

希薄気体数値風洞 III. 3次元汎用プログラム

古浦 勝久* 中村 絹代* 磯部 俊夫*
末松 和代* 島山 正行** 下地 敏之***

Rarefied Gas Numerical Wind Tunnel III. Universal Code for Three Dimensional Bodies

by

Katsuhisa KOURA, Kinuyo NAKAMURA,
Toshio ISOBE, Kazuyo SUEMATSU
National Aerospace Laboratory

Masayuki HATAKEYAMA
Tokyo Metropolitan College of Aeronautical Engineering

Toshiyuki SHIMOJI
Facom Hitac Co., Ltd.

ABSTRACT

The rarefied gas numerical wind tunnel is under construction using the null-collision direct-simulation Monte Carlo method. It is confirmed that the universal code (RGNWT) for three dimensional bodies is valid for general use. The vectorized code (RGNWTV) for the NAL NS system is successfully in progress.

1. ま え が き

地上 100 km 以上の希薄大気中を飛行するスペース・プレーン等の空力特性を求めるための希薄気体数値風洞の開発を進めている¹⁾。本報告では、3次元物体汎用プログラム(RGNWT)²⁾における分子衝突及び分子運動シミュレーション・コードの正確さの吟味を行う。また、RGNWTを用いて得られたシミュレーション結果と航技研NSシステムにおける高速化プログラム(RGNWTV)³⁾について報告する。

2. 分子衝突シミュレーション

弾性衝突断面積はエネルギー依存剛体球モデル^{4,5)}を用いる。分子衝突シミュレーション技法は null-collision (NC) 直接シミュレーション・モンテカルロ法⁶⁾を用いている。time-counter (TC) 法⁷⁾及び collision-frequency (CF)⁸⁾法との比較のために、空間セル中での速度分布緩和のシミュレーションを行った。初期 δ 関数分布に対する速度分布関数 P の時間 $t/t_0=2$ での比較を図 1, 2 に示す。ここに、時間 t 及び分子速度 v は分子衝突時間 t_0 及び最確速度 v_0 で各々無次元化してある。シミュレーション分子数 N は 10^5 である。図 1, 2 は各々時間ステップ $\Delta t/t_0=1.0$ 及び 10^{-4} の場合である。 $\Delta t/t_0 \geq 10^{-3}$ では NC, CF, 及び TC 法の結果は良い一

