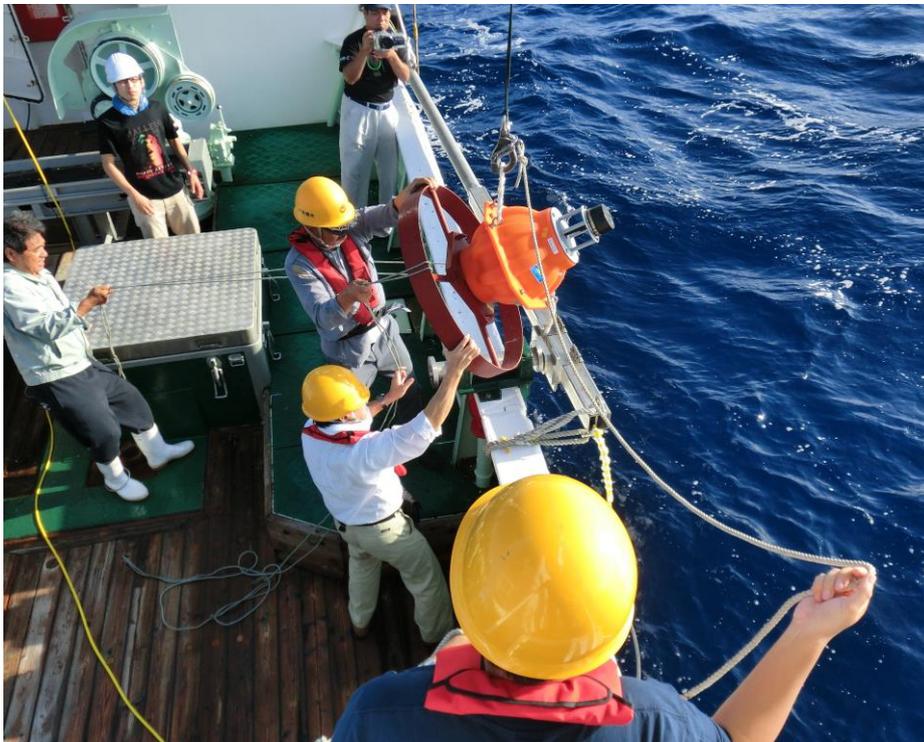


琉球海溝での巨大地震発生可能性と、その対策

琉球海溝では巨大地震が起こりにくいとされています。でも本当にそうなのでしょうか。プレート間で巨大地震が起こる場合、巨大地震の起こる前にはプレート運動によって歪がたまります。この歪が一気に解放されると巨大地震が発生します。歪がプレート間にたまっているのかどうか調べれば、巨大地震が起こりうるかどうか分かるはずです。

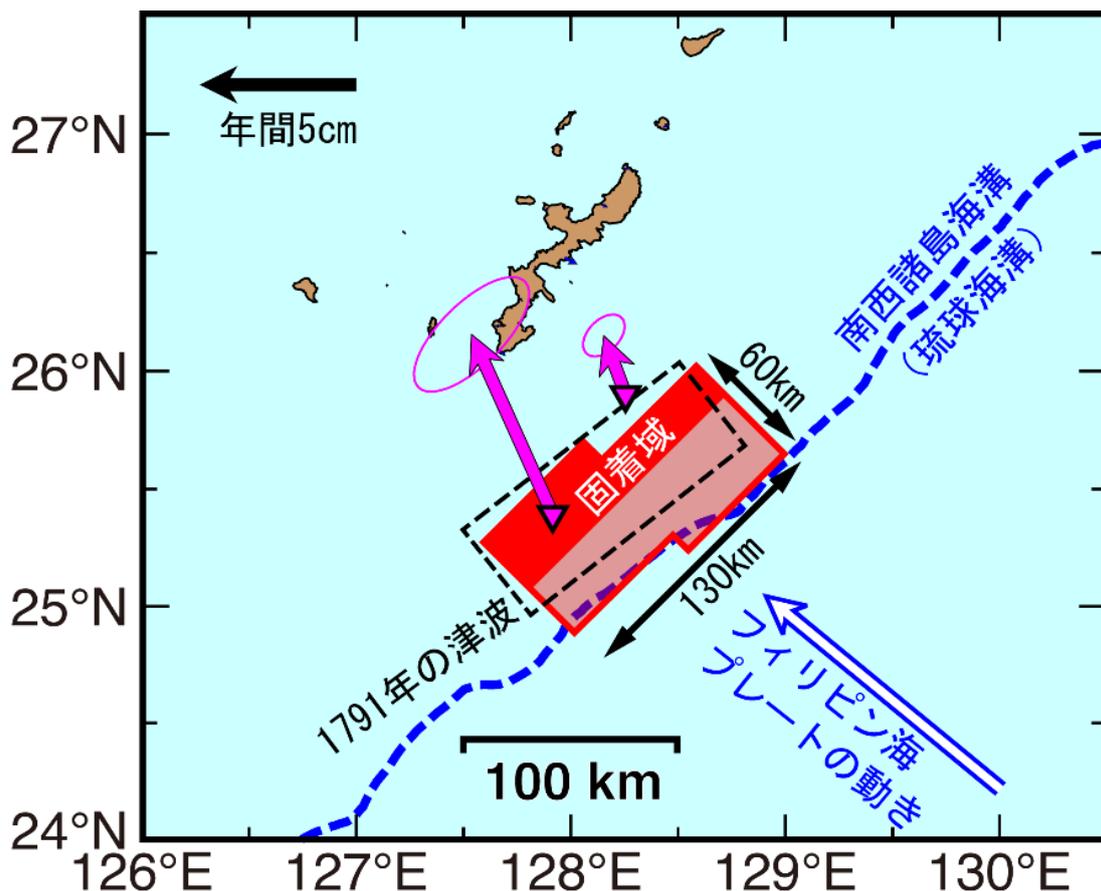
通常はGNSS (GPS) 観測点が陸上に多数配置されているので、GNSS 観測点の動きを調べてプレート間に歪がたまっているのかどうかを知ることができます。紀伊半島や四国地域の場合、フィリピン海プレートの沈み込みによってGNSS 観測点がフィリピン海プレートの動きと同じく北西方向に移動し、かつ中国地方はほとんど静止していることから、紀伊半島や四国地方に歪がたまっていることがわかっています。しかし南西諸島の場合、島に設置されたGNSS 観測点は南東方向に動いています。フィリピン海プレートの沈み込みで歪がたまっているのであれば、GNSS 観測点は北西向きに動くはずですが、南西諸島には歪が蓄積していないのでしょうか。ただ、南西諸島の場合、観測点は海溝から約100km離れた島々にしか設置できません。もし歪のたまっている領域がもっと沖合だったら、島々のGNSS 観測点では歪を捉えることはできません。



