

地球化学 35, 13-25 (2001)

Chikyukagaku (Geochemistry) 35, 13-25 (2001)

総説

最近の落下例を含む隕石における宇宙線生成放射性核種

—コンドライトの宇宙線照射履歴への制約—

井上 陸夫*・小村 和久*

(2000年6月19日受付, 2000年11月17日受理)

Cosmogenic radionuclides in meteorites including recently fallen ones

—Constraints on the exposure history of chondrites—

Mutsuo INOUE* and Kazuhisa KOMURA*

* Low Level Radioactivity Laboratory (LLRL), Faculty of Science,
Kanazawa University, Tatsunokuchi, Ishikawa 923-1224, Japan

Activities of cosmogenic nuclides have been numerous reported for extraterrestrial material, meteorites (especially chondrites). In addition to noble gases, cosmogenic radionuclides (e.g., ^{22}Na , ^{26}Al , ^{46}Sc , ^{53}Mn , ^{54}Mn and ^{60}Co) have also kept important records of their history during last ten million years. For example, low ^{60}Co activity observed in most chondrites (< 30 dpm/kg) suggests that their preatmospheric radii are less than ~ 30 cm, and activities of ^{22}Na and ^{26}Al reflect various irradiation conditions by cosmic-ray such as shielding effect, exposure age and cosmic-ray flux with time and space.

Terrestrial age (Antarctic meteorites; H group, $< 0.4 \times 10^6$ y; L, LL, $< 10^6$ y estimated from ^{26}Al , ^{36}Cl and ^{14}C activities) as well as exposure age (H, $3 - 40 \times 10^6$ y; L, LL, $3 - 50 \times 10^6$ y) shows different distributions between H- and L-, LL-group chondrites, which have possibly preserved the information about breakage of parent body and so on.

The combined data of exposure age and activities of cosmogenic nuclides also give constraints on the complex history of chondrites (e.g., multi-stage irradiation as a result of fragmentation) until the collision with the Earth.

Recently, with the progress of nondestructive γ -ray techniques, activities of relatively short-lived nuclides such as ^{46}Sc , ^{22}Na implied the irradiation conditions just before fall to the Earth.

In this paper, "the evolution history of chondrites after separation from the parent body" is represented from activities of cosmogenic radionuclides in meteorites including recently fallen ones.

Key words: cosmogenic radionuclides, γ -ray spectrometry, chondrite, preatmospheric size, shielding depth, exposure/terrestrial ages, cosmic-ray flux

1. はじめに

地球外物質である隕石には、宇宙空間を漂っている間に宇宙線との相互作用により生じた多種にわたる宇

宙線生成核種が存在する。これら宇宙線生成核種のうち、特にネオン、ヘリウムなど希ガスの安定核種に関してはこれまで膨大な報告例があり (Nishiizumi, 1987), 隕石の宇宙線照射年代を中心に重要な知見をもたらしてきた (e.g., Marti and Graf, 1992; Crabb and Schultz, 1981)。これら希ガスの他、宇宙線生成放射性核種についても1950年代後半以降多くの研究が

* 金沢大学・理学部附属低レベル放射能実験施設
〒923-1224 石川県能美郡辰口町和気

おこなわれ、 ^{22}Na , ^{26}Al , ^{53}Mn , ^{54}Mn および ^{60}Co など様々な核種において多くの測定データが蓄積されている。隕石は45.6億年前から現在に至る太陽系形成および進化の情報を保存する始源物質であるとされており、特にその初期に相当する隕石形成過程については宇宙化学、鉱物学など多くの分野において精力的に研究がなされてきた。 ^{87}Rb (half life; $t_{1/2} = 4.88 \times 10^{10}$ y), ^{238}U (4.47×10^9 y), ^{40}K (1.25×10^9 y) など著しく半減期の長い核種が隕石形成時の情報を保持しているのに対し、今回議論する宇宙線生成核種は半減期が数日から数百万年と短く、地球への落下に至るここ数千万年間に於ける出来事を記録している (Michel, 1999)。ゆえに落下前の隕石サイズや宇宙線照射年代といった隕石の履歴、さらにはその当時の太陽系における宇宙線照射状況を探るうえで重要な役割を果たしてきた (Vogt *et al.*, 1990; Caffee *et al.*, 1988)。

一方日本においては、1991年愛知県・田原 (H5) 隕石、1992年島根県・美保関 (L6) 隕石 (Shima *et al.*, 1993a, b), 1995年石川県・根上 (L6) 隕石 (Komura *et al.*, 1996a), 1996年茨城県・つくば (H5-6) 隕石 (Komura *et al.*, 1996b), さらに1999年には兵庫県に非常に特異なタイプ (CK4) の神戸隕石 (Nakamura *et al.*, 2000; Komura *et al.*, 2000) とこれまでにない隕石の落下が相次いだ。

本稿ではこれら最近の落下例を含むコンドライト隕石 (隕石全体の85%を占める始源的隕石) の宇宙線生成放射性核種のうち、非破壊 γ 線法を中心とした測定結果が、母天体脱離以降のコンドライトがたどった道のりを議論する上でどのような制約をもたらすのかをまとめる。

2. 測定手法およびその進歩

地球外物質である隕石においては、希ガス同様に宇宙線生成放射性核種濃度の測定が古くからおこなわれてきた。1960年前後における放射性核種の測定は、 β 線、 γ 線およびX線カウンティングの併用によるものであったが、これには数百グラムの貴重な隕石試料を用いた非常に複雑な化学分離が不可欠であった (Mabuchi *et al.*, 1968; Shedlovsky *et al.*, 1967)。1960年代後半になるとNaI (Tl) シンチレーションカウンタからエネルギー分解能が格段に優れたゲルマニウム (Ge) 半導体検出器へと移行し、多くの放射性核種の分析が化学分離過程を必要としない“非破壊 γ 線測定法”に取って代わるようになった。さらに半

導体技術の進歩に伴い、よりサイズの大きなGe単結晶が作製されるようになるなど、その検出効率においても今なおめざましい向上をとげつつある (小村ほか (1986) に詳しい)。隕石の γ 線測定のような物理的に試料の形状を変えない“完全”非破壊測定においては、核種ごとの検出効率を求めるため、既知量の目的核種を含み、測定試料、形状および密度が同じの模擬線源 (モックアップ試料) を同時に測定する必要がある。これには例えば陶土と酸化銅を適当な割合で混合したものが用いられている (Komura *et al.*, 1996a)。

一方隕石から放出される宇宙線生成核種の γ 線はほとんどが極低レベル ($< 1 \sim 100$ dpm/kg; disintegrations/min kg) であることから、検出器の進歩に加え、最近では低バックグラウンド (宇宙線および周辺物質の放射性核種からの「雑音」の低い条件) の γ 線測定用地下室 (石川県・小松市・旧尾小屋鉱山トンネル跡; 水深換算270 m) が効力を発揮するようになっていく (Komura *et al.*, 1996a)。

これに対し ^{53}Mn 濃度に関しては、 γ 線を放出しない、半減期が著しく長い ($t_{1/2} = 3.7 \times 10^6$) といった理由から中性子放射化分析 (neutron activation analysis; NAA) による測定が精力的におこなわれてきた (e.g., Nishiizumi, 1978)。さらに ^{10}Be , ^{26}Al および ^{36}Cl 濃度の測定には加速器質量分析計 (accelerator mass spectrometer; AMS) が導入され (Elmore and Phillips, 1987), 特に隕石の落下年代など年代測定の分野において重要な位置を占めるようになっていく。

3. 隕石と宇宙線生成核種

3.1 隕石にみられる主要な宇宙線生成核種

隕石における宇宙線生成放射性核種は、宇宙線 (主に高エネルギーの陽子) とケイ素、鉄、ニッケルなどの核破砕反応による一次生成核種 (e.g., ^{22}Na , ^{26}Al , ^{53}Mn , ^{54}Mn) と二次中性子との核反応により生ずる中性子捕獲反応生成核種 (^{60}Co , ^{36}Cl), または短寿命核種 (半減期が10年以下の ^{48}V , ^{46}Sc , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co) と長寿命核種 (半減期が数十万年から数千年に至る ^{36}Cl , ^{26}Al , ^{10}Be , ^{53}Mn) といった分類がなされる。

