



Study of fluid dynamical phenomena around compact objects

岡, 和孝

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3113

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003113>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 8 7 】

氏 名・（本 籍） 岡 和孝 （和歌山県）

博士の専攻分野の名称 博士（理学）

学 位 記 番 号 博い第257号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成16年3月31日

【 学位論文題目 】

Study of Fluid Dynamical Phenomena around Compact
Objects

（コンパクト天体周りの流体现象に関する研究）

審 査 委 員

主 査 教 授 松田 卓也
教 授 中川 義次
教 授 蔦原 道久

1. イントロダクション

連星系とは、主星と伴星が互いの重力により引き合いながら回転している系のことである。宇宙に存在する星々の大半は、このような連星系を成している。従って連星系は非常にありふれた天体である。その中でも、主星と伴星が非常に接近している天体を特に、近接連星系と呼ぶ。このような天体として、例えば激変星が挙げられる。この天体は、主星が白色矮星で、伴星は主系列星であり、伴星のガスの一部が主星の重力に捉えられ主星近傍に降着円盤とよばれるガス円盤が形成されると考えられている。

近接連星系において、このように伴星と主星がガスを交換し合い、その結果天文学的に興味深い様々な現象が引き起こされると考えられてきた。特に、主星及びその周りのガスのダイナミクスが天文学的に興味深い現象を引き起こすことが知られており、従ってそれらがこの天体に関する研究の中心であった。しかしその一方で、伴星の構造を知ることは近接連星系を理解する上で非常に重要であるにも係わらず、十分な研究がなされていないのが現状である。その理由の一つとして伴星の観測が現在に至るまで非常に困難であったことが挙げられる。

しかし近年、伴星表面を観測する有力な手法が開発された。また伴星表面の詳細な構造を知らなくては解明できない観測的問題も最近報告されている。このような状況のもとで、伴星表面の構造を詳細に知ることは非常に重要なことであるといえる。そこで、我々はこの問題を解明すべく3次元数値流体シミュレーションを行った。本論文第2章において結果を示す。

また我々のモデルを用いれば、実際の連星系における謎を解明できることが期待される。そこで我々はこの動機をもとに、「銀河系内超軟 X線源 RX J0019.8+2156 における謎」に取り組んだ。第3章において結果を示す。

2. 伴星表面における表面流の数値計算

<シミュレーション>

以下のような手法、仮定に基づいて伴星表面のガスの流れの3次元数値シミュレーションを10公転周期まで行った。

- 1) 座標系は近接連星系の回転に対して静止(連星系と伴星は反時計回りに回転)
- 2) 基礎方程式(オイラー方程式)は有限体積法を用いて計算
- 3) ガスは比熱比 γ で記述される理想気体の状態方程式に従う(γ の値は5/3を適用)
- 4) ガスの粘性、伴星表面の磁場、そして主星および降着円盤からの照射などの効果は無視

<計算結果>

気圧は伴星表面の極において最も高くなり、赤道面にかけて徐々に低くなり、L1点において最も低くなるという結果を得た。等圧線は極から同心円状に分布し、L1点領域で複雑

な構造を示すことが分かった。また、伴星表面には3つの特徴的な渦、H-eddy、L1-eddy、そしてL2-eddyが発生することを確認した。H-eddyは極の高気圧領域に発生し、時計回りに回転する。L1-eddyは最も気圧の低いL1点領域で発生し、反時計回りに回転する。そして、L2-eddyはL1点とは反対側に発生し、反時計回りに回転している。

