

22GHz帯ラジオメータによる水蒸気検出

○川口則幸（元国立天文台）、近廣祐一、原田健一（エレックス工業）

概要 (Abstract)

2017年4月から2020年3月までの3ケ年計画で、国立天文台共同開発経費により水蒸気ラジオメータの開発がすすめられた。このラジオメータを用いて、悪天候下での計測実験を行ったところ、降雨下で微小な水蒸気量の計測に成功したので報告する。

1. はじめに

2014年3月に国立天文台を退職した後2017年3月までの3年間、川口は中国科学院上海天文台にて大型電波望遠鏡や水蒸気ラジオメータの研究を行った。上海天文台の水蒸気ラジオメータは正しく校正されておらず、計測結果は大型電波望遠鏡、天馬65m、の観測に有効に利用されていなかった。そこで、2017年度から2019年度の3ケ年計画で国立天文台共同開発経費により水蒸気ラジオメータの開発を行った。この開発では、電波望遠鏡搭載型で安価で高性能の水蒸気ラジオメータを開発することを目的とし、特に校正システムとデータ処理手法に工夫を凝らし、計測結果の信頼性と精度の向上を目指した。校正システムとデータ処理に関し、2件の特許を申請している。また、この経験を生かして、JAXAの地球観測グループとの共同研究も開始している。

2. 世界の水蒸気ラジオメータ

大気中の水蒸気量を計測するために、世界各国の観測所では水蒸気ラジオメータの開発を進めている。図1に主な水蒸気ラジオメータの外観を示す。このうち、米国のRadiometrics社、ドイツのRADIO PHYSICS社 (RPG) のラジオメータはコマーシャルベースで購入が可能であるが、1台が二千数百万円と高価である。日本の気象研究所、防災技術研究所や大学では、これらの水蒸気ラジオメータを購入して運用している。オーストラリアのATCA (Australian Compact Array) では水蒸気ラジオメータを望遠鏡に搭載している。また、ボン100m (Effelsberg, MPIfR) では副鏡の背面に水蒸気ラジオメータを搭載している。その他はすべて自立式で電波望遠鏡とは独立して水蒸気の計測を行っている。筆頭著者である川口は2014年から2017年にかけて上海天文台の水蒸気ラジオメータを用いて大気吸収の研究を行った。

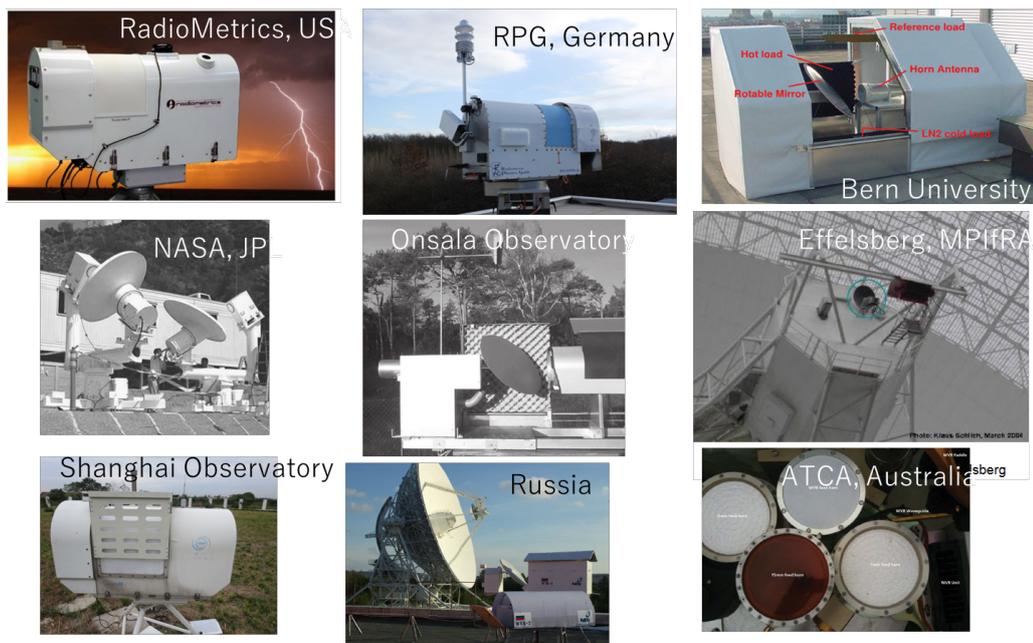


図1 世界の水蒸気ラジオメータ

2. 水蒸気ラジオメータの弱点

中国科学院上海天文台は上海市の郊外、天馬地区に直径6.4mの電波望遠鏡を建設した（参考文献（1））。望遠鏡サイトには図1に示した水蒸気ラジオメータが設置されていたが、電波天文観測に有効に利用されていなかった。そこで、川口は新しいデータ解析手法を開発してGPSや例トレース法との比較を試み良く一致する結果を得た（図2）。

