

冬季北海道西岸に現れる収束雲に伴う降雪の研究及び北海道の強風特性に係る研究

－日本気象学会北海道支部 2020 年度「北海道支部賞」受賞－

釧路地方気象台 中山 寛

1 はじめに

この度は栄誉ある日本気象学会北海道支部賞をいただき光栄に存じます。これまで、主に北海道内の気象台で予報業務に従事しながら、災害を伴う気象現象について研究を続けてきました。私が研究を続けられているのは、数多くの方のご支援あつてのものです。これまで私の研究に関わっていただきました全ての方々にこの場を借りて感謝申し上げます。

今回受賞理由となった冬季北海道西岸に現れる収束雲に伴う降雪の研究は、20 年ほど前に行ったもので、気象台の研究の歴史みたいなものも交えて解説したいと思います。また、もうひとつの受賞理由である北海道の強風特性に係る研究は、10 年ほど前から続けてきたもので、地方官署で数値予報モデルを使った研究の先駆けのようなことをやってきたので、その変遷を解説したいと思います。また、2019 年 6 月から気象庁のスーパーコンピュータシステムを地方官署から使えるようになっていきますので、そのあたりの最近の話題も解説させていただきます。

2 札幌管区気象台による冬季北海道西岸に現れる収束雲に伴う降雪の研究

冬型の気圧配置が緩んだとき、北海道西岸では西よりの季節風と内陸からの東よりの冷気流との間にしばしば小低気圧や明瞭な収束線が形成されます。西岸収束雲と呼ばれるこの収束線などに伴う帯状の雪雲が流入すると、数時間から半日のあいだに局地的な大雪をもたらす、特に人口の多い札幌圏や空港を持つ千歳市に流入すると大きな影響となるため、予測精度の向上が求められてきました。道内の大雪警報基準は 12 時間降雪の深さ 40～50cm に設定されていますが、札幌市など石狩中部や千歳市など石狩南部の平地では、加えて 6 時間降雪の深さ 30cm が設定されているのはこのためです。

ここでは小低気圧を含めた西岸収束雲の札幌管区気象台における研究の歴史について解説します。札幌管区気象台には 2011 年まで技術時報という研究誌が定期的に刊行されていて、不定期にテーマを絞った別冊号が刊行されていました。1989 年には「北海道西岸に発生する小低気圧の研究」技術時報別冊 38 号が刊行されています。それによると、札幌管区気象台ではじめて研究を行ったのは長谷川（1949）です。小低気圧が出現した 30 例について道内気象官署の 6 時の平均気圧を求め、平年偏差をプロットしました（図 1）。石狩湾沖

に偏差 0 の小低気圧の存在を示しています。その後も 1960 年代はじめにかけて気象官署の気圧や気温の観測値による研究が続けられ、小低気圧は放射冷却によってできた内陸高気圧に相対的な低圧部であると認識されました。

1960 年代中頃に赤外放射計を搭載した気象衛星 (Nimbus, ESSA) が登場すると、収束雲の全容が次第に明らかになってきました。岡林 (1967) は北海道西岸の収束線上に南北の帯状雲が存在していることを見つけ、岡林 (1972) では次のような降雪機構のモデルを作りました (図 2)。冬季、沿海州とサハリン～北海道それぞれの寒冷高気圧に挟まれた海上は相対的に暖域となるため南北に走るサーマルローとなります。図の小高気圧は北海道の放射冷却による内陸高で、サーマルローの西側では北西風、東側では北東風となって、サーマルローに沿って不連続線ができ、収束雲が南北に走ります。

村松ほか (1975) は、冬季北海道に現れる小低気圧には 2 種類の異なった構造と成因を持っているものがあり、大雪のときの主低気圧の位置から、冬型の気圧配置の末期に起こるカムチャツカ型と主低気圧の強い循環内で起こるエトロフ型に分けました

(図 3)。また、これらのタイプの大雪は袋状低圧部の中に弧状エコーを伴っている場合が多く、その発生場と弧状エコーとの関係をまとめました (図 4)。この概念は、今も札幌管区気象台の予報現場で使われています。その後も多くの研究が行われましたが、誌面の都合でここでは割愛させていただきます。

