

地球化学の話

①

高橋 清

はじめに

最近の とくに戦後20年の世界の地球化学の進歩と活動は目をみはらせるものがあり 地球や宇宙の多くの現象を化学的に解決し 地球科学の分野で大きな役割りを果たしている。

地球化学の最近のめぼしい研究方向として 同位体地球化学 高温高压下における化学変化の理論と実験的研究があげられる。放射性および安定同位体の研究は岩石の絶対年代の測定をはじめ 新しい研究面を開拓しつつあり 高温高压下の合成実験は 地球深所でのマントル内の化学変化 マグマの発生機構などの推定に大いに役立っている。放射化分析など より正確な分析法の開発による きわめて微量にしか含まれない元素分布なども 大いに地球化学の発展に大きな役割りを果たしている。地球化学全般についての成書は クラーク (Clarke) の *Data of Geochemistry* (1908) 以来 ベルナドスキー (Vernadsky) の *La Géochimie* (1924) など古典的なものから数多く刊行されており また戦後 *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1951) をはじめとして昨年第1巻を発行した *Chemical Geology*。日本地球化学会の *Geochemical Journal* など地球化学関係の雑誌の刊行も活発である。地質ニュース137号 (1966) に参考図書が列挙されているが ここに再録すると次のとおりである。

Date of Geochemistry (1908): F. W. Clarke

U.S. Geological Survey Bulletin No. 330. Revised 6th Ed (1963) **La Géochimie** (1924): W. I. Vernadsky (高橋純一訳 地球化学 1933) 化学実験学-地球化学-(1941)河出書房 **Geochemistry** (1949): K. Rankama and T. G. Sahama, Univ. of Chicago Press. **Principles of Geochemistry** (1952): B. Mason, John Wiley, N. Y. (半谷高久訳 (メースン) 地球化学概論 1954 みすず書房) 地球化学概説 (1953): 岩崎岩次 大日本図書 **Geochemie** (1953) A. A. Saukow Ver Verlag Technik, Berlin (貴志光雄訳 (ザウコフ) 地球化学 (1955) 地調海外文献翻訳集 14 一部抄訳) 地球化学 (1954): 三宅泰雄 朝倉書店 **Geochemistry** (1954): Edit. A. Muir, V. M. Goldschmidt, Clavendon Press. **Isotope Geology** (1954): K. Rankama, Pergamon Press, London **Nuclear Geology** (1954): Edit. H. Faul, John Wiley, N. Y. **Researches in Geochemistry** (1957): Edit. P. H. Abelson, John, Wiley, N. Y. A. E. Ферсман Изъранные Труды I~V (1952~1959) Академии Наук С. С. С. Р.

(フェルスマン論文選集 ソビエト科学アカデミー) **Methods in Geochemistry** (1960): Edt. A.A. Smales and L. R. Wager, Interscience Publishers Inc., N.Y., London. **The Abundance of the Elements** (1961): L.H. Aller, Interscience Publishers Inc. **Abundance of Chemical Elements** (1961): V. V. Cherdynstev translated by W. Nichiporuk, Chicago Univ. Press. **Meteorites** (1962): B. Mason, John Wiley, N. Y., London **Progress in Isotope Geology** (1963): K. Rankama, Interscience Publishers Inc., N.Y. **Physical Geochemistry** (1963): F.G. Smith, Addison-Wesley Publ. Co., Inc. **Geochemistry of Solid** (1964): W. S. Fyfe, McGraw-Hill 地球化学入門 (1964): 菅原健・半谷高久編 丸善 **Elements of Geochemistry** (1965): Y. Miyake, Maruzen Co., Ltd., Tokyo

さらに最近10年間の地球化学関係の主要雑誌に発表された内外の論文内容を検討してみると 地球についての論文とともに宇宙に関する化学 すなわち宇宙に存在する物質を化学的な見方や方法で解明しようとするいわゆる宇宙化学 (Cosmochemistry) の論文がきわめて多いことが注目される。宇宙からの外来物質である隕石の研究が 地球の内部の物質および構造を推定するための重要な手掛かりの1つとして考えられてきたことと 太陽系の起源や地球を含めた惑星の物質についての重要な知識を与えることなどから 宇宙化学の研究が大いに推進されてきたものと考えられる。

さて「地球化学」とはどのような学問なのか? さきに挙げた地球化学の教科書や専門書で 著者たちはそれぞれ地球化学の定義を述べている。現状は 地球科学のあらゆる分野に入りこみ 滲みこんで 化学的あるいは物理的手法を駆使して 宇宙や地球のもろもろの現象を解釈しようとしている。ここでは 厳密な地球化学の定義を述べるのはやめにしよう。

実際に地球化学のとり組んでいる多くの問題 これらの問題を解決するためにとられている方法 考え方をわかりやすく解説し これによって 皆さんに地球化学のイメージを画きだしてもらいたいと思っている。

最初はわれわれにとってもっともなじみの薄い空から降ってくる石 隕石 (meteorites) からはじめてみたい。

I. 隕石の話 (その1)

夏の夜空に一すじ二すじと流れ星が流れ 闇の中にあた消えてゆくのを子供心にも不思議だと感じたのはわたしばかりではないであろう。この流れ星が多くは宇宙から地球に向かって落下してきた隕石が大気圏に突入しその摩擦によって光を発しているのだということを知ったのはずっと後のことである。

このように地球の外から落下してくる隕石は年間 100 トン位だと推定されており 隕石よりはるかに小さな宇宙塵は 100 万トンも降ってくるものといわれている。

世界中とところらわず落下している隕石は 年に数個程度 落下地点からほり出されて 隕石学者 鉱物学者 地球化学者などの手により詳しく研究され 多くは各地の博物館で保存されている。隕石の約 1 万倍もの量が落下している宇宙塵は余り細かいのと 他の地球上の塵の影響を除くことがむずかしいので 未だ余り収集研究がなされていないが 太洋の海底土や絶海の孤島 極地などで収集する試みがなされており またジェット機の網にひっかけるなどから集められているが 隕石に比べるとその研究はいとぐちについたに過ぎない。

このような隕石や宇宙塵をなぜ多くの学者が競って研究するのか 単に地球の外からやってきた物質に過ぎないではないかなどという疑問がわいてくるに違いない。

19世紀から20世紀前半にかけては 多分このような興味だけから 隕石は調べられ 鉱物や化学成分の記載がなされたのであろうが これらの記載が蓄積されてくるにつれて 組織的な分類が行なわれ いつどのようにして隕石ができ上り 地球に落ちてきたかなどの進歩した議論が除々に行なわれるようになってきたのである。さらに地球やその他の太陽系の惑星についての密度などの物理的データから 地球の構造がどのようになってい

るかが議論されるようになると 隕石の研究はますます脚光を浴びてきた。これは隕石が地球のような構造をもった太陽系の惑星が なんらかのできごとによってこわされたものだという考えにもとづいている。

ゴールドシュミット (Goldschmidt) やワシントン (Washington) などにより 1920年代に隕石にもとづいた地球のモデルが提案された。われわれはこのような地球のモデルを中学や高校の理科の授業で習った覚えがある。その頃は 地球をはじめは太陽のように燃えているガス球で それがだんだん冷えて固ったのだと教えられたに違いない。

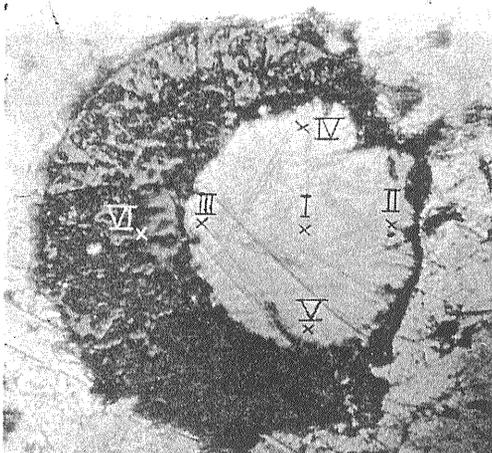
第2次世界大戦以後の宇宙化学の目ざましい進歩と 同位体地球化学や放射化分析などによる隕石中の元素や同位体の存在量が明らかになるにつれて 隕石のでき方もむかしとは違って低温の宇宙塵のような原物質が集ってできたものだとされ この方が通りがよくなるとともに地球のモデルもそのように変ってきた。

