



地球温暖化に伴う気象災害の影響評価 Impact Assessment of Meteorological Hazards under Global Warming

竹見哲也*
Tetsuya TAKEMI

1. はじめに

気象災害による国内の死者数・行方不明者数は、かつては1959年伊勢湾台風による死者4697名・行方不明者401名という甚大な被害があったものの、社会基盤の整備や防災・減災対策の結果、着実に減少している。ところが、人的被害はゼロとなるには至っておらず、毎年数十名から百数十名の命が気象災害により失われている。内閣府¹⁾によれば、1993年以降、風水害と雪害をあわせた死者・行方不明者の数は着実に減少しているとは言えず、2014年においては200名を超える死者・行方不明者が出た。1993年以降の記録によると、気象災害による人的被害は下げ止まっているかのように見える。

気象災害により命を落とす人をゼロにすることが、気象災害に係わる防災・減災の究極の目的である。過去20年間で気象災害により命を落とす人の数が減っていない現状を考えると、今後の防災・減災はこれまで以上の対策が必要であることは容易に想像される。さらに、今後の防災・減災対策を考える上で無視できないのは、地球温暖化による気象災害への影響である。地球温暖化により気象災害の激甚化が将来起こるとするならば、今後の防災・減災を実現するためには加速的な対策が必要不可欠と言える。

このため、地球温暖化によって気象災害がどのように変化するかについて、科学的な根拠に基づくできるだけ精度の高い予測をすることが大事である。そのために

は、気象災害を起こす台風・豪雨・竜巻といったハザードとしての気象外力が、将来予想される地球温暖化の影響によってどのように変化するかを把握する必要がある。

このような考えのもと、文部科学省の主導により気候変動予測に関する研究プロジェクトが2002年度より始まり、現在は3世代目の気候変動リスク情報創生プログラム(以降、創生プロと略す)として継続している。創生プロでは、4つの主要テーマのひとつとして、「課題対応型の精密な影響評価」という課題が設定され、気候変動による自然災害、水資源、生態系・生物多様性への影響評価研究が2012年度から5年計画で進められている。本テーマ「課題対応型の精密な影響評価」では、創生プロ他テーマによる将来気候の予測実験データや第5期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)による気候予測データを利用し、自然災害・水資源・生態系など対象に応じた定量的な影響評価研究がなされている。

影響評価研究において利用する気候予測実験データはもともと地球規模のグローバルな全球気候モデル(GCM)によるシミュレーションによるものであるため、データの空間分解能は影響評価のためには必ずしも十分とは言えない場合もある。そのため、評価対象に対応した地域規模へと空間分解能を高めて評価する必要がある。空間分解能を高めるための手法として、領域気象モデルや領域気候モデル(RCM)による力学的ダウンスケール

* 京都大学防災研究所 准教授
Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

ング手法や統計的なダウンスケーリング手法が用いられる。

ここでは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（AR5）など最新の研究に基づき、地球温暖化による気象外力の将来変化についての知見を紹介し、創生プロ「課題対応型の精密な影響評価」のうち、地球温暖化に伴う気象災害への影響評価に係わる研究について解説する。また、気候予測データを利用する際に留意すべき点についても議論する。

2. 気象外力の将来変化

災害をもたらす気象外力としては、台風（熱帯低気圧）、温帯低気圧、前線、豪雨、竜巻などが挙げられる。中でも台風は、強風・突風災害の主要な原因であり、風工学の観点からは重要な対象と言える。地球温暖化時の台風の強度変化については本特集の前の章で述べられているので、参照していただきたい。本章では、自然災害への影響評価の観点から、地球温暖化時の台風の変化傾向について現在理解されていることをまとめる。

IPCCによるAR5では、ワーキンググループ2（WG2）による報告書^{2,3)}において、将来の温暖化気候における影響評価や適応策について議論されている。前提となるのは気候モデルによる高い精度の将来気候の予測情報であるのは言うまでもない。この点では、気象庁気象研究所によるGCMの将来気候予測実験^{4,5,6)}は、水平分解能20 km という全球モデルとしては極めて高い空間分解能を誇っており、台風や梅雨活動など大気循環の将来変化の定量的な評価に役立てられている。A1Bシナリオでの21世紀末将来気候の予測実験の結果、北西太平洋での台風の発生数は減少し、北西太平洋の海域でも西側では台風発生数が減少し南東部では増加することが示された⁷⁾。このように北西太平洋の台風の発生位置が変化すること、また台風移動に及ぼす指向流の変化によって、台風経路が東側にシフトするという結果が得られている。台風経路がシフトすることによって、例えば東南アジアの沿岸域では台風の接近数が44%減少するという事も算出されている。このような変化傾向がモデル設定や実験条件に依存しないロバストな温暖化のシグナルであるかどうかを検証したところ、北西太平洋での台風の変化傾向は地球温暖化の寄与によるものであることが示された⁸⁾。また、台風による最大風速分布を調べたところ、特に北西太平洋の北側の沿岸地域では、台風の頻度は下がる傾向にあるにもかかわらず、最大風速は数%程度強まることも示された⁹⁾。

