

研究成果報告書

事業名（補助金名）： 基盤的研究開発育成事業（若手研究補助金）
研究開発テーマ名： 環オホーツク地域の大気－海洋－海水－陸面結合モデルの開発
研究代表者名： 中村知裕【 北海道大学／ 講師 】

背景・目的

オホーツク海を中心とした「環オホーツク地域」は、東西にユーラシア大陸と北太平洋、南北に北極圏と日本（温帯）その南の熱帯太平洋西岸域と、非常に特徴の異なる地域をつなぐ位置にある。この地理的配置のため、環オホーツク地域では独特の気候が形成され、同時に環オホーツク地域は北半球の気候形成・変動に重要な役割を果たすと考えられている。例えば、北半球の寒極であるシベリアから吹く冷たく強い季節風のため、オホーツク海は世界で最も低緯度で結氷する海となっている。海水の消長はオホーツク海における大気－海洋間の熱の交換量を激変させるため、オホーツク海沿岸の気候に影響するだけでなく、シベリア高気圧やアリューシャン低気圧の変動を通して、地球規模の気候・環境変動に重要なインパクトを与える。また、海氷生成に伴って生成された高密度水は、オホーツク海から流出して親潮を変質し、さらには北太平洋の中層水形成ひいては温暖化物質の海洋への取り込みに多大な影響を及ぼす。

こうした環オホーツク地域特有の気候形成と変動には、大気、海洋、海氷、陸面それぞれにおける過程に加えて、それらの間の相互作用が重要となる。上の海氷の例で言うと、海氷の生成・輸送は大気・海洋の状態に依存しているが、逆に海氷の消長は大気・海洋の循環場の変化や気団・水塊の変質を引き起こし、大気・海洋の状態を変える。しかしながら、これまで環オホーツク地域の研究は、大気や海洋、海氷や陸面を独立に調べる段階に止まっている。

そこで、環オホーツク地域特有の気候形成・変動のメカニズムの総合的な理解と予測向上を最終的な目的として、まずはそのための基盤となる大気－海洋－海水－陸面結合モデルを構築した。

内容・方法

環オホーツク地域の気候形成したがってその変動には、大気－海洋－海水－陸面の相互作用が重要な役割を果たしている。代表的なものを挙げると、冬季には、ユーラシア大陸が著しく低温となり、オホーツク海／北太平洋との間に強い温度コントラストが生じ、これに起因したシベリアからの強い季節風は上述の海氷を介在した大気－海洋相互作用を引き起こす。夏季には逆に、オホーツク海周辺の低い海面水温のため霧が発生し、霧は日射を遮り海面水温を低く保つため、大陸との間に強い温度コントラストが生じ、オホーツク海高気圧の形成を促進する。

こうした過程は従来、大気と海洋それぞれ独立に調べられてきた。しかしながら、その場合には大気－海洋（および海氷、陸面）間の相互作用やフィードバックが考慮できない。このため、大気・海洋それぞれに対して物理的に整合性のとれた境界条件を与えることが原理的に不可能に近く、大気単体あるいは海洋単体モデルの再現・予測精度に限界が生じる。そこで、環オホーツク地域を対象とした大気－海洋－海水－陸面結合モデルを構築して結合現象の解明を目指すことで、以上の問題の抜本的解決を図るところが本計画の特徴である。

構築する結合モデルの大気／海洋コンポーネントは、環オホーツク地域に焦点を当てるためどちらも静力学領域モデルとした。大気コンポーネントには、雲過程のパラメタ化で優れた結果を出している国際太平洋研究センター(IPRC)の領域モデルを採用し、海洋コンポーネントには、世界最高レベルの大循環モデルである東京大学気候システム研究センター(CCSR)で開発された COCO を採用した。今年度はこれらの大気モデルを環オホーツク地域に適用するに当たっての計算速度向上（高速化）、大気・海洋モデルのテストとスピンアップ、そしてこれらのモデルを元にした結合モデルの構築を行った。これらの詳細を、次の結果および成果において順に述べる。

結果・成果

大気モデルの高速化

モデルの計算速度はモデルの解像度や積分時間を大きく左右する。高速であれば同じ計算時間で解像度

を細かくでき、解像度が同じなら積分期間を長く取れる。また高速ならばモデルのテストの効率も上がる。そこでまず、大気モデルの高速化を行った。大気モデルは申請の際にはまだ並列化されていなかったが、その後入手するまでの間に IPRC で y 方向に領域分割する並列化が行われたので、こちらでは高速化のための簡単なチューニングと x 方向の領域分割を行った。

