

衝突蒸気雲内の化学反応に関する数値計算と生命起源への影響

宮脇誠一¹、玄田英典¹

¹東京科学大学 未来社会創成研究院 地球生命研究所

1. 背景

生命の起源において、アミノ酸や核酸塩基等の生命前駆物質がどのように生成され、地球へ供給されたのかを解明することは重要である。初期地球では、CO₂に富む中性的な大気組成を有していたと考えられるが (Trail et al., 2011)、これは一般的に生命前駆物質の合成にとって不利な条件である。一方で、小天体の地球への高速度衝突 (>15km/s) によって生成される衝突蒸気雲は、高温・高圧の特殊な環境を形成し、これにより様々な化学反応が促進される (Sekine et al., 2006; Kress and McKay, 2004)。蒸気雲は高温状態から急速に冷却される過程で、化学反応のタイムスケールが膨張の冷却タイムスケールよりも長くなることで、化学組成は平衡状態から非平衡状態に移行して凍結 (クエンチ) される (Ishimaru et al., 2010)。この過程によって、惑星表層の平均的な環境では生成し得ない化学種が生じ、局所的に還元的な環境が形成されることが期待される。本研究は、コンドライトが衝突した際に生じる衝突蒸気雲内の化学反応を解析し、生命前駆物質や還元的な大気形成された可能性を明らかにすることを目的とする。

2. 手法

本研究では、まず iSALE 衝突計算コード (Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wünnemann et al., 2006) を使用し、衝突天体の粒子における平均ピーク温度、圧力、密度を計算した。衝突条件としては、炭素質コンドライト (CI, CV) および普通コンドライト (H, LL) の計 4 種類を使用し、さらにインパクトターの直径を 1 km に固定した上で、衝突速度を 10, 15, 20 km/s の 3 パターンで計算を行った。次に、衝突計算で得られたピーク温度・圧力・密度を初期条件として、衝突蒸気雲が理想気体として音速で断熱膨張すると仮定して、蒸気雲の温度と圧力の進化を計算した。得られた温度と圧力の進化に基づき、十分に高温な条件では、気相、液相、固相を含む多相平衡計算を行った。この平衡計算には GGchem (P. Woitke et al., 2018) を使用した。平衡計算は、岩石に含まれる主要な難揮発性元素である Si, Mg, Fe が 99%凝縮する温度・圧力まで行い、その条件における平衡組成を算出した。その後、得られた平衡組成からガス相の化学組成を抽出し、ガス相の化学反応計算を行った。この化学反応計算には Cantera (Goodwin & D. Moffat, 2022) を使用し、GRI Mech の HCNO 系の化学反応に加え、硫黄 (S) を含む反応 (Ströhle et al., 2014; Rahman et al., 2021) を追加した化学反応ネットワークを利用した。このようなアプローチによって、衝突蒸気雲内の最終的なクエンチ組成を求めた。

3. 結果と考察

本研究では、衝突蒸気雲内で生成されるクエンチ後のガス組成について、インパクトター物質や衝突速度の違いが与える影響を計算した。その結果、インパクトター物質ごとに組成の違いが確認された (図 1)。CI コンドライトでは H₂O や CO₂ が主要な化学種となり、酸化的な組成となっている。この結果は、CI コンドライトが水質変成作用を受けて多量の水を含む酸化的な天体であるという特徴と一致している。一方、CV コンドライトは H₂O の量が少なく、H₂ が主成分となる還元的な組成を示した。また、普通コンドライト (LL および H) では、CO や H₂ などの還元的な化学種が主要な成分として現れた。

次に、ストレッカー反応の出発物質として知られる NH₃、HCN、H₂CO について比較すると、図 2 に示すように、普通コンドライト (LL および H) の衝突においてこれらの化学種が特に多く生成されることがわかつ

