ガウスによる彗星の放物線軌道の研究

植　村　栄　治　（大東文化大学）

２０１８年１０月７日

1　はじめに

突然夜空に現れてどこかへ去ってしまう彗星の存在は古来からよく知られていたが，その軌道が科学的に研究されるようになったのは 17 世紀のことである．ニュートンは 1687 年初版の著書『プリンキピア』において彗星の軌道が放物線であることを示し，観測データからその放物線軌道を算定する方法を提示した．もっとも彼の計算法には種々の制約があり，その精度も極めて高いとは言えなかった．18 世紀にはオイラーを始め，多くの数学者・天文学者たちが彗星の放物線軌道の計算法に取り組んだが，いずれも現在の観点からは不十分なものであった．しかし，それらの先行業績を踏まえた上で，オルバースが 1797 年の著書で示した軌道計算法は非常に優れたものであり，その基本的な骨組みは現在まで受け継がれて「オルバースの方法」と呼ばれている．

こうして，彗星の放物線軌道の計算法は一応の確立を見たが，楕円軌道については全く事情が異なる．当時は，円軌道の場合を除いて，楕円軌道の精確な計算はほとんど不可能と思われていた．1801 年にガウスは同年に発見された小惑星ケレスの楕円軌道を精確に計算することに成功し，1809 年刊行の『天体運動論』において楕円軌道及び双曲線軌道の計算法を明らかにした．しかし，放物線軌道については，既にオルバースの方法が知られていたため，取り立てて詳しくは説明しなかった．

もっとも，ガウスはオルバースの方法にも改善の余地があると感じていたようで，その後数年をかけてその改良に向けての論稿を執筆している．本稿は，まずニュートン以降，オルバースの方法が提唱されるに至るまでの経緯を概観し，オルバースの方法の要点を紹介する．次いで，ガウスが放物線軌道についてどのような計算法を構想していたかを検討し，それがオルバースの方法とどの程度異なるものであっ

たかの評価を試みる．これらの作業を通じて，彗星の放物線軌道の計算法においてオルバース及びガウスの果たした役割が明確に認識されるであろう．

2　放物線軌道に関するニュートンとハレーの研究

アイザック・ニュートン(Isaac Newton, 1642-1727)は，『プリンキピア』[1]において，彗星の3回の観測からその放物線軌道を決定するという問題を論じた．ニュートンが与えた解法は，「ほぼ相等しい時間間隔だけ離れた3つの観測」を基準とし，太陽を焦点とする放物線を想定して種々の作図を行いその放物線軌道を得るというものであった．すなわち，求める放物線軌道は数値ではなく図面上の放物線として得られるのであり，あとはその図面上の長さや角度を実測して，各種の軌道要素が得られ，あるいは与えられた時刻における彗星の黄経・黄緯等が算出される[2]．

この方法による精度についてニュートンは1680年の彗星の例を挙げているが，それによれば4個の位置について計算値と観測値の誤差は黄経が1分から2分以内，黄緯が7分から10分以内であった[3]．

ハレーは，このニュートンの方法を基にして，軌道を図面でなく計算によって算定する方法を案出し，より精確な軌道決定を可能にした．ハレーは1695年頃にはこのような軌道計算法を会得していた模様である[4]．彼は1705年の論文[5]において，1337年から1698年までに観測された24個の彗星についてその放物線軌道を計算し，軌道要素の一覧表を作成した．その中で1531年，1607年及び1682年の3個の彗星については，軌道要素が酷似していたので，ハレーはこれらは周期76年程度の同一の周期彗星であると考え，次回は1758年頃に回帰するだろうと予言した[6]．この彗星は実際に1758年に発見され，ハレー彗星と呼ばれるようになった．

ハレーが算定した各種の彗星の軌道要素は，後世の天文学者らが算定した軌道要素とそれほど異なっておらず[7]，彼の軌道計算法はそれなりに精確なものであったと評価してよいであろう．

1) Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1st edition, (London: 1687).

