

# 2019(令和元)年度国立天文台共同開発研究成果報告書

2020年5月28日

国立天文台長 殿

研究代表者	氏名	かわぐち のりゆき
		川 口 則 幸
	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	別紙報告書参照	
研究の活用	本研究の成果は、JAXAが開発を進めている広帯域マイクロ波放射計に活用されることになった。 (別紙学会発表のIEEE論文を参照)	

国立天文台共同開発研究 報告書(別紙)

氏名 川口則幸	所属 国立天文台	標題名 高精度位置天文研究用水蒸気ライン プロフィールの開発	ID
------------	-------------	--------------------------------------	----

回答日: 2020年6月10日

1 欧文論文(査読あり)

記述不要	著者(DOIが付与されていれば記述不要)	出版年	論文名	雑誌名	巻(※1)	ページもしくはID (DOIが付与されてい れば記述不要)	DOI	調査年度	備考
	N. Kawaguchi	2019	Water vapor detection under rainy weather condition	Technology Development Center News	38	6-10			
	Takashi Maeda, Noriyuki Kawaguchi, Ken- ichi Harada, Kensuke Ozeki, Yuichi Chikahiro, Hirofumi Onuki, Yoshinori Hayashi, Kenji Ema, Kazuhiro Naoki, Masashige Nakayama, and Tadashi Takano	2020	Direct RF Sampling Hyperspectral Microwave Radiometer (DS $\mu$ RAD) for Ground Use	IEEE Geoscience and remote sensing	Open Web	Open Web	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9107449">https://ieeexplore.ieee.org/document/9107449</a>		

2 和文論文(査読あり)

筆頭著者名 ローマ字表記	著者(DOIが付与されていれば記入不要)	出版年	論文名	雑誌名	巻(※1)	ページもしくはID (DOIが付与されてい れば記述不要)	DOI (付与されている場合)	調査年度	備考

3 国内・国際会議講演、学会発表等

記述不要	講演者	年	講演名	会議等名	開催場所・開催日	招待講演(※2)	調査年度	備考
	川口則幸	2019	水蒸気ラジオメータの研究開発状況(2019年)	2019年度 VLBI懇談会シンポ	大妻女子大学 千代田キャンパス 2019年11月23日			

4 修士/博士論文

記述不要	著者	学位授 与年度	論文名	学位授与大学	言語	取得学位	DOI (付与されている場合)	調査年度	備考

5 その他

--

(※1)巻がない場合は省略可。また、号の記載が必要な場合は巻の後ろに括弧で記載する。(例:57(12))  
(※2)招待講演の場合には「\*」を記載する。

(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)

2020年6月8日

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(2018年)。2019年には水蒸気ラジオメータをVERA 入来20mアンテナに常置し、連続的な計測が可能になった。また、輻射輝度温度の絶対値を計測するためには受信機雑音温度の校正が不可欠である。しかし、従来の液体窒素を用いた校正はアンテナの指向角(仰角)が大きく変化するので天体観測中における水蒸気ラジオメータの校正は行えない。そこで受信機が発生する雑音自信を利用する全く新しい校正法を考案した。この新しい手法による校正が有効であることを実証し、特許を出願した。この手法は、これからの電波天文観測に応用可能で、これまで行ってきた電波フォトメトリの確度を大幅に向上させる。

#### 【入来常置】2020年1月23日—25日

昨年度までに開発した最新のアンチエリアシングフィルタや受信機雑音の校正装置を搭載した水蒸気ラジオメータ(広帯域デジタル分光計)をVERA 入来観測局の20m望遠鏡に搭載した(写真1)。



