

気象庁のウィンドプロファイラ観測における 渡り鳥エコーの影響と対策

小林 健二*・阿保 敏広*・泉川 安志*・河原 恭一**
石原 正仁*・若山 俊夫***・松田 知也***

要 旨

気象庁は2001年6月、全国25地点(2003年5月からは31地点)からなるウィンドプロファイラ観測システム(WINDAS)の運用を開始した。その年の秋、渡り鳥が原因と考えられる異常データの発生を確認した。

渡り鳥に起因すると考えられる信号(渡り鳥エコー)発生時のドップラースペクトルを調べたところ、大気エコーや降水エコーとは異なる特徴が認められた。また、渡り鳥エコーの発生時期や、その影響を受けた風データの特徴は、これまで報告されている渡り鳥の生態に対応していた。

渡り鳥エコーが観測データに影響を及ぼさないための対策として、受信信号から大気エコーと渡り鳥エコーを分離し、大気エコーのみを取り出す処理を開発し実観測に導入した。その結果、異常データにもとづく欠測の発生が抑えられるとともに、渡り鳥エコーと大気エコーを分離したことにより、渡り鳥エコー発生時のデータ取得率が向上するなどの効果を確認できた。

1. はじめに

気象庁は2001年6月、全国25箇所に設置したウィンドプロファイラによる高層風観測を開始した。各地のウィンドプロファイラはネットワークで結ばれており、機器の制御やデータの収集は気象庁本庁からオンラインで行われている。これらウィンドプロファイラによる観測システム全体は、WINDAS(Wind Profiler Network and Data Acquisition System)と呼ばれている。なお、2003年3～5月には、さらに6箇所のウィンドプロファイラが増設された(加藤ほか, 2003; 石原ほか, 2004)。

WINDASのウィンドプロファイラが観測に使用する電波の周波数は約1.3 GHzであり、従来の分類では境界層レーダーにあたる(橋口ほか, 1999)。高度方向に100～600 m間隔(通常の観測モードでは300 m間隔)、上空平均5 kmまで最大9 kmまでの風向、風速

を観測することができる。観測値は10分間平均値であり、品質管理を施した後、リアルタイムで数値予報等の気象業務の中で利用されている。2002年3月からは、(財)気象業務支援センターを通じて民間気象会社等へのデータ配信が開始された。さらに、同年4月からは気象庁月報(CD-ROM)に収録され非即時的データとして一般での利用が可能となっている。

ウィンドプロファイラは、上空の大気や降水粒子等によって散乱された微弱な電波を受信し、その周波数偏移を測定することによって風(風向、風速)を測定している(小林, 2004)。1.3GHz帯ウィンドプロファイラにおいては、大気中に降水粒子があると大気よりも降水粒子による散乱が優位になるが、降水粒子は大気と同じ水平移動速度をもつから、このときの観測値は風データ(大気の水平移動速度)とみなすことができる。しかし、大気中に鳥などが飛翔する場合には事情が異なる。鳥は大気や降水粒子以上に強く電波を散乱させ、また大気とは異なる移動速度を持っているため、それが集団で行動するとウィンドプロファイラはその動きをあたかも風として認識してしまうのである。鳥は、季節によって生息場所を移動するいわゆる

* 気象庁観測部、** 神戸海洋気象台。

*** 三菱電機株式会社。

—2003年10月14日受領—

—2004年10月18日受理—

「渡り」の習性をもつものが多いが、渡りは集団で一定方向に移動するため、それらがウィンドプロファイラ上空を飛ぶときには観測データへの影響が顕著に現れる。

WINDAS の運用において、渡り鳥を散乱体とする信号（渡り鳥エコーと呼ぶ）に起因する異常データを始めて見出したのは、2001年9月であった。ラジオゾンデの観測値や数値予報モデルの予報値とは明らかに異なる向きと強さの風が広い範囲で観測されたのである。しかし、異常データの発生原因が渡り鳥にあると判断するまでには数か月を要した。まず、機器の不具合、信号処理の影響、気象現象など、発生原因として考えられることを検証し、それらが異常データの発生原因になっていないことを確認した。その上で、異常データの出現時刻、季節、高度、及び異常データの方向と大きさが渡り鳥の生態によく対応していることから、渡り鳥が異常データの原因であると判断するに至った。その後の調査で、渡り鳥エコーは春と秋の晴れた夜間に全国の広い範囲で発生し、WINDAS の観測値に与える影響は少なくないことがわかった。このため、渡り鳥エコーに対する対策を急ぐ必要に迫られた。なお、WINDAS の運用開始当初から、鳥によるエコーが生じることはある程度予想されていたが、これ程の規模になることは考えていなかった。

渡り鳥エコーについては、ウィンドプロファイラを運用する国外の気象機関や研究機関による報告がある。米国海洋大気庁（NOAA）は、米国中部平原に30数台の400 MHz 帯ウィンドプロファイラ観測網（NOAA Profiler Network ; NPN）を1992年から運用している。NPNでもWINDASと同様の異常データの存在が認められ、発生状況やその対策について詳しく報告されている（Wilczak *et al.*, 1995）。この報告では各種の調査結果をもとに異常データの原因を渡り鳥と特定した。NPNに出現する異常データの発生状況や、信号の特徴はWINDASのそれらと各種の点で類似している。同様のことがドイツ気象局のウィンドプロファイラ（Engerbart and Görsdorf, 1997）においても報告されている。国内の大学・研究機関では、WINDASの運用開始以前から大気レーダーやウィンドプロファイラを運用しており、これまで異常データの存在には気がついてはいたが、その原因を特定するまでには至っていない。これは、それらが研究・教育用であるため、WINDASのように通年で運用されることが少なく、異常データが系統的に調査される