* 航空宇宙技術研究所

** 東京都立航空工業高等専門学校

*** ファコムハイタックKK

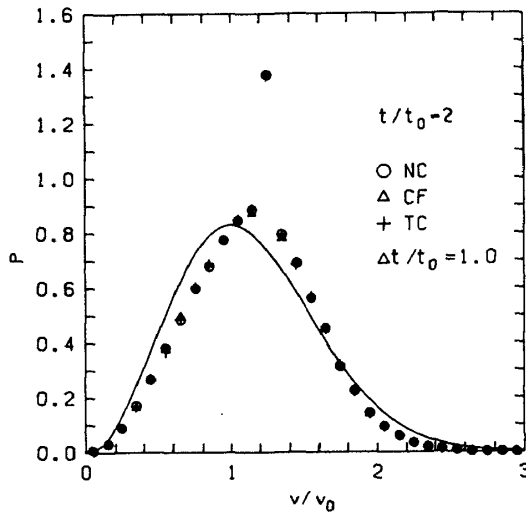


図1 速度分布緩和の比較

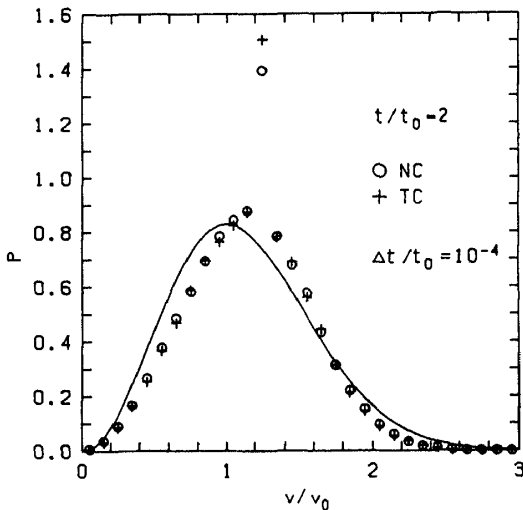


図2 速度分布緩和の比較

致を示す。しかし、 $\Delta t/t_0 \leq 10^{-4}$ では、TC法は正しい結果を与えない。これは、TC法に $\Delta t/t_0$ の下限($\sim 10/N$)があるためである(Δt 欠陥)。分子衝突と分子運動の分離のための条件^{6,8)} $\Delta t/t_0 \ll 1$ を満たすためには各空間セルにおいて $N \gg 10$ が必要となり、3次元シミュレーションにおいて厳しい条件となる。CF法はTC及びNC法に比較して多くの計算時間を必要とするので、 $\Delta t/t_0 = 10^{-4}$ の場合は求められていない。NC法にはTC法のような原理的欠陥はなく、また、計算時間もTC法と同程度である⁶⁾。

3. 分子運動シミュレーション

分子衝突を無視した場合(自由分子流)の分子運

表1 FMNWTで求めた抵抗係数と自由分子流厳密解との比較

$\Delta\theta(=\Delta\varepsilon)$	FMNWT C_D	
	Sphere	Cylinder
20°	2.0795	2.1546
10°	2.1371	2.1678
1°	2.1532	2.1704
Exact	2.1534	2.1705

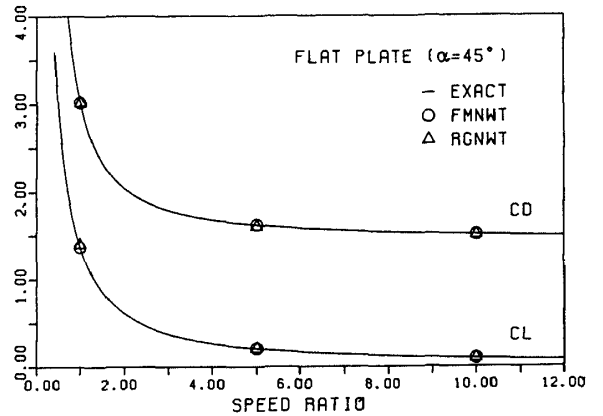


図3 抵抗・揚力係数の比較

動シミュレーション結果を自由分子流厳密解(EXACT)と比較する。複雑な形状物体に対する自由分子流厳密解を求めるのは必ずしも容易ではないので、自由分子流汎用プログラム(FMNWT)⁹⁾を作成した。Newtonian流の解析も可能である。RGNWT及びFMNWTでは、物体表面を四辺形のパネルに分割する。FMNWTで求めた球及び円柱に対する抵抗係数 C_D のEXACTとの比較を表1に示す。分割角度($\Delta\theta, \Delta\varepsilon$)を小さくするとFMNWTの結果はEXACTに一致する。RGNWTによって求められた迎角 45° の平板、球、及びAGARD標準模型HB-1に対する C_D 及び揚力係数 C_L とEXACT及びFMNWTの結果との比較を図3-5に示す。RGNWTの結果はEXACT及びFMNWTの結果と良い一致を示す。なお、分割角度が大きい場合、RGNWTとFMNWTの値は一致するが、EXACTより小さくなるのが球の場合に示されている(表1参照)。

