

交通運輸技術開発推進制度
令和6年度業務実績説明書

深層学習を用いた乱気流・風の予測
モデルの開発

令和7年3月
BlueWX 株式会社

I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和7年3月
研究課題名	深層学習を用いた乱気流・風の予測モデルの開発
研究代表者名	BlueWX 株式会社
研究期間	令和6年10月18日～令和7年3月31日
研究の目的	交通運輸事業は天候によって大きく影響され、特に航空や船舶業界などでは日常業務で天候予測データが必要である。しかし、風向や風速といった風に関する予測は難しく、予測の誤差によって乱気流の事故や余分な燃料（CO2）の消費、到着遅延等につながり、経済的・環境的損失が生じている。本プロジェクトでは、これまでのものとは根本的に異なる AI（深層学習）を用いた手法で風を予測するモデルを構築し、上記課題の解決に貢献する。
研究成果の要旨	本研究では、航空業界で安全性・経済性の観点から重要視される乱気流、及び、風速・風向に関して、過去の事例データと気象データを用いた深層学習を実施することで、それぞれに対する予測モデルを構築した。具体的には、過去に測定された乱気流や風に関する情報と気象情報を学習した AI 予測モデルを構築した。その結果、乱気流に関しては、日本空域のみならず太平洋上や北米、欧州と言った多くの航空機が飛行する世界の主要エリアにおいて、目標としていた予測精度を実現することができた。これらの値は現場でも利用可能な精度であり、今後現場での幅広い利用が期待される。また、風速・風向に関する予測に関しても、乱気流の時と似たアルゴリズムを用いて深層学習を実施し、予測モデルを構築した。本研究では、比較的サンプル数が多く、これまでに申請者らの研究によって風の予測誤差が特に大きいことが示されている太平洋上を対象に学習を行った。その結果、今回の解析範囲において既存の予測モデルの精度を上回る値を得ることができた。この結果は、本研究で開発した AI による予測モデルが、世界中の空域において風速・風向の予測精度を向上させる可能性を示唆している。
知的財産権 取得状況	特許出願 0 件 著作権登録 0 件
研究成果発表実績	論文発表：国内 0 件、海外 0 件 口頭発表：国内 0 件、海外 0 件 その他 :

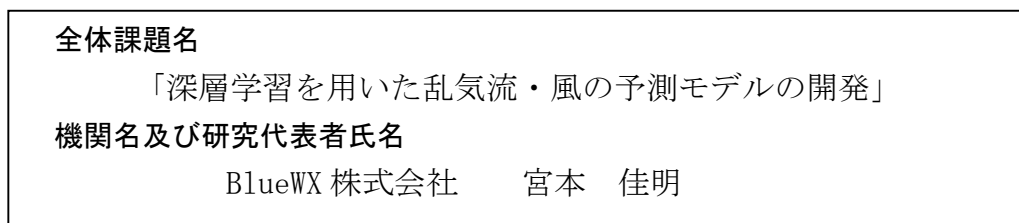
II. 研究開発の目的と実施体制

(1) 研究開発の目的

交通運輸事業は天候によって大きく影響され、特に航空や船舶業界などでは日常業務で天候予測データが必要である。しかし、風向や風速といった風に関する予測は難しく、予測の誤差によって乱気流の事故や余分な燃料（CO2）の消費、到着遅延等につながり、経済的・環境的損失が生じている。本プロジェクトでは、これまでのものとは根本的に異なる AI（深層学習）を用いた手法で風を予測するモデルを構築し、上記課題の解決に貢献する。

(2) 研究実施体制

本研究は、BlueWX 株式会社を総括研究機関として実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



個別課題名

「深層学習を用いた乱気流・風の予測モデルの開発・高度化」

機関研究代表者

BlueWX 株式会社

・宮本 佳明

学習データの選定・収集、深層学習モデルの設計、学習・精度検証・システム化までの
取りまとめ

研究分担者氏名及び研究内容

・村上 百合

深層学習モデルの設計、学習・精度検証・システム化までの取りまとめ

研究支援者氏名及び支援内容

・岸 宏行

深層学習モデルの設計、学習及び精度検証の実施

・前田 佳奈美

学習データの収集・整備、学習及び精度検証の実施

・松本 紋子（ANA ホールディングス株式会社）

現場でのデータの利活用に関する調査・助言

III. 研究開発の成果

1. 序論

交通運輸分野は天候の影響を非常に強く受ける分野であり、特に航空や船舶業界においては、日常的に天候予測データが必要不可欠である。これらの業界では、航行や運行の安全性、効率性を確保するために、風や降水量、気温などの詳細な天候予測が求められており、天候の急変による影響を最小限に抑えるためのデータが日々提供されている。近年、気象予測の技術は急速に進歩しており、たとえば翌日の降水有無に関する予測精度は約 90%にも達している。しかし、特に航空機が飛行する対流圏上層の風の予測に関しては、依然として精度向上のための技術的な課題が残されているという現状がある（例：Hirayama et al. 2024）。申請者らの研究（Hirayama et al. 2024）では、航空機が飛行中に測定した風向・風速データと、気象庁が提供する全球気象予測モデルの結果の差を調査した。図 1 に調査対象とした変数を測定した太平洋航路上の航空機の航路を示す。その結果、風の予測誤差が飛行時間と共に増大しつつも、飛行中で最大となり、その後減少することが分かった。一般的には予測時間が長い方が精度は落ちることから、今回の結果は矛盾したものとなっており、特に太平洋上で予測が難しいことを示している。その理由は、予測対象となる範囲や時間軸、さらには気象モデルの限界など、複数の要因が絡み合っているためである。

