

鈍頭物体まわりの超音速二相流の数値解析

石井隆次* 梅田吉邦* 由比政年**

Numerical Analysis of Supersonic Gas-Particle Two-phase Flows Around a Sphere

by

Ryuji ISHII, Yoshikuni UMEDA

Kyoto University

and Masatoshi YUHI

Mazda K.K.

ABSTRACT

This paper is concerned with unsteady supersonic gas-particle flows around a sphere. Impingement of a large particle-cloud on a shock layer of a dust-free gas in front of a sphere is numerically simulated. The effect of particles rebounded from the sphere is taken into account. It is shown that a temporal reverse flow region of the gas is induced near the body axis in the shock layer, which is responsible for the appearance of the gas flow region where the pressure gradient becomes negative along the surface. The flow region with the negative pressure gradient moves towards the downstream direction with time along the surface. These phenomena are consistent with previous experimental predictions. It is shown that the present results strongly support a flow model for the particle-induced flow field postulated in connection with "heating augmentation" found in the heat transfer measurements in hypersonic particle erosion environments. The particle behavior in such a flow is very complicated so that it is almost impossible to treat the particle-phase flow as an ordinary continuum medium. A few new findings are also described.

1. まえがき

1970年代の初めに超音速二相流中でのチタンやステンレススチールなどの金属の強度を調べる一連の実験がNASAを中心に行われた。その結果、ダクトを含む気体中では鈍頭物体前面で物体への熱伝達率がダクトを含まない気体中の場合に比べて数倍にも増加する事が観測された。そしてこの

ような現象は気体中に含まれるダクトの量のごくわずかな場合でも起こる事、しかも熱伝達率の増加は物体表面に直接入射（衝突）した微粒子が持ち込むエネルギーフラックスに比べてはるかに大きい事が明らかになった。

そこでこの原因が詳しく考察され、現象を説明するために鈍頭物体まわりで起こる流れ場について図1のようなモデルが提案された。すなわち物体面に入射した微粒子はかなりの速度で反射され、物体前面の衝撃波層をつき抜けて一様流にまで達

* 京都大学

** マツダKK

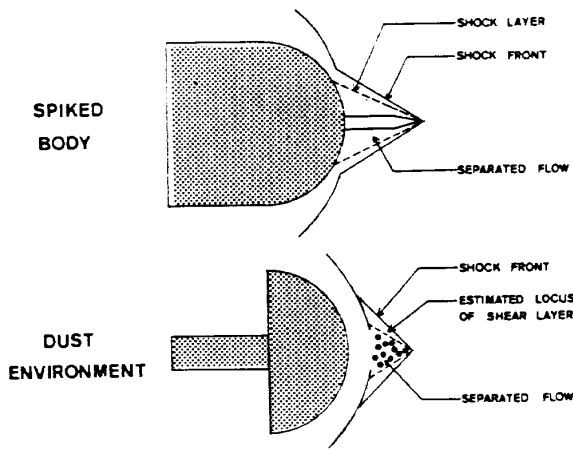


図1 ダスティガス中の球の前方の流れ場とスパイクトボディ前方の流れ場の類似性

する。この間粒子は衝撃波層内の気体を前方に引っ張ることになり、結果的にスパイクトボディにより引き起こされるような剥離流れがつけられ、物体表面の境界層が層流から乱流に遷移する。すなわち物体表面への熱伝達率の増加はこの層流から乱流への境界層の遷移が原因であると結論されている。

本研究では球に入射する超音速ダスティガスにより引き起こされる流れ場をスーパーコンピュータにより数値実験し、上に述べたようなこれまで提案されている流れ場のモデルについてその妥当性を詳しく検証する。

2. 数値スキームと境界条件

計算に用いたスキームはこれまでに我々が開発した混合スキームである¹⁾。すなわち気体相に対してはChakravarthy & OsherのTVD法²⁾、粒子相に対してはトラジェクトリー法を用いた。

