

つくば隕石雨の落下経路と軌道

司馬康生¹⁾・伊藤大雄¹⁾・下田 力²⁾・福井敬一¹⁾・重野好彦³⁾

1. はじめに

1996年1月7日16時21分(JST)過ぎに関東地方を中心に、東北地方南部から中部地方にかけて非常に明るい火球が観測された。この時刻は日没の約20分前で、この地方はほとんど雲一つ無い快晴の青空だった。続いて、埼玉県東部を中心に大音響が轟き、屋内に居た人までが何事かと思ひ戸外に多く飛び出した。また、この火球は、大音響と共に隕石雲を残し、これは40分以上観測された。この後、つくば市とその周辺の23ヵ所から合計800g余の普通球粒隕石が発見回収され、「つくば隕石」と命名された(奥山(楠瀬)ほか, 1996)。

日本流星研究会火球観測部門では、通常から火球の観測データを収集し、その中で特に大きな火球についてはその経路や隕石落下の可能性について検討してきた。また、JN(Japan fireball Network)では、晴天時の夜間に写真やTVによる自動火球観測を続け、多くの火球を撮影し、軌道計算を行うことで、その起源の解明を進めてきた。その中には1989年3月10日20時57分40秒頃、浜名湖上空で発光し、四日市市上空で消滅した火球(四日市火球)のような小規模な隕石落下をもたらした可能性のあるものも含まれている。流星物理セミナー・ワーキンググループでは、近年暗い流星についてTVによる観測と軌道計算を精力的に進め、多くの流星軌道データを得てきた。

1月7日夕刻、我々はマスコミからの問い合わせにより情報を得て、この火球が昼間に多くの人によって観測される明るさだったこと、衝撃波の発生と見られる大音響が観測されたこと、経路に沿って隕石

雲が残ったことから、この大火球が隕石をもたらした可能性が高いこと、また隕石雨の可能性が考えられることをパソコン通信網で紹介すると共に、情報提供を呼びかけた。火球の明るさはその火球の質量に依存すると共に、突入速度にも依存するので、それだけで隕石落下の判断はできない。もし、速度が特に大きい火球なら、明るく光ると共に大気中で磨耗し尽くしてしまう。一方、衝撃波の発生は、大きな断面積の物体が、大気密度の大きな低空まで流星物質が磨耗、減速することなく超音速のまま貫入したことを意味し、その後大規模な火球の分裂が起きて隕石が回収できないことも有るが、隕石となって落下している可能性が高い。また、隕石雲の発生はたいへん珍しい現象で、日本における近年の隕石落下では、1986年7月29日に落下した国分寺隕石で記録され(国分寺町教育委員会, 1988)、一般に大規模な隕石の落下に伴って観測されるものと思われる。ここで注意が必要なのは、流星に伴う類似の現象が見られることである。すなわち、高速の流星が高層大気に突入したときに観測される「流星痕」との区別である。これは高層の希薄大気中の励起したプラズマが発する禁制線による光であり、中、低層大気中に放出されたダストを中心とする隕石雲とは性質の違うものである。

我々はその後、落下経路の推定、速度の見積もりに関する試み、シミュレーションによる隕石落下領域の再現などを行ってきた。その結果、多くの観測データからいくつかの新たな見地を得ることができた。ここでは現在までに得られたそれらの結果を紹介する。

1) 日本流星研究会:

〒654-01 神戸市須磨区南落合1-17-8-201

2) JN(日本火球ネットワーク)