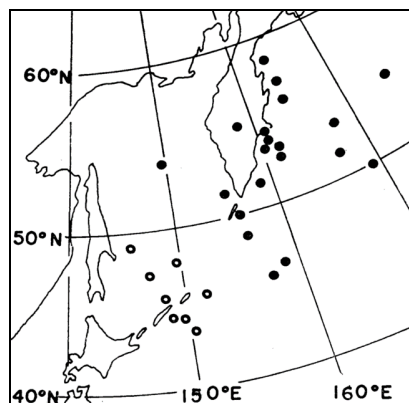


図 3 小低気圧型大雪時の 850hPa 循環の中心位置 (村松 1975)。

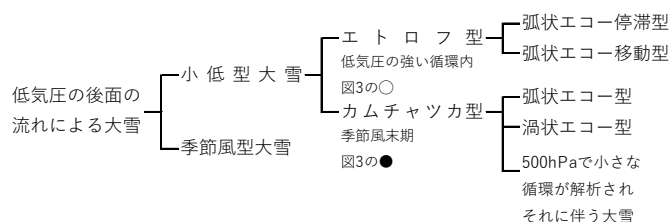


図 4 低気圧後面流による大雪の系統図。

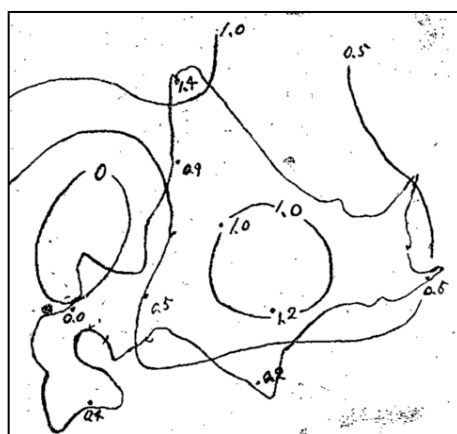


図 1 気圧平年偏差分布図 (長谷川 1949)。

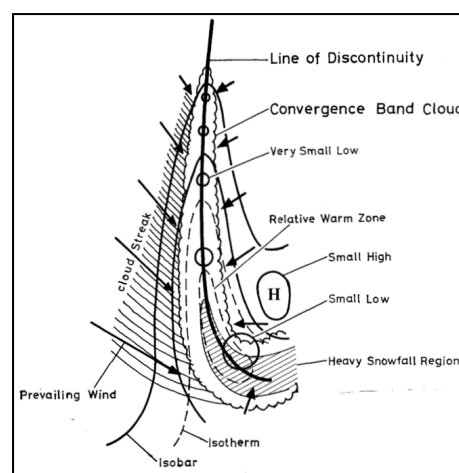


図 2 収束雲生成と降雪機構モデル図 (岡林 1972)。

気象庁は 1996 年 3 月から地方天気分布予報と地域時系列予報を開始しました。それまでの晴れや曇りなどの定性的な予報に加え、定量的な予報を追加発表することになったのです。札幌管区气象台では、これに先立つ数年前から量的予報に関する研究を開始していて、この頃から小職も研究に参加しました。当時の現業数値予報モデルは水平格子間隔が約 40km で、北海道西岸に現れる収束雲の動向や量的予想は十分に表現できていませんでした。そこで、大橋ほか（1994）は現業数値予報モデルの格子点値を使って収束雲の流入地域を推定し、各種気象要素を説明変数とした線形重回帰式を作って 12 時間降水量を予測する手法を開発しました。なお、降水量から降雪量への換算は、あらかじめ調べておいた雪水比を用いました（中山ほか 1993）。

1999 年になると気象研究所で開発された非静力学モデル（斉藤ほか 1999）が Windows を OS に用いたパソコン上で実行及び解析できるソフト「NHM 統合環境」が作られ、全国の気象官署で利用可能となりました（上野ほか 2000）。計盛ほか（2001）は、水平格子間隔 3km による NHM 統合環境の初期値・境界値に、水平一様な北西風の鉛直プロファイルと海上と陸上とにそれぞれ一様な温度分布を与えることで西岸の収束線を再現することに成功しました（図 5）。

2001 年 12 月 10 日未明から 11 日昼過ぎにかけて、収束線に伴う帯状雲が石狩平野に流入し、記録的な大雪となりました。札幌市の 10 日の降雪の深さ日合計は 56cm に達し、12 月としては統計開始（1953 年）以来第 1 位となり、年間を通して第 2 位となりました（図 6：この記録は今も塗り替えられていない）。中山ほか（2003）は、気象衛星ひまわりの赤外データの輝度温度を北海道西岸域について東西平均し、縦軸に同時刻の緯度別平均温度をとり、横軸に各時刻を並べた南北時間断面図を作り、発達したクラウドクラスター（CC）が 10 日 3 時頃（CC a）と 17 時頃（CC c）に札幌付近に流入したことを解明しました（図 7）。また、札幌に南下するまでに衰弱してしまったものもありました（CC b, CC d）。

