

135 DSMC 法による再突入物体周りの流れ解析

Direct Simulation of Reentry Flows Around a Cylinder

○油田さと子 (日本アバンステクノロジー)

正 白井紘行 (群馬大学工学部)

Satoko UTAH, Nippon Advanced Technology

Hiroyuki SHIRAI, Gunma University

DSMC analysis was conducted for flows around a cylindrical object under reentry conditions. Gas particles were described by the VSS model, and three energy modes namely translational, rotational and vibrational energy modes were taken into account. Five chemical species model (N_2 , N , N_2^+ , N^+ and e^-) was applied to air plasmas. The NTC model suggested by Bird was used for collisions, 4 chemical reactions of dissociation, recombination and two ionizations being included. For vibrational relaxation, Millikan-White's empirical formula with Park's high temperature correction was used. Analysis was made for the conditions of Fire II project of NASA and the results clarified the nonequilibrium properties of the flows.

Key Words: Direct Simulation of Monte Carlo Method, Rarefied gas, Reentry flow

1. 緒言

マッハ数 40 前後で流れる希薄流体中に配置された円柱体 (半径 10mm) の周りに生じる流れを対象に DSMC 法で解析を行ない、流れの諸条件、化学種、化学反応によって流れが受ける影響を確認した。流れのモデルは、解離反応と 2 つの電離反応、再結合反応を含む 5 化学種空気 (N_2, N, N_2^+, N^+, e^-) とし、エネルギーモードとして並進、回転、振動の 3 モードを考慮した。計算領域は円柱前面から上流側に 90.0mm、下流側に 10.0mm、円柱中心から半径方向に 50.0mm の半円柱軸対象領域である。

2. DSMC 法

低密度の気体の流れは連続流としてではなく空間を自由に飛行する分子の集まり、自由分子流としての性質を持ち、次のボルツマン方程式に支配される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(nf(c)) + c \frac{\partial}{\partial r}(nf(c)) + F \frac{\partial}{\partial c}(nf(c)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2(f(c')f(c'_{\#}) - f(c)f(c_{\#}))c_r \sin\theta d\theta dc_{\#}$$

n は数密度、 c は速度で、速度 $c, c_{\#}$ を持った 2 粒子の衝突後の速度が $c', c'_{\#}$ になる。 c_r は相対速度である。

DSMC 法では速度分布関数 $f(c)$ をデルタ関数の和、すなわち分子の集団で近似し、この粒子群を時々刻々追ひ、運動、衝突をさせ、速度分布関数の変化を調べる。

DSMC 法では分子に起こりうる物理現象がすべて検証される。したがって分子の移動、分子間の衝突、固体壁面との衝突、化学反応などはすべてモデル化して計算される。分子間衝突の有無、弾性・非弾性衝突の判断、エネルギー再分配の判断、化学反応の有無、内部エネルギー準位などは、棄却法によって計算される。棄却法とは、ある衝突ペア分子に起こる物理現象 A の確率 P_A を計算としたとき、それらの最大確率 $P_{A \max}$ を予測して 0 から 1 の間に一様に分布する乱数 Rf を用いて次式、

$$\frac{P_A}{P_{A \max}} > Rf$$

が成立するときに現象 A が起こるとする方法である。

分子間衝突には内部エネルギーの授受が行なわれない弾性衝

突と、別種エネルギーモード間でエネルギーの授受が行なわれる非弾性衝突がある。DSMC 法では非弾性衝突の起こる確率を、緩和衝突数の逆数として計算する。緩和衝突数とは、内部モードが緩和するのに必要な衝突の数である。文献¹⁾によれば、回転モードの緩和衝突数は 5 程度であるとされており、本研究でもこの一定値を用いた。振動モードについては、文献²⁾にならい Millikan-White の経験式に Park による高温補正項を加えて振動緩和衝突数を計算した。

