


平成29年度国立天文台共同開発研究報告書

平成 30年 5月 1日

国立天文台長 殿

研究代表者	氏名	(ふりがな) かわぐちのりゆき		
		川口則幸		印
	所属・職	国立天文台名誉教授		
	電話			
研究課題名	高精度位置天文研究用水蒸気ラインプロファイラの開発			
研究実績	<p>〔研究成果を記入すること。研究データ等含め別添対応可〕                  ※学会等での発表、学会誌等に掲載するなどされた場合はその旨ご記入ください。</p> <p>別紙参照</p>			
研究の活用	<p>〔今後、本研究の推進等にどのように活用できるかについて記入すること〕</p> <p>別紙参照</p>			

## 平成29年度国立天文台共同開発研究成果報告書

### 高精度位置天文研究用水蒸気ラインプロファイラの開発

報告者：国立天文台名誉教授

川口則幸

報告日：2018年5月1日

#### 1. 概要

大気中の水蒸気は電波に遅延を与え、VLBIによる電波位置天文観測（VERAなど）や電波測位観測（GPS/VLBI測位など）に大きな影響を与える。前者では10マイクロ秒角の天体位置計測精度を達成することが困難な主要因になっている。また、後者では鉛直成分の計測精度が水平成分に比べて4倍もの誤差を与える主要因になっている。

水蒸気及び大気中の水滴（雲）は大きな吸収減衰を与え、時間的にも大きく変動する。このため、天体の明るさに大きな不確実性が発生する。観測される天体の明るさの変動が大気吸収の変動か、天体固有の変動（変光星）かの識別を困難にしている。

以上の課題を解決するために、大気中の水蒸気量や水滴量を正確に計測する「水蒸気ラジオメータ」の開発が、電波天文観測所や宇宙開発研究機関で行われてきた。また、気象研究機関（気象研究所や防災科学研究所）では集中豪雨の早期予報のために水蒸気ラジオメータの導入を行っている。これらの開発では、数千万円から数億円の開発経費が必要とされ、国立天文台の観測局（VERA4局など）に設置して位置天文観測や電波天文観測の観測精度向上を図ることは予算的に困難であった。そこで、簡易な受信機で安価な水蒸気ラジオメータを製作し、VERAなどの位置天文観測の精度向上を図ることになった。

#### 2. 実施経過と実験成果

##### 2-1 部品レベルでの水蒸気スペクトル計測（工場での屋上実験）

本研究で開発する「高精度位置天文研究用水蒸気ラインプロファイラ」の試作機として「簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置」を製作することにした。この装置の仕様書を作成するにあたって、使用候補部品を組み合わせて試験を行った。2016年12月に行ったKEK実験では、KEKの開発したガスヘリウム冷却受信機による水蒸気モニタシステム（KUMODES）のアナログ出力に国立天文台が開発した広帯域デジタル分光計を

接続して試験を行い、0.1 Kという高い計測精度を達成した<sup>(1)</sup>。この高い計測精度は主として広帯域デジタル分光計の導入によるものであり、受信機の性能には大きく左右されない。そこで、常温の増幅器を使用した簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置を製作し、簡易型の受信機でも水蒸気スペクトルの計測精度を確認することにした。使用候補部品を機上で組み合わせたただけの実験系であった(写真1)が、水蒸気スペクトルの計測とその時間変化を捉えることに成功した(図1)。図中、点線は水滴(雲)による吸収放射で、



写真1 部品レベル実験状況 (2017年7月2日)

22.2GHz 付近のスペクトルが水蒸気の放射である。水蒸気放射のピーク値を時間方向にトレースしたものを図2に示す。図2から放射強度が時間と共に急速に低下していることが分かる。これは、上空にある厚い雲の切れ目に入ったため、主に水滴による吸収放射の変動と思われる。この直線的な変化を低次の多項式でフィッティングし、その残差を求めたところ、0.08 Kであった。