2001 年 7 月には気象庁本庁で防災情報モデル開発システム（ミニスーパーコンピュータ）の利用が開始され、地方官署からも現業数値予報モデルの計算結果を初期値・境界値に用いた気象庁非静力学モデル（JMA-NHM：気象庁予報部 2003）の実行が可能となりました（気象庁予報部 2019）。中山（2003）は、現業数値予報モデルの計算結果を初期値・境界

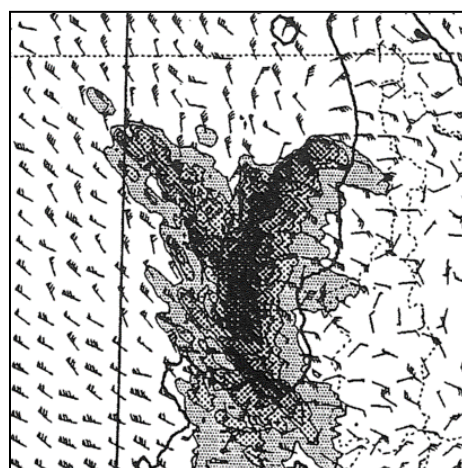


図 5 NHM 統合環境で再現された収束線（計盛ほか 2001）。

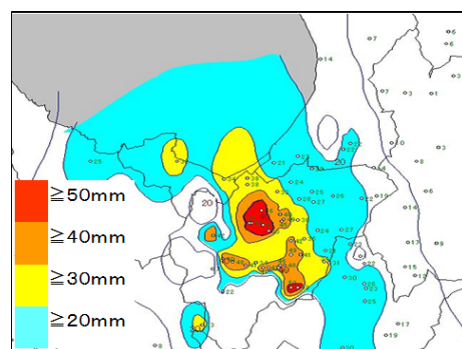


図 6 2001 年 12 月 10 日の降雪の深さ日合計（中山ほか 2003）。

値に用い、2001 年 12 月 10～11 日の札幌の大雪事例について、水平格子間隔 5km で JMA-NHM を実行しました。当時の現業数値予報モデルは地中熱容量・熱拡散係数・アルベドがすべて土壌の値で統一されていましたが、これを実況と同じ新雪の値に変更することで、北海道西岸の帯状雲とそれに伴うクラウドクラスターを維持・再現することに成功しました（図 8）。