写真1

搭載作業にあたっては水沢 VLBI 観測所の設置許可を得るとともに鹿児島大学の学生・スタッフから多大な協力を得た(写真2)。

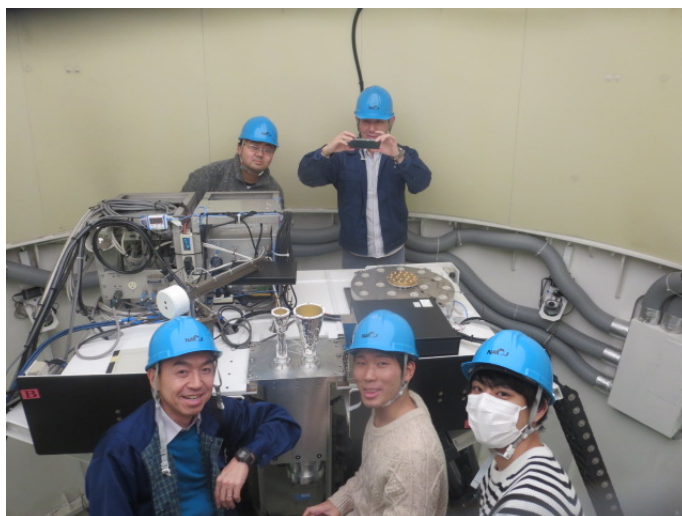


写真 2

### 【遠隔運用】

昨年度の実験では、現地（VERA 入来局）に数日滞在することで水蒸気ラジオメータを運用した。たまたま滞在中に強い降雨などがあり、降雨中でも水蒸気量の計測が可能であることが実証され、仰角に対しての水蒸気量の変化が従来想定した大気通過路長に比例するのではなく、大気通過路長の対数に依存することなどが明らかにされた（図 1）。

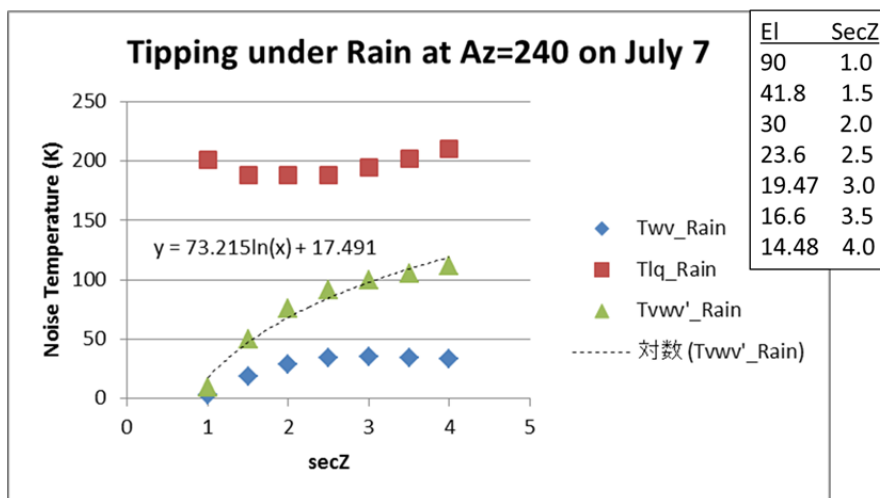


図 1

図 1 の赤□は大気中の雨滴による吸収輝度温度で、青◆が水蒸気の輻射輝度温度である。横軸は SecZ で天頂の通路長で規格した大気通過路長である。大気通過路長が長くなればなるほど（アンテナの仰角が低くなればなるほど）アンテナビーム中に含まれる水蒸気量が増え輻射輝度温度が高くなるはずである。しかし、青◆で示す計測結果は低仰角で飽和し、ほぼ一定になってしまった。これは、水蒸気輻射が雨滴の吸収を受けたものと考え、赤□で得た水滴の輻射輝度温度から推定される吸収を補正すると黄緑△で示すように低仰角における水蒸気量の増大が確認された。しかし、増加量は大気通過路長の対数に比例していることが分かった。水蒸気量の対数比例が真実かを見極めるためには多くのデータを取得して統計的な検証が必要とされる。そこで、入来局の水蒸気ラジオメータの遠隔運用システムを整備した。水蒸気ラジオメータによる計測結果はいったん入来局の運用計算機に格納され、データ伝送に

