

希薄気体数値風洞 II. 2次元・軸対称物体

古 浦 勝 久*

Rarefied Gas Numerical Wind Tunnel

II. Two-dimensional and Axially Symmetric Bodies

by

Katsuhisa KOURA

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

A rarefied-gas numerical wind tunnel is being developed in order to simulate the rarefied gas flows around space vehicles such as the AOTV and the space plane. The null-collision (NC) technique, which Koura recently introduced into the direct-simulation Monte Carlo method, is used. The NC technique overcomes the principal fault in the time-counter (TC) technique and the difficulties in the collision-frequency (CF) technique and, moreover, the computation time required for the NC technique is comparable to that for the TC technique. The elastic collisions between molecules are taken to be the energy-dependent hard sphere model. The gas-surface interactions are taken to be the Maxwell reflection model. It is confirmed that the numerical wind tunnel (research codes) works well for two-dimensional and axially symmetric bodies.

1. ま え が き

高層大気飛行物体まわりの希薄気流シミュレーションのための“希薄気体数値風洞”の創設を目的として、Null-Collision (NC) 直接シミュレーション・モンテカルロ法¹⁾を用いたソフトウェアの開発を進めている。NC法は最近筆者により直接シミュレーション・モンテカルロ法に導入された画期的方法であり、BirdのTime-Counter (TC)法の原理的欠陥及びKouraのCollision-Frequency (CF)法における困難性を克服し、また、計算時間もTC法と同程度である¹⁾。

初期 θ 関数速度分布の緩和に対するNC, CF, 及

びTC法の比較を図1及び図2に示す。剛体球モデル(図1)での一致は極めて良いが、Cutoff剛体球モデル(図2)においては、TC法は原理的欠陥を暴露し、極端に速い緩和をもたらす。表1に、本数値風洞で採用したエネルギー依存剛体球モデル^{2,3)}に対するTC法に相対的な計算時間の比較を示す。CF法はTC法の約2倍の計算時間を必要とするが、

表1 直接シミュレーション・モンテカルロ法における各手法の相対的計算時間

Direct-simulation Monte Carlo method	Energy-dependent hard sphere model
Time counter	1
Null collision	1.05
Collision frequency	2.2

