

静止気象衛星を用いた台風強度推定に向けて —SAR 海上風との比較検討—
Toward the Tropical Cyclone Intensity Estimation Using Geostationary Meteorological Satellites:
Comparison with SAR Sea Surface Winds

塚田大河*1, 堀之内武*1,2

Taiga TSUKADA, Takeshi HORINOUCI

Geostationary meteorological satellites are the only instruments that can observe tropical cyclones (TCs) over their life cycle. To develop a new method for estimating TC intensity using geostationary meteorological satellites, a method for estimating the radius of maximum wind speed (RMW) from infrared images observed by geostationary meteorological satellites is investigated. We found that the radius of the eye (R_{eye}) obtained from infrared images and the RMW obtained from sea surface wind observed by Synthetic Aperture Radar corresponded very well, with a mean absolute error of 3.5 km. On the other hand, in some cases, the correspondence was poor, and it is necessary to create a criterion to judge the correspondence from infrared images. There was no significant difference in the correspondence by developmental stage.

1. はじめに

近年, 新世代 (第3世代) 気象衛星により, 従来よりも高頻度に台風 (ハリケーン・サイクロンを含む) のモニタリングが実施されている。Tsukada and Horinouchi (2020; TH20) は静止気象衛星の台風高頻度観測を用いて, 台風内部コア領域の下層接線風を雲追跡によって導出する手法を開発した。これには大きく分けて二つの目的があった。一つは, 強い回転成分を持つ目の中の接線風速が従来の衛星観測および手法では原理的に導出が困難であったことから, 最新の衛星および新たな手法を用いてこれを解決することで, その動態を明らかにすること。もう一つは, 大気境界層に閉じ込められた目の中の雲から推定される下層風は, 台風が最大風速を持つ高度の風であることから, 新たな台風強度推定に応用し得る物理量としてこれを導出することであった。TH20の手法で推定される目の中の接線風の動径分布から台風強度推定を行うこと, つまり最大風速を推定することは, 目の中の軸対称接線風を, 壁雲内の最大風速半径 (RMW: Radius of Maximum Wind) まで動径方向に外挿することに相当する。しかしながら, RMWにおける下層雲の動きを現在の静止気象衛星から

観測することはできないため, ある程度妥当なRMWの推定が必要となる。

Kossin et al. (2007; K07) は, クリアな眼を持つ台風事例に対して, 静止気象衛星観測による赤外画像から算出した眼の半径と, 航空機観測のフライトレベルデータから推定した高度 10 m における RMW を比較して, 以下の回帰式を得た:

$$RMW_{est} = 2.8068 + 0.8361R_{eye} \quad (1)$$

ここで, RMW_{est} [km] は目的変数の高度 10 m における RMW で, R_{eye} [km] は静止気象衛星から算出した眼の半径である。なお, 図 1 は K07 による R_{eye} の算出フローを示し, R_{eye} は壁雲上端付近の高度で算出されるため, 最大風速を持つ高さの半径ではない。K07 の回帰は平均絶対誤差 (MAE: Mean Absolute Error) が 4.7 km だったことが報告されており, 当時の赤外画像の解像度が 4 km であったことを考えると, 精度は当時のほぼ限界まで達していたと言える。上述のように, K07 は静止気象衛星観測から RMW を高精度に推定できる画期的な方法を提案したが, 実用上いくつかの問題が生ずる。K07 では「クリアな眼を持つ事例を対象にした」ことしか記されておらず, それ以上の判

*1 北海道大学大学院環境科学院 tsukada@ees.hokudai.ac.jp
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

*2 北海道大学大学院地球環境科学研究院
Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

別基準を持ち合わせていない。そのため、実際の衛星画像（特に、クリアな眼と言いきれないような事例）を前にした時、上記の回帰式を適用してよいかどうか分からない。また、K07 で用いた航空機観測のフライトレベルデータには、夜間の観測がないことや、アメリカ本土周辺のハリケーンのみを対象とするため、海盆間の違いについては考慮できない。また、航空機観測から完全な軸対称風を算出することは難しく、衛星観測時刻（当時は 30 分感覚）との時間的ラグも生ずる。また、世代交代を経た現在の静止気象衛星は従来と比べて時空間分解能が高い。そこで本研究では、改めて広い視点で K07 の研究を再訪し、RMW と眼の半径の関係を探る。

