

ドップラーレーダーを用いた 突風探知システムに関する研究



藤原 忠誠*



鈴木 博人*

小型の気象観測用のドップラーレーダーを用いて、突風探知・予測方法の開発及び列車運行判断への応用可能性を評価することを目的として、2007年3月から羽越本線余目駅の屋上にドップラーレーダーを設置し、その観測データを用いた突風探知システムの開発を継続している。本報告では、庄内平野に展開されている気象観測網の観測データを用いて、突風探知システムのアルゴリズムの中で仮定している渦の特性の妥当性について検討を行った。その結果、突風探知システムで推定される地上での風速や、仮定している渦モデルが妥当であることが確認された。

●キーワード：ドップラーレーダー、突風、竜巻、突風探知、気象観測

1. はじめに

突風は、破壊的な力を伴い、鉄道災害や輸送障害をもたらすことがある。そのため、突風に対する警戒情報の必要性は高く、その方法の確立は鉄道防災上においても大きな課題の一つである。

2005年12月25日、羽越本線北余目駅～砂越間の第2最上川橋りょう付近で列車脱線転覆事故が発生した。航空・鉄道事故調査委員会（現・運輸安全委員会）は、「列車が走行中に転覆限界速度を超えるような局所的な突風を受けたため」と調査結果報告をまとめた¹⁾。このような鉄道分野での突風災害を防止するためには、突風を事前に探知し、突風が線路を通過する前に列車の運行を停止する方法の開発が必要である。

しかし、竜巻やダウンバースト（注：積乱雲からの強い下降流）などの突風は、空間的に小規模で短時間に生じる現象であり、離散的に配置された既存の地上風速計による観測では、事前に捉えることが困難である。仮に線路沿線の風速計で突風を捉えた段階で警報を発令し、列車運行を抑制したとしても間に合わない。よって、突風による鉄道災害を効果的に防止するためには、広範囲の風の動きを面的にかつ短時間周期で連続的に観測できるドップラーレーダーが最適であるとされている²⁾。

そこで、ドップラーレーダーを応用した突風探知・予測方法の開発及び列車運行判断への応用可能性を評価することを目的として、羽越本線余目駅屋上に小型気象ドップラーレーダーを設置し、2007年3月1日より観測を開始した（図1）。

本報告では、山形県庄内平野での突風観測の概要、ドップラーレーダーによる突風探知アルゴリズムの手法、及び突風探知システムのアルゴリズムの中で仮定している渦の特性についての妥当性を検討した結果を紹介する。

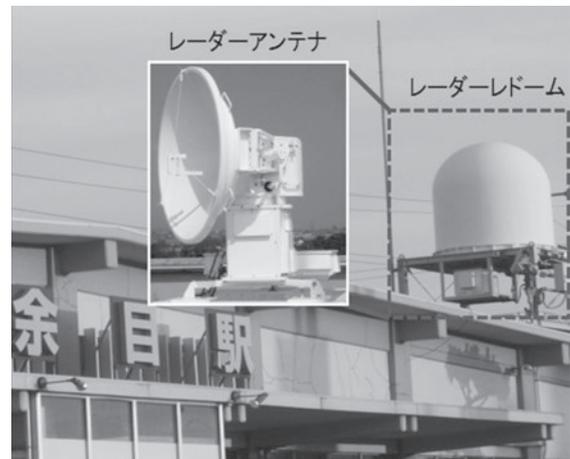


図1 羽越本線余目駅屋上に設置されたドップラーレーダー

2. 庄内平野での突風観測の概要

2.1 庄内平野で突風観測

突風を探知・予測・追跡するシステムを開発するためには、これまで未解明の部分が多かった突風の実態を把握することが重要である。竜巻やダウンバーストなど突風やそれらをもたらす気象現象を観測するには、それらの時間空間スケールが小さいため、以下のような問題がある。