このような台風強度予測に基づき、将来の温暖化気候下では、台風による災害外力は増大することが懸念される。WG2の報告書では、熱帯低気圧の将来変化による災害リスクの増大が指摘されており、北西太平洋での台風についても同様に捉えることができる。気候モデルによる予測には不確実性があるのは避けられないものの、しかし、災害リスクの増大が指摘されたという事実は、将来の防災・減災対策を考える上で地球温暖化の影響を考慮すべきときに至ったということの意味している。もちろん、現時点では、あるシナリオで想定される将来についての影響評価に留まり、シナリオ毎の違いについて検討する研究段階には至っていない。したがって、予測の不確実性には常に配慮が必要である。

一方、竜巻・ダウンバーストといった局所的な現象も風災害の要因である。しかしそれらの現象は、空間規模が小さいことから、気候予測シミュレーションで直接表現することは現時点では不可能である。そこで、竜巻・ダウンバーストそのものではなく、それらを発生させる積乱雲活動に着目し、その将来変化について述べる。

積乱雲の空間規模は数kmから十数km程度であるため、水平分解能が数十kmのGCMでは積乱雲そのものを表現することは不可能である。そこで、GCMにRCMをネストさせた領域気候シミュレーションにより積乱雲活動を表現することになる。例えば、5 km 格子の領域気候シミュレーションによって、日本の暖候期の降水の将来変化の解析がなされ、温暖化気候では強い降水の頻度が増大することが指摘されており^{10, 11)}、降水量の定量的な表現においてはGCMよりもRCMのほうが優れていることは言うまでもない。しかし長期の気候変動のシミュレーションをする必要があることから、RCMの水平分解能は数km程度となるため、これでも積乱雲を十分に解像できるとは言い難い。特に竜巻やダウンバーストといった局所的な突風現象は、積乱雲の上昇・下降運動の詳細な時空間構造と密接に関連しているため、数 km 程度の分解能では竜巻やダウンバーストの親雲を表現することは不可能である。

そこで、積乱雲を発達する場合の気象条件を調べることにより、竜巻やダウンバーストといった突風現象の発生を将来変化を論じるというアプローチが考えられる。例えば、Brooks 他¹²⁾は、大気的不安定度と鉛直シアを組み合わせた竜巻の親雲の発生のしやすさを表す気象パラメータを用い、長期再解析データを統計解析し、世界において竜巻の発生のしやすい地域を同定した。このような長期間の再解析データの解析や近年の気候モデルに

よる予測結果に基づき、Brooks¹³⁾は、将来気候においては大気が不安定になるため雷雲は発生しやすいものの鉛直シアーは弱まるために竜巻の親雲は逆に発生しにくくなる傾向にあり、結果として竜巻が温暖化気候において発生しやすくなるかどうかについてはまだ十分理解する段階にはないとした。

夏季静穏時に午後発達する積乱雲は、局地豪雨をもたらしたり突風をもたらしたりする。このため、夏季の積乱雲の発生環境の将来変化についても調べられている。気象研究所 GCM による気候予測実験データを用いて関東平野を対象に積乱雲の発生環境条件を解析したところ、現在気候に比べて将来気候においては、対流圏下層の気温減率は下がるものの水蒸気量は増加し、結果として可降水量は増加して対流不安定度も増大することが分かった¹⁴⁾。このような環境条件の変化から、将来気候においては積乱雲がいったん発生すると強度は強まることが示唆された¹⁵⁾。

