

## 2005年春季極域・寒冷域研究連絡会の報告

日本気象学会2005年度春季大会(東京)4日目(5月18日)のセッション終了後に、極域・寒冷域研究連絡会が大会D会場(山上会館大会議室)にて行われた。出席者は約50名であった。今回の極域・寒冷域研究連絡会は、「雪氷圏のモデリング」と題しての講演会を行った。大気海洋現象の予測や研究には、大循環モデルや領域モデルは、もはや不可欠のものとなっている。モデリングに際しては、積雲対流スキームなどに代表されるように、どうしても関心が熱帯に向かいがちだが、気象現象や気候のより精緻な予測及び研究のためには、モデル内での雪氷圏の取り扱いも重要であることは論を待たない。そこで、様々な立場から雪氷圏のモデリングに関わる研究をなさっている4人の方々に、気象庁現業モデルでの雪氷圏の取り扱い、GCMでの極域水循環、結合モデルでの雪氷圏の取り扱い、及び季節海水域のモデリングを行うにあたって重要となる観測事実などのテーマについて、それぞれ講演していただいた。以下に、各講演者より寄せられた講演要旨を紹介する。

代表:

山崎孝治(北海道大学大学院地球環境科学研究院)

世話人:

平沢尚彦(国立極地研究所)

中村 尚(東京大学理学系研究科)

浮田甚郎(千葉大学)

高田久美子(地球環境フロンティア研究センター)

阿部彩子(東京大学気候システム研究センター)

佐藤 薫(東京大学理学系研究科)

本田明治(地球環境フロンティア研究センター)

齋藤冬樹(東京大学気候システム研究センター)

猪上 淳(地球環境観測研究センター)

高谷康太郎(地球環境フロンティア研究センター)

[http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl\\_index](http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index)

話題:

## 1. 「気象庁全球モデル・領域モデルにおける現状の雪氷表現と今後の課題」

平井雅之(気象庁予報部)

気象庁が天気予報作業のために運用している現業用全球数値モデル(GSM)における雪氷の取り扱いについて述べる。本日は、発表の持ち時間の都合上、領域数値予報モデル(RSM)に関しては触れず、GSMに関してのみ述べる。GSMは、週間予報・長期予報など目的に応じて解像度や予報時間を変えて運用しているが、本日は、私が業務で担当している週間予報向けのGSM(水平解像度約60km(TL319)、鉛直層数40層、最大予報時間216時間)における雪氷域の取り扱いの現状、現在取り組んでいる開発課題について示す。

初めに、GSMの陸面過程パラメタリゼーションは、雪氷域だけではなく全球を予報対象とするため、雪氷域に特化したものではなく、熱帯雨林、砂漠、雪氷域など全球のあらゆる地域で共通に取り扱うことに留意する。陸面過程は、キャノピー・積雪・土壌の各過程に大別できる。GSMの陸面過程のうちキャノピー過程に関しては、基本的にSellers *et al.* (1986)に基づいている。一方、土壌・積雪過程は、土壌温度が1層しかなく雪を明示的に扱わないなど、簡便な仕組みになっている。現状のGSMによる陸面表現で最大の問題と考えている点は、融雪が実況よりも早く進行することである。また、統合水循環観測期間(CEOP)プロジェクトによる、ロシアやモンゴルでの現地観測で検証した結果、凍土における気温の日変化特性を十分に表現していないことが明らかになっている。CEOPプロジェクトの現地観測のような、高品質の放射・熱フラックス観測は数値予報モデルの陸面過程の検証にとって貴重なものである。

現在、気象庁と気象研究所が共同で、新しい陸面過程のパラメタリゼーションの開発を進めている。新しい陸面過程では、多層の土壌・雪層モデルを導入した

り、水の相変化時の熱を考慮したりするなど、現行の陸面過程で簡便な取り扱いとなっていた土壌と雪の取り扱いの精緻化を図っている。新陸面過程を用いて長期積分を行った結果、現行の陸面モデルで問題であった融雪過剰の系統的な誤差を解消できることが確認できた。また、新陸面過程は、凍土域における気温の日変化特性や地上付近の熱収支の再現性が現行の陸面過程に比べて良いことが分かった。しかし、事例により地面付近の気温を観測値及び現行モデルより低く予想することが判明した。