高速化の前に、並列化に関するデバッグを IPRC と協力して行った。また、領域分割数に課されていた制限（分割後の領域幅が初期・境界条件の格子間隔の整数倍）をなくし、数字の単精度指定を倍精度に変更し、組み込み関数も単精度用のものから総称に置き換えた。

高速化のための簡単なチューニングとしては、プロセッサ間の通信の一部を他の計算と同時に行うようにした。その結果、15cpu 使用時に並列化効率が少し向上した（約3%）。

さらに高速化するため、x 方向の領域分割を行った。上述のように、並列化と y 方向の領域分割が入手時には行われていた。先に y 方向のみ分割した理由はベクトル化率をなるべく下げないためだが、申請者の利用している環オホーツク観測研究センター情報処理システムの計算機や北海道大学大型計算機システムに新しく導入されたスカラー機では、これはそれほど気にしなくても良い。一方、x 方向に領域分割すると、同じプロセッサ数のときの通信量が減るので、通信時間の点からすると並列化効率が上がりやすい。また、通常の大気大循環モデルと同様に、IPRC 大気モデルはいわゆる「物理部分」において鉛直方向のみのやりとりを考慮しているので並列化率が高い。これらの理由から x 方向に領域分割すると、プロセッサ数を増やしたときに計算速度が頭打ちになる数がより大きくなる（したがってトータルで速くなる）ことが期待される。すなわち、さらなる高速化が期待できる。

領域分割は以下の一般的な方法で行った。まず、x の関数である変数全てについて定義域を分割する。この分割された各領域毎に別のプロセッサで計算する。次に、水平差分のように、隣のグリッドの値を参照する計算で用いられる変数について、「袖」と呼ばれる重複領域を設け、必要に応じて通信を行い「袖」の値を他のプロセッサから得る。その他、積分など領域をまたがる計算についても適宜通信を行うか適当な組み込み関数を用いて行う。入出力についてもデータを分割・統合するプログラムを用意する。最後に、分割の前後およびプロセッサ数を変えたときとで結果が一致することを確認した。

期待されたように、x 方向に分割することで並列化効率は約21%向上した（15cpu 使用時。グリッド数は $100 \times 60 \times 28$ ）。その結果、図1に示すようにプロセッサ数とほぼ比例して速度が増加するようになった。このことは、cpu 数を15以上に増やしたときに速度向上が頭打ちになるcpu数が増えることを示唆している。

