HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	融雪と漁業生産をつなげる陸海連関 ： 噴火湾の例
Author(s)	中田, 聡史; 馬場, 勝寿; 石川, 洋一; 齊藤, 誠一
Citation	低温科学, 74, 31-41
Issue Date	2016-03-31
DOI	10.14943/lowtemsci.74.31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/61061
Type	bulletin (article)
File Information	p031-041.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 74 （2016） 31-41
doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 31

融雪と漁業生産をつなげる陸海連関：噴火湾の例

中田　聡史[1)]，馬場　勝寿[2)]，石川　洋一[3)]，齊藤　誠一[4)]

噴火湾を代表する沿岸漁業であるホタテガイの稚貝生産と融雪出水には極めて高い相関関係があることがわかっている．本研究では，噴火湾と湾に接する集水域を実験フィールドとして，融雪出水とホタテガイ稚貝生産とを関係づけている陸海連関を解明する．そのために，時空間的に高解像度な陸海統合シミュレーションによる水文環境と海洋環境の再現計算データと，河川において観測された栄養塩濃度データを，融雪期に注目して解析した．その結果，河川からの溶存無機態窒素フラックスは，農地からの寄与が大きく，溶存無機態窒素濃度の時間変化よりもむしろ河川流量の時間変化に支配されていた．海洋モデルと粒子追跡シミュレーションの計算結果から，融雪出水による淡水フラックスが沿岸海域において時計回りの流動場を強化させており，時計回りの流動場が溶存無機態窒素を沿岸に沿って一様に輸送していることがわかった．このことは，融雪出水に伴って農地から河川を通じて排出された多量の陸起源の栄養塩が噴火湾沿岸域の植物プランクトン等の生物生産を高めた結果，ホタテガイ母貝の摂餌状態が改善されて産卵量と稚貝密度が高められることを示唆した．このような陸海連関（land-sea pathway）が，特に融雪期において陸域の農業と海域の養殖業を強く結びつけていると考えられる．沿岸域における農業と漁業が持続的かつ協働的であるための統合的管理を目指すには，陸海連関を認識することが重要である．

Land-sea pathways between snowmelt and fishery production in Funka Bay, Japan

Satoshi Nakada[1], Katsuhisa Baba[2], Yoichi Ishikawa[3] and Sei-Ichi Saitoh[4]

The annual spat density of scallop that is a typical coastal fishery in Funka Bay is highly correlated with the snowmelt runoff or accumulated snowfall. This study investigated the land-sea pathways in Funka Bay, Japan, a typical semi-enclosed bay during snowmelt period to understand how the snowmelt runoff can improve the production of cultured scallop larvae associated with ocean primary production, by analyzing hydrological and oceanic data produced by a land-sea integrated model in conjunction with newly compiled datasets of riverine nutrient concentrations. The model successfully estimated the riverine dissolved inorganic nitrogen (DIN) flux that is dominated by the temporal variation of the river runoff rather than that of the riverine DIN concentration. Ocean

連絡先
中田　聡史
神戸大学大学院海事科学研究科
〒658-0022　兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1　1 号館 1F
Tel. 078-431-6252
e-mail：snakada@maritime.kobe-u.ac.jp
1）神戸大学大学院海事科学研究科
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe, Japan
2）北海道立総合研究機構水産研究本部　企画調整部企画課
Hokkaido Research Organization, Fisheries Research Department, Central Fisheries Research Institute, Yoichi-cho, Japan
3）海洋研究開発機構　地球情報基盤センター
Data Research Center for Marine-Earth Sciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama Institute for Earth Sciences, Yokohama, Japan
4）北海道大学北極域研究センター
Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan

simulation indicated that the freshwater flux supplied by the snowmelt runoff enhances clockwise circulations along the coast of the bay. The close relationship between the annual spat density of scallop and the snowmelt runoff associated with high DIN concentrations suggested that riverine nutrients can increase the biomass of phytoplankton in near-shore seas and improve food availability for scallop spawners, resulting in increased egg production in March to April. Therefore, the nutrient flux from agricultural source areas through the large snowmelt runoff has an important role in larvae production. Land-sea pathways need to be identified to design sustainable and synergetic systems of aquaculture and agriculture for the integrated management of coastal regions.

キーワード：融雪水，陸海連関，噴火湾，栄養塩，ホタテガイ
Snowmelt water, Land-sea pathway, Funka Bay, Nutrients, Scallop

1．はじめに

本特集号の趣旨である「陸海結合システム」と類似した英単語に，land-sea linkage（e. g., Katsuki et al., 2009），land-to-sea connectivity（Gorman et al., 2009），等の用語がある．2000 年以降，これらに類似した用語は，様々な観点・時空間スケールから多様な意味で使われている．陸から海への単方向の河川を通じた物質輸送のつながりを調べた研究（e. g., Antonio et al., 2010）だけでなく，陸と海の相互作用に焦点を当てた研究（e. g., Milner et al., 2007）や，時には社会科学・人文科学的な要素を含む研究例もある（e. g., Stoms et al., 2005）．もちろん，森林生態系と海洋生態系の相互作用（Polis et al., 1996）が，特に沿岸域における海洋生態系の真の理解には不可欠であることは間違いない（向井，2012）．このような land-sea linkage は，日本語で表現するならば「陸海連関」あるいは「陸海連環」という言葉が適切かもしれない．本論では，陸と海にまたがる双方向の“つながり”のイメージを喚起する「陸海連環」というよりは，噴火湾を例にした陸から海への単方向の“パス（pathway）”の意味として「陸海連関」の知見を提供する．

これまでの国内外における陸海連関の研究については，様々な実験フィールドで研究が進められてきているものの，陸海連関の体系的な理解にまで至っていないのが現状であろう．陸海連関に“里”という社会科学・人文科学的な視点を取り入れた森里海連環学（山下，2007）は，森から海までのつながりの機構を解明し，持続的で健全な国土環境を保全・再生する具体的な方策を研究する新しい学問領域として提唱された．森里海連環学が包括する研究例を紹介した「森と海をむすぶ川―沿岸域再生のために」（向井，2012）では，陸海域の統合的沿岸域管理の方法論にまで至ってないものの，主に日本沿岸域おける森林や河川，湖沼，海洋を具体例とした陸海連関がレビューされている（e. g., 赤羽ら，2003）．

近年では，主に積雪寒冷地における融雪出水と海洋生物生産に関連した陸海連関の研究成果が挙げられてきている（e. g., O'Neel et al., 2015）．北半球にある多くの集水域は主に積雪寒冷帯に存在する．融雪期に河川出水の影響を受ける沿岸海域，本論で便宜上，融雪出水影響域（Region Influenced by Snowmelt Water）と呼ぶ海域（Nakada et al., 2014a）は，北緯 35 度以北の緯度帯（北半球の約 2/3）の沿岸域に存在している．積雪量が多い集水域に接する沿岸海域においては，融雪期は一年の中で河川流量が多く，河川を通じた陸域からの栄養塩負荷量が多くなる期間である．融雪出水が沿岸海域の生物生産・海洋生態系に果たす重要性は大きい．