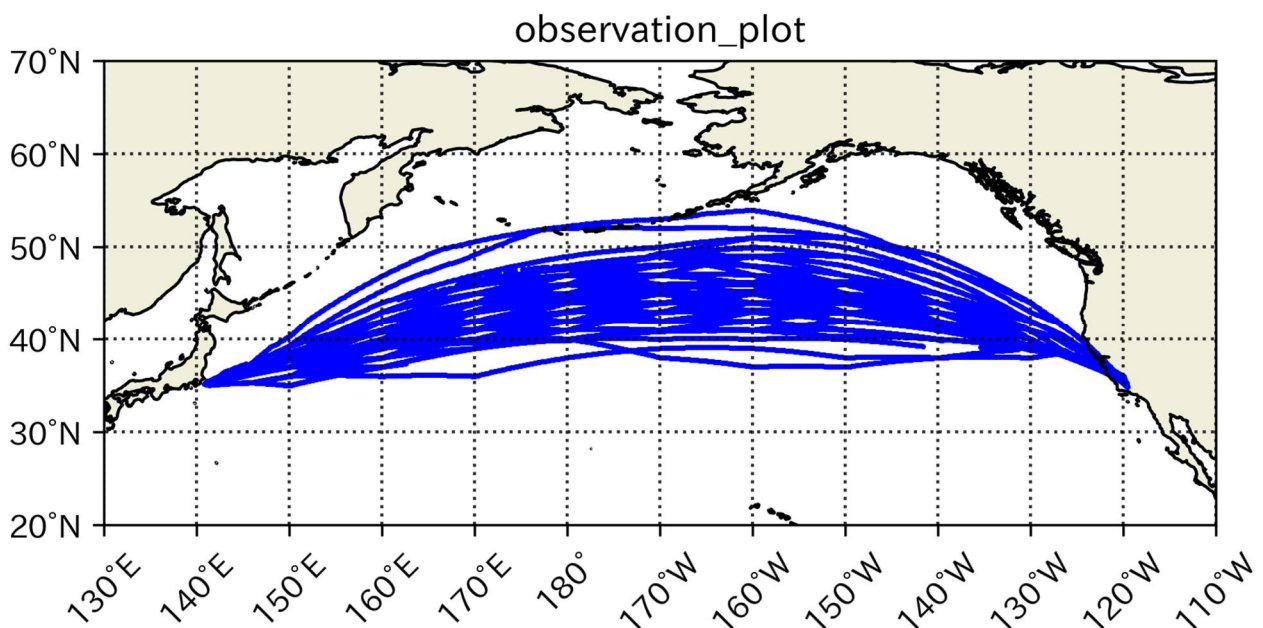


図 1：Hirayama et al. (2024) の解析に用いた実測データを測定した航空機の航路図。

風の予測精度が不十分であるにもかかわらず、航空業界では出発の数時間前に航路をある程度決定し、運航に必要な燃料を計算する際に、風向・風速の予測データを重要な参考資料として利用している。このため、予測が外れた場合、航空機の飛行時間に無駄が生じるだけでなく、必要以上の燃料が消費されることとなり、運航コストに加えて環境負荷の増大を招くことになる。特に、航空業界では二酸化炭素（CO₂）の排出量削減が急務とされており、こうした温室効果ガスの排出を減らすためには効率的な燃料使用が欠かせない。そのため、風予測精度の向上は、経済的な効率性や環境面でも非常に重要な課題となっている。また、近年では、航空機の航路変更や燃料の最適化だけでなく、パイロットの安全確保や客室乗務員の健康にも風の予測精度が関わるようになっており、その重要性はますます

ます高まっている。

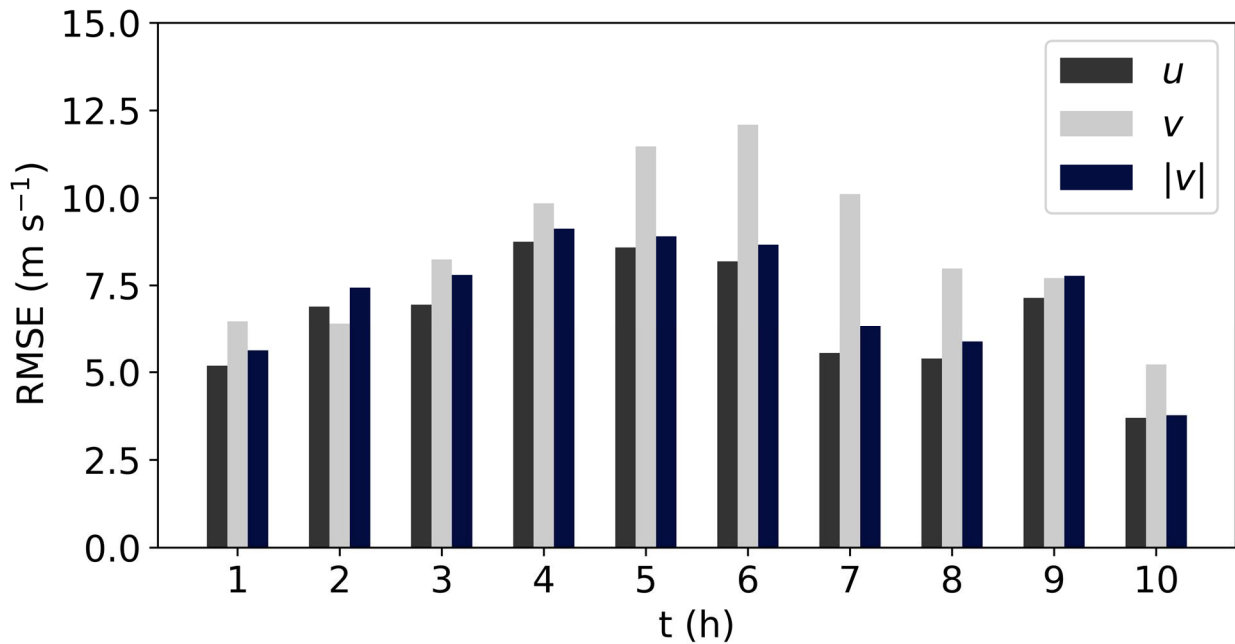


図 2：太平洋路線における飛行時間（横軸）と予測誤差（縦軸、平均二乗誤差平方根：Root Mean Squared Error）の関係図。予測誤差は航空機が飛行した際に実際に測定した値と気象予測モデルによる予測結果の差から求めた。 u 、 v はそれぞれ東西、南北風速を、 $|v|$ は水平方向風速の絶対値を表す（Hirayama et al. 2024）。

同様に、航空業界で大きな課題となっているのが乱気流である（Gultepe et al. 2019）。乱気流は、航空機を揺らす気象現象のことで、乗員・乗客にはほとんど影響の生じない軽微なものから、重症者や死亡者を出してしまうほど強いものまで、様々な強度が存在する。また、その継続時間もばらつきが大きく、数十秒程度のものから一分以上のもも存在する。図 3 に航空機に影響を与える乱気流の模式図を示す。この図では、雲によって可視化された Kelvin-Helmholtz 不安定を表しているが、実際には多くの事例でこのように乱れが可視化されている訳ではないことに注意されたい。Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定は、大気のような成層流体において、上下方向（重力方向）の流れの差が大きく、同じく上下方向の温度差など流体の静的安定度が小さい時に生じやすい。この上下方向の流れの差を風の鉛直シアー、もしくは単に鉛直シアーと呼ぶ。K-H 不安定が生じることで、上下方向の混合が起こり、結果的に流れの差（鉛直シアー）が弱まる。そのため、鉛直シアーが強い領域で乱気流が生じやすいということが古くから言われており、乱気流の発生可能性を表す最も有名な指標として鉛直シアーが広く使われている。

