

4. 環オホーツク圏領域気候モデル

中 村 知 裕*・三 寺 史 夫**

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。この地域では季節変動や気候変動に顕著な特徴があり、日本の気候にも重要な影響を与えている。夏季には、オホーツク海は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、オホーツク海高気圧の形成を促進する（例えば、Nakamura and Fukamachi 2004；Tachibana *et al.* 2004）。オホーツク海高気圧は、特に北日本の夏の気候に大きな影響を持つ。冬季には、シベリア東部では地上寒気が涵養され、それに関連してシベリア高気圧が発達する（例えば、Ding 1990；Takaya and Nakamura 2005）。その形成は日本からオホーツク海に掛けて広い範囲に亘る寒気の吹き出しなどを通じ、日本を含め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こる。

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へと広がっていく（Talley 1993；Watanabe and Wakatsuchi 1998；大島 2003）。この過程を通じて、大気に接し

ていた海水が海洋中層に沈み込まれることになるので、大気中の酸素に加え、二酸化炭素やフロンといった温室効果気体も一緒に海洋中層に取り込まれて行くため、結果として、北太平洋中層を「換気」する効果を持つ（Yamamoto-Kawai *et al.* 2004；Watanabe *et al.* 1994）。

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、北太平洋、ユーラシア大陸に囲まれており、さらに遠く熱帯からの影響も大気循環変動を通じて受けることから、「気候変動の十字路口」とも言える地域である。加えて、温暖化に伴う変化も大きい。実際、1966年から1995年の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。この傾向はとりわけ冬に著しく、平均して10年間に2℃のペースで昇温している地域もある（Serreze, *et al.* 2000）。昇温に伴うようにシベリア高気圧も弱化傾向にあり（Nakamura *et al.* 2002；D'Arrigo *et al.* 2005）、オホーツク海の海水面積も減少する傾向にある（Tachibana *et al.* 1996；Nakanowatari *et al.* 2007）。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（Nakanowatari *et al.* 2007）。このように、環オホーツク圏では、気候の温暖化傾向に重畳して、興味深くかつ重要な気候の自然変動が季節から経年スケール、そして10年以上に亘る長期スケールで生じている。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気候変動を理解し予測する上でも重要である。

以上は環オホーツク圏の物理過程だが、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。環オホーツク圏で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。この高い基礎生産は、温暖化物質である二酸化炭素を海洋へ取り込むな

* 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、nakamura@lowtem.hokudai.ac.jp

** 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、humimom@lowtem.hokudai.ac.jp

© 2008 日本気象学会

ど、物質循環に重要な役割を果たすとともに (Takahashi *et al.* 2002), 食物連鎖を通し水産資源の基礎ともなっている。最近の研究によると、この高い基礎生産を支えるには、亜寒帯域のエクマン湧昇に伴う豊富な栄養塩だけでなく、海水中に微量に存在する鉄が重要である (Tsuda *et al.* 2003)。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 (Nishioka *et al.* 2007)。

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) が主要な供給源と考えられていたが、最近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海洋経由の供給路が注目され始めた (Nishioka *et al.* 2007)。これら2つ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と考えられる。

そこで、北海道大学低温科学研究所環オホーツク圏観測研究センターでは、環オホーツク圏の気候および環境変動のより良い理解のために、

- シベリア、東アジアから西部北太平洋に注目した、大気—海洋—海水—陸面結合モデルの構築；
- 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およびその予備的結果について紹介する。

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基盤は大気—海洋—海水—陸面結合モデルである。結合モデルの大気・陸面コンポーネントにはハワイ大学国際太平洋研究センター (IPRC) の領域気候モデル (Wang *et al.* 2004) 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 COCO3.4 (Hasumi 2000) を用いている。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、雲の微物理、放射、積雲対流の各過程のパラメタリゼーションや、大気境界層における (E-ε) 乱流クロージャスキームなどが組み込まれ、陸面モデル (BATS) と結合されている。Iced COCO3.4は、熱塩循環を含めた

