

論文内容の要旨

Water-mass variability in the subarctic North Pacific in relation to 18.6-year tidal cycle

(潮汐 18.6 年振動に伴う北太平洋亜寒帯海域の水塊変動)

長船 哲史

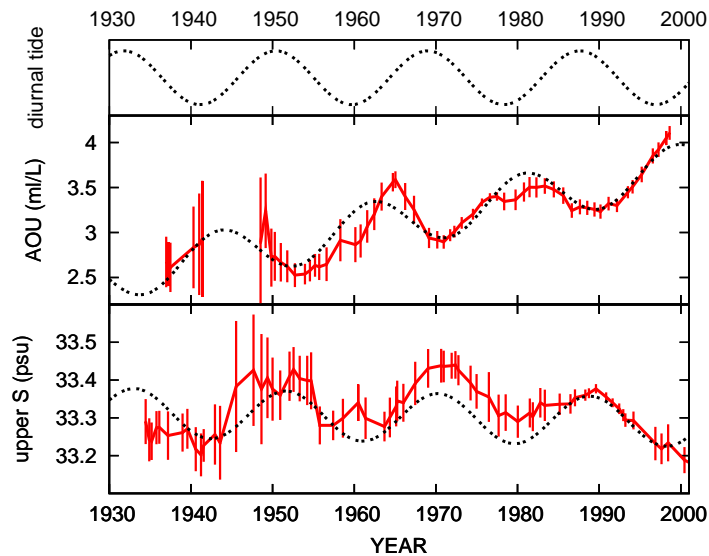
北太平洋周辺における海洋・気候の長期変動には、顕著な約 20 年周期変動が見られる (e.g. Minobe, 2002)。降水や気温の変動の他、水産資源にも同様の周期変動が現れているなど (Parker et al., 1995; Ishida et al., 2002)、社会的にも影響の大きな現象である。しかしながら、その発生メカニズムは明らかにされていない。海洋の変動に関しては大気変動によって引き起こされているとの考えが主流である。近年の研究により、西部北太平洋亜寒帯域において、冬季でも海面に露出することのない中層密度帯にも、みかけの酸素消費量 (AOU) やリン酸濃度等の約 20 年周期の変動が見られることが明らかになってきた (Ono et al., 2001; Andreev and Kusakabe 2001)。これらの変動も大気変動に起因する可能性が指摘されているが、大気と海洋中層の変動をつなぐメカニズムは明らかではない。

一方で、海洋の約 20 年周期変動を引き起こす要因の候補として、潮汐 18.6 年振動が挙げられる (Loder and Garrett, 1978; Royer, 2001)。これは、月の軌道傾斜角の変動に伴う起潮力の変化をさし、日周潮の平衡潮汐の振幅は最大で約 20 % 変調することが知られている (Doodson, 1921; Godin, 1972)。北太平洋亜寒帯域では、千島列島やベーリング海の周辺において、日周潮汐流による強い鉛直混合の存在が示唆されている (Nakamura et al., 2000; Foreman et al., 2006)。千島列島周辺における鉛直混合が、中層水形成において重要な役割を果たしているとの指摘もある (Nakamura et al., 2004)。したがって、潮汐 18.6 年振動に伴って鉛直混合強度が変動していれば、周辺海域の中層水塊に影響が表れる可能性が考えられる。

