

デカメータ波帯長距離電波干渉計によるカシオペアA電波源のマッピング —超巨大ブラックホール群探査にかかわるデカメータ電波方位決定法の開発

大 家 寛*・飯 島 雅 英**

Mapping of the Cassiopeia A Radio Sources in the Decameter Radio Wavelength Range by Long-baseline Interferometer

— Development of a new direction finding method related to identification of the
decameter radio wave pulse sources as rotating super massive black holes

Hiroshi Oya and Masahide Iijima

Abstract

A new method for measurements of radio sources in the universe has been developed; the method consists of the correlation analyses between observing interferometer fringes and the reference fringe to search for the source position. By applying the developed method to observations of 100 km range decameter wavelength interferometer of Tohoku University, with a long integration time more than 30 hours, it is verified that the positions of the decameter radio sources are able to be determined with accuracy of arc second. For the purpose of the verification of the method, mapping of the radio sources Cassiopeia A has been achieved for the first time. The present results also verify that the results of our study, on the determination of the decameter radio pulses, in which the source positions are concluded at the exact center of our galaxy with accuracy of arc second are quite acceptable; the result then supports the hypothesis that radio wave pulses are related to rotating super massive black holes.

1. 序

波長10–100mの範囲に入るデカメータ電波源は宇宙の到るところに存在するが、歴史的にまず注目を惹いたのは、1933年のカールジャンスキーの発見(Jansky, 1933)以来、我々の銀河より到来するもので、この発見は電波天文学の発祥でもあった。1950年代に入ってからBurkeら(1955)によって発見された木星デカメータ電波の研究は、その後大きく発展し、木星の宇宙の電磁気とプラズマの諸現象を解明する重要な鍵にまでなってきた。その他には、星雲、特に超新星爆発の残渣として知られるカシオペアA星雲からのデカメータ電波が観測されている(Bovkoon, et al., 1982; Megn et al., 1993)。こうしたデカメータ電波観測の歴史の中で、本研

* 宇宙通信工学科 ** 東北大学大学院理学研究科

究が直接関わるのが、銀河中心で回転するブラックホールからと断定したデカメータ電波パルスである (Oya et al., 1987; Oya et al., 1989)。しかしこのデカメータ電波パルスの存在は、現在、天文学界においては公認されたものとはなっていない。その理由は、従来電波天文学の分野では、地球電離層や銀河系空間のプラズマの影響から電波の伝播方向はたえずゆらぎ、方位決定はたとえば $10'$ 角以下には定められないと想い込まれていたからである。したがって方位を $1''$ 角精度で決定したという当研究の結果 (Oya and Iizima, 1999) に対しても常識を逸脱した結果としかとらえられないのが現在までの実状である。

従って従来発表してきたデカメータ電波パルス群が銀河中心に回転する超巨大ブラックホールからの起源であることの確かさを証明していくため、また、従来確立したと見なされてきた宇宙空間の電波伝播理論に大きな欠陥があることを明かすために、幾つかの基礎的な観測研究が必要な時点に達した。そこで、本研究では、デカメータ波帯電波で $1''$ 角精度で宇宙の電波源位置が決定されることを実証するため、従来全く不可能とされてきた、カシオペア A 電波源を $1''$ 角精度で決定する観測研究を行った。その結果は、天文学の歴史上初めてデカメータ波帯 22.158MHz でカシオペア A 電波源位置が $1''$ 角で正確に決定され、既存の天文学の常識を大きく覆すものとなった。

本論はその方法とその確かさを示す理論的裏づけ、そして結果とその評価を詳述するもので、デカメータ電波パルスを用いるブラックホール研究の正しさを示す方向へ大きく一步を踏み出す意義をもっている。

2. 方法

デカメータ電波源位置決定の研究は、東北大学理学研究科の設置するデカメータ電波 100 km 級長距離干渉計を福井工業大学との共同研究として施設利用の形で進めている。しかし、既成概念を破る意義を持つ研究の常として、既存装置そのままでは本研究は成立するものでなく、装置の制作とデータ解析法に特徴ある方法を創出している。

