


平成30年度国立天文台共同開発研究報告書

令和 元年 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
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>	

(別紙)

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
研究実績報告書
(研究活用含む)

国立天文台
河野裕介、川口則幸

【成果概要】

既存の水蒸気ラジオメータは、厚い雲に覆われている時や降雨時に大きな誤差が発生することが知られている。本研究で開発した広帯域デジタル分光による水蒸気スペクトルの計測によって、雲や雨滴による吸収放射と水蒸気輻射を分離し水蒸気量と雨滴による吸収を分離、計測することに成功した。

【水沢実験結果】 2018年7月4日ー8日

2017年度に製作した水蒸気ラインプロファイラ（評価版）を図1に示すようにVERA水沢20m望遠鏡に搭載し、水蒸気量の仰角、方位角分布の計測を行った。

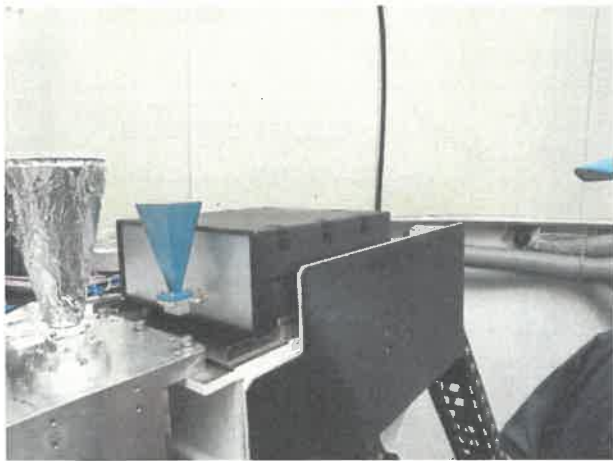


図1(a) VERA 20m鏡への搭載状況

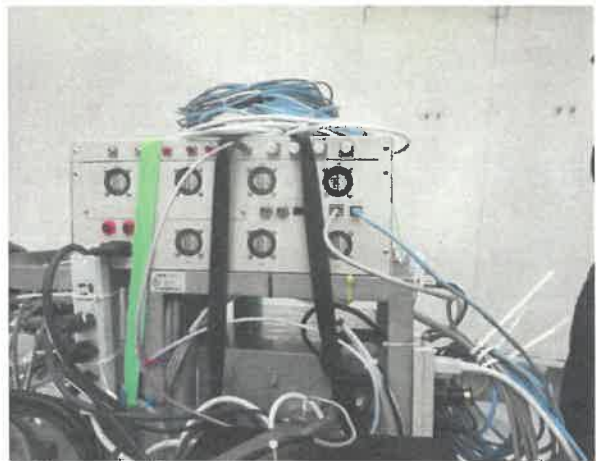


図1(b) 借用デジタル分光計の搭載状況

VERA観測に用いられている22GHz帯受信機（ホーン及び冷却デューワー）に隣接して装置を設置した（図1）。評価装置で使用したホーンは、廉価で購入可能な角錐ホーン、PASTERNAK-PE9853/SF20である。全角ビーム幅はE面 17.2° でH面 16.5° とVERA 20mの副鏡見込み全角 22° よりも狭く、主鏡ビームに含まれる97%以上の大気輻射電力が受信される。しかし、主鏡の全面を照射しないために専用受信機で受信するビーム幅より広いこと、焦点位置がオフセットしているため、測地・位置天文観測天体と同一方向の水蒸気計測ではないことに注意する必要がある。

