

# ミラ型変光星の位置天文観測

中川 亜紀治

〈鹿児島大学大学院理工学研究科 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-35〉

e-mail: nakagawa@sci.kagoshima-u.ac.jp



ミラ型変光星の変光周期と等級の間の数量的な関係（周期光度関係）は星への距離を測るための尺度となる。ミラ型変光星に付随するメーザーに対しVERAによるVLBI連続観測を行い、年周視差およびその逆数である距離を高精度で計測する。この距離を用いて絶対等級を決め、天の川銀河のミラ型変光星に固有の周期光度関係を確立することを目指している。観測は現在も進行中であり、これまでに得られた精度の高い距離計測例や活動の現状について報告する。

## 1. 目的

### 1.1 天体までの距離

天文学はほかの実験物理学と違い、観測対象に直接の作用を及ぼせないという点にとてももどかしさを感じる。遠方にある観測対象、それは星であったり銀河であったりするが、その性質を理解するためには遠く離れた地球から眺めること以外に手だてではなく、得られる情報から天体の性質を導き出す際に距離の情報は欠かせない。天文学では近傍の天体から宇宙論的遠方の天体まで、その性質や種類に応じていろいろな距離の計測法が用いられており、この手法は「距離はしご」と呼ばれている。天の川銀河に存在する恒星に対して有効な距離計測法の一つが年周視差法である。地球の公転による見かけの動きを利用するこの手法は、天体の性質に何らかの仮定を必要とするほかの計測法と違い、位置と運動から幾何学的に距離を算出するためとても信頼性が高い計測法である。しかし遠い天体では年周視差が小さくなるため、この方法で計測できる距離の上限は望遠鏡の角分解能に大きく依存する。超長基線電波干渉計（Very Long Baseline Interferometer; 以降VLBI）は数千メートルの間隔を隔てて配置された複

数の電波望遠鏡で天体を観測する手法である。センチ波からミリ波帯におけるVLBIの角分解能は1ミリ秒角（milli arc second; 以降mas）程度であり、この高い分解能のおかげで、計測できる天体の距離は光学望遠鏡を用いる場合に比べて桁違いに大きくなる。

ミラ型変光星は明るさを周期的に変える天体である。その周期の対数と等級の間には比例関係の存在が知られ、この関係（周期光度関係と呼ぶ）は距離計測の道具として利用できる。この道具の確立や校正を行うのが筆者らをはじめ鹿児島大学と国立天文台のVERAが進める研究テーマの一つである。

### 1.2 ミラ型変光星を用いた距離尺度

ミラ型変光星はM型のスペクトルをもつ質量が1-8太陽質量程度の変光星であり、その明るさは規則的に変化する。変光の周期はおよそ100-1,000日の範囲にあり天体ごとに異なる。Feastら<sup>1)</sup>により調べられたミラ型変光星およそ800天体の変光周期分布を図1のヒストグラムに黒い実線で示した。この分布をガウス関数でフィットすると、周期の対数で2.53（338日）付近にピークをもつことがわかる。一方、私たちが観測対象とする星は水メーザーを伴うことが条件であり、それらの分

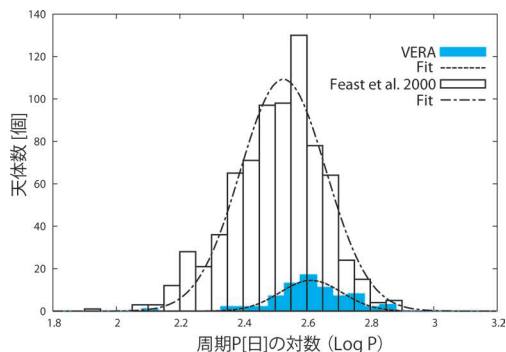


図1 変光周期分布のヒストグラム。黒い実線は Feastら<sup>1)</sup> によるおよそ800個のミラ型変光星、青色は私たちが観測候補とするおよそ80個の水メーザーを伴うミラ型変光星である。一点鎖線および破線はその分布をガウス関数でフィットしたもので、分布の中心はやや異なり私たちが観測対象とする星の変光周期はやや長いほうに寄っている。