- (1) 通常の気象観測では、突風の観測そのものが困難である。
- (2) 被害を起こすような少数事例について、突風の被害調査などを通じて散発的に扱わざるをえないため、系統的な知見として蓄積されにくい。

そこで、2007年7月から2010年3月まで、山形県庄内平野に図2に示す気象観測網を展開し、気象庁気象研究所、財団法人鉄道総合技術研究所、京都大学防災研究所とともに、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の支援を受けた「小型ドップラー気象レーダによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究」を実施した²⁾。2009年

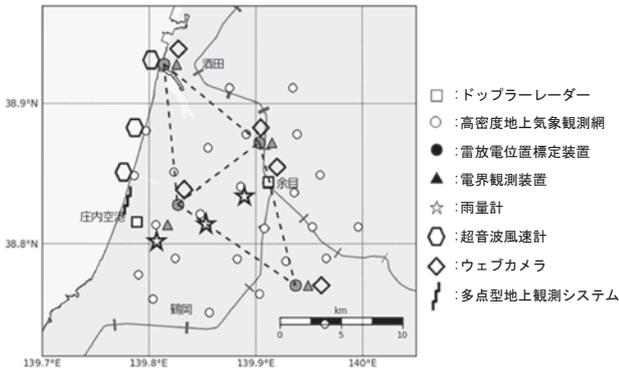


図2 庄内平野の気象観測網

4月からは、気象研究所とドップラーレーダーを用いた突風探知システムに関する共同研究を開始した。

羽越本線余目駅屋上のドップラーレーダー（以下JRレーダー）の観測領域は、余目駅を中心とする半径30kmの領域であり、庄内平野の全域をカバーする（図2）。JRレーダーは、周囲の建物にレーダービームが障害されない最低仰角である仰角3.0度に固定し、約30秒で1回転の頻度で観測を実施している。そのため、通常の気象レーダーよりも時間分解能および空間分解能が高く、小規模で持続時間の短い突風現象を捉えられる可能性がある。

JRレーダーは、高時間分解能で観測できる反面、固定された高度のみしか観測できない制約がある。そこで冬期間、庄内空港に気象研究所のドップラーレーダーを設置し、渦の特性や立体構造の観測を継続している。

庄内平野では、JRレーダーのほかに、高密度で幾何学的に配置された26台の風向風速や気温、湿度、気圧を観測する気象観測装置（高密度地上気象観測網）を展開し、地上での突風現象との関係を調べている。

このほかに、風速計を100m間隔で12台、気圧計を50m間隔で25台配置し、高時間分解能サンプリング（100ms）で観測する「多点型地上観測システム」を新たに開発し、庄内空港北西側海岸に総延長1.2kmにわたって直線状に設置し、地上での突風の詳細な構造を調べている（詳細は、後述の4.2.1を参照）。

2.2 今までの観測で得られた庄内平野で発生する突風に関する知見

今までの気象研究所との共同研究の成果として、庄内平野で発生する突風に関して、以下のことが明らかとなった²⁾。

- (1) 庄内平野では、冬期間に多数の渦が発生する。多くの渦が季節風の向き（日本海から陸）に移動する。
- (2) 冬期間の庄内平野では、複数の渦が同時に観測されることが多い。
- (3) 突風は降水（降雪）を伴っており、レーダーで観測が

可能である。

- (4) 地上で観測された顕著な突風のほとんどは上空に渦を伴い、その渦の水平スケールが数km以下と小さい。

これらの研究成果をふまえ、ドップラーレーダーによる上空の渦の探知と追跡・予測技術を基にした突風探知システムの開発を開始した。

3. 突風探知システムの原理と問題点

JRレーダーのデータを用いて、突風をもたらす可能性のある渦の位置と強さを表示できる突風探知システムを試作した²⁾。試作した突風探知システムの構成は、次の通りである。

