

高解像度シミュレーションを用いた台風制御の考察 Consideration of Typhoon Modification Using High Resolution Simulation

稲垣滉^{*1}, 筆保弘徳^{*2}, 高良拓馬^{*2}, 清原康友^{*2}

Ko INAGAKI, Hironori HUDEYASU, Takuma KORA, Yasutomo KIYOHARA

This study examined how the intensity of typhoon was suppressed by artificial intervention using the numerical simulation. Our numerical experiments included decreasing/increasing temperature or moisture content of the typhoon at a specific location. The responses of the typhoon in simulations were evaluated in terms of intensity, extent of damage, and change in course. The control method devised will lead to the establishment of typhoon control theory.

1. 台風制御の概要

現在、台風を人為的に制御する方法としては、小元(1968, 1971a, 1971b)、土屋(1970)、藤原(1971)、Hoffman (2004)、Rosenfeld ほか (2007)、Willoughby (1985)の中で、以下のようなアプローチが提案されている。

- ・ヨウ化銀のシーディングを用いた人工降雨による力学的構造操作
- ・気温湿度調節による進路操作
- ・マイクロ波加熱による進路操作
- ・ドライアイス散布による氷晶核増加に伴う力学的構造操作
- ・人為的なアイウォールリプレイスメントの誘発による力学的構造操作
- ・高級アルコールの単分子層形成による海面蒸発抑制
- ・暖かい雲への散水シーディングによる降水プロセスの早期化
- ・吸湿性エアロゾルのシーディングに伴う暖かい雨の形成プロセスの阻害による強度制御 etc...

これらの制御方法は、図1に示すように「エネルギーを分散する」、「エネルギーを奪う」「エネルギー供給を断つ」の3つに大別され、台風の勢力減衰につなげられる。複数の要因から構成される方法もある。

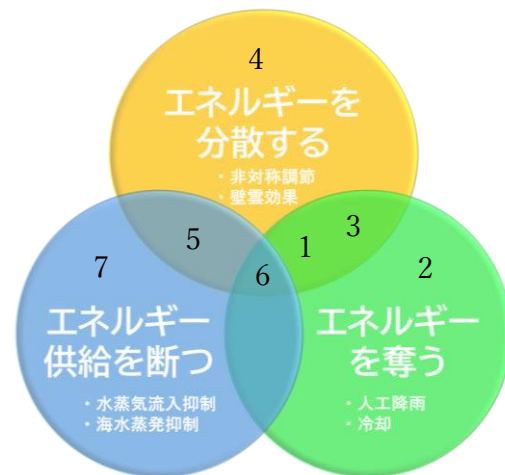


図1：台風制御方法の要因

最も有名な台風制御の構想は 1962～1983 年にかけてアメリカで行われた STORMFURY 計画である。この計画ではヨウ化銀のシーディングで過冷却雲の凍結を誘発し、潜熱加熱によりアイウォールリプレイスメントを起こすことがねらいであった。当時は実験の成功が報じられたものの、後年の考察ではその方法はハリケーンの構造的に成り立たないこと、アイウォールリプレイスメントが自然に発生していたことが明らかとなった。この計画の問題点はハリケーンの構造を当初から正確に把握できていなかったこと、制御効果を正確に評価できていなかったことの2点である。

*1 横浜国立大学教育学部 inagakiko-ky@ynu.jp
Faculty of Education, Yokohama National University

*2 横浜国立大学教育学部
Faculty of Education, Yokohama National University

一方、現代においては、スーパーコンピュータによる計算技術や測器による観測技術の向上により、精度の高いモデルを用いた高解像度シミュレーションが行えるようになった。これは **STORMFURY** 計画が抱えていた2つの問題点の両方を解決することができる。よって、現在再び台風制御に取り組む意義は大きいと考えられる。

台風制御の社会実装にあたっては、5つの課題が挙げられる。台風制御理論の確立、シミュレーション精度の向上、観測精度の向上、台風介入・エネルギー利用技術の確立、社会経済効果の評価である。本研究では、台風制御理論の確立を目的として進めている。

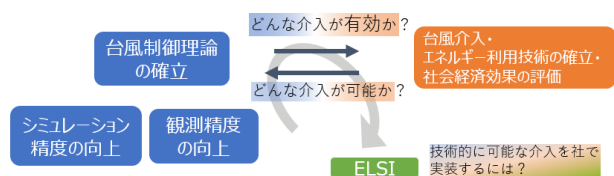


図2：台風制御の課題

2. 解析手法

2-1. 概要

高解像度シミュレーションを用いて、令和元年度房総半島台風(FAXAI)に対して、任意のタイムステップにおけるデータを変更し、人工制御を再現した。適用した制御方法はいずれも台風の構造に着目し、勢力の減衰に寄与すると予想されるデータの変更を行った(表1)。結果は①強度(海面気圧、風速)、②被害範囲(R15)、③進路変化の3つの観点で評価した。制御の観点から、意図しない進路変化はデメリットになりえるため、ここでは進路変化が小さいほどよいものと評価している。また、各制御ランを3つの要因に分類した(図1)。番号はシミュレーション番号(Shot)を表している。

