祝・日本学士院賞受賞

激変星の研究─矮新星爆発メカニズム─

尾　崎　洋　二
〈長崎大学教育学部　〒852-8521 長崎市文教町 1-14〉
e-mail: osaki@net.nagasaki-u.ac.jp

私はこの度,「激変星の研究」というテーマで平成 12 年度の日本学士院賞を頂くことになりました. この機会に, 私の激変星の研究, 特に矮新星の爆発メカニズムについての研究を歴史的経緯も含めて私なりにまとめてみました.

本稿では, 激変星が特殊な近接連星系であることが分かってきた 1960 年代の研究からスタートして, 円盤不安定モデルを提案するまでの歴史的経緯と, 1980 年代の, 降着円盤の熱不安定の発見から矮新星爆発メカニズムとして円盤不安定モデルが広く受け入れられるまでを前半部として述べます. そして後半部では, その後の研究であるおおぐま座 SU 型矮新星のスーパーアウトバーストとスーパーハンプを説明する熱─潮汐不安定モデルの提案と, さらに激変星の統一モデルの提案にいたる研究について紹介します.

I. はじめに

私はこの度, はからずも「激変星の研究」に対して平成 12 年度の日本学士院賞を頂くことになりました. この研究は, 私がライフワークとして取り組んで来た研究であり, 特別に思い入れの深いものです. それに対して, このような権威のある賞を頂けることは, 私にとって望外の喜びであります.

天文月報の編集部より原稿の依頼があり, この機会に天文月報の紙面を借りて, これまでの私の激変星研究について紹介したいと思います.

ここでは, まず II 章で私の激変星研究の概要を紹介し, つぎに III 章および IV 章で研究の詳細およびこの研究にまつわる思い出などを述べたいと思います. これらの話しは長くなりますので, 円盤不安定モデル確立までの（1980 年代半ばまでの）研究を前半部として III 章に, 矮新星爆発の統一モデルにいたる（1980 年代後半からの）研究を後半部として IV 章にと, 二つの章に分けることにします.

II. 研究の概要

今回, 受賞の対象になったのは「激変星の研究」です. 激変星というのは, ある日突然明るく輝き出す爆発的変光星です. その中でも特に, 1 ～ 3 ヶ月程度に 1 回の割合で爆発を繰り返す矮新星と呼ばれる星があります. 私は 1974 年に世界にさきがけて, 矮新星の爆発メカニズムとして「円盤不安定モデル」と呼ばれる説を提案しました. このモデルは矮新星の爆発の原因を降着円盤の不安定性に求めるものです. その後 10 年ほど, この円盤不安定仮説は, それ以前に提案されていた「伴星不安定仮説」のライバルモデルとして激しく競争することになります. ところが, 1980 年代になって降着円盤に熱不安定という物理的不安定性メカニズムが見つかり, その後の観測の進展もあり, 私の提案した円盤不安定仮説は矮新星の爆発を説明するモデルとして世界的にも広く受け入れられるようになりました.

その後さらに進んだ観測により, 矮新星の爆発

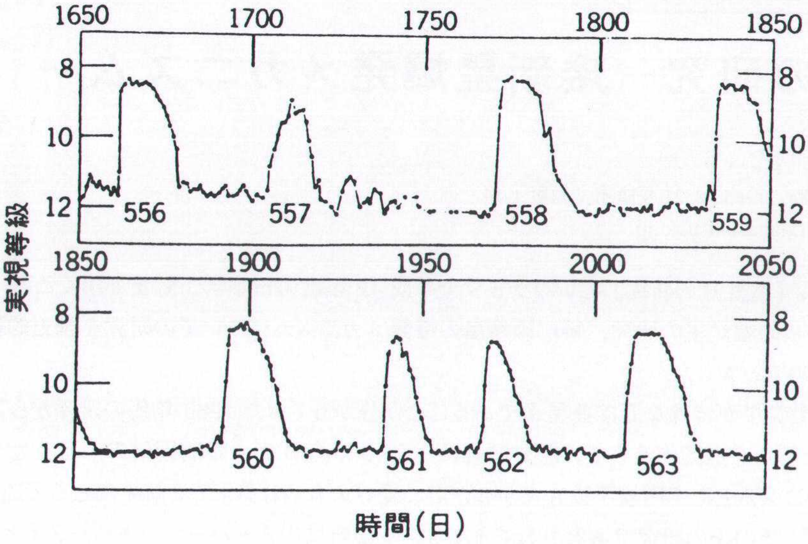

図1．はくちょう座SS星の光度曲線[21]．アメリカ変光星観測協会（AAVSO）による1973年1年間の光度変化のまとめ．

は極めて多様性に富むことも分かってきました．特に矮新星の一つであるおおぐま座SU型と呼ばれる星の場合，「スーパーアウトバースト」と「スーパーハンプ」と呼ばれる不思議な現象があることが分かってきました．1980年代末になって，降着円盤の不安定性としてこれまで知られていた熱不安定性以外に，「潮汐不安定性」と呼ばれる新しい不安定性が見つかってきました．この不安定性は，伴星の潮汐力の影響で，降着円盤が離心楕円円盤に変形するという不安定性です．私は1989年，円盤不安定モデルの枠組みの中で，これまで知られていた熱不安定と新しく見つかった潮汐不安定を組み合わせて，おおぐま座SU型星のスーパーアウトバースト現象を説明する「熱―潮汐不安定モデル」を提案いたしました．この熱―潮汐不安定モデルは，現在のところおおぐま座SU星のスーパーアウトバースト現象をうまく説明できる唯一のモデルであると，思っております．

すでに述べましたように矮新星の光度曲線は極めて多様性に富んでおります．私は1990年代に，これら多様性に富む矮新星を統一的に説明する激変星の統一モデルを提案しました．これは，円盤不安定モデルの枠組みの中で，降着円盤が熱安定であるか不安定であるかという判定条件，つぎに降着円盤が潮汐安定であるか不安定であるかという判定条件の二つを組み合わせることによって激変星を4つの形に分類し，それと実際に観測される激変星の光度曲線による分類を対応させるというものです．この考えにより，多様性に富む激変星の光度曲線は極めてすっきりした形に分類，理解できるようになりました．

降着円盤は，恒星および太陽系の誕生過程から，X線星，クェーサーに至るまで宇宙の活動現象で大きな役割を果たす天体現象としてその重要性が高く認識されています．矮新星はこの降着円盤がもっとも直接的な形で観測される極めて貴重な天体です．その矮新星の爆発メカニズムとしての円盤不安定モデルは，降着円盤の理解に多いに貢献したものと思っております．

