アンサンブル実験による全球陸域 積雪シミュレーションの不確実性評価

ENSEMBLE EXPERIMENTS TO QUANTIFY
UNCERTAINTY IN GLOBAL SNOW SIMULATION

新田友子¹・芳村圭²・James D Annan³・Julia C Hargreaves⁴・鼎信次郎⁵・沖大幹⁶
Tomoko NITTA, Kei YOSHIMURA, James D ANNAN, Julia C HARGREAVES,
Shinjiro KANAE and Taikan OKI

¹学生会員 工修 東京大学 大学院工学系研究科 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 工博 東京大学 大気海洋研究所 (〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³Non-Member of JSCE, Ph.D., Research Institute for Global Change, JAMSTEC

⁴Non-Member of JSCE, Ph.D., Research Institute for Global Change, JAMSTEC

⁵正会員 工博 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

⁶正会員 工博 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

Global- and continental-scale snow simulation has been used to produce snow estimates and attribute the change of snow into hydrological variables. However, uncertainties in global- and continental-scale snow simulation due to model structure, model parameters, and meteorological forcing has not been well documented. In the present study, we used MATSIRO land surface model and conducted ensemble simulations for snow, i.e., perturbed parameter ensemble simulation and multi precipitation ensemble simulation. The results show that uncertainties in parameters are larger in the melting season than accumulation season and uncertainties in precipitation are large in accumulation seasons. The uncertainties of parameters in melting season are comparable to that of precipitation.

Key Words : snow, land surface model, uncertainty analysis

1. はじめに

積雪被覆は世界の多くの場所で特に春・夏季に減少していると報告されている¹⁾²⁾。大陸・全球スケールの積雪変化とその原因を明らかにするにあたって、衛星観測から得られる積雪に関する物理量は限られるため、また高緯度域は現地観測の少ない場所を含むため、モデルの利用が有用な手法のひとつとなる。例えば、Liston and Hiemstra³⁾は、再解析データを10 kmの空間解像度にダウンスケールし、雪モデルを用いて北極圏における1979年から2009年の積雪トレンドについて調べている。その結果、北極圏の積雪は全体としては減少傾向にあるものの、地域的な変化が大きく、北極圏全域にわたって減少傾向の場所と増加傾向の場所が存在することを示している。また、Shi et al.⁴⁾はVICモデルを用いて衛星によって観測された北半球の積雪被覆変化を再現し、熱収支のどの要素が積雪被覆変化に影響を与えているのか

を調べ、積雪被覆変化には正味放射変化の影響が最も大きく、次に顕熱変化の影響が大きいことを示している。このような積雪の変化を検出し原因を特定する研究は大変興味深いですが、モデルの出力値には、モデル構造、パラメータ、気象強制力に起因する不確実性があり、ひとつのシミュレーション結果が必ずしも正しいとは言えない。

ここでの不確実性とは、ランダムノイズに起因する統計的な不確実性ではなく、データを作成する際の、つまりシミュレーションを行って結果を出力する過程における不確実性を意味している。モデル構造の不確実性は、同じ変数をシミュレーションするとき、モデルとそのスキームの選択肢が複数あることから、それら全ての出力値のばらつきで表現できる。パラメータの不確実性は、いったんモデルを選択するとモデルが持つパラメータの値は限られた数のデータから決めなければならないため、また全球パラメータの場合は実際には条件によって異なる値をとることがあるために生じる。気象強制力(モデルに与える降水量、放射量、気温等)の不確実性は、全

図-1 アンサンブル実験による不確実性評価の概念図.

ての場所と時間の連続的な観測は不可能で、観測プロダクトによって特徴が異なる可能性があるために生じる。つまり図-1のように、モデル構造、気象外力、パラメータの3つの軸に関して不確実性が存在すると考えられる。このような不確実性が存在するため、モデルの出力値を用いる場合には、限られたデータを有効に利用して検証を行うこと、シミュレーションの不確実性を定量的に評価することが重要な課題である。また、モデルの不確実性評価は将来的に観測データをモデルに同化する場合にも重要な情報となる。

モデル構造の改良点と不確実性を明らかにするために、モデルを相互に比較し検証する研究が行われている⁵⁾⁶⁾。また、雪モデルのパラメータ不確実性評価⁷⁾⁸⁾も行われている。しかしながら、このような研究は、ある特定の場所や流域を対象とする場合が多く、大陸・全球スケールで積雪シミュレーションの不確実性を評価する研究は、あまり行われてこなかった。