* 航空宇宙技術研究所

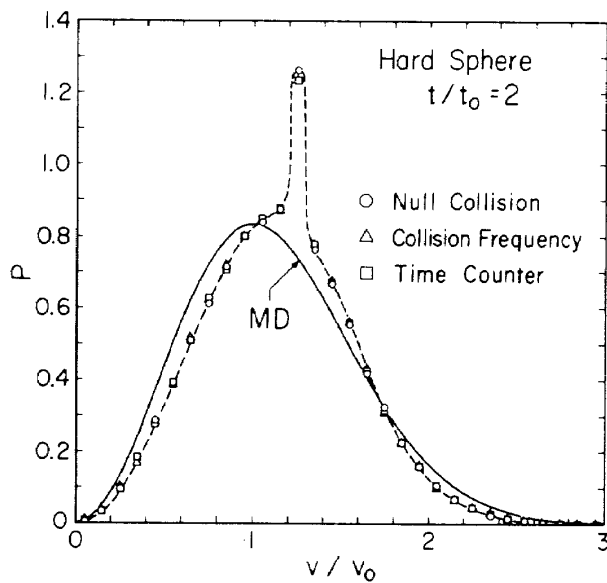


図1 剛体球モデルに対する速度分布緩和の比較

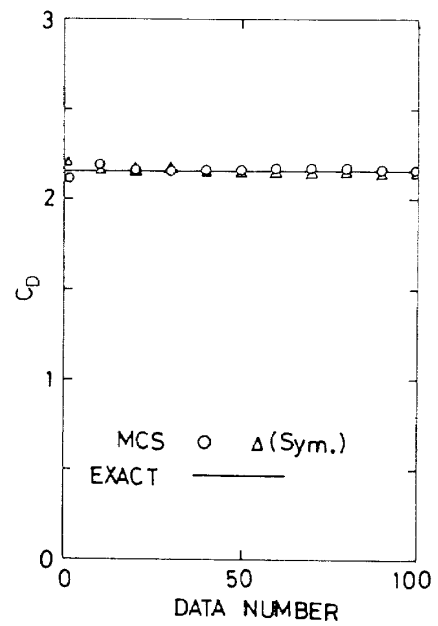


図3 自由分子流における円柱の抵抗係数

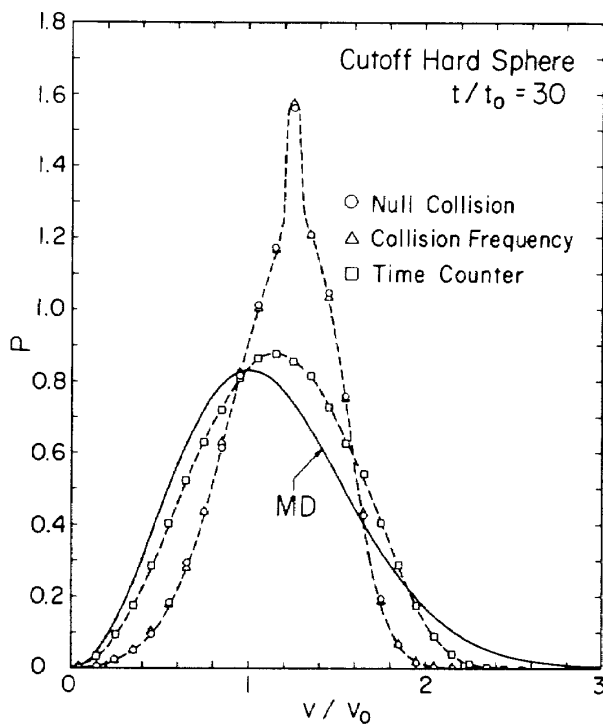


図2 Cutoff 剛体球モデルに対する速度分布緩和の比較

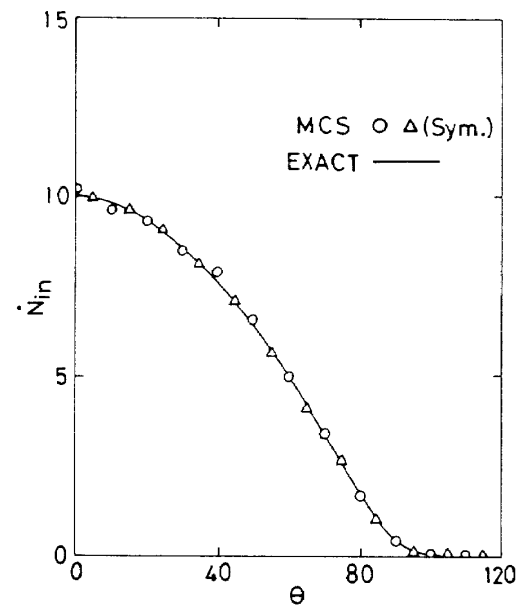


図4 自由分子流における円柱の分子流入フラックス分布

NC法はTC法と同程度の計算時間である。

2. 数値風洞

分子間衝突は弾性衝突のみを考慮し、弾性衝突断面積はエネルギー依存剛体球モデル^{2,3)}を採用した。分子の物体表面における反射はマックスウェルの反射モデルを用いる。風洞形状(計算領域)は矩形と

した。プログラム(研究コード)は第一段(データ入力)、第二段(非定常過程)、及び第三段(定常過程、平均値出力)で構成され、必要データをファイルでつなぎながら、第一段→第二段→第二段→…→第三段→第三段→…と計算を進め、定常解(平均値出力)を得る。

