鉱 物 学 雑 誌

第18巻

第5号

1988年7月

招待特別講演

石 質 隕 石 の 鉱 物 学*

The Mineralogy of Stony Meteorites

A. L. GRAHAM**

このテーマについて、日本鉱物学会で話すことは、日本の研究者が古来、流星や隕石を観測してきたという点で特に当を得ていよう。隕石はその発見された場所あるいは落下が目撃された場所にちなんで名付けられる。標本が現存するもののうち最も古い記録を持つ隕石は、西暦861年に九州に落下したNogata石質隕石(Shima et. al., 1983)であり、これはヨーロッパで隕石の落下や回収が報告されるより600年以上も前のことである。西欧文明が、隕石が地球以外からの到来物であるという考えを容認したよりもずっと前に、日本で隕石は特に意味のある物体であるとみなされていた。現在、隕石の分野では国際的な共同研究が行われているが、それは科学的に興味深い隕石の多くが、重量が軽い(多くの場合全重量は50g以下)ためだけではなく、隕石物質を研究する多くの方法が高度に専門化したものであるためである。宇宙空間からの物体に対する我々の理解を進歩させるために国際的なレベルでの努力が行われている中で、日本での隕石研究は重要な位置を占めるようになっている。これは東京の国立極地研究所に保管されている新しい南極隕石の素晴らしい標本に負う所が大である。南極における科学的研究の動機が何であるにしろ、隕石を研究している人々は、これらの新しい隕石回収によって研究意欲をかき立てられている。日本の非南極隕石の標本は、ほとんど全てが東京の国立科学博物館に保管されている。

隕石は太陽系の初期の歴史に関する情報を提供してくれる主な源である。隕石研究において我々はその起源と年代についての多くの疑問を解こうとしている。これらの物体がその形成中に起こった出来事をどれだけ詳細に留めているか、また形成後に変成を受けたかどうか知る必要がある。これらの疑問に対する解答は、隕石の全体の化学組成を知ることにより得られるが、時にはその構成

* 1987年6月6日 東京医科歯科大学で行われた昭和62年度日本鉱物学会年会における招待特別講演

** 大英博物館(自然史部門)

British Museum (Natural History), London.

鉱物の化学組成や構造を知ることがより重要なこともある。これらの情報は、これらの鉱物の結晶構造を構成しているシリコン、マグネシウム、鉄、アルミニウム等の元素だけでなく、特に希ガスのように構造に入っていないが包有されているものからも得られる。さらに鉱物の結晶構造と高エネルギー粒子との相互作用について、例えば宇宙線と核分裂生成物、特に今では消滅核種である ^{244}Pu の分裂生成物によって作られたフィッシュントラックを研究することが大切である。

ほとんどの隕石は原始的なものであると見なされている。つまり、それらの隕石が約46億年もの間変化しなかったということである。しかし、その構成元素のほとんどは46億年以前に作られたものである。その化学元素は星の誕生と死にともなって起こる核合成の期間に形成された(1図)。現

図 1. 46億年前太陽系形成に至った可能な一連の事件を示す略図。

在我々の研究室にある隕石は、約46億年前、ガス／塵よりなる星雲からできた均質な固体物質とみなされてきた。この形成年代はたくさんの隕石の分析から得られたものである(図2)。しかしながら図から明らかなように、その組織を変え、ある程度、隕石の化学組成まで変えてしまうような活動が後にあったことは明瞭である。実際に46億年より新しい、確かな形成年代を持っている隕石はごく少数である。そのような隕石は46億年よりもずっと最近まで継続していた情報を含んでいる。

我々は落下するのが目撃されて回収された隕石と、落下していたものを発見、回収した隕石とを区別している。鉄隕石はその質量が地球上の岩石に比べてかなり重いので「発見された」部類に属するものでは石質隕石よりもずっと数が多い。その結果、宇宙空間から地球に落下してくる自然物質の組成を厳密に表わすためには、我々は落下が観測されたものだけを対象にすべきである。「落下」データの分析は石質隕石がすべての落下のうち92%を占める最も一般的なものであることを示している。地球に突入してくる全物質の真の化学組成を代表していると解釈するには、慎重に考える必要がある。ある種のタイプの隕石、特に炭素質コンドライトは他の隕石に比べて壊れ易いので、地球の大気を通過した後に発見可能な物体として残りにくい。この種の物質のほとんどは、地球上の物質と区別することが難しい微細なちりにまで壊れてしまう。隕石の多くはその落下した地域の人によって回収され、そのうち珍しい物質だけが報告され回収されるのが一般的である。この

図 2. (a)普通コンドライトについて、固体元素に基づいた年代決定で得られた年代分布.
(b)異なるグループの普通コンドライト(～300個)について、気体元素(Ar)に基づいて、K-Ar, Ar-Ar法で得られた年代分布. 矢内等編, 南極隕石(1987)より.

