

列車運転規制のためのレーダーエコーデータを用いた 冬期寒冷前線に伴う突風に対する警戒基準の開発

鈴木 博人*・加藤 亘**・島村 誠**
畑村 真一***・野村 真奈美***・日置江 桂***

要 旨

本研究では、列車運転規制に利用することを目的に、日本海沿岸部における冬期（11月から3月）の寒冷前線に伴う突風に対して、レーダーエコーデータを用いた突風警戒基準を開発した。突風を発生させる可能性のある親雲の検出基準は、1 km 格子のレーダーエコーデータにおいて、80 mm/h 以上のエコー強度が10格子以上存在し、なおかつそれらの格子における最大のエコー頂高度が6 km 以上の場合とした。この基準を用いることで、2005年冬期から2008年冬期までの4冬期において、日本海及びオホーツク海の沿岸部で発生した人的被害を伴う全突風3事例を検出できる。また、人的被害のなかった事例を含めた全突風7事例のうち、4事例を検出できる。

本研究で定めた突風検出基準を用いて、次のような列車運転規制方法を考案した。突風検出基準を超過するレーダーエコーが現れた場合には、その地点の北から南東までの方角において約38 km 以内の範囲を突風の警戒範囲とする。鉄道の線路がその警戒範囲に含まれる場合には、その区間における列車の運行を停止する列車運転規制を実施することにした。この方法を羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間に適用したところ、これらの路線が突風の警戒範囲に含まれる時間及び回数は、4冬期の平均で1年あたり150分及び4.0回であることが分かった。この検証結果に基づき、上記区間において本研究で開発した列車運転規制の試行を2008年1月28日から開始した。

1. はじめに

突風は、破壊的な力を伴い、鉄道災害をもたらすことがある。突風の中でも特に大きな物理的・人的被害をもたらす竜巻は、Niino *et al.* (1997) や気象庁 (2007) によると日本では1年あたり20件程度発生している。こうした竜巻等による突風災害を防止するための突風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。鉄道

では、第1表に示すとおり突風によると考えられる災害が1970年以降において4件発生している。航空・鉄道事故調査委員会 (2008 a, b) によると、2005年12月の羽越本線北余目・砂越間や2006年9月の日豊本線南延岡駅構内における列車脱線事故の原因として突風の可能性が高いとしている。また、藤井ほか (1995) によると1970年2月の羽越本線神山駅構内や1978年2月の営団地下鉄東西線南砂町・葛西間の列車脱線事故は竜巻が原因である。これらの突風災害を防止するためには、突風の発生を予測して、突風の発生前に列車の運行を停止する方法の開発が不可欠である。

しかしながら、突風は一般的に空間的にも時間的にもスケールが非常に小さいことから、離散的に配置された地上風速計による観測では、事前に捉えることが難しい。突風による災害を効果的に防止するためには、広範囲で連続的な観測が可能な気象レーダーを用

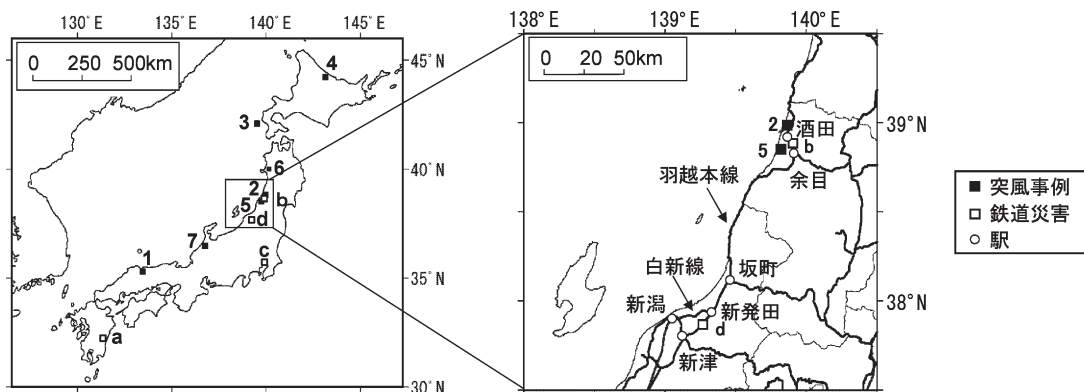
* 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター防災研究所（現在、千葉支社設備部）。

** 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター防災研究所。

*** 株式会社ウェザーニューズ R-Corner。
—2008年8月14日受領—
—2009年2月10日受理—

第1表 突風による鉄道災害.

No	日時	場所	突風種別	総観場	事故概要		出典
a	2006.9.17 14:05	日豊本線 南延岡駅構内	竜巻	台風	特急列車が徐行運転中, 2両が脱線転覆	乗客1名・運転士1 人負傷	航空・鉄道事故 調査委員会 (2008 b)
b	2005.12.25 19:14	羽越本線 北余目・砂越間	不明	寒冷前線	特急列車が走行中, 6両 が脱線転覆	乗客5人死亡, 乗客 31人・運転士1人負 傷	航空・鉄道事故 調査委員会 (2008 a)
c	1978.2.28 21:34	営団地下鉄東西線 南砂町・葛西間	竜巻	寒冷前線	中川橋りょうを走行中, 2両が脱線し, 1両が横 転	乗客20人・運転士1 人負傷	藤井ほか(1995)
d	1970.2.5 10:10	羽越本線 神山駅構内	竜巻	寒冷前線	貨物列車が10 km/hで 走行中, 車掌車1両が横 転	車掌4人負傷	



第1図 鉄道災害の発生位置, 解析に用いた突風の発生位置, 及び羽越本線と白新線の位置. 鉄道災害の発生位置は第1表の番号, 突風事例は第2表の番号.

いて, 突風を発生させる可能性の高い気象状態を捉える方法が有効と考えられる.

日本では気象レーダーを用いて突風を捉える方法として, 空港においてドップラー気象レーダーで低層シアを検出(石原 1995など)する方法が航空機の安全運航に利用されている. 鉄道用では, 楠ほか(2007)によって小型ドップラー気象レーダーによる突風探知方法の開発が進められている. これらは, 専用のドップラー気象レーダーが必要なことや探知方法が開発途上であることから, 直ちに列車運転規制に導入することは難しい. 一方, 気象庁は全国展開を開始したドップラー気象レーダーによるメソサイクロンの検出と突風危険度指標(エコー強度と数値予報による大気安定度などを基にした指数)の組合せに基づいた竜巻注意情報(板井 2008)の発表を2008年3月26日

から開始した. しかしながら, 竜巻注意情報は県単位での発表となることや情報の配信方法から, 現時点で列車運転規制に用いることは難しい.

列車運転規制に用いる突風警戒情報の要件として, 情報の即時性が高いことと, 突風が発生する可能性のある範囲が特定できることが挙げられる. 現在, これらの要件を満たすことが可能で, 容易に入手できるデータとしては, 気象庁が発表するレーダーエコーデータが考えられる. レーダーエコーデータからは, 突風そのものを直接検出できないが, 突風を発生させる可能性のある強い降水を伴った親雲の検出が可能であると考えられる.

