HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	日本周辺に存在する「陸海結合システム」の理解に向けて
Author(s)	西岡, 純; 三寺, 史夫; 白岩, 孝行; 関, 宰; 中村, 知裕; 的場, 澄人; 江淵, 直人
Citation	低温科学, 175-180
Issue Date	2016-03-31
DOI	10.14943/lowtemsci.74.175
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/61217
Type	bulletin (article)
File Information	p175-180.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 74 （2016） 175-180
doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 175

日本周辺に存在する「陸海結合システム」の理解に向けて

西岡　純[1)]，三寺　史夫[1)]，白岩　孝行[1)]，関　宰[1)]，中村　知裕[1)]，的場　澄人[1)]，
江淵　直人[1)]

日本は，オホーツク海，日本海，東シナ海といった「縁辺海」と「北太平洋」に面しており，太平洋からみると縁辺海と大洋を隔てる列島の一部である．さらにベーリング海を含めたこれら北太平洋の縁辺海は，自然科学的視点からみても，人間活動の場として見ても多くの共通性と特異性を持ち合わせている．これらのすべての縁辺海には，大河川や，規模は小さいが数多くの中・小河川が流れ込むことで，陸域の影響が大きく現れる．これら河川を通じて陸からの物質を受け取り，縁辺海内部で起こる様々な物理的プロセスと生物的・化学的反応を介して物質循環が活発に起こっている場所である．これらの各縁辺海は，陸域の影響を大洋に伝える間の緩衝作用も担うと同時に，大洋の影響も強く受け，物質的にも暖流（黒潮）や寒流（親潮）で結ばれている．縁辺海の自然科学的な機能を明らかにすることは，東シナ海，日本海，オホーツク海を経由して，北太平洋へと至る，長大な物質循環システムを理解することに繋がる．本稿では，環オホーツク域の「陸海結合システム」という概念に焦点を当て，環オホーツク域で進めてきた研究で残されている課題と，日本の周辺領域も含めたさらに大きなスケールで陸海結合システムをとらえるための研究展開について記す．

The role of Pacific marginal seas in linking adjacent land with ocean

Jun Nishioka[1], Humio Mitsudera[1], Takayuki Shiraiwa[1], Osamu Seki[1], Tomohiro Nakamura[1],
Sumito Matoba[1] and Naoto Ebuchi[1]

Linkage between land and ocean is one of important issue for understanding earth system, and marginal seas are a key place for this linkage. The South China Sea, the East China Sea, the Japan Sea, the Sea of Okhotsk and the Bering Sea are marginal seas located on the north/west rim of the Pacific Ocean. These marginal seas received strong influence from the land via large and small scale river discharge, which include human influence. The marginal seas have high productivity and active biogeochemical cycles relative to those in oceanic regions, which are controlled by individual local processes, such as fresh water discharge, interior current systems, tidal mixing, local upwelling, continental shelves interactions, sea ice production/melting, and flows through straits. Further, recent studies indicated that some of the marginal seas strongly influence to the Pacific Ocean on physical and biogeochemical processes. Therefore, clarifying roles of the marginal seas for linkage between land and oceanic region is one of the major remaining issue for understanding whole Pacific Ocean. In this paper, we discuss remaining issue to understand not only pan-Okhotsk biogeochemical system but also the role of Pacific marginal seas in linking adjacent land with ocean.

キーワード：太平洋周辺縁辺海，オホーツク海，陸海結合システム
Pacific marginal seas, The Okhotsk Sea, linking adjacent land with ocean

連絡先
西岡　純
北海道大学低温科学研究所
〒060-0819　北海道札幌市北区北 19 条西 8 丁目
Tel. 011-706-7655
e-mail：nishioka@lowtem.hokudai.ac.jp
1）北海道大学低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

1．はじめに

2004年に北海道大学低温科学研究所に環オホーツク観測研究センター（以下センター）が発足して既に10年以上が経過した．この間センターは，オホーツク海を取り巻く「環オホーツク域」を対象とし，自然科学と環境に関わる研究を推進するための国際研究拠点としての活動を目指してきた．特に，環オホーツク域で起こっている水・海洋循環や物質循環，生物生産システム，環オホーツク域が気候に与える影響，気候変動が環オホーツク域に与える影響などの研究を進め，当該地域の自然科学的研究を推進してきた．