ことがなかったためと考えられる。

本論文では、WINDASの高層風観測で出現した渡り鳥エコーについて、その特徴や観測データに与える影響を述べるとともに、渡り鳥エコーへの対策を報告する。

2. 渡り鳥エコーの発生事例

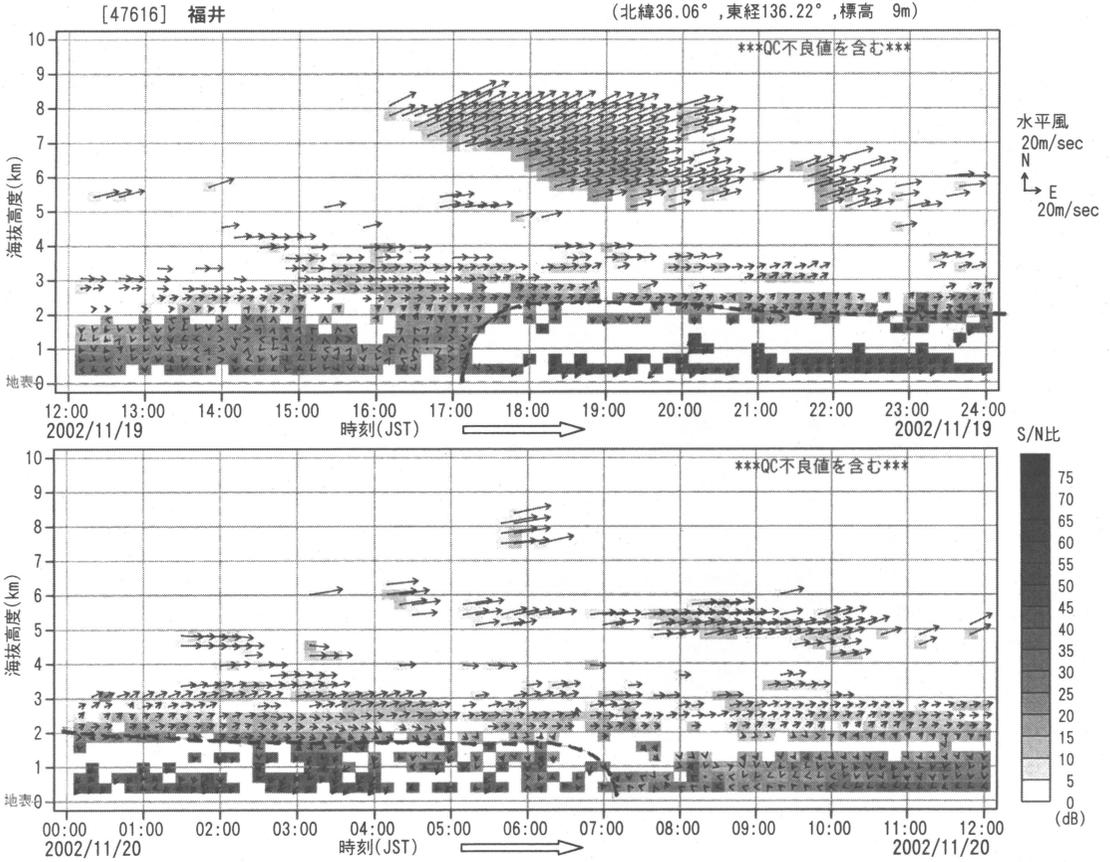
渡り鳥エコーが原因と思われる異常データの顕著な例として、2002年11月19～20日、福井における水平風の風向・風速とS/N比（信号対雑音比、受信強度と等価）の時間・高度断面図を第1図に示す。全体を概観すると、19日夕方～20日明け方にかけて高度約2 km以下の層で観測データが大きく周囲と異なっていることがわかる。すなわち、地表から高度1 km付近にかけては、19日の17時20分から20日の07時頃までの間、それまでなかったような風速10 m/s前後の北東風を示す層が出現し、そのときのS/N比は降水時に観測されるような50 dB以上の大きな値となっている。また、高度1～2 kmでは観測データの欠損が多くなっている。このように渡り鳥エコー発生時に観測データの欠損が多くなるのは、渡り鳥エコーが発生するとドップラースペクトルの時間変動が大きくなるために、風が算出できなくなることが原因である。このことについては、3.4節で詳しく述べる。

近隣の輪島（福井からの水平距離は約100 km）における19日21時と20日03時のラジオゾンデ観測データ（第2図）によると、高度1 km付近での風向・風速は西南西、約5 m/sであり、ウィンドプロファイラの観測結果とは大きく異なっていることがわかる。また第3図に示すように、地上付近は移動性高気圧に覆われていたことから、地表付近における風は弱い状態であったと考えるのが自然である。したがって、ウィンドプロファイラにより観測された下層の観測データは大気の流れを正しく表現しているとはいえない。

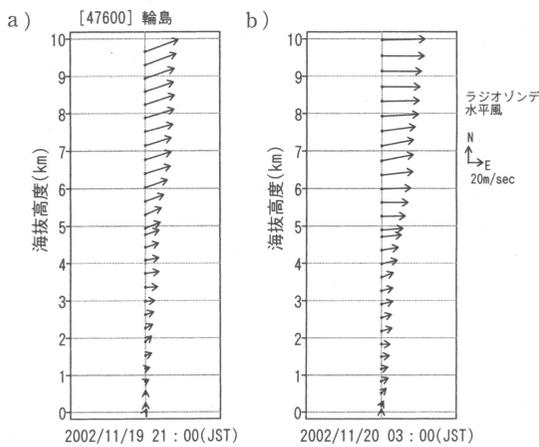
3. 渡り鳥エコーの特徴

3.1 ドップラースペクトルの特徴

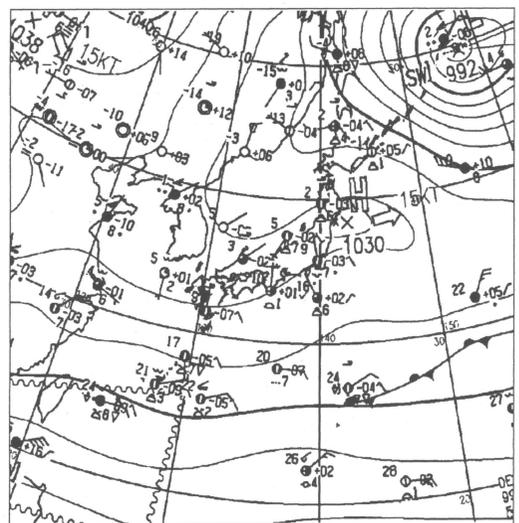
ウィンドプロファイラが大気から受信する電波はごく微弱であり、1回の受信信号の中で大気信号とノイズを判別することができない。そこで、受信信号を約0.4秒間連続してサンプリングし得られた約4千個の時系列データに対し、S/N比を改善するため時間方向の平均（コヒーレント積分）を行い、その後フーリエ変換を施してパワースペクトルすなわちドップラース



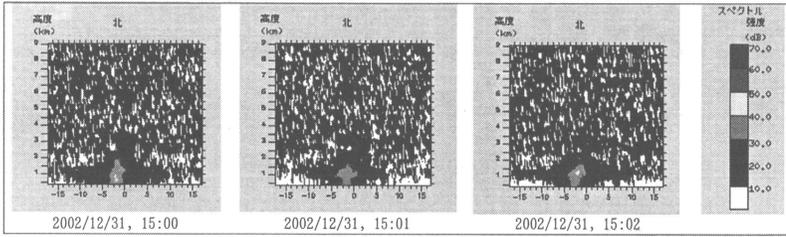
第1図 渡り鳥エコー発生時のウィンドプロファイラの観測データの例。福井，2002年11月19～20日。ベクトルは水平風，等値線はS/N比を表す。点線で囲まれた部分では渡り鳥エコーの影響を受けていると思われる。



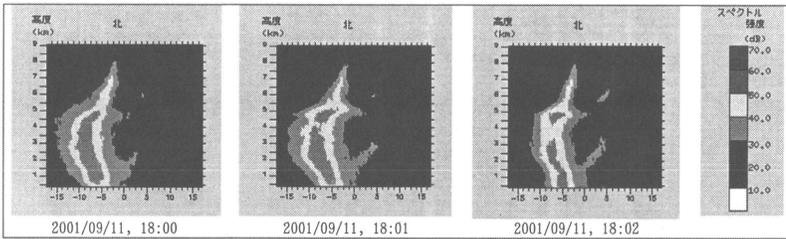
第2図 輪島におけるラジオゾンデの観測データ。2002年11月19日21時 (a)，20日03時 (b)。



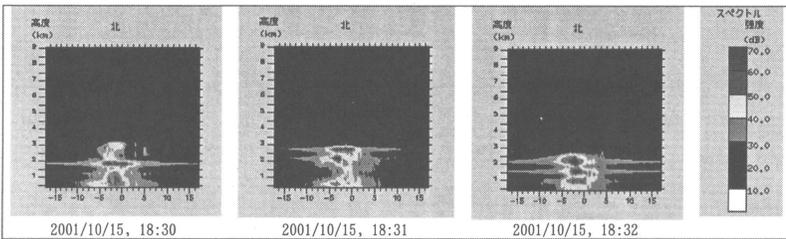
第3図 地上天気図，2002年11月20日03時。



(a) 大気エコー卓越時のドップラー・スペクトル 与那国島



(b) 降水エコー卓越時のドップラー・スペクトル 水戸



(c) 渡り鳥エコー卓越時のドップラー・スペクトル 室蘭

第4図 ドップラー・スペクトルの例. 北ビームにおける観測値. 横軸はドップラー速度 (m/s), 縦軸は高度, 等値線はスペクトル強度.

