1表のように定義される局所レイノルズ数に依存するパラメータである。また $\beta_{Re2}$ 、 $\beta_{Re3}$ は、解析による熱伝達率分布が平田&森岡<sup>(2)</sup>の衝突噴流実験相関式と合うように微調整するためのチューニングパラメータである。

## 2.3 よどみ領域判定

モデルでは、流体粒子がよどみ領域にいるか否かで、先に述べた代表速度や代表長さを変更する。ここでは、その判定条件を述べる。第1図に示すように、流体粒子速度 $V$ を壁面に垂直な成分 $V_{\perp}$ と平行な成分 $V_{\parallel}$ に分けた時、 $V_{\perp}$ が以下の条件の場合、流体粒子はよどみ領域にいるとする。

$$V_{\perp} \geq \alpha_{ST} V_{\parallel} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $\alpha_{ST}$ は $0 < \alpha_{ST} \leq 1$ の値を取るチューニングパラメータであり、解析の熱伝達率分布が衝突噴流実験相関式と一致するように決定する。

## 2.4 よどみ領域の代表長さと同様速度のモデル化

まず、よどみ領域以外では、代表長さ $x_{Nu}$ と $x_{Re}$ は流体粒子が壁面近傍において壁面に沿って移動した距離 $x_{TL}$ とし、代表速度 $V_{Re}$ は $V_{\parallel}$ とする。

次に、よどみ領域でのモデル化を説明する。局所ヌセルト数の代表長さ $x_{Nu}$ は、壁垂直方向に熱が流体へ影響する距離と考え、MPS法(Moving Particle Simulation Method)の影響半径 $3.1l_0$ とする。ここで、 $l_0$ は初期粒子間距離である。また、局所レイノルズ数の代表長さ $x_{Re}$ は、基本的にはよどみ領域以外と同様に $x_{TL}$ とする。しかし、よどみ領域では流れが壁へ衝突した直後の状況のため、 $x_{TL}$ が極端に小さくなる場合が考えられる。よって、MPS法の解像度に相当する $l_0$ より移動距離が小さい場合は $x_{Re} = l_0$ とする。

よどみ領域の局所レイノルズ数の代表速度 $V_{Re}$ には噴流速度 $V_{inj}$ を採用したいが、一般的な状況で局所物理量から $V_{inj}$ を正確に知ることは不可能であるため採用できない。そこで、ノズル出口からよどみ領域への流れにベルヌーイの定理が成り立っているものとし、噴流速度を以下のように評価することとした。

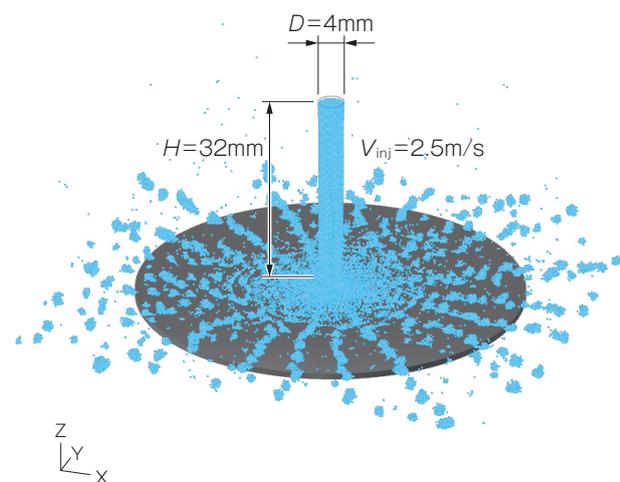
$$\tilde{V}_{inj} = \sqrt{\frac{2}{\rho} P_s + V^2} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\rho$ は流体の密度、 $P_s$ と $V$ はよどみ領域の壁近傍での流体粒子の静圧と速度である。すなわち、よどみ領域では $V_{Re} = \tilde{V}_{inj}$ とする。

