

# VERAによる長周期変光星の位置天文観測

中川亜紀治、倉山智春、加世田大地、湯田晶斗、守田篤史、  
松野雅子、濱田翔太、田中理央

鹿児島大学理学部

nakagawa@sci.kagoshima-u.ac.jp

我々はVERAを用いた長周期変光星のVLBI観測を進めてきた。周期300日-400日を中心とするMira型変光星を主な対象として観測を進めてきた結果、天の川銀河の周期光度関係が明らかになってきた。近年、その研究対象を従来より長い周期まで広げて観測を展開している。本講演では  
(1) これまでの活動の結果、(2) 現在進めているOH/IR星の観測を紹介する。また(3) VLBI (VERA及びVLBA) とGaia DR2による年周視差を比較した結果についても報告する。

表1: VLBIにより決定された長周期変光星の年周視差

Source	Type	$\Pi_{VLBI}$ [mas]	$\Pi_{Gaia}$ [mas]	$P$ [day]	$\log P$	$m_K$ [mag]	$M_K$ [mag]	Maser	Ref. <sup>†</sup> ( $\Pi_{VLBI}, m_K$ )
SY Scl	Mira	0.75±0.03	0.68±0.23	411	2.614	2.55	-8.07±0.09	H <sub>2</sub> O	nyu11,b
WX Psc	OH/IR	5.3 <sup>b</sup>	...	660	2.820	2.22	-4.16	OH	oro17,a
S Per	SRc	0.413±0.017	0.22±0.12	822	2.915	1.33	-10.59±0.09	H <sub>2</sub> O	asa10,b
OH138.0+7.2	OH/IR	0.52±0.09	...	1410	3.149	8.548	-2.87±0.38	OH	oro17,a
T Lep	Mira	3.06±0.04	2.96±0.19	368	2.566	0.12	-7.45±0.03	H <sub>2</sub> O	nak14,c
RW Lep	SRa	1.62±0.16	2.35±0.13	150	2.176	0.639	-8.31±0.22	H <sub>2</sub> O	kam14,a
U Lyn	Mira	1.27±0.06	0.58±0.22	434	2.637	1.533	-7.95±0.10	H <sub>2</sub> O	kam16,a
VY CMa	SRc	0.88±0.08	-5.92±0.83	956	2.980	-0.72	-11.00±0.20	H <sub>2</sub> O	cho08,b
OZ Gem	Mira	1.00±0.18	-0.96±0.46	598	2.777	3.00	-7.00±0.40	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
OH231.8+4.2	OH/IR	0.55±0.05	0.10±0.18	548	2.739	6.546	-4.53±0.11	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
R Cnc	Mira	3.84±0.29	4.43±0.55	357	2.553	-0.97	-8.05±0.16	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
R UMa	Mira	1.97±0.05	2.04±0.20	302	2.480	1.19	-7.34±0.06	H <sub>2</sub> O	nak16,d
S Cr1	SRb	2.33±0.13	2.65±0.15	155	2.190	0.786	-7.38±0.12	H <sub>2</sub> O	nak08,a
T UMa	Mira	0.96±0.15	0.75±0.10	257	2.410	2.60	-7.49±0.44	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
RT Vir	SRb	4.417±0.134	2.05±0.29	158	2.199	-0.97	-7.76±0.07	H <sub>2</sub> O	zha17,a
R Hya	Mira	8.96±0.51	4.47±0.89	380	2.580	-2.51	-7.75±0.12	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
W Hya	SRa	10.18±2.36	6.09±0.82	361	2.558	-3.16	-8.12±0.51	OH	vle03,c
RX Boo	SRb	7.31±0.50	7.83±0.30	162	2.210	-1.96	-7.64±0.15	H <sub>2</sub> O	kam12,b
VF Boo	Mira	0.97±0.06	0.57±0.18	340	2.531	3.84	-6.23±0.13	H <sub>2</sub> O	kam16b,a
Y Lib	Mira	1.24±0.13	...	276	2.441	3.16	-6.37±0.23	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
S CrB	Mira	2.39±0.17	2.32±0.29	360	2.566	0.21	-7.90±0.15	OH	vle07,c
U Her	Mira	3.76±0.27	1.75±0.15	406	2.609	-0.27	-7.39±0.16	OH	vle07,c
VX Sgr	SRc	0.64±0.04	0.79±0.23	732	2.865	-0.17	-11.14±0.14	H <sub>2</sub> O	xu18,a
RR Aql	Mira	1.58±0.40	3.15±0.30	396	2.598	0.46	-8.55±0.56	OH	vle07,c
SY Aql	Mira	1.10±0.07	3.43±0.21	356	2.551	2.36	-7.43±0.14	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
NML Cyg	SRc	0.62±0.047	1.53±0.57	1280	3.107	0.791	-10.25±0.16	H <sub>2</sub> O	zha12,a
UX Cyg	Mira	0.54±0.06	0.18±0.17	565	2.752	1.40	-9.94±0.24	H <sub>2</sub> O	kur05,a
SV Peg	SRb	3.00±0.06	1.12±0.28	145	2.161	-0.55	-8.16±0.04	H <sub>2</sub> O	sud18,a
NSV25875	OH/IR	0.38±0.13	...	1748	3.243	6.857	-5.24±0.77	SiO	...
IRAS22480+6002	SRc	0.400±0.025	0.48±0.08	...	...	2.78	-9.21±0.14	H <sub>2</sub> O	ima12,a
R Peg	Mira	3.98±0.21	2.83±0.25	378	2.577	0.45	-6.55±0.11	H <sub>2</sub> O	iaus336,a
R Aqr	Mira	4.7±0.8	3.12±0.28	390	2.591	-1.01	-7.65±0.37	SiO	kam10,c
R Aqr	Mira	4.59±0.24	3.12±0.28	390	2.591	-1.01	-7.70±0.11	SiO	min14,c
PZ Cas	SRc	0.356±0.026	0.42±0.08	925	2.966	1.00	-11.24±0.16	H <sub>2</sub> O	kus13,b
R Cas	Mira	5.67±1.95	5.34±0.24	430	2.633	-1.80	-8.03±0.78	OH	vle03,c

