

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03805

研究課題名(和文) 新たな建物強風被害ハザード提案に向けた積雲対流下のドップラーライダー観測

研究課題名(英文) Doppler lidar observation of wind profile under cumulus convection for establishing a state-of-the-art wind hazard

研究代表者

丸山 敬 (MARUYAMA, TAKASHI)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00190570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ドップラーライダーと気象レーダー等を組み合わせた立体的フィールド観測を行って、地表面摩擦に起因する「風の乱れ」だけでなく、積雲対流下の上昇・下降流に由来する「突風」を含んだ境界層の発達および地面付近の変動風速場の性状を明らかにした。次に、これら積雲対流下で起こる上昇・下降流および境界層内で観測された気流性状を再現・予測できる解析手法を構築し、観測と同様な流れ場の再現・予測計算を可能にした。これにより、地表面上に発達する乱流境界層が積雲対流下の上昇・下降流を伴う場合の気流性状について、パラメータスタディを行ってその特性を明らかにし、「新たな強風ハザード」の提案に資するデータを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物被害の原因となる強風特性に関して、これまで地表面摩擦に起因する「風の乱れ」だけが考慮されてきたが、ダウンバーストや竜巻、ガストフロントなど局所的ではあるが激甚な建物被害を引き起こす極端気象現象が明らかになるにつれ、これら積雲対流下の上昇・下降気流に由来する風速の急変を伴う「突風」を考慮した「新たな強風ハザード」が求められている。本研究は、地表面摩擦による「風の乱れ」だけでなく、積雲対流による「突風」の影響を予測・評価できる変動風速場の解析手法を構築し、これにより、最大瞬間風速も評価できる「新たな強風ハザード」の提案に資するデータを得、強風建物被害の低減に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Field observation of wind profile near the ground has been carried out by using a doppler lidar and meteorological radars. Characteristics of fluctuational wind under cumulus convection and the growth of boundary layer including not only the effect of ground friction caused by surface roughness but also the effect of gust caused by up/down draft was examined and clarified. The calculation method was constructed to simulate and to predict the flow fields in the boundary layer under cumulus convection. The boundary condition was downscaling from meteorological model WRF. The surface roughness was obtained from GIS and evaluated by the canopy model. The transport equation of temperature and the cloud-resolving model was used resulting that the up/down draft was generated under the cumulus convection. The parameter study on the fluctuational wind has been carried out and obtained the characteristics of the wind flow contributing to establishing a state-of-the-art wind hazard.

研究分野：建築耐風構造

キーワード：ドップラーライダー 立体的フィールド観測 強風ハザード 積雲対流 突風 境界層 レーダー観測 強風被害

1. 研究開始当初の背景

平成26年の東北地方への台風の直接上陸はこれまでの記録にないもので、わが国における気候変動の象徴的事象の一つであり、さらに、ゲリラ豪雨や線状降雨帯による集中豪雨や、F3クラスの竜巻による強風などの極端気象現象に起因する災害も多発している。このように、地球温暖化による極端気象現象の増加とそれに伴う被害の激甚化・頻発化（IPCC 報告 AR5,2013）は、気候変動を視野に入れた社会と経済の構造変化への対応策を喫緊の課題として突きつけている。

災害に対する政策決定と住民合意を円滑に進め、防災・減災対応の実効性を高めるにはタイムラインに即して対応案を提示することが不可欠である。このとき、被害予測は対応案策定の要となるが、正確な予測は災害発生の原因となる強風ハザードの予測精度に左右される。現在のところ、強風ハザードは確率台風モデルやメソ気象モデルにより求められた平均風速に基づいているのが現状である。建物被害にとって最も危険な風速値である最大瞬間風速の評価・予測には、地表面摩擦による「風の乱れ」や、積雲対流による「突風」の影響を取り込んだ変動風速場の解析手法の構築が不可欠であるが、未だ開発途上であった。特に、「突風」の発生原因となる積雲対流下の気流性状に関しては系統的な観測と定量的な解明が進んでいないのが現状であった。

