

## 電波シーイングの測定とその対策

石黒正人(国立天文台・野辺山)

### 1. はじめに

地球大気中を電波が伝搬する時に発生する位相ゆらぎは電波望遠鏡、特に電波干渉計による天体観測の精度を大きく低下させる。この大気による位相ゆらぎは「電波シーイング」と呼ばれ、電波の透過率とともに観測サイトを評価する上で重要な要素となる。電波シーイングの要因としては、メートル波からセンチメートル波にかけては電離層の電子密度ゆらぎが、短センチメートル波からミリ波・サブミリ波にかけては対流圏の水蒸気密度のゆらぎが支配的となる。ここでは、おもに後者の電波シーイングの測定とその対策について述べる。

### 2. 電波シーイングの測定

これまで電波シーイングの測定はVLA(5GHz/15GHz)、ハットクリークミリ波干渉計(86GHz)、野辺山ミリ波アレイ(22/43/86GHz)、IRAMミリ波干渉計(86GHz)など既存の電波干渉計を使用して行われてきた([1]、[2]、[3]、[4])。電波干渉計でクエーサーやメーザー源などの点電波源を観測することにより、大気、アンテナ、受信機など電波の通路すべてについての位相差が求められる。装置による位相差の変動はゆるやかなのでアラン分散をとるなどのデータ処理によって大気による位相変動、すなわち電波シーイングが評価できる。中性大気による位相変動は非分散性であるのでいろいろな周波数での測定をすべて光路差の変動に変換することができる。

位相変動の周波数特性を調べるために野辺山ミリ波干渉計を使い、43GHzと87GHzの二つの受信周波数を20分ごとに交互に切り換えて観測を行なった([5])。図1は基線長287mでの位相変動データの