海底地殻変動観測の様子

歪を捉えるには、海域で GNSS 観測を行う必要があります。しかし海底には GNSS の電波は届きません。そこで、GNSS と音響測距を組み合わせたシステムで、海底の位置変化をセンチメートルの精度で測定するシステム（海底地殻変動観測）を使い、琉球海溝の海溝軸付近に歪がたまっているかどうか調べました。海底地殻変動観測は、名古屋大学と 2008 年から沖縄本島の南東沖で行っています。

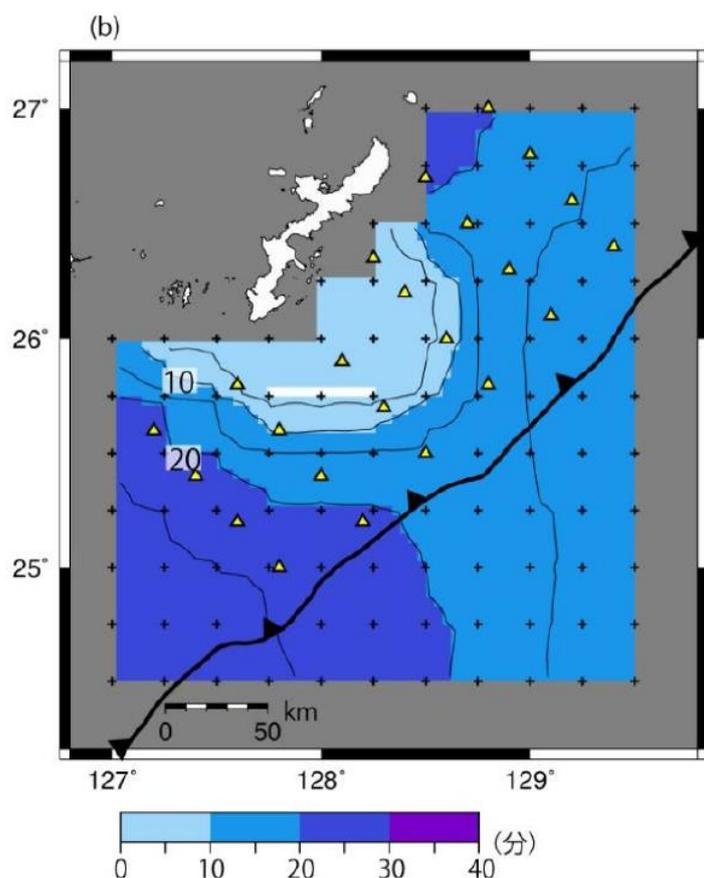
13 年におよぶこれまでの観測から、南側の観測点は沖縄本島に対して陸側に年間 7 cm で、北側の観測点は陸側に年間 2cm の速度で移動していることがわかりました (Tadokoro et al., 2018)。プレート間に歪をためている場所（固着域）があると仮定して、その領域を推定したところ、幅 30~60 km の固着域が必要であることがわかりました。海溝に沿った固着域の長さは 130 km 以上だと推定しています。ただし正確な長さはわかりません。これは海底観測点が沖縄本島沖の 2 か所だけのためです。固着域の大きさを把握するには、琉球海溝に沿ってさらに観測点を増やす必要があります。



