

港湾域の突風災害軽減にむけた 強風ナウキャスト手法の開発

DEVELOPMENT OF A STRONG WIND NOWCASTING METHOD
IN ORDER TO MITIGATE THE GUST DISASTERS OF HARBOR REGIONS

鈴木靖¹・増田有俊²・守屋岳³・真木雅之⁴・

前坂剛⁵・清水慎吾⁶・鈴木真一⁷

Yasushi SUZUKI, Aritoshi MASUDA, Takeshi MORIYA, Masayuki MAKI,
Takeshi MAESAKA, Shingo SHIMIZU and Shin-ichi SUZUKI

¹正会員 博(理) 京都大学特定教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²理修 一般財団法人日本気象協会 防災事業部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

³工修 一般財団法人日本気象協会 管理部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

⁴理博 (独)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁵博(理) (独)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁶博(理) (独)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁷博(理) (独)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Mitigation of the gust disasters of harbor regions is one of major problems to resolve. The gust wind occurs suddenly due to the cold front, thunder storm, tornado and so on. An insufficiency of margin time to take some action causes the gust disasters. In order to mitigate the gust disasters, a new nowcasting method for strong wind prediction was developed. Observed Doppler wind velocity by X-band radar network named X-NET is used to predict advection of strong wind regions. In the case of the gust disaster on 18/Apr/2008, gust wind over 20m/s at Haneda airport was successfully predicted before 1 hour by using this strong wind nowcasting method.

Key Words : Nowcasting method, gust wind, X-band doppler radar, X-NET

1. はじめに

竜巻などの突風災害がここ数年多発しており, 強風の監視予測技術の開発が求められている。港湾域においてもクレーンが突風により倒壊する事故が, 市原市(2008/4/18), 新潟東港(2006/11/7), 堺港(2004/11/26), 鹿島港(2003/10/13)などで相次いで発生しており, 対策が求められている。荷役作業中のガントリークレーンがひとたび倒壊すると, 復旧までの数ヶ月間, 港湾の荷役機能が低下し, 影響は甚大なものとなる。天気予報や注意報警報により強風が事前に予測できる場合には作業を中止し, 十分な安全措置を施すことができるが, 倒壊事故が発生した事例では予見できない突風により安全措置を施す余裕がないことが災害に結びついている。

港湾域の突風災害軽減に向けた取り組みとして, 二瓶ほか¹⁾は新潟東港と周辺の寺泊と相川の風観測値との地点間相関を調べ, 冬季低気圧通過時の強風

は地点間相関の応用により強風の出現を予測できるとしている。しかし, 低気圧よりもさらにスケールの小さい雷雲等にもなうダウンバースト等の突風現象に対しては適用することができず, また, 観測点で検知されていない強風を予測することは不可能である。

一般に気象現象の短時間予測手法としては, 数値気象モデルを用いた力学的な手法と, 過去から現在までの変化傾向を外挿するナウキャスト手法が知られている。数値気象モデルは気象観測値から解析された初期値を時間積分して将来予測を求めるものであり, 初期値から対流雲等の擾乱が発達するための時間を必要とし, 数時間先までの予測精度は十分ではない。これに対してナウキャスト手法は, レーダデータをもとにした降雨の短時間予測手法として, 日々の天気予報に既に実用化されている。ナウキャスト手法はレーダデータを時間的に外挿する手法のため, 初期値から3時間程度先までの予測精度が高い, という特長を有する。

数値気象モデルで突風を予測することは非常に困難であるが、発生した強風をいち早く検知し、その移動をナウキャスト手法により予測することができれば、たとえ数十分前の予測であったとしても、作業員の避難や施設の安全対策を施すことが可能となり、被害の軽減に資することができる。本研究では、強風の短時間予測を目的として、ドップラーレーダデータを用いた強風ナウキャスト手法を開発し、事例検証した成果をとりまとめる。