表1：適用した制御方法と想定される影響

Shot No.	方法	想定する影響	想定する制御結果
Shot 1.	水分量の減少	エネルギーの減少	風速の減少、中心気圧の減少
Shot 2.	眼の冷却	エネルギーの減少&水平気圧傾度の縮小	最大風速の減少、中心気圧の減少
Shot 3.	上層の水蒸気、水増加	上層の潜熱加熱による鉛直温度傾度の縮小、人工降雨	風速の減少、中心気圧の減少、(降水量の増加)
Shot 4.	上層の加熱	鉛直温度傾度の縮小	風速の減少、中心気圧の減少
Shot 5.	外側壁雲の加熱	壁雲効果の誘発によるエネルギー分散	最大風速の減少、眼の半径の増加
Shot 6.	下層の冷却	鉛直温度傾度の縮小&海面蒸発の抑制	風速の減少、中心気圧の減少
Shot 7.	海表面の冷却	海面蒸発の抑制	風速の減少、中心気圧の減少

2-2. 数値シミュレーションの設定

台風通過時の大気場をシミュレーションする数値モデルとして **Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW) Version4.2.1** (John Collins et al. 2020) を用いた。領域気象モデル **WRF** の初期・境界値に利用した格子点値データセットは **NCEP Final Analysis (GFS-FNL)** である。本データセットの空間解像度は **0.25 度**、時間分解能は **6 時間ごと** である。**6 時間ごと** の海表面水温データも同様に **NCEP Final Analysis** から取得した。このデータをモデルの計算解像度に変換した上で **WRF** に入力した。

詳細な **WRF-ARW** の計算設定を表2に示した。計算コスト削減のため、すべての事例において、水平解像度 **5km** とした。台風の発達をより正確に表現するためには、より高解像度での計算が望ましい。しかし、各事例で **50 ケース以上** のシミュレーションを実施した際に必要となるデータストレージや計算時間、計算機資源の制約を考慮し、水平解像度は **5km** の設定に統一した。鉛直解像度についても同様の理由から、以下のように設定している。鉛直層数は **49 層** とし、下層における風の再現性を高めるために上層から下層に進むにつれて鉛直解像度が細くなるように設定した。モデルの最下層高度は **50m**、上端高度を約 **23km** とし、上端から **5000m** の範囲はダンピング層とした。ダンピングスキームには **w-Rayleigh damping** を採用している。

シミュレーションの出力間隔についてもデータ容量の制約から **30 分** とした。また、選択した各物理過程の計算スキームを表2に示した。モデルのタイムステップは **30 秒** に設定している。下部境界条件として与える海面温度はその保管境界条件と同じく **6 時間ごと** で与える。

表 2: WRF の計算条件 (放射過程は短波放射・長波放射ともに同一のスキームを用いたため統一している)

WRFの計算条件	
水平解像度	5km
水平格子数	564×555
地形データ	WPS_GEOG
鉛直層数	49
最下層高度	50m
モデル最上端高度	約23km
微物理スキーム	Thompson graupel scheme
放射スキーム	RRTMG Shortwave and Longwave scheme
惑星境界層スキーム	Mellor-Yamada-Janjic(Eta)TKE scheme
対流スキーム	Tiedtke scheme
接地境界層スキーム	Eta Similarity scheme
陸面スキーム	Unified Noah Land Surface Model
ダンピング	w-Rayleigh damping

3. 結果

3-1. コントロールラン(CTRL)

図 3 はコントロールランの海面気圧を示している。解析値の最低気圧が 955.0hPa であるのに対し、コントロールランは 970.6hPa までしか発達していない。図 4 はコントロールランのトラックと解析値のベストトラックを示している。全体的にベストトラックより西にずれた進路を取っている。本実験ではコントロールランと制御実験ランの差異を評価することが目的であるため、現実の台風との違いは問わないこととした。



図 3. コントロールランの海面気圧

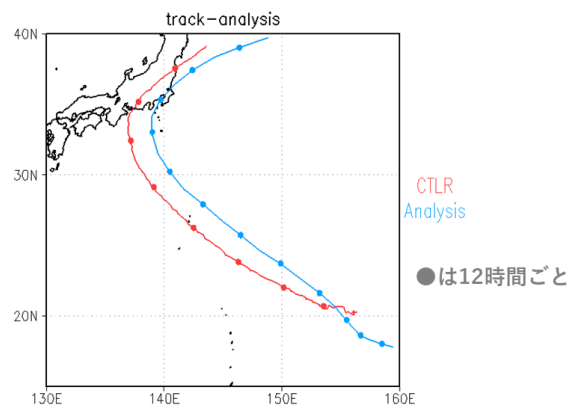


図 4. 解析値のベストトラック(青)とコントロールランのトラック(赤)

3-2. 水分量の減少(Shot 1.)

図 5 はそれぞれ水分量の減少を行ったランについての結果である。9/6/00UTC において、水蒸気(qvapor)、雲粒(qcloud)、雨滴(qrain)、雪片(qsnow)、氷(qice)、雹(qgraup)の値を元の 50%の量に変更した。2 つの実験を行い、高度 0.05~23km の台風の雲域が広がる $4^{\circ} \times 3^{\circ}$ 四方(台風領域-50%)と、シミュレーション領域全体を覆う $30^{\circ} \times 25^{\circ}$ 四方(全領域-50%)においてそれぞれ水分量を減少させた。結果として、2 つの制御ランのどちらでも、シミュレーションの全期間において、海面気圧の上昇、最大風速の減少、強風域半径の減少が見られた(図 5-b,c,d)。このことから、水分量の減少させることは台風の減衰に寄与すると考えられる。また、2つの制御ランで勢力変化に大きな違いが見られないことから、台風雲域の水分量を減らすことがより重要であると考えられる。また、2つの制御ランはともに西よりに大きく進路変化している(図 5-e)。

3-3. 眼の冷却(Shot 2.)

