

論文内容の要旨

放送大学大学院文化科学研究科
文化科学専攻自然科学プログラム
2014年度入学

ふりがな うえむら えいじ
(氏名) 植村 栄治

1. 論文題目

軌道計算法から見た超短周期彗星発見の歴史

2. 論文要旨

この博士論文の全体は、「序論」、「第1部 超短周期彗星発見の前史 —— レクセル彗星の検討を中心として」、「第2部 天体の軌道計算の発展に関する考察 —— 1797年～1818年を中心に」、「第3部 エンケ彗星発見の過程の考察 —— 1819年を中心に」、「第4部 総括的考察」から構成されている。

「序論」では、太陽の周りを周回する周期彗星のうち、その周期が10年以下のものを本論文では特に「超短周期彗星」と呼ぶと断った上で、最初の超短周期彗星を発見したのは誰かという問題について説明する。1770年の彗星について、レクセルは、これが周期5年余の超短周期彗星であることを計算によって導き、その旨を主張した。その主張は正しかったものの、その後、木星の引力によってこの彗星の軌道が大きく変わってしまったために、その回帰を観測によって実証することができず、超短周期彗星として公認されるには至らなかった。その後、天体の楕円軌道を精確に計算する技法が進展するに従い、1810年代には周期彗星の周期がかなり良い精度で計算されるようになった。例えば、1812年に現れたポンス・ブルックス彗星（周期72年程度）や1815年に現れたオルバース彗星（周期70年程度）について、相当に精度の良い周期が算定された。このような状況の下で、エンケは1818年に現れた彗星が1805年の彗星と同一であり、その周期はわずか3年余であることに気が付いた。これが立証されれば天文学上の画期的な発見となるので、エンケは師であるガウスの支援も得て、両彗星の同一性の立証に乗り出し、数か月の苦心の計算作業の末、これに成功した。こうして、エンケは、ハレー彗星に次ぐ史上2番目の周期彗星であり、かつ、史上初の超短周期彗星である「エンケ彗星」の発見者となる栄誉を得た。本論文は、こ

のようにエンケによって初の超短周期彗星が発見されるに至った過程やその発見の意義を軌道計算法の観点から歴史的に考察することを目的とするものである。

「第 1 部 超短周期彗星発見の前史 —— レクセル彗星の検討を中心として」は 4 つの章から成る。「第 1 章 オイラーの軌道計算法 —— 1769 年彗星の軌道計算について」では、オイラーが 1769 年に現れた彗星についてどのような方法でその軌道を計算したかを検討する。オイラーはその計算方法を 1770 年の著書で説明しているので、その著書に沿って、オイラーの軌道計算の方法を紹介する。

続いて「第 2 章 レクセル彗星の発見」では、1770 年 6 月 14 日にパリ在住のメシエによって発見され、後にレクセル彗星と呼ばれることになる彗星について簡単に紹介する。

次に「第 3 章 レクセルによる彗星の軌道計算について」では、1770 年彗星についてレクセルが著した 8 編の論稿を紹介し、その内容を検討する。彼の軌道計算法は基本的にオイラーの計算法を受け継いだものであり、その精度も決して悪くはないが、ただ楕円軌道の場合の周期についての精確さは期待できなかった。しかし、たまたま 1770 年彗星は地球の極めて近くを通り、3 か月以上にわたってよく観測され、豊富な観測データが得られていた。このような幸運にめぐまれて、レクセルは、丹念な計算を繰り返すことにより、この彗星の周期は 5 年半程度でなければならないことを立証した。

「第 4 章 レクセルの軌道計算の評価」では、軌道計算法がまだ未熟だった 18 世紀において、レクセルがこのような精確な周期算定をなし得た理由として、長期間に及ぶ豊富で精確な観測データの存在が大きかったことが示される。

天体の軌道計算法は 1800 年頃から大きく進展する。その様子を考察したのが「第 2 部 天体の軌道計算の発展に関する考察 —— 1797 年～1818 年を中心に」である。最初に「第 1 章 概説」では、天体の放物線軌道の計算については 1797 年のオルバースの著書によって、また、楕円軌道の計算については 1809 年のガウスの著書によって、それぞれ概ね完成の域に達したこと、そして 1810 年以降は周期彗星の周期についても最小二乗法の適用によって相当に精確な算定が可能になっていたこと等を概観する。

