

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-1

力学的ダウンスケーリングによる 台風ハザードの気候変動影響評価

京都大学 准教授

竹見哲也

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

力学的ダウンスケーリングによる台風ハザードの気候変動影響評価

Assessment of the Impacts of Climate Change on Typhoon Hazards by Dynamical Downscaling

竹 見 哲 也

Tetsuya TAKEMI

1. はじめに

2018 年は、冬季の豪雪、7 月に発生した「西日本豪雨」、その後の猛暑、9～10 月の台風 21 号・24 号など強大な台風といったように、様々な極端な気象現象が発生し、全国各地で風水害が頻発した。「西日本豪雨」は、台風 7 号の通過ののち、梅雨前線の活発な活動により、西日本を中心にして中部地方や北海道地方を含めて全国各地で大雨による災害が発生した。また、台風 21 号は、最大発達時に中心気圧が 915 hPa まで下がり、四国地方および近畿地方に上陸し、近畿地方を中心にして広域で暴風雨による災害が発生した。このような災害をいかにして防止・軽減するかは、短期的な視点と中長期的な視点とで整理して対策を考える必要がある。中長期的な視点で考える場合には、極端な気象現象が生起する気候場が変化すること、すなわち気候変動の影響を考慮し、気象ハザードが気候変動によりどのように変化するかを考えなければならない。ここでは、特に台風を例にとり、台風による気象ハザードに及ぼす気候変動の影響をどのように評価するかについて解説する。

2019 年は、1959 年 9 月に発生した伊勢湾台風から 60 年という節目の年にあたる。伊勢湾台風は、室戸台風 (1934 年)・枕崎台風 (1945 年) とともに「昭和の三大台風」として数えられる顕著な台風であった。過去においては、昭和の三大台風、さらには 1947 年カスリーン台風、1954 年洞爺丸台風という 1500 名を超える犠牲者が生じた事象があった。中でも伊勢湾台風では、5000 名を超える犠牲者があり、過去 100 年の間で風水害の中で最も多くの人的被害が生じた。その後、気象防災への取り組みが進み、伊勢湾台風以前のように多くの犠牲者を生じさせるような台風災害というものは発生していない。しかし 1993 年以降では、風水害と雪害をあわせた気象災害による死者・行方不明者の数は減少しているとは言えず、毎年数 10 名から 200 名以上の方が気象災害により命を落としている (内閣府, 2018)。近年でも、2011 年 9 月の台風 12 号による紀伊半島での豪雨災害、2014 年 8 月に広島で発生した土砂災害、2016 年 8 月の台風 9・10・11 号による北海道・東北地方での豪雨災害など、数 10 名の方が亡くなるという事象が発生している。そして 2018 年には、200 名を超える犠牲者を発生させた西日本豪雨が 발생し、風水害による犠牲者数という点で言えば、平成 30 年は平成最悪の風水害被害の年となった。

2018 年の西日本豪雨や台風 21 号による被害は、あらためて気象防災のあり方を考えさせることとなった。台風 21 号にあつては、大阪湾沿岸で高潮・高波が発生し、また近畿地方の広域で強風が吹き、建築構造物の被害、樹木の被害、電力網への被害、飛散物による被害、さらには関西空港の浸水といった様々な被害が生じた。そのため、日本損害保険協会の 2019 年 5 月 20 日付公表 (日本損害保険協会, 2019) によれば、この台風 21 号により生じた被害に対する各種損害保険の支払い総額は 1 兆 678 億円に達した。この額は、風水害による保険金支払額のこれまでの歴代第 1 位であった 1991 年台風 19 号の際の 5680 億円をはるかに超えるものとなった。伊勢湾台風から 60 年経ったいま、今後 60 年先を見据え、気候変動の影響を的確に把握し、今後起こり得る次の「伊勢湾台風」のハザードを理解し、想定される被害を的確に把握することが大切である。

ここでは、最初に、地球温暖化が台風に及ぼす影響を概観する。次に、力学的ダウンスケーリングおよび擬似温暖化実験の手法を用いた台風ハザードの気候変動影響評価の方法について述べる。伊勢湾台風をはじめ、いくつかの台風を対象として解析した結果をまとめる。最後に、今後の力学的ダウンスケーリング手法の展開について述べる。

2. 地球温暖化が台風に及ぼす影響

台風の発生に適した条件は、大気と海洋のそれぞれの条件によって決まる。地球温暖化が台風に及ぼす影響を理解するためには、これら大気と海洋の条件がどう変化するかを把握する必要がある。

まず大気の条件から考えてみる。地球温暖化とは第一義的には地上気温の上昇のことを指すのが一般的である。ところが高度方向で見ると、気温上昇の幅は、対流圏内では地上よりも上空ほど大きくなることがよく知られている。夏の高気圧に覆われた関東地方での局地的な降水の発生条件の地球温暖化による変化を調べた研究によれば、日本においても同様に気温上昇幅は地上よりも上空のほうが大きいことが分かった (Takemi et al. 2012)。このことから、地球温暖化が進むと、対流圏の気温減率は小さくなり、大気は安定になると予測される。すなわち、台風の発生を抑制する方向に進むのである。一方、Takemi et al. (2012) による同じ研究によれば、大気の相対湿度は温暖化によって有意な変化はないことが示された。このことから、相対湿度の条件の変化が台風の発生に及ぼす影響は顕著ではないものと考えられる。

一方、海洋の条件を考えると、海面水温は温暖化とともに上昇する。上昇の傾向は地上気温と同様であり、低緯度よりも中高緯度ほど上昇幅は大きい傾向にある。海面水温が高くなると、海面から大気に熱や水蒸気の供給が活発となり、台風は発達しやすくなる。よって、海面水温の条件で言えば、温暖化すると台風は発達しやすくなる。

さらに考慮すべきこととして、水蒸気量の変化が挙げられる。一般に、気温が高くなるほど飽和水蒸気量は多くなる。したがって、相対湿度が変わらないと仮定すれば、気温が上がるとともに大気中の水蒸気量は多くなるのである。将来の地球温暖化した気候では、対流圏全層にわたって気温が上昇すると予測されており、また相対湿度には有意な変化がないことを考えると、温暖化とともに大気中の水蒸気量は増加することになる。一般に、水蒸気量が増加すると、積乱雲の発達強化されるため、台風が積乱雲の集団であることを考えると、台風も水蒸気量が多いほど発達しやすくなる。温暖化による水蒸気量の増加は、気温減率の低下という安定化の効果とは相反する効果である。このように、大気の状態でも促進効果と抑制効果の双方がある。

