

氏 名 佐 藤 勲

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第261号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Asteroidal Occultation Observations from Japan

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 小杉 健郎  
教 授 櫻井 隆  
教 授 木下 宙  
助 教 授 吉澤 正則  
教 授 岡村 定矩（東京大学）  
助 教 授 藤原 顯（宇宙科学研究所）  
助 教 授 中村 士（国立天文台）

# 論文内容の要旨

小惑星による恒星の掩蔽の観測は、小惑星の大きさ、形、衛星の存在に関する正確な情報だけでなく、隠された恒星の視直径や伴星に関する情報を得る可能性を持っている。小惑星の掩蔽によって得られる精度は、だいたい1%の程度で、赤外観測やその他の観測方法によって得られる精度よりも約1桁高い。小惑星の絶対的な大きさは、小惑星の基本的な物理量であり、大きさの10%の誤差は、アルベドの20%の誤差、密度の30%の誤差となるので、小惑星の物理組成を明らかにする上で、サイズを正確に知ることは重要なことであるにもかかわらず、なかなか正確に知ることが難しい。探査機による調査には莫大な費用と時間がかかり、到底多数の小惑星の観測は望めないが、小惑星による掩蔽は、多くのアマチュア観測者を巻き込んだ安上がりの方策である。このため、最初の本格的な観測となった1975年の小惑星エロスによる掩蔽以来、過去20年余りにわたって、多くの研究者が掩蔽によって小惑星の絶対的なサイズと形を測定しようとしてきた。だが、現時点では、小惑星の暦と恒星のカタログ位置が十分正確でないため、その予報には、小惑星のサイズをはるかに超える大きな誤差があり、その現象を実際に観測することは大変難しい。このため、今日までに世界中で100回以上の現象が観測されているが、これまでアマチュア中心で、初期予報と改良予報の多くを外国に依存してきた日本では、わずかな成果しか挙げることができなかった。

本研究では、小惑星の掩蔽観測の持つポテンシャルを引き出し、より高い成果を挙げるため、次のようなことを行なった。

- ・観測者の密度が高く、レベルの高いアマチュア観測者の多い日本の事情に合った多数の初期予報の計算、
- ・小惑星の名前の呼び方が混乱するのを避けるため、全ての確定小惑星の日本名の調査、
- ・正確な改良予報を出すため、CCDカメラで得られた2次元画像上の天体の位置を理論限界に近い精度で測定するための、ガウシアン型直交関数フィルター理論の開発、
- ・三鷹のCCD子午環と50cm反射、および木曾シュミットによる改良予報のための直前の位置観測と、それによる改良予報の計算、
- ・国内の観測ネットワークの整備と、初期予報および改良予報の配布、啓蒙活動、観測の呼びかけ、
- ・観測結果の評価方法を整備し、これまであいまいな評価しかされていなかった過去の観測結果についても、現在の視点から再評価すること、
- ・個々の観測成功例について、他の観測データとも合わせて適切な解析方法をケースバイケースで行なうこと。

詳しくは、次の通りである。

これまで日本では、主にGoffinの予報が初期予報として使われてきたが、大きな小惑星だけを含む年間40個ほどのGoffinの予報だけでは、観測者の密度の高い日本の国内事情には十分とはいえ、より小さい小惑星による掩蔽が観測できる可能性があるため、1994年から独自に初期予報の計算にとりかかった。1995年には、1995年6月までに番号登録された6445個の全ての確定小惑星と、FK5,FK5 Extension, PPM, GSC星表の組合せから大量の現象を計算した。しかし、これらの中からどのような現象を選択

するかの基準については、これまで予報計算者が適当に考えていただけであり、合理的な基準はなかったので、1996年までは、十分な数の予報を出し、その実際の観測の結果を基に、どのような現象が条件の良い現象であるかを定量化する基準を作り、1997年の初期予報からそれを適用した。このようにして選ばれた現象の数は、1995年が269個、1996年が256個、1997年が125個である。1997年の予報に適用した基準が妥当かどうかの評価は、これから行なわれる。

初期予報に現れる小惑星は、馴染みの薄い名前のもので大変多い。これらの小惑星の名前を各自が適当に発音することは、混乱の原因となるので、予め小惑星名の由来とその読み方を調査した。その結果、小惑星の名前は、約80種類もの言語で付けられており、その日本名を与えるにあたっては、一人では解決し難い問題点がいくつかあることが明らかになった。