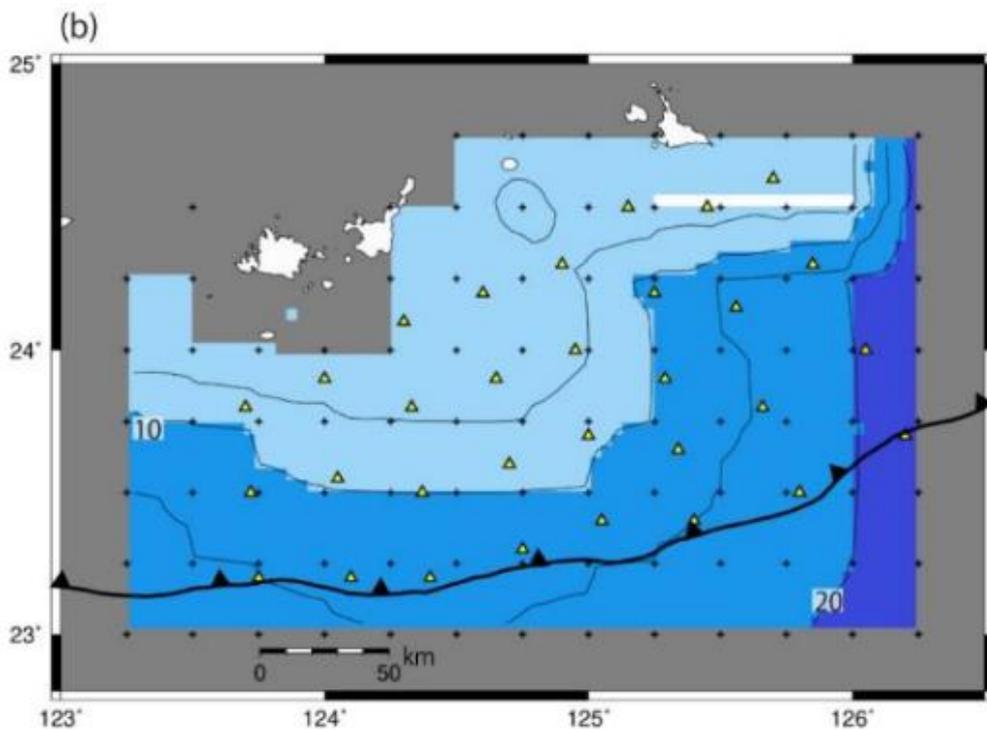
沖縄本島南東沖の固着域の分布

さて、琉球海溝で大地震が起こった場合、私たちはいち早く避難行動をとることができるでしょうか。避難行動をとるうえで、沖縄では予想外に大きな津波が襲来したことがあることが問題になってきます。例えば 1771 年に起こった八重山地震津波（明和津波）では、地震の大きさ（M8）から予想したものよりもはるかに大きな津波（遡上高 30 m 以上）が島々を襲っています。現在の気象庁の津波警報システムでは、陸上の地震計で地震の揺れを捉えた後、それを使って地震の位置とマグニチュードを決定し、それをもとに津波警報を発表します。しかし、海底地すべりなどによって地震の大きさから推定するよりも大きな津波が発生した場合、現在のシステムでそれを事前に察知することは不可能で、異変に気づくのは津波が沿岸に到達してからとなります。

それを防ぎ、いち早く正確な津波高さを知るには沖合で津波の観測を行う必要があります。そこで、沖縄本島や宮古・八重山諸島の沖合に地震津波観測網を設置した場合に、どれだけ早く地震や津波を検知できるのかを計算しました（仲間・中村, 2020; 親川・中村, 2020）。沖合に観測網がある場合には、津波を現在より 10~20 分早く検知できるようになります。また地震の揺れに対しても、大きな揺れを 10~20 秒前に検知できるようになります。



沖縄本島沖に沖合津波観測システムを設置した時に、システムが津波を感知して津波が沿岸に到達するまでの猶予時間(分)。



宮古・八重山諸島沖に沖合津波観測システムを設置した時に、システムが津波を感知して津波が沿岸に到達するまでの猶予時間。

現時点では海底に地震計や水圧計を設置して海底ケーブルで接続するシステムが主流です。非常に高価なのが難点です。しかし今、光ファイバケーブルそのもので地震観測をおこなう、安価な手法が注目されています。この手法を使えば、既存の使用されていない海底光ファイバケーブルや新たに設置する海底光ファイバケーブルを地震観測システムとして利用できます。

このような沖合地震津波観測網を設置するには県ぐるみの取り組みが必要です。現在、沖縄県は、九州地方知事会を通じて、沖合地震津波観測網設置のための琉球海溝における地震研究推進を国に働きかけているところです(九州地方知事会、2020年11月)。

論文リスト

Tadokoro, K., M. Nakamura, M. Ando, H. Kimura, T. Watanabe, K. Matsuhiro, 2018: Interplate coupling state at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements. *Geophys. Res. Lett.*

45(14) pp.6869-6877. doi.org/10.1029/2018GL078655.

