

2

THE CHEMICAL COMPOSITION OF
COMETARY METEOROIDS

化学構成

P. M. MILLMAN

上空に採集板を置く。

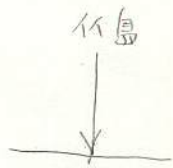
Evidence for the chemical composition of cometary meteoroids is available from the spectra of shower meteors, from the analysis of extra-terrestrial dust particles, from a study of residues in the bottom of microcraters on plates exposed to the interplanetary environment, and from measures of the relative abundances of non-atmospheric ions in the E-region of the earth's upper atmosphere. Quantitative measures of chemical abundances in meteoroids, based on the four techniques listed, show that in general the cometary meteoroids encountered by the earth conform to the carbonaceous chondrites type 1 in the case of the commonest metallic elements. There is also qualitative evidence of the presence of significant quantities of some of the light volatiles.

There is good evidence that the small particulate material encountered by the earth, in the size ranges below kilogram weights, has a cometary origin (Jacchia and Whipple 1961; Jacchia et al. 1967). Particles of mass 10^{-4} to 10^{-6} g contribute the largest fraction of the total mass swept up by the earth each day (Whipple 1967; Millman 1975). Hence, in discussing the chemical composition of this complex, we should not extrapolate from the large amount of laboratory data on the composition of meteorites. It is significant that no meteorite has shown clear evidence of any association with the cometary meteor streams.

流星物質の化学構成を調べるための方法がいろいろある。
その一例、
DFTでイオン測定

There are a number of areas of observational data which give independent evidence concerning the chemistry of small meteoroids. Impact microcraters on surfaces exposed directly to the interplanetary space environment sometimes exhibit residues that are foreign to the target chemistry. These residues presumably originate from the impacting particle. The techniques for the collection and analysis of small particles in the earth's upper atmosphere have recently been perfected to the extent that we can identify with some certainty material of extraterrestrial origin. Rocket-borne mass spectrometers have recorded unusual quantities of metallic ions at heights from 90 to 120 km above the earth, and under circumstances which strongly indicate a meteoritic origin. Meteor spectroscopy has made possible a qualitative chemical analysis of all the major meteor streams, and in some cases quantitative abundances have been calculated. It is the purpose of this review to summarize briefly the information on meteoroid chemical composition that has resulted from the types of research noted above.

Brownlee et al. (1974) have published quantitative abundances for nine elements found in a residue at the bottom of a 110 μ m crater on an aluminum sur-



MILLMAN

67日間了心標出

face exposed for 67 days during Skylab-IV. They used the scanning electron microscope and energy-dispersing X-ray analysis. These relative abundances for seven elements, by weight, have been plotted in Figure 1, normalized to Si at a log weight of 6.00. In this plot, Cameron's values for the solar system are almost identical to the relative abundances for C1 chondrites taken from Mason (1971) and Schmitt *et al.* (1972). In a smaller crater with a diameter 35 μm Brownlee *et al.* also found a different type of residue, consisting mainly of Fe and S in proportions that suggested the mineral troilite. C. L. Hemenway and D. S. Hallgren (unpublished) have found Fe, Si, Mg residues in four craters out of 20 produced on rocket-borne copper plates by submicron particles. These residues give qualitative confirmation of the relative abundances of the three elements, as found by Brownlee's team.

Brownlee *et al.* (1976a) have more recently published a detailed analysis of a small spherical micrometeoroid, 12 μm diameter, that is considered to be an ablation product from a larger meteoritic particle. These data for six elements are plotted in Figure 1.

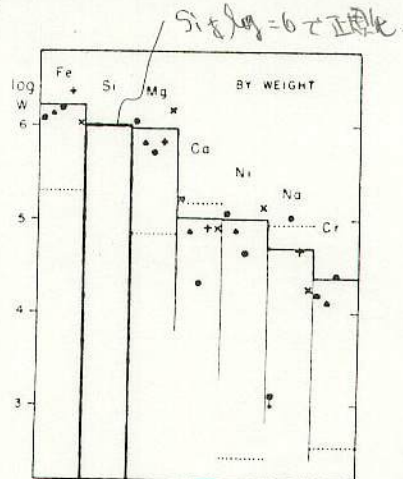


Figure 1. The relative abundances, by weight, of seven elements commonly found in cometary meteoroids. Values are plotted as log weight and normalized to Si at 6.00. Since Si values for meteor spectra are not available, normalization in this case was to the mean of Fe and Mg.

———— solar system, Cameron, 1973, also true for carbonaceous chondrites, type C1.

..... earth's crust, Ahrens 1965.

■ micrometeoroid, Brownlee *et al.* 1976a.

▲ microcrater residue, Brownlee *et al.* 1974.

● E-region ions, Goldberg and Aikin 1973.

+ 12 meteor spectra, Millman 1972a, 1972b.

X 4 meteor spectra, Harvey 1973.

Some 150 particles with good evidence of extraterrestrial origin have been collected on balloon and U-2 flights (Brownlee *et al.* 1976b; Brownlee and Rajan

1977). These are in the size range 2 to 30 μm with three main types, divided according to chemical composition as follows:

60% - aggregates with grain size 0.1 μm and Mg, Fe, Si, S, Ca, Ni in about solar system relative abundances.

30% - mainly Fe and S with a few % Ni, suggestion of troilite.

10% - Mg Fe silicates, and iron poor olivines and pyroxenes.

Additional proof of extraterrestrial origin comes from the detection of large amounts of ^4He (10^{-2} to 10^{-1} ccSTP g^{-1}) in six particles. This is most likely due to solar wind implantation. Six particles, analyzed for C, gave a mean carbon content of over 5% (Brownlee *et al.*, unpublished).

Mass spectrometers have been used with upper-air rockets by several groups (Goldberg and Aikin 1973; Krankowsky *et al.* 1972; Narcisi 1968) and a consistent pattern of ions in the upper atmosphere results from all these programs. In addition to the characteristic atmospheric ions, which are always present, occasional marked enhancements of metallic ions are found. These peak at heights which correspond to levels where small meteoritic particles disintegrate and vaporize. There has been a correlation in some cases between the time when the earth passes through a known meteor stream and the enhancement of the metallic ions in the upper atmosphere. Goldberg and Aikin (1973) have published quantitative abundances for an enhancement that took place on July 3 in 1972, after the earth had passed through the β Taurid meteor stream, associated with Comet Encke. These data have also been plotted in Figure 1.

Meteor spectroscopy has supplied a large amount of qualitative data on the elements present in the cometary meteoroids, and H, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Sr, N₂, CN, and possibly Li, K, Ba, FeO, CH have been identified in meteor spectra (Halliday 1961; Millman 1963; Cepelcha 1971). The difficulty has been to reduce this material to quantitative values. An empirical approach to this problem was provided by Savage and Boitnott (1973), who made laboratory measures of atomic collision cross-sections under conditions that attempted to simulate these corresponding to the production of visible meteor radiation. Harvey (1973) has favoured a more theoretical approach, using a concept of thermodynamical equilibrium and effective temperatures. The first technique is limited by the fact that luminous efficiencies are available for only four atoms and apply directly only to the higher collision speeds in the regime of molecular free-flow, that is in the high-level, early portions of meteor trajectories. The second technique is suspect on theoretical grounds, as evidenced by the widely varying effective temperatures found for different atoms and molecules in the same meteor spectrum, and the necessity of using various correction factors that have to be assumed without adequate theoretical or observational background. Personally, I favour the first approach, as far as it goes, and emphasize here the need for more laboratory work on collision cross-sections. Average results from the analysis of 10 Giacobinid and 2 Perseid spectra by Millman (1972a, 1972b) and of 4 meteors, a Taurid, Geminid, Perseid and Leonid, by Harvey (1973) mainly based on the Savage and Boitnott luminous efficiencies, are plotted in Figure 1.

When we examine the overall picture, as presented in the Figure, it is quite clear that all four independent types of research combine to show that, on the average, the small meteoritic particles, which are predominately cometary, agree much more closely with the chemical abundances of the solar system average mix than with the composition of the earth's crust. As Brownlee and his group have shown, a more detailed study of individual particles reveals examples, like the iron-sulphur-nickel particles, which depart from the general average for elemental abundances. This is also true for the small submicron grains that make up the larger particle aggregates.

Little can be said concerning the amount of light elements, such as H, C, N and O, present in the cometary meteoroids. Unfortunately, although there is considerable qualitative evidence for some of the light volatiles, as I have



武蔵高
↓
入射小孔で個々の厚さの
量を求めるのは難しい。
+ 加速: 衝突断面積と実験で求めた
11-14% 理論的値 (熱力学)
分光学や流星観測で重要
流星素性は地球物質のものより
太陽系の素性に似ている。

pointed out previously (Millman 1976), we have little in the way of quantitative data. It is hoped that further advances in the techniques of the collection and analysis of micrometeoroids, and in the reduction of meteor spectra, will soon result in filling this gap in our knowledge of the interplanetary environment.

REFERENCES

- Ahrens, L. H. 1965, *Distribution of the Elements in our Planet*, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., p. 96.
- Brownlee, D. E., Tomandl, D. A., Hodge, P. W., and Hörz, F. 1974, *Nature*, 252, 667.
- Brownlee, D. E., Hörz, F., Tomandl, D. A., and Hodge, P. W. 1976a, *The Study of Comets* (eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn, R. Harrington) NASA SP-393, Washington, D.C., p. 962.
- Brownlee, D. E., Tomandl, D. A., and Hodge, P. W. 1976b, *Interplanetary Dust and Zodiacal Light* (eds. H. Elsässer and H. Fechtig), Springer-Verlag, New York, N.Y., p. 279.
- Brownlee, D. E., and Rajan, R. S. 1977, this volume.
- Cameron, A.G.W. 1973, *Space Sci. Rev.*, 15, 121.
- Ceplecha, Z. 1971, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*, 22, 219.
- Goldberg, R. A., and Aikin, A. C. 1973, *Science*, 180, 294.
- Halliday, I. 1961, *Publ. Dominion Obs.*, 25, 1.
- Harvey, G. A. 1973, *J. Geophys. Res.*, 78, 3913.
- Jacchia, L. G., and Whipple, F. L. 1961, *Smithsonian Contrib. Astrophys.*, 4, 97.
- Jacchia, L. G., Verniani, F., and Briggs, R. E. 1967, *Smithsonian Contrib. Astrophys.*, 11, 1.
- Krankowsky, D., Arnold, F., Wieder, H., and Kissel, J. 1972, *Intern. J. Mass Spectr. Ion Phys.*, 8, 379.
- Mason, B. 1971, *Meteoritics*, 6, 59.
- Millman, P. M. 1963, *Smithsonian Contrib. Astrophys.*, 7, 119.
- Millman, P. M. 1972a, *From Plasma to Planet* (ed. A. Elvius) Almquist and Wiksell, Stockholm, p. 157.
- Millman, P. M. 1972b, *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 66, 201.
- Millman, P. M. 1975, *The Dusty Universe* (eds. G. B. Field and A.G.W. Cameron) Neale Watson Academic Pubs., New York, N.Y., p. 185.
- Millman, P. M. 1976, *Interplanetary Dust and Zodiacal Light* (eds. H. Elsässer and H. Fechtig) Springer-Verlag, New York, N.Y., p. 359.
- Narcisi, R. S. 1968, *Space Research VIII* (eds. A. P. Mitra, L. G. Jacchia and W. F. Newman) North-Holland Publ. Co., Amsterdam, p. 360.
- Savage, H. F., and Boitnott, C. A. 1973, *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids* (eds. C. L. Hemenway, P. M. Millman, A. F. Cook) NASA SP-319, Washington, D.C., p. 83.
- Schmitt, R. A., Goles, G. G., Smith, R. H., and Osborn, T. W. 1972, *Meteoritics*, 7, 131.
- Whipple, F. L. 1967, *The Zodiacal Light and the Interplanetary Medium*, (ed. J. L. Weinberg) NASA SP-150, Washington, D.C., p. 157.

DISCUSSION

HUGHES: I'm worried about the 114 km high enhancement in the metallic ion density reported by Goldberg and Aitken. Wouldn't you expect the main mass ablation of a β -Taurid to occur much lower down, around 75 to 85 km?

MILLMAN: Metallic ion enhancements have been observed over a wide variation in height within the range 80 - 120 km above the earth. It just happens that the most marked enhancement for the case quoted (where quantitative values were

明=0



理大

published) was at 114 km, but the relative values of the elements were very similar at 101 km and the results I have plotted are the mean of measures for the two heights, 101 and 114 km. As a matter of fact very small meteorite particles vaporize at heights above 90 - 100 km and these represent the greater part of the total mass contributed to the atmosphere, apart from the micro-meteoroids which do not vaporize.

EBERHARDT: The altitude at which the metal ions in the upper atmosphere are observed is not necessarily the altitude at which they were formed. Vertical transport processes due to horizontal winds occur and in some cases more than one layer has been observed with indication of vertical movement. Generally a strong metal layer at approximately 100 km altitude is present.

WASSON: The smaller the sample, the greater the potential for sampling inhomogeneities. As a result, I was surprised at the very good agreement between the analyses of individual dust particles and the composition of CI chondrites. Contamination is still a serious problem in the atmospheric collection of dust particles. I wonder if it is possible that some extraterrestrial particles having compositions deviant from chondritic compositions are misinterpreted as terrestrial contaminants, and whether this could result in a biasing of the results toward CI-like compositions.

MILLMAN: It is quite possible that some extraterrestrial particles impacting on the upper atmosphere, may be rejected if they masquerade as terrestrial particles in their physics and chemistry. From what we now know, the possibility of this happening in a significant number of cases is of small probability.

ANDERS: The sampling error mentioned by John Wasson is mainly a function of grain size. For carbonaceous chondrite matrices we can get an idea of the magnitude of this effect from electron microprobe measurements. If I am not mistaken, (and perhaps Dr. Kurat or Grossman will correct me), the variation for major elements is no more than 10-20% over distances of a few microns.

WETHERILL: In discussing comparisons of meteor and microparticle compositions with those of C1, C2, and C3 chondrites, sampling problems, etc., it should be remembered that this general type of unfractionated primordial non-volatile composition is found in many parts of the solar system - the sun and probably Jupiter, comets, and some asteroids. Therefore this composition is much less useful in diagnosing a source than is the case when dealing with a particular pattern of chemical fractionation.

LIPSCHUTZ: What are the standard deviations (based upon the dispersion of the individual measurements) of the means for the elements reported in meteor-like the Giacobinids - where statistics are best?

MILLMAN: They range from $\pm 5\%$ for Fe and Mg to $\pm 10\%$ for Na and Ca.

ANDERS: To determine whether cometary meteors are of C1 or C2 chondrite composition, you may want to take advantage of the fact that the latter, but not the former, contain Mg_2SiO_4 chondrules low in Fe. Thus, when a C2 chondrite breaks up, at least a few of the fragments of 10^{-3} g or smaller will be high in Mg, Si, but low in Fe.

MILLMAN: So far, on a qualitative basis, few meteor spectra show a significant depletion of Fe. It is certainly a good point to consider in future statistical studies of meteor spectra.

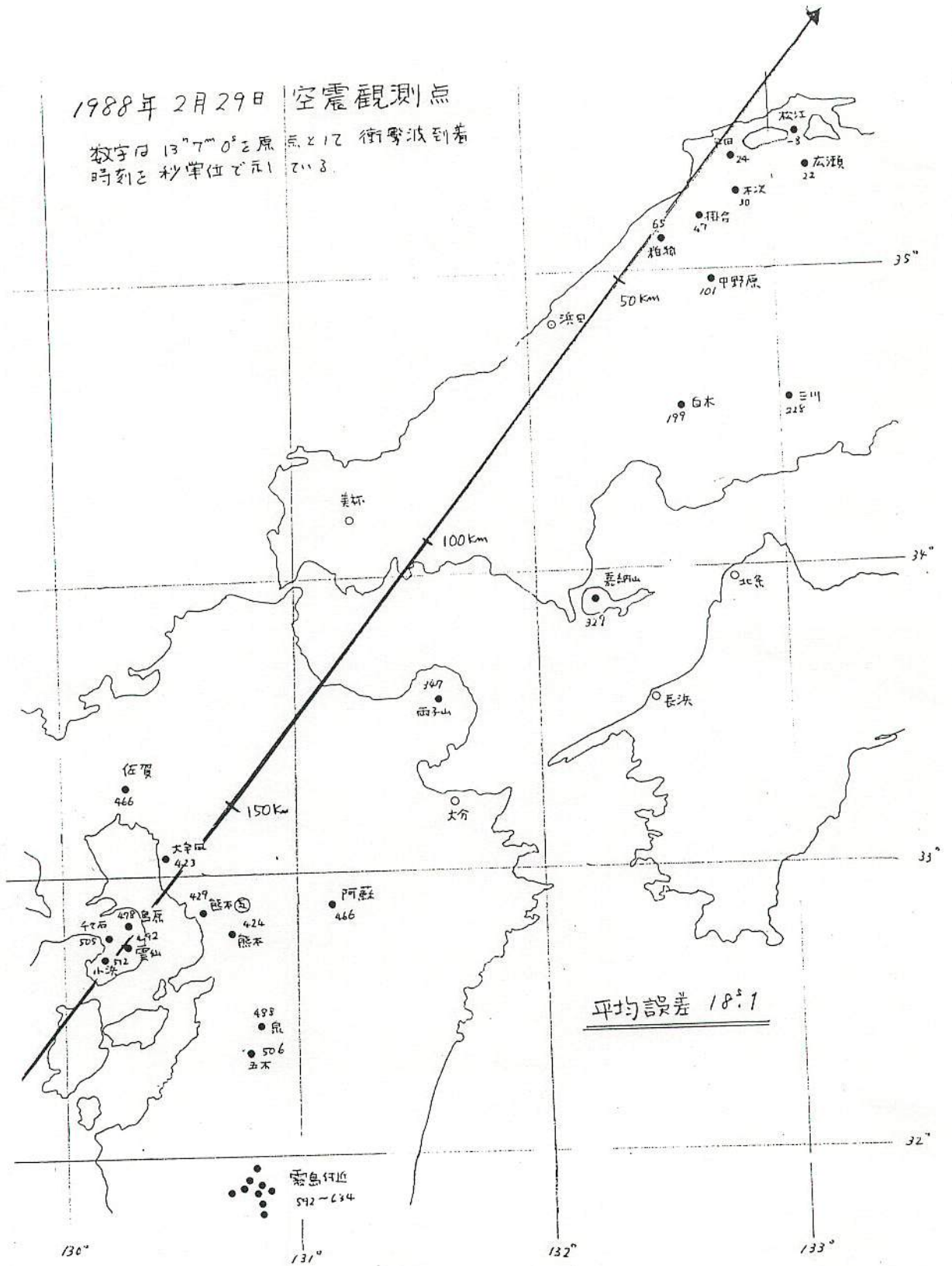
131

GROSSMAN: Have some of these same collection techniques not been used immediately after the fall of a known type of carbonaceous-chondrite? If so, how do the results compare?

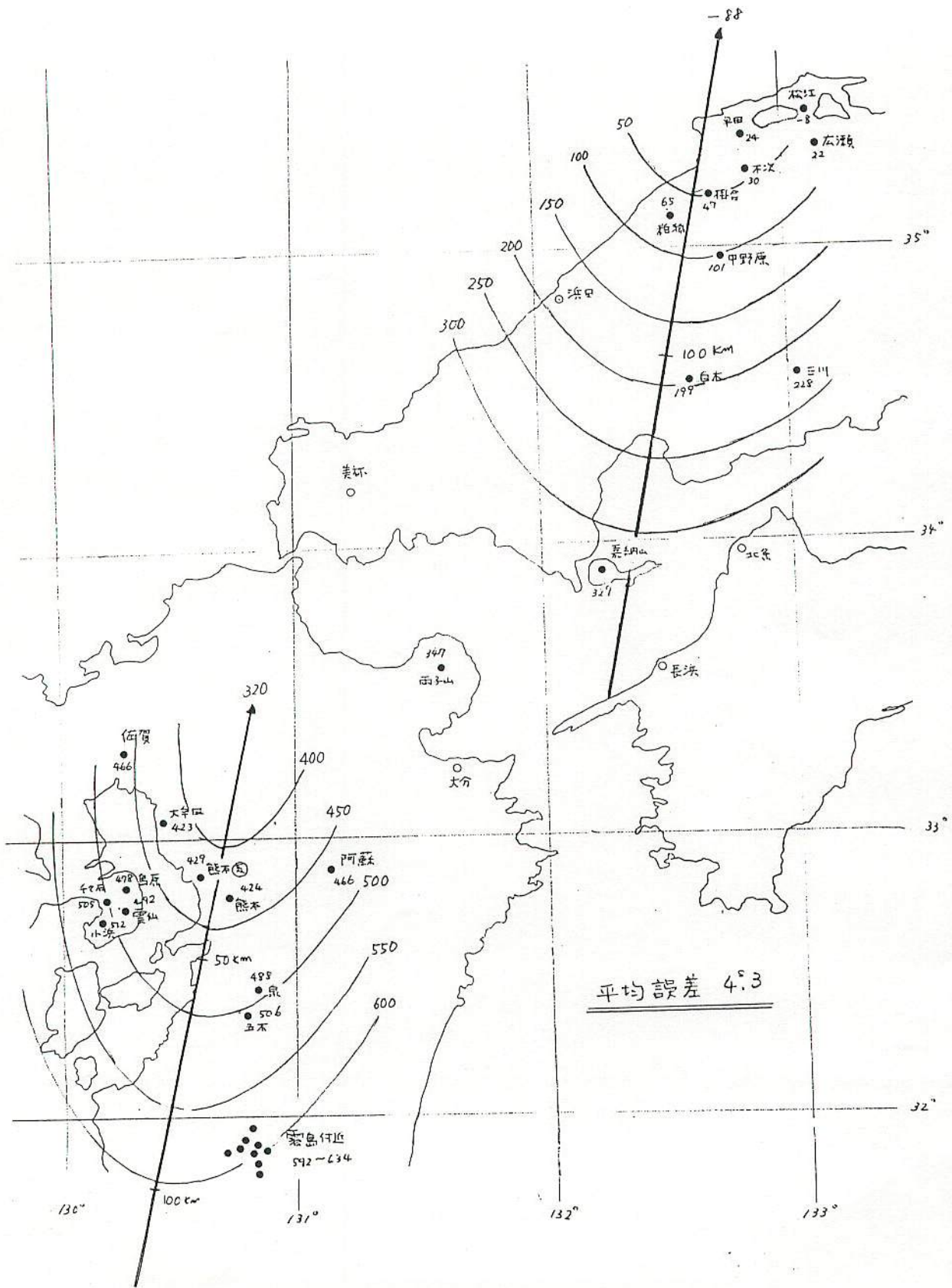
MILLMAN: I am not aware of quantitative values published for the complete chemical composition of individual dust particles. There are cases where the study of the particle was used to define the nature of the meteorite which fell.