その後の現業数値予報モデルの高度化に伴い、西岸収束雲が現業レベルで予想できるようになったこともあり、これに関する研究は少なくなっていました。

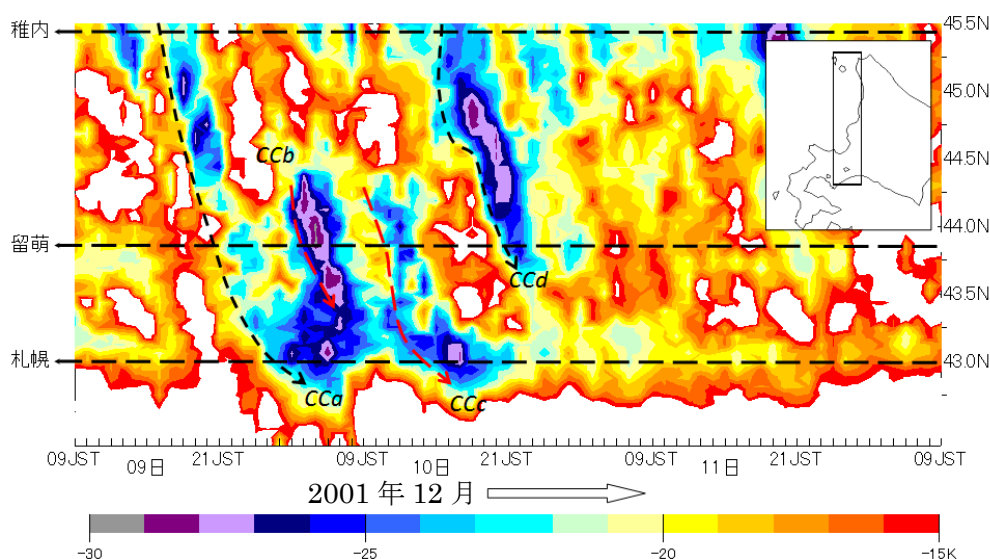


図 7 北海道西岸収束線付近でのGMS 赤外輝度温度の南北時間断面図（図中右上の北海道西岸の四角領域での東西平均輝度温度）。

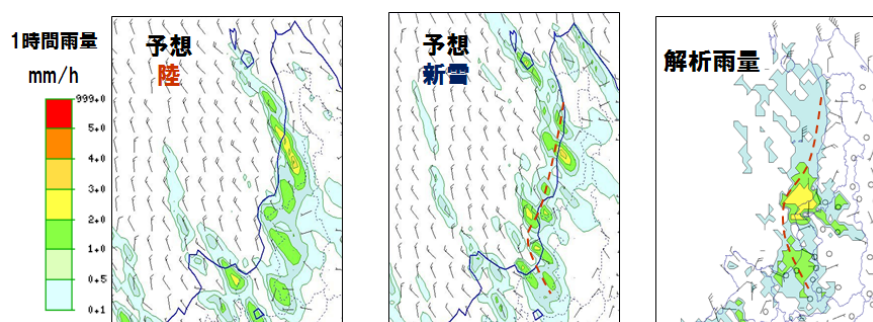


図 8 2001 年 12 月 10 日 9 時の 1 時間雨量の JMA-NHM による予想と実況。

地中熱容量・熱拡散係数・アルベドは左図が陸、中図が新雪、赤破線は西岸の収束線。

3 数値予報モデルを使った北海道の強風特性に関わる研究

（1）ハインドキャストに基づく風の基本パターン作成

気象庁は注警報の発表地域として、気候特性の似通った「市町村等をまとめた地域」をあらかじめ決めておき、これを最小単位として運用してきましたが、2009 年 5 月からは最小単位を市町村等に細分しました。それまでの知見により、いくつかの市町村をまとめた基本パターンを数種類決めておき、気象条件によって選択して注警報を運用する方法をと

っています。ところが、気象官署やアメダスのない市町村があるため、レーダーで捉えられる雨と違って、風の基本パターンが正しいのか疑問が生じました。そこで、数値予報モデルで過去の多数の強風事例を再予報（ハインドキャスト）し、風の実況データがない市町村についても検討して基本パターンを新たに作成することを着想しましたが、これには多くの計算機資源が必要となります。一方、前述の防災情報モデル開発システム（ミニスーパーコンピュータ）は非静力学メソモデル開発のため臨時に導入されたもので、2008年11月に運用を終了しました。運用中の約7年間は札幌管区管内各官署でこれを使った研究が多く行われていたこともあり、代替策の要望が多く寄せられました。この2つの問題を解決するため、札幌管区気象台独自で4つのCPUで並列計算が可能なパーソナルクラスタを2009年に導入し、JMA-NHMの実行環境を構築し、全道の職員が利用を開始しました。

パーソナルクラスタを使い、JMA-NHMにより長期再解析データ（JRA-25 : Onogi ほか2007）を初期値・境界値として、水平格子間隔を20km→5km→2kmとダウンスケーリングするハインドキャストを行い、風の基本パターンを作成することを計画しました（図9）。予備調査として、中山ほか（2010）は2009年1年間のハインドキャストを行い、現業メソモデル（MSM）との精度比較を行いました。すると、寒候期の日中に強風バイアスがあることがわかりました（図10）。原因は水平格子間隔が約110kmのJRA-25から積雪域をダウンスケーリングすると積雪域が狭くなってしまふことだったため、それぞれの水平格子間隔で積雪域を独自に解析することにし、1年間をとおして現業メソモデル（MSM）と同等の精度であることが確認できました（図11）。

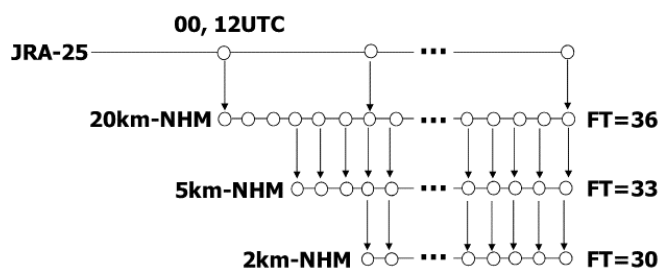


図9 ハインドキャストにおける JMA-NHM の計算方法。

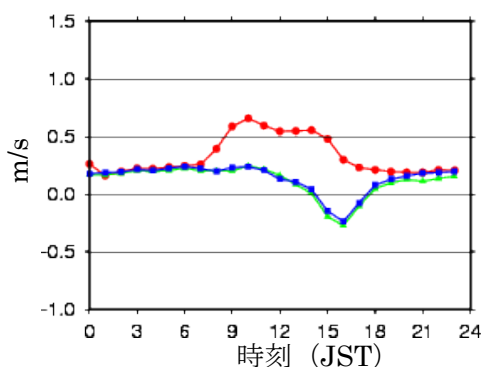


図10 2009年寒候期の全道のアメダスの地上風速に対する平均誤差。赤はJMA-NHM、緑はMSM00（初期値00Zと12Z）、青はMSM03（初期値03Zと15Z）。

