

【受賞解説】

「2021年3月2日に新千歳空港のドップラーレーダーで観測された 低層内部重力波の解析」等の北海道内の気象に関する事例解析

—日本気象学会北海道支部 2024 年度「北海道支部賞」受賞—

気象庁 帯広測候所 中村 誠吾

1. はじめに

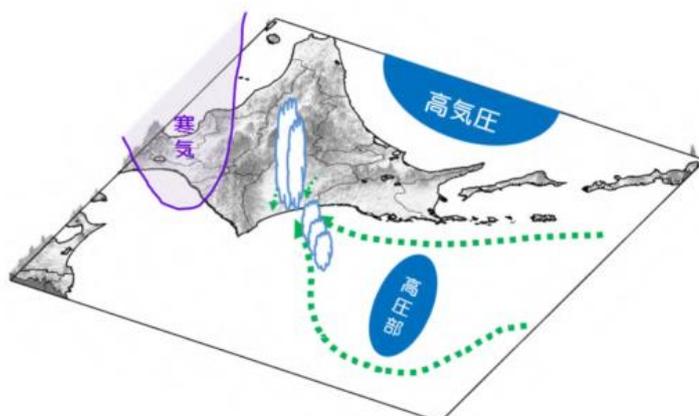
この度は日本気象学会北海道支部より「北海道支部賞」をいただきまして、大変嬉しく、同時に身の引き締まる思いであります。受賞のメールをいただいた際は非常に驚きました。これまで、主に予報業務に従事しながら北海道内の気象に関する調査研究を進めて参りました。自分の思いどおりに研究を進められたことは一度もなく、苦しい思いをすることが多くありましたが、職場の方からのご指導、サポート、妻が美味しいご飯を作ってくれたおかげで、気象に対しての好奇心を忘れることなく研究を進めることができました。私に関わっていただいたすべての皆様に感謝申し上げます。ありがとうございます。

私は大学 4 年生のとき山形大学理学部で越境大気汚染の研究室に所属しており、中国から輸送されるエアロゾルの経年変化や季節変化に関する卒業研究を行いました。元々気象学には興味がありましたが、大気汚染の研究を通じて、背景にある大気の運動にさらに強い興味をもちました。そこで、他大学院の受験を決意し、北海道大学大学院に入学しました。北大では地域気候システム研究室に所属し、佐藤友徳先生にご指導いただきました。修士論文では WRF を用いて、冬季の日本海における低気圧活動と SST の関係を研究しました。この研究を通じて、一から大気力学や気象学、プログラミングを勉強し、同期の仲間の知識量に圧倒されつつ、佐藤先生をはじめ、多くの先生方にご指導いただき、また研究に対する姿勢を学びました。この修士課程の 2 年間で佐藤先生や同期の仲間に出会えたことは、私にとって大きな財産となりました。研究を進める上で苦しいこともありましたが、ますます気象学が好きになり、この 2 年間で気象庁入庁後、調査研究を続ける土台となりました。以下に私が入庁後に行った調査研究の内容をご紹介します。

2. 十勝地方の大雨や強風に関する研究

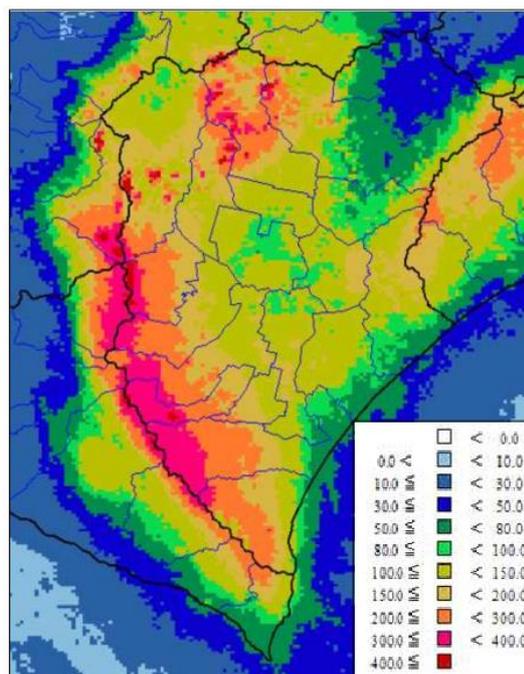
2014 年 9 月に十勝地方沿岸部で発生した大雨では、大樹町や豊頃町で土砂災害や通行止めなどの被害が発生しました。2015 年に入庁した際、大先輩の寺尾建哉さんにお声がけいただき、この大雨事例の研究に取り組みました（寺尾ほか、2015）。高渦位域に伴う上空の寒冷化や下層暖湿気の流入、風の収束等の外部強制の有無を調査し、大雨に至った要因を明らかにしました（第 1 図）。この研究を進める上で寺尾さんから多くの事を学ぶことができ