日本において融雪出水による影響が大きい海域は，積雪する集水域に接する山陰～北陸～東北，北海道の沿岸海域であることが積雪量から推察される（Fig. 1）．特に，豪雪地帯である能登半島以東の日本海側と北海道の沿岸域は，4～5 月の融雪期においては河川流量が一年の中で最大となる（Fig. 1）．融雪出水がどのように沿岸海域の生物生産に影響を与えるかについては，近年理解が少しずつ進んでいるものの（e. g., 大橋ら，2013），知見の蓄積は十分ではない．融雪期は春季のブルーミング期と重なり，海洋基礎生産が高い日本沿岸海域においては漁業生産にとって重要な時期である．例えば，積雪寒冷域である集水域を持つ噴火湾において，融雪出水とホタテガイ生産との関係が極めて高いという関係がある（Nakada et al., 2014a）．噴火湾ではホタテガイ養殖が盛んであり，年間国内生産量（約 50 万トン）の約 2 割（約 10 万トン）を占めている．

本論では，これまで蓄積されてきた研究知見やデータを利活用して，融雪出水とホタテガイ生産との関係を解明するため，融雪期に注目して噴火湾と湾に接する集水域における陸海連関を調べた．なお，解析期間はホタテガイの稚貝データが得られている 2006 年から 2013 年までとした．

2．研究対象地域

亜寒帯に位置する噴火湾（Fig. 2）は，北太平洋西部の

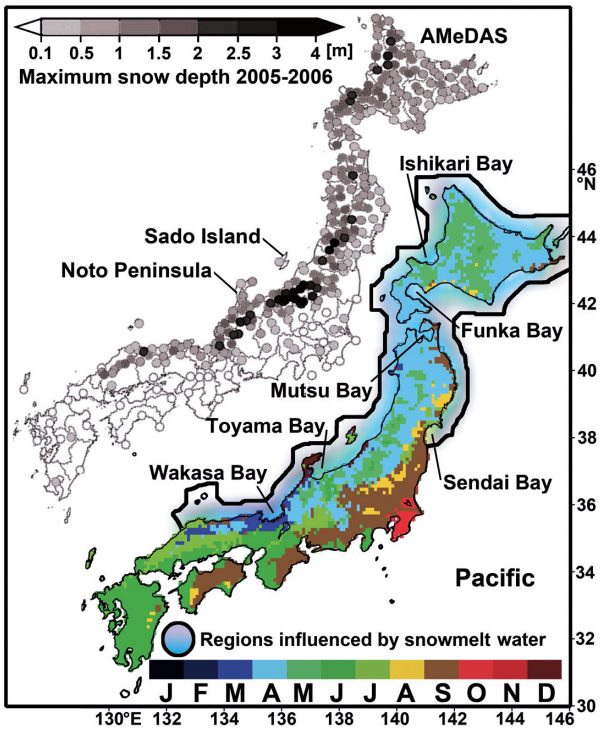

図 1：積雪域と河川流量が最大値をとる月の水平分布．黒太線で示された領域は融雪出水によって影響をうける海域（Regions influenced by snowmelt runoff）を示す．

Figure 1：Snow-cover chart and map of months of runoff maxima (After Nakada et al., 2014a). Snow-cover chart estimated using the Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) dataset (JMA) and a map of months of runoff maxima in Japan based on simulated data (Yoshimura et al. 2008). The capital letters along the color bars are abbreviations for each month of the year.

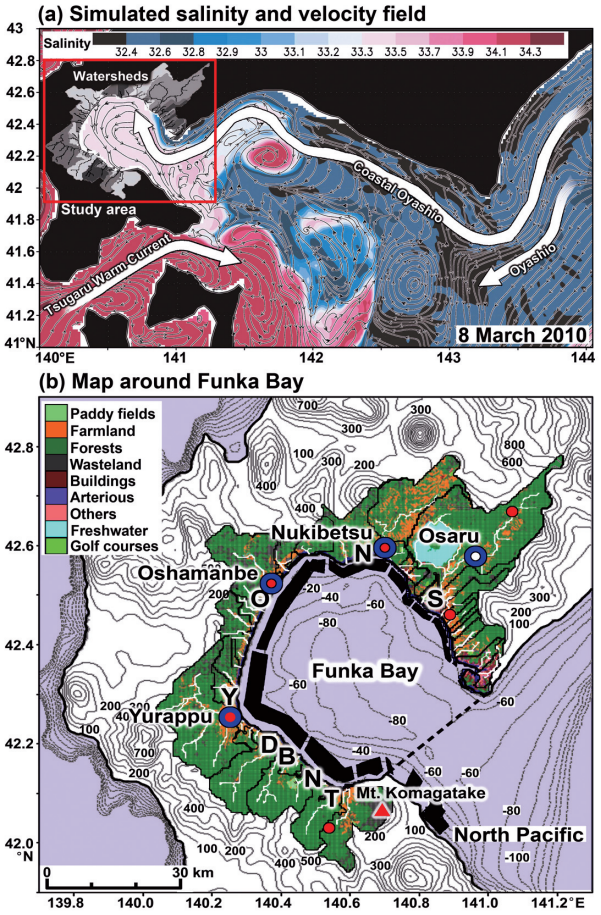

図 2：(a) 2010 年 3 月 20 日における OGCM による塩分場再現計算結果と流速ベクトル．(b) 研究対象領域の噴火湾周辺における地形図と土地利用図．黒塗の領域はホタテガイ養殖施設であり，陸域の黒太線で囲まれた領域は河川流域を示す．赤点は AMeDAS 観測地点，青円は流量の多い四河川（遊楽部川，長万部川，貫気別川，長流川）における河川流速観測地点を示す．

Figure 2：(a) Maps of the simulated salinity (colors) and current at a depth of −12 m on 20 March 2010. The white stream lines with arrows indicate the flow direction estimated by the simulated velocity field. (b) Map of the study area showing watersheds and aquafarms (black blocks) around Funka Bay. The white lines and colored areas indicate river paths and land use in the watersheds, respectively. Blue circles represent river observation stations. Red dots denote the AMeDAS stations. Gray lines indicate isobaths and topographic contours in meters. The dashed line defines the mouth of the bay. The eight capital letters (T, N, B, D, Y, O, N, and S) are the abbreviations for the major rivers (Torizaki, Nigori, Otoshibe, Nodaoi, Yurappu, Oshamanbe, Nukibetsu, and Osaru rivers, respectively).

亜寒帯水を起源とする親潮水と，亜熱帯水を起源とする津軽暖流水が，季節的に交互に流入する極めてユニークな湾である（大谷，1971）．このように亜寒帯水系と亜熱帯水系の水塊が内湾で混ざり合う場所は世界的に稀有である．親潮水は主にオホーツク海からの融氷水を含むため低塩分（～32）で極めて低温（<2℃）な水塊である．特に，沿岸側に捕捉された親潮を沿岸親潮と呼ぶ．沿岸親潮は，北海道南岸に沿って西進南下し，春季に噴火湾口の北岸から流入する（Fig. 2a）．一方，津軽海峡から流出した津軽暖流水は，高温・高塩分の対馬暖流水とほぼ同じ特徴を維持しており，一旦は日高湾沖合に滞留して，秋季～冬季に噴火湾へと流入する（小林ら，2015）．それゆえ，湾内では寒海性と暖海性の魚種が漁獲され，噴火湾内の生物多様性を象徴していると言われている（大谷・木戸 1980）．また，特徴の全く異なる二つの外洋水と，陸域からの河川水が季節的に湾内へ流入し，それらが混合して水塊の特徴が変質した結果，湾内固有の水が形成される．