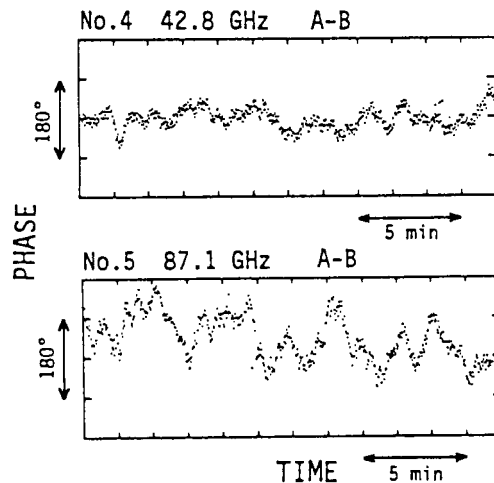


図1. 基線長287mで観測された位相変動の一例

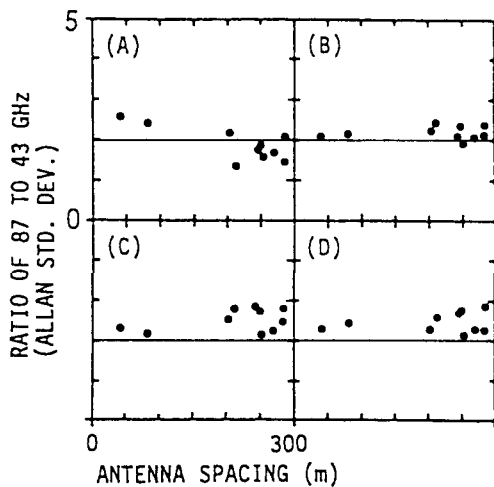


図2. 43GHzに対する87GHzの位相変動の比

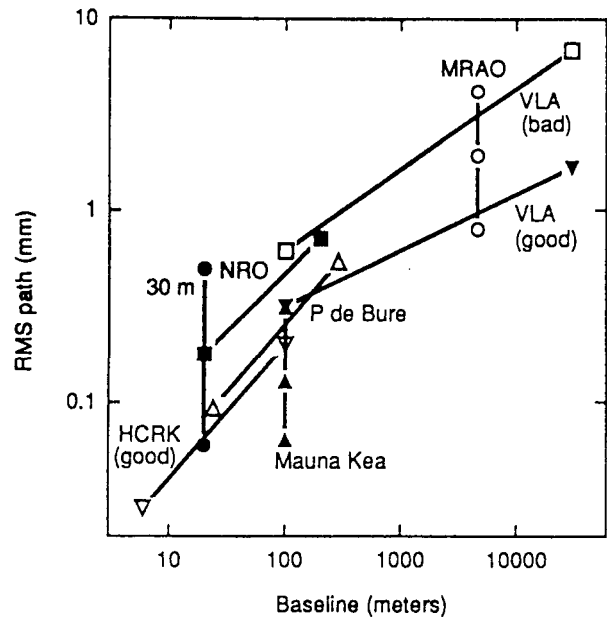


図3. 世界各地で観測された光路長のゆらぎ

一例である。図2は43GHzに対する87GHzのアラン分散の比を基線長に対してプロットしたものである。測定時のアンテナ配列は2次元であったが、図2は基線の方向を区別しないで40mから287mまでの10組の基線長に対してプロットしてある。図中の(A)、(B)、(C)、(D)はそれぞれアラン分散を計算する時のタイムスケールが4、20、80、160秒に対応している。どのタイムスケール、どの基線長でも二つの周波数でのアラン分散の比はほぼ周波数比の2.04(=87.1/42.8)に近く、位相変動の非分散性を示している。データのばらつきは、本来同時に行うべき観測を装置の制限のために切り換えで行ったためではないかと思われる。

既存の干渉計で観測された位相ゆらぎを非分散性を仮定して光路長のゆらぎに変換しプロットしたのが図3である(Masson, C.R., 1992, private communication)。図はサイト、観測時の季節や天頂距離の違いにもかかわらず、ある一定の傾向を示している。光路長ゆらぎはほぼ(基線長)<sup>2</sup>に比例しており、基線長が数100m以下では $Q=0.7$ 、それ以上では $Q=0.4$ ぐらいである。乱流理論によれば、対流圏の厚み(約1km)以下では乱流は3次元的で光路長ゆらぎは基線長の5/6乗に比例し、それ以上で1000km程度以下では乱流が2次元的で光路長ゆらぎは基線長の1/3乗に比例し、それより先では光路長ゆらぎはほぼ一定となることが示されており、実際の観測結果もこれに近い。

このように既設の干渉計で電波シーイングの測定を行うことは可能であるが、季節、時間などが不揃いであり、相互に比較するにはサンプルが不十分である。そこで野辺山では静止衛星電波を利用して電波シーイングを連続的にモニターする専用の装置を開発した([6])。この装置は図4のような小型の干渉計システムであり、通信衛星からの19.45GHzのビーコン電波を1.8mのオフセット・パラボアラで受信し、278MHzに変換後ベクトル電圧計などで位相を測定するものである。静止衛星電波(方位角184度、仰角48度)を利用するのでアンテナの駆動は必要なく(0.03度/日以下)、また信号も強いので装置は極めてシンプルである。高いS/N(信号対雑音)比のため0.1度オーダー(4マイクロン