そこで本研究では、全球積雪シミュレーションの不確実性評価を行う。近年気候変動予測の分野では、アンサンブル実験を用いた不確実性評価が行われている⁹⁾¹⁰⁾。この手法を参考にして、いつ、どこで、どのくらい、積雪水当量の計算結果に全球パラメータと気象強制力に起因する不確実性があるのかを検討することを目的とする。パラメータの不確実性に関しては、年平均積雪面積を用いて制約を行う。これは、精度よい衛星観測が得られる積雪被覆率から計算できるためである。また、年平均積雪面積を用いて制約した場合に、積雪被覆率に対して感度のあるチューニングパラメータを持つモデルと持たないモデルで、積雪水当量のパラメータ不確実性がどのように変化するかについても検討を行う。以下では、第2章(1)で用いたモデルと標準実験の設定を説明し、(2)でパラメータ、(3)で気象強制力の不確実性を定量化するためのアンサンブル実験の設定を説明する。(4)ではモデル間の比較をどのように行ったかについて説明する。第3章で結果を示し、第4章でまとめを述べる。

表-1 パラメータ摂動アンサンブル実験に用いたパラメータ

パラメータ		標準	最小	最大
被覆率1になる閾値	P1	120 kg/m ²	1×10 ⁻²⁰	150
積雪の熱伝導率	P3	0.3 W/K/m	0.05	0.7
積雪密度	P4	300 kg/m ³	50	600
最大凍結率	P5	0.1	0	0.5
新雪アルベド (可視)	P7	0.9	0.7	0.999
新雪アルベド (近赤外)	P8	0.7	0.4	0.8
古い雪のアルベド (可視)	P9	0.4	0.3	0.7
古い雪のアルベド (近赤外)	P10	0.2	0.1	0.5
Refreshに必要な積雪量	P11	1 kg/m ²	0.1	20
Aging の温度依存の係数	P12	5000 K	500	50000
古さの関数の時定数	P13	2×10 ⁶ s	2×10 ⁵	2×10 ⁷
汚れ係数 (切片)	P14	0.01	0.001	0.1
汚れ係数 (傾き)	P15	0.1	0.01	0.3
汚れ係数 (最大値)	P16	1	0.5	50
積雪面の粗度 (運動量)	P18	0.05 m	0.001	0.1
積雪面の粗度 (熱)	P19	0.001 m	0.0001	0.01

2. 手法

(1) モデルと実験設定

積雪シミュレーションには陸面モデルMATSIRO¹¹⁾を用いる。MATSIROは気候モデルの下部境界条件として重要な地表面からのエネルギー・水フラックスを表現する目的で開発されたモデルである。大気海洋結合モデルMIROC5に合わせて改良されたMATSIROは、6層14mの土壌層、最大3層の積雪層、1層のキャノピー層で、陸面の温度と水の量を予報する。積雪水当量の時間変化は、

$$\frac{dS_n}{dt} = P_{sn}^* - E_s^{(sn)} - M_{sn} + F_R \quad (2a)$$

から計算する。ただし、 S_n : グリッド平均の積雪水当量、 P_{sn}^* : キャノピーによる遮断後の降雪量、 $E_s^{(sn)}$: 昇華量、 M_{sn} : 融雪量、 F_R : 融雪水及び降雨の再凍結量である。

積雪温度は以下の熱伝導方程式から計算する。

$$c_i \frac{dT_{sn}}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z} \quad (2b)$$

ただし、 c_i : 積雪の熱容量、 T_{sn} : 積雪温度、 k_{sn} : 積雪の熱伝導率、 z : 積雪深とする。 T_{sn} が融点より高くなった場合には、 T_{sn} を0°Cに固定し、融雪量を計算する。積雪アルベドは、ダストと黒色炭素の沈着による汚れの影響を考慮した積雪古さの関数を用いて計算する。

標準実験は全球1度の空間解像度、1時間のタイムステップで行った。また、気象強制力として再解析と観測降水量を組み合わせで作成されたデータ¹²⁾を用いた。実験は標準実験の2000年1月1日0時を初期値として、2000年から2007年まで実験を行い、2000年はスピンアップとして除外し、2001年から2007年までの7年間の結果を用いた。

図-2 パラメータ摂動実験におけるパラメータの選択手法。a) 各パラメータを最大値と最小値に摂動させた場合の北半球年平均積雪面積。横軸が各パラメータ、縦軸が北半球年平均積雪面積 $[\text{m}^2]$ で、青と緑の棒グラフがそれぞれ最小値と最大値にした場合の結果、黒実線が標準実験の結果、黒点線が観測値。b) 10000のパラメータセットに対して、線形的に計算した積雪面積のヒストグラム。黒実線は観測。横軸が北半球年平均積雪面積 $[\text{m}^2]$ 、縦軸は確率。