第1表によると, 突風が原因と考えられる鉄道災害4事例のうち3事例が寒冷前線に伴うもので, これらは12月から2月までの冬期に発生している. また, こ

のうち2事例が日本海沿岸部の羽越本線新津・酒田間(新潟県と山形県)で発生している。そのため、検出すべき突風の中で最も優先すべきものは、日本海沿岸部において冬期の寒冷前線に伴って発生する突風であると考えられる。

そこで、本研究ではレーダーエコーデータを用いて、日本海沿岸部における冬期(11月から3月)の寒冷前線に伴う突風の親雲を検出し、突風が発生する可能性のある範囲を特定して突風警戒情報を出せる突風警戒基準の開発を目的とする。ここでは、2004/2005年冬期(以下、2005年冬期とする)から2008年冬期までの4冬期に寒冷前線に伴って発生した7事例の突風を対象とし、レーダーエコーデータを用いて突風を発生させる可能性のある親雲の検出に最適な基準及び突風が発生する可能性のある範囲を特定するための解析を行う。この結果に基づいた突風警戒基準を用いて、日本海沿岸部の羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間を対象にした突風に対する列車運転規制方法を提案する。

2. 利用するデータ

突風警戒情報には、10分ごとに気象庁から発表される高度2 kmを基準にしたエコー強度(以下、エコー強度とする)とエコー頂高度を利用する。また、突風事例は「竜巻等の突風データベース(気象庁2008)」から抽出する。

2.1 レーダーエコーデータの均質性

気象庁における気象レーダー観測は、10分ごとに19の仰角によるボリュームスキャンで行われている。エコー強度は、レーダーサイトからの距離に応じて利用する仰角を定めた仰角合成テーブルを基に仰角別のレーダーエコーから作成される(毛利ほか2003)。また、エコー頂高度は仰角別のレーダーエコーによる最高高度を基に作成される。これらのデータは、厳密にはレーダー観測の特性に応じた時空間的な不均一があるが、ここでは格子ごとの精度について時空間的に均一なものとして扱う。

2.2 レーダーエコーデータの分解能

レーダーエコーデータは、2004年6月以後エコー強度が緯度30秒×経度45秒の約0.9×1.1 km格子(以下、1 km格子とする)、エコー頂高度が緯度90秒×経度112.5秒の約2.8×2.7 km格子で発表されている。突風を発生させる可能性のある親雲の検出は、後述のようにエコー強度とエコー頂高度の論理積(AND条

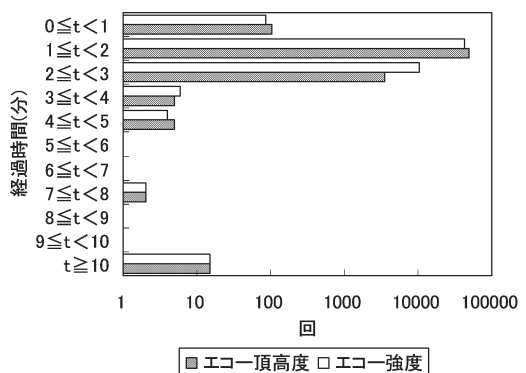
件)で行うことから、両者の格子幅の最小公倍数である緯度180秒×経度215秒の約5.5×5.5 km格子(以下、5 km格子とする)で行うことにした。また、突風が発生する可能性のある範囲についても5 km格子で設定することにした。この5 km格子の領域には、エコー強度が6×5の30格子、エコー頂高度が2×2の4格子が含まれる。エコー強度は252階調(各階級の最低値で0~256 mm/h)、エコー頂高度は8階調(同様に0~14 km)で発表されており、以降で示すエコー強度とエコー頂高度の観測値は各階級の最低値で示す。

2.3 レーダーエコーデータの受信時間

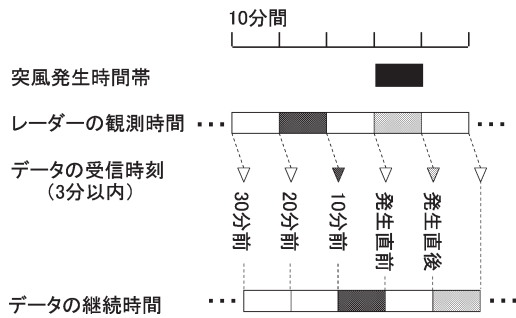
気象庁から配信されるレーダーエコーデータは、10分ごとの観測値として発表されるが、実際に配信されるまでに要する時間は必ずしも一定ではない。第2図は2007年の1年間において、エコー強度とエコー頂高度のデータを受信した時刻を毎10分からの経過時間で示したものである。第2図によると、これらのデータの約80%を2分以内、99.9%以上を3分以内に受信している。受信が10分以上遅延した場合は約0.03%であり、その原因を調べると気象庁におけるシステム障害などであった。したがって、本研究では、このデータの即時性がほぼ3分以内の時間で成り立っているという前提で、以降において突風警戒基準の検討を行う。

2.4 データの受信時刻と突風発生時間の関係

第3図は、気象レーダーの観測時間、レーダーエ



第2図 エコー強度とエコー頂高度の受信までの経過時間ごとの取得データ数。2007年1月1日9時から2008年1月1日8時50分の1年間のデータ。ただし、気象庁からの受信記録が残っていなかった1月27日16時10分から1月28日10時10分のデータを除く。



第3図 突風が発生している時間帯、気象レーダーの観測時間、レーダーエコーデータの受信時刻、及びデータの継続時間の関係。

コーデータの受信時刻、レーダーエコーデータの継続時間、及び突風が発生している時間帯を模式的に示したものである。突風の発生時刻が含まれる時間帯のレーダーエコーデータを発生直後のデータ、突風の発生時刻の直前の観測時間帯のレーダーエコーデータを発生直前のデータ、その10分前を10分前のデータ、さらにその10分前を20分前のデータなどとする。

レーダーエコーデータの受信までに要する時間として3分を考慮すると、発生直前のデータを受信してから突風発生までの時間はほとんどないと考えられる。そのため、発生直前のデータは突風の発生予測に利用できない。したがって、データの受信までに要する時間を考慮した場合に、突風の発生予測に利用可能な突風の発生時刻に最も近いデータは、突風発生の10分前のデータである。また、受信したレーダーエコーデータは、次にレーダーエコーデータを受信するまでの10分間継続する。

2.5 対象とする総観場と場所

第1表によると、突風が原因と考えられる鉄道災害4事例のうち3事例が寒冷前線に伴うもので、これらは12月から2月までに発生している。そこで、対象とする総観場を寒冷前線に絞り、対象期間は鉄道災害が発生した12月から2月に前後1ヶ月を加えた11月から3月までとし、この期間を冬期とした。また、突風4事例のうち2事例が日本海沿岸部の羽越本線新津・酒田間で発生していることから、対象場所を日本海沿岸部の羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間(第1図)とした。

