

偏波降雨レーダが観測した渡り鳥エコー

民田晴也

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

概要

沖縄偏波降雨レーダが観測した初夏に西太平洋を渡る大規模な渡り鳥エコーを紹介する。

1 はじめに

降雨レーダは降水観測に適した周波数を利用しているが、晴天時にレーダエコー(Clear air radar echo; CAE)を観測する場合がある。その起源として、鳥や虫などの生体エコー、大気屈折率の非一様性による Bragg 散乱エコー(大気エコー)がある。大気エコーを風観測に利用する場合、その精度向上のため、風に逆らって移動する生体エコーの分離が重要である。偏波レーダ(polarimetric radar)は水平・垂直偏波を使い分けることで、従来のレーダ反射因子 Z に加え、散乱体の形状に関する複数のパラメータを取得が可能であり、複雑な形状で特徴付けられる生体エコーの分離に有効である。例えば、水平・垂直偏波のレーダ反射因子比 Z_{dr} は散乱体の縦横比を代表し、偏波間相関係数 ρ_{hv} は散乱断面の規則性・安定性を表す^[1]。大気エコーの Z_{dr} は 0 dB に近い値(散乱体が球形)を、 ρ_{hv} は 1 に近い値(均一な散乱断面)を示す。逆に、生体エコーは Z_{dr} の絶対値が大きな値を、 ρ_{hv} は小さな値を示す^[2]。

琉球諸島は九州から台湾にかけて弓状に並び、中央に沖縄島が位置している。渡り鳥は洋上を移住する場合、島に沿って飛行する傾向があり、沖縄レーダは琉球諸島を経由する渡り鳥を観察するに適している。また、沖縄は台風の通り道に位置し、本州に停滞する梅雨前線に水蒸気を供給する領域に存在するため、多くの降水観測が実施されてきた。情報通信研究機構(NICT)は降雨偏波レーダを沖縄島中部の山頂で定常運用を行っている。2005年6月29日、レーダは太平洋を越えて沖縄島に飛来した渡り鳥エコーを観測した。本報告では、この渡り鳥エコーの偏波特性を紹介する。

2 レーダ観測

NICT 沖縄亜熱帯計測技術センターは COBRA (C band Okinawa Bistatic polarimetric Radar)^[3]を沖縄島中部(26.59°N, 128.06°E, 標高 363 m)で運用し、沖縄島北部の大宜味大気観測施設では wind profiler radar(WPR)による沖縄島上空の風鉛直分布の定常観測を行っている。地球水循環研究センターでは、COBRA, WPR, ラジオゾンデを用いた大気境界層の集中観測を2005年7月上旬に行った。この観測で、COBRA は主に WPR の鉛直分布を含む鉛直断面(RHI)の連続観測を行った。COBRA はこの集中観測モードで6月28日から運用された。表1にCOBRAの主な仕様と観測設定を示す。

表 1. COBRA major specification and observational settings

送信周波数	5.3 GHz	PPI	仰角 1.4, 7, 8 deg
送信電力	250 kW	RHI	方位角 41.2 deg
アンテナ	4.5 m ϕ (45 dB)		3 PPI & 14 RHI every 10 min
ビーム幅	0.91 deg	分解能	75m, 300m (PPI 仰角 1.4 deg)

PPI: Plane Position Indicator, RHI: Range Height Indicator

3 気象状況

沖縄地方は 6 月 27 日に梅雨明けし、6 月 29 日、沖縄島は太平洋高気圧に覆われ南から南東風が卓越した。7 月 1 日以降、太平洋高気圧は勢力を衰え、沖縄島は太平洋高気圧の北西エッジに位置することで風向は南西に変わり、梅雨前線が九州南部まで南下した 7 月 6 日以降は 10 m s^{-1} に達する強い風が吹いた。6 月 29 日 0900JST のラジオゾンデ(那覇)は、0 高度が 5 km に位置し、地上から高度 5 km まで風向は南から南東で風速は 6 m s^{-1} 。但し、大気境界層上端周辺の高度 1 km に 10 m s^{-1} の強い南風が存在した。このように、渡り鳥は発達した太平洋高気圧の南風に乗って太平洋を渡り飛来した。特に、低高度を移住した渡り鳥は高度 1 km の下層ジェットを利用した可能性がある。

