

# B

## 数値シミュレーション

### —熱流動分野への応用—

CAE(Computer-Aided Engineering)の方法と応用に関する前2回の解説<sup>1)2)</sup>に続く第3回として、今回は熱流動分野について紹介する。

熱流動の数値シミュレーションが工学上の問題に広く適用されるようになったのは、 $k-\epsilon$ 乱流モデルという近似理論が確立されて、高レイノルズ数の問題が実用的なメッシュ数で解けるようになったためである。現在では何種類もの汎用ソフトが市販されている。

これらのソフトを使えばだれでも簡単に計算ができるかという点必ずしもそうではない。

その理由は、(1)乱流理論の限界についての理解度 (2)有効な境界条件設定の困難性 (3)熱に関するさまざまな現象の連成の複雑性、などによる。そこで、熱流動の数値シミュレーションの手法と実際の課題についての適用例について、要点を紹介する。

## B-1

### 熱流動問題のためのCAE手法

#### どのような解法を選べばよいか

熱流動計算には層流計算と乱流計算がある。

層流計算は流体力学の基礎方程式をそのまま解くもので、通常の計算環境では、高粘性流体の計算または低流速・小サイズの対象の計算に限定される。

乱流計算は、流速を乱れの成分と平均成分に分け、乱れの成分は乱流エネルギー $k$ と散逸率 $\epsilon$ の2つの変数についてのモデル化された輸送方程式を解いて求めるもので、これを用いて補正された運動方程式より平均成分の流速を求める。

一般に水や空気を対象にする場合、乱流計算をすることになる。

#### 境界条件はどうあたえるのか

熱伝導についてはよく知られた3種類の境界条件のあたえ方がある。それは、

- (1)境界温度を既知とする
- (2)境界を横切る熱流束を既知とする(特に熱流束が0の場合は断熱条件である)
- (3)境界の外部温度と熱伝達率を既知とするである。  
流動の境界条件は境界に垂直な方向については、
  - (1)境界を横切る流速を既知とする(壁面の場合、0をあたえる)
  - (2)境界に垂直な圧力勾配を0とするの2種類がある。  
境界に沿う方向については、
  - (3)境界に沿う圧力を既知とする
  - (4)境界に沿う流速をあたえる(特に壁面に沿う流速を0とする場合、ノースリップ条件という)の2種類がある。開放系をモデル化する場合、境界条件をどの位置に置くのがよいか難しい場合がある。このような場合、試し計算によって大体の傾向をつかんでモデル化をやり直すことになる。

1) 清水泰洋：こべるにくす、Vol.5(1996), Apr., p.5

2) 廣岡栄子：こべるにくす、Vol.5(1996), Oct., p.5

## B-2

### 熱流動問題へのCAE適用例

#### 熱交換器ヘッダー内の流れと流量分配

熱交換器は流体が入り口から均一に流入すると仮定して設計されているが、熱交換器を大型化すると、配管から熱交換器に流体を均一に流入させるためにヘッダーの設計が問題になる。ヘッダーの寸法・形状はそのほかに耐圧や製作法そしてコストを考慮して決定される。

第1~3図はプレートフィン型熱交換器の入り口ヘッダー内の流動を解析し、熱交換器への流量

分配の均一性を確かめた例である。

下部に2つのノズルがついた半円筒形ヘッダーの内部の4分の1流動モデルを第1図に示す。手前および左側が対称面である。上面には熱交換器の流路の代わりとなる短いスリットを接続している。

ヘッダーの入り口条件としては、ノズルにおける流速をあたえた。出口は熱交換器本体の圧力損失をモデル化した分散抵抗体を介して流出させた。

ノズルからの流入速度を $0.53\text{m/s}$ とした場合のヘッダー内速度分布は第2図のようになる。

出口の幅方向の速度分布を描くと、第3図に示すように均一になることがわかる。

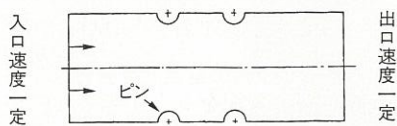
## ピンフィン列を通過する流れと流動抵抗

円柱群を横切る流れの圧力損失は風洞実験によって古くから調べられているが、線径0.2mm程度のピンフィンに適用できる低レイノルズ数領域でピッチが広い場合のデータがない。

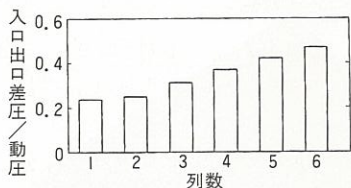
このため数値解析により、正方配置の縦・横のピッチと列数をパラメーターとして、平均オイラー数とレイノルズ数の相関式を求めた。<sup>3)</sup>

