



|                  |                                                                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 縁辺海モデルの現状と新たなモデリング手法                                                                            |
| Author(s)        | 木田, 新一郎                                                                                         |
| Citation         | 低温科学, 74, 67-75                                                                                 |
| Issue Date       | 2016-03-31                                                                                      |
| DOI              | <a href="https://doi.org/10.14943/lowtemsci.74.67">https://doi.org/10.14943/lowtemsci.74.67</a> |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/61185">https://hdl.handle.net/2115/61185</a>               |
| Type             | departmental bulletin paper                                                                     |
| File Information | 067-075.pdf                                                                                     |



# 縁辺海モデルの現状と新たなモデリング手法

木田 新一郎<sup>1)</sup>

縁辺海の二つの特徴、海峡交換流と河川流入、に焦点を当て縁辺海の数値モデルの現状、手法、そして進展についてレビューした。縁辺海の空間スケールは沿岸より大きい海盆より小さい。海底地形や海岸線の影響を強く受けつつ、二つの空間スケールで起こる力学が相互に作用する海域となっている。縁辺海の鉛直・水平循環に伴う海峡交換流の力学過程をまず紹介し、西岸境界流を現実的に再現する重要性を Island Integral Constraint を基に議論した。また近年の高解像度化に伴って必要性が高まっている河川流入を再現する新たな手法として層厚モデルを提案し、陸域から海洋の流れ場をシームレスに繋ぐことが可能であることを示した。

## A numerical model for the marginal seas

Shinichiro Kida<sup>1</sup>

This manuscript reviews current methods, knowledge, and progress of numerical models for the marginal seas. Marginal seas cover areas that are larger than a coastal scale but smaller than a basin scale. It is a region where dynamics occurring in both scales interact, under the influence of detailed structures in bottom topography and coastlines, which often requires high spatial resolution models to resolve. Two aspects are raised, where numerical models of marginal seas could improve, straits exchange flows and river outflows. The dynamics of the straits exchange flows that occur between marginal seas and open ocean are first discussed, with a focus on the overturning circulation. The importance of resolving realistic western boundary currents is then discussed based on the framework of the island integral constraint. This framework becomes especially important when the straits that connect the marginal seas and open ocean are narrow. Lastly, a new approach for modeling river inflows and ocean circulation simultaneously is introduced. The use of a layer model is shown to successfully capture the water flow from land to the ocean during extreme precipitation events.

キーワード：数値海洋モデル・海峡交換流・河川流出・エスチュアリー循環

Numerical ocean model, Strait exchange flow, River discharge, Estuary circulation

### 1. 縁辺海という存在

大気と海洋の大きな違いは「壁があるかないか」にある。「空気と水」という物質としての違いはもちろんあるが、壁の有無も同じくらい重要な違いではないだろう

か。壁のない大気大循環は基本的には緯度「帯」があり、そのなかで山の起伏や海水温の変化等によって経度方向に空間変動が生まれている（図 1a）。一方、陸という壁がある海洋大循環は緯度「帯」をつくることできず、代わりに緯度をまたぐ「環（わ）」が形成されている（図 1b）。この一見、教科書の始まりに載っていそうなことをなぜ改めて述べたかという、大気の「帯」と海洋の「環」の違いは、流れの「外側」「内側」のような位置の概念に全く異なる性格をもたらしからである。例えば大気ではジェット気流の外側と内側が赤道と極域に相当するのに対して、海洋では風成大循環の外側と内側が沿岸と外洋に相当する。つまり太平洋の縁にある日本に住んでいる人と太平洋の真ん中にあるハワイに住んでいる人

---

連絡先

木田 新一郎

海洋研究開発機構・アプリケーションラボ

〒236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25

Tel. 045-778-5514

e-mail: kidas@jamstec.go.jp

1) 海洋研究開発機構・アプリケーションラボ

Application Laboratory, JAMSTEC, Yokohama, Japan

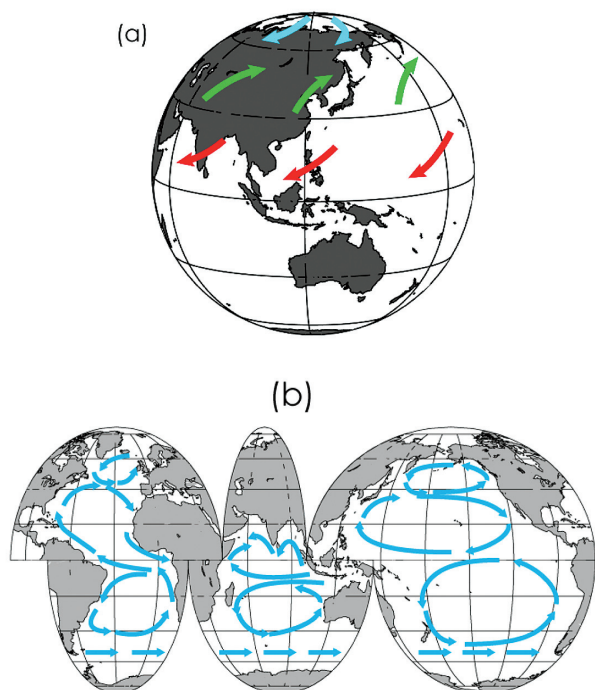


図1：(a)大気大循環の模式図。北東貿易風、偏西風、極偏東風が形成されている。(b)海洋大循環の模式図。海盆毎に循環場が形成されている(Adapted from Fig 3.1 of Open University, 2001).