以上のとおり、温暖化の進行によって想定される大気と海洋の条件の変化に伴い、台風を発生・発達させる条件への温暖化の影響には、促進する方向と抑制する方向との双方の効果がありうるのである。大気条件に見られる大気の安定化という抑制効果と水蒸気量の増加という促進効果は、簡単に言えばそれぞれ次のようにまとめられる。大気の安定化により、積乱雲の発達は抑制され、積乱雲から台風への集団化も抑制され、したがって台風の発生頻度は全般的には抑えられる傾向になる。一方、水蒸気量の増加により、積乱雲や台風は一度発生すれば豊富な水蒸気量の供給を受けてより強く発達するのである。水蒸気量が増加すると、降水量が多くなる傾向にある。温暖化気候で台風が強まるかどうかは、大気安定化と水蒸気量増加の相反する効果に加え、海面水温や大規模な大気循環の変化の影響も受ける。これらの因子の微妙な関係のもとに、温暖化気候と台風の発生数や強さとの関係が決まるのである。

以下に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による第5次報告書 (AR5) などに基づき、現時点での知見を紹介する。IPCC による AR5 では、第1作業部会 (WG1) による報告書 (IPCC 2013) において、温暖化による気象の変化の物理的な側面についてまとめられている。WG1 の報告書において観測された気候変動についてまとめた記述によれば、地球温暖化は確実に進行しているとされているものの、熱帯低気圧の活動度が前世紀から長期的に強化傾向にあるかどうかという点では未だ確信度は低いと評価されている。それでも確実性が高いと評価された海域は一部あり、北大西洋地区に限っては 1970 年代以降で見ると最強部類の熱帯低気圧の頻度と強度が増大していることはほぼ確実であると評価されている。しかし、北西太平洋地区を含む他の海域での熱帯低気圧の変化傾向は、長期的な観測値の不足や北大西洋とは異なる大気循環の様相から未だよく理解できていないのが現状である。

一方、第2作業部会 (WG2) による報告書 (IPCC 2014a, 2014b) では、将来の温暖化気候における影響評価や適応策についてまとめられている。この影響評価の前提となるのは、WG1 の報告書でまとめられているような、気候を予測する数値モデル (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全球気候モデルの将来気候予測実験（Mizuta et al. 2006; Mizuta et al. 2012; Mizuta et al. 2014）は、全球気候モデルとしては世界的にも極めて高い水平分解能 20 km 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。温室効果気体の排出シナリオの一つである A1B シナリオを想定し、21 世紀末将来気候の予測実験をした結果、北西太平洋全体としては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するものの南東部では増加することが示された（Murakami et al. 2011）。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 % 減少すると算出された。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（Murakami et al. 2012a）。また、台風の強さを表す指標として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（Murakami et al. 2012b）。

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、温室効果気体のある特定の排出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。また、気候モデルの予測にもばらつきがあるため、気候モデルの性能に起因する不確実性も忘れてはならない。したがって、予測には不確実性が伴うことを正確に認識した上で、不確実性に配慮した科学的判断が求められる。

まとめると、北西太平洋で発生する台風は、地球温暖化が将来進むと、発生数はどちらかと言えば減少する傾向にあり、一方の強度については強まることが予測されている。言い換えると、平均的には年間の台風発生数は減少するものの、強い台風はこれまで以上に強まることが懸念される。発生数が減少するのは、大気の安定化という抑制効果が作用することが理由であると考えられる。一方、強度が増すのは、海面水温の上昇や大気中の水蒸気量の増加という促進効果が作用するためであると考えられる。このように、温暖化気候での抑制効果と促進効果とが、台風の発生数や強度に影響するものと考えられる。

最近では、Kossin (2018)により、温暖化の進行と共に台風の移動速度が遅くなっていることが指摘されている。日本では、2011 年に発生した移動速度の遅い台風 12 号により、紀伊半島で 2000 mm を超える豪雨が発生した。温暖化によって台風の移動速度が遅くなるとすれば、2011 年台風 12 号により生じた豪雨被害が発生する可能性がより高まることが懸念される。台風の中心気圧・大きさだけではなく、移動速度の影響も考慮する必要があることを示唆しており、今後注視すべき点である。

3. 力学的ダウンスケーリングによる台風ハザード評価

3.1 台風の力学的ダウンスケーリング

力学的ダウンスケーリングとは、物理モデルを用いて、低分解能の情報を高分解能化する手法である。気象現象を取り扱う場合には、物理モデルとして領域気象モデルまたは領域気候モデルが用いられる。全球気候モデルなど広域にカバーするものの分解能が粗い場合、その全球モデルの出力データを初期条件・境界条件として用いて、領域モデルによって、カバーする範囲は限定的ではあるものの高分解能で気象の支配方程式系を数値的に時間積分を実行することで、領域の気象・気候情報を作り出す。

領域モデルは、国内外で様々なモデルが開発されている。近年では、全球モデルにおいて局所的に解像度を上げることにより、同じ数値モデルを用いてシームレスにダウンスケールする技術開発も進められている。ここでは、米国・国立大気研究センター（NCAR）が中心になった開発した領域気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) モデル（Skamarock et al. 2008）を用いてダウンスケール実験を行う。

ダウンスケール実験するにあたり、対象とする気象現象を選択する必要がある。それでは、対象とする現象をどのように選ばよいか。地球温暖化による台風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）に来襲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。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。最近では、「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) (Mizuta et al. 2017) という大規模アンサンブルの気候予測データが利用できるようになり、物理計算に基づいた台風の確率的な評価に道筋が見えているものの、極端台風の影響を評価するという立場からは、必ずしも十分とは言えない。

もちろん、台風の物理モデル (Mitsuta and Fujii 1987) 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 (Nakajo et al. 2014)。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 (松本他 2015)。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。

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。

とは言うものの、台風の年間平均発生数は 26 個程度である。このうち最強の部類の台風は年間を通して数個しか発生せず、災害をもたらすような台風も同様に 1 年にせいぜい数個しか発生しない。ある地域に限って言えば、現在のような気象観測の記録が存在する期間には災害をもたらした顕著な台風の事例がない場合もある。このように、顕著な台風は気象現象としては極めて低頻度の事象である。低頻度な極端現象を取り扱うという困難さが避けられない。

このような考え方から、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全球モデルや領域モデル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す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。異なる経路をとる仮想的な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）とが組み合わさ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. (1985) 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 Emanuel (1991) 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 (2003) 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 (Ishikawa et al. 2013; Shimokawa et al. 2014)。このようにして、切り出した台風中心の渦位場を任意の地点に移動させ、その地点で渦位逆変換により風速、気温、気圧などの大気場に戻すことで、もともとの台風位置からずらして仮想的な台風を生成することができる。位置を移動させたあとは、通常の通りに領域気象モデルの時間積分を行うことで、結果として異なる経路の台風を生成することができる。移動させる位置を多数設定することにより、異なる経路をとる仮想的な台風を多数生成することができるのである。図 1 に、伊勢湾台風を対象として、渦位逆変換法により台風の中心渦を東西に移動させることで、多数の経路をとる仮想台風を生成した結果を例として示す。