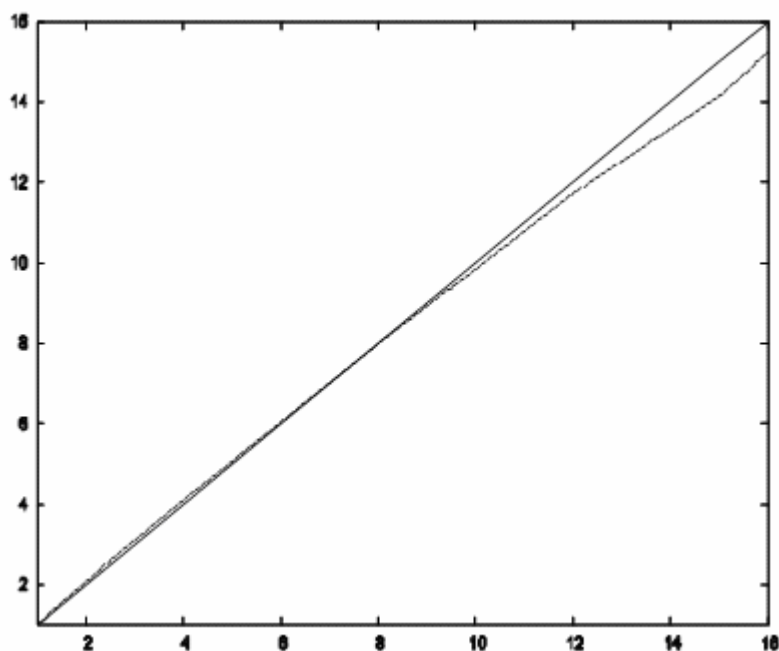


図1：プロセッサ数（横軸）の増加に伴う計算速度の増加率（縦軸）。

なお、海洋モデルについても通信の一部を他の計算と同時にやるよう若干のチューニングを行った。

大気・海洋モデルのテスト

結合モデルを動かす前に、大気・海洋モデルそれぞれ単体でのテストおよび海洋のスピナップを行った。モデル領域は図2に示したように、大気はオホーツク海を中心としシベリア高気圧・アリューシャン低気圧の大部分が含まれるよう設定し、海洋は北太平洋亜寒帯・亜熱帯循環を含む海域とした。水平分解能は結合時の計算時間を考慮し、共に $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ とした。初期・境界条件には、大気は ECMWF 再解析データを、海洋は World Ocean Atlas 2001 を用いた。

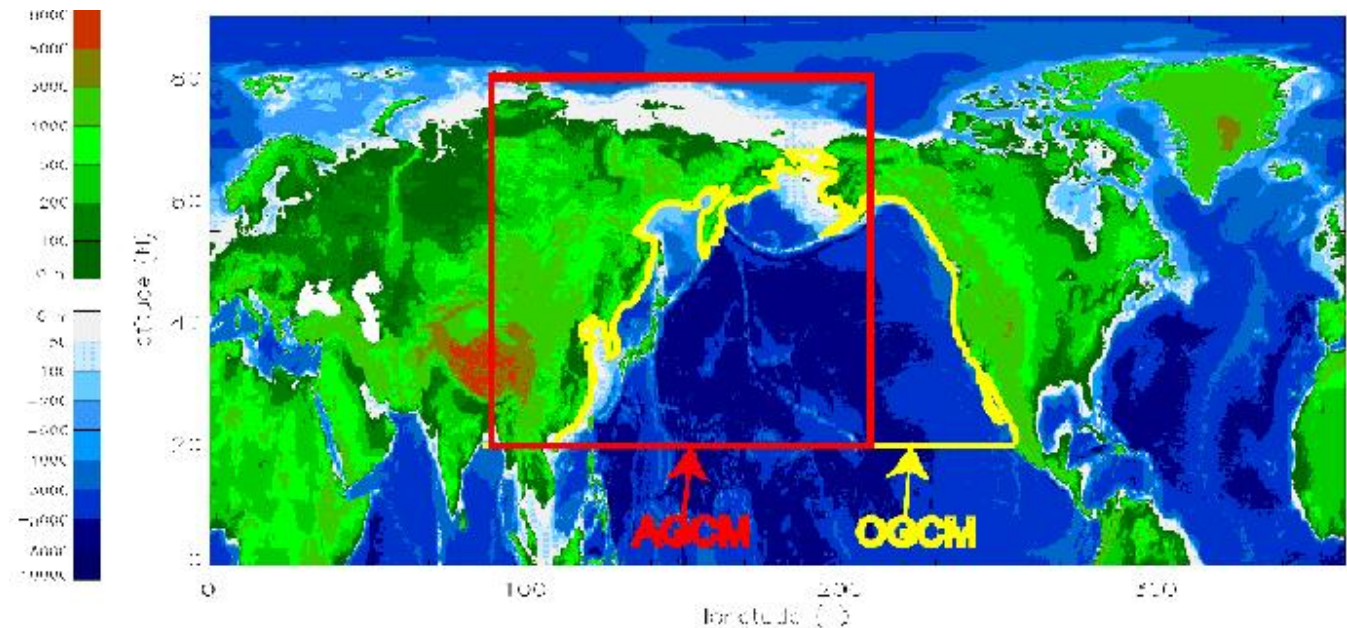


図2：大気（赤）・海洋（黄）コンポーネントのモデル領域。

最初に、大気モデルのテストとして夏季と冬季の計算例を以下に示す。夏季については、オホーツク高気圧やヤマセの発達に影響する霧（下層雲）－SST フィードバックの再現可能性を探るため、ヤマセのとき(1998 年 7 月 12 日)の日平均を図3に示す。モデル最下層の気温（正確ではないが以下では海面気温と呼ぶ）は、オホーツク海から低温域が東北地方の太平洋側および日本海の大津沿岸へと2又に伸びる典型的なヤマセ時のパターンを示している。ただ、海面気圧で見るとオホーツク海で比較的高気圧であるものの、北西太平洋上に高気圧があるため典型的なオホーツク高気圧発達時とは言い難い。このときオホーツク海およびそこから伸びた低温域周辺は下層雲に覆われている。とりわけ、オホーツク海中央部・千島列島と言った低温域ではモデル最下層（ $1-0.994\sigma$ 、海面からおおよそ 100m 前後）においても雲（または霧）ができており、霧（下層雲）－SST フィードバックの再現に欠かせない下層雲や霧の再現において、

