

日本海における海面水温の冬季十年規模変動

山田 広大

気象庁環境・海洋気象課

1. はじめに

日本近海海面水温(SST)には、長期的な上昇傾向とともに、数年から数十年規模の周期変動が見られるため、将来予測を正確に行う上で、長い周期の変動の要因を理解することが重要である。また、日本海北部での高水温偏差が北海道岩見沢に大雪をもたらすという報告もあり(Sato et al., 2022)、日本海のSSTの変動要因を明らかにすることが日本海側での気温や降水・降雪量の正確な長期予報にもつながる。

吉田ほか(2020)はCOBE-SST(Ishii et al., 2005)を用いて年平均及び季節平均の日本近海SSTの長期変動に関するEOF解析の結果と大気循環場との関係について調べた。その結果、年平均のSSTのEOF第1モードは冬季平均のSSTの第1モードと空間パターンや時間変動がほとんど一致していることが分かった。以上の結果から、日本近海における最も主要な十年規模変動を理解するためには冬季の十年規模変動の要因を理解する必要があることが示された。空間パターンに関しては、東シナ海や日本海南部で振幅が大きく、東アジア冬季モンスーンやアリューシャン低気圧の南北移動との高い相関が示されたが、冬季第1モードと大気・海洋間の正味の熱フラックス(NHF)が有意な相関を示す海域は限られ、特に、日本海においてはほとんど有意ではないため、海洋内部の変動による影響の評価(Park et al., 2012; Sugimoto and Kako, 2016)を、日本海においても行う必要がある。

また、日本海におけるSSTの十年変動は東アジアモンスーンとの関係が報告されているが、メカニズムについては明らかになっておらず(Minobe et al., 2004)、データの期間を延長して調査を行う必要がある。本研究では、日本海におけるSSTの冬季十年規模変動と混合層深度(MLD)や極前線といった海洋内部の変動との関係について、長期の海面水温解析データと大気再解析データを用いて調査した。

2. データ

SSTはCOBE-SST2(Hirahara et al., 2014)の月平均値を用い、 1×1 度の格子毎の月平均値の偏差から全球平均SST偏差を除いて長期トレンドを除いた。大気循環場の偏差データは

JRA-55(Kobayashi et al., 2015)の月平均値を用いた。MLDと極前線の南北位置の計算には、水温・塩分客観解析値(Ishii et al., 2017)を使用した。MLDは深さ10dbar(深さ約10mに相当する圧力)からポテンシャル密度が0.125大きくなる深さと定義し、極前線の南北位置は東経135度における100m深指標水温(重岡, 2010)により定義した。また、より詳細な海洋内部構造の変化を知るため 0.1×0.1 度のFORA-WNP30(Usui et al., 2017)を使用し、極前線の南北位置によるコンポジット解析等を実施した。SSTの季節変化が気温の変化に対して、一般的に約1ヶ月遅れることを考慮し、冬季平均として、大気データは前年12~2月の、海洋データは1~3月の平均を求め、また、それぞれ5年移動平均値を用いた。解析対象期間は1958~2020年(FORA-WNP30を用いた解析は1982~2014年)とした。以降は、冬季のみのデータを使用して、SSTの十年規模変動と海洋内部の変動の関係を調査した。

3. 結果

COBE-SST2を用いた日本近海における冬季平均のSSTのEOF解析の第1モードの空間パターンはCOBE-SSTを使用したEOF解析(吉田ほか, 2020)と概ね一致しているが、十年変動の振幅が大きい海域が日本海や東シナ海の西側に限定されているという特徴を持っていた(図1(a))。時係数は吉田ほか(2020)と同様の傾向を示した(図1(b))。第1モードの時係数に対するNHF(下向きを正)及び925hPaでの風速(uv925)の相関係数と回帰係数の分布(図2)から、東シナ海ではNHFとの相関が有意ではない一方、uv925とは有意な相関を示し、SSTの変動に対して強制対流による混合層発達及ぼす影響が大きい可能性がある。一方で、日本海では有意な相関を示す海域が限られ、日本海SSTの冬季十年規模変動は大気との直接的な熱交換や強制対流による寄与が小さいことが示唆された。

