

— 総 説 —

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*

建部 洋晶^{1**}・長船 哲史²

要 旨

海洋潮汐と気候との関連性を調べるにあたり、太平洋数十年規模気候変動に関する観測及びモデリングの先行研究をまとめ、今後展開すべき研究の方向性を議論した。北太平洋中緯度気候は、現実には大気を介した熱帯からの影響を多分に受けている。また、観測結果からその存在が報告されている約 20 年周期の気候変動は、大気海洋結合系自励振動として、潮汐変動がなくとも生じると考えられている。数 100 年間にわたるプロキシデータには、潮汐変動に対応した 18.6 年周期成分が有意に検出される。しかし、これが潮汐に起因する気候変動のシグナルなのか、それとも単に局所的な潮汐の影響によるシグナルなのか、現時点での判断は難しい。海洋潮汐が気候変動を制御する一要因であることを実証するためには、モデリング研究に立脚したメカニズムの提示及び不確実性の定量化が望まれる。

キーワード：海洋潮汐変動、数十年規模気候変動、太平洋海盆

1. はじめに

全球深層海洋を数 1000 年の時間スケールで巡る熱塩循環は、深層対流域である両半球極域海洋を出発点とし、深層から表層への海水湧昇域である北太平洋を終着

点とする (Broecker, 1991; Marshall and Speer, 2012)。極域深層対流は、冬季海面冷却により形成された高密度な海水が表層から深層まで沈降することに伴って生じる。北太平洋での湧昇は、南大洋から赤道を越えて北上してきた密度の比較的高い深層海水が微細スケールの乱流に伴う鉛直拡散過程を介して浮力を獲得することで維持される。全球熱塩循環は、膨大な熱・淡水を輸送することにより密度の全球的な分布を決定し、気候の長期的な場を制御する。また、大気に蓄積された熱を効率的に深層へ隔離することで産業革命以降の人為起源温室効果ガスの増加に起因する地球温暖化を律速し、気候変動にも影響すると考えられている。

極域深層対流過程に関する物理過程及び観測的描像については一定の知見が得られている一方で、北太平洋全域の深層循環の実態は未だ十分に把握されていない。深

* 2016 年 11 月 10 日受領; 2017 年 4 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 気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
〒236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25

2 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

** 連絡著者: 建部 洋晶
TEL: 045-778-5630
e-mail: tatebe@jamstec.go.jp

層水湧昇量の空間的分布はもとより、南半球から北太平洋への深層水流入量についても観測に基づいた定量的議論は難しい。また、北太平洋深層水の湧昇を維持するために必要な海水の乱流鉛直拡散は、主に海底地形上を通過する順圧潮汐流及び大気擾乱の両者から海洋へ供給されたエネルギーが、内部重力波の非線形干渉を介して微細な乱流過程へカスケードダウンしてゆくことにより生じると考えられている（例えば、Munk and Wunsch, 1998; 日比谷, 2009）。しかし、海洋中の微細な乱流過程の海盆規模での直接観測は困難である。一方、1990年代半ばから活発に行われてきたモデリング研究、特に全球海洋大循環モデルを用いた研究によって、モデル内の鉛直渦拡散係数としてパラメータ化された海洋微細乱流過程は、全球熱塩循環を質的にも量的にも大きく制御することが報告されている（例えば、Hasumi and Sugino-hara, 1999; Tsujino *et al.*, 2000; Saenko and Merryfield, 2005）。しかしながら、比較対象とすべき観測データが限定されているため、パラメータ化によって得られた鉛直渦拡散係数の全球分布、モデル実験から得られた深層循環流量、などの妥当性は十分には検証されていない。

近年、投棄式流速計や深海用微細構造プロファイラーなどの鉛直的に高分解能な観測測器の開発に伴い、より広範な海域での深海乱流の直接観測や流速鉛直シアなどに基づく乱流強度の見積もりが可能となってきた。この結果、急峻な海底地形近傍や強潮流域（例えば、千島列島沿岸やインドネシア多島海など）において、これまで考えられてきたよりもはるかに強い海水鉛直混合の存在が明らかとなった（例えば、Hibiya *et al.*, 2006, 2007, 2009; Yagi and Yasuda, 2012; Yagi *et al.*, 2014）。また、大型計算機の発展とともに可能となった、分解能の極めて高い数値実験では、順圧潮汐による内部潮汐波の励起とその伝播過程が再現可能となり、これら物理過程の詳細な考察が行われるようになった（Nakamura and Awa-ji, 2004; Tanaka *et al.*, 2010）。観測、理論、モデリングが相補的に進展した結果、内部波の碎波に伴う潮汐エネルギー散逸率や鉛直拡散係数の全球分布も見積もられるようになった（例えば、St. Laurent *et al.*, 2002; 日比谷, 2009; Niwa and Hibiya, 2011, 2014; Whalen *et al.*, 2012; Waterhouse *et al.*, 2014）。さらには、得られた内部潮汐エネルギーの全球散逸率マップを全球海洋大循環モデル

に与え、全球熱塩・物質循環に対する微細乱流過程の影響をより詳細に検証する研究も行われている（例えば、Simmons *et al.*, 2004; Jayne, 2009; Saenko *et al.*, 2012; Oka and Niwa, 2013; Melet *et al.*, 2014, 2016）。

海洋微細過程に伴う海水の混合と全球熱塩循環とのつながりが観測・理論・モデリングの研究において統合的に議論され始めた中、2015年度から文部科学省・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）が始まった。冒頭で述べたように、北太平洋は全球深層海洋における熱塩循環の終着点にあたり、ここでの湧昇は中深層の栄養塩や炭酸系物質の表層への輸送を担うため、全球炭素循環を制御すると同時に、我が国周辺海域における海洋生態系の維持にも重要な役割を果たす。また、北太平洋の中でも特に北西海域は二酸化炭素の吸収能力が世界で最も高いことが知られている（Takahashi *et al.*, 2002）。OMIXの目的は、海洋立国たる我が国が主導して海水とそこに含まれる生物化学物質の鉛直混合を観測し、ここから得られた知見を理論・モデリングへ反映させ、海水の鉛直混合がいかなるプロセスを介して気候・海洋熱塩及び物質循環・生態系の維持に寄与しているのかを解明することである。また、本稿第2節及び第3節で紹介するように、太平洋海盆には約20年周期の気候変動が存在する。地球赤道面に対する月の軌道傾斜角は約18.6年周期で振動しており、海洋起潮力は同様の周期で変調される。このため、海洋潮汐の18.6年周期変動が微細スケールの乱流及び海水鉛直混合プロセスを介して、海洋大循環、ひいては上述の約20年周期の気候変動を制御している可能性がある。OMIXでは、10年以上の時間スケールにおける気候変動と潮汐及び水産資源変動との関連性も検証することになっている。本稿では、数十年規模気候変動に関する先行研究の成果をまとめるとともに、海洋潮汐18.6年周期変動と気候変動との関連性を検証する上で必要な問題点及び今後の課題を整理する。

2. 北太平洋の数十年規模気候変動

ここではまず、全球気候にどのような時間スケールの変動が存在するのかを整理する。Fig. 1に観測データに

基づく地表面気温及び海面水温偏差の時系列を示す。全球気候には数年から100年の時間スケール変動が存在し、先行研究で提示されているメカニズムもさまざまである。19世紀半ばから現在までの昇温傾向、20世紀初頭から中盤までの緩やかな昇温傾向及び中盤から1970年代にかけての寒冷化傾向、が最も長い時間スケール変動として確認できる。いわゆる地球温暖化に対応する前者の長期トレンドは、気候変動に関する政府間パネル（以下、IPCC）第5次評価報告書において疑う余地のない観測的事実であると述べられている（IPCC, 2013）。特にここ数十年間の昇温は、人為起源温室効果気体の増加が要因である可能性が極めて高いと結論されている。温室効果気体に限らず、人為起源エアロゾル・太陽放射・火山噴火など、地球気候システムの外からの強制により駆動される気候の変動は、しばしば外部変動と呼ばれ、この意味で地球温暖化は外部変動と認識されている。一方、地球気候システムに内在する自励振動は、内部変動と呼ばれる。20世紀初頭から中盤の昇温とその後の寒冷化については、外部変動と内部変動との両面から説明が試みられている。しかし、どちらの変動が支配的要因なのかの結論は未だに出ていない。気候モデルを用いた研究に基づく外部変動説では、昇温は太陽活動の活発化とこれに伴う大気循環の変化、寒冷化は火山活動の影響（Fig. 1の灰色の影）として解釈されている（Meehl *et al.*,