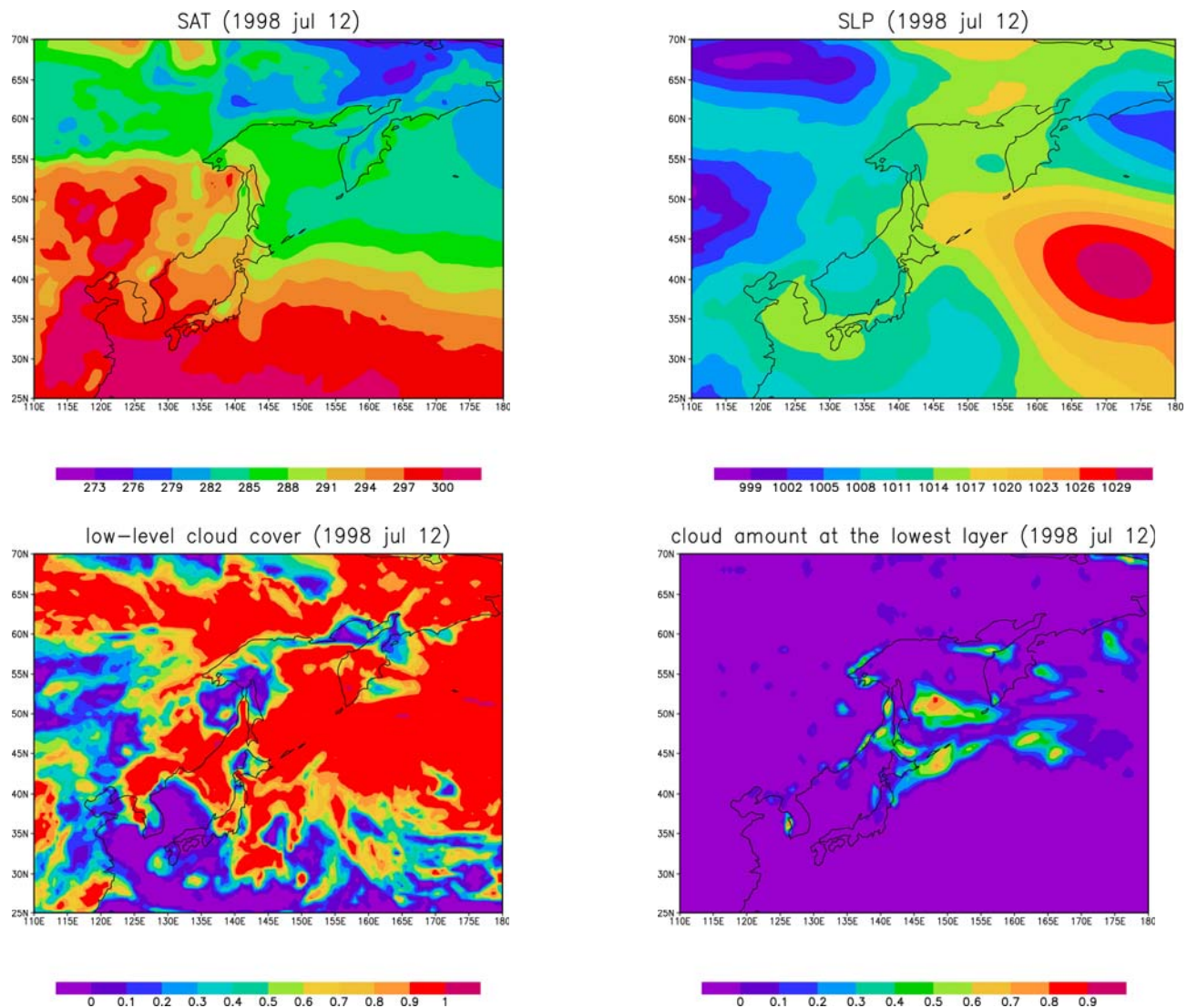


図3：大気モデルのテスト結果（夏季：1998/07/12）。（左上）海面気温、（右上）海面気圧、（左下）下層雲被覆率、（右下）モデル最下層における雲量。

このモデルは十分なポテンシャルを持っていると期待される。

冬季については、オホーツク海における海氷を介した大気・海洋相互作用の再現可能性をみるため、オホーツク海および日本海に寒気が吹き出しているとき(1998年1月5日)の日平均を図4に示す（ただし今回使用したのは海氷の取り扱いを入れる前の版）。