分子が非弾性的に衝突してエネルギーの授受が行われると、化学反応が起こる可能性がある。DSMC 法では化学反応は活性化エネルギーのレベルに達した振動モードの励起として扱われる。本研究では次の 4 化学反応を考慮した。

解離反応、 $N_2 \rightarrow N + N$

電離反応、 $N_2 \rightarrow N_2^+ + e^-$

$N \rightarrow N^+ + e^-$

再結合反応、 $N + N \rightarrow N_2$

3. 結果と考察

本解析で用いた飛行条件を Table1 に示す。これらは NASA による Fire II プロジェクトにおける値である。

条件 I・II における並進温度分布を Fig.1 に示す。円柱前面を囲むように並進温度の高い領域があり衝撃層が形成されているのがわかる。円柱に向かって流れが圧縮されるが、それにつれて、分子間・壁面衝突の頻度が高くなり、エネルギー交換も活発になって分子の持つ熱運動エネルギーが上昇する。衝撃層内部の物体壁面近くになると、気体は壁面によって冷却され、温度が急激に低下する。

Table 1 Flow Conditions for the Project FIRE II Vehicle

	Condition I	Condition II
Altitude[km]	84.60	76.42
Velocity U^* [km/s]	11.37	11.36
Density ρ^* [kg/m ³]	8.5690×10^{-6}	3.50836×10^{-5}
Number Density n^* [Particle/m ³]	1.7820×10^{20}	7.2940×10^{20}
Gas Temperature T^* [K]	180.65	194.602
Mach Number M	41.4	39.8
Mean Free Path λ^* [m]	9.4940×10^{-3}	2.318×10^{-3}
Wall Temperature T_w [K]	460	615
Knudsen Number Kn	0.475	0.116

条件Ⅰと条件Ⅱの結果を比較する。密度の高い条件Ⅱの流れでは圧縮が進み、並進温度が高くなる。流れの密度が高くなると、分子間衝突の頻度も高まり、運動エネルギーの熱エネルギーへの変換が活発になり、熱運動エネルギーが高くなるためである。明らかに、条件Ⅱの流れではⅠより衝撃層の幅が狭くなっている。これは流れの密度が高いために反応が進み、衝撃層内部の密度が高くなるためと考えられる。すなわち、衝撃波の前後で流量が保存されるので高密度の流れでは、同じ流量が狭い領域を通り抜けることになる。条件Ⅰ・Ⅱにおける岐点流線上の各エネルギーモードの温度変化を Fig.2 に示す。壁面から 90mm の位置では各モードの温度がほぼ一致しており、熱的に平衡な一様流とみなせる。流れが圧縮されるにしたがって各温度は急激に上昇し衝撃層では各温度が大きく異なり、この領域での流れは強度の熱的非平衡状態にあることがわかる。

並進温度は下流に向かって著しく上昇し、条件Ⅰでは円柱の手前で最大 52,300K になる。その後、非弾性衝突による並進モードから内部モードへのエネルギー移動、化学反応、壁面の影響などにより並進温度は急激に低下する。壁面境界では希薄流特有の温度飛躍で見られる。

内部モードは並進モードに比べて緩和に要する衝突数が大きく、緩和が起こりにくい。このため、回転温度と振動温度は並進温度よりもおくれて上昇する。また、衝突などによってエネルギーが並進モードから供給されるので、回転温度のピークは並進温度より物体寄りに現れる。特に希薄な流れでは分子間衝突の頻度が低く、内部モードにはエネルギーが再分配されにくい。再分配されたエネルギーも、化学反応に奪われ、振動と回転温度は並進温度に比較して低いまま留まる。

条件Ⅱの流れでも並進温度は円柱前面で急激に上昇し、最高 61,000K に達する。条件Ⅰと比べて内部モードの温度の上昇も大きい。これは、比較的高密度の流れでの衝突頻度の増加に伴い、内部モードに再分配されるエネルギーが増えたためであると考えられる。