図 6 は台風の眼の冷却を行ったランについての結果である。眼の冷却により、暖気核構造を弱め、中心部の水平気圧傾度を縮小し、最大風速を減少させることを目的とした。9/6/00UTC において、THM_1、THM_2(温位)を元の値から 10°C 下げた。適用した領域は高度 0.3~12.5km の台風の眼内の $0.55^{\circ} \times 0.50^{\circ}$ 四方である(図 6-a)。結果として、制御時刻から約 20 時間後まで海面気圧の増加と最大風速の減少が見られた(図 6-b,c)。また、最大風速半径や強風域半径には大きな変化が見られなかったことから、台風の構

造変化はほとんどなく、被害範囲も変化がないと考えられる(図 6-d,e)。また、進路変化は小さく、ほとんど変化しなかった(図 6-f)。

3-4. 上層の水蒸気、水散布(Shot 3.)

図 7 は台風の上層に水蒸気と水を散布したランについての結果である。上層での水蒸気、水の凝結、凝固加熱による、鉛直温度傾度の縮小によって、対流を弱め、勢力を落とすことを目的とした。9/6_00:00:00UTC において、qvapor、qcloud、qrain をそれぞれ 0.01[kg/kg]、0.001[kg/kg]、0.0013[kg/kg] 加えた。適用した領域は高度 6.0~15km の台風雲域の 4.0° × 3.0° 四方である。結果として、制御直後に海面気圧は急激に減少したのち増加、最大風速は急激に増加したのち減少に転じた(図 7-a,b)。強風域半径は、前半期間はほとんど変化がみられず、9/8_18:00 以降は縮小した(図 7-c)。また、制御ランはやや西よりに進路変化している(図 7-d)。

3-5. 上層の加熱(Shot 4.)

図 8 は台風の上層を加熱したランについての結果である。Shot 3.の実験と同様に、鉛直温度傾度の縮小を目的とした。また、Shot 4.は上空からのマイクロ波加熱を想定しているため、加熱範囲は上層雲の雲頂部に限定している。9/6_00:00:00UTC において、THM_1、THM_2(温位)を元の値から 10°C 上げた。適用した領域は高度 14~15km の台風雲域の 4.0° × 3.0° 四方である。結果として、海面気圧、最大風速、強風域半径に大きな変化は見られなかった(図 8-a,b,c)。9/8_12:00 以降、海面気圧と最大風速がやや増加し、強風域もやや拡大する傾向が見られた。また、進路はほとんど変化しなかった(図 8-d)。

3-6. 外側壁雲の加熱(Shot 5.)

図 9 は台風の外側壁雲を加熱したランについての結果である。台風の外側壁雲での対流を活性化させ、アイウォールリプレイスメントを誘発し、中心部の最大風速を減少させることを目的とした。9/6_00:00:00UTC において、THM_1、THM_2(温位)を元の値から 10°C 上げた。適用した領域は高度 0.3~3.5km の台風外側壁雲領域である(図 9-a)。結果として、海面気圧、最大風速、強風域半径に大きな変化は見られなかった(図

9-b,c,d)。アイウォールリプレイスメントは、風速の大きい発達した台風で見られる現象であり、発達の初期段階を対象とした Shot 5.では、必要な条件が満たせなかった可能性が考えられる。また、進路はほとんど変化しなかった(図 9-e)。

3-7. 下層の冷却(Shot 6.)

図 10 は台風の下層を冷却したランについての結果である。下層の冷却による鉛直温度傾度の縮小と、海面からの水の蒸発を抑制することで、勢力を減衰することを目的とした。9/6_00:00:00UTC において、THM_1、THM_2(温位)を元の値から 5°C 下げた。適用した領域は高度 0.05~1.6km の台風雲域の 4.0° × 3.0° 四方である。結果として、9/8_00:00 を境に、海面気圧は増加から減少(図 10-a)、最大風速は減少から増加(図 10-b)、強風域半径は縮小から拡大に転じた(図 10-c)。このことから、Shot 6.は勢力の減衰と増幅の両方に寄与する可能性が考えられる。また、進路は 9/8_00:00 以降、やや東よりに変化した(図 10-d)。

3-8. 海表面の冷却(Shot 7.)

図 11 は海表面を冷却したランについての結果である。シミュレーション期間全体にわたって SST を下げることで、海面からの水蒸気の供給を抑制し、勢力を減衰させることを目的とした。9/6_00:00:00UTC から 6 時間ごとに更新される SST を常時、元の値から 5°C と 2°C 下げる 2 つのランを実施した。適用した領域はシミュレーション領域全体の 30° × 25° 四方である。結果として、2 つのランで海面気圧は大きく増加し、最大風速、最大風速半径、強風域半径ともに大きく減少した(図 11-a,b,c,d)。このことから、Shot 7.は勢力の減衰と被害範囲の縮小に大きく寄与すると考えられる。また、進路は大きく西よりに変化した(図 11-e)。

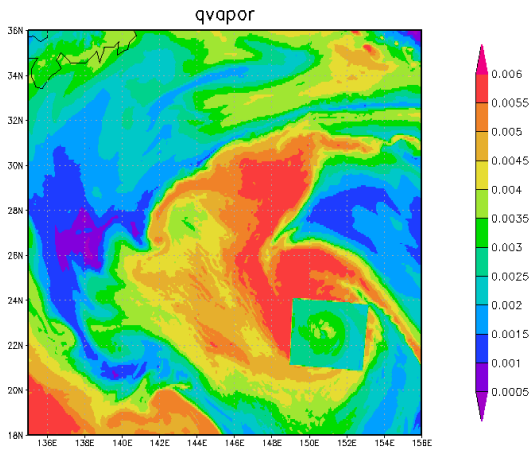


図 5-a. 台風雲域の変更後の qvapor[kg/kg] (高度 4.6km)(Shot 1.)

