

天体衝突時に隕石の K-Ar 同位体時計が初期化される条件

黒澤耕介¹, 小池みずほ², 玄田英典³,

¹千葉工業大学, ²広島大学, ³東京工業大学,

はじめに: 地球上で発見される各種隕石は程度の差はあるものの、ほとんどの隕石が過去の天体衝突時に生成されたとみられる衝撃変成組織を有している。例えばチェリヤビンスク隕石は少なくとも 8 回の衝撃事件を記録していることがわかっている。過去の太陽系で天体の相互衝突が頻繁に起こっていたことは確かであろう。K-Ar 同位体系は U-Pb 系などの他の同位体系に比べて閉鎖温度が低いことが知られており、天体衝突時の加熱で初期化されやすいことが知られている。過去の衝突事件の年代を知ることができる有用な同位体時計である。

どのような衝突条件であれば K-Ar 同位体時計が変化するのかをオーダ推定してみると、実は K-Ar 同位体時計を初期化するのはそんなに容易ではない。これは衝突加熱の持続時間が短いからである。残留温度が熱伝導で冷却する特徴時間を考えると、衝突天体半径が ~ 1 km 程度とある程度大きい条件を考えても、残留温度が $\sim 1,000$ K になる必要がある。また旧来の手法で小惑星帯における典型的な衝突速度時の残留温度を求めると ~ 600 K 程度である。従って小惑星帯における典型的な衝突速度程度では K-Ar 同位体は初期化されず、従来の解釈と矛盾する。

塑性変形加熱の重要性: Kurosawa & Genda (2018)は天体衝突時の加熱度を再評価し、旧来の手法は加熱度を過小評価していることを示した。これは低速度衝突時(< 10 km s^{-1})には流体近似が成立せず、剪断・塑性変形時のエネルギー変化が無視できないからである。この効果の重要な点は減圧中にエントロピーが上昇するため、残留温度 $>$ 衝撃波背面温度の関係になることである。従って衝突現象の最高到達温度 = 残留温度となる。残留温度は、周囲への熱放射 and/or 熱伝導で冷えるまで持続するため、最高温度の持続時間は旧来の推定よりも数桁長くなることが期待できる。

今回は塑性変形加熱の効果を取り入れた場合に K-Ar 同位体時計が初期化される条件を定量化することを目指した。

計算手順: Kurosawa & Genda (2018)と同様に iSALE を用いて弾塑性体挙動を取り入れた数値計算を実施した。衝突速度は小惑星帯の典型的な衝突速度である 5 km s^{-1} で固定した。ANEOS dunite を用い、計算出力のエントロピーから残留温度を求めた。ほとんどの隕石の宇宙線照射年代は ~ 1 億年以内であることから同位体初期化を起こした衝突事件では隕石母天体に留まる物質の加熱度を調べることが重要である。今回は直径 200 km の母天体を想定し、脱出速度(130 m s^{-1})を超えない物質のみを解析した。高温物質は成長中のクレータの壁面に集中し、高温薄層を形成する。本来は温度分布が存在するが、今回は簡単のため衝突直下点における衝撃波背面温度(800 K)を超える物質を均質化することにした。その質量は衝突天体質量の 1.43 倍であった。質量重み付き平均残留温度は $1,200$ K であった。埋め込まれた熱量は衝突天体が持ち込む運動エネルギーの 15% であった。この結果は衝突天体サイズに依存しない。

続いてこの条件で形成されるクレータサイズを求めた。iSALE でクレータ形成が終了するまで数値積分を行うことは計算時間の点で現実的でないことと、そもそも数値拡散の観点から好ましくないことから、 π -group scaling law を用いて推定した。クレータ崩壊の経験式を用いて、過渡クレータ直径から最終クレータ直径に変換した。

衝突で埋め込まれた熱量とクレータ直径をもとに 1 次元球座標での熱伝導方程式を解いた。クレータ表面でのエネルギーバランスでは熱放射によるエネルギー消失も考慮した。iSALE 計算で求めた高温物質の質量と温度から、最終クレータ壁面の高温薄層の厚みと温度を求め、計算の初期条件とした。温度変化

と同時に長石中の Ar の拡散距離を計算し、各タイムステップで積算した。

計算結果: 以下では衝突天体半径 1km の場合の結果について述べる。温度が下がり始めるのは衝突から 0.01 年ほど時間がかかり、0.1 年後には~500 K 程度まで温度が下がることがわかった。Ar の累積拡散距離は~0.01 年の極初期に段階で終了し、温度が下がってくるとほぼ無視できることがわかった。また高温薄層から伝わる熱による元素拡散距離は無視できるほどに短いことがわかった。累積拡散距離は空間分布を持つが、今回は簡単のため最大累積拡散距離が隕石中の長石のサイズ(100 μm)を超えた場合に K-Ar 同位体時計が初期化されると判定することにした。その結果、少なくとも半径 1km よりも大きい衝突事件では Ar 年代は初期化されただろう、という結果を得た。この場合形成されるクレータ直径は 20 km である。つまり小惑星上に現存する >20 km のクレータ形成時には Ar 年代が初期化されたと推定される。なお、この見積もりは冷えやすく、元素拡散が起きにくい条件を与えたために保守的である。実際にはより小さい衝突天体も K-Ar 年代を初期化させていたと推定されるが、この見積もりは今後の研究課題である。

隕石母天体への応用: Vesta のクレータ年代学モデルを流用し、直径 200 km の天体表面に形成されるクレータ個数と年代の関係を求めた。K-Ar 同位体時計が初期化される衝突事件(直径 >20 km のクレータの個数)は、統計的には過去 40 億年間に 100 回、30 億年間に 4 回、5 億年間に 1 回程度起こり得ることがわかった。チェリャビンスク隕石の岩体が過去 30 億年の間に 5 回の衝突事件を記録していたこととは調和的な結果ではある。しかし、母天体上の異なる場所で起きたすべての同位体時計初期化事件を経験した岩石組織がたまたま一箇所で角礫岩化し、最後の天体衝突によって地球に飛来した可能性は高くはないと思われ、隕石母天体上での水平混合過程を検討する必要がある。これは今後の課題である。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏, pySALEPlot の開発者である Tom Davison 氏に感謝致します。

※図や参考文献についてはスライドの PDF ファイルをご参照下さい。