人間活動による温暖化が、台風豪雨の頻度に影響
～東アジアにおける台風豪雨の増加傾向への寄与を証明～

１．発表者：

内海 信幸（京都先端科学大学 ナガモリアクチュエータ研究所 助教）
金　 炯俊（東京大学 生産技術研究所 特任准教授／韓国科学技術院 准教授）

２．発表のポイント：

◆過去約５０年間の観測データから、台風由来の豪雨の頻度が、中国南東部の沿岸域から日本にかけては増加し、より南の地域では減少していることが分かった。
◆気候モデルによるシミュレーションデータと併せて解析した結果、人間活動による温暖化の影響が、台風の豪雨の変化として既に顕在化していることが示唆された。
◆人間活動による温暖化が極端な気象現象に与える影響を理解し、適切な気候変動対策を進めるための重要な手がかりとなると期待される。

３．発表概要：

台風（熱帯低気圧：注１）によってもたらされる豪雨は、洪水や土砂災害を引き起こし、人間社会に大きな脅威となります。また、地域の生態系にも影響を与えます。これまで、台風由来の豪雨の頻度が過去数十年で変化してきたことが、世界各地で報告されてきました。しかし、台風の活動は偶然性や気候システムの自然変動にも影響されるため、人間活動による温暖化がどの程度、台風由来の豪雨頻度に影響を与えているのかは分かっていませんでした。

京都先端科学大学の内海 信幸 助教と東京大学 生産技術研究所の金 炯俊 特任准教授は、日本を含む北西太平洋における台風由来の豪雨の頻度を、過去およそ５０年間の観測データから確認しました。その結果、中国南東部の沿岸域から日本にかけては豪雨の頻度は増加し、より南の地域では減少したことが示されました。さらに、気候モデルによるシミュレーションデータ（注２）と併せて解析したところ、その変化には人間活動に由来する温暖化が影響していることが分かりました。

今回の研究は、人間活動による温暖化の影響が台風の豪雨の変化として既に顕在化していることを示したものです。費用と効果のバランスをとった気候変動対策を考えるためには、気候変動の影響を適切に評価することが重要です。本研究は、気候変動の影響を理解するうえで重要な手がかりとなると期待されます。

４．発表内容：

＜研究背景＞

台風による豪雨は、洪水や土砂災害をもたらす原因として人間社会の大きな脅威であるだけでなく、地域の生態系などにも影響を与えます。このため、台風がもたらす豪雨の変化は防災、保険業、農業、観光業など、さまざまな分野から関心を集めています。

コンピュータシミュレーションによる研究では、温暖化が将来の台風を変化させることが予測されています。一方、観測では、台風由来の豪雨の頻度が過去数十年で変化してきたことが各地で報告されていました。しかし、台風の活動は偶然性や気候システムの自然変動にも影響されるため、過去に観測された変化が自然変動によるものか、人間活動による温暖化の影響であるかは分かっていませんでした。

＜研究内容・結果＞

今回、日本を含む北西太平洋域の台風由来の豪雨（以下、「台風豪雨」）の頻度が、過去およそ５０年間で変わってきたことを観測データから確認し、さらに気候モデルによるシミュレーションデータと併せて解析することで、観測された変化は人間活動による温暖化の影響なしには説明できないことを示しました。

図１の左図は北西太平洋域の観測データに基づく過去約５０年間（１９６１年～２０１５年）の台風豪雨の頻度変化です。東アジアの沿岸域（中国南東部、台湾、韓国南部、日本の沖縄から北海道東部）では台風豪雨の頻度が増加しています。一方、北緯２２度付近（図１左図の台湾や香港の付近に示した黒破線）から南側では、台風豪雨の頻度が減少した地域が多く見られます。この図から、北西太平洋域の中でも台風豪雨の変化は一様でないことが分かります。

図１の右図は、人間活動による温暖化が台風豪雨の頻度に与える影響を、気候モデルによるシミュレーションデータを用いて推定したものです。気候モデルは過去の気候の再現（過去実験）だけでなく、人間活動による温暖化がない場合の気候（非温暖化実験：注３）のシミュレーションも可能です。過去実験データと非温暖化実験データそれぞれで台風豪雨の頻度を計算し、両者を比較すると、人間活動による温暖化が台風豪雨に与える影響を調べることができます。図１の右図から、温暖化の影響は東アジアの沿岸域で台風豪雨の頻度を増加させ、一方でより低緯度の地域の多くでは台風豪雨を減少させることが分かります。こうした地理的分布は図１の左図で見られた特徴とよく一致していることから、観測された変化には人間活動による温暖化が影響していることが示唆されます。

