

気象衛星ひまわり 8号データからみた 日本付近で発生するトランスバースバンドの時空間的特徴

藤田友香* 渡来 靖** 増田耕一**

キーワード：トランスバースバンド, ジェット気流, 衛星画像, 航空気象

1. はじめに

トランスバースバンド（以下、TVB）とは、流れに対してほぼ直角方向に並んだ波状の上層雲の雲列のことで、ジェット気流や熱帯低気圧、温帯低気圧、メソ対流系等の様々な現象に伴って発生する（Knox et al. 2010）。TVB付近では航空機の航行等に影響を与える乱気流が発生しやすく（Ellrod 1985, Lenz et al. 2009）、衛星画像から目視で判別できることから、TVBは乱気流の目安のひとつとして乱気流予想で用いられている（Ellrod 1989）。

これまでに衛星画像を用いたTVBに関する研究では、Miller et al. (2018) が2013~2015年の3年間の太陽同期円軌道衛星の可視画像から、全球での発生日数の空間分布を調査したものがあ。それによると、TVBと関連する現象の全球分布とTVBの発生日数の分布は相関がよく、特にジェット気流と温帯低気圧が存在する地域で発生日数が多いことが報告されている。このことから、全球的に見ても日本付近は、TVBに伴う乱気流の発生頻度が高い地域であることが推測されるが、具体的にどの現象に伴って多く発生していたかについては言及されていない。また、可視画像を使用していることから、夜間の発生が反映されず、個々のTVBの継続時間について調査されていない。

TVBの発生する時間帯に関する研究としては、アメリカで発生する対流雲に伴うTVBを扱ったLenz et al. (2009) がある。一方で、日本付近で発生するTVBについての統計的な調査は、これまで行われていないため、日本付近ではどの時間帯で多く発生しているのかについても十分把握されていない。TVBは事前に発生を予測することが難しいことから、出現頻度の時空間的な特性の理解は、航空機の安全運航に繋がることが期待さ

れる。

そこで本研究では、日本付近で発生するTVBの時空間的な特徴を明らかにすることを目的に、日本付近を常時観測している静止軌道衛星の赤外画像からTVB事例を抽出して、TVBと関連する現象ごとに発生しやすい季節・場所・時間帯等について調査する。また、その結果から航空機への影響についても考察する。

2. TVB関連要素の抽出方法

本研究では、気象衛星ひまわり 8号の毎正時の赤外画像（バンド13）から、日本付近で発生したTVBを目視により手動で抽出した。赤外画像は、情報通信研究機構（NICT）の「ひまわりリアルタイム Web」と千葉大学環境リモートセンシング研究センターによるひまわり 8号フルディスク gridded data（緯度経度直交座標系精密幾何補正済データ）Version 02（Takenaka et al. 2020）を利用した。抽出する際のTVBの定義は「上層雲で、同高度の流れに対し直交方向に並ぶ複数の雲列」とし、同高度の流れは気象庁の広域雲解析情報図や連続した時間の画像による該当TVBの動き等から判断した。

対象範囲は北緯20~50°、東経120~165°で、この範囲を緯度10°、経度15°ごとの9つの領域に細かく区分（図1）し、出現頻度の高い場所の調査も行った。同時刻に複数の領域にわたって存在していた場合は、それぞれの領域で数えている。

対象期間は2016年1月1日~2021年12月31日の6年間とした。衛星画像が高解像度化（赤外画像は空間解像度が約2 km）したのは2015年7月7日からだが、全ての月が揃っていないことから2016年以降を対象とした。

抽出したTVB発生に関する要素の項目は、日時、継続時間（発生~消滅）、領域、関連する現象（以下、親現

* 立正大学大学院地球環境科学研究科環境システム学専攻

** 立正大学地球環境科学部環境システム学科

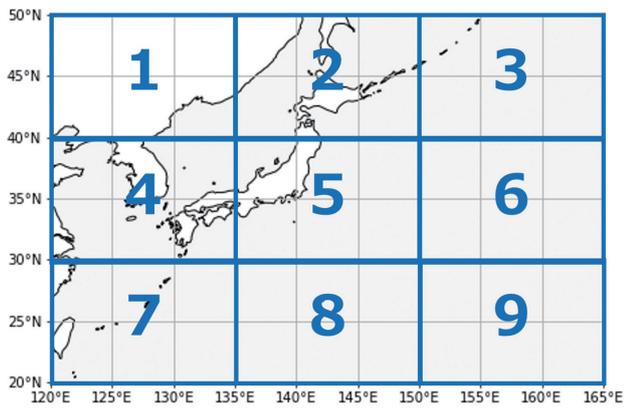


図1 対象範囲と区分領域.

象と呼ぶ)である. なお, TVBが同一現象で断続的に発生する場合は, 毎正時で連続して追えるものをひとつのTVBとして数え, 同一時間に複数発生する場合は, 雲列の方向や場所から同一TVBか別のTVBかを判断した.

親現象は, ジェット気流, 熱帯低気圧 (台風を含む), 温帯低気圧, 寒冷低気圧, メソ対流系で, いずれにも該当しないものはその他に分類した (図2). 各現象の判別はKnox et al. (2010) を参考に, 衛星画像の雲の形状および気象庁の高層天気図や地上天気図から総合的に判

断して行った. ジェット気流に伴って発生したと同定したTVBは, ジェット気流の流れの向き (北, 北東, 東, 南東, 南の5方向) での細かい分類も行った. なお, 温帯低気圧はジェット気流に伴って発生しており, どちらが親現象かを見分けるのは難しい. このため, 分類上での温帯低気圧は, 図2 (c) のように衰弱期にある温帯低気圧の中心付近にできる渦に伴って発生しているもののみとした.