よっていつでも利用可能である。これまでのデータ取得状況を下表に示す。これまでに延べ60日間のデータが取得された。

年	開始月	開始日	開始時分	終了月	終了日	終了時分	日数
2020	2	1	00 h 35 m	2	11	19 h 35 m	11
2020	3	17	17 h 47 m	3	31	23 h 47 m	15
2020	4	1	00 h 47 m	4	23	12 h 47 m	23
2020	5	14	11 h 20 m	5	24	08 h 20 m	11

データの欠損があるのは、現地に設置したPCのデータ記録容量の制限によるもので、現在、解決法を検討している。

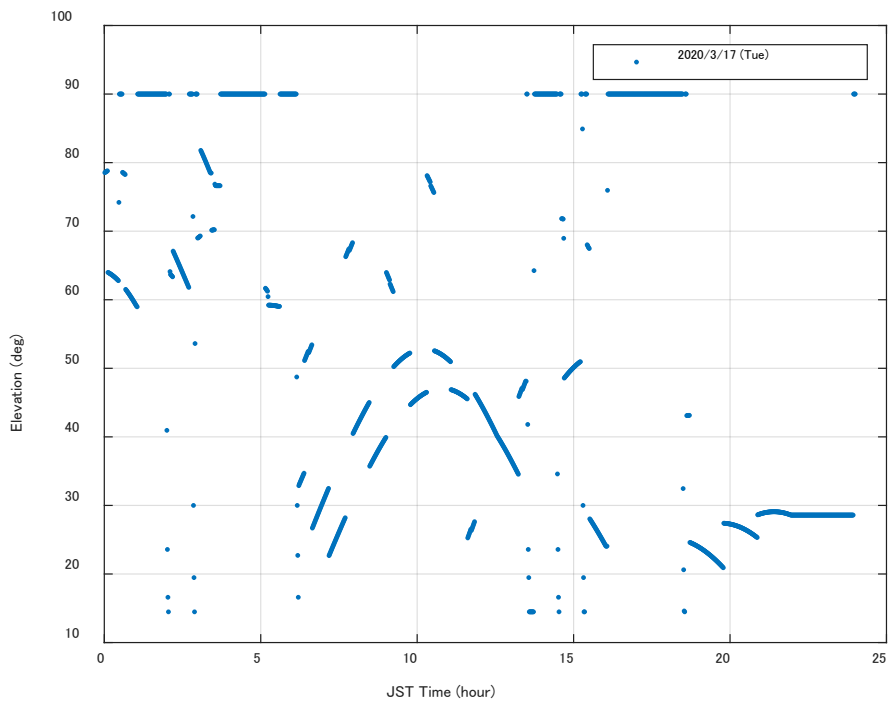


図2

2020年2月以降、VERA観測によって電波望遠鏡は運用されており、様々な仰角（方位角）でのデータが自動的に取得される。水沢VLBI観測所の田村良明氏の協力により膨大な望遠鏡の運用履歴から指向角度を抽出している。図2は3月17日の仰角運用履歴を示す。これから、一日に仰角は10数度から90度まで大きく変化していることが分かる。現在、水蒸気の輻射温度の計測結果は解析中である。

#### 【新しい受信機雑音温度校正システムの開発】

水蒸気輻射温度の正確な計測のためには受信機雑音温度の校正が不可欠である。従来の受信機雑音温度の絶対校正は液体窒素で冷却されたアブソーバ（図番21）と常温のアブソーバ（図番30）の受信電力比から行っていた（図3上、特許申請資料より）。

