

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887025

研究課題名(和文) 複数の河川によって形成されるプリュームはどのように相互作用するのだろうか？

研究課題名(英文) Interaction of plumes formed by plural rivers

研究代表者

中田 聡史 (NAKADA, SATOSHI)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・助教

研究者番号：70540871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：複数の小河川から形成される、岸を”左手”にみて流れるType2プリュームは沿岸海洋生態系に多大な影響を与えていると考えられるが、観測例もなく数値実験でも扱われていない。本研究では、矩形海洋の多層モデルを用いて、河川流量、河口数、河川間隔、成層強度、海底斜面を変化させた数値実験によって複数河川によるType2プリュームの形成過程を調べた。その結果、河川流量と河川間隔が支配要因であり、流量が増大するとプリュームは長くなり、河川間隔が大きいと短くなった。数値実験結果から日本沿岸海域におけるType2プリュームの出現海域を特定し、静止海色衛星プロダクトからプリュームの観測事例を収集することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The formation process for upstream spreading plume (Type 2 plume) formed by plural river was investigated by using the numerical simulation and products based on the ocean color satellite observation. We conducted the numerical experiments in the variation of the river runoff, river interval, density stratification, and bottom slope. The simulated results indicated that the key factors are river runoff and interval to control the length of Type 2 plume. The increase of the river runoff elongates the upstream excursion of Type 2 plume, but the large river interval shortens the excursion. We identified the emergence of Type 2 plume in the Japanese coastal seas based on the numerical experiments. By using the map of sea surface salinity estimated from the satellite-based products, observed result of Type 2 plume were collected to analyze the dynamical behaviors of the plumes.

研究分野：海洋物理学

キーワード：河川プリューム 数値シミュレーション 海底斜面 陸海連関 河川流量 海表面塩分 有色溶存有機物 海色衛星

1. 研究開始当初の背景

小河川の多い日本沿岸海域では、河川プリュームがいつ・どのように形成され、その結果塩分はどれくらい低下するのかという情報について、主に養殖漁業者から関心が非常に高いことがわかってきた(中田ら, 2013)。複数の小河川からの出水がどのような河川プリュームを形成するのかは興味深い問題である(Pimenta et al., 2010)。大河川(河川流量 $100 \sim 10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上)からの出水によって形成された岸を右手に見て流れる Type1 河川プリューム(Garvine, 2001)については、観測・数値実験による多くの知見が蓄積され、体系的な理解に到達している(e.g. Garvine 2001)。一方、岸を左手にみて流れる upstream intrusion と呼ばれる Type2 プリュームも存在し、近年少ないながらも現場観測や数値実験によって確かめられている(e.g. Tanaka, 2008)。実際に、我が国において流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の小河川の多くは互いに数 km~数十 km の間隔で隣接しており、大河川だけでなく小河川からのプリュームによっても沿岸生態系やノリ養殖などの漁業生産高に影響を与えていると考えられる。

例えば、大阪湾では淀川の洪水時には Type1 プリュームが出現するが、平水時には Type2 プリュームが形成される(藤原ら, 1994)。また、小河川からの出水 ($100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下)によっても Type2 プリュームが形成されることを噴火湾において確かめ、それが水産資源に有益であることが指摘されている(Nakada et al., 2012)。世界中の多数の沿岸海域においても、小河川からのプリュームは気象・海象・地形条件の複合的影響により様々な様相を示すと同時に、漁場や海洋環境に恩恵を与えていると考えられる。しかし、複数の小河川からのプリューム形成プロセスに関しては、体系的な理解が未達成である。

2. 研究の目的

佐藤ら(2003)は、McReary (1996)の理論(1.5層モデル)を元にして、複数の小河川が Type2 河川プリュームを形成することを数値実験により確認し、噴火湾における時計回りの循環場を説明した。しかし、彼らのモデルは、海底斜面や河川数、その流量の多寡などを考慮していない。また、Type2 プリュームの観測事例が圧倒的に不足しており、数値シミュレーションに基づいた知見に偏っている。