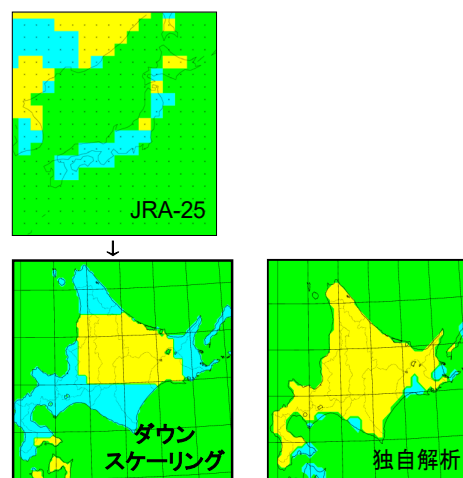


図11 2009年1月1日の地表面種別解析。黄色は雪、水色は陸、緑は海。

そして、リストアップした強風事例を自動的にハインドキャストするシステムを構築し、クラスター分析によって風向別の基本パターンを抽出する手法を作成し、海藤ほか（2012）で石狩・空知・後志地方について新たに作成しました（図 12）。同様の手法で、安斎ほか（2014）で網走・北見・紋別地方、中山ほか（2014）で上川・留萌地方、西村ほか（2015）で釧路・根室地方、毛利ほか（2015）で胆振・日高地方、中村（2016）で十勝地方と、全道の風の基本パターンを作成しました。

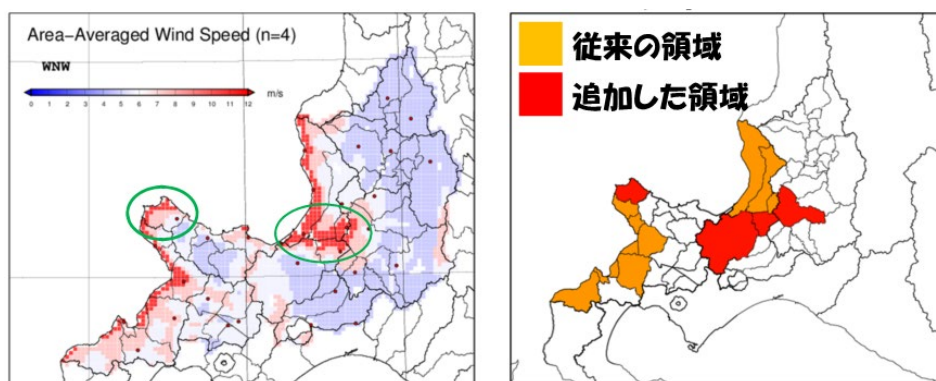


図 12 西北西風系のクラスター別の平均風速(左)をもとに基本パターンに追加した市町村(右)。

（２）高解像度ダウンスケーリングによる地域の強風特性調査

2017 年 4 月 18 日の後志地方における暴風災害はこれまで災害がなかった地域でも発生したため、札幌管区気象台は後志町村会から、重大な災害が発生するおそれがある場合に、きめ細やかな情報発信を求める要望書の提出を受けました。その年、JMA-NHM により水平解像度 500m までダウンスケーリングを行って後志地方の強風特性について調査を行い、各市町村の暴風要因を解明するとともに自治体に対し説明を行い、首長等関係の方々から、防災気象情報の「読み解き」に非常に効果的で、地域特性に応じた災害リスクの認識が高まったとの評価をいただきました（鳥山ほか 2019）。これを受け、2018 年度の札幌管区管内特別重点事項として「地域の強風特性調査及び自治体等への情報共有」が設定されました。ところが、調査の頼みであるパーソナルクラスタが OS のサポート終了に伴い 2017 年 9 月をもって運用を終了してしまい困っていましたが、2018 年 9 月から気象庁のスーパーコンピュータシステムを構成する業務処理用のクラスタサーバが、2019 年 6 月からスーパーコンピュータ本体（冗長構成の副系）が地方官署から利用可能となり調査を進めることができ、パーソナルクラスタを利用した場合に比べて調査のスピードが大幅に増しました。そこで、札幌管区気象台でスーパーコンピュータにおける JMA-NHM の実行環境を構築し、利用マニュアルを整備し、フルード数を計算するツールや強風域抽出ツールを開発し、2018 年度から 2019 年度にかけて札幌管区内の全官署で強風特性調査に取り組みました。