1988年2月29日 空震観測点

数字は $13^{\circ}7'0''$ を原点として 衝撃波到着時刻を秒単位で示している。



MSS-047



平均誤差 4.3

SEAN. Bulletin Vol. 12. No 10
 ポーランド、チェコスロバキア発 87年10月4日 02h57m (GMT=UT)
 次の報告は Z. Ceplecha と P. Spurny による。田口泰雄試訳

ゆっくりと移動する火球がヨーロッパネットのカメラで撮影された。撮影したカメラはチェコスロバキアの ~~チェコ~~ 地方のカメラ4台である。火球の最大絶対等級は -1.2 等である。径路上の消滅点から最も近いカメラとの距離は 70 km である。

火球は発光部分の径路が 11.7 km、発光時間は 9.5 秒、発光停止高度は 19.0 km である。最近ヨーロッパネットは多点写真観測を満月期にも拡張した。この火球は満月期にえられた第一号の火球である。

最大光輝部の光度曲線はきわめてなだらかであり、光度変化は絶対等級で -1.0 ~ -1.1 等の間にある。(高度 4.5 ~ 2.5 km) 最大光輝部分はこの光輝部の終わりに生じている。興味深い事実は、この最大光輝部は、減速が最大の部分とぴったりと一致していることである。火球は高度 21.3 km 以下で急激に減光している。火球径路の発光部分の測定値は 97 切断点となっている。切断点の1つの値で abration 係数は $0.0098 \pm 0.0008 \text{ sec}^2/\text{km}^2$ である。1つの切断点による距離測定の標準偏差は 90 m である。(これは観測点からの距離による誤差を含んでいる。) 97の切断点の最大の誤差は標準偏差の 2.3 倍である。

次の結果が最終的な数値に非常に近いと考えられる。これらのデータは、J. Bockek, によって測定され、Z. Ceplecha と P. Spurny によって計算されたものでほぼ信頼できると考えられるからである。

	発光部	減速時 (光輝部)	発光消滅部
速度 (Km/s)	15.82	9.12	31.1 3.1
高度 (Km)	71.1	25.09	19.0
北緯	51.197°	50.470°	50.373
東経	16.657°	17.280°	17.359°
加速度 (Km/s ²)	-0.02	-3.49	-1.19
絶対等級	-3.8	-11.87	-1.4
測光質量 (kg)	500	280	* 75
天頂距離	63.12		64.04
	隕石タイプ I		
(1950.0分点)	観測値	地心	日心
幅射点 α	305.60°	297.02°	
δ	57.30°	46.38°	
λ			285.80°
β			17.142°
初速 (Km/s)	15.834	11.421	35.219
軌道要素 (1950.0分点)			
a 1.638 AU	1.6638	Q 遠日点 2.344 AU	e 0.4090
ω 199.74°	q 0.9834	Ω 189.8322°	
i 17.230°			

予想される隕石のタイプは通常のコンドライトであることがほぼ確実である。(鉄は含まない) 分裂して、落下したのはほぼ確実である。破片の質量の値は 40 ~ 100 kg (75 kg が最も妥当であろう。) 予想される落下範囲 (75 kg 隕石体) は $50.2542^\circ \text{ N} \pm 0.0091^\circ$, $17.4705^\circ \text{ E} \pm 0.0101^\circ$

予想される落下範囲 (10 kg のオーダーの隕石体) 50.2451° N 17.4604° E , 50.2633° N 17.4806° E , 50.2808° N 17.4110° E , 50.297° N

1 kg 以下の破片は消滅点と 1 kg の上限との中間にあろう。最大落下物の探索範囲はチェ

1 kg α - η - 50.2808° N 17.4110° E 50.3997° N 17.4603° E
 50.3333° N 17.3337° E 50.3647° N 17.425° E

コスロバキア領で、探査活動はチェコスロバキア科学アカデミー、天文部が行っている。
 他の大部分の破片はほとんどポーランド領である。(図1、2、3、参照)
 情報連絡者 Z.Ceplecha, P.Spurny
 Ondrejov天文台、25165
 Ondrejov チェコスロバキア

~~1987年10月31日受理~~

(訳者注)

落下地点付近は中生代の堆積岩類, 古生代後半の火成岩類の分布があり, 鉱床も多い。

隕石タイプIとよく似た basalt (玄武岩), カラン岩類, 超塩基性岩が多く, また氷河性モレーンとの区別が難しいので, 隕石発見の可能性は低いと思われる。

参考文献

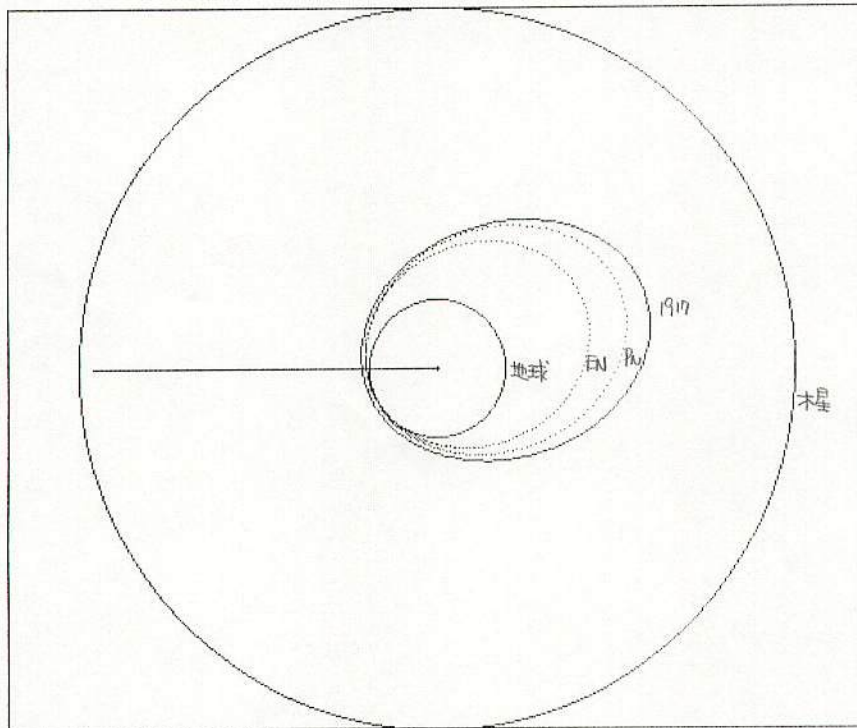
- (1) 世界の地質 岩波、地球科学シリーズ15
- (2) 世界地図帳(高校版) 三省堂
- (3) 地殻・岩石・鉱物, 牛来正夫, 共立出版
- (4) 高校白地図 三省堂

MSS 47
from 天塚

shower	LMD	e	q	i	Omega	Node.	R.A.	Dec.	dist(A.U.)	Vg
(1917)	187.9	0.505	1.06	24.0	194.2	187.9	289.9	57.3	0.74E-01	14.6

DSH<0.2 or D'<0.1

NO.	e	q	i	Omega	Node.	R.A.	Dec.	DSH	D'
			1950.0	1950.0	1950.0	1950.0	1950.0		
(1917)	0.505	1.064	23.99	194.15	187.85				
PN39038B	0.490	0.992	19.20	192.90	192.00	290.00	46.70	0.1166	0.0483
EN041087	0.409	0.983	17.23	199.74	189.83	297.02	46.38	0.1823	0.1199



隕石学入門 (I)

長沢 工

ここ20年ほどの間に隕石についての研究が非常に進み、隕石に対する考え方も大きく変化した。その結果、隕石は、太陽系の進化の歴史を探る鍵を握っているとされるようになった。

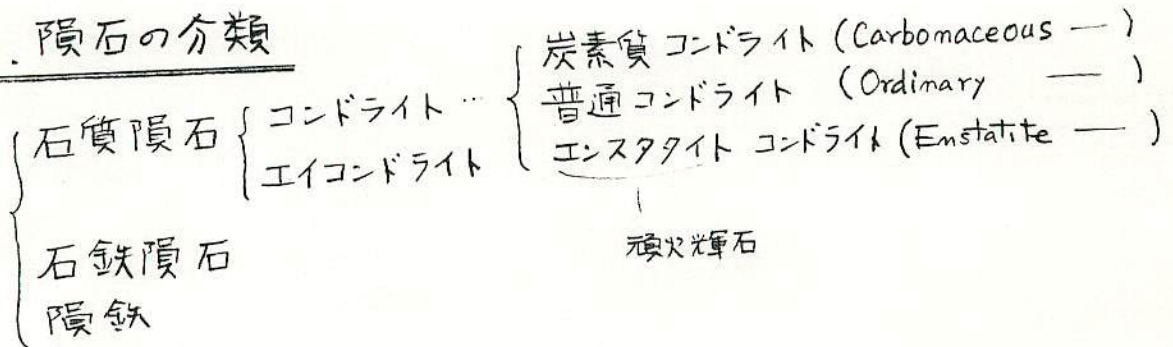
。なぜそう考えられるのか。

。どのようにして隕石から太陽系の歴史がわかるのか。

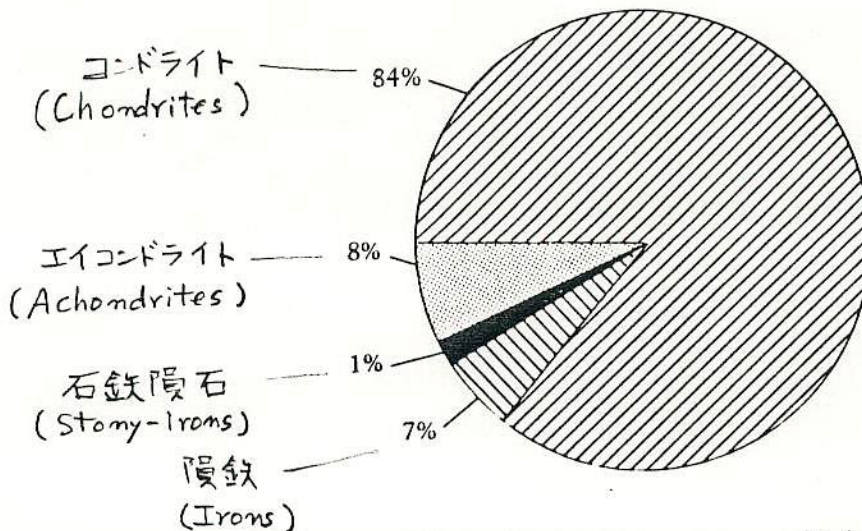
そういったことの一端について述べる

南極大陸における多数の隕石の発見で、現在、日本は世界でもっと多くの隕石を保有する国となった。隕石についての理解を深め、隕石の研究の意味を知ることは、日本人にとって重要なことになってきている。

1. 隕石の種類



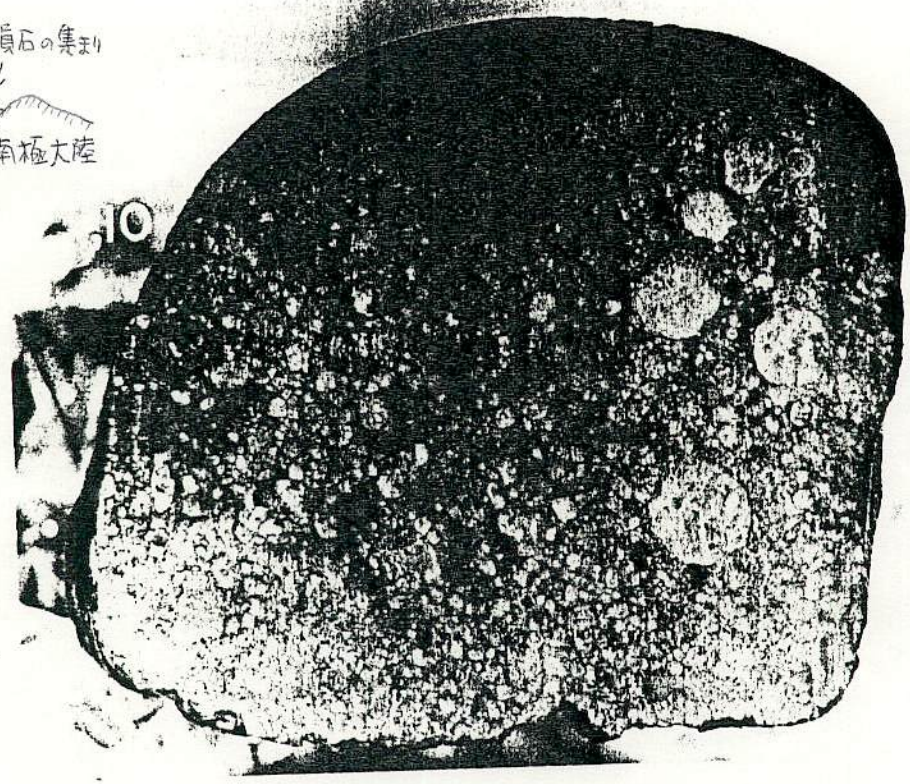
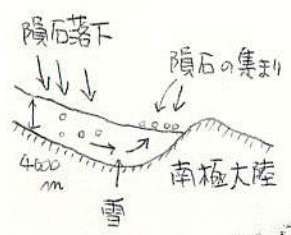
落下の割合 (落下隕石中の割合)



発見された割合とは大きく異なる (発見されたものは隕鉄の割合が特に多い)

落下隕石 (falls) — 国分寺隕石, ロスト・シティ隕石 etc.
 発見隕石 (finds) — 南極隕石群, ホバウズ隕鉄 etc.

コンドライト... コンドリュール (Chondrule) と呼ばれる球状の組織が含まれるものという。



1977年に南極で発見されたコンドライト

コンドリュールは 数cm ~ 数mmの大きさで 珪酸塩 鉱物 (Silicates) が主体であるが、このような構造のものは地上の岩石には全く存在しない。したがって、コンドリュールは宇宙空間の特殊な条件下で生成したと考えられる。またあとで述べるさまざまな条件から、コンドリュールが固結したのは、太陽系創成のごく初期のことと推定されている。

一方、コンドリュールの間を埋めている物質 (Matrix minerals) は 微細な珪酸塩 鉱物 { オlivine (Olivine), 輝石 (Pyroxene), 長石 (Feldspar) } や Troilite (Troilite, FeS), 鉄, ニッケル 等である。

こうした 鉱物の状態を詳細に調べると、そこにはさまざまな過去の歴史の痕跡がある。たとえば

- 高熱を受けた
 - 高压にさらされた
 - 水による変成を受けた
 - 衝突によるショックを受けた
- } 熱, 圧力による変成鉱物の存在
- } 粘土 鉱物など含水 鉱物の存在

などである。

結局 我々が隕石と手にするまでには、ほぼ次のステップを経由した可能性がある

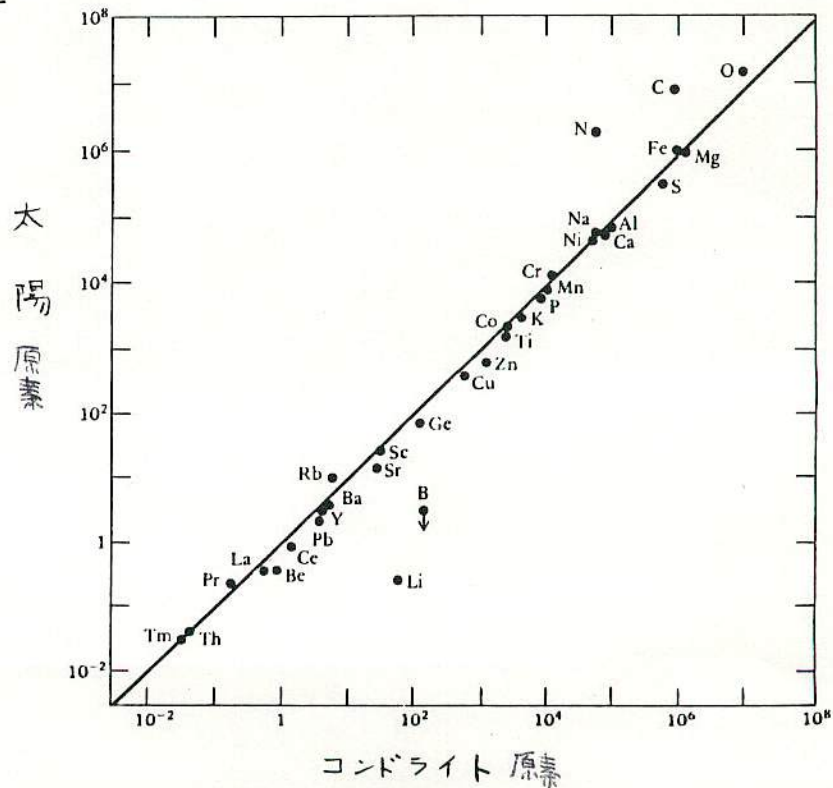
1. 原始太陽系星雲の存在
2. コンドリュール や マトリックス 鉱物の生成
3. 凝集 → 原始母天体の形成
4. 熱, 圧力による 鉱物の 変成
5. 母天体からの 放出
6. 太陽系空間での 放浪
7. 地球への 落下
8. 風化
9. 発見, 回収

必ずしもすべてのステップを通る必要はない。

こうした状況を考えれば、コンドライトは特に重要である。それは、コンドライトが太陽系の過去をもつともよく保存し、記憶しているからである

2. コンドライイト

コンドライトと太陽の組成の比較
 (Si 100万原子に
 対する原子数比)
 Si 100万を1とする。



4.

この図を見ることによって、コンドライトは、原始太陽系の成分をほとんどそのまま保有し、あまり大きな変化を受けていないことがわかる。地上のどんな岩石をとっても、このような一致は見られず、ていでんばらばらの図が描ける。これは地球が形成されてから、その大部分が融けて、重い物質は地球中心部へ沈み(コア)、軽い物質は上層に集まり(マントル、地殻)といわゆる分化(Differentiation)が起ったからである。

分化 → 一樣であった物質が成分の異なる物質に分離すること

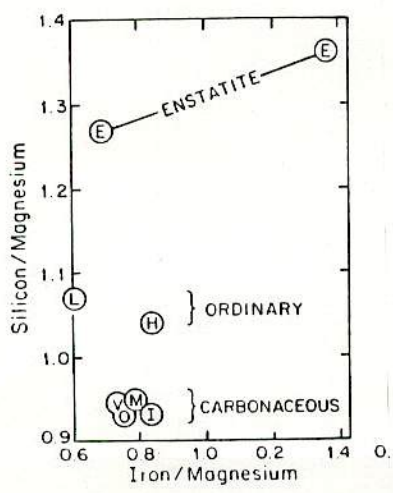
- 例 牛乳 → ミルクとクリームに分化
- 原酒 → ウイスキー、ブランディなどの蒸留

一般に大きな天体が形成されると、重力エネルギーや含まれている物質の自然放射エネルギーなどによって温度が上昇し内部が融ける。その結果、分化が起って成分が分離し、より以前の情報が失われる。

この点でコンドライト(特に炭素質コンドライト)は融解の経験がなく、原始太陽系の情報を保持していると思われる。

炭素質コンドライト

特に炭素を多量に含むわけではなく、この名称は誤解を与えやすい。ただ、有機物を含むことがあるのでこの名がある。コンドライトを分類するわかりやすい方法は Mg と Si の原子数の比をとることである



エンスタタイト コンドライト

普通コンドライト

炭素質コンドライト

I.M.O.V は炭素質コンドライトの細分類。

炭素質コンドライトの特徴

1990-4-15

54MSS MSS-054

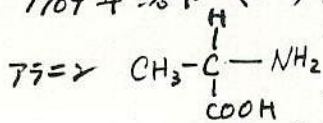
他種の隕石と比べて著しい特色あり

① 有機炭素化合物をもつ (ex. アミノ酸)

生物による合成ではない

1864年落下 オルグイエ隕石 ... 1950年代に分析
フランス 微量のアミノ酸, 炭化水素が多種検出され
 地上の汚染が主 (L-アラニンが多い)

1969年落下 マーチソン隕石 ... 汚染に十分注意して分析
オーストラリア (アラニン, L, Dが等量, ¹³C/¹²C比大)

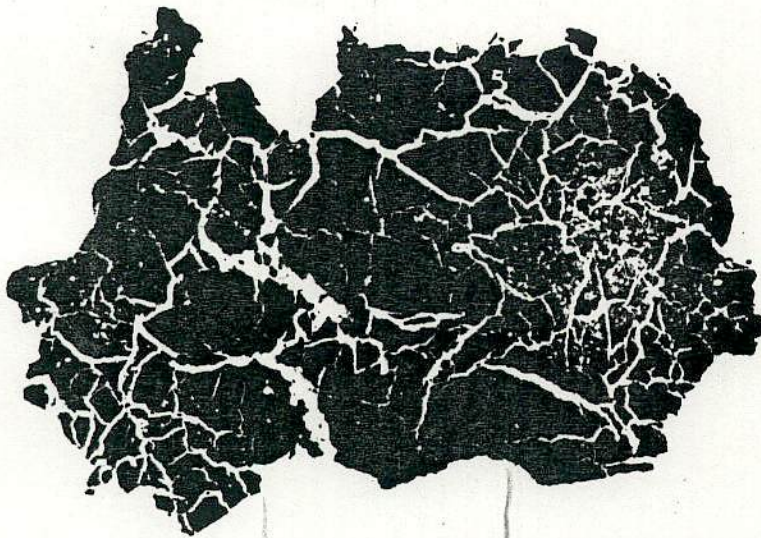


隕石中であつたと確認された

② かなりの量の水を含む (ex. $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)

$n = 1 \sim 7$ Epsom Salt (?)

結晶水を含む鉱物が脈状に入る



オルグイエ隕石
 (炭素質コンドライト)
 の顕微鏡写真

白い部分が炭酸塩
 および硫酸塩

この状態は 岩の割れ目に水溶液が流れこみ、あとで水分が蒸発した形である。これはこの隕石が単独に存在したのではなく、ある程度の大きさをもつ母惑星上にあつたことも意味する。また同時に、このような状態になってから大きく加熱されたことがないことも示す。

{ 成分が太陽組成 (Cosmic abundance) とほとんど一致していること
 生成以来ほとんど変化を受けていないこと

によって、炭素質コンドライトは、もつとも「始原的」な隕石と見なされている。その構成から、生成時の環境が推測できる。

2-1 コンドライトの年令

これらコンドライトは太陽系創生とほとんど同時に形成された。
理由：放射性同位元素による年代測定

年代測定に利用される主要元素

	半減期
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$	5730 (年)
$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$	74 万
$^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$	1700 万
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	7 億 400 万
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	13 億
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	45 億
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	140 億
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	490 億

原理は簡単だが現実の測定にはいろいろな問題がある

1955年に Claire Patterson が鉛の同位元素を使ってコンドライトの年令をはじめて 45 億年と推定。その後たくさん人の測定がなされ、現在は平均して 45.5 億年の値となっている。

これは太陽系が誕生したはじめの / 億年以内に現在の状態のコンドライトができたことを意味する。特にコンドリュールは最初の 2~3 百万年に形成されたと考えられる。したがって、コンドライトの研究は太陽系創生期の環境条件を知る上で非常に重要である。

コンドリュールの成因

コンドライト中のコンドリュールの成因については、今までにありとあらゆる説が唱えられた

- 火山から噴出、◦ 火成岩が溶くおこった、◦ 高温ガスが冷却
- 衝突でとけた岩石、◦ 太陽に落下中にとけた物質 etc.

1860年代 C. Sorby が 顕微鏡観察から

MSS-054

} 与けた状態から結晶した コンドライトより前にできた	}	珪酸塩

と結論して以来、前記のさよごまる説が出され 与けた岩石を冷やして
コンドライトを作る実験 鉱物の研究や同位元素の調査なども行なわれ
たが、コンドライトの成因についての定説はまだない。

2-2 CAI (Calc-aluminous inclusion)

炭素質コンドライトの基質(matrix)部分には、Ca, Al, Tiなどの
酸化物、珪酸塩などからなる集合体が含まれ、CAIと呼ばれる

1968年以後、このCAIの研究が重視されるようになった。

理由 ① 高温でのみ形成される成分で(次ページ参照)太陽成分のガスから
最初に晶出したもの。...その後与けていない。

② 酸素その他のアイソトープ組成が異常で、太陽系内の通常の過程
では説明できない

①は、最初に生じたこれらのCAIが太陽系ガス雲にそのまゝ残っていたの
ではないことを示す

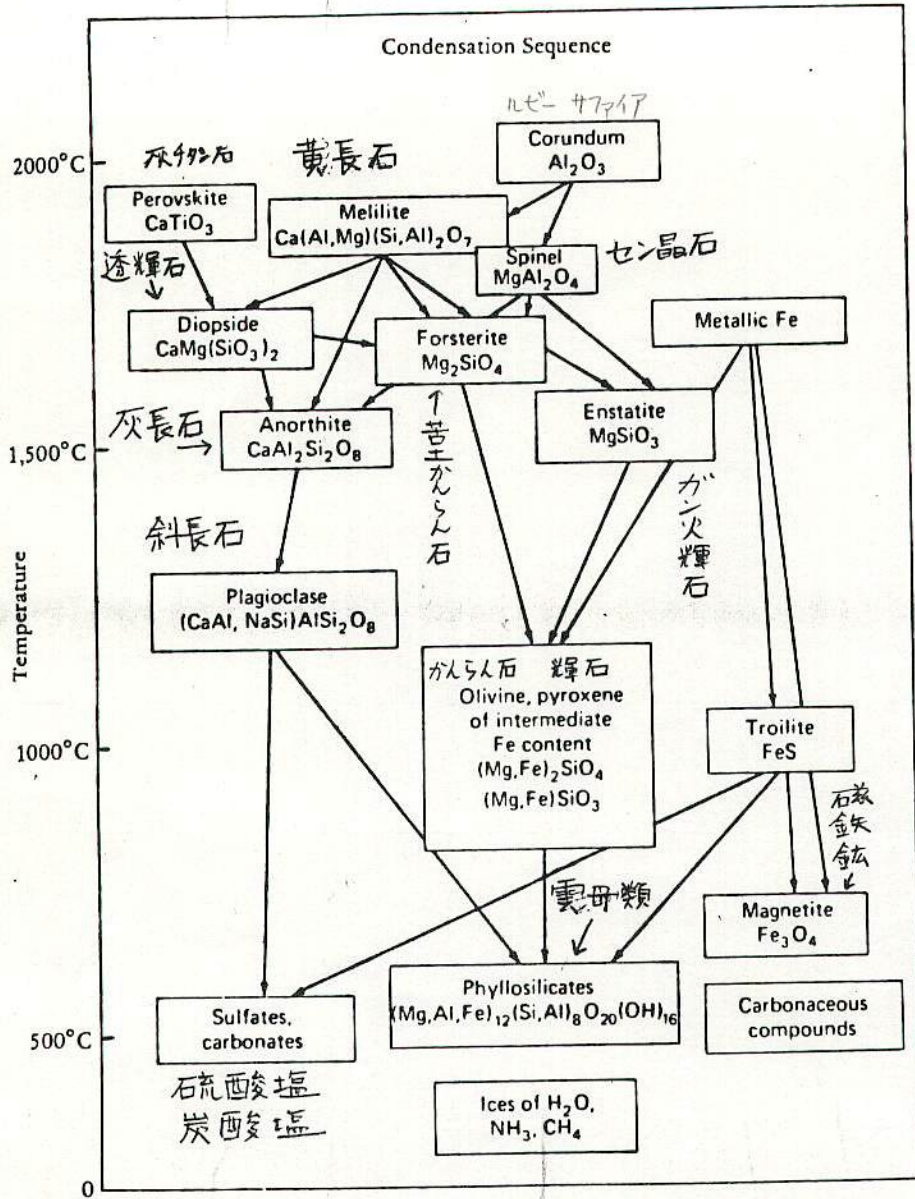
}	ある温度でCAIがガス雲から分離した(ヨとヨって固固と反転したるなど)
	コンドライト成分が熱されて一部が気化し、あとはCAIを残した

の2通りの考え方があ

②は $^{18}O/^{16}O$, $^{17}O/^{16}O$ の存在比に関して、地球上のもの
と本質的な差がある (Mass-Fractionationのちがひ)

炭素質コンドライトでは ^{16}O が大量に補給される環境にあった
ことが推定される。→ 太陽系内のプロセスでは生じない → 超新星
星からの補給?