3. 結果と考察

2016~2021年で発生したTVBは合計2856事例で, 年平均は476事例だった. 親現象を見ると, 最も多かったのがジェット気流に伴うもの (68.2%) で, 続いて熱帯低気圧 (10.4%), メソ対流系 (3.6%) の順で多かった (図3). 1949事例あるジェット気流に伴うTVBのうち65.3%がジェット気流の走向が北東 (気圧の尾根の後面等) であった. Ellrod (1985) では, 亜熱帯ジェット気流に伴うTVBがアメリカ南部でよく観測され, 高気圧性の曲率を持つことが多いことが報告されている. 気候学的にリッジ後面が位置しやすい同地域でのTVBの走

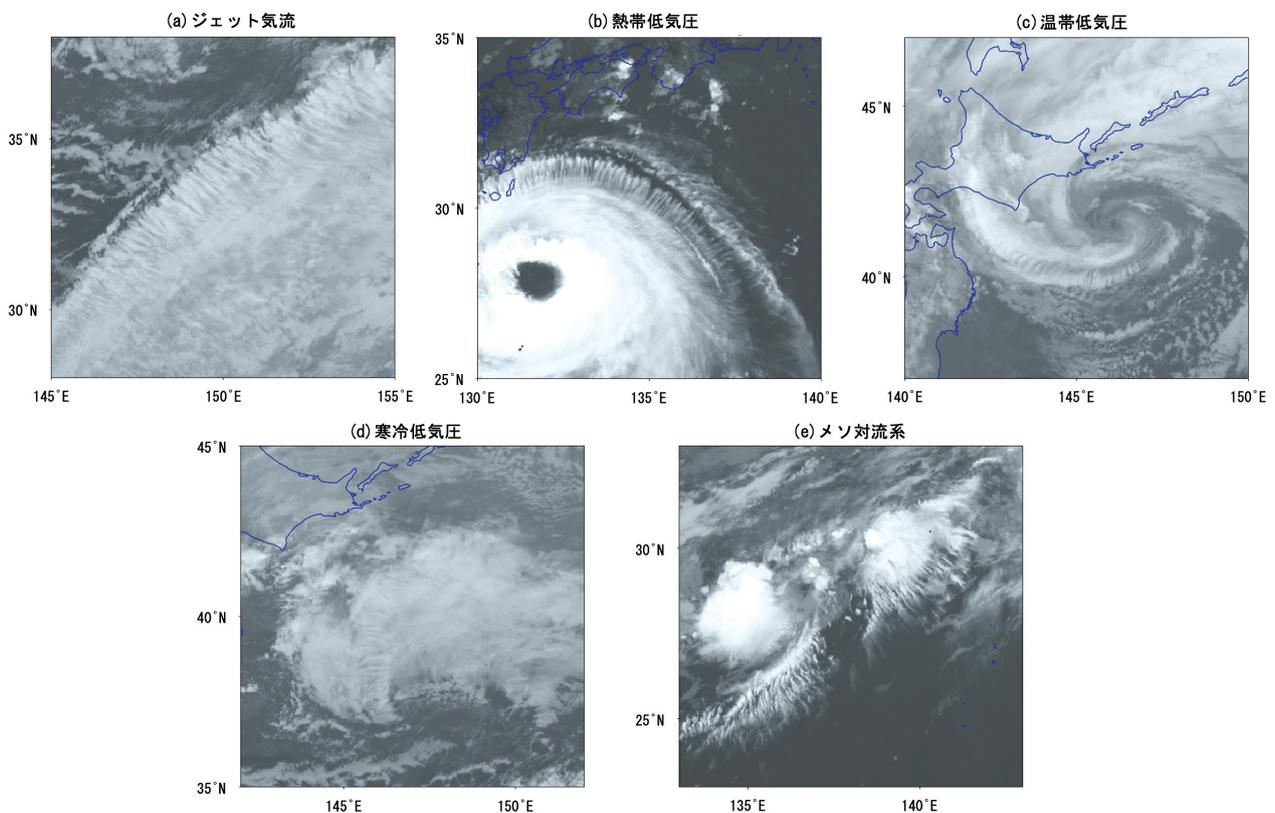


図2 TVBの親現象. それぞれの赤外画像の時刻は, 日本時間で (a) 2018年2月6日23時, (b) 2018年8月21日11時, (c) 2020年3月5日23時, (d) 2018年2月6日16時, (e) 2019年6月3日7時. 千葉大学環境リモートセンシング研究センターのデータより作成.

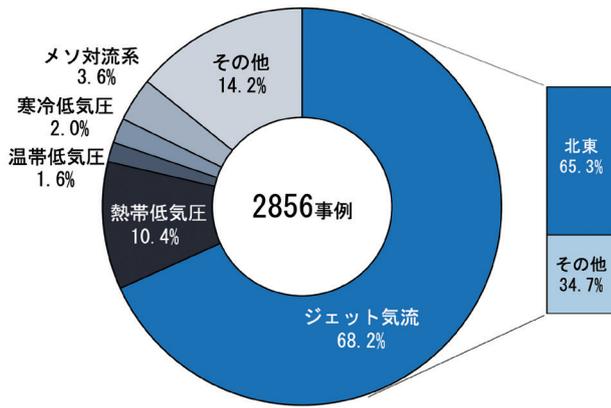


図3 親現象別の出現数と割合. 円グラフは全事例中の割合で, 右の棒グラフはジェット気流で発生する事例のうち, さらに細かく流れの方向で分類した中での割合を示す.

向は北東方向が多いと推測されることから, 日本付近における今回の結果と類似している.

次節以降は, TVB発生の季節変化, 空間分布, 継続時間と日変化についてまとめる.

