3R-05

マルチエージェントシミュレーションによる熱伝導方程式の解法

清水　幸紘†　　芳賀　博英‡
同志社大学大学院理工学研究科†　　同志社大学理工学部‡

Solving heat transfer equations using Multi Agent Simulation

1. はじめに

近年，コンピュータ上に人工社会を生成し，実際の社会現象や実際に起こりうる社会現象をシミュレーションすることで，その原因の発見や問題を解決する手法としてマルチエージェントシミュレーション（Multi Agent Simulation，以下 MAS）が注目されている．それはエージェントを社会の構成要素とし，エージェント間の相互作用を記述することで社会現象をシミュレーションするによって解析する試みである．また，MAS はあるルールに従って自律的に行動する「エージェント」と，エージェントが行動する「空間」の 2 つで構成されている．MAS の特徴は，エージェントの相互作用によってボトムアップアプローチでシステム全体の流れが創発され，その流れがエージェントにフィードバックされ，またその流れが個々のエージェントの行動を決定してく循環を持つ．しかし，MAS は社会現象を主な対象としており，自然現象を構成する微分方程式などの数値計算には利用されていない．そこで本研究では，熱伝導方程式の数値計算を対象に MAS による解析を行った．また，MAS ではエージェント数の増加に伴い実行時間が増加するため，並列計算のプラットフォームである OpenCL(Open Computing Language)の利用を試みた．

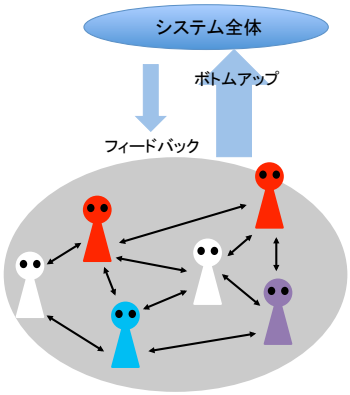

図 1　MAS の概要図

2. 熱伝導方程式

熱伝導方程式とは，熱伝導が生じている物質の密度の変動を記述する放物型偏微分方程式である．1 次元熱伝導方程式は，以下のように示される．ただし，C は熱量で，x は空間である．

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \left(k = \frac{(\Delta x)^2}{2\Delta t} > 0\right) \tag{1}$$

ここで，式(1)を差分化すると以下の式が導出される．

$$C(x, t+\Delta t) = C(x,t) + \left(k\frac{C(x+\Delta x,t)-2C(x,t)+C(x-\Delta x,t))}{\Delta x^2}\right)\Delta t \tag{2}$$

式(1)，(2)より

$$C(x, t+\Delta t) = \frac{1}{2}C(x+\Delta x, t) + \frac{1}{2}C(x-\Delta x, t) \tag{3}$$

式(3)より次のステップにおける熱量は現在における左右の熱量の平均値をとることで求めることができる．

3. MAS による熱伝導方程式モデルの設計

MAS ではモデリング法として，移動するエージェントと固定的なエージェントでのモデル化が可能である．熱伝導において，図 2 のように金属をセル状に断片し，各セルをエージェントとみなすことで MAS によるシミュレーションを行う．各エージェントの属性として，空間と熱量を定義する．式(3)より空間 x，時刻 t+Δt におけるエージェントの熱量 C(x,t+Δt)は時刻 t における左右のエージェントの熱量から導出することができる．つまり，微分方程式を作らずに物理現象をそのままモデリングすることができる．MAS によるモデル化の特徴は，熱伝導方程式を導く必要はなく，物理的挙動に即した局所近傍則と遷移則だけを用いるという点が挙げられる．つまり，トップダウンアプローチである支配方程式から解を求めるのではなく，近傍とのエージェントの相互作用により全体の現象を再現することができる．

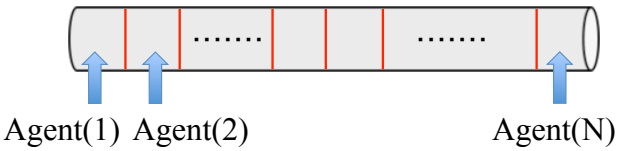

図 2　1 次元熱伝導モデルの概要図

また本研究では，熱移流現象と熱伝導を考慮したシミュレーションも行った．移流拡散とは，ある種の濃度分布が流れを受けながら拡散する現象である．1 次元熱移流伝導方程式は，以下のように示される．ただし，D は拡散係数，V は移流速度である．

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V\frac{\partial C}{\partial x} \tag{4}$$

本研究では熱移流伝導方程式を熱移流と熱伝導の 2 つに分離してモデル化した．熱移流現象を以下のように定義した．

$$C(x, t+\Delta t) = C(x-\Delta x, t) \tag{5}$$

また，熱伝導を以下のように定義した．ただし，α は移動確率である．

Solving heat transfer equations using Multi Agent Simulation
†Yukihiro Shimizu　Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University
‡Hirohide Haga　Department of Science and Engineering, Doshisha University

$$C(x,t+\Delta t)=\alpha C(x+\Delta x,t)+(1-2\alpha)C(x,t)+\alpha C(x-\Delta x,t) \quad (6)$$

式(5)，式(6)より以下の式が導出される．

$$C(x,t+\Delta t)=\alpha C(x,t)+(1-2\alpha)C(x-\Delta x,t)+\alpha C(x-2\Delta x,t) \quad (7)$$