このようなことから、夏季の積乱雲は一般に、温暖化した将来気候において発生しやすい状況にあり、一度発達すると強度は増す、と言える。しかし、積乱雲が竜巻やダウンバーストをもたらす親雲かどうかという点では、親雲が将来気候でどう変化して、竜巻やダウンバーストの発生の可能性はどのように変化するかについては、まだ不確実性が高い。気象災害の外力として竜巻やダウンバーストを見た場合には、その影響が将来気候でどう変化するかについて評価するのは現状ではまだ困難であると言える。

3. 最悪シナリオに基づく気象災害の影響評価

前節で、災害をもたらす気象外力としての台風と積乱雲の将来変化について概観した。積乱雲に比べると台風の将来変化は幅広く研究されているものの、災害をもたらすほどの台風は低頻度の極端な事象であることから、サンプル数は少ないと言える。

地球温暖化による気象災害への影響を評価することにおいて、事象の生起確率を算出できるほどの十分なサンプル数があれば、統計的な有意性を考慮した将来変化を論じることができる。特に、災害を論じるためには特定の地域を対象とした将来変化を調べる必要がある。例えば、伊勢湾（あるいは特定の沿岸域）に襲撃する伊勢湾台風級の極端台風は将来気候条件で頻度や強度は増大するのか、伊勢湾台風級の極端台風の生起確率はどの程度か、といった問題設定である。この点では、現在の気候予測実験で得られる極端台風のサンプル数は決して十分

とは言えないのである。すなわち、極端台風による気象災害の将来変化について気候予測実験データを直接使って確率的に評価することは現状では困難である。

もちろん、台風の物理モデル¹⁶⁾を用いて台風を確率的に発生させ、台風によるハザードの将来変化を確率的に評価することは可能である¹⁷⁾。地表面の土地利用分布や地形の影響を考慮する必要がなければ、解析的な台風モデルは極めて有効である。しかし、現実の複雑な地形分布で強雨・強風の分布を把握するためには、領域気象モデルを用いることが必要不可欠である。この問題点を解決する手法として、既往極端台風の事例に基づき、領域気象モデルと確率台風モデルとを併用して仮想極端台風のサンプル数を増やし、台風特性と降水との統計的な関係を求める取り組みがなされている¹⁸⁾。ただし、将来気候での極端台風への適用という点では、まだ手法の改良が必要である。

また、領域気象モデルを用いて台風のシミュレーションを行うにしても、モデルの初期条件・境界条件として用いる気候予測データのサンプル数には依然として限りがある。

ここで、別の角度から影響評価を考えてみる。極端な気象現象が災害として地域にどのように影響を及ぼすかを評価するためには、通常は過去において実際に気象災害をもたらした事象について調べる。地域に応じて気象災害をもたらした事象は異なり、また過去に最も顕著な被害をもたらした事象も異なる。そのため、地域毎に最も被害影響を及ぼした顕著な災害事例に基づき、最大規模の気象外力を考えることになる。最大規模の気象外力を想定し、地域毎に災害影響を評価するのである。

このような考え方から、地域で過去において顕著な被害をもたらした気象現象を最大規模の気象外力として捉え、「最悪シナリオ」によって温暖化気候下の影響を評価する、というアプローチが提案された。「最悪シナリオ」とは、最大規模の気象外力を GCM や RCM といった物理的な気象・気候モデルによりシミュレートし、最大規模の気象外力群の中から最悪の被害をもたらさうる気象外力シナリオを想定する、というものである。

台風の場合の最悪シナリオとは、災害をもたらした既往顕著台風が、仮に経路が少し東あるいは西にずれていたら被害はより甚大化するか、仮に温暖化した気候条件で同程度のクラスの台風が来襲したら被害はどのように変化するのか、といったことを検討することで想定される。台風による風の吹き方や雨の降り方は、同じ強度であっても経路が異なることで、海陸分布や地形の影響を

受けるため、対象地域の風雨の時空間特性は大きく変化する。台風経路の違いによる風雨の分布の違いを定量的に評価するためには、領域気象モデルによる力学的ダウンスケール・シミュレーションが必要不可欠である。異なる経路をとる極端台風の多数のサンプルがあれば、対象地域に最悪のハザードとなる台風を想定することが可能となる。

