

隕石の話

都 城 秋 穂 (東大理)

1. 隕石分類

隕石は、主として金属相（ニッケル鉄合金）とケイ酸塩鉱物（カンラン石、輝石、斜長石など）とからできている。金属相とケイ酸塩との量の割合によつて、ふつうは大きく次の三つに分けられる：鉄隕石（主としてニッケル鉄合金によりなつているもの）、石鉄隕石（ニッケル鉄とケイ酸塩とをほぼ等量含んでいるもの）、および石質隕石（主としてニッケル鉄よりなつているもの）

古い時代に落ちた隕石を見つける場合には、鉄隕石の方が地上の岩石とひどく違うので見つけやすい。また一般に風化に対する抵抗力も鉄隕石の方が強いであろう。そのために、これまでに落下を見ることなしに発見された隕石約900個の大部分は、鉄隕石である。しかし、落下を直接見て拾われた約700個の隕石だけについていうと、石質隕石の方が圧倒的に多い、おそらく、この方が隕石のほんとうの割合に近いものを表わすと考えられている。

鉄隕石、石鉄隕石および石質隕のおのおのは、さらに細かく分類され、名前をつけられている、それを簡単に解説しよう：

(1) 鉄隕石 (irons)

ニッケル鉄合金のニッケル含有量は4～35%で、ことに5～10%の範囲にはいるものが多い。ニッケル鉄合金には、 α 相（鉱物名 Kamacite）と γ 相（鉱物名 taenite）とがある、合金のニッケル含有量が4～6%のときは、その合金は α 相だけからなり、六面体方向に劈開があつて、その方向に割れやすい。そのために、そのような鉄隕石を、hexahedriteという。

合金のニッケル含有量が6～13%のときには、合金は α 相と γ 相からなつている。このときには、二つの相がいきりまじつて、Widmanstätten 構造というものをつくつている。この構造のなかの α 相は、薄板をなして、八面体方向に平行にならんでいる。そこで、このような鉄隕石をoctahedriteという。

ニッケル含有量が13%を越えると、鉄隕石は肉眼的には何も構造を示さな

くなる。この様な鉄隕石を、Ni-rich ataxite という。これは極めて α 相と r 相との集合体（これを plessite という）のこともあるし、 α_2 相とよばれるもののこともある。 α_2 相とは、 α 相とほぼ同じ結晶構造だが、はなはだしく歪んだもので、金属学で martensite とよんでいるものと同じである。

鉄隕石のなかでは、octahedrite が圧倒的に多い。

(2) 石鉄隕石 (stony irons)

石鉄隕石の大部分を占める種類は、mesosiderite と pallasite である。前者は主として斜方輝石と斜長石とニッケル鉄よりなり後者は主としてカンラン石とニッケル鉄よりなる。

石鉄隕石のなかには、そのほかに、siderophyre とよばれるものと、lodranite とよばれるものが、おのおのただ1個だけ知られている。前者は主に斜方輝石とトリデイマイトとニッケル鉄よりなり、後者は主に斜方輝石とカンラン石とニッケル鉄よりなる。

(3) 石質隕石

石質隕石は、その構造によつて二つに大分けされる。一方は chondrite といい、他方は achondrite という。Chondrite というのは、Chondrule とよばれる直径 0.3 - 3.0 mm ぐらいの丸い粒をたくさん含んでいる石質隕石のことである。Chondrule も、また Chondrule と Chondrule との間の部分も、どちらも主としてケイ酸^塩鉱物からできている。achondrite というのは、chondrule を含まない石質隕石である。したがつて、achondrite の構造は地球上の火成岩の構造によく似ている。Achondrite は、構造も鉱物組成も、どちらも地上の岩石に似ているので、落ちたのを見ていて拾わないと、見つけにくい。

Chondrule があるか否かという様な構造上の違いによつて石質隕石を分類することが、ほんとうに本質的な分類であるかどうか、疑いをもつ人もあるかもしれない。しかし、研究の結果によると、chondrite と achondrite との区別は、化学組成上の区別にも対応している。おそらく、この区別は成因的に本質的な区別を表わしていると思われる。

ところが、chondrite と achondrite とは、対等な重要性をもつものではない。後で明らかになる様に、chondrite の方が圧倒的に重要性が大きい

のである。そこで、chondriteは節を改めて詳細に解説することにし、ここではachondriteの簡単な記述だけを与えておくことにする。

achondriteを、普通は、さらに二つに大分けする。Ca-poor achondriteと、Ca-rich achondriteとである。そして、この二つのおのものが、さらに細分して名前をつけられている。それを列挙すれば、次の如くである：