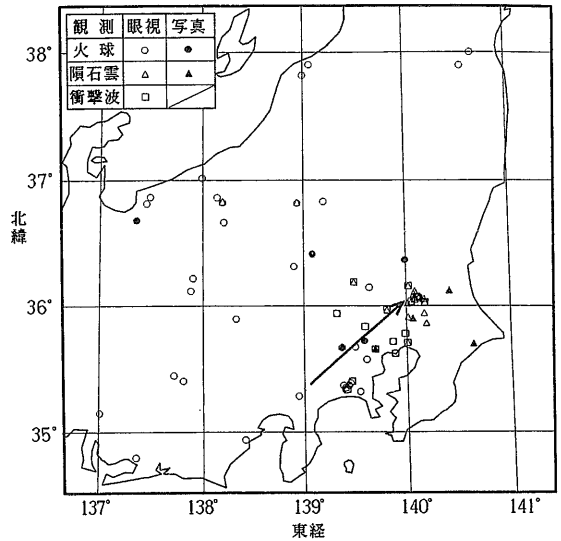
3) 流星物理セミナー・ワーキンググループ

キーワード:つくば隕石, 隕石, 火球, 隕石雨

2. 火球経路

突入方位角は眼視観測報告によるデータ(司馬, 1996a,b;伊藤ほか, 1996;平野, 1996)から推定を進めた。一般に, 眼視観測による観測データは誤差が大きいので, 精度の吟味や, 誤差をカバーするための観測報告数が多いことが望まれる。つくば隕石の経路については, 約40件の報告が得られ, その中で特に経路の「垂直」に対する観測に着目した。誤差の大きな眼視データだが, 経路の水平や垂直の方向感覚は一般に信頼度が高い。つくば隕石は多くの人が目撃した首都圏上空を通過したが, 経路直下の人にとっては, その経路が地平線に対して垂直であり, 経路より左側から見た人は左下がりに, 逆に経路の右側から見た人は右下がりに落下するように見えたはずである。観測報告から東京都小金井市, 東村山市, 府中市から「垂直」を示唆する報告が為されている。それに対して東京都目黒区では「頭上東を通過」, 東京都日野市からは「経路は垂直から10°の角度で左下がりに落下」, 静岡県御殿場市から「わずかに右下がり」, 静岡市からは「垂直から10°以下の角度で左下がりに」と報告されている。幾分相矛盾するものも含まれるが, これらから静岡市の南→御殿場市の北→府中市→小金井市→というラインが推定できる(第1図)。すなわち突入方位角では南西方向, 南から48°西方向である。これは, 東田進也氏(気象庁)から私信でいただいていた地震計記録による衝撃波到達時刻から推定した経路方向, 南から48°西と全く一致した。

また, 経路上の点として, 我々は隕石雲の正確な



第1図 眼視観測・落下経路

発生点を求めた。なぜなら, 隕石雲は火球の経路上で発生しているはずである。つくば隕石の隕石雲は多くの人によって目撃されると共に, 写真も撮影された。これらの多くの観測から, 隕石雲は時間と共に北西に流されたことがわかったので, 発生直後に撮影された写真を必要とした。幸いにも東京都日野市から小林正人氏, 東京都目黒区から大橋芳之氏がそれぞれ火球を観測した直後に隕石雲を撮影していた(写真1, 2)。火球消滅後30秒以内と思われる2氏の1枚目の写真から, 隕石雲は水海道市上空24~26kmで発生していたことがわかった。また, 小林氏の連続写真から発生直後の隕石雲は形が激しく変化したこともわかった。最初の写真(写真1, 2)

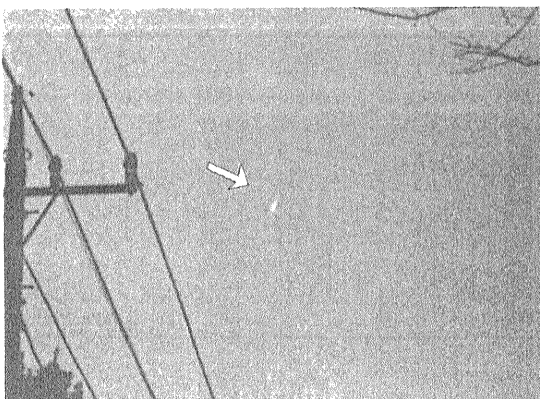


写真1 隕石雲(小林正人氏撮影)

