

インド洋ダイポールモードと海盆モード

1. はじめに

熱帯インド洋における海面水温変動がアジア・アフリカ諸国の気候変動に多大な影響を及ぼすことが近年の研究で示されている。またインド洋が太平洋変動の変調を引き起こす役割も指摘され (Izumo *et al.* 2010; Xie *et al.* 2009), 北西太平洋の熱帯低気圧やエルニーニョ現象の発生予測の観点からその重要性が認識されつつある。熱帯インド洋上の気象や海洋現象を含む気候変動の解明のために、船舶等を用いた集中観測や係留観測ブイ網の構築などが着実に進められている (McPhaden *et al.* 2009; Yoneyama *et al.* 2008)。こうした研究背景を踏まえ、本稿では熱帯インド洋における海面水温の年々変動とその影響を解説する。なお季節に関する記述は北半球を前提とする。

熱帯インド洋における海面水温の年々変動として、主に2つの卓越変動が挙げられる。一方はインド洋海盆全体で一様に海面水温が上昇あるいは低下する海盆(一様)モード (Indian Ocean Basin Mode; 第1図a)である。もう一方は海面水温偏差が東西非対称構造を示すダイポールモード (第1図b)で、しばしばインド洋ダイポールと呼ばれている。

2. ダイポールモード

十数年ほど前までは、海面水温の年々変動に関して熱帯インド洋は深さ50 mの混合層(後注1)として扱われるなど、エルニーニョ/南方振動に対して受動的な振る舞いしかないという見方が一般的であった。ダイポールモードの研究はこの常識を大きく変えた。

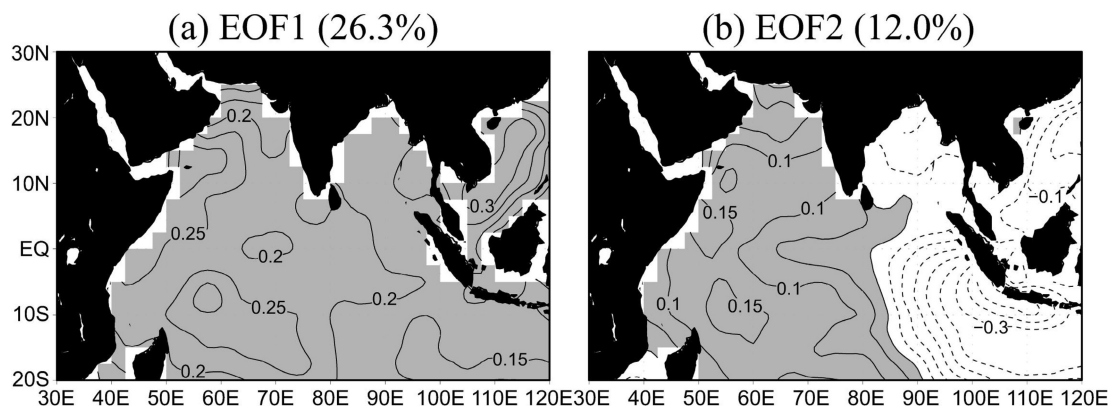
ダイポールモードは古くからその存在を示唆されていたが、長期間の大気海洋観測データを統計的に解析した Saji *et al.* (1999) によって初めて、熱帯インド洋における大気海洋結合現象として広く認知されることになった。太平洋や大西洋とは異なり、インド洋における赤道域の年平均水温躍層(後注1)は東西方向

の傾きが非常に小さい。そのため、赤道域に海上東西風偏差が現れたとしても、海面水温に対する海洋力学の影響は小さいと考えられていた。しかし、夏季から秋季にかけては南東季節風がインドネシアのスマトラ島西方沖で卓越するため、沿岸湧昇および赤道湧昇(後注2)により東部赤道インド洋の水温躍層が1年で最も浅くなる。この時期に赤道インド洋で東風偏差が現れると、ラニーニャ現象のような冷たい水温偏差が東部熱帯インド洋に現れ、赤道域に東西非対称な海面水温偏差が形成される。この海面水温の東西差は西部(東部)熱帯インド洋上における積雲対流活動の強化(抑制)を通して海上東風偏差をさらに強めるため、正の大気海洋フィードバック (Bjerknes フィードバック) によって強化される。

