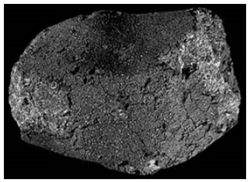



隕石の中の炭素14
ー宇宙線生成核種を用いた落下年代決定ー

隕石とは

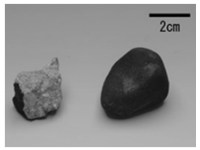
- 地球の外ー宇宙空間ーから飛来した物質で、地上まで形を残して届いたもの
- 探査によって持ち帰られた月試料以外で実際に分析できる唯一の地球外物質
- 太陽系の成り立ちを研究するための極めて貴重な試料

Orgueil隕石
化学組成が太陽系の元素存在度とされるもっとも始原的な隕石



隕石の確認法

- 落下が確認されたもの
  落下、fall
  今年2月15日
  ロシア・チェリャビンスク
  日本でも1996年1月7日
  つくば

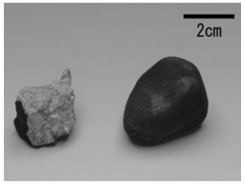




- 落ちていたものが隕石と認められたもの
  発見、find

隕石の判別法

- 外観的な特徴
  地球への突入時に大気との摩擦で表面が解けたことによる溶融殻
  外観的な特徴は落下後、時間の経過とともに風化作用によってかき消されていってしまう。