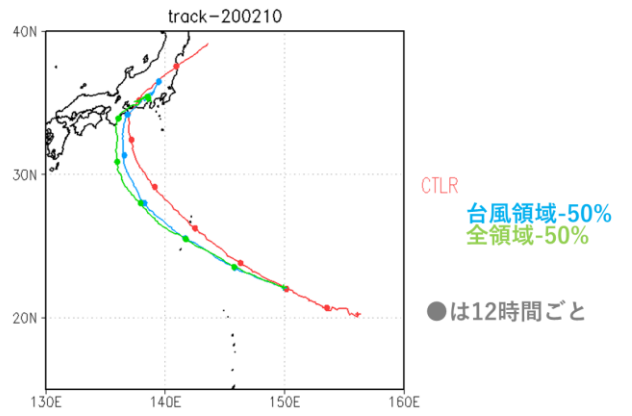


図 5-e. 台風中心のトラック(赤 : CTLR、青 : 台風領域-50%、緑 : 全領域-50%)(Shot 1.)

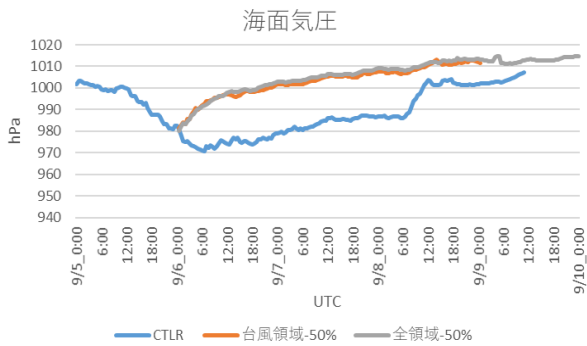


図 5-b. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 1.)

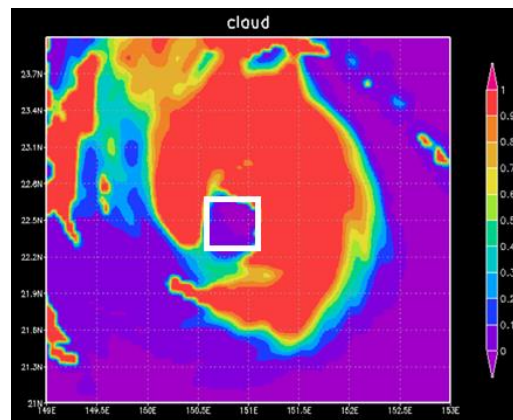


図 6-a. 雲域で定義した台風の目の領域 (白枠内)(6.0km) (Shot 2.)

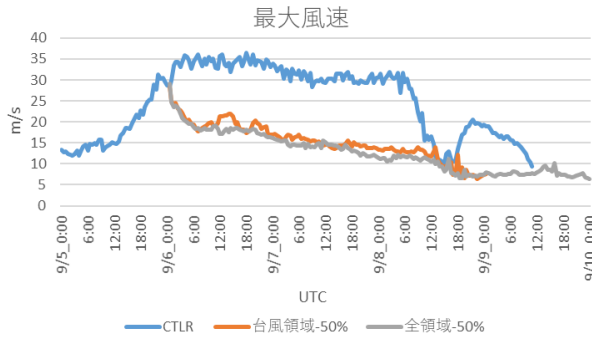


図 5-c. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 1.)



図 6-b. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 2.)

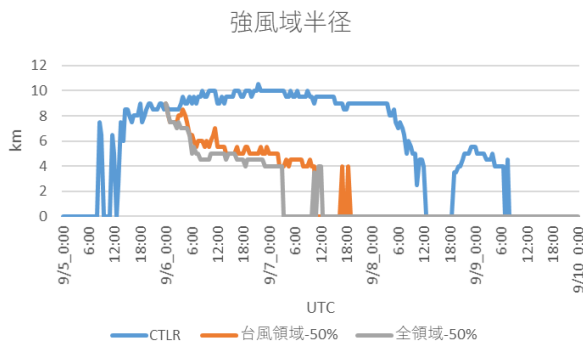


図 5-d. 時間ごとの強風域半径(Shot 1.)

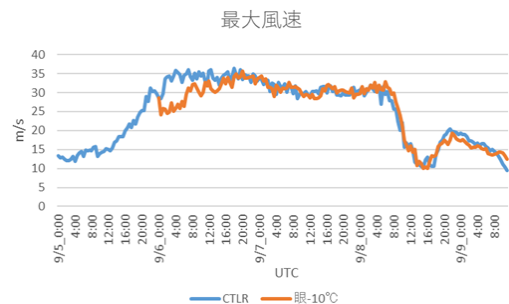


図 6-c. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 2.)

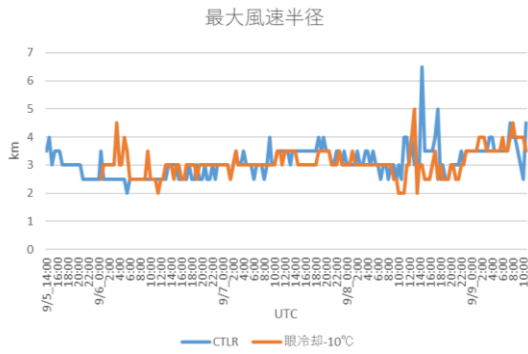


図 6-d. 時間ごとの最大風速半径(Shot 2.)