このダイポールモードは海洋力学を介して熱帯南インド洋の海面水温変動と有意に相関する (Xie *et al.* 2002)。気候平均場において、赤道域では弱い偏西風が吹くのに対し、南インド洋では偏東風が卓越する。この偏西風域と偏東風域の間に形成される強い負の海面風応力カール(後注3)はエクマン湧昇(後注4)を引き起こし、南緯10度付近に非常に浅い水温躍層域を形成する。ダイポールモードやエルニーニョによって西進海洋ロスビー波が励起され (Masumoto and Meyers 1998)、この水温躍層の最浅部に伝播してくると、海面水温と海洋亜表層水温との間に強い相互作用が生じる。特に海面水温変動が大きいのは水温躍層が最も浅い東経80度以西の熱帯南インド洋で、この海域では、暖かい(冷たい)海面水温偏差によって大気の高(低)気圧性循環偏差が励起され、正(負)の降水偏差を生じさせる (Xie *et al.* 2002)。熱帯東部インド洋からこの海域に西進海洋ロスビー波が到達するには数ヶ月の時間を要するため、南インド洋で発生するサイクロンや南アフリカの長期予報への利用が示唆されている。

3. 海盆モード

海盆モードは人工衛星観測が開始される1980年代以



第1図 熱帯インド洋 (30°–120°E, 20°S–30°N) における月々の海面水温に対する (a) EOF1および (b) EOF2. コンター間隔は0.05°Cで、正偏差の領域に影. 1～12月の各々の月について1982年から2009年までの線形トレンドを除去した NOAA OISST データに基づく.

前からその存在が指摘されており、熱帯太平洋におけるエルニーニョ/南方振動と強く相関する変動と考えられている (Klein *et al.* 1999). 熱帯太平洋でエルニーニョ現象が発生すると、インド洋上では積雲対流活動が抑制され、海面に到達する太陽放射が増加する。一方、大気東西循環の変化は負の海上風速偏差を熱帯インド洋上にもたらし、海面からの潜熱放出を抑制する。これらの効果が熱帯インド洋の海面水温を上昇させる (Tokinaga and Tanimoto 2004; Ueda 2001). この水温上昇はエルニーニョ現象が冬季に最盛期を迎えてから3–4ヶ月後の春季に卓越する傾向を示す。

エルニーニョ最盛期の冬季から引き続く春季にかけては、周辺地域の気候に対してエルニーニョによる直接の影響が支配的である。しかし、エルニーニョが終息しその直接影響が弱くなった夏季から秋季においても、熱帯インド洋の暖かい海面水温偏差は維持され、周辺地域の気候に大きな影響を与えていることが分かってきた。このように、熱帯インド洋があたかもエルニーニョ現象によって“充電”された後、エルニーニョ終息後に周辺地域に対して“放電”するかのように働くことから、この遅延影響は熱帯インド洋の“コンデンサ効果 (capacitor effect)”と呼ばれている (Xie *et al.* 2009)。

熱帯インド洋全域の海面水温上昇に対する大気の準定常応答は、松野-ギル応答 (後注5) の形で熱帯/亜熱帯対流圏全体に現れる。インド洋の東側に位置する赤道西太平洋では、赤道ケルビン波に伴う低気圧偏差が下部対流圏に形成される。地表面摩擦の効果により

この低圧部に向かって吹き込む循環偏差は、その北側に位置する南シナ海およびフィリピン東沖に大気下層の発散偏差を引き起こす。これが積雲対流活動を抑制するように働き、夏季に Pacific-Japan (PJ) パターンと呼ばれる遠隔影響を励起して、日本を含む東アジアの気候に影響する可能性が指摘されている (Xie *et al.* 2009). PJ パターンは北西太平洋における降水および対流圏下層の循環に南北ダイポール型の偏差を伴い (Nitta 1987; Kosaka and Nakamura 2006), 上記の極性で励起されると太平洋高気圧の北への張り出しを抑制し、梅雨前線域の降水を強化するように働く。実際に、エルニーニョ現象の翌夏には日本付近で低温・多雨となる傾向があることが知られている。

4. おわりに

本稿で述べたようなインド洋の年々変動に関する近年の研究は、気象庁による長期予報にも活用されている。気象庁は2009年より、熱帯インド洋の海面水温の監視および予測を、エルニーニョ監視速報の一部として発表している (気象庁 2009). 最新の研究成果に基づいてこのように気候情報が提供され、予測にも役立てられていることは実に頼もしい。

