

超長基線電波干渉計の観測における位相補正手法

Multi frequency phase referencing の開発と

異なる周波数での異分子メーザーの位置比較

平成 26 年度

修士論文

横浜市立大学大学院

生命ナノシステム科学研究科

物質システム科学専攻

渡利藤香

目次

要旨	1
1 章 序論	
1.1 電波天文学の現状	
1.1.1 超長基線電波干渉計	5
1.1.2 VLBI が抱える技術上の問題点	6
1.2 電波干渉計の位相補正手法	
1.2.1 Phase referencing	6
1.2.2 Multi Frequency Phase Referencing (MFPR)	7
1.2.2 Source Frequency Phase Referencing (SFPR)	7
1.3 本研究の目的	8
2 章 実験概要	
2.1 観測概要	9
2.2 相関処理	9
3 章 データ解析	
3.1 準備研究	
3.1.1 評価方法と目標値	10
3.1.2 連続電波源 BL Lac	10
3.1.3 連続電波源 J0244+6228	11
3.1.4 BL Lac と J0244+6228 の考察	11
3.2 S Per	
3.2.1 S Per	12
3.2.2 手順	12
3.2.3 MFPR	13
3.2.4 SFPR	14
3.2.5 メーザー位置比較の結果と考察	15
4 章 まとめと考察	
4.1 まとめと考察	17
4.2 展望	18
参考文献	19
謝辞	20
研究発表	21
表	22
図	24

超長基線電波干渉計の観測における位相補正手法

Multi frequency phase referencing の開発と

異なる周波数での異分子メーザーの位置比較

渡利藤香

主研究指導教員：Ruggero Micheletto

副研究指導教員：大月俊也

木下郁雄

超長基線電波干渉計の観測における位相補正手法 Multi frequency phase referencing の開発と異なる周波数での異分子メーザーの位置比較

物質システム科学専攻 渡利藤香

指導教員：Ruggero Micheletto

超長基線電波干渉計(VLBI)：遠距離にある2つ以上の電波望遠鏡で受信した信号に相互
相関処理を行い、観測量としてフリンジ位相を得る干渉計

Multi frequency phase referencing(MFPR)：異なる周波数のフリンジ位相を使う電波干渉計
の位相補正手法

Source frequency phase referencing(SFPR)：位置天文解析を目的として、MFPRに加えて
近傍の天体のフリンジ位相も使う電波干渉計の位相補正手法

1 背景と目的

対流圏の水蒸気は、超長基線電波干渉計(VLBI)観測でフリンジ位相（以下、位相）の安定度を悪化させる。この位相エラー（以下、エラー）は高い周波数で深刻となるため、取り除くことが課題となっている。本研究では、ミリ波 VLBI 観測で高い観測精度を得ることを目的として、銀河系内の晩期型星メーザー源に対して、Multi frequency phase referencing(MFPR)を用いて、大気によって生じるエラーの補正法の実証を行う。さらに、Source frequency phase referencing(SFPR)[1]を適用して、異なる分子での異なる周波数のメーザーを放射する星間ガス分布を描画し、その位置の直接比較について検討する。星間ガスの複数のメーザーの空間分布を直接比較することにより、星間ガスの温度や速度構造といった物理状態をより詳細に把握することができる。また、恒星進化末期段階での質量放出現象の研究において、メーザー放射をこれまで以上に有効活用することが可能となる。

2 使用した手法と観測データについて

MFPR では、水蒸気によるエラーが非分散性を持つことを利用する。まず、低周波数の位相に高周波数との周波数比をかけて補正解を得る。次に、高周波数

Source	BL Lac, S Per, J0244+6228
Array	KVN and VERA Array (KaVA)
Date	March 30, 2012
Frequency	22 GHz, 43 GHz, 86 GHz

の位相からこの補正解を引くことで、位相を補正する。一方 SFPR では、近傍にあるキャリブレーション天体の位相の変動を差し引くことで、周波数に反比例した電離層によるエラー、および観測装置内の伝送路に起因するエラーを取り除く。

観測は、3つの周波数帯を使用して、同じ観測セッションで行われた。まず、解析が比較

的容易と考えられる連続波源 BL Lac の観測データの解析を試み、その後、H₂O メーザー源である S Per、キャリブレーション天体である J0244+6228 の観測データを使用した。観測には、KVN の 3 局と、VERA の 4 局、計 7 局を使用した。しかし、KVN の 1 局で設定が誤っていたため、解析は 6 局 15 基線で行った。

3 連続波源 BL Lac の結果

BL Lac は、地球から 0.3 Gpc 離れた銀河の中心核であり、シンクロトロン放射によりメートル波からサブミリ波にかけて強い電波が観測される連続電波源である。そのため、データの信号対雑音比が高く、MFPR の実証研究に非常に適している。

図 1 に 22 GHz の位相で 43 GHz の位相を補正した結果を示す。横軸が経過時間の秒、縦軸が位相のラジアンである。上側にある変動が 22 GHz の位相を元にした補正解、下側が補正前の高周波数 43 GHz の位相、ほぼ横ばいになっているのが 2 つの差分である。補正の効果は、差分の RMS 位相で評価する。今回目標としたのは、RMS 位相が 1 ラジアン=約 58°以下になることである。補正前の RMS 位相は、位相変化の傾斜を考慮しないで 43 GHz で 304.96°、86 GHz で 611.10°だったが、補正後にはそれぞれ 22.56°、37.22°まで下がった。いずれの周波数でも目標を達成できたため、MFPR の実証を確認することができた。

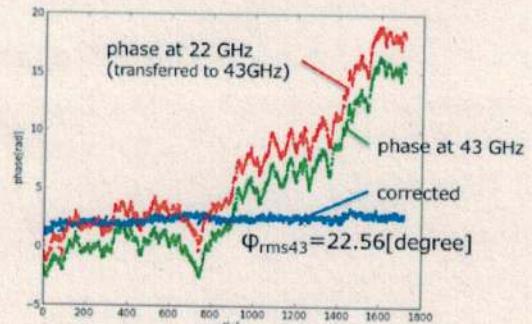


fig.1 Phase correction at 43GHz.

4 S Per の結果

MFPR の補正効果について、信号対雑音比が高い場合には正しく機能することが確認できた。そこで、当初の目的であった、地球から 2.4kpc の距離にある天の川銀河系内の赤色超巨星 S Per への適用を開始した。S Per の周囲には、星の重力の束縛から逃れたガスから強い

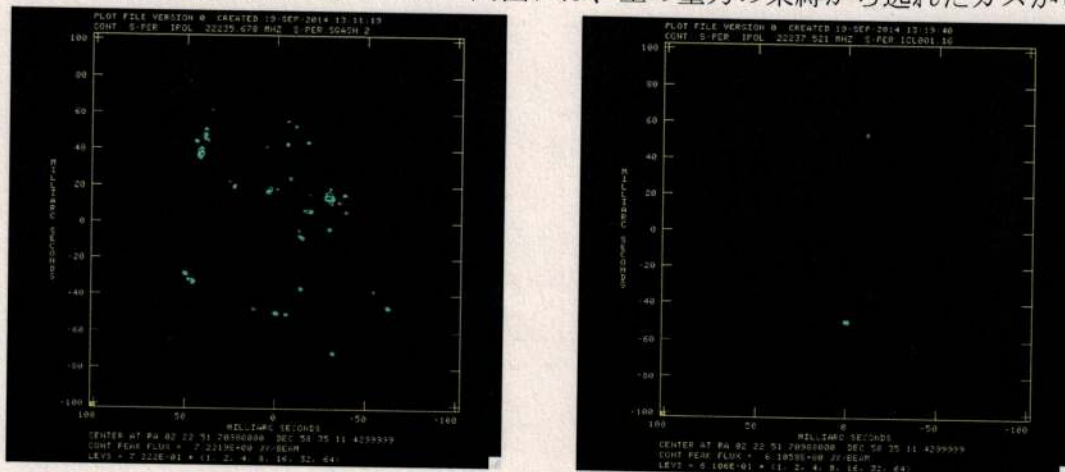


fig.2 H₂O maser distribution (left : for the full velocity range, right : at V_{LSR} of -45.6 km s⁻¹)

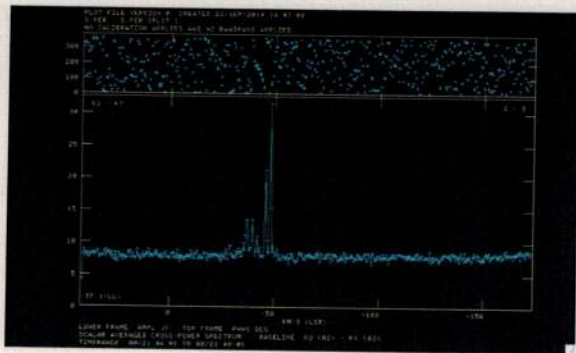


fig.3 H₂O maser spectrums

メーザー放射が観測されている。S Per では 22 GHz H₂O メーザーの位相を使って、43 GHz SiO メーザーの位相を補正することを目指す。

最初に、観測天体の構造を反映する、22 GHz H₂O メーザーのビジビリティ位相を求める。次に、観測で得られたフリッジ位相からそれを引くことで、補正解を求め、43 GHz SiO メーザーの位相から差し引くことで補正をする。図 2 に、同じ時間に観測した KaVA の観測データを電波干渉計解析ソフト AIPS(Astronomical Image Processing System)で解析することにより得た 22 GHz H₂O メーザーの空間分布を示す。横軸、縦軸は位相追尾中心からの赤経、赤緯の差分である。図 2 の左は、全視線速度 $-20.72 \text{ km s}^{-1} \sim -62.44 \text{ km s}^{-1}$ の 22 GHz H₂O メーザーのマップである。

図 3 に、横軸に速度、縦軸にフラックス密度をとった 22GHz H₂O メーザーのスペクトルを示す。 -45.6 km s^{-1} 付近で強度が高くなっており、この速度成分は時間的に安定している。つまり、この視線速度ではメーザーが点源に近い構造をしていると考えられる。そこで、この速度のメーザーを使って、ビジビリティ位相を導出した。求めた -45.6 km s^{-1} のマップを、図 2 の右に示す。ほぼ $(0, -60) \text{ mas}$ の明るいメーザー源からの放射が占めており、単純な空間分布になっていることが確認できた。

本研究では、AIPS の解析途上で出される中間生成データ(SolutioN テーブル、以下 SN テーブル)を取り込み、S Per の 43GHz SiO メーザーの MFPR の補正解を同様の形式で生成する Python プログラムを開発した。生成された SN テーブルを 43 GHz SiO メーザーのフリッジに適用したところ、位相のばらつきを大きく改善することに成功した。図 4 に、生成した SN テーブルを適用する前と後での 43 GHz SiO メーザーの位相を示す。ここで補正されていない位相の時間変動には、(1)SiO メーザーの空間構造の情報 (2)電離層によるエラー (3)電波望遠鏡伝送路内のエラー の 3 つが含まれている。

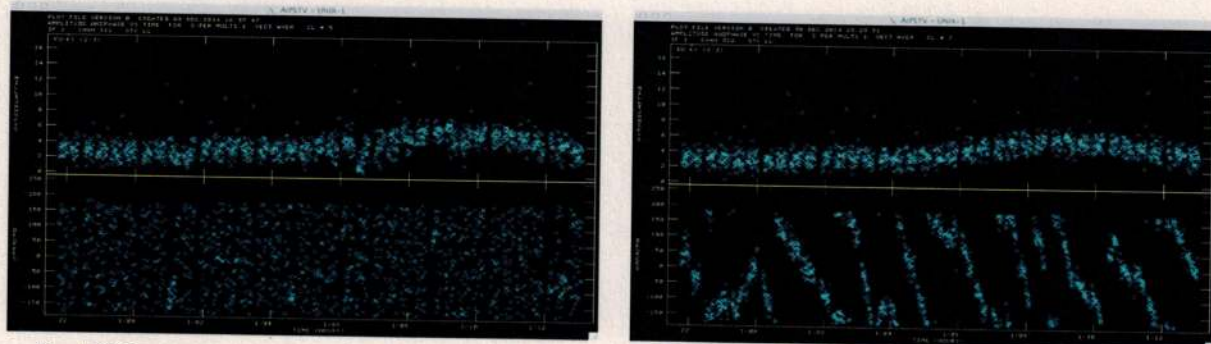


fig.4 SiO maser position (left : natural, right : after applying calibration phase)

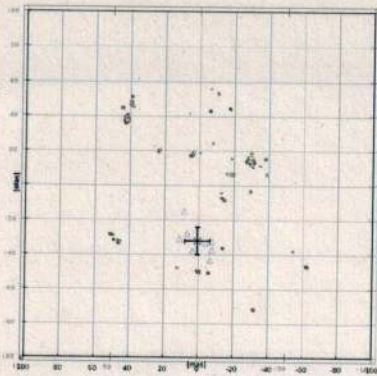


fig.5 H₂O and SiO maser map

さらに、SFPRを行い、(2)と(3)のエラーを取り除き、(1)を正確に得ることを試みた。SFPRに使用したキャリブレーション天体は、S Perとの離角が4°のJ0244+6228である。今回は、J0244+6228を3分、S Perを15分の短時間の観測を交互に行っている。そこで、S Perの前後に観測したJ0244+6228の位相を結んで一次近似することで、2天体に共通する変動を差し引き、MFPRで補正できないエラーを取り除いた。図5

