

## 回転流体に対する分子粘性係数のモンテカルロ計算

## Monte Carlo Simulation for Molecular Viscosity Coefficients of Rotating Gases

# 小山 亜希子[1], 林 英二[1], 松田 卓也[2]  
# Akiko Koyama[1], Eiji Hayashi[2], Takuya Matsuda[3]

[1] 神戸大・自然, [2] 神大・理・地球惑星

[1] Kobe-Univ, [2] Earth and Planetary Sci., Kobe Univ, [3] Earth and Planetary Sci., Kobe Univ.

降着円盤の標準モデルでは、乱流粘性によって角運動量が輸送されるとされている。通常、乱流粘性は非回転ガスの場合を考えた分子粘性の公式で代用されている。回転流体を考えた場合、粘性は非等方的になり、粘性係数に異方性が現れるはずである。また分子の平均自由行程が降着円盤の厚み程度になれば、粘性係数は非常に小さくなる。本研究では、モンテカルロ直接シミュレーションで様々な回転のケースを考え、分子粘性係数と熱伝導率をクヌッセン数（気体分子の平均自由行程/系の典型的サイズ）の関数として求めた。結果、クヌッセン数の増大に伴って粘性係数は小さくなり、温度勾配に垂直な方向にも熱が流れることを確認した。

降着円盤の角運動量輸送の理論に用いられる分子粘性の公式と粘性係数について検討する。とくに回転気体における粘性係数をモンテカルロ直接シミュレーションから求め、解析的理論値と比較する。

降着円盤の標準モデルにおいては、降着円盤は乱流状態にあり、乱流粘性により、角運動量が内から外に向けて輸送されると考えられている。ケプラー運動する降着円盤が、流体力学的に不安定で乱流状態にあるかどうかは、議論の分かれるところであるが、ここではそれは認めることにする。乱流粘性がどのような公式に従うかは分かっていないので、通常の議論では分子粘性の公式をそのまま用いる。ただ粘性係数を分子粘性よりは、遙かに大きく取り、動粘性係数は乱流渦の典型的サイズと音速 $c$ の積に適当な係数をかけたものとしている。これが有名な

円盤モデルである。しかし、通常用いられる粘性公式は、非回転ガスに対するものであり、回転の効果は考慮されていない。これは降着円盤の分野では、こういった知識が不足しているからである。いっぽう惑星リングの分野では、回転円盤における粘性公式は徹底的に研究されている。それによると、粘性公式は Boltzmann 方程式から Chapman-Enskog 展開を行って導かれる。剛体回転している気体に対する場合、粘性は非等方的になる。また粘性係数の大きさは、分子の平均自由行程により異なる。平均自由行程が系の典型的なサイズ、たとえば降着円盤の厚みに近いとき、粘性係数は非常に小さくなる。また非等方性の影響も大きくなる。回転流体がケプラー回転のような微分回転を行っている場合は、解析的扱いはきわめて困難になる。基本となる気体の速度分布関数がマクスウエル分布ではなくなるからである。この場合は、数値計算によらなければならない。

本論文では、気体の分子粘性係数を非回転気体、剛体回転気体、ケプラー回転気体の場合に合わせて、モンテカルロ直接シミュレーションの手法で求める。モンテカルロ直接シミュレーションの手法は Bird により開発されたもので、Boltzmann 方程式を直接に解くことなく、希薄気体の運動を計算するものである。ここで希薄気体とはクヌッセン数  $Kn$  (気体分子の平均自由行程/系の典型的サイズ) が 1 に近い場合を言う。円盤モデルは、乱流要素を気体分子と考えるので、 $Kn$  が 1 に近い場合は希薄気体に相当する。回転気体の場合、回転系の上で計算する。ここでは、遠心力、コリオリ力が現れる。気体分子の運動は 3 次元的であるが、変数は 1 次元のみに変化するとする。つまり降着円盤の場合は厚みを無視し、物理量は動径変数にのみ依存すると仮定し、周方向や鉛直方向には依存しないと仮定する。計算領域を適当なセルに分割し(たとえば 40)、そこに粒子をたくさん(たとえば 40-100)ランダムに配置する。これらの粒子の初期速度分布は局所的マクスウエル分布と仮定する。各粒子は力の影響を受け、粒子間衝突の時以外は、ニュートンの運動方程式に従って運動する。1 ステップ進んだ後に、粒子は衝突確率に従って衝突する。衝突は 2 粒子の運動量とエネルギーを保存するように行い、衝突後の運動方向はランダムであると仮定する。モンテカルロ直接法では、分子動力学と異なって、衝突の詳細を計算しないことが特徴である。これは物理的には、分子をビリヤードボールのようなものと仮定していることに等しい。なお本研究では、衝突過程に最大衝突数法を用いた。

この研究は降着円盤に対して妥当であるばかりでなく、惑星リングの場合にもっとも適合する。ここでは気体分子の代わりに、氷の玉が乱雑運動をしている。ここで特徴的なことは微分回転と、非弾性衝突である。本研究では、それらの場合も取り扱う。結果は、 $Kn$  が増大するとともに、理論で予想されるように、粘性係数は大きく抑制される。また速度勾配と垂直な方向にもストレスが見いだされた。また熱伝導係数も求める。熱伝導は回転のせいで、温度勾配に垂直な方向にも、熱が流れることが見いだされた。これらは回転の典型的な効果である。