小惑星の掩蔽を効率良く観測するには、現象直前の位置観測によって改良予報を出すことが重要である。CCDカメラによって得られた2次元画像から得られる天体の位置や明るさを測定する精度には、S/N比から決まる理論限界があり、理論限界に迫る精度で天体の位置を測定することは、正確な改良予報を出すための1つの要素である。シーイングその他の要因により、単一の星像は2次元ガウス分布で近似できる。ノイズ過程は、ポアソンノイズである。このような場合、最も精度の高い現実的なフィルターは、最尤フィルターであるが、S/N比によってフィルターの形が変わるため、高速演算には適していない。測定精度を向上させるための最も重要なポイントは、星像中心から遠い部分から来るノイズの影響を抑えることであるので、ガウシアン型の重みをかけ、この重みで直交する関数を使うことによって、測定精度を向上させ、フィルターの性能を理論的に正確に予言でき、かつ高次のモーメントを使った量の測定にも拡張可能となる。このガウシアン型直交関数は、1次元の場合には、エルミート多項式、2次元の場合には、ラゲール陪多項式を使って表される。この直交関数フィルターの理論的性能は、シミュレーションによって確かめられ、光度測定フィルターに現れるバイアスの消去法が開発され、測定精度の劣化についても定量的評価がなされた。

三鷹のCCD子午環と50cm反射、および木曾シュミットのCCDカメラで、改良予報のための位置観測を多数行ない、得られた2次元画像に対して、上述のフィルター理論を適用して、正確な位置を測定した。改良予報の精度を左右する要因は、個々の星の測定精度だけでなく、比較星に用いたGSC星表の精度も大きい。これについては、三鷹のCCDカメラで5夜にわたって観測した結果から、GSCには大きなローカルな系統誤差があり、比較星の選択効果による誤差が大きく影響することが明らかになった。このため、高精度の測定のためには、同一フレーム内での小惑星と恒星の相対位置測定が非常に重要である。

このようにして出された改良予報のうち、日本で見られる可能性のあるものについては、E-mail、FAX、電話、郵便などによって、全国の観測者に伝えられる。動員できる観測者の数は、現象の条件や、改良予報の出された時期などによって様々であるが、前半夜や週末に起こる現象、明るい恒星の掩蔽、早期に正確な改良予報が出された場合などは、比較的多くの観測者の協力を得ることができる。1996年1年間の実績では、全国の約50ヶ所から観測報告が寄せられた。

寄せられた観測報告は、この種の観測に詳しくない人からの信頼性の低い観測報告なども含まれるので、観測報告の信頼性を正しく評価することが、まず必要である。そこで、観測報告については、A: 観測成功、B: 未確認、C: 観測不成功、D: スプリアス、E: 現象なし、F: 観測なし、G: 観測報告なし、の7段階に分類し、Aランクのみを観測成功にカウントした。過去に行なわれた観測の中には、当時あいまいな評価しかなされなかったものもあるので、上記の基準に従って、再整約と再評価を行なった。この結果、従来よりも観測成功数が飛躍的に向上し、1996年までに、以下の合計12回の現象の観測に成功したことが確認された。

日本で最初の確実な成功は、1983年1月19日に起こった小惑星(106)DioneによるPPM098776の掩蔽である。この現象は、滋賀県の井田三良氏によって眼視的に観測されたことが報告されていたが、他に確認となる観測がないことから、長い間未確認とされてきた。しかし、筆者の調査により、デンマークでも観測されていたことがわかり、整約の結果、井田氏の観測が一致することから、日本で最初の成功であることが確認された。全ての観測を整約した結果、 $(172 \times 119)\text{km}^2$ の楕円形断面が得られた。

2回目の成功は、1987年12月8日の小惑星(324)BambergaによるPPM049241の掩蔽である。この現象は、筆者による木曾観測所での位置観測と、アメリカでの位置観測の結果から、津軽海峡付近で見られるという改良予報が出されたが、実際に青森市の小田桐茂良氏によって観測された。この現象は、アメリカと上海でも観測され、小惑星の直径が $227.6 \pm 1.8\text{km}$ と求められた。この現象の結果は、*Millis et al.* (1989)に発表されている。