分子運動シミュレーションの正確さは、自由分子

流(クヌーセン数 $K_{n\infty} \rightarrow \infty$)における厳密解を比較することにより検証できる。いくつかの単純形状物体に対するシミュレーション結果(MCS)は、厳密解(EXACT)と良い一致を示し、分子運動シミュレーションの正確さが検証された。一様流に垂直におかれた円柱(速度比 $S_\infty=10$, 表面温度比 $T_w/T_\infty=1$, 表面反射適応係数 $ACC=1$)に対する抵抗係数 C_D , 分子流 λ フラックス \dot{N}_{in} , 表面圧力 P , 表面摩擦力 τ , 及びエネルギー伝達率 Q の比較を図3-7に示す。 θ ($0 \leq \theta \leq 180^\circ$) は前方よどみ点から測った円柱の中心角(度)である。2次元数値風洞では対称面上部のみのシミュレーションも可能であり、○及び△は各々全円柱及び半円柱(対称面上部)に

対する結果である。少数のシミュレーション分子 $N \sim 10^3$ の場合でも、データ数10個程度の平均値は厳密解と良い一致を示す。

分子間衝突シミュレーションの正確さは既に検証済み^{1,4)}である。

2次元・軸対称物体用数値風洞(研究コード)にいくつかの試験物体を適用し、良好に作動することを確認した。図8-12は一様流に物体挿入後、物体基本長の約10倍流れが進行した(非定常)時点での分子位置($N \sim 10^3$)の表示例である($K_{n\infty}=1$, $S_\infty=10$, $T_w/T_\infty=1$, $ACC=1$)。一様流分子、物体表面反射分子、及び反射分子との衝突分子はカラー識別されている。図8は全円柱(2次元), 図9は半円柱(2次元対称面上部), 図10は球(軸対称), 図11はAOTV(空力制動軌道間輸送機), 及び図12はAGARD標準模型HB-2である。

