

## 前線通過時のドップラーライダーによる強風観測

### Observation of Strong Wind Fields during Passage of Cold Front by Doppler Lidar

丸山 敬・竹見哲也・山田広幸<sup>(1)</sup>・山口弘誠

Takashi MARUYAMA, Tetsuya TAKEMI, Hiroyuki YAMADA<sup>(1)</sup> and Kosei YAMAGUCHI

(1) 琉球大学

(1) Ryukyu University, Japan

#### Synopsis

Field observation of wind fields 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. Some observed cases with the down flow under cumulus during passages of cold front were examined. The wind fields were simulated by large eddy simulation with canopy model, cloud physics model and boundary condition from simulated wind field by meteorological model WRF. The simulated wind fields consist with the observation. The wind speed near the ground increases with the down flow under the cumulus convection.

**キーワード:** ドップラーライダー, 強風, フィールド観測, 積雲対流, 境界層, レーダー観測

**Keywords:** doppler lidar, strong wind, field observation, cumulus convection, boundary layer, radar observation

#### 1. はじめに

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る。

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 (Fig. 1) を解明し、変動風速場の解析手法を構築するための検



Fig. 1 Origin of strong wind which causes damage on houses and buildings

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) ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究, H27～H31；基盤研究(B)（一般）流域上空大気と地上部での多様な水文観測に基づく3次元水循環モデルの構築, H28～H30；基盤研究(S) 豪雨と暴風をもたらす台風の力学的・熱力学的・雲物理学的構造の量的解析, H28～R2）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。

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と考えられる。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得るため、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。

## 2. ドップラーライダーによる観測結果

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と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（Fig. 2）。

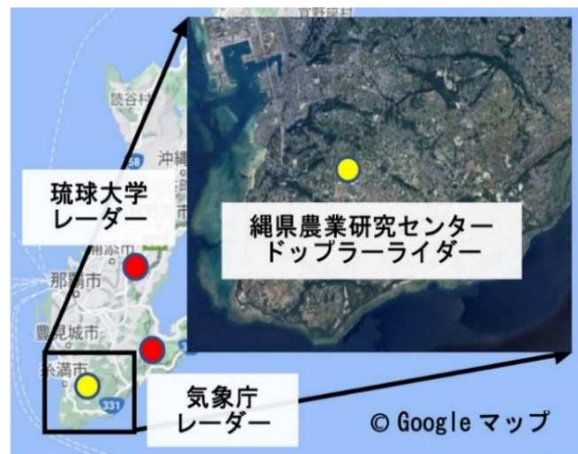


Fig. 2 Layout of observation devices

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（Fig. 3,4）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（Fig. 5）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止んで良好な観測データが得られている。

