

— 総 説 —

潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合変動と海洋 20 年変動*

長船 哲史^{1**}・田中 祐希²

要 旨

地球赤道面に対する月の軌道傾斜角は約 5° の振幅をもって 18.6 年周期で振動している。これに付随した起潮力の変動に対応して、内部潮汐波の微細散逸過程に起因する海水の鉛直混合強度も同じ周期で変動していると考えられる。この鉛直混合変動が、北太平洋及びその縁辺海における海洋中の物理及び生物化学変量に見られる約 20 年周期の変動に寄与している可能性が指摘されている。この仮説を支持するいくつかの結果が観測データ解析や数値実験から得られている。しかし、定量的な議論はほとんどなく、また、鉛直混合変動と海洋変動をつなぐメカニズムも充分には理解されていない。この仮説の検証には、鉛直混合に対する直接的な海洋応答のみを通じた影響の評価が必要不可欠である。このためには、大気変動と鉛直混合変動のそれぞれに対する海洋応答を定量的に議論する必要がある。現実的なメカニズムを通じて平均場・変動場を再現することの出来る高い表現力をもった、より高度なモデルを用いた数値実験の実施が望まれる。一方、数値実験の結果を検証するためにも、観測データに基づいた 20 年変動の実態に関する情報を量と質の両面から拡充する必要もある。

キーワード：潮汐 18.6 年振動、鉛直混合、20 年変動、長期変動

1. はじめに

月の軌道傾斜角は 18.6 年周期で変動しており、これに

対応した起潮力の変調（以下、潮汐 18.6 年振動）に伴い、海水の鉛直混合強度が変動していると考えられる (Loder and Garrett, 1978)。一方で、海洋・気候システムに関して、約 20 年周期の変動（以下 20 年変動）が数多く報告されており、そのメカニズムを解明することは、地球環境変動を理解する上で重要な課題の 1 つである。この 20 年変動に対して、潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合の変動が影響を与えている可能性が指摘されており（例えば、Yasuda *et al.*, 2006）、その仮説を検証することが、2015 年 4 月に開始した文部科学省・科学研究費補助金新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」(Ocean Mixing Processes; 以下, OMIX) の中でも、主要なテーマの 1 つとなって

* 2016 年 11 月 10 日受領；2017 年 5 月 19 日受理
著作権：日本海洋学会, 2018

1 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

2 東京大学 理学系研究科
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

** 連絡著者：長船 哲史
TEL：046-867-9453
e-mail：osafune@jamstec.go.jp

いる。

月の公転軌道の地球の赤道面に対する傾斜角は、平均で23.4度であるが、18.6年の周期で5度という大きな振幅を持って振動している。これに伴い、月の影響を受けた主要分潮の起潮力も18.6年周期で変動している。平衡潮汐理論によれば、潮汐18.6年振動に伴う主要分潮の変調率は、日周潮で特に大きく、日月合成日周潮 K_1 で11%、主太陰日周潮 O_1 で19%である。一方、主太陰半日周潮 M_2 では比較的小さく3.7%である。この変動の位相は正確に分かっており、1932年1月、1950年8月、1969年3月、1987年11月等に、日周潮は極大、半日周潮は極小となる (Fig. 1の(a))。

主要分潮に代表される半日から1日程度の周期を持った短周期分潮による順圧潮流は、急峻な地形にぶつかる際に内部波を発生し、その碎波によって鉛直混合が生じる。北太平洋の高緯度域周辺では、千島・アリューシャン列島等の急峻な海底地形の近傍において、大量の順圧日周潮汐エネルギーが失われており、内部波へとエネルギーが供給されている (Foreman *et al.*, 2006; Tanaka *et al.*, 2007)。これらの海域は、緯度30度より極側に位置しており、日周期の内部波が自由伝播出来ないために、地形近傍に内部波エネルギーが集積し、局所的に非常に強い鉛直混合が生じている (Nakamura *et al.*, 2000)。このような、潮汐による海水の鉛直混合は、周辺海域における水塊形成に重要な役割を果たすほか (Nakamura *et al.*, 2006)、大規模な海洋循環をも制御している (Tatebe and Yasuda, 2004)。したがって、潮汐18.6年振動に伴って日周潮による鉛直混合の強度が変動すれば、北太平洋における水塊や海洋循環に影響が生じる可能性がある。

一方、北太平洋周辺では、大気・海洋の20年変動が数多く報告されている。20年変動は、全球規模の表面気温分布および海面気圧分布に現れる10年から100年程度の時間スケールを持つ長周期気候変動の中で、最も顕著な変動の1つであり、その振幅は北太平洋周辺で特に大きい (例えば、Mann and Park, 1996; Minobe, 1999; Tourre *et al.*, 2001)。20年変動は、気温変動や気圧変動以外にも、降水変動 (例えば、Cook *et al.*, 1997; Minobe and Nakanowatari, 2002) や水産資源変動 (例えば、Parker *et al.*, 1998) 等にも表れており、社会的な影響も

大きい。また、海洋における物理量や生物化学変量等にも顕著な20年変動が見られることが分かってきた (例えば、Ono *et al.*, 2001)。20年変動に限らず、長周期変動は、それ自体として重要であるだけでなく、限られた観測資料から長期トレンドを推定するうえで大きな誤差要因となり得る。したがって、そのパターンや強度・分布等を再現・予測することへの要望は大きく、メカニズムの解明が求められている。

以上のような背景を考慮し、Yasuda *et al.* (2006) は、北太平洋高緯度域において、日周潮によって急峻な地形近傍で引き起こされる局所的な強い鉛直混合が、潮汐18.6年振動に伴って変動することで、北太平洋周辺において顕著に見られる大気・海洋の様々な20年変動を引き起こしているとの仮説を提唱した。周期と位相が正確に分かっている潮汐18.6年振動の影響が確かめられれば、10年～数10年規模の海洋・気候変動予測の精度向上に資すると期待される。本稿では、海洋における20年変動に焦点を絞り、それらと潮汐18.6年振動との関連を議論した先行研究を取りまとめるとともに、今後の研究の課題について議論する。気候変動との関連については、建部・長船 (2018) が議論しているので、合わせて参照されたい。

