

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18340138
 研究課題名(和文) 準ミリ波水蒸気分光放射計による中層大気水蒸気・オゾンの観測的研究
 研究課題名(英文) Observational study of water vapor and ozone in the middle atmosphere
 by using a quasi-millimeter wave spectroscopic radiometer

研究代表者
 水野 亮 (MIZUNO AKIRA)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
 研究者番号：80212231

研究成果の概要(和文)：オゾン破壊に関与する HO_x のソースであり大気の放射バランスでも重要な役割を果たす成層圏水蒸気鉛直分布を計測するため、HEMT 増幅器とデジタル FFT 分光計を用いた 22GHz 帯マイクロ波分光計を開発した。冷却増幅器を用いることなく常温で運用可能なため、軽量で可搬性に優れている。十分な感度を有し、対流圏での吸収により平地からの観測が困難であった成層圏水蒸気の昼夜を通じた連続観測を可能にした。

研究成果の概要(英文)：Water vapor plays an important role in stratospheric chemistry as a source of HO_x molecules that cause catalytic ozone destruction, and is also major greenhouse gas that affects the radiative energy balance in the middle atmosphere. In order to obtain the vertical profiles of stratospheric water vapor, we have newly developed a 22GHz microwave spectroscopic radiometer equipped with room temperature HEMT amplifiers and a digital FFT spectrometer. The radiometer shows good receiver performance without any cooling system, and the portability of the instrument is drastically improved compared with cooled radiometer systems. The radiometer allows us to observe the stratospheric water vapor through day and night from ground at sea level.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2007 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：環境変動,大気現象,リモートセンシング,電子デバイス・機器

1. 研究開始当初の背景

中層大気における水蒸気混合比は対流圏に比べ3桁以上少なくなるが、成層圏の温度

構造を支配しているオゾンと並んで、中層大気の物理化学過程を明らかにする上で主要な鍵を握る微量成分である。水蒸気は HO_x

のソースとしてオゾン破壊に関係しており、両者は互いに関連しあい、中層大気化学において両者の総合的な理解が必要不可欠である。しかし地上からの中層大気水蒸気の観測は、対流圏の水蒸気による吸収量が大きいため、近年全球的な観測ネットワークが形成されつつある赤外線フーリエ分光計でのリモートセンシングでは困難であった。また、露点湿度計（気球）を用いた「その場」観測では、高度分解能の高い成層圏水蒸気のデータが取得できるものの、上部成層圏以上の高さのデータが取得できないことや観測が散発的になり連続データが取得できないなどの弱点があった。電波は赤外線に比べ吸収が少なく、地上から成層圏水蒸気の鉛直分布変動を測定できるほぼ唯一の波長帯である。水蒸気は 183GHz 帯に強い線スペクトルをもつが、同周波数帯ではまだ対流圏水蒸気による吸収の影響が大きく、気圧の低い標高 3,000m 以上の高地でなければ実際の観測は難しい。準ミリ波帯の 22GHz の水蒸気スペクトル線は、183GHz 帯に比べて強度は約 2 桁近く弱いものの、吸収が少なく、平地からのモニター観測網の構築が現実的なものとなる可能性が見込まれる。研究開始当時、米国、スイスの大気観測グループが 22GHz 帯の観測装置を開発・運用を行っており、我が国でも同波長帯の観測装置を早急に立ち上げ、世界的な観測ネットワーク構築の足掛かりとすることが重要であった。

2. 研究の目的

水蒸気は HO_x のソースとしてオゾンの破壊に関係しており、中層大気中の物理過程、光化学過程を理解する上で重要な微量分子のひとつである。しかし、これまでに多くの地上観測がなされているオゾンとは対照的に、対流圏での吸収が大きい水蒸気は地上からの観測が極めて難しい。本研究では、対流圏での吸収が比較的小さくまた技術的にも最近の発展が著しいマイクロ波の分光法を用い、小型可搬型の高感度準ミリ波帯 (22GHz) 分光放射計を開発し、マイクロ波による水蒸気地上観測網構築の足がかりとすることを目的とするものである。研究項目は (1)22GHz 帯の低ノイズ常温 HEMT 増幅器に一次放射ホーン、高度角変更用回転ミラー、分光計を備えた水蒸気スペクトル線観測用の分光放射計システムを開発する。(2) 同放射計を水蒸気の 183GHz 帯スペクトル線観測を適宜行っている名古屋大学のアタカマ観測基地（チリ共和国標高 4,800m）に持ちこみ、観測データの相互検証を行う。(3) 同放射計を名古屋大学太陽地球環境研究所の陸別観測所に設置し、同観測所でモニタリング観測を進めている観測データと比較を行う。上記のような開発・観測を通して、