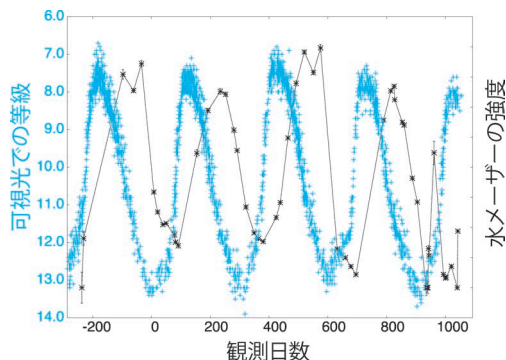


図2 ミラ型変光星 R UMa の観測例<sup>5)</sup>。黒のマークは水メーザーの強度変動、青は可視光の明るさの変動を示す。可視光データはアメリカ変光星観測者協会 (American Association of Variable Star Observers; AAVSO) のデータを利用している。

布は図中に青色で示され、同様にフィットして得られた分布の中心は2.61 (407日) 付近となった。

この種の星は数十億年から百億年を超える年齢をもつ。その間、周期的な変光を見せる期間は10万年程度であり、その長い進化過程の終盤にさしかかった時期にあると考えられている。Feastら<sup>2)</sup> は大マゼラン雲中のミラ型変光星の観測から、その変光周期と見かけの等級との間に直線的な周期光度関係があることを報告している。いま大マゼラン雲の距離を既知とすると見かけの等級から絶対等級が計算でき、周期の対数と絶対等級の関係がわかる。この関係を使うと、距離の分からないミラ型変光星の見かけの等級と周期の二つの観測量から距離を得ることができる。このように周期光度関係は天体の距離を導出するための尺度として利用できる。しかし大マゼラン雲の距離には不定性が残り、また銀河間の金属量の違いが周期光度関係に与える影響も考慮する必要がある。van Leeuwenら<sup>3)</sup> は、位置天文衛星 HIPPARCOS<sup>4)</sup> による年周視差の観測結果を利用して天の川銀河における周期光度関係を求めたが、利

用した距離の精度は十分とは言えず、より信頼できる関係の確立が望まれる。そこで私たちは VERA を用いることでこれまでより高い精度の距離計測を行い、この距離に基づいた信頼性の高い周期光度関係の確立を目指している。

## 2. 観 測

### 2.1 単一鏡観測によるメーザーの強度監視

ミラ型変光星に付随する水メーザーの明るさは数十日から数百日の時間スケールで大きく変動するため、VIBI観測の時期を適切に決めることが重要となる。この変動を把握するため、私たちはおよそ250個のミラ型変光星を対象としてVERA 入来局で月に1回の単一鏡観測による強度監視を行っている。2008年には新谷ら<sup>5)</sup> により当時の結果がまとめられていた。図2はその一例であり、ミラ型変光星 R UMa の電波および光での変動を示している。R UMa は水メーザーが周期的な強度変動を示す一例であり、その周期は光の変動と同程度である。こうしたきれいな周期性を示すメーザーもあれば、一方では不規則に変動するものもあり、その様子はさまざまである。こうした変動を把握して、VLBI観測を行う天体を選定

する。

VLBIには淡く広がった構造の電波源に対して検出感度が低下する特性があり、VLBI観測での電波強度は多くの場合に単一鏡観測の結果より小さくなる。そこで、VLBI観測での検出を確実にするために強度監視において約10 Jyを閾値として、それ以上の強度を数年間にわたり安定して保っている天体をVLBIのよい観測対象としている。また変光周期に着目すると、周期光度関係の確立のためにはその範囲はできるだけ広く設けることが望ましい。私たちは強度監視の結果を常時見直し、明るさや変光周期の条件に照らし合わせてVLBI観測を実施する天体とその開始時期を決定している。

