

DSMC 法による二重円錐まわりの極超音速希薄流の 数値シミュレーション —セルサイズの影響—

Effect of cell size in DSMC method on Hypersonic Rarefied Flow about Double cone

○五十嵐 三武郎*

○Saburo Igarashi*

*いわき明星大学

*Iwaki Meisei University

キーワード：セルサイズの影響, 2重円錐(double cone), DSMC法(DSMC method),
極超音速流(hypersonic flow), 希薄流(rarefied flow)

連絡先：〒970-8551 いわき市中央台飯野5-5-1 いわき明星大学 理工学部 機械工学科
五十嵐 三武郎, Tel.: (0246)29-7182, Fax.: (0246)29-0577, E-mail: igarashi@iwakimu.ac.jp

1. はじめに

3次元極超音速希薄流は宇宙船の再突入時に
いてその制御に関連してきわめて重要である。従
来,主に剥離のない2次元や3次元物体まわりの流
れについて連続流の立場から多くの実験的研究な
らびに数値シミュレーションが行われてきた^{1)~4)}。
希薄流では比較的Reynolds数が小さい流れが研究
の対象であるため剥離の起こる問題はあまり数値
シミュレーションは行われていない。しかし再突
入時の流れは希薄流,中間流をへて連続流へと広範
囲の流れがあらわれる。中間流に威力を発揮するモ
ンテカルロ直接シミュレーション法(DSMC法⁵⁾)は
ボルツマン方程式に基礎を置くが,連続流に近い
流れに対しても適用できる。そこで3次元剥離が
起こると思われるような流れを対象としてDSMC

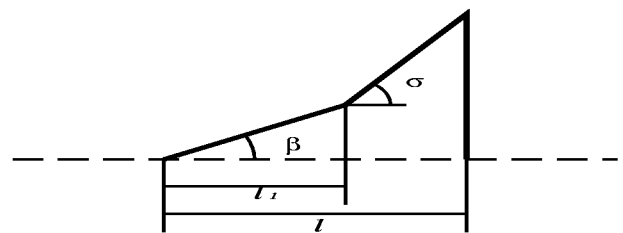


Fig. 1 Body Configuration

法を適用する。しかしながら2次元と3次元流れ
ではシミュレーションする分子の数が大幅に異な
る。したがって3次元流れでは計算機の数と能力
を考慮して分子数を決定する。そのため計算領域の
設定とセルネットワークをどのように決めるかは
シミュレーションの結果に重大な影響を及ぼす。

本研究では3次元2重円錐まわりの極超音速希
薄流のDSMC法による数値シミュレーションにお
いて,セル分割の違いによる物体上の圧力,熱伝達,

表面摩擦の変化について検討する。それによって物体表面上の圧力、表面摩擦や熱伝達の違いを明らかにしようとするものである。

2. 物体形状とセルネットワーク

Fig.1は物体形状で、全長を l 、前部の円錐の長さは $l_1 = 0.85l$ である。次に2種類のセル分割を考察する。Fig.2は各セルの体積を等しくなるようセル分割を行ったもので $\beta = 10^\circ, \sigma = 45^\circ$ の場合を示す。まず計算領域を x 軸方向に150分割、 r 方向には120~150分割し、その小さな円の半径(r_j)は $r_j = r_n \sqrt{j/J}$ ここに r_n は $x = l_1$ での半径で、全セル数は $150 \times (120 - 150)$ である。軸近くの Δr は大きい、大きな r でのそれは小さくなる。各セルの体積は等しいので分子数はセル数に比例する。しかし軸近くの Δr のセルサイズが多きいのでその領域のデータは変化の著しいときには平均的な値を求めることになるので注意が必要である。

これに対してセルを r 方向に対してすべての x に対して張らないでいわば物体近傍に沿うように限定する。そして Δr を一定とする。このため分子数が増大するがそれを押さえるために r 方向の計算領域を x に依存するように、いわば効果的でないシミュレーション分子を考慮しないようにする。このようにして作られたセルがFig.3で $\beta = 10^\circ, \sigma = 70^\circ$ の場合である。