2.6 突風事例

冬期の寒冷前線に伴う突風事例は、「竜巻等の突風

データベース(気象庁2008)」を基に、レーダーエコーデータの格子幅が現在と同じである2005年冬期から2008年冬期までの4冬期に発生した事例を抽出した。このとき、突風に対する列車運転規制の対象にする羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間の沿線において、冬期の寒冷前線に伴って発生した突風事例は2005年の酒田市の1事例のみである。突風を発生させる可能性のある親雲を検出するための基準(以下、突風検出基準とする)及び親雲が検出された場合に突風が発生する可能性のある範囲(以下、突風の警戒範囲とする)を定めるためには、多数の突風事例を用いた解析が必要で、1事例ではこの解析ができない。そこで、対象地域をこれらの路線と地理的・気候的条件が類似した北側に海洋が存在する積雪地域である山陰から北海道までの日本海沿岸部及び北海道のオホーツク海沿岸部に拡大し、この地域で発生した突風事例を用いて、突風検出基準及び突風の警戒範囲についての解析を行うことにした。

山陰から北海道までの日本海沿岸部及び北海道のオホーツク海沿岸部において、2005年冬期から2008年冬期までの4冬期に、冬期の寒冷前線に伴って発生した突風は7事例である。突風検出基準及び突風の警戒範囲を解析する上で7事例という数は決して多くはないが、事例数を単純に増やすためには対象地域を拡大する必要がある。しかし、対象地域をこれ以上拡大すると、地理的・気候的な条件が異なる地域で発生した突風事例を含めて解析することになり、それには疑問が生じる。したがって、より多くの事例を用いた解析は対象期間を延ばすことが必要になるが、その点は今後の課題とする。第2表には対象とする7事例の突風の概要、第1図にはその発生場所を示す。突風の発生場所は山陰が1事例、北陸が1事例、東北が3事例、北海道が2事例である。また、突風の発生月は11月が5件、12月が1件、3月が1件であり、11月が最も多い。

3. 突風警戒基準の策定

寒冷前線に伴う突風に対して警戒情報を出す手順として、初めに天気図から寒冷前線が通過する時間帯を予想する。次に、寒冷前線の通過時間帯に対してレーダーエコーデータに基づいて突風を発生させる可能性のある親雲の検出と突風が発生する可能性のある範囲を予測する。

第2表 「竜巻等の突風データベース（気象庁 2008）」から抽出した山陰から北海道の日本海沿岸部と北海道のオホーツク海沿岸部で発生した冬期の寒冷前線に伴う突風事例とその概要。なお、「竜巻等の突風データベース」に示されている突風の発生時刻と消滅時刻の誤差時間は省略した。寒冷前線の通過時刻との差は、突風の発生時刻と突風発生地点を寒冷前線が通過した時刻の差で、突風が寒冷前線の通過前に発生した場合を正とした。網掛けは人的被害が発生した突風事例。

番号	年日	発生時間	消滅時間	場所	突風の種類	藤田スケール	被害幅(m)	被害長さ(km)	死亡者	負傷者	住家被害	寒冷前線の通過時刻との時間差(時間)
1	2007/3/30	1:30	1:40	鳥取県米子市	その他	F1	200	2.5	0	0	58	1
2	2006/11/14	8:10	8:15	山形県酒田市	その他	F0	50	0.7~0.9	0	0	1	1
3	2006/11/9	12:05	12:05	北海道奥尻町	竜巻	F1	100	0.6~1.5	0	0	11	8
4	2006/11/7	13:23	13:24	北海道佐呂間町	竜巻	F3	100~300	1.4	9	31	39	1
5	2005/12/25	19:10	19:15	山形県酒田市	その他	不明	不明	不明	0	0	1	2
6	2005/11/8	9:30	不明	石川県志賀市	その他	不明	50~100	0.1	0	0	4	1
7	2005/11/8	12:05	12:05	秋田県大潟村	竜巻またはダウンバースト	F1	100以下	2.3	0	2	21	3

※2005年12月25日の酒田市の突風事例は、航空・鉄道事故調査委員会（2008 a）によると鉄道事故による死亡者5人、負傷者32人。また、小林ほか（2006）によると被害幅は数10 m、被害長さは約12 km。

3.1 寒冷前線の通過時間帯

寒冷前線の通過時間帯は、現況天気図と予想天気図の画像データを用いて予想する。寒冷前線の通過時刻は、羽越本線新津・酒田間または白新線新潟・新発田間に寒冷前線が最初にかかる時刻で、その時刻を現況天気図と予想天気図に描かれた寒冷前線の位置の按分により求めることにする。

小林ほか（2007）によると、寒冷前線付近で発生する竜巻は寒冷前線周辺だけでなく前方の暖域でも発生する。そこで、突風の発生時刻と突風発生地点を寒冷前線が通過した時刻の差を調べて第2表に示した。第2表によると、この時間差はNo.3奥尻町の突風事例が寒冷前線の通過の約8時間前に発生したのが最大で、他の事例は1時間から3時間前に発生している。これから、寒冷前線の通過前については寒冷前線の通過時刻の前9時間からを寒冷前線の通過時間帯とした。寒冷前線の通過後については、寒冷前線が対象にする路線を通過するのに要する時間として3時間を考えて、寒冷前線の通過時刻の後3時間までを寒冷前線の通過時間帯とした。したがって、寒冷前線の通過時間帯は寒冷前線の通過時刻の前9時間と後3時間の合計12時間とした。

第3表は、2005年冬期から2008年冬期の4冬期において、寒冷前線が羽越本線新津・酒田間または白新線新潟・新発田間を通過した回数を示したもので、寒冷前線の通過は5ヶ月間で18回程度である。これから、

第3表 羽越本線新津・酒田間または白新線新潟・新発田間を寒冷前線が通過した回数。

	11月	12月	1月	2月	3月	合計
2005年冬期	5	6	5	1	4	21
2006年冬期	6	3	3	5	5	22
2007年冬期	5	3	1	4	6	19
2008年冬期	5	1	0	3	2	11
平均	5.3	3.3	2.3	3.3	4.3	18.3

対象とする総観場を寒冷前線に限定することは、突風発生の可能性のある状態の絞り込みの手段として有効である。また、寒冷前線の通過回数は11月と3月に多く、1月に少ない傾向にある。

3.2 突風の警戒基準

寒冷前線の通過時間帯に、レーダーエコーデータを用いて突風を発生させる可能性のある親雲を検出し、親雲が検出された場合に範囲を特定して突風の発生を予測する突風警戒基準を検討する。

3.2.1 突風警戒基準の評価方法

鉄道において自然災害に対する列車運転規制を行う際の基本は、村石ほか（1995）によると、自然外力により被る危険を十分に回避した上で、列車の正常な運行を可能な限り確保することである。つまり、第1の条件は列車運転規制中に発生する災害の割合が十分に高いことで、列車運行の安全性を十分に高くできることである。一方、災害の発生は稀であることから、列