本研究では、複数の小河川からの出水によって生じる河川プリュームが、相互作用しながらどのような塩分・流動場を形成するのかを、数値シミュレーションと高い時空間分解能を持つ静止海色衛星観測プロダクトを用いた海面塩分(Sea Surface Salinity: SSS)の解析結果にもとづいて明らかにし、プリューム形成に関する体系的な理解につながる基礎研究を実施した。

3. 研究の方法

(1) 数値実験

河口域から沿岸海域を模した数値モデルを作成し(Fig.1)を実施し、複数の小河川が形成する upstream intrusion の特徴を数値実験によって調べた。成層強度、海底斜面、河川数、河川流入量等の多くの物理パラメータを変化させた多数の数値実験を実施するためスーパーコンピュータを用いた。数値計算には、自由海面、z 混合座標系の海洋大循環モデル RIAMOM を使用した。計算領域は東西 $150 \text{ km} \times$ 南北 672 km の矩形海であり側面境界は閉境界とした。モデルは西岸中央部付近に設置した単一ないしは複数の河口から淡水フラックスにより駆動される。北・南・東岸に沿って幅 6 km の初期条件へ緩和する領域を設置し河口域から伝播する擾乱を消滅させ、西岸に沿って発達する河川プリュームへの影響を無くした。用いた物理パラメータは、密度成層を代表するブラントバイサラ振動数($0 \leq B \leq 7.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)を 7 パターン、河川流量($4 \leq Q \leq 400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)を 5 パターン、海底地形勾配($0 \leq a \leq \infty$)を 8 パターン、河川間隔 ($1.5 \leq dR \leq 120 \text{ km}$)を 7 パターン、コリオリパラメータ ($15 \leq \phi \leq 55^\circ \text{N}$)を 3 パターン用意し、これらを変化させた実験 5880($7 \times 5 \times 8 \times 7 \times 3$)ケースを実施した。計算は河川プリューム形成が明瞭にみられる海面加熱期の春季~秋季を想定した 180 日間である。海面冷却期に入ると鉛直混合により河川プリュームは消滅すると考えられるため、180 日以降は計算をしない。

(2) 海色衛星 GOCI/COMS プロダクト解析

日本沿岸海域において、どのようなタイプのプリュームが出現するかを数値計算結果から予想するため、空間解像度 500 m の毎時観測(1日8回)可能な GOCI 衛星プロダクトの CDOM(有色溶存有機物)データを SSS データに変換して SSS マップを作成する。SSS マップに基づいて抽出されたプリューム動態を調べることで、予想結果を実証した。

4. 研究成果

(1) 数値実験結果

数値実験結果の一例として、Fig.2 に単一河川と複数河川からの出水による河川プリュームを比較した(180 日後)。出水される合計流量($400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)は両ケースで同じであり、海底斜面(4×10^{-3})や密度成層($2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)、コリオリパラメータ(36°N)も同一条件である。単一河川からの河川プリュームは、岸を右にみて流れる Type1 プリュームに加えて、岸を左にみて流れる Type2 プリュームの両方が形成されており、Type2 プリュームの長さは 125 km 程度となった。複数河川からの Type2 河川プリュームは最北に位置する河川からプリューム先端までの距離(L_r)は 100 km 程度と単一河川よりも短くなっているが、流速ベクトル

に注目すると、北向きの流速を持つ岸を左手にみて流れる領域は最北に位置する河川よりも南側から形成されている。複数河川の河口が存在する海域をまとめて河口域と定義するなら、河口域においても Type2 プリュームが形成されており、その長さ(Li)は、ほぼ河口域全体の 120km となっている。Type2 プリュームの実際の長さは、最南に位置する河川からプリューム北端までを合計した長さ(Lc=Lr+Li)は 220km 程度となり、単一河川によって形成される Type2 プリュームよりも長くなる。つまり、各河口からのプリュームが合流し合うことで、長大な Type2 プリュームが形成される。複数河川によって形成される Type2 プリュームは、河川間隔が広がっていくと、Lr は長くなるものの、河口域で形成される Li は短くなり、河川数が二つの場合は、二つの Type2 プリュームが形成されるだけの結果となる。従って、長大な Type2 プリュームの形成には適切な河川間隔があると考えられる。