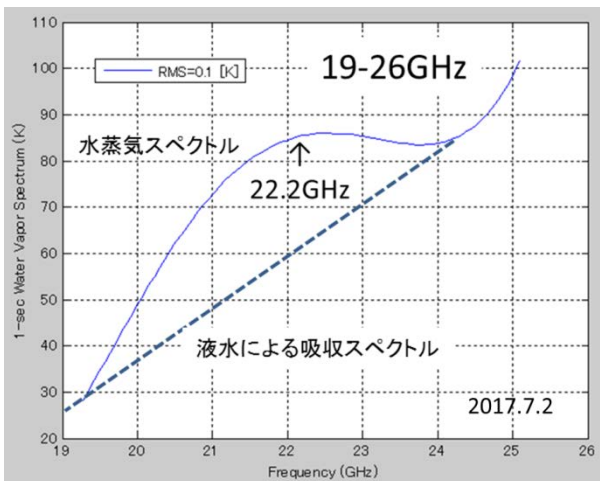


図1 部品レベル実験での水蒸気スペクトル

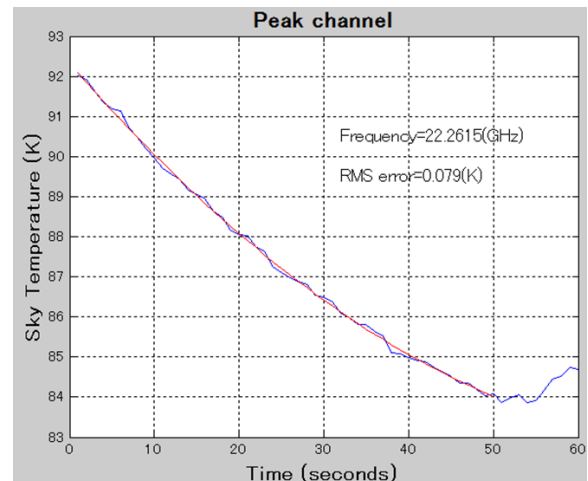


図2 ピーク値の時間変動

この実験結果から、簡易な受信機でも十分に高い精度で水蒸気スペクトルの計測が可能であることが明らかになった。

## 2-2 簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置の完成検査

部品レベルでの実験の結果、簡易な受信機でも高精度で水蒸気スペクトルの計測が可能であることが分かったが、水蒸気と水滴の放射を分離するためにはより広帯域な受信機が

必要であることも判明した。受信機の広帯域化で問題になるのは、

- (1) アイソレータ
- (2) アンチエリアシングフィルタ

で、前者については山口大学の山本節夫教授のご指導により広帯域アイソレータの入手が可能になった (写真2)。この広帯域特性を評価するために、国立天文台先端技術センタの保有するネットワークアナライザを共同利用にて使用して計測した。計測に当たっては、先端技術センタの藤井泰範、新関康昭両氏の支援があった。



写真2 山口大学提供のアイソレータ

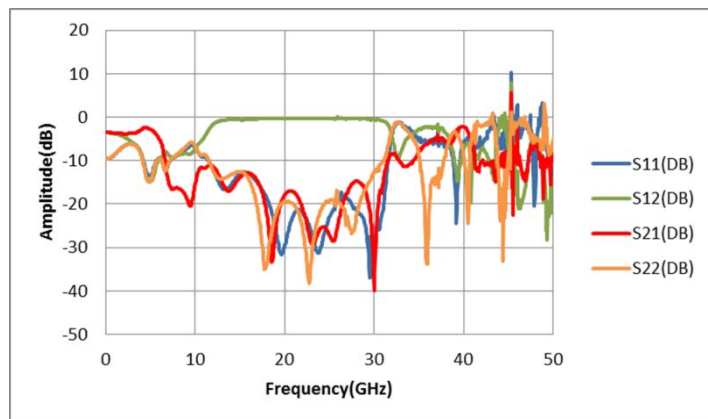
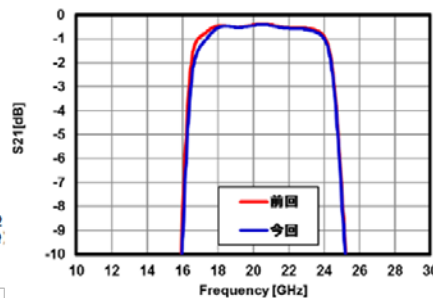
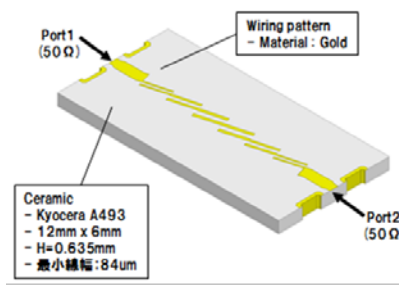