車運転規制が実施されても、災害が発生しない場合がほとんどである。したがって、第2の条件は列車運転規制を発令したにも関わらず災害が発生しない場合を可能な限り少なくすることで、災害が発生しない場合の列車運行の安定性を最大限に確保することである。

これらの条件の適合度の評価では、全災害事例に対するしきい値以上で発生した災害（列車運転規制中に発生した災害）の割合である災害の検出率で安全性を評価し、災害の発生の有無に関わらず観測値がしきい値を超過した時間及び回数である警戒時間及び警戒回数（列車運転規制時間及び回数）で安定性を評価することが多い（村石ほか（1995）など）。また、安定性の評価に警戒時間を用いるのは、観測値がしきい値を超過した回数が少なく（多く）ても、観測値がしきい値を超過した1回あたりの時間が長け（短け）れば、安定性の評価が低く（高く）なる場合があるためである。このような災害の検出率と警戒時間及び警戒回数から災害警戒基準を評価する方法は、降雨災害などの警戒基準の評価にもしばしば用いられる方法である（鈴木・小橋 1981など）。

天気予報では、突風などの稀にしか発生しない現象に対する予報精度の評価にスレットスコアが用いられることが多い。スレットスコアは、予報の当たりとはずれを総合的に評価できる点で優れている。しかし、列車運転規制方法の評価に用いられることの多い安全性と安定性のそれぞれに対する適合度の評価には不向きであるとともに、警戒時間に関する評価ができない。したがって、本研究では突風警戒基準の評価を突風の検出率と警戒時間及び警戒回数で行うことにし、それぞれ以下のように定義する。突風の検出率は、過去に発生した全突風事例に対する突風検出のしきい値以上で発生した突風事例の割合とする。警戒時間及び警戒回数は、突風の発生の有無に関わらずレーダーエコーデータが突風検出のしきい値を超過した場合に、突風の警戒範囲に線路が含まれる時間及び回数の1年あたりの平均値とする。

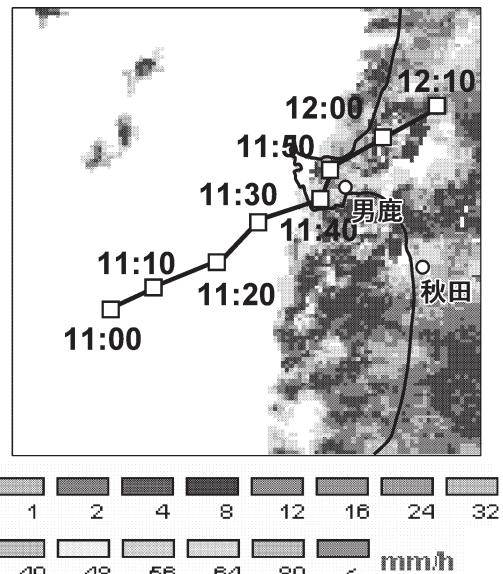
突風検出基準の検討は、初めに7事例の突風を用いて突風を検出するための複数のしきい値を設定し、これらのしきい値に対する突風の検出率を算出した。次に、これらのしきい値を羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間に適用した場合に、これらの線路が突風の警戒範囲に含まれる時間及び回数である警戒時間及び警戒回数を求めた。そして、突風の検出率と警戒時間及び警戒回数の評価から、列車運行の安全性

を確保した上で安定性を最大限に満たす列車運転規制に利用可能な突風警戒基準を開発することが本解析の目指すところである。

3.2.2 突風発生時のレーダーエコー

突風を発生させる親雲は、一般的に強い降水を伴っていると考えられる。強い降水を伴う親雲の中でも非常に発達して突風を発生させる可能性が高いものを検出するために、降水強度が強だけでなく、降水強度が強い領域が広く、雲頂高度が高い場合を抽出することを考える。そこで、エコー強度、特定のエコー強度以上の格子数、エコー頂高度を指標とした突風検出基準を検討することにした。

第4図は、2005年11月8日に発生したNo.7秋田県大潟村の突風事例について、突風を発生させた親雲の10分ごとの中心位置と12時00分のエコー強度図を示したものである。ここで、エコー強度の強い領域が突風を発生させた親雲であるものとみなし、エコー強度の強い領域を突風が発生した時刻から遡ることで、それぞれの時刻の親雲の中心位置を求めた。親雲の中心位置は、エコー強度の最大値が80 mm/h 以上の場合にはエコー強度が80 mm/h 以上の1 km 格子群の重心



第4図 2005年11月8日12時00分の秋田県沿岸部のエコー強度、及び2005年11月8日のNo.7秋田県大潟村における突風事例の親雲の10分ごとの中心位置。なお、No.7秋田県大潟村の突風発生地点及び消滅地点は12時00分の親雲の中心位置付近。

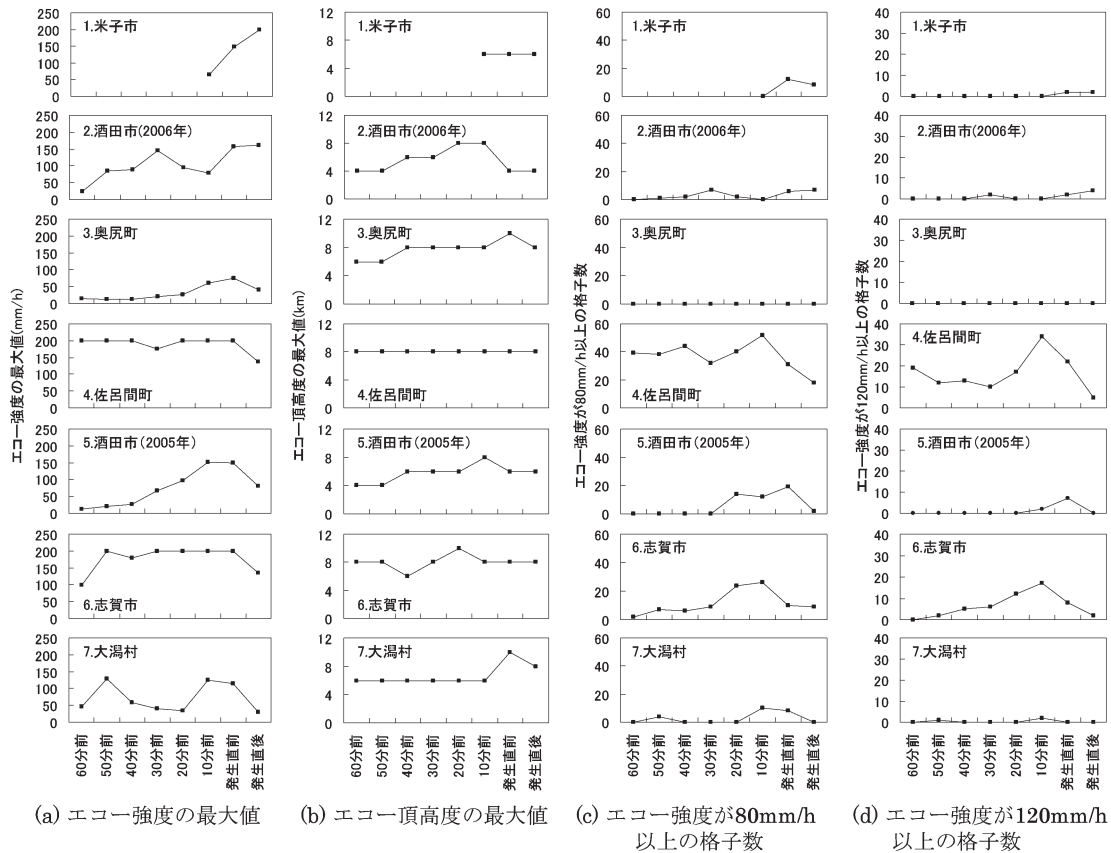
位置とし、親雲のエコー強度の最大値が80 mm/h 以下の場合には個別に設定した強いエコー強度域の重心位置とした。