新しく取った方法の一つは干渉計のデータ処理におけるフリンジ相関法である。

2. 1 フリンジ相関法

此の方法を説明するに当たって、慣性系に原点を置いた座標系を用い、干渉計の各観測点即ち i 及び j 観測点の位置を \mathbf{r}_i 及び \mathbf{r}_j ベクトルで表す。従って、掛け算形干渉計では、フリンジ関数は次のように表される。即ち

$$\Phi(t) = E_i E_j \cos[\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)) + (\phi_i - \phi_j)] \quad (1)$$

であり、ここで、 E_i 及び E_j は i 及び j 観測点で観測される電場成分の振幅であり、 \mathbf{k} は波数ベクトル、そして、 ϕ_i および ϕ_j は各観測点間の時間標準の位相差である。干渉計の固定された

観測周波数において、一定の帯域幅をもって受信される全天からの受信電波は

$$D(t) = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_{\delta(t)} \int_{R(t)} E^2(\theta, \varphi, t) \cos[\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)) + (\phi_i - \phi_j)] \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

と表される。ここで、 $E(\theta, \varphi, t)$ は電場強度を天空の方位の関数として表現したもので、 θ 及び φ は任意の時点 t での赤経及び赤緯を示す。ここで座標系を図1の様に取るとき、 \mathbf{k} ベクトルは

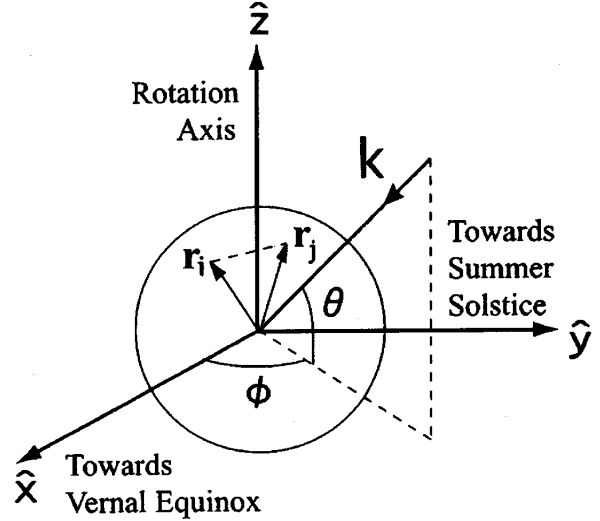
$$\mathbf{k} = k(\cos \theta \cos \varphi \hat{x} + \cos \theta \sin \varphi \hat{y} + \sin \theta \hat{z}) \quad (3)$$

で表される。それぞれの記号は図1に示す。

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ は単位ベクトルである。

ここで、このフリンジ相関法では、相関評価関数を以下のように定義する。即ち、

$$I(\theta_s, \varphi_s, t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T D(t) \cdot \cos[\mathbf{k}_s(t) \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) - \phi_s] dt \quad (4)$$



第1図 観測点と電波源を取扱う座標系

である。したがって、(2)式を用い、積分時間 T を永くとれば、

$$\cos[(\mathbf{k}_s(t) + \mathbf{k}(t)) \cdot (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)) + (\phi_i - \phi_j) - \phi_s] \quad (5)$$

の成分は消失し、相関評価関数 $I(\theta_s, \varphi_s, t_0)$ は、

$$I(\theta_s, \varphi_s, t_0) = \frac{1}{2T} \int_{t_0}^T \int_{\delta(t)} \int_{R(t)} E^2(\theta, \varphi, t) \cdot \cos[(\mathbf{k}_s(t) - \mathbf{k}(t)) \cdot (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)) - (\phi_i - \phi_j) - \phi_s] \sin \theta dt d\theta d\varphi \quad (6)$$