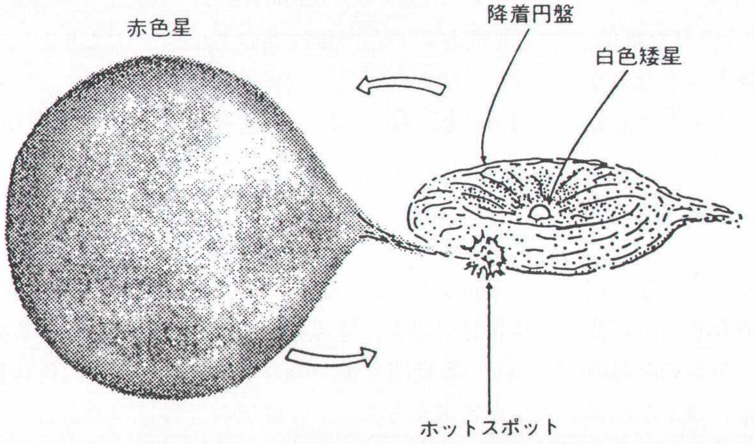

図2．激変星近接連星と降着円盤[22]．激変星は，白色矮星と赤色星との半分離型近接連星である．ロッシュ限界を満たした赤色星からガスが流出し，白色矮星のまわりに降着円盤を作る．赤色星から流出したガスが降着円盤と衝突する場所に衝撃波面が出来，明るく輝く．そこをホットスポットと呼ぶ．

III. 円盤不安定モデルの確立まで

以上簡単に私の研究の概要を述べましたが，これだけでは説明不充分ですので，以下にその詳細を述べたいと思います．

3.1. 激変星とは

普段は暗い星ですが，ある日突然明るく輝き出す星があり，このような星を激変星と呼んでいます．激変星にはその爆発の規模により，新星，矮新星などがあります．まず新星ですが，普段は肉眼ではとても見えないような14～15等の暗い星がある日突然明るく輝き出し，ものによっては1等程度にまで明るくなる天体現象です．

新星の場合，過去にこのような爆発は1回しか観測されていませんが，新星ほど爆発の規模は大きくありませんが，頻繁に爆発を繰り返す星があり，矮新星と呼んでいます．図1は，代表的な矮新星であるはくちょう座SS星の光度曲線です．光度曲線は，変光星の明るさの時間変化を示す図です．この図から分かるように，はくちょう座ＳＳ星は，普段は12等の暗い星ですが，平均して約50日に1回の割で明るく輝き出し，極大光度では8等星にまでなります．すなわち普段の明るさに比べて約40倍ほど増光します．

矮新星として最初に見つかった星は，ふたご座U星で，19世紀の半ばのことです．それ以来，沢山の矮新星が見つかっており，現在ではその数は数百個にのぼっています．

3.2. 激変星は特殊な近接連星系

太陽など普通の星は，このように突然明るく輝き出すということは考えられません．したがって，このような爆発現象を示す激変星はなにか特別な星であろうと推察されていましたが，具体的にはどんな星が新星，矮新星のような激変星になるのかは長い間謎でした．ところが，1950年代から1960年代にかけて，いくつかの激変星について，あるものは食連星であったり，また別のものは分光連星であったりと，周期が極端に短い近接連星系であることが明らかになりました．

さらに，激変星としての近接連星系では，その成分星は白色矮星と太陽に似た赤色主系列星から構成されていて，図2に示すような半分離型近接連星であることが分かってきました．半分離型近接連星とは，連星系の一方の星が自分自身の重力圏であるロッシュの限界を満たしている連星系です．そして，これらの近接連星系ではロッシュ限界を満たしている赤色矮星から流れ出た物質が白色矮星のまわりに降着円盤を形成し，降着円盤を経由して白色矮星に降り積もっています[2]．（降着円盤についての詳しい説明はのちほど行ないますの

で，知らない方はあまり気にせずに，読み飛ばして下さい.）

そして，それまでに詳しい観測がなされた新星，矮新星すべてについて，基本的には上述したような近接連星系とする描像で説明の出来ることが分かりました．さらに，その後の観測で過去に爆発の記録はありませんが，図2に示すような白色矮星と赤色星からなる半分離型の近接連星が存在することがわかり，このような星を新星様変光星と呼んでいます．そして，新星様変光星も激変星に分類することになりました．すなわち，爆発の記録の有無にかかわらず，上記の性質を兼ね備えた近接連星系を激変星と呼ぶように，激変星の定義も拡大されたのです．

この定義は，一見すると本来の激変星の定義である爆発的に明るさを変える星というものから逸脱するように見えます．ところが，現在では新星も爆発を繰り返す星であり，その繰り返しのサイクルが約1万年程度と長いと考えられています．その場合本来は新星になるべき天体ですが，たまたま詳しい観測が行われるようになった過去百年ほどの間が爆発と爆発の間の暗い時期であるような星が当然存在するはずで，それが新星様変光星であろうと考えられます．したがって，爆発を示さない新星様変光星を激変星と分類することには，特に矛盾はないことになります．

3.3. 新星は白色矮星表面での核爆発

激変星がこのような近接連星系であることが明らかになるとすぐの1960年代に，新星の爆発の原因は，赤色矮星から供給され，白色矮星の表面に積もった水素が，核融合反応を起こしそれが暴走した結果であるという現在から見ても正しいと考えられている説が提案されました．そして，それに基づいた詳しい計算も実行され，新星の爆発は白色矮星の核爆発とする説が広く受け入れられるようになりました．

そこで，矮新星の爆発も，新星の小型版であり，新星と同じように白色矮星表面での核爆発ではないかと疑われましたが，この可能性は，後ほど述べるように観測および理論両面で否定されることになります．

3.4. 矮新星では，連星系のどちらの星が爆発するのか？

矮新星爆発の原因が分かるまでには，色々の紆余曲折がありました．まず最初に問題になったのは，矮新星の場合，連星系のどちらの星が爆発するのかという疑問です．1960年代に激変星が白色矮星と赤色星からなる半分離型の近接連星であることが明らかになってすぐに，矮新星の爆発は赤色星が増光するために起こるという説が提案されました．

これには観測的な裏付けがあり，矮新星として最初に見つかった「ふたご座U星」が食連星で，爆発を起こしていない静穏期には深い食が観測されるが，爆発を起こすと食がだんだん浅くなり，爆発の極大期には食が消えてしまうという観測事実です[3]．この観測の一般的な解釈として，静穏期の食は赤色星が白色矮星およびそれを取り巻く降着円盤を隠すために起こると考えられ，それが爆発の増光とともに食が浅くなり，ついには食が消えてしまうという観測事実は，もともと暗かった赤色星が増光した結果であるというものです．