いづれにしても CAIについてこれらの事実が見出されたことは、太陽系初期
の過程を考える上で大きな意味をもつ。

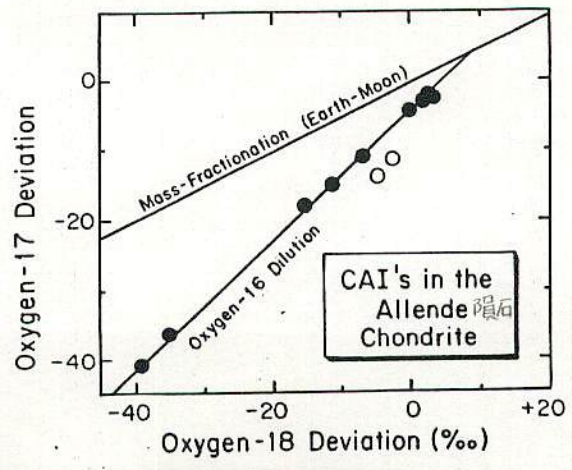


CAI 成分

コンドリュール成分

基質成分

太陽組成のガスを冷却した場合の物質の晶出順序



MSS Jul. 15, 1990

長沢 エ

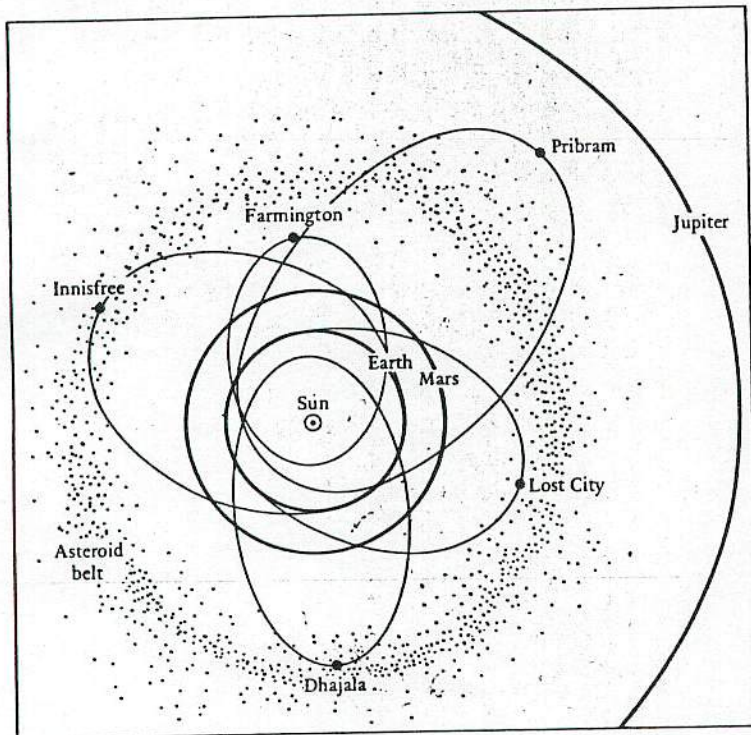
3 コンドライトの母天体

- 太陽系とほぼ同時に形成
- 溶けたコシがない
- あるていどの大ききの母天体上にあった (水による変成)

このような特徴がある コンドライトの 母天体はどんなものだろうか

3-1 軌道からの推測

軌道のわかっている コンドライトの 軌道図



Pribram チェコ } 写真
 Lost City アメリカ }
 Innisfree カナダ }

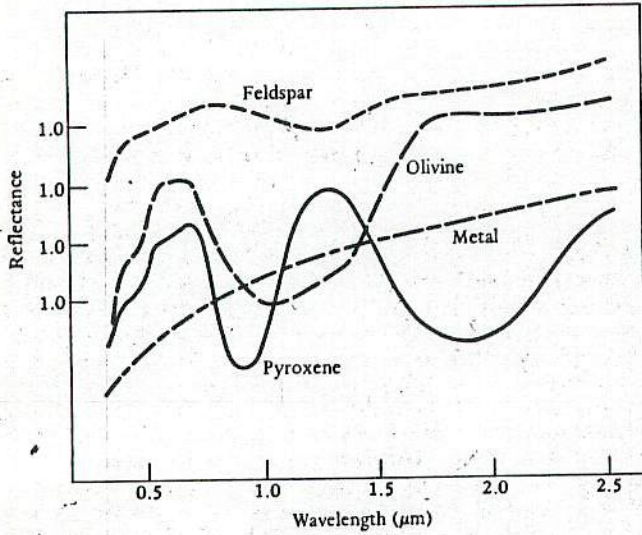
Farmington アメリカ } 眼視
 Dhajala インド }

これらの軌道の遠日点はいずれも小惑星帯付近にある。この事実はコンドライトが小惑星起源、あるいは小惑星と同じ母天体であったことを思わせる。一方、地球軌道に接近するアポロ-アモール型小惑星が多数発見されていることも、この考え方を支持する

- アモール型 ... 火星軌道より内側に達する
- アポロ型 ... 地球 "
- アテン型 ... 軌道長半径 < 1A.U.

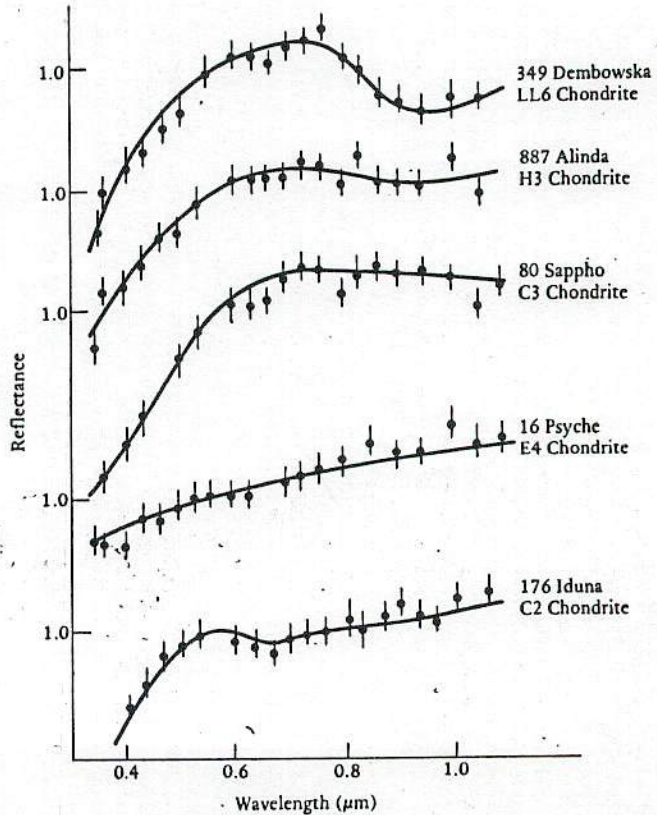
小惑星、隕石の表面で反射した太陽光線の分光観測をすると、その反射スペクトルは太陽光と全く同じではない。物質表面の鉱物組成によって特徴のある吸収帯が生じる。これは赤外域で顕著である。

主要鉱物の赤外吸収 (粉末にて測定)



Feldspar: 長石類
 $Na[AlSi_3O_8] - Ca[Al_2Si_2O_8]$
 Olivine: かんらん石類
 $(Mg, Fe)_2SiO_4$
 Pyroxene: 輝石類
 $(Ca, Mg, Fe)SiO_3$
 Metal: 金属

コンドライトの反射スペクトルと、小惑星の反射スペクトルを比較すると、右の図のように、その形が一致するものがある。これは、少なくとも、その表面を構成する物質が類似していることを物語る。



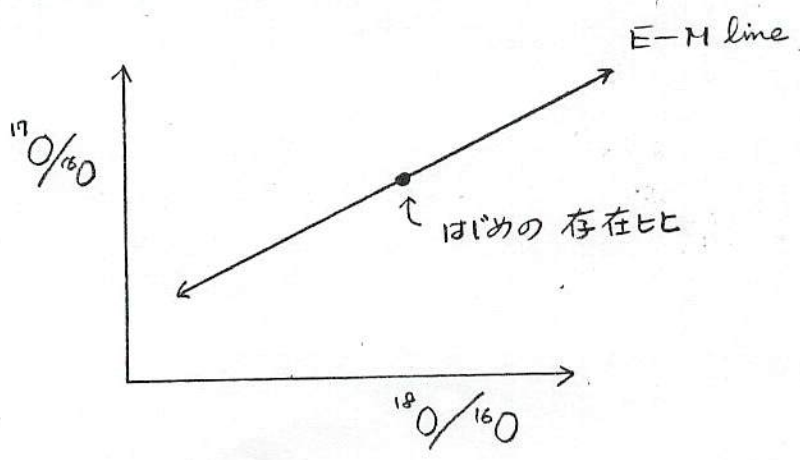
小惑星の型	反射率(%)	隕石との対比	スペクトルの特徴
E	> 23	} E-コンドライト	平坦で特徴なし
R	> 23		
S	7~23	普通コンドライト	0.9~1.0μmに吸収帯
C	2~7	} 炭素質コンドライト	青でやや吸収あり
D	2~7		

3-3 母天体の数

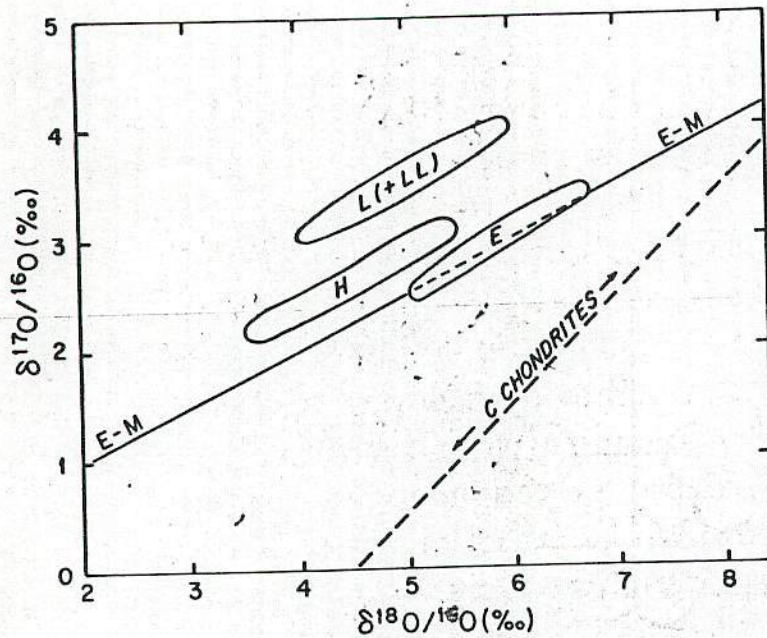
地上に落下したコンドライトは、かつてひとつの母天体に含まれていたのだろうか、それとも、いくつもの母天体があったのだろうか。これを考えるとき、酸素の同位体比が手がかりになる

酸素には ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の三種の同位体がある、ここでそれらの存在比 $^{17}O/^{16}O$, $^{18}O/^{16}O$ の2つの値を考えよう

たとえば、はじめに地球ができたとき、地球全体の $^{17}O/^{16}O$, $^{18}O/^{16}O$ は、それぞれある一定の値だったに違いない。その後、11311の作用を受けて、物質が分化した。分化の過程で $^{18}O/^{16}O$ の変化は $^{17}O/^{16}O$ の変化の2倍になる。したがって、地球上のあらゆる物質中の $^{18}O/^{16}O$, $^{17}O/^{16}O$ の値をプロットすると、それは下の図のように傾き $1/2$ の直線上にある。



これを逆に考える。もし隕石中の酸素の同位体比の直線が一致しなかつたらそれははじめから別の天体にあったことを意味する。現実には下のような結果が得られている。



E-M: 地球-月直線

E: Eコンドライト

H: High-Iron (鉄が多い)
コンドライト

L: Low-Iron (鉄の少ない)
コンドライト

これから、少なくとも H, L(+LL), E のコンドライトはそれぞれ別の母天体にあったことが推定できる。C (炭素質) コンドライトの直線を生じるためには最低 2 つの母天体が必要であり、結局、少なくとも 5 個のコンドライト母天体が推定される。

その他、化学的、鉱物学的研究から、コンドライトだけでなく、E コンドライト、石鉄隕石、隕鉄などの母天体も含めて、最低でも 20、もっとも多い見積りで 70 ぐらいの母天体が存在したのではないかと考えられている。

この方面はさらに研究が必要な分野であり、たくさん発見されている南極隕石などの資料によって、多くのデータの蓄積が望まれる。

MSS Oct. 7, 1990

長沢エ

3-4 母天体の大きさ

コンドライト隕石が存在した深さを考える → 母天体の最小半径
 隕石中の鉱物が生成した温度, 圧力, 変成後の冷却速度
 が手がかりになる

初期の説

鉱物の多形がヒント

例 石墨 ←————→ ダイヤモンド
 6万気圧
 1000°C

かんらん石 ←————→ リングウッドイト
 (オリビン) 10万気圧

$[Ca, Fe, Mg]_2Si_2O_6$ 輝石 ←————→ マヨライト
 (ピロキシン) >10万気圧

SiO_2 リンケイト ←————→ クリスタル石 etc (コーズ石
 (ヒダマイト) 3000気圧 (スチヨブ石)
 隕石孔

低圧鉱物 ←——|——→ 高圧鉱物

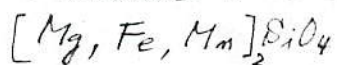
存在する鉱物によって生成時の温度, 圧力を知ることはできると
 考えられた。しかし、高圧鉱物は衝突によるショックで生じたもので
 あることがわかってきた

証拠 { 鉱物に割れ目があるもの → 高圧鉱物と含まれる
 " " ないもの → " 含まれない

現在の考え方

(A) 温度, 圧力... 鉱物固溶体に含まれる成分の違いを利用する

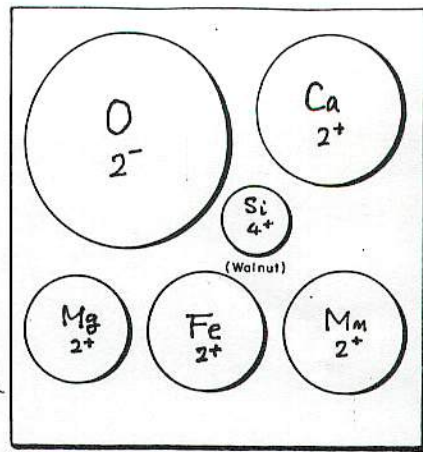
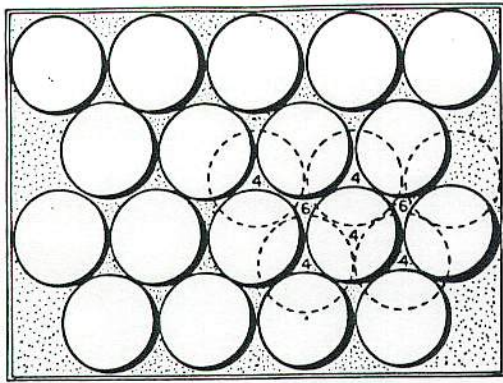
◎ かんらん石中の Ca の割合 ... 生成時の温度の指標



◎ 輝石中の Mg, Fe が Na, Al と置換している割合 ... 圧力の指標

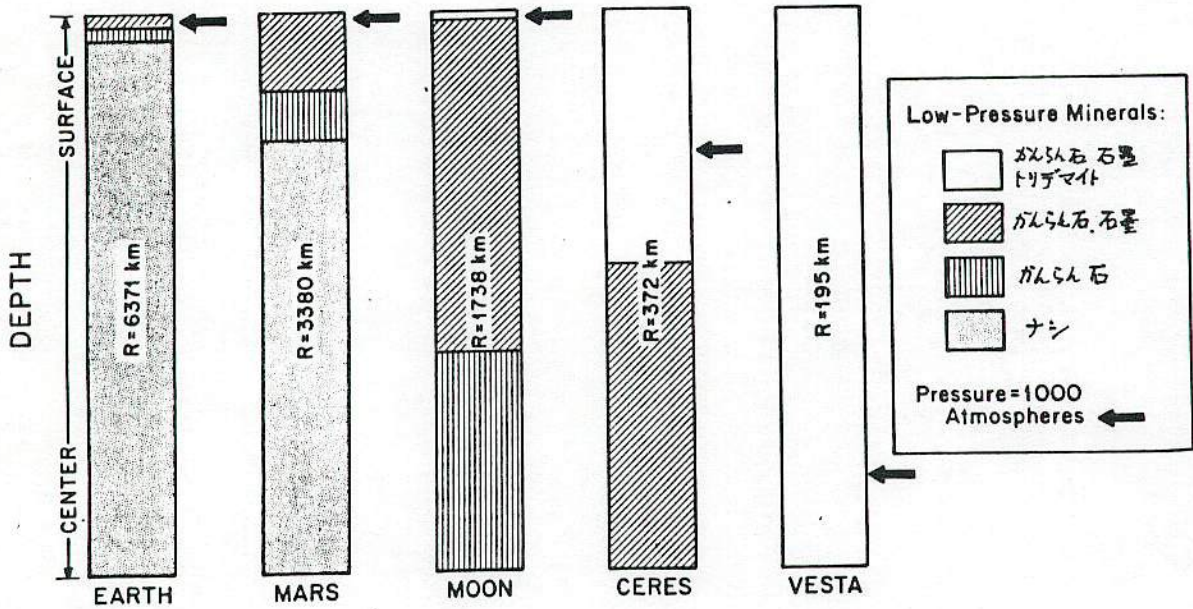
これによると、普通コンドライト, エスタイトコンドライトはほとんど
 が 1000 気圧以下の低圧で生成している ~ $r \lesssim 200 \text{ km}$

かんらん石の構造



原子の大きさと帯電荷

惑星内部の圧力と鉱物 ↓



(B) 変成鉱物の冷却速度の測定

母天体中のより深いところにあつた方が冷えにくい
浅いところでは早く冷える

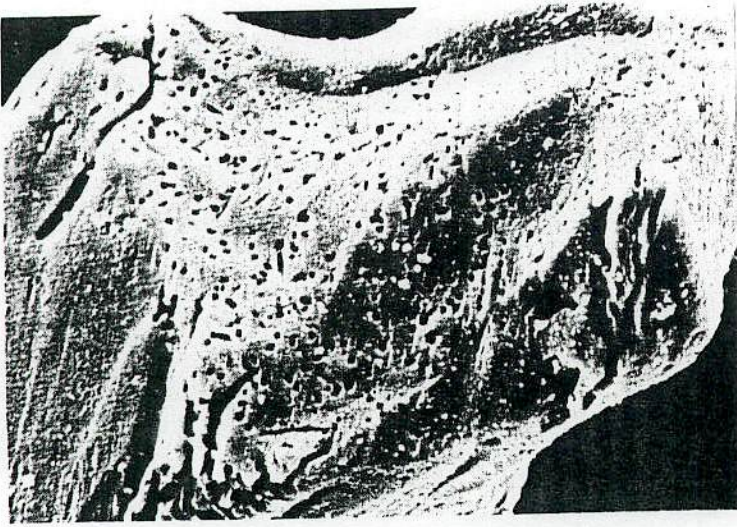
- ◎ 鉄かん石のウドマン・スラッテン構造の変化を見る (後述)
- ◎ プルトニウム-244の フュージョン・トラックを見る

^{244}Pu は短寿命の放射性元素で、太陽系が創生し、隕石の母天体が形成された当時は存在したが現在は存在しない。
電荷、大きさの関係で、通常の鉱物中には入りこめず、
リン酸塩鉱物中にだけ取りこまれる。自然崩壊によって
 α 線を出し、自分自身および周辺の鉱物に孔をあける
(その孔を フュージョン・トラックという)。

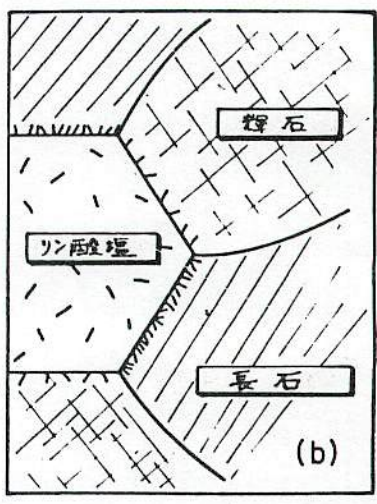
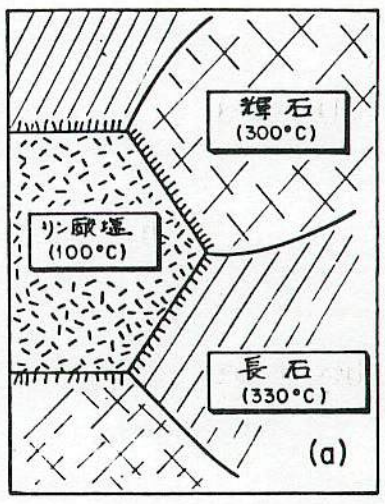
孔とあけられた鉱物も、その温度が高ければ原子が移動してその孔を自然にふさいでしまう。しかし、温度が低くなると、その孔はそのまゝ残ってしまう。孔のふさがる温度は鉱物によって異なる 長石 → 輝石 → リン酸塩鉱物 の順に低くなる。

結局 急速に冷えたとき → どの鉱物も同様なフィッション・トラック
 ゆっくり冷えたとき → 孔のふさがる温度の低いものほど孔の数は少くなる

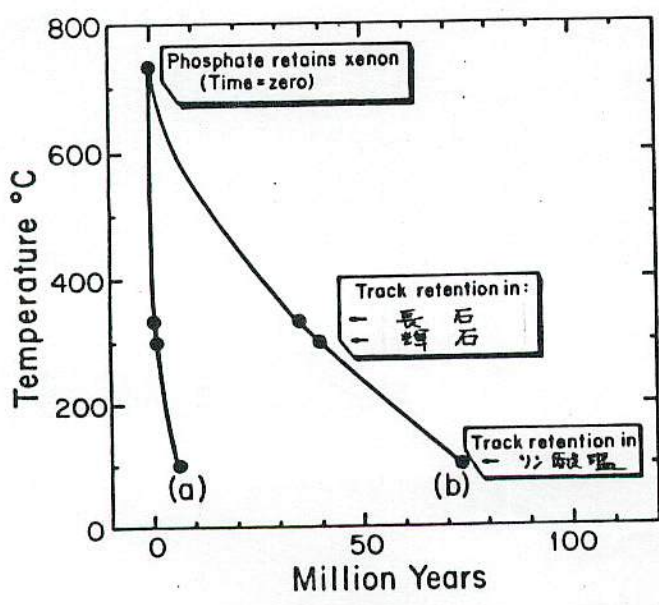
したがって、鉱物ごとにフィッション・トラックの数を数えることで冷却速度の推定ができる



LL-コンドライトの輝石中のフィッション・トラック (電子顕微鏡写真)



フィッション・トラックのつき方 (模式図)



実際にこの方法で冷却速度を決めるのはかなり面倒である
求められた冷却速度は 大部分の普通コンドライトで

$$1^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C} / 100 \text{ 万年}$$

程度であった。

以上のようなデータから推論される コンドライト母天体の半径

普通コンドライトで	720 ~ 190 km	(cf. セレス: 370 km ベスタ: 195 km)
炭素質コンドライトで	190 ~ 380 km	

このように、コンドライトの母天体は 四大小惑星クラスのかなり大きなものとする考え方...「大母天体説」... が広がった。

これに対して ゴールドシュタインらのグループは異議を唱えた。それまでに決められた冷却速度は ゆっくりすぎる。実際はその100倍くらい速く冷却したというのが彼等の主張である (鉄いん隕石の研究に基づく)。これに従って考えると、コンドライト母天体の半径は

大きく見積っても上記の値の $1/10$ になる。せいぜい 数10 km というごく小さい母天体ということになる...「小母天体説」

これらの議論は結着がっていない。

3-5 母天体の構造

隕石の多くは生成初期 (数百万年間) に 変成する程度のかんりの熱を受け、その後急速に冷えたことがわかっている。この熱源が何であるかが 永いこと問題になっている。熱源は、母天体内部にあるのか (たとえば放射性同位元素)、あるいは外部にあるのか (たとえば衝突、あるいは太陽風) で母天体の構造は大きくちがってくる。これには、大母天体か小母天体かということも大きくかわってくる。これを究明するのは今後のことである。

(全体的には 小母天体説で ^{26}Al による 内部熱源説が有利)