大変勉強になった気象庁1年目でした。



第1図 寺尾ほか(2015)の第16図より。2014年9月8日から9日にかけて豊頃町・大樹町沿岸部で発生した大雨の要因をまとめた概念図。

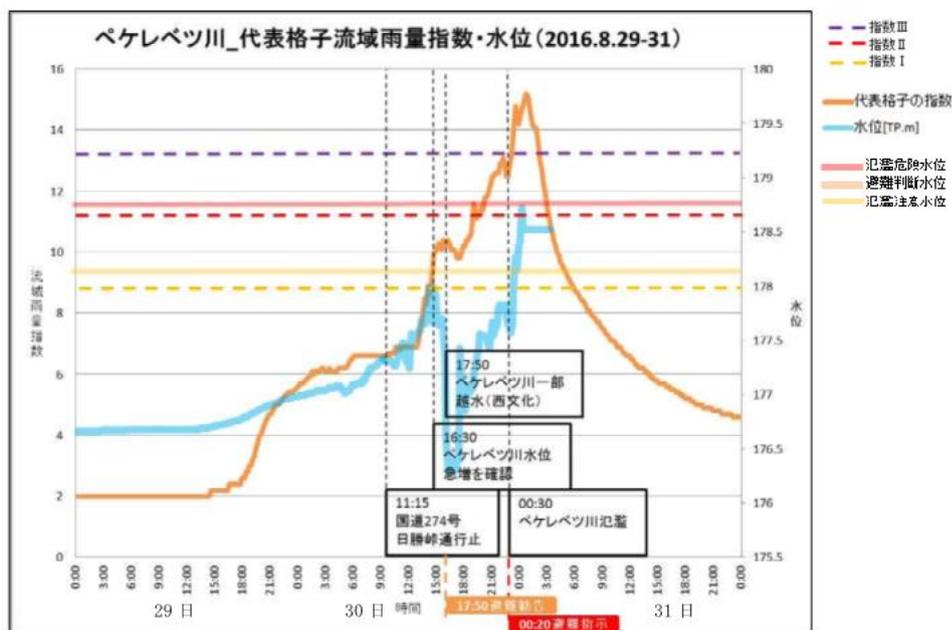
2016年の8月29日から31日にかけて、日高山脈沿いや東大雪方面において72時間で300mmを超える雨量を解析し、昭和56年水害に匹敵する記録的な大雨となりました(第2図)。この大雨の影響で清水町のペケレベツ川が氾濫し多数の床下・床上浸水など甚大な被害がでました。私も2017年に実際に清水町に行き、被害の状況を目の当たりにし衝撃を受けました。この大雨災害の原因について、気象学的な要因だけではなく、現在気象庁で洪水警報や注意報の発表に用いている流域雨量指数と河川の水位の動向を調査しました(中村ほか, 2017)。その結果、被害が大きかったペケレベツ川等、複数の河川で流域雨量指数と河川水位の変化が概ね対応していたこと(第3図)や、台風近傍の降水の影響のみならず1日以上もの間、上流の日高山脈沿いで降水が続いたことが洪水害に大きく影響していたことが分かりました。



