

第2章 モデル概要と実験概要

2.1 モデル概要

2.1.1 全球大気モデル (AGCM20)

地球温暖化予測情報第8巻等で用いられている全球大気モデル (AGCM20) は、気象研究所大気大循環モデル MRI-AGCM3.2 (Mizuta *et al.*, 2012) である。MRI-AGCM3.2は、気象庁・気象研究所統一全球大気モデルおよびそのごく一部を改訂した MRI-AGCM3.1 (Kitoh *et al.*, 2009) をベースにし、多くの物理過程パラメタリゼーションスキームを新たに開発・導入したものである。

このモデルは静力学プリミティブ方程式系のスペクトルモデルである。切断波数は959で、対応する格子数は東西1920格子、南北960格子となり、格子間隔はおよそ20km である。鉛直座標系は σ -p ハイブリッド座標、鉛直層数は64層で、最上層は0.01hPa に置いている。時間積分は保存性のある2タイムレベルセミインプリシット・セミラグランジュ法 (Yoshimura and Matsumura, 2005) で、積分時間間隔は10分となっている。

積雲対流スキームは、従来の Arakawa-Schubert スキーム (Arakawa and Schubert, 1974; Randall and Pan, 1993) に代えて、Tiedtke (1989) のスキームをベースにした新しいスキームが開発・導入された (Yoshimura *et al.*, 2014)。Arakawa-Schubert 型の積雲スキームにおいては1つの格子の中で高さの異なる複数の上昇流を想定しているが、計算量が多くなるためそれぞれの上昇流は単純なものを仮定している。一方、Tiedtke 型の積雲スキームでは1つの格子につき1つだけの上昇流を扱うかわりに、それをより精緻に計算する。新しい積雲スキームにおいては、1つの格子の中で Tiedtke 型の上昇流を2つ計算する (図2.1.1)。それぞれが最も高い上昇流と最も低い上昇流を表現しており、その間の高さの上昇流の性質が両者の線形内挿で表されると仮定することにより、Arakawa-Schubert スキームと同様に複数の上昇流の存在を想定することができる。

雲物理過程には、雲水量・雲量を確率密度関数で診断的に求める Smith (1990) のスキームに代えて、雲水

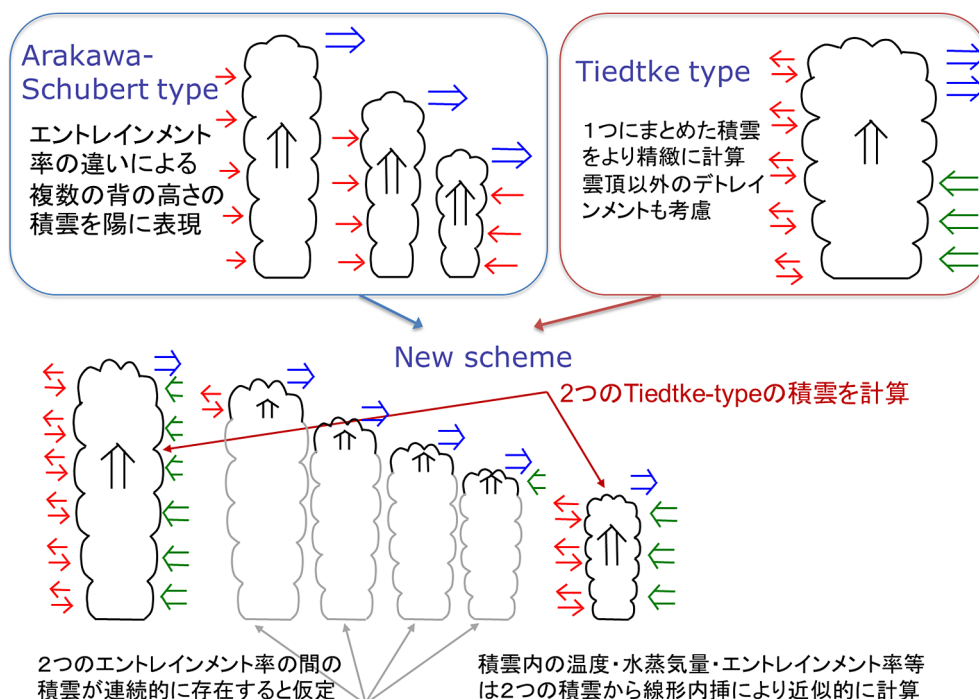


図2.1.1 Arakawa-Schubert 積雲対流スキーム、Tiedtke 積雲対流スキームと、Yoshimura 積雲対流スキームの比較。赤矢印は乱流混合 (またはエントレインメント)、青矢印は組織的デトレインメント、緑矢印は組織的エントレインメント、黒矢印は積雲内上昇流を表す。

量・雲量を予報変数とした Tiedtke (1993) のスキームを使用している (Kawai, 2006)。雲は断熱・非断熱の冷却、および積雲対流からのデトレインメントによって生成され、加熱や周囲との混合による蒸発、および降水への変換によって消滅する。層積雲パラメタリゼーションスキームはこの実験においては使用していない。

放射過程は、エアロゾルとの相互作用の部分を除いて、気象庁現業モデルのスキーム (JMA, 2007) を使用している。計算負荷を考慮して、放射過程の計算は東西方向の 2 格子おきに計算している。太陽 (短波) 放射については 1 時間毎、赤外 (長波) 放射については 3 時間毎に計算し、時空間内挿して用いている。長波放射における温室効果を考慮するため、二酸化炭素 (CO_2) に加えメタン (CH_4)、亜酸化窒素 (N_2O)、およびフロン (CFCs) の吸収も計算している。

エアロゾルの直接効果については、硫酸、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダストの 5 種によるものを計算する。それぞれの分布は外部ファイルから与える。エアロゾルの間接効果についてはこの実験においては考慮していない。

境界層スキームについては Mellor and Yamada (1974) の Level 2 スキーム、陸面スキームについては Simple Biosphere model (SiB) の改良版 (Hirai *et al.*, 2007) を使用している。これら 2 つは MRI-AGCM3.1 で用いられていたものと同じである。重力波抵抗スキームについても従来と同じ Iwasaki *et al.* (1989) を用いているが、強さについては MRI-AGCM3.1 よりは弱い、現業モデルと同じ値を使用している。50hPa より上の高度にはレイリー摩擦を導入している。