MSS Jan. 15 1991

長沢 エ

4 エイコンドライト

エイコンドライトは、コンドライトに特徴的なコンドリュールを含まない石質隕石である。別の言い方をすれば、エイコンドライトは火成活動によって生じた隕石である。母天体の中にあつて、火成活動により融け、分化した歴史をもつというともできる。したがってエイコンドライトの研究は、その母天体の活動の歴史の研究でもある。

4-1 エイコンドライトの種類

a) ユークライト類

ユークライト (eurite) ... もっとも普通のエイコンドライト
 ダイオジェナイト (diogenite)
 ハワードイト (howardite)

b) シャーゴットイト (SNC) 類

シャーゴットイト (shergottite) 1865年 インドに落下 (Shergotty)
 ナークライト (nakhilite) エジプト
 チャシナイト (chassignite) フランス

c) 月からきた隕石 ALHA 81005 1982年 南極大陸で発見

d) ユーレライト (ureilite) 1886年 ロシアに落下 (Novo Urei)

主要なものは上記4つの分類ができる。このそれぞれの類が異なる母天体によるものと推定されている。

o 概略の説明

ユークライト ... 玄武岩に似ている 斜長石の Na が少なく
 輝石の Ca が多い
 還元的で 鉄は 金属鉄か Fe^{2+}

ダイオジェナイト ... ほとんど全部が Ca の少ない 輝石だが
 ごく少量の 斜長石と カらん石



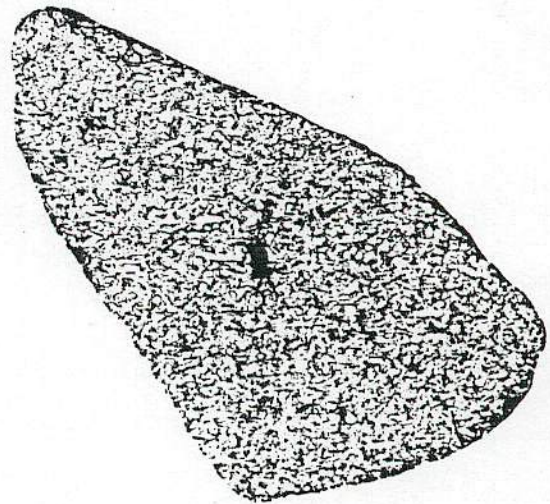
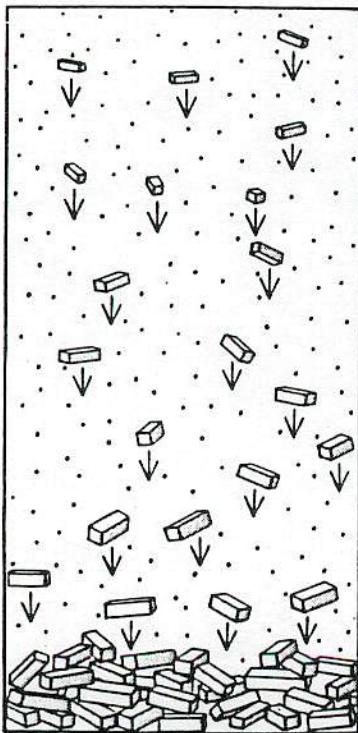
← ユークライトの一種

ALHA76005
(南極大陸)

Allen Hill

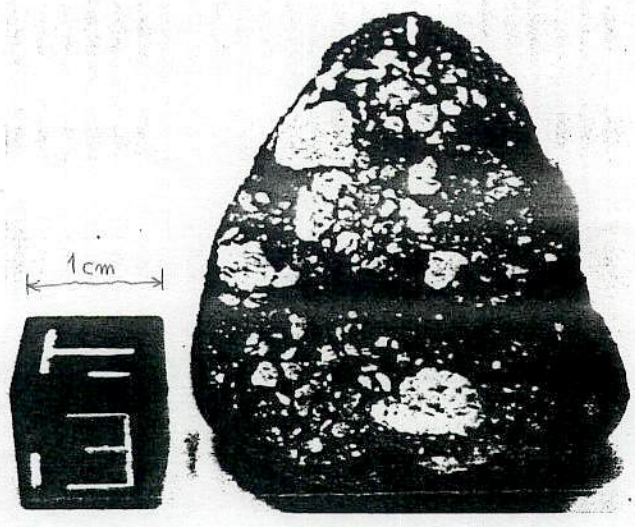
シヤーゴツタイト ... 玄武岩に似ている Caの多い輝石を含む
酸化的で Fe^{3+} も含む 含水鉱物もある
輝石の細長い結晶にオ向性あり ... マグマ貯りの底に
沈積したものである。地上の岩石とよく似ている

ナークライト ... ほとんどすべてが輝石 (Augite)
クァンツナイト ... ガラス石



↑ シヤーゴツタイト

月からの隕石 → アメリカの調査隊が南極で氷を調査中 偶然に見つかり、月から持ち帰ったサンプルと類似していることから詳しく研究。ほとんど全部が斜長石で微量のカムラン石、輝石を含む。



← 月からの隕石
ALHA 81005

ユークライト → 大部分がカムラン石と輝石の一種(ピジオナイト)・その間隙に石炭、ダイヤモンド、鉄ニッケル・トロイイト FeS などがある

4-2 分類の争い

a) 年代決定

ユークライト類 45~46億年 (太陽系創生時の短期間融けた) Rb-Sr法

シャープゴットタイト類 13億年 (ずっと後になって火成活動) Sm-Nd法など

b) 鉱物中の成分比

マグマから結晶するとき、温度によって成分が変わる

Fe Mg	カムラン石	} 高温 Mg多 ↔ Fe多 低温
Fe Mg Ca	輝石	
Na Ca	斜長石	

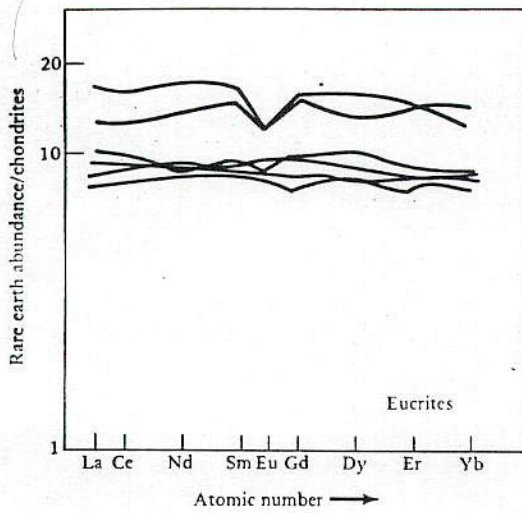
c) 希有元素の存在比

⁵⁷La ~ ⁷¹Lu の 15元素のうち Eu だけは +2価であるため Ca²⁺と容易におきかわり 斜長石に入り込む。その他の元素はマグマの残りに濃縮される。単純な融解では相対比はあまり変わらない。

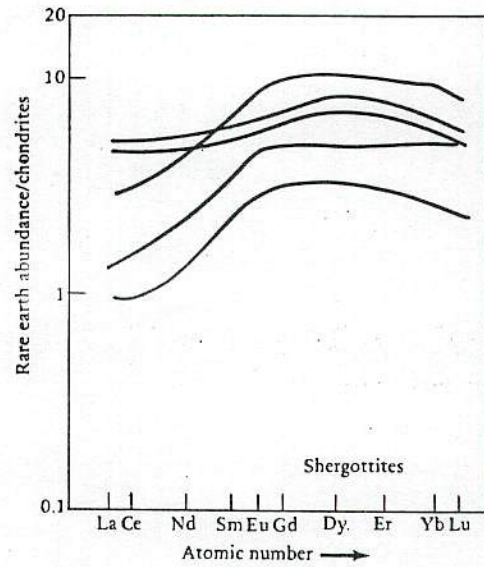
と3で

ユークライト 直線状

コンドライト的な値に對する成分比



シャーゴクタイト

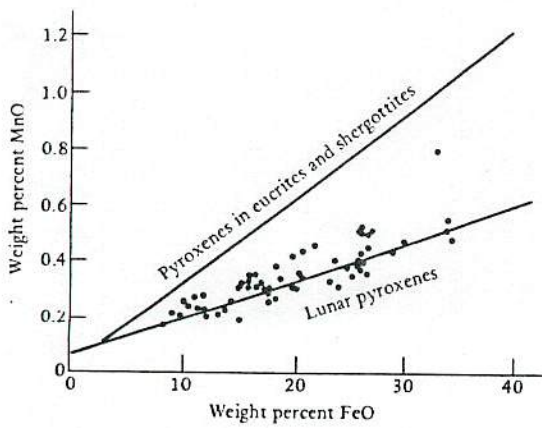


またユークライトはV型を示す。

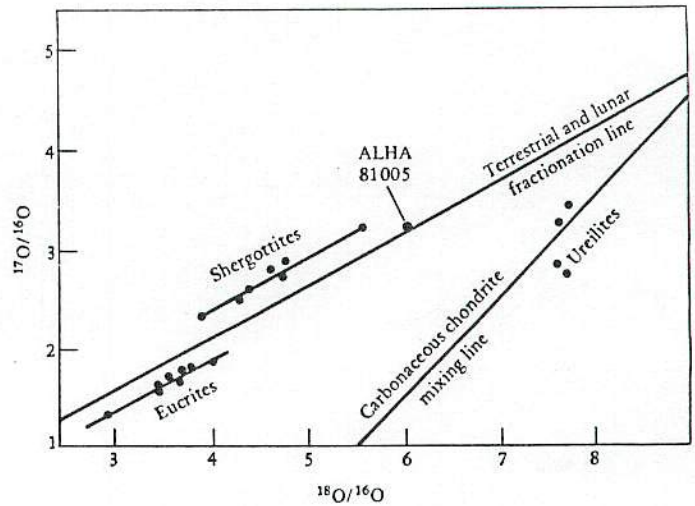
シャーゴクタイト, ユークライトは単純に融解したのではないことを示している

d) ALHA 81005 が月起源とされた理由

- 隕石中の MnO/FeO の比が月のサンプルと一致
- 酸素同位体比が他のエイコンドライトと一致せず 地球-月ライン上にいる



↑ は ALHA 81005 の測定値




これらの理由から 1983年の第14回月惑星会議 (Houston) で ALHA 81005 についての特別セッションが開かれたとき、出席者がほとんど満場一致で月起源説に同意した。

MSS Apr. 14, 1991

長沢 エ

4-3 エイコンドライトの母天体

石炭 { コンドライト  コンドラール
 エイコンドライト 融けてコンドラールがない
 石鉄 { ユークライト 45億年 → 地球より小さい
 シンクロナイト 13 " → 大
 隕鉄 { 月
 ユーレライト 火星

a) ユークライト類の母天体

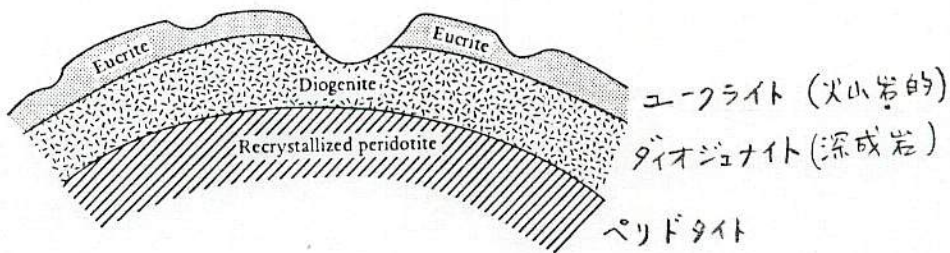
② ユークライト類の母天体は比較的小さな天体である可能性が大きい

理由 1) 成分が全体としてコンドライト的である... フヨリ融けても地球のコア、マントルのように層状に分化して「な」と思われるこれは小天体の特徴である

2) 含まれる輝石の冷却速度が早い
 ○ 隕石を融かして、再結晶するときの状況を見る → $100 \sim 0.1^\circ\text{C}/\text{h}$
 ○ 隕石中の輝石結晶の厚さから推定する
 (pigeonite (Ca-poor) → Augite (Ca-rich) が晶出)
 温度が下るにつれて Ca が移動なくなる

冷却速度は もっとも遅くても $1^\circ\text{C}/1\text{万年}$ 、ニニから推定して ユークライトは 15km より浅いところでは生成したと思われる。

ハワードイト (ユークライトとダイオジェナイトの混合) が存在することからユークライト類の母天体には この両方があると思われる。さらに推論すると、より下層にペリドタイトのある可能性が高い



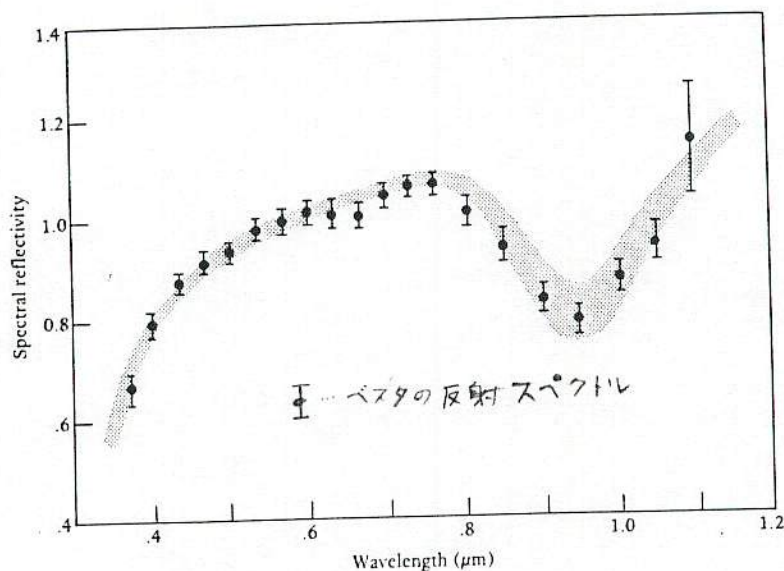
(ユークライト類母天体の推定構造)

② ユークライト類の母天体は、現存する可能性が強い

理由、下層に推定されるペリドタイトの隕石が地上では発見されていない
つまり母天体は大破壊されているらしい

したがって、あまり大きくなって、いま存在する天体 → 小惑星が母天体である
と考えられる。

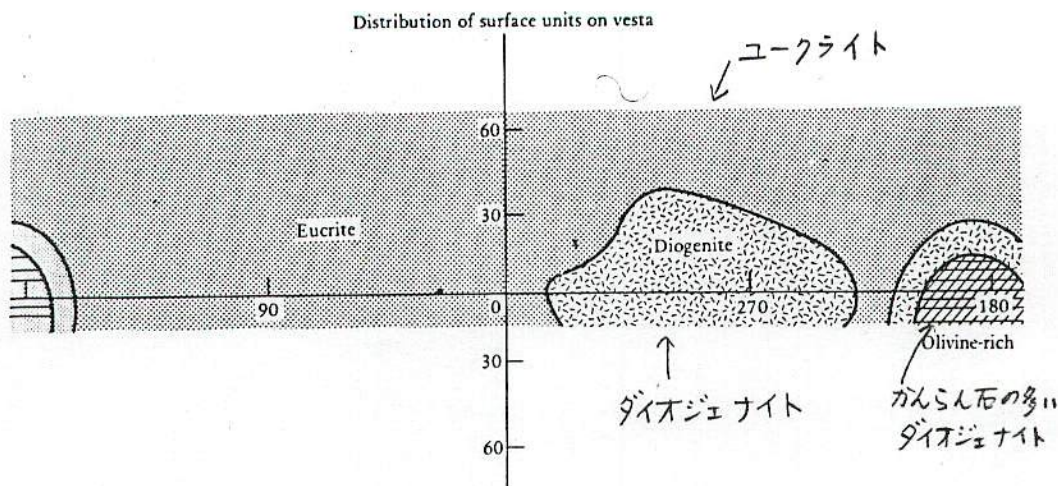
ユークライトの反射スペクトル …… $0.9\mu\text{m}$ に輝石による強い吸収がある。さまざまな小惑星の反射スペクトルと照合した結果、ベスタと一致するものが発見された



(ユークライトとベスタの反射スペクトルの比較)

そこでベスタの反射スペクトルが詳細に研究された。
小惑星は光点であるので、表面を分解してスペクトル撮影とするのは
困難である。さまざまな時点でのスペクトルを合成することで
次ページのような表面分解像が作られた。

ベスタ以外に、スペクトルの一致する小惑星はまだ発見されていない
もちろん、またスペクトルの調べられていない小惑星はたくさんある
が、あまり小さいものは、エイコンドライトとなるのに必要な溶融を
起さない。



(ベスタの表面の岩石分布)

ベスタの大きさ

直径	538 km	(ラジオメトリー)
	558 "	(偏光測定)
	550 "	(スペックル干渉)
	549 "	(星食)

この大きさの点からいっても、ユークライト類を生み出す程度の融解に相当であり、ベスタは現在ユークライト類エイコンドライトの母天体として最有力の候補である

b) シャーゴッタイト類の母天体

ユークライトの成功によって、シャーゴッタイトの母天体推定のために小惑星の反射スペクトルが精力的に調査されたが、一致するスペクトルなし。一方で、母天体は惑星である可能性が高いと考えられるようになってきた。

理由: $\delta^{17}O$ のアイソトープ組成を説明するには一連の火成活動が必要。たとえば

最初の分化 ... 45億年前 (Non-Condric による)
 奇分融解 ... 13 " (異なったアイソトープ比のものが混合)

といったプロセスが考えられる。これは小惑星ではむずかしい。

またシャ-ゴツタイトでは希土類での重元素と軽元素がはっきり分離している
これには複雑な過程が推定され…これも小惑星内では困難

たとえば ガーネットは Yb (イッテルビウム 重希土類) を選択的にとりこむ
シャ-ゴツタイト類に Yb が多い (宇宙存在比で考えて、軽希土類に比べて)
ことは、融解のソース部分に ガーネットを含む岩石があった可能性
が高い。ガーネットは高圧下で安定であり、小惑星ではそれだけの
圧力は期待できない。

惑星は重力が大きいので、そこから隕石を放出させることが困難である。
できるだけ小さな惑星として、金星、火星が候補となる。

アリナー、バイキングの写真 → 火山の存在を示す

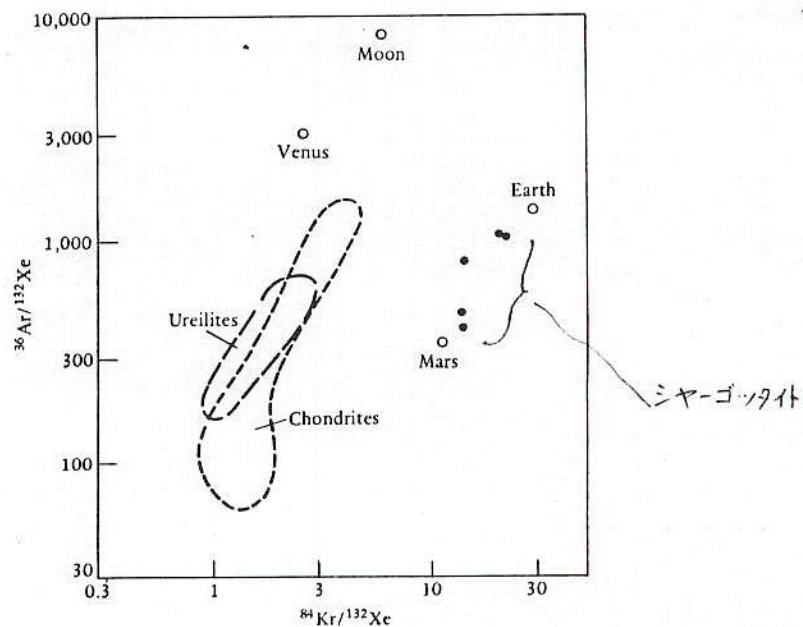
バイキングによる火星土壌の分析 → 平均組成はシャ-ゴツタイトに類似

南極シャ-ゴツタイト中のガラス中の希ガス組成 (Kr, Xe, N)

→ バイキングで測定した火星の大気組成と一致

衝突時に融解した際に大気をとりこんだものと考えられる

同じくガラス中の同位体比 → 火星と地球の中間にくる
地球大気の汚染を考えれば説明できる



(シャ-ゴツタイト中の希ガスのアイントープロビ)

火星はシャ-ゴツタイト類エィコンドライトの母天体の最有力候補である

c) ユ-レライトの母天体については まだ不明の点が多い

MSS July 7, 1991

長沢 工

5 隕鉄

隕鉄は 金属鉄を主成分とする隕石で、落下隕石数のほぼ7%を占める。しかし、風化せず長期に残存するニと発見しやすいのため、発見隕石数の7~8割が隕鉄である。そのため博物館の展示なども隕鉄が多い。

最大の隕鉄 ... 西アフリカ, ナミビアの ホバ隕鉄 50~60トン
 カニの隕鉄 ... 北極探検でピアリーが発見、ニューヨークに持ち帰った ケープ・ヨーク隕鉄 3コで 59トン

アメリカ大陸最大のもの ... オレゴン川の ウラメット隕鉄 13.5トン
 オーストラリア最大のもの ... マンドラピラ隕鉄 10~12トン
 環状の隕鉄 ... ソーン隕鉄 (アリゾナ) 635 kg
 日本最大の隕鉄 ... 田上 (たながみ) 隕鉄 174 kg
 大津市 田上山で発見

cf. (石質隕石は最大で1トン程度)

5-1 隕鉄の分類

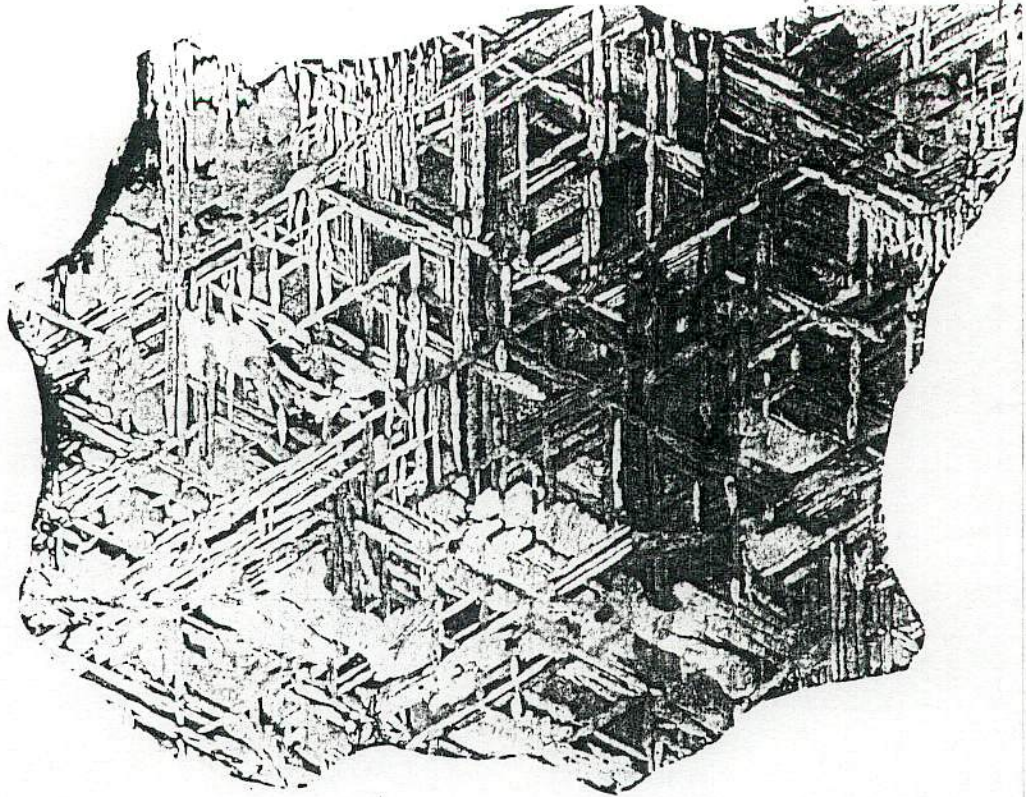
- ヘキサヘドライト (Hexahedrite) ^{Ni < 6%}
- オクタヘドライト (Octahedrite) ^{Ni 6~13% - さらに細分されている}
- アタキサイト (Ataxite) ^{Ni > 13%}

これらの分類は外見や性質によってまず分けられたものであり、それが Ni 含有量の差によることはあとからわかった。

Niの量がどのように影響するのか、その理由は後述する

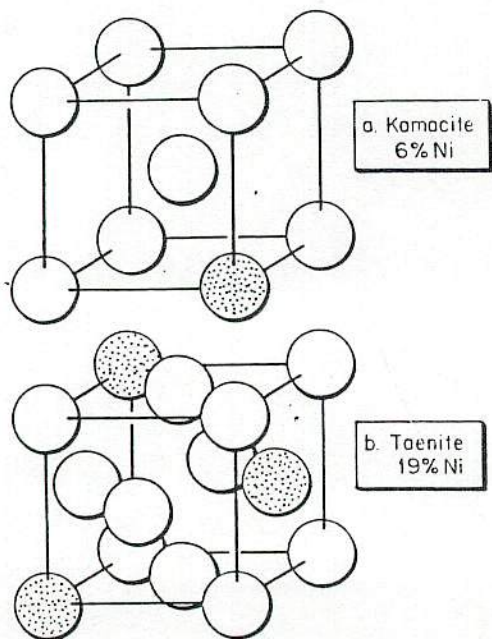
最大の特徴は、隕鉄の過半数を占めるオクタヘドライトにウイスマンステッテン (Widmannstätten) 構造が現われることである。ヘキサヘドライト、アタキサイトにはこの構造はない。