2003, 2004; Nozawa *et al.*, 2005)。内部変動説では、西部熱帯太平洋の珊瑚に含まれるマンガン/カルシウム比から再構成された熱帯貿易風データに基づき、熱帯及び中緯度太平洋における数十年スケールの気候変動として解釈されている（Thompson *et al.*, 2014）。

これら数十年から100年スケールの変動に加え、全球気候変動には数年及び10年から30年程度の、より短周期な変動成分も見られる。前者のうちの多くはエルニーニョ・南方振動（El-Niño Southern Oscillation; 以下、ENSO）と関連した内部変動である（例えば、1982/83年、1997/98年）。後者は太平洋十年規模振動（Pacific Decadal Oscillation, 以下、PDO; Mantua *et al.*, 1997; Mantua and Hare, 2002）、太平洋数十年規模振動（Interdecadal Pacific Oscillation, 以下、IPO; Power *et al.*, 1997）及び大西洋数十年規模振動（Atlantic Multidecadal Oscillation, 以下、AMO; 例えば、Schlesinger and Ramanakutty, 1994）などと関連した変動であり、全球に占める海盆面積を考慮すると、全球地表面気温変動にはIPOの影響が反映されやすい傾向にある。未だ議論の余地はあるが、例えばハイエイタス（Hiatus）として知られる2000年以降の気温上昇の一時的な停滞は、直接的にはIPOの負の位相時期に対応して生じていると認識されている（例えば、Meehl *et al.*, 2011; Kosaka and Xie, 2013; Watanabe *et al.*, 2014）。

北太平洋の数十年規模気候変動に関する研究は、歴史的観測データの蓄積とデータの補正・デジタル化に伴い、1990年代半ばから活発になった。Minobe (1997) は、約100年間の海面気圧及び地上気温データに、春冬季のアリューシャン低気圧および春季の北米西部気温の変動に伴う50年から70年程度の有意な周期変動を見出した。Overland *et al.* (1999) は、Minobe (1997) と同様のデータから冬季アリューシャン低気圧の20-30年周期変動を報告している。彼らは、この変動が、北太平洋で見られる大気の典型的な気圧配置パターンである太平洋・北米（Pacific North America）パターン（PNAパターン; Wallace and Gutzler, 1981）の指標および北極振動（Arctic Oscillation, 以降、AO; Thompson and Wallace, 1998）の指標と関連することを示している。Minobe *et al.* (2002) は、約20年周期成分のアリューシャン低気圧変動の中心が、20世紀初頭から中盤にかけて南方へ移動

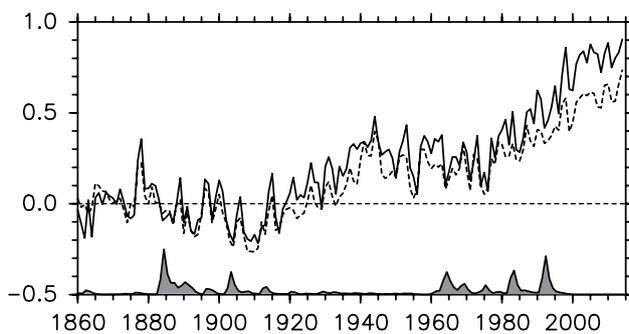


Fig. 1. Time series of global-means of the surface air temperature (solid; HadCRUT4) and the sea surface temperature (dashed; COBE-SST) anomalies with respect to the 1850-1999 mean. Gray shading represents volcanic activity measured by the global-mean optical depth corresponding to volcanic aerosols.

しながら、その振幅を増していることを報告している。さらに Minobe (1999) は、春冬季アリューシャン低気圧が示す 20 年程度の周期変動と 50 年程度の周期変動との位相反転時期が同期しており（なお、変動周期は変調しており、平均するとそれぞれ 17 年及び 50 年）、その結果、50 年周期の半分であり 20 年周期の 1.5 倍の周期である 30 年程度の周期で、いわゆる気候のレジームシフト (1922/23, 1948/1949, 1976/77 年) が起きていることを示した。興味深いのは、両周期成分は季節性を示すことである。特に北米西部の地表気温変動では、50 年周期成分は春に、20 年周期成分は冬にのみ顕著である (Minobe, 2000)。このため、これらの変動はそれぞれ異なる力学で駆動されていると考えられる。

次に、海洋潮汐 18.6 年周期変動と北太平洋の気候変動との関連性について触れた研究を紹介する。潮汐変動に対応した海洋及び大気の変動は、沿岸に近い海域では古くから報告されており（例えば、Loder and Garrett, 1978）、また、米国の気温や降水等のデータに 18.6 年周期の変動を検出した研究も存在する（例えば、Currie *et al.*, 1988）。しかしながら、北太平洋海盆規模の気候変動との関連性が指摘されたのは最近である。Yasuda *et al.* (2006) は、ここ数十年間のアリューシャン低気圧、北太平洋海面水温、千島列島沿岸の等密度面深度及び見かけの酸素消費量データを解析し、日周潮汐の 18.6 年周期変動とこれに伴う海水の鉛直混合強度の変化及び北太平洋数十年規模気候変動との相関関係を見出だした。彼らが千島列島沿岸に着目した理由は、この海域において日周潮汐に起因する海水の非常に強い鉛直混合が存在する（例えば、Nakamura and Awaji, 2004; Yagi and Yasuda, 2012; Yagi *et al.*, 2014）ためであり、また、ここで形成される低温、低塩分、低渦位の水塊が、北太平洋亜熱帯海域に広く分布する北太平洋中層水の起源水となっている（例えば、Yasuda, 1997; Nakamura *et al.*, 2004, Tatebe and Yasuda, 2004）ためである。彼らの解析によると、18.6 年周期変調により日周潮汐が強い（弱い）時期から 4 年程度遅れて日本東方海域で正（負）、北米沿岸で負（正）となる海面水温偏差の空間パターンが現れ、同時にアリューシャン低気圧は弱まる（強まる）傾向にある。実際、Fig. 2 に示した PDO 指数及び NPI の時系列が、1920-30 年代及び 1970 年以降において潮汐との間に上述の関

係性を持つことが確認される。なお、1920 年以前と 1930 年代後半から 1960 年にかけては、潮汐と PDO 指数および NPI の変動の位相関係は、Yasuda *et al.* (2006) が指摘した位相関係と必ずしも一致していない。Newman *et al.* (2016) が総括しているように、10 年から数 10 年規模の北太平洋気候変動は、いくつかの複合的要因によって駆動されている。日周潮汐の 18.6 年変調は、これら要因の候補の 1 つに過ぎない。このため、Yasuda *et al.* (2006) の報告した位相関係は常に成立しているとは限らないと考えられる。

約 20 年周期で生じるこのような気候変動パターンは、PDO の空間パターンと類似している。Yasuda *et al.* (2006) の仮説では、潮汐の強弱に応じて生じる千島列島及び日本沿岸の等密度面深度の変化が、黒潮流量及びこれに伴う北向き熱輸送量に影響を与え、結果として日本東方海域の海面水温が変わることで、大気海洋相互作用を介して北太平洋中緯度における気候変動を制御しうるとしている。なお、千島列島周辺等における局所的な潮汐変動と関連した水塊変動と、これに伴う水温・塩分偏差の伝搬過程について調べた先行研究の紹介や、黒潮流域における水温変動に占める潮汐起因成分の割合に関する定量的な議論は、長船・田中 (2018) に詳しく記述されている。Yasuda *et al.* (2006) が解析したデータの期間は 18.6 年周期変動を論じるには短く、また、提示した

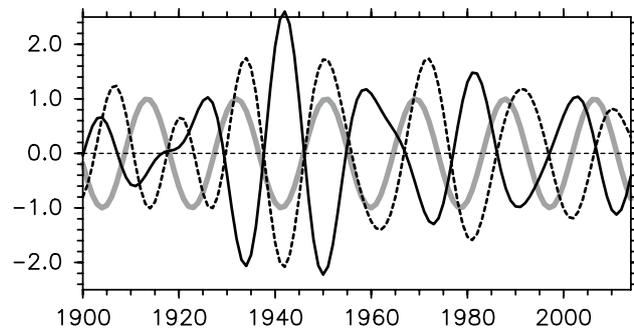


Fig. 2. Time series of band-pass filtered (12–25 yr) wintertime (December–February) PDO index (black solid), NPI (black dashed), and diurnal tide cycle (gray solid). COBE-SST and NPI of Trenberth and Hurrell (1994) are used. Anomalies are defined with respect to 1900–2014 mean.

