

氏 名 永井 洋

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1034 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Kinematic and Synchrotron-Aging Studies for Young
Extragalactic Radio Sources

論文審査委員 主 査 教授 小林 秀行
教授 櫻井 隆
助教授 和田 桂一
教授 平林 久
教授 田代 信（埼玉大学）

論文内容の要旨

Compact Symmetric Objects (CSOs) are proved to be young radio sources from both the kinematic- and synchrotron-aging studies.

With Very Long Baseline Array (VLBA) observations for CTD 93 over 8.5 yr, we detected an increase of separation between the hot spot and the counter hot spot. The separation rate along the source axis is $0.34 \pm 0.11c$, which results in a kinematic age of 2200 ± 700 yr. Assuming that two hot spots are moving apart from the core at equal speeds, we derive an advance velocity of $0.17 \pm 0.06c$. On the other hand, our multi-frequency observations revealed that radio-lobe spectra show a high-frequency steepening due to synchrotron aging. The spectral break decreases with distance from the hot spot. This tendency is expected from the basic scenario of radio lobe evolution involving particle acceleration at the hot spots, with the radio lobe populated by high-energy electrons that have leaked out from the hot spots. From the spectral fit in the radio lobe of CTD 93 under the minimum-energy assumption, we derive the advance velocity of $0.232 \pm 0.005c$ and synchrotron age of 1720 ± 40 yr. The kinematic age and synchrotron age show an agreement within a factor of two.

Following the detection of hot-spot motion and spectral break in CTD 93, we examined both kinematic and synchrotron ages of the innermost radio source of 3C 84 using VLBA. Since 3C 84 is one of the nearest powerful CSOs, detailed kinematics and spatial distribution of break frequency are revealed. Measurements of hot spot motion with respect to the core over 4.5 yr resulted in the advance velocity of $0.43 \pm 0.06c$. The resultant kinematic age is 33 ± 5 yr in 2000. The radio-lobe spectra also show a high-frequency steepening due to synchrotron aging. The break frequency decreases with the distance from the hot spot. The lowest break frequency of 2.3 ± 1.4 GHz is occurred near the core. Assuming the minimum-energy field, we derive the synchrotron age of $24 (+14, -5)$ yr in 1995. The kinematic and synchrotron ages are thus in very good agreement. Also these ages indicate that innermost radio lobe is associated with the 1959 outburst of activity.

We proved that CTD 93 and 3C 84 are young radio sources from both kinematic- and synchrotron-aging studies. This is strong evidence for the hypothesis that CSOs are young radio sources. As well, the agreements between kinematic and synchrotron ages imply a validity of synchrotron-aging analysis under the minimum-energy assumption in CSOs. Assuming that minimum-energy assumption is also applicable to FR II sources, we found that an averaged expansion velocity of FR II sources is $\sim 0.05c$. This is comparable to an averaged CSOs' expansion velocity of $\sim 0.1c$. This implies that expansion velocity of radio lobe does not strongly depend on the linear size of radio source, if we allow that CSOs evolve into FR II sources.

Finally, we examined the physical property of hot spots for a large number of radio galaxies to reveal the relation among CSOs, MSOs, and FR II sources. The hot spot luminosity of CSOs and MSOs are almost equivalent to that of FR II sources, indicating that the jet power of CSOs and MSOs is favorably comparable to that of FR II sources. The hot spot pressure and radius show simple power-law changes as expected from the dynamical evolution model of the hot spot. This is a supporting evidence for evolutionary sequence from CSOs to MSOs to FR II sources.

Overall results strongly argue that CSOs are young extragalactic radio sources that are potentially able to evolve into FR II sources through MSOs.

永井洋氏によって提出された学位論文(題名「Kinematic and Synchrotron-Aging Studies for Young Extragalactic Radio Sources」)は、天文学の分野における活動銀河中心核についての電波天文学による観測的な研究結果をまとめたものである。本文は5章の構成から成っている。

