

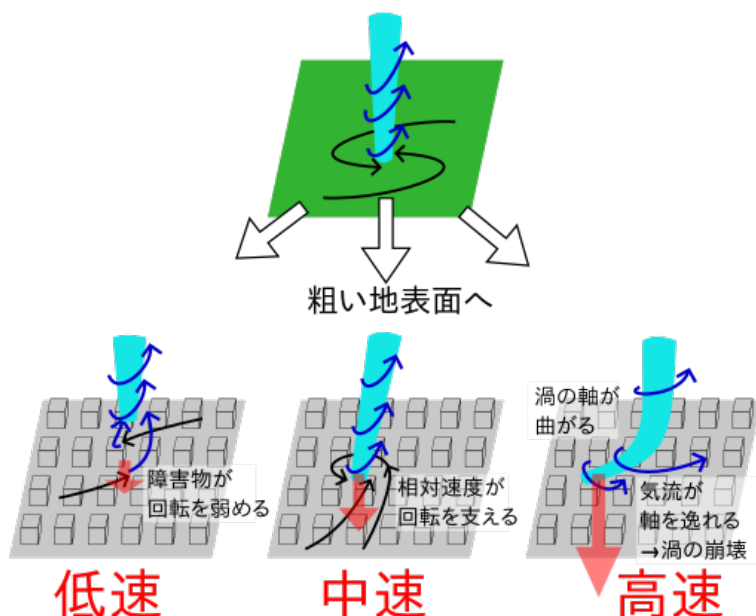
海上竜巻は上陸後直ちに弱まるわけではない — 移動速度の違いで竜巻の強さが維持される —

概要

竜巻は、局所的に回転性の猛烈な風を引き起こす気象現象です。日本の竜巻は、海上で発生するもの（海上竜巻）を含めると、年間 50 件程度確認されています。日本の市街地の多くは沿岸域の平野部に広がっていることから、竜巻の上陸後の挙動を把握することは、災害を予測・防止する上で大切です。京都大学の佐藤宏樹 理学研究科博士課程学生（研究当時、現：名古屋大学研究員）と竹見哲也 防災研究所教授の研究グループは、計算機シミュレーションにより、海上竜巻が上陸した後の強さや形の変化の仕組みを明らかにしました。

シミュレーションでは、竜巻の移動の速さや市街地での建物の密集度合いの組み合わせを変えて、地面の摩擦が竜巻に及ぼす作用を調べました。竜巻が低速で移動する場合（時速約 5.8 km）では、竜巻へと流れ込む気流が障害物によって乱されることで回転の強さが小さく、竜巻が弱まります。ところが、竜巻が中程度の速さで移動する場合（時速約 29 km、日本の竜巻の平均的な移動速度）には、地面摩擦の影響で作られた渦が効果的に竜巻に取り込まれることで、竜巻の強さが維持されます。さらに高速で竜巻が移動する場合（時速約 58 km）には、地面摩擦の影響で竜巻の構造が崩れてしまい、竜巻は急速に弱まってしまいます。しかし、竜巻が大きくて強くなると、どんな移動速度の場合であっても、上陸後に強まる場合もあります。このように、竜巻の移動速度の違いによって、海上竜巻が上陸後に強さの変化の仕方が変わります。本研究により、陸上での地面摩擦が竜巻に及ぼす作用は竜巻の移動速度によって異なることが明らかになりました。

本研究成果は、2026 年 7 月 29 日午前 11 時（米国東部時間）に米国気象学会の国際学術誌 *Journal of the Atmospheric Sciences* にオンライン掲載されました。



イラスト：佐藤宏樹

1. 背景

強風をもたらす気象現象には、台風、低気圧、竜巻、塵旋風などがあります。こういった現象に伴い、時に、局所的かつ瞬間的に風が強まる突風が発生します。中でも竜巻は、局所的に回転性の猛烈な風を引き起こす気象現象です。日本では、竜巻は、海上で発生するもの（海上竜巻）を含めると、年間 50 件程度確認されています（気象庁統計による）。日本の市街地の多くは沿岸域の平野部に広がっていることから、海上竜巻が上陸した後の挙動を把握することは、市街地での強風災害を予測・防止する上で大切です。また、日本には、沿岸域に原子力発電所が立地するなど、災害から守るべき施設があります。こういった施設は、特に地震被害後の脆弱な状況下にある場合に、強風による影響は甚大なものになります。極めて頻度が低い状況ではありますが、複合的な影響で災害が顕著となるという観点で、海上竜巻の上陸後の挙動を理解することは大切です。

