

雲頂に波状の模様が現れるトランスバースバンドに関連する乱気流の要因

藤田友香* 渡来靖** 工藤淳***

キーワード：トランスバースバンド, 乱気流, 数値シミュレーション

1. はじめに

航空機の運航において、乱気流は安全性と快適性に影響を及ぼす。乱気流の強さは、日本では6段階 (Smooth, Light minus, Light, Light plus, Moderate, Severe) で表現され (運輸安全委員会 2012), Moderate以上の乱気流はキャビンサービスの中止や気分の悪化等に繋がりが、乗客や客室乗務員が怪我をして航空事故になることもある。運輸安全委員会 (2024) によると、過去20年間 (2004~2023年) に国内で発生した大型機の航空事故の件数は67件あり、そのうちの37件 (約55%) は乱気流によって乗客または客室乗務員が重傷を負った事故であった。

乱気流を発生させる気象要因は複数あり、晴天乱気流の主な原因であるケルビン・ヘルムホルツ不安定によって励起される波 (ケルビン・ヘルムホルツ波) (Shapiro 1980, Ellrod and Knapp 1992), 活発な対流雲 (MacPherson and Isaac 1977, Sharman and Trier 2019), 山岳波 (Lilly 1978, Shen and Lin 1999), 中層雲底乱気流 (Kudo 2013, Kudo et al. 2015), トランスバースバンド (以下, TVB) (Ellrod 1985, Knox et al. 2010) 等が挙げられる。

TVBは、流れに対して垂直方向に伸びる複数の帯状雲のことで (NOAA 2009), ジェット気流や熱帯低気圧等の数種類の現象に伴って発生し (Knox et al. 2010), ジェット機の巡航高度にあたる対流圏上部で発生する場合は、多くの航空機が影響を受ける。日本付近で発生するTVBに伴う乱気流の割合を調べたFujita et al. (2024) では、TVBの95%以上が乱気流を伴い、雲頂に図1のような波状の模様が現れるTVBでは、模様のないTVBに比べてModerateの割合が有意に高いことに加え、TVBから上下4,000 ft (約1.2 km) の範囲でもModerateが観測されたことが示された。この模様は、気象庁の予報官

が「浪雲」と呼んでいることから、本研究でも同様の名称を用いる。気象衛星センター (2002) では、巻雲でしばしば観測される非地理的な波状の模様を浪雲と呼び、乱気流が発生しやすいとしている。しかし、気象衛星センター (2002) で示す浪雲は、TVBに伴ったものではなく、より短命かつ模様の並ぶ向きが流れに対して平行 (TVBの浪雲は流れに対して直交) であることから、形は類似していてもTVBの浪雲とは異なる。TVBの浪雲は、気象衛星ひまわり8号が可視赤外放射計を搭載して高解像度化した2015年以降、頻繁に観測されるようになった。

TVBに関連した乱気流のメカニズムについてTrier and Sharman (2016) では、ケルビン・ヘルムホルツ不安定と鉛直シアのもとでの静的不安定を指摘しており、雲列上に再現された浪雲に似た構造がケルビン・ヘルムホルツ波に似ていると報告している。この研究は、浪雲に特化して行ったシミュレーションではないため、浪雲を伴う場合に乱気流強度が高くなる原因や浪雲の成因については示されていない。また、雲近傍での乱気流のメカニズムは、対流雲に起因する重力波やその碎破 (Lane et al. 2012, Zovko-Rajak and Lane 2014), 中層雲の雲

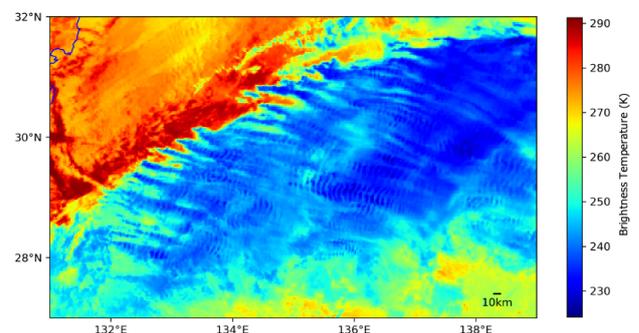


図1 浪雲があるTVBの例。ほぼ東西に伸びるTVB雲列の上部に現れる波状の模様を波雲と呼ぶ。(ひまわり8号による10.4 μm赤外画像)

* 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

*** 気象庁

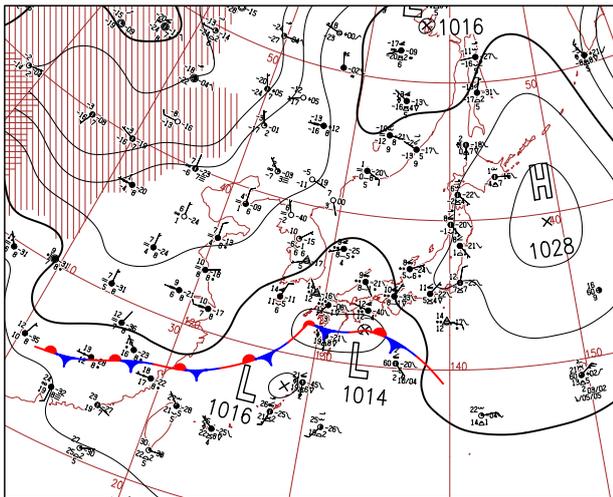


図2 2015年12月23日15:00 JSTの地上天気図。
(気象庁の図を一部加工)