- 宇宙線生成核種の存在
  隕石を判別する貴重な手段

落下隕石の発見

- 外観的な特徴は風化作用で失われてしまう
- 砂漠や極域の氷河の上など乾燥したところは風化を受けにくく、発見されやすい。

  南極隕石の発見・砂漠での探査 → 隕石数の増加

  特に、南極大陸では日本を含めて計画的な隕石探査が行われてきた。



南極隕石の発見による隕石の増加

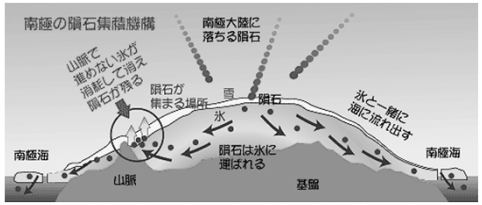


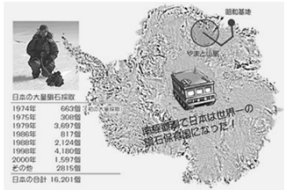
南極あるいは砂漠以外で確認されている隕石が5000個程度

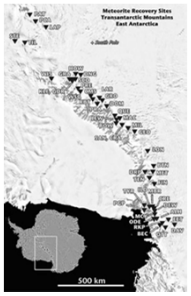
南極隕石は約28000個もあり、火星隕石や月隕石など貴重な隕石がある。

南極で隕石が見つかりやすい要因

南極大陸での集積機構：集中して発見

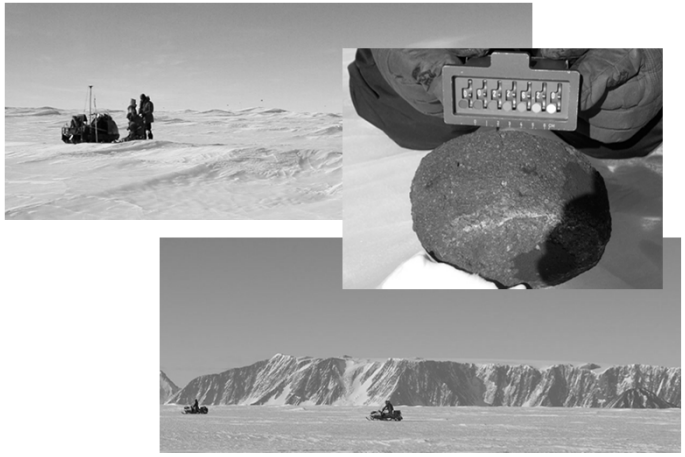






計画的な探査

南極隕石の探査

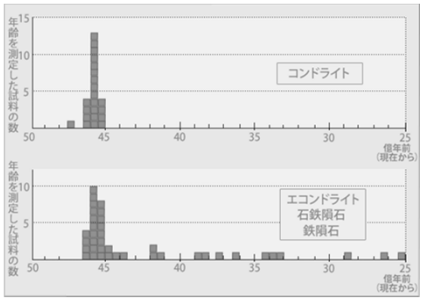


隕石の種類

- 始原的なもの

  太陽系で最初に形成された固体物質が現在までその状態を保っているもの

  実は太陽系の年齢はもっとも古い隕石の年代から決められている



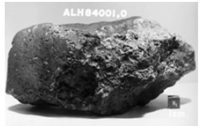
隕石の種類

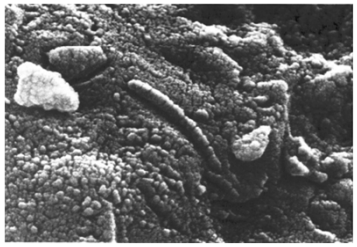
- 火成作用を経験したもの

  形成された固体物質が衝突・集積を繰り返し、微惑星などになって、火成作用を経験したもの

  月や火星を起源とするとされる隕石

火星隕石：ALH84001
顕微鏡写真に生物の化石と見られる線状の物質が確認





隕石の種類（分類）

隕石の分化の程度を考慮した分類

始原的隕石 primitive meteorite		分化した隕石 differentiated meteorite		
石質隕石 stony meteorite			石鉄隕石 stony-iron meteorite	鉄隕石 iron meteorite
コンドライト chondrite	エコンドライト achondrite			
炭素質コンドライト carbonaceous chondrite	アカプルコアイト acapulcoite	オーブライト aubrite	パラサイト pallasite	ヘキサヘドライト hexahedrite
普通コンドライト ordinary chondrite		ホワルダイト howardite	メソシデライト mesosiderite	オクタヘドライト octahedrite
H chondiite		ユークライト eucrite	シデロファイア siderophyre	アタキサイト ataxite
L chondiite		ダイオジェナイト diogenite		
LL chondiite		ユレイライト ureilite		
頑火輝石コンドライト enstatite chondrite		シャーゴッタイト shergottite		
		ナクライト nakhlite		
		シャシナイト chassignite		
	ロドラナイト lodranite			

それぞれの分類が一つの母天体から来たものとする考えもある。

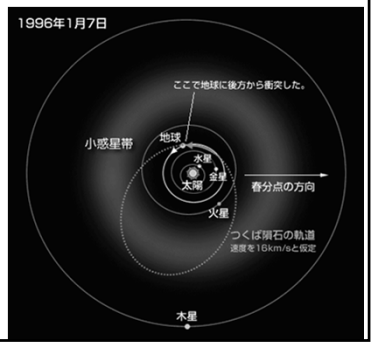
隕石の起源

- 落下の軌道や速度を複数の地点から観測し、地球に突入する前の軌道を決める。

  これまでの隕石は小惑星帯からきたことを強く支持

- 月・火星隕石

  希ガスなどの化学組成が一致



隕石の中の宇宙線生成核種の測定意義（1）

- チェリャビンスク隕石のように落下が確認されている隕石は検討するまでもない。
- 落下が確認されていない物質を隕石と決める手段は
- 宇宙線生成核種の確認

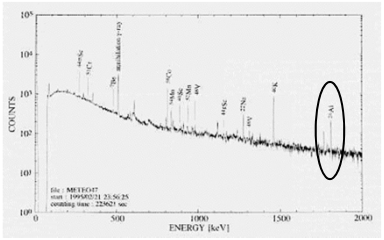
  宇宙線生成核種の多くは放射線を出して壊変する放射性核種なので、放射線計測機を用いて、測定することができる。

隕石のγ線測定による宇宙線生成核種の検出



高純度Ge半導体検出器

- γ線の測定は比較的容易
- 宇宙線生成核種の^{26}Al



広島隕石（2003年落下）のγ線測定の結果

隕石の中の宇宙線生成核種の測定意義（2）

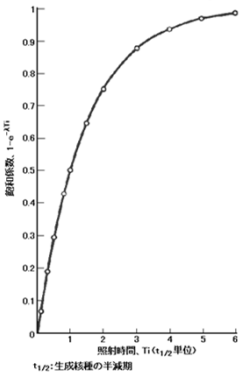
- 宇宙空間では宇宙線に晒されている。

放射性核種の生成と減衰

- 宇宙線によって放射性核種が生成
- 放射性核種の生成とともに放射壊変による減衰が始まる。
- 減衰率は放射性核種の量に依存
- 放射性核種の量は一定になる

→ 飽和状態

放射性核種の半減期の4～5倍程度の時間



隕石の中の宇宙線生成核種の測定意義（2）

- 宇宙空間では宇宙線に晒されている。
  隕石の中の宇宙線生成核種はおおよそ飽和状態
- 地球に落下してくると
  宇宙線から隔離されて、生成がなくなる。
  放射壊変によって減衰するのみ
- ということは、
  飽和状態の量がわかれば、
  落下してからの年代がわかる！

