

令和元年6月5日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17808

研究課題名（和文）河川から流入する淡水が外洋へ広がる力学

研究課題名（英文）The dynamics of river outflows

研究代表者

木田 新一郎 (Kida, Shinichiro)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：50543229

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：ガンジス・ブラマプトラ川は大量の淡水をベンガル湾へ供給しており、その河口には巨大なデルタ域が存在する。河川水がこのデルタ域を通じてどのように時間変化しながら海洋へと流出するのかが、海洋の存在はその流出過程にどのような影響をもつのか、数値モデルを用いて明らかにした。河川水の多くは本流を通じて海洋へと流出したのち海岸線に沿って西進する河川プリュームを形成する。川幅が狭い支流はこの本流が作り出した河川プリュームによって生じる海面高度の変化の影響を強く受けることが明らかになった。この結果は、デルタ域を通じた河川流出過程が河川海洋間の相互作用によってコントロールされていることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川と海洋の流れ場や変動場をコントロールする力学過程は、これまでそれぞれ独立なものとして理解が進んできた。本研究から河川と海洋の接続域であるデルタ域では、河川の本流と支流の流れが海洋の存在を通じて連動していることが明らかになった。ガンジス・ブラマプトラ川のようなデルタ域は洪水が数多く発生する地域であるとともに多くの人が生活する場でもあるため、海水と河川水の境界線の位置や海水の遡上のメカニズムは、土地の利用方法にも大きな影響をもつ。この研究成果は気候変動に伴う大規模河川の河口域における環境変動の予測精度の向上に繋がること期待できる。

研究成果の概要（英文）：The dynamics of the Ganges Brahmaputra river outflow is investigated using a numerical ocean model. A significant amount of freshwater is observed to enter the Bay of Bengal through the Ganges mega delta with a maximum outflow from later summer to fall. Our focus was to understand how this river outflow behaves in the presence of a mega-delta and whether the presence of the ocean plays any role in its time-variability. The model showed that the majority of the outflow enters the ocean through the main branch with the seasonal cycle of the sea surface height analogous to observations. While the flow through the narrow branches within delta was weak, we found its time-variability to be strongly influenced by that of the main branch and the ocean. This was because the outflow establishes a geostrophic coastal current along the coast that alters the sea surface height.

研究分野：海洋物理学

キーワード：河川プリューム 水循環 ガンジス・ブラマプトラ川 デルタ域

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

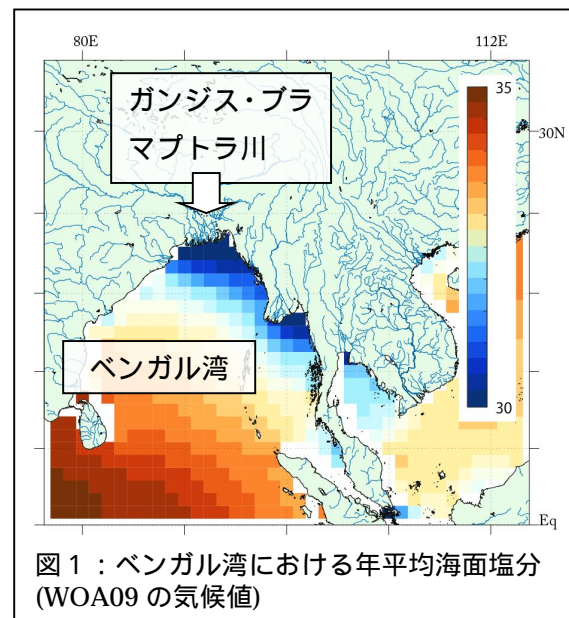
1. 研究開始当初の背景

気候変動に伴う水循環の変動が海洋に与える影響を知るには塩分場の変動を把握する必要がある。しかし、船舶による直接観測から時々刻々と変化する塩分場の空間分布を把握する事は難しく、海洋学では水循環を議論することは難しかった。近年、アルゴフロートによる観測網の充実や海面塩分を計測できる衛星の開発により、海盆スケールの塩分分布とその変動を捉えることが可能になり、海洋における水循環の実態が徐々に明らかになりつつある。

