

# Ph.D. 取得報告書（2018年5月）

2014 年度 Funai Overseas Scholarship 奨学生  
Department of Meteorology and Atmospheric Science  
The Pennsylvania State University  
南出将志

本報告書をお読み頂きありがとうございます。アメリカに来てから3年と8ヶ月、ついに博士号を取得することができました。本報告書では、頂いたご支援の果てに達成することのできた、博士論文の研究内容と今後の展開についてご報告差し上げたく思います。また、末尾に業績リストを添付いたしますので、宜しければご覧ください。

\*\*\*\*\*

博士論文タイトル：

## On the Predictability of Tropical Cyclones through All-sky Infrared Satellite Radiance Assimilation

Advisor: Dr. Fuqing Zhang,

Committee: Dr. Eugene E. Clothiaux, Dr. David J. Stensrud, Dr. John Harlim

### 1. 背景

さて、みなさんは、「台風」と聞いてどの程度の危険度を想像するだろうか。「傘が壊れそう」「田んぼの様子を見に行ってはいけない」「やった、学校が休みだ！」などの意見を最近耳にしたが、果たして日本においては、無茶をしなければ決して恐れるに足りないものと思っている方も多いかもしれない。しかし、決してそんなことはない。台風はその大雨による河川氾濫だけでなく、強風による木々の倒壊や、低気圧と強風による吹き付けが相まって発生する高潮など、都市に壊滅的な被害をもたらすことも少なくない。例えば近年では、2017年8月にテキサス州などを襲ったハリケーン<sup>1</sup> Harvey は、同地域に100人を超える死者を出した。あるいは2011年12月にフィリピン・ミンダナオ島を襲った台風 Washi は、一つの街を丸々流し去ってしまうような猛烈な被害を生じている。残念ながら、台風は今もなお、人を殺す災害である。

---

<sup>1</sup> 台風とハリケーン（およびインド洋のサイクロン）は、熱帯低気圧という同じ現象です。大西洋または東太平洋で発生すればハリケーン、西太平洋で発生すれば台風と呼ばれます。

よって、被害を軽減するために、台風の予測精度向上は至上命題である。しかしながら、台風には厄介な特徴が一つある。台風やハリケーンは突然急激に発達することが知られており、そのような急速な発達、極めて予測が難しい。

一般的に、台風強度予測の向上には、台風の内部領域に関する観測情報の同化が必要不可欠であることが幾つかの先行研究から指摘されている。しかしながら、殆どの台風は陸上観測網、及び航空機観測の届かない熱帯海洋上で発達するため、台風の内部領域の情報を得られる観測網は非常に限られている。例えば米国では、無人航空機などを大西洋上空のハリケーン（の卵）に向けて飛ばすことで、その内部構造の観測を積極的に行なっている。しかしながら、そのような多くの資源を投じた観測をもってしても、観測できる空間的範囲・期間は地上から航空機が飛んで戻って来られる領域に限られており、急速に猛烈に発達するハリケーンを捉えるには大きく不足している。衛星観測でさえも、極軌道衛星のような非静止軌道衛星は、偶然台風の位置と衛星の軌道が一致しなければ台風を観測することができず、かつ時間分解能も良くて数時間程度と、台風の内部領域の発達を捉えるには十分でない。多くの場合、静止軌道衛星による赤外衛星観測データが、台風の内部領域を高頻度・高解像度で捉えることのできる唯一の情報ソースである。

次世代の静止軌道衛星観測を担う存在として、近年、高空間・時間分解能を持つ衛星が登場した。2014年11月に日本より打ち上げられたひまわり8号、それから2年の時を経てアメリカより打ち上げられた Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)-16 である。両者はいずれも、2 km メッシュの空間分解能と、フルディスクスキャンで 10-15 分の時間分解能を持つ赤外センサーを搭載している。さらに、高い水平分解能だけでなく、大気中の水蒸気量に感度のある周波数帯における観測（水蒸気バンドと呼ばれる）を、初めて3種類も搭載しており、大気中の鉛直構造についても多くの情報をもたらすことが期待されている。特に、ひまわり8号については、私が2014年に博士課程を初めた直後に打ち上げが成功しており、個人的に時運を感じずにはいられない。