## 2.5 衝突噴流実験相関式との比較によるチューニングパラメータの決定と再現性の確認

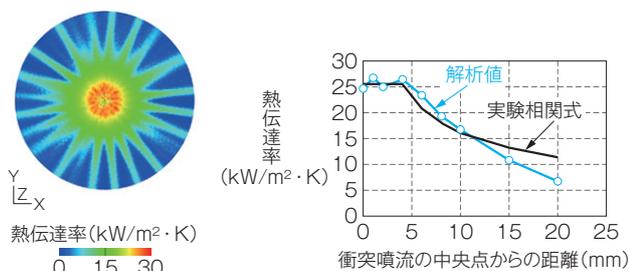
**第1図**に示した系に対する解析を行い、平田&森岡<sup>(2)</sup>の衝突噴流実験相関式とモデル実装した解析とを比較した。流体は常温の水である。**第2図**に衝突噴流解析<sup>(1)</sup>を示す。

**第3図**に熱伝達率分布<sup>(1)</sup>を示す。図の左は、解析から得られた熱伝達率を壁面にマッピングした時の分布である。また、図の右は、熱伝達率を衝突噴流の中央点からの距離ごとに円環平均して求めた熱伝



**第2図 衝突噴流解析<sup>(1)</sup>**

衝突噴流解析の条件と定常流れの結果を示す。



**第3図 熱伝達率分布<sup>(1)</sup>**

衝突噴流解析による壁面への熱伝達率マッピングの結果と衝突噴流の中央点からの距離に対する熱伝達率分布を示す。

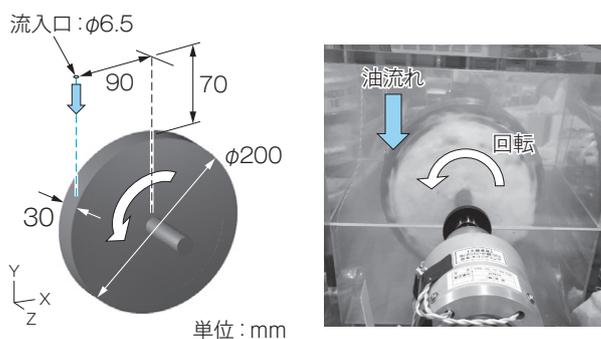
達率分布である。黒線が平田&森岡<sup>(2)</sup>の相関式、丸点付の青線が本稿のモデルによる解析の結果である。チューニングパラメータのセットは、 $(\alpha_{ST}, \beta_{Re2}, \beta_{Re3}) = (0.5, 1.6, 1.3)$  である。解析の誤差は、よどみ領域で5%以下、その外側で十数%である。本モデルは、実験をおおむね再現できていることが分かる。よどみ領域から遠方で誤差が大きくなるのは、流体粒子が放射状に離散的に広がり、流れの再現性が悪化していることが原因と考えられる。

## 3 回転体油冷実験によるモデル妥当性の確認

**第4図**に回転体油冷実験の構成と実験の様子<sup>(1)</sup>を示す。回転体油冷実験で得られる回転体表面の熱伝達率をモデル実装した解析の結果と比較、本モデルの妥当性を確認した。内部にヒータを埋め込んだアルミ製の回転体をポリカーボネート製のケース内に入れ、回転軸上方矢印の位置から冷媒を流量1.5L/minで流下させた。冷媒には、工業用油であるハイランドワイド15 (ENEOS(株))を用いた。回転体外周面と冷媒の温度、及び冷媒が奪った熱量から回転体外周の平均熱伝達率を求めた。

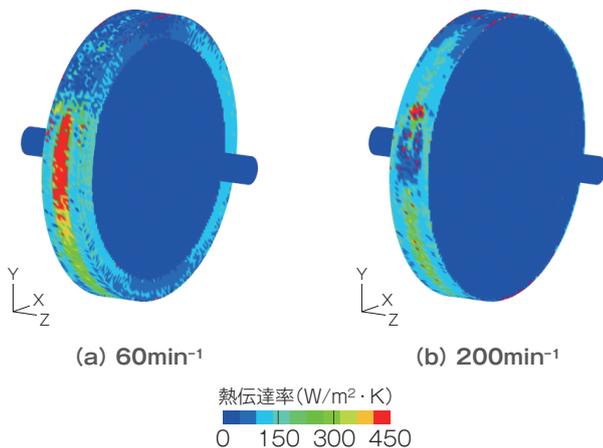
一方、**第5図**に上記の実験を本稿のモデルで解析した時の回転体外周の熱伝達率分布を示す。流れが定常に達した後の熱伝達率分布のスナップショットである。