2) ニュートンが示した以上の解法については，*Id.*：487-490参照．なお，同書第3版(1726年)は邦訳されており，以上の解法は，ニュートン(河辺六男訳)『自然哲学の数学的諸原理』(世界の名著31「ニュートン」所収)(中央公論社，1979年)，519-522頁に訳出されている．

3) Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 3rd edition, (London: 1726)：494；ニュートン(河辺六男訳)，注2)，528頁．

4) ハレーによる軌道計算の研究成果は，『プリンキピア』の初版には登場しないが，第3版ではかなり詳しく紹介されている．Newton, *supra* note 3)：500-502；ニュートン(河辺六男訳)，前注2)，527-531頁．

5) Edmond Halley, Astronomiae cometicae synopsis, *Philosophical*

Transactions of the Royal Society of London, 1705 24, 1882-1899, published 1 January 1705. なお，この論文はラテン語で書かれているが，現在では種々の英訳単行本の形でも刊行されている．例えば，Edmond Halley, *A synopsis of the astronomy of comets. By Edmund Halley, ...Translated from the original, printed at Oxford,* (Gale ECCO, 2012) 参照．

6) Halley, Astronomiae cometicae synopsis, *supra* note 5) : 1897.

7) 例えば，ハレーは1682年に発見されたハレー彗星につき，その近日点通過時刻＝1682年9月14日19時39分(ユリウス暦に換算後)，昇交点黄経＝51°16'30"，軌道傾斜角＝162°04'00"，近日点引数＝360° − (302°52'45" − 51°16'30")＝108°23'45"，近日点距離＝0.58328(AU) と算定した(現在と比較できるように表記を一部修正した)．*Id.* : 1886. これに対し現代の天文学によれば，当時のハレー彗星の軌道要素は，概ね，近日点通過時刻＝1682年9月15日6時42分，昇交点黄経＝55°34'08"(基準時は2000年初頭．1700年頃に比して約4°増大している)，軌道傾斜角＝162°15'54"，近日点引数＝109°13'17"，近日点距離＝0.582621(AU)，であったと算定されている(Gary W. Kronk, *Cometography : A Catalog of Comets*, vol. 1 : Ancient − 1799, (Cambridge: Cambridge University Press, 1999) : 376)．したがってハレーの計算の精度はかなり高かったと評価してよいであろう．もっともハレーは公転周期については軌道計算で導出したわけではなく，過去に現れた類似彗星の記録から推論したにとどまる点に注意を要する．

3　18世紀における進展

18世紀には，ニュートンとハレーに続いて，多くの天文学者・数学者たちが彗星の放物線軌道の計算法の研究を行った．一般に天体の軌道決定については近似解しか得ることができないので，いかに精度が高くかつ計算量が少なくてすむ近似計算法を案出するかが問題となる．この軌道計算の問題を研究した学者は多いが，しばしば挙げられるのは，ニコラ＝ルイ・ド・ラカーユ(Nicolas-Louis de Lacaille, 1713-1762)[8)]，レオンハルト・オイラー(Leonhard Euler, 1707-1783)[9)]，ヨハン・ハインリヒ・ランベルト(Johann Heinrich Lambert, 1728-1777)[10)]，ピエール・ブーゲ(Pierre Bouguer, 1698-1758)[11)]，ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ(Joseph-Louis Lagrange, 1736-1813)[12)]，ルジェル・ヨシプ・ボスコヴィッチ(Rugjer Josip Bošković, 1711-1787)[13)]，ピエール＝シモン・ラプラス(Pierre-Simon Laplace, 1749-1827)[14)]らである．

そのほか，18世紀の著名な天文学者アレクサンドル・パングレ(Alexandre Guy Pingré, 1711-1796)は，その著書『彗星論』において[15)]，ヨハン・フリードリッヒ・ヘンネルト(Johann Friedrich Hennert, 1733-1813)[16)]，ゲオルク・フリードリッヒ・フォン・テンペルホフ(Georg Friedrich von Tempelhoff, 1737-1807)[17)]，ジョゼフ＝ジェローム・ルフランセ・ド・ラランド(Joseph-Jérôme Lefrançois de Lalande, 1732-1807)[18)]らの軌道計算法をも紹介している．

また，次節で取り上げるハインリッヒ・ヴィルヘルム・マトイス・オルバース(Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers, 1758-1840)の 1797 年の著書は，主要な学者の軌道計算法を幅広く比較検討し[19]，ブーゲ[20]，ジャック・カッシーニ(Jacques Cassini, 1677-1756)[21]，トーマス・バーカー(Thomas Barker, 1722-1809)[22]，アシル・ピエール・ディオニス・デュ・セジュール(Achille Pierre Dionis du Séjour, 1734-1794)[23]，アンダース・レクセル(Anders Johan Lexell, 1740-1784)[24]，ツァハリアス・ノルドマルク(Zacharias Nordmark, 1751-1828)[25]らの研究にも言及している．