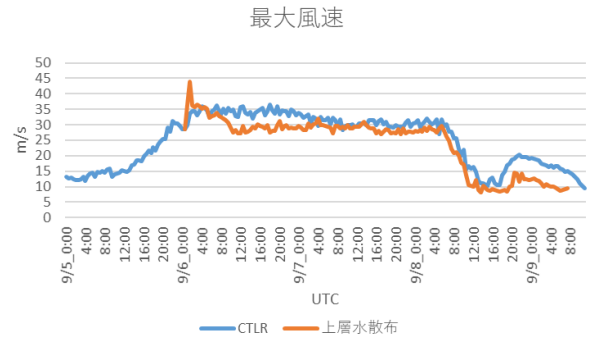


図 7-b. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 3.)

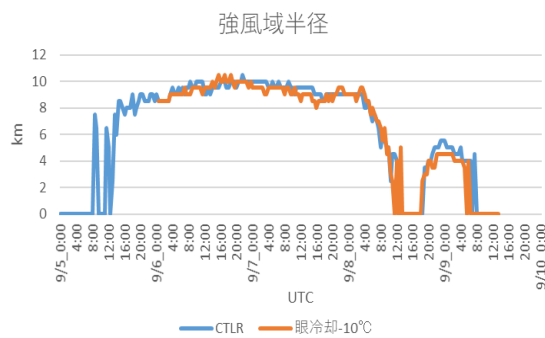


図 6-e. 時間ごとの強風域半径(Shot 2.)

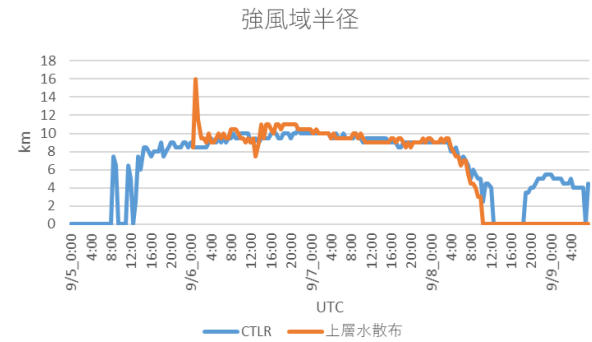


図 7-c. 時間ごとの強風域半径(Shot 3.)

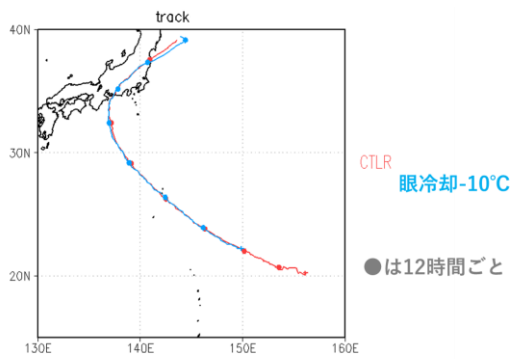


図 6-f. 台風中心のトラック(赤：CTLR、青：眼冷却-10°C) (Shot 2.)

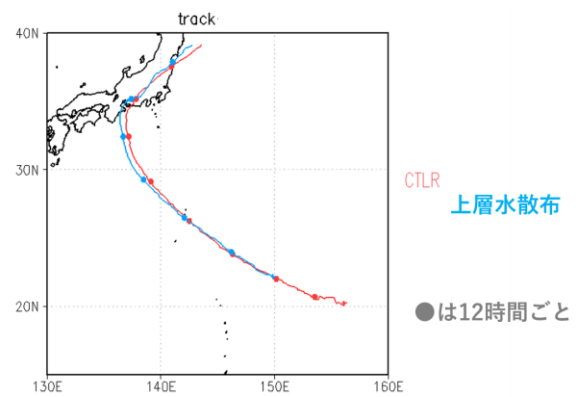


図 7-d. 台風中心のトラック(赤：CTLR、青：上層水散布) (Shot 3.)

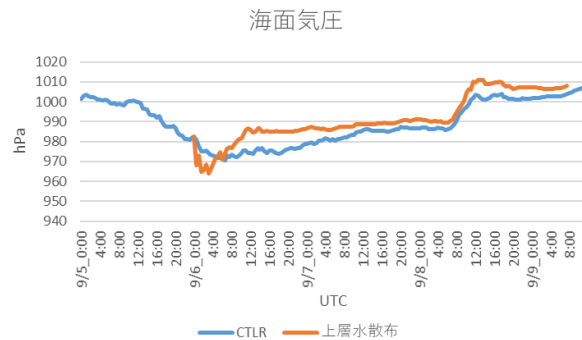


図 7-a. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 3.)

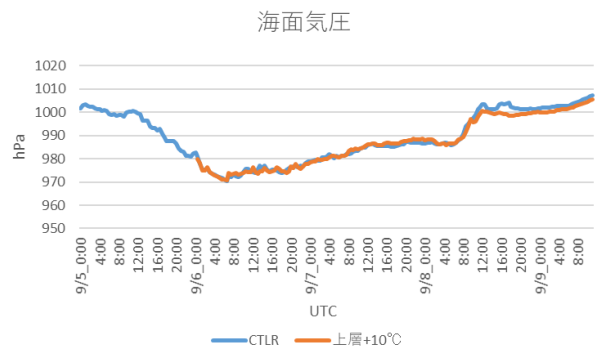


図 8-a. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 4.)