Ishikawa et al. (2013) は、A1B 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 WRF モデル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. (2014) は、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。

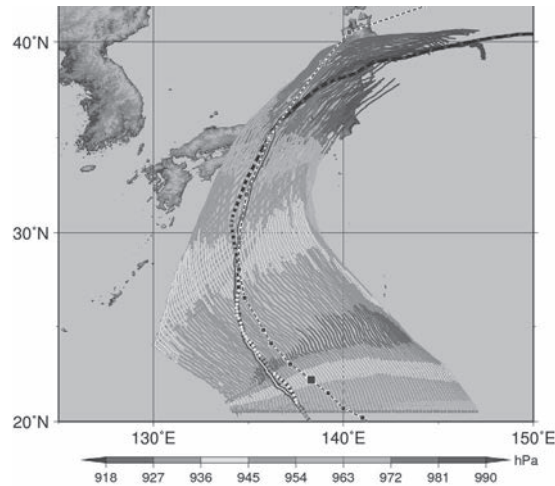


図 1：伊勢湾台風を対象に渦位逆変換法を用いて台風中心位置をずらして生成した仮想台風の経路群。

3.2 力学的ダウンスケーリングの利点

力学的ダウンスケーリングの利点としては、上記の通り、領域規模を対象として解像度を高くすることにより、台風や豪雨の構成要素である積乱雲をよりの確に表現することができる点にある。積乱雲の空間スケールは数 km から十数 km 程度であるため、気象庁気象研究所全球気候モデル MRI-AGCM 3.2S の空間解像度 20 km では積乱雲を陽に表現することができない。このため、MRI-AGCM 3.2S をはじめ多くの全球モデルでは、積雲パラメタリゼーションを用いて、積乱雲がモデル化して表現されている。領域モデルであっても、空間解像度が数 km 程度に達しない場合には、一般には積雲パラメタリゼーションを用いられることが多い。しかし、解像度が 1 km 程度あるいはそれより細くなると、積雲パラメタリゼーションを使うことなく積乱雲を陽に表現することが可能となる。したがって、この程度にまで解像度が高くなれば、力学的ダウンスケーリングの利点が発揮される。

ここで数値解法という視点で、空間分解能の考え方について簡単に述べておく。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 Rotunno 2003; Skamarock 2004）。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 2008 ; Oku et al. 2010）。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。

力学的ダウンスケーリングの別の利点としては、解像度が高くなることによって、地形の表現がより正確になるということである。日本の地形が複雑かつ急峻であることを考えると、例えば全球モデルとして最も高い分解能の部類に入る 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よ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。それが領域モデルにより例えば 5 km 程度の格子間隔にダウンスケールすると、こういった特徴はより現実的に表現されるようになる。しかしそれでも、細かい谷筋など微細地形の表現性はまだ劣っている。Oku et al. (2010) は、二つの領域気象モデルを空間格子間隔 1 km と設定して 2004 年台風 18 号のシミュレーションを行い、地上風の変動の再現性がモデルによってどのように違うかを調べた。気象モデルは異なるものの、物理過程のパラメタリゼーションは可能な限り同種のものとし、格子幅を 1 km と同一にしてシミュレーションすることで、モデルの地形表現の違いによる影響に着目した。すなわち、モデルによって地形データをモデル格子に合致させる処理方法（空間補間、空間スムージングなど）が異なるため、同じ格子幅 1 km であってもモデル地形は異なるのである。解析の結果、モデル地形が実際の地形の起伏をより忠実に表現している場合のほうが、風の変動はより顕著に表現される

ことが分かった。また、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りて異なることも分かっている (Takemi 2009, 2013, 2018a)。特に Takemi (2018a) は、平成 29 年 7 月九州北部豪雨を対象として格子間隔 167 m という高分解能でダウンスケールし、分解能の高い地形データ (国土地理院数値地図 50 m メッシュ値) および分解能の低い地形データ (全球 30 秒メッシュデータ GTOPO30) によりそれぞれモデル地形を作成した場合で数値シミュレーションを行い、同じ 167 m 分解能でも高分解能地形データを用いてより忠実にモデル地形を作成した場合のほうが降水の極値がより定量的に表現できることを示した。Oku et al. (2010) や Takemi (2018) などの結果から、地形をより正確にモデルで表現することで、大雨や強風といった気象ハザードがより定量的に表現できることが分かった。

4. 擬似温暖化実験

次に、台風ハザードに及ぼす温暖化影響を評価するための手法について考えてみる。最大クラスの台風あるいは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のか、を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. (2013) で行ったような全球気候モデル将来予測実験で表現された極端台風を気象モデルにより力学的にダウンスケールして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ない。そのため、伊勢湾台風級の台風を対象として、将来気候での影響を評価できるアプローチが必要となる。

まず、伊勢湾台風のような過去の事象を対象とする場合には、領域気象モデルの初期条件・境界条件は過去の気象場の格子点情報を用いることになる。これは、再解析値と呼ばれ、世界の代表的な気象機関で様々なデータセットが作成されている。日本では、気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) (Kobayashi et al. 2015) と呼ばれるデータセットが作成されており、1958 年以降のデータが利用可能である。1959 年 9 月に発生した伊勢湾台風など 1958 年以降に発生した顕著な事象については、JRA-55 データセットを用いることで過去の気象場を表現することができ、領域気象モデルによる計算機シミュレーションが可能となる。

次に、伊勢湾台風が仮に温暖化した気候条件でどのように変化し、温暖化により強化した伊勢湾台風級の台風が仮に 1959 年と同じような経路で同じような地点に上陸した場合に過去と比べて風水害の規模はどのように変化するのか、といった温暖化の影響を評価するための手法を述べる。この手法のひとつとして、擬似温暖化実験 (Sato et al., 2007) と呼ばれるものがある。擬似温暖化とは、過去の気象場に、気候モデルによる現在気候から将来気候への気候変化分 (温暖化差分) を加算することで、擬似的に温暖化気候条件を表現するひとつの方法である。風向・風速、気温、水蒸気量など空間 3 次元 (座標を x, y, z とする) の気象要素を ϕ と表し、過去の実際の気象場を下付き文字 **Actual**、温暖化差分を下付き文字 **Increment** で表すと、擬似温暖化気候での気象要素 ϕ_{PGW} は次式で表される：

$$\phi_{PGW} = \phi_{Actual} + \phi_{Increment} \quad (2)$$

過去の実際の気象場は、気象庁の再解析値 JRA-55 などの長期再解析データにより、1959 年 9 月などある特定の事例毎に復元することができる。この気象場と温暖化差分を利用して領域気象モデルによるシミュレーションを行うことにより、伊勢湾台風といった極端台風の温暖化影響を調べることが可能となる。