一般に隕石の宇宙線生成核種濃度は、宇宙線に対する深度 (隕石のサイズや破壊前の位置関係), 隕石の化学組成, 宇宙線の強度 (フラックス) および照射/落下年代といった複数の要素により決定される。これまで一次生成核種と中性子捕獲反応生成核種の組み合

わせは、破壊前の隕石原型や宇宙線照射環境の推定に用いられ、また短寿命、長寿命核種はそれぞれ地球近傍での宇宙線の照射状況および宇宙線照射年代・落下年代に関する知見をもたらしてきた。

宇宙線生成放射性核種と母天体脱離以降の隕石の履歴との関係を Fig. 1 にまとめた。これまでに報告のあるこれら核種濃度から導き出した、コンドライト隕石の地球への落下に至るまでのシナリオを以下に議論する。

3.2 宇宙線生成核種と隕石の履歴

3.2.1 落下前の隕石の原型 隕石の内部で二次中性子との核反応により生成される中性子捕獲反応生成核種、特に ^{60}Co ($t_{1/2}=5.26\text{ y}$) の濃度は、希ガスにおける $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ 比 (Bhandari and Potdar, 1982) 同様、落下前の隕石サイズおよび破壊前の位置関係を探るうえで重要な指標となる (Spergel *et al.*, 1986)。一般的なサイズ (半径 $<\sim 75\text{ cm}$) のコンドライト隕石においては、落下前のサイズが大きいほど、また中心部に近いほど、 ^{60}Co 濃度が高いとされる (Eberhardt *et al.*, 1963)。Fig. 2 にこれまでに報告されたコンドライトの ^{60}Co 濃度 (dpm/kg, 落下時の値に換算) (e.g., Evans *et al.*, 1982; Cressy, Jr., 1970) と落下

後のサイズ (回収量から見積もった最小半径; r) を比較した。鉄隕石に比べて小さいものが多いにもかかわらず、隕石間および同一隕石においても破片間で顕著な濃度差がみられる。特にコンドライト最大サイズとされる Allende (CV3) および Kirin (H5) (国際隕石学会の命名では正式名称 Jilin) 隕石の ^{60}Co 濃度はそれぞれ53~260 dpm/kg (Rancitelli *et al.*, 1969; Cressy, Jr., 1972), 23~179 dpm/kg (Honda *et al.*, 1980, 1982) と明らかに高く、破片間でのばらつきも大きい。その他大部分のコンドライトにおける ^{60}Co は、30 dpm/kg 以下 (特に $<10\text{ dpm/kg}$ に集中) と著しく低い濃度を示した。Eberhardt *et al.* (1963) の計算によると、一般的なコンドライトは落下前、Allende および Kirin 隕石より小さなサイズ ($r<\sim 30\text{ cm}$) で、宇宙空間を漂っていたものと推測される。

一方で St. Robert (H5) 隕石 (3.5~66 dpm/kg; Brown *et al.*, 1996), Dhajala (H3) 隕石 (5.8~84 dpm/kg; Potdar *et al.*, 1986) などには回収量に対し比較的高い ^{60}Co 濃度がみられた。大気圏突入時における大気との摩耗 (アブレーション) は落下後の隕石重量に大きな損失 (27~99.9%) をもたらし (Bhandari *et al.*, 1980), また隕石シャワーとして広範囲に落下

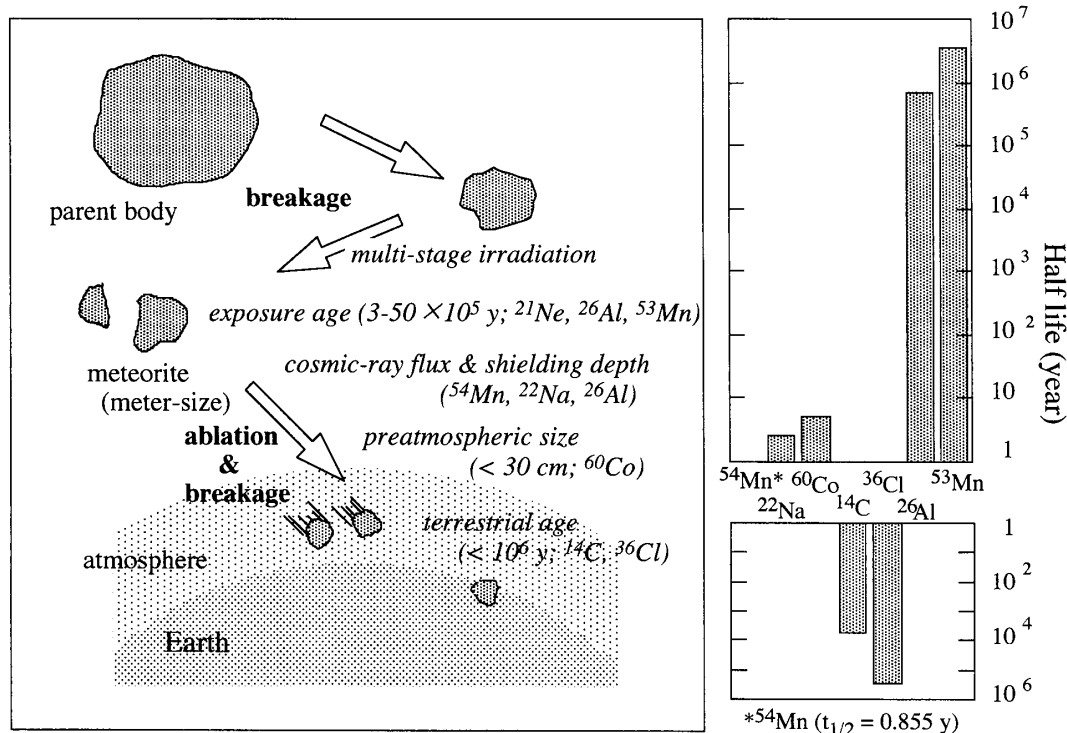


Fig. 1 Schematic illustration of the evolution history of chondrites after separation from the parent body.

した場合には全ての破片の回収は困難である。St. Robert 隕石に関しては大気圏突入時の理論モデルなどから落下前の重量が1,500 kg から2,000 kg 程度 ($r \sim 55$ cm) と見積もられ、Dhajala 隕石についても高速落下 (>20 km/sec) によるアブレーション ($>90\%$) 前には1,000 kg ($r \sim 45$ cm) を超えていたと推測されている (Ballabh *et al.*, 1978)。Mbale (L5-6) 隕石 (Jenniskens *et al.*, 1994; Murty *et al.*, 1998) など他のコンドライトについても程度の差はあれ、アブレーションの影響を受けていると考えられる。また含水ケイ酸塩を多量に含む ($H_2O \sim 10$ wt.%) CM 2 タイプの Murchison (50~79 dpm/kg; Cressy, Jr., 1972) および Kaidun 隕石 (80 dpm/kg; Lavrukhina and Gorin, 1985) にみられる回収量に対し高い ^{60}Co 濃度は、水(水素)の存在が中性子との核反応に影響を及ぼしたことによるとされた (Spergel *et al.*, 1986)。すなわち CM 2 コンドライト内部においては二次中性子が水素原子に当たって減速することによ

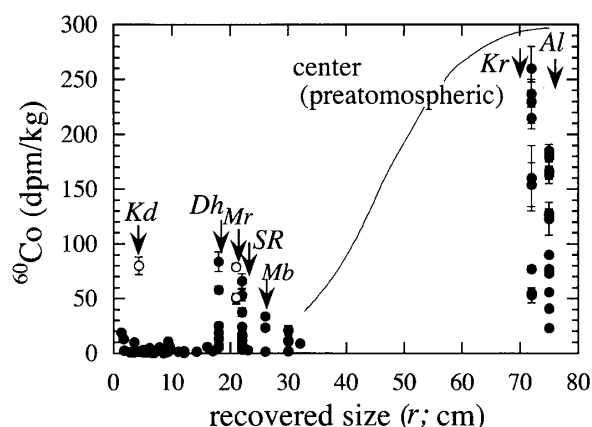


Fig. 2 ^{60}Co activity (dpm/kg corrected at time of fall) vs. the recovered size (radius; r) (cm) in 114 fragments of 42 chondrites (Evans *et al.*, 1982; Cressy, Jr., 1970 etc.) (especially Dh = Dhajala; Potdar *et al.*, 1986; SR = St. Robert; Brown *et al.*, 1996; Mb = Mbale; Jenniskens *et al.*, 1994; Murty *et al.*, 1998; Kr = Kirin; Honda *et al.*, 1982; Al = Allende; Rancitelli *et al.*, 1969; Cressy, Jr., 1972). Open circles indicate CM 2 type chondrites, Murchison (Mr; Cressy, Jr., 1972) and Kaidun (Kd; Lavrukhina and Gorin, 1985). Here r is estimated from recovered mass as spherical meteorite, and solid line is ^{60}Co activity in the center (preatmospheric) of chondrite (Eberhardt *et al.*, 1963).