## 2.2 VERAによるVLBI位置天文観測

観測すべき天体と時期を決めるとVERAによるVLBIモニター観測を開始する。VERAは二つの受信機を搭載することでメーザーと遠方のクエーサーを同時に観測し、クエーサーを基準としてメーザーの位置を精密に測り年周視差計測を実現する<sup>6)</sup>。観測の頻度は月に1回で、観測の継続期間は典型的には1.5-2.0年である。私たちがこれまでにVERAを用いて観測を終了した天体、または現在観測中の天体を赤経の順に表1に示した。周期Pと変光星のタイプ（ミラ型変光星、Mira,または半規則型変光星, SR）を示しており、数はおよそ30天体である。

## 3. これまでの結果と展望

### 3.1 距離計測の結果

VERAによる直接の観測量は年周視差とそこから得られる距離であるが、私たちはこの情報を利用して星そのものの性質（温度、サイズなど）や運動を明らかにする。ここではいくつかの結果を紹介する。図3, 4は半規則型変光星S Crtの観測結果である<sup>7)</sup>。図3では9回の観測からメーザーが天球面上を運動する様子がきれいにとらえられ、直線的な固有運動と年周視差による楕円運動

表1 観測天体（赤経順）。

天体名	周期 (P)	周期 (Log P)	Type
SY Scl	415	2.62	Mira
WX Psc	660	2.82	Mira
RU Ari	354	2.55	SR
T Lep	368	2.57	Mira
BW Cam	—	—	Mira
RW Lep	150	2.18	SR
BX Cam	454	2.66	Mira
U Ori	368	2.57	Mira
AP Lyn	450	2.65	Mira
U Lyn	434	2.64	Mira
GX Mon	527	2.72	Mira
Z Pup	509	2.71	Mira
QX Pup	—	—	Mira
R Cnc	362	2.56	Mira
X Hya	301	2.48	Mira
R UMa	302	2.48	Mira
S Crt	155	2.19	SR
VX UMa	215	2.33	Mira
T UMa	257	2.41	Mira
RS Vir	354	2.55	Mira
FV Boo	340	2.53	SR
W Hya	361	2.56	Mira
RX Boo	278	2.44	SR
Y Lib	276	2.44	Mira
S CrB	360	2.56	Mira
SW Lib	292	2.47	Mira
FS Lib	415	2.62	Mira
IRC+10374	—	—	Mira
IRC-20540	510	2.71	Mira
SY Aql	356	2.55	Mira
SV Peg	145	2.16	SR
R Aqr	390	2.59	Mira

が合成された蛇行運動が見える。これより年周視差 $2.33 \pm 0.13$  masが得られ、距離は $430_{-23}^{+25}$  pc（パーセク、1 pcは約3.26光年）と決定できる。また、一連のVLBI観測から、星周メーザーの分布や星の静止系での運動も調べた。この手法はメーザーが星の周囲に等方的に分布しているような場合に、より効果的である。図4はS Crtの星周メーザーの分布とその運動を示したものであり、およそ40 mas（17天文単位）四方の領域にメーザーが分布する様子がわかる。中心の+印は分布から推定した星の位置とその誤差を示す。メーザーは外側に広がる運動をもっていることもわかる。中心の斜線で示された円は赤外線観測

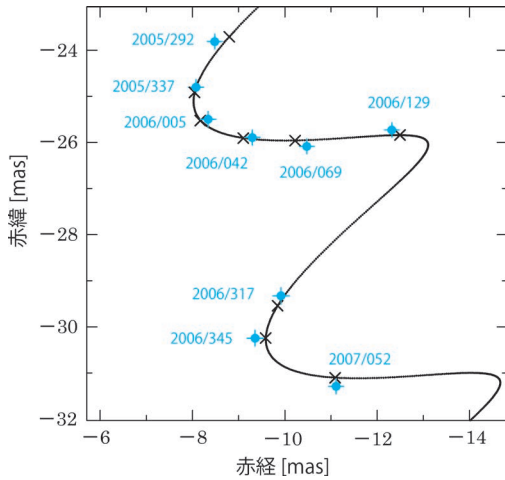


図3 S CrTの水メーザーの天球面上での運動<sup>7)</sup>. 青色の●印は観測値, ×印はベストフィットモデルのメーザーの位置. 楕円運動と直線運動が合成され蛇行の様子が見える.