実験は、厚い雲に覆われ時々雨が降る気象条件化で行われた（図2）。雨量データを図3に示す。



図2 気象状況

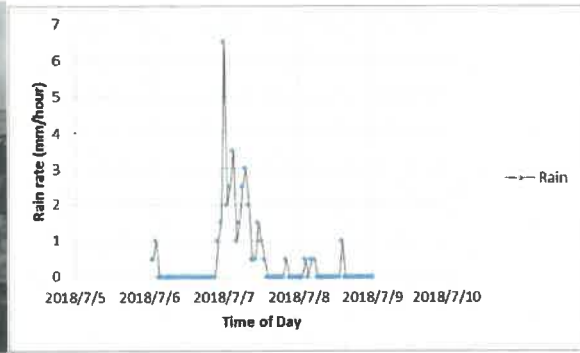


図3 降雨時の雨量データ

水蒸気量の仰角依存性を複数の方位角で計測した。図4は方位角240° でSecZが2と2.5の時（仰角30° と23.6°）の水蒸気放射スペクトルを示す。

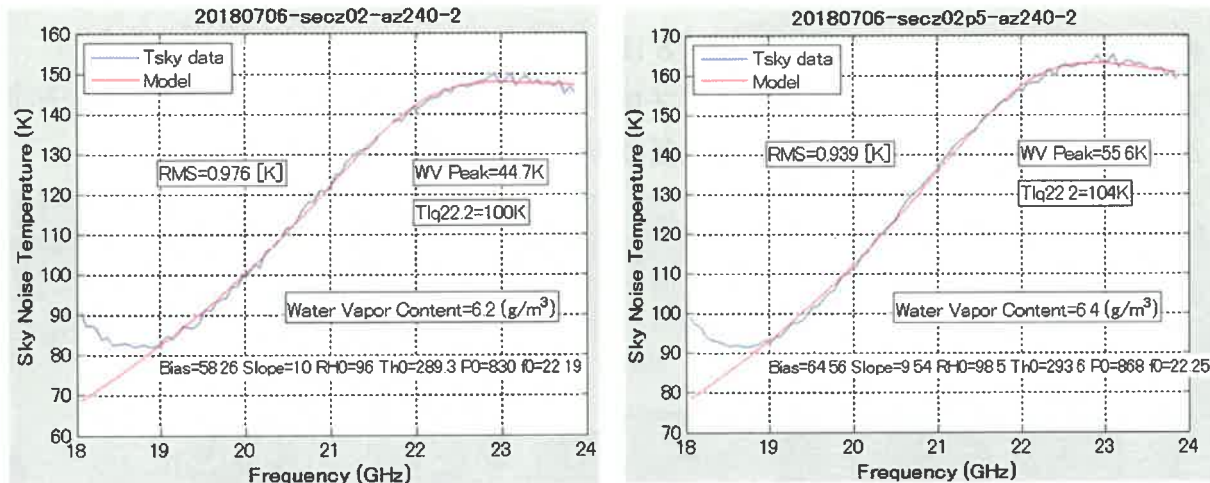


図3 方位角240度、仰角30度（左）、23.6°（右）の水蒸気スペクトル

広帯域スペクトルは、水蒸気の輻射モデルと雨滴による吸収モデルで観測データ（図中青印）をフィッティングした。仰角30度の時の水蒸気の輻射輝度温度は44.7K、仰角が23.6度では55.6Kに上昇した。水滴による吸収温度はほぼ同じで、それぞれ100K、104Kであった。

周波数が18 - 19 GHzの範囲で、大きな誤差が生じているが、これはアンチエイリアシングフィルタに市販のものを使用したため、低域側の雑音が折り返して計測されたものと思われる。サンプリング周波数16.384GHzに最適設計されたフィルタが年度末に納入され、低域側のスペクトルが大幅に改善された（後述）。