擬似温暖化実験の手法を用いれば、例えば伊勢湾台風を対象として、伊勢湾台風級の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、長期再解析値 JRA-55 といった再解析値を用いる。

次に、全球気候モデル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、気候モデル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ことで、仮想的に温暖化した条件下での伊勢湾台風の振る舞いを調べることが可能となる。

温暖化差分としては、ここでは、気象庁気象研究所の全球気候モデルMRI-AGCM 3.2Sの実験結果から導出する。将来予測は、RCP8.5 シナリオに基づいた温暖化実験である。Mizuta et al. (2014) は、CMIP5 の大気海洋結合モデル実験群から、クラスター分析により3種類の海面水温 (SST) パターンに分類した。全モデルアンサンブルをコントロールとして、クラスター分類された3パターンと合わせ、合計4パターンの SST 分布による将来予測実験が実施されている。それぞれの将来予測実験結果から現在気候の再現実験結果を気象変数毎に差し引くことにより、変数毎に温暖化差分の空間分布を算出する。2次元変数であれば2次元面内での温暖化差分、3次元変数であれば、3次元空間での温暖化差分となる。

図2に地表面温度（海上ではSST，陸上では陸面温度）の温暖化差分を示す。高緯度になるほど温暖化差分量が大きくなるのが分かる。また、温暖化差分の空間パターンが SST アンサンブルによって異なることも分かる。ここでは地表面温度しか示していないが、気温、気圧、風速、相対湿度についても同様に温暖化差分が求められる。これらの温暖化差分を過去の気象場に式 (1) のように足し合わせることで、擬似的な温暖化気候場を設定することができる。こうして得られた擬似温暖化気候場を初期条件・境界条件として用いることで、WRF モデルなどの領域気象モデルを用いて力学的ダウンスケーリング実験を行うことができる。

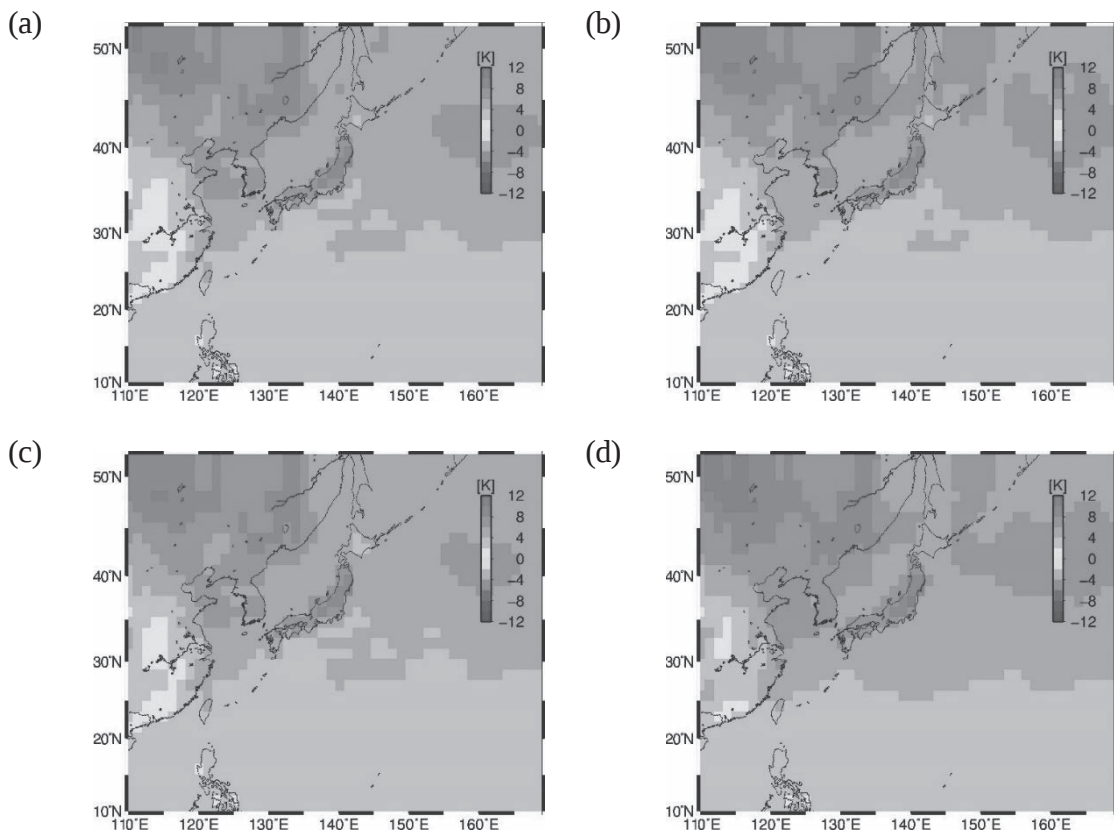


図2：MRI-AGCM 3.2S の実験結果から算出した SST の温暖化差分。

5. 台風ハザードの気候変動影響評価の実際

我々は、これまで、過去において顕著な災害をもたらした台風を対象として、力学的ダウンスケーリングや擬似温暖化実験を行い、地域規模での台風ハザードとその温暖化影響を調べてきた。表 1 にこれまで我々が解析対象とした台風（熱帯低気圧）と関連する文献を挙げたので、参照していただきたい。ここでは、顕著な水災害を発生させた台風として、伊勢湾台風、2011 年台風 12 号を選び、その解析結果についてまとめる。

表 1：解析対象とした顕著台風とその解析対象地域および関連文献

対象地域		文献
伊勢湾台風(1959 年台風 15 号)	近畿地方, 中部地方	Takemi et al. (2016a), Kanada et al. (2017)
1991 年台風 19 号	九州地方, 東北地方	Takemi et al. (2016b)
2004 年台風 18 号	九州地方, 北海道地方	Oku et al. (2010), Ito et al. (2016), Takano et al. (2016), Morimoto et al. (2019)
2011 年台風 12 号	紀伊半島	Oku et al. (2014), Takemi (2019)
2013 年台風 30 号	フィリピン	Mori et al. (2014), Takayabu et al. (2014)
2015 年サイクロンパム	南太平洋, バヌアツ	Takemi (2018b)
2016 年台風 7 号	北海道地方	Nayak and Takemi (2019a)
2016 年台風 10 号	北海道地方, 東北地方	Nayak and Takemi (2019b)
2018 年台風 21 号	近畿地方	Takemi et al. (2019)