成層圏および中間圏における水蒸気変動の実態とそのオゾン変動への影響を明らかにすることを旨とする。

3. 研究の方法

観測システム開発では、まず観測視線高度角の切り替え用回転ミラーを備えた光学系部と受信器フロントエンドの開発、製作を行なう。次にバックエンド分光計の開発を行い、実験室における性能評価、試験観測等を通して問題点を明らかにし、改良を進め最終的に実用化を目指す。

受信器はまず HEMT(High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ)を用いた増幅器を 2 段置く。その後導波管一同軸変換により同軸モードに変換し、ミキサ、フィルタ、増幅器を用いた中間周波数信号処理系により、最終的に分光計の中心周波数に合わせた信号を出力する。

バックエンドとしては、当初、音響光学型分光計を使用する予定であったが、研究開始直後に 1GHz 帯域の非常に高速のデジタル FFT 分光計が関連企業により商品化され、これを使用するバックエンドシステムを新たに構築することに計画を変更し、それに伴い受信器系の仕様を変更し、データ取得・観測制御プログラムも新規に開発する必要が生じた。開発に伴う装置の製作および評価については、大学院生および技術支援職員らと協力しながら進める。また観測的研究面では、チリ共和国アタカマ高地で進めている水蒸気同位体、オゾン、オゾン破壊物質の観測、陸別やつくばで行っている成層圏微量分子のミリ波・赤外線データなども活用して研究を進める。

4. 研究成果

まず、22GHz 帯 HEMT アンプ、ミキサを入手し、ネットワークアナライザ等の汎用測定器を用い、個々のコンポーネントの特性を調べ、それに基づき、途中 2.1GHz を経由し最終的に中心周波数 0.5GHz、帯域 1GHz に出力する中間周波数(IF)信号処理系の設計・開発を行った。

IF 出力のトータルパワーより Y-factor 法を用いて受信器システムの雑音温度としては約 160K(SSB)が達成できていることが確認できた。常温観測システムとしては世界最高水準に達する感度を有している。

名古屋大学の豊川キャンパスの実験室において試験観測をおこない、6 時間程度の積分でアンテナ温度 $\sim 0.4\text{K}$ のスペクトルが S/N 比 ~ 12 で取得できた。3,000m 以上の高地でないと観測困難な 183GHz 帯の水蒸気スペクトルとは異なり、大気透過度の高い 22GHz 帯の水蒸気スペクトルは平地に位置する豊川市においても十分な S/N で観測可

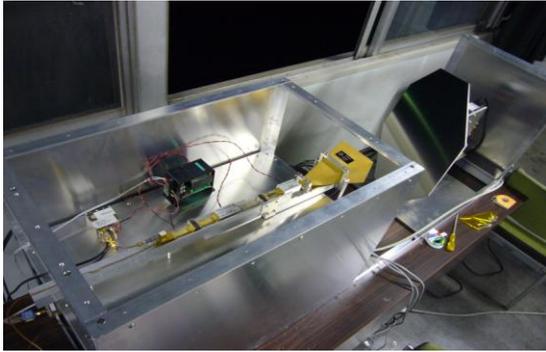


図1. 22GHz 帯常温 HEMT 受信機水蒸気観測システム

能であることを実証した。

ただし、0.2-0.4Kの信号強度に対し、振幅2K程度の周波数ベースラインのうねりが見られ、鉛直高度分布のリトリバル解析の障害となっていた。そこで中間周波数信号処理系内の適所にアイソレータやアッテネータを挿入し、うねりの原因となる定在波を抑えるようにした。また、高周波回路シミュレーションプログラム GENESYS と高精度プリント基板加工機を用いて、ストリップ線路を用いたバンドパスフィルタの製作を容易に行なえるようにした。また、回転鏡ホルダーを電動リアガイドステージ上に設置し、前後に周期的に動かす光路長変調機能を附加し、光学系内の反射に起因する定在波を抑えるなどの工夫も施した。

