

NWTを用いた希薄流モンテカルロ直接シミュレーション  
 高平 幹成 (大興電子通信株式会社) 古浦 勝久 (航空宇宙技術研究所)

Monte Carlo Direct Simulation of Rarefied Gas Flows Using the NWT

by

Mikinari TAKAHIRA (Daiko Denshi Tsushin, Ltd)

Katsuhisa KOURA (National Aerospace Laboratory)

#### ABSTRACT

A code of the "rarefied gas numerical wind tunnel (RGNWT)" developed for the Monte Carlo direct simulation of rarefied gas flows is paralleled to work on the NWT parallel vector computer system. Some simulation results indicate that the NWT is preferable to the Monte Carlo direct simulation of rarefied gas flows.

#### 1. はじめに

H O P E等の高層大気飛行物体の希薄大気飛行時における空力特性を求めため「希薄気体数値風洞」の開発研究を進めている<sup>1)</sup>。希薄気流中の3次元全機シミュレーションには、高精度・高効率な手法が必要であり、擬衝突直接シミュレーション・モンテカルロ(NC-DSMC)法を用いているが、飛行高度の減少につれて流れは連続流に近づき、計算時間と記憶容量が急速に増大する。そのため、1993年2月に航空宇宙技術研究所に導入されたNWTを用いてコードの並列化を行い、希薄流シミュレーションにおけるNWTの有効性を検討した。

#### 2. コードの並列化

NWTはVP400相当の要素計算機(PE)を140台配置し、それらを高速のクロスバーネットワークで結合した分散メモリ型並列計算機システムであるが、PE間のデータアクセス(グローバルアクセス)速度が計算処理速度等に比べて非常に遅い事に注意して並列化を行う必要がある。「希薄気体数値風洞」においてNWTの性能を十分に引き出すため次の様な並列化を行った。

DSMC法では分子運動と分子衝突を小さな時間ステップの間分離して取り扱う。分子運動については、PE間の分子データの転送を極力少なくするため、衝突セルを最小単位とする計算領域を一様流方向にそって各PEに分割する。物体の形状に関する比較的少量のデータは各PEに重複したローカルデータとして持たせ、分子と物体の衝突は各PEで独立に処理を行う。また、PE間を移動する分子データは用意したバッファにローカルアクセスで入れ、その後、SPREAD MOVEで

まとめて他のPEへ転送する。この際、使用するメモリーを少なくするため、隣接PEへの転送用2種類及び2つ以上離れたPEへの非常に少ない分子データ転送用の1種類の計3種類のバッファを用意した。

分子衝突については、分子を計算領域毎にまとめ、それぞれのPEが受け持つ計算領域における分子に独立に通し番号をつけ、各PEでローカルに独立な処理を行う。また各衝突セルの分子間衝突シミュレーションの計算時間は一律ではないので、各PEの計算領域の大きさを任意に指定できるようにし、各PEの計算時間のばらつきを小さくするように工夫した。

並列化前後の上述のイメージを図1、2に示す。

#### 3. NWT台数効果

「希薄気体数値風洞」の並列化コードを用いてNWTのPE台数効果の評価を行った。

2次元並列化プログラムを用いて、一様流マッハ数 $M_\infty=20$ 、一様流温度 $T_\infty=20\text{K}$ 、及び連続流に近い一様流クヌーセン数 $Kn_\infty=0.025$ の2次元円柱周りの窒素分子流のシミュレーションを行った。衝突セル数 $405 \times 505$ 個、データセル数 $81 \times 101$ 個、及び計算領域内の分子数 $\sim 10^6$ 個を用いた。ベクトル化のみを行ったプログラムをPE1台で実行した場合を基準とし、さらに並列化を行ったプログラムの計算速度及び実効記憶容量の比を図3に示す。PE16台を用いた場合、計算速度は15倍、実効記憶容量は11倍程度の向上がみられる。

3次元並列化プログラムを用いて、一様流マッハ数 $M_\infty=20$ 、一様流温度 $T_\infty=300\text{K}$ 、及び一様流クヌーセン数 $Kn_\infty=0.1$ の3次元H O P E形状周りの窒