Figure 1: (a) A schematic of the general atmospheric circulation. Notice the bands of trade winds, westerlies, and polar easterlies. (b) A schematic of the general oceanic circulation. Notice the closed loops in oceanic basins (Adapted from Fig. 3.1 of Open University, 2001).

は、大気の視点では緯度差  $15^\circ$  ほどの違いしかない環境に属しているが、海洋の視点から見ると赤道と北極のように大きく違う環境に住んでいるということになるのである。

海洋の縁には文字通り「縁辺海」と呼ばれる海が存在しており(図1b)、先程述べた表現を使うとこの海が海洋の最も「外側」に位置する海になる。日本周辺だとオホーツク海・日本海・東シナ海、ヨーロッパ周辺だとノルウェー海・地中海などが縁辺海の代表例といえよう。おそらくこの縁辺海に相当するような存在は大気にはないのではないだろうか。縁辺海は陸面の情報を外洋へ伝える役目を担っており、陸上の降水パターン、植生、生態系、地質の違いは河川や地下水を通じて、まずこの縁辺海に伝わることになる。そして「陸の情報」をもった淡水や物質は縁辺海内部で変遷を重ねたのち、外洋へと徐々に流出することになる。逆に縁辺海は外洋で起きている海洋大循環の変動を陸域に伝える役目も担っている。縁辺海は複雑な海岸線・海底地形によって外洋から半閉鎖的な空間が形成されている事が多く、海峡や大陸棚で起きている海水の交換を通じて外洋循環は縁辺海の影響

に変化をもたらすことになる。

### 1.1 縁辺海の数値モデルの現状

縁辺海は、陸域と海域の繋ぎ役であると同時に人間の社会活動に接する海でもあるため、その数値モデルは現実的な海域の変化・変動を予測することが求められている(e.g., JCOPE2; Miyazawa et al., 2009)。では縁辺海の数値モデルを構築する上で気をつけるべき事とは何だろうか？

これまで縁辺海で用いられてきた数値モデルは外洋大循環モデルを領域で用いるようにしたものか(e.g., COCO; Matsuda et al., 2009)、沿岸モデルの計算領域を拡大(e.g., FRA-ROMS: <http://fm.dc.affrc.go.jp>)したものである。外洋大循環モデルを用いて全球・海盆スケールとともに縁辺海を解く場合は、縁辺海—外洋間で起きる物理はモデル内部で解くことになる。この場合、海域に特化したチューニングは施しにくくなり、結果として数値モデルの再現技術が確認できるという利点がある。しかし、全球での計算は計算資源を多く消費し、解析する中で追加実験が必要になった際は、更に多くの計算資源が必要となる。そのため、より利便性の高い領域モデルを構築する方が現実的であろう。欠点としては外洋大循環モデルの多くは領域モデルとして用いる際に必要な側面境界条件の設定手法に豊富なオプションを備えてないことがあげられる(MOM4; Griffies et al., 2008; HYCOM; Bleck, 2002)。また数m深といった浅水域を解くことを念頭に開発されていないため、潮汐・海底混合・陸域への浸水(wet & dry)など縁辺海で起きる多様な物理現象が組み込まれていない場合が多く、沿岸付近の現象の再現性には不安が残る。外洋大循環モデルを縁辺海に用いる際は、あくまでも深い外洋と同様の物理過程が縁辺海でも起きているという仮定のもとに用いていることを気にしておく必要がある。

沿岸モデルを用いて縁辺海のモデルを構築する場合、外部境界条件の設定方法に豊富なオプションが用意されているというメリットがある(e.g., ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005)。これは沿岸モデルが領域モデルとして発展してきたためであり、多様な物理現象が組み込まれていることも多く、浅水域や複雑な海岸線を再現できる非構造格子にも対応していることが多い。ただ沿岸モデルは全球・長期積分のために開発されてこなかったため、海盆スケールで用いた場合、海域・積分期間によって観測から大きくずれてしまう可能性が高く、外洋大循環モデルに比べてより注意する必要がある。とはいえ、この10年で外洋大循環モデルも沿岸モデルも

どちらも利便性が高まってきており、モデルの違いはかなり小さくなっている。研究する上で、どちらかのタイプのモデルを使わなければ研究が進まない、という状況は限られているように思う。ほとんどの研究者は、自身を使い慣れている数値モデルに必要な機能を持たせる工夫を施して縁辺海モデルを構築しているというのが現状だろう。問題の多くは、外洋大循環モデルであれ、沿岸モデルであれ、領域モデルとして用いるとなる上で必要となる側面境界条件を準備しなければならない点にある。データ同化プロダクト・観測値・他のシミュレーション結果などを用いるわけだが、これらのデータが必ずしも欲しい時空間解像度や再現精度で用意できるとは限らないのである。