2. X-NET レーダネットワーク

本研究ではドップラーレーダによる風のデータとして、X-NETレーダネットワークによって観測されたデータを用いる。X-NET²⁾は防災科学技術研究所が首都圏にある各大学や研究機関と共同で進めている研究用Xバンドレーダネットワークである。局地気象擾乱の発生機構の理解と監視・予測技術の確立を目的としている。図-1に示すように、首都圏約250km四方に配置されている。2010年3月時点では、防災科学技術研究所の3台(MP-X1,MP-X2,MP-X3)のマルチパラメータ(MP)レーダ、中央大学(CHUO)、防衛大学校(NDA)、日本気象協会(JWA)、山梨大学(YMNS)、電力中央研究所(CRIEP)の各ドップラーレーダによって構成されている。国交省MPレーダ(MLIT1,MLIT2)もデータ取得を開始する予定である。ほぼ首都圏全域が観測範囲となり、この観測範囲内には東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県の一部と茨城県、静岡県、山梨県、栃木県、群馬県の一部が含まれる。複数台のレーダで観測される動径風の解析からは水平方向の風向風速分布を求めることができる。アンテナのスキャンモードは5分間隔のボリュウムスキャンを行っている。空間分解能は各レーダにより異なるが、レンジ方向が100m~250m、方位角方向が1.3°前後である。

各レーダデータは商用の光ファイバー通信回線で防災科学技術研究所に送られリアルタイムで処理

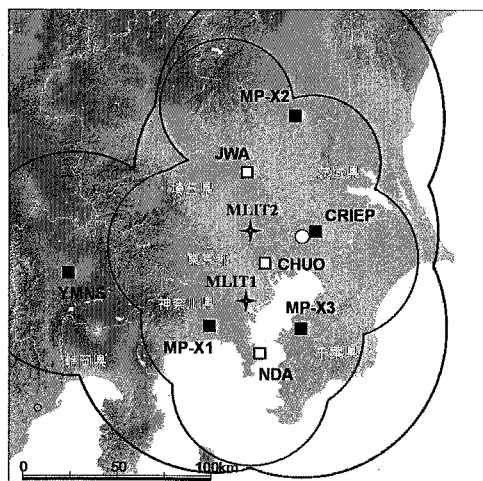


図-1 X-NET レーダネットワーク配置図（太線は降雨、細線は風の観測範囲を示す）

される。2 台以上のレーダによって動径風が観測された領域では水平方向の風向と風速が計算され、500m メッシュの観測データが作成される。ドップラーレーダは降水粒子による反射波のドップラシフトを利用しているため、降水粒子が存在していない領域で風を観測することはできない。

3. 強風ナウキャスト手法

X-NETレーダネットワークから得られた風向と風速の500mメッシュ観測データ（高度1000m, 5分間隔）を入力として、図-2に示すフローにより強風域を短時間予測する。

過去3時刻分の観測値から運動学的手法を応用して強風域の移動ベクトルを算出し、現時刻の強風域を時間外挿することにより、1時間先までの強風域を予測する。移動ベクトルの算出には、強風域（風速15m/s以上）だけを用いることで、移動方向や移動速度を良好に再現することができた。また、ドップラーレーダから得られる風の領域が限られていることや、弱風域の予測を行うことによる見逃しの危険性を避けるために、予測対象を強風域だけに絞ることとした。

