

レーダーインバージョンによる大気擾乱精測技術の開発

Development of measurement technique for atmospheric disturbance using radar inversion

研究代表者：橋口浩之（京都大学生存圏研究所）

hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：西村耕司（京都大学生存圏研究所）

nishimura@rish.kyoto-u.ac.jp

担当：理論的側面の検討と研究の助言

研究分担者：揣 爾陸（京都大学生存圏研究所）

chuai.erlu.87t@st.kyoto-u.ac.jp

担当：シミュレーションコードの作成と解析

研究目的 (Research Objective):

スペクトル観測方程式は、レーダーシステムと大気による電波散乱過程をモデル化した理論から導出され、Nishimura et al. [IEEE, 2020]により提唱された。これによると、レーダーシステムが多チャンネル受信（干渉計観測）の場合に、レーダービームを向けた観測体積内の3次元風速が観測可能となる。すなわち、従来のDBS観測では困難であった3次元風速場の観測が、レーダービームを多方向に向けることで可能となる(Fig.1)。この観測を実現するため、スペクトル観測方程式の逆問題を数値的に解いて3次元風速を推定するインバージョンアルゴリズムを構築した(RI法)。数値実験による推定精度検証のため、散乱シミュレーションを開発し、RI法の精度検証を行なうと同時に、従来法である空間アンテナ法(SA法)による風速推定による比較も踏まえたRI法の相対的な性能も評価するため、数値実験を行なった。また、MUレーダーを用いて、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)レーダーの開発・実証実験を行った。

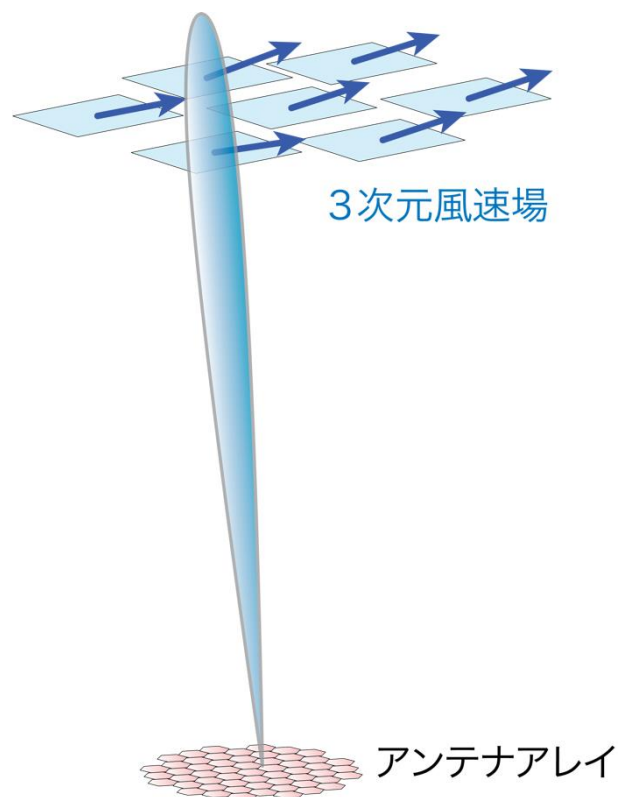


Fig. 1 3次元風速場観測の概念図

計算手法 (Computational Aspects):

散乱シミュレーションは、サンプリング領域よりも十分に広い空間内に一様分布する散乱体が、ある平均風速と速度分散をパラメータとする正規分布に従うランダムな速度でレーダーの送信波を散乱しながら、等速直線運動するモデルである(Fig.2)。散乱体の初期位置は、レーダーの半波長ほどの間隔で、ランダムな一様分布によって決まり、サンプリング領域の境界条件は周期境界としている。シミュレーションの計算コストは、散乱体の個数とアンテナ本数に依存する。本研究ではレーダーシステムとして、数多くの素子アンテナを持つ MU レーダーを想定しているため、大規模計算機を利用した計算が必要となる(Table 1)。散乱シミュレーションの時間発展モデルは散乱体ごとに独立なので、散乱体を計算機の利用可能ノード数で分割し、各ノード内では OpenMP を用いた並列計算を行った。