り、他のグループの隕石と比較し、表面近くでも ^{60}Co が生成しやすかったのであろう。

3.2.2 隕石の宇宙線照射状況 宇宙線は一般に太陽宇宙線 (solar cosmic-ray; SCR) (1~100 MeV) と銀河宇宙線 (galactic cosmic-ray; GCR) (>100 MeV) に大別され、一次生成核種 (核破碎反応生成核種) の生成には GCR が重要な影響を及ぼす。特に ^{22}Na , ^{26}Al , ^{54}Mn および ^{53}Mn などの濃度と隕石の履歴との関係についてはこれまで多くの議論がなされ、隕石内部での遮蔽効果や宇宙線照射環境 (太陽活動に伴う宇宙線フラックス、隕石の宇宙空間での軌道、宇宙線の照射期間および SCR の影響) に関し、以下のような制約をもたらしてきた。

遮蔽効果：隕石における ^{22}Na ($t_{1/2} = 2.60$ y), ^{54}Mn ($t_{1/2} = 312$ d) などの短寿命核種濃度は比較的最近の情報を、それに対し ^{26}Al ($t_{1/2} = 7.1 \times 10^5$ y) 濃度は、より古い年代における照射の歴史を保存している。普通 (H グループ; high iron group; L; low iron group; LL; low iron low metal group) コンドライトにおける ^{22}Na , ^{54}Mn 濃度と ^{26}Al 濃度 (落下時の値に換算済) の関係を Fig. 3 に示した。ともにマグネシウム、アルミニウム、ケイ素および鉄などを主要ターゲットとする ^{22}Na と ^{26}Al の濃度にはある程度相関関係がみられたのに対し (Fig. 3 a), ^{54}Mn 濃度においてはその主要ターゲット (鉄) のグループ間での濃度差が反映された (H グループ; Fe = 27~32 wt.%, $^{54}\text{Mn} = 60 \sim 170$ dpm/kg; L, LL グループ; 20~30 wt.%, 40~110 dpm/kg) (Fig. 3 b)。隕石にみられるこのような相関関係は、破片間の核種濃度が大きくばらついた St. Robert (データ数, $n_{\text{Na}} = 14$, 相関係数, $r_{\text{Na}} = 0.82$; $n_{\text{Mn}} = 8$, $r_{\text{Mn}} = 0.64$; Brown *et al.*, 1996) および Mbale 隕石 ($n_{\text{Na}} = 4$, $r_{\text{Na}} = 1.00$; $n_{\text{Mn}} = 4$, $r_{\text{Mn}} = 1.00$; Jenniskens *et al.*, 1994; Murty *et al.*, 1998) で特に顕著であった (Fig. 3)。 ^{60}Co 濃度においても同様に大きな差がみられたことから (St. Robert, 3.5~66 dpm/kg; Mbale, $<1.5 \sim 34$ dpm/kg), これら ^{22}Na , ^{54}Mn および ^{26}Al の濃度差は破壊前の遮蔽効果の情報を多く含んでいるものと推測される。またこの遮蔽効果を利用し、複数の破片が回収された Kirin 隕石や St. Séverin (LL 6) 隕石においては、破片間の濃度の比較から落下前の原型の復元が試みられた (Honda *et al.*, 1980, 1982; Cressy, Jr., 1970)。

隕石における深度とこれら核種生成速度の関係については、これまで実測値、理論値などが多く報告され

ており、またシミュレーション実験からのアプローチもなされてきた (e.g., Bhandari *et al.*, 1993; Michel *et al.*, 1995; Leya *et al.*, 2000a, b)。その結果、核種ごとに異なる傾向を示すのはもちろん、同一核種でも隕石のサイズその他、化学組成や宇宙線のエネルギーによって画一的ではないことがわかっている。さらには以下に述べるようなそれぞれの隕石固有の照射の履歴も加わることから、これら一次生成核種濃度のみで落下前の深度分布の直接的な指標とするには至っていない。

宇宙線照射環境：これまでコンドライトに議論されてきた特異的な ^{22}Na 、 ^{54}Mn および ^{26}Al 濃度の要因をTable 1にまとめた。Fig. 3にみられるMalakal (L5) 隕石の高い ^{26}Al 濃度 (78 dpm/kg) は、数百万年前に (Cressy, Jr. and Rancitelli, 1974), Dhajala (Bhandari *et al.*, 1978) および Noblesville (unusual

Table 1 Cosmic-ray irradiation records in ordinary chondrites.

	activity		
	^{22}Na , ^{54}Mn	^{26}Al	
	high	low	high
high GCR flux			
(i) orbit (< 10 y)	Dhajala ¹		
	Noblesville ²		
(> 10 ⁶ y)			Malakal ³
(ii) solar activity	Dhajala ⁴		
effect of SCR	Salem ⁵		Salem ⁵
short exposure age		Kirin ⁶	

¹Bhandari *et al.* (1978); ²Lipschutz *et al.* (1993);

³Cressy, Jr. and Rancitelli (1974); ⁴Potdar *et al.* (1986);

⁵Nishiizumi *et al.* (1990); ⁶Honda *et al.* (1980)

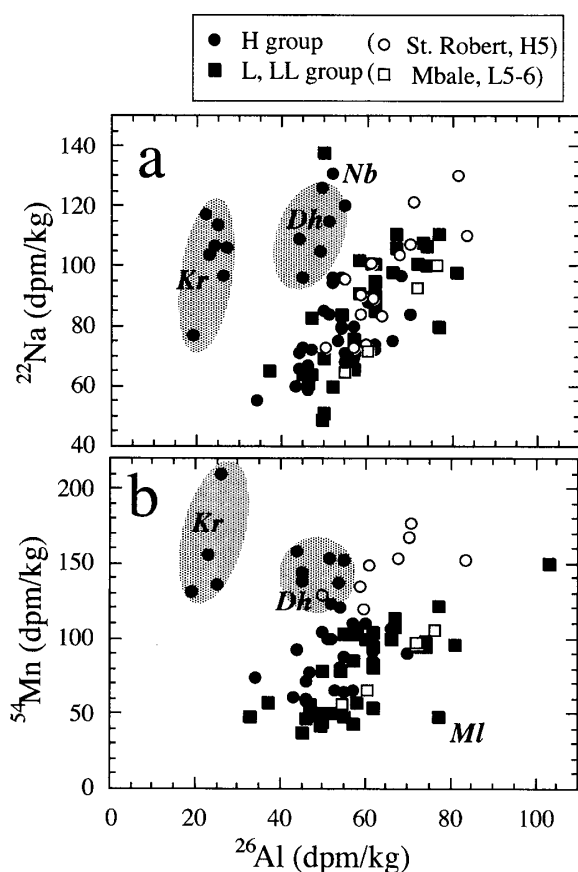


Fig. 3 Plots of a) ^{22}Na and b) ^{54}Mn vs. ^{26}Al activity (dpm/kg corrected at timof fall) in ordinary chondrites so far reported (Dh = Dhajala; Nb = Noblesville; Lipschutz *et al.*, 1993; MI = Malakal; Evans *et al.*, 1982; Kr = Kirin).