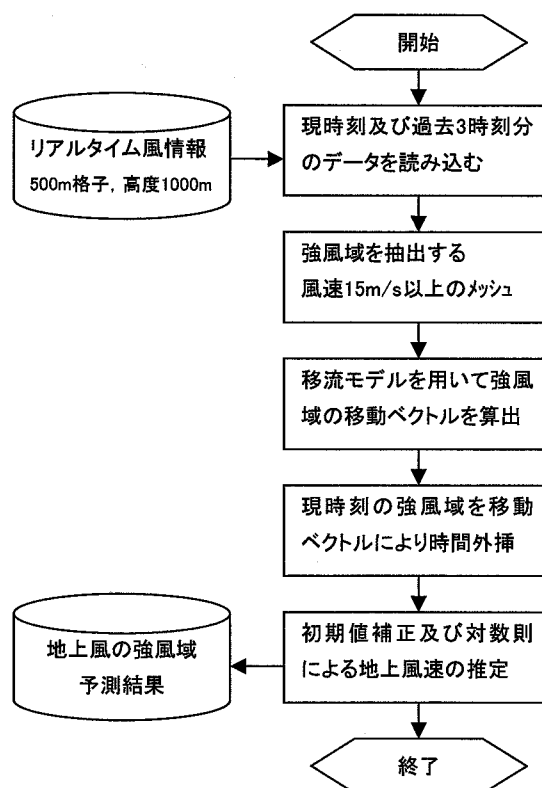


図-2 強風ナウキャスト手法のフロー

(1) 移動ベクトルの算出

移動ベクトルの算出には、短時間降雨予測で用いられている椎葉ほか(1984)³⁾の移流モデルを用いた。移流させる物理量として、降雨量から風速値に置き換えることにより、風速パターンの移流を予測する

手法である。

風速を $Z(x,y,t)$ のように位置 (x,y) と時刻 t の関数で表したとき、 $Z(x,y,t)$ は、時刻を固定すると 1 つの曲面を表す。風速予測はこの曲面の変化を予測するものである。そこで、風速 Z の変化を立平ほか⁴⁾ による移流方程式(1)で表す。式(1)は質量保存の式であり、ある微小面積内の Z の時間変化は、周囲から流れ込む Z とその場所での Z の増減と等しいことを意味している。ここで、 u は Z の東西方向の移動速度、 v は Z の南北方向の移動速度を表す。ベクトル (u,v) は Z の移動方向と移動速度を表すため、これを移動ベクトルと称する。 w は Z の発達・衰弱を表すソース項である。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} = w \quad (1)$$

ここで、式(1)における移動ベクトル (u,v) と発達・衰弱項 w は位置座標 (x,y) の一次式で表されると仮定する。ここに $C_1, C_2, \dots, C_9$ はパラメータである。

$$\begin{aligned} u &= C_1 x + C_2 y + C_3 \\ v &= C_4 x + C_5 y + C_6 \\ w &= C_7 x + C_8 y + C_9 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)におけるパラメータ $C_1, C_2, \dots, C_9$ が同定できれば、風速 Z の移動ベクトルと発達・衰弱量を推定することができる。そこで、連続する複数時刻 t_k における風速データ $Z(x_i, y_j, t_k)$ に対する観測方程式を求めて、パラメータを最小二乗法によって決定する。式(1)の左辺と右辺の残差 V_{ijk} は式(3)で表される。

$$\begin{aligned} V_{ijk} &= -\left[\frac{\partial Z}{\partial t}\right]_{ijk} - \{(C_1 x_i + C_2 y_j + C_3) \left[\frac{\partial Z}{\partial x}\right]_{ijk} \\ &\quad + (C_4 x_i + C_5 y_j + C_6) \left[\frac{\partial Z}{\partial y}\right]_{ijk} \\ &\quad - (C_7 x_i + C_8 y_j + C_9)\} \end{aligned} \quad (3)$$

最小二乗法によってパラメータ $C_1, C_2, \dots, C_9$ を求めるには、評価関数 J_c として残差 V_{ijk} の 2 乗和を導入し、 J_c が最小になる解を求めればよい。式(4)の J_c を $C_1, C_2, \dots, C_9$ の各パラメータによって偏微分し、それを 0 とおいて得られる連立一次方程式（観測方程式）を解くことによりパラメータを求めることができる。

$$J_c = \sum_{k=-K}^{-1} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} V_{ijk}^2 \quad (4)$$

ここに、 K は K 時刻前の観測データを表し、 M, N は東西方向および南北方向のメッシュサイズを表す。このモデルでは風速域の回転まで表現することがで

きるが、積乱雲などの局地的な気象現象では個々の移動が同じとは限らず予測精度が安定しないという問題があるため、予測範囲を 50~100km 四方のいくつかの領域に分け、領域ごとに単一の移動ベクトルを算出した後、それらを内挿してメッシュ単位の移動ベクトルに置き換えて、場所による風速域の移動方向の変化を表現することとした。