ペクトル (0.4秒値) を一次的に算出する. さらにその一次的なドップラー・スペクトルを複数個 (通常28個) 集めて平均し (インコヒーレント積分), 最終的なドップラー・スペクトル (1分値) を得る.

第4図は, ドップラー・スペクトル (1分値) の例である. (a) は大気エコー, (b) は降水エコー, (c) は渡り鳥エコーが卓越するときのドップラー・スペクトルである (いずれも天頂から北に約10°傾けた方向に発射した北ビームの観測値).

3種類のドップラー・スペクトルの違いは次のようにまとめることができる. 大気エコーのS/N比 (受信強度) は5~30 dB程度であり, 降水エコーや渡り鳥エコーの値が30~70 dBであるのに比べてかなり弱い. 渡り鳥エコーでは, 高度方向に強いところと弱いところが不規則に現れることが特徴である (他のエコーでは高度方向にほぼ連続的に変化する). また, ドップラー・スペクトルの時間変化に着目すると, 大気エコーや降水エコーのドップラー・スペクトルの形や強さが時間とともにあまり変化しないのに対して, 渡り鳥エ

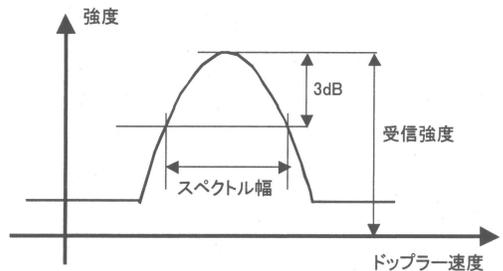
コーのものは分単位で見ても激しく変化している.

スペクトルのピークを中心とする横軸方向への広がりをスペクトル幅と呼ぶ. WINDASのプロファイラでは, スペクトル幅は, “スペクトル強度の値がピークから3 dB減少した部分でのドップラー速度の幅”として定義している (第5図参照). 降水エコーや渡り鳥エコーのスペクトル幅は, 大気エコーのそれより大きくなる. 大気エコーが卓越するときのスペクトル幅は0.4~2.0 m/s程度であるが, 降水エコーや渡り鳥エコーでは2.0 m/sを超える事例が多い. 渡り鳥エコーのスペクトル幅が大きくなる理由としては, 鳥の飛び方のばらつき, 羽ばたき, 大気エコーとの混合のほか, 受信信号が強いことに

より受信機内の信号が飽和し, スペクトルの形がつぶれてしまうことなどが考えられる.

3.2 得られる風ベクトルの特徴

渡り鳥エコーから得られる風ベクトルは, 渡り鳥の移動方向や移動速度を表現していると考えられる. 2001年10月, 室蘭における渡り鳥エコーに対応する観測データをラジオゾンデなどの観測結果と比較したところ, それらの風向は最大90°, 風速は最大10 m/s程度



第5図 ある高度のドップラー・スペクトルにおける, 受信強度, スペクトル幅の概念図.

の違いがあることがわかった。

第1表 大気エコー、降水エコー、及び渡り鳥エコーの特徴。

	スペクトル強度 (S/N比)	スペクトル幅	時間変化	鉛直速度
大気エコー	5~30 dB	0.4~2.0 m/s	小さい	-1.0~1.0 m/s
降水エコー	30~70 dB	2.0~m/s	小さい	~-1.0 m/s
渡り鳥エコー	30~70 dB	2.0~m/s	大きい	-1.0~1.0 m/s

また、2001年4~11月のWINDASの全国の観測データから、渡り鳥エコー発生時の鉛直速度は-1.0~+1.0 m/s (鉛直上向

き方向の速度をプラス、下向きをマイナスとする)の範囲に収まることが分かった。降水エコーでは、鉛直速度が降水粒子の終端落下速度と大気鉛直速度の和を示すため、0°C層より下での値は下向きに1.0 m/s以上になることが多いが、渡り鳥エコーでは大気エコーとほぼ同様の値となることが多い。これらの特徴をまとめると第1表のようになる。

渡り鳥エコーのドップラースペクトルの時間変動は大気エコーのスペクトルのそれより大きいことを前節で述べたが、このことは最終的な風ベクトルデータ(10分値)に多くの欠損が生じることにつながっている。WINDASのウィンドプロファイラにおいては、各観測高度におけるドップラースペクトルの1分値をガウス関数で近似し、関数がピーク値をとる点の速度をドップラー速度としている(橋口ほか, 1999)。その際、まず前回の近似結果を参考にして初期値を求め、その後、非線形最小自乗近似を行う。渡り鳥エコー発生時のようにドップラースペクトルの時間変動が大きい場合には、前の観測時刻の結果から推定したガウス関数が現在の値と大きく異なるため近似に失敗することがある。このような場合にはドップラー速度が決定されず、ドップラー速度の1分値は欠損となる。また、1分値を平均して10分値を算出する際、1分値のパラッキが一定以上大きい場合にはデータの信頼性が低いと判断し、10分値を作成していない。以上の理由により、ドップラースペクトルの時間変動が大きい場合には10分値に欠損が多く発生する。

4. 渡り鳥エコーの発生状況

4.1 地点による発生率の違い

3節で述べた渡り鳥エコーの特徴から、スペクトル幅が2.0 m/s以上でかつ鉛直速度が-1.0 m/s以上のときには渡り鳥エコーが発生している可能性が高いとみることができる。この渡り鳥エコーの特徴に合致するデータが観測データ全体に占める割合を求め、それにより渡り鳥エコーの発生率を見積もった。なお、この発生条件のもとであっても、一部の渡り鳥エコーが

第2表 WINDASにおける地点別の渡り鳥エコーの平均発生率(2001年4~11月)。

高 (12.2~8.1%)	宮古, 室蘭, 留萌, 酒田 河口湖, 尾鷲, 高田, 敵原 福井, 高知
中 (7.6~4.5%)	大分, 延岡, 熊本, 浜田 静岡, 水戸, 名古屋, 帯広 屋久島, 熊谷
低 (4.1~2.0%)	高松, 平戸, 清水, 与那国島 勝浦

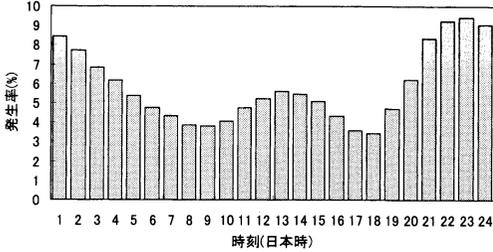
含まれなかったり、逆に渡り鳥エコーではないものが一部含まれてしまう可能性はある。このため、発生率の具体的な値については多少の誤差を含む可能性があるが、以下に見ていくように渡り鳥エコーの発生状況を把握するには十分な精度を持っていると考えられる。