4 渡り鳥エコー

2005 年 6 月 29 日、COBRA は高度 1.5 km を移住するエコーと、高度 5 km を飛来するエコーを観測した。低高度を移動したエコーは、10 時に COBRA の南 90 km の洋上に現れ、14 時半に沖縄島を通過し、17 時に COBRA の北 45 km の伊是名島周辺で収束するように消滅した。高高度を移動したエコーは南から飛来し、沖縄島上空で一部は西に転進、一部は沖縄島北東部で降下し、低高度を海岸線に沿って飛行し再び北へと飛び去った。

4.1 低高度を移住した渡り鳥

アジサシ類は、初夏に沖縄・奄美地方で多く目撃される。クロエリアジサシ、ベニアジサシは 6 月下旬から沖縄での観測数が増え^[4]、近年、ベニアジサシがオーストラリアから移住していることが確認された^[5]。アジサシは体長 30 cm(翼長 70cm)の小型の渡り鳥であるが、高度 2km での目撃例がある^[6]。大型の渡り鳥は滑空して移住することが多いが、小型の渡り鳥は長距離移住時に高度を維持するため羽ばたきながら飛行する^[7]。

図 1 に、太平洋を越えて沖縄島に飛来した渡り鳥エコーの Z_{dr} , Z_{hv} の水平分布 (PPI 仰角 1.4 度) を示す。エコーは顕著な正の Z_{dr} を示し (横長の飛行物体)、0.6 以下の Z_{hv} を示した (散乱断面積が不安定・不均一)。図 2 に RHI で観測した渡り鳥エコーの Z_{dr} , Z_{hv} の出現頻度を示す。エコーは 1.5 km 以下に現れ、 Z_{dr} の頻度分布は 5dB にピークを持ち、 Z_{hv} は 80 % 以上のエコーが 0.6 以下に集中している。不均一、不安定な散乱断面積は、複数の羽ばたく渡り鳥をレーダが観測したと考えられる。

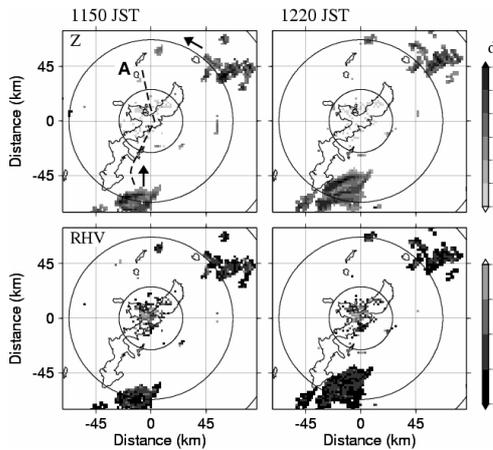


図 1.太平洋を越え沖縄島に飛来した渡り鳥エコーのレーダ反射因子Zと偏波間相関係数 ρ_{hv} (PPI at 1.4 deg EL at 1150 and 1220 JST)。破線は軌跡を、円は高度 1 km, 2 km のレンジを示す。A は伊是名島,伊平屋島。