底下での固体降水の昇華冷却に伴うベナール対流 (Kudo 2013, Kudo et al. 2015) 等が知られているが、TVBの近傍に対しては十分理解されていない。浪雲がどのように発生し、乱気流に寄与しているのかを明らかにすることは、乱気流予想の精度向上に繋がる。

本研究では、安全運航に貢献することを目的に、Moderate以上の乱気流が多数報告された浪雲を伴うTVB事例の環境場を数値シミュレーションで再現し、浪雲出現時にTVBとその周辺で乱気流強度が高くなる要因と浪雲構造の成因について解析を行う。

2. 対象事例

気象衛星ひまわりの赤外画像でも浪雲が明瞭かつ複数の乱気流報告があった2015年12月23日のTVBを対象とした。この日は、前線を伴った低気圧の影響で、東・西日本では広く雨となった(図2)。対象のTVBは降水を伴った対流雲で、12:00~16:00 JST頃に対馬海峡付近から山陰で明瞭になり(図3)、16:00 JST頃には北陸へ到達した。雲頂は、はじめは20,000 ft (約6.1 km) 程度で、時間とともに徐々に高くなり15:00 JST頃には25,000 ft (約7.6 km) 前後に達した。雲底は4,000 ft (約1.2 km) と厚みがあり、TVBの波長は55 km前後、浪雲の波長は9 km前後であった。

乱気流報告は、パイロットレポート (PIREP) を使用した。PIREPには、時刻、位置、高度、乱気流の強さ、空の状態等の情報が含まれている。PIREPには、時間や位置の不確実性(水平方向で50 km、垂直方向で70 m、時間では200秒)があるが(Sharman et al. 2006)、TVB

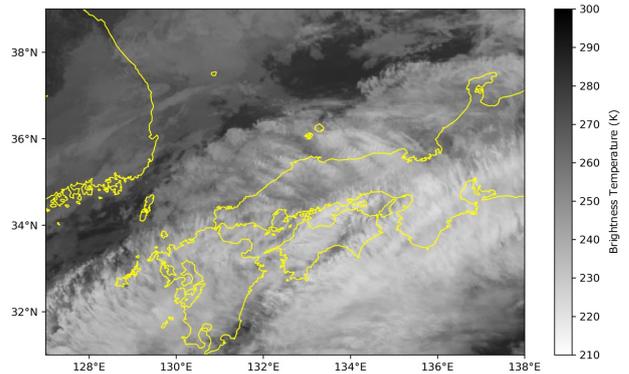


図3 2015年12月23日14:00 JSTのひまわり8号による10.4 μm 赤外画像。

の時空間スケールよりはるかに小さいため、不確実性の影響は考慮しない。TVBに伴うModerate以上の乱気流報告を同時帯の衛星画像にプロットしたものを図4に示す。Moderate以上の乱気流は、歩行やキャビンサービスが困難または不可になるため、シートベルト着用サインを点灯したり、高度や経路を変更したりと運航に影響が出る。乱気流報告は、毎正時の衛星画像ひまわり赤外画像(バンド13)からTVBの範囲を特定し、同時刻の前後30分(1時間)にTVB範囲内で報告されたものをプロットしている。乱気流報告は、はじめFL200(約6.1 km)以下で雲中の報告が多かった(「FL: フライトレベル」は航空で用いられる飛行高度のひとつで、国際標準大気における高度を100 ft単位の数値で表記したもの)。雲頂が高くなった頃からは、FL250(約7.6 km)前後の雲中の報告が増え、(空の状態は不明だが)雲頂よりも高いと見られるFL300(約9.1 km)前後の報告が多数あった。このうちSevereの報告は13:00 JSTの上昇中FL150~200(約4.6~6.1 km)間と16:00 JSTのFL320(約9.8 km)の2件だった。ともに空の状態は「不明」なものの、上昇中FL150~200はTVBの雲中、FL320の報告は雲頂から数千ft上の雲外であると推測される。

3. モデルの概要

シミュレーションには領域気象モデルWeather Research and Forecasting (以下、WRF) (Skamarock et al. 2019) を使用した。WRFは完全圧縮の非静力学モデルで、基本方程式は、運動方程式、連続の式、状態方程式、熱の保存式、混合比の保存式等である。本研究ではVersion 4.6.0を利用し、計算期間はTVBの発生時間を含む2015年12月22日0:00 JST~12月23日21:00 JSTの45時間とした。