第2図 中村ほか(2017)の第2図より。2016年8月29日0時から9月1日0時までの72時間積算解析雨量(mm)。

十勝地方の強風に関しては、JRA-25を初期値・境界値としてJMA-NHM(気象庁非静力学モデル)を用いたダウンスケーリングにより、十勝地方の強風事例の再現実験を行い、強風域の分布(基本パターン)を求めました(中村, 2016)。当時、中山ほか(2010)を皮切りに、北海道の各府県単位で風の基本パターンを作成する試みがあり、十勝地方の強風分布の作

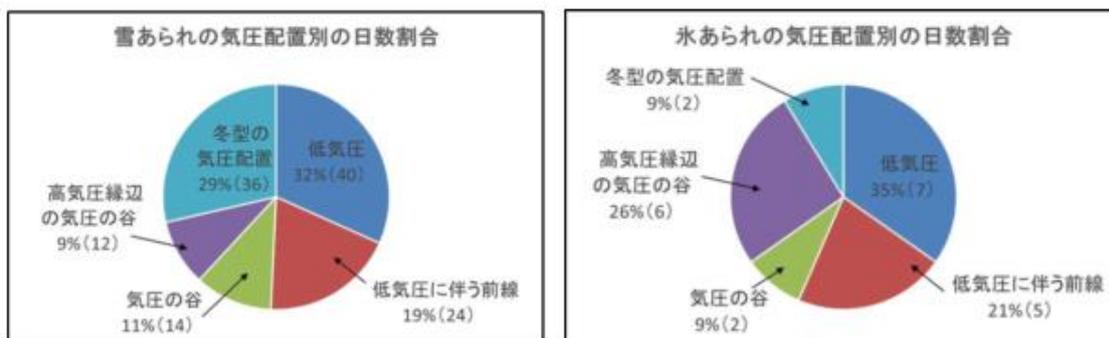
成をもって、全道分が完了しました。



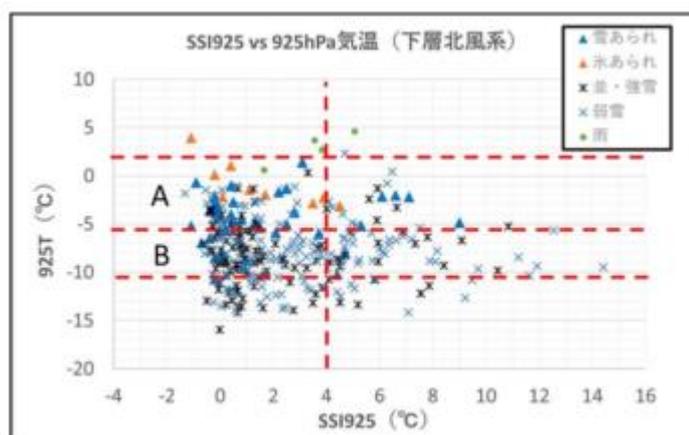
第 3 図 中村ほか (2017) の第 13 図より。清水町ペケレベツ川の 2016 年 8 月 29 日から 31 日までの水位 (TP. m) と代表格子の流域雨量指数の時系列。時刻は JST。

