

コスト・ロス・モデルにもとづく 竜巻警報の最適運用に関する研究

松井 京子¹・島村 誠²

¹学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

E-mail: matsui@trip.t.u-tokyo.ac.jp

²フェロー会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

E-mail: shimamura@civil.t.u-tokyo.ac.jp

本研究の目的はレーダー等による観測技術による竜巻警報システムの精度を経済評価し、より効率的な運用に導くことである。竜巻は低頻度・局所事象であるため空振りの削減は難しいが、誤警報は警報の信頼性を減じ事業者損失を発生させる。そこで、直前警報によって被害の軽減が可能な個人・事業者を対象者と設定し、一定の技術性能を有する竜巻警報の経済価値定式化を行った。

その結果本研究で得られた知見は、「警報には最適な誤警報率・捕捉率の組み合わせが存在し、これは受け取り手の利益構造によって異なること」「誤警報による損失が大きい場合には、『閾値を高く設定して弱い竜巻を見逃すかわりに、カストロフィックな災害のみ回避する』という戦略が有効である可能性があること」の2点である。

このように、警報の精度特性と対象者の利益構造によって経済価値を最大にする捕捉率・誤警報率を導き出すことを可能にした。

Key Words : *tornado warning, cost-loss model, economic evaluation, false alarm, cry-wolf effect*

1. はじめに

2012年に発生したつくば市の竜巻や2013年のさいたま市の竜巻など、近年首都圏で多くの負傷者を出す竜巻災害が発生し注目を集めている。同時に気象庁の発表する竜巻注意情報空振り率の高さ、捕捉率の低さが指摘されるようになった。また、JR東日本は5名の死者を出した2005年の羽越本線脱線転覆事故を受けて独自に高解像度のドップラーレーダーを設置し、気象研究所と共同で突風探知システムの開発に乗り出している。

このように探知・警報の技術開発が進んでいる一方で、警報システムの評価については明確な手法がないというのが実情である。鉄道事業者の運用する竜巻警報については島村・杉崎¹⁾が支払意思額を用いた対策ごとの費用便益比較を試みているが、これまでに包括的な評価手法の提案はなされていない。本論文は人的被害の金銭的損失、事業損失等を考慮した経済評価の枠組みを提案する。

竜巻災害は年間約20件、1件につき被害面積が平均0.32km²という低頻度かつ極端な局所事象である。このため無数に存在する事象なし時の判定機会について必然的に発生する誤判定の警報が、ごくまれに発生する事象の正判定の警報に対して相対的に多くなってし

まい、誤警報率が必然的に高止まりするという特徴がある。この誤警報が社会的不利益を招いていることは明らかだが、総体的な損得の計算はこれまでなされてこなかった。

そこで本論文は、「捕捉率と誤警報率のトレードオフ関係」「対象者によって異なる警報価値」「誤警報が個人の避難心理に及ぼす悪影響」を考慮した評価を試みた。竜巻については被害の情報も警報精度の情報も蓄積・公開が不足しているのが現実であるが、これは現在アクセス可能な限られた情報およびいくつかの仮定によって、任意の技術水準における最適捕捉率およびその時の警報価値を簡易に算出するものである。

2. 提案手法

本研究では開発中の竜巻検知技術の技術進展を考慮し、警報の捕捉率を変数として扱うためにBrooks²⁾の誤警報率-捕捉率モデルを導入した。また誤警報が住民の避難率に与える影響を推定するために、アンケート調査を行い警報に対する避難意識を調査した。これらを加えて警報価値を評価するために採用したのは、従来天気予報の評価手法として確立されてきたコスト・ロス・モデルを採用する(図-1)。

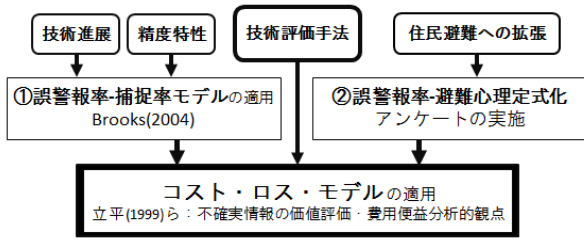


図-1 本研究の流れ

表-1 予報当たり・外れを示した分割表

	警報あり	警報なし
竜巻あり	損失 L' + コスト C 確率 w	損失 L 確率 $p - w$
竜巻なし	コスト C 確率 $q - w$	損失・コスト 0 確率 $1 - p - q + w$