そこで，ポーランドのパチンスキー[4]，イギリスのバース[5]と言った研究者は，近接連星系の赤色星は連星系のロッシュ限界を満たしていて，相手の白色矮星に向けて質量放出をしているが，この質量放出は不安定で，間欠的に質量放出量が増大し，その際に赤色星の高温の内部が表面に露出するため，赤色星の表面温度が増大し赤色星が増光するというモデルを提案しました．実は，私自身も1970年にこの線に沿った改良モデルを作り，Astrophysical Journal に論文として発表しました[6]．

3.5. 矮新星爆発は，白色矮星を取り巻く降着円盤の増光現象

ところが，1971年にポーランドのスマック[7]およびアメリカのウォーナーとネーザー[8]といった研究者が，ふたご座U星の食についての上述の解釈が間違いであることを示しました．すなわち，ふたご座U星の場合その軌道傾斜角が60度近くあり，その場合，白色矮星とそれを取り巻く降着円盤は赤色星に食されることはなく，降着円盤の外縁部にあるホットスポットのみが赤色星に食されるというものです．そして静穏時に見えていた食が増光とともに見えなくなる理由として，爆発時には白色矮星自身ないしはそれを取り囲む降着円盤が増光，静穏時の明るさに大きく寄与していたホットスポットをしのぐようになるためであるという解釈が提案されました．

さらに，連星系の軌道傾斜角が90度に近い別の矮新星も見つかり，その場合には爆発の極大期にも食が観測され，実際，赤色星が増光するのではないことが示されました．どちらの星が爆発するかという問題に対しては，赤色星とする可能性は消えたことになります．すなわち，ふたご座U星の軌道傾斜角が特別な値であったために，たまたまホットスポットは食されるが白色矮星と降着円盤は食されないという現象が起こったのです．

そしてさらに，軌道傾斜角が90度に近い矮新星の極大時での食の観測から，矮新星の爆発は白色矮星自身ではなく，白色矮星を取り巻く降着円盤が突然増光する現象であることが明らかになりました．

3.6. 激変星で重要な働きをする降着円盤

激変星のような近接連星系の場合，二つの星が接近し過ぎたため，白色矮星の強い重力により赤色矮星の大気からガスが引きずり出され，白色矮星へ向けてガスが流出するということが起こります．流出したガスは，白色矮星の方向に流れて行きますが，流出したガス自身が白色矮星に対して角運動量を持っているため，まっすぐに白色矮星には落ちず，いったんは白色矮星のまわりを回る円盤になります．ちょうど土星のまわりに円盤が存在するように，白色矮星のまわりには円盤が出来ます．

これは，中心天体である白色矮星の周りを回転する円盤で，中心星の重力と回転の遠心力が釣り合った状態にあります．このような円盤ではケプラーの第三法則により中心星に近い所ほど回転角速度が速く，外へ行くほど回転速度が遅くなる，いわゆる微分回転（差動回転）の状態にあります．言いかえると，円盤の内側のガスは外側のガスより速く回転するため，外側のガスを追い越して行きます．その際，隣り合ったガス同士に摩擦が働き，内部のガスは角運動量を失って中心天体へ渦巻きながら降り積もって行きます．そこで，このような円盤を降着円盤と呼びます．

降着円盤では，まず降着に伴う重力ポテンシャルエネルギーが回転運動エネルギーに転換され，さらに回転運動エネルギーが摩擦により熱エネルギーに転換，最終的には放射として円盤を輝かせることになります．このような，位置のエネルギーを利用する現象として私達に馴染み深いものは，水力発電です．水力発電は，山の上に降った雨をダムに蓄えて，その水をふもとに落とすときに開放される位置のエネルギーを利用して発電しています．

3.7. なぜ降着円盤が突然増光するのか？伴星不安定モデル

それでは，矮新星ではなぜ降着円盤が突然増光するのでしょうか？　上に見たように，降着円盤の放射の究極的なエネルギー源は，重力の強い中心天体に質量が降着する際に開放される重力ポテンシャルエネルギーです．したがって，矮新星の爆発の際に降着円盤が突然輝き出すのは，降着円盤を経由して中心の白色矮星への質量降着が突然増大したことを意味します．では，なぜ矮新星では白

色矮星に質量が定常的に降着せず，間欠的に降着するのでしょうか？

矮新星の爆発では，赤色星ではなく降着円盤が増光することが明らかになってすぐの1973年に，上述したバースは彼自身の伴星不安定モデルの基本的考えをそのまま維持したまま，降着円盤が増光する新しいモデルを提案しました[9]．すなわち，赤色星からの質量放出は不安定で赤色星の大気から白色矮星に向けて間欠的に質量が放出され，それが降着円盤を経由して中心天体である白色矮星へも間欠的に降着するというモデルです．すなわち，白色矮星への質量降着が間欠的に起こるのは，伴星である赤色星からの質量放出率が一定していなく，それが間欠的に増大するために，矮新星爆発は起こるというモデルです．このモデルは，次に述べる円盤不安定モデルと対比して，伴星不安定モデルと呼ばれてました．

3.8. 円盤不安定モデルの提案

1970年代に入り，新たな観測の解釈と新たな観測事実の登場により，私も矮新星爆発の新しいモデルについて模索しはじめました．そして，私自身も矮新星の爆発について白色矮星への間欠的降着というモデルに到達し，それをPublications of the Astronomical Society of Japanの論文として1974年に発表しました[10]．私のモデルは，白色矮星への降着という点ではバースのモデルと一致していましたが，以下に説明するように，彼のモデルとは本質的な点で異なっていました．このモデルは，現在では円盤不安定モデルと呼ばれているものです．

1974年に発表した私のモデルは以下のようでした．すなわち，矮新星では赤色星から白色矮星へ向けて質量放出が起こっている．そして，この伴星の質量放出率は時間的に一定の割合で起こると考えます．放出された物質は，白色矮星に対して角運動量を持つため，直接は白色矮星には降着せず，一旦白色矮星のまわりを回る回転円盤あるいは回転リングに貯め込まれると考えます．この状態が矮新星の静穏時に対応します．この場合，回転円盤中の物質密度は一定ではなく，時間が経過するとともに増大して行きます．しかし，円盤内に貯め込まれる量にはある限界があり，その限界を越えたところで円盤内部で不安定性が起こり，それまでに貯めたものが一気に中心の白色矮星に降着し，それによって一気に重力ポテンシャルエネルギーが解放され，円盤が明るく輝き出します．これが矮新星の爆発です．爆発により降着円盤に貯め込まれた物質密度が減少すると，円盤は元の安定な状態に戻り，また伴星からの物質を貯め込む状態に戻ります．以上のプロセスを繰り返すのが矮新星の爆発現象であると考えるものでした．