(2) 地上風速の推定

レーダで遠方まで観測する場合には、ある程度の仰角で電波を発射する必要がある。そのため、空間的に広い範囲をカバーするデータは、地上よりも上空の高度を代表するデータとなる。強風ナウキャスト手法では高度 1000m のレーダデータを入力として用いている。そのため、移動ベクトルによって時間外挿される強風予測データは、同じ高度 1000m の風である。高度 1000m の風から地上風速を推定する手法として、以下の手法を採用した。

① 地上観測値が存在する地域の場合

現時刻における地上風速観測値と上空風速観測値の差を、上空風速予測値に対してバイアス補正量として適用する。

② 地上観測値が存在しない地域の場合

対数則と呼ばれる風速の鉛直プロファイルを設定することにより、上空風速から地上付近の風速値を推定する。

4. 強風災害事例による検証

強風ナウキャスト手法を実際の強風災害事例に適用し、その精度を検証した。強風災害事例として、2008年4月18日の南岸低気圧に伴う関東地域の強風災害を対象とした。本事例は、図-3の天気図に示すように、本州の南岸を東進する低気圧にともなう前線の影響で、午前7時から10時頃にかけて強風域が西から東へ通過しており、これに伴って各所で強風災害が発生した。

報道によると、朝7時40分頃に神奈川県綾瀬市でアルミ製フェンスの倒壊で通学途中の小学生が負傷、

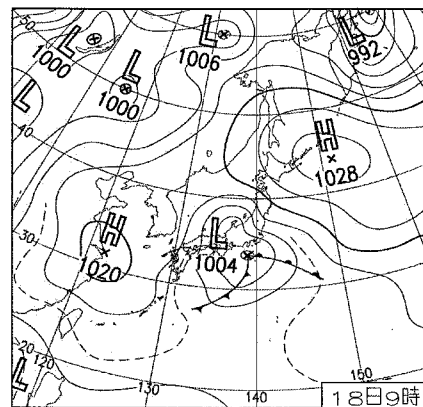


図-3 2008年4月18日9時の天気図

8時40分頃には横浜港南本牧埠頭に停泊していた貨物船が強風にあおられて流され、港湾構造物に接触して船体を破損、9時10分頃には羽田空港で4月の観測史上最大の風速23m/sを記録し、航空機の離発着を一時見合わせている。また、9時30分頃には千葉県市原市の造船所で強風によりクレーンが倒壊している。

本事例に強風ナウキャスト手法を適用した。8時10分を初期時刻とした30分先及び60分先の強風予測結果を図-4に示す。8時10分に観測された強風域は、東京都多摩地域から神奈川県三浦半島にかけて北北西から南南東方向に線状に分布している。最大風速は30m/s近くが観測されている。図-4上段の30分後の観測値によると、強風域は東北東方向へ移動し、8時40分頃には強風域は川崎付近に達している。60分後の9時10分頃には、強風域は羽田空港を通過し、東京都東部から千葉県房総半島付近にかけて分布している。その間、強風域の線状構造はほぼ維持されているが、強風域の南部のほうが北部よりも移動速度が速くなっている。また最大風速は8時10分よりもさらに強まり、30m/sを超える分布がみられる。市原市で高さ70mの300トンクレーンが強風により倒壊したのは9時30分であるが、9時10分の段階で線状の強風域が南西から接近していることが明らかであり、事前の強風予測が十分可能であることが分かる。事故直後の9時45分には、千葉測候所において

最大瞬間風速22.5m/sを観測している。

強風ナウキャスト手法による30分先、60分先の予測結果（図-4下段）によると、線状の強風域が東北東方向へ移動する様子がよく捉えられている。移流モデルによる風速15m/s以上の強風域の移動ベクトルを解析した結果によると、移動ベクトルは北から時計回りに53.8度（北東から東北東）の方向へ時速33.0kmと解析されている。移動ベクトルを用いた外挿予測によると、強風域は30分後の8時40分には川崎付近に達し、60分後の9時10分には羽田空港を通過し、東京灯標付近に達すると予測されている。移流モデルによる風速の予測では、初期値のパターンを移動させるため、強風の発達を十分表現することはできず、初期値の最大風速が持続している。