それでは、領域気象モデルによる台風経路をどのような手法で操作することができるのだろうか。以下に台風経路の操作の仕方について述べる。

台風の中心付近の構造は、周囲大気より温暖な暖気核と半時計周りの循環を持つ低気圧性渦とで特徴付けられる。すなわち、台風の中心構造を記述する上では、温度場と風速場との双方を考慮する必要がある。そのためには、温度と風速とを組み合わせた渦位という気象変数が便利である。渦位 (q で示す) とは、次式で定義されるパラメータである。

$$q = \frac{(\vec{\nabla} \times \vec{V} + \vec{\Omega}) \cdot \vec{\nabla} \theta}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 \vec{V} は風ベクトル、 $\vec{\Omega}$ は地球回転、 θ は温位、 ρ は密度である。渦位は、風速場の回転（主として水平風速場の回転）と温位の空間勾配（主として温位の鉛直勾配、すなわち安定度）とが組み合わせられたパラメータとなっていることが分かる。渦位は一般に、成層圏に比べて対流圏では極めて小さい値を取る。対流圏において顕著な渦位の値をとるような例外は、台風や温帯低気圧など循環と安定度が周囲大気と比べて顕著な違いを持つ気象現象の場合である。逆に言えば、対流圏内では、渦位が高い領域は何らかの顕著な気象擾乱と同定することが可能である。台風の中心付近では、渦位の値が成層圏並みの数値となり、周囲の対流圏での渦位の値（ほぼゼロ）と比べて容易に台風中心を判別することができる。対照的に風速場で考えると、半時計周りの循環は、台風中心付近だけでなく、最大風速半径を超えた広域に及んでいるため、台風中心がどこからどこまでかを客観的に判別することは難しい。よって、台風中心を判別するには渦位が便利である。

さらに、風速、気温、気圧など通常の気象パラメータがあれば、渦位は式(1)に基づき容易に算出でき、その逆に、適当な境界条件を与えることで渦位から式(1)により通常の気象パラメータを導出することも可能である。この渦位逆変換の考え方は、Hoskins et al.¹⁹⁾により気象場の

力学解析の診断手法として有力であることが示され、Davis and Emanuel²⁰⁾により温帯低気圧の形成過程に関する力学解析において用いられた。さらに、吉野他²¹⁾により台風の発達過程に関する解析でも渦位逆変換法が適用され、台風の力学構造の解析でも強力なツールであることが示された。

渦位により台風中心構造を同定することができれば、その台風中心の渦位場を大気場から抜き出すことができる。次に、その抜き出した渦位をボーガス台風として別の位置に置き、式(1)と境界条件により渦位場から、力学的に整合的な風速、気温、気圧などの大気場を逆変換により求めることができる^{22), 23)}。Ishikawa et al.²²⁾は、AIBシナリオでのGCMによる将来気候予測実験で得られた極端台風を領域気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF)²⁴⁾によりダウンスケール・シミュレーションを行い、渦位逆変換法により台風中心位置を様々に変化させて様々な台風経路を持つ仮想台風を作成し、利根川流域圏での河川流量の将来変化の予測を行った。また、Oku et al.²⁵⁾は、紀伊半島において深層崩壊と呼ばれる大規模土砂災害をもたらした2011年台風12号について、台風経路操作シミュレーションを行い、紀伊半島での地形性豪雨が経路の違いによりどのように変化するかについて解析した。このような手法により、対象とする地域で想定すべき最大クラスの台風を考え、最大クラス台風の中で最も影響を及ぼす台風を最悪シナリオ台風として想定することが可能となるのである。

次に、こういった最大クラスの台風、最悪シナリオ台風が、温暖化した将来気候においてどのように変化するか、について考える方法について述べる。温暖化時の極端台風による影響評価のひとつのアプローチは、Ishikawa et al.²²⁾で行ったようなGCM将来予測実験で表現された極端台風をダウンスケール・シミュレーションすることである。将来予測実験で得られた極端台風を直接ダウンスケールするという利点があるものの、将来予測実験での極端台風がある特定の地域での災害影響を評価する点で有用であるかどうかは一概には言えない。例えば、将来予測実験で最も強度が強かった台風が、日本に上陸したり接近したりすることなく、日本への影響は小さい、という事象である可能性はある。影響評価をする観点からは、例えば、伊勢湾台風級の台風が将来気候でどのように強化して影響が甚大になるのか、という問いに答えられるものでなければならぬ。そのため、仮想伊勢湾台風の将来気候での影響を評価できるアプローチが有用である。

このように気象現象の温暖化影響を評価する上で、擬似温暖化実験という手法がある。Sato et al.²⁶⁾は、気候予測実験における将来気候と現在気候との差を温暖化差分として定義し、数値実験の初期条件・境界条件で使う格子点解析値に温暖化差分を上乗せし、擬似的な温暖化気候を表現する手法を考案した。