図3 広帯域アイソレータの測定結果

この計測の結果、13-31GHzの広い周波数帯にわたって良好な通過・反射特性が得られることがわかった。

後者のアンチエリアシングフィルタだが、デジタル分光計のAD変換・FFTスペクトル処理では2<sup>20</sup>GHzのサンプリング速度が必要で、このような特殊なフィルタは市販品にはないことが分かり、取敢えずは市販の18-24GHzのバンドパスフィルタ (BPF) を使用することにしましたが、理想とする16.384-24.576GHzのBPFの設計を行うことにした。今年度の



研究費で設計は終了した (図4) が、実際の製作・評価は次年度に行うことになった。

図4

このフィルタは、バンド幅 8.192GHz、サンプリング周波数 16.384GHz に最適になるよ

う設計されたフィルタであり、本機だけでなくデジタル化されつつある電波天文観測や測地 VLBI 観測などに幅広く応用が可能である。

常温 LNA、電力増幅器、アイソレータ、BPF を 1 筐体に収納し、簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置として完成させた (写真 3) のち、完成検査として水蒸気の検出実験を工場で行った。



写真 3 簡易型 WVR

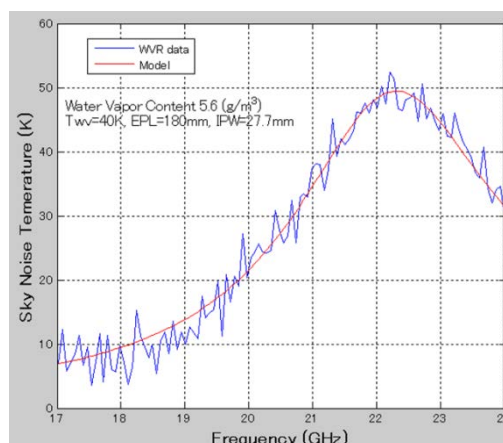


図 5 工場出荷前試験結果

図 5 に試験結果を示す。図中の赤線は水蒸気輻射スペクトルの理論モデル<sup>(2)</sup>で、青線が反射リップルの補正を行っていない生の計測データである。両者は非常に良く一致し、水蒸気輻射輝度温度が 40K、水蒸気量が 27.7mm (Integrated Precipitable Water) と計測された。

### 2-3 水沢観測局での実験

工場で性能を確認した後、水沢 VLBI 観測所で実験を行った (2018年3月23日)。



写真 4 簡易型 WVR の水沢 20m 鏡への設置

まず 20m 鏡観測室において装置の性能を確認した後、20m 鏡の既設 20GHz 帯受信機の横に簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置を設置 (カセグレン焦点付近、写真 4) し、大気中の水蒸気輻射スペクトルを計測した。ラジオメータのホーンアンテナは、安価な市販品を使用したために、そのビーム幅は VERA20m 鏡の副鏡見込み角よりも広く、一部は副鏡をスピルオーバーしている。このため VERA20m 鏡のビームとは完全に