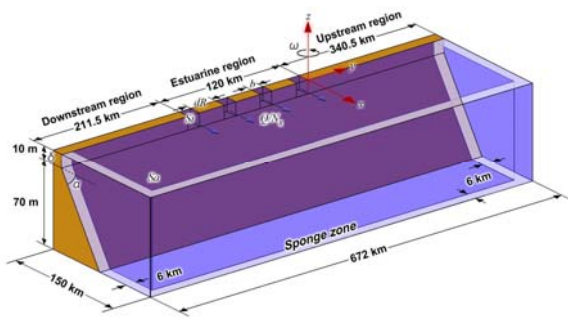


Fig. 1 Domain of the numerical simulations used for the sensitivity experiments in the Northern Hemisphere. Similar domains were applied to different model configurations of the bottom topography in terms of the bottom slopes.

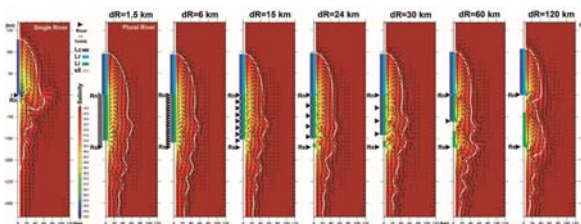
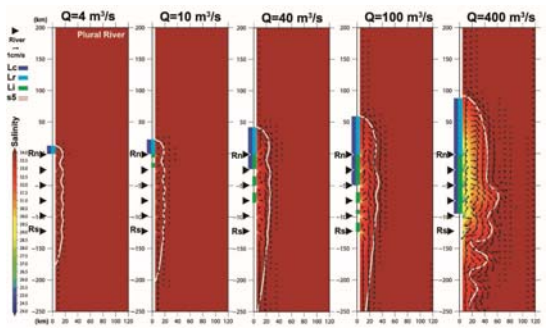


Fig. 2 Snapshots of surface sea salinity (color) and surface velocity field at day 180 in experiments of changing the river interval under the standard density stratification and bottom slope. White lines indicate the effective plume boundary (see text). The black arrow marks the location of the inlet of plural rivers.

次に河川流量を増減させてみた実験結果を Fig.3 に示す。流量が少ないときはプリューム同士の合流が起きずに、河口域では Type1 プリュームが形成され、Type2 プリュームの長さ(Lr)も短いことがわかる(例えば $Q=4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のケース)。流量を増加させていくと、北上する Lr も長くなる。河口域ではプリュームの合体が起きて、最北河川の位置から Li が南へと長くなっていく傾向がある。これらの結果から、Type2 プリュームの形成には河川流量も支配的な物理パラメータであることがわかる。このような傾向は、密度成層や海底地形勾配を変化させても、Lc の長短に影響がみられるものの、定性的には変わらなかった。

このように Type2 プリュームが形成される支配的な物理パラメータは Q および dR であり、密度成層や海底地形勾配はプリュームが存在するための前提条件であるものの、支配ファクターとはならない。

Fig. 3 Snapshots of surface sea salinity (color)



and surface velocity field at day 180 in the experiments of river runoff (Q) variations. White lines indicate the effective plume boundary (see text). The black arrow marks the location of the inlet of plural rivers.