第4図に列数2の場合の解析モデルを示す。列数を順次増やした場合の圧力差は第5図のようになる。

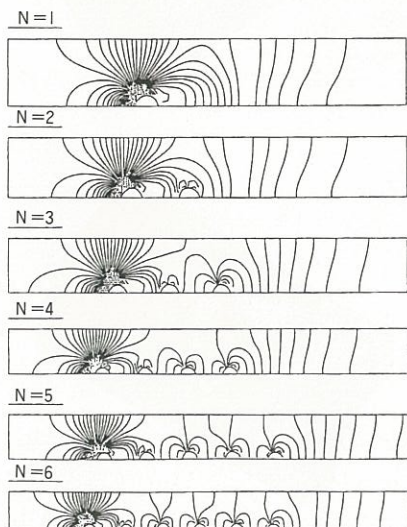
圧力差が列数に比例しない理由は、第6図に示す等圧線パターンの比較でわかるように、図の左からの流れに対し1番目のピン手前で高い圧力上昇を生じるものの、2番目以降のピンは直前のピンの負圧領域に続いているため小さい圧力勾配しか生じないからである。



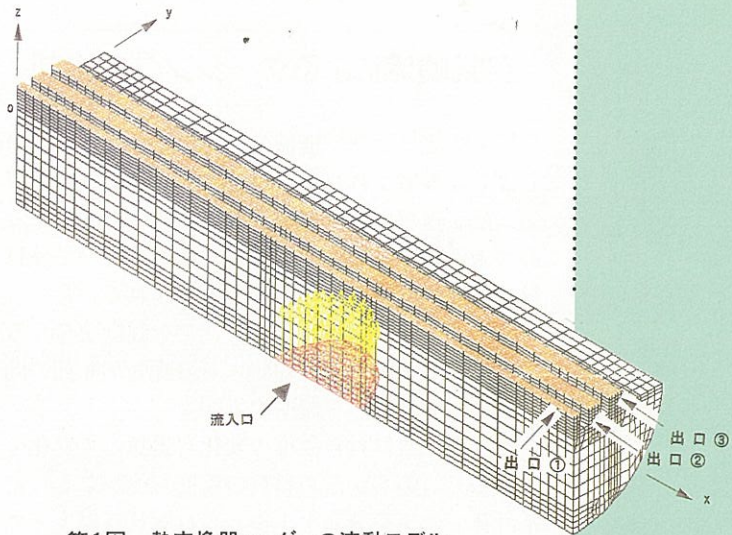
第4図 ピンフィン列を通過する流れのモデル



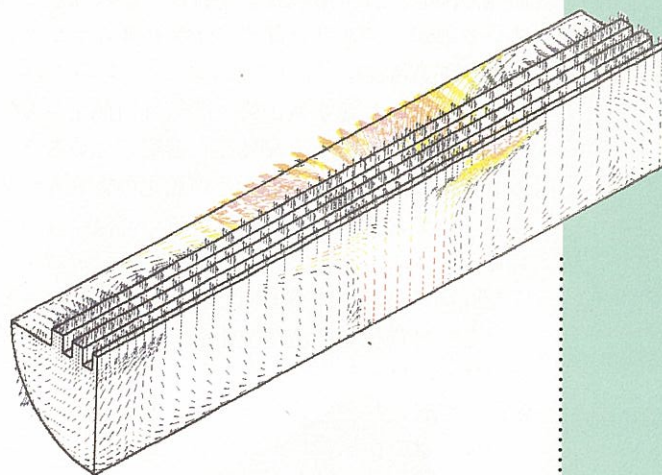
第5図 列数による圧力差の変化



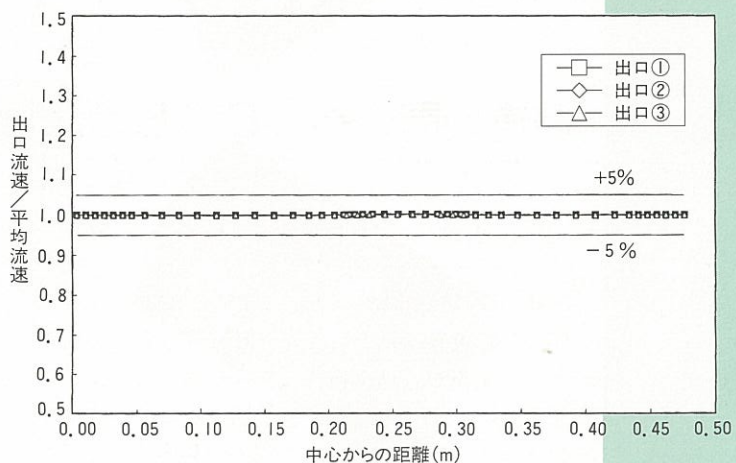
第6図 ピンフィン列による等圧線パターン



第1図 熱交換器ヘッダーの流動モデル



第2図 熱交換器ヘッダーの流速分布



第3図 熱交換器への流量分配

3) 園井英一ほか：R&D 神戸製鋼技報、Vol.42(1992), No. 4, p.19