このように，ニュートンとハレー以降も天体の軌道計算について多くの研究がなされ，種々の計算法が提示された．しかし，そのほとんどはニュートンの放物線軌道の計算法を一定程度改良するにとどまり，それを本質的に凌駕するものではなかったと評価してよいように思われる．

8) Nicolas-Louis de Lacaille, *Leçons d'astronomie,* (Paris, 1746).* [注：以下，* は筆者が未参照の文献を示す．]

9) Leonhard Euler, *Theoria motuum planetarum et cometarum,* (Berlin: Ambrose Haude, 1744) ; Leonhard Euler, *Recherches et calculs sur la vraie orbite elliptique de la Comète de l'an 1769 et son tems periodique,* (St. Petersbourg: De l'Imprimerie de l'Académie Impériale des Sciences, 1770).

10) Johann Heinrich Lambert, *Insigniores orbitae cometarum proprietates,* (Augsburg: 1761). なお，Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 133* に同書の独訳がある．

11) Pierre Bouguer, *Entretiens sur la cause de l'inclinaison des orbites des planètes: où l'on répond à la question proposée par l'Académie Royale des Sciences, pour le sujet du prix des années 1732 et 1734,* seconde édition, (Paris: Chez Ch. Ant. Jombert, 1748).

12) Joseph-Louis Lagrange, Sur le problème de la détermination des orbites des comètes d'après trois observations, *Œuvres complètes*, tome 4, 439-532.

13) Rugjer Josip Bošković, De determinanda orbita planetae ope catoptricae ex datis vi celeritate & directione motus in dato puncto, (1749) [掲載誌不詳].*

14) Pierre-Simon Laplace, *Théorie du mouvement et de la figure elliptique des planètes,* (Paris, Imprimerie de Philippe-Denis Pierres, 1784).*

15) Alexandre Gui Pingré, *Cométographie ou Traité historique et théorique des comètes,* Tome Second, (Paris: De l'Imprimerie Royale, 1784): 420-424.

16) 例えば，Johann Friedrich Hennert, Ueber die Parabolische Laufbahn der Kometen und derselben wahren Anomalie, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1786,* (Berlin, 1783) : 167-169 参照．

17) Georg Friedrich von Tempelhoff, *Essai sur la solution du probléme*

Déterminer l'orbite de la comète par trois observations, (Utrecht, 1780).*

18) Joseph-Jérôme Lefrançois de Lalande, *Astronomie*, seconde édition revue et augmentée, (Paris, Chez la Veuve Desaint, 1771), tome troisième: 319-369.

19) Heinrich Wilhelm Olbers, *Abhandlung über die leichteste und bequemste Methode die Bahn eines Cometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen*, (Weimar: Industrie-Comptoirs, 1797):21-38.

20) ブーゲの軌道計算法に関するオルバースの記述については, *Id.* : 22-29 参照.

21) カッシーニの軌道計算法に関するオルバースの記述については, Olbers, *supra* note 19) : 27-29 参照.

22) Thomas Barker, *An account of the discoveries concerning comets with the way to find their orbits and some improvements in constructing and calculating their places, for which reason are here added new tables, fitted to those purposes; particularly with regard to that comet which is soon expected to return,* (London, J.Whiston and B. White, 1757).*

23) Achille Pierre Dionis du Séjour, Traité analytique des mouvemens apparens des corps célestes, 2 vol. (Paris, De L'Imprimerie De La Veuve Valade, 1786-1789).

24) Anders Johan Lexell, *Réflexions sur le temps périodique des comètes en général, et principalement sur celui de la comète observée en 1770*, (St. Petersbourg: de l'Imprimerie de l'Académie imperiale des sciences, 1778).

25) Zacharias Nordmark, *Solutio problematis: ex dato loco cometae geocentrico invenire ejus locum heliocentricum, si locus nodi et inclinato orbitae, in qua cometa movetur pro cognitis habeantur,* (Greifswald, 1786).*

4　オルバースの方法(1797 年)

オルバースはブレーメン在住の開業医であったが, 天文学者としても著名で, 小惑星パラスの発見(1802 年), オルバース彗星の発見(1815 年), 「オルバースのパラドックス」[26)]の提示等で知られている. 彼は彗星の軌道計算についても関心を持ち, 種々の軌道計算法の研究を重ねた後, 1797 年の著書[27)]において自己の考案した放物線軌道の計算法を発表した. その計算法は「オルバースの方法」と呼ばれ, その基本的な考え方は現在でも天体の放物線軌道の計算法において広く利用されている(参考文献【4】の第 8 章参照).