5 まとめと考察

準備段階として、位相補正手法であるMFPRを連続波源に対して適用し、その実証性を検証した。その結果、信号対雑音比の高い天体では、開発したプログラムにより、MFPRで目標とした位相補正性能を達成することを確認した。

この結果を受けて、S Perの22 GHz H₂Oメーザーと43 GHz SiOメーザーにMFPRを適用した。このとき、SiOメーザーを補正するため、AIPSで出力されたH₂Oメーザーの位相SNテーブルを入力して、MFPRの補正解を作るPythonプログラムを開発した。さらに、生成したこの補正解を適用することで位相のばらつきを改善し、MFPRの効果を確認できた。また、J0244+6228を新たに解析してSFPRを適用し、S PerのH₂OメーザーとSiOメーザーの位置の比較を行うことにより、赤色巨星において異なるメーザー同士の直接の位置比較が可能となった。得られたSiOメーザーの空間分布は、H₂Oメーザーの空間分布の中央付近にあることがわかった。これは、励起するのにより高いエネルギーが必要となるSiOメーザーを放射するガスが、より中心星近くに分布することを意味している。この結果は、ガスの膨張運動モデルで得た過去の研究内容[2]と大きく矛盾しておらず、かつより正確に中心恒星の位置を求める観測的手法であることを示したものと言える。

6 参考文献

- [1] R Dodson et al. *Astron.J.*, 148, 97 (2014)
- [2] Y. Asaki et al. *Astrophys.J.* **721**, 267-277 (2010)

1 章 序論

本章では、超長基線電波干渉計の原理と、その測定誤差（エラー）の観点から、現在のミリ波電波干渉計が抱える技術上の問題点を説明し、解決のための手法と本研究の目的を述べる。

1.1 電波天文学の現状

1.1.1 超長基線電波干渉計

電波干渉計は、2 つ以上の電波望遠鏡からなる干渉計観測装置である。同時刻に観測した天体からの電波に対して相互相関処理を行い、観測結果として干渉された波動としての電波の位相と振幅（フリンジ位相、およびフリンジ振幅）を得る。電波干渉計のうち、ケーブルで物理的な接続ができない遠距離の電波望遠鏡に対し、独立した高精度時刻基準（周波数標準）と受信電波を電気信号に換えて一時的に記録するデータ記録装置を持ち、観測後に記録データを持ち寄って相互相関処理を行う電波干渉計も、電波天文学の最前線で活躍している。このような観測手法のことを、超長基線電波干渉法（Very Long Baseline Interferometry、または VLBI）と呼ぶ。

電波干渉計で天体を観測するとき、電波の同じ波面が 2 つの望遠鏡 A と B に到達した時の時刻をそれぞれ t 、 $t + \tau$ とする。このとき、先に受信した望遠鏡 A での電波の波面を、後に受信した望遠鏡 B の波面に合わせるために、望遠鏡 A の受信電波に対して、人工的に τ の遅延を付与する。こうすることで、2 つの望遠鏡で受信した電波の波面を揃え、相互相関処理を行うことができる。現代においては、受信信号を高速アナログ/デジタル変換器によってデジタル信号とし、遅延バッファとしての揮発性メモリの読み出し位置を変えることによって人工的な遅延の調整を行っている。

電波干渉計には、天体を観測する上で高い角度分解能が得られるというメリットがある。単一の電波望遠鏡（単一鏡）の角度分解能 θ [radian] は、観測波長 λ 、パラボラアンテナの直径 D を用いて、回折限界である $\theta = \lambda / D$ で与えられる。しかし、単一鏡では、建造可能なアンテナの大きさには物理的な限界がある。一方、電波干渉計では、2 つのアンテナ間の距離（基線長）を D' とおくと、角度分解能 θ' は λ / D' で与えられ、基線を延伸させることによってより高い角度分解能を得ることが可能となる。高い角度分解能が得られる長基線の干渉計観測は天体の細かい構造の把握に、短基線は天体の大きな構造の観測に適している。

1.1.2 VLBI が抱える技術上の問題点

天体からの電波は、宇宙（真空）から地球の大気を通り抜けて地上に到達する。そのため、大気中の気体分子による吸収や、大気の運動による擾乱の影響を避けることができない。対流圏にある水蒸気を含んだ地球大気は、真空とは異なる屈折率を持つため、伝搬する電波に対して超過遅延を及ぼす。大気中の水蒸気は空間的に不均一に分布しており、大気の擾乱と相まって、電波干渉計観測においてフリンジ位相の安定度を悪化させることが知られている。基線が短ければ、2つのアンテナで受信する電波の通る大気中の経路はほとんど同一となり、大気による超過遅延もまた同程度となるため、相互相関処理によって容易に相殺される。一方、長基線になると、天体からの電波の経路にある大気的环境、特に経路中の水蒸気量が大幅に変わり得る。また、任意の視線方向で積分した水蒸気量は、フリッカ周波数ノイズの特徴を持つ予測困難な時間変化をすることが知られており、水蒸気による電波到達の遅延は2つのアンテナ間で相関のない時間変化をするため、フリンジ位相に大きな位相雑音が混入することになる。さらに、大気中の水蒸気によるフリンジ位相のエラー（以下、位相エラー）は観測周波数に比例するため、高い周波数でより深刻になる。そのため、センチ波以下の波長による長基線を用いた VLBI 観測では、水蒸気による位相のエラーを取り除くことが課題となっている。

1.2 電波干渉計の位相補正手法

1.2.1 Phase Referencing

VLBI 観測で広く用いられている位相補正法に Phase Referencing がある[1]。これは、観測天体とその近傍のキャリブレーション天体を1分以内の周期で交互に観測し、観測天体のフリンジ位相からキャリブレーション天体のフリンジ位相を差し引くことによって、大気による位相エラーを取り除く方法である。しかし、ミリ波やサブミリ波のような高周波数での VLBI 観測になると、水蒸気による位相の揺らぎが大きくなってしまうため、スイッチングの周期をより短くしなければならない。スイッチング周期はアンテナの性能に依存するため、大型パラボラを持つ天体電波望遠鏡では技術上困難になる。また、ミリ波やサブミリ波では位相補正に使うための強度の強いキャリブレーション天体の数が少なくなるため、任意の観測天体近傍にキャリブレーション天体が必ず見つかるとは限らない。そこで、ミリ波 VLBI 観測では、新しい位相補正手法の確立が求められている。

1.2.2 Multi Frequency Phase Referencing (MFPR)

Multi Frequency Phase Referencing (以下、MFPR) は、異なる周波数のフリンジ位相を用いる位相補正手法である。位相は、周波数を f 、遅延時間を τ として、 $2\pi f\tau$ で表される。ここで、遅延時間 τ は、大気中での光速が周波数によらず一定であるという非分散性をおおむね持つことが知られている。つまり、遅延時間のエラーによるフリンジ位相のエラーは、周波数に比例する。そこで、非分散性を仮定して、周波数に比例する位相エラーを取り除くために、低周波数のフリンジ位相を使って高周波数のフリンジ位相を補正する手法が、MFPR である。主な手順としては、まず、高周波数を低周波数で割った比を求める。次に、低周波数のフリンジ位相に求めた周波数比をかけて、補正解を得る。最後に、高周波数のフリンジ位相から補正解を引いて、目的とする観測周波数でのフリンジ位相を補正する。

1.2.3 Source Frequency Phase Referencing (SFPR)

Source Frequency Phase Referencing (以下、SFPR) は、位置天文解析を目的として、MFPR と合わせて、さらに観測天体の近傍にあるキャリブレーション天体の位相を用いる位相補正手法である[2]。MFPR では、周波数に比例する位相エラーは取り除けても、比例しないエラーは取り除くことができない。周波数に比例しない位相エラーには、観測装置内の伝送路に起因する位相エラーや、周波数に反比例する電離層による位相エラーなどがある。これらのエラーは、MFPR のように単純な積の差で取り除くことができない。そこで、1.2.1 で紹介した Phase Referencing と同様に、観測天体のごく近傍にあるキャリブレーション天体の位相を利用する。この際問題になるのは、電波の経路における大気の影響であるので、観測天体とキャリブレーション天体の絶対的な距離ではなく、アンテナから見たときの 2 天体の離角が小さいことが重要である。離角が小さければ、電離層による位相エラーはほとんど同じように 2 天体の位相に現れる。そこで、観測天体の位相からキャリブレーション天体の位相を引くことで、2 天体に共通する変動を差し引き、目的とする観測周波数でのフリンジ位相を補正する。ただし、電離層位相エラーと装置起因の位相エラーは時間スケールの長い変動であるため、観測天体とキャリブレーション天体のスイッチング周期は数分でよい。また、電離層による位相エラーは、水蒸気位相エラーと比較して空間的により遠く離れた離角でも相関があるため、1.2.1 で紹介した Phase Referencing より離角の大きなキャリブレーション天体を利用することができ、ミリ波やサブミリ波でも比較的容易にキャリブレーション天体を見つけやすいという特徴がある。この SFPR は、VLBI 観測技術として最近提案された手法であり、まだ十分な技術実証が積まれていない。

1.3 本研究の目的

VLBI で観測したミリ波長を持つ宇宙電波に対して有効とされる位相補正手法 MFPR、ならびに SFPR の検証をすること、位相補正をしたメーザーを放射する星間ガス分布を描画すること、また、異なる周波数の異なる分子メーザーの位置を比較することの3つを目的とした。星間ガスの複数のメーザーの位置を直接比較することができれば、星間ガスの温度や速度構造といった物理状態をより詳細に把握することが可能となり、恒星進化の研究に大きく貢献することになると期待できる。

2 章 実験概要

VLBI 観測での MFPR、および SFPR の検証を行うため、KVN で、メーザー天体を 1 天体と連続波源を 2 天体の多周波同時観測実験を行い、実験データを取得した。本章では、その観測の概要について述べる。

2.1 観測概要

観測は、Korean VLBI Network (KVN) の 3 局と VERA の 4 局、計 7 局を使用し、2012 年 3 月 30 日に行われた。KVN は、タンナ、ウルサン、ヨンセにアンテナを持ち、VERA は、水沢、入来、小笠原、石垣にアンテナを持つ。しかし、KVN のうちの 1 局であるタンナについて、偏波の設定が誤っていたため、正確なデータが得られず、実質 6 局 15 基線を使った観測となった。観測に使用した周波数は、KVN で 22 GHz 帯、43 GHz 帯、86 GHz 帯の 3 つ、VERA で 22 GHz 帯である。KVN は 22 GHz で 16MHz の帯域を持つ連続したスペクトルをなす Intermediate Frequency (IF) チャネルを 2 チャネル、43 GHz で 6 チャネル、86 GHz で 8 チャネル分記録した。VERA では、22 GHz において 16 MHz 帯域の 1 IF チャネルを記録した。観測諸元を表 1 にまとめる。

2.2 相関処理

各局で記録された天体観測記録データのうち、22GHz の KaVA 観測のデータは、国立天文台 VLBI 相関局で相互相関処理された。相関処理後、KaVA データは 22 GHz で 1024 点の周波数分解能を持つ 8 MHz 帯域の信号が出力されている。一方、KVN の多周波同時観測データ (22、43、86 GHz) のデータは、韓国ヨンセ大学に設置された diFX コリレータによって相互相関処理された。diFX での相互相関処理により、KVN は 22 GHz、43 GHz、86 GHz において、512 点の周波数分解能を持つ 16 MHz 帯域の信号が、それぞれ、2 チャネル、6 チャネル、8 チャネル出力されている。本研究では、多周波同時観測における MFPR 補正技術の検証を行うため、22GHz、43GHz、86GHz で同時観測を行い diFX コリレータで処理された KVN 観測データを主としてデータ解析に使った。ただし、3 局のうちタンナ局が観測に失敗しているため、利用できるデータはヨンセ局 - ウルサン局の 1 基線のみとなる。

3章 データ解析

直接解析に使用した BL Lac, J0244+6228, S Per の 3 天体の他に、3C454.3, 3C84, NRAO150 の 3 天体、合計 6 天体を観測した。準備研究として、解析が比較的容易と考えられた連続波源である BL Lac, J0244+6228 の観測データの解析を試み、その後に H₂O メーザー、および SiO メーザー源である S Per の観測データを用いた。

3.1 準備研究

3.1.1 評価方法と目標値

MFPR によるフリンジ位相の補正効果は、位相補正後の Root-Mean-Square (RMS) 位相の大きさを評価する。今回目標としたのは、RMS 位相が 1 [radian] 以下になることである。なぜならば、RMS 位相が 1 [radian] を超えると、VLBI での天体画像の合成において、コヒーレンス損失により振幅が 30% 以上低下してしまう。このような振幅低下は電波干渉計の著しい性能損失とみなされるためである。この準備研究では、BL Lac と J0244+6228 の観測結果について MFPR を適用し、低い周波数のフリンジ位相で高い周波数のフリンジ位相の補正ができたかどうかを確認する Python プログラムを開発した。

