

気圧センサノードを用いた局地的異常気象検知アルゴリズムの提案

大塚 孝信^{1,a)} 鳥居 義高² 伊藤 孝行³

概要: 近年、局地的な豪雨や竜巻といった、従来では考えられない気象現象が発生している。しかし、従来の気象予測システムでは観測ポストが少なく、実データを用いた予測を行うためには観測地点を大幅に増加させる必要がある。我々は、局地的な異常気象の兆候を検知するために小型で安価な気圧情報取得システムを試作した。本研究では、多数の気圧センサの情報を基に、時系列での気圧値の異常を検知することにより、局地的な異常気象を事前に予測及び通報することを目的としたアルゴリズムを提案する。

1. はじめに

近年、局地的な豪雨や竜巻といった、従来の気象システムでは予測が困難な異常気象が多く発生している。これらの異常気象を事前に予測するためには現在の広域気象観測システムに加え、局所的な気象情報を基にした気象予測システムが必要である。しかし、従来の気象観測システムは一般的に高価であり、設置箇所の増加にも限界がある。そのため、我々は局所的な温度と気圧を安価に取得するためのシステムを試作した。本研究では、我々が試作した局所的な環境情報を取得する観測ノードの使用を前提として、時系列での気圧値の異常を検知することにより、局地的な異常気象を事前に予測及び通報することを目的としたアルゴリズムを提案する。

本論文の構成を示す、まず、2章で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。そして、3章で実装した観測システムについて述べる。その後、4章において提案するアルゴリズムについて述べ、5章において実験結果を示す。そして最後に、6章で本稿のまとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

2.1 気象予測システム

現在、我々の生活に気象予測は深く浸透している。我が国での気象予報は、全国各地に設置された気象ポスト、衛

星画像、及びレーダ等により取得された情報を基に、計算機シミュレーションにより気象確率を算出している。近年では、降水の有無に関しては85%程度の確率で正答しており、世界的に見ても信頼性の高い予報システムといえる。近年では、各地に設置されたレーダーサイトや、気象衛星による環境情報の計測が主流となっており、ミリ波レーダーを用いた霧の観測 [Sakamaki 02] や、ドップラーレーダーを用いた竜巻の観測 [Araki 12] がある。また、最新の動向として、電波ではなく、レーザー光を放射して大気中の塵や微粒子からの反射光を受信することで風速を観測する、ドップラーライダーを用いた観測も始まっている [Yasui 13]。更に、気象予測を目的としたシミュレーション研究も広く行われており、雲解像モデルを用いた積乱雲のシミュレーション研究 [Sato 07] や都市や州単位での領域に分割してシミュレーションを行う領域気象モデルに関する研究 [Kusaka 09] などがある。しかし、近年ではこれらのシステムでは予測が困難な局地的な豪雨や、局地的な気圧変化による竜巻などが多く発生している。特に、竜巻に関しては過去10年間で100個以上が観測されており [Niino 97]、予測に関する研究も行われている [Sakurai 08]。竜巻や局地的な豪雨を発生させる原因としてスーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲 [Browning 64] や、局地前線にともなって発生する積乱雲 [Wakimoto 89][Wakimoto 00] が挙げられ、発生原因の解明が望まれている。しかし、竜巻を代表とする局地的な異常気象の発生は幅100から200mの狭い範囲で発生することがあり [水野 07]、都市単位での気象予測システムでは予測に必要な観測データが十分ではない。これら異常気象の予測精度向上のためには、高密度な気圧や温湿度データが必要であるが、気象ポストに代表さ

¹ 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻
Doctor of Information Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

² 名古屋工業大学 情報工学科

³ 名古屋工業大学大学院 産業戦略工学専攻

a) otsuka.takanobu@nitech.ac.jp

れる観測機器は一般的に高価であるため、観測地点の密度を増加させるにも限界がある。我々はまず、局地的な環境情報を取得した上で異常気象の検知を行うことを目的として、大量に設置が可能な安価で設置の手間が少ない環境情報取得装置を試作した。