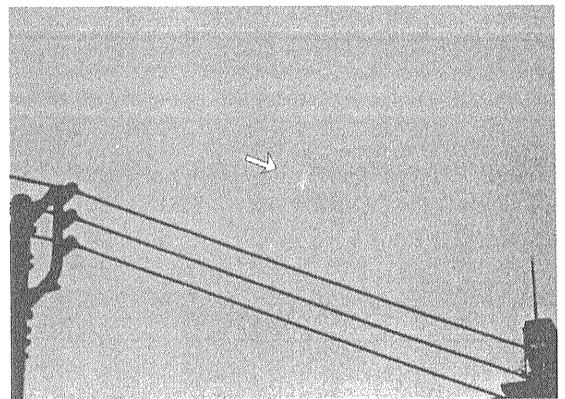


写真2 隕石雲(大橋芳之氏撮影)

第1表 写真観測者

撮影者	撮影地 経度,緯度,標高	掲載新聞・雑誌	備考
石田哲美	群馬県前橋市 139°05'28.5"E, 36°24'06.7"N, h106m	読売新聞(1996.1/8) 月刊天文(1996.3月)	地上物は写っておらず, 位置測定できず。 7~8個の分裂片が写っており, 各破片の相対位置測定は済み。
本郷喜代則	富山県上市町女川 137°21'30"E, 36°40'34"N, 36m		地上物が条件良く写っており, 富山科学文化センターの布村氏, 渡辺氏により比較写真が撮影され, 位置測定済み。
小林伊一	茨城県下館市	天文ガイド(1996.3月)	長く線を引いたように写っている。 未調査。
樋口克則	東京都小金井市	東京スポーツ(1996.1/11)	5秒間に3枚撮影。掲載写真に地上物は写っていない。

ははっきりした上部と, たいへん淡い下部から構成されている(下部は不鮮明である)。上部の明るい部分の中では最も下の部分が最も明るい。そして上下の部分には「く」の字型に曲がっている。そして, それぞれの部分の地平線と為す角度は, 後に示す火球の突入角と比べてあまりにも大きい。これが, 2枚目の写真では上部の明るい部分が2つの塊に分裂し, それらが水平に近い位置に並ぶように変化し, 1分以内に劇的な変化を遂げている。従って, 火球通過点と見込んだ隕石雲の写真位置は既に発生直後大きく移動した後かもしれない。その劇的な変化の要因として, 発生熱による上昇運動, 通過した隕石の運動量が与えられて経路方向に押し出される運動, など考えられるが, ここでは, 小林氏によって連続撮影された写真から確認できた上昇運動だけを考慮した。計算された隕石雲の最も淡い末端が, 既に500m上昇していたと仮定し, 経路上の点を推定した。すなわちこれは, 東経139.9823°, 北緯36.0299°, 高度24.2kmである。これは, 眼視観測のみから既

に推定されていた位置に対して東に1km程, 高度は2km程高くなったが, 良く一致した。

最後に経路の仰角を決定するために火球の写真を利用した。落下中の火球の写真は(第1表)に示す4氏が撮影していることが新聞, 雑誌で紹介された。このうち2氏から写真をお借りし, 測定することができた。しかし, 石田氏の写真(写真3)は地上物が写っておらず, 経路測定はできなかった。一方, 本郷氏の写真(写真4)は非常に良い条件で地上物が写っており, 精度良く火球の位置が決定できた。これを測定した結果, 隕石雲の発生点を通り, 眼視観測から決定した方位角上に火球が存在したとして, 東経139.795°, 北緯35.897°, 高度39.4kmであることがわかった。ここから隕石雲の発生点へ直線を引くと, 突入高度角は35.1°である。なお, (写真4)からわかるとおり火球は尾を引いている。この尾の長さは0.7°, 実長は2.9km, 伸びている方向は地平線に対して32.9°だった。これは火球経路の突入高度角より2.2°小さいが, 尾の先は先頭より小さな破