仮説はデータの統計解析結果を定性的に説明しうるにすぎない。Yasuda (2009) は統計的に有意なシグナルの検出を目的として、北米沿岸における木の年輪から再構成された 300 年を越える期間でのプロキシ PDO 指数 (D'Arrigo *et al.*, 2001) を解析し、北太平洋中緯度に 18.6 年周期の有意な気候変動が存在すること、また、PDO 指数は、日周潮汐の 18.6 年周期変調成分が最も強くなる時期から 3-5 年後に負偏差となること、を示した。Minobe (1997) は、統計的に有意ではないため陽には述べていないが、彼の北米西部春季地表面気温データの解析結果にも、18.6 年周期にスペクトルピークがあることを確認出来る。なお、Yasuda *et al.* (2006) と Yasuda (2009) で指摘されている 18.6 年周期の日周潮汐変調と PDO 指数及び NPI とのラグを説明するメカニズムとして、千島列島周辺における潮汐変動によって励起された沿岸波動の赤道への伝播、あるいは、北太平洋中緯度における水温偏差の東への移流過程、などがモデリング研究から提案されている (第 3 節で詳述)。

数 100 年を越えるプロキシデータを解析し、海洋潮汐変動と海盆スケールの気候変動との関連性を調べた研究は Yasuda (2009) 以外にも幾つかある。Wilson *et al.* (2007) は、アラスカ湾岸で採取された木の年輪データから再構成した地表面気温時系列データから、北太平洋中緯度気候の有意な周期変動を 18.6 年を含む極めて狭い周期帯に検出している (正確には、1514-1999 年間では 17.7-19.7 年の周期帯、713-1847 年間では 18.1-19.0 年の周期帯)。D'Arrigo *et al.* (2015) は、根室で採取された木の年輪データから再構成した地表面気温時系列データには、18.6 年周期の有意なピークがあることを報告している。この変動について、彼らは西部北太平洋黒潮・親潮混合水域における水温フロントの南北移動と、これに付随する日本近海における局所的な大気海洋相互作用との関連性を示唆している。また、オホーツク海及び千島列島周辺における潮汐変動とこれに伴う海面水温変動が、より局所的な気温変動ひいては木の成長過程へ与える影響についても言及している。なお、上の 2 つの解析結果は、潮汐変動と北西太平洋域の地表面気温変動との関連性を示唆するのにとどまっており、主要分潮のどれが重要であるかなど、メカニズムにつながる結果は示されていない。有意なスペクトルピークについての記述はないが、

Mckinnel and Crawford (2007) は、過去 400 年を越える期間での北米南西部の木の年輪データから再構成した地表面気温プロキシデータを解析し、18.6 年周期で変調される日周潮汐が最も強い時期から 2-4 年後に PNA 指数が負となる傾向を示した。なお、PNA 指数は北太平洋上の大規模風系変動を反映する指数として知られており、この指数が負 (正) の場合、アリューシャン低気圧は平年よりも弱 (強) 化傾向と定義されている。

ここに挙げた研究成果のうち、Mckinnel and Crawford (2007)、Wilson *et al.* (2007) 及び Yasuda (2009) は、海盆スケールの気候変動に伴う地表面気温変動がプロキシデータに現れていると報告している。一方、D'Arrigo *et al.* (2015) は、北西太平洋あるいは北海道周辺における局所的な大気海洋結合過程に伴う気温変動がプロキシデータに現れている可能性があることを示唆している。このような解釈の差異は、プロキシデータが北太平洋規模の気候変動をどの程度代表しているのか、という問題を想起させる。18.6 年周期の気候変動の存在を指摘した先行研究で使用されているプロキシデータの出典 (具体的には、Biondi *et al.*, 2001; D'Arrigo *et al.*, 2001; D'Arrigo *et al.*, 2015) を調べてみると、プロキシデータの基となる木の年輪データなどは全て北米大陸あるいは日本北部の沿岸に近い場所で採取されていることに気付く。沿岸潮汐の変動に伴う海面水温・地表面気温の局所的な変動は古くから指摘されており (例えば、Loder and Garrett, 1978)、この影響がプロキシ PDO 指数などに現れている可能性がある。プロキシデータが海盆規模の気候変動をどの程度代表しているのか検証する必要があるかもしれない。

一方、約 20 年周期の気候変動をもたらす外的要因の候補として、海洋潮汐 18.6 年周期変動以外にも Hale cycle と呼ばれる太陽放射の約 22 年周期変動が挙げられる。Cook *et al.* (1997) は、北米西部における木の年輪データから 1700 年以降の干ばつ指数のプロキシデータを再構成し、19.2 年と 22.2 年の周期成分に顕著なスペクトルピークを検出した。干ばつ指数には約 20 年周期の変動があり、この変動はさらに長い周期で変調している。彼らは、潮汐変動に関連するであろう 19.2 年周期の変動と Hale cycle に関連するであろう 22.2 年周期との重ね合わせにより、前述の変調が生じていることを示唆している。

Yasuda (2009) は、プロキシ PDO 指数に見られる 18.6 年周期の変動がさらに長周期な成分により変調されることを示している。したがって、このような変調もまた、Hale cycle など近い周期帯の異なる変動との重ね合わせで説明される可能性がある。

いずれにせよ、数 100 年を越える長期のプロキシデータをを用いない限り、18.6 年という特定周期の有意なシグナルを検出することは難しい。したがって、観測に基づくデータ解析のみから、潮汐変動と気候変動との関連性及びそこに介在するメカニズムを同定するのは困難である。

3. 太平洋海盆における数十年規模気候変動

北太平洋の数十年規模気候変動は、他の海盆の変動と必ずしも独立しておらず、むしろ大気を介して伝えられる熱帯からのシグナルの影響を多分に受けていると考えられている。本節では、まず、熱帯変動に対する北太平洋中緯度気候変動の従属性について論じた先行研究を観測及びモデリングの両面から紹介する。次に、熱帯及び太平洋海盆全体における気候変動の周期性に関する観測的研究について触れ、海洋潮汐の 18.6 年周期変動と気候変動との関連性を調べた研究を紹介する。

Nitta and Yamada (1989) は、1970 年代から 80 年代に発生した、熱帯太平洋海面水温上昇、熱帯対流活動の変化、及び大気テレコネクションを介したアリューシャン低気圧の強化について報告している。より長期的な観測データでも、このような熱帯変動と北太平洋中緯度気候変動との関係性は確認できる。Minobe (1999) の冬季北太平洋指数時系列 (North Pacific Index, 以下、NPI) を Thompson *et al.* (2015) の赤道貿易風偏差時系列と比較すると、NPI に顕著な 1920 年代半ば、1940 年代終盤、1970 年代半ばの気候レジームシフトが、赤道貿易風偏差の符号反転期とよく対応していることが分かる。観測データから定義された IPO 指数も同様の符号反転を示しており、20 世紀初頭から 1970 年代半ばにかけて出現した全球平均地表気温の昇温傾向と寒冷化に対する内部変動の寄与が報告されている (Thompson *et al.*, 2015)。推測の域を出てはいないが、Minobe (1997) は、太陽活動に伴う熱帯海水温の変動と北太平洋における 50 年周期の

気候変動との関連性を挙げている。また、Evans *et al.* (2001) は、約 300 年間のプロキシデータの解析から、レジームシフトに限らず、数十年規模気候変動においても、熱帯変動が北太平洋中緯度変動に先行していることを報告している。

北太平洋の気候に対する大気を介した熱帯の寄与は、数値モデル実験や観測データ解析に基づく多くの先行研究で論じられており、その中でも特に先駆的な研究として Lau (1997) の研究がある。彼は、準全球 (40°S-60°N; GOGA 実験)、熱帯太平洋 (25°S-25°N; TOGA 実験)、北太平洋中緯度 (25°N-55°N; MOGA 実験) でのみ、年々変動する海面水温データで駆動した大気大循環モデル実験を 1946 年から 1988 年までの間で実施した。熱帯太平洋の気候変動を代表する時系列として 5°S-5°N, 180°-90°W の海面水温領域平均値、中緯度を代表する時系列として 27°N-45°N, 170°E-146°W の海面水温領域平均値をそれぞれ定義し、前者が顕著に高く、後者が顕著に低い時期と、この逆になっている時期の北太平洋上 500 hPa 高度の差を調べ、GOGA 及び TOGA 実験でのみ、観測と整合的な PNA パターンの気圧配置が再現されるという結果を得た。このため、北太平洋の気候変動は熱帯からの影響で概ね決まると結論している。ただし、気圧配置は観測と整合的であるが、両実験とも気圧偏差の振幅は観測の半分程度と過小評価されている。その原因として、彼の研究で使用された大気モデルの水平解像度が 600 km と非常に粗く、移動性大気擾乱から大規模循環へのフィードバックが過小評価されていること、近年、注目を集めている海洋水温フロントを介した移動性大気擾乱の増幅過程 (例えば、Nakamura *et al.*, 2004; Taguchi *et al.*, 2009) が適切に表現されていないことなどが原因として挙げられる。また、大気海洋結合過程が考慮されていないことも要因かもしれない。例えば、Tanimoto *et al.* (2003) や Taguchi *et al.* (2012) は、黒潮続流で形成された海面水温偏差とアリューシャン低気圧とが、大気海洋相互作用を介して互いに成長することを示すとともに、この正のフィードバック過程に対する海洋水温フロントの重要性を論じている。これらの点については、高解像度大気大循環モデルあるいは大気海洋結合モデルに基づく再考察が待たれる。