調査には2001年4~11月の10分値データを用いた。なお、2001年4~5月はWINDASの試験運用期間だったため、通常的高度分解能300 mとは異なる観測モードでも運用しているが、調査に大きな影響はないものと思われる。また2001年12月からは、渡り鳥エコーの影響を受けたデータは削除する措置を開始し、渡り鳥エコーがデータとして残されていないため、今回の集計からは除外した。

集計の結果、期間を通じてWINDASの全国どの観測地点でも渡り鳥エコーが発生していることがわかった。地点によって発生頻度には違いがあり、第2表に示すように3つのランクに分類することにした。発生率の少ない地点での発生率は2%程度、多い地点では12%である。全地点の平均発生率は約7%である。

4.2 日変化

第6図は、全国25地点の2001年4~11月の観測データをもとに、時刻別の渡り鳥エコー発生率を示したものである。渡り鳥エコーの事例数(渡り鳥エコーから算出された風ベクトル数)が全体の観測数(風ベクトルが算出された数)に占める割合を集計した。各時刻とも前1時間のデータを対象としている。



第6図 渡り鳥エコーの時刻別発生率. 全国25地点の平均, 集計期間2001年4~11月.

渡り鳥エコーの発生率が高い時間帯は、夜の23時頃を中心とした夕方18時頃から朝7時頃にかけてである。また、昼間の12時頃から15時頃にも夜間ほどではないが小さなピークがあることがわかる。

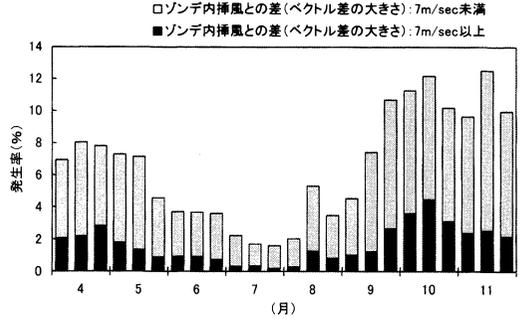
ケリンガー (2000) は渡り鳥の生態について詳しく述べている。それによると、渡り鳥の大多数は夜間に渡りを行い、それらのほとんどがツグミなどに代表される小鳥類である。それらが飛び立つ時刻は日没後30分から1時間以内が多いが、渡りを終える時刻は広い時間帯に及んでおり日の出にはほとんど終了する。渡りの活動のピークは日没後1時間から午前0時ごろまでである。一方、一部には昼間に渡りを行う鳥もあり、これらは主に大型の鳥で、昼間の対流が活発なときに上昇流を利用しながら渡っていくタイプのものが多いという。国内における鳥類研究の中心的立場にある山階鳥類研究所の鳥類専門家に対して行った意見照会によっても、同様の見解が示された。

今回の集計結果は、以上の渡り鳥の生態によく対応しているといえる。

4.3 季節変化

第7図は、渡り鳥エコーの発生率を旬別に集計したものである。集計期間は時刻別の集計と同じ2001年4~11月である。なお、ラジオゾンデ観測データと比較する都合から、集計に用いたウィンドプロファイラデータはラジオゾンデの観測時刻(03, 09, 15, 21時)と同じ時刻のものに限った。

全国20箇所のラジオゾンデ観測地点で得られた風データを、ウィンドプロファイラ観測地点に空間内挿して(ゾンデ内挿風という)、ウィンドプロファイラによる風データと比較した。空間内挿値は、すべてのラジオゾンデ観測値に、観測地点とウィンドプロファイラ観測地点との間の緯度及び経度の差に応じた重みを掛け、それらを平均することにより求めた。具体的には、ゾンデ内挿風ベクトルを V_{naisou} として次式により



第7図 渡り鳥エコーの旬別発生率. 全国25地点の平均, 集計期間2001年4~11月. ゾンデ内挿風との差(ベクトル差の大きさ)が7 m/s未滿, 7 m/s以上の場合で分けて集計した. ラジオゾンデと比較するため, 03, 09, 15, 21時のデータのみを使用した.

求めた。

$$V_{naisou} = \frac{\sum_{i=1}^{20} k_i V_i}{\sum_{i=1}^{20} k_i} \quad (1)$$

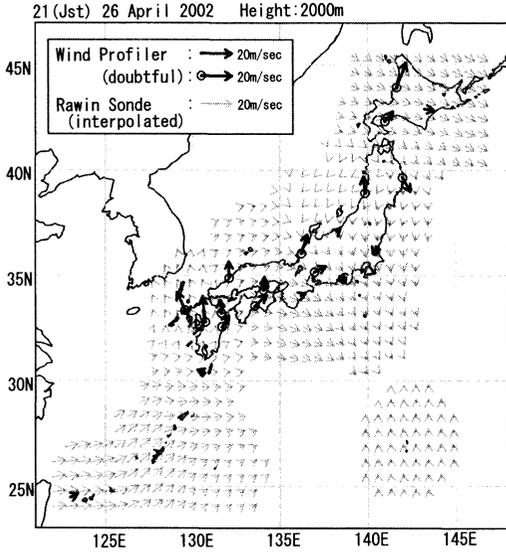
ただし, $k_i = e^{-Ad_i}$ (2)

$$d_i = \sqrt{(Lat_{wpr} - Lat_i)^2 + (Lon_{wpr} - Lon_i)^2} \quad (3)$$

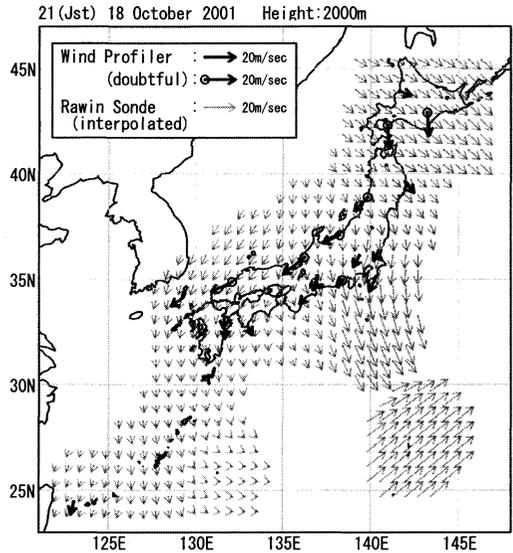
ここで、 V_i は i 番目のラジオゾンデ観測地点において観測された風ベクトル、 d_i はウィンドプロファイラ観測値点と、 i 番目のラジオゾンデ観測値点との間の緯・経度の距離(度)である。また、 A は重みを決める定数で、ここでは1.0とした。なお、日本付近では緯度線の間隔よりも経度線の間隔の方が狭いため、南北方向と東西方向では重みに違いがあるがそのまま扱うことにした。第7図では、ゾンデ内挿風ベクトルとウィンドプロファイラによる風ベクトルのベクトル差の大きさが7 m/sを超える場合を濃い色で塗りつぶしている。