数値海洋モデルの利便性が向上し、モデル毎の差が縮まるのは時間の問題とすると、現モデルの組み合わせや高解像度化・精緻化では解決できない問題とはなんだろうか？「縁辺海」という括りで考えるなら、ひとつは先程述べた領域モデルの宿命である側面境界条件、つまり外洋と縁辺海の繋がり具合の再現性であろう。この問題は領域モデルを用いる限り永遠のテーマであり、どこかの時点で完璧にはならないことを受け入れるしかない。どちらかという何を押さえて置く必要があるか、という点を知っておくことが重要になる。もうひとつの解決できない問題は河川水の再現性ではないだろうか。河川水は短い時間スケールで変動するうえ、陸域にまたぎ、溶存・懸濁物質が関わる一筋縄ではいかない現象である。その他にも海水や直上大気の再現性も考えられるが、本稿では「外洋と縁辺海の繋がり方」と「河川」の二つのテーマに絞って縁辺海モデリングの考察を進めたい。

## 2. 縁辺海の基礎的モデル

縁辺海と外洋との繋がり方は縁辺海ごとに大きく異なる。北太平洋の場合、縁辺海の多くは西側にある。オホーツク海は 1000 m 程深く 40 km 程の幅のあるクリル諸島の割れ目ともいえる狭い海峡で太平洋と繋がっており、東シナ海は大陸棚縁を境に 1000 km 以上にわたって太平洋と繋がっている（図 2a）。北大西洋の場合は、縁辺海は東側にもある。地中海は 300 m 程深く 20 km 程の幅しかない狭いジブラルタル海峡で大西洋と繋がっており、ノルウェー海はグリーンランド・スコットランド海嶺を境に数 100 km にわたって大西洋と繋がっている（図 2b）。

縁辺海と外洋を繋ぐ海峡は代表的なものでも数 10 km 幅しかないことが多いため、縁辺海モデルは海峡の流れが解像できるよう 10 km 以下の水平解像度はあることが望ましい。この要件はおそらく今日の計算機能力では実現可能であろう。とすると、次に気にすべきことは、海峡を通じた鉛直循環、そして水平循環による海水交換の再現性である。

### 2.1 外洋との鉛直循環の再現性

海峡の上と下では流れが逆になる二層流が生じていることが多く、縁辺海が軽い水をつくる環境だった場合は上層で縁辺海から外洋へと流れている（図 3）。このような縁辺海は Dilution basin と呼ばれる（Tomczak and Godfrey, 2003）。逆に縁辺海が重い水をつくる環境だった場合は海峡の下層で縁辺海から外洋へと流れている。このような縁辺海は Concentration basin と呼ばれる。下層で外洋へ流出する重い水は深層重力流となり、深層

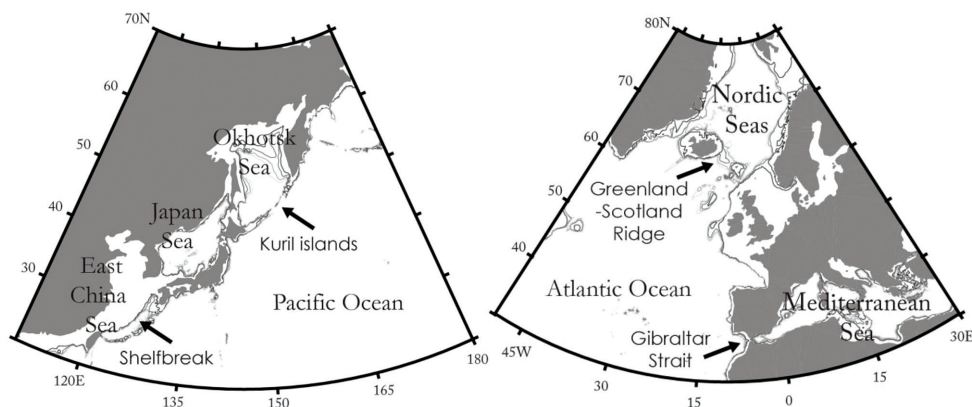


図 2：(左)北太平洋とその縁辺海 (右)北大西洋とその縁辺海。陸域がグレーでコンターは水深 250, 500, 750, 1000 m. Based on ETOPO1.

Figure 2 : (Left) North Pacific and its marginal seas. (Right) North Atlantic and its marginal seas. Lands are in gray and the contours are drawn for 250, 500, 750 and 1000 m depths. Based on ETOPO1.

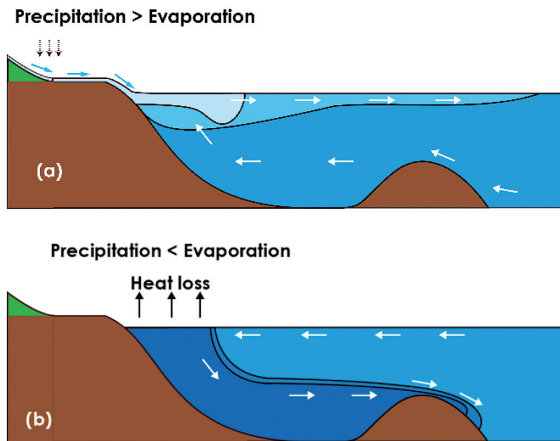


図3：(a) Dilution basin. 海峡の下から外洋の水が入り、上から縁辺海の水が出ている。(b) Concentration basin. 海峡の上から外洋の水が入り、下から縁辺海の水が出ている。

Figure 3: (a) A schematic of a dilution basin. Oceanic water enters the marginal sea near the bottom and marginal sea water exits above. (b) A schematic of a concentration basin. Oceanic water enters the marginal sea near the surface and marginal sea water exits below.