擬似温暖化実験の手法を用いれば、伊勢湾台風の温暖化気候時の変化やその影響を調べることが可能となる。そのためにはまず、伊勢湾台風を1959年9月の条件の設定の下、WRFモデルなど領域気象モデルでダウンスケール・シミュレーションして再現する必要がある。このときに初期条件・境界条件として用いる大気データは、気象庁による1958年以降の長期再解析値 JRA-55^{27), 28)}が有用である。JRA-55を用いてWRFによる伊勢湾台風の再現シミュレーションを行う。

次に、GCMの予測実験データを用いて、温暖化差分を求める。伊勢湾台風は9月に発生したので、GCMによる現在気候での9月の平均場と将来気候での9月の平均場を求め、将来9月平均場から現在9月平均場を引くことにより、温暖化差分を算出する。この温暖化差分をJRA-55に上乗せすることにより、伊勢湾台風が発生した大気条件の仮想的な将来気候での大気場を設定することができる。この温暖化差分を上乗せした格子点値を初期条件・境界条件に用いてWRFによるダウンスケール・シミュレーションを行う。

伊勢湾台風を対象とした擬似温暖化実験²⁹⁾の結果の概略を述べる。温暖化差分は、気象研究所GCMによる現在気候の再現実験とRCP8.5シナリオによる将来気候予測実験³⁰⁾の結果から算出したものである。伊勢湾台風の再現シミュレーションは、JRA-55を初期条件・境界条件としてWRFにより行った。JRA-55に上乗せする温暖化差分の変数は、風速および相対湿度以外とした。風速を差分に加えなかった理由は、風速差分を加えることにより将来条件の下でシミュレートされる台風の経路が過去の伊勢湾台風と大きく乖離してしまうためである。また、相対湿度は現在気候に比べて将来気候において有意な偏差がないことが知られており¹⁴⁾、本実験では加えない。

表1は、1959年9月条件での伊勢湾台風の再現実験および将来気候の9月条件での仮想伊勢湾台風の擬似温暖化実験で得られた台風の最盛期の強度をまとめたものである。それぞれ、計算開始時刻を変えた場合の違いについて記している。中心海面気圧および地表面での最大風速ともに、1959年9月条件に比べて擬似温暖化条件のほうが台風の強度が強まっていることがわかる。この結果

表1 伊勢湾台風の再現実験および擬似温暖化実験で得られた最盛期の台風強度

Table 1 The intensity of the simulated Isewan Typhoon at its maturity under the September 1959 condition and the future September condition.

計算初期時刻 (世界標準時)	1959年9月		将来気候9月	
	中心 気圧 (hPa)	最大 風速 (m/s)	中心 気圧 (hPa)	最大 風速 (m/s)
9月22日12UTC	901.9	58.3	890.2	65.3
9月22日00UTC	901.8	58.4	893.0	65.5
9月21日12UTC	899.5	57.9	898.1	66.2
9月21日00UTC	904.9	55.4	886.0	65.6
9月20日12UTC	909.0	61.8	879.4	66.1

は、計算開始時刻に依存しないロバストな結果であると言える。本実験では、WRFのナッジング機能を用いて格子点解析値へのフィードバックを加味しているため、1959年9月条件および擬似温暖化条件ともに台風の経路は似たようなコースを取っており、経路の違いの影響は表1の結果には現れないものと言える。

以上、伊勢湾台風を例として、擬似温暖化実験の概略を述べた。最悪シナリオの考え方で地球温暖化の気象災害への影響を評価するアプローチは、フィリピン・レイテ島において2013年11月に激甚な高潮・高波災害をもたらした2013年台風30号(Haiyan)でも採られた。気象庁ベストトラックデータによれば、Haiyanは最盛期において中心気圧が895hPa、最大風速が65m/sを記録した猛烈な台風であり、気象庁の風速が10分平均値であることを考慮すれば、瞬間的には100m/s程度の風が吹いていたものと推定される(米軍合同台風警報センターのベストトラックでは90m/s近くの風が記録されている)。レイテ島での高潮は台風の経路の微小な変化により大きく変化することがわかっている³¹⁾。そのため、異なる経路を通る適当な数のシミュレーション台風のサンプルがあれば、異なる経路による高潮への影響を考慮した上で最悪の場合の高潮影響を論じることができる。Takayabu et al.³²⁾は、産業革命前の1850年の仮想的な自然条件の大気場を与えた場合と実際の2013年11月の大気場を与えた場合とでダウンスケール計算される台風の強度の違いとそれによる高潮影響の違いを評価し、温室効果ガスの増加のない仮想的な自然条件に比べて実際の温暖化した現在の気候条件のほうが、Haiyanという最大クラスの台風強度は強まり、それにより高潮影響も甚大化すると結論づけ

