

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560159

研究課題名（和文） ボルツマン方程式のモンテカルロ解析におけるノイズ低減スキームの構築に関する研究

研究課題名（英文） Study on noise reduction scheme in the Monte Carlo simulation for Boltzmann equation

研究代表者

松本 裕昭 (MATSUMOTO HIROAKI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10251753

研究成果の概要（和文）：本研究では Markov 過程を DSMC 法に導入し、DSMC 法における統計誤差を小さくする試みを行なった。本手法を 2 次元の Couette 流れや Cavity 流れに適用し、DSMC 法の結果と比較した。統計的な誤差は小さくすることに成功したが、DSMC 法の解と本手法の間に多少の差異が見られた。DSMC 法におけるノイズ低減法を確立させるためには、更に特別なノイズ低減法を考慮する必要があるが、これらの知見は今後の発展につながる重要な成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A noise reduction scheme based on the Markov statistical process was introduced to the direct simulation Monte Carlo method, and then applied to the two dimensional Couette flow and cavity flow in the low speed and low Knudsen number rarefied gas fields. It was confirmed that the noise reduction scheme was reduced the statistical errors faster than those of DSMC simulation. However small discrepancies were observed in the profiles of the flow structures such as velocity and temperature distributions between the noise reduction scheme and DSMC method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、流体工学

キーワード：分子流体力学、希薄気体流れ、ボルツマン方程式、モンテカルロ解析、ノイズ低減

1. 研究開始当初の背景

真空環境や、ミクロスケール技術を用いる分野の気体流れは、系の代表長さが分子の平均自由行程と同程度のオーダーとなり、ボルツマン方程式を基礎とした分子レベルからの

解析が必要となる。現在、ボルツマン方程式を解析する技法として、工学的な諸問題への柔軟な対応性と計算精度の見地から、直接シミュレーション・モンテカルロ (DSMC) 法が有力である。DSMC 法は現実に存在する膨大な数

の分子から抽出した数百～数万の模擬分子の挙動を確率・統計的に計算することで、巨視的物理量を計算する点に特徴があるが、その物理量には統計的な誤差（ノイズ）が含まれる。そのため、速度、温度、密度等のマクロな物理量の絶対値や変化量が統計的なノイズに比べ小さい場合や、非定常流れの解析には膨大な計算が必要となる。従って、工学的な観点から、特に低速度や希薄度の小さな流れ場の解析に置いてノイズを低減させる効率の良い計算技法の構築が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、DSMC 法の特徴を活かしつつ、ノイズを低減させるスキームを構築し、特に低速度で希薄度の小さな流れ場に適した解析技法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

流れ場は、近似的に局所平衡状態にあると仮定し、Maxwell の速度分布関数をあてはめて、その値を重み係数とすることで、ノイズの低減の可能性を探る他、Markov 過程の考え方を導入して分子を生成・消去する試みを行ないノイズ低減の効果を探る。これらの技法を 2 次元の単純な流れ場に適用し、による解析結果と比較し、計算手法の性能を検討する。

