

極超高速衝突時の電離・輻射過程を考慮した2次元衝突計算

○中澤 淳一郎¹、長友英夫²、矢野創^{1,3}

(¹総合研究大学院大学、²大阪大学、³宇宙航空研究開発機構)

背景と目的

天体衝突現象における典型的な衝突速度は数 km/s 程度と言われるが、近年の惑星探査では、長周期彗星への高速フライバイ等において、固体微粒子が 20 km/s を超えるような速度で探査機へと衝突する場合が考えられる。こうした極超高速衝突時の物質の熱力学的過程においては、電離や輻射、熱拡散等の影響が大きくなりうる。しかし、従来の超高速衝突に対する数値流体計算では、このような物理現象は十分に取り扱われていなかった。

計算手法

本研究では、一流体につきイオンと電子の2温度を計算し、固体溶融からプラズマ状態までを扱える状態方程式等のモデルを考慮した2次元放射流体コード「P4P」を用いた衝突計算を実施した。これにより、バンデグラフ型静電加速器を用いた、数十 nm の鉄微粒子をタンタルターゲットに 20-40 km/s で射出した超高速衝突実験 (Ratcliff et al., 1997) の結果を再現することを試みる。計算ではプロジェクトイルを 125-375 分割しており、計算領域はプロジェクトイル直径の 10 倍ほどの広さである。

衝突圧力の比較

P4P では、数値流体計算にイオン・電子のエネルギー交換項、熱拡散項、輻射輸送項を追加することでプラズマの挙動を再現することができる。Ratcliff et al. (1997) の衝突条件における衝撃圧力を、インピーダンスマッチングおよび P4P により計算された結果と比較した (図1)。

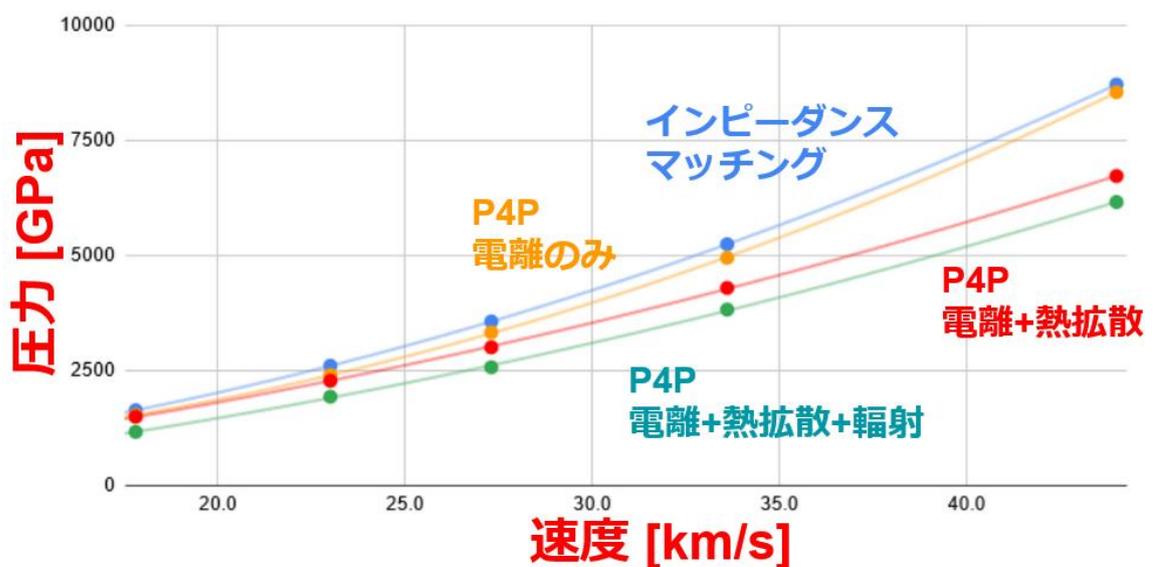


図1 Ratcliff et al. (1997) の衝突条件における衝撃圧力の比較

すると、電離項のみを追加した場合はインピーダンスマッチングと非常に近い一方で、熱拡散項を追加すると約 20%、熱拡散項および輻射輸送項を追加すると約 25% 近く減少していた。これは、数十 nm の鉄微粒子とタンタルターゲットの 20-40 km/s での衝突現象においては、熱拡散や輻射輸送の影響が断熱膨張に対して無視できないことを示している。