は一致していない。最終的なラジオメータには16 – 24 GHzの広帯域でビーム幅が水沢

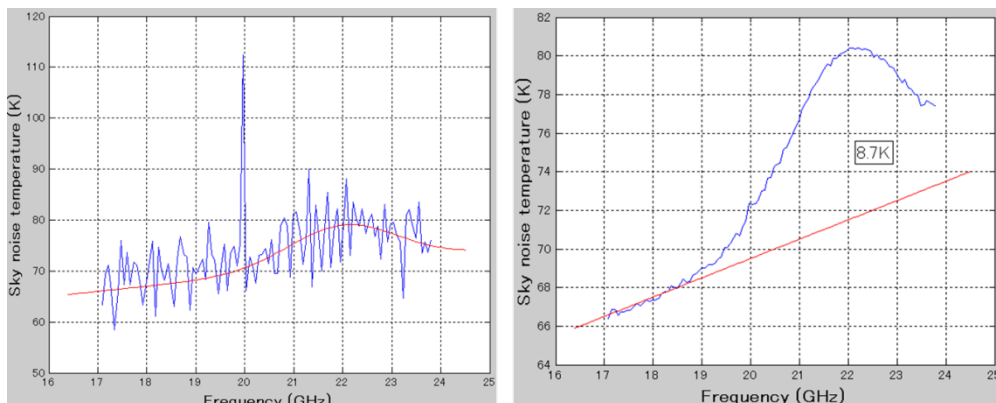


図6 水沢 20m 鏡設置時の水蒸気スペクトル計測結果  
(左：計測生データ、右：反射リップル除去後のスペクトル)



写真5 観測棟の前での計測状況

20m 鏡の副鏡見込み角に適合した専用のものにする必要がある。20m鏡のカセグレン焦点付近に設置したときの計測結果を図6に示す。

図6左の計測生データから明らかなように反射波の定在波リップルが大きく、水蒸気スペクトル(図中赤線)が隠されている。図6の右側は最初の1秒で得られたリップルパターン(図6左の理論値からの差分)を次の1秒値から差し引いたものである。定在波リップルを差し引けば、水蒸気スペクトルは精度良く検出で

きる。輻射強度は8.7K(6mm\_IPW)で図5に示す工場試験の四分の1以下である。これは、前日から当日の朝にかけて激しい降水(雨)があり、大気中の水蒸気が水滴(雨)に変化して少なくなったものと思われる。

カセグレン焦点に設置した際に計測された大きなリップルが、副反射による反射による定在波リップルであることを確認するため、簡易型水蒸気ラジオメータを20m観測棟の前に設置して計測を行った(写真5)。計測結果を図7に示す。

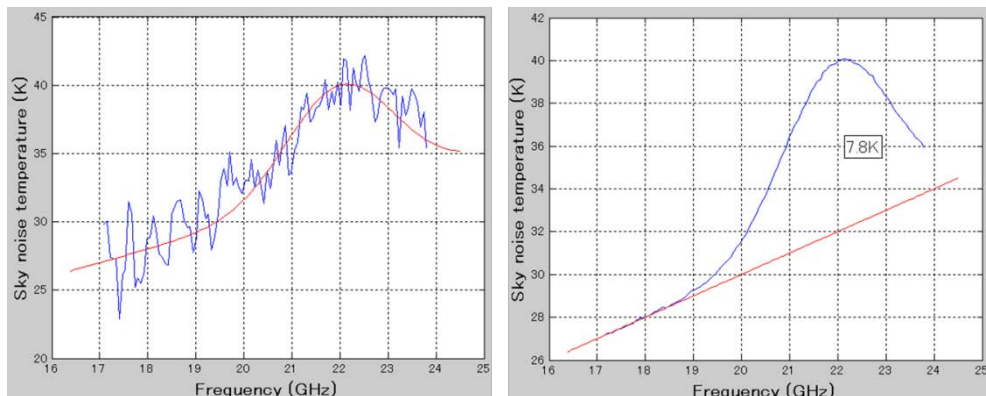


図7

図7（左）は生データで、カセグレン焦点設置時に比べ定在波リップルは小さくなっている。図7（右）は図7（左）で理論値からの差分で得られた定在波リップルを次の1秒値から差し引いたものである。図7（右）から計測される水蒸気スペクトルピーク値は7.8Kで、カセグレン焦点に設置したときの計測結果（8.7K）とほぼ同じ値になった。

定在波リップルは時間的にも安定で、最初の1秒で得られたリップルパターンは30秒後にも60秒後のデータにも適用可能であることが分かった（図8（左）30秒後、図8（右）60秒後）。これらの事実から、カセグレン焦点設置時の大きなリップルは副鏡からの反射であると結論できる。