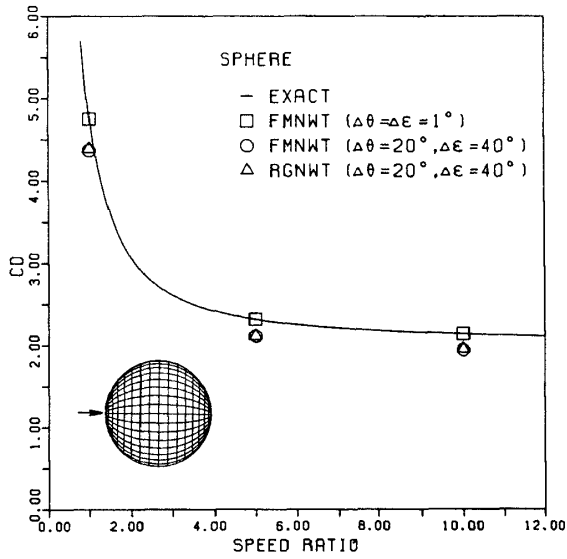


図4 抵抗係数の比較

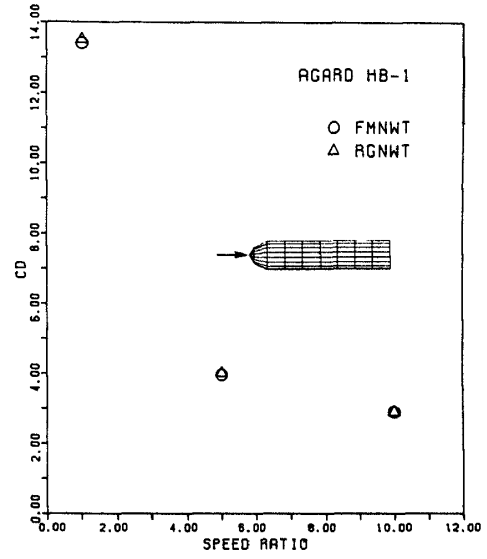


図5 抵抗係数の比較

4. RGNWTによるシミュレーション結果

RGNWTでは、物体表面格子を適当にとれば、空間セルは自動的に作成される。RGNWTによって求めた速度比 $S_\infty = 10$ 及びクヌーセン数 $K_n = 1$ の希薄気流中での球、AGARD標準模型HB-2、及びHB-1

に簡単な翼を取り付けたモデル・プレーン回りの分子位置表示例を図6-8に示す。一樣流分子、物体反射分子、及び物体反射分子との衝突分子はカラー識別されている。スペース・プレーン等の実機モデルのシミュレーションでは、画像処理を含む適切な入出力ソフトウェアの整備が必要である。

