

## 研究ノート

# グリーンランド雪氷フィールド観測支援のための気象予測実験

橋本明弘<sup>1\*</sup>, 庭野匡思<sup>1</sup>, 青木輝夫<sup>1</sup>

## 要 旨

科学研究費補助金によって「北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究」において実施されたグリーンランド氷床での雪氷放射観測の間、観測隊の活動を支援するために、グリーンランド全域を対象領域として気象予測実験を行った。このためのシステム構築と運用について概説し、予測精度に関する初期的な検証結果を示す。気象予測実験は、気象庁非静力学モデルを用いて行われた。実験結果は図化され、無料ウェブサービスを利用して観測隊に提供された。観測隊が、情報インフラの整った拠点を離れ、氷床上の観測点に滞在している間は、必要最小限のデータのみ実験結果から抽出・圧縮され、定時交信メールに載せて提供された。提供された予測情報は観測隊の日々の生活や観測活動、人員・物資の輸送等の計画・実施のために役立てられ、その有用性が実地に確認された。同様の気象予測実験システムは、グリーンランドに限らず、極域における野外観測支援のために有効利用できる可能性をもっている。一方、観測隊からもたらされる報告や観測データは、予測実験結果の検証とモデル改良に役立てられている。

キーワード：グリーンランド、気象予測、非静力学モデル

Key words: Greenland, Weather prediction, Non-hydrostatic model

## 1. はじめに

気象予測は、野外観測を安全で効果的に遂行する上で、最も重要な情報の一つである。極域や高山における野外観測では、過酷な環境下での活動をしばしば強いられるため(青木, 2007)、気象予測の重要性は特に大きい。しかし、野外観測は公的な気象予測の空白地帯で行われることも多いため、これを補い、観測隊を支援する取り組みが必要である。

現在、Arctic Numerical Weather Prediction (Hines *et al.*, 2008, Hines *et al.*, 2011, Wilson *et al.*, 2011), Antarctic Numerical Weather Prediction (Powers *et al.*, 2003, Bromwich *et al.*, 2013) を始めとして、大学等の研究機関による極域気象予測が、インターネットを介して自由にアクセスできるようになっている。それらは、極域における野

外観測の際に、重要な情報源として利用されているが、個々の観測の目的・手法やロジスティクスの事情に合わせてカスタマイズできるわけではない。もし、現地での活動計画に合わせてカスタマイズされた気象予測情報が利用できれば、野外観測をより安全で効率的に実施できるだろう。そのためには、グローバルな情報通信網を介して入手できる予測情報とは別に、ローカルな研究コミュニティの内部で、必要な予測情報を作り出す取り組みが必要である。村上ら(2015)は、人工降雨・降雪プロジェクトの中で、冬季季節風下の山岳上空で人工降雪に適した過冷却雲の出現や航空機による雲シーディングに最適な場所を予測するために、気象予測モデルを用いて様々な予測情報を作成し、観測計画とその実施に役立てたことを紹介している。

科学研究費補助金によって実施した「北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究 (SIGMA)」では、

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所予報研究部

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

\* 連絡先: ahashimo@mri-jma.go.jp

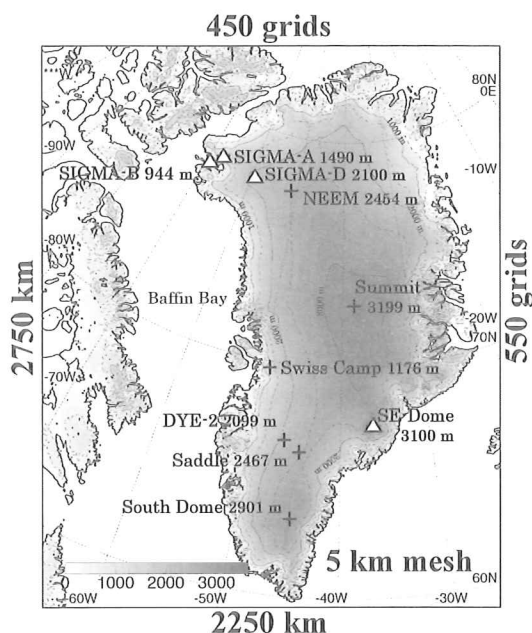


図 1 気象予測実験の計算領域。△は科研費 SIGMA により設置された AWS 地点、及び、南東ドーム浅層アイスコア掘削地点。+は GC-Net 配下の AWS。

Fig. 1 Calculation domain for numerical weather prediction experiment. Triangles indicate the AWS stations installed by the SIGMA project (SIGMA-A, -B, -D) and SE-Dome shallow ice core drilling site. Crosses indicate the AWS stations of GC-Net.

2011 年から 2015 年にかけて、予備観測を含め多数の集中観測 (Aoki *et al.*, 2014) やアイスコア掘削 (Matoba *et al.*, 2015) がグリーンランド氷床上で実施された。2013 年夏期以降、SIGMA 観測隊の活動支援とともに気象予測モデルの精度検証と改良を目的としてグリーンランド気象予測実験システムを構築し、気象予測実験を毎日実施した。このような取り組みに付随して得られた技術的ノウハウは、野外観測をとまなう雪氷研究分野一般にとって有益であると考え、その概要を解説し、初期的結果を示す。

## 2. システム構築

### 2.1 数値モデル

グリーンランド気象予測実験のために、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM, Saito *et al.*, 2006) を

表 1 モデル設定の変更点。

Table 1 Changes to model settings.

|                 | Original settings | Greenland weather prediction |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
| MSWSYS(18)      | 0                 | -2                           |
| ipccnd          | 10                | 12                           |
| inuclei         | 6                 | 2                            |
| my3_sgm_min_fct | 0.09              | 0.07                         |