そこで、接地境界層内の地表面摩擦による「風の乱れ」および積雲対流下の「突風」現象（図1）を解明し、変動風速場の解析手法を構築するための検証用データを取得することは喫緊の研究課題であると考え、本研究の分担者らにより行われている各種レーダーやゾンデ観測を用いた広域上空風および積雲の発生・発達に関する総合的な研究（基盤研究(S), H27～H31；基盤研究(B)（一般）, H28～H30；基盤研究(S), H28～H32）と、補完的かつ緊密な連携によるドップラーライダー観測を基軸とした立体的フィールド観測を行う本研究を計画した。



図1 建物被害を引き起こす強風の原因

2. 研究の目的

建物被害の原因となる強風特性に関して、これまでは地表面摩擦に起因する「風の乱れ」だけを考慮してきた（建築基準法、建築物荷重指針・同解説）が、観測技術の進歩に伴いダウンバーストや竜巻、ガストフロントなど局所的ではあるが激甚な建物被害を引き起こす極端気象現象が明らかになるにつれ、これら積雲対流下の上昇・下降気流に由来する風速の急変を伴う「突風」を考慮した「新たな強風ハザード評価」が正確な被害予測に不可欠であることが判ってきた。しかし、従来の強風ハザードを求める確率台風モデルやメソ気象モデルでは、建物にとって最も危険な最大瞬間風速を予測するには時空間解像度が十分ではなく、「風の乱れ」や「突風」の影響を予測・評価することができないのが現状である。そこで、地表面摩擦による「風の乱れ」の影響を受ける「接地境界層」において、積雲対流による「突風」の影響を予測・評価できる変動風速場の解析手法を構築して、最大瞬間風速も評価できる「新たな建物強風被害ハザード」の提案に資するデータを取得するため、本研究では以下の項目の達成を目標とした。

- 1) ドップラーライダー観測を基軸に、レーダー観測などを組み合わせた立体的フィールド観測を行い、建物強風被害の予測手法の開発・精度検証を行うための変動風速場の観測データを、新たな視点で収集・分析する。

- 2) 接地境界層内変動風速場に関して、地表面摩擦だけでなく積雲対流の影響を考慮した観測データの収集・分析を行う。
- 3) 接地境界層内変動風速場の予測手法を構築する。
- 4) 積雲対流の影響を考慮した地面付近の風速変動特性を取り込んだ建物被害発生の危険度を評価できる、「新たな被害風速ハザード」の提案に資するデータを取得・提供する。

3. 研究の方法

(1) ドップラーライダーによるフィールド観測

本研究では積雲対流下の突風性状の把握のために、レーザー光を上方に固定して照射し高さ方向に風速分布を測定することができる上方スキャン型のドップラーライダーと、それを搭載する自動車を購入して機動的な観測を行った。神戸において、研究分担者らが展開する広域上空風および積雲に関する観測と補完的かつ緊密に連携した立体的フィールド観測を行い、積雲発達時の都市域における接地境界層の発達の特性を明らかにするための観測データを得た。さらに、場所を沖縄に移し、積雲対流が安定して発生する冬季の季節風の吹き出し時を狙って観測を行った。沖縄の観測では、ドップラーライダーを沖縄県糸満市の沖縄県農業研究センター内に設置し、中頭郡西原町の琉球大学や南城市の気象庁の気象観測レーダー、さらに、ゾンデ観測による上空風および積雲の観測と連携して接地境界層内の風速観測を行った（図2）。

観測期間中、前線の通過等により急激な風速変化が起こった際の上空の風速変化を捉えることができた。2020年2月16日11時ごろに沖縄の観測地点を寒冷前線に伴うレインバンドが通過した事例（図3）を例に、得られた接地境界層内の気流性状を紹介する。沖縄県農業研究センターのドップラーライダーの観測記録（図4）をみると、前線通過時の風向は南西から北北東に急変し、地上付近の風速は前線通過後上昇した。前線通過直後の11時以降は降雨のため風速の観測記録の状態が良くないが、12時以降になると雨がやんで良好な観測データが得られている。

前線通過後の地上付近の風速をみると、風速が増加する前に下降流が大きくなり、風速が減少する前に下降流が小さくなる傾向が見られ、積雲下の対流により上空の速度の速い空気塊が降