<議論>

—渦の形成メカニズム—

これらの渦の形成や気圧配置は次のように理解される。L1点からガスが絶えず主星側に抜け出ているため、L1点および赤道面の気圧が低くなり、その結果として極が相対的に高気圧になる。しかし、連星系の公転速度が速いため、ガスは直接高気圧から低気圧(つまり、極から赤道面)に進めず、その進路はコリオリ力により大きく曲げられる。その結果、圧力勾配とコリオリ力が釣り合う形で、高気圧領域である極付近には時計回りの渦、H-eddyが、低気圧領域であるL1点付近には反時計回りの渦、L1-eddyが形成される。このようなガスの流れは、星衡風(Astrostatic Wind, Lubow & Shu 1975)と呼ばれる。しかし、これら2つの渦だけでは力学的に不安定である。つまり、渦同士の相互作用の結果、H-eddyはL1-eddyを、L1-eddyはH-eddyを互いに赤道面に向けて同じ方向に流そうとする。しかし、L1-eddyはあくまでもL1点に固定されているため、結局、H-eddyだけが流されることになり、その結果この渦系は不安定となる。そこで、この渦系を安定化させるために、副次的な渦が必要となる。その結果L2-eddyが出現したと考えることができる。

—粘性起源(エックマン層)—

もしガスに粘性が働かなければ、星衡風は等圧線上を運動し続けることになり、赤道面への下降流は起きない。従って、下降流が発生するためには粘性を生み出すエックマン層の存在が必要となる。本研究のシミュレーションにおいては物理粘性を導入していないため、唯一の粘性起源は数値粘性であると考えられる。このことを確認するため、我々は空間精度を倍にすることにより数値粘性を減少させた。このことにより粘性はもとの精度の1/8倍になると想定される。その結果、H-eddyの巻き付き具合がもとの場合と比べてきつくなることが分かった。従って、我々の計算では数値粘性が下降流を生み出していると考えられる。なお、現実の星では表面の対流層の対流粘性がその役割を担っていると考えられている。

—Lubow and Shu との比較—

Lubow and Shu (1975) は半解析的手法により伴星表面のガスの運動の研究を行った。彼らは伴星表面において時計回りの星衡風を予言した。この流れは、我々の計算で発見したH-eddyに対応する。本研究において我々は新たに、L1-eddyとL2-eddyを発見した。

(氏名：岡 和孝 NO. 3)

3. 超軟X線源 RX J0019.8+2156 への応用

<超軟X線源 RX J0019.8+2156 に関する謎>

我々は本研究において超軟X線源 RX J0019.8+2156 における以下の謎を解明する。スペクトル観測によりこの天体から He II λ 4686 輝線が観測されているが、この放射位置は未だに謎である。従来、この輝線が主星周辺から放射されると想定し、輝線から測定されるドップラー速度を手段に伴星の質量が求められてきた。その結果、伴星の質量は主星の質量よりも小さいという結果を得ている。しかし、この結果は van den Heuvel (1992) による「超軟X線源においてX線強度を説明するためには伴星の方が主星よりも重くなければならぬ」という理論的予測と矛盾している。またさらに、Deufel et al. (1999) によって観測されたドップラーマップにおける輝線分布は、これらの輝線の集中領域が主星および降着円盤の内縁の高温部分と一致していないことを示した。従って、輝線が主星及びその周辺から放射されるという考えは疑問視される。

<アプローチ>

そこで本研究においては、輝線が主星から放射されるのではなく、伴星表面の主星および降着円盤に照らされた部分が熱せられ、その結果熱せられた部分が輝線を放射すると想定した。この想定のもとに、現在までの理論及び観測結果を我々の伴星表面流モデルを用いて矛盾なく説明できるかを調べた。

<結果>

その結果、我々は伴星の方が主星よりもおおよそ3倍程度重い場合に Deufel et al. (1999) によって観測されたドップラーマップにおける輝線分布を説明できることを発見した。さらに、伴星の方が主星よりも重いという結果は、van den Heuvel (1992) による理論的予測にも矛盾しない。従って、輝線のドップラー速度による伴星質量の推定は、誤った結果を導くことになることを示した。