図5に計算領域、表1に計算条件を示す。親領域の

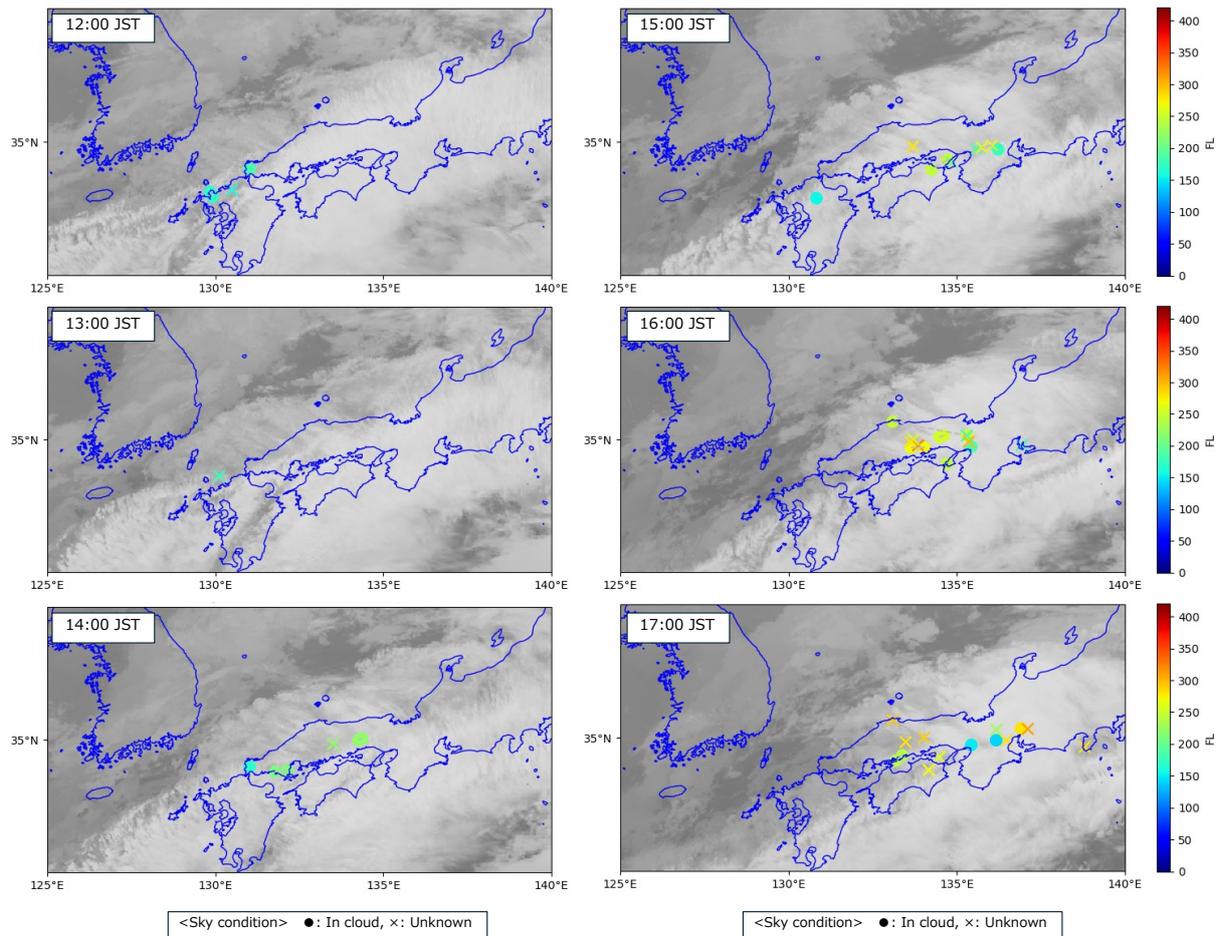


図4 TVBに伴う Moderate 以上の乱気流報告 (12:00~17:00 JST). 空の状態はマーク, 高度は色で表示 (点線で繋がっているものは区間を示す).

Domain1は西日本を中心とした約2160 km × 1620 kmの範囲, 子領域のDomain2とDomain3ではTVBが入る領域とし, 3段階のネスティング計算をした. 計算格子を9 km, 3 km, 1 kmと変化させてダウンスケーリング解析を行った. 鉛直層は, 地表から100 hPaまで82層で高度が上がるほど鉛直格子間隔が大きくなり, 約2 kmより上では230 m前後となる. 積雲対流過程はDomain1のみKain-Fritsch (Kain 2004) を使用した. そのほか, 雲微物理過程はWRF Single-moment 6-classスキーム (Hong and Lim 2006), 境界層過程は Mellor-Yamada-Janjicスキーム (Janjic 1994, Mesinger 1993), 大気放射過程は長波放射でRRTM スキーム (Mlawer et al. 1997), 短波放射はDudhiaスキーム (Dudhia 1989), 地表面過程はNoah Land-Surface Model (Tewari et al. 2004) を全ての領域で用いた.

初期値と境界値には, 気象庁メソ数値予報モデルの初期値を用いたが, 土壌水分量と地温, および表面温度については米国環境予測センター (National Centers Environmental Prediction) 全球予報モデル (Global Forecast

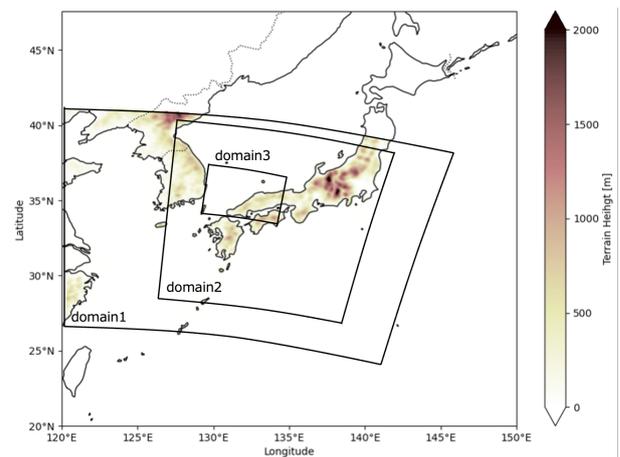


図5 計算領域. 一番外側が気象庁メソ数値予報モデルの範囲を示す.