用いた。このモデルは、防災気象情報や航空気象予報の発表のために、気象庁で現業利用されている。計算領域は水平 2750 km × 2250 km 鉛直 22 km でグリーンランド全域をカバーし (図 1)、空間解像度は水平 5 km、鉛直 40–904 m とした。積分時間間隔は 8–12 秒とし、42 時間の時間積分を 12 時間毎に行った。

JMA-NHM をグリーンランド気象予測に適用するにあたり、モデル設定オプションのいくつかを変更した。以下、表 1 に示した変更点について説明する。オリジナル版では、5 種類 (雲粒・雨・氷晶・雪・霰) の雲降水粒子の内、氷晶のみ混合比と数濃度を予報変数とし、他は混合比のみを予報変数とする (MSWSYS (18)=0) が、本実験では氷晶に加えて雪・霰についても混合比と数濃度の両方を予報変数とするよう変更した (MSWSYS (18)=−2)。また、オリジナル版では、気温 −36℃ 未満の格子に対して水蒸気の氷過飽和を許容せず、余剰水蒸気を全て氷晶に置き換えているが (ipccnd=10)、本実験ではどの温度域でも氷過飽和を許容するよう改めた (ipccnd=12)。オリジナル版の氷晶生成数は、氷過飽和度と上昇流速度の関数として与えられるが (inuclei=6)、これを気温の関数とするよう改めた (inuclei=2)。さらに、格子平均総水混合比に対する雲量のゆらぎ幅の下限値 (my3\_sgm\_min\_fct=0.09, 原, 2008) を、事前のテスト結果に基づき、0.07 に変更した。

モデル設定の変更に加え、雪温の取り扱いについてソースコードを修正する必要がある。普通、雪温は 0℃ 以下に保たれているが、日本国内を対象として JMA-NHM を適用する場合、数 km のモデル格子内で実際の積雪域と非積雪域が時空間的に不均質に分布することがある。このことに配慮して、JMA-NHM では格子点の雪温が 0℃ 以上になることを許容している (原, 2008)。一方、グリーンランド氷床上は、積雪域と非積雪域が数 km

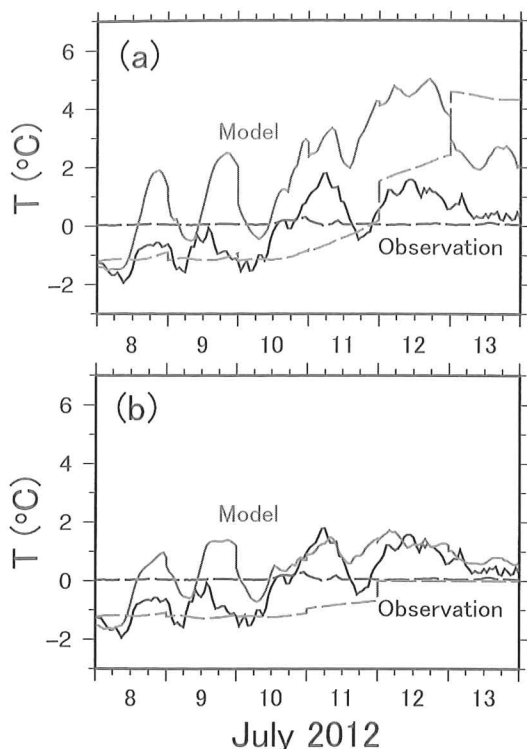


図 2 2012 年 7 月の SIGMA-A における気温 (実線) と雪温 (破線) に関する (a) モデル修正前と (b) 修正後の予測結果 (灰色)。黒は観測値。

Fig. 2 Prediction results in July 2012 at SIGMA-A (a) before and (b) after the modification of the model (gray lines). Black lines indicate the observed results. Solid and broken lines indicate air temperature and snow temperature, respectively.

の水平スケールで不均質に分布することは稀である。そのため、グリーンランド気象予測実験にあたっては、雪温を  $0^{\circ}\text{C}$  以下に限定するようモデルに修正を加えた。図 2 は、2012 年 7 月の SIGMA-A における修正前と修正後のモデルによる地上気温の予測結果を表している (灰色実線)。修正前 (図 2a) は観測値 (黒実線) に対して  $3\sim 4^{\circ}\text{C}$  の高温バイアスが目立つが、この修正によって、その大部分が解消されている (図 2b)。モデルの雪中温度 (灰色破線) については改善の余地が多分に残されている。

モデル実行には、ユーザズガイド (<http://pf.kishou.go.jp/>) (モデル利用申請の上、閲覧には認

証が必要) ; 1.4.1 気象庁ルーチン GPV (GSM) からのダウンスケーリングを参照し、JMA-NHM パッケージが提供する領域予報のためのスクリプト群 (RF20km) をグリーンランド気象予測用に修正して利用した。

## 2.2 入力データ

モデル実行時に必要となる風速・気温・湿度等に関する初期条件・境界条件として、00, 12UTC を初期時刻とする気象庁全球予報値 (GRIB2 形式) を京都大学生存圏研究所生存圏データベース (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/>) から取得した。同じデータは、東京大学先端科学技術研究センター (<http://dias.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/gpv/>)、筑波大学計算科学研究センター (<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/~gpvjma/>) でもアーカイブされている。

## 2.3 描画ツール (mplot, GMT, GrADS)

数値実験の出力は MRI 形式 (齊藤ら, 2001) で行い、JMA-NHM パッケージに含まれる描画ソフト mplot を用いて水平・鉛直断面図を作成した。mplot は、数値予報標準データセットシステムに準拠した Nusdas 形式の出力にも対応している。地点気象要素の時間変化を描画する際には、自作の解析プログラムを用いてテキストデータに変換の上、描画ソフト GMT (<http://gmt.soest.hawaii.edu/home/>) を用いて図化した。全球予報値を図化するには、描画ソフト GrADS (<http://iges.org/grads/>) を用いた。