2. 観測研究

近年、海洋観測資料の蓄積に伴い、精度の高い長期変動の記述が可能になってきた結果、北太平洋周辺の海洋における物理量や生物化学変量等に顕著な20年変動が存在することが分かってきた。Ono *et al.* (2001) は、気象庁が1968年以降に継続して行ってきた三陸沖親潮域の観測データを解析し、密度が $26.7\sigma_\theta$ から $27.0\sigma_\theta$ の等密度面上における見かけの酸素消費量 (apparent oxygen utilization, 以下、AOU) が、線形の増加傾向に加え、明瞭な20年変動を示すことを報告した (AOUは、水温で決まる飽和濃度からの減少量であるが、飽和濃度の変動より大きい場合は、酸素濃度自体の変動と見てもよい)。この密度帯は、北太平洋において冬季でも海面に露出しない中層密度帯である。彼らは、統計的に有意ではないものの、リン酸塩濃度でも同様に20年変動の傾向があることを示した。AOUの20年変動は、西部亜寒帯

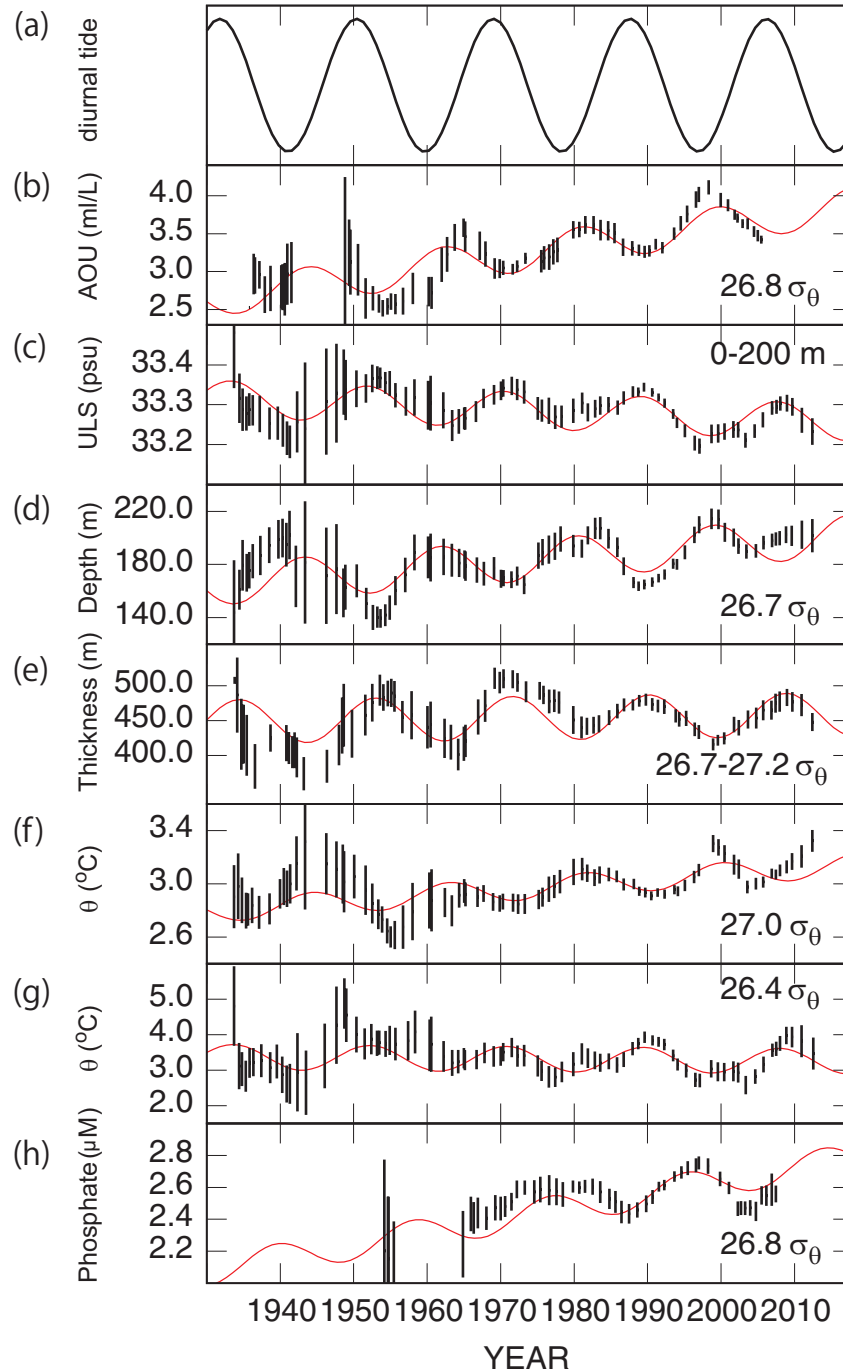


Fig. 1. Time series of water properties in the Oyashio region with fitted curves for the 18.6-year period and linear trend. The data processing method is the same as that used by Osafune and Yasuda (2006), but an updated data set is used. (a) Strength of the diurnal tide in the 18.6-year nodal tidal cycle; (b) apparent oxygen utilization (mL/L) at $26.8 \sigma_{\theta}$; (c) upper layer salinity in the top 200 m layer (psu); (d) depth (m) at $26.5 \sigma_{\theta}$; (e) layer thickness (m) between 26.7 and $27.2 \sigma_{\theta}$; (f) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$) at $27.0 \sigma_{\theta}$, around the temperature maximum; (g) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$) at $26.4 \sigma_{\theta}$, around the temperature minimum; and (h) phosphate (μM) at $26.8 \sigma_{\theta}$.

循環内やオホーツク海南部のクリル海盆内 (Andreev and Kusakabe, 2001), 日本海の深層 (Watanabe *et al.*, 2003) 等でも報告されている。相関解析の結果は, これらの 20 年変動とアリューシャン低気圧強度の 20 年変動との間の関連性を示唆しているが, 大気変動と海洋中・深層をつなぐ具体的なメカニズムは明らかではない。

