

SS 433

高岸 邦夫*

1. はじめに

SS 433 は、1960年代の初めにスチープンソンとサンドリュークが銀河面にある H_{α} の輝線を示す星のサーベイのために作ったリスト中にあるわし座の 14 等級の星である ($\alpha=19^{\text{h}}09^{\text{m}}$, $\delta=4^{\circ}54'$). 1978年までに、この近くに超新星残骸と考えられる W50 という広がった電波源があり、その中心の変動電波源が 14 等級の星と一致していることが観測されていたが、この星が SS 433 であることは気付かれていなかった。

一方、X線では人工衛星による観測で W50 と一致する位置に弱い変動 X 線源である 4U1908+05 があることが知られていた。1978年の8月になって、それまで X 線星の光学観測を精力的に進めていたマーゴンのグループは SS 433 の分光観測を行ない、極めて奇妙な現象を発見したのである。 H_{α} , H_{β} , HeI などの輝線が波長の偏移を示さない「静止」成分と、その両側の赤方と青方に偏移した「移動」成分の3つに分裂し、移動成分のドップラー速度は振幅が光速の 10 分の 1 にも達する 164 日周期の変動を示していたのである。Na の星間吸収の強さなどから SS 433 までの距離は 3.5~5 kpc と推定され、銀河系内の天体であることは確かである。さっそくハーバードの掃天写真乾板が調べられ、1929年までは $B \approx 17.5$ でその後は現在の光度と同じになり約 160 日の周期的な変動をしていることが明らかになった。銀河系内の天体でこのような高速で運動する物体はかつて知られていなかった。SS 433 では何が起っているのだろうか？

マーゴンの発見した SS 433 の輝線の異常な振舞いは多くの人々の興味を引くこととなり、その後の数年間に SS 433 は世界中(宇宙中?)で最も多くの観測がなされた天体の一つとなった。第2, 第3の SS 433 を探す試みもなされたが、未だに SS 433 の同類は見つかっていない。

本稿では光、電波、X線での観測について紹介(詳解ではありません)することとしたい。

2. 移動輝線と運動学的モデル

移動輝線の示す視線速度の変化は図1のような正弦的な曲線である。最大視線速度は赤方成分で 50,000 km/秒、青方成分で 35,000 km/秒にも達している。このように大きな視線速度を連星系の軌道運動で説明するのは不可能である(連星系の質量が $10^9 M_{\odot}$ にもなってしまう!)。初めの頃は巨大なブラックホール説などもあったが、現在多くの人々に信じられているのが「運動学的モデル」といわれているものである。このモデルによると図2に示すように 164 日周期で歳差運動する中心天体から反対方向に高速ジェット流が飛び出している。歳差角は 20° で、歳差軸と視線方向のなす角が 79° であり、ジェット流の速度が 0.26 C であれば、移動輝線の変化はジェット流の発光として見事に説明できるのである。移動輝線の強さや幅から発光部分の温度は $\sim 10^4$ K 程度であり、ジェットは非常に細く ($\leq 5^{\circ}$) コリメートされていなければならない。またジェット流は中心の天体から少なくとも 10^{38} エルグ/秒、多分 10^{40} エルグ/秒のエ