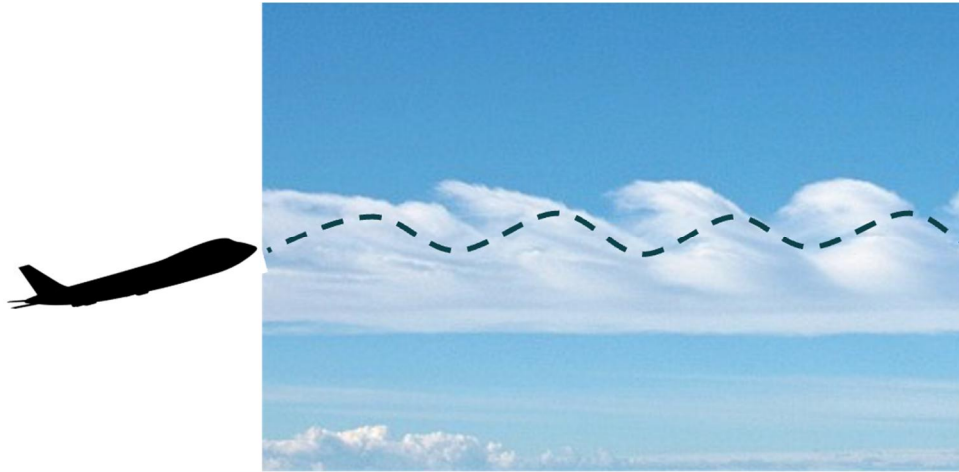


図3：航空機に影響を与える乱気流の模式図。

乱気流が発生するメカニズムにはさまざまな要因が関与しているとされており、代表的なものとして上述した Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定や水平シア不安定といった大気力学的な不安定のほか、対流性の雲や山岳地形に気流が衝突することで発生する重力波などが挙げられる。これらの要因は単独で作用することもあれば、複合的に関与する場合もあり、乱気流の発生には多様な環境条件が関係している。このように複数の乱気流の発生メカニズムが考えられる中、大きくは次の3種類に分類されると言われている。1) 山岳波が起因する乱気流、2) 対流性の雲による乱気流、そして 3) 晴天乱気流である。

1) 山岳波によって生じる乱気流 (Mountain-Wave Turbulence, MWT)

山岳波によって生じる乱気流 (Mountain-Wave Turbulence, MWT) は、図4に示すように、地形によって発生する重力波が伝搬し、風の鉛直シアが増加することで発生する乱気流である (Nastrom and Fritts, 1992; Wurtele et al., 1996)。

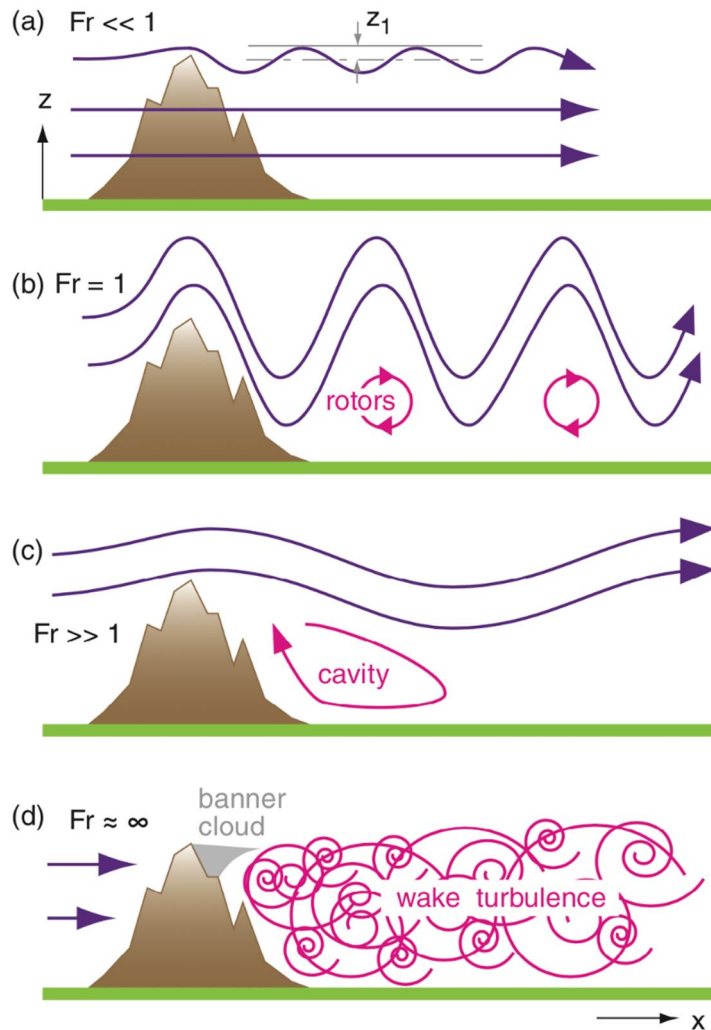


図4：山岳によって生じる乱気流の模式図

(https://www.eoas.ubc.ca/courses/atasc113/flying/met_concepts/03-met_concepts/03d-mountain_waves/index.html)。図はFroude数（慣性力（流速）と重力の比を表す無次元数）ごとの流れの違いを模式的に表している。

山岳波は、安定した乾燥大気の中を移動する気流が山岳地帯にぶつかることで強制的に上昇し、復元力によって下降を繰り返すことで形成される。この波が強まると、風の鉛直シアーが増加し、K-H不安定が発生しやすくなる。特に、山頂付近に強い逆転層があり、その上空に不安定な空気層が存在する場合、鉛直に伝搬する内部重力波が発生し、乱気流の強度が増すことがある（気象衛星センター，2002）。Wolff and Sharman（2008）による研究では、山岳波が発生する際の低空の風向が山脈に対して垂直方向から30度以内である場合に、乱気流の発生リスクが高まることが示されている。日本においても、奥羽山脈に気流が影響されて乱気流が生じている可能性があり、これは奥羽山脈に東西風がぶつかることで重力波が生じ、伝搬していく中で安定度の低い層で増幅して、そこに航空機が入ると揺れるという考えである。

2) 対流性乱気流 (Convectively Induced Turbulence, CIT)

対流性乱気流 (Convectively Induced Turbulence, CIT) は、対流活動によって発生する乱気流のことを指し、主に積乱雲 (雷雲) の内部やその周辺で発生する (Sharman and Trier, 2019)。このタイプの乱気流は、積乱雲の強い上昇気流や下降気流によって引き起こされるほか、雷雨活動に伴う重力波や風の鉛直シアーによっても発生する (Lane and Sharman 2008)。

特に、メソ対流系では強い風の鉛直シアーが形成されるため、 Ri が減少し、結果として K-H 不安定が発生しやすくなる。対流活動が活発な雲の周辺では、これにより強い乱気流が生じることがある。

さらに、Lane et al. (2003) による研究では、対流の上空で発生する乱気流の一因として

「overshooting top」現象が挙げられている。この現象は、積乱雲の雲頂部付近で強い上昇流によって重力波が生じて、結果的に乱気流を引き起こすというメカニズムである。図5は、対流性の雲に伴う強い上昇流が大気成層中に重力波を生じ、それが上部に伝搬して行って増幅する過程を示している。対流性の雲では、雲の内部はもちろん、その上部においても乱気流に注意が必要である。こうした研究結果を踏まえ、FAA (2017a) は対流性乱気流の回避方法として、雷雨が発生している積乱雲の真下を航行しないことや、激しい雷雨が観測された場合には20マイル以上離れて飛行することを推奨している。