なぜ隕石を研究するのか? 現在では隕石を通じて地球を知ることとともに 隕石を通じて宇宙を知るという大きな意味が含まれているからである。

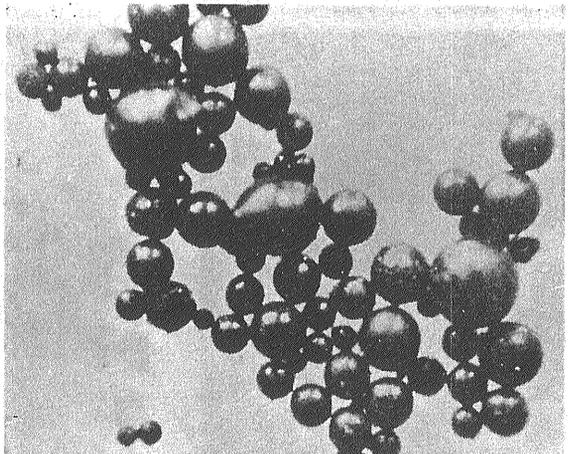
隕石とはどういうものか またどのような研究が現在なされているか などを地球化学的立場から解説することは あながち無意味ではあるまい。

1. 隕石はどこからきたものか?

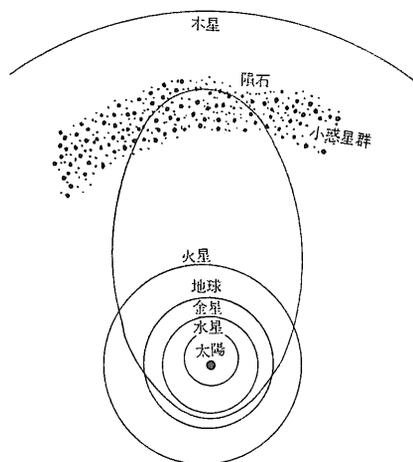
隕石が宇宙空間のどこから地球上にきたものかについては19世紀頃からさかんに論議された。19世紀のはじめに太陽系の火星と木星に数多くの小惑星が発見されてからは これらの小惑星が衝突その他のできごとにより壊された破片がうまく軌道にのり 地球上に落ちてきたものが隕石であると信じられている。太陽系以外の宇



宇宙塵粒子 直径55 μ 。金属相の核(白色) I~V と酸化物の外殻(Ⅵ)とからなっている。I~V (Ni; 29.8-31.6%), VI(Ni 0.1%); X線マイクロアナライザーにより分析 (R. Castaing K. Fredriksson, 1958, *Geschim. et Cosmochim. Acta*, 14, 114-117 より)



宇宙塵粒子 ($\times 160$)。Sikhote-Alin 隕石シャワーから磁気的にとりだされたものより (P. W. Hodge, R. Wildt, 1958, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 14, 126-133 より)



第1図
1959年4月7日
に落下した
Pribram隕石の
軌道(B.Mason
1962)

宙空間からきたものであるという説も一時さかんだったが 第2次世界大戦後 流星の速度が正確に測られるようになって すたれてしまった。

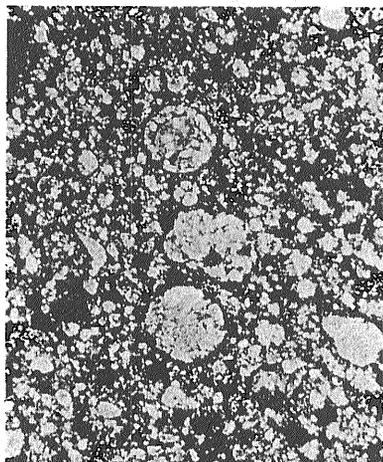
1959年4月7日に落下したプリブラム (Pribram)隕石は 正確に軌道を計算され 火星と木星との間にある小

惑星群からきたことが明らかにされた(第1図)。

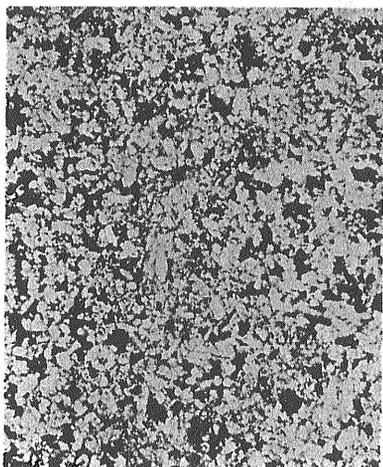
今日 隕石の源泉として考えられているのは 小惑星と彗星で 隕石として地上に落ちてくるのは小惑星と同じ性質のものと考えられている。これらの小惑星の大きさは一般に月ぐらいだろうといわれている。

2. 隕石の種類と分類

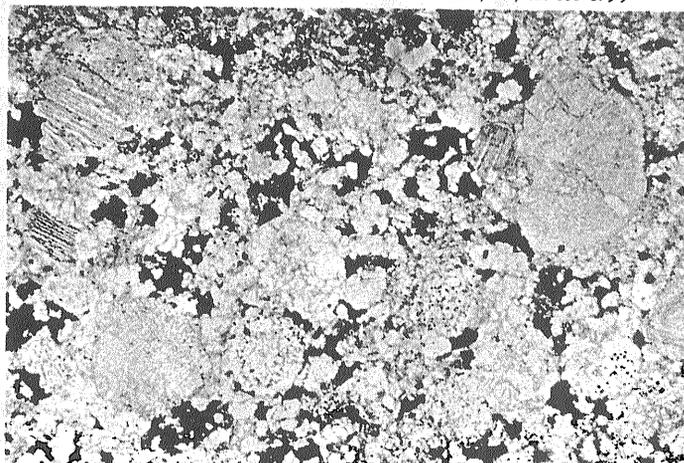
一口に隕石といっても 合金からなる鉄隕石や地球上の岩石と見た目はあまり変りのない石質隕石などいろいろな種類がある。現在までに地球上で見つけられた隕石の数は約 1,600 個で 鉄隕石と石質隕石の比率は約 3.5 : 6.5である。しかし 実際に落下してきた場所を確かめて 掘りおこして取り出した隕石では鉄隕石と石質隕石の比率は 0.7 : 9.3となり圧倒的に石質隕石が多いことがわかる。なぜ過去の時代に落下した隕石では鉄隕石が非常に高い割合でみつまっているのだろうか? 理由は簡単だ。石質隕石は一度地球上に落ちてしまうと 地球上の岩石とよく似ていることと 風化されてしまうためにわからなくなってしまうことが多いが



③ Indarch 頑火輝石コンドライト(灰色)(Fe-rich型)の薄片写真 Ni-Fe と Sulfides (黒色)のマトリックス中に clinoenstatite の球粒と粒子がみられる もっとも大きな球粒は直径 0.75mm
(B. Mason, 1966, Geochim. et Cosmochim. Acta, 30, 23-39 より)



④ Jajh deh Kot Lalu 頑火輝石コンドライト (Fe-poor型)の薄片写真 粒状の enstatite (灰色) Ni-Fe と Sulfides (黒色)集合体からなり 球粒はほとんどみられない enstatite の最大粒子は約 0.5mm
(B. Mason, 1966, Geochim. et Cosmochim. Acta, 30, 23-39 より)



⑤ Breitscheid 橄欖石-古銅輝石コンドライトの薄片写真(×25) 基地の黒色は Ni-Fe, トロイライト イルメナイト クロマイト 灰色は橄欖石と古銅輝石で 球粒は橄欖石と古銅輝石である
(H. Hentschel, 1959, Geochim. et Cosmochim. Acta, 17, 323-338 より)