3.1.2 連続電波源 BL Lac

BL Lac は、地球から 0.3 G パーセク離れた位置にある銀河の中心核であり、シンクロトロン放射により、メートル波からサブミリ波にかけて強い電波が観測される連続電波源天体である。そのため、取得されたデータの信号対雑音比が高く、MFPR の実証研究に非常に適している。

本観測では、BL Lac を連続的に 20 分観測している。観測を開始してからの経過時間と、電波の位相の実部と虚部の情報が周波数ごとに記録されたテキストファイルから、各時間におけるフリンジ位相を求めた。図 1 と図 2 に、それぞれ 22 GHz と 43 GHz、22 GHz と 86 GHz のフリンジ位相のグラフを示す。周波数に比例して、時間変動が激しくなっていることがわかる。次に、補正データを作成する 22GHz のフリンジ位相の 2π ラジアンの不連続性を排除して、暫定的に滑らかに接続した。結果を図 3 に示す。さらに、22 GHz のフリンジ位相に高周波数との比をかけることで、MFPR に使用する補正解を得た。43 GHz と 86 GHz につ

いて求めた補正解を、それぞれ図 4、と図 5 に示す。最後に、高周波数のFRINGE位相と補正解との差を求め、その RMS 位相を計算した。図 6 と図 7 に、22 GHz の位相で 43 GHz と 86 GHz の位相を補正した結果をそれぞれ示す。

MFPR 前の RMS 位相は、位相変化の傾斜を考慮しないで 43 GHz で 5.323 [radian] , 86 GHz で 10.67 [radian] であった。これが、補正後にはそれぞれ、0.3937 [radian] , 0.6495 [radian] にまで下がった。補正前と補正後の RMS 位相を表 2 にまとめる。MFPR 補正後の RMS 位相は 1 [radian]を下回ることができたので、BL Lac ではいずれの周波数でも目標とした MFPR 位相補正の性能を得られたことがわかる。

3.1.3 連続電波源 J0244+6228

J0244+6228 についても、先に使用した BL Lac と同じ形式のファイルを使用し、BL Lac の位相補正に使用した手法と同じアルゴリズムを採用したプログラムを開発した。J0244+6228 では、BL Lac のように長時間の連続的な観測ではなく、20 分ごとに 3 分の短時間観測を複数回行っている。そこで、各短時間の観測ごとに位相の 2π ラジアンの不連続性を処理した。観測データのうち、始めから 12 回分の観測について、BL Lac と同じアルゴリズムを用いて MFPR を行った結果を確認した。補正前と後の RMS 位相を表 3 にまとめる。

連続的な短時間の観測 1 セットをセグメントと呼ぶことにする。BL Lac と異なり、J0244+6228 では MFPR の後の RMS 位相が、すべてのセグメントで目標値まで下がったわけではなかった。例えば、セグメント 1 では、補正前の RMS 位相が 1.458 [radian] だったのに対し、MFPR 補正後には 1.120 [radian] と、目標値まで下がらなかった (図 8)。しかし、セグメント 8 では、補正前には 1.956 [radian] だった RMS 位相を、MFPR 補正後には 0.8141 [radian] まで下げることに成功した (図 9)。一方、セグメント 5 では、補正前には 1.261 [radian] だった RMS 位相が、MFPR 補正後に 1.776 [radian] まで上がってしまい (図 10)、プログラムを適用することで、却ってFRINGE位相の安定度を悪化させる結果になった。

3.1.4 BL Lac と J0244+6228 の考察

MFPR 補正前の RMS 位相が、BL Lac よりも J0244+6228 のほうが小さくなっている。大気による電波の超過経路長の時間変動には、フリッカ周波数雑音成分が卓越していることがよく知られており、長い時間の受信電波の位相変動のモニタではより大きな位相変動が観

測される傾向にある。今回、BL Lac が長時間の観測であったのに対し、J0244+6228 では3分程度の短時間の観測の中で RMS 位相を求めているので、フリッカ周波数雑音を持つ特徴によりフリンジ位相の変動が小さかったからであると考えられる。

BL Lac では目標とした補正精度が得られたのに、J0244+6228 では得られなかった。この原因として、J0244+6228 が BL Lac よりも電波が弱いため、熱雑音による影響が大きくなってしまったことが挙げられる。今回のプログラムでは、隣接した時間における位相の差の大きさで、位相の 2π ラジアンジャンプを排除し、不連続さを持たない時間変化をとるよう処理している。BL Lac では、熱雑音による影響が判定を阻害することはなかった。しかし、J0244+6228 では、熱雑音の影響で位相の変動が激しいため、適切に処理できていないことが考えられる。このことから、強度の高い、信号対雑音比の高い天体では、MFPR により目標とした精度でフリンジ位相の補正が可能であることがわかったとともに、強度の弱い天体においては信号対雑音比を改善することが MFPR において重要であることが判明した。

3.2 S Per

3.2.1 S Per

これまで紹介してきた2つの連続波源天体の MFPR 解析は、信号対雑音比が高い場合には正しく機能することが確認できた。そこで、当初の目的であった、メーザ天体である赤色超巨星 S Per への適用を行った。S Per のデータ解析でも、連続波源天体と同様に、22 GHz (H_2O メーザ) の位相を使って、43 GHz (SiO メーザ) の位相を補正することを目指す。これまでは、Python で作成した、MFPR アルゴリズムを搭載したプログラムのみを使用して調査していたが、S Per では、電波干渉計データの画像合成解析ソフトであるアメリカ国立電波天文台 (National Radio Astronomy Observatory) の AIPS (Astronomical Image Processing System) も併用した電波放射領域の画像合成解析を行う。

3.2.2 手順

最初に、観測天体の構造を反映する、22 GHz H_2O メーザのビジビリティ位相を求める。次に、観測から得られたフリンジ位相からそれを引くことで、MFPR のための補正解を求める。そして、43 GHz SiO メーザの位相から補正解を差し引いて補正をする。さらに、S Per との離角が 4° の J0244+6228 をキャリブレーション天体として、その観測結果を利用して

SFPR を行うため、改めて解析を行った。最後に、22 GHz H₂O メーザーと、43 GHz SiO メーザーの位置を比較するため、空間分布を描画した。

3.2.3 MFPR

ビジビリティ位相を求めるにあたって、参照する 22 GHz H₂O メーザーの分布については、KVN のヨンセやウルサンも含んだ 6 局 15 基線で観測し、KVN の 1 基線よりもクオリティの高い画像が得られると期待される KaVA のデータを使用して合成した。まず、同じ時間に観測した KaVA の観測データを AIPS で解析して得た 22 GHz H₂O メーザーの全視線速度-20.72 km s⁻¹ ~ -62.44 km s⁻¹ の空間分布を図 11 に示す。

次に、22 GHz H₂O メーザーの全視線速度のスペクトルを図 12 に示す。-45.6 km s⁻¹ 付近のピークの位置では強度が高いことがわかり、安定しているため、点源に近い構造をしていると考えられる。この速度成分だけを抜き出した H₂O メーザーの分布を図 13 に示す。放射源が、中央の上下に 2 点あり、ほとんどを(0, -60) [mas]の明るいメーザー源からの放射が占めている、単純な空間分布になっていることが確認できた。

よって、この視線速度-45.6 km s⁻¹のメーザーを使ってビジビリティ位相を導出した。求めたビジビリティ位相を図 14 に示す。これをフリンジ位相から引くことによって、天体の構造が招く位相変動を除去することができる。その残差に、22 GHz H₂O メーザーの周波数と目的とする周波数との比をかけることで、目的とする周波数での MFPR 補正解を求める。これら一連の処理は AIPS では実装されていないため、AIPS の解析途上で蓄積される 22 GHz H₂O メーザーの中間生成データである SN テーブル (SolutioN テーブル) から 43 GHz SiO メーザーに適用する MFPR 補正解を求め、SN テーブル形式で出力する Python のプログラムを開発した。Python プログラムで生成した SN テーブル形式の補正解を AIPS に取り込み、適用することで、MFPR 補正を実現する。

今回観測した 43 GHz SiO メーザーには、周波数 42.8 GHz と 43.1 GHz ($v=2$ および $v=1$, $J=1-0$) の 2 つの遷移が存在する。よって、この 2 つそれぞれに対応するように補正解を出力し、SN テーブルを作成するプログラムを開発した。図 15 に、生成した SiO ($v=1$, $J=1-0$) の補正解を示す。S Per はおよそ 20 分間の観測を複数回行っているため、セグメントごとに位相の 2π の不連続性を処理している。

図 16 と図 17 にヨンセ - ウルサン基線における 43 GHz SiO メーザー ($J=1-0$) の $v=2$ の、図 18 と図 19 に $v=1$ の、MFPR 位相補正解の適用前と適用後のフリンジ位相について、それぞれ示す。開発した Python プログラムによって生成された SN テーブル形式の 43 GHz MFPR 位相補正解を 43 GHz SiO メーザーのフリンジに適用したところ、位相のばらつきを

大きく改善することに成功した。

3.2.4 SFPR

SFPR では、MFPR で補正できない装置起因の位相誤差と電離層起因の位相誤差を、ターゲット天体近傍のキャリブレーション用の天体の位相を差し引くことで補正を施す必要がある。S Per 観測では、離角 4° の位置にある J0244+6228 をおよそ 20 分おきに観測しており、キャリブレーション天体である J0244+6228 の MFPR 解析を改めて行い、SFPR 用の補正データを生成することとした。まず、J0244+6228 についても KVN 基線のビジビリティ位相を得るため、KaVA の 22 GHz の観測結果から図 20 のような電波画像を得た。SFPR のキャリブレーション天体の解析では、FRINGE 位相のエラーを可能な限り除くために 43 GHz の分布も必要となるが、KaVA では 43 GHz の観測を行っていなかったこと、また、22 GHz の分布から J0228+6228 の構造は点源天体に近いものとみなせると判断し、43 GHz の分布は利用せずに解析を進めた。

3.1.3 の解析では、22 GHz と 43 GHz で、それぞれ帯域幅 16 MHz の 1 つの IF チャネルしか使わなかったため、信号対雑音比が低くなり、補正ができなかったと考えられる。そこで今回は、22 GHz では 2 つの IF チャネル (合計した帯域幅は 32 MHz) を、43 GHz では 6 つの IF チャネル (合計した帯域幅は 96 MHz) を使うことで、信号対雑音比をそれぞれ $\sqrt{2}$ 倍、 $\sqrt{6}$ 倍に上げた。22 GHz において、図 20 の KaVA の 22 GHz のマップにより AIPS 内でビジビリティ位相を計算し、KVN のヨンセ - ウルサン基線の複数の IF チャネルを積分して合成したFRINGE位相からビジビリティ位相を差し引いた残差を、AIPS のサブプログラムであるFRINGE・フィッティングを使用して SN テーブルに出力した。同様に、J0244+6228 の 43 GHz の KVN のヨンセ - ウルサン基線のデータにおいてFRINGE・フィッティングを施し、先の 22 GHz の SN テーブルと組み合わせて J0244+6228 での MFPR を行った。その結果である、J0228+6228 で MFPR 補正した後の残差が、S Per における SFPR 補正解となる。上記の SFPR 処理は AIPS に実装されていないため、S Per の MFPR 処理で開発した Python プログラムを改修し、AIPS の SN テーブルをインターフェースとして、S Per の MFPR 補正解導出し、J0224+6228 の MFPR 処理を行い、S Per の SFPR 補正解の導出を行うプログラムを開発した。S Per 43 GHz SiO メーザー ($v=1, J=1-0$) の SFPR 補正解の SN テーブルを AIPS に取り込んだ KVN のヨンセ - ウルサン基線のFRINGE位相補正解を図 21 に示す。これを適用することで SFPR を行い、FRINGE 位相を補正する。

作成した SN テーブルを適用し、43 GHz SiO メーザー ($J=1-0$) の $v=2$ および $v=1$ の、KVN のヨンセ - ウルサン基線でのFRINGE位相の補正を行った結果を図 22 と図 23 に示す。

MFPR で水蒸気による位相エラーを取り除くことで、図 17 と図 19 のように、フリンジ位相の大まかな変動を確認できた。その後、J0244+6228 の変動を差し引いて SFPR を行うことで、より細かい変動を目視することができるようになった。

3.2.5 メーザー位置比較の結果と考察

恒星進化末期段階周囲の星周ガスから放射される 22 GHz H₂O メーザーは、恒星の半径の数百倍の場所に分布する。対して、43 GHz SiO メーザーは、励起するのにより高いエネルギーを必要とするところや、外周にいくに従って Si を含んだガスがダストに変化してくことから、より中心に近い、半径の数~数十倍の位置に存在する。恒星から放出されるガスは、等方的な分布をするとは言えず、22 GHz H₂O メーザーの分布から、星周ガスの放射源となっている恒星の位置を割り出すことは難しい。そこで、22 GHz H₂O メーザーの分布だけではなく、SiO メーザーの分布と組み合わせて、恒星の位置を推定する天体物理学研究が注目されている。