次に、領域を日本海に絞って日本近海と同様に冬季平均のSSTのEOF解析を行った。その結果、空間パターンは日本近海の結果(図1(a))と同様に北緯40度の西側で十年変動の振幅が大きく、時係数は2000年ごろを除き、日本近海の結果(図1(b))と同様の傾向を示した(図3)。以降は日本海SSTの

冬季十年規模変動に対する海洋内部構造の変動による影響について焦点を当てた。

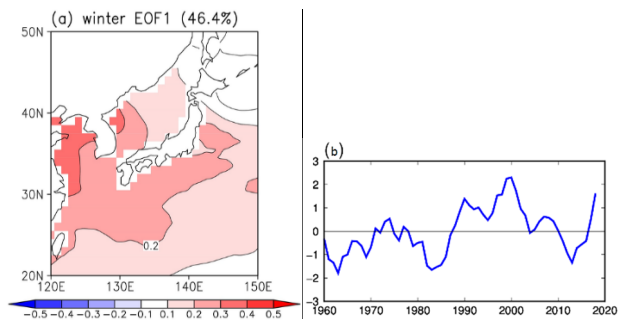


図1. (a) 日本近海における冬季平均の SST の EOF 第 1 モードの空間パターン (EOF 解析の範囲は図の範囲と同じ)。カラーは十年規模変動の振幅。括弧内の数字は寄与率。(b) 日本近海における冬季平均の SST の EOF 第 1 モードの時係数。

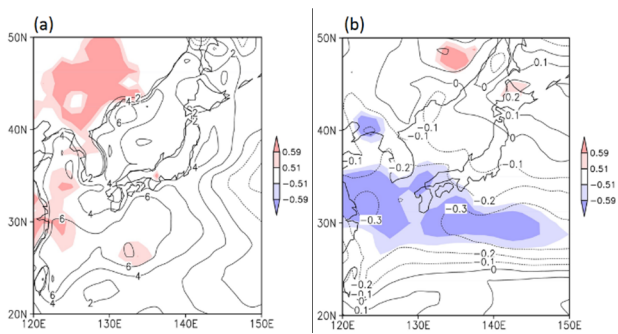


図2. 日本近海における冬季平均の SST の第 1 モードの時係数に対する大気要素との有意な相関係数(カラー:90%有意と95%有意で色分け)及び回帰係数(コンター)。(a)NHF (Wm⁻²)。 (b) 925hPa の風速 (m/s)。

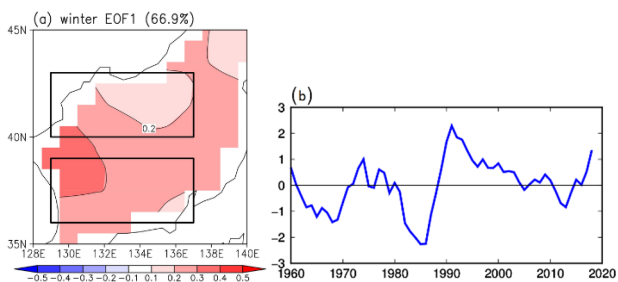


図3. (a) 日本海における冬季平均の SST の EOF 第 1 モードの空間パターン (EOF 解析の範囲は図の範囲と同じ)。カラーや括弧内の数字は図 1(a) と同じ。黒枠は今回解析を行った極前線の南北領域。(b) 日本海における冬季平均の SST の EOF 第 1 モードの時係数。