海面過程においては、風と太陽放射の短時間の変動による大気海面の日変化を表現するために、単純化した海面表層スキームを導入している (Yukimoto *et al.*, 2011)。このスキームでは厚さ 1 m の層を仮定し、この層の最下部 (深さ 1 m) での温度が海面水温境界値ファイルで与えられた値であるとする。最下部からの熱フラックスの係数が表面風速に依存するようにし、このスキームで計算された表面温度を、大気モデルの下端境界温度として使用する。このスキームを使用することにより、熱帯の風の弱い晴れの日で最大 2 K 程度の日変動が生じる。この値は観測された値 (Yasunaga *et al.*, 2008) と整合的である。計算された表面温度の月平均と、境界値ファイルで与えられた海面水温の値との差は多くの場所で 0.1K 以内である。

2.1.2 非静力学地域気候モデル (NHRCM)

i) NHRCM の概要

NHRCM は、2004 年から気象庁がオペレーションで使っている非静力モデル (NHM) をベースに、長時間積分可能なように改良したものである。基礎方程式系は完全圧縮非静力学方程式を用いている。対流のパラメタリゼーションには Kain and Fritsch (1993) を用いている。また、雲物理過程として、雲氷・雪・あられの 3 相の氷相を含んでいる。その他 NHM についての論文・解説はたくさんあるので、Saito (2006) などを参考にしていきたい。オペレーションで使われている NHM との最大の違いは地面温度や積雪量の計算に MRI/JMA-SiB (以後、MJ-SiB と略す) を用いていることである。MJ-SiB に関する詳しい説明は 2.1.2.2 で述べる。NHRCM は格子間隔に合わせて物理過程で多少のチューニングを行っているが、基本的な仕様は同じである。NHRCM に関しては、完全境界による予備実験 (Sasaki *et al.*, 2008)、現在気候の再現性について (Sasaki *et al.*, 2011)、将来気候変化予測 (Sasaki *et al.*, 2012) などの論文があるのでそちらを参考にしていきたい。

ii) MJ-SiB

MJ-SiB は気象庁非静力学モデル NHM に、予測期間中の積雪変化や土壌中での土壌水の流動あるいは土壌水／氷間の相変化を再現するために導入された陸面モデルである。現在、気象庁での短期予報現業で使用されて

いる NHM の陸面過程は、地表面被覆状態（積雪有り／無し）を初期値で一定とし、地表面温度、地温、土壤水分を地表面熱収支式、熱伝導方程式、土壤水分に対する強制復元法で予測する簡易平板モデルであり、MJ-SiB ではない。短期予報中での積雪形成／融解を無視しているため、このような現象が生じた時に、地上気温の予測に誤差が生じる。一方、NHRCM は領域気候モデルであり、寒冷域では長い期間の間に積雪形成と融雪・土壤水／氷間の相変化が起こるため、これらの再現が必須である。オリジナルの MJ-SiB は気象研究所全球大気気候モデルや気象庁全球モデルに最初に組み込まれ、そのモデルの詳細は数値予報課別冊報告（大泉・保坂（2000）、Hirai *et al.*（2007））に書かれている。NHRCM に組み込んだ MJ-SiB では全球モデルと異なって、降水過程から陸面モデルに渡される降水が雨・雪・霰・雹と区分されており、大気最下層の気温で雨か雪かを判断する必要がない。また、大気境界層での乱流輸送スキームとの結合方法がモデル本体の物理過程のアルゴリズムの違いを反映して異なっている。ここではごく簡単に地球温暖化予測情報第8巻で使用した MJ-SiB の解説を行い、第7章でその後の開発に触れることとする。

MJ-SiB は、植生キャノピー・積雪・土壤の3つのサブモデルから構成されており（図2.1.2）、積雪形成の初期及び融雪末期の陸面被覆状態を表現するために部分積雪／無積雪のサブ格子を持つ。これらの部分積雪／無積雪サブ格子の下には、それぞれ地温4層・土壤水／氷3層の予報変数を持つ土壤サブモデルが存在する（但し、3、4層はサブ格子ではなく共通）。

植生キャノピーモデルは植生キャノピーと下草／裸地の2つのパーツで構成され、この両パーツに温度、（キャノピー）水分比、（キャノピー）氷比の3変数が割り当てられている。考慮している素過程は、(a) 樹冠による降水／降雪遮断、(b) 大気最下層とキャノピー空間（1つの陸面格子を代表する空間のこと）の間での顕熱／潜熱／運動量輸送、(c) 葉／地面／積雪面からの蒸発散／昇華と土壤水の吸い上げ、(d)（植生キャノピー内）放射過程、(e)（葉面上の）水／氷相変化、(f) 積雪表面／土壤1層熱伝導、である。