大気を介した熱帯太平洋からの影響は、北太平洋のみ

ならず全球に及ぶことも示されている。Kosaka and Xie (2013) は、観測データまたは将来シナリオに基づく外部強制のみで駆動した気候モデル実験と、外部強制に加えて東部熱帯太平洋海面水温を観測値へ拘束した実験の2種の実験を1950年から2012年までの間、それぞれ10個のアンサンブルメンバーで実施した。地球温暖化に伴う全球気温の昇温は、両実験で観測と整合的に再現されている。しかし、内部変動に伴うと考えられる数年から数十年規模変動は、後者でのみ再現されている。このことは、東部熱帯太平洋の海面水温変動及び熱帯対流活動の変動が、全球地表面気温変動に含まれる内部変動成分をコントロールしていることを意味する。実際、2000年以降のハイエイタス期における冬季地表面気温の線形トレンドは、空間的にも観測とよく一致している。彼らはまた、19世紀まで遡った実験の結果から、過去の全球的な数十年規模気候変動における熱帯の重要性を指摘している (Kosaka and Xie, 2016)。

多くの先行研究で、北太平洋中緯度気候変動の熱帯に対する従属性が指摘されている。しかし、熱帯太平洋と北太平洋の気候変動は、常に連動して同様の周期性を示すのかと言えば、必ずしもそうではない。PDO及びIPO指数が示す変動の卓越ピークの周期は、それぞれ10-20年周期、20-30年周期と異なっており、PDOをIPOの一部として単純に解釈してしまうことの危険性が指摘されている (望月, 2015)。実際、気候モデルを用いた幾つかの先行研究では、北太平洋中緯度固有の数十年規模気候変動の存在が指摘されている。年々から10年規模の変動周期に関する Nakamura *et al.* (1997) の観測データ解析によると、熱帯を含む太平洋海盆の気候変動のうち、7年よりも長い周期成分では、黒潮・親潮混合水域のみで海面水温のシグナルが顕著であるのに対し、7年よりも短い周期成分では、熱帯と中緯度の両方にシグナルが検出され、かつ、中緯度シグナルの中心は混合水域ではなく、やや南東の亜熱帯フロント周辺に位置する。これらのことは、北太平洋中緯度域の変動が熱帯の変動に完全には従属していないこと、北太平洋中緯度で閉じた数十年規模気候変動が存在しうること、などを示唆している。

大気を介した熱帯から北太平洋中緯度へのテレコネクションとは逆に、海洋を介した中緯度から熱帯へのテレコネクションに関する先行研究も存在する。Gu and Phi-

lander (1997) は、南北太平洋中緯度における大気海洋結合過程で生じた亜表層水温偏差が、等密度面上での移流過程により、10年以上の歳月をかけて熱帯まで伝播し、これが遅延振動子の役割を果たすことで、太平洋海盆の数十年規模気候変動が駆動されるという仮説を立てた。しかしながら、後の観測的研究やモデリング研究の結果は、北太平洋から熱帯へ水温偏差が伝播するという仮説には否定的である (例えば、Lu and McCreary, 1995; Schneider *et al.*, 1999)。Giese *et al.* (2002) は、大気再解析データで駆動した海洋大循環モデル実験を実施し、南太平洋の亜熱帯海域亜表層における水温偏差が赤道域へ伝播し、海面へ露出することで熱帯水温が変わり、結果的に1976年の北太平洋気候シフトが引き起こされていた可能性に言及している。Luo and Yamagata (2001) や Nonaka and Sasaki (2007) も同様のことを推察しており、最近では、南太平洋の海洋プロセスこそが遅延振動子の役割を果たしている、との認識が広まっている (例えば、Luo and Yamagata, 2003; Tatebe *et al.*, 2013)。なお、数年規模の変動では、北太平洋振動 (例えば、Rogers, 1981; Linkin and Nigam, 2008) と呼ばれる冬季西部中緯度太平洋上における非対称な海面気圧偏差分布に伴って生じる北太平洋亜熱帯での海面水温偏差が、風-蒸発-海面水温間の大気海洋相互作用系フィードバック (WEBフィードバック) 及び海洋傾圧ロスビー波の伝播を介して、夏季から冬季における ENSO の発達を促すことが指摘されており (Seasonal Footprinting Mechanism; Alexander *et al.*, 2010)、中緯度から熱帯への影響も重要である。

上述のプロセスに加えて、太平洋・大西洋の海盆間相互作用過程や、人為起源エアロゾル排出量の変動も、太平洋における数十年規模気候変動を議論する上で無視できない (例えば、Booth *et al.*, 2012; McGregor *et al.*, 2014; Chikamoto *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2016; Takahashi and Watanabe, 2016)。北太平洋中緯度気候の変動メカニズムをより深く理解するためには、他の海盆 (これは熱帯に限らず、北極域や大西洋も含む) からの大気を介した影響、南太平洋における海洋力学過程なども同時に調べる必要がある。実際、近年の PDO に関する総括的研究 (Schneider and Cornuelle, 2005; Newman *et al.*, 2016) では、北太平洋中緯度気候変動は単一の物理

プロセスのみで説明されるものではなく、ENSOに伴う中緯度へのテレコネクション、アリューシャン低気圧変動の海洋応答に伴う赤色化、黒潮・親潮の変動に伴う大気海洋結合過程、などの異なる時空間特性を持つ複数プロセスの組み合わせにより、現実のPDOが形作られていることが述べられている。

次に、実際の観測データまたはプロキシデータから同定されている、熱帯あるいは熱帯を含む太平洋海盆における数十年規模気候変動の周期性について述べる。White and Cayan (2000) は、20世紀に観測された熱帯海面水温データに10年及び24年周期の卓越変動があることを報告している。Tourre *et al.* (2001) は、太平洋海盆全体の20世紀における海面水温及び海面気圧データについての特異値分解によって、12-25年及び9-12年の周期帯に含まれる16.7年及び11.2年の有意なピークを検出している。D'Arrigo *et al.* (2005) は、熱帯変動を代表するNINO3海域(5°S-5°N, 150°-90°W)における海面水温データを北米南西部の木の年輪データから再構成した。彼らは、過去およそ600年間の時系列データから、太陽活動に伴う100年規模のENSO振幅変動及び90%の信頼限界で有意な約10年周期変動を検出した。しかし、20年周期周辺での有意な変動は検出していない。Tierney *et al.* (2015) は、過去約300年間の珊瑚データから再構成した熱帯太平洋の海面水温プロキシデータの解析を行った。彼らの結果では、東部熱帯太平洋でTourre *et al.* (2001) と整合的な16.7年周期に有意なピークが、また、西部熱帯太平洋では20-30年の周期帯にやや不明瞭なピークが、それぞれ検出された。

ここまでで紹介した熱帯または熱帯を含む太平洋海盆の気候変動に関する観測研究では、太平洋海盆規模気候変動における18.6年周期成分についての言及はない。しかしながら、熱帯太平洋の気候変動のみに着目し、18.6年周期に有意ではないが明瞭なスペクトルピークを見出した研究、あるいは、海洋潮汐変動との関連性を報告した研究は、わずかながらであるが存在する。近田 (2012) は、Stahle *et al.* (1998) が北米大陸熱帯域及びインドネシアの木の年輪データから再構成した1706-1977年間の北半球冬季における南方振動指数(Southern Oscillation Index; SOI) 時系列を解析し、18.6年周期に有意ではないものの明瞭なスペクトルピークが存在することと、SOI

