

特集「北西太平洋・日本周辺海域における海流系の流量・熱輸送量の変動」

特集の概要*

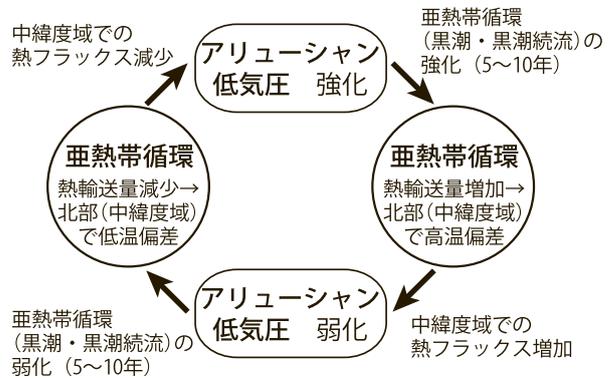
高槻 靖**

1. はじめに

地球表面の7割を覆う海洋は、その熱容量や比熱が大きいことから大きな熱的慣性を持っている。海洋は大気と接する海面で熱・水フラックスなどを通じて相互に影響を及ぼしているが、海洋はその熱的慣性の大きさのゆえに大気に比べて応答は鈍い。また、風成循環のような運動量についても海洋の応答には時間がかかる。このため、特に気候変動のような長い時間スケールにおいては、海洋の変動が大気の変動に与える影響が大きいと考えられている。

近年、異常気象の多発や地球温暖化の顕在化に伴って、北太平洋の気候変動として太平洋十年規模変動 (PDO ; Mantua *et al.*, 1997) が注目を浴びてきている。このような太平洋における十年規模の大気と海洋の変動のメカニズムについては様々な仮説が提示されているが、いまだ解明には至っていない。提案されている仮説の一つは、北太平洋中緯度域の大気と海洋が相互に影響しあってそれぞれの循環の強度が振動しているというものである (第1図)。すなわち、北太平洋中緯度での海面水温の偏差に対して、中緯度の大気循環が変化する。この大気循環の変化に対して海洋の亜熱帯循環が十年規模で応答し、西岸境界流による熱輸送量を変化させ、北太平洋中緯度域の海面水温を逆転させることにより、大気と海洋の循環

強度の振動が起きるというものである (Latif and Barnett, 1994 ; 1996)。この仮説において、モデルでは示唆されているがまだ観測結果からは明らかにされていないのは、西岸境界流による熱輸送量の変化が海洋から大気への熱フラックスを変化させているのか、そして熱フラックスの変化が大気の循環を変化させているのかという点である。また、日本東方の黒潮統流域は、北太平洋において最も海洋から大気への熱が放出されている海域



第1図 北太平洋十年規模変動のメカニズム

Latif and Barnett (1994, 1996) により提唱されている仮説の模式図。大気大循環の変化 (アリューシャン低気圧の強弱) は北太平洋の亜熱帯循環 (黒潮・黒潮統流) の強度を変化させる。亜熱帯循環の強度の変化は熱の南北輸送量を変化させ、中緯度域の熱フラックスの変化を通じて大気大循環に影響を及ぼす。

* Results of Analysis for the variability of mass and heat transport in the western North Pacific and the seas adjacent to Japan

** Yasushi Takatsuki

Marine Division, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部海洋気象課)

であり、また海洋内部へ熱を蓄える働きをしている北太平洋亜熱帯モード水 (Hanawa and Talley, 2001) が形成される海域でもあることから、この海域での海洋変動と大気の変動との関連は近年特に注視されている。

気象庁では、海洋気象観測船によりおよそ 40 年にわたって日本周辺海域及び北西太平洋において、黒潮、親潮などの海流を横断する海洋観測が実施され、海流の位置やその流速、流量の変動を中心とした海洋変動の把握を行ってきた。先に述べた太平洋十年規模変動のメカニズム解明やその予測の鍵と考えられる西岸境界流の変動を監視する上で、観測船による定線観測の成果に期待されるところは大きい。平成 13 年度海洋気象技術検討会では、これらの観測成果を用いた黒潮、親潮などの流量の変動特性及び北太平洋中緯度の気象変動との関連について調査され、その結果本州南方における黒潮の通過流量は北太平洋中央部の風応力の変動から 2 年遅れで変動していることなどが明らかになった (石川ほか, 2003)。しかし、地衡流計算において仮定している無流面の深度は妥当なのか、一つの定線における観測結果では再循環や中規模渦の影響を客観的に除いて黒潮の通過流を評価することが困難、東シナ海から本州南方につながる黒潮を評価するためには東シナ海内のみでなく南西諸島の南東側を北上する流れも評価する必要がある、などの課題が残った。そこで、気象庁では総観的に海流系や各種の水塊を把握できるよう観測定線を見直し、従来の定線を中心にして北西太平洋・日本周辺海域に岸から岸までの閉じた複数の観測線を設定して、平成 15 年度から 5 隻の海洋気象観測船が連携して観測を実施している。