積雪サブモデルでは、積雪層が積雪相当水量 SWE に応じて部分積雪層・1～3層積雪層へと変化し、予報変

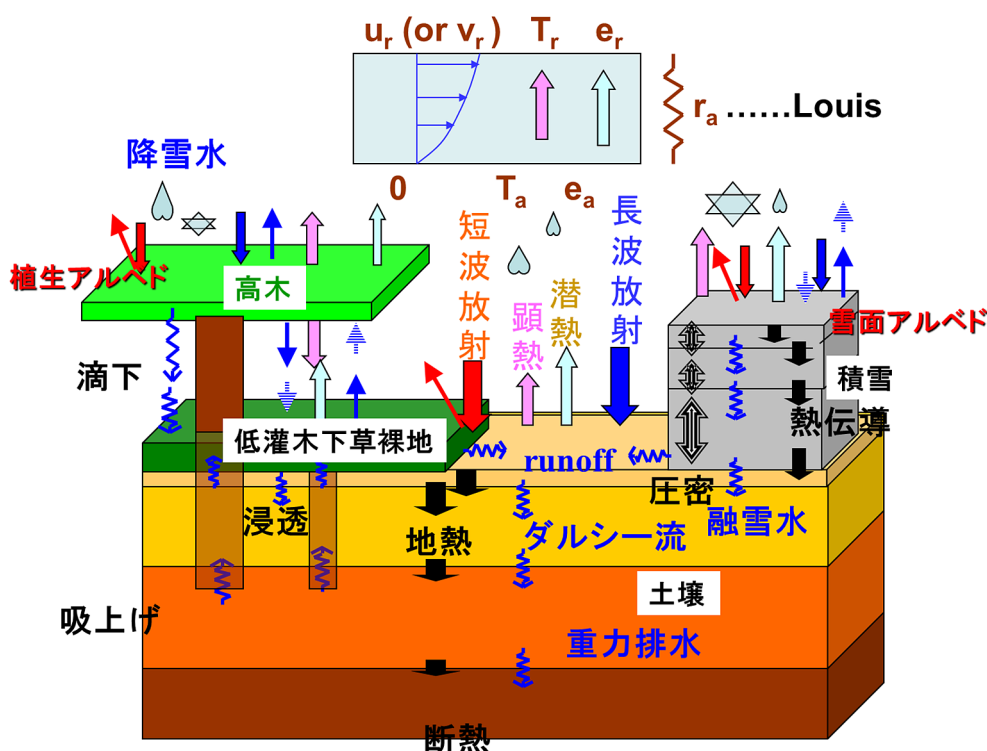


図2.1.2 MRI/JMA-SiB (MJ-SiB) の概念図。

数は各積雪層に定義される雪温・バルク密度・乾き雪積雪水量・含水量の4種類である。積雪サブモデルでは、(a) アルベド変化、(b) 日射透過、(c) 熱伝導、(d) 圧密、(e) 水分流下、(e) 融解、の素過程が生じる。

土壌サブモデルは上述したように、地温4層、土壌水／氷3層の予報変数を持ち、(a) 熱伝導、(b) 地表面水の浸透と表面流出、(c) 土壌内での不飽和ダルシー流、(d) 土壌底層からの底面流出、(e) 土壌水／氷相変化、が生じる。

2.2 実験概要

2.2.1 AGCM20の実験設定

3章から5章で用いたAGCM20の実験設定を説明する。なお、AGCM20の時間積分は、文部科学省の21世紀気候変動革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」(平成19-23年度)の後期において実施されたものである。実験は現在(1979-2003)、近未来(2015-2039)、21世紀末(2075-2099)の3つについて、それぞれの条件で海面水温(SST)・海氷密接度・海氷厚・温室効果気体・オゾン・エアロゾル等の境界条件を与えて行った。現在気候実験では、なるべく現実に近い条件の実験を行って観測された気候との比較を通じてモデルの気候再現性能を確認するため、SST・海氷密接度・海氷厚については観測の値を用いた。SST・海氷密接度については年々変動を含んだ月平均値(HadISST; Rayner *et al.*, 2003)、海氷厚については年々変動を含まない月平均気候値(Bourke and Garrett, 1987)を使用した。

近未来・21世紀末などの将来条件の実験においては、現在気候実験で用いた値と、IPCC第4次報告書のために提出された各機関のモデル結果(CMIP3)のアンサンブル平均を用いて、将来の推定値を作成しそれを使用した。近未来実験と現在実験との差および21世紀末実験と現在実験との差を気候の変化予測として評価する。使用したモデルは表2.2.1に示した18のモデルの、20世紀再現実験(C20C)およびA1Bシナリオ実験の結

表2.2.1 使用したCMIP3モデル。それぞれのモデルで複数のランがある場合は1つのランのみを使用した。

モデル名	組 織
bccr_bcm2_0	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway
cccma_cgcm3_1	Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis, Canada
cccma_cgcm3_1_t63	
cnrm_cm3	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France
csiro_mk3_0	CSIRO Atmospheric Research, Australia
gfdl_cm2_0	U.S. Dept. of Commerce/NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
gfdl_cm2_1	
giss_aom	NASA/Goddard Institute for Space Studies, USA
inmcm3_0	Institute for Numerical Mathematics, Russia
ipsl_cm4	Institut Pierre Simon Laplace, France
miroc3_2_hires	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
miroc3_2_medres	
miub_echo_g	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model & Data Group, Germany/Korea
mpi_echam5	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
mri_cgcm2_3_2a	Meteorological Research Institute, Japan
ncar_ccsm3_0	National Center for Atmospheric Research, USA
ukmo_hadcm3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK
ukmo_hadgem1	

果である。それぞれのモデルで複数のランがある場合は1つのランのみを使用した。将来の推定値の作成手法は Mizuta *et al.* (2008) で説明されているが、以下に概略を述べる。

将来の SST はモデル結果のアンサンブルから次のように推定する。まず観測の SST およびモデルアンサンブル平均の SST を、各月ごと、各点ごとに、長期間平均・線形トレンド・それらを差し引いた残差の3つの項に分離する。残差の項を年々変動と呼ぶことにする。そして将来実験に用いる値は以下の式で決める：

$$\begin{aligned} & \text{観測長期間平均} + (\text{モデル将来長期間平均} - \text{モデル現在長期間平均}) \\ & + \text{モデル現在トレンド} \\ & + \text{観測年々変動} \end{aligned}$$

これを図に示したものが図2.2.1となる。将来実験にとっては期間平均の現在から将来への変化分が気候変化の重要な要素であるから、長期間の平均値に関しては観測値からモデルでシミュレートされた変化分を上乗せする形にする。期間内のトレンドについてはモデルアンサンブル平均を用いるが、将来の年々変動についてはモデルごとに変化傾向が異なっており、またモデルアンサンブル平均では変動部分が相殺されてしまうことから、現在の年々変動がそのまま将来にも起こるという設定にし、観測値の年々変動を用いることとした。年々変動の位相は1979年の位相が2015年・2075年、1980年の位相が2016年・2076年というように36年・96年ずらしたものとしている。3つの実験で与えている海面水温分布を年平均したものを図2.2.2に、および年平均・1月・7月における現在実験と将来実験との、与えている海面水温の差を図2.2.3に示す。

将来実験に用いる海氷は、各月の半球別の海氷面積の減少が SST と同じ式に従うようにする（図2.2.4）。その面積になるように観測の分布を後退させる形で将来実験に用いる海氷密接度分布を決める。元となる観測の