噴火湾の面積は 2270 km^2 であり，伊勢湾（2130 km^2）や富山湾（2120 km^2）と同程度の大きさである．噴火湾に流入する全河川の集水域面積の合計は 2624 km^2 であり，噴火湾の面積の約 1.2 倍である．湾の最大水深は中央部で −107 m であり，お椀上の形状をしている（Fig. 2b）．集水域の最大標高は約 800 m，平均地形勾配は約 1/25 と極めて急勾配であるため，表層水となる降水は河川を通じて 1 日以内に湾内に流入する（Nakada et al.,

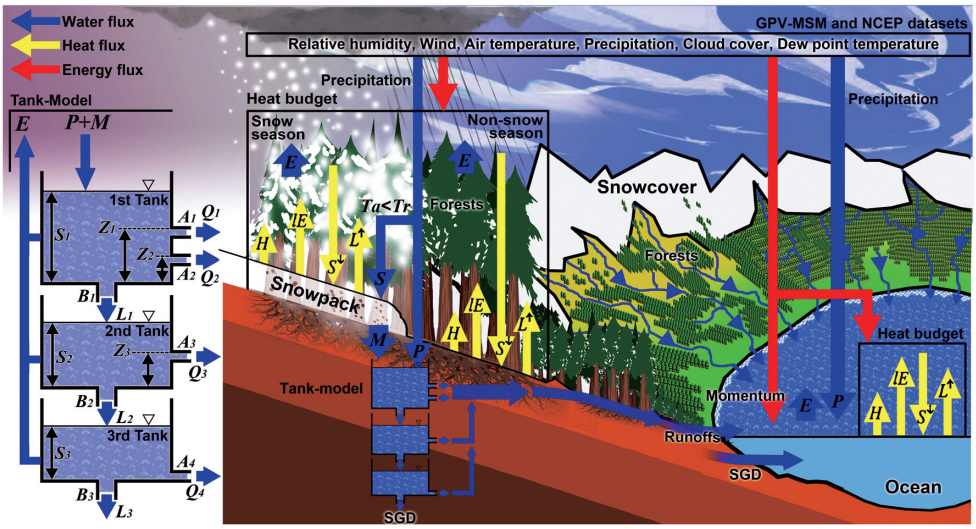

図 3：陸海統合モデル内の熱・水収支計算のフロー図および河川流量推定のための 3 段タンクモデルの概要．具体的な計算式や物理変数の表記については Nakada et al.（2014）を参照されたい．
Figure 3：Flowchart to estimate river runoff and structure of the tank model with three serial tanks. The physical quantities depicted in the diagram are described in Nakada et al. (2014a).

2012）．流入河川には一級河川が無いものの，鳥崎川，濁川，落部川，野田追川，遊楽部川，長万部川，貫気別川，長流川（Fig. 2b）等の二級河川は流量の多い河川である．融雪の時期は 3〜5 月であり，年間合計河川流量に占める融雪出水量の割合は 3〜5 割である．噴火湾に接する各流域の特徴は，集水域の地質，土壌，土地利用形態の割合が酷似しており，陸面物理過程を共通してモデル化しやすい．噴火湾内の海洋学的知見も蓄積されており，陸海連関を理解するには理想的な沿岸域である．

3．陸海統合シミュレーションおよび河川水中の栄養塩濃度データセット

陸海統合モデル（Fig. 3）は，京都大学が開発した海洋モデル（OGCM：ocean general circulation model）（Ishikawa et al., 2009），および内湾域における現実的な塩分分布予報のために河川流量を予測できる水文モデル（HaRUM：hydrometeorological and multi-runoff utility model）（Nakada et al., 2012）をベースにしている．陸海統合モデルは，すでに現業化されている海洋予測システムのひとつである水産海洋 GIS システム（http://inno-va01.fish.hokudai.ac.jp/marinegis/）において海洋予測シミュレーションの物理モデルとして採用されている（Nakada et al., 2014b）．予測情報は PC や携帯電話，スマートフォン等の様々な端末からアクセスできる．次に OGCM と HaRUM の簡単な説明を記載するが，陸海統合モデルの詳細については Nakada et al.（2014a）等を参考にされたい．

最も解像度の高い OGCM 計算領域は，日高湾と青森県の太平洋側を含む北海道南岸域と東北地方沿岸域を含む海域であり，水平解像度約 1.5 km，鉛直 78 層で分解されている．OGCM の側面境界条件は，4 次元変分法を用いた北西北太平洋の海況再解析データ（Ishikawa et al., 2009）を 2 段階のネスティング手法によって計算されている．海面境界条件には，GPV-MSM の 3 時間平均風応力と NCEP-NCAR の 6 時間平均熱・水フラックスが入力されている．

HaRUM は，全河川の集水域の植生・熱・水収支が考慮され，500 m 格子に配置された分布型タンクモデルで構成される．HaRUM の陸面境界条件には GPV-MSM データが入力される．この手法は計算コストを抑えながら，流量の季節変化や経年変化，洪水イベントの再現性をある程度担保できるという利点がある．シミュレーションの再現性は，2010 年まで得られた観測流量データを用いて十分検証されており（観測流量と推定流量の相関係数は約 0.8，誤差 3% 以内），再現性の指標となる Nash-Sutcliffe efficiency 係数（Nash and Sutcliffe, 1970）は 0.6 以上を示し，再現性は十分であった．

使用した河川水中の栄養塩濃度データは，噴火湾に流入する八河川（Fig. 2）の最下流地点において採水を実施し栄養塩分析したデータ（芳村・工藤，2003）に加えて，遊楽部川の最下流地点における採水の栄養塩分析データ（Nakada et al., 2014a）である．栄養塩分析データとして，硝酸塩，亜硝酸塩，アンモニウム塩，リン酸塩，ケイ酸塩等が計測されているが，噴火湾の低次生態系は窒素律速であるため（Kudo et al., 2000），栄養塩の

代表として無機態溶存窒素（DIN：NO_3 + NH_4）データを解析に使用した．

4．水文環境の経年変化とホタテガイ稚貝生産量の関係

噴火湾に接する集水域における水文環境の経年変化をみてみよう．Fig. 4a は，集水域内における AMeDAS サイトで観測された年間降水量と年間降雪量（ただし，降雪が認められる前年 11 月～当年 5 月まで）である．近年 8 年間の平均降水量は 1275 mm/ 年，平均降雪量は 613 mm/ 年であり約半分が降雪量である．これらは北海道道南では代表的な値である．2010 年と 2013 年が多雨年であり，対応して降雪量も多い．集水域内における積雪期の平均積雪深（Fig. 4b）は 25 cm 程度であり主に平野部の積雪状況を反映している．山間部の平均積雪深は 40～53 cm の範囲をとり，平野部の平均積雪深の二倍以上である．その平均積雪深は 2006 年が最大で，山間部の平均積雪深は 2013 年に最大を示しており，必ずしも両者の経年変化は一致しない．また降水量，降雪量とも明瞭な関係性はみられなかった．

全河川からの流量を積算した年平均流量は 100 m^3/s 程度であるが（長谷川・磯田，1996），融雪期には約 300 m^3/s にも達しており一級河川の流量に匹敵する（例えば，淀川の平水流量は 278 m^3/s）．河川流量の観測は，二級河川である長流川，遊楽部川，貫気別川，長万部川における四地点で継続して実施されている（Fig. 2）．長流川の流量観測地点が山間部にあるため観測流量は少ないものの，融雪出水の傾向を知るには十分である．これらの四河川は河川流量が多く，噴火湾に注ぐ全河川流量の約 50％を占める（Nakada et al., 2012）．Fig. 4c に，シミュレーション結果に基づいた四河川の流量観測地点における春季（3～4 月）の河川流量を示す．これらの四河川の合計平均流量は約 48 m^3/s であり 2013 年が最も多く，春季（3～5 月）の全流量の 7～8 割は融雪出水量である（Nakada et al., 2012）．また，春季における河川流量と 12～5 月における積算降雪量（Fig. 4b の積雪深ではないことに注意）には高い相関関係がある（相関係数 0.82）．すなわち積雪期の積算降水量が融雪出水量を支配している．