(1) コスト・ロス・モデル

コスト・ロス・モデルは「実際の気象現象の有り・無し」と「予報の有り・無し」の組み合わせである4つの状態に対して、それぞれ発生確率と損益を設定し、当該予報の経済価値を「予報がない時の期待総損益」と「予報があるときの期待総損益」の差分として定義するものである。立平³⁾や山田⁴⁾は降雨に対するコスト（回避行動にかかる費用）・損失（事象に遭遇することによる被害）観の異なる対象者にとっての降雨予報価値評価手法について論じたが、本研究では、警報対象者として「住民」と「事業者」の二種類を設定した。なおここで扱う被害とは、直前警報によって軽減が可能な人的被害や移動物・操業施設被害である。

表-1は竜巻警報についての分割表である。ここでは確率 p で発生する竜巻のうち、警報は w/p の確率で予測でき、1回の被害は L' 、コストは C である。また竜巻について $(p - w)/p$ の確率で警報は竜巻を見逃し、1回の竜巻見逃しにつき L の被害が発生する。一方で発令される警報のうち $(q - w)/q$ は空振りであり、このときはコスト C のみが発生する。警報も竜巻もない平常時には損失もコストも発生しない。この警報の経済価値 V は次式で表される。

$$V = p \times L - (w \times (L' + C) + (p - w) \times L + (q - w) \times C) \quad (1)$$

(2) サブモデル 1: Brooks による捕捉率と誤警報率の関係

二項分類においては、観測値に対して閾値を操作することによって捕捉率と適中率（ $= 1 - \text{誤警報率}$ ）がトレードオフになることが一般的に知られている。竜巻警報では「竜巻あり」「竜巻なし」の2種類の予測とな

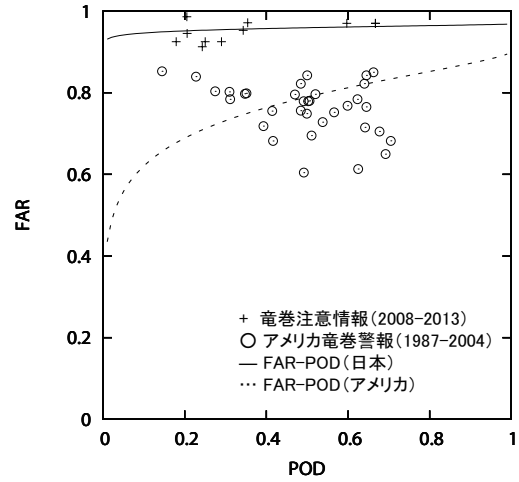


図-2 捕捉率-誤警報率の関係

り、観測値はレーダーエコー指数や突風関連指数から成る突風危険指数である。この特徴は「竜巻の見逃しを減らすために観測値に対して警報を出す閾値を下げると、空振り警報が増えてしまう」ということを意味している。

Brooks²⁾は、以上のような二項分類の特性を踏まえ、アメリカの竜巻警報について誤警報率 FAR (False Alarm Rate) と捕捉率 POD (Probability Of Detection) を以下式のように定義し、これらの関係を推定した。

$$FAR = (q - w)/q \quad (2)$$

$$POD = w/p \quad (3)$$

観測値に対して「非竜巻事象」と「竜巻事象」の発生数が同分散の正規分布に従うことを仮定したうえで、任意の技術水準・事象頻度のもとに誤警報率を捕捉率の関数として表したものである。ここで便宜的に分散を1とすると、閾値 x を超えた際に警報を出すとき、この POD は次式のように閾値 x の関数となる。

$$POD(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

また、非竜巻事象と竜巻事象の発生数分布は平均値が離れているほどより明確に分類が可能である。ここから非竜巻事象と竜巻事象の分布平均値の差を β とおくと、非竜巻時に閾値 x 下で竜巻判定をしてしまう確率 $POFD$ (Probability Of False Detection) は次式のようなである。

$$POFD(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{x+\beta} e^{-t^2/2} dt \quad (5)$$

Brooksはこの β を警報の技術水準であるとした。ここで、警報のうち FAR を POD の関数として表したのが次式である。

$$FAR(POD) = \frac{(1 + w - p - q) \times POFD(POD)}{(1 + w - p - q) \times POFD(POD) + w \times POD} \quad (6)$$