3. 新千歳空港のあられに関する研究

秋季から春季にかけて空港であられが観測されると、航空会社の運航規定により離陸禁止や機体への防除氷作業が必要となり、管制機関は離着陸の調整や駐機場の確保が迫られます。新千歳航空測候所ではこのあられに関する研究や知見がほとんどない状況であったため、知見を蓄積し気象解説に生かすことを目的として、2 年間にわたり新千歳空港のあられの研究を行いました (中村ほか, 2021)。この研究では、あられの気圧配置別頻度や気象庁メソ解析のデータを用いて、雪とあられの環境場の違い等を調査しました。あられは雪あられと氷あられに分けられますが、雪あられ、氷あられともに低気圧や前線の通過時が多いこと、雪あられは冬型の気圧配置が全体の約 3 割を占める一方、氷あられは 1 割未満など、あられの中でも発生時の気圧配置に違いがみられることが分かりました (第 4 図)。また、あられが降る環境場の特徴として、冬型の気圧配置といった下層北風系においては雪に比べて静的安定度が低く、下層の気温が高い場が多いことを明らかにすることができました (第 5 図)。あられの形成には、氷晶が多く過冷却水滴を捕捉し成長すること (ライミング) が重要です。したがって、静的安定度が比較的 low 降水粒子が上昇・下降しやすい中で、雲中の気温が高く十分な過冷却雲粒が存在する場合は、ライミングが発生しあられが形成されやすいことが考えられます。本研究で示したあられが発生する際の環境場の特徴は、新千歳空港の飛行場気象解説情報など気象解説の資料に利用されています。



第4図 中村ほか(2021)の第3図より。あられ観測時の気圧配置別日数の割合(%)。括弧内の数は日数を示す。統計期間は2005年から2017年までの1月から4月、10月から12月を対象。

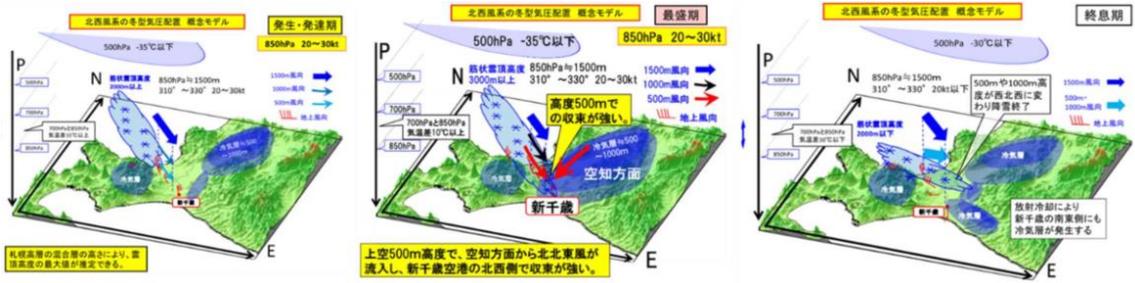


第5図 中村ほか(2021)の第6図より。下層(850hPa)北風系におけるSSI925(925hPaから700hPaのSSI)および925hPaの気温の散布図。