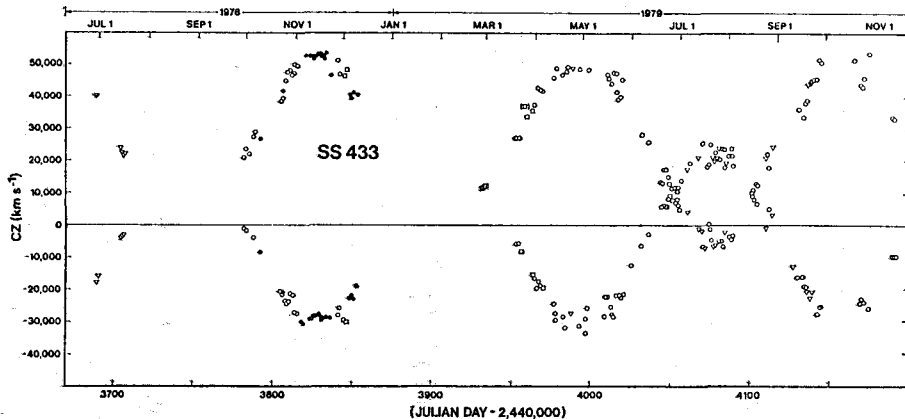


図1 移動輝線 (H_{α}) の視線速度曲線

* 宮崎大・工 Kunio Takagishi: SS 433

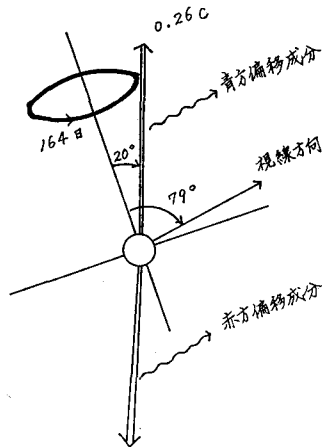


図2 運動学的モデル

エネルギーを運んでいることになる。高速ジェットの加速とコリメーションはどのようにして行なわれているのだろうか？中心天体の正体は何なのだろうか？ジェットのエネルギー源は何であるのだろうか？「運動学的」モデルは移動輝線の振舞いを現象論的には見事に説明するが、本質的な問題には何一つ答えていないのである。

3. 「静止」成分の変化

マーゴン達の発見の当初は静止していると思われていた成分は、その後の観測で図3(上)に示すように、視

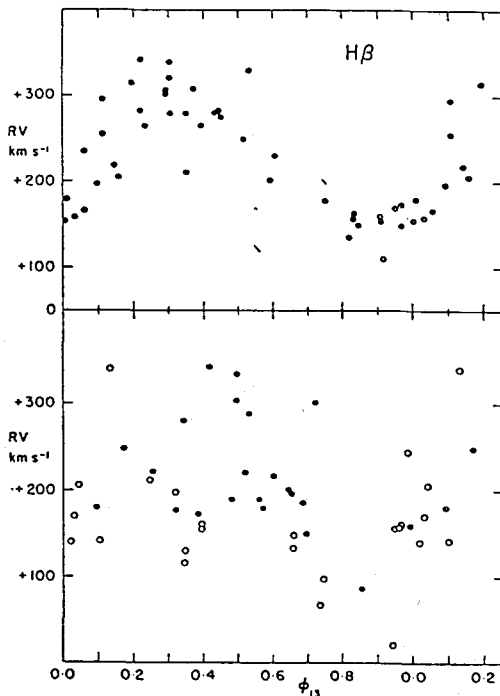


図3 H β の静止輝線の視線速度曲線。1979年7月までのもの(上)。1979年8月以降(下)。

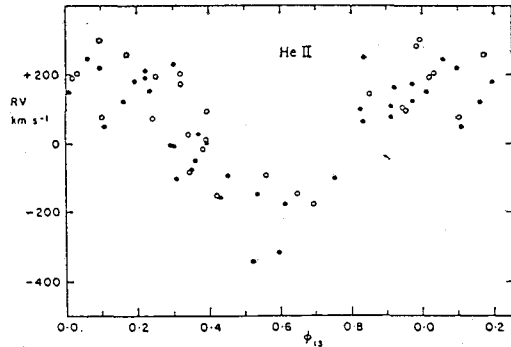


図4 HeIIの静止輝線の視線速度曲線。

線速度振幅が75 km/秒の周期13.1日の連星的な変化をしていることが見出された。もしこの変化が連星系の軌道運動によるものであれば、連星系の一方に中性子星を仮定すると、他方の星の質量は2M \odot 程度となり、X星連星として極く普通の組合せである。ところがさらに観測が進むと、静止成分のうちでHeIIの輝線の視線速度はH β の輝線の視線速度より4分の1位相だけ進んでおり、しかも振幅は195 km/秒であることがわかってきた(図4)。またH β の輝線はある時期には13日の周期性が消えてしまうのである(図3下)。HeIIの輝線の方が本当の連星系の軌道運動を表わしているならば、コンパクト星として中星子星より重いものも不自然ではなく、他方の星の質量としても10~30M \odot の星が考えられ、むしろ重いX線連星のグループに入ることになる。

