

水蒸気観測技術の発達とこれから*

小 司 禎 教**

1. はじめに

水は固体・液体・気体の三態として相変化を繰り返しながら、熱エネルギーを大気に放出し、又自らに蓄える。水蒸気の凝結した雲は、太陽や地球表面からの放射を反射する。水はこれらの働きを通して、地球の熱環境の変化を緩和する役割を担っている。一方、降水現象の源としても私たちの生活に深くかかわり、時に豪雨や豪雪といった災害をもたらす。

大気下層における水蒸気の増加は、潜在的な大気不安定の増大を意味し、豪雨の予測にとって動態の把握は重要である。しかし、水蒸気は大気を構成する成分の中で最も変化が激しく、また観測の難しい要素でもある。水蒸気観測は一般に陸上に限定され、12時間間隔で行われる高層ゾンデなどの直接観測では、水蒸気の複雑な動態を把握することはできない。

この四半世紀は、“全地球規模で均質かつ高精度な水蒸気の情報が利用可能となった歴史的な時期”，として捉えることができる。マイクロ波や赤外域の放射強度を用いたリモートセンシング技術の発展は、気象や地球環境の研究はもちろん、天気予報の精度向上にとってなくてはならないものとなっている。地球規模での通信網の飛躍的な発展、さらに数値予報で変分法によるデータ同化技術が実用化され、解析変数以外の観測物理量（例えばマイクロ波放射計の観測する放射輝度温度など）の直接同化が可能となったことなどが背景として挙げられる。気象庁では2001年9月の全球解析への3次元変分法導入を皮切りに、メソ解析（2002年3月）、領域解析（2003年3月）での4次元変分法採用、さらに2005年2月には全球解析の4次元変分法化を行ってきた。呼応するように2003年以降、全球・メソ解析の両方で衛星観測からリトリブされた

湿度の他に、輝度温度や可降水量（気柱全体の鉛直積分水蒸気量）、屈折率といった解析変数以外のデータが、同化システムに精力的に取り込まれてきている¹⁾。

本稿では、ここ25年の水蒸気観測技術の発達を概観したいが、非常に多くの水蒸気センサーが開発・研究されており、筆者の力量と紙面の制限から全てをレビューしきれものではない。ここに取り上げられなかった重要な観測技術があるとすれば、筆者の浅学によるものであり、読者の皆様のご教示、アドバイスをお待ちしたい。

2. 主な水蒸気観測手法の現状

第1表には、天気予報業務で利用されている、あるいは近い将来に利用が期待される水蒸気観測手法をまとめた。表中の精度・分解能・観測高度に関しては、同じ手法であっても衛星やセンサの感度等によって異なるため、一般的な値を記している。

2.1 直接観測

水蒸気の連続モニタリングという気象学的な要求に加え、リモートセンシングの精度確認の意味においても直接観測の重要性はますます高まっている。

気象庁では地上気象観測の湿度センサーとして、1971年から塩化リチウム露点計（塩化リチウム水溶液を塗布した膜の表面における水蒸気圧が周囲の気体の水蒸気圧と等しくなる温度を測定）を採用していたが、1996年からは静電容量式湿度計（感湿体の水分吸収に伴う誘電率の変化がもたらす電極間の静電容量の変化から湿度を測定する）が展開された^{2,3)}。

高層気象観測に関しても1992年に導入されたRS2-91型レーウィンゾンデから、静電容量式湿度計が用いられるようになった⁴⁾。静電容量式湿度計は、温度変化に依存して精度が変わるため、温度による補正が必要である。温度センサーは日射の影響を受けるため、正しく日射補正が行われないと、温度の誤差が間接的に湿度計測の精度に影響を与える。Meteorolabor製のSnow Whiteと呼ばれる湿度センサーは、日射の影響

* Development of water vapor monitoring technology : Overview and perspective.

** Yoshinori SHOJI, 気象研究所, yshoji@mri-jma.go.jp

© 2007 日本気象学会

第1表 各種水蒸気観測の分解能, 精度など.

