

台風と地球温暖化 — 我々は何をなすべきか

名古屋大学

宇宙地球環境研究所 教授 坪木和久



北海道大学理学部卒業。日本学術振興会特別研究員（北海道大学低温科学研究所）、東京大学海洋研究所助手、名古屋大学大気水圏科学研究所助教授、名古屋大学地球水循環研究センター助教授／准教授、教授を経て、現在、名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授。日本人として初めて、航空機によるスーパー台風の直接観測に成功した気象学者。

1. はじめに — 地球温暖化は何をもたらすのか

我々人類が直面している最大の問題の一つ、それが地球温暖化（より一般的に「気候変動」という）である。しかし生活習慣病とよく似て、その危機の大きさを直接感じることは難しい。なぜなら人間は目の前に突然現れる危険には機敏に反応できるが、長い時間を掛けて起こる緩やかな変化には極めて鈍感だからだ。

地球の表面は、地球から逃げる熱（地球放射）を大気が捉えることで適温に保たれている。これを大気の温室効果といい、その程度は大気成分によって決まっている。地球放射を捉えて熱が逃げにくくする気体成分（温室効果ガス）が増えればそれだけ地表面付近の気温が上昇することは容易に理解できる。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書⁽¹⁾によると、代表的な温室効果ガスである二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の濃度が、少なくとも過去 80 万年間で前例のない水準に達しているということである。それに伴って地表面付近の気温が上昇するのは当然のことである。

これも IPCC 報告書によるものであるが、1880 年から 2012 年の間に地球全体の平均気温が 0.85℃ 上昇している。これは 100 年当たりになると 0.64℃ になる。一方、気象庁の観測によると日本の平均気温は、100 年当たり 1.26℃ 上昇している⁽²⁾。つまり日本は世界平均のおよそ 2 倍の速度で気温が上昇していることになる。温暖化は地球全体が一様に昇温するのではなく、地域によって上昇率は異なるのである。地球全体を対象とする数値シミュレーションを用いた将来予測では、高緯度ほど温暖化に伴う昇

温が大きいことを示している。特に極域は昇温率が大きく、実際に北極海の海水はどんどんと減少していることが観測されている。

もちろん地球の歴史には今より温暖な時期があった。たとえば縄文時代には温暖な期間があった。現在起こっている地球温暖化が問題なのは、平均気温が何度になるかということよりも、むしろ平均気温の上昇速度がかつてなく大きいということである。人間を含む地球の生物は長い時間を掛けて気候に適応してきた。現代の気候変動は、生物が適応できないほど急激であることが問題なのである。そしてその急激な変化を人間活動がもたらしている。産業革命以降、人間は石油、石炭、天然ガスなどの地中に埋まっている化石燃料を燃焼させ、大気中の二酸化炭素を急激に増加させてきた。その結果、かつて地球が経験したことがない速度で地表面付近の気温が上昇しているのである。まさに私たちは気候を大変動させている時代に暮らしているのである。

この気候変動に伴い、大気や海洋さらに陸面のさまざまな現象や状態に変化が起こる。猛暑、豪雨、台風やハリケーンの激甚化、海水温の上昇、それに伴う海面上昇による低地の浸水、植生の変化、海洋の酸性化、海洋生物の変化、熱帯性病原体の中緯度域への侵入などが起こっている。これらはどれも科学者が予言したもののばかりだ。平均気温が上昇すると、平均的に大気中の水蒸気量が増加する。温暖化とともに大気中の水蒸気が増えることで、より激しい積乱雲の群が発生しやすくなる。その結果、より強い雨が多くなる。実際、気象庁や国土交通省の資料では、強い雨が增加していることが示されている⁽³⁾。日本は湿