た。地球温暖化の影響により Haiyan クラスの極端台風による最悪の高潮はより激甚化するということであり、災害への影響評価の観点から見た温暖化の影響は確実に現れはじめていると言える。

4. 気候予測データの利用において留意すべき点

気象災害への影響を評価する場合、その評価対象の時間空間スケールは地域規模にならざるを得ない。ある特定の河川流域圏、ある沿岸・湾岸域、ある平野部、ある山間部などといった地域で生じる強風などの気象現象がどのように災害を及ぼす外力になるのか、といった評価が必要となる。GCM や RCM の出力データを用いて影響評価をする場合、地域の地形・海陸分布・土地利用といった地理的な状況が数値モデルにどの程度詳細に表現されているかに注意すべきである。

一般的に、数値モデルによるシミュレーション結果は、計算格子間隔（スペクトルモデルであれば対応する空間分解能）と同じ空間分解能で物理的に意味のある数値情報が得られるわけではない。数値モデルには、計算安定性確保のため、様々な時間・空間のフィルターがかけられており、計算格子幅の空間規模ではシミュレートされた物理現象が強く減衰されているのが普通である。目安としては、計算格子幅の 6 倍程度以下の空間スケールについてはシミュレートされた現象が数値計算手法による影響を受けていると考えたほうがよい（例えば Takemi and Rotunno³³⁾; Skamarock³⁴⁾）。こういった数値モデルに内在するフィルター効果の影響によって、気象モデルで表現される風速変動はかなり時間的に平滑化された変動しか表現されない（丸山他³⁵⁾; Oku et al.³⁶⁾）。数値モデルには、物理的に意味のある実効的な空間分解能は計算格子幅の数倍はあることに留意すべきである。

また、地形表現という点でも、解像度が粗いほど実際の地形を正確に表現するのは困難になる。日本の地形が複雑かつ急峻であることを考えると、例えば GCM としては最も高い分解能の 20 km メッシュであっても、大きな山脈・山地スケールではおおそ表現されているものの、谷地形や尾根、富士山のような孤立峰は表現されていない。また、東京湾、伊勢湾、大阪湾の形状の表現もかなり粗い。RCM で用いられる 5 km 程度の格子間隔になると、こういった特徴はより現実的に表現されるようになるものの、細かい谷筋など微細地形の表現性はまだ劣っている。空間分解能が異なると地形の表現性も異なり、結果として強風・強雨といった風雨の極値側の定量的な表現も地形の表現性に依拠して異なる^{37),38)}。

気候予測モデルのデータを利用して影響評価を行う際、気候モデルの実効的な空間分解能や地形表現に注意し、考えている問題にとって適切かどうかを十分検討する必要がある。

5. まとめと今後の指針

ここでは、地球温暖化による気象災害への影響を評価する考え方やアプローチを、創生プロの研究成果を中心にして述べた。特に、風工学的に興味の対象となる台風を中心にして、影響評価の手法についてまとめた。甚大な災害を及ぼすほどの極端台風の事例は、特定の地域に限って考えると記録上ではひとつあるかどうか、というくらいに低頻度である。このような低頻度かつ最大規模の気象外力を評価するためには、領域気象モデルに基づくダウンスケール・シミュレーションと渦位逆変換法に基づく台風ボーガス手法が有効である。最大規模の外力群を考えることにより、その中から最悪の外力をひとつのシナリオとして想定することが可能となる。

もちろん、最悪シナリオの想定のみで影響評価が完結するわけではない。最大クラス、最悪シナリオの気象外力の生起確率を評価できてこそ、ハザード評価は完結すると言える。現時点では、台風といった極端な事象の生起確率を確率分布とともに評価するには十分なサンプルがあるとは言いがたい。特に複雑な地形で発生する強雨や強風を再現するには、実際の地形を取り込んだ気象モデルによるシミュレーションが必要不可欠である。GCM や RCM による予測実験、また台風やその他の極端事象に特化した領域気象シミュレーションにおいて、確率的な評価に耐えうるほどの劇的なサンプル数の増大が望まれる。

