

天体衝突時の火球の熱線放射の影響

荒川 眞和¹, 黒澤 耕介^{1,2}

¹神戸大学 国際人間科学部 環境共生学科, ²千葉工業大学 惑星探査研究センター

研究背景及び先行研究の問題点

人々が天体衝突による危機を再認識したきっかけは, 2013 年に起きたロシアのチェリャビンスク州で起きた直径 20 m 程度の天体衝突事件である. このような規模の小天体の衝突頻度は 100 年に一度程度と推定されている [1. 岡田ら 24]. 今から約 6600 万年前に直径約 10 km の小天体がユカタン半島に衝突した事件 (Chicxulub) は, 地球規模の環境変化や生物の大量絶滅を引き起こし, その後の生物進化にも大きく影響を与えた. この規模の衝突頻度は一億年に一度程度だが, 与えた影響はチェリャビンスクの比ではない. このように衝突頻度や与えた影響の大きさは, 衝突天体の大きさに依存するが, 天体衝突は地球の環境とそこで住む生物に度々関与してきたと考えられ, これからの地球環境にも様々な影響を与えていく恐れがある.

本研究では上述した二つの例の間に位置する直径数百 m から数 km の天体の衝突に着目している. 地球への天体衝突速度が 15 km s^{-1} に達すると, 衝突直下点の岩石は完全に融解し, またその一部が蒸気化し, 急激に膨張する [2. Collins+05]. これはしばしば「衝突蒸気雲」または「火球」と呼ばれる. Chicxulub の衝突では衝突天体直径が大気のスケーリングハイトよりも大きく, 衝突蒸気雲は大気存在に関係なく宇宙空間へ向けて膨張する. 今回はそれよりは小さい場合, すなわち衝突蒸気雲と惑星大気の相互作用が起こるような直径数百 m から数 km の天体衝突に焦点を当て, 特に熱線放射に着目する. 先行研究 [2. Collins+05] では核爆発時の熱線放射に関する知見を基に, 直径数百 m から数 km の天体衝突時に発生する熱線放射の影響を評価する簡易的な理論モデルを構築した. しかしこのモデルでは, 大気の温度が大気の透明化温度 (光学的厚みが 1 を下回る温度) である 3000 K に冷却されるまでの放射を以下の 3 つの仮定に従い無視している.

- (1). 膨張初期は放射表面積が小さい.
- (2). 膨張初期の冷却率は大きく, 総放射エネルギーとしては小さいと思われる.
- (3). 膨張する岩石蒸気が周辺大気に衝撃波を発生させ大気がプラズマ化する.

大気プラズマは光学的に厚く, 岩石蒸気の光を通さない.

以上の議論は, 熱線放射のスペクトル情報を含まない. しかし実際には初期の高温状態の岩石蒸気や衝撃加熱された大気は光学的厚さが ~ 1 の面から紫外線を放射すると考えられる. 岩石蒸気の膨張初期段階の放射の総エネルギーが小さくても地球環境に影響を与えた可能性があろう. 本研究では, iSALE2D [4-6] を使用し, 大気中で岩石蒸気が急激に膨張する様子を調べた.

計算条件

1200×2400 格子の円柱座標系で計算している. 1 格子の大きさは 50 m である. 蒸気雲の初期直径は 2 km としている. 蒸気雲の初期条件は 20 km s^{-1} 衝突時の密度と内部エネルギーを与えている. 初期の大気は一様に

一気圧で 293 K である。状態方程式は ANEOS granite と Tillotson EOS dry air を使用している。大気の比熱比は温度の下限となる 1.2 を採用している。

結果

膨張する蒸気雲の動径方向の線上の温度、圧力、密度、流速の分布を調べた。はじめに 0.25 s 毎の分布を図示し、0 s から 9 s までの 37 のスナップショットを重ね合わせた。岩石側を赤色、大気側を青色と色分けしている。温度分布をみると、核爆発の状況とは異なり、内側の岩石蒸気は素早く冷却し、その前面で衝撃加熱された大気の方が高温になっている可能性があることがわかった。

膨張初期をより詳細に調べるため、0.02 s 毎に 0 s から 0.48 s までの 25 のスナップショットを重ね合わせた。その結果、岩石蒸気は 0.3 s で 3000 K まで冷却することがわかった。衝撃加熱された大気が 0.02 s で 44000 K になっていることがわかった。また、0 s を除く 24 ステップで岩石蒸気の温度より、大気の温度の方が高温であることがわかった。

大気の温度が透明化温度である 3000 K に到達するまでに ~6 s かかることがわかった。以上から蒸気雲の膨張初期の ~10 s 間は衝撃加熱された大気から強力な熱線放射が発生する可能性があることがわかった。

解析

今回は簡単のため衝撃加熱された大気の最高温度の面から黒体放射が発生すると仮定した。膨張開始から ~3 s の間は大気温度は 6000 K を超えており、その間は、3000 K 以下ではあまり放射されない紫外線領域の波長を多く含むだろう。特に 200–250 nm はオゾンと酸素の吸収が弱い大気の窓と呼ばれる領域であり、紫外線が遠方まで到達する可能性がある。この波長域は UV-C と呼ばれ、生物にとって有害であり、熱線放射が地球環境に与える影響について見直しが必要であると考えられる。

まとめ

膨張する岩石蒸気より、蒸気雲に押された大気の方が高温になることがわかった。初期の ~10 s 間に加熱された大気の表面から高エネルギーの紫外線が発生する可能性があることがわかった。このようなことから、熱線放射が地球環境へと与える影響について見直しが必要であると考えられる。今後の研究では輻射輸送計算を解き、具体的なエネルギー量を調べる予定である。

謝辞 iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。数値計算結果の解析/ 作図には pySALEPlot software を使用しました。開発者の Tom Davison 氏に感謝致します。数値計算は国立天文台 CfCA の計算サーバ/ 解析サーバを用いました。

参考文献 1. 岡田ら (2024), *遊星人*, **33**, 220 – 234., 2. Collins et al. (2005), *MaPS*, **40**, 817 – 840., 3. https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333534.htm 4. Amsden et al. (1980) Los Alamos National Laboratories Report LA-8095. Los Alamos, New Mexico. 101 pp., 5. Ivanov et al. (1997) *Int. J. Impact Eng.* **17**, 375–386., 6. Wünnemann et al. (2006), *Icarus* **180**, 514–527.