5.1 伊勢湾台風

用いた領域気象モデルは、WRF モデル (version 3.3.1)である。数値シミュレーションでは、まず 1959 年 9 月の伊勢湾台風の再現を行う。初期値・境界値には JRA-55 を用いた。計算領域は北西太平洋の大部分をカバーするようにランベルト地図投影により設定し（モデル上端高度：20 hPa；格子点数：976×831×56）、水平格子幅は 5 km とした。選択した物理過程は Takemi et al. (2016a, 2016b)を参照されたい。定量的な影響評価を可能とするため、計算開始時刻に台風ボガスをベストトラック位置に設定した。再現実験では、計算開始時刻を 1959 年 9 月 20 日 12 UTC から 22 日 12 UTC まで 12 時間毎にずらし、初期時刻の違いに対する感度も調べた。

次に、将来の地球温暖化条件を設定するために、擬似温暖化実験を行った。気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2 による現在気候および将来気候の数値実験の結果を用いて、将来気候の 9 月の月平均値から現在気候の 9 月の月平均値の差分を求めた。この差分を JRA-55 に加算し、WRF モデルの初期値・境界値として与えた。モデルの設定は、この初期値・境界値以外は 1959 年 9 月の再現実験と同一である。

温暖化差分を加算するにあたり、相対湿度の加算はしないこととした。これは、気候予測実験結果から、相対湿度の将来変化は有意でないと考えられるためである (Takemi et al. 2012)。また、異なる SST 条件による気候予測結果の違いの影響を考慮するため、Mizuta et al. (2014)による異なる SST クラスター（3 通り）の温暖化差分についても調べた。SST（コントロールと 3 通りのクラスター）および相対湿度以外の大気場の温暖化差分および初期時刻の違いを考慮した数値実験を行った。さらに、最も極端な状況として、大気場は変化させずに SST のみを温暖化させた場合の強度変化も調べた。

まとめると以下の数値実験を行った。

- 再現実験 (CNTL)
- 擬似温暖化実験
 - MM (SST/T/GHT) : SST・気温・ハイトを加算
 - MM (SST/T) : SST・気温を加算
 - MM (SST) : SST のみ加算

C1 : SST (クラスター1)・気温・ハイトを加算

C2 : SST (クラスター2)・気温・ハイトを加算

C3 : SST (クラスター3)・気温・ハイトを加算

再現実験およびMM 実験では5通りの初期時刻を設定した。

再現実験および擬似温暖化実験により、伊勢湾台風のベストトラックに近い経路をとる台風をシミュレートすることができた。したがって、経路が仮に同じであった場合に伊勢湾台風級の極端台風が温暖化によりどこまで強まるかという議論が可能となる。

図3には、シミュレートされた台風が最も強まった時点での中心気圧と最大風速を全実験についてプロットした。再現実験では、中心気圧は899.5–909.0 hPaの範囲であり、ベストトラックとよく一致している。一方、SSTと大気場を加算した擬似温暖化実験では、中心気圧は879.4–898.1 hPaの範囲となった。SSTクラスター別の実験でもこの範囲に収まっている。このことから、伊勢湾台風は温暖化時には10から10数hPa程度強まると言える。

SSTのみが温暖化するという極端な条件を設定すると、中心気圧は859.7–876.8 hPaの範囲で強まった。極端な設定ではあるものの、この結果は仮想伊勢湾台風の強度変化の上限とみなせるであろう。

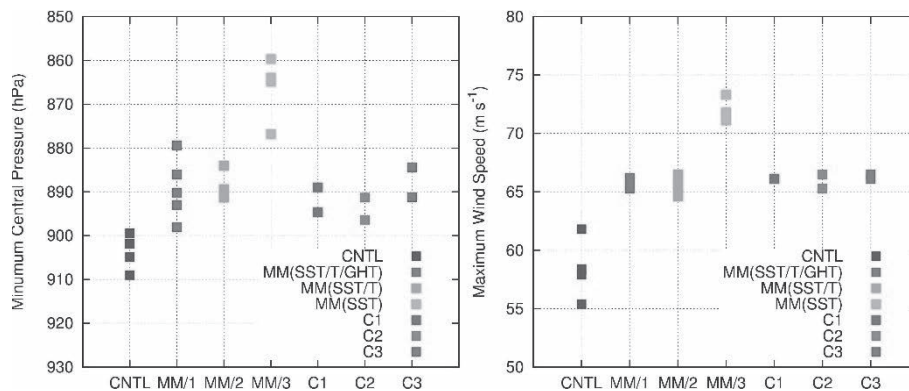


図3：伊勢湾台風の再現実験（CNTL）および擬似温暖化実験による最低中心気圧（hPa）（左図）および最大地上風速（m/s）（右図）。

5.2 2011 年台風 12 号

2011 年台風 12 号 (Talas) は、紀伊半島において5日にもわたって持続的な強雨をもたらし、積算で2000 mmを超える大雨を発生させた。この豪雨により、紀伊半島各地で洪水災害・土砂災害・大規模な地すべりをもたらした。上述の通り、この台風は移動速度が遅かったことが特徴である。2011 年 8 月 30 日 0000 UTC から 9 月 3 日 0000 UTC の期間で平均した移動速度は、4.2 m/s であった。このように移動速度が遅く雨が長続きするタイプで生じる豪雨の温暖化影響を評価する。

WRF モデル (version 3.3.1) を用いてダウンスケール実験を行った。外側の第1領域として4875 km×4150 kmの領域を設定して日本を含む北西太平洋を5 km メッシュでカバーし、内側の第2領域として430 km×400 kmの範囲を設定して紀伊半島および周辺地域を1 km メッシュでカバーした。鉛直方向には56層を設定し、モデル上端高度は20 hPaとした。2011 年9月の再現実験にはJRA-55の再解析値を用い、擬似温暖化実験にはRCP8.5シナリオによるMRI-AGCM 3.2Sの出力データから算出した温暖化差分を用いて温暖化気候場を作成した。なお、ここでは台風ボーガスは使用せず、再解析値で表現された台風場を初期条件としてWRFモデルの時間積分を行った。

