

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360186
 研究課題名（和文） 雲から地上までの3次元水蒸気分布計測とレーダ降雪観測への応用
 研究課題名（英文） 3-D distribution of water vapor in surface air near the ground and its application to snowfall measurement by radar
 研究代表者
 村本 健一郎（MURAMOTO KEN-ICHIRO）
 金沢大学・電子情報学系・教授
 研究者番号：70042835

研究成果の概要（和文）：降水と蒸発は気候変動の解明に重要である。水素と酸素の安定同位体比は水蒸気の起源の情報を含んでいることが知られている。本研究では、レーザ式水蒸気同位体分析装置、既設装置による地上の連続降雪観測、レーダとライダによる地上から降雪雲までの連続降雪観測を行った。更に、海上の水蒸気同位体長距離移動観測を実施した結果、このレーザ分光測定装置を使って、現場で水蒸気同位体比観測が可能であることが実証された。

研究成果の概要（英文）：Precipitation and evaporation play an important part in understanding of climate change. The hydrogen and oxygen stable isotope ratio in the precipitation are known to contain information on the origin of the water vapor. In order to measure continuously 3-D distribution of the water vapor and snowfall characteristics in surface air near the ground with high temporal resolution, a water-vapor isotope analyzer, multi-instrument snowfall observation system, two small microwave radars and two ceilometers are installed. Long distance recordings for stable isotope ratio of vapor on board of a ship were conducted using the water-vapor isotope analyzer. It was demonstrated that in situ measurement using this analyzer is effective.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

研究分野：雲微物理学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：水蒸気同位体比、Z-R関係、降雪粒子諸特性

1. 研究開始当初の背景

地球上の水循環に関わる水の中には、通常の H_2O の他に酸素・水素安定同位体を含んだ水がごくわずかに存在する。この中でも比較的存在量の多い $H_2^{16}O$ 、 $HD^{16}O$ 、 $H_2^{18}O$ の3種類が一般に水の安定同位体と呼ばれる。

水の安定同位体は、水の循環中の相変化の履歴や分子拡散の程度がその組成（同位体比）に反映される。従って、水の安定同位体比を測定することにより、その水が経てきた相変化と循環過程の逆推定が可能となる。こういった水の安定同位体のふるまいは、主に長年にわたる降水の安定同位体の研究から明らかにされたものであるが（例えば、GNIP: Global Network of Isotopes in Precipitation）、水蒸気の安定同位体に関しては、このようなグローバルにシステムティックなデータセットは無い。その理由の一つとして、水蒸気の場合は大気中の水蒸気を数時間掛けて採取し、適当な前処理を行った後に質量分析装置で試料の分析を行う必要があるため手間と時間が掛かり、長期にわたる高時間分解能での観測が難しかったことがあげられる。しかし近年になって分光分析法による安定同位体の測定法が発達して以前より手軽に水蒸気安定同位体を観測できるようになり、人工衛星からの測定も可能となった(Zakharov et al., 2004)。

日本海沿岸の雪は、主に日本海から蒸発した水蒸気を源としている。また、日本海上で発達した雪雲からもたらされる降雪粒子の多くは、過冷却水滴が凍結した「あられ」である。従って、冬季の日本海沿岸での水循環を議論するためには、海上の水蒸気と陸上の「あられ」の特性を明らかにしなければならない。しかし、本研究開始以前には、日本海上での水蒸気の同位体の広域連続測定は行われたことは無かった。また、レーダから降水強度を推定する関係式（Z-R 関係）は数多く提案されているが、レーダから「あられ」がもたらす降雪量を推定する、統計的に信頼できるような関係式は存在しなかった。

2. 研究の目的

「あられ」に関しては、金沢大学と北海道大学での長期の降雪粒子観測データを統計的に整理することで、「あられ」の落下速度、粒径分布、Z-R 関係を明らかにすることを目的とした。

「水蒸気の安定同位体」に関しては、これまでほとんど知られていない、細かい時空間変動特性について、分光分析の技術を利用した水蒸気安定同位体分析装置を用いて、高時間分解能での連続観測を行い、様々な気象条件、陸面状態、緯度の違いなどを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 地上の連続降雪観測

既設の小型ドップラーレーダ、降雪強度計（電子天秤）、2DVD（2D-Video-Disdrometer）、画像処理システムを近接して設置し、降雪を連続同期観測したデータをパソコンにリア

ルタイムで解析・記録するシステムを構築した。これにより、降雪の反射強度Zと降雪強度Rを同一観測空間かつ高い時間分解能で連続的に測定し、高精度のZ-R関係の解析が可能になった。画像処理システムでは、撮影された全ての降雪粒子を雪片とあられに自動分類し、粒径分布ならびに落下速度分布を測定した。図1に金沢大学自然科学研究科棟屋上に設置された全装置を示す。北海道大学では、2DVDを用いて、あられの形、大きさ、落下速度を1ミリ秒の時間精度で測定した。

(2) 地上から降雪雲までの連続観測

地上から上空の降雪雲までの水蒸気および降雪粒子を連続的に観測するシステムを構築した。すなわち、2台のシーロメータ（ライダ）を約3km離れた地点に設置し、それぞれ地点で地上から降雪雲までの水蒸気の濃度分布の時系列データを取得した。次に補間により、2地点間の濃度分布値を計算して表示した（図2）。これにより、水蒸気（雲）の上空から地上までの移動を追跡できるようになった。更に、小型垂直レーダ（MRR）を用いて降雪粒子の鉛直分布を測定した。シーロメータとレーダの観測データを組み合わせることにより、雲の移動と降雪粒子の分布の同期解析が可能になった。

(3) レーザ式水蒸気同位体分析装置による水蒸気安定同位体比の測定

大気中の「水蒸気安定同位体比」の連続観測は、分光分析法を利用した安定同位体分析装置を用いて行った。装置は $\delta^{18}O$ (‰)、 δD (‰)、水蒸気濃度(ppm)の観測が可能で、20秒~1分の時間間隔で観測を行った。測定は、北海道小樽市と京都府舞鶴市を結ぶ定期フェリー船上、札幌市の北海道大学構内および金沢大学角間キャンパスで実施した。観測期間は札幌市が2009年4~6月と9~11月、フェリーが2009年12月から2010年1月、金沢大学が2010年1月~2月である。

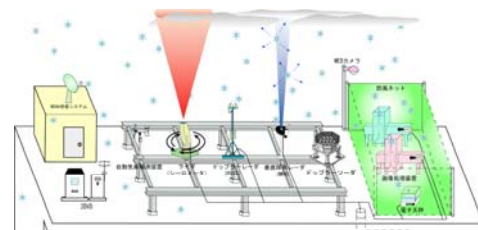


図1 降雪観測装置（金沢大学）

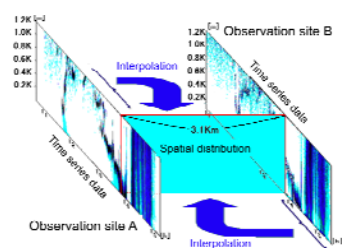


図2 2地点間の濃度分布表示法

4. 研究成果

(1) 地上の連続観測

画像処理システムにより、降雪粒子を雪片とあられに自動分類した事例を図3に示す。1分ごとに、雪片、あられ、未分類を粒子数と粒子の占める体積で表示している。

札幌でほぼ乾霰のみが降った8事例を抽出し、あられの落下速度式と粒径分布を求めた。経験的にあられの落下速度は粒径と線形関係であることがわかっていたので落下速度式は粒径と落下速度のプロットに回帰直線を引いて求めた。本研究で得られた式を過去の関係式と比較すると、最もよく一致していたのはKajikawa (1976)のLump型あられの式であった。一方、本研究で得られた式に比べMuramoto et al. (2002)の落下速度式は傾きが小さくKajikawa (1976)のConical型あられの式は傾きが大きかった。また今回求めた落下速度式と観測データとの標準偏差を粒径ごとに求めた。その結果、粒径Dと標準偏差SDは線形関係を示し、次式のように粒径の関数として標準偏差を表すことができた。

$$SD = 0.13D - 0.02$$

このように落下速度式からの標準偏差を示したのは本研究が初めてであり、落下速度による乾霰の判別に有用である。

(2) 地上から降雪雲までの連続降雪観測

金沢大学の角間キャンパスと宝町キャンパスに設置したシーロメータを用いて測定された2009年2月16日の時系列データ（横軸：時刻、縦軸：水蒸気の濃度分布）から距離分布データ（横軸：距離、縦軸：水蒸気の濃度分布）に変換した例を図4に示す。

(3) レーザ式水蒸気同位体分析装置による水蒸気安定同位体比の測定

札幌市での「水蒸気の安定同位体比」を、天候別に比較したところ、陸上では、地表付近の水蒸気の起源を安定同位体の情報を使って細かく推定することが可能であることが示唆された。また、降水と水蒸気の同位体比の短時間変動を調べたところ、降水時には雨水と水蒸気の同位体比の時間変動はきれいに連動しているが、雨が一時的に弱まったときには連動していない。このことは、降水中の水蒸気は雨水から蒸発したものが支配的であると考えたと理解できる。

2009年12月15日から2010年1月14日までの約1ヶ月間、小樽-舞鶴間を往復するフェリーに水蒸気同位体レーザ分光装置を設置し、日本海洋上水蒸気の同位体比を連続で観測した。水蒸気量は、半数以上の航海で、船が南下するにつれて増加する傾向を示したのに対し、水素同位体比には顕著な南北分布がみられない。また、各航海毎の同位体比は大きく変化しており、ローカルな蒸発の影響よりも、雪雲の発達程度や総観規模での大気循環の影響が大きいことが示唆された。

MIROC3.2(T42L20)に、JCDASの風データをナッジングし、観測期間中の下層水蒸気同位体比の再現実験を行った(図5)。モデルは、航路上の北緯40度、東経138度の日平均データを抽出し、これを各クルーズ平均値と比較した。モデル出力は、地表面ではなく、960hPa付近のデータであり、同位体比は、上層に行くほど低くなるので、絶対値は、過小評価になっているが、その効果を加味すると、モデルと観測結果はよく一致している。

今回は、レーザ分光計測装置を使った、世界でも初めての現場水蒸気同位体観測を実施したが、結果は、モデル結果と比較しても整合的であり、この装置を使って、現場で水蒸気同位体比観測が可能であることが実証された。

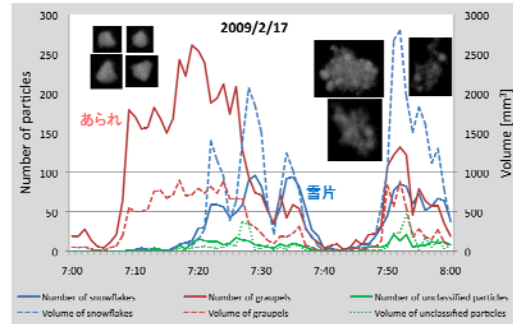


図3 降雪粒子の雪片とあられへの分類例

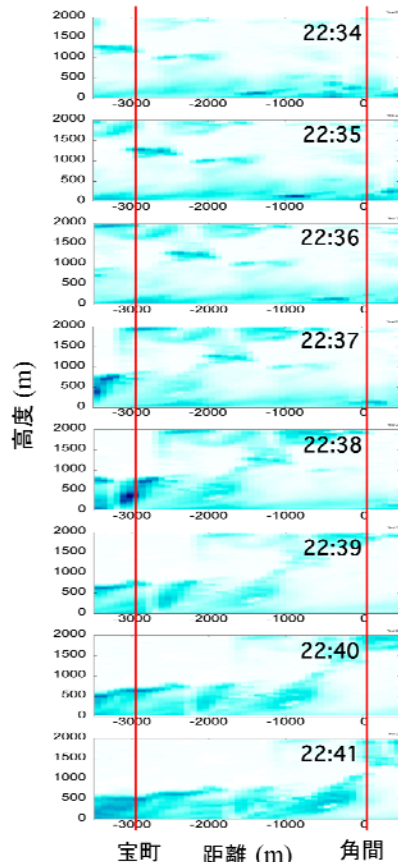
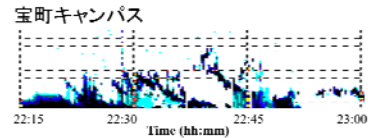


図4 2地点間の濃度分布値表示例

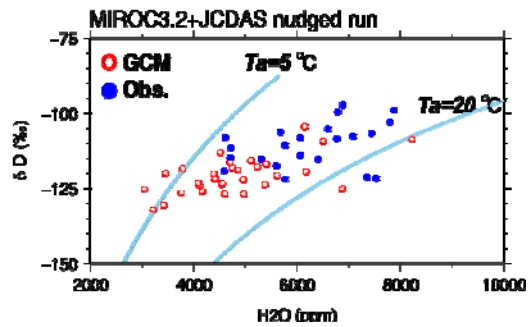


図5 観測データとモデルの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

1. Kubo, M., Sougen, A., Muramoto, K., Fujiyoshi, Y.: Z-R relation for snowfall using small Doppler radar and high sensitive snow gauges, *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 5439-5444, 2009, 査読有
2. Kubo, M., Nakamura, K., Muramoto, K., Ohigashi, T., Shinoda, T., Fujiyoshi, Y.: Visualization of water vapor distribution in the lower atmosphere using two lidars, *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 5445-5450, 2009, 査読有
3. Kubo, M., Seto, K., Muramoto, K., Fujiyoshi, Y., Shinoda, T., Ohigashi, T.: Shape classification of snow particle into snowflake and graupel using image processing, *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 5451-5456, 2009, 査読有
4. 藤吉康志: 雨滴の最大粒径の気候学(解説), 日本大気電気学会誌, Vol2 (No.1), 8-18, 2008, 査読無
5. 藤吉康志: 雨滴の最大粒径について、日本気象学会北海道支部機関紙「細氷」(解説), 53, 2-14, 2007, 査読無

〔学会発表〕(計17件)

1. 青木篤史, 川島正行, 藤吉康志: 雨縞を構成する雨滴の粒径分布特性, 日本気象学会北海道支部研究発表会, 2009年12月22日, 札幌管区气象台(札幌市), 査読無
2. 金田祐介, 川島正行, 藤吉康志: 水蒸気の酸素・水素同位体の時間変動特性, 日本気象学会北海道支部研究発表会, 2009年12月22日, 札幌管区气象台(札幌市), 査読無
3. 瀬戸一希, Karolina Nurzyska, 久保守, 村本健一郎, 椎名徹: 落下中降雪粒子の画像

処理による分類, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2009-96, pp. 21-26, 金沢市, 2009年11月26日, 査読無

4. 惣元昭好, 久保守, 村本健一郎, 椎名徹, 藤吉康志: 降雪 Z-R 関係と降雪粒子画像解析のためのユーザ支援システム, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2009-97, pp. 27-32, 金沢市, 2009年11月26日, 査読無

5. 中村健二, 久保守, 村本健一郎, 椎名徹, 大東忠保, 篠田太郎: ライダとレーダによる冬季下層大気境界層の降水粒子の可視化, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2009-98, pp. 33-38, 金沢市, 2009年11月26日, 査読無

6. 椎名徹, 惣元昭好, 瀬戸一希, 中村健二, 久保守, 村本健一郎, 藤吉康志: 小型レーダと高分解能降雪強度計による降雪粒子タイプ別の Z-R 関係, 雪氷研究大会講演要旨集, P2-05, p.100, 北海道大学(札幌市), 2009年10月1日, 査読無

7. 久保守, 瀬戸一希, 惣元昭好, 椎名徹, Karolina Nurzyska, 村本健一郎, 藤吉康志:

画像処理による自動降雪粒子分類と降雪強度の解析, 雪氷研究大会講演要旨集, P1-53, p. 88, 北海道大学(札幌市), 2009年9月30日, 査読無

8. 村本健一郎, 惣元昭好, 瀬戸一希, 中村健二, 久保守, 椎名徹, 藤吉康志: 高分解能降雪強度計による長期降雪量解析, 雪氷研究大会講演要旨集, P1-54, p. 89, 北海道大学(札幌市), 2009年9月30日, 査読無

9. 瀬戸一希, 久保守, 村本健一郎, 藤吉康志: 降雪モニタリングにおける画像計測と粒子分類, 映情学技報, vol. 33, no. 23, IST2009-30, pp. 57-60, 金沢大学(金沢市), 2009年6月16日, 査読無

10. 山村育代, 藤吉康志, 南雲信宏, 中川勝広, 下舞豊志, 村本健一郎: 最大雨滴の気候学的特性, 日本気象学会北海道支部研究発表会, 2008年12月17日, 札幌管区气象台(札幌市), 査読無

11. 藤吉康志, 山村育代, 南雲信宏, 中川勝広, 村本健一郎: 異なった気候区における日最大雨滴直径の日変化と季節変化, 「アジアモンスーンにおける対流・降水の日変化過程の解明」ワークショップ, MAHASRI 国内研究集会, 箱根, 2007年12月18日, 査読無

12. Fujiyoshi, Y.: Maximum size of raindrops - Can it be a new proxy of precipitation climatology?-, 7th GPM International Planning Workshop, Bellesalle Kudan, Tokyo, 5-7 Dec., 2007, 査読無

13. Fujiyoshi, Y. : Stable isotopes of water and Cloud Science, International Symposium on Water Isotopes and Climates, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 2-4 Dec., 2007, 査読無

[その他]

ホームページ等

<http://wis02.ec.t.kanazawa-u.ac.jp/>

<http://stellar.lowtem.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村本 健一郎 (MURAMOTO KEN-ICHIRO)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：70042835

(2) 研究分担者

久保 守 (KUBO MAMORU)

金沢大学・電子情報学系・助教

研究者番号：90249772

藤吉 康志 (FUJIYOSHI YASYSHI)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：40142749

(3) 連携研究者

木村 繁男 (KIMURA SHIGEO)

金沢大学・環日本海域環境研究センター・
教授

研究者番号：70272953

(H19：研究分担者)

椎名 徹 (SHIINA TORU)

富山高等専門学校・教授

研究者番号：80196344

(H19：研究分担者)