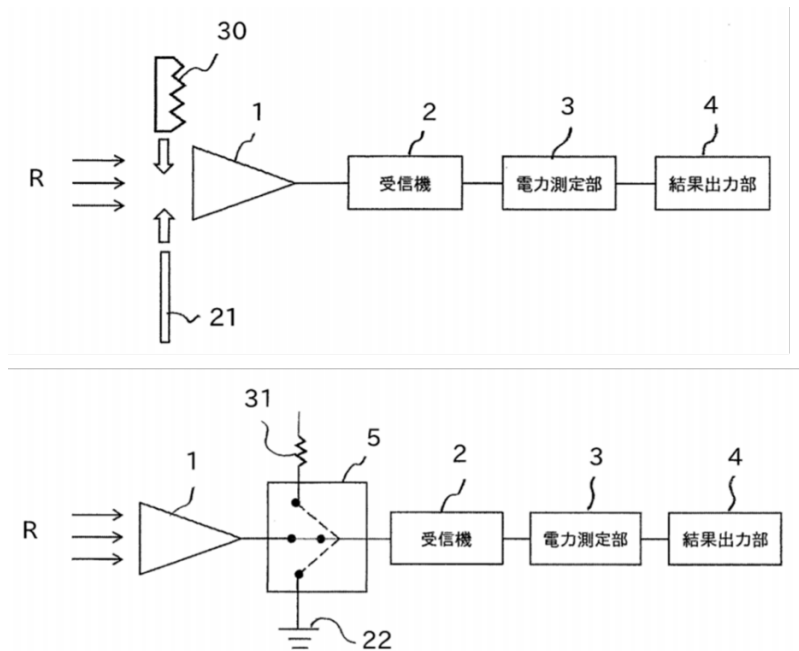


図3

様々な仰角で観測を行う電波望遠鏡では液体窒素で冷却したアブソーバーを使用することはできない。そこで、図3（下）に示すように、完全吸収ターミネータと完全反射体をスイッチで切り替える方法を考案した。完全反射体で自ら発生する雑音を基準雑音源とする方法である。従来の方法で計測した受信機雑音温度を横軸に、新しい校正法で計測した受信機雑音温度を縦軸にした結果を図4に示す。

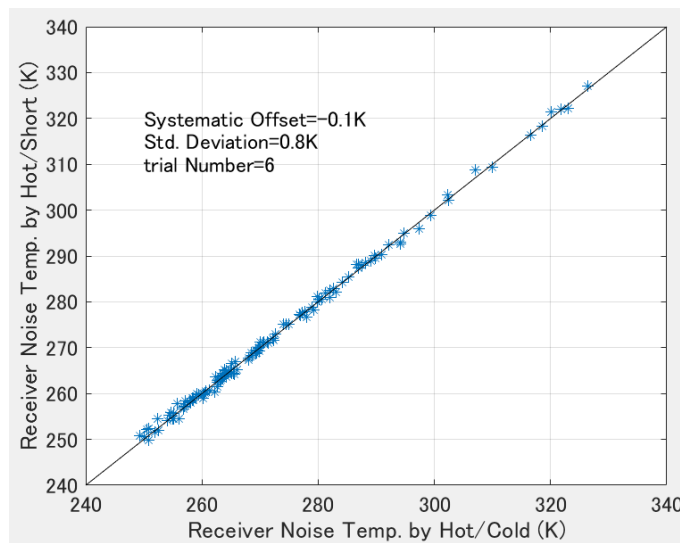


図4

図4から両者が良く一致し、新しい校正法の有効性を示している。VERA 観測では図3（上）に示す校正システムで常温アブソーバのみで受信機雑音温度の校正を行っている。観測前後で、常温アブソーバとシステム雑音温度（大気輻射+受信機雑音）の比から大気透過率と受信機雑音温度を計測している。この方法で得られた大気透過率とKVN アンテナで計測された透過率を比較したものを図5に示す。図5から明らかに VERA 計測法では大気透過率（水蒸気量に比例）を過小評価している。入来局に常置した水蒸気ラジオメータを増設して各局に配備、今後の大気補正（吸収と遅延）への活用が強く望まれる。