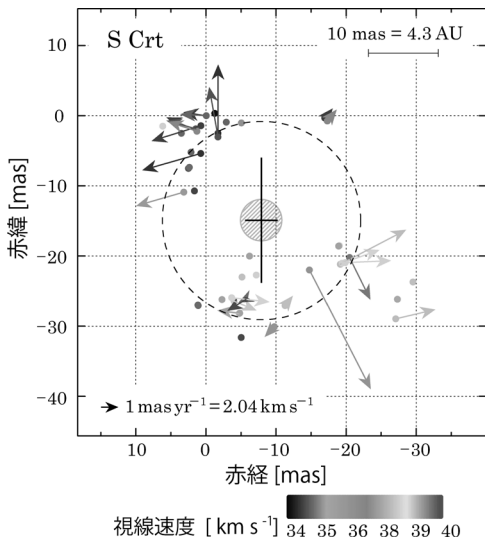


図4 S CrTの星周メーザーの分布と運動<sup>7)</sup>. 中心の円は見積もった赤外線 (Kバンド) での光球サイズ. 矢印は運動の速度, 濃淡は視線速度を表す.

結果と光球の推定温度を利用して見積もった光球サイズを表している. 半径は太陽の  $260 \pm 20$  倍となり, この星の赤外線での変光が光球サイズの変動のみに起因すると仮定した場合の半径の変動幅

は太陽半径の213-309倍と見積られた. Haniffら<sup>8)</sup> や van Leeuwenら<sup>3)</sup> による研究で, 多くのミラ型変光星の光球サイズは太陽半径の300倍以上であると報告されているので, 半規則型変光星である S CrTのサイズはその下限値に近い値をもつことが示唆される. ミラ型変光星と半規則型変光星の関係を明らかにするうえでも, 距離から導き出される種々の物理量は重要な情報となる.

次にミラ型変光星 SY Sclの観測結果を星の運動に着目して紹介したい. VERAによる年周視差の計測値は  $0.75 \pm 0.03$  masであり, 距離は  $1.33 \pm 0.05$  kpcと決定された<sup>9)</sup>. 同時に得られる固有運動と視線速度からは星の3次元の運動がわかるが, これを銀河中心に静止した座標系での運動に変換すると, 銀河回転の動径方向速度  $V_R$ , 回転方向速度  $V_\theta$ , 北銀極方向速度  $V_Z$  の値として, それぞれ  $(V_R, V_\theta, V_Z) = (-1.8, 178.5, -25.9)$  km s<sup>-1</sup> が得られた. 導出の際, 局所恒星系に対する太陽の運動は Dehnenら<sup>10)</sup> の結果を利用している. 星は銀河面から南銀極方向に1.3 kpc離れた位置にあり, 銀河面から更に離れる方向の速度成分 ( $-25.9$  km s<sup>-1</sup>) をもって運動していることがわかった. この星がたどってきた銀河系内での運動を過去10億年までさかのぼって計算した結果が図5である<sup>9)</sup>. 静的な重力ポテンシャル<sup>10)</sup> を仮定し, 今回の観測結果を初期条件として計算した結果である. 星は最大で銀河面からおよそ1.5 kpcの距離まで大きく離れながら, 銀河面を南北に貫きながら振動している様子がわかる. また動径方向にも振幅およそ2 kpcの振動が見られる. ミラ型変光星が銀河を構成する「厚い円盤」に属していることがこれらの結果からもわかる.