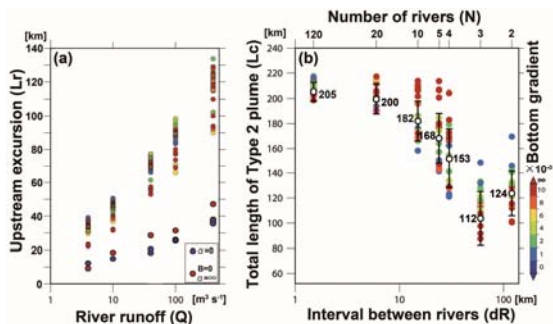


Fig. 4 (a) Scatter plots between the upstream excursion (Lr) and river runoff (Q) in the variation of bottom gradients (color) and density stratification. (b) Scatter plots between the total length of Type 2 plume (Lc) and interval between rivers (dR) in the variation of bottom gradients (color) and density stratification. The bars and white dots indicate the standard deviation and averaged length, respectively.

河川流量 Q と北に伸びるプリューム長 L_r との関係を知るため、Fig.4a に 180 日後の L_r と Q についてプロットした。 Q が指数関数的に増加するとプリュームも長くなる。海底勾配や密度成層が変化することで L_r の長短に影響を与える傾向があり、 L_r のばらつきを与える効果があると捉えられる。例外的に、密度成層がなく ($B=0$)かつ海底地形勾配が無い ($\alpha=\infty$)、深い平坦な海底地形を持つ場合と、河口と同じ水深(10m)を持つ遠浅な海底地形の場合 ($\alpha=0$)は、極端に L_r の長さは短くなる。前者の計算結果は、これまでの単一河川の数値実験結果(例えば、Garvine, 1999)が示唆する内容と同様に、 L_r の形成には海底地形勾配と密度成層のどちらか、もしくは両方がキープクターであることがわかる。後者は Matano and Palma (2010)で議論されたように、海底摩擦によってプリュームの移流が抑制されるためである。

もうひとつの支配的な物理パラメータである河川間隔(dR)と Type2 プリューム長(L_c)との関係を、 L_c が長くなる $Q=400$ としたケースについて調べた(Fig. 4b)。 dR が最も小さい 1.5km の時(河川数 $N=120$)が L_c は最も長い。 dR が 12km 以上になると L_c は大きく減少していく。 $dR=40\text{km}$ ($N=3$)の時に L_c は最も短くなり、海底地形が急になるほど L_c は減少する傾向にある。 $dR=60\text{km}$ ($N=2$)の時は両河川から明瞭な Type2 プリュームが形成されるため、 $dR=40\text{km}$ 時より少し L_c が長くなるようである。 $dR=40\text{km}$ の時は 3 つのプリュームが相互に干渉するため Type2 プリュームの形成を阻害していたと考えられる。このように、ある河川流量の条件の下で、安定的で河口域のほぼ全域で Type2 プリュームが形成されるための適切な河川間隔が存在することを示唆している。

(2) 海色衛星プロダクト解析結果

既往の研究結果から、Type2 プリュームが発生する海域として噴火湾や周防灘、駿河湾などが挙げられている(例えば、馬込・磯辺 2002)。噴火湾においては、複数小河川からの融雪出水の時期が早いと Type2 プリュームが形成されることがわかっている(例えば、Nakada et al., 2014)。

本研究では、数値実験で示唆された Type2 プリュームが存在する条件、すなわち支配的な物理パラメータ(河川流量と河川間隔)を用いて、潮流条件と気象条件に注意を払いながら日本沿岸海域において適合する場所を調べた。候補として新たに挙げたのは、日本海の沿岸海域では富山湾(小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川)、太平洋側では、仙台湾(阿武隈川、名取川、成瀬川)、福島県沖(夏井川等の二級河川)である。これらの海域において、GOCI/COMS 海色衛星プロダクトから得られた SSS マップを用いて Type2 プリュームの消長を調べた。

沿岸域においては CDOM と SSS は高い相

関にあることがわかっているため、この現場 CDOM、SSS データを収集し、CDOM から SSS を推定する経験式を作成した。Fig.5 は日本海沿岸域における推定 SSS マップである。1 級河川近くの沿岸域においては(例えば、信濃川周辺海域)、河川プリュームが表現されており、概ね SSS をうまく推定できていると考えられる。