隕石の落下年代

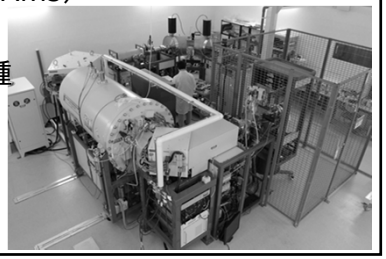
- 南極隕石などのfind隕石の増加
- それぞれの隕石の飛来時期は非常に重要な情報
- たとえば、同じ種類の隕石が同時期に飛来
  → 一つの隕石が地球に飛来した時に分裂：pairing
  pairであることがわかれば一つの隕石として取り扱う
  → 同じ種類の隕石が多数飛来：meteoroid stream 隕石流
  特定の分類の隕石が集中的に飛来 → なぜ？

隕石の中の宇宙線生成核種の測定

- HP-Geなどのγ線測定器
  測定器との立体配置などの関係で
  測定した放射能の絶対的な定量が困難



- 加速器質量分析計（AMS）
  測定可能な同位体の
  多くが宇宙線生成核種



隕石の落下年代決定

- 熱ルミネッセンス（Thermoluminesence: TL）
- 宇宙線生成核種

TABLE 1. Radionuclides of interest for terrestrial-age studies.

			Saturated Activity (dpm/kg)		
	Half-life	Phase	L	H	References
^{39}Ar	269 yr	metal	25	21	*Begemann et al.* (1969)
^{14}C	5.73 k.y.	bulk	51	46	*Jull et al.* (1998b); *Jull* (2001)
^{41}Ca	100 k.y.	metal	24		*Fink et al.* (1991); *Herzog et al.* (1997)
^{59}Ni	108 k.y.*	metal	~350		*Schnabel et al.* (1999a)
^{81}Kr	229 k.y.	bulk	0.003–0.0045†		*Freundel et al.* (1986); *Eugster* (1988a)
^{36}Cl	300 k.y.	metal	22.8		*Nishiizumi et al.* (1989a); *Herzog et al.* (1997)
^{26}Al	700 k.y.	bulk	60	56	*Evans et al.* (1982); *Vogt et al.* (1990)
^{60}Fe	1.49 m.y.				*Knie et al.* (1999); *Goel and Honda* (1965)
^{10}Be	1.5 m.y.	bulk	22	20	*Nishiizumi et al.* (1989a); *Nishiizumi* (1995)
^{53}Mn	3.7 m.y.	metal	434		*Nishiizumi et al.* (1977, 1989a)

Data adapted from *Jull* (2001).
* *Ruhm et al.* (1994).
† Based on the average production rates for ^{81}Kr of 6–9 × 10^{-14} cm^3/g/m.y. (*Eugster,* 1988a); depends on composition.

宇宙線生成核種による落下年代決定

- 宇宙線生成核種は飽和状態で地球に飛来
- 宇宙線生成核種の生成核反応は決まっていて、飽和状態の量はもととなる元素の存在度に依存 → 隕石の分類ごとにおおよそ同じ

  たとえば^{14}Cは酸素と宇宙線との反応によって生成される。
- 落下年代のわかっている隕石の宇宙線生成核種の量から飽和状態の量を決める
- 飽和状態の量を初期値として測定された量まで減衰する時間を算出