「第 2 章 オルバースの放物線軌道計算法」では、オルバースの 1797 年の著書を参照しつつ、彼の放物線軌道計算法の骨子を探る。そして彼の着想が現代の軌道計算法にどのように生きているかが示される。

「第 3 章 ガウスの楕円軌道計算法（その 1）」では、1801 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ガウスが成功し、ケレスの再発見に貢献したことやそのときの計算方法が 1802 年の論稿に記されていたこと等を説明する。

「第 4 章 1805 年第 1 彗星（エンケ彗星）について —— ベッセルの登場」では、1805 年頃から天文学界で活躍し始めたベッセルの経歴を簡単に紹介するとともに、彼がオルバースの薫陶を得て 1805 年第 1 彗星の軌道計算を行った様子を述べる。この彗星は実は後のエンケ彗星であるが、1805 年当時はまだその楕円軌道を突き止めるほど軌道計算技術が発達していなかったことを明らかにする。

「第 5 章 1805 年第 2 彗星（ビエラ彗星）について」では、1805 年第 2 彗星が 1772 年の彗星と同一である可能性を認識しつつも、ガウスがその周期を実際より約 2 年短く見積もって 4.74 年と算定したことを説明する。すなわち、1805 年の時点では、ガウスにとっても周期彗星の周期の計算は決して容易でなかったことが明らかにされる。

「第 6 章 ガウスの楕円軌道計算法（その 2）」では、ガウスの 1809 年の名著『天体運動論』の概要を紹介し、ガウスが確立した楕円軌道と双曲線軌道の計算方法がどのようなものであったかを明らかにする。また、同書で示された最小二乗法の理論的考察にも触れる。

「第 7 章 ベッセルの軌道計算法」では、ベッセルの 1810 年の著書を取り上げ、ベッセルが 1807 年の彗星の周期（約 1700 年）を最新の計算技法で相当精確に算定した様子を述べる。そしてこの著書は、ガウスの 1809 年の『天体運動論』を直ちに修得したベッセルが軌道計算に初めて最小二乗法を適用した画期的な論稿であることを明らかにする。

「第 8 章 ガウスの 1811 年論文について」では、小惑星パラスの軌道要素の計算に関するガウスの 1811 年の論文を紹介する。この論文で、ガウスは、7 年間にわたる 6 回の観測データをもとに、最小二乗法を使ってパラスの軌道要素を精確に求める方法を示した。この論文は、前述の 1810 年のベッセルの著書と相俟って、最小二乗法を使った軌道計算の精確化に大きく貢献したことが明らかにされる。

「第 9 章 ニコライの 1813 年論文について」では、ガウスの有能な弟子であるニコライが、1811 年の彗星について、最小二乗法を使ってその周期を約 870 年と算定した 1813 年の論文を紹介する。このように最小二乗法を駆使できる天文学者が次第に増加し、軌道計算のレベルが向上する様子が明らかにされる。

「第 10 章 1812 年以降の周期彗星の発見について」では、1812 年のポン

ス・ブルックス彗星および 1815 年のオルバース彗星について、ガウス、エンケ、ニコライ、ベッセルらが相当に精度の高い周期算定を行ったことを紹介する。彼らの軌道計算では最小二乗法の使用はもはや当然のこととされていたが、ガウスはむしろそのような細かい計算を自分で行わず、若手に任せる傾向があったことも指摘される。

「第 11 章 1810 年代における軌道計算の水準について」では、それまでの考察を踏まえて、1810 年代に入ってから軌道計算の技術が急速に向上したこと、しかしそのような最新の計算方法を駆使できたのはベッセル及びガウス周辺の学者ら数名にとどまっていたこと等が指摘される。

このような状況の下で、ついに 1819 年にエンケによる史上初の超短周期彗星の発見が行われるが、その模様は「第 3 部 エンケ彗星発見の過程の考察 —— 1819 年を中心に」で扱われる。

第 3 部の「第 1 章 概説」では、1818 年の彗星が 1805 年の彗星と同一であることの証明が問題の中心であることが説明される。

「第 2 章 超短周期彗星の発見に至る経過」では、1819 年の 2 月から 5 月までの間にエンケとガウスが交わした 4 通の未刊行の書簡（Web 掲載）を判読・紹介しつつ、エンケが両彗星の同一性を計算によって確認した過程を丹念にたどって明らかにする。