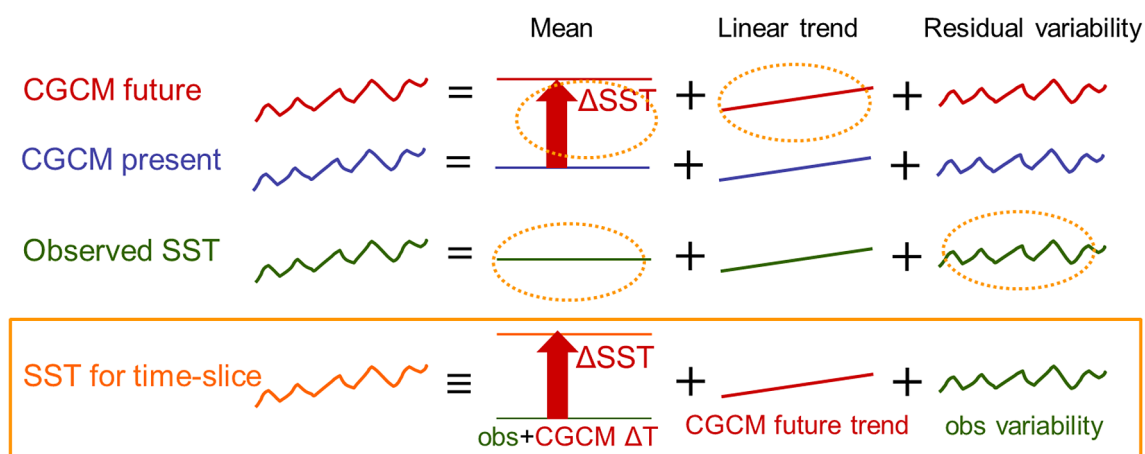


図2.2.1 将来実験に用いる海面水温の計算方法

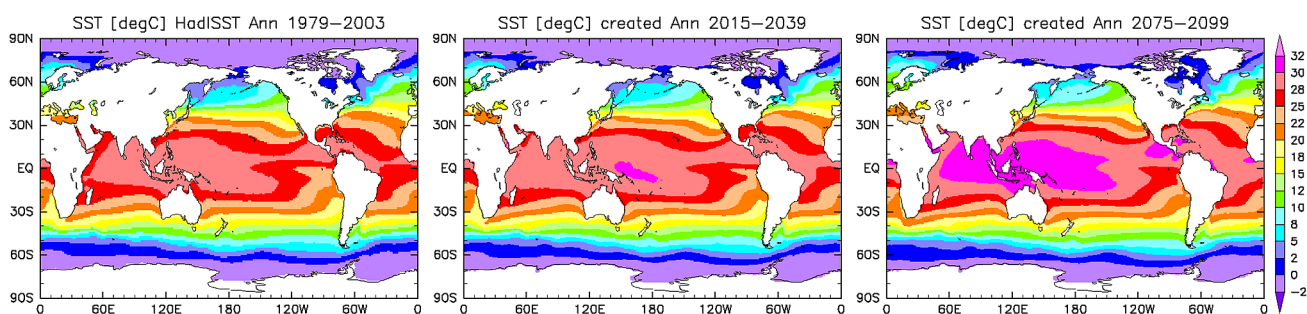


図2.2.2 (左) 現在 (1979-2003)、(中) 近未来 (2015-2039)、(右) 21世紀末 (2075-2099) の3つの実験で与えている、年平均海面水温分布。

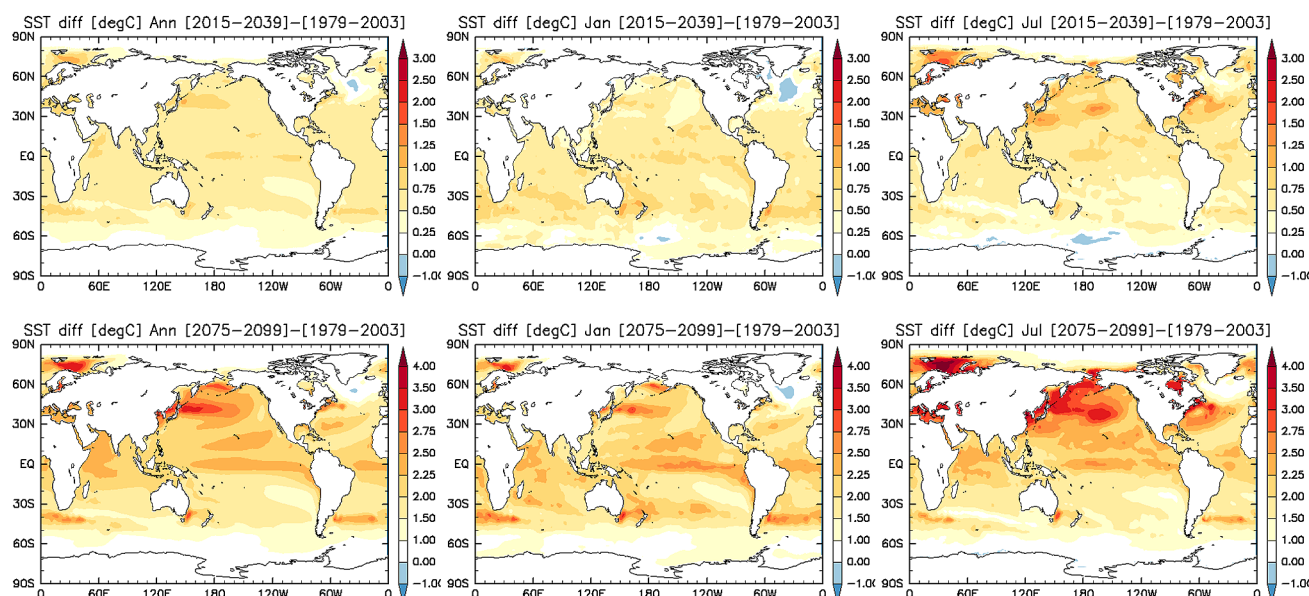


図2.2.3 (上) 現在実験と近未来実験、(下) 現在実験と21世紀末実験で与えている海面水温の差の分布。
(左) 年平均、(中) 1月、(右) 7月。

分布は、年々変動の位相が SST と一致するように、近未来では各年月の36年前、21世紀末では各年月の96年前のものを用いる。これにより、将来実験においても観測に近い形で海水分布の年々変動が与えられる。また将来実験の海水厚は、現在の観測値にどの場所でも一様な定数をかけたものとする。定数は月ごと・半球ごとの海水量（海水密接度×海水厚）の減少割合がモデルアンサンブル平均の結果と一致するように決める。