SFPR の結果を使って、KaVA の観測データから得た AIPS のイメージ合成処理により、43 GHz SiO メーザーの分布を得た。これを、KaVA の観測データで得た 22 GHz H₂O メーザーの分布と重ね、43 GHz SiO メーザー (J=1-0,) の v=2 と v=1 のそれぞれの遷移の分布について位置を比較した。その結果を、図 24 と図 25 に示す。

星間ガス中の分子がメーザー放射する過程として、星や加熱されたガスからの放射光子を吸収してエネルギー準位間分子数分布の反転を実現する放射励起と、ガス内の運動が分子同士の衝突を引き起こすことによる衝突励起がある。v が表す振動励起状態の違いにより励起に必要なエネルギーが変わるため、放射励起の場合には、主として赤外線が上げられる放射光子、つまり恒星からの距離やガスの温度により、振動励起状態によって放射位置が異なると考えられている。一方、衝突励起の場合は、ガスの運動が励起を決めることになり、振動励起状態が違っていても放射する場所の違いは大きくならないと考えられている。進化末期段階の恒星 (evolved star) の星周ガスでは、SiO メーザー (J=1-0) の v=1 と v=2 の遷移ではほぼ同じ位置から放射されているとの報告が複数ある[2]。今回の S Per の SFPR 解析結果では、v=2 と v=1 の遷移での位置は 3 [mas] 程度のずれで一致しており、S Per の SiO メーザー放射においても衝突励起が重要な放射機構であることが分かった。

また、朝木ら[3]が報告した 2007 年の VLBI 観測による S Per の 22 GHz H₂O メーザーの分布と、今回の 2012 年の観測結果について比較を行った。星周ガスは、恒星からの放射圧により外側に向かって加速されていき、概ね恒星中心から放射状に広がっていく。2007 年と 2012 年の H₂O メーザーの一分布を比較し、2 つの時期の間のメーザーを同定して重ねた結

果を図 26 に示す。重ねることで、2007 年のメーザー位置が、2012 年のメーザー位置よりも内側に分布している様子が分かり、星周ガスが放射状に拡大していく様子が確認できた。さらに、今回の SFPR 解析で得られた 2 つ振動状態遷移の SiO メーザーの分布と重ねた結果を図 27 に示す。朝木らの求めた分布における恒星位置は、星周ガスが等方的に単純膨張とした運動学的モデルから求められ、誤差 8 [mas] で得られていた。今回の SiO メーザーの分布と比較すると、朝木らの求めた恒星位置からは赤経、赤緯で(0, -10)から(0, -20) [mas] の付近に恒星があるという結果が得られた。

4章 まとめと考察

これまでの結果から得られた知見について述べる。

4.1 まとめと考察

BL Lac について、低周波数の 22 GHz のフリンジ位相を使って、高周波数の 43 GHz と 86 GHz のフリンジ位相を補正する、MFPR のアルゴリズムを搭載した Python のプログラムを開発した。MFPR 適用前には、43 GHz と 86 GHz でそれぞれ 5.323 [radian], 10.67 [radian] だった RMS 位相を、適用後には 0.3937 [radian], 0.6495 [radian] にまで下げることが成功した。目標とした RMS 位相は 1 [radian] 以下だったので、目標とした位相補正性能を達成したことが確認できた。これをふまえて、J0244+6228 に対しても同じアルゴリズムを適用し、補正の精度を確認した。ところが、この天体では、全てのセグメントで求める補正精度が得られたわけではなかった。これは、BL Lac に比べ、J0244+6228 の信号対雑音比が低いため、位相ノイズによって 2π ラジアンの不連続性を適切に処理できなかったためであると考えられる。この 2 天体に MFPR を行った結果から、信号対雑音比の高い天体では求める補正精度が得られることがわかった。

次に、銀河系内の赤色超巨星であるメーザー天体の S Per に対して適用した。S Per に対しては、BL Lac と J0244+6228 の解析で開発した Python プログラムだけでなく、電波干渉計解析ソフト AIPS を用いた解析を行い、データの補正だけでなく、天体の電波画像合成も組み合わせた応用研究を行った。S Per の 22 GHz H₂O メーザーと、43 GHz SiO メーザーに対して、43 GHz のフリンジ位相を補正する目的で MFPR を行った結果、SiO メーザーのフリンジ位相のばらつきを大幅に改善することができた。さらに、S Per からの離角が 4° である J0244+6228 をキャリブレーション天体として利用することにより、本研究課題について、SFPR による異種メーザー間の位置比較研究に展開していった。J0244+6228 については、上記のように開発した Python プログラムで解析を行ったときは、信号対雑音比が低かったためにうまくいかなかった。そこで、IF チャネルを複数使うことによって、信号対雑音比を 22 GHz で $\sqrt{2}$ 倍、43 GHz で $\sqrt{6}$ 倍にすることで、MFPR 補正の改善を図った正確な解析を行った。その結果、MFPR で確認できた大まかなフリンジ位相の変動から、さらに詳細な変動を確認することに成功した。この結果を用いて、43 GHz SiO メーザーの空間分布を描画し、22 GHz H₂O メーザーの空間分布との位置比較を行った。

恒星進化末期段階の星周ガスに関する VLBI を用いた先行研究[2]から、43 GHz SiO メーザー (J=1-0) の 2 つの振動遷移 ($v=2$ と $v=1$) では、放射位置はほとんど一致するという結

果が得られている。今回の S Per の結果では、3 [mas] 程度の相違が見られたが、概ね一致していることが分かった。2 種類の SiO メーザーの位置が非常に近いため、SiO メーザーの放射過程に衝突励起が重要な役割を担っていることと推測される。さらに、朝木らの報告した S Per の H₂O メーザーの 2007 年の VLBI 観測結果とも比較した。朝木らは、H₂O メーザーを放射する星周ガスが単純膨張をしているとした運動学的モデルにより恒星位置を求めたが、本研究では、MFPR の応用発展である SFPR も適用することによって、SiO メーザーの放射源の分布から恒星位置を推定することに成功した。

4.2 展望

S Per の SFPR の補正から、メーザー位置比較を行うことによって得た恒星位置と、KVN で観測した 86 GHz の SiO メーザー ($J=2-1$) も合わせて比較することで、より正確な恒星位置推定を行うことが天体物理研究上の課題である。86 GHz と周波数が高くなることで、信号対雑音比が小さくなる。また、フリッジ位相の変動も 43 GHz と比べて 2 倍程度大きくなるため、 2π ラジアン位の位相ジャンプの修正により大きな困難さを伴うことになる。技術上の課題である、この問題を効率よく解決するアルゴリズムの開発に取り組みたい。

参考文献

- [1] Taehyun JUNG, Bong Won SOHN, Hideyuki KOBAYASHI, Tetsuo SASAO, Tomoya HIROTA, Osamu KAMEYA, Yoon Kyung CHOI, and Hyun Soo CHUNG, "First Simultaneous Dual-Frequency Phase Referencing VLBI Observation with VERA", *Astron. Soc.* **63**, 375-385 (2011)
- [2] Richard Dodson, María J. Rioja, Tae-Hyun Jung, Bong-Won Sohn, Do-Young Byun, Se-Hyung Cho, Sang-Sung Lee, Jongsoo Kim, Kee-Tae Kim, Chung-Sik Oh, Seog-Tae Han, Do-Heung Je, Moon-Hee Chung, Seog-Oh Wi, Jiman Kang, Jung-Won Lee, Hyunsoo Chung, Hyo-Ryoung Kim, Hyun-Goo Kim, Chang-Hoon Lee, Duk-Gyoo Roh, Se-Jin Oh, Jae-Hwan Yeom, Min-Gyu Song, Yong-Woo Kang, "Astrometrically Registered Simultaneous Observations of the 22 GHz H₂O and the 43GHz SiO masers towards R Leonis Minoris using KVN and Source/Frequency Phase Referencing", *Astron.J.* **148**, 97 (2014)
- [3] Y.Asaki, S.Deguchi, H.Imai, K.Hachisuka, M.Miyoshi, and M.Honma, "Distance and Motion Measurement of the Red Supergiant, S Persei, with VLBI H₂O Maser Astronomy", *Astrophys.J.* **721**, 267-277 (2010)

謝辞

本研究を行うにあたり、事細かにご指導いただいた朝木義晴教授には深く感謝申し上げます。

また、プログラム開発にあたり、ルジェロ・ミケレット教授には多大なるアドバイスをいただきました。

そして、対話の場を持ってくださいました大月俊也教授、木下郁雄教授、毎週のゼミで討論してくださった坪井研究室のみなさま、研究会の場でコメントくださいました今井裕教授を始めとする参加者の方々のおかげで、理解を深めることができました。

多くの方々のご助力のもと、研究を続け、こうして論文にまとめることができました。本当にありがとうございました。

研究発表

“VLBI 観測における Multi Frequency Phase Referencing の開発 (Development of the Multi Frequency Phase Referencing in VLBI observation)”

渡利藤香 (横浜市大), 朝木義晴 (宇宙科学研究所), Ruggero Micheletto (横浜市大), KaVA evolved star working group

第 12 回 水沢 VLBI 観測所ユーザーズミーティング

2014 年 9 月 24 日 (水) - 9 月 25 日 (木)

“Development of the multi frequency phase referencing method in VLBI observation”

Fujika Watari (Yokohama city university), Yoshiharu Asaki (ISAS), Ruggero Micheletto (YCU), KaVA evolved star working group

2014 年度 VLBI 懇談会シンポジウム

2014 年 10 月 29 日 (水) - 10 月 31 日 (金)

Source	BL Lac, J0244+6228, S Per (3C454.3, 3C84, NRAO150)
Array	KVN and VERA Array (KaVA)
Date	2012年3月30日 20:40 UTC – 3月31日 13:38 UTC
Frequency (KVN)	22 GHz (22.21501660 GHz から 16 MHz × 2 IF ch) 43 GHz (42.81401660 GHz から 16 MHz × 6 IF ch) 86 GHz (86.21001660 GHz から 16 MHz × 8 IF ch)
Frequency (KaVA)	22 GHz (22.23400195 GHz から 8 MHz × 1 IF ch)

表 1 MFPR 観測実験の諸元

	MFPR 補正前の RMS [radian]	補正後の RMS [radian]
43 GHz	5.323	0.3937
86 GHz	10.67	0.6495

表 2 BL Lac の MFPR の結果

J0244+6228 43 GHz	補正前の RMS [radian]	補正後の RMS [radian]
セグメント 1	1.458	1.120
セグメント 2	1.723	1.155
セグメント 3	1.070	2.507
セグメント 4	0.9595	2.537
セグメント 5	1.261	1.776
セグメント 6	1.338	2.177
セグメント 7	1.355	2.206
セグメント 8	1.956	0.8141
セグメント 9	1.690	0.8993
セグメント 10	1.810	0.7357
セグメント 11	1.172	1.559
セグメント 12	0.9078	2.396

表 3 J0244+6228 の 43 GHz の MFPR 補正結果

3.1.2 連続電波源 BL Lac

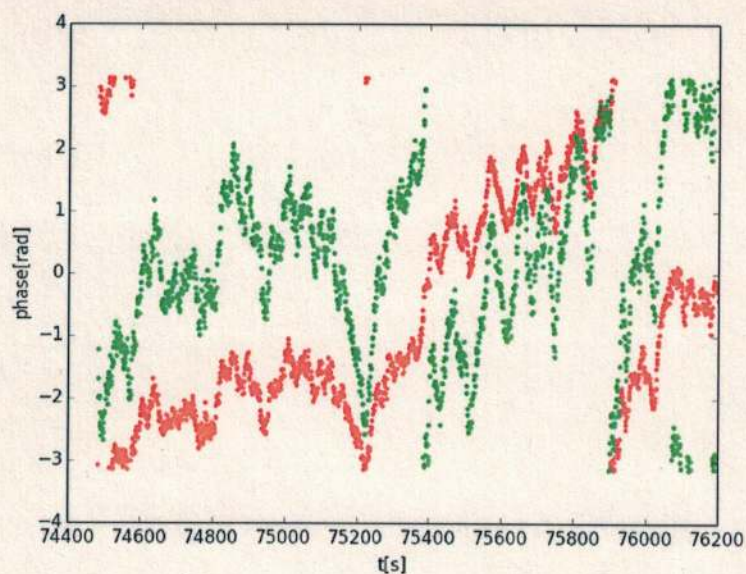


図1 BL Lac の 22 GHz と 43 GHz の ヨンセ - ウルサン 基線 の フリンジ 位相 。 横軸 は 観測 日 0:00 UT から の 経過 時間 (秒) 、 縦軸 は 位相 (ラジアン) 。 赤 は 22 GHz の フリンジ 位相 を 、 緑 は 43 GHz の フリンジ 位相 を 表す 。