謝辞

創生プロ「課題対応型の精密な影響評価」は、文部科学省の委託により実施されているものです。著者はサブ課題「気候変動に伴う気象災害リスクの評価」の代表を務めており、課題代表の中北英一教授（京都大学）、文部科学省の関係各位に感謝いたします。温暖化差分データは、創生プロテーマ C の荒川 理博士（筑波大学）に提供していただきました。ここに深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府、「平成 27 年度防災白書」,(2015)
- 2) IPCC, “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects”,

- Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp., (2014)
- 3) IPCC, “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects”, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp., (2014)
 - 4) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H., Nakagawa, M., “20 km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model”, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 84, pp. 165–185, (2006)
 - 5) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., Kusunoki, S., Kitoh, A., “Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid”, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 90A, pp. 233–258, (2012)
 - 6) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H., Kitoh, A., “Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes”, *SOLA*, Vol. 10, pp. 167-171, (2014)
 - 7) Murakami, H., Wang, B., Kitoh, A., “Future Change of Western North Pacific Typhoons: Projections by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model”, *J. Climate*, Vol. 24, pp. 1154–1169, (2011)
 - 8) Murakami, H., Mizuta, R., Shindo, E., “Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by Multi-Physics and Multi-SST Ensemble Experiments using the 60 km-Mesh MRI-AGCM”, *Clim. Dyn.*, Vol. 39, pp. 2569–2584, (2012)
 - 9) Murakami, H., Wang, Y., Yoshimura, H., Mizuta, R., Sugi, M., Shindo, E., Adachi, Y., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Ose, T., Kitoh, A., “Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by the New High-Resolution MRI-AGCM”, *J. Climate*, Vol. 25, pp. 3237–3260, (2012)
 - 10) Kanada, S., Nakano, M., Kato, T., “Climatological Characteristics of Daily Precipitation over Japan in the Kakushin Regional Climate Experiments Using a Non-Hydrostatic 5-km-Mesh Model: Comparison with an Outer Global 20-km-Mesh Atmospheric Climate Model”, *SOLA*, Vol. 6, pp. 117-120, (2010)
 - 11) Kanada, S., Nakano, M., Kato, T., “Projections of Future Changes in Precipitation and the Vertical Structure of the Frontal Zone during the Baiu Season in the Vicinity of Japan Using a 5-km-Mesh Regional Climate Model”, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 90A, pp. 65-86, (2012)
 - 12) Brooks, H. E., Lee, J. W., Craven, J. P., “The Spatial Distribution of Severe Thunderstorm and Tornado Environments from Global Reanalysis Data”, *Atmospheric Research*, Vol. 67–68, pp. 73-94, (2003)
 - 13) Brooks, H. E., “Severe Thunderstorms and Climate Change”, *Atmospheric Research*, Vol. 123, pp. 129-138, (2013)
 - 14) Takemi, T., Nomura, S., Oku, Y., Ishikawa, H., “A Regional-Scale Evaluation of Changes in Environmental Stability for Summertime Afternoon Precipitation under Global Warming from Super-High-Resolution GCM Simulations: A Study for the Case in the Kanto Plain”, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 90A, pp. 189-212, (2012)
 - 15) Takemi, T., “Projected Regional-Scale Changes in Atmospheric Stability Condition for the Development of Summertime Convective Precipitation in the Tokyo Metropolitan Area under Global Warming”, *Hydrologic Research Letters*, Vol. 6, pp. 17-22, (2012)
 - 16) Mitsuta, Y., Fujii, T., “Analysis and Synthesis of Typhoon Wind Pattern over Japan”, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 37, pp. 169-185, (1987)
 - 17) Nakajo, S., Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., “Global Stochastic Tropical Cyclone Model Based on Principal Component Analysis with Cluster Analysis”, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 53, pp. 1547-1577, (2014)
 - 18) 松本 幸大, 折池 雄太, 鈴木 久紀, 竹見 哲也, 中北 英一, 「台風時の降雨量推定手法に関する研究」, *河川技術論文集*, Vol. 21, pp. 419-424, (2015)
 - 19) Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., Robertson, A. W., “On the Use and Significance of Isentropic Potential Vorticity maps”, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 111, pp. 877-946, (1985)
 - 20) Davis, C. A., Emanuel, K. A., “Potential Vorticity Diagnostics of Cyclogenesis”, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 119, pp. 1929–1953, (1991)
 - 21) 吉野 純, 石川 裕彦, 植田 洋匡, 「Piecewise Potential Vorticity Inversion を用いた中緯度における台風 9918