は日周潮汐の18.6年周期変動が最も強い時期から4-5年後に正偏差となること、を見出した。なお、一般に、SOIが負(正)偏差のときに熱帯太平洋はエルニーニョ(ラニーニャ)傾向であることが観測的事実として知られている。Cervery and Shaffery (2001) は、SOIと月の軌道傾斜角とが正相関で変動することを示した上で、海洋潮汐18.6年周期変動との関連性を議論している。ただし、SOIの変動と潮汐変動との間の時間的ラグや分潮には言及していない。

前節で紹介したYasuda (2009) は、プロキシPDO指数における18.6年周期の有意なピーク及び日周潮汐強度とPDO指数との3-5年ラグにおける負相関を報告している。また、Mckinnel and Crawford (2007) は、PNA指数と日周潮汐強度との2-4年ラグでの負相関を示している。Yasuda (2009) とMckinnel and Crawford (2007)、近田 (2012) の解析結果を合わせて考えると、日周潮汐が強い(弱い)時期から数年後に熱帯太平洋の海面水温偏差は負(正)となり、北太平洋中緯度の海面水温偏差は正(負)となる。これはIPOの負(正)位相期における海面水温偏差及び気圧偏差の空間パターンと類似している。ここで留意すべきは、上で紹介した研究の全てが日周潮汐強度の変動にのみ着目している点である。天文学的に求められる起潮力ポテンシャルや観測及び潮汐モデルから得られた順圧潮汐の振幅分布及び内部波に伴う潮汐エネルギーの散逸率分布によると、中高緯度では日周潮が、低緯度では半日周潮が、それぞれ卓越する(例えば、Egbert *et al.*, 1994; Niwa and Hibiya, 2011)。一方、主要分潮 K_1 , O_1 , M_2 の18.6年周期変動成分の振幅は、平均振幅に対して、それぞれ11%, 18%, 35%であり、半日周潮の変調成分は、日周潮のそれと比べて顕著に小さい(Loder and Garrett, 1978)。また、半日周潮の18.6年周期変動成分は日周潮と逆位相の変動を示す。このため、 K_1 , O_1 , M_2 を合わせた内部波エネルギー散逸率の18.6年周期成分は、中高緯度で顕著な振幅を持つ一方、低緯度では逆位相の比較的小さな振幅を持つにとどまる(Tanaka *et al.*, 2012)。したがって、中緯度気候変動に対する熱帯気候の優位性を合わせて考えると、太平洋中高緯度における日周潮汐変動に伴って生じる海洋変動が、移流あるいは波動伝播などの海洋力学を介して、熱帯水温及び大気へ影響を与え、大気テレコネクションを

介して北太平洋中緯度における気候変動を駆動あるいは制御することにより、潮汐変動と関連した IPO が現れている可能性がある。実際、先駆的なモデリング研究では、18.6年周期の海洋潮汐変動が熱帯を含む太平洋海盆における気候変動の周期性を制御することが示されている。Hasumi *et al.* (2008) は、日周潮汐が卓越する千島列島沿いの海水鉛直混合を鉛直渦拡散係数として気候モデルへ与え、これを平均値の30%の振幅、18.6年の周期で変動させることにより、潮汐混合の気候に対する影響を調べた。彼らは、千島列島付近での潮汐変動に伴って生じる沿岸波動が赤道へ達することで水温偏差を作り出し、これが大気を介して中緯度気候変動を変えることで、気候モデルで表現される IPO の卓越周期が12年程度から18.6年へ遷移することを示した。ただし、海洋潮汐が気候変動を駆動しているわけではなく、潮汐がペースメーカーとして働き、モデルの気候システムに内在する数十年規模変動の位相を制御していることに留意しなければならない。また、彼らの結果では、日周潮汐の最も強い時期から約6年後に、熱帯太平洋（北太平洋中緯度）において海面水温の最大負（正）偏差が出現している。また、約6年のラグは、中緯度から赤道に至る海洋波動の伝搬時間で説明される。Yasuda (2009)、近田 (2012) のプロキシデータ解析で示された約3-5年の時間的ラグに比べるとやや遅れてはいるが、日周潮汐強度と IPO (あるいは PDO) との位相関係は整合的である。なお、モデル結果に見られる沿岸波動は、現状、観測データからは検出されていない。このことは、Hasumi *et al.* (2008) のプロセスを検証する上で、今後の課題である。Tanaka *et al.* (2012) は、気候モデルにおける潮汐の取り扱いをより精緻化し、順圧潮汐モデルから見積もられた内部潮汐波エネルギー散逸率の全球マップを基に、鉛直渦拡散係数を診断している。彼らは、日周潮汐の18.6年変動と北太平洋中緯度気候変動との関連を示しているが、熱帯に有意なシグナルを検出していない点で、Hasumi *et al.* (2008) の結果と大きく異なる。彼らの結果では、千島列島付近における日周潮汐変動に伴う海水の混合強度変動によって形成された水温偏差が、日本東方海域まで移流され、大気海洋結合過程を介して北太平洋中緯度大気を変えることにより、18.6年周期の気候変動が現れている。なお、両研究とも、低緯度海大陸周辺における半日周潮

の18.6年周期成分の影響を議論していない。海大陸周辺海域では大気対流活動が活発であり、ここでの潮汐変動に伴う局所的な水温変化もまた、熱帯及び中緯度太平洋気候変動を考える上で重要である。しかしながら、前述のように、低緯度における半日周潮18.6年周期変動の振幅は、中高緯度の日周潮汐のそれと比べて顕著に小さい。このため、上述のモデル実験では、その影響が不明瞭であると考えられる。

海洋潮汐18.6年変動と気候変動との関連を調べたモデリング研究は、現状では、ここに紹介した2つしか存在しない。両研究では、同じ気候モデルを使用しているにもかかわらず、潮汐変動に伴って現れる気候変動パターン及び提示されたメカニズムは異なる。Tanaka *et al.* (2012) は、両モデルにおける千島列島周辺での内部潮汐波エネルギー散逸率あるいは鉛直渦拡散係数の鉛直プロファイルの違いに起因する沿岸波動伝搬特性の違いが、気候変動パターンの違いをもたらしている可能性に言及している。しかし、気候モデルを用いた研究を行う場合、実験結果の差異をもたらすであろう要因はこれだけではない。気候モデルのパフォーマンスは、陽に解像することの出来ない物理過程のパラメーター化手法のうちでも、特に積雲対流過程・放射過程・雲微物理過程のパラメーター化に大きく依存する（具体的には、ENSO やこれに伴う北太平洋中緯度気候変動パターン、熱帯降水系・中緯度偏西風の気候場など、多岐にわたる。詳細は IPCC 第5次評価報告書第9章を参照）。このことは、潮汐の取り扱い方を同一とした場合でも、異なる気候モデルで実験を実施すれば、得られる結果が変わりうることを意味する。海洋潮汐変動と気候変動との関連性について、そもそもそのような関連性が存在しうるのか否かも含め、現時点でのモデリング研究に基づいて結論を出すのは早計であろう。

4. まとめと議論、及び今後の研究展開

海洋潮汐18.6年変動と気候変動との関連性を調べるにあたり、北太平洋及び太平洋海盆における数十年規模気候変動について、先行研究で報告されている観測的事実及びモデリング研究から提唱されているメカニズムをまとめた。20世紀以降に実測された観測データからは、北

太平洋中緯度における約 20 年周期の気候変動の存在が報告されている。また、木の年輪や珊瑚から再構成された数 100 年間の地表面気温及びプロキシ PDO 指数データの解析からは、潮汐変動に対応すると考えられる 18.6 年の有意な周期性を持つ、北太平洋中緯度における気候変動が報告されている。このような観測的事実は、OMIX の掲げる研究目標の一面を支持する。しかしながら、海洋潮汐変動と気候変動、この 2 つをつなぐメカニズムが解明されない限り、統計に基づく仮説を述べているに過ぎない。北太平洋における「物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」という OMIX 全体にわたる課題を解決するためには、メカニズムを明らかにすることが最重要かつ挑戦的な作業の 1 つである。