System) の解析値を使用した. 標高データはGlobal Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 : GMTED 2010 (Danielson and Gesch 2011), 土地利用データはMODIS IGBP 21-category data (Strahler et al. 1999) を用いた.

表1 計算条件.

計算領域	Domain1	Domain2	Domain3
水平解像度	9 km	3 km	1 km
水平格子数	240×180	409×436	457×310
鉛直層数		82層	
タイムステップ	54s	18s	6s
積雲対流過程	Kain-Fritsch	None	
雲微物理過程	WRF Single-moment 6-class		
境界層過程	Mellor-Yamada-Janjic		
大気放射過程	長波：RRTM, 短波：Dudhia		
地表面過程	Noah		

4. 結果

4.1 計算結果の再現性

図6にDomain2の計算結果（輝度温度）と同時刻における赤外画像を示す。TVBは出現時間・位置とも比較的よく再現できており、雲頂高度と雲底高度、波長は概ね一致した。

浪雲は、Domain3で構造が確認できた（図7）。Domain3では、TVBの雲列の向きが少しずれて波長がやや短くなっているものの、浪雲の波長は実況とほぼ同じだった。浪雲の再現には、少なくとも1 km程度の解像度が必要だといえる。Trier and Sharman (2016)でも、解像度が1 kmで浪雲に似たような構造を持つTVBが再現できたことが示され、今回の結果と一致する。

4.2 TVBの発生環境 (Domain2)

TVB構造が形成される前後の時間の鉛直断面図を図8に示す。TVB構造が明瞭になる前（図8上）は、高度5～6 km付近で等温位線の間隔が広く安定度が低い一方で、その上下は等温位線の間隔が狭く安定度が比較的高い状況となっていた。TVB構造が明瞭になると（図8下）、風下のB'側ほど雲列が発達し、等温位線の形状から雲列内で渦が生じていたことがわかる。TVBに関連した乱気流のメカニズムとして、Trier and Sharman (2016)は、ケルビン・ヘルムホルツ不安定と鉛直シアのもとでの静的不安定の両方を指摘している。これらの不安定性の影響を評価するため、大気の静的安定度と鉛直シアの比であるリチャードソン数 Ri を(1)式より求めた。

$$Ri = \frac{g \frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

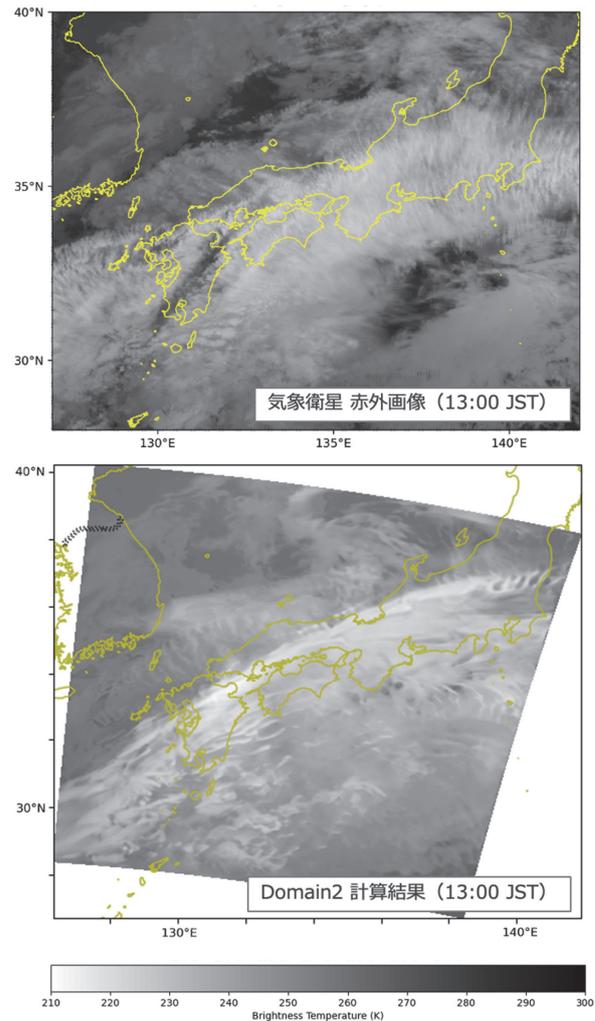


図6 Domain2の計算結果（輝度温度）とひまわり8号の赤外画像（13:00 JST）。（上：衛星画像、下：計算結果）

ここで、 g は重力加速度、 θ は温位、 z は高度、 V は水平風ベクトルである。リチャードソン数は、正の値で0.25を下回るとケルビン・ヘルムホルツ不安定の条件となり、静的不安定な場合は符号が負となることから、どちらの不安定の影響を受けているかを判断する目安となる。計算結果のリチャードソン数の分布は、雲頂付近で正の値で0.25未満の領域が見られ、特にTVB構造が現れてからはその傾向が明瞭だった。鉛直流は、雲列に対応して雲中に0.6 m/s前後の上昇流が存在していた。また、雲列の雲頂からは、内部重力波の鉛直伝播による上昇流と下降流が見られた。伝播による鉛直流は、雲頂から2 km前後までの範囲が比較的大きく、乱気流報告があった範囲と一致する。