	直接観測		リモートセンシング							
	地上気象 測器	ラジオゾ ンデ	衛星観測				地上観測			
			静止気象衛星 (イメージャ)	マイクロ波 放射計	鉛直探査計 (サウンダー)	GPS 掩蔽法	マイクロ波放射計		ライダー	地上 GPS
もともとなる観測量	感湿体の水分吸収に伴う誘電率の変化がもたらす電極間の静電容量の変化		可視、及び赤外域の放射輝度温度	マイクロ波領域の放射輝度温度	赤外・マイクロ波領域の放射輝度温度	GPS 電波の位相	マイクロ波領域の放射輝度温度		レーザー光パルスの大気分子やエアロゾルによる後方散乱強度	GPS 電波の位相
解析要素	相対湿度	相対湿度 プロファイル	対流圏中・上層の水蒸気、可降水量	可降水量	比湿プロファイル	屈折率	可降水量	湿度プロファイル	水蒸気混合比あるいは数密度のプロファイル	可降水量
水平分解能 (観測点密度)	～100 km (国によって観測点密度は異なる)	数100 km (国によって観測点密度は異なる)	衛星直下で 4 km	10～数10 km	15～50 km	対流圏下層では数100 km				約20 km (国土地理院のGPS 観測網)
観測高度	地表面	地表～ 30 km	水蒸気チャンネルでは対流圏中上層、スプリットウィンドウを利用し鉛直積算水蒸気量		地表～	地表～40 km	鉛直積算水蒸気量	地表～	100 m～ 10 km	鉛直積算水蒸気量
鉛直分解能		30 m		鉛直積算水蒸気量	2～3 km	数10 m		2 km 未満： 0.2 km 2～6 km： 0.4 km	100 m	
時間分解能	1 時間	6， 12時間	(ひまわり 6 号の場合) 北太平洋30分，他 1 時間		数時間 (衛星の数に依存)	1 機の低軌道衛星につき 1 日400～500観測	1 ～数分		数分	数分
精度	相対湿度 5 %	相対湿度 5 %	可降水量 3～5 mm	可降水量 3～5 mm	相対湿度 10～20%	屈折率 1 %	可降水量 2～3 mm	相対湿度 30～50%	水蒸気混合比 5 ～10%	可降水量 2～3 mm
主な衛星 (センサ)			GMS, MTSAT, GOES, METEOSAT	DMSP (SSM/I), TRMM (TMI), Aqua (AMSR-E)	NOAA (AMSU-A, B, MHS, HIRS), MetOp (AMSU-A, MHS, HIRS, IASI), Aqua (AMSU-A, HSB, AIRS) GOES	CHAMP SAC-C FORMOSAT -3/COSMIC MetOp GRACE				
備考		海上の観測が少ない	降雨域・厚い雲域以外で有効	降雨域・厚い雲域以外の海上で有効	降雨域・厚い雲域以外で有効	対流圏下層で負のバイアス	降雨，厚い雲が無い場合		降雨，厚い雲が無い場合 雲がある場合は雲底まで	NCEP (米) で2005年 6 月から数値予報での利用開始

を受けない鏡面露点温度計 (観測面を冷却していき, 結露を生じた時の温度を測定する) を採用している. 近年 Snow White と他のゾンデ湿度センサーとの比較研究が行われている^{5,6)}.

2.2 静止気象衛星

静止気象衛星は, 赤外域の観測チャンネルを増加させることで定量的な水蒸気観測が可能となってきた. 日本で最初の静止気象衛星 “ひまわり 1 号 (1977年打上げ)” は可視と赤外各 1 チャンネルずつであったが, その後, 赤外チャンネルは “5 号 (同1995年)” で 3 チャンネル, さらに “6 号 (同2005年)” と “7 号 (同2006年)” では 4 チャンネルに増加してきている. 6.3 μm に中心をもつ吸収帯の観測は, 水蒸気画像として配信されている. 他の水蒸気に対する吸収特性の異なる複数の赤外チャンネル (スプリットウィンド

ウ) で観測した放射輝度温度を解析することにより, 水蒸気量や雲形, 海面温度などの広範囲な情報が連続して得られる利点がある⁷⁾. 気象庁では2007年6月, 6.5~7.0 μm 帯輝度温度の全球解析への利用を開始している.