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	岡 和孝		
論文 題目	Study of Fluid Dynamical Phenomena around Compact Objects (コンパクト天体周りの流体現象に関する研究)		
審 査 委 員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	松田卓也
	副 査	教授	中川義次
	副 査	教授	薦原道久
	副 査		
	副 査		
印			
要 旨			
連星系とは、主星と伴星が互いの重力により引き合いながら回転している系のことである。宇宙に存在する星々の大半は、このような連星系を成している。その中でも、主星と伴星が非常に接近している天体を特に、近接連星系と呼ぶ。近接連星系の例として激変星と呼ばれる天体がある。激変星は、主星が白色矮星で、伴星は主系列星である。伴星のガスの一部が主星の重力に捉えられて流れ出し、主星の近傍に降着円盤とよばれるガス円盤を形成する。 近接連星系において、このように伴星と主星が質量を交換し合う。質量交換は連星系の進化を考える際に重要な要素である。また質量交換は天文学的に観測可能な興味深い様々な現象を引き起こす。主星周りに形成される降着円盤はその例である。降着円盤の流体力学は従来の研究の中心であった。 しかしその一方で、質量を失う伴星の性質を知ること近接連星系を理解する上で非常に重要である。それにも係わらず、伴星に関しては十分な研究がなされて来なかった。その理由の一つとして伴星の観測が現在に至るまで非常に困難であったことが挙げられる。 しかし近年、伴星表面を観測する有力な手法が開発された。また伴星表面の詳細な構造を知らなくては解明できない観測的問題も最近報告されている。したがって伴星表面の構造、とくに流れの構造を詳細に知ることは重要な問題となってきた。 本研究では伴星の表面のガス流を解明すべく3次元数値流体力学シミュレーションを行った。そしてその結果を用いて、実際の連星系における観測的な謎に取り組んだ。具体的には「銀河系内超軟 X 線源 RX J0019.8+2156」における理論と観測の不一致に関する謎を解明した。			
本論文は4章から構成されている。第1章では全体の導入部である。			
第2章では伴星表面のガス流の数値計算について述べた。内容をまとめると以下になる。			
数値シミュレーション手法			
以下のような手法、仮定に基づいて3次元数値シミュレーションを行い、伴星表面のガス流の時間発展を10公転周期まで計算し、定常流を求めた。			
1) 座標系は近接連星系とともに回転するデカルト座標系を採用する。			
2) 基礎方程式としてオイラー方程式を用いて、それを有限体積法を用いて近似する。			
3) ガスは比熱比 γ で記述される理想気体の状態方程式に従う(γ の値は5/3を適用)。			
4) ガスの粘性、伴星表面の磁場、そして主星および降着円盤からの照射などの効果を無視する。			
計算結果			
伴星表面でのガスの気圧は伴星表面の極において最も高くなり、赤道面にかけて徐々に低くなり、L1点において最も低くなる。等圧線は極を囲む同心円状に分布し、L1点領域で複雑な構造を示す。伴星表面には3つの特徴的な渦(H-eddy, L1-eddy, L2-eddy)が発生することを確認した。H-eddyは極の高気圧領域に発生し、時計回りに回転する。L1-eddyは最も気圧の低いL1点領域で発生し、反時計回りに回転する。L2-eddyはL1点とは反対側に発生し、反時計回りに回転する。			
議論			
一渦の形成メカニズム			
これらの渦や気圧配置の起源は次のように理解される。L1点からガスが絶えず主星側に流れ出るため、L1点および赤道面の気圧が低くなり、その結果として極が相対的に高気圧になる。しかし、連星系の公転速度が速いため、ガスは高気圧から低気圧(つまり、極から赤道面)に直接には進まず、その進路はコリオリ力により大きく曲げられる。その結果、圧力勾配とコリオリ力が釣り合う形で、高気圧領域である極付近には時計回りの渦、H-eddyが、低気圧領域であるL1点付近には反時計回りの渦、L1-eddyが形成される。			