3. 仲間辰樹, 中村 衛, 2020: 沖合津波観測システムによる沖縄近海での津波早期検知の可能性. 琉球大学理学部紀要, 109, 21-32.
4. 親川佳乃子, 中村 衛, 2020: 沖合地震観測システムによる沖縄近海での緊急地震速報の改善可能性. 琉球大学理学部紀要, 109, 9-19.

人々を災害から守るソロモン諸島気象局の新たな天気予報システム

南太平洋の島国であるソロモン諸島は、熱帯低気圧などの大気現象により、しばしば被害を受けてきました。そこで、ORCHIDS プロジェクトにおいて、当該国からの留学生らとともに、ソロモン諸島の気象防災に特化したシステムの構築に取り組んできました。2020年8月からは、現地気象局での運用が始まり、日々の気象防災に役立てられています。

背景

ソロモン諸島は、百あまりの島々からなる人口約65万人の南太平洋の国で、首都はガダルカナル島・ホニアラです。気候区分としては熱帯に位置し、海面水温も比較的高いことから、11月から5月にかけて、しばしば熱帯低気圧が発生します。多くの人々は現在でも島と島のあいだを木製のボートで行き来しており、社会的なインフラも十分には整っていないため、しばしば気象災害が発生します。

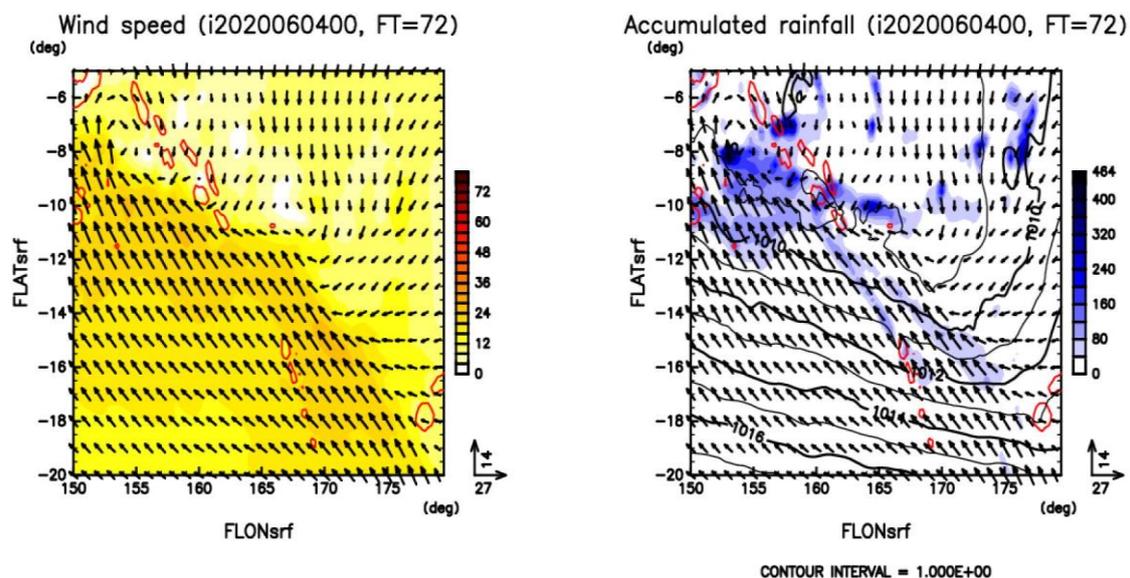


サイクロン Harold(2020)によって倒壊した建物(ソロモン諸島国家災害管理局 HP より)

効果的な防災・減災を実現するためには、その基礎となる天気予報の精度を高めることが欠かせません。これまで、ソロモン諸島気象局が日本・ヨーロッパ・アメリカ・オーストラリアなどが提供する天気予報システムの結果を監視し活用してきましたが、これらのシステムは、ソロモン諸島の天気予報、とりわけ、極端な大気現象の予報に特化したものではありませんでした。