方位角200度と240度において様々な仰角で計測された水蒸気の輻射温度、雨滴による吸収、雨滴による吸収を補正した水蒸気輻射温度を図4に示す。

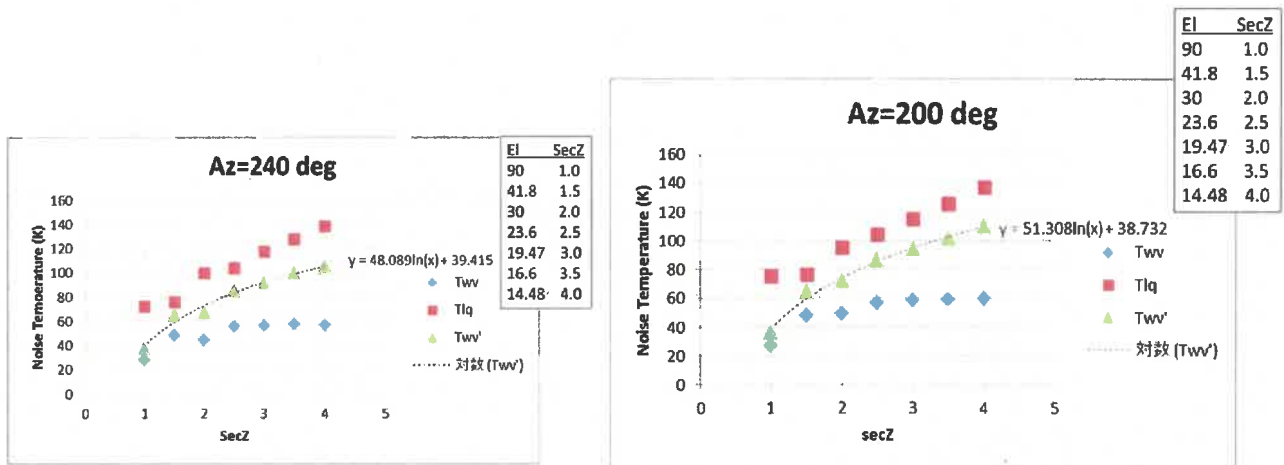


図4 異なる方位角で計測された大気放射スペクトルの仰角依存特性

水蒸気の放射強度（図中青い◇）を水滴による吸収（赤い□）で補正した水蒸気の放射強度（図中緑の△）が真の水蒸気量を表すと思われる。水蒸気量は大気の通過長（secZ、Zは天頂角）に比例して増加することが予想されるが、今回の計測により対数関数でよく近似できることが明らかになった。

図5にSecZが2, 2.5, 3の方位角分布を示す。方位角は0° から330° まで30° おきに計測した。方位角が0° と330° の値が一致しないのは、各方位角で仰角を変化させて0° から330° まで計測したために、この間時間が経過し、気象状態が変化したものと思われる。

