



Title	環オホーツク圏領域気候モデル構築に向けて
Author(s)	中村, 知裕; Nakamura, Tomohiro; 三寺, 史夫 他
Description	3章 環オホーツク圏のモデリング
Citation	低温科学, 65, 123-130
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20461
Type	departmental bulletin paper
File Information	NAKAMURA-02.pdf





環オホーツク圏領域気候モデル構築に向けて



中村 知裕, 三寺 史夫 北海道大学低温科学研究所

環オホーツク圏は特徴的な地理的配置のため特有の気候を形成している。この環オホーツク圏の気候形成・変動の再現とメカニズム解明そして予測、および環オホーツク圏の3次元的な栄養物質循環と生態系の相互作用の解明とその変動の予測を目指し、環オホーツク圏領域気候モデルを構築する計画が、北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センターで進んでいる。ここでは計画と予備的結果を紹介する。

1. はじめに

環オホーツク圏とはオホーツク海とその周辺の地域を指している。環オホーツク圏は様々な特徴を持ち、それにより生じる特有の季節変動や気候変動は日本に重要な影響を与えている。例えば、オホーツク海は夏でも冷たい海面水温を保ち、海面付近の大気を冷やしシベリアとの温度傾度を通して対流圏上層にも影響を与え、オホーツク高気圧の形成を促進する。オホーツク高気圧は日本特に北日本の夏の気候に大きな影響を持つ。冬には、シベリア東部は北半球の寒極となり地上寒気を形成し、それに関連してシベリア高気圧が発達する。シベリア高気圧の形成は日本からオホーツク海に掛けて広い範囲に渡る寒気の吹き出しなどを通じ、日本を含め極東アジアの冬の気候を大きく決定している。加えて、寒気の吹き出しに関連して、オホーツク海では大規模な海水生成が起る。

オホーツク海における海水の生成は北海道沿岸の気候や産業に影響するだけでなく、北太平洋ほぼ全域の海洋中層に影響を与えている。海水が生成される際には、海水が結氷点まで冷却される上に、海水が凍る際に不純物として塩が排出されるため、密度の高い水が作られる。この高密度水生成がオホーツク海北部の沿岸域で大規模に生じており、生成された高密度水はオホーツク海そして北太平洋の中層に広がっていく。その際、大気に接していた海水が海洋中層に沈み込むので、大気中の酸素、温室効果ガス(二酸化炭素など)、フロンといった様々な気体が海洋中層に取り込まれ、北太平洋中層を「換気」する。

この環オホーツク圏は、温暖化による変化が大きい地域としても知られている。1966年から1995年間の気温の変化傾向を見ると、シベリアを中心に環オホーツク圏で顕著な温暖化が進行している¹⁾。この傾向はとりわけ冬に著しく、平均して10年間に2°Cのペースで昇温し

ている地域もある。昇温に伴うようにシベリア高気圧も弱化する傾向にあり、オホーツク海の海水面積も減少する傾向にある。これらは上述の北太平洋中層の換気も弱まっていく可能性を示唆している。

また環オホーツク圏は、顕著な数年から数十年規模変動の生じている北極圏、赤道域、北太平洋、ユーラシア大陸に囲まれている。南北方向を見ると、北は北極圏に接し、南には世界でも最も海面水温の高い赤道西太平洋があるため、極域変動の影響を強く受けるのに加えて、PJパターンと呼ばれる大気を介したテレコネクション等により赤道域の変動も伝わってくる。東西方向を見ると、東は太平洋、西はユーラシア大陸と対照的な地域に挟まれてその影響を受ける上に、偏西風帯に位置するため東西における変動が伝わって来る。このように環オホーツク圏は、いわば十字路の交差点に位置している。十字路の先には、いわゆる北極振動や ENSO、太平洋10年規模振動などの数年からそれ以上の周期の変動が生じており、環オホーツク圏は、そうした様々な要因による数年から数10年周期の変動にさらされている。

このように、環オホーツク圏では興味深くかつ重要な変動、季節から経年スケール、10年規模変動そして温暖化といった気候変動が生じており、これらをより良く理解することは日本および北太平洋の変動を理解し予測する上でも重要である。そこで環オホーツク観測研究センターでは、環オホーツク圏の気候およびその変動のより良い理解を目指し、観測的・理論的研究と相補するものとして、本稿で紹介する環オホーツク圏領域気候モデル構築が行われている。

環オホーツク圏領域気候モデルとして、大気-海洋-海水-陸面モデルを結合したモデルを構築する。環オホーツク圏の気候形成したがってその変動には、大気、海洋、海水、陸面の相互作用も重要になる。例えば、夏季にはオホーツク海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といったフィード