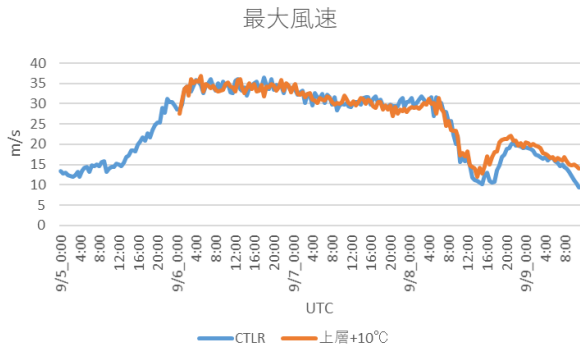


図 8-b. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 4.)

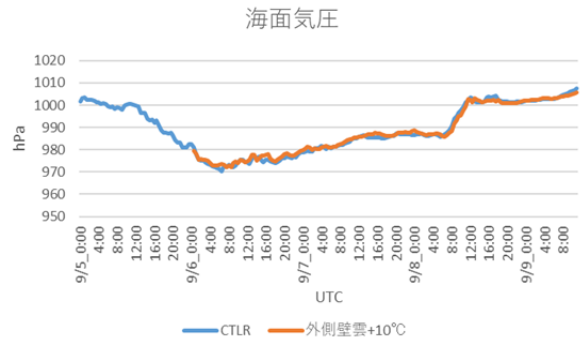


図 9-b. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 5.)

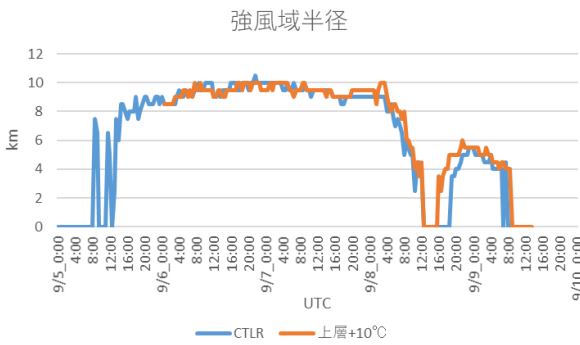


図 8-c. 時間ごとの強風域半径(Shot 4.)

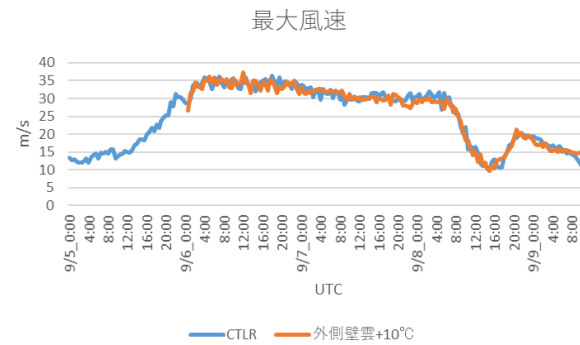


図 9-c. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 5.)

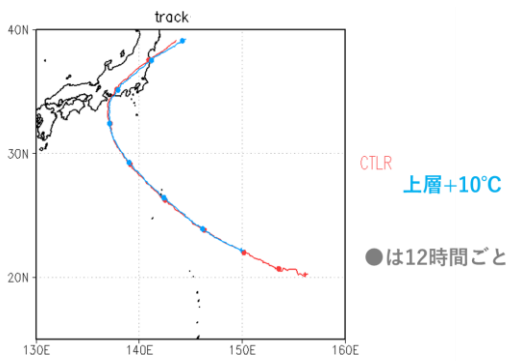


図 8-d. 台風中心のトラック(赤: CTLR、青: 上層+10°C) (Shot 4.)

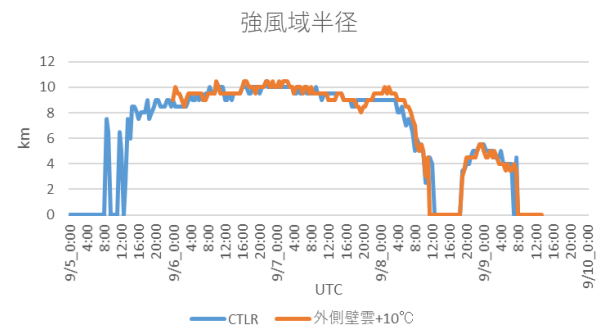


図 9-d. 時間ごとの強風域半径(Shot 5.)

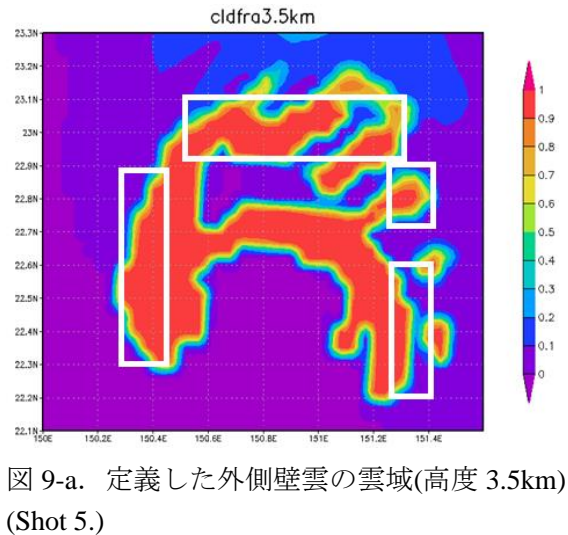


図 9-a. 定義した外側壁雲の雲域(高度 3.5km) (Shot 5.)