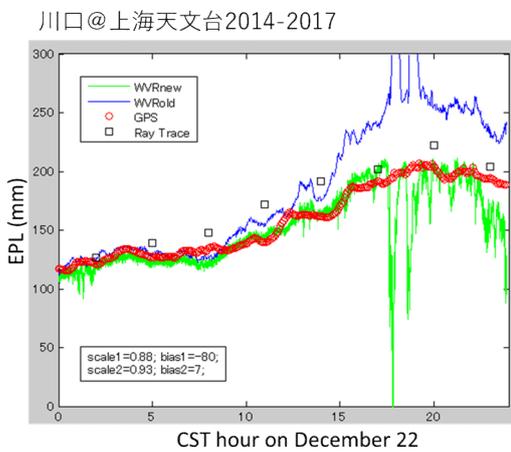


図2 上海天文台のラジオメータによる計測結果

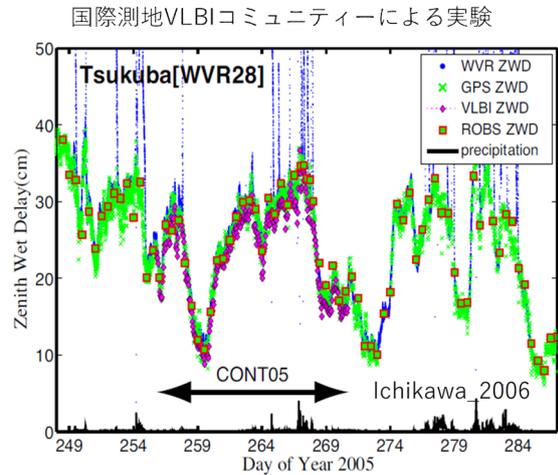


図3 国際測地VLBIコミュニティによる実験結果

図2から明らかなように、CST 0-9時の晴天時には水蒸気ラジオメータの計測結果（図中青色）はGPSによる計測結果（図中赤）やレイトレースによる計測結果（図中黒）と良く一致する。CST 14時ごろに雲が発生すると、水蒸気ラジオメータによる計測結果は大きな誤差を発生し、18時頃から降り出した降雨下では異様に大きな計測結果を示した。これは、水滴と水蒸気の分離が正確になされておらず、水滴による吸収を水蒸気の吸収と見誤ったためである。そこで、新しいデータ解析法を考案して処理したところ、図中緑で示す結果が得られ、多少の雲でも正しい計測が行えるようになったが、降雨下では大きな新しい処理方式でも追従することができず、大きな誤差が生じることが分かった。同様な状況は国際測地VLBIコミュニティによる実験結果でも確かめられた（図3）。図のDay of Year軸上に降雨量がプロットされているが、降雨とともに水蒸気ラジオメータの結果（図中青）に大きな誤差が生じることが報告されている。