となる。即ち選択方位 $\hat{\mathbf{k}}_s$ に対し、 $\mathbf{k}_s(t) - \mathbf{k}(t) = 0$ の条件をもつ方向の電波に対する相関評価関数は、

$$D_s = AE^2(\theta_s, \varphi_s) \cos(\phi_i - \phi_j + \phi_s) \quad (7)$$

となる。この相関評価関数には大切な二つの情報が含まれている。即ち $\mathbf{k} = \mathbf{k}_s$ の方向にある電波源に対する受信信号の電力とそのときの i 及び j 局間の周波数標準の位相差を参照位相との差として示す $\cos(\phi_i - \phi_j + \phi_s)$ 値を含んでいることである。従って、この相関評価関数を使うことにより、各局間の位相差を校正出来るとともに、 \mathbf{k} の方向を掃引する事により、広がりのある電波源のマッピングをすることが可能になる。

3. 観測システム

3. 1 100 km級干渉計の受信機と テレメータ・システム

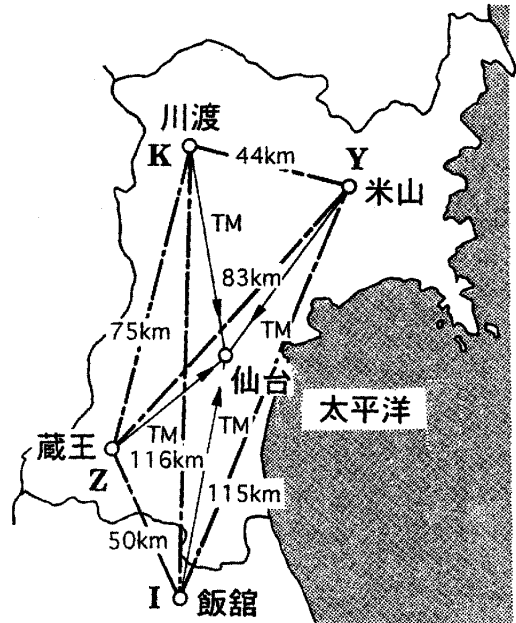
本研究で使用する東北大学100 km級干渉計は第2図に示すような4点のメンバー局より構成され各局からの受信信号はHF帯テレメータによって直接仙台（東北大学大学院理学研究科）に設定された干渉計処理部に伝送される。

3. 1. 1 受信機システム

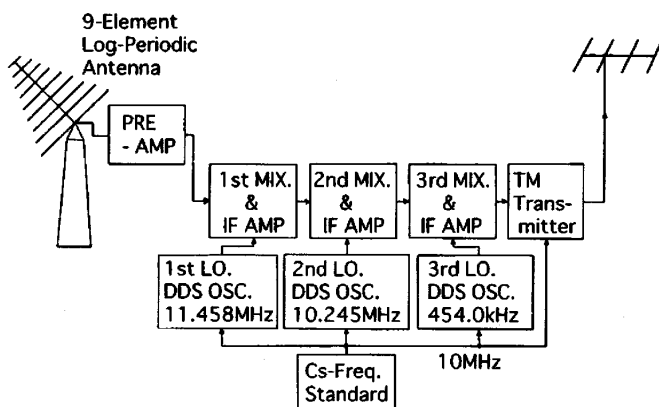
第3図に各局に設置されている周波数20 MHzから30 MHzに対する受信機のブロック図を示す。各局では広帯域八木アンテナに対し低雑音素子を持った前置増幅器をもってフロント・エンドを構成していて、主受信部は3段スーパーヘテロダイン方式を採用している。最終信号は中心周波数1 kHzで帯域幅500 Hzとなっている。スーパー・ヘテロダインの周波数変換にはその長期安定度 $\leq 1 \times 10^{-13}$ のCs周波数標準を設置し局部発信器としている。