最後に、数値予報モデルの陸面初期値に用いる陸面解析について示す。積雪は1日に1回解析している。解析には、世界の現業機関の地上気象観測のほかに、気候値・前日解析値を用いているが、衛星データは使用していない（ただし、アンサンブル予報用のGSMの積雪解析には衛星データを使用している）。現行の積雪解析には、積雪域を過大に見積もること、ヒマラヤなど地上気象観測データの乏しい領域で積雪を解析できないという問題がある。これを解決するには、衛星データを利用した積雪域/無積雪域の判別が必要になる。また、GSMでは海水や土壌水分の分布の予報初期値として気候値を用いている。今後、陸面解析を高度化するためには、衛星データの利用が重要である。現在、積雪や土壌水分の解析手法の高度化に関して、数値予報課と東京大学大学院工学系研究科で共同研究を行っている。また、MTSATによる積雪や海水分布のプロダクトの利用も考えていきたい。

## 2. 「GCMによる極域水循環」

保坂征宏（気象研究所）

気象庁・気象研究所で開発している全球大気モデル・全球気候モデルの、特に雪氷圏のモデリングとして、陸面モデル、海水モデル・海氷上フラックススキームの概要とその振る舞いを示す。現在気象庁と気象研究所とは大気モデル・海洋モデルとも統一モデルを共同開発中であり、平井氏と筆者は同じ陸面モデルを開発しているが、筆者は特に気候研究的な観点から紹介する。

まず陸面モデルであるが、地表面フラックスを評価する植生部分、積雪部分、土壌部分に大別できる。予報変数は構成要素の温度・水分量であり、大気モデルからは下向き放射、降水量などを得て、大気モデルには評価した熱・水のフラックスを返す。この他、大気モデルの放射計算用にアルベドも渡す。植生区分は13

で、雪氷域としては、氷床・砂漠・ツンドラ・常緑/落葉針葉樹林などがある。植生被覆率などのパラメータは異なるが、基本的に同じスキームで計算される。

植生部分では、キャノピー・下草・裸地面での長波・短波放射のほか、顕熱（蒸発・蒸散・昇華）・潜熱・地熱が評価され、その際気孔抵抗や自由対流などが考慮される。積雪があると植生が減る（下草がすべて隠れ、キャノピーの一部が隠れる）ような扱いがされる。部分積雪の場合は、積雪域と無積雪域のそれぞれでフラックス・予報変数が評価され、大気に返すフラックスは面積平均された値となる。

積雪は、積雪量に応じて積雪なし（SWE：積雪水当量0 mm）、部分積雪（同4 mm以下）、全面積雪（同4 mm以上）であり、全面積雪の場合はSWEに応じて最大3層になる。積雪では、熱伝導・短波透過・液水の浸透・融解・再凍結・底面融解・圧密が考慮され、密度も予報される。ただし吹雪や着氷などは扱われておらず、非一様性は部分積雪以外には考慮されていない。アルベドはAoki *et al.* (2003) に従い、時間経過するにつれて減少し、降雪で初期値にリセットされ、また、減少率と初期値は温度に依存する。

土壌は3層で、熱伝導、液水の浸透、水の相変化の過程を含む。第三層の下には、熱溜めとなる第四層がある。土壌の表層および第三層の下では河川流出水が評価され、これは系から排出される。

このような陸面モデルを含む気象庁・気象研究所全球大気統一モデルを20 km メッシュで計算したときの積雪被覆率の季節変化を、NOAA/NCDCによる結果と比較すると、積もりはじめでは多少低緯度側に多めに出る傾向はあるものの、非常によく一致している。ただしこれは、積雪アルベドとして上記のスキームを用いたためであり、以前用いていたスキームでは約1か月ずれ、そのため場所によっては地表面温度に10度近いバイアスがあった。モデル化しやすい観測あるいはプロセス研究の優れた成果は、モデル開発に非常に役に立つ好例である。