隕石中の宇宙線生成核種による落下年代決定（1）

アメリカ隊発見の南極隕石の^{36}Clによる落下年代研究

Nishiizumi *et al.* 1989

TABLE 2

Terrestrial ages of Antarctic meteorites

Meteorite	Class	Recovered mass (kg)	Weathering [a] W	Weathering [a] F	Terrestrial age (10^3 yrs)	Reference
Adelie Land	L5	1.0			70 ± 70	this work
ALH 76002	L6	1.510			200 ± 80	[22]
ALH 76005	L6	0.800	B	A	> 34	[9]
ALH 76006	L6	0.800	B	A	> 32	[9]
ALH 76007	L6	0.410	B	A	> 34	[9]
ALH 76008	H6	1.150	BC	B	100 ± 70	[20]
ALH 77001	L6	0.252	B	B	60 ± 60	[21]
ALH 77002	L5	0.235	B	AB	820 ± 80	this work
ALH 77003	C3	0.780	A	A	110 ± 70	[21]
ALH 77004	H4	2.230	C	C	170 ± 70	[22]
ALH 77005	SH	0.483	A	A	190 ± 70	[17]
ALH 77009	H4	0.236	C	A	330 ± 70	this work
ALH 77124	H5	0.004	C	A	40 ± 40	this work
ALH 77180	L6	0.191	C	A	80 ± 70	this work
ALH 77182	H5	1.135	C	B	250 ± 80	this work
ALH 77208	H4	1.733	C	C	> 38	[13]
ALH 77214	L3	2.111	C	C	120 ± 80	[21]
ALH 77219	Mes	0.637	B	B	65 ± 65	this work
ALH 77231	L6	9.270	AB	AB	600 ± 70	this work
ALH 77232	H4	6.494	C	C	> 48	[13]
ALH 77249	L3	0.504	C	C	150 ± 70	this work

何万年以上も前の隕石が多い

隕石中の宇宙線生成核種による落下年代決定（2）

日本隊発見の南極隕石の^{14}Cによる落下年代研究

Minami & Nakamura, 2001

Table 2 Terrestrial ^{14}C ages of two Antarctic meteorites

	Weight (g)	CO_2 (cm^3 STP)	$(^{14}C/^{12}C)$sam / $(^{14}C/^{12}C)$std	^{14}C (dpm/kg)	Saturated activity[a]	Terrestrial age (ka)	Reference
Y-75102	0.982	0.015	74.6 ± 0.8	35.3 ± 1.1	57	3.0 ± 0.7	This work
	0.680	0.014	41.9 ± 0.3	30.1 ± 1.5	57	4.2 ± 0.7	This work
	—	—	—	44.1 ± 2.7	57	4.2 ± 0.8	Fireman (1983)
	—	—	—	46.3 ± 1.4	57	1.7 ± 0.3	Jull et al. (1984)
ALH-77294	0.832	0.147	2.0 ± 0.1	4.2 ± 0.2	44	20.1 ± 0.8	This work
	0.831	0.048	4.1 ± 0.2	3.9 ± 0.2	44	20.7 ± 0.9	This work
	10.5	1.32	—	1.6 ± 0.3	61	30 ± 2	Fireman and Norris (1981)
	0.42	—	—	13.9 ± 0.3	44	9.5 ± 1.0	Jull et al. (1989)

[a]Saturated activity used for estimation of terrestrial ^{14}C ages; these footnoted data were obtained after improving the carbon extraction method in our system.

数千年前など若い年代

10万年以上の半減期の宇宙線生成核種よりも
半減期5730年の^{14}Cが適している！

隕石の落下年代決定

- 隕石の落下年代
  一つの隕石だけでは分類などの記載情報
  さらなる研究には多くの数の値が必要
- 日本の膨大な南極隕石の価値を高める
  系統的に年代決めをする必要がある
  実は日本の南極隕石の落下年代はほとんどない

隕石中の宇宙線生成核種

- 落下が確認されていない物質が隕石であるか否かの判別
- find隕石の落下年代決定
  地球への隕石の飛来頻度
  隕石の分類との関係 → 隕石の起源（母天体）
- fall隕石から宇宙線の照射履歴
  飽和状態の放射性核種の量
  宇宙空間に漂い始めてから地球に飛来してくるまでの時間

隕石中の宇宙線生成核種：炭素14

- 南極隕石には何十万年以上も前に落下したものがあり、^{26}Alや^{36}Clなどが用いられる。
- 日本が保有する南極隕石は若いものが多い
- 若い落下年代の決定は半減期の短い^{14}Cが適している。
- 日本の南極隕石コレクションの「価値」を高めるためにも落下年代決定は非常に重要