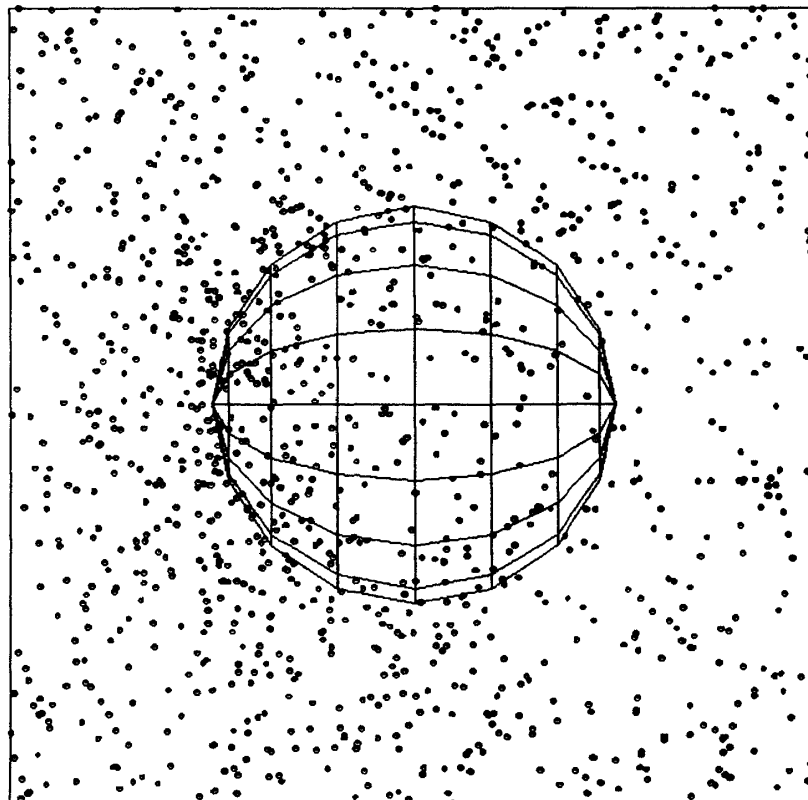


図6 球のまわりの分子位置表示

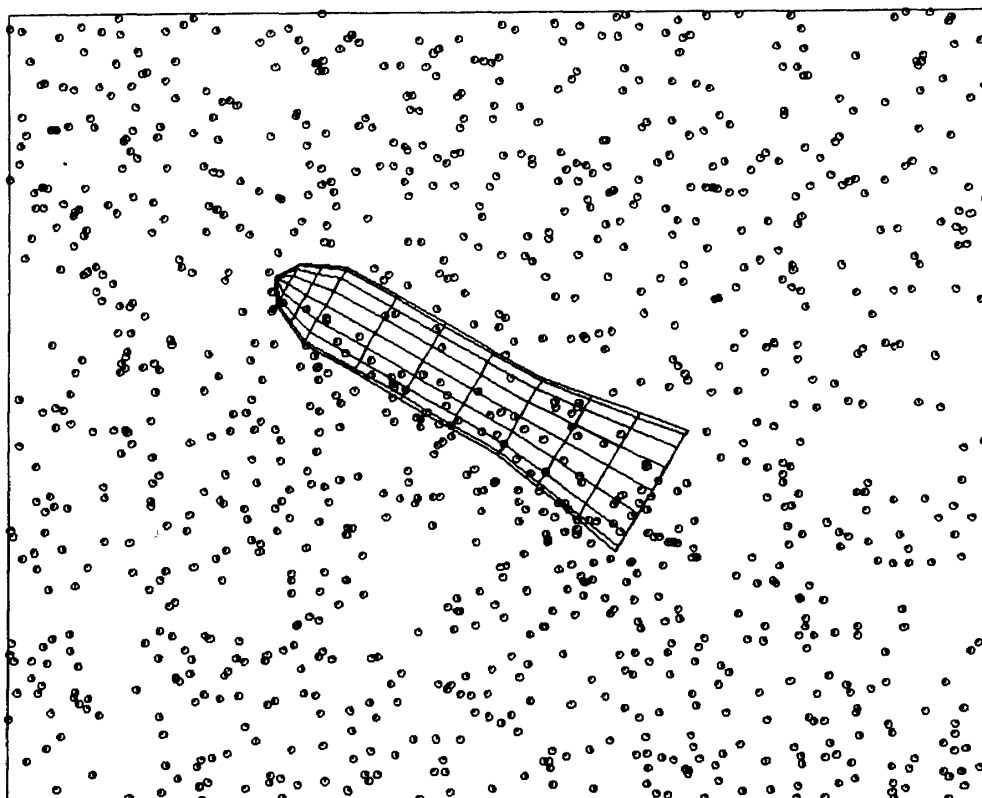


図7 AGARD HB-2(迎角 30°)まわりの分子位置表示

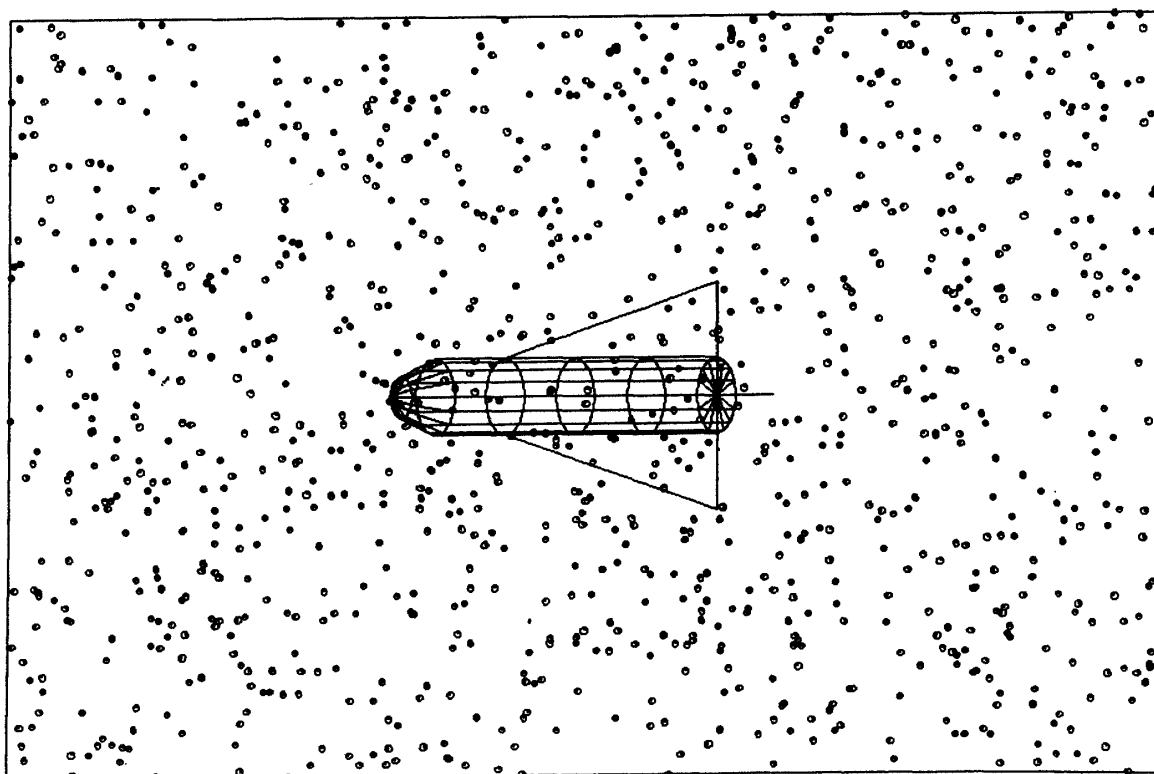


図8 モデル・プレーン(迎角 30°)まわりの分子位置表示(下面図)

5. 高速化プログラム

RGNWTは分子衝突シミュレーションに多大な計算時間を要するので、コードのベクトル化のための近似を用いて高速化を行った³⁾。分子衝突シミュレーションにおいて、VP-400でのRGNWTVはM-780でのRGNWTの数倍の高速化を達成している。しかし、全コードに対しては、現在のところ3倍程度の高速化になっている。

謝 辞

コードの汎用化において、柳沢三憲（航技研）、久保 紳（TSI）、岡崎 卓（統数研）各氏には有益な助言・協力を得た。また、出口良二氏（DDTL）はコードの高速化に協力された。神戸垂紀氏（SSL）はプログラム編成に協力された。

参 考 文 献

- 1) K. Koura, NAL SP-3, 17 (1984); SP-7, 159 (1986).
- 2) K. Koura, RGNWT (unpublished code) (1987).
- 3) K. Nakamura and K. Koura, RGNWTV (unpublished code) (1987).
- 4) K. Koura, J. Chem. Phys. 66, 4078 (1977).
- 5) G.A. Bird, Phys. Fluids 26, 3222 (1983).
- 6) K. Koura, Phys. Fluids 29, 3509 (1986); NAL TR-926T (1987).
- 7) G.A. Bird, Molecular Gas Dynamics (Oxford U.P., London 1976).
- 8) K. Koura, Phys. Fluids 13, 1457 (1970).
- 9) K. Koura, FMNWT (unpublished code) (1987).