3. 1. 2 テレメータ・システム

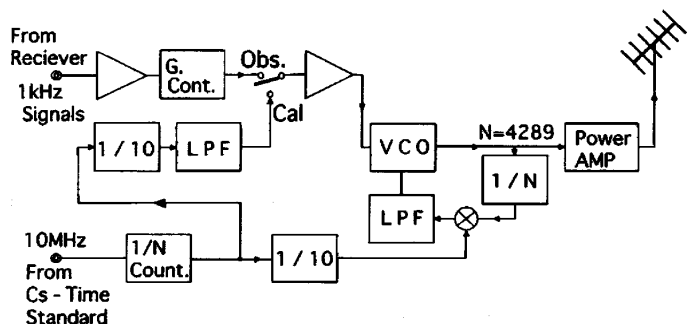
第4図に各局に配備されているテレメータ・システムのブロック図を示す。1 kHzの中心周波を持つ受信信号はVCO（Voltage Control Oscillator）に入って周波数変調回路に供給される。ここでは中心周波数がそれぞれの局に割り当てられたテレメータ周波数に設定するようPLL（Phase Lock Loop）によって周波数変調と同時にテレメータ信号を発信する。この部分の重要な点はPLLの基準信号が受信機の局部発信信号を構成する場合の基準になったCs



第2図 100 km級ベースライン
デカメータ電波干渉計（東北大学）



第3図 干渉計システム各局受信機の
ブロック図



第4図 干渉計システム各局に配置される
テレメータ送信システム・ブロック図

周波数標準とまったく共通のC s 周波数標準を用いていることである。したがって、中心局で、各局から伝送されて来る信号の位相差を検出するとき、位相計測の安定性は各局に配置されたC s 周波数標準の位相安定度に依存し、高い安定度が保証されることになる。

3. 2 位相検出とデータ取得

FM されて仙台の中央局に送られてくる信号はこの中央局で復調され各観測局に設置された受信機出力即ち、その中心周波数1 kHz 帯域幅500 Hz の信号として、復調される。それぞれの信号は、極めて狭い帯域で信号処理を行う目的（別論文で後に議論）のため、各帯域幅50 Hz の8チャンネルをもつアクティブ・フィルターバンクを経てアナログデータ処理部に入る。ここで、Yoneyama(Y), Kawatabi(K), Zao(Z)および Iitate(I)の各局からの信号がアナログ掛け算器を通じ位相検出用データとして取り出される。ここでは、アナログ掛け算器への入力組み合わせは1) K-Z 局間、2) Y-Z 局間、3) I-Z 局間、4) I-K 局間の4組み合わせとし、それぞれの出力はA/D変換を通じ12ビットのデジタル信号として、2Gバイトのハードディスクに蓄積されている。A/D変換からハードディスク取り込みまでPCによるコンピューター制御で行われこの場合のデータ・サンプル率は毎秒10点になっている。

4. 観測とデータ解析

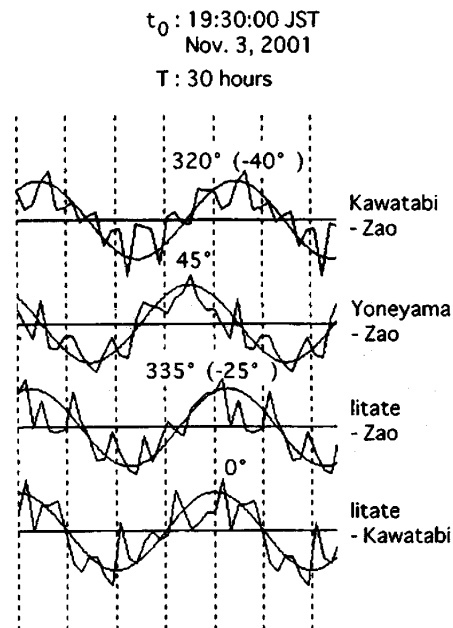
4. 1 各局間周波数標準の位相差の較正

本研究では、カシオペアA電波源を対象とした観測を2001年9月18日より

22.158 MHz で開始し、本格的なデータ取得は2001年10月6日より始まった。

第5図に中心周波数1000 Hz のチャンネルより選択された D_s ((7)式参照) の値をK-Z, Y-Z, I-Z, 及び I-K の各局組み合わせに対し示す。この結果はフリンジ相関を求めるための相関評価関数の位相 ϕ_s を掃引し ϕ_s の関数として、受信パワーを相対値で示したものである。