Yasuda *et al.* (2006) は、観測データの解析結果から、海洋潮汐の 18.6 年周期変動が北太平洋中緯度の閉じた系における数十年規模気候変動を律速するという、外部強制を主要因とした作業仮説を提唱している。しかしながら第 3 節で述べたように、北太平洋中緯度の気候変動は、大気を介した熱帯からのシグナルにより概ね制御されることが、多くの先行研究によって報告されている。北太平洋中緯度気候に対する熱帯気候の優位性は、観測データの解析・モデリング・理論と多岐にわたる研究手法から報告されており、このことは気候変動研究者にとってごく一般的な認識となっている。また、古くは Latif and Barnett (1994) が報告しているように、海洋潮汐の 18.6 年周期変動を考慮せずとも、この周期に近い約 20 年周期の変動は、北太平洋中緯度大気海洋結合系の不安定解として生じうる。同様の考察は、最近のモデリング研究でもなされている (例えば、Zhong *et al.*, 2008; Zhong and Liu, 2009; Tatebe *et al.*, 2013)。したがって、Yasuda *et al.* (2006) の仮説と気候変動研究者の一般的認識との間にはやや距離があると言える (実際、海洋潮汐と全球気候との関連性についての言及は、IPCC 第 5 次評価報告書で皆無である)。しかしながら、逆説的であるが、このことは OMIX が通説を覆すようなテーマを掲げていることを意味し、その先駆性の拠るところでもある。OMIX 課題解決に向けた取り組みの中で、Yasuda *et al.* (2006) の仮説を修正しつつ、説得力のあるメカニズムを提示する必要がある。

ここまでに述べてきたことに基づいて考察すると、Ha-

sumi *et al.* (2008) のモデリング研究が提示した、熱帯も含めた太平洋海盆全体の気候変動は潮汐変動に、ある程度、律速される、というような仮説が、海洋潮汐変動と気候変動とを関連づける最も単純な道筋として現実的かもしれない。このような仮説が説得力を持つには、北太平洋中緯度で検出される 18.6 年の有意な周期変動が、熱帯を含む太平洋海盆でも検出される必要がある。しかし、現状では数 100 年を越えるプロキシデータの解析からですら、このような周期性は確認されていない。一方、熱帯太平洋のみに着目すると、日周潮汐に含まれる 18.6 年周期変動成分の位相別コンポジット解析では有意な SOI の変動が検出されている (近田, 2012)。SOI は ENSO と深く関連する指標であり、したがって、潮汐変動に起因する熱帯気候変動 (これが ENSO と独立なのか、あるいは ENSO の数 10 年規模変動なのか、現時点でははっきりと言えない) が、北太平洋中緯度気候をある程度制御している可能性がある。この場合、Hasumi *et al.* (2008) とは異なる、例えば海大陸周辺での強い潮流 (例えば、Ffield and Gordon, 1996) とこれに伴う海面水温変化が熱帯大気の大気対流活動を変調し、大気テレコネクションを介して北太平洋中緯度気候へ影響を与えるというメカニズムも考えられる。いずれにせよ、海洋潮汐の 18.6 年周期変動が、太平洋の数十年規模気候変動を過不足なく説明すると考えるのは難しい。しかし、周期性を決める要因の 1 つである可能性を現時点で棄却する必要はないだろう。

現実の北太平洋における気候変動は、熱帯を含む他海盆からの影響、北太平洋固有の内部変動、人為起源エアロゾルや温室効果ガス排出、太陽放射や火山噴火など、様々な要因に応じて起きている。本節冒頭での記述とやや重複するが、OMIX の研究課題の 1 つである「潮汐変動と気候変動との関連」が具体的に目指すべきところは、18.6 年周期の海洋潮汐変動が気候変動を説明しうる要因の 1 つであることを国際的・学際的に明確に示すこと、そのために観測的事実とモデリングとで統合的なメカニズムを提案することであろう。とはいえ、18.6 年という特定周期の気候変動を議論するに十分な広範囲かつ長期的観測データを入手することは、現状では困難である。このような場合、モデル計算に立脚した研究が有用である。しかし、モデリング研究には不確実性が存在する。潮汐

混合に関して言えば、第3節で述べたように鉛直渦拡散係数あるいは内部潮汐エネルギー散逸率の分布の与え方でモデル結果は定性的に変わりうる。また、気候場及び内部変動の再現性は、モデル分解能よりも小さなスケールにおける物理過程をパラメーター化する手法に依存し、気候モデル毎に顕著に異なる。このため、仮に同様の手法で潮汐を導入した場合でも、気候モデルが違えば、得られる結果は定性的に異なる可能性がある。そもそも、潮汐起因の内部波がどのようなプロセスを経てどこで散逸されているのか、この点からして統一的な見解は得られていない。したがって、海洋潮汐変動と気候変動との関係性を物理的に議論すると同時に、不確実性の定量化も進める必要がある。

モデリング研究の具体的なアプローチとして、現時点の高解像度潮汐モデルから得られている時間に依存しない内部潮汐エネルギー散逸率の全球マップを全球気候モデルへ取り入れ、経験的に得られた鉛直渦拡散係数プロファイル（例えば、Tsujino *et al.*, 2000）を使用した場合の結果と多角的に比較し、（準）周期的な気候変動ではなく、気候の長期平均場や100年スケールでの温暖化に対する潮汐混合の影響をまずは評価することが挙げられる。海洋深層の鉛直拡散過程は、全球海洋熱塩循環を決定する支配的な要因である。このため、熱塩循環の変化を通じて、海洋密度構造の気候学的な場が大きく変わることが考えられる。また、熱塩循環の強度は、大気から海洋への熱吸収量をコントロールする大きな要因の1つである。したがって、温室効果ガスの増加に伴う過渡的な気候応答も変わりうる。IPCC第4次及び第5次評価報告書の科学的根拠となる第3期及び第5期結合モデル間相互比較プロジェクト（Coupled Model Intercomparison Project; CMIP）では、二酸化炭素濃度を産業革命前レベルから年毎に1%漸増する実験及び瞬時に4倍とする実験などを実施し、各気候モデルでの過渡的気候感度（Transient Climate Response; TCR）及び平衡気候感度（Equilibrium Climate Sensitivity; ECS）を見積もっている。その結果、TCRとECSの両気候感度ともに、モデル間で大きくばらつくことが判明した。TCRのばらつきは海洋熱塩循環の強度と海洋熱吸収における不確実性に、ECSのばらつきは雲放射過程における不確実性に、それぞれ起因すると考えられている。内部波エネルギー

散逸率を与えた実験と従来の経験的鉛直渦拡散係数分布を与えた実験との間でTCRが有意に異なるならば、微細スケールの海水混合過程が温暖化に対応する100年スケールの気候変動にも影響を与えうると言える（なお、ここでの有意とはCMIP参加モデル間のTCRのばらつき同等以上の差を意味する）。このように、まずは理想的な実験下で潮汐の気候への影響を評価するのが妥当であろう。また、国際プロジェクトであるCMIPに準じた実験を実施することは、OMIXで得られる結果の国際的な受け入れられやすさにつながると考えられる。次の段階として、気候モデルの外部強制を産業革命前レベルに固定した実験を1000年を越える長さで実施し、海洋潮汐186年周期変動の有無で気候変動の現れ方にどのような差異が生じるか、また、その差異を説明するメカニズムは何か、を調べることに取り組む。これら一連の実験は、可能ならば複数の気候モデルで実施し、各モデルでのパラメーター化の違いに起因する不確実性を定量的に評価することが望ましい。また、潮汐混合の与え方を変えた実験を複数実施することで、潮汐のパラメーター化に起因する不確実性の定量化を行うことも必要であろう。

しかしながら、現実には時間的制約と計算機資源の制約があり、全ての実験を理想的に遂行することは困難と思われる。海洋潮汐変動と気候変動との関連性を研究課題とする気候モデリング班の他、OMIXには海洋微細構造の観測、微細物理プロセスの理論的解明とパラメーター化の開発などを課題とする研究班も存在し、これら研究班には我が国の海洋物理学研究を牽引する人材が配置されている。他班と有機的に連携し、得られた最新の知見を、随時、モデルへ取り入れることで、潮汐のパラメーター化による不確実性の効率的な定量化が可能であろう。また、国の内外を問わずさまざまな研究機関と積極的に連携をとることで、海洋潮汐に関する複数モデル間比較研究を実施し、これにより海洋潮汐に対するモデル気候の応答（例えば、TCR）を定量化することも先々考えられる。いずれにせよ、気候モデル実験で閉じることなく、ここから得られたデータを観測データや先行研究と詳細に比較し、最終的には観測的事実と整合するメカニズムを不確実性とともに提示する、というのが現実的なアプローチである。また、上に述べた幾つかの簡単ではない課題を解決することによって、ようやく微細ス

ケールの海洋潮汐が気候変動を説明しうる要因の1つであることが国際的に認知されると考えられる。

謝辞

本研究は、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・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」の計画班「鉛直混合を取り入れた海洋循環・物質循環・気候モデル開発と影響評価」（科研費JP15H05825）の助成を受けた。