潤な気候帯にあるので、豪雨が激甚化すること、すなわち、その強度、頻度、総雨量が増大することが、今後ますます防災上の大きな問題となる。

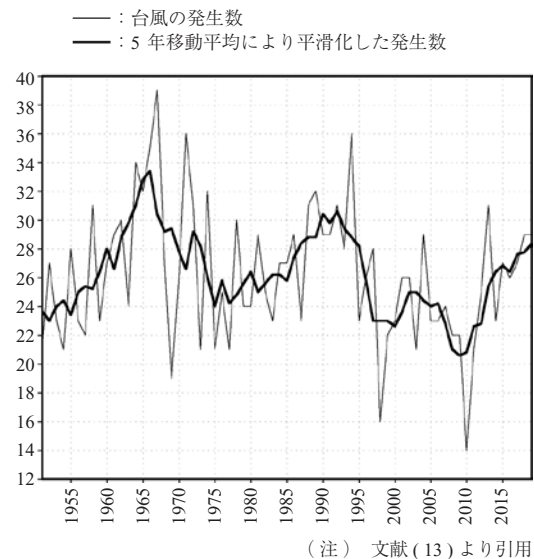
2. 台風の将来予測

日本は世界的にみても自然災害が多く、自然災害のデパートのような地域である。地震や火山などの地球物理学的災害もあるが、特に気象災害はその種類という点でも頻度という点でもほかに類のないほど多い地域である。日本はユーラシア大陸と地球上で最も温かい北太平洋西部の間に位置しており、モンスーン（季節風）活動により発生する梅雨前線が豪雨をもたらす。さらに北太平洋西部では熱帯低気圧が発生し、台風が発達して日本に暴風と豪雨をもたらす。地球上で発生する熱帯低気圧には、ほかにハリケーンとサイクロンがあるが、それらのなかでも台風は最強であり、かつ発生数が最も多い。

実際、台風は日本における風水害の最も大きな要因である。一般社団法人日本損害保険協会が公表する風水害による保険金の支払額⁽⁴⁾を見ると、その上位10位のうち8件が台風によるものである。最も支払額の大きなものは、2018年台風21号によるもので1兆円を超えている。これは関西国際空港を高潮・高波で水没させ、神戸、大阪、京都などの関西地域に暴風による甚大な災害をもたらした台風である。

日本を含む東アジア地域に甚大な災害をもたらす台風が、地球温暖化とともに将来どのようなようになるのかは社会的に大きな問題である。しかしながら、温暖化に伴う台風の変動を過去の記録から推定することは容易ではない。台風の強度や位置の記録は、ベストトラックデータと呼ばれ、気象庁やアメリカの合同台風警報センター（JTWC）が公表しているが、その期間はたかだか70年ほどである。一方で台風の強度や大きさが台風ごとに大きく異なるだけでなく、第1図に示すように発生数は年々変動が大きく、さらに数十年変動が長期変動に重なっているため、この短いデータ期間から長期的な変動のトレンド（傾向）を抽出することは容易ではない。

それでもベストトラックデータから、台風の最大強度となる緯度が北半球では年々北上していることや⁽⁵⁾、東アジアと東南アジア地域に上陸する台風の強度が過去数十年間に増大していること⁽⁶⁾などが示されている。さらに気象研究所が最近発表した研究結果では、過去40年の日本の太平洋側に接近する台風の数が増えていること、こ



第1図 気象庁のベストトラックデータによる1951～2019年の各年の台風の発生数

れらの台風の強度が増大していること、さらに台風の移動速度が遅くなっていることが示された⁽⁷⁾。これらの研究結果は、中緯度に位置する日本において、台風の災害リスクが増大していることを意味している。その主な原因は海面水温の上昇で、気象庁によると日本付近の海面水温は過去100年で1℃程度上昇している⁽⁸⁾。

台風のなかでも最強のカテゴリーをスーパー台風（supertyphoon）と呼び、JTWCは最大地上風速67m/s以上の台風と定義している。2013年にフィリピンに上陸したスーパー台風Haiyanは、猛烈な暴風による災害に加えて、大規模な高潮を発生させ、死者7000人を超える甚大な災害をもたらした。このスーパー台風がもし150年前の気候で発生したらどのような強度になるのかという数値シミュレーションが行われた。それによると150年前と比べて温暖化の進んだ現在では、Haiyanの強度が増加しており、それに伴う高潮も20%増大したことが示された⁽⁹⁾。