3. 結果と考察

Knudsen 数は $Kn = \lambda_\infty / l$ (λ_∞ は一様流の平均自由行程)である。気体分子はMaxwell分子で、内部自由度は回転のみ考慮し、VHSモデルを採用した。衝突は完全非弾性としLarsen-Borgnakkeモデルを採用した。

計算は $M_\infty = 10, Kn = 0.01$, 温度比 $T_w / T_\infty = 6$ とし、剥離現象に注目するためにセル I では $\sigma = 45^\circ$ に固定し、 $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ と変化させた。セ

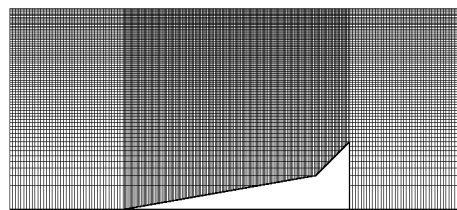


Fig. 2 Network I of cells

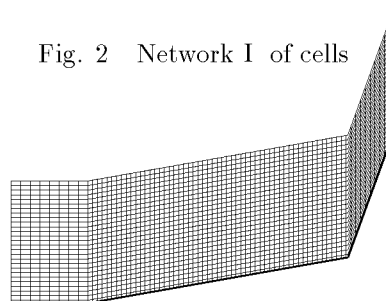


Fig. 3 Network II of cells

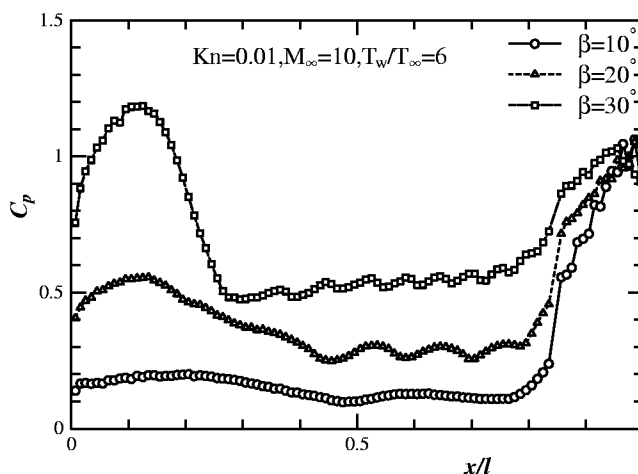


Fig. 4 Pressure distributions for $\sigma = 45^\circ$

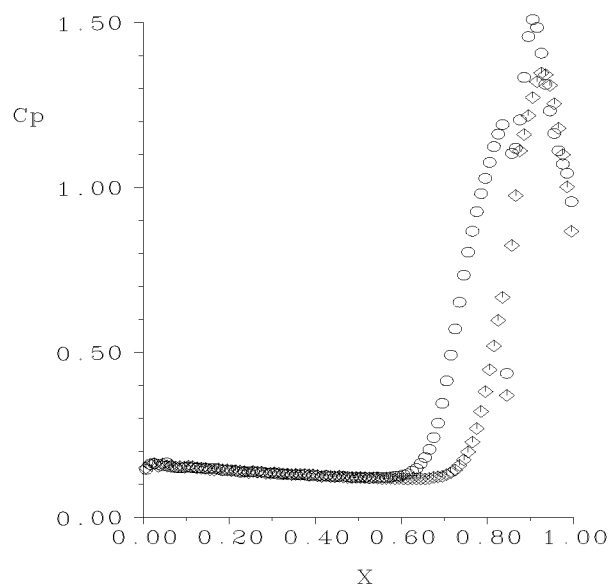


Fig. 5 Pressure distribution for $\sigma = 70^\circ$ (o), 60° (\diamond), at $\beta = 10^\circ$