2.3 マイクロ波放射計

衛星搭載マイクロ波放射計は, この四半世紀で最も質的・量的に発展してきた観測手法と言える.

大気中の水蒸気は, その温度に応じて電磁波を射出・吸収し, 大気中に含まれる水や氷の粒子 (雨や雲など) は電磁波を射出・吸収・散乱する. その放射特性は, 特にマイクロ波 (周波数で 3~300 GHz) の領域で周波数によって異なる. 水物質の相変化に敏感な複数の周波数における放射強度観測から, 大気中の水蒸気量や降水強度等を解析するのが, マイクロ波放

射計 (Microwave radiometer : MWR) による大気中の水物質のリモートセンシングの基本的なアイデアである^{8,9)}。1970年代の NIMBUS 計画や SKYLAB 搭載の MWR による地球大気観測実験の成功を経て、1978年運用開始の SEASAT や NIMBUS-7 の MWR、及び TIROS-N、NOAA6、7、8 号のサウンダ (TOVS-MSU) で実用段階に入ったと考えられる¹⁰⁾。

可降水量の水平分布を解析するイメージャでは、1ないし2つの周波数が利用される。より多くの周波数域を用いて水蒸気のプロファイル解析するサウンダ、鉛直分解能と精度を高めるため赤外領域の観測も利用するハイパースペクトルサウンダ、さらに地球の周縁 (limb) 方向に大気を透かして観測することで同じく水蒸気プロファイル解析するリムサウンダなどの計測手法があり、数値予報に利用されている。

地上設置型のマイクロ波放射計では、観測点上空の可降水量観測の他、複数の波長帯を観測することによる水蒸気プロファイルの解析も研究されている。将来、観測周波数の増加によって精度を向上させること、また雨や雲の粒子の影響を取り除くことなど、課題はあるが、対流圏下層に分布する水蒸気の連続観測器として期待したい。

2.4 GPS (Global Positioning System)

GPS は、米国が運用する高度約 2 万 km 上空を周回する約 30 機の衛星群が射出した電波を利用した測位・航法支援システムである。受信機では GPS 衛星から到達した電波の位相を計測する。位相から解析される電波の遅れが伝播経路上の大気屈折率の積分であること、屈折率が気温、気圧、水蒸気圧の関数であることを利用して水蒸気情報を得ることができる。1990年代に急速に研究が進展し実用化レベルまで発展してきた。地上受信機の観測データから解析される可降水量は、高層ゾンデに匹敵する精度を有する¹¹⁾。また、GPS 掩蔽法では高度 500~800 km を周回する低軌道衛星に搭載した受信機で、大気を水平に貫いてくる電波の遅れを連続計測し、屈折率の鉛直変化を解析する。全球規模で均質な精度のプロファイルが得られる¹²⁾。

GPS による水蒸気観測では、高精度の時刻情報に基づき電波の位相をカウントするという単純な原理を採用しているため、降雨の影響を受けず、長期的な環境モニタリングに適する利点がある。また、GPS 掩蔽法の場合、小型・軽量 (数十 kg) の衛星で観測できる。2006年4月に台湾・米国共同の FORMOSAT-3/COSMIC プロジェクトは、6 機の掩蔽観測用衛星を1台のロケットで同時に打ち上げ、1日に約 2500にも及ぶ屈折率プロファイルを観測している。今後もインド (Ocean-Sat 2, Megha-Tropiques) や韓国