素分子流シミュレーションを行った。衝突セル数 $64 \times 64 \times 64$ 個、データセル数 $64 \times 64 \times 64$ 個、計算領域内の分子数 $\sim 2 \times 10^6$ 個を用いた並列化プログラムの台数効果を図4に示す。PE16台を用いた場合、計算速度は14倍、実効記憶容量は13倍程度の向上がみられる。

以上の結果よりNWTが希薄流モンテカルロ直接シミュレーションに対し有効であることが確認できたので、「希薄気体数値風洞」の汎用コードの並列化をさらに進める予定である。

参考文献

- 1) 古浦勝久、高平幹成：  
NAL SP-16 (1991)；  
NAL SP-19 (1992)；  
NAL SP-22 (1993)。

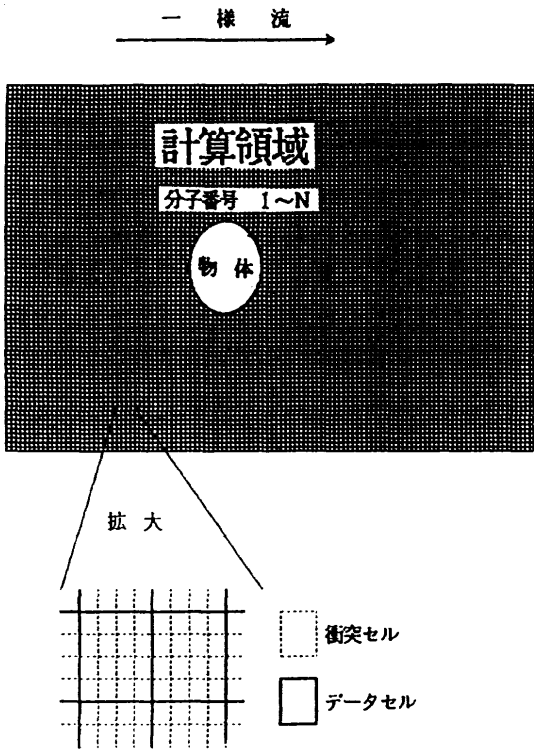
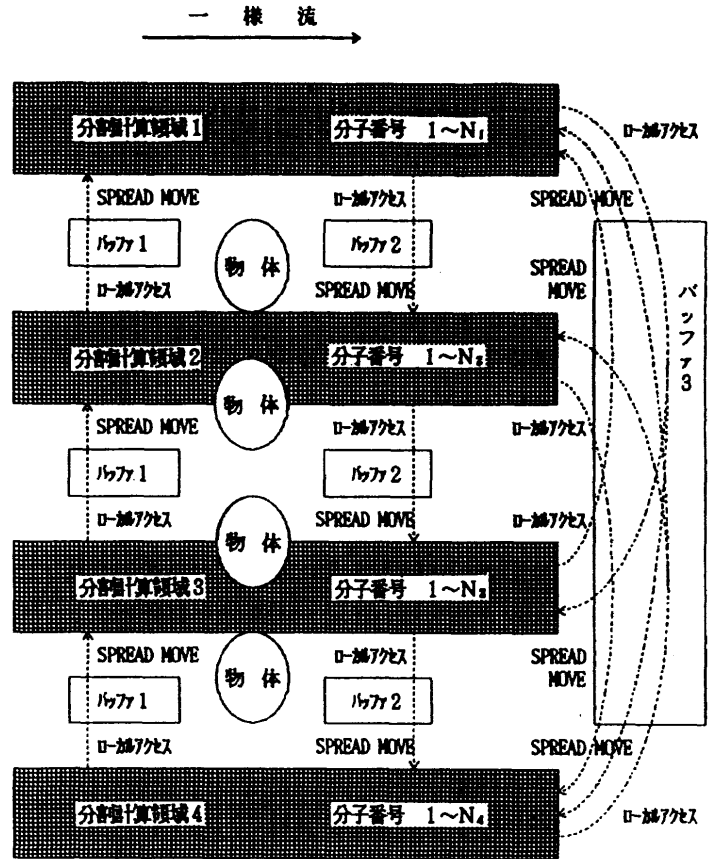