前述の二つの星は単一の変光周期を示す星の観測例であるが, 中には二つの変光周期を示すものもある. 半規則型変光星 RX Booは変光周期に関しさまざまな値が報告されているが, それらを整理すると長い周期と短い周期に大別されることがわかる<sup>12)</sup>. VERAによる観測の結果, 年周視差

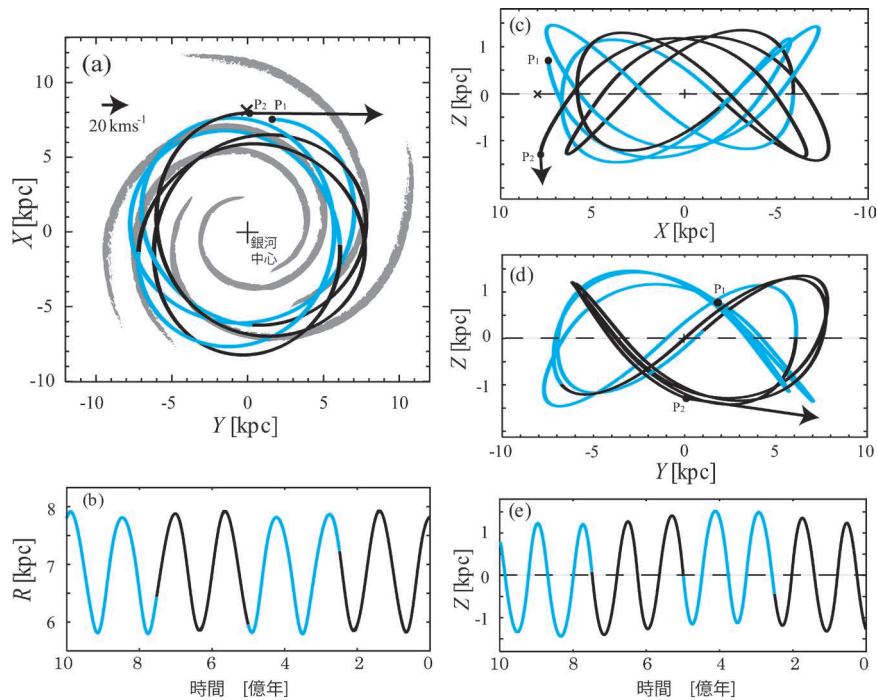


図5 ミラ型変光星SY Sclの運動を過去10億年までさかのぼり描いたもの<sup>9)</sup>。実線は星の軌跡を表し、2.5億年ごとに色を変えている。(a) 銀河系を北銀極方向から見た様子。P<sub>1</sub>とP<sub>2</sub>はSY Sclの10億年前と現在の位置、×印は太陽の位置を表す。背景に灰色で描いた渦状腕は中西と祖父江<sup>10)</sup>の結果から引用。Z軸は紙面に垂直で手前方向が正になるように定義する。矢印は銀河中心に固定した座標系での星の運動を示す。(b) 銀河中心からの動径方向距離の変化の様子。(c),(d) 銀河系を横から見た様子。それぞれX-Z平面、Y-Z平面への投影。(e) 銀河面からの垂直距離Zの時間変化を表す。

は $7.31 \pm 0.50$  masであり、距離 $136^{+10}_{-9}$  pcが得られた<sup>12)</sup>。この距離とKバンドでの見かけ等級 $-1.85$ <sup>13)</sup>より、絶対等級 $-7.35^{+0.15}_{-0.14}$ が得られる。二つの周期と絶対等級を用いて、周期光度関係上での位置を調べた結果、長周期の場合はミラ型変光星やそれに準じる半規則型変光星(SRa)を多く含む系列に属し、短周期の場合は周期の規則性に乏しい半規則型星(SRb)を多く含む系列に属することがわかった。これは現在RX Booが二つの系列間を遷移する時期にある可能性を示唆している。

図6はミラ型変光星R Aqrの観測結果であり、複数の観測のうち、2005年12月24日のレーザー分布を示したものである<sup>14)</sup>。この星は43 GHz帯の一酸化ケイ素レーザーの観測から年周視差が決