(KOMPSAT-5) など、米国以外でも掩蔽観測用衛星を打ち上げる計画が進められている。

2.5 ライダー

ライダーは、パルス状のレーザ光を大気中に発射し、大気分子やエアロゾル等による後方散乱強度を測定し、水蒸気などの微量気体成分や、風、気温、エアロゾル、雲などの分布を算出する。水蒸気を測定するライダーには、大きく分けて2種の方式がある。1つは窒素分子と水蒸気からの振動ラマン散乱を利用するもので、水蒸気の混合比が測定できる。もう1つは差分吸収法ライダーで、水蒸気の吸収線に同調したレーザ光と、この極近傍で吸収を受けない波長の2波長を用い、両者の強度変化の差から数密度を算出する。第1表には地上観測のカラムに記述したが、後者では航空機搭載型ライダーによる観測も行われている¹³⁾。

2.6 太陽光リムサウンディング

第1表には記述できなかったが、太陽光の分光技術の発達により、赤外波長域の太陽光リムサウンディングによる成層圏水蒸気の観測が、1996年に打ち上げられた地球観測衛星「みどり」によって行われている。また、地上に設置された高分解フーリエ変換型分光計による水蒸気観測も世界各地で行われている¹⁴⁾。

3. 対流圏下層の水蒸気計測に関する研究

地上設置ライダーは水蒸気鉛直プロファイルを連続・高分解能で抽出できるが、対流圏下層での観測は未だに十分行われているとは言えない。ここでは対流圏下層の水蒸気観測手法の開発と観測実験について紹介する。

3.1 気象レーダーによる水蒸気観測

気象レーダーは雨粒からの反射強度を観測対象とするが、晴天時に地表の対象物 (ビルや送電鉄塔など) からの反射電波の位相を計測することで光路長の変化を推定し、大気中の屈折率の解析に利用しようとする研究が行われている¹⁵⁾。位相を用いる点で GPS と共通点があるが、大気の下層、地表付近で対象物までの限られた範囲内で屈折率の情報が得られるという特徴がある。

3.2 ウィンドプロファイラー

ウィンドプロファイラーは風を観測するが、レーダーエコーのスペクトル幅から得られる乱流強度と、エコー強度から得られる屈折率の鉛直勾配の絶対値を用いた屈折率解析の研究が行われている。Furumoto *et al.*¹⁶⁾は、地上 GPS 観測から得られる可降水量を利用した屈折率鉛直勾配の符号判定アルゴリズムを開発し、実際の観測に適用することで高層ゾンデ観測では得られない水蒸気の急激な変化を解析することに成功している。

3.3 GPS ダウンルッキングとGPS トモグラフィ

GPS 掩蔽法の応用として、孤立峰の山頂や航空機に搭載した GPS 受信機で掩蔽観測を行い、大気境界層内の屈折率プロファイルを観測する GPS ダウンルッキング手法の研究¹⁷⁾が行われている。また、複数の地上 GPS 受信機から衛星方向の遅延量を解析し、トモグラフィという手法を用いて対流圏下層の屈折率や水蒸気密度の 3 次元構造を解析する研究¹⁸⁾も進められている。

3.4 水蒸気観測実験

下層水蒸気の観測を目的とした観測実験も、世界各地で行われている。

2002年5月13日から6月25日の間、米国南部のグレートプレーンにおいて、多くの水蒸気センサーを集中させた実験観測が行われた。水蒸気の 3 次元観測を目的の 1 つとするこの観測は、International H₂O Project (IHOP_2002) と呼ばれる¹⁹⁾。また、民間航空機搭載用の湿度センサーを開発し、実際に観測を行う TAMDAR (Tropospheric Aircraft Meteorological Data Relay) と呼ばれるプロジェクトなども精力的に取り組まれている²⁰⁾。

日本でも「メソ対流系の構造と発生・発達のメカニズムの解明 (科学技術振興機構・戦略的創造的研究推進事業)」という研究プロジェクトの中で行われた 1998年、1999年の東シナ海・九州梅雨特別観測や2001年、2002年の日本海メソ対流系観測などは、水蒸気が最も重要な観測要素の 1 つであった²¹⁾。2000年と2001年には、1～3 km 間隔に設置した75台の地上 GPS 受信機を用いた実験観測「GPS 気象学つくば稠密観測」が行われ、トモグラフィ法を用いた対流雲に関連する水蒸気構造の解析が行われた¹⁸⁾。

4. おわりに

水蒸気観測について、現状と研究開発の進展を概観した。この25年、衛星からのリモートセンシング技術の発達により、水平方向の観測範囲が拡大し、全地球規模で均質かつ高精度の水蒸気情報が得られる時代となった。次の25年は、鉛直方向の観測の拡充が重要なテーマとなる。大気下層の観測ということもあり、地上設置型のリモートセンシングがこれまで以上に重要な役割を担う。観測には誤差が不可避だが、異なる手法による観測データを相互比較することで、個々の手法特有の誤差を分離・抽出することも重要であろう。GPS 可降水量との比較によって Vaisala 製ゾンデ (RS80-A) の湿度センサーにドライバイアスが含ま

れることが明らかとなった²²⁾。一方、ラジオゾンデと GPS 可降水量との比較からは、昼と夜で差の傾向が異なることも明らかとなっている¹¹⁾。

筆者は専ら GPS 気象学の研究に携わっているが、微力ながら水蒸気観測の分野に貢献し、25年後に再び水蒸気観測のレビューが行われることがあれば、水蒸気の鉛直プロファイル観測の発展が記述されるよう、精進していきたい。

本稿を執筆するにあたり、査読者をはじめ、多数の方々からの情報を参考にさせていただきました。名前を記すことはできませんが、心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 気象庁予報部, 2007: 数値予報課報告・別冊, (53), 220pp.
- 2) 鈴木宣直, 1996: 気象研究ノート, (185), 25-36.
- 3) 気象庁編, 1975: 気象百年史, 311-312.
- 4) 阿部豊雄, 1997: 高層気象台臺報, 57, 41-58.
- 5) Nash, J. *et al.*, 2005: http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/reports/2003-2007/RSO-IC-2005_Final_Report.pdf
- 6) Vance, A. K. *et al.*, 2004: J. Atmos. Ocean. Tech., 21, 921-932.
- 7) 井上豊志郎, 2006: 気象研究ノート, (212), 1-50.
- 8) 早坂忠裕, 1996: 気象研究ノート, (187), 9-21.
- 9) 早坂忠裕, 1996: 気象研究ノート, (187), 65-76.
- 10) 伊東康之, 1996: 気象研究ノート, (187), 177-196.
- 11) 西村昌明ほか, 2003: 天気, 50, 909-917.
- 12) 津田敏隆, 2006: 天気, 53, 19-29.
- 13) 内野 修ほか, 1999: 気象研究ノート, (194), 113-168.
- 14) 深堀正志, 1999: 気象研究ノート, (194), 183-205.
- 15) Fabry, F. *et al.*, 1997: J. Atmos. Ocean. Tech., 14, 978-987.
- 16) Furumoto, J. *et al.*, 2005: J. Meteor. Soc. Japan, 83, 895-908.
- 17) Aoyama, Y. *et al.*, 2004: J. Meteor. Soc. Japan, 82, 433-440.
- 18) Seko, H. *et al.*, 2004: J. Meteor. Soc. Japan, 82, 569-586.
- 19) Weckwerth, T. M. *et al.*, 2004: Bull. Amer. Meteor. Soc., 85, 253-277.
- 20) Moninger, W. R. *et al.*, 2003: Bull. Amer. Meteor. Soc., 84, 203-216.
- 21) 吉崎正憲ほか編, 2005: 気象研究ノート, (208), 386 pp.
- 22) Nakamura, H. *et al.*, 2004: J. Meteor. Soc. Japan, 82, 277-299.