日本海の海洋内部構造は、北部では冬季季節風によって冷

やされた水が広がっている一方で、南の対馬海峡から暖水である対馬暖流が供給されることにより、北緯 40 度あたりに極前線を形成するといった特徴を有する(磯田 2011)。このような形成過程によって、極前線の北側では成層が弱く、南側では成層が強いという場になっている。そこで、極前線の南北 2 つの領域に分け(図 3(a)の黒枠で図示)、MLD 及び大気データの領域平均と日本海 SST 第 1 モードを比較した結果(図 4(a) (b)), NHF や uv925 と MLD の変動は対応していなかった一方で、特に、深い MLD によって特徴づけられる極前線北側では冬季第 1 モードと MLD が良く対応していた(北側の相関係数は-0.53 で90%有意、南は-0.16)。これは、MLD が深い海域では大気の変動が SST に反映されにくいことを意味し、従って MLD 及び SST の変動は大気よりも海洋内部の変動に影響を受けている可能性が考えられる。100m 深指標水温(重岡 2010)から求めた極前線の南北位置は日本海 SST 第 1 モードと高い相関を示し(図 5、相関係数は 0.77 で99%有意)、極前線付近で最も十年規模変動の振幅が大きいことも矛盾しない(図 3)。以上から、極前線の南北移動と日本海 SST の冬季十年規模変動との関連が示唆される。

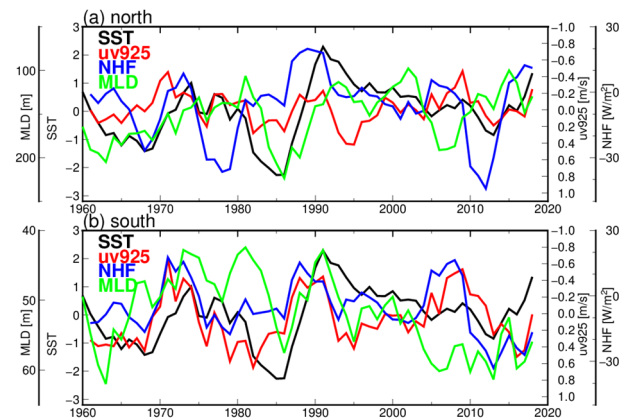


図4. 日本海 SST 第 1 モードの時係数と図 3(a)のそれぞれの黒枠で領域平均した各要素の時系列。(a) 北。(b) 南。

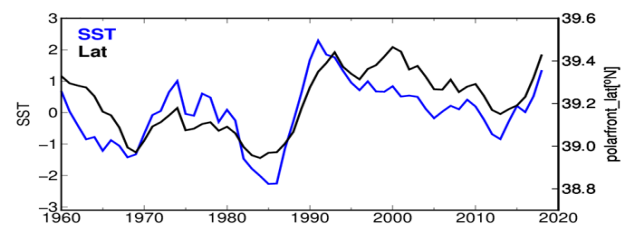


図5. 日本海 SST 第 1 モードの時係数と極前線の南北位置の時系列。

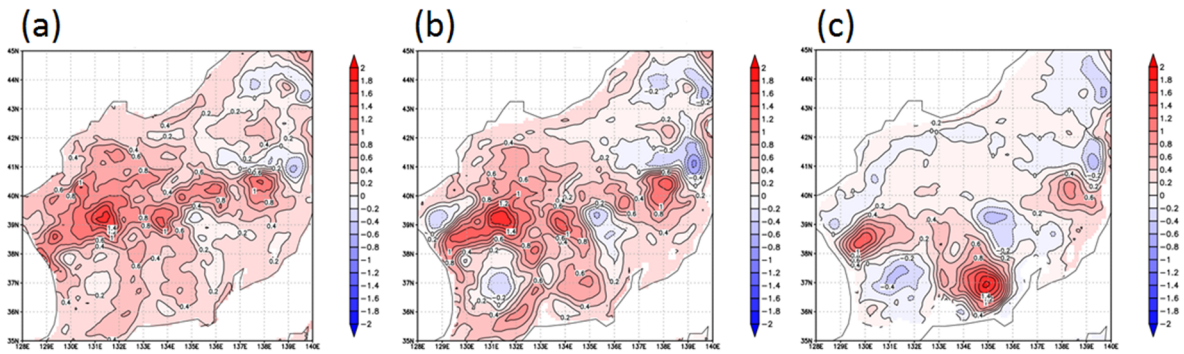


図 6. FORA-WNP30 で求めた極前線の南北位置によるコンポジット解析から得られた各深度の水温差。(a)0.5m(ほぼ海面)。(b)100m。(c)200m。

