



ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

Moonshot R&D MILLENNIA* Program

*Multifaceted investigation challenge for new normal initiatives program

「ムーンショット目標検討に向けた
台風制御と台風発電についての
研究開発と社会実装に関する調査研究」
調査研究報告書/Initiative Report
付録

令和3年7月

目標検討チーム/Brainstorming Team「タイフーンショット」

チームリーダー：筆保 弘徳（横浜国立大学 教育学部 教授）

サブリーダー：鹿渡 俊介（デロイトトーマツコンサルティング（同） マネジャー）

チームメンバー：坪木 和久（名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授）

佐藤 正樹（東京大学 大気海洋研究所 教授）

森 信人（京都大学 防災研究所 教授）

林 秀樹（新エネルギー・産業技術総合開発機構 客員フェロー）

川又 昭夫（川崎重工業株式会社 基幹職）

加藤 大輔（株式会社東京海上研究所 主任研究員）

寺尾 裕（東海大学 海洋学部船舶工学科 名誉教授）

満行 泰河（横浜国立大学 大学院 工学研究院 准教授）

Contents（目次）

付録 A. 本調査研究に対する有識者からのコメント

付録 B. 台風人工制御において経済的合理性を満たす航空機の規模

付録 C. 台風災害に関する資料

付録 D. 諸外国における US stormfury 以降の熱帯低気圧の人工制御についての動向

付録 E. 水素エンジン無人航空機の可能性についての文献調査及びヒアリングのまとめ

付録 F. 「今後の台風予測研究に関する研究会」 レポート

付録 A.

本調査研究に対する有識者からのコメント

1. 一般財団法人次世代環境船舶開発センター理事長、東京大学名誉教授 大和 裕幸 様

2021 年 7 月 1 日

JST ミレニア・プログラム

「ムーンショット目標検討に向けた台風制御と台風発電についての研究開発と社会実装に関する調査研究」課題代表者 筆保弘徳 殿

上記課題の報告書を拝見しました。

目標を設定したうえで、そこに至る研究開発、社会的な影響などを簡潔明快に記述しており、読み手にとっては詳細に書かれるよりもむしろ想像力をかき立てられ、提案者の考えに寄り添う事ができました。深く敬意を表します。

2050 年には台風を災害から恵にかえるという目標は人類の長年の夢で、また国のグリーンイノベーション戦略などに歩調のあったものです。研究内容はスパコンによる台風現象の本質的解明から観測技術の展開、無人発電船舶や電源供給システムの開発、社会受容性の検討、さらにはプラットフォーム型産学連携研究システム、新しいムーンショット型の人材育成、これらはいずれもこれからの社会・産業の要請、また技術の展開にふさわしく、学術や科学を大事にする姿勢も未来社会には是非必要な規範であると思います。

これらの技術の展開は台風対策が喫緊の課題になっている浮体式洋上風車の開発にも大きなヒントとなり、社会的にも大学とベンチャーが主導する機動的な産業組織と人材育成システムは 2050 年頃の知識中心社会の実像でもあります。

この研究計画は、研究テーマそのものばかりでなく、社会と科学の相関や、産業社会像の実装にも大きく貢献するもので、ゴールを明確にして科学の適切な展開のもとで進めるべきムーンショット型研究にはまさに適切な課題と考えます。

一般財団法人 次世代環境船舶開発センター理事長、東大名誉教授
大和裕幸

2. 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所理事長 栗山 善昭 様



2021 年 6 月 29 日

JST ミレニア・プログラム

「ムーンショット目標検討に向けた台風制御と台風発電についての研究開発と社会実装に関する調査研究」課題代表者 筆保弘徳 殿

上記課題の報告書を拝見いたしました。「台風の脅威を恵みにかえる」の目標は、台風の持つ膨大なエネルギーから逃げるだけでなく、それを積極的に利用していこうという、台風に対する今までの世界の取り組みを一変させるさせる大胆な目標と考えます。本研究は、人類が面している気候変動に対しても適応策、緩和策の両面で貢献するものであり、本研究が関連する技術の裾野が広いため、社会に与えるインパクトは科学技術的にも経済的にも大きいと考えます。報告書に記載されているように、幾つかのブレイクスルーが必要であるものの、2050 年までに実現を目指した野心的な研究課題と判断します。我が国初の革新的イノベーション科学技術の創出につながる研究課題設定であると確信しております。

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
栗山善昭

3. 京都大学防災研究所所長 中北 英一 様

京都大学



京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2021 年 6 月 29 日

JST ミレニア・プログラム

「ムーンショット目標検討に向けた台風制御と台風発電についての研究開発と社会実装に関する調査研究」課題代表者 筆保弘徳 殿

上記課題の最終報告書を拝見いたしました。掲げられている目標の「台風の脅威を恵みにかえる」は、これまでの防護という観点の防災減災対策から、ハザードそのものを変化させるという災害研究および対策のパラダイムシフトを目指すものであると思われます。また、我が国初の革新的イノベーション科学技術の創出につながる研究課題設定でもあります。報告書に記載されているように、幾つかのブレイクスルーが必要であるものの、2050年までに高いレベルの研究目標とその実現を目指した野心的な研究課題と判断致します。

国立大学法人 京都大学防災研究所

所長 中北英一

KYOTO UNIVERSITY

Disaster Prevention Research Institute

Kyoto 611-0011 JAPAN TEL/FAX: +81-774-38-4321

付録 B.

台風人工制御において経済的合理性を満たす航空機の規模

台風制御

台風制御システムの確立

本文中の上記項において、台風制御システムの一つである航空機の、台風制御に必要な機体規模の試算を行っている。本項では、その試算の内容について詳細にまとめる。

○ 目的

台風の人工制御では、台風に接近又は侵入し、直接インパクト物質を散布する方法が主に提案されており、これには航空機の適用が有力である。また、ミッション遂行能力、安全性及びコストにおいて高いパフォーマンスを発揮する航空機が望ましい。

航空機を用いた台風制御については、多くの文献でその効果が検証されているものの、経済的成立性はあまり検討されていない。航空機は他の輸送システムと比べて維持コストが各段に高いため、台風制御事業を安定的に継続するためには、台風制御により得られる経済効果に見合う規模の機体とその運用を構想する必要がある。

そこで本調査研究では、台風制御におけるインパクト物質の散布量（≡粒子濃度）及び散布継続時間と、経済的成立性を満たす航空機の機体規模（サイズ及び機数）の関係を調査し、今後台風制御理論を検討する際に、それを実現するための航空機の機体規模（サイズ及び機数）を概算できるようにした。更に、文献で示されている台風制御に必要な粒子濃度及び散布継続時間から台風制御に必要な機体規模を推算し、それが経済的成立性のある規模なのかを評価し、台風制御に航空機を用いる場合の課題と今後必要な取り組みを抽出した。

○ 想定する台風制御理論（Rosenfeld）

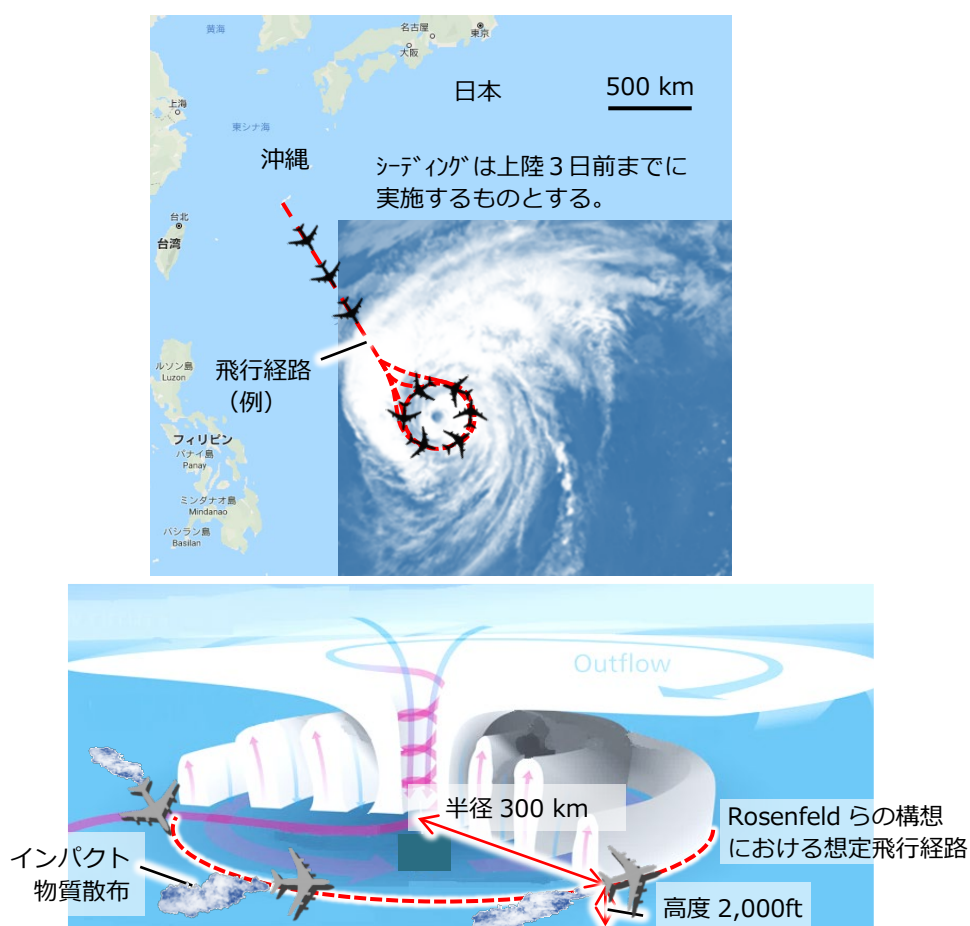
航空機による吸湿性粒子散布を想定した台風制御理論として、Rosenfeld ら^{本文[4]}の数値シミュレーション結果が報告されている。その内容は、ハリケーン・カトリーナ（2005 年）に対し、ハリケーン中心から 200～400km の周辺域（風速約 20m/s 以下）の雲底部に吸湿性粒子を粒子濃度 1.05kg/km³、散布速度 21.6 ton/h、状態維持（散布継続時間）2.5 日の条件で散布することで、強風域が 25%低減するというものである。なお、ハリケーン中心から 300 km の地点に散布されたインパクト物質は、ハリケーンの中心に向かう風によって螺旋状に航跡を描きながら中心に引き込まれ、強風域を低減するようなプロセスを誘発する。本調査研究では、この台風制御理論をベースに、必要な航空機の機体規模と機数を計算する。

○ 台風制御における航空機のミッション（飛行経路／飛行サイクル）

まず、台風制御を行う航空機の補給処として沖縄を想定し、台風までの進出距離を設定す

る。インパクト物質の散布継続時間が2.5日であることから、台風が沖縄に上陸する3日前からインパクト物質を散布すると仮定すると、台風が南方海上を西に進む時の平均移動速度(20km/h)より、1,440km(台風の3日間の移動距離)が沖縄からの進出距離となる。これは、飛行速度が300 kt(556 km/h)の場合、2.6 h で到着できる距離である。(図 xx-1 参照)

また、航空機のチームを複数編成し、入れ代わり立ち代わり途絶えることなく散布を行って2.5日の粒子濃度の状態維持を達成するような飛行サイクルを設定する。各チームのインパクト物質散布時間は、ペイロード、航続距離、飛行速度等に依存するため一律には決まらないが、次項に示す経済成立性を満足するペイロードと機数の関係チャートの算出に限っては、便宜的に2チームで散布継続することを前提に考え、それが可能な最小時間である7時間として計算を行った。(図 xx-2 参照)