発生するイオンのエネルギー

Ratcliff et al. (1997) では、衝突により発生するイオンのエネルギーは 20-45 km/s の範囲で約 20-50 eV であり、速度との相関が見られなかった。一方、今回の P4P による計算では、図 2 のように衝突後に数 eV-100eV の様々なイオン温度 (エネルギー) を持つ構造が見られた。これらの構造ごとの平均温度は、速度が上昇するに従って増加した。一方で、実験ではこれらの構造の空間平均の時間平均を観測していた可能性がある。そのため、これらのイオン温度を計算領域、計算時間全体で平均した値を計算したところ、おおよそ 0.5 -1 eV 程度であり、速度依存性を示さなかった。Friichtenicht, Slattery 1963 では、衝突プラズマが局所熱平衡であることを仮定し、発生するイオンのエネルギーを 0.5 eV 程度と見積もっている。これを踏まえて Ratcliff et al. (1997) では、20-45 km/s の範囲で約 20-50 eV のエネルギーを観測していたため、今回の実験の時間 (サブ ns) ・空間スケール (nm) では衝突プラズマは局所熱平衡とは言えないという結論が述べられていた。今回の P4P の計算では、計算領域、計算時間全体で平均した際は、Friichtenicht, Slattery 1963 に近い値が出た一方、局所的には数 10-100 eV の幅を持つイオンのエネルギーの存在を見積もることができたため、上記の Ratcliff et al. (1997) の結論を定量的に示すことができている。

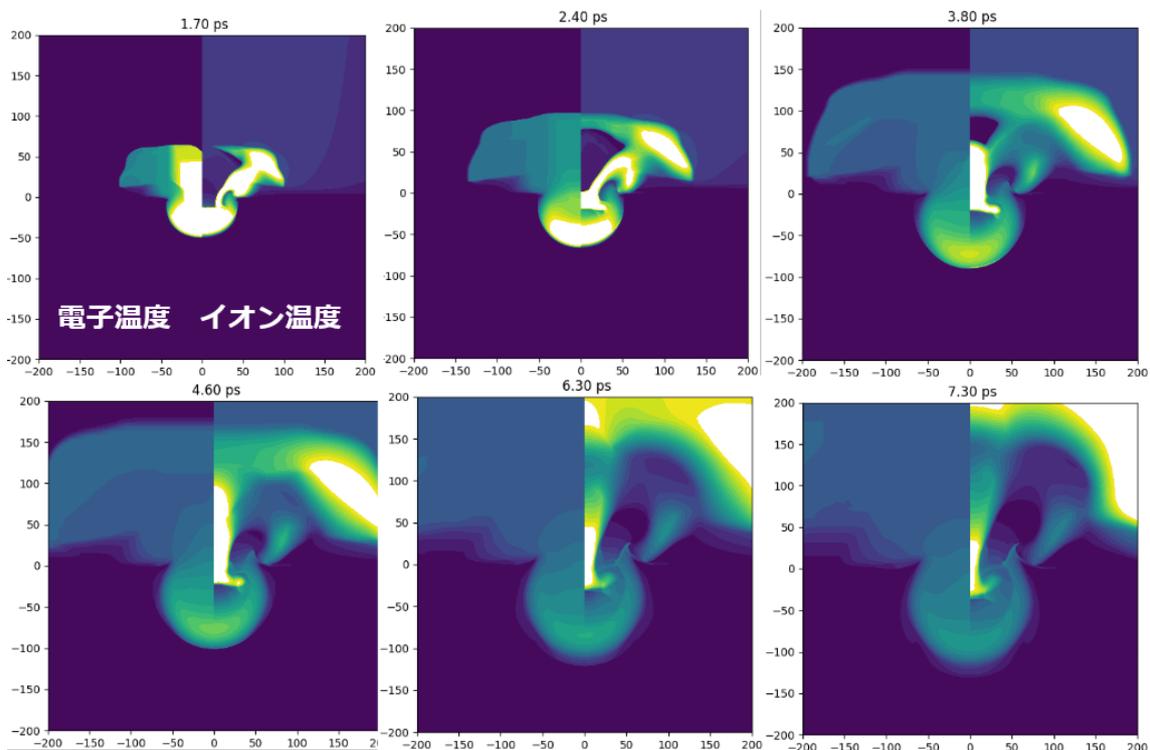


図 2 衝突後のイオン温度・電子温度の空間分布の変化