システム開発～運用開始まで

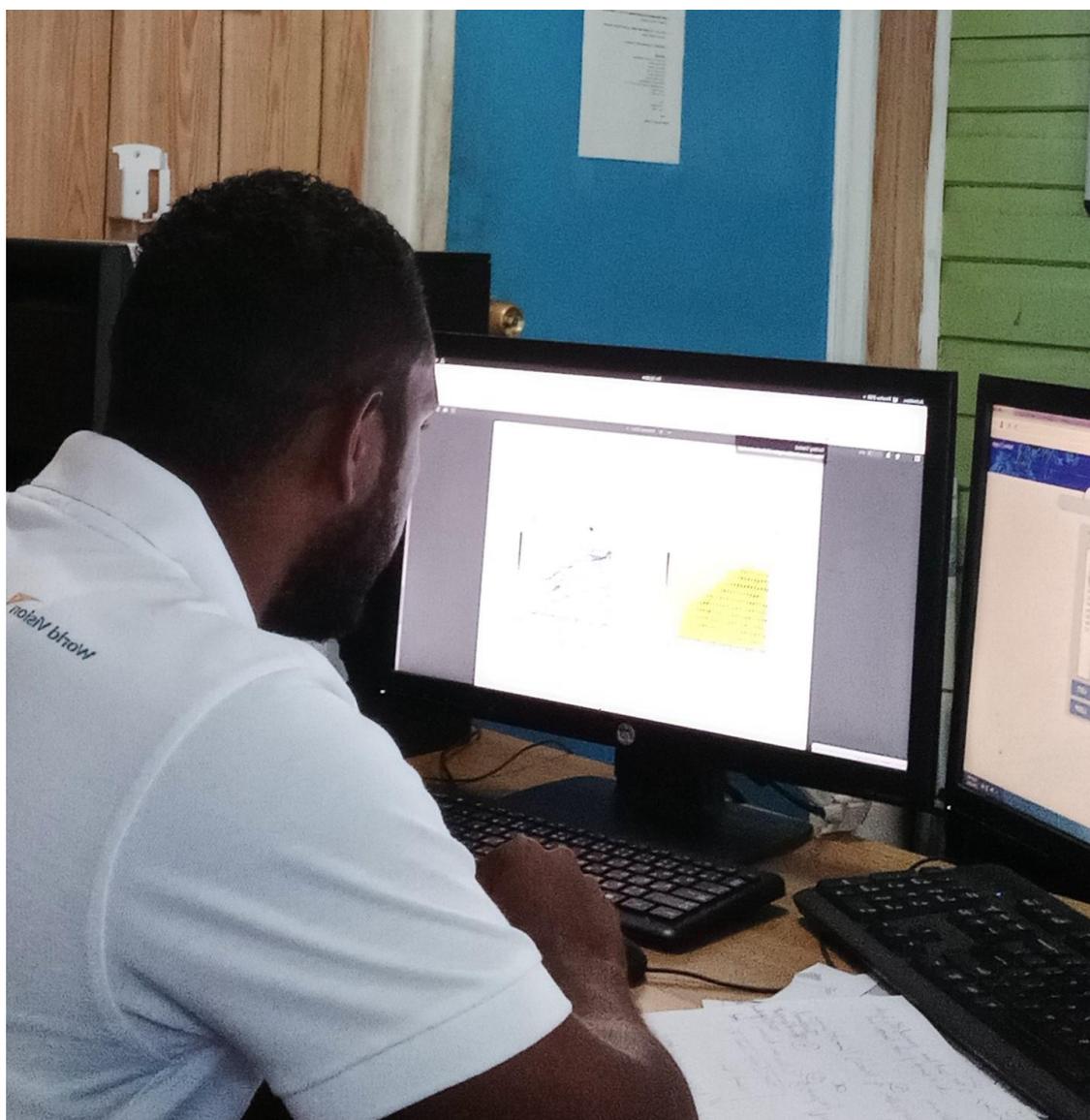
そこで、ソロモン諸島気象局から琉球大学理工学研究科修士課程に留学してきた Edward Maru 予報官(現:予報課長)と琉球大学理学部の伊藤耕介准教授,大学院生の柴田大河氏が中心となって、当該国の予報に特化した高解像度天気予報システム(以下、本システム)の開発に着手しました。ベースとしたのは、気象庁の非静力学大気モデル JMA-NHM で、対象となる領域の極端な大気現象の予測を行うのに優れたシステムです。気象庁から与えられた許可をもとに、Edward Maru 氏の留学中(2016年10月-2018年9月)から帰任後(2018年10月-)にいたるまで、計算領域の設定・最適化、予測計算、結果の可視化を行うシステムの開発とテストを重ねてきました。また、2020年7月1日には、琉球大学は、計算サーバーのひとつをソロモン諸島気象局に対して無償譲渡し、ソロモン諸島気象局が天気予報を実行できる環境を整えました。その後、日々の安定的な運用に向けて必要な最終調整を行い、2020年8月4日から、ソロモン諸島気象局は、正式に本システムの運用を開始しました。



本システムにより出力された風速・風向と積算雨量の分布。2020年6月4日時点(試験運用期間中)からの3日予報値。海上で20 m/s以上の風速と400 mm以上の積算降水量が予報されている。

現在の様子

本システムは1日1回、3日先までの地上風速・風向・雨量の予報を行うもので、ソロモン諸島気象局の予報官が、一般国民向けの天気予報・海上予報・航空気象情報を作成する場合や顕著な大気現象に伴う被害軽減策を講じる場合の参考情報として用います。テスト運用からこれまでの予報結果について、現場からも、本システムの予報は現実の観測値とも良く対応しており、現在(2022年3月15日執筆時点)まで大きなトラブルなく稼働しているとの報告を得ています。



本システムの予報を確認するソロモン諸島気象局の予報官。

プロジェクトの助成による論文リスト

Maru, E., T. Shibata, and K. Ito, 2018: Statistical Analysis of Tropical Cyclones in the Solomon Islands, *Atmosphere*, 9(6), doi:10.3390/atmos9060227.