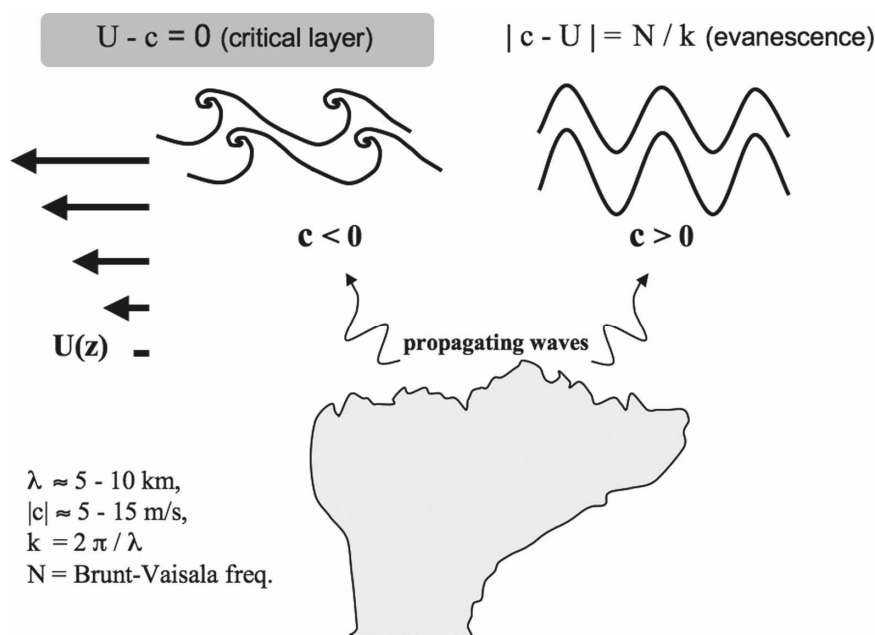


図5：対流性の雲から生じる重力波によって生じる乱気流の模式図 (Lane and Sharman 2008)。図中の U は水平風速 (高度方向に依存)、 c は重力波の伝搬速度、 N は Brunt-Vaisala 振動数、 λ は波長、 k は波数を表す。図中の各パラメータの値は、典型的な値を表す。

3) 晴天乱気流 (Clear-Air Turbulence, CAT)

晴天乱気流 (Clear-Air Turbulence, CAT) は、雲や雷の影響を受けることなく、また山岳地帯からも遠く離れた地点で発生する乱気流のことを指す。この現象は視覚的に確認することが困難であり、航空機が突然乱気流に遭遇する原因となるため、航空安全上の重要な課題とされている。

主な CAT の発生メカニズムの一つとして、Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定がある。K-H 不安定は、リチャードソン数 (Richardson number, Ri) が小さいときに生じやすいと考えられており、大気 of 静

的安定度と風の鉛直シア（Vertical Wind Shear, VWS）の比率を表す無次元数であり、次の式などで定義される。

$$Ri = \frac{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}, \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 θ は温位、 z は高度、 u は東西風、 v は南北風を表す。式の分子は大気の安定性（Brunt-Vaisala 振動数の二乗）を、分母は水平風速の鉛直差（風の鉛直シア）を示しており、水平・鉛直方向の2次元流体を考えると、理論的には Ri が 0.25 を超える場合は安定で、少なくとも K-H 不安定は生じないとされる。しかし、風の鉛直シアが強く、かつ大気の安定性が低い場合には、 Ri が 0.25 を下回り、K-H 不安定が発生する可能性が高くなる。この不安定が発生すると、風の異なる層間で渦が形成され、結果として乱気流が生じる。

CAT に関わる時空間スケールが大きな現象としてジェット気流が挙げられる。ジェット気流は南北両半球の中緯度帯の対流圏上層に存在することが多く、強い風の鉛直シアを生じさせるため、 Ri が広範囲で減少し、K-H 不安定が発生しやすい環境場となる。したがって、航空機の航路を決定する際には、ジェット気流の位置を正確に把握することが極めて重要である。さらに、晴天乱気流の発生には重力波も関与することが知られている。大気重力波は、重力を復元力とした波で、湿潤対流や中緯度低気圧の影響を受けることがあり、巡航高度付近の流れに影響を及ぼすことがある。対流による重力波は、雲頂付近で発生することが多く、特に上昇気流が強い場合に顕著となる。例えば、中緯度低気圧の影響で発生した対流が高度を上昇すると、対流圏上部で気流が変化し、乱気流の発生を促すことがある。

乱気流は、上述のようなメカニズムによって、日本のみならず世界中の空域で発生し、季節的な違いや発生環境場の違いが先行研究によって明らかになっている。これまでに、アメリカや韓国、そして日本の空域を対象とした乱気流の研究が数多く行われてきた（e.g., Wolff and Sharman, 2008; Kim and Chun, 2011; Miyamoto et al. 2023; Ito et al. in press）。たとえば、Wolff and Sharman (2008) はアメリカ上空で報告された乱気流遭遇データをもとに、18,000 ft 以上の高度で発生した中程度以上の強さの乱気流を抽出し、その遭遇地点の分布や環境場の特徴を解析した。その結果、アメリカ周辺では冬季に乱気流の遭遇数が多く、夏季には比較的少なくなる傾向が見られた。また、全季節を通じて山岳地帯周辺での発生頻度が高く、冬季には山岳波、夏季には雷雨が乱気流発生の主要因となっていることが明らかになった。特に冬季には、ジェット気流がアメリカ上空を南下するため、乱気流の発生が増加することが示された。一方、Kim and Chun (2011) は韓国上空での乱気流遭遇データを用いて、季節ごとの環境場を解析した。その結果、冬季および春季には晴天時に乱気流が発生しやすく、その多くがジェット気流に起因していることが判明した。さらに、夏季には対流活動が活発化することで乱気流の発生頻度が増加することが確認された。

図 6 は、申請者らの研究（Miyamoto et al. 2023）によって示された、日本空域で 2006 年から 2018 年の間での乱気流の発生箇所をプロットしたものである。この図から、乱気流の発生しやすさに差があるものの、基本的には日本全国どこでも航空機が飛行している限り遭遇するリスクが存在することがわかる。乱気流は、航空機の飛行中に予測できない形で発生し、乗客に大きな危険をもたらすことがある。2024 年 5 月には、シンガポール航空の航空機が乱気流による影響で事故を起こし、悲惨な結果を招いてしまった。このような乱気流による事故は、航空機の安全運航における最大のリスク要因の一つとなっており、その件数は年々増加している。図 7 に、2006 年から 2018 年にかけて日本空域で

発生した乱気流の月毎の報告数を示す。報告件数が徐々に増加傾向にあることが分かる (Miyamoto et al. 2023)。気候変動の影響で、乱気流が今後ますます発生しやすくなることが予測されており、このリスクは今後さらに高まる可能性がある。