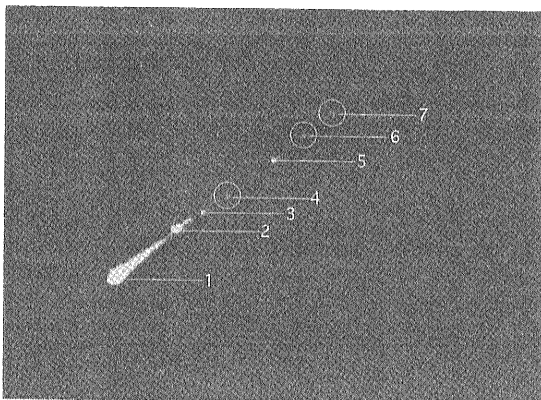


写真3 つくば隕石の落下写真(石田哲美氏撮影)

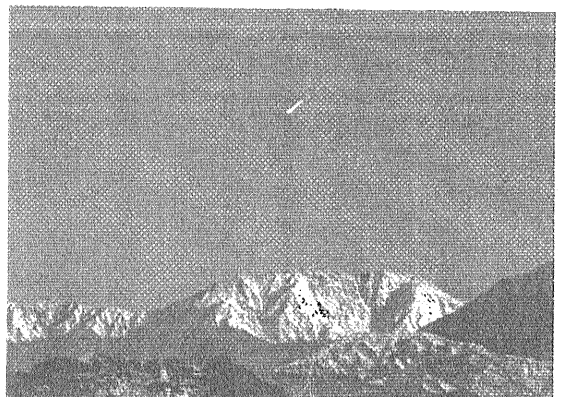


写真4 つくば隕石の落下写真(本郷喜代則氏撮影)

片が飛行しているため、既に減速して重力の影響からより早く落下していると理解できる。この突入高度角は東田氏らにより地震計記録から求められた角度、47°よりかなり小さい。

3. 大気突入速度と隕石軌道

隕石の起源を知るためには、その突入方向と共に速度が正確にわかっているなければならない。今までに正確な速度が決定されたのは、Pibram (Ceplecha, 1961), Lost City (McCrosky et al., 1971), Innisfree (Halliday et al., 1978), Peekskill (Brown et al., 1994) の4つの隕石だけである。これらは写真もしくはTVカメラによって速度が決定され、その日心軌道はいずれも遠日点を火星と木星の間を持つ事がわかっている。つくば隕石については、当初火球の飛行が一般の方によってTV撮影されたと報じられたが、それは飛行機雲の映像であり、速度を決定できるTV映像は今回は得られていない。一方、写真観測から速度を求める方法は、夜間なら回転シャッターと呼ばれる羽をレンズ前面で一定速度で回転させて得られた像から求められる。もちろん、今回得られた写真にこの装置は使われておらず、シャッター速度が速いため、撮影された火球映像の伸びも確認できない。このため、信頼できるつくば隕石の大気突入速度(単に「突入速度」とする)を求めることはできない。そして、困難なことに突入速度の見積もり誤差はむしろ突入方向の見積もり誤差より、その起源たる日心軌道により大きな誤差を一般にもたらす。

今回は、突入速度の推定を2つの方法で試みた。眼視観測データからと、落下物理の検討からである。

眼視観測から速度を求めることは突入方向を求める以上に大きな誤差を伴う。それは、主に発光時間の見積もりが困難なことによる。それでも観測数が多く得られたので、そこから求めたものが、第2表である。大気中を飛行する火球は空気抵抗によって減速し、一般に隕石となって落下する場合は消滅直前に4[km/s]程度以下まで減速することが知られている。従って、第2表で得られた結果は、突入速度より小さな数値かもしれない。