1974年に私がこのモデルを提案した段階では，円盤の不安定性が如何にして起こるかは不明でした．従って，円盤の不安定性は単なる作業仮説です．しかし，このように仮定すると矮新星の爆発現象は極めてうまく説明がつくことが分かりました．このようなモデルは，現象論的モデルと呼ばれている種類のものです．

3.9. 伴星不安定モデルと円盤不安定モデルとの競合

矮新星爆発についての伴星不安定モデルと円盤不安定モデルの二つのモデルは，1970年代後半にかけて互いに激しく競い合うことになります．伴星不安定モデルを強行に主張したのはバースを先頭とするイギリスのグループでした．それに対して，円盤不安定モデルを援護したのは，スマックおよびパチンスキーなどのポーランドの天文学者でした．しかし，どちらの側にも決定打がなく，膠着状態が続いていました．これを打ち破ったのが，降着円盤に新たに見つかった熱不安定性です．

3.10. 降着円盤の熱不安定性の発見

降着円盤の熱不安定性を最初に見つけたのは，昨年逝去された立教大学の蓬茨霊運さんです[11]．

1979年に蓬茨さんは矮新星で出会うような降着円盤の外縁部では円盤の温度が数千度で，ちょうど水素が電離状態から中性状態に遷移する温度に対応していることを見出されました．このような場合，降着円盤の構造を計算すると，円盤の温度が1万度以上で水素が完全電離状態と温度が数千度以下で水素が中性状態になっている二つの安定の状態があり，その中間の状態は不安定になり，円盤は二つの状態を不連続的に遷移することを蓬茨さんは見出されたのです．すなわち，二つの平衡状態を行ったり来たりする緩和振動を起こす可能性があり，これが矮新星の静穏時と爆発時に対応するというものです．

しかし，蓬茨さんの論文ではこの緩和振動が完全に一周期まわらず，途中でストップしてしまうという欠点がありました．1979年の蓬茨さんの論文は日本の理論物理学会誌に発表された論文であったため，世界の天文学会では氏の論文に気づかなかった人が多く，その後まったく独自にドイツのマイヤー夫妻が蓬茨さんと同じ熱不安定性の考えに基づく矮新星爆発モデルを提案，マイヤー夫妻の場合は緩和振動が完全にリミットサイクルを組んで一周期まわる理論を発表しました[12]．この不安定性は，降着円盤の熱平衡の不安定性に起因するので熱不安定性あるいは熱緩和振動と呼ばれています．

一旦熱不安定性の基本的メカニズムが分かると，世界の5つのグループがそれぞれにこの熱不安定性に基づく矮新星の爆発モデルの数値計算を実行し，このモデルにより矮新星の爆発が再現できることを示しました．1980年代前半のことです．この5つのグループというのは，ドイツのマイヤー夫妻，ポーランドのスマック，アメリカのカニゾーとホィーラー，イギリスのフォークナー，リン，パパロイゾーと，日本の嶺重と尾崎です[13]．嶺重さんは，もちろん皆さんよくご存知の現京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻助教授・嶺重 慎さんのことで，当時東京大学大学院の学生でした．この仕事は，嶺重さんの修士論文および博士論文です．一方私は，彼の指導教官という関係です．

一方，観測の方からも円盤不安定モデルを支持する結果が出てきて，理論および観測両面から矮新星爆発は円盤不安定モデルとする考えが世界的に広く受け入れられることになります．

3.11. 研究上のライバル

矮新星爆発についての科学的記述が続きましたので，ここですこし横道にそれることにします．私が1974年に提案した「円盤不安定モデル」に対して，「伴星不安定モデル」という強力のライバルがありました．このモデルは，その前年の1973年にイギリスのオックスフォード大学のバースが提案したものです．この二つのモデルは，対立するモデルとして1970年代後半に大いな論争を引き起こすことになります．しかし，1980年代に入り，「円盤不安定モデル」では降着円盤に熱不安定性という物理的に納得の行くメカニズムが見つかり，一方観測の方からも円盤不安定モデルに有利な観測が次々に出てきて，最終的には私の提案した円盤不安定モデルが世界的に広く受け入れられて行きます．ライバルモデルを提案したオックスフォード大学のバースは結果的に敗れた形になり，天文学の世界から去って行くことになります．

ライバルモデルの存在は確かにうっとおしいものですが，問題の本質がどこにあるかということを際立たせてくれるという点では意義が大きいと思います．

自然科学の良いところは，学問上での論争が起こった場合，最終的な決着は自然自身が判断を下してくれるということです．すなわち，自然自身が公正な裁判官の役割を果たしてくれるのです．言いかえると，どんなに権威がある人が唱えた説であっても，実際の観測事実と矛盾してしまえば，その説は引っ込めざるを得ないことになります．

IV. 矮新星爆発の統一モデルへ向けて

閑話休題．話をもとに戻して，矮新星爆発のそ

の後の発展（1980年代後半からの発展）に目を向けることにします．これからお話することはかなり専門的内容ですので，あまり深入りしたくない読者は4.5節まで飛ばして読まれるとよいかと思います．

4.1. スーパーアウトバーストとスーパーハンプ

さて，すでに見てきたように，矮新星の特徴は爆発が繰り返すことです．しかし，その爆発の繰り返しの平均間隔は星毎にある程度分かっていますが，一つ一つの爆発自身は周期的に起こるわけではなく，次に何時爆発が起こるかを予測することは難しくなっています．そこで，矮新星の爆発に関しては，多くのアマチュア天文家による観測が貴重になって来ます．実際，現在ではアマチュア観測家もCCDカメラを使った観測で，14～15等の暗さの矮新星の静穏時も観測可能になっています．このようにして，矮新星について多くの観測が蓄積されて来ますと，矮新星の爆発の光度曲線は極めて多様性に富むことが分かって来ました．その中でも特に興味を引く現象として「おおぐま座SU型星」のスーパーアウトバーストとスーパーハンプがあります．

おおぐま座SU型星は矮新星の一つのサブグループですが，その特徴は2種類の規模の異なった爆発を起こすことです．二種類の爆発の一つは通常の矮新星の爆発現象と基本的に同じものですが，それとは別に，爆発の極大光度および爆発の継続時間が通常の爆発に比べて格段に大きいスーパーアウトバーストと呼ばれる別の種の爆発が起こります．

さらにスーパーアウトバーストの際に光度曲線に周期的な明るさのこぶ（英語でハンプと言い，その振幅は0.2等程度）が現れます．このこぶのことをスーパーハンプと呼びます．スーパーハンプの周期は連星系の公転周期に極めて近いのですが，不思議なことに公転周期より数パーセントだけ長いという特徴があります．このことは食をおこすおおぐま座SU型星の光度曲線で，スーパーハンプの極大の時刻が連星の食の位相に対して少しずつ遅れていくことからもよく分かります．

