

気象レーダー情報を用いた 突風による強風箇所検出アルゴリズムの開発

福原 隆彰* 高見 和弥* 荒木 啓司*

Development of Extraction Algorithm of Strong Wind Area
Caused by Gusts using Meteorological Radar Information

Takaaki FUKUHARA Kazuya TAKAMI Keiji ARAKI

Since gusts such as tornados, gust fronts, and downbursts are localized and short-time phenomena, these gusts cannot be always detected by existing anemometers along railways used for train operation. Therefore, to secure the safety of train operation against these gusts, we developed an algorithm for extracting ground strong wind area caused by them. This algorithm is based on two elements. One is to detect the gust index of upper air from the echo and Doppler wind velocity observed by existing radar, and the other is to estimate the surface wind velocity from the gust index of upper air by using results obtained from the reproduction calculation of previous gust events based on meteorological models.

キーワード：突風，気象レーダー，数値計算

1. はじめに

鉄道における強風災害を防止するための強風時の運転規制は、沿線に設置された風速計が示す値が閾値を超えたときに発令される。沿線の風速計は平均すると 15km ~ 20km 間隔で設置されており、台風や低気圧など、比較的広い範囲で長い時間吹く強風については十分な検知が可能である。その一方で、近年報告された風による列車の脱線転覆事故¹⁾などでは竜巻等のいわゆる突風が原因とされているが、その空間的な大きさは 100m ~ 1km と上に述べた風速計の配置間隔より小さく、風速計で的確に捉えることが難しい。仮に風速計の配置密度を増して風速計で突風が検知できたとしても、すでに列車が接近していれば運転規制が間に合わない可能性がある。

近年、これら突風の検知や予報に関して気象レーダー情報を用いた様々な取り組みが行われている。気象庁では竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストといった、突風の発生可能性に関する情報を提供している。また、独自に設置した気象レーダー情報を用いて突風時の運転規制を実施している鉄道会社もある²⁾。

鉄道総研でも、突風発生時の鉄道運行の安全性の向上を目的に、既存の気象レーダーの情報を用いた運転規制に関する研究開発を進めている。気象レーダーで得られる降水や風の情報は上空のものであり、地上の情報を直接得ることはできない。上述の竜巻注意情報が発表されたときに地上で被害が報告されていないことがあり³⁾、このような場合、上空で突風が発生していても地上では風が強く吹いていない可能性が考えられる。観測で得ら

れない箇所の気象状況を得る手段として数値計算を用いて風や雨などの分布を求める方法があり、数値計算で突風発生時の上空の風と地上の風との関係を求めることで、気象レーダーで得られる情報から鉄道の安全運行に影響を及ぼす地上での突風の状況を実態に即して推定できる可能性がある。

そこで、突風発生時の気象レーダー情報と数値計算による上空の風と地上の風との関係とを組み合わせ、鉄道沿線での突風による地上の風速値を推定するアルゴリズムについて検討した。

2. アルゴリズムの概要

竜巻、ダウンバースト、ガストフロントといった突風、または前線の通過により生じる風速の急激な増加（以下、これらの現象をまとめて突風と表記する）を対象に、突風により運転規制値を超える地上での強風の箇所を気象レーダー情報を用いて抽出するアルゴリズムを検討した（図 1）。

このアルゴリズムは 2 つの手法で構成される。1 つは気象レーダーより得られるドップラー風速から竜巻、ダウンバースト、ガストフロントに特徴的な上空の渦、風の発散、収束が顕著な箇所（以下、突風指標と表記する）を検出するアルゴリズム①である（図 1 の①）。

ここで、気象レーダーで観測される降水や風は概ね地上数百 m から 3km 程度の高さでの値であるため、気象レーダーで得られる突風指標と地上での風の状態とが一致しているとは限らない。そこで、2 つめに気象モデルを用いた過去の突風事例の数値計算より、突風指標と地

