極超音速希薄流における並進・回転エネルギーの微視的状态:

気体分子衝突モデルの影響

Microscopic State of Translational and Rotational Energy in Hypersonic Rarefied Gas Flow :

Effects of Gas-gas Collision model

○ 正 坪井伸幸 (宇宙研) 正 松本洋一郎 (東京大学)

Nobuyuki TSUBOI, ISAS, 3-1-1, Hikinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510

Yoichiro MATSUMOTO, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

A DSMC (direct simulation Monte Carlo) simulation using Dynamic Molecular Collision (DMC) model based on Molecular Dynamics (MD) calculation is applied for solving the two-dimensional nonequilibrium hypersonic rarefied flow over a flat plate with angle of leading edge. Numerical results show that nonequilibrium between translational and rotational temperature is obtained behind the leading edge over the plate. Translational and rotational energy distributions in the nonequilibrium flow show a typical distribution which is significantly different from the Maxwell-Boltzmann distribution, and reveal a transition process from the nonequilibrium state to the equilibrium state.

Key Words: Rarefied Gas Flow, Hypersonic Flow, Numerical Analysis, Nonequilibrium Flow

1 はじめに

近年, 国内外で宇宙往還機及び惑星探査機の開発が活発に推進されているが, その空力における重要な課題の1つとして, 再突入時の衝撃波/境界層干渉がある。その代表的な現象の一つとして, 鋭い前縁を有する平板近傍で生じる粘性干渉が挙げられるが, Rarefaction parameter $\bar{V} > 0.15$ であるような, 衝撃波と境界層が融合する領域における流れ場の構造及び並進温度と回転温度の非平衡現象はまだ十分に解明されていない。

本論文では, 実験結果と DSMC 計算結果のより詳細な比較を実施する。さらに, 衝突モデルとして Larsen-Borgnakke (LB) モデル [1] と Dynamic Molecular Collision (DMC) モデル [2] をそれぞれを使用した場合の DSMC 計算結果を比較する。その際, 巨視的な状態量としての温度, 圧力等, そして微視的な状態量である並進エネルギー及び回転エネルギー分布の比較を行う。そして特に後者に関して, 衝突モデルが微視的な状態量に与える影響を定量的に把握する。

2 数値計算法

本研究で使用した 2 次元 DSMC 法の衝突モデルは, 分子動力学法によって構築されたデータを基にしている。また, 分子衝突頻度の計算には, Null-Collision 法を使用している。壁面境界条件は拡散反射を適用した。LB モデルにおける非弾性衝突確率 ϕ は, 0 (No.2), 0.5 (No.3) 及び 1.0 (No.4) を使用した。

3 結果及び考察

計算条件は, Lengrand らが実験で実施した条件 [3] を元にしており, $M_\infty = 20.2$, $Re_\infty = 566$, $Kn_\infty = 0.047$ である ($L = 0.05\text{m}$ 基準)。詳細な計算条件は講演論文を参照されたい。

微視的な見地から, LB モデルと DMC モデルの比較を示す。図 1 に $X/L = 0.5$ における並進エネルギー分布を示す。前縁近傍では, どの結果も Maxwell-Boltzmann (MB) 分布と大きく異なっていることが分かる。しかし, LB モデルの非弾性衝突確率 ϕ が 0 では並進エネルギーは MB 分布に近く, $\phi = 1$ では MB 分布と大きく異なっていることが分かる。DMC モデルは

LB モデル ($\phi = 0.5$) と大きな違いは見られない。また, 回転エネルギー分布の場合は, 並進エネルギーの場合とは逆に, LB モデルの非弾性衝突確率 ϕ が 1 では回転エネルギーは MB 分布に近く, $\phi = 0$ では MB 分布と大きく異なっている。DMC モデルは LB モデル ($\phi = 0.5, 1.0$) の間の分布を示している。DMC モデルと LB モデル ($\phi = 0.5$) の回転温度はほとんど違いがないにもかかわらず, 回転エネルギー分布は大きな違いが現れている。DMC モデルは非弾性衝突確率の温度依存性は MD 計算のデータベース中に組み込まれている。そして, 本計算条件だけでなく 1 次元垂直衝撃波に関しても, 非弾性衝突確率の値に依存せずに非平衡な流れ場を解析できることが示されている点 [2] で, LB モデルよりも物理的根拠がありかつ, 十分に優位性があることが本結果から示された。

Fig. 1: Energy distributions on the plate at $X/L = 0.5$ (left : translational energy; right : rotational energy).

参考文献

- [1] Borgnakke, C., Larsen, P.S., J. of Comp. Phys., 18, No.3 (1975), 405-420.
- [2] Tokumasu, T. and Matsumoto Y., Phys. Fluids, Vol. 11, No.7(1999), 1907-1920.
- [3] Lengrand, J.C. et al., 18th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics (1992), 276-284.