循環の駆動源の一つとなるのだが、数値モデルでの再現が非常に難しい現象であることが知られている (Legg et al., 2006). 全球・海盆スケールモデルではその再現性は芳しくなく、原因は深層重力流が大陸棚を駆け下る際に過剰に混合してしまうためである。特に海底斜面を棚田のように表現する  $z$  座標モデルでは流れが棚を降りる度に、不自然な混合が起きてしまい再現性が悪い。海底付近の解像度が高ければよいが、深層重力流は 1000 m 以上も深く斜面を下る現象のため、実質鉛直解像度を全水深で高める必要があり、非現実的な手段である。深層重力流の再現性に関しては、 $z$  座標モデル (Danabasoglu et al., 2012) に比べ密度座標モデル GOLD (Winton et al., 2013) やハイブリッド型モデル HYCOM (Xu et al., 2007) の方が自然な形で成功している。

## 2.2 西岸境界流の再現性

縁辺海—外洋間の水平循環を再現するには西岸境界流の再現性が非常に大切である。しかし渦活動が活発な西岸境界流は数値モデルで現実的に再現することが難しい現象のため、西太平洋に在るような縁辺海のモデルを構築するには十分にその再現性を確認しておく必要がある。海峡を通る流れと西岸境界流の関係性を決める物理過程は、これまでのところインドネシア通過流や日本海通過流の平均流においては Island Rule と呼ばれる理論がその基本原理だと考えられている (図 4a, Minato and Kimura, 1979; Godfrey, 1989; Tsujino et al., 2008)。この理論は島を回る流量が島の真東で吹く外洋上の風応力の

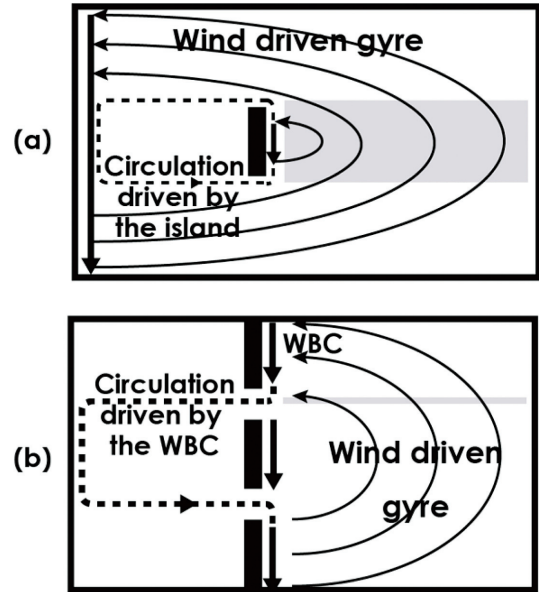


図4：(a) 孤立した島がある場合の循環場。(b) 半島や狭い海峡がある場合の循環場 (Adapted from Kida and Qiu, 2015)。

Figure 4: A schematic of the oceanic circulation (a) when there is an isolated island and (b) when an island is located close to a peninsula with narrow straits. (Adapted from Kida and Qiu, 2015).

平均分布で決まる、というものである。ケルビンの循環定理を用いて導かれた理論で、流れによって島に掛かる摩擦力の積分値はゼロになるという拘束条件に基づいている。つまり島のある部分に時計回りの流れがあるとなると『島が時計回りに回転』しないように島の別の部分では反時計回りの流れが生じる、ということである。Island Rule は島の東岸の西岸境界流のみでこのバランスが満たされることを仮定している。

Island Rule は海の中に孤立して存在する海盆スケールの島を想定した理論のため、残念ながら全ての縁辺海に適用できる理論ではない。例えばオホーツク海—太平洋間のように島が小さく、かつ半島に挟まれた海峡を通じた水平循環のような場合には不適切である。Ohshima et al. (2010) も Island Rule が観測流量に対して 1 オーダー大きく見積もってしまうことを指摘している。これは島が小さく、かつ半島によって挟まれた海峡がある状況では、島にかかる摩擦力は上流から流れてくる西岸境界流が海峡を通過する際に生じるものの方が支配的になるからである (Kida and Qiu, 2013)。つまり Island Rule のように「西岸境界流だけ」で島に掛かる摩擦力の積分値をゼロにするのではなく「海峡での流れ」と「西岸境界流」によって満たすようになる。こうなると二つの流れはお互いに強く依存するようになり、海峡の流れの再現性にとって西岸境界流が重要なことがわかる。縁辺海と外洋の海水交換にとって島の真東で吹く風応力の正確

性だけでなく上流から流れてくる西岸境界流の再現性も重要なのである。この「上流」の重要性は大陸棚のような地形が加わると更に高まるようである (Yang et al., 2015)。