4. 新千歳空港の冬型降雪に関する研究

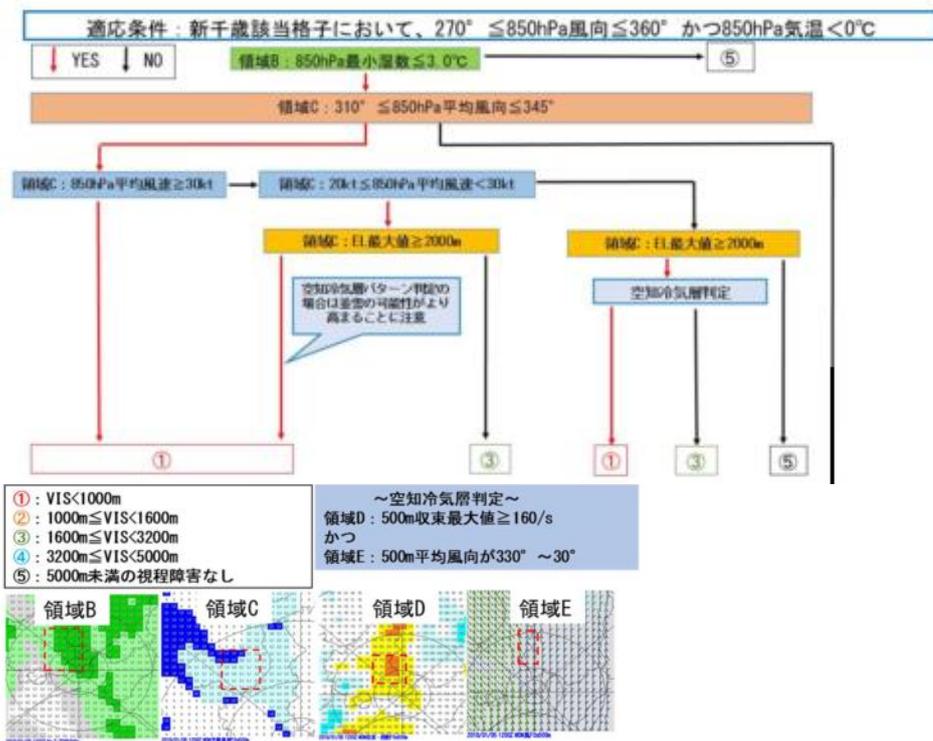
新千歳空港において冬季の航空機の離着陸の影響及ぼすのは何といたっても雪です。降雪量が多くなると滑走路の除雪や防除氷作業など運行管理に大きな影響が出ます。中でも冬型の気圧配置による降雪は、上空の風向風速のわずかな変化が新千歳空港への雪雲の流入の有無に影響を与えるため、予想が難しく予報担当者は頭を悩ませています。新千歳航空測候所の予報現業では「冬型の降雪による視程予測ワークシート」を作成し運用していましたが、中村ほか(2020)では最新の知見を取り込むことでこのワークシートを改良し、その精度検証を行いました。この知見の1つに新千歳航空測候所(2014)で示された「冬型の気圧配置の降雪の概念モデル」があります(第6図)。この中の降雪の「最盛期」(第6図中央)に示されているのが、空知方面の冷氣層による北寄りの風と石狩湾からの北西風が収束することで雪雲が発達するパターンです。これを新千歳航空測候所の予報現業では、「空知冷氣層パターン」と呼んでいます。空知冷氣層パターンが発生すると、石狩湾に近い札幌市よ

りも内陸の恵庭市や千歳市の方で降雪量が多くなることがあります。



第6図 新千歳航空測候所（2014）の第10図より（一部抜粋・修正）。冬型の気圧配置の降雪の概念モデル。

この空知冷気層パターンをワークシートに取り入れることを目指し、統計解析を進めていきました。その結果、空知地方の500m高度の風向や恵庭島松付近の収束値の使用が有効であることが分かり、これらの予報値を取り込むことで、空知冷気層パターンをワークシートに反映させました（第7図）。



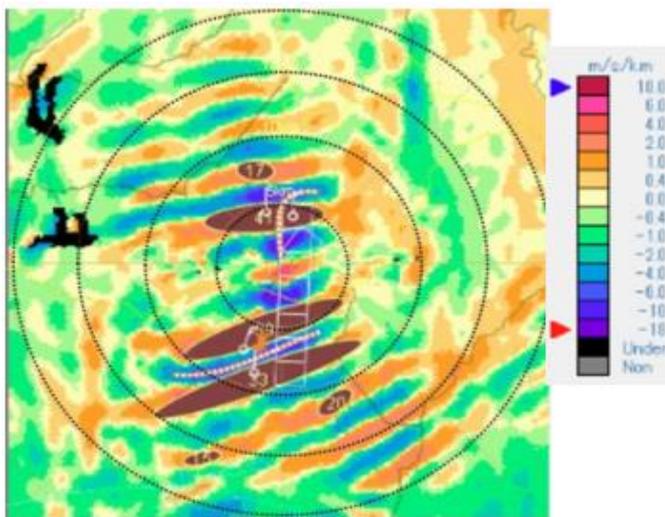
第7図 中村ほか（2020）の第24図より（一部抜粋）。改良した新千歳空港の冬型降雪ワークシート。

改良したワークシートと既存のワークシートで独立資料を用いた精度検証を行った結果、改良したワークシートは既存のワークシートに比べて、エクイタブルスレットスコアは並雪（視程（VIS）1000m未滿の雪）で有意に増加し、捕捉率を同水準に保ちつつ空振り率は有