この台風は、移動速度の遅さと経路によって、紀伊半島という特定の場所で大雨となった。言い換えると、移動速度と経路を適切に表現しなければ、ダウンスケール実験で紀伊半島での大雨の再現が困難となる。そこで、移動速度や経路を実際の状況にできるだけ合致させるために、スペクトルナッジングによって総観規模の流れ場の効果を取り込んだ。もちろん、スペクトルナッジングによっても台風経路を高精度に再現できるわけではない。そこで、ナッジング係数を何通りかに変化させ、それによって変化する台風経路の違いによって降水のパターンがどの

ように影響を受けるかを考えた。

図4に2011年9月の条件のもとでの再現実験による降水量分布を、図5に擬似温暖化実験による降水量分布を示す。再現実験では、ケース毎に台風経路が若干異なり、結果として紀伊半島での降水の量や分布パターンが変わるものの、2000 mmを超える雨量を再現するなど概ね大雨の様子が表現されている。

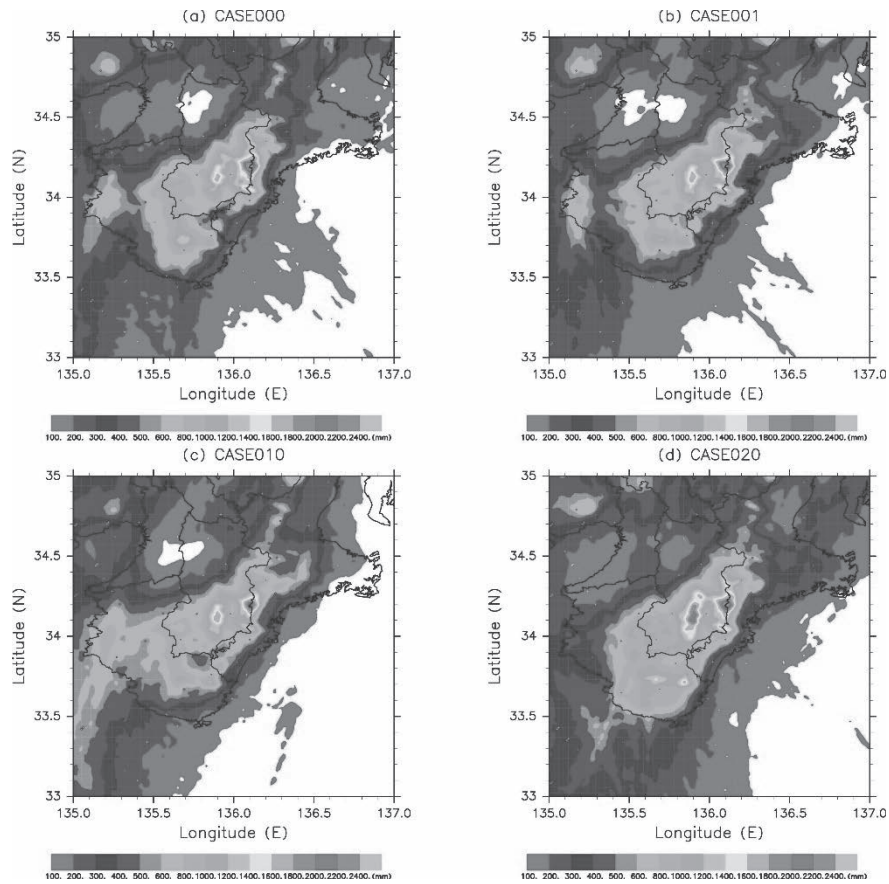


図4:異なるナッジング係数の設定での再現実験で得られた2011年8月31日0000UTCから9月5日0000UTCの期間の降水量分布。

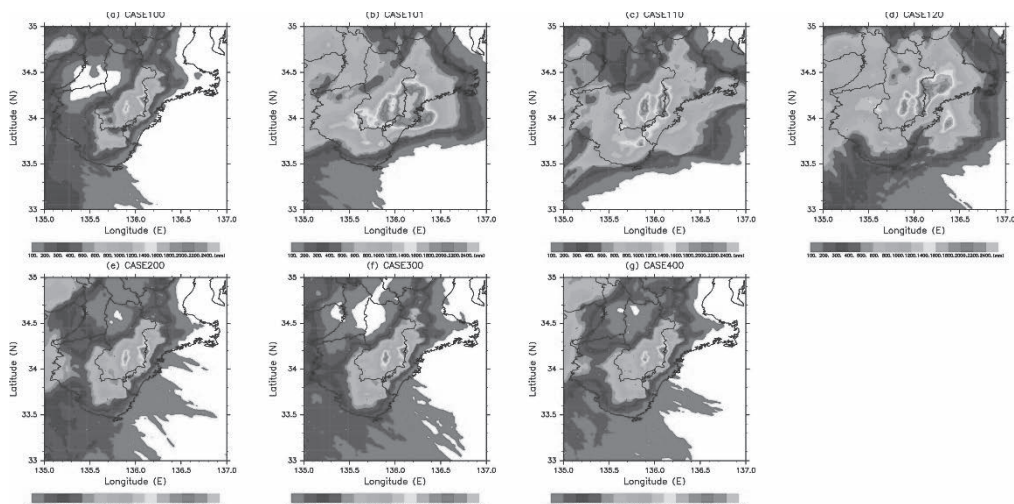


図5: 擬似温暖化実験で得られた8月31日0000UTCから9月5日0000UTCの期間の降水量分布。(a)から(d)図4の異なるナッジング係数に対応したコントロールSSTによる温暖化差分を用いた場合。Mizuta et al. (2014)の分類による各SST分布による温暖化差分を用いた場合:(e) クラスタ1のSST, (f) クラスタ2のSST, (g) クラスタ3のSST。

一方、擬似温暖化実験の結果から、ケースによっては再現実験とほぼ同様の場合もあれば、降水量がより多くなって多い降水量の範囲が広がっている場合もある。

紀伊半島南部を対象として、その範囲での各格子点において計算期間で積算した雨量および全格子点での時間雨量の分布を調べてみた。その結果、期間積算は、2011 年 9 月条件によりも擬似温暖化条件の場合において、一般的に雨量が増大しており、特に極端側で空間的な広がりが増大することが分かった。

このような降水の変化が生じた原因は何であろうか。このことを考えるため、降水量および降水をもたらす対流活動に関連した大気条件を表す指標を調べた。解析の結果、温暖化条件では、気温の上昇幅が対流圏下層よりも上層で大きいと、大気は安定化するものの、対流圏全層での気温上昇のため可降水量は増加することが分かった。台風のような組織だった構造をもつ気象擾乱の場合には、大気の安定化という対流活動を抑制する効果に打ち勝って台風が組織化し、水蒸気増加という効果により雨量が増大するということが言える。