H) 隕石 (Lipschutz *et al.*, 1993) の高い ^{22}Na 、 ^{54}Mn 濃度 (それぞれ90~130 dpm/kg, 100~150 dpm/kg) に関しては、落下前の数年間に宇宙線フラックスの強い領域 (軌道) を漂っていたためであるとの説明がなされた。一方 GCR は、太陽活動におけるウォルフ黒点数変化 (11年周期) に伴いそのフラックスが変動し (太陽活動が活発、すなわち黒点数が多いほど太陽系磁場が強く、GCR フラックスが弱くなる)、コンドライトの短寿命核種 (^{22}Na 、 ^{46}Sc および ^{54}Mn) 濃度はこの影響を反映する (Evans *et al.*, 1982)。Dhajala 隕石が落下した1976年は太陽活動の弱い周期 (GCR フラックスの最大期) に相当することから、この要因によるとの報告もなされている (Potdar *et al.*, 1986)。それに対し Salem (L6) 隕石は普通コンドライトにおける最高濃度を示したが (^{26}Al = 103 dpm/kg, ^{22}Na = 244 dpm/kg, ^{54}Mn = 150 dpm/kg) (Evans *et al.*, 1987), この隕石が落下した1981年は GCR フラックスが最小近くであったことから、太陽活動周期とは矛盾する。GCR フラックスの強い軌道の他、 ^{26}Al 濃度にみられる深度分布 (隕石表面, ~160 dpm/kg; 内部, ~80 dpm/kg) から、落下時のアブレーションが少なく隕石表面 (~1 cm) でのみ反応する SCR (Michel *et al.*, 1982) の影響が保持されている可能性も挙げられた (Nishiizumi *et al.*, 1990)。

一方 Kirin 隕石にみられる低い ^{26}Al 濃度 (19~27 dpm/kg) は、宇宙線フラックスの特異性より、むしろ宇宙線にさらされた期間が短かった (宇宙線照射年代; ~0.5 × 10⁶ y) ゆえの未飽和で説明された (Honda

et al., 1980)。その他複数のコンドライトにおいても同様に、その低い ^{26}Al 濃度から比較的短い照射年代が見積もられている ($6 \sim 48 \text{ dpm/kg}$, $0.14 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ y}$; Heymann and Anders, 1967: $14 \sim 39 \text{ dpm/kg}$, $0.3 \sim 1.2 \times 10^6 \text{ y}$; Vogt *et al.*, 1991)。

3.2.3 隕石の宇宙線照射年代・落下年代 コンドライトの宇宙線照射年代 (隕石がメートルサイズで宇宙空間を漂っていた期間) は希ガス、特に ^{21}Ne を中心に多くの報告がなされ (H グループ, $3 \sim 40 \times 10^6 \text{ y}$; L, LL, $3 \sim 50 \times 10^6 \text{ y}$; Marti and Graf, 1992), 母天体破壊の情報を得る上での重要な手がかりとなってきた。例えば H および L グループの年代分布ヒストグラムにみられる 2 本の大きなピーク (H, $7, 33 \times 10^6 \text{ y}$; L, $28, 40 \times 10^6 \text{ y}$) は母天体破壊の時期を保存しており、また鉄隕石 ($200 \sim 1000 \times 10^6 \text{ y}$; Voshage and Feldmann, 1979) に比較し短い年代は、衝突などの衝撃に対し壊れやすかったためと解釈されている。希ガス以外にも長寿命核種である ^{26}Al , ^{36}Cl ($t_{1/2} = 3.0 \times 10^5 \text{ y}$) および ^{53}Mn ($t_{1/2} = 3.7 \times 10^6 \text{ y}$) などの濃度と生成速度、もしくはそれらの濃度比が、照射年代の測定に利用されてきた (Heimann *et al.*, 1974; Herpers and Englert, 1983)。 ^{26}Al 濃度の照射年代への適用は先に述べた通りである。しかし測定誤差 (計数値すなわち測定時間や検出効率などにより異なるが、 ^{26}Al 濃度では $3 \sim 15\%$ 程度) が大きいことや核種生成速度の正確な見積もりが困難であることなどから (Nishiizumi *et al.*, 1980), 信頼性には問題が残る。

一方で60年代後半以降の南極探査によって回収された一万個以上にもものぼる南極隕石試料は、宇宙化学の分野に飛躍的な進歩をもたらした。 ^{36}Cl (Nishiizumi *et al.*, 1989), ^{14}C ($t_{1/2} = 5.7 \times 10^3 \text{ y}$) (Boeckl, 1972) などの放射性核種は、その飽和濃度と隕石中の濃度との比較から落下年代 (隕石が地球に落下してからの期間) を求める上で効力を発揮し、その結果南極隕石においては 10^3 年から 10^6 年にわたる年代値が得られた。これらによると H より L, LL コンドライトに古く幅広い年代分布がみられるなど ($\text{H} < 0.4 \times 10^6 \text{ y}$; L, LL $< 10^6 \text{ y}$; Nishiizumi *et al.*, 1989), グループ間で異なる傾向を示すことに興味もたれる。この要因として、一つにはグループ別の落下頻度、すなわち地球近傍における H および L, LL コンドライトの存在割合の変化が挙げられる。これに関しては、南極隕石と現在落下する (非南極) 隕石との化学組成の違い (Dennison *et al.*, 1986) の他、最近では落下年代とコンドライト

母天体の火成作用や衝撃の程度との関連がサーモルミネッセンスの測定結果から指摘されている (Benoit and Sears, 1993, 1996)。南極隕石の落下年代はコンドライトの化学的特徴などの経時変化、さらにはこれまであまり明らかにされていない隕石母天体およびその破壊過程を考える上での時間軸としての役割を果たすかもしれない。

一方南極隕石の落下年代においては、年代が古くなるにつれ頻度分布が指数関数的に小さくなる傾向がみられる。ゆえに二つめの解釈として、落下年代は隕石の風化作用を大きく反映し、Fe-メタルを多く含む H グループのコンドライトにおいて特にその影響が大きかったとする説も提案されている。しかしこれら落下年代に関してはいまだ統一的な説明はなされておらず、今後より詳細な議論が必要とされよう。

また南極隕石の落下年代においては、コンドライトグループ間のみならず、やまと山脈 ($< 0.2 \times 10^6 \text{ y}$) より Allan Hills 山脈 ($< 10^6 \text{ y}$) が古い年代を示すなど、地域間でも明らかな違いがみられる (Nishiizumi *et al.*, 1989)。最近でも Allan Hills 山脈においては、さらに古い年代を示す隕石 (Allan Hills-880919, $\sim 2 \times 10^6 \text{ y}$; Scherer *et al.*, 1997) が発見されている。南極隕石の発見が特定の地域に集中する要因としては、かつては隕石シャワーなども挙げられていたが、今日では氷河運搬集積モデルが定説となっている (矢内, 1999)。これら落下年代は各採取地域に至る隕石の集積過程、例えば氷床の動きなどに関しても重要な制約をもたらすであろう。

さらにこれまで隕石の照射年代に放射性核種および希ガス濃度といった情報を組み合わせることにより、隕石の履歴に関する詳細なイメージの構築が可能となる。例えば Kirin (Honda *et al.*, 1980, 1982), Bur Gheluai (H5) (Vogt *et al.*, 1993) および Torino (H6) (Wieler *et al.*, 1996) 隕石では多種の核種濃度における複雑な分布が、母天体離脱以降の数回にわたる破壊を示唆する多段階照射モデルで説明された。これは隕石においては特殊な出来事ではなく、隕石同士の衝突などによる破壊の時期およびそのサイズなど隕石 (母天体) 破壊過程に対する知見をもたらす。また照射/落下年代に ^{53}Mn 濃度、 $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ 比を照らし合わせることで、落下前の隕石原型の推定および回収された破片間のペアリングなどにも利用されている (Honda, 1981)。