<sup>†</sup> Reference of VLBI parallax : (nyu11)Nyuu et al. 2011, (oro17)Orosz et al. 2017, (asa10)Asaki et al. 2010, (nak14)Nakagawa et al. 2014, (kam14)Kamezaki et al. 2014, (kam16a)Kamezaki et al. 2016a, (cho08)Choi et al. 2008, (iaus336)Nakagawa, IAU Symposium 336, (nak16b)Nakagawa et al. 2016b, (kur05)Kurayama et al. 2005, (zha17)Zhang et al. 2017, (vle03)Vlemmings et al. 2003, (kam16b)Kamezaki et al. 2016b, (vle07)Vlemmings & van Langevelde 2007, (xu18)Xu et al. 2018, (zha12)Zhang et al. 2012, (kur05)Kurayama et al. 2005, (sud18)Sudo et al., (ima12)Imai et al. 2012, (kam10)Kamohara et al. 2010, (min14)Min et al. 2014, (kus13)Kusano et al. 2013. References of the apparent magnitudes ( $m_K$ ) are as follows : (a) The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog (Cutri et al. 2003), (b) Catalogue of Stellar Photometry in Johnson's 11-color system (Ducati 2002), (c) Photometry by Whiteclock & Feast (2000), and (d) Photometry using Kagoshima 1m telescope.

## (1) 年周視差の計測と周期光度関係

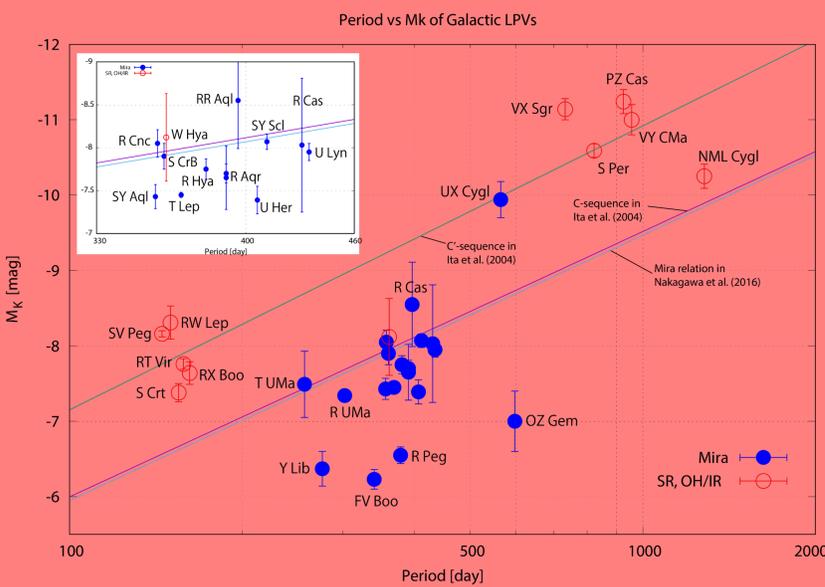
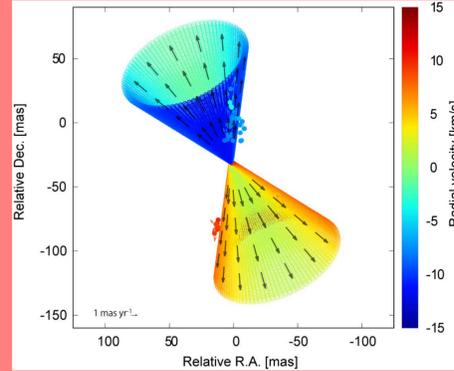


