

潮流が河川水に対する海洋生態系の応答メカニズム に与える影響

泉, 智貴

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻地球環境理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7182197>

出版情報：九州大学, 2022, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 4 年度

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻地球環境理工学メジャー修士論文

潮流が河川水に対する海洋生態系の

応答メカニズムに与える影響

氏 名 泉 智貴

指導教員名 木田 新一郎 准教授

目次

第1章 はじめに	4
1.1 研究背景	4
1.2 先行研究	4
1.3 研究目的	5
1.4 論文の構成	5
2章 厚岸湾を模した数値実験の設定	8
2.1 理想実験1	8
2.1.1 物理場	8
2.1.2 生態系モデル	9
2.2 理想実験2	10
3章 モデル結果：理想実験1	12
3.1 塩分・流れ場	12
3.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度	12
3.3 考察	13
第4章 モデル結果：理想実験2	21
4.1 潮流のみの実験	21
4.1.1 塩分・流れ場	21
4.1.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度	22
4.1.3 考察	22
4.2 背景流のみの実験	29
4.2.1 塩分・流れ場	29
4.2.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度	29
4.2.3 考察	29
4.3 潮流と背景流を併せた実験	36
4.3.1 塩分・流れ場	36
4.3.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度	36
4.3.3 考察	37
第5章 まとめ	48

概要

沿岸域において河川水が流出すると河川プリュームと呼ばれる低塩分水塊を形成することが知られている。河川プリュームは沿岸生態系の維持に重要な役割を果たしていると考えられている。しかし沿岸域は強い潮流等により流れ場が複雑であり、小規模な河川によって生じる河川プリューム由来の栄養塩を用いた植物プランクトンの増殖メカニズムには解明されていないことが多い。そこで本研究では潮流の影響を強く受ける小規模河川において、河川水が駆動する植物プランクトンの応答メカニズムを明らかにすることを目的とする。

小規模河川から流出した河川水が沿岸域において潮流の影響を受けながら流出し、沿岸生態系に与える影響を調べるため、北海道の厚岸湾・厚岸湖の環境場に焦点を当てた。鉛直 2 次元モデルを構築し、河口から河川水が流入し湾内の海水と混合する様子を再現し、生態系モデルと統合することで植物プランクトンの増殖が起きるメカニズムを検証する。海底地形を再現した理想実験 1 及び海底を平坦にした理想実験 2 を行う。

理想実験 1 では、低密度な河川水が河口から流入し、海面上を広がり河川プリュームを再現することに成功した。また、上げ潮時の下層において局所的に上層から下層へ栄養塩の輸送が起き、リチャードソン数の値が十分に小さかったことから、その要因としてケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生していたことが推察された。この栄養塩を利用し、河川水の下層で植物プランクトンが増殖していた。

理想実験 2 では理想実験 1 と同様に河川プリュームが形成され、下層において植物プランクトン濃度が上昇していた。河川水中の初期植物プランクトン濃度を低く設定したため、光合成によって植物プランクトン濃度が上昇する効果よりも混合によって植物プランクトン濃度が減少する効果が上回る水塊中では、植物プランクトン濃度の上昇は起きない。潮流のみ、背景流のみ、潮流と背景流が両方ある実験、の 3 つの実験からは、潮流のみの実験が最も沖合側・浅い深度で植物プランクトン濃度が上昇し、背景流のみの実験が最も河口側・海底付近で上昇することが明らかになった。また、どの実験においても河口へと向かう流れの中で起きていた。水塊が河口へと移動する流れが弱いほど増殖が早く起きるものの、鉛直混合が活発になると河川水の割合が高くなることで植物プランクトンの増殖が抑制されてしまう。つまり混合が強く起きる潮流では河口の近くにおいて混合効果によって植物プランクトンが増殖できない環境になっていたため、増殖の極大値が沖合に移動することが分かった。以上より小規模河川において潮流は植物プランクトンの増殖をより浅い深度、そして沖合で引き起こす役割があることが示唆された。

第1章 はじめに

1.1 研究背景

沿岸域において、河川水が流出すると河川プリュームと呼ばれる低塩分水塊を形成することが知られている。河川プリュームの特徴は、河川水が海水よりも密度が小さいために河口域で海水の上を薄く展開することである。河川プリューム内における河川水は河川フロントと呼ばれる水塊特性が河川水から海水へ急激に変化する境界域で海水と混合することになる。そして、河川プリュームには陸域の栄養塩や土砂を沿岸域へ運搬する働きがある(宇野木ら, 2008)。

栄養塩を沿岸域へ運搬するという特徴から、河川プリュームは沿岸生態系の維持に大きな役割を果たしていると考えられている。なぜなら、沿岸生態系の一次生産者である植物プランクトンや藻類は水中に溶存する栄養塩を消費して一次生産を行うからである。そのため、河川プリュームを通じて陸域の栄養塩が沿岸域へ運搬されることで、一次生産者の生産活動が活発になり、沿岸生態系全体の生物量が維持される。実際、沿岸域における単位面積当たりの一次生産は外洋とは比較にならないほど大きい(宇野木ら, 2008)。生態系が豊かになることによって沿岸域における水産資源が増加すれば、漁業による漁獲量の増加も期待できるだろう。河川プリュームは沿岸生態系に留まらず我々の生活に対しても恩恵を与えている。