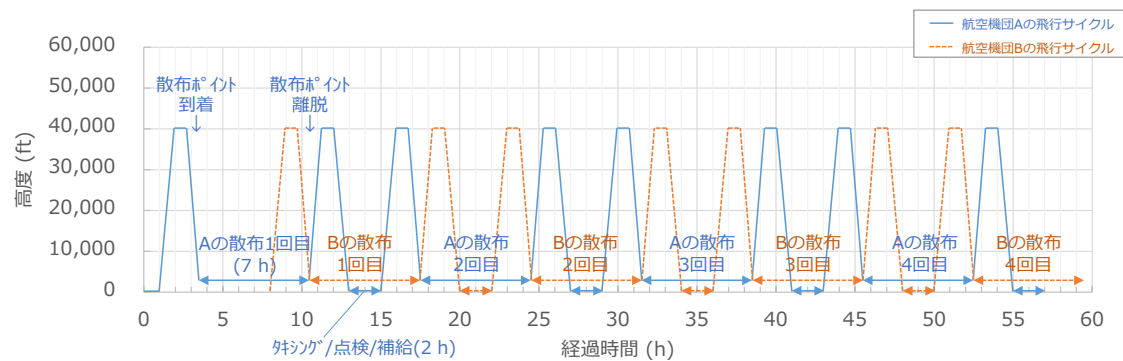


図 xx-2. 想定飛行サイクル（2 組編成を前提として設定）

以上を、台風制御を行う航空機のミッションとしてまとめると表 xx-1 となる。なお、Rosenfeld らの台風制御理論は、比較的風速の小さい領域で散布を行うことを想定している。そのため本調査では、台風の強風に耐える特別な構造強度は考慮しない。

表 xx-1. 台風制御を行う航空機のミッション（運用コスト算出用）

項目	仕様	補足
台風までの進出距離	片道 1,440 km (往復 2,880 km)	台風が沖縄上陸前の 3 日間に移動する距離
インパクト物質散布時間	7 時間※	1 チームあたりの散布時間 (2 チームで散布継続が可能な最小時間)
散布サイクル数	8 サイクル	2.5 日間の散布継続に要するサイクル数
飛行速度	300kt (556 km/h)	台風進出時とインパクト物質散布時の飛行速度。 多目的無人航空機 MQ-9 や MQ-4 と同等。
インパクト物質搭載量(ペイロード)	1.4ton～40ton	本検討では、航空機の機体サイズを表すパラメータとなる

※ インパクト物質散布時間 7 時間は、想定する機体の航続距離を考慮すると成立しない場合もあるが、運用コストの定義においては、便宜的にその点を無視する。

○ 経済的成立性を満足する機体規模

台風制御を実行するのに必要なコストとして、以下が想定される。

- ① 航空機の運用コスト（整備費、燃料費、機体保管費等）
- ② 航空機の調達コスト（減価償却費）
- ③ 台風制御実行に関わる人件費等
- ④ 台風制御に必要な情報入手コスト（航空機観測データ、台風シミュレーション、被害額シミュレーション等）

① 運用コストは、他機例情報に基づき、航空機のペイロードと運用コストの線形関係式により定義した。本調査研究では、関係式の勾配を他機例情報が充実している有人輸送機の統計から求め、関係式の切片を、ペイロード以外の要求仕様を満足し、運用実績も多い MQ-9 Reaper の情報から求めた。（本運用コスト推算式は無人機ベースに補正されているが、台風制御を行う航空機を無人航空機に限定している訳ではない。）

本運用コストは飛行時間の関数となるため、台風制御 1 回あたりの飛行時間を、 $(2,880[\text{km}] \div 556[\text{km/h}] + 7[\text{h}]) \times 8 \text{ サイクル} = 99.2 \text{ 時間}$ と仮定することで、台風制御 1 回、1 機あたりにかかる運用コストとして推算した。

② 調達コストも、①と同様に航空機のペイロードと機体調達コストの線形関係式により定義した。なお、機体調達コストは、台風制御 20 回で減価償却されると仮定して、台風制御 1 回、1 機あたりのコストに換算した。

台風制御を行う航空機のコスト(運用コスト①と機体調達コスト②の合計)とペイロードの関係を図 xx-4 に示す。

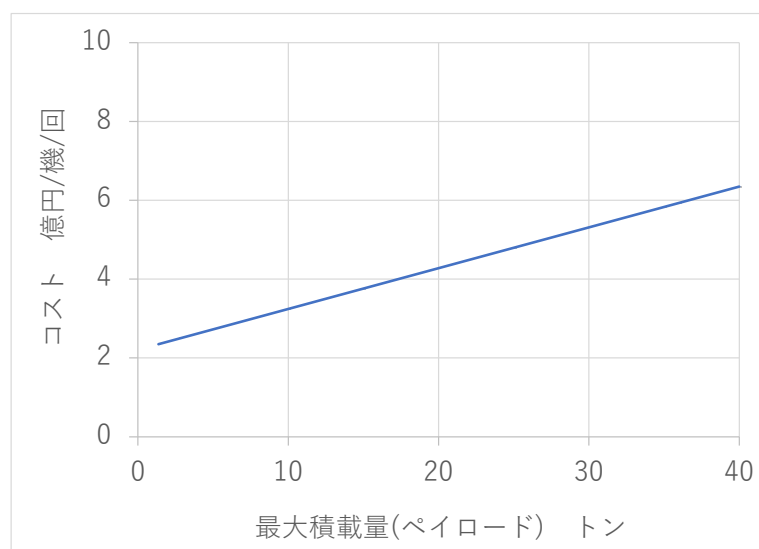


図 xx-4. 台風制御を行う航空機のコスト(運用+調達)とペイロードの関係

次に、経済的成立性を満足しつつ、台風制御にかけることが可能なコストを検討した。本調査研究では、台風制御を行うために必要なコスト（運用コスト①、機体調達コスト②に、台風制御人件費③、観測及びシミュレーション費用④を加えたコスト）が、大型の台風を並の台風に減勢させた場合に想定される経済的被害の金額の削減量よりも小さいときに、経済的成立性が満足されるとした。

経済的成立性を満足する機体サイズ（ペイロード）と機数の関係を図 xx-5 に示す。ペイロードが数トンの機体だと 30~40 機程度、ペイロードが 40 トン近くあると数十機が経済的に成立する機数となる。

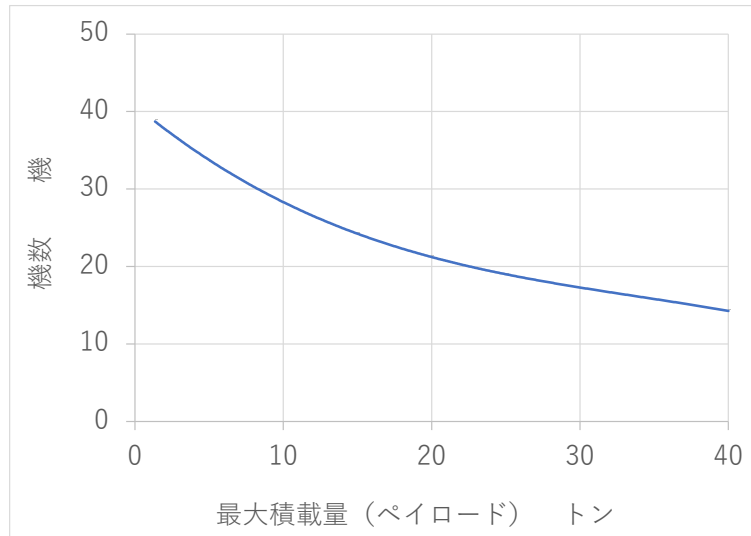


図 xx-5. 経済的成立性を満足する機体サイズと機数の関係

○ 台風制御パラメータと機体規模との関係

Rosenfeld らの台風制御理論に基づき、台風中心から 300 km、海面上 600m (2000ft) の円周上で、台風中心に向かう風が吹いている領域に航空機でインパクト物質を散布することにより、インパクト物質を台風中心に引き込み、台風の強風領域を狭めることを考える。

台風制御理論及びインパクト物質を散布する航空機に係るパラメータとして以下を設定する。

<台風制御理論に係るパラメータ>

- ・ 粒子濃度 : 台風中心に向かって吹き込まれる空気に占めるインパクト物質の量
⇒ $0.1 \text{ kg/km}^3 \sim 4.0 \text{ kg/km}^3$
- ・ 散布速度※ : 単位時間あたりのインパクト物質の散布量
(散布速度遅い＝均質と考える領域が広くなる＝均質と考えにくい
散布速度速い＝均質と考える領域が狭くなる＝均質と考えやすい)
- ・ 散布継続時間：減勢効果を得るのに必要な散布を維持する時間
⇒ 2h、5h、10h、15h、60h

<インパクト物質を散布する航空機に係るパラメータ>

- ・ ペイロード : 航空機に搭載できるインパクト物質の量
⇒ 1.5、36ton
- ・ 周回速度※ : インパクト物質を散布するときの航空機の飛行速度
⇒ 100～300km/h (ペイロード 1.5ton の航空機)
200～500km/h (ペイロード 36ton の航空機)
- ・ 航続距離 : 補給処である沖縄と台風の往復を含めた、航空機が飛行できる距離
⇒ 3,020km (ペイロード 1.5ton の航空機)
4,270km (ペイロード 36ton の航空機)

※ 散布速度と周回速度は従属変数なので、散布速度のパラメータ設定は行わない

本調査研究では、航空機から散布されたインパクト物質は、(周回速度×散布時間)×(台風中心に向かって吹く風の速度×散布時間)×航空機の飛行高度で定義される体積の空気を均質に満たすと仮定する。なお、台風風に吹き込む空気全体におけるインパクト物質の均質性を確保するために、台風一周の中に少なくとも4機の航空機を配置することとする。

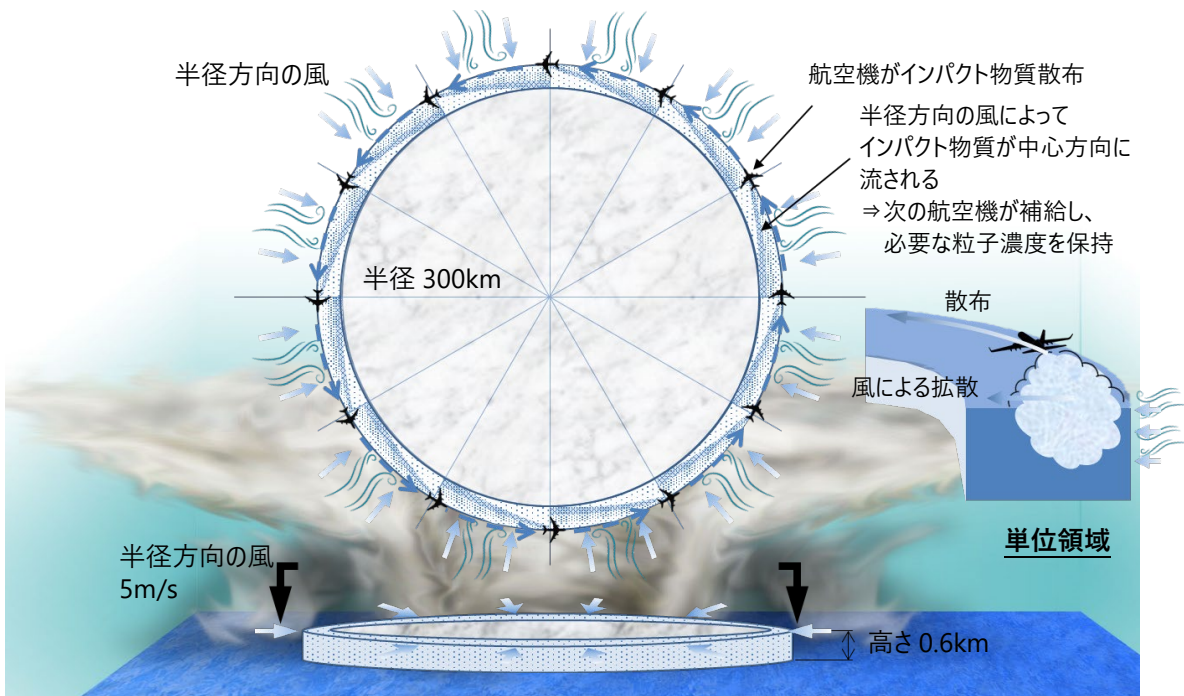


図 xx-6. 航空機によるインパクト物質散布の考え方

前頁で設定した粒子濃度をパラメータに、各ペイロードの航空機が様々な周回速度でインパクト物質を散布する場合に必要な配置機数を算出する。粒子濃度はペイロード（散布量）と散布体積に関連付けられることから、関係式は以下となる。

$$\begin{aligned}(\text{粒子濃度}) &= (\text{散布量}) / (\text{散布体積}) \\ &= (\text{散布量}) / \{ (\text{周回速度}) \times (\text{散布時間}) \\ &\quad \times (\text{台風中心に向かって吹く風の数値}) \times (\text{散布時間}) \\ &\quad \times (\text{航空機の飛行高度}) \} \\ &= (\text{散布量}) / \{ (\text{周回速度}) \times (\text{散布時間}) \times 5\text{m/s} \times (\text{散布時間}) \times 0.6\text{km} \} \\ &= (\text{散布量}) / \{ 10.8\text{km}^2/\text{h} \times (\text{周回速度}) \times (\text{散布時間})^2 \} \\ (\text{散布時間}) &= \sqrt{ \{ (\text{散布量}) / (\text{粒子濃度}) \} / \{ 10.8 \times (\text{周回速度}) \} }\end{aligned}$$