台風の将来予測については、理論的研究のほかに数値シミュレーションによる研究が活発に行われている。私の研究室でも高解像度モデルを用いた研究を行っており、特にスーパー台風のような強い台風が将来どうなるのかについて注目している。主要な温室効果ガスである二酸化炭素の量の将来変化についてはさまざまなシナリオがあるが、極端ではない増加を想定すると、今世紀末ごろには現在より気温や海面水温が2～3℃上昇すると予想される。そのような温暖化気候で台風の高解像度シミュレーションを行うと、最も強いスーパー台風は、現在の気候の最も強い台風

の最低中心気圧より 10 hPa ほど低くなる。この結果は、多くの研究から示されている温暖化とともに強い台風が増えることと符合している。さらに現在の気候では日本本土にスーパー台風は上陸していないが、予測された未来のスーパー台風の経路（第 2 図）が示すように、今世紀末ごろの温暖化した気候では、スーパー台風が本土に上陸する可能性があることが示された⁽¹⁰⁾。

3. 台風の強度推定と予測における問題点

前節で述べたように、日本は自然災害大国であり、そのなかでも台風が風水害の多くの部分を占めている。フィリピンに大災害をもたらしたスーパー台風 Haiyan は、地球温暖化に伴う台風災害の日本における激甚化を示唆している。日本の位置する中緯度地域の台風災害のリスクが増大していることは多くの研究が示しており、Haiyan のようなスーパー台風の日本本土への上陸についての対策が必要である。特に東京湾、伊勢湾、大阪湾周辺では海拔ゼロメートル地帯が広がり、高潮に対して脆弱である。これらの地域ではスーパー台風の上陸が予想されると、数十万人、あるいはそれ以上の大規模な避難が必要になる。その極めて大きなコストの大規模避難には、それに見合う精度の台風強度の解析とそれに基づく予測が必要である。台風の進路だけでなく、強度の高精度推定と予測精度の向上に対する社会的要請は大きい。

しかしながら台風については未解明な点が多く、進路や強度の予測には大きな不確実性がある。そもそも海上で発

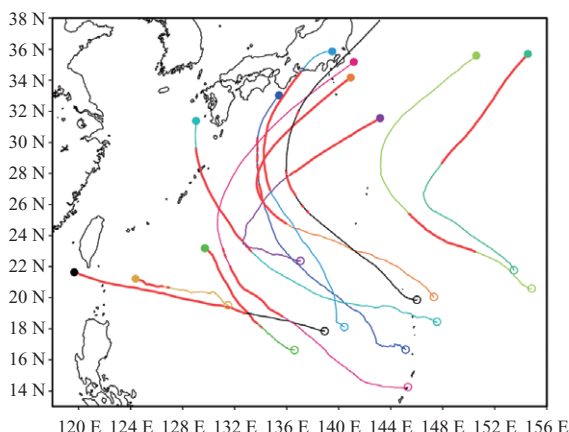
生・発達する台風については、観測データが限られており、正確な中心気圧を知ることは容易ではない。実際、台風の強度の指標である最大地上風速や中心気圧などの推定値にも大きな不確実性がある。1987 年までは米軍が航空機により台風を直接観測していたが、その終了以降は、気象衛星で観測される雲のパターンから台風の強度が推定されるようになった。気象庁と JTWC はそれぞれ西太平洋の台風の強度を推定しているが、それらのベストトラックデータを比較すると、強度に大きな違いがあることが分かる。特に強い台風ほどその違いは顕著になり、最も強い台風では地上風速の違いが 20 m/s に達することもある。これは防災という観点で大きな問題であるだけでなく、さらに台風の強度予測の原因として大きな問題となる。

もう一つの問題である台風の予測については、進路予測は年々改善されているが、強度の予測が過去数十年にわたってほとんど改善されていないという問題がある⁽¹¹⁾。この強度予測についての問題は、アメリカやヨーロッパなどのほかの気象予報機関にも共通してみられ、台風の強度予測が容易ではないことを示している。その原因は台風を予測する数値予報モデルの解像度やそれに取り入れられている物理過程の不十分さもあるが、そもそも海上の台風については観測データがほとんどないという点が大きな原因となっている。