既に 3 年間の新たな観測線での観測結果が得られたことから、平成 18 年度の地球環境情報技術検討会海洋気象分科会 (平成 19 年 2 月 7, 8 日) では北西太平洋・日本周辺海域における海流系の流量・熱輸送量の変動をテーマに上記のデータを用いた解析結果を基に議論を行った。本特集は、上記海洋気象技術検討会での発表とその後得られた解析結果をまとめたものであり、本稿では、その全体の概要を示す。

2. 調査の方法

まず、北西太平洋・日本周辺海域における海洋気象観測船による海洋観測結果に対して、閉じた観測線内における質量の保存や表層海流計による流速観測値などの普遍的な拘束条件を設定し、線形インバース法 (Wunsch, 1978) を用いて流速分布を求める。これにより、主要な海流系の流量・熱輸送量及び亜熱帯循環・亜寒帯循環の強度を評価し、季節変動あるいは年ごとの特徴をまとめるとともに、従来の流量算出方法における無流面の妥当性などを検討する。それぞれの解析対象は、北西太平洋域の黒潮と黒潮続流 (第 3.1 節)、本州南方及び東方の黒潮 (第 3.2 節)、奄美大島南方の琉球海流系及び本州南方・東シナ海の黒潮 (第 3.3 節)、北海道南方の親潮 (第 3.4 節) である。

また、1990 年代になって利用できるようになった衛星海面高度計のデータを用い、北太平洋亜熱帯循環の一部である黒潮続流の東向きの流量やその南側にある再循環の強度との関係を広域にわたって調査し、さらにその変動の要因を検討する。(第 3.5 節)

さらに、亜熱帯循環系の一部である対馬暖流の気候変動への影響という観点で、日本海の表層貯熱量とその経年変動の要因と、冬季季節風及び表層貯熱量と冬季降水量の関係について検討する。(第 3.6 節)

なお、これらの調査においては、近年整備されつつある、大気及び北太平洋域の海洋の長期再解析データ (Onogi *et al.*, 2007 ; Usui *et al.*, 2006) も利用した。

3. 調査結果

次に本誌に掲載した各課題の調査結果の要旨を示す。主要な結果と相互の関連については第 4 章で考察する。

3.1 海水特性の違いに着目した黒潮ネット流量の評価 (小島ほか)

北西太平洋域の岸から岸までの閉じた観測線における 2003 ~ 2006 年夏季のデータを用いて、北西太平洋スケールでの黒潮 / 黒潮続流の正味の通過流量 (ネット流量) を評価した。ネット流量

の評価の際には、塩分や渦位の分布を用いて海水特性の違いを特定して、正味の黒潮と再循環流を分離した。その結果、本州南方の3つの定線における黒潮ネット流量は $40 \sim 60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ で、期間を通じてほぼ同程度と見積もられた。また、東シナ海及び琉球海流系域では日本南方域に比べて $0 \sim 20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、黒潮統流域では日本南方域に比べて $15 \sim 35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 少ないと見積もられた。ASUKA 線における熱輸送量は平均 $3.3 \times 10^{15} \text{ W}$ 、日本周辺海域における熱輸送量の収束発散は約 340 W m^2 と見積もられた。

3.2 黒潮・黒潮統流の正味流量及びその季節変動について（伊藤）

日本周辺における黒潮及び黒潮統流の正味流量（通過流量）とその季節変動を明らかにするために、2003年春季から2007年冬季までに本州南方及び東方の岸から岸まで閉じた観測線において得られたデータを用いてより正確な流れの構造を推定した。さらに、水塊分析によって黒潮とその再循環を分離することにより、黒潮の正味流量と熱輸送量を評価した。その結果、日本南方から東方における黒潮・黒潮統流の正味流量は $40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と見積もられた。一方、伊豆海嶺の東西における黒潮流量の季節変動特性の違いを調査した結果、Isobe and Imawaki (2002) によるモデル結果から期待される東西での差異は見られなかった。これは、伊豆海嶺の東側での観測が2000dbar以浅に限られているために、順圧流量を十分に評価できなかった可能性があり、伊豆海嶺の東側海域での深層までの観測の重要性を示唆している。