氏名	岡 和孝
このようなガスの流れは、星衡風(Astrospheric Wind, Lubow & Shu 1975) と呼ばれる。しかし、これら2つの渦だけでは力学的に不安定である。つまり、渦同士の相互作用の結果、H-eddy は L1-eddy を、L1-eddy は H-eddy を互いに赤道面に向けて同じ方向に流そうとする。しかし、L1-eddy はあくまでもL1点に固定されているため、結局、H-eddy だけが流されることになり、その結果この渦系は不安定となる。そこで、この渦系を安定化させるために、副次的な渦が必要となる。その結果 L2-eddy が出現したと考えることができる。 —粘性による赤道への下降流— もしガスに粘性が働かなければ、星衡風は等圧線上を運動し続けることになり、赤道面への下降流は起きない。下降流が発生するためには粘性の存在が必要となる。本研究のシミュレーションにおいては物理的粘性を導入していないため、唯一の粘性起源は数値粘性であると考えられる。このことを確認するため、我々は空間精度を倍にすることにより数値粘性を減少させた。このことにより粘性はもとの大きさの1/8倍になると想定される。H-eddy の巻き付き具合がもとの場合と比べてきつくなることから、上記の予想が確認された。従って、我々の計算では数値粘性が下降流を生み出していると考えられる。現実の星では表面对流層の対流による渦粘性がその役割を担っていると考えられるが、その性質は明らかではない。 —Lubow and Shu との比較— Lubow and Shu (1975) は半解析的手法により伴星表面のガス流の研究を行い、伴星表面における時計回りの星衡風の存在を予言した。この流れは、本研究で発見した H-eddy に対応する。本研究においてさらに、L1-eddy と L2-eddy を発見した。 第3章では第2章で得られた結果を超軟X線源 RX J0019.8+2156 へ応用した。それについて以下にまとめる。 <u>超軟X線源 RX J0019.8+2156 に関する謎</u> 本研究において超軟X線源 RX J0019.8+2156 における以下の謎を解明する。スペクトル観測により He II λ 4686 輝線が観測されているが、その放射位置に関する従来の定説には問題がある。定説では、この輝線は白色矮星(主星)周辺から放射されると想定していた。その仮定の下に、輝線から測定されるドップラー速度を利用して伴星の質量が求められてきた。その結果、伴星の質量は主星の質量よりも小さいという結果を得ていた。 しかし、van den Heuvel (1992) は「超軟X線源においてX線強度を説明するためには伴星の方が主星よりも重くなければならない」と理論的に予測しており、それと矛盾する。またさらに、Deufel et al. (1999) によって観測されたドップラーマップにおける輝線分布は、これらの輝線の集中領域が主星および降着円盤の内部の高温部分とは一致していないことが分かった。従って、輝線が主星またはその周辺から放射されるという考えは疑問視される。 <u>輝線が伴星表面から出るとする本研究のアプローチ</u> そこで本研究においては、輝線が主星周辺から放射されるのではなく、主星および降着円盤に照らされ、熱せられた伴星表面の一部分から放射されると想定した。この想定のもとに、現在までの理論及び観測結果を本研究の伴星表面流モデルを用いて矛盾なく説明できるかを調べた。 <u>結果</u> 伴星の質量を色々変えて調べた結果、伴星の方が主星よりもおおよそ3倍程度重い場合に Deufel et al. (1999) によって観測されたドップラーマップにおける輝線分布をよく説明できることを発見した。伴星の方が主星よりも重いというこの結果は、van den Heuvel (1992) による理論的予測と一致する。だから輝線のドップラー速度により伴星質量を推定するという従来の方法は、誤った結果を導くことが推論できる。 第4章では上記以外の伴星の観測について概観した。 本研究は近接連星系の伴星の表面流を数値シミュレーション的手法で解明するという、従来誰も行っていない分野を開拓した新しい研究である。それによって超軟X線源の観測と理論の矛盾を解明した。よって学位申請者岡和孝は博士(理学)の学位を得る資格があると認める。	