オルバースの方法の特色は, 彗星と地球との距離（地心距離）に着目し, それをまず算出しようとしたことである. その際, 彼は 3 番目の観測における地心距離と 1 番目の観測における地心距離の比に焦点を当て, その比の値を計算するための適切かつ有効な近似式を導出することに成功する[28)]. それができれば地心距離そのものを求めることができ, 後は比較的容易にすべての軌道要素を算出できる.

このオルバースの方法は理論面でも実用面でもなかなか優れたものであり,ニュートンに始まった放物線軌道計算法の研究はここで一応の完成を見たと評価することができる.

このようなオルバースの方法に対し,天体の円錐曲線軌道の一般的な理論を確立したガウスはどのような対応を示したのであろうか.それが次節以降の課題である.

26) 「宇宙の恒星がどこまでも一様に分布していると仮定すると,夜空は全体が太陽面のように明るく輝くはずだ」というパラドックス.実際にはオルバースよりも前にジャン=フィリップ・ロワ・ド・シェゾー(Jean Phillippe Loys de Chéseaux, 1718-1751)らが唱えていたとされる.現在では,そのような現象が生じるほど実際の星の量は多くないと説明されている.

27) Olbers, *supra* note 19).

28) このようにまず1番目と3番目の地心距離の比を近似的に求めるというアイデアはオルバース以前にも提示されていた.セジュールは1782年に刊行された論文の中で軌道計算について2つの方法を挙げているが,そのうちの2番目の方法はまさしくオルバースの方法に該当するものであった(Dionis du Séjour, Nouvelles méthodes analytiques pour résoudre différentes questions astronomiques, quatorizième mémoire, dans lequel on applique l'analyse, à la détermination des orbites des comètes, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1779*, (Paris, De L'Imprimerie Royale, 1782):51-168[134/679-251/679] (82-83[165/679-166/679])).しかし,セジュールはこの2番目の方法は1番目の方法の補完物に過ぎず観測期間が長い場合に使えると位置付けた.そのため,オルバースはセジュールの軌道計算法については1番目の方法のみを取り上げて考察の対象とし,これに消極的な評価を与えている(Olbers, *supra* note 19):37-38).同様にパングレも,セジュールに関しては上述の1番目の方法について検証しこれに否定的な見解を示すものの,2番目の方法については触れていない(Pingré, *supra* note 15): 315-324(321)).オルバースの方法に該当する計算方法をセジュールが先に示していたという事実は,1883年のファブリティウスの論文によって初めて一般に明らかにされた(W. Fabritius, Du Séjour und Olbers, Ein Beitrag zur Geschichte des Cometenproblems, *Astronomische Nachrichten*, 106, (1883, No.2526):87-94).しかし,セジュールは2番目の方法の一般的な有効性を明確に主張しなかったのであるから,オルバースの方法の提唱者はやはりオルバースであったと評価して差し支えないように思われる.

5 オルバースの方法に関するガウスの指摘

ガウスは,1806年1月3日付のオルバース宛書簡の中で,オルバースの方法を適用できないケースがあることを指摘した.すなわち,ガウスによれば,彗星の見かけの進行方向がほとんど太陽に向かっている場合には,オルバースの方法は使え

ないというのである[29]. ガウスは1772年の彗星（ビエラ彗星）がその例であるとし，この場合にオルバースの方法をそのまま適用すると中間の観測について37分以上の誤差が生じると述べた[30].

この指摘を受けて，オルバースは対応策を考え，それを天文雑誌に投稿した[31]. その内容は，中間の観測データとして彗星の進行方向が太陽に向かっていないものを選ぶか，あるいは，別の近似式を適用してより多量の計算を行うというものであった.

この問題はこうして一応解決したが，彗星の見かけの進行方向の先に太陽があるということは時折生ずることであって，ガウスの指摘はオルバースの方法を完璧なものにする上で必要なものであったと評価してよいと思われる.

29) Carl David Schilling (hrsg), *Briefwechsel zwischen Olbers und Gauss,* (*Wilhelm Olbers : sein Leben und seine Werke,* Band 2, Erste Abteilung), (Berlin: Verlag von Julius Springer, 1900) : 281. なお，筆者(植村)は，この指摘内容がガウス日記の第94項目「彗星の理論をより完成されたものにした」(1798年7月)という記述に対応するのではないかと考えている．植村栄治「彗星に関するガウスの研究について」津田塾大学数学・計算機科学研究所報37号，2016年，81–93 (91-92)頁参照.