海洋上で起きる水循環の変化は降水分布に伴って海盆スケール(100km以上)の海面塩分の変化を通じて現れる。陸域で起きる水循環の変化は流域規模の降水量の変化、そして河川流量の変化として海洋へと伝わるため、海洋に対して凝縮した形で局所的(10km以下)に影響を与えることになる。この河川水の流入は海面塩分だけでなく、陸域から海域へ物質を輸送する役割があり、空間スケールは小さいものの地球科学的に重要な役割を担っている。しかし、このような河川水の流れは近年のアルゴフロート・衛星観測でもってさえも解像するのが難しい空間スケールである。淡水がいったいどのように河川を通じて陸域から海洋へと流れて出ていくのか、という問いは現象が人間生活に身近であるにも関わらず、いまだ解決されていない。

水循環が海洋へ強く影響を与える海域としてインド洋の北東部に位置するベンガル湾が知られている(図1)。ベンガル湾の表層にはバリアレイヤーと呼ばれる低塩分水層が形成されており、ガンジス・ブラマプトラ川等の河川水や直上からの雨水がその源となっている。この低塩分水層は、大気熱を海面に蓄える効果を持ち、海面水温の変動を抑制するため、頂上大気、そして領域で発達するインドモンスーン気候場の形成に重要な役割を担っていると考えられている。

ガンジス・ブラマプトラ川の河川水はどのようにしてベンガル湾のバリアレイヤーを形成するのだろうか？河川水が陸域からベンガル湾へどのような経路と時間変動で流入するのか、これまで実態が不明であった。ベンガル湾における河川水の振る舞いに関する議論は、これまで主に海洋数値モデルに月気候値の流入値を用いて進められてきた。河川水と海水の間には大きな密度差があるため、基本的な物理プロセスとしてはまず河川水は河口から出た後、地衡流バランスによって沿岸域に捕捉され、沿岸流を形成する河川プリュームが生じる。季節によってベンガル湾上の風の強さ・方角とともに海流の強さも変わるものの、河川水の多くはベンガル湾の岸に沿って流ることが数値モデルでも再現されている。しかし、ガンジス・ブラマプトラ川の河川流量は、季節変動に加え数日～数週間スケールでも変動する。また河口にはメガデルタ域が横たわっており、本流に加え幾つもの支流を通じて河川水が流出している様子が衛星観測では捉えられている。



2. 研究の目的

陸から海への河川水の流入を支配する力学過程は、これまで河口が一つしか存在しないような河川を想定して議論が進んできた。しかし大規模河川の多くは河口にデルタ域を形成している(図2)。そのなかでもガンジス・ブラマプトラ川は世界の中でも最も大きいメガデルタ域が存在し、このような河口が幾つにも分岐した河川水の流出プロセスは研究が進んでいない。

デルタ域を通じた河川水の流出は観測が困難であることに加え、支流を解像できる高解像度の数値モデルが必要である。ただこれまでの数値モデルは、河川モデルと海洋モデルはそれぞれ独立に発展してきた歴史があり、それぞれの現象のもつ空間スケールが大きく異なっていたことがその主な要因である。河川は基本的には一次元的な流れであるのに対して海洋は三次元的である。しかし、デルタ域のような河川と海洋が組み合わさった領域であり、もはやそれぞれの力学過程を独立で解くことは現実的ではない。つまり、河川・海洋の力学過程を一体的に解かない限りこの陸と海の接続域の実態を明らかにすることはできない。デルタ域における河川の流れのメカニズムを定量的に検証するには、複雑な地形と分岐を捉えると同時に河川・海洋の流れを同じ力学過程の枠組みで捉えることが可能な数値モデルを用いる必要がある。そこで本研究ではKida&Yamashiki (2015, Journal of Oceanography)で提案された河川海洋一体型モデルを活用することにした、これまで再現できなかったガンジス・ブラマプトラ川の河川水がメガデルタを経てベンガル湾へと流出するプロセスを再現することで、その力学過程を解明することが目的である。

デルタ域を通じて河川海洋間でどのような相互作用が働いているのか、以下の3点を中心に明らかにする。

(1) 数日～数週間スケールで起こる河川の流量変動の影響

河川流量は、流域規模で起こる気候学的な降雨量の変化による季節変動に加え、局所的な降雨や経年変動による月より短い時間スケールでも変動する。この短い時間スケールで変動する河川水は、月気候値に基づいて外洋へ運ばれる経路にどのような影響を与えるのだろうか？