第1表 隕石の分類 (Prior-Hey のカタログ 1953 による) —これに B. Mason (1962) の分類を付け加えた

隕石 (meteorites)	1. 鉄隕石 (iron meteorites) 6%*	ヘキサヘドライト (hexahedrites)	4-6% Ni
		オクタヘドライト (octahedrites)	6-14% Ni
		アタクサイト (ataxites)	>12% Ni
2. 石鉄隕石 (stony-iron meteorites) 2%*	3. 石質隕石 (stony meteorites) 92%*	コンドライト (chondrites) 83%*	頑火輝石コンドライト —FeO/(MgO+FeO)(分子比) 0.0~0.1 (enstatite chondrites)
			橄欖石・古銅輝石コンドライト—0.1~0.2 (olivine-bronzite chondrites)
			橄欖石・シソ輝石コンドライト—0.2~0.3 (olivine-hypersthene chondrites)
アコンドライト (achondrites) 9%*	橄欖石・ビジオン輝石コンドライト—0.3~0.4 (olivine-pigeonite chondrites)		
	炭素質コンドライト (carbonaceous chondrites)		
	頑火輝石アコンドライト (enstatite achondrites)		
シソ輝石アコンドライト (hypersthene achondrites)			
橄欖石アコンドライト (olivineachondrites)			
橄欖石・ビジオン輝石アコンドライト (olivine pigeonite achondrites)			
輝石・斜長石アコンドライト (pyroxene-plagioclase achondrites)			
普通輝石アコンドライト (augite achondrites)			
透輝石・橄欖石アコンドライト (diopside-olivine achondrites)			

* 落下を確認したものについての比率

鉄隕石の場合は地球上にはこのような合金は全くなく風化にも強いために発見されやすいというのがその理由であろう。

これらの隕石を鉱物組成や化学組成から系統的に分類したのは 大英博物館のプライヤー (Prior) で今から50年程前のことである(1916年 1920年)。プライヤーの分類の前にも ドイツとオーストリアの隕石学者ローゼ (Rose) チェルマク (Tschermak) ブレジナ (Brezina) による分類が知られているが プライヤーの分類法が現在でもほとんどそのまま使われている。

隕石は鉄とニッケルの合金からなる金属相と 橄欖石輝石 斜長石などの珪酸塩鉱物相と これらの2相に比べるとずっと量は少ないが 硫化鉄からなる硫化物相の3相からできている。プライヤーはこれらの点に注目し詳しく鉱物組成と化学組成のデータを調べて 第1表のように隕石を分類した。

(1) 鉄隕石あるいは隕鉄 (iron meteoritesあるいはsiderites)

鉄とニッケルの合金からなり ニッケルの含有量によってさらに次の3種類に分けられた
 ヘキサヘドライト (hexahedrites) 4~6% Ni
 オクタヘドライト (octahedrites) 6~14% Ni
 アタクサイト (Ni-rich ataxites) >12% Ni
 数の上からは 6~14% Ni の octahedrite が圧倒的に多く 約80%をしめている

(2) 石鉄隕石 (stony-iron meteoritesあるいはsiderolites)
 これは鉄 ニッケルの合金と珪酸塩鉱物をほぼ等量含んでいる隕石である。

(3) 石質隕石 (stony meteoritesあるいはaerolites)
 これは主として橄欖石と輝石からなる珪酸塩鉱物からできている隕石をいい 鉄 ニッケルの合金はこの場合約25%以下である。

石質隕石は その構造によってコンドライトあるいは球粒隕石 (chondrites) とアコンドライトあるいは無球粒隕石 (achondrites) とに分けられている。球粒 (chondrules) というのは 珪酸塩鉱物の生地の中にみられる小さな丸い粒のことをいい これの入っている石質隕石をコンドライト 入っていないものをアコンドライトといっている。これらの石質隕石は 構成している鉱物の種類によってさらに細分されている。

さきに述べたように 地球上に実際に落下してきた隕石の約90%は石質隕石でしかもその大半はコンドライトである。従って隕石がどのようにしてできたかを考える上にコンドライトが最も重要であり 多くの隕石研究者はこぞってコンドライトの研究をおし進めた。コンドライトの中で 橄欖石や輝石や合金をほとんど含まず有機物や含水鉱物を含んだ炭素質コンドライト (carbonaceous chondrites) がある。後で述べるようにこの炭質コンドライトの研究は 現在ではコンドライトの原物質と考えられ 隕石の成因研究の1つのポイントとなっている。

このように隕石は数多くの種類があり 分類されているが 落下の比率も高く隕石の成因を探る上に最も重要

第2表 コンドライトの鉱物組成 (Mason, 1962より)

	頑火輝石 コンドライト	橄欖石・古銅輝 石コンドライト	橄欖石・シソ輝 石コンドライト	橄欖石・ピジオン 輝石コンドライト
Pyroxene	50-60(Fs ₀)*	20-35(Fs ₁₄₋₂₀)	25-35(Fs ₂₀₋₅₀)	5
Olivine	none	25-40 (Fa ₁₅₋₂₂)*	35-60 (Fa ₂₂₋₈₂)	65-70 (Fa ₈₂₋₄₀)
Nickel-iron	20-28	16-21	1-10	0-6
Oligoclase	5-10	5-10	5-10	5-10
Troilite	7-15	~5	~5	~5
Total Fe	23-35	27-30	20-23	24-26
FeO	<1	7-12	12-22	22-29
FeO/FeO+MgO	<1	15-22	22-32	32-40

*Fs=モル比 FeSiO₃ Fa=モル比 Fe₂SiO₄

なのはコンドライトであることがわかる。それで今後の話しは隕石の中でもコンドライトについての問題が多くなってくるのはやむをえない。

3. 隕石とくにコンドライトの化学組成

隕石の分類を行なったプライヤーは コンドライトの性質について重要な規則性を発見している。コンドライトの化学分析値を集めて それらに含まれている珪酸塩鉱物の FeO/(MgO+FeO) 比をとってみると 一緒に含まれている合金と硫化鉄の量とが きれいな逆相関の関係がみとめられ また FeO/(MgO+FeO) 比が大きくなるにつれて 逆に合金中のニッケル含量が 増すことを明らかにした。これを プライヤーの法則 といひ 今日でもコンドライトの化学組成や鉱物組成を論じたり 分類したりする上に広く使われている。

プライヤーはこの FeO/(MgO+FeO) 比を用いて 比の値が 0.0~0.1 0.1~0.2 および 0.2 以上のものをそれぞれ頑火輝石コンドライト 橄欖石・古銅輝石コン

ドライトおよび橄欖石・シソ輝石コンドライトと名付けた。

メイスン (Mason) はさらに橄欖石・ピジオン輝石コンドライトを付け加えている。コンドライトのうち 橄欖石・古銅輝石コンドライトと 橄欖石シソ輝石コンドライトはもっとも普通で90%以上を占めている。コンドライトの鉱物組成も プライヤーの法則に対応して変化する。すなわち FeO/(MgO+FeO) 比が大きくなるにつれて 輝石が減り橄欖石が増加し(第2表) 輝石や橄欖石の組成もそれぞれ変化する。

プライヤーは 隕石のでき方として われわれがむかし習った地球のでき方のように 高温のものが次第に冷えて液体となり 鉄隕石は中心に集まり 残った珪酸塩を主として溶融体(マグマ)の結晶作用によりコンドライトを生成したと考えた。マグマの最初の状態は 強い還元状態であったために その珪酸塩の FeO/(MgO+FeO) 比はほとんど0で これが結晶して頑火輝石コンドライトができ マグマの結晶作用が進むにつれて 輝石は古銅輝石→シソ輝石→ピジオン輝石と変り 最終的には最も酸化した状態になり 有機物や水を含んだ炭質コンドライトをつくるという考え方である。プライヤーはじめむかしの隕石学者は皆隕石の出発点として高温無水の還元状態を考え マグマの酸化により種々のコンドライトができると説明していた。これは現在とは全く逆の進化の方向を示している。

1950年頃までは隕石の平均化学組成は 金属相 珪酸塩相および硫化物相の平均化学組成に それぞれの存在比と比重を掛けて求められていた。

第3表 各種のコンドライトの化学組成—分析例 (B. Mason, 1962より)