第1章において銀河のなかで中心部で電波やX線で強く輝き、可視光でのスペクトル線の速度幅が大きいなどの中心で大きな活動性を示す活動銀河中心核(AGN)のなかでも、電波強度の高い銀河(radio galaxy、以下電波銀河と呼ぶ)について、研究の現状を概説している。AGNは中心に巨大ブラックホール天体(SMBH)を持っていると考えられ、巨大なジェットを形成している天体であるが、それらの進化を明らかにするためには天体の年齢の推定が重要であることを述べている。年齢を推定する有力な方法として、これらの天体のジェットの年齢を推定するものがあり、電波ローブ内のホットスポットと呼ばれる電波強度が強くスペクトルの傾きの大きい(高エネルギー電子が多い)領域の中心から広がる速さと中心からの距離から求められた年齢(力学的年齢)と、シンクロトロン放射によるそれぞれの領域での高エネルギー電子の放射減衰の分布から求められた年齢(放射減衰年齢)があることを述べている。CSO銀河と呼ばれる1 kpc(キロパーセック)以下のコンパクトな広がりを持ち、対称な電波ローブを持つ電波銀河では力学的年齢のみが観測的に求められているが、対称な電波ローブが0.1から1 Mpc(メガパーセック)とCSO銀河に比べて1000倍程度に広がっているFR II銀河(ファナローフリータイプ2型銀河)の年齢は放射減衰年齢でのみ年齢が推定されており、両者の整合性を明らかにすることがこの手法の信頼性を明らかにすることであり、この種の銀河の進化を明らかにする上で非常に重要であり、それが本論文の目的であることが述べられている。

第2章においてはCSO天体の1つであるCTD93について、米国VLBA、VLAの2つの大型電波干渉計によって観測を行い、それらをどのように解析を行ったかについて述べている。観測は2GHz、5GHz、8GHz、15GHzの周波数の電波で行い、得られた空間分解能は約4ミリ秒角とたいへん高精度なものである。さらにこれらの観測装置によって以前に観測されたアーカイブデータを用いることで、この天体のジェットの固有運動と周波数インデックの構造を求めることができ、ジェットの力学的年齢が2200(±700)年、放射減衰年齢が1100(±30)年と求めることができた。その結果、この両者の年齢推定の方法が2倍程度の差異で一致することをはじめて示した。この部分はすでに論文としてまとめ、学術誌に掲載されている。

第3章においては、同じくCSO天体である3C84についてVLBAによる観測を行い、第2章に記述された解析方法と同じ手法によって解析し、アーカイブデータも加えて力学的年齢および放射減衰年齢を推定し、それぞれ33(±5)年および24(+15, -5)年と誤差の範囲で一致することを見出した。

第4章においては、2つの天体CTD93と3C84の観測結果による力学的年齢と放射減衰年齢の一致から、CSO銀河とFR II銀河が同じ進化の系列に属し、CSO銀河からFR II銀河に進化してことが観測に強く示唆されることを示している。さらに、年齢推定に使用された仮定である電波ローブにおける磁場と粒子のエネルギーがおおよそ等分配則に従っている

ことが正しいということも強く示唆されることを示している。この仮定を用いてFR II 銀河の電波ローブの大きさと年齢に相関があり、電波ローブはおよそ $0.1c$ の速度で等速的に広がっていく描像が強く示唆されることがわかった。CSO銀河からFR II 銀河に進化したというシナリオの妥当性について、観測的に年齢の推定をすることによって、はじめて示すことができた。

第5章においては、これらの観測結果および解釈についてまとめている。さらに今後の研究の方針として、本論文の結果を強固なものにするために、この手法による年齢推定についてとくに2つの方法で検証することのできる天体の観測を今後増やす必要があること。電波ローブの広がりの中程度であるMSO銀河についても同様の観測・解析手法を適用する必要があること。すべてのCSO銀河がFR II 銀河に進化するのかどうかの検証が必要であることなどが述べられている。

さらに付録として磁場と電子の運動エネルギーの等分配則にしたがっている時の観測される電波強度のスペクトルから磁場強度を求める導出方法について定式化し、シンクロトロン自己吸収プロセスを仮定した際の電波スペクトルの強度がもっとも大きくなる点の周波数と強度、磁場強度と大きさの関係を定式化している。さらにコルモゴロフスミルノフテスト法についても述べている。

この論文について審査員全員によって質疑応答を行い、CSO 銀河および FR II 銀河について力学的年齢と放射減衰年齢が一致したことを見出したことの科学的な意義は大きく、その結果を用いて電波ローブが広がって行く進化過程に重要な観測的な知見をもたらした科学論文であることが確認された。観測手法およびデータ解析の方法についても、すでに得られている理論的な知見を踏まえて、新たな観点で検討を行い観測データに適用したもので学位論文に足る十分に独創的な研究である。さらに本論文の科学的な価値に加えて、米国の VLBA や VLA という世界最先端の装置を用いた観測であり、これらの装置の過去のアーカイブデータの再解析を行うなど、博士課程3年間の研究期間が必要な内容であることなどの観点から学位論文にふさわしいものであるという意見で審査委員全員が一致した。