* 防災技術研究部 気象防災研究室

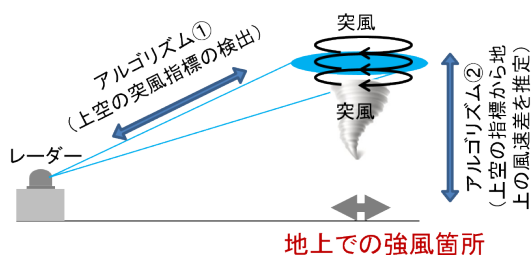


図1 開発したアルゴリズムの概念図

上の風との関係をあらかじめ求める。気象レーダーの観測結果より検出される突風指標からこの関係式を用いて地上の風速を推定し、強風箇所を推定するアルゴリズム②である(図1の②)。

最後に、突風がその後鉄道路線に到達しうかを判断するため、抽出した強風箇所の移動を突風指標の移動ベクトルを用いて外挿し、強風箇所の時間変化を予測する。

以下、突風指標の検出を3章で、突風指標から地上での風速値の推定を4章で詳しく述べる。

3. 気象レーダーを用いた突風指標の検出手法

突風の発生時、竜巻では風の渦、ダウンバーストでは風の発散、ガストフロントでは風の収束が上空で顕著に現れる⁴⁾。そこで、これらの顕著な上空の渦、発散、収束(突風指標)を気象レーダーを用いて検出する手法について述べる。ここで、上に示したうち竜巻による渦は水平スケールが小さく、気象レーダーで直接捉えられるとは限らないが、竜巻をもたらすメソサイクロンの渦は気象レーダーで観測できる水平スケールを持つ。そこで、竜巻はメソサイクロンの渦を検出する。

3.1 分析に用いる気象レーダー情報

気象レーダーは、降水粒子による電波の反射から、反射強度(降水量に変換される、降水粒子によって反射された電波の強さ)とドップラー速度(降水粒子の動きの、レーダービームの視線方向(レーダーに近づく/遠ざかる方向)のみの成分)を、レーダービームの視線方向・方位角方向(同心円上での回転方向)のデータとして観測する(図2)。本開発では国土交通省のXバンドMPレーダー(以下、XRAIN)のうち、日本海側の2エリア4基の観測データを用いた。XRAINでは、雨量情報配信用に2仰角(各仰角の観測は2分に1回)、CAPPIデータ(Constant Altitude Plan Position Indicator, 複数仰角を用いて切り出した等高度面のデータ)作成用に10仰角(各仰角の観測は5分に1回)、あわせて12仰角で観測が行われている。今回の突風指標の検出方法の検討では3仰角(雨量情報配信用のうち低い1仰角, CAPPIデータ作成用のうち低いほうの2仰角)を用いた。

3.2 突風指標の検出手法

気象レーダーで観測されるのは風速分布そのものではなく、レーダービームの視線方向成分のみの1次元の速度であるドップラー速度(気象レーダーから遠ざかる方向を正とする)の分布である。本アルゴリズムの開発では既往研究にて開発された手法^{5) 6) 7)}などをもとに、メソサイクロン、ダウンバースト、ガストフロント、前線がそれぞれもたらす渦、発散、収束を気象レーダーで観測した時に得られるドップラー速度分布の視線方向、あるいは方位角方向の増減領域に着目して検出することとした。気象レーダーによる検出のイメージを図3に示す。

はじめに、気象レーダーで突風発生時に特徴的な上空の風の流れ(渦や風の発散および収束、図3の白抜き矢印)を観測した時にみられる、ドップラー速度が視線方向あるいは方位角方向に増加・減少する領域(図3の赤太実線。以下、シアースegmentと表記)を抽出する。シアースegmentの抽出例を図4に示す。図4はガストフロント事例でのドップラー速度(点線)及びそれを移動平均して平滑化した値(実線)の、1つの方位角での視線方向(すなわち、レーダーからの距離)分布を示したものである。ガストフロントおよび前線では、視線方向分布において極大値(V_+)、極小値(V_-)に挟まれ、かつ気象レーダーからの距離が大きくなるとともにドップラー速度が減少する領域をシアースegmentとして抽出する。同様に、ダウンバーストではドップラー速度の視