(2) 複数に分岐するデルタ域の役割

河口が一つある場合と比べ河口が複雑に分岐するデルタ域のような場合、河川流量はどのように分配・変動するのだろうか？また河川 海洋間の相互作用はどのように働くのだろうか？

(3) 外洋で引き起こされる波の影響

河川流量が季節変動するように、海洋循環もまた季節変動している。ベンガル湾ではインド洋の赤道域で励起されたケルビン波が到達し、沿岸域の海面高度を変動させていることが知られている。外洋から伝搬する波は河川水の流出にどのような影響を与えているのだろうか？

3. 研究の方法

ガンジス・ブラマプトラ川の河口に焦点を当てた高解像度河川海洋一体型モデルを構築した。このモデルは水平解像度 500m で等密度座標に基づいて河川水(1000kg/m³)と海水(1030kg/m³)の流れを解く二層モデルであり、デルタ域の河川流路上を流れる河川水とともにモデル領域内で起きる降水イベントが駆動する河川水を再現した。陸域の地形、そして上流から流入するガンジス・ブラマプトラ川の流量は全球河川モデル Cama-Flood の出力データを用い(データは山崎大(東京大学・研究協力者)より提供)、海底地形には GEBCO を用いた。河川の深さは本流では 5 m、支流では 2 mと設定した。降水データには TRMM(衛星データ)、そして降水の 70%が地表面流出すると仮定した。海洋のモデル境界域では河川水の層厚をゼロへ緩和するスポンジ領域を設定することで、モデル内部に河川水が滞留し続けないようにした。

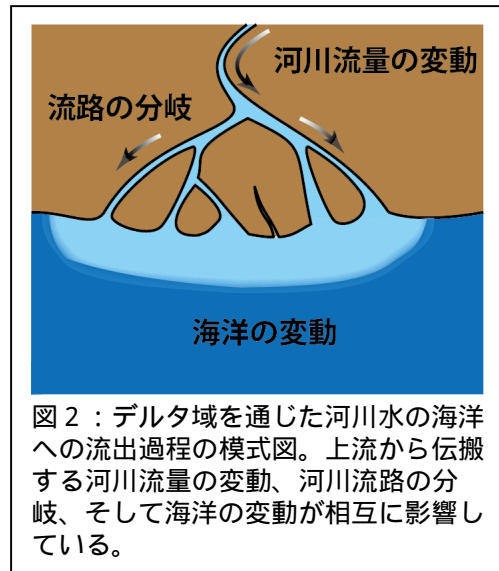


図2：デルタ域を通じた河川水の海洋への流出過程の模式図。上流から伝搬する河川流量の変動、河川流路の分岐、そして海洋の変動が相互に影響している。

(1) 数日～数週間スケールで起こる河川の流量変動の影響

河川の流れに焦点を当てるため、海は初め静かだと仮定し、上流から到達する河川水の変動と領域内で起こる降水が河川流量に与える役割を検証する。特に地衡流調節によって河口域で河川水が沿岸に捕捉される前にどこまで水深の深い外洋へ直接流出しうるのか、河川流路による違いはあるのかを検証する。

(2) 複数に分岐するデルタ域の役割

デルタ域の本流と支流における流量変動を解析し、その力学過程を検証する。デルタ域内で生じる領域ごとの違いを検証し、ガンジス・ブラマプトラ川のようなデルタ域の大きさが果たす役割の理解を進める。さらに理想モデルを構築することで本流と支流で起こる変動を支配する基本メカニズムを検証する。また流路、地形、そして流量変動が起きる時間スケールを変化させことで流出メカニズムの感度実験を行う。

(3) 外洋で引き起こされる波の影響

方法(1)(2)で実施した数値モデルにインド洋で励起されるケルビン波を再現し、外洋で引き起こされる波が河川水の流出プロセスに与える影響を検証する。ベンガル湾の海岸線に沿って伝搬するケルビン波の海面高度変動は衛星観測・海洋大循環モデルから推定する。