ここで、

$$(\text{散布距離}) = (\text{周回速度}) \times (\text{散布時間})$$

であるから、円周方向に配置することが必要な機数は、下式で求めることができる。

$$(\text{配置機数}) = (\text{航空機が周回する円周の長さ}) / (\text{散布距離}) \cdots \text{小数点以下切り上げ}$$

ただし配置機数は、前述の通り散布距離によらず最低 4 機とする。

なお、航空機の 1 サイクル分のミッションは、ペイロード分のインパクト物質を全て散布し終わるか、航空機の航続距離に達するか（燃料がなくなるか）のいずれかとする必要がある。算出された散布距離（ペイロード分のインパクト物質散布に要する飛行距離）は航続距離を上限とする。

さらに、散布継続時間を 2.5 日間（60 時間）とした場合、算出された散布時間と台風制御に必要な散布継続時間である 60 時間から、必要なチーム数を求める（例えば、1 サイクル分のミッションにおける散布時間が 1 時間の場合、1 時間毎に別のチームが現地に到着するようにする）。ここまで求めた 1 サイクル分のミッションにおける配置機数と必要なチーム数から、必要な機数を求めることができる。

以上より、散布継続時間が 2.5 日間（60 時間）の場合における、各ペイロードの航空機を用いた場合の、粒子濃度と必要機数の関係を図 xx-7 に示す。

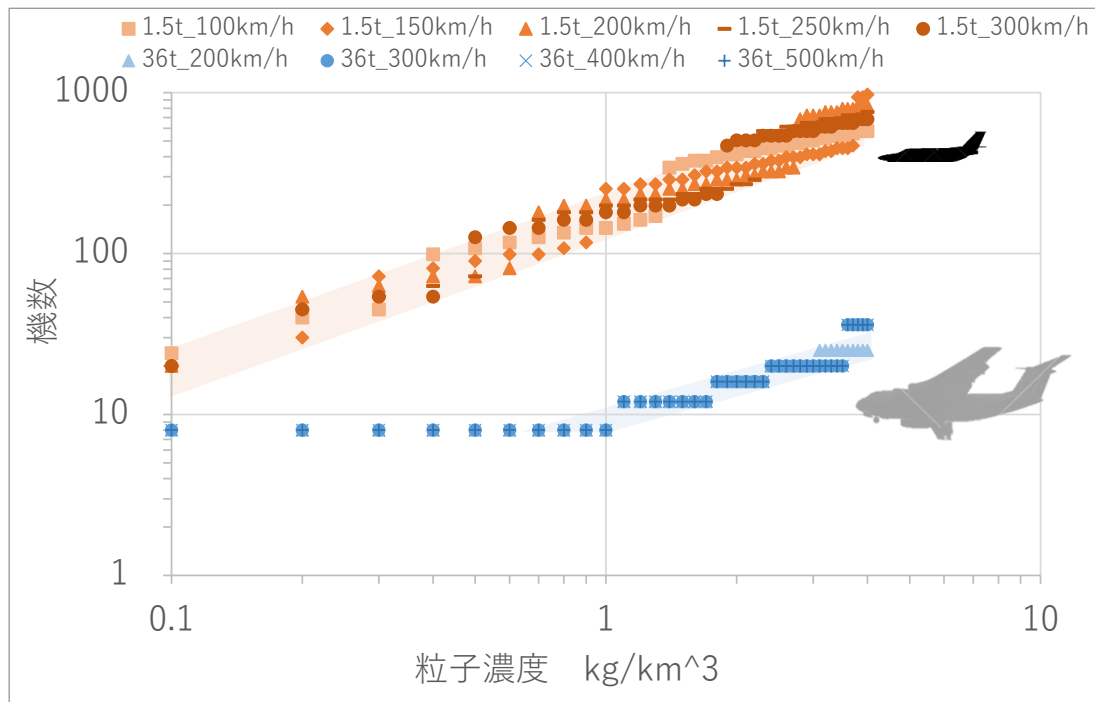


図 xx-7. 粒子濃度と必要機数の関係(散布継続時間 60 時間の場合)

図 xx-7 より、ペイロードの大きい機体の必要機数が 10～20 機程度、ペイロードの小さい機体の必要機数が 20～1000 機程度であることが分かった。周回速度との関係を見ると、周回速度を遅くすると、散布速度を落とした上で、ゆっくり飛行することになる（少量の散布を長時間継続する）ので、Team 編成が少なく済み、必要機数が少なくなる傾向となった。一方、周回速度を速くすると、散布速度を上げて、高速飛行（短い時間で多量の散布を実施）するので、Team 編成が多く必要となり、必要機数が多くなる傾向となった。以上より、粒子濃度をパラメータとした場合は、周回速度を遅くした方が、必要機数が少なくなり、効率的となる傾向が見られた。

次に、散布継続時間をパラメータとした場合の機体規模との関係を算出する。

算出された散布時間と、パラメータ設定された散布継続時間から、必要なチーム数を求め、1 サイクル分のミッションにおける配置機数を乗じることで、必要な機数を求めることができる。各ペイロードの航空機を用いた場合の、散布継続時間と必要機数の関係を図 xx-8 に示す。

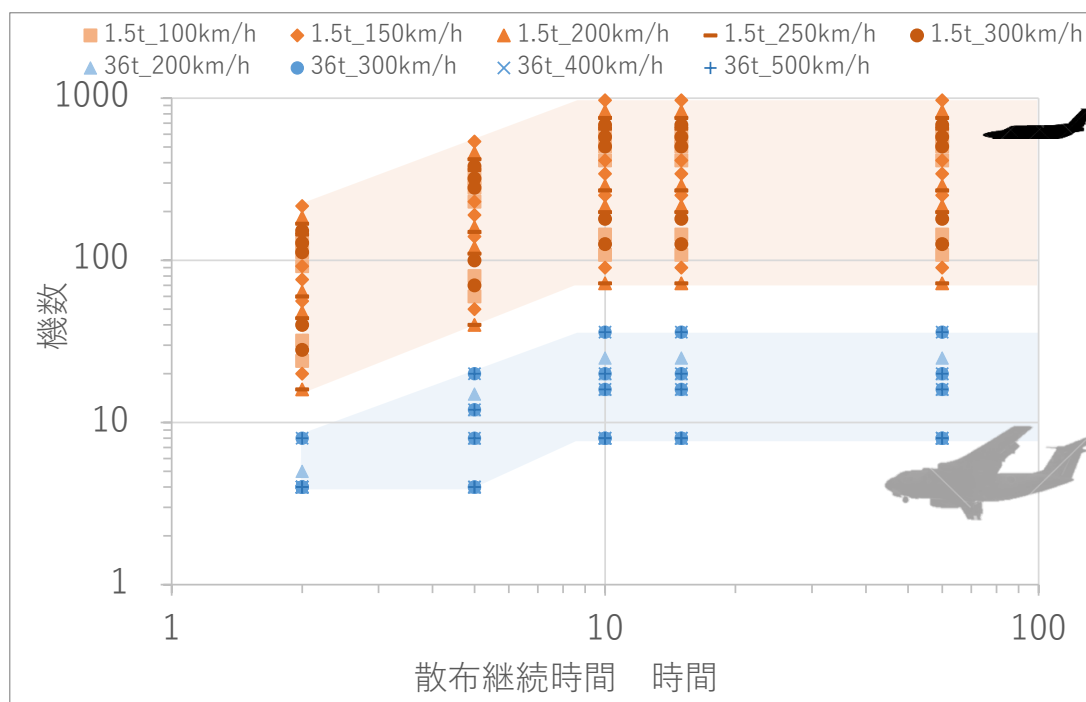


図 xx-8. 散布継続時間と必要機数の関係

図 xx-8 より、散布継続時間が 10 時間以下の場合は、散布継続時間が短いほど機数を少なくすることができるが、10 時間を超えてしまうと、航空機の集団編成を組むことになるため、必要機数が一定になることが分かった。

○ 経済的成立性と技術的成立性のすり合わせ

台風制御向けの航空機とはいえ、その運用には経済的な上限値が存在すると考えられ、それを意識した台風制御理論を構築する必要がある。その際の参考データとなるように、図 xx-7～図 xx-8 にて示した、各種散布パラメータと機数の関係に、図 xx-5 に示した経済的に成立し得る運用可能な機体サイズと機体数の関係を重ね合わせ、さらに、Rosenfeld らの台風制御理論を参考に、粒子濃度 $1.05\text{kg}/\text{km}^3$ 、散布速度 $6\text{kg}/\text{s}$ ($21.6\text{ton}/\text{h}$)、状態維持 2.5 日 (60 時間) を台風制御のための条件として設定することで、経済的に成立し得る機体規模について検討を行う。ダブルプロットした結果を図 xx-9～図 xx-10 に示す。