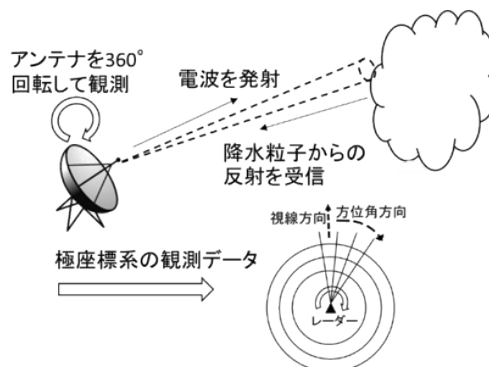


図2 気象レーダーの観測イメージ

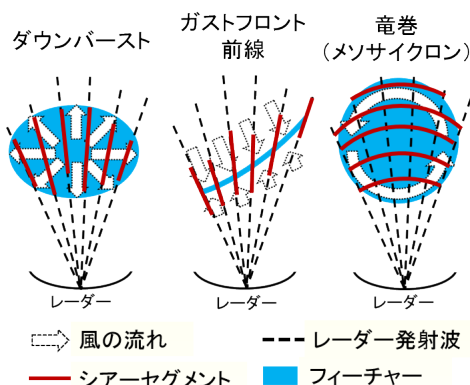


図3 レーダーによる突風発生時の上空の特徴的な風の流れの検出イメージ

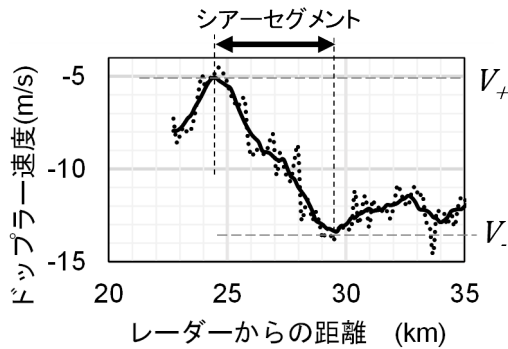


図4 シアースegmentを抽出するドップラー速度抽出例

線方向分布において気象レーダーからの距離が大きくなるとともにドップラー風速が増加する領域を抽出する。メソサイクロンではドップラー速度の方位角方向分布において時計回りに増加する領域をそれぞれ抽出する。

地上での突風発生時以外にも上空では渦、風の発散・収束がみられる。そこで、地上での突風に対応する渦、風の発散・収束を検出するため、突風をもたらすシアースegmentの検出に閾値を設定する。ここで、上空の風における周囲の風速場からの相対速度 (V_r) は、単純化すると図4に示した極大値 (V_+)、極小値 (V_-) を用いて式(1)のように表すことができる。

$$V_r = (V_+ - V_-) / 2 \quad (\text{メソサイクロン・ダウンバースト})$$

$$V_r = V_+ - V_- \quad (\text{ガストフロント・前線})$$

(1)

本アルゴリズムでは対象領域で発生した突風事例を見逃さないように V_r の閾値を定めることとした。閾値の設定にあたっては対象とした XRAIN 観測エリアにおいて過去に突風被害が発生した事例⁸⁾、または気象庁アメダス観測点で瞬間風速の急激な増加が確認された事例の計8事例を用いた。各事例でシアースegmentを検出できる V_r を調べたところ、突風被害箇所やアメダス観測点の直上においてはその最小値は3.0m/sであった。このことから、本アルゴリズムでシアースegmentを検出する V_r の閾値を3.0m/sとし、 V_r がこの値以上のものをシアースegmentとして検出する。

このようにして抽出されたシアースegmentは視線方向もしくは方位角方向の1次元の値である。そこで、近接する同じ種類のシアースegmentを統合し、2次元の領域(図3の青色の領域。以下、フィーチャーと表記。)として検出する。ただし、地形の影響等による誤検知を減らすため、使用した3つの仰角のうち2つ以上でこの領域が検出されることをフィーチャー検出の条件とする。本アルゴリズムでは検出するフィーチャーの形状はメソサイクロンを円、ダウンバーストを楕円、ガストフロントおよび前線を曲線で近似した。