「第 3 章 ガウスの関与についての検討」では、ガウスが愛弟子であるエンケの作業を終始後押しし支援したこと、また、その成果をいち早くゲッティンゲン大学の紀要に寄稿してエンケの功績を称賛し、初の超短周期彗星の発見者としてのエンケの地位を確定させたことを説明する。

「第 4 章 ガウス秘伝の計算法について」では、摂動計算に関してエンケが学生時代にガウスから教わった積分計算の方法をガウスの命に従って 20 年以上公開しなかったというエピソードを紹介する。

「第 5 章 1820 年以降の展開」では、1820 年代半ばまでに 2 回回帰したエンケ彗星がエンケの計算通りに発見・確認されたこと、1826 年には第 2 の超短周期彗星として周期 6.6 年のビエラ彗星がビーラによって発見されたこと、またエンケ彗星の発見はその後の天文学の発展に少なからぬ影響を与えたことを説明する。

「第 6 章 エンケ彗星のまとめ」では、エンケによる史上初の超短周期彗星の発見の背景には、軌道計算技術の向上という必然的な要素もあるが、たまたまベッセルが 1818 年彗星を観測できなかったという偶然的な要素も無視できないことを指摘する。

最後の「第 4 部 総括的考察」では、「第 1 章 軌道計算の精度の変遷」でニ

ュートンからエンケまでの軌道計算の精度を比較考察する。次いで、「第 2 章 軌道計算における最小二乗法の使用について」では最小二乗法の使用による軌道計算の精確化が超短周期彗星の発見に不可欠であったことを確認する。そして、「第 3 章 最終総括」では、最小二乗法を含めた最新の軌道計算技術を修得したエンケが超短周期彗星を発見できた背景には、当時力強く発展しつつあったドイツ天文学界の存在が無視できないことを指摘して、本論文を結んでいる。

A b s t r a c t

The School of Graduate Studies,
The Open University of Japan

EIJI UEMURA

History of discovery of the ultra-short-period comet
as viewed from the standpoint of orbit calculation

This doctoral dissertation consists of the introduction and 4 parts. In the introduction, after defining “a ultra-short-period comet” as a comet with the period of less than 10 years, following question is raised: Who discovered first a ultra-short-period comet, and how was it done ? Whereas Halley Comet was the first short-period comet, the first ultra-short-period comet was discovered in 1819 by Encke. The object of this dissertation is to clarify the features of Encke’s discovery of the first ultra-short-period comet.

The title of the Part 1 is “before the discovery of the ultra-short-period comet —— about Lexell’s Comet.” In the first chapter of the Part 1 Euler’s orbit calculation on the comet of 1769 is explained. His book which was published in 1770 at Petersburg showed his way of orbit calculation and we introduce and estimate his method of orbit calculation.

In the second chapter of the Part 1 we explain briefly Lexell’s Comet, which French astronomer Messier discovered on June 14, 1770 in Paris.

In the third chapter of the Part 1 we look into eight articles which were written by Lexell and dealt with the comet of 1770. Lexell computed the orbit of the comet in the same way as Euler did. Lexell’s method of orbit calculation was relatively accurate, but was not enough to give the exact

period of the elliptical orbit. Lexell, however, succeeded in proving that the period of comet of 1770 was about 5 years and a half. His success was mainly due to the fact that the comet had passed very close to the Earth and many observations were reported during more than three months.

In the fourth chapter of the Part 1 we show that despite the low level technique of orbit calculation in the 18th century Lexell reached the right answer of 5.5 years due to much amount of observations.

Orbit calculation methods made a remarkable progress after around 1800. The Part 2 “Development of calculation methods on comet orbits from 1797 to 1818” describes how orbit calculation methods were developed during this period by many astronomers.

In the first chapter of the Part 2 general aspects on this issue are given.

In the second chapter of the Part 2 we introduce a book which was written by Olbers in 1797 and discussed the best and easiest way of calculating parabolic orbits of comets.