ホタテガイ母貝は 2 月に卵巣を増大させ，春季（3～5 月）に産卵する（Baba et al., 2009）．ホタテガイの浮遊幼生は，春季から夏季にかけて（3～7 月）湾内で過ごし，漁業者は稚貝となったホタテガイを採集器によって一旦捕獲し陸上の養殖施設で養育する．春季の噴火湾内における稚貝密度は，ホタテガイ年間生産量を決定する重要な要素である．

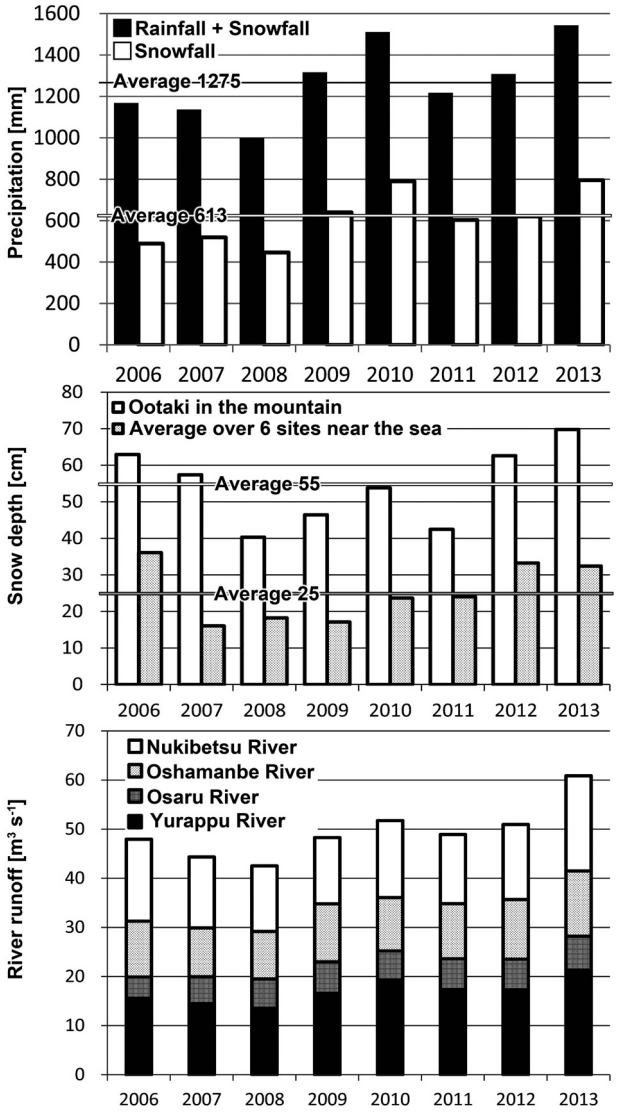

図 4：噴火湾周辺の AMeDAS 観測点（Figure 2）における（a）観測降水量（降雨量と降雪量）と（b）積雪深（全地点平均値と山間部）の経年変化．（c）四河川の観測点（Figure 2）における河川流量の季節平均値（3～4 月）．

Figure 4：Interannual variations of（a）the total observed precipitation (rainfall and snowfall) averaged over six AMeDAS stations (Figure 2), (b) averaged snow depths observed at the Ootaki of the AMeDAS in the mountain, and averaged over six AMeDAS stations, and (c) the runoffs of 4 major rivers averaged over the period from March to April. The runoffs were observed at the river observation stations (Figure 2).

Fig. 4 でみた積雪深，降水量，降雪量と，春季のホタテガイの稚貝密度（Baba et al., 2009）の関係をみてみよう（Fig. 5）．積雪深，降水量，降雪量は，山間部における 12 月から 5 月までの平均値である．稚貝密度と積雪深，降水量との間には明瞭な関係性がなさそうだが，稚貝密度と降雪量の間には高い相関関係がみられる（ただし，2011 年を除く）．2011 年については，3 月 11 日に発

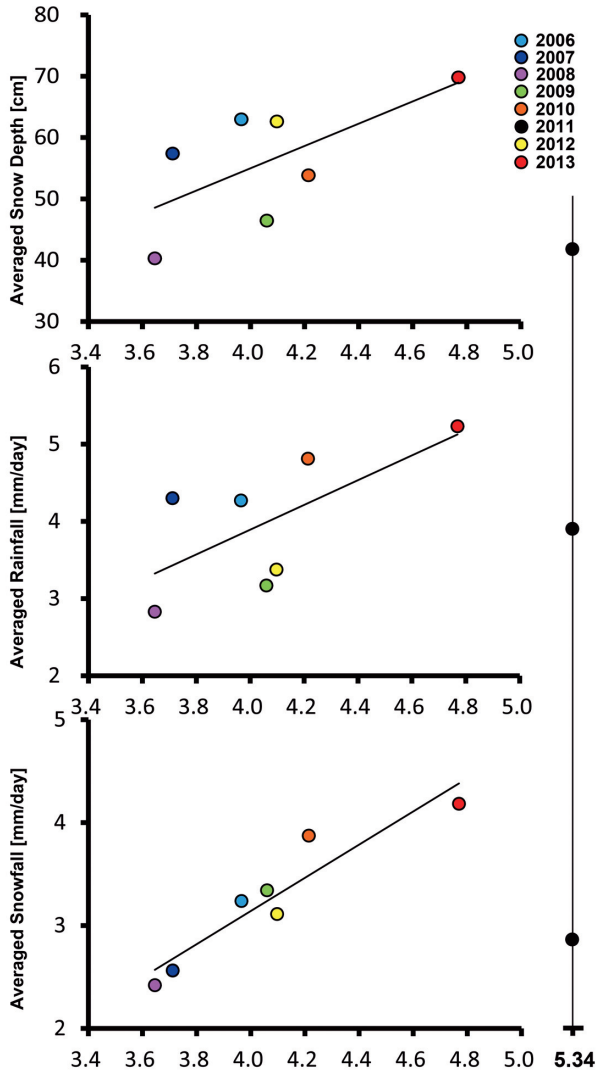

図 5：ホタテガイ稚貝密度の平均値（5 月から 7 月まで）と積雪深（上段），降雨量（中段），降雪量（下段）の平均値（前年 11 月から 5 月まで）の散布図.
Figure 5：Scatter plots of spat densities for scallops averaged over late May to early July and snow depth, rainfall, and snowfall averaged over November in a previous year to May of 2006 to 2013 (see Baba et al. 2009 for the sampling and calculation procedures used to derive the spat density data).

生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）による津波によって海況が劇的に一変したため，一時的に降雪量と稚貝密度の間をつなぐ陸海連関が崩れたものと考えられる．2011 年について別途検討中である．稚貝密度と 3〜4 月の河川流量（すなわち融雪出水量）とも極めて高い相関関係（相関係数 0.99）があることがわかっている（Nakada et al., 2014a）.