札幌管区気象台で取り組んだ強風特性調査の一例として空知地方の強風特性調査（小室ほか 2019）の一部を紹介します。札幌管区気象台が管轄する空知地方は面積の小さい市町

が多く、町ごとの強風特性を調べるには細かい谷筋の地形を JMA-NHM で解像する必要があります。図 13 は芦別市の谷筋の解像状況です。左の 10m メッシュの地理院地図の標高と比較しても、右の解像度 500m の JMA-NHM の地形は十分に谷筋を解像していることがわかります。図は南東方向の谷の入口から見たもので、はじめ狭い谷筋があり、芦別のアメダスの手前付近から平野部が開けている地形が確認できます。このような地形では、大気の流路が広がることによって流れが水平に広がり位置エネルギーが運動エネルギーに変わることによって強風となる“地峡風（ちきょうふう）”の発生が考えられます。図 14 は 2016 年 2 月 29 日 11 時の JMA-NHM の計算結果です。左図は高度 20m の風ベクトルで風速 15m/s 以上を着色しています。芦別のアメダスでは捉えられない谷筋が開けるあたりから 15m/s 以上の強風域が見られます。右図は谷筋に沿った鉛直速度の断面図で、谷筋が開けるあたりに明瞭な下降流が見られ、温位の垂れ下がりも見られることから、地峡風の影響が考えられます。こういった JMA-NHM による計算と解析を積み重ね、図 15 にあるような市町村ごとの強風特性資料を作成し、市町村と気象台の打合せなどの際に提供して認識を共有し、気象台が市町村に対して行う地域防災対策支援の一助としています。

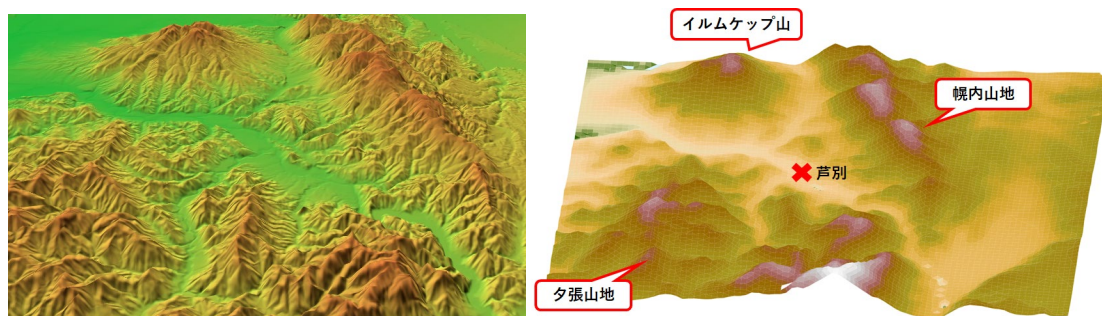


図 13 芦別市の谷筋の解像状況。左図は地理院地図の 10m メッシュの標高。右図は水平解像度 500m の JMA-NHM の地形（×は芦別のアメダスの位置）。谷の幅は約 20km。