バックが働き、オホーツク高気圧を形成しやすくする。また冬季には、海水の生成・輸送は大気・海洋の状態に依存し、逆に海水の消長は大気・海洋の循環場や気団・水塊の変質に影響を与える。こうした相互作用も含めて、環オホーツク圏の気候とその変動を総合的に理解することを目指し結合モデルを用いる。

以上は環オホーツク圏の物理過程についての話だが、環オホーツク圏は生物・地球化学的にも興味深く重要な海域である。環オホーツク圏は海洋植物プランクトンによる基礎生産が世界的に見ても大きい海域となっている。高い基礎生産は、気候の観点からすると温暖化物質である二酸化炭素を海洋へ取り込む等重要な役割を果たし、水産の観点からしても漁獲を支えるので非常に重要である。最近の研究により、この高い基礎生産は豊富な栄養塩だけでなく、海水中に微量に存在する鉄により支えられていることが明らかになった。実際、環オホーツク圏、特にオホーツク海の中層は他海域に比べ鉄濃度が非常に高い²⁾。

しかしながら、海洋中の鉄の分布や循環は未だ大部分が不明である。主な供給源についても議論は収まっていない。従来は大気中を風により運ばれる砂塵（風送塵）によると考えられていたが、最近になり低温科学研究所の観測プロジェクトの成果として、アムール川起源の鉄が冬季の海水生成に伴って形成された高密度水によって運ばれるという供給路が注目され始めた。これらの起源からの鉄供給量は、共に、温暖化によって大きく変化する可能性が高い。風送塵による供給量は、風送塵の起源である大陸の雪氷面積や偏西風に依存している。このため、黄砂に見られるように年々変動が大きい上に、温暖化によって変化していくと予想される。アムール川起源の方も、流域環境の温暖化による変化や開発による人為的变化に加えて、結氷に伴う高密度水生成の量が温暖化により減少し鉄の供給量を変えてしまう危険性が心配されている。

そこで次の目的として、構築した結合モデルに鉄化学モデルおよび生態系モデルを組み込み、環オホーツク圏の栄養物質循環の3次元像とその変動の解明を目指している。以下では、構築中の環オホーツク圏領域気候モデルについて記述し、その後予備的結果を示す。

2. 環オホーツク圏領域気候モデル

環オホーツク圏領域気候モデルの構成を図1に模式的に示す。前節で述べたように、先ず、大気-海洋-海水-陸面結合モデルを構築する。結合モデルの大気・陸面コ

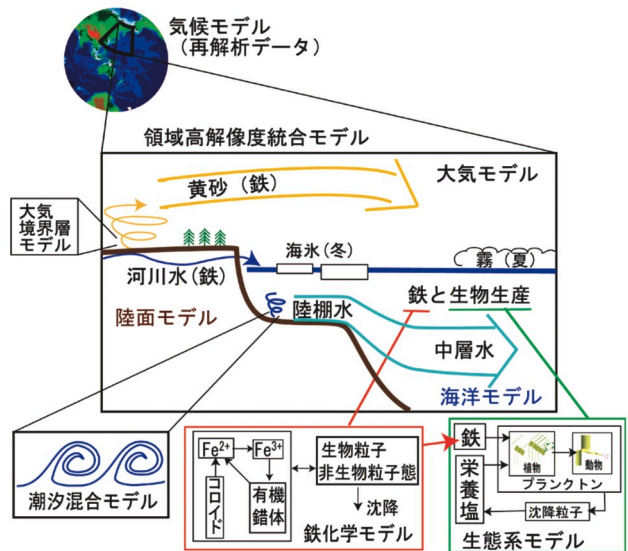


図1：環オホーツク圏領域気候モデル構成の模式図。

ンポーネントには国際太平洋研究センター (IPRC) の領域気候モデル³⁾を、海洋・海水コンポーネントには東京大学気候システム研究センター (CCSR) で開発された iced COCO3.4⁴⁾を使わせて頂いた。IPRC 領域気候モデルは、東太平洋赤道から亜熱帯に掛けて雲の再現で優れた結果を出しているモデルで、雲微物理、放射、積雲パラメタリゼーション、E-ε 乱流クロージャーなどが組み込まれ、陸面モデル (BATS⁵⁾) と結合されている。BATS は、いわゆる第2世代の陸面モデルの一つで、植物の蒸散の効果等も考慮されている。Iced COCO3.4 は、熱塩循環を含めた海洋大循環を再現するために構築されたモデルで、トレーサの移流には保存性の良いスキーム (UTOPIA/QUICKEST) が用いられている。その他、等密度面拡散および渦のパラメタリゼーションや海面混合層乱流クロージャーなどを選択できる。海水は、いわゆる2カテゴリー・モデルで、海水の効果が無視できる薄氷域と海水の効果を考慮する厚氷域の2つに分類して計算する。厚氷は、力学には弾・粘塑性体で、熱力学的には熱の蓄積を無視する0層モデルである。また積雪とその熱・水フラックスへの効果も考慮されている。