線状の強風域通過後のデータが空白域となっているのは、ドップラーレーダが降水粒子による反射波のドップラーシフトを利用しているため、降水粒子が存在していない領域で風を観測することができないことを表している。したがって空白域で強風が存在していないと結論することはできず、他の風速監視手法と組み合わせてデータを利用する必要がある。

羽田空港、東京灯標及び千葉灯標における地上と海上の風速観測値との比較を行った。表-1に比較に用いた風観測データの概要を示す。各観測点の風速計の設置高さが異なるため、強風ナウキャスト手法で求めた高度1000mの風速から地上風速を推定した。

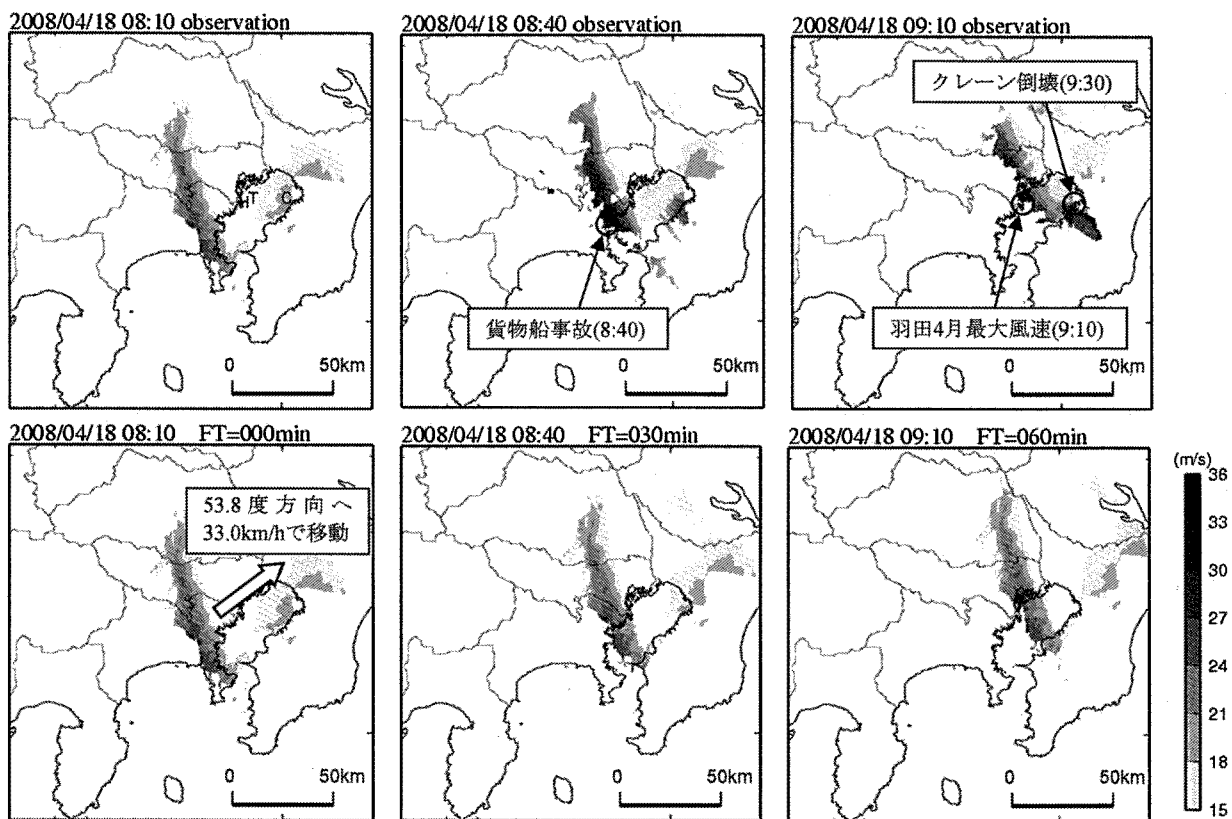


図-4 2008年4月18日8時10分のドップラーレーダ風速分布（左下）を初期値とする強風予測値（下段）と観測値（上段）の風速分布比較（左から初期値、30分予測、60分予測を示し、羽田空港(H)、東京灯標(T)、千葉灯標(C)の位置を左上図に示す)