## 2.4 情報提供

実験結果は、総観場を把握するための水平・鉛直断面図 (図 3)、観測サイトや氷床上にあるその他の自動気象観測装置 (AWS) 観測点の地点別時系列図 (図 4) として図化され、無料ウェブサービスを利用して観測隊に提供された (図 5)。表 2 に、提供された予測情報をまとめた。

観測隊のロジスティクス拠点であるグリーンランド北西部に位置するカナック (Qaanaaq) は、情報インフラが整備されており、観測隊は気象予測結果を図情報の形で PC 上のブラウザで閲覧することができる。一方、地上の情報インフラから隔絶された氷床上の観測点では、観測隊が利用できる通信は衛星通信に限られるため、データサイズの大きい図情報の入手は困難である。そこで、

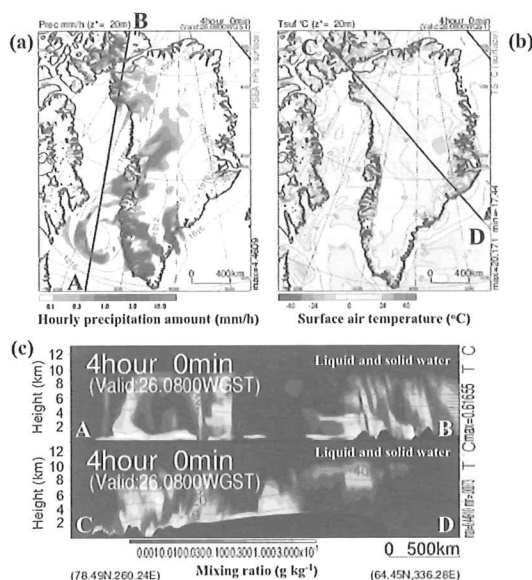


図3 水平・鉛直断面図の例(2013年7月26日08 WGST). (a) 1時間降水量, (b) 地上気温, (c) ABおよび(d) CDに沿った鉛直断面における液体・固体水粒子の混合比.

Fig. 3 Examples of weather chart in horizontal and vertical cross section (08 WGST on 26 July 2013). (a) Hourly precipitation amount. (b) Surface air temperature. (c) Mixing ratio of liquid and solid water.

観測隊の活動に有益な気象予測情報を必要最低限の範囲で選択し, 通信資源を圧迫しない程度の大きさの簡易データを作成した. まず, 予測実験結果から, 地上と, 対流圏中層の代表としての高度5000 mについて, 予め決められた4つの地点における10種類の気象要素(気圧・気温・湿度・雲量(高層, 中層, 下層)・風速・風向・雨雪フラグ・降水量)を12時間毎4回分抽出した. 抽出したデータそれぞれを適度に階調化し, 8バイト実数から1バイト(8ビット)または1, 4, 7ビットのいずれかのサイズの整数に変換した(表3). この処理により, 合計データサイズを1/10程度(256バイト)に縮小できた. この簡易データは, 観測隊に滞在中の観測隊と国内の留守本部との間で毎日交わされる定時交信の際に, 観測隊宛ての天気予報文とともに電子メールに添付して送信された. これを受信した観測隊の気象担当者は, 式(1)および表3に基づくデコードプログラムを用いて逆

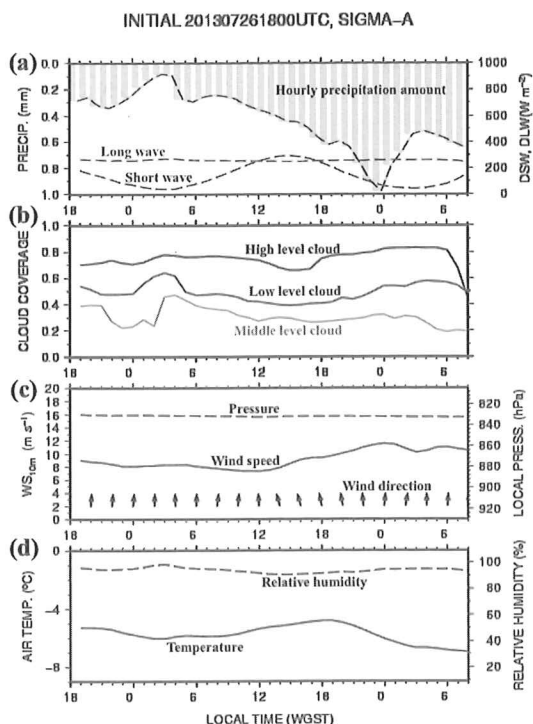


図4 地点別時系列の例(2013年7月26日, SIGMA-A). (a) 1時間降水量と下向き短波・長波放射フラックス. (b) 高層・中層・下層の雲量. (c) 風速・風向・気圧. (d) 気温と湿度.

Fig. 4 Examples of time series of local weather element (July 26, 2013, SIGMA-A). (a) Hourly precipitation amount, and downward short and long wave radiation fluxes. (b) Cloud coverage. (c) Wind speed and direction, and pressure. (d) Air temperature and relative humidity.

