

金型設計のための CAE 技術開発

メカニクス系工学専攻 講師 橋本 知久

1. 緒言

現在、プラスチック射出成形金型の設計において、CAE 解析が利用されている。主に、金型キャビティへの樹脂充填時の流れ、金型冷却による成形品の温度分布や離型後の成形品のそり変形予測等の解析が行われている。本研究では、最新の計算手法を導入して単一の直交格子上で流体の運動と固体の熱伝導を同時に解く、熱流動の一括シミュレーション手法の開発を行った。

格子生成については、成形品の形状および冷却管の配置は多岐にわたるため、簡便な直交格子上で任意の三次元物体形状を比較的容易に取り扱うことができる仮想流束法⁽¹⁾を採用した。この方法は物体内部と外部の領域を分離してそれぞれの流れ場を計算できるため、管路などの内部流れと物体周りの外部流れを同時に取り扱えるという利点がある。ここでは特に、CAD により作成された三次元形状を直交格子上にマッピングする方法を構築した。流体の運動の数値計算については、非圧縮性粘性流の非定常流れの問題に対して、非圧縮性局所ナビエ・ストークス方程式 (KRLNS)⁽²⁾を用いて反復計算することなく時間精度良く解を求められることを検証してきた⁽³⁻⁵⁾。また、その優位性について従来から用いられている擬似圧縮性解法 (ACM)、格子ボルツマン法、および擬スペクトル法により得られた解と比較検討している。固体の熱伝導の数値計算については、射出成形金型を対象とした場合、その温度境界条件として、金型温度調節器の制御による温度一定の条件や、樹脂から金型への熱伝達に対しては熱伝達係数を設定して熱流束を評価する条件を与え、時々刻々と変化する金型内部の温度分布を時間精度よく求められることを検証した⁽⁶⁾。これらの方法を統合して、熱流動の一括シミュレーション手法を確立した。その際、流体の運動方程式は固体内部の速度を零に与えることで熱伝導方程式と同形に帰着することを利用している。

この熱流動の一括シミュレーション手法は射出成形を対象に開発を進めてきたが、一般的な熱流動現象の問題に適用可能である。

2. 円管内流れの数値シミュレーション

図 1 に計算領域中に配置された円管および流れの条件を示す。直交格子を用いた円管内流れの計算は、図 2 に示すように、円管の表面を微小な三角形要素で分割した後、直交格子の格子線と交差する要素面上の交点を求めることで表面形状を直交格子上にマッピングし、それらの交点で流れの物体面境界条件を満足させている。流れの条件として、円管の直径を代表長さ、流入部における一様流速度を代表速度としてレイノルズ数 $Re=100$ を与えた。直交格子は等間隔格子として円の直径を 33 分割として格子点数 $321 \times 65 \times 65$ とした。得られた計算結果として、KRLNS でマッハ数 $Ma=0.02$ とした場合の等圧力線図を図 3 に示す。また、管長方向の圧力勾配および流出部での速度分布をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。従来法である ACM により得られた解および理論解と定量的に比較した結果、良好に一致することが確認できた。さらに、図 6 に示すような流路の分岐合流や管径が異なる冷却管に適用した結果、図 6 に示す速度ベクトルからわかるように、本手法は複雑形状流路内の流れを計算できることが確認できた。