意に減少しました。この独立検証の結果を踏まえ、2020年度の12月から予報現業で改良したワークシートの運用を始めました。2021年度からはメソアンサンブル予報との併用でこのワークシートの運用を行っています。しかし、まだまだ改善しなければならないことはたくさんあり、引き続き知見の蓄積およびワークシートの改良が必要です。

5. 新千歳空港の低層内部重力波に関する研究

大袈裟かもしれませんが、2021年3月2日は私にとって忘れることができない日です。1日の夕方から夜勤で新千歳空港の予報当番に入りました。1日午後から新千歳空港は温暖前線北側による大雪の予想があり、環境場の把握等、雪の実況の監視に努めておりました。2日未明から、新千歳空港の空港気象ドップラーレーダ（DRAW）でダウンバーストの検知が多発しました。特に午前9時過ぎにピークを迎えました（第8図）。この時は正直大雪のことで頭が一杯で、どうしてダウンバーストが発生したのかと考える余裕もなく、観測

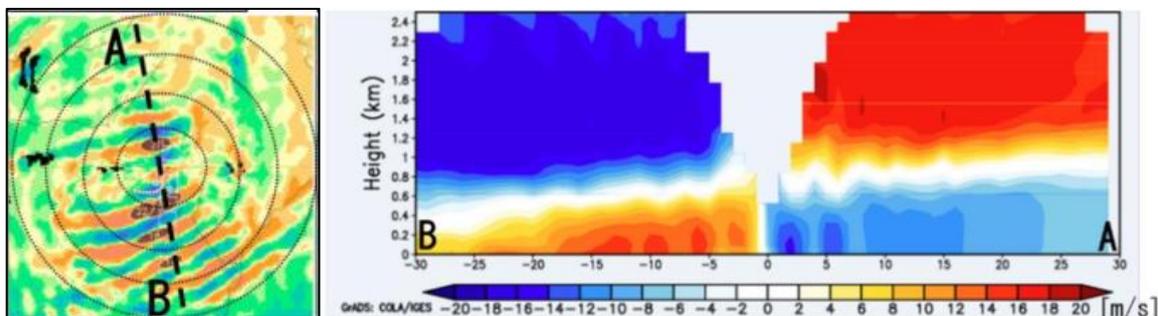


第8図 中村ほか（2023）の第1図より。2021年3月2日0015UTCのDRAW観測による地上付近の距離方向速度シアア、マイクロバースト、シアアラインの分布。

実況でウィンドシアアに関する飛行場気象情報を発表しました。翌日、後の共同研究者の児玉裕樹さんとこのダウンバーストの検知の件でお話した際に、「これは内部重力波ではないか？」というご指摘をいただきました。改めて、ドップラー速度のデータを見ると、確かに波模様ははっきりと見られ、これは事例解析したらすごく面白そうだなと思い、児玉さんと共に研究に取り組みました（中村ほか、2023）。解析の際は、成田空港で発生した低層内部重力波の研究（Kusunoki *et al.*, 2000）を参考に研究を進めていきました。当時、大雪により2日昼前にかけてほとんどの航空機が欠航していたことから当該時刻の航空機自動観測データ（気温、風向風速を観測）は得ることができなかつたため、現業局地モデル（LFM）初期値や空港から約20km離れた札幌管区気象台の高層気象観測データを利用しました。

内部重力波は大気中の浮力振動によって発生した重力波です。すなわち、安定層の存在が必要不可欠です。内部重力波は大気中に満ちあふれていますが、通常は振幅が小さく観測されることは少ないと言えます。しかし、上空の中立層や臨界高度（内部重力波の対地位相速度と環境場の風速が一致する高度）の存在により、ウェーブダクトが形成されると、波がそこにトラップされて振幅が大きくなり観測されることがあります。観測された内部重力波

のピーク時のドップラー速度の断面をみると、水平速度の位相がほぼ鉛直方向に直立していました（第9図右図）。また、水平速度が0の高度は南から北へ向かうにつれて高くなり、この高度を境に、下層は北風、上層は南風といった風向の顕著な鉛直シアーが見られました。