Figure 1. ひまわり8号の想像図

さて、高性能の静止軌道衛星が無事に打ち上がったわけであるが、それによって予測向上が達成されました、と言うほどに話は単純ではない。残念ながら、静止軌道衛星による赤外衛星観測データは、数値気象予報に対して十分に使われていない現状がある。一般に、観測データを気象予報に活用する際には、データ同化という手法を用いて、気象予報モデ

ルによる数値シミュレーションに観測の情報を取り入れるという方法が用いられる。より具体的には、データ同化を通じて、大気の風速場・気温場・気圧場などについて正確な初期値を作成することで、観測の情報を数値シミュレーションに反映させている。しかしながら、赤外衛星の観測データのうち、特に雲域について観測したものは、数値シミュレーションに必要な大気の大気場・気温場・気圧場などの値に変換することが非常に困難であるため、（より専門的には、データ同化理論の前提となる大気鉛直プロファイルの観測に対する線形性という仮定が大きく破られているため）、数値予報に活用することは困難であった。例えば、ひまわり8号による台風の内部領域の情報のうち、現業の気象予報にデータ同化を通じて活用されている領域は、観測している地域の10%にも満たない<sup>2</sup>。

よって、本研究では、第一パートとして、静止軌道衛星による観測データを気象条件（雲域または晴天域）によらず活用することを可能とする、新たな手法を開発する。次に、第二パートとして、新たに開発した手法を用いて、次世代静止軌道気象衛星が台風・ハリケーン予測にどの程度貢献し得るか検証を行う。

## 2. Part 1: データ同化における新手法の開発

本研究では、まず気象条件によらない赤外観測のデータ同化を実現するために、2つの手法を開発した。この内容に関しては、どれだけ平易な表現を心がけてもなお、専門的な内容になってしまうこと、ご容赦願いたい。一方で、専門の方にとってはあまりに一般的な表現となってしまうかと思うので、詳細を知りたい方は原論文を参照頂ければ幸いである。

さて、データ同化とは、モデルシミュレーションの誤差と、観測の誤差という二つの異なる誤差に関する情報を組み合わせて、両者よりも正確な解析値を研鑽する手法である。本研究ではまず、従来のアルゴリズムのままでは赤外衛星観測データを上手く同化することができなかったのは、これらの誤差の推定方法に問題があったことが一つの要因であることを明らかにした。その上で、それぞれの誤差をより正確に推定する方法として、2種類の方法を新たに提案している。Minamide and Zhang (2017, MWR; 2019, QJRM)で詳細に議論されている二手法である。

---

<sup>2</sup> このわずかな10%ですら、過去数十年間で数値気象精度向上に革命的な変化をもたらしています。衛星が使われる前と後の数値気象予報を区別し、後者を”Satellite era”と呼ぶほどです。よって、打ち上げのコストに見合うメリットは十分にあるのですが、もし、衛星のデータを100%使えたら一体どれだけ良くなってしまおうんだ……！？というのが本研究のモチベーションです。