この結果を克服することが国立天文台水蒸気ラジオメータ開発の主要な目標となった。

3. 国立天文台の水蒸気ラジオメータの悪天候下での運用結果

2017年度からの3ヶ年計画で、国立天文台共同開発経費による水蒸気ラジオメータの開発が行われた。図4にこの水蒸気ラジオメータの概略構成図を示す。

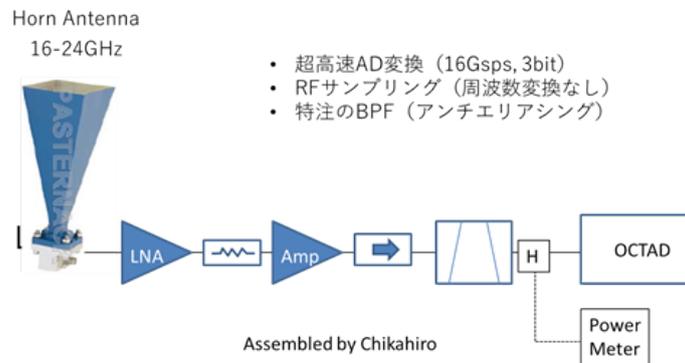


図4 国立天文台水蒸気ラジオメータの概略構成図

ホーンアンテナで受信した16-24GHzの信号は増幅され、周波数変換することなく直接AD変換され

る (RFサンプリング技術)。周波数変換を行わないため、アナログ部の構成を陥落化することができた。広帯域アイソレータは山口大学の山本節夫教授、実験開発センタの藤井泰範氏、新関康昭氏らの協力で開発された。アンチエリアシングフィルタは16.384GHzで量子化に最適になるよう設計され、アルモテックにより開発された。図4のOCTADはエレックス工業が開発した超高速RFサンプリング装置 (FFTによるデジタル分光機能付き) で、現在はJAXAと共同開発したデジタル信号処理ボードが装置に組み込まれて使用されている。この水蒸気ラジオメータを工場試験で大気中水蒸気を計測した結果を図5に示す。

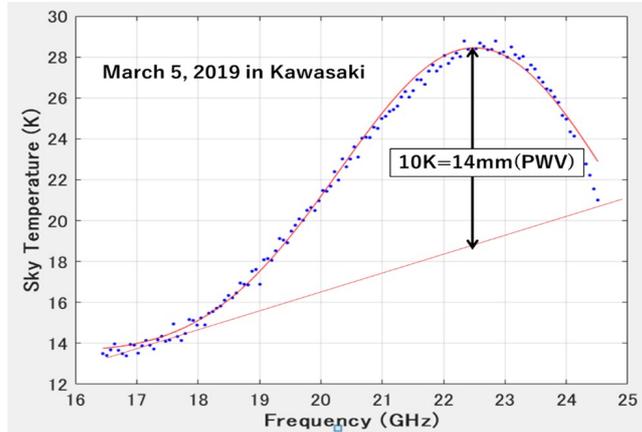


図5 国立天文台水蒸気ラジオメータの工場試験結果

図5から共振周波数22.2GHz付近でピークを示す水蒸気スペクトルが高精度で計測されていることが分かる。図中赤の直線は水滴による吸収で、大気輝度温度28Kのうち水蒸気だけの輝度温度が10Kであることが分かる。遅延を起こさない液水と水蒸気の正確な分離に成功した。

この水蒸気ラジオメータをVERA入来局の20m望遠鏡に搭載し、様々な方位角・仰角での水蒸気の計測を行った。搭載された水蒸気ラジオメータの写真を図6に示す。図では左からVERA43GHzホーン、VERA22GHzホーンが見えるが、ERA22GHzホーンの横に水蒸気ラジオメータを設置した。ラジオメータのホーンは電波天文観測用に設計製作されたVERA22GHzホーンよりも小型で、副鏡を照射するビームが広く、開口効率をはるかに劣るが計測対象が上空数kmの大気水蒸気輻射なのでアンテナ開口効率の低下は無視した。受信機の初段増幅器は常温の増幅器であったが、十分な感度で大気中の水蒸気スペクトルの検出が行えた。ビーム幅は副反射鏡、主反射鏡のほぼ全面を照射していることから電波天文観測ビームとほぼ同じであることが期待される。

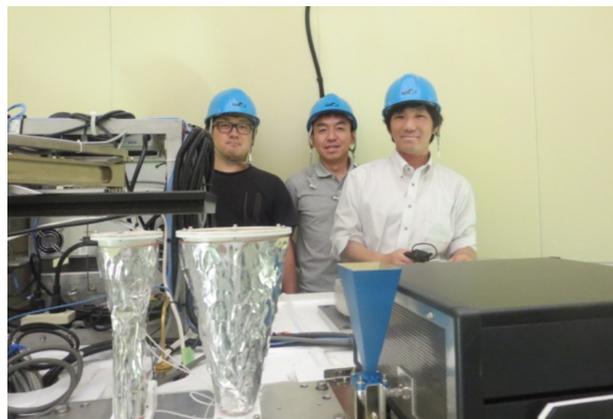


図6 VERA入来局に搭載された水蒸気ラジオメータ

図7に2018年の7月に行った実験結果を示す。この実験期間中の天候は最悪で、上空は厚い雲に覆われ、時々強い雨(7mm/h)が降る中で計測が行われた。図7(左)から明らかなように、非常に高い大気雑音温度が計測され、22GHz付近の水蒸気共振はほとんど見られない。しかし、詳しい解析結