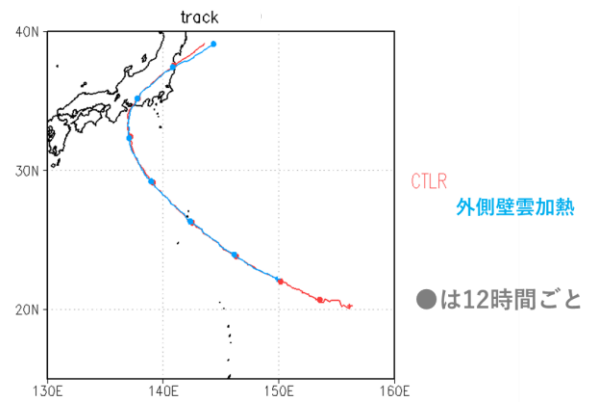


図 9-e. 台風中心のトラック(赤: CTLR、青: 外側壁雲加熱) (Shot 5.)

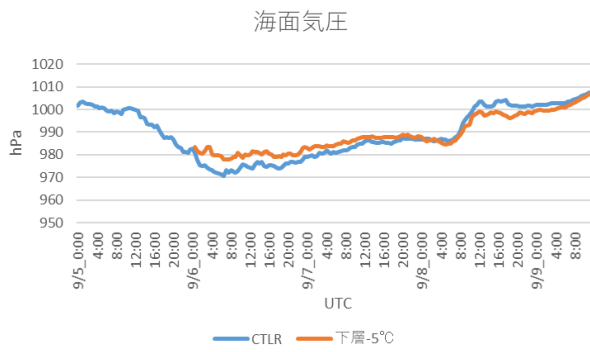


図 10-a. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 6.)

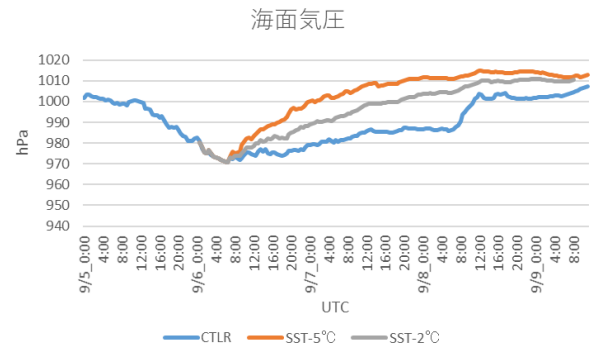


図 11-a. 時間ごとの海面気圧の変化(Shot 7.)

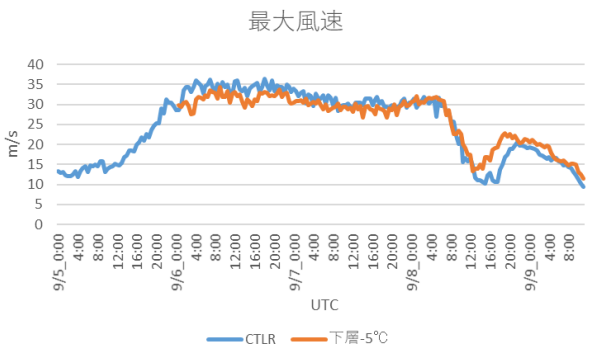


図 10-b. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 6.)

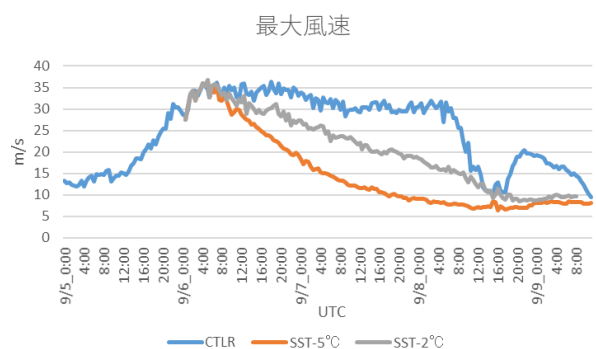


図 11-b. 時間ごとの最大風速の変化(Shot 7.)

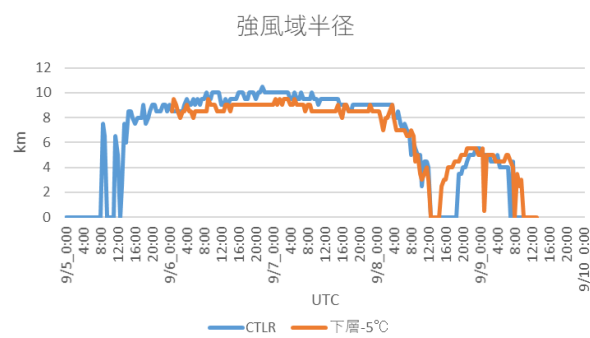


図 10-c. 時間ごとの強風域半径(Shot 6.)

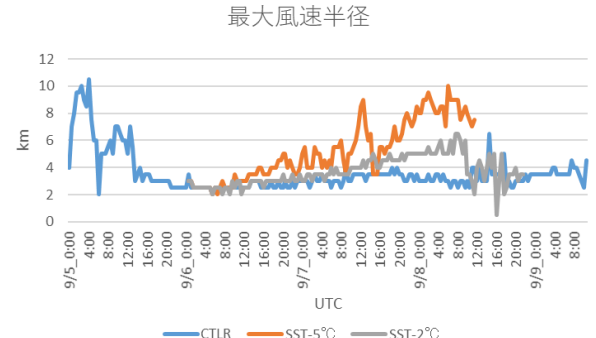


図 11-c. 時間ごとの最大風速半径(Shot 7.)