表1にVLBI位置天文観測により得られた年周視差を示す。VERAとVLBAによる観測をすべて拾い上げたものだが、過半数はVERAによる計測結果となっている。これらの年周視差をもとに、図1に赤外線K-band絶対等級と変光周期の関係を示した。周期光度関係より予測される等級より暗い位置にも結果が分布する。

←図1: Absolute K-band magnitude ( $M_K$ ) of Galactic LPVs obtained from apparent magnitude ( $m_K$ ) and VLBI parallaxes. Three solid lines show sequences in literatures. Filled and open circles are results of Mira and other type of variables.



VLBI観測からは星周のメーザーの運動も明らかになる。図2はOH231.8+4.2の星周H<sub>2</sub>Oメーザーの分布と運動である。分布と運動をモデルフィットした結果、開口角 $\sim 58 \pm 1^\circ$ の3次元コーンモデルが得られた。

↑図2: Angular distribution and internal motions of H<sub>2</sub>O masers in a PPN "OH231.8+4.2", with a 3D-cone model. (Ooyama et al. in prep.)

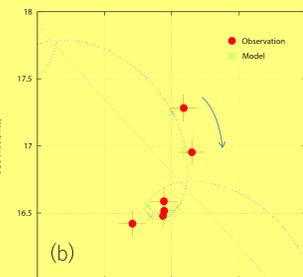
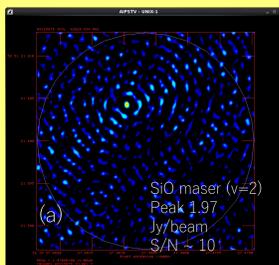
最近の観測による新たな年周視差の計測結果は下記ポスターで報告する。

- 加世田大地 V637 Per(SR), R Prg, X Hya, UU Peg (Mira)
- 湯田晶斗 R Hya, S Ser, W Leo (Mira)
- 松野雅子 RS Vir, BX Cam (Mira)
- 守田篤史 NSV17351(OH/IR)
- 濱田翔太 R Lmi (Mira)

## (2) 非常に長い周期を持つOH/IR星への研究展開

これまで研究対象とされている長周期変光星の周期はおよそ1000日以内であり、1000日を超える周期のサンプル数は決して多くはない。OHメーザーを用いたEngelsらによるモニター観測で、1000日以上周期が確認されているOH/IR星が15天体ほど存在する。長周期側のAGB進化段階の解明や振動モードの有無の確認を目指し、VERAによる位相補償観測を開始した。