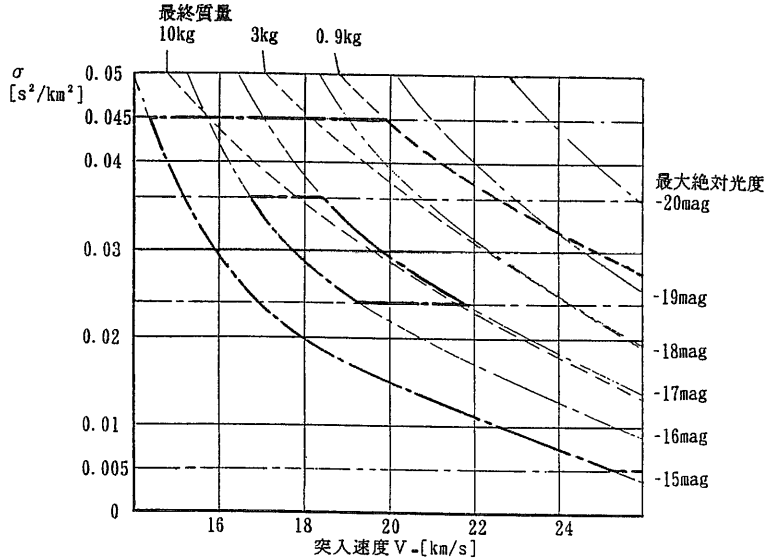
一方、突入速度を推定するため飛行する火球の物理的な面に着目する。一般に火球観測から直接

第2表 眼視観測による火球速度(司馬ほか, 1996)

観測者	観測地	観測経路長		観測時間 [s]	速度 [km/s]
		[deg]	[km]		
高橋清利	福島県国見町	5	40	2~3	13~20
玉木 聡	新潟県妙高高原杉の原	55	99	3	33
大宮英男	新潟県糸魚川市早川	12?	45	2~3	15~23
坪井 宏	新潟県黒崎町木場地内	18~31	133	10	13
樫村信也	富山県黒部市若栗	10~15	115	3~4	29~38
森 和雄	長野市吉田	44	55	2~3	18~28
小林和宏	長野市信濃町	67	143	5~6	24~29
成尾誌穂 他	長野県朝日村	69	133	3.6~5.5	24~37
辻 庸一	埼玉県毛呂山町	100	148	3	49
橋爪貞美	茨城県つくば市	33	20	5	4
山本哲也	茨城県つくば市新井	40?	45	2~3	15~23
小林正人	東京都日野市多摩平	20~25	35	2~3	12~18
渡辺 裕	東京都府中市	45	48	3?	16
麻生 他	神奈川県藤沢市円行	64	68	5	14
白石	神奈川県鎌倉市雪の下	16~20	30	1~2	15~30
高井	神奈川県寒川町	26?	39?	5?	8
明田	神奈川県茅ヶ崎市堤	38~69	57	2	29
栗原	神奈川県藤沢市遠藤	17~19	43	1~2	22~43
井上	神奈川県茅ヶ崎市新栄町	38~43	60~69	5?	13
山本義秀	静岡県登呂	23	63	1~2	32~63
合計 (幅のあるものは中央値)		1423.5		71.55	
合計20件		平均速度 =		19.9 ± 4.5[km/s]	

得られる物理量は、位置、速度、光度である。今回、速度が不明なのでそれを位置、光度から類推したい。まず、位置に関する重要なデータは地上高度である。隕石落下の可能性を判断する場合にも、火球の消滅点高度の決定が欠かせない。つくば隕石火球は、消滅点はやや不正確だが、隕石雲の発生高度が正確に決定できた。隕石雲の発生はこの高度で最も多量のダストが大気中に放出されたことを意味し、大気と隕石とが最も効率よく衝突した地点と考えられる。更に、同じ根拠から、この地点で最大光度となったと考えられ、観測でもそれを支持するデータが得られている。一方、光度について精度の高いデータは無い。しかし、白昼の青空で多くの人が認めたことから満月より十分明るく、逆に、火球による影や背後からの光で気付いたという報告が見られないことから、太陽よりは十分暗く、おそらく-15等~-20等程度ではなかったかと推測する。石田氏の写真(写真3)の予備的な測定では、-15等以上有ったと認められるが、最も明るい部分はネガ濃度が飽和に近く、精度の高い測定はできていない。長谷川隆氏は、白いテーブルに反射した光から-16~-17等ではないか、と推測している。

これらから、隕石雲発生高度で最大光度となり、



第2図 物理面から考察した速度(司馬ほか, 1996)