- (1) ドップラーレーダーの観測値から渦のパターン（注：近く風と遠ざかる風のペア）を自動探知し、渦の回転速度を計算する。
- (2) 探知された渦を追跡する。それらの位置情報から渦の移動速度・移動方向を計算し、数分後の進路予報円を算出する。
- (3) 渦の回転速度と移動速度を合成して渦の風速を計算する。
- (4) 突風の基準値以上の風速をもった上空の渦の進路予報円が、線路に接近・通過する場合、その駅間に対して警報を発令する（図3）。

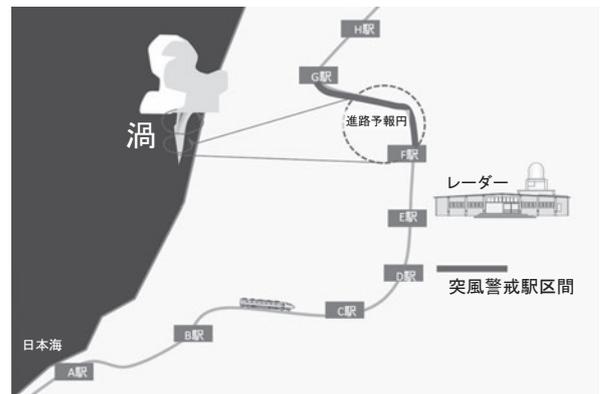


図3 突風探知システムの概要

突風探知システムの中核の部分のうち、渦の探知に関わる部分は、気象研究所で開発された「メソサイクロン検出アルゴリズム」³⁾をベースとして改良・開発を進めてきたものを使用している。

試作した突風探知システムのアルゴリズムは、レーダー観測上の制約の問題や庄内平野で発生する渦の特性に関して未解明な部分を含んでいるため、以下の仮定が存在する。

- (1) JRレーダーは、周囲の建物からのビーム遮蔽を防ぐため、仰角3度で観測している。そのため、観測高度はレーダーからの距離10kmで高度0.5kmとなり、上空の渦を探知

していることになる。突風探知システムでは、地上と上空の渦の風速が一致していると仮定している。

- (2) 渦は、ランキン複合渦(注:渦に伴う速度の接線成分が、渦の内域では中心からの距離に比例し、外域では距離に半比例するような分布をもった仮想的な渦のモデル)の構造を持つと仮定している。
- (3) 地上に突風をもたらす渦は、鉛直方向に傾きがないと仮定している。

これら突風探知システムで仮定している渦の特性についての妥当性を検討し、得られた知見を基に突風探知システムの列車運行判断への応用を検討するため、次節では、庄内平野で展開している気象観測網でこれまで得られた長期間の観測データベースを用いて、解析を行った。

4. 突風探知システムに用いている渦の特性に関する仮定の妥当性の検討

4.1 上空の渦と地上の渦の風速の関係

ドップラーレーダーは地上の突風を直接観測できないため、ドップラーレーダーで観測する上空の風と地上で観測する風との関係付けは、突風探知システムの実用化の上で本質的な課題である。しかし、渦内部を地上まで含め定量的に観測した先行研究はほとんどなく、米国で竜巻の予想進路上に測器を臨時設置する試みが始まっている程度である⁴⁾。本研究では、高密度地上気象観測網の気象観測装置における風向風速計の長期間の観測データを用いて、地上に突風が発生した事例について、ドップラーレーダーで観測された上空の渦との関係の統計解析を行った⁵⁾。

以下に使用データ、解析手法、解析事例について、説明する。

- (1) 使用データ: 地上気象観測点の風データ(超音波風速計WXT520およびWS425の1秒値)およびJRレーダーのドップラー速度データを使用した。
- (2) 解析手法: 地上観測点の風データをレーダーで得られるドップラー速度に変換し、対応する地上観測点上空のJRレーダーのドップラー速度を比較をした。
- (3) 解析事例: 2007年から2012年の冬季で抽出された渦突風事例中顕著な18事例を調べた。