果、天頂におけるわずか3Kの水蒸気輻射温度の計測に成功した。

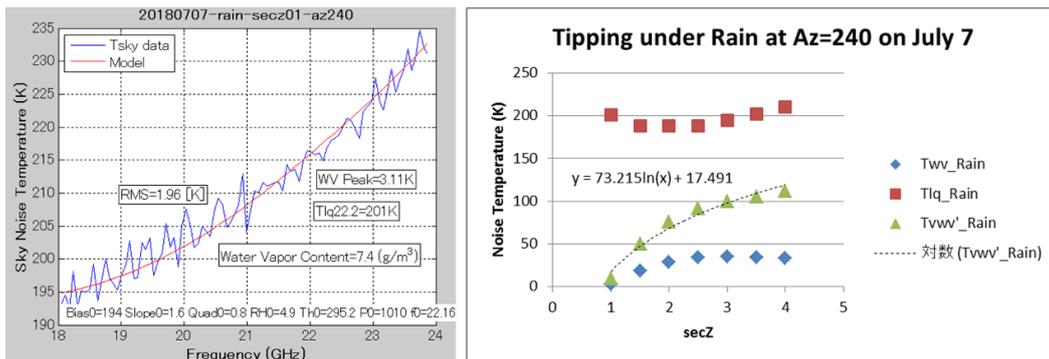


図7 2018年夏の計測結果（左は降雨中の水蒸気スペクトル、左は仰角に対する計測結果）

大気中の水蒸気はほとんどが水滴となって降雨になり、残存する水蒸気は極端に少なくなっていると思われる。このわずかな水蒸気量が妥当なものかどうかを見るために図7（右）に仰角（ $\sec Z = 1/\sin(E1)$ ， $E1$ ：仰角）を下げた時の計測結果を示す。低仰角時（ $\sec Z > 1$ ）には水蒸気量が上昇し、明らかな水蒸気量の増加が見られた。しかし、 $\sec Z = 3$ （仰角19.5度）以上で水蒸気量が飽和していることが分かる（図中青のひし形）。これは水滴による吸収が発生しているものと考え、図（右）の水滴の輝度温度（図中赤四角）から吸収量を推定し補正したものが緑三角で示している。水滴の吸収を補正した水蒸気量を真の水蒸気量とすると $\sec Z$ に対して対数関数で近似されることが分かった。

2019年8月に実施した再実験では、水沢VLBI観測所の寺家孝明氏、田村良明氏の協力により、水蒸気ラジオメータを測地VLBI観測モードで運用し、GPSによる超過通路長（EPL）との計測結果との比較を行った。図8にその結果を示す。横軸はGPSによる大気遅延（超過通路長、EPL）で縦軸が水蒸気ラジオメータによる大気遅延である。測地観測モードで望遠鏡が運用されているので様々な仰角（方位角）で計測が行われているが、両者の強い相関が明らかに見て取れる。しかし、水蒸気ラジオメータの計測結果はGPSの結果に対して対数関係にある。このGPSや $\sec Z$ に対する対数依存性の発生原因は不明である。

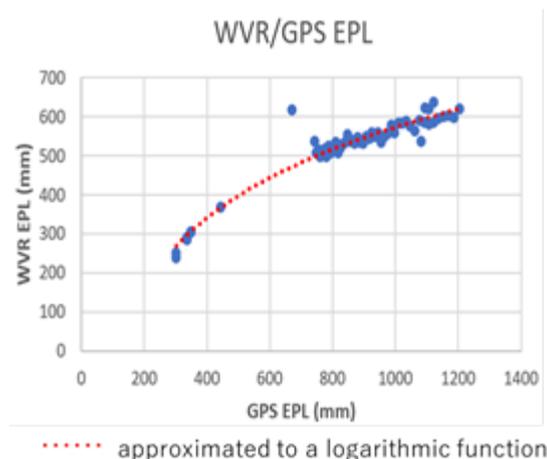


図8 水蒸気ラジオメータの計測結果とGPSによる遅延予測との比較

5. おわりに

国立天文台との共同研究によって水蒸気ラジオメータの開発が行われ、降雨中でも微小な水蒸気量の計測に成功した。今後は、電波天文観測技術として開発してきた目に見えない水蒸気の検出技術を火山の噴火予知にも役立てていきたいと考えている。

参考文献

- (1) 川口則幸、中国における大型電波望遠鏡の開発と東アジアVLBI観測、第34回天文学に関する技術シンポジウム、2014年9月29日