5. 融雪出水による淡水・栄養塩フラックスと土地利用

Fig. 6a は，主要な八河川（Fig. 2b）の最下流地点の水中における DIN（栄養塩）濃度の季節変化の図である．長流川を除けば，全ての河川の DIN 濃度は春季（3 月〜4 月），すなわち融雪期間においてピークをとっていることが確認できる．濁川と貫気別川の DIN 濃度は，他の六河川に比べ高い．次いで，長流川，遊楽部川の濃度が高い．集水域における土地利用をみると（Fig. 6b），全ての集水域において森林域が占める割合が高く人為影響が少ないが，濁川と貫気別川の農地の割合が 23%，30% となっており他の河川より高い．次いで長流川，遊楽部川の農地の割合が高い．このことは，DIN 濃度が農地（主に畑地・酪農地）から排出される栄養塩によって増加していることを示唆している.

水文モデル（Nakada et al., 2012）による計算結果を用いて，観測データの無い河川の流量を推定し，噴火湾に注ぐ全ての河川流量を計算した．Fig. 7a は，2006 年から 2013 年 4 月までの全河川の合計流量である．明らかに春季に河川流量のピークがみられ，融雪出水が再現されている．夏季・秋季にもピーク流量がみられるが一時的な降雨増大による洪水出水であり，月平均値を計算すると 4〜5 月における河川流量が季節的に最も多い.

推定河川流量に DIN 濃度（Fig. 6a）を乗じて DIN フラックスを推定した．Fig. 7b は，2006 年から 2013 年 4 月までの全河川の合計 DIN フラックス推定値である．春季の融雪出水時において DIN フラックスのピークがみられ，河川流量の時間変動と非常によく似た変動を示している．これは，DIN 濃度の時間変動幅よりも，河川流量の時間変動幅が大きいため，河川流量の時間変動に DIN フラックスの変動が支配されるからである．ゆえに，春季の河川流量が最も多い 2013 年において年間 DIN フラックスが最も多かった．海底湧水による DIN フラックスも評価されているが（Nakada et al., 2014a），融雪期においてのそれは河川出水と海底湧水を合計した DIN フラックスの 10% 以下であり，海域への DIN フラックスのほとんどが河川からのものである.

6. 融雪出水によって強化される時計回りの流動場

融雪出水によって噴火湾沿岸域には，大量の栄養塩を含んだ河川水が供給されると共に，海水塩分が低下した河川希釈水が形成される．つまり，融雪期には沿岸海域へ継続的に浮力が供給される．一例として，Fig. 8 に 2012 年における陸海統合モデル（Nakada et al., 2014a）のシミュレーション結果を示す．2012 年は，春季において湾内へ反時計回りに流入する沿岸親潮が弱く，融雪出

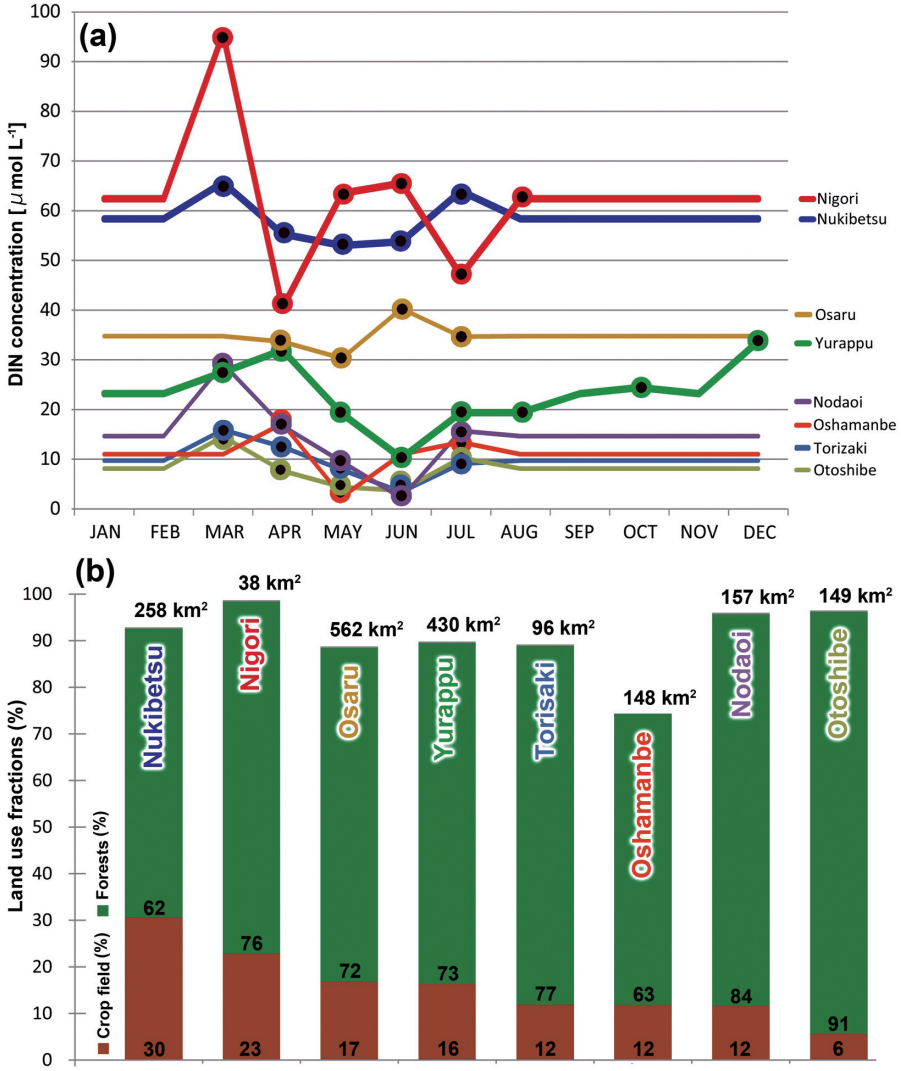

図 6：(a)主要八河川（Fig. 2）の最下流地点の水中における DIN（栄養塩）濃度の季節変化．(b)主要八河川における集水域面積と農地と森林域が集水域に占める割合．

Figure 6：(a) Seasonal variations of DIN concentrations observed at the mouths of the eight major rivers (after Nakada et al., 2014a). Black dots with each river color indicate values calculated by observational datasets. (b) Percentages of crop field and forests in the eight major watersheds. See Figure 2 for the map of land use in each watershed. The numerals on the bars represent the summed percentages of crop field and forest in the watersheds. The numerals at the top of the bars indicate the areas of each watershed.

水が流動場に与える影響がみえやすい．海域には流動場（ベクトル）と塩分場（カラー）が示され，陸域の集水域上には積雪量（積雪相当水量）がコンターで，河川流量がカラーによって示されている．融雪出水が始まる前の 3 月 1 日（Fig. 8 左図）には，湾内中央に時計回りの渦が形成されている．この時期は山間部での積雪量が多く河川流量は少ない．湾中央の流動場は 3〜5 月にかけて弱化し，沿岸側の海域においては融雪出水による淡水（浮力）の流入によって時計回りの流動場が強化される．例えば，4 月 26 日（Fig. 8 右図）をみると，沿岸近傍に時計回りの流動場が形成され，河口から出水した河川水によって沿岸域の塩分が低下している．山間部は 3 月下旬頃から融雪が始まり積雪量が激減した結果，融雪出水による河川流量が増大した河川が多くみられる．沿岸近傍における流動場の流速は，湾口南岸から時計回りに強くなっていき湾口北岸付近で最大となる．本モデルの再現性については，期間は限られているものの（2008〜2009 年），ADCP や CTD による海洋観測データによって検証されている（Nakada et al., 2013; Nakada et al., 2014a）．