1950年代以降の長期的な海面水温上昇は熱帯インド洋で非常に大きい傾向にあり、これが温室効果ガスの増加に起因する可能性が指摘されている (Du and Xie 2008). 一方、熱帯インド洋のコンデンサ効果は1970年代の気候レジームシフト後に持続性が強くなっており、対応して日本付近の夏季の天候に対する影響も大きくなっている (Xie *et al.* 2010). このような

年々変動の長期変動がなぜ起こるのか、また地球温暖化がどのようにインド洋および東アジアに影響を及ぼすのか、など多くの課題が残っている。その解明は東アジア域の気候予測の改善に大きく貢献できるものと思われる。

後注

1. 混合層・水温躍層：大気との熱や運動量の交換によって海面付近の海水が混合され、水温がほぼ鉛直一定になる表層数十～数百 m 程の部分を混合層と呼ぶ。その下には水温が深さとともに急激に低下する水温躍層がある。
 2. 沿岸湧昇・赤道湧昇：北（南）半球で岸を左（右）に見るように風が吹くと、エクマン輸送は岸から離れる向きになり、それを補償するために岸沿いでは下層から海水が湧昇する（沿岸湧昇）。また貿易風のように赤道をまたぐ東風が吹く場合、エクマン輸送は北半球で北向き、南半球で南向きになるため、赤道があたかも岸であるかのように湧昇が起こる（赤道湧昇）。
 3. 海面風応力カール：海面摩擦によって海上風が海洋に伝える応力ベクトルの回転。
 4. エクマン湧昇：北（南）半球では風向きに対し直角右（左）向きのエクマン輸送が起こるため、大気の高気圧性循環に伴う正（負）の海面風応力カールに対し、海洋表層の海水は低気圧の外側に輸送される。これに対する補償流として低気圧の中心域に引き起こされる湧昇をエクマン湧昇と呼ぶ。
 5. 松野-ギル応答：熱帯域のように水平温度勾配が小さい場合、積雲対流活動に伴う大気加熱強制に対し、対流圏上（下）層に東西に伸びた高（低）圧場が形成される。特に熱源が赤道対称な場合、その西側にはロスビー波が励起され、赤道から離れた緯度で南北に極大を持つ気圧応答と地衡風の風系が形成される。東側には赤道ケルビン波が励起され、赤道に沿って気圧および東西風の応答が極大になる。これに伴い、対流圏下層の赤道域では熱源の西側で西風が、東側では東風が熱源域に向かって吹き込む。
- 参 考 文 献
- Du, Y. and S.-P. Xie, 2008 : Role of atmospheric adjustments in the tropical Indian Ocean warming during the 20 th century in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08712, doi : 10.1029/2008 GL033631.
- Izumo, T. *et al.*, 2010 : Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following year's El Niño. *Nature Geosci.*, **3**, 168-172.
- 気象庁, 2009 : エルニーニョ/ラニーニャ現象. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/index.html> (2010.11.26閲覧).
- Klein, S. A., B. J. Soden and N. C. Lau, 1999 : Remote sea surface temperature variations during ENSO : Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, **12**, 917-932.
- Kosaka, Y. and H. Nakamura, 2006 : Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2009-2030.
- Masumoto, Y. and G. Meyers, 1998 : Forced Rossby waves in the southern tropical Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, **103**, 27,589-27,602.
- McPhaden, M. J. *et al.*, 2009 : RAMA : The Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 459-480.
- Nitta, T., 1987 : Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran and T. Yamagata, 1999 : A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360-363.
- Tokinaga, H. and Y. Tanimoto, 2004 : Seasonal transition of SST anomalies in the tropical Indian Ocean during El Niño and Indian Ocean Dipole years. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1007-1018.
- Ueda, H., 2001 : Equatorial monsoon system as regulation for a dipole mode in the Indian Ocean. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 147-154.
- Xie, S.-P., H. Annamalai, F. A. Schott and J. P. McCreary, 2002 : Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability. *J. Climate*, **15**, 864-878.
- Xie, S.-P., K. M. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang and T. Sampe, 2009 : Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730-747.
- Xie, S.-P., Y. Du, G. Huang, X.-T. Zheng, H. Tokinaga, K. Hu and Q. Liu, 2010 : Decadal shift in El Niño influences on Indo-western Pacific and East Asian climate in the 1970 s. *J. Climate*, **23**, 3352-3368.
- Yoneyama, K. *et al.*, 2008 : MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1889-1903.

(ハワイ大学国際太平洋研究センター
時長宏樹・小坂 優・謝 尚平)