3回目の成功は、1991年1月13日の小惑星(381)Myrrhaによる $r$  Gemの掩蔽である。1.9等星というかつてない明るい恒星を隠されるというこの現象は、九州で見られるという改良予報がはずれて東京近郊で見られたため、1ヶ所の光電観測、3ヶ所のビデオ観測、9ヶ所の写真観測を含む30ヶ所以上で観測に成功した。特に筆者は、日本で最初の小惑星による恒星の掩蔽の写真観測に成功した。この現象の観測から、小惑星の断面が $(147.2 \pm 2.4\text{km}) \times (126.6 \pm 7.9\text{km})$ の楕円であることがわかり、この断面から小惑星の自転軸の方向や立体形状に関する確率分布が得られた。また、光電測光観測から $r$  Gemの視直径が $1.3 \pm 0.3\text{mas}$ であることがわかった。さらに、 $r$  Gemの分光的伴星が初めて直接捕らえられ、約7.5等の黄色い星であることと、伴星の位置がわかった。この結果は、後に*Feckel & Tomkin* (1993)によって支持されている。この現象の結果は、*Sato et al.* (1993)に発表されている。

4回目の成功は、1991年9月11日の小惑星(1564)SrbijaによるPPM235822の掩蔽で、岡山氏の大倉信雄氏により、偶然に光電的に捕らえられた。この観測により、この小惑星の直径が $25 \pm 1\text{km}$ 以上であることがわかった。

5回目の成功である1994年3月11日の小惑星(152)AtalaによるPPM100177の掩蔽は、現象の7日前の三鷹での観測により改良予報が出され、ほぼその予報通りに宮崎県高崎町の葺部樹生氏により観測された。小惑星の直径は $59 \pm 3\text{km}$ 以上であることがわかった。

6回目の成功は、1995年5月26日の小惑星(7)IrisによるPPM143744の掩蔽である。この現象は、改良予報は出されなかったが、ほぼ初期予報に近い形で岡山県船穂町

の赤澤秀彦氏により、光電的に捕らえられた。小惑星の最小直径は、 $252 \pm 4\text{km}$ であることがわかった。

7回目の成功は、1995年12月6日の小惑星(704)InteramniaによるGSC518700396の掩蔽である。この現象は、岡山市の大倉信雄氏によって偶然捕らえられ、小惑星の直径が $343 \pm 3\text{km}$ 以上であることがわかった。

8回目の成功は、1996年1月24日の小惑星(14)IreneによるPPM098416の掩蔽である。この現象は、宮城県丸森町の大槻功氏と茨城県日立市の富岡啓行氏によって、いずれも眼視的に捕らえられ、離心率最小を仮定して、 $(167 \times 139)\text{km}^2$ の楕円形状が求められた。

9回目の成功は、1996年2月18日の小惑星(532)HerculinaによるPPM100492の掩蔽である。この現象は、改良予報に基づいて、滋賀県の2人の眼視観測者によって捕らえられたが、減光が浅かったため、出現の時刻が正確に測定されなかった。

10回目の成功は、1996年3月25日の百武彗星(C/1996B2)によるPPM018962の掩蔽である。百武彗星が地球に最接近した日に起こったこの現象は、改良予報が出され、蔵王山の小石川正弘氏がコマによるものと思われる緩やかな減光を写真的に捕らえた他、核による掩蔽帯に非常に近いところにいた鳥取県米子市の池口邦雄氏が、約1秒間の減光を眼視的に捕らえた。これにより、直径 $65\text{km}$ 以上という結果が得られるが、レーダーや電波による観測からは、核の直径は $1 \sim 2\text{km}$ であるという結果が得られており、この減光が何によって引き起こされたのかについての解釈には、議論の余地がある。

11回目の成功は、1996年9月21日の小惑星(12)VictoriaによるPPM203217の掩蔽である。この現象は、改良予報に基づき、札幌市の生田盛氏によってビデオで捕らえられた。この観測から、最小直径が $68\text{km}$ 以上となるが、明らかに中心から外れた部分を通ったものと考えられる。

12回目の成功は、1996年11月25日の小惑星(93)MinervaによるPPM070495の掩蔽である。この現象は、岡山県の大倉信雄氏と赤澤秀彦氏によって光電的に捕らえられ、隠された恒星が近接2重星で、離角 $6.5\text{mas}$ 、位置角 $249^\circ$ 、主星と伴星の光度差が、 $\Delta m_V = 0.81 \pm 0.02\text{mag.}$ であることが発見された。また、小惑星のサイズは、約 $132\text{km}$ であった。

