隕石分析からの宇宙化学進化

2020年1月7日(火) 第6回超新星ニュートリノ研究会

東京工業大学理学院地球惑星科学系 横山 哲也





- 隕石学基礎
- プレソーラー粒子と元素合成
- 隕石全岩の超高精度重元素同位体分析

横山研 研究内容 超高精度同位体分析が切りひらく新しい宇宙地球化学

ビッグバン 🧔 (138億年前)

分子雲

原始太陽系星雲形成

テーマ1 プレソーラー粒子と元素合成 始原的隕石に残存しているプレソーラー粒子の重 元素同位体組成を高精度分析し、物質の最小構成 単位である「元素」の生成過程を解明する。

> テーマ2 初期太陽系ダイナミクス 隕石の化学的多様性は、初期太陽系におけるダスト の成長・合体・破壊の歴史を反映する。隕石の高精 度同位体測定から初期太陽系の物質進化を解明する。





横山哲也教授

羽場麻希子助教

CAI・コンドリュール形成 (45.7億年前~)

テーマ3 初期太陽系年代学 太陽系形成直後の数百万年は、極限環境において種々のイベントが次々起きた。隕石に記 録されているこの年代を超高精度で測定する。



左:超高精度同位体測定を可能にする表面電離型質量分析計中:pptオーダーの微量元素を高精度で測定するICP質量分析計右:環境からの汚染を防ぐクラス100のクリーンルーム

微惑星 · 原始惑星形成

惑星の溶融・分化

テーマ4 惑星の進化過程 地球型惑星において地殻・マントル・ 核の分別はいつ、どのようにして生 じたのか。隕石の同位体分析と室内 実験から真実に迫る。

テーマ5 火星内部と表層環境の進化 火星はかつて表層に液体の水が存在するほど 温暖湿潤な環境であった。隕石の化学分析や 探査データから、火星の水・大気の起源と進 化、地殻・マントルの化学進化を解明する。

> テーマ6 地球表層史 岩石の高精度元素分析により、 古海洋の化学進化、並びに生物 大量絶滅の原因を解明する。



隕石学基礎

隕石とは

地球に落下した地球以外の天体のかけら (>1mm)

由来: 微惑星・小惑星・火星・月など



Hoba隕石(ナミビア)60トン



ISSで撮影された火球(2017/11/17) Paolo Nespoli氏のtwitterより



Chelyabinsk隕石の落下 (2013/2/15) 隕石の落下現象
 母天体の衝突や破壊
 破片が地球引力圏につかまり、燃え尽きずに地上に落下。
 落下隕石の軌道 → 楕円軌道
 地球近傍小惑星の軌道に近い





NASA

落下隕石と発見隕石

落下隕石 (fall): 落下が実際に目撃され、落下地点から直接回収 地球での汚染が最小限であるため貴重だが、数は多くない



Chelyabinsk隕石 の落下と回収

発見隕石 (find):落下は目撃されず、回収後隕石と認定 地球での風化は免れない





Meteor Crater (Arizona) とCanyon Diablo隕石



1970年以前 2,000 個

2000年のデータ: 16,486 個

2012年5月: 総数 42,517 個

2013年4月: 総数 45,468 個 2014年5月: 総数 48,879 個

2015年4月: 総数 51,615 個

2016年3月: 総数 53,236 個 2017年4月: 総数 56,233 個 2018年4月: 総数 58,858 個 2020年1月: 総数 62,212 個

> Meteoritical Bulletin Databaseより (名前が与えられた隕石数。Provisionalも含む。)

なぜここ30年で発見数が急増? → 南極や砂漠から組織的に採取される



1969年、日本の南極観測隊は昭和基地に近い<u>やまと山脈</u>で9つの 隕石を発見した。その後、南極の特定の地域には隕石が濃集するこ とが判明し、日本や米国を中心に大量採取が行われている。







アフリカ北西部などで見つかる隕石。 砂漠は乾燥しており、雨による変質が(比較的)少ない。 南極隕石と異なり、現地部族などにより組織的に収集されている。 収集された隕石はブローカーにより売買され、一般人でも入手可能。 貴重なものは驚くほどの高値がつく。





www.saharamet.com



研究機関・博物館 (スミソニアンや国立極地研究所など)

- 豊富な隕石種(特に南極隕石)
- 高い信頼度
- 無料
- 申請書の執筆が必要
- 審査に時間を要する
- 提供される試料重量はごく少量
- 場合によっては成果報告が必要



- 砂漠隕石が多く、南極隕石は入手不能
- 信頼度はサイトによる
- 有料
- 申請書は不要
- 海外サイトであってもすぐに発送
- 資金さえあれば大量に入手可能
- ・ 成果報告は不要