Osafune and Yasuda (2006) は, 親潮域やオホーツク海等の中層における AOU の 20 年変動が, 親潮の上流に位置する千島列島における海水の鉛直混合強度の変動と関連しているという仮説を基に, 歴史的海洋観測データの解析を行った。親潮域中層等密度面上の AOU は, Ono *et al.* (2001) の解析期間より過去に遡っても, 20 年変動が続いていたことを確認した (Fig. 1 の (b))。この変動を潮汐 18.6 年振動と比較すると, 日周潮が強い時期に AOU が低い傾向があった。彼らは, 親潮域・オホーツク海を含む千島列島周辺海域における海面塩分・密度, 亜表層等密度面上の水温 (塩分), 中層層厚等にも 20 年変動を見出した。続いて Osafune and Yasuda (2010) は, アリューシャン列島に近いベーリング海南東部海盆地でも同様の解析を行い, 類似の 20 年変動を検出した。これらをまとめると, 親潮域やオホーツク海等の各海域に共通の傾向があることが分かる。全ての海域で, 日周潮が強い時期に, 表層が高塩分で, 表層付近の等密度面が浅く (すなわち表層が高密度), 中層層厚が大きい傾向があった (Fig. 1 の (c) から (e))。等密度面水温については, より複雑であるが, 鉛直構造に照らし合わせると, 共通した傾向があった。北太平洋亜寒帯域周辺では, 表層に強い塩分躍層が存在する。この影響で, 水温極大の上に水温極小があるという水温逆転構造が安定して存在する。この水温の極大・極小層の密度は海域によって異なるが, これらの構造と対応付けて整理すると, 概ね, 日周潮が強い時期に, 鉛直水温極大 (極小) の周辺で, 等密度面水温が低い (高い) 傾向があった (Fig. 1 の (f) と (g))。水温及び塩分に比べ, 溶存酸素 (以下, 酸素と記述) は, 入手可能なデータが少ないために, 親潮域以外では AOU の長期変動はあまり明瞭に捉えられなかったが, オホーツク海とベーリング海においても, 日周潮が強い時期に AOU が低いという, 親潮域と同様の変動傾向が見られた。オホーツク海の AOU については, 後に Andreev *et al.* (2008) が, 異なるデータセットを用い

て長期変動特性を解析し, 親潮域とよく似た 20 年変動の存在を報告している。

上述の表層塩分, 等密度面水温, AOU の時系列に見られた海域に依らない共通の 20 年変動は, 鉛直プロファイルから推定される鉛直混合による水塊変質のパターンを考えることで, 定性的には説明可能である (Osafune and Yasuda, 2006; 2010)。北太平洋の亜寒帯域では, 強い塩分躍層が表層に存在しており, 亜表層の塩分は, 表層に比べ高塩となっている。鉛直混合は, 亜表層の高塩水を表層に運ぶため, 上向きの塩分フラックスが生じる (Fig. 2 の (a))。したがって, 混合が強い時期ほど, 表層が高塩化すると考えられる。一方, 鉛直混合による等密度面上の変量への影響の符号は, 状態方程式の非線形性を無視すれば, 主に密度座標で見た変量の曲率によって決まる。この効果は, 典型的には, 極大・極小構造を弱める働きと理解できる (Fig. 2 の (b))。結果として, 混合が強い時期ほど, 水温極大 (極小) 周辺の密度帯では, 等密度面水温が低く (高く) なると考えられる。

なお, Osafune and Yasuda (2006) は, 親潮の起源水の一つであるオホーツク海モード水 (Okhotsk Sea Mode Water; 以下, OSMW) が存在するクリル海盆では, 水温極大に近い密度帯も含めた広範な密度帯で, 日周潮が強い時期に等密度面水温が高い傾向があることから, 上述の説明とは整合しないと述べ, 異なる変動メカニズムを提示している (これについては, 後述する)。しかし, 曲率を見ると, 鉛直混合による効果が加熱に働く密度帯が広範であり, 上述の説明はクリル海盆地の水温変動についても, ある程度, 整合的であると言える。酸素の変動についても, 同様の議論により説明が可能である。北太平洋の中層下部には, 鉛直的な酸素極小 (AOU 極大) が存在しているが, 曲率としては冬季混合層密度付近まで同じ符号を持っている。したがって, 鉛直混合は, 中層の等密度面上の酸素濃度を高める (AOU を下げる) 効果がある (Fig. 2 の (c))。加えて, 鉛直混合は, 高酸素 (低 AOU) の表層水を亜表層に取り込む効果もある。したがって, 混合が強い時期ほど, 中層等密度面上の AOU が低下すると考えられる。

Osafune and Yasuda (2006) は, クリル海盆における中層水温変動について, 中層水形成を介した間接的な影響による説明を試みた。日周潮が強い時期には, 千島海

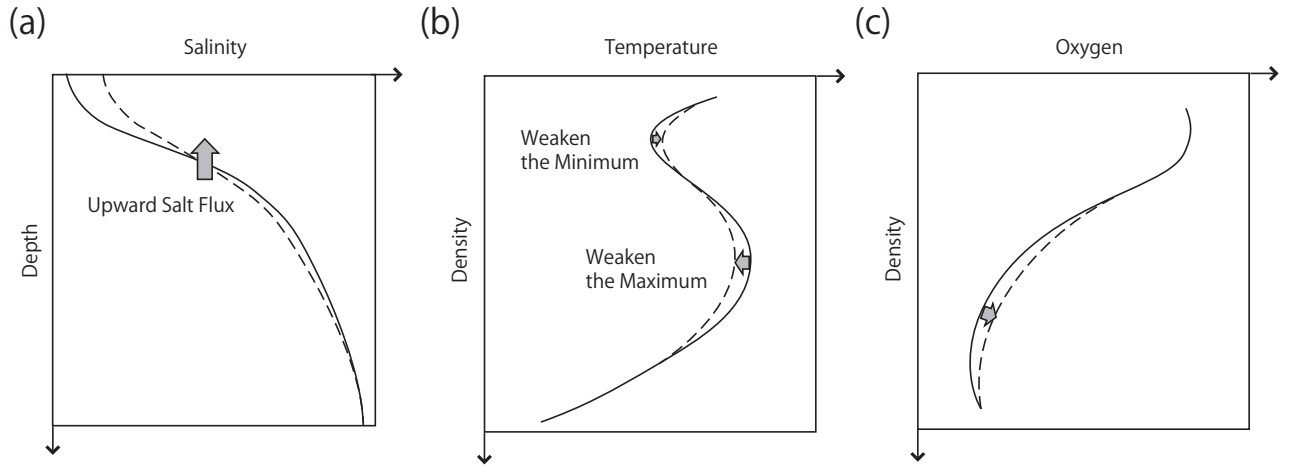


Fig. 2. Schematic diagrams showing effects of vertical mixing for (a) upper layer salinity, (b) isopycnal potential temperature, and (c) isopycnal oxygen. Solid lines are mean profiles, and dashed lines are profiles modified by vertical mixing.