図2 沖縄における観測網

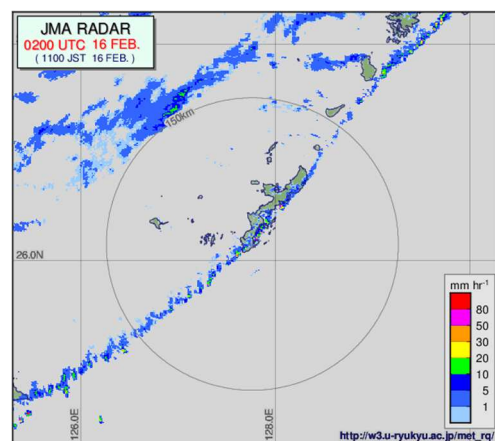
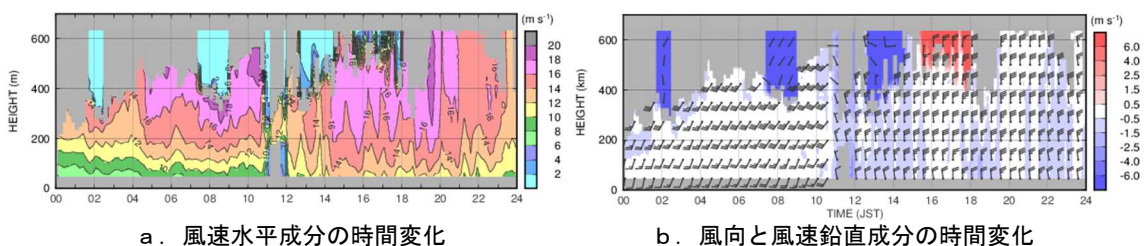


図3 2020年2月16日11時のレーダーエコー（気象庁・沖縄レーダー観測所提供）



a. 風速水平成分の時間変化

b. 風向と風速鉛直成分の時間変化

図4 ドップラーライダーの観測記録（2020年2月16日）

下してくる様子が示唆される。また、図5に示す通り、前線通過前（10時10～20分）の南西風では鉛直方向の風速勾配が、通過後（13時10～20分）の北風に比べて大きいのも特徴である。観測地点の北側是那覇の市街地に続いており、南西側よりも陸地の吹送距離が長く、また地表面粗度も大きいと考えられる。鉛直方向の風速勾配が地面との摩擦力により決まるのであれば、北風の方がより高くまで境界層が発達し、上空でも風速勾配は大きくなるはずである。しかし、観測記録は北風の方が風速勾配が小さくなっていることを考えると、前線に伴う積雲対流により、上空の速度の大きな空気と下層の空気の混合が促進されていると考えられる。

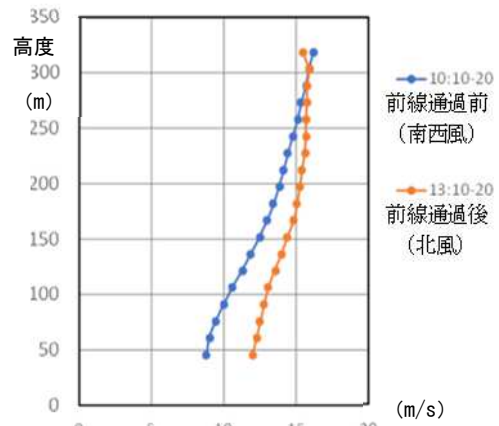


図5 10分間平均風速（水平成分）のプロファイル

このように従来の風荷重算定時に用いられている地表面摩擦による「風の乱れ」によって形成される風速分布とは異なる結果を示す観測が得られた。このことは、強風・突風時の風荷重を精度よく予測し、強風による建物リスク低減のための強風ハザードを評価するためには、接地境界層内において地表面摩擦による「風の乱れ」だけでなく積雲対流による「突風」の影響を受けた変動風速場を再現できる解析手法が必要であることを示唆している。

(2) 接地境界層内変動風速場の解析手法の構築

広域上空風の解析：

地面付近の接地境界層内の変動風速場の解析にあたって、流入条件および初期条件を与えるために、広域の上空風のデータを作成する必要がある、これには風速場の情報だけでなく、積雲の発生・発達の情報が必要になる。本研究では、メソ気象モデルであるWRFを用いた解析を行い、観測サイト周囲の広域気象場を再現した。図3に示した前線通過時の再現計算結果を図6に示す。観測された風速場が再現されており、前線面において、風向が南西から北東に変化する様子や、前線の後ろに積雲対流下の下降流の領域が見えている。

