

氏 名 松本 尚子

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1409 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 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 Astrometry of 6.7 GHz Methanol Maser Sources and the
Bar Structure of the Milky Way Galaxy

論文審査委員 主 査 准教授 久野 成夫
教授 川口 則幸
准教授 出口 修至
准教授 羽部 朝男 北海道大学
教授 藤澤 健太 山口大学

論文内容の要旨

The goal of this thesis is to kinematically establish the existence of the bar structure in the Milky Way Galaxy based on VLBI astrometry of masers in star-forming regions. To achieve this goal, the thesis consists of three parts described below. First, we measured annual parallax and absolute proper motions of the 6.7 GHz methanol maser source W3(OH) with the JVN/VERA (Japanese VLBI Network/VLBI Exploration of Radio Astrometry). We derived the trigonometric annual parallax to be 0.633 ± 0.112 mas, corresponding to a distance of $1.58^{+0.34-0.24}$ kpc. This is the first detection of a parallax for 6.7 GHz methanol maser with the JVN/VERA, and demonstrates that the JVN/VERA is capable of conducting VLBI astrometry for 6.7 GHz methanol maser sources within a few kpc from the Sun. We also measured the internal proper motions of 6.7 GHz methanol maser of W3(OH) for the first time. The internal proper motions basically show north-south expansion with velocities of few km s^{-1} , being similar to OH masers. The global distributions and the internal proper motions of 6.7 GHz methanol masers suggest a rotating and expanding torus structure surrounding ultracompact HII region. We also obtained averaged absolute proper motion for all six spots of W3(OH), which is $\mu_{\alpha} \cos b = -1.10 \pm 0.30$ mas yr^{-1} and $\mu_{\delta} = -0.16 \pm 0.38$ mas yr^{-1} . The accuracy of the absolute proper motion obtained here indicates that we will be able to detect the non-circular motion caused by the Galactic bar, which is expected to be an order of sub-mas yr^{-1} .

Next, we conducted the fringe check observations to select observable target sources toward the Galactic bar. We selected sources from the 6.7 GHz methanol maser catalog of Pestalozzi et al. (2005). In our sources selection, we used four criteria as follows: First, sources must have the galactic longitude $|l| < 40^\circ$ and $\langle \text{Dec} \rangle -37$ deg. Second, the sources must have a galacto-centric radius less than 5 kpc, which is estimated from the kinematic distance. Third, we chose strong sources with the flux are 15 Jy or more at single dish observations except some sources that were specially included to investigate the detection limit for the flux under the 15 Jy. Fourth, the maser sources must have one or more detectable reference sources with the JVN or the VERA within 4 degree separations from the maser sources. In these selections, we chose the reference sources with the peak flux about 100 mJy beam^{-1} or more at 8 GHz (X-band) in the VLBA Calibrator Survey. The fringe check observations were conducted with six sessions from 2008 October to 2009 June with the JVN/VERA: In total, 75 maser sources were observed. 26 maser sources were detected with signal to noise ratio of more than 5σ at the baseline of about 1,000 km or longer in the 75 sources, corresponding to the detection rate of 35%.

For astrometric observations, out of the 26 sources detected in the fringe check observations, we chose ten maser sources, which are easy to observe with phase referencing because of high flux at longer than 1,000 km VERA baselines and suitable

reference sources. These ten sources were G353.4+0.64, G351.41+0.64, G30.76-0.05, G29.95-0.02, G28.14+0.00, G25.70-0.04, G25.65+1.04, G24.78+0.08, G23.01-0.41 and G9.98-0.02. We obtained the three dimensional velocities with VLBI phasereference observations. With these data sets for 2, 3 or 4 epochs, we fitted linear proper motions with least-square fittings without a parameter of annual parallax. Finally, we obtained the suitable proper motions for seven sources.

By combining our data with previous results from the VERA/VLBA, we compared the 3-D data of star forming regions with the flat/non-flat circular rotation models and a dynamical model proposed by Wada (1994) and Sakamoto et al. (1999). We find clearly a deviation from the flat/non-flat circular rotation models in the absolute proper motions at the three dimension of $(l, \mu_l \cos b, V_{LSR})$. Around the maximum region of V_{LSR} , the absolute proper motions are smaller than the flat rotation model for the five sources out of eight. From the dynamical models and VLBI data, an acceptable parameter of the inclination angle of the Galactic bar is derived as $\sim 35^\circ \pm 20^\circ$, which is consistent with previous studies. Thus, with the existence of the Galactic bar, observed proper motions with VLBI can be explained better.