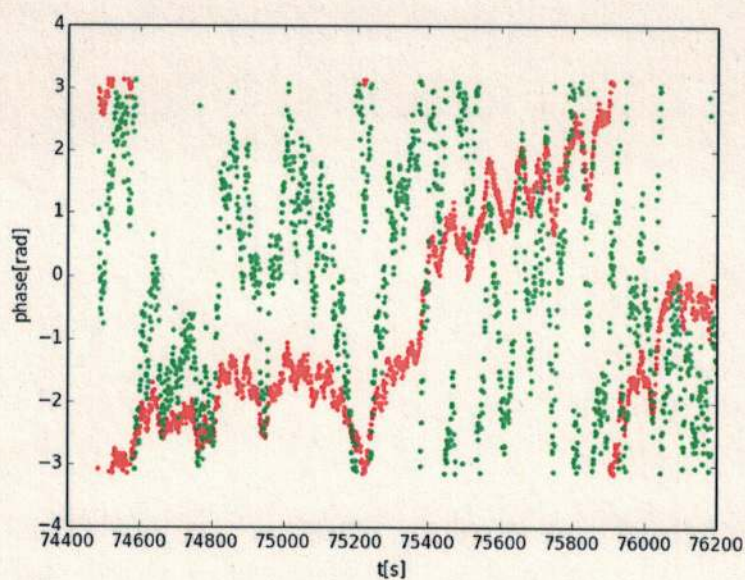


図2 BL Lac の 22 GHz と 86 GHz の ヨンセ - ウルサン 基線 の フリンジ 位相 。 横軸 、 縦軸 は 図 1 と 同 じ 。 赤 は 22 GHz の フリンジ 位相 を 、 緑 は 86 GHz の フリンジ 位相 を 表す 。

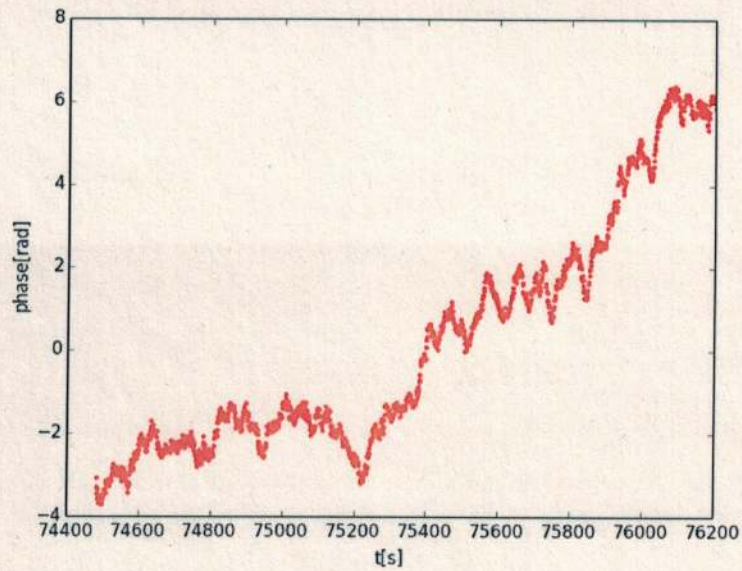


図3 2π の不連続を排除して滑らかに接続した、BL Lacでの22 GHzのヨンセ - ウルサン基線のフリンジ位相。横軸と縦軸は図1に同じ。

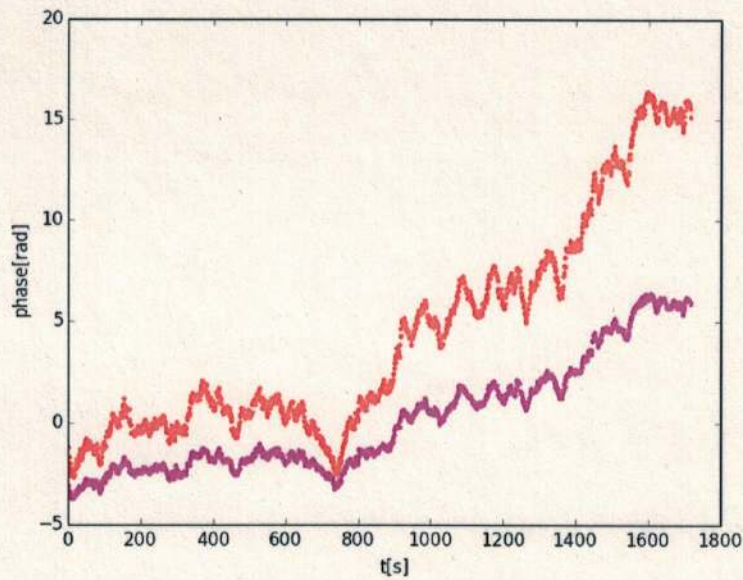


図4 BL Lac観測の43 GHz MFPR補正解。横軸と縦軸は図1に同じ。マゼンダは43 GHzの補正解を、マゼンダは22 GHzのフリンジ位相を表す。

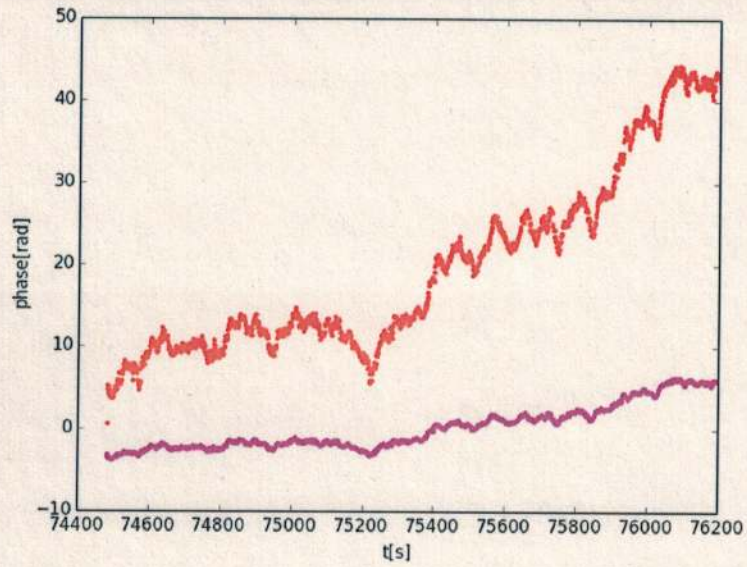


図5 BL Lac 観測の 86 GHz MFPR 補正解。横軸と縦軸は図 1 に同じ。赤が 86 GHz の補正解、マゼンダは 22 GHz のフリンジ位相を表す。

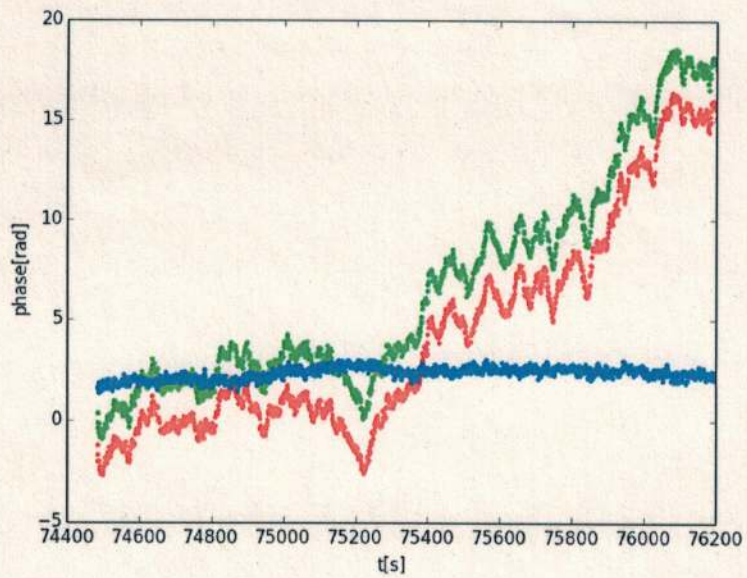


図6 BL Lac の 43 GHz の補正結果。横軸と縦軸は図 1 に同じ。赤が 43 GHz の補正解、緑が 43 GHz のフリンジ位相、青が補正值を表す。

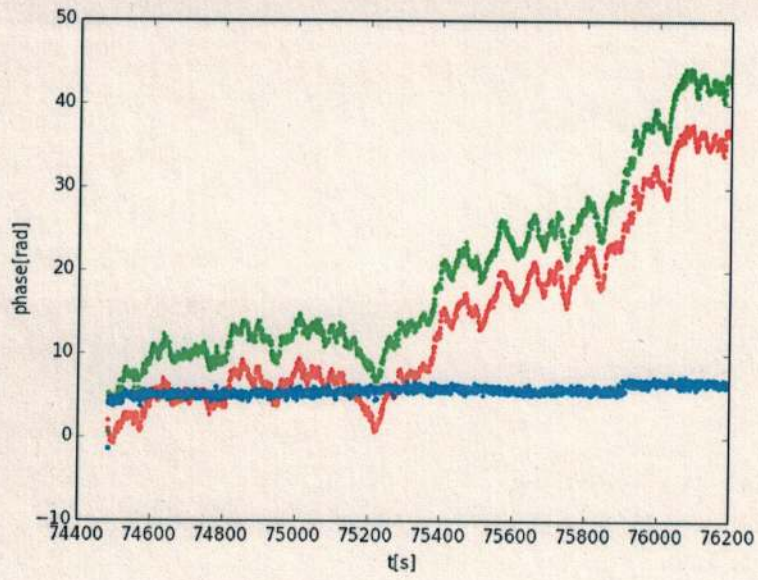


図7 BL Lac の 86 GHz の補正結果。縦軸と横軸は図1に同じ。赤が 86 GHz の補正解、緑が 86 GHz のフリンジ位相、青が補正值を表す。

3.1.3 連続電波源 J0244+6228

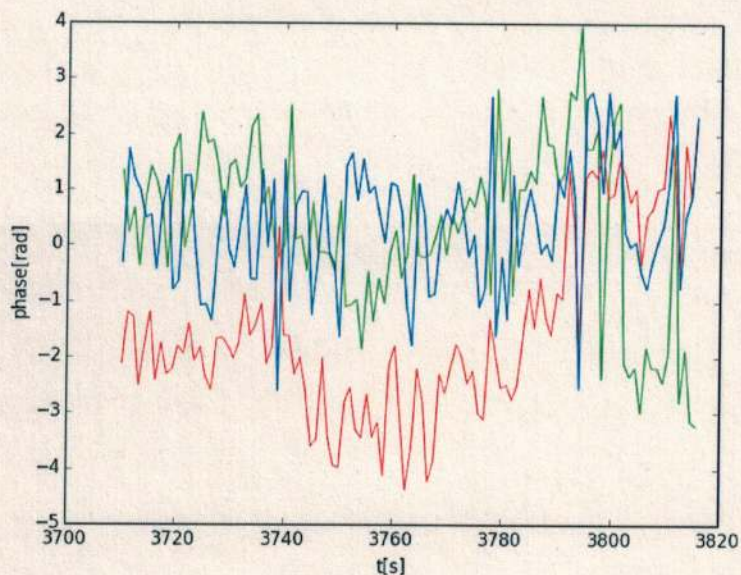


図 8 J0244+6228 のセグメント 1 における 43 GHz の MFPR 補正結果。横軸は観測 2 日目 0:00 UT からの経過時間 (秒)、縦軸は位相 (ラジアン) である。赤が 43 GHz の補正解、緑が 43 GHz のフリンジ位相、青が補正値を表す。

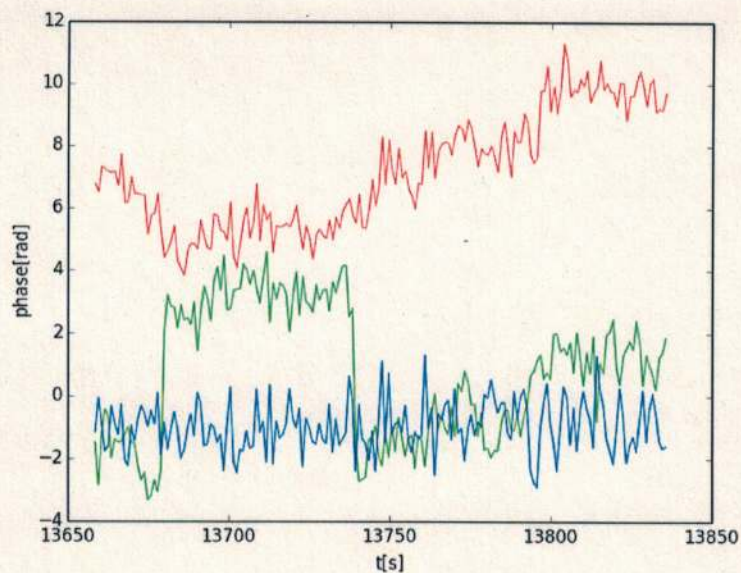


図 9 J0244+6228 のセグメント 8 における 43 GHz の MFPR 補正結果。横軸と縦軸は図 8 に同じ。赤が 43 GHz の補正解、緑が 43 GHz のフリンジ位相、青が補正値を表す。