Type2 プリュームの形成が確認された観測結果の一例として、富山湾における Type2 プリュームを紹介する。Fig.6 は 2015 年 7 月 14 日から 20 日までの日平均 SSS マップであり、この期間に台風 11 号(Nangka)が本州に上陸し大量の降水をもたらした。その結果、SSS マップにみられるように富山湾沿岸域において、河川プリュームが河川出水に伴い 7 月 15 日に強化されているのがわかる。Type2 プリュームが、富山湾西部に形成されており、プリュームの先端が、岸を左手にみながら 7 月 20 日には能登半島の付け根に到達した。約 5 日間で先端部が 10km 移動したことから 2 cm/s の伝播速度を持っていたことがわかる。この速度は数値実験で表現された Type2 プリュームの代表的な速度(1 cm/s)と同程度であることから、Type2 プリュームが富山湾において形成されたと判断した。

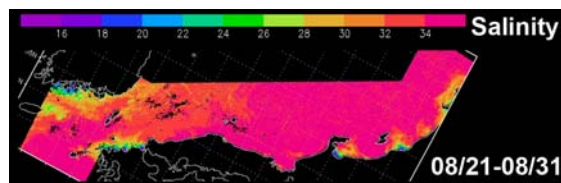


Fig. 5 Averaged surface sea salinity (color) around Japanese coast from the period of August 21 to 31 in 2011.

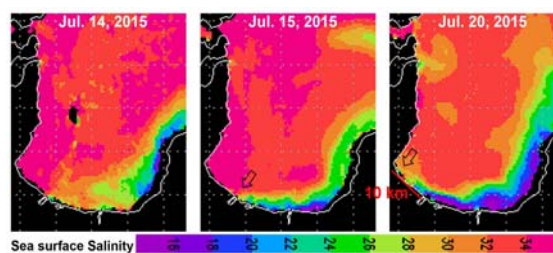


Fig. 6 Daily averaged surface sea salinity (color) in Toyama Bay from July 14, 2015 to July 20. The arrows indicate the head of upstream excursion formed by plural rivers (Shogawa, Oyabe, Jinzu, Joganji, and Kurobe rivers).

(3) 研究成果の国内外における位置づけ

本研究では、複数の小河川を設定した数値実験から Type2 プリユームの形成条件を明らかにし、時空間的に高分解能の静止海色衛星プロダクトを活用して、Type2 プリユームの存在しうる場所を特定、観測事例を多数挙げる事ができた。これまで大河川に注目されがちだった河川プリユーム研究を、複数の小河川からのプリユーム形成に注目し、基本的には河川プリユームは岸を右手に流れるが、複数のプリユームが合流した結果、左手にもみながら流れるプリユームが存在しえることを数値実験と観測事例から示す事ができた。河川から出た河川希釈水が、“岸を右手に見て流れる”ということが本質的なのではなく、希釈水が河口域で高気圧性の渦を形成することが本質であり、その結果として、岸を右手と左手に流れる河川プリユームが形成されるのである。本研究ではサブテーマであった、静止海色衛星からの毎時 SSS マップの推定方法の開発も世界初の試みである。これらの研究成果は、これまでの河川プリユームのイメージを大きく変えうる可能性があり、沿岸海洋における水質・漁場環境や赤潮研究をさらに深化させることができると期待して、本研究結果の集大成の論文を執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 1 件）

1) 中田聡史, 小林志保, 石坂丞二, 林正能, 湊真輝, 中嶋昌紀, 2016 年 5 月 26 日, 大阪湾における河川プリユームの動態解析: 海色衛星観測データを用いた海表面塩分の新推定法, 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 聡史 (NAKADA, Satoshi)
神戸大学・大学院海事科学研究科・特命助教
研究者番号: 70540871