

氏 名 松澤 歩

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 1872 号

学位授与の日付 平成28年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study on the Verification Method of Pointing Performance of  
Submillimeter Wavelength Antenna through the ALMA

論文審査委員 主 査 教授 高見 英樹  
准教授 松尾 宏  
准教授 伊王野 大介  
特認教授 小川 英夫 大阪府立大学  
教授 河野 孝太郎 東京大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA)は 50 台の 12-m アンテナからなる 12-m Array と、12 台の 7-m アンテナ及び 4 台の 12-m アンテナからなる Atacama Compact Array (ACA, a.k.a. Morita Array)で構成される、ミリ波帯及びサブミリ波帯(観測波長 10 ~ 0.3 mm)の電波干渉計である。全ての ALMA アンテナは高いクオリティを持つ観測結果を得るために、高い referencing pointing performance が要求される。Referencing pointing performance とは、追尾開始時の視野内の天体の位置を reference position とし、追尾中の天体の reference position に対する相対位置の精度である。ALMA アンテナは、第一運用条件下において 12-m アンテナの最高観測周波数での視野の 1/19 である 0.6 arcsec という referencing pointing performance が要求されている。すべての ALMA アンテナは標高 5000m の観測サイトへ移送する前に標高 3000m の Operations Support Facility (OSF)において組み立てと評価が行われる。

本論文では ALMA ACA アンテナの詳細な referencing pointing performance に含まれる様々な成分及び性能の詳細な評価方法とその物理的な解釈について記述する。ALMA ACA アンテナの Referencing pointing performance は、アンテナ主鏡面内部に設置された Optical Pointing Telescope (OPT)による画像中の天体の重心座標の Root Mean Square (RMS of centroid positions)を測定することで評価される。referencing pointing performance のアンテナに起因する系統的な成分を推定するためには、測定された RMS of centroid positions からランダムに変化する成分(光学シーイング、測定時の風荷重による pointing jitter)を差し引く必要がある。この内、非常に大きなファクターである光学シーイングの OSF での特性を明らかにすることは非常に重要である。OPT の画像の積分時間が短いほど RMS of centroid positions への光学シーイングの寄与が大きくなるため、先行研究である Saito et al. (2012) では、referencing pointing の測定の積分時間(5 秒)よりも短い積分時間(1 秒)で光学シーイングを測定している。さらに積分時間の違いはコルモゴロフ乱流の理論に基づく時間依存性(光学シーイング $\propto t^{-0.17}$ )によって補正される。しかし、この時間依存性による補正は光学シーイングを過大評価するという問題があることがわかっていた。実際に Saito et al. (2012)では referencing pointing の測定結果からランダムな成分を差し引いた残差が negative になる結果が全測定中 135/458 個のデータで見られた。これらのデータは、ACA アンテナの referencing pointing performance を過小評価するため、このデータが多い場合 ACA アンテナの評価結果の信頼性が下がるという問題が起こる。

本研究では、積分時間 1 秒から 5 秒での RMS of centroid positions の時間依存性の冪指数と様々な気象条件との関係を重回帰解析によって調べた。その結果、冪指数は風速 ( $V_{wind}$ )と強い相関を持つことをつきとめ、この光学シーイングと風速の関係式(光学シーイング $\propto t^{-(0.16\pm 0.05)-(0.06\pm 0.02)\times V_{wind}}$ )を用いた新しい光学シーイングの積分時間の補正方法を確立した。この関係式は風速が非常に小さい場合  $t^{-(0.16\pm 0.05)}$  となり、理論的に導出された関係式とよく一致する。この光学シーイングと風速との新しい関係は、物理的には以下のよう

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

に解釈できる。望遠鏡の観測するスケールがコルモゴロフ乱流の外部スケールより小さい場合、冪指数はコルモゴロフ乱流の理論により $-0.17$ と期待されるが、外部スケールを超える場合、 $-(0.16 \pm 0.05) - (0.06 \pm 0.02) \times V_{\text{wind}}$ のように風速( $V_{\text{wind}}$ )に支配されることを意味する。この新たな補正式を用いて Saito et al. (2012)の結果を再評価した結果、negative な残差のデータは 63/458 個まで減少した。さらに negative な残差が現れる要因として、reference position の影響がある。測定開始時の重心座標を reference position としたとき、開始時の重心座標とランダム成分の平均値の offset を差し引く必要がある。あらゆる時刻でのランダム成分の値は不可知であるため Saito et al. (2012)ではこの offset を推定するためにランダム成分の標準偏差を用いていたが、この推定方法は offset を過大評価して negative な残差を引き起こす可能性があることがわかっていた。本研究では、offset の推定法として開始時の重心座標と測定中の全ての重心座標の平均値の差を用いる方法を提案した。さらに、ACA 7-m アンテナ No.1 から No.4 の 4 台の referencing pointing の測定結果についてこの方法と前述の光学シーイングの新しい補正方法の 2 つを適用させた。その結果、ACA 7-m アンテナ No.1 から No.4 の 4 台について negative な残差のデータは 24/99 個から 2/99 個まで減少し、残差が negative になる要因の大部分を明らかにし、評価結果を大きく改善することに成功した。

本研究では光学シーイングの OSF における Az 軸と El 軸の特性についてもはじめて評価を行った。光学シーイングは Az 軸に対しては依存性を持たず、El 軸に対しては、コルモゴロフ乱流の理論から予測された依存性(光学シーイング  $\propto \sin(\text{El})^{-0.5}$ )を持つと考えられている。本研究での評価の結果、OSF での光学シーイングは El 軸に対してコルモゴロフ乱流に基づく依存性を持ち、さらに Az 軸に対しては、依存しないことを確認した。