(a) Ca-poor achondrite

- i) Aubrite (主成分はMgの多い斜方輝石)
- ii) Ureilite (主成分はカンラン石と単斜輝石とニッケル鉄・よくダイヤモンドを含む)
- iii) Diogenite (主成分は斜方及び単斜輝石)
- iv) Chassignite (主成分はカンラン石で、これまでに1個知られているだけ)

(b) Ca-rich achondrite (別名 basaltic achondrite)

- v) Angrite (主成分は単斜輝石で、これまでに1個知られているだけ)
- vi) Nakhilite (主成分は単斜輝石とカンラン石で、確実なものは1個知られているだけ)、
- vii) Shergottite (主成分は単斜輝石と斜長石組成のガラスとで、これまでに1個知られているだけ)
- viii) Euclite (比較的よく出現するachondriteで、主成分は単斜輝石と斜長石で、ophiticという構造をしている。すなわち、鉱物組成も構造も、地球上の輝緑岩によく似ている)。
- ix) Howardite (これもよく出現するachondriteで、主成分は斜方輝石と斜長石)

2. Chondriteの重要性とPriorの法則

chondriteは、二つの著しい特徴をもっている。オ1に、落下してくる数が、非常に多いことである。オ1表に示す様に、落下を目撃された隕石の83%はchondriteである。

オ2に、chondriteの化学組成において、酸素OやH₂Oの様な揮発性成

都城秋穂

分の量はさまざまであるが、Si, Mg, Fe, Al, などのような不揮発性成分の相互の割合は、ほとんど一定している。そこで、相互の割合のほぼ一定した不揮発性成分と化合する酸素OやH₂Oの量に変化するに

オ1表 落下を目撃された隕石の数の割合

種 類	落下数の割合
鉄隕石	6%
石鉄隕石	2%
石質隕石	92%
Achondrite	9%
Chondrite	83%

オ2表 Chondrite の平均化学組成

	全ての Chondrite	H group	L group
SiO ₂	38.04	36.17	39.49
MgO	23.84	22.93	24.55
FeO	12.45	9.26	14.97
Al ₂ O ₃	2.50	2.36	2.61
CaO	1.95	1.95	1.96
Na ₂ O	0.98	0.91	1.04
K ₂ O	0.17	0.17	0.18
Cr ₂ O ₃	0.36	0.27	0.43
MnO	0.25	0.23	0.27
TiO ₂	0.11	0.11	0.11
P ₂ O ₅	0.21	0.17	0.24
Fe	11.76	17.76	7.04
Ni	1.34	1.68	1.06
Co	0.08	0.10	0.07
FeS	5.73	5.69	5.77
Total Fe	25.07	28.58	22.33

つれて、その鉱物組成が規則正しく変化する。ただし、 H_2O を明らかに含んでいるのは、carbonaceous chondrite とよばれる1群だけであつて、chondrite の鉱物組成の変化の大部分はOの量の違いによつて生ずる。すなわち、酸化還元状態の違いによつて生ずる。

最も強く還元された状態のchondriteでは、すべてのFeは還元されてニッケル鉄相にはいつている。MgはSi及びOと化合して、斜方輝石 $MgSiO_3$ をつくつている。このような種類を、enstatite chondrite という。

これに、少しずつOを加えて化合させると、ニッケル鉄の中のFeがO及び斜方輝石と反応して、Feを含む斜方輝石とカンラン石を生ずる。Oが増加するにつれて、斜方輝石が減少して、カンラン石が増す。この様な種類を、Oの増加の順序にbronzite chondrite 及びhypersthene chondrite という。

Oが増加して、酸化が進むにつれて従つて、 $\wedge$ ニッケル鉄相の量が減少し、その相の中の $Fe/(Ni+Fe)$ の値が小さくなり、同時にケイ酸塩相の中の $FeO/(MgO+FeO)$ の値が増す。この規則的關係を、Priorの法則という。

もつとも酸化の進んだhypersthene chondriteでは、ケイ酸塩の $FeO/(MgO+FeO)$ の値は0.35くらいになる。Carbonaceous chondriteは、化学組成上は、この酸化の進んだchondriteに H_2O が加わつた様な性質をもつている。しかし、鉱物の種類はひどく違つて、蛇紋石、磁鉄鉱、非結晶質物質、有機物(hydrocarbons)などを含んでいる。