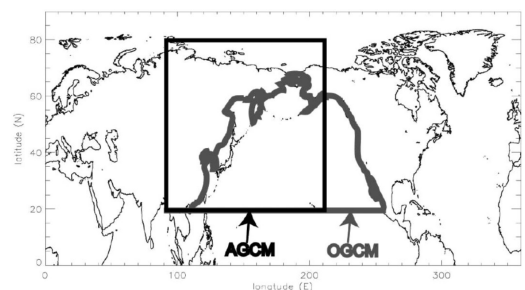
海洋大循環を再現するために構築されたモデルで、トレーサの移流に保存性の良いスキーム (UTOPIA や QUICKEST) が用いられている。海水は2カテゴリーモデルで表され、力学的には弾・粘塑性体、熱力学的には熱の蓄積が無視されている。また積雪とその熱・水フラックスへの効果が考慮されている。以上の結合モデルに、海洋生態系モデルや鉄化学モデルを順次組み込んで行き、さらに将来的には河川流路網モデル、風送塵モデル、潮汐混合モデルの組み込みも計画している。

モデル領域は、大気はオホーツク海およびシベリア東部を中心とする領域、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的結果では、大気モデルの境界が海洋に及ぼす影響をなくすため、大気モデル領域を海洋モデルの境界の少し外側まで含むよう設定している (第1図)。結合時の計算時間を考慮し、大気・海洋モデルの水平分解能は共に $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ とした。

結合モデルの時間積分の手順として、最初は大気データとして気候平均場を与えて、海洋コンポーネントを40年間スピンアップする。次に、各特定年の大気再解析データを与えて海洋コンポーネントのスピンアップを続ける。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、海洋は米国海洋データセンター (NODC) の World Ocean Atlas 2001を、大気は欧州中期予報センターの再解析データ (ERA-40) を用いている。ただし、最初はテストおよび調整のため、海洋コンポーネントを気候平均場でスピンアップしたところで大気と結合して計算した。

3. 予備的結果

結合して1年間計算した例の1つを紹介する。先ず



第1図 モデルの領域。

大規模な循環場について示し、その後、夏季および冬季の事例について示す。

3.1 大規模場とその季節変化

海面気圧で見ると、夏季には太平洋高気圧が発達し、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おり、基本的な場は再現されている（第2図a. 夏季は図を省略）。ただし、シベリア高気圧をより良く再現するため、今後、モデル領域を北東に広げる予定である。

海面高度からは、海洋の亜熱帯・亜寒帯両循環系に代表される大規模循環の特徴が見て取れる（第2図b）。これらの季節変動はかなり小さいが、冬季はオホーツク海や亜寒帯の循環が強化されている（変動が小さいので夏季の図は省略）。黒潮とその先の黒潮続流の幅は少し広すぎるが黒潮の離岸位置の再現性は比較的良い。親潮は現実より弱いものの、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、特に冬季に明瞭に見て取れる。このように、大規模な場の基本的特徴は、分解能と領域の許す範囲で良く再現されている。