発生率には顕著な季節変化があり、4月にピークをもつ4~6月の春季期間と、10月にピークをもつ8月中旬から11月までの秋季期間に二分される。7月上旬~8月上旬の盛夏には、渡り鳥エコーの出現は少ない。また、ベクトル差が大きくなる(7 m/s以上になる)割合は、渡り鳥エコー発生中、全体の1/3程度であることがわかる。

第8図、第9図は、春と秋に広範囲に渡り鳥エコーが発生したときの観測データの例を示している。グレーの矢印で示した風ベクトルはラジオゾンデにより



第8図 春の渡り鳥エコー発生時のウィンドプロファイラ(濃い太いベクトル)、ラジオゾンデ(薄く太いグレーのベクトル)及びゾンデ内挿風(薄く細いベクトル)。2002年4月26日21時、高度2000m。ゾンデ内挿風とのベクトル差の大きさが7m/s以上の地点には○印を付けた。



第9図 秋の渡り鳥エコー発生時のウィンドプロファイラ、ラジオゾンデ及びゾンデ内挿風。2001年10月18日21時、高度2000m。

観測された高層風の内挿値である。黒色の矢印はウィンドプロファイラの観測値で、○印を付加した地点はゾンデ内挿風からの偏差ベクトルの大きさが7m/s以上であり、ウィンドプロファイラによる測風への渡り鳥エコーの影響が顕著に現れていることを示している。そうしたウィンドプロファイラ地点での異常な風ベクトルの方向は、春の例ではほぼ北向き、秋はほぼ南向きにそっており、渡り鳥が広範囲に同じ方向に向かって移動していることを示唆している。渡り鳥は、早春から初夏にかけて南から北へ移動するものが多く、逆に夏の終わりから初冬にかけては北から南下していくものが多いといわれている。上の結果は、そうした渡り鳥の生態によく合致しているといえる。

4.4 発生時の天候及び高度

2001年4～11月の期間で渡り鳥エコーの発生と天候との関連を調べたところ、渡り鳥エコーは降水時には発生しないことが、ドップラースペクトルなどを調査することにより明らかになった。逆に、渡り鳥エコーの発生は晴れた日に多く、中でも風が弱い場合や鳥の移動に追い風となるようなときには特に多く発生する。

一方、渡り鳥エコーの出現高度については、最高で

は4kmを超えることがあるが、おおむね3km以下であることがわかった。

清棲・清棲(1974)によると、渡り鳥の群れをレーダーで捉える方法で渡り鳥の飛ぶ高度を測定した結果、小鳥では100mぐらゐのことが多いが、ときには1500mに達し、4000m以上を飛ぶこともある。シギやチドリ類では1000～2000mが一般的で、ときには3000mを超えることもある。このことは、上で述べた渡り鳥エコーの出現高度と一致する。

4.5 渡り鳥エコーについての外国での調査結果

WINDASにおける渡り鳥エコーの調査結果は、Wilczak *et al.* (1995)が1991～1993年にかけて行った米国中部平原における調査結果と類似している。渡り鳥エコーに影響された異常データは、ラジオゾンデによる観測値と比べ、ベクトル差の大きさが5～14m/s大きく、またそのときのスペクトルにはスペクトル幅が大きい、時間変化が大きいなどの特徴が、事例解析により明らかにされている。また、空間的に広い範囲に設置された複数のウィンドプロファイラによる観測結果を用いて、春と秋の渡り鳥エコー事例を調査し、季節に特有な渡り鳥の移動方向などを示した。各観測点において、渡り鳥エコーが発生したかどうかは、6分平均された受信強度、ビーム方向のドップラー速度およびスペクトル幅の時間変化により判断した。この方法により、渡り鳥エコーの発生状況を1993年3

～5月の期間で集計した結果、気圧系の変化に対応する4～5日周期の増減があることや、より長期的な盛衰がみられたと報告している。

さらに、Engerbart *et al.* (1997) が1993～1995年にドイツ東部で行った調査も本調査と同様の結果を得ている。その調査では、渡り鳥エコー発生時の基準としてラジオゾンデによる観測結果との差に注目し、風速差が5 m/s以上、または風向が90°以上違うときに渡り鳥エコーが発生しているとしている。この基準により長期間にわたり渡り鳥エコーの統計的な調査を行い、3～5月、8～10月に発生時のピークがあること、渡り鳥の移動方向に季節変化があること、また渡り鳥エコーは夜間に発生し降水時には発生しないことが報告されている。

いずれの報告も、温帯に属する地域と同様の渡り鳥エコー発生時の状況を示すものといえる。

5. 渡り鳥エコーの対策

渡り鳥エコーの影響により、WINDASの観測データに欠損や異常値が発生してしまうことはこれまで述べた。WINDASのデータはリアルタイムで利用されるため、異常データは観測直後の品質管理で取り除く必要がある。渡り鳥エコーへの対策は、簡便ですぐ実施できるものから始め、段階的により高度な手法へと発展させた。

5.1 スペクトル幅を利用した対策

渡り鳥エコーを初めて確認した3か月後の2001年12月より、WINDASに当初から装備されているデータ品質管理機能のひとつである“スペクトル幅チェック”を使って異常データの除去を開始した。“スペクトル幅チェック”は、スペクトル幅があらかじめ設定したしきい値を超えたときに、そのデータを除去するものである。渡り鳥エコーはスペクトル幅が2.0 m/s以上となることが多いので、しきい値は2.0 m/sに設定した。しかし、降水エコーのスペクトル幅も渡り鳥エコーと同様に大きいため、そのままでは降水エコーも除去されてしまう。そこで、気象衛星や気象レーダーのデータを参考にしながら、各ウィンドプロファイラ観測地点付近で降水が認められる時にはスペクトル幅チェックのしきい値を大きな値にして降水エコーが除去されないように調整を行った。なお、渡り鳥エコーの発生する春や秋の時期の降水時には、ドップラースペクトルにおいて降水によるピークの他には渡り鳥エコーによるピークが見られないことから、渡り鳥エコーが出

現しないことを確認している。

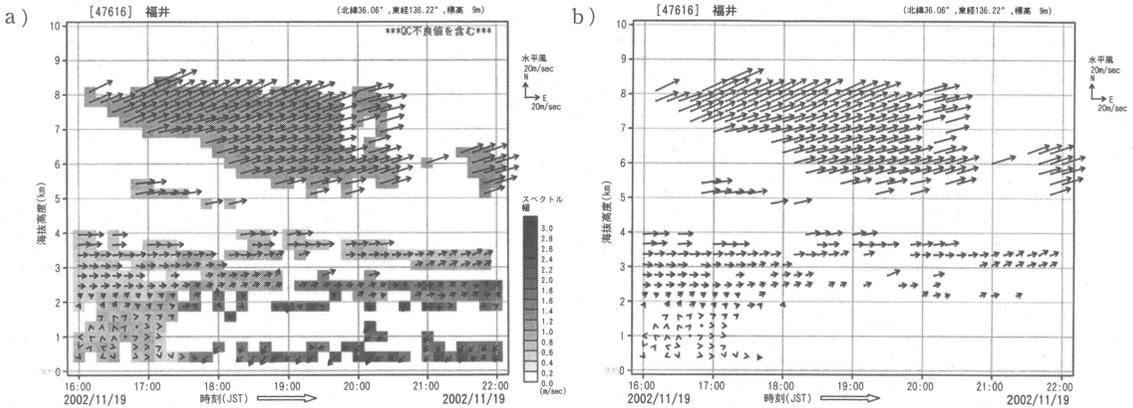
降水の発生の有無を判断し、しきい値を調整することは煩雑である。そこで2002年3月からは、より自動的に渡り鳥エコーを除去できるような方法に移行した。すなわち、鉛直速度がマイナス方向に大きいときには降水エコーであると判定する。一方、スペクトル幅が大きく鉛直速度の絶対値が小さいときには渡り鳥エコーの影響を受けている可能性が大きいと判定し、データを除去することにした。これは、4.2節で示した渡り鳥エコーの判定基準をしきい値として利用し、除去を行うものと言いかえてもよい。第10図は、2002年11月19日の福井ウィンドプロファイラにおけるスペクトル幅の値と、それをもとに渡り鳥による異常データを除去した例である。第1図で示した渡り鳥エコーの影響を受けていると思われる領域ではスペクトル幅が大きいことがわかる。スペクトル幅2.0 m/s以上、鉛直速度-1.0 m/s以上、高度4.5 km以下の条件にすべて合致した場合にデータを除去している。