予測開始時刻の地上風速観測値と強風予測初期値との差を補正量として、以後の予測時間に対してバイアス補正を行った。バイアス補正は各観測点ごとに実施している。

表-1 地上・海上風速観測点の概要

観測点	風速計 高さ	データ 間隔	所管
羽田空港	6m	10分	気象庁
東京灯標	22.8m [*]	10分	東京都港湾局
千葉灯標	17.4m [*]	15分	海上保安庁

^{*}) 東京湾平均海面(TP)上

強風の出現時刻がずれているため、予測初期時刻を各観測点ごとに別々に設定した。羽田空港は8時10分から60分先まで、東京灯標は8時30分から60分先まで、千葉灯標は8時40分から70分先までを予測対象期間とした。各観測点の風速観測値と初期値バイアス補正済み予測値の時系列の比較を図-5に示す。羽田空港の予測値は観測値との対応が良く、8時45分ころから風速が10m/sを超え、その後急激に強くなった風速が9時頃に20m/sを超えることがうまく予測されている。強風が出現するピーク時刻は観測値よりも5分程度遅れているが、ピークの風速値は良く一致している。東京灯標の観測値では9時頃に30m/s弱の強風が出現しているが、予測値のピークが出現する時刻は9時20分頃であり、20分程度の遅れがみられる。また、ピークの風速予測値は25m/s程度であり、観測値よりも5m/s程度低めに予測している。東京灯標における予測は、羽田空港に比べて精度が悪いことがわかる。千葉灯標の観測値は9時45分頃にピークとなり、20m/sを超える強風が出現している。予測値ではピークの出現は9時40分頃で、風速25m/s程度であり、強風のピークを概ね予測していると考えられる。千葉灯標の予測値が9時20分から9時30分にかけて空白となっているのは、レーダエコーが途切れていてドップラー速度が観測されない領域があり、強風域の移動が計算できないためである。千葉灯標の観測値は15分毎とデータ数が限られるが、予測対象期間の風速変化傾向はよく捉えられている。

東京灯標の予測において、強風の出現時刻が観測よりも15分程度遅れ、風速値が5m/s程度低めに予測されている原因を以下に考察する。強風域の風速分布(図-4)によると、ドップラーレーダ観測値による線状の強風域は、東京よりも南部の強風域が東京北部の強風域よりも速く移動している。そのため8時10分には直線状にほぼ南北に分布していた強風域が、9時10分には反時計回りに回転している。それに対して予測値はほぼ南北の構造をそのまま保ちつつ移動することが予測されており、その結果、南側では強風域の移動のずれが大きくなったものと考えられる。本手法では、移動ベクトルを算出する領域の分割数の設定などのパラメータがいくつかあるため、パラメータをうまく設定すれば東京灯標の予測再現性をもっと高めることは可能と思われる。しか

し、パラメータを特定の現象に合わせこむことは再現計算では意味があっても、過去と同じ現象が発生するかどうか分からない予測への適合性を保障することはできない。予測手法として用いるのであれば、できるだけシンプルなパラメータ設定を用いるべきである。