References

- Alexander, M. A., D. J. Vimont, P. Chang, and J. D. Scott (2010): The impact of extratropical atmospheric variability on ENSO: Testing the seasonal footprinting mechanism using coupled model experiments. *J. Climate*, **23**, 2885–2901.
- Biondi, F., A. Gershunov, and D. R. Cayan (2001): North Pacific decadal climate variability since 1661. *J. Climate*, **14**, 5–10.
- Booth, B., N. Dunstone, P. R. Halloran, T. Andrews, and N. Bellouin (2012): Aerosols implicated as a primary driver of 20C North Atlantic climate variability. *Nature*, **484**, 228–232.
- Broecker, W. S. (1991): The great ocean conveyor. *Oceanogr.*, **4**, 79–89.
- Brönnimann, S. (2009): Early twentieth-century warming. *Nature Geosci.*, **2**, 735–736.
- Cerveny, R. S., and J. A. Shaffer (2001): The moon and El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 25–28.
- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Watanabe, M. Ishii, and T. Mochizuki (2012): Relationship between the Pacific and Atlantic stepwise climate change during the 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL053901.
- Chikamoto, Y., A. Timmermann, J.-J. Luo, T. Mochizuki, M. Kimoto, M. Watanabe, M. Ishii, S.-P. Xie, and F.F. Jin (2015): Skilful multi-year predictions of tropical trans-basin climate variability. *Nat. Commun.*, **6**, doi:10.1038/ncomms7869.
- 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. Climate*, **10**, 1343–1356.
- Currie, R. G., and D. P. O'Brien (1988): Periodic 18.6-year and cyclic 10 to 11 year signals in northeastern United States precipitation data. *J. Climatol.*, **8**, 255–281.
- D'Arrigo, R., E. R. Cook, R. J. Wilson, R. Allan, and M. E. Mann (2005): On the variability of ENSO over the past six centuries. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL022055.
- D'Arrigo, R., R. Villalba, and G. Wiles (2001): Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability. *Clim. Dyn.*, **18**, 219–224.
- D'Arrigo, R., R. Wilson, G. Wiles, K. Anchukaitis, O. Solomina, N. Davi, C. Deser, and E. Dolgova (2015): Tree-ring reconstructed temperature index for coastal northern Japan: implications for western North Pacific variability. *Int. J. Climatol.*, **35**, 3713–3720.
- Egbert, G. D., A. F. Bennett, and M. Foreman (1994): TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24821–24852.
- Evans, M., M. A. Cane, D. P. Schlag, A. Kaplan, B. K. Linsley, R. Villalba, and G. M. Wellington (2001): Support for tropically-driven decadal variability based on paleoproxy evidence. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3689–3692.
- Ffield, A., and A. Gordon (1996): Tidal mixing signatures in the Indonesian Seas. *J. Phys. Oceanogr.*, **26**, 1924–1937.
- Giese, B., S. C. Urrizar, and N. S. Fučkar (2002): Southern Hemisphere origins of the 1976 climate shift. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2001GL01328.
- Gu, D., and S. G. H. Philander (1997): Interdecadal climate fluctuations that depend exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, **275**, 805–807.
- Hasumi, H., and N. Sugimoto (1999): Effects of locally enhanced vertical diffusivity over rough bathymetry on the world ocean circulation. *J. Geophys. Res.*, **104**, 23367–23374.
- 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**, doi:10.1029/2008GL034406.
- 日比谷紀之 (2009): 海洋の中・深層における鉛直拡散強度の全球分布に関する理論的・観測的研究. 海の研究, **18**, 115–134.
- Hibiya, T., M. Nagasawa, and Y. Niwa (2006): Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler (XCP) surveys. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2005GL025218.
- Hibiya, T., M. Nagasawa, and Y. Niwa (2007): Latitudinal dependence of diapycnal diffusivity in the thermocline observed using a microstructure profiler. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2007GL032323.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jayne, S. R. (2009): The impact of abyssal mixing parameterizations in an ocean general circulation model. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1756–1775.
- Kawasaki, T., and H. Hasumi (2010): Role of localized mixing around the Kuril Straits in the Pacific thermohaline circulation. *J. Geophys. Res.*, **115**, doi:10.1029/2010JC006130.
- 近田俊輔 (2012): 潮汐 18.6 年振動と水温・気圧場との関係: 太平洋低緯度域への影響. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, 修士論文, 33pp.
- Kosaka, Y., and S.-P. Xie (2013): Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403–407.
- Kosaka, Y., and S.-P. Xie (2016): The tropical Pacific as a key pacemaker

- of the variable rates of global warming. *Nature Geosci.*, doi:10.1038/ngeo2770.
- Latif, M., and T. P. Barnett (1994): Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, **266**, 634–637.
- Lau, N. C. (1997): Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 21–33.
- Linkin, M. E., and S. Nigam (2008): The North Pacific Oscillation -West Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. *J. Climate*, **21**, 1979–1997.
- Loder, J. W., and C. Garrett (1978): The 18.6-year cycle of sea surface temperature in shallow seas due to variation in tidal mixing. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1967–1970.
- Luo, J., S. Masson, S. Behera, P. Delecluse, S. Gualdi, A. Navarra, and T. Yamagata (2003): South Pacific origin of the decadal ENSO-like variation as simulated by a coupled GCM. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL018649.
- Luo, J., and T. Yamagata (2001): Long-term El Niño-Southern Oscillation (ENSO)-like variation with special emphasis on the South Pacific. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22211–22227.
- Mantua, N. J., and S. R. Hare (2002): The Pacific decadal oscillation. *J. Oceanogr.*, **58**, 35–44.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. Francis (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069–1079.
- Marshall, J., and K. Speer (2012): Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geosci.*, **5**, 171–180.
- McCreary, J. P., and P. Lu (1994): Interaction between the subtropical and equatorial ocean circulations: The subtropical cell. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 466–497.
- McGregor, S., A. Timmermann, M. F. Stuecker, M. H. England, M. Merrifield, F.-F. Jin, and Y. Chikamoto (2014): Recent walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming. *Nature Clim. Change*, **4**, 888–892.
- McKinnell, S. M., and W. R. Crawford (2007): The 18.6-year lunar nodal cycle and surface temperature variability in the Northeast Pacific. *J. Geophys. Res.*, **112**, 1–15, doi:10.1029/2006JC003671.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster, J. T. Fasullo, A. Hu, and K. E. Trenberth (2011): Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Clim. Change*, **1**, 360–364.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, C. M. Ammann, J. M. Arblaster, T. M. L. Wigley, and C. Tebaldi (2004): Combination of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate. *J. Climate*, **17**, 3721–3727.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, T. M. L. Wigley, J. M. Arblaster, and A. Dai (2003): Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the twentieth century. *J. Climate*, **16**, 426–444.
- Melet, A., R. Hallberg, S. Legg, and K. Polzin (2013): Sensitivity of the ocean state to the vertical distribution of internal-tide-driven mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 602–615.
- Melet, A., S. Legg, and R. Hallberg (2016): Climatic impacts of parameterized local and remote tidal mixing. *J. Climate*, **29**, 3473–3500.
- Minobe, S. (1997): A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 683–686.
- 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. (2000): Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Progr. Oceanogr.*, **47**, 381–401.
- Minobe, S., T. Manabe, and A. Shouji (2002): Maximal wavelet filter and its application to bidecadal oscillation over the northern hemisphere through the twentieth century. *J. Climate*, **15**, 1064–1075.
- 望月崇 (2015): 太平洋十年規模振動 (PDO), 天気, **62**, 609–611.
- Munk, W., and C. Wunsch (1998): Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Res. I*, **45**, 1977–2010.
- Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata (1997): Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2215–2225.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo (2004): Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. *Earth's Climate: The ocean-atmosphere interaction, Geophys. Monogr.*, Vol. 147, Amer. Geophys. Union, 329–346.
- Nakamura, T., and T. Awaji (2004): Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JC001850.
- Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji (2004): Tidal mixing in the Kuril Straits and its impact on ventilation in the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **60**, 411–432.
- Newman, M., and 14 coauthors (2016): The Pacific decadal Oscillations, Revisited. *J. Climate*, **29**, 4399–4427.
- Nitta, T., and S. Yamada (1989): Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the northern hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 375–383.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2011): Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations. *J. Oceanogr.*, **67**, 493–502.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2014): Generation of baroclinic tide energy in a global three dimensional numerical model with different spatial grid resolutions. *Ocean Modell.*, **80**, 59–73.
- Nonaka, M., and H. Sasaki (2007): Formation mechanism for isopycnal temperature-salinity anomalies propagating from the eastern South Pacific to the equatorial region. *J. Climate*, **20**, 1305–1315.
- Nozawa, T., T. Nagashima, H. Shioyama, and S.A. Crooks (2005): Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20719, doi:10.1029/2005GL023540.
- Oka, A., and Y. Niwa (2013): Pacific deep circulation and ventilation controlled by tidal mixing away from the sea bottom. *Nat. Commun.*, **4**, doi:10.1038/ncomms3419.
- 長船哲史・田中祐希 (2018): 潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合変動と海洋 20 年変動. 海の研究, **27**, 19–30.
- Overland, J. E. (1999): Decadal variability of the Aleutian low and its relation to high-latitude circulation. *J. Climate*, **12**, 1542–1548.
- Power, S., T. Casey, C. Folland, A. Colman, V. Mehta (1999): Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Clim. Dyn.*, **15**, 319–324.
- Rogers, J. C. (1981): The North Pacific Oscillation. *J. Climatol.*, **1**, 39–57.
- Schlesinger, M. E., and N. Ramankutty (1994): An oscillation in the glob-