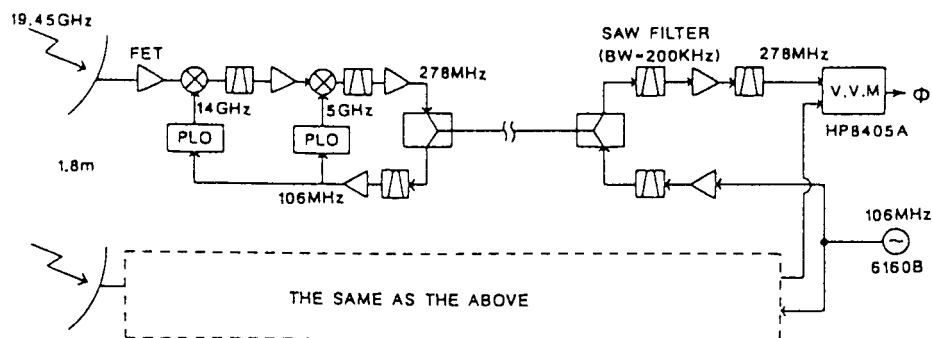


図4. 野辺山の電波シーイングモニター

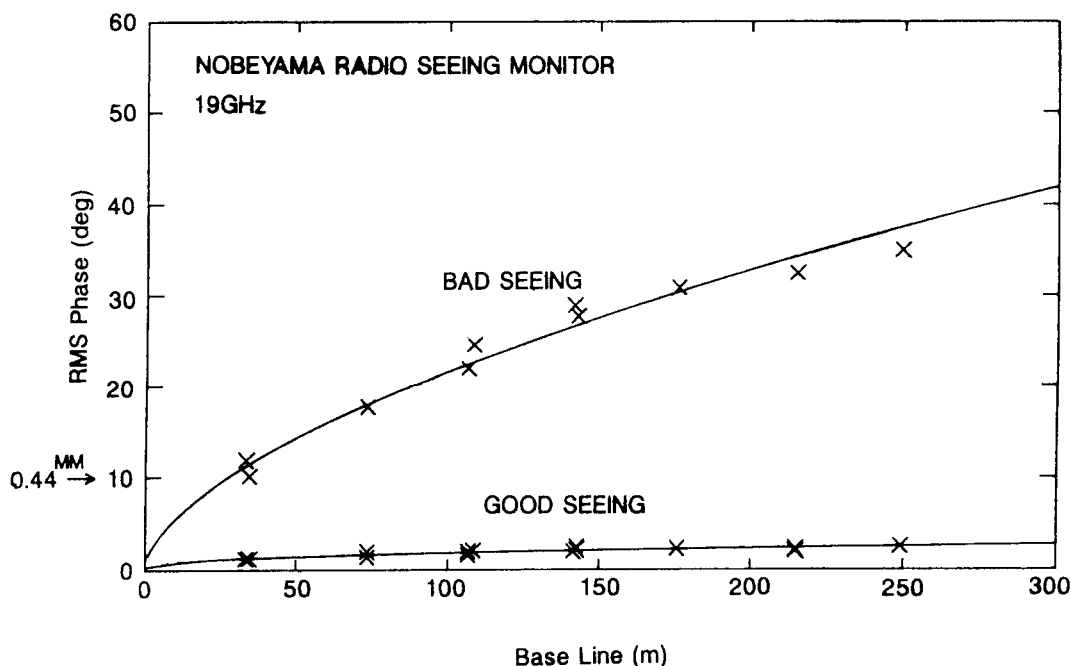


図5. 位相ゆらぎの基線長依存性

の光路長に相当)の位相測定が可能であり、19GHzでの測定にもかかわらずミリ波・サブミリ波でのシーイングが十分評価できる。

野辺山に設置されたシーイングモニターは実際には1.8mアンテナを5台使い、10組の干渉計から33mから250mの間の10の基線長に対する位相ゆらぎの変化を同時に測定できるものである。初段の低雑音増幅器の雑音温度は約300K、位相データのサンプリング間隔は2秒である。このシーイングモニターを使用し、1990年3月より連続観測を開始した。図5は位相ゆらぎの基線長依存性の例で、シーイングの良い時と悪い時の例を示してある。位相ゆらぎは基線長のべき乗でよくフィットされる ( $[RMS\ Phase] = A \cdot [Baseline]^a$ )。図6はある一日(1990年4月9日)の夜間と昼間のAとQのヒストグラムを示したものである。Aのヒストグラムには昼・夜の変化があるにもかかわらず、Qのヒストグラムはほとんど変化がみられない。この特長は野辺山データではかなり普遍的である。

