

彗星に関するガウスの研究について

植村 栄治 (大東文化大学)

2015年10月10日

1 はじめに

夜空にどこからともなく尾を引いて現れる茫洋とした星＝彗星は古代から人々の関心を集めてきたが、近代的な自然科学の対象として考察されるようになったのは17世紀頃からである。18世紀にはハレー彗星の回帰が予言・確認され、楕円軌道を描く周期彗星の存在が明らかになった。また、18世紀末までには放物線軌道を描く彗星についてその軌道計算を行うことが可能となっていた。

ガウスは、1801年に小惑星ケレスの楕円軌道を正確に計算することに成功し、その再発見に貢献した。ガウスが1809年に刊行した著書「天体運動論」には、楕円軌道あるいは双曲線軌道を描いて太陽を周る天体の軌道を計算する方法が詳述されている。

彗星には、再び太陽近辺に戻ってくる周期彗星と、二度と戻ってこない非周期彗星とがある。彗星と太陽の2体問題として考える限り、周期彗星の軌道は楕円（円を含む）であり、非周期彗星の軌道は放物線または双曲線である。もっとも、実際には木星その他の諸惑星の重力の影響等によって途中で全く違った軌道に変化することも珍しくない。

周期彗星であっても、その公転周期が概ね200年以上のものは非周期彗星に分類されるのが通例である。彗星の場合、太陽からある程度離れると観測できなくなるので、軌道計算も太陽近辺（近日点の周辺）に重きが置かれる。

たとえ楕円軌道を描く周期彗星であっても、彗星が発見された当初は、放物線軌道で近似した方が精度のよい軌道が得られると言われている。つまり、彗星の軌道計算に関しては、小惑星の場合と異なり、ガウスが「天体運動論」で明らかにした軌道計算方法は必ずしも必要でなく、18世紀末までに知られていた放物線軌道の計算方法で十分だった可能性が高い。

以上のような状況を背景に、本稿では、19世紀前半に欧州で目撃された諸彗星に関して、その観測や軌道計算につきガウスがどの程度の貢献をしたのかを具体的・個別的に探ることにする。

2 18世紀末までの彗星研究について

彗星についての古い記録としては、古代バビロニアの記録があるとされる。欧州では、彗星は「遠くにある星」でなく「上空で生じる気象現象」と考えられたため、彗星の古い記録はそれほど多くない。中国では彗星に対する関心が深く、史記には紀元前5世紀から紀元前1世紀にかけて現れた幾つかの彗星の記録がある。そのうち、BC240年の彗星はハレー彗星の確実な記録として世界最古とされている。日本では、

日本書紀にある634年の彗星の記録が最古とされている。

アリストテレスは、彗星は惑星の一種だとする従来の説を否定し、大気の上層部で生じる気象現象だと主張した。彼のこの考えの影響力は大きく、その後の西洋の天文学を長く支配することになった。

デンマークの天文学者ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546-1601)は、1577年の彗星を観測して地球からの距離を測定し、彗星は少なくとも月より4倍以上遠くにあつて宇宙空間を移動する天体であることを立証した。ヨハネス・ケプラー(Johannes Kepler, 1571-1630)は、1609年に、惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を描くという「ケプラーの第1法則」を発表したが、同法則は彗星の軌道については触れていない。ケプラー自身は、彗星は直線運動をしていると考えており、これを支持する天文学者もいたが、楕円あるいは放物線を描くと主張する者もあり、両者が対立していた。

アイザック・ニュートン(Isaac Newton, 1642-1727)は、1687年刊行のプリンキピアにおいて、天体の軌道は楕円、双曲線、放物線のいずれかになることを示し、この論争に決着をつけた。

3 彗星の概念と構造

古くから、洋の東西を問わず、「彗星」と言えば、先頭部にぼんやりとした「コマ」を持ち後部に長い「尾」を持って天空に現れる天体を指していた。

現代の天文学では、太陽の周りを回る天体のうち、惑星・準惑星・衛星以外のものはまとめて「太陽系小天体」と呼ばれる。そして「太陽系小天体」は、「小惑星」、冥王星より遠くに位置する「太陽系外縁天体」、「彗星」、「惑星間塵」に分類される。

「小惑星」と「彗星」の区別については、観測をしたときに質量放出(例:ガスや塵の噴出)の兆候があるものは「彗星」、そうでないものは「小惑星」とされる。一般に小惑星の軌道帯(火星と木星の間にあり、黄道面との傾斜角が小さい)と彗星の典型的な軌道(遠日点は木星より遠く、公転面は黄道面とほぼ無関係)とはかなり異なるが、最近では、標準的な小惑星の軌道帯にありながら質量放出が見られる天体や、彗星のような軌道を持ちながら質量放出が見られない小惑星も発見され、両者の厳密な区別は困難になってきている。