デジタル分光計は、当初使用予定であった音響光学型分光計と同じく1GHzの広い周波数帯域をカバーしつつ、周波数分解能は約60kHzと音響光学型分光計の分解能(約1MHz)よりも16倍高い。さらに出力ドリフト等による時間変動を示す尺度であるアラン分散最下点までの到達時間が1000秒以上と音響光学型分光計の数十秒という典型値よりも長く安定している。これにより、高度角スイッチング観測などのスイッチング時

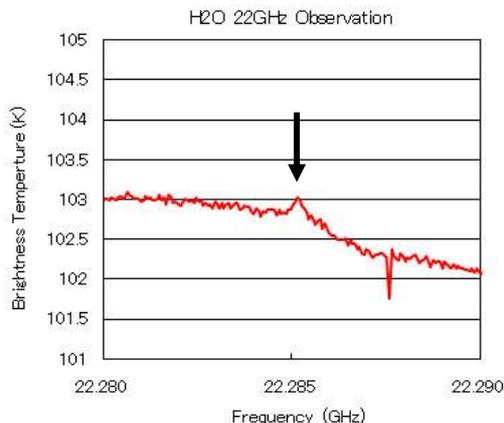


図2. 22GHz 帯水蒸気の線スペクトル

間を100秒オーダーまで延ばすことができ、スイッチングに伴う観測のデッドタイムを減らし観測効率を向上させることが可能となった。また、入出力の線形性も音響光学型分光計よりも優れ、ホワイトノイズ連続波の電波信号を入力し分光計の線形性を評価したところ、デジタル分光計の入力レベルで-40dBmから-20dBmの範囲で全チャンネルにわたって高い線形性が得られていることを確認した。ただし、入力レベルが低い場合には、周期的なスパイク状(数チャンネル幅)のスプリアスノイズがある一定周波数間隔で発現することが、測定条件を変えながら行った評価試験の結果、明らかになった。原因としては、分光計内のFPGAボードの制御クロック信号(約60MHz)が入力のA/D回路に漏れこみ、そのクロック信号をフーリエ変換した結果がスプリアスノイズとして見えていることが考えられる。製作メーカーとも協議を行ったが、ハード的な対策をすぐに講じることが難しく、当面は入力レベルの最適化やノイズ部分にソフト的なマスクをかけることで実際の観測には支障が出ないようにして観測を行っている。また、分光計入力信号が出力される中間周波数信号処理系出力端において、大気からの電波入力信号強度に比べDC成分が相対的に大きく、これが分光計A/Dの入力レンジを制限していたため、DCカットのフィルタを挿入し、DCオフセットの成分を抑えるようにした。また、実際の観測では、常温(約300K)の黒体からの電波放射と液体窒素温度(約77K)の黒体からの電波放射を基準強度信号として、電波強度スケールの較正を行うが、受信器雑音が低いほど、また観測中の大気状態が良好なほど、常温黒体と冷却黒体もしくは大気信号との分光計入力レベルの違いが大きくなる。入力レベルを大気信号に合わせると、常温黒体を見たときに入力レベルが飽和する可能性がある。現時点では大きな支障はないが、今後観測大気条件のよいサイトでの観測に備え、分光計入力部にプログラマブルアッテネータを導入し入力レベルを計算機制御で自動的に最適化調整しながら電波強度較正を行うオプションを検討するのが今後の課題である。

デジタル分光計の制御に関しては、メーカーから供給されているWindows用のドライバを用い、分光計の積分時間、窓関数、入力電圧レンジを外部から制御できるプログラムを作成した。またフラグファイルを用いて、分光計のデータ取得の起動・停止を制御できるプログラムを作成し、Linux PCとの間のソケット通信により分光計の起動、取得データのLinux PCへの転送を可能とした。これらのプログラムにより、高度角を変化させる回転鏡と分光計の間の同期を取ることが可能となり、ミクサの局部発信器(LO)信号源で