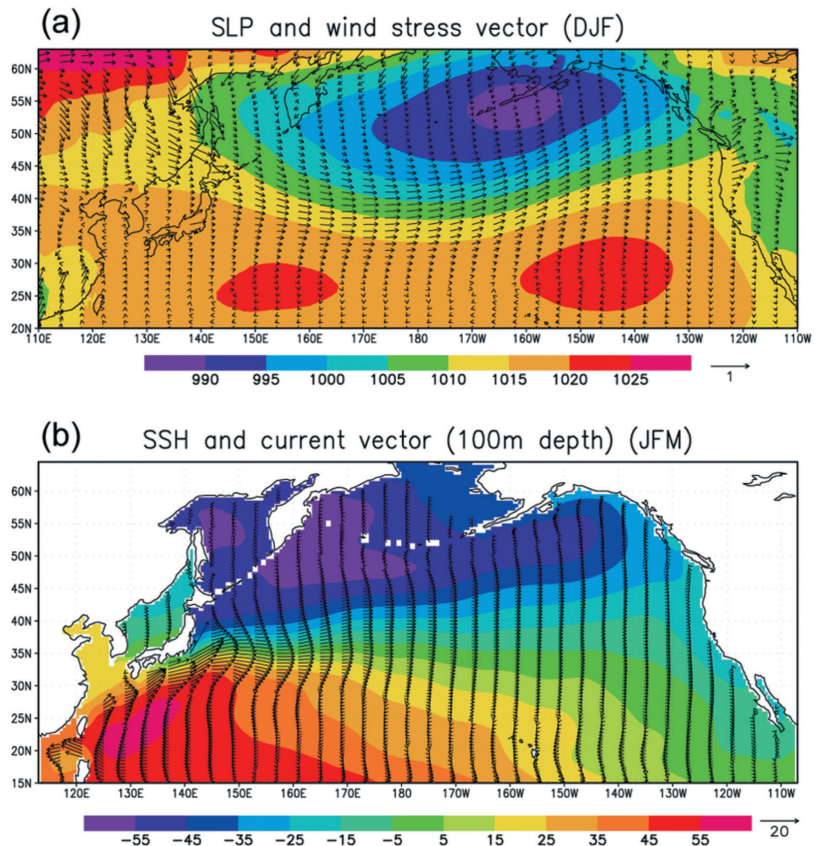
ただし、海水の形成に関しては今後改良の必要がある。海水ができ始めるのは現実より少し早く、11月下旬にはオホーツク海北西部に広がる。その後3月には、千島海盆を除くオホーツク海のほぼ全域、およびベーリング海の東部に広がった（図は省略）。海水の南下もほぼ東西一様に生じており、西側で早く南下する観測的特徴とは一致しない。モデルでは海水の量が少し多すぎる傾向にあり、海水の後退も観測より遅い。

3.2 夏季のオホーツク海高気圧

夏季に特徴的な循環パターンの例として、結合モ

デルで見られたオホーツク海の下層雲（または霧）とオホーツク海高気圧について紹介する。第3図aは、モデルの8月8日の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下層の雲量にほぼ等しい。すなわち、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い。

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。オホーツク海中央部の下層雲の多い海域では気温も下がっていた。すなわち、下層雲・霧の発生により気温が低く抑えられ地上高気圧の形成を促進している。これはまた、はじめに言及した霧-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。オホーツク海上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偏差の南北断面を第3図bに示す。50°N～57°Nの海面付近にある雲量の多い領域が、先程述