温室効果気体（CO₂、CH₄、N₂O、CFCs）の濃度は、現在気候実験では観測値、将来実験においては A1B シナリオに従った濃度を用いた。濃度は全球で一様な値を年ごとに変化させている。オゾン分布については気象研究所化学輸送モデル、エアロゾル分布については気象研究所地球システムモデルでの A1B シナリオ実験における各期間の結果をそれぞれ使用した。いずれも月平均の3次元分布に5年の移動平均をかけたものを外部境界条件として与えている。表2.2.2でこれらをまとめたものを示した。

表2.2.2 実験別の境界条件

	現在	近未来	21世紀末
期間（25年間）	1979-2003	2015-2039	2075-2099
海面水温・海水密接度	年々変動あり 観測値 HadISST	HadISST+CMIP3 マルチモデル平均の変化	
海水厚さ	観測気候値	マルチモデル変化から評価（海水体積で拘束）	
温室効果ガス CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CFC	観測値	A1B シナリオ	
エアロゾル	MRI-ESM1 現在実験 5 年 移動平均		MRI-ESM1 A1B 実験 5 年移動平均
オゾン	MRI-CCM 現在実験 5 年 移動平均		MRI-CCM A1B 実験 5 年移動平均

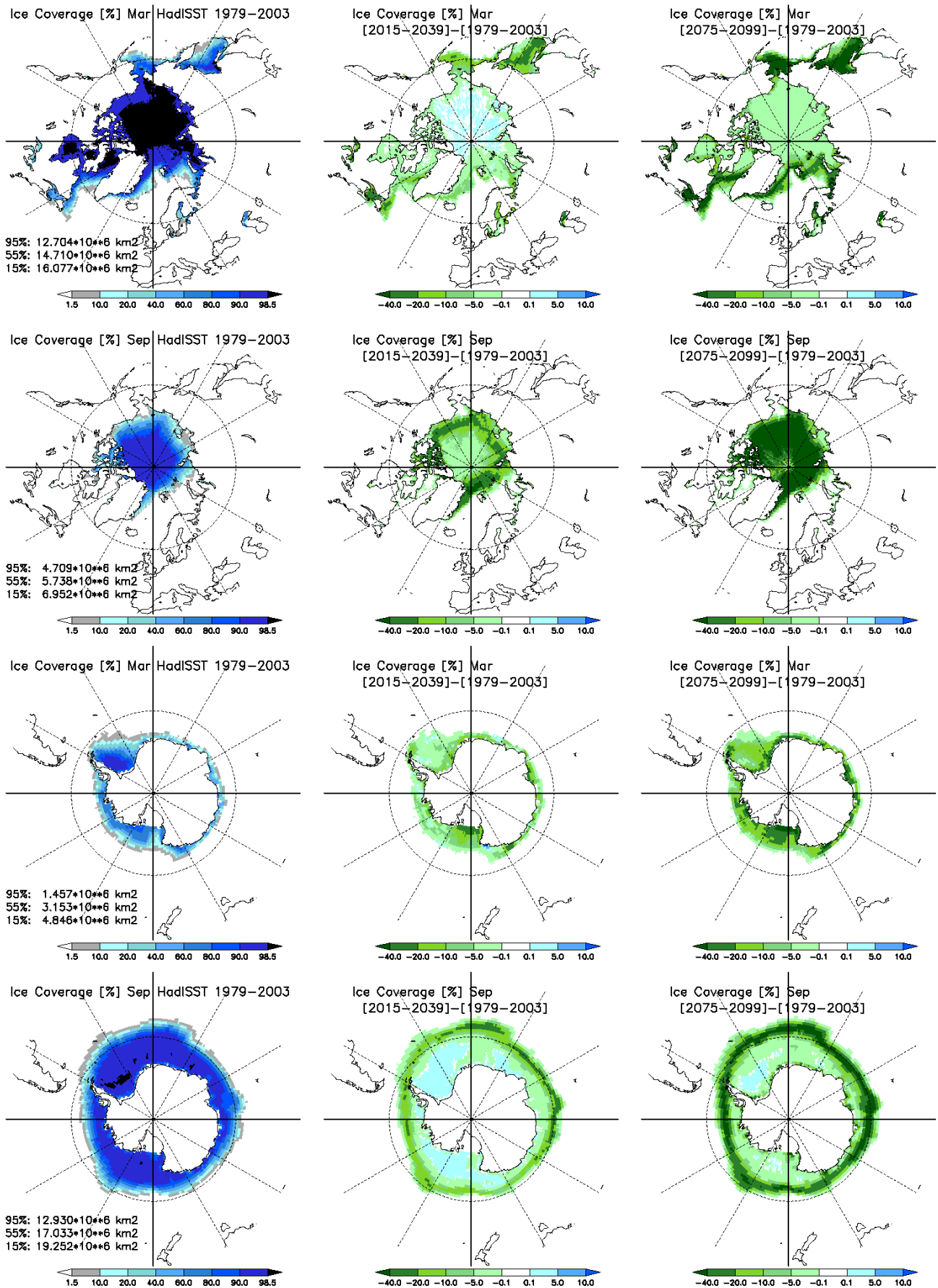


図2.2.4 (左) 現在実験で与えている年平均海氷密度分布。(中) 現在実験と近未来実験、(右) 現在実験と21世紀末実験で与えている海氷密度の差。上から北半球3月、北半球9月、南半球3月、南半球9月。

2.2.2 NHRCMの実験設定

図2.2.5はこの実験に用いられたネスティングの手法である。この図で示される通り、格子間隔の違うNHRCMが2段にAGCM20とネストされるというマルチネスティング（one-way ネスティング）の手法が用いられている。最も内側のモデルである5 km 格子間隔のNHRCM（NHRCM05）は北東から南西方向に傾いた計算領域となっている。こうすることにより、狭い計算領域で日本列島を広くカバーすることができる。しかし、日本列島が側面境界からの距離が短いため側面境界から入ってきた気塊内で十分な雲水、雲氷などの雲物理量が生成することができないうちに陸上に達し、降水量が少なくなることを避けるために、格子間隔15kmのNHRCM（NHRCM15）がAGCM20にネストされている。NHRCM05及びNHRCM15のSSTにはAGCM20と同様のSSTを用い、温室効果気体濃度も現在及びA1Bシナリオの濃度を与えた。なお、NHRCMではオゾンとエアロゾル濃度については、現在と将来で同様の値を用いている。