(A)	1	2	3	4	5	(B)	1	2	3	4	5
Fe	23.70	15.15	6.27	4.02	0.00	Fe	28.52	26.32	21.85	25.72	26.18
Ni	1.78	1.88	1.34	1.43	0.00	Ni	1.65	1.74	1.27	1.38	1.41
Co	1.12	1.13	0.046	0.09	0.00	Co	0.11	0.12	0.04	0.08	0.06
FeS	8.09	6.11	5.89	5.12	3.66(S)	Si	34.98	33.17	36.78	32.77	31.85
SiO ₂	38.47	36.55	39.93	34.82	27.81	Ti	0.08	0.10	0.09	0.14	0.09
TiO ₂	0.12	0.14	0.14	0.15	0.08	Al	1.91	2.04	2.01	2.42	2.90
Al ₂ O ₃	1.78	1.91	1.86	2.18	2.15	Mn	0.02	0.25	0.26	0.16	0.19
MnO	0.02	0.32	0.33	0.20	0.21	Mg	29.43	31.72	33.92	33.03	33.19
FeO	0.23	10.21	15.44	24.34	27.34	Ca	1.67	2.34	1.57	2.19	2.04
MgO	21.63	23.47	24.71	23.57	19.46	Na	1.13	1.37	1.30	1.25	1.40
CaO	1.03	2.41	1.70	2.17	1.66	K	0.18	0.23	0.17	0.27	0.07
Na ₂ O	0.64	0.78	0.74	0.69	0.63	P	—	0.23	0.25	0.16	0.29
K ₂ O	0.16	0.20	0.13	0.23	0.05	Cr	0.32	0.37	0.39	0.43	0.33
P ₂ O ₅	trace	0.30	0.31	0.20	0.30		—	—	—	—	—
H ₂ O	0.34	0.21	0.27	0.10	12.86		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cr ₂ O ₃	0.23	0.52	0.54	0.58	0.36						
NiO	0.11	—	—	0.00	1.53	1. 頑火輝石コンドライト					(Daniel's Kuil)
CoO	—	—	—	0.00	0.07	2. 橄欖石-古銅輝石コンドライト					(Oakley)
C	0.32	—	0.03	0.19	2.48	3. 橄欖石-シソ輝石コンドライト					(九州)
	99.89	100.29	99.67	100.08	101.01	4. 橄欖石-ピジオン輝石コンドライト					(Wavventon)
						5. 炭素質コンドライト					(Mighei)

(B) 表は(A)表より O, H, C, S などの揮発性成分を除いて再計算したものの

1953年にユーレイ (Urey) とクレイグ (Craig) は コンドライトの化学組成と鉱物組成を検討し コンドライト中にも金属相や硫化物相が分散していることと 地球上に落下してくる隕石の大半がコンドライトであること またコンドライトの化学組成が一 二の元素を除いて一様であることに注目して 隕石の平均化学組成としてコンドライトの平均化学組成を使うことを提案した。ユーレイらは これまで出された約 300 個のコンドライトの化学分析値を検討して この中から94個の信頼できる分析値を使ってコンドライトの平均化学組成を算出した。

このさい コンドライトの珪酸塩中の鉄含量と 金属相および硫化物相中の鉄含量との関係から 全鉄量が約 28%のグループと約22%のグループのあることを発見し それぞれHグループ Lグループと名付けた。

ユーレイ クレイグが算出したこのコンドライトの平均化学組成は その後小さな改訂は行なわれたが 隕石の平均化学組成として 現在でも最も信頼のできる値として用いられている。(第3表は各コンドライトの分析例である)

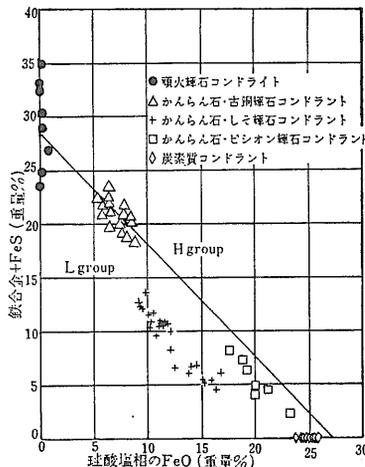
1956年にウィイク (Wiik) は コンドライトの中でも金属相や橄欖石 輝石をほとんど含まず有機物や含水鉱物を含んでいる炭素質コンドライト11個の化学分析を行なった。非常に特殊にみえたこれらの炭素質コンドライトも その中の水や酸素 硫黄 炭素などの揮発性成分を除いて再計算してみると コンドライトの平均化学組成とほとんど変わらないということがわかった。

メイソンは コンドライトのHおよびLグループの関係を鉱物学的に検討した結果 Lグループの大半は 橄欖石・シソ輝石コンドライトのグループであることを確かめた。第2図は ユーレイ・クレイグの鉄含量の関係にメイソンの鉱物学的検討をつけ加えたものである。

このように隕石 とくにコンドライトの化学組成がどのコンドライトをとり上げててもよく似ているということは非常に重要なことである。

コンドライトの化学組成がほぼ一様であることがわかってくると 隕石を落としてきた宇宙と比べたくなってくる。もちろん 太陽だとか火星などはるかかなたの星の化学組成は 隕石のように色々な方法で分析するわけにはいかない。元素の同定には望遠鏡でとらえられた天体の像を 回折格子など分光器でスペクトル線に分けて写真にとって行なう方法でおもに行なわれる。

太陽表面の温度は数千度で その表面の光を分光器にかけるわけであるが 主成分は水素(H) ヘリウム(He) 炭素(C) 酸素(O) などでコンドライトとは全く異なっ



第2図
コンドライト中の FeO と FeS および FeNi 合金の含量との関係 コンドライトの種類によりきれいに区分されている (B. Mason 1962より)

ている。しかし これらのガスは揮発性成分としてコンドライトからはほぼ完全に逃げだしているにちがいないから 揮発性成分以上の元素を尺度として比較してみるとコンドライトと太陽の化学組成とは 意外によく似ていることに驚いてしまう。この尺度としては 珪素 (Si) を使い $Si=10^6$ として原子数で比較している。太陽は主系列星といわれる大部分の恒星を代表するものであるところから 元素の宇宙存在度 (cosmic abundance) として 太陽の元素存在度を代表させている。第4表は1956年にユーレイとシュース (Suess) がまとめた宇宙存在度と コンドライトの元素存在度を比べたものである。もちろん比較の尺度としては今述べた珪素を使っている。

第3表でみられるように存在度の高い元素はだいたいよく一致しているが ただ鉄だけが宇宙存在度に比べてコンドライトが約5倍も高くなっている。後にでてくる地球の場合にはさらに鉄は多く このコンドライトに鉄が多いことは大きな問題となっている。

また さらに細かく微量に含まれている元素群についてみると 銅(Cu) インジウム(In) カドミウム(Cd) テルル(Te) 水銀(Hg) タリウム(Tl) 鉛(Pb) 蒼鉛(Bi) がコンドライト中で一桁ないし二桁も 宇宙存在度より低い。これらの元素群はゴールドシュミットのいわゆる親銅元素 (chalcophile) に属している。これらの鉄が多すぎること 親銅元素が少なすぎることは コンドライトのでき方に有力な推理の道を与えている。

4. 炭素質コンドライト (carbonaceous chondrites)

ここで脚光を浴びて登場するのが コンドライトの中でもほんのわずかしか見付かっていない炭素質コンドライトと頑火輝石コンドライト (enstatite chondrites) である。第2図でみても分るように両者ともコンドライト