Brooksは $p = 0.1$ を仮定してアメリカ各州における竜巻警報の捕捉率・誤警報率にこの関係式を適用した。

ここでは日本における 2008 年から 2013 年に発表された竜巻注意情報の $POD \cdot FAR$ から β および p を推定した。図-2 には 2008–2013 年の各年竜巻注意情報の POD と FAR を + で、アメリカ各州の竜巻警報の POD と FAR を、1987–2004 年平均値（データは Simmons and Sutter⁵⁾ より）に ○ で示した。また、今回推定された日本の竜巻注意情報における $\beta = 0.29$ 、 $p = 0.032$ と、Brooks が用いた $p = 0.1$ およびそこから推定された $\beta = 0.81$ におけるアメリカの $POD-FAR$ をそれぞれ実線と破線に示した。

(3) サブモデル 2: 誤警報率と避難心理

高い誤警報率が警報の信頼性低下を招き、避難心理を減じることは「狼少年効果 (“cry-wolf effect”）」として知られている。しかしその一方で、この効果の影響は極めて限定的である、またはほとんど存在しないという見解もある。ここでは国内外の研究を参照したうえで、架空の竜巻警報を想定したアンケートによって効果を推定した。

a) 既往研究

アメリカにて研究蓄積がある。Dow and Cutter⁶⁾ はハリケーン被害を受けた住民に対するアンケートで、誤警報率はリスク認知に顕著な影響こそ与えないものの、「避難するかしないかは実際の状況に依る」と不確実性の高い回答をした住民の割合は誤警報率増加によって増えることを明らかにした。また Barnes et al.⁷⁾ は既存の「誤警報」という概念にはニアミス (close calls) など含まれていることを指摘し、警報のあたりはずれをスペクトラムとして表現することを提案しながら単純に誤警報率と避難心理を論じることに異議を唱えている。Schultz et al.⁸⁾ はアンケート調査により、9 割の住民は現状の竜巻警報について誤警報が多いとは感じておらず、狼少年効果はほとんどないと考察している。

このように狼少年効果については懐疑的な研究もある一方で、Simmons and Sutter⁵⁾ は高い誤警報率が負傷者の増加と明確な正の相関関係にあることを示した。これはアメリカ各州の National Weather Service や TV 番組による直前 1, 2 年間の竜巻警報誤警報率が死傷者数とどのように関係しているかを調査したものであり、警報のリードタイムや時間帯などによる影響を除外してもなお誤警報率の増加は死傷者数に大きく貢献していると結論付けている。

日本では竜巻に対する避難心理研究の蓄積はほとんどない。調査として、竜巻等突風対策局長級会議⁹⁾ は竜巻により被災した埼玉県熊谷市などの住民を対象としたアンケートを行い、『「竜巻注意情報」は精度が低くても発表の方が良いと思うか。』という質問をした。9 割の住民が「あった方が良い」と回答した一方で、「注

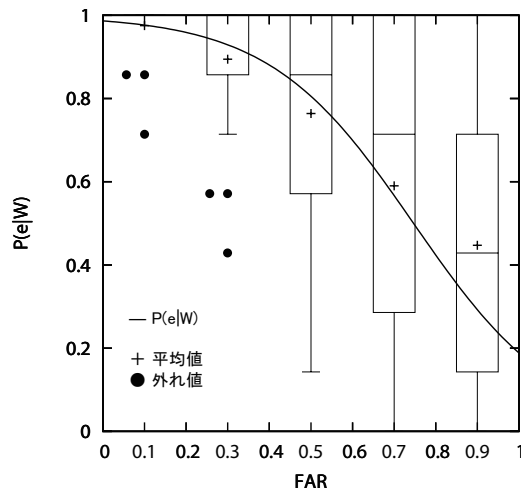


図-3 誤警報率と避難行動割合の関係

意情報は補足的情報として使う」「気にするかどうかは本人次第である」「県単位の発表では粗すぎる」などといった自由回答があり、現実には精度が課題となっていることがわかる。

b) アンケート調査

竜巻警報の誤警報率と避難率の関係を推定するため、アンケート調査を行った。なお、被験者は 18–24 歳の学生 23 名である。これは、現在の竜巻注意情報を模倣した

竜巻警報 第 4 号 平成 25 年 12 月 10 日 10 時 58 分

お住まいの地域では、30 分以内に竜巻などの激しい突風が発生する危険性が高くなっています。頑丈な建物内に移動するなど、安全確保に努めてください。落雷、ひょう、急な強い雨にも注意してください。

という架空の竜巻警報を提示し、これについて「10 回発令されてもそのうち n 回が空振りで、竜巻が発生しない警報の場合 (10 回のうち $10 - n$ 回は本当に竜巻が発生する場合) にどの程度の確率で避難するかを訊いたものである。空振り回数 n は 9, 7, 5, 3, 1 回について質問し、各設問に「絶対に避難しない」から「絶対に避難する」まで 8 段階の回答欄を設けた。この結果を警報が出たときの避難行動確率 $P(e | W)$ として図-3 に箱ひげ図で示した。一が中央値、+が平均値、箱は第一四分点から第三四分点まで、ひげは箱端点から 1.5 倍の中で最も離れているデータ、●はそれ以外の外れ値を示している。