このような背景のもとで、日本学術振興会・科学研究費基盤研究(B)「原子力複合災害時の実効的な災害対策重点区域設定のための大気拡散評価手法の構築」の一環として、沿岸域での建物群に及ぼす強風ハザードを評価することに取り組んでいます。今回の研究では、強風ハザードをもたらす要因として竜巻に着目し、竜巻が海上から陸上に移動した時に竜巻の強さがどのように変化するかについて、計算機シミュレーションにより調べました。

2. 研究手法・成果

竜巻の渦としての振る舞いを計算機で再現するために、OpenFOAM という数値流体解析用のシミュレーションコードを使いました。このコードにおいて、竜巻状渦が海上のように滑らかな面から市街地のように粗い面へと移動する状況を表現し、粗い面として直方体形状の障害物を置くことで市街地の建物を模擬しました。この設定において、竜巻の移動の速さや市街地での建物の密集度合いの組み合わせを変えて、地面の摩擦が竜巻に及ぼす作用を調べました。

竜巻が低速で移動する場合（時速約 5.8 km）では、竜巻へと流れ込む気流が障害物によって乱されることで回転の強さが小さく、竜巻は細くなり上下方向にちぎれてしまい、結果として竜巻は弱まりました（図 1 左）。そのときの様子は、これまでの研究で知られてきた、粗い地面の上に竜巻が静止している場合の様子とよく似ていました。

竜巻が中程度の速さで移動する場合（時速約 29 km）には、高度毎の渦が上下方向に繋がった状態となり、竜巻の構造と強さが維持されるようになりました（図 1 中央）。このように強さが維持されたメカニズムを調べた結果、地面摩擦の影響で作られた渦が選択的かつ効果的に竜巻に取り込まれることで、竜巻の強さが維持されるようになることが分かりました。

さらに高速で竜巻が移動する場合（時速約 58 km）には、地面摩擦の影響で竜巻の構造が崩れてしまい、渦は引きちぎられ、竜巻は急速に弱まってしまいます（図 1 右）。

ただし、竜巻が大きくて強い時には、上陸後に地面摩擦によって竜巻の渦が引き絞られることにより、竜巻が強まる場合もあることが分かりました。

このように、竜巻の移動速度の違いによって、竜巻が海上から上陸後に受ける摩擦の作用が異なることが分かりました。そして、上陸後でも竜巻の強さが維持される中程度の移動速度が存在することが分かりました。本研究で調べた中程度の移動速度とは、日本の竜巻の移動速度のおおよその平均値（気象庁「竜巻等の突風データベース」から本研究で毎秒 7.8 m と算出しました）に対応します。移動速度の違いによる上陸後の竜巻の強さの変化の仕方に違いがあることが明らかとなりました。