海面気圧に見られるようにこの日はオホーツク海上に低気圧が進んできて大陸から寒気が吹き出している。それに伴い海洋から大気への熱フラックスが、オホーツク海では顕熱を、日本海南部では潜熱を通して生じる（図は省略）。結果として上流から下流へ進むにつれて境界層が発達し、下層に雲が出来、本州の日本海側に雪をもたらしている。このように、定量的な再現性の評価はまだ行っていないものの、定性的な特徴は妥当な範囲内で再現可能だと思われる。

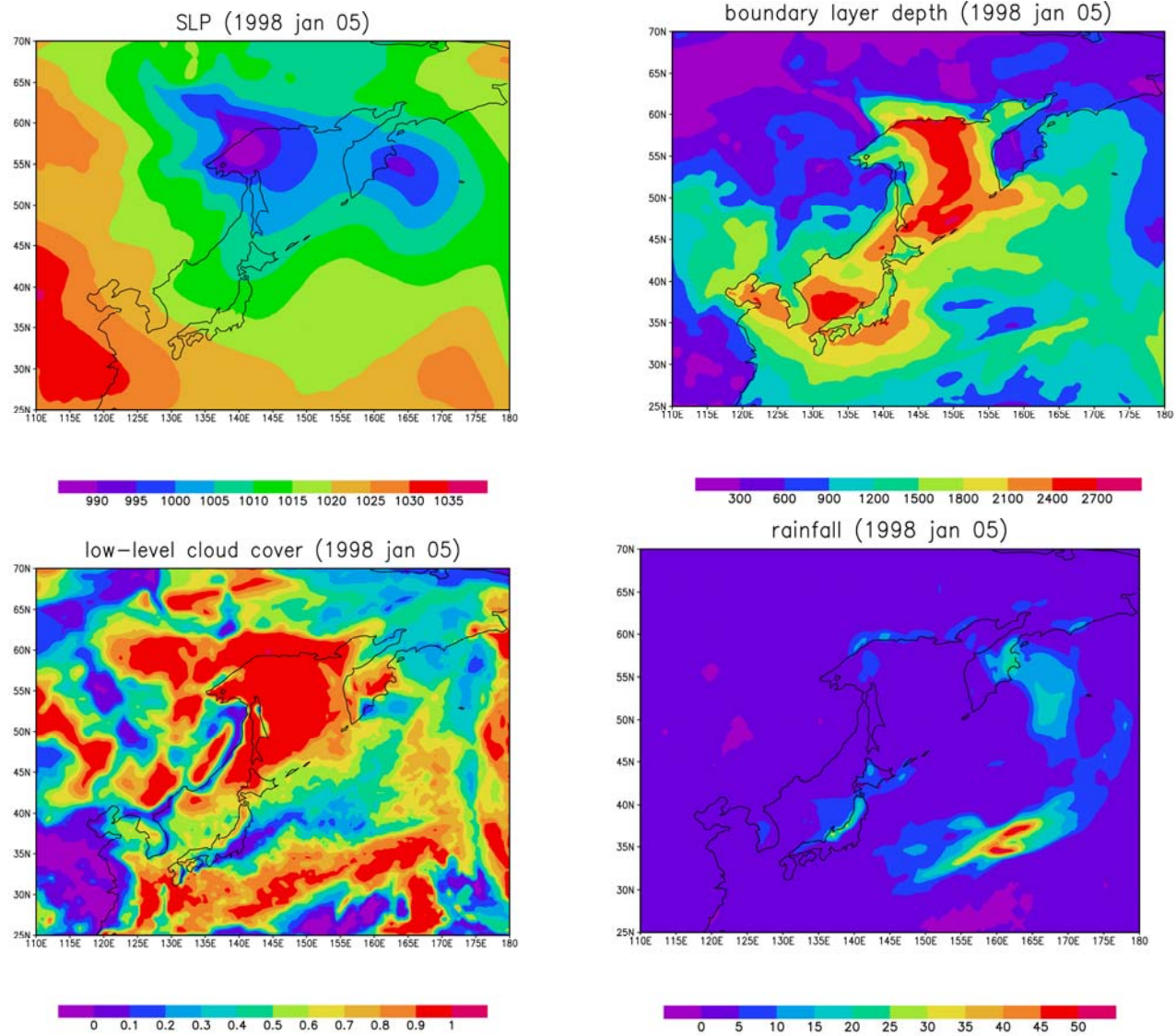
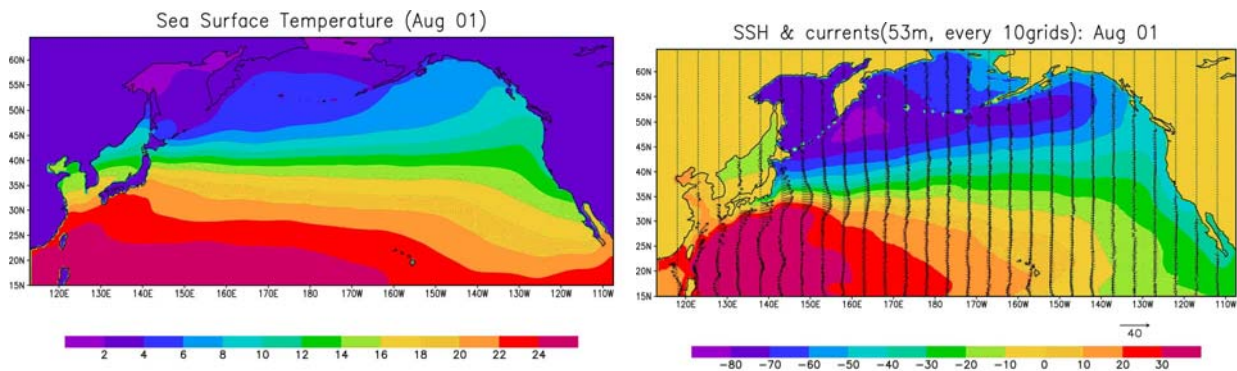