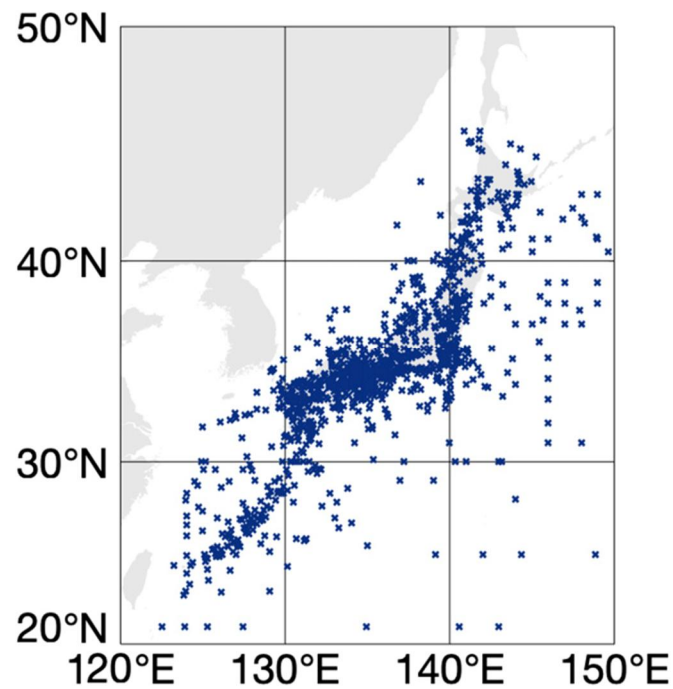


図 6 : 2006 年から 2018 年の間に日本空域で発生した乱気流の報告位置の分布図 (Miyamoto et al. 2023)。

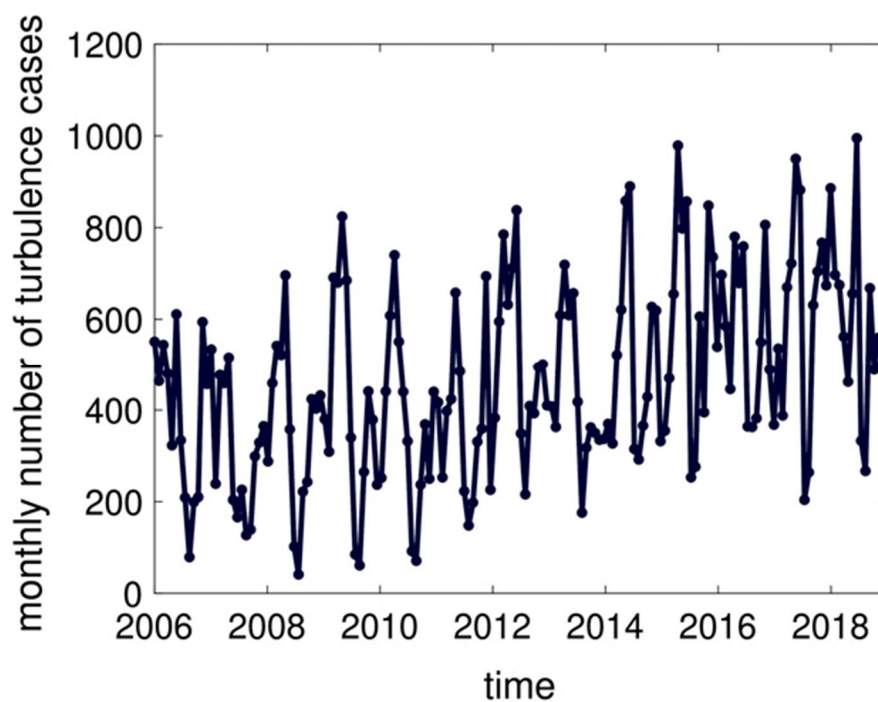


図 7 : 2006 年から 2018 年の間に、日本空域で発生した乱気流の月毎の報告数の時系列図 (Miyamoto

et al. 2023)。

こうした背景から、世界中のさまざまな機関や研究グループが乱気流の発生を予測するための研究を進めており、現在までに複数の予測モデルが開発され、実際の運用に導入されている (e. g., Sharman and Pearson, 2017)。しかしながら、まだ予測制度には課題が残っている (Sharman and Lane, 2016)。この予測精度の限界の主な要因として、そもそも乱気流の発生メカニズムが完全には解明されていないことが挙げられる。乱気流の発生にはさまざまな大気現象が関与しており、これらの複雑な相互作用を正確にモデル化することが困難であるため、発生条件の正確な特定が難しいとされている (Lane et al., 2012; Sharman and Lane, 2016)。このように、乱気流の予測精度を向上させるためには、その発生メカニズムのさらなる解明が不可欠であり、今後の研究の進展が強く求められている。

2. 目的・内容・手法

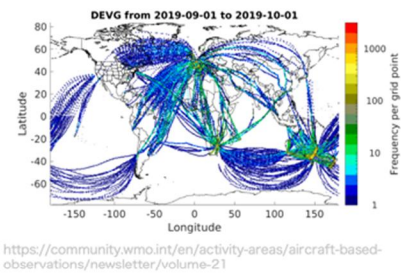
本研究では、二つの主要な目標を設定した。第一に、日本空域において高精度を示した乱気流予測モデルを基に、主要な国際線航路に対応した予測モデルを構築し、その適用範囲を世界へと拡張すること (目的 A)。第二に、乱気流モデルのアルゴリズムを応用し、風向・風速の予測を行う深層学習モデルを開発することである (目的 B)。これらの技術が確立されれば、航空業界における安全性と運行効率の両面で大きな貢献が期待される。

【目的 A】では、まず過去の乱気流事例を広く収集・整理し、学習用データセットを構築した。その後、深層学習によるモデル開発と検証を繰り返し、主要な国際空域に対応可能な乱気流予測モデルを構築した (図 8)。

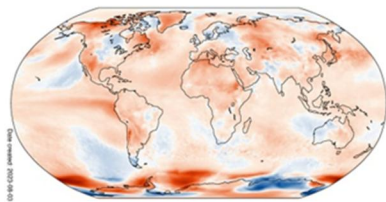
【目的 B】では、乱気流モデルの技術を基盤としつつ、風向・風速の予測に特化した新たなモデルを開発した。航空業界にとって風の予測は極めて重要である。モデル構築にあたっては、風予測に必要な気象データを収集・整理し、深層学習手法により学習を実施した。特に日本および太平洋域における精度向上に重点を置き、実務に適した予測出力形式の設計も行った。

両モデルの開発は並行して進められ、開発工程や技術基盤を共有することで、作業効率の最適化とモデル間の相互補完が図られた。特に、乱気流と風予測の精度向上を相互に促進することが可能となり、限られた資源の中で最大の成果を引き出す設計とした。

風データ



気象データ



風予測

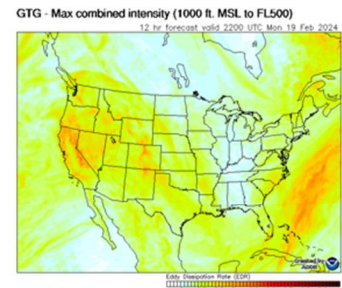


図8：本研究で構築する乱気流・風の予測モデルの概念図。図の左側は航空機による乱気流・風の実測データと気象データを用いた学習過程を、そして右側は構築したモデルを用いた予測を表す。