4. 台風の航空機観測

台風の強度の正確なデータを得るには航空機による直接観測しかないが、日本が台風について航空機観測を行ったのは、2008 年の T-PARC (THORPEX Pacific Asian Regional Campaign) プロジェクトだけで、それ以来、台風の航空機観測は行われてこなかった。日本は西太平洋の台風を観測するべき最前線にあり、しかも社会的意義の大きな観測であるにもかかわらず、これまで台風の航空機観測は行われてこなかったのである。そこで名古屋大学、琉球大学、気象研究所を中心とする研究グループは、台風の航空機観測を行う T-PARCI (Tropical cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts) プロジェクトを 2016 年から開始した。T-PARCI は科学研究費助成事業基盤研究 (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」(研究代表者 坪木和久)の主課題として実施しているものである。

台風のような変動の激しい現象について、しかも広大な



(注) 文献(10)より引用。
 水平解像度 2 km の雲解像モデルを用いたコンピュータ実験から得られた、今世紀後半の温暖化した気候で発生するスーパー台風の移動経路を示す。
 経路のうち、赤い太線部は最大地上風速 67 m/s 以上のスーパー台風の期間、開円は計算開始点、閉円は終了点を示す。

第 2 図 スーパー台風の移動経路

西太平洋の陸から遠く離れた海洋上で発生・発達する台風について機動的観測を行うためには、長距離を飛行できるジェット機が唯一の手段となる。さらに台風は十数 km の高度まで発達するので、その高度まで上れる航空機が必要である。台風は沖縄地方の南方海上付近で最大強度に発達するものが多い。また、この海域は偏東風で西進した台風がそのまま大陸方向に進むのか、転向して日本に向かうのかの分かれ道で、しばしば、進路について不確実性が高くなる領域である。そこで T-PARCII プロジェクトでは、この海域を通過する台風を対象として航空機観測を実施している。

T-PARCII プロジェクトでは、名古屋大学と明星電気株式会社で新たにドロップゾンデを開発し、台風観測を行った。明星電気は高層気象観測で用いる気象ゾンデを長年にわたって製作している国内唯一の電機メーカーで、公益社団法人日本気象学会は、その功績をたたえて、2017 年度の「岸保・立平賞」という社会貢献を顕彰する賞を授与した。気象学会はさまざまな顕彰を行っているが、民間企業で気象学会の賞を受賞したのは、今のところ明星電気だけである。

この研究で使用するドロップゾンデシステムは、2016 年に一から開発したもので、ドロップゾンデ本体（第 3 図）は軽量化し、航空機からの射出時にトラブルの主要因となるパラシュートを使用しない点が特長である。本体は発泡スチロールでできているように見えるが、その素材はトウモロコシを原料とする生分解性素材である。1 回の台風観測では 20 ～ 60 個のドロップゾンデを投下するので、近年、大きな問題となっているプラスチックを使用せず、環境負荷を低減することは重要である。ドロップゾンデは大気中を落下しながら、上空十数 km か

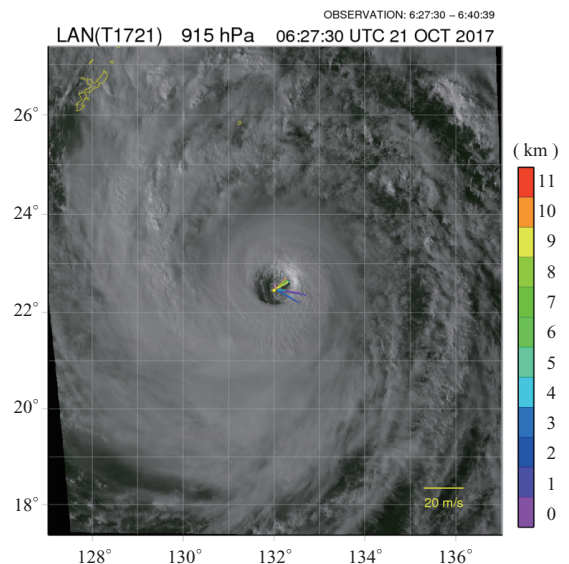


（注）右端の温度と湿度センサー側が下になって落下し、上空から海面までの温度、湿度、気圧、風向・風速、高度を測定する。ボディは生分解性素材でできている。

第 3 図 台風の航空機観測で使用するドロップゾンデ（明星電気株式会社製）

ら海面までの気温、気圧、高度、湿度、風向・風速を測定し、データを電波で航空機に送信する。機内ではリアルタイムでデータを見ることができ、さらにそのデータを地上に送ることができる。T-PARCII プロジェクトでは、観測データをリアルタイムで名古屋大学を經由して気象庁に送信することに成功した。さらにそのデータは世界中の気象予報機関に転送され、台風の予報に生かされた。