### 3. 陸から海への水循環図

#### 3.1 河川水の流入

河川は陸から海へと淡水が流れる現象だが (図 5)、河口付近では海水が淡水の下を河川流量、潮汐混合、地形に応じて陸域へと遡上していることが知られている。遡上した海水は、海起源の物質を陸域に運ぶと同時に混合によって河川水に取り込まれ、再び海へと流れ出る。このような二層流はエスチュアリー循環と呼ばれ、河口で流出する河川水量を陸から流れてきた正味の淡水量を強化する働きをもつ。海へと流出した河川水は河口域で海水を取り込んだのち、北半球なら陸を右手に見ながら海岸に沿って進み、河川プリュームを形成する (Hetland, 2005)。河川水は低塩分のため、縁辺海の海面に広がると海面の成層を強め、混合を抑制することで、海面水温を変化させたり (Nghiem et al., 2014)、海水の生成過程に影響をもたらすことになる (Alkire et al., 2015)。

河川を縁辺海モデルの中で現実的に表現するにはどうしたらよいのだろうか？ 外洋大循環モデルの多くは河口付近の塩分を緩和するか Mass として河口のグリッドに淡水を足すことで表現してきた。大雑把な表現方法に留まっていたのは河川流量が海流に比べ小さいことや、河川による低塩分のシグナルが河口付近に集中していることが一因だろう。しかしそれ以上に外洋の海面で起きる降水・蒸発バランスの調整役として海面塩分を全海域

で観測気候値へと緩和していたことも大きな理由ではないだろうか (e.g., OFES; Masumoto et al., 2003)。海面塩分を気候値に緩和することで河川の効果がモデルの中に暗に組み込まれているのである。

沿岸モデルの多くは河口から海洋に流入する淡水を側面境界値として表現してきた。河口で起こる物理よりも縁辺海における河川プリュームを検証するにはおそらくこれで十分だろう。しかしこの表現手法には問題点が二つある。ひとつは河口が側面境界となり河川流量を気候値や観測値に前もって決めてしまうため、河口付近で起こる河川水と海水の相互作用が検証できなくなることである。もうひとつは河川の流れ場を再現するとはいえ月気候値でもって表現することが多いことである。大規模河川は上流から河口まで長い時間をかけて流れるため短期的な一気象イベントに大きく左右されないが、日本にあるような急峻な山々から駆け下る河川の流れは数日間のイベントである。つまり月気候値では日本の河川のように台風や集中豪雨のあとに起きる急激な流量の変化は全く捉えられない。これでは沿岸付近の海況を再現・予測するためには不十分であり、この問題はたとえ非構造格子等を用いたとしても解消されない。流量の観測データを用いるとしても大規模河川なら入手できるかもしれないが、中小規模河川ではおそらく無理がある。

現実的な河川を縁辺海モデルの中で再現するには、やはり陸上の河川と海洋の流れを数値的に同時に求めていることがベストである。もし将来予測をする必要があるケースでは河川流入量を求めるには河川モデルを組み込む以外に選択肢はないだろう。

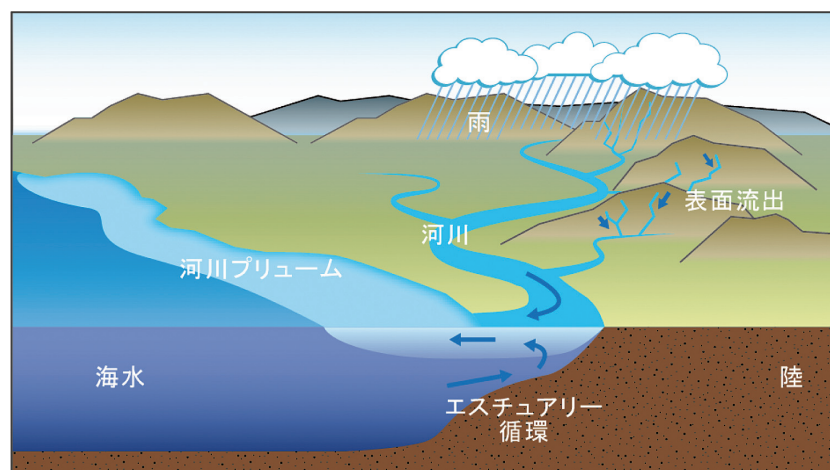


図 5：陸から海への水循環の模式図 (Blue Earth 第 135 号より)。

Figure 5: A schematic of the hydrological cycle from land to the ocean (Adapted from Blue Earth Vol. 135).