普通コンドライト(Dimmitt) 11グラム 5,400円

ļ			
# DT10-9	#DT16-4	# DT16-7	# DT29-6
Weight: 10.9 gm	Weight: 16.4 gm	Weight: 16.7 gm	Weight: 29.6 gm
Features: Part slice.	Features: Part slice.	Features: Part slice.	Features: Slice.
Price: \$49	Price: sold	Price: sold	Price: sold

火星隕石(SAU 005) 15グラム 825,000円

#SAU005-1-870	#SAU005-5-892	#SAU005-15-1	#SAU005-32-4
Weight: 1.870 gm	Weight: 5.892 gm	Weight: 15.1 gm	Weight: 32.4 gm
Features: End	Features: End	Features: Slice	Features: Full slice
Price: sold	Price: \$2800	Price: \$7500	Price: sold



コンドリュールを含む?

Yes – 未分化隕石:母天体における融解を経験しておらず、太陽系 初期の始原的情報を多く残す。

No --- 分化隕石: 母天体において融解・分化を経験。始原的ではないが、母天体で何が起きたかを知るのに有用。



コンドリュール 大きさ 1 mm 程度の球状のケイ酸塩



石質隕石:主にケイ酸塩鉱物からなる。 コンドライト:コンドリュールを含む 分化していない母天体の破片	未分化隕石
エイコンドライト :コンドリュールを含まない 母天体の地殻やマントル	
鉄隕石: 主に鉄・ニッケル合金からなる 分化した母天体の中心核	分化隕石
石鉄隕石:ケイ酸塩とFe-Ni合金の双方を含む 分化した母天体の中心核とマントルの混合体	





www.sciencedaily.com



グループの違いは母天体の違いを反映。

コンドライトの分類

化学組成や酸素同位体組成によって細かく分類。

- 炭素質コンドライト(Cコンドライト)
- エンスタタイトコンドライト (Eコンドライト)
- その他

炭素質コンドライト (CC)

- 揮発性成分(水・有機物など)を多く含む
- 始原性高い
- 母天体は酸化的環境
- 全隕石数のわずか3%
- 8グループに分類。

$\textbf{CI} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CM} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CR} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CO} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CV} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CK} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CH} \boldsymbol{\cdot} \textbf{CB}$

CIコンドライト ≒ 太陽の元素組成







- 最も普遍性の高い隕石 (全隕石数の89%)
- 全岩の鉄存在量によって、
 以下の3グループに分類。
- H (High iron)
 L (Low iron)
 LL (Low iron and Low metal)



酸化の度合いは炭素質とエンスタタイトの中間。

エンスタタイトコンドライト (EC)

- ・ 全隕石数の0.7%
- 母天体は非常に還元的
- 隕石中の鉄は金属鉄か硫化鉄(酸化鉄≒0)
- 鉄の存在量によって、

EH (High iron) EL (Low iron)

の2グループに分けられる。



同位体的特徴から、地球の原材料はエンスタタイトコンドライト的物質では ないかと考えられている。



4つの基本構成要素からなる。

- ・ コンドリュール
- 難揮発性包有物(CAI)
- Fe-Niなどの金属相
- ・ マトリクス



コンドリュール

- 大きさ1mm程度の球状のケイ酸塩



- かんらん石(Mg,Fe)2SiO4と斜方輝石(Mg,Fe)SiO3が主成分
- 高温で溶融したものが急冷した岩石学的組織

到達温度1400~1850℃、持続時間は長くても数分(揮発性成分が残っているので)

• コンドリュールの成因はまだ良く分かっていない

衝撃波によるガス摩擦熱?有力だが衝撃波の発生機構が不明。

難揮発性包有物(CAI)

- CAI (Calcium and Aluminum rich Inclusion)
- Ca、AIに富む白色物質。ほぼ全てのコンドライトに存在(特にCV)
- サイズ10 μm~2 cm
- Naなどの揮発性元素やFe・Niなどの親鉄元素に乏しい
- 太陽系物質の中で最も古い年代を持つ 45億6700万年
- 高温のガスが冷却するときに凝縮した 組成は凝縮モデルとよく一致





- 主に鉄とニッケルの合金。エンスタタイトコンドライトに多く含まれる。
- ニッケルの多いテーナイトと、ニッケルの少ないカマサイトから なる。
- このほか、オスミウム、イリジウム、白金といった難揮発性親鉄 元素の合金も存在。

マトリクス

- コンドリュール、CAI、その他構成要素が埋め込まれている"基質"
- 粒径10 nm 5µm程度のケイ酸塩、酸化物、硫化物、Fe・Niなど
- ・コンドリュール、CAIと比較すると低温で凝縮する成分が多い。
- 太陽系前駆物質(プレソーラー 粒子)や原始太陽系星雲での凝縮物など、様々な履歴を持つ鉱物の混合体