た。したがって、普通コンドライトの衝突が局所的な還元的場を形成し、生命前駆物質の生成に寄与する可能性が示唆された。

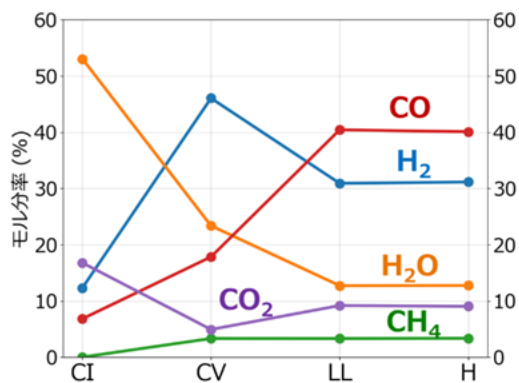


図 1：インパクト物質ごとの主要化学種 (H₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂) のクエンチ mol 分率 (15km/s, 750 K)

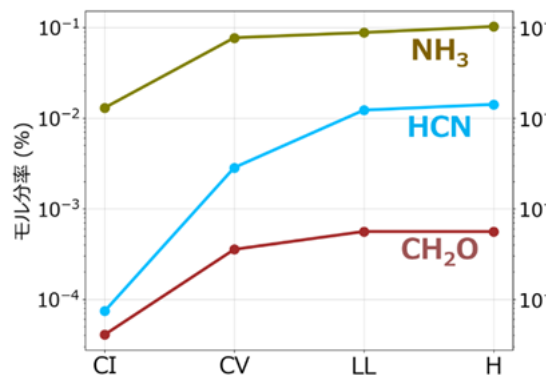


図 2：インパクト物質ごとのストレッカー反応出発物質 (NH₃, HCN, H₂CO) のクエンチ mol 分率(15km/s, 750 K)

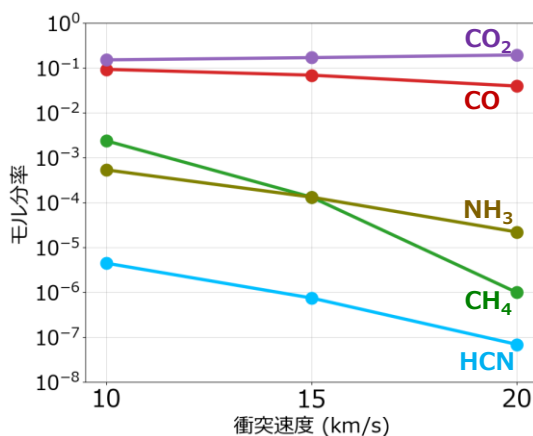


図 3：CI コンドライトのクエンチ組成の衝突速度依存性

さらに、衝突速度がクエンチ組成に及ぼす影響を調査した結果、図 3 に示すように、衝突速度が増加するにつれて、CH₄や NH₃、HCN といった還元的な多原子分子のモル分率が減少する傾向が見られた。図 3 で示した CI コンドライト以外のコンドライトについても同様の傾向が確認されている。この傾向は、衝突速度が増加すると、同じ温度で比較した場合に圧力が低下するため、ルシャトリエの原理によりこれらの多原子分子の合成が抑制されることに起因すると考えられる。この結果は、先行研究 (Ishimaru et al., 2010; Kuwahara and Sugita, 2015) の結果とも整合的である。

最後に、衝突による NH₃生成量を基に濃度を概算した。インパクトサイズを 1 km、衝突速度を 15 km/s に固定して計算を行った結果、衝突蒸気雲内で生成された NH₃が、同じ蒸気雲で生成された水蒸気が凝縮してできた水に全て溶解すると仮定した場合、その濃度は原始海洋の NH₄⁺濃度 (3.6–70 μM; Summers and Chang, 1993) の数千倍から数万倍に達することがわかった。特に、CV コンドライトおよび普通コンドライト (LL および H) においては、アミノ酸の熱水合成が効率的に進むとされる基準濃度 (50 mM; e.g., Aubrey et al., 2009) を上回る濃度が得られた。これにより、初期地球では CV コンドライトや普通コンドライトの衝突によって NH₃が高濃度で濃集した環境が形成され、生命前駆物質であるアミノ酸の合成に寄与した可能性が示唆された。