4. 研究成果

本研究では 2004 年に焦点をあてて数値実験を行った。2004 年はガンジス・ブラマプトラ川流域で大きな洪水が起きた年であり、河口より 100km ほど上流の地点の観測データにおいても平年に比べ夏季に大きく河川流量が増加したことを示している(Ikeuchi et al. 2017, JAMES)。モデル実験では夏から秋にかけて増加する河川流量とともに河口から大量の河川水が海洋へ流出する様子を再現することに成功した。モデルでは本流沿いの河口と上流、そして支流で観測された海面高度の季節変動を現実的にとらえていることから十分に現実的な流れを再現していることが確認できた。河川水は海洋に流出したのち、海岸線に沿って河川プリュームを形成し(図3)、最大流量時は 100km ほど沖まで河川水が広がることが示唆された。しかし、地衡流調

節によって河川水の多くは直接外洋の内部へ侵入せず、本流の河口を中心に弱いバルジと岸を右手に見ながら西へと流れる沿岸流を形成していた。

本流とデルタ域を流れる河川水量を解析したところ上流から流入する河川流量のほとんどが、そのまま本流を通じてベンガル湾へと流出していた。デルタ域を通じて海洋へと流出する流量は小さく、支流が本流に比べ川幅が狭いことから妥当な結果だと思われる。時間変動成分を比較すると、本流はそもそもの流量が大きいためモデル領域内で起こる降水イベントの影響は小さい一方、支流では降水イベントの影響を強く受けることが明らかになった。特に9月の降水イベント時は、支流で海面高度が1週間程度で1.5倍に増加する様子が確認でき、その結果、支流で海洋への流出イベントが発生していた。このような降水イベントに伴う支流の流出イベントは、衛星観測によって取得される河口付近における海色（濁度）の空間分布が局地的な降水イベントがその一部分を担っていることを示唆している。ただ、本研究で用いた数値モデルは海岸線に沿って形成される河川プリュームと支流から流入する河川水の区別ができないため、海面付近で生じている可能性のある支流からの強い流出イベントは確認できなかった。このような現象を再現するには河川水内の密度差を正確に再現する必要があるだろう。

デルタ域の支流で起こる流量の時間変動は本流のものと大きく異なることが数値モデルから明らかになった。そこでその要因となるメカニズムを抽出するため、ガンジス・ブラマプトラ川のデルタ域を模した理想モデルを構築し、力学過程の検証を行った。

理想モデルから、上流から伝搬する河川流量の時間変動とともに本流が海洋域でつくりだす河川プリュームの存在が重要であることを明らかになった。つまり河川水が流出する際に主流と支流の間で相互作用が引き起こすことを示した。河川プリュームは本流の西側に形成されるため、本流の西側は本流の影響を強く受ける一方、東側は本流の影響を受けにくかった。このことはコリオリ力の存在がデルタ域の河川流の時間変化に大きな影響を持つこと、そしてこの作用に河口の外側、つまり海域で起こる地衡流調節が重要な役割を担っていることを明らかにした。通常、河川の流れはその川幅がロスビーの変形半径より小さいことからコリオリ力を考慮しないが、デルタ域のように一本ではなく多数の河川が存在する際は、コリオリ力は無視できないのである。コリオリ力を考慮しない数値モデルでは支流における時間変動がコリオリ力を考慮する場合と大きく異なることを示唆している。

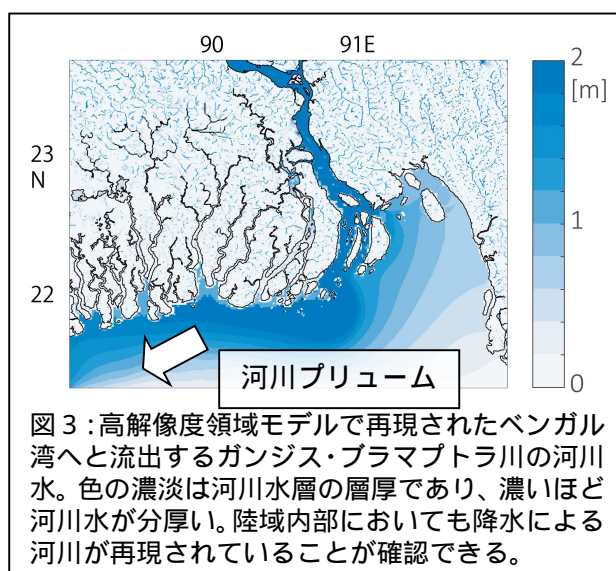


図3：高解像度領域モデルで再現されたベンガル湾へと流出するガンジス・ブラマプトラ川の河川水。色の濃淡は河川水層の層厚であり、濃いほど河川水が分厚い。陸域内部においても降水による河川が再現されていることが確認できる。