続いて海氷の扱いに移る。気候モデルでは、大気モデル内の海面上フラックススキームと海洋モデル内の海水モデルとに分かれている。まず大気モデルで海面上の熱・水フラックスが評価される。これが海洋モデルに外部強制として渡され、海水のある領域では海水の計算がされる。海洋モデルで予測された海水面温度・海氷密接度等は大気モデルに渡され、下部境界条件として使われることになる。

海洋モデル内の海氷モデルは、内部応力（レオロジー）を考慮した、氷2層・積雪1層の比較的簡単なものである。

大気モデル内の海面上フラックススキームは、海水を計算するスキームと海氷を計算するスキームが存在する。従来大気モデルとして扱う場合は、海氷密接度（気候値）が閾値を超えるとすべて海水、閾値未満ではすべて海水として評価してきた。また海氷の厚さは季節によらず2mと一定で、海氷上の雪も考慮されていない。それに対して大気海洋結合モデルでは、海水・海氷の混在、海氷厚さの予報（海洋モデル）、海氷上の雪の取り扱いをしてきた。現在、大気モデルでの海氷の扱いを気候モデルに準じたものにするべく改良中である。実際、海水・海氷の混在を許すことにすると、従来の扱いで見られた海氷縁辺部の温度・フラックス等のギャップが緩和され連続的になる。また、海氷密接度は実際には1にはならないため、わずかながら存在する海面から大量の熱・水蒸気フラックスが供給される。

このように、気候モデルでは、アイスアルベドフィードバックやAOなどの現象の理解のため、雪氷圏を念頭に置いたモデリングもある程度はなされてきたが、まだまだ単純である。その高度化のためにも、優れた観測事実・プロセス研究の蓄積を期待する。それらは、モデルに直接導入できたり、モデルの強制・検証データとして使えることはもちろん望ましいが、そうでなくてもモデル開発者にとってイメージや刺激を与えることになる。

### 3. 「結合モデルCFESにおける雪氷圏の取り扱い」

小守信正（地球シミュレータセンター）

大気海洋結合モデルCFESは、大気大循環モデルAFES 2と海洋大循環モデルOIFESから構成される。前者は、CCSR/NIES AGCM 5.4.02 (Numaguti *et al.*, 1997) を参考にして地球シミュレータ用に開発されたAFES (Ohfuchi *et al.*, 2004) に、陸面モデルMATSIRO (Takata *et al.*, 2003) 導入などの改良を行ったものである。後者は、GFDL MOM 3 (Pacanowski and Griffies, 2000) を基に地球シミュレータ用に最適化されたOFES (Masumoto *et al.*, 2004) に、海氷モデルを導入したものである。

CFESの中の雪氷過程としては、降雪・積雪・凍土・海氷などが挙げられる。この他に、陸面の分類と

して氷床が存在し、他の陸面とは異なった取り扱いがなされている。また、氷河の代用として、積雪量がある閾値を超えた場合には、超過分を海洋へ流し込んでいる。以下では、積雪と海氷について述べる。

MATSIROでは、モデル格子内の陸面を裸地面と植生面に分け、それぞれについて無雪域・積雪域を考慮し、計4種類の陸面過程を計算した後、積雪面積率などを用いて合成している。標準の設定では、土壤温度と土壤水分は5層、積雪は最大で3層に分割して計算される。積雪が存在することにより、アルベドや植生高などの陸面パラメータが変化し、また当然のことながら、水蒸気フラックスは蒸発ではなく昇華となる。

積雪が大気大循環に与える影響としては、アルベドの変化を通して、熱的な境界条件を変化させることが重要である。実際、MATSIRO導入前のCFESを用いて、積雪のアルベドを0.1変化させた実験を行ったところ、3年間の平均で地表面温度が最大で5K以上変化しただけでなく、季節的なジェット的位置や強度も大きく変化した。