計算は現在（1980–2000年）、近未来（2016–2036年）、21世紀末（2076–2096年）の各20年について1年毎のタイムスライスで行っている。次章からの将来変化の議論は、特に断りがない限り21世紀末（2076–2096年）を対象とする。NHRCM15の計算は各年の7月1日00UTCを初期値として行っている。それにネストするNHRCM05は、7月21日00UTCから計算を開始し、翌年の9月1日00UTCまで計算を行っている。このように、各年の計算を7月から行っているのは、積雪を正確に計算するために、積雪がない状態から計算を開始するためである。ただし、8月まではスピナップ期間とし、9月1日から翌8月31日を使用することとする。

2.3 出力データ

表2.3.1にNHRCM15およびNHRCM05で出力されているファイルの属性を示す。各ファイルに出力されている変数は付録に掲載する。出力される変数はNHRCM15とNHRCM05で同じであるが、出力される時間間隔と1ファイルに含まれる日数が異なる。モデル面データはさらにこの出力にネストするために作られたものの

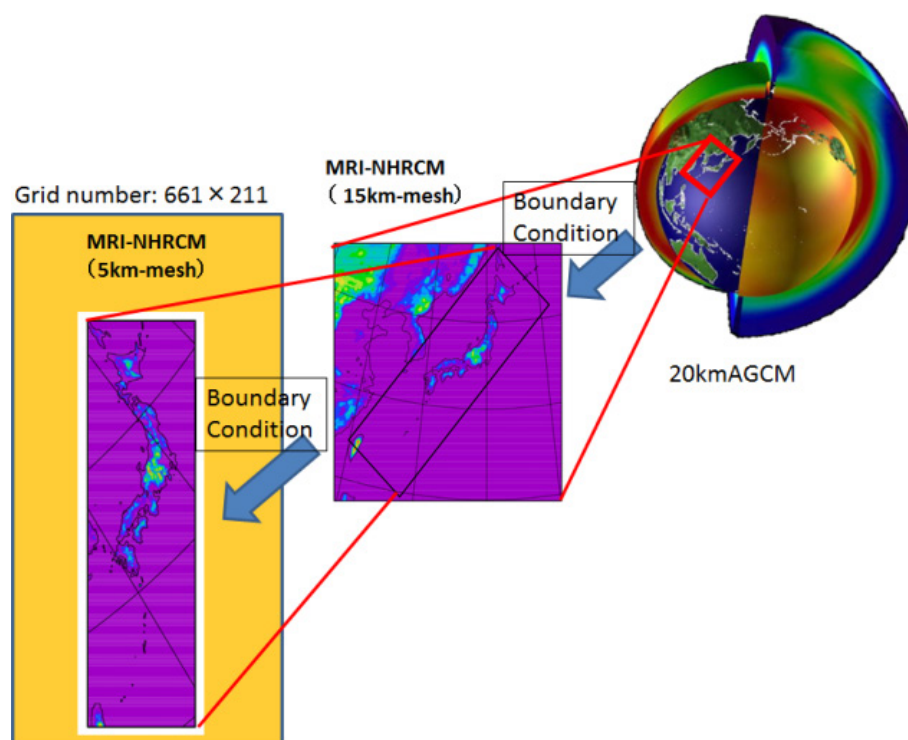


図2.2.5 この実験に用いられたネスティングの手法。

表2.3.1 NHRCM15及び05で出力されているファイルの属性

	NHRCM15		NHRCM05		ファイル形式
	出力間隔	ファイルサイズ (Gb)	出力間隔	ファイルサイズ (Gb)	
1) 2次元物理ファイル	1時間	1.20	1時間	0.90	順編成
2) 3次元P面ファイル	6時間	0.66	6時間	0.49	順編成
3) 地上データファイル	1時間	1.13	10分	5.09	順編成
4) SiB データファイル	1時間	4.07	1時間	3.04	MRI 形式
5) モデル面ファイル	1時間	24.40	3時間	6.09	MRI 形式
1ファイルの時間	半月		4日		

で内容に関しては省略する。順編成のファイルに関しては GrADS のコントロールファイルが用意されているのでそれからファイル内容を知ることができる。MRI 形式のファイルは以下の形で一つのデータが 2 バイトに圧縮されている。

```

REAL*4F4 (*), FMAX, FMIN
INTEGER*2F (* )
WD=(FMAX-FMIN)/64000. O
F(,)=NINT((F4(,)-FMIN)/WD-32000. 0).
```

詳しくは気象研究所技術報告第42号（2001）を参照されたい。NHRCM15のファイルは半月毎となっているため、計算のカレンダーは通常の暦に従うため、月後半のファイルサイズはその月によって異なる。ここに載せたファイルサイズは15日分のものである。初期値を含むファイルは他のファイルサイズよりやや大きくなっている。地表面の高さは、風は10m、その他の気温・露点差などの変数は1.5mの高さとなっている。風についてはモデル座標の x 軸方向・y 軸方向になっているので、これを東西・南北方向に変換するには簡単な一次変換の式で求められる。つまり

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$\theta = -(\lambda_s - \lambda) * n$$

$$n = \frac{\ln(\cos \varphi_1 \cdot \sec \varphi_2)}{\ln \left[\tan \left(\frac{1}{4} \pi - \frac{1}{2} \varphi_2 \right) \cot \left(\frac{1}{4} \pi - \frac{1}{2} \varphi_1 \right) \right]}$$

ここで、 u , v はモデル出力の x 軸・y 軸方向の風、 U , V は東西・南北方向の風、 φ_1 , φ_2 は基準の緯度、 λ_s は基準の経度、 λ はその地点の経度を表す。ここでは、 φ_1 , φ_2 は 30° , 60° 、 λ_s は NHRCM15 および NHRCM05 でそれぞれ 140° と 80° を用いている。それぞれの地点の経度 λ は、地形ファイルに含まれる地点ごとの緯度・経度のデータを参照していただきたい。