「環オホーツク域」とは，直接的にはオホーツク海とその周辺地域を指す．しかしその意味するところは，東西には北半球で最も広大なユーラシア大陸と北太平洋を包含し，南北には北極圏や熱帯・亜熱帯からの影響を受けている広大な領域である，と捉えることができる．このような地域性のため，オホーツク海には，以下に述べるような様々な特色がある．

- アムール川という世界有数の大河川が注ぎ込んでおり，淡水や様々な物質を通した陸海結合が大規模に生じている．
- 北半球で一番寒冷な地域（寒極）であるシベリア東部と接しているため，世界最大規模の海氷生成が起こっており，北半球における流氷の南限にもなっている．海氷生成に伴って重い海水ができ，それが沈み込みながら，海洋中層を通して，物質を大陸棚から外洋へと流し出す．
- 北太平洋の西側に位置しており，オホーツク海の海水は親潮・黒潮を通して北太平洋全体に大きな影響を与える．
- 海氷，アムール川流域の凍土帯，カムチャツカの山岳氷河など雪氷圏を包含しており，温暖化など気候変動に対して脆弱な地域である．

我々は以上のような環オホーツク域の特性を背景に，アムール川の陸域の観測や，北太平洋の縁辺海であるオホーツク海において包括的な観測を実施し，環オホーツク域の持つ自然科学的な機能として，オホーツク海を介した陸海を繋ぐ巨大な物質循環システムの存在が，西部北太平洋亜寒帯域，特に親潮域の生物生産に寄与していることを明らかにしてきた．現時点で明らかになっている全貌は次のようなものである．「アムール川流域の主に湿原で付加される鉄分がオホーツク大陸棚に運ばれ堆積し，この大陸棚上の鉄分が，凍る海であるオホーツク海特有の海洋中層循環を通じて，西部北太平洋や親潮海域に運ばれ，千島海峡による混合を介して表層に回帰し，植物プランクトン増殖量，有機炭素の生成量を制御している」（e.g., Shiraiwa, 2012; Nishioka et al., 2013）．本稿ではこの物質循環システムを「陸海結合システム」と呼ぶこととする．これらの一連の「陸海結合システム」の研究成果は，日本近海の豊かな水産業の維持機構や，将来の気候変動に対する海洋の応答を理解することに繋がる重要な発見であり，日本の位置する西部北太平洋の生物生産が，隣接するオホーツク海を介して陸域の多大な影響を受けていることを科学的に実証した点で，これまでの概念を大きく覆すものである．また陸域の観測やモデルの結果は，アムール川周辺の土地利用や人為的な影響が，この陸海結合システムに多大な影響を与える可能性を指摘している（Shiraiwa, 2012）．さらに，長期海洋観測データの解析では，海氷生成量の減少にともなう環オホーツク域の海洋循環の弱化が指摘されており，西部北太平洋への栄養物質供給に影響を与え得ることも予測される（Ono et al., 2002; Nakanowatari et al., 2007; Kashiwase et al., 2014）．

このように環オホーツク域には大変ユニークな，また我が国の水産業や気候変動を考える上で大変重要な陸海結合システムが存在していることが明らかになってきた．これまで実施してきた研究によって，環オホーツク域の陸海結合システムの概観に対する理解は進んだが，陸から海に至る物質循環過程の詳細や，あるいは，さらに大きなスケールで見たときの環オホーツク域の周辺エリアとの関わり合いについては，未だ不明な点が多い．本稿では，「陸海結合システム」という概念に焦点を当て，環オホーツク域に残されている課題と，日本の周辺領域も含めたさらに大きなスケールで陸海結合システムを捉えるための課題，さらなる研究展開について記す．