第4表 宇宙の元素存在度

元素	宇宙存在度 Suess-Urey (1956)	普通のコンドライト	炭素質コンド ライトおよび 頑火輝石 コンドライト
3 Li	100	(2.0)(ppm) 45	—
4 Be	20	(0.04) 0.7	0.4
5 B	24	(0.43) 6	—
9 F	1600	(130) 1100	5700
11 Na	4.4・10 ⁴	(6800) 4.6・10 ⁴	6.10 ⁴
12 Mg	9.5・10 ⁵	(14%) 9.5・10 ⁵	1.10 ⁶
13 Al	9.10 ⁴	(11000) 9.10 ⁴	9.10 ⁴
14 Si	1.10 ⁶	(17%) 1.10 ⁶	1.10 ⁶
15 P	1.0・10 ⁴	(1300) 5300	1.2・10 ⁴
16 S	3.8・10 ⁵	(2.1%) 1.1・10 ⁵	2-5・10 ⁵
17 Cl	9000	(160) 700	1500, 2200
19 K	3200	(1000) 3400	3300, 3800
21 Sc	28	(8.5) 30	23, 33
22 Ti	2400	(800) 2100	1200
23 V	220	(64) 200	680-950
24 Cr	7800	(3000)7000-10000	8400, 12000
25 Mn	6900	(2000) 7400	6000
26 Fe	8.10 ⁵	(28%) 8.10 ⁵	8・10 ⁵
27 Co	1800	(1000) 1300	2500
28 Ni	3.6・10 ⁴	(1.34%) 3.6・10 ⁴	3.6・10 ⁴
29 Cu	210	(90) 220	490
30 Zn	490	(54) 128	100-500
31 Ga	11	(5.3) 12	—
32 Ge	50	(9.3) 20	60-135
33 As	4.0	(2.2) 4.6	—
34 Se	68	(9) 18	—
35 Br	13	—	—
37 Rb	6.5	(3) 5	7
38 Sr	19	(11) 20	58
39 Y	9	(2) 3.4	2.3-4.6
40 Zr	55	(12) 22	30
41 Nb	1.0	—	—
42 Mo	2.4	2.5	—
44 Ru	1.5	(1.0) 1.5	1.5
45 Rh	0.2	(0.2) 0.3	—
46 Pd	0.7	(0.4-0.8)0.6-1.2	—
47 Ag	0.26	(0.03-0.09)	—
48 Cd	0.89	0.05-0.13	—
49 In	0.11	(0.06) 0.08	2.35
50 Sn	1.3	(8・10 ⁻⁴) 0.001	—
51 Sb	0.25	(0.43) 0.56	1.2
52 Te	0.25	0.08-0.15	—
53 I	4.7	(0.6) 0.7	2.7
55 Cs	0.80	(0.04) 0.05	0.21
56 Ba	0.46	(0.1) 0.13	—
57 La	3.7	(4) 5	11
58 Ce	2.0	(0.34) 0.39	0.23-0.36
59 Pr	2.3	1.17	0.66, 1.17
60 Nd	0.40	0.14	0.11, 0.17
62 Sm	1.44	0.64	0.35, 0.77
63 Eu	0.66	0.23	0.13, 0.23
64 Gd	0.19	0.082	0.048, 0.091
65 Tb	0.58	(0.34) 0.34	0.20, 0.55
66 Dy	0.10	0.051	0.031, 0.037
67 Ho	0.56	0.33	0.19, 0.36
68 Er	0.12	0.076	0.047, 0.090
69 Tm	0.32	0.23	0.15, 0.22
70 Yb	0.032	0.031	0.020, 0.035
71 Lu	0.22	0.18	0.11, 0.21
72 Hf	0.05	(0.035) 0.031	0.021, 0.035
73 Ta	0.44	0.16	—
	0.065	0.020	—

元素	宇宙存在度 Suess-Urey (1956)	普通のコンドライト	炭素質コンド ライトおよび 頑火輝石 コンドライト
74 W	0.49	0.12	—
75 Re	0.14	0.046	—
76 Os	1.0	(0.94) 0.77	—
77 Ir	0.82	0.38	—
78 Pt	1.6	0.9	—
79 Au	0.15	(0.16) 0.13	—
80 Hg	0.28	0.023	11.5
81 Tl	0.11	(1.4・10 ⁻⁸) 0.001	0.79, 0.18
82 Pb	0.47	(0.18) 0.135	2.2, 1.6
83 Bi	0.14	0.002	0.06, 0.17
90 Th	—	0.027	—
92 U	—	(0.014) 0.009	0.008, 0.009

[Si=10⁶ としたときの原子数] ()は含量

トの主流からは全くはずれている両極端に陣取っている。とくに炭素質コンドライトは含水鉱物や有機化合物を含みほかのコンドライトとは見掛けも内容も全く異なっており こんなこわれやすいものがよく地球の大気圏を無事通過してきたものである。実際 これまで見付かっている炭素質コンドライトはいずれも 落下を確認ししかも落下直後に拾い上げられたものばかりである。

1956年にウイク (wiik) は 炭素質コンドライト11個の化学分析を行ない これまであった3個の分析値とあわせて検討し 3つのサブグループに分類した。

	SiO ₂	MgO	C	H ₂ O	S	比重
Type I	22.56	15.21	3.54	20.08	6.20	~2.2
Type II	27.57	19.18	2.46	13.35	3.25	2.5-2.9
Type III	33.58	23.74	0.46	0.99	2.27	3.4-3.5

炭素質コンドライトは一般に暗黒色 こわれやすく比重も小さく ニッケル・鉄の金属相をほとんど含まないのが特長である。ウイクの3つのサブグループの特長は表でもわかるように。

Type I: 非常に軽く(比重 ~2.2)大部分は含水珪酸塩からなり 強磁性で(細かい鉄・ニッケル・スピネルによる)硫黄の大部分は可溶性硫酸塩である。コンドライトに特長的な球粒(chondrules)はこの Type には含まれていない。

Type II: 比重は2.5~2.9で 大部分は蛇紋岩からなり 磁性は弱い。硫黄はフリーの硫黄であり Type I と異なって球粒を含む(これらの球粒は MgSiO₄ 組成をもつ)。

Type III: 比重3.4~3.5で 大部分は橄欖石からなり ビジオン輝石を伴っている。隕石学者の中には Type III を橄欖石ビジオン輝石コンドライトの中に含めている人もある。

その後アンダース (Anders) 達は それぞれの Type の鉱物組成を調べ Type I は全く低温生成であり Type III はほとんど高温生成 Type II は両者の混合したものであることを 第3図のように示した。

炭素質コンドライトの研究が最近きそって行なわれるようになったのはなぜだろうか？

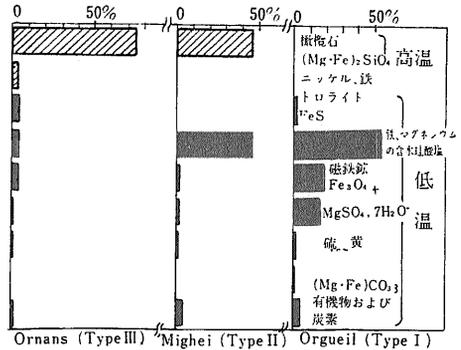
これは普通のコンドライトの元素の存在度でみられた親銅元素の欠損が 炭素質コンドライトではほとんど認められないことと 隕石低温生成説が有力となって含水しかも有機物を含む低温生成の炭素質コンドライト Type I II が隕石の原物質ではなからうかと考えられはじめられたことによる。

さて これらの炭素質コンドライトは 多くの地球化学者によって 最近著しく進歩してきた放射化分析などの手段で いろいろの元素 とくに先ほど問題になった親銅元素の含有量などが徹底的に調べられた。 その結果は 親銅元素の含有量はその他のコンドライトより1桁か2桁高く 宇宙存在度と非常によく一致することがわかってきた。 またコンドライト中の希ガスの研究者はキセノン (Xe) などの希ガスが Type I II で高いことを見出している。

炭素質コンドライトの中では Type I → Type II → Type III の順で元素の欠損率は大きくなっている。

1964年にアンダース (Anders) は これら炭素質コンドライト中の微量成分含量について検討し 第4 5図に示すような結果を得ている。 普通のコンドライトはどうしてこれらの親銅元素を減らしてしまったのであろうか？ これについてはいろいろな議論があるが やや低温で硫黄がこれら金属元素を抽出して 揮発性成分とともに揮発してしまったとか 機械的に細分化された硫化物が発散してしまったとか考えられている。

炭素質コンドライトはこのような元素の欠損がないという点でもっとも原始的な物質というイメージを与えてくれる。 しかしこのような素晴らしい研究材料である炭素質コンドライトとくに Type I II のものは 現在まで20個足らずしか見付かっておらず 1959年にソ連の Mighei おちた約8kg のものが最大であり 研究用に

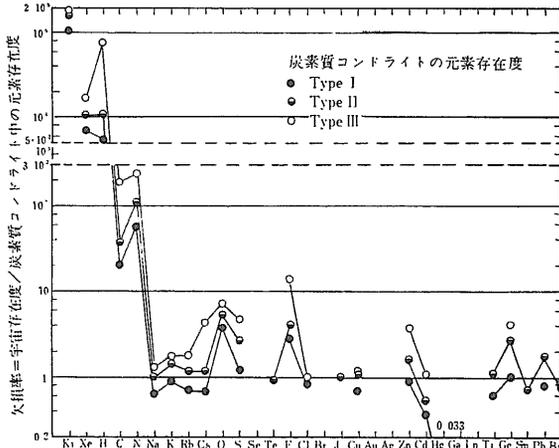


第3図 炭素質コンドライトの鉱物組成
Type I → Type II → Type III と高温生成鉱物/低温生成鉱物の比は大きくなっている (E. Anders 1964 より)