H β の輝線やHeI, FeIIの吸収線は移動輝線の164日周期の位相によってその強さやプロファイルが変化しているようである。これに対しHeIIの輝線にはこのような164日周期に対する依存性は観測されていない。またクランプトン等によれば、静止成分のスペクトルの一般的な特徴は激変星のものによく似ているということである。(激変星ではその光の多くの部分は周りの降着円板、ホットスポット、連星間のガス流から出ていると考えられている)。これらの静止成分のスペクトルの特徴は、SS 433のモデルを考える上で大変興味深いことであろう。

4. 光度変化

SS 433は比較的小きな望遠鏡でも測光可能な明るさを持っている。長期にわたる連続観測が重要であるSS 433のような天体を観測しようとする者にとって、これは大変都合のよいことである。ここではバイン山天文台(アメリカ)、ワイズ天文台(イスラエル)、内之浦で行なわれた測光観測(いずれも60~100センチの望遠鏡で行なわれた)の結果を紹介しよう。

SS 433の光度変動の特徴は次の3点にまとめられる。

- (1) 輝線の変動の 2 つの周期に対応した 164 日と 13 日の光度の周期的変動がある。
- (2) 2 つの周期の光度曲線は、互いに他の周期の位相により変化している。
- (3) 1 日程度のタイムスケールでの 0.2~1 等級の不規則な変動がある。

以下で光度曲線の形を少し詳しく見ることにしよう。図 5 は 164 日周期の光度曲線を移動輝線の視線速度変化と対応させて示したものである。光度曲線は全体としては正弦的な曲線に「こぶ」がついた形である。光度の最も明るい位相は、移動輝線の赤方と青方の 2 成分の視線速度の差が最大となる位相に一致している。

図 6 a と図 6 b はそれぞれ、13 日周期の位相の前半と後半にあたるデータだけを集めた 164 日周期の光度曲線である。図 6 b では 164 日周期の位相が 0.2 附近の「こぶ」が消えているのが注目される。

図 7 a~図 7 c は 13 日周期の光度曲線を、164 日周期の位相で 3 つに分けて示したものである。164 日周期での光度が明るい位相では (図 7 a)、アルゴン型の光度曲線を示すのに対して、暗い位相では (図 7 b) 主極小が広く浅くなり、副極小が消えているのがわかる。

次に不規則な変動の特徴を見てみよう。図 5~図 7 の光度曲線は一見すると非常になめらかに変化しているように見えるが、実際のデータはこの曲線のまわりに相当

程度ばらついているのである。平均的な光度曲線に相対的なばらつきの程度は、13 日周期の光度曲線ではどの位相をとっても変わらないが (~ 0.25 mag.), 164 日周期の光度曲線に対しては、光度が明るい位相ではばらつきが小さく (~ 0.17 mag.), 逆に光度が暗い位相ではばらつきが大きい (~ 0.31 mag.) 傾向がある。別の言い方をすると、不規則変動は 13 日周期の光度変化と同じ「変調」のされ方をしており、164 日周期とは別の変動らしいということである。