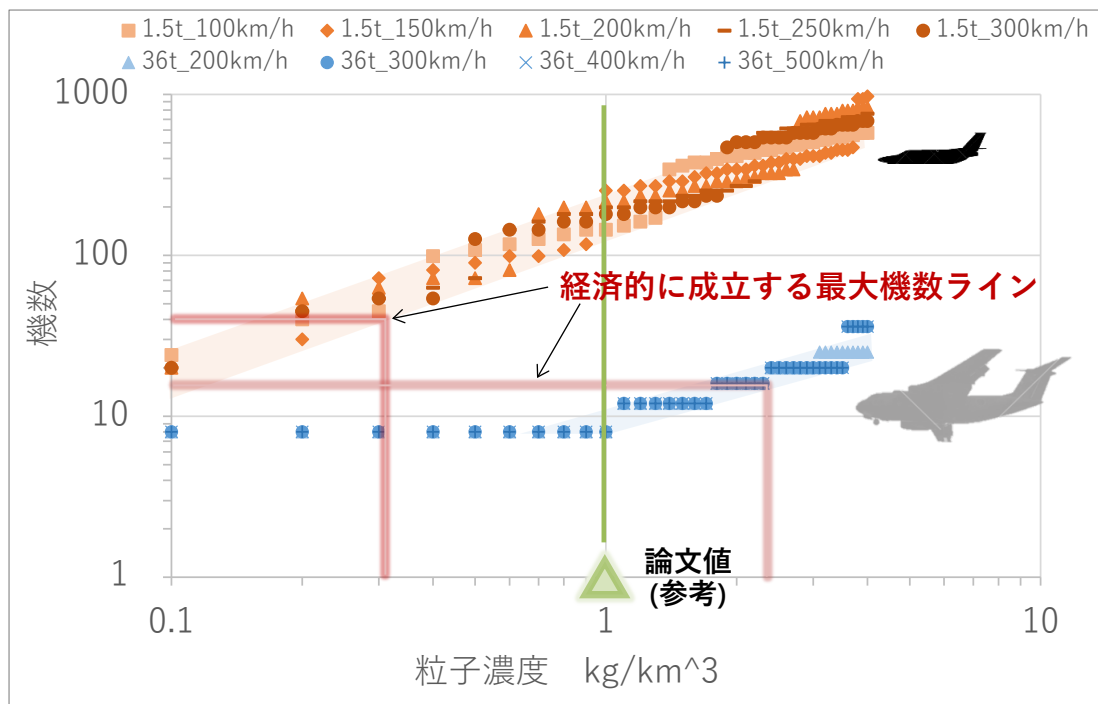


図 xx-9. 論文にて設定される粒子濃度と経済的に成立する機数について

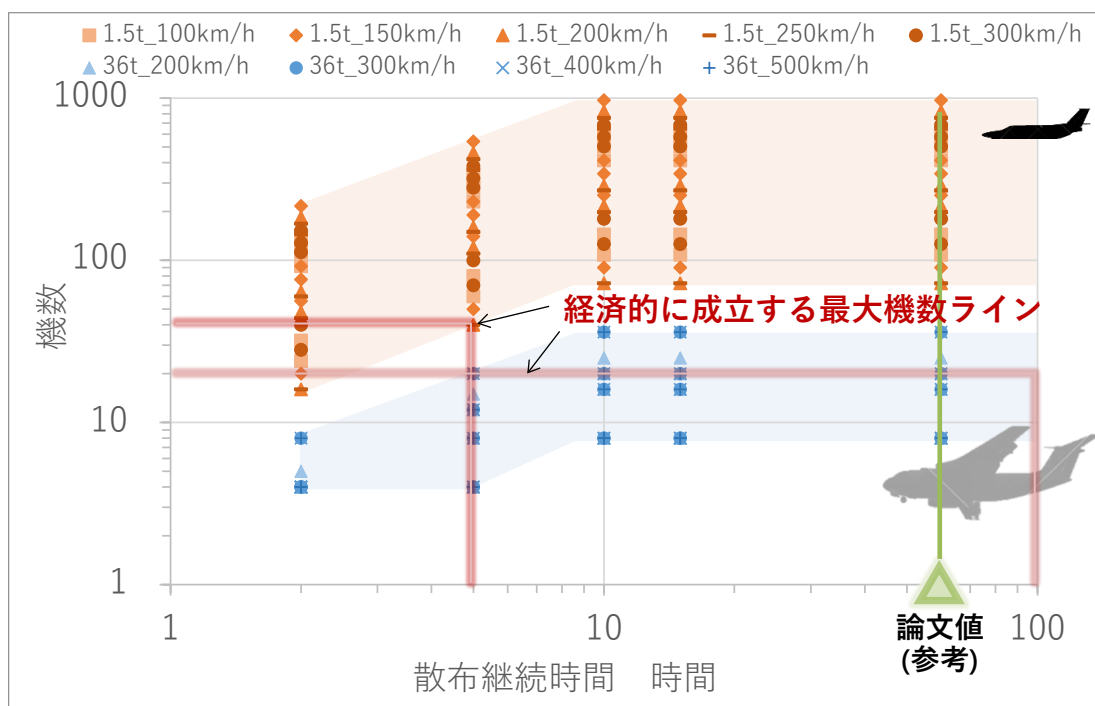


図 xx-10. 論文にて設定される散布継続時間と経済的に成立する機数について

図 xx-9～図 xx-10 いずれの結果についても、36ton クラスの積載量の大きい機体に関しては、散布に要する機数が 10～20 機程度でかつ、経済的に成立する最大機数ラインが 15 機程度のところにあり、さらに論文推奨値も経済的に成立する最大機数ラインの中にあるため、台風制御理論としても、機体規模としても、成立する可能性があることが示唆される。

一方で、本調査研究では、航空機から散布されたインパクト物質は、(周回速度×散布時間)×(台風中心に向かって吹く風の速度×散布時間)×航空機の飛行高度で定義される体積の空気を均質に満たすと仮定しているが、実際の航空機オペレーションを考えたときに、粒子濃度の均一化がどこまで担保されるのかは未知数であり、その点の検討の深化(粒子の拡散を考慮した時に、どのような航空機オペレーションが、濃度を均質に近い状態にできるのか、又は台風インパクトを与えるという観点から、どのような粒子分布を再現すると、最も効果的なのか、それを実現するための航空機オペレーションはどのような方法なのか等)が課題となる。

1.5ton クラスの積載量の小さい機体に関しては、経済的に成立する最大機数ラインの内側に入る散布条件はあるものの、論文推奨値とは大きく離れており、その値を前提に台風制御理論を成立させようとする、必要機数がかなりの多数となることが分かる。粒子濃度の均一性という観点からは、非常に多数の航空機を派遣し、それらが非常に近いところを飛行した方が良いと考えられるが、それでは経済的に成立しない。そのため、大きさの小さい機体であっても、シードの積載量を極力大きくするような機体計画を行い、なるべく少ない機数で散布要求を満たせるようにすることを考えることが課題となる。

○ 航空機を用いた台風制御実現に向けた課題と必要な取り組み

台風制御のためのインパクト物質散布を航空機で行うことを考えた場合、以下のような課題があることが明らかとなった。これらの課題に対して必要な取り組みをまとめる。

- ① 質量対効果の高いインパクト物質／撒き方
(散布装置、オペレーションに求められる要求)
- ② 積載量を稼げる機体構造 (航空機に求められる要求)
- ③ 低コスト構造 (航空機等に求められる要求)
- ④ 高速進出／帰投性能 (航空機に求められる要求)

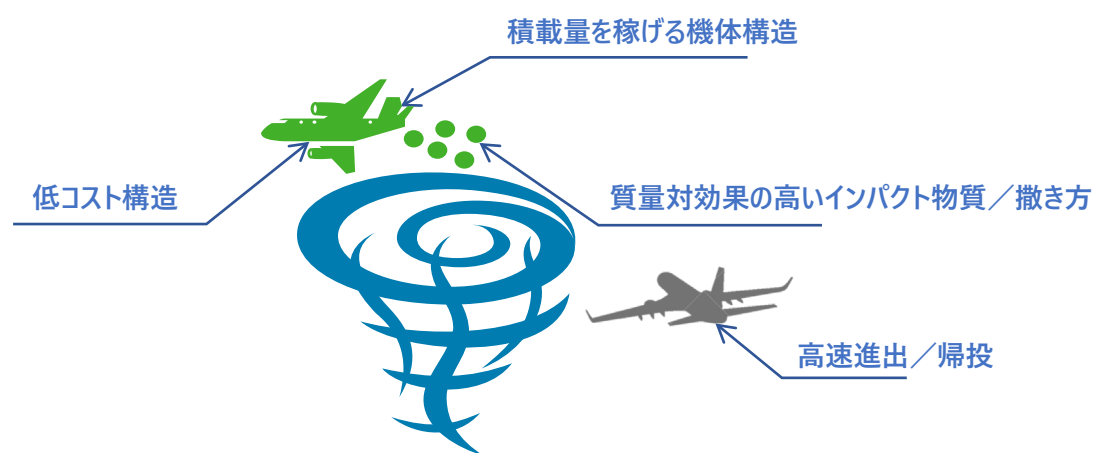


図 xx-11. 航空機を用いた台風制御実現に向けた課題

① 質量対効果の高いインパクト物質

人工降雨関連の研究において、質量対効果の高いインパクト物質の開発は活発に行われており、吸湿性粒子やヨウ化銀等が有力視されている。

一方で、インパクト物質に対して、地球上に無尽蔵に存在する物質や、環境に全く無害等の要求を加えると、採用できるインパクト物質の種類は限られてきて、例えば水、水蒸気という選択肢も考えられるようになる。

例えば、航空機に水素を搭載して、水素を燃焼させることで水蒸気を散布する方法を採用した場合、航空機に水を搭載した場合と比較すると、搭載重量を 1/9 に削減できる。これもある意味、質量対効果の向上であり、より多くのインパクト物質を積載して散布することができるようになる。このような工夫を含め、質量対効果の高いインパクト物質を検討する必要がある。

参考：

仮に、水素を搭載した航空機を考える場合、最初に課題として挙がるのが水素タンクの重量である。水素タンクにかなりの重量を割付ける必要が生じるので、それを考慮しても、水素搭載が有利なのかを、ペイロード 2.7ton クラスの航空機を適用する場合を想定して、簡易的に検証する。

通常、水素タンク質量の指標として、GI (Gravimetric Index = LH2 質量／満タン時 LH2 タンク総質量) が使われるが、最新の水素燃料航空機のコセプトでは GI=20%であり、これをもとに、ペイロード 2.7ton を LH2 と水素タンクとに分配すると、それぞれの質量は LH2 が 0.5ton、水素タンクが 2.2ton となる。

0.5ton の LH2 は、燃焼させると 5ton 程度の水になり、単に水の状態で搭載 (2.7ton) した場合に比べて 1.8 倍となる。

以上から、ペイロード 2.7ton クラスの機体で、インパクト物質を水蒸気にするのであれば、水素にして航空機に搭載した方が、多くの量を積載できることが分かる。

② 積載量を稼げる機体構造

前述の通り、台風制御用航空機は、積載量の多い機体が要求されるが、特に、無人機クラスの小型機は、図 xx-12 の通り、積載量の多い機体が世間に少なく、新しいコセプトの機体開発に向けた取組みが必要である。

それに加え、例えば①にて示した水素を搭載して水蒸気を散布する航空機を想定した場合、水素は水に比べて体積が 1.6 倍* (液体水素の場合) となる上に、タンクの必要肉厚も厚いため、巨大タンクの積載を考えると、機体のサイズに比べて、相対的に体積の大きい機体形状が要求される。そのような機体の形態例としては、例えばブレンデッド・ウィング・ボディなども考えられ、台風制御用航空機の機体計画は、いわゆる滞空型航空機の形態やコンベンショナルな形態にとらわれることなく、最適形態を検討する必要がある。

一方で、積載量が多いと、前述の通り、粒子濃度の均一化がどこまで担保されるのかが未知数となりやすく、粒子の拡散を考慮した時に、どのような航空機オペレーションが、濃度を均質に近い状態にできるのか、又は台風インパクトを与えるという観点から、どのような粒子分布を再現すると、最も効果的なのか、それを実現するための航空機オペレーションはどのような方法なのか等が課題となる。