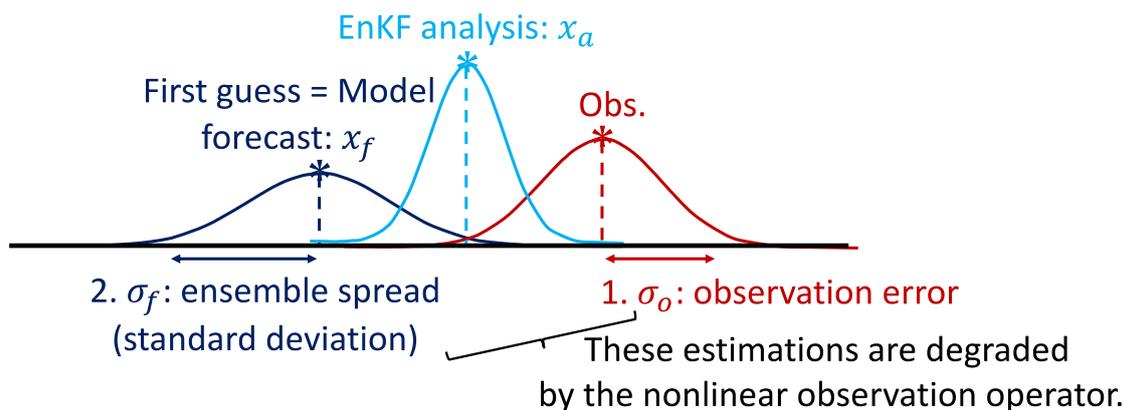


Figure 2. データ同化模式図。観測誤差（赤色）とモデルシミュレーションの誤差（青色）という2つの誤差に関する情報を組み合わせて、両者よりも正確な解析値（水色）を作る。

- **Minamide, M., and F. Zhang, 2017: Adaptive Observation Error Inflation for Assimilating All-sky Satellite Radiance, Monthly Weather Review, 145,1063-1081, doi:10.1175/MWR-D-16-0257.1**

Minamide and Zhang (2017)は、観測誤差に関する方の論文で、Adaptive Observation Error Inflation (AOEI)手法と呼ばれる手法を提案した。有り体に言えば、「非線形な観測演算子」という仮定の破れによって生じる、データ同化のパフォーマンス理論値との乖離を、誤差の計算に取り入れる内容となっている。ちなみに、このAOEI手法は、赤外衛星観測の全天候データ同化を行うために唯一のものではなく、（世界をリードする気象機関である）ECMWFの手法と同様のパフォーマンスが出ることも示している。この論文の本質的な成果は、「観測誤差の導出方法を再検討する必要がある」という他の分野で知られていた知見が、本研究のケースにも当てはまる（むしろ他のケースよりもシビアにその影響が効いてくる）ことを発見し、新たな手法を一つ提案したことによって、その解決策の潜在的な多様性を示したことではないかと考えている。

この手法（あるいは同等の効果を持つようにデザインされた手法）を用いなければ、安定的に全天候の赤外衛星観測データ同化を行うことは難しいので、本博士論文の中でも最も大切な基盤となった仕事だったと言える。元になるアイデアは、最初の学期中（2014年秋）に思い付き、指導教官や同僚の力を借りて数式化した。あまりデータ同化のことを深く理解していなかった時期だったからこそ出た、柔軟な発想の賜物だったと今にして思う。PhD課程前期の作品である。

- **Minamide, M., and F. Zhang, 2019: Adaptive Background Error Inflation for Assimilating All-sky Satellite Radiance, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, doi:10.1002/qj.3466.**

こちらは、モデルシミュレーションの誤差推定の方の論文で、上のものと対にすべく、Adaptive Background Error Inflation (ABEI)と名付けている。背景において説明した通り、気象条件の中でも特に雲域の扱いが、データ同化にとって困難で克服すべき問題として立ちふさがっていた。

ここで、もし全天候が雲域か晴天域の2種類に分類できるとすると、データ同化においては下図の4つの天候シチュエーションに直面することが分かる。本論文の面白いところは、この4つの天候シチュエーションによって、適切なモデルシミュレーションの誤差推定値が異なるという事実を明らかにしたことにある。その知見を用いて、本論文ではこれらの天候シチュエーションに合わせて、モデルシミュレーションの誤差推定値を矯正する手法を提案している。