非常に周期が長いOH/IR星の単一鏡モニター観測を行い、メーザーによる周期決定も試みている。田中理央によるポスターを参照。



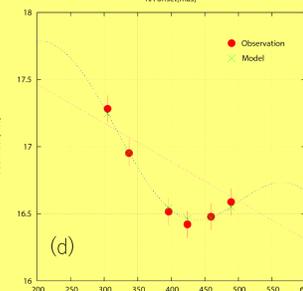
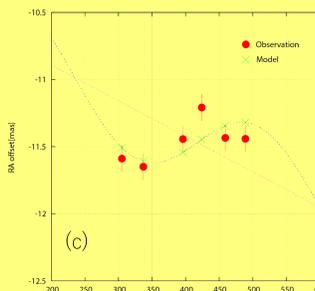
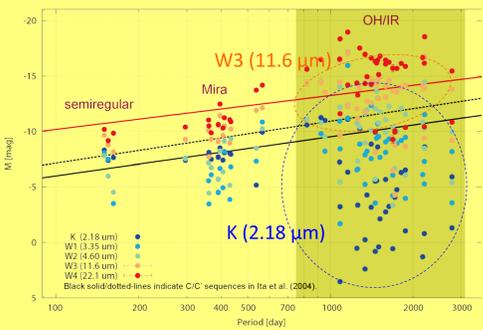
左はVERA広帯域モードによる43GHz観測で得られたOH/IR星 NSV25875の結果。他の距離推定法である"Phase-lag法"と"運動学的距離"と比較すると、誤差範囲内で一致する。

- VERA Phase-referencing observation
- Freq. 43 GHz
- Bandwidth : Target maser source [16MHz] Reference QSO [512MHz]
- Pair : NSV25875 and J2231+5922
- Pulsation period = 1748 day (Engels et al. 2015)
- Annual parallax =  $0.38 \pm 0.13$  mas  $\Rightarrow$  Distance =  $2.60 \pm 0.85$  kpc
- $\mu_{RA} = -0.97 \pm 0.55$  mas/yr
- $\mu_{DEC} = -1.06 \pm 0.31$  mas/yr

Method	Distance [kpc]
VERA parallax	$2.60 \pm 0.85$
Phase-lag method	$2.1 \pm 0.42$
Kinematic distance	$2.50 \pm 1.18$

←図4: (a)43GHz SiO v=2 maser spot of an OH/IR star NSV25875 on 1 Nov 2017. (b)Sky plane motion of the maser spot from 1 Nov., 2017 to 4 May, 2108. (c)RA motion of the spot. Horizontal axis is days from 1 Jan., 2017. (d)DEC motion.

図3: Phase-lag法と運動学的距離に基づく、近赤外から中間赤外までの絶対等級と周期の関係。周期1000日を超える範囲でのM<sub>K</sub>のばらつきは星周減光による影響と考えている。



## (3) VLBIとGaiaによる年周視差の比較

- 誤差範囲内での一致は半数以下
- VLBI parallax > Gaia parallax の傾向

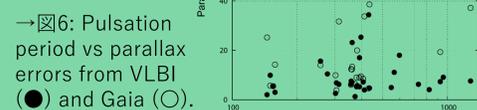
- Mira (●)
- Other (○)

$$\text{Residual} = \frac{\Pi_{VLBI} - \Pi_{Gaia}}{\sqrt{\sigma_{\Pi_{VLBI}}^2 + \sigma_{\Pi_{Gaia}}^2}}$$

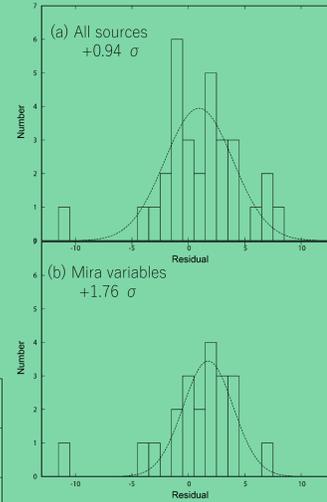
図5,6,7は比較の結果である。VERAに比べてGaiaは系統的に小さな年周視差値を出す傾向が読み取れる。



←図5: Annual parallaxes determined from VLBI and Gaia in logarithmic scale.



→図6: Pulsation period vs parallax errors from VLBI (●) and Gaia (○).



↑図7: Histogram of the residual and fitted Gaussian function. (a)Histogram for all sources (Mira, SR, OH/IR). (b)Histogram for Mira variables.

Chiavassa et al. 2018 により、表面輝度構造の変化がGaiaの観測に与える影響が見積もられている。変光周期に比例する誤差の増大は見えるものの、GaiaがVLBIに比べて小さな年周視差を示すことは説明できない。

- シミュレーションによる見解
- 短い時間(<1yr)で表面輝度構造が変化する
  - 数auの光球がその数十%のスケールで構造変化
  - 重心の移動
  - 0.077 to 0.198 AU (~5 to ~11% of R\*)
  - $\sigma_{\pi}$  の周期 (P) 依存性が見える

←図8: Chiavassa et al. 2018による輝度重心変化(上)、周期依存性(中)、表面の様子(下)。対流を考慮した3次元simulationによる。