図4：大気モデルのテスト結果(冬季：1998/01/05)。(左上)海面気圧、(右上)境界層深、(左下)下層雲被覆率、(右下)降水。

次に、海洋について、気候学的な大気境界条件（日平均）を用いたスピナップの結果を述べる。夏季および冬季の海面水温・海面高度場等から見て、亜寒帯・亜熱帯循環等の海盆スケールの循環は分解能からして妥当な範囲で十分良く再現されていた（図5）。



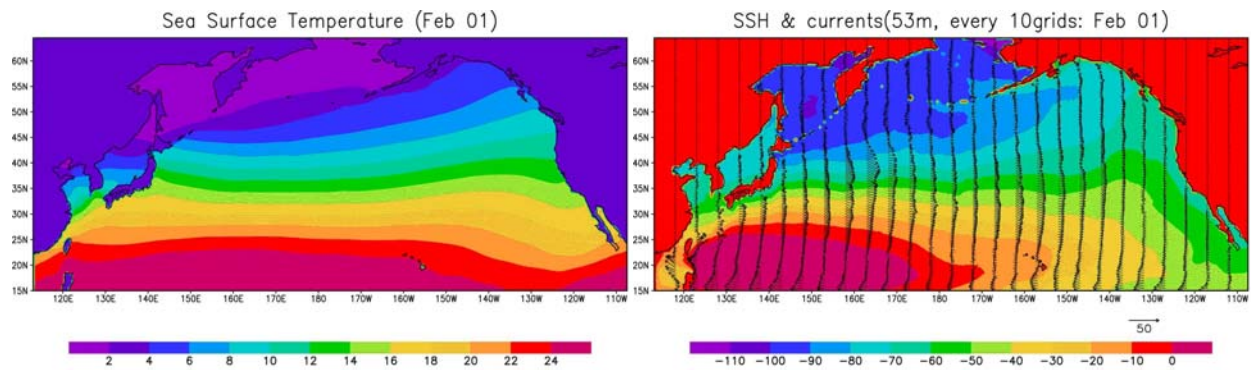


図5：海洋モデルのテスト結果。夏季（8月1日）の（左上）海面水温、（右上）海面高度と流速ベクトルの一部）、および冬季（2月1日）の（左下）海面水温、（右上）海面高度と流速ベクトルの一部）。