峡域で高塩化した表層水が、オホーツク海の北西陸棚域に移流される。この海域では、冬季の冷却により結氷するが、その際にブラインと呼ばれる結氷点の高塩分水が排出され、高密度陸棚水 (Dense Shelf Water; 以下, DSW) が形成される。これが OSMW, ひいては親潮水の起源水であり、北太平洋中層の通気に重要な役割を果たすと考えられている。彼らは、日周潮が強い時期には、表層が高塩であるために、排出されるブラインの塩分も高くなり、高塩な DSW が形成されるとすれば、等密度面上で見れば高温の偏差が生じうることを指摘した。ただし、彼ら自らが指摘しているように、この説明は、単純化した議論に基づいた仮説に過ぎない。次章で述べるように、季節的な冷却・加熱の影響を受ける表層においては、表層塩分変動を反映して、等密度面水温が変動しうる。DSW が季節的な冷却が及ぶ最も高密度の水であることを考慮すると、それより低密度側の広範な密度帯において、日周潮が強い時期に、表層塩分が高いことを反映して、等密度面上で見れば高温の偏差が生じる可能性がある。一方で、海洋大循環モデルを用いた数値実験からは、鉛直混合を強くすると、DSW が高塩化し、それに伴い密度も高くなるため、より高い密度帯まで冷却の効果が及ぶようになることが示唆されている (Matsuda *et al.*, 2009)。そのような密度帯では、日周潮が強い時期

のみに、冷却の効果が及ぶことで、逆に低温となる可能性もある。OSMW への影響を理解するには、さらに、DSW から OSMW が形成される過程を考慮した議論が必要である。この過程には、鉛直混合を含め、様々な過程が含まれると考えられるが、未解明な部分が多い。したがって、精緻な議論は困難である。

Osafune and Yasuda (2006) は、その他にも、中層水形成を介した影響について論じている。日周潮が強い時期に、高密度の DSW が形成されるならば、より重い密度帯まで通気されることで、中層等密度面上の酸素濃度が上昇する可能性がある。このことは、AOU の変動と整合的である。また、日周潮が強い時期には、表層水が高塩なため、少ない冷却で効率的に高密度水を形成出来る。このことから、DSW の形成効率が高い可能性もある。その結果、中層水の形成量が増加すれば、オホーツク海から太平洋への中層水の流出量が増加するかもしれない。オホーツク海水の等密度面上の水温・AOU は相対的に低い。したがって、このオホーツク海水の流出量が増加し、親潮水における混合比が高くなれば、親潮水が低温・低 AOU となると考えられる。彼らは、以上の過程により、観測された 20 年変動を説明しうると述べている。ただし、こうした影響に関する過程にしても、不確実性の大きな仮説に過ぎない。特に、中層水形成量への

影響や、その結果としての太平洋への流出量の変動に関しては、多くの仮定に基づく、非常に単純化した議論に過ぎず、定性的にも疑問の余地が大きい。

潮汐 18.6 年振動が、親潮域と黒潮親潮移行領域における動物プランクトンの生産量にも影響を与えている可能性が指摘されている。Osafune and Yasuda (2006) は、親潮域の中層等密度面 ($26.7\text{--}26.8\sigma_\theta$) 上において、日周潮が強い時期にリン酸塩濃度が低いという 20 年変動を見出した (Fig. 1 の (h))。Tadokoro *et al.* (2009) は、同様の変動傾向が、親潮域と黒潮親潮移行領域の 2 つの海域の中層等密度面上および海面におけるリン酸塩濃度にもあることを報告した。また、時系列は短いものの、硝酸塩・ケイ酸塩濃度にも同様の変動傾向があることを見出した。さらに同海域で採取された 1960–2000 年のプランクトン資料をもとに推定したメソ動物プランクトン *Neocalanus plumchrus* の生物量が、表層リン酸塩濃度と高い正の相関を持つことを示した。これにより、表層における栄養塩の中層と同期した 20 年変動に対応して、動物プランクトンも、一次生産量の変動を介して応答していることを示唆した。彼らは、上述した、Osafune and Yasuda (2006) による議論 (オホーツク海における中層水形成量および太平洋への流出量への影響) を念頭に、栄養塩の 20 年変動に関するメカニズムを議論した。具

体的には、日周潮が強い時期に、オホーツク海における中層水形成が強化された結果、生物生産によって栄養塩の消費が進んだ表層水に由来する低栄養塩水が、より多く親潮域や黒潮親潮移行領域の中層に広がることで、中層の栄養塩濃度が低下し、さらには表層への栄養塩の取り込みも減少したという仮説を提唱した。ただし、上述のように、潮汐 18.6 年振動が中層水形成過程におよぼす影響に関しては疑問の余地があり、彼らの栄養塩や動物プランクトンの変動に関する仮説についても、推論の域を脱していない。

潮汐 18.6 年振動と気候変動の関連性については、詳細は建部・長船 (2018) にゆずるが、気候変動と関連付けられるような大規模な海面水温変動への影響も示唆されている。Yasuda *et al.* (2006) は、日周潮が強い時期と弱い時期の海面水温の差の分布が、太平洋十年規模気候変動 (Pacific Decadal Oscillation; Mantua *et al.* 1997; 以下, PDO) として知られる水温偏差の分布とよく似ており、日周潮による混合が強い (弱い) 時期に PDO 指標が負 (正) となる傾向があることを示した (Fig. 3)。ただし、この水温偏差構造が、18.6 年という特定の周期を持った変動を代表したものであるかどうかは明らかではない。また、Yasuda (2009) は、木の年輪データから再構成した PDO 指標のプロキシデータをを用いることで、統

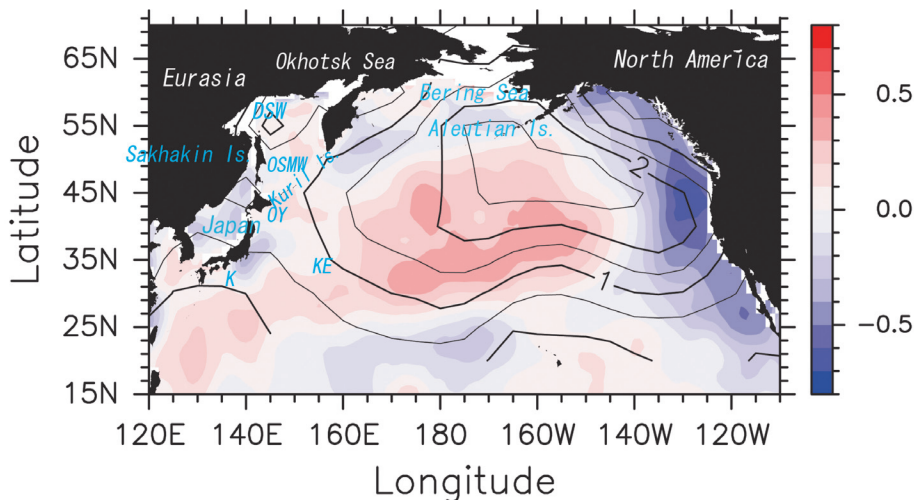


Fig. 3. Differences in winter-SST (color in $^{\circ}\text{C}$) and SLP (Sea-Level Pressure: contours in hPa) distributions between the periods of strong and weak diurnal tides based on bidecadal components that are bandpass-filtered in 11.6–25.6-year periods. After Yasuda *et al.* (2006).