6. 力学的ダウンスケーリングの今後の展開

最後に、力学的ダウンスケーリングの今後の展開として、2018 年台風 21 号を対象とした解析結果について概略を述べる。

ここでは、気象モデルと Large-Eddy Simulation (LES) モデルとの融合により、実際の市街地で生じたと想定される暴風を定量的に評価することを試みる。気象モデルにより、台風 21 号の実際の気象場を数値的に再現する。一方、LES モデルでは、実際の市街地の建物・構造物の配置・高さのデータを下端境界に設定することにより、実際の市街地での流れ場をシミュレーションする。この両者を接続することにより、市街地での風速を推定する。なお、ここで述べる結果は、Takemi et al. (2019)により速報的に得られた成果である。

台風など気象場の再現には、領域気象モデルである Weather Research and Forecasting (WRF)モデル (Skamarock et al. 2008) を用いた。計算領域は、4.5 km 格子幅の Domain 1 を設定して日本列島および周辺の北西太平洋の 2500 km×2700 km の範囲をカバーし、その内側に 0.9 km 格子幅の Domain 2 を設定して近畿地方を中心とした 300 km×300 km の範囲をカバーするようにした。

市街地内での風を再現するために、Yoshida et al. (2018), Yoshida and Takemi (2018)による LES モデルを用いた。これは、Nakayama et al. (2011)に基づき開発した LES モデルである。国際航業の GIS データを用いて大阪市街地（南北 3 km・東西 2 km）の実際のビル群を 2 m メッシュで LES モデルに表現した。本計算領域の上流部にドライバ領域を設け、乱流を生成した。南風を想定し、計算領域と流入面を設定した。LES では、5400 秒分の計算を行い、最後の 1800 秒間を解析対象とした。

LES モデルでは、モデルで形成される境界層上端高度 ($z_\infty = 326$ m) の風速で無次元化し、都市キャノピー内での風速の時空間変動を精密に表現している。この LES 無次元風速を、WRF で計算された高度 z_∞ での風速 U_{WRF} (m/s) を基準値とし、実風速に換算した。すなわち、高さ z における LES 無次元風速 U_z/U_∞ を次式の通り台風時の風速 $U(z)$ (m/s) に換算する。

$$U(z) = \frac{U_z}{U_\infty} U_{WRF}$$

WRF モデルにより、異なる開始時刻であっても、台風の経路や強度の再現性は大きくは変わらず、すべてのケースで良好であった。また、中心気圧や最大風速についても、WRF 計算により良好な結果が得られた。一方、大阪市および関西空港島でのアメダス地上観測値と比べると、10 分間の平均風速については WRF により良く表現できていたものの、WRF では瞬間値の再現は困難であった。そもそも WRF では、都市のビルや構造物は陽に表現されていないため、粗度の影響を受ける境界層の構造も再現することができない。そこで、粗度境界層での風の非定常かつ空間非一様な変動を量的に表現するために、建物を陽に解像した LES モデルを用いる。

図 6 は、LES の計算時間内で見られたメッシュ毎の風速の最大値の分布を示す。数値が 1 に近いほど上空 z_∞ の

風と同じであることを意味する。図 6 から、0.8 を超える場所が多数あり、ところによっては 0.9 を超えて 1 に迫るような地区もあることが分かる。

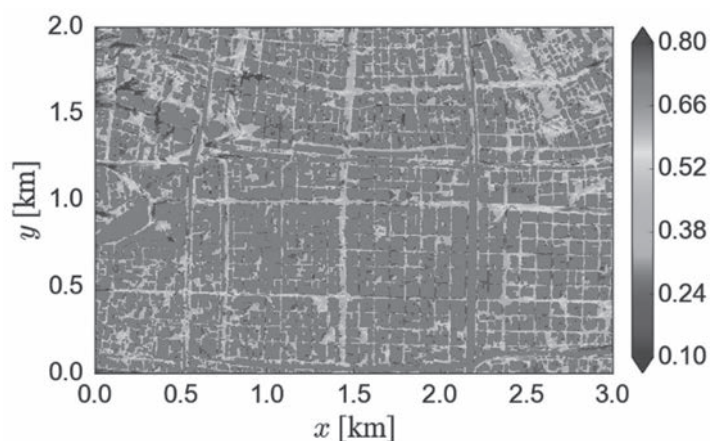


図 6 : LES モデルによりシミュレートされた大阪市街地での地上 10 m での最大瞬間風速の分布。

一方、WRF モデルによるシミュレーション結果から、台風の通過に伴って大阪市上空 z_{00} の高さでは、風速が最大で 70 m/s に達していたと推定される。このことから、WRF での高度 z_{00} の風速により、図 6 に示す LES の無次元風速を実風速に換算すると、市街地内では、場所によって、瞬間的に 60 m/s から 70 m/s にも迫る暴風が吹いていたと推定できる。

以上の通り、気象モデル WRF と建物解像乱流計算モデル LES とを組み合わせ、台風 21 号に伴う大阪市街地内での暴風を定量的に評価することができた。高層ビルが林立する大都市では、台風などの極端現象により極めて強い風が吹く可能性がある。こういった建物解像の精緻な数値モデルを用いることにより、街区スケールにまでダウンスケールすることが可能となる。こういった解析をより広域で実行することができれば、近年の都市の再開発や将来の気候変動を考慮して、大都市での災害リスクを評価することが可能となるであろう。

7. まとめ

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、また台風を対象とした解析結果について述べた。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ダウンスケール・シミュレーションが必要不可欠である。全球モデルや領域モデルによる予測実験、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。

参考文献

内閣府、2018：平成 30 年度防災白書。

日本損害保険協会、2019：「2018 年度発生した風水災に係る各種損害保険の支払件数・支払保険金（見込含む）等の年度末調査について」、http://www.sonpo.or.jp/news/release/2019/1905_02.html, (2019 年 6 月 27 日閲覧)