この様に隕石全体の中で占めるchondriteの割合が大きく、その上、すべてのchondriteの中の不揮発性元素の比はほぼ一定であるということは、chondriteの中の不揮発性元素の比は太陽系の原始物質の不揮発性元素の比をそのまま表わしているのではないかということを暗示している。すなわち、太陽系の原始物質のなかの大部分を占めるH, He, C, N, Neなどの揮発性元素はほとんど失なわれたが、Mg, Al, Si, Feなどの不揮発性元素はそのまま残つて、幾らかの量のOなどと化合してchondriteをつくつたのであろう。

3. Chondrite のグループ

こう書くと、chondriteは成因的には共通で、Oの量とともに、その性質

は連続的に変化する様な印象を与えるであろう。ところが実は、その印象は正しくないのである。たとえばケイ酸塩鉱物の $\text{FeO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 比をみると、この比が0に近い1群があつて、それから0.14-0.20の1群があり、さらに0.22-0.35の1群がある。ところが、これら3群の中間の値のものはほとんどないのである。chondriteの多様性が酸化と還元だけによつて支配されているのであるならば、この様に切れ切れではなくて、連続的にあつてもよいであろう。

chondriteの中でFeは1部分は金属相に含まれ、1部分はケイ酸塩相に含まれ、1部分は硫化鉄に含まれている。もしchondriteの多様性が酸化と還元だけで生ずるものならば、Feの総量は、どんなchondriteでもほとんど一定になつてゐるはずである。ところが、事實はそうではない。UreyとCraig (1953)は、chondriteの分析多数を集めて、Feの総量と出現頻度との関係をしらべた。その結果、Feの総量が28% (重量) 付近と22%付近のものがことに多く、その中間のものはあまりないことを発見した。そこでFeの総量が28%付近のものをHグループ、22%付近のものをLグループと命名した。

HグループとLグループとのおのおの平均組成を、才2表に示してある。

その後、bronzite chondriteとcarbonaceous chondriteとはHグループに属し、hypersthene chondriteはLグループに属することがわかつた。

これらのグループが成因的に何を意味するかは明らかでない。

4. 隕石鉱物

隕石の大部分は、カンラン石 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$, 斜方輝石 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$, 単斜輝石 $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})\cdot\text{SiO}_3$, 斜長石 $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$, トロイ鉱 FeS , およびニッケル鉄 (Fe, Ni) のさまざまな組合せからできている。しかし、そのほかに、約40種の鉱物がときによつて隕石に出現することが知られている。

その中で、隕石には出現するが、地球上では発見されたことのない鉱物は、オールダム鉱 Cas , ドーブレー鉱 FeCr_2S_4 , シュライバーサイト $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$, オスボーン石 TiN , レダー石 $(\text{Na}, \text{K})_2\text{Mg}_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$, merrihueite $(\text{Na}, \text{K})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$, ファリント石 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ などである。

最後の二つを除けば、他のものは、隕石の方が地球上よりも強い還元状態にあるために、地球上ではできないが隕石ではできたのであろう。

隕石鉱物の中で、これまで特に興味をもたれたのは、高圧を示すらしい鉱物である。隕石は、地球上に落ちてくるときには一般に小さなかたまりになっているが、過去のある時期にはかなり大きな母天体をつくっていたのではないかという考えが、昔から今日まで広くもたれている。高圧を示す鉱物があれば、その母天体はかなり大きかったといえることになるだろうと考えられたのである。

隕石鉱物の中で、高圧鉱物としてこれまでに特に注目されたのはダイヤモンドとコーエン石である。ダイヤモンドは数個の隕石から見いだされている。アリゾナの大隕石孔のものは、ことに有名である。母天体が月くらいの大きさがあれば、中心近くではダイヤモンドを生じうるにすぎずである。しかし、隕石のダイヤモンドが母天体の内部で静かな高圧を受けてできたのだという見解に対しては、近年否定的な意見が多い。母天体が破壊されたときのショックとか、地球に落ちたときのショックとかで生じた瞬間的な高圧でできたのではないかと考えている人が多い。

隕石の中に斜長石の化学組成をもつガラスが含まれていることがあつて、これを maskelynite という。これも、母天体が破壊されたときのショックでできたのではないかといわれている。ハンレイ岩に、実験室でショックで 30 万 atm くらいの圧力を与えると、その中の斜長石の部分だけがガラス状に物質に変わる（固体のままで）そうである。