2．陸海をつなぐ過程

これまで海洋生物生産に必須な栄養物質として，森林から河川を通じて供給される鉄分の重要性が取り上げられてきた（e.g., Matsunaga et al., 1998）．しかし，最近の研究結果では，森林よりも湿地が河川への鉄分供給にとって重要な陸面状態であると言われるようになった（Onishi et al., 2010；楊，2012）．また，人為的な土地利用の変遷が，河川を通じた海域への栄養物質の供給にどのような影響を与えているのかを定量的に評価することも引き続き重要な課題となってくる．アムール川のような大河川を対象として全流域をカバーして研究することは難しいため，源流域から河口までの全流域を対象とでき

る中規模の，また土地利用形態の違う複数の河川を対象とした綿密な観測研究が必要である．センターでは北海道の網走川流域，風蓮湖流入河川集水域，猿払川および天の川・石崎川などの中規模な河川を対象として，河川を通じた海洋への溶存鉄供給量の定量化に関する観測研究を軌道にのせている（夏目ほか，2014）．

陸から河川に供給される鉄の化学形態や，河口域での除去過程など未だ不明な点は多い．海での鉄の滞留時間を決定する上で重要な因子となり得る陸起源有機リガンド（配位子）の河川での挙動は精力的に研究が進められている（e.g., 長尾，2016）．これらの河川の有機リガンドを含む溶存有機物の知見は，海側で得られている有機リガンドの情報とは議論が別に進められている状況であり，今後は陸と海の溶存有機物の動態を一貫して理解するための整合的な解釈が必要となってくる．また，今後は沿岸と沖合，外洋を繋ぐスケールを超えた理解が欠かせない．これには中規模河川の沿岸域への影響を大河川と縁辺海に置き換える場合に，スケールを超えた共通性と特異性を整理して理解する必要がある．スケールを超えて共通なプロセスは，積極的に数値モデルなどに取り込むことで，陸海結合システムの定量的理解に繋げる必要がある．また一方で，小中規模の河川の影響は，その河川数の多さから，沿岸域の栄養状態を決定する要因になる．そのため，沿岸域の栄養物質分布等を理解するためには，沿岸における河川水や沿岸流などの物理的過程も含めて，陸域からの物質供給と海洋からの物質供給が交わる境界領域の研究をさらに進める必要がある．朝隈ら（2016）によって提案されている衛星による河口付近の観測は，沿岸域への河川水拡散を把握する上で強力なツールになり得る．

3．環オホーツク域の数値モデル開発

オホーツク海を取り巻く，陸海結合システムを，将来の変動を含めて定量的に把握するためには，観測結果に基づいた数値モデル研究が欠かせない．この点においては，これまでも精力的に進められており，陸域の水・物質循環モデルの研究や環オホーツク海域の海氷－海洋循環を高精度で再現するために研究が実施されてきた（Onishi et al., 2010; Matsuda et al., 2015）．センターでは現在，これらの数値シミュレーションに，栄養物質である鉄や栄養塩，生物生産を加えて表現するためのモデルの開発を実施している（Uchimoto, 2014；内本，2016）．西部北太平洋の生物生産を支える栄養物質の3次元循環像を明らかにするためには，今後，観測によるデータとモデルによる数値シミュレーションの融合が欠かせない．また環オホーツク域に対する気候変動の影響や，環オホーツク域の気候への影響を表現するためのモデルの開発を実施しており，今後センターが推進すべき研究の重要な柱の一つとなっている（中村・三寺，2008；Koseki et al., 2012）．

以上を踏まえ，環オホーツクシステムのプロセスの解明に加え，今後はこのシステムが地球規模の変動にいかに応答するのか，という課題に重点をおいてモデリング研究を進めていきたい．具体的には，海氷の顕著な10年規模変動はいかに起こるのか，温暖化に対して海氷はいかに応答するのか，気候変動や水循環変動，海氷変動に対して栄養物質循環や生物生産はいかに応答するのか，陸域や雪氷圏の変動と海洋環境の変動はいかにリンクしているのか，という課題を念頭に進めたい．また，上記2．にも記したが，沿岸域の河川水供給，沿岸流などの物理過程と物質循環を理解するためには，陸域からの河川水や物質のインプットの詳細と，沿岸から沖合にかけた海洋循環が表現できる境界領域を表す数値モデルの開発も重要な要素となってくる（Fujisaki et al., 2014）．