計的に有意な 18.6 年周期シグナルが存在することを示した。しかし、プロキシデータがどの程度大規模な気候変動を代表しているかという問題などもある。

3. 数値実験

前節で述べた水温・塩分の 20 年変動に関する単純化した議論の妥当性を確認するために、Osafune and Yasuda (2012) は、海水海洋結合大循環モデルを用いた数値実験を行った。気候学的季節変動のみを含み経年変動しない大気外力で駆動したモデルに対し、千島・アリューシャン列島等において潮汐 18.6 年振動に対応する鉛直拡散の変動を組み込んだ結果、亜寒帯域で観測された水温・塩分の 20 年変動が、定性的には概ね再現された。モデル結果は、観測では検出が困難な、季節性を持った 20 年変動への寄与も示唆した。具体的には、混合が強い時期に冬季混合層内の塩分が高いことを反映して、加熱期に形成される季節水温躍層内では、等密度面塩分・水温がともに高くなるという、間接的な影響が見られた。また、鉛直混合が強い時期に表層が高塩分・高密度化した海域では、亜表層との密度差が小さくなったことに伴って、冬季混合層がより深く発達する傾向があった。冬季混合層の深化は、表層への栄養塩の輸送や亜表層の通気の強化にもつながると考えられるため、物質循環や低次生態系への影響を考えるうえで興味深い結果である。また、亜熱帯亜寒帯循環境界等の水温フロント周辺においては、鉛直混合に対する力学応答によって、流速偏差が水温フロントを横切る向きに生じることで、水温偏差が形成されるなどの効果もあることが確かめられた（この効果については、次の段落でより詳しく記述する）。ただし、このモデルで再現された変動の振幅は、実験の設定や海域によって異なるが、全体的に弱い傾向があった。彼らは、過小評価につながりうる様々な要因を挙げ、このモデルを用いて、鉛直混合変動による影響の重要性を定量的に議論するのは困難であると結論付けている。例えば、表層塩分変動の振幅は、鉛直混合を変動させた海峡部では比較的大きいものの、海峡部を離れるにつれて急激に減少しており、観測結果と比べて 1 オーダー以上小さかった。これに対し、このモデルでは海面塩分を気候値に緩和しているために、表層塩分変動が減衰してい

たことが、過小評価の原因の 1 つであった。加えて、モデルの平均場の再現性が不十分であるために、鉛直混合に対する応答が必ずしも現実的でなく、過小評価につながった可能性も考えられた。また、モデル解像度が粗く、潮汐流も再現されていないために、局所的な強混合域での水塊の滞留時間が長く、そこでの鉛直コントラストが弱くなってしまうことが、鉛直混合変動に対する応答を鈍らせる効果を持つ可能性も示唆している。このように、モデルがもつ表現力の限界が、様々な形で過小評価の原因となりうる。

Osafune and Yasuda (2013) は、同じ数値実験結果を用いて、潮汐 18.6 年振動による、北太平洋外洋の海面水温への影響について調べた。彼らの実験では、18.6 年周期の鉛直混合変動によって西岸付近に生じた 18.6 年周期の海面水温偏差が、亜寒帯亜熱帯循環境界に沿ってゆっくりと東進し、中央・東部太平洋にも遠隔的な影響を及ぼしていた。Nakamura *et al.* (2006) によると、千島列島等で鉛直混合により生じた密度偏差に対する力学応答として、沿岸ケルビン波が西岸に沿って赤道方向に伝播した後、鉛直第 2 モード以上の低次モードの長波ロスビー波が、亜熱帯亜寒帯循環境界を流れる東向きの海流（黒潮続流、および亜寒帯海流へとつながる東向きの親潮）によって移流されることで、太平洋中央部の循環にも影響を及ぼす。Osafune and Yasuda (2013) は、東進する水温偏差には、この東向きのロスビー波の伝播に対応した流速偏差による水温偏差生成が重要な役割を果たしていることを示した。ただし、このモデルでは、PDO の変動中心が位置する東部太平洋域におけるシグナルは非常に小さく、現実の 20 年変動と位相も合っていないなど、Yasuda *et al.* (2006) によって示された大規模海面水温変動の構造とは必ずしも整合していなかった。この海域における表層水温の力学バランスを解析した結果、バルク式に基づく海面熱フラックスを通じて擬似的な熱フラックスが発生し、表層水温偏差が減衰していた。また、水温変動の位相も、この擬似的な効果によって制御されていた。このことは、海面フラックスの扱いによって生じる擬似的なフラックスによる減衰効果は、変動の振幅を小さくするだけでなく、力学を歪める性質もあることを示唆している。以上の理由により、彼らは、このモデルに現れた東進する水温偏差を、現実の変動と比較し、

議論することは困難であると結論付けた。

Osafune *et al.* (2014) は、四次元変分法データ同化手法を応用して推定された長期海洋環境再現データセット (Estimated State of global Ocean for Climate research, 以下, ESTOC; Osafune *et al.*, 2015) をベースに、より現実的な設定で同様の数値実験を行った。ESTOC は、強拘束の四次元変分法を用いており、初期値および大気外力 (海面熱フラックスを含む) を制御変数とし、それらを修正することで、海洋大循環モデルの計算結果を最適化している。彼らは、このモデルに対し鉛直混合変動を組み込み、ESTOC で使用されているのと同じ初期値と大気外力を与えた数値実験を行った。この実験では、修正済みの熱フラックスを直接与えており、バルク式を用いた熱フラックスは用いていない。このため、熱フラックスが、擾乱として与えた鉛直混合変動により生じた水温偏差に応じて変化することはない。したがって、上述の疑似的な熱フラックスを通じた減衰効果の影響を排し、鉛直混合変動に対する直接的な海洋応答の影響を切り出して調べることが出来る。この実験でも、18.6年周期の海面水温偏差が、亜熱帯亜寒帯循環境界に沿ってゆっくりと東進していたが、Osafune and Yasuda (2013) と比べて、変動の振幅が大きく、また東進速度も速くなっていた。その結果、この東進する水温偏差の位相が、東部太平洋の PDO 変動中心付近において観測されている海面水温の 20 年変動の位相と一致し、振幅にして約 20% と定量的にも有意な影響がある可能性が示された。この結果は、海洋応答を通じた遠隔的な影響が、大規模海面水温変動である PDO に一定の寄与をしている可能性を示唆している。しかし、大気海洋結合システムとしての気候の変動に対し、有意な影響があるか否かは不明である。