以上の結合モデルに、海洋生態系モデル、鉄化学モデル、風送塵モデルを順次組み込んで行き、さらに潮汐混合モデルや河川流路網モデルの組込も計画している。前節では触れなかったが、潮汐混合は千島列島やオホーツク沿岸で強く、オホーツク海の水塊構造や循環に大きな影響を与え、ひいては北太平洋中層の水塊・循環にも影響する可能性が示唆されている⁶⁾。また、このことは潮汐混合が生態系や鉄にも大きな影響を与えている可能性も示唆している。河川流路網モデルは、アムール川を初め

とする河川からの流出が水循環の変動に伴い変動する効果を考慮するのに必要となる。

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する予定である。ただし次節で示す予備の結果では、テストとして大気モデルの境界が海洋に悪影響を及ぼさないように、大気モデルの境界を北太平洋の東端まで含むよう広げている。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。

時間積分の手順を図3に示す。最初に、大気データとして気候値を与え、海洋コンポーネントを40年間スピニングアップする。その後、1950年前後からの各年の大気再解析データを与え、海洋コンポーネントのスピニングアップを続ける。最後に、解析する期間の少し前から大気・海洋コンポーネントを結合して計算する。初期・境界条件として、海洋はWorld Ocean Atlas 2001(米国海洋データセンター)を、大気は欧州中期予報センターの再解析データを用いている。ただし、最初はテストおよびチューニングのため、海洋コンポーネントを20年間スピニングアップしたところで結合して計算している。次節の結果は、この予備的テストの結果の1例である。

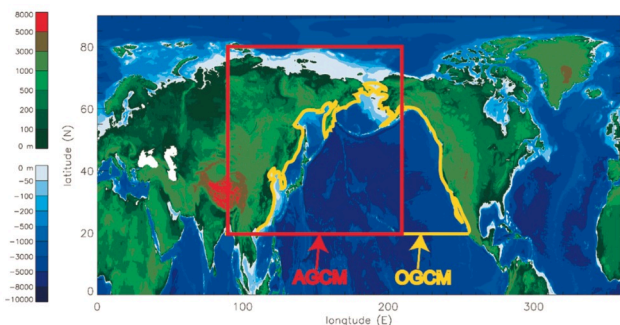


図2：モデル領域（計画）。

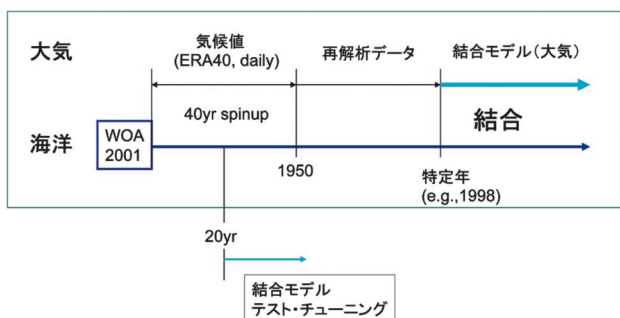


図3：時間積分の手順。

3. 予備的結果

テストのため結合して1年間計算した結果の一部を紹介する。なお、大気は1998年のデータを用いたが、海洋は気候値でスピニングアップ中なので1998年の状態を再現していない。したがって、大気境界条件により1998年の特徴が現れるものの、特定の年に限らない基本的特徴が再現されるか確認できれば十分である。以下では、先ず大規模な場について示した後、夏季および冬季のイベントについて紹介する。

3.1 大規模場とその季節変化

図4に海面気圧、風応力、降水量、海面高度、表層流速、海面水温を6ヶ月毎に平均したものを示す。海面気圧を見ると、夏季を含む半年（以下「夏季」と省略）には太平洋高気圧が発達し、冬季を含む半年（以下「冬季」）にはアリューシャン低気圧とシベリア高気圧が発達している。海上における風応力は、中緯度で偏西風、低緯度で貿易風が吹いている。太平洋高気圧とアリューシャン低気圧の発達に伴い、偏西風と貿易風の境界は「夏季」は少し北にずれ「冬季」に少し南に下がる（地衡流平衡にある風は気圧の等値線に沿って、気圧の高い方を右に見て吹く）。また「冬季」にはアリューシャン低気圧のため亜寒帯で時計回りの成分が強化されている。降水量の多い領域は、中国南部またはフィリピン付近からカナダやアラスカ沿岸へ北東に伸びており、比較的季節変動が小さい。