付録：出力変数一覧

1) YYYYMMDD_ph2m.dat

W_G1	土壌第 1 層の飽和度	0-1
W_G2	土壌第 2 層の飽和度	0-1
UFLSH	上向き顕熱フラックス	W/M**2
UFLH	上向き潜熱フラックス	W/M**2
URSDB	地表面下向き短波フラックス	W/M**2
URSUB	地表面上向き短波フラックス	W/M**2
URLDB	地表面下向き長波フラックス	W/M**2
URLUB	地表面上向き長波フラックス	W/M**2
Sunsh	日照時間	hour
USOLAR	地表面での上向き短波放射	W/m**2
QVGRD	地表面の qv	kg/kg
TIN1	土壌第 1 層の温度	K
TIN2	土壌第 2 層の温度	K
TIN3	土壌第 3 層の温度	K
TIN4	土壌第 4 層の温度	K
A_TSFC	t_sfc max	K
I_TSFC	t_sfc min	K
A_VEL	u_10	m/s

2) YYMMDD_plev.dat

1000 850 500 300 200hPa

T	気温	K
Z	ジオポテンシャル高度	m
U	x 方向の風速	m/s
V	y 方向の風速	m/s
W	z 方向の風速	m/s
TTD	湿数	K
CVR	雲量	0-1
CWC	雲水量	g/m**3
OMG	鉛直 P 速度	hPa/hour
VOR	渦度	10**-6/s
SMQR	雨の積算降水量	mm
SMQI	(雲) 氷の積算降水量	mm
SMQS	雪の積算降水量	mm
SMQG	あられの積算降水量	mm
SMQH	ひょうの積算降水量	mm
RAIN	降水量	mm
PSEA	海面気圧	hPa
Psrf	地上気圧	hPa
Usrf	地上の x 方向の風速	m/s
Vsrf	地上の y 方向の風速	m/s
Tsrf	地上気温	K
TTDsrf	地上湿数	K

3) YYYYMMDD_surf.dat

SMQR	雨の積算降水量	mm
SMQI	(雲) 氷の積算降水量	mm
SMQS	雪の積算降水量	mm
SMQG	あられの積算降水量	mm
SMQH	ひょうの積算降水量	mm

RAIN	降水量	mm
PSEA	海面気圧	hPa
PSURF	地上気圧	hPa
U	地上の x 方向の風速	m/s
V	地上の y 方向の風速	m/s
T	地上気温	K
TTD	地上湿数	K
CLL	下層雲量	0-1
CLM	中層雲量	0-1
CLH	上層雲量	0-1
CLA	全層雲量	0-1
TPW	可降水量	mm/hour

4) YYMMDD_SiB.data

Z0	粗度	M
FLPT	温位フラックス (= (u_*)*(PT_*))	M*K/S
FLQV	水蒸気フラックス (= (u_*)*(q_*))	M/S
UMOM	Tau_x/Rho (= (u_*)*(U_*))	M**2/S**2
VMOM	Tau_y/Rho (= (u_*)*(V_*))	M**2/S**2
FLG1	地熱フラックス (SURF. to 1st SOIL)	W/M**2
FLG2	地熱フラックス (1st to 2nd SOIL)	W/M**2
FLG3	地熱フラックス (2nd to 3rd SOIL)	W/M**2
FLG4	地熱フラックス (3rd to BOT.SOIL)	W/M**2
RSDB	地表面下向き短波フラックス	W/M**2
RSUB	地表面上向き短波フラックス	W/M**2
RLDB	地表面下向き長波フラックス	W/M**2
RLUB	地表面上向き長波フラックス	W/M**2
RSDT	トップでの下向き短波フラックス	W/M**2
RSUT	トップでの上向き短波フラックス	W/M**2
RLUT	トップでの上向き長波フラックス	W/M**2
CLA	全雲量	%
CSDB	晴天時地表面下向き短波フラックス	W/M**2
CSUB	晴天時地表面上向き短波フラックス	W/M**2
CLDB	晴天時地表面下向き長波フラックス	W/M**2
CSUT	トップでの晴天時下向き短波フラックス	W/M**2
CLUT	トップでの晴天時下向き長波フラックス	W/M**2
FLSH	上向き顕熱フラックス	W/M**2
FLLH	上向き潜熱フラックス	W/M**2
TSC	キャノピー温度	K
TSG	下草／裸地面温度	K
TSS	雪面の温度	K
TSD1	土壌第 1 層の温度	K
TSD2	土壌第 2 層の温度	K
TSD3	土壌第 3 層の温度	K
MSC	キャノピー水分比	%
ISC	キャノピーの氷比	%
MSG	下草／裸地面上の水分比	%
ISG	下草／裸地面上の氷比	%
SW1	土壌第 1 層の水分飽和度	%