変換し, 気象予測値を読み取った.

$$VARn_L^U = MINn_L^U + \frac{DIGn_L^U}{TONEn_L^U - 1} (MAXn_L^U - MINn_L^U) \quad (1)$$

$$(n_L^U = 0^U, 0_L, 1, 2, 3, 4^U, 4_L, 5^U, 5_L, 6^U, 6_L, 7^U, 7_L)$$

ここで,  $VARn_L^U$ ,  $DIGn_L^U$  は地点・時刻情報および10種類の気象要素値(8バイト実数)と, それを整数化した簡易データ値.  $DIGn$  は1バイト整数.  $DIGn^U$  は1バイト整数の内の上位4ビット( $n=7$ については上位1ビット),  $DIGn_L$  は下位4

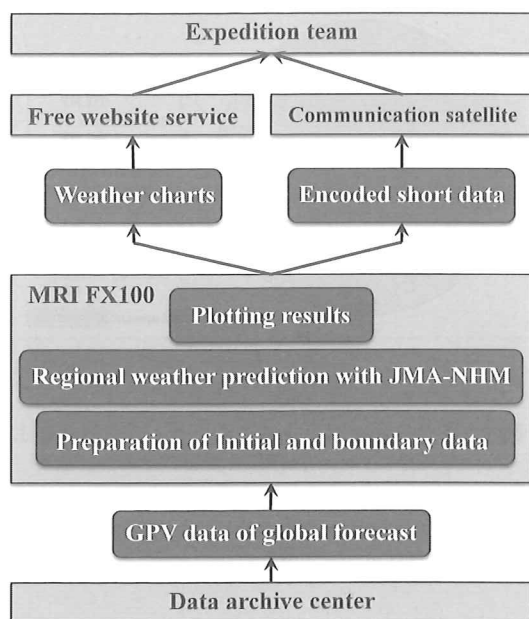


図 5 気象予測実験システムの模式図。

Fig. 5 Schematic chart of weather prediction system.

ビット ( $n=7$  については下位 7 ビット) を表す。 $MIN_n^L$ ,  $MAX_n^L$  は、簡易データが保持できる値の下限と上限。 $TONE_n^L$  は、下限値と上限値の間を分割する階調の数である。

### 3. 運用

#### 3.1 計算資源

予測実験は、気象研究所のスーパーコンピューター FX100 (FUJITSU Supercomputer PRIMEHPC FX100) を用いて実行した。数値モデルの最適化には、ソースコードの変更はせず、コンパイルオプションと並列計算の仕様をいくつか試行した上で、モデル実行の効率化と定時性維持の観点から、256 MPI 並列ジョブ (32 MPI×8 ノード) として実行することとした。1 ノード当りの最大メモリ使用量は 18.5 GB である。この仕様で実行すると、予測実験 1 回当りの実行時間は、積分時間間隔 ( $\Delta t$ ) 8 秒の場合、2 時間強であった。図 6a は、水平風速・鉛直風速・浮力振動数のモデル計算値から予測実験毎に診断される CFL 条件 (数値解が安定であるための必要条件) を  $\Delta t$  の上限値として表している。これによると、グリーンランド

表 2 観測隊に伝達された気象情報。

Table 2 Weather information provided to the expedition team.

| Drawing element                                 | Horizontal cross section | Vertical cross section | Time-height cross section* | Local weather element† | Encoded short data** |
|-------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------|
| Potential temperature                           | ●                        |                        |                            |                        |                      |
| Relative humidity                               | ●                        |                        |                            | ●                      | ●                    |
| Vorticity                                       | ●                        |                        |                            |                        |                      |
| Wind speed and direction                        | ●                        | ●                      | ●                          | ●                      | ●                    |
| Pressure                                        |                          |                        |                            | ●                      | ●                    |
| Sea surface pressure                            | ●                        |                        |                            | ●                      | ●                    |
| Temperature                                     | ●                        | ●                      | ●                          | ●                      | ●                    |
| Rainfall or snowfall amount                     | ●                        |                        |                            | ●                      | ●                    |
| Mixing ratio of all hydrometeors                |                          | ●                      |                            |                        |                      |
| Mixing ratio of liquid or solid hydrometeors    |                          |                        | ●                          |                        |                      |
| Cloud coverage of high, middle, low level cloud |                          |                        |                            | ●                      |                      |
| Downward radiation flux (shortwave or longwave) |                          |                        |                            | ●                      |                      |

\*Expeditionary base and AWS sites

\*\*Four AWS sites (SIGMA-A, SIGMA-B, Qaanaq, NEEM)

表 3 簡易データの仕様。

Table 3 Specifications of the encoded short data.

|                         | VARIABLE           | UNIT        | MIN  | MAX   | INCREMENT | TONE | SIZE         | DIGIT              |
|-------------------------|--------------------|-------------|------|-------|-----------|------|--------------|--------------------|
| Station ID              | VAR 0 <sup>0</sup> | (height) km | 0    | 15    | 1         | 16   | upper 4 bits | DIG 0 <sup>0</sup> |
|                         | VAR 0 <sub>1</sub> |             | 0    | 15    | 1         | 16   | lower 4 bits | DIG 0 <sub>1</sub> |
| Time                    | VAR 1              | *day UTC    | 0    | 63.75 | 0.25      | 256  | full 8 bits  | DIG1               |
| Pressure                | VAR 2              | hPa         | 100  | 1120  | 4         | 256  | full 8 bits  | DIG2               |
| Temperature             | VAR 3              | °C          | -100 | 27.5  | 0.5       | 256  | full 8 bits  | DIG3               |
| Humidity                | VAR 4 <sup>0</sup> | %           | 25   | 100   | 5         | 16   | upper 4 bits | DIG 4 <sup>0</sup> |
| High-cloud coverage     | VAR 4 <sub>1</sub> |             | 0    | 1     | 0.0625    | 16   | lower 4 bits | DIG 4 <sub>1</sub> |
| Middle-cloud coverage   | VAR 5 <sup>0</sup> |             | 0    | 1     | 0.0625    | 16   | upper 4 bits | DIG 5 <sup>0</sup> |
| Low-cloud coverage      | VAR 5 <sub>1</sub> |             | 0    | 1     | 0.0625    | 16   | lower 4 bits | DIG 5 <sub>1</sub> |
| Wind velocity scale     | VAR 6 <sup>0</sup> |             | 0    | 15    | 1         | 16   | upper 4 bits | DIG 6 <sup>0</sup> |
| 16-direction wind scale | VAR 6 <sub>1</sub> |             | 0    | 15    | 1         | 16   | lower 4 bits | DIG 6 <sub>1</sub> |
| Flag (if snow < rain)   | VAR 7 <sup>0</sup> |             | 0    | 1     | 1         | 2    | upper 1 bit  | DIG 7 <sup>0</sup> |
| Precipitation scale     | VAR 7 <sub>1</sub> |             | 0    | 5.1   | 0.04      | 128  | lower 7 bits | DIG 7 <sub>1</sub> |