上空と地上のドップラー速度の比較例を図4に示す。突風時は地上の方が絶対値が大きいものの、全体的に両者はよく一致している。

図5に18事例に関する地上および上空のドップラー速度の散布図を示す。各事例の突風発生前後のJRレーダーのデータのうち、渦が観測点上空を通過している時間のデータについて、全部で32データを使用した(例えば、図4の事例では太い×印の時間のデータの3データを使用した)。レーダービー

ムが地上観測点上空をスキャンした時刻を1秒精度で認識し、その時刻のデータ(必ずしも突風時ではないことに注意)を比較に用いた。両者の差は概ね $\pm 5\text{ms}^{-1}$ とよく合っており、相関係数は0.88であった。両者が大きく外れているのは、渦の中心付近の変化の激しい領域を通過した場合であり、渦の鉛直方向の傾きなどに起因すると推測される。

以上をまとめると、地上で突風が観測された18事例のデータを用いて地上と上空のドップラー速度を比較した結果、良い相関であることが統計的に示された。この結果は、上空の渦に依存する探知システムの地上風速推定手法の妥当性を示している。

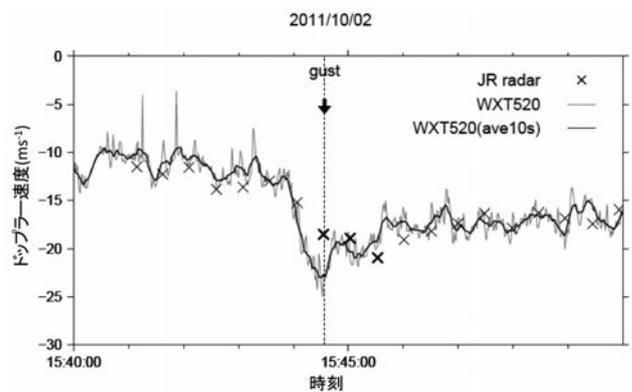


図4 地上観測点とその上空で観測されたJRレーダーのドップラー速度(地上風速計(WXT520)高度及びレーダービーム高度はそれぞれ7.6mと375m。)

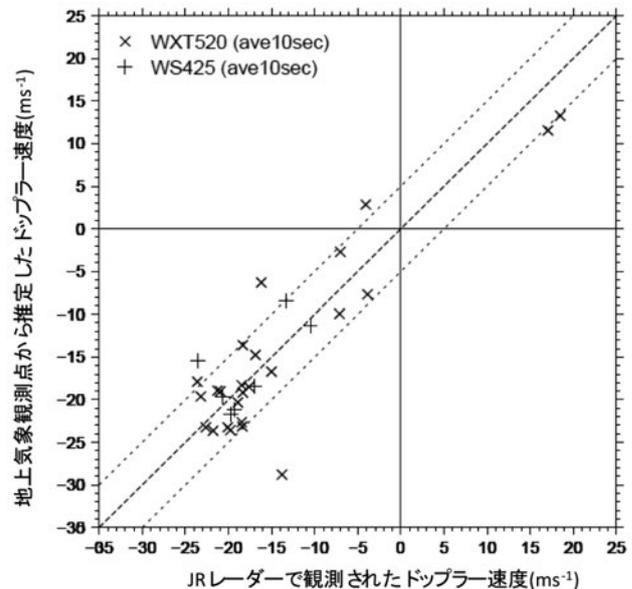


図5 突風18事例に関する地上データとその上空のドップラー速度データの散布図

4.2 地上付近の渦の水平構造

4.2.1 多点型地上観測システム

JRレーダーで探知した上空の渦と、高密度地上気象観測網の気象データを照合することにより、同地域で発生する地上の突風が上空の渦を伴うことなどの特徴が分かった。しかし、ドップラーレーダーで観測される渦は地上気象観測網の設置間隔に比べて小さいため、地上の渦の水平構造や強度、空間スケールの推定が難しく、渦に伴う地上突風現象の解明には至っていない。