3.1 季節変動特性 (事例数の季節変化)

TVB発生事例数の月ごとの事例数を図4に示す. 3~5月と11月の春と秋が多く, 7~8月の夏に少ない傾向で, 事例数が多い月は年による変動が大きかった. この年々変動の要因を調べるために, 年による差が最大の4月において事例数が最少だった2018年と, 最多だった2021年の環境場を比較した. 両年とも月事例数のうち最も多くを占めていた親現象がジェット気流であったことから (2018年87.5%, 2021年66.3%), 両年の4月の月平均200hPa高度および年偏差から違いを見た (図5). 日本付近に注目すると, 少なかった2018年 (図5上)は

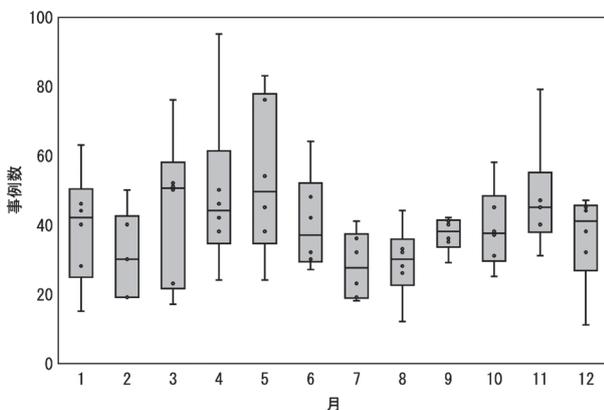


図4 月ごとのTVB事例数. 箱の中の点は年ごとの値で, ひげが最大・最小, 箱の中線が中央値を示す.

広く正の偏差となっている一方で, 2021年 (図5下)は大陸から日本のはるか東にかけて正偏差と負偏差が並び, ジェット気流の蛇行が明瞭であった. ジェット気流の蛇行の詳細を知るために, 2021年4月に親現象がジェット気流のTVBが圧倒的に多かった中旬 (41事例) の10日平均200hPa高度および年偏差の図 (図6) に注目する. 中国東北区や朝鮮半島付近は負の偏差, カムチャツカ半島付近で明瞭な正の偏差となっていて, ジェット気流が日本付近で南西から北東に向かう流れとなりやすかったことがうかがえる. ジェット気流に伴うTVBは, このパターンでの事例数が多かったことから, 年による月事例数の差はジェット気流の蛇行等の位置が影響していると推測される.