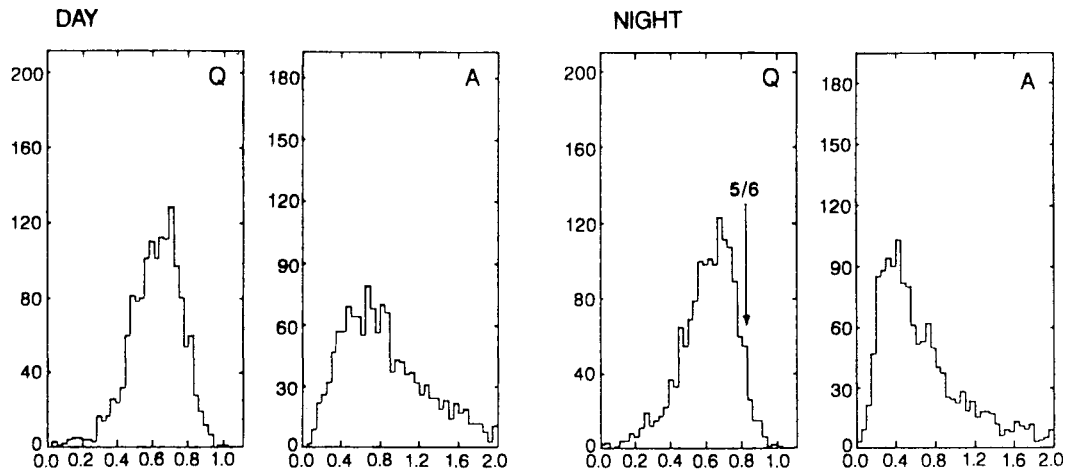


図6. 位相ゆらぎのパラメータ ( $[RMS\ Phase] = A \cdot [Baseline]^Q$ )

Qの最頻値は0.7ぐらいでコルモゴロフ乱流の5/6よりやや小さい。夏になるとAは大きくなり、またQの最頻値は小さい方(0.55ぐらい)へシフトする。

野辺山と同様な電波シーイングモニターがスミソニアン天文台のグループによってマウナケア山頂に設置され、1990年9月より今後建設されるサブミリ波アレイのために連続モニターが行われている([7])。静止衛星の電波の周波数は12GHz、アンテナは1.8m<sup>2</sup>素子、基線長は100mである。図7は野辺山のデータ(1990年11月21日-1991年1月28日)とマウナケアのデータ(1990年11月28日-1991年1月31日)を比較したものである。比較にあたっては、基線長依存性をべき乗モデルとして基線長を100mに、また仰角依存性についてはair massに比例すると仮定して([6])観測仰角を48度に換算した。図7から、野辺山に比べマウナケアの日変化が大きく、昼間はマウナケアの方が悪い日もかなりあることがわかる。マウナケアの日変化は逆転層の上下に伴うものである。光路長ゆらぎの累積度数分布から評価すると、野辺山では約0.3mm以下が、マウナケアでは約0.1mm以下が50%で、マウナケアの電波シーイングは野辺山に比べて3倍ほど良いことがわかった。マウナケアでのシーイング条件から可能な角度分解能の推定を行った結果が図8である。マウナケアでは1秒角以下の分解能