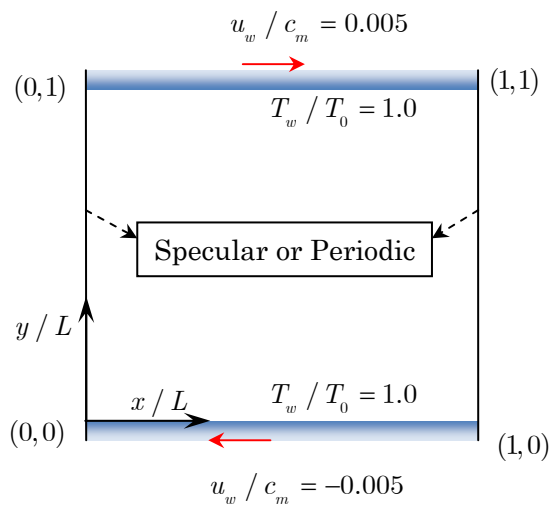


図 1. 計算対象領域

計算対象は、図 1 に示すような 2 次元矩形領域とする。計算領域を $0.0 \leq x/L \leq 1.0$, $0.0 \leq y/L \leq 1.0$ に取り $N_x=N_y=50$ の等間隔セルに分割する。ここに L は計算領域の幅を表す。上下の壁面には、それぞれ速度 $u_w/c_m=0.005$, $u_w/c_m=-0.005$, 温度 $T_w/T_0=1.0$ の完全拡散反射壁を仮定する。ここに c_m は基準温度 T_0 における分子の最大確率速度を表す。図の左右の境界は、周期境界または鏡面反射壁を仮定する。周期境界の場合は Couette 流れとなり、鏡面反射壁の場合は Cavity 流れとなる。流れ場の Knudsen 数を $Kn=0.1$ に固定し、初

期に T_0 の平衡状態にある N 個の分子を一様に配置し、分子の移動、壁面との干渉、分子間衝突を計算する。流れ場が十分に発達した後、分子情報を時間平均することでマクロな物理量を計算する。その際、初期分子数や時間平均の長さとの関係性を調べ、ノイズ低減スキームの性能を検討する。

4. 研究成果

代表例として、図 2(a), (b) に Cavity 流れについて、DSMC 法と Noise reduction スキームを導入した DSMC 法 の速度ベクトル図をそれぞれ示す。計算に用いた模擬分子数は 1 セルあたり平均 1000 個としている。また、無次元時刻 100~250 の時間平均の結果を示している。図より、いずれも Cavity 内に渦流れが生じているのが確認できる。また Noise reduction DSMC 法の方が DSMC 法よりも統計誤差が小さく、滑らかな解になっていることが確認できる。

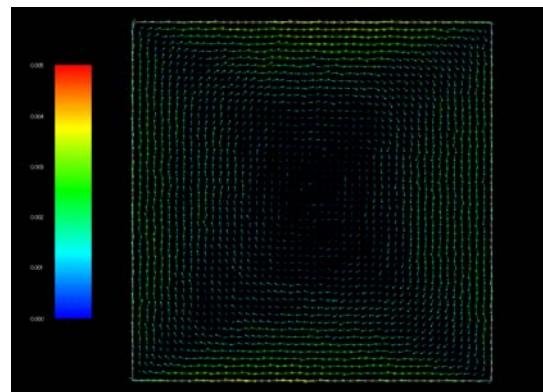


図 2(a) Cavity 内の速度ベクトル (DSMC)

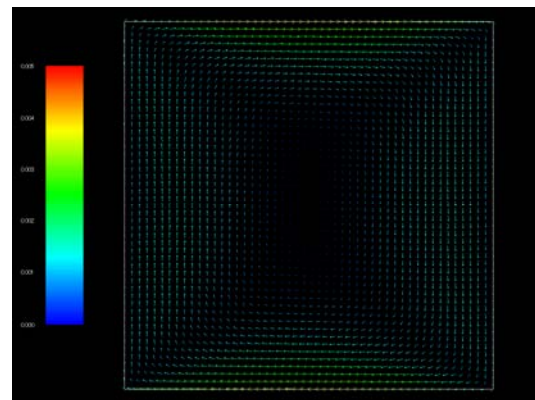


図 2(b) Cavity 内の速度ベクトル (Noise reduction DSMC)

解の滑らかさを見るために、図 3 に、Cavity の中央断面 ($x/L=0.5$) における x 方向速度分布について、DSMC と Noise reduction DSMC の比較を示す。