### 3.2 河川海洋結合モデル

河川モデルはこれまで水文学の分野で開発され、陸域から河口までの水の流れを再現することで洪水などの防災情報を提供するツールとして大きく発展を遂げてきた。そしてこの既存の河川モデルを海洋モデルに繋げれば河川と海洋の繋がった結合モデルが構築できるように思える。しかし残念なことにこの結合（接合）方法には幾つかのハードルがあり、かつ大きな課題が残ってしまうのである。主に海洋学からみた視点でこれらを列記する。

一つ目のハードルは河川モデルが1次元モデルであるということである。河川はそもそも細くて長く、その流路を全て正確に解こうとすると1次元で解くほうが効率がよい。また河川網は樹形図のように2次的に広がっているとはいえ、そこを流れる水はほぼ決まった方向に流れており、1次元モデルを接続していくだけで十分に表現できる。対して海洋モデルは3次元モデルであるため、河川モデルと海洋モデルを接合するには河川モデルで解かれている1次元の流れを河口付近で3次元へ変換する作業が伴う。ここで流れの水平・鉛直構造になにかしらの仮定を組み込むことになり、物理的には自然とはいえなくなる。

二つ目のハードルは河川モデルの多くが一つの河に焦点をあてて構築されていることである。河川ごとに河川網があり、観測データを基に統計的なキャリブレーションを施している。つまり一つの河川モデルとパラメータ設定を用意して多くの河川に使う、というユニバーサルな設計ではないのである。地球システムモデル等に使われている河川モデルはユニバーサルなモデル仕様だが、流体方程式を解くというよりは質量保存式に基づくモデルである。これはそもそも100 km 近い解像度を持つ全球モデルに用いるための河川モデルであるため、河川の流れは解像できないことが前提になっているためだといえる。もし流れを再現できる河川モデルを一つ一つの河川で準備し、チューニングしたのち海洋モデルに結合するとすると、河川の数だけ作業が伴うことになる。大規模河川だけならば縁辺海に流れ込む河川は多くても数本程度のため、観測データが揃っていることも期待でき、チューニングした河川モデルを準備することも可能かもしれない。しかし、中小規模河川まで考慮すると、観測データを集める作業、そして一つ一つの河川モデルを構築していく作業は膨大になることが容易に予想できる。高解像度化が進むと指数関数的に河川の本数は増えることを考えると、作業量がどこかの段階で限界にぶつかるように思う。

三つ目のハードルは、既存の河川モデルの多くが河口で起きる海洋の変動を考慮しない方程式を解いていることである。しかし潮汐などによって河口付近の海面は時々刻々と変化し、河川によっては河川水が上流へと逆流する Tidal Bore（海嘯）と呼ばれる現象も起きている（＝サーフィンができる）。これではせっかく高い時空間解像度で河川流を再現しているにも関わらず、河口付近での物理場が不連続なままである。当然、河口付近で起こるエスチュアリー循環も不自然なものになってしまうだろう。物理的な整合性に限れば河川モデルは河口ではなく潮汐やエスチュアリー循環の影響がない上流点までしか用いず、それより下流は高解像度海洋モデルを用いて流れ場を再現したほうがよい。しかしこれでは河川モデルと海洋モデルの接続点が複雑になり、相当作業量が増えてしまうことが予想される。

### 3.3 陸と海を一体的に捉えるということ

既存の河川モデルと海洋モデルを河口で接合するような河川海洋結合モデルには、様々な課題が残ることを述べた。では他にどのようなアプローチがありえるだろうか？ ここでは Kida and Yamashiki (2015) で新たに提案した Layer モデル（層厚モデル）を用いた河川と海洋を一体に解くモデル手法を紹介する。

陸面で降った雨水が表面流出を通じて谷に集まり、河となって海まで流れていく淡水の一連の動きは淡水の布（層）のように表現できるのではないかと Layer モデルを用いた河川海洋一体型モデルはこのような着想に基づいており、薄い厚さの氷床モデルのようなイメージである（図 6a）。陸水を淡水の布として捉える、ということは実際にはごく一般的な浅水モデル（一層の Layer モデル）を使って陸水の流れを解くに過ぎない。雨水は淡水層の厚さを増やす mass source として表現され、海域では既存の Layer モデルの上に淡水 Layer があることになる。海洋において Layer モデルは既に長く使われているので、もし陸水の流れも浅水モデルで十分に捉えられるのであれば、これで陸と海の水を一つのモデルで表現できることになる。注意点としては、数ミリの薄さをもつ表面流出や干上がった陸面を表現できるように浅水モデルが層厚ゼロに対応している必要があることで、数値的な問題である。陸面の水、河川の水、海洋の水、のどれも液体の「水」には変わらないことを考えると、同じ方程式系で全ての流れを解くことは物理的には自然な手法だといえる。

