

円柱回りの極超音速窒素分子希薄流のモンテカルロ 直接シミュレーション

古浦勝久 (航技研)、高平幹成 (大興電子通信)

Monte Carlo Direct Simulation of Hypersonic Rarefied Nitrogen Flow
over a Circular Cylinder

by

Katsuhisa Koura (National Aerospace Laboratory)

and

Mikinari Takahira (Daiko Densi Tsushin)

ABSTRACT

The Monte Carlo direct simulation of the hypersonic rarefied nitrogen flow over a circular cylinder is implemented using the recently proposed elastic and rotationally and vibrationally inelastic cross sections. The effects of the vibrational excitation, molecular number per collision cell, and truncation of the number of vibrational level step are briefly discussed.

1 はじめに

希薄実在気体モンテカルロ・シミュレーションのための高精度・高効率分子モデルの開発研究を進めている。これらの分子モデルの検証の一環として、最近提案した弾性衝突(VSS)モデル¹⁾、回転非弾性衝突(SICS)モデル²⁾、及び振動非弾性衝突(EITFITS-LCCS、TSS-LCCS)モデル³⁾を円柱回りの極超音速窒素分子希薄流のモンテカルロ直接シミュレーションに適用した。本報告では、振動励起の影響及び衝突セル当たりの分子数と振動遷移ステップ数の影響を検討する。種々の(弾性・非弾性)衝突過程を伴う希薄実在気体に対する分子衝突シミュレーション手法はNull-Collision技法⁴⁾を改良したImproved Null-Collision技法³⁾が有用である。

2 円柱回りの極超音速窒素分子希薄流

2.1 衝突セル

円柱回りの矩形計算領域を巨視的物理量の計算のための小さな矩形データセルに分割する。時刻 t から $t + \Delta t$ までの分子衝突シミュレーションのための衝突セルは、時刻 t においてデータセルを分子数適合分割法により分割して自動的に生成する。すなわち、各衝突セルの分子数 ΔN が与えら

れた数にほぼ等しくなるように、時刻 t でのデータセルの分子数に対応してデータセルを幾つかの矩形衝突セルに分割する。衝突セルの生成例をFIG. 1に示す。

2.2 振動励起

一様流マッハ数 $M_\infty=20$ 及び温度 $T_\infty=300$ Kの極超音速窒素分子希薄流中におかれた表面温度 $T_w=300$ Kの拡散反射壁を有する円柱回りの希薄流シミュレーションをNWT超並列計算機のPE16台を用いて行った。円柱直径を基準長とする一様流クヌーゼン数 $Kn_\infty=0.1$ に対する計算結果を以下に示す。

振動非弾性衝突のない場合とある場合における密度(n/n_∞)、並進温度(T_{tr}/T_∞)、及び回転温度(T_r/T_∞)の一様流値(∞)を基準にした等値線分布の比較をFIG. 2-4とFIG. 5-7に示す。衝突セル当たりの分子数は $\Delta N=100$ である。両者の等値線パターンは類似しているが、振動励起により円柱前方の衝撃層の厚さが減少している。

2.3 衝突セル当たりの分子数

振動非弾性衝突モデルの離散的振動準位に起因する励起振動準位の分子数の不足による結果の不正確さを検証するために、衝突セル中の分子数

ΔN の影響を調べた。FIG. 8及びFIG. 9に $\Delta N=2$ と100及び $\Delta N=10$ と100に対する振動温度(T_v/T_∞)の比較を示す。 $\Delta N=2$ では不十分であるが、 $\Delta N=10$ 程度で十分に正確な結果が得られる。

2.4 振動遷移ステップ数

振動準位遷移のステップ数 Δv を適当に切断することによる計算時間の短縮と結果の正確さを吟味した。FIG. 10とFIG. 11に $\Delta v=1$ と無切断及び $\Delta v=5$ と無切断に対する振動温度(T_v/T_∞)の比較を示す。一量子遷移($\Delta v=1$)近似は不十分であるが、 $\Delta v=5$ 程度の切断で十分に正確な結果が得られる。

無切断に対する計算時間は振動非弾性衝突のない場合に比較して約3倍であるが、 $\Delta v=5$ の切断近似に対する計算時間は約1.5倍であり実用計算の範囲内にある。