現在、3次元数値風洞用研究コードの開発及びスーパー・コンピュータにおけるベクトル化による高速化を進めており、かなりの高速化が実現されている。

謝 辞

航技研スーパー・コンピュータ(VP-400)における高速化は、航技研計算センターのスーパー・コ

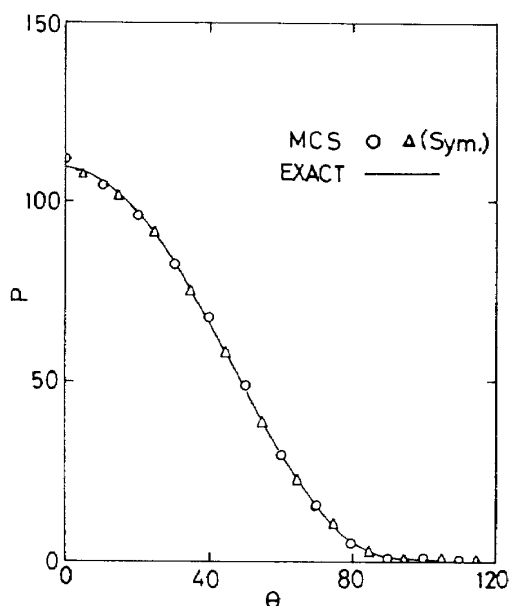


図5 自由分子流における円柱の表面圧力分布

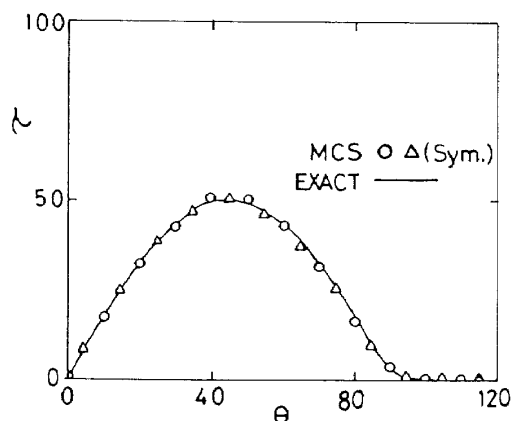


図6 自由分子流における円柱の表面摩擦力分布

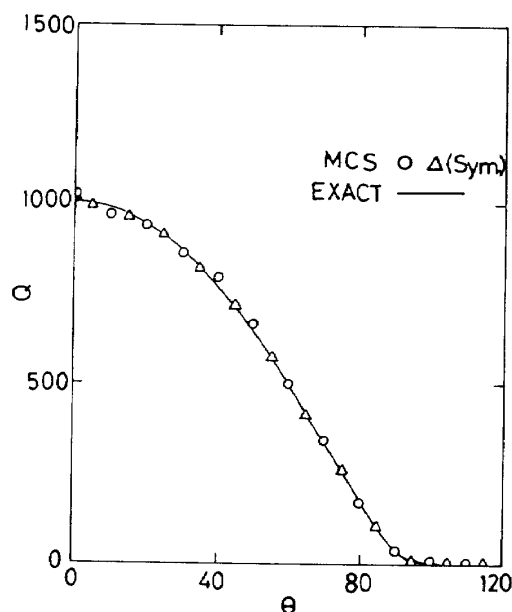


図7 自由分子流における円柱のエネルギー伝達率分布

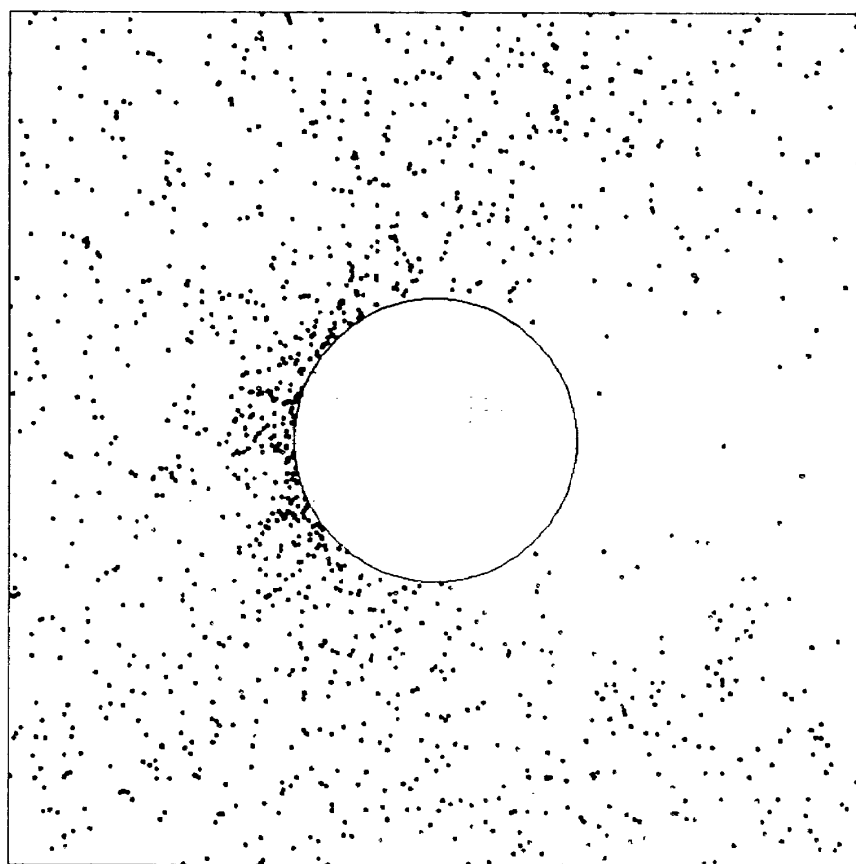


図8 円柱(2次元)