本稿では詳細は割愛するが、Hasumi *et al.* (2008) および Tanaka *et al.* (2012) は、大気海洋結合モデルを用いた数値実験によって、潮汐 18.6 年振動の気候変動への影響を調べ、ともに、潮汐 18.6 年振動が大規模海面水温変動を伴う気候変動の周期性を制御しうることを示唆する結果を得ている。しかし、モデルの不確実性等を考慮すると、潮汐 18.6 年変動による気候変動への影響を強く肯定するには至っていない。

4. まとめと議論

北太平洋亜寒帯およびその縁辺海では、中深層も含めて、様々な物理量や生物化学変量の 20 年変動が観測されている。千島列島やアリューシャン列島など、潮汐に起因する非常に強い鉛直混合が生じている海域の下流で検知された変動の多くは、潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合強度の変動で定性的な説明が可能であることが示されている。水温・塩分の変動パターンについては、潮汐 18.6 年振動を考慮した数値実験 (Osafune and Yasuda, 2012) により、ある程度、定性的に再現されたが、重要性の定量的な評価はほとんどされていない。また、中層水形成を介した間接的な影響や生物化学変量への影響については、定性的な説明についても疑問の余地がある。したがって、現状では、潮汐 18.6 年振動が海洋・気候の 20 年変動に影響を及ぼしているという仮説が、海洋変動の観測およびモデル計算によって十分に検証されているとは言い難い。

海洋の 20 年変動が潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合の変動の影響を受けているとすれば、その応答機構には 2 つの経路が考えられる。1 つは、鉛直混合に対する直接的な海洋応答のみを通じた結果であり、もう 1 つは、大気海洋結合システムとしての応答の結果である。本稿では論じないが、実際に観測されている大気の 20 年変動が、潮汐 18.6 年振動に対する結合システムとしての応答なのか、気候システムの自励振動なのか、またはその他の外的要因の影響なのかについては、確定しておらず、潮汐 18.6 年変動の影響が強く肯定されるまでには至っていない (詳しくは、建部・長船 (2018) を参照)。一方、潮汐 18.6 年変動の影響の有無にかかわらず、海洋は大気の 20 年変動による影響も受けているのは明白である。数値実験からは、風応力の強度や海面熱・淡水フラックスの変動が、オホーツク海における DSW の形成に影響を与えることが示されている (Matsuda *et al.*, 2009; 2015; Nakanowatari *et al.*, 2015)。また、水塊形成の変動がなくとも、風応力の変動によって決まる水平循環の強度の変化によっても、定性的には、オホーツク海や親潮域で観測された中層における AOU や水温変動を説明しうるとの指摘もある (Andreev *et al.*, 2008; Ohshima *et al.*,

2010)。したがって、中層水の 20 年変動を考えるうえでも、大気の変動の影響を無視することは出来ない。加えて、大気変動が特定の周波数を持たない場合でも、海洋の応答、特に水温・塩分やその他のトレーサー濃度の変動では、低周波成分が強調される性質がある（例えば、Kilpatrick *et al.*, 2010）。したがって、海洋の 20 年変動が潮汐 18.6 年振動の影響を受けていることを実証するには、様々な周波数を含む大気変動による影響と切り分けて、鉛直混合に対する直接的な海洋応答のみを通じた影響を評価する必要がある。こうして得られる知見は、大気海洋結合システムとしての応答を論じる上でも、重要な基礎になるだろう。

潮汐 18.6 年振動と大気変動の影響を切り分けるうえで、大気変動による影響を評価することが重要である。そのための有効な手段の 1 つは、過去の気候変動を考慮した過去再現数値実験である。ただし、数値モデルによる 20 年変動の再現性に限界があるだけでなく、観測データに基づく 20 年変動の推定にも不確実性がある。このため、大気変動を考慮した数値実験による定量的な議論から、20 年変動への潮汐 18.6 年振動の影響を棄却することは難しい。したがって、潮汐 18.6 年振動の影響自体についても定量的な議論に耐えうる数値実験が必要であろう。Osafune and Yasuda (2012) は、平均場の再現性や、擬似的海面フラックスによる変動の減衰効果などが、鉛直混合変動に対する応答の定量的な議論の阻害要因となりうることを指摘した。同様の問題は、大気変動を考慮した過去再現実験でも起こりうるだろう。特に、海面塩分の気候値への緩和やバルク式を用いた熱フラックスの推定は、ほとんどのモデルで採用されており、変動が過少評価されている、あるいは、変動の再現性が高くても、力学が歪んでしまっている可能性がある。特に長期変動を議論する際には、この影響に注意する必要がある。この影響を評価する方法としては、データ同化プロダクトを元にした数値実験 (Osafune *et al.*, 2014) が、有効な手段の 1 つである。一方、適切な物理過程を通じて現実的な場を再現可能な高い表現力をもったモデルでは、こうした擬似的なフラックスの寄与も小さくなると考えられる。オホーツク海や親潮域を含む外洋における水塊の形成・変質過程や循環などをより適切に表現できる高解像度モデルを用いた数値実験にも期待がかかる。

一方で、鉛直混合をどのように組み込むかという点に關しても、改善の余地がある。これまでの数値実験による研究では、順圧潮流が地形にぶつかった際に生じる内部波が地形のごく近傍で砕波することで生じる混合 (near-field の混合と呼ぶ) のみを考慮してきた。しかし、内部波形成域から遠方に伝播した傾圧潮流が背景内部波場との相互作用などを通じて引き起こす混合 (far-field の混合と呼ぶ) の変動も考慮する必要があるかもしれない。特に、最大のエネルギーを持つ M_2 潮は、日周潮に比べて変調率は低いものの、全球積算値で比較すると、非常に大きな変調量になると考えられる。しかし、 M_2 潮のエネルギーの多くは far-field の混合に寄与しているため、その変調の効果は、先行研究では十分に考慮されていない。また、陸棚等における海底摩擦に起因する鉛直混合も考慮する必要があるかもしれない。例えば、Loder and Garrett (1978) は、北米沿岸域の浅海部における鉛直混合の変化が、季節躍層を壊す効果を通じて、海面水温の 18.6 年変動を引き起こしている可能性を指摘した。near-field, far-field, 海底摩擦起源のいずれの形式の混合にしても、鉛直構造をどう与えるべきかなど不明な点も多く、理論および観測事実に基づく、物理的により信頼性の高いパラメタリゼーションの登場が望まれる。