海面高度からは、海洋の亜熱帯・亜寒帯循環と言った大規模循環の特徴が見て取れる。季節変動は少し小さいが、「冬季」はオホーツク海や亜寒帯の循環が強化されている。表層流速で目立つのは、台湾付近から日本南岸に伸びる黒潮とその先の黒潮続流で、少し幅が広いが離岸位置はかなり良い。親潮は弱くて図では見にくいだが、アラスカ南岸からアリューシャン列島にかけて流れるアラスカ海流は、特に「冬季」に見て取れる。その他、南の境界付近に赤道反流があるが、これには境界の影響が大きいと思われる。海面水温も、循環による移流などのため、亜熱帯では西で高温・東で低温となり、亜寒帯ではその逆となっている。「夏季」には全体に暖まり、「冬季」には冷える。オホーツク海やベーリング海では、「冬季」に -1 度を下回り結氷点に達している。

こういった大規模な場については、定量的には改善の余地があるものの基本的特徴は分解能からして妥当な範囲で良く再現されている。

図5に海水密度度の月平均分布を示す。海水が出来るのは少し早く、11月にはオホーツク海北西部に広

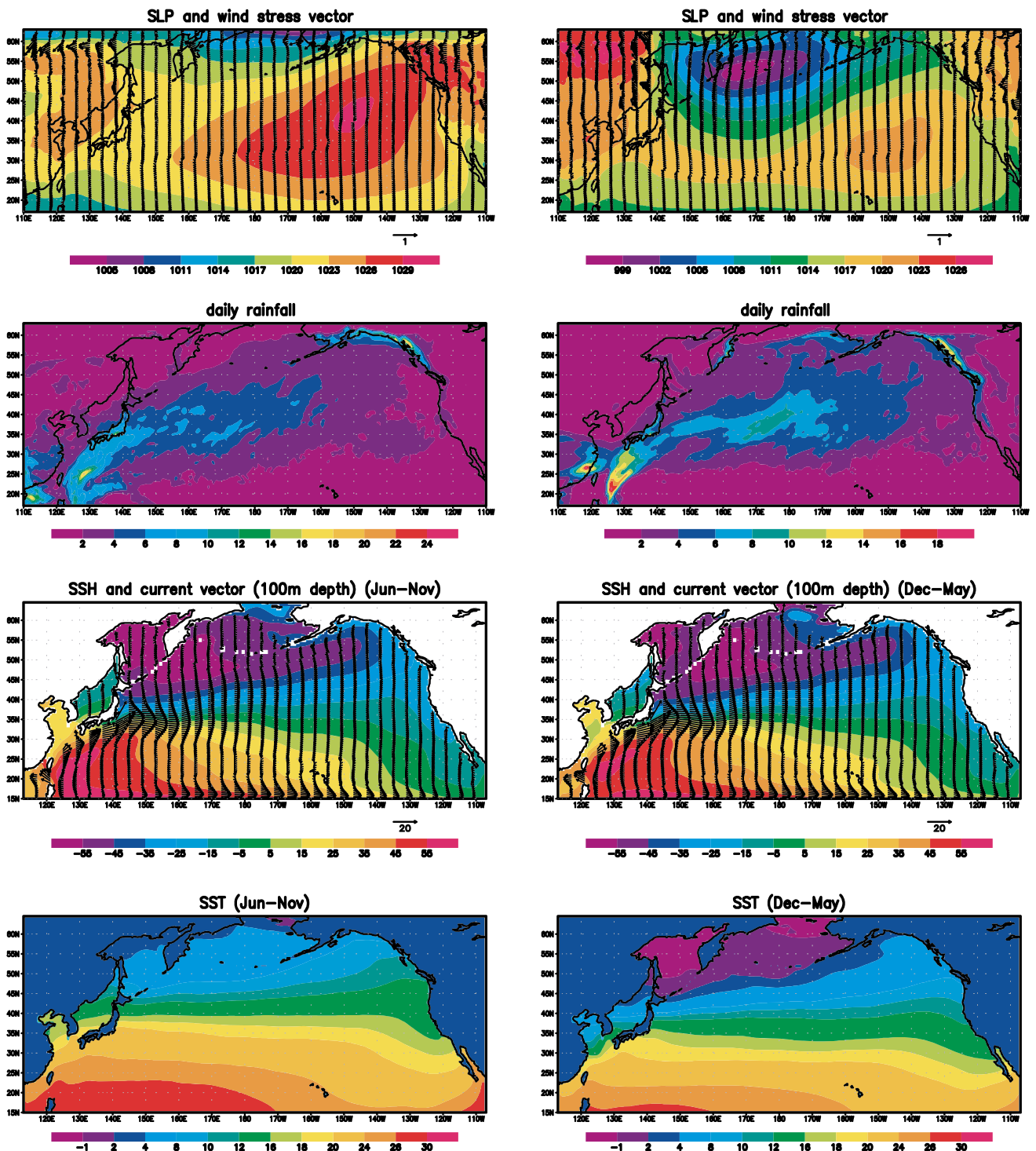


図4：上から、海面気圧 (hPa) と風応力ベクトル (Nm^{-2}), 日降水量 (mm), 海面高度 (cm) と100 m 深の流速ベクトル (cm/s), 海面水温 ($^{\circ}\text{C}$) の6ヶ月平均図。左が「夏季」, 右が「冬季」で、大気は5月~10月と11月~4月, 海洋は6月~11月と12月~5月の平均。

がり、ベーリング海の北端でも形成されている。その後、徐々に南へ広がり、3月には千島海盆を除くオホーツク海のほぼ全域およびベーリング海の東部に広がっている。オホーツク海で、海水がほぼ東西一様に南下し、12月には東の方が早く南に広がっているのは観測と異な

る。おそらく風によるドリフトが効き過ぎているのだろう。また、海水の量は少し多すぎ、海水の後退も観測より遅い(図は省略)。

3.2 夏季イベント (オホーツク高気圧)