## 空気噴流によるケーシングの冷却

衝突噴流により、機械の強制冷却を行うことがしばしば考案されるが、噴流の中心からはずれると、熱伝達率、温度差がともに急速に小さくなるので条件設定が難しい。また、機械によっては材料の温度勾配による熱変形が懸念される。

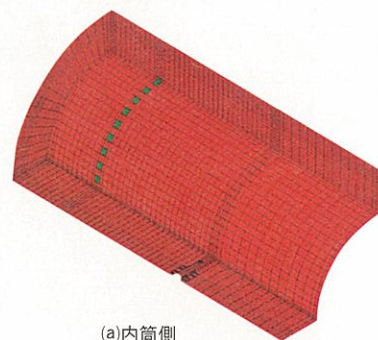
例として2重円筒状ケーシングを強制冷却する目的で、環状部内の冷却ノズルの吹き出し孔の向きを検討したものを説明する。

熱流動現象は材料温度の変化に追従して変化するため、あらかじめ材料の温度レベルごとに定常計算で熱流束分布を求め、これを材料温度と熱ひずみの履歴を計算する際の境界条件として用いた。

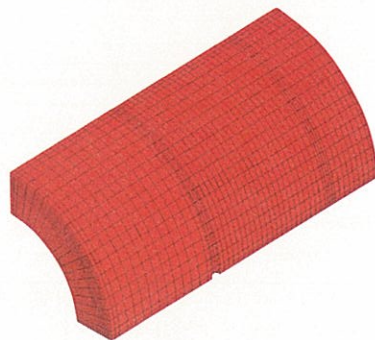
第7図に内部空間のメッシュ分割図を示す。内筒側の図で、青く塗ったます目が一か所に集まっているのがノズル開口部で、1列に並んでいるのが出口である。

常温で流入した空気は第8図の外筒側で見るように、周方向への噴流が外筒に衝突しているところで急激に昇温している。その周辺のよどんでいるところでは空気温度は壁温に近い高温になっている。