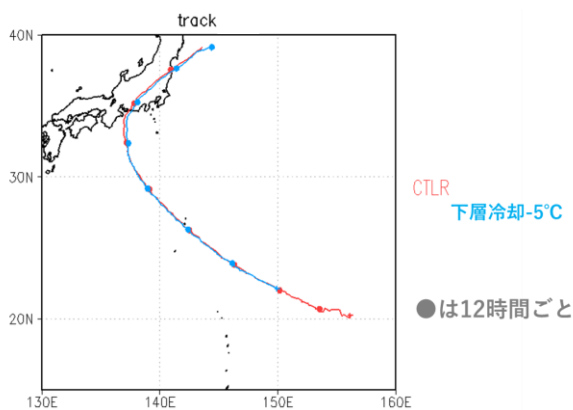


図 10-d. 台風中心のトラック(赤 : CTLR、青 : 下層冷却-5°C) (Shot 6.)

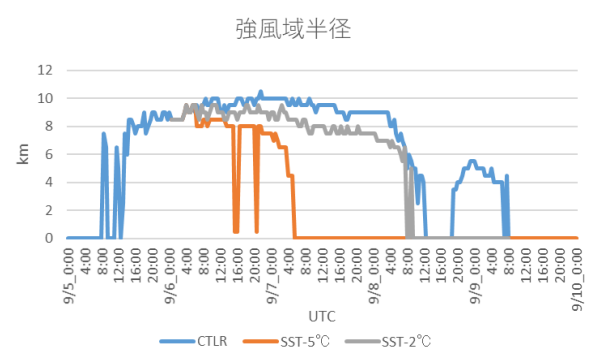


図 11-d. 時間ごとの強風域半径(Shot 7.)

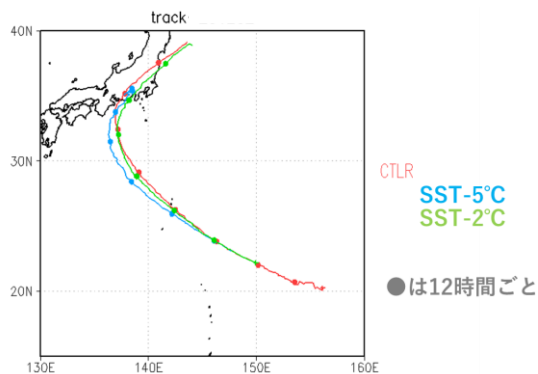


図 11-e. 台風中心のトラック(赤：CTRL、青：SST-5°C、緑：SST-2°C) (Shot 7.)

4. まとめ

各制御ランを強度、被害範囲、進路変化の観点から評価し、表 3 にまとめた。

エネルギーを奪うタイプの制御ランでは、その全てにおいて強度が減少した。エネルギーを分散するタイプの制御ランでは、被害範囲が拡大したランが複数見られた。また共通の特徴として、勢力変化が大きい制御ランほど進路変化が大きく、特に勢力が減衰したランに関しては、コントロールランと比較して、西よりの進路を取る傾向が見られた。さらに、Shot 3.のように1つの制御方法でも勢力の減衰と増幅の両方に寄与する可能性があることが明らかになった。また、外側壁雲の加熱によるアイウォールリプレイスメントの誘発実験は、十分に発達した段階の台風で改めて適用し、その効果を検証する必要があると考える。今回実施した制御ランは十分な数ではなく、上述の傾向もまだ確実とは言えない。今後、サンプル数をもっと増やし、より確実な傾向を掴む必要がある。

今後は、まず現在行っている「制御方法の立案」を一通り実施したのち、「制御規模の縮小」を持って実現性の高い制御方法を見いだす。次に、その制御方法を台風の発達段階ごとの影響で評価することで、より効果的な時期を模索する。そして、これらの一連の流れを複数の台風で実施することで制御方法を一般化し、台風制御理論の確立を目指したい。

表 3. 各制御ランの評価

	Shot 1. 水分量減少	Shot 2. 眼冷却	Shot 3. 上層水散布	Shot 4. 上層加熱	Shot 5. 外側壁雲加熱	Shot 6. 下層冷却	Shot 7. 海表面冷却
強度	◎	○	△	×	—	△	◎
被害範囲	◎	—	—	×	—	△	◎
進路変化	××	◎	×	○	◎	○	××

謝 辞

本研究は、ムーンショット型研究開発事業ムーンショットミレニアの支援を受けて行われた。また、チームタイフーンショットのメンバーにも有益なご助言などを頂きました。

参 考 文 献

- 小元敬男, 1968 : 気象及び気候の人工変換 —現状と問題点—, 農業気象, 1968年3月第23巻4号
- 小元敬男, 1971a : 熱帯性積乱雲の気象調節. 防災科学技術, 1971年5月 No.19
- 小元敬男, 1971b : 熱帯性積乱雲の気象調節に関するセミナー報告. 天気, 1971年12月 vol. 18, No.12
- 土屋巖, 1970 : 台風コントロール物語 —アメリカでの実験を中心に—. 科学朝日, 1970年10月
- 藤原美幸, 1971 : 台風の人工制御 ストームフューリー計画をめぐる.
- R. N. Hoffman, 2004 : 台風をあやつる 夢ではない 天気の制御. 日経サイエンス, 2004年11月号
- D. Rosenfeld, A. Khain, B. Lynn, and W.L. Woodley, 2007 : Simulation of hurricane response to suppression of warm rain by sub-micron aerosols
- H.E. Willoughby, D.P. Jorgensen, R.A. Black, S.L. Rosenthal, 1985 : Project STORMFURY: A Scientific Chronicle 1962-1983