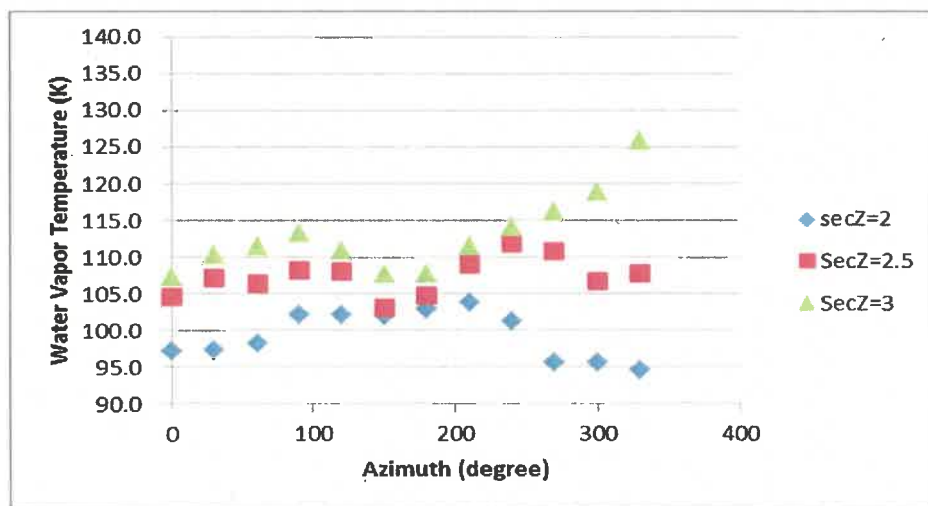


図5 水蒸気の方角分布計測結果

水蒸気ラジオメータは降雨時に大きな誤差が生じることがよく知られている。図6は報告者が上海天文台に勤務していた時の上海ラジオメータによる計測結果を示す。

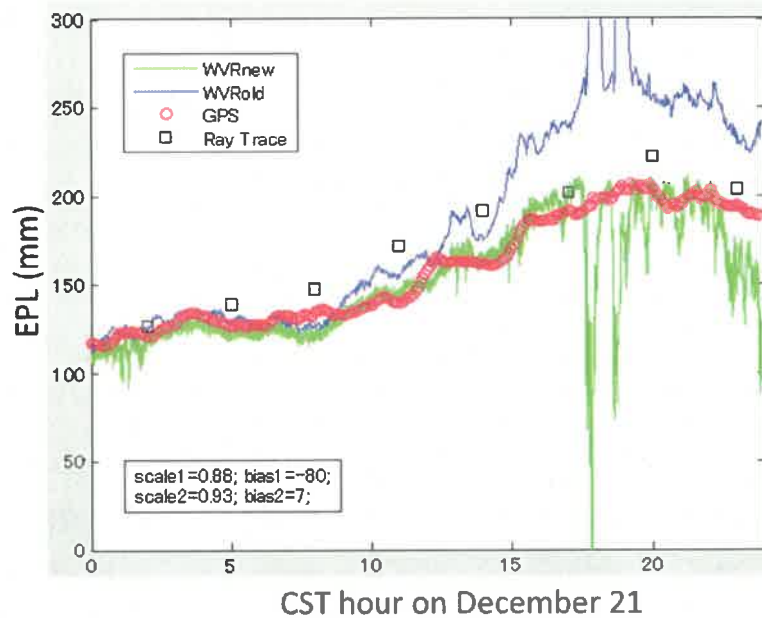


図6 上海天文台の水蒸気ラジオメータの計測結果とGPS, Ray Traceとの比較

CST0時から9時ごろまでは、水蒸気ラジオメータの計測結果（青）とGPSによる天頂大気遅延（赤）、Ray Trace法によるものは良く一致しているが、9時以降、雲に覆われはじめ、16時ごろから激しい降雨の時には、水蒸気ラジオメータは大きな誤差を示した。雨滴吸収補正を行った水蒸気量（緑）でも、降水量が大きくなると計測は不可能になる。