ような制限がありながらも、隕石は太陽系の初期の歴史についての我々の情報源として重要であり、特に石質隕石は貴重な科学的データを含んでいる。

隕石中に同定された鉱物を、付録1に表にして示した。石質隕石中に産出する最も一般的な鉱物の略表も本文中に含まれている(表1)。ほとんどの隕石鉱物は揮発性成分に乏しい環境で形成されたので、普通地球上で記録されたものより、より限定された部類の鉱物を含んでいる。したがって地球上で一般的な鉱物の多く、例えば炭酸塩、硫酸塩及び塩化鉱物が隕石に含まれていることは希である。地球環境と隕石鉱物が形成された環境のもっと違うところは、地球上ではほとんどの火成岩は角レキ岩化していず、鉱物の平衡状態での組み合わせとして存在する。これに対し、隕石鉱物は非平衡な鉱物組合せが多く、角レキ岩化と破碎の後に再集合したものがごく一般的である。これは隕石の最初の構成物の形成に関連しない特徴が複雑に組み合わせられたものである。

石質隕石は、コンドライトとエコンドライトという2つの大きなグループに分けられる(表2)。コンドライトは一般に球状から球状に近い直径1～2mmの主にケイ酸塩鉱物より成る物体、コンドルール(図3)を包含することからこのように呼ばれる。コンドライトには、コンドルールの球が密につまった集合物のものもあるが、細粒のケイ酸塩質のマトリックス物質から成るものもある。現在のところ、コンドルールの多くが、かつては溶解したケイ酸塩の小滴であり、場合によっては金属や硫化物をもいくらか含んでいるということに関して合意が得られている以外、その形成過程について一般的に受け入れられている説はない。コンドライト隕石は、主にカンラン石、低カルシ

表 1 Minerals commonly present in stony meteorites

Olivine	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
Ca-poor pyroxene	$(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
Ca-rich pyroxene	$(\text{Ca, Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
Troilite	FeS
Kamacite	$\alpha - (\text{Fe, Ni})$
Taenite	$\gamma - (\text{Fe, Ni})$
Plagioclase	$(\text{Na, Ca}) (\text{Al, Si})_4\text{O}_8$
Chromite	$(\text{Fe, Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$
Ilmenite	FeTiO_3

Other, less common, minerals that are present in some stony meteorites :

Serpentine	$(\text{Mg, Fe, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Magnetite	Fe_3O_4
Graphite	C
Diamond	C
Cohenite	$(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$
Tridymite	SiO_2
Oldhamite	CaS
Ninningerite	$(\text{Mg, Fe})\text{S}$
Alabandite	$(\text{Mn, Fe})\text{S}$
Sinoite	$\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$
Merrillite	$\text{Ca}_9(\text{Mg, Fe})\text{H}(\text{PO}_4)_7$
Chlor-apatite	$(\text{Na, Ca})_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH, Cl})_3$

For a more comprehensive list of the minerals in meteorites see the Appendix.

表 2 The classes of stony meteorites

Chondrites

- H-group (bronzite chondrites)
- L-group (hypersthene chondrites)
- LL-group (amphoterites)
- E-group (enstatite chondrites)
- C-group (carbonaceous chondrites)

Achondrites

- Eucrite association
 - Eucrites
 - Howardites
 - Diogenites
- Shergottite association
 - Shergottites
 - Nakhlites
 - Chassignite*
- Aubrites (enstatites achondrites)
- Ureilites (olivine-pigeonite achondrites)

*A single meteorite

図 3. Lグループ・コンドライトの1つ Bovedy 隕石の薄片顕微鏡写真。カンラン石と輝石よりなる不規則な形をしたコンドルールが密につまり、暗色細粒のマトリックスの中に埋もれている。コンドルールの多くはガラスあるいは微晶質の物質を含む。写真の幅は3 mm, 平面偏光。

ウム輝石などのケイ酸塩鉱物と、ニッケル／鉄金属と硫化物の密に混合したものから成っている。このケイ酸塩鉱物、金属と硫化物の共存は組織上の証拠と組み合わせてみれば、これらの隕石は集積して以来、強度には溶融していず、それゆえに46億年前の形成期の状態を反映する特徴を留めていることを示す。エコンドライトはコンドルールを欠き、一般的にコンドライトより金属や硫化物の含有量がずっと少ない。ほとんどのエコンドライトは、ある種の地球上の火成岩に似た火成岩的な組織を持ち、普通角レキ岩化と衝突のあった証拠を示す。

石質隕石中に最も多く産するケイ酸塩鉱物は、カンラン石 $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ と輝石 $(\text{Ca, Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ である。長石 $(\text{Na, Ca, K})(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$ も普通に存在し、エコンドライトの中で特にユークライトとホワルダイトでは主構成物質である。コンドライトの多くでは、カンラン石は各々の隕石で均質な組成を持っており、各隕石グループ内での組成の範囲は非常に狭い。H, L, および LL グループのコンドライトのカンラン石の組成分布の間には明確な不存領域があり、この差は又これらの隕石の全鉄量の差にも表われている。種々のコンドライト・グループの化学組成範囲は、図4に示されている。この特質の原因はまだこれから完全に説明されるようになる必要があるが、これらの化学組成のグループ分けは隕石が46億年前に形成された時に確立されたということは明らかである。コンドライトの中には $(\text{Fa}_0\text{--}\text{Fa}_{40})$ 組成に範囲を持つカンラン石を含むものもいくつかあり、これは「非平衡コンドライト」(UOC) (Dodd et. al., 1967) と言われている。コンドライトの中のあるものは、主に単一の組成のカンラン石から成るが、化学組成の異なるカンラン石をも含有物として含んでいる。Hグループのコンドライトである Romero 隕石中のカンラン石の研究 (Graham, 1983) で、マトリックス中のカンラン石よりももっとマグネシウムに富むカンラン石を含む含有物が発見された(図5a)。もし含有物がこのマトリックスのカンラン石と異なった熱史的歴史を