* 同じ水蒸気量を散布するために必要な液体水素体積の水との比は下式の通り。

$$P_{H_2O} / P_{H_2} \times [H_2] / [H_2O] = 1 / 0.071 \times 2 / 18 = 1.57$$

ここで、 P_{H_2O} と $[H_2O]$ はそれぞれ水の比重と分子量、 P_{H_2} と $[H_2]$ はそれぞれ液体水素の比重と分子量である。

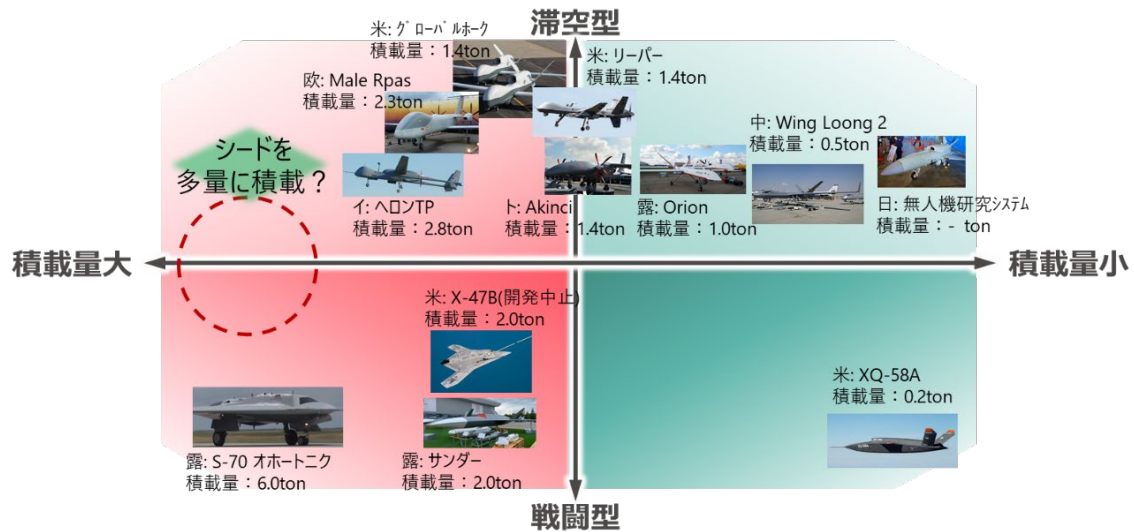


図 xx-12. 既存無人機の形態及び積載量調査結果

③ 低コスト構造

機体の製造／調達コストが低減されれば、図 xx-9、-10 に示した最大機数ラインが上に上がるので、粒子濃度の適用範囲が広がり、台風制御理論条件の自由度が広がる。

④ 高速進出／帰投性能

補給処として想定している沖縄と台風の往復の効率化を図る（時間の短縮、燃料消費量の低減等）ことで、チーム編成数を減らすことができ、必要機数を減らすことができる。

本調査研究では、燃料消費量と関連付けられる航続距離について、飛行高度や台風環境中の飛行に基づく空気抵抗の違いの影響を考慮するには至っておらず、航続距離の標準値に基づいて散布時間の制限を設けたにとどめたため、航続距離標定でチームの入れ替わりを定義するケースは少なかったが、例えば、台風環境での飛行の燃料消費率が極端に高いような場合には航続距離標定となって、進出／帰投時の燃料消費率が重要となる可能性もあるため、効率的に進出／帰投ができることも、求められる性能の一つになると考えられる。

○ おわりに

本調査研究の成果として、台風制御におけるインパクト物質の散布量（≡粒子濃度）及び散布継続時間と、経済的成立性を満たす航空機の機体規模（サイズ及び機数）の関係を調査し、今後台風制御理論を検討する際に、それを実現するための航空機の機体規模（サイズ及び機数）を概算できるようにするとともに、航空機を用いた台風制御実現に向けた課題を整理した。台風制御技術の社会実装に向けて、これらの課題解決への取組みを加速させる必要がある。

付録 C.

台風災害に関する資料

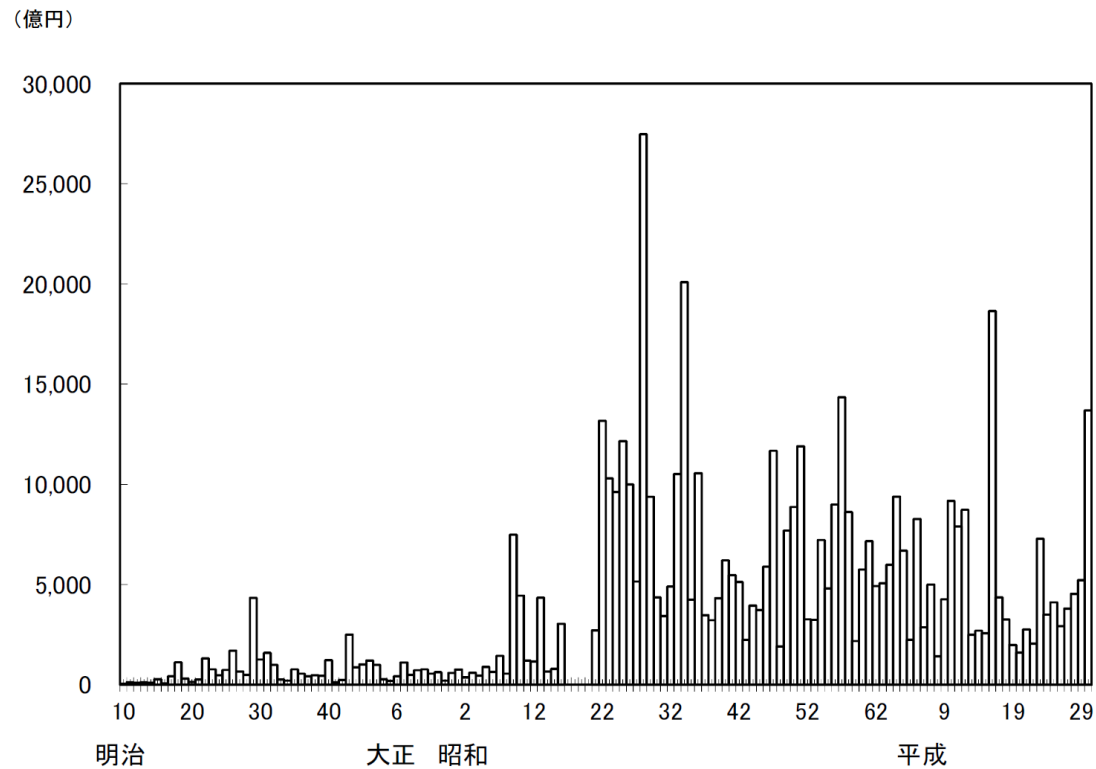


図 C-1 明治以降の水害被害額の推移（平成 23 年価値）

（出典：水害統計，台風以外の水害も含む）

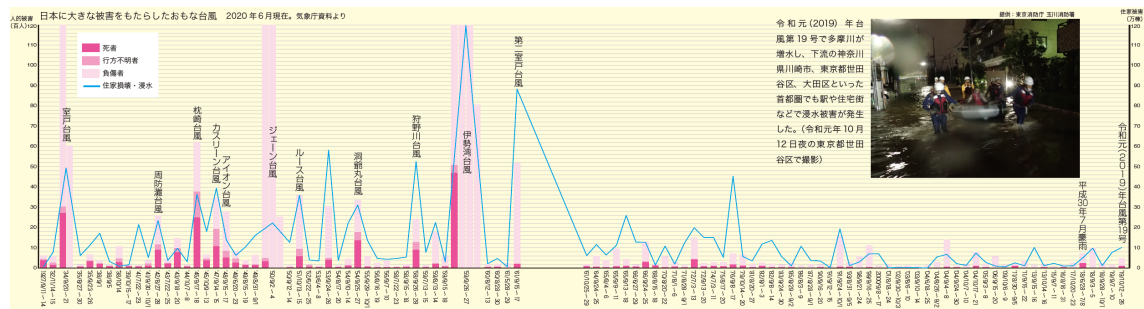


図 C-2 日本に大きな被害をもたらした主な台風

（出典：台風の大研究）

過去の主な風水災等による保険金の支払い

順位	発生年月日	災害名	地域	支払保険金（見込みを含む）（単位：億円）			
				火災・新種	自動車	海上	合計
1	2018.9.3～5	平成30年台風21号	大阪・京都・兵庫等	9,363	780	535	10,678
2	2019.10.6～13	令和元年台風19号 （令和元年東日本台風）	東日本中心	5,181	645	－	5,826
3	1991.9.26～28	平成3年台風19号	全国	5,225	269	185	5,680
4	2019.9.5～10	令和元年台風15号 （令和元年房総半島台風）	関東中心	4,398	258	－	4,656
5	2004.9.4～8	平成16年台風18号	全国	3,564	259	51	3,874
6	2014.2月	平成26年2月雪害	関東中心	2,984	241	－	3,224
7	1999.9.21～25	平成11年台風18号	熊本・山口・福岡等	2,847	212	88	3,147
8	2018.9.28～10.1	平成30年台風24号	東京・神奈川・静岡等	2,946	115	－	3,061
9	2018.6.28～7.8	平成30年7月豪雨	岡山・広島・愛媛等	1,673	283	－	1,956
10	2015.8.24～26	平成27年台風15号	全国	1,561	81	－	1,642

（注）損保協会調べ（2020年3月末現在）。

千万円単位で四捨五入を行い、算出しているため、各項目を合算した値と合計欄の値が一致しないことがある。

図 C-3 主な風水災による火災保険の支払い
（出典：日本の損害保険・ファクトブック 2020）

付録 D.

諸外国における US stormfury 以降の熱帯低気圧の人工制御についての動向

以下は諸外国における熱帯低気圧の人工制御についての動向をヒアリングしたものである。熱帯低気圧（台風、ハリケーン、サイクロン）の研究に関心のある研究者にそれぞれの国の、stormfury 以降の人工制御について尋ねた。以下では回答の原文の通りをまとめてある。

All answers are a personal opinion but not an official opinion of your organization or country.

Q1: Were there any TC-control trials in the past for research and/or operational purposes in your country? If any documents are available, please let me know them.

Q2: Are there any plans or discussion to perform TC-control in the future. If possible, could you let me an appropriate person who I should contact to inquire about the research plan?

Q3: Do you think that a TC-control contributes human well-being. On the other hand, are there any concerns for TC-control?

Q4: If Japan conducts a project of TC-control, are you interested in collaboration with us?

(1) Taiwan

Chun-Chieh Wu, Dean, College of Science, Chair Professor, Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

A1: No.

A2: There is no plan I know on this work in Taiwan.

A3: TC-control can have positive contribution if the technique can be successful and is used for the good-will purpose (such as reducing the induced damage) (But it can become harmful if it was used for ill-will purpose, such as diver the track or intensify the storms to attack other regions...)

A4: Sure, my pleasure to collaborate with you on potential research opportunity.

(2) US

Michael M. Bell, Colorado State University

A1. The Stormfury research project was conducted from the 1960's to early 1980's. Modification by cloud seeding to stimulate an outer eyewall and weakening of the inner eyewall was attempted in four hurricanes on eight different days. On four of these days, the winds decreased somewhat, and the lack of response on the other days was interpreted to be the result of faulty execution of the seeding or the wrong cases. Later flights in late 70's and early 80's provided new observations in unmodified hurricanes that indicated the hypothesis was flawed because the rainbands contained too much natural ice and too little supercooled water. Additionally, it was determined that eyewall replacement cycles happen naturally so it was difficult to determine whether the secondary eyewall formation was caused by human intervention or not.

An additional factor we are now aware of is that eyewall replacement can reduce the peak intensity but expands the area of damaging winds. While this may have better impacts for the landfall location, it may be worse for areas farther from the center.

The Stormfury project is described in more detail in this BAMS article: Willoughby, H. E., D. P. Jorgensen, R. A. Black, and S. L. Rosenthal, 1985: Project STORMFURY, A Scientific Chronicle, 1962-1983, Bull. Amer. Meteor. Soc., 66, 505-514.

A2. I am not aware of any plans. I have read about some ideas to put surfactants on the ocean to reduce surface fluxes or pumps to bring up cool water ahead of the storm but to my knowledge these are just ideas with no funding. I am not aware of any aircraft-based research plans at the current time.

A3. I think that the idea of TC-control could have a positive impact on society, but is very difficult in practice. The scale of the TC is so large and so energetic it is difficult to come up with ideas that will have significant effect without major cost. Unfortunately I have not heard of an idea yet that I believe can meet this goal, but would like to remain optimistic.