水沢実験時における降雨がない場合と降雨時（時間降水量 6 mm）の水蒸気スペクトルの計測結果を図7に示す。

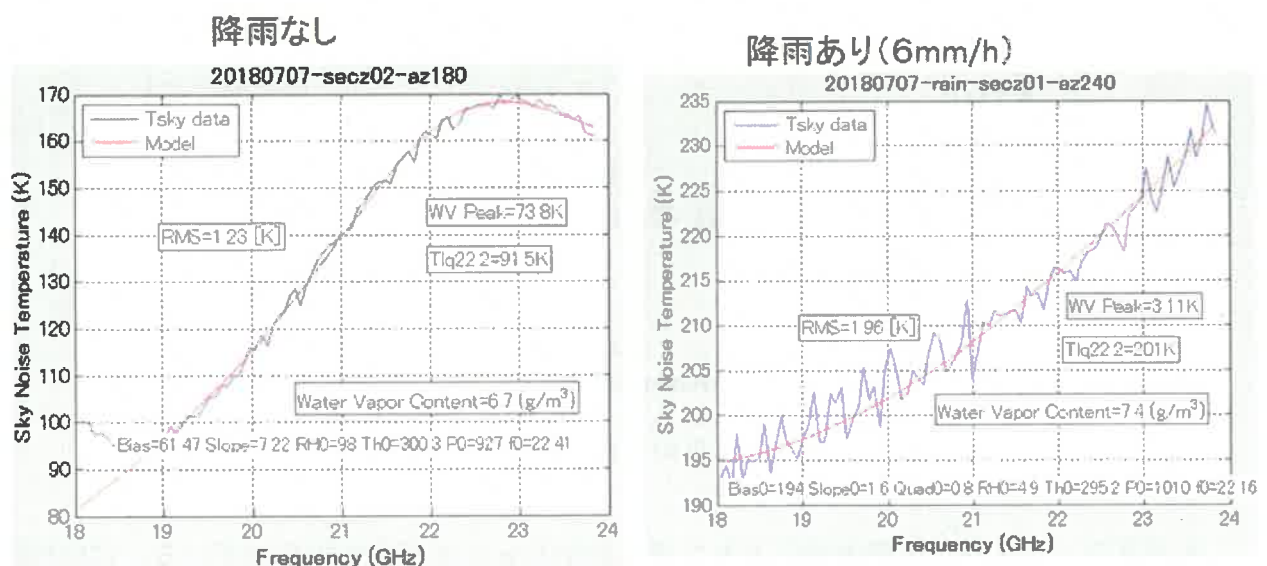


図7 降雨がない時（左）と降雨時（右）の水蒸気スペクトル

降雨がない時に明瞭に観察される水蒸気リゾナンス (22.2GHzにピーク) が、降雨時にはほとんど見られない。雨滴による吸収スペクトル (周波数の二乗) が強調され (201K) 水蒸気スペクトルはそれに隠されているが、それでもわずかな水蒸気量 (3K) がモデル解析で検出された。降雨時に計測された仰角依存特性を図8に示す。水滴による吸収を補正した水蒸気の輻射輝度温度は、降雨がない時のそれと同様、対数依存していることが明らかになり、降雨時の水蒸気も正確に計測されていることが明らかになった。

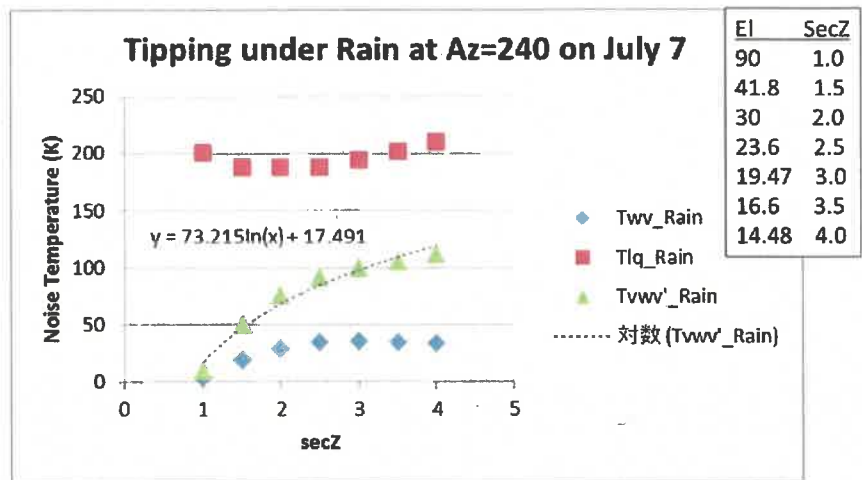


図8 降雨時における水蒸気輻射輝度温度の仰角依存特性

【専用フィルタの開発】

図3から明らかに見て取れるように、2017年度予算で整備した水蒸気ラインプロファイラ初号機では、アンチエリアシングフィルタが最適化されていないために、19GHz以下の低域で大きなスペクトル計測誤差が発生した。そこで、2018年度予算によって、16.384から24.576GHzの計測帯域に最適設計されたフィルタを特注で開発した。図9にその特性を示す。

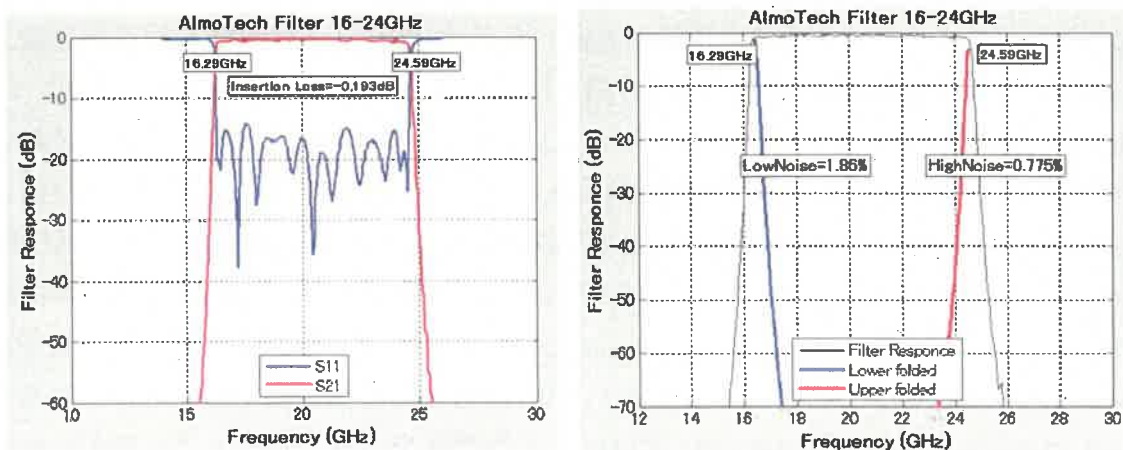


図9 デジタル分光計に特化したアンチエリアシングフィルタの特性

この特性から、低域の折り返し雑音は1.9%以下、高域では0.8%以下と帯域端における特性が大幅に改善されることが分かる。これを確かめるために2018年度末に納入されたフィルタを初号機に導入し、水蒸気スペクトルの計測を行ったところ、16.384–24.576GHzのスペクトルが折り返し雑音の影響を受けることなく計測されることが確認された（図10）。