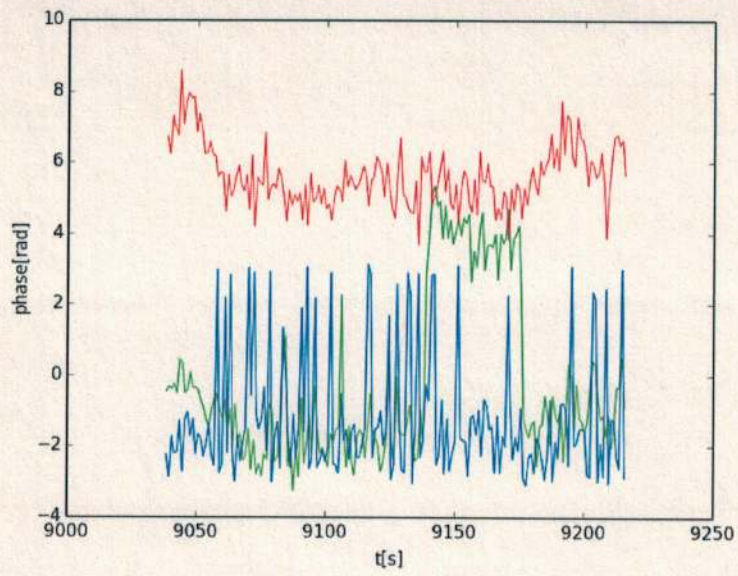


図 10 J0244+6228 のセグメント 5 における 43 GHz の MFPR 補正結果。横軸と縦軸は図 8 に同じ。赤が 43 GHz の補正解、緑が 43 GHz のフリンジ位相、青が補正值を表す。

3.2.3 MFPR

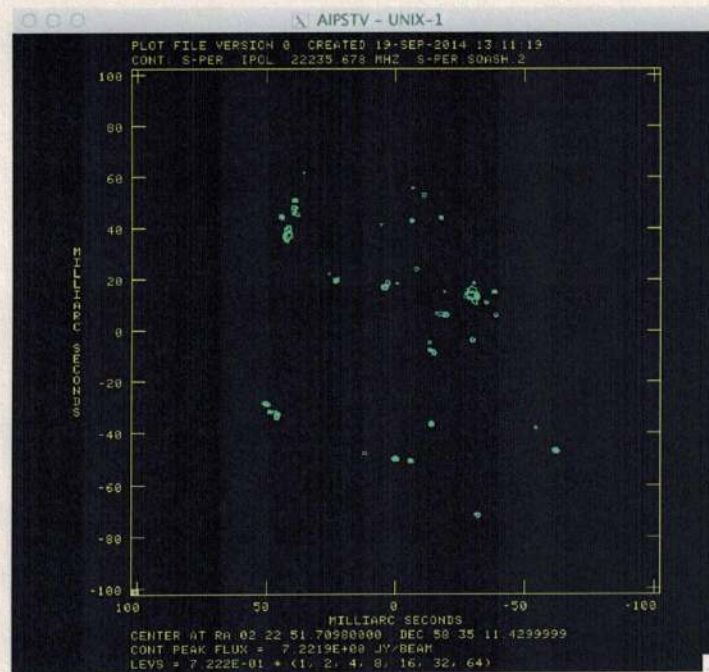


図 11 S Per の 22 GHz H₂O メーザーの全視線速度 $-20.72 \text{ km s}^{-1} \sim -62.44 \text{ km s}^{-1}$ における 22 GHz H₂O メーザーの空間分布。横軸と縦軸は、それぞれ赤経、赤緯 (mas) である。

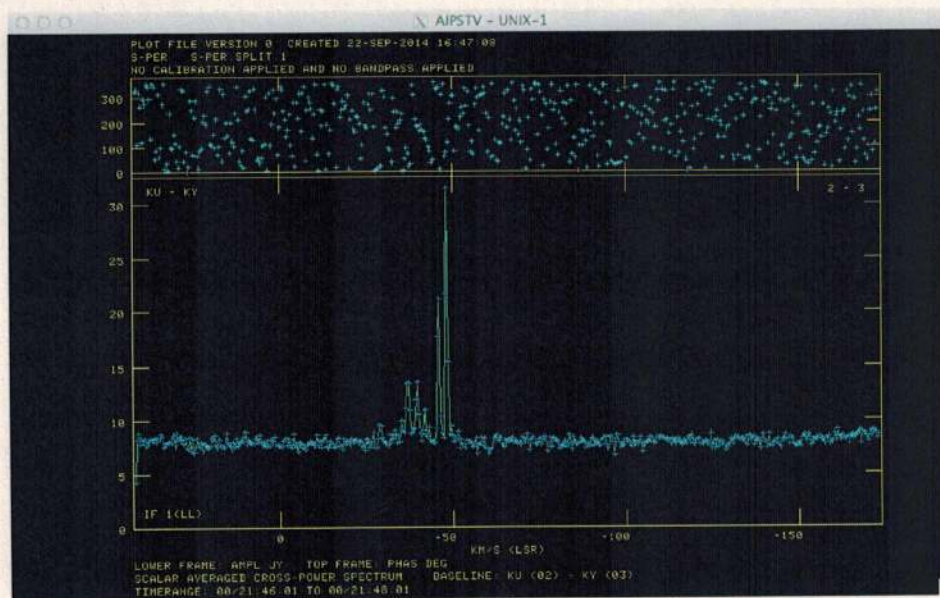


図 12 S Per の 22 GHz H₂O メーザーの全視線速度のスペクトル (下段)。横軸は視線速度 (km/s)、縦軸はフラックス密度である。

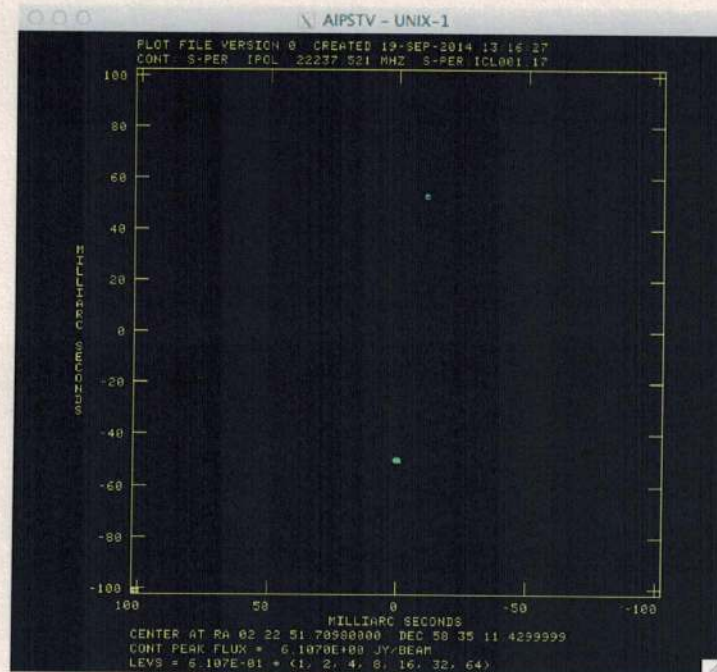


図 13 S Per の視線速度 -45.6 km s^{-1} における H_2O メーザーの空間分布。横軸と縦軸は、図 11 に同じ。

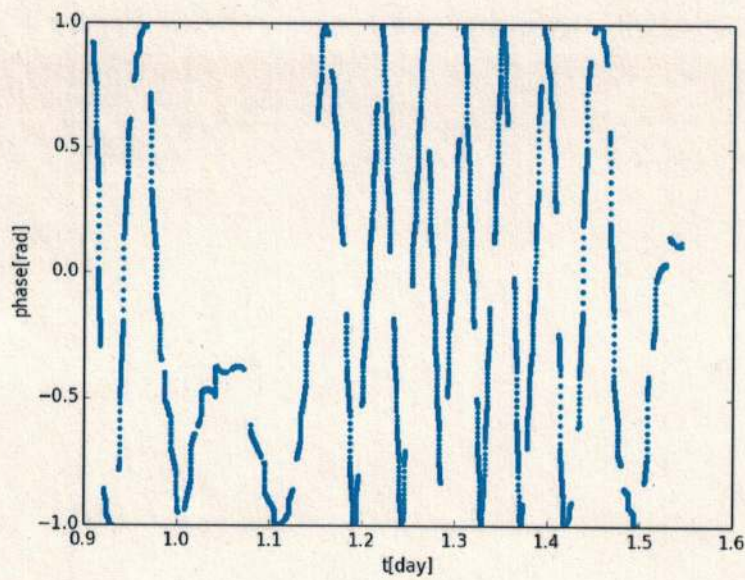


図 14 S Per の視線速度 -45.6 km s^{-1} におけるビジビリティ位相。横軸は観測日 0:00 UT からの経過時間 (時間)、縦軸は位相 (ラジアン) である。

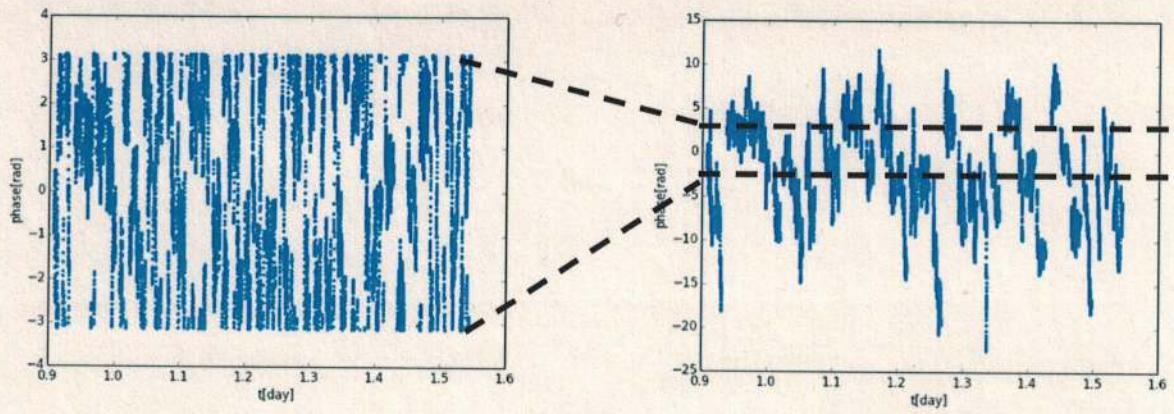


図 15 S Per の 43 GHz SiO ($v=1, J=1-0$) の補正解。横軸と縦軸は図 14 に同じ。左が位相差をそのまま、右には位相の 2π の不確定性を考慮し、位相の時間変化を連続的に示した結果である。

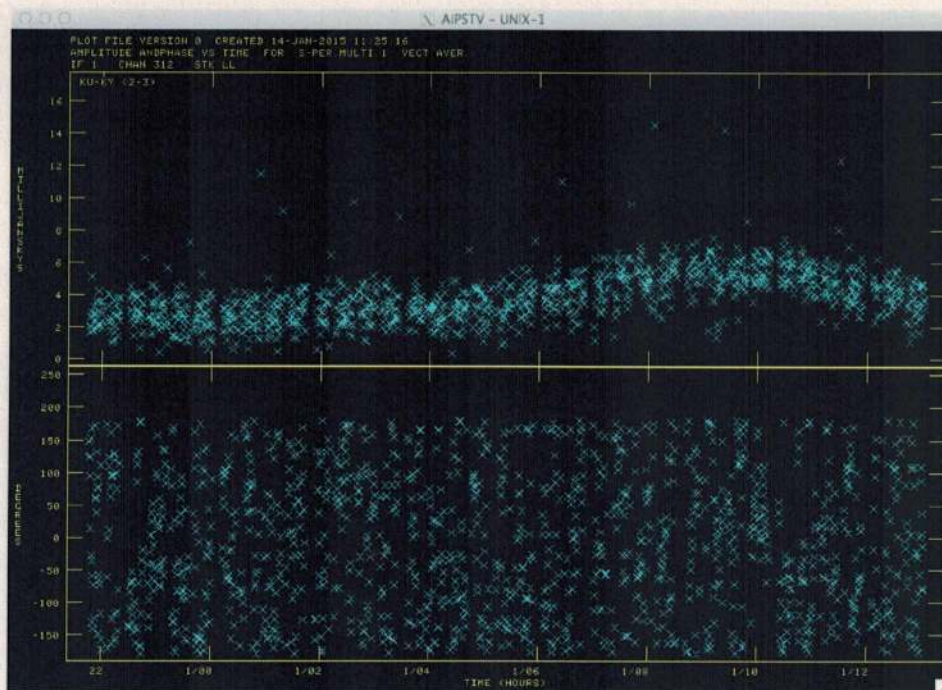


図 16 S Per の 43 GHz SiO ($v=2, j=1-0$)メーザーの MFPR 補正前のフリンジ位相 (下段)。横軸は観測日 0:00 UT からの経過時間 (時間)、縦軸は位相 (degree) である。