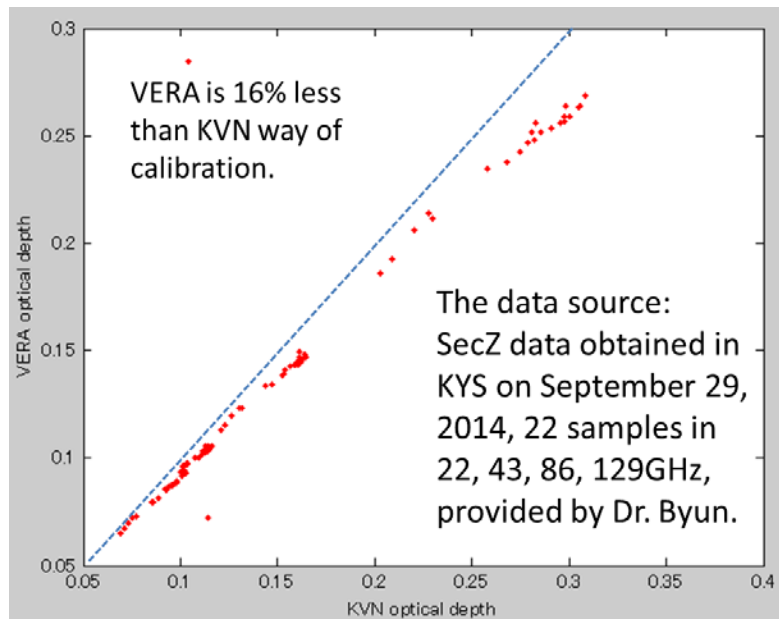


図 5

新しい校正法によって正しく輝度温度の計測が可能かどうかの検証を行った。図 3（下）の新校正システムによって受信機雑音温度を計測し、図 3（上）のようにホーンの前面に常温アブソーバと冷却アブソーバを置き、それらの輝度温度を計測した。図 6 は液体窒素で冷却された冷却アブソーバの輝度温度の計測結果を示す。実験は 10 日間、繰り返し実施され、液体窒素温度（80 K）を正確に計測していることが分かる。

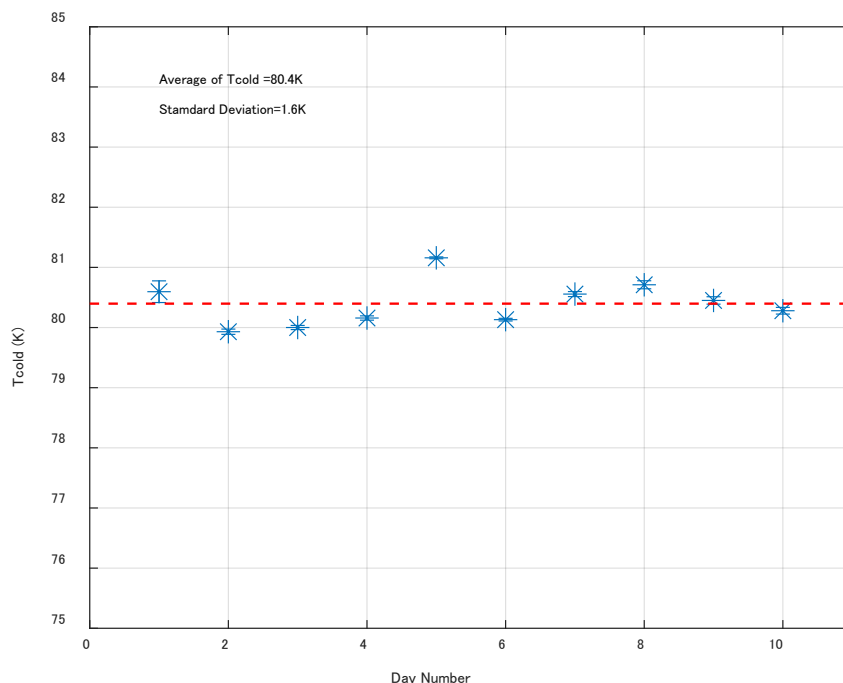


図 6

図 7 は常温アブソーバの計測結果で、水蒸気ラジオメータで計測した輝度温度（青）と別途計測された室温の計測結果（赤）が良く一致していることが分かる。特に 6 日目では、天候や空調の問題で室温が異常に高くなったが、正確に計測されていることが分かる。