また OPT は積分時間よりも短い time scale で変動する成分は評価できないが、本研究ではこの成分を servo error を測定することで評価した。Servo error はアンテナ制御によって起こる error であり、Antenna Control Unit による角度測定値と指示値の差で表される。本研究では referencing pointing performance に対する servo error の寄与を調べるために、天体追尾に用いられる様々な回転速度で Az 軸及び El 軸の各軸でアンテナを等速回転させて servo error を測定した。その結果、全ての回転速度で Az 軸及び El 軸の servo error の RMS は  $0.1$  arcsec を下回り、referencing pointing performance の要求性能( $0.6$  arcsec)に対する寄与は十分に小さいことを確認した。

また ACA アンテナはスイッチング後の dead time を小さくするために、スイッチング後にアンテナがすばやく静定することが要求されている。本研究では ACA アンテナの高速スイッチング後の servo error を評価し、その結果、あらゆる方向のスイッチングに対して ACA アンテナは ALMA の要求性能を完全に満たすことを確認した。

最終的に、本研究では、これらの評価結果を通して、ALMA ACA アンテナの referencing pointing performance を従来よりも高い精度で評価することができたと結論付ける。

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

ALMA望遠鏡は、日本（東アジア）、欧州、米国（北米）の共同による国際プロジェクトとしてチリ、アタカマの標高5000mの高地に建設された66台の口径12mおよび7mの電波望遠鏡からなる世界最大最高性能の電波干渉計である。2012年から観測を開始し、これまでの電波観測を遥かに凌駕する成果を上げつつある。この電波望遠鏡が所定の観測性能を發揮するには、個々のアンテナ、受信機など各構成要素が高い性能を有することが重要であるが、その中でもアンテナの指向精度が大きな役割を果たしている。指向精度が十分でないと、天体からの受信信号強度が低下してしまい、アンテナの性能が劣化してしまう。ALMAの指向精度としては、最高観測周波数における単一鏡の空間分解能の1/10である0.6秒角（rms）より高い精度が求められている。アンテナ指向精度の測定としては、これまで観測波長である電波による測定が主であった。電波による測定は、観測波長による測定という利点があるが、測定の空間分解能が高くない。また、測定に時間がかかるため短い時間スケールのアンテナの指向精度についての測定が困難であるという問題があった。申請者は、近年新しい評価方法として導入されたアンテナに同架した光学望遠鏡を用いた評価方法についての詳しい研究を行った。光学望遠鏡を用いた測定では、短時間で、アンテナの解像度よりも高い精度での測定ができるという大きなメリットがある。しかし、測定データはアンテナ自身の指向精度に加えて、大気揺らぎによる星からの光の到来方向の変動が組み合わさったものとなり、真のアンテナの指向精度の測定に影響を与えてしまうという問題がある。

申請者は、アンテナの指向精度に与える様々な影響として、アンテナ自身の指向精度、アンテナに当たる風の影響、および大気揺らぎによる星からの光の到来方向の変化（光学シーイング：本来アンテナ指向精度には含まれないもの）の影響を詳細に解析した。特に、光学シーイングが、追尾精度の見積もりに大きな影響を与えることから様々な測定条件で星の連続追尾観測を行い、光学望遠鏡による星像の位置の変化を解析し、大気揺らぎによるランダムな成分と望遠鏡追尾誤差による成分の寄与について評価を行った。

具体的には、長時間積分（5秒）での星像位置変化は望遠鏡追尾誤差に起因するものとし、大気揺らぎによるランダム成分は短時間（1秒）での積分で測定した。しかし、5秒積分の測定においてもランダム成分の影響は無視できない。そのため申請者は、大気揺らぎの変動の時間依存性を、本研究で得られた測定データ（0.05秒～50秒積分）を用いて解析し、純粋に光学シーイングとみなせる1秒積分のデータから5秒積分でのシーイングの寄与を見積もった。大気揺らぎについてのコルモゴロフ理論モデルによると、光学シーイング $\propto t^{0.17}$ （ $t$ ：積分時間）の依存性があり、通常これを適用するが、現実の大気では必ずしもその依存性が成り立たないことを見出した。その理由としては、大気揺らぎには空間的に有限の大きさ（アウトースケールという）があり、それ以上の大きさでは揺らぎの相関がなくなってしまうことが挙げられる。ある一定の時間より長くデータを積分すると、風により空気の揺らぎの塊が移動する距離がアウトースケールを超えてしまい、シーイングが理論的な予測よりも小さくなっていくことになる。申請者はこの影響を詳細に解析し、

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

シーイングを評価する積分時間および風速による影響を高い精度で見積もることを可能にした。この結果を用い、合同 ALMA 観測所において許容されている最大風速 9.5m/s の場合での総合的なアンテナ指向精度を求めた。その値は 0.58 秒角 (rms) であり、ALMA が要求している性能 0.6 秒角を満たすことを確認した。

上記の研究は、光学望遠鏡を用いた ALMA アンテナの追尾精度の評価において、最も重要な要素である大気揺らぎの影響を、これまでにない精度で測定する手法を確立したものである。特に、風速の影響を含めた精密な大気モデルを構築するなど多岐にわたる検討がなされており、極めて重要かつオリジナリティの高いものである。よって、本審査委員会は、本研究を博士論文として十分な内容であると判定した。