連続流に近い高密度の流れでは並進温度の低下に伴って再結合反応が活発に起こり、内部モードのエネルギーが再上昇する現象が見られるが、本研究で扱う希薄流では 3 体再結合反応の起こる確率が非常に低く、回転・振動温度の再上昇は見られなかった。

4. 結論

円柱周りの極超音速流れを FireII の再突入条件で DSMC 法により解析した。主な結果は以下の通りである。

- 1) 物体前面から 0~10mm の位置に衝撃層が形成され、その内部では極度に強い熱的非平衡状態であることを確認した。
- 2) 温度飛躍(壁面境界で壁面温度のとの不一致)や内部モードの温度が上昇しない、3 体衝突による化学反応が起こらないなど、希薄流中で特有に起こる物理現象が見られた。
- 3) 条件Ⅱの高密度の流れでは、衝突頻度の増大によって化学反応率が高まり、衝撃波背後の密度が増加して衝撃層が圧縮されるのを確認した。高い衝突頻度が起因し、分子の熱運動

が活発になるため、並進温度が高くなった。また、化学反応率の増加により、並進・内部モード間でのエネルギー授受が活発化し、内部エネルギーモードの温度も比較的上昇した。

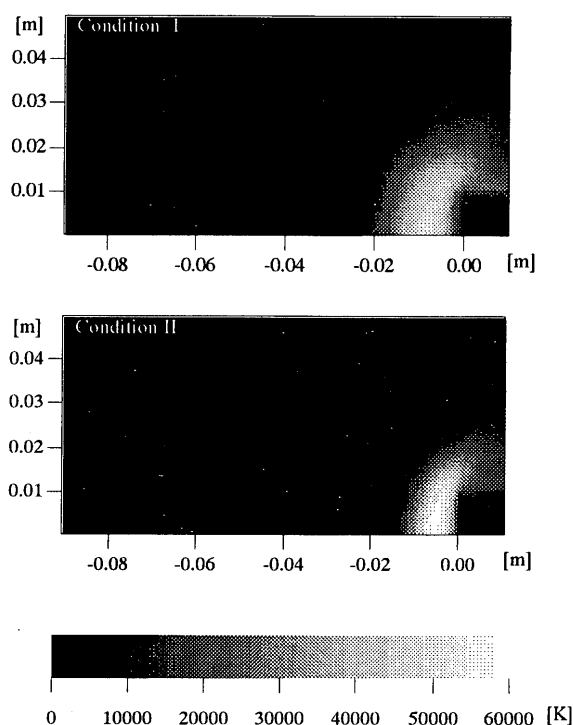


Fig.1 Temperature profiles

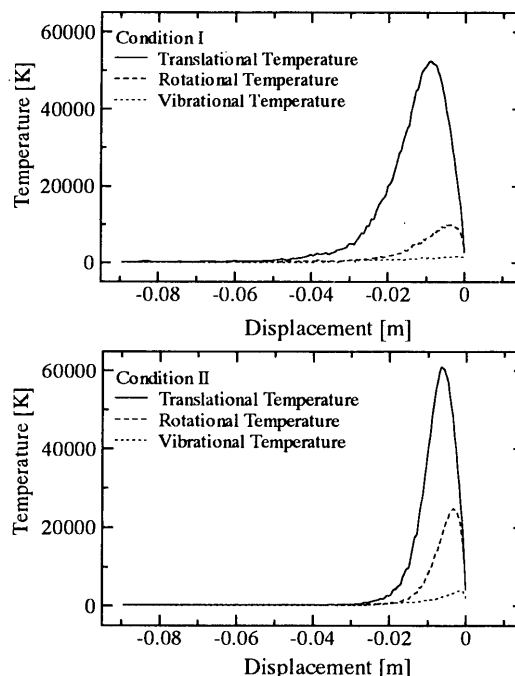


Fig.2 Temperature Change along Stagnation Line

5. 参考文献

- 1) Bird, G.A., Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Oxford University Press Inc., 1994
- 2) Taylor, J.C., Monte Carlo Simulation of Ionizing and Radiating Reentry flows, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 1994