図8と同時刻・同断面における鉛直シアを図9に示す。TVB構造が明瞭になる前は、低安定度の層の上下の安定層にあたる4 kmと6 km付近で14 kt/1000 ft前後の鉛直シアの大きい領域が広がっていた。この領域は、TVB

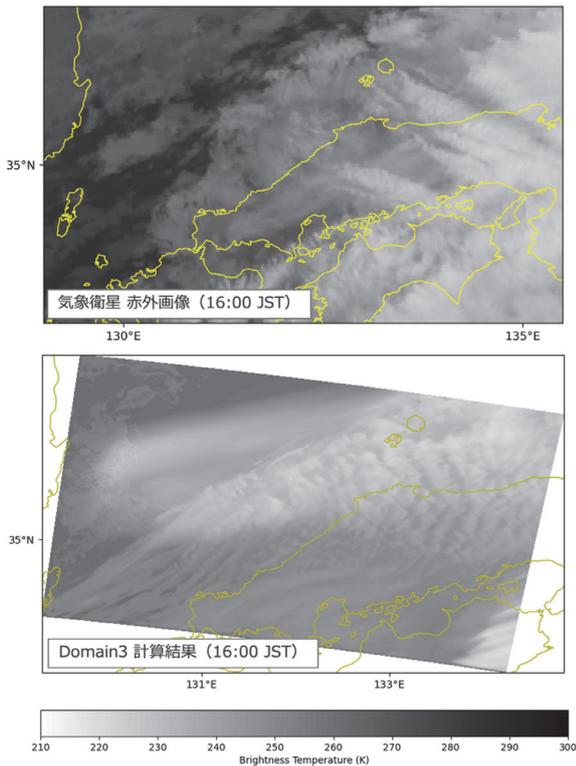


図7 Domain3の計算結果（輝度温度）とひまわり8号の赤外画像（16:00 JST）.（上：衛星画像，下：計算結果）

構造が明瞭になると雲列の山と谷にあたる部分に集中し、局地的には20 kt/1000 ft程度まで強まった。鉛直シアが強い領域とリチャードソン数0.25未満の領域は概ね一致し、TVB周辺でのリチャードソン数の低下には、鉛直シアの寄与が大きいことを示す。環境場の特徴から、雲頂付近でケルビン・ヘルムホルツ波が発生していた可能性が高い。

4.3 浪雲の発生環境 (Domain3)

図10に同一の帯状雲を時間ごとに追った鉛直断面図を示す。リチャードソン数0.25以下の領域は、浪雲が明瞭になるにつれ雲頂に沿うように広がっていた。これは、図8下のTVBの雲列の雲頂にあった同様の領域が雲頂全体に存在していたことを表す。雲列が明瞭になる前から5~8kmの雲頂付近では等温位線が大きく波打っていて波が横に流れるような形になり、そのような部分では局地的にリチャードソン数が負になっていた。これは、ケルビン・ヘルムホルツ波の碎破と乱流の発生を示唆する。鉛直流に注目すると、安定度の低い高度帯では全体的に上昇流域となっていて、浪雲構造が明瞭になる時間帯には全体的に強まり、上昇流が2m/sに達する所もあった。また、雲頂から上方への内部重力波の伝播による鉛直流変動は、TVBの帯状雲が明瞭になる前から見