さかんにつぶされるのを 博物館側では大いになげいて いる。

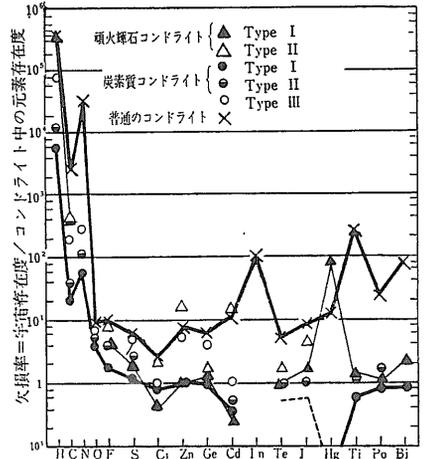
5. 頑火輝石コンドライト (enstatite chondrites)

頑火輝石コンドライトは炭素質コンドライトとともにコンドライトの分類では両極端に位置している。 主要鉱物は頑火輝石 (enstatite, または clinoenstatite) で 球粒は普通のコンドライトに比べるとはつきりしない場合が多い。 現在まで世界で15個しか発見されておらず 研究も炭素質コンドライトや普通のコンドライトほど十分には行なわれていない。 この頑火輝石コンドライトは コンドライトの中で最も還元条件で生成されたために 金属相 硫化鉄相の含有量は一番高く また地球上で発見されていないような 特殊な還元条件で生成する鉱物を含んでいる。 Schreibersite ((Fe, Ni)₃P), Osbornite (TiN), Oldhamite (CaS), Alabandite (MnS), Daubreelite (FeCr₂S₄), Sinoite (Si₂N₂O) などがその代表的なものである。 鉱物組成の特長によって2群に分けられる。 すなわち頑火輝石 (enstatite) を主要鉱物として含むものは 同時に斜長石 (An₁₄~An₂₀) が入ってくるが clinoenstatite を主要鉱物として含むものは



第4図 炭素質コンドライト中の元素の宇宙存在度に対する欠損率 Type I → Type II → Type III の順で欠損率は高くなっている (E. Anders 1964 より)

第5図 種々のコンドライトの元素(主として親銅元素)の宇宙存在度に対する欠損率 (E. Anders 1964 より)



第5表 頑火輝石コンドライトの鉱物組成 (B. Mason, 1966 より)

所 石 名	SiO ₂											others
	Enstatite	Clinoenstatite	Plagioclase	C = Cristobalite T = Tridymite Q = Quartz	Nickel-iron (Ni-Fe)	Troilite (FeS)	Dahreelite (Fe-Cr ₂ S ₄)	Olthamite (GaS)	Althamite (NiS)	Schreibersite(Fe ₃ Ni ₃ P)	Graphite (C)	
Adhi Kot	X											
St.-Sauveur	X											
Indarch	X											
Abco	X											
Kota-Kota	X											
Bethune	X											
St. Mark's	X	An ₁₁										
Daniel's K.	X	An ₁₁										
Atlanta	X	An ₁₁										
Pillistfer	X	An ₁₁										
Hvistia	X	An ₁₁	Q									
Khairpur	X	An ₁₁										
Jajh d.K.L.	X	An ₁₁	T									
Blithfield	X	An ₁₁										
Ufana	X	An ₁₁										

斜長石を含まない。その他に SiO₂ 鉱物 (Cristobalite, tridymite, quartz) は後者に含まれ グラファイトは両者に入ってくる。第5表はメイスン(1966)によってまとめられた頑火輝石コンドライト鉱物組成で明らかに2群に分れることがわかる。頑火輝石コンドライトの化学組成は他のコンドライトとほとんど変わらない。しかし鉄含量は20.7%~35%の範囲にばらつき また硫黄と親銅元素は他の普通のコンドライトに比べて高い。

鉄含量の多少によって頑火輝石コンドライトを分けると第5表の上半の clinoenstatite を主とするものは鉄が高い (Fe-rich) グループで 下半の頑火輝石・斜長石を主とするものは鉄が低い (Fe-poor) グループに属する。

頑火輝石コンドライトはいつどこでどのようにしてできたのか? これについては二 三の議論があるが生成の条件としては著しく還元的な条件であることは間違いない事実のようである。他の石質隕石 石鉄隕石よりも還元的で しかも頑火輝石コンドライトの金属相中にシリコンが入っている事実は 鉄隕石よりも還元的といえそうである。頑火輝石の中での進化はFe-rich

第6表 コンドライトの平均化学組成 (Mason 1966より)
(Si 10000 原子に対する化学組成)

	1	2	3	4	5	6
O	29,670	34,130	34,670	40,830	55,110	76,860
Fe	7630	8175	5815	8179	8389	9036
Si	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Mg	7894	9651	9406	10,630	10,430	10,610
S	2213	989	1041	1192	2253	4991
Ni	412	459	282	418	450	474
Ca	350	521	510	743	719	681
Al	610	743	708	943	908	842
Na	464	457	464	345	411	647
Cr	79	92	90	125	120	120
Mn	53	78	74	53	63	84
P	69	58	58	76	90	122
Co	26	25	15	21	22	23
K	35	34	35	37	28	35
Ti	16	21	22	34	22	23

グループから Fe-poor グループに進化していったと考えられている。その温度・圧力条件はシリカ (SiO₂) 鉱物との共生関係から比較的高温 低圧でしかも急激に結晶作用が行なわれたとされ 化学的環境は著しく還元的で CO 炭化水素とくにCH₄(メタン)が非常に多い雰囲気が想定されている。

頑火輝石コンドライト中では親銅元素の宇宙存在度に対する欠損は小さく その点でこのコンドライトの原物質は炭素質コンドライトではないかとの疑問がおこってくる。しかし 炭素質コンドライトでは鉄含量は均一でしかも Mg/Si 比(原子比)は1に近いが 頑火輝石コンドライトでは約0.8である。それで頑火輝石コンドライトは炭素質コンドライトと鉄・ニッケルに富む粒子からできたと考える人もある。いずれにせよ コンドライトの中ではこの頑火輝石コンドライトが一番不明な点が多く 今後の地球化学的研究がまたれている。

最後にメイスン(1966)によってまとめられた各コンドライトの平均化学組成を示す(第6表)。

コンドライトの化学組成を調べているうちに 太陽系宇宙の元素の存在度との比較にまで話しが進み 適当な元素 (Si) を尺度としてみれば ある元素群を除いて非常によく似ていることが分ってきた。この元素群 いわゆる親銅元素が宇宙存在度より低いことは コンドライトの両極端に陣取る炭素質コンドライトと頑火輝石コンドライトでは認められないことが分り 両者のうち炭素質コンドライトがもっとも原始的な物質ではなからうかと考えられるようになり 脚光を浴びてきた。

太陽系の一員である地球も コンドライト質物質からできているのだとする仮説が現在信じられているが この化学組成の類似性も多くの証拠の中の1つにあげられている。

コンドライトは隕石のうちでは もっともよく研究が進んでおり個々のコンドライトの記載を主とした論文は膨大な数に昇っている。現在は炭素質コンドライトに興味が集まっているが 今後はさらに研究のおくれている頑火輝石コンドライトに目を向けてゆくようになるであろう。



1. 頑火輝石コンドライト (B. Mason, 1966)
2. 橄欖石・古銅輝石コンドライト (B. Mason, 1965)
3. 橄欖石・シソ輝石コンドライト (B. Mason, 1965)
4. 橄欖石・ビジオン輝石コンドライト (H. B. Wiik の平均)
5. 炭素質コンドライト Type I (H. B. Wiik の平均)
6. 炭素質コンドライト Type II. (H. B. Wiik の平均)

6. 鉄隕石とアコンドライト

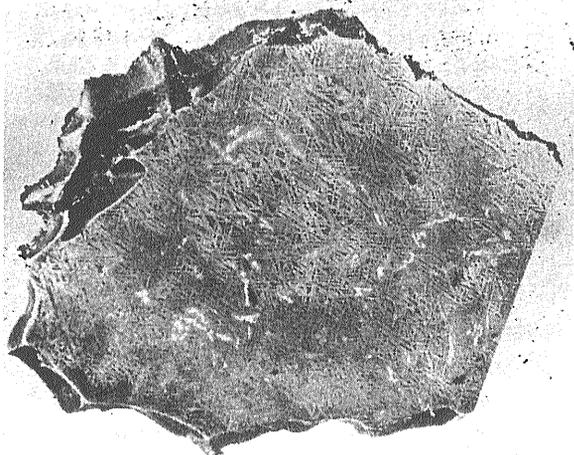
隕石の話だというのに コンドライトのことばかりで他の隕石はどうでもよいのかと誤解されると困るので鉄隕石とアコンドライトの話もつけ加えよう。