第9図 中村ほか（2023）の第8図（b）・第11図より。

左図：2021年3月2日0010UTC（波の最盛期）におけるDRAW観測による地上付近の距離方向速度シアー、マイクロバースト、シアーラインの分布。

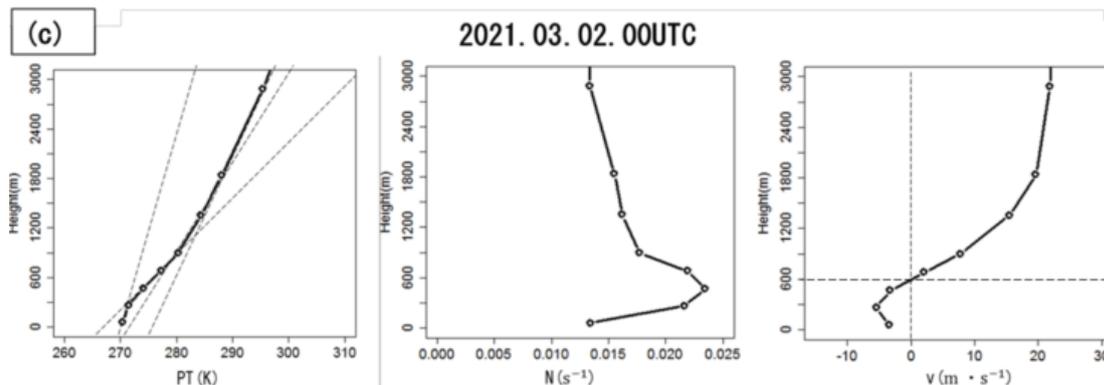
右図：左図A-Bの方向で切断したドップラー速度（暖色系：DRAWから遠ざかる方向、寒色系：DRAWに近づく方向）

小倉（1997）によると、波の重ね合わせが起きた場合、波面の傾きが鉛直方向に直立します。このことから、何らかの形でウェーブダクトが形成されて、波がトラップされて波の重ね合わせが起きていたのではないかと推察し、環境場の解析を進めていきました。すると、波源は北海道の南海上にあった温暖前線からのびる前線帯付近の上昇流であった可能性が高いことが分かりました。また、空港上空には前線帯に対応した安定層や風向の強い鉛直シアーが存在していたこと、その上層には比較的中立な層が存在していたこと、臨界高度（この事例では南北風速が0m/sの高度）が形成され、この高度付近でのリチャードソン数が0.25未満であったこと、が明らかになりました（第10図、第11図）。これらの結果から、波の反射条件が満たされ、波がウェーブダクト内にトラップされることで波の重ね合わせが発生し、内部重力波が顕在化・持続した可能性が高かったことが示唆されました。本研究の結果が飛行場予報の精度向上やユーザに対する気象解説の一助となれば幸いです。