第5図 a, b は、No.7秋田県大潟村の突風事例と同様の方法で、突風事例ごとに求めたエコー強度とエコー頂高度の最大値で、突風発生の60分前から突風の発生直後までの時系列を示したものである。第5図 c, d は、エコー強度が80 mm/h 及び120 mm/h 以上の1 km 格子の格子数について、同様に時系列を示したものである。なお、エコー強度が他の値以上の格子数については図示を省略した。ここで、特定のエコー強度以上の格子数は、親雲の中心位置を中心とした11×11格子（1 km 格子、緯度方向は約9.9 km、経度方向は約12.1 km）の範囲における特定のエコー強度以上の格子数とした。これは、突風の親雲にあたと考えられる積乱雲の代表的なスケールが10 km（メソγスケール）であることと、レーダーエコーデータが

突風検出基準を超過したことの有無の判定を自動化する（第4節参照）ためである。

第5図によると、親雲のエコー強度とエコー頂高度の最大値、及び特定のエコー強度以上の格子数は、突風発生の数10分前から直前にかけて大きい傾向にある。突風発生の10分前のレーダーエコーデータは、このように強い降水を伴う親雲の指標としたそれぞれの値が大きい傾向にあるだけでなく、突風の発生予測に利用可能な突風の発生時刻に最も近いデータである。そこで、突風検出基準の検討は突風発生の10分前のデータを用いて行うことにした。

第4表は、突風事例ごとに突風発生の10分前における親雲のエコー強度とエコー頂高度の最大値、及び特定のエコー強度以上の格子数を示したもので、エコー強度の最大値が大きい順に示してある。ここで、特定のエコー強度以上の格子数はエコー強度が60 mm/h 以上の場合を示した。これは、50 mm/h 以下の場合



第5図 突風を発生させた親雲の (a) エコー強度の最大値、(b) エコー頂高度の最大値、エコー強度が (c) 80 mm/h 及び (d) 120 mm/h を超過した格子数の10分ごとの時系列。

には、特定のエコー強度以上の領域が1 km 格子で11×11格子の矩形領域の外側に広がる場合があったためである。第4表によると、エコー強度の最大値が大きい突風事例ほど、特定のエコー強度以上の格子数が多いことが分かる。また、第4表に網掛けで示した人的被害が発生した突風事例のエコー強度の最大値と特定のエコー強度以上の格子数は、人的被害が発生しなかった突風事例に比べて大きい傾向にある。

突風検出のしきい値の検討は、エコー強度が10 mm/h 単位、特定のエコー強度以上の格子数が1 格子単位、エコー頂高度が2 km 単位の組合せで行った。ここで、突風の検出率が低い組合せは検討の対象から外し、人的被害を伴う突風3事例のうち2事例以上を検出できる場合を解析の対象とした。例えば、人的被害を伴う突風2事例を検出するには、第4表でNo.5酒田市（2005年）の突風事例より上段にある事例を検出する必要がある。このとき突風検出のしきい値はNo.5酒田市（2005年）の事例における各エコー強度とそのエコー強度以上の格子数に、エコー頂高度の最大値を組合せた場合である。人的被害を発生させた全突風3事例を検出できる突風検出のしきい値は、No.7大瀧村の事例における同様の組合せの場合である。このようにして設定した突風検出のしきい値と突風の検出率の関係をまとめたのが第5表で、以降においてこれらのしきい値を用いた検討を行った。

3.2.3 突風の警戒範囲

突風を発生させる可能性のある親雲は、突風発生時の10分前のレーダーエコーデータを用いて検出する。そのため、突風の発生前に突風の発生を予測するには、突風発生時の10分前に突風の発生地点と消滅地点が突風の警戒範囲に含まれるように警戒範囲を設定する必要がある。そこで、突風発生時の10分前の親雲の中心位置

から突風の発生地点と消滅地点までの距離と方角を調べて、第6表に示した。

第6表によると、突風発生時の10分前の親雲の中心位置から突風の発生地点までの距離は最短が13 km、最長が26 km であり、突風の消滅地点までの距離は最短が15 km、最長が35 km である。これから、突風の警

第5表 突風検出のしきい値と突風の検出率の関係。

エコー強度 (mm/h)	エコー強度以上の格子数	エコー頂高度 (km)	突風の検出率		記事												
			人的被害あり	人的被害なし													
150	1	8	2 / 3	1 / 4	記事1												
140																	
130																	
120	2				6	3 / 3	2 / 4	記事1									
110																	
100	4							6	3 / 3	2 / 4	記事1						
100																	
90	5										6	3 / 3	2 / 4	記事1			
80																	
80	12													6	3 / 3	2 / 4	記事1
70																	
70	21	6	3 / 3	2 / 4													記事1
60																	
60	32				6	3 / 3	2 / 4										記事1
120																	
120	2							6	3 / 3	2 / 4							記事1
110																	
100	5										6	3 / 3	2 / 4				記事1
90																	
90	7													6	3 / 3	2 / 4	記事1
80																	
80	10	6	3 / 3	2 / 4													記事1
70																	
70	12				6	3 / 3	2 / 4										記事1
60																	
60	19							6	3 / 3	2 / 4							記事1
70																	
60	3										6	3 / 3	2 / 4				記事1
60																	
60	4													6	3 / 3	2 / 4	記事2
60																	
60	2	6	3 / 3	2 / 4													記事2
60																	