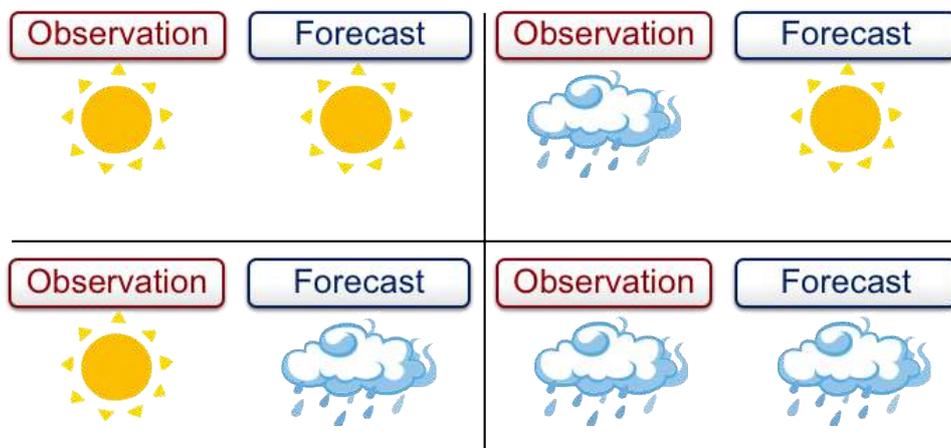


Figure 3. 4つの天候シチュエーション

前述の AOEI 手法は、全天候赤外衛星観測データ同化をクラッシュさせずに行うことを可能にしたが、依然として問題（「雲域をシミュレーションモデルで正確に捉えられなかった場合 (i.e. Fig.1 の右上のシチュエーション) に、データ同化を通じてそれを修正するのは難しい」)が残っていた。この問題を乗り越えるために、新たに開発した2つ目の手法が、この ABEI 手法である。

なお、本論文の内容は、指導教官からも "Everybody is excited about your data assimilation research, in particular in dealing with adaptive error inflation

schemes for all-sky radiance assimilation."というお墨付きを頂くことができた（先の 2018 年 AMS annual meeting でも、セッションを超えて、NCAR の Dr. Chris Snyder など業界のビッグネームを含む様々な方に言及して頂けたと聞いている）。また、個人的にも、この手法は PhD の後半に自分でアイデアを思い付き、実装し、結果を出すことができた内容であり、自身の成長を感じることでできた思い入れの深いものでもある（ほとんどの結果が出揃い、「もうこれで論文が書けます」というところになって初めて指導教官に見せに行ったのは、指導教官もびっくりしたことと思う）。ある程度分野のことを学んできて、面白いと思ったアイデアを指導無しに実装まで持って行き、実際に機能し、論文になりそうな成果を生み、かつ他の人にも面白いと思ってもらえたことは大きな自信になった。この経験を経て初めて、「卒業してもやっていけるかもしれない」という実感を得た。

### 3. Part 2: ハリケーン予測への適用

前章で開発した手法によって、その殆どが捨てられるしかなかった静止軌道赤外衛星の観測データについて、気象条件（雲域または晴天域）によらず赤外衛星観測データを活用することが可能となった。博士研究の後半では、それらの手法を活用し、次世代静止軌道気象衛星が実際にハリケーン・台風予測をどの程度向上しうるのかについて検証した。

- **Zhang, F., M. Minamide, E.E. Clothiaux, 2016: Potential Impacts of Assimilating All-sky Satellite Radiances from GOES-R on Convection-Permitting Analysis and Prediction of Tropical Cyclones, Geophysical Research Letters, 43, doi:10.1002/2016GL068468.**

赤外衛星観測輝度温度について、（雲域、晴天域によらない）全天候のデータ同化を、対流規模（数 km スケールメッシュの）ハリケーンシミュレーションに適用した世界で初めての研究となった。この論文では、proof-of-concept study を通じて、擬似観測を用いた理想実験により、台風予測における GOES-16 やひまわり 8 号といった静止軌道衛星の潜在的な有用性が示された。さらに、（当時はまだ GOES-16 がまだ打ち上がっていなかったため）GOES-13 により実際の観測データを用いての検証も行っている。[公開したアニメーション](#)では、まるで観測と見紛うほど正確に再現された、ハリケーン Karl (2010)の様子を見ることができる。