ここから、避難する場合・避難しない場合について「安全性」 S と「面倒くささ」 R の項と誤差項 ε から成る期待効用 U を次式

$$U = (1 - FAR) \times S + FAR \times R + \varepsilon \quad (7)$$

表-2 住民避難における分割表

	警報あり	警報なし
竜巻あり	$L' = L \times (1 - P(e W))$ 確率 $p \times POD$	L 確率 $p - p \times POD$
竜巻なし	$C = 0$ 確率 $q \times FAR$	0 確率 $1 - p - q \times FAR$

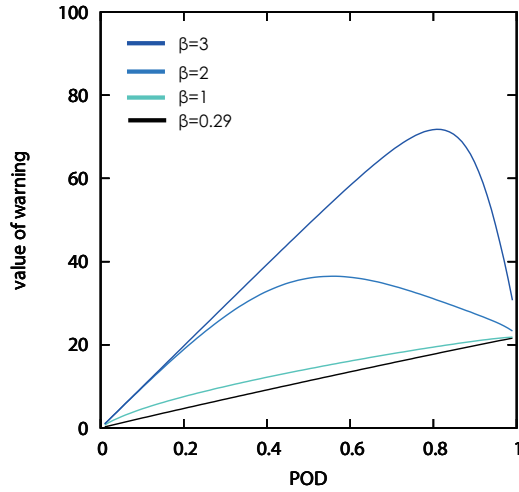


図-4 住民避難における捕捉率-警報価値

表-3 事業者における分割表

	警報あり	警報なし
竜巻あり	$L' + C = C \times (1 - P(e W))$ 確率 $p \times POD$	L 確率 $p - p \times POD$
竜巻なし	C 確率 $q \times FAR$	0 確率 $1 - p - q \times FAR$

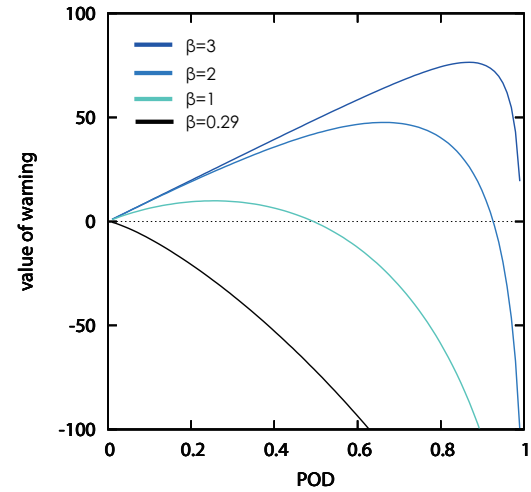


図-5 事業者における捕捉率-警報価値

のように設定し、ロジットモデルで表現した。このときの避難行動率は

$$P(e|W) = 1 - 1 / (1 + \exp((1 - FAR) \times S + FAR \times R)) \quad (8)$$

となる。アンケート結果および「誤警報率1のときに避難者が0」という仮定から推定されたのが $S = 4.24$ 、 $R = -1.46$ であり、これに基づく $FAR - P(e|W)$ を図-3に曲線で示した。本論文ではこれ以降 S 、 R の値としてこれらを用いる。

3. 結果: 警報価値と捕捉率

本論文では、「誤警報によって回避行動率が左右されるが、警報によって回避行動コストは発生しない」主体を住民、「一定の回避行動確率だが、毎警報による回避行動コストが発生する」主体を事業者として定義した。この2種類の警報対象について、警報が存在せず竜巻が発生する場合の被害総額を $100 (L \times p = 100)$ としたときの警報価値 V を、複数の β の下で求めた。

(1) 概要

a) 住民避難における警報価値

住民の分割表は、表-1 のようであり、各状態の生起確率は POD と FAR に書き換えたものである。警報あり・竜巻あり時の損失 L' は、警報を聞いたが避難しなかったことによる人的被害であるので、次式

$$L' = L \times (1 - P(e|W)) \quad (9)$$

となる。

今回 2.(2) にて求めた $p = 0.032$ 、および避難率式 (8) のときの警報価値 V を図-4 に示した。曲線はそれぞれ各 β 下の V を示しており、警報価値を最大にする POD は β によって異なる。

b) 事業者における警報価値

事業者の分割表は表-3 のように設定した。

仮想的に $C = L/100$ 、 $p = 0.0032$ として計算した警報価値 V が以下図-5 である。 $V < 0$ の領域で竜巻警報価値はマイナス、つまり「警報はないほうがまし」という状態であり、誤警報による不利益が警報による利益を上回っている。ここでは β の増加につれて警報価値を最大にする POD は単調増加している。