彗星であっても、太陽から遠く離れている所では、全体が凍って質量放出が行われず、小惑星と区別できない。しかし、多くの場合、太陽に3天文単位(AU。地球と太陽の平均距離を1とする)程度まで近づくと、太陽からの熱によって蒸発が始まる。

彗星のコマは希薄な球状の大気でその中心部は明るく光っている。コマの中には「核」と呼ばれる固体が存在するが、コマにさえぎられてその姿は見えない。太陽と反対側には彗星の「尾」が形成される。尾には、彗星の核から放出された塵によって形成される「ダストテイル」のほか、イオン化されたガスによって形成される「イオンテイル(又はプラズマテイル)」があり、また、中性ナトリウム原子によって形成される尾が観測される場合もある。

核の大きさは直径数百メートルから数キロメートル程度だが、コマはそれよりずっと大きく、直径百万キロメートル以上になることもある。尾も、長い場合には、1A

Uに達することがある。

4 彗星の軌道

ニュートンの証明したところによれば、太陽を回る彗星の軌道は楕円（円を含む）、双曲線、放物線のいずれかになる。もっとも、これは木星その他の天体が彗星に及ぼす影響を無視した場合の話であり、太陽光線や太陽風による圧力等の非重力的効果も考慮していない。また、彗星の質量放出に伴う質量減少や反動作用の効果、あるいは太陽の引力による彗星の分裂や崩壊等も考えていない。

彗星が木星や土星に接近したためにその軌道が全く変化してしまう現象は決して珍しくない。したがって、彗星の軌道計算に当たっては単純な円錐曲線の当てはめで済まない可能性があることを常に念頭に置く必要がある。

天体が太陽を中心とする円軌道を描く場合、その天体の観測データから軌道を決定する方法はガウス以前から知られていた。また、天体が太陽を焦点とする放物線軌道を描く場合、その天体の観測データから軌道を知る方法はまずニュートンが考案し、18世紀末にはオルバースが精密な計算方法を確立した。

これに対し、天体の軌道が太陽を焦点の1つとする楕円（円を除く。以下同じ）である場合については、1801年にガウスが3個の観測データから軌道を決定する方法を編み出してケレスの再発見を可能としたことがよく知られている。また、ガウスが1809年に刊行した「天体運動論」では、天体が楕円軌道のほか双曲線軌道を取る場合の軌道決定方法についても述べられている。

ところで、彗星の軌道は、多くの場合、円、楕円、双曲線、放物線のいずれになるのだろうか。19世紀前半頃までに発見された彗星に関して言えば、若干の周期彗星が楕円軌道であるのを除くと、ほとんどは放物線軌道として計算されていた。円軌道と双曲線軌道は実例としては皆無だったと考えてよい。

19世紀前半においては、観測可能な彗星の位置は、木星の軌道よりもずっと内側の範囲に限られていた。したがって、周期彗星の場合の公転周期を別とすると、太陽周辺の近日点を中心として、そこから1~2AU以内程度の範囲で良い近似を与える計算方法があれば一応事足りた。つまり、実際には楕円軌道であっても、その遠日点が例えば10AUを超えるような場合には、太陽から遠い軌道部分を計算しても観測によってその当否を確認することはできない。そして、太陽に近い軌道部分だけ求めるのであれば、放物線軌道を仮定して計算しても——その結果さえ良好なら——何ら差し支えない。

このように考えると、彗星の軌道については——特に彗星が発見された直後に太陽周辺におけるおおよその軌道を知りたいときは——放物線軌道を仮定して計算すれば足りるので、1809年の「天体運動論」の刊行以前でも天文学者たちは軌道計算ができたわけである。

このように、彗星の軌道計算については、ケレス等の小惑星の軌道計算と異なり、ガウスの独壇場とは言えなかった。では、ガウスは彗星の観測や軌道計算についてどのような貢献をしたのであろうか。それを以下に見ていこう。

5 ガウスが観測又は軌道計算に関与した彗星

ガウスは若いときから天文学に関心を持っていた。小惑星ケレスの軌道計算に成功したのは1801年のことだが、既に1798年7月には「彗星の理論を、より完成されたものにした」とガウス日記に記している（後記8参照）。

1802年頃からガウスは質素な観測器械で天文観測を行っていた。また、1807年にゲッティンゲン大学の天文台長に就任した後は、次第に高性能の望遠鏡をそろえながら天体観測を行っていた。

当時の彗星に関する研究は、望遠鏡による位置や形状の観測と軌道の計算が主だった。ガウスはゲッティンゲン大学の天文台において彗星を観測する一方、自己あるいは他人が取得した観測データに基づいて彗星の軌道を計算する、という2つの面で彗星の研究に貢献していたわけである。そこで、まず、ガウスが実際に観測又は軌道計算に関与した記録がガウス全集に記載されている彗星について、ガウスがどのような寄与をしたのかを調べてみよう。