矮新星では，その静穏時にも周期的なハンプが観測されています．しかし，このハンプの周期は厳密に連星の軌道周期に等しいので，軌道ハンプと呼ばれています．軌道ハンプについては，図2に示すように赤色星から流失したガスが降着円盤と衝突する場所にホットスポットという衝撃波面が出来，そこが明るく輝いていて，それを連星系の軌道周期ごとに真正面から見る位相で極大になる現象として説明されます．従って，スーパーハンプはこの軌道ハンプとは明らかに別の現象です．

4.2. スーパーハンプ現象と離心楕円円盤モデル

スーパーハンプ現象を説明しようとする色々な試みがなされましたが，結局生き残った唯一のモデルは離心楕円円盤モデルと呼ばれるものです．このモデルを最初に提案したのはドイツのフォクトで，1982年のことです[14]．このモデルは，おおぐま座SU星でスーパーアウトバーストが起こった際，降着円盤が離心楕円円盤に変形し，楕円円盤の形状がゆっくり前進する（離心楕円円盤の近星点が前進するプリセッション現象）というものです．主星のまわりを公転する伴星とゆっくり前進する楕円円盤の会合周期は，連星の軌道公転周期より少し長くなり，この会合周期がスーパーハンプ周期であるというものです．

少し話が横道にそれますが，私自身も，おおぐま座SU星のスーパーアウトバースト現象に興味を持ち，スーパーアウトバースト現象を説明するモデルとして，降着円盤からの放射により伴星からの質量放出率が増大するという「伴星不安定説」に近いモデル（ここでは「照射モデル」と名づけます）を1985年に提案します[15]．私自身は，その後にこの照射モデルを撤回することになりますが，皮肉な

うまく説明できませんでした．

4.3. 潮汐不安定性の発見

そうこうしている内に，離心楕円円盤に理論的根拠を与える論文がイギリスのホワイトハーストによって1988年に発表されます[16]．ホワイトハーストはバースの弟子で，もともとは楕円円盤に強く反対していて，実際，彼自身は楕円円盤モデルを批判する論文を書いていました．ところが，降着円盤の数値シミュレーションをしている過程で，彼は降着円盤が楕円円盤に変形する新しい種類の不安定性を発見します．この不安定性は，降着円盤への伴星の潮汐力の影響で起こるため，潮汐不安定性と呼ばれるようになります．

当時，東京大学大学院で私の学生であった広瀬雅人君が同じような計算を実行していましたので，広瀬君の計算を調べたところ同じ現象が現れていることを私達は知りました．私達は，そこでこの潮汐不安定性の原因を調べ，それが伴星の公転周期と降着円盤内のガスの公転周期が3：1のレゾナンスによって起こることを明らかにし，それを1990年に広瀬・尾崎論文としてPublications of the Astronomical Society of Japan誌に発表しました[17]．図3は，広瀬・尾崎による楕円円盤の数値シミュレーションです．

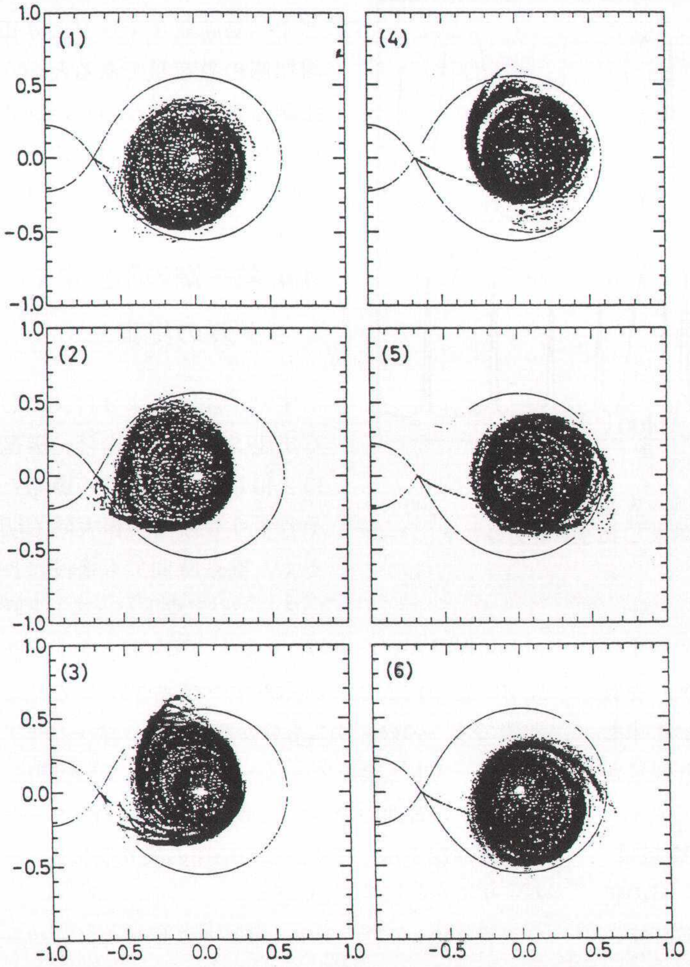

図3．スーパーハンプの際に出来る離心楕円円盤の数値シミュレーション．連星系の公転に同期した回転座標系から見た楕円円盤のスーパーハンプ周期での振動の様子．

ことに照射モデルは別の研究者に支持されて，私自身が1989年に提案した熱—潮汐不安定モデルと対抗することになります．

照射モデル論文の中で，私はスーパーハンプ現象を離心楕円円盤で説明する試みを行いました．そして，定性的にはスーパーハンプ現象は，離心楕円円盤のプリセッション周期を使ってうまく説明できることを示しました．しかし，肝心の降着円盤がなぜ離心楕円円盤に変形するのかという点は

この3：1のレゾナンスが起こるためには，降着円盤の半径が連星系の両星間距離の0.47にも達するような大きな値を持つ必要があることが知られています．実は，降着円盤の半径がこのように大きな値を持つことが出来るためには，連星系での伴星（赤色星）の質量（M2）と主星（白色矮星）の質量（M1）の比（q= M2/ M1）が，約0.25以下であることが必要になります．白色矮星の典型的な