(2) 感度分析

ここでは提案したモデルの感度を示す。図-6~9 中曲線上任意の各点は、ある技術水準指標 β 下における警報価値 V の最大値とそのときの捕捉率を示したものである。各図において、同一曲線上にある点はその他の条件を同じくする $\beta = 0 \sim 3$ のものである。

a) 住民避難における警報価値

図-6 で検討したのは事象頻度 p に対する感度であり、同一曲線上の点は一定の事象頻度 p における $\beta = 0 \sim 3$ のものである。 p の取り得る範囲として、日本の竜巻注意情報から推定された 0.32 の 1/30 程度から、Books の用いた 0.1 までを想定した。同一曲線上では V が大きいものほど高い β に相当している。

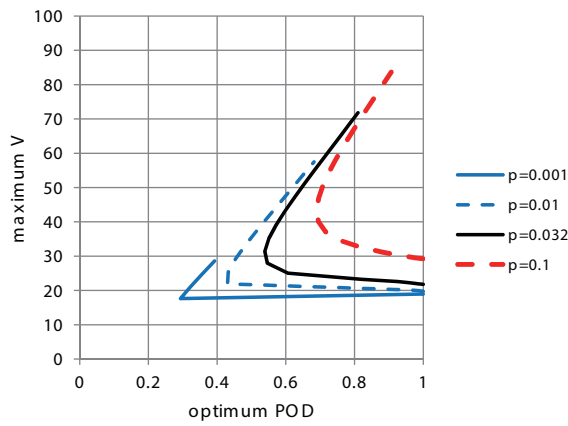


図-6 事象頻度 p ごと住民避難における最大警報値

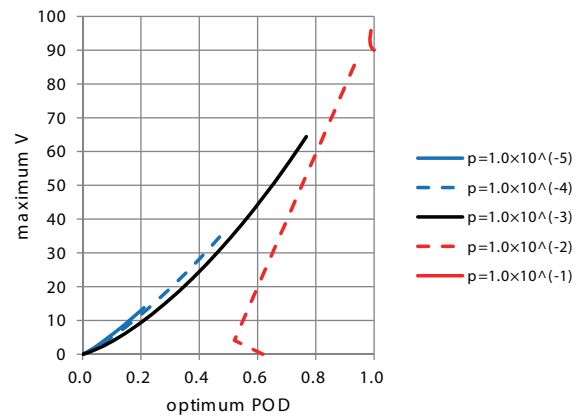


図-8 $C = L/100$ の時事業者における最大警報値

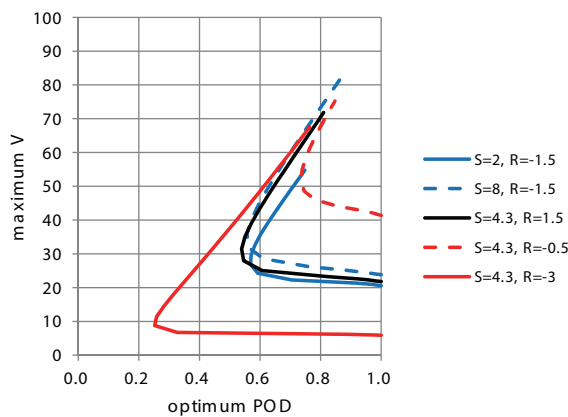


図-7 避難率式ごと住民避難における最大警報値

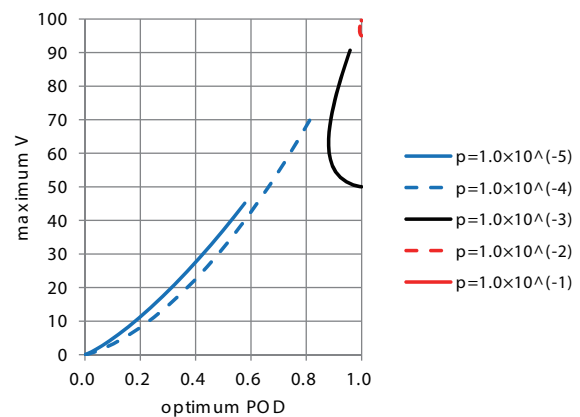


図-9 $C = L/2000$ 時事業者における最大警報値

図-7 で検討したのは誤警報率-避難率式 (8) における S と R に対する感度であり、これについては取り得る範囲に関して情報がなかったためそれぞれ倍半分を試している。