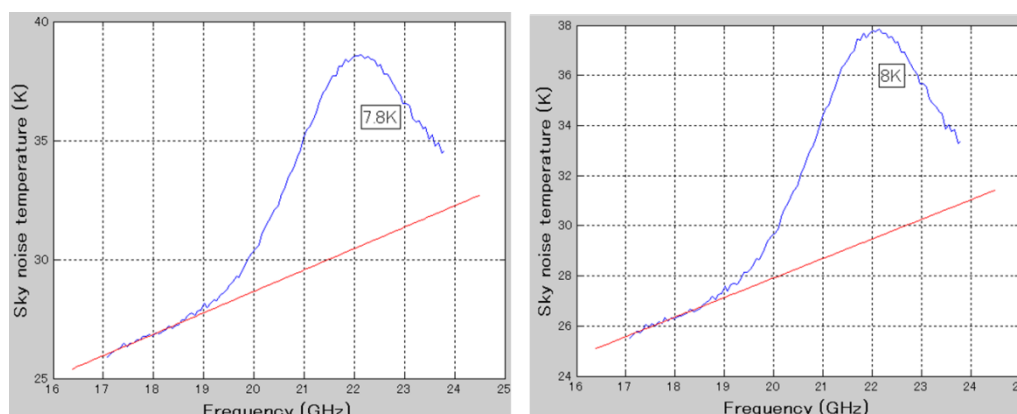


図8 30秒、60秒後へのリップルパターン適用（生データからの差し引き結果）

図6（左）に見られたカセグレン焦点設置時の大きなリップルパターンは、大きいだけでなく時間的にも不安定で、リップルパターンの適用は1-3秒程度までしか有効ではないことが分かった。図9に示すように2秒後にはリップルパターンが変化して完全には除

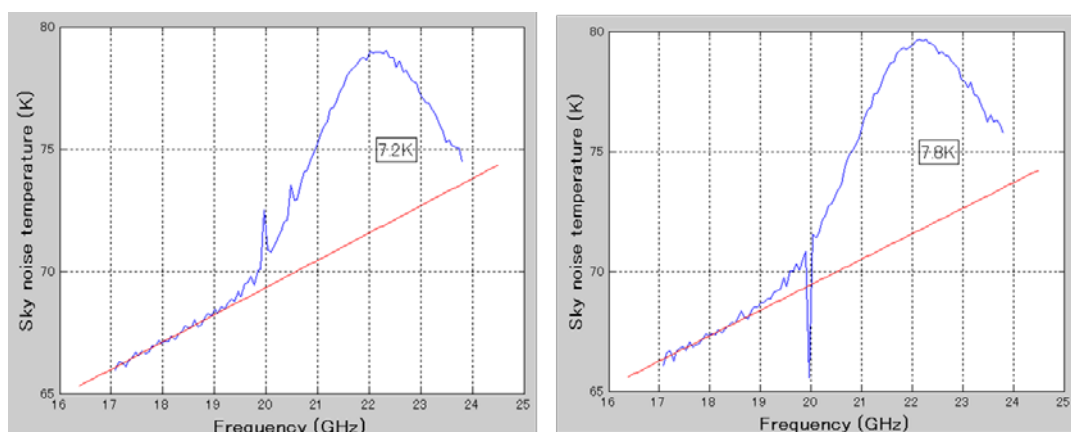


図9 カセグレン焦点設置時のリップルパターン補正結果（左が2秒後、右3秒後）

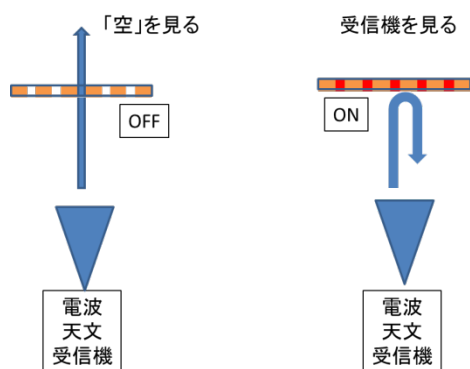
去できないことが分かる。カセグレン焦点に水蒸気ラジオメータを設置する際には、機械的にしっかり固定し、副反射鏡との相対位置関係が大きく変化しないようにすること、ラ

ジオメータ周辺の金属部分を無反射吸収材で覆い、できるだけ反射波を小さくすること、などが必要になると思われる。

### 3. 今後の計画と研究意義

2018年度には、デジタル分光計に最適設計したアンチエリアシングフィルタを10-20個製作し、チップ間のバラツキを評価したのち、同軸モジュールに埋め込む作業を行う。このフィルタは、今後20GHz帯の電波天文観測装置に汎用的に使用が可能で、広帯域測地VLBI観測に有効である。