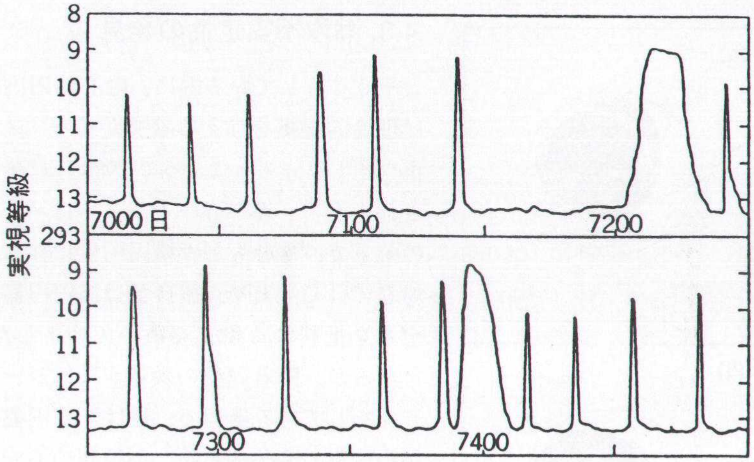

図4．おおぐま座SU型の代表的な星みずへび座VW星の光度曲線[23]．500日の観測期間中に2つのスーパーアウトバーストと16個の普通のアウトバーストが見られる．

スーパーハンプ現象を示すおおぐま座SU型星が，ほとんどすべて周期ギャップより短周期側の激変星であるという観測事実は，スーパーハンプ現象の説明としての潮汐不安定性とうまく一致しています．

質量は，太陽質量程度ないしその8割程度ですから，このことは赤色星の質量が0.2～0.25太陽質量以下という極めて小さな値であることを意味します．すなわち，赤色星は，低質量の主系列星か褐色矮星であるということになります．

よくご存知のことと思いますが，褐色矮星は，その質量が太陽質量の0.1以下で，あまりに星の質量が小さいので，内部で水素の核融合反応も起こらない，恒星と惑星の中間のような天体です．

激変星の公転周期の分布を調べてみますとその分布には二つの山があり，公転周期として周期2時間より短い星と周期3時間より長い星の二つにきれいに分かれ，その中間である2時間から3時間の周期を持つ激変星の数が極めて少なく，激変星の周期ギャップと呼んでいます．そして，激変星連星では，連星系の公転周期と伴星である赤色星の質量にはよい相関があり，周期ギャップより周期の短い連星では赤色星の質量は0.2太陽質量以下で，一方周期ギャップより周期の長い激変星の赤色星の質量は約0.3太陽質量以上であろうと考えらえています．

4.4. 熱—潮汐不安定モデルの提案

すでに述べたように，おおぐま座SU型星の場合，爆発に2種類あり，通常の爆発とそれよりも爆発の極大時も明るく，継続時間でも格段に長いスーパーアウトバーストと呼ばれる爆発が存在することです．図4は，おおぐま座SU型の代表星であるみずへび座VW星の光度曲線です．この図からも分かるように，スーパーアウトバーストと次のスーパーアウトバーストの間に，いくつかの普通の爆発が挟まるある一定のパターンの光度曲線を示します．この一連の繰り返しをスーパーサイクルと呼んでいます．

私は1989年に，おおぐま座SU型星のスーパーサイクルを説明するモデルとして，熱—潮汐不安定モデルと呼ばれるモデルを提案しました[18]．おおぐま座SU型星の場合，普通の矮新星爆発のサイクルとスーパーアウトバーストが繰り返すスーパーサイクルの二つのサイクルがあります．私の熱—潮汐不安定モデルは，円盤不安定モデルの基本的枠組みの中で，降着円盤の熱不安定性と潮汐不安定性の二つを組み合わせることによって，これらの現象を説明しようというものです．

このモデルではまず，普通の爆発は降着円盤の熱不安定による爆発であると考えます．それに対して，スーパーアウトバーストは同じく熱不安定性により起こると考えますが，普通の爆発と違う点