時計回りの流動場はホタテガイ稚貝を沿岸に沿って輸送すると言われている．時計回りの流動場の強化のメカニズムについては，河川希釈水の浮力駆動による，内部ケルビン波（McCreary et al., 1997；佐藤ら，2003）による説明や self advection（Garvine, 2001）により説明され

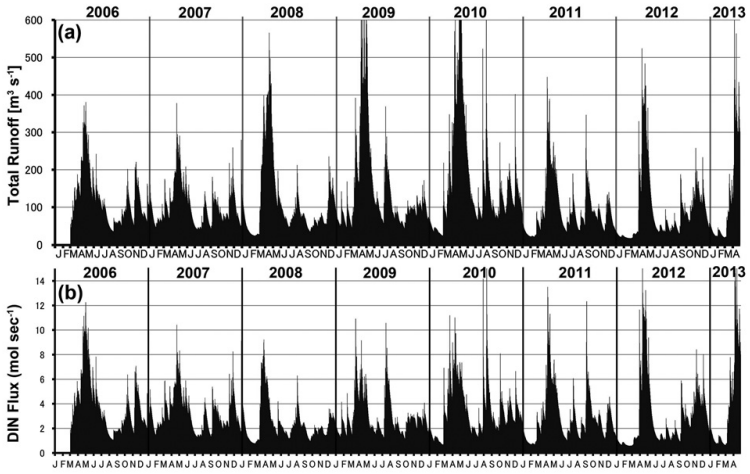

図 7：(a) 噴火湾に流入する河川流量の推定結果を日平均した全河川の合計値の時系列（2006 年 3 月から 2013 年 4 月まで）．(b) 全河川からの日平均 DIN フラックスを合計した時系列．

Figure 7：(a) Temporal variation in daily mean estimated volume transports of the total discharge from all rivers from March 2006 to April 2013. (b) Temporal variations in estimated daily mean DIN fluxes (mol s^{-1}) from all rivers.

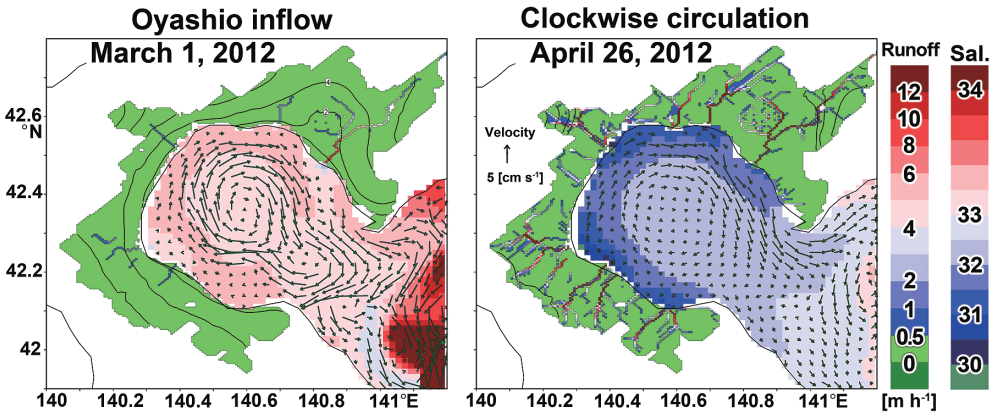

図 8：陸海統合モデルによって再現された塩分（海域のカラー），流速場（ベクトル），河川流量（陸域のカラー），および積雪相当水量（黒太線のコンター）の日平均値．(a) は 2012 年 3 月 1 日，(b) 4 月 26 日．

Figure 8：Daily mean maps of the simulated salinity (colors on the ocean), current (vectors) at the surface layer (−2 m depth), terrestrial runoff (colors on the land), and water equivalent of the snow cover (m) (black solid contours on the land) (a) on 1 March 2012 and (b) on 26 April 2012. The levels of runoff volume transport are depicted by red to blue to white colors along the river paths.

ている（Nakada et al., 2014a）．海表面上を吹送する風駆動による発生メカニズムも提案されている（Takahashi et al., 2010）．このような噴火湾における流動場の季節変化は，これまでの様々な観測結果によっても明らかになっている（e. g., Takahashi et al., 2007）．

7. 陸起源栄養塩の沿岸海域への広がり

Fig. 8 でみたような流動場の時間変化によって，河川から湾内へ流入した栄養塩がどのように湾内で輸送されるのかを粒子追跡シミュレーション（Awaji et al., 1980）によって調べた．栄養塩消費が顕著な春季ブルーミング後（融雪出水中期）の 4 月 10 日から融雪出水末期の 6 月 10 日までの 2 か月間，半日ごとに全河川の河口付近グリッドにおいて粒子を 9 個配置して，輸送計算を行った．粒子にそれぞれの河川からの栄養塩フラックス値を持たせた．なお，簡単のため移流による粒子の水平輸送だけをみることとし，粒子は沈降せず表層にとどまり続け，粒子の拡散過程は考慮していない．

Fig. 9 の上段は，計算格子毎に計算した粒子密度の水平分布図である．5 月 7 日の分布図をみると粒子が時計回りの流動場によって沿岸域に沿ってほぼ一様に存在し

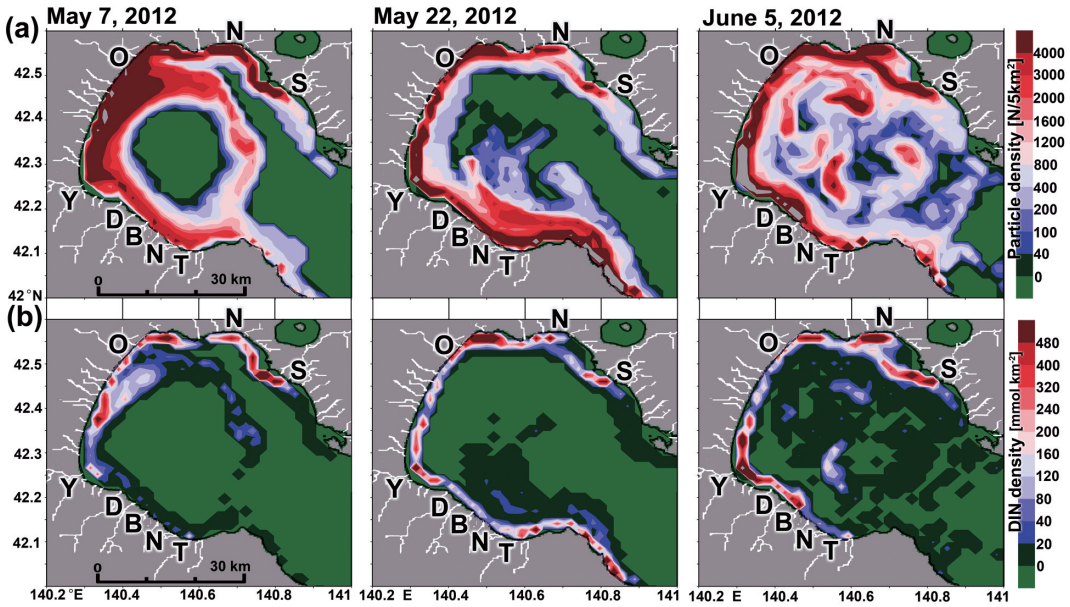

図 9：粒子追跡シミュレーションによる(a)粒子密度と(b)DIN 濃度の水平分布．2012 年 5 月 7 日（左図），5 月 22 日（中央図），6 月 5 日（右図）における計算結果．
Figure 9：Horizontal distributions of (a) simulated particle densities, and (c) DIN densities on (left) May 7, 2012, (mid) May 22, 2012, and (right) June 5, 2012. The eight capital letters (T, N, B, D, Y, O, N, and S) denote the abbreviations for the major rivers (Figure 2). White lines along the bay are river paths.