博士論文の審査結果の要旨

近年、いくつかの研究（赤外線測光による星の分布の非対称性の発見、一酸化炭素および水素原子ガスの運動と理論との比較、恒星進化の晩期にある AGB 星に付随する一酸化ケイ素メーザー源の運動など）から、我々の銀河系の中心部には棒状構造が存在すると考えられるようになってきた。しかし、棒状構造付近に存在する天体に対し、その運動を計測し、棒状構造による重力場の影響を検証する事はほとんど行われてこなかった。一方、高い位置測定精度を達成できる超長基線電波干渉法（Very Long Baseline Interferometry：以下 VLBI とする）は、銀河系内の天体の運動を調べるための強力な手法である。特に、6.7GHz メタノールメーザー輝線は、強度が高く安定であり、分子雲内の内部固有運動も銀河回転速度に比べ十分小さく、また、周波数が低いので、位置の基準として使われる参照天体（系外電波源）を得やすいという利点がある。そのため、VLBI 位置天文観測の新たな道具として注目されている。

このような背景の中、出願者の博士論文では、星形成領域に付随する 6.7GHz メタノールメーザー輝線の VLBI 観測によって、これまで観測例のない遠方の分子雲の 3 次元運動を計測し、銀河系の棒状構造の存在を検証することを目的としたものであり、全 5 章からなる。

第 1 章では、これまでに行われてきた銀河系の棒状構造の検証についておよび、VLBI 位置天文観測についてまとめ、本論文の目的を述べている。

第 2 章では、銀河系内の星形成領域のひとつであるウルトラコンパクト HII 領域 W3(OH) について、日本の VLBI 観測装置である Japanese VLBI Network/VLBI Exploration of Radio Astrometry（以下 JVN/VERA とする）を用いたメタノールメーザー源の観測を行い、6.7GHz メタノールメーザー輝線を用いた VLBI 位置天文観測の可能性を検証している。また、その観測結果を基に、W3(OH) に付随する 6.7GHz メタノールメーザー源の内部固有運動を検出し、それが 1.6GHz OH メーザー源の運動と一致し、ウルトラコンパクト HII 領域に付随した回転膨張するトーラスモデルで説明できることを示した。この結果は、JVN/VERA を用いた 6.7GHz メタノールメーザー輝線による初めての VLBI 観測例であり、メタノールメーザー輝線を用いた VLBI 位置天文観測の可能性を切り開くものであった。

第 3 章では、銀河系棒状構造検証の観測に使用できるターゲットを選ぶために 6.7GHz メタノールメーザー源のカタログから棒状構造近傍に存在するものを 75 天体選んで JVN/VERA でのフリッジ確認観測を行い、25 天体を十分な信号雑音比で検出している。同時に、参照電波源のキューサーのフリッジ確認観測も行っている。

第 4 章では、その結果をもとにフリッジ確認観測で検出された 25 天体の内、10 天体について位置天文観測を実行し、7 天体について 3 次元運動の計測に成功した。得られた 7 天体に加え、過去に行われた 12GHz メタノールメーザー源 3 天体に加え、いくつかの銀河

系のモデル（1. 平坦な回転曲線をもつ、2. 銀河中心方向に回転速度の勾配をもつ、3. 棒状構造を持つ）との比較を行い、観測されたメタノールメーザー源の運動および水素原子ガスで観測されている速度構造を、中心に棒状構造を持つ銀河系モデルが最もよく再現することを示した。また、このモデルは棒状構造の方向について星の分布の観測とは独立した力学的制限を与えるが、これまで考えられていた棒状構造の向きと一致することを示した。

第5章は、全体のまとめおよび本研究の課題や将来の展望についてまとめている。

6.7GHz のメタノールメーザー源を用いた位置天文観測を JVN/VERA で実現し、W3(OH)の内部固有運動を明らかにした点、また、メタノールメーザー源を用いた VLBI 位置天文観測によって、銀河系内の分子雲の運動に対する棒状構造の影響を調べるという新しい手法で銀河系の棒状構造を示唆する結果を得たことは、今後の研究の発展性も含め、高く評価できる。また、W3(OH)の観測結果はすでに学術雑誌に英語論文として投稿されており、提出された博士論文も明快な英語で記述されている。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。