かつその光度が上記予想の範囲とする突入速度を求めたい。この計算のため、単純アブレーションモデル (McIntosh, 1970) によるシミュレーションを行った。このモデルは、大気と衝突する火球物質が、消耗する運動エネルギーに対して一定の割合で質量欠損が進むと仮定された古典的なモデルである。大気に突入した火球の運動エネルギーは、その質量と速度の2乗に比例し、それが光や蒸発、衝撃波、分裂に分配される。このモデルにより、大気突入質量と、突入速度、磨耗係数を変化させ、計算したものが第2図である。図から、可能性の高い磨耗係数の値、推測された光度、900g以上の落下質量に対応する突入速度は18~20[km/s]前後である。

ただし、この推測には問題点が含まれている。一つは火球の分裂がもたらす効果であり、もう一つは、このモデルで使う磨耗係数の信頼度である。

最近、大気中を飛行する火球はその多くが分裂をすることがわかってきた。そして、適当な分裂を考慮することで、いろいろな光度変化がモデル計算と良く一致することが示されている (Babadzhanov et al., 1990)。具体的な分裂モデルとしては、火球表面から小破片が少しずつ剥離してゆく準連続分裂 (Babadzhanov, 1992) と、大規模な分裂が階段状に繰り返す粗分裂 (Ceplicha, 1995) が、モデル化されて観測と計算の比較が為されている。これらのモデルによる計算結果は、単純アブレーションモデ

ルと違った光度変化をもたらす。しかし、つくば隕石火球の限られた観測データから分裂を定量化することは、想像力抜きにはできない。

一方、磨耗係数 σ が大きいほど大気中ですみやかに磨耗が進み、落下質量は小さくなってしまふ。この数値の見積もりは、観測された火球から隕石を発見回収する際に重要なため、火球観測網であるヨーロッパネットワークでは特に詳細に調べられてきた。実際に落下した Pribram, Lost City 隕石に対しては (McIntosh, 1970) によって示され、 $\sigma = 0.005 \sim 0.045$ 程度とかなりの幅がある。一方長沢は、 $\sigma = 0.03 \pm 2$ 割程度であろうとしている (長沢, 1981)。

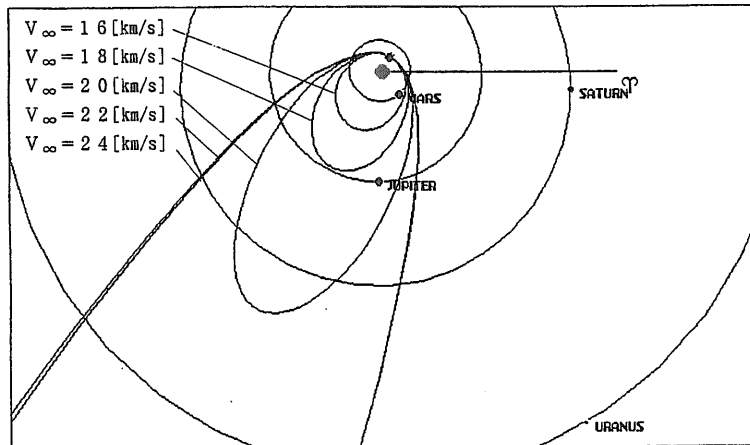
得られた突入方向、推測する速度に対して求めた軌道は、第3表、第3図になる。もし突入速度が16[km/s]程度なら、その日心軌道は遠日点を火星と木星との間を持つ典型的な隕石軌道であるが、これまで推測した速度から推定すると、より大きな軌道を持っていた可能性が十分考えられる。

4. 落下シミュレーション

経路が判明した明るい火球に伴い、隕石落下が見込まれる場合に落下点を予測したり、既に隕石が発見回収された場合でも、更なる分裂片の落下位置を予想する事は、多くの破片を早期に発見回収するために重要である。