p の多寡によって最適捕捉率変遷のパターンはほとんど変わらないが、極低頻度においては最大警報値の上限が顕著に低い。また誤警報率-避難率を操作した結果、 S の変化に対しては値の変動はごく小さいものの R に対しては敏感であることがわかった。

b) 事業者における警報値

図-8、9 では異なる曲線は異なる事象頻度下における、事業者に対する警報値を示している。図-8 は $C = L/100$ 、図-9 は $C = L/2000$ について示した。同一曲線上では、より大きい警報値がより高い β に対応している。

ここでは高頻度事象、または C が小さい場合において最適捕捉率・警報値ともに高くなることがわかった。そのほかについては概ね同じ挙動が見られる。

4. JR 余目レーダー警報値試算

本章では JR 東日本が JR 羽越線余目駅に設置した小型ドップラーレーダーおよびこの圏域半径 30km を想定し、このモデルの部分的な適用をした。ただし、警報の捕捉率・誤警報率について正確なデータが得られなかったため、この試用では技術水準 β の変化および警報閾値の連続的な変化は考慮せず仮想的な精度を設定し、コスト・ロス・モデルおよび 2.(3) の誤警報率と避難心理の関係のみを用いたものである。

また、2.(2) で示した連続的な閾値変化の代わりに、本章では二段階の閾値を扱う。これは低閾値警報「弱い竜巻も極力捕捉するが、結果的に誤警報も増える」と高閾値警報「弱い竜巻は見逃すことによって誤警報を減少させ、強い竜巻について警報を出す」という二つの方針を比較検討するものである。前章までは危険指数の大小と発生する竜巻の強弱が無相関であることを暗黙に前提としていたが、指数が大きいほど強度が大きくなるという実情を想定した。加えて、ここでは誤警報による事業者のコストとして、運営停止に際して実際に払う費用（特急券払い戻し・線路点検など）では

表-4 各パターン・方針における FAR と POD

	パターン A		パターン B		パターン C	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
方針 1	75%	63%	75%	63%	50%	70%
方針 2	33%	90%	40%	80%	25%	80%

なく、利用者の時間損失を便宜的に設定している。

(1) 試算条件

前述した二つの方針として、方針 1「F1 スケール（風速 32.4～49.8m/s）以上の竜巻をターゲットに閾値を設定」、方針 2「F2 スケール（風速 49.8～69.8m/s）以上の竜巻をターゲットに閾値を設定」を考え、これらについて仮想的な誤警報率・捕捉率を設定し、若干数字を上下させた 3 パターンについて計算した。表-4 がその 2 方針・3 パターンの誤警報率・捕捉率である。方針 2 の誤警報率・捕捉率は F2 スケール以上の竜巻についてのみのものである。

対象地域、余目ドップラーレーダーから半径 30km 圏内での竜巻発生数は新井ら¹⁰⁾、藤原ら¹¹⁾の観測結果の観測結果および日本における近年の F1 竜巻と F2 以上竜巻の比から、F1 スケールの竜巻を年間 13 件、F2 スケール以上を年間 2 件程度と仮定した。

また、警報があるときの住民年間被害額 Dh は、年間竜巻発生数を T 、警報がない場合の竜巻 1 件あたり人的被害額を Lh とすると以下の式で表される。

$$Dh = Lh \times (1 - P(e | W)) \times T \times POD + Lh \times (T - T \times POD)$$

また警報があるときの羽越線年間被害 Dt は、一件当たり列車転覆による被害を Lt 、警報がない場合の列車の年間竜巻遭遇数を T' 、年間誤警報数を FA とするとき以下式である。

$$Dt = Lt \times T' \times (1 - POD) + C \times (T' \times POD + FA)$$

住民の竜巻被害における避難率 $P(e | W)$ は式 (8) を用い、 Lh は竜巻 1 件の被害で負傷者・死者が F1 スケールの場合でそれぞれ 0.57 人と 0.013 人、F2 スケールの場合で 4.47 人と 0.073 人発生すると仮定した。これは近年の主な竜巻災害 29 件から求めた、竜巻災害による死傷者の居住者に対する割合および今回の対象地人口から推定した。人的損失は交通事故による死亡と障害の金銭的損失からそれぞれ 3,152.8 万円と 161.9 万円を採用した。