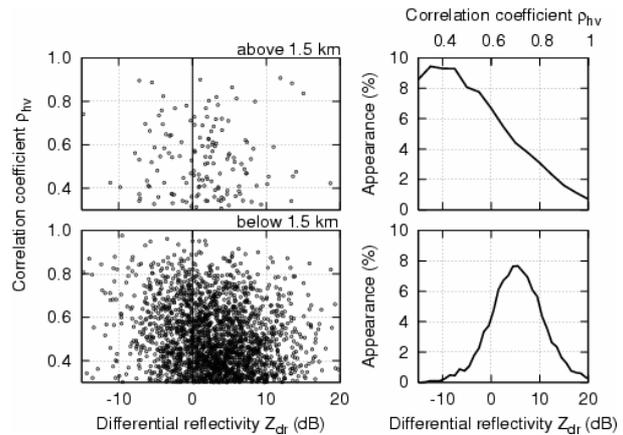


図 2.RHI で観測した低高度を飛来した渡り鳥エコーの Z_{dr} と ρ_{hv} の離散図 (高度 1.5 km 以上と未満)、高度 1.5 km のエコーの Z_{dr} , ρ_{hv} の出現頻度分布。

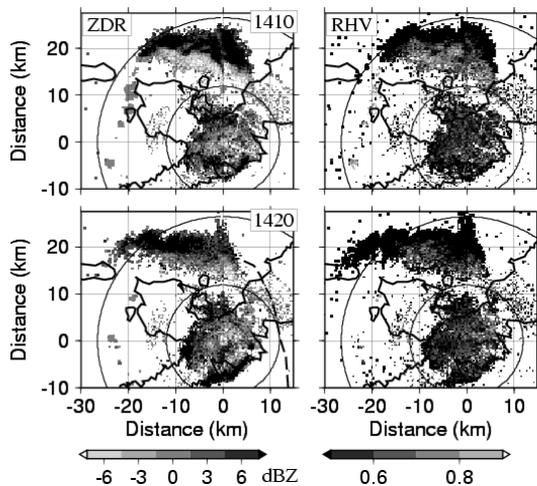


図 3.高度 5 km を飛来し、沖縄島で西に転進した渡り鳥エコーの偏波特性 Z_{dr} , ρ_{hv} (PPI at 8 deg EL at 1410 and 1420 JST)。円弧は高度 2 km, 4 km のレンジを示す。レーダ近傍のエコーは前節の低高度を飛来した渡り鳥エコー。

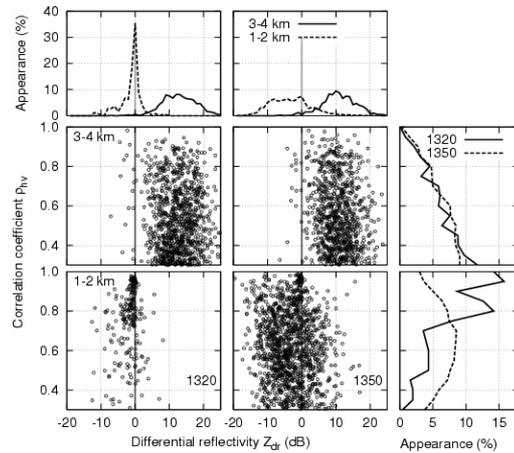


図 4.RHI で観測した高高度を飛来した渡り鳥エコーの Z_{dr} と ρ_{hv} の離散図 (高度 1-2 km, 3-4km) と Z_{dr} , ρ_{hv} の出現頻度分布。

4.2 高高度を移住した渡り鳥

大型の渡り鳥はエネルギー節約のため移住経路の 90%以上の区間で上昇風をうまく捕らえながら滑空し、高度 9km を飛行する種も存在する^[7]。COBRA は前述の低高度エコーと同時刻に、沖縄島の南から飛来する線状エコーを高度 5 km に観測した^[8]。本文で図を示さないが、その偏

波特性は低高度エコーと異なり顕著な正と負の Z_{dr} を示した(線状エコーの先頭部分で正、後部で負の値)。負の Z_{dr} は縦長の散乱体を表し、渡り鳥が進路を調整するためバンクしていると考えられる。また、 $_{hv}$ は低高度エコーに比べ大きく(0.7に集中)、滑空していた(羽ばたきが少ない)と考えられる^[8]。この渡り鳥は沖縄島上空で分裂し、図3にCOBRAの北の海上を西進した帯状の渡り鳥エコーを示す。西に転進(旋回)中のエコーの内側(COBRAに近い側)は、負の Z_{dr} と大きな $_{hv}$ 値を示した。逆に、外側は正の Z_{dr} と小さな $_{hv}$ 値を示した。エコー内側に位置する渡り鳥は、深いバンク角で少ない羽ばたきで旋回し、外側の鳥は浅いバンク角で羽ばたきながら西に飛行したと考えられる。

