

VERAの参照電波源

国立天文台
笹尾哲夫

1 はじめに

VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry : 天文広域精測望遠鏡) 計画は、天体メーザー源の距離と運動の実測に基づく銀河系ダークマターの総質量と分布の決定など、全銀河系規模の高精度天体位置計測による新しい天文学の開拓を第一の目標に掲げている。また、ミリ波帯 VLBI による活動銀河中心核等の高分解能観測も重要な目標である。これらの目的を実現するためには、従来の VLBI で位置計測精度とコヒーレントに積分できる時間を共に制限する最大の要因であった大気位相揺らぎの影響を克服することが必要になる。

そのために用いるのが、位相補償相対 VLBI である。これは、近接した複数の電波源を同時もしくはほぼ同時に VLBI で観測し、それらのフリッジ位相の差を観測量とすることによって、共通に含まれる大気揺らぎの効果を相殺除去する技術である。

大気位相揺らぎの統計的モデルに基づく考察によれば、位相補償相対 VLBI が最も有効なのは、電波源同士が互いに離角 2 度程度以内の近距離にあるときである (例えば、笹尾、1997)。そこで、距離と固有運動を測りたい天体メーザー源などの対象電波源の近傍にクエーサーなどの参照電波源が見つかるかどうか、計画の重要な鍵になる。

この問題については、以前から既存の電波源カタログに基づいて検討を行い、肯定的な結果を得ている (笹尾、河野、亀谷、1992 ; Sasao et al., 1997)。しかし、従来の VLBI 連続波電波源のカタログには最大でも数百個の明るい電波源しか記載されておらず、任意の対象電波源の近傍で参照電波源を探すという目的には全く不十分であった。従って、統計的考察や単一鏡観測によるカタログを用いて、期待される参照電波源の数を推定するほかなかった。

今日でも、この状況に基本的な変化はないが、最近発表された VLBA Astrometric Calibrator Survey (Peck and Beasley, 1998) カタログには、北天だけで 1 千個を超える VLBI 連続波電波源が登録されており、これま

での推定の精度をより高めることが可能になっている。そこで、主にこの新しいカタログを用いて、参照電波源の存在を議論する。

2 VLBI 電波源カタログ

従来の VLBI 電波源カタログの中で最も包括的なものは、測地 VLBI 観測用に作成された ICRF94 カタログ (The International Celestial Reference Frame, 1994 International Earth Rotation Service Annual Report) であった。これは、8GHz 帯におけるカタログで、全天 ($-86^\circ \leq \delta \leq 85^\circ$) で 607 個の測地 VLBI 観測に使える明るいコンパクトな電波源の位置、フラックス及びスペクトル指数等の情報を記載している。

これに対して、VLBA Astrometric Calibrator カタログ (以後 VLBA_Calib カタログと略記、1998 年 10 月に NRAO の Web サイトから入手したバージョン) には、北天の 1390 個の電波源の位置とフラックスが記載されている。しかし、このうち 7 個の電波源については重複しているので、実際の登録電波源数は 1383 個 (うちフラックスの値が記載されているものは 1014 個) である。

図 1 は、VLBA_Calib 電波源と、それと重複しない ICRF94 電波源の赤道及び銀河座標系における分布を示したものである。銀河面近傍が VLBA_Calib のサーベイが進んでいない領域であることがわかる。また、低赤緯の領域は、高赤緯領域に比べて電波源の個数密度が低く、やはりサーベイが進んでいないことを示唆している。このことは、VLBA_Calib 電波源の赤緯帯毎の個数密度を示した表 1 を見れば一層明らかになる。比較的サーベイの進んでいる赤緯 40 度以北では、既に任意の点の周辺 2 度以内に平均 1 個以上という数の VLBI 電波源が見つかることがわかる。

Declination range	Number of sources	Area radian ²	Average number within a circle of r=2 deg
00.0-10.0	172	1.091	0.603
10.0-20.0	166	1.058	0.601
20.0-30.0	180	0.993	0.694
30.0-40.0	214	0.897	0.913
40.0-50.0	237	0.774	1.171
50.0-60.0	177	0.628	1.078
60.0-70.0	143	0.463	1.183
70.0-80.0	76	0.283	1.026