図 4. コンドライトの分類. 鉄の酸化還元状態に基づく南極普通コンドライトと炭素質コンドライトの分類(HARAMURA et al., 1983).

図 5. a) Hグループコンドライトである Romero 隕石中のカンラン石 (Fa, Fe_2SiO_4 モル%) および低 Ca 輝石 (Fs, FeSiO_3 モル%) の組成変化を示す頻度分布図. 包有物 (inclusion) 中のカンラン石の Fe 含有量は, 隕石主要部分 (matrix) のカンラン石のものと明瞭な差がある.
b) カンラン石中のクロム含量有 (Cr_2O_3) を Fa 量に対してプロットした図. A11 および A12 は Smith (1971) によるアポロ 11 および 12 号のデータ. St. Mesmin のデータは Dodd et al. (1975), Sharp のデータは Dodd (1973). Graham (1983) より. i は含有物, m はマトリックス.

経験していれば、両方の組成のカンラン石が単一の液体から造られたものであるとも考えられたが、Romero のカンラン石のクロム含有量の研究 (図 5 b) でカンラン石含有物 (i) はマトリックス (m) のカンラン石とは異なる Fe/Cr の関係を持ち、したがって原料物質が異ったものである必要があることを示した。形成された領域が異なっているが、近いものの一例に、L グループ・コンドライトの Julesburg 隕石がある。この石質隕石は、隕石の主要部分に比べて、化学組成も組織も異なったカンラン石に富む含有物を含む。これらの含有物は又少量の斜長石と化学組成にゾーニングのあるスピネルを含む。スピネルの化学組成はほとんど純粋に近いクロム鉄鉱から、よりマグネシウムに富む組成に及ぶ (図 6 a, b)。きれいな集積組織を持つ平衡に達したカンラン石が、どのようにして著しくゾーニングを持つスピネルと共存できるのかはまだ明らかになっていない。これらの隕石が非平衡状態に保たれるような条件で形成されたことと、以後再加熱されていないことは明らかである。

炭素質コンドライトはその名前が示すように、普通 1 から約 5 重量%の炭素を含み、しばしば層状ケイ酸塩鉱物を多く含む (図 7)。これらの隕石は、 Fa_0 - Fa_{90} の間の化学組成を持ったカンラン石をも含んでいる。コンドルールの中に産出するか、あるいは比較的大きな孤立した結晶 (直径約 $200\mu\text{m}$) として産出するカンラン石は、ほとんど鉄を含まない (Fa_0)。一方マトリックス中のより小さなカンラン石は、より鉄に富んでいる (Fa_2 - Fa_{90})。孤立したカンラン石は非常に顕著な微量元素の分布様式を呈し、その良い例がやまと 82042 炭素質コンドライトに挙げられる。この隕石中の孤立したカンラン石にある鉄とカルシウムの分布の研究で、はっきりと区別できる 2 つの傾向が示

a)

b)

図 6. a) L グループ・コンドライト Julesburg 隕石の薄片顕微鏡写真。変形したコンドルールがカンラン石とスピネル (カンラン石の間にある暗色の粒間物質) よりなる大きな包有物に接している。これらのスピネルは著しい化学的ゾーニングを示し、粒間液の組成変化を反映している。写真の幅は 3 mm, 平面偏光。
b) Julesburg 隕石中にみられるスピネルの組成変化。もっとも一般的な組成は Mg に乏しいクロム鉄鉱 (長方形の領域)。図中の化学組成変化の範囲は図 6 (a) に示した大きな包有物中のもの。

図 7. 炭素質コンドライトやまと 82042 の薄片顕微鏡写真。マトリックスは層状ケイ酸塩鉱物よりなり、暗色の層状ケイ酸塩鉱物のコロナで囲まれたカンラン石を含む。他の淡色の結晶は主として炭酸塩鉱物の方解石と苦灰石。写真の幅 3 mm, 平面偏光。

図 8. やまと 82042 炭素質コンドライト中の単独のカンラン石結晶中の FeO を CaO に対してプロットした図。低 Fe 領域の 2 つの密な分布は単結晶中に見出されたもの。