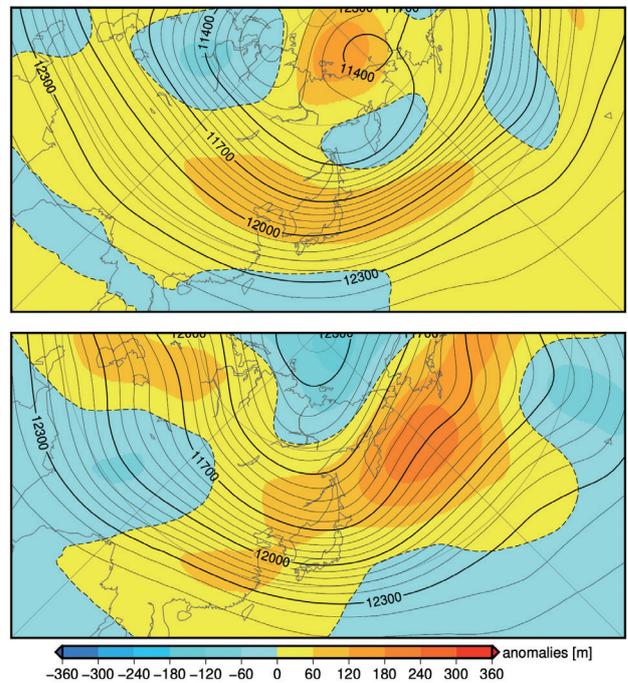


図5 4月の月平均200hPa高度および年偏差 (上: 2018年, 下: 2021年). JRA-55より作成

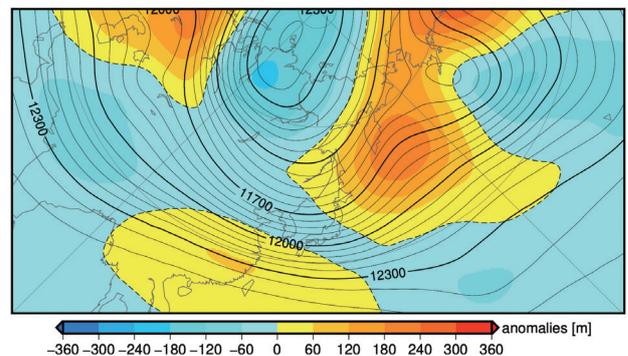


図6 2021年4月中旬の10日平均200hPa高度および年偏差. JRA-55より作成

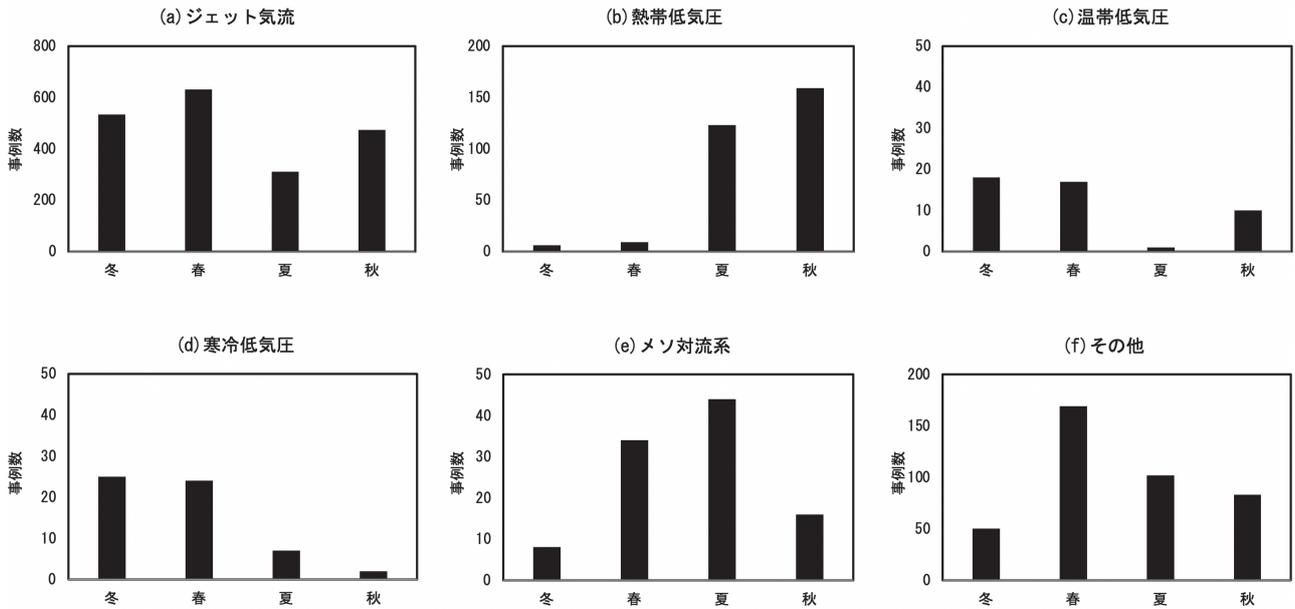


図7 親現象別の季節ごとの事例数. 冬:12~2月, 春:3~5月, 夏:6~8月, 秋:9~11月. 縦軸の範囲は (a) が0~800, (b) と (f) で0~200, (c) ~ (e) は0~50と異なる.

次に、冬（12～2月）、春（3～5月）、夏（6～8月）、秋（9～11月）に分けて親現象別の事例数を比較した（図7）。最も事例数の多いジェット気流は、夏以外の季節での事例数が多く、春が最も多くなった。温帯低気圧も似たような傾向となり、夏の発生は1事例のみで、冬と春を中心に多くなった。寒冷低気圧は冬と春の事例が主で、強い寒気が流れ込みやすい時期に一致している。一方、熱帯低気圧は夏と秋に多く、日本付近に近づくコースを辿りやすい時期に多くなっていることがわかる。メソ対流系は梅雨前線付近で発生しやすかったこともあり、夏が最も多くなった。その他は春を中心に多い傾向が見られた。

親現象別の結果から、現象によって発生しやすい時期があり、その傾向が顕著に出ていることが確認できた。また、日本付近で発生するTVBの季節変化は、事例数が最も多いジェット気流の特徴が反映されていることが示唆された。ジェット気流に関連したTVBは、ジェット気流の位置等の影響を受けるとみられることから、事例数の多い夏以外の季節で月ごとの事例数の年々変動が大きくなるのではないかと考えられる。

3.2 空間的特性（領域別の出現頻度）

全事例の領域ごとのTVB月別出現時間数・出現割合を図8に示す。最も出現時間が多かったのは領域5で、次いで領域4、領域6、領域2の順で多く、総出現時間に対する割合はそれぞれ44.9%、33.0%、23.7%、21.0%

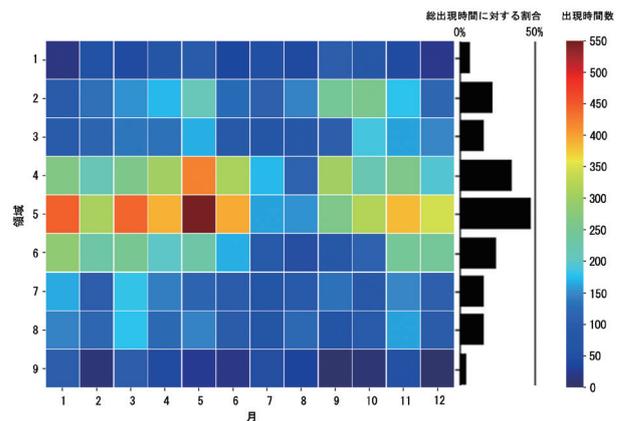


図8 全事例での領域ごとのTVB月別出現時間数（ヒートマップ）と総出現時間に対する割合（横棒グラフ）。

だった（同時刻に複数領域で発生している事例もあり、各領域の割合の合計は100%を超える）。特に出現数の多い領域5、4では、どちらか一方もしくは両方で出現している事例での時間数は、総出現時間の67.1%となった。月別出現時間数では、7、8月を除く期間で本州付近の領域4～6の出現時間数が多く、初夏や秋は北の領域2、3、冬は南の領域7、8でやや増える傾向が見られた。

親現象ごとの月別出現時間数（図9）では、ジェット気流によるものは、全事例の結果と類似していて、初夏・秋の北の領域と冬の南の領域で増える傾向が顕著になっていた。これは、事例数の多いジェット気流の特徴が全事例の結果に反映されていることと、南北へ移動するジェット気流の季節変化の影響が明瞭になったことを