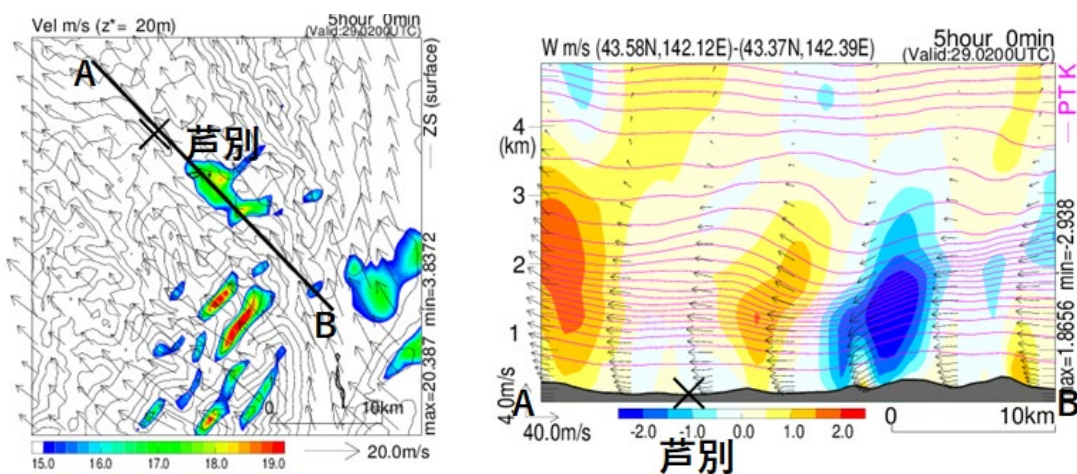


図 14 2016 年 2 月 29 日 11 時の JMA-NHM の計算結果。左図は高度 20m の風ベクトルで風速 15m/s 以上を着色し、等値線は標高。右図の色分けは鉛直速度（m/s）の断面図で等値線は温位。×は芦別のアメダスの位置。

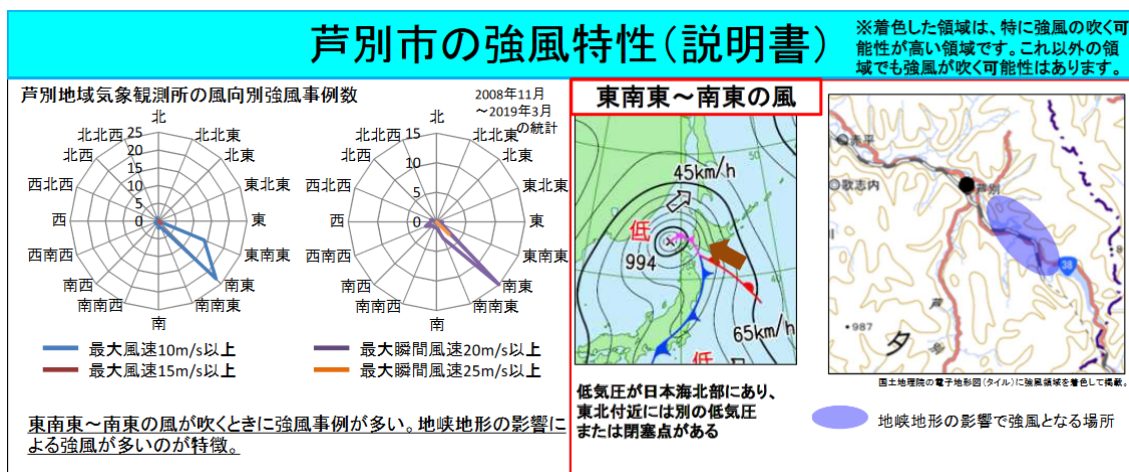


図 15 芦別市に提供する強風特性資料の一部。

(3) 気象庁スーパーコンピュータの地方官署からの利用

前述したように、2019 年 6 月から気象庁のスーパーコンピュータ本体が地方官署から利用可能となりました。セキュリティに配慮して、インターネットに接続していない庁内ネットワークに接続された各気象台に配置されている端末からフリーのターミナルエミュレータ (Tera Term) でログインして使用します。気象庁のスーパーコンピュータは冗長構成となっており、主系では毎日の天気予報などで使われる数値予報モデルが実行されています。副系は主系に障害が発生した時のために待機して、開発業務に使われています。片系に 15 キャビネットあり、1 キャビネットに 192 ノードあります。1 ノードは 2CPU (48 物理コア) で構成されています。地方官署には本庁開発部署と共用で 39 ノードが解放されており、本庁開発部署に比べて小規模な 10 ノードまで同時利用が可能で実行制限時間が 10 ～120 分のジョブクラスが用意されています。

JMA-NHM の実行環境は前述の強風特性調査のために札幌管区気象台で構築し、全国の職員が利用可能になっています。また、現在の現業用メソモデル (MSM) や局地モデル (LFM)に使われている気象庁非静力学モデル asuca が 2020 年 5 月から利用可能となり、地方官署が主体となって実行環境が整えられつつあります。

謝辞

2003 年にわたしは札幌管区気象台に在籍し、気象研究所と開始した地方共同研究の経費で Linux パソコンを購入し、はじめて JMA-NHM の実行環境を構築しました。当時、研究所で担当された方にはマンツーマンでご指導いただきました。地方で数値予報モデルを調査研究に利用できる時代の幕開けに関わることができました。