ていることがわかる．5 月 22 日には，湾口の北端，南端から湾外へ少しずつ流出しているものの，沿岸に沿って粒子密度が高い領域がある．6 月 5 日には湾中央部においても粒子密度が高くなっており，河口付近の粒子は湾内から中央へ少しずつ輸送された．ところが栄養塩フラックスの密度をみると，どの日においてもほぼ沿岸域でのみ高い値を示しており，栄養塩は湾中央の内部へはほとんど供給されていないことを示唆している．これは，栄養塩フラックスの大きな河川から流出した栄養塩が，主に沿岸域で留まり続け，そして消費されるものと推察される．ただし，粒子数をさらに多くして拡散過程を考慮すれば，栄養塩濃度が高い領域は沖側へ拡張すると考えられるが，本シミュレーション結果の定性的な傾向は変わらないと考えられる．

8. まとめ

8.1　融雪出水とホタテガイ稚貝密度との陸海連関

冬季降雪量は春季（3〜4 月）の河川流量（すなわち融雪出水量）を支配する．多くの農地に接してきた河川水は農地から排出される栄養塩を多く含むため，河川水の栄養塩濃度が高くなる傾向にある．しかし，これら栄養塩濃度の時空間変動幅は，河川流量の時間変化に比べて変動幅が小さいため，結果として河川流量の時間変動が栄養塩フラックスを支配している．春季（3〜4 月）において多量の栄養塩が沿岸域に供給されると植物プランクトン（クロロフィル a：Chl-a）濃度が増加し，ホタテガイ母貝の摂餌量が多くなるため卵巣の栄養状態もよくなる（Baba et al., 2009）．その結果，沿岸海域における卵や浮遊幼生の密度が高くなり，年間のホタテガイ養殖生産量を決定する稚貝の量も多くなると考えられる．これらの結果は，融雪出水中の栄養塩濃度が農地からの影響を受けているため，農業が養殖生産量に重大な役割を果たしていることを示唆する．このような陸海連関の存在が，融雪出水量を決定する降雪量とホタテガイ稚貝密度との間に高い相関を生み，陸域の農業と海域の養殖業とを，特に融雪期において強く結びつけていると考えられる．

8.2　その他に見出された陸海連関

本論では，陸域と海域における物理過程を再現および定量化できると共に，陸域と海域を統合的に解析・可視化するためのモデルの集合体を陸海統合モデルと呼称している．本論の陸海統合モデルは物理的（水理学的）な側面が強いものの，噴火湾におけるホタテガイ生産を支える主要な陸海連関を見出すことができた．その他にも，陸海統合モデルにより興味深い陸海連関が発見されてきているので最後に簡単に紹介する．

春季に漁業者がホタテガイ稚貝を洋上で収集した後，稚貝を成貝へ養成させるため陸上に設営された養殖場に

移される．この工程が実施される 5〜7 月の時期に，河川希釈水がホタテガイ稚貝の生残・成長に負の影響を与える．養殖場では地先の海水を汲み上げており，ホタテガイ稚貝は塩分 30 以下では斃死する可能性がある（Nakada et al., 2014b）．春季（3〜4 月）の流量（すなわち融雪出水量）が多いと，稚貝密度を高める方向に作用するが，融雪時期が遅くなるなど 5 月以降の河川流量が多くなった場合は養殖生産を妨げる方向に作用する．

春季の湾内沿岸海域における塩分低下は，主に沿岸親潮水と河川水の流入によって引き起こされる．降水による塩分低下は，沿岸海域の面積が小さいためほとんど無視してもよい程度である．沿岸親潮の流入のタイミングが融雪期よりも遅い場合，湾内が先に融雪出水によって低塩化するため，湾内の沿岸水と沿岸親潮水との密度差が小さくなり，沿岸親潮が湾内に流入しにくくなる．その結果，沿岸親潮水塊は少なくなる傾向にある（Nakada et al., 2014b）．沿岸親潮の湾内流入が 3 月初旬の場合，早期から湾内は低塩化し，加えて 3〜5 月の融雪出水によってさらに低塩化する．例えば，2010 年はその典型的なケースであった．

河川からの淡水フラックスによる湾内表層水の塩分低下は，噴火湾における水塊配置にも影響をあたえる．春季の河川出水（融雪出水）が無い場合，淡水による浮力フラックスが無いため時計回りの流動場も強化されない．また，湾内と湾外の密度差が大きくなって沿岸親潮が湾内に流入しやすくなり，親潮水塊が約 1.2 倍に増える．融雪期に河川出水した淡水は，湾内表層で河川希釈水として滞留し続け，冬季における冷却混合によって河川希釈水と対馬暖流水の混合水が形成される．融雪出水が無い場合，混合水の量が減少し，かわりに対馬暖流水の割合が最大で約 3 倍多くなる（Nakada et al., 2014a）．このように積雪・融雪過程も再現可能な陸海統合モデルによって，湾内に存在する水塊が陸水の影響をどの程度受けるのかを正確に評価することができる．

海底湧水（submarine groundwater discharge：SGD）による栄養塩フラックスが，Chl-a 生産や漁業生産に貢献するという研究結果もある（e.g., Hu et al., 2006）．噴火湾に流れ出す SGD を通じた年平均 DIN フラックスが，河川を通じた全 DIN フラックスの 17％程度であることが陸海統合モデルによって推定されている（Nakada et al., 2014a）．SGD による DIN フラックスが植物プランクトン（Chl-a）や海藻類に与える影響は，噴火湾においては海底近傍等における局所的なものであると考えられる．例えば，湾内沿岸域に点在する海底湧水スポットではコンブ等の海藻類が繁茂していることが，漁業者の経験や CTD 観測・潜水調査によって函館水産試験所職員によって確かめられている．

沿岸域における農業と漁業が持続的かつ協働的であるための統合的沿岸域管理の方法論を創出するには，陸海連関を認識することが重要である．そのために，様々な対象沿岸域を実験フィールドとして陸海連関を見出すための現地調査・モデル開発研究を継続し，陸海連環の一般性や地域性を検証していく必要があるだろう．特に陸海連環を表現できるモデルは必須である．本論で紹介した陸海統合モデルだけでは生態学的な側面からのアプローチができない．今後は，陸海統合モデルに，物質循環を表現できる地球化学的なモデルや，森林生態系や海域生態系モデル，生態系サービスを評価できる社会科学的なモデルを組み込み，より多様な観点から陸海連関を解明できると期待している．

謝辞

本研究は文部科学省地域クラスター創成事業（函館マリンバイオクラスター）の一環として実施された．数値計算には京都大学のスーパーコンピューター（CRAY XE6）を使用した．また，気象庁が作成した GPV-MSM 再解析気象データについては，京都大学生存圏研究所からご提供いただいた．有益な議論をさせていただきました北海道立総合研究機構函館水産試験場の渡野邉雅道氏，金森誠氏および佐藤政俊氏に深く感謝申し上げます．

参考文献

赤羽敬子，岸道郎，向井宏，飯泉仁（2003）陸域からの栄養塩負荷量に対する北海道厚岸湖の生態系の応答．沿岸海洋研究，**40**(2)，171-179.