第3表 軌道要素

初速度 V_{∞} [km/s]	修正輻射点 α (2000) δ [deg] [deg]	地心速度 VG [km/s]	軌道半長径 a [AU]	離心率 e	近日点距離 q [AU]	近日点引数 ω [deg]	昇交点黄経 Ω [deg]	軌道傾斜角 i [deg]
16	312.1 -13.0	11.9	1.98	0.562	0.864	131.6	286.4	1.6
18	313.7 -11.2	14.5	3.09	0.723	0.854	133.4	286.4	2.4
20	314.7 -10.0	16.9	7.16	0.882	0.845	134.4	286.4	3.0
22	315.5 -9.2	19.3	-21.	1.040	0.837	135.0	286.3	3.6
24	316.0 -8.6	21.5	-4.1	1.200	0.829	135.3	286.3	4.1

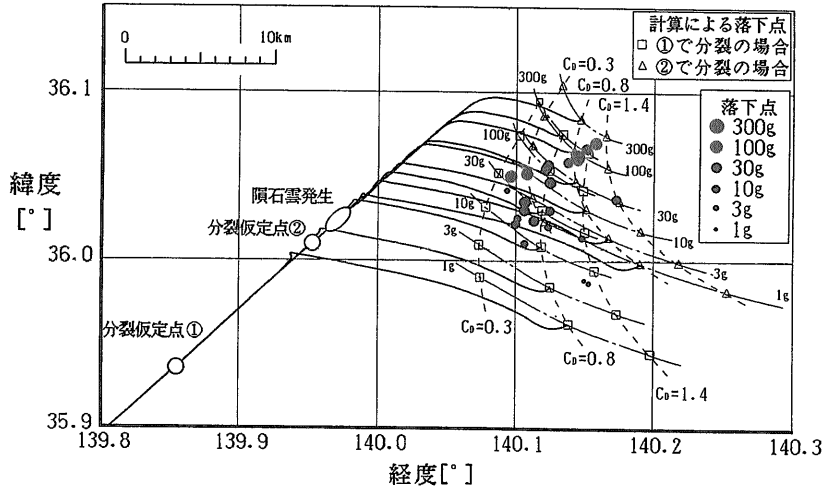


第3図 日心軌道

つくば隕石の場合、これらの計算を進める前に複数の隕石が発見された。このため我々の注目は、落下領域が奇妙な形をしていることと、もっと大きな破片が落下しているならばその位置はどこになるかの2点だった。一般に、隕石雨の落下領域は楕円形になることが知られている。そして、典型的な落下楕円の短径は4~5kmで、長径は火球の突入方向を向き、その長さは火球の突入角が小さいほど長くなることが知られていた。そして、落下楕円の手前に小さな質量の破片が早く減速して落下し、より先に大きな破片が落下する。しかしつくば隕石の落下領域は、一辺8~9km程度の三角形になっており、これは従来知られていた落下楕円とは全く違う形状だった。一方、観測された火球が大きな規模だったのに、発見回収された隕石の総質量が少ないことから、未発見の大きな隕石破片への期待も大きかった。

求められた経路から単純アブレーションモデルを使い、高度35kmと隕石雲の発生直前の高度26.5kmの2点で分裂を仮定し、計算したものが第4図である。隕石雲の発生点では、大規模な分裂が起きていたと推定されると共に、これより前の位置で撮影さ

れたと見られる石田氏の写真(写真3)で既に7~8個の分裂片が認められるため、分裂点を2点考慮した。上空では偏西風が強く吹いているため、小さな質量の隕石は予想以上に流されて東南東に落下することがわかる。落下領域が経路上からかなり東にそれた地域になっていることも計算で再現できた。ここで上空の風は、つくば市の高層気象台で得られた当日9時(JST)と15時(JST)のデータを使っている。図中の C_D は落下する隕石速度が音速以下に減速したときの抵抗係数で、 $C_D=0.3, 0.8, 1.4$ の3例について示した。なお、図中の質量は、落下質量であり、上空ではもっと大きい。図示していないが、超音速飛行時の抵抗係数を大きくすると自由落下に早く移行するため、落下位置は南西にずれる。また、分裂高度を低くすると落下位置は北東になるが、仮定した35kmでの分裂より高い高度での分裂を仮定しても、結果はほとんど変化しない。ここで図示した結果は、眼視観測に基づく経路データで行ったシミュレーション(Shiba et al., 1996)と比べて超音速飛行時での抵抗係数を大きく、 $C_D=1.5$ とした。球形での理論値 $C_D=1.0$ より大きな値で実際の落下点によ