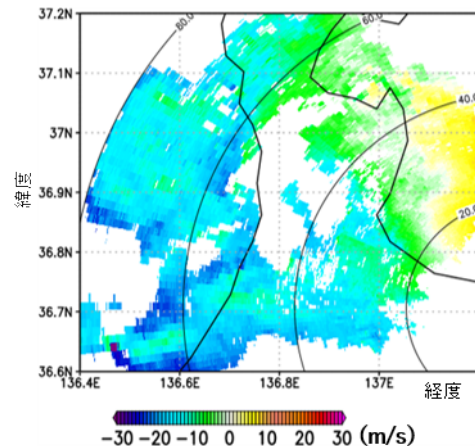


図5 レーダーによるドップラー速度の分布例

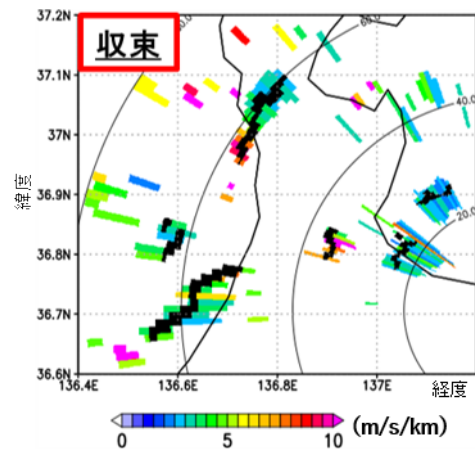


図6 シアースegmentと突風指標の検出例 (ガストフロント、上空の風の収束)

次に、突風指標の検出にかかるフィーチャーの閾値を定めた。前述の8事例についてフィーチャー内のシアースegmentの V_r を調べた結果、 V_r が5m/s以上となるものが存在していた。上記を勘案して経験的に、地上で突風が発生する可能性があるフィーチャーの閾値はそれを構成するシアースegmentの最大値を5m/sと設定し、この値以上となるものを突風指標として検出することとした。

以上の方法により設定した突風指標の検出例として、ガストフロントに伴う風の収束を検出した例を示す。当該事例発生時のドップラー風速分布を図5に、この分布から抽出したシアースegmentおよび検出した突風指標を図6に示す。このように、気象レーダー情報より突風指標が検出できる。

3.3 検出した突風指標の移動予測

鉄道の防災においては地上の突風が線路や列車に支障を与える可能性の情報が必要となる。そこで本節では、突風指標の移動予測について述べる。

特集：防災技術

突風指標は積乱雲など強い降水を伴う雨雲の中に検出されることが多い。ナウキャストなど降水予測の分野では、雨域の移動予測手法として運動学的予測手法が実運用に用いられている。運動学的予測手法とはその時刻において観測された降水域が、ある移動ベクトルに沿って移動するという仮定のもとでその移動予測を行う手法である。突風指標の位置は観測時刻により積乱雲内で変化する可能性があることから、突風指標の移動を追跡するよりもそれを伴う雨雲の移動を追跡するほうが容易である。そのため、突風指標の移動は突風を伴う雨雲の移動ベクトルで推定することとした。

移動ベクトルの推定には相互相関法⁹⁾を用いた。相互相関法は、観測された降雨分布とその一定時間前の時刻での降雨分布について、位置をずらしながら空間相関（ずらし空間相関）をとり、最も相関が高いずらし位置との差分を移動ベクトルと推定する。本アルゴリズムでは検出した突風指標の中心点を中心とした1辺10kmの領域内で反射強度の鉛直方向の最大値が20dbZ以上の箇所を対象とし、その5分前に観測された反射強度の鉛直方向の最大値とのずらし空間相関を求めた。このずらし空間相関が最も強くみられた地点を5分前の突風指標の位置と推定し、移動ベクトルを求めることで、突風指標の移動を予測した。

4. 突風による地上の風速値の推定

気象レーダーで得られる風は上空の風であるが、列車が走行するのは地上であることから、地上での風を知る必要がある。そこで、気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting)¹⁰⁾を用いた数値計算により、突風の鉛直構造を求め、3章で検出した突風指標での V_r (風速差)と地上での風速差との関係式を構築して、地上の風を推定することとした。ここで、気象モデルは対象領域を経度方向、緯度方向、高さ方向の格子に区切り、各格子点における地形や土地利用のデータ、風速、雨、気温などの気象データ（初期条件、境界条件とよぶ）を与え、格子ごとの各気象要素の時間変化をコンピュータで計算するものである。