In the third chapter of the Part 2 we explain that Gauss succeeded in calculating exactly the elliptic orbit of Ceres which was discovered at the beginning of 1801. After Italian astronomer Piazzi observed Ceres for 41 nights, it disappeared behind the sun. Ceres was supposed to appear again next winter, but it was extremely difficult to predict its exact position. Gauss began to tackle this problem in September 1801. In only a few months he succeeded in deciding its elliptic orbit. His result was made public in Zach’s magazine. Due to Gauss’ prediction Zach and Olbers could find again Ceres in December 1801. This successful recovery made Gauss famous among European astronomers and led him several years later to the post of Professor of Astronomy and Director of the astronomical observatory in Göttingen. In March of 1802 Olbers discovered Pallas, the second minor planet. Gauss computed again successfully the orbit of Pallas and nobody doubted any more the accuracy of Gauss’ method. We also show in this chapter that his calculation method for Ceres and Pallas was presented to Olbers in 1802. This paper remained unknown till 1809, when Lindenau happened to see it and make it public under Gauss’ consent.

In the fourth chapter of the Part 2 a young and talented astronomer Bessel was introduced. He tried to calculate the orbit of the comet which appeared

in October 1805, but could not know that the comet moved in the elliptic orbit.

In the fifth chapter of the Part 2 a comet which appeared in November 1805 is discussed. Gauss concluded that this comet's period was about 4.7 years. The actual period, however, was about 6.6 years. This mistake of Gauss shows how difficult it was in 1800's to calculate accurately the periods of periodic comets.

In the sixth chapter of the Part 2 Gauss' famous book of 1809 on the astronomical calculation is introduced. In this book Gauss showed how to calculate elliptic or hyperbolic orbits of heavenly bodies. We also take a look at his

discussion on least squares method. Gauss gave in this book the proof of the least squares method.

In the seventh chapter of the Part 2 we focus on Bessel's way of calculation which he showed in his book published in 1810. In this book Bessel used for the first time least squares method in calculating a comet orbit. He also tried to calculate perturbation caused by Jupiter, Saturn and other planets.

In the eighth chapter of the Part 2 Gauss' article which was published in 1811 is introduced. In this article Gauss showed how to use least squares method in order to calculate the orbit of Pallas. This article as well as Bessel's book in 1810 made it possible to calculate quite accurately the orbit of heavenly bodies.

In the ninth chapter of the Part 2 we introduce the article written by Nicolai in 1813. Nicolai, whom Gauss taught at Göttingen University, was very talented in calculation. In this article he used least squares method in calculating the period of the comet of 1811, concluding that the comet had the period of 870 years. His case clearly showed that more and more astronomers were able to calculate accurately the orbit of comets by using least squares method.

In the tenth chapter of the Part 2 we give some examples of orbit calculation on periodic comets that appeared between 1812 and 1818. For instance, Encke calculated in 1816 the orbit of Pons-Brooks Comet which was discovered by Pons at Marseille in 1812. The period of Comet Olbers, which was discovered in 1815 by Olbers, was estimated about 70-80 years by many astronomers. As the use of least squares method was more and

more common in calculating comet orbits, Gauss seemed to leave those detailed calculations to young astronomers such as Bessel, Nicolai and Encke.

In the eleventh chapter of the Part 2 it is pointed out that although the level of orbit calculation was rapidly going up in 1810's, only a few astronomers including Bessel, Gauss and his former students could use least squares method.

Under these circumstances Encke made in 1819 the historic discovery of the ultra-short-period comet. This is the subject of Part 3 "How the Encke's Comet was discovered."

In the first chapter of the Part 3 it is stated that the question is whether the comet of 1818 was identical to the comet of 1805 or not.

In the second chapter of the Part 3 four letters which Encke and Gauss exchanged between February 1819 and May 1819 are introduced. These letters, which are not yet published but are open to the public in Web sites, clarify how Encke proved merely through orbit calculations that two comets were identical.

In the third chapter of the Part 3 we show that Gauss helped Encke conduct orbit calculation and wrote an article appreciating Encke's report.

In the fourth chapter of the Part 3 we show an episode that Encke did not disclose for more than 20 years a kind of integral calculation which Gauss taught Encke in his class at Göttingen University.

In the fifth chapter of the Part 3 we remark that Encke's Comet was observed in 1822 and 1825 in the position that Encke had predicted. In 1826 the second ultra-short-period comet was discovered by Biela. The discovery of Encke's Comet was considered to give much influence on the astronomy of 19th century.

In the sixth chapter of the Part 3 we point out that we must not disregard the incidental factor: Bessel could not observe Encke's Comet in December 1818 due to bad weather. If Bessel himself had observed comet of 1818, he could have very probably found soon the identity of comet of 1818 and that of 1805.