夏季のイベントとして、結合モデルで見られたオホー

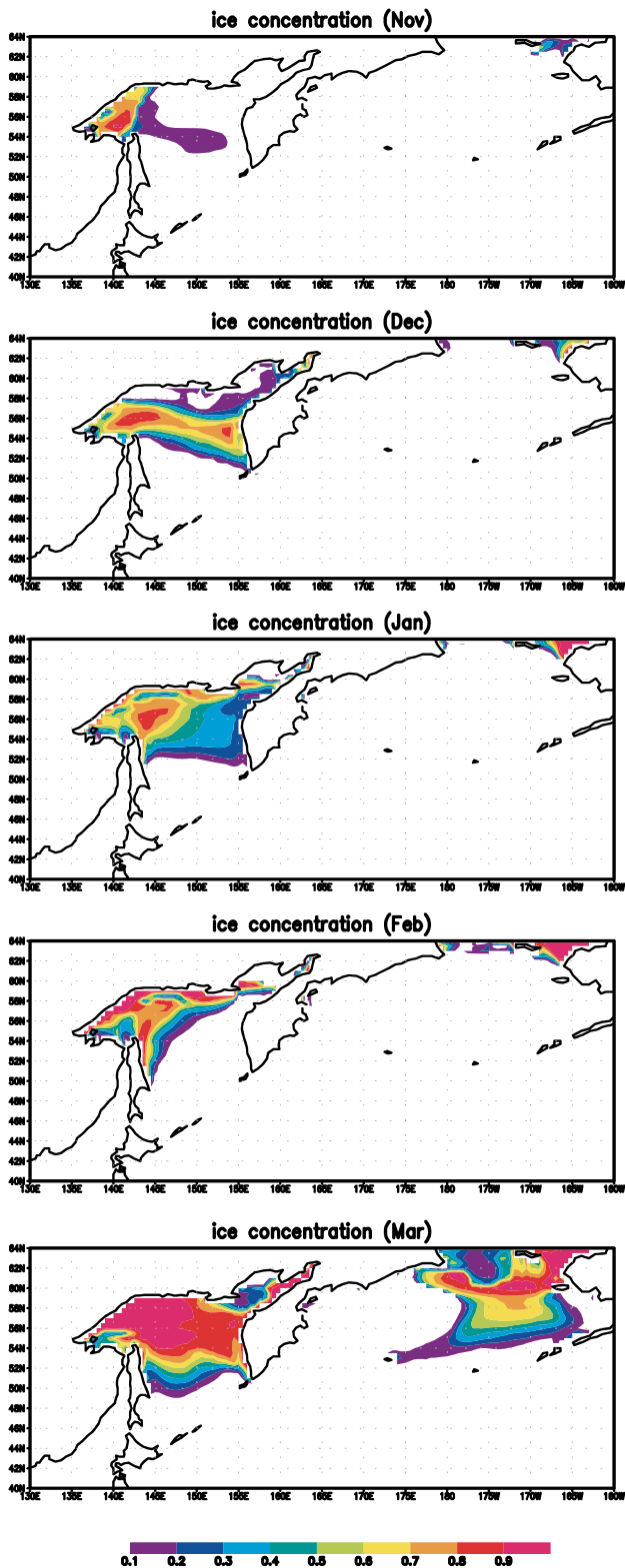


図5：海水氷接度の月平均分布図. 上から11月から3月のもの。

ツク海の下層雲（または霧）とオホーツク高気圧について紹介する。図6(a)は、モデルの8月8日における1000 hPaにおける雲量と海面気圧の日平均分布である。前者はモデル大気の最下層の雲量にほぼ等しく、したがってモデルの分解能では接地しているため下層雲と霧の区別がつかなくなっている。

オホーツク海に注目すると、中央部で下層雲または霧が濃く、その付近で地上高気圧が形成されている。海面気温を見ると(図6(b))、オホーツク海中央部の下層雲の多いところで気温も下がっている。すなわち、下層雲・霧の発生により気温が低く抑えられ高気圧の形成を促進している。これはまた、はじめに触れた霧-海面水温フィードバックが働きうることを示唆している。

オホーツク海の高気圧の鉛直構造を見るため、雲量とジオ・ポテンシャル高度アノマリの南北断面を図6(c)に示す。50°N~57°Nの海面付近にある雲量の濃い領域が先程のオホーツク海中央部の下層雲に対応している。この下層雲の高さは950 hPa程度までに限られ、それに対応するかのように地表付近で高気圧偏差が大きくなっている。しかし、高気圧自体は比較的背が高く、対流圏上部へ伸びている。こうした構造は、オホーツク高気圧に見られる幾つかの典型的構造の内の一つである。