- 松本 幸大, 折池 雄太, 鈴木 久紀, 竹見 哲也, 中北 英一, 2015: 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.
- 丸山 敬, 前田 潤滋, 友清 衣利子, 中野 満寿男, 金田 幸恵, 2008: 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. 風工学シンポジウム論文集, 第 20 巻, pp. 37-42.
- 吉野 純, 石川 裕彦, 植田 洋匡, 2003: 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.
- Davis, C. A., and K. A. Emanuel, 1991: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, Vol. 119, pp. 1929-1953.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 111, pp. 877-946.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2014a: 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.
- IPCC, 2014b: 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.
- Ishikawa, H., Y. Oku, S. Kim, T. Takemi, and J. Yoshino, 2013: 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.
- Ito, R., T. Takemi, and O. Arakawa, 2016: A possible reduction in the severity of typhoon wind in the northern part of Japan under global warming: A case study. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 12, pp. 100-105, doi:10.2151/sola.2016-023.
- Kanada, S., T. Takemi, M. Kato, S. Yamasaki, H. Fudeyasu, K. Tsuboki, O. Arakawa, and I. Takayabu, 2017: A multi-model intercomparison of an intense typhoon in future, warmer climates by four 5-km-mesh models. *Journal of Climate*, Vol. 30, pp. 6017-6036, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0715.1.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 93, pp. 5-48.
- Kossin, J. P., 2018: A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature*, Vol. 558, pp. 104-107, doi: 10.1038/s41586-018-0158-3.
- Mitsuta, Y., and T. Fujii, 1987: Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 37, pp. 169-185.
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai, M. Nakagawa, 2006: 20 km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 84, pp. 165-185.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 90A, pp. 233-258.
- Mizuta, R., O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo, and A. Kitoh, 2014: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, Vol. 10, pp. 167-171.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase,

- M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, M. Kimoto, 2017: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 98, pp. 1383-1398, doi: 10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
- Mori, N., M. Kato, S. Kim, H. Mase, Y. Shibutani, T. Takemi, K. Tsuboki, and T. Yasuda, 2014: Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, pp. 5106-5113, doi:10.1002/2014GL060689.
- Morimoto, J., K. Nakagawa, K. T. Takano, M. Aiba, M. Oguro, Y. Furukawa, Y. Mishima, K. Ogawa, R. Ito, T. Takemi, F. Nakamura, and C. J. Peterson, 2019: Comparison of vulnerability to catastrophic wind of Abies plantation forests and natural mixed forests in northern Japan. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, doi: 10.1093/forestry/cpy045
- Murakami, H., B. Wang, and A. Kitoh, 2011: Future change of western north pacific typhoons: Projections by a 20-km-mesh global atmospheric model. *Journal of Climate*, Vol. 24, pp. 1154-1169.
- Murakami, H., R. Mizuta, and E. Shindo, 2012a: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-sst ensemble experiments using the 60 km-mesh MRI-AGCM. *Climate Dynamics*, Vol. 39, pp. 2569-2584.
- Murakami, H., Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose, and A. Kitoh, 2012b: Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *Journal of Climate*, Vol. 25, pp. 3237-3260.
- Nakajo, S., M. Mori, T. Yasuda, and H. Mase, 2014: global stochastic tropical cyclone model based on principal component analysis with cluster analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 53, pp. 1547-1577.
- Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2011: LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp. 1692-1712, doi: 10.1175/2011JAMC2567.1.
- Nayak, S., and T. Takemi, 2019a: Quantitative estimations of hazards resulting from Typhoon Chanthu (2016) for assessing the impact in current and future climate. *Hydrological Research Letters*, Vol. 13, pp. 20-27, doi: 10.3178/hrl.13.20.
- Nayak, S., and T. Takemi, 2019b: Dynamical downscaling of Typhoon Lionrock (2016) for assessing the resulting hazards under global warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 97, pp. 69-88, doi:10.2151/jmsj.2019-003.
- Oku, Y., T. Takemi, H. Ishikawa, S. Kanada, and M. Nakano, 2010: 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.
- Oku, Y., J. Yoshino, T. Takemi, and H. Ishikawa, 2014: 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, doi:10.5194/nhess-14-2699-2014.
- Sato, T., F. Kimura, and A. Kitoh, 2007: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*, Vol. 333, pp. 144-154.
- Shimokawa, S., T. Murakami, S. Iizuka, J. Yoshino, and T. Yasuda, 2014: 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.
- Skamarock, W. C., 2004: Evaluating mesoscale nwp models using kinetic energy spectra. *Monthly Weather Review*, Vol. 132, pp. 3019-3032.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47 + STR, 113 pp.
- Takano, K. T., K. Nakagawa, M. Aiba, M. Oguro, J. Morimoto, Y. Furukawa, Y. Mishima, K. Ogawa, R. Ito, and T. Takemi, 2016: Projection of impacts of climate change on windthrows and evaluation of potential silvicultural adaptation measures:

- A case study from empirical modelling of windthrows in Hokkaido, Japan, by Typhoon Songda (2004). *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 138-144. doi: 10.3178/hrl.10.138.
- Takayabu, I., K. Hibino, H. Sasaki, H. Shiogama, N. Mori, Y. Shibutani, T. Takemi, 2015: Climate change effects on the worst-case storm surge: a case study of Typhoon Haiyan. *Environmental Research Letters*, Vol. 10, 064011, doi:10.1088/1748-9326/10/6/064011
- Takemi, T., 2009: High-resolution numerical simulations of surface wind variability by resolving small-scale terrain features. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 57, pp. 421-428, doi:10.11345/nctam.57.421.
- Takemi, T., 2013: 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, doi: 10.11345/nctam.61.3.
- Takemi, T., 2018a: Importance of terrain representation in simulating a stationary convective system for the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall case. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, pp. 153-158, doi:10.2151/sola.2018-027.
- Takemi, T., 2018b: The evolution and intensification of Cyclone Pam (2015) and resulting strong winds over the southern Pacific islands. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 182, pp. 27-36, doi: 10.1016/j.jweia.2018.09.007.
- Takemi, T., 2019: Impacts of global warming on extreme rainfall of a slow-moving typhoon: A case study for Typhoon Talas (2011). *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 15, pp. 125-131, doi: 10.2151/sola.2019-023.
- Takemi, T., and R. Rotunno, 2003: The effects of subgrid model mixing and numerical filtering in simulations of mesoscale cloud systems. *Monthly Weather Review*, Vol. 131, pp. 2085-2101.
- Takemi, T., S. Nomura, Y. Oku, and H. Ishikawa, 2012: 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. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 90A, pp. 189-212.
- Takemi, T., R. Ito, and O. Arakawa, 2016a: Robustness and uncertainty of projected changes in the impacts of Typhoon Vera (1959) under global warming. *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 88-94, doi: 10.3178/hrl.10.88.
- Takemi, T., R. Ito, and O. Arakawa, 2016b: Effects of global warming on the impacts of Typhoon Mireille (1991) in the Kyushu and Tohoku regions. *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 81-87, doi: 10.3178/hrl.10.81.
- Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 15, pp. 22-27, doi:10.2151/sola.2019-005.
- Yoshida, T., and T. Takemi, 2018: Properties of mixing length and dispersive stress in airflows over urban-like roughness obstacles with variable height. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, pp. 174-178, doi:10.2151/sola.2018-031.
- Yoshida, T., T. Takemi, and M. Horiguchi, 2018: Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 168, pp. 127-153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8.