AllendeのX線マップ CAI(左)とMatrix



 $100 \,\mu \,m$

プレソーラー粒子と 元素合成

プレソーラー粒子

- 太陽系形成前に作られた粒子。初期太陽系における激しいプロ セスを生き残った。
- 太陽系が同位体的に平均化される前の物質。大きな同位体異常 を持つ。
- プレソーラー粒子の同位体組成は、生成した星環境の元素合成 プロセスを反映。
- ・ 始原的隕石(主にCコンドライト)中に少量(基本的にppmレベル)存在。

プレソーラー粒子の種類



Yokoyama and Walker (2016)

Grain type	Abundance (ppm)	Size (µm)	Stellar sources
Nanodiamonds	1000	0.002	SNe
SiC	40	0.1–20	AGB, SNe, Novae, J-stars
Graphite	2	1–20	SNe, AGB
Oxides	100	0.1–3	RG, AGB, SNe
Silicates (IDPs)	15000	0.1–1	RG, AGB, SNe
Silicates (meteorites)	200	0.1 - 1	RG, AGB
Si ₃ N ₄	0.002	0.3–1	SNe

Table 1 Abundances, sizes, and stellar sources of presolar grains.

Presolar grain abundances vary with meteorite type.

(A) Nanodiamond
(B) SiC
(C) Graphite
(D) Corundum (Al₂O₃)

プレソーラー粒子の同位体分析

SIMS (Secondary ion mass spectrometry)による局所同位体分析



U of Wisconsin-Madison SIMS lab



なぜPresolarだとわかるのか

- 太陽系の値に比べ、同位
 体組成が違いすぎる
- 同位体組成の変動を太陽
 系内の物理化学プロセス
 で作ることが不可能







Yokoyama and Walker (2016) (Data from Hynes and Gyngard 2009)





Yokoyama and Walker (2016) (Data from Hynes and Gyngard 2009)





Si同位体比は銀河化学進化モデルと合わない→太陽系物質の起源は?

酸化物・ケイ酸塩プレソーラー粒子



- Group 1-3 赤色巨星・AGB星
- Group 4 超新星(?)

全部を平均してもSolarに ならない。見逃している フェーズがあるかも。

レアなプレソーラー粒子

Nittler et al. (2018)



CIコンドライトから抽出した60 nmの酸化物プレソーラー粒子のCr-Ti同位体比を測定。 高密度SN Ia、またはelectron capture SN (ECSN) 起源?



Mainstream SiC

 炭素星の¹²C/¹³C観測 値とも一致

 s-過程により作られ た重元素の同位体的 特徴をもつ。

今後、プレソーラー粒子の重元素同位体組成を もっと測定する必要がある



r-process核種に富むプレソーラー粒子?

Croin two	Abundance	Size	Stallar gauraag			
	(ppm)	(µm)	Stellar sources			
Nanodiamonds	1000	0.002	SNe			
SiC	40	0.1–20	AGB, SNe, Novae, J-stars			
Graphite	2	1–20	SNe, AGB			
Oxides	100	0.1–3	RG, AGB, SNe			
Silicates (IDPs)	15000	0.1–1	RG, AGB, SNe			
Silicates (meteorites)	200	0.1–1	RG, AGB			
Si ₃ N ₄	0.002	0.3–1	SNe			

Table 1 Abundances, sizes, and stellar sources of presolar grains.

Presolar grain abundances vary with meteorite type.

- SiC: X grains
- Graphite: Grains with ¹²C/¹³C < 20
- Oxides + Silicates: Rare grains (Groups 3-4??)

プレソーラー粒子の同位体測定: Trans-Fe elements RIMS (Resonance ionization mass spectrometry) による測定 Mo isotopes



s-process核種に富むパターン(AGB stars)

Yokoyama and Walker (2016) (Data from Hynes and Gyngard 2009) s-, r-, p-processのいずれとも合致しないパターン →超新星衝撃波による中性子バースト?

100

プレソーラー粒子1粒単位での鉄より重い元素の同位体情報は限定的



Ba isotopes



(Data from Hynes and Gyngard 2009)

SiC x-grainにはr-processの兆候? \rightarrow ¹³⁴Ba, ¹³⁵Baに問題あり

CHILI @ Chicago Univ.







Stephan et al. (2018)

CHILIにより、高精度・高確度の重元素同位体データが得られるかもしれない

プレソーラー粒子の重元素同位体研究における問題点

- Feより重い元素は低濃度(<10 ppm)。
- ・ プレソーラー粒子1粒単位での測定は限定的。
- ・ 研究がSiCに集中(s-process)。
- はっきりしたr-processのキャリアはみつかっていない (supernova grainはみつかっている)。
- そもそも r = solar s を仮定しているので、r-processのendmember compositionはよくわかっていない。

隕石の分析から、r-processの同位体比を特定できるのか?