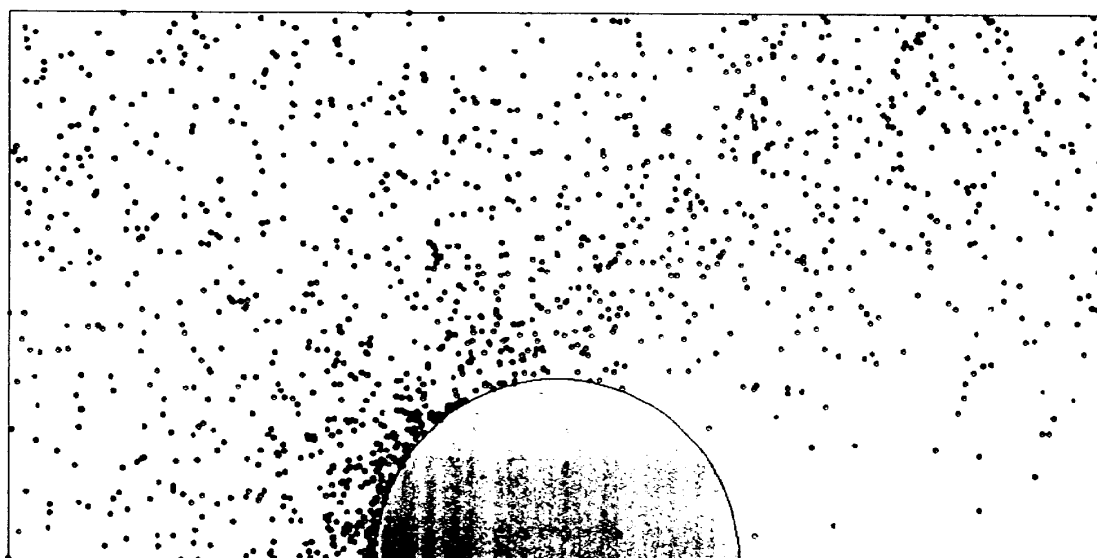


図9 円柱(2次元対称面上部)

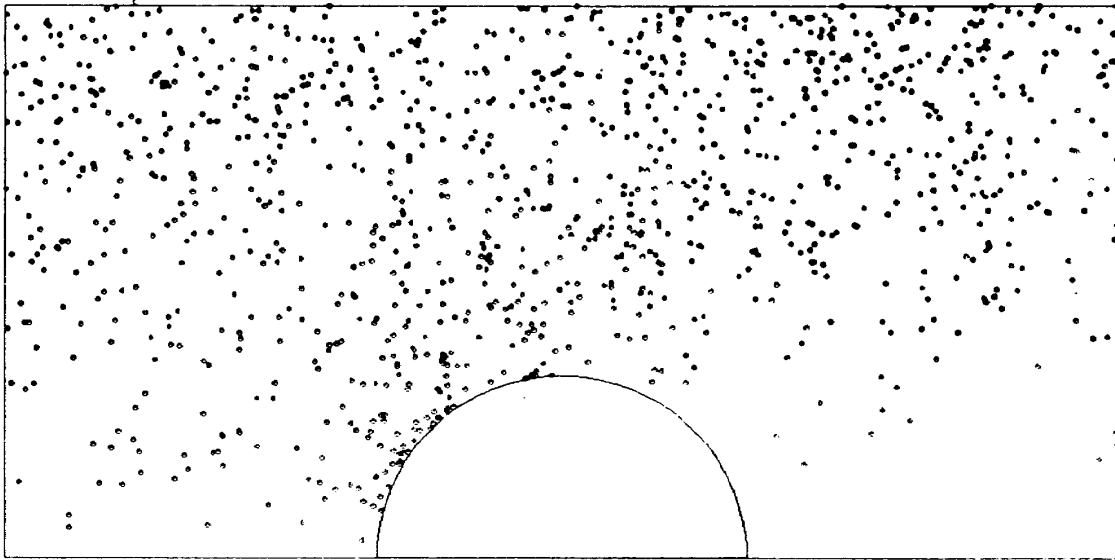


図10 球(軸対称)