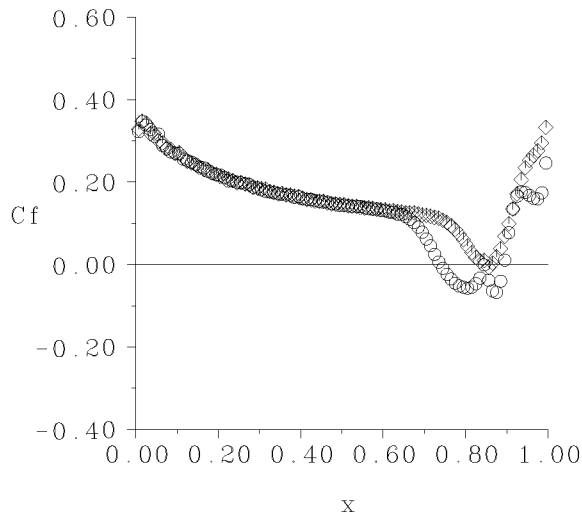


Fig. 6 Skin-friction distributions for $\beta = 10^\circ$ [$\sigma = 70^\circ$ (\circ), 60° (\diamond)]

ルIIでは剥離に近い流れを得るために $\beta = 10^\circ$ を固定して, $\sigma = 60^\circ$ と 70° に変化させた. Fig. 4,5はそれらの場合の圧力分布を示したものである. Fig.4では振動しているのに対して, Fig.5ではなめらかな変化を呈している. Bird⁵⁾によれば次の条件が満たされていればよい. $\Delta t/\Delta \tau$ と $\bar{\lambda}/\lambda \ll 1$. ここに Δt =タイムステップ, $\Delta \tau$ =局所的な平均衝突時間, $\bar{\lambda}$ =衝突分子の平均距離, λ =局所的な平均自由行程である. 振動的な傾向はセルサイズが物体近傍において粗いためである.

表面摩擦分布についてはFig.6に $\sigma = 60^\circ, 70^\circ$ の場合とFig.7に $\sigma = 45^\circ$ の場合の結果を示す. Fig.6では円錐接合部近傍で表面摩擦係数 c_f が負,つまり剥離領域がみられる.これに対して $\sigma = 60^\circ$ では小さな剥離領域がみられるにすぎない. 粗いセルでは大きな β になるほど振動的な傾向がみられるのは圧力の場合と同じである. $\beta = 10^\circ$ では一見するとなめらかな変化に見えるだけである. このためサンプルサイズを大きくしたが最終的な結果にはほとんど変化はなくセルサイズによる影響と考えられる.

以後剥離領域の流れを詳しくみるために $\sigma = 70^\circ$ または 70° の場合のみを考える. Fig.8にその場

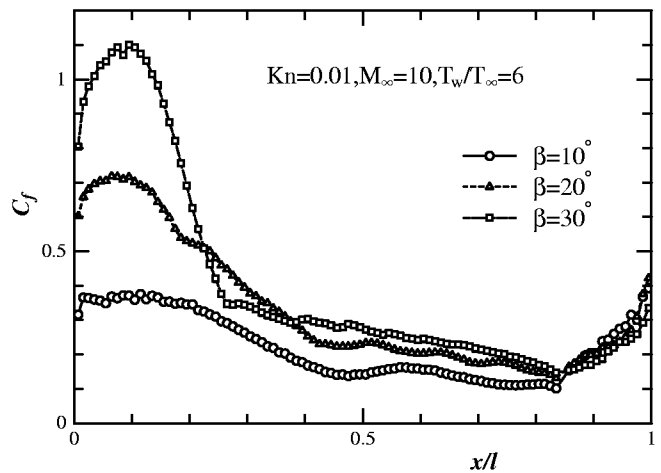


Fig. 7 Skin-friction distributions for $\sigma = 45^\circ$

合の流線を示す. 明らかに接合部近傍に閉じた渦領域が形成され3次元剥離が生じている. 剥離の影響はFig.3でみたように圧力分布にもあらわれている.