T-PARCII プロジェクトでの航空機観測は、2017 年台風 21 号と 2018 年の台風 24 号について実施された。私は航空機でこれらの台風の目の中に入り、中心気圧や最大地上風速を直接観測することに成功した。第 4 図は 2017 年の台風 21 号の衛星画像と、その目の中心でドロップゾンデにより観測した風である。第 5 図はそのとき撮影した台風の目の中の風景である。下層の渦と、その後ろにそそり立つ目の壁雲が見える。さらにその観測デー



（注）投下点から延びる線は風速、色は高度 (km) を表す。

第 4 図 台風 21 号（国際名 Lan）の気象衛星ひまわり 8 号の可視画像（2017 年 10 月 21 日、日本時間 15 時 27 分）とドロップゾンデ投下位置



第 5 図 航空機のキャビンから見た目内部の風景（2017 年 10 月 21 日、台風 21 号の目に貫入観測を行ったとき）

タを用いて台風予報が改善されることが示された⁽¹²⁾。これらの台風の航空機観測については、拙著「激甚気象はなぜ起こる」⁽¹³⁾にその詳細を記述したので、そちらを参照いただきたい。

5. 無人航空機 — 将来の台風観測

世界的にみると台風やハリケーンの航空機観測を行っているのはアメリカと台湾だけである。台湾は台風周辺の飛行観測を行うだけで、目には入らないことになっている。アメリカは米軍のハリケーンハンターが特殊な航空機で3 kmほどの低高度での貫入観測を行っているが、それ以外では、中程度の強度以上のハリケーンの目には入らない規則となっている。T-PARCIプロジェクトが実施した強い台風への高高度での貫入観測は世界的にもほとんど行われておらず、高高度からの台風の目内部での直接観測は貴重なデータを提供する。

一方でこのような有人航空機による観測は、人的負担が大きく、長期間の高頻度観測は容易ではない。近年の無人航空機の技術の発展はめざましく、将来、有人航空機による台風観測は無人航空機によるものに置き換えられることが期待される。実際、アメリカではグローバルホークを用いたハリケーンの観測が行われている。台湾も固定翼型無人航空機による観測を試験的に行っている。ただ、やはり長期間の観測は、技術的にまだ難しいのが現状で、航空機観測先進国のアメリカもすぐには無人飛行機に移行するわけではないようだ。

北太平洋西部では時期になると台風が次々と発生するので、長期間の観測を無人飛行機により行えるようにすることは将来的には不可欠である。そのためには長期間上空に滞在できる無人飛行機が必要で、成層圏下部から常に太平洋上の台風を監視できるようにしたい。台風が発生するとその上空に移動し、必要に応じてドロップゾンデを投下し、台風の直接観測を行う。そのデータはリアルタイムで気象予報機関に送信され、高解像度の予報モデルに取り込まれる（同化される）。その結果、台風の進路だけではなく、強度も量的に精度よく予報できるようになるだろう。そのような予報は前述の大規模避難を可能にし、その結果、日本を含む東アジア地域では、台風災害により人の命が失われることのない世の中を実現している。それには20～30年かかるかもしれないが、それに向けた研究と技術開発は非常に価値のあるものだ。

6. おわりに — 台風災害の軽減に向けて

残念ながら、現状は毎年のように多くの命が台風により失われている。2019年の台風19号（令和元年東日本台風）では100人を超える犠牲者が出た。2011年の台風12号、2004年の台風23号でも100人近い命が失われた。2013年のフィリピンのスーパー台風Haiyanの災害では、犠牲者が7000人を超えた。このような人命損失を防ぐことが、防災における最も重要な課題である。

そのために台風予報精度を向上させ、それに基づく適切な避難を実施することこそが、台風による犠牲者をなくす最も重要な方法である。現状で台風災害を軽減するのはそれ以外にない。一方でもし台風やハリケーンを人為的にコントロールできれば、その社会に与える恩恵は計り知れないだろう。科学者はそのような夢のようなことを考えるものである。