一方で、沿岸域は海域ごとに地形や河川流入等が大きく異なり、強い潮流が作用することも多いため、流れ場が多様かつ複雑である。特に小規模河川は時間変化が速いため、沿岸域における流れ場を詳細に把握することは困難である。そのため沿岸域において流れ場がどのように植物プランクトンの増殖メカニズムにつながるのかには不明な点が多い。なぜなら、河川水の行く末がわからないと、植物プランクトンが増殖する際に必要とする栄養塩がどのように沿岸域へ輸送されるかがわからないからである。そこで、植物プランクトンが増殖するメカニズムを解明するためには、流れ場を詳細に把握しつつ、混合過程を明らかにすることが求められている。

1.2 先行研究

潮流によって駆動される河川水の流入が沿岸域に与える影響について、物理場に注目した様々な研究が行われてきた。例えば Yankovsky and Voulgaris(2018)では、アメリカの Winyah 湾沖で河川プリュームの観測を行い、河川プリュームの形状や深度に風が与える影響について議論している。そして、河川プリュームの沖合端だけでなく河川プリュームの深度が大きく変化している場所でも混合が起きている可能性が示唆された。また Iwanaka and Isobe (2018)では、河川水の流出方向に対して垂直に働く海岸線に沿った潮汐振動が河川プリュームの挙動に与える影響を数値実験によって調べている。そして、潮流によって河川水と海水の間の強い流れのシアが作られることで、海水と河川水の混合が強まることを示した。

生物場に注目した研究についても同様に数多く行われている。Isada, et al (2021)では、北海道の厚岸湾における着色溶存有機物や栄養塩濃度等および植物プランクトンの光吸収係数に関する季節的・空間的分布を調査し、河川水の流出だけでなく養殖とアマモ場が栄養塩循環や着色溶存有機物の吸着に寄与していることを明らかにしている。また、生物場の新たな観測手法として高見(2022)はドローンにラジコンボートを組み合わせることで、河川フロントの海面における海色や

泡列等といった水平構造に加えて鉛直断面構造の観測を実現し、フロントを境に水塊構造が変化する様子を捉えることに成功した。

1.3 研究目的

本研究の目的は、小規模河川から流出した河川水が沿岸域において潮流の影響を受けながら沿岸生態系に与える影響を調べることである。物理場と生物場それぞれで沿岸域における研究は進められているものの、両方を取り入れた研究を小規模河川において実施した研究はまだ少ない。これは現場の観測では時間変化が速い河川プリュームの動きを捉えることは難しいうえ、河川水と海水の混合過程が植物プランクトンの増殖につながる過程を調べるためには長いスケールで観測を実施する必要があるためである。また潮流の有無や河川水の塩分の違いによる対照実験を行うことはできない。そこで本研究では数値モデル実験を実施することで、潮流が河川水の流出を駆動する環境を再現し、強制流を変えることで河川水が沿岸域の植物プランクトンの増殖を引き起こす過程を検証する。

潮流が河川水の流出を駆動する沿岸域を再現するうえで、北海道厚岸郡厚岸町に位置する厚岸湾(図 1.2.)に注目することにする。厚岸湾は湾口から湾奥までおよそ 10 km であり、湾奥では幅数百メートルの海峡を通じて厚岸湾と厚岸湖が接続している。厚岸湖には別寒辺牛川由来の河川水が多く流れ込んでおり、別寒辺牛川から厚岸湖を通じて河川水が厚岸湾へと流出している。そのため、厚岸湾は海水と河川水が混ざる汽水域だといえる。

厚岸湾と厚岸湖の間には海峡があり、河川水が流出する方向と平行に強い潮汐振動が生じている。具体的には、下げ潮の時間帯では厚岸湖から厚岸湾へ河川水が流出し、上げ潮の時間帯には厚岸湾から厚岸湖へ逆流するような、流れの向きが逆転する特徴がある。つまり、Iwanaka & Isobe (2018)のような河川水の流出方向に対して垂直に働く潮汐振動が河川水に与える状況とは異なることが予想される。

本研究では、強い潮汐振動が河川水の流出入を駆動するという厚岸湾の特徴を数値モデルで再現し、河川水が引き起こす沿岸域の植物プランクトンの増殖過程に潮汐振動がもたらす効果を検証する。沿岸生態系への影響を示す指標として、本研究では植物プランクトン濃度に注目する。その理由は、植物プランクトンが沿岸域における主要な 1 次生産を担っており、植物プランクトンの増減は高次の捕食者の増減にも大きな影響を与えるからである。前述した通り植物プランクトンの増殖速度は物理場に大きく依存しており、潮流の有無によって植物プランクトンの分布や濃度に顕著な差が生じると考えられる。

1.4 論文の構成

本論文は全 5 章で構成されている。各章の内容は下記の通りである。

第 1 章では、沿岸域において河川プリュームが果たす役割と沿岸域における物理場・生物場の先