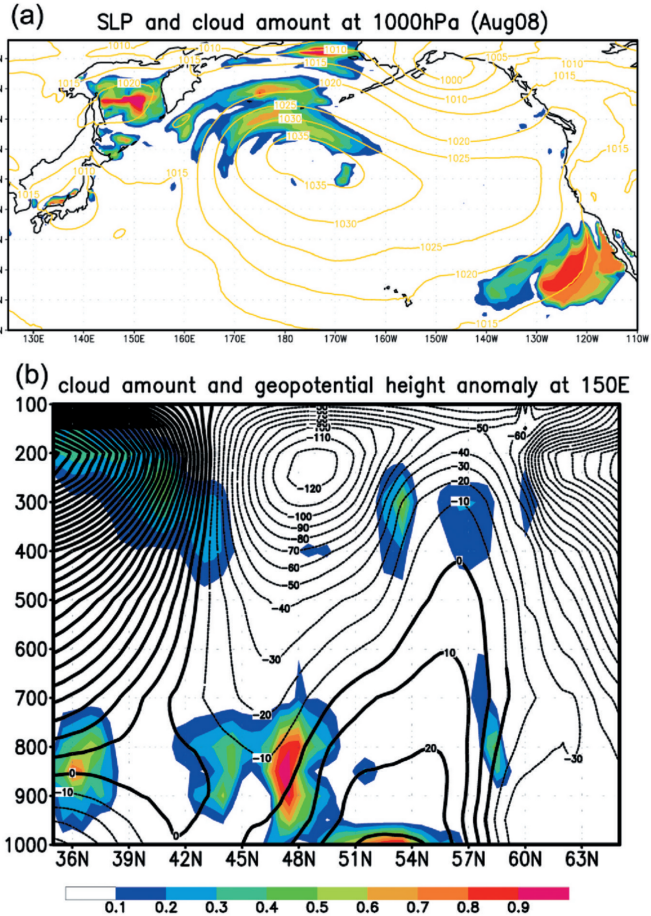


第2図 冬季の大規模場。(a) 海面気圧 (hPa; カラー) と海面風応力 (Pa; ベクトル)。(b) 海面高度 (cm; カラー) と海洋表層流速 (cm/s; ベクトル)。

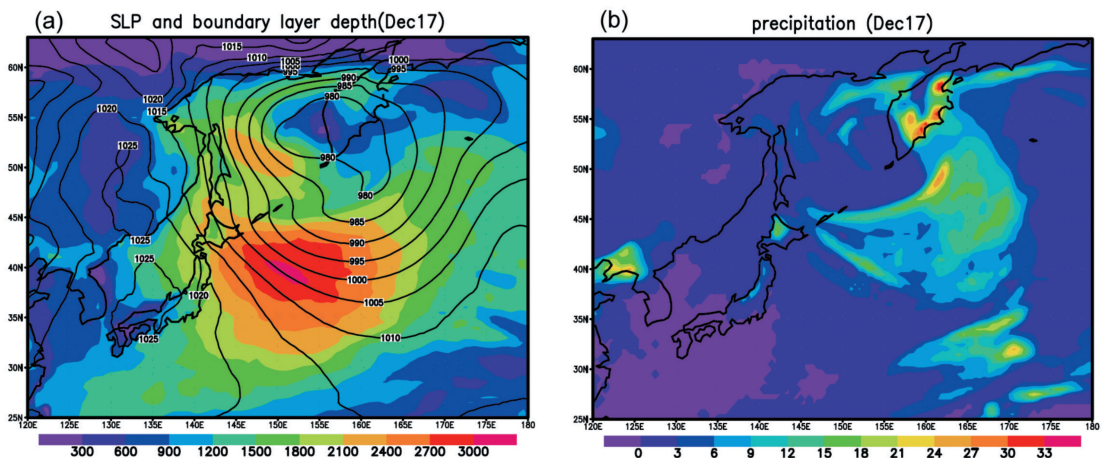
べたオホーツク海中央部の下層雲に対応している。この下層雲の高さは950 hPa程度までに限られ、それに対応するように地表付近で高気圧偏差が強くなっている。しかし、高気圧自体は比較的背が高く、対流圏上部へ伸びている。こうした構造は、オホーツク海高気圧に見られる幾つかの典型的構造のうちの1つである(Tachibana *et al.* 2004)。この事例の特徴の再現性からみると、モデルは環オホーツク圏の夏季大気の特徴であるオホーツク海高気圧や下層雲・霧の再現に有望そうである。

3.3 冬季の寒気吹き出しの事例

冬季については、低気圧の通過に伴う海上への寒気吹き出しの例を示す。第4図は、モデルの12月17日における海面気圧と大気境界層の厚さ、降水量の日平均



第3図 夏季(8月8日)の(a) 1000 hPaにおける雲量(カラー)と海面気圧(hPa;等値線)。(b) 東経150度断面における雲量(カラー)とジオポテンシャル高度偏差(m;等値線)。



第4図 冬季(12月17日)における(a) 海面気圧(hPa;等値線)と境界層の厚さ(m;カラー)。(b) 降水量(mm/day)。

分布を示すものである。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、大陸からオホーツク海および日本海北部にかけて寒気が吹き出している。寒気が海洋から熱を奪うのに伴い、境界層は下流に行く程発達している。その蒸発の際に大気へ供給された水の一部は、本州や北海道の山岳に降水（雪または雨）をもたらしている。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。

4. おわりに

これまで、低温科学研究所をはじめとして、大気、海洋、海水、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は、こうした蓄積を統合するためのツールとなることを目指している。本稿では、そのモデル構築の計画と初期的な実験結果を記述した。まだ改良すべき箇所は多々あるものの、オホーツク海高気圧と海霧の形成や、冬季モンスーンの吹き出しなど、この地域に特有な大気—海洋—海水—陸面結合システム再現の可能性を示した。

このように環オホーツク圏領域気候モデルが、当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をいっそう促進することを期待している。

参 考 文 献

- D'Arrigo, R., G. Jacoby, R. Wilson and F. Panagiotopoulos, 2005: A reconstructed Siberian High index since A.D. 1599 from Eurasian and North American tree rings. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05705, doi : 10.1029/2004 GL022271.
- Ding, Y., 1990: Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia. *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 281-292.
- Hasumi, H., 2000: CCSR Ocean Component Model (COCO). CCSR Rep., (13), 68 pp.
- Nakamura, H., T. Izumi and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and east Asian winter monsoon. *J. Climate*, **15**, 1855-1874.
- Nakamura, H. and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1213-1233.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi, 2007: Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, doi : 10.1029/2006 GL028243.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson and A. Tsuda, 2007: Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10012, doi : 10.1029/2006 JC004055.
- 大島慶一郎, 2003: 東樺太海流と海水. *天気*, **50**, 503-507.
- Serreze, M. C., J. E. Walsh, F. S. Chapin III, T. Osterkamp, M. Dyurgerov, V. Romanovsky, W. C. Oechel, J. Morison, T. Zhang and R. G. Barry, 2000: Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim. Change*, **46**, 159-207.
- Tachibana Y., M. Honda and K. Takeuchi, 1996: The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579-584.
- Tachibana, Y., T. Iwamoto, M. Ogi and Y. Watanabe, 2004: Abnormal meridional temperature gradient and its relation to the Okhotsk High. *J. Meteor. Soc. Japan*, **32**, 1399-1415.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson and Y. Nojiri, 2002: Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 1601-1622.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- Talley, L.D., 1993: Distribution and formation of North Pacific Intermediate Water. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 517-537.
- Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri, I. Kudo, H. Kiyosawa, A. Shiimoto, K. Imai, T. Ono, A. Shimamoto, D. Tsumune, T. Yoshimura, T. Aono, A. Hinuma, M. Kinugasa, K. Suzuki, Y. Sohrin, Y. Noiri, H. Tani, Y. Deguchi, N. Tsurushima, H. Ogawa, K. Fukami, K. Kuma and T. Saino, 2003: A mesoscale iron enrichment in the Western Subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom. *Science*, **300**,

- 958-961, DOI : 10.1126/science.1082000
- Wang, Y., H. Xu and S.-P. Xie, 2004 : Regional model simulations of marine boundary layer clouds over the southeast Pacific off South America. Part II : Sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2650-2668.
- Watanabe, Y., K. Harada and K. Ishikawa, 1994 : Chlorofluorocarbons in the central North Pacific and southward spreading time of North Pacific intermediate water. *J. Geophys. Res.*, **99**, 25195-25213.
- Watanabe, T. and M. Wakatsuchi, 1998 : Formation of 26.8-26.9 σ_θ water in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk as a possible origin of North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **103**, 2849-2865.
- Yamamoto-Kawai, M., S. Watanabe, S. Tsunogai and M. Wakatsuchi, 2004 : Chlorofluorocarbons in the Sea of Okhotsk : Ventilation of the intermediate water. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09 S11, doi : 10.1029/2003 JC001919.
-