の気象条件の季節変化に応じて CFL 条件は変化する。予測実験システムの運用に当たっては CFL 条件の変化を見つつ、安全側に立ち、 $\Delta t = 8 \sim 12$  秒の間で調節した。図の期間を振り返ると、あと数秒程度  $\Delta t$  を長くしても問題ない。図 6b は気象予測実験 1 回当りの実行時間を表している。 $\Delta t$  の調節により、実行時間は 1 時間～2 時間 10 分程度の範囲で変化した。

予測実験開始時に必要となる初期値・境界値等の入力データは 2.3 GB、予測結果として出力されるデータは 21.1 GB であった。したがって、1 回の予測実験に必要なディスク容量は合計 23.4 GB である (図 7)。入出力データは必要な処理 (地点別プロファイルデータ・図化データの作成) をした後、一部 (地上 2 次元出力データ) を除いて削除した。地点別プロファイルデータ (6.3 MB)・図化データ (487 MB)・地上 2 次元出力データ (772 MB) を合わせ、予測実験 1 回あたり 1.3 GB を長

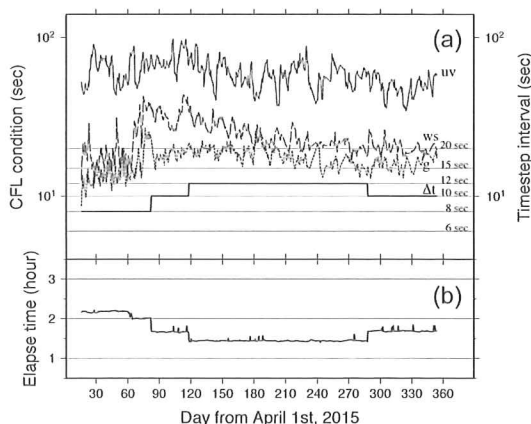


図 6 (a) 積分時間間隔 ( $\Delta t$ , 太線) に対する CFL 条件。細実線 (uv)・破線 (ws)・点線 (g) は、それぞれ、水平風速度・鉛直風速度・浮力振動数の計算値から診断される積分時間間隔の上限。(b) 気象予測実験 1 回当たりの実行時間。

Fig. 6 (a) CFL condition on the permissible range of timestep interval ( $\Delta t$ , bold line). Thin (uv), broken (ws), and chain (g) lines indicate the upper limit of timestep interval which is diagnosed by the simulated horizontal and vertical wind, and the buoyancy frequency, respectively. (b) Elapsed time of a simulation.

期保存している。

気象研究所 FX100 で、1 日 2 回の予測実験を 1 年間行う場合に必要となる計算時間は、373,760 CPU 時間 ( $256 \text{ CPU} \times 2 \text{ 時間} \times 2 \text{ 回} \times 365 \text{ 日}$ ,  $\Delta t = 8 \text{ 秒}$ )、ストレージ容量は 949 GB ( $1.3 \text{ GB} \times 2 \text{ 回} \times 365 \text{ 日}$ ) である (図 7)。

### 3.2 人的資源

気象予測実験システムの運用には、前節で述べた十分な計算資源 (CPU 時間およびストレージ容量) とともに、システム運用を適切に維持するためのスキルをもった要員も不可欠である。システム運用に当たってなすべき作業は、予測実験システムの構築と改良に関するものと、システム監視と障害対応に関するものに大別できる。JMA-NHM は、流体力学過程の他、大気中の放射過程、雲物理過程や陸面過程等、様々な物理過程を包括した偏微分方程式系で成り立っている。このため、予測実験の構築や改良には、偏微分方程式の差分法と数値安定性に関する基礎知識が要求される他、csh, bash 等のシェルスクリプト、awk

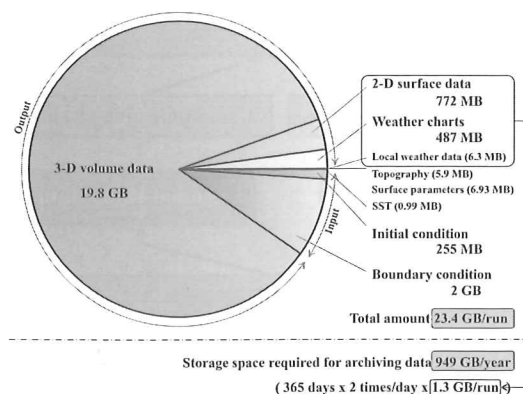


図 7 予測実験 1 回当たりに必要なディスク容量と 1 年間分のデータ保存に必要なディスク容量。

Fig. 7 Disk amount required for a run of the weather prediction system and storage space required for archiving data.