5. 光度曲線とディスクモデル

静止輝線や光度曲線の様子をみると、SS 433 は周期 13 日の連星系であるのは確かであろう。しかし絶対等

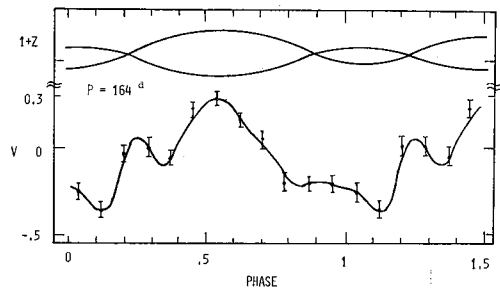


図 5 164 日周期の光度曲線。移動輝線の視線速度の変化が上に示してある。

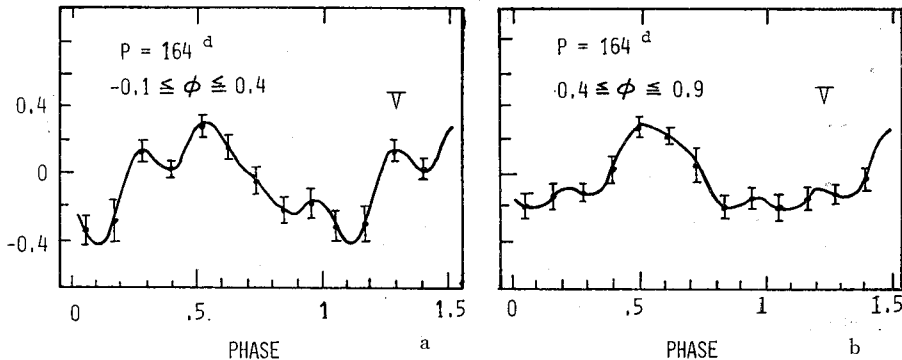


図 6 164 日周期の光度曲線の 13 日周期の位相による変化。a, b はそれぞれ 13 日周期の位相の前半と後半にあたるデータだけについての光度曲線。

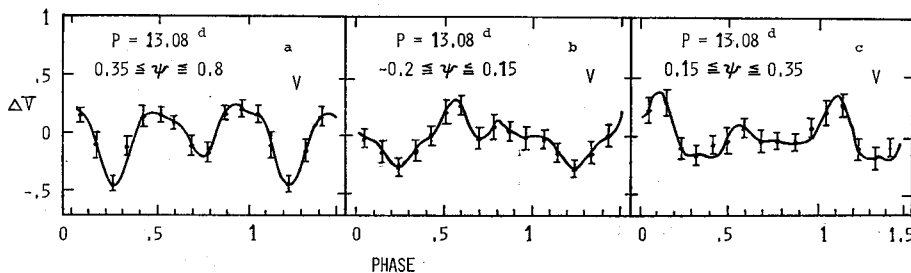


図 7 13 日周期の光度曲線。a, b, c は 164 日周期の光度が明るい位相、暗い位相、「こぶ」のある位相にあたる。

級 ($M_V \approx -6 \sim -8$) は推定され得る範囲の質量 ($\leq 20 M_\odot$) を持つ「普通」の星としては明るすぎると思われる。またその静止成分のスペクトルの特徴は、X線連星や激変星のディスクのものに似ているようである。これらのことから SS 433 のモデルとして、可視光 (移動輝線は別として) の多くの部分を放射するような大きなディスクを持った中性子星 (又はブラックホール) を含む連星系が考えられている。このモデルによると、164 日周期の光度変化は歳差運動するディスクの視線方向に対する傾きの変化によって説明される (図 8=表紙)。光度曲線にみられる「こぶ」はディスク面上のホットスポットによるものか、あるいはディスクからの輻射光の、星による照り返しを示しているのかもしれない。

13 日周期の光度曲線はディスクと「普通」の星による食であると解釈される。そうすると光度曲線の主極小の位相から、HeII の静止輝線の視線速度がディスクの軌道運動を表わしていることになる。H β の静止輝線の変動は、ディスクへのガス流の運動を表わしていると考えられるであろう。

このモデルで考えているディスクは、絶対光度や光度曲線の振幅、食の深さを説明するためには、通常の X線連星のディスクに比べて非常に大きく ($R \sim 20 R_\odot$)、また厚く ($d \sim 0.2 R$)、円形からかなり歪んだ「円板」ということになる。