された。CaO 含有量に対して FeO 含有量をプロットすると (図 8) 著しい負の傾向を示す。CaO の低いカンラン石組成の数個は、この傾向からかなり外れてプロットされ、FeO が低い CaO 含有量の非常に異なる 2 つの組成領域が単結晶の中に存在する。これは、このカンラン石が形成された条件が変化したことを示している。これらの 2 つの例は、隕石中の鉱物の化学組成の研究が初期

太陽系の歴史においての生成条件の情報をいかに与えてくれるかを示している。

コンドライトの中には、衝撃により形成されたと思われる暗色の細粒物質でできた脈があるものがある。これらの脈はしばしばリングウッド石を含む。これはカンラン石の組成をしているが、スピネルの構造を持つ等軸晶系鉱物に属す。この鉱物は、メイジョライトと呼ばれる、斜方輝石（ハイパーシン）の組成を持っているが、ガーネット構造を持つ別の等軸晶系鉱物をしばしばともなっている。これらの鉱物は、この隕石が地球の大気に突入するよりも前にショックを受けて形成されたものである。このショックが加えられたのは、この隕石が地球に捕獲される何百万年も前に小惑星帯でその母天体の衝突が起きた時であろう。

輝石は、ケイ酸塩鉱物に富む隕石に産する第2の主要な鉱物グループである。コンドライト中に多量に産する輝石は、低カルシウムの種類、ブロンザイトかハイパーシンで、一般には斜方晶系のものであるが、時として単斜晶系のものがある。特に非平衡普通コンドライト（UOC 隕石）のものに単斜晶系のものが多い。コンドライトの中の低カルシウム輝石は、普通そのコンドライトのクラスに独特の化学組成を持っており、Hグループ・コンドライトでは通常 Fs_{16} 位であるが、Lグループコンドライトでは普通約 Fs_{22} である。少数のUOC 隕石はそれぞれのFe/Mg比の範囲ではあるが比較的一定で低いカルシウム含有量 (Wo_{1-2}) の輝石を含んでいる。一つの隕石中のカンラン石は平衡になっていても、共存する輝石は化学組成において異なることがある。ダイオプサイトは、コンドライト中には存在はするが豊富でないのに対し、ある種のエコンドライト中では主要構

図 9. やまと 82 年試料の玄武岩質エコンドライトの輝石組成図。Y-82066, Y-82082, Y-82037, および Y-82210 はユークライト。Y-82052 および Y-82091 はホルワルダイト。

成物となっている。普通輝石とピジョン輝石はある種のエコンドライト中に多く存在し、その化学組成はこれらの石質隕石の熱的歴史をたどるのに有益であり（武田，1982），またその分類にも使われる。これらの鉱物の同定と分析にはエレクトロンマイクロプローブを使うのが最も便利である。図9は南極で回収された幾つかのエコンドライトに於ける、輝石の化学組成変化を示す一連の図である。ある種の隕石にはあまり一般的でない輝石も存在し、例えばある種の炭素質コンドライトにはチタンに富むファッサイトが産出し、それはアングラ・ドス・レイス・エコンドライトでは主要な相である。

石質隕石のほとんどのタイプには斜長石が産出する。コンドライトは普通、約10モード%の長石を含んでいる。非平衡普通コンドライト中には長石は光学顕微鏡では普通観察できないが、隠微晶質（Cryptocrystalline）の粒間物質中に存在することがある。コンドライト中の斜長石の化学組成は、普通 $An_{10-14} Or_{4-6}$ の範囲である。エコンドライトでは、斜長石は主要相であることが多く、隕石の50%を形成している。このグループの隕石中の斜長石組成は広範囲に及び、 $An_{50-97} Or_{1-4}$ である。

スカポライトは最近になって初めてコンドライト隕石中にあると報告された（Alexander 等，1987）。この鉱物は、LLグループ・コンドライトの1つ、ビシュンプール（Bishunpur）隕石中の鉱物の化学組成をエレクトロンマイクロプローブを使って分析中に同定された。図10に、その分析によって得られた元素分布図を示す。スカポライトの存在は微小領域X線回折計によって確認された。

図 10. A) Bishunpur コンドライト中の岩石片の背面反射電子像(BEI)。スケールバーは100 μm 。
B) 同上。A中のB領域の拡大像。中間的灰色はカンラン石または輝石、暗灰色はスカポライト。スケールバーは10 μm 。
CおよびD) 塩素(Cl)およびアルミニウム(Al)のX線分布図。スケールバーは10 μm 。AlおよびClに富む領域はスカポライト。