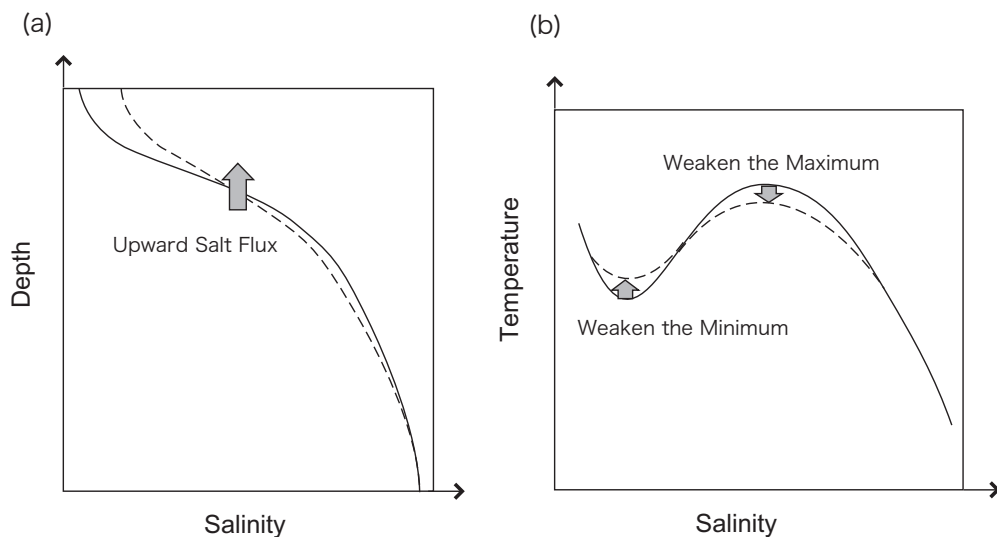
そこで、本研究では、北太平洋における海洋の約 20 年周期変動の実態を明らかにし、これらの変動が潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合の変動によって引き起こされているとの仮説を検証することを目的とした。これらの目的に対し、まず、歴史的海洋観測データ (WOD05) を用い、強混合域周辺における海洋表・中層における変動について解析を行い、水塊変動と潮汐混合変動の関連について議論を行った。次に、海洋大循環モデルを用いた数値実験を通じて、鉛直混合変動の影響を評価した。

本研究では、まず、先行研究により中層における AOU の約 20 年周期変動の存在が報告された親潮域に関して詳細な解析を行った。図 1 に親潮域中層における AOU の時系列を示す。WOD05 を用いたことで、先行研究よりも 20 年以上長い時系列を作成することが出来た。先行研究と同様、明瞭な約 20 年周期の変動を示しており、1970 年以前にも同様の変動傾向が続いていたことが明らかになった。この変動は、潮汐 18.6 年振動と同期しており、日周潮が強い時期に AOU が低い (溶存酸素濃度が高い) という対応関係があった。これは、日周潮が強い時期に、より大きな鉛直混合に伴って高酸素の表層水の取り込みが強化されたと考えれば解釈可能な変動である。

同海域において、表層の塩分や密度、中層の層厚や等密度面水温等にも潮汐 18.6 年振動と同期した約 20 年周期の変動を見出した。日周潮が強い時期に、表層が高塩 (図 1)・高密度 (非図示) であり、中層層厚が大きいという傾向があった。この海域では塩分成層しているため、鉛直混合によって上向き塩分フラックスが生じることを考えると (図 2 a)、混合が強い時期にこのフラックスが強化され表層が高塩化したと解釈出来る。表層密度に関しても同様の解釈が可能である。鉛直混合は上下層の海水を混合することで中間的な密度を持つ水塊を形成すると考えられるため、混合が強い時期に中層層厚が大きいことも整合的な結果であると言える。中層等密度面水温は、日周潮が強い時期に、水温極小 (中冷) 周辺が高温、水温極大 (中暖) 周辺が低温である傾向が見られた。鉛直混合は、鉛直的な極小・極大構造を削り取る効果があると考えられるので (図 2 b)、これらの変動も鉛直混合強度の変動によって解釈可能である。



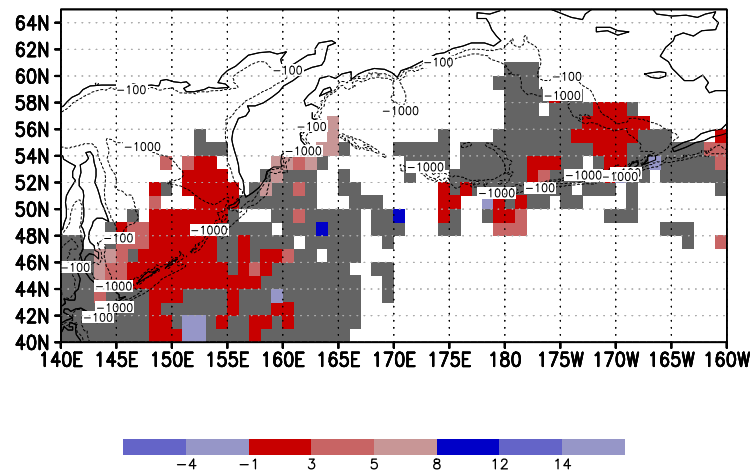
(図 1) 親潮域における時系列図。上から、潮汐 18.6 年振動に伴う日周潮の振幅、中層 $26.8\sigma_\theta$ におけるみかけの酸素消費量 (AOU)(ml/L)、表層塩分 (0-200m)(psu)。