極前線の南北移動による海洋内部構造のより詳細な変化を知るため、FORA-WNP30 でデータのある 1982～2014 年の期間について極前線の南北位置を計算し、それぞれ極前線が極端に北(南)に位置する上位 3(4)年のコンポジット解析を行い、極前線が北にあるときの水温場の値から極前線が南にあるときの水温場の値を引くことで各深度での水温差を求めた(図 6)。海面での水温差は極前線付近で大きく、特に西側で大きい。この特徴は EOF 解析の空間パターンと同様の傾向を示した(図 1(a))。深度 100m の水温差でも極前線の西側で最も大きく、混合層の形成されない深度 200m でも同様であり、極前線西側の正偏差は暖水渦の発生による影響で生じているようにも見えることが分かった。

4. 議論

太平洋においては、アリューシャン低気圧の南北移動によって太平洋中央部の風の変動が生じることで、海洋循環場が南北移動していることが報告されている(Sugimoto and Hanawa, 2009)。日本海についても、極前線付近の curl τ (北緯 42 度、東経 130～140 度平均)は SST 第 1 モード及び極前線の南北位置との同時相関が -0.63 (95%有意)、 -0.58 (90%有意)と高く、大気場の変動が即時的に極前線の南北移動や SST の変動に大きな影響を及ぼしている可能性が示唆される(図 7(a))。ここで、curl τ とは風応力カールのことを指し、正(負)の値は反時計回り(時計回り)の風応力場であることを表している。Wallace and Gutzler(1981)が指摘した「Western Pacific(WP)パターン」の指数が、アリューシャン低気圧の南北移動との相関が高いことを Sugimoto and Hanawa(2009)では指摘しているが、WP 指数と極前線付近の curl τ との同時相

関もまた -0.73 と(99%)有意であり(図 7(b))、アリューシャン低気圧の南北移動と極前線付近の大気場の変動が関係している可能性が認められる。より詳細な風の分布を示すため、WP 指数によるコンポジット解析から得られた uv925 と curl τ の分布図(図 8)を示した。この図から、アリューシャン低気圧が南北どちらに移動していても日本海付近は正の curl τ 場となっているにもかかわらず(図 8(a) (b) (d) (e))、それらの差を取ると負の curl τ アノマリーの場になっている、すなわち、時計回り偏差の循環場になっていることが分かった(図 8(c) (f))。以上のことから、アリューシャン低気圧の南北移動に伴い極前線付近が時計回りの大気循環場になることにより極前線の南北位置が変動し、日本海 SST の冬季十年規模変動をもたらしている可能性を示した。