流れは軸対称とし、計算領域は図2に示す。Oは球の中心、ABは物体表面、OCは中心軸である。気体は矢印の方向からマッハ数3で流れており、微粒子は始め図中の斜線部分にのみ存在し、その速度、温度は一樣流中の気体のそれらと同じ（平衡状態）であるとする。気体に対しては軸OA及び物体面ABでは対称条件、外側境界CD及び下流境界DBでは一樣流条件をもちいた。粒子に対しては物体表面で完全弾性衝突と完全非弾性衝突の二つの条件を用いた。計算に使用した物理量は

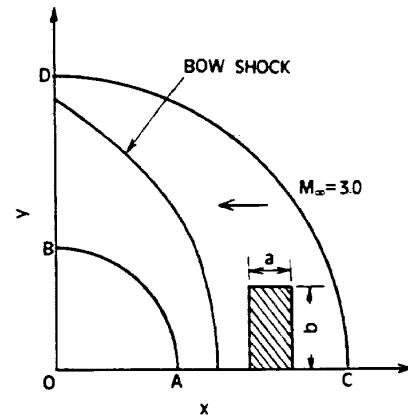


図2 計算領域と境界条件：球の半径3cm；一樣流の気体（空気）の圧力及び温度0.1atm, 290K；粒子の半径及び流量比（loading ratio）2μm, 5.0；ダストクラウドの大きさ（無次元）a×b=0.3×0.2

表1 粒子及び気体の物理量

Gas (Air)
$\gamma = 1.4$
$C_{pg} = 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
$\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ (for $T = 288 \text{ K}$)
$\delta = 0.5$
$Pr = 0.75$
Particles (Al_2O_3)
$\rho_{mp} = 4.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
$C_{pp} = 1686 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

表1に示す。

3. 計算結果

以下の結果は全て球の半径と一樣流の気体の物理量で無次元化された値で示される。

図3, 4にはそれぞれ球を通る中心軸OC上の密度分布と物体表面上の圧力分布の時間履歴が示されている。いずれも左の結果は粒子が物体表面で弾性衝突をすとした場合、右の結果は非弾性衝突をすとした場合である。図3ではバウ衝撃波の時間変動の大きさの違いが非常に顕著であることがわかる。すなわち、衝撃波層内の流れ場の変動には反射粒子の存在が決定的な効果を持つことが理解できる。図4でも両者の違いは歴然としている。すなわち粒子が弾性衝突する場合、物体表面に沿う圧力勾配の逆転領域がはっきりと現れてお