**第6図**に実験と解析における回転数ごとの回転体外周一周の平均熱伝達率を示す。図中の実線は



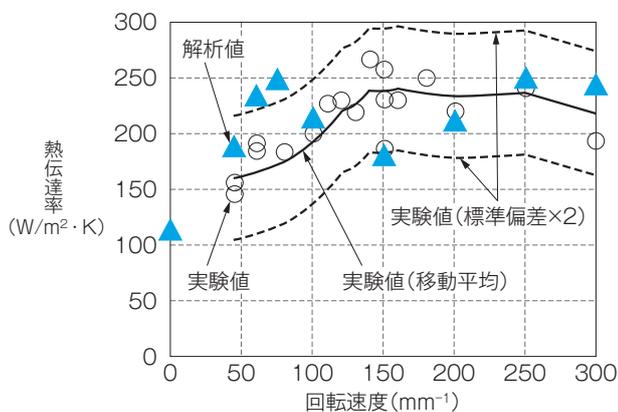
**第4図 回転体油冷実験の構成と実験の様子<sup>(1)</sup>**

回転体油冷実験の構成 (左図) と実験の様子 (右図) を示す。



第5図 回転体油冷実験の解析の熱伝達率分布<sup>(1)</sup>

回転体油冷実験の解析で得られた熱伝達率分布を示す。回転数が(a) 60min<sup>-1</sup>と(b) 200min<sup>-1</sup>の結果である。



第6図 回転数に対する回転体外周の平均熱伝達率<sup>(1)</sup>

実験と解析のそれぞれの回転数に対する回転体外周の平均熱伝達率を示す。

3区間移動平均から求めた平均値，破線は140min<sup>-1</sup>から160min<sup>-1</sup>のデータから求めた標準偏差の2倍(2σ)を表している。解析の平均熱伝達率は，実験と同程度で実験値の2σ以内，また回転数依存の傾向もおおよそ捉えられており，モデルが現象をおおむね模擬できることを確認した。

## 4 むすび

今回，油冷モータ開発における噴流による高温部局所冷却設計で使える熱流体解析手法構築を念頭に，粒子法による流れ解析から被冷却部材表面の局所熱伝達率を算出できる熱伝達率モデルを開発した。

今後は，斜め衝突・壁面移動・油噴流実験相関式比較による更なるモデル最適化を進め，熱伝達率モデルの高精度化を目指す所存である。

本研究は，東京理科大学の山本誠教授，福留功二助教（現 金沢工業大学講師），研究室学生との共同研究の成果であることを記す。また，長年にわたるご助言・ご指導への感謝の意を表する次第である。

- ・ハイランドワイドは，ENEOS(株)の登録商標である。
- ・Particleworksは，プロメテック・ソフトウェア(株)の登録商標である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは，それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《参考文献》

- (1) 佐藤潤一・志村裕毅・福留功二・江尻光良・山本誠：「粒子法熱流体解析のための衝突噴流熱伝達率モデルの開発」，日本計算工学会論文集，Paper No.20210012，2021。
- (2) 平田賢・森岡茂：「衝突水噴流の熱伝達に関する研究」，日本機械学会論文集，42-353，pp.236-243，1976
- (3) 越塚誠一：「粒子法」，丸善，2005
- (4) Zukauskas, A.：「Heat Transfer from Tubes in Crossflow」，Advances in Heat Transfer, 8, pp.93-160, 1972

### 《執筆者紹介》



佐藤 潤一  
Jun'ichi Sato  
基盤技術研究所  
熱流体解析技術の開発及び社内普及に従事



江尻 光良  
Mitsuyoshi Ejiri  
基盤技術研究所  
熱流体解析技術の開発及び社内普及に従事