(2) パラメータ摂動アンサンブル実験

パラメータの不確実性を定量化するために、異なるパラメータの値を用いた感度実験を行う。パラメータには、全球パラメータと土地利用ごとや土壌タイプごとに異なる値をとるパラメータがあるが、ここでは全球パラメータのみに着目する。積雪水当量に及ぼす影響が大きいと予想されるパラメータを16個選択した。表-1に選択したパラメータとその標準値、最小値と最大値を示す。地点シミュレーションにおけるパラメータの不確実性を評価した既往研究では、数千のオーダーのパラメータセットを作成し、再現性の良い結果のみを選択して解析するという手法をとっているが、全球シミュレーションでは計算負荷が大きすぎて困難であるため、観測に近い結果が期待できるパラメータセットを最初に選択する。まず、各パラメータを最小値と最大値に振って残りのパラメー

タに標準値を与えた実験を行った。図-2のa)に、この実験結果から7年間平均の北半球積雪面積を計算した結果を示す。次に、Latin Hypercube Sampling¹³⁾ (LHS)を用いて、表-1に示した全てのパラメータの値を同時に変えた10000のパラメータセットを作成した。LHSで作成した各パラメータの値に対して、パラメータを最小値と最大値に摂動させた結果(図-2a)を用いて、線形補間して北半球積雪面積を計算した。結果のヒストグラムを図-2 b)に示す。黒の縦線は観測値で、MODISの積雪被覆率¹⁴⁾から計算した。ここから、観測値と近い30のパラメータセットを取り出した。この値を用いて、30メンバーで2000年から2007年までのアンサンブル実験を行った。

(3) 気象強制力のアンサンブル実験

オフライン実験による全球積雪シミュレーションには、気象強制力に関する不確実性も大きいと予想される。本研究では、気象強制力の中でも積雪に影響が大きいと予想される降水量のみに着目して、Kim et al.¹²⁾の5種類のデータセットを用いて降水量に起因する不確実性を見積もった。つまり、5メンバーで2000年から2007年までのアンサンブル実験を行った。

(4) モデル間の比較

簡単なモデルとして、アルベドを時定数のみで低減させ、積雪被覆率を0/1で表現し、液体水の再凍結を考慮しないモデルを作成した(モデルA)。また、上記(2)と(3)のアンサンブル実験に用いた標準のMATSIROをモデルBとした。複雑なモデルとして、積雪被覆率算定スキームとしてSSNOWD¹⁴⁾を用い、積雪密度を予報し熱伝導率を診断し、液体水の貯留を考え、標高帯によるモザイク考慮したモデルを作成した(モデルC)。モデルAにはアルベド低減の時定数を追加し、標準で 2×10^6 s、最小値が 2×10^5 s、最大値が 2×10^7 sとした。またモデルCには液体水の最大貯水量(標準0.05、最小値0、最大値0.5)、雨雪判別に用いる湿球温度(標準 0°C 、最小値 -1°C 、最大値 2°C)が新たなパラメータとして追加された。つまり、モデルBは積雪被覆に対して感度のあるチューニングパラメータ(表1のP1)を持つモデルであるのに対して、モデルAとモデルCは、感度のあるチューニングパラメータを持たないモデルとなる。それぞれのモデルに対して(2)と同じ手順を踏んで実験を行う。ただし、モデルAは積雪面積を過大評価するという系統的なバイアスを持ち、図-2 b)のヒストグラムを描くと、観測よりもヒストグラムの最小値が大きくなる。それによって偏ったパラメータを選択して、不確実性が過小に評価される可能性がある。そのため、全てのモデルに関してヒストグラムの中央値を観測と仮定して(つまりバイアスのない条件を仮定して)、モデル間の比較を行った。つまり、モデル間の比較に関しては、モデルA、B、Cを用

図-3 a) 北極圏流域の積雪水当量[kg/m²]. 棒グラフは標準実験の結果で左から2005年11月（赤）2006年2月（緑）2006年5月（青）. +のばらつきがパラメータの不確実性、×のばらつきが気象強制力の不確実性を示す. 数字は、アンサンブルメンバーの標準偏差を示している. b) 対象とした流域.

いてそれぞれについて30メンバーで2000年から2007年までのアンサンブル実験を行った.