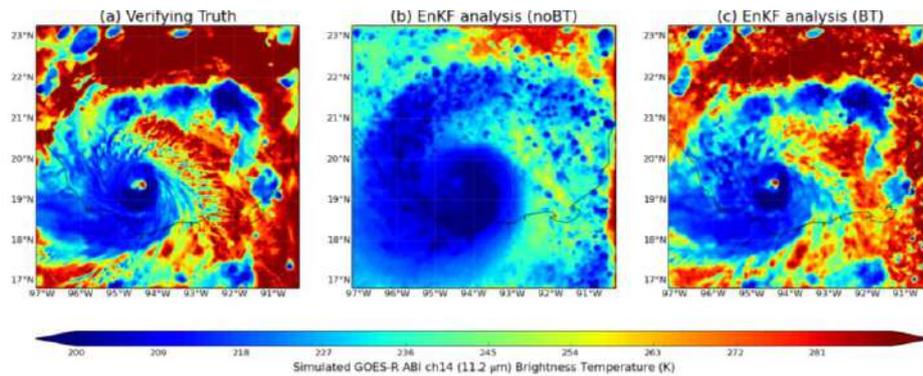


Figure. Simulated brightness temperature of GOES-R ABI channel 14; (a) verifying truth, (b) EnKF analysis with assimilating only minimum sea level pressure (c) EnKF analysis with assimilating brightness temperatures and minimum sea level pressure.

Figure 4. 開発した手法を用いた赤外衛星観測輝度温度全天候データ同化のパフォーマンス比較

この成果は、ペンシルベニア州立大学のプレスリリースを始めとして、数々のニュースに取り上げられ、”(This research) could potentially revolutionize hurricane prediction”と称された。詳しい内容は、[2016年3月の報告書](#)でご紹介した通り。なお、指導教官が First author にはなったものの、100%私の博士論文の研究成果である。

- **Minamide, M., and F. Zhang, 2018: Assimilation of all-sky infrared radiances from Himawari-8 and impacts of moisture and hydrometer initialization on convection-permitting tropical cyclone prediction, Monthly Weather Review, 146, 3241-3258, doi:10.1175/MWR-D-17-0367.1.**

Zhang, Minamide and Clothiaux (2016, GRL)の論文は Proof-of-concept study であったが、その後 PhD 課程途中でひまわり 8号が無事に打ち上がったので、次の論文では実際に打ち上がったひまわり 8号のデータに適用した成果を報告した。2015年最強の台風となったスーパー台風 Soudelor が発達するメカニズムや、予測に必要な要素について明らかにしている。実際の観測データを使って、実際に生じたケースで、予測向上に効果があることを示すことは、分野の発展を考える上で避けては通れない道である。幸いにも、台風の強度予測を大きく向上させることを示すことができ、少しホッとした。同時に、この分野がますます発展していく可能性が見えてきて、これ以降研究がどんどん益々楽しくなっていくきっかけとなった論文だった。

- Zhang, F., M. Minamide, R. Nystrom, X. Chen, S.-J. Lin, L. Harris, 2019: Improving Harvey forecasts with next-generation weather satellites. Bulletin of the American Meteorological Society, doi:10.1175/BAMS-D-18-0149.1
- Minamide, M., F. Zhang, 2018: Predictability of the rapid intensification of Hurricane Harvey (2017) examined through the convection-permitting ensemble assimilation of all-sky GOES-R radiances (投稿準備中)