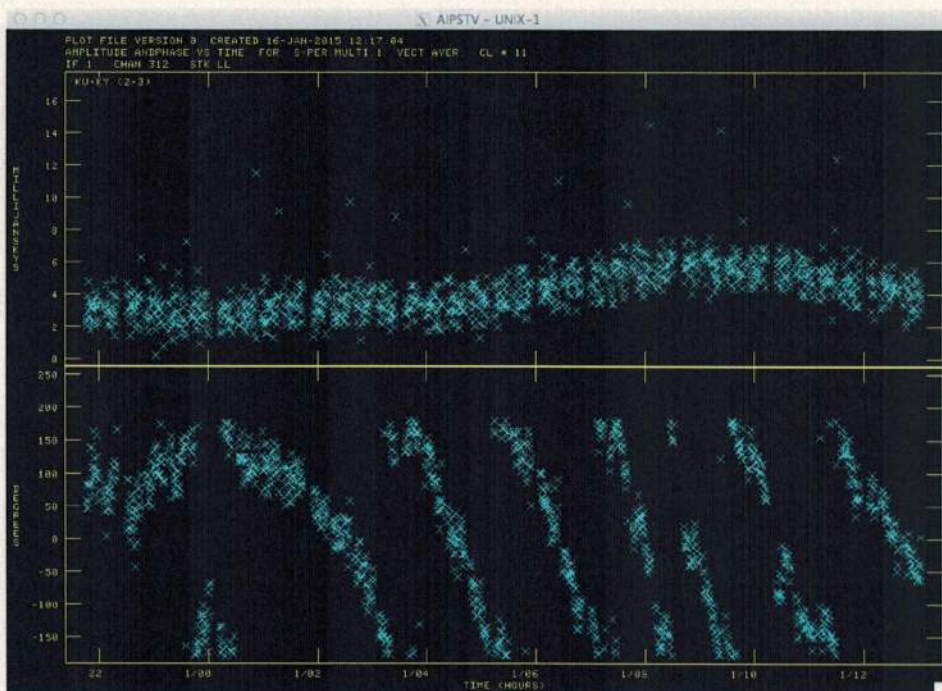


図 17 S Per の 43 GHz SiO ($v=2, j=1-0$)メーザーの MFPR 補正後のフリンジ位相 (下段)。横軸と縦軸は図 16 に同じ。

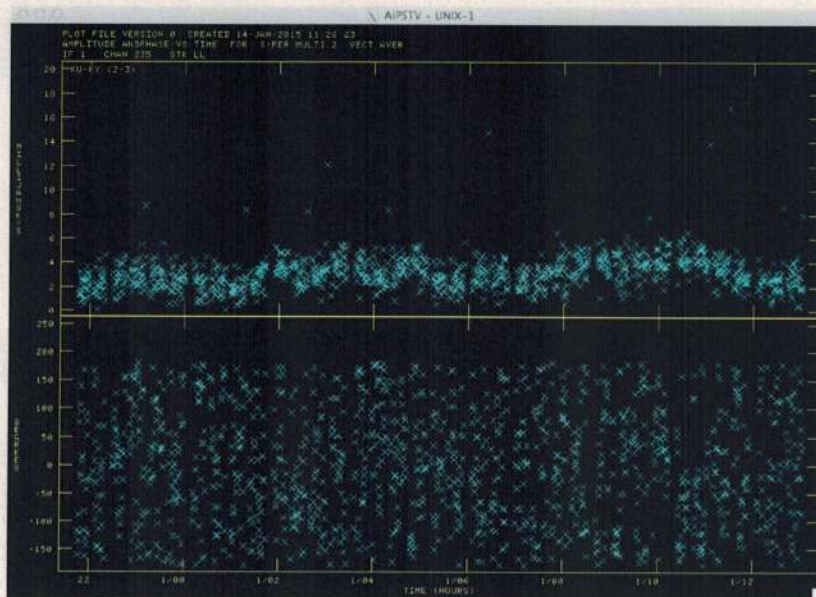


図 18 S Per の 43 GHz SiO ($v=1, j=1-0$)メーザーの MFPR 補正前のフリンジ位相(下段)。横軸と縦軸は図 16 に同じ。

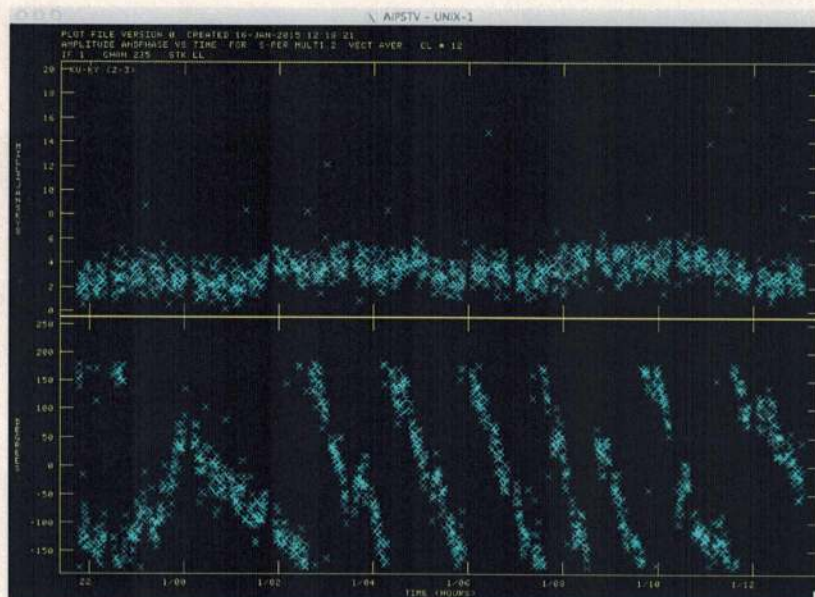


図 19 S Per の 43 GHz SiO ($v=1, j=1-0$)メーザーの MFPR 補正後のフリンジ位相 (下段)。横軸と縦軸は図 16 に同じ。

3.2.4 SFPR

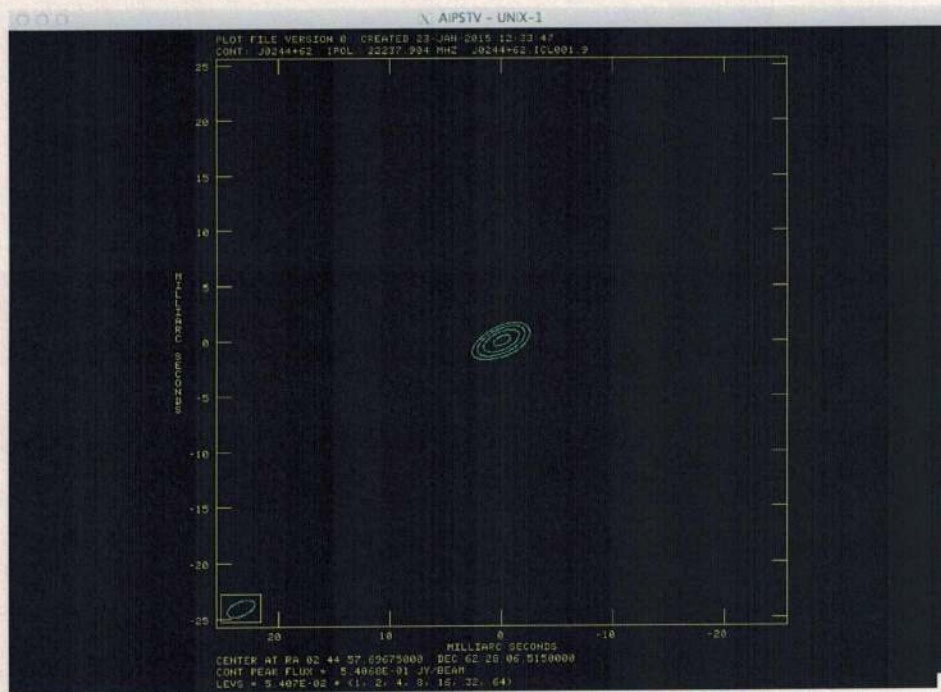


図 20 KaVA で観測した J0244+6228 の 22 GHz H₂O メーザーの空間分布。横軸、縦軸はそれぞれ、J0244+6228 の位置を位相追尾中心とする座標からの赤経、赤緯の差分である。

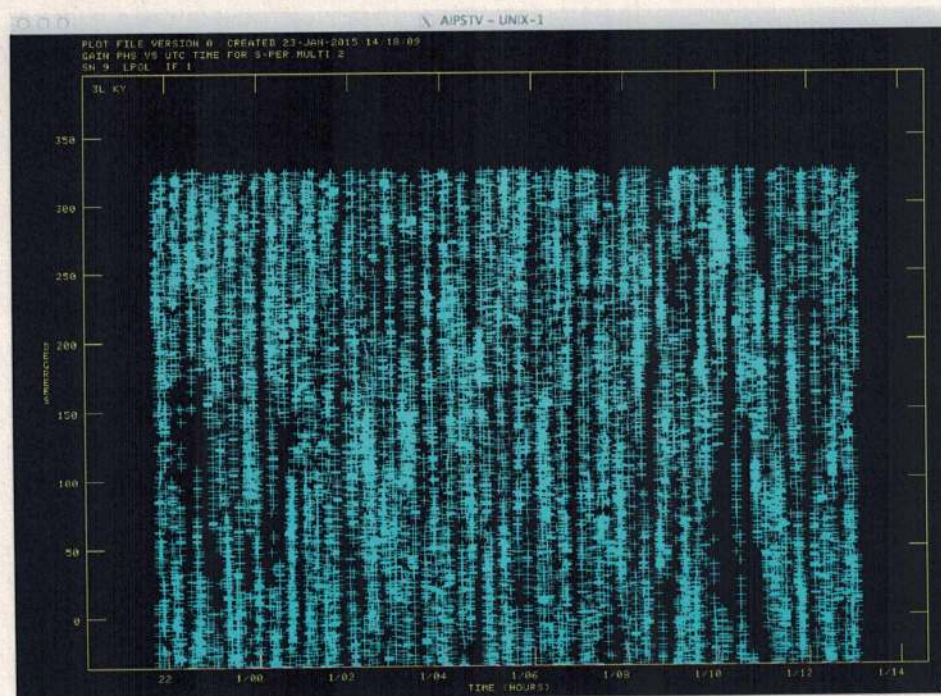


図 21 Python プログラムで生成した SiO メーザー ($v=1, J=1-0$) の補正解。横軸は図 16 に同じ、縦軸は位相 (degree) である。