観測又は軌道計算についてガウスが関与した彗星としては、ガウス全集によれば、次のものが挙げられる。

[以下のリストについての注記：/の前のCは非周期彗星(公転周期200年以上の周期彗星を含む)を、また、Pは周期彗星を、Dは発見後に消滅した彗星をそれぞれ表す。PとDについてはまとめて18世紀以来の通し番号が付される。/の後は彗星の発見時期を表す。すなわち、4桁数字は発見年を示し、アルファベットはAが1月前半、Bが1月後半、Cが2月前半を意味して以下同様に続くが、Iは使用しないので、Yが12月後半となる。末尾の数字は当該半月の間で何番目に発見された彗星かを示す。()の中は発見者の名前又は当該彗星の一般的な名称。[]の中は周期彗星について今日算定されている公転周期。]

★ガウスが関与した彗星(延べ18個)の一覧表

発見年	符号	発見者又は名称	公転周期	(後出6の番号)
1805年	2P/1805 U1	(Encke)	[3.30年]	[1]
1805年	3D/1805 V1	(Biela)	[6.54年]	[2]
1807年	C/1807 R1	(Great comet)	[1714年]	[3]
1811年	C/1811 F1	(Flaugergues)	[3096年]	[4]
	C/1811 W1	(Pons)		
1813年	C/1813 C1	(Pons)		
1815年	13P/1815 E1	(Olbers)	[69.5年]	[5]
1817年	C/1817 Y1	(Pons)		
1818年	2P/1818 W1	(Encke)	[3.30年]	[6]
	C/1818 W2	(Pons)		
1819年	C/1819 N1	(Great comet)		
1821年	C/1821 B1	(Nicollet-Pons)		

1823年	C/1823 Y1	(Great comet)	
1826年	3D/1826 D1	(Biela)	[6.54年]
1827年	C/1827 P1	(Pons)	
1844年	54P/1965 M1	(de Vico-Swift-NEAT)	[7.34年]
	C/1844 Y2	(d' Arrest)	
1845年	C/1845 L1	(Great June comet)	

6 いくつかの彗星についての具体例

【1】エンケ彗星 [2P/1805 U1] (1805年10月20日フートら発見)

1805年10月20日早朝にフランクフルト・アン・デル・オーデル在住のヨハン・フート(Johann Sigismund Gottfried Huth, 1763-1818)は彗星を発見した。マルセイユ天文台のジャン＝ルイ・ポン(Jean-Louis Pons, 1761-1831)とパリ天文台のアレクシス・ブヴァール(Alexis Bouvard, 1767-1843)も同じ日にこの彗星を発見した。フランツ・フォン・ツァハ(Franz Xaver von Zach, 1754-1832)はこれらの情報を直ちに自分が編集・発行していた月刊誌「月報」(注1)の1805年11月号に掲載した。なお、この彗星は、公転周期3.3年の周期彗星であることが1819年にヨハン・フランツ・エンケ(Johann Franz Encke, 1791-1865)によって確認され、以後、エンケ彗星と呼ばれるようになる。

オルバースは、この彗星の軌道要素の計算をフリードリヒ・ヴィルヘルム・ベッセル(Friedrich Wilhelm Bessel, 1784-1846)に依頼しその結果を1805年12月7日付の書簡でツァハに送った。ガウスは、自身の計算した軌道要素を12月5日付の書簡でツァハに送った。両者の放物線軌道の軌道要素は1806年1月の月報に掲載された(月報13巻79-83頁(1806年1月)、ガウス全集(以下「全集」)第6巻265-266頁)。ガウスは、フートやテュリの観測データの精度が低いように感じており、自分の算出した軌道要素も余り当てにならないと断っている。

以上のように、この彗星の観測は何人も天文学者によって行われたが、1805年末頃までにこの彗星の放物線軌道要素を計算してツァハに報告できたのは、ベッセルとガウスのみであった。

(注1) この「月報」は、ツァハが編集・発行していた月刊誌「地球及び天空に関する学問の発展のための月刊報告」(Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels- Kunde)を指す。

【2】ビエラ彗星 [3D/1805 V1; Biela] (1805年11月10日ポンス発見)

1805年11月10日にポンが前月のエンケ彗星とは別個の彗星を発見した。続いて、11月16日にはブヴァールが、また11月22日にはフートが同じ彗星を発見した。なお、この彗星については、1826年に至りヴィルヘルム・フォン・ビーラ(Wilhelm von Biela, 1782-1856)が周期6.6年の周期彗星であることを発見し、それ以後はビエラ彗星と呼ばれるようになる。以下、この彗星に関してガウスが執筆した書簡や論

稿で全集に収録されているものの概要を見ていこう。

a) [月報 13 巻 83-91 頁(1806 年 1 月), 全集第 6 巻 266 頁]

1805 年 12 月 8 日のガウス自身の観測データと, 11 月 16 日および 12 月 2 日の他者の観測データに基づき, この彗星の放物線軌道の昇交点= $250^{\circ} 33'$, 軌道傾斜角= $16^{\circ} 33'$ 等と計算した。

b) [1809 年度用天文年鑑 137-140 頁(1806 年), 全集第 6 巻 267-269 頁, ガウスよりボーデ宛の 1806 年 3 月 14 日付書簡]