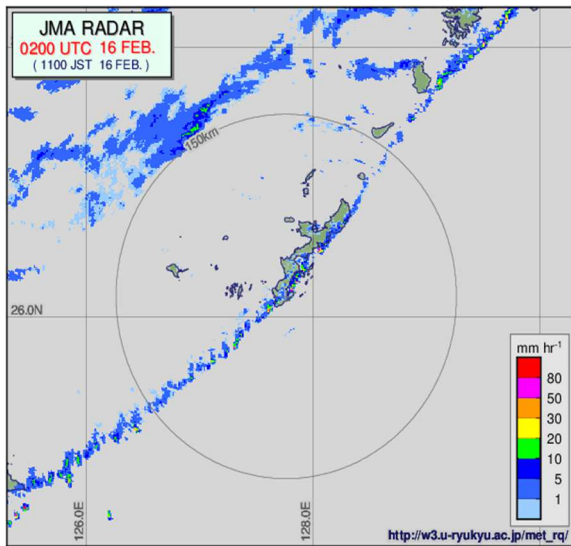


Fig. 3 Radar echo on February 16, 11:00am, 2020. Okinawa radar JMA

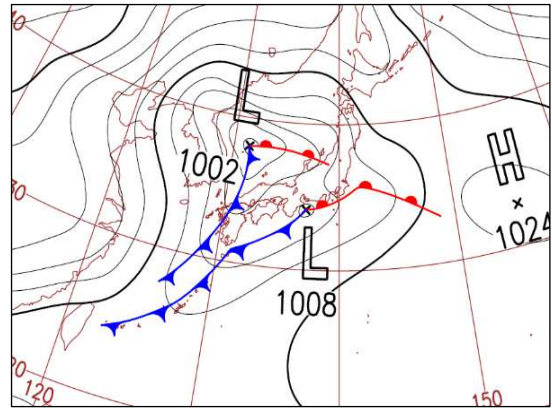
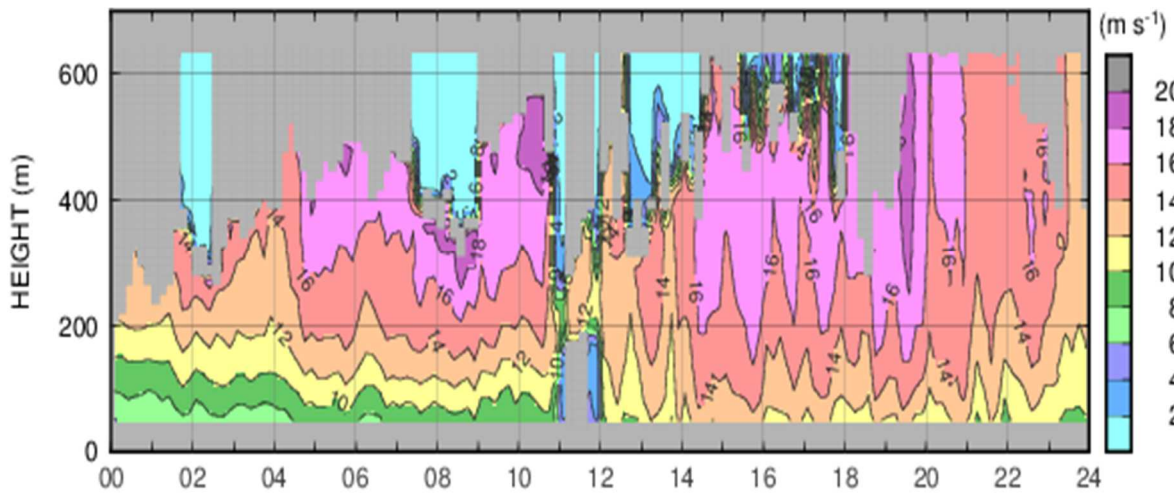
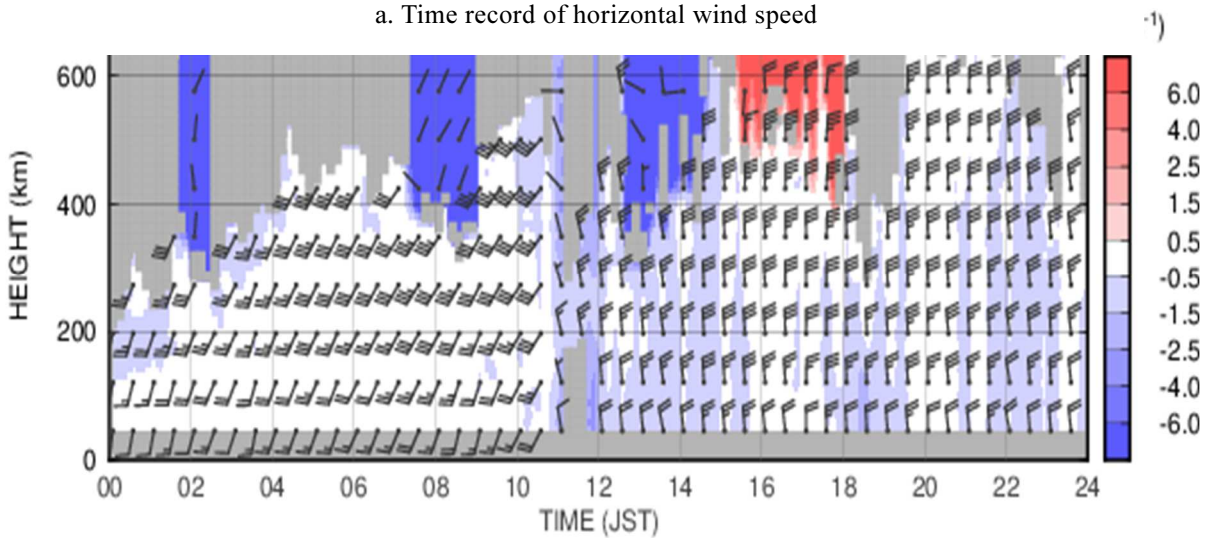


Fig. 4 Weather map on February 16, 9:00am, 2020. JMA



a. Time record of horizontal wind speed



b. Time record of vertical wind speed and wind direction

Fig. 5 Observed record by doppler lidar on February 16, 2020.