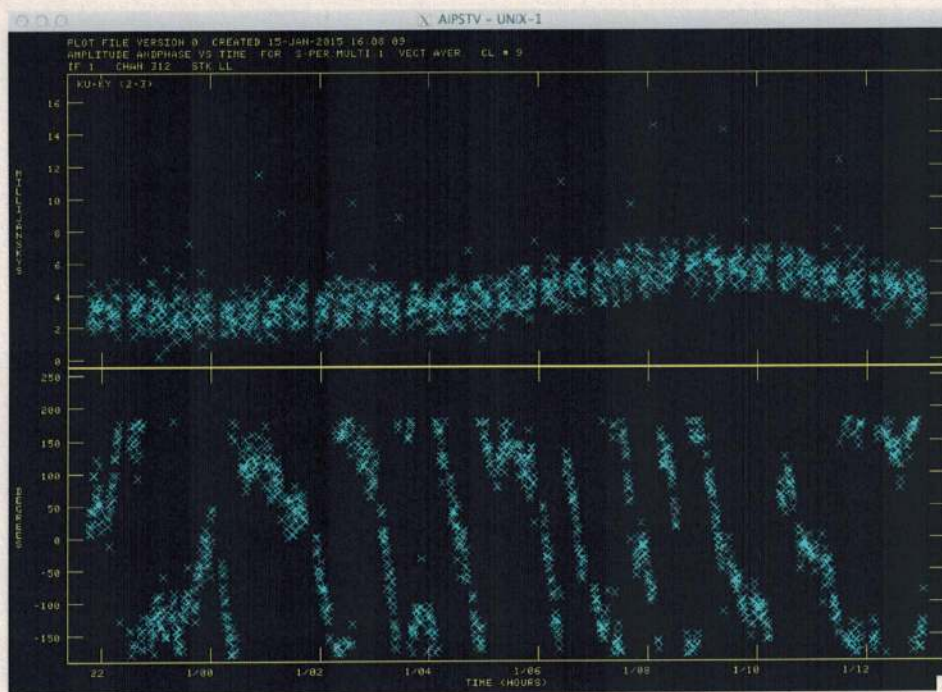


図 22 S Per の 43 GHz SiO ($v=2, j=1-0$)メーザーの SFPR 補正後のフリンジ位相 (下段)。横軸と縦軸は図 16 に同じ。

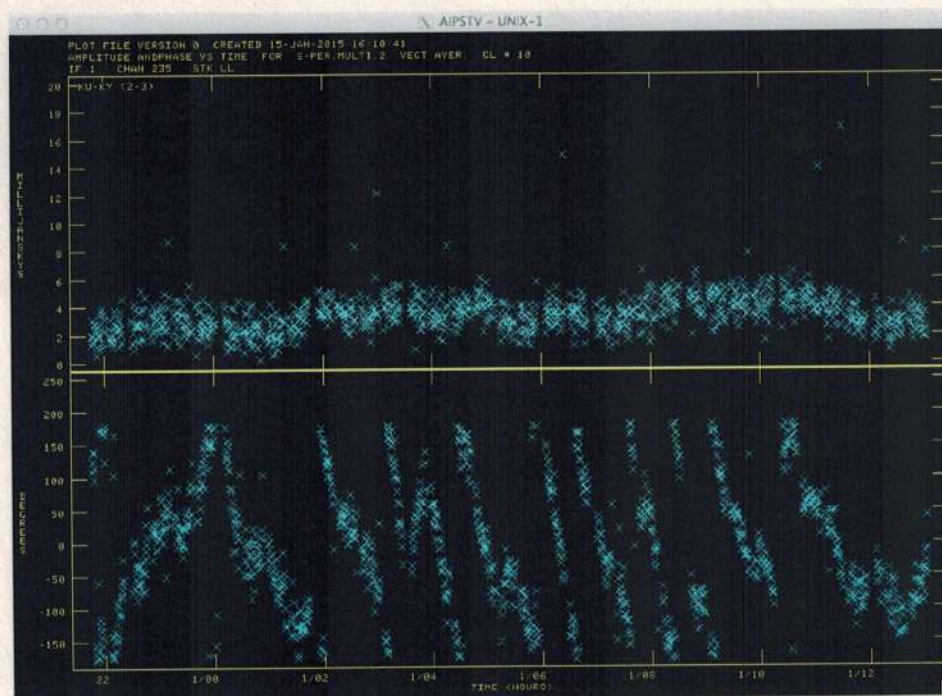


図 23 S Per の 43 GHz SiO ($v=1, j=1-0$)メーザーの SFPR 補正後のフリンジ位相 (下段)。横軸と縦軸は図 16 に同じ。

3.2.5 メーザー位置比較の結果と考察

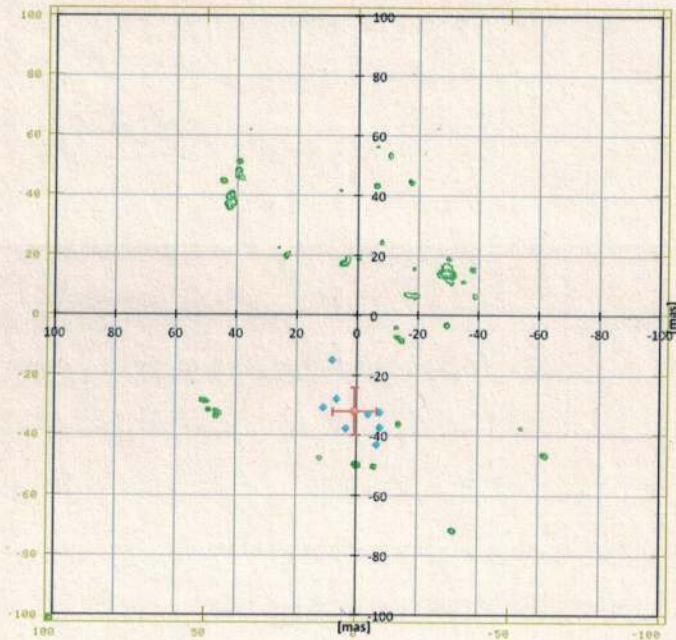


図 24 S Per の 22 GHz H₂O メーザーと 43 GHz SiO ($v=2, J=1-0$) メーザーの位置比較。横軸と縦軸は図 11 に同じ。緑が 22 GHz H₂O メーザーの位置、青が主な 43 GHz SiO メーザーの位置、赤が 43 GHz SiO メーザーの平均位置と誤差である。

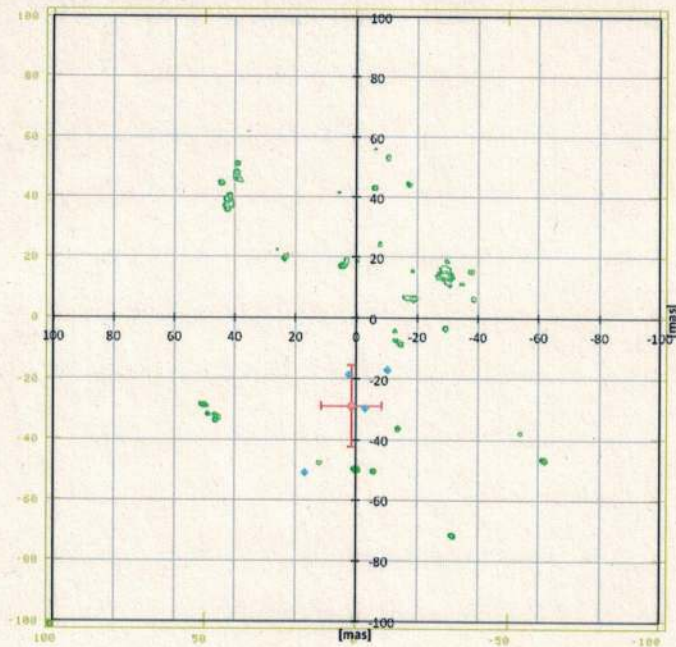


図 25 S Per の 22 GHz H₂O メーザーと 43 GHz SiO ($v=1, J=1-0$) メーザーの位置比較。横軸と縦軸や色使いは図 24 に同じ。

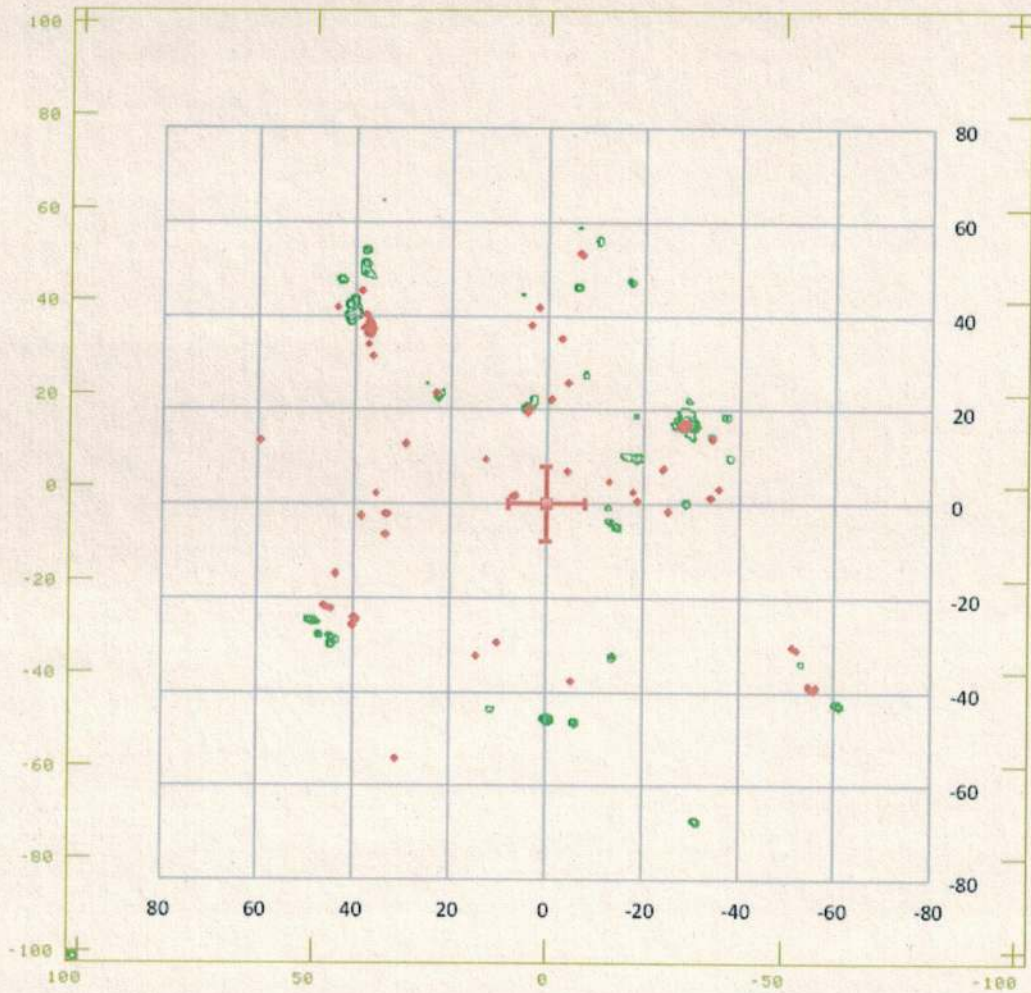


図 26 S Per の 2007 年と 2012 年の 22 GHz H₂O メーザーの空間分布。横軸と縦軸は図 11 に同じ。緑が 2012 年の、赤が 2007 年の H₂O メーザーの分布を表す。誤差つきの赤の点は、2007 年に数学モデルフィッティングから得られた恒星中心位置である。

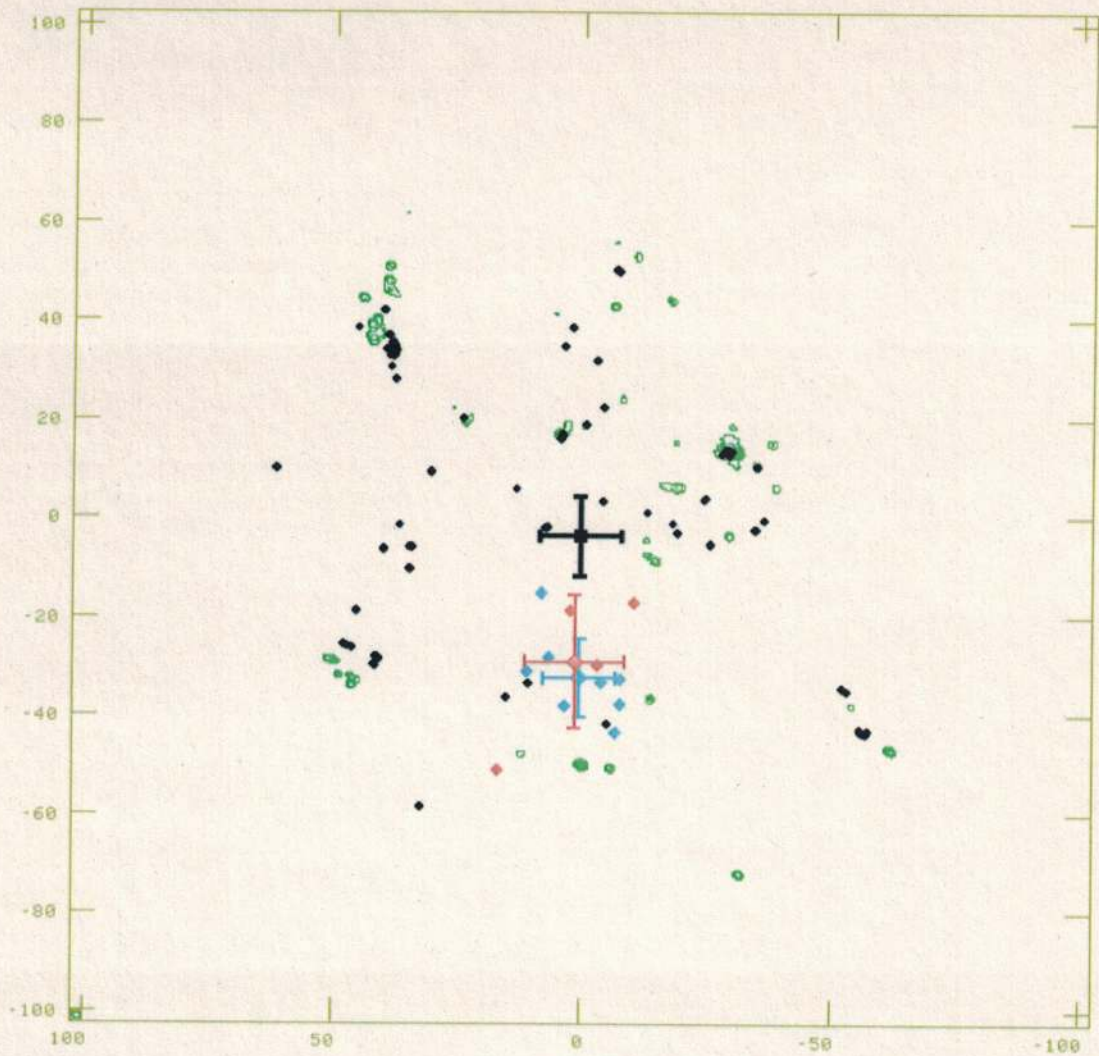


図 27 S Per の 2007 年と 2012 年の H_2O メーザー、および 2012 年の $\text{SiO}(j=1-0, v=2$ と $v=1)$ メーザーの空間分布。横軸と縦軸は図 11 に同じ。黒が 2007 年の H_2O メーザーの分布、緑が 2012 年の H_2O メーザーの分布、青と赤がそれぞれ $\text{SiO}(j=1-0,)$ の $v=2$ と $v=1$ のメーザーの分布を表す。