OIFESでは、Zhang and Zhang (2001) から拡張した海氷モデルを使用している。これは、モデル格子内の平均的な海氷厚を変数とし、海氷の存在する部分としない部分を分けて取り扱う“two-category model”と呼ばれる（これに対し、格子内の海氷厚分布を考慮するものは“multi-category model”と呼ばれる）系統の、また、温度に関しては、海氷の表面と底面にのみ変数を配置し、海氷内部には変数を持たない“zero-layer model”と呼ばれる（ただし、海氷上の積雪は考慮している）系統の海氷モデルである。普通の熱力学的な過程に加え、海氷上に積もった雪が徐々に氷に変化する圧密過程や、雪の重さで海水が沈んで雪が海水に浸かり氷に変化する過程 (snow ice) も考慮されている。また、海氷の力学過程は、粘塑性体モデル (Hibler, 1979) から弾粘塑性体モデル (Hunke and Dukowicz, 1997) に改めている。後者は、海氷の構成方程式に擬似的な弾性を導入して予報式とすることにより、計算効率を向上させたものである。

なお、海氷モデルに関する和文の解説としては、本井 (1996) や山口 (2001) など参照されたい。

海洋大循環にとっては、海水が動く、ということが重要である。海水が生成する際には、淡水の減少により周囲の塩分濃度を上昇させ、融解する際には下降さ

せるので、生成域から融解域へ淡水（あるいは負の塩分）を輸送することになる。また、いったん海水が生成されると大気海洋間の相互作用が阻害されるため、それ以上の海水生成は困難になるが、海水が生成域から移動することにより、効果的に海水が（そして高塩分の海水が）生成される。

『鎖の強さは、その最も弱い輪の強さで決まる』という言葉があるように、気候モデルにおいても、雪氷過程や水文過程など、これまであまり注意が払われていなかった部分の精度向上が、今後ますます重要になると予想される。一方で、モデル全体としてのバランスも大事であり、特定の素過程にのみ凝ったモデルを全球大循環モデルに導入するのは得策ではない。その意味で、大循環スケールの研究者と素過程の研究者など、異分野間の交流を進めることが大切であろう。

#### 4. 「季節海水域の特徴—オホーツク海の海水観測から—」

豊田威信（北海道大学低温研究所）

季節海水域とは冬季のみ海水に覆われる海域のことであり、北半球の最大海水域の約半分、南半球では約6分の5を占める。低気圧活動や外洋の影響を受けやすく、様々な形態の海水が存在する特徴を持つ。気候変化などによる海水域の消長の鍵を握っており、季節海水域における海水の成長・融解過程を正しく理解することは大変重要である。しかしながら、観測の困難さもあって未解明の部分も多い。北大低温研では、海上保安庁の協力の下に、オホーツク海南部において巡視船「そうや」を用いて1996年以来毎年2月に海水サンプリングや氷厚などの観測を実施している。ここでは、季節海水域のモデリングを念頭において、これまでの解析結果から推定される氷厚発達過程、それに融解過程で重要となる氷盤の大きさ分布の解析結果を紹介する。

海水モデルは大まかには力学過程を扱ったモデルと熱力学過程に着目したモデルとに分けられる。従来の力学モデルは、多年海水域と季節海水域とを問わず、基本的には Hibler (1979) の Viscous-Plastic Rheology, Two-category model が礎となっている。すなわち、海水域を連続体近似で取り扱い、氷厚と密接度の関数とした構成式から内部応力を見積もる手法である。しかしながら、実際に季節海水域の海水分布に接してみると、海水域は連続体というよりも開水面を挟んでクラスターとして分布する様子、ダイナミッ

クな ridging の一方でクラスター内の比較的静かな氷盤の重なり合い (rafting) の様子が散見される。そこで、観測された氷厚分布や海水構造をもとに、実際に氷厚はどのように発達しているのかを改めて考察してみた。

観測解析の結果、様々な氷厚の氷盤も基本的には結晶構造は粒状氷が卓越して平均5~10 cmの氷盤が乗り重なった構造をしており、nilas (比較的静穏な海域で生成される厚さ10 cm以下の氷) や young ice の比較的薄い氷の rafting がこの海域の海水の氷厚発達過程に本質的であることがわかった。これらの観測事実を踏まえて、rafting によってある面積比率の氷盤が乗り重なり、開いた開水面で新たに海水が生成して、更に次の rafting で、ある面積比率の氷盤が乗り重なる、という確率過程的なモデルを考案した。その結果、オホーツク海南部で観測された氷厚分布が精度良く再現されることが示された。このモデルは従来南極域の海水成長として提案されていた pancake cycle とも概念が共通しており、季節海水域全般に適用される可能性がある (Toyota *et al.*, 2004)。