隕石標本中に、小惑星のような天体ではなく、もっと大きな物体、多分月や惑星の1つより導かれたと思われるものがあるとわかってもうかなりになる。自然に産するガラス質の物体で、流れた様な線、模様を持つことがあるテクタイトと呼ばれるものが、月で出来た物質から形成されたということについては、長い間論争があった。テクタイトが月で作られたものではないという確かな結論が得られたのは、その同位体の関係、特に鉛について研究され、月から持ち帰られた試料と比較してからであった。テクタイトは地球の衝撃でできたガラスであり、宇宙空間からやってきたわけではない。比較的若い結晶化年代、13億年を持ついくつかのエコンドライト隕石の源としては火星が挙げられている。この年代が真の形成年代であれば、これらの隕石は、約13億年前まで溶けた物質を作るのに足る熱を保てるだけの大きさを持った天体にあったに違いない。この天体は月よりも大きいはずである。というのは、月では約28億年前にはほとんどの火成活動は止まってしまう程冷却されていたということが知られているからである。この“惑星の”隕石（シャーゴッタイト）は他の隕石とは化学組成において非常に異なっている。実際、これらの隕石中の希ガスの同位体比が測定されたが、バイキング着陸船によって測定された火星の大気に似たものがあった。シャーゴッタイトとナクライトが火星から来たというのは十分可能性のあることであり、月から来た隕石が発見されたことによって、この可能性は増々高まっており、注目を浴びている。南極隕石の素晴らしい発見の一つは、確かに月から来たという隕石を発見したことである。それらの化学組成と元素間の関連性は他の隕石とは明瞭に区別されるものであり、月高地の岩石に似ていることが、確認されている。このことは、特にFeO/MnOの関係（図11）に明瞭に示されている。月隕石は全て高地から来た角レキ岩化された岩石であり、その発見は月の重力圏から脱出させることが可能な衝突過程の研究を促進した。これらの研究は、火星表面から物質を放出させ、その後地球によってそれら

図 11. 月隕石 Y-791197, 斜長岩質表土角レキ岩の FeO/MnO 相関図. Y-791197 は、月高地の岩石の分布と同じで、玄武岩質エコンドライトとは著しく異なる。矢内等編、南極隕石 (1987) より。

の物質が捕獲される過程にも及んでいる。

要約するに、我々の隕石標本中にある隕石は、我々の太陽系を形成した化学的・物理的過程を記録しているのである。隕石は我々の手にしている地球外物質の最も古い試料であり、地球をも含めた惑星系の初期の歴史に関する主要な情報源である。この講演は筆者が日本学術振興会研究員として滞日中（東大理学部鉱物学教室）に行われたものなので、同会に感謝したい。（武田弘・伊藤真樹訳）

文 献

- Alexander, C. M. O., Hutchison, R., Graham, A. L. and Yabuki, H., 1987. Discovery of scapolite in the Bishunpur (LL 3) chondritic meteorite. *Mineral. Mag.*, **51**, 733-735.
- Barber, D. J., 1985. Phyllosilicates and other layer-structured materials in stony meteorites. *Clay Minerals*, **20**, 415-452.
- Binns, R. A., Davis, R. J. and Reed, S. J. B., 1969. Ringwoodite, natural $(\text{MgFe})_2 \text{SiO}_4$ spinel in the Tenham meteorite. *Nature*, **221**, 943-944.
- Brett, R., 1967. Cohenite: its occurrence and a proposed origin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 143-160.
- Buchwald, V. F., 1975. A Handbook of Iron Meteorites, University of California Press, 1560 pp.
- Buchwald, V. F. and Scott, E. R. D., 1971. First nitride (CrN) in iron meteorites. *Nature (Phys. Sci.)*, **33**, 113-114.
- Bunch, T. E. and Fuchs, L. H., 1969a. Yagiite, a new sodium-magnesium analogue of osumilite. *Amer. Mineral.*, **54**, 14-18.
- Bunch, T. E. and Fuchs, L. H., 1969b. A new mineral: Brezinaite, Cr_3S_4 , in the Tucson meteorite. *Amer. Mineral.*, **54**, 1509-1518.
- Bunch, T. E. and Keil, K., 1971. Chromite and ilmenite in non-chondritic meteorites. *Amer. Mineral.*, **56**, 146-157.
- Bunch, T. E. and Olsen, E., 1968. Potassium feldspar in Weekeroo Station, Kodaikanal and Colomera iron meteorites. *Science*, **160**, 1223-1225.
- Buseck, P. R., 1969. Phosphide from meteorites: Barringerite, a new iron-nickel mineral. *Science*, **165**, 169-171.
- Clarke, R. S. Jr., Jarosewich, E., Mason, B., Nelen, J., Gomez, M. and Hyde, J. R., 1971. The Allende, Mexico, meteorite shower. *Smithson. Contrib. Earth Sci.*, **5**, 1-53.
- Clarke, R. S. Jr. and Scott, E. R. D., 1980. Tetrataenite-ordered FeNi, a new mineral in meteorites. *Amer. Mineral.*, **65**, 624-630.
- Dodd, R. T., 1971. Calc-aluminous inclusions in olivine of the Sharps chondrite. *Mineral. Mag.*, **38**, 451-458.
- Dodd, R. T., 1973. Minor element abundances in olivines of the Sharps chondrite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **42**, 159-167.
- Dodd, R. T., Morrison-Scott, D. J. and Heyse, J. V., 1975. Chromium-bearing olivine in the St. Mesm in chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **39**, 1621-1627.
- Dodd, R. T., Van Schmus, W. R. and Kaufmann, D. M., 1967. A survey of the unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 921-951.
- Dodd, R. T., Van Schmus and Marvin, U. B., 1965. Merrihueite, a new alkali-ferromagnesian silicate