この方法により、渡り鳥エコーの影響を受けていると考えられる観測データはほぼ確実に除去されるようになった。しかしスペクトル幅は、降水エコー時の他に、大気の乱流が強い場合にも値がやや大きくなる。このため、上の方法では、渡り鳥エコーによるデータの他に正常なデータ（大気エコー）も除去することがある。また、降雪層には、その鉛直速度が-1.0 m/s以上になることが多いことから、この手法を使用できないなどの弱点があった。

5.2 大気エコーと渡り鳥エコーを分離して除去する方法の導入

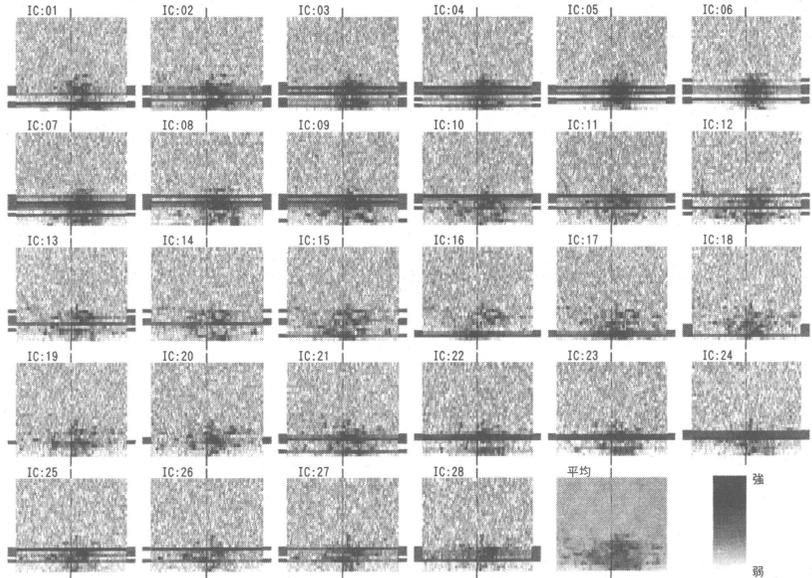
渡り鳥エコー発生時の受信信号には、ほとんどの場合、渡り鳥エコーと大気エコーが混在している。渡り鳥エコーを細かい時間間隔（約2秒間隔；各ビームでは、約0.4秒連続して観測し、その後約2秒間休止する）で見ると、その信号強度は一定ではなく大きく変動しており、その中には渡り鳥エコーの影響を受けていない信号が混在することがわかった。これは、ウィンドプロファイラ上空における渡り鳥の飛翔密度には時間変動があり、ウィンドプロファイラのビーム中に渡り鳥が存在しない時間帯があることによるものと考えられる。そこで、渡り鳥エコーの存在の有無を微小時間ごとに判別し、渡り鳥エコーの影響を受けていないときの受信信号だけを使ってデータを作成すれば、大気エコーに対応する正常なデータが得られると考えた。

3.1節で述べたように、WINDASでは各ビームの各



第10図 スペクトル幅に着目した渡り鳥エコー除去の例。2002年11月19日、福井。a) 図のコンターはスペクトル幅を表す。b) はスペクトル幅2.0 m/s以上、鉛直速度-1.0 m/s以上、高度4.5 km以下の条件で、渡り鳥に起因するデータを除去した結果。

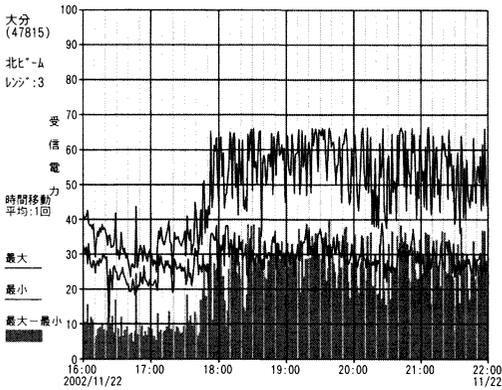
観測高度において約0.4秒間の受信信号からひとつのドップラスペクトルを計算し、それを28個平均（インコヒーレント積分）して、ドップラスペクトルの1分値としている。そこで、まず各観測高度における28個のドップラスペクトルのそれぞれにおいて、受信電力（ドップラスペクトルの積分値、すなわち、すべてのドップラー速度におけるスペクトル強度を積算した値）を計算する。それが一定値（通常22 dB程度）を超えていれば渡り鳥エコーが存在するものとし、そのときのドップラスペクトルを除去する。そして、除外されずに残ったドップラスペクトルだけを集めてその1分値を作成することとした。このように渡り鳥エコーの影響のないデータのみを使うことにより渡り鳥による異常データを除去できるが、この処理によってインコヒーレント積分に使われる個数は減少してしまう。その結果、ドップラスペクトル（1分値）の品質がある程度低下することになるが、これは避けられない。インコヒーレント前のドップラスペクトル



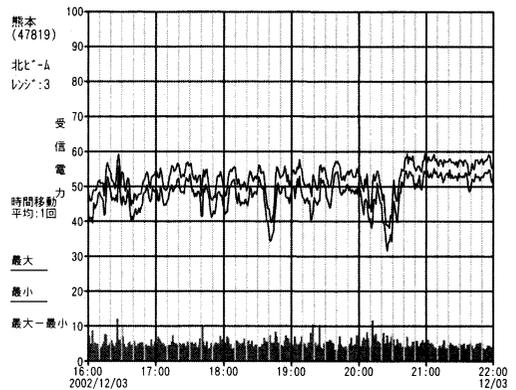
第11図 受信電力の時間変動を利用した渡り鳥エコーの除去の例。水戸，2002年4月14日20時25分。28個のドップラスペクトル（0.4秒値）と、それを平均したもの（1分値）。縦軸が高度（レンジ）、横軸がドップラー速度、受信強度をグレースケールで示す、黒色ではさまれたデータは渡り鳥エコーと判断し除去したことを示す。

の段階で渡り鳥エコーの除去を行う処理は、すでに米国で調査され実際に効果があったことが報告されている (Wilczak *et al.*, 1995; Pekour *et al.*, 1999)。第11図は、この手法で渡り鳥エコーを除去した一例（2002年4月14日、20時25分の水戸ウィンドプロファイラ）である。“IC：01～28”は、0.4秒ごとに作成された28個のドップラスペクトルであり、黒色ではさま