2004～2007 年には気象庁数値予報課に在籍し、JMA-NHM をベースにした水平格子間隔 2km の局地モデル (LFM) の開発に携わりました。開発環境の整備やデータ同化部分の実装など多くの関係者のご支援とご協力をいただきました。

2007 年に札幌管区气象台に戻ると、パーソナルクラスタ導入の話が持ち上がりました。予算要求や調達など多くの関係者のご支援とご協力をいただきました。また、2010～2015 年に地方气象台の予報官としてハインドキャストに基づく風の基本パターン作成の取り組みを各地で行いました。企画力不足のため公式な枠組みとして進めることなく、毎年いずれかの地方气象台や測候所の知人などに個人的に取り組みの打診を行い進めました。協力していただいた知人や、実際に取り組んでいただいた若手を中心とした職員に感謝いたします。

2018 年から札幌管区管内重点事項として取り組まれた各地域の強風特性調査では、担当者に任命していただき、やりがいのある仕事に従事させていただきました。また、各地方气象台や測候所の担当者には多大なご協力をいただきました。これらの皆様にも感謝申し上げます。

引用文献

- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007) : The JRA-25 Reanalysis, J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.
- 安斎太朗、堀内飛鳥、中山寛 (2014) : JRA-25 を用いた JMA-NHM によるハインドキャストに基づく網走・北見・紋別地方の風の基本パターン作成、札幌管区気象研究会誌.
- 上野幹雄、川畑拓矢、酒井亮太、白川栄一、石田純一、斉藤和雄 (2000) : NHM 統合環境の紹介ーパソコン版気象研究所非静力学モデル (NHM) ー、天気、47、289-294.
- 大橋雅寿、中山寛 (1994) : 北海道西岸小低気圧に伴う収束雲の流入予測と降雪量予測、細氷 40 号.
- 岡林俊雄 (1967) : 気象衛星から見た小低と雪雲について、北部管区気象研究会誌、昭和 42 年度版、48-51.
- 岡林俊雄 (1972) : 気象衛星から見た雪雲と降雪についての研究への利用、気象研究ノート、113、74-106.
- 海藤幸広、井上創介、中山寛、安斎太朗、堀内飛鳥、酢谷真巳 (2012) : 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 (第 3 報)、札幌管区気象研究会誌.
- 計盛正博、中山寛、木村光一、大橋康昭 (2001) : 冬季北海道西岸に現れる収束雲の数値実験、細氷 47 号.
- 気象庁予報部 (2003) : 気象庁非静力学モデル、数値予報課報告・別冊第 49 号.
- 気象庁予報部 (2019) : 数値予報 60 年誌～数値予報課 60 年 (1959-2019) の歩み～、11.

- 小室美沙、中山寛（2019）：空知地方の強風特性について、札幌管区気象研究会誌。
- 斉藤和雄、加藤輝之（1999）：気象研究所非静力学メソスケールモデル、気象研究ノート（196）、169-195.
- 鳥山暁人、小谷野陽介、榎本弘（2019）：後志地方の強風特性調査と自治体支援について、測候時報、第 86 巻、41-62.
- 中村誠吾（2016）：JRA-25 を用いた JMA-NHM によるハインドキャストに基づく十勝地方の基本パターン作成、札幌管区気象研究会誌。
- 中山寛、山内博行（1993）：降水量と降雪量の関係について、細氷 39 号。
- 中山寛、森本真一、工藤淳（2003）：2001 年 12 月 10 日～11 日の札幌の豪雪、細氷 49 号。
- 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、札幌管区気象研究会誌。
- 中山寛、津田元気（2014）：JRA-25 を用いた JMA-NHM によるハインドキャストに基づく上川・留萌地方の風の基本パターン作成、札幌管区気象研究会誌。
- 西村三治、加藤貴之、赤松滯、瀬崎歩美、山中智、中山寛（2015）：JRA-25 を用いた JMA-NHM によるハインドキャストに基づく釧路・根室地方の風の基本パターン作成、札幌管区気象研究会誌。
- 長谷川徳太郎（1949）：北海道西海岸に発生する副低気圧について、研究時報、1、207-212.
- 村松照男、小倉士郎、小林尚治（1975）：北海道西海岸小低気圧型の大雪、天気、22、369-379.
- 毛利香、野村達郎（2015）：JRA-25 を用いた JMA-NHM によるハインドキャストに基づく胆振・日高地方の風の基本パターン作成、札幌管区気象研究会誌。