デルタ域の支流の流れを支配する力学過程をより詳細に検証したところ、浅い川底、狭い川幅、そして蛇行の存在が支流の流れを弱くし、かつ波の伝搬を遅くすることがわかったこの波の伝搬速度の違いが主流と支流の間で起こる相互作用をより強化することになる。本流を伝わる波はいち早く海洋へと到達し、海面高度を変化させたのち支流の河口における海面高度を変化させる。このような波は河川プリュームの流れと同様、コリオリ力によってケルビン波として本流の西側へ伝搬するため、本流の西側に位置する支流では上流から下流に向けて伝搬する波と本流に伝って海洋へと伝搬した波が河口から伝搬する波との相互作用が働く。デルタ域の本流と繋がっていない領域では上流から伝わる波がないため、本流が海洋側で駆動した波のみの影響を受け、河口で起きる海面高度の変動が減衰しつつ河川の上流域へ伝搬する。モデル実験からはデルタ域の支流では河川 海洋 河川と連結する河川海洋相互作用の影響が強く、支流の一部では本流の流れが強まるとともに遡上が起きうることを示唆している。本研究で再現した現実的な領域モデルにおいてもデルタ域内においても本流から離れているほど河口で遡上が起きやすいことが確認できた。遡上が起きるには流量変動の強さとともに支流の平均流の強さに依存する。

次に外洋循環の影響を検証するため、インド洋赤道域からベンガル湾へと伝搬するケルビン波を模した境界条件を領域モデルに導入し、その影響を検証した。衛星観測や海洋大循環モデルはこのケルビン波が10cm程度の振幅をもつことを示しており、これは観測されているガンジス・ブラマプトラ川の流量変動に伴う1mを超える海面高度の変動と比べは弱い。そのため本流では上流から伝搬する季節変動と比べ位相が多少ずれる形で影響が確認できた。また支流においても同様の効果だった。ただ経年変動によって大きなケルビン波が生じた場合は影響が無視できない存在となりうることを示唆している。

本研究は、デルタ域を通じた河川水の流出が河川海洋相互作用によって本流と支流が連動しながら起きることを初めて明らかにした。大規模河川を通じた河川水の流入、そしてデルタ域で引き起こされる洪水等のタイミングをより正確に予測するには、河川と海洋の流れを一体的に考慮する必要がある。

5 . 主な発表論文等

〔論文発表〕(計0件)

〔学会発表〕(計8件)

Shinichiro Kida, Development of an ocean-river-surface runoff seamless model, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016年

Shinichiro Kida, The dynamics of the freshwater discharge at the Ganges-Brahmaputra river mouth, Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017年

木田新一郎,洪水時における海洋・河川プリュームとその堆積物の振舞い,地球環境史学会(招待講演),2017年

Shinichiro Kida, The dynamics of strait exchange flows, National University of Taiwan, Taida Institute for Mathematical Sciences, Joint CQSE and CASTS SEMINAR(招待講演),2017年

Shinichiro Kida and Yosuke Yamashiki, Capturing high river discharge events from multiple sources along coasts, Ocean Sciences Meeting, 2018年

Shinichiro Kida, River-ocean interaction at the Ganges-Brahmaputra river mouth, Japan Geoscience Union Meeting, 2018年

Ryusuke Kuroki, Yosuke Yamashiki, and Shinichiro Kida, Introduction of Canopy Component into Isopycnal-layered model and Comparison with Cell Distributed Runoff Model at Kyushu, Japan Geoscience Union Meeting, 2018年

Shinichiro Kida and Dai Yamazaki, River-ocean interaction at the Ganges-Brahmaputra river mouth, Japan Geoscience Meeting, 2019年

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：山敷 庸亮

ローマ字氏名：(YAMASHIKI, yosuke)

研究協力者氏名：山崎 大

ローマ字氏名：(YAMAZAKI, dai)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。