れ



第12図 渡り鳥エコー発生時における受信電力の1分ごとの時間変動のようす。2002年11月22日、大分の例。28個の受信電力(0.4秒値)の最大値(上側の実線)と、最小値(下側の実線)、及びその差(グレーで塗りつぶした領域)を示す。



第13図 降水エコー時における受信電力の時間変動のようす。2002年12月3日、熊本の例。

れた層のデータは渡り鳥エコーと判断されたものである。右下は、除去されずに残った値を平均(インコヒーレント積分)して作成したドップラースペクトルの1分値である。渡り鳥エコーの影響である受信強度の強い部分がほとんど除去されていることがわかる。

ところで、受信電力は降水エコーの場合にも渡り鳥エコーと同様に大きくなる。したがって、受信信号が降水エコーであるときには、データを除去しないようなアルゴリズムを組み込むことが必要である。

渡り鳥エコー及び降水エコーの受信電力の時間変化を第12図、第13図に示す。1分間に含まれる28個の受信電力の最大値と最小値、及び両者の差の時間変動を表している。渡り鳥エコーでは、最大値の時間変動は大きいが最小値の時間変動は比較的小さい。また、受信電力の最大値と最小値の差が大きく、短周期の変動が大きい。一方、降水エコーでは、受信電力の最大値と最小値の差は小さく、また短周期の時間変動が小さい。このような渡り鳥エコーと降水エコーにおける受信電力の時間変動の大きさの違いを利用すれば、降水エコーを誤って除去することなく、渡り鳥エコーだけを除去することが可能である。

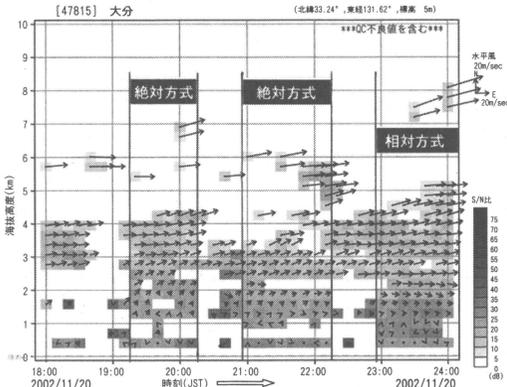
そのため、除去を行うべきデータの受信電力の下限値を決める方法として、任意の値をあらかじめ決めておく「絶対方式」と、前の時刻に観測した最小受信電力値にあらかじめ決めたバイアス値を加えたものをしきい値とする「相対方式」の2種類を用意した。

実際のデータに絶対方式と相対方式による除去を適

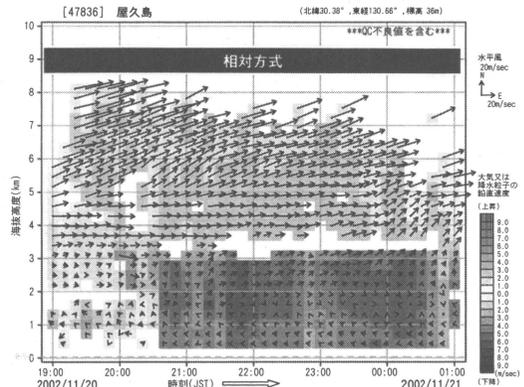
用した結果を第14図に示す。いずれの方式でも、渡り鳥エコーが出現しているときには異常データが除去され、またそれまで欠損となっていた高度においても残された大気エコーから正常なデータが計算されていることがわかる。両方式は、降水がない場合には、ほぼ同じ性能を示すが、降水時には異なった効果を示す。絶対方式では、渡り鳥エコーは完全に除去されるが、降水時に適用すると正常なデータも除去することがある。一方、相対方式は、鳥がプロファイラの上空で同じ空間密度で連続的に飛んでいるようなときには渡り鳥エコーが一部残る可能性はあるが、降水時に正常値を誤って除去してしまうことは少ない。降水エコー時に相対方式を適用した結果(第15図)では、わずかにデータの欠損がみられるものの、10分値の算出にはほとんど影響がないことがわかる。

絶対方式と相対方式の選択は、受信電力の最大値と最小値の差の大きさに応じて行う。この差が大きいときは渡り鳥エコーが発生している可能性が高いので、絶対方式を用いる。逆に、この差が小さいときは降水エコーの可能性もあるので相対方式を用いる。

なお、絶対方式と相対方式に用いるしきい値は、運用前の実際の観測データを用いて経験的に決定した。まず、渡り鳥エコーが明瞭に発生しているときには受信電力の最大値と最小値の差が20 dB以上となることが多いことから絶対方式と相対方式の切り替えのしきい値を20 dBとした。その上で絶対方式及び相対方式のしきい値を、はじめは緩めの値に設定しておき、異常データが認められたらしきい値を厳しくすることを繰り返し、正常値をできるだけ残しながら渡り鳥エコーを取り除くことができるように最適値を決定し



第14図 渡り鳥エコー発生時に、受信電力の時間変動を利用した対策を施した結果. 2002年11月20日, 大分の例.



第15図 降水エコー時に、渡り鳥エコー対策を実施した影響結果. 2002年11月20日, 屋久島の例.

た. その結果, 絶対方式のしきい値(受信電力の上限値)は22 dB, 相対方式のしきい値(バイアス値)は4 dBとすることにした.

スペクトル上でのこうした渡り鳥エコーの除去をリアルタイムで行うことは信号処理装置に負荷を与えることになるが, Wilczak *et al.* (1995) や Peckour *et al.* (1999) が用いたような他の渡り鳥エコーの除去処理に比べれば, 既存のシステムに組み込みやすく, 信号処理装置に与える負荷も少ない.

このアルゴリズムは, 2003年3月より WINDAS のプロファイラの信号処理部に組み込み, 実際に運用を行っている.

6. まとめ

WINDAS による上空の風の観測において, 渡り鳥による散乱波(渡り鳥エコー)の影響を多く受けることがわかった. 2001年4~11月までの全国の観測データをもとに, 渡り鳥エコーについて調べた結果, 以下のことがわかった.

- 1) 渡り鳥エコーによるドップラースペクトルの強度は S/N 比で30 dB 以上であり, 大気エコーより大きく, 降水エコーと同程度だった. また, 強度は高度方向に不連続で時間変化が大きい, スペクトル幅が大きい(2.0 m/s 以上)などの特徴があった.
- 2) 渡り鳥エコー発生時には, ドップラースペクトルの時間変化が大きいことにより風ベクトル(10分値)が算出されないことがあった. 算出された風ベクトルは, 近隣のラジオゾンデなどの結果と比べると, 風向で最大90°, 風速で最大10 m/s 程度の違いがあった.

- 3) スペクトル幅が2.0 m/s 以上, 鉛直速度が-1.0 m/s 以上のときには渡り鳥エコーが発生しているものと仮定し, 全観測データのうち, 渡り鳥エコーの占める割合を調べた. その結果, 渡り鳥エコーの発生率は地点によって違いがあり(2~12%), 全地点の平均では7%だった. 一日のうちで最も発生率が高いのは夕方18時頃から朝7時頃までの夜間であり, 昼12~15時頃にかけても小さいピークがあった.
 - 4) 季節変化に着目すると, 4月にピークをもつ春季期間(4~6月)と10月にピークをもつ秋季期間(8月中旬~11月)に多く渡り鳥エコーが発生した.
 - 5) 渡り鳥エコーは晴れた風の弱いときに多く発生し, 降水時には発生しなかった. また, 発生高度は最高で4 km, おおむね3 km 以下だった.
- 以上のような渡り鳥エコーの特徴をふまえ, 渡り鳥エコーがウィンドプロファイラの観測データに影響を及ぼさないようにするため, 最終的に以下の対策を施した.
- 1) インコヒーレント積分前のドップラースペクトル(0.4秒値)において受信電力値を計算し, しきい値を超えるものを除去し, 残ったドップラースペクトルを平均して1分値を作成する. その際, 受信電力の時間変化が大きいときには渡り鳥エコーが発生している可能性が大きいので, しきい値を渡り鳥エコーが十分取り除くことができるような値に設定し, 逆に受信電力の時間変化が小さいときには降水エコーの可能性があるので, 前の観測時刻の受信電力に一定のバイアスを加えた値にしきい値を設定す

ことで、降水エコーが誤って除去されないようにする。

この方法により、大気エコーと渡り鳥エコーが混在した信号から、大気エコーだけを取り出して風データを作ることが可能になり、渡り鳥エコー発生時においてデータ取得率の向上を図ることができた。

WINDAS では渡り鳥エコーの影響を除去するための対策は一応の完成をみた。ただし、時間変化の激しい降水現象のもとでは、まれに正常なデータも除去してしまうという問題点が残っている。今後もアルゴリズムの改良を行い、観測データの品質向上に努力したい。具体的には、渡り鳥エコーの受信電力が高度方向に不連続であるという性質を降水エコーとの区別利用し、時間変化の激しい降水エコーが誤って除去されないようにするなどの工夫が考えられる。

なお、春や秋の晴れた夜など渡り鳥エコーが連続的に発生しているときには受信信号のほとんどを渡り鳥エコーが占めるため、これまで述べた対策にもかかわらず、広い範囲でデータが欠損することがある。

謝辞

渡り鳥エコーの調査及び対策は、気象庁と三菱電機(株)が共同で実施した。

本調査を進めるにあたり、京都大学・宙空電波科学研究センター(現 生存圏研究所)・深尾昌一郎所長(当時)、橋口浩之氏、通信総合研究所・大野裕一氏、福島大学・渡辺 明氏、山階鳥類研究所・佐藤文男氏、ならびに気象研究所気象衛星・観測システム研究部・小林隆久氏、足立アホロ氏から有益な助言をいただきました。また、本論文の改稿にあたっては、査読および編集委員の方々に懇切丁寧なコメントをいただきました。

た。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- Engerhart, D. and U. Górsdorf, 1997: Effects and observation of migrating birds on a boundary-layer wind profiler in a eastern Germany, COST-76 Workshop, Engelberg, 227-230.
- 石原正仁, 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 2004: 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務, 気象研究ノート, 205, 169-202.
- 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 石原正仁, 2003: 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務, 天気, 50, 891-907.
- 小林隆久, 2004: ウィンドプロファイラ概論, 気象研究ノート, 205, 1-10.
- 清棲幸保, 清棲保之, 1974: 渡り鳥. 保育社, 151pp
- 橋口浩之, 深尾昌一郎, 津田敏隆, 山本 衛, 中村卓司, 佐藤 亨, 山中大学, 浜津享助, 磯村昭彦, 1999: RASC における境界層レーダー開発, 第3回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学超高層電波研究センター. 64-68,
- ホール・ケリンガー, 2000: 鳥の渡りを調べてみたら, 文一総合出版, 255pp.
- Pekour, M. S. and R. L. Coulter, 1999: A technique for removing the effect of migrating birds in 915-MHz wind profiler data, J. Atmos. Oceanic Tech., 16, 1941-1948.
- Wilczak, J. M., R. G. Strauch, F. M. Ralph, B. L. Weber, D. A. Merritt, J. R. Jordan, D. E. Wolfe, L. K. Lewis, D. B. Wuertz, and J. E. Gaynor, 1995: Contamination of wind profiler data by migrating birds: characteristics of corrupted data and potential solutions, J. Atmos. Oceanic Tech., 12, 449-467.

Development of a Method Reducing the Effect of Echoes of Migrating-birds on Wind Measurements in the Wind Profiler Network of JMA.

Kenji KOBAYASHI*¹, Toshihiro ABO*², Yasushi IZUMIKAWA*²
 Kyouichi KAWAHARA*³, Masahito ISHIHARA*²
 Toshio WAKAYAMA*⁴ and Tomoya MATSUDA*⁴

*¹ (Corresponding author) Observations Department, Japan Meteorological Agency, Tokyo 100-8122, Japan. E-mail : kenzi-kobayashi@met.kishou.go.jp

*² Observations Department, Japan Meteorological Agency

*³ Kobe Marine Observatory.

*⁴ Mitsubishi Electric Corporation.

(Received 14 October 2003 ; Accepted 18 October 2004)

水資源学シンポジウム「国連水の日－気候変動がもたらす水問題」のお知らせ

主催：日本学術会議水資源専門委員会，水文・水資源学会，国土交通省水資源部

期日：2005年3月23日（水）

場所：日本学術会議講堂
 （東京都港区六本木7-22-34）

後援：日本気象学会他

趣旨：昨年日本の夏は、西南日本の一部で旱天が続き、一方で多くの台風が上陸して大きな洪水被害をもたらした。これらは、一部では「地球温暖化・気候変化」の現れのひとつではないかと報じられている。この「地球温暖化・気候変化」に関しては、地球シミュレータの成果など、これまでにない高解像度で将来の変化が計算されるようになり、日本では年々の降水量の変動が大きくなる、台風は数が減少するものの強大化する、積雪量が激減するといった見通しが議論されるようになってきている。実際に、日本列島の気候についてこれまでとは異なる状況が確認されているのであろうか、また、今後どのように変化していくと考えられているのであろうか。そして、それは各流域や日本全体の洪水や渇水、水資源、社会・生活、生物などにどのような変化をもたらしているのか、またもたらすと

予想されているのか。

シンポジウムでは、近年と将来に関する気候変動の状況についての最新の観測結果や研究成果を確認し、その上で、水循環や水資源に及ぼす影響とその管理の問題を整理する。また、人間社会、農業生産や環境、生態系に及ぼす影響の変化も含め、水資源学や水資源に関わる技術・制度でこれらの状況の把握や予想される問題に対応できるのかを議論する。

プログラム（講師未定）：

1. 挨拶 日本学術会議・水資源専門委員会，国土交通省（10：00～）
2. 基調講演「気候変動と水資源」（仮題，10：15～）
3. 報告講演（11：00～，途中昼食）
 - 講演1 気候変化に関する最新の予測
 - 講演2 近年の日本の気候変化
 - 講演3 近年の日本の洪水と渇水
 - 講演4 気候変動と水循環・水資源
 - 講演5 気候変動・水循環変動が社会に及ぼす影響
 - 講演6 気候変動・水循環変動が農業に及ぼす影響
4. 総合討論（15：00～）
5. 挨拶 水文・水資源学会（16：50～）