もう50年以上も前のことであるが、アメリカではハリケーンに対して実際に航空機からインパクト物質の散布を行い、ハリケーン制御を行ったことがある。それは1969年を最後に途絶えたままとなっている。その理由は台風やハリケーンにインパクト物質を散布して台風の強度や進路が変わったとしても、人為的インパクトが原因であることを証明できないからである。何もしくなくても台風は急速に強度が変わることもあるのだ。

かつて日本でも台風の人工制御を検討したことがあった。実は災害対策基本法には、「台風に対する人為的調節その他防災上必要な研究」が実施に努めなければならない項目として挙げられている。しかし日本では霧消しや人工降雨という気象の人為的調節は行われたことはあるが、台風の人工制御は行われたことはない。

それでは台風の人工制御は可能だろうか。台風という自然現象の人為的変更の是非についての哲学的問題や、それについての社会の受容性の問題、さらにはその一国では閉じないという国際問題があることを認識したうえで、台風の人工制御は原理的には可能だと思う。50年前と現代の大きな違いは、コンピュータの急速な発達により、台風を精度よくシミュレーションできるようになったことである。これによりコンピュータの中で、完全に同じ台風をいくつでも作り出すことができ、それらに何通りでもインパクト物質を散布して台風の応答を調べたり、物理実験や生物実験で行われるような対照実験を行ったりすることができる。これにより人為的インパクトで台風が変化したこと

を証明できるようになった。

ただし原理的にできるということと、実際にできるということには、天と地ほどの違いがある。実際に台風インパクトを与えるためには、多くの技術開発が必要であり、それに加えて上記のような哲学的・社会的問題を克服する必要がある。そのためには30年はかかるだろう。それでも30年後、台風の脅威そのものを低減できる世の中が実現すれば素晴らしいと皆さまは思わないだろうか。さらに台風の人工制御に向けた研究や技術開発は、台風の科学的理解、観測法の発展、無人飛行機の開発、台風の高精度シミュレーション、予報技術の高度化など極めて多くの有益な副産物をもたらす。実際に台風の人工制御を実施するかどうかは別として、それに向けた研究を加速することは、学術的にも社会的にも非常に価値の高いものである。さて、30年後、そのような世の中が実現しているだろうか。

参 考 文 献

- (1) IPCC : IPCC 第5次評価報告書, 第1作業部会報告書, 自然科学的根拠, 2013年
- (2) 気象庁 : 日本の年平均気温偏差の経年変化 (1898 ~ 2020年), https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html, (参照 2021. 4. 12)
- (3) 気象庁 : 大雨や猛暑日など (極端現象) のこれまでの変化, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html, (参照 2021. 4. 12)
- (4) 一般社団法人日本損害保険協会 : 風水害等による保険金の支払い, https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/ctuevu000000530r-att/c_fusuigai.pdf, (参照 2021. 4. 12)
- (5) J. P. Kossin, K. A. Emanuel and G. A. Vecchi : The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity, *Nature*, Vol. 509, No. 7 500, (2014. 5), pp. 349 - 352

- (6) W. Mei and S.-P. Xie : Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s, *Nature Geoscience*, Vol. 9, No. 10, (2016. 10)
- (7) M. Yamaguchi and S. Maeda : Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 98, No. 4, (2020. 8), pp. 775 - 786
- (8) 気象庁 : 海面水温の長期変化傾向 (日本近海), http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html, (参照 2021. 4. 12)
- (9) I. Takayabu, K. Hibino, H. Sasaki, H. Shiogama, N. Mori, Y. Shibutani and T. Takemi : Climate change effects on the worst-case storm surge: a case study of Typhoon Haiyan, *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 6, (2015. 6)
- (10) K. Tsuboki, M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada and A. Kitoh : Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change, *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 2, (2015. 1), pp. 646 - 652
- (11) K. Ito : Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 12, (2016), pp. 247 - 252
- (12) K. Ito, H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda and K. Tsuboki : Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of tropical cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARACH, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, (2018), pp. 105 - 110
- (13) 坪木和久 : 激甚気象はなぜ起こる, 新潮社, 2020年5月, p. 399