コーエン石 (cohenite) は $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$ という化学組成をもつ鉱物で、この中の Ni が零になつたものは鋼鉄の成分であるセメンタイト Fe_3C である。Ringwood (1960) は、隕石の中にコーエン石がでることは、圧力が 3 万 atm 程度より高かつたことを示すと考えた。しかし、この推論の根拠は十分でなく、強い反対もある。

結局今のところ、隕石の母天体が内部に高圧を生ずる様な大きさであつたことを示す様な積極的な証拠はない。むしろ、トリデイマイト、クリストバライトなどの様な低圧を示す鉱物があり、また鉱物の組合せからみても、2 万 atm を超える高圧ははたらかなかつたと考える方が自然である。大部分はトリデイ

マイトの安定な圧力、すなわち 3000 atm 以下で生じたのであろう。3000 atm という圧力は、小惑星の中で最大のものである Ceres (半径 400km) の中心部の圧力に相当している。

5. 隕石の成因

隕石全体の中で、chondrite は特に重要である。これは、太陽系の原始物質に比較的近いものと考えられるからである。他の種類の隕石は、chondrite の物質から出発して、いろいろな分化をすることによつてできると考えられる。例えば、chondrite が融解して、その中のニッケル鉄が沈降して集ると鉄隕石を生ずる。融解したケイ酸塩の部分が冷却して結晶すれば、いろいろな achondrite を生じうる。

従つて、隕石の成因論の中心問題は、chondrite の成因である。その他の種類の隕石の成因は、従属的な問題にすぎない。

chondrite には H や L のグループがあるが、一応これを見れば、主な性質は酸化還元反応で説明できる。そこで、二つの仮説が生れた：

(1) Prior の説。 chondrite のもとになつたマグマは、強い還元性のマグマであつた。それが結晶作用が進むにつれて、しだいに酸化性になつてきて、色々な chondrite を生じた。

(2) Ringwood や Mason の説。 chondrite の中でいちばん原始的な状態を表わすのは、酸化の進んだ carbonaceous chondrite である。これが熱せられて、脱水し、還元されて、色々な chondrite を生じた Ringwood は、carbonaceous chondrite がたくさん集まつて、かなり大きい母天体を生じ、その内部で脱水と還元が起つたのみならず、融解が起つて火山まで生じたと考える。chondrule の粒は、火山噴火によつてできたとする。Mason は、それと違いその様に大きい母天体はつくられず、脱水・還元されたけれど融解は起らなかったと考える。

しかし、近年の微量成分の定量によると、上記の様な考えはどれも具合が悪い。たとえばタリウムは、最も酸化した chondrite と、最も還元した chondrite とに多く、その中間のものに少い。したがつて、最も酸化した chondrite から出発して中間のものをへて、最も還元した chondrite に

達することも、その逆も不可能である。

そこで最近では、太陽系のもとの原始物質から、いろいろ違ったコースを通つてさまざまな chondrite ができた、そのコースによつて、酸化・還元をうける程度や微量成分を失う程度が違つたのだと考えるようになった。

(3)Wood の説。原始太陽ができるときに、その外側に太陽に集まりそこなつた物質が残つた。太陽のフレアなどによる衝撃波をうけて、その物質は瞬間的に強熱され、一部分は融けて液滴となり、固まつたものが、chondrule である。融けなかつた部分は微粒子でありつづけた。やがて温度が下がり、その附近の O_2 や H_2O の作用をうける様になつたが、微粒子の方だけが選択的に酸化され、 H_2O の作用をもうけた。chondrule は大きいので、ほとんどそのまま残つた。この様なものが全部集つて chondrite をつくつた。こういう状態をそのまま保存しているのが、Renazzo とよばれる 1824 年落下の 1 隕石である。他のすべての chondrite は、その後さらに母天体の中で加熱され、再結晶してできた。そのために、たいていは、chondrule とそのまわりの物質とは化学平衡の状態に達した。

付記： これは 1966 年 1 月 12 日京大基研での話とほぼ同じ内容であるが、そのとき配布した印刷物となるべく重ならない様にした。なお、雑誌「科学」才 32 巻 5-6 号 (1962) の拙稿をもご参照いただければ幸である。

(附) 都城秋穂* 鉄-ニッケル系の金属相鉱物

Metal-phase minerals of the Fe-Ni system

I. ま え が き

鉄-ニッケル系の金属相鉱物は、地殻の中に出現することは比較的稀である。自然鉄が玄武岩の中に産出し、ニッケル鉄合金が蛇紋岩のなかに産出すること

* 東京大学理学部地質学教室