この渡り鳥エコーはRHIを横切って沖縄島を通過した。RHIは高度4.5 km, 3 kmに2つの層状エコーを観測し、4.5 kmのエコーは徐々に3 kmまで高度が下がった。3 kmに現れたエコーはレーダから離れる方向(北東)に降下し、負の Z_{dr} を示す down-slope echo を形成した。また、RHIは浅い積雲状のエコーを高度0.5-1.5 kmに観測した^[8]。図4は、RHIに現れたエコーの Z_{dr} と $_{hv}$ の離散図、および出現頻度を示す。1320 JSTは高度3-4 kmに層状の渡り鳥エコーと高度1.5 km以下に大気エコーを観測した事例、1340 JSTはdown-slopeエコーを形成した事例である。渡り鳥は顕著な Z_{dr} と小さな $_{hv}$ 値を生成し、大気エコーは0に近い Z_{dr} と0.8以上の $_{hv}$ 値を示した。但し、ground clutterが0.75近辺の値を示すので、0.8のピークはground clutter除去の残りが影響している可能性がある。また、エコーedgeは小さな $_{hv}$ を示す傾向がある。

5 まとめ

2005年6月29日、COBRAは太平洋を越えて沖縄島に飛来する大規模な渡り鳥エコーを観測した。低高度を飛来した渡り鳥は、常に正の Z_{dr} (横長の形状)と非常に小さな $_{hv}$ 値(<0.6)を示した。この渡り鳥は、翼を頻繁に羽ばたかせながら飛来したと考えられる。高高度を飛来した渡り鳥は、正負の Z_{dr} (横長,縦長)を示し、バンクする鳥は顕著な負の Z_{dr} 、水平飛行の鳥は正の値を示すと考えられる。このように、偏波情報は渡り鳥の飛行パターンの推測に有用である。また、偏波情報は渡り鳥と大気エコーの分離に有効で、大気エコーは0に近い Z_{dr} 、1に近い $_{hv}$ で分離でき、渡り鳥は $|Z_{dr}| > 1.5$ dB、 $_{hv} < 0.8$ の条件で分離できる。

参考文献

- [1] V.N. Bringi, and V. Chandrasekar, Polarimetric Doppler Weather Radar: Principals and Applications, Cambridge University Press, 2001.
- [2] D.S. Zrnich, and A.V. Ryzhkov, "Observations of insects and birds with a polarimetric radar", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.36, pp.661-668, 1998.
- [3] Nakagawa, K., H. Hanado, S. Satoh, T. Iguchi, and S. Fujii, "Development of the Okinawa polarimetric rain radar: COBRA", 5th International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar - Radar

Hydrology, pp.153 -158, Kyoto, Japan, Nov., 2001.

- [4] H15 年度 TaKaRa ハーモニストファンド活動助成報告,
沖縄島におけるアジサシ類の繁殖状況調査
- [5] P. O'Neill, C. Minton, K. Ozaki, and R. White, "Three populations of non-breeding roseate terns (*Sterna dougallii*) in the Swain Reefs, Southern Great Barrier Reef, Australia", *Emu*, vol.105, pp.57 -66, 2005.
- [6] P. Child, "Black-fronted tern breeding at high altitude", *Notornis*, vol.33, pp.193 -194, 1986.
- [7] B. Bruderer, "The study of bird migration by radar Part2: Major achievements", *Naturwissenschaften*, vol.84, pp.45 -54, 1997.
- [8] H. Minda, F.A. Furuzawa, S. Satoh, and K. Nakamura, " Bird migration echoes observed by polarimetric radar ", *IEICE Trans.*, vol. E91 -B, 2008. (in press)