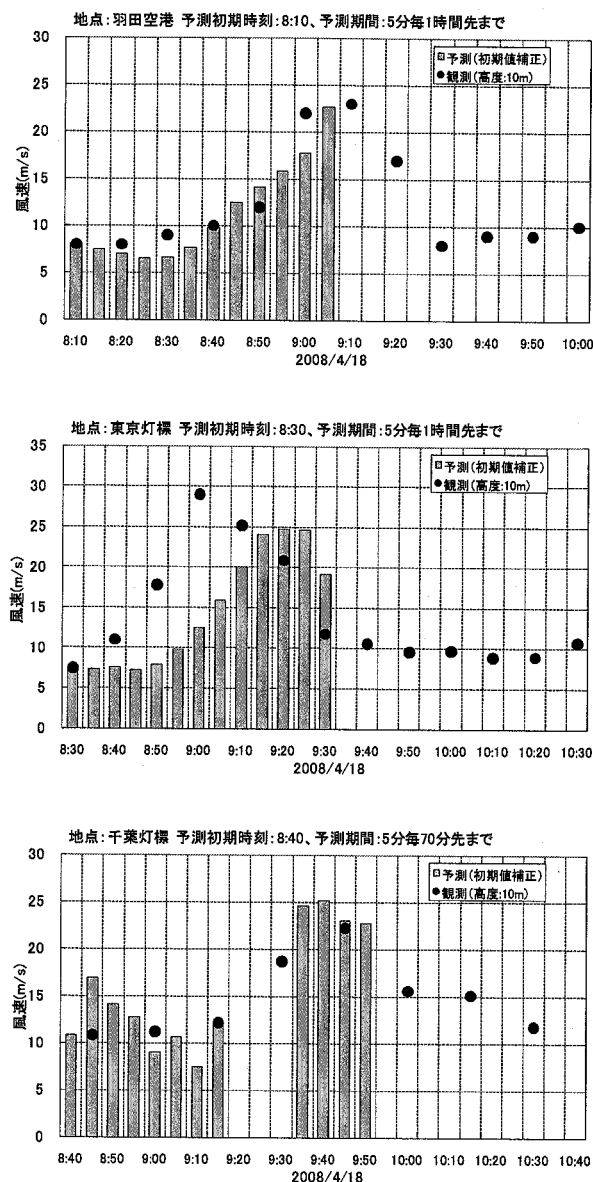


図-5 羽田空港、東京灯標、千葉灯標における風速の観測値(●印)と予測値(棒グラフ)の比較

X-NETレーダネットワークでは5分毎の風観測値がリアルタイムで処理されている。したがって、5分毎に初期値を変えた強風予測を行うことができる。45~50分先の強風予測を評価するために、初期値を変えた予測計算を実施した。観測値が10分毎および15分毎であることから、それに合わせて各観測点について初期値を10分毎および15分毎に変えた計算を行う。風速観測値のピーク出現の前後で、レーダエコーから予測計算が可能な期間を予測対象期間として設定した。羽田空港と東京灯標については7時50

分から9時20分の10分毎の時刻を対象とし、その50分前からの予測値と観測値を比較する。千葉灯標については、8時00分から10時00分の15分毎を対象とし、その45分前からの予測値と観測値を比較する。予測値と観測値の散布図を図-6に示す。予測対象期間すべてに対して、予測値と観測値のペアが揃わないため、サンプル数は多くても10個と限られている。統計的にはサンプル数は十分とはいえないが、相関係数とRMS誤差を表-2にとりまとめる。