この場合選定された方位は赤経23 h 21 m 24 s 赤緯58° 32' 24" でカシオペアA星雲の中心である。これらの結果は(6)式において積分時間 $T=30$ 時間を取ったもので、それぞれの結果に対して、最小自乗法でフィッティング曲線を与えている。これらのフィッティング関数は明らかに正弦関数で、相互の位相ずれは各局のもつC s 周波数標準の位相差を示している。即ちこの結果はとりもなおさず干渉計の各メンバー局に設定されているC s 周波数標準が発信している正弦波信号の位相差の較正值そのものを示している。もし、Iitate-Kawatabi 間の位相差を基準に取る場合 Kawatabi-Zao, Yoneyama-Zao,そして Iitate-Zao 間の位相差はそれぞれ、



第5図 30時間積分の場合の D_s の値

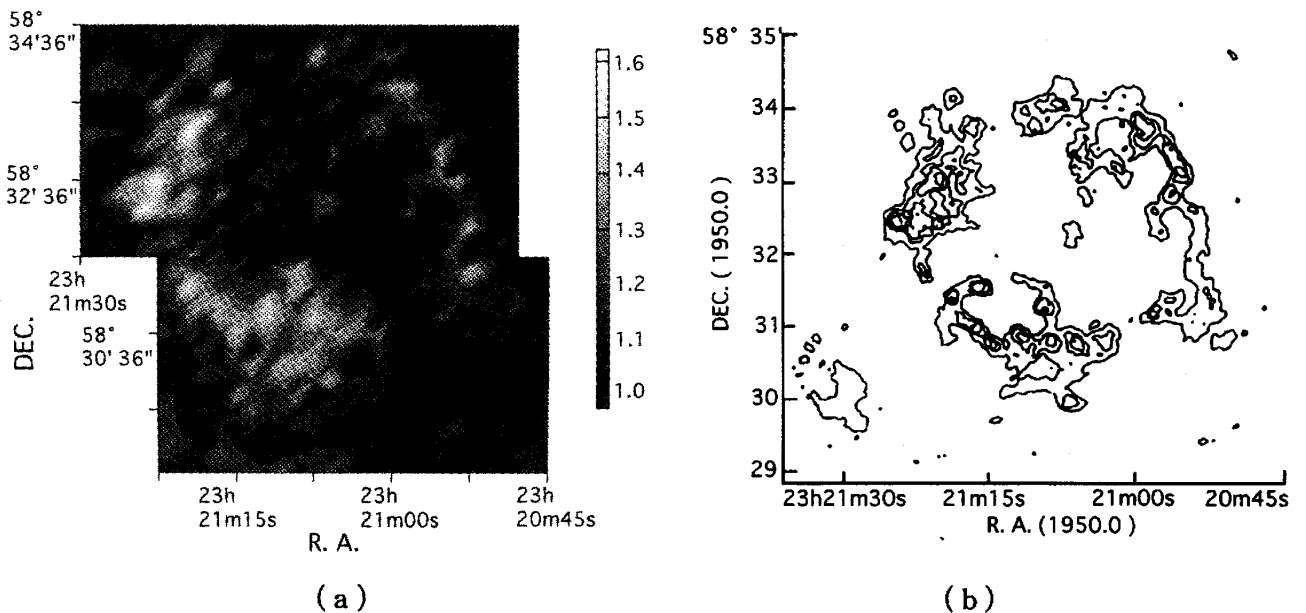
−40°、45°及び−25°ずれている事を示す。このずれを補正し絶対位相差が確定することになる。

こうして、本論で提唱するフリンジ相関法を用いれば大きな広がりのある電波源を用いても干渉計の位相差が較正出来ることが実証された。

4. 2 カシオペアA電波源のマッピング

本論で実証されたように、フリンジ相関法による干渉計周波数標準の局間位相差の較正が実現することが、本研究の第一の目的であるが、 $k = k_s$ の方位を掃引しつつフリンジ・相関評価関数の振幅値を利用するとき、広がりのある電波源の強度分布すなわち電波源マッピングが可能となる。そこで、すでに、第2節において述べた方法に従い方位選択関数を赤経23時20分45秒から23時21分30秒の間、また、赤緯58°29'36"から58°34'36"までをまず12"間隔のメッシュで掃引し相関評価関数を求めた。即ち12"メッシュでカシオペアA電波源の強度分布が求められることになった。この場合その分解能は6"角となる。