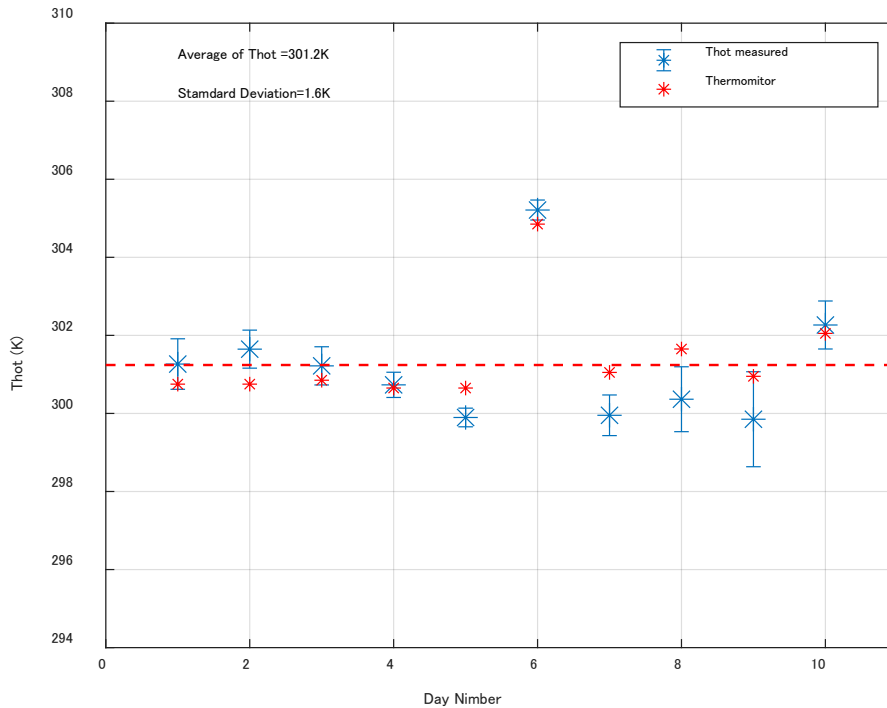


図 7

図 4、図 5、図 7 から新しい校正の有効性が立証されたと判断し、特許申請（国内、国際）を行った。

【GPS 天頂大気遅延との比較】

2018年の水蒸気ラジオメータの計測結果から天頂大気遅延を計測し、入来局に設置されたGPSによる大気遅延との比較を行った（図 8）。

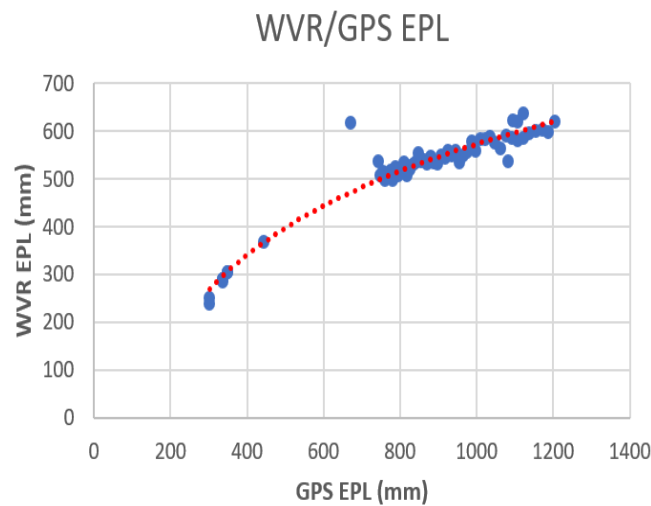


図 8

これによると天頂大気遅延も GPS 遅延に対して対数依存関係が見られた。図 1 に示した大気通過路長に対する水蒸気ラジオメータの対数依存関係共に、将来解決すべき重要な課題である。なぜなら、これまでの VLBI 測地観測では、GPS による天頂帯域遅延の計測結果を大気通路長に対してリニアであることを仮定して測地解を求めていた。これが、VLBI による鉛直成分の大きな誤差要因になっている可能性があるためである。