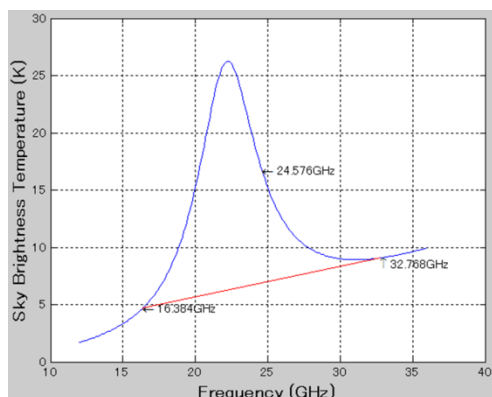
2式目の簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置を製作し、水沢一入来でのVLBI実験を可能にする。これは、水蒸気ラジオメータで計測された水蒸気量をEPL, Excess Path lengthで評価し、VLBIの遅延時間計測結果と照合するうえで重要である。ここで報告した本機の安定度は $1.7 \times 10^{-13}$ に達し、1秒という短周期の遅延変動も補正可能になる。これは、将来のミリ波VLBI観測において大気の変動に伴うコヒーレンス損失を補償し、長時間積分による微弱天体の検出も可能になることを意味している。



輝度温度の絶対値スケールを与えるキャリブレーションは、現在手動で行っているが、電波スクリーンによる校正手法についても今後研究を進める(図10)。この方法が確立すると、現在VERAで行っているロボットアームによる機械的な校正システムを電気制御システムにすることができる。

図10 アクティブ透過・反射膜による校正

超高速S/H回路は、現在のAD変換の上限をさらに高い周波数に拡張可能にする。現在東北大学では末松憲治教授が30GHzを越えるアナログ信号をRF Samplingするサンプルホールド回路(S/H Circuit)をCMOS ICで



製作することに成功している。この技術を導入することで、現在の上限周波数24GHzを32GHzまで拡張することが可能になれば、水滴(雲)と水蒸気をより正確に分離することが可能になる(図11)。図中赤線が水滴による輻射スペクトルだが、現状では24GHzまでしか計測できないので、水滴成分の分離が完全ではない。

図11 広帯域化による水滴成分の分離



#### 4. おわりに

2017年度の本研究は国立天文台の共同開発研究によって進められている。研究グループは水沢 VLBI 観測所の河野裕介氏、小山友明氏、鈴木駿策氏、高エネルギー加速器研究機構の長崎岳人氏、宇宙研究開発機構の前田崇氏の協力によってなされた。また、デバイスの計測に当たっては先端技術センタの高度な計測装置を共同利用で使用させていただいている。実際の計測に当たっては、藤井泰範氏、新関康昭氏のご支援をいただいた。また、コンポーネントデバイスの設計の際には山口大学の山本節夫教授や東北大学の末松憲治教授のご指導をいただいている。デジタル分光計に最適化されたアンチエリアシングフィルタの設計に関しては、(株)京セラの白崎隆行氏、久保田耕治氏、松下健次郎氏のご助力をいただいている。電波シャッターに関しては電子整備研究所の高萩和宏氏、吉積義隆氏の助言をいただいている。水沢実験の際には望遠鏡時間の確保に水沢 VLBI 観測所の柴田克典氏の、液体窒素の調達に亀谷収氏のご助力を得ました。これらの研究協力者の各位に深く感謝いたします。最後に、簡易型水蒸気ラジオメータ試験評価装置を受注いただき、試験評価に多大な貢献をいただいておりますエレクトクス工業株式会社の原田健一氏、近廣祐一氏に感謝しておわりとします。

#### 5. 参考文献

(1) N. Kawaguchi, , Water Vapor Radiometer for Radio Astronomy and Volcano Monitoring, Proceedings of the 16th NICT TDC Symposium (Kashima, June 21, 2017), No. 37, pp.5-9

(2) Shervin Shambayati, Atmosphere Attenuation and Noise Temperature at Microwave Frequencies, DESCANSO Book Series, volume 10, chapter 6, p. 255, February 2008