3.3 琉球海流系の流量変動（観測船データの解析）（村上）

2003年春季から2006年秋季までに、本州南方及び東シナ海の岸から岸まで閉じた観測線において得られたデータを用いて、奄美大島の南東に存在する北東向きの流れである琉球海流系と黒潮の流量の変動を調査した。その結果、琉球海流系の流量は2003年から2006年までの12回の解析結果の平均で $13.6 \pm 6.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ で

あったことが示された。これはこれまでの他の解析結果と整合している。また、今回の解析において正味の黒潮流量の平均は、東シナ海のPN線で $30.1 \pm 4.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、トカラ海峡のTK線で $28.1 \pm 3.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、四国沖のASUKA線で $42.2 \pm 5.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。また、奄美大島南東の琉球海流系へと続く沖縄南東の北上流は、平均 $6.1 \pm 3.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。琉球海流系の熱輸送量は平均 0.70 PW で、約半分が沖縄南東から供給され、残り半分は本州南方の再循環流から供給されていた。琉球海流系の流れの構造については、その範囲が2000dbarよりも深層にまで及ぶことがある。

3.4 北海道南方における親潮の流量とその経年変動（佐々木・橋本）

北海道南方において2003年から2006年に行った春季のCTD観測データを用いて親潮流量の解析を行った。北海道南方の 41.5°N に沿った観測線（以下、PH線）を南下する親潮流量については、親潮の一部がPH線内で再循環している可能性があり、再循環流の流量は年によっては千島列島沿いに南下してくる親潮流量と同程度 ($10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) にまで達することが明らかになった。また、釧路南東線（以下、KSE線）の親潮流量を 41.5°N で南北に分けて評価した結果、KSE線全体の親潮流量の経年変動は沿岸寄りの変動成分を、2000dbar以深では沖合の変動成分をそれぞれ反映していることが示された。KSE線全体を南下する親潮流量は、春季の亜寒帯循環のスヴェルドラップ輸送量とその経年変化の傾向が一致しており、日本に近い海域の循環強度に対応しているか、あるいは北太平洋全体の亜寒帯循環に順圧的に短時間で応答している可能性が示された。亜寒帯循環の勢力の指標として親潮の流量を評価する場合は、PH線よりもKSE線における流量を用いるべきであり、かつ2000dbar以深の流れも含めて評価することが必要であることが明らかになった。

3.5 北太平洋亜熱帯循環強度の経年変動と海洋変動との関係（衛星海面高度計データの

解析) (谷・桜井)

衛星海面高度計データを用いて、北太平洋亜熱帯循環の一部である黒潮統流の東向きの流量やその南側にある再循環の強度との関係を調査し、さらにその変動の要因を検討した。その結果、黒潮統流を挟んだ南北の海面高度差は、本州南方の黒潮流量に再循環流が付加された黒潮統流の流量と変動傾向が一致しており、再循環流も含めた黒潮統流の東向き流量の指標となることがわかった。この東向き流量の変動は、1992～2000年においては本州南方の東経137度線を横切る正味の黒潮流量と高い相関があるが、2000年以降については相関は有意ではなかった。これは2000～2005年ころは再循環が特に強化された状態にあったためであり、本州南方の黒潮流量の変動のほかに、北太平洋中部～東部での風応力の鉛直回転成分の変動により生じた海洋の内部構造の変動が、傾圧ロスビー波によって西方へ伝播することによって生じたことが示された。このことから、2000年以降は黒潮統流の再循環のみが強化されるメカニズムが働いたのではないかと示唆された。また、再循環域を含む黒潮統流域の強度は、その海域の貯熱量と高い相関にあることも示された。

3.6 日本海の貯熱量の変動及びその日本海側の降雪の関係 (日比野ほか)

北太平洋域海洋データ同化モデル MOVE/MRI.COM-NP (Usui *et al.*, 2006) を用いた同化実験結果に基づく表層貯熱量データと、大気長期再解析データ JRA-25 (Onogi *et al.*, 2007) / 気象庁気候データ同化システム JCDAS による海面熱フラックスと降水量のデータを用い、日本海の表層貯熱量とその経年変動の要因と、冬季季節風及び表層貯熱量と冬季降水量の関係について検討した。冬季降水量については、秋の日本海の貯熱量の大きさは日本海側の冬季降水量に大きな影響を与えており、冬季季節風の強さとともに日本海側の大雪の条件となっていることがわかった。日本海の表層貯熱量については、1～3月の貯熱量の季節変化は、海面熱フラックスだけでほぼ説明できるが、4～12月は、熱フラックスに加えて対馬暖流による熱の移流によっても日本海に熱が蓄えられて