その後の他者の観測データをも利用して修正計算したところ, 昇交点= $250^{\circ} 33' 34''.9$, 軌道傾斜角= $16^{\circ} 30' 31''.9$, 近日点距離= 0.8919284 AU 等となった。この軌道要素に基づく計算値と全 19 個の観測データとの誤差を調べると, 赤経については $+2' 12'' \sim -2' 30''$, 赤緯については $+2' 44'' \sim -1' 12''$ の範囲に収まっている。この彗星の軌道は 1772 年発見の彗星と似ているが, 特に近日点距離等においてかなりの相違がある。

c) [月報 14 巻 75-86 頁(1806 年 7 月), 全集第 6 巻 270-275 頁: ガウスよりツァッハ宛の 1806 年 5 月 20 日付書簡]

23 個の観測データを示す。これを楕円軌道で計算すると, 昇交点= $251^{\circ} 28'$, 軌道傾斜角= $12^{\circ} 43'$, 公転周期= 4.74 年となる。これだと諸データと数十秒程度しか違わない。この軌道は, 1772 年の彗星の軌道(昇交点= $263^{\circ} 24'$, 軌道傾斜角= $13^{\circ} 39'$ と計算される)と似ているが, 同一とまで断定はできない。

d) [月報 14 巻 181-186 頁(1806 年 8 月), 全集第 6 巻 275-277 頁: ガウスよりツァッハ宛の 1806 年 7 月 8 日付書簡]

新たに入手したフランスの観測者の 6 個の観測データをこれまでに算出された軌道要素と照合すると, 「この彗星の軌道を楕円と見た方が放物線と見た場合よりも観測データと良く一致する」とは言えない。なお今後の観測を待つ要あり。(注 2)

【参考】この彗星と 1772 年の彗星は同一であることを 1826 年にビエラが確認した。今日の計算では, 昇交点= 250.669° , 軌道傾斜角= 13.2164° , 公転周期= 6.6454 年, 離心率= 0.751299 , 軌道長半径= 3.534658 AU だったとされている。ビエラ彗星は 1845 年に 2 つに分裂し, 1852 年を最後に以後は観測されていない。なお, ガウスの示した公転周期 4.74 年は実際とかなり違っている。1772 年と 1805 年の彗星を同一とした場合, 33 年間の間にガウスによれば 7 回周回したことになるが, 実際には 5 回だった。ガウスの示した軌道要素がこれほど実際と違っていたのは珍しい。

(注 2) この頃, ツァッハは最小二乗法についてのルジャンドルの最新の著作のことを書簡でガウスに知らせた模様である。それに対し, ガウスはこの 1805 年 7 月 8 日の書簡で, 自分は最小二乗法の原理を 12 年前から種々の計算で使用していたこと, 及びその原理は自分の方法(Methode)の本質に属するものではないが, 自分の仕事において(今後)使用するであろう(den ich auch in meinem Werke mit gebrauchen werde)旨を述べている(全集第 6 巻 276 頁)。ここで“gebrauchen werde”と未来形になっている点が注目される。ガウスが 1801 年にケレスの軌道計算を行った際に最小自乗法を

用いて精確な軌道を得たとの記述が一部の書物に見られるが、それが正しくないことはこの文章からもうかがえる。

【3】1807年の大彗星 [C/1807 R1] (1807年9月9日パリジ発見)

a) [月報 16 巻 562-567 頁(1807年12月), 全集第6巻 292 頁]

ガウスは、ブレーメンとリリエントールにおける 1807 年 11 月 5 日までの観測データに基づき、この彗星の放物線軌道を昇交点= $266^{\circ} 38'$, 軌道傾斜角= $63^{\circ} 12'$, 近日点距離= 0.6478772 AU 等と計算した。この軌道要素は、編者ツァッハやベッセルが計算して得たものとそれほど違わない。

b) [1811 年度用天文年鑑 135-139 頁(1808 年), 全集第 6 巻 293-294 頁: ガウスより編集者宛の 1808 年 1 月 24 日付書簡]

ガウス自身が観測した 1807 年 12 月 17 日, 29 日および 1808 年 1 月 4 日の計 5 個の観測データと同僚ハーディング教授の観測データ 1 個を掲載。軌道要素については上記 a) の内容を紹介。放物線軌道からのずれは、あったとしてもわずかだろうとした。

c) [ゲッチンゲン学術公報 32 号 313-315 頁(1808 年 2 月 25 日), 全集第 6 巻 298-299 頁]

上記 b) の観測データが示され、さらにガウス自身による 1808 年 1 月 31 日の観測データが追加された。

d) [ゲッチンゲン学術公報 53 号 521-523 頁(1808 年 4 月 2 日), 全集第 6 巻 300-301 頁]