第9図の表面熱流束も同じような分布パターンを示し、外筒側の噴流衝突中心付近で高い値を示す。

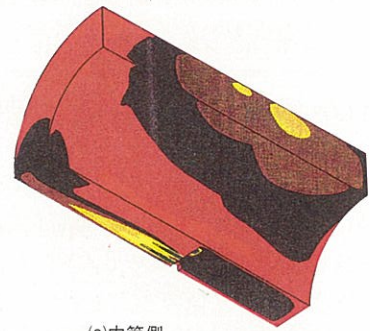


(a)内筒側

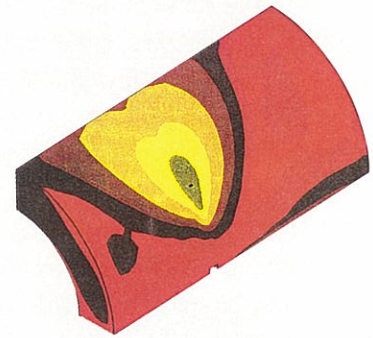


(b)外筒側

第7図 ケーシング内部空間のメッシュ分割

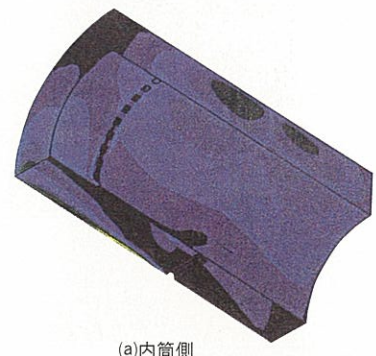


(a)内筒側

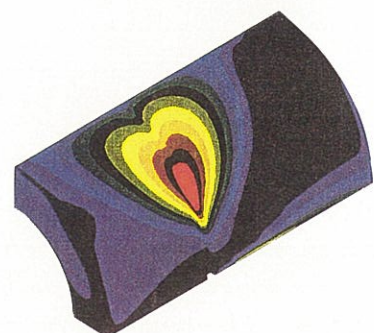


(b)外筒側

第8図 ケーシング内の空気温度分布



(a)内筒側



(b)外筒側

第9図 空気噴流による熱流束の分布

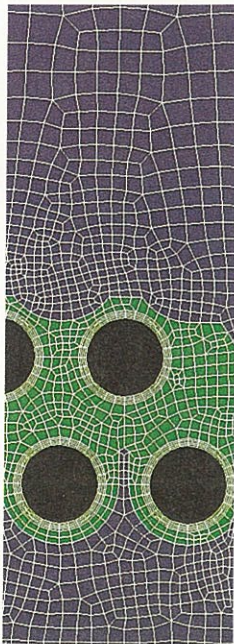
## 給湯器の熱性能解析

給湯器の熱交換器は高性能な熱交換器であるが非常に小型であるため、熱流動シミュレーションを用いてシステム設計を行うことが考えられる。

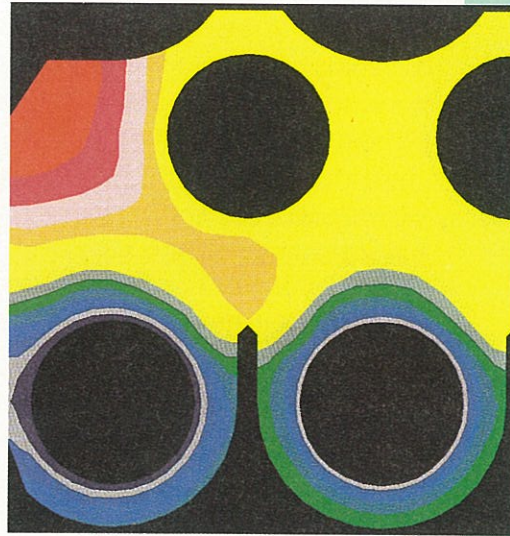
第10図に燃焼ガスのメッシュ分割図を示す。緑色の部分は吸熱板にはさまれた流路を示し、紺色の部分は熱交換器の前後の空間を示す。下辺から上に向かって燃焼ガスが流れ、黒色で示された位置にあるパイプ内の水を加熱する。

数値シミュレーション結果として、第11図に吸熱板の温度分布を、第12図に燃焼ガスの温度分布を示す。

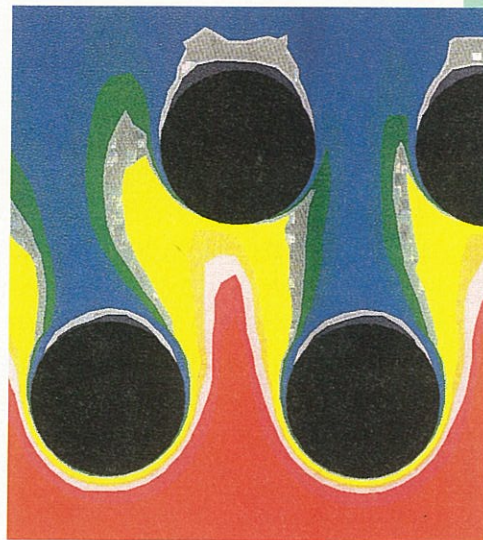
汎用ソフトの場合、水温の変化まで連成して解くのは計算機の負担が大きく困難である。このため専用のシミュレーションソフトの開発も行っている。



第10図 給湯器の燃焼ガスメッシュ分割図



第11図 給湯器の吸熱板温度分布



第12図 給湯器の燃焼ガス温度分布

本報では、熱流動分野へCAEを適用した例を示した。

流れの数値シミュレーションの方法は、実験に代わる方法として広く受け入れられるようになってきた。

しかしながら、現実の機械は熱流動のメカニズムから見ると、コンピューターの容量をはるかに超えた複雑さをもっているため、機械まるごとの熱性能をこの方法で評価するのは一般に不可能で

ある。

ここに示したように、従来の設計手法と組み合わせ、問題に応じた適切な評価項目の選定と解析領域の限定を行うことが重要なポイントである。

これまで3回にわたって、構造、振動音響、熱流動の各分野のCAEの応用例を紹介した。本号で掲載を終了するが、今後さらに広い分野でCAEが利用されていくものと期待している。

〔受託研究本部 CAE研究部 園井英一〕