

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740321

研究課題名(和文) 大気レーダー・イメージング法を用いた水蒸気高度分布推定手法の高精度化と実用化

研究課題名(英文) Improvement of the humidity estimation method by applying radar imaging method

研究代表者

古本 淳一 (Furumoto, Jun-ichi)

京都大学・生存圏研究所・助教

研究者番号：10402934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、研究代表者が世界をリードして開発を推進してきたウインドプロファイラを用いた水蒸気推定手法を発展させ高精度化を計ることを目的とし、その最も重要なファクターであるレーダー観測の鉛直分解能の向上を目指した研究を進めた。従来の鉛直分解能向上手法では、レーダー観測値の保存性が原理的に確保されないため、水蒸気の定量的観測には使用できない。そこで、レーダーのオーバーサンプルデータを用いて、データ同化手法の一つである1次元変分法を用いることでレーダー分解能を向上させる手法を開発した。またレーダーエコー生成メカニズム解明に向けて、高分解能気球観測とレーダー観測の同時実証観測を実施した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to improve the vertical resolution of radar measurement by applying variational assimilation method to the oversampled radar data to implement the humidity estimation with the wind profiling radar with the higher precision. The conventional method to improve vertical resolution of radar measurement does not consider the radar parameter conservativeness, which is essential for the quantitative evaluation of radar data. Our newly developed algorithm is tested by the quasi-radar data generated from data of balloon measurement, showing the excellent performance of our method. We also aimed the improvement of humidity estimation with the radar in the aspect of the elucidation of generation mechanism in clear-air echo. The hyper-high-resolution radiosonde observation is conducted simultaneously with the radar measurement. The preliminary results shows the good coincide, and the further analysis is very promising to improve humidity estimation with the wind profiling radar.

研究分野：大気精測診断

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：水蒸気 レーダー イメージング 干渉計 RASS MUレーダー 気球観測

1. 研究開始当初の背景

地球大気中に発生する大気現象の振る舞いを考える上で、大気中の水蒸気の影響は極めて大きい。水蒸気は地球大気中では微量分子に過ぎないが、その相変化に伴う潜熱は、集中豪雨など時に災害をもたらす激しい気象現象を駆動する主要なエネルギー源となっており、水蒸気の高精度かつ高い分解能での観測は、大気現象メカニズムの解明に重要な課題である。

最も一般的に行われている大気水蒸気測定法であるラジオゾンデ観測では高度約 10 km までの水蒸気観測が可能であるが、その時間分解能を数時間より短くすることは難しく、数時間の時間スケールを持つ激しい気象擾乱のメカニズムの観測的解明には不十分である。こうした要請に応えるべく高時間分解能の水蒸気を推定するリモートセンシング手法が開発されている。例えば、光を用いた水蒸気推定手法であるラマン・ライダー観測では、対流圏内の水蒸気を高い時間分解能で得ることが可能となっている。ところが、ライダー観測は雲の薄い気象状態下に観測条件が限られるため、降雨を伴うような激しい気象擾乱の観測には適しない。このように現在に至るまで天候や昼夜に関わりなく高い分解能で水蒸気を観測する技術はいまだ発展途上であり、全天候型かつ時刻に関わりなく高い時間分解能で水蒸気を推定する手法の開発は喫緊の課題であった。

本研究開始までに、研究代表者はこうした要請に応えるべくウインドプロファイラを用いた水蒸気推定手法の開発を世界に先駆けて行ってきた。これはウインドプロファイラの乱流散乱エコー強度に含まれる水蒸気情報を取り出すことによって全天候型かつ昼夜にかかわり無く水蒸気推定を行うものである (Furumoto et al. 2003, 2006 など)。

ウインドプロファイラによる乱流散乱エコー強度は主に大気屈折率の高度変動 (M) の二乗値に依存することが知られている。また、M は湿潤大気中では主に水蒸気の高高度勾配により決定されることがわかっている (Furumoto et al. 2001)。これらの知見からエコー強度と水蒸気量の高度勾配間を関係付ける微分方程式を導出し、エコー強度から水蒸気プロファイルを推定する手法が開発された。さらにこの式に含まれる気温を音波を用いた大気温度推定技術である RASS (Radio Acoustic Sounding System) 観測を併用することで求めて実際に水蒸気量が推定された (Tsuda et al. 2001)。