さらにこの一致が偶然ではないことを確かめるため、フィンガープリント分析（注４）と呼ばれる手法を用いました。これは台風豪雨の頻度変化のデータに、温暖化の影響（気候変動シグナル）がどれだけ強く埋め込まれているかを検出するものです。図２は観測データと非温暖化実験それぞれについて気候変動シグナルを計算したものです。非温暖化実験では初期状態を少しずつ変化させた５０通りの実験（アンサンブル実験）のデータを使っています。これにより初期状態のわずかな差に由来する変化の違いを考慮することができます。図２を見ると、非温暖化実験では自然変動によるゆらぎがあるものの、気候変動シグナルは概ね０付近に留まっています。一方で観測データの気候変動シグナルは特に１９７０年代以降に強い増加傾向を示していることが分かります。

フィンガープリント分析では気候変動シグナルの時間的な変化率（図２のそれぞれの線の傾き）に着目します。観測データと人間活動の影響がない自然状態（非温暖化実験）での変化率を比較し、前者（観測）が後者（非温暖化実験）よりも偶然では説明できないほど大きい場合、観測された変化には人間活動による温暖化が影響していることになります。図３は観測データと非温暖化実験の気候変動シグナルの傾き（１９６１年～２０１０年）を比較したものです。観測された傾きは非温暖化実験での傾きと比較して偶然では説明が難しいほど大きな値であることをこの図は示しています。これは、観測された台風豪雨の頻度変化には人間活動による温暖化が影響していることを意味しています。

＜社会的意義＞

本研究では、人間活動による温暖化の影響が、北西太平洋域の台風豪雨の頻度変化に既に現れていることを明らかにしました。今回対象とした北西太平洋域は世界でも台風の活動が特に活発な地域の１つです。また、台風の影響を強く受ける沿岸部には多くの人口が集中し、経済活動が盛んな大都市が複数存在します。費用と効果のバランスをとった気候変動対策を考える

ためには、気候変動の影響を適切に評価することが重要です。本研究は気候変動が極端な気象現象に与える影響を理解するうえで重要な知見となります。

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業「基盤研究（B）」（21H01442）、「学術変革領域研究（A）」（21H05178）、「国際共同研究加速基金（国際共同研究強化（B））」（18KK0117）、科学技術振興機構「ベルモントフォーラム」（JPMJBF2101）、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（JPMXD0717935457）、韓国政府 National Research Foundation of Korea（NRF） grant（MSIT; NRF-2018R1A5A7025409、2021H1D3A2A03097768）の助成を受けて実施しました。

５．発表雑誌：

雑誌名　：「*Nature Climate Change*」（４月２８日）
論文タイトル　：Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall
著者　：Nobuyuki Utsumi*, Hyungjun Kim*
（*：責任著者）
DOI 番号　：10.1038/s41558-022-01344-2

６．注意事項：

日本時間４月２９日（金）午前０時（英国時間：２８日（木）午後４時）以前の公表は禁じられています。

７．問い合わせ先：

京都先端科学大学 ナガモリアクチュエータ研究所　助教
内海 信幸（うつみ のぶゆき）
Tel：075-496-6512
E-mail：utsumi.nobuyuki@kuas.ac.jp

東京大学 生産技術研究所　特任准教授
韓国科学技術院　准教授
金 炯俊（きむ ひょんじゅん）
Tel：03-5452-6382
E-mail：hjkim@iis.u-tokyo.ac.jp / hyungjun.kim@kaist.ac.kr

８．用語解説：

（注１）台風（熱帯低気圧）

北西太平洋の熱帯低気圧（tropical cyclones）のうち最大風速が一定以上（約 17m/s 以上）に発達したものが台風と呼ばれます。本研究はこれよりも風速が小さいものも含む熱帯低気圧全般を対象とし、論文ではそのように記述していますが、本稿では分かりやすさを優先し「台風」と呼称しています。

（注２）気候モデルによるシミュレーションデータ

本研究では文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムの下で作成された「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change（d4PDF）」による気候シミュレーションデータを用いました。d4PDF では気候シミュレーション実験の不確実性を統計的に考慮するため、初期条件をわずかに変えた多数の実験（アンサンブル実験）を行っています。

（注３）非温暖化実験

非温暖化実験では海面水温のトレンドを除去し、温室効果ガス等の外的な要因を産業革命前の条件に設定してシミュレーションを行うことで、人間活動による温暖化の影響を受けない気候をシミュレーションしています。これを過去再現実験と比較することで、人間活動による温暖化の影響を明示的に調べることができます。

（注４）フィンガープリント分析

気候変動の影響（ここでは台風豪雨の頻度変化）の空間パターンが、観測やシミュレーションによるデータにどれだけ強く埋め込まれているかを調べる方法です。その強さの度合いを本研究では「気候変動シグナル」と呼んでいます。気候変動シグナルの長期変化を観測データと非温暖化実験で比較し、前者（観測）での変化率が後者（非温暖化実験）よりも偶然では説明できないほど大きいとき、観測された変化には人間活動による気候変動が影響していると判定されます。