ベッセルが 3 月 18 日付でガウスに送った書簡によれば、この彗星を 2 月 24 日まで計 8 回観測できた。オルバースの 2 月 14 日の観測データを付記。ベッセルの計算した放物線軌道は上記 b) のガウスの結果とほぼ一致する。さらにベッセルは楕円軌道の場合を計算して、公転周期 1953 年等とした。

e) [ゲッチンゲン学術公報 180 号 1793-1795 頁(1808 年 11 月 10 日), 全集第 6 巻 308-309 頁]

ペテルスブルグではこの彗星が 3 月 1 日・22 日・27 日にも観測された。

【参考】この彗星に関して、ベッセルは、上記 d) で見たように、1808 年 4 月の時点で 1953 年という公転周期を算出した。彼は 1810 年に著書『1807 年に現れた大彗星の見かけ上の及び真の軌道に関する研究』(参考文献【4】)を刊行してその計算方法を説明している。なお、現在では、この彗星の昇交点= 269.48370° , 軌道傾斜角= 63.17620° , 近日点距離= 0.646124 AU , 離心率= 0.995488 , 公転周期= 1714 年とされている。

【4】1811年の大彗星 (フロジェルグ大彗星) [C/1811 F1; Flaugergues] (1811年3月25日フロジェルグ発見)

この彗星は肉眼で 8 ヶ月以上に渡って見ることができた。見かけの明るさは約 0 等級にまで達した。尾は 90° 以上の長さに見えたとも言われる。トルストイの小説「戦争と平和」にも登場することで知られている。

a) [月報 24 巻 180-182 頁(1811 年 8 月), 全集第 6 巻 326-327 頁: ガウスからリンデ

ナウ宛の 1811 年 8 月 3 日付書簡]

ツァッハとリンデナウの観測データに基づき、放物線軌道を昇交点= $141^{\circ} 4' 59''$ 、軌道傾斜角= $73^{\circ} 48' 02''$ 、近日点距離= 0.980686 AU 等と計算した。また、1811 年 8 月～10 月の位置と光度及び 1812 年 7 月 2 日の位置と光度を予測した。

b) [ゲッチンゲン学術公報 130 号 1289-1293 頁(1811 年 8 月 17 日), 全集第 6 巻 327-330 頁]

内容は、上記 a) とほぼ同じ。

c) [1814 年度用天文年鑑 254-256 頁(1811 年), 全集第 6 巻 333-334 頁: ガウスより編集者宛の 1811 年 9 月 10 日付書簡]

ガウスが観測した 9 月 4 日, 6 日, 7 日のデータとツァッハの得た新しい観測データに基づいて、放物線軌道を昇交点= $140^{\circ} 24' 13''$ 、軌道傾斜角= $73^{\circ} 7' 17''$ 、近日点距離= 1.040064 AU 等と修正した。また、1811 年 9 月 12 日から 12 月 21 日までの 10 日ごとの位置、地球からの距離及び光度を予測した。

d) [月報 24 巻 304-307 頁(1811 年 9 月), 全集第 6 巻 335-337 頁: ガウスからツァッハ宛の 1811 年 9 月 8 日付書簡及び同年 9 月 16 日付書簡]

上記 c) と同じ観測データ及び修正した軌道要素を示す。楕円性の確認はまだできない。彗星の尾は 2 本はっきり見える。前例のない彗星で、核は見えない(以上 9 月 8 日付書簡)。9 月 9 日～16 日までのガウス自身の観測データに基づき、12 月 31 日までの軌道を 10 日ごとに予測した。これまでの実測データと予測値を見ると赤経のずれが急速に増大しているため、楕円性が存在すると思われる(以上 9 月 16 日付書簡)。

e) [ゲッチンゲン学術公報 151 号 1497-1499 頁(1811 年 9 月 21 日), 全集第 6 巻 337-338 頁]

上記 c), d) と概ね同じ内容で、特に新規の情報はない。楕円性はまだ認定できないとしている。

f) [月報 24 巻 406-411 頁(1811 年 10 月), 全集第 6 巻 338-340 頁: 後半ではガウスからツァッハ宛の 1811 年 10 月 14 日付書簡を紹介]

計 6 名の観測者から得られた 8 月 22 日～10 月 11 日の全観測データについて放物線軌道とのずれを示す(最大 $20'$ 程度)。ガウスからの 10 月 14 日付書簡の内容: これまでの計算中に書き間違いが発見された。それを修正した後の放物線軌道は、昇交点= $140^{\circ} 21' 40''$ 、軌道傾斜角= $73^{\circ} 4' 18''$ 、近日点距離= 1.015530 AU 等となる。この軌道と観測結果とのずれは概ね $1'$ 以内に収まるので、楕円軌道の確かな証拠はまだ認められない。もし楕円軌道だとすると、公転周期は千年以上になると思われる。

g) [月報 24 巻 507-517 頁(1811 年 11 月), 全集第 6 巻 341-342 頁: ガウスからツァッハ宛の 1811 年 11 月 15 日付書簡]