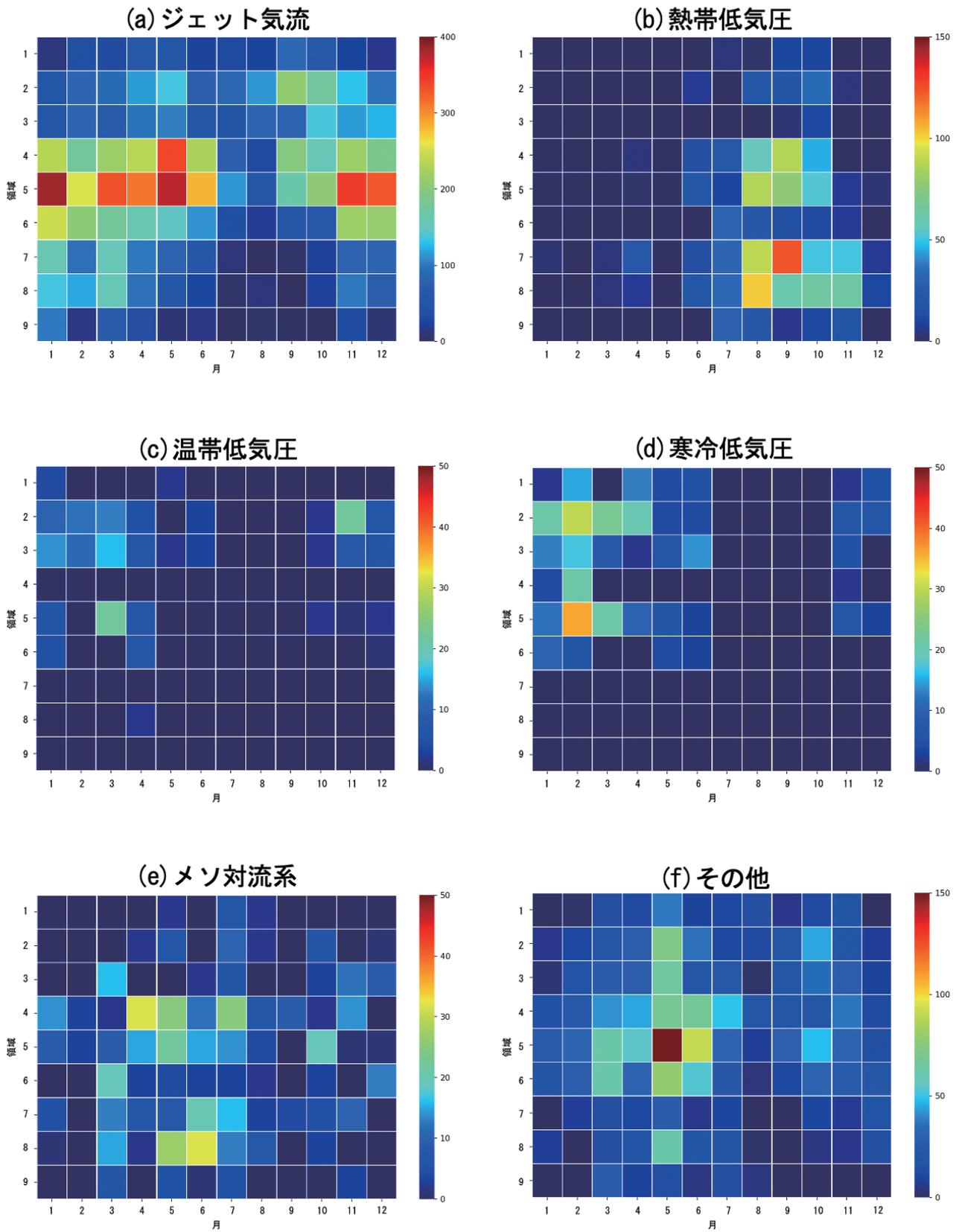


図9 親事例別の領域ごとのTVB月別出現時間数. 出現時間数の最大値は (a) が400, (b) と (f) で150, (c) ~ (e) は50と異なる.

示し、出現域の季節変化の特徴から亜熱帯ジェット気流による事例数が多いことを表している。また、ジェット気流のみでは、夏～秋に本州付近と南の領域を中心に出現時間数が極端に少なくなっており、かわりに熱帯低気圧に伴うTVBの出現時間数が多くなっている。そのほかジェット気流に比べると出現時間数は少ないものの、温帯低気圧・寒冷低気圧では冬～春に寒気が流入する北側の領域2, 3, 5を中心に、メソ対流系は春～夏に暖湿気が流れ込みやすい南西側の領域4, 5, 7, 8で出現時間数が多くなる傾向が見られた。親現象が明確ではないその他によるものは、春に領域5の出現時間数が多いものの、あまり特徴的な分布にはならなかった。

これらのことから領域5, 4は、ジェット気流が位置しやすいうえに他の親現象の影響も加わり、全体的に出現時間数が多くなっていたことがわかった。

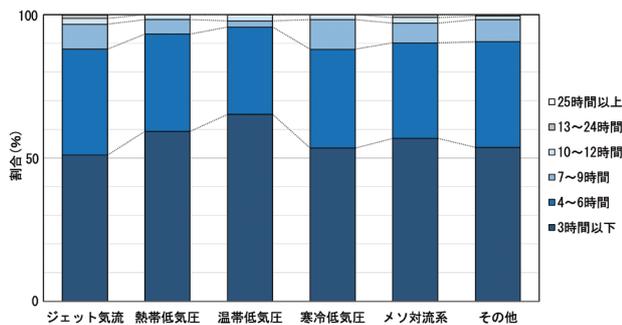


図10 親現象ごとのTVB継続時間の割合.

3.3 時間的特性 (継続時間と時間帯別出現件数)

まず、TVBの構造が発生してから消滅するまでの継続時間の割合を親現象ごとに示す (図10). 親現象による大きな違いはなく、全て3時間以下が50%以上で、6時間以下を含めると90%前後となった。継続時間が長いものでは半日以上持続していたが、24時間を超えて持続するものはほぼなかった。また、ジェット気流によるものは、他の親現象に比べて3時間以下の割合が低く、4～6時間と7～9時間を合わせた割合が高いことから、ジェット気流に伴って発生するTVBは他の親現象に比べて寿命がやや長い。Lenz et al. (2009) によるアメリカでの対流雲に伴うTVBの調査では、平均9時間継続していたと報告されており、本研究とは異なる結果となった。アメリカでは、竜巻をもたらすスーパーセル等の大規模な対流雲が発生しやすいのに対し、日本では比較的小型の対流雲であり、規模の違いが継続時間の長さに影響していることが考えられる。

次に、TVBが存在していた時間帯をまとめた時間帯別出現件数を示す (図11). TVBの成因が親現象によって異なる可能性を考慮し、親現象別に比較している。特徴的だったのはジェット気流に伴うTVBで、全ての時間帯で出現しているものの、日中に出現件数のピークが見られた。熱帯低気圧、温帯低気圧、寒冷低気圧、メソ対流系、その他は、事例数が多くないこともあり明瞭な傾向は見られなかった。Lenz et al. (2009) では、対流雲に伴うTVBは夜間に多く観測され、これは昼過ぎか