等のスクリプト言語、および、プログラミング言語 Fortran 等を自在に操るスキルが必要である。さらに、気象学・雪氷学的観点から計算結果に潜む問題を見抜き、プログラム上での解決策を講じる (場合によっては解決可能かどうかを見極める) ための見識が必要である。一方、システム監視や障害対応には、利用する計算機システムやネットワークのスペック・運用スケジュール等の基本事項を理解しておく必要がある。以上のように、予測実験システムの運用に当たり、必要となる知識や技術は様々であるため、数名で知識や技術を共有しつつ取り組むことが望ましい。ポスドクや大学院学生を含め研究者がこれにあたる場合は、研究的動機付けが適切になされることが重要である。

### 3.3 運用スケジュール

予測実験結果の図情報が、現地時間 (Western Greenland Summer Time; WGST) で毎日午前・午後 7 時頃に、インターネットを介して閲覧可能となるよう、午前・午後 2 時半 (日本時) 頃に、予測実験を開始した。この時間帯に取得可能な最新の全球予報結果である 00UTC または 12UTC を初期時刻とする予報値をもとに、グリーンランド気象予測実験の初期値・境界値を作成した。初期値・境界値の作成は数分で完了し、予測実験を開始する。予測実験は計算開始後 2 時間程度、午前・午後 4 時 30 分頃 (WGST) に終了する。その

## 04-SERIES

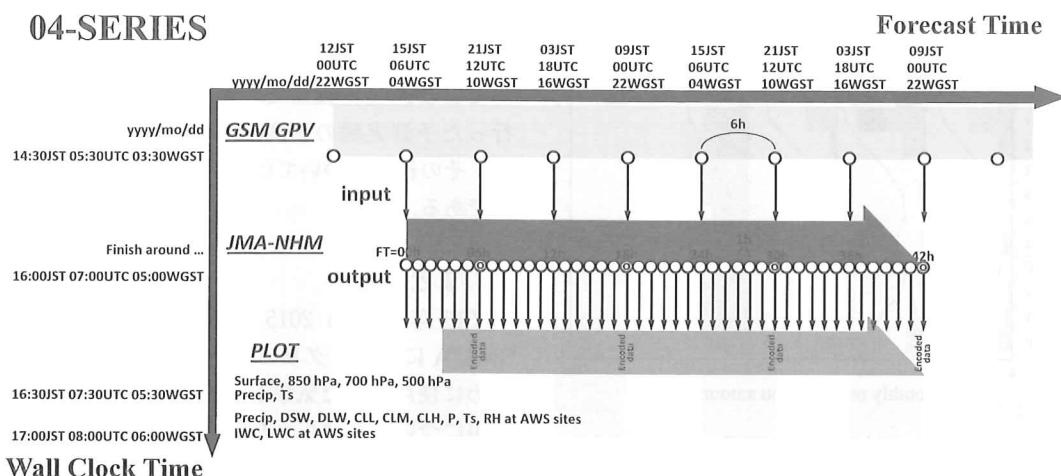


図 8 初期時刻を 04 WGST とする気象予測実験の実行スケジュール。横軸は予測時刻。縦軸は実時刻。図中の矢印は入出力を表す。

Fig. 8 Schedule for the weather prediction with initial time of 04 WGST in each day. Horizontal axis indicates the forecast time. Vertical axis indicates the wall clock time. Arrows indicate the data flow.

後、描画を行い、午前・午後 7 時頃 (WGST) に全ての図情報が閲覧可能となる。毎日 2 回の実行の内、日本時間の夕方に実行する際のスケジュールを図 8 にまとめた。

## 4. 効果

2013 年 7 月 23 日から 30 日にかけて 1 週間にわたる SIGMA-A 地点での SIGMA 隊による観測は、その期間中 4 日間 (25~28 日) をブリザードに見舞われ、いくつかの気象・雪氷観測を取りやめざるを得ない状況だった (Aoki *et al.*, 2014)。この 4 日間、気象予測実験システムによる風速は、SIGMA-A 地点で  $10 \text{ m s}^{-1}$  以上の値を示しており、この間の状況をよく予測していた (図 9)。さらに、29 日以降、風が次第に弱まっていく傾向も予測できており、撤収およびカナックへのヘリコプターオペレーション実施 (30 日) のための有力な判断材料となった。

図 10 は、科研費 SIGMA で AWS を設置した地点 (SIGMA-A, -B, -D) とグリーンランド南東ドームアイスコア掘削地点 (Iizuka *et al.*, 2016) における 1 水文年間の月別降水量 (2013 年 9 月~2014 年 8 月) の予測値である。北部で夏涵養型、南部で冬涵養型の季節変化が現れている。Cappelen *et al.* (2001) によると、グリーンランド

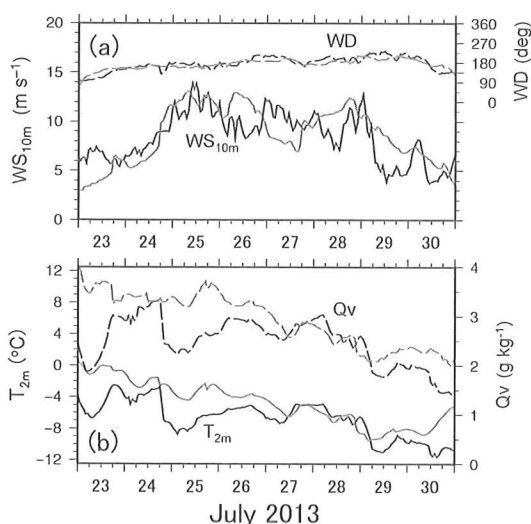


図 9 2013 年 7 月集中観測期間中の SIGMA-A における (a) 風速 (実線), 風向 (破線), (b) 気温 (実線), 水蒸気混合比 (破線)。灰色が予測値, 黒が観測値を表す。

Fig. 9 (a) Wind speed (solid line), direction (broken line), (b) air temperature (solid line) and water vapor mixing ratio (broken line) during the intensive observation period in July 2013 at SIGMA-A. Gray and black indicate predicted and observed values, respectively.