(図 2) 鉛直混合による水塊変質の概念図

千島列島に接する親潮上流域やオホーツク海クリル海盆、アリューシャン列島やベーリング海陸棚域に接するベーリング海南西部・中南部など、強混合域に接するいくつかの海域においても、同様の約 20 年周期変動を見出した。表層の塩分・密度や中層層厚の変動は海域によらず、親潮域と同様の変動傾向を示した。

上述の日周潮が強い時期に表層が高塩であるという変動が、千島列島など強混合域を中心に下流方向に広がっている様子も捉えられた (図3)。



(図3) 表層塩分変動の潮汐 18.6 年変動に対するラグ (YEAR) の水平分布図。赤 (青) 色が日周潮が強い時に表層塩分が高い (低い) 海域を示す。18.6 年変動が有意でない海域を灰色で示す。

中層等密度面水温の変動が見られる密度帯は海域毎に異なるが、各海域における中冷・中暖構造と比較すると、オホーツク海クリル海盆を除く全ての海域で、日周潮が強い時期に中冷付近が高温・中暖付近が低温である傾向を示した。一方で、クリル海盆においては、日周潮が強い時期に等密度面水温が高い傾向が広い密度帯において見られた。この変動も、鉛直混合の間接的効果を考えれば解釈可能である。この海域の中層には、冬季の結氷過程に伴って高密度化した表層水が沈み込むことで形成される陸棚高密度水 (DSW) の影響を受けた水塊が存在している。表層高塩時に高塩な DSW が形成されると考えれば、日周潮が強い時期に等密度面上で高塩、すなわち高温な性質を持つことになる。

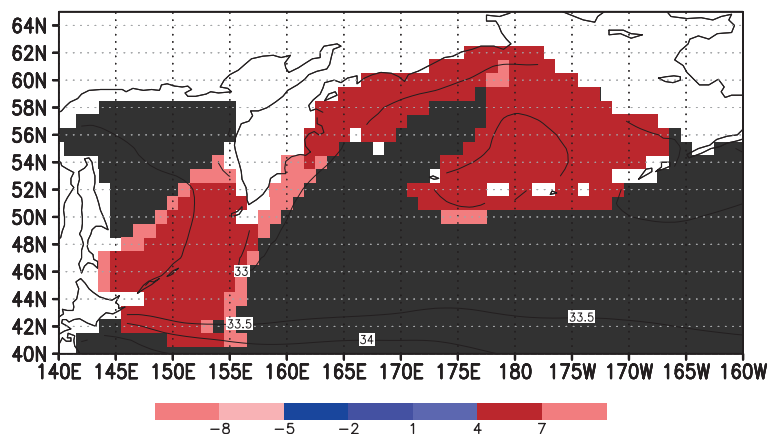
以上のように、表・中層水塊の約 20 年周期変動は、北太平洋亜寒帯域の広範囲で見られる一般的な現象であり、潮汐 18.6 年振動に伴う強混合域における混合変化によって解釈可能な空間分布や変動パターンを示していることが明らかになった。

北太平洋亜寒帯および亜熱帯における中層水の再現は、数値実験における課題の一つである。Nakamura et al. (2004) は、千島列島周辺における潮汐混合に対応して、 $200\text{cm}^2/\text{s}$ という非常に大きな鉛直拡散係数を用いる事で、オホーツク海における水塊の再現性を向上させた。しかし、その混合強度に関しては、海域平均で $8\text{cm}^2/\text{s}$ 程度に過ぎないとの見積もりもなされているなど (Tanaka et al., 2007)、未だ疑問の余地がある。また、北太平洋における中層水を再現するには、オホーツク海とベーリング海の両海域における水塊を再現することが重要であることが示唆されているが (e.g. Yamanaka et al., 1998)、ベーリング海周辺における鉛直混合を導入した実験例もない。そこで、鉛直混合の強度及び空間分布を変えた比較実験により鉛直混合と水塊の平均場との関係について考察した後、混合強度を変化させた振動実験を行った。本研究では、中層水塊形成における重要なメカニズムの一つと考えられている海氷形成を考慮した気候システム研究センターの海洋・海水結合モデル (CCSR Ocean Component Model: Coco) を使用した。