表 1 VLBA_Calib 電波源の赤緯帯毎の個数密度

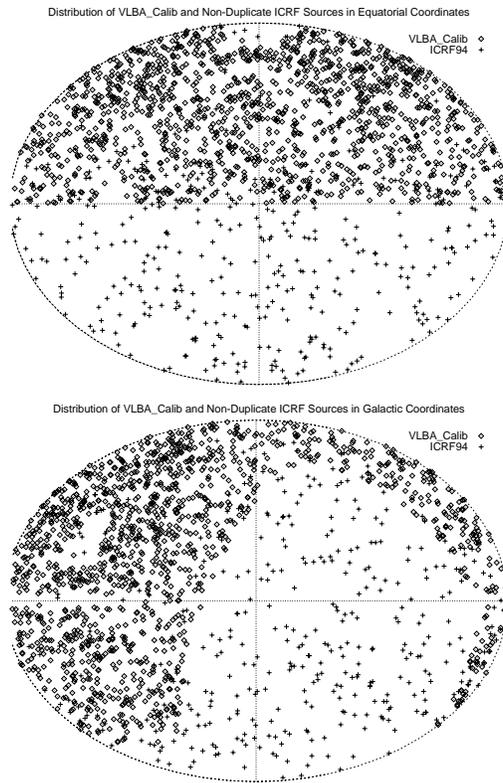


図 1: 赤道 (左) 及び銀河座標系 (右) における VLBA_Calib&ICRF94 電波源の分布

3 参照電波源

現時点で最も包括的な天体メーザー源カタログである Arcetri 水メーザー源カタログ (Palagi et al., 1993; Brand et al., 1994) には、赤緯-30度以北の 994 個の水メーザー源が登録されているが、このうち同じメーザー領域の異なる成分など実質上重複しているものを除くと、独立なものは 785 個である。図 2 に、Arcetri カタログに載っている星生成領域及び晩期型星周辺の水メーザー源の分布を示す。

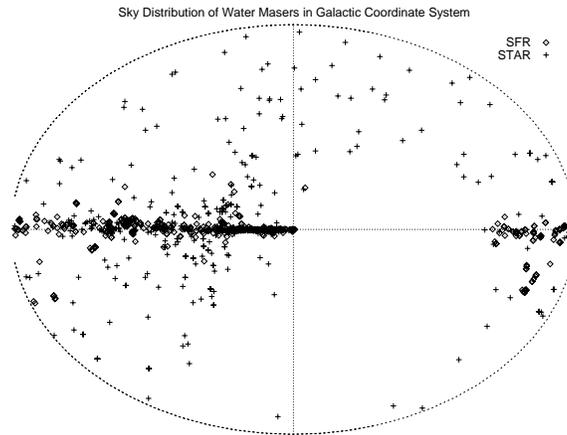


図 2: Arcetri カタログ記載の星生成領域 (菱形) 及び晩期型星周辺 (十字) 水メーザー源の銀河座標系における分布

従来は、このうちで周辺 2 度以内に ICRF94 カタログの電波源が見つかるものは、96 個しかなかった。VLBA_Calib 電波源が加わって、その数は全体で 243 個、VLBA_Calib カタログがカバーしている北天だけを見ると 221 個に増えた。Arcetri カタログの水メーザー源のうち、北天にあるものは 540 個である。そこで、既に、赤緯-30 度以北では 31%、北天では 41%の水メーザー源の周辺 2 度以内に VLBI 電波源が見つかったことになる。

図 3 は、これらの参照電波源候補が既に見つかっている水メーザー源の銀河座標系における分布と、そのうちでおおまかな距離推定値のあるものについて銀河面に投影したものを示している。これらが銀河系の広い範囲に分布し、距離と固有運動さえわかれば回転曲線の決定など銀河系動力学の研究に役立つようなことが見て取れる。