本研究では、【A】既存の乱気流予測モデルをさらに高度化し、世界規模での予測に対応させるとともに、【B】それを基盤として、風向・風速の予測モデルを構築することを目的とした。風向・風速の実測データは市販されていないため、乱気流予測モデルの構築時と同様に、必要な変数を含むサンプルデータを取得し、データ形式や内容の検証を実施した。

モデルの学習過程では、変数の選定やデータ構造を調整しながら、複数回の学習・検証を繰り返し、予測精度の最適化を図った。出力される風向・風速予測の誤差を分析し、精度を高めるためのパラメータ調整やアルゴリズムの改良も随時行った。そしてモデルが完成した後、気象庁から日々更新される予測データを入力として使用し、風の予測結果を自動出力するシステムを構築した。本システムは航空業界での実用を見据え、運用現場で使いやすい形を目指して設計された。

乱気流の強度を定量的に評価する指標としては、渦散逸率（Eddy Dissipation Rate: EDR）を用いた。物理的に EDR は、大気の流れが大きなスケールの流れから小さなスケールの流れへと運動エネルギーが伝わっていき、やがて分子粘性によって熱エネルギー変換する率を表す。大気など流体の流れは一般的に、空間スケールの大きいものから小さいものが生じるため（例えば、ジェット気流からそのシア（風速差）によって生じる流れなど）、運動エネルギーも大きなスケールの流れから小さい物へと伝わっていく。流体には粘性が働くため、ある程度スケールが大きければ渦が年生のような役割を担ってエネルギーを小さいスケールへ渡していく（エネルギーカスケード）。やがて、エネルギーは分子粘性のスケールへと伝わり、熱エネルギーへと変換される。この割合は、その場所ごとに流れのシアなどによって定まる。

特に近年、EDR は乱気流の発生およびその強度を物理的に評価する上で国際的に広く用いられており、本研究では「1 分間に観測された EDR の最大値が $0.15 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ を超える場合」を、乱気流が発生したとみなす定義とした。この閾値設定は、航空機の安全運航に与える影響を定量的に評価する上で妥当なものであり、過去の研究や運用実績においても広く支持されている。

本研究で利用した乱気流の報告地点は、航空交通の主要航路付近に存在していた。これは、航空機の飛行頻度が高い空域で観測機会が多くなるためであり、報告頻度の地理的偏りを反映している。乱

気流サンプルの頻度を、緯度・経度・高度・温度などごとに調べてみると、先行研究（例：Miyamoto et al. 2023 など）とも整合的な結果が得られた。

本研究では、乱気流の発生地点における気象場の特徴を適切に把握するために、各サンプルの発生時刻に対応する気象データとして、気象庁が長年にわたり開発・運用を続けてきた全球予測モデル（Global Spectral Model: GSM）の出力結果を利用した。GSM は、地球全体の大気を対象とした数値予報モデルであり、運動量保存則、エネルギー保存則、質量保存式といった大気の基本的な支配方程式を、時空間的に離散化された格子系上で数値的に解くことによって、大気の将来状態を予測する枠組みである。さらに、放射、雲、降水、地表面過程などの複雑な物理過程も組み込まれており、現実の大気を多角的かつ整合的に模擬することが可能となっている。

GSM は、気象庁のスーパーコンピュータ等の大規模計算資源を用いて定期的に運用されており、その出力結果は、航空、農業、防災、環境など多岐にわたる分野で活用されている。対象領域が全球であることから、空間解像度は水平格子間隔約 20 km（提供されるデータは 0.5 度、すなわち約 55 km 間隔）と、気象庁が日本付近に特化して運用している領域モデル（水平解像度 2~5 km）と比較して粗い。しかし、広域的な気象現象の把握においては十分な精度を備えており、航空機運航の支援や全球的な乱気流リスクの評価において有用な基礎資料を提供している。

本研究においては、GSM の出力データのうち、乱気流の発生時刻に最も近い予報時刻のデータを選択し、対象地点およびその周辺領域の気象場の特徴を抽出した。GSM の気象データは、気象庁から気象業務支援センター（Japan Meteorological Business Support Center）を経由して提供されており、以下のような仕様を有する。

- **対象変数**：高度、気温、相対湿度、東西風速、南北風速、上昇流
- **鉛直解像度**：1000 hPa から 100 hPa までの 12 層（気圧面）
- **時間分解能**：1 日 4 回（00, 06, 12, 18 UTC）出力、6 時間間隔
- **空間解像度**：0.5 度 × 0.5 度（経度方向 720 点、緯度方向 361 点）
- **データ形式**：GRIB2 形式
- **対象範囲**：全球全域

本研究では、航空機の運航高度に相当する気圧面を重点的に取り扱うこととし、200、250、300、400、500、600、700 hPa の各気圧面に対応するデータを利用した。これにより、乱気流が発生しやすい高度帯における気象場の特徴を、より詳細に解析することが可能となる。

以上のように、GSM データは、乱気流発生時刻における広域的な気象場を高い空間的整合性のもとで再現可能とするものであり、本研究の乱気流予測モデル構築において基盤的な役割を果たしている。乱気流観測データと GSM の数値予報出力とを統合的に利用することにより、乱気流の発生に関わる物理過程を学習データに反映させ、ひいては予測精度の向上を実現することを目指した。

3. 結果・考察

構築した乱気流予測モデルの性能を検証するため、学習に用いたデータとは異なる独立した検証用データセットを用いて評価を実施した。その結果、北米など複数の空域において、高い予測精度を実現する AI 予測モデルを構築することができた。一方で、地域や予測対象高度によって、予測精度にばらつきもあり、今後の課題である。

本研究で構築したモデルを用いて、過去に乱気流が生じた日の予測を行なった。ここで、過去の検証ながら、予測値を用いて“予測”を行ったことに注意されたい。図 4 は、実際に乱気流の発生が報

告された 2023 年 6 月 29 日 0900UTC において、500 hPa (FL180) 高度面での予測の結果を表す。具体的には、伝統的に利用される水平風の鉛直シア（Vertical Wind Shear: VWS）による予測と、本研究で構築した AI モデルによる予測結果を表す。この図から、我々が構築した AI による予測モデルは山口県上空で生じた乱気流の事例の発生を、正しく予測できていることが分かる（右図）。一方で鉛直シア（VWS）では、発生を予測することは難しいことも見てとれる（左図）。このことは、この乱気流の事例が、鉛直シアだけによって生じたものでは無いことを示唆している。一方で強い鉛直シアに伴って生じる乱気流についても、構築した AI 予測モデルで予測が可能であることから、このモデルは様々な事例を学習したことで、鉛直シアのように典型的なものだけでなく様々な要因で生じる乱気流についても予測が可能であることを示している。