3.3 最近落下した隕石の話題

3.3.1 短寿命核種と落下時期 鉄隕石などに古くから報告があるように、隕石の宇宙線生成核種濃度を宇宙線フラックスのモニターとして長期的にみた場合、その変動はここ百万年間にわたって2倍を超えたことはなく (e.g., Arnold *et al.*, 1961), また短期的には11年周期の太陽活動を反映するとされる (Evans *et al.*, 1982)。ここでは短寿命核種濃度から最近の隕石を取り巻く太陽系の状況を探るため、1988年より1998年の11年間に国内外に落下した11種の普通コンドライトにおける ^{46}Sc ($t_{1/2}=83.9\text{ d}$) 濃度 (Fe + Ni 濃度で規格済) および $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 濃度比と落下時期との関係を調べた (Fig. 4)。

^{46}Sc 濃度は隕石間で大きな差を示し ($^{46}\text{Sc}=2\sim57$

dpm/kg Fe + Ni), その経時変動は太陽活動の周期と対応しているようにみえる (Fig. 4a)。また隕石間における $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 比の差はそれほど大きくはないが ($^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}=1.0\sim2.5$), ^{46}Sc 濃度と類似した変動の特徴を示す。隕石の $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 比に関してもこれまで宇宙線フラックス, すなわち太陽活動 (Evans *et al.*, 1982) や落下に至る軌道 (Fireman, 1967; Bhandari *et al.*, 1978) の他に, 深度に対する生成速度の違いから遮蔽効果を探る指標 (Cressy, Jr., 1972) として利用されてきた。Fig. 4bにみられる Noblesville 隕石の著しく高い $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 比 (2.52) は, 先に述べたように落下前における軌道の特異性で (Lipschutz *et al.*, 1993), Portales Valley (H6) 隕石の場合 ($^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}=1.53$) は太陽活動の周期を反映する比較的強い宇宙線の照射を受けたことで説明された (Bonino *et al.*, 1999)。

また多数の破片が回収された St. Robert 隕石においては, 破片間で ^{46}Sc 濃度, $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 比ともに大きなばらつきがみられた ($^{46}\text{Sc}=2\sim36\text{ dpm/kg Fe + Ni}$; $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}=1.2\sim1.8$; Brown *et al.*, 1996)。これら破片間では ^{26}Al 濃度が ^{60}Co 濃度と (中心に近いほど高濃度の) 正の相関がみられるなど, 低エネルギーの SCR の影響や破片間の化学組成の違いでは説明しにくく, GCR 照射における隕石内での遮蔽効果を反映している可能性が高い。

3.3.2 最近日本に落下した隕石 90年代本国においては5種のフォール隕石 (落下が目撃された隕石, 全てコンドライト) が回収されており, その全ての隕石に非破壊 γ 線法による放射性核種の測定が実施された。極低バックグラウンド測定例として, つくば隕石の最大破片 (177 g) に得られた γ 線スペクトルを Fig. 5に, 美保関・根上隕石の γ 線測定結果 (落下時の濃度に換算済) を, 1992年ウガンダ共和国に落下した同タイプの Mbale 隕石 (L5-6) (#3, #50の2破片; Jenniskens *et al.*, 1994) とともに Table 2に示した。

ここで注目に値するのは, これまでほとんど報告例のない短半減期の核種が検出されたことである。これには極低バックグラウンド地下測定室 (小松市・尾小屋) 利用に加え, 隕石落下から測定開始までの時間短縮が大きく貢献した。特に最近では, 微弱放射能測定の環境の整う金沢大学 (金沢市) 近隣の根上町, また隕石の専門家をも有する地質調査所, 神戸大学の位置するつくば市, 神戸市へ, さらに車のトランクや住宅

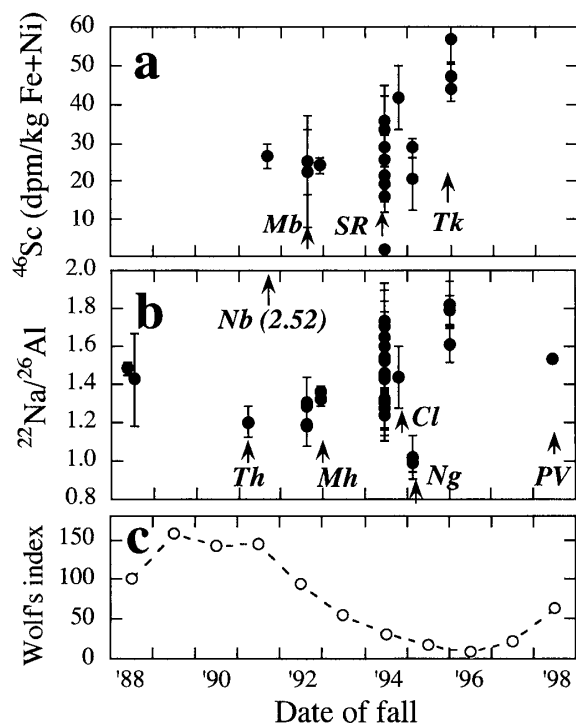


Fig. 4 a) ^{46}Sc ($t_{1/2}=83.9\text{ d}$) activity, b) $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ activity ratio and c) solar activity (Wolf's index; Rika Nenpyo, 2000) are plotted vs. date of fall in recently fallen eleven chondrites (Th = Tahara; Shima *et al.*, 1993a; Nb = Noblesville; Mb = Mbale; Mh = Mihonoseki; Shima *et al.*, 1993a; SR = St. Robert; Cl = Coleman; Osborn *et al.*, 1997; Ng = Neagari; Komura *et al.*, 1996a; Tk = Tsukuba; Komura *et al.*, 1996b; PV = Portales Valley; Bonino *et al.*, 1999).

の屋根をめがけ落下するなど、短寿命核種の測定には非常に好都合であった。その結果根上隕石では落下の62時間後、つくばおよび神戸隕石に至っては6時間、21時間後と世界的にも例のない早い段階で γ 線測定が開始された。これら最近本国に落下した隕石における宇宙線生成核種の測定結果からみたトピックを以下に述べる。

田原 (H5)・美保関 (L6)・根上 (L6) 隕石：田原隕石では ^{22}Na , ^{54}Mn といった短寿命核種が他の普通コンドライトより低濃度であり（ともに59 dpm/kg; Shima *et al.*, 1993a), また ^{48}Sc ($t_{1/2}=1.82\text{d}$; 17dpm/kg), ^{44}mSc ($t_{1/2}=2.44\text{d}$; 4.2 dpm/kg)といったそれまでほとんど報告のなかった短寿命核種が検出された根上隕石 (Komura *et al.*, 1996 a) や美保関隕石においても、大部分の短寿命核種が低濃度の傾向を示した (Table 2)。これは根上隕石が一般的なコンドライトの $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ 比 (1.2~1.7) に比べ著しく低い値 (0.99) を示したことにもみてとれる (Fig. 4)。先の St. Robert 隕石 (Brown *et al.*, 1996) 同様、Mbale 隕石 (Jenniskens *et al.*, 1994) にみられた核種濃度の低い破片 (#50) (Table 2) に関しても、破壊前の

Table 2 Activities of cosmogenic radionuclides (dpm/kg corrected at time of fall) in the Mihonoseki, Neagari and Mbale meteorites.

nuclide	half-life	Mihonoseki ¹ (L6) Dec. 10. '92	Neagari ² (L6) Feb. 19. '95	Mbale ³ (L5-6) Aug. 14. '92	
		420 g frag.	325 g frag.	# 3	# 50
^{44}mSc	2.44 d	4 ± 2	4.2 ± 1.4	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>
^{52}Mn	5.6 d	21 ± 3	15 ± 3	<i>n. d.</i>	17 ± 5
^{48}V	16 d	15 ± 2	13 ± 4	33 ± 20	18 ± 6
^{51}Cr	27.7 d	57 ± 12	41 ± 7	< 80	37 ± 14
^{7}Be	53.3 d	62 ± 7	75 ± 7	71 ± 25	60 ± 11
^{58}Co	71 d	3.3 ± 0.7	0.5 ± 0.2	11.8 ± 4.1	4.5 ± 1.5
^{56}Co	77 d	8.9 ± 0.5	7.3 ± 0.6	< 8	6 ± 4
^{46}Sc	84 d	5.8 ± 0.5	6.9 ± 0.6	5.4 ± 3.5	6 ± 2
^{57}Co	272 d	6.5 ± 1.1	6.6 ± 0.8	15.4 ± 2.0	7.4 ± 1.3
^{54}Mn	312 d	47 ± 1	42.0 ± 1.0	105.3 ± 6.5	56.7 ± 3.5
^{22}Na	2.60 y	61 ± 1	48.7 ± 1.3	100 ± 7	64.5 ± 3.9
^{60}Co	5.26 y	0.3 ± 0.3	1.0 ± 0.6	34.0 ± 2.0	< 1.5
^{48}Ti	47.3 y	0.6 ± 0.5	0.98 ± 0.32	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>
^{26}Al	7.1 × 10 ⁵ y	46 ± 1	49.3 ± 1.5	76.4 ± 5.0	54.8 ± 3.3

¹Shima *et al.* (1993a); ²Komura *et al.* (1996a); ³Jenniskens *et al.* (1994)

"*n. d.*" denotes "*not detected*".