記事1：エコー強度以上の格子数が上段と同じため検討の対象から除外。

記事2：下段と同じ値のため検討の対象から除外。

第4表 突風発生時の10分前における親雲のエコー強度とエコー頂高度の最大値、及び特定のエコー強度値以上の格子数。網掛けは人的被害が発生した突風事例。

No	突風発生時の10分前の時刻	場所	エコー強度の最大値 (mm/h)	エコー頂高度の最大値 (km)	親雲のエコー強度が下記の値 (mm/h) 以上の格子数										
					60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	
4	2006/11/7 13:10	北海道佐呂間町	200	8	59	51	48	46	42	35	32	32	26	21	
6	2005/11/8 9:20	石川県志賀市	200	8	36	32	26	24	21	17	17	15	13	12	
5	2005/12/25 19:00	山形県酒田市	152	8	32	21	12	5	5	4	2	2	1	1	
7	2005/11/8 11:50	秋田県大瀧村	125	6	19	12	10	7	5	2	2	0	0	0	
2	2006/11/14 8:00	山形県酒田市	78	8	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	2007/3/30 1:20	鳥取県米子市	66	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	2006/11/9 11:50	北海道奥尻町	60	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

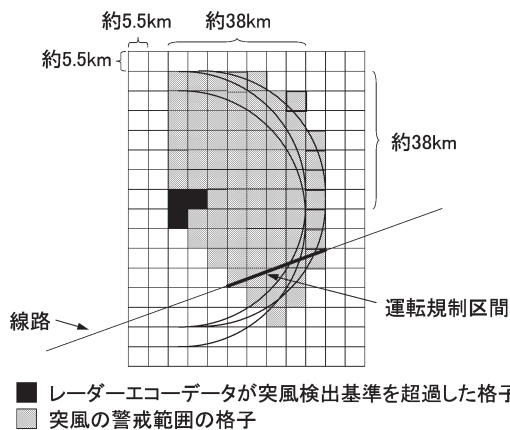
警戒距離は35 km 以上にする必要があり，突風の警戒範囲の設定は5 km 格子（約5.5×5.5 km 格子）で行うことから，警戒距離は5 km 格子の格子幅の倍数にあたる約38 km（7格子）とした（第6図）。

また，第6表によると，突風発生時の10分前の親雲の中心位置から突風の発生地点と消滅地点までの方向は，北北東から東である．これから，警戒する方向は北北東から東のそれぞれの外方側に余裕を持たせて，北から南東の135度の範囲とした（第6図）。

以上のように，突風の警戒範囲は，レーダーエコーデータが突風検知基準を超過した5 km 格子の北から南東までの方向において約38 km 以内の範囲とした。

第6表 突風発生時の10分前の親雲の中心位置と突風の発生地点及び消滅地点までの距離と方向．網掛けは人的被害が発生した突風事例。

No	日付	場所	突風の発生地点		突風の消滅地点	
			距離 (km)	方向	距離 (km)	方向
1	2007/3/30	鳥取県米子市	25	東	28	東
2	2006/11/14	山形県酒田市	21	東北東	22	東北東
3	2006/11/9	北海道奥尻町	13	北東	15	北東
4	2006/11/7	北海道佐呂間町	23	北北東	25	北北東
5	2005/12/25	山形県酒田市	21	東北東	35	東北東
6	2005/11/8	石川県志賀市	26	東北東	26	東北東
7	2005/11/8	秋田県大潟村	22	東北東	24	東北東



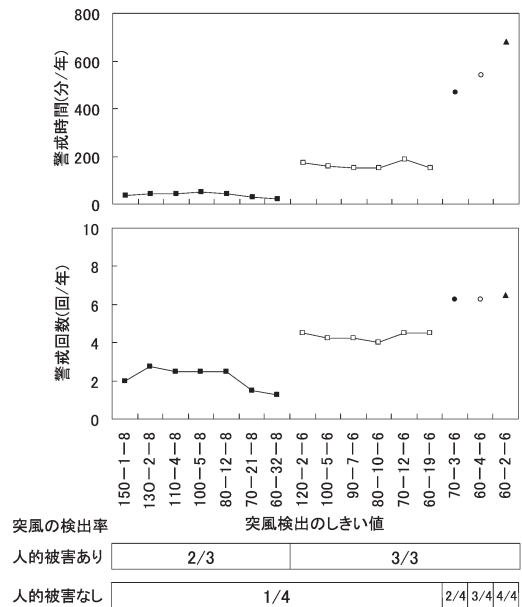
第6図 レーダーエコーデータが突風検出基準を超過した格子（約5.5×5.5 km 格子）と突風の警戒範囲，及び線路の関係の模式図。

3.2.4 突風検出基準

第5表で提示した突風検出のしきい値を用いて，羽越本線新津・酒田間または白新線新潟・新発田間の線路が突風の警戒範囲（第6図）に含まれる時間及び回数である警戒時間及び警戒回数を算出した．警戒時間はレーダーエコーデータが10分ごとに更新されることから，線路が突風の警戒範囲に含まれるごとに10分間継続するとした1年あたりの平均時間である．また，警戒回数は線路が警戒範囲に含まれた寒冷前線の通過回数である。

第7図は，2005年冬期から2008年冬期の4冬期における1年あたりの警戒時間と警戒回数である．第7図によると，警戒時間と警戒回数は突風の検出率が高く（低く）なるほど増加（減少）する傾向にある．また，突風の検出率が同じ場合でも警戒時間や警戒回数が大きい組合せと小さい組合せがあることが分かる．すなわち，突風の検出率をある値に定めた場合に，警戒時間や警戒回数が最小になる組合せが存在する。

第7図によると，人的被害を伴う突風3事例のうち2事例を検出できる突風検出のしきい値の中で警戒時



第7図 第5表で示した突風検出のしきい値の組合せごとの警戒時間（上段），警戒回数（中段），及び突風の抽出率（下段）．突風検出のしきい値は，エコー強度 (mm/h)-そのエコー強度以上の格子数-エコー頂高度 (km) の順で示してある。

間及び警戒回数が最小の組合せは、エコー強度が60 mm/h以上の格子が32格子かつエコー頂高度が8 kmの場合で、警戒時間が23分/年、警戒回数が1.3回/年である。人的被害を伴う全突風3事例を検出できるしきい値の中で、これらが最小の組合せはエコー強度が80 mm/h以上の格子が10格子かつエコー頂高度が6 kmの場合で、警戒時間が150分/年、警戒回数が4.0回/年である。また、人的被害のなかった事例を含めた全突風7事例を検出できるしきい値は、エコー強度が60 mm/h以上の格子が2格子かつエコー頂高度が6 kmの場合で、警戒時間が680分/年、警戒回数が6.8回/年である。

上記のうち、列車運行の安全性を確保した上で安定性を最大限に満す突風検出のしきい値は、エコー強度が80 mm/h以上の格子が10格子かつエコー頂高度が6 kmとした組合せであると考えられる。このしきい値は人的被害を伴う全突風3事例に加えて、人的被害のなかった1事例を含めた4事例を検出でき、1年あたりの警戒時間は150分、警戒回数は4.0回である。そこで、この突風検出のしきい値を突風検出基準とすることにした。

第7表は、警戒時間及び警戒回数の月ごとの内訳を示したもので、これらは11月が最も多く、次いで12月で、2005年冬期から2008年冬期では1月から3月までは0分及び0回であった。これは、突風の発生月が11月が5件、12月が1件、3月が1件という突風の発生傾向とほぼ一致する。