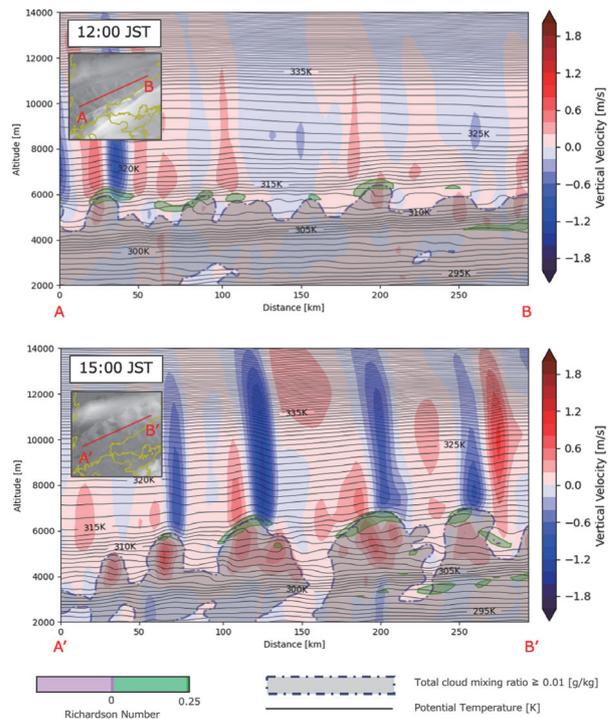


図8 TVBの鉛直断面図（温位・鉛直流・リチャードソン数・混合比）.（上：12:00 JST，下：15:00 JST）

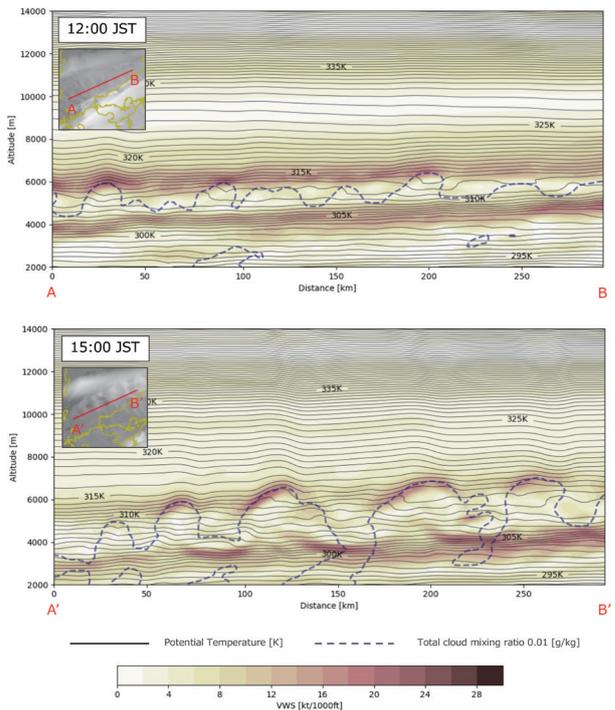


図9 TVBの鉛直断面図（温位・混合比・鉛直シア）.（上：12:00 JST，下：15:00 JST）

られ、浪雲が形成されるとさらに強まり、雲頂から約1.5 kmにかけては2 m/s前後の所が多かった。重力波の波長と浪雲の山と谷の位置が対応していたことから、浪雲は内部重力波の振幅の大きさ（鉛直流の強さ）と関連している可能性がある。

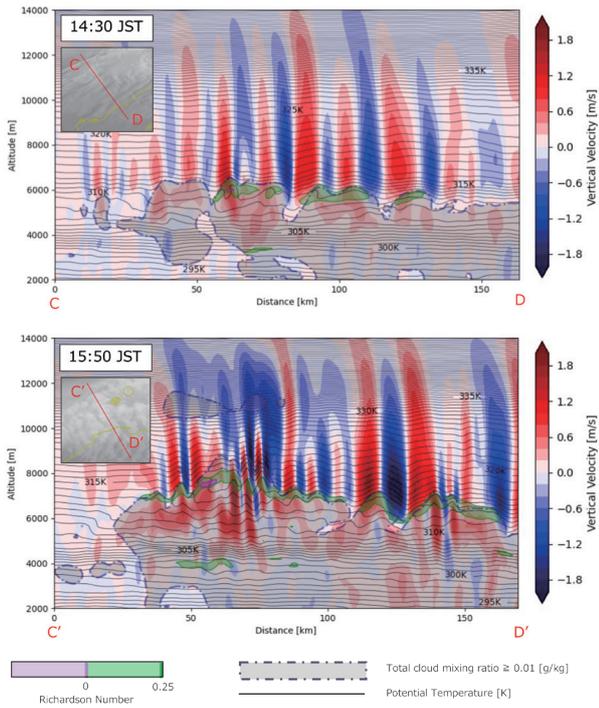


図10 浪雲を伴う雲列の鉛直断面図（温位・鉛直流・リチャードソン数・混合比）。（上：14:30 JST，下：15:50 JST）

図10と同時刻・同断面の鉛直シア（図11）は、浪雲が出現する前は雲列の雲頂付近の高度4 kmと6 km付近で12 kt/1000 ft前後と強く、浪雲構造が明瞭になると同高度の鉛直シアは局地的に20 kt/1000 ftを超えた。この鉛直シアの強い領域は、リチャードソン数0.25未満のエリアと対応していた。浪雲がある雲列では、ケルビン・ヘルムホルツ波の碎破と、それに起因する内部重力波の鉛直伝播が明瞭で、これらが乱気流と関連している可能性が高い。

5. 議論

5.1 TVBや浪雲に伴う乱気流の要因

シミュレーションの結果、TVBの形成に伴って強まる鉛直流で雲頂付近の鉛直シアが強まり、ケルビン・ヘルムホルツ波が発生しやすい状況になっていたことがわかった。浪雲が明瞭になると雲中の鉛直流が強まり、ケルビン・ヘルムホルツ波の碎破と乱流が発生していたと見られ、これが浪雲ありのTVBで強度の高い乱気流が観測される要因のひとつだと推測される。

また、TVBの雲頂から上方へ内部重力波が伝播する様子が確認でき、この内部重力波は環境場からケルビン・ヘルムホルツ波によって励起されたものだと見られる。この内部重力波の伝播に伴う鉛直流は、浪雲が現れ