そこで、高時間分解能サンプリング(100ms)で風速や気圧を高密度で観測する超高密度観測システム「多点型地上観測システム」を新たに開発し⁶⁾、風速計を100m間隔で12台、気圧計を50m間隔で25台配置し、庄内空港北西側海岸に総延長1.2kmにわたって直線状に設置した(図6)。日本海から庄内平野に上陸する渦の移動方向と直角する方向にこの観測システムを展開することで、観測システムの上空を渦が通過した場合、1つの渦に対して複数箇所の観測データ(風向・風速・気圧)が得られるため、地上の渦の空間スケールや強度の詳細な水平構造を把握することが可能になる。冬季に庄内平野で発生する渦の水平スケールは数100m～

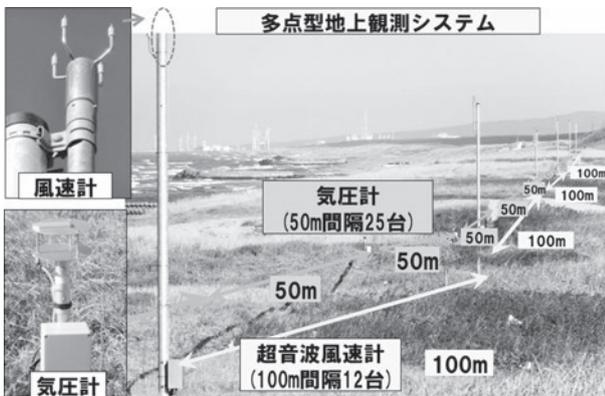


図6 庄内平野海岸部に設置した多点型地上観測システム

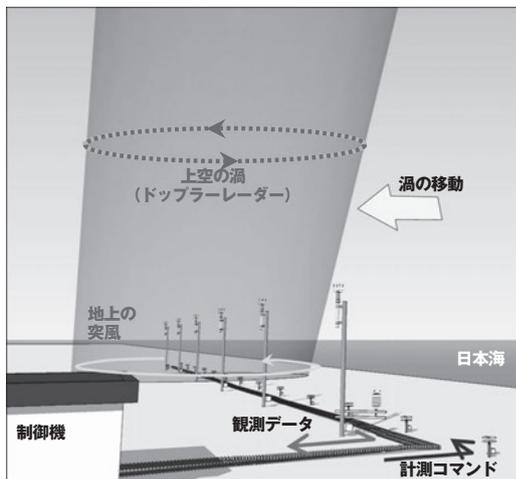


図7 多点型地上観測システムを用いた上空の渦と地上の突風の詳細な立体構造の把握の概念図

2km程度であることから、渦がこのシステムを通過すると、データが取得できる可能性がある。また、冬季には庄内空港に気象研究所のドップラーレーダーを設置して、突風をもたらす積乱雲の立体構造を調べるための観測を実施することから、上空の渦と地上の突風の詳細な立体構造を把握できると考えられる(図7)。

4.2.2 竜巻状気流の捕捉事例

2012年1月29日10時24分頃、日本海上から庄内平野に向けて移動した渦の中心が、多点型地上観測システムの南西側を通過した事例について解析を行った⁷⁾。観測システムの風速計⑤(風速計の場所は、図9参照)のデータおよび2台のドップラーレーダーで追跡した渦の移動速度(13ms⁻¹東南東進)から求めた、渦の回転速度の時間変化(図8(a))より、最大風速直径約500m、最大回転速度5ms⁻¹と推定され、渦の移動速度を加えた18ms⁻¹は風速計⑤の最大風速17.7ms⁻¹と整合する。また、気圧計データの時系列(図8(b))から、渦の中心に近い南西側の気圧計ほど気圧の下降幅が大きかった。以上から、本事例の渦は竜巻状の気流構造を持っていたと推測され、多点型地上観測システムによってその特徴を詳細に捕捉することができた(図9)。

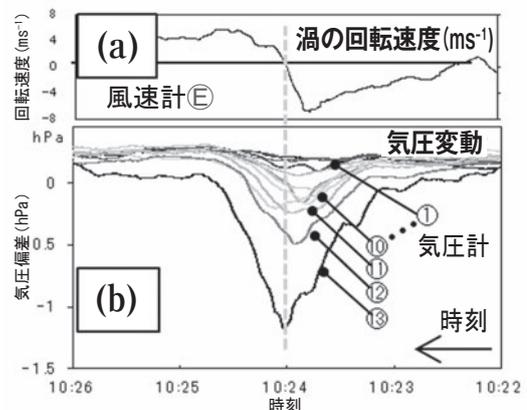


図8 (a) 風速計⑤における、渦の回転速度の分布
(b) 気圧計による気圧変動データの時系列
(北東側から順に①～⑬の番号を付けている(図9参照))

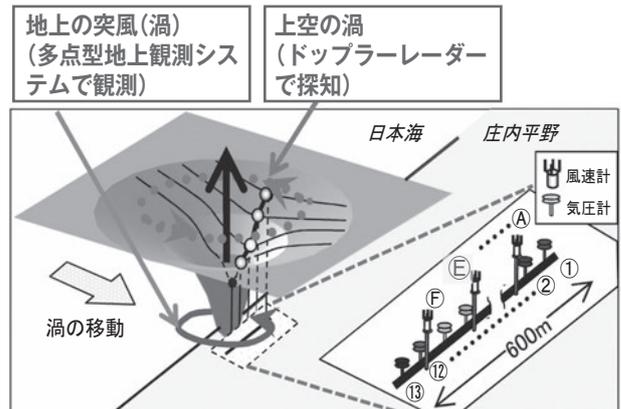


図9 図8の観測データに基づく竜巻状気流の模式図

4.2.3 ランキンの複合渦の検証

突風探知システムで渦を探知する際、ランキンの複合渦モデルを仮定した渦のフィッティングを行っている。この渦モデルと実際の渦の構造が大きく異なる場合、渦が探知できず見逃しにつながる。したがって、実際の渦の構造を詳細に調べ、ランキンの複合渦の仮定の妥当性について検討する必要がある。観測期間中に取得できた観測データのうち、渦に伴う気圧降下が最も大きかった2012年12月10日の事例について、地上の渦がランキンの複合渦に適合するか調べた⁸⁾。

2012年12月10日12時09分頃、明瞭なフックエコー（注：渦に伴う降水エコーのパターン）とパターンを伴った渦が多点型地上観測システムの北端上空を通過した。この渦は東北東へと進行し（多点型地上観測システムに対して約45度の角度）、移動速度は最低仰角（高度約90m）のレーダーのドップラー速度パターンから約16ms⁻¹と推測された。この渦の通過とともに、複数の風速計と気圧計で風速の増加と気圧の降下がみられた。最大風速はシステムの北端から50mに位置する風速計で35.3ms⁻¹を、最大気圧降下は同じ位置の気圧計で4.0hPaを観測した。これらの位置関係を詳しく調べることで、渦の中心はシステムの北端から0-150mを通過し、最大風速半径は150m以下であることが推測された。

図10 (a) に最大風速を観測した風速計のデータ及び渦の移動速度を用いて時空間変換した接線風速（実線）と旋衡風バランス（注：遠心力と気圧傾度力がバランスすること）を仮定したランキンの複合渦の接線風速（破線）を示す。合わせて、図10 (b) に最低気圧降下を記録した気圧計について上記と同様に求めた気圧降下（実線）とランキンの複合渦の気圧降下（破線）を示す。ここでランキンの複合渦の最大接線風速を21ms⁻¹、最大風速半径60mと仮定すると、観測された変動の全体的な分布は、風速・気圧ともにランキンの複合渦の分布とよく一致していた。

解析を行った事例のほか、多点型地上観測システムにおいて、2011、2012年度の冬季に渦を伴い25ms⁻¹を超える突風が少なくとも22事例あることが確認された。今後、解析を行う事例数を増やし、現象の普遍性を明らかにする予定である。

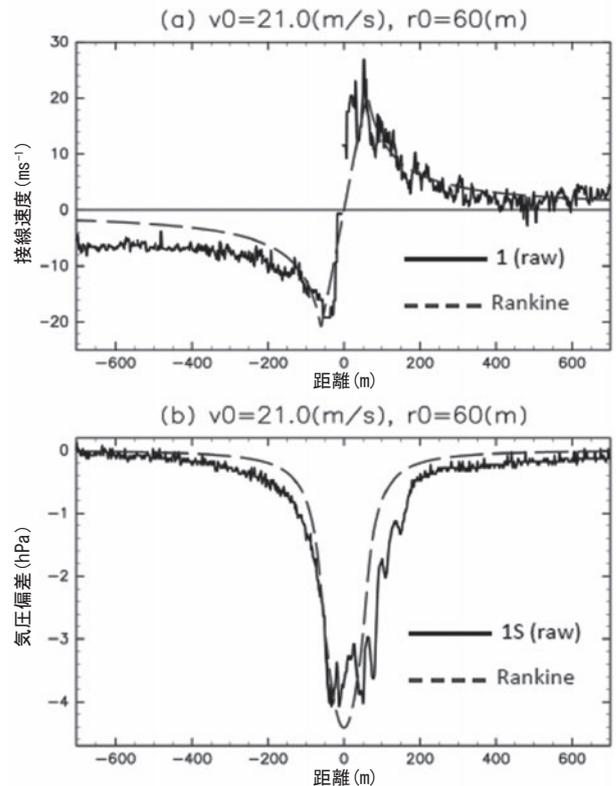


図10 (a) 最大風速を記録した風速計の接線風速と (b) 最大気圧降下を記録した気圧計の気圧を時空間変換した分布 (実線) 及び旋衡風バランスを仮定したランキン渦の分布 (破線)

4.3 渦の鉛直構造

突風探知システムでは、上空の渦の探知を行う。これまで、渦の傾きに関する知見が乏しかったため、システムでは渦の傾きがないと仮定し、移動方向・移動先の予測を行っている。そのため、上空の渦から見て、渦が進行方向の前方に傾いていると、地上の渦が先行することとなり、システムでは警報を出すのが遅れる。その結果、システムでの警戒時間のリードタイムの確保が難しくなる。一方、上空の渦に対して地上の渦が進行方向の後方にあれば、リードタイムが確保できることになる。つまり、突風を発生する渦について、立体構造の実態を把握することが重要となる。

庄内空港で渦の立体構造の観測を実施している気象研究所のレーダー観測のデータの解析から、庄内平野で発生する渦の立体構造を把握することができた⁹⁾ (図11)。渦の立体構造が解析できた7つの全ての事例で、海上で発生した渦が、庄内平野に上陸後に、進行側に大きく傾く（天頂から30～60度）ことが分かった。つまり、地上の渦は、突風探知システムで探知される上空の渦から、進行方向後方の数100m海側に存在していることを意味する。したがって、庄内平野では、地上の渦は、探知される上空の渦よりも、線路から遠くの位置に存在することになり、突風探知システムで早めに警報を発令することができることが分かった。

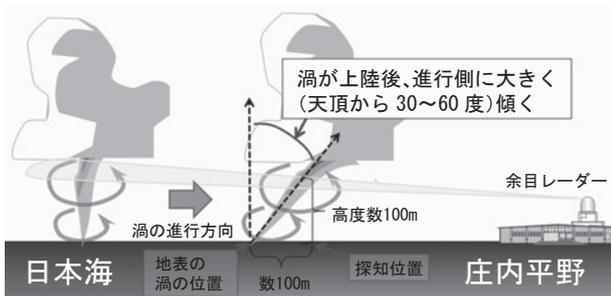


図11 庄内平野で発生する渦の傾きと探知システムの関係

5. おわりに

ドップラーレーダーを用いた突風探知システムのプロトタイプを開発した。システムのアルゴリズムで仮定している渦の特性の妥当性について、庄内平野で展開している気象観測網の観測データから解析を行った。その結果、以下のことが確認された。

- ①レーダーで探知される上空の渦の風速と地上で観測された風速は $\pm 5\text{ms}^{-1}$ で一致し、突風探知システムで推定される上空の渦の風速を地上の風速とするのは、概ね妥当である。
- ②地上で観測される渦の水平構造は、ランキンの複合渦に概ね一致しており、突風探知システムで適用している渦モデルが妥当である。
- ③渦が上陸後、進行側に大きく傾いているため、突風探知システムで早めに警報を発令できる。

突風探知システムでは、「渦の誤認識」、「渦の見逃し」、などにより、空振りや見逃しが発生することが分かっている¹⁰⁾。今後、これらの課題を解決するため、突風探知システムのアルゴリズムの改良と探知精度向上の取り組みを進める予定である。また、突風探知システムの実用化に向けて、列車運転規制に用いる渦の風速値の基準値(しきい値)の設定や、突風の予想進路の設定方法の開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会；鉄道事故調査報告書 東日本旅客鉄道株式会社羽越線砂越駅～北余目駅間列車脱線事故、2008.4
- 2) 楠研一、今井俊昭、鈴木博人、竹見哲也；小型ドップラー気象レーダーによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究、運輸分野における基礎的研究推進制度平成19年度報告書、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構、2010
- 3) Suzuki, O., H. Yamauchi, M. Nakazato and K. Akaeda: A new multi-scale meso-vortex/divergence detection algorithm with modified Rankine combined vortex. Preprints, 33rd Conf. on Radar Meteorology, 2007
- 4) Karstens, Christopher D., Timothy M. Samaras, Bruce D. Lee, William A. Gallus, Catherine A. Finley; Near-Ground Pressure and Wind Measurements in Tornados*. Mon. Wea. Rev., 138, 2570-2588, 2010
- 5) 猪上華子、藤原忠誠、加藤亮平、楠研一、新井健一郎、斉藤貞夫、林修吾、益子渉、佐藤英一、西橋政秀、鈴木博人；庄内平野で観測された突風と気象じょう乱-渦および渦内部の地上風についてII-、2013年度日本気象学会秋季大会予稿集B109、2013
- 6) 楠研一、佐藤英一、小野木茂、斉藤貞夫、猪上華子、益子渉、下瀬健一、西橋政秀、新井健一郎、森島啓行、足立啓二；竜巻等突風のための多点型地上観測システムの開発、2011年度日本気象学会秋季大会予稿集C156、2011
- 7) 楠研一、佐藤英一、小野木茂、斉藤貞夫、猪上華子、益子渉、下瀬健一、西橋政秀、新井健一郎、森島啓行、足立啓二；竜巻等突風のための多点型地上観測システム-初期結果-、2012年度日本気象学会春季大会予稿集B202、2012
- 8) 加藤亮平、楠研一、佐藤英一、藤原忠誠、猪上華子、新井健一郎、西橋政秀、益子渉、斉藤貞夫、鈴木博人；多点型地上観測システムでとらえた下層渦の構造、2013年度日本気象学会秋季大会予稿集B110、2013
- 9) 加藤亮平、楠研一、新井健一郎、西橋政秀、下瀬健一、益子渉、佐藤英一、斉藤貞夫、猪上華子、別所康太郎、星野俊介、鈴木博人；庄内平野で観測された渦の上陸時の変質-渦の傾き増加のメカニズム-、2013年度日本気象学会春季大会予稿集A109、2013
- 10) 新井健一郎、足立啓二、森島啓行；ドップラーレーダーの鉄道への応用に関する研究、JR EAST Technical Review, No.35, 42-45, 2011