また、第8図は上述の突風検出基準と突風の警戒範囲を組合せた突風警戒基準を用いた場合に、解析の対

第7表 2005年冬期から2008年冬期の羽越本線新津・酒田間または白新線新潟・新発田間における月ごとの警戒時間及び警戒回数。

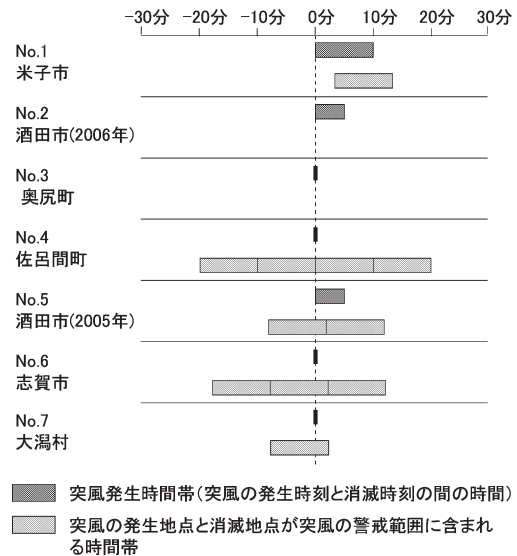
		11月	12月	1月	2月	3月	合計
警戒時間(分)	2005年冬期	40	0	0	0	0	40
	2006年冬期	160	50	0	0	0	210
	2007年冬期	160	40	0	0	0	200
	2008年冬期	150	0	0	0	0	150
	平均	127.5	22.5	0.0	0.0	0.0	150.0
警戒回数(回)	2005年冬期	1	0	0	0	0	1
	2006年冬期	4	1	0	0	0	5
	2007年冬期	5	2	0	0	0	7
	2008年冬期	3	0	0	0	0	3
	平均	3.3	0.8	0.0	0.0	0.0	4.0

象にした7事例について、突風発生時間帯(突風の発生時刻から消滅時刻までの時間)と突風の発生地点及び消滅地点が突風の警戒範囲に含まれる時間帯の関係を突風の発生時刻を0分として示したものである。ここで、突風の警戒範囲に含まれる時間は、レーダーエコーデータを受信するまでの遅延時間として3分を仮定し(第3図参照)、3分間のずれを考慮して示してある。この図から、この突風警戒基準で検出可能な4事例(No.4, 5, 6, 7)の突風は、「竜巻等の突風データベース(気象庁2008)」の突風発生時刻(第2表参照)をそれぞれの発生時刻とすると、20分から7分前にその発生を予測できる。

4. 列車運転規制方法

日本海沿岸部における冬期(11月から3月)の寒冷前線の通過時を対象に、突風が予想される場合に列車の運行を停止する列車運転規制は、以下の手順で実施することにした。

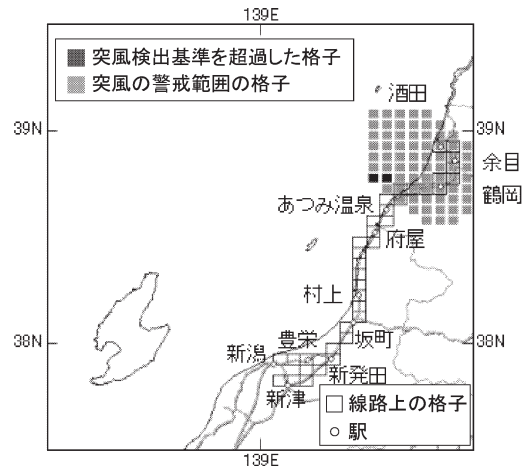
- (1) 現況天気図と予想天気図の画像データを用いて寒冷前線の通過及び通過時刻を予想し、その時刻の前9時間と後3時間を寒冷前線の通過時間帯とす



第8図 突風発生時刻を0分として、突風が発生している時間(突風の発生時間から消滅時間までの時間)、及び突風検出基準をエコー強度が80 mm/h以上の1 km格子が10格子かつエコー頂高度が6 kmとした場合の突風の発生地点と消滅地点が突風の警戒範囲に含まれる時間。

る。現況天気図は3時間ごと、予想天気図は12時間ごとに発表されることから、寒冷前線の通過時間帯はその発表の都度更新する。

- (2) 警戒時間帯にレーダーエコーデータが突風検知基準である
- ① エコー強度が80 mm/h以上の1 km格子が10格子かつ
 - ② エコー頂高度が6 km
- を超過した場合に突風が発生する可能性があるとして判定する。この判定は、エコー強度が6×5の30格子、エコー頂高度2×2の4格子が含まれる5 km格子ごとに行い、下記のアルゴリズムにより、レーダーエコーデータを受信するごと（10分ごと）に実施する。
- 1) 5 km格子に含まれるエコー頂高度2×2格子の中で6 km以上の格子があれば、次のステップに進む。
 - 2) その5 km格子に含まれるエコー強度6×5格子の中で80 mm/h以上の格子があれば、次のステップに進む。
 - 3) エコー強度が80 mm/h以上の格子を中心に11×11格子の領域を考え、その領域に80 mm/h以上の格子が10格子以上あれば、突風検出基準を超過したと判定する。
 - 4) 1)から3)のステップを全ての5 km格子で繰り返して、突風検出基準を超過した全ての5 km格子を抽出する。
- (3) レーダーエコーデータが突風検出基準を超過した5 km格子がある場合にはその格子の北から南東の約38 kmに含まれる範囲を突風の警戒範囲とする（第6図の灰色の格子）。そして、線路がこの範囲に含まれる場合には、その区間に対して列車の運行を停止する列車運転規制を実施する（第6図の太線で示した線路）。
- (4) この列車運転規制は、次に線路が突風の警戒範囲に含まれることの有無の判定が行われるまでの10分間継続し、その後線路が突風の警戒範囲から外れた場合でも10分間の列車運転規制を継続する。つまり、列車運転規制の解除は2回連続して線路が突風の警戒範囲に含まれない場合とする。これは、線路が突風の警戒範囲から外れた直後に、再度突風の警戒範囲に含まれる場合があることから、安全性と実務上の取扱いの観点から上記のように解除基準を定めた。



第9図 列車運転規制区間のイメージ。突風検出基準を超過した格子または警戒範囲の格子が線路上の格子にかかった場合に、その線路上の格子に含まれる区間の列車運行を停止。

- (5) 現況天気図と予想天気図から予想される寒冷前線の通過時刻から3時間以上経過し、エコー強度図で寒冷前線に伴う強エコー域が通過したことが確認された場合に寒冷前線の通過時間帯を解除する。

第9図は、列車運転規制区間のイメージで、突風検出基準を超過した格子または突風の警戒範囲の格子が線路上の格子にかかった場合に、その線路上の格子に含まれる区間の列車の運行を停止することにする。

5. おわりに

本研究では、日本海沿岸部における冬期（11月から3月）の寒冷前線に伴う突風に対して、レーダーエコーデータを用いた突風警戒基準を開発し、それを用いた突風に対する列車運転規制方法を考案した。