千島列島周辺のみで鉛直混合を考慮した場合と比較して、ベーリング海周辺における鉛直混合も考慮することにより、ベーリング海のみならずオホーツク海や北太平洋の広範囲における水塊の再現性が向上することが示された。鉛直混合により塩分躍層を弱化させることで冬季混合層の発達が促進され、効率良く鉛直水温極大が削られていたことが分かった。このことは、比較的小さな拡散係数 ($20\text{cm}^2/\text{s}$) を用いたより現実的な設定でも、強混合域を広範囲に分布させることで、効率的に水塊の再現性が向上する可能性が示唆している。

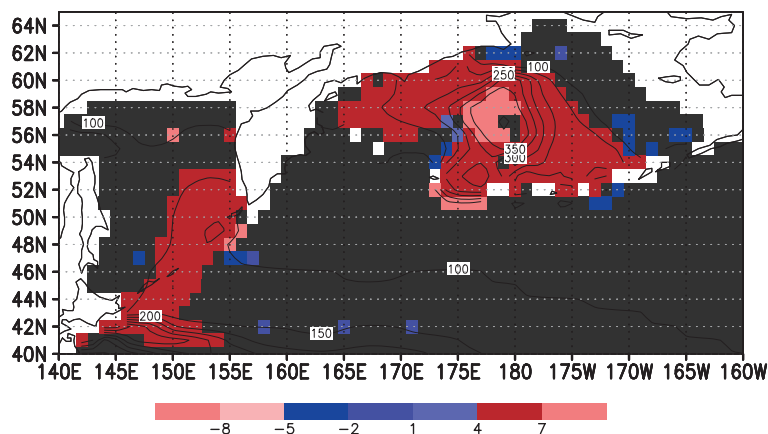
潮汐振動実験によって、混合が強い時期に表層が高塩である海域が強混合域を中心に下流方向へ広がっ

ている様子が再現された (図4)。モデル上での強混合域周辺における表層塩分変動は、拡散係数の変化によって生じた塩分偏差が、平均流によって移流されるという単純な仕組みによって説明出来ることが示唆された。平均混合強度が強い ($200\text{cm}^2/\text{s}$) と負のフィードバックがかかり変動が抑制されるのに対し、強度が比較的弱い時には ($20\text{cm}^2/\text{s}$) 効率よく変動が引き起こされていた。その結果、強混合域における平均鉛直拡散係数が $20\text{cm}^2/\text{s}$ の実験では、振幅 $3\text{cm}^2/\text{s}$ という比較的小さな変動によって、観測と同オーダーの変動が再現された。



(図4) モデルにおける表層塩分変動の潮汐 18.6 年振動に対するラグの分布図。赤 (青) 色が鉛直混合が強い時期に表層が高塩 (低塩) である海域に対応する。

等密度面水温に関しても、観測によって得られた描像と一致する変動パターンが再現された。水温極大 (極小) を削るという鉛直混合の直接的な効果によって説明される変動の他、オホーツク海における陸棚高密度水形成を通じた間接的な水温変動も再現されており、観測結果から示唆されていたメカニズムを支持する結果が得られた。この他にも、移流によって広がった表層塩分変動が、間接的に水塊変動を引き起こす可能性が示唆された。モデル上での季節躍層内の水温変動は、冬季混合層内の塩分変動を反映していた。また、表層塩分が高い時期に冬季混合層深度が大きいという傾向が見られた。



(図5) モデルにおける2月の混合層深度変動の潮汐 18.6 年振動に対するラグの分布図。赤 (青) 色が鉛直混合が強い時期に混合層が深い (浅い) 海域に対応する。

本研究により、潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合の変動が、北太平洋亜寒帯域における水塊の約 20 周期変動を引き起こすことが示された。大気変動に伴う海洋循環や混合の変動が間接的に海洋中層に影響を与えている可能性についても検討する必要があるが、本研究の結果は、鉛直混合の強度や時空間分布の実態をより明らかにしていくことの重要性を示唆している。