ちなみに、図6(a)ではアメリカ西海岸の沖合にも下層雲が広がっている。観測によると、この海域では層雲・層積雲が夏季には頻繁に形成され、海面水温が低く保たれる。従来の分解能の粗い全球結合モデルでは、この下層雲の再現が難しく、海面水温にも高温バイアスが生じてしまうことが知られている。

こうしたイベントや特徴の再現性からして、モデルは環オホーツク圏の夏季大気的重要な特徴であるオホーツク高気圧や下層雲・霧の再現に有望そうである。

3.3 冬季イベント（寒気の吹き出し）

冬季については低気圧の通過に伴う海上への寒気の吹き出しの例として、図7にモデルの12月17日における海面気圧と境界層厚、降水量、海水氷接度の日平均分布を示す。

海面気圧を見ると、オホーツク海西部に低気圧があり、いわゆる西高東低の気圧配置となっている。これに伴い、寒気が大陸からオホーツク海および日本海北部に吹き出している。吹き出した寒気は海洋から熱を奪う。このため大気は下から暖められて不安定となり境界層が発達する。図7でも、下流に進むに連れて境界層が厚くなっているのが見て取れる。降水量の分布を見ると、寒気が海洋から熱を奪う際に蒸発した水の一部は、本州や北海道の山岳に当たり降水（雪または雨）をもたらしている。