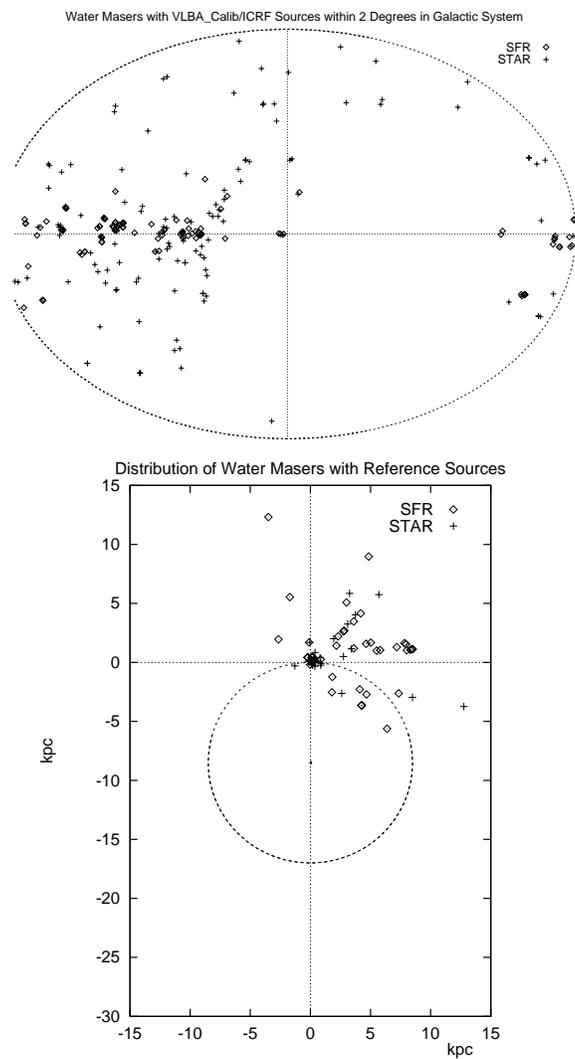


図 3: 周辺 2 度以内に VLBI 電波源を持つ水メーザー源の銀河座標系における分布 (左) 及びそのうち距離がおおまかに推定されているものについて銀河面に投影したもの (右: 図中の原点は太陽位置、円は solar circle を示す)

4 VLBI 電波源探査の重要性

しかし、水メーザー源に比べて、参照電波源の数が足りないことは、図 2 と図 3 を比較するだけで明らかである。そのことは特に、銀河面への集中度が高い星生成領域の水メーザー源で顕著である。

サーベイを進めれば、さらに多くの電波源が見つかるであろうことは、図 4 を見ればわかる。この図は、VLBA_Calib カタログの電波源のうちで、赤緯 40 度と 50 度の線に挟まれた個数密度が比較的高い帯状の領域に存在するものについて、相関フラックスの値 S とその値を超える相関フラックスを持つ電波源の数 N の関係 (N - S 関係) を示したものである。相対論的時空の歪みや進化の効果が顕著でなく、電波源の分布が一様であ