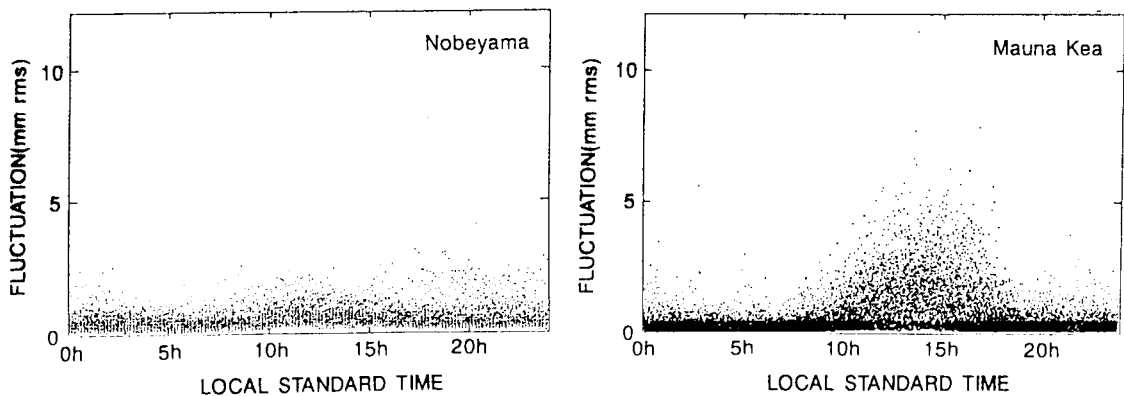


図7. 野辺山とマウナケアでの光路長ゆらぎの比較

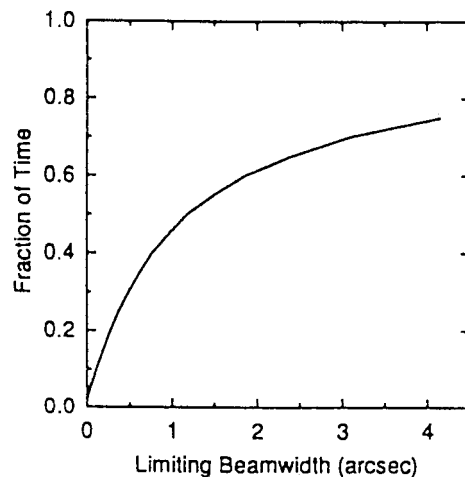


図8. マウナケアでのシーイングから推定される角度分解能

が50%期待できることを示しているが、一方0.2秒角以下の角度分解能となると10%程度しか期待できないことを示している。

野辺山では、将来の大型ミリ波・サブミリ波アレイ(LMA)のサイト調査のために可搬型の220GHzラジオメータと小型の電波シーイングモニターを開発中である。このシーイングモニターは口径60cmの平面アンテナ2素子でインテルサット衛星からの信号(12GHz)を受信するもので、現在チリのラシヤ天文台でテスト運用中である。感度、周波数追従性能などの改良を施した後220GHzラジオメータとともにチリ北部の砂漠地帯に移設し、本格的な調査を行う予定である。

### 3. 干渉計観測における対策

干渉計観測では、観測天体と基準天体を10-20分間隔で交互に観測し、相関値の振幅と位相の較正を行うのが標準的な方法である。しかし、ミリ波・サブミリ波では強い基準天体(通常は位置の良く分かったクエーサーなどの点電波源)の数がかなり少なく、また位相の時間変化も早いことが多く、従来方法では観測上の制限が大きい。センチメートル波では観測天体のS/Nも良く、アンテナ素子数が多い場合には観測データそのものから大気+装置の位相・振幅誤差を補正するセルフキャリブレーション法が有効であることも多いが、ミリ波・サブミリ波ではかなり苦しくなる。このため、今後の対策としては以下のような方法が検討されている。

#### (1)同時/高速キャリブレーション

干渉計の各アンテナを複ビームとして観測天体と基準天体を同時観測するか、または副鏡を高速に駆動してほとんど同時に両者を観測する。観測天体と基準天体はかならずしも同一周波数である必要はなく、より低い周波数でのSiOメーザー源なども利用できる可能性がある。もしLMAのようにアンテナの数がかなり多い場合は、アレイを2分割して近似的に複ビームとすることも可能であろう。2台のアンテナが極めて近距離にある場合は理想的であるが、観測できる情報量が犠牲となる。

#### (2)大気放射のゆらぎを利用する方法

この方法はまだ研究が始まったばかりであるが、将来有望な方法の一つである。この方法では干渉計の2台のアンテナで測る大気放射のゆらぎの差と位相ゆらぎの相関を利用するものであり、図9はその成功例のひとつである([8])。これまでの経験では、空の輝度温度1Kの変化が200度の位相変化に対応しているので、10度の精度で位相を校正しようと思うと0.05Kの精度で大気放射を測定する必要がある。望遠鏡のシステム雑音温度を150Kと仮定すると、 $0.05\text{K}/150\text{K} = 0.033\%$ の安定度が要求される。500MHzの帯域幅で10秒の積分時間をかけるとシステムのゆらぎは0.002%となるので雑音はほとんど問題とならない。問題となるのは検出器のゲインを0.01%以下に安定化することであり、温度制御や積極的にゲインのフィードバック制御を行うなどの方法が考えられる。大気放射のゆらぎの測定を位相を測定しているアンテナと同じにすべきか、あるいは小さなラジオメータをそれぞれのアンテナに装着する方が良いのか、また大気放射から位相誤差への変換方法などの問題があり、今後の研究が必要である。