4．ベーリング海を含めた環オホーツク域海洋・物質循環システムの構築

環オホーツク域の陸海結合システムが西部北太平洋へ与える影響を定量的に把握するためには，オホーツク海の水塊と北太平洋水が混じり合う千島海峡や，西部北太平洋の西岸境界流である親潮・東カムチャツカ海流の理解が欠かせない．これまでも千島海峡部や親潮海域の物理的・生物地球化学的観測は実施してきたが，今後は東カムチャツカ海流上流域や，さらに西部ベーリング海内やアリューシャン列島海域からどのように高い栄養塩や鉄などの物質が流入してくるのか，また海洋循環や鉛直混合によってどのように水塊や物質が混ざって，北太平洋の持つ化学的性質の水塊が形成されていくのかを明らかにする必要がある．このためには，これまでの研究同様に，政治的な理由で日本の研究船による観測が困難なロシアのEEZ（排他的経済水域）内の観測を実施する必要がある．今後もロシアとの共同研究を主体的に進め，ロシア船による観測プラットフォームを確保し，国内外の多くの分野の研究者に観測機会を提供していくことで，ロシアEEZ内の研究を推進していく．これまで環オホーツク域のデータが不足していた海域に観測エリアを広げ，北太平洋と隣接する寒冷圏縁辺海をボーダレスに多方面からデータ収集することで，オホーツク海や

ベーリング海周辺における大規模湧昇が，栄養塩をどれだけ中深層から表層に回帰させ，その後，どのように栄養塩が鉄分と混合しながら輸送されて西部北太平洋に供給されていくのか，その全体像を定量評価する必要がある．栄養物質の物質循環の３次元的な動態を捉えることで，我が国の隣接する西部北太平洋の生物生産構造や，その変動に関わるプロセスの理解が一層進展すると考えられる．

5．古環境研究との融合

これまでのセンターの研究では，現在存在する環オホーツク域の陸海結合システムの理解について研究が進められてきた．一方で，環オホーツク域の陸海結合システムがどのような変遷をたどってきたかを明らかにするための，長いタイムスケールを対象とした研究への発展も提案されている．過去の気候･環境変動の解析からは，気候変動に対する環オホーツク域の陸海結合システムの応答性や北太平洋亜寒帯域の生物生産に与えるインパクトを検証する上で重要な知見が得られるため，非常に有益である．例えばオホーツク海から採取された海底堆積物コアの古気候データ解析により，アムール川流域からオホーツク海にかけての物質輸送システムは気候変動に伴い大きく変化してきた可能性が指摘されている（Seki et al., 2003; Seki et al., 2012）．さらに本特集号に寄稿している関（2016）によれば，海水準や水循環の変動，氷床の消長などの複数の劇的な環境変動が起こっていた融氷期には，現在よりも規模の大きな物質輸送を伴う陸海結合システムを介して北太平洋亜寒帯全域の生物生産を増加させていたというシナリオが提案されている．現在存在する環オホーツクの陸海結合システムは，地球規模の変遷を経た後の最終系であるとも考えられ，この陸海結合システムの規模の大小が過去にどのように変動していたかは大変興味深く，地球上に存在する自然界のシステムの過去の変遷を理解するためには大変重要なモデルともなり得る．関（2016）の提案したシナリオを検証するためには，さらなる観測と海底堆積物採取による古海洋学・古気候学的なアプローチが必須である．また，古海洋学・古気候学的なアプローチは，現在の気候メカニズム研究と融合することで，新たな気候変動研究に発展させることにも繋がる．特に環オホーツク海域において，海底堆積物，樹木年輪，氷河アイスコアなどの代替試料からの古気候の復元を，現気候システムの研究と融合させることで，環オホーツク域とグローバルな気候システムの変遷との関係を理解することに繋がる可能性もある（中塚，2006）．このような古海洋学・古気候学的取り組みは，これまで進めてきた環オホーツク域の陸海結合システム研究のタイムスケール，空間スケールを拡張する魅力ある一つの研究展開だと思われる．