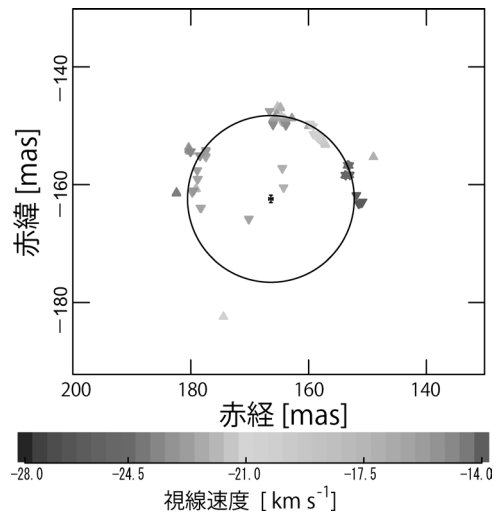


図6 R Aqr星周の一酸化ケイ素レーザー<sup>14)</sup>。円はレーザーの分布をフィットしたもので、中心を+印で示す。

表2 年周視差の計測結果.

天体名	年周視差 [mas]	Reference
SY Scl	0.75±0.03	丹生ほか <sup>9)</sup>
S Crt	2.33±0.13	中川ほか <sup>7)</sup>
RX Boo	7.31±0.5	亀崎ほか <sup>12)</sup>
R Aqr	4.7±0.8	蒲原ほか <sup>14)</sup>

定された. 2004年から2年間にわたる観測で得られた年周視差は $4.7 \pm 0.8$  masであり, 距離 $214_{-32}^{+45}$  pcに対応する. R Aqrはメーザーの時間変化が激しく, 一つのメーザーを同定して長期にわたり追跡することが困難であった. そこで蒲原ら<sup>14)</sup>は図6のようにメーザーが円状に分布することを利用し, その分布中心を追跡することで年周視差を決定した.

紹介した年周視差の結果を表2にまとめた. メーザーの分布中心を利用したR Aqrの観測では, メーザーの変化の激しさに手を焼いたものの, 解析手法を工夫することで年周視差を決定することができた. また他の天体での年周視差は誤差10%を超える高い決定精度となっている.

### 3.2 観測の困難

変光星のメーザーの時間的な振る舞いはしばしば私たちが悩ませる. 前章で示したように, 長期にわたる検出の末に年周視差が精度よく決定できる星がある一方で, メーザーの明るさは時に複雑な時間変動を示し, 1年未満のうちに強度が低下して検出できなくなる場合がある. また追跡していたメーザーがなくなり, 違う場所で新たなメーザーが見え始めるなど, 空間分布が大きく変わる場合もある. こうした状況から, 時にはVLBIモニター観測を短期間で中断せざるをえないことがある. こうした困難を避けるためにも前述の単一鏡観測による強度監視は重要である.

### 3.3 ミラ型変光星の周期光度関係

周期光度関係は観測から得られた変光周期 $P$ と絶対等級 $M$ を次の関係式

$$M = \rho(\text{Log } P - \text{Log } P_0) + \delta \quad (1)$$

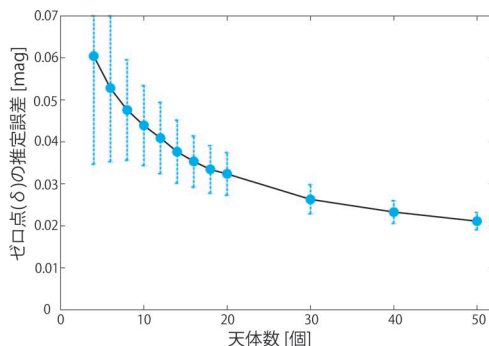


図7 シミュレーションから得られた周期光度関係のゼロ点推定誤差と観測天体数の関係. 縦軸はゼロ点の推定誤差, (バーは標準偏差), 横軸は観測天体数. 1回のフィッティングに用いる $N$ 個のテストデータの等級誤差はすべて0.1等とした.