4. OpenCL の概要

本研究では，MAS のエージェント数増加に伴う，実行時間の増加という問題点を解決するため，OpenCL の利用を試みた．OpenCL は Khronos Group によって策定されている並列コンピューティングのためのフレームワークである．OpenCL は GPU コンピューティングを実現する CUDA や DirectCompute と異なり，並列環境を GPU だけでなく，あらゆるプロセッサで動作することができるため，ハードウェアへの依存性が低く，汎用性がある．OpenCL のプログラムはホストとデバイスに分割され，OpenCL デバイスのカーネルプログラムで並列処理が行われる．

MAS のプログラムはエージェント生成部とエージェント行動部に分けることができる．OpenCL を用いたプログラムではホストプログラムで，エージェントの生成と OpenCL に関する処理を記述し，カーネルプログラムで並列対象であるエージェント行動部のプログラムを記述した．

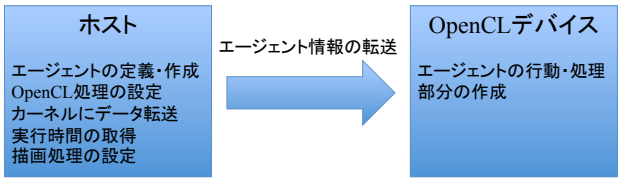

図 3　OpenCL プログラムの概要図

5. 実装

熱伝導方程式をエージェント数 1000，ステップ数 100，100000 で実行した．また，空間の左端を 100 度，右側を 0 度に固定した．その時における熱伝導の様子を図 4 に示す．図 4 よりステップ数が増加するにあたって，熱が左側から右側に伝導していることがわかる．

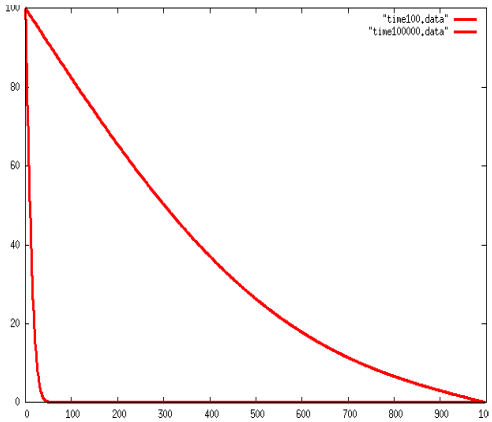

図 3　熱伝導

また，熱移流伝導方程式をエージェント数 50 で実装した．ステップ数 0，7 におけるシミュレーションの様子を図 5，6 に示す．

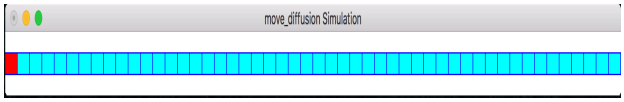

図 5　熱移流伝導（t=0）

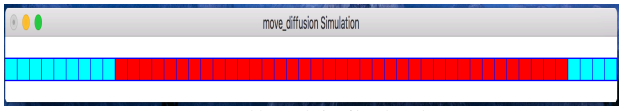

図 6　熱移流伝導（t=7）

本研究では，エージェント数増加に伴う実行時間の増加という問題点を改善するため，並列プラットフォームである OpenCL を用いてエージェント処理部分の並列処理を行った．表 1 に熱伝導方程式における CPU 単一と OpenCL による実行時間の比較を示す．

表 1　CPU と OpenCL の実行時間(s)

	1000step		10000step		100000step	
Agent	CPU	OpenCL	CPU	OpenCL	CPU	OpenCL
1×10^3	0.021	0.127	0.075	0.090	0.708	0.480
5×10^3	0.048	0.056	0.395	0.169	3.865	0.909
1×10^4	0.083	0.195	0.798	0.298	8.144	1.559
1×10^5	0.752	0.354	7.857	1.554	83.890	15.331
5×10^5	3.955	0.900	39.947	7.486	401.70	18.078

表 1 よりエージェント数とステップ数が増加すると CPU 単一で実行するより，OpenCL を用いた方が実行時間は短いことがわかる．エージェント数とステップ数が少ない場合は，OpenCL との速度はあまり変わらないことがわかる．このため，エージェント数とステップ数がある一定値以下であると OpenCL を用いる必要はない．しかし，大規模かつステップ数が大きい場合は，OpenCL を用いるべきであるとわかる．エージェント数の増加に伴い，OpenCL の実行時間が増加しているのは，CPU からデバイスに転送するエージェント情報の増加によるものであると考えられる．

6. 今後の課題

本研究では，放物型偏微分方程式である熱伝導方程式と双曲線型偏微分方程式である移流方程式を組み合わせた熱移流伝導方程式を対象にし，MAS によるモデル化を行った．今回は，1 次元モデルを対象にしているため，次元数を増やして実装する必要がある．また，今後は波動方程式を対象にし，物理モデルを作成し，MAS による解析を行いたいと考えている．

参考文献

1) 大内東，山本雅人，川村秀憲：マルチエージェントシステムの基礎と応用，コロナ社(2002)．
2) 第 6 章　拡散方程式, http://www2.kobe-u.ac.jp/~iwayama/teach/kisoIII/2011/chap6.pdf
3) 鳥羽康介，板垣靖，森下信：セルオートマトンによる移流拡散方程式のモデル化, http://www.jsme.or.jp/monograph/dmc/2001/data/pdf/228.pdf
4) Cliff Woolley: Introduction to OpenCL,http://www.cc.gatech.edu/~vetter/keeneland/tutorial-2011-04-14/06-intro_to_opencl.pdf