潮汐 18.6 年振動による水温・塩分への影響については、既に数値実験が行われており、今後は、より高度なモデルを用いた定量的な議論が必要である。一方で、潮汐 18.6 年振動による生物化学変量への影響に関しては、筆者の知る限り、現時点では数値実験は行われていない。したがって、まずは、既存の生態系モデルを用いて数値実験を行い、定性的な応答について評価・議論することは、十分な意義があるだろう。ただし、北太平洋亜寒帯域は、高栄養塩低クロロフィル (High Nutrient/Nitrate Low Chlorophyll; HNLC) 海域であり、微量栄養素である鉄が植物プランクトンの増殖に対する制限要因となっていることにも注意が必要である。その鉄の平均的な分布を再現するうえで、海峡部における潮汐混合が重要な役割を果たす可能性も示唆されている (Uchimoto *et al.*, 2014)。したがって、この海域における潮汐 18.6 年振動による生物化学変量への影響を理解するためには、鉄も含めた議論が必要になるかもしれない。将来的には、水温・塩分への影響と同様に、生物化学変量への影響につ

いても、より信頼性の高い数値実験に基づく定量的な評価を行う必要があり、そのためには、基盤となる物理モデルだけでなく、生態系モデル自体の高度化も必須であろう。

数値実験の結果が、現実の世界を適切に表現しているかどうかを評価するためには、海洋観測データに基づく20年変動の情報もより充実させていく必要がある。海洋観測データ解析によって潮汐18.6年振動の影響を論じた先行研究では、最長でも60年間程度の時系列から20年変動の推定を行っており、周期性や振幅の見積もりには大きな不確実性が存在する。より多くのデータを収集したとしても、海洋観測データは高々150年程度しか存在せず、活発な渦活動や季節性の存在も考慮すると、海洋観測から不確実性が低い(質の高い)情報を抽出するには限度がある。しかし、情報の量的な拡充を通じて、数値実験の結果を多角的に検証することで、仮説の信憑性を高めていくことは可能である。例えば、今まで用いられてこなかった生物化学変量などの新たな変量を用いることによって、情報の種類を増やすのが有効な手段の1つであろう。また、人工衛星リモートセンシングやアルゴフロートなどの近年の観測システムのデータをよりよく活用することで、シグナルの空間構造を把握する、より丁寧に季節性も含めたシグナルを抽出する、などの試みも有効かもしれない。気温や降水量の20年変動については、木の年輪等から再構成されたプロキシデータを用いることで、実測データでは得られない数100年を超えるような長期時系列を作成し、統計的に有意なシグナルを検出する試みがなされてきた(例えば、Yasuda, 2009)。海洋内部の変動に関しても、例えば、サンゴや堆積物等を用いて推定されたプロキシデータを用いることで、推定される周波数の誤差を低減することも、1つの方向性かもしれない。

潮汐18.6年振動が海洋の20年変動に影響を与えているという仮説は、科学的に興味深く、かつ10年~数10年規模の海洋環境変動の予測や地球温暖化の影響評価等の精度向上に資する可能性があるなど、実用的にも大きな意義がある。しかし、この仮説を高い精度で検証するには多くの課題が残されている。この仮説の検証精度を高めるためには、物理・生物・化学の幅広い分野において、数値シミュレーションと観測双方からの地道な検証を重

ねるより方法はないだろう。OMIXでは、最新の海洋大循環モデルや気候モデルを用いた数値実験、乱流混合パラメタリゼーションの開発、生態系モデルの高度化とそれを用いた数値実験、潮汐鉛直混合スキームの最適化を目指したデータ同化実験等が行われる。また、複数の班で、様々な観測データに基づいた長期変動の解析が行われる。こうした多種多様な研究が密に連携出来るのがOMIXの強みであり、この枠組みの下で、各々の研究が高度化・効率化することで、仮説の検証が大きく進展することが期待される。

謝辞

本稿は、2名の査読者および特集号編集委員からの貴重なコメントにより、大きく改善されました。感謝いたします。本稿は、文部科学省・科学研究費補助金新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・機構・生態系の維持と長周期変動の解明」の計画班「大規模観測データの統合による太平洋循環の実態把握とメカニズムの解明」(科研費JP15H05819)の助成を受けています。

References

- Andreev, A. G., and M. Kusakabe (2001): Interdecadal variability in dissolved oxygen in the intermediate water layer of the Western Subarctic Gyre and Kuril Basin (Okhotsk Sea). *Geophys. Res. Lett.*, **28** (12), 2453–2456.
- Andreev, A.G., and G. V. Shevchenko (2008): Interannual variability of water transport by the East Kamchatka and East Sakhalin Currents and their influence on dissolved oxygen concentration in the Sea of Okhotsk and subarctic pacific. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, **33**, 657–664. doi:10.3103/S1068373908100075
- Cook, E. R., D. M. Meko, and C. W. Stockton (1997): A new assessment of possible solar and lunar forcing of bidecadal drought rhythm in the western United States. *J. Clim.*, **10**, 1343–1356.
- Foreman, M. G. G., P. F. Cummins, J. Y. Cherniawsky, and P. Stabeno (2006): Tidal energy in the Bering Sea. *J. Mar. Res.*, **64**, 797–818.
- Hasumi, H., I. Yasuda, H. Tatebe, and M. Kimoto (2008): Pacific bidecadal climate variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14601, doi:10.1029/2008GL034406.
- Kilpatrick, T., N. Schneider, and E. Di Lorenzo (2011): Generation of low-frequency spiciness variability in the thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 365–377, doi:10.1175/2010JPO4443.1.
- Loder, J. W., and C. Garrett (1978): The 18.6 year cycle of sea surface temperature in shallow seas due to variations in tidal mixing. *J. Geo-*