Antonio, M.S., M. Ueno, Y. Kurihara, K. Tsuchiya, A. Kasai, H. Toyohara, Y. Ishii, H. Yokoyama and Y. Yamashita (2010) Consumption of terrestrial organic matter by estuarine molluscs determined by analysis of their stable isotopes and cellulose activity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science,* **86**, 401-407.

Awaji, T., N. Imasato and K. Kunishi (1980) Tidal exchange through a strait: A numerical experiment using a simple model basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 1499-1508.

Baba, K, R. Sugawara, H. Nitta, K. Endou and A. Miyazono (2009) Relationship between spat density, food availability, and growth of spawners in cultured *Mizuhopecten yessoensis* in Funka Bay: concurrence with El Nino Southern Oscillation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **66**, 6-17. doi:10.1139/F08-183.

Garvine, R.W. (2001) The impact of model configuration in studies of buoyant coastal discharge. *J. Mar. Res.,* **59**, 193–225. doi:10.1357/002224001762882637.

Gorman, D.B., D. Russell and S.D. Connell (2009) Land-to-Sea Connectivity: Linking Human-Derived Terrestrial Subsidies to Subtidal Habitat Change on Open Rocky Coasts. *Ecol. Appl.,* **19**(5), 1114–1126.

長谷川伸彦，磯田豊（1997）噴火湾の水収支．海と空，**73**，113–121.

Hu C., F.E. Muller-Karger and P.W. Swarzenski (2006) Hurricanes, submarine groundwater discharge, and Florida's red tides. *Geophys. Res. Lett.,* **33**, L11601, doi: 10.1029/2005GL025449.

Ishikawa Y, T. Awaji, T. Toyoda, T. In, K. Nishina, T. Nakayama, S. Shima and S. Masuda (2009) High-resolution synthetic monitoring by a 4-dimensional variational data assimilation system in the northwestern North Pacific. *J. Mar. Syst.,* **78**, 237–248.

Katsuki, K., B.K. Khim, T. Itaki, N. Harada, H. Sakai, T. Ikeda, K. Takahashi, Y. Okazaki and H. Asahi (2009) Land-sea linkage of Holocene paleoclimate on the Southern Bering Continental Shelf. *The Holocene*, **19**(5), 747–756.

小林直人，磯田豊，朝日啓二郎（2015）日高湾陸棚斜面に沿って西方に引き延ばされる津軽 Gyre の数値実験．海の研究，**24**(5)，171–187.

Kudo, I., T. Yoshimura, M. Yanada and K. Matsunaga (2000) Exhaustion of nitrate terminates a phytoplankton bloom in Funka Bay, Japan: change in SiO_4: NO_3 consumption rate during the bloom. *Mar. Ecol. Prog. Ser.,* **193**, 45–51.

McCreary, J.P., S. Zhang and S.R. Shetye (1997) Coastal circulation driven by river outflow in a variable-density 1 1/2-layer model. *J. Geophys. Res.,* **102**, 15535–15554.

Milner, A.M., C.L. Fastie, F.S. Chapin III, D.R. Engstrom and L.C. Sharman (2007) Interactions and Linkages among Ecosystems during Landscape Evolution. *BioScience,* **57**(3), 237–247.

向井宏（監修）（2012）森と海をむすぶ川―沿岸域再生のために―．京都大学学術出版会，335pp.

Nakada S., Y. Ishikawa, T. Awaji, T. In, S. Shima, T. Nakayama, T. Isada and S. Saitoh (2012) Modeling runoff into a region of freshwater influence for improved ocean prediction: An application in Funka Bay. *Hydro. Res. Lett.,* **6**, 47–52.

Nakada S., Y. Ishikawa, T. Awaji, T. In, K. Koyamada, M. Watanobe, H. Okumura, Y. Nishida and S. Saitoh (2013) An integrated approach to the heat and water mass dynamics of a large bay: High-resolution simulations of Funka Bay, Japan. *J. Geophys. Res.-Ocean,* **118**, 1–18. doi:10.1002/jgrc.20262.

Nakada, S., K. Baba, M. Sato, M. Natsuike, Y. Ishikawa, T. Awaji, K. Koyamada and S. Saitoh (2014a) The role of snowmelt runoff on the ocean environment and scallop production in Funka Bay, Japan. *Progress in Earth and Planetary Science,* **1**(1), 1–25. doi:10.1186/s40645-014-0025-2.

Nakada, S., Y. Ishikawa, K. Koyamada, T. Awaji and S. Saitoh (2014b) Ocean Prediction for Aquaculture: An Interview-based system. *J. Adv. Simulat. Sci. Eng.,* **1**(1), 111–126. doi:10.15748/jasse.1.111.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydro.,* **10**(3), 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.

O'neel, S., E. Hood, A.L. Bidlack, S.W. Fleming, M.L. Arimitsu, A. Arendt, E. Burgess, C.J. Sergeant, A.H. Beaudrea, K. Timm, G.D. Hayward, J.H. Reynoldsand and S. Pyare (2015) Icefield-to-Ocean Linkages across the Northern Pacific Coastal Temperate Rainforest Ecosystem. *BioScience,* **65**(5), 499–512. doi:10.1093/biosci/biv027.

大橋正臣，山本潤，須藤賢哉，水垣滋，門谷茂（2013）鵡川沿岸の基礎生産に対する融雪出水の効果について．土木学会論文集 B2（海岸工学），**69**(2)，I_1191-I_1195.

大谷清隆（1971）噴火湾の海況変動の研究Ⅱ　噴火湾に流入・滞留する水の特性．北大水産彙報，**22**(1)，58–66.

大谷清隆，木戸和男（1980）噴火湾の海洋構造．北大水産彙報，**31**(1)，68–80.

Polis, G.A. and D.H. Stephen (1996) Linking Marine and Terrestrial Food Webs: Allochthonous Input from the Ocean Supports High Secondary Productivity on Small Islands and Coastal Land Communities. *Am. Nat.,* **147**(3). 396–423.

佐藤千鶴，磯田豊，清水学（2003）夏季噴火湾表層に形成される時計回りの循環流．沿岸海洋研究，**40**(2)，181–188.

Stoms, D.M., F.W. Davis, S.J. Andelman, M.H. Carr, S.D. Gaines, B.S. Halpern, R. Hoenicke, S.G. Leibowitz, A. Leydecker, E.M.P. Madin, H. Tallis and R.R. Warner (2005) Making the Land-Sea Connection. *Frontiers in Ecology and the Environment,* **3**(8), 429–436.

Takahashi, D., K. Kido, Y. Nishida, N. Kobayashi, N. Higaki and H. Miyake (2007) Dynamical structure and wind-driven upwelling in a summertime anticyclonic eddy within Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Conti. Shelf Res.,* **27**, 1928–1946.

Takahashi, D., H. Miyake, T. Nakayama, N. Kobayashi, K. Kido and Y. Nishida (2010) Response of a summertime anticyclonic eddy to wind forcing in Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Conti. Shelf Res.,* **30**, 1435–1449. doi:10.1016/j.csr.2010.05.003.

山下洋（監修）（2007）森里海連環学：森から海までの総合的管理を目指して．京都大学学術出版会，335pp.

Yoshimura K, T. Sakimura, T. Oki, S. Kanae and S. Seto (2008) Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan. *Hydro. Res. Lett.,* **2**, 22–26.

芳村毅，工藤勲（2003）噴火湾における河川からの栄養塩負荷量およびそれらが湾内の基礎生産に与える影響．海の研究，**12**(2)，185–193.