4.1 数値計算の概要

数値計算の対象とした突風は、対象としたXRAINの観測範囲で、XRAINのデータが収録されている期間内に発生し、その種別が特定されている7事例⁸⁾（竜巻6事例、ガストフロント1事例、ダウンバーストは発生しなかった）とした。各事例において地上の被害が報告された箇所²⁾を中心とする30km程度～60km程度四方の領域を数値計算の領域と設定し、東西・南北方向に200m間隔、鉛直方向に60層の格子を設定した。初期条件、境界条件は気象庁のメソ客観解析データ、GSM（日

本域）領域客観解析データ、アメリカの環境予測センター（NCEP: National Centers for Environmental Prediction）が作成した客観解析データを用いて作成した。

4.2 突風発生時の数値計算結果

気象レーダーで得られる突風指標はレーダーからの距離により高さが異なっていることから、レーダーで得られた突風指標での風速差から地上の風を推定する際の関係式には、高さの情報を含める必要がある。ここでは、地上での風速差を求める関係式は、高度差200mの層間での風速差を鉛直方向に積算するものとした。また、突風は3次元的な構造であり、風速差が大きい領域が鉛直方向に直立しているとは限らない。そのため、突風指標での風速差から地上での風速差を求める場合には、上に述べた風速差そのものに加え、風速差が大きい箇所の領域分布の水平方向のずれを考える必要がある。

はじめに、海面からある高さをもつ面を設定し、その面内での2地点間風速差を数値計算で得られる3次元の風向風速の値から求めた（図7）。高さの差200mの2つの高度面それぞれで求めた風速差の空間相関は強い正の相関があるため、関係式の作成方法は概ね妥当と考える。

次に、風速差が大きい領域が地上と高度面とでどの程度ずれているかを調べるために、風速差が大きい箇所を対象に、風速差が大きい領域の分布について2つの高度面間での水平方向のずれを求めた。海面からの高さZにおける風速差の分布と高さZ+200mでの風速差の分布について、高さZ+200mでの面の分布の中心位置をずらしながら空間相関を求めた。その結果、紙面の都合で図には示さないが、東西方向・南北方向のずれが0、すなわちずれがない場合に相関係数が最も高かった。このことから、高度差200mの高度面間では風速差が大きい領域の水平方向のずれはないものとし、突風指標での風速差と地上での風速差との関係式を作成する。

ガストフロント事例を対象に、ある高度面で隣接する格子点間の風速差を求め、高度面Zでの風速差をそれより200m低い高度面（Z-200m）での風速差で除した値を図8に示す。値が1より大きければ高い方の高度面

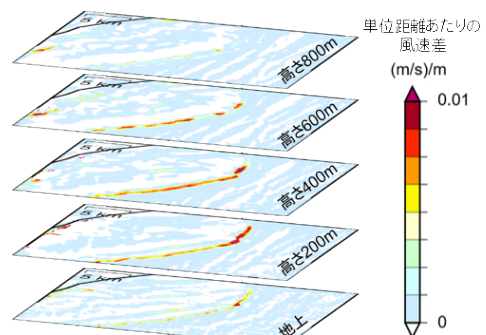


図7 各高度面における2地点間風速差の計算例

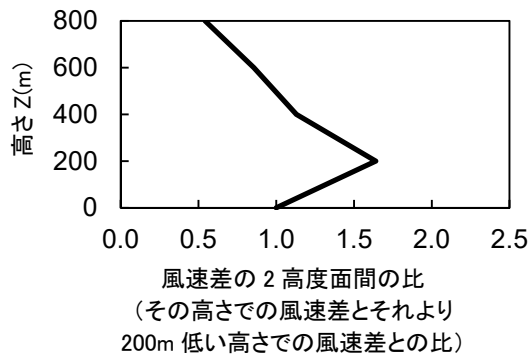


図8 ガストフロント事例における上空の風速差と地上の風速差との関係

での風速差が低い方の高度面のそれより大きいこととなる。ガストフロントでは地上から高さ400mにかけて風速差が大きくなり、それより高い箇所では高くなるほど風速差が小さくなる傾向にあった。