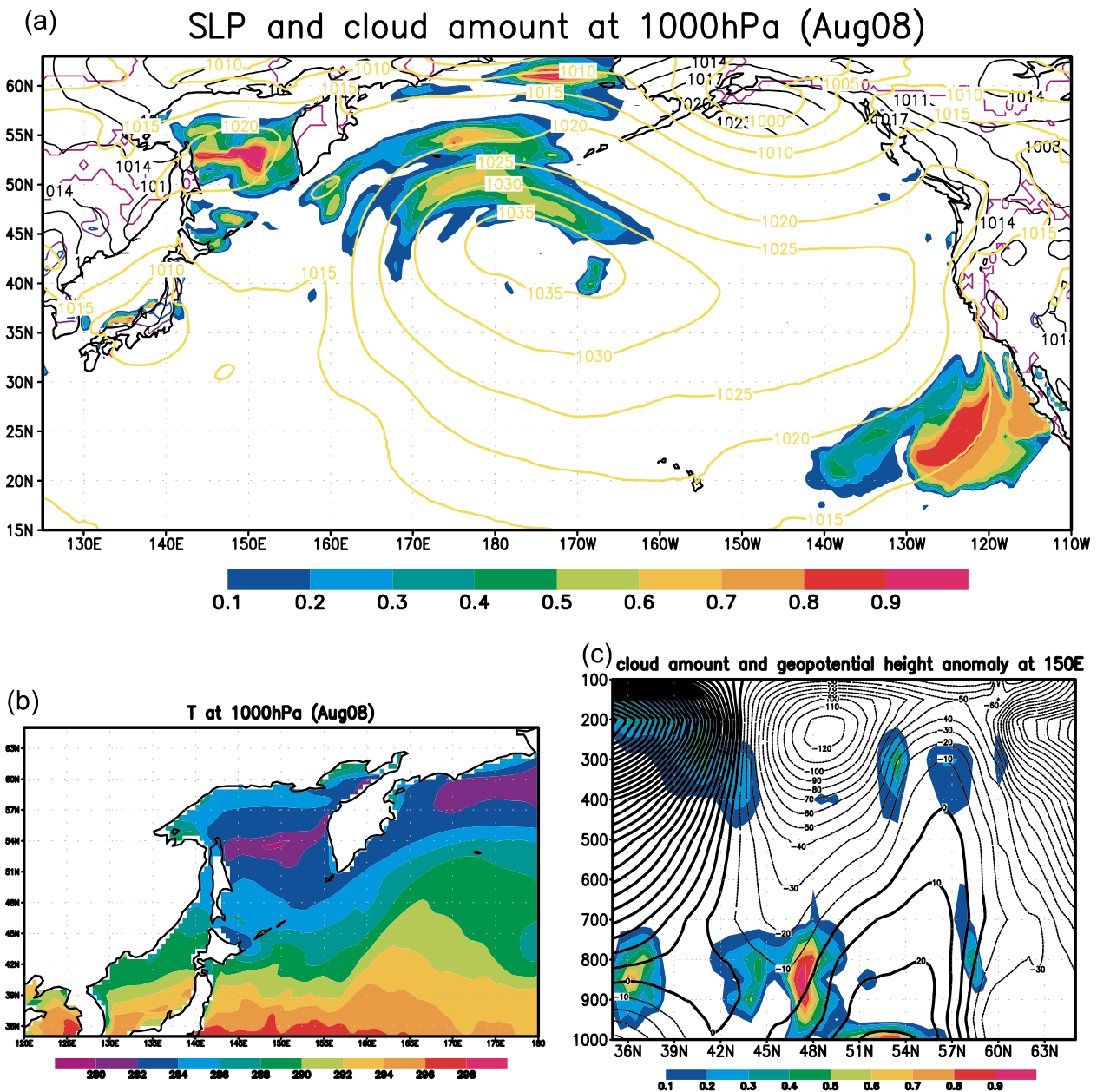


図6：モデルの8月8日において日平均した、(a)1000 hPaにおける雲量（カラー）と海面気圧（hPa：コンター）、(b)1000 hPaにおける気温（K）、(c)150 Eにおける雲量（カラー）とジオ・ポテンシャル高度アノマリ（m：コンター）の鉛直断面。(c)の太実線は正、細点線は負を表す。

また、低気圧の東側と北側では湿った暖気の流入に伴う降水が見られる。このように、定量的な再現性の評価はまだだが、定性的な特徴は妥当な範囲内で再現可能だと思われる。

海洋は、寒気の吹き出しにより冷却され、オホーツク海では海水生成が生じる。海水密接度と境界層厚を見比べると、海水密接度の高い海域では大気境界層も比較的薄いように見える。これは、海水があると大気-海洋間の熱フラックスが著しく減少するため、境界層の発達や気団の変質が制限されていることを示唆している。また、

オホーツク海北岸に海水の少ない海域（ポリニア）が広がっている。この海域は海水に大気-海洋間の熱フラックスを遮られることもなく、大陸に近いので吹き出してくる寒気がより冷たい。このため海水生成は主にこうしたポリニアで生じている。ただ、このモデルではポリニアが少し広すぎる。これが上で言及した海水生産量過大の原因の一つだろう。