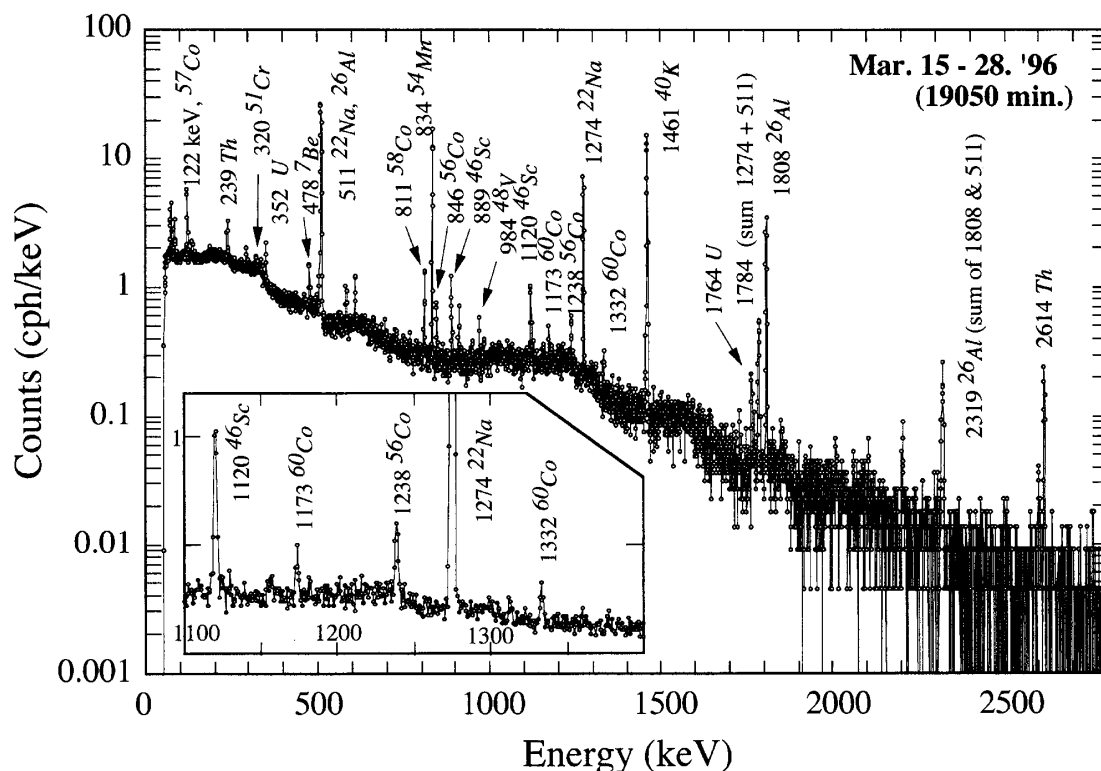


Fig. 5 "Extremely" low background γ -ray spectrum of the largest fragment (#13, 177.2 g) of the Tsukuba (H5-6) meteorite (Komura *et al.*, 1996b).

隕石における位置関係で説明された。田原、美保関および根上隕石における低い核種濃度の要因として、このような破壊前の遮蔽効果の影響が挙げられる。これら隕石における低い ^{60}Co 濃度 (0.3~4.6 dpm/kg) および美保関隕石で報告された比較的大きな $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ 比 (1.180; Shima *et al.*, 1993b) から、落下前のサイズが小さかった ($r < 30$ cm), もしくは破壊前表面近くに位置していたことが推測されている。ただし根上隕石ではその落下時期 (1995年2月) から落下前の強いフラックスのGCR照射が推測され (Fig. 4), これら低い核種濃度が直接太陽活動の周期を反映しているとは考えにくい。田原隕石に関しては太陽活動が活発な時期 (1991年) に落下したことから当時の弱いGCRフラックスの情報が記録されている可能性も挙げられる。

つくば (H5-6) 隕石: 1996年1月に落下したつくば隕石では合計23個の破片が回収され、そのうち比較的大きな3破片 (29~177 g) について非破壊 γ 線測定がおこなわれた (Komura *et al.*, 1996b)。この隕石についても ^{60}Co 濃度が < 2 dpm/kgと、落下前のサイズが比較的小さかったことが推測される。 ^{46}Sc をはじめとする短寿命核種が、他のコンドライトと比較し高い濃度を示したが、この隕石はGCRフラックスの最大期近くに落下したこと、太陽活動の影響が考えられる (Fig. 4)。さらにこれら3破片間で ^{54}Mn , ^{22}Na に計数誤差以上の濃度差が、 ^{57}Co ($t_{1/2} = 272$ d) および ^{58}Co (71 d) 濃度においては2~3倍に達する大きな違いが報告されている。模擬試料を用いた宇宙線照射のシミュレーション実験では、ニッケルを主要ターゲットとする ^{57}Co , ^{58}Co の生成速度は ^{26}Al , ^{54}Mn および ^{22}Na などに比較し、深度の影響が顕著にあらわれた (Leya *et al.*, 2000b)。これら破片間における濃度差の要因として、遮蔽効果を挙げるのは矛盾がない。測定技術の進歩などに伴い、これまで詳細な議論のなされる機会の少なかった核種がもたらす情報にも今後期待がもたれる。

神戸 (CK4) 隕石: 神戸隕石は1999年9月神戸市北区の民家の屋根を突き破り落下し、そのうち135 gが回収された。最大破片 (65 g) においては、隕石ではこれまでに報告例のない ^{28}Mg ($t_{1/2} = 20.9$ h; 7.4 dpm/kg), ^{57}Ni ($t_{1/2} = 1.5$ d; 3.9 dpm/kg) (tentative data; Nakamura *et al.*, 2000) など、非常に短寿命の核種の検出に成功している。最終的に非破壊 γ 線測定法で検出された宇宙線生成核種は、半減期が24時間以

下の ^{24}Na , ^{28}Mg , ^{43}K , ^{57}Ni をはじめ、 ^{48}Sc , $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{47}Sc , ^{52}Mn , ^{56}Ni , ^{48}V , ^{51}Cr , ^7Be , ^{58}Co , ^{56}Co , ^{46}Sc , ^{57}Co , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{44}Ti および ^{26}Al (寿命の短い順に列挙) の21核種にわたった (Komura *et al.*, 2000)。またこの隕石では ^{60}Co 濃度と $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比から見積もった遮蔽効果が一致しない、宇宙線照射年代のばらつきが著しく大きい (^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar , ^{10}Be , ^{21}Ne 年代; $12 \sim 56 \times 10^6$ y) などの理由から、多段階照射を経験していることが報告されている (Caffee *et al.*, 2000)。

神戸隕石においては落下後まもなくコンソーティアム組織が生まれ、現在これら宇宙線生成核種を含む多くの分野にわたる研究が進行中である。研究例のほとんどない極めて希少なタイプの隕石であることから、今後の研究成果の公表に注目されよう。