- 天体核物理
 - 核反応
 - 原子核の性質
- 銀河化学進化
 - 銀河の初期組成と時間進化
 太陽系の重元素組成
- 隕石学
 - プレソーラー粒子
 太陽系内同位体異常
- 重力波天文学
 - 連星中性子星合体■ 短寿命r-process核種による電磁波放射







Yokoyama and Walker (2016)



r-核種の起源



- 軽いr-核種 (A< 110-130): 重力崩壊型超新星 (SiC X-grain, LD graphite)
- 重いr-核種 (A> 110-130): 中性子星合体 (特定の担体なし)

隕石全岩の超高精度 重元素同位体分析

鉄より重い元素の同位体異常



57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



質量分析:精度と空間分解能



TIMS 同位体分析誤差0.0005% (5 ppm) を達成可能な(ほぼ)唯一の装置



NanoSIMS 1ミクロン以下の 微小鉱物の同位 体測定が可能





空間分解能



隕石全岩の超高精度同位体分析

- 表面電離型質量分析計(TIMS)
 ppmレベルの同位体比の違いを検出
 ¹⁴²Nd/¹⁴⁴Nd = 1.141837 (地球)
 ¹⁴²Nd/¹⁴⁴Nd = 1.141827 (隕石)
 Difference = 10 ppm
- ・事前の化学処理(試料の分解と元素分離)が必要
 → クラス100クリーンルームで実験





隕石全岩の同位体異常と初期太陽系

【【隕石の同位体異常】異なる核合成に由来する物質が異なる比率で混合し、 隕石の同位体組成が地球と異なる値を示すこと。



- ・ 炭素質コンドライト(CC)は正のCr同位体異常を示す
- ・ エンスタタイトコンドライト(EC)は地球と同じCr同位体組成を持つ
- ・ CC・EC以外の隕石は負のCr同位体異常を示す
- → 隕石母天体形成時、太陽系は同位体的に不均質であった(プレソーラー粒子の不均質分布)



サブグループまで含めると、約50種類に分類することができる

隕石の同位体二分性



同位体で見ると、未分化 vs 分化ではなく、 炭素質コンドライトとそれ以外の隕石に二分化される Warren (2011)





隕石母天体の軌道

Calculated orbit of meteoroids



Orbit of near Earth asteroids





小惑星のスペクトルと隕石母天体





 $\cdot 10^{6}$

Sr, Mo同位体は太陽系内で不均質分布をしている

隕石全岩のOs・Te同位体異常





Os, Te同位体は太陽系内で均質分布をしている

r-核種の起源と隕石同位体異常



和南城 (2014)

- 太陽系r-核種の第2ピーク(Ba~軽希土類)まで同位体異常が存在。
- 第2ピークまでのr-核種と、それ以降のr-核種で起源が異なる?
- 質量だけでなく、凝縮温度にも関連あり?

隕石同位体異常の原因



Late injection of SN grains

Trinquier et al. (2007) Qin et al. (2011)



Trinquier et al. (2009) Burkhardt et al. (2012)



いずれのモデルも一長一短あり、 結論は得られていない。

Regerous et al. (2008) Dauphas et al. (2010)

隕石同位体異常の原因







- 重元素r-核種の起源は中性子星合体。特定の担体は 隕石内に残存しない。
- Ba, Ndの異常を作るため、極端に低い電子比(Y_e
 < 0.3)の超新星を仮定すると、Ruの低いη_rを説明で きない。
- Decouplingさせるための太陽系内プロセスが必要 →熱プロセス?

まとめ

- 隕石を分類すると約50グループ存在。その一つ一つが異なる母天体に由来。
- 始原的隕石(コンドライト)のマトリクスには太陽系形成前に様々な星環境で合成 された物質(プレソーラー粒子)が存在。
- プレソーラー粒子1粒単位での同位体分析により、元素合成の実証的研究が可能。
- プレソーラーSiCのほとんどはAGB星に由来。ごく一部のSiCは超新星由来。
- ・ プレソーラー酸化物・ケイ酸塩は赤色巨星やAGB星に由来。超新星粒子は稀。
- 非常にレアなプレソーラー粒子の研究が進行中。
- ・ プレソーラー粒子1粒単位で鉄以降の重元素同位体を測定するのは難しい。
- 隕石全岩の精密同位体測定により、重元素の合成過程が議論可能。
- 隕石全岩の重元素同位体異常から、r-processの起源が制約できるかもしれない。