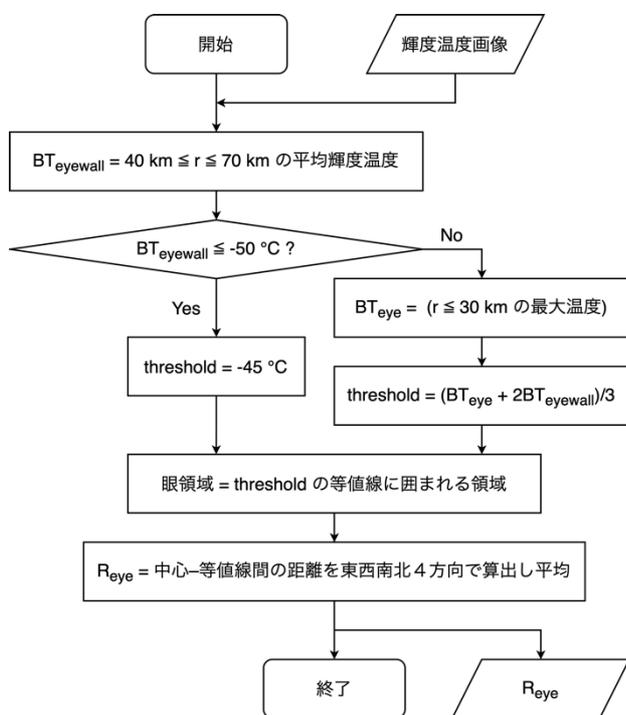


図 1 : Kossin et al. (2007) の眼の半径算出フローチャート。赤外輝度温度画像を入力に受け、眼の半径 R_{eye} を出力する。

2. データ

本研究での RMW の推定には C-band の合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) 搭載衛星 (Sentinel-1a/b, Radarsat-2) 観測が Ifremer/Cyclobs によりリトリブされた高度 10 m 海上風プロダクトを用いた。SAR は合成開口技術とパルス圧縮技術を用いて高解像度化した能動型センシング観測を実現する。従来のマイクロ波散乱計による観測では、台風のような強風下（特に 35 m/s を超えるような強風下）においてマイクロ波の反射信号

が飽和する問題があったが、近年、異なる偏波観測 (HH, HV) とモデル出力を結合してリトリブに用いることで、70 m/s 程度までは飽和せずに導出できることが示された (Mouche et al., 2017; 2019)。解析に用いたプロダクトは Mouche et al. (2019) で提案されたリトリブ手法によって作成されている。なお、同プロダクトは風向の推定精度が悪く、循環中心が眼の外に出る場合がある。これはリトリブに用いられる全球モデルにおける台風中心が実際の台風中心とずれることによると考えられる。そのため、台風の移動の効果を除去することができない。また、風向の精度悪化が風速値の精度悪化にもたらす影響の程度を定量化することは難しい。以上の理由から、本研究では常に軸対称平均した風速値のみを用い（移動による非対称性を除去）、風速値ではなく風速の動径変化傾向を見ることに留めた（風速値は参考程度に用いた）。

静止気象衛星からの R_{eye} の算出にはひまわり 8 号台風機動観測の赤外 (10.4 μm) 輝度温度データを用いた。時間間隔は 2.5 分、衛星直下点における空間分解能は 2 km である。使用した波長は大気の窓領域のため、光学的に厚い雲においては、雲頂の輝度温度を反映する。本稿ではひまわり 8 号のみを用いたため、2015 年 7 月から 2020 年 12 月までの東経 100–180 度において選定基準を満たした 31 回の観測を解析対象とした。今後は使用衛星も増やす予定である。

衛星画像の視差補正には JRA-55 再解析データ (Kobayashi et al., 2015) の等圧面データ (温度・ジオポテンシャル高度) を用いた。また、台風ベストトラックデータは IBTrACS (Knapp et al., 2010) より取得し、JTWC の強度解析値を用いた。

3. 解析手法

SAR 海上風において眼の存在が認められる事例を抽出し、それらの最近傍時刻における赤外画像においても眼の存在が認められた事例を解析対象とした。なお、眼の存在判定は「下層風推定が十分にできる範囲で眼が開いていること」を条件に、現在は主観で行なっているが、今後は客観的な判定を組み込む予定である。