- phys. Res.*, **83** (C4), 1967–1970.
- Mann, M. E., and J. Park. (1996): Joint spatiotemporal modes of surface temperature and sea level pressure variability in the Northern Hemisphere during the last century. *J. Climate*, **9**, 2137–2162.
- Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace, and R. Francis (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78** (6), 1069–1080.
- Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, Y. Sasajima, H. Hasumi, and M. Wakatsuchi (2015): Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: The role of salinity advection. *J. Geophys. Res.*, **120**, 1462–1489, doi:10.1002/2014JC009995.
- Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, and N. Ebuchi (2009): Wind and buoyancy driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Res., Part I*, **56** (9), 1401–1418, doi:10.1016/j.dsr.2009.04.014.
- Minobe, S. (1999): Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855–858.
- Minobe, S. and T. Nakanowatari (2002): Global structure of bidecadal precipitation variability in boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1396, doi:10.1029/2001GL014447.
- Nakamura, T., T. Awaji, T. Hatayama, K. Akitomo, T. Takizawa, T. Kono, Y. Kawasaki, and M. Fukasawa (2000): The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial K₁ tidal flow. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1601–1621.
- Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji (2006): Effects of tidal mixing at the Kuril Straits on North Pacific ventilation: Adjustment of the intermediate layer. *J. Geophys. Res.*, **111**, C04003, doi:10.1029/2005JC003142.
- Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Uehara, H. Mitsudera, K. I. Ohshima, H. Hasumi, and M. Wakatsuchi (2015): Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific. *J. Climate*, **28**, 714–736.
- Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, and M. Wakatsuchi (2010): Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific. *Deep-Sea Res.*, **57**, 1247–1256.
- Ono, T., T. Midorikawa, Y. W. Watanabe, K. Tadokoro, and T. Saino (2001): Temporal increase of phosphate and apparent oxygen utilization in the subsurface waters of western subarctic Pacific from 1968 to 1998. *Geophys. Res. Lett.*, **28** (17), 3285–3288.
- Osafune, S., S. Masuda, and N. Sugiura (2014): Role of the oceanic bridge in linking the 18.6 year modulation of tidal mixing and long-term SST change in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, doi:10.1002/2014GL061737.
- Osafune, S., S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi (2015): Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4903–4911, doi:10.1002/2015GL064538.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2006): Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, **111**, C05007, doi:10.1029/2005JC003277.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2010): Bidecadal variability in the Bering Sea and the relation with 18.6 year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, **115**, C02014, doi:10.1029/2008JC005110.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2012): Numerical study on the impact of the 18.6-year period nodal tidal cycle on water masses in the subarctic North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **117**, C05009, doi:10.1029/2011JC007734.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2013): Remote impacts of the 18.6 year period modulation of localized tidal mixing in the North Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**, 3128–3137, doi:10.1002/jgrc.20230.
- Parker, K. S., T. C. Royer, and R. B. Deriso (1995): High latitude climate forcing and tidal mixing by the 18.6-year lunar nodal cycle and low frequency recruitment trends in Pacific halibut (*Hippoglossus stenolepis*). *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, **121**, 447–459.
- St. Laurent, L. C., H. L. Simmons, and S. R. Jayne (2002): Estimating tidally driven mixing in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2106, doi:10.1029/2002GL015633.
- Tadokoro, K., T. Ono, I. Yasuda, S. Osafune, A. Shiimoto, and H. Sugisaki (2009): Possible mechanisms of decadal-scale variation in PO₄ concentration in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08606, doi:10.1029/2009GL037327.
- Tanaka, Y., T. Hibiya, and Y. Niwa (2007): Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10021, doi:10.1029/2007JC004172.
- Tanaka, Y., I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe, and S. Osafune (2012): Effects of the 18.6-year modulation of tidal mixing on the North Pacific bidecadal climate variability in a coupled climate model. *J. Clim.*, **25** (21), 7625–7642.
- 建部洋晶・長船哲史 (2018): 太平洋数十年規模気候変動と海洋潮汐 18.6 年周期変動との関連性. *海の研究*, **27**, 3–18.
- Tatebe, H., and I. Yasuda (2004): Oyashio southward intrusion and cross-gyre transport related to diapycnal upwelling in the Okhotsk Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2327–2341.
- Tourre, Y. M., B. Rajagopalan, Y. Kushnir, M. Barlow, and W. B. White (2001): Patterns of coherent decadal and interdecadal climate signals in the Pacific basin during the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2069–2072.
- Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, K. Misumi, D. Tsumune, and M. Wakatsuchi (2014): Simulation of high concentration of iron in dense shelf water in the Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 194–210, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.018.
- Watanabe, Y. W., M. Wakita, N. Maeda, T. Ono, and T. Gamo (2003): Synchronous bidecadal periodic change of oxygen, phosphate and temperature between the Japan Sea deep water and the North Pacific intermediate water. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (24), 2273, doi:10.1029/2003GL018338.
- Yasuda, I. (2009): The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Decadal oscillation reconstructed from tree-rings in western North America. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05605, doi:10.1029/2008GL036880.
- Yasuda, I., S. Osafune, and H. Tatebe (2006): Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL025237.

Bidecadal variability in ocean related to the 18.6-year modulation of tide-induced vertical mixing

Satoshi Osafune^{1*} and Yuki Tanaka²

Abstract

The 18.6-year modulation of the short-period tides related to the precession of the moon's ascending node probably modulates vertical mixing in the ocean through microscale dissipation processes of internal waves. It is hypothesized that the modulation of mixing contributes to the bidecadal variability in physical and biogeochemical variables in the North Pacific and its marginal seas. Previous studies support this hypothesis. However, the quantitative importance of this modulation remains far from clear. Even qualitatively, we do not understand well the mechanism linking the modulation of mixing and the bidecadal variability in the ocean. To verify the hypothesis, it is necessary to evaluate the quantitative importance of ocean variability as a result of the direct ocean response to the modulation of mixing, which requires us to quantitatively discuss the response to both atmospheric forcing variations and mixing modulation. One promising way to do this is via numerical experiments using a reliable ocean model that can reproduce both the mean states and temporal variations through realistic processes. It is also important to obtain more information about bidecadal variability based on observations.

Key words : 18.6 year nodal cycle, tidal mixing, bidecadal variability, long-term variability

(Corresponding author's e-mail address : osafune@jamstec.go.jp)

(Received 10 November 2016 ; accepted 19 May 2017)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2018)

¹ Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15 Natsusima-cho, Yokosuka, Kanagawa, 237-0061, Japan

² Graduate School of Science, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-0033, Japan

* Corresponding author : Satoshi Osafune
TEL : +81468679453
e-mail : osafune@jamstec.go.jp