台風の目は台風自身の強さを反映する

台風の進路と強さの予報は、災害を未然に防ぐうえでとても重要な情報ですが、強さの予報の改善が難しいという課題が今でも残っています。このため、実際の台風がどのように発達・衰退するか、その仕組みを理解することが必要です。私たちは、航空機を使って台風の内部で気象観測を行い、それに基づき台風の強さに関わる現象の理解を目指しています。そして私たちは、台風の目の中の温度と、目の中に現れる雲の様子が台風自身の強さを反映していることを突き止めました。この成果について紹介します。

背景

台風の予報には、台風自身の移動を予測する「進路予報」と、強さを表す中心気圧と地上での最大風速の変化を予測する「強度予測」の2種類があります。これらはコンピューター内に仮想の地球を設定し、物理法則に基づく数値計算（シミュレーション）から導き出されます。コンピューターの精度向上と数値計算により、進路の予報は過去30年間において確実に精度が向上していますが、強度の予報には目だった向上がみられません。これは日本の気象庁だけでなく、米国やヨーロッパの気象機関も抱えている世界共通の問題で、気象学に残された課題の一つです。

航空機を用いた台風観測プロジェクト

そこで私たちは、台風の内部で直接観測を行い、台風の強さと関係する現象を見出し、その物理的なしくみを理解することを目指しました。日本で初めて、航空機を用いて台風を直接観測する研究プロジェクト「T-PARCI」(ティー・パーク・ツーと読みます)が2016年に始動しました。このプロジェクトでは、航空機で台風の内部に進入し、「ドロップゾンデ」(図1)という測定機器を航空機から投下して、気象の要素である気圧・気温・湿度・風向・風速を測定することを目指します。私たちはこのプロジェクトに開始当初から参加し、これまで2017年の台風第21号、2018年の第24号、2021年の第16号という、非常に強い、または猛烈な勢力に発達した台風の観測を行いました。これらの飛行では、台風の中で最も風速が強まり最も強い雨が降る「壁雲」(かべぐも)を突き抜け、雲がなく青空が広がる目の中に進入することに成功し、台風の中心でドロップゾンデを投下することにより、台風の強さを表す中心気圧を直接観測することができました。また、中心気圧に関係する目の中の気温や湿度を観測することができました。このデータを用いて調査を行ったところ、(1)台風の目の中の温度と、(2)目の中に現れる雲の様子が、台風自身の強さを反映していることを突き止めました。



図1 (上) 台風観測に使用した小型ジェット機「ガルフストリーム II」
 (下) ジェット機から投下するドロップゾンデ。降下中に気圧、気温、湿度、
 風向、風速を1秒間隔で測定し、データをラジオ電波でジェット機に送信する

台風の目の温度は中心気圧と関係する

2017年第21号の観測では、2日間にわたり台風の中心にドロップゾンデを投下して目の中の温度を測ることができました。この観測期間中、衛星画像によると台風の目は収縮しており、気象庁ではこの衛星画像をもとに、中心気圧が935から915ヘクトパスカルに低下したと推定しました。一方、ドロップゾンデの測定によると、中心気圧は926から929ヘクトパスカルへわずかに増加していました(図2)。つまり、衛星画像から推定されるほど強まっていないという結果です。このとき、中心気圧を捉えたドロップゾンデのデータを用いて気温の高さ方向の変化を調べてみました。ここでは、台風の外側よりどれだけ温