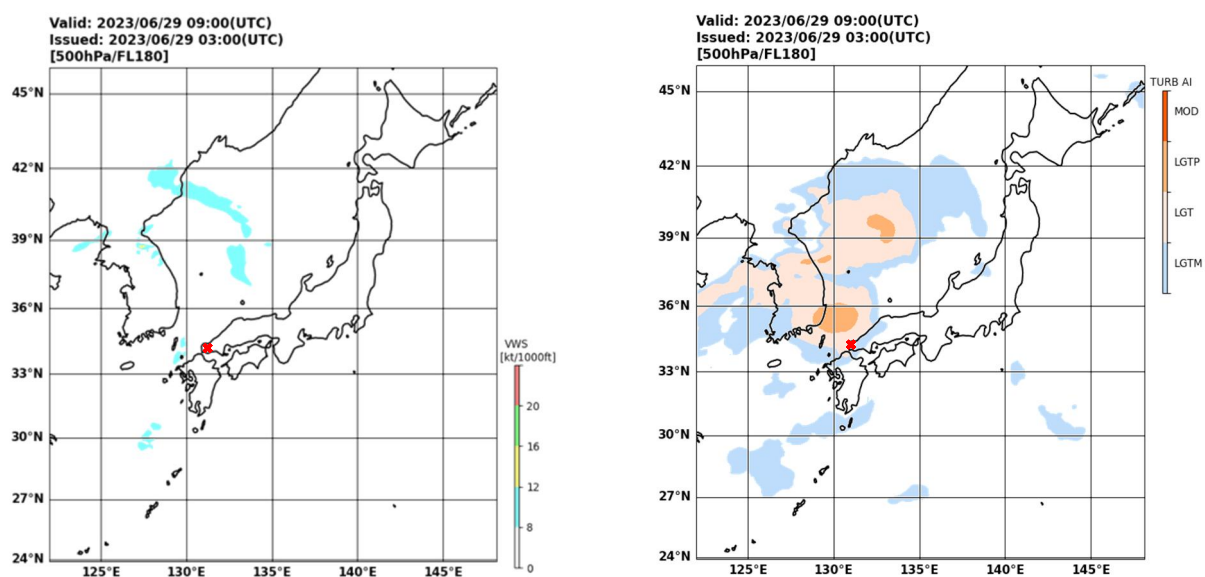


図 9：2023 年 6 月 29 日 0900UTC における 500 hPa (FL180) 高度面の乱気流予測の結果を描画した水平面図。左側は水平風の鉛直シア（Vertical Wind Shear: VWS）、右側は本研究で構築したモデルによる予測結果を表す。陰影はそれぞれの強度を表す。図中の赤バツ印は、実際にこの時刻・高度において報告された乱気流の発生地点を表す。

次に、図 10 に本研究で構築した北米を対象とした AI 予測モデルを用いて、2025 年 3 月 2 日 1200UTC 頃に、米国テキサス州上空で生じた乱気流の事例での検証結果を表す。ここでは、遭遇した高度の近くである 300 hPa と 400 hPa の結果を示している。この事例では複数の怪我人も出てしまっており、航空会社・利用者ともに、可能な限り回避したい事例である。

乱気流の発生地点を危険域として予測できていることが分かる。つまり、今回構築したモデルを用いることができれば、今回の乱気流は避けられた可能性が高く、この結果は本プロジェクトで構築したモデルの精度が優れていることを示している。

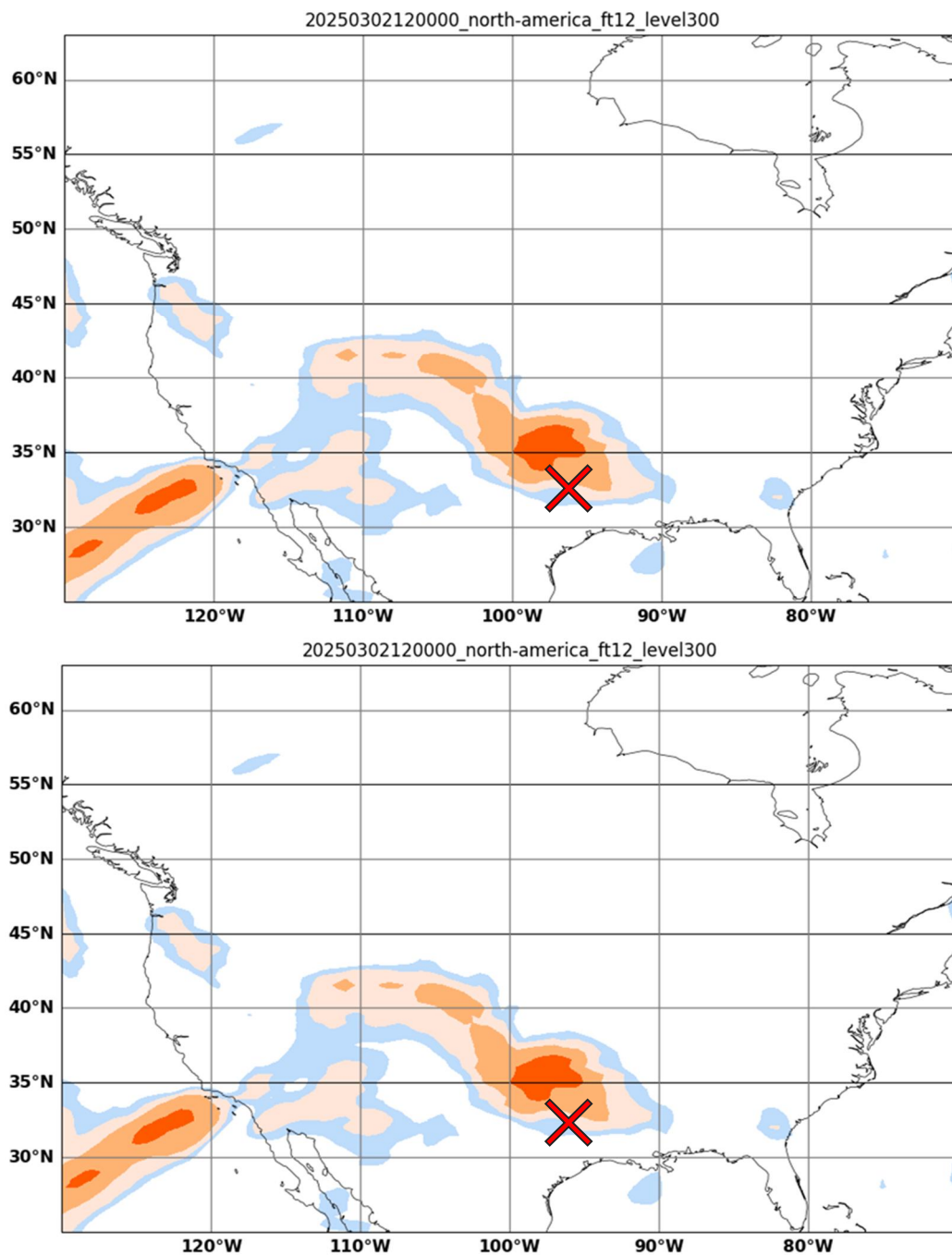


図 1 0 : 2025 年 3 月 2 日 1200UTC 頃に、米国テキサス州上空で生じた乱気流事例での検証結果。上の図は高度 300 hPa での結果を、下の図は高度 400 hPa での結果を示す。図中のバツ印は乱気流が報告された地点を表す。