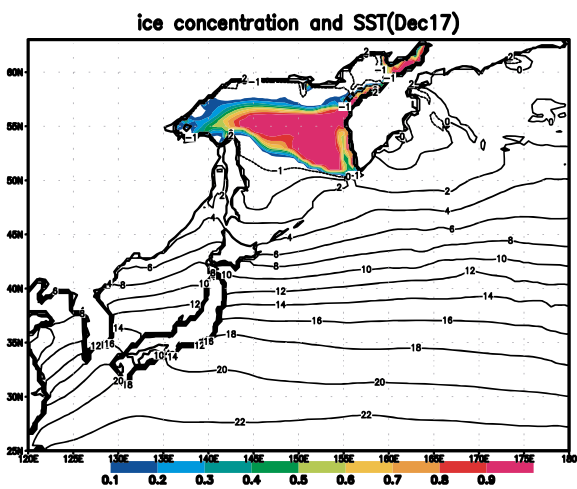
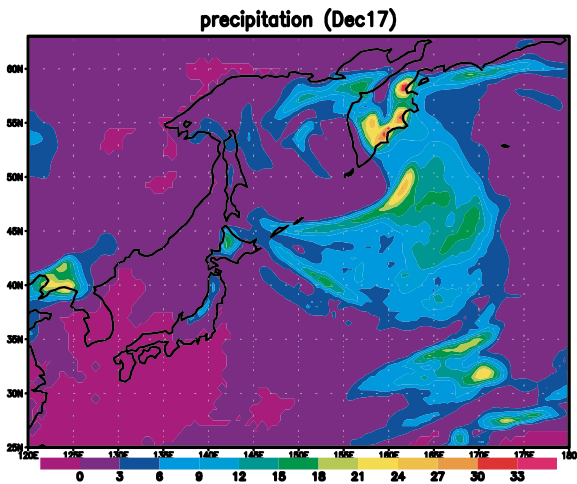
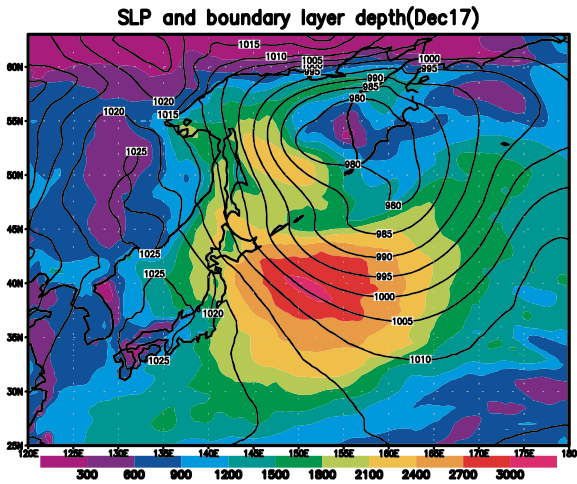


図7：上から、海面気圧 (hPa：カラー) と境界層厚 (m：コンター)、日降水量 (mm)、海水密度度 (カラー) と海面水温 (°C：コンター)

4. 終わりに

これまで低温科学研究所をはじめとして、大気、海洋、海氷、陸面それぞれにおいて環オホーツク圏の観測データを蓄積し理論的モデル的研究を進め、それぞれ単体での過程解明に成果を上げてきた。環オホーツク圏領域気候モデルが、こうした蓄積を統合するための一助になることを期待している。例えば、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することで、それら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様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ことができるかもしれない。そうした解析の際には、数値モデルの特長、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といった利点が生きてくる。このように環オホーツク圏領域気候モデルが、環オホーツク地域の気候システムとその変動そして鉄など栄養物質循環と生態系の変動の研究のいっそうの促進に役立つようになることを期待したい。

参考文献

- 1) M. C. Serreze, J. E. Walsh, and F. S. Chapin, *Clim. Change*, **46** (1-2) (2000), p.159-207.
- 2) J. Nishioka, *Proc. Amur-Okhotsk International Workshop* (2004)
- 3) Y. Wang, *Mon. Wea. Rev.* **132** (2004) p.274-296.
- 4) H. Hasumi, *CCSR Rep.* **13** (2000) 68pp.
- 5) R. E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy, *NCAR Tech. Note NCAR/TN-387* (1993) 72pp.
- 6) T. Nakamura, T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji, *J. Oceanogr.* **60** (2004) p.411-423.
(2007年1月12日 改訂受付)

Pan-Okhotsk regional climate model

Tomohiro Nakamura
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Humio Mitsudera
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

abstract:

The pan-Okhotsk region has a characteristic climate that is changing rapidly due to global warming. The pan-Okhotsk Regional Climate Model is being constructed at the Pan-Okhotsk Research Center within the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, to gain a better understanding and improved prediction of the formation process and change in: (1) the climate in the Pan-Okhotsk region, and (2) three-dimensional circulations of nutrients and their interaction with the ecosystem in the region. This article describes the model and presents preliminary results.

中村知裕

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目
北海道大学 低温科学研究所
e-mail: nakamura@lowtem.hokudai.ac.jp
URL: <http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/Nakamura/index.html>

三寺史夫

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目
北海道大学 低温科学研究所
e-mail: humiom@lowtem.hokudai.ac.jp
URL: <http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/Mitsudera/index.html>