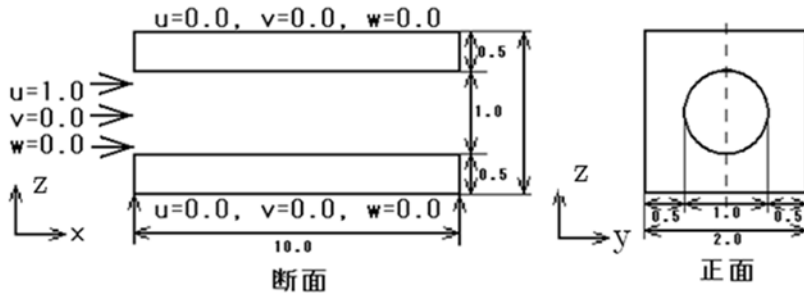


図 1 計算領域中に配置された円管および流れの条件

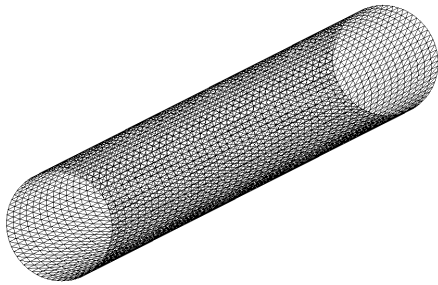


図 2 三角形要素で表現された円管形状

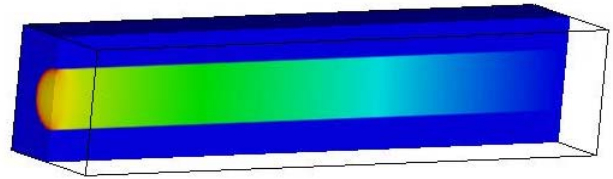


図 3 圧力分布

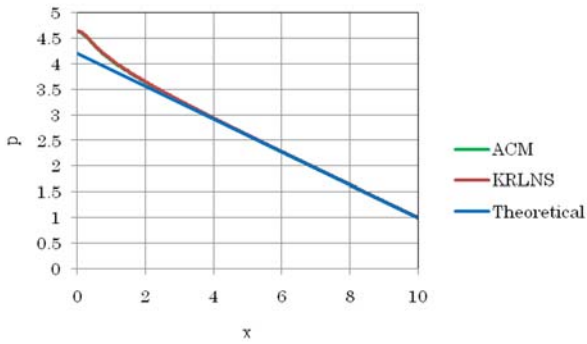


図 4 圧力勾配の比較

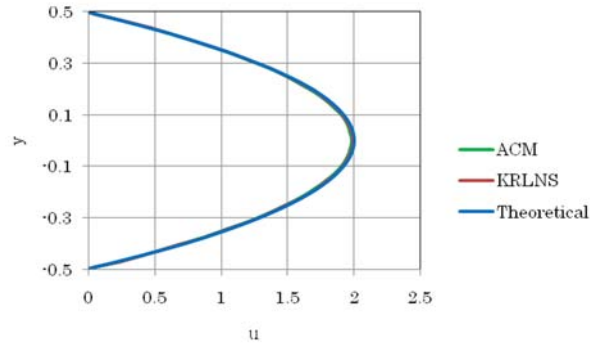


図 5 速度分布の比較

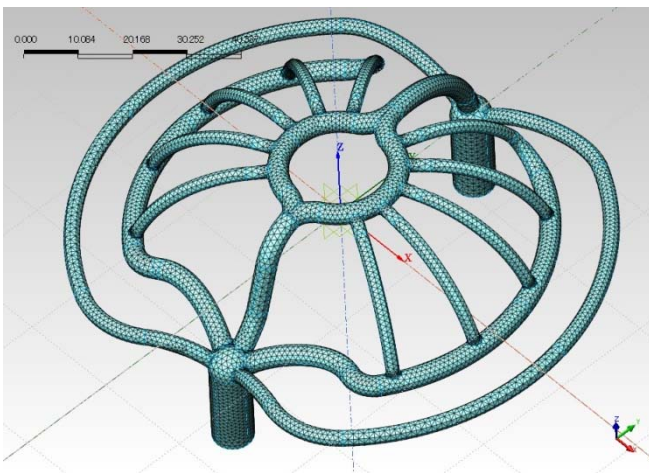


図 6 三角形要素で表現された冷却管形状

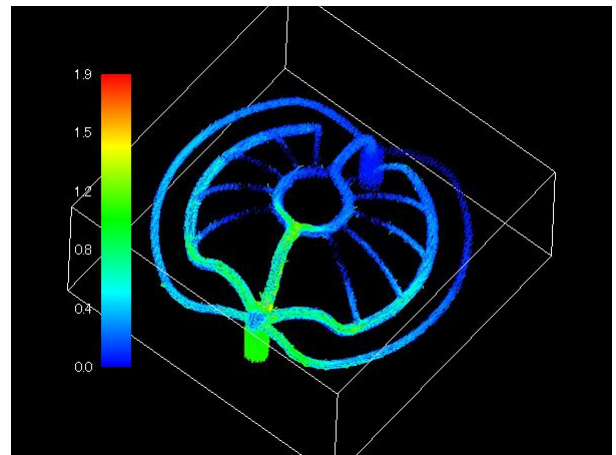


図 7 速度ベクトル

3. 円および球体の非定常熱伝導シミュレーション

非定常熱伝導解析に対しても直交格子上で物体表面を表現し無次元化した熱伝導方程式を用いて計算を行った。円および球体はそれぞれ正方形および立方体の計算領域内の中心位置に配置した。まず、円の場合に用いた直交格子は円の半径 1 の長さを 30 分割して格子点数 91×91 とした。計算は初期における円内部（計算領域全体）の温度を $T=0$ とし、円周上に温度 $T=1$ の流体から設定した熱伝達係数に応じた熱流束を求め、時間経過後の温度分布について理論解と比較検証した。得られた計算結果として、無次元時間 $t=1$ と $t=8$ における温度分布のコンター図を図 8、そのときの円の半径方向の温度分布を理論解と重ねてプロットしたグラフを図 9 に示す。これらよりそれぞれの時間において両者の解がよく一致していることが確認できる。次に、球体の場合についても同様の方法により計算を行った。初期における球体内部（計算領域全体）の温度を $T=1$ 、球面上に温度一定 $T=0$ の境界条件を与え、時間経過後の温度分布について理論解と比較検証した。円の場合の結果と同様に、温度分布のコンター図および無次元時間 $t=0.016$ と $t=0.16$ における球の半径方向の温度分布を理論解と重ねてプロットしたグラフをそれぞれ図 10 および図 11 に示す。これらより球体の内部の温度変化をよく捉えられていることがわかる。