PhD 課程も終盤に差し掛かった頃、今度は GOES-16 が運用を開始したため、GOES-16 の実際の観測データを適用した研究が、本博士論文の最後のパートとなった。ここでは、2017 年に米国テキサスを襲ったハリケーン Harvey に適用している。Harvey は特に、メキシコ湾での急速に再発達しテキサスに上陸した点が特徴的だが、その急発達をいずれの現業機関による予報も捉えることができなかった。非常に予測の難しいハリケーンであった。同時に、Harvey は GOES-16 によって観測された最初の上陸したハリケーンであり、かつ史上稀に見る壊滅的な被害をもたらしたため、非常に関心の高いトピックとなっている。本研究では、GOES-16 を用いて、Harvey の急激な発達の予測精度を、劇的に向上させることができた。GOES-16 と、これまでに提案してきたデータ同化手法の有用性が示された結果である。そのような背景から、顕著な成果を示した BAMS の論文は、[Nature の News article](#) にも取り上げられた。

ちなみに、このシミュレーションを回しているとき、ちょうど財団奨学生の何人かとニューヨークを旅行中で、みんながボードゲームに興じる横でラップトップを叩いていた記憶がある（ボードゲームには後ほど合流した）。懐かしい思い出である。あの時の作業が、こんな成果になりました！

#### 4. まとめと今後の展望

本博士論文の成果として、全天候における赤外衛星観測（特にひまわり8号のような次世代静止軌道衛星）を活用するための新たな手法を開発し、そのパフォーマンスを検証した。結果、雲や雨域について、観測と見分けがつかないほど正確にシミュレーションモデルで捉えることができるようになり、ハリケーンや台風の予測を大きく向上させる可能性を示すことができた。

静止軌道衛星は高頻度に半球をずっと観測し続けてくれているので、本研究の成果は、今回紹介した台風やハリケーンの事例だけでなく、豪雨や雷雨など社会に大きな被害をもたらすような様々な現象について、時と場所を選ばずに適用可能である。手前味噌だが、大変強力な手法であると言える。本研究の応用可能性は幅広い。とは言えもちろん、まだ検証できていないことや科学的に面白い問題点は数多く残っているので、今後も研究を通じて分野の発展に尽力していきたいと考えている。