(隕鉄を切断、研磨し、その面をアルコールに溶かした硝酸でエッチングすると現われる)



(ウェインガロミア隕鉄の ウィドマンステッテン構造, ニュージランド)

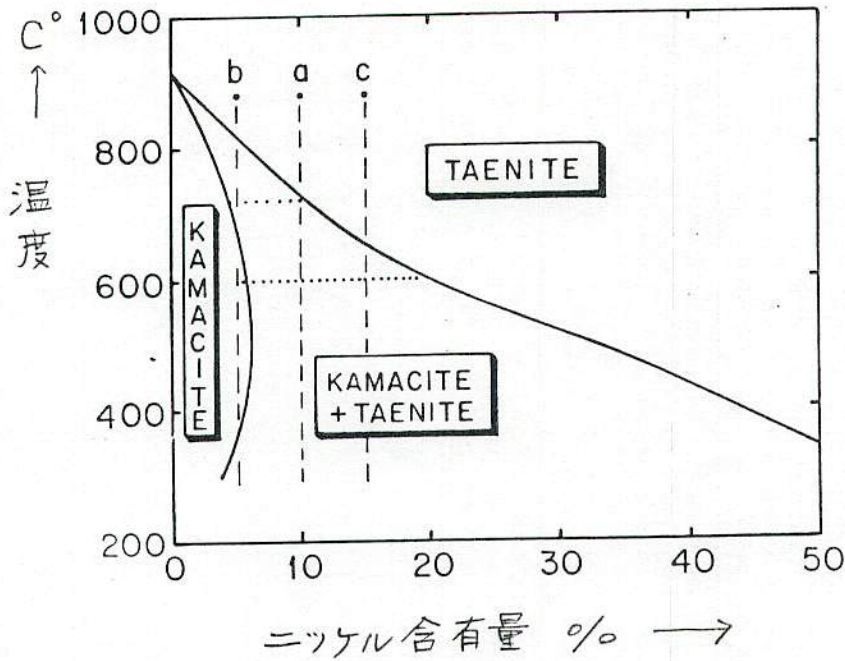
この構造のできる理由は、隕鉄の主成分である鉄とニッケルの合金に、タエナイト (Taenite)、カマサイト (Kamacite) の 2 つの結晶構造があることによる



カマサイトの結晶は体心立方格子

タエナイトの結晶は面心立方格子

カマサイト, タエナイトは 下図のような条件で存在する



Romig
Goldstern
が実験で
決定
(1979)

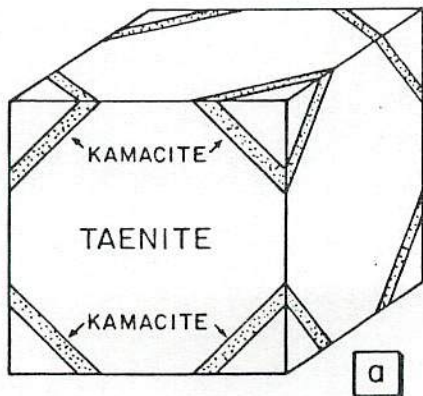
高温のとき... すべてタエナイトで存在.

aの成分で冷却 700°C ぐらいで タエナイトの中にカマサイトの結晶が成長し始める. 温度が下るにつれてカマサイトが成長しウドマンスラッテン構造ができる → オクタヘドライト

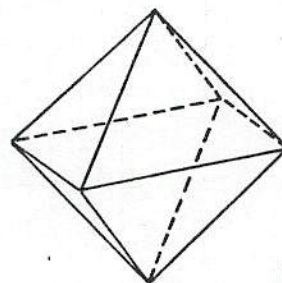
bの成分で冷却 700°C ぐらいで結晶はすべてカマサイトだけとなる. したがってウドマンスラッテン構造はできない → ヘキサヘドライト

c, cより Niの成分が多いとき, 600°C 近くで タエナイト, カマサイトの共存する領域に入るが, 温度が低いために原子の移動が困難であり, 現実にはカマサイトの結晶は成長しない. ウドマンスラッテン構造はできない → アタキサイト

タエナイトの結晶系



a



b

カマサイトの結晶系

◎ このような見かけの性状による分類でなく、その起源にさかのぼる本質的な分類法はないか。

隕鉄に比較的により元素 Fe, Ni, Co, S, C, P はさておき
 通常の化学分析では検出できないう微量元素を調べる
 中性子を照射して目標の元素を放射性に変え、その減衰を測る
 イリジウム、ガリウム、ゲルマニウムなど。

鉄、ニッケルを主成分とした高温の液体が冷却する場合を考える

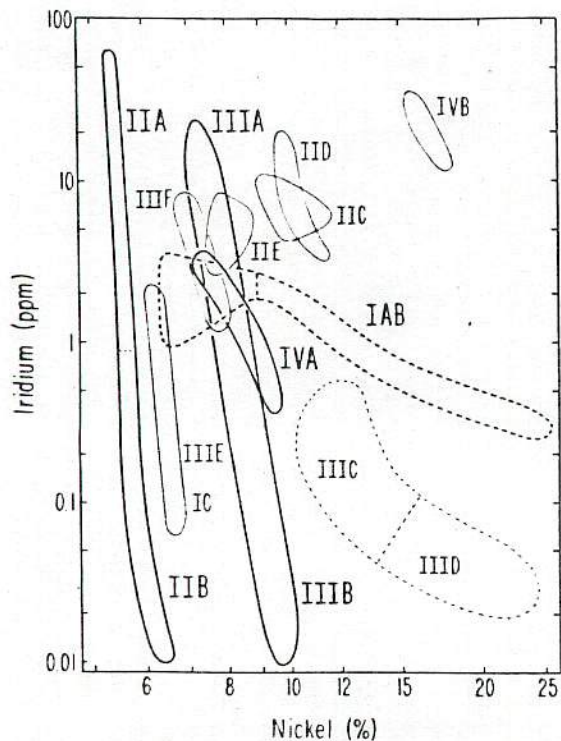
- 初期に固化したもの ニッケルが少しい (左の図参照)、イリジウムは Fe と容易に置き代って 固体中に入りこむ……下に沈む
- あとで固化したもの ニッケルが多い……イリジウムは少しい

はじめに同一の溶液だったもの Ni-Ir 曲線はひとつづきになる
 はじめに異なる溶液だったもの 異なる場所での Ni-Ir 曲線になる

このような基準で Layering は I ~ IV に分類 (1957年)

あとから Wasson は 12 ~ 16 に細分

異なるグループは異なる母天体、あるいは異なるマグマ溜りにあつたものと推定される



500コの隕鉄を分析した結果による Wasson の分類 (1975)

ここで見かけ上重なっているものも、他の微量元素 (Ga, Ge) による図からはつきり分離していることがわかる

隕鉄の 14% は、この分類に入らない。

MSS Oct. 6, 1991

長沢 工

5-2. 隕鉄の冷却速度

隕鉄の冷却速度は、その母天体の大きさと決める指標となる

母天体の深いところに存在 → 冷却速度小さい

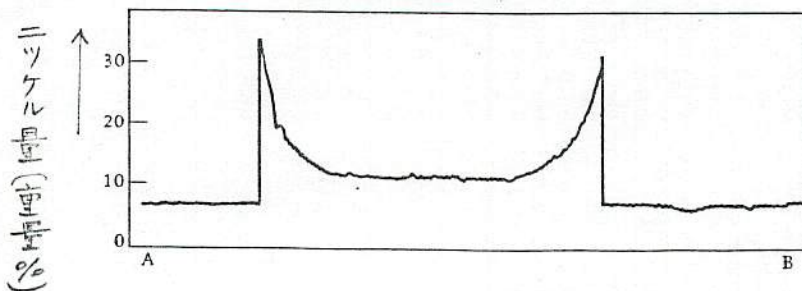
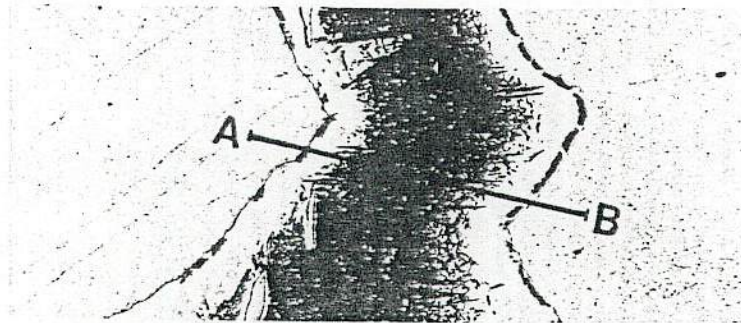
〃 浅いところに存在 → 〃 大きい

冷却速度はどのように測るか

ウイドマンステッテン構造で タエナイト中の Ni (ニッケル) 含有量の分布から推定

冷却速度小 → Ni 分布が一様

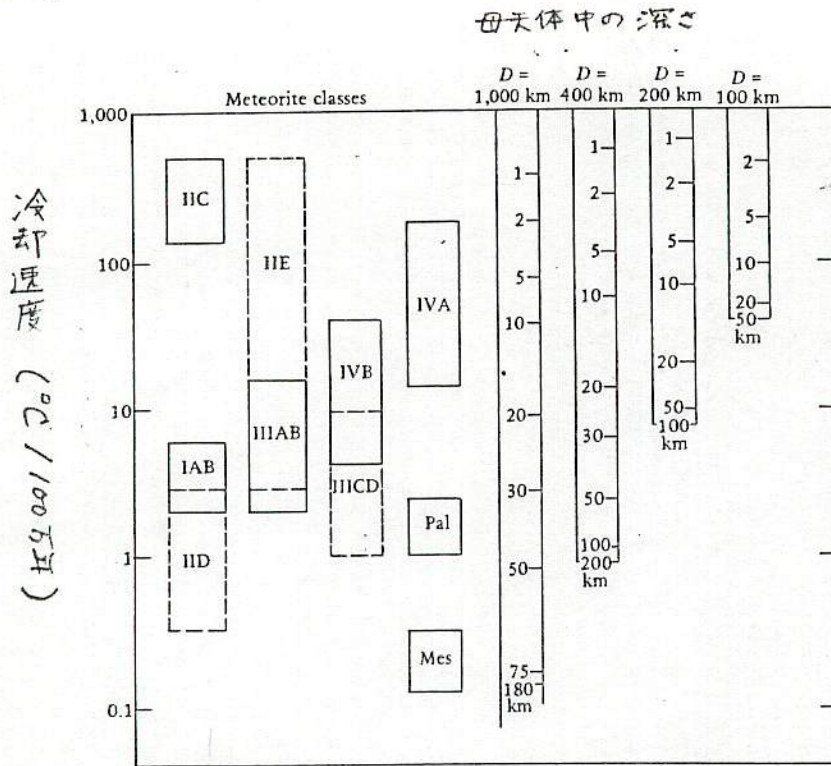
〃 大 → Ni 分布が M 型になる



具体的な冷却速度の数値は理論と比較して決める

結果 1° ~ 数1000°C / 100万年

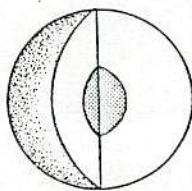
冷却速度から推測される母天体の大きさ



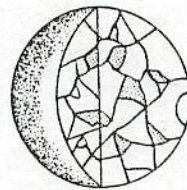
隕鉄の母天体は比較的小さい (地球, 火星などのような惑星が
破砕したものではない)

問題 ... 同じ隕鉄のグループであって、冷却速度のばらつきが大きくなること
Fe, Niは熱をよく通すので、同じ中心核にあつたとすれば、
これほどの差は生じない

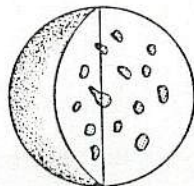
解釈 ... ブドウパン型コア



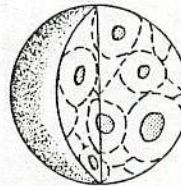
(a) Central core



(c) Fragmented and reaccreted core



(b) Failure of metallic pockets to congregate



(d) Accretion of smaller differentiated bodies

プロパン型コアのでき方について、さまざまな考え方があ

- (b) ... 部分熔融は生じたが中心核はできなかった
- (c) ... 固結したコアがまだ熱いうちに衝突破砕がおこりそれが再び集まって母天体を作った
- (d) ... それぞれ中心核をもった小さな天体が集まって母天体となった

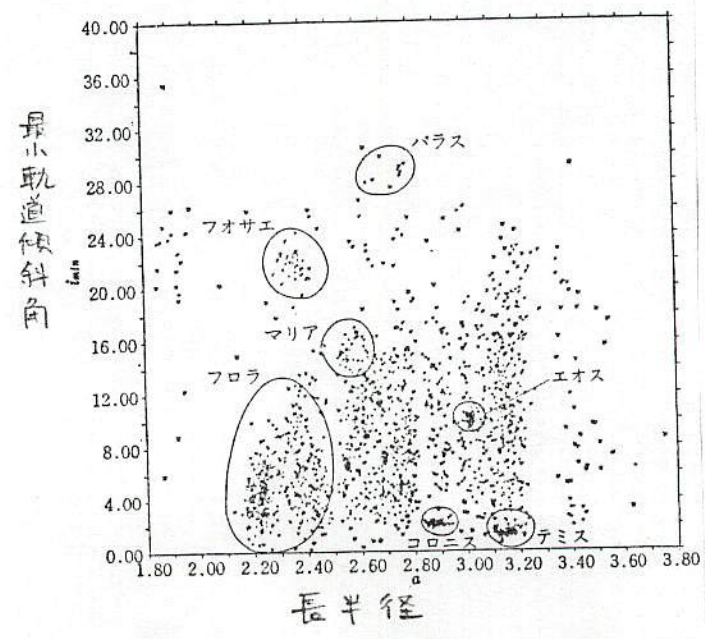
今のところどの考え方が正しいか、これ以外の解釈があるのか、結論はついていない

5-3 小惑星からの推論

隕石、隕鉄は ある程度の大きさのある母天体が破砕して生じたことはほぼ確実であり、現存する小惑星と密接に関連していることは疑いの余地がない、これら小惑星はどんな手がかりを与えるのか、

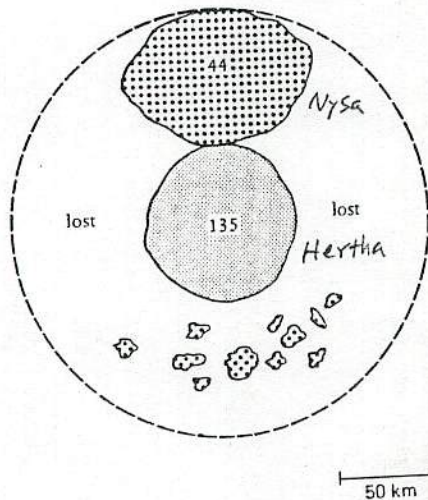
1918年 平山清次は小惑星の「^{family}族」を発見 (群とは異なる) 軌道の長半径、離心率、傾斜角の類似したグループ (短周期の変化は考えない)

テミス族、エオス族、コロニス族、マリア族、フロラ族など (全部で9つ) 「平山ファミリー」と呼ばれる



これは、元来ひとつであった小惑星が破砕したあと、それぞれの破片が類似した軌道をとっているものと考えられている

- テミス族 → 直径300kmのC型母天体が破砕
- コロニス族 → S型母天体の一部
- ニサ族 → 44 Nysa (E型), 135 Hertha (M型) および直径20kmほどのたくさんのE型小惑星を含む。そこから次の図のおよな母天体の推定がある



Nysa 族の母天体

これらはいずれも推測の域を出ないが、このような小惑星の状況は過去に多くの衝突、破砕の繰り返しがあつたことを示し、地球に落下した隕石から考えられることと矛盾しない。

隕石は、さよごまな点で、太陽系のたどってきた複雑な歴史をさぐる手がかりを与えてくれる、隕石に刻まれたその過去は、そのまま太陽系の過去のるのである。

しかし、隕石の母天体を推定することは、いくつかのジグソーパズルを混ぜ合わせたものの一部だけを与えられて、もとのそれぞれの絵を復元するようのものであり、完成への道は遠い。隕石学は古い学問ではあるが、その進展はごく近年になつてからである、そこにはまだ数多くの謎が解かれる日を待っている。

美保関隕石の軌道について

和歌山県立 向陽高等学校
(物理) 教諭 曾和 俊英

1. はじめに

1992年12月10日午後8時59分(日本時間)、西日本の各地において、空を飛んでいく明るい火球が、たくさんの人々により目撃されて、その直後に島根県美保関町にある松本優さんの二階建住宅の天井と床を突き破り、重さ6.5キロの隕石が落下した。

私はこれらの目撃情報をもとにして、この隕石が地球に突入して来た経路を求めることができた。そして、さらに計算を進めることにより、私はこの隕石がそれまで太陽系の中で、どのような軌道を運動していたのかを解明することに成功した。

これは、その結論にいたるまでの経過を、資料に基づいて説明したものである。

2. 各地からの目撃報告

私自身は、この火球を目撃してはいないが、たくさんの人々の御協力により、以下のような情報を知ることができた。

この中で、和歌山市のものは私自身が電話で直接お聞きしたもので、また奈良市のものは滋賀県の藪保男氏(日本流星研究会事務局)のもとに寄せられたもの、淡路島と高松市のもは兵庫県の菅野松男氏(明石市立天文科学館)のもとに寄せられたもの、広島市のものは12月13日付けの朝日新聞や読売新聞からの情報である。


(資料1)

目撃地	見えた方角
和歌山市	西に向いた車中より見たら左上から右下に飛んでいった。
奈良市	西に向いた車中より見たら、左15°高度15°から右15°少し下方へ飛んだ。
淡路島	西を見ていたら左から右に飛んでいった。
高松市	北の空で東の方へ流れるのを見た。
広島市	北極星の右側を地平線近くまで落ちていった。

これらの目撃情報を総合して、私はこの火球の突入経路として、ひとつの結論に達した。それでそれを発表したところ、ラジオのNHKニュースで流れたり、読売新聞・朝日新聞・中国新聞・山陰中央新報などに掲載されることになった。ここにその記事のひとつを(資料2)として、示すことにする。

(資料2)

年月
日
発行
(夕刊)
1992年(平成4年)12月15日



落下した隕石の推定路

**島根県八束郡美保関町の
松本優さん宅へ突入**

高知沖から
島根へ突入
和歌山の先生推定

島根県八束郡美保関町の会社員宅を十日夜直撃した「美保関隕石」について、和歌山市島、高校教師曾和俊英さん(50)が十五日、天文仲間の目撃などから、隕石は高知沖から島根県へ突入したとの推定路を伺った。

明石市の天文科学館の知人や和歌山市、広島市、高松市など五件の「火球」の目撃から推定した。

曾和さんのまごめによると、高知県・足摺岬付近の上空約百メートルで、地表に対して約10度の角度で大気圏に突入、四国、瀬戸内海を越え、落下した。目撃時間から秒速は約50メートルと考えられるという。

曾和さんは「小惑星のかけらが大気圏に突入。大気との摩擦で発熱、発光した。燃え尽きたなかった部分が美保関町の民家に落ちたと断定できる」と話している。

3. 火球の突入経路について

私は(資料1)の人々の目撃情報より、この火球の突入の様子として以下のような結論に達した。

1992年12月10日午後8時59分(日本時間)頃、四国の足摺岬の上空約100km付近から地表面に対して約20°の角度で大気圏に突入した天体が約50km/sという速さで進み、大気との摩擦による発熱と発光の結果、満月くらいの明るさで輝いて、初めは青白く尾を引いていたが後半は赤くなり、数個に分裂して、そのうちの燃え尽きなかった1個が、島根県の民家に隕石として落下した。

この隕石の突入速度が、約50km/sであるという結論に至った理由は、和歌山市からの目撃者による報告では目撃時間が、3~4秒であったということに基づいている。

つまり、和歌山市からは約200kmの実経路を目撃していると考えられたので、この200kmを4秒で割った値から求めている。

しかし、これは後に奈良市からの目撃報告による目撃時間が約10秒であったと知ったことにより、奈良市から見た実経路150kmをこの10秒で割るという計算で、突入速度は約15km/sであったと訂正されることになる。

なお、この奈良市からの目撃者は、日本流星研究会の会員の原口雅哉氏である(この会は、流星の観測者仲間がつくっているアマチュア天文同好会で、私もその会員である)。

4. 隕石の軌道についての計算

次に、この隕石が地球に突入する前に、太陽系の中でどのような軌道を運動していたのかを計算してみた。

その計算の根拠となったのは、私自身が求めた隕石の推定経路と突入速度(約15km/s)である。

私はまず、島根県、美保関町(東経133.2°、北緯35.6°、海拔高度0m)から、1992年12月10日の午後8時59分(日本時間)に隕石が突入してきた方向(足摺岬の上空約100km)の天空座標を求めてみた。

そして比較的簡単な計算の結果、その座標が以下のようなことを知った。天文用語ではこのように、天体がやって来た方向を示す天空座標は「輻射

点」と呼ばれている。

$$\text{輻射点座標} \begin{cases} \text{赤経 } \alpha = 24.5^\circ \\ \text{赤緯 } \delta = -30.4^\circ \end{cases} \quad (\text{2000年分点})$$

また、突入速度については、15km/sを採用することにより、計算を進めていった。

私は、流星に関するパソコンソフトを所有していないため、長谷川一郎氏の著作である「天体軌道論」という本を参考にしながら、小さな関数電卓を使って実際の計算を進めていくことになった。

そして、小さな補正(日周光行差や天頂引力など)を考慮せずに一応、下のような軌道要素を求めることに成功した。

隕石の軌道要素 (資料3)
(日周光行差および天頂引力の補正なしで計算)

近日点引数	$\omega = 11.1^\circ$
昇交点黄経	$\Omega = 78.3^\circ$
軌道傾斜角	$i = 8.85^\circ$
離心率	$e = 0.632$
近日点距離	$q = 0.978 \text{ (AU)}$
公転周期	$T = 4.32 \text{ (年)}$

(1992年12月18日計算)

この得られた軌道要素の値には、ずいぶん誤差もあるだろうと思われたが、電話で一応の成果として滋賀県の藪保男氏に連絡してみたところ、まもなくこの軌道要素にきわめて近い値をもつ小惑星があることを知らされた。

その小惑星とは「1983VA」と呼ばれているもので、その軌道要素を示すと次のようである。

小惑星「1983VA」の軌道要素 (資料4)

近日点引数	$\omega = 11.68^\circ$
昇交点黄経	$\Omega = 78.87^\circ$
軌道傾斜角	$i = 16.24^\circ$
離心率	$e = 0.6917$
近日点距離	$q = 0.8065 \text{ (AU)}$
公転周期	$T = 4.22 \text{ (年)}$

そこで気を良くした私は、細かい補正も考慮に入れて、再び隕石の軌道要素を計算し直してみた。

つまり、計算の方法を具体的にいうと、地球は自転しながら突入してきた隕石を観測したことになるから、それを考慮に入れた数値に変換する。これが「日周光行差」と呼ばれる補正である。

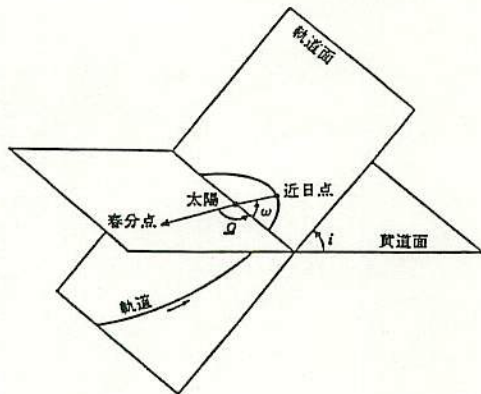
それから、ずっと太陽の引力を受けて運動していた隕石が地球のすぐそばまで接近して来ると、地球の引力の影響を受けて、地球のまわりに双曲線の軌道を描いて大気の中に入って来る。その補正が「天頂引力」である。

このような細かい補正を考慮して得られたのが、最終的に下の数値である。

隕石の軌道要素 (資料5)
(日周光行差および天頂引力の補正を入れて計算)

近日点引数	$\omega=3.88^\circ$
昇交点黄経	$\Omega=78.8^\circ$
軌道傾斜角	$i=11.5^\circ$
離心率	$e=0.584$
近日点距離	$q=0.984$ (AU)
公転周期	$T=3.63$ (年)

(1992年12月19日計算)



5. 結論

一時はこの隕石と関係のありそうな小惑星が見つかって、色めき立ったが、この値をみるとあまり関係は無さそうにも思われる。

しかし、これらの軌道要素を計算するに当たり、その根拠とした数値にずいぶん誤差が含まれていることを考えると、「美保関隕石と小惑星 1983VA は無関係である」という結論を出すのは、早計であるようにも思われる。そここのところは今後の課題である。

いろいろな観察の誤差を含むため、あまり数値的に詳しく述べることは避けたいが、以上の計算および考察より以下のことは断言できるであろう。

美保関隕石は、太陽系内を約4年の公転周期で楕円運動していた小惑星のかげら(直径数メートル)が、1992年12月10日午後8時59分(日本時間)に、地球と衝突して、大気との摩擦で発熱・発光して、燃え尽きなかった部分が民家に落下したものである。