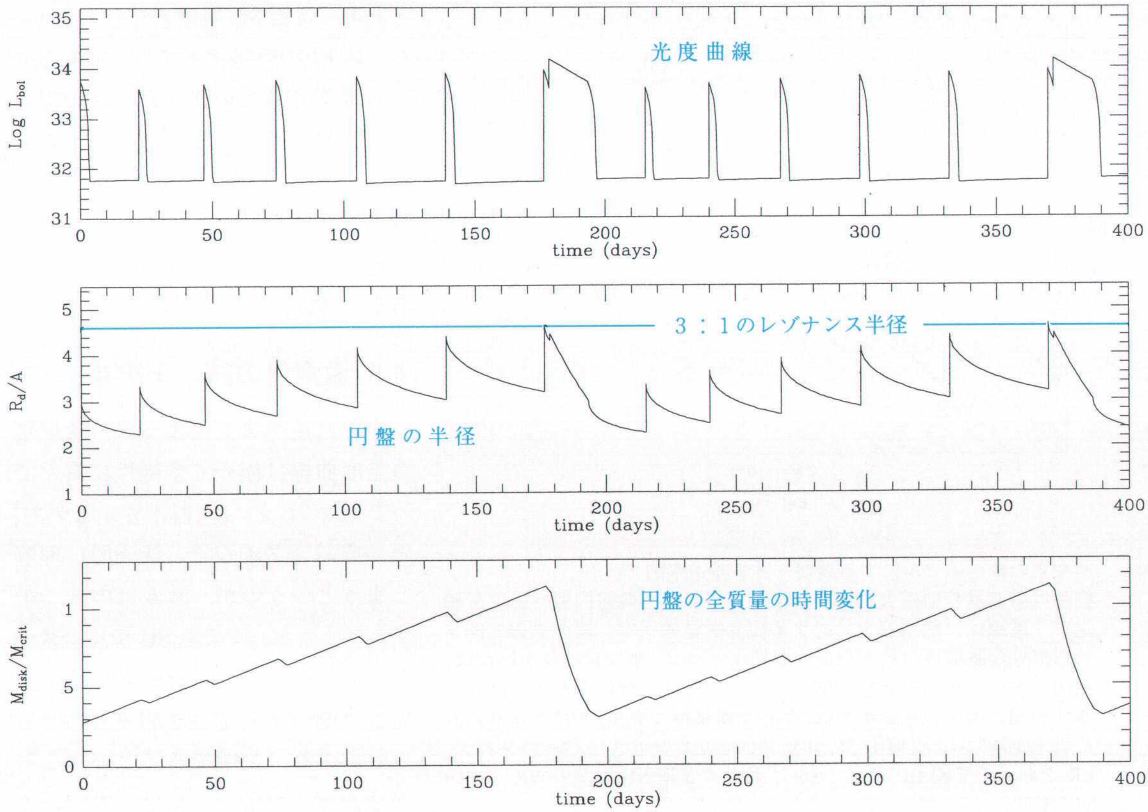

図5．おおぐま座SU型星のスーパーサイクルの熱—潮汐不安定モデルによる数値シミュレーション

は熱不安定性と同時に潮汐不安定性も起こると考えるところです．それでは，なぜある時には，通常の熱不安定だけが起こり，ある時には熱不安定と潮汐不安定性が同時に起こるのでしょうか？ この熱—潮汐不安定モデルでは，その違いは降着円盤の半径の違いであると考えます．潮汐不安定性が起こるためには，降着円盤の半径が連星間の距離の約0.47に達する必要があるということを前節のところで述べました．このモデルでは，スーパーサイクル初期の段階では，降着円盤の半径がこの臨界値より小さいコンパクトな円盤であると考えます．その場合，熱不安定は起こっても，潮汐不安定は起こりません．ところが，その場合，爆発の規模はあまり大きくなりません．その理由は，熱不安定で降着円盤の粘性が急増した場合，降着円盤内部の一部の物質は中心天体に降着しますが，降着円盤の角運動量を保存するためには，円盤の残りの物質が降着物質の余分の角運動量を受け取り，円盤の外縁部へ移動しなければならないからです．その結果，熱不安定が起こる毎に円盤の半径は一時的に膨張します．このように，熱不安定による爆発を繰り返していますと，円盤の半径は徐々に増大し，ついには熱不安定による爆発の際に，潮汐不安定の臨界半径である連星間距離の約0.47という値を越えることが起こります．すると，熱不安定をきっかけにして潮汐不安定も始まります．これがスーパーアウトバーストであるという考えです．

いったん，熱不安定と潮汐不安定が起こります

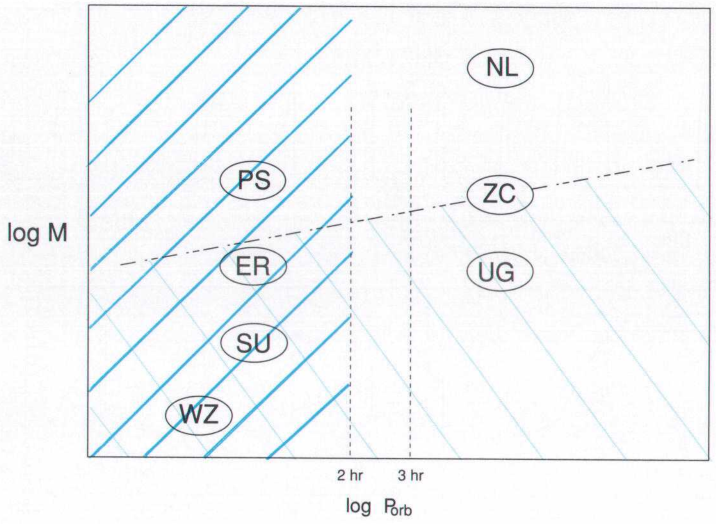

図6．激変星の統一モデルによる周期―質量輸送率図[20].
横軸は激変星の軌道公転周期，縦軸は伴星から降着円盤への質量輸送率．破線は，熱不安定に対する臨界質量輸送率．縦の点線で囲まれた部分が激変星の数が少ない周期ギャップ．激変星の降着円盤は，本図においてその安定性に関して4つの領域に分けられる．詳細は本文参照．図中のシンボルは，NL：新星様変光星，ZC：きりん座Z型，UG：ふたご座U型，PS：パーマネントスーパーハンパー，ER：おおぐま座ER型星，SU：おおぐま座SU型星，WZ：や座WZ型星

と，熱不安定による粘性の増大と潮汐不安定による潮汐摩擦で，降着円盤内の角運動量が連星系の公転角運動量へ引き渡されます．これは，月による地球の潮汐摩擦で地球の自転速度が遅くなると同時に月の公転軌道半径が大きくなる現象と同じ効果です．その結果，降着円盤内部の角運動量が減り，一気に沢山の物質が中心天体に降着し，爆発も大規模になり，また爆発の継続時間も長くなります．これが，スーパーアウトバーストです．そして，スーパーアウトバースト終了後には，半径の小さなコンパクトな降着円盤になります．これで，スーパーサイクルのスタート時点に戻ったことになり，このサイクルを繰り返すことになります．これが熱―潮汐不安定モデルのエッセンスです．図5は，熱―潮汐不安定モデルによるおおぐま座SU型星の光度曲線のシミュレーションです．

おおぐま座SU型のスーパーアウトバーストのモデルとしては，別の考え方も提案されていますが，私の提案した「熱―潮汐不安定モデル」のレベルにまでは完成されていません．私は，現在のところ，私の熱―潮汐不安定モデルがもっとも優れたモデルであると自負しております．

4.5. 激変星の統一モデル

すでに述べましたように，激変星の光度曲線は極めて多様性に富んでいます．これを，「円盤不安定モデル」というパラダイムで，統一的に理解しようというのが，激変星の統一モデルです．おおぐま座SU型星のスーパーサイクルが，降着円盤の熱不安定性と潮汐不安定性を組み合わせることにより，説明できるということが分かった段階で，私はこの統一モデルの基本的なアイディアに到達しました．1990年代はじめのことです．

そして，1990年代中ごろにさらにこの統一モデルの考えを補強するような観測事実が見つかってきます．それは，京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻の加藤太一さん達のグループが発見したおおぐま座ER型星と呼ばれる星の観測です[19]．この星は，おおぐま座SU型星の一種ですが，そのスーパーサイクル周期が40日程度とこれまで知られていたものに比べて格段に短いという特徴がありました．そして，これら一群の星は伴星からの質量輸送率が特別大きな系として熱―潮汐不安定モデルでうまく説明できるが分かりました．

1990年代に，私はこの激変星の統一モデルについていくつかの国際会議で発表して来ました．それに対して，アメリカの太平洋天文学会が出している研究論文誌 Publications of the Astronomical Society

of the Pacificの編集長から，同誌の招待論文として矮新星爆発についてのレヴュー論文を書くよう要請を受けました．その機会に，この激変星の統一モデルを論文の形で発表することにしました[20]．

4.6. 激変星統一モデルの説明

円盤不安定モデルのパラダイムによる統一モデルとは，以下のようなものです．すなわち，降着円盤の不安定性としては，熱不安定性と潮汐不安定性という二つがあります．これら二つの不安定性が起こるか起こらないかを決める条件ですが，熱不安定性は伴星からの降着円盤への物質輸送率が決め手で，輸送率が大きい場合は，降着円盤は熱的に安定，小さい場合は熱的に不安定であることが知られています．すなわち，ある臨界輸送率より大きい場合は，降着円盤は安定で矮新星爆発は起こらないが，臨界輸送率以下の場合は矮新星爆発を起こします．