- al climate system of period 65–70 years. *Nature*, **376**, 723–726.
- Saenko, O. A., and W. J. Merryfield (2005): On the effect of topographically enhanced mixing on the global ocean circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 826–834.
- Saenko, O. A., X. Zhai, W. J. Merryfield, and W. G. Lee (2012): The combined effect of tidally and eddy-driven diapycnal mixing on the large-scale ocean circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 526–538.
- Schneider, N., and B. D. Cornuelle (2005): The forcing of the Pacific decadal oscillation. *J. Climate*, **18**, 4355–4373.
- Schneider, N., A. J. Miller, M. A. Alexander, and C. Deser (1999): Subduction of decadal North Pacific temperature anomalies: observations and dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 1056–1070.
- Simmons, H. L., S. R. Jayne, L. C. St. Laurent, and A. J. Weaver (2004): Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation. *Ocean Modell.*, **6**, 245–263.
- Smith, D., M. B. Booth, N. J. Dunstone, R. Eade, L. Hermanson, G. S. Jones, A. A. Scaife, K. L. Sheen, and V. Thompson (2016): Role of volcanic and anthropogenic aerosols in the recent global surface warming slowdown. *Nature Clim. Change*, doi:10.1038/nclimate3058.
- Stahle, D. W., and 14 coauthors (1998): Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 2137–2151.
- St. Laurent, L. C., H. L. Simmons, and S. R. Jayne (2002): Estimating tidally driven mixing in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015633.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto (2012): Seasonal evolutions of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic zone: observations and a coupled model simulation. *J. Climate*, **25**, 111–139.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, and S.-P. Xie, 2009: Influences of the Kuroshio/Oyashio extensions on air-sea heat exchanges and storm-track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/04 cold season. *J. Climate*, **22**, 6536–6560.
- Takahashi, C., and M. Watanabe (2016): Pacific trade winds accelerated by aerosol forcing over the past two decades. *Nature Clim. Change*, **6**, 768–774.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, and Y. Nojiri (2002): Global air-sea CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res II*, **49**, 1601–1621.
- Tanaka, Y., T. Hibiya, Y. Niwa, and N. Iwamae (2010): Numerical study of KI internal tides in the Kuril straits. *J. Geophys. Res.*, **115**, doi:10.1029/2009JC005903.
- Tanaka, Y., I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe, and S. Osafune (2012): Effects of the 18.6-yr modulation of tidal mixing on the North Pacific bi-decadal climate variability in a coupled climate model. *J. Climate*, **25**, 7625–7642.
- Tanimoto, Y., H. Nakamura, T. Kagimoto, and S. Yamane (2003): An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JC001750.
- Tatebe, H., Y. Imada, M. Mori, M. Kimoto, and H. Hasumi (2013): Control of decadal and bi-decadal climate variability in the tropical Pacific by the off-equatorial South Pacific Ocean. *J. Climate*, **26**, 6524–6534.
- 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.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace (1998): The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297–1300.
- Thompson, D. M., J. E. Cole, G. T. Shen, A. W. Tudhope, and G. A. Meehl (2014): Early twentieth-century warming linked to tropical Pacific wind strength. *Nature Geosci.*, **8**, doi:10.1038/ngeo2321.
- Tierney, J. E., N. J. Abram, K. J. Anchukaitis, M. N. Evans, C. Giry, K. Halimede Kilbourne, C. P. Saenger, H. C. Wu, and J. Zinke (2015): Tropical sea surface temperatures for the past four centuries reconstructed from coral archives. *Paleoceanography*, **30**, 226–252.
- Tourre, Y. M., B. Rajagopalan, Y. Kushnir, M. Barlow, and W. B. White (2001): Patterns of coherent decadal and inter-decadal climate signals in the Pacific basin during the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2069–2072.
- Trenberth, K. E., and J. W. Hurrell (1994): Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.*, **9**, 309–319.
- Trenberth, K. E., and D. A. Paolino (1980): The northern hemisphere sea level pressure data set: trends, errors, and discontinuities. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 855–872.
- Tsujino, H., H. Hasumi, and N. Sugimoto (2000): Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depth. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 2853–2865.
- 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.
- Watanabe, M., H. Shioyama, H. Tatebe, M. Hayashi, M. Ishii, and M. Kimoto (2014): Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. *Nature Clim. Change*, **4**, 893–897.
- Waterhouse, A. F., and 18 coauthors (2014): Global patterns of diapycnal mixing from measurements of the turbulent dissipation rate. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1854–1872.
- Whalen, C. B., L. D. Talley, and J. A. Mackinnon (2012): Spatial and temporal variability of global ocean mixing inferred from Argo profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL053196.
- White, W. B., and D. Cayan (2000): A global ENSO wave in surface temperature and its interdecadal modulation from 1900–1997. *J. Geophys. Res.*, **105**, 11223–11242.
- Wilson, R., G. Wiles, R. D'Arrigo, and C. Zweek (2007): Cycles and shifts: 1,300 years of multi-decadal temperature variability in the Gulf of Alaska. *Clim. Dyn.*, **28**, 425–440.
- Wu, L., Z. Liu, R. Gallimore, R. Jacob, D. Lee, and Y. Zhong (2003): Pacific decadal variability: The tropical Pacific mode and the North Pacific mode. *J. Climate*, **16**, 1101–1120.
- Yagi, M., and I. Yasuda (2012): Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2011GL050349.
- Yagi, M., I. Yasuda, T. Tanaka, Y. Tanaka, K. Ono, K. I. Ohshima, and K. Katsumata (2014): Re-evaluation of turbulent mixing vertical structure in the Bussol' Strait and its impact on water masses in the Okhotsk Sea and the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 121–134.
- Yasuda, I. (1997): The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **102**, 893–909.
- Yasuda, I. (2009): The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Dec-

- adal Oscillation reconstructed from tree-rings in western North America. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, 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:10.1029/2005GL025237.
- Zhong, Y., and Z. Liu (2009): On the mechanism of Pacific multidecadal climate variability in CCSM3: The role of the subpolar North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 2052–2076.
- Zhong, Y., Z. Liu, and R. Jacob (2008): Origin of Pacific multidecadal variability in CCSM3: A combined statistical and dynamical assessment. *J. Climate*, **21**, 114–133.

Possible relationship between Pacific interdecadal climate variability and the periodic 18.6-year tidal oscillation in the ocean

Hiroaki Tatebe^{1*} and Satoshi Osafune²

Abstract

We have reviewed previous observational and modeling studies on Pacific interdecadal climate variability and discussed a roadmap for investigating possible relationships between the climate variability and the periodic 18.6-year tidal oscillation in the ocean. Instrumental data in the 20th century show significant bidecadal climate variability over the mid-latitude North Pacific. Meanwhile, it is recognized that the real climate variability over the North Pacific is under tropical influences via atmospheric teleconnections, which can be occurred intrinsically even without the tidal oscillations. Although proxy data for several hundred years show significant periodic 18.6-yr variations in the Pacific, whether the signal is relevant to basin-scale climate variability or results from local oceanic tidal variations is debatable. For the hypothesis of the tidal control or regulation of the basin-scale climate variability to be accepted by the international communities of climate research, influences of the tidal oscillation on the Pacific climate variability need to be evaluated and mechanisms that link the two phenomena need to be proposed. It is also important that uncertainties in the tidal influences based on modeling approach be estimated.

Key words : ocean tidal mixing, Pacific interdecadal climate variability

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

(Received 10 November 2016 ; accepted 19 April 2017)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2018)

¹ Project Team for Advanced Climate Modelling, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001, Japan

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

* Corresponding author : Hiroaki Tatebe

TEL : +81457785630

e-mail : tatebe@jamstec.go.jp