一方、熱力学過程における季節海水域の特徴は、比較的低緯度に位置するゆえに特に融解期に日射量が多く、融解過程においては海水の側面融解が本質的となることである。最近では南極域の海水域の観測結果をもとに、比較的シンプルな側面融解モデルも考案されている (Ohshima and Nihashi, 2005)。この場合、同じ密接度であったとしても氷盤の大きさによって側面積が大きく異なるため、氷盤の大きさ分布は重要な意味合いを持つ。

そこで2003年2月に、オホーツク海南部において衛星、航空機、船舶の同期観測を行い、直径1 m~数 kmの幅広い氷盤の大きさ分布を調べた (Toyota *et al.*, 2006)。解析には、船舶・航空機のビデオ画像を合成した帯状画像と、その画像を含むように切り出した Landsat-7/ETM+衛星画像を使用し、オホーツク海南部における38 km×26 kmの領域に分布する氷盤を調べた。氷盤と海との輝度の違いを利用して氷盤を抽出する手法を用いて解析を行った結果、基本的には氷盤の大きさ分布には自己相似性が見られるが、直径約40 mを境に分布の特徴が変化することなどが明らかになった。また、同じ海水面積を1枚の氷盤で占めた場合に比べて、側面積は約600倍も大きくなることが示され、氷盤の大きさ分布の情報の重要性が示唆された。

以上、ここでは氷厚発達過程と氷盤分布に焦点を当てて観測から推定されることを記述した。これらの結果を如何に海水モデルの中に組み込むかは今後の重要な課題と考えている。

#### お詫びおよび謝辞

編集作業が遅れ、研究会報告が大幅に遅れてしまったことを、ここに心からお詫びいたします。また、講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。

#### 略語一覧

CEOP : Coordinated Enhanced Observing Period 統合水循環観測期間  
 MTSAT : Multi-functional Transport Satellite 運輸多目的衛星

#### 参考文献

- Aoki, T., A. Hachikubo and M. Hori, 2003 : Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi : 10.1029/2003JD003506.
- Hibler, W. D., III, 1979 : A dynamic thermodynamic sea ice model, *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 815-846.
- Hunke, E. C. and J. K. Dukowicz, 1997 : An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics, *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1849-1867.
- Masumoto, Y., H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma and T. Yamagata, 2004 : A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean : Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator), *J. Earth Simulator*, **1**, 35-56.
- 本井達夫, 1996 : 海水のモデリング, 鳥羽良明編「大気・海洋の相互作用」6-4節, 東京大学出版会, 237-249.
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima and A. Sumi, 1997 : Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model. Study on the climate system and mass transport by a climate model, CGER's Supercomputer Monograph Report, (3), 1-48.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M.K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura Y. Kurihara and K. Ninomiya, 2004 : 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator : Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), *J. Earth Simulator*, **1**, 8-34.
- Ohshima, K. I. and S. Nihashi, 2005 : A simplified ice-ocean coupled model for the Antarctic ice melt season, *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 188-201.
- Pacanowski, R. C. and S. M. Griffies, 2000 : MOM 3.0 Manual, GFDL/NOAA, Princeton, NJ, U. S. A., 680 pp.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986 : A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, 2003 : Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global Planet. Change*, **38**, 209-222.
- Toyota, T., T. Kawamura, K. I. Ohshima, H. Shimoda and M. Wakatsuchi, 2004 : Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, **109**, C06001, doi : 10.1029/2003JC002090.
- Toyota, T., S. Takatsuji and M. Nakayama, 2006 : Characteristics of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02616, doi : 10.1029/2005GL024556.
- 山口 一, 2001 : 海水変動の数値予測, *ながれ*, **20**, 295-303.
- Zhang, X. and J. Zhang, 2001 : Heat and freshwater budgets and pathways in the Arctic Mediterranean in a coupled ocean/sea-ice model, *J. Oceanogr.*, **57**, 207-234.