Layer モデルを河川モデルに適用するメリットは大きく二つある。一つ目は先ほど述べたように、歴史的に海

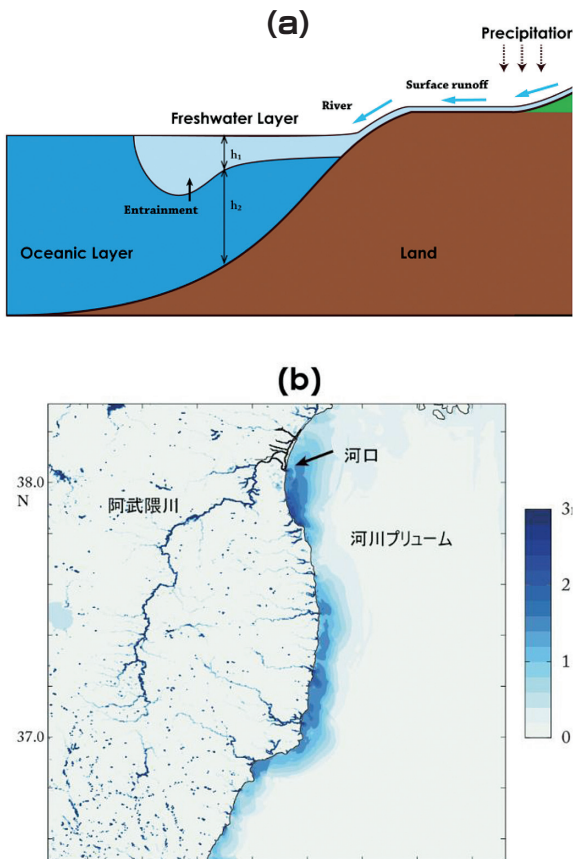


図 6 : (a) 河川海洋一体型モデルの模式図 (b) 台風が通過した際の阿武隈川・河川シミュレーション結果 (Kida and Yamashiki, 2015)

Figure 6 : (a) A schematic of the Surface runoff-River-Ocean seamless model. (b) Freshwater layer thickness simulated for the Abukuma River when Typhoon Roke passed over the area (From Kida and Yamashiki, 2015).

洋物理学に馴染みのあるモデルであること、である。密度変化が循環場に重要な役割を持つ海洋では、密度ごとに水の「層」がある (= Isopycnal Layer) と考えることで理論的な海洋循環の理解度を深めてきた。また理論に限らず HYCOM (Bleck, 2002) や GOLD (Adcroft and Hallberg, 2006) のように全球スケールでも使われており、現実的な流れを再現することも可能である。Layer モデルを河川モデルとして用いることができると河川と海洋が一体的に解け、かつ既存の海洋モデルに淡水層を一層、海面に加えるだけで構築が可能なため煩雑なコード作業が伴わない。

もう一つのメリットは、陸面の水が陸全域で同じ物理式を用いて解けるようになることである。海洋モデルを通常使用している者にとってはピンと来ないメリットだが、河川モデルの多くは上流から下流までの流れを一つの流体方程式を用いて解く手法を歴史的にはとってこなかった。これは計算資源の効率性を重視したためかもしれないが、山岳域・平野部・河川軸と流域ごとに流れに

最適な近似式を用いて河川モデルを構築しているのである。しかしこれでは流域ごとに物理を決め打ちしており、かつ流域が変わる箇所物理が不連続になっていることを意味している。

陸水と海水を同じ流体方程式で解けるようになるということは、前節で述べた河川海洋「接合」モデルの課題をかなり解決してくれることがわかる。まず河川ごとに特化したモデルではなくユニバーサルな仕様になるため、河川の大小や流域に関わらず用いる基本物理法則は同じになる。また降水データから河川流量がモデル内で求まるようになるため、海洋への河川流入量を境界条件として準備する必要がなくなる。つまり、河川と海洋の流れは河口で「接合」するのではなく「連続的」になる。河川と海洋を同じモデル内で解く最大のメリットはおそらくこの点だろう。河川モデル、海洋モデルという分け方がもはや存在しなくなるのである。

実際に Layer モデルを用いて阿武隈川を再現した結果が図 6b である。2011 年 9 月に台風 15 号が日本を通過した際による降水 (レーダアメダス解析雨量; <http://www.jmbasc.or.jp/hp/offline/cd0100.html>) に基づいて河川のシミュレーションしており、図からは陸面で起きている薄い表面流出の存在は不明瞭かもしれないが、谷にそって雨水が収束し、河川を形成し、海へと流れ出ていることがわかる。また流量の時系列を見て観測とかなり似たものとなっていることから (Kida and Yamashiki, 2015 の図 3)、このモデル手法が陸水の流れを解く有効な手段であることが確認できる。河口付近でも河川ブリュームが形成されており、Layer モデルが陸と海で起きている淡水・海水の流れのどちらも連続的に捉えることが可能であることを示している。河川と海洋の間に接合点がなくなることで河口域の再現性が大きく向上したといえるだろう。潮汐等によって河川を上流へと伝搬する波、河川軸に沿った海水の侵入、そしてエスチュアリー循環のどれもがモデル内で自然と再現できるようになるのである。

Layer モデルの現時点での課題はシミュレーションに 100 m 近い水平解像度が必要なことだろう。このような解像度を用いて縁辺海モデルを構築することは、現時点での計算機能力を考えると相当な計算資源を要することになるだろう。またこれまでのところ Layer モデルを用いて集中豪雨に伴う急な流出イベントでの検証は済んでいるが、大規模河川、平均流、などの再現性は進行中である。まだまだこれから段階にあるといえるだろう。

## 4. これから

縁辺海モデルの地形（海峡・島）に起因する流れ場の特徴と新しい河川モデルの手法についてこれまで述べてきた。最後に、縁辺海モデルが今後さらに発展していく上で考慮すべき視点について思案し、本稿のまとめとした。