全ての赤外画像に対して視差補正を施した。赤外画像の台風中心には、気象庁ベストトラックの補間による中心位置から半径 60 km 以内の最高輝度温度 BT_{eye} を求め、 $BT_{eye} - \Delta T$ より高温の連続領域の外

接円中心を採用した。本稿では主に $\Delta T = 30 \text{ K}$ とした場合の結果を示す。SAR 海上風の台風中心には、前述の赤外画像中心から半径 20 km 以内の最小風速値 V_{eye} を求め、 $V_{\text{eye}} + 15 \text{ m/s}$ より低風速の連続領域の外接円中心を採用した。両画像を中心からの正距方位図法に投影した。 R_{eye} は、投影後の赤外画像に対して同様の手順で外接円を当てはめた時の半径とした。 $\Delta T = 30 \text{ K}$ とした場合、それは高度約 $6\text{--}8 \text{ km}$ 程度の壁雲内縁に沿ったコンターに外接円を当てはめたことに相当する。RMW は半径 200 km 以内で SAR 海上風の方角平均が最大となる半径とした。

4. 結果

図2の散布図は R_{eye} と RMW の関係を示し、それらは基本的に非常に良い対応を持っていた。対応の悪い水色文字で示された3事例のうち、2018年台風24号 TRAMI (以降 TRAMI と表記) は赤外画像からも明らかなように、二重壁雲を持つ事例であることで、衰退中の第一壁雲に対応する半径が R_{eye} として算出されてしまった。2017年台風5号 NORU と2018年台風26号 YUTU (以降 YUTU と表記) はそれぞれ赤外画像において眼の形が崩れており、見かけ上の R_{eye} が小さいことが対応悪化の原因であった。

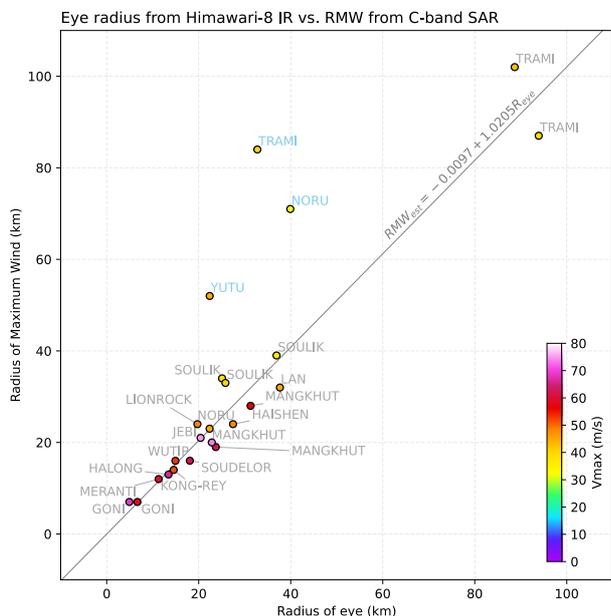


図2：眼の半径 R_{eye} と最大風速半径 RMW の関係。色は SAR 海上風から得られた最大風速、図中の文字は各点の台風名を示す(2015年7月から2020年12月の事例)。複数回出現する名前は同一の台風の複数回観測を意味する。水色の事例は外れ値と見做した事例で、その理由についての考察を本文で述べた。回帰線は灰色の事例のみを用いていることに注意。

水色の事例を除いた単回帰により、以下の回帰式を得た：

$$\text{RMW}_{\text{est}} = -0.0441 + 1.0208 R_{\text{eye}} \quad (2)$$

また、これによる平均絶対誤差 (MAE) は 3.5 km であった。

図3は全ての事例を最大風速と RMW で正規化した軸対称平均 SAR 海上風の動径分布を示す。事例 TRAMI と YUTU は他のプロファイルに比べて明らかに異質で、YUTU は特に海上風が明瞭な二つのピークを示している。C-band SAR のマイクロ波観測においては、 40 mm/h 以上を超えるような降水域での降雨減衰が報告されており (Mouche et al., 2019; Combet et al., 2020)、今回の YUTU がそれに該当するか、または二重壁雲的な風速構造を持つかは、YUTU の SAR 海上風の眼の半分以上が欠損であることから判断ができなかった。