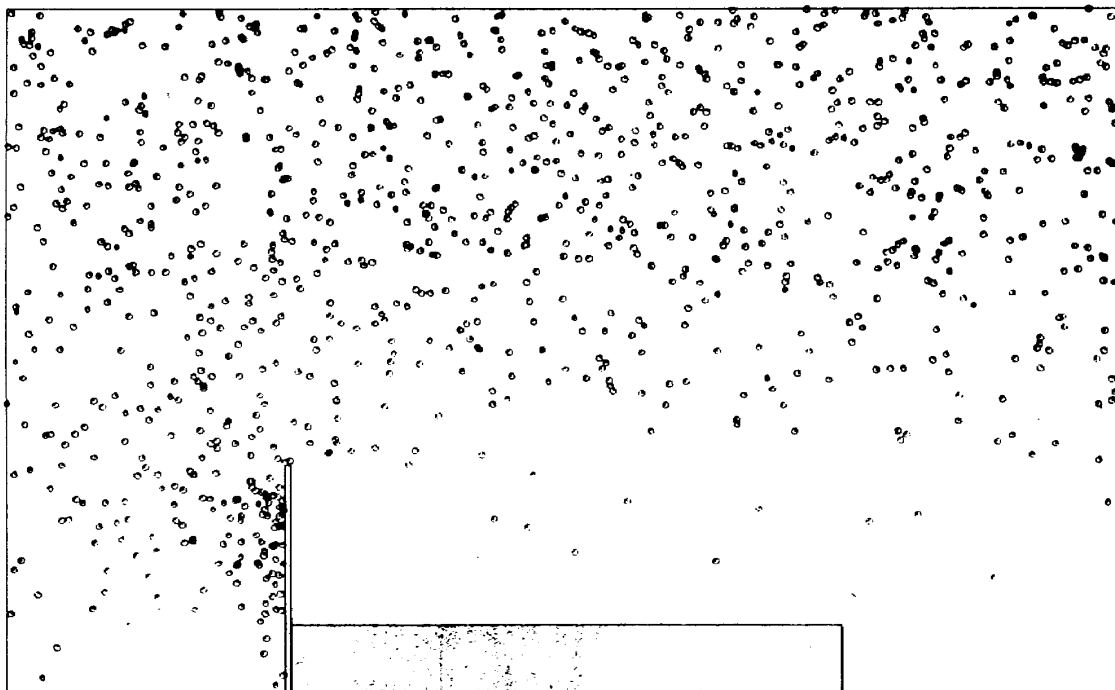


図11 AOTV(軸対称)

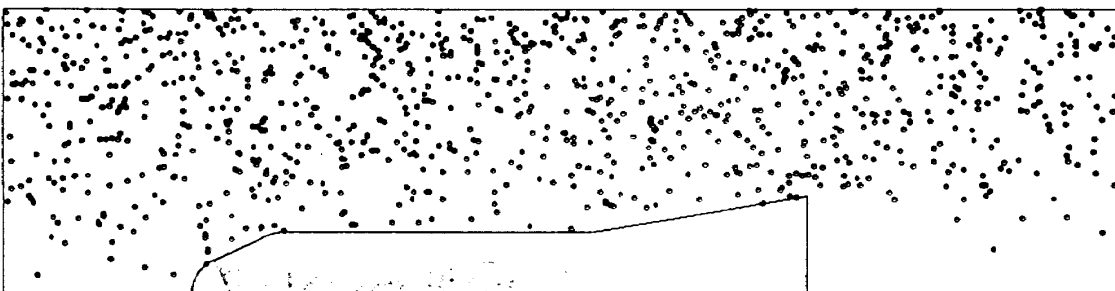


図12 AGARD標準模型HB-2(軸対称)

ンピュータ利用技術向上業務による中村絹代氏の協力により進めている。ここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Koura: Phys. Fluids (to be published).
- 2) K. Koura, J. Chem. Phys. 66, 4078, 1977.
- 3) G.A. Bird, Phys. Fluids 26, 3222, 1983.
- 4) K. Koura, NAL SP-3, 17, 1984.