鉄隕石 (iron meteorite)

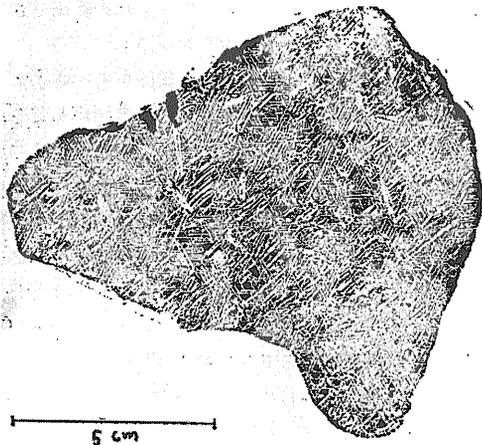
鉄隕石は鉄とニッケルの合金からなり ニッケル含量により3種類に分類されることはさきに述べた。これらの特長を挙げると次のようである。

- (i) ヘキサヘドライト (hexahedrites) は <6%Ni で 普通六面体の大きなカマサイト(α -鉄 kamacite)の結晶からなり 研磨片のエッチングの結果 ノイマン線と呼ばれる細かい線があらわれるのが特長で これは (112)面に沿ってカマサイトの体心立方構造の双晶によってできた線である。ニッケル含量が約6%になると カマサイトへのニッケルの溶解度ぎりぎりになるので カマサイト結晶のまわりにニッケルに富んだ相であるテュナイト(γ -鉄 taenite)が生成している。
- (ii) オクタヘドライト (octahedrites) は 6~14% Ni でいわゆるウイドマンジュテッテン構造 (Widmanstätten structure) をもつのが大きな特長である。これは八面

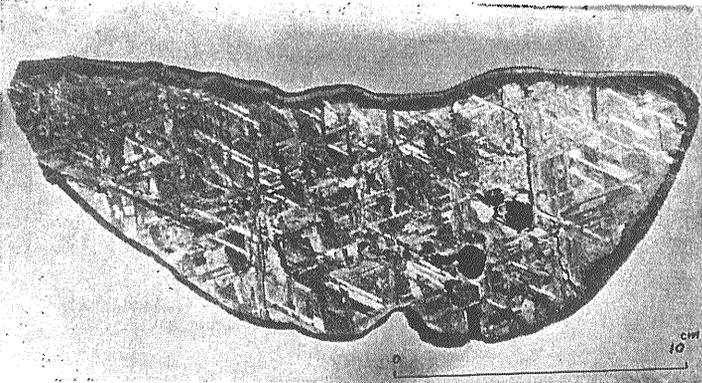
体面に平行にカマサイトとテュナイトが織りなす縞模様で 幅の広い方がカマサイトである縞の間にはプレッサイト (plessite) ができている カマサイトの幅の広さによってオクタヘドライトはさらに coarse→fine とサ



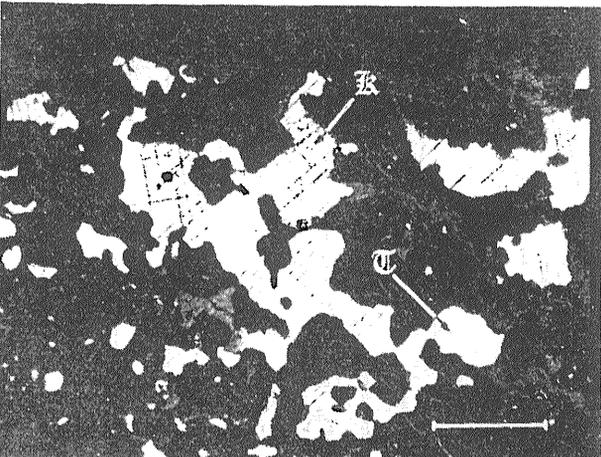
Treysa 鉄隕石の Widmanstätten 構造 (全長約 15cm)
(H. Fechtig, W. Gentner, G. Kistner, 1960 Geochim. et Cosmochim. Acta, 18, 72-80 より)



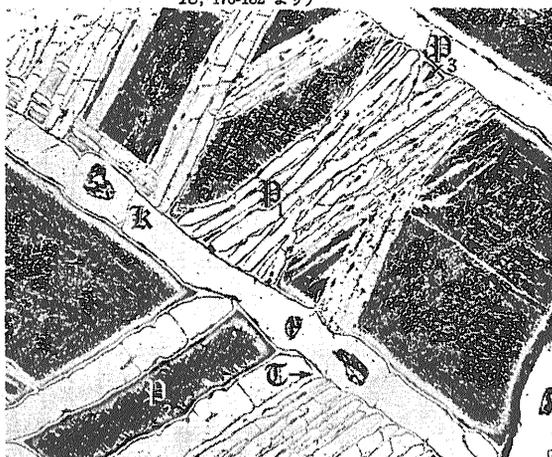
Elbogen 鉄隕石
(F. A. Paneth, 1960, Geochim. et Cosmochim. Acta, 18, 176-182 より)



Costilla Peak 鉄隕石の Widmanstätten 構造
(R. E. Maringer, 1960. Geochim. et Cosmochim. Acta, 19, 5-6)



Clover Springs 石鉄隕石 R: カマサイト T: テュナイト
カマサイト中にノイマン線がみられる。—— 200 μ
(E. Anders, 1964, Space Sci. Rev., 3, 583-714 より)



Carton 鉄隕石 (fine octahedrite) の Widmanstätten 構造
—— 1mm, R: カマサイト T: テュナイト P: プレッサイト
(E. Anders, 1964, Space Sci. Rev., 3, 583-714 より)

グループに分けられている。 カマサイトの幅がせまくなるにつれて ニッケル含量は増す。

(iii) ニッケルに富むアタクサイト (Ni-rich ataxites) オクタヘドライトのニッケル含量が増えてくると カマサイトの幅はどんどん細くなってしまい 12~14% Ni となるとウイドマンシュテッテン構造はみられなくなる。この種の鉄隕石をニッケルに富むアタクサイトと分類している。 ニッケルに富むアタクサイトは 微粒のカマサイト テーナイトの混合物からなることが多い。これらの鉄隕石のニッケル含量による頻度分布をしらべてみると 5.5%Niのヘクサヘグライトと 8% Ni のオクタヘドライトが圧倒的に多いことがわかる(第6図)

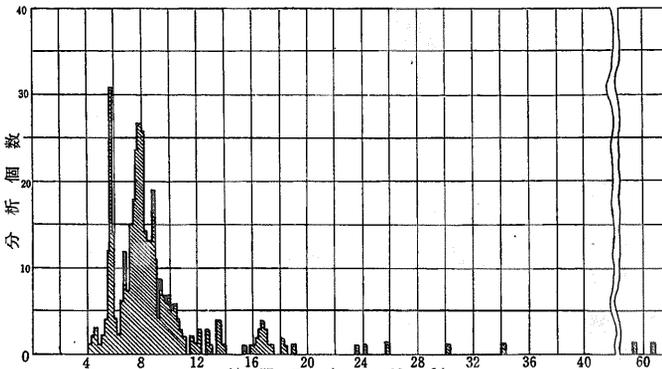
鉄隕石はどのような条件でできたのか? 主成分が鉄とニッケルであり α -鉄 と β -鉄 とからなる鉄隕石の生成の条件は 多くの金相学者により研究された Fe-Ni 系の相平衡図から推定される。この場合圧力がどのぐらいであったかは この平衡図からは説明できない。

第7図は Fe-Ni 系の一気圧における相平衡図で その生成温度のちがいでによって それぞれの鉄隕石がニッケル含量と対応して生成することを示している。

さて 鉄隕石がコンドライト組成をもつ物質が溶融して珪酸塩相と金属相とに分離した金属相にあたるものとすると 鉄隕石の生成圧力は その隕石の母体の大きさを示すインディケイターとなるので 非常に重要な意味をもつ。戦後20年の間 この問題についての議論はさかに行なわれ 現在ではそれほど高い圧力ではない約 50,000気圧以下 星の大きさでいえばちようど月がそれより小さい大きさの母体が考えられようになっている。