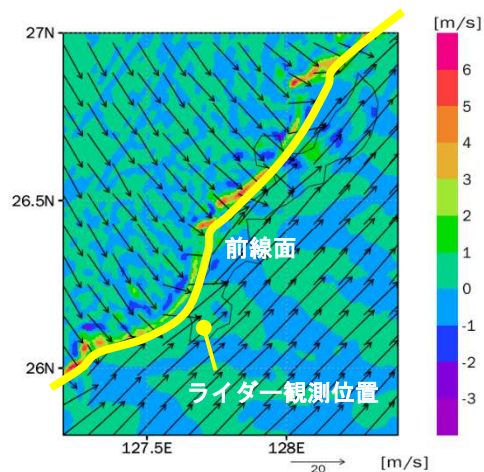


図6 メソ気象モデルWRFによる再現計算結果
色付きコンターは1200mにおける鉛直風速、
矢印は500mにおける水平風向

地表面摩擦の影響を取り込んだ解析：

建物の強風被害に直接関係する地面付近の変動風速場を再現するために、非定常な乱流場を計算することができるラージ・エディシミュレーション（LES）を用いる。地表面摩擦の影響はキャノピーモデルを用いたLES（丸山，2004）により地表面粗度を空力抵抗として評価して取り込み、接地境界層内の変動風速場を再現した（図7a）。キャノピーモデルにおいて空力抵抗を評価するために必要となる粗度形状は、地理情報システム（GIS）上の地形や建物形状、土地利用の数値情報データから求めた。さらに、積雲対流下の下降流を再現するために、温度の移流拡散も計算できるようにした（内田ら，2021）。これにより上空に冷気塊を設定し、積雲対流による冷気塊が上空から下降してくる様子を模擬することにより、地面付近で風速が増加し、観測と同じように風速分布が変化の様子が再現された（図7b）。

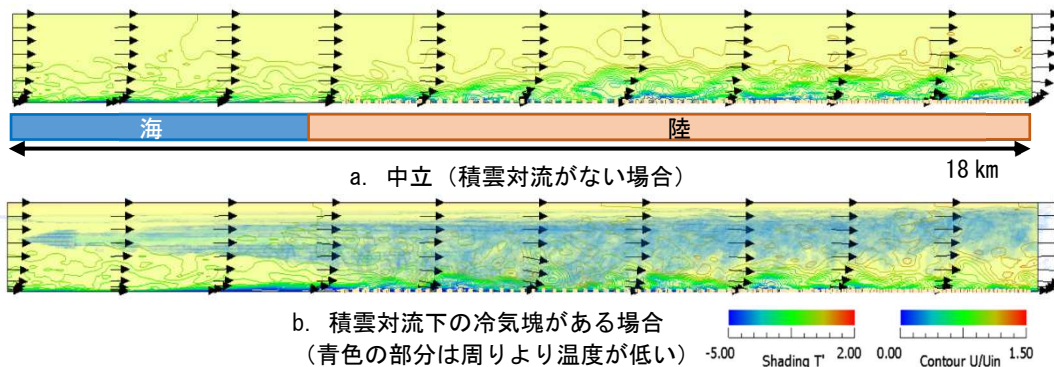


図7 LES解析による風速プロファイルの変化（瞬間値）

風が海側（表面粗度が滑らか）から陸上（粗度が粗い）に向かって吹く際の風速分布の変化

積雲対流の影響を取り込んだ解析：

積雲対流の解析が可能な雲物理モデルをLESに導入し（山口ら，2016）、積雲対流下の接地境界層内の変動風速場を計算した。計算に必要な初期条件および境界条件には、気象モデルによる広域上空風場の解析結果を用いた。図8に示すように、前線の通過後に上昇・下降流が交互に出現している様子が再現された。