- from the Mezo-Madaras chondrite. *Science*, **149**, 972-974.
- DuFresne, E. R. and Roy, S. K., 1961. A new phosphate mineral from the Springwater pallasite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **24**, 198-205.
- El Goresy, A., 1965. Mineralbestand und Strukturen der Graphit und Sulphideinschlüsse in Eisenmeteoriten. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **29**, 1131-1151.
- El Goresy, A., 1971. Meteoritic rutile: a niobium-bearing mineral. *Earth planet. Sci. Lett.*, **11**, 359-361.
- El Goresy, A. and Ottemann, J., 1966. Gentnerite, $\text{Cu}_8\text{Fe}_3\text{Cr}_{11}\text{S}_{18}$, a new mineral from the Odessa meteorite. *Zeits. Naturforsch.*, **21a**, 1160-1162.
- El Goresy, A., Grögler, N. and Ottemann, J., 1969. Djerfisherite from the Pena Blanca Spring and Toluca meteorites. *Meteoritics*, **4**, 180.
- Frondel, C. and Klein, C., 1965. Ureyite, $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$: a new meteoritic pyroxene. *Science*, **149**, 742-744.
- Frondel, C. and Marvin, U. B., 1967. Lonsdaleite, a hexagonal polymorph of diamond. *Nature*, **214**, 587-589.
- Fuchs, L. H., 1969a. The phosphate mineralogy of meteorites. In *Meteorite Research*, P. M. Millman, ed., D. Reidel, Dordrecht, Holland, 683-695.
- Fuchs, L. H., 1969b. X-ray crystallographic evidence for the meteoritic occurrence of nepheline. *Meteoritics*, **4**, 176-177.
- Fuchs, L. H., 1969c. Occurrence of cordierite and aluminous orthoenstatite in the Allende meteorite. *Amer. Mineral.*, **54**, 1645-1653.
- Fuchs, L. H., 1971. Occurrence of wollastonite, rhönite and andradite in the Allende meteorite. *Amer. Mineral.*, **56**, 2053-2068.
- Fuchs, L. H., Frondel, C. and Klein, C., 1966. Roedderite, a new mineral from the Indarch meteorite. *Amer. Mineral.*, **51**, 949-955.
- Fuchs, L. H., Olsen, E. and Henderson, E. P., 1967. On the occurrence of brianite and panethite, two new phosphate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 1711-1719.
- Fuchs, L. H., Olsen, E. and Jensen, K. J., 1973. Mineralogy, mineral chemistry and composition of the Murchison (C2) meteorite. *Smithson. Contrib. Earth Sci.*, **10**, 1-39.
- Graham, A. L., 1983. An unequilibrated inclusion in the Romero (H3-4) chondrite. *Meteoritics*, **18**, 51-61.
- Graham, A. L. and Yanai, K., 1986. A review of the Yamato-80, -81 and -82 meteorite collections. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Tokyo*, Spec. issue, **41**, 167-180.
- Grant, R. W., 1969. The occurrence of silica minerals in meteorites. *Meteoritics*, **4**, 180-181.
- Haramura, H., Kushiro, I. and Yanai, K., 1983. Chemical compositions of Antarctic meteorites, I. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Tokyo*, Spec. issue, **30**, 109-121.
- Keil, K., 1968. Chemical and mineralogical relationships among enstatite chondrites. *J. Geophys. Res.*, **73**, 6945-6976.
- Keil, K. and Anderson, C. A., 1965. Occurrence of sinoite, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$, in meteorites. *Nature*, **207**, 745-746.
- Keil, K. and Brett, R., 1974. Heideite, $(\text{FeCr})_{1+x}(\text{TiFe})_2\text{S}_4$, a new mineral in the Bustee enstatite achondrite. *Amer. Mineral.*, **59**, 465-470.
- Keil, K. and Fuchs, L. H., 1971. Hibonite from the Leoville and Allende chondritic meteorites. *Earth planet. Sci. Lett.*, **12**, 184-190.
- Keil, K., Berkley, J. L. and Fuchs, L. H., 1980. Suessite, Fe_3Si , a new mineral in the North Haig ureilite. *Meteoritics*, **15**, 312.
- Kerridge, J. F., 1970. Meteoritic pyrrhotite. *Meteoritics*, **5**, 149-152.