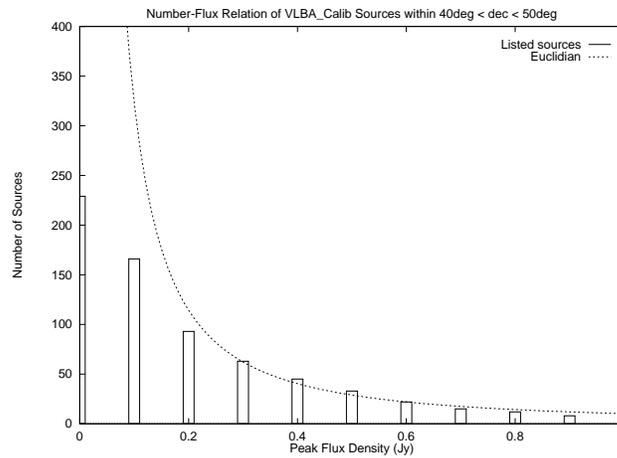


図 4: 赤緯 40 度から 50 度の領域における VLBA_Calib 電波源の個数 フラックス関係

れば、 $N(S) \propto S^{-3/2}$ という「ユークリッド則」が成り立つはずである。図 4 には、この関係を点線で示している。縦棒で示した実際のカタログ中の電波源の個数は、明るいものはほぼ「ユークリッド則」に乗っているが、暗いものでは大きく外れており、0.1Jy 程度の暗い電波源はまだ半分位しか検出されていないことを示唆している。全部検出できれば、任意の半径 2 度の円内に、0.1Jy 以上の電波源が平均 1.6 個以上は見つかることが期待される。銀河面付近を中心に VLBI 電波源のサーベイを進め、早期にこの水準に達することが、VERA 計画にとってきわめて重要である。Becker, White and Edwards (1991) 及び Parkes-MIT-NRAO サーベイ (Griffith and Wright, 1993) の 5GHz 帯単一鏡電波源カタログは、このサーベイの有力な手がかりになるだろう。これらのカタログを使って、

ほぼ全ての水メーザー源の周辺 2 度以内に、VLBI 電波源である可能性のある参照電波源候補が 1 個以上見ついているからである (Sasao et al., 1997)。

5 8GHz 帯 VLBI 電波源の 22GHz 帯フラックス

VLBA_Calib 及び ICRF94 は、共に 8GHz 帯でのカタログであるから、そこに記載されている電波源でも、水メーザー源を観測する 22GHz 帯で検出できるとは限らない。全ての電波源の 22GHz 帯フラックスを知るためには、実際に 22GHz 帯で観測するほかないが、一部については 22GHz 帯での観測結果があるので、8GHz 帯の結果と比較することができる。

表 2 は、VSOP Prelaunch Survey (PLS: Moellenbrock et al., 1996) による 22GHz 帯 VLBI カタログと VLBA_Calib におけるフラックス値を比較したものである。PLS に記載された 140 個の電波源のうち、北天の 56 個が VLBA_Calib の電波源と一致している。うち 36 個については、両方のカタログにフラックス値が記載されている。これらを比較したものが表 2 である。PLS には、基線長によって 2 種類のフラックス値が載っているが、ここでは、VERA の最長基線が 2300km で PLS では短基線にあたることを考慮して、‘maximum fringe amplitude’ の値を採用している。

	VLBA-C name	PLS name	VLBA-C flux 8GHz (Jy)	PLS flux 22GHz (Jy)
1	J0136+4751	0133+476	1.99	1.93
2	J0152+2207	0149+218	1.10	0.82
3	J0237+2848	0234+285*	0.91	2.54
4	J0303+4716	0300+470	0.69	0.63
5	J0319+4130	0316+413	3.07	1.60
6	J0555+3948	0552+398	4.06	1.93
7	J0646+4451	0642+449	1.80	1.64
8	J0741+3112	0738+313	1.20	0.33
9	J0808+4950	0804+499*	0.63	0.54
10	J0818+4222	0814+425	0.77	0.45
11	J0920+4441	0917+449*	0.83	1.14
12	J0927+3902	0923+392	8.17	2.71
13	J0956+2515	0953+254	0.68	0.33
14	J1146+3958	1144+402	0.66	0.85
15	J1159+2914	1156+295*	1.41	1.26
16	J1221+2813	1219+285	0.20	0.17
17	J1419+5423	1418+546	0.35	0.35
18	J1506+3730	1504+377	0.70	0.82
19	J1613+3412	1611+343*	2.02	3.80
20	J1635+3808	1633+382*	0.79	1.34
21	J1638+5720	1637+574	1.34	0.74
22	J1640+3946	1638+398	0.86	3.07
23	J1642+3948	1641+399	3.26	10.65
24	J1653+3945	1652+398	0.48	0.29
25	J1658+4737	1656+477	0.84	0.26
26	J1740+5211	1739+522*	0.45	1.84
27	J1800+3848	1758+388	1.07	0.45
28	J1824+5651	1823+568	1.09	1.47
29	J1902+3159	1901+319	0.66	0.68
30	J1955+5131	1954+513	1.05	1.43
31	J2023+3153	2021+317	1.58	0.41
32	J2101+0341	2059+034	0.90	1.68
33	J2202+4216	2200+420	2.24	2.74
34	J2203+3145	2201+315	0.94	0.88
35	J2236+2828	2234+282	0.61	0.73
36	J2354+4553	2351+456	0.72	0.42
Average flux			1.39	1.47