羽越線の竜巻被害では

遭遇数 $T' =$ 対象地での発生数 $T \times$ 遭遇率 $E \times$ 転覆確率 Pt とした。遭遇率 E は過去の竜巻進路および対象地域に路線が占める面積割合、羽越線運行頻度から発生した竜

表-5 各試算条件

住民：		
竜巻発生件数 T (/年)	F1	13
	F2 以上	2
被害 Lt (万円)	F1	133.27
	F2 以上	953.85

羽越線：		
遭遇率 E	8.27×10^{-4}	
転覆確率 Pt	F1	10%
	F2 以上	100%
被害 Lt (万円)	45763.8	
運転規制コスト C (万円)	25.6	

巻が列車に遭遇する確率を推定したものであり、転覆確率 Pt は各スケールにおいて風速が列車転覆限界 43m/s を超える確率の仮定である。転覆被害 Lt は 3 車両、18 人の負傷、3 人の死亡、20 日間の事故後運転休止を仮定したものである。また、ここでは警報対象地域内のいずれかで出された警報について毎回運転規制が発生するとして、誤警報数 FA を以下のように計算した。

$$FA = FAR \times T \times POD / (1 - FAR) \quad (10)$$

警報によるコスト C として、今回は 1 時間の運転規制による乗客の時間価値損失を考えた。

(2) 結果

以上の仮定から試算した警報価値結果が表-6、7 である。

表-6 ではすべてのパターンと方針で警報なしの被害よりも警報ありの被害が下回っており、警報価値が正の値になっている。また、パターン A と B では低閾値の方針 1 がより高価値となっており、全体を通してより多くの警報を出すほうがよいことがわかる。

表-7 では反対に、すべてのパターンにおいて方針 1 の警報価値がマイナスになっている。方針 2 ではわずかながら正の警報価値となり、事業者に対しては閾値を引き上げ、強い竜巻のみ回避する戦略のほうが有効であることがわかる。

5. 結論と今後の課題

本論文では導入が検討されている新しい竜巻検知システムについて、その評価を行うためにコスト・ロス・モデルの使用、誤警報率一見逃し率モデルおよび誤警報率一避難率モデルの利用を提案した。また、JR の余目ドップラーレーダーについてコスト・ロス・モデルと誤警報率一避難率モデルから、低閾値方針と高閾値

表-6 各パターン・方針ごと住民に対する警報価値と詳細 (/ 年)

		見逃し F1 数	見逃し F2 数	誤警報数	F1 による 被害 [万円]	F2 による 被害 [万円]	総コスト [万円]	警報価値 [万円]
警報なし		12.75	2.25	0.0	1699.2	2146.2	3845.3	
パターン A	方針 1	5.32	0.23	28.4	1209.0	1189.4	2398.4	1446.9
	方針 2	12.75	0.23	0.9	1699.2	374.9	2074.0	1771.3
パターン B	方針 1	5.10	0.45	28.4	1194.2	1295.7	2915.1	930.2
	方針 2	12.75	0.45	1.2	1699.2	634.0	2333.2	1512.1
パターン C	方針 1	4.05	0.45	10.5	765.0	762.7	1503.5	2341.8
	方針 2	12.75	0.45	0.6	1699.2	521.9	2221.1	1624.3

表-7 各パターン・方針ごと事業者における警報価値と詳細 (/ 年)

		見逃し F1 数	見逃し F2 数	誤警報数	F1 による 被害 [万円]	F2 による 被害 [万円]	運行規制 コスト [万円]	総コスト [万円]	警報価値 [万円]
警報なし		0.01054	0.00186	0.0	26.5	46.8	0.0	73.3	
パターン A	方針 1	0.00440	0.00019	28.4	11.1	4.7	726.0	741.7	-668.4
	方針 2	0.01054	0.00019	0.9	26.5	4.7	25.6	56.8	16.5
パターン B	方針 1	0.00422	0.00037	28.4	10.6	9.4	726.0	745.9	-672.6
	方針 2	0.01054	0.00037	1.2	26.5	9.4	30.8	66.6	6.7
パターン C	方針 1	0.00335	0.00037	10.5	8.4	9.4	269.0	292.1	-218.8
	方針 2	0.01054	0.00037	0.6	26.5	9.4	15.4	51.3	22.0