にフィットさせ, 傾き $\rho$ および縦軸の基準であるゼロ点 $\delta$ を求めることで得られる. 右辺で括弧の中の $P_0$ には観測する複数の天体の周期の平均値を用いる. 天体数が十分であれば天の川銀河のミラ型変光星のみを利用して, 傾き $\rho$ およびゼロ点 $\delta$ の両方を決定することが可能であるが, 現時点ではサンプル数が不十分であり難しい.

信頼できる周期光度関係の確立には天体数の増加が不可欠であり, そのためにも困難が多い中で観測の効率化を図る必要がある. 現在シミュレーションにより目標達成に必要な天体数の目安や変光周期の幅を見積っている. 図1で示したメーザーを伴う星の周期範囲でテストデータを生成し, そこからランダムに $N$ 個のデータ(すなわち星)を取り出して周期光度関係のフィッティング試行を行うことで傾き $\rho$ やゼロ点 $\delta$ の推定誤差が天体数にどのように依存するかを調べた. 試行の際, テストデータがもつ絶対等級の誤差は年周視差の誤差5%に対応する0.1等としている. 図7は横軸を観測天体数, 縦軸をゼロ点 $\delta$ の推定誤差として, シミュレーションの結果を示したものである.  $N \sim 20$ 個までの推定誤差の減り具合に比べ, それ以上の $N$ では変化が緩やかである. 天体数を増やすことは精度向上にまだ十分に有効であ

り、ほかにも精度向上に有効な観測方針を検討中である。

鹿児島大学では赤外線による新たなミラ型変光星の探査も進めており、本研究から得られる周期光度関係を用いることで多くの星の銀河系内での位置が決まることが期待される。また、VERAで進められる研究の多くは銀河面近くの重い星や若い星、いわゆる薄い円盤を構成する星を主なターゲットとしているが、私たちが狙う変光星は厚い円盤に属している。両者が補完し合うことでより立体的な銀河の理解へとつながることが期待される。

### 参考文献

- 1) Feast M. W., Whitelock P. A., 2000, MNRAS 317, 460
- 2) Feast M. W., Glass I. S., Whitelock P. A., Catchpole R. M., 1989, MNRAS 241, 375
- 3) van Leeuwen F., Feast M. W., Whitelock P. A., Yudin B., 1997, MNRAS 287, 955
- 4) Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al. 1997, A&A 323, L49
- 5) Shintani M., Imai H., Ando K., et al., 2008, PASJ 60, 1077
- 6) Kawaguchi N., Sasao T., Manabe S., 2000, Proc. SPIE 4015, 544
- 7) Nakagawa A., Tsushima M., Ando K., et al., 2008, PASJ 60, 1013
- 8) Haniff C. A., Scholz M., Tuthill P. G., 1995, MNRAS 276, 640
- 9) Nyu D., Nakagawa A., Matsui M., et al., 2011, PASJ 63, 63
- 10) Dehnen W., Binney J., 1998, MNRAS 294, 429
- 11) Nakanishi H., Sofue Y., 2006, PASJ 58, 847
- 12) Kamezaki T., Nakagawa A., Omodaka T., et al., 2012, PASJ 64, 7
- 13) Neugebauer G., Leighton R.-B., 1969, NASA Special Publication, 3047
- 14) Kamohara R., Bujarrabal V., Honma M., et al., 2010, A&A 510, A69

### Astrometric VLBI Observation of the Galactic Mira Variables

Akiharu NAKAGAWA

Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto,  
Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan

Abstract: Mira variables show a relation between its pulsation period and absolute magnitude. This is known as "Period-luminosity Relation (PLR)." This relation can be used as a distance estimator. But PLR for Miras in our Galaxy have not clearly established because of their large uncertainties of distances. Using VERA, a VLBI array dedicated especially for astrometric observations, we accurately measure the distances and decide reliable absolute magnitudes of stars. We aim to obtain an accurate PLR for the Galactic Miras. We have measured parallaxes of several Miras with errors less than 10%. Current results of our study are presented.