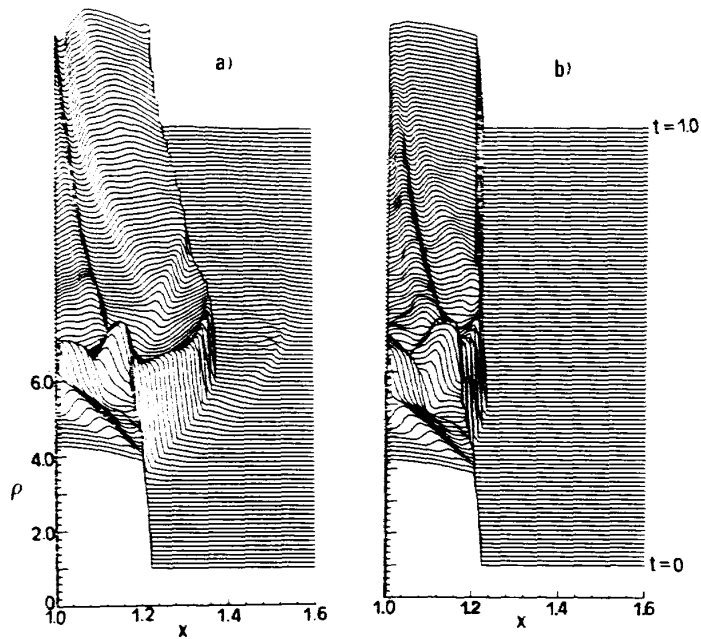


図3 軸に沿う気体の密度分布の時間履歴： a) 完全弾性衝突モデル； b) 完全非弾性衝突モデル

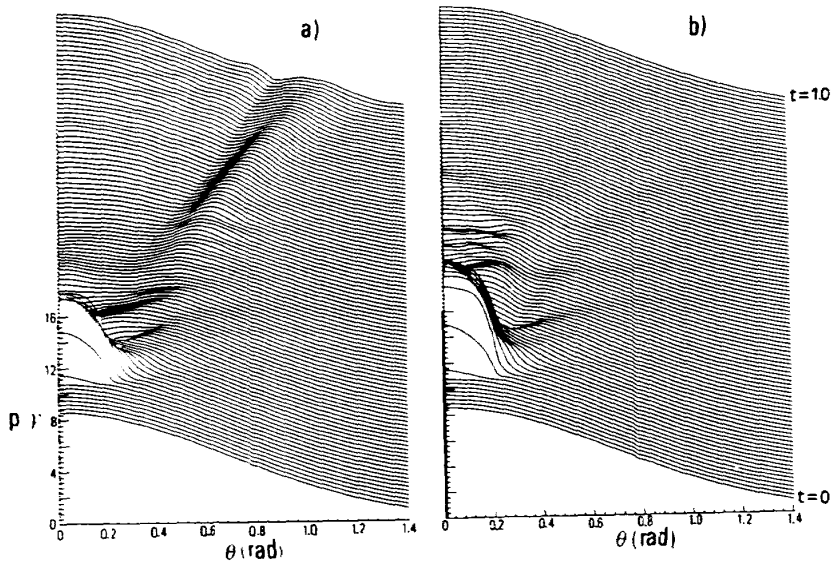


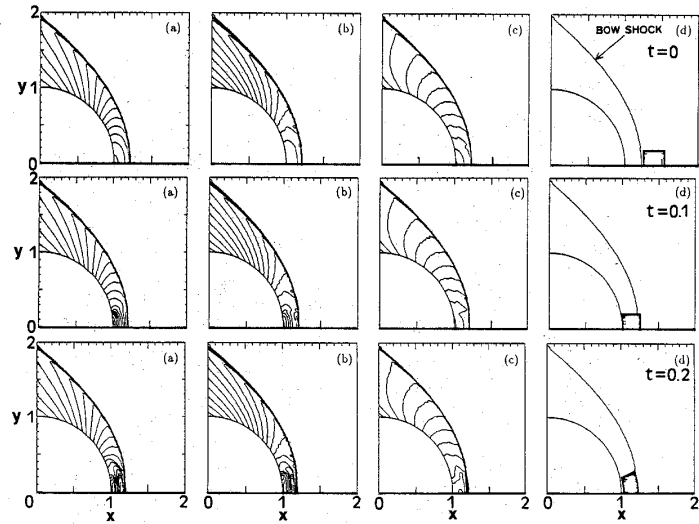
図4 球の表面に沿う圧力分布の時間履歴： a) 完全弾性衝突モデル； b) 完全非弾性衝突モデル

り、それが気体とともに下流へ流されていく状況がよくわかる。反射粒子により流れの剥離現象が引き起こされるとした従来のモデルはこの点では全く正しいことがわかる。

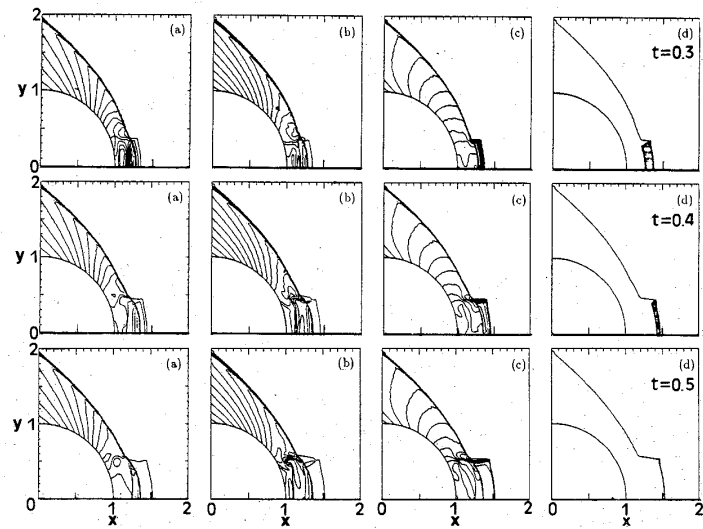
さらに流れ場の性質を調べるため、流れ場の密度、圧力、マッハ数及び粒子群位置の空間分布を図5に示す。これらの図から衝撃波層内で気体の流れの剥離が起こり、渦構造が形成されていく状