方針の有効性比較を行った。本論文が提案するのは精度をベースとした経済価値評価による、効率的な警報開発および運営である。

(1) 結論

a) 適切な閾値採用の必要性

一点目に、災害頻度・警報精度・対象者によって警報の適切な捕捉率が異なるということを示した。例えば全く同じ観測機器および警報システムを用いた場合であっても、低頻度災害の場合ではより低捕捉率の警報が有効である。また住民には低閾値、事業者には高閾値が望ましい可能性を 4. のケーススタディにおいて示した。

b) 低技術水準警報による損失

ここまで示してきたように、ある程度の精度に足りない警報の導入は利益ではなく特に事業者において損失を生む場合がある。一方で、技術水準の低い警報であっても、誤警報によるコストが相対的に低い対象者にとっては有益である。

(2) 課題

主題であった竜巻は事象頻度の極度に低いレア災害であるために、基本的にデータ数が不足している。特に気象庁の竜巻注意情報やナウキャストは正確な誤警報数を発表しておらず、有効性評価の妨げとなっている。

本論文では多くの仮定を用いた。中でも誤警報率と避難率の関係については今回のアンケートは条件・対象が限定的であり、詳細・広範な実施によってリードタイムや発令時間帯、形式が与える影響を調査する必

要がある。

そのほかにも、本論文では個人避難について回避コストを 0 と設定している。しかし Sutter and Erickson¹²⁾ がアメリカにおいて竜巻警報による回避行動が個人にもたらす時間価値損失はその利益を上回ると指摘しているように、個人においても回避コストを考慮に入れるべきであるという可能性がある。

また、各コスト・損失などの金銭換算は便宜的なものであり、実際の適用を考える際には書く状況に合わせた数値の検討が不可欠である。

謝辞：藤原忠誠特別研究員や鈴木博人所長をはじめとした JR 東日本研究開発センター防災研究所のみなさまには、お忙しい中お時間を割いて議論・御助言をいただいた。楠研一主任研究員を筆頭に気象研究所のみなさまには、研究の初段階において基礎的な竜巻観測についての知識にとどまらず、気象研究の最先端についてお話をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 島村誠・杉崎光一: 防災対策によるリスク低減効果の定量評価に関する考察, 鉄道力学論文集, Vol. 40, pp. 45-50, 2010.
- 2) Brooks, H. E.: Tornado-warning performance in the past and future: A perspective from signal detection theory, *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 75, pp. 995-1006, 2004.
- 3) 立平良三: 天気予報による意思決定—不確実情報の経済価値—, 東京堂出版, 1999.
- 4) 山田真吾: コスト・ロス・モデルに基づいた天気予報の評価指数の提案, 天気, Vol. 48, pp. 39-45, 2001.

- 5) Simmons, K. M. and Sutter, D.: False alarms, tornado warnings, and tornado casualties, *Weather, Climate and Society*, Vol. 1, pp. 38–53, 2009.
- 6) Dow, K. and Cutter, S. L.: Crying wolf: Repeat responses to hurricane evacuation orders, *Coastal Management*, Vol. 26, pp. 237–252, 1998.
- 7) Barnes, L. R., Grunfest, E. C., Hayden, M. H., Schultz, D. M., and Benight, C.: False alarms and close calls: A conceptual model of warning accuracy, *Weather and Forecasting*, Vol. 22, pp. 1140–1147, 2007.
- 8) Schultz, D., Grunfest, E. C., Hayden, M. H., Benight, C. C., Drobot, S., and Barnes, L. R.: Decision making by austin, texas, residents in hypothetical tornado scenarios, *Weather, Climate and Society*, Vol. 2, No. 3, pp. 249–254, 2010.
- 9) 内閣府竜巻等突風対策局長級会議: 「竜巻等突風対策局長級会議」報告, 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, *Technical Review* 35, JR EAST 2011.
- 11) 藤原忠誠・植村昌一・友利方彦・鈴木博人: 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, *Technical Review* 45, JR EAST 2013.
- 12) Sutter, D. and Erickson, S.: The time cost of tornado warnings and the savings with storm-based warnings, *American Meteorological Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 103–112, 2010.

(2014.4.25 受付)

OPTIMAL RUNNING OF TORNADO WARNING BASED ON COST-LOSS MODEL

By Kyoko MATSUI and Makoto SHIMAMURA

Tornado detection and warning system is under development using high resolution radars, however, evaluation process for the system is not enough. Because tornadoes are extremely rare events especially in Japan, false warnings must happen at a relatively high rate and might cause serious damages to its reliability and business losses. This paper proposes a means for economic evaluation of tornado warnings by cost-loss model, considering evacuation psychology, relationship between probability of detection (POD) and false alarm rate (FAR).

As a result, it is suggested that comparatively high POD is recommended for resident evacuation warning. In addition, high thresholds to decrease FAR are effective particularly for business operators even if they miss some small tornadoes.