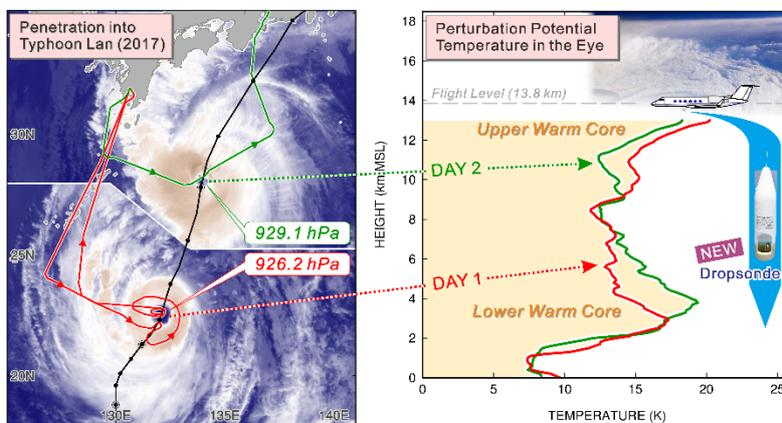


図2 (左) 航空機観測を行った時の衛星雲画像
 (右) 台風の中心における温位偏差(台風の外からの差)の高度分布

度が高いかを調べるため、台風の外との温度の差を表しています（注：図では温度ではなく、エネルギー量を温度の単位で表す「温位」を用いていますが、偏差が正の値なら中心が外側より暖かいという意味は同じです）。2日間の温位偏差は高度3キロメートルに極大があり、12キロより上でさらに暖かくなるという特徴を示しています。これは「2重暖気核構造」とよばれるものです。2つの偏差の差は小さく、高さ方向で平均するとほぼ同じ値になります。つまり、2日間で中心気圧がほとんど変わらなかったことと整合しており、「目の暖かさは中心気圧と関係する」ことを意味します。このことから、中心気圧を直接測定しなくても目の中の温度を衛星のリモートセンシング技術を用いて測ることができれば、台風の強さを推定できることが予想されます。

他の台風ではどうなのか？その点に答えるため、これまで実施した航空機観測で得た台風中心のデータに加え、台風が沖縄本島の真上を通過したときに地上からのラジオゾンデで観測したデータを加えて、中心気圧と目の平均温度偏差の関係を表したのが図3です。中心気圧が低いほど温度偏差が高くなっており、両者が密接に関係しているのがわかります。これは、大気鉛直方向の平衡状態を表す「静水圧平衡」の関係に整合する結果です。つまり、対流圏の高さが台風中心と外で同じと仮定した場合、2つの高度の間の気圧差は温度が高いほど小さくなるというものです。台風中心でもこのような関係が成り立っていることを航空機観測で直接表すことができました。

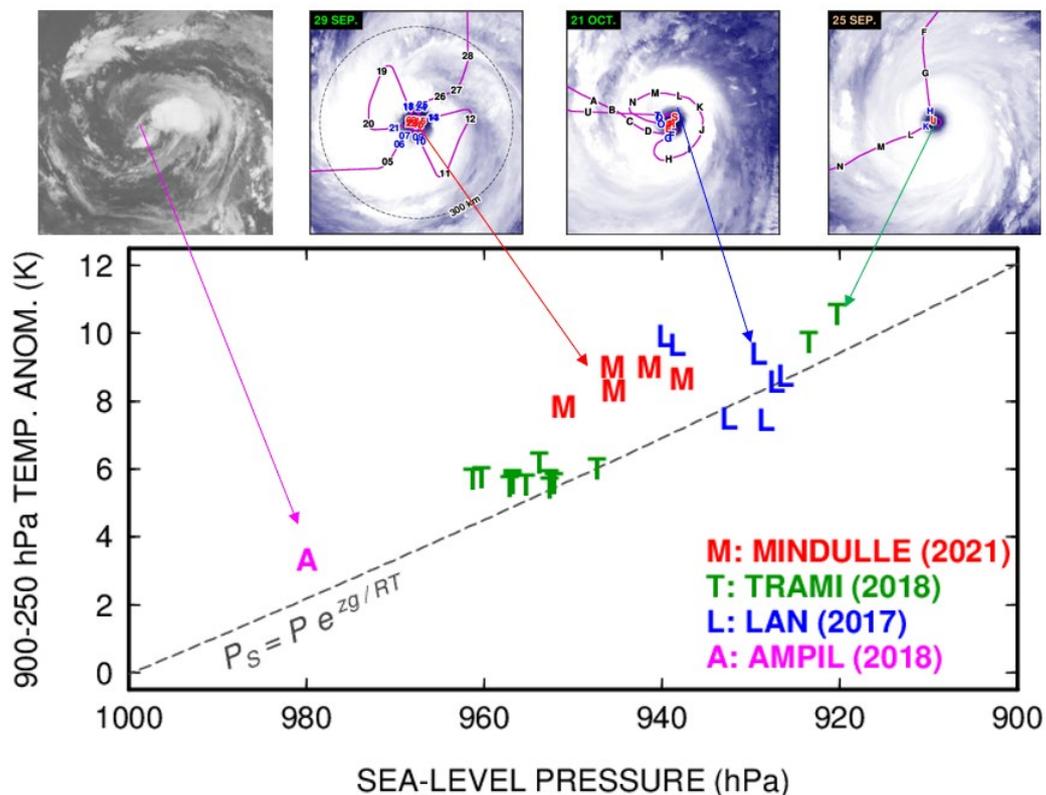


図3 台風の中心気圧と目の平均温度偏差の関係

目の中の雲も台風の強さを反映する

2018年の台風第24号の観測では、4日間にわたり観測を実施しました。この期間中、中心気圧は920から950ヘクトパスカルに増加し、その変化を観測することができました。このとき、目の中の温度は、中心気圧の増加に伴い低下したのを確認しています（図3の”T”）。それだけでなく、この観測では目の中の雲の様子にも顕著な変化がみられました。図4は4日間のそれぞれの日において航空機から撮影した中心の雲の様子です。