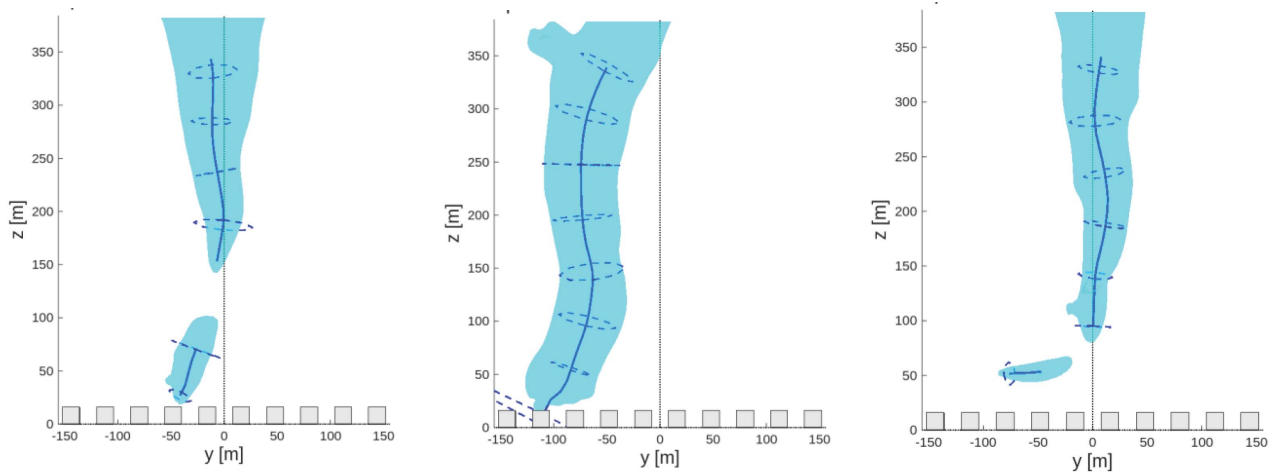


図 1 市街地から海上方向に見た時の竜巻の形状。竜巻は、紙面の奥から手前に向かって移動しています。
 (左) 移動速度が毎秒 1.6 m (時速 5.76 km)、(中央) 移動速度が毎秒 8 m (時速 28.8 km)、(右) 移動速度が毎秒 16 m (時速 57.6 km) の場合を示しています。

3. 波及効果、今後の予定

この研究により、海上竜巻が上陸する際の気流の形成メカニズムに関する基礎的な理解を深めることができました。竜巻の強さや構造が上陸後にどのように変化するか、またどのような場合に維持されるのか、といったことを理解することは、竜巻による強風災害の予測や防止のために大切な知見となります。日本の市街地や沿岸域に多く、また、沿岸域には工場や発電所など産業の中核や原子力発電所のような重要施設が立地する場合もあります。こういった市街地や建物群への強風ハザードを把握する上で、竜巻の上陸後の振る舞いを明らかにすることは大切です。

また、ここでは海上竜巻としていますが、実は本研究の成果は、海上竜巻にのみならず、都市の郊外部から市街地へ移動するなど、都市に移動する竜巻全般に当てはまるものと言えます。こういったことから、本研究の成果や知見が、幅広く竜巻防災に活かされることを期待しています。

本研究の成果では、竜巻に特化した設定で計算機シミュレーションした結果に基づきます。これが、現実の竜巻にどのように適用できるかについては、現地での観測や被害調査などにより確かめる必要があります。今後の研究の展開が期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会・科学研究費基盤研究(B)「原子力複合災害時の実効的な災害対策重点区域設定のための大気拡散評価手法の構築」(25K01477)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

●竜巻：大気中の渦現象であり、大気的不安定性や風速分布の条件が合うと、発達した積乱雲の上昇流域に生じる場合がある。局所的に回転性の強風が発生し、被害は激甚になりうる。日本の竜巻に関する統計情報は、気象庁「竜巻等の突風データベース」を参照。

●OpenFOAM：流体现象一般の振る舞いを計算機上でシミュレーションするための数値流体解析コード。

●気象庁「竜巻等の突風データベース」：<https://www.data.jma.go.jp/stats/data/bosai/tornado/>

<研究者のコメント>

日本の沿岸域は、都市が広がっていたり、工場や発電所など工業地帯が展開していたり、原子力発電所が立地していたりと、災害に対する脆弱性の高い場所です。日本における強風災害は、台風・低気圧・竜巻といった現象によって生じます。中でも竜巻は、発生頻度は高くはないものの、一度強い竜巻が発生すると被害は激甚なものになります。また、台風により竜巻が発生する場合があります。こういった竜巻は海上で発生するケースが多いことから、竜巻の上陸後の振る舞いを理解することが科学的にも実用的にも大切です。さらに、稀な現象ですが、地震被害後の竜巻の発生といった複合的な要因による災害の激甚化に対する想定も必要だと思います。日本のように、気象災害、地震災害、火山災害といった多様な自然災害の発生地では、複合災害の視点はますます重要になってきます。(竹見哲也)

竜巻は大学の理学部の気象学分野、工学部の風工学分野のそれぞれから研究されています。私は理学部の所属でしたが、工学部で行われている竜巻研究に近い手法で研究を行いました。特に、計算機の中に仮想的な実験装置を作成して動かすことに楽しみを感じました。自然現象をモデルとして再現する、理学と工学の良いところ取りのような研究を今後も続けていければと思います。(佐藤宏樹)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Numerical Simulations of Tornado-Like Vortices Translating toward Rough Surfaces (粗面に移動する竜巻状渦に関する数値シミュレーション)

著 者：Hiroki Sato, Tetsuya Takemi (佐藤宏樹、竹見哲也)

掲 載 誌： *Journal of the Atmospheric Sciences* DOI：10.1175/JAS-D-25-0171.1