3. 結果

(1) 北極圏流域の積雪水当量

図-3に北極圏流域の積雪水当量の結果を示す. オビ川, エニセイ川, レナ川, コリマ川, アムール川, ユーコン川, マッケンジー川の各流域と北半球の陸域平均につい

て, 2005年11月（赤）, 2006年2月（緑）と5月（青）の流域平均積雪水当量を示している. 棒グラフが標準のモデルを使った結果, +がパラメータ摂動アンサンブル実験の各アンサンブルメンバー, ×が降水量のアンサンブル実験の各アンサンブルメンバー, 図中の数字は標準偏差を示している. この図を用いてパラメータ摂動アンサンブル実験と降水量のアンサンブル実験の比較を行うが, 性質の異なるアンサンブル実験で, アンサンブル数も異なるため, 定量的に直接比較可能な実験ではないことに注意が必要である. それでも, 結果の幅や季節による違いを議論することは意味があるだろう. まず, 2005年11月を見ると, どの流域でもパラメータ摂動アンサンブル実験はほぼ同じ値を取っている. 一方で, 降水量のアンサンブル実験はある程度ばらついている. オビ川, エニセイ川, レナ川ではひとつの降水量を用いた実験だけ離れた値を取り, 残り4つのばらつきは小さい. ユーコン川とマッケンジー川では比較的均等にばらつく. 2月になると, 降水量のアンサンブル実験では, 11月よりもばらつきが大きくなるが, パラメータ摂動アンサンブル実験のばらつきは11月とほとんど変わらず, 降水量のアンサンブル実験によるばらつきの方が大きい. 5月になると, 融雪に伴ってパラメータ摂動アンサンブル実験のばらつきが大きくなる.

(2) 積雪水当量の空間分布

次に, この結果の空間分布をより詳細に検討する (図-4). 紙面の都合上, パラメータ摂動アンサンブル実験による2005年11月, 2006年2月, 2006年5月の積雪水当量のアンサンブル平均値と, 不確実性の指標として標準偏差について示した. 2005年10月から2006年1月までは標準偏差は比較的小さい. 例外は, 北アメリカの海岸山地で, 11月から時間とともに標準偏差が大きくなっていく. 2006年2月になると, ヨーロッパの一部, 北緯40° 東経70° 付近, 五大湖周辺などで標準偏差が10 kg/m²を超える場所が出てくる. 3月には, ヨーロッパの北緯45° 付近, チベット高原の西側, 五大湖付近で標準偏差が大きくなり, 20 kg/m²を超えるところがある. 4月には北緯60° を中心にユーラシアでも北アメリカでも標準偏差が大きくなり, 5月になると標準偏差の大きい地域はさらに北上する. 標準偏差の大きい場所は融雪する場所と対応している. ほとんどの地域で融雪した6月には, ユーラシアの東経90° 付近, 北アメリカの北部地域を除くほとんどの地域で標準偏差は小さくなる.

(3) 異なるモデル間における不確実性の比較

図-1に示したアンサンブル実験による不確実性評価の概念図では, 中央の灰色の丸が標準実験の結果を表している. 例えば, 積雪の変化を検出し原因を特定する既往研究では, この値が解析に用いられてきた. 本研究ではパラメータ（第一の軸; 水色）と気象外力（第二の軸;

図-4 パラメータ摂動実験の結果. 2005年10月, 2006年2月, 2006年5月の
月平均積雪水当量のアンサンブル平均値(左)とその標準偏差(右) [kg/m²].

緑色)のうち, 全球パラメータと降水量データに関するアンサンブル実験を行い, 積雪シミュレーションが各軸に沿ってどの程度のばらつき(=不確実性)を持つのかを調べた. ただし, アンサンブル実験は軸によって実験設定が違うので, 軸同士の単純比較は難しい点に注意が必要である.

モデルの複雑さによって, パラメータや降水量に起因する不確実性がどの程度変化するか調べるために, モデル構造の異なる3つのモデルでパラメータに起因する不確実性がどの程度変化するかを調べた. 図-5は, 2001年-2007年の北半球陸域平均の積雪水当量の標準偏差について, モデル間の比較を示している. 7年間の各月について月平均を計算し, その標準偏差を示している. モデルAとモデルBと比較すると, どの季節でもモデルBの方が不確実性が大きく, 最大で5kg/m²程度となっている. これは, モデルAは積雪面積を0/1で表現するのに対して, モデルBは積雪被覆率が1となる閾値をパラメータで決めている. そのため, 似たような積雪面積になると予想できるパラメータセットは, モデルAでは融雪に関して似たような値をとるパラメータセットを選択して

いるのに対して, モデルBでは積雪被覆率の閾値と融雪に関するパラメータが相殺しているためだと考えられる. モデルBとモデルCに関しても同様のことが言える. 積雪の少ない時期にモデルC方が大きなばらつきを示すのは, 雨雪判別のパラメータを振っているためだと考えられる.