(a) 0447 UTC 25 September



(c) 0550 UTC 27 September



(b) 0728 UTC 26 September



(d) 0433 UTC 28 September



図4 台風を中心付近で航空機から撮影した雲の様子。矢印は背の高い積乱雲を指す。

中心気圧が920ヘクトパスカルまで下がった日（図4a）では、目の中には背の低い雲しかありませんが、950ヘクトパスカルまで上昇した日（図4b,c）には、目の中に高さが10キロメートルまで達する背の高い積乱雲が表れています。このような背の高い雲が目の中に現れることは、これまで観測されたことがありません。この雲がどのようにして現れたのかを調べるため、コンピューターにより台風を数値的に表す「数値シミュレーション」を行いました。その結果を示したのが図5です。壁雲に囲まれた目の中に、積乱雲が発生するのが再現されています。この雲は強い上昇気流を伴う壁雲から離れたところに現れるのが特徴です。これは、目の中では下降気流によって気温が上昇し、湿度が低下して雲ができにくいのが、壁雲の上昇気流が弱まると目の中の下降気流も弱まって湿度が増加し、積乱雲の発達に好都合な条件が作られるからです。つまり、目の中で積乱雲が発達するのは、壁雲の上昇気流が弱まっていることを表し、それは台風の強さと関係しているということです。

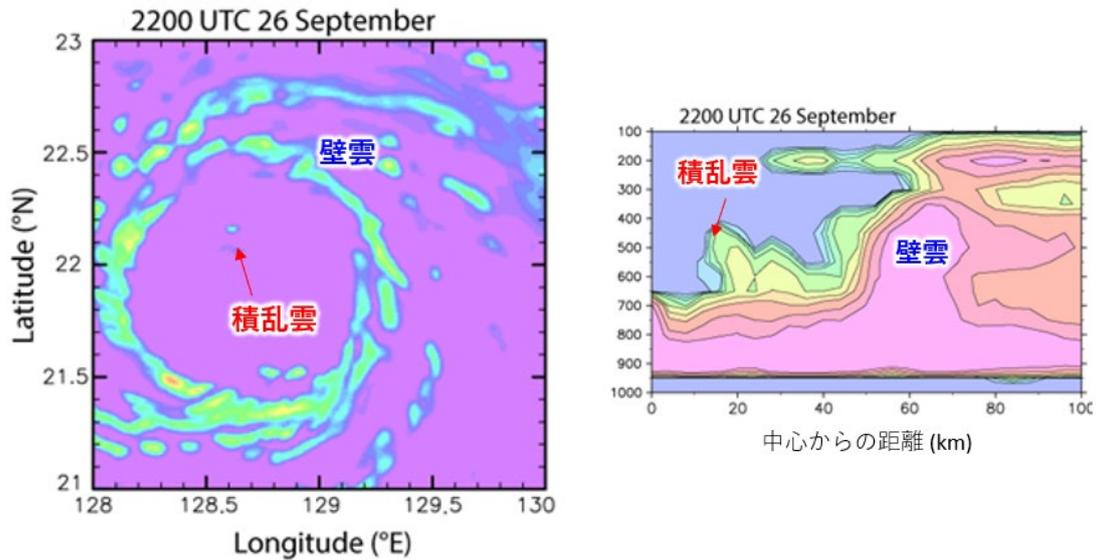


図5 数値シミュレーションによって再現された、2018年台風第24号の雲の分布。赤の矢印は目の中に現れた積乱雲を指す。

まとめ

台風の強度予報の改善に向けて、私たちは実際の台風を航空機で観測することにより、台風の発達や衰退といった強さの変化に関わるメカニズムの解明を目指しています。今の段階において、台風の目の中の温度と雲の特徴が台風の強度を反映することを、現場観測に基づき初めて明らかにしました。このような知見は、航空機を使わずに衛星などのリモートセンシング観測によって、台風の強さを正確に監視するうえで役立つと考えられ、将来的には台風の強さの監視と予報の精度向上に貢献すると考えております。日本が位置する北西太平洋は、世界で最も多くの熱帯低気圧（台風）が発生します。私たちはこの海域で、他の国が真似することができない観測研究を今後も続けていきたいと考えております。

プロジェクトに関する論文リスト

Hirano, S., K. Ito, H. Yamada, S. Tsujino, K. Tsuboki, and C.-C. Wu, 2022: Deep eye clouds observed in Tropical Cyclone Trami (2018) during T-PARCIID dropsonde observations. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 683-703.

Yamada, H., K. Ito, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Ohigashi, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, and K. Shimizu, 2021: The double warm-core structure of Typhoon Lan (2017) as observed through the first Japanese eyewall-penetrating aircraft reconnaissance. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1297-1327.

Ito, K., H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda, and K. Tsuboki, 2018: Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of Tropical Cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCII. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **14**, 105–110.