これまでの観測の統計によれば、日本における平均観測成功率は、悪天候などによる欠測を除くと、約5%である。日本からは、国土の狭さや晴天率の低さなどから、現状ではこれ以上の高い成功率を挙げることは難しいが、1997年に出版されると期待されているHIPPARCOSカタログが利用できるようになれば、初期予報の精度が格段に向上し、大きな小惑星の掩蔽は、ほぼ初期予報通りに起こるようになるので、より高い成功率が得られるようになるものと期待される。21世紀には、小惑星による恒星の掩蔽は、現在の接食観測と同様なスタイルで、容易に観測されるようになり、小惑星の正確な大きさと形を得る安価で重要な手段としての位置を築くであろう。

## 論文の審査結果の要旨

天文学では、最新の装置による観測から新しい知見が得られることが多いが、多地点より広く普及した簡便な装置を用いて同時観測を実行することで意義のある成果が得られる場合もある。この論文で取り扱う「小惑星による恒星の掩蔽の観測に基づく小惑星の形状の推定」もそのような観測の1つである。1億km先の天体の形を $\pm 1$  kmの誤差で測るには、 $10^{-8}$  (約2ミリ秒角)の測角精度を必要とするが、このような分解能を有する望遠鏡は(VLBI装置を除き)未だ実現していない。他方、地上の観測者と恒星を結ぶ視線を太陽系小天体が横切るときにはこの小天体の恒星光による影が地上を走行して行くが、この掩蔽の時刻を多地点で観測すれば $10^{-8}$  オーダーの測角精度が得られるとの認識が1970年代の米国で広まり、これを用いた小惑星の形状決定が試みられるようになった。

この論文は、上記手法の有用性に着目し、日本で小惑星の掩蔽観測を行なうために必要となる観測者ネットワークの構築、掩蔽初期予報の計算、直前の予備観測に基づく掩蔽予報の改良、新しいデータ解析法の開発などを積み重ね、多くの観測データの集積と解析を行なったものである。その結果、12回の掩蔽観測に成功し、11個の小惑星の大きさが推定された。その内のいくつかについては、偏平率などのさらに詳しい情報をも(統計的手法を介しての蓋然値としてではあるが)得ることができた。これらの実績を通して、論文の手法の確実性が示され、また将来の見通しが示された。

この論文で著者は、大量の初期予報計算を実行(4章)し、直前の観測の解析に基づいて改良予報を行なう方法を開発(7章)したほか、観測者ネットワークへの初期予報・改良予報の配布(8章)、観測結果の主要な解析(9章)などをほぼ独力でこなしている。このことは、小惑星の運動と恒星の視位置、ならびに運動する地球から見たこれらの相互関係についての位置天文学の専門知識、およびそれを応用する数学的素養が著者に備わっていることを示している。すでに専門学術誌に出版済みの英文2編の原著論文も含めて本論文はオリジナルなデータ解析方法などの創意工夫を含み、また多数回の掩蔽観測の成功という実績に裏打ちされたものであり、博士論文として十分な内容を備えている。

本論文は学位論文として、1昨年7月に審査が開始されたものである。当初の論文は、現在進行中の研究のその時点での到達点をまとめたものであり、既に日本での小惑星掩蔽観測の前進の前兆は見られたものの、著者の寄与によりこの前進が確かなものとなってゆくかに関して、議論の余地があった。また、小惑星の学術的研究の最前線について適切なレビューが欠けている、掩蔽を利用して恒星の視直径を測定する際に観測装置の時間分解能の影響が十分考慮されていない、位置観測の誤差の評価が不十分であるなど、いくつかの問題となる点があった。審査委員会はこれらの諸点に関し改訂を要請し、今回、改訂版を再審査の俎上にのせたのであるが、上述のように博士論文としての基本的要件を満たしたものと判断した。もとより、本論文は完璧ではない。本論文の体系における改良予報の精度的限界がどのようになっているか、その主たる要因も含めて、定量的に明らかにされていけば、論文の手法の有望性がより客観的に明確になったものと思われる。この点については更なる研究の積み重ねに期待する。このほか、論理的明確さに欠ける表現や議論の説得性が多少不十分な部分があった。しかしながら、これらはいずれも論文全体の

内容を大きく損なうものではない。

以上を総合して、審査委員会は本論文が博士論文に値すると判断した。