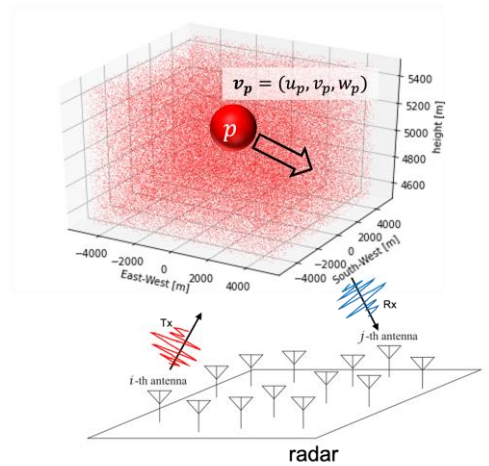


Fig.2 散乱シミュレーションの概念図

Table 1 シミュレーションの設定パラメータ

種別	設定項目	設定値
レーダーシステム	サンプリング間隔	0.032 sec
	ビーム方向	(天頂角, 方位角)=(0,0)
	距離分解能	150 m
	送信波長	6.45 m
	サンプリングレンジ	2000 m
	受信チャンネル	3
	送受信サブアレイ	F2, F3, F4
	レーダーの中心座標	$(x, y, z) = (0, 0, 0)$ m
散乱モデル	サンプリング継続時間	128 sec (サンプリング 4000 回)
	散乱体積領域 V の x 軸移動領域 (東西)	$-2000 \leq x \leq 2000$ m
	散乱体積領域 V の y 軸移動領域 (南北)	$-2000 \leq y \leq 2000$ m
	散乱体積領域 V の z 軸移動領域 (上下)	$1500 \leq z \leq 2500$ m
	散乱体積領域 V 内の散乱体個数	$O(10^8)$ 個
	風速	$(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) = (20, 0, 1)$ m/s
	速度分散	$\sigma = 0.5$ m/s

研究成果 (Accomplishments) :

従来、RI 法では相互相関関数全体でフィッティングしていたが、しばしば失敗することがあった。そこでフィッティング範囲を制限する改良を行った。最適な範囲を調べ、Fig.3 に示すように相互相関のピークラグから $\pm 3\sigma$ (σ : 標準偏差)の範囲のみを

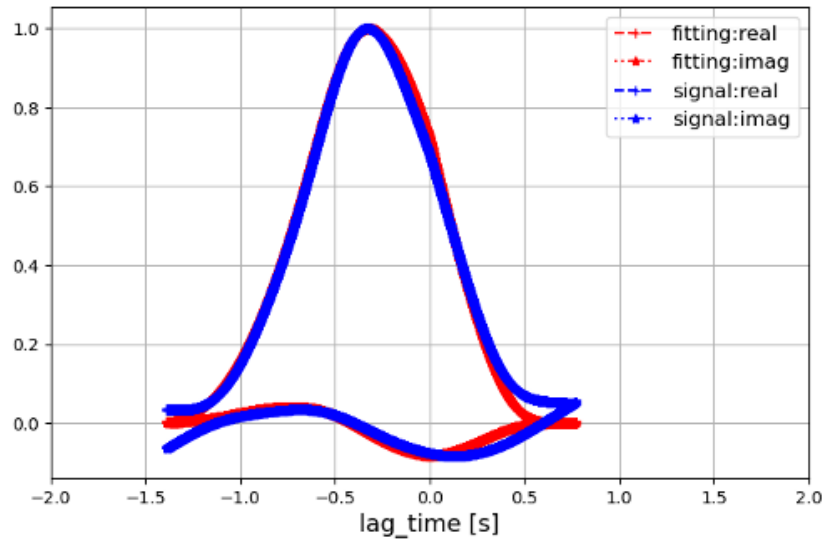


Fig.3 改良型 RI 法によるフィッティング結果。

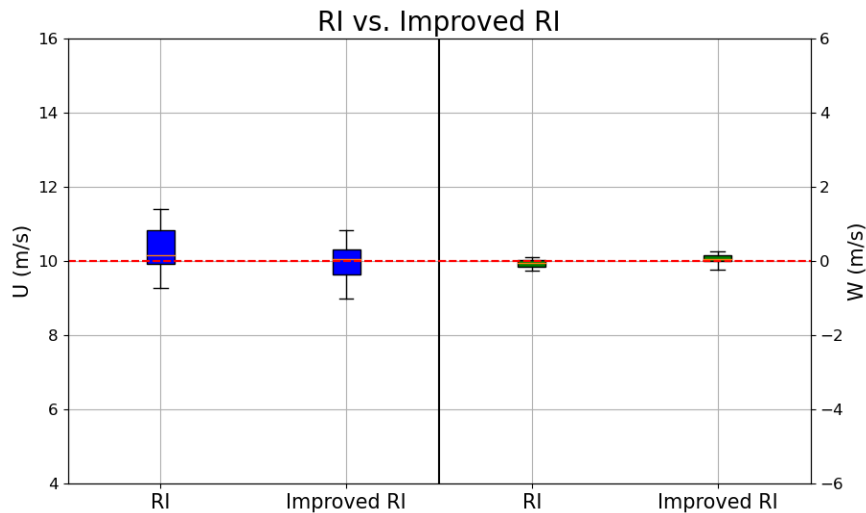


Fig.4 従来の RI 法と改良型 RI 法による水平風(左)と鉛直流(右)の推定結果。

フィッティング対象とすると、安定してフィッティングに成功することが分かった。Fig.4 に、従来の RI 法と改良型 RI 法による、水平風と鉛直流の推定結果を示す。改良型 RI 法により、オフセットもばらつきも減少していることが分かる。また、SA 法との比較も行い、SA 法ではオフセットが見られたが、RI 法では全ての推定パラメータの標準偏差内に真値を含んでおり、高精度に 3 次元風速および速度分散を推定できた。また、RI 法では SA 法では得られない鉛直流と風速分散も推定可能である。以上より、電波散乱の物理的、統計的性質とレーダーシステムを考慮したスペクトル観測方程式のインバージョンアルゴリズムは、従来手法に比べ、推定の高精度化と観測情報量の向上を図ることができる。