一方，潮汐不安定性が起こるか起こらないかを決める条件は連星の質量比で，伴星の質量（M2）に対する主星（白色矮星）の質量（M1）の比 q=M2/ M1 が 0.25 以下の星でのみ潮汐不安定性が起こることが知られています．この条件は激変星の公転軌道周期に焼きなおしが可能で，潮汐不安定性は激変星の公転軌道周期が激変星の周期ギャップ（周期2時間から3時間の間）以下の周期の短い系でのみ起こります．

図6は，激変星の周期―質量輸送率図と呼ばれる図です．この図の横軸は，激変星の公転軌道周期を，縦軸には伴星からの降着円盤への質量輸送率を示します．この図の上で，上記二つの不安定性の判定条件により，激変星は4つの領域に分類できます．まず，熱不安定性の判定条件は，図を上下に分ける破線で境界が出来ます．一方，潮汐不安定性が起こるかどうかは，連星の公転軌道周期により，周期ギャップより周期が長いか短いかで左右の二つの領域に分けられます．

この図の右上の領域では，激変星の降着円盤は，熱的にも潮汐的にも安定な領域で，観測的には特別な活動性を示さない新星様変光星と呼ばれる激変星が存在する領域です．

次にこの図の右下に目を移しますと，ここでは降着円盤は熱的には不安定ですが，潮汐的には安定です．観測的には，普通の矮新星爆発を繰り返す「ふたご座U型星」が存在する領域です．そして，上記両者の境界には，ある時は矮新星爆発を示すが，時々爆発の休止に入ることのある「きりん座Z型星」が存在します．

つぎに，周期ギャップ以下の公転周期の短い激変星について考えてみましょう．まず，左上の領域では潮汐的には不安定ですが，熱的には安定です．この領域にはパーマネントスーパーハンパーと呼ばれる一群の激変星が存在します．これらの星の特徴は，矮新星爆発は起こしませんが，おおぐま座SU型星のスーパーアウトバースト時に見られるスーパーハンプ現象が常に観測され，そこでパーマネントスーパーハンパーと名づけられました．これらの星では，降着円盤は熱的に安定で，高温で安定なスーパーアウトバースト状態につねにいると理解できます．

一方，左下の領域は，降着円盤が熱的にも潮汐的にも不安定になる領域で，そこには「おおぐま座SU型星」が存在し，矮新星爆発を示すとともにスーパーアウトバーストおよびスーパーハンプという潮汐不安定性特有の現象を示します．また，おおぐま座SU型星には，そのスーパーサイクルの長さによって，通常の「おおぐま座SU型」，スーパーサイクルが50日以下の「おおぐま座ER型」，またスーパーサイクルが数年と極端に長い「や座WZ型」の3種類があります．これらの差は，物質輸送率が臨界値以下であっても，その値の大小によって違った形の光度曲線を示すことが分かります．

このようにして，激変星の爆発の様子は，円盤不安定モデルの枠組みできれいに理解できることが分かります．図6は，さしずめ激変星のHR図に対応すると言えるかと思います．

V. 稿を終わるにあたって

以上，私の激変星研究について私なりにまとめてみました．これまでの私の激変星研究は，最初の論文から最近の論文まで約30年にわたっており，文字通り私のライフワークであったと思っております．

その間，数多くの論文を書き，その中には間違ったものもありました．しかし，円盤不安定モデルという矮新星爆発の基本になるモデルを世界にさきがけて提案することが出来たこと，また激変星の統一モデルという総仕上げの論文を書くことが出来たことは，とても幸せなことであったと思っております．

また，私の矮新星研究の後半は，大学院学生であった嶺重さん，広瀬さん，市川 晋さんなど若い研究者との共同研究としてなされたものです．40代，50代の研究者にとって若い研究者と共同研究出来ることは，この上もない喜びです．こうした共同研究者および色々な形で私の研究を励まして下さった多くの方々にあらためて感謝して，この稿を終わりたいと思います．どうも有難うございました．

参考文献

1）矮新星爆発メカニズムについての日本語の解説記事としては，嶺重 慎, 1987, 天文月報, 80巻, 10号, 284頁, 尾崎洋二, 1989, 科学, 59巻, 10号, 682頁, 尾崎洋二, 1990, パリティ, 5巻, 12号, 2頁
2）Kraft R.P., 1962, ApJ 135, 408
3）Krzeminski W., 1965 ApJ 142, 1051
4）Paczynski B., 1965 Acta Astronomica 15, 89
5）Bath G. T., 1969, ApJ 158, 571
6）Osaki Y., 1970, ApJ 162, 621
7）Smak J., 1971, Acta Astronomica 21,15
8）Warner B., Nather R. E., 1971, MNRAS 152, 219
9）Bath G.T., 1973, Nature Phys. Sci 246, 84
10）Osaki Y., 1974, PASJ 26, 429
11）Hoshi R., 1979, Prog. Theor. Phys. 61, 1307
12）Meyer F., Meyer-Hofmeister E., 1981 A&A 104, L10
13）Mineshige M., Osaki Y., 1983, PASJ 35, 377
14）Vogt N., 1982, ApJ 252, 653
15）Osaki Y., 1985, A&A 144, 369
16）Whitehurst R., 1988, MNRAS 232, 35
17）Hirose M., Osaki Y., 1990, PASJ 42, 135
18）Osaki Y., 1989, PASJ 41, 1005
19）Kato T., Kunjaya C., 1995, PASJ 47, 163
20）Osaki Y., 1996, PASP 108, 39
21）Mattei J., 1974, J. Roy. Astron, Soc. Canada 68, 169
22）福江 純, 1988,「降着円盤への招待」, 講談社ブルーバックス
23）Glasby J. S., 1970, The Dwarf Novae, (Constable, London) p.207

A Personal Account of My Research on Cataclysmic Variable Stars

Yoji Osaki

Faculty of Education, Nagasaki University, Nagasaki, 852-8521

Abstract: On the occasion of my acceptance of The Japan Academy Prize in the year 2000 awarded to my research on cataclysmic variable stars, I summarize my research on cataclysmic variable stars, in particular on the outburst mechanism of dwarf novae from my personal point of view. In the first half of this article, by starting from research in the 1960s when cataclysmic variable stars were established to be special types of close binary systems, I review my proposal of the so-called disk instability model in 1974 from a historical perspective and then proceed to deal with its establishment as a correct explanation for the dwarf nova outburst in the 1980s. In the second half, I try to explain my proposal of the thermal-tidal instability model which can explain the "superoutburst" and "superhump" phenomena in SU UMa-type dwarf novae and finally try to explain about the unification model for the cataclysmic variable stars.