なお、この天体が地球と衝突するまでに、太陽系内で運動していた軌道の様子を模式的に示すと(資料6)のようになる。

6. おわりに

私がこのように、美保関隕石についてひとつの小論を書き上げることができたのは、ひとえに各地から、貴重な火球の目撃情報を寄せて下さった皆様のお蔭です。感謝申し上げます。

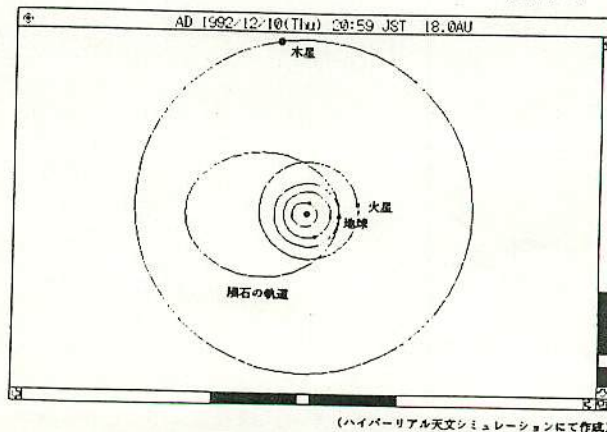
また、日本流星研究会の会員である奈良市の原口雅哉氏からの貴重な情報と、軌道計算を進めるに当たり、いろいろと御助言いただいた、同会の事務局の滋賀県の藪保男氏には、特にお礼申し上げます。

【参考文献】

- 「天体軌道論」(長谷川一郎 著)
- 「1992年天文年鑑」(天文年鑑編集委員会)
- 「ハイパーリアル天文シミュレーション」
(アストロアーツ)

●以下のページに、「補足」として具体的な数値計算について示した。

(資料6)



【補足】……具体的な数値計算について

数学に詳しい人のために、私がどんな計算によって美保関隕石の軌道を見出したのかを具体的に示したいと思う。

この文中に出てくる記号の意味は、すべて前述の参考文献中の「天体軌道論」(長谷川一郎 著)に合わせている。

(1) 基礎数値

観測時刻：1992年12月10.5日 UT

観測地の恒星時と緯度： $\theta = 32^\circ.65$

$$\varphi = +35^\circ.6$$

$$\text{輻射点: } \begin{cases} \alpha = 24^\circ.5 \\ \delta = -30^\circ.4 \quad (\text{2000年分点}) \end{cases}$$

速度： $V_\infty = 15 \text{ km/sec}$

太陽座標とその速度成分：

$$\begin{cases} X_\odot = -0.1913896 \\ Y_\odot = -0.8861464 \\ Z_\odot = -0.3842093 \\ \dot{X}_\odot = +0.017149 \\ \dot{Y}_\odot = -0.003009 \\ \dot{Z}_\odot = -0.001305 \end{cases}$$

(2) 日周光行差

$$H = \theta - \alpha = 8^\circ.15$$

$$\Delta\alpha = \frac{-26^\circ.6 \cos \varphi \cos H \sec \delta}{V_\infty} = -1^\circ.6548558$$

$$\Delta\delta = \frac{-26^\circ.6 \cos \varphi \sin H \sin \delta}{V_\infty} = +0^\circ.1034387$$

$$\alpha_c = \alpha + \Delta\alpha = +22^\circ.8$$

$$\delta_c = \delta + \Delta\delta = -30^\circ.3$$

$$H_c = H - \Delta\alpha = +9^\circ.80$$

(3) 天頂引力

$$V_c = \sqrt{V_\infty^2 - 123.8} = 10.059821 \text{ km/sec}$$

$$\sin Z_{RC} \cdot \cos P = \sin \varphi \cos \delta_c - \sin \delta_c \cos \varphi \cos H_c = +0.9068477$$

$$\sin Z_{RC} \cdot \sin P = \cos \varphi \sin H_c = +0.1383974$$

$$\cos Z_{RC} = \sin \varphi \sin \delta_c + \cos \delta_c \cos \varphi \cos H_c = +0.3980864$$

これらの式を解いて

$$Z_{RC} = 66^\circ.541348$$

$$\tan \frac{\phi}{2} = \frac{V_\infty - V_c}{V_\infty + V_c} \cdot \tan \frac{Z_{RC}}{2} = +0.1293493$$

$$\phi = 14^\circ.740492$$

$$\Delta\alpha_c = -\frac{\phi \sin P}{\cos \delta_c}$$

$$= -2^\circ.5757052$$

$$\Delta\delta_c = -\phi \cos P$$

$$= -14^\circ.571772$$

$$\alpha_{cc} = \alpha_c + \Delta\alpha_c$$

$$= 20^\circ.224294$$

$$\delta_{cc} = \delta_c + \Delta\delta_c$$

$$= -44^\circ.871772$$

つまり、日周光行差と天頂引力の補正を考慮に入れた輻射点の座標は次の通りである。

$$\begin{cases} \alpha_{cc} = 20^\circ.2 \\ \delta_{cc} = -44^\circ.9 \quad (\text{2000年分点}) \end{cases}$$

(4) 直角座標による方法

$$\lambda_R = \cos \delta \cos \alpha = +0.7848539$$

$$\mu_R = \cos \delta \sin \alpha = +0.3576785$$

$$\nu_R = \sin \delta = -0.5060337$$

$$V_c \lambda_{RC} = \lambda_R V_\infty + 0.465 \cos \varphi \sin \theta = 11.97679$$

$$V_c \mu_{RC} = \mu_R V_\infty - 0.465 \cos \varphi \cos \theta = 5.0468311$$

$$V_c \nu_{RC} = \nu_R V_\infty = -7.5905055$$

$$V_c^2 = (V_c \lambda_{RC})^2 + (V_c \mu_{RC})^2 + (V_c \nu_{RC})^2 = 226.52976$$

$$V_c = 15.050905$$

$$\lambda_{RC} = 0.7957521$$

$$\mu_{RC} = 0.3353174$$

$$\nu_{RC} = -0.5043221$$

次に、流星経路の直下点の地心緯度として落下地点の地心緯度 φ' をとり、流星経路の直下点の地方恒星時として落下地点の地方恒星時 θ をとること

$$\begin{aligned}\varphi - \varphi' &= 0.19243 \sin 2\varphi - 0.00032 \sin 4\varphi \\ &= 0.1819685\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi' &= \varphi - 0.1819685 \\ &= 35^\circ.6 - 0.1819685\end{aligned}$$

だから

$$\begin{cases} \varphi' \approx 35^\circ.4 \\ \theta = 32^\circ.65 \text{ とする。} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}\lambda_z &= \cos \varphi' \cos \theta \\ &= 0.6863228\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_z &= \cos \varphi' \sin \theta \\ &= 0.439766\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_z &= \sin \varphi' \\ &= 0.5792811\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_N \sin Z_{RC} &= \mu_{RC} \nu_z - \nu_{RC} \mu_z \\ &= 0.4160267\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_N \sin Z_{RC} &= \nu_{RC} \lambda_z - \lambda_{RC} \nu_z \\ &= -0.8070918\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_N \sin Z_{RC} &= \lambda_{RC} \mu_z - \mu_{RC} \lambda_z \\ &= 0.1198088\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin^2 Z_{RC} &= (\lambda_N \sin Z_{RC})^2 + (\mu_N \sin Z_{RC})^2 + (\nu_N \sin Z_{RC})^2 \\ &= 0.8388294\end{aligned}$$

$$\sin Z_{RC} = 0.9158763$$

$$\begin{cases} \lambda_N = 0.4542389 \\ \mu_N = -0.8812235 \\ \nu_N = 0.1308132 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}\lambda_K &= \mu_N \nu_{RC} - \nu_N \mu_{RC} \\ &= 0.4005565\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_K &= \nu_N \lambda_{RC} - \lambda_N \nu_{RC} \\ &= 0.3331775\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_K &= \lambda_N \mu_{RC} - \mu_N \lambda_{RC} \\ &= 0.8535496\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\cos Z_{RC} &= \lambda_{RC} \lambda_z + \mu_{RC} \mu_z + \nu_{RC} \nu_z \\ &= 0.4014597\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin Z_{RC} &= \lambda_K \lambda_z + \mu_K \mu_z + \nu_K \nu_z \\ &= 0.9158762\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{CC} &= \sqrt{V_C^2 - 123.8} \\ &= 10.135569\end{aligned}$$

$$\approx 10.1 \text{ km/sec (地心速度)}$$

$$\begin{aligned}\tan \frac{\phi}{2} &= \frac{V_C - V_{CC}}{V_C + V_{CC}} \cdot \tan \frac{Z_{RC}}{2} \\ &= \frac{V_C - V_{CC}}{V_C + V_{CC}} \cdot \frac{\sin Z_{RC}}{1 + \cos Z_{RC}} \\ &= 0.1273823\end{aligned}$$

$$\frac{\phi}{2} = 7^\circ.2593725$$

$$\phi = 14^\circ.518745$$

$$\begin{aligned}\lambda_{RCC} &= \lambda_{RC} \cos \phi - \lambda_K \sin \phi \\ &= 0.6699221\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{RCC} &= \mu_{RC} \cos \phi - \mu_K \sin \phi \\ &= 0.2410828\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_{RCC} &= \nu_{RC} \cos \phi - \nu_K \sin \phi \\ &= -0.7021988\end{aligned}$$

(5) 軌道要素

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -0.033574 V_{CC} \lambda_{RCC} \\ &= -0.2279687\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Y} &= -0.033574 V_{CC} \mu_{RCC} \\ &= -0.0820384\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= -0.033574 V_{CC} \nu_{RCC} \\ &= +0.2389522\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -0.033574 V_{CC} \lambda_{RCC} - 58.132 \dot{X}_{\odot} \\ &= -1.2248743\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{y} &= -0.033574 V_{CC} \mu_{RCC} - 58.132 \dot{Y}_{\odot} \\ &= 0.0928807\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -0.033574 V_{CC} \nu_{RCC} - 58.132 \dot{Z}_{\odot} \\ &= 0.3148144\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}r^2 &= X_{\odot}^2 + Y_{\odot}^2 + Z_{\odot}^2 \\ &= 0.969502\end{aligned}$$

$$r = 0.9846329$$

$$\begin{aligned}G^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \\ &= 1.6080519\end{aligned}$$

$$G = 1.2680898$$

$$V_H = 29.785G$$

$$= 37.770054$$

$$\approx 37.8 \text{ km/sec (日心速度)}$$

$$\begin{aligned}H &= -(x \dot{X}_{\odot} + y \dot{Y}_{\odot} + z \dot{Z}_{\odot}) \\ &= -0.0311678\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{a} &= \frac{2}{r} - G^2 \\ &= 0.4231619\end{aligned}$$

$$a = 2.3631617$$

$$\begin{aligned}p &= r^2 G^2 - H^2 \\ &= 1.5580381\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sqrt{p} &= 1.2482139 \\ A &= (\dot{x}Z_{\odot} - \dot{z}X_{\odot})/\sqrt{p} \\ &= 0.4252958 \\ B &= (\dot{y}Z_{\odot} - \dot{z}Y_{\odot})/\sqrt{p} \\ &= 0.1949072 \\ C &= (\dot{x}Y_{\odot} - \dot{y}X_{\odot})/\sqrt{p} \\ &= 0.8838183\end{aligned}$$

また2000年分点での計算だから

$$\begin{aligned}\epsilon &= 23^{\circ}.69937 - 0^{\circ}.00013004 \times 2000 \\ &= 23^{\circ}.43937\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin i \cos \Omega &= A \cos \epsilon - C \sin \epsilon \\ &= 0.0386372 \\ \sin i \sin \Omega &= B \\ &= 0.1949072 \\ \cos i &= A \sin \epsilon + C \cos \epsilon \\ &= 0.9800603\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tan \Omega &= 5.0445477 \\ \Omega &= 78^{\circ}.787403 \\ &\approx 78^{\circ}.8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin i &= 0.1986999 \\ i &= 11^{\circ}.460943 \\ &\approx 11^{\circ}.5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}e \cos v &= p/r - 1 \\ &= 0.5823542\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}e \sin v &= \sqrt{p} H/r \\ &= -0.0395111 \\ \tan v &= -0.0678471 \\ v &= -3^{\circ}.8814041 \\ \omega &= -v \\ &= 3^{\circ}.8814041 \\ &\approx 3^{\circ}.88 \\ \cos v &= 0.9977063 \\ e &= 0.583693 \\ &\approx 0.584 \\ q &= a(1-e) \\ &= 0.9838007 \\ &\approx 0.984 \text{ (AU)} \\ T^2 &= a^3 \\ &= 13.197155 \\ T &= 3.6327888 \\ &\approx 3.63 \text{ (年)}\end{aligned}$$

以上の結果をまとめてみると、美保関隕石の軌道要素は次のようになる。

美保関隕石の軌道要素	
近日点引数	$\omega = 3.88^{\circ}$
昇交点黄経	$\Omega = 78.8^{\circ}$
軌道傾斜角	$i = 11.5^{\circ}$
離心率	$e = 0.584$
近日点距離	$q = 0.984 \text{ (AU)}$
公転周期	$T = 3.63 \text{ (年)}$

ペルー・クレーター奇譚

大塚 勝 仁

日本スペースガード協会 会員

このペルーでの「衝突クレーターと異臭騒ぎ」は、日本でもごく最近、ニュースになったので、JSGA 会員の多くの方がご存じであろうと思う。この事件は9月15日に起こり、18日にロイターから画像とともに世界各地に配信され、翌19日には日本でもTVニュースや新聞各紙に取り上げられた(図1)。しかし一般向けに話題となったのは、クレーター本体よりもむしろ異臭騒ぎの方であった。記事(例えば9月19日付産経新聞)を要約すると「9月15日にチチカカ湖近辺に隕石と思われる物体が落下して、直径数十メートルのクレーターが形成され、そこから硫黄のような異臭が発生し、現地住民数百人が、吐き気、めまいや頭痛などの体調不良を訴え、病院で手当を受けた」というもので、実に奇怪極まりない、もしかしたら名探偵シャーロック・ホームズもお手上げの難事件であったかも知れない。

さて我々、惑星物理関係者の関心は、そんな事よりもどうしてクレーターが出来たのか? という事である。これに関しては、当初、多くの専門家の

意見は、隕石起源のクレーター説に懐疑的であった。というのも、ここ数年、南米の政情不安定な地域では同様の事件が何度かあったが、何れも戦争兵器によって出来た「穴」であり、そんな事もあって、今回もガセネタだろうと関係者は皆、思ったであろうし、自分自身そうであった。異臭に関しては、最初、化学兵器の誤爆なども容易に想像できた。また地質学者などは火山活動などの地質形成メカニズムが十分あり得る事を、指摘していた。クレーターリング研究の第一人者も最初は「あのクレーターは地球外物体の衝突のものではなく、火山活動のものだろう」と決めつけていたくらいである。また天から降ってきたにせよ、スパイ衛星の落下の可能性の指摘する意見も

あり、隕石落下形成説を唱える人の方が遙かに少なかった。当初、送られてくる隕石のメーリングリストでもこれらに追随するようなネガティブな意見が多数をしめていた。これを書いている10月6日現在、この天文ニュースにも雑誌にも、この事が扱われていないので、読者の中にはいまだ非隕石形成説を信じて疑わない人もいる事と思われる。

しかしながら、数日してから隕石メーリングリストを通じて、その奇跡的な実態が段々明らかになってきた。たまたま南米ボリビアでフィールド調査をしていたあるカナダ地質調査所のジャクソンが、急遽現地へ向かい、「ありゃ天体衝突によって出来たクレーターに間違いない」という意見を出して



図1 クレーターの概観 (9月18日ロイター/Miguel Carrasco/La Razon)

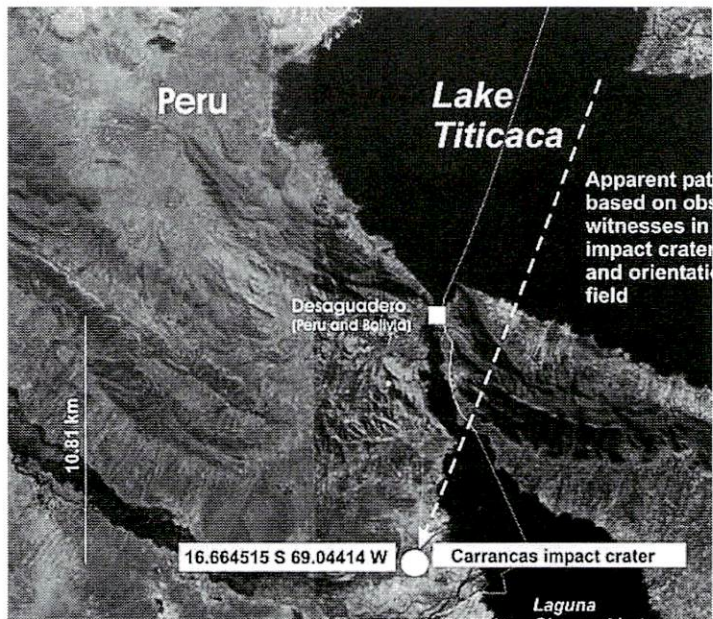


図2 火球の飛行経路（ファーマー氏のホーム・ページより）

きたり、やはり現場へ行ったペルー地球物理研究所のイシツカは、クレーター付近で3インチ大の物体の破片を回収した。その回収試料は、金属鉄を含み、磁性があり、地球外の鉱物を含むものであった。また地震計にも、隕石火球特有の4.9トンTNT相当の衝撃波が記録されていた。

こうなると俄然、隕石成因説に注目が集まってくる。そうこうしている内に、9月25日にペルー地質鉱物調査所から最初のプレスリリース（9月21日付）が出された。またこの記事を書いている途中、たった今、隕石ハンターのマイケル・ファーマーも独自のホーム・ページに遠征記と現地調査をまとめたものを公表した。彼は今や隕石ハンターかつ隕石商人として世界的に有名な第一人者で、世界各地で採集した隕石を、隕石研究機関やコレ

クターに数多く販売している（<http://meteoriteguy.com>）。更にこれらに、ボリビアのサンアンドレス大学や隕石メーリングリストからの情報など加えて、その概要をまとめると
落下地点：

ペルー、プナ地方カランカス（西経 $69^{\circ} 02' 38''$ 南緯 $16^{\circ} 39' 52''$ 海拔 3824m）

ボリビア国境にも近く、有名なチチカカ湖のすぐそばである。
落下時刻：

2007年9月15日午前11:45 現地時

現地の地質学的特徴：

プナ高地、新生代の南米大陸の堆積岩でモラッセ或いは赤色層である。それらは泥岩、頁岩、粘板岩よりなる。数mの厚みのある、赤茶けた土壤が発達したところでもある。

主な現象：

火球は北東30度方向ボリビア領空より飛来し、チチカカ湖

を越えて、プナ地方のカランカスに落ちた（図2）。火球頭部は白く太陽よりも明るく輝き、後に隕石雲（ダスト雲）が棚引いていた。火球は1個のみで分裂片などは認められなかった。衝突地点から20km離れた経路直下の国境沿いのディサガデロ市では、大きな爆発音が聞こえ、多くの窓ガラスが割れた。1kmしか離れていない地域医療センターの窓は粉々になった。爆発音は15分間持続した！（信じがたい話であるが、これは付近の山岳に山彦として反射し続けて減衰したのでは？）衝突直後、キノコ雲が立ち上った。数分後、カランカスの村人達が現場に着くと、クレーター内部には水かさが、どんどん増しているところで、水たまりは沸騰し湯気が立ち上り、それは数分間続いた。と同時に硫黄臭が報告されている（これも個人的見解であるが、例えばこの地域はなにしろ湿っているし塩分が多いみたいだし、それに隕石ならばFeS（トロイライト）が多く含まれることから、衝突による強いショック、即ちエネルギーの解放で高温状態になり硫化水素などが発生したのでは？と想像するが、村人の中毒症状は硫化水素の毒性とは異なるようだ）。
クレーター：
衝突の衝撃で柔らかかなで湿っぽい大地に、クレーターが形成された。クレーターのり

ム径は14mあり、深さは3m以上ありそうである。水たまりは差し渡し径7~8mであり、深さは数mはあるであろう。リムの高さは、高いところでは1mもある。衝突エジェクタ・ブランケットはクレーター中心から全ての方向に150mまで拡がり、地質的な赤茶けたものと粉碎したグレーの衝突体とが混ざったものである。サンアンドレス大学から発表されたクレーターの模式図を図3に示した。

隕石サンプル：

ペルー地質鉱物調査所のメンバーがイベント発生から36時間後に、現地を訪れたところ、水たまりの外の（おそらく20~30kgはあったであろう）衝突物質の多くは既に村人らに持ち去られた後であった。それでもメンバーは周囲に散らばっていた幾つかのサンプルの回収に成功した。それらの見た目は、内部は細粒のもので、色はグレーがかった。脆い物質で、1mmサイズの鉄らしきものが、散らばっていた。表面を研磨して顕微鏡で調べてみると、オリビン、パイロキシン、トロイライト、アルカリ長石、金属鉄、更にコンドリュールを認め、コンドライトらしい事が確認された。顕微鏡写真を見て、部分溶融していたり、熱変成の進んだものである事を指摘するリストメンバーもいた。ファーナー氏らも落下約2

週間後に現場に到着し、「警官の警護」のもと、周辺の野外調査で隕石の破片を見つけ、また現地人から買い求めて、サンプルの入手に成功した。ただそれらは衝突の衝撃で飛び出してきた脆く崩れやすい破片で、合計でも概ね300gである。外観は隕石内部のライトグレーのマトリックスがむき出ししており、溶融被膜は見られないが、黒いショック・ベインが認められる。これは母天体上での、他天体との大きな衝突現象の履歴を意味するものである。いわゆる角礫化したHコンドライト隕石ではないかと、マイクは見ている（図4）。ただ、今回の衝突イベントで出来たものかどうかはまだ判らない。リストメンバーの大方の見方では、多分、水たまりの下には、少なくとも数トンに達する、壊れた

コンドライト隕石が埋まっているであろうとの事である。

従って今回のイベントがコンドライト隕石落下に伴うクレーター形成であった事は、全く疑いの余地がない。そのコンドライトは1個ものとしては、記録に残っているものの中でも最大級のものであろう。隕石を伴う隕石クレーターの形成といえば、大方、鉄隕石か石鉄隕石のものである。最近の形成された隕石クレーターとしては、1947年のシホテアリン鉄隕石雨の最大27mクレーターや1990年のスターリタマーク鉄隕石の10mサイズのものあげられるが、ともにロシアで起きたイベントである（そういえばツングース現象もそうであった）。後者の場合、鉄隕石本体はまだ引き上げられずクレーター内部に留まっている

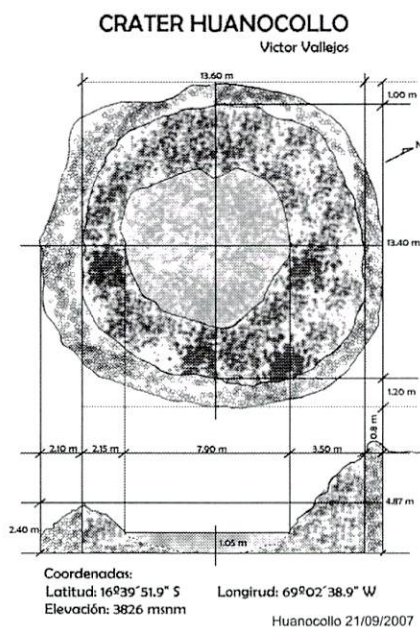


図3 クレーターの模式図
(http://fcpn.umsa.bo/fcpn/app?service=page/Planetarium_PublicationListより)

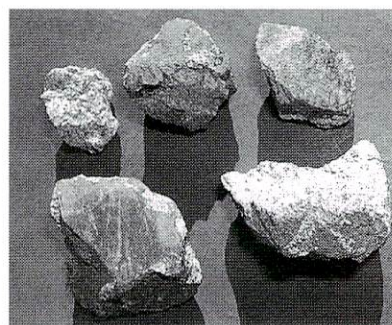


図4 ファーナー氏（上）とショック・ベインを伴うカララズ隕石（下）（ファーナー氏のホーム・ページより）



図5 隕石雲（ダスト雲）の写真（ファーナー氏のホーム・ページより）。火球出現後5～7分後の姿。

らしい。コンドライト隕石が形成したクレーターといえば、1976年の中国の吉林隕石雨が思い出される。その内、最大のもは1.7トンもあったが、それが形成したクレーター径はたった2mしかなく、隕石本体は6mの深さから回収された。これはランカス・クレーターの14mと比較すると1桁近くスケールが小さい。ランカス・イベントでは地震計データから20～21GJのエネルギーが解放されたのではないかと、いう指摘があった。これは隕石を蒸発させるのに十分なエネルギーである。しかしながら火球と衝突のデータが混在したものと思われ、実際はそれよりも小さいであろう。また、スケール則を当てはめて考えた場合、ランカス・クレーターは土壌の弱いところに作られたというファクターは無視できない。ただ隕石クレーターが保存される地域では