図より、Noise reduction DSMC の方が、統計誤差が小さくなっていることが確認され、本手法がノイズを低減させることに効果があ

ることがわかる。しかし、速度分布の形状に若干差異が生じていることも確認できる。

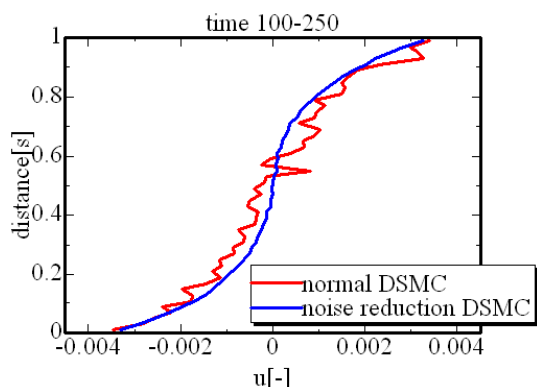


図3 中央断面($x=0$)における、 x 方向速度分布の比較

次に、計算領域に用いる模擬分子数がノイズに及ぼす影響について調べた。

図4に、初期に配置する分子が1セルあたり10個、100個、1000個の場合について、Cavityの中央断面($x/l=0.5$)における x 方向速度分布を示す。(a)がDSMC、(b)がnoise reduction DSMCの結果である。図からわかるように、1セルあたりの分子数を増大させるとノイズが減少する傾向にあるが、特にNoise reduction DSMCにノイズ低減効果が大きくなっていることがわかる。以上より、本解析手法は、模擬分子数がそれほど多く無くとも、ノイズを低減させることが可能であり、低速領域の希薄気体流れの解析に有効な技法のひとつになる可能性があると考えられる。

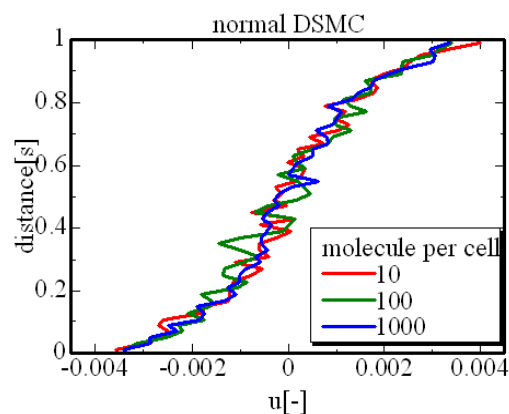


図4(a) 初期に投入する模擬分子数とノイズの関係 (DSMC)

ただし、DSMC法の解析結果と若干の相違が見られ、この原因については今後更に検討を要すると思われる。

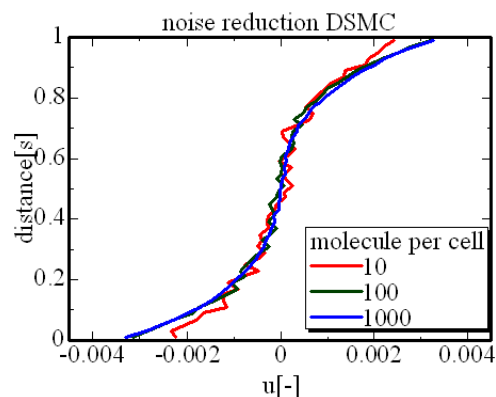


図4(b) 初期に投入する模擬分子数とノイズの関係 (noise reduction DSMC)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Hiroaki Matsumoto and Kyoshiro Kanamori, Monte Carlo Simulation of Rarefied Gas Flow induced by Wall Temperature Gradient, Rarefied Gas Dynamics, 査読有、AIP CONF. PROC. 1501, 2012, 6661-6666.
- ② Hiroaki Matsumoto, Monte Carlo Simulation of Hypersonic Rarefied Gas Flow using Rotationally and Vibrationally Inelastic Cross Section Models, Rarefied Gas Dynamics, 査読有、AIP CONF. PROC. 1333, 2011, 1245-1250.

[学会発表] (計4件)

- ① 松本 裕昭、金森 恭士郎、非一様な壁面温度に誘起される自由分子流れのモンテカルロシミュレーション、2012年9月17日、高知大学。
- ② 松本 裕昭、金森 恭士郎、壁面温度勾配に誘起される希薄気体流れのモンテカルロシミュレーション、日本機械学会、2012年度年次大会、2012年9月10日、金沢大学。
- ③ 松本 裕昭、佐宗 純、Double Cone 形状物体周りの超音速希薄気体流れのモンテカルロシミュレーション、日本機械学会 2011年度年次大会、2011年9月14日、東京工業大学。
- ④ 松本 裕昭、超音速希薄気体中の熱的非平衡現象のモンテカルロシミュレーション、日本流体力学会 2011年会、2011年9月9日、首都大学東京。

[図書] (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 裕昭 (MATSUMOTO HIROAKI)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号：10251753

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：