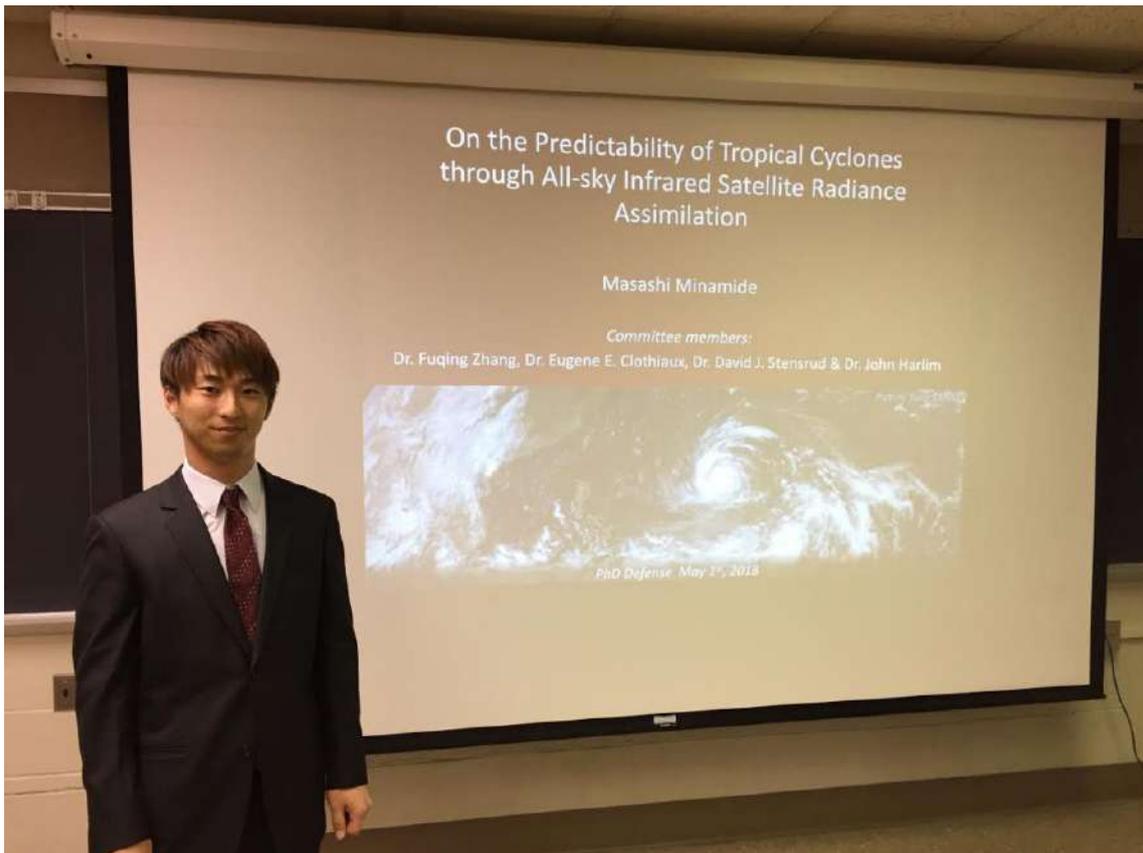


Figure 5. PhD defense の様子

PhD 卒業後は、博士論文の成果が認められ、かつさらなる研究と将来の衛星ミッションデザインへの貢献が期待され、ロサンゼルス近郊にある NASA の Jet Propulsion Laboratory (JPL) よりポスドクのおファーを頂いている。財団より暖かいご支援を賜ったからこそ、ペンシルベニア州立大学という、今思い返す限り博士課程を送る上で最高の環境に身を置くことができ（大学の環境や指導教官、その他の同僚という観点から、他のどの大学に行っても、私はこれ以上の成果は出せなかったという確信がある。もちろん他の人にとってベストな環境は異なるかもしれないが、そう断言できるほどに、私にとってペンシルベニア州立大学は合っていた）、結果このような研究を続ける光栄な機会を頂いたことは疑いの余地がない。どれだけ感謝してもしきれない。邁進せずに、自分ができることを一つ一つ積み重ねていきたい。

そして、昔フィリピンで見たような、台風の悲惨な爪痕をもう二度と見ることがないよう、そんな社会が実現されるよう、今後も気象予測と防災のさらなる発展に貢献できたら幸いである。

\*\*\*\*\*

ここまでお読み頂きありがとうございました。最後に改めて、ご支援頂いている船井情報科学振興財団の皆様には感謝の意を示したいと思います。このような貴重な機会を提供頂いたご厚意に応えることができるよう、今後とも精一杯精進したいと思います。よろしく願いいたします。

## 博士論文に関連する業績一覧

### PEER-REVIEWED PUBLICATIONS

- Minamide, M.**, and F. Zhang, 2019: Adaptive Background Error Inflation for Assimilating All-sky Satellite Radiance, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, doi:10.1002/qj.3466.
- Zhang, F., **M. Minamide**, X. Chen, R. G. Nystrom, S.-J. Lin and L. M. Harris, 2019: Improving Harvey forecasts with next-generation weather satellites and numerical models: Advanced hurricane analysis and prediction with NOAA's newly developed NGGPS model and assimilation of the newly launched GOES-16 all-sky radiance, *Bulletin of American Meteorological Society*, 100, doi:10.1175/BAMS-D-18-0149.1
- Minamide, M.**, and F. Zhang, 2018: Assimilation of all-sky infrared radiances from Himawari-8 and impacts of moisture and hydrometer initialization on convection-permitting tropical cyclone prediction, *Monthly Weather Review*, 146, 3241-3258, doi:10.1175/MWR-D-17-0367.1.
- Liu, S., D. Tao, K. Zhao, **M. Minamide**, and F. Zhang, 2018: Dynamics and predictability of the rapid intensification of Super Typhoon Usagi (2013), *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 123, 2147-2159, doi:10.1029/2018JD028561.
- Minamide, M.**, and F. Zhang, 2017: Adaptive Observation Error Inflation for Assimilating All-sky Satellite Radiance, *Monthly Weather Review*, 145,1063-1081, doi:10.1175/MWR-D-16-0257.1
- Zhang, F., **M. Minamide**, E.E. Clothiaux, 2016: Potential Impacts of Assimilating All-sky Satellite Radiances from GOES-R on Convection-Permitting Analysis and Prediction of Tropical Cyclones, *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2016GL068468.