ある信号発生器(SG)や、IF トータルパワーモニタなどの周辺機器の制御も含め、すべての観測機器を Linux PC 上で制御することが可能となった。

観測的な研究面においては、既設のミリ波放射計を用い、チリ共和国アタカマ高地において、183GHz 帯の水蒸気スペクトルの検出と同データを用いた高度 40km から 64km の水蒸気鉛直分布の導出を行った(Kuwahara et al. 2008)。線スペクトルの強度をもとに下層大気的光学的厚みを 1.1 とした場合、スペクトルの S/N により決まるランダム誤差として 6%、下層大気的光学的厚みの決定誤差に伴う系統的誤差が 15%程度あると見積もられた。光学的厚みの決定精度に影響しているのは、初段の超伝導ミキサが2つの受信サイドバンドを持ち、水蒸気スペクトル信号以外のサイドバンドからの寄与が大きいことが要因となっていることが明らかになった。その決定精度を向上させるためには、183GHz 帯受信機では初段の超伝導ミキサの片サイドバンド化が必要である。一方、陸別観測所への準ミリ波水蒸気観測装置の設置および同装置による陸別での観測は、マンパワー的な制約およびデジタル分光計の組み込み実用化、光路長変調機能の組み込み等で当初想定以上の開発時間を要したため、研究期間内に終えることはできなかったが、実験室における観測システムとしては、最終的に駆動系モータードライバ等を収納し受信機コンポーネントも安定して固定できる一体型のハウジングを製作して完成させることができた。今後、実際の観測に供していきたい。

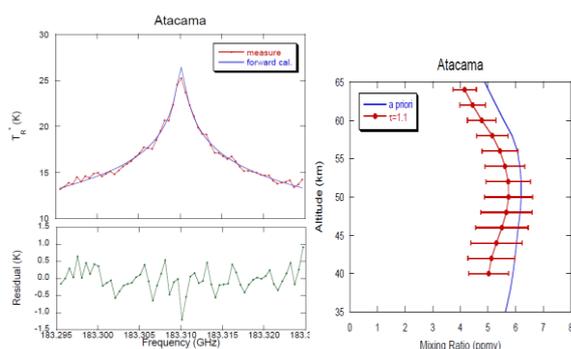


図 3. チリ共和国アタカマ高地で取得した 183GHz 帯の H₂O スペクトル(左図)と同スペクトルから導出した水蒸気混合比の鉛直分布(右図赤線、青線は初期推定値)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, S.

Asayama, N. Mizuno, T. Onishi and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave observations of water vapor emission (183 GHz) at Atacama, Chile”, *Adv. Space, Res.*, 42, 1167-1171, 2008, 査読あり

② T. Nagahama, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, A. Mizuno, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave radiometer for measuring the stratospheric ozone over Rikubetsu, Japan”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 495-509, 2008, 査読あり

③ T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Continuous measurements of the stratospheric and mesospheric ozone by using ground-based millimeter-wave radiometers”, *Proceedings of the International Conference on Submillimeter Science Technology (ICSST 04)*, 2006, 査読あり

[学会発表] (計 19 件)

① T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, R. Terada, and Y. Kojima, “Ground-based millimeter-wave measurements of mesospheric NO₂ in Atacama Highland, Chile”, *AOGS 2009 6th Annual Meeting*, 11-15 August 2009, Singapore.

② 桑原利尚, 水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 鳥山哲司, 「チリ・アタカマ高地における 200 GHz 帯ミリ波放射分光計を用いた成層圏 ClO の高度分布観測」, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 16 日~21 日, 千葉幕張メッセ

③ 長濱智生, 水野亮, 前澤裕之, 桑原利尚, 寺田良平, 児島康介, 「南米チリ・アタカマ高地における中間圏 NO₂ のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 16 日~21 日, 千葉幕張メッセ

④ A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, N. Toriyama, A. Morihira, H. Nakane, N. Mizuno, and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric H₂¹⁸O over Atacama highland, Chile”, *Quadrennial Ozone Symposium 2008*, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑤ A. Morihira, A. Mizuno, K. Toki, T. Nagahama, H. Maezawa, and T. Kuwahara, “A new compact and power-saving millimeter-wave radiometer for ground-based measurements of O₃ and ClO at 110 GHz and/or 200 GHz”, *Quadrennial Ozone Symposium 2008*, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑥ T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, R. Terada, N. Toriyama, N., Y. Kojima, and A. Morihira, “The first results of ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric ClO over Atacama, Chile”,