SW2	土壌第 2 層の水分飽和度	%	ROS2	雪の有る部分格子での土壌 2 → 3 層への水の流出	MM/DAY
SW3	土壌第 3 層の水分飽和度	%	LTRS	葉から大気への蒸散	W/M**2
SI1	土壌第 1 層の氷飽和度	%	LINT	葉での遮断損失	W/M**2
SI2	土壌第 2 層の氷飽和度	%	LSBL	雪から大気への昇華	W/M**2
SI3	土壌第 3 層の氷飽和度	%	TSD4	土壌第 4 層の温度（雪有り／無し部分格子で共通）	K
CVRS	雪の被覆率	%	SNMT	日融雪量	MM/DAY
TSS1	雪第 1 層の温度	K	TC_N	雪の無い部分格子のキャノピー温度	K
TSS2	雪第 2 層の温度	K	TC_S	雪の有る部分格子のキャノピー温度	K
TSS3	雪第 3 層の温度	K	TG_N	雪の無い部分の格子下草／裸地面温度	K
TSS4	実質的なモデル出力無し	K	TG_S	雪面の温度	K
SWE1	雪第 1 層の積雪相当水量	KG/M**2	TD_N	雪の無い部分格子の土壌温度（1 層～3 層）	K
SWE2	雪第 2 層の積雪相当水量	KG/M**2	TD_S	雪の有る部分格子の土壌温度（1 層～3 層）	K
SWE3	雪第 3 層の積雪相当水量	KG/M**2	WD_N	雪の無い部分格子の土壌水の飽和度（1 層～3 層）	0-1
SWE4	実質的なモデル出力無し	KG/M**2	WD_S	雪の有る部分格子の土壌水の飽和度（1 層～3 層）	0-1
WTR1	雪第 1 層の含水量	KG/M**2	ID_N	雪の無い部分格子の土壌氷の飽和度（1 層～3 層）	0-1
WTR2	雪第 2 層の含水量	KG/M**2	ID_S	雪の有る部分格子の土壌氷の飽和度（1 層～3 層）	0-1
WTR3	雪第 3 層の含水量	KG/M**2	TS_S	雪の有る格子の積雪各層の温度（1 層～4 層）	K
WTR4	実質的なモデル出力無し	KG/M**2	WTR_S	雪の有る格子の積雪各層の含水量（1 層～4 層）	KG/M**2
RHO1	雪第 1 層に含まれる雪の密度	KG/M**3	SWE_S	雪の有る格子の積雪各層の相当水量（1 層～4 層）	KG/M**2
RHO2	雪第 2 層に含まれる雪の密度	KG/M**3	RHO_S	雪の有る格子の積雪各層の密度（1 層～4 層）	KG/M**3
RHO3	雪第 3 層に含まれる雪の密度	KG/M**3	AGE_S	雪の有る格子の積雪 1 層の降雪後の経過時間	0 — 8674
RHO4	実質的なモデル出力無し	KG/M**3	INF_S	雪の層の情報	(-999,-2,-1,0,1,2,3)
FLS0	積雪内の伝導熱 (SURF. to 1st SNOW)	W/M**2	ENG_S	0℃の水を基準とした雪の熱量	J/M**2
FLS1	積雪内の伝導熱 (1st SNOW to LOWER)	W/M**2	CVRS	雪の被覆率	0-1
FLS2	積雪内の伝導熱 (2nd SNOW to LOWER)	W/M**2	ALB_S	雪のアルベド	0-1
FLS3	積雪内の伝導熱 (3rd SNOW to SOIL)	W/M**2	SWE_T	(積雪全層の) 積雪相当水量	KG/M**2
FLS4	実質的なモデル出力無し	W/M**2	SNDEP	積雪深	M
RDSS	短波放射 (SKIN to 1st SNOW)	W/M**2			
ROFS	地表面流出	MM/DAY			
ROFB	土壌 3 層底面での下向き重力排水	MM/DAY			
RON0	雪の無い部分格子での土壌 1 層への水の浸透	MM/DAY			
RON1	雪の無い部分格子での土壌 1 層→2 層への水の流出	MM/DAY			
RON2	雪の無い部分格子での土壌 2 層→3 層への水の流出	MM/DAY			
ROS0	雪の有る部分格子での土壌 1 層への水の浸透	MM/DAY			
ROS1	雪の有る部分格子での土壌 1 → 2 層への水の流出	MM/DAY			

参考文献

- Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974: Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701, doi:10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2.
- Bourke, R. H., and R. P. Garrett, 1987: Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean. *Cold Regions Sci. and Tech.*, **13**, 259–280, doi:10.1016/0165-232X(87)90007-3.
- Hirai, M., T. Sakashita, H. Kitagawa, T. Tsuyuki, M. Hosaka, and M. Oh'izumi, 2007: Development and validation of a new land surface model for JMA's operational global model using the CEOP observation dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85A**, 1–24.
- Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A parameterization scheme of orographic gravity wave drag with the different vertical partitioning, part 1: Impact on medium range forecast. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 11–41.
- Japan Meteorological Agency, 2007: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency (Appendix to WMO numerical weather prediction progress report)*. Japan Meteorological Agency, 194pp. [available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/index.htm>].
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteorol. Monogr., vol. 24, edited by K. A. Emanuel and D. J. Raymond, pp. 165–170, Am. Meteorol. Soc., Boston.
- Kawai, H., 2006: PDF cloud scheme and prognostic cloud scheme in JMA global model. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Ocean Modeling*, **36**, 4.15–4.16.
- Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi, and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group, 2009: Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. *Hydrological Research Letters*, **3**, 49–53, doi:10.3178/hrl.3.49.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mizuta, R., Y. Adachi, S. Yukimoto, and S. Kusunoki, 2008: Estimation of future distribution of sea surface temperature and sea ice using CMIP3 multi-model ensemble mean. *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, **56**, 28pp.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233–258.
- Randall, D., and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *Meteorological Monograph/The representation of cumulus convection in numerical models*, **46**, 145–150.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108(D14)**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Aranami, A. 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**, 1266–1298.
- Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, 2008: Preliminary experiments of reproducing the present

- climate using the non-hydrostatic regional climate model. *SOLA*, **4**, 25–28, doi:10.2151/sola.2008-007.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara, 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. *SOLA*, **7**, 173–176, doi:10.2151/sola.2011-044.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara, 2012: Projection of future climate change in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmospheric general circulation model. *SOLA*, **8**, 053–056, doi:10.2151/sola.2012-014.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460, doi:10.1002/qj.49711649210.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1779–1800.
- Tiedtke, M., 1993: Representation of clouds in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3040–3061.
- Yasunaga, K., M. Fujita, T. Ushiyama, K. Yoneyama, Y. N. Takayabu, and M. Yoshizaki, 2008: Diurnal variations in precipitable water observed by shipborne GPS over the tropical Indian Ocean. *SOLA*, **4**, 97–100, doi:10.2151/sola.2008-025.
- Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami, 2014: A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Yoshimura, H., and T. Matsumura, 2005: A two-timelevel vertically-conservative semi-Lagrangian semiimplicit double Fourier series AGCM. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Ocean Modeling*, **35**, 3.27–3.28.
- Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute–Earth System Model v1 (MRIESM1) —Model description—. *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, **64**, 88 pp.
- 大泉三津夫, 保坂征宏, 2000: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 48–66.
- 斉藤和雄, 加藤輝之, 永戸久喜, 室井ちあし, 2001: 気象研究所技術報告第42号気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル.