

氏 名 金丸 礼

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2271 号

学位授与の日付 2021年9月 28日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 ユークライト隕石の物質科学的研究:原始惑星地殻における
熱史と衝撃史

論文審査委員 主 査 山口 亮
極域科学専攻 准教授
今榮 直也
極域科学専攻 助教
堀江 憲路
極域科学専攻 助教
三河内 岳
東京大学 総合研究博物館 教授
宮原 正明
広島大学 大学院先進理工系科学研究科
准教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 金丸 礼

論文題目 ユークライト隕石の物質科学的研究：原始惑星地殻における熱史と衝撃史

多くのエコンドライト(分化隕石)は、マグマから固化後に複雑な二次的プロセス(衝撃変成作用・熱変成作用・メタソマティズム)を経験しており、原始惑星地殻における進化の歴史に関する情報を保持していると考えられている。本研究対象であるユークライト隕石は、小惑星ベスタの表層地殻物質に起源を持つと考えられているエコンドライトの一種であり、これまで1500個以上の試料が回収されている。大量の同一隕石種の回収は、その母天体における岩石種の多様性や変成度の連続的な変化を観察可能にする。そのためユークライトは、原始惑星地殻における進化の歴史を明らかにするために最適な隕石種と言える。本博士論文では、ユークライトの母天体地殻における熱史および衝撃史をより良く理解するために、ユークライトの詳細な岩石・鉱物学的研究、X線回折(XRD)分析、カソードルミネッセンス(CL)分析を行った。また、得られた結果をまとめてユークライトにおける熱史に関する分類、衝撃分類体系を作成した。さらに、これら分類法を応用し、複雑な岩石組織を持つユークライトの成因の解析を行った。

熱史に関する分類では、シリカ鉱物の多形の存在度および産状に注目した。CL手法を用いた観察から、ユークライト中の石英、クリストバライトおよびトリディマイトの存在度が連続的に変化することを見出した。石英やクリストバライトは、岩石学的タイプが低い玄武岩質ユークライトに多く観察され、一方トリディマイトは集積岩ユークライトや岩石学的タイプ5以上の玄武岩質ユークライトに多く観察された。シリカ鉱物の産状に注目すると、ユークライト中の石英は主に多孔質なメソスタシス部分を形成し、クリストバライト、不透明鉱物およびリン酸塩鉱物と共存する。一方、トリディマイトは主に自形から半自形で産し、石英のように不透明鉱物やリン酸塩鉱物との共存関係は示さない。本研究ではこれら観察に基づき、石英に富むユークライト(Si-I type)、石英とトリディマイトに富むユークライト(Si-II type)およびトリディマイトに富むユークライト(Si-III type)の3つに分類した。熱力学的な観点において、低圧およびユークライトのソリダス温度(~1060 °C)から平衡状態で結晶化するシリカ鉱物はトリディマイトであると推定される。一方で、結晶化実験のような急速な冷却速度による非平衡状態での結晶化の場合、クリストバライトやシリカガラスができることが報告されている。これら議論に基づけば、Si-IIIタイプは、マグマから徐冷により平衡状態で結晶化した試料と考えられる。一方、石英やクリストバライトを多く含むSi-Iタイプは、マグマの急冷により非平衡状態で結晶化した試料であり、また、Si-IIタイプは、平衡状態で結晶化中に非平衡状態へと遷移した試料であると考えられる。石英の成因は、非平衡状態において、クリストバライトとともにできたガラス部分とその後のサブソリダスでの熱変成作用によって再結晶化したと考えることができ、トリディマイトとの産状の違いをよく説明できる。さらに本研究では、それぞれの試料中の斜長石サイズから最大結晶化速度を計算し、Si-IタイプからSi-IIIタイプにか

けて、冷却速度が低下することを明らかにしており、これら結果も前述の考察を支持する。このようにユークライト中のシリカ鉱物の組み合わせ、連続的な量比の変化および共存する鉱物は、結晶化プロセス(平衡・非平衡)とサブソリダスでの熱変成作用のみによってよく説明できる。つまりユークライトの Si-タイプ分類は、ユークライトのマグマからの結晶化過程の指標として利用できる。

衝撃分類では、ユークライトの体系的な衝撃組織の観察に基づき、衝撃変成度を定義した。この衝撃変成度は、斜長石・輝石の波状消光の角度、マスクリナイト量に基づいており、衝撃変成度 A から E までの 5 段階に分類される。分類された衝撃変成度ごとの試料の観察では、衝撃変成度の増加に伴い、斜長石の割れ目量の増加、トリディマイトの非晶質化の程度の増加を見出した。また、衝撃変成度 D 以上の試料からは、ステショバイト、コーサイト、ティッシンタイトなどの高压鉱物を発見した。XRD 分析では、衝撃変成度が増加するに連れて、回折 X 線の平均半値幅が増加することを見出した。回折 X 線の半値幅は、結晶の格子面間隔を反映する値であることから、衝撃変成度増加に伴い結晶内部の格子面間隔の乱れが増加を実測することができた。この分析から XRD 分析によって得られる回折 X 線の平均半値幅からもユークライトの衝撃変成度を決定できることを示した。本研究において、岩石・鉱物学的に定義したユークライトの衝撃変成度と XRD 分析から得られた回折 X 線の平均半値幅は、母天体上の衝撃イベント推定のために効果的な指標として利用できる。

前述の 2 つの分類手法を用いてユークライトの詳細な熱史・衝撃史の推定を行った。研究対象としたのは、複雑な岩石組織を示す **Juvinas** (玄武岩質ユークライト)である。**Juvinas** は、粗粒部分、細粒部分、砕屑性マトリックスから構成されるモノミクト角礫岩として知られている。**Juvinas** の Si-タイプ分類では、細粒部分は典型的な Si-II タイプの岩石学的特徴を示すことを観察した。一方、粗粒部分はシリカ粒子内に石英とトリディマイトが不透明鉱物と共存せずに産する。このような組織は、トリディマイトが衝撃変成作用によって部分的に非晶質し、その後の熱変成作用によって非晶質部分が石英へと再結晶化した部分と考えられる。つまり粗粒部分はもともと Si-III タイプとしてマグマから結晶化し、その後、衝撃変成作用および熱変成作用を経験していることが示唆される。これら観察は、**Juvinas** の細粒部分が粗粒部分の衝撃部分熔融メルトから結晶化したという提案 (Takeda and Yamaguchi, 1991) と調和的である。ここで、衝撃変成度に注目すると、**Juvinas** の各部分は衝撃変成度 A である。これは、粗粒部分の衝撃組織が細粒部分形成時の熱変成作用によってアニーリングされていることが示唆している。また、**Juvinas** の砕屑性マトリックスは、粗粒部分と細粒部分の岩片および鉱物片から構成されており、わずかに再結晶化した組織を示す。これら観察は、粗粒部分と細粒部分が形成された後に衝撃変成度 A を超えない衝撃イベントおよび弱い熱変成作用を経験したことを示している。つまり、**Juvinas** は、マグマから結晶化後に少なくとも 3 回の熱変成作用、2 回の衝撃変成作用を経験していることを明らかにした。

まとめると、本博士論文では、ユークライトの熱史に関する分類および衝撃分類を行った。熱史に関する分類は、マグマからの結晶化過程に関する情報を提供する。衝撃分類は、衝撃イベントにおける衝撃圧力を制約する。さらに、これら手法の応用は、複雑な岩石組織を持つ試料において、従来よりも詳細に母天体上での熱史・衝撃史の推定を可能

にした。本研究成果は、今後、年代学など補完的な研究との比較により太陽系初期に存在したと考えられる原始惑星の形成・変成史を解き明かすための有効な指標となる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 金丸 礼

Title
論文題目 ユークライト隕石の物質科学的研究：原始惑星地殻における熱史と衝撃史

ユークライト隕石は、分化隕石の中では最大のグループであり、小惑星ベスタの地殻を起源としている。小惑星ベスタ（直径約 530km）は、形成当時の形状や構造を保っている原始惑星の唯一の生き残りであるとされる。よって、ユークライトは、太陽系初期に起こった小天体での物質進化プロセスを知るには重要な試料である。しかし、ユークライト隕石の研究から、ベスタの初期地殻は、熱変成作用、衝撃変成作用、メタソマティズムなどのさまざまな二次的プロセスを経験しているため、これまで地殻の形成過程を知るのは困難であった。

申請者は、南極隕石を中心とした 18 個のユークライトの組織解析、鉱物組成の定量、また、微量元素組成から、小惑星ベスタの地殻の形成過程を明らかにしようとした。第 1 章では、構成鉱物の微細組織や化学組成から読み取った熱履歴からベスタ地殻の熱史や地殻構造についての検討を行なった。申請者は、ユークライトに 10% 程度含まれるシリカ鉱物に着目した。その産状から、ユークライトを 3 つのグループに分類した。これらのグループは、ユークライトが固化した当時の特徴およびその後の熱変成作用の強度で決まることを明らかにした。この手法は、これまでの輝石を使った手法と相補的なものであり、ユークライトの熱履歴をさらに詳細に解析できることになった。

第 2 章では、組織観察と X 線回折データからユークライト隕石の衝撃変成度の指標化を行なった。この手法でユークライトの衝撃変成度を 5 段階（A-E）に分類した。特に X 線回折およびカソードルミネセンスという手法を用いたアプローチは、当該分野において新しく独創性の高い試みである。また、これまでの組織観察に基づく衝撃変成度の分類より精度の高いものであり、ユークライトの衝撃変成過程をさらに精密に評価することが可能になった。

第 3 章では、上記の研究で確立した手法を、複雑な形成史を経験したとされるユークライト隕石（Juvinas）に適用した。Juvinas 隕石は、典型的なユークライトと呼ばれていたが、その組織の複雑さゆえ形成過程はよくわかっていなかった。申請者は、自身が開発した評価手法および微量元素組成の分析を通して、Juvinas 隕石は、マグマからの固化後に、複数回の程度の異なる熱変成作用と衝撃変成作用を受けていることを明らかにした。このような指標は、他の HED 隕石や他の分化隕石にも適用でき、原始惑星地殻の形成過程を解明するのに重要な手段になることが期待される。

以上のように、申請者は、ユークライト隕石の詳細な分析から原始惑星の生き残りである小惑星ベスタの地殻の形成過程を明らかにした。本成果の一部は、査読付き論文として国際誌 1 編（Polar Science, Kanemaru et al. 2020）で公表されている。したがって、審査委員会では、提出された論文が学位論文に値するものと、全員一致で判定した。