最近になって移動輝線の視線速度に周期的 (6.3 日) な小変化が重なっていることが明らかになってきた。この変動は赤方偏移線と青方偏移線に対称的に起っている。カット等によればこの現象はディスクモデルで次のように説明される。ディスクが連星の軌道面に対して傾いていると、ディスクにはディスクをねじるような重力的な力が働く。ディスクの歳差周期に比べて連星の軌道周期が無視できない長さであれば、この力はディスクの傾き (従って歳差角) に周期的な変化を引起す。これがディスクから垂直に飛び出しているジェット、視線方向に対する角度の周期的変化となって現われるというわけである。

ディスクモデルではジェット流はディスクから垂直に出ているのであるが、ジェットに $10^{38} \sim 10^{40}$ エルグ/秒のエネルギーを与えるためには、円板への質量の降着率は少なくとも $10^{-5} M_\odot$ /年程度はなければならないだろう。このような多分エディントン限界を越えている降着率が、実はジェットの加速のために必要であるらしい。ジェットの加速は円板の表面附近の大きな圧力勾配により起るといふ説もある。「らしい」とか「だろう」の話はこのへんでやめることにしよう。加速機構は実はまだよくわかっていないのである。

6. 電波・X線での観測

最初に述べたように、SS 433 は電波源 W50 の中心にある。図 9 が W50 の電波強度分布 (3 GHz) である。南北方向に約 1° 、東西方向に約 2° の広がりを持っている。中心にある点状電波源 (SS 433) を VLA や VLBI で分解してみると点状電波源も構造を持ち、 $0.002''$ 以下の中心核と東西に長い $0.1'' \sim 5''$ のジェットから成っていることがわかった。またジェットの電波は強い直線偏光 ($8 \sim 25\%$) を示し、その構造は変動していることが明らかになった。図 10 は直線偏光での強度分布の変化を示したもので、電波のジェットが「つぶ」のように移動輝線を出しているジェットの歳差運動と同じ方向へ飛び出していることがわかる。重要なことは、移動輝線を放射しているジェットと電波のジェットの方向が一致していることと、その方向が W50 の東西方向のふくらみの方向とも一致していることである。

電波のスペクトラムは非熱的で、強さは $0.6 \sim 1$ Jy (1.5 GHz) の間を変動し、スペクトラルインデックスも $-0.5 \sim -1$ の間を変動している。電波の変動はフレア的に起きているようで、X線の強度変化とも関係しているらしい。

図 11 はアイنشユタイン衛星でとらえられた X線の強度分布である。中心に $3''$ 以下の核と東西に長いジェットから成っていることがわかる。X線でもジェットの方向は電波と光のジェットとの方向と見事な一致をみせている。X線強度は中心核が $2 \sim 15 \times 10^{-11}$ エルグ/秒/ cm^2 (適当な距離を入れると $\sim 10^{35}$ エルグ/秒) の間を変動し、広がった成分は中心核より 1 桁弱い。X線のエネルギースペクトラムは硬いとみてよいようで、非熱型で表わせばインデックスは $-1 \sim -0.2$ の間を変動して

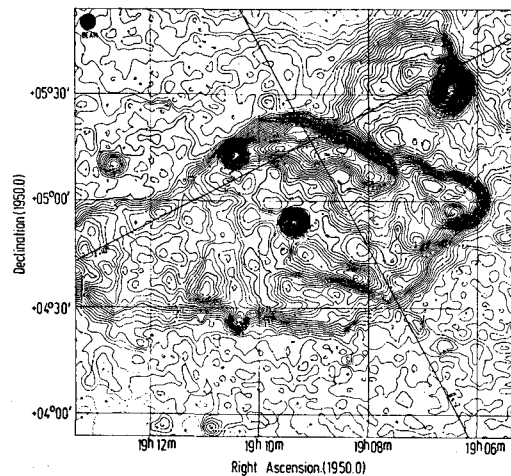


図 9 電波でみた W50. 中心の電波源が SS 433.