ないのが気かりである。雨期にはしばしば洪水もあるらしいので、直に浸食されて消えゆく運命であろう。より数が多くありそうなこの程度のサイズのクレーターが地球上に余り残っていない理由としては、ランカス隕石に相当する大きさのものは、しばしば地球大気との衝突により分解し、隕石雨となりやすいというバイアスがかかるのと、例えクレーターが形成されても地上風化による浸食作用が大きいからだと思われる。

ランカス隕石火球の力学や物理にも興味を尽きない。オリジナルの衝突体の質量やサイズがどれくらいであったかはJSGAとしては、大いに気になるところではないだろうか？地震計で捕らえられているようだし、アメリカ国防省(DoD)監視衛星の赤外センサーなどに受かっていれば、それらが判明するものと思われる。なお隕石

雲の写真が、現地の少年によって捕らえられている(図5)。

という事でまだまだ不確定要素をはらんではいらるが、以上が、今現在までに判っている、ペルー隕石クレーターの真相の第一報である。今後、更に興味深い結果が次々に出てくるであろう。尚、隕石とクレーターの名称をランカスとしたが、これはあくまでも隕石メーリングリストで呼ばれていた仮称で、名前の最終決定は隕石学会命名委員会に委ねられるはずである。今回使用した写真の幾葉かはファーナー氏のホーム・ページにあるもので、彼の許可を得て掲載した。これに対して感謝の意を表したい。またJAXA/ISASの吉川真助教授と九州大学の中村智樹准教授のお二方には、ご多忙にもかかわらず、急遽、拙稿を閲読して頂いた上、貴重なコメントや誤りのご指摘を頂いた。厚く御礼を申し上げる次第である。

追記:

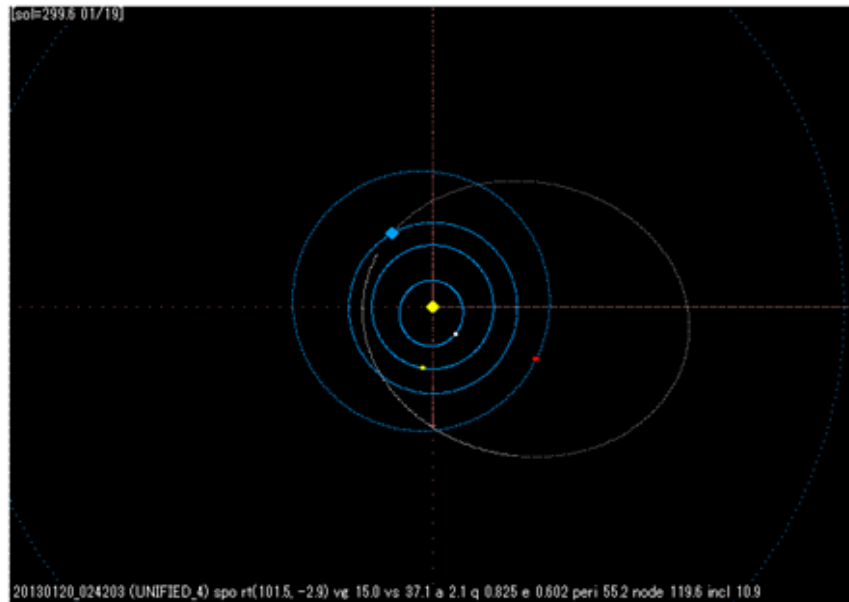
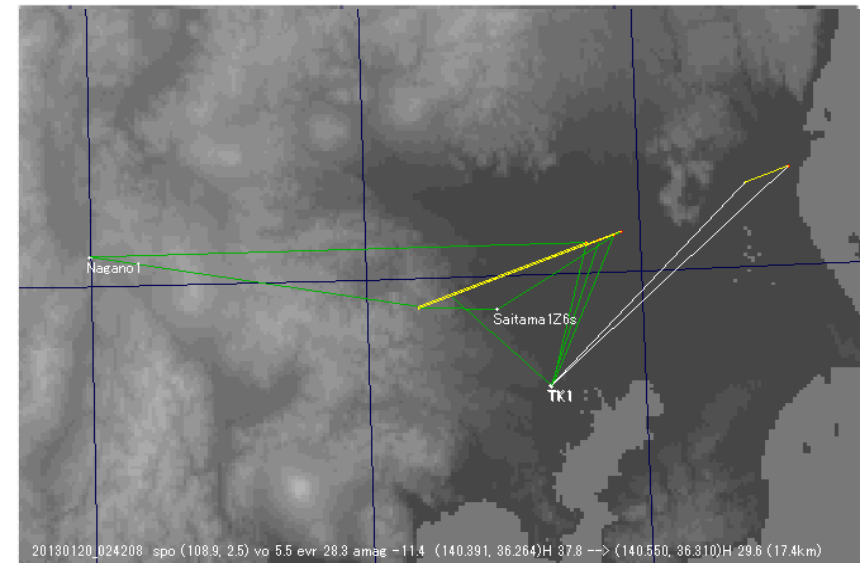
書き終えた直後で、また新たな情報が入ってきた。カナダ西オンタリオ大のピーター・ブラウン教授はボリビアのラパス観測所で記録された超低周波データを解析して、衝突体のエネルギーを約0.03キロトンTNTと見積もった。これは先のペルー地震計データよりも1桁大きい。

1月20日の2時42分04秒の 爆発低速分裂火球について

第133回流星物理セミナー
2013年2月3日(日)
文責 関口孝志

2013/01/20_02:42:08.9_0082_00155_V00011+110_UFOCaptureV2_Saitama1 Z 6mm

SonotaCo Network Japan Forumでの解析結果
<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=2940>



上田氏の解析結果

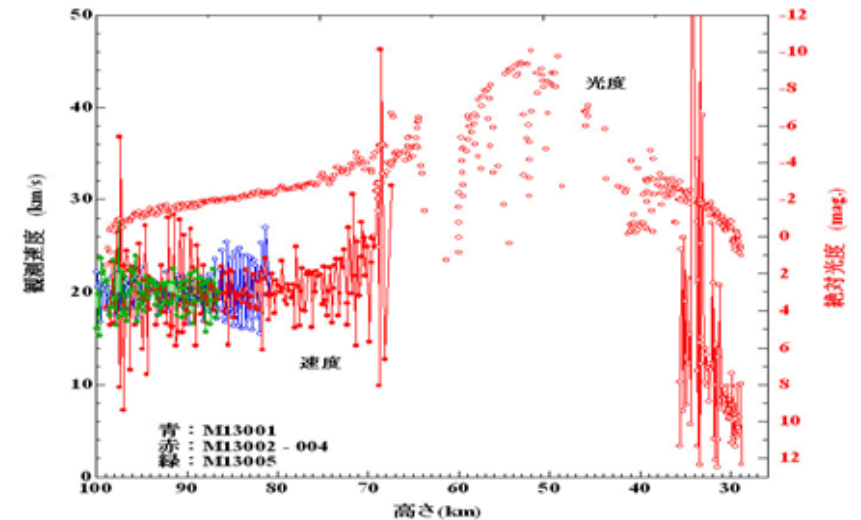
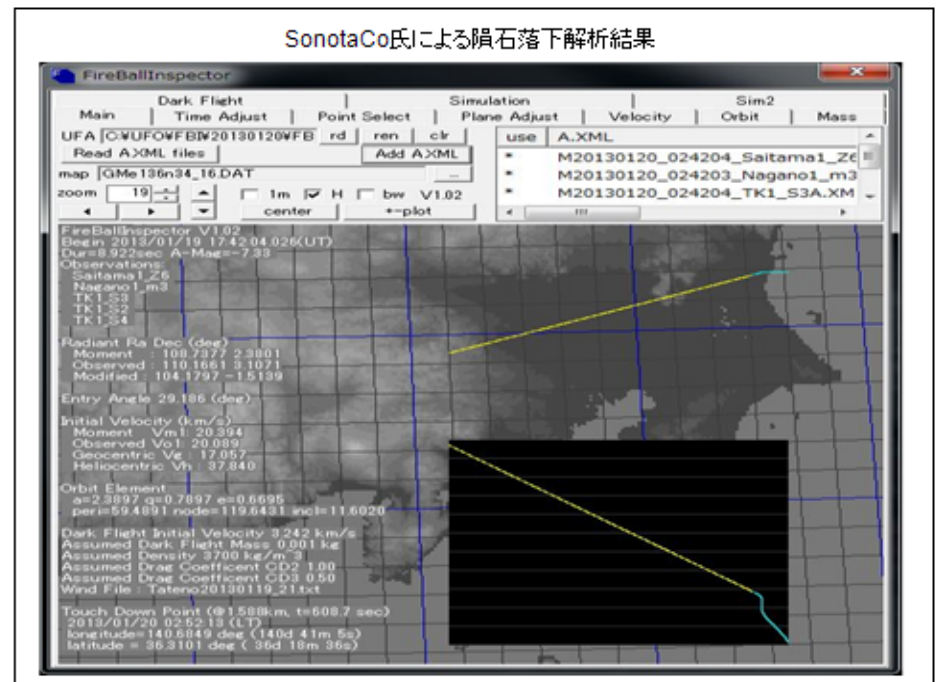


図 * 2013-1-20, 2:42:04 JST 大火球 (鹿島灘火球) の高さとお観測速度絶対光度、

軌道等、2013-1-20, 2:42:04 JST(鹿島灘火球)		
年月日	(YYYYMMDD)	2013/1/19
時刻UT	(hhmmss)	17:42:04
観測射点	α_o	110.5 \pm 0.03°
	δ_o	-3.4 \pm 0.11°
修正観測射点	α_c	105.4 \pm 0.05°
	δ_c	-0.5 \pm 0.10°
観測速度	V_{∞} (Km/s)	20.0 \pm 3.5 km/s
消滅点での速度	V (km/s)	6.1 \pm 2.3 km/s
地心速度	V_G (Km/s)	17.0
日心速度	V_H (Km/s)	37.5
交差角	Q (deg)	69.3
絶対光度	(Mag)	-10.0 λ :140.09° ϕ :-36.18° h:52.0 km
発光点	H_0 (Km)	106.0 λ :139.185° ϕ :-35.899°
消滅点	H_c (Km)	28.8 λ :140.529° ϕ :-36.299°
a : 軌道長半径	(AU)	2.25
e : 離心率		0.654
q : 近日点距離	(AU)	0.780
Ω : 昇交点黄経	(deg)	119.64
i : 軌道傾斜角	(deg)	11.14
ω : 近日点引数	(deg)	61.64
P : 周期(年)	(yr)	3.38
流星群名	Sp0	
継続時間	(sec)	7.3
太陽黄経		299.643
突入角	(deg)	31
測光質量	g	-
実経路長	km	143
(J2000.0)		



今回の火球は、私の天頂カメラに第一爆発点までが撮影できました。他の3台のカメラは、全てフラッシュのみが撮影できました。多くの方が写真撮影していて軌道計算ができています。詳しい、画像や解析結果等は、<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=2940> で公開されています。

また、「京都大学 防災研究所 地震防災研究部門 2013年1月20日の隕石の軌道の推定」として京都大学がこの火球の音波による飛行経路を推定しています。<http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/fireball2013/index.htm> 地震計のデータを利用して、この火球の音波が地上に到達した時刻を調べ、火球の飛行経路を推定しています。SonotaCo氏による琉軌道計算結果とよく一致しています。

私の入会している同好会の会員で、千葉県の方が消滅後に音を聞いていたので、その後、他の方がサイト検索した結果、もうすでに、このデータが公開されていました。火球ネットワークの眼視観測情報でも、多くの方が音を聞いていたという情報がありました。また、動画でも音を記録していたというのが、公開されています。また、電波観測でもエコーが観測されていました。

今回の火球は、残念ながら、隕石としては、海上のため捜索不可能であったが、ライブカメラや車載カメラなどによって複数撮影されていた。また、音の情報がたくさんあり、写真と電波観測と地震計とによる同時観測ができ多くの情報が得られたものであった。

隕石はいつ落ちるか

——PHA による輻射点推算と軌道が判明している 20 個の隕石のデータ比較

2014/10/5 流星物理セミナー
日本流星研究会 小関正広

1. はじめに

前回の発表「太陽をかすめる彗星と流星」(流星物理セミナー、2014/7/6) で用いたのと同じ手法で PHA (Potentially Hazardous Asteroid)1458 個 (データをダウンロードした 2014/3/7 時点、2014/9/4 では 1497 個になっている) について流星の出現予想を試みた。小惑星から流星群が発生するとは考えにくい、2008 TC3 のように小惑星と隕石との関係は密接である。そこで、小惑星(PHA)の予想輻射点から、隕石がいつ落ちる可能性が高いのかを実際の隕石データと比較し、検討することにした。

2. 隕石落下のデータ

LPI (Lunar and Planetary Institute)の'Meteoritical Bulletin Data Base'、<http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> の検索によって、落下日時が判明しているもののリストを作成した。8月30日時点で名前が付けられ、登録されている 49591 個の隕石中、落下時刻が月まで判明しているもの 360 個、時間帯までわかっているものが 116 個である。このデータベースの関心は隕石本体にあって、落下の状況については詳しく記されていない。Grimsby 隕石についての論文(付録の文献(15)参照)には、軌道の判明している(何らかの機器によって測定されている)隕石が 15 個掲げられているので、Grimsby 隕石より後のものについては上記のデータベースを援用して文献を調査した。これによると、2014/9/4 現在で軌道が測定されている隕石は 20 個ということになる。付録にはそれに加えて、小惑星として観測された後に大西洋に落下した 2014AA のデータも付け加えている。

第1表：月別落下数と PHA からの流星出現予測

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Witnessed	24	<u>32</u>	29	<u>31</u>	25	29	41	28	<u>32</u>	<u>39</u>	23	24
Observed	4	4	1	5	1	0	1	0	1	3	1	0
PHA	<u>200</u>	167	194	<u>205</u>	181	<u>208</u>	186	186	198	<u>214</u>	<u>212</u>	198

月別で見ると、4月と10月が隕石落下の目撃回数も多く、PHA からの流星(隕石)出現可能性も高いことが分かる。特に4月は軌道が求められている隕石の個数も多い。中でも Pribram は4月7日、Neuschwanstein は4月6日であり、軌道も極めて似ている。さらに軌道は求められていないものの、オランダの Glanerbrug(1990年)とアルゼンチンの Berduc Centroid(2008年)はともに4月7日に落下したことは注目される。

第2表：時間帯別落下数：時間は地方時。

Time	0~	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Witnessed	1	0	1	3	3	4	4	5	4	4	4	5
Observed	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
Time	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Witnessed	3	4	3	8	<u>10</u>	6	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>9</u>	7	5	4
Observed	1	0	0	0	0	2	1	3	3	2	1	1

時間帯別では夕方に目撃回数が多い。これは従来から、人間の外での活動時間に左右されるためと説明されてきた。しかし、軌道が求められている隕石でも夕方に多くなっている。夜半前後から明け方にかけての目撃例(必ずしも隕石の飛行自体を目撃したという意味ではない)少ないこともある程度は実際の現象を表している可能性がある。また、昼前後は人が外で活動し、目撃も多くなるはずであるが少ない。このことは隕石(大火球)の輻射点分布に大きく影響されているものと考えられる。

残念ながら、PHA からの予想輻射点から落下の時間帯を推測することはできないので、第2表には PHA の行はない。

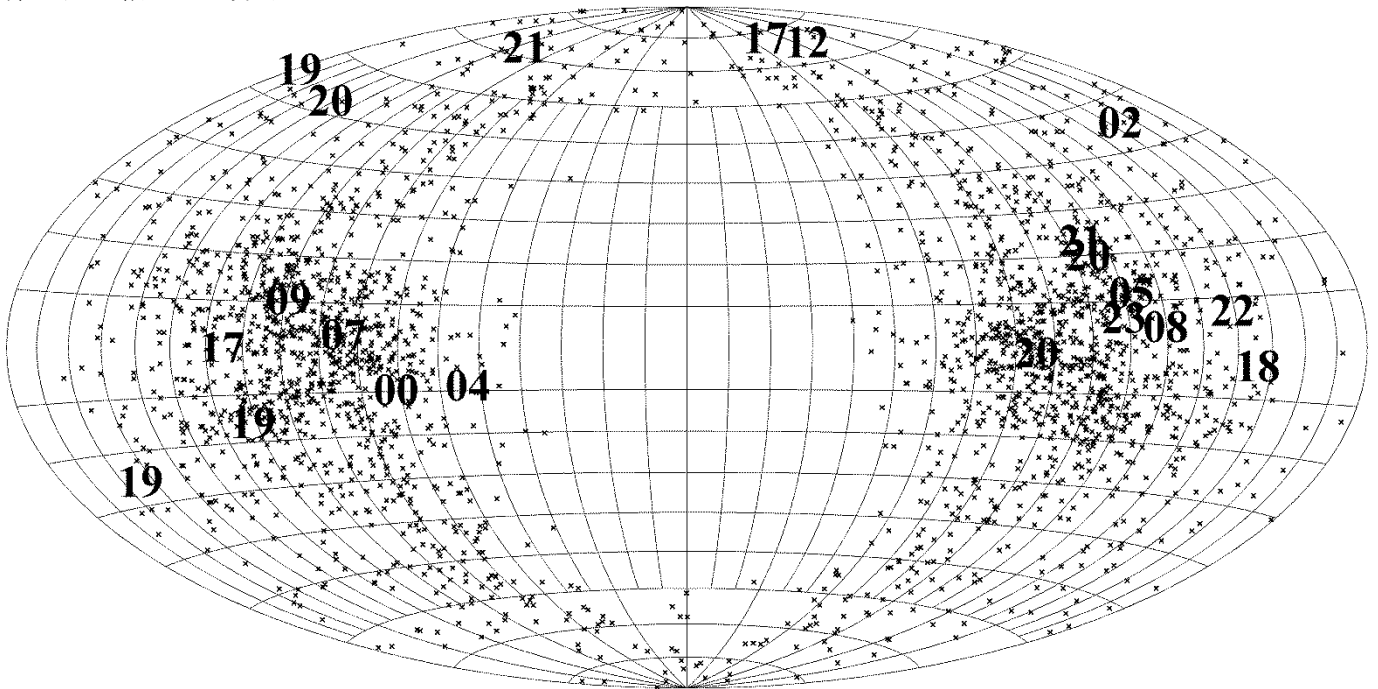
3. PHA からの予想輻射点

PHA の定義は絶対等級が 22.0 以下(明るい)で地球軌道との最短距離が 0.05au 未満の NEA である。そのため、実に多くの PHA からの輻射点(流星出現)が予想される。DSH<0.1 という条件に限定しても、昇降点と降交点の両方で流星出現が予想されるものがあるため、1458 個の小惑星から 2093 個の輻射点が推定された。

輻射点の分布を(λ - λ_s , β)の座標で第1図に示す。+が PHA による予想輻射点で、数字は落下が観測された隕石の落下時間帯(地方時)である。両者が極めてよく一致していることが分かる。前回の発表で示した、放物

線に近い軌道をたどる彗星からの予想輻射点とは逆に、輻射点は地球向点方向に存在せず、太陽方向と反太陽方向に集中している様子が明らかである。

第1図：輻射点の分布



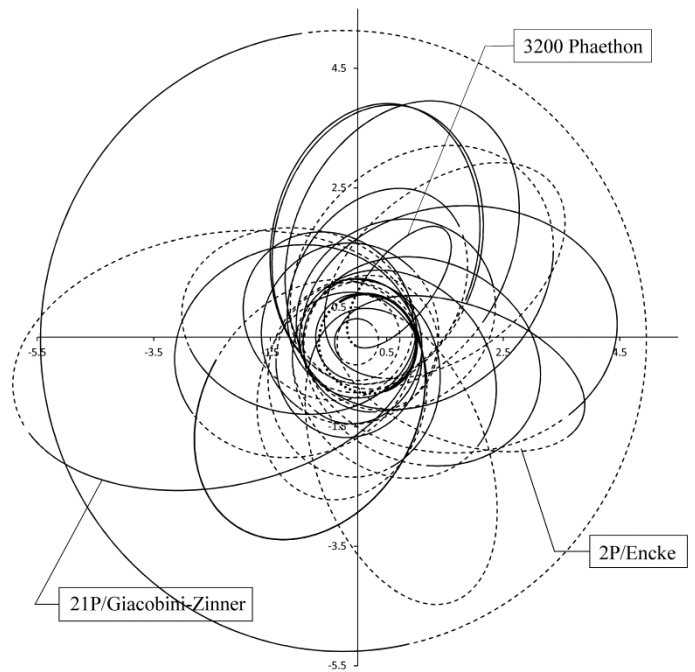
4. 検討

ここで取り上げた 20 個の隕石と 2014AA の軌道と流星群の母天体として良く知られている天体の軌道を第2図に示す。たくさんの軌道があつて分かりにくいのが、流星群の母天体と考えられているものに比べて隕石の軌道は離心率の小さいものが多い。また、代表的な木星族彗星である 21/P Giacobini-Zinner より遠日点は内側の小惑星帯にあるものが多い。つまり、隕石となった天体の多くは Apollo または Aten 型小惑星であり、それらの小惑星が隕石の供給源とみてよいであろう。

しかし、隕石の落下が夕方が多いことと、PHA の輻射点分布との間には食い違いがある。太陽方向の輻射点が南中するのは正午付近であり、反太陽方向は夜半である。ここで実際に観測された隕石落下の分布を詳しく見ると、太陽方向の輻射点であっても 00(2014 AA)を除いて、04, 07, 09 または 17, 19, 19 であり、反太陽方向の場合でも 05, 08 または 18, 20, 20, 21, 23 である。反太陽方向に一部夜半に近いものも含まれるが、いずれの方向であっても落下が起きているのは朝方か夕方である。

隕石は PHA のような小惑星と考えられるが、予想輻射点 (太陽方向と反太陽方向) が天頂にあるときではなく、地平線に近い方が落下に至りやすいと考えられる。これは、流星体が斜めに大気に突入することによって、急激な大気密度の上昇によって破碎されることを免れているためであろう。

以上の考察から、隕石落下を目撃する可能性が高いのは春・秋の朝と夕方ということになる。隕石の軌道はオーストラリアの火球ネットによる 2 個を除けば、北半球の観測によるものである。従って、PHA による予測の方が偏りは少ないと考えられる。つまり、10 月と 11 月は隕石落下を目撃するチャンスと言える。また、最近の軌道データの多くは車載ビデオを含め、目撃者が撮影した写真・ビデオによるものが多い。従って、朝に比べて夕方に観測されているものが見かけ上多くなっているものと考えられる。アメリカで好奇心旺盛な観測者の中には、昼間の火球を記録するビデオ観測を試行しているものがある。チェリャビンスク隕石の衝撃的な映像が記録され、軌道が求められたように朝の通勤時間帯に車載ビデオを動かすのも有効かもしれない。



第2図：隕石の軌道と流星群の母天体

付録：軌道が判明している 20 個の隕石

(1)Pribram

Ondřejov では 1951 年から流星の 2 点観測が開始され、当初は 5 台のカメラであったが、その後 10 台に増強された。10 台ではほぼ全天の半分を撮影できる。1959 年 4 月 7 日 19h30m21sUT に-18~-19 等の火球が Ondřejov と 40.388 km 離れた Prčice で撮影された。Ondřejov で使用されたレンズは F/4.5, f=18cm の Tessar であり、フィルムは Agfa ISS 21/10 DIN である。9×12cm1400/m 回転のシャッターが取り付けられていた。また、自動追尾のタイミングカメラにも撮影されていたので、時刻の精度は±1s である。当初は落下地点に近い Luhy という村の名前が隕石の名称に用いられていた。推定落下地点から 485m の距離で発見された。

(2)Lost City

Prairie Network の 4 か所の地点オクラホマの Hominy と Woodward、カンサスの Pleasanton と Garden City で撮影された。予測された地点から 700m の地点で発見された。Prairie Network は F/6.3, f=150mm のレンズと 9 インチ角のフィルムが使用されていた。回転シャッターは切断間隔を規則的に変化させるようにプログラムされており、それによって出現時刻が推定された。全部で 16 の観測地点で構成され、1963~1975 年の間、運用された。

(3)Innisfree

カナダの Meteorite Observation and Recovery Project (MORP)で Super-Komura 50mm に Kodak 70-mm Plus-X Pan が使用された。自動運用のため、パイロットの雲上からの目撃報告により、フィルムが回収、測定された。Vegreville と Lousana の 2 点からの観測で、20~40cm の積雪の中で捜索が行われた。

(4)Peekskill

火球ネットでない、一般のビデオが飛跡・軌道決定の基本データとなった最初の例である。-13 等（満月程度）の火球が 40 秒飛行するという華々しいものであった。ビデオが流星会議等でも了解されたので、映像を記憶されている人も多と思われる。落下が宵の時間帯で、16 件以上のビデオが撮影され、目撃者も多かった。また、自動車の車体に落下したものも含め、落下地点の捜索以前に発見された個体が多かった。

(5)Tagish Lake

明け方の薄明中の出現のため、火球の飛行記録は衛星からの画像と目撃である。飛行後の永続痕についてはビデオと写真の記録があり、それらに基づいて軌道が求められた。落下地点は湖を中心とする地帯で、落下直後には氷上から回収されたりしたが、かなりの部分は氷の融解とともに水中に没したものと考えられている。炭素質コンドライトであり、彗星起源も想定される。