2.2 局地的な環境情報取得

個人で運用可能な環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている。農業用のワイアレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [memsic] を用いた研究 [Ito 2010] も行われているが、ユニット単価が 10 万円程度と高く、大量に設置するには敷居が高い。更に、民生用の製品として、米デバイス社の Vantage シリーズ [Davis] などがあり、通信装置別途で 6 万円と、比較的低価格であるが専用のアプリケーションでのみ動作可能なため、大規模なデータ収集には向いていない。そのため、我々は、安価なコストで精度よく環境情報を測定可能なシステムを開発し、局地的に発生する異常気象の予測に用いることを目的としている。

3. 環境情報収集システムの試作

3.1 気圧情報取得システム

本研究では、環境情報を取得する観測ノード。取得した環境情報を格納し、異常時にユーザへ通報を行うサーバアプリケーションについて実装した。観測ノードはセンサにより気圧と温度を測定し、3G 回線によりセンシングデータをサーバへ送信する。観測ノードの構成と価格を以下に示す。

- 気圧、温度センサ：SCP1000 1.2 千円
- Arduino UNO 1.5 千円
- Arduino 3G シールド 56 千円
- 3.7V 100mAh リチウムポリマ充電電池 1 千円
- 充電装置：Li-Po ライダ 1 千円
- 1W 80mm*100mm 太陽電池 1 千円

観測ノードは搭載された太陽光発電装置と蓄電池により、外部電源を必要とせず環境情報を測定することができる。また、屋外での使用を想定し、防水加工された筐体を実装した。観測ノードの外観を図 1 に示す。

観測ノードは市販品で構成されており、3G 通信機能を持つ本ノードの構成で 60 千円程度と、既存研究と比較しても安価である。また、3G 通信を Zigbee 等の無線通信で共有することにより、観測ノードひとつあたり 10 千円程度で製作可能であるため、大量に設置が可能である。そのため、既存製品や他研究と比較しても大規模な観測が安価に実現可能である。また、気圧センサ以外にも、温度センサや湿度センサ、及び風速センサといった多様なセンサの接続も可能としている。さらに、太陽光発電装置と蓄電池を内蔵しており、屋外に設置することで永続的な動作を可