ガウスの計算した最新の放物線軌道を、オルバース(ブレーメン)、ニコライ(ゼーベルク)(Friedrich Bernhard Gottfried Nicolai, 1783-1846)の 10 月・11 月の観測データと比較した。どちらも赤経は計算値より $2\sim 3'$ 程度小さく、赤緯は $2\sim 6'$ 程度大きい。また、この彗星の発見直後の 1811 年 3 月 26 日から 4 月 1 日までのフロジエルグの観測データと上記軌道との差をニコライが計算したところ、赤経は $+14' \sim -6'$ 程度、

赤緯は+3' ~ +5' 程度の差があった。

h) [ゲッチンゲン学術公報 19 号 185-189 頁(1814 年 1 月 31 日), 全集第 6 卷 373-375 頁: ベッセルがガウスに宛てた 1813 年 12 月 30 日付書簡の紹介]

1812 年 8 月にコーカサスで Vincent Wisniewski がこの彗星の数か月ぶりの観測に成功した。その 5 回の観測データを, ベッセルが計算した楕円軌道と比較すると, 赤経・赤緯のずれは 1' から 2' 程度に収まる。

【参考】現在では, この彗星の昇交点は 143.30° , 軌道傾斜角は $73^\circ 5'$ で, 公転周期 3096 年程度の楕円軌道とされている。

【5】オルバース彗星 [13P/1815 E1; Olbers] (1815 年 3 月 6 日オルバース発見)

a) [ゲッチンゲン学術公報 45 号 441 頁(1815 年 3 月 20 日), 全集第 6 卷 382 頁: オルバースのガウス宛て 1815 年 3 月 7 日付書簡の紹介]

オルバースは, 新彗星を 1815 年 3 月 6 日に発見した旨をガウスに 3 月 7 日付の書簡で知らせた。それによると, 3 月 6 日 10 時 55 分(ブレーメン平均時)には赤経 $49^\circ 32'$, 赤緯北 $32^\circ 7'$ にあり, 3 月 7 日 7 時 40 分には赤経 $49^\circ 22'$, 赤緯北 $32^\circ 32'$ にあった。今後かなり長い間観測できるであろう。この彗星は非常に小さく, ぼんやりした核と淡いもやを有している。

b) [ゲッチンゲン学術公報 55 号 537-538 頁(1815 年 4 月 8 日), 全集第 6 卷 382-383 頁]

1815 年 3 月 20 日から 30 日までに 4 回の晴れた夜があり, 新彗星について 5 個の観測データが得られた。そのうちの 1 つはエンケの観測による。実地天文学における彼の有能さは既にしばしば示されている。他所からの観測結果の報告はまだない。上記の観測データに基づいてガウスが暫定的に求めたこの彗星の軌道要素は, 近日点通過時刻=1815 年 4 月 24 日 16 時 37 分 34 秒(ゲッチンゲン平均時), 昇交点= $82^\circ 43' 4''$, 軌道傾斜角= $45^\circ 8' 55''$, 近日点距離= 1.24738 AU 等である。この彗星は終始肉眼では見えず, 6 月には観測できなくなると予測される。

c) [1818 年度用天文年鑑 167-173 頁(1815 年), 全集第 6 卷 383-385 頁: 後半にガウスより編集者宛の 1815 年 4 月 24 日付書簡を含む]

内容は上記 b) とほぼ同じ。7 月まで観測できれば楕円軌道を計算できそうとしている。

d) [ゲッチンゲン学術公報 105 号 1041-1043 頁(1815 年 7 月 3 日), 全集第 6 卷 385-387 頁]

ガウスは 3 月 6 日・4 月 25 日・6 月 12 日の 3 個の観測データに基づき, 放物線軌道を昇交点= $82^\circ 43' 6''$, 軌道傾斜角= $44^\circ 43' 13''$, 近日点距離= 1.23024 AU 等と計算した。もし楕円軌道とすると, 昇交点= $83^\circ 26' 21''$, 軌道傾斜角= $44^\circ 30' 43''$, 近日点距離= 1.21349 AU , 遠日点距離= 35.0911 AU , 公転周期= 77.5 年となつて, この方が観測データにより良く合致する。公転周期は, たとえ今後のより精確な計算により増大することがあつたとしても, 100 年を超すことはないと思われる。

e) [1818 年度用天文年鑑 229-232 頁(1815 年), 全集第 6 卷 387-389 頁: ガウスよりボ

一デ宛の 1815 年 8 月 9 日付書簡]

内容は d) とほぼ同じだが、軌道計算者としてニコライとベッセルの名を挙げ、計算のさらなる緻密化は彼らの手に委ねたいと述べ、また、公転周期については、遠からず分かるだろうが、おそらく 77.5 年より小さいだろうとしている。

f) [ゲッチングン学術公報 149 号 1437-1476 頁(1815 年 9 月 18 日), 全集第 6 巻 389-391 頁]