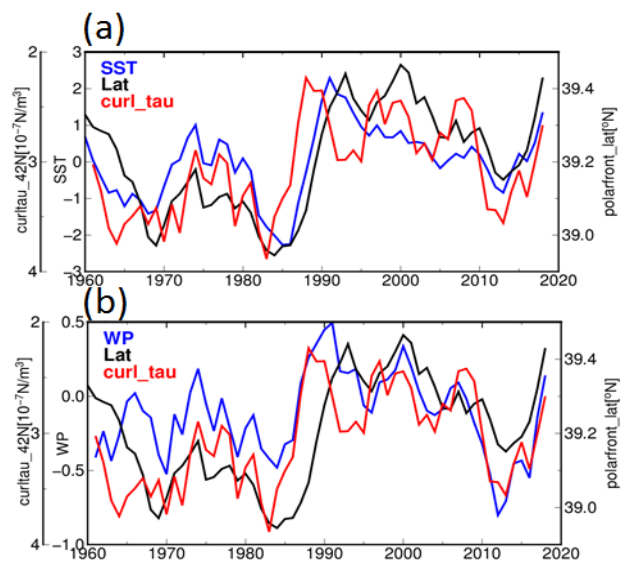


図 7. (a) 日本海 SST 第 1 モードの時係数と各要素の時系列。(b) WP 指数と各要素の時系列。

日本海を流れる対馬暖流は分岐した流れであり、その流路が変動することが報告されている (Yabe et al., 2021) が、そのメカニズムは良く分かっていない。本研究の結果から、筆者はアリューシャン低気圧の北への移動が極前線付近に時計回りの循環を形成することで対馬暖流の流路が変動し、日本海の SST が変動するというメカニズムを提案している。他に考えられるメカニズムとしては、負の curl τ アノマリー場によって暖水渦が励起する(朝日ほか2016)といった理論や下向きのエクマン湧昇によって SST が上昇するといった理論が

考えられる。また、本研究では考慮しなかったが、太平洋側の大気循環場の影響がロスビー波で西方に伝搬することによって対馬暖流の流量が変動するという可能性も考えられる。これら海洋内部に関するメカニズムもしくは大気循環場の直接的な影響の内、日本海 SST の冬季十年規模変動に対して何が一番支配的なのか、また、それらの寄与は時期によって変化するものなのか、大気・海洋結合モデルを用いた研究をはじめとする今後の研究の進展によって、これらの詳細なメカニズムが解明されることが期待される。