オホーツク海周辺の表層流速場についても、東カムチャッカ海流・親潮・東サハリン海流・オホーツク海の反時計回り循環・宗谷暖流といった特徴は再現された。海氷についても定量的には改善の余地がまだまだあるものの、オホーツク海北部で張り始め、3月には南東部を除くオホーツク海の約半分に広がると言った定性的特徴は再現された（図は省略）。このように、パラメタの調整等で改善すべき点があるものの重要な特徴は再現されており、今後具体的な年のシミュレーションを行う際にも各年の定性的特徴は再現できるものと期待される。

結合モデル構築

以上の大気・海洋モデルを元に結合モデルを構築するため、先ず大気モデルに海氷の取り扱いを組み込み、次に両コンポーネントを繋ぐカップラーを作成し、そして、海洋のスピナップ途中の結果を用いて動作確認を行った。なお、陸面および海氷モデルはそれぞれ上述の大気・海洋モデルに組み込まれている。

大気モデルに海氷の取り扱いを組み込むにあたって、放射および乱流フラックスの計算を一部変更した。海氷密接度・海氷表面温度・海氷の存在するグリッドの海面水温と乱流熱フラックスを大気モデルに与え、大気モデルにおいて放射温度・アルベド（海氷のアルベドは Toyota et al., 1995 に基づく）および乱流運動量フラックス（風応力）を計算している。なお、乱流フラックスを大気・海洋モデルのどちらで計算するのが望ましいかはそれぞれの時間分解能にも依存するので、将来的にはモデル設定に応じてどちらか一方で計算するよう変更する。

結合モデルの計算手順としては、図6に示すように海洋モデル単体でのスピナップを大気の気候値および特定の期間の再解析データを用いて行い、その後、注目する年の積分を開始する。今年度は作業効率を上げるため、注目する年の積分を開始する前にスピナップと平衡して結合モデルの動作確認も行った。

時間積分

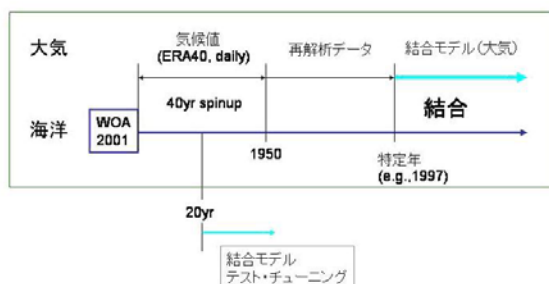


図6：結合モデルの積分手順。

動作確認を行うに当たり、海洋は気候値で20年間スピナップした結果を初期値とし1998年の再解析データを大気の初期・境界条件として計算を行った。計算開始1週間後の結果を大気についてのみ示

す(図7)。海洋は図5と同様なので省略する。海洋の状態が異なるため徐々に再解析データとの差が大きくなっていくものの、特に問題なく動作している。詳細なパラメタのチューニングは、再解析データを用いて1950年からスピナップした後、特定年を対象に結合してから行うことになる。