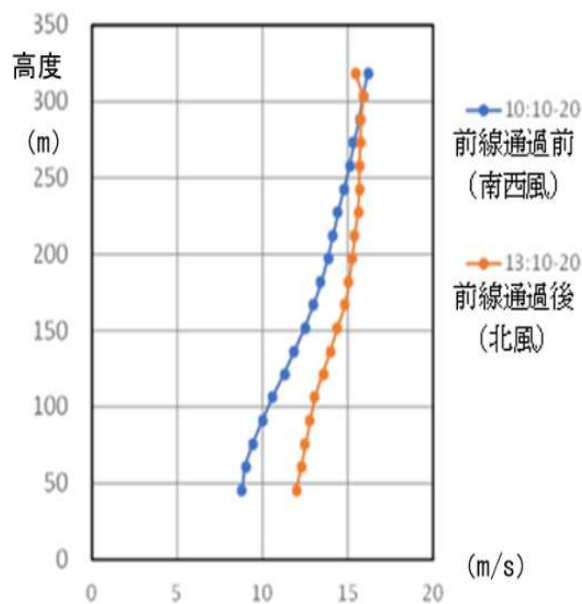


Fig. 6 10 minutes averaged mean wind speed profiles. Observed by doppler lidar before (10:10-20) and after (13:10-20) the passage of cold front on February 16, 2020.

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下してくる様子が示唆される。また、Fig. 6に示す通り、前線通過前（10時10～20分）の南西風では10分間平均水平風速の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。観測地点の北側は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下の下降気流により、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。

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。

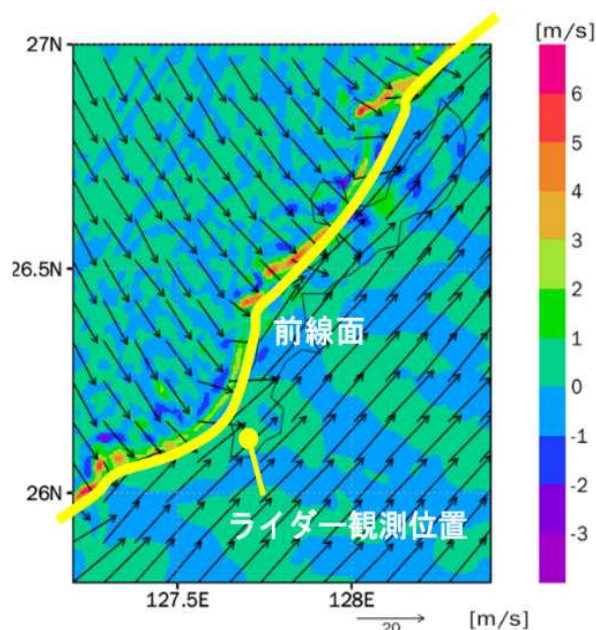


Fig. 7 Wind field calculated by WRF on February 16, 11:00am, 2020. Color contour shows vertical wind speed at 1200m, vector shows horizontal wind velocity at 500m.

### 3. 接地境界層内変動風速場の解析

#### 3.1 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。Fig. 3,4に示した前線通過時の再現計算結果をFig. 7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。

#### 3.2 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（Fig. 8 a）。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。