(6)Morávka

白昼の落下で、多数の目撃とともに電磁波音と衝撃波の両方が記録されている。軌道はスタンバイモードであったビデオカメラ 3 台の記録から求められた。

(7)Neuschwanstein

ヨーロッパ火球ネット(EN)の、ドイツ 5 台、チェコとオーストリア各 1 台のカメラで撮影された。すべて全天カメラで 1 晩に 1 コマ撮影する運用がなされていた。ドイツとオーストリアのものは反射鏡であるが、チェコのは魚眼レンズで精度が高いものであった。求められた軌道は Pribram 隕石と一致しており、両者が共通の起源をもつことは確実と思われる。

(8)Park Forest

軌道は衛星画像と地上からのビデオ画像から求められた。少なくとも 2 軒の屋根に落下している。流星本体が撮影されたビデオはいずれも警察の車載ビデオによる 2 件で、うち 1 件は静止した車両からのものであった。

(9)Villalbeto de la Peña

落下は日没前であり、多数の目撃者がある。軌道は 2 枚の写真と 1 件のビデオ画像から求められた。

(10)Bunburra Rockhole

オーストラリアの砂漠火球ネット(DFN)の 2 台のカメラで撮影された。DFN では F/3.5, f=30mm の魚眼レンズで 1 晩 1 コマ撮影する運用がなされ、Ilford FP4 の 9×12cm シートフィルムが使用されている。

(11)Almahata Sitta

Catalina Sky Survey (CSS)の 1.5m 望遠鏡によって Kowalski が小惑星を発見して 19 時間後に地球に衝突した劇的な隕石である。落下は飛行中のパイロットからも目撃され、気象衛星 Meteosat 8 の他、アメリカの軍事衛

星からも撮影されている。隕石の名前はスーダンの Wadi Halfa と Khartoum を結ぶ最寄りの「6 番駅」という意味である。

(12) Buzzard Coulee

晩方の出現で、目撃者は多数あり、衝撃波も多数報告されている。警察車両搭載のビデオ他の火球画像もかなりあるが、軌道決定には監視カメラで撮影された火球による影の移動が用いられた。

(13) Maribo

デンマークに落下した CM2 隕石であるが、火球画像はスウェーデンの監視カメラとオランダの全天カメラによるものである。また、ドイツの流星レーダーでも記録されている。EN では、曇天のため、火球画像は撮影されなかったが、光電管によって増光の様子が記録されていた。軌道は参考文献(18)による。

(14) Jesenice

チェコの 2 台の火球カメラから軌道を求めることができた。しかし、月明と薄雲のために条件は悪く、軌道は隕石の発見地点と合うように調整されている。スロベニアで 2 台の全天カメラと 1 台のビデオ観測があるが、チェコのものと系統的なずれを示している。

(15) Grimsby

Southern Ontario Meteor Network (SOMN) の 6 台の全天 CCD カメラ(解像度 1k×1k の KAF1001E を用いた SBIG ST-1001E に F/3.5、f=8mm のレンズを装着して-2 等の流星が撮影できる)で撮影された。SOMN では全部で 7 台のカメラを運用しているが、その観測点の 1 は CMOR の観測所にある。写真に比べてカメラの精度は低いが、この火球についての平均残差は 150m 程度であった。1 台の駐車車両に当たっている。

(16) Košice

ヨーロッパ中央部は曇天または雨天で、チェコの EN とスロバキアのビデオネットでは火球本体を撮影することができなかった。しかし、EN の観測点では雲を通しての強烈な光はラジオメーターに記録されていた。軌道はハンガリーの 3 台の監視カメラ画像から求められている。永続痕が火球出現 7 時間後に撮影された。

(17) Mason Gully

オーストラリアの砂漠火球ネット(DFN)の 2 台のカメラで撮影された。隕石は推定落下地点から 150m の場所で発見された。

(18) Sutter's Mill

アメリカの国立気象局が運用する気象ドップラーレーダーシステム"NEXRAD" (NEXt-Generation RADar)のうち 3 台によって落下が記録され、軌道が求められた。記録的な高速 28.6km/s で大気へ突入し、軌道から木星族彗星を起源とすると考えられる。炭素質コンドライトである。落下に際して、電磁波音が観測され、<溶接>の臭いが記録されている。

(19) Novato

Allsky Meteor Surveillance (CAMS)で捉えられた火球・隕石である。CAMS は Fremont Peak Observatory、Lick Observatory、Sunnyvale の 3 点に 20 の Watec Wat 902H2(+4 等級まで撮影可能、画角 20°×30°)を配置して地平から 30° 以上の全天をカバーしている。このうち 5 台のビデオカメラで撮影されている。なお、CAMS は Jenniskens の母国であるオランダを含め、西ヨーロッパでもアマチュアにより展開され、さらに活動の範囲を広げている。

(20) Chelyabinsk

落下当初から多くの車載カメラ、監視カメラの映像がインターネットに流されていたため、多くの研究者により、多様な軌道が求められている。ここで引用したものは 10 か所の火球ビデオと 5 か所の火球による影のビデオから求められたものである。英語版のウィキペディアでは複数の軌道計算結果が比較されている。

(21) 2014 AA

これは隕石が回収されたものではないが、観測された小惑星が地球に衝突した二番目の例である。Richard Kowalski が Catalina Sky Survey の一環として Mount Lemmon の 60 インチ反射望遠鏡で 1 月 1 日 6:18UT(地方時では前日 12 月 31 日の午後 11:18)に 9 分ごとの 4 枚の映像でオリオン座北部に 19 等級の天体として発見した。2014 年初の小惑星であるため、2014AA と名付けられたが、すぐに地球に衝突することが予報された。Peter Brown (University of Western Ontario)は核実験の検出用に配備されている 3 台の低周波検出器(20 hertz 以下)から西経 40 度、北緯 12 度に 2 日 3 時 UT 過ぎに落下したと推定している。

軌道が正確に求められている20個の隕石と大西洋に落下した小惑星

Name	Place	Year	Month	Day	Time(LT)	α	δ	Vg	a	e	q	i	ω	Ω	Type	Ref.
Pribram	Czechoslovakia.	1959	4	7	20h30m20s	192.343 ± 0.011	17.461 ± 0.002	17.427 ± 0.006	2.401 ± 0.002	0.6711 ± 0.0003	0.78951 ± 0.00006	10.478 ± 0.004	241.738 ± 0.015	17.80285 ± 0.00001	H5	(1),(7)
Lost City	USA.	1970	1	4	20h14m	315.5	39.3	8.8	1.66	0.417	0.967	12.00204	160.9702	283.7277	H5	(2)
Innisfree	Canada	1977	2	5	19h17m38	7.4	66.5	14.54	1.872	0.4732	0.986	12.27514	177.9511	317.517	L5	(3)
Peekskill	USA	1992	10	9	19h50m	209.6	-29.3	10.1	1.49 ± 0.03	0.41 ± 0.01	0.886 ± 0.004	4.9 ± 0.2	308 ± 1	17.030 ± 0.001	H6	(4)
Tagish Lake	Canada	2000	1	18	08h43m42s	88.0	27.9	11.3	2.1 ± 0.2	0.57 ± 0.05	0.891 ± 0.009	1.4 ± 0.9	222 ± 2	297.900 ± 0.003	C2-ung	(5)
Morávka	Czech Republic	2000	5	6	12h51m52s	250.1 ± 0.7	54.96 ± 0.24	19.6 ± 0.4	1.85 ± 0.07	0.47 ± 0.02	0.9823 ± 0.0009	32.2 ± 0.5	203.5 ± 0.6	46.2580	H5	(6)
Neuschwanstein	Germany	2002	4	6	21h20m17.7s	192.33 ± 0.09	19.58 ± 0.13	17.51 ± 0.05	2.4 ± 0.02	0.670 ± 0.003	0.7931 ± 0.0009	11.43 ± 0.06	241.1 ± 0.2	16.82666 ± 0.00001	EL6	(7)
Park Forest	USA	2003	3	26	23h50m	171.8 ± 1.3	11.2 ± 0.5	16.1 ± 0.4	2.53 ± 0.19	0.680 ± 0.023	0.811 ± 0.008	3.2 ± 0.3	237.5 ± 1.6	6.1156 ± 0.0007	L5	(8)
Villalbeto de la Peña	Spain	2004	2	4	17h46m45s2s	311.4 ± 1.3	-18.0 ± 0.7	16.9 ± 0.4	2.3 ± 0.2	0.63 ± 0.04	0.860 ± 0.007	0.0 ± 0.2	132.3 ± 1.5	283.6712	L6	(9)
Bunburra Rockhole	Australia	2007	7	21	04h43m57s	80.73 ± 0.06	14.21 $\pm .04$	6.743 ± 0.014	0.8529 ± 0.0004	0.2427 ± 0.0005	0.6459 ± 0.0007	8.95 ± 0.03	210.04 ± 0.06	297.595	Euclite	(10)
Almahata Sitta	Sudan	2008	10	7	05h46m	348.5	7.7	7.1	1.308201	0.312065	0.899957	2.5422	234.449	194.1011	Ureilite-an	(11)
Buzzard Coulee	Canada	2008	11	20	17h26m45s	285.3	77.3	14.3	1.225	0.215	0.961	25.486	212.019	238.937	H4	(12)
Maribo	Denmark	2009	1	17	20h08m28s	124.6 ± 1.0	18.8 ± 1.6	25.4 ± 0.8	2.34 ± 0.29	0.795 ± 0.026	0.481 ± 0.010	0.72 ± 0.98	99.0 ± 1.4	117.64 ± 0.05	CM2	(13),(18)
Jesenice	Slovenia	2009	4	9	2h59m40.5s	159.9 ± 1.2	58.7 ± 0.5	8.3 ± 0.4	1.75 ± 0.07	0.431 ± 0.022	0.9965 ± 0.0006	9.6 ± 0.5	190.5 ± 0.5	19.196	L6	(14)
Grimsby	Canada	2009	9	25	21h03m	242.61 ± 0.26	54.97 ± 0.12	17.89 ± 0.22	2.04 ± 0.05	0.518 ± 0.011	0.9817 ± 0.0004	28.07 ± 0.28	159.865 ± 0.43	182.9561	H5	(15)
Košice	Slovakia	2010	2	28	22h24m46s	114.3 ± 1.7	+29.0 ± 3.0	10.3 ± 0.5	2.71 ± 0.24	0.647 ± 0.032	0.957 ± 0.004	2.0 ± 0.8	204.2 ± 1.2	340.072 ± 0.004	H5	(16)
Mason Gully	Australia	2010	4	13	18h36m10s	148.4	9.2	9.2	2.470 ± 0.004	0.6023 ± 0.0007	0.98240 ± 0.00007	0.832 ± 0.013	18.95 ± 0.03	203.2112	H5	(17)
Sutter's Mill	USA	2012	4	22	7h51m12s	24.0 ± 1.3	12.7 ± 1.7	26.0 ± 0.7	2.59 ± 0.35	0.824 ± 0.020	0.456 ± 0.022	2.38 ± 1.16	77.8 ± 3.2	32.77 ± 0.06	C	(18)
Novato	USA	2012	10	17	19h44m29.88s	268.1 ± 0.6	-48.9 ± 0.7	8.21 ± 0.22	2.09 ± 0.11	0.526 ± 0.024	0.9880 ± 0.0003	5.5 ± 0.6	347.37 ± 0.18	24.9414 ± 0.0005	L6	(19)
Chelyabinsk	Russia	2013	2	15	09h20m32.2s	333.2 ± 1.6	+0.3 ± 1.8	15.3 ± 0.4	1.76 ± 0.16	0.581 ± 0.018	0.739 ± 0.020	4.93 ± 0.48	108.3 ± 3.8	326.4422 ± 0.0028	LL5	(20)
2014 AA	Atlantic Ocean	2014	1	2	0h	82.4	14.3	5.1	1.164276	0.213168	0.91609	1.425552	52.28165	101.5794		(21)

- (1) NEW CZECHOSLOVAK METEORITE “LUHY”, Zdeněk Ceplecha, J. Rajchl and L. Sehnal, *BAC* 10(1959), 147-148; Orbital data from (7)
- (2) LOST CITY METEORITE - ITS RECOVERY AND A COMPARISON WITH OTHER FIREBALLS, R. E. McCrosky, A. Posen, G. Schwartz, and C. -Y. Shao, *SAO Special Report #336* (1971)
- (3) THE INNISFREE METEORITE AND THE CANADIAN CAMERA NETWORK, IAN HALLIDAY, ALAN T. BLACKWELL AND ARTHUR A. GRIFFIN, *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, Vol. 72, No. 1, 15-39, 1978
- (4) The Fall of the Peekskill Meteorite: Video Observations, Atmospheric Path, Fragmentation Record and Orbit, M. Beech, P. Brown, R. L. Hawkes, Z. Ceplecha, K. Mossman, and G. Wetherill, *Earth, Moon, and Planets* 68: 189-197, 1995.
Videos: <http://meteor.uwo.ca/~pbrown/Videos/peekskill.htm> and <http://fireball.meteorite.free.fr/meteor/en/1/1992-10-09/peekskill/synthese>
- (5) The Fall, Recovery, Orbit, and Composition of the Tagish Lake Meteorite: A New Type of Carbonaceous Chondrite, Peter G. Brown et al. 13 OCTOBER 2000 VOL 290 SCIENCE, 320-325.
- (6) The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records, J. BOROVIČKA, P. SPURNÝ, P. KALENDA, and E. TAGLIAFERRI, *Meteoritics & Planetary Science* 38, Nr 7, 975–987 (2003)
- (7) THE ATMOSPHERIC TRAJECTORY AND HELIOCENTRIC ORBIT OF THE NEUSCHWANSTEIN METEORITE FALL ON APRIL 6, 2002, Pavel Spurný, Dieter Heinlein, and Jurgen Oberst. In: *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002. International Conference, 29 July - 2 August 2002, Berlin, Germany*. Ed. Barbara Warmbein. ESA SP-500. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-810-7, 2002, p. 137 – 140
- (8) The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite, P. BROWN, D. PACK, W. N. EDWARDS, D. O. REVELLE, B. B. YOO, R. E. SPALDING, and E. TAGLIAFERRI, *Meteoritics & Planetary Science* 39, Nr 11, 1781–1796 (2004)
- (9) The Villalbeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of atmospheric trajectory and orbit, Josep M. TRIGO-RODRÍGUEZ, Jiri BOROVIČKA, Pavel SPURNÝ, José L. ORTIZ, José A. DOCOBO, Alberto J. CASTRO-TIRADO, and Jordi LLORCA, *Meteoritics & Planetary Science* 41, Nr 4, 505–517 (2006)
- (10) The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit, and impact position from photographic and photoelectric records, Pavel SPURNÝ¹, Philip A. BLAND, Luka² s³ SHR BENY⁴, Jir⁵ i⁶ BOROVIČ⁷ KA¹, Zdeněk CEPLCHA, Andrew SINGELTON, Alex W. R. BEVAN, David VAUGHAN, Martin C. TOWNER, Terence P. MCCLAFFERTY, Ralf TOUMI, and Geoff DEACON, *Meteoritics & Planetary Science* 47, Nr 2, 163–185 (2012)
- (11) Almahata Sitta (=asteroid 2008 TC3) and the search for the ureilite parent body, Peter JENNISKENS, Je⁸ re⁹ mie VAUBAILLON, Richard P. BINZEL, Francesca E. DeMEO, David NESVORNY¹⁰, William F. BOTTKER, Alan FITZSIMMONS, Takahiro HIROI, Franck MARCHIS, Janice L. BISHOP, Pierre VERNAZZA, Michael E. ZOLENSKY, Jason S. HERRIN, Kees C. WELTEN, Matthias M. MEIER, and Muawia H. SHADDAD, *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 10–11, 1590–1617 (2010)
- (12) Pre-fall Orbit of the Buzzard Coulee Meteoroid, E. P. Milley, A. R. Hildebrand, P. G. Brown, M. Noble, G. Sarty, A. Ling, and A. Ling, *AAPG Search and Discovery Article #90172 CSPG/CSEG/CWLS GeoConvention 2010*, Calgary, Alberta, Canada, May 10-14, 2010
- (13) Maribo—A new CM fall from Denmark, Henning HAACK, Thomas GRAU, Addi BISCHOFF, Marian HORSTMANN, John WASSON, Anton SØRENSEN, Matthias LAUBENSTEIN, Ulrich OTT, Herbert PALME, Marko GELLISSSEN, Richard C. GREENWOOD, Victoria K. PEARSON, Ian A. FRANCHI, Zelimir GABELICA, and Philippe SCHMITT-KOPPLIN, *Meteoritics & Planetary Science* 47, Nr 1, 30–50 (2012)
- (14) Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009, Pavel SPURNÝ, Jir¹¹ i¹² BOROVIČ¹³ KA, Javor KAC, Pavel KALENDA, Jure ATANACKOV, Gregor KLADNIK, Dieter HEINLEIN, and Thomas GRAU, *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 8, 1392–1407 (2010)
- (15) The fall of the Grimsby meteorite—I: Fireball dynamics and orbit from radar, video, and infrasound records, P. BROWN, P. J. A. McCAUSLAND, M. FRIES, E. SILBER, W. N. EDWARDS, D. K. WONG, R. J. WERYK, J. FRIES, and Z. KRZEMINSKI, *Meteoritics & Planetary Science* 46, Nr 3, 339–363 (2011)
- (16) The Kosice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit, Jiri BOROVIČKA, Juraj TOOTH, Antal IGAZ, Pavel SPURNÝ, Pavel KALENDA, Jakub HALODA, Jan SVOREN, Leonard KORNOS, Elizabeth SILBER, Peter BROWN, and Marek HUSARIK, *Meteoritics & Planetary Science* 1–23 (2013)
- (17) THE MASON GULLY METEORITE FALL IN SW AUSTRALIA: FIREBALL TRAJECTORY AND ORBIT FROM PHOTOGRAPHIC RECORDS, P. Spurný, P. A. Bland, L. Shrubeny, M. C. Towner, J. Borovička, A. W. R. Bevan, D. Vaughan, 74th Annual Meteoritical Society Meeting (2011), 5101.pdf
- (18) Radar-Enabled Recovery of the Sutter’s Mill Meteorite, a Carbonaceous Chondrite Regolith Breccia, Peter Jenniskens, et al., 21 DECEMBER 2012 VOL 338 SCIENCE, 1583-1587
- (19) Fall, Recovery and Characterization of the Novato L6 Chondrite Breccia, Peter JENNISKENS, et al., *Meteoritics & Planetary Science*, 7 AUG 2014, (draft paper can be found at https://profile.usgs.gov/myscience/upload_folder/ci2014Jun1214154574880176_MAPS-Novato8.pdf)
See also: <http://cams.seti.org/index-N.html>
- (20) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization, Olga P. Popova, et al, *SCIENCE* VOL 342 29 NOVEMBER 2013, 1069-1073
See also: http://en.wikipedia.org/wiki/Chelyabinsk_meteor
Videos: <http://newswatch.nationalgeographic.com/2013/02/15/best-videos-from-meteor-strike-in-russia/>
- (21) <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/small-asteroid-2014-aa-hitsearch/>

長良隕石の落下情報に関する考察 アブスト

沼津市 渡邊美和 WATANABE Yoshikazu

1. はじめに

2018年3月、岐阜県で新たに隕石が確認されたことがメディアをにぎわした。

筆者による江戸時代の流星現象観察記録としては、これまでに583例が集められている。また、先行する大崎史料集には、一部重複があるが303例が収められている。なお、大崎史料集には観察地点が不明などの利用しにくさも散見される。

勿論、前述したように、長良隕石(Nagara)の落下の可能性は江戸時代に限られるものではない。或いは何億年以前に遡ることも考えられ、或いは、明治以降さらには、ごく最近の可能性もある。

史料検索が可能な江戸時代記録に基づき、或いはそれを彷彿させる事象が得られたなら、更にそこから史料発掘も可能となるかもしれないと考え、この時代のそれらしい記録を検討する。そのために発見地点である岐阜市長良に近いものピックアップすることにした。

この結果、筆者史料から選び出した岐阜・愛知・三重・滋賀・長野の各県に残る流星らしき記録として77例を検討した。これを更に吟味した結果、22例が8事象に関して重複観察(同時観察)されていた。当初、大流星の観察記録ではないとされたものの内、雷かもしれない現象4例、花火のことを記載した例が1例、竜巻かもしれない現象が2例、流星雨現象が4例(1事象)で、既知または知られていない隕石に関する例が4例含まれていた。なお、雷かもしれない記録と隕石に関する記録が混在しているもの1例がある。これら大流星の観察記録ではないと見られるものを排除すると、61例となる。

2. 長良隕石の候補記録

この61例で検討した中では、仮N○34の金明録に記録された安永八年一月七日1779.02.22の記録が興味深い。金明録は、一般には「猿猴庵日記」とも称されている尾張藩士高力種信の日記で、明和9～文政5から成っている。名古屋叢書三編第14巻にも集録されていて接しやすい。

この記録は次のように記述されている。

「夜戌ノ刻比、大成ひかり物、東より西へ飛、わるゝ音、雷のごとく。東の方より星落る。同時、北西の方より星落る沙汰有り。光り物は星にて有之由。見届たる人の咄し也。鳴音、二度聞へる。」

記録者が音を聞いていると見られる状況からは、落下地と記録者の距離は2-30kmと推察され、長良と名古屋の関係に一致する。また、「星落る」と何らかの落下現象があり、「星落る沙汰有り」と何らかのこれに対するアクション(例えば報告など)があったことも推察される。「光り物は星にて有之由」「見届たる人の咄し」などは何らかの現物が誰かにより確認されたような印象を受ける。

もとより、長良隕石の候補を探るとしたら、何億年間に遡ることもあるかもしれない。ただ、長良川近くという条件なら、案外、この1000年間くらいに絞ることも可能かもしれない。ここでは候補の一つと

して安永八年一月七日 1779.02.22 の記録を提示するにとどめる。今後、安永年間についての現地記録などの精査が望まれよう。

岐阜県揖斐川町の西美濃プラネタリウムに勤務されていた松本幸久によると、重さ 4.2kg の隕石らしきものがかつてあった。大正 2 年 4 月 23 日に村の若者 4 人が、旧坂内村川上と旧徳山村門入の村境であるホハレ峠近くで拾ったとのこと。たまたま拾い上げた石がずしりと重く、これは通常の石ではないと思い持ち帰ったとのことだ。ホハレ峠は滋賀県に近い揖斐川町にある。この「坂内隕石」との関係にも今後注目していきたい。

3. 追記 曾根隕石の新史料

兵庫県三田市の史料である「諸事風聞日記」から、新たに曾根隕石の落下時の史料が 2018 年 2 月に筆者により発掘できた。

この史料は北摂三田鍵屋重兵衛家の史料で、摂津国有馬郡三田町の商家で、南町東組の町年寄を務めていた鍵屋重兵衛(朝野庸太郎)家の所蔵史料のうち、「諸事風聞日記」と題された幕末から明治維新时期(慶応元年～明治七年)の日記である。記載された内容は以下の通り。

「爰ニ天変不思議之事御座候、丹州天田郡曾根村と申田地江、四月廿五・六日頃ニ昼九ツ時ニ大音致シ、大筒之音也、曾根村百姓田中へ罷出候処、其音之時土煙上り、天より真直ニ四貫目斗リ之石落ル、田地へ三尺斗り入、其石式ツニ割レ、此曾根村ハ天下領ニ候間、その殿様篠山様隣国ニ候間、申上ルニ付見聞有之候処、丸石ニてなし、割石ニて、角石ニ付、鉄砲江ハ不入候と申事也、下方ニて天狗しわざと申、其石ハそのべ様へ持帰り被成候、笹山近辺数多見物ニ行、笹山之村方へ石之われを持帰り候、其石金気まぜりニて光り有と申、此事篠山之人申、廿九日無相違事也」

これまで曾根隕石に関しては国立天文台で所蔵されている、慶応二年六月三日付けの「丹波国隕石之事」だけだったと見られる。

「諸事風聞日記」史料の特徴として次の点があげられる。

- ・四月廿九日に情報を入手したことが記され、これは形式的には慶応二年六月三日付けの「丹波国隕石之事」の報告より早い。
- ・おおむね、内容は「丹波国隕石之事」と一致していて「丹波国隕石之事」の確かさを補強。
- ・「天より真直ニ四貫目斗リ之石落ル」はいかにも隕石のダークフライトと最終的な垂直方向への落下を示している。
- ・「鉄砲江ハ不入候」と、先ずこれの鉄砲や大砲との関係が調べられている。

3. 追記

長良隕石については、岐阜市民から 2 つ目のものかと思われる隕石様のものか岐阜聖徳学園大学教育学部に 2018 年 3 月 22 日に連絡の上で持ち込まれている。更に、隕石に関係する現象かとして、「2018 年 4 月 2 日に、岐阜県内に住む 90 歳の女性から電話があり、昭和 19 年秋に岐阜市長良上空に火球が出現したという目撃情報が寄せられた。この女性は当時 16 歳で、家族とともに長良隕石の発見場所に近い岐阜市長良新屋敷に住んでいた。夕刻に長良橋の上空から岐阜市雄総に向かって大きさ 50 センチぐらいの火の玉が飛んできた」との紹介もある。

以上