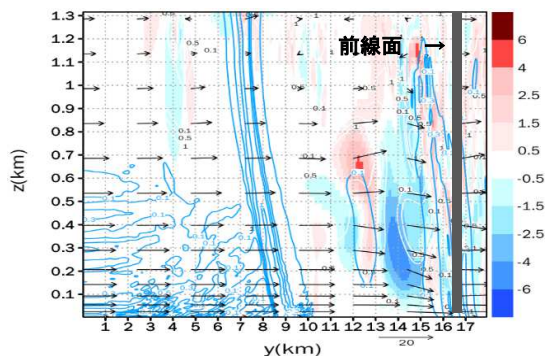


図8 接地境界層内の再現計算、色付きコンターは風速鉛直成分（青色部分は下降流）

4. 研究成果

ドップラーライダーと気象観測レーダーやゾンデ観測による上空風および積雲の観測と連携した立体的フィールド観測を行い、接地境界層の発達および積雲対流下の変動風速場の特性を測定できる体制を整えた。これにより、神戸および沖縄において積雲発達時の接地境界層の発達の特性を明らかにするための観測データを得た。さらに、接地境界層内の変動風速場を再現・予測可能な解析手法を以下のように構築した。

- ・流入条件および初期条件を与えるための広域の上空風のデータを、観測値に対応した条件で、気象モデルを用い、再現計算ができるようにした。
- ・地上付近の非定常な乱流場の計算に地表面摩擦の影響を取り込むために、ラージェディ・シミュレーションにキャノピーモデルを組み込み、地表面粗度を空力抵抗として評価できるようにした。地表面粗度は、地理情報システム上の地形や建物形状、土地利用の数値情報データから求めることができるようにした。さらに、温度の輸送、積雲対流の解析が可能な雲物理モデルを組み込んで、積雲対流下の上昇・下降流の再現計算ができるようにした。
- ・これらを使って、地表面上に発達する乱流境界層内の気流性状が、上空の積雲対流下の下降気流によってどのように変化するかを、地表面粗度、下降流の頻度や強度によるパラメータスタディを行った。

以上により得られた接地境界層内の変動風速場の情報をもとに、地表面摩擦に起因する「風の乱れ」だけでなく積雲対流下の上昇・下降気流に由来する「突風」の影響を考慮し、最大瞬間風速も評価できる「新たな建物強風被害ハザード」の評価・提案に資するデータが得られた。

参考文献

- ・丸山 敬: LESによる粗面上の乱流境界層の数値計算, 第18回風工学シンポジウム論文集, 2004.12, pp.57-62.
- ・内田孝紀・高桑 晋: 複雑地形における風力資源の数値予測に対する大気安定度の影響, 日本風力エネルギー学会論文集, 2021, 印刷中.
- ・山口弘誠, 高見和弥, 井上実, 中北英一: 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮する LES 気象モデルの開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 第72巻, 2016, pp.L205-L210.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 丸山 敬・竹見哲也・山田広幸・山口弘誠	4. 巻 64B
2. 論文標題 前線通過時のドップラーライダーによる強風観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所年報	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 丸山 敬・竹見哲也・山田広幸・山口弘誠	4. 巻 46
2. 論文標題 ドップラーライダーによる前線通過時の強風観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本風工学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ginaldi Ari Nugroho, Kosei Yamaguchi, Eiichi Nakakita, Masayuki K. Yamamoto, and Seiji Kawamura	4. 巻 17
2. 論文標題 Utilization of high-resolution boundary layer radar and wavelet to detect microscale downdraft-updraft combination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2021-010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 山口弘誠, 千賀幹太, 中北英一	4. 巻 63B
2. 論文標題 都市気象LESモデルを用いた豪雨の種となる熱的上昇流と渦管の組織化の解明	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所年報	6. 最初と最後の頁 190-204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kosei Yamaguchi
2. 発表標題 Collaboration of CPM, LES, and observation in high-resolution
3. 学会等名 International Workshop on Convection-Permitting Modeling for Climate Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千賀幹太, 山口弘誠, 中北英一
2. 発表標題 都市気象LESモデルを用いた豪雨の種となる熱的上昇流と渦管の組織化の解明
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川中子ひかる, 山田広幸
2. 発表標題 ドップラーライダーで観測された寒冷前線に先行する気流構造の変動
3. 学会等名 気象学会沖縄支部 研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹見 哲也 (TAKAMI TETSUYA) (10314361)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 広幸 (YAMAADA HIROYUKI) (30421879)	琉球大学・理学部・准教授 (18001)	
研究分担者	山口 弘誠 (YAMAGUCHI KOUSEI) (90551383)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関