- 号の衰弱・再発達過程に関する診断的解析」, 京都大学防災研年報, Vol. 46B, pp. 423-442, (2003)
- 22) Ishikawa, H., Oku, Y., Kim, S., Takemi, T., Yoshino, J., “Estimation of a Possible Maximum Flood Event in the Tone River Basin, Japan Caused by a Tropical Cyclone”, *Hydrological Processes*, Vol. 27, pp. 3292-3300, (2013)
 - 23) Shimokawa, S., Murakami, T., Iizuka, S., Yoshino, J., Yasuda, T., “A new Typhoon Bogussing Scheme to Obtain the Possible Maximum Typhoon and Its Application for Assessment of Impacts of the Possible Maximum Storm Surges in Ise and Tokyo Bays in Japan”, *Natural Hazards*, Vol. 74, pp. 2037-2052, (2014)
 - 24) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47+STR: 113 pp., (2008)
 - 25) Oku, Y., Yoshino, J., Takemi, T., Ishikawa, H., “Assessment of Heavy Rainfall-Induced Disaster Potential Based on an Ensemble Simulation of Typhoon Talas (2011) with Controlled Track and Intensity”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 14, pp. 2699-2709, (2014)
 - 26) Sato, T., Kimura, F., Kitoh, A., “Projection of Global Warming onto Regional Precipitation over Mongolia Using a Regional Climate Model”, *J. Hydrology*, Vol. 333, pp. 144-154, (2007)
 - 27) Ebita, A., Kobayashi, S., Ota, Y., Moriya, M., Kumabe, R., Onogi, K., Harada, Y., Yasui, S., Miyaoka, K., Takahashi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Soma, M., Oikawa, Y., Ishimizu, T., “The Japanese 55-Year Reanalysis "JRA-55": An Interim Report”, *SOLA*, Vol. 7, pp. 149-152, (2011)
 - 28) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., Takahashi, K., “The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics”, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 93, pp. 5-48, (2015)
 - 29) Mori, N., Takemi, T., “Impact Assessment of Coastal Hazards due to Future Changes of Tropical Cyclones in the North Pacific Ocean”, *Weather and Climate Extremes*, under review, (2015)
 - 30) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H., Kitoh, A., “Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes”, *SOLA*, Vol. 10, pp. 167-171, (2014)
 - 31) Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K., Yasuda, T., “Local Amplification of Storm Surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf”, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 41, pp. 5106-5113, (2014)
 - 32) Takayabu, I., Hibino, K., Sasaki, H., Shioyama, H., Mori, N., Shibutani, Y., Takemi, T., “Climate Change Effects on the Worst-Case Storm Surge: A Case Study of Typhoon Haiyan”, *Environmental Research Letters*, Vol. 10, 064011, (2015)
 - 33) Takemi, T., Rotunno, R., “The Effects of Subgrid Model Mixing and Numerical Filtering in Simulations of Mesoscale Cloud Systems”, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 131, pp. 2085-2101, (2003)
 - 34) Skamarock, W. C., “Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra”, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 132, pp. 3019-3032, (2004)
 - 35) 丸山 敬, 前田 潤滋, 友清 衣利子, 中野 満寿男, 金田 幸恵, 「メソスケール気象モデルにより再現された台風0418号の強風場」, 第20回風工学シンポジウム論文集, pp. 37-42, (2008)
 - 36) Oku, Y., Takemi, T., Ishikawa, H., Kanada, S., Nakano, M., “Representation of Extreme Weather during a Typhoon Landfall in Regional Meteorological Simulations: A Model Intercomparison Study for Typhoon Songda (2004)”, *Hydrologic Research Letters*, Vol. 4, pp. 1-5, (2010)
 - 37) 竹見 哲也, 辰己 賢一, 石川 裕彦, 「高分解能領域気象モデルによる気象擾乱に伴う風速の極値の解析」, 第21回風工学シンポジウム論文集, pp. 19-24, (2010)
 - 38) Takemi, T., “High-Resolution Meteorological Simulations of Local-Scale Wind Fields over Complex Terrain: A Case Study for the Eastern Area of Fukushima in March 2011”, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 61, pp. 3-10, (2013)