表 2 Prelaunch Survey 及び VLBA-Calib カタログに共通に記載されている

電波源の 22GHz 帯及び 8GHz 帯フラックスの比較

この表で見る限り、22GHz 帯の方が特に暗いとは言えず、平均値ではむしろ明るくなっている。22GHz 帯の方が暗い場合でも、VERA の検出限界と想定している 0.1Jy より暗いものはない。一般に、VLBI で見る電波源のスペクトルは広い周波数範囲にわたってフラットであることが多いと言われているが、今回の比較結果も、それを支持するものと言えよう。

6 光のキューサーカタログ

参照電波源のサーベイを行う上で、光学天文学の分野で蓄積されているキューサー及び活動銀河のデータを利用することはできるだろうか？こ

のことを調べるために、Verron-Cetty and Veron (1998) の 15044 個のクエーサー、BL Lac 及び AGN 光学カタログのデータと VLBA_Calib を比較してみた。

VLBA_Calib の 1383 個の電波源のうち、光学カタログの天体と位置が一致したものは、549 個 (40%) のみであった。しかも、その中には、光のカタログで ‘non-radio’ とされていたものが 3 個あった。このような結果になった原因については、位置の比較法も含めてより詳細に検討すべきだが、とりあえず、光学カタログが良いガイドになることは、期待できそうにない。

References

- Becker, R.H., White, R.L., and Edwards, A.L., 1991, A New Catalog of 53,522 4.85 GHz Sources, *Astrophys. Journ. Suppl. Ser.*, **75**, 1–229.
- Brand, J., Cesaroni, R., Caselli, P., Catarzi, M., Codella, C., Comoretto, G., Curioni, G.P., Curioni, P., Di Franco, S., Felli, M., Giovanardi, C., Olmi, L., Palagi, F., Palla, F., Panella, D., Pareschi, G., Rossi, E., Speroni, N., and Tofani, G., 1994, The Arcetri Catalogue of H₂O Maser Sources Update, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **103**, 541–572.
- Griffith, M.R., and Wright, A.E., 1993, The Parkes-MIT-NRAO (PMN) Surveys, I. The 4850 MHz Surveys and Data Reduction, *Astron. Journ.*, **105**, 1666–1679.
- Moellenbrock, G.A., Fujisawa, K., Preston, R.A., Gurvits, L.I., Dewey, R.J., Hirabayashi, H., Inoue, M., Kamenno, S., Kawaguchi, N., Iwata, T., Jauncey, D.L., Migenes, V., Roberts, D.H., Schilizzi, R.T., Tingay, S.J., 1996, A 22 GHz VLBI Survey of 140 Compact Extragalactic Radio Sources, *Astron. Journ.*, **111**, 2174–2186.
- Palagi, F., Cesaroni, R., Comoretto, G., Felli, M., and Natale, V., 1993, Classification and Statistical Properties of Galactic H₂O Masers, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **101**, 153–193.
- 笹尾、河野、亀谷、1992、VERA 複視野相対 VLBI による天体メーザー源のアstrometrie、1991 年度経緯度研究会集録、234–243.
- Sasao, T., Asaki, Y., Okudaira, A., and Omodaka, T., 1997, Reference-Radio-Source Candidates for VERA Observations, *Proceedings of Technical Workshop for APT and APSG 1996*, 257–261.
- 笹尾、1997、VERA 計画における位相補償方式の検討、国内 VLBI ネットワークコロキウム集録 (面高俊宏、「国内 VLBI ネットワークによる天体観測」研究成果報告書)、111–127.
- Veron-Cetty M.P., and Veron P., 1998, Quasars and Active Galactic Nuclei (8th Ed.), *ESO Scientific Report*, 18.