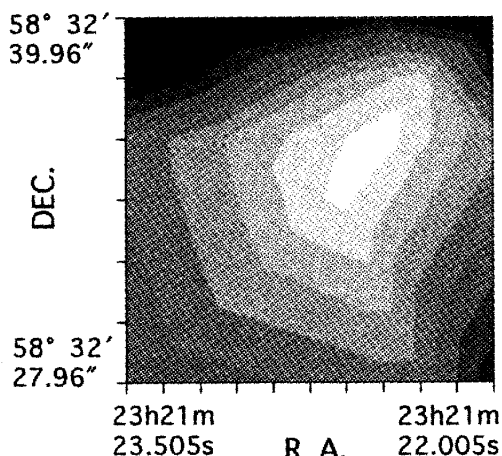
第6図(a)には本研究の結果得られた22.158MHzでみた6"角精度のカシオペアA電波源の強度分布を示す。一方、第6図(b)には、石黒等(理科年表1992参照)によって22.2GHzで観測されたカシオペアA電波源のマッピングを示す。両者の驚異的な一致はフリンジ相関法の正しさを実証するとともに検討の項で述べるようにデカメータ電波天文学の革命的と言っても過言でない事象を示している。



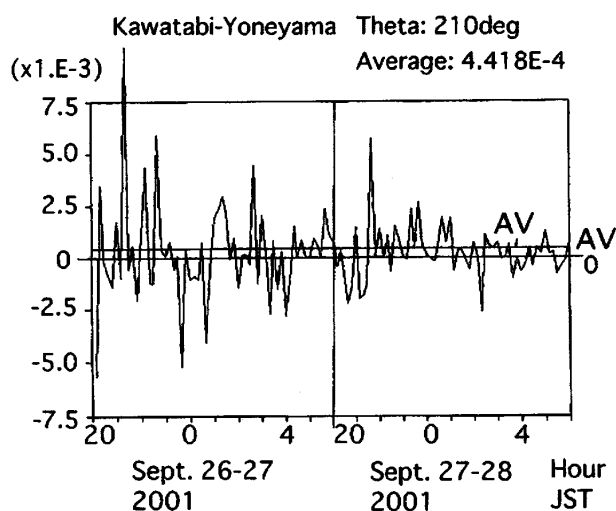
第6図 (a)本研究の結果得られた22.158MHzで観測されるカシオペアA電波源のマッピング

(b)石黒らによって得られた22.2GHzで観測されたカシオペアA電波源

デカメータ波帯で電波源位置を決定する場合数分角以下の角度分解能はないと思い込んでいるのが、現在までの電波天文学の常識であった。しかし、長時間積分の結果得られる平均像は1"角精度でデカメータ電波源の位置決定を可能にすることが、やはりこの研究で実証された。第7図には第6図(a)に示されたカシオペアA電波源の赤緯 $58^{\circ}32'27.96''$ から $58^{\circ}32'39.96''$ 赤経23時21分22.005秒から23時21分23.505秒までの範囲を1"角精度でマッピングした結果を示す。



第7図 22.158MHzのデカメータ波帯で1秒角の分解能で求めたカシオペアA電波源の一部



第8図 10分間ランニング平均(積分)の場合の相関評価関数の場合の相関評価関数
AVレベルは30時間平均(積分)の値

5. 検討

5.1 長時間平均効果

すでに述べてきたように、デカメータ波帯電波に対する方位決定の限界の概念が本研究によって革命的に変えられことになった背景には、長時間積分の概念をいかに受け入れるかと言う根本問題がある。第4節で示された、30時間に渉る時間積分の結果をうる途中段階のデータの一例を第8図に示す。ここには、10分間のランニング平均を示すが図中に示す30時間の平均値AVに対し最大100倍にも迫る揺らぎを示している。即ち方位に換算するならば、10分間平均で方位を決定する場合、数分角でしか決定出来ないことを示している。この揺らぎの最大の原因は電離層電子密度分布の時間的揺らぎによるもので、その点従来の電波天文学者達が大方経験した事柄である。ここに、本研究で開発した長時間積分を取り入れる方法論が今までの方法では不可能であった領域を開拓したと言える。