The Part 4 gives final conclusions. In the first chapter of the Part 4 we estimate the accuracy of the orbit calculations which such astronomers as

Newton, Euler, Olbers, Gauss, Bessel and Encke used. In Newton's calculations the differences between the observed and the computed longitudes and latitudes were usually less than a few minutes. Euler seemed satisfied if those differences were less than one or two minutes. Lexell, who succeeded Euler's calculation method, found successfully that the period of the comet of 1770 was around five years and a half. But it did not mean that he could compute accurately every comet's period. The comet of 1770 should have been the first ultra-short-period comet, if it had not been missing due to the attraction of Jupiter. Olbers showed in his book published in 1797 the easy and effective method of calculating parabolic orbits of comets. According to Olbers' method, the differences between the observed and the computed longitudes and latitudes seemed to be in most cases less than around one minute. In his famous book of 1809 Gauss explained his method of computing elliptic orbits of heavenly bodies. He could compute elliptic orbits of Ceres and Pallas with errors of just some seconds. He, however, could not give a right answer in 1806 on the period of the second comet of 1805: he believed it to be 4.7 years, but it turned out in 1827 to be 6.6 years. Bessel used least squares method in his book of 1810 when he computed the orbit of the Great Comet of 1807. It was the first example of using expressly least squares method in computing orbits. After 1810 he seemed to be able to compute elliptic orbits of comets with errors of less than ten seconds. Encke used quite often least squares method when he computed comet's orbits. The orbits which he decided were mostly quite accurate.

In the second chapter of the Part 4 we confirm that use of least squares method was indispensable for the discovery of the ultra-short-period comet. It was noted that Gauss seemed to be reluctant to use least squares method in computing orbits of comets.

In the third chapter of the Part 4 we estimate highly the role played by German astronomers. Many astronomers such as Olbers, Gauss and Bessel, as well as Zach, Lindenau, Bode, Nicolai and Gerling, had been all so friendly and helpful to Encke that Encke could achieve lengthy and difficult calculation which led to the first discovery of the ultra-short-period comet.

博士論文審査及び試験の結果の要旨

学位申請者

放送大学大学院文化科学研究科
文化科学専攻自然科学プログラム
氏名 植村 栄治

論文題目

軌道計算法から見た超短周期彗星発見の歴史

審査委員氏名

- ・主査（放送大学教授 Ph. D. (数学)) 隈部 正博
- ・副査（放送大学教授 博士 (理学)) 石崎 克也
- ・副査（放送大学教授 博士 (文学)) 滝浦 真人
- ・副査（神戸大学名誉教授 修士 (理学)) 三浦 伸夫

論文審査及び試験の結果

彗星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 世紀のニュートンの頃からである。ニュートンは観測データから彗星の放物線軌道を計算する方法を考案した。18 世紀の初頭、ハレーは、ニュートンの計算方法を基にして、75 年程度の周期を持つ「ハレー彗星」の存在を初めて主張し、次の回帰をほぼ正しく予言した。18 世紀末には彗星の放物線軌道についてオルバーズがより優れた計算方法を提唱し、また 19 世紀初頭にはガウスが 3 個の観測から天体の楕円軌道を精確に計算する方法を編み出し、これらにより軌道計算法は大きな進歩を遂げた。

一般に彗星の観測期間は数週間から数か月程度と短く、その軌道の精確な計算は困難なことが多い。そのため、ハレー彗星に次ぐ第 2 の周期彗星はなかなか発見されなかった。しかし、1810 年代に入ると、最小二乗法を使った軌道計算法が次第に広まり、周期が 70 数年程度と算定された彗星も現れた。そして、1819 年には、前年に現れた彗星について、その周期がわずか 3 年余であり、以前にも出現して観測されていたことがガウスの弟子であるエンケの計算によって明らかにされ、エンケ彗星の名で呼ばれるようになった。このような極めて短い周期の彗星の存在が現実立証されたことは当時の天文学において画期的な