海洋モデルの発展は、流れ場の再現性の高解像度化・精緻化という形ではかなり進んできている。とはいえ流れ場というのは海の一側面に過ぎないこともまた事実である。密度が保存する視点で描ける循環図もあれば、塩分・鉄分・酸素・炭素・窒素など様々な物質がそれぞれの持つ固有の時間スケールで描く循環図もある。海洋化学の専門家が描いている「物質循環」の視点から物理場の再現性をもういちど検証したとき、現在の縁辺海モデルは果たしてどこまでの技術を備えているのだろうか。深層大循環だけでなく、かなり短い時間スケールにおいても積極的に検証を進めていくのもよいのではないかと思う。オホーツク海を中心に現在進んでいる研究が示唆するように、物質の流れを考え始めると陸域と海洋の境界ではまだまだ物理を用いて説明しきれない世界が待っていることにも気付かされる。海岸線は壁というよりは物質の源泉なのである。淡水だけでなく土砂・生物も考え始めると陸と海を不連続に扱ってきたこれまでの海洋モデルは、まだようやく基礎ができてつつある段階なのかもしれない。水文・化学・地質との融合がこれから一体どこまで縁辺海モデルを高度な次元へと導いてくれるのか楽しみである。

## 参考文献

- Adcroft, A. and R. Hallberg (2006) On methods for solving the oceanic equations of motion in generalized vertical coordinates. *Ocean Modelling*, **11**(1), 224–233.
- Alkire, M.B., A.D. Jacobson, G.O. Lehn and R.W. Macdonald (2015) Small rivers could have big impact on Arctic Ocean. *Eos*, **96**, doi: 10.1029/2015EO034005.
- Blue Earth, 2015, 第27巻 第1号（通巻135号），環境変動の予測を社会に活かす, p 8–9.
- Bleck, R (2002) An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, **4**, 55–58.
- Danabasoglu, G., S.C. Bates, B.P. Briegleb, S.R. Jayne, M. Jochum, W.G. Large, S. Peacock and S.G. Yeager (2012) The CCSM4 Ocean Component. *J. Climate*, **25**, 1361–1389. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00091.1.
- Fong, D.A. and W.R. Geyer (2001) Response of a river plume during an upwelling favorable wind event. *J. Geophys. Res.*, **106**, 1067–1084.
- Godfrey, J. S. (1989) A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulations. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **45**, 89–112.
- Griffies, S.M, M.J. Harrison, R.C. Pacanowski and A. Rosati (2008) A technical guide to MOM4 GFDL Ocean Group Technical Report No. 5, NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Version prepared on February 4, 2008, available online at [www.gfdl.noaa.gov](http://www.gfdl.noaa.gov).
- Hetland, R.D. (2005) Relating river plume structure to vertical mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 1667–1688.
- Kida, S. and Y.A. Yamashiki (2015) A layered model approach for simulating high river discharge events from land to the ocean. *Journal of Oceanography*, **71**(1), 125–132.
- Kida, S. and B. Qiu (2013) An exchange flow between the Okhotsk Sea and the North Pacific driven by the East Kamchatka Current. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **118**(12), 6747–6758.
- Legg, S. and Coauthors (2009) Improving oceanic overflow representation in climate models: The Gravity Current Entrainment Climate Process Team. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 657–670.
- Masumoto, K. and Coauthors (2004) A fifty-year eddy-resolving simulation of the World Ocean—Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 35–56.
- Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari and N. Ebuchi (2009) Wind and buoyancy driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **56**(9), 1401–1418.
- Minato, S. and R. Kimura (1980) Volume transport of the western boundary current penetrating into a marginal sea. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **36**(4), 185–195.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou and K. Komatsu (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of Oceanography*, **65**, 737–756.
- Nghiem, S.V., D.K. Hall, I.G. Rigor, P. Li and G. Neumann (2014) Effects of Mackenzie River discharge and bathymetry on sea ice in the Beaufort Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 873–879, doi: 10.1002/2013GL058956.
- Ohshima, K.I., T. Nakanowatari, S. Riser and M. Wakatsuchi (2010) Seasonal variation in the in-and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **57**(13), 1247–1256.
- Open University (2001) Ocean Circulation, 2nd ed., Butterworth-Heinemann. 286pp.
- Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams (2005) The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model.

- Ocean Modelling*, **9**, 347-404.
- Tomczak, M. and J.S. Godfrey (2003) Regional Oceanography: an Introduction, <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/regoc/>
- Tsujino, H., H. Nakano and T. Motoi (2008) Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: mean state and seasonal variation. *Journal of Oceanography*, **64**, 141–161.
- Winton, M., A. Adcroft, S.M. Griffies, R.W. Hallberg, L.W. Horowitz and R.J. Stouffer (2013) Influence of Ocean and Atmosphere Components on Simulated Climate Sensitivities. *J. Climate*, **26**, 231–245. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00121.1.
- Xu, X., E.P. Chassignet, J.F. Price, T.M. Özgökmen and H. Peters (2007) A regional modeling study of the entraining Mediterranean outflow, *J. Geophys. Res.*, **112**, C12005, doi: 10.1029/2007JC004145.
- Yang, J., X. Lin and D. Wu (2013) Wind-driven exchanges between two basins: Some topographic and latitudinal effects. *J. Geophys. Res.*, **118**(9), 4585–4599.