Quadrennial Ozone Symposium 2008, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑦ T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, N. Toriyama, Y. Kojima, T. Kuwahara, K. Toki, R. Terada and A. Morihira, “Measurements of mesospheric O₃, NO₂ and HO₂ with a ground-based millimetre-wave radiometer at Atacama, Chile”, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑧ 水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 森平淳志, 中根英昭, 福井康雄, 「チリ共和国アタカマ高地における水蒸気同位体 H₂¹⁸O のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25 日~30 日, 千葉幕張メッセ

⑨ 長濱智生, 水野亮, 前澤裕之, 桑原利尚, 寺田良平, 森平淳志, 「南米チリ・アタカマ高地における成層圏 ClO のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25 日~30 日, 千葉幕張メッセ

⑩ T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, N. Toriyama, T. Sugimoto, and M. Matsuura, “A new development of uncooled 22 GHz band spectroscopic radiometer for observations of stratospheric water vapor”, AOGS 2007 4th Annual Meeting, 30 July–4 August 2007, Bangkok.

⑪ T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, T. Sugimoto, M. Matsuura, S. Murayama, K. Toki, N. Toriyama, A. Morihira, and Y. Fukui, “Ground-based Millimeter-wave Measurements of Vertical Distribution of H₂¹⁸O in Upper Stratosphere and Mesosphere over Atacama, Chile”, AOGS 2007 4th Annual Meeting, 30 July–4 August 2007, Bangkok.

⑫ A. Mizuno, T. Sugimoto, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, M. Matsuura, N. Toriyama, Y. Fukui, N. Mizuno, T. Onishi, H. Nakane, and A. Morihira, “Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric H₂¹⁸O in a subtropical region in the southern hemisphere, Atacama highland in Chile”, IUGG 24th General Assembly, 2–13 July, 2007, Perugia.

⑬ 松浦真人, 長濱智生, 水野亮, 中根英昭, 森平淳志, 「陸別上空の成層圏オゾンの短期変動と、その力学的変動要因に関する研究」, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 19 日~24 日, 千葉幕張メッセ

⑭ 水野亮, 杉本朋世, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 松浦真人, 村山智史, 水野範和, 福井康雄, 中根英昭, 森平淳志, 「チリ・アタカマ高地における成層圏・中間圏 H₂¹⁸O の時間変動観測」, 日本気象学会春季大会, 2007 年 5 月 13-16 日, 東京

⑮ A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S.

Asayama, “A new mm-wave spectroscopic radiometer for the measurements of stratospheric and mesospheric water vapor isotopomers”, 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing.

⑯ M. Matsuura, T. Nagahama, A. Mizuno, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Analysis of short-term Variation of Stratospheric Ozone Connected with Dynamical Variations”, 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing.

⑰ T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S. Asayama, “Ground-based millimeter-wave observations of water vapor emission (183 GHz) at Atacama, Chile”, AOGS 2006 Third Annual Meeting, 10–14 July 2006, Singapore.

⑱ 水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 松浦真人, 村山智史, 杉本朋世, 福井康雄, 水野範和, 大西利和, 小川英夫, 森平淳志, 「チリ共和国アタカマ高地における成層圏・中間圏水蒸気のミリ波(183GHz) テスト観測」, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006 年 5 月 14 日~28 日, 千葉幕張メッセ

⑲ 長濱智生, 水野亮, 前澤裕之, 桑原利尚, 杉本朋世, 松浦真人, 村山智史, 森平淳志, 「ミリ波分光法による中間圏オゾン、HO_x、NO_x のモニタリング観測計画」, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006 年 5 月 14 日~28 日, 千葉幕張メッセ

〔図書〕 (計 1 件)

① 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄, 水野亮, ほか 全 14 名, 日本評論社, 宇宙の観測 II —電波天文学, 2009, 43–89

〔その他〕

ホームページ等

<http://skxl.stelab.nagoya-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 亮 (MIZUNO AKIRA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号: 80212231

(2) 研究分担者

長濱 智生 (NAGAHAMA TOMOO)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号: 70377779

前澤 裕之 (MAEZAWA HIROYUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号: 00377780

神沢 博 (KANZAWA HIROSHI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：20150047

秋吉 英治 (AKIYOSHI HIDEHARU)

独立行政法人国立環境研究所・大気圏環境
研究領域・主任研究員

研究者番号：10270589

(3) 研究協力者

桑原 利尚 (KUWAHARA TOSHIHISA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・大学院
生

児島 康介 (KOJIMA YASUSUKE)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・技術職
員