### PRESENTATIONS

- Minamide M.**, F. Zhang, D. J. Posselt, 2019: An adaptive background error inflation method for assimilating all-sky radiances, *Spring Meeting of the Meteorological Society of Japan*, Tokyo, Japan (Oral Presentation)
- Minamide M.**, Y. Zhang, F. Zhang, 2019: Adaptive Observation Error Inflation (AOEI) and Adaptive Background Error Inflation (ABEI) for Convection-permitting Ensemble Assimilation of All-sky GOES-16 Radiances, *The 99<sup>th</sup> Annual Meeting of American Meteorological Society*, Phoenix, AZ (Oral Presentation)
- Minamide M.**, F. Zhang, 2018: On the Predictability of Tropical Cyclones through All-sky Infrared Satellite Radiance Assimilation, *Second ADAPT Symposium on “Advanced Understanding, Monitoring and Prediction of Weather, Climate and Environmental Systems”*, University Park, PA (Invited Oral Presentation)

- Minamide M.**, F. Zhang, 2018: On the Predictability of Tropical Cyclones through All-sky Infrared Satellite Radiance Assimilation, *Fall Meeting of the Meteorological Society of Japan*, Sendai, Japan (Oral Presentation)
- Minamide M.**, F. Zhang, 2018: Convection-Permitting Analysis and Prediction of Hurricane Harvey (2017) through Ensemble Assimilation of All-Sky GOES-R Radiance, *The 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Ponte Vedra, FL (Oral Presentation)
- Minamide M.**, J. Anderson, F. Zhang, 2018: Application of Empirical Localization Functions on All-Sky Satellite Radiance Assimilation, *The 98<sup>th</sup> Annual Meeting of American Meteorological Society*, Austin, TX (Oral Presentation)
- Minamide M.**, Y. Zhang, F. Zhang, 2018: Assimilating High-resolution All-sky Infrared Radiances from GOES-R and Himawari-8 for Severe Weather and Tropical Cyclone Prediction, *The 98<sup>th</sup> Annual Meeting of American Meteorological Society*, Austin, TX (Oral Presentation)
- Minamide M.**, F. Zhang, E. Clothiaux, 2016: Assimilation of all-sky infrared radiance from geostationary satellites, *Symposium on Advanced Assimilation and Uncertainty Quantification in BigData Research for Weather, Climate and Earth System Monitoring and Prediction*, State College, PA (Invited Oral Presentation)
- Minamide M.**, F. Zhang, E. Clothiaux, 2016: Assimilation of All-sky Infrared Brightness Temperatures and Atmospheric Motion Vectors in Tropical Cyclone Forecasting, *the American Meteorological Society's 32nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, San Juan, PR (Oral Presentation)
- Minamide M.**, F. Zhang, E. Clothiaux, 2015: Impact of Assimilating GOES-R Infrared Brightness Temperatures on the Forecast of Tropical Cyclones, *American Meteorological Society's 27<sup>th</sup> Conference on Weather Analysis and Forecasting / 23<sup>rd</sup> Conference on Numerical Weather Prediction*, Chicago, IL (Oral Presentation)

## **HONORS and AWARDS**

2018	AMS IOAS-AOLS Travel Award for the 22nd IOAS-AOLS Conference
2017	NCAR's Advanced Study Program's Graduate Student Fellowship
2015	Scholarship recipient of Joint Center for Satellite Data Assimilation (JCSDA) Summer Colloquium, Fort Collins, CO, 27 July to 7 August 2015