況がよく理解できる。ここでは粒子が物体面で完全弾性衝突する場合の結果だけを示すが完全非弾性衝突の場合には流れの剥離や渦構造はほとんど無視できる程度に弱い。

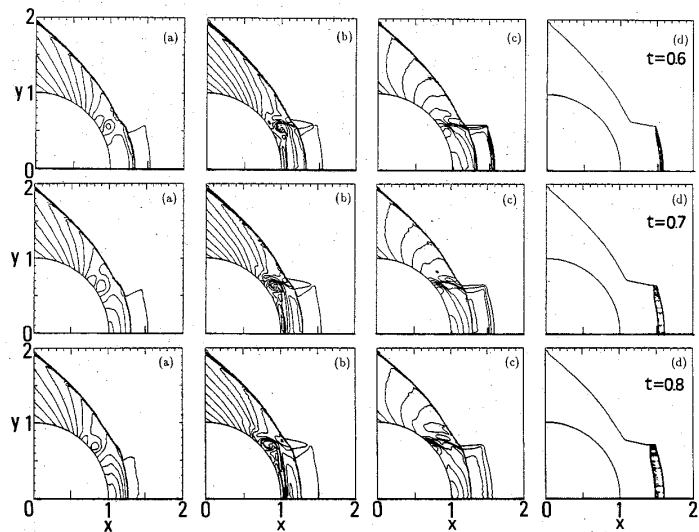
図6には粒子の完全弾性衝突モデルに対する気体の流れ場に剥離が起こった瞬間の気体の速度ベクトルを示す。この場合には図1で示された流れモデルとはかなり異なっていることがわかる。



(a)



(b)



(c)

図5 完全弾性衝突モデルに対する気体の流れ場の時間変化：
 a) 等圧力線図；b) 等密度線図；c) 等マッハ線図；
 d) 粒子の空間分布

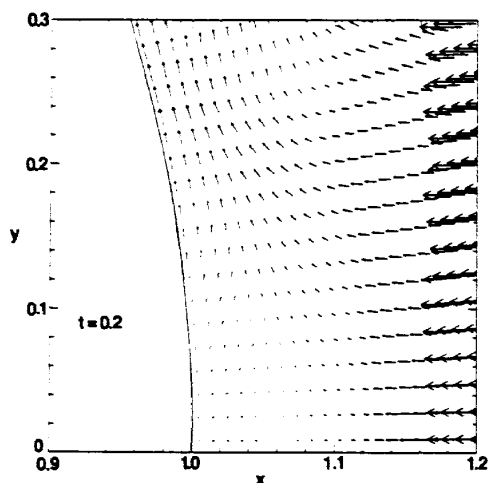


図6 気体の流れの剥離

4. 結論

球の周りの超音速二相流では、物体面での粒子の反射がバウ衝撃波及び衝撃波層内の流れ場の時

間変動にとって決定的に重要な効果を持つ。数値実験で得られた結果はこれまで実験を説明するために提案された流れモデルをある程度支持している。しかし図1に示された流れ場と計算で得られたものでは明らかに異なる部分が存在する。

本研究は科学研究費（重点領域01613004及び一般研究C01550532）により行われたものである。

参考文献

- 1) R. Ishii, Y. Umeda, and M. Yuhi, "Numerical Analysis of Gas-Particle Two-Phase Flows", *J. Fluid Mech.*, 203, 475 (1989).
- 2) S.R. Chakravarthy and S. Osher, "A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws", *AIAA Paper 85-0363*, 1985.