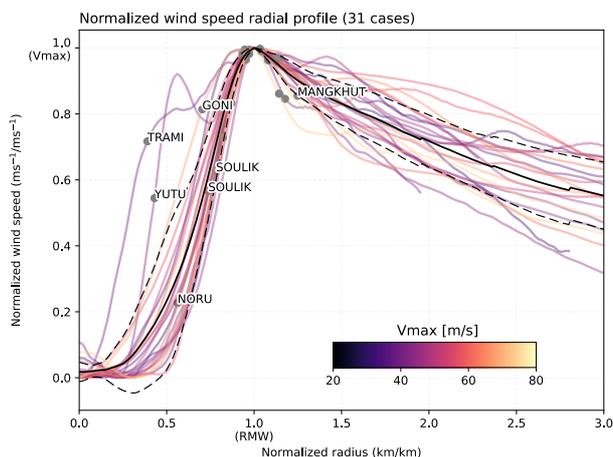


図3：SAR 海上風の正規化動径分布。軸対称平均した SAR の海上風の動径分布を RMW と最大風速でそれぞれ正規化して表示した。灰色の丸印は赤外画像から算出された R_{eye} を示し、RMW から2割以上離れた事例には名前を付した。各プロファイルの色は最大風速の値を示す。

次に、IBTrACS による強度解析結果を用いて、各事例の発達段階を調査した。発達段階は SAR 観測時刻 t における強度 V_t から、その12時間前 $t-12 \text{ h}$ における強度 V_{t-12h} を減算した値 ($\Delta V = V_t - V_{t-12h}$) に基づき4段階に分類した。 $\Delta V \geq 15 \text{ kt}$ を急速発達 (Rapid intensification: RI) 事例、 $15 \text{ kt} > \Delta V \geq 5 \text{ kt}$ を低速発達 (Slow intensification: SI) 事例、 $5 \text{ kt} > \Delta V \geq -5 \text{ kt}$ を定常 (Steady: S) 事例、 $-5 \text{ kt} > \Delta V$ を衰退 (Weakening: W) 事例とした (図4)。図5はこの基準に基づいた分類とともに R_{eye} と

RMW の関係を示す散布図である。R_{eye} と RMW の対応関係には、発達段階による顕著な傾向はみられなかった。

最後に、R_{eye} と RMW の関係について、R_{eye} 定義に用いた閾値 ΔT に対する閾値依存性を調べた。図6は閾値 ΔT を変化させて回帰した時の、バイアス・回帰係数・平均絶対誤差を示す。本稿で用いた値である $\Delta T = 30 \text{ K}$ 周りの各指標は概ね安定しており、本稿で示した関係がロバストであることを示す。

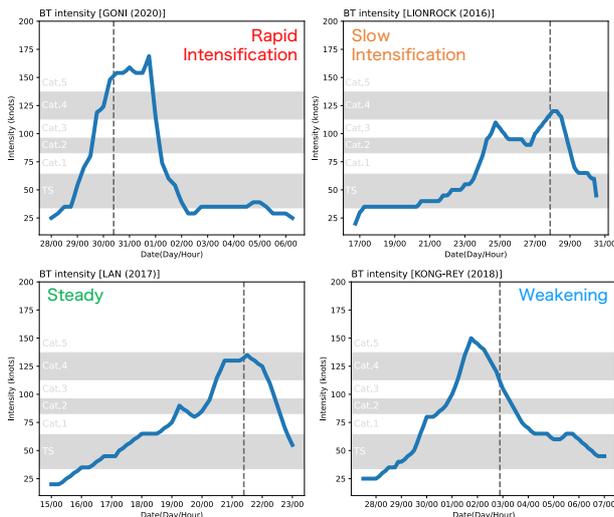


図4：台風発達段階の分類の例。図は台風ベストトラックデータの強度変化と、その分類を文字で示す。点線は SAR 観測があった時刻を表し、分類にはその時点から 12 時間前の強度との差を用いている。