いることが示された。また、4～10月の表層貯熱量の増分の経年変動に対しては、熱フラックスよりも、対馬暖流による熱の移流が効いていることがわかった。

4. まとめと今後の課題

北西太平洋・日本周辺海域における海流系の流量・熱輸送量の変動に焦点をあてて、海洋気象観測船による岸から岸まで閉じた観測線のデータによるインバース法を用いた黒潮などの流量の解析、衛星高度計データを用いた亜熱帯循環強度変動の解析などを行った。その結果、今後の海洋気象観測船の観測定線網構築の検討にも資する以下の結論が得られた。

本州南方における黒潮についてはほぼ2000dbarを無流面としても差し支え無いこと、再循環を除く通過流量を算出するには、渦位や塩分などの水塊指標を用いることでほぼ妥当に分離できることが示された。これらの結果に基づき、従来の観測線における観測結果も渦位の分布などを用いて妥当な通過流量を得られることがわかった。ただし、指標のしきい値については検討すべき課題が残った。また、奄美大島南東方の琉球海流系の熱輸送量は、およそ半分が沖縄南東側から供給され、残り半分は本州南方の再循環流から供給されていることが示された。南北熱輸送量の変動の把握という観点では、今後も沖縄南東での北上流の寄与をきちんと評価していく必要がある。これらのことから、日本南方の海域における海洋の循環強度や熱流量の変動を監視するには、PN線－OK線－24N線－ASUKA線（あるいは137E線）で囲まれた海域を観測することが有効であると考えられる。

一方、本州東方における親潮については、PH線を南下する親潮流量にはPH線内で再循環する流量が含まれており、再循環流の流量は年によっては千島列島沿いに南下してくる親潮流量と同程度にまで達するため、KSE線の方が親潮の南下流量の把握に適していること、また2000dbarより深層ではKSE線の沖合いでの変動が無視できないことが明らかになった。KSE線については、水産総合研究センターがほぼ同じ海域のA-line

で1988年より観測を実施しており、このデータを活用することが重要である。

衛星海面高度計データについては、黒潮統流を挟んだ南北の海面高度差が再循環流も含めた黒潮統流の東向き流量の指標となることがわかった。また、再循環域を含む黒潮統流域の強度は、その海域の貯熱量の経年変動と高い相関にあることも示された。これらのことは、衛星海面高度計データにより亜熱帯循環の強度をモニターできる可能性を示している。ただし、その上流に当たる本州南方の正味の黒潮流量との相関が2000年以降に有意でなくなっていることから、本州南方での黒潮流量と本州東方での循環強度の変動の傾向の違いを生じさせているメカニズム、さらには、本質的にはどちらが亜熱帯循環全体の強度を代表していると考えられるかについて、今後検討する必要がある。

日本海側の冬季降水量については、春季からの対馬暖流の積算流量で決まる秋季の日本海の貯熱量が大きく影響しており、冬季の季節風の強さとともに大雪の条件となっていることが明らかになった。寒候期の大雪の予想という点からみると先行指標となる秋の時点における表層貯熱量が重要であろう。

大気との相互作用を通じて気候変動に影響していると考えられる表層貯熱量あるいは熱フラックスと黒潮などの流量との関係の調査は、まだ緒についたばかりである。海洋については、今後北太平洋域モデルよりも格子が細かく、西岸境界流などの細かな現象をより良く表現できることが期待される北西太平洋域の同化モデル(MOVE-WNP)による再解析データが今後整備される予定であり、これらの再解析データも活用して、大気と海洋の変動の関係をさらに明らかにし、気候変動の監視と予測に役立てていきたい。

参考文献

- Hanawa, K. and L. D. Talley (2001) : Mode waters. in *Ocean Circulation and Climate*, edited by G. Siedler, J. Church and J. Gould, 373-386, Academic Press, San Diego.
- 石川孝一・高槻靖・白石昇司・椿修二・中舘明・宮尾孝・北野昌幸・井上博敬・久保直・西澤純一 (2003) : 気象庁の定線にみられる海洋変動とその要因. 測候時報, 70, 特別号, S1-S34.
- Isobe, A. and S. Imawaki (2002) : Annual variation of the Kuroshio transport in a two-layer numerical model with a ridge. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 994-1009.
- Latif, M. and T. P. Barnett (1994) : Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 266, 634-637.
- Latif, M. and T. P. Barnett (1996) : Decadal climate variability over the North Pacific and North America : dynamics and predictability. *J. Climate*, 9, 2407-2423.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis (1997) : A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069-1079.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007) : The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi (2006) : Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system : Some early results. *Advances Space Res.*, 37, 806-822.
- Wunsch, C. (1978) : The North Atlantic general circulation west of 50°W determined by inverse methods. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 583-620. (邦訳 : インバース法によって求めた 50°W 以西の北大西洋海洋大循環. 金子他訳 (2003), 測候時報, 70, 特別号, S141-S188.)