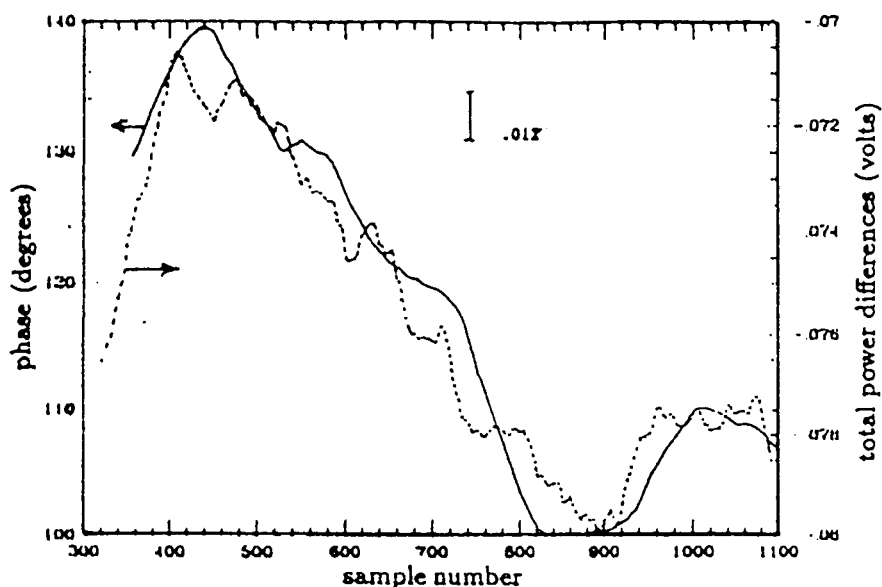


図9. 大気放射のゆらぎと位相ゆらぎの相関の例(実線:位相、点線:大気放射)

電波シーイングの測定とその評価はLMAなど今後の大型のミリ波・サブミリ波干渉計で0.1秒角オーダーの角度分解能を達成するための対策を考える上で非常に重要であり、これらの方法のサイト依存性やその適用限界などを調べるには世界各地で行われているサイト調査のための測定の情報交換や研究協力が今後ますます必要となるであろう。

#### 参考文献

- [1] Armstrong, J.W., Sramek, R.A., 1982, Radio Science 17, 1579.
- [2] Bieging, J.H. et al., 1984, Radio Science 19, 1505.
- [3] Kasuga, T., Kawabe R., Ishiguro, M., 1986, IEEE Trans. Antennas Propagat. AP-34, 797.

- [4] Olmi, L., and Downes, D., 1992, *Astron. Astrophys.*
- [5] Kasuga, T., Kanzawa, T., Ishiguro, M., 1990, *IAU Symp on Radio Astronomical Seeing*, eds J.E. Baldwin and Wang Shouguan. IAP, Beijing.
- [6] Ishiguro M., Kanzawa, T., Kasuga, T., 1990, *IAU Symp on Radio Astronomical Seeing*, eds J.E. Baldwin and Wang Shouguan. IAP, Beijing.
- [7] Masson, C.R., 1993 in *Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry*, eds. M. Ishiguro and Wm J. Welch, *Astron. Soc. of the Pacific Conference Series*, Sanfrancisco, in press.
- [8] Welch, Wm J., 1993 in *Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry*, eds. M. Ishiguro and Wm J. Welch, *Astron. Soc. of the Pacific Conference Series*, Sanfrancisco, in press.