この鉄隕石の生成圧力の論争はなかなか面白く ウーリッヒ (Uhlig) で代表される高圧説と ウッド (wood) アンダース (Anders) で代表される低圧説とあり 現在にいたっている。

高圧説の1つの根拠となった鉄隕石中の高圧で安定な鉱物—ダイヤモンド クリフトナイト (cliftonite) コヘナイト (cohenite (Fe, Ni)₃C) —の存在は 後にア



第6図 鉄隕石中のニッケル含量の頻度分布 (Yavnel 1958より)

ンダースらにより ダイヤモンドは落下のさいの衝撃によるものであり 他の鉱物も圧力指示鉱物とはならないと反撃された。ウイドマンシュテッテン構造の解析によると 10万気圧以上では 合金の組成と結晶成長は実際とあわなくなり 5万気圧程度うまく説明できるとしている。鉄隕石の生成圧力が高圧か低圧かはまだまだ議論の余地がある。いずれにせよ 高圧の場合は 約300°Cで 10⁸年かけて 低圧の場合は約 450°Cで 10⁷~10⁸年かけてゆっくり冷えたものが鉄隕石に特長的なウイドマンシュテッテン構造である。

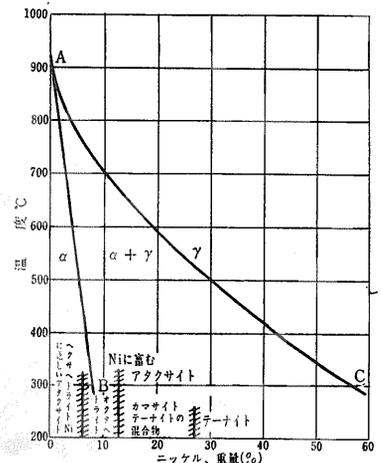
アコンドライト (achondrites)

石質隕石で球粒をもたないものは アコンドライトと呼ばれ 外観も化学組成も 地球上の火成岩と非常によく似ている。アコンドライトの分類は コンドライト同様に鉱物組成によるが また化学組成からは カルシウム (Ca) を規準として分けられている。

アコンドライトの分類(メイスン 1962による)

- 1. カルシウムに乏しいアコンドライト (Ca-poor achondrites)
 - 頑火輝石アコンドライト (aubrites) 9個 (enstatite achondrites)
 - シソ輝石アコンドライト (diogenites) 8個 (hypersthene achondrites)
 - 橄欖石アコンドライト (chassignites) 1個 (olivine achondrites)
 - 橄欖石・ピジオン輝石アコンドライト (ureillites) 3個 (olivine-pigeonite achondrites)
- 2. カルシウムに富むアコンドライト (Ca-rich achondrites)
 - 輝石—斜長石アコンドライト (eucrites howardites) 39個 (pyroxene-plagioclase achondrites)
 - 普通輝石アコンドライト (angrites) 1個 (augite achondrites)
 - 透輝石・橄欖石アコンドライト (nakhilites) 2個 (diopside olivine achondrites)

アコンドライトと鉄隕石の成因は コンドライト組成



第7図 Fe-Ni 合金の相平衡図(1気圧) (Uhlig 1954より)

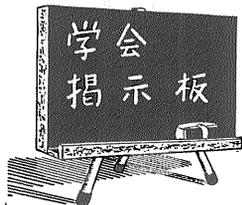
をもつ小惑星が生成し、これの溶融によって鉄・ニッケル合金相は中心に沈み鉄隕石が生成し、珪酸塩相はその外側を取かこみ、その岩漿分化作用によって生じたのがアコンドライトであると考えられている。地球でいえばアコンドライトは地殻と上部マントルの一部にあたるのであろう。隕石の中でアコンドライトがもっともウラン(U)含量が高いのはこのせいかもしれない。

最後にとり残された石鉄隕石は珪酸塩相と金属相がほぼ半分づつ混り合った隕石で、このような2相の混合生成物がみられることから隕石の天体母体があまり大きくなかったとする一つの証拠となっている。

「隕石の話」の第1回では分類だとか化学組成、鉱物組成のような非常に地味な話ばかりでいささかうんざりしたと思う。第2回はこれらの隕石の同位体組成やこれまで積み重ねてきた事実をもととして隕石はどうしてできたのかという議論に入って行くことにしている。隕石の同位体地球化学は世界の最尖端に行く研究者達がしのぎを削っている分野で、宇宙線の影響だとか化石として隕石の中にとり残された放射性同位体の話などをおりこんで行きたい。(筆者は技術部地球化学課)

「隕石の話」の主要な参考文献

Mason B. (1962): Meteorites John Willey, New York.
 Mason B. (1963): The carbonaceous chondrites. Space Sci. Rev. 1, 621-646
 Mason B. (1966): The enstatite chondrites, Geochim. Cosmochim. Acta, 30, 23-39
 都城 秋穂 (1962): 隕石と地球 I, II. 科学 32, 229-235., 284-291
 本田 雅健 (1963): 隕石中の同位元素 科学 33, 2-9
 本田 雅健 (1965): 宇宙化学 化学と工業 18, 1406-1416
 本田 雅健 (1966): 放射能とイン石の起源 日本物理学会誌 21, 574-584.
 木越邦彦・小田稔 (1962): 宇宙線と宇宙の歴史 科学 32, 236-242.
 木越邦彦 (1965): 年代測定法 紀伊国屋書店
 Anders, E. (1964): Origin, age, and Composition of meteorites, Space Sci. Rev., 3, 583-714
 Anders, E. (1963): Meteorite Ages; Middlehurst and Kuiper: The moon, meteorites and comets (The Solar System, Vol IV), The Univ. of Cicago Press, 1963
 なお文献その他で東大物性研究所本田雅健教授にはひとかたならぬお世話になった



・日本鉱物学会

1. 昭和42年5月31日(水) ~ 6月2日(金)
2. 日本鉱物学会年会 および総会
3. 国立科学博物館 (台東区上野公園)

4. 日本鉱物学会
5. 東京都台東区上野公園

国立科学博物館 地学研究部 地学第II研究室
 Tel. 東京 (03) 822-6111 (内線58)

・石膏石灰学会

1. 昭和42年6月2日(金)
2. 第18回総会および第35回学術講演会
3. 葛生会館(栃木県葛生町)
4. 石膏石灰学会
5. 東京都千代田区神田駿河台1-8

日本大学理工学部大学院内 石膏石灰学会
 Tel. 東京 (03) 293-3251(内線359)

・日本地質学会

1. 昭和42年10月11日(水)~14日(土)
2. 日本地質学会第74年総会ならびに
 日本地質学会 日本鉱山地質学会 日本鉱物学会
 日本岩石鉱物鉱床学会 日本粘土学会連合学術大会
3. 名古屋大学 (豊田講堂 教養部)
 名古屋市千種区不老町
4. 日本地質学会行事委員会
5. 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学理学部地質学教室 日本地質学会

Tel. 東京 (03) (812) 2111 (内線2432)

・日本古生物学会

1. 昭和42年6月18日(日)
2. 第96回例会
3. 大阪市立自然科学博物館 (大阪市西区ウツボ町)
4. 日本古生物学会
5. 東京都台東区上野公園

国立科学博物館 古生物学課

・石炭科学国際会議

1. 昭和43年6月10日~14日
2. 石炭化作用熱分解ガス化石炭組織に関する講演会
3. Mining Institute of the Czechoslovakia, Academy of Science
4. 第7回石炭科学国際会議
5. Mining Institute of the Czechoslovak Academy of Science, Praha.

・石炭科学部会

1. 昭和42年11月9日(木)~11日(土)
2. 第4回石炭科学 (石炭の地球科学組織・化学的性質加工等)に関する講演会
3. 九州
4. 燃料協会石炭科学部会
5. 東京都中央区銀座西4-5 西銀座ビル内
 燃料協会 東京 (03) (561)-3760

[注] 1. 開催年月日 2. 会合名 3. 会場
 4. 主催者 5. 連絡先 (掲載順は原稿到着順)