９．添付資料：

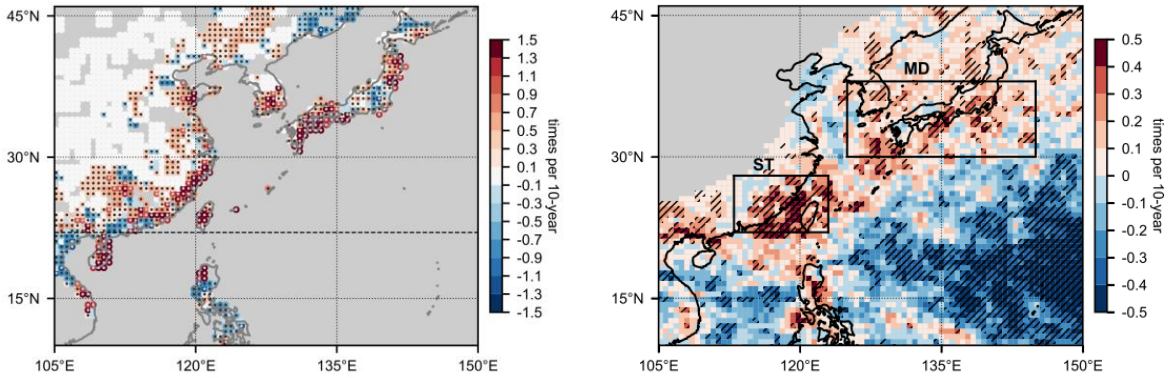

図１　（左）観測による台風豪雨の頻度変化（1961 年～1985 年の発生頻度と 1986 年～2015 年の発生頻度の差）。赤くなるほど台風の豪雨が増えたことを示す。長期間の雨量観測が存在する陸上の変化だけを表示している。（右）コンピュータシミュレーションで示された、人間活動による温暖化が台風豪雨の頻度に与える影響。赤くなるほど温暖化で台風豪雨の頻度が増えることを示す。

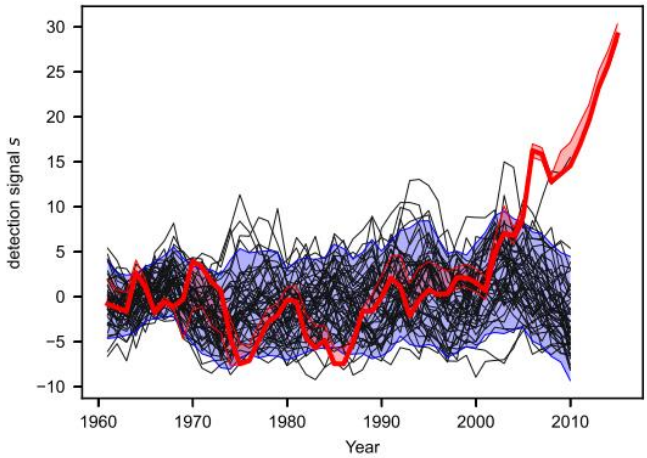

図２　気候変動シグナルの時系列変化。横軸は年。縦軸は気候変動シグナル。正の大きな値ほど人間活動による温暖化の影響が強く検出されていることを示す。赤色は観測された台風豪雨の空間パターンから検出された気候変動シグナル。黒い細線は非温暖化実験の５０アンサンブルメンバーそれぞれから検出された気候変動シグナル。

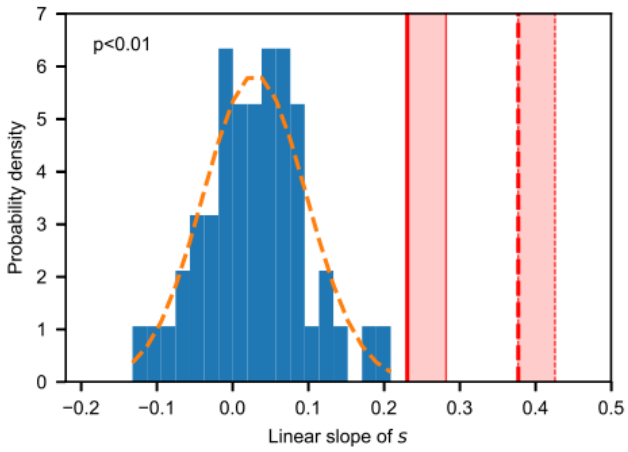

図３　気候変動シグナルの傾きの比較。横軸は気候変動シグナルの傾き（1961 年～2010 年）。青いヒストグラム（棒グラフ）は非温暖化実験での傾きの確率分布を示す。赤色の縦太線（0.23 付近）は観測データから求めた気候変動シグナルの傾き。参考のためにより長い期間（1961 年～2015 年）の観測データを用いた場合の値も赤色の縦破線で表示している。観測（赤線）は非温暖化実験（青色棒グラフ）の分布の範囲を超えて大きな値になっている。これは、観測された気候変動シグナルの増加率は、人間活動による温暖化がない状態（非温暖化実験）と比較して偶然では説明できないほど（p 値＜0.01）大きいことを示している。