

ベキ乗則流体の熱伝達

Eric Ricci*, William J. Kelly(アメリカ, ペンシルベニア州ヴィラノバ, ヴィラノバ大学)

混合タンクは、石油、プラスチック、ペイント、紙、化粧品、食品などに関係する粘性流体の製造によく使用されています。混合タンクの流体を機械で攪拌すると、プロセス流体と冷却流体の間で熱伝達が著しく促進されます。同様の熱伝達の問題は1950年代以来、多くの研究者がニュートン流体を対象とし、攪拌タンクの構成をさまざまに変更しながら調査してきました。しかし、ベキ乗則に従う非ニュートン流体の熱伝達については限られた研究しかなされていませんでした。

ヴィラノバ大学で進行中の研究プロジェクトでは、CFDを活用して、攪拌タンクが遷移流の状態にあるときに、ベキ乗則流体のレオロジーが中のヘリカルコイルの局所熱伝達係数にどのような影響を与えているかという点を調べています。FLUENT6.0を使用することにより、タンク内の流体の流れと熱伝達について空間的にさまざまな現象を観察することができました。これは、従来の研究では技法が限られていたため、レオロジープロセスの一般的近似のみに留まっていた。

非ニュートン流体の挙動(Metzner-Otto粘性法の擬塑性指数 n で定義)で既存のヌッセルト数相関関係がレイノルズ数を十分に反映しているかどうかをシミュレーションで調査しました。Metzner-Otto法で記述されているのはインペラーの高せん断領域での流体粘度特性で、実際に熱伝達が起きる膜内の粘度は分かりません。そこで n の依存性をより正確に考慮するため、3通りの相関関係を新たに提案し、それぞれ個別のアプローチでヌッセルト数を予測しました。CFDシミュレーションの計算グリッドをGAMBIT 2.0で分割する際には、インペラー領域内部と熱伝達面近傍に大量のセルを割り当てるといった戦略をとりました。モデルは6面体と4面体のメ



インペラーとコイルの隙間にできた流れパターン。Re=650。



混合タンクの定常温度分布

ッシュからなり、セル数は497,000で、コイル面周辺の境界層にセルを集中させることで(2mm幅に10セル)、局所的な温度と速度の勾配が捉えられるようになりました。非ニュートン流は層流と同様にモデル化し、複数基準座標(MRF)アプローチでエネルギーと運動の離散化された方程式を計算しました。解析領域は、Lightnin

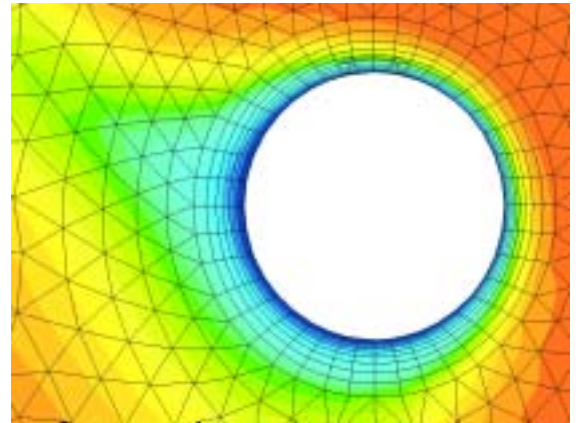
*現勤務先はアメリカインディアナ州ラファイエット, Eli Lilly and Co.

A200型ピッチ角付きブレードタービンで攪拌される，パ
ッフル板付きタンクの1/4です．

上記の相関関係としては，Sieder-Tate型の式($Nu = CRe^xPr^y$)が推奨されています．ここでCは幾何学的定数，xはレイノルズ数の指数で，いずれも擬塑性(n)の関数です．相関によるヌッセルト数の予測値をFLUENTの予測値と比較したところ，その差はnの全範囲で平均8%でした．この差は，流体の擬塑性が増加する(低n)とともにわずかに拡大します．

本研究で，遷移流状態にあるタンクを，ピッチ角付きブレードタービンで攪拌する場合に熱伝達効率を一層高められる(面積の縮小と消費電力の削減)コイルの設計が可能になりました．CFDによる流れパターンを解析し，インペラーの流出角によるタンク内流れの相対方向を把握した結果，上側3本のコイルを移動してインペラーのブルーム(レイノルズ数450～850)に近づけ，直接触れる位置に置くと，熱伝達率が増加するという事実が発見されました．

GAMBITとFLUENTを併用することにより，混合タンクの幾何形状パラメータ(コイル間隔，管のサイズ，コイル束やインペラーの直径，位置など)をさまざまに変更し，これらの追加パラメータが擬塑性流体の熱伝達にどのような影響を与えるかを評価することが可能になりました．その結果，化学プロセスの設計で特定のタンク構成をモデル化する際に，流体と混合条件をさまざまに組み合わせた場合の，タンクの最適な熱伝達を決定できるようになりました．



高密度なグリッドにより捉えられたコイル面の温度境界層