30) *Id.* : 279.

31) Herrn Doct. Olbers Bemerkunug über seine Methode, die Bahn eines Kometen zu berechnen, *Berliner Astronomisches Jahrbuch für 1809,* (1806) : 193-195.

6　放物線軌道に関する『天体運動論』(1809年)の記述

ガウスが1809年に著した『天体運動論』[32]は，彗星や惑星等の天体が描く円錐曲線軌道の計算法を示した書物であり，楕円軌道と双曲線軌道のほか放物線軌道も対象として含んでいる.

同書は，「序言」のほか，第1部と第2部から成る．第1部「太陽を回る天体の動きを決定する諸量の間の一般的な諸関係」では，天体が或る1点にある場合にその位置や軌道要素等の間で成り立つ関係を考察し，また，空間における天体の位置を黄道面や天球に投影しあるいは地球や太陽を原点とする3次元直交座標で表しつつ，それらの相互関係や軌道要素との関係を考察している．これらはいわば軌道計算の基礎理論であるが，そこでは放物線軌道の場合も楕円軌道・双曲線軌道の場合と概ね同等に取り上げられている.

そして，第2部「地球から見た観測に基づく天体軌道の考察」では，その第1章において，3個の完全な観測から軌道を決定する方法がかなり詳細かつ具体的に述べられているが，そこでも放物線軌道を含めた円錐曲線軌道全体が考察の対象とされている[33]．しかし，その後に示された具体的な計算例は小惑星のユノー，パラス，ケレスの楕円軌道についてであり，放物線軌道や双曲線軌道の計算例は示され

ていない[34].

ガウスが『天体運動論』において放物線軌道の実際の計算例を示さなかった理由については，オルバースの方法によって既に相当に実用的な放物線軌道の計算法が知られていたことがその一因と推測されている[35]. しかし，オルバースの方法とガウスの計算法の間には多少の相違がある．放物線軌道についても実際の具体的な計算例を示さないと軌道計算論としては完璧でないと言えよう．ガウス自身もそのように感じて，『天体運動論』の補充を目指した．それを次節で見よう．

32) 『天体運動論』の正式名称は『円錐曲線で太陽を回る天体の運動の理論』である． Carl Friedrich Gauss, *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium*, (Hamburg, Friedrich Perthes und I.H. Besser, 1809). 本書はラテン語で書かれ，ガウス全集(以下『全集』又は "*Werke*" と略す)第 7 巻に収録されている．Carl Friedrich Gauss, *Werke*, 7, (Göttingen, Druck der Dieterichschen Universitäts-Buchdruckerei (W. Fr. Kaestner), 1906) : 1-288.

33) 『天体運動論』第 115 節～第 149 節参照．

34) 『天体運動論』第 150 節～第 163 節参照．なお，ガウスが 1801 年に示したケレスの出現予想位置のデータを筆者は本所報 31 号 268 頁で紹介したが，そこには地心経度の表示等に誤りがあったので，後に訂正用のファイルを本所報用のサイトに掲載させていただいた． https://www2.tsuda.ac.jp/suukeiken/math/suugakushi/sympo20/20_17uemura2.pdf 参照．

35) 例えば，Martin Brendel, Über die astronomischen Arbeiten von Gauss, *Werke*, 11-2, Abhandlung 3, (Berlin, Julius Springer, 1929) : 186 参照．なお，ガウスは『天体運動論』の序言で彗星の放物線軌道の計算法について「ニュートン以後，多くの数学者がこの問題に熱心に取り組んで様々な成果を挙げ，今日望むべきものはわずかしか残されていない．」と述べており，オルバースの方法を高く評価していたことがうかがわれる． Gauss, *Werke*, 7 : 5.

7　ガウスによるその後の放物線軌道の研究

前述のように，『天体運動論』が述べた軌道計算の方法は放物線軌道の場合をも含むものであった．しかし，同書は，楕円軌道については 3 個の例を挙げて具体的な計算過程を示したものの，放物線軌道については具体的な計算例を示さなかった．実際の軌道計算においては，効果的な近似方法の工夫や諸数値の適切な取捨選択等が重要な意味を持つので，具体的な計算例を示す意義は大きい．

後にガウスは，1813 年 4 月に現れた彗星を例に取って，放物線軌道の具体的な計算方法を示した[36]. 1813 年秋に発表されたこの計算方法はオルバースの方法と本質的に異なるものではないと言ってよいであろう．ただ計算の過程でより便利な補助量を設定し，5 桁の短い対数表でも十分な精度が得られるように工夫した点が注目される[37].