参考文献

- 1) K. Koura et al., Phys. Fluids A3, 2459 (1991); A4, 1083 (1992); AIAA Prog. Astronaut. Aeronaut. 159, 459 (1994).
- 2) K. Koura, Phys. Fluids A4, 1782 (1992); A5, 778 (1993).
- 3) K. Koura, Phys. Fluids, 6, 3473 (1994); in Rarefied Gas Dynamics 19, edited by J. Harvey and G. Lord (Oxford U.P., Oxford, 1995), p.483; preprint (submitted).
- 4) K. Koura, Phys. Fluids 29, 3509 (1986); AIAA Prog. Astronaut. Aeronaut. 117, 25 (1989); Phys. Fluids A2, 1287 (1990).

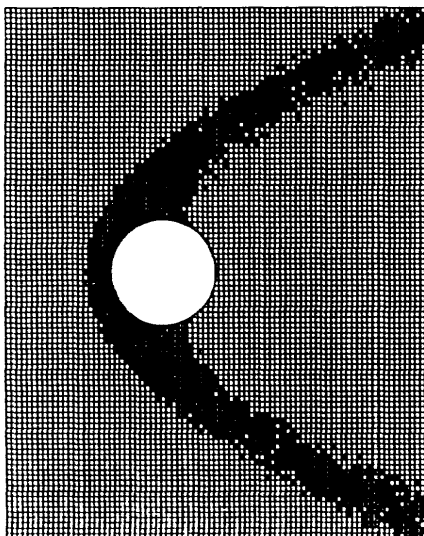


FIG. 1. Adaptive Collision Cell.

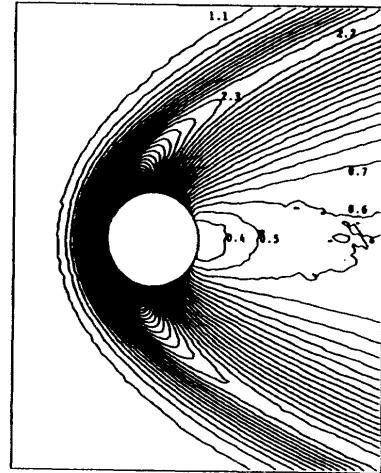


FIG. 2. Number density contour (increment 0.1) without vibrationally inelastic collisions.

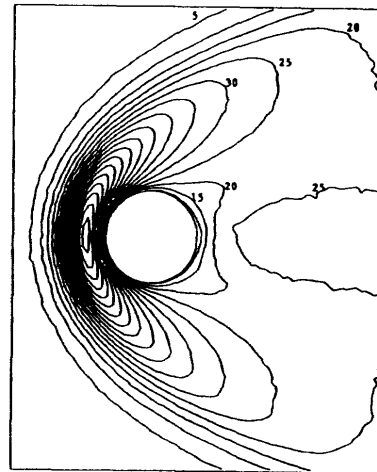


FIG. 3. Translational temperature contour (increment 5) without vibrationally inelastic collisions.

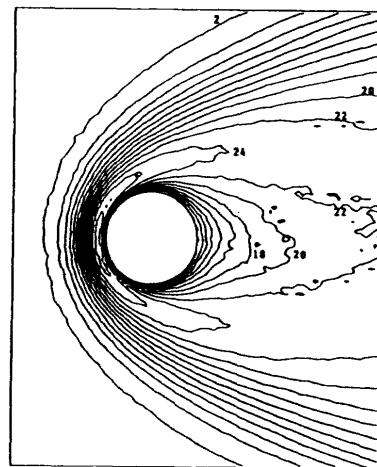


FIG. 4. Rotational temperature contour (increment 2) without vibrationally inelastic collisions.

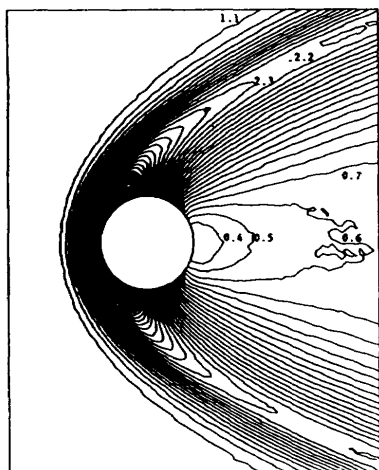


FIG. 5. Number density contour (increment 0.1) with vibrationally inelastic collisions.

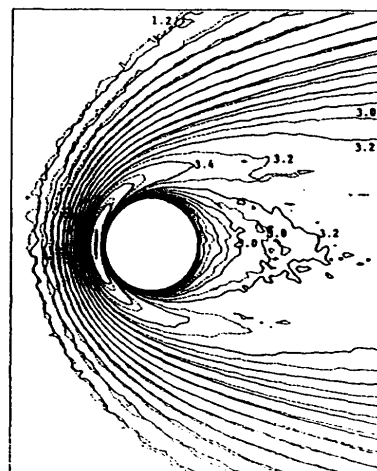


FIG. 8. Vibrational temperature contour (increment 0.2) for $\Delta N=2$ (---) and 100 (—).

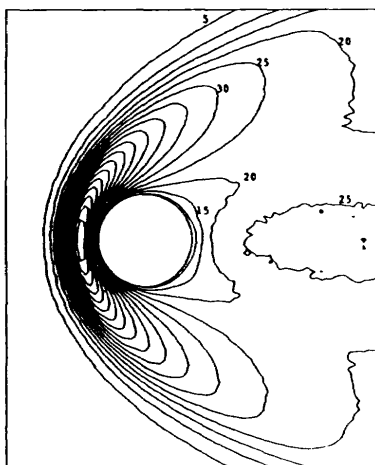


FIG. 6. Translational temperature contour (increment 5) with vibrationally inelastic collisions.

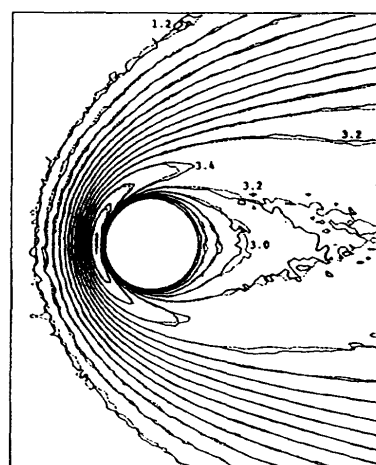


FIG. 9. Vibrational temperature contour (increment 0.2) for $\Delta N=10$ (---) and 100 (—).

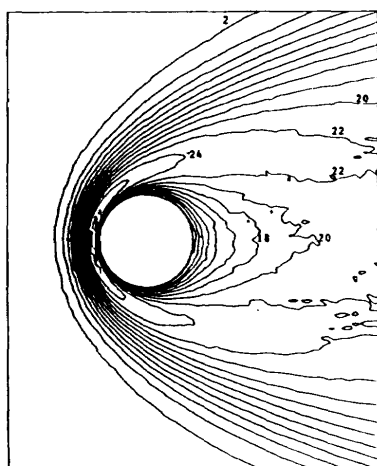


FIG. 7. Rotational temperature contour (increment 2) with vibrationally inelastic collisions.

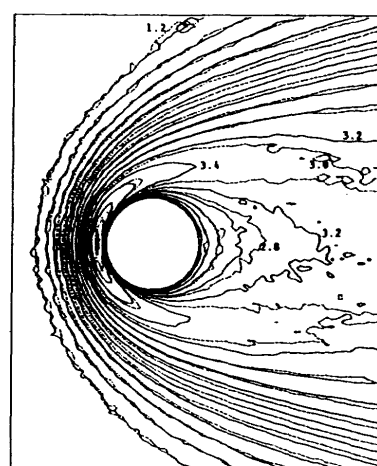


FIG. 10. Vibrational temperature contour (increment 0.2) for $\Delta v=1$ (---) and no truncation (—).

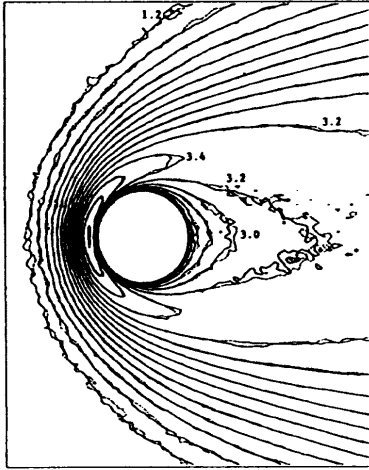


FIG. 11. Vibrational temperature contour (increment 0.2) for $\Delta v=5$ (---) and no truncation (—).