3 月 20 日から 8 月 25 日までの 12 個の観測データをまとめ、ベッセルおよびニコライが楕円軌道として計算した場合のそれぞれの結果を紹介した。ベッセルによれば、昇交点=83° 28' 46", 軌道傾斜角=44° 29' 54", 近日点距離=1.21282 AU, 離心率=0.93113, 長軸半径=17.60964 AU, 公転周期=73.8968 年となり、ニコライによれば、昇交点=83° 28' 52", 軌道傾斜角=44° 29' 46", 近日点距離=1.21269 AU, 離心率=0.93029, 長軸半径=17.39704 AU, 公転周期=72.564 年となる。

【参考】オルバース彗星は、現在では、昇交点=86° 6', 軌道傾斜角=44° 37', 近日点距離=1.17845 AU, 離心率=0.930297, 長軸半径=16.90678 AU, 公転周期=69.5 年とされている。次回の太陽接近は 2024 年 7 月の予定。

【6】エンケ彗星 [2P/1818 W1; Encke] (1818 年 11 月 27 日ポンス発見)

a) [ゲッチングン学術公報 28 号 273-278 頁(1819 年 2 月 18 日), 全集第 6 巻 417-419 頁]

1818 年 11 月にマルセイユのポンスが発見した 2 つの彗星のうちの 1 つにつき、マンハイムのニコライは 12 月 22 日から 29 日までの間に 5 回観測し、その観測データ及び自分の計算した軌道要素を 1819 年 1 月 8 日付の書簡でガウスに送った。ニコライは、近日点距離=0.52933 AU, 昇交点=330° 14' 17", 軌道傾斜角=14° 59' 6" 等と算定した。その他、ハーディングやエンケが得た観測データもある。エンケのガウス宛 1819 年 2 月 5 日付書簡によれば、エンケは公転周期 3 年 7 月の楕円軌道を算出した。この楕円軌道と観測値とのずれは 30" 以内であり、昇交点=334° 18' 8", 軌道傾斜角=13° 42' 30", 長軸半径=2.3430189 AU, 離心率=0.8567776 等となる。すると、この軌道は 1805 年の第 1 彗星と似ている。その彗星については、当時、ベッセルが、放物線軌道として、昇交点=344° 37' 19", 軌道傾斜角=15° 36' 36", 近日点距離=0.37862 AU, 等を算出していた。この 2 つの彗星が同一かはさらに注意深く調べる要あり。

b) [ゲッチングン学術公報 83 号 825-829 頁(1819 年 5 月 24 日), 全集第 6 巻 420-422 頁]

これら 2 つの彗星が同一であることは、その後のエンケの計算で明白になった。木星の引力の影響につきエンケはガウスの方法を用いて計算した。この彗星の公転周期は 3.42 年で、昇交点=334° 43' 37", 軌道傾斜角=13° 38' 42", 離心率=0.8490883 等となる。

【参考】この彗星は、1786 年にピエール・メシヤン(Pierre François André Méchain, 1744-1804)によって発見され、その後 1795 年と 1805 年にも観測されたことが分かっている。公転周期は次第に短くなっているとされる。周期性が確認された彗星として

は、ハレー彗星に次いで2番目である。なお、上記【2】のピエラ彗星の周期性確認は1826年である。

7 放物線軌道の計算について

彗星の放物線軌道を計算で求める方法を最初に示したのはニュートンである。彼はプリンキピアの第3篇中の「命題」の中で彗星に関する命題・問題・補助定理・系・実例等を述べ、彗星の運行・軌道・構造等について詳しく論じた。その中には、例えば、「放物線上を運動する彗星の軌道曲線を、与えられた三つの観測から決定すること」という問題もあり、ニュートンは自分の案出した幾何学的な解法（作図を含む）を3頁ほどにわたって記している。但し、ここでの「三つの観測」は全く任意に取れるわけではなく、二つの時間間隔がほぼ等しい等の制約がある。ニュートンは1680年の彗星を例にとって、その軌道を計算し、観測値との差が経度は2分以内、緯度は10分以内程度に収まっていることを示した。

1797年にオルバースは『数個の観測から彗星の軌道を計算するための最も容易にして快適な方法に関する論文』（参考文献【2】）を著し、その中で彗星の放物線軌道を計算する方法を示した。この方法は、3個の観測から放物線軌道を決定する一般的なやり方であり、理論的にも優れたものであった。

ガウスは1809年刊行の「天体運動論」において放物線軌道の計算については基本的に取り上げなかった。その理由は、オルバースの上記書物によって放物円軌道の計算問題は解決済みと考えたからと推測されている。しかし、ガウスは、オルバースの計算方法には不十分な点があると考えていた模様である。1813年頃から1815年頃にかけてガウスは彗星の放物線軌道に関する論文を手がけていた。その論文は「天体運動論」を補完しつつ放物線軌道についての完成した理論を提供するはずのものであった。その論文は結局発表されないままに終わったが、その骨子と思われる草稿はガウス全集第7巻に収められている。

8 ガウス日記の第94項目について

ガウス日記の第94項目は1798年7月に書かれ、次のように述べている。

「彗星の理論を、より完成されたものにした。」(Cometarum theoriam perfectiorem reddidi.)