次に風向・風速を予測するモデルの結果を紹介する。この学習過程は、基本的に乱気流の予測モデルと同じ手法で行った。このモデルでは、気象庁が提供する予測値を入力値として、構築した予測モデルで改めて予測を行うことで、さらなる精度向上を目指す。今回は太平洋空域を対象に学習を行った。

本研究では航空機が実際に測定した東西風速および南北風速のデータを使用した。これらのデータ

は、航空機が飛行中に1秒ごとに測定した風速値から取得したものであり、本研究では180秒間隔で抽出した値を用いた。この理由は次の通りである。巡航高度でMach数（航空機の飛行速度と音速との比）が0.8で音速が300 m/sとした時に、飛行速度は250 m/sとなり、180秒間隔だと15 kmとなる。45 kmは今回用いる気象庁が提供する全球気象モデル（Global Spectral Model: GSM）によるデータの水平方向の格子点間隔50 kmに近く、すなわち航空機は180秒の間に次の格子点へ移動すると考えられるためである。データの範囲は2023年7月1日から2024年6月30日までの1年間である。

図1 1に、太平洋空域において航空機によって実測された風速の絶対値と、それに対応する予測値（GSMで出力された初期値）の散布図を示す。ここで実測値として、上で示した条件を満たすものだけを抽出しており、各サンプルに対応する格子点の予測値と比較を行った。図から、予測値は実際に測定した値と整合的であり、一部に過大・過小評価しているサンプルも見られるが、 R^2 は0.946と高く、RMSEは3.58 m/sである。

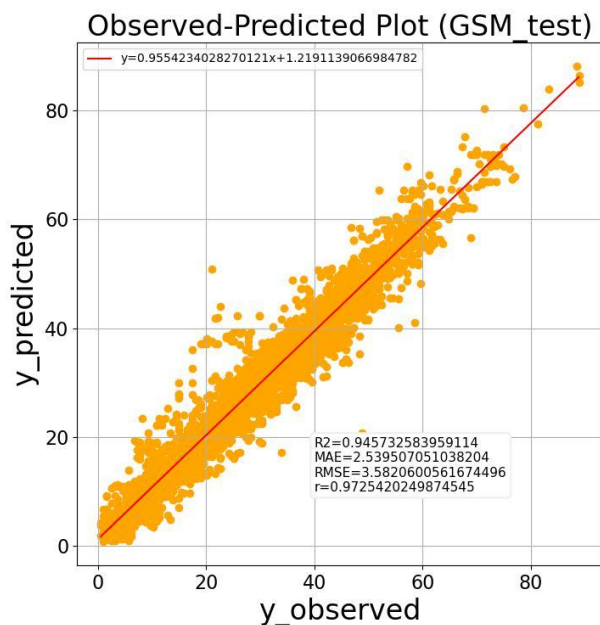


図1 1：航空機による風速絶対値の実測値（縦軸）とそこに対応する予測値（横軸）の散布図。赤線は回帰直線を示し、図中にRMSEや R^2 などの値を示す。ここで予測値とは、GSM出力結果の初期値である。実測値は、上で示した一連の条件を満たすものだけを抽出し、対応する格子点の予測値と比較を行っている。

4. 結論

本研究では、深層学習を用いた乱気流および風の予測モデルを構築し、航空機の運航における安全性と効率性の向上を目指した。気象データとして、GSM（Global Spectral Model）の出力結果を用いた。風の予測モデルについては、乱気流予測モデルと同様に、GSMのデータを基に予測を行い、特に太平洋上の航路における風速の予測に焦点を当てた。

今後の課題としては、低高度における予測精度のさらなる向上が挙げられる。特に、予測対象とする高度層のデータの収集を充実させ、深層学習モデルの改良を進めることで、精度の向上が期待される。また、気象モデルや予測アルゴリズムの改良も、より精密な風速や乱気流の予測に寄与するだろう。さらに、気候変動の影響を受けて風のパターンや乱気流の発生頻度が変動する可能性があるた

め、これらの変動を反映した予測モデルの更新が重要である。

5. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件

6. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 0 件、海外 0 件

2) 口頭発表

国内 0 件、海外 0 件

3) その他（研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等）

・特になし

7. 参考文献

Ellrod, G. P., & Knapp, D. I. (1992). An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Weather and Forecasting*, 7(1), 150–165.

Gultepe, I., and Coauthors, 2019: A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure Appl. Geophys.*, 176, 1869–1921, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>.

Hirayama, T., Y. Miyamoto, K. Okamoto, and I. Okabe, 2024: Verification of wind prediction in the upper troposphere in the north Pacific via flight observation, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, <https://doi.org/10.2151/sola.2024-019>

Ito, S., Y. Miyamoto, and Y. Kajikawa: Environmental Fields of Moderate Clear Air Turbulence above 400 hPa around Japan, *Atmospheric Science Letters*, in press

Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **50**, 311–324, doi:10.1175/2010JAMC2492.1.

Lane, T. P., Sharman, R. D., Clark, T. L., & Hsu, H.-M. (2003). An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(10), 1297–1321.

Lane, T. P., Sharman, R. D., Trier, S. B., Fovell, R. G., & Williams, J. K. (2012). Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 499–515.

Miyamoto, Y., A. Matsumoto, and S. Ito, 2023: Statistical analysis of Aviation Turbulence in middle–upper troposphere over Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 62, 575–588, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0191.1>

Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting, *Weather Forecast.*, **21**, 268–287, doi:10.1175/WAF924.1.

Sharman, R., Trier, S., Lane, T., & Doyle, J. (2012). Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophysical Research Letters*, 39(12), L12803.

Sharman, R., & Lane, T. (2016). *Aviation turbulence: Processes, detection, prediction*. Berlin: Springer.

Sharman, R., & Pearson, J. (2017). Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part I: Forecasting nonconvective turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 317–337.

Sharman, R.D., Trier, S.B. Influences of Gravity Waves on Convectively Induced Turbulence (CIT): A Review. *Pure Appl. Geophys.* **176**, 1923–1958 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1849-2>

Storer, L. N., P. D. Williams, and M. M. Joshi, 2017: Global response of clear-air turbulence to climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9976–9984, <https://doi.org/10.1002/2017GL074618>.

松本紋子, 宮本佳明, 岡本幸三, 石井晶憲, ”衛生搭載ドップラー風ライダーデータの同化による航空路の風の予測への影響”, ”第37回レーザーセンシングシンポジウム講演予稿集”, 2019 (https://laser-sensing.jp/37thLSS/37th_papers/P8_matsumoto.pdf)

一般財団法人 気象業務支援センター “全球数値モデルGPV” (<http://www.jmbse.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>)

村上百合, 岸宏行, 岸和喜, 永留幸雄, 西郷彰, 松本紋子, 宮本佳明, ”CNNを用いた風情報からの乱気流予測システム”, ”第36回人工知能学会全国大会論文集, 2022
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/pjsai/JSAI2022/0/JSAI2022_3D4GS1001/_pdf/-char/ja)

気象庁, ”予報の基礎資料に関する用語”, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/shiryo.html
(2023 年 11 月 12 日閲覧)