4.3 突風指標での風速差と地上の風速差との関係式

4.2節の2高度面間の風速差より求めた、突風指標での風速差 (UD_{sf} , 式(1)の V_r に相当) と地上の風速差 (UD_{sf}) との関係式を、ガストフロントについて式(2)に、竜巻について式(3)に示す。なお、ガストフロントの式(2)の係数は、図8で示した風速比の逆数となる。

ガストフロント

$$UD_{sf} = (ZF(z_d-800, 1.00)) \times (ZF(z_d-600, 1.84)) \times (ZF(z_d-400, 1.17)) \times (ZF(z_d-200, 0.89)) \times 0.61 \times UD_2 \quad (2)$$

(※ $ZF(a, b)$: $a \geq 0$ のとき b , $a < 0$ のとき 1)

竜巻

$$UD_{sf} = 1.0 \times UD_2 \quad (3)$$

ガストフロント事例について式(2)で求めた、地上での風速差を1としたときの高さZでの風速差を図9に示す。

4.4 地上での風速値の推定

3章で検出した突風指標での風速差と式(2)(3)より、地上での風速値を推定する。

ガストフロントなど、竜巻以外は気象レーダーと数値計算で求められる地上での風速差(ガストフロント事例では式(2))を突風本体による地上での風速差とする。

竜巻では、4章で述べた風速差はメソサイクロンの渦によると考えられる。そこで、竜巻がこのメソサイクロンの渦の中に生じているとし、竜巻の風速値に変換する。本アルゴリズムでは竜巻の風速分布の近似において広く使われているランキン渦モデルを用いた。ランキン渦モデルは竜巻中心から最大接線風速半径までは風速が線形的に増加し、それより外側は風速が中心からの距離に反比例するモデルである。最大接線風速(ランキン渦での

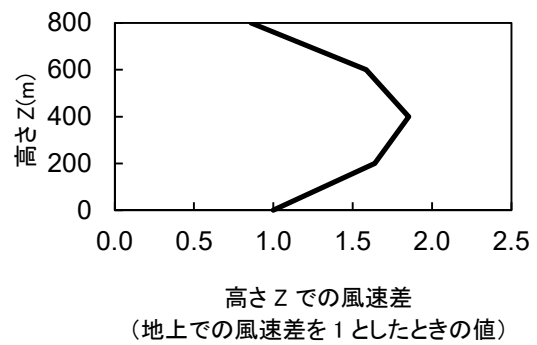


図9 ガストフロント事例における地上での風速差を1としたときの高さZでの風速差

風速の最大値)をとる半径を国内の竜巻事例の平均的な被害幅(約100m)の1/2である50mとし、式(3)で求めた地上での風速差がランキン渦の外側で生じているとして最大接線風速を求め、この値を突風本体による地上での風速差とする。

また、突風発生時にはガストフロント等の突風本体のみならず、突風の周辺でも風が吹いている。そのため、突風発生時の風速は周辺風速と突風による風速差の合計値とみなすことができる。そこで、突風の周辺で吹いている風は環境場の風速として周辺の気象観測点(気象庁アメダスなど)の平均風速を用い、環境場の平均風速に突風本体による地上での風速差を加えた値を地上での風速値とする。

ここで、数値計算で求められる風速値は平均的な値であることから、数値計算結果で得られた風速差をそのまま用いているガストフロントでは、得られた値を瞬間風速値に変換する必要がある。そこで、最大瞬間風速と平均風速との比を、XRAINデータを分析した領域で発生したガストフロント事例において気象庁アメダス観測点で得られた観測値をもとに求めた結果、最大瞬間風速と平均風速との比は平均して1.8となった。このことから、竜巻以外の事例では最後にこの値を乗じて地上での最大瞬間風速の推定値とする。

5. 本アルゴリズムによる強風箇所の抽出例

本アルゴリズムによるガストフロントの強風域の抽出例を示す。図10に、ある時刻で観測されたエコー強度、ならびに3章で述べた方法で抽出した突風指標を示す。この図の赤実線がガストフロントに対応する突風指標である。この突風指標での風速差を気象レーダーでのドップラー風速より求めたところ約6m/sであった。また、突風指標を検出した時刻の前後における周辺の気象庁アメダス観測点の平均風速より求めた環境場の風速値は5m/sであった。この突風指標を式(2)、環境場の風速値および最大瞬間風速と平均風速の比である1.8を用いて求めた