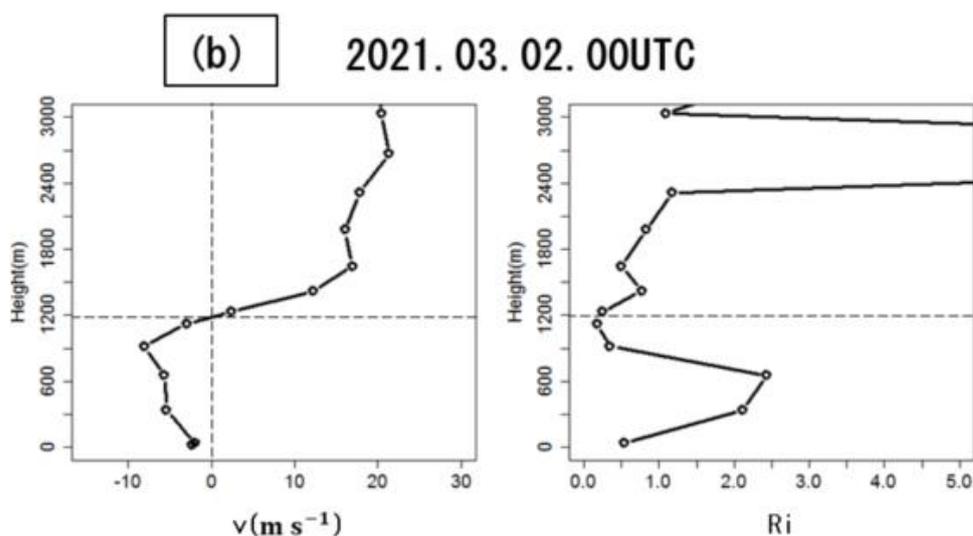
5. おわりに

繰り返しになりますが、気象庁に入庁してから、ほぼ毎年のように調査研究に取り組むことができたのは、修士課程で佐藤先生のご指導の下で研究できたこと、職場の方々の支え、妻からの応援、そして気象学に対する好奇心でした。現業等で自分が遭遇した気象に対して、自分なりに解釈し（勝手な解釈も多々ありますが）、調査を行うことが好きでとても面白いと感じます。苦しみながらも面白いと感じ、自分のできる範囲で行った調査研究が少しでも気象業務に貢献しているのご評価をいただいたことはこの上ない喜びです。私は専門の研究者ではありませんが、気象に対する好奇心をこれからも持ち続け、気象庁の一技術者として、調査研究等を通じて気象予測や庁内の技術力向上に微力ながら努めて参ります。改めて、

関わっていただいた皆様に感謝申し上げます。ありがとうございました。



第10図 中村ほか (2023) の第18図 (c) より。2021年3月2日00UTCにおける新千歳付近の(左)温位、(中央)ブラント・バイサラ振動数、(右)南北風速の鉛直プロファイル。LFM初期値より作成。



第11図 中村ほか (2023) の第19図 (b) より。2021年3月2日00UTCにおける札幌の(左)南北風速、(右)リチャードソン数の鉛直プロファイル。札幌高層気象観測データより作成。

引用文献

- Kusunoki, K., H. Eito and K. Akaeda (2000) : A Case Study of Low-level Internal Gravity Waves using Doppler Radar and ACARS. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 511-525. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1965/78/5/78_5_511/_pdf/-char/en
- 中村誠吾 (2016) : JRA-25 を用いた JMANHM によるハインドキャストに基づく十勝地方の風の基本パターン作成. 平成 28 年度札幌管区気象研究会誌.
- 中村誠吾, 加藤大佳, 児玉裕樹 (2020) : 新千歳空港の冬型降雪ワークシートの改良. 令和 2 年度札幌管区気象研究会誌.

中村誠吾, 川畑聡史, 三木雄詩, 瀧田芳信 (2021) : 新千歳空港のあられについて. 航空気象ノート, **83**, 13-25.

中村誠吾, 児玉裕樹 (2023) : 2021年3月2日に新千歳空港のドップラーレーダーで観測された低層内部重力波の解析. 気象庁測候時報, **90**.

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/90/vol190_3.pdf

中村誠吾, 森信行, 政石晃秀, 山田修 (2017) : 平成28年台風第10号の大雨事例の災害調査. 平成29年度札幌管区気象研究会誌.

中山寛, 米田宗平, 海藤幸広, 松永崇, 木下延幹 (2010) : JRA-25を用いたJMA-NHMによるハインドキャストに基づく風の基本パターン作成. 平成22年度札幌管区気象研究会誌.

小倉義光 (1997) : メソ気象の基礎理論. 東京大学出版会, 215pp.

新千歳航空測候所 (2014) : 冬型の気圧配置による降雪. 平成25年度航空気象予報技術検討会個別調査資料.

寺尾建哉, 中村誠吾 (2015) : 2014年9月8日から9日にかけて十勝地方沿岸部で発生した大雨事例解析. 平成27年度札幌管区気象研究会誌.