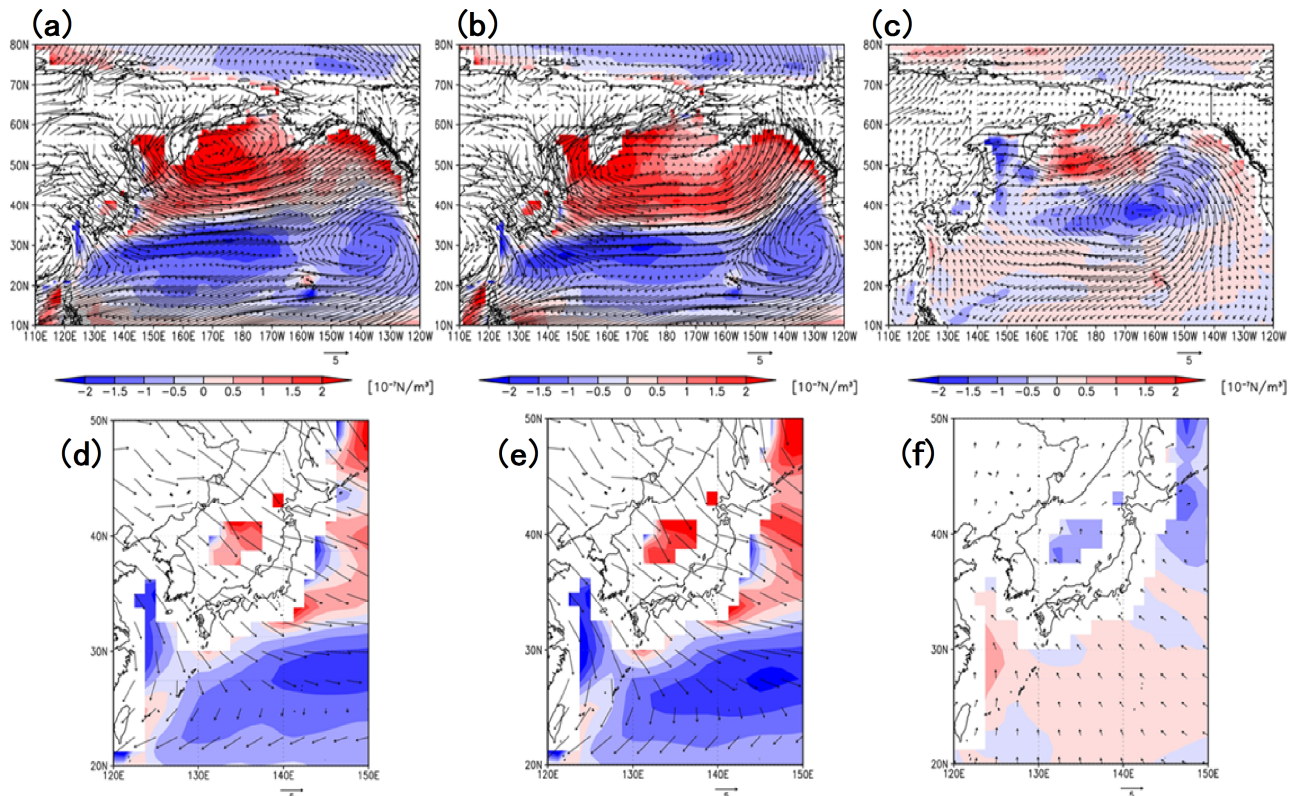


図8. WP 指数によるコンポジット解析から得られた curl τ (カラー) 及び uv925 (矢羽根)。(a, d) アリューシャン低気圧が北のときの curl τ 。(b, e) アリューシャン低気圧が南のときの curl τ 。(c, f) アリューシャン低気圧の南北移動の差による curl τ 。

参考文献

- 朝日啓二郎・磯田豊・方曉蓉, 2016: 日本海における海面高度偏差と海面地衡流偏差の季節変化. 海の研究, **25**(3), 43-61.
- Hirahara, S., M. Ishii and Y. Fukuda, 2014: Centennial-Scale Sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57 – 75.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879.
- Ishii, M., Y. Fukuda, H. Hirahara, S. Yasui, T. Suzuki and K. Sato, 2017: Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA*, **13**, 163 – 167.
- 磯田豊, 2011: 気候変化と対馬暖流の物理過程. 北大水産紀要, **53**(2), 2-12.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55

- Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Minobe, S., A. Sako, and M. Nakamura, 2004: Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2382-2397.
- Park, Y.-H., J.-H. Yoon, Y.-H. Youn, and F. Vivier, 2012: Recent warming in the western North Pacific in relation to rapid changes in the atmospheric circulation of the Siberian high and Aleutian low systems. *J. Climate*, **25**, 3476-3493.
- Sato K., T. Kameda and T. Shirakawa, 2022: Heavy snowfall at Iwamizawa influenced by the Tsushima Warm Current. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 873-891.
- 重岡裕海, 2010: MOVE/MRI.COM-WNP データを用いた日本海の極前線の指標水温. *測候時報*, **77**, 特別号, S109-S118.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa, 2009: Decadal and interdecadal variations of the Aleutian Low activity and their relation to upper oceanic variations over the North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 601-614.
- Sugimoto, S., and S.-I. Kako, 2016: Decadal variations in wintertime mixed layer depth south of the Kuroshio Extension and its influence on winter mixed layer temperature. *J. Climate*, **29**, 1237-1252.
- Usui, N., Wakamatsu, T., Tanaka, Y., Hirose, N., Toyoda, T., Nishikawa, S., et al., 2017. Four-dimensional variational ocean reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *Journal of Oceanography*, **73**(2), 205-233.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.
- Yabe, I., Kawaguchi, Y., Wagawa, T., & Fujio, S., 2021. Anatomical study of Tsushima Warm Current system: Determination of principal pathways and its variation. *Progress in Oceanography*, **194**: 102590.
- 吉田久美・北村佳照・中野俊也, 2020: 日本近海における海面水温の十年規模変動. *海の研究*, **29**(2), 19-36.