One concern with TC-control is unintended consequences. A lawsuit was threatened after an earlier attempt in the 1940's to seed a hurricane that changed direction after modification and

made landfall in a different location. During Stormfury this led to difficulties in selecting storms that met the right criteria due to potential issues if the storm were to change direction after seeding. I believe all subsequent attempts were made in storms that were close enough to fly but had very little chance of impacting land while also having appropriate rainband structure. That is evidently part of the reason that only 8 attempts were made over many years.

A4. I am always interested in collaboration in novel and exciting science with you and other Japanese colleagues. I think much care and thought would need to be taken before any attempts were made in real storms. However, I think that one key difference between now and Stormfury is that numerical modeling has improved significantly. One could conduct numerical experiments to test relevant hypotheses in a way that could not be done in the 60's and 70's. Collecting additional data from aircraft to validate those simulations and hypotheses without actually modifying the storms could be very beneficial. I am not sure whether we can come up with a practical TC-control solution, but do appreciate the idea of tackling a grand challenge like this.

(3) UK

Professor Ralf Toumi, Co-Director Grantham Institute- Climate Change and Environment, Department of Physics, Imperial College, London

A1,2 In the UK weather modification (cloud seeding - never TC related as far as I know) was abandoned in the late 1970s due to lack of evidence. There is no UK activity I am aware of in this space.

A3. TC can be source of rainfall. I remember that in the Philippines, for example, TC lack has been blamed for poor agricultural yields.

A4. I would be delighted to join your efforts.

(4) France

Keunok LEE, CNRS researcher, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclone (LACy), Université de la Réunion, FRANCE.

A1. Any TC-control trials have not been made in France. French TC-scientists are aware of the importance of understanding and predicting future TCs which will approach to French territory. However so far, most TC-related studies employ measurement data from spaceborne or ground-based stations and largely rely on high resolution simulations.

A2. No plan nor any formal project regarding TC-control has been discussed or planned at

the current state. I found this TC-control study very interesting. I feel a need for a deep preliminary study using idealized numerical experiments before trying TC-control experiments using aircraft. A series of idealized numerical experiments will help to understand the impact of seeding and to find out the best timing (and duration) and location for seeding. Also, we can adapt to TCs with various intensity scales and environmental conditions (e.g. current and future climate).

A3. I think so. We have already been facing current TCs which are mortal. Since scientists have been reporting even stronger TCs may happen in future (in 50 to 100 years) and those TCs are out of control at this moment, our anxiety has been increasing across the world, especially poor countries. If we can understand the mechanism behind controlling the TC intensity and if we can obtain the accurate methodology to control it, it would contribute to protecting our life.

Regarding other concerns for TC-control, we might consider how to commercialize the use of aircraft and seeding procedure if the purpose of the project is to diminish disaster. This part would be related to the development of instrumentation. Another concern is by-product. Is there any impact on the global and/or local scale water budget? What would be the influence on the ocean mixed layer?

A4. Sure. I am more than interested in collaboration with you. Besides the idealized numerical experiments (mentioned in Q2), I can bring some resources of modelling and instrument (for instance, in situ microphysics probes, mobile radars with French national collaboration), as well as human resources.

(5) Korea

回答者は匿名 KMA（政府機関の上席研究員）

A1: There is no TC-control project in Korea, as far as I know.

A2: There is, currently, no plan to carry out TC-control experiments. We are just working on researches of weather modification researches (e.g. cloud seeding) for drought damage reduction in KMA. My department are of control of weather modification researches in KMA. You can get in touch with me to inquire on our research plan.

A3: I'm not sure because there are positive effects of TCs, and also many side effects of weather control. If TC would be not adjusted as expected, it would make it serious and impact on other regions, causing conflicts between countries.

A4: We need some discussion in KMA. We have priorities in Korea due to limited human resources and fund.

(6) Bangladesh • India

Professor Nasreen Akter, Department of Physics, Bangladesh University of Engineering and Technology

A1. To my knowledge, there is no such activity going on in Bangladesh.

A2. TC-control is a new idea and may be very expensive to afford for a developing country like Bangladesh. Hence, there is no possibility to plan or discuss about such research by ourselves in the future.

A3. TC is one of the most devastating weather phenomena in the globe. During the landfall of TCs the coastal areas of Bangladesh experience massive destructions due to its geographical location, low-lying topography, high population density, socio-economic condition. It is to be noted that death tolls from the cyclone Bhola (May 1970), BoB_02 (April 1991) and Nargis (April 2008) exceeded 224,000, 138,000 and 130,000, respectively. In the last year, when TC preparedness and awareness were high because of improved forecasting and modern communication system, cyclone Amphan (2020) even caused the estimated damages of approximately 14 billion US dollars in India and 260,000 houses were destroyed in Bangladesh with a total dead of 116. Therefore, research on TC-controls and its applications will be acted as a blessing for Bangladesh and neighboring coastal areas.

A4. It would be a great opportunity for my country if Japan is considered me as a collaborator.

(7) Canada

G.W.K. Moore, Vice-Principal Research, Professor of Physics, University of Toronto Mississauga

A1. I am not aware of any such trials here in Canada.

A2. I do not believe that any such trials are planned.

A3. Of course, TC-control would be of benefit, especially to the Maritimes of Canada that do experience TCs (that are undergoing a transition to extra-tropical cyclones). The concern that I have is similar to that for any weather modification/geoengineering trials. The possibility of unanticipated consequences or merely the shifting of risk from one region to another.

A4. I would be happy to collaborate.

(8) China

回答者は匿名 CAMS (政府機関の教授)

A1. No, I do not know any TC-control trials in China.

A2. No, I do not know any such plans.

A3. I do not know much about TC-control. As TCs are so powerful, I doubt how efficient a TC-control would be.

A4. No. Personally I do not have much interests in conducting TC-control.

Summary table

Q1: Were there any TC-control trials in the past for research and/or operational purposes in your country? If any documents are available, please let me know them.							
Q2: Are there any plans or discussion to perform TC-control in the future. If possible, could you let me an appropriate person who I should contact to inquire about the research plan?							
Q3-1: Do you think that a TC-control contributes human well-being?							
Q3-2: On the other hand, are there any concerns for TC-control?							
Q4: If Japan conducts a project of TC-control, are you interested in collaboration with us?							
All answers are a personal opinion but not an official opinion of your organization or country.							
Regions	respondent	affiliation	Q1	Q2	Q3-1	Q3-2	Q4
Taiwan	Prof. Chun-Chieh Wu	National Taiwan University	none	none	positive contribution	harmful if it was used for ill-will purpose	Yes
US	Prof. Michael M. Bell	Colorado State University	none	none	positive impact on society	unintended consequences	Yes
UK	Prof. Ralf Toumi	Imperial College, London	none	none	source of rainfall	TC lack has been blamed for poor agricultural yields.	Yes
France	Dr. Keunok LEE	CNRS	none	none	contribute to protecting our life	impact on the global and/or local scale water budget? What would be the influence on the ocean	Yes
Korea	anonymous	KMA	none	none		if TC would be not adjusted as expected, it would make it serious and impact on other regions, causing conflicts between countries.	Yes
Bangladesh	Prof. Nasreen Akter	Bangladesh University of Engineering and Technology	none	none	research on TC-controls and its applications will be acted as a blessing for Bangladesh and neighboring coastal areas.		Yes
Canada	Prof. G.W.K. Moore	University of Toronto	none	none	TC-control would be of benefit	unanticipated consequences or merely the shifting of risk from one region to another.	Yes
China	anonymous	CAMS	none	none		I doubt how efficient a TC-control would be.	No

付録 E.

水素エンジン無人航空機の可能性についての文献調査及びヒアリングのまとめ

め

2050 年における台風の航空機観測と人工制御において、水素エンジン無人航空機は理想的な航空機である。現在の航空機のほとんどは化石燃料を用いているが、それにより温室効果気体の二酸化炭素が排出される。水素エンジンでは水素の燃焼または緩やかな化学反応によるエネルギーを用いるので、二酸化炭素はほとんど排出されない。また、水素は化石燃料に比べて圧倒的に軽い。一方で高可燃性のため扱いの難しさや燃料タンクの堅牢化などの問題を解決する必要がある。無人航空機による台風制御を雲物理学的に行う場合、インパクト物質の散布によって制御を実現するが、そのインパクト物質として水蒸気を用いる場合、水素エンジン無人航空機は、その排気として水蒸気を散布するという大きなメリットがある。これらのメリットを考えると、2050 年には水素エンジン無人航空機を台風の航空機観測と人工制御に利用することは大きな意義があると考えられる。

ここでは台風の観測のための無人航空機の利用、水素エンジン、および水素エンジン無人航空機の現状と将来性を、文献調査およびヒアリングよりまとめる。

台風などの熱帯低気圧の観測に利用されている無人航空機としては、米国の Global Hawk があり、高度 19.8km からドロップゾンデ観測を行うことができる。GH は 681kg のペイロードで、90 個のドロップゾンデを搭載し、31 時間の飛行が可能である。これまでハリケーンや atmospheric river などの観測を行ってきている(Wick et al. 2018)。台湾はエアロゾンデとよばれる固定翼無人機を利用した台風の観測を行っている。これは無人機本体にセンサーがついていて、最大高度 4km、30 時間のフライトが可能で、3000km の観測レンジをもつ (Lin and Lee, 2008)。

国内では無人航空機の研究開発が九州大学工学部 (Higashino and Maruyama 2018) などで行われており、福岡大学を中心として南極での無人航空機を用いた観測が行われている(平沢他 2019)。しかしながら、台風をはじめとした気象観測には、無人航空機はほとんど使用されていない。

国内の民間企業で高高度まで飛行できる無人航空機を作成しているのは、TERRA LAB がある。ここでは巡航高度 20km、航続距離 2000km の固定翼無人機の開発を行っている。他にはフジ・インパック株式会社が固定翼無人機を作成しており、比較的低高度で、1000km を超える飛行を実現している(下記のアンケート回答参照)。

水素エンジン航空機については、既に 1979 年に坂井 (川崎重工) が解説記事を書いており、液体水素を航空用ガスタービンエンジンに使用する可能性を示している。現在のジェッ

ト燃料と比較しつつ、液体水素の軽量で発熱量が多い利点を挙げている。一方で液体水素の強い引火性を注意点としてあげている。2016 年には JAXA が「水素社会に適応する航空機の検討」という報告書をまとめており、水素を用いたガスタービンジェットエンジンが既に開発されて、国外においていくつかの試験飛行の例や Boeing の無人機での液体裾燃料利用例があることを述べている。

また、同報告書では燃料電池の技術についても言及しており、航空用途に有望な技術がまとめられている。この燃料電池を用いた航空機の実証試験は株式会社 IHI が 2012 年に成功した例がある。

引用文献：

- Higashino, S. I., & Maruyama, Y. (2018). Flight demonstration of realtime path planning of an UAV using evolutionary computation and rule-based hybrid method. *International Journal on Engineering Applications*, 6(5), 156-162. <https://doi.org/10.15866/irea.v6i5.16629>
- 平沢尚彦, 林政彦, 東野伸一郎, 岡部和夫, 大石孟, 齋藤晃紀, アリマス, .. & 舟木實 (2019). 日本南極観測隊における無人飛行機観測. Summaries of JSSI and JSSE Joint Conference on Snow and Ice Research, 2019(0), 13. https://doi.org/10.14851/jcsir.2019.0_13
- Gary A. Wick, Terrence F. Hock, Paul J. Neiman, Holger Vömel, Michael L. Black, and J. Ryan Spackman, 2018: The NCAR–NOAA Global Hawk Dropsonde System. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **35**, 1585-1604.
- Lin, P.-H. and C.-S. Lee, 2008: The eyewall penetration reconnaissance observation of Typhoon Longwang (2005) with unmanned aerial vehicle, Aerosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **25**, 15–25.