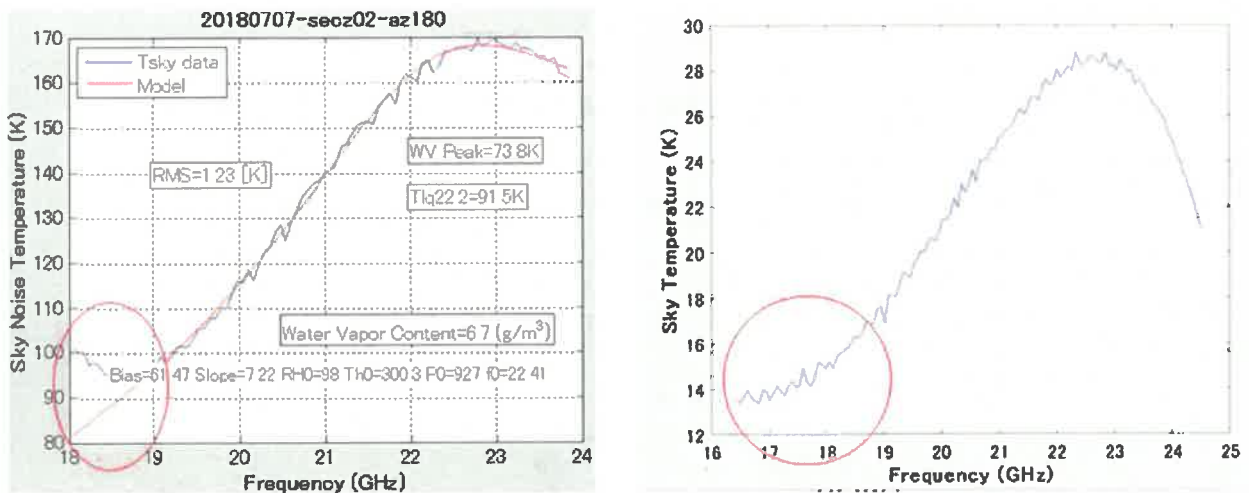


図10 特注アンチエリアシングフィルタによる水蒸気スペクトル（右）

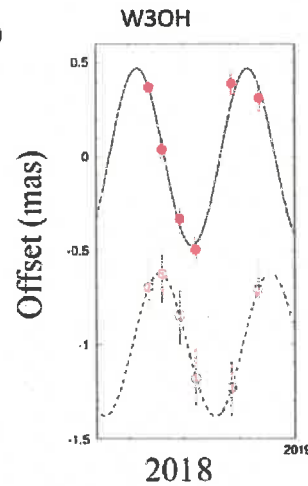
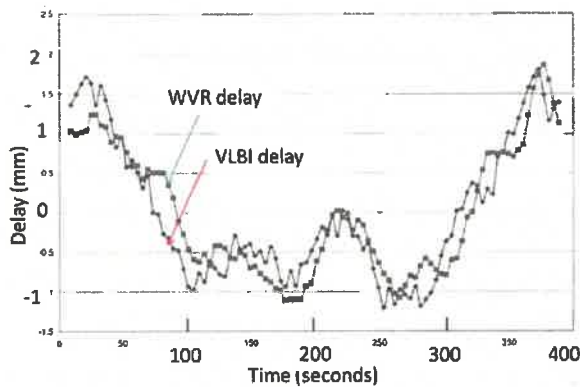
図10（左）は旧フィルタにおけるスペクトルを再掲した。図10（右）から明らかなように全帯域にわたってスペクトルが忠実に計測されていることが分かる。図中（左）は厚い雲に覆われた日の計測結果で、大きな雨滴吸収（95K@19GHz）に22.2GHzの水蒸気リゾナンスが隠されていたが、新フィルタの試験時（2019年3月5日）は快晴で湿度も低く（17K@19GHz）、22.2GHzをピークとする水蒸気リゾナンスがはっきりと見て取れた。