突風の発生を予測するための突風検出基準は、2005年冬期から2008年冬期までの4冬期に発生した7事例の突風を対象として検討した結果、

- ① エコー強度が80 mm/h以上の1 km格子が10格子かつ
- ② エコー頂高度が6 km

とした。レーダーエコーデータがこの基準を超過した場合に突風発生の可能性があるとし、この基準を満たした格子の北から南東の方角において約38 kmに含まれる範囲を突風の警戒範囲とした。この突風警戒基準

は、日本海沿岸部及びオホーツク海沿岸部で2005年冬期から2008年冬期の4冬期に発生した人的被害を伴う全突風3事例を検出できるとともに、人的被害のなかった事例を含めた全突風7事例のうち4事例を検出できる。また、この方法を羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間に適用すると、警戒時間及び警戒回数はこの4冬期の平均で1年あたり150分及び4.0回である。すなわち、この突風警戒基準は列車運行の安全性を確保した上で、列車運行に必要な安定性を十分に現実的なものとして満たす基準であると考えられる。この結果を基に、レーダーエコーデータが突風検出基準を超過した場合に設定される突風の警戒範囲に線路が含まれるときに、その区間の列車運行を停止する列車運転規制方法を考案した。

この方法を用いた突風に対する列車運転規制は、羽越本線新津・酒田間及び白新線新潟・新発田間において、2008年1月28日から3月31日の期間で試行を実施した。試行の開始以降は、寒冷前線の通過はあったものの、これらの線路が突風の警戒範囲に含まれることはなかった。したがって、列車の運行を停止することはなく、また対象区間において寒冷前線に伴う突風も報告されていない。なお、2009年冬期もこの試行を実施し、この方法の有効性を検証する予定である。

本研究では、現状で容易に入手可能な気象庁が配信するレーダーエコーデータのみを用いて、突風に対して列車運行の安全性を確保した上で安定性を最大限に満たす列車運転規制方法を考案した。将来的にはこのような方法と、楠ほか(2007)が開発を進める小型ドップラー気象レーダーによる突風探知方法を組合せることで、より精度の高い突風に対する列車運転規制方法を構築できるものと考えている。また、2010年には気象庁から突風等短時間予測情報(仮称)が発表されることから、この情報の利用についても検討する予定である。今後もより精度の高い突風の予測方法を開発することで、鉄道の安全性をより高めていきたいと考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり京都大学松本 勝教授(現在、名誉教授)、東京工芸大学田村幸雄教授、東京大学石原 孟教授、京都大学林 泰一准教授、防衛大学校小林文明准教授、気象庁牧原康隆予報課長(現在、名古屋地方気象台長)、鉄道総合技術研究所藤井俊茂

博士から有益なご助言を頂きました。また、担当編集委員茂木耕作博士と2名の査読者から貴重なご意見を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。また、本研究では気象庁のレーダーエコーデータを利用しました。

参 考 文 献

- 藤井昌隆, 藤井俊茂, 村石 尚, 1995: 強風時の運転規制の歴史. 鉄道総研報告, 9 (3), 43-48.
- 石原正仁, 1995: 空港気象ドップラーレーダーについて. 航空無線, (3), 4-10.
- 板井秀泰, 2008: 気象ドップラーレーダーと竜巻注意情報. 災害情報, (6), 13-15.
- 気象庁, 2007: 気象業務はいま 2007 情報から始まる防災. 121 pp.
- 気象庁, 2008: 竜巻等の突風データベース. www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.htm (2008.7.31. 閲覧)
- 小林文明, 松井正宏, 田村幸雄, 2006: 2005年12月25日から26日にかけて北日本で発生した突風災害. 日本風工学会誌, (107), 137-144.
- 小林文明, 菅原祐也, 松井正宏, 2007: 最近10年間のわが国における竜巻の統計的特徴. 日本風工学会誌, (111), 155-156.
- 航空・鉄道事故調査委員会, 2008 a: 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」. 98 pp.
- 航空・鉄道事故調査委員会, 2008 b: 鉄道事故調査報告書「九州旅客鉄道株式会社 日豊線南延岡駅構内 列車脱線事故」. 24 pp.
- 楠 研一, 今井俊明, 鈴木博人, 竹見哲也, 別所康太郎, 中里真久, 益子 涉, 林 修吾, 星野俊介, 猪上華子, 福原隆彰, 柴田 徹, 加藤 亘, 2007: 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—研究の概要—. 日本気象学会講演予稿集, (92), 228.
- 毛利光志, 伊藤正則, 藤沢亜希子, 2003: 観測仰角・仰角合成テーブルの変更とその検証. レーダー観測技術資料, (51), 13-15.
- 村石 尚, 杉山友康, 香川清治, 1995: 実効雨量による災害予測法の検討. 鉄道総研報告, 9 (3), 7-12.
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, 1997: A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. J. Climate, 10, 1730-1752.
- 鈴木雅一, 小橋澄治, 1981: がけ崩れ発生と降雨の関係について. 新砂防, (121), 16-26.

Development of Warning Criteria of Gusts
Accompanied by a Cold Front in the Coastal Regions
of the Sea of Japan Based on Radar Echo Data for
Train Operation Control

Hiroto SUZUKI*, Wataru KATO**, Makoto SHIMAMURA**,
Shinichi HATAMURA***, Manami NOMURA*** and Kei HIKIE***

* *Research and Development Center, East Japan Railway Co., Saitama, 331-8513, Japan.
(Present affiliation: Chiba Branch office, Chiba, 260-8551, Japan.)*

** *Research and Development Center, East Japan Railway Co., Saitama, 331-8513, Japan.*

*** *R-Corner Weathernews Inc., Chiba, 261-0023, Japan.*

(Received 14 August 2008 ; Accepted 10 February 2009)

Abstract

This study developed the warning criteria of gusts accompanied by a cold front in the coastal regions of the Sea of Japan, based on radar echo data in the winter (from November to March next year), for train operation control. Criteria for detection of a parent cloud which has the possibility of gust occurrence are as follows :

- (1) The existence of 10 grid points (in a 1-km-mesh) of an echo intensity over 80 mm/h,
- (2) The echo top height is more than 6 km.

These criteria could detect all of three gusts which caused injuries and fatalities in the coastal regions of the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk during the 2005-2008 winter seasons, and could detect four of the seven gusts in these areas during these seasons.

This study designed the following train operation control method using the above criteria. When the radar echo satisfying the criteria appears, a warning area is specified as an area within a radius of approximately 38 km from the radar echo to the directions of the north to the southeast. If there is a railway line within the warning area, a dispatcher immediately stops trains in the area. When this method is applied to the Niitsu-Sakata section of the Uetsu Line and the Niigata-Shibata section of the Hakushin Line, these lines are included within the warning area for an average of 150 minutes and 4.0 times per year during the 2005-2008 winter seasons. Based on this verification, train operation control using this method has been conducted on a trial basis in these sections since January 28, 2008.