

Modelica によるドリップ式コーヒーのシステムシミュレーション

植田 恵法^{1†}

¹Modelica ライブラリ勉強会

System simulation of drip coffee using Modelica

Shigenori UEDA^{*†}

^{*}Modelica Library Study Meeting

Keywords: Modelica, MBD, system simulation, coffee

1. はじめに

食品業界や化学業界では様々な液体の輸送、温度管理が行われている。それらの現象は流体輸送、伝熱、化学反応、制御などマルチドメインかつ多工程にわたっており、着目する時間スケールも大きく異なる。充填機や攪拌槽など各工程のシミュレーションは 3D CAE における事例が多く報告されている[1, 2]が、複数の工程を考慮したシステムシミュレーションの事例は少ない。近年では、マルチドメイン、多工程かつ時間スケールの異なる stiff な問題に対して、1D CAE の適用が注目されており、食品や化学プラントでの製造工程にも有効と思われる。

本稿では、代表的なモデリング言語である Modelica を用いて液体の輸送、伝熱現象が含まれるコーヒーのドリップ現象を解析し、その有効性と 1D CAE の考え方を確認する。今回は特にコーヒーの温度に着目し、実測値と解析結果を比較し精度検証を行ったため報告する。

2. コーヒーのドリップ現象

ドリップ式コーヒーは①焙煎、②グラインド、③サーバーへのドリップ、④攪拌、⑤サーバーからカップへの小分けからなる工程を経て喫茶に至る。コーヒーの美味しさを決める重要なファクターの一つとしてコーヒーを飲む際の温度が挙げられる。コーヒーの温度は各工程によって決定されるため、適温に保つためカップを温めるなどの事前準備が重要となる。特にコーヒーが冷めないうちに飲み終わることが余計な酸化を抑え美味しく飲むための必須要件となる。

2.1. 妥当性の検証方法

コーヒーを淹れる工程を熱の移動という観点から分類すると、ドリッパーを通過するコーヒーの熱移動と容器内の液体の熱移動に大別できる。特に熱に影響を与える工程は容器内の液体の熱移動である。そこでお湯をカップへ一気に注いだ際の温度を測定し、容器の熱応答性を表現するモデルを作成し妥当性を検証した。

2.2. 実測と解析条件

2.2.1. 測定器具と解析環境

液体温度や雰囲気温度の測定には K 型熱電対を用いた。解析ツールには OpenModelica1.13.0 を用いた。解析モデルは主に Modelica Standard Library3.2.2(MSL)の Fluid, Media, Thermal パッケージから構成されており、既存ライブラリにはない自然対流熱伝達率の計算などにはオリジナルモデルを作成した。使用した PC の CPU は Intel core-i7-6600U, メモリは 16Gbyte である。

2.2.2. 容器内の液体の熱移動

直径 73mm, 高さ 96mm の陶器製のマグカップにお湯を注いだ時の温度を測定した。温度測定の概要を fig. 1 及び解析モデルを fig. 2 に示す。温度測定時、カップは Al ワイヤラック上に設置した。そのため、接触面

[†] E-mail address of corresponding author: molibstudy@gmail.com

積は非常に小さく解析モデルではカップと接地面との接触熱伝達は考慮していない。

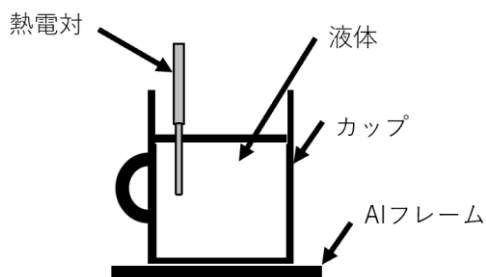


fig. 1 Measurement of water temperature

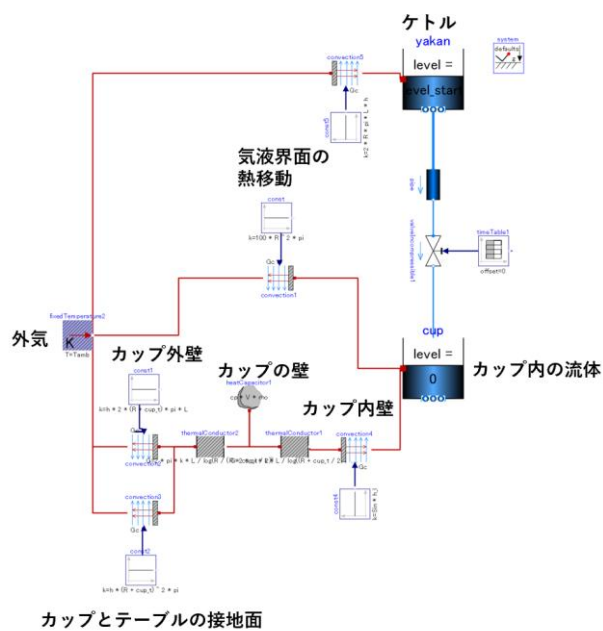


fig. 2 The model of pouring a water of cup

2.3. 実測と解析結果

容器内の液体温度の実測値と解析結果の比較を fig. 3 に示す。

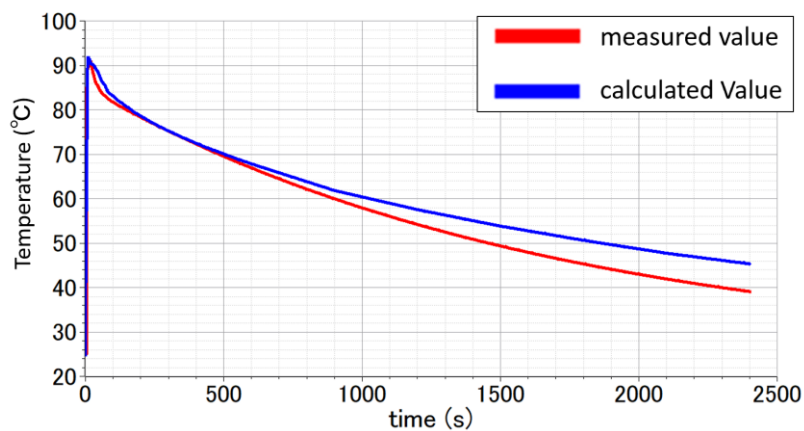


fig. 3 The water temperature of measured and calculated value

実測値と解析結果は良い一致を示した。Modelica コードのコンパイルから計算終了まで 23sec であり、3D CAE に比較し非常に低い計算コストで精度良く計算可能なことが分かる。

3. まとめ

コーヒーのドリップ現象の解析を目標に、まずは注がれるお湯の温度計算を行った。本稿では記載できなかったがドริปパーを通過するコーヒーの温度についても解析モデルを作成している。

ドリップ現象の各工程を 3D CAE で解析しようとする気液界面の波打ちや流体-固体熱連成解析が必要となるところ、MSL によって非常に簡便なモデリングにて十分な精度と短い時間で計算を行うことが出来た。今後は最適化や 3D CAE との連成を見越しつつ、より工業的な現象に対して 1D CAE の適用範囲を広げていく。

参考文献

- [1] サイバネットシステム株式会社. 攪拌槽内部の非定常流れ場解析事, <http://www.cybernet.co.jp/ansys/case/analysis/160.html>, (accessed 2018-11-20).
- [2] サイバネットシステム株式会社. 攪拌槽の攪拌効率を最大化する最適化解析事例. <http://www.cybernet.co.jp/ansys/case/analysis/318.html>, (accessed 2018-11-20).