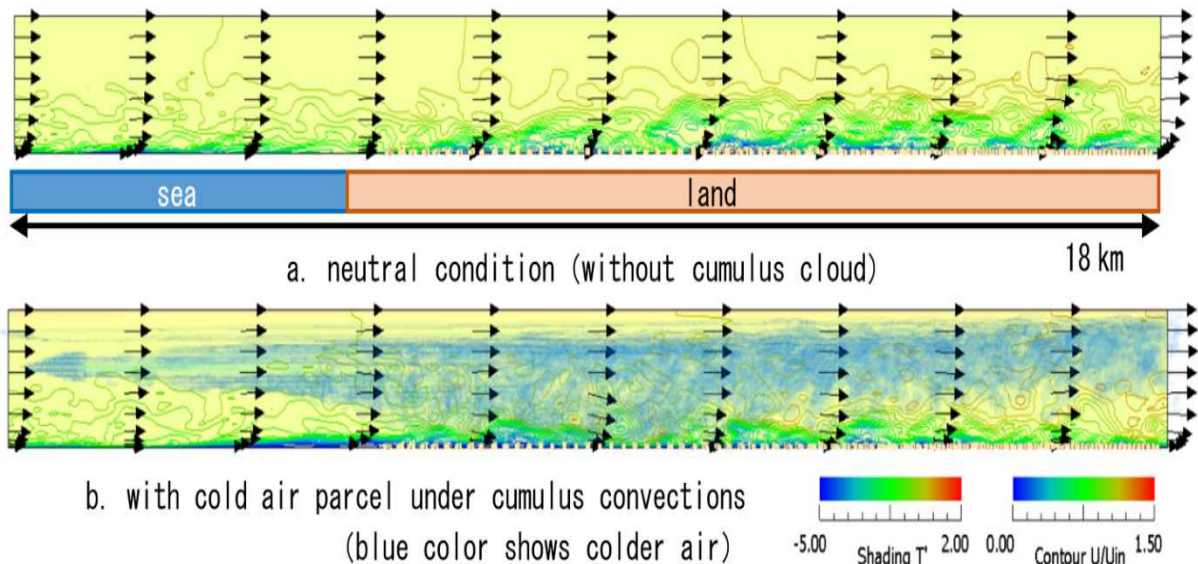


Fig. 8 Instantaneous wind fields over roughness change surface from smooth (sea) to rough (land) calculated by LES. Variation without and with cold air parcel under cumulus convection.

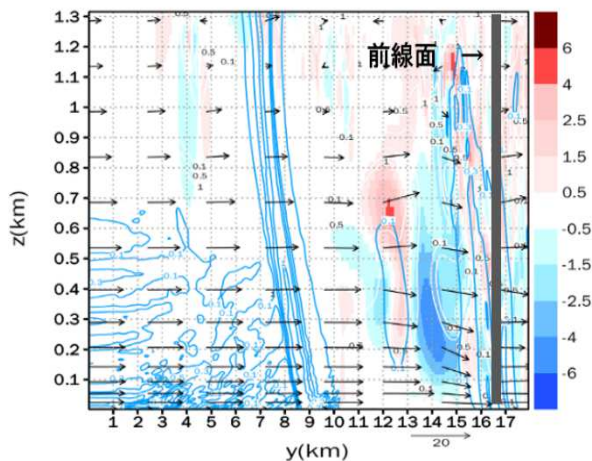


Fig. 9 Wind field in the vertical plane near the ground during the passage of cold front calculated by LES with cloud physics model. Color contour shows vertical wind speed, vector shows wind velocity in the plane.

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 (Fig. 8 b)。

### 3.3 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。Fig. 9 に示すように、前線の通過後に上昇・下降流れが交互に出現している様子が再現された。

## 4. まとめ

ドップラーライダーと気象観測レーダー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観測を行った。得られた観測結果のうち、前線通過時の風速場を解析したところ、積雲対流に伴う下降流が存在する場合に、平均風速プロファイルの形状に関して、鉛直方向の風速勾配が対応する地表面粗度よりも小さくなる観測事例が見つかった。

この事例に関して、気象モデルWRFを用いて観測値に対応した上空の広域風速場を計算で再現し、前線に伴う積雲対流に伴う下降流の範囲を求めた。再現された下降流に対応する冷気塊を、風速変動場を再現できるラージエディ・シミュレーションによる再現計算に取り込んで、観測条件と同じ地表面粗度の変化に伴う乱流境界層内の気流場の再現計算を行い、下降流の有無による影響を考察した。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だラージエディ・シミュレーションによる計算を行い、前線通過時の降雨を含む風速場も再現された。

これらの解析により、積雲対流に伴う下降流によ

って、地面付近の風速増加および、上空の風速の早い空気と下層の空気が混合する様子が再現され、接地境界層内の変動風速場に関して、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下降気流によって、地面付近での風速は下降気流がない場合よりも増加することが明らかになった。

今回構築した計算方法を用いて、積雲対流下の上昇・下降気流に由来する「突風」の影響を考慮した最大瞬間風速の予測・評価につなげ、それらの影響をも考慮できる「新たな建物強風被害ハザード」の評価・提案に反映させる予定である。

## 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H03805 : 平成 30 年度～令和 2 年度 科学研究費助成事業, 基盤研究(A) (一般) 「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」の補助を受けて行われたものである。

## 参考文献

- 内田孝紀・高桑 晋(2021): 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, 45(1), pp.1-9.
- 丸山 敬(2004): 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, pp.57-62.
- 山口弘誠・高見和弥・井上実・中北英一(2016): 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, pp.I\_205-I\_210.

(論文受理日: 2021年8月31日)