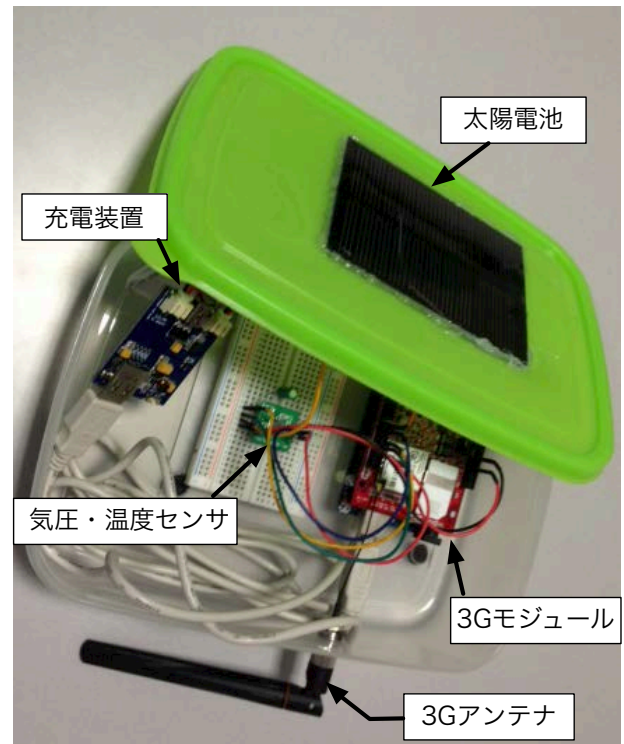


図 1 試作した気圧観測ノード

能としている。

本研究では、我々の試作した観測ノードの使用を前提として、竜巻を想定した異常気象検知アルゴリズムについて提案する。

3.2 サーバアプリケーションの実装

サーバアプリケーションは主として 3 つの機能を備えており、センサデータを時系列で表示するグラフ機能とセンサ名称等を管理できるユーザインターフェース (UI) 部。観測データを格納し、CSV 形式での出力を行うデータベース部。しきい値の設定としきい値を超えた際にユーザへ e-mail 及び SMS へ通報する警報モジュール部に大別される。サーバアプリケーションの概要を図 2 に示す。サーバアプリケーションは web での使用を前提としており、ユーザーは警報時の通報先 e-mail アドレス、SMS 送信先携帯電話番号の登録及び変更やセンサ情報の閲覧を行うことができる。また、個別のセンサをグループとして登録することで、グループ内の他のセンサ情報との比較や、各センサ毎のしきい値の設定を行うことを可能としている。現在では、一定のしきい値による通報機能のみ実装されているが、本研究で提案する異常気象検知アルゴリズムを実装することにより、異常気象発生時の迅速な通報を行うことを目標としている。

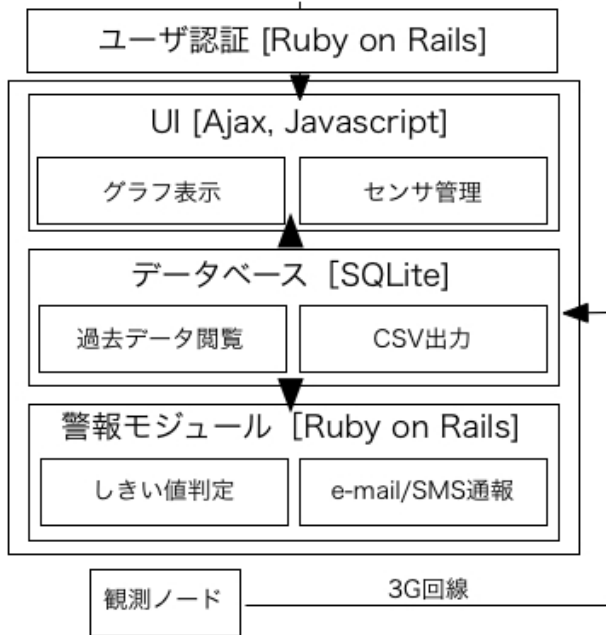


図 2 サーバアプリケーションの概要

4. 異常気象検知アルゴリズムの提案

4.1 異常気象時の気圧変動

本研究で提案するアルゴリズムは、異常気象の際の気圧変化に焦点を当て、異常気象の際に起こる気圧変化を早期に検知し、通報することを目的としている。我々はまず、異常気象の代表的な例として竜巻を選定し、実際のデータを収集した。

- 福岡県福岡市南区向野 1 丁目 図 3
2011 年 8 月 21 日 12 時 35 分頃発生
気象データ観測地：福岡管区気象台, 福岡市中央区
- 秋田県秋田市泉北 図 4
2013 年 11 月 7 日 6 時 47 分頃発生
気象データ観測地：秋田地方気象台, 秋田県秋田市山王
- 茨城県常総市 図 5
2012 年 5 月 6 日 17 時 00 分頃発生
気象データ観測地：高層気象台, 茨城県つくば市長峰
これらの気圧データは、気象庁の提供する観測値 [気象庁] を基に作成しており、竜巻発生地点の近傍観測点のデータである。気象庁の提供するデータは、当日のリアルタイムデータは 60 分毎に更新され、翌日 5 時以降には 10 分毎のデータを閲覧することができる。竜巻発生地点直下のデータではないが、各データとも竜巻の発生以前から気圧の下降が発生し、竜巻発生時には急激な気圧下降が生じていることが見て取れる。いずれの気象データについても、気圧観測地点から竜巻発生地点までは 5km~15km 離れているため、竜巻直下のデータでは更に激しい気圧下降が起きているものとする。また、竜巻は移動するものであり茨城

県で発生した竜巻 [気象庁報道資料] では被害長さが 35km に達するものもあり、竜巻の詳細な気圧データを取得するためには観測地点数を増加するとともに、格子状に配置することで竜巻の移動による詳細な気圧変化が取得可能になると推察される。気象庁報告資料 [水野 07] より抜粋した実際の竜巻の移動経路を図 6 に示す

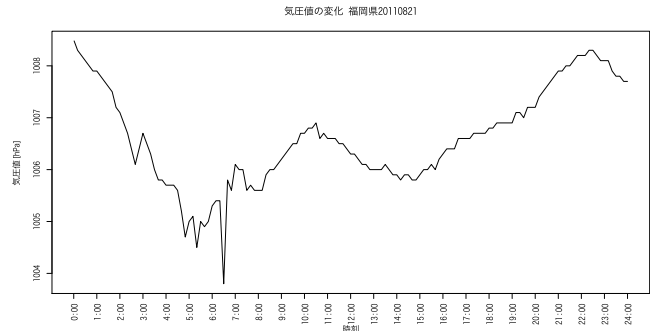


図 3 福岡市における竜巻発生時の気圧観測データ



図 4 秋田県における竜巻発生時の気圧観測データ



図 5 茨城県における竜巻発生時の気圧観測データ

これらの実データにより、竜巻発生初期の段階で気圧降下が発生し、竜巻発生・通過時には急激な気圧降下が起こることを確認した。我々は、竜巻による人的被害を最小限に留めることを目的とし、時系列で気圧変動を監視することにより、竜巻発生時の初期段階で検知することを目的とした異常検知アルゴリズムを提案する。



図 6 竜巻の移動経路 (気象庁報道資料より引用)

4.2 時系列データにおける気圧異常検知

4.1 章で述べたように竜巻の初期発生時の検知には時系列での気圧変化を観察することが重要であることがわかった。また、竜巻が直近に迫っているか、そうでないかについても避難や屋内待機を判断するためにも重要な情報である。そのため、我々は観測ノードを 1000m 間隔の格子状に配置することで、局地的な気圧変化を観測する。更に、個々の観測ノードで取得した気圧データにより竜巻の移動経路を観測することで、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能なシステムを目指している。また、特定の観測ノードが異常値を検出した場合、気圧センサの異常であることも考えられる。そのため、近隣の観測ノードの気圧値と比較することで、機器の不具合なのか、観測データが正しいのかを判断することができる。観測ノードの配置図を図 7 に示す。

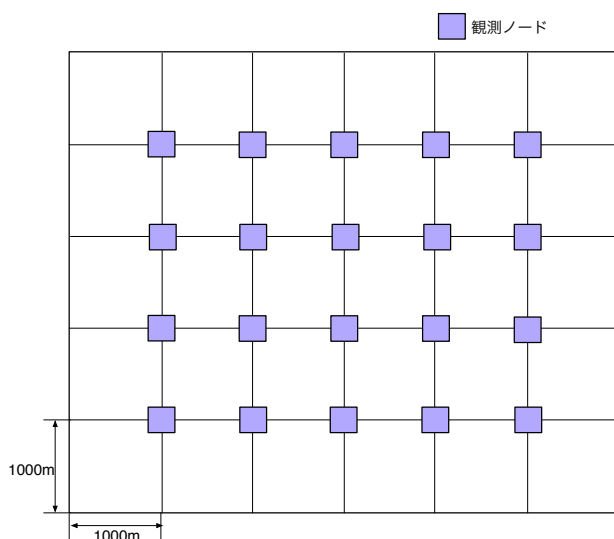


図 7 観測ノードの配置

以上により、各観測ノードの気圧値の変動を監視するこ

とで竜巻の発生初期状態の検知と共に、観測ノード個別の気圧変化を取得することで竜巻の移動経路を把握することができ、竜巻が迫っているのか、離れていくのかについても検知できると考える。

4.3 時系列における異常な気圧データの検出アルゴリズム

次に、時系列における異常な気圧データの検出アルゴリズムについて述べる。各観測ノードの気圧データは式 (1) で表される。観測ノードにおける気圧データは X_{node} で表され、取得した時間のデータは時刻 t 、日付 d 、年 y で表される。

$$X_{node}(t, d, y) \quad (1)$$

次に、時系列における気圧変動を式 (2) によりスコアリングする。各観測ノードの時刻ごとのスコアは min で指定する過去のデータの二乗誤差で計算され、時系列における気圧データの変動をスコアとして出力する。現在は $min = 5$ と設定し過去 5 分間の気圧測定データと比較することでスコアを算出している。

$$val_{node}(t, d, y) = \sum_{i=-1}^{min} \{x_{node}(t, d, y) - x_{node}(t - i, d, y)\} \quad (2)$$

更に、提案したアルゴリズムによって時系列での異常がスコアリング可能であることを確認する。テスト気圧データは、4.1 章にて述べた実際の竜巻発生時の気圧を用いて、式 (2) によりスコアリングする。スコアは、過去 5 分間に気圧の変動がない場合は 0 に近づき、過去 5 分間の気圧変動が大きくなるほど値が増加する。テストデータのスコアリング結果を福岡市における竜巻発生時のスコアリング結果を図 8 に、秋田県における竜巻発生時のスコアリング結果を図 9 示し、茨城県における竜巻発生時のスコアリング結果について図 10 に示す。

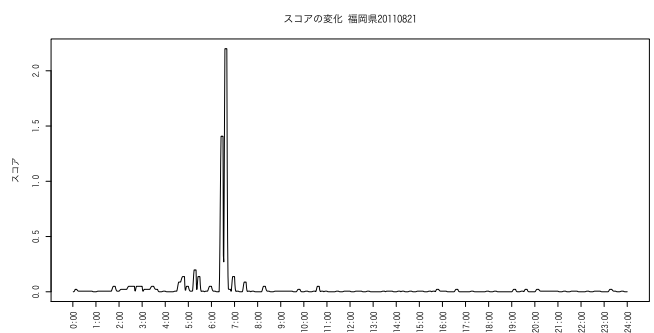


図 8 福岡市における竜巻発生時のスコアリング結果

スコアリング結果を観察すると、気圧変化に従ってスコ

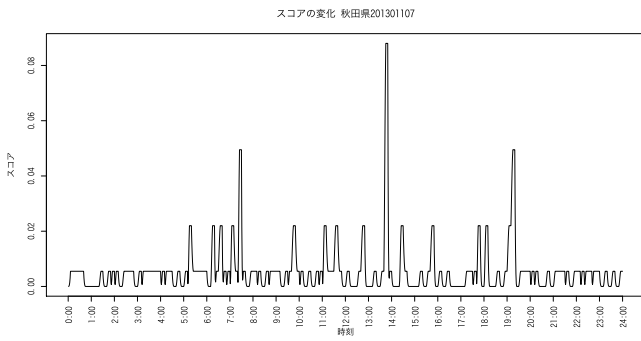


図 9 秋田県における竜巻発生時のスコアリング結果

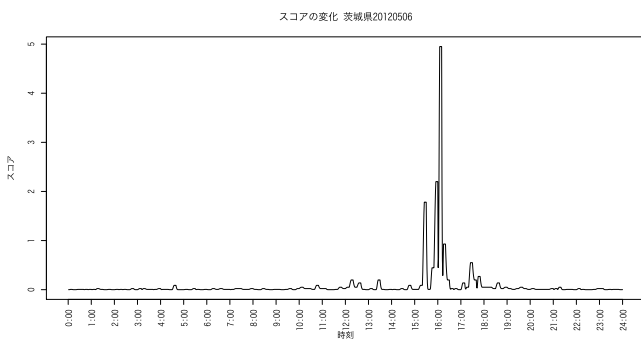


図 10 茨城県における竜巻発生時のスコアリング結果

ア値が増加しているのがわかる。更に、竜巻の接近時気圧の最低値以前にスコア値の大幅な変化が観測できる。本結果により、時系列での気圧変動が検知可能であることを示すとともに、竜巻の初期段階での検知が可能であることを示した。

5. 評価実験

5.1 実験設定

本章では評価実験に使用した実験設定について述べる。本実験では、竜巻が発生した際の最近傍ノードの気圧変化に加え、隣接するノードの気圧変化についてもスコアリングを行った。竜巻の最近傍に観測ノード A、隣接する 2 つのセンサを観測ノード B 及び観測ノード C と設定した。

各ノードには竜巻発生時の気象データを参考にし、ダミーの気圧データを生成している。各データの特徴を以下に示す。

- ノード A：竜巻直下の気圧データを想定（実際の竜巻データを基に生成）
- ノード B：竜巻近傍の気圧データを想定（ノード A の変化量の半分を 30 分遅れて生成）
- ノード C：竜巻よりやや離れた位置での気圧データを想定

以上のダミーデータを生成し、スコアリングを行うことで、竜巻の初期発生時の検知及び、隣接する観測ノードとの関係を把握できるかを確認する。

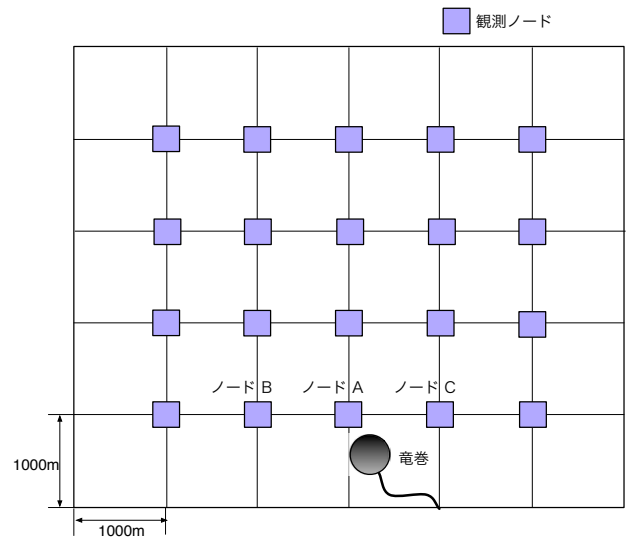


図 11 観測ノード

5.2 実験結果

5.1 章で設定した実験環境を用いて、各観測ノードのスコアを算出した。図 12 に使用した気圧値を示し、図 13 にスコア出力結果を示す。

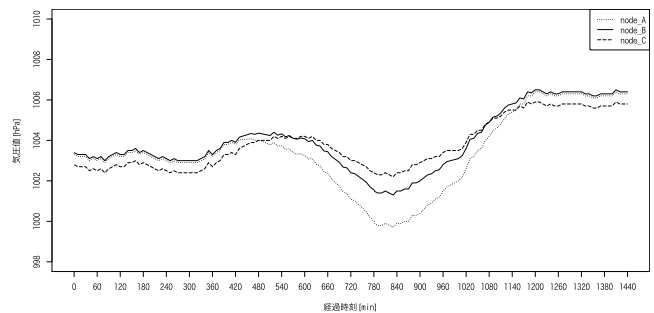


図 12 生成した気圧値の出力結果

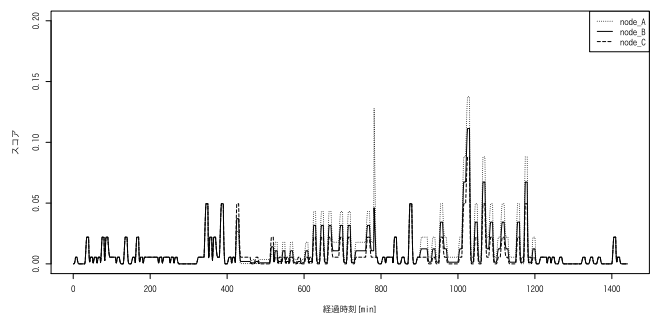


図 13 スコア値の出力結果

スコア算出結果を見ると 4.3 項での検証結果と同様に、竜巻の発生初期段階で異常なスコアが検出されていることから、竜巻の初期段階での異常が検出でき、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能なシステムを目指している。また、特定の観測ノードが異常値を検出した場合、気圧セ

ンサの異常であることも考えられるが、今回のノード群のように、隣接した観測ノードに同一傾向が見られる場合は観測データは正しく、気圧の異常値が観測されていることがわかる。以上のように、本研究の提案するアルゴリズムを用いて、局地的な異常気象の検知が可能である。また、複数の観測ノードの値を比較することにより、センサそのものの異常なのか、観測値が異常なのかを判断することも示した。今後は、気象庁の提供する過去データを蓄積し、実測値と比較することで精度の向上を目指す。また、環境情報観測装置についても小型化を進めるとともに、Zigbee通信によるノードの低価格化についても実装する。