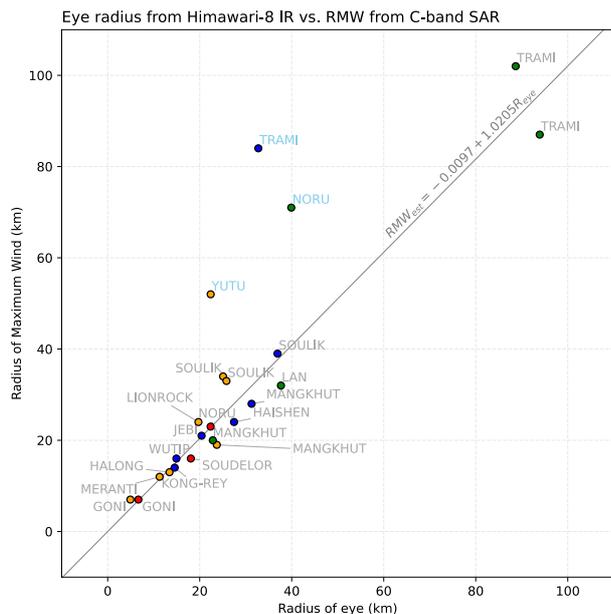


図5：図2と同じ。ただし、色は台風の発達段階を示す。赤色は急速発達 (RI)、橙色は低速発達 (SI)、緑色は定常 (S)、青は衰退 (W) を意味する。

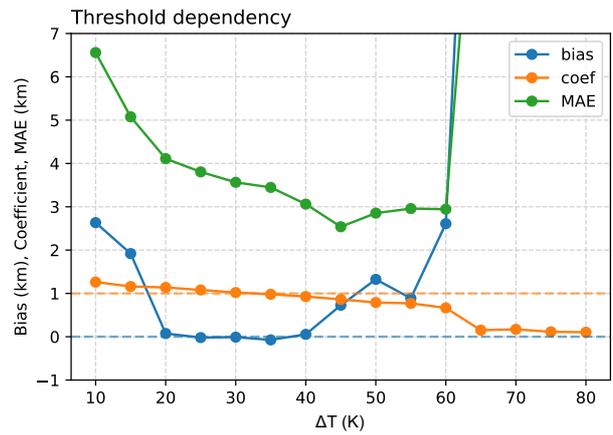


図6：眼の半径決定に用いた ΔT に対する回帰の閾値依存性。青線と橙線は回帰直線のバイアスと回帰係数をそれぞれ表し、緑線は平均絶対誤差を示す。青点線はバイアス 0、橙点線は回帰係数 1 を表す。本稿では $\Delta T = 30 \text{ K}$ を用いた場合の結果を示した。

5. まとめ

本研究では眼のある台風を対象に、静止気象衛星から算出した眼の半径 R_{eye} と、SAR 海上風から算出した最大風速半径 RMW の関係を調べた。R_{eye} と RMW は基本的に良好な対応関係にあった。一方で、一部の事例では対応が悪く、このような事例であるかどうかを赤外面像から判断できる指標が必要であり、今後の課題である。ベストトラック解析値より見積もった台風の発達段階に対する変化は小さく、発達・定常・衰退を問わず R_{eye} と RMW の関係は良かった。解析に用いた閾値に対する依存性は小さく、本研究で見積もった R_{eye} と RMW の関係はある程度ロバストなものであると考えられる。

謝辞

衛星画像は情報通信機構 NICT サイエンスクラウドより取得しました。SAR 海上風プロダクトは Ifremer/Cyclobs より取得しました。

参考文献

- Combrot, C., A. Mouche, J. Knaff, Y. Zhao, Y. Zhao, L. Vinour, Y. Quilfen, and B. Chapron, 2020: Extensive high-resolution synthetic aperture radar (SAR) data analysis of tropical cyclones: Comparisons with SFMR flights and best track. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 4545–4563.
- Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate

- Stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data. *BAMS*, **91**, 363–376.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., et al., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *JMSJ*, **93(1)**, 5–48.
- Kossin J. P., J. Knaff, H. Berger, D. Herndon, T. Cram, C. Velden, R. Murnane, and J. Hawkins, 2007: Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance. *Wea. Forecasting*, **22**, 89–101,
- Mouche A., B. Chapron, B. Zhang, and R. Husson, 2017: Combined co- and cross-polarized SAR measurements under extreme wind conditions. *IEEE Xplore: IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, **55**, 6476–6755.
- Mouche, A., B. Chapron, J. Knaff, Y. Zhao, B. Zhang, and C. Combot, 2019: Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: Application to Irma category 5 hurricane. *J. Geophys. Res. Oceans*, **124**, 3905–3922.
- Tsukada, T., and T. Horinouchi, 2020: Estimation of the tangential winds and asymmetric structures in typhoon inner core region using Himawari-8. *Geo. Phys. Lett.*, **47**, e2020GL087637.