【研究活用】

16-24GHzの広帯域デジタル分光計を内蔵した水蒸気ラジオメータの研究成果がJAXAのマイクロ波放射計(図9)に活用されることになった。広帯域デジタル分光技術、新しい校正システムが導入され、0-8GHz、8-16GHz、16-24GHzの広帯域マイクロ波放射計が実現された。



図9

さらに、相関型ラジオメータの開発を進め、水蒸気量の高度分布の計測に挑戦している(図10)。

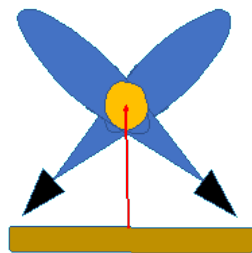


図10

2台の水蒸気ラジオメータで取得したデータの相関スペクトルから、ビームが交叉する領域の水蒸気輻射を検出する。ビームの仰角を変えることで水蒸気の高高度分布が計測可能になる。これは世界で初めての試みで、成功すればリモートセンシングの分野で画期的な成果が得られる。科研費等への申請も考えていきたい。また、相関型干渉計(図11)に成功するとフェーズドアレイ型ラジオメータが実現されることになり、火山上空の水蒸気分布とその変動が計測可能になり水蒸気爆発の予知などにも活用できるものとする(図12)。

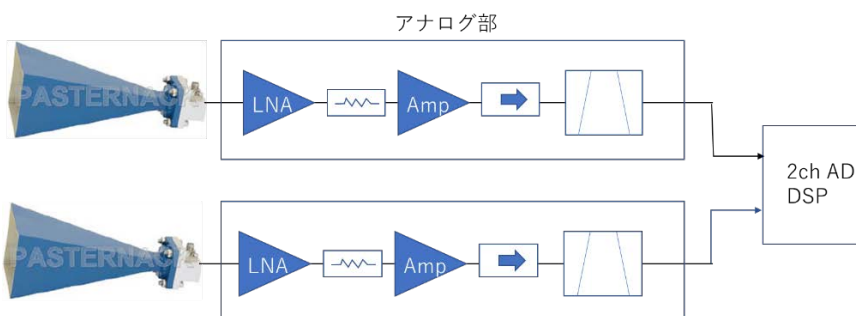
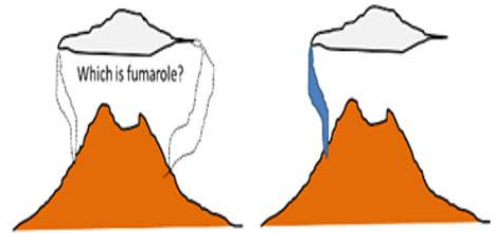


図11



2014年の御岳爆発、死者・  
行方不明者63名（左図）  
前兆現象は全くなかった（上図）。



相関型水蒸気ラジオメータで火山上空の水蒸気分布を計測する。爆発前の目には見えない水蒸気（上図左）を可視化する（上図右）ことで水蒸気爆発源の早期特定が可能になる。

図12 アレイ型水蒸気ラジオメータの水蒸気イメージングと火山水蒸気爆発の予知

### 【最後に】

3年間の共同研究開発で、1年目は試作機の開発、2年目は降雨中での水蒸気検出、3年目は実用機の開発と VERA 入来局での定常観測システムの整備など大きな研究成果を上げることができた。国立天文台を退職後も研究経費の支援を受けることができ、引き続き観測天文学の分野で貢献できていることは、国立天文台関係者各位の多大なるご配慮のおかげであり、ここに深く感謝いたします。これからも天文観測装置の開発で培った最新の計測技術を社会に役立てていきたいと思っています。今後ともご支援をお願いいたします。