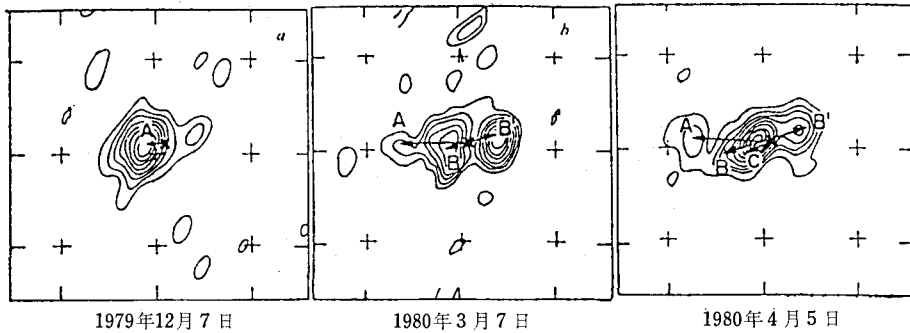


図 10 電波（直線偏光）でみた W50 の中心部の強度変化。A, B, C で示された「つぶ」が中心から飛び出している。

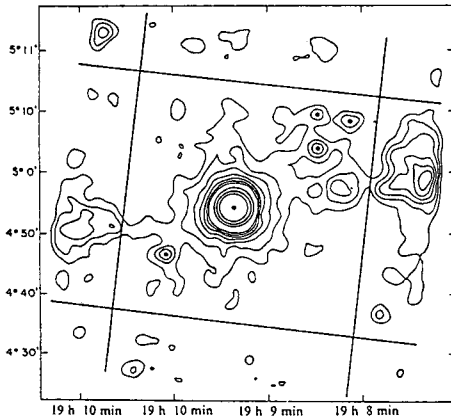


図 11 アインシュタイン衛星がとらえた X 線の強度分布。

いる。注目されるのは 6.8 KeV の線スペクトル (e.w ≃ 600 eV) があるという報告もあることで、このときはスペクトラムが軟かったこともあり時間変動と関係があるのかもしれない。

SS 433 が注目された時期にはウフルやアリエル V の活動がなくなってしまい、アインシュタイン衛星も間もなく死んでしまったために、X 線での観測データは電波や光に比べて極めて少ない。X 線と光の光度曲線の関係、特に X 線での食があるのかどうか、X 線と電波のフレア的な変動の関係等々よくわからないことばかりである。幸いなことに今年の 2 月に「てんま」が打ち上げられ、活動を始めた。今後の「てんま」のデータに期待しよう。

7. おわりに

SS 433 はまだまだ多くの謎にまつまれた天体である。特に高速ジェットの原因やその加速機構については不明な点が多い。スケールは全く異なるが、電波銀河やクエーサーにみられるジェットとの類似も指摘されている。今後も多くの観測が続けられるだろうが、特に X 線と光、電波との同時観測が必要であろうと思われる。

お 知 ら せ

宇宙科学研究所助手公募

公募人員：助手 1 名

所属部門等：共通基礎研究系宇宙空間原子物理学部門。

同部門には、教授 高柳和夫、助教授 市川行和、助手 崎本一博が在任中。原子分子過程の理論的研究と、その宇宙科学への応用（必要なデータの収集・評価等を含む）に意欲をもつ若い人を求めます。現在までの専門分野は問いません。

着任時期：決定後なるべく早い時期

必要書類：(1) 略歴、(2) 研究歴、(3) 論文リストおよび主要論文別刷各 1 部、(4) 着任後の研

究に対する抱負、(5) 他薦の場合は推薦書、自薦の場合は本人について意見を述べられる人 2 名の氏名と連絡先。

締切：昭和 58 年 8 月 20 日（土）

宛先：宇宙科学研究所 所長 森 大吉郎

〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

電話 (03) 467-1111

問合せ先：不明の点の問合せ、および資料の請求は下記あてに願います。

宇宙科学研究所 高柳和夫 内線 355

選考：選考は宇宙科学研究所運営協議員会議において行います。応募者中に適任者がいない場合は決定を保留することがあります。

その他：封筒に「助手応募（推薦）書類在中」と朱書して下さい。