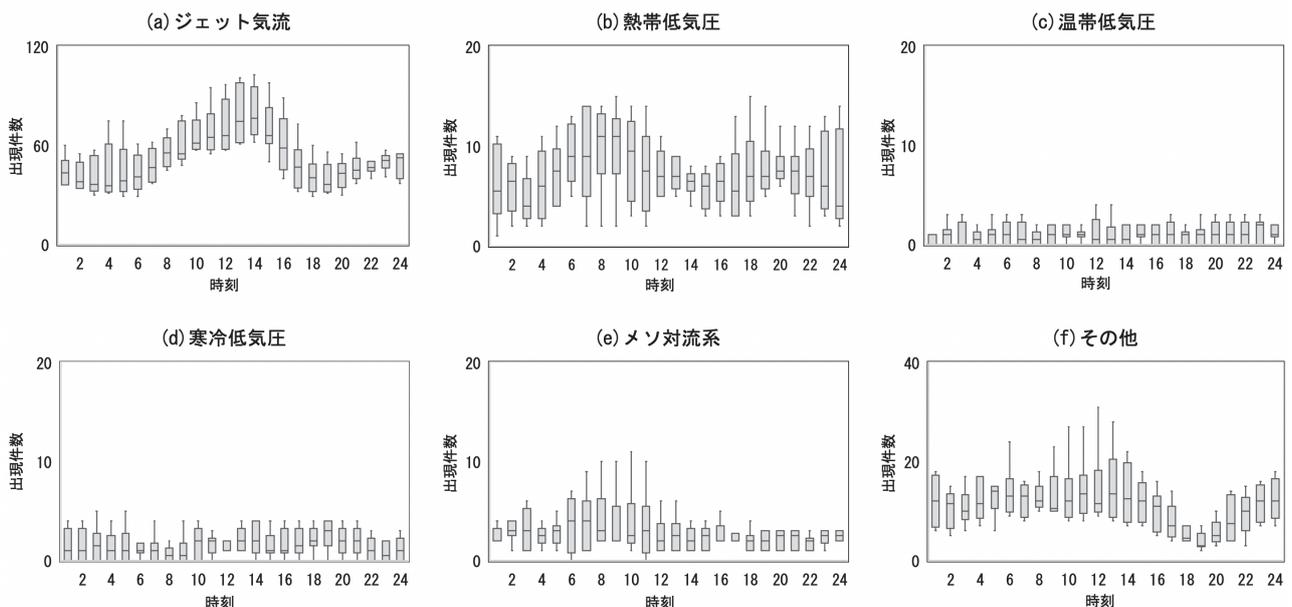


図11 親現象ごとのTVB時間帯出現件数. ひげが最大・最小、箱の中線が中央値を示す。縦軸の範囲は (a) が 0～120, (b)～(e) は 0～20, (f) は 0～40と異なる。時刻は全て日本時間。

ら夕方に発生した対流雲が早朝まで持続し、成熟期から衰弱期にTVBが出現することが多かったためだと報告している。メソ対流系の発生数が多いアメリカに比べ、発生数が少ない日本では同様の傾向は現れなかった。

ジェット気流に伴う事例の特徴である日中と夜の出現件数の差を確かめるために、年間を通しどの領域でも昼間である10～15時と夜間である22～3時のグループに分け（ともに日本時間）、昼間と夜間の出現件数の差の検定を行った。検定には、等分散性が仮定できない場合の2つの分布の平均の差を検定するパラメトリック検定である「ウェルチのt検定」と、2つの分布が異なるかどうかを検定するノンパラメトリック検定である「ラペー

ジ検定」の2種類の方法を用いた。その結果、通年の出現件数で両検定とも有意な差が見られ ($p < 0.01$) (図12)、月ごとでも多くの事例数を含む春を中心に昼間の出現件数が有意に多くなり (図13)、ジェット気流に伴うTVBの出現件数は夜間に比べて昼間が多いことが認められた。また、TVBの発生開始時刻 (TVBの構造が確認できる最初の時刻) の件数で同様の検定を行っても、通年の件数では昼間に発生開始となった事例が有意に多い結果が得られた (図省略)。

TVBの成因は、ケルビン-ヘルムホルツ不安定 (大野・三浦 1982) や、鉛直シアのもとでの静的不安定 (Kim et al. 2014, Trier and Sharman 2016) が挙げられている。日本付近のTVBをラジオゾンデの観測データで解析した Yamazaki and Miura (2021) でも、29事例の全てに静的不安定層が含まれていたことが報告されている。また、これらの研究では雲の放射が静的不安定に影響していることを指摘していた。昼間に出現件数が多くなることは日射の影響が考えられるが、雲の放射の観点からは逆の効果となってしまふ。これらの研究は熱帯低気圧等ジェット気流以外の親現象によるTVBが含まれているため、ジェット気流に伴うTVBの出現件数が日中に多くなる原因を明らかにするためには、今後シミュレーション等で昼頃にジェット気流によって発生した複数のTVBの成因を調査することが必要である。

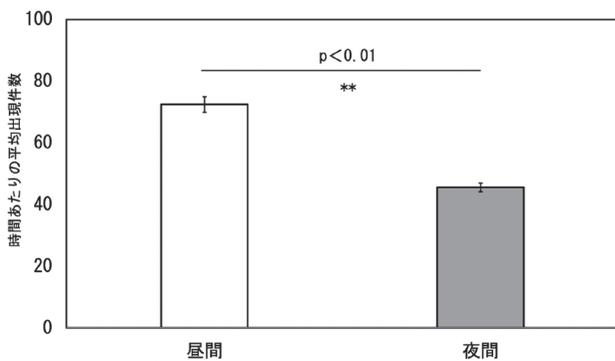


図12 全期間における昼間と夜間の平均出現件数。昼間：10～15時、夜間は22～3時（ともに日本時間）。上部のp値は昼間と夜間の出現件数の差の検定結果、エラーバーは標準誤差を示す。