第4図 シミュレーションによる落下域

り近付くことは、分裂直後の各破片が凹凸の多い形だった事が原因と考える。

ほとんどの破片の落下位置は計算で再現できたが、1号-2号隕石に至る北北東-西南西の顕著なラインが形成され、その北側から全く隕石が発見されていないことをこの計算から説明することはできない。この点は未解明の問題として残った。

5. おわりに

本稿は、落下経路については主として伊藤、速度、シミュレーションについては主として司馬、による。また、下田により眼視・写真データ収集と写真の測定を、また福井により現地隕石雲の調査と上空の風のデータの収集、重野により軌道計算をそれぞれ主として行った。なお、これら調査を進めるにあたり、実に多くの方から観測データの提供を受けた。それらのほとんどはここで詳しく紹介できなかったが、彼らのデータがあってここまでまとめることができたのであり、感謝申し上げたい。とりわけ貴重な写真を測定させていただいた本郷喜代則氏、石田哲美氏、小林正人氏、大橋芳之氏、安本昌彦氏、柴原 充氏、そして写真収集に助力いただいたり、資料やデータの転送に関わった多くの方々、データ提供をいただいた高層气象台の職員の方、助言をいただいた方々に感謝申し上げる。

文 献

Babadzhanov, P.B., Novikov, G.G. and Konovalova, N.A. (1990) : Solar Sys. Res., 23 (4), 167-170.
 Babadzhanov, P.B. (1992) : Solar Sys. Res., 26 (5), 488-499.
 Brown, P., Ceplecha, Z., Hawkes, R.L., Wetherill, G., Beech, M. and Mossman, K. (1994) : Nature, 367-17, 624-626.
 Ceplecha, Z. (1961) : Bull. Astron. Inst. Czech. 12, 21-47.
 Ceplecha, Z. (1995) : Earth Moon and Planets, 68, 107-126.
 Halliday, I., Blackwell, A.T. and Griffin, A.A. (1978) : Roy. Astron. Soc. Canada, 72 (1), 15-39.
 平野英雄 (1996) : つくば隕石による雲の目撃。地質ニュース, no.499, 55-58.
 伊藤大雄・司馬康生・下田 力・福井敬一 (1996) : つくば隕石 — その一部始終と実経路。きときと流星会議資料集 89-102.
 国分寺町教育委員会 (1988) : ドキュメント国分寺隕石。141p.
 McCrosky, R.E., Posen, A., Schwartz, G. and Shao, C.-Y. (1971) : J. Geophys. Res., 76 (17), 4090-4108.
 McIntosh, B.A. (1970) : Roy. Astron. Soc. Canada, 64 (5), 267-281.
 長沢 工 (1981) : 流星観測の立場から見た隕石落下。月刊地球 3 (9), 588-596.
 奥山 (楠瀬) 康子・豊 遙秋・富樫茂子・木田紀子・佐藤益生・米田成一・島 正子・岡田昭彦・矢吹貞代・村山定男 (1996) : つくば隕石の組織的特徴とその記載。地質調査所月報 47 (7), 245-254.
 司馬康生 (1996a) : 火球報告No.26。天文回報 644, 18-21.
 司馬康生 (1996b) : 火球報告No.28。天文回報 646, 12-13.
 Shiba, Y. Ito, D. and Shimoda, C. (1996) : wgn 24 (3), 92-95.
 司馬康生・伊藤大雄・下田 力・福井敬一・重野好彦 (1996) : つくば隕石の突入速度 (V_{∞}) の検証。きときと流星会議資料集, 59-62.

SHIBA Yasuo, ITO Daiyu, SHIMODA Chikara, FUKUI Kei-ichi and SHIGENO Yoshihiko (1997) : Trajectory and Orbit of Tsukuba Meteorite Shower.

<受付: 1996年10月15日>