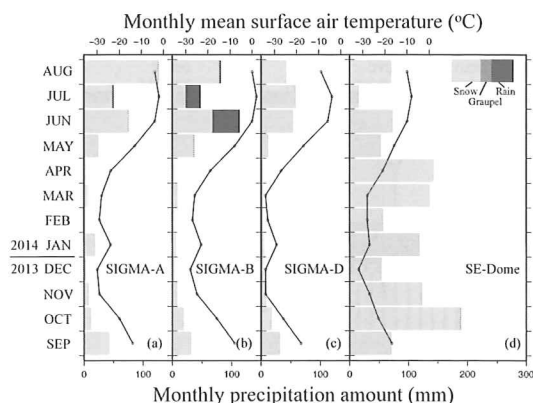


図 10 SIGMA-A, -B, -D および SE-Dome における 1 水文年 (2013 年 9 月 1 日～2014 年 8 月 31 日) の予測値から計算された月別降水量 (棒グラフ). 棒グラフの薄灰色, 灰色, 黒は, それぞれ, 月別降水量に対する雪, 霰, 雨の寄与を表す. 実線は月別平均気温を表す.

Fig. 10 Monthly precipitation amount in the hydrological year from 1 September 2013 to 31 August 2014 at the SIGMA-A, -B, -D, and SE-Dome. Thin gray, middle gray, and black indicate the contributions of snow, graupel, and rain to monthly precipitation amount, respectively. Solid lines indicate monthly mean surface air temperature.

氷床周辺の観測点の月別降水量の気候値は, 北部では夏季に, 南部では冬季に極大を示しており, 図 10 の結果は, これと同じ傾向を示している. 定量的な検証は今後の課題だが, グリーンランドの実際の降水の季節変化と整合的な結果を得たことは, 本予測モデルの気候モデルとしての応用性にも期待できる結果である.

科研費 SIGMA において予測実験システムの有用性が確認できたことから, グリーンランド氷床上で行われるその他の現地活動に対しても情報提供を行った (グリーンランド北西部でのエアロゾル・気象・フロストフラワー観測 (2013, 2014 年度, Matoba *et al.*, 2014, Hara *et al.*, 2014), GRENE-Arctic ボードイン氷河観測 (2013, 2014, 2015 年度, Sugiyama *et al.*, 2015), グリーンランド南東ドームアイスコア掘削 (2015 年度, Iizuka *et al.*, 2016), スイス連邦雪・雪崩研究所による GC-Net AWS メンテナンス (2015 年度)). 一方, 観測サイドからは, モデルの予測精度や予測特性

に関して, 定時交信, 観測データ, または, 私信の形でフィードバックされ, 予測モデルの精度評価および改良に役立てられている. これまでに行った予測実験の精度検証作業を目下進めており, その結果については, 別の論文で公表する予定である.

## 5. まとめ

2013 年度から 2015 年度にかけて, 科研費 SIGMA におけるグリーンランド野外観測支援のために使用された気象予測実験システムの構築・運用について概説し, 初期的結果を示した.

本予測実験システムの仕様は, 気象研究所スパコンシステム (FX100) に合わせたものだが, 国内主要研究機関の保有する同程度の規模のスパコンシステム上でも, 同様の予測実験システムが実現可能である. 予測対象領域 (本稿ではグリーンランド) は, 利用可能な計算資源に応じて, 北極域または南極域を広くおおう領域に拡張できる. また, グリーンランド氷床・南極氷床のみならず, 山岳氷河や海水をはじめ, 様々な雪氷フィールド観測にも適用可能である.

予測実験システムの運用にあたっては, 十分な計算資源の他, 気象・雪氷に関する知識および数値実験に関するスキルをもった人材が不可欠であり, そのような人材の確保と育成が必要である.

グリーンランド氷床上での現地観測において, 本予測実験システムの有用性を実地に確認できたことは大きな成果であった. 今後, 雪氷観測と気象モデルの連携により, 関連研究がさらに促進されることを期待している.

## 略 語

CFL “Courant-Friedrichs-Lewy condition” 数値解が安定であるための必要条件. 現実の大気中におけるエネルギー・物質の移流速度や音波・重力波の伝搬速度を, 数値計算で再現できるよう, 格子間隔や積分時間間隔を適切に設定する必要がある.

GMT “The Generic Mapping Tools” ハワイ大学によって開発された汎用マッピングツール群  
GPV “Grid Point Value” 格子点値

GrADS “The Grid Analysis and Display System”  
コロンビア大学海洋地表大気研究所によって  
開発された格子解析表示システム

GRENE-Arctic “Green Network of Excellence Arctic Climate Change Research Project” グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業  
北極気候変動分野「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」

GSM “Global Spectral Model” 気象庁全球モデル  
JMA-NHM “Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model” 気象庁非静力学モデル  
MRI “Meteorological Research Institute” 気象研究所

NusDaS “Numerical weather prediction standard Dataset System” 数値予報標準データセットシステム

SIGMA “Snow Impurity and Glacier Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” 北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究

## 謝 辞

北海道大学低温科学所グリーンランド南東ドームアイスコア掘削隊、ならびに、GRENE-Arctic ボードイン氷河観測隊から現地の気象実況を毎日報告していただきました。また、SIGMA プロジェクト研究者の皆様から有益な助言と励ましをいただきました。記して謝意を表します。査読過程で適切な助言をいただいた査読者に感謝いたします。グリーンランド気象予測実験システムで利用した全球予報格子点データは京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたものです (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>)。本研究の一部は JSPS 科研費 23221004 の助成を受けたものです。

## 文 献

青木輝夫, 2007: 極地・寒冷域・僻地の気象観測. 天気, 54, 593-596.  
Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama, 2014: Field activities of the “Snow Impu-

rity and Glacier Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 3-20, doi : 10.5331/bgr32.3.