4. まとめ

本研究ではアンサンブル実験を用いた全球積雪シミュレーションの不確実性評価を行った. 北極圏流域の流域平均水当量を堆積期, 積雪最大期, 融雪期で比較した結果, 堆積期にはパラメータの不確実性は小さいこと, 降水量に関する不確実性は比較的大きいこと, また, 融雪期になるとパラメータの不確実性は降水量の不確実性よりも大きいか, 同程度となり, 標準実験のおよそ半分から1.5倍程度の値をとることがわかった. また, パラメータに起因する不確実性をモデル間で比較した結果, 年平均積雪面積を用いる本研究の手法でパラメータを選択すると, 積雪被覆率に対して感度のあるチューニング

図-5 北半球陸域平均積雪水当量の標準偏差[kg/m²]. 2001年から2007年の月平均値を用いて計算している. 左からモデルA (縦軸)とモデルB (横軸)の比較, モデルC (縦軸)とモデルB (横軸)の比較, モデルC (縦軸)とモデルA (横軸)の比較.

パラメータを持つモデルの方が, そのようなパラメータを持たないモデルよりも不確実性は大きくなることがわかった.

今後の課題として, より詳細な観測 (例えば, 季節ごとの積雪面積や, 積雪被覆率の日単位のグリッドデータ) による制約を与えると, 積雪水当量をどの程度制約できるのかの検討が挙げられる. 季節ごとの積雪面積については, 本研究の手法をそのまま適用できる可能性がある. また日単位のグリッドデータを用いるには, アンサンブル・カルマンフィルタといったデータ同化技術が利用できるかもしれない. また, 本研究では積雪水当量の検証を行わなかったが, 例えば現地観測の積雪深を用いて, ある地点での検証を加えることは可能だと考えられる. さらに, 第1章で述べたような, 積雪とその変化を再現し, 原因を特定するような研究において, シミュレーション結果がいつどこで信頼できるのかといった情報を付加することも, 本研究の今後の課題である.

謝辞: 本研究はJST/CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム 安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」, GRENE北極気候変動研究事業, 環境省環境研究総合推進費 (S-10) の成果の一部である.

参考文献

- 1) Lemke, P., et al.: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- 2) Derksen, C. and R. Brown: Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections, *Geophys. Res. Lett.*, 2012 (in press).
- 3) Liston, G. E. and C. A. Hiemstra: The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979-2009). *Journal of Climate*. Vol.24, pp. 5691-5712, 2011.
- 4) Shi, X., P. Y. Groisman, S. J. Dery, and D. P. Lettenmaier: The role of surface energy fluxes in pan-arctic snow cover changes. *Environmental Research Letters*, Vol.6, 035204, 2011.
- 5) Rutter, N., R. Essery, et al.: Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *J. Geophys. Res.*, Vol.114, 2009.
- 6) Slater, A. G., et al.: The representation of snow in land surface schemes: Results from PILPS 2(d), *Journal of Hydrometeorology*, Vol.2, pp.7-25, 2001.
- 7) Essery, R. and P. Etchevers: Parameter sensitivity in simulations of snowmelt, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, 2004.
- 8) He, M., T. S. Hogue, et al.: Characterizing parameter sensitivity and uncertainty for a snow model across hydroclimatic regimes., *Advances in Water Resources*, Vol.34, pp.114-127, 2011.
- 9) Shiogama, H., M. Watanabe et al.: Perturbed Physics Ensemble using the MIROC5 Coupled Atmosphere-Ocean GCM without Flux Corrections: Experimental Design and Results, *Climate Dynamics*, 2012 (in review).
- 10) Watanabe, M., H. Shiogama, et al.: Using a Multiphysics Ensemble for Exploring Diversity in Cloud-Shortwave Feedback in GCMs, *Journal of Climate*, Vol.25 pp.5416-5431, 2012.
- 11) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global and Planetary Change*, Vol.38, pp.209-222, 2003.
- 12) Kim, H., P. J. F. Yeh, T. Oki, and S. Kanae: Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.36, L17402, 2009.
- 13) McKay, M., R. Beckman, and W. Conover: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, Vol. 21, pp. 239-245, 1979.
- 14) Hall, D., V. Salomonson, G. Riggs: MODIS Terra/Aqua Snow Cover Monthly L3 Global 0.05Deg CMG, Version 5.0. Version 5.0. Boulder, CO, USA, National Snow and Ice Data Center., 2006.
- 15) Liston, G. E.: Representing Subgrid Snow Cover Heterogeneities in Regional and Global Models, *Journal of Climate*, Vol.17, pp.1381-1397, 2004.

(2012. 9. 30受付)