4. 今後の展望

隕石の宇宙線生成核種には、その母天体形成以降地球へと到着する45.6億年にわたる壮大な歴史の最後の1ページを飾る様々な出来事の情報凝縮され保存されている。その反面、落下 (破壊) 前のサイズや位置関係および宇宙線フラックスなど多くの要因がからみ合うために、不確実な要素が極めて多い。さらに幅広い照射年代の分布、隕石破壊に伴う多段階照射などにみられる隕石の多様な履歴がこれに拍車をかける。今後隕石が宇宙空間に放出されてから地球に至る詳細なシナリオを描くには、より多くの実測データを蓄積、系統的に吟味する必要がある。

また最近では測定技術の進歩に伴い、従来議論されることがなかった短寿命核種にも注目が集まるようになった。今後これまで困難とされていた新たな短寿命核種の検出に、さらには隕石の落下直前の宇宙線照射状況などに重要な知見をもたらすことが期待される。

謝 辞

神戸大、中村昇教授および金沢大、山本政儀助教授には貴重な助言をいただきました。また匿名の査読者の方々、並びに日高洋氏には本稿査読の際有益なご助言を頂きました。

ここに改めて謝意を表します。

(最近の本国における落下例の報告に関しては、1995年6月、1996年6月、2000年6月の極地研・南極隕石シンポジウム、および1996年9月放射化学討論会において一部発表)

文 献

- Arnold, J. R., Honda, M. and Lal, D. (1961) Record of cosmic-ray in the meteorites. *J. Geophys. Res.* **66**, 3519–3531.
- Ballabh, G. M., Bhatnagar, A. and Bhandari, N. (1978) The orbit of the Dhajala meteorite. *ICARUS* **33**, 361–367.
- Benoit, P. H. and Sears, D. W. G. (1993) Breakup and structure of an H-chondrite parent body: The H-chondrite flux over the last million years. *ICARUS* **101**, 188–200.
- Benoit, P. H. and Sears, D. W. G. (1996) Rapid changes in the nature of the H chondrites falling to Earth. *Meteorit. Planet. Sci.* **31**, 81–86.
- Bhandari, N., Bhattacharya, S. K. and Somayajulu, B. L. K. (1978) Cosmogenic radioisotopes in the Dhajala chondrite: implications to variations of cosmic rayfluxes in the interplanetary space. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **40**, 194–202.
- Bhandari, N., Lal, D., Rajan, R. S., Arnold, J. R., Marti, K. and Moore, C. B. (1980) Atmospheric ablation in meteorites: A study based on cosmic ray track and neon isotopes. *Nucl. Tracks* **4**, 213–262.
- Bhandari, N. and Potdar, M. B. (1982) Cosmogenic ^{21}Ne and ^{22}Ne depth profiles in chondrites. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **58**, 116–128.
- Bhandari, N., Mathew, K. J., Rao, M. N., Herpers, U., Bremer, K., Vogt, S., Wölfli, W., Hofmann, H. J., Michel, R., Bodemann, R. and Lange, H. -J. (1993) Depth and size dependence of cosmogenic nuclide production rates in stony meteoroids. *Geochim. Cosmochim. Acta* **57**, 2361–2375.
- Boeckl, R. (1972) Terrestrial ages of nineteen stony meteorites derived from their radiocarbon content. *Nature* **236**, 25–26.
- Bonino, G., Cini Castagnoli, G., Taricco, C., Bhandari, N. and Killgore, M. (1999) Cosmogenic radionuclides in different fragments of Portales Valley. *Meteorit. Planet. Sci.* **34**, A14–A15.
- Brown, P., Hildebrand, A. R., Green, D. W. E., Pagé, D., Jacobs, C., Revelle, D., Tagliaferri, E., Wacker, J. and Wetmiller, B. (1996) The fall of the St-Robert meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* **31**, 502–517.
- Caffee, M. W., Goswami, J. N., Hohenberg, C. M., Marti, K. and Reedy, R. C. (1988) Irradiation records in meteorites. In: *Meteorites and the Early Solar System* (eds. J. F. Kerridge and M. S. Matthews), Tucson, Univ. Arizona Press, pp. 205–245.
- Caffee, M. W., Nishiizumi, K., Matsumoto, Y., Matsuda, J., Komura, K. and Nakamura, N. (2000) Noble gases and cosmogenic radionuclides in Kobe CK meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* **35**, A 37.
- Crabb, J. and Schultz, L. (1981) Cosmic-ray exposure ages of the ordinary chondrites and their significance for parent body stratigraphy. *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 2151–2160.
- Cressy, P. J. Jr. (1970) Multiparameter analysis of gamma radiation from the Barwell, St. Séverin and Tathlith meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **34**, 771–779.
- Cressy, P. J. Jr. (1972) Cosmogenic radionuclides in the Allende and Murchison carbonaceous chondrites. *J. Geophys. Res.* **77**, 4905–4911.
- Cressy, P. J. Jr. and Rancitelli, L. A. (1974) The unique cosmic-ray history of the Malakal chondrite. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **22**, 275–283.
- Dennison, J. E., Lingner, D. W. and Lipschutz, M. E. (1986) Antarctic and non-Antarctic meteorites from different populations. *Nature* **319**, 390–393.
- Eberhardt, P., Geiss, J. and Lutz, H. (1963) Neutrons in meteorites. In: *Earth Science and Meteoritics* (eds. J. Geiss and E. D. Goldberg), North-Holland, Amsterdam, pp. 143–168.
- Elmore, D. and Phillips, F. M. (1987) Accelerator mass spectrometry for measurement of long-lived radioisotopes. *Science* **236**, 543–550.
- Evans, J. C., Reeves, J. H., Rancitelli, L. A. and Bogard, D. D. (1982) Cosmogenic nuclides in recently fallen meteorites: Evidence for galactic cosmic ray variations during the period 1967–1978. *J. Geophys. Res.* **87**, 5577–5591.
- Evans, J. C., Reeves, J. H. and Reedy, R. C. (1987)