Bromwich, D. H., F. O. Otieno, K. M. Hines, K. W. Manning and E. Shilo, 2013: Comprehensive evaluation of polar weather research and of forecasting performance in the Antarctic. *J. Geophys. Res.*, 118, 274-292, doi : 10.1029/2012JD018139.

Cappelen, J., B. V. Jørgensen, E. V. Laursen, L. S. Stannius and R. S. Thomsen, 2001: The observed climate of Greenland, 1958-99 - with climatological Standard Normals, 1961-90. *Danish Meteorological Institute Technical Report*, 00-18.

原 旅人, 2008: 第 6.3 節地表面物理量の評価. 数値予報課報告・別冊第 54 号「気象庁非静力学モデル II」, 176-180.

Hara, K., S. Matoba and T. Yamasaki, 2014: Aerosol measurements at Siorapaluk, Greenland. The Fifth Symposium on Polar Science, Tokyo, 2-5 December 2014. [http://www.nipr.ac.jp/symposium2014/program/abstract/OM\\_Hara\\_00355\\_01.pdf](http://www.nipr.ac.jp/symposium2014/program/abstract/OM_Hara_00355_01.pdf).

Hines, K. M. and D. H. Bromwich, 2008: Development and Testing of Polar WRF. Part I. Greenland Ice Sheet Meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 1971-1989, doi : 10.1175/2007MWR2112.1.

Hines, K. M., D. H. Bromwich, L.-S. Bai, M. Barlage and A. G. Slater, 2011: Development and testing of Polar WRF. Part III. Arctic land. *J. Clim.*, 24, 26-48, doi : 10.1175/2010JCLI3460.1.

Iizuka, Y., S. Matoba, T. Yamasaki, I. Oyabu, M. Kadota and T. Aoki, 2016: Glaciological and meteorological observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, 33, doi : 10.5331/bgr.15R03.

Matoba, S., K. Hara and T. Yamasaki, 2014: Chemical compositions of frost flower at Siorapaluk in northwestern Greenland. The Fifth Symposium on Polar Science, Tokyo, 2-5 December 2014. [http://www.nipr.ac.jp/symposium2014/program/abstract/OM\\_Matoba\\_00172\\_01.pdf](http://www.nipr.ac.jp/symposium2014/program/abstract/OM_Matoba_00172_01.pdf).

Matoba, S., H. Motoyama, K. Fujita, T. Yamasaki, M. Minowa, Y. Onuma, Y. Komuro, T. Aoki, S. Yamaguchi, S. Sugiyama and H. Enomoto, 2015: Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, 33, 7-14, doi : 10.5331/bgr.33.7.

村上正隆, 石原正仁, 加藤輝之, 橋本明弘, 2015: JCSEPA プロジェクトの実施体制. 気象研究ノート, 231, 27-35.

- Powers, J.G., A.J. Monaghan, A.M. Cayette, D.H. Bromwich, Y.-H. Kuo and K.W. Manning, 2003 : Real-time mesoscale modeling over Antarctica : The Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 1533-1545, doi : 10.1175/BAMS-84-11-1533.
- 斉藤和雄, 加藤輝之, 永戸久喜, 室井ちあし, 2001 : 気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル. 気象研究所技術報告, **42**, 133 pp.
- Saito K, T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006 : The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1297.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki, 2015 : Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *J. Glaciol.*, **61**, 223-232, doi : 10.3189/2015JoG14J127.
- Wilson, A.B., D.H. Bromwich and K.M. Hines, 2011 : Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis domain : Surface and upper air analysis. *J. Geophys. Res.*, **116**, D11112, doi : 10.1029/2010JD015013.

## Numerical weather prediction supporting cryospheric field observation campaign on the Greenland Ice Sheet

Akihiro HASHIMOTO<sup>1\*</sup>, Masashi NIWANO<sup>1</sup> and Teruo AOKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,*

*1-1 Nagamine, Tsukuba, Japan, 305-0052*

*\* Corresponding author: ahashimo@mri-jma.go.jp*

**Abstract:** Short-range weather forecast experiments, covering entire Greenland were carried out in order to support the field research activities on the Greenland ice sheet (GrIS) in the research project "Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic" (SIGMA, FY2011-FY2015). This article summarizes the technical method for development and operation of the forecast system and shows preliminary results on its performances. The forecast system is established on the basis of the Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model. Outputs of the model are plotted on figures, and provided to an expedition team by using a free web service. When the expedition team leaves the logistical base and camps on the GrIS isolated from the ground-based internet access, minimal data are selected, compressed, and provided to the team through a satellite communication service. The forecast system updates field researchers with information and help them in planning and executing their daily missions. The effectiveness of the system has been verified in the expedition on the GrIS, and its potential application extends to wide range of field works in the polar regions and mountain glaciers. The meteorological observation data obtained on the GrIS are used for validation and improvement of the model.

(2016 年 3 月 30 日受付, 2016 年 4 月 29 日改稿受付, 2016 年 5 月 5 日最終改稿受付,  
2016 年 5 月 6 日受理, 討論期限 2017 年 1 月 15 日)