- Kullerud, G. and El Goresy, A., 1969. Sulphide assemblages in the Odessa meteorite. *Meteoritics*, **4**, 191-192.
- Lewis, R. S., Ming, T., Wacker, J. F., Anders, E. and Steel, E., 1987. Interstellar diamonds in meteorites. *Nature*, **326**, 160-162.
- Marvin, U. B. and Klein, C. 1964. Meteoritic zircon. *Science*, **146**, 919-920.
- Marvin, U. B., Wood, J. A. and Dicky, J. S., 1970. Ca-Al rich phases in the Allende meteorite. *Earth planet. Sci. Lett.*, **7**, 346-350.
- Mason, B., 1968. Pyroxenes in meteorites. *Lithos*, **1**, 1-11.
- Mason, B., 1972. The mineralogy of meteorites. *Meteoritics*, **7**, 309-326.
- Nielson, H. P. and Buchwald, V. F., 1981. Roaldite, a new meteoritic mineral. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **Suppl. 16**, 1343-1348.
- Okada, A. and Keil, K., 1982. Caswellsilverite: a new mineral in the Norton County enstatite achondrite. *Amer. Mineral.*, **67**, 132-136.
- Olsen, E. 1967. Amphibole: first occurrence in a meteorite. *Science*, **156**, 61-62.
- Olsen, E. and Fuchs, L. H., 1968. Krinovite, $\text{NaMg}_2\text{CrSi}_3\text{O}_{10}$: a new meteorite mineral. *Science*, **161**, 786-787.
- Olsen E., Erlichmann, J., Bunch, T. E. and Moore, P. B., 1977. Buchwaldite, a new meteoritic phosphate mineral. *Amer. Mineral.*, **62**, 362-364.
- Price, G. D., Putnis, A., Agrell, S. O. and Smith D. G. V., 1983. Wadsleyite, natural β -(MgFe) $_2\text{SiO}_4$ from the Peace River meteorite. *Can. Mineral.*, **21**, 29-35.
- Reed, S. J. B., 1965. Electron-probe microanalysis of schreibersite and rhabdite in iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **29**, 513-534.
- Scott, E. R. D. and Agrell, S. O., 1971. The occurrence of carbides in iron meteorites. *Meteoritics*, **6**, 312-313.
- Shima, M., Murayama, S., Okada, A., Yabuki, H. and Takaoka, N., 1983. Description, chemical composition and noble gases of the chondrite Nogata. *Meteoritics*, **18**, 87-102.
- Smith, J. V. and Mason, B., 1970. Pyroxene-garnet transformation in Coorara meteorite. *Science*, **168**, 832-833.
- Smith, J. V., 1971. Minor elements in Apollo 11 and Apollo 12 olivine and plagioclase. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **Suppl. 2**, 143-150.
- Van Schmus, W. R. and Ribbe, P. H., 1968. Composition and structural state of feldspar from chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 1327-1342.
- Van Schmus, W. R. and Ribbe, P. H., 1969. Composition of phosphate minerals in ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **33**, 637-640.
- Vdovykin, G. P., 1969. New hexagonal modification of carbon in meteorites. *Geochem. Internatl*, **6**, 915-918.
- Vdovykin, G. P., 1970. Ureilites. *Space Sci. Rev.*, **10**, 483-510.
- Wai, C. M., 1970. The metal phase of Horse Creek, Mount Egerton, and Norton County enstatitic meteorites. *Mineral. Mag.*, **37**, 905-908.

この他の日本語参考文献

- 矢内桂三, 武田弘, 下山昇編, 1987. 南極の科学 6, 南極隕石, 特に 10 章 (222頁), 1 章 (10 頁), 3 章 (54 頁), 国立極地研究所編. 古今書院.
- 武田弘, 1982. 惑星の物質科学, Up Earth Sci. 10, 150 頁, 東大出版会.

付 録 1 隕石中の鉱物 (after Mason, 1972, with additions).

鉱物名	化学式	産 状	文 献
Kamacite	(Fe, Ni)	Common	Buchwald (1975)
Taenite	(Fe, Ni)	Common	Buchwald (1975)
Tetrataenite	(Fe, Ni)	Accessory	Clarke and Scott (1980)
Copper	Cu	Acc.	
Awaruite	Ni ₃ Fe	Acc.	Clarke et al. (1971)
Lonsdaleite	C	Rare	Fron del and Marvin (1967)
Chaoite	C	Rare	Vdovykin (1969)
Graphite	C	Acc.	Vdovykin (1970)
Diamond	C	Rare	Lewis et al. (1987)
Cohenite	(Fe, Ni) ₃	Acc.	Brett (1967)
Haxonite	Fe ₂₃ C ₆	Acc.	Scott and Agrell (1971)
Whewellite	CaC ₂ O ₄ ·H ₂ O	Rare	Fuchs et al. (1973)
Calcite	CaCO ₃	Rare	
Dolomite	(Ca, Mg)CO ₃	Rare	
Quartz	SiO ₂	Rare	Grant (1969)
Tridymite	SiO ₂	Rare	
Cristobalite	SiO ₂	Rare	
Schreibersite	(Fe, Ni) ₃ P	Acc.	Reed (1965)
Barringerite	(Fe, Ni) ₂ P	Acc.	Buseck (1969)
Perryite	(Ni, Fe) ₅ (Si, P) ₂	Acc.	Wai (1970)
Osbornite	TiN	Acc.	Keil (1968)
Carlsbergite	CrN	Acc.	Buchwald and Scott (1971)
Roaldite	(Fe, Ni) ₄ N	Acc.	Nielson and Buchwald (1981)
Suessite	Fe ₃ Si	Rare	Keil et al. (1980)
Sinoite	Si ₂ N ₂ O	Rare	Keil and Anderson (1965)
Sulphur	S	Acc.	
Troilite	FeS	Common	
Pentlandite	(Fe, Ni) ₉ S ₈	Acc.	
Pyrrhotite	Fe _{1-x} S	Acc.	Kerridge (1970)
Mackinawite	(Fe, Ni) ₉ S ₈	Acc.	El Goresy (1965)
Heazlewoodite	Ni ₃ S ₂	Acc.	Kullerud and El Goresy (1969)
Oldhamite	CaS	Acc.	Keil (1968)
Niningerite	(Mg, Fe)S	Acc.	Keil (1968)
Alabandite	(Mn, Fe)S	Acc.	Keil (1968)
Chalcopyrite	CuFeS ₂	Acc.	
Sphalerite	(Zn, Fe)S	Acc.	
Daubreelite	FeCr ₂ S ₄	Acc.	Keil (1968)
Brezinaite	Cr ₃ S ₄	Acc.	Bunch and Fuchs (1969b)
Caswellsilverite	NaCrS ₂	Rare	Okada and Keil (1982)
Djerfsherieite	K ₃ CuFe ₁₂ S ₁₄	Acc.	El Goresy et al. (1969)
Gentnerite	Cu ₃ Fe ₃ Cr ₁₁ S ₁₈	Acc.	El Goresy and Ottemann (1966)
Heideite	(Fe, Cr) _{1+x} (Ti, Fe) ₂ S ₄	Rare	Keil and Brett (1974)
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Rare	
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Rare	

Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Rare	
Lawrencite	$(\text{Fe}, \text{Ni})\text{Cl}_2$	Acc.	
Rutile	TiO_2	Rare	El Goresy (1971)
Perovskite	CaTiO_3	Rare	Marvin et al. (1970)
Ilmenite	FeTiO_3	Acc.	Bunch and Keil (1971)
Spinel	MgAl_2O_4	Acc.	Clarke et al. (1973)
Magnetite	Fe_3O_4	Acc.	
Hercynite	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Al}_2\text{O}_4$	Rare	Marvin et al. (1970)
Hibonite	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{18}$	Rare	Keil and Fuchs (1971)
Chlorapatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	Acc.	Van Schmus and Ribbe (1969)
Whitlockite	$\text{Ca}_9\text{MgH}(\text{PO}_4)_7$	Acc.	Van Schmus and Ribbe (1969)
Farringtonite	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	Rare	DuFresne and Roy (1961)
Buchwaldite	NaCaPO_4	Rare	Olsen et al. (1977)
Graftonite	$(\text{Fe}, \text{Mn})_3(\text{PO}_4)_2$	Rare	Fuchs (1969a)
Sarcopside	$(\text{Fe}, \text{Mn})_3(\text{PO}_4)_2$	Rare	Fuchs (1969a)
Brianite	$\text{CaNa}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$	Rare	Fuchs et al. (1967)
Stanfieldite	$\text{Ca}_4(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{PO}_4)_6$	Rare	Fuchs (1969a)
Panethite	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{PO}_4)_2$	Rare	Fuchs et al. (1967)
Olivine	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Common	
Ringwoodite	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Rare	Binns et al. (1969)
Wollastonite	CaSiO_3	Acc.	Fuchs (1971)
Orthopyroxene	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Common	Mason (1968)
Clinopyroxene	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Common	Mason (1968)
Majorite	$\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si})_2(\text{SiO}_4)_3$	Rare	Smith and Mason (1970)
Wadsleyite	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Rare	Price et al. (1983)
Ureyite	$\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$	Rare	Fron del and Klein (1965)
Alkali feldspar	$(\text{K}, \text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Rare	Bunch and Olsen (1968)
Plagioclase	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	Common	Van Schmus and Ribbe (1968)
Nepheline	NaAlSiO_4	Rare	Fuchs (1969b)
Sodalite	$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$	Rare	Clarke et al. (1971)
Scapolite	$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$	Rare	Alexander et al. (1987)
Serpentine	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Rare	Barber (1985)
Merrihueite	$(\text{K}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	Rare	Dodd et al. (1965)
Roedderite	$(\text{K}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	Rare	Fuchs et al. (1966)
Yagiite	$(\text{K}, \text{Na})_3\text{Mg}_4(\text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Si}, \text{Al})_{24}\text{O}_{60}$	Rare	Bunch and Fuchs (1969a)
Melilite	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7$	Rare	Clarke et al. (1971)
Richterite	$\text{Na}_2\text{CaMg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	Rare	Olsen (1967)
Rhonite	$\text{CaMg}_2\text{TiAl}_2\text{SiO}_{10}$	Rare	Fuchs (1971)
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Rare	Fuchs (1971)
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Rare	Clarke et al. (1971)
Zircon	ZrSiO_4	Rare	Marvin and Klein (1964)
Cordierite	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	Rare	Fuchs (1969c)
Krinovite	$\text{NaMg}_2\text{CrSi}_3\text{O}_{10}$	Rare	Olsen and Fuchs (1968)
Monticellite	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_4$	Rare	Dodd (1971)