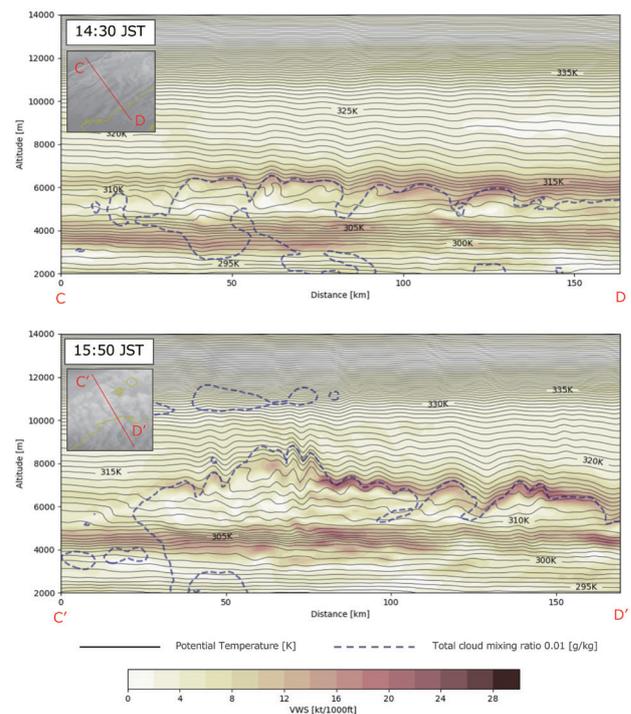


図11 浪雲を伴う雲列の鉛直断面図（温位・混合比・鉛直シア）。（上：14:30 JST，下：15:50 JST）

ると顕著に強まっていた。今回の結果には現れていないが、TVB構造の雲の下にも内部重力波が伝わることもあり（Trier et al. 2010, Trier and Sharman 2016）、内部重力波の鉛直伝播がTVB周辺での乱気流に関与している可能性が高い。しかし、乱気流を引き起こす乱流の水平スケールは0.1~2 kmとされ（Lane et al. 2012）、浪雲の波長よりも小さい。Lane and Kniewel（2005）は、シミュレーションでは、鉛直伝播する重力波の碎破が水平解像度に強く依存していること、解像度1 kmでは発生した重力波の水平波長を過大評価したことについて指摘している。今回の結果では表現できていないだけで、乱気流をもたらすスケールの内部重力波等が存在している可能性は十分あり、それらがTVBの周辺での乱気流の成因の一つと考えられる。この乱気流の発生メカニズムは、活発な対流雲の近傍での乱気流（Kim et al. 2018）と似ており、今回のTVBが降水を伴った対流雲で構成されていたことが関連している可能性がある。

5.2 浪雲の模様の成因

今回の結果では、浪雲を伴う帯状雲内でケルビン・ヘルムホルツ波が碎破していたことから、浪雲の模様を構成する直接の成因がケルビン・ヘルムホルツ波ではないことが推測される。浪雲構造が明瞭な場合は、上方伝播した内部重力波による鉛直流が徐々に強まっていたこと、

内部重力波の鉛直流変動と浪雲の波長が概ね一致していたことから、内部重力波が浪雲の形成に関与している可能性が考えられる。Trier and Sharman (2016) では、浪雲に似た構造を持つTVBの雲列がケルビン・ヘルムホルツ不安定に関連している可能を指摘している。今回の結果からは成因の特定までは難しいが、内部重力波がケルビン・ヘルムホルツ波に起因していることから、関連するという点では一致する。

6. 結論

浪雲を伴うTVBをシミュレーションで再現した結果、TVBを構成時に発生する雲中での鉛直流やケルビン・ヘルムホルツ波の碎破、内部重力波の鉛直伝播がTVBに関連する乱気流の成因である可能性が示唆された。これらは、浪雲が現れると強まったり、顕著になったりすることから、浪雲を伴うTVBやその周辺で強度の高い乱気流に遭遇しやすいことを説明すると考えられる。また、浪雲の様子は、雲頂付近で発生するケルビン・ヘルムホルツ波が直接の成因ではなく、ケルビン・ヘルムホルツ波に起因した内部重力波との関連が示唆された。これらの結果は、浪雲が乱気流の指標となることを裏付ける可能性がある。今回は対流雲に伴うTVBが対象であったため、対流雲に関連する状況と類似していた。今後は、ジェット気流等のその他の要因で発生するTVBでも同様の状況であるのかを確かめる必要がある。

浪雲の構造が解像度1 kmで再現できたということは、数値予報モデルが高解像度化すれば、浪雲も事前に予測することが可能になる。しかし、今回の結果からは、浪雲を伴うTVBに関連する乱気流や浪雲構造の直接的な成因を特定することはできず、乱気流のメカニズムについての理解は十分とは言えない。対流雲中の上昇気流やそれに起因する重力波の表現が解像度に依存すること(Lane and Knievel 2005)、ケルビン・ヘルムホルツ波の碎破による変動を伴う乱流渦は解像度35 mのシミュレーションで再現ができたこと(Yoshimura et al. 2023)から、乱気流や浪雲の発生メカニズムを解明するためには、数十 mの解像度でのシミュレーションが必要だろう。

謝辞

本研究は、気象庁との共同研究で実施した。PIREPデータは、日本航空株式会社の許可を得て使用した。衛星画像のデータは、千葉大学環境リモートセンシング研究センター(CEReS)のひまわり8号グリッドデータ

を利用した。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

- Danielson, J. J., and D. B. Gesch, 2011: Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073, 26pp.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107.
- Ellrod, G. P., 1985: Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data. NOAA Tech. Memo. NESDIS 10, 30pp.
- Ellrod, G. P., and D. L. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Wea. Forecasting*, 7, 150-165.
- Fujita, Y., Y. Watarai, and A. Kudo, 2024: Levels of turbulence intensity associated with transverse bands in the upper troposphere near Japan: Comparison with and without wave-like patterns on cloud tops. *SOLA*, 20, 306-312.
- Hong, S.-Y., and J. O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-Class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteorol. Soc.*, 42(2), 129-151.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Weather Rev.* 122, 927-945.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.* 43, 170-181.
- Kim, J. H., R. Sharman, M. Strahan, J. W. Scheck, C. Bartholomew, J. C. H. Cheung, P. Buchanan, and N. Gait, 2018: Improvements in nonconvective aviation turbulence prediction for the World Area Forecast System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, 2295-2311, doi:10.1175/BAMS-D-17-0117.1.
- 気象衛星センター, 2002: 気象衛星画像の解析と利用 - 航空気象編 -, 気象衛星センター, 223pp.
- 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, doi:10.1002/wea.417.
- Kudo, A., 2013: The generation of turbulence below midlevel cloud bases: The effect of cooling due to sublimation of snow. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 819-833, doi:10.1175/JAMC-D-12-0232.1.
- Kudo, A., H. Luce, H. Hashiguchi, and R. Wilson, 2015: Convective Instability Underneath Midlevel Clouds: Comparisons between Numerical Simulations and VHF Radar Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54, 2217-2227, doi:10.1175/JAMC-D-15-0101.1.