各地点とも予測値と観測値は正の相関があり、東

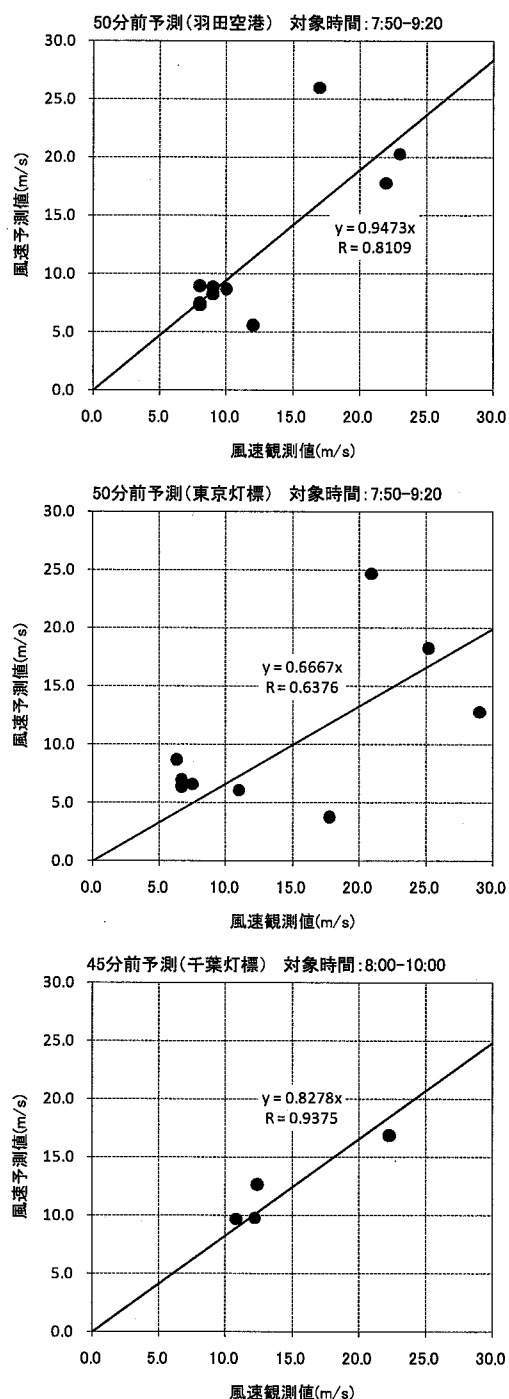


図-6 羽田空港、東京灯標、千葉灯標における風速の観測値と予測値の散布図

京灯標以外の回帰式の傾きは1に近い。東京灯標では図-5に示すように風速ピークの出現時刻がずれたために予測値と観測値の対応が悪くなったと考えられる。RMS誤差では東京灯標を除けば3-4m/s程度の誤差であり、20m/s以上の強風に対しては15-20%程度の風速予測誤差である。45~50分先の強風予測精度としては実用上十分な精度を持っていると考えられる。50分以上先の予測は、強風域を外挿するデータが不十分なため本事例では検証できなかった。

表-2 45~50分先の強風予測精度

観測点	相関係数	RMS 誤差
羽田空港	0.8109	3.9m/s
東京灯標	0.6376	7.4m/s
千葉灯標	0.9375	3.0m/s

5. 結論

本研究により、レーダ実況に基づく強風ナウキャスト手法は、物理モデルが不得意とする短時間予測を補う予測手法として効果的であることが分かった。羽田空港では60分前に20m/s以上の強風の出現を精度よく予測している。海上での予測精度は、東京灯標で強風ピーク出現が遅れて精度が悪いものの、強風が数十分後に出現することは予測できており、港湾域の突風災害軽減にむけた強風予測の新たな手法として、強風ナウキャスト手法が有効であることを確認することができた。

今後の課題として、X-NET観測網における強風発生解析事例を蓄積しサンプル数を増やすことと、前線通過以外の雷雲などの局地現象にともなう強風予測への適用性を検討することが必要である。

謝辞：本研究の実施に際し、東京灯標の風データは東京都港湾局技術管理課から、千葉灯標の風データは海上保安庁海洋情報部よりご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 二瓶章，山崎一雄，水内邦夫：冬季における強風予測手法の検討について，平成 20 年度土木学会全国大会 第 63 回年次学術講演会，2008。
- 2) 真木雅之，前坂剛，岩波越，三隅良平，清水慎吾，加藤敦，鈴木真一，木枝香織，D.I.Lee，D.S.Kim，山田正，平野廣和，加藤拓磨，小林文明，守屋岳，鈴木靖，増田有俊，高堀章：X バンドマルチパラメータレーダネットワークによる豪雨の監視と予測，2008 年度水文・水資源学会講演予稿集，2008。
- 3) 椎葉充晴，高棹琢馬，中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討，第 28 回水理講演会論文集，423-428，1984。
- 4) 立平良三，牧野義久：デジタル化されたエコパターンの予測への応用，研究時報，第 26 巻，1974。