従来、この「彗星の理論」が何を指すかは不詳とされてきた。この問題に関する明確なノート、遺稿、書簡等は発見されていないので、この「彗星の理論」の内容を立証することはほとんど不可能である。もっとも、当時はまだ彗星の構造や起源等についての理論的考察はほとんど皆無だったのだから、「彗星の理論」が「彗星の軌道に関する理論」を指すことは確かと考えてよい。

ここで筆者は、或る事実を指摘して、1つの推測ないし仮説を提示しておきたい。それは、上記7で述べたように、1797年にオルバースが彗星の軌道（すなわち放物線軌道）の決定方法を述べた著書を刊行したという事実である。ガウスはこの著書を読んだ上で、その放物線軌道の決定方法に何らかの不十分な点を見出し、その修正を図

ったのではないかと思われる。オルバースの著書は放物線軌道の計算方法のほぼ完成版と言えるものであり、だからこそガウスも1809年の「天体運動論」では放物線軌道について詳説しなかった。

ガウスがオルバースの著書の不十分さをいつから認識していたかは明確でない。しかし、その不十分な箇所は或る1つの節に関してであり、比較的限定されている。1798年に当時21歳のガウスがそれまで天文学をほとんど勉強していなかったとしても、オルバースの記述の不十分さに気づくことは十分可能だったと思われる。

オルバースが示した軌道計算法は、ニュートンのものと比べて格段に進歩しており、一応、「完成された」(perfectus)ものと言って差し支えない。ただ、1箇所だけ不十分な点を見つけてその修正方法を考案したので、放物線軌道決定の理論は「より完成された」(perfectior [= perfectus の比較級])ものになった、というのがガウス日記第94項目の趣旨ではないか。これが筆者の仮説である。

9 まとめ

1. ガウスがその観測や軌道計算に関与した彗星は、全集で確認できるものだけでも18個に上る。但し、ガウス自身が発見した彗星はなく、ガウスの手による観測データも他の天文学者に比べてそれほど多くはない。
2. ドイツの有力な天体観測者が彗星の観測データをガウスに送った例は多く、ガウスはそれらのデータを検討して速やかに彗星の軌道計算を行い、その結果を頻繁に各種の雑誌に発表していた。
3. 彗星の放物線軌道は、1797年以降、天文学者の多くが(その精確さは別として)計算しているが、周期彗星の楕円軌道をガウス以外の者が計算するようになるのは、若干の例外を除き、1810年以降のことである。
4. 周期彗星の公転周期算出についてガウスはかなり慎重であり、自分の計算結果を安易に公表しなかったように見える。その理由は必ずしも明確でないが、彗星のように離心率が小惑星より相当に大きい場合には周回軌道の正確な計算は非常に難しくなることをガウスはよく承知していたのではないかと思われる。彼が1806年にビエラ彗星の周期の計算を間違えたことも彼を慎重にさせた一因かも知れない。
5. 結局のところ、彗星の研究に関してガウスの果たした役割として目に付くのは、彗星発見直後にいち早く観測データに接してその軌道を計算・公表し、観測者たちのその後の追跡・観測を容易ならしめたことである。1810年代の後半以降、天文学に対するガウスの熱意は次第に薄れていくように思われるが、その頃までに発見された短期周期彗星はごくわずかだったこともあり、小惑星の軌道計算において見られたようなガウスの圧倒的な存在感は彗星の軌道計算の場合には余り感じられないと言ってよい。

参考文献

- 【1】 ガウス全集 : Carl Friedrich Gauss, *Werke*, Bde 1-12, 1863-1929.
- 【2】 Wilhelm Olbers, *Abhandlung über die leichteste und bequemste Methode die Bahn eines Cometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen*, 1797.
- 【3】 *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels- Kunde*, hrsg. von Freyherrn von Zach, Bd.4, 1801.
- 【4】 Friedrich Wilhelm Bessel, *Untersuchungen über die scheinbare und wahre Bahn des im Jahre 1807 erschienenen grossen Kometen*, 1810.
- 【5】 *Briefwechsel zwischen Olbers und Gauss*, Erste Abteilung, hrsg. von Dr. C. Schilling, 1900.
- 【6】 Guy Waldo Dunnington, *Carl Friedrich Gauss: Titan of Science*, 1955 (2004).
- 【7】 ダニングトン著, 銀林浩他訳, 『ガウスの生涯』, 東京図書, 1976.
- 【8】 高瀬正仁訳・解説, 『ガウスの《数学日記》』, 日本評論社, 2013.
- 【9】 長谷川一郎著, 『天体軌道論』(改訂版), 恒星社厚生閣, 1986.