図1 並列化前のイメージ



$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N$$

---> : 分子移動

バッファ1、2の必要量=分割数×隣接する計算領域に移動する分子数

バッファ3の必要量=分割数×分割数×2つ以上離れた計算領域に移動する分子数

図2 並列化後のイメージ (PE 4台使用の場合)

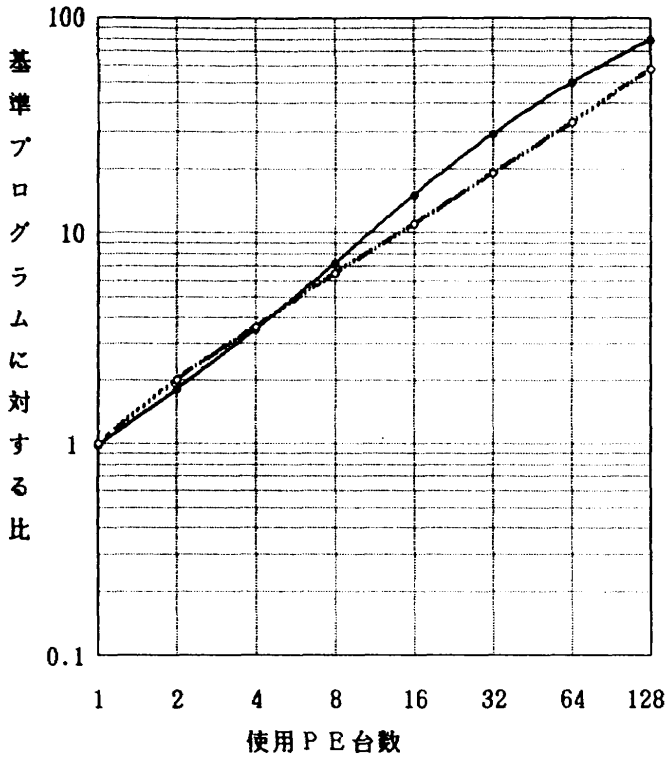


図3 NWTの台数効果(2次元円柱)

—●— : 計算速度比  
 - - ○ - - : 実効記憶容量比

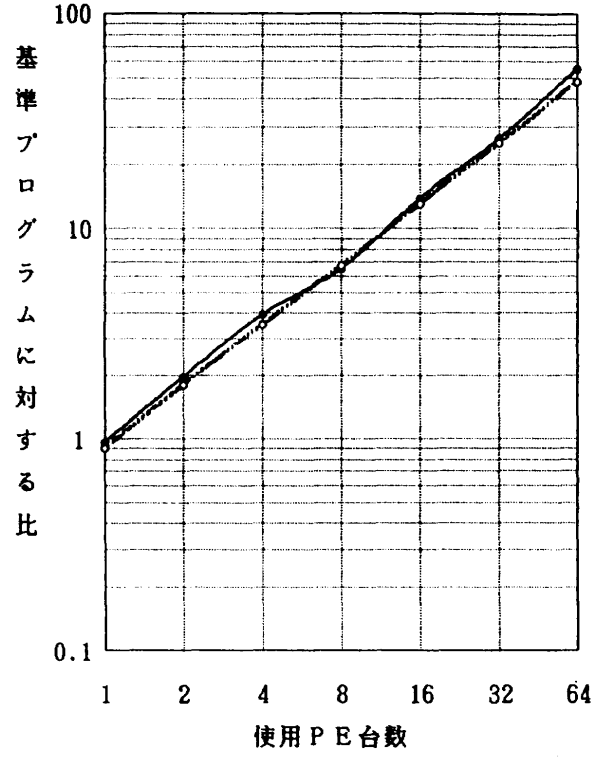


図4 NWTの台数効果(3次元HOPE形状)

—●— : 計算速度比  
 - - ○ - - : 実効記憶容量比