ところがウインドプロファイラから得られる測定量は M^2 であるため M の符号がライダー観測からは決定できない。ライダーによる水蒸気推定にはこの符号を決定する必要がある。Furumoto et al. (2004) は、GPS 受信機から得られる可降水量データを拘束

条件として与えることで符号を推定し、水蒸気の時間高度分布を連続的に安定して推定することを可能とした。これによりラジオゾンデでは捕えることの出来ない 1 時間以下の短周期水蒸気変動も検出され、気象レーダー観測で検出された雨雲の運動や発達・衰退過程と合致する結果を得た。さらに Furumoto et al. (2006) では最尤推定に基づくデータ同化手法である 1 次元変分法を用いて符号を決定するアルゴリズムを開発しさらなる M の符号決定精度を実現している。

一方、近年、レーダーイメージング技術の発展に伴いレーダー観測の高精細化が急速に進んでいる。例えば、複数のレーダー中心周波数を用いて鉛直分解能を向上させる周波数領域干渉計映像法 (RIM: Range IMaging method) が近年開発されている。MU レーダーの乱流散乱エコー観測に RIM を適用することで高度分解能が向上し乱流の薄層構造を観測することにも成功している (Luce et al, 2006)。また、近年、音波とレーダーを用いて気温を測定する RASS (Radio Acoustic Sounding System) 観測に FII を組み合わせることで気温推定の鉛直分解能を向上させることにも成功している (Furumoto et al. 2010)。

2. 研究の目的

レーダーを用いた水蒸気推定精度を向上させ実用化させるには、レーダー観測の鉛直分解能を向上させることが最も重要な課題として残されている。一方で、近年の干渉計観測技術の進展により、限られた周波数占有帯域の制約の中で鉛直分解能を向上させる手法が開発されている。

レーダーを用いた水蒸気推定はレーダー散乱エコー強度を利用することから観測量の定量性が確保されなくてはならない。しかしながら、上記の従来手法ではスペクトルパラメーターの保存性を確保していない。水蒸気推定の精度向上に直結する鉛直分解能の向上には、スペクトルパラメーターの保存性を確保した鉛直分解能向上法が求められている。

本研究では、以上のような要請に応えるべく、スペクトルパラメーター量を保存する鉛直分解能向上法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

レーダーイメージングに代わる高分解能化手法としてレーダー観測領域を一部重ねながら受信するオーバー・サンプル法を用いて受信したデータを用いて、レーダー探査領域内部の微細な構造を得ることとする。恊うして得られたレーダー観測によるスペクトルパラメータ保存性は確保される。従来のイメージング結果が定性的な解析に留まっていたのに対し、観測量の定量的理解が可能と

なる。

同様の取り組みとして Torres and Zrníc (2003a, b), Zrníc and Ivic et al (2003) 等による先行研究が存在する。これらで開発されたホワイトニング法では観測値に誤差がないと仮定して、線形論で逆問題を解くことで高分解能化を図るものである。

しかし実際のレーダー観測データにはさまざまな誤差が含まれており、その影響が行列演算中に拡大をすることが知られている。また、図1に示すとおり、従来法ではオーバーサンプル数を増やしても、鉛直分解能の向上はたかだか、1割程度に留まることがわかった。

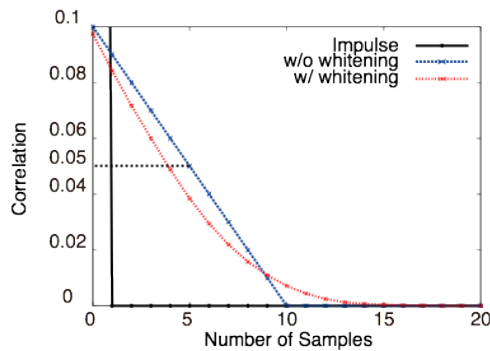


図1：オーバーサンプル数を10とした場合の、インパルス信号（黒実線）の応答関数を示す。オーバーサンプル手法による応答関数青実線、ホワイトニング法適用後の感度関数を赤線で示す。ホワイトニング法により若干半値幅が狭くなり、鉛直分解能が向上しているのがわかる。一方で、横軸で10以上離れた点のエリアジングの影響がホワイトニング法では見られる

大気観測データには必ず観測誤差を含むので、それを適切に扱う手法を開発しなくてはならない。このような要請を受けて、数値予報モデルのデータ同化手法である変分法を適用することで、観測誤差を適切に取り扱い、高分解能データを得る手法を開発した。得られた結果は同時観測された気球観測データと比較することにより検証することとした。