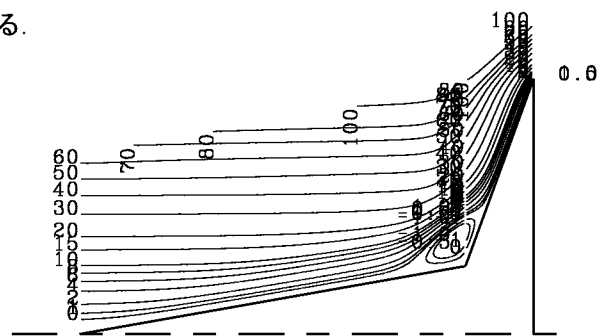


Fig. 8 Streamlines for $\sigma = 70^\circ$

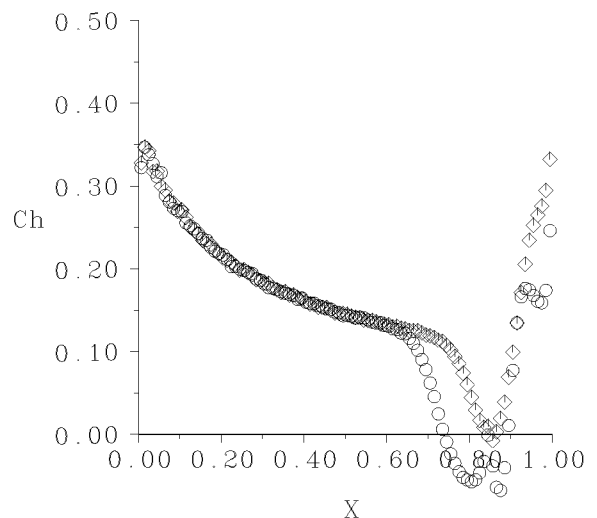


Fig. 9 Heat transfer distributions for $\sigma = 70^\circ$ (\circ), 60° (\diamond)

Fig.9は熱伝達分布を示す. σ が大きくなると熱伝達も表面摩擦と同じように接合点のより前方から

符号が逆転し,かつその領域も大きい. すなわち剥離が起こらなければ物体全表面において気体から物体への熱伝達であったものが,剥離部分では逆になる.

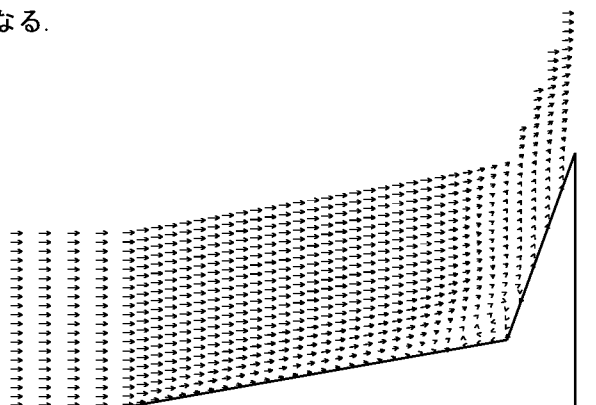


Fig. 10 Velcocity vectors for $\sigma = 70^\circ$

またFig.10に速度ベクトルを示す. 流線と比較しみると円錐接続部の閉じた再循環領域の速度ベクトルの向きが逆になっていることがわかる.

4. まとめ

DSMC法による2重円錐まわりの極超音速希薄流において連続流における衝撃波と境界層の干渉に対応する流れでは流体力学的な量が局所的に急激に変化するためにセルの選定は慎重に行わなければならない. そうしないと正しいと思われる結果が得られないばかりか実際現象に合わない結果が出てくる. また計算機のメモリーと計算時間から用いる分子数が決まってくるのでそれに対応したセルを張る.

本結果からなるべく少ない分子数で精度よく計算するためには,連続流の結果から計算に必要な流れの領域を類推して物体に沿って細かいセルを張る. その結果一様流に近い流れで物体への影響が小さいと思われるセルを除く. それによって分子数はなるべく少ないが妥当な結果が得られよう.

参考文献

- 1) Hayes, W.D. and Probstein, R.F., *Hypersonic Flow Theory*, 1959. Academic Press, New York and London.
- 2) Delery J. and Coet M.- C., *Hypersonic Flows for Reentry Problems*, edited by J.A. Désidéri, R. Glowinski and J. Périaux, Vol. II, Springer-Verlag, Berlin, 1991, 97-128.
- 3) Chun, Ch.-H., *Rarefied Gas Dynamics*, ed. by Baylich, VCH, Weinheim, 562-569, 1992.
- 4) Moss, J.N., Price, J.M and Chun, Ch.-H., AIAA 91-1313, 1994.
- 5) Bird, G. A., *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- 6) Bird, G. A., Private communication, Aug., 1998.