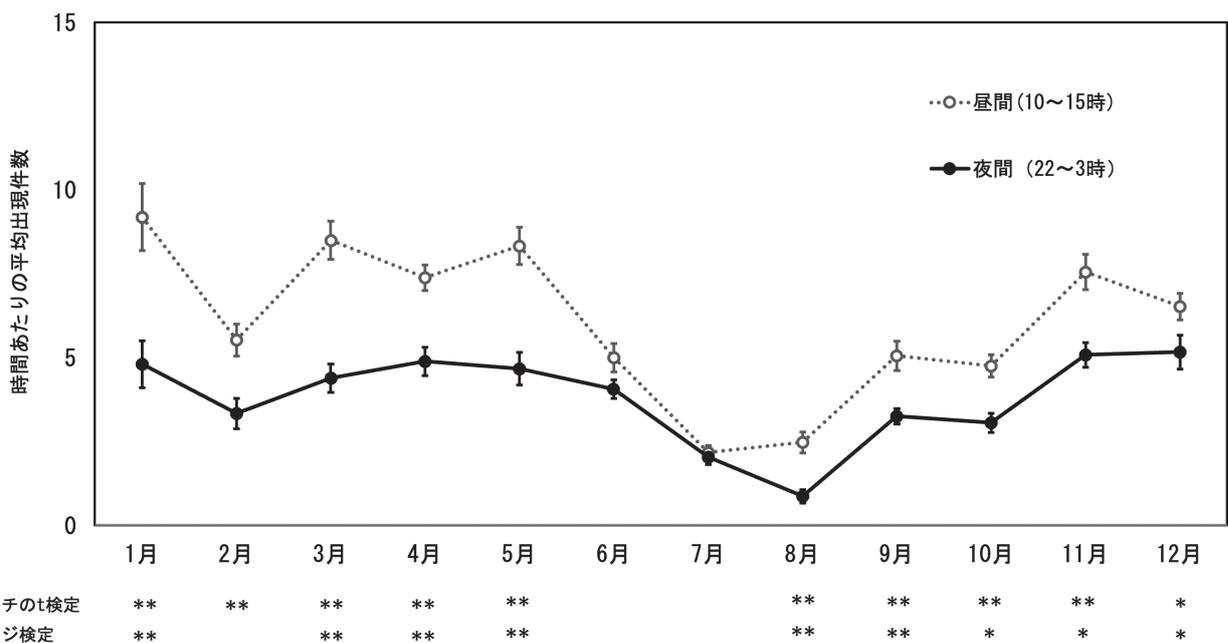


図13 月ごとの昼間と夜間の平均出現件数。昼間と夜間の出現件数の差の検定結果のp値を** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$ で示す。エラーバーは標準誤差。

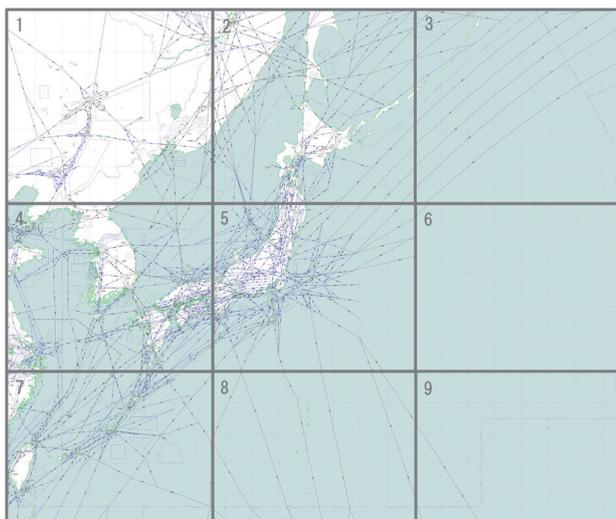


図14 日本付近の航空路。青と黒の細線が航空路、灰色の太線と数字が各領域の範囲と番号を示す。領域6には一日単位で設定される航空路が2～5本があるが、日単位で経路や数が変わるため省略している。Skyvector HP : <https://skyvector.com>の画像を一部加工。

3.4 航空機の運航への影響

今回の対象範囲は、日本が航空交通業務を行う福岡飛行情報区を含み、航空路が設定されている（図14）。主要な航空路が集中している領域4、5を中心に、多くの航空機が行き交っている。3.2より、日本付近で発生するTVBは領域4、5での出現時間数が多く、総出現時間のうち約70%がこの2つの領域で出現していたことから、日本付近を飛行する航空機は、航空路の位置の影響もあってTVBが出現した際には遭遇しやすいと言える。また、3.3より全事例の多数を占めるジェット気流に伴うTVBは、昼間に出現件数が統計的にも有意に多いことがわかった。これらの結果は、日中に便数が多く領域4、5を中心に飛行する国内線が、特にTVBに遭遇する可能性が高いことを示唆している。

TVBは発生を事前に予測することが難しく、気象庁の悪天予想図では衛星画像で出現を確認してから注意を呼びかけている。一般的にエアラインの運航は、出発の1時間ほど前に運航乗務員と運航管理者等がブリーフィングを行い、飛行する経路や高度、それに燃料等を決めている。運航者の観点から、発生してからの対策は効果があるのかTVBの継続時間から考察する。継続時間は、3.3より親現象によらず3時間以下が50%以上で、6時間以下を含めると90%前後であった。最も多い継続時間を知るために、全事例での継続時間を1時間ごとにした事例数とそれらの割合を示したのが図15である。最も事例数が多かったのは3時間で全体の28.5%、次いで2