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output; 多入力多出力) レーダーは、アレイレーダーにおいて直交する複数の信号を異なるアンテナ素子から同時に送信し、複数のアンテナで受信することで、物理開口を超える受信仮想開口を形成する技術である。MU

レーダーを部分的に改造することで MIMO レーダーとしての観測実験を実施した。複数の信号発生器を用いて、ローカル信号周波数を僅かに変えることで送信信号の直交性を確保し、ドップラー分割多重接続(DDMA)方式を実現した。また、複数の任意波形発生器を用いて、IF 信号を完全相補符号変調信号に置き換えることにより、符号分割多重接続(CDMA)方式を実現した。月面反射エコーを利用してビームパターンを推定し、理論と矛盾しない結果を得た。MIMO によりチャンネル数が大幅に増えるので、Capon 法などのアダプティブ信号処理を適用することで、さらに分解能を向上できることも実証した。しかし、実験結果を従来のレーダー工学の知識で説明できない部分があるため、今後スペクトル観測方程式を用いた数値シミュレーションを MIMO レーダーに応用し、観測結果の解釈・評価を行うことを検討している。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. R. Tamura, K. Nishimura and H. Hashiguchi, Volume scattering simulation for 3D wind vector estimation using radar inversion, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting, online, May 30-June 6, 2021
2. Ryosuke Tamura, Koji Nishimura and Hiroyuki Hashiguchi, The Inversion Algorithm of Atmospheric Radar Signal Given by a 3-Dimensional Volume Scattering Semi-Physical Simulation, LAPAN/BRIN-Kyoto University International Symposium for Equatorial Atmosphere / The 6th Asia Research Node Symposium on Humanosphere Science / International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment (INCREASE), online, September 20-21, 2021.
3. 田村亮祐・西村耕司・橋口浩之, レーダー干渉計インバージョンによる 3 次元風速場推定手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 幕張・オンライン, 2022 年 5 月 22-6 月 3 日.
4. 王元・西村耕司・橋口浩之, バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 北海道大学・オンライン, 2022 年 10 月 24-27 日.
5. 松田知也・西村耕司・橋口浩之, MU レーダーを用いた DDMA MIMO レーダー検証 -月面反射エコーを用いた Capon 法との組み合わせ 実験-, 日本気象学会 2023 年度春季大会, オンライン・東京, 2023 年 5 月 16-20 日.
6. Koji Nishimura, Erlu Chuai, and Hiroyuki Hashiguchi, Estimating the Cross-Radial Wind Velocity based on the Spectral Observation Theory for Atmospheric Radar, XXXVth URSI General Assembly of and Scientific Symposium, Sapporo, Japan, August 19-26, 2023.
7. Chuai Erlu, Koji Nishimura, and Hiroyuki Hashiguchi, Estimating the

Cross-Radial Wind Velocity based on the Spectral Observation Theory for Atmospheric Radar, 第 17 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, オンライン, 2023 年 9 月 19-20 日.

8. Tomoya Matsuda, Koji Nishimura, and Hiroyuki Hashiguchi, DDMA-MIMO observation with the MU radar, International Symposium on the 40th Anniversary of the MU Radar, Online and Uji Hybrid meeting, November 18-21, 2024.
9. 松田知也・西村耕司・橋口浩之, DDMA/CDMA-MIMO 方式を用いた MU レーダーによる観測実験, 第 19 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, オンライン, 2025 年 9 月 8-9 日.

(修士論文)

田村亮祐, レーダー干渉計インバージョンによる 3 次元風速場推定の研究, 令和 3 年度京都大学理学研究科地球惑星科学専攻修士論文.

王元, Development of Low Altitude Observation Technology by Bistatic Radar (バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発), 令和 4 年度京都大学情報学研究科通信情報システム専攻修士論文.

Chuai Erlu, Estimation of Cross-Range Wind Velocity Components Based on Radar Inversion Technique (レーダーインバージョン技術によるクロスレンジ風速成分の推定), 令和 5 年度京都大学情報学研究科通信情報システム専攻修士論文.

(博士論文)

松田知也, Development of the MIMO Radar with the MU Radar (MU レーダーを用いた MIMO レーダーの開発), 京都大学情報学研究科通信情報システムコース博士論文, 2025.