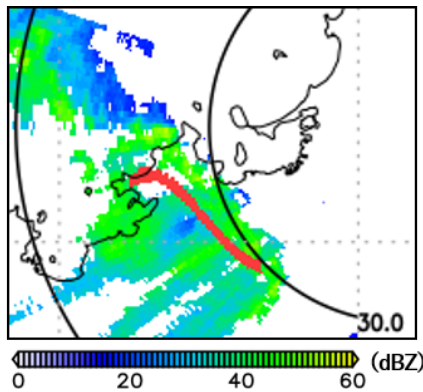


図 10 観測されたエコー強度とガストフロントに対応する突風指標

結果、表 1 に示すように 21.6m/s となった。そのためこの突風は地上において瞬間風速 20m/s 以上と推定できる。

一方で、このガストフロントの発生時刻の前後で気象庁アメダス観測点において観測された最大瞬間風速は 21.0m/s であった。このことから、この事例では本アルゴリズムにおいて地上での最大瞬間風速を概ね推定できていると考えられる。

表 1 ガストフロント事例での瞬間風速の推定値と観測値の例

	最大瞬間風速
推定値 (本アルゴリズム)	21.6m/s
観測値 (気象庁アメダス)	21.0m/s

6. おわりに

突風（竜巻，ダウンバースト，ガストフロント，前線の通過により生じる風速の急激な増加）は局地的かつ短寿命な現象であるため、既存の規制用風速計で的確に検知できるとは限らない。

そこで、これら突風による強風箇所を、①既存の気象レーダー情報から地上で突風による強風が発生するような、顕著な上空の風の発散・収束の値の大きさや渦の強さを表す突風指標を検出し、②過去に発生した突風等の事例の数値計算結果により求めた突風指標における風速差から地上の風速差を推定する式、2つの手法を組み合わせ検出し、その移動を推定するアルゴリズムを構築した。その結果、このアルゴリズムにより突風による地上での強風域を概ね推定できることがわかった。

本アルゴリズムにおける突風指標の検出に用いる閾値や、突風指標での風速差と地上の風速差との関係式は日本海側の 2 領域で発生した突風により定めたものであり、他の地域や事例に適用できるかの検証までには至っていない。今後は、これらの検証を行い、本アルゴリズムの信頼性向上を目標に開発を進めていく計画である。

謝 辞

利用した XRAIN データは、国土交通省より提供されたものである。この利用したデータセットは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム (DIAS) の枠組みの下で収集・提供されたものである。

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, p.95, 2008
- 2) JR 東日本：ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制の実施について,
<https://www.jreast.co.jp/press/2017/20171201.pdf> (参照日：2019 年 5 月 27 日)
- 3) 気象庁：竜巻注意情報の精度について,
http://ds.data.jma.go.jp/fcd/tatsumaki/tatsumaki_hyoka_top.html (参照日：2019 年 5 月 27 日)
- 4) 気象庁：竜巻などの激しい突風とは
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/toppuu/tornado1-1.html> (参照日：2019 年 5 月 27 日)
- 5) Stumpf, G. J., A. Witt, E. D. Mitchell, P. L. Spencer, J. T. Johnson, M. D., Eilts, K. W. Thomas, and D. W. Burgess : The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, 13, pp.304～326, 1998.
- 6) Merritt, M.W. : Microburst divergence detection for terminal Doppler weather radar. *Preprints, 24th Conf. on Radar Meteor.*, Tallahassee, FL, Amer. Meteor.Soc.,pp.220～223, 1989.
- 7) Hermes, L. G., A. Witt, S. D. Smith, D. Klinge-Wilson, D. Morris, G. J. Stumpf, and M. D. Eilts : The Gust front detection and wind-shift algorithms for the terminal Doppler weather radar system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, pp.693～709, 1993.
- 8) 気象庁：竜巻等の突風データベース,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html> (参照日：2019 年 5 月 27 日)
- 9) Bellon, A., and G. L. Austin : The evaluation of two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP). *J. Appl. Meteor.*, 17, pp.1778～1787, 1978.
- 10) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 2008.