- Lane, T. P., and J. C. Knievel, 2005: Some effects of model resolution on simulated gravity waves generated by deep, meso- scale convection. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3408-3419, doi:10.1175/JAS3513.1.
- Lane, T. P., R. D. Sharman, S. B. Trier, R. G. Fovell, and J. K. Williams, 2012: Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 499-515, doi:10.1175/BAMS-D-11-00062.1.
- Lilly, D. K., 1978: A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave. *J. Atmos. Sci.*, 35, 59-77.
- MacPherson, J. I. and G. A. Isaac, 1977: Turbulent characteristics of some Canadian cumulus clouds. *J. Appl. Meteor.*, 16, 81-90.
- Mesinger, F., 1993: Forecasting upper tropospheric turbulence within the framework of the Mellor-Yamada 2.5 closure. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 18, 4.28-4.29.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long- wave. *J. Geophys. Res.*, 102(D14), 16663-16682.
- NOAA, 2009: National Weather Service Glossary. (Available online at: <https://w1.weather.gov/glossary/index.php?letter=t>, accessed 1 April 2024).
- Shapiro, M. A., 1980: Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 37, 994-1004.
- Sharman, R. D., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, 21, 268-287, doi:10.1175/WAF924.1.
- Sharman, R. D., and S. B. Trier, 2019: Influences of gravity waves on convectively induced turbulence (CIT) : A review. *Pure Appl. Geophys.*, 176, 1923-1958, doi:10.1007/s00024-018-1849-2.
- Shen, B. and Y. Lin, 1999: Effects of critical levels on two-dimensional back-sheared flow over an isolated mountain ridge on an f plane. *J. Atmos. Sci.*, 56(18), 3286-3302.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2019: A description of the advanced research WRF version 4. NCAR Tech. Note., 128pp. doi:10.5065/1dfh-6p97.
- Strahler, A., D. Muchoney , J. Borak, M. Friedl, S. Gopal, E. Lambin, and A. Moody, 1999: MODIS Land Cover Product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 5.0, Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University Boston, MA, USA, (Available online at: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf, accessed 12 November 2024).
- Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca., 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *Proceedings of the 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, Seattle, WA, USA, 10-15 January 2004.
- Trier, S. B., R. D. Sharman, R. G. Fovell, and R. G. Frehlich, 2010: Numerical simulation of radial cloud bands within the upper-level outflow of an observed mesoscale convective system. *J. Atmos. Sci.*, 67, 2990-2999, doi:10.1175/2010JAS3531.1.
- Trier, S. B., and R. D. Sharman, 2016: Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 3003-3027, doi:10.1175/MWR-D-16-0094.1.
- 運輸安全委員会, 2012 : 航空事故調査報告書, AA2012-5-4, <https://jtsb.mlit.go.jp/aircraft/rep-acci/AA2012-5-4-JA8569.pdf> (2023年10月24日最終閲覧).
- 運輸安全委員会, 2024 : ~飛行中の突然の揺れに備えて~ 機体動揺による事故の防止に向けて, 運輸安全委員会ダイジェスト, 44, 24pp.
- Yoshimura, R., J. Ito, J., P. A. Schittenhelm, K. Suzuki, A. Yakeno, and S. Obayashi, 2023: Clear air turbulence resolved by numerical weather prediction model validated by onboard and virtual flight data. *Geophys. Res. Lett.*, 50(12), e2022GL101286. doi:10.1029/2022GL101286
- Zovko-Rajak, D., and T. P. Lane, 2014: The generation of near- cloud turbulence in idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2430-2451, doi:10.1175/JAS-D-13-0346.1.

On the Factors of Turbulence Related to the Transverse Bands with Wave-Like Patterns on Cloud Tops

FUJITA Yuka*, WATARAI Yasushi**, and KUDO Atsushi***

* Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

** Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

*** Japan Meteorological Agency

Abstract :

Such turbulence that affects aircraft operations frequently occurs in and around the transverse bands (TVBs). The occurrence rate of turbulence is significantly higher in the TVBs with wave-like patterns on cloud tops (WPC) than without WPC. Using numerical simulations, we investigated the causes of the turbulence associated with TVBs with WPC and the causes of the formation of WPC.

Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, we conducted numerical simulations of the TVB with WPC that occurred on December 23, 2015. The simulation suggests that the turbulence is caused by the vertical wind in TVB clouds, the breaking of Kelvin-Helmholtz billows, and the vertical propagation of internal gravity waves generated during the formation of TVBs. These are enhanced when WPC appears, explaining the strong turbulence in TVBs with WPC. In addition, it has been suggested that WPC is related to internal gravity waves caused by Kelvin-Helmholtz waves that occur near the cloud tops.

Key words : Transverse bands, Turbulence, Numerical Simulation