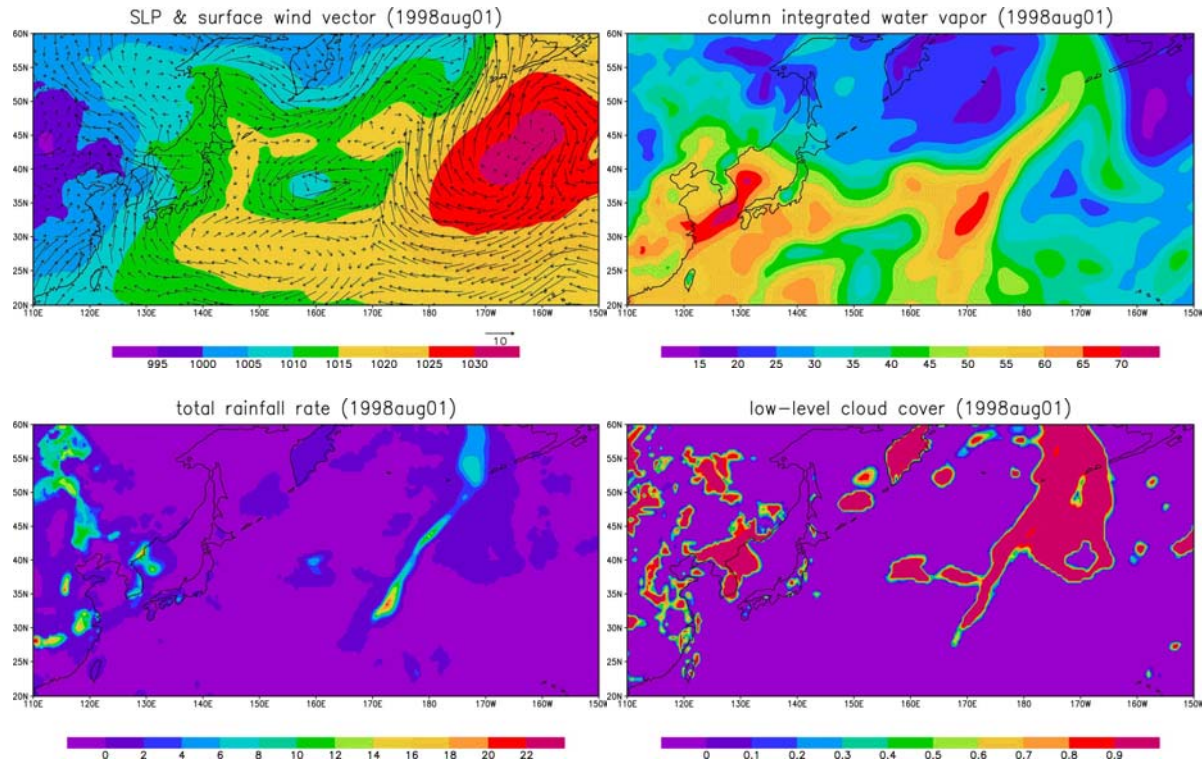


図7：結合モデルのテスト結果(夏季：1998/08/01)。(左上)海面気圧と風速ベクトル、(右上)可降水量、(左下)降水、(右下)下層雲被覆率。海洋は図5と同様。

今後の展開

低温科学研究所ではこれまで、大気、海洋、海氷、陸面それぞれの専門家が観測データを蓄積し、それぞれ単体の過程解明に成果を上げてきた。構築した結合モデルは、こうした蓄積を統合するための基盤となりうる。すなわち、観測から明らかになった各現象とその機構を結合モデルで再現ないしパラメタ化で考慮することで、各現象・機構が、環オホーツク地域の大気—海洋—海氷—陸面結合システムにおいてどのような役割を果たすのか、その結果、どの様に全体のシステムが構成されているのかを調べるための有効な手段となるだろう。こうした解析の際には、数値モデルの利点(各物理量が全グリッドで得られる、様々な仮想実験が行える)が生きてくる。このように結合モデルを基盤に各過程の知見を統合できれば、環オホーツク地域の大気—海洋—海氷—陸面の相互作用の研究のいっそうの促進に役立つだろう。

環オホーツク地域の大気—海洋—海氷—陸面の相互作用は、既に述べたように、オホーツク海沿岸の気候を形成するだけでなく、オホーツク海高気圧やシベリア高気圧・アリューシャン低気圧の発達や、北太平洋中層水の起源水形成による温暖化物質の海洋内部への取り込みなどを通して、地球規模の気候変動に影響すると考えられている。したがって、開発された結合モデルを用いた研究が進めば、オホーツク海周辺の日本の気候形成・気候変動の理解とそれに伴う予測向上(比較的小さいスケールで言えば、夏季のオホーツク海周辺の霧や、親潮周辺のやませ、冬季の海氷や雪、爆弾低気圧なども含まれる)、そして環オホーツク地域が全球の気候形成・気候変動に果たす役割の理解が進むと期待される。

さらに、申請時は想定していなかった計画も始まった。今回構築した結合モデルをベースに栄養物質循環・生態系のシミュレーションを行い、観測と併せて、環オホーツク地域における栄養物質循環像を解明していこうという計画である。このように、本研究課題で構築した結合モデルは、今後、様々な研究の基盤として有効利用されていく予定である。