さらに本課題では新しい取り組みとしてレーダーによる水蒸気観測の精度向上を目指して、レーダーエコーの生成メカニズムに迫る研究も進めた。近年開発された超高分解能温度センサー搭載型ラジオゾンデとレーダーの同時観測を企画した。レーダーとの同時観測によって、レーダーエコー強度の生成メカニズムに迫ることが可能なる観測スキームを提唱した。

4. 研究成果

まず、開発手法の評価を行うため、気球観測データを用いて疑似的に鉛直分解能の低い気温データを生成し、開発アルゴリズムを用いることで詳細構造が再現出来るか調べた。

解くべき高分解能気温データ列をベクトル x 、分解能を低下させた疑似オーバーサンプル観測データを y_0 としたときに、変分法の評価関数は以下のように表される。

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(Hx - y_0)^T R^{-1}(Hx - y_0)$$

ここで、 x_b は y_0 を線形補間して作成した初期解である。 H はレーダーレンジ重み関数から求められる行列であり x に対応する疑似観測データに変換する。 B, R はそれぞれ x_b, y_0 の誤差共分散関数を示し、今回はそれぞれの誤差に基づき決定したものを経験的に調整して作成した。

最終的な最適解を求めるためには $J(x)$ を最小にする x を準ニュートン法などにより求めればよい。

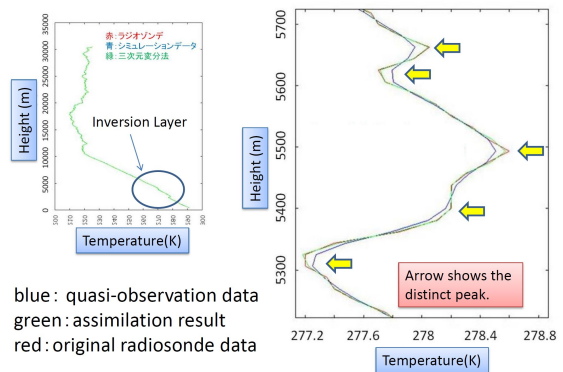


図2：気球観測による気温データ（赤）の分解能を人為的に低下させ疑似レーダー観測データ（青）を作成し、さらに変分法により最適化した結果（緑）の高度分布を示す。左図が地上から高度33kmまでの結果を示し、右図は、微細な逆転層構造が見られた高度5.2-5.7km付近のデータを示す。

図2右に示す通り、疑似レーダーデータでは気温勾配が変化する点において、ピークが緩やかになってしまっているが、変分法適用後は、鋭いピーク構造がみられるようになり、元々の気球データと極めてよく一致する。

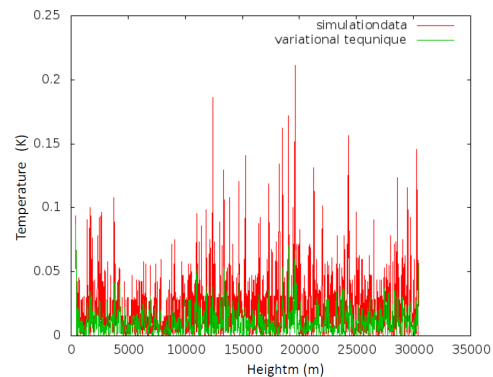


図3：気球観測で得られたもとの気温データと、疑似観測データ（赤）変分法結果（緑）の偏差の絶対値。横軸は高度を表す。

図3に気球観測の元観測データと、疑似観測データと変分法結果の偏差の絶対値を示す。全校度にわたって、変分法解析により誤差が小さくなっていることがわかり、本開発アルゴリズムが正常に動作していることがわかる。

引き続き、実際のレーダーデータを用いた解析を行った。滋賀県甲賀市信楽町に設置された MU レーダーのデータを用いて得られた東西風に本アルゴリズムを適用した結果を示す。MU レーダーは $1\mu\text{s}$ のパルスを $0.25\mu\text{s}$ ずつオーバーサンプルして取得した。

変分法観測結果は、元々の観測データと概形が一致するだけでなく、ピーク構造が鋭くなっており、より詳細な構造を捉えられたことが示唆される。

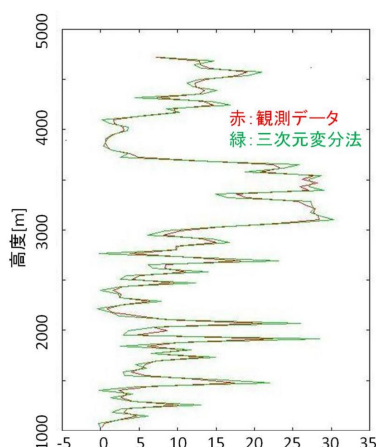


図4：MU レーダーの晴天エコーから推定された東西風の高度分布、オーバーサンプルされた観測データ(赤)と比べて、変分法観測データはよりピークが鋭く表現されている。

これを実証するため、レーダーとの同時観測できる超高分解能の気球観測の観測手法を開発し、試験観測を実施した。この結果の詳細な解析により、レーダー散乱エコーの生成メカニズムに新たな知見が得られるであろうことは間違いなく、今後も新奇な手法の確立に向けて研究開発を続けてゆく所存である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

J. S. Chen, J. Furumoto, and M. Yamamoto, 2014: Three-dimensional radar imaging of atmospheric layer and turbulence structures using multiple receivers and multiple frequencies, *Annales Geophysicae*, in print. (査読有)

J. S. Chen, C. L. Su, Y. H. Chu, R. M.

Kuong and J. Furumoto, 2014, Measurement of Range-Weighting Function for Range Imaging of VHF Atmospheric Radars Using Range Oversampling, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31, 47-61.

<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JTECH-D-12-00236.1> (査読有)

Anandan, V.K., V.N. Sureshbabu, T. Tsuda, and J. Furumoto 2013: Extraction of horizontal wind velocities from a multi receiver phased array radar system using post beam steering technique and efficiency of various beam forming methods, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, in revision. (査読有)

Sureshbabu, V.N., V.K. Anandan, T. Tsuda, J. Furumoto, and S. V. Rao, 2013: Denoising Atmospheric Radar Signals Using Spectral-Based Subspace Method Applicable for PBS Wind Estimation, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 51, 3853-3861. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6422377> (査読有)

Kumar, S., V.K. Anandan, T. Tsuda, J. Furumoto, and Ch. G. Reddy, 2013: Improved Performance in Horizontal Wind Estimation Using a Spaced Antenna Drift Technique and Signal Processing Approaches, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 51, 3056 - 3062.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6329424> (査読有)

Chen, J. S. and J. Furumoto, 2013: Measurement of Atmospheric Aspect Sensitivity Using Coherent Radar Imaging after Mitigation of Radar Beam Weighting Effect, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 30, 245-259.

<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JTECH-D-12-00007.1> (査読有)

Sureshbabu, V.N., V.K. Anandan, T. Tsuda, J. Furumoto, and S. V. Rao, 2013: Performance Analysis of Optimum Tilt Angle and Beam Configuration to Derive Horizontal Wind Velocities by Postset Beam Steering Technique, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 51, 520 - 526.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06244902> (査読有)

児玉安正・佐藤悠・石田祐宣・堀内征太郎・瀬古弘・津田敏隆・橋口宏之・古本淳一・東邦昭, 2013: 青森県津軽地方で行われた冬季季節風とヤマセの高層気象観測, および気象庁非静力学モデルを用いたダウンスケー

ル再現実験 . 天気, 60 (1) ,11-20.
http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2013/2013_01_0005.pdf(査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

J. Furumoto, 2013: Improvement of Vertical Resolutions in Wind Profiling Radars to Detect Detailed Vertical Structure of Wind Velocities Temperature and Humidity, International symposium on Earth-Science Challenges in Kyoto. 2013 年 10 月 3 日 ~ 5 日、京都.

古本淳一、山本衛、橋口浩之、津田敏隆、EISCAT 3D による下層大気の 3 次元風速分布観測に向けて、日本地球惑星科学連合大会、2013 年 5 月 19 日 ~ 24 日、千葉.

古本淳一、橋口浩之、山本衛、津田敏隆、RASS による気温観測の実用化、日本地球惑星科学連合大会、2013 年 5 月 19 日 ~ 24 日、千葉.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：最大瞬間風速予測システム、コンピュータプログラム、及び、突風警報情報発令システム

発明者：古本淳一、東邦昭、橋口浩之

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-7263

出願年月日：平成 26 年 1 月 17 日

国内外の別：国内

6 . 研究組織

(1)研究代表者

古本 淳一 (FURUMOTO, Jun-ichi)

京都大学・生存圏研究所・助教

研究者番号：1 0 4 0 2 9 3 4