5.2 銀河デカメーター電波源位置

すでに発表しているように (Oya and Iizima 1999) 銀河系中心部に存在すると結論したデカメーター波帯電波パルス群は30時間から100時間に達する長時間積分のもとでフリンジ相関評価関数を求めることによって得られた結果である。その結果の正しさが本研究によって確認されることになった。この確認の意義は、これらのパルス群の源が銀河中心及び1"角離れた位置さ

らに4"角はなれた位置に配置されていて、パルス群はそれぞれ、対応する超巨大ブラックホールから放射されていることを示すことを結論した基本点を実証するもので、重要である。

6. 結論

20 MHz から30 MHz 帯の宇宙デカメーター電波源を100 km級長距離干渉計で決定するための重要な基礎事項として、干渉計の各局に置かれた周波数標準の相互位相差の較正法を開発し、カシオペアA電波源を対象にし実際観測を通じてその有効性を実証した。カシオペアA電波源は6分角程度の大きな広がりのある星雲からの電波であるが、本研究で実現したフリンジ相関法により、広がりに関わらず較正電波源として用い得ることが実証された。

実験の結果は周波数標準機器の位相差を12°まで確定できることが示され、これは天空における電波源の位置を1秒角精度で確定できることを示している。この性能を利用して、本研究ではカシオペアA電波源を観測し、6"角精度の広域マッピングと1"角精度の詳細マッピングを得ることに成功した。

デカメーター波帯の電波観測では、電離層電子密度や銀河系や惑星間空間の電子密度揺らぎのため、従来数分角以下の精度で方位決定をするのは不可能とされてきた。しかし、本研究では、新たに開発されたフリンジ相関法をもって対象を30時間以上の長時間に渉って積分観測することにより、これらの揺らぎの影響を完全に取り去ることが出来ることを示した。この成果はすでに発表しているデカメーター波電波パルス群の電波源位置が銀河中心部にあることが正しいものであり、ひいてはそのパルス電波群が銀河中心部にある超巨大ブラックホール群から放射されているとする仮説を強く支持するものとなる。

参考文献

- Bovkoon, V.P., S.Ya. Braude, and A.V. Megn, Observations of Cassiopeia A at 20 and 25MHz with the Uran-1 Interferometer, *Astrophys. and Space Sci.*, 81, 221, 1982.
- Burke, B.F., and K.L. Franklin, Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter, *J. Geophys. Res.*, 60, 213-217, 1955.
- Jansky, K.G., Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin, *Proc. IRE.* 21, 1387-1398, 1933.
- Megn, A.V., S.Ya. Braude, S.L., Rashkovsky V.A. Shepelev, N.K. Sharykin, V.V. Galanin, O.A. Litvinenko, G.A. Inyutin, A.D. Khristenko, and G.S. Podgorny, An investigation of the Cassiopeia A radio-image in the decameter range, *Astrophys. and Space Sci.*, 201, 79, 1993.
- Oya, H., M. Iizima, and A. Morioka, Discovery of a pulsating component in a decametric frequency range suggesting a rotating super black hole at the Galactic center as a source, *Tohoku Geophys. J.*, 30, 15-49, 1987.
- Oya, H., M. Iizima, and A. Morioka, Possible detection of a pulsar of decameter radio waves in the direction of the Galactic center, *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 331-369, 1989.
- Oya, H. and M. Iizima, Clusters of super massive black holes in the central region of our Galaxy observed by decameter radio wave pulses: Discovery of 24 super massive black holes and their motions, *Tohoku Geophys. J.*, 35, 2, 1-78, 1999.

(平成14年12月3日受理)