図：台湾で使用されたエアロゾンデ(Lin and Lee, 2008)。

これらの現状を踏まえ、上記の関係企業にヒアリングを実施した。質問事項は、以下の 3 点である。

台風の人工制御において、水素エンジン無人航空機が重要な要素と考えていますが、その現状をヒアリングしたいと考えています。

そこで、下記の点につきまして、可能な範囲で、また、ざっくりとした回答で結構ですので、お考えをお教えいただけませんか？

1. 既にトヨタが車両用水素エンジンを開発していますが、そのような水素エンジンを無人機に搭載することは可能でしょうか？
2. もし可能とすると、水素エンジン無人航空機の開発の現状として、開発段階がどのレベルにあるのでしょうか？
3. もし開発が進められているとすると、水素エンジン無人航空機で高度 50000 フィート付近まで飛行できるようになるのは何年ごろでしょうか？

回答者：川崎重工業(株)

1. 既にトヨタ車両用水素エンジンを無人機に搭載可能？

可能かもしれません。先日のスーパー耐久シリーズ 2021 に参戦した車両のエンジンは、862 馬力だとのことで、

(<https://news.yahoo.co.jp/articles/2b3dbdd693e7a4d877ef6e6436cf84894a3b2be9>)

Boeing の水素航空機（これもフォードの車両用エンジンらしいですが）が 150 馬力×2 基のエンジンを積んでいるようですので、成立性がないわけではないと思います。とはいえ、トヨタの水素エンジンが、普通のガソリンエンジンとほぼ同じであるように水素航空機用エンジンについても、普通のジェットエンジンがベースになるとすれば、わざわざトヨタのエンジンを持ってくる必要はないのかもしれないかもしれません。

2. 水素エンジン無人航空機の開発の現状

本日の新聞記事にもありましたが、経産省 グリーンイノベーション基金のプロジェクトで次世代航空機の研究開発に向けた計画を公表し、液化水素燃料貯蔵タンクやエンジン燃焼器など、水素を燃料にして飛行する「水素航空機」に必要な中核技術を確認すると言っています。記事では、水素航空機の本格投入は 2035 年以降とのことですので、それに向けて、研究開発は進むと考えられます。

3. 水素エンジン無人航空機で高度 50000ft 到達は何年ごろ？

Boeing 水素航空機は、テストフライトの中で、なんとか 54000ft まで上昇したようですので、技術的には可能と考えられます。（ペイロードが 200kg の機体ですが・・・） 開発が進められる航空機の用途に依存するでしょうが、滞空型無人機としての開発が進めば、本格投入の頃に 50000ft は実現できるかもしれません。

(https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Phantom_Eye)

回答者：匿名

1. 既にトヨタが車両用水素エンジンを開発していますが、そのような水素エンジンを無人機に搭載することは可能でしょうか？

航空機の燃料として水素を燃焼させる研究は古くからおこなわれており、また、産業用のガスタービンでも水素燃焼の研究は盛んにおこなわれています。燃焼速度の速い水素を燃焼させる場合、逆火という現象を回避するために燃焼器を新たに開発する必要がありますが、ガスタービン本体は大きく変わるところはありません。水素を燃焼させるジェットエンジンは比較的早い段階で実用化するものと思われます。その意味で、水素エンジンを無人機に搭載することは可能となる時代は来ると考えられます。

水素を燃料する場合、液体かガスかで燃料供給システムが大きく異なります。トヨタの水素エンジンは燃料電池車と同様に高圧ガスのタイプと考えられます。航空機の燃料としては、航続距離を確保するために密度の大きい液体での搭載が望まれており、-253℃の液体水素を供給するための燃料システムの技術的ハードルは高いと言われています。

まずタンクを大幅に軽量化する必要性があり、FRP などの適用が期待されています。ポンプやバルブ、配管など、断熱特性と軽量化の両立、繰り返し使用できる寿命と整備性が求められます。ロケットなど水素を燃料にして飛ぶ機械は存在しますが、その技術の転用は難しいと言われています。

液体水素をどこで気化させるのかも課題と思われます。タンクで気化させる場合配管が太くならないか、エンジンに近いところで気化させる場合、気化させる熱源はどうするのか、気化によって配管が詰まってしまわないかなどの課題がありそうです。

無人機という用途を考え、航続距離は短くてよいというと高圧ガスの使用も選択肢としてあるのかなと思われます。

2. もし可能とすると、水素エンジン無人航空機の開発の現状として、開発段階がどのレベルにあるのでしょうか？

上記のように水素エンジン航空機の技術課題は、エンジン側というより機体の燃料供給システム側にあるように思われます。機体側の燃料供給システムの開発段階がどのレベルにあるのかは、公開情報が少なくよくわかりません。まだプロトタイプの製造に着手したというアナウンスを聞かないので、Technology Readiness Levelで2~3（コンセプトとして成立性が検証されているかどうかという段階）ではないかと推察します。

3. もし開発が進められているとすると、水素エンジン無人航空機で高度 50000 フィート付近まで飛行できるようになるのは何年ごろでしょうか？

エアバスは、2035 年ごろに水素航空機の商用運航を開始とするという ZEROe 構想を発表しています。水素無人機の実現の時期については、無人機をどのように運用するかによっても大きく異なると考えられます。

例えば、航空機から発射して海上で回収するような標的機のような使い方か、空港から離陸して空港に戻ってくるような繰り返し利用可能な使い方が考えられます。前者は、気象制御という目的から察するに想定される運用の仕方ではないのかなと推察いたします。後者の場合、空港インフラの整備や、航空機としての安全性の規格整備、認証の仕組み整備なども課題になることが考えられ、まずはエアバスがアナウンスする 2035 年ごろと考えるのが妥当と思われます。

回答者：テララボ（松浦氏（代表者））（中部大学福井先生を通じてヒアリング）

1. 既にトヨタが車両用水素エンジンを開発していますが、そのような水素エンジンを無人機に搭載することは可能でしょうか？

車両用の水素燃料電池や水素エンジンの小型化にはかなり時間が必要と考えています。航空機に搭載できる大きさになっていれば検討は可能です。（車用はあまり小型化を重視していないと思われます）

2. もし可能とすると、水素エンジン無人航空機の開発の現状として、開発段階がどのレ

ベルにあるのでしょうか？

水素エンジンについては、無人航空機用のものについてはあまり知らないですが、イギリスの水素燃料電池の会社と連携して開発を進めています。この会社の燃料電池はドローンに搭載ができるように小型化されています。以下ニュース内の水素燃料電池を現在購入して検証を進めています。

<https://www.google.co.jp/amp/s/japan.cnet.com/amp/article/35131749/>

3. もし開発が進められているとすると、水素エンジン無人航空機で高度 50000 フィート付近まで飛行できるようになるのは何年ごろでしょうか？

また、その他にテララボの無人機の現状として、無人機の大きさ（翼長、ペイロードなど）とその到達高度や飛行時間について。

テララボとしては災害対策として研究開発を進めているため、成層圏までいかに早く上昇するか、という点でジェットエンジンの搭載を考えています。翼長 16m、積載量 20kg(燃料含まず)。というのも日本上空にはジェット気流があり、これを突破しなければいけないのですが、時速 200km 以上のジェット気流を越えるためには、それ以上のスピードで運行しなければいけないと考えています。

成層圏まで 30 分くらいで上がってしまえば、グライダーとして滑空し、気流を見つけて再上昇というシステムを検証しています。京都大学発ベンチャーと連携し、ドップラーLidarを活用した風況を可視化することで、自動的に上昇気流を探し出し上昇するための飛行ルートを設定できないか模索中です。

水素燃料電池はプロペラを電動で回すため、高度 6000m くらいであれば対応可能と考えていますが要求と合わないと思われますので、やはりジェットエンジンで上昇した方が良いかと考えています。

NASA のグローバルホークも台風監視を研究段階で行なっていたと聞いています。

これらの開発を進めるにあたり現在最も重視しているのは、FAA(アメリカ連邦航空局)の耐空証明を取得し有人航空機の空域を安全に飛ばせる機体にするための構造計算などをやり直しています。

現在は制御装置、通信装置などの検証も行なっています。

来年度から経産省や NEDO が、レベル 4 の実装のために予算化する動きがあり、その中において耐空証明の取得に向けての検証が重視されるようです。

テララボの取り組みは彼らのサンプルとして使いたいようで、予算化の措置が動き始めています(未確定な話です)

これまでの経過と今後の予定は以下のとおりです。

2019:機体の設計、試作機飛行

2020:制御装置の検証、機体のコンポジット成形
2021:制御装置・通信装置の搭載、成形された機体で検証、機体の構造計算→再設計
2022:再設計した機体の試作機飛行
2023:機体のコンポジット成形、飛行試験、FAA の認証準備
2024:高高度飛行試験(高度 6000m 以内)、FAA 認証
2025:高高度飛行試験(高度 6000m 以上)、FAA 認証
2026:実装化

回答者：三菱航空機

1. 既にトヨタが車両用水素エンジンを開発していますが、そのような水素エンジンを無人機に搭載することは可能でしょうか？

自動車用に開発された水素エンジン技術を流用した液体水素レシプロエンジンによる高高度無人機(Phantom eye)という機体がすでに存在します。

出展：Boeing, Phantom eye

<https://www.boeing.com/defense/phantom-eye/>

よって、車両用水素エンジンそのままを搭載することは難しいですが、車両用エンジンを応用したエンジンを搭載した無人機は可能と考えられます。

2. もし可能とすると、水素エンジン無人航空機の開発の現状として、開発段階がどのレベルにあるのでしょうか？

ご質問の”水素エンジン無人航空機”を液体水素レシプロエンジンによる高高度無人機(Endurance 4days, 450lbs payload 程度)と想定すると、Phantom eye については、実証試験の段階にまで至っていたため、開発段階としては、かなり実用に近いレベルにまで至っていたと推察されます。TRL(Technology readiness level)でいうと、7 相当と考えられます。

もし、“水素エンジン無人航空機”がより長い航続距離(対空時間)、より重い Payload 等を指す場合は液体水素燃料タンクのボリューム等、考慮すべき技術課題が追加されることが想定され、TRL は下がると考えます。

3. もし開発が進められているとすると、水素エンジン無人航空機で高度 50000 フィート付近まで飛行できるようになるのは何年ごろでしょうか？

Phantom eye は、65,000ft までの運用を想定して設計されており、54,000ft までの実証試験まで完了したようです。このプログラムが終了した理由については、明確な情報は得られませんが、技術的な問題は報告されていないようですので、開発が再開されれば、実証段階までの機体を製造済みの Boeing であれば、数年で実用化できると予想されます。

一方で、Boeing が Phantom eye の開発を行っていた 2010 年台前半から、現在にかけて、

電動航空機の技術革新が急速に進んでおります。大きな出力を必要としない場合(必要出力は、搭載物の重量と航続距離によって決まります)は、今の技術であれば、純電動航空機(内燃機関を有せず、バッテリーのみで出力を得る)という選択肢もあると思います。

(高高度無人機ではありませんが)純電動航空機については、世界中で開発競争が進められており、いずれも 2020 年代の中盤が運用開始目標となっております。

逆に、高高度無人機という観点では、近年、成層圏通信プラットフォームのための無人航空機が開発されています。太陽電池で得られる電力を使用して、成層圏(高度 20 キロメートル、65,000ft)を飛び続けるというものです。