出来事であった。

植村栄治氏の本論文は、以上のような歴史的経過を踏まえて、エンケ彗星の発見にいたる過程を主として軌道計算法の観点から考察したものである。

本論文は、「序論」のほか、「第 1 部」から「第 4 部」までによって構成されている。

「序論」では、太陽の周りを周回する周期彗星のうち、その周期が 10 年以下のものを本論文では特に「超短周期彗星」と呼ぶと断った上で、最初の超短周期彗星を発見したのは誰かという問題について説明する。1770 年の彗星について、レクセルは、これが周期 5 年余の周期彗星であることを計算によって導き、その旨を主張した。その主張は正しかったものの、その後の回帰を観測によって実証することができず、超短周期彗星として公認されるには至らなかった。その後、エンケは、1818 年に発見された彗星について、その周期が 3 年余であり、1805 年に観測された彗星と同一であることを精確な軌道計算によって立証し、初の超短周期彗星の発見者として認められた。このようにエンケによって初の超短周期彗星が発見されるに至った過程を主として軌道計算法の観点から歴史的に考察することが本論文の目的として設定される。

「第 1 部 超短周期彗星発見の前史 —— レクセル彗星の検討を中心として」では、オイラーが 1769 年の彗星の軌道計算に用いた方法を検討した後、彼の弟子とも言えるべきレクセルが 1770 年の彗星について丹念な軌道計算の結果、その周期が 5 年半程度の周期彗星であることを示した事情を紹介する。もっとも、この彗星は、木星の引力によって軌道が大きく変わってしまったためにその後の回帰が確認されず、周期彗星として公認されるに至らなかった。レクセルの周期算定方法については、何通りもの周期を想定した上で、各々の場合の計算値と観測値との乖離を調べるといういわば帰納的なものであった点が指摘される。

「第 2 部 天体の軌道計算の発展に関する考察 —— 1797 年～1818 年を中心に」では、18 世紀末頃から天体の軌道計算法が大きく進展した様子が考察される。すなわち、1797 年には、オルバースが、彗星の放物線軌道について、ニュートンやオイラーよりも簡明で精確な計算方法を示し、後世に大きな影響を与えた。次いで、1801 年には、ガウスが 3 個の観測から天体の楕円軌道を精確に計算する方法を案出し、同年に発見された小惑星ケレスの再発見に貢献した。ガウスは楕円軌道の計算法を 1809 年に刊行された著書『天体運動論』において公開した。しかし、ガウスが 1801 年当時に用いた計算法はそれとは大きく異なるものであり、そのことを示すガウスの 1802 年の論稿が紹介される。1805 年には後にエンケ彗星及びビエラ彗星と呼ばれることになる 2 つの彗星が観測されたが、当時はまだそれらの周期性あるいはその精確な周期を突き止めることができなかった。1809 年の『天体運動論』に記述された最小二乗法を直ちに理解したベッセルは、1810 年の著書において、1807 年の彗星の周期(約 1700 年)を最小二乗法を用いて求めた。その直後には、ガウスも最小二乗法を用いた小惑星パラスの軌道計算方法を具体的に示した。こうして 1810 年代にはガウスの弟子であるニコライやエンケも加わって、非周期彗星の放物線軌道や、周期彗星の

楕円軌道が、かなり精確に算定されるようになった。

以上のような軌道計算法の進展を背景にして、「第 3 部 エンケ彗星発見の過程の考察 —— 1819 年を中心に」では、1819 年にエンケが成し遂げた史上初の超短周期彗星発見の様子が明らかにされる。エンケは 1818 年 11 月に発見された彗星が 1805 年 10 月に発見された彗星と同一でありその周期は約 3.3 年ではないかと考えた。しかしそれを数少ない観測データのみに基づき精確な軌道計算によって証明することは決して容易でなかった。エンケは師ガウスの後押しを受け、数か月に及ぶ苦心の計算の結果、その証明に成功した。第 3 部では、その間の経緯が、兩人の間で交わされた未刊行の書簡の紹介等を通じて叙述される。

最後の「第 4 部 総括的考察」では、まず、ニュートンからエンケまでの軌道計算の精度が比較検討され、それぞれの時代における軌道計算法において、彗星の経度・緯度の計算値と観測値との間には概ねどの程度の誤差が存在していたかが検証される。次いで、1809 年の『天体運動論』において紹介された最小二乗法が軌道計算の精確化にいかに貢献したかが考察され、最小二乗法による軌道計算の精確化がなければエンケによる超短周期彗星発見の立証はほとんど不可能であったことが示される。