その後,ガウスは1815年に放物線軌道についてのより深い考察を行うとともに,計算を迅速に行うための計算表をも作成した[38]. これらの成果を30頁前後にまとめて『天体運動論』の補章とする構想をガウスは有していたが,結局それは実現しなかった[39].

このガウスの計算表は,生前に公表されなかったこともあり,余り活用されるに至らなかった模様である[40]. 結局,放物線軌道に関するガウスの研究は,楕円軌道の場合ほど顕著な足跡を残さなかったという印象を受ける.

36) Gauss, Observationes cometae secundi a. 1813 in observatorio Gottingensi factae, adjectis nonnullis adnotationibus circa calculum orbitarum parabolicarum, *Werke*, 6 : 27-36. このラテン語の論稿はガウスがゲッティンゲン大学において1813年9月10日に行った講演をまとめたものであり,同年中に刊行されたと思われる Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis Recentiores, Vol. II : 342:1-352:11 に収録されている. またそのドイツ語訳が *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels- Kunde,* Band 28, (Gotha, Beckersche Buchhnadlung, 1813) : 501-513 に掲載されている.

37) この点については, Gauss, *Werke*, 6 : 29 の記述参照.

38) ここでバーカーの表について説明しておこう. バーカーは, 彗星の真近点角(彗星と太陽を結ぶ直線が放物線の中心軸となす角)が分かれば近日点通過後の経過時間が容易に分かる表(真近点角は5'刻みで0°から180°まで)を作成した. この表は1793年にイギリスで刊行された或る書物に収録されたが, ドイツ等ではまだ余り知られていないとして, オルバースの著書に参考資料として収録され, 広く利用されるようになった. Olbers, *supra* note 19) : XXII-XXXIII, Teil 2 :3-32.これに対し, ガウスが作成した表は, ガウス独自の計算の過程で現れる或る補助量と真近点角の対応を示したものであるが, バーカーの表ほど汎用性を有しなかった模様である. Gauss, *Werke*, 7 : 351-367.

39) 放物線軌道に関するガウスの未刊行の草稿や書簡等は, *Werke*, 7 : 325-374 に収録されている.

40) 前注 39)の諸資料の注釈者である Brendel は, 或る放物線軌道の計算を行ったガウスの1843年の論稿において彼がもはや自分の計算表に言及しなかったことが注目されると述べている.

8　結語

放物線軌道の計算法に関するオルバースとガウスの貢献について筆者なりの見解をまとめると以下のようになる.

①天体の放物線軌道の計算方法を最初に案出したのはニュートンであり, 18世紀には多くの学者がその改良を試みたが, 最も成功したのはオルバースであった.

②ガウスは19世紀の初頭に天体の楕円軌道の計算に成功するが, その著書『天体

運動論』においても，放物線軌道に関しては，オルバースの方法を超える画期的な計算法が示されたわけではない．
③その後ガウスは放物線軌道の計算法について補足の論稿の刊行を意図するものの，結局実現せずに終わった．しかし，彼の遺稿等を検討しても，オルバースの方法を本質的に超える計算法が考案されていたとは評価し難いと思われる．
④ガウスはケレスやパラス等の小惑星の楕円軌道の計算には熱心であったが，すぐに姿を消してしまう彗星の放物線軌道の計算にはそれほど熱意を持たなかったように見受けられる．1810 年以降，放物線軌道の計算は一段と精確に行われるようになるが，それは軌道計算理論の改良よりも最小二乗法の導入によるところが大きいと考えられる．

参考文献（上記以外のもの）

【1】ガウス全集：Carl Friedrich Gauss, *Werke*, Bde. 1-12, 1863-1929.
【2】Guy Waldo Dunnington, *Carl Friedrich Gauss : Titan of Science*, (New York, Hafner Publishing, 1955), (Reprinted 2004 by The Mathematical Association of America).
【3】ダニングトン著，銀林浩=小島穀男=田中勇訳，『ガウスの生涯』，東京図書，1976.
【4】長谷川一郎著，『天体軌道論』(改訂版)，恒星社厚生閣，1986.