- Solar cosmic ray produced radionuclides in the Salem meteorite. *Lunar Planet. Sci.* **XVIII**, 271–272.
- Fireman, E. L. (1967) Radioactivities in meteorites and cosmic-ray variations. *Geochim. Cosmochim. Acta* **31**, 1691–1700.
- Heimann, M., Parekh, P. P. and Herr, W. (1974) A comparative study on ^{26}Al and ^{53}Mn in eighteen chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **38**, 217–234.
- Herpers, U. and Englert, P. (1983) ^{26}Al -production rates and $^{53}\text{Mn}/^{26}\text{Al}$ production ratios in non-Antarctic chondrites and their application to bombardment histories. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 14th, J. Geophys. Res.* **88**, B312–B318.
- Heymann, D. and Anders, E. (1967) Meteorites with short cosmic-ray exposure ages, as determined from their Al^{26} content. *Geochim. Cosmochim. Acta* **31**, 1793–1809.
- Honda, M., Horie, K., Imamura, M., Nishiizumi, K., Takaoka, N. and Komura, K. (1980) Irradiation history of the Kirin meteorite. *Geochim. J.* **14**, 83–89.
- Honda, M. (1981) Terrestrial history of Antarctic meteorites recorded in the cosmogenic nuclides. *Geochim. J.* **15**, 163–181.
- Honda, M., Nishiizumi, K., Imamura, M., Takaoka, N., Nitoh, O., Horie, K. and Komura, K. (1982) Cosmogenic nuclides in the Kirin chondrite. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **57**, 101–109.
- Jenniskens, P., Betlem, H., Betlem, J., Barifaijo, E., Schlüter, T., Hampton, C., Laubenstein, M., Kunz, J. and Heusser, G. (1994) The Mbale meteorite shower. *Meteoritics* **29**, 246–254.
- 小村和久・坂本浩・本田雅健 (1986) 放射性核種の計数法. 西村純編, 宇宙放射線. 共立出版, p. 515–537.
- Komura, K., Yamazaki, S., Nakanishi, T., Miyamoto, Y. and Sakamoto, K. (1996a) Cosmogenic nuclides in Neagari meteorite. Proc. Kazuo Yamakoshi Memorial Symp. Cosmic dust and related topics, Tanashi, Tokyo, 71–83.
- Komura, K., Yamazaki, S., Yoneda, S. and Shima, M. (1996b) Preliminary reports on cosmogenic nuclides in Tsukuba meteorite fell on Jan. 7, 1996. Paper presented for NIPR Symp. **XXI**, 76–77.
- Komura, K., Inoue, M. and Nakamura, N. (2000) Cosmogenic nuclides in Kobe meteorite fell on Sep. 26th, 1999. Paper presented for NIPR Symp. **XXV**, 59–61.
- Lavrukhina, A. K. and Gorin, V. D. (1985) Radioactivity of some stone meteorites. *Meteoritics* **20**, 692–693.
- Leya, I., Lange, H. -J., Neumann, S., Wieler, R. and Michel, R. (2000a) The production of cosmogenic nuclides in stony meteoroids by galactic cosmic-ray particles. *Meteorit. Planet. Sci.* **35**, 259–286.
- Leya, I., Lange, H. -J., Lüpke, M., Neupert, U., Daunke, R., Fanenbruck, O., Michel, R., Rosel, R., Meltzow, B., Schiekel, T., Sudbrock, F., Herpers, U., Filges, D., Bonani, G., Dittrich-Hannen, B., Suter, M., Kubik, W. and Synal, H. -A. (2000b) Simulation of the interaction of galactic cosmic-ray protons with meteoroids: On the production of radionuclides in thick gabbro and iron targets irradiated isotropically with 1.6 GeV protons. *Meteorit. Planet. Sci.* **35**, 287–318.
- Lipschutz, M. E., Wolf, S. F., Vogt, S., Michlovich, E., Lindstrom, M. M., Zolensky, M. E., Mittlefehldt, D. W., Satterwhite, C., Schultz, L., Loeken, T., Scherer, P., Dodd, R. T., Sears, W. G., Benoit, P. H., Wacker, J. F., Burns, R. G. and Fisher, D. S. (1993) Consortium study of the unusual H chondrite regolith breccia, Noblesville. *Meteoritics* **28**, 528–537.
- Mabuchi, H., Tobailem, J., Leger, C., Bibron, R. and Biettmann, D. (1968) Radioactivite induite par le rayonnement cosmique dans la meteorite Granés. *Geochim. Cosmochim. Acta* **32**, 949–963.
- Marti, K. and Graf, T. (1992) Cosmic-ray exposure history of ordinary chondrites. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **20**, 221–243.
- Michel, R., Brinkmann, G. and Stück, R. (1982) Solar cosmic-ray-produced radionuclides in meteorites. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **59**, 33–48.

- Michel, R., Lüpke, M., Herpers, U., Rösel, R., Suter, M., Dittrich-Hannen, B., Kubik, P. W., Filges, D. and Cloth, P. (1995) Simulation and modeling of the interaction of galactic sputrons with stony meteoroids. *Planet. Space Sci.* **43**, 557–572.
- Michel, R. (1999) Long-lived radionuclides as tracers in terrestrial and extraterrestrial matter. *Radiochim. Acta* **87**, 47–73.
- Murty, S. V. S., Bhandari, N., Suthar, K. M., Clement, C. J., Bonino, G. and Cini Castagnoli, G. (1998) Cosmogenic effects in Mbale, L 5/6 chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* **33**, 1311–1316.
- Nakamura, N., Ebihara, M., Hirota, Y., Oura, Y., Yoneda, S., Kojima, H., Tomeoka, K., Kojima, T., Komura, K., Clayton, R. N., Mayeda, T. K. and Wang, D. (2000) The Kobe meteorite; Preliminary results of bulk chemical composition, petrography, cosmic-ray induced radioactivities, oxygen isotopes and classification. *Lunar Planet. Sci.* **XXXI**, CD-ROM.
- Nishiizumi, K. (1978) Cosmic-ray-produced ^{53}Mn in thirty-one meteorites. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **41**, 91–100.
- Nishiizumi, K., Regnier, S. and Marti, K. (1980) Cosmic ray exposure ages of chondrites, pre-irradiation and constancy of cosmic ray flux in the past. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **50**, 156–170.
- Nishiizumi, K. (1987) ^{53}Mn , ^{26}Al , ^{10}Be and ^{36}Cl in meteorites: data compilation. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **13**, 209–273.
- Nishiizumi, K., Elmore, D. and Kubik, P. W. (1989) Update on terrestrial ages of Antarctic meteorites. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **93**, 299–313.
- Nishiizumi, K., Nagai, H., Imamura, M., Honda, M., Kobayashi, K., Kubik, P. W., Sharma, P., Wieler, R., Signer, P., Goswami, J. N., Sinha, N., Reedy, R. C. and Arnold, J. R. (1990) Solar cosmic ray produced nuclides in the Salem meteorite. *Meteoritics* **25**, 392–393.
- Osborn, W., Matty, D., Velbel, M., Brown, P. and Wacker, J. (1997) Fall, recovery and description of the Coleman chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* **32**, 781–790.
- Potdar, M. B., Bhandari, N. and Suthar, K. (1986) Radionuclide depth profiles in Dhajala chondrite. *Proc. Indian Acad. Sci.* **95**, 169–182.
- Rancitelli, L. A., Perkins, R. W., Cooper, J. A., Kaye, J. H. and Wogman, N. A. (1969) Radionuclide composition of the Allende meteorite from nondestructive Gamma-ray spectrometric analysis. *Science* **166**, 1269–1272.
- 理科年表 (2000) 国立天文台編, 丸善, p.113–115.
- Scherer, P., Schultz, L., Neupert, U., Knauer, M., Neumann, S., Leya, I., Michel, R., Mokos, J., Lipschutz, M. E., Metzler, K., Suter, M. and Kubik, P. W. (1997) Alla Hills 88019: An Antarctic H-chondrite with a very long terrestrial age. *Meteorit. Planet. Sci.* **32**, 769–773.
- Shedlovsky, J. P., Cressy, P. J. Jr. and Kohman, T. P. (1967) Cosmogenic radioactivities in the Peace River and Harleton chondrites. *J. Geophys. Res.* **72**, 5051–5058.
- Shima, M., Honda, M., Yabuki, S. and Takahashi, K. (1993a) Cosmogenic radionuclides in recently fallen chondrites Mihonoseki and Tahara. *Meteoritics* **28**, 436.
- Shima, M., Okada, A. and Nagao, K. (1993b) The chondrite Mihonoseki - new observed fall. *Lunar Planet. Sci.* **XXIV**, 1297–1298.
- Spergel, M. S., Reedy, R. C., Lazareth, O. W., Levy, P. W. and Slate, L. A. (1986) Cosmogenic neutron-capture-produced nuclides in stony meteorites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 16th, J. Geophys. Res.* **91**, D 483–D 494.
- Vogt, S., Herzog, G. F. and Reedy, R. C. (1990) Cosmogenic nuclides in extraterrestrial materials. *Rev. Geophys.* **28**, 253–275.
- Vogt, S., Albrecht, A., Herzog, G. F., Klein, J., Fink, D., Middleton, R., Weber, H. and Schultz, L. (1991) Cosmogenic nuclides in short-lived meteorites. *Meteoritics* **26**, 403.
- Vogt, S. K., Aylmer, D., Herzog, G. F., Wieler, R., Signer, P., Pellas, P., Fiéni, C., Tuniz, C., Jull, A. J. T., Fink, D., Klein, J. and Middleton, R. (1993) On the Bur Gheluai H 5 chondrite and other meteorites with complex exposure histories. *Meteoritics* **28**, 71–85.

- Voshage, H. and Feldmann, H. (1979) Investigation on cosmic-ray-produced nuclides in iron meteorites, 3. Exposure ages, meteoroid sizes and sample depths determined by mass spectrometric analyses of potassium and rare gases. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **45**, 293-308.
- Wieler, R., Graf, Th., Signer, P., Vogt, S., Herzog, G. F., Tuniz, C., Fink, D., Fifield, K. L., Klein, J., Middleton, R., Jull, A. J. T., Pellas, P., Masarik, J. and Dreibus, G. (1996) Exposure history of the Torino meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* **31**, 265-272.
- 矢内桂三 (1999) 南の果てに隕石を求めて. 地球化学, **33**, 177-189.