【次年度の計画と研究成果活用】

最新のVERAアストロメトリ計測結果を図11に示す。図11（右）の年周視差計測結果から明らかなように赤緯方向の誤差が赤経方向に比べて大きく、44 μ 秒角の誤差が生じている。VERAの当初目標は10マイクロ秒角であり、さらなる改善が求められる。また、赤経、赤緯の計測誤差も、赤緯誤差は赤経誤差の2倍以上になっている。多くの誤差原因が検討されているが、不十分な大気の屈折率補正が大きな誤差要因であることは間違いない。図10（左）には、先行研究として水蒸気ラジオメータによる水蒸気遅延とVLBIによる幾何学的遅延の比較結果を示している（Tahmoush and Rogers_2000）。これによると水蒸気量の計測補正によりVLBI遅延変動（図では6分間で3 mm）を0.1 mmの桁で補正が可能であることを示唆している。0.1 mmは基線長2200kmのVERAによる位置計測誤差で10マイクロ秒角に相当する。本研究で開発を進めている広帯域デジタル水蒸気ラインプロファイラにより、図10（左）

と同等以上の結果が得られればVERAによって究極の位置天文計測精度が達成される。このことを示すために、2018年度に開発した水蒸気ラインプロファイラ2号機をVERA入来局に設置し、初号機を設置する水沢局との間でVLBI観測を行うことが2019年度の最大の課題である。

水蒸気遅延とVLBI遅延(VERA水沢-入来)



Parallax = 0.497 ± 0.044 mas
 $(\Delta\alpha, \Delta\delta) = (0.072, 0.160)$ mas

図10 (左) 水蒸気遅延 (WVR) と幾何学的遅延の比較、
 (右) VERA位置天文観測の現状

【将来の成果活用】 火山の水蒸気爆発予知

日本は火山国で、現在もしばしば火山が爆発し、多くの人的被害も発生している。特に2014年に発生した御岳の火山爆発では死者58名、行方不明5名という大災害となった。

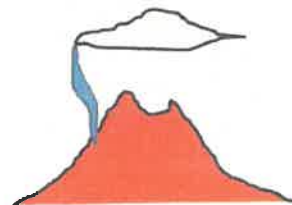
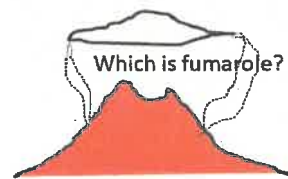


図11 干渉型広帯域デジタル水蒸気ラインプロファイラによる水蒸気噴出孔の特定

御岳の爆発（図11左上）では顕著な予兆が見られず（図11左下）、それが大きな災害をもたらした原因であった。図11左下のように噴気孔が噴煙で目視できる場合は良いが、多くは図11右上のように噴気孔付近では熱い水蒸気で目視できない。上空で冷やされ水滴になった（雲）状態は目視できる（図11右上）が、噴気孔の位置は特定できない。そこで、水蒸気分布を実時間で監視し、噴気孔が特定でき、かつ噴出する水蒸気量が急激に減少することがとらえられれば火山爆発（特に水蒸気爆発）の事前余地が可能になるものと思われる（図11右下）。水蒸気量が爆発前に急速に低下することが知られている。

VLBI観測では、水蒸気分子の検出技術、強度分布のイメージング技術をすでに確立し、天文観測に応用している。この技術によって火山爆発の予知に役立てることができれば、大きな社会的貢献が行える。天文観測は「人類の未知に挑戦する夢の学問」ではあるが、「実際の役には立たない」というのが世間的な評価である、本研究をさらに発展させて火山噴火予知に役立てられれば電波天文学の社会貢献も可能になる。このためにはラインプロファイラのアレイ化技術に取り組む必要があり、「相関型広帯域デジタル水蒸気ラインプロファイラ」の基礎実験がその第一歩となる。今後とも研究支援をお願いしたい。