本論文の主な内容は以上の通りであるが、その特色として以下の諸点を挙げることができる。

まず第 1 に、19 世紀初頭頃までの天体軌道論という先行研究の少ないテーマを取り上げて、関連文献を極めて広範に収集・参照していることである。従来の研究においては『天体運動論』やその他のガウス全集に収録された資料が主に参照されていたが、本論文は、ツァッハ編集の「月報」(MC)のほか、「ベルリン天文年鑑」(BAJ)、「ゲッティンゲン学術公報」(GGA)等の定期刊行物に掲載された記事や論文を幅広く参照し、また、オルバースの 1797 年書、ベッセルの 1810 年書等の内容も踏まえて、軌道計算に関する深い考察を展開している。さらに、必要に応じて、ガウスとオルバースの書簡集やガウスとエンケの間で交わされた未刊行の書簡(web 掲載)も検討・紹介している。このような広範な資料の収集・参照は、近年急速に進展した古い文献のデジタル化・ネット公開によって初めて可能となったものであるが、本論文はそのような有利な研究環境をいち早く活用し、これまでわが国では閲覧不可能だった諸文献を参照・読解することによって、精緻な分析を実現している。また、これらの文献を紹介する際の訳文は極めて読みやすい文章である。

第 2 の特色として、ニュートンからエンケに至るまでの軌道計算について、計算値と観測値との誤差に着目し、その精度の考察・評価を行っていることが挙げられる。ニュートンの頃には数分から 10 分程度見られた経度・緯度の誤差が、オイラーやレクセルでは 2~3 分程度に減少し、19 世紀に入ると 30 秒以下の誤差が期待されるようになった。そして、1810 年代には最小二乗法の使用を前提として誤差を数秒程度に抑えることが目標となった。本論文は、そのような軌道計算の精確さの向上を原典資料に基づいて明らかにするとともに、かかる軌道

計算の精密化がなければ 1819 年の超短周期彗星の発見は困難だったことを説得力をもって説いている。この考察は本論文のオリジナリティを示すものとして高い評価を与えることができる。

第 3 の特色として、軌道計算における最小二乗法の役割を多角的に考察した点が挙げられる。最小二乗法の原理はルジャンドルの 1805 年の著書で初めて公表された。ガウスはそれ以前からこの原理を使用していたと主張しているものの、その明確な証拠は残されていない。この点に関して、本論文はガウスが 1802 年に執筆し 1809 年になって刊行された論稿の末尾の文章が最小二乗法による軌道改良の方法を意味するとの見解を示している。また、ガウス研究者の間では 1802 年当時の小惑星パラスの軌道改良の計算においてガウスが実際に最小二乗法を使用したとの有力な見解が存在するが、本論文は、その場合の最小二乗法の具体的内容はガウスが 1811 年のパラスの軌道計算の論文で使った最小二乗法とは全く異なるのではないかと注目すべき指摘を行っている。この指摘を厳密な資料精査によって裏付けることは今後に残された課題であるが、従来、「ガウスは 1805 年以前に最小二乗法を用いたか」という形でやや漠然と議論されてきた感のあるこのテーマに関して、本論文が、これまで見られなかった新しい論点を提起したことは確かであり、その鋭い着眼点と深い問題意識は称賛に値する。

以上のように、本論文には多くの優れた特色が認められる。先行研究が乏しい中で、多くの専門雑誌や原典を直接参照し、英語・ドイツ語・フランス語のほか、ラテン語の文献に至るまで幅広く読み込んで、軌道計算法の発展の歴史を綿密にたどり、エンケが史上初の超短周期彗星を発見するまでの状況を詳細に描き出した点は、筆者の能力と独創性を十二分に示しており、高く評価することができる。

また、諸資料を検討する過程で明らかにされた、これまで余り指摘されたことのない多くの興味深い事実——例えば、1801 年のケレスの軌道計算に際してガウスが考案した計算方法は 1802 年の論稿に相当詳細に記されていると考えてよいこと、1805 年 11 月に発見された彗星(ビエラ彗星)の周期(約 6.6 年)をガウスが約 4.7 年とかなり大きく間違っ算定したこと、またその後のガウスはパラスの摂動計算には多大の労力を費やしたものの、彗星の軌道計算には余力を注がず、最小二乗法を使用した彗星軌道の精密化をほとんど行っていないこと等——の記述も、本論文の価値と魅力を一段と高めるものである。

以上の次第であり、本論文の内容は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものであると認める。

以上