出展；<https://www.aerospace-technology.com/projects/hawk30/>

しかし、こちらは太陽電池による発電のため、出力が小さく、高速で移動したり、物を運ぶという役目には向いておりません。

付録 F

「今後の台風予測研究に関する研究会」レポート

佐藤正樹（東京大学大気海洋研究所）（2021 年 4 月 25 日作成）

「今後の台風予測研究に関する研究会」

2021 年 4 月 15 日（木）13:00-17:00 オンライン開催

アジェンダは後述

本レポートでは、本研究会を通じて得られた知見をもとに、台風の数値予測の向上のための必要な進展についてまとめる。

必要な進展の概要

台風の予測精度向上のためには、以下の各項目の進展が必要である。

1. 高性能なスーパーコンピュータ
2. 稠密・高頻度な観測
3. 台風を現実的に表現が可能な高解像度・高精度な数値モデルの継続的な改良・開発
4. 台風の進路・強度変化に対する科学的理解・台風に関連する気象学的知見の発展

観測等から得られた初期場・環境場の情報から、数値モデルをスーパーコンピュータ上で駆動することによって、台風の進路・強度等の予報が得られる。台風を現実的に再現するためには数値モデルの高解像度化等の改良・高度化が必要であり、数値シミュレーションの結果を改善するためには、台風および気象場に関する科学的理解の進展が必要である。

現状の取り組み：2030 年代まで

計算性能の観点からは、スーパーコンピュータの今後の進展・発展を踏まえることで、将来の台風予測の進展が展望される。現在、現業として台風の予測情報を発信している気象庁では、2030 年を目標とした台風予測向上の目標をもっている。気象庁では概ね 6 年毎に 25 倍程度の計算性能をもつスーパーコンピュータが更新されている。2030 年頃に気象庁に設置されるスーパーコンピュータは現在から 2 世代先のものが予想される。2030 年時点では、台風予報などに数日前からの見通しの予測を可能とし、現在の 1 日先の同程度の進路予測誤差の 3 日先の予測に実現することを目標としている。

世界最高性能を誇るスーパーコンピュータ「富岳」級のスーパーコンピュータが現業で利用可能になるのは 2030 年代中頃と予想される。「富岳」では高解像度の大アンサンブルの

数値予測により予測精度を向上する試みがなされている。台風の進路・強度に関して、確率情報を付加した高精度予測が 2030 年代中頃に実現している可能性がある。「富岳」では日本域 1km 以下のメッシュ、全球 10 km 程度以下のメッシュの大アンサンブルでの予測実験を実施している。

現状では海洋上の台風の観測データは、不十分であり、人工衛星データに頼らざるを得ない。台風の中心付近の圧力や風などの真値は実際には知り得ず、人工衛星データを用いた経験的な手法（ドボラック法）で推定するのみである。台風の予測精度を向上するためには、真値をより正確に観測する必要がある、そのためには航空機による直接観測が要請される。現在、北西太平洋では、航空機による台風の現業的な観測は行われていない。近年、名古屋大学等の主導により、航空機により台風の眼壁内の観測が実施され、その有効性が示されている。台湾等の東アジア諸国の研究者と連携することで、引き続き台風の航空機観測が計画されている。

台風の人工衛星観測による監視のため、静止気象衛星ひまわりの他、周回軌道衛星（全球降水計画 GPM による降水量、GCOM-W/C による雲降水分布、ALOS による海上風等）の多くの観測衛星による包括的な観測が利用されている。

2050 年頃に要請される技術

2030 年中頃から 2050 年までの 15 年の間に、今までの延長上では、現業システムでは 2-3 世代更新し、 $25 \times 25 \times 25 = 15000$ 倍程度の計算性能の向上を見込むことができる。

台風の数日先の予測はいまだに不確実性が大きく、特に強度変化は数値モデル予測の精度向上はまだまだ課題がある。台風中心付近の眼壁やアウトーレインバンドは km スケールのメソ対流によって構成される一方で、太平洋高気圧や中緯度トラフ等の大規模場によって台風の進路が規定される。高精度な予測のためには、台風の内部構造から大規模循環のスケールまでを表現可能な高解像度の広域～全球数値モデルが必要であり、不確実性を含めての予測情報のためには多数のアンサンブル実験が必要である。これらの目標の達成のためには、数値モデルの性能として「1km メッシュの全球の 1000 アンサンブル」をとりあえず設定する。水平解像度が 10 倍になると、必要な計算資源は 1000 倍であるとされる。2030 年代中頃に解像度 10km, 100 アンサンブル数が実現されているとすると、順調に計算資源の向上が進むのであれば、2050 年頃に「1km メッシュの全球の 1000 アンサンブル」は現実的な目標として設定可能である。

目標を達成するための課題

・ スーパーコンピュータ

スーパーコンピュータの今後の発展に関して、今後は今までの外挿での技術の進展は難しい。「富岳」の次期を見据えたスーパーコンピュータの検討が進められているが、従来のアーキテクチャーでの性能向上には限界が予想されている。メモリスループット、電力等制約要因を考慮して、新時代のコンピュータに適合して、数値モデルの方も変革が迫られる。多様なアーキテクチャーに対応できるように、数値モデルのプログラムを Domain Specific

Language (DNS)で構築し直す等の開発が必要であり、モデル開発のために計算科学的な素養を有する研究者の養成が必要である。

- ・ **数値モデル**

台風の強度変化、特に急発達(rapid intensification)の予測のためには、km 程度以下のメッシュの数値モデルが必要とされており、かつ雲物理や乱流過程等の物理過程の精緻化が必要である。解像度、アンサンブル数に関しては、さらなる高解像度、多くのアンサンブルがある方がなお精度向上に寄与すると考えられる。台風の強度予測には、台風の眼付近の雲、すなわち眼壁の数値的再現性が必須であり、現状ではまだまだ不十分である。眼壁の生成・強化、多重眼壁、眼壁の入れ替わり **eyewall replacement** 等が台風の強化と関わっている。これらの予測精度向上のためには、眼壁の力学の理解の進展、再現のための数値モデルの改良（力学的・物理的）に多くの課題がある。

- ・ **科学的理解の進展・数値モデルの開発**

将来の台風予測の精度向上のためには、必要な解像度・アンサンブル数を実現することに加えて、数値モデルの性能を向上させる必要がある。このためには、数値モデルの結果を、実際の観測データによって検証し、その相違を改善するための科学的な検討が必要になる。台風の強度変化の予測向上のためには、台風の内部構造の力学の理解の進展が必要であり、台風の進路の予測向上のためには、台風と環境場の相互作用の理解の進展、環境場自体の変化の精度向上が必要である。数値モデルの改良のためには、力学的な数値スキームの検討、雲や乱流・放射等の物理スキーム、大気と海洋・陸面等との相互作用の検討と改善が必要であり、それぞれ科学的課題を正確に理解して、改良を図る必要がある。

- ・ **観測**

現状では海洋上の台風の観測データは、不十分であり、台風の予測精度を向上するためには、真値をより正確に観測する必要がある、そのためには航空機による直接観測が要請される。日本に接近する台風全てについて航空機観測をするのであれば、毎年4億円程度の経費が必要と見積もられる。2050年にむけて前半では、台風の航空機による現業的な観測を実現する必要がある。さらに将来（後半）は、無人航空機・無人観測船による台風中心の定常的な観測の実現に向けて検討を進める必要がある。

台風の内部構造について、高解像度かつ高頻度(km, 5分程度)での時空間分布をより正確に把握する必要がある。人工衛星観測・航空機・船舶観測、地上観測を統合的に利用して、数値モデルを介した同化により、台風内部構造のデータ同化データベースを構築する必要がある。技術的には、現状の知見で十分取り組みが可能であるため、早急にこの研究を進める必要がある。数値モデルにおいては、雲・降水過程の表現の不確定性が大きい、様々なリモセンデータを制約条件として利用することで、台風の雲物理構造を検証・改善・精緻化する必要がある。

台風の人工衛星観測による監視のため、静止気象衛星ひまわり等の多くの観測衛星による包括的な観測が利用されている。これらの人工衛星は5-10年程度の寿命があり、今後継

続的に人工衛星観測を継続する必要がある。特に、台風の現業的な監視には、静止気象衛星ひまわりが最重要な役割を果たしており、将来も安定的に観測を継続する必要がある。また、台風の静止気象衛星による常時監視のためには、国際的な静止気象衛星観測網の構築・維持が必要である。気象庁において、2028年頃の打ち上げを目標に、ひまわり9号後継機の静止気象衛星について検討が進められているが、着実な実現が要請される。次期静止気象衛星では、国際的に要請される新規センサー（赤外サウンダーや雷検出装置等）の整備も進める必要がある。

日本に接近する台風の稠密な観測のためには、高解像度高頻度のレーダー網による地上リモートセンシング観測が必要である。フェーズドアレイ気象レーダー・二重偏波気象レーダーの全国の稠密な展開が要請される。また、台風の現状監視のために今まで観測が手薄であった南洋（小笠原等）の離島での観測を今後整備する必要がある。これら地上リモセン観測データは、台風の内部構造の詳細監視のために直接利用される他、数値モデルの雲降水過程の検証・改良およびデータ同化による台風内部構造・コアデータベース構築のために必要不可欠である。

今後の台風予測研究に関する研究会

2021 年 4 月 15 日（木）13:00-17:00 オンライン開催

趣旨・目標：

2050 年までの台風予測研究の展望について議論する。2030 年までの現業センターでの台風予測計画、「富岳」成果創出加速プログラム」課題における取組を踏まえ、2050 年までの台風予測の展望を議論する。台風予測向上のための基礎研究・基盤研究の網羅的な議論、必要な観測についての展望、富岳・ポスト富岳を踏まえた必要な計算資源についての見通し等の多角的な観点から、2050 年頃における台風予測のあるべき姿を議論する。

[https://u-tokyo-ac-](https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/j/87303012656?pwd=a3F2bk1FaXdpdU5jZGljaDN3c0hNZz09)

[jp.zoom.us/j/87303012656?pwd=a3F2bk1FaXdpdU5jZGljaDN3c0hNZz09](https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/j/87303012656?pwd=a3F2bk1FaXdpdU5jZGljaDN3c0hNZz09)

ミーティング ID: 873 0301 2656

パスコード: 719832

発表時間の目安：10 分/人、発表タイトルはいずれも仮題

13h

佐藤正樹（東京大学）：はじめに、「富岳」成果創出加速プログラム課題での狙い

佐藤芳昭（気象庁数値予報モデル基盤技術開発室長）：2030 年までの台風予測関連の数値予報技術開発重点計画（15 分発表時間）

八代尚（国立環境研）：気象シミュレーションモデル開発と計算機に関する近年の動向

伊藤耕介（琉球大学）：台風予報のボトルネック

14h

筆保弘徳（横浜国大）：タイフーンショット計画～2050 年までに台風の「脅威」を「恵み」に！～

三好建正（理研）：台風のためのデータ同化研究と制御可能性への展望

川畑拓矢（気象研）：2050 年における台風防災に向けて

坪木和久（名古屋大学）：台風の人工制御に向けた検討：航空機観測

15h

堀之内武（北海道大学）：台風の強度・構造推定の将来について

岡本幸三（気象研） [嶋田宇大代理発表]：衛星観測を用いた台風予測研究

山口宗彦（気象研）：台風インパクトベース予報に向けて

中野満寿男（海洋研究開発機構）：台風季節予測実現に向けて あるいは「あなたの季節予

報」実現に向けて

16h

和田章義（気象研）：2050 年までの台風予測研究の展望 大気海洋相互作用

金田幸恵（名古屋大学）：大気海洋相互作用と台風予測研究

辻野智紀（北海道大学）：台風内部コア力学 -多重壁雲に関する課題-

17h

議論

関連情報：

気象庁「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html

気象庁 数値予報モデル開発懇談会

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/suuchi_model_kondankai.html

過去の議事資料が入手できます。

先月 3 月に第 5 回が開催されましたが、議事資料もまもなく公開されるものと思われます。

2020 年度「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」成果発表会の資料が一部公開されています。

<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/seika.html>