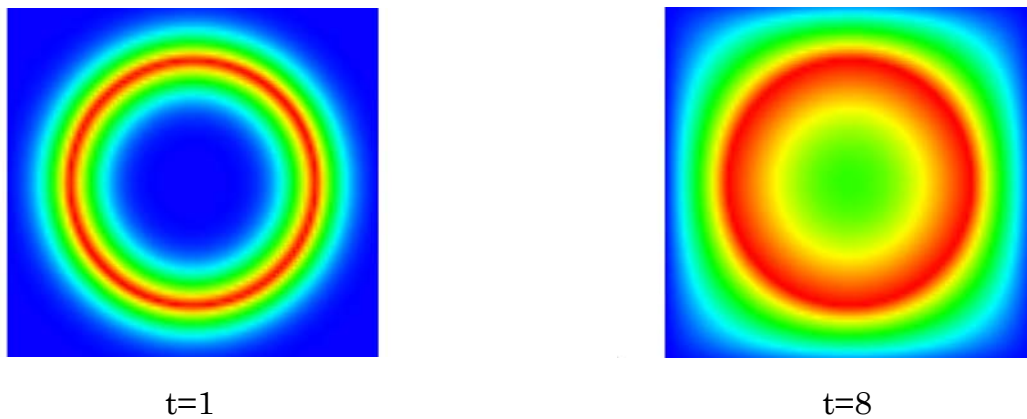


図 8 円の内部の温度分布（円の外部も同時に計算）

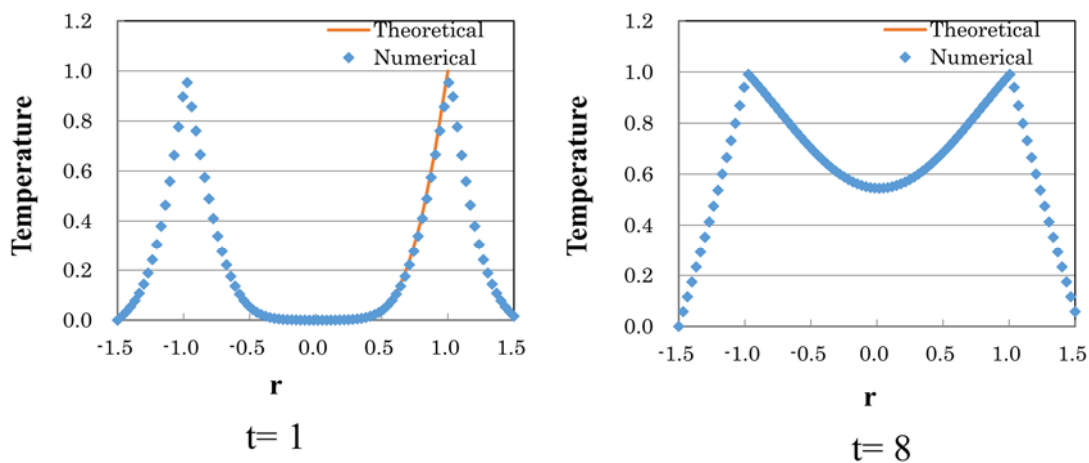


図 9 温度分布の理論解との比較

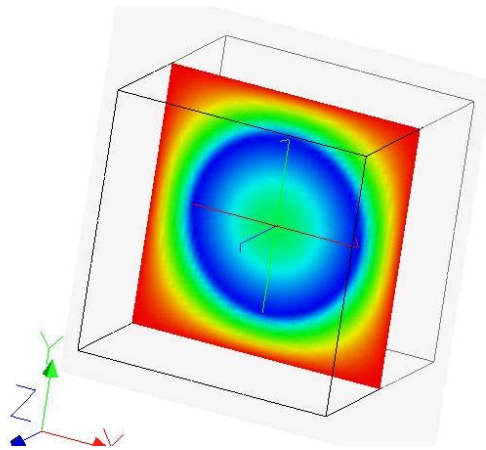


図 10 球体の内部の温度分布（球体の外部も同時に計算）

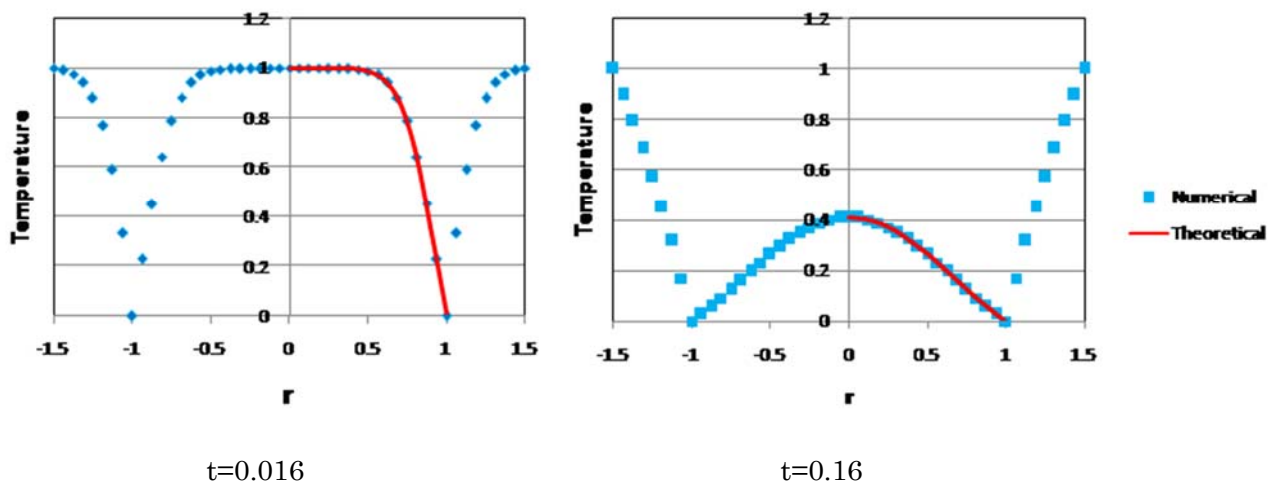


図 11 温度分布の理論解との比較

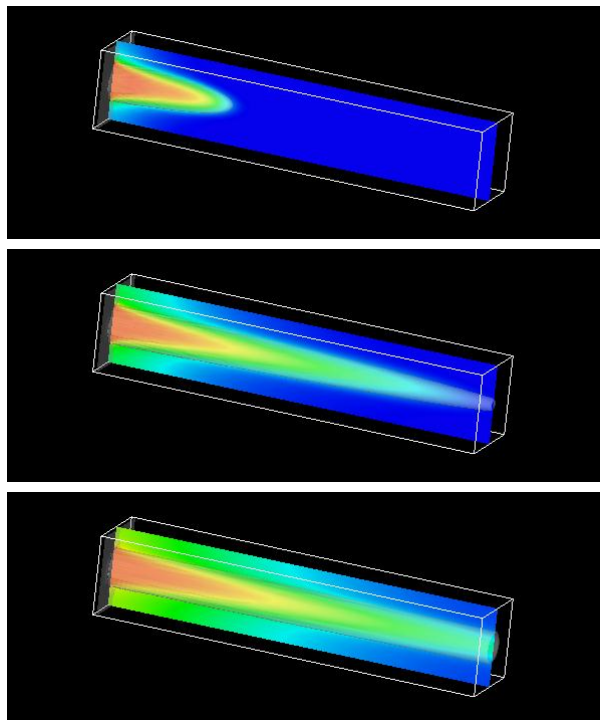


図 12 界面進展による温度分布の変化

4. 熱流動の一括シミュレーション

ここでは2章と3章において、流体の運動および固体の熱伝導の数値計算に対してそれぞれ計算結果の信頼性を確かめられたので、それらを統合して熱流動の一括シミュレーション手法を確立した。その際に界面の進展を捕獲できる手法を組み込んでいる。計算の一例として、円管内への流体充填の結果を図12示す。この図から流れの界面が進展するのに伴い流体の熱が固体に伝わっていく様子が確認できる。

5. 結言

本研究で開発した熱流動の一括シミュレーション手法は、三次元物体形状のCADデータに基づいて格子生成が簡便な直交格子へその形状をマッピングして管路などの内部流れや物体周りの外部流れを同時に計算できる。また、流体の運動と固体の熱伝導を組み合わせることも可能である。さらに界面捕獲法を導入しているため、表面張力を入れた二相流の数値計算を行うことができる。今後は熱流動現象の様々な問題へ適用が期待できる。

6. 参考文献

- (1) 丹野格, 森西晃嗣, 松野謙一, 西田秀利, 仮想的な流束を用いた直交格子系での任意形状物体周りの計算, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 699 (2004), pp. 2689–2696.
- (2) Borok, S., Ansumali, S and Karlin, I. V., Kinetically reduced local Navier-Stokes equations for simulation of incompressible viscous flows, *Physical review E* 76, 066704 (2007).
- (3) 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 非圧縮性局所ナビエ・ストークス方程式と仮想流束法を用いた流路内流れの数値計算, 日本機械学会 2012 年次大会, G010021 (2012), pp. 1–4.
- (4) T. Hashimoto, I. Tanno, Y. Tanaka, K. Morinishi, and N. Satofuka, Simulation of doubly periodic shear layers using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, *Computers and Fluids*, 88, (2013) pp. 715–718.
- (5) T. Hashimoto, I. Tanno, T. Yasuda, Y. Tanaka, K. Morinishi, and N. Satofuka, Higher order numerical simulation of unsteady viscous incompressible flows using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, *Computers and Fluids*, 110, (2015), pp. 108–113.
- (6) 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 直交座標系格子を用いた任意形状に対する非定常熱伝導解析, 日本機械学会 2013 年次大会, G011052 (2013), pp. 1–4.