6. まとめと今後の課題

本研究では、局地的な異常気象の予測を目的とした安価な環境情報収集システムを実装した。また、実際の竜巻発生時の気圧変化を用いて観測地点の急激な気圧変化を判断できることを示した。更に、竜巻の初期発生時に異常を検知できることを示した。そのため、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まらざるべきかを判断可能であり、人的被害の軽減にも役立つと考える。また、特定の観測ノードが異常値を検出した場合、気圧センサの異常であることも考えられるが、今回のノード群のように、隣接した観測ノードに同一傾向が見られる場合は観測データは正しく、気圧の異常を正しく判断することも示した。今後は、実際に観測ノードを設置しデータ収集を行うとともに、温湿度や風速センサ、及び気象庁の過去データの蓄積などのデータを総合し判断することで精度の良い異常検知及び予測システムを実装していく。

今後は、観測地点を増やすとともに長期実験を行うことで異常検知の手法を研究していく

謝辞 本研究の一部は、内閣府の先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発プログラム）により助成を受けている。

参考文献

- [Ito 2010] 伊藤昌毅. "センサネットワーク技術を活用した環境モニタリングの実現." 電気学会研究会資料. IIS, 次世代産業システム研究会, IEEE Japan. Vol. 2010. No. 66. 2010.
- [Sakamaki 02] 酒巻 洋, 若山 俊夫, 白石 将, 田中 久理, 藤坂 貴彦, 植松 明久, 手柴 充博, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, "ミリ波気象ドップラーレーダーによる霧検出", 日本気象学会, 日本気象学会大会講演予講集, 2002.
- [Araki 12] 荒木 健太郎, 新野 宏, 加藤 輝之, "2011年4月25日に千葉県で発生した竜巻とその親雲のドップラーレーダー解析", 日本気象学会, 日本気象学会大会講演予講集, 2012.
- [Yasui 13] 安井 元昭, 石井 昌憲, 岩井 宏徳, "ドップラーライダーによる新しい気象観測:一光による豪雨をもたらす気流の計測技術", The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.133, No.3, The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2013
- [Sato 07] 佐藤正樹. "全球非静力学モデルへの道." 日本気象学

- 会論文誌, 日本気象学会, Vol.54, 2007.
- [Kusaka 09] 日下博幸. "領域気象モデル WRF について (特集: 次世代気象モデルの開発事例と気象シミュレーションの最先端)." ながれ: 日本流体力学会誌 28.1 (2009): 3-12.
- [Browning 64] Browning, Keith A., 1964: Airflow and Precipitation Trajectories Within Severe Local Storms Which Travel to the Right of the Winds. J. Atmos. Sci., 21, pp.634-639.
- [Wakimoto 00] Wakimoto, Roger M., Huaqing Cai, 2000: Analysis of a Nontornadic Storm during VORTEX 95. Mon. Wea. Rev., 128, 565-592.
- [Wakimoto 89] Wakimoto, R.M., and J.W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. Mon., Wea. Rev., 117, 1113-1139.
- [memsic] MEMSIC .inc, Wireless Sensor Network, "Eko", <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/>
- [Davis] Davis Instruments, "Whether Products", <http://www.davisnet.com/weather/>.
- [気象庁] 気象庁, "天気予報の精度検証結果", http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/yohohyoka_top.html
- [Niino 97] Niino, Hiroshi, Tokunosuke Fujitani, Nobuyuki Watanabe, 1997: A Statistical Study of Tornadoes and Waterspouts in Japan from 1961 to 1993. J. Climate, 10, 1730?1752.
- [Sakurai 08] SAKURAI Keita, KAWAMURA Ryuichi, "日本における竜巻発生環境場と予測可能性", 気象学会会誌 天気, 日本気象学会, 2008, vol. 55, no.1
- [水野 07] 水野 孝則, 新野 宏, 小林 文明, 鈴木 修, 加藤 輝之, 坪木 和久, 田村 幸雄, 赤枝 建治, 海老原 智, "気象学会主催「竜巻シンポジウム」報告", 日本気象学会, 2007.
- [気象庁] 気象庁, "過去の気象データ検索", <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- [気象庁報道資料] 気象庁報道資料, "2012年(平成24年)5月6日茨城県・栃木県で発生した竜巻について", <http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/tyousa-houkoku.pdf>