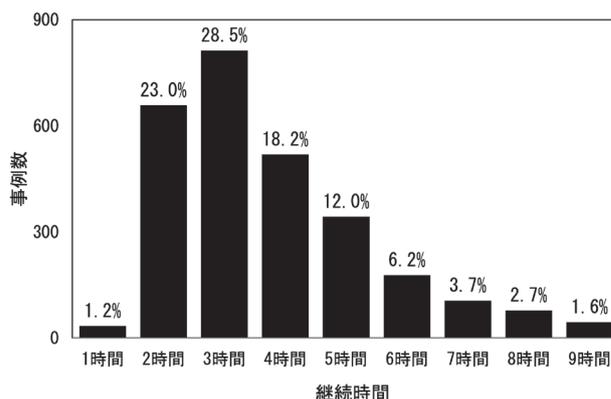


図15 TVB継続時間の事例数と全事例数に対する割合。棒グラフが事例数、上の数字は割合を示す。10時間以上の各時間の事例数は25事例以下で、割合が1%未満のため省略。

時間が23.0%、4時間は18.2%となり、2～4時間継続していた事例数が70%近くを占めていた。国内線は飛行時間が1～2時間程度の便が多いことから、航空機の出発前にTVBを確認し回避等の対処を行うことは、一定の効果があると見込まれる。

4. まとめと結論

- 日本付近で発生するTVBの季節・場所・時間帯等の特徴を把握するために、衛星画像を用いて抽出した事例をもとに様々な側面から調査した。その結果、新たに以下のようなTVBの時空間的出現特性が明らかになった。
- ・主にジェット気流によって発生し、出現頻度や場所はジェット気流の季節変化に依存している
 - ・事例数は春を中心に多く、ジェット気流が弱まり北上する夏に少なくなる
 - ・日本の主要な航空路がある北緯30°～40°、東経120°～150°（領域4、5）での出現が総出現時間の約70%を占めている
 - ・継続時間は3時間前後ものが約70%で、発生から6時間以下で約90%が消滅する
 - ・ジェット気流に伴うTVBは日中の出現件数が有意に多い

今回は、衛星画像から目視によって手動でTVBの事例抽出を行ったため、主観的な検出が含まれる可能性がある。客観的な判別を行うには、Miller et al. (2018)が行った深層学習を用いた検出法を気象衛星ひまわりの画像に応用する必要がある。また、航空機への影響について具体的に評価するためには、TVBと乱気流強度の関係性についての研究が不可欠である。強い乱気流を伴

う TVB が明確になることで、今回の結果を航空機の安全運航に活かすことができるだろう。

謝辞

本研究は、気象庁との共同研究、および千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究（2022）により実施された。本稿の執筆にあたり、気象庁の工藤淳氏、松下泰広氏には有益なコメントを頂いた。また、査読者には丁寧な原稿チェックとご指摘を頂いた。深く感謝する。

参考文献

- Ellrod, G. P., 1985: Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data. *NOAA Technical Memorandum NESDIS*, **10**, 30p.
- Ellrod, G. P., 1989: A decision tree approach to clear air turbulence analysis using Satellite and upper air data, *NOAA Technical Memorandum NESDIS*, **23**, 20p
- Kim, J.-H., H.-Y. Chun, R. D. Sharman, and S. B. Trier, 2014: The role of vertical shear on aviation turbulence within cirrus bands of a simulated western Pacific cyclone. *Monthly Weather Review*, **142**, 2794-2813, doi:10.1175/MWR-D-14-00008.1.
- Knox, J. A., A. S. Bachmeier, W. M. Carter, J. E. Tarantino, L. C. Paulik, E. N. Wilson, G. S. Bechdol, and M. J. Mays, 2010: Transverse cirrus bands in weather systems: A grand tour of an enduring enigma. *Weather*, **65**, 35-41, <https://doi.org/10.1002/wea.417>.
- Lenz, A., K. M. Bedka, W. F. Feltz, and S. A. Ackerman, 2009: Convectively induced transverse band signatures in satellite imagery. *Weather and Forecasting*, **24**, 1362-1373, <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222285.1>.
- Miller, J., U. Nair, R. Ramachandran, and M. Maskey, 2018: Detection of transverse cirrus bands in satellite imagery using deep learning. *Computers & Geosciences*, **118**, 79-85, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.05.012>.
- 大野久雄・三浦信男 1982：圏界面直下におけるケルビンヘルムホルツ波の励起。 *天気*, **29**, 1235-1241.
- Takenaka, H., T. Sakashita, A. Higuchi, and T. Nakajima, 2020: Development of geolocation correction for geostationary satellite observation by phase only correlation method using visible channel. *Remote Sensing*, **12**, 2472, doi:10.3390/rs12152472.
- Trier, S. B., and R. D. Sharman, 2016: Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. *Monthly Weather Review*, **144**, 3003-3027, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0094.1>.
- Yamazaki, K., and H. Miura, 2021: On the formation mechanism of cirrus banding: Radiosonde observations, numerical simulations, and stability analyses. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **78**, 3477-3502, doi:10.1175/JAS-D-20-0356.1

Spatio-temporal characteristics of transverse bands occurrence near Japan using Himawari-8 data

FUJITA Yuka*, WATARAI Yasushi** and MASUDA Kooiti**

* Department of Environment Systems, Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

** Department of Environment Systems, Faculty of Geo-Environmental Science, Rissho University

Abstract :

The seasonal, geographical, and temporal distribution of transverse bands occurrence near Japan was investigated using satellite images for six years. The investigation showed that the transverse bands are mainly generated by the jet stream, and the seasonal and geographical distribution of the occurrence number depends on the position of the jet stream. The number of occurrences tended to be high mainly in spring and low in summer, and the highest frequency areas of transverse bands are concentrated between 30° N and 40° N and between 120° E and 150° E, which includes major airways. The frequency of transverse bands was higher during the daytime, and the difference between daytime and night was statistically significant. These findings suggested that domestic flights are likely to encounter transverse bands.

Key words : Transverse bands, Jet stream, Satellite images, Aviation weather