6．雪氷圏研究との融合

山岳地域の氷河や季節積雪は，流域の水資源，下流域への水供給の季節配分の調整機構，急激な異常気象に対して下流への水供給量の急激な応答を抑える緩衝機構として，下流域に住む人間生活に大きな役割を担っている．山岳地域の雪氷圏は，気候変動に対する応答が大きく，近年の地球温暖化の影響が大きく現れやすい．オホーツク海の海氷面積の変化が雲構造の変化や海洋表面の熱収支の変化を通して，周辺陸域の降水量などに影響を与えることが指摘されている．つまり，オホーツク海の海況，海氷況の変化に対し，周辺地域の水循環は脆弱な一面がある．一方，山岳氷河の隆盛と衰退は，水循環を通じて海洋循環や海洋物質循環に大きな影響を及ぼすことは既に報告されている（Horikawa et al., 2015）．特に，アラスカやカムチャツカ半島に存在している山岳氷河の存在は，融解水による淡水供給やそれに含まれる物質供給を通じて広く日本周辺の海洋の陸海結合システムに直接的に大きな影響を及ぼしている可能性がある．山岳地域，高高度地域では，現状の把握やモデルの精緻化に必要な気象観測データは現状でも少ないが，アイスコアや季節積雪面積などの雪氷圏の環境プロキシが，その不足を補うツールとなり得る（Matoba et al., 2011; Tsushima et al., 2015）．古海洋から現海洋への変遷過程，現在生じている変化を理解するためには，アラスカやカムチャツカ半島の雪氷圏とベーリング海やオホーツク海を含めた統合的な陸海結合システムの理解が重要な課題となるであろう．

7．日本を取り巻く「陸海結合システム」の総合的理解を目指して

これまで環オホーツク観測研究センターでは，オホーツク海という一つの縁辺海を中心とした陸海のシステムの自然科学的機能と，その変動に着目した研究が展開されてきた．一方で，オホーツク海の陸海システムを一つの例として，さらに広いスケールで大陸と海洋間におかれている日本を見ると，もう一つ大きなシステムが見えてくる．日本は，オホーツク海，日本海，東シナ海といった「縁辺海」と「北太平洋」に面しており，太平洋から

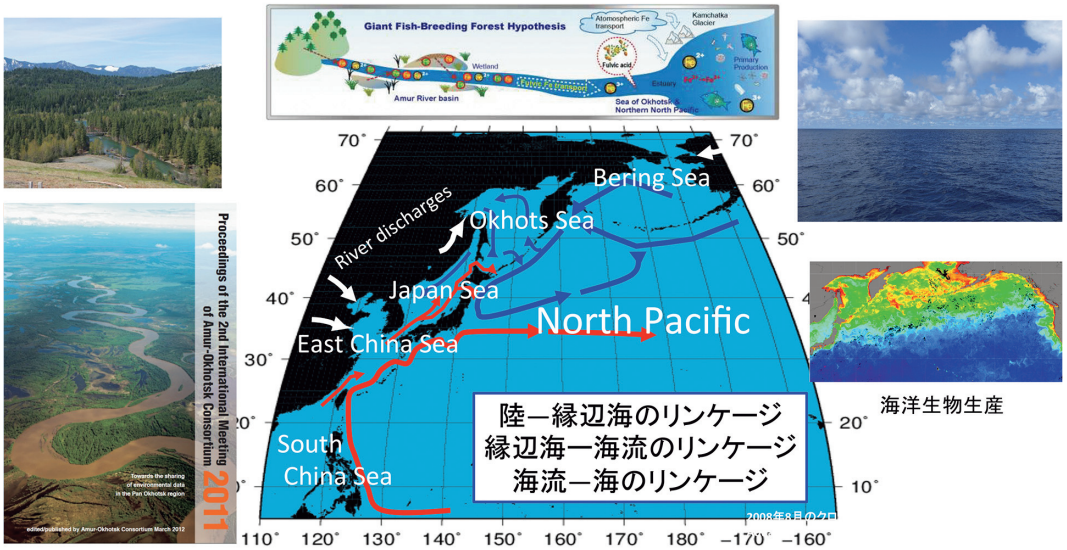

図 1：日本を取り囲む陸海結合システムのイメージ図
Figure 1：Schematic draw of the role of Pacific marginal seas in linking adjacent land with ocean

みると縁辺海と大洋を隔てる列島の一部である．さらにベーリング海を含めたこれら北太平洋の縁辺海は，自然科学的視点からみても，人間活動の場として見ても多くの共通性と特異性を持ち合わせている．これらのすべての縁辺海には，オホーツク海におけるアムール川同様に，大陸から長江，黄河，ユーコン川などに代表される大河川や，規模は小さいが数多くの中・小河川が流れ込むことで，陸域の影響が大きく現れる．これら河川を通じて陸からの物質を受け取り，縁辺海内部で起こる様々な物理的プロセスと生物的・化学的反応を介して物質循環が活発に起こっている場所である．これらの各縁辺海は，陸域の影響を大洋に伝える間の緩衝作用も担うと同時に，大洋の影響も強く受け，物質的にも暖流（黒潮）や寒流（親潮）で結ばれている．また，縁辺海は陸や海の栄養を受けるため，生物生産が活発であり，水産業にとっても欠かせない場所となっている．一方で，この地域の縁辺海は地球上でもっとも人口密度の高い東アジアに隣接し，人間活動とも最も密接に繋がっている海である．さらに比較的面積が小さいため，陸域の人間活動の影響が顕著に出やすい海域ともいえる．各縁辺海を比べてみると，多くの異なる特徴を持つ事も事実である．寒冷圏に位置するオホーツク海やベーリング海は季節海氷域でもあり，中緯度域や極域の影響を強く受け，海氷の減少など地球規模のシステムに支配される問題を抱える．亜熱帯に位置する東シナ海やその亜熱帯と亜寒帯の移行域に位置する日本海は，急速に発達する東アジアの影響を受けており，大型クラゲの大発生に見られる様にその生態系にも変化が現れている．

これらの縁辺海の共通性や特異性については，上記のように様々な点が指摘されるが，外洋に比べて複雑なプロセスが多く存在するため，これらの特徴を科学的に，あるいは定量的に捉えて議論できる状況には至っていない．そのため，各縁辺海が抱える解決すべき問題点や研究課題，またその解決策などが十分に理解できていない状況にある．さらに，各縁辺海は日本に隣接する国々のEEZ を含んでおり，政治的な理由で日本の研究船による観測を実施することが困難な状況である．各縁辺海の陸との繋がり，海洋循環，物質循環を理解することは，日本周辺の海流とともに太平洋へと至る大きな地球システム（図 1）を理解することにも直結している．そのためにはボーダーを超えた観測の実現が不可欠である．今後は，各縁辺海の自然科学的な機能を明らかにするとともに，国際的な研究者コミュニティの連携や議論をこれまで以上に推進し，日本周辺に存在する巨大物質循環システムの統合を視野に入れた仮説作りが必要であると考える．

謝辞

本「低温科学，Vol.74」は，H 25-27 年度に北海道大学低温科学研究所共同利用のサポートを受けて実施された「共同利用萌芽研究：陸域と大洋間における縁辺海の自然科学的な機能と人間活動への役割」によって抽出された課題と議論をもとに記された内容である．本共同研究に参加したすべての研究者に感謝する．また，共同利用をサポート頂いた低温科学研究所・事務スタッフ，環オ

ホーツク観測研究センター・スタッフの水野紗希氏，村山愛子氏，篠原琴乃氏に感謝の意を表す．

参考文献

朝隈康司，兼上裕作，島岳志（2016）衛星画像を用いたオホーツク海北海道沿岸河口付近の沿岸水分類方法の検討．低温科学，**74**，85–93.

Fujisaki, A., H. Mitsudera, J. Wang and M. Wakatsuchi (2014) How does the Amur River discharge flow over the northwestern continental shelf in the Sea of Okhotsk? *Prog. Oceanogr.*, **126**, 8–20, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.028.

Horikawa, K., E. E. Martin, C. Basak, J. Onodera, O. Seki, T. Sakamoto, M. Ikehara, S. Sakai and K. Kawamura (2015) Priocene cooling enhanced by flow of low-salinity Bering sea water to the Arctic Ocean. *Nature communications*, doi: 10.1038/ncomms8587.

Kashiwase, H., K. I. Ohshima and S. Nihashi (2014) Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Ohhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 21–32.

Koseki, S., T. Nakamura, H. Mitsudera and Y. Wang (2012) Modeling low-level clouds over the Okhotsk Sea in summer: Cloud formation and its effects on the Okhotsk high. *J. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JD016462.

Matoba, S., T. Shiraiwa, A. Tsushima, H. Sasaki and Y. D. Muravyev (2011) Records of sea-ice extent and air temperature at the Sea of Okhotsk from an ice core of Mount Ichinsky, Kamchatka, *Ann. Glaciology*, **58**, 44–50, doi:10.3189/172756411797252149.

Matsunaga, K., J. Nishioka, K. Kuma, K. Toya and Y. Suzuki (1998) Riverine input of bioavailable iron supporting phytoplankton growth in Kesennuma Bay. *Water Res.*, **32**, 436–442.

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.

長尾誠也，久米川雅志，児玉宏樹，寺島元基（2016）北海道東部の湿原を流れる別寒辺牛川水系における溶存有機物と溶存鉄の流出挙動．低温科学，**74**，1–12.

中村知裕，三寺史夫（2008）：環オホーツク圏領域気候モデル．天気，**55**，555–560.

Nakanowatari, T., K. Ohshima and M. Wakatsuchi (2007) Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1995–2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.

夏目奏・澤柿教伸・白岩孝行（2014）土地利用・土地被覆の違いが河川水質成分および沿岸の磯焼けに与える影響評価—道南上ノ国町を例に—．経済学論叢，**65**(3)，347–369.

中塚武（2006）戦略的な気候変動研究の体制構築を目指して，気候学と古気候学の新たな統合をめざして．低温科学，**65**，3–4.

Nishioka, J., T. Nakatsuka, Y. W. Watanabe, I. Yasuda, K. Kuma, H. Ogawa, N. Ebuchi, A. Scherbinin and Y. N. Volkov (2013) Intensive mixing along island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochem. Cy.*, **27**, 1–10, doi:10.1002/gbc.20088.

Onishi, T., M. Yoh, H. Shibata, S. Nagao, M. Kawahigashi and V. Shamov (2010) Topography as a macroscopic index for the dissolved iron productivity of different land cover types in the Amur River Basin, *Hydrological Res. Lett.*, **4**, 85–89.

Shiraiwa, T. (2012) "Giant-Fish-Breeding Forest": a new environmental system linking continental watershed with open water. in Taniguchi, M and Shiraiwa, T. (eds) *The Dilemma of Boundaries, Towards a new concept of catchment*, Springer, 73–85, doi:10.1007/978–4–431–54035–9.

Seki, O., K. Kawamura and T. Nakatsuka (2003) Sediment core profiles of long-chain *n*-alkanes in the Sea of Okhotsk: enhanced transport of terrestrial organic matter from the last deglaciation to the early Holocene. *Geophys. Res. Lett.* **30**, doi:10.1029/2001GL014464.

Seki, O., N. Harada, M. Sato, K. Kawamura, A. Ijiri and T. Nakatsuka (2012) Assessment for paleoclimatic utility of terrestrial biomarker records in the Okhotsk Sea sediments. *Deep-Sea Res., II* **61–64**, 85–92.

関宰（2016）北太平洋亜寒帯の融氷期生物生産増大イベントの原因．低温科学，**74**，143–151.

Tshusima, A., S. Matoba, T. Shiraiwa, S. Okamoto, H. Sasaki, D. J. Solie and K. Yoshikawa (2015) Reconstruction of recent climate change in Alaska from the Aurora Peak ice core, central Alaska. *Clim. Past*, **11**, 217–226, doi: 10. 5149/cp–11–217–2015.

内本圭亮，中村知裕，西岡純，三寺史夫，三角和弘，津旨大輔，若土正暁（2016）オホーツク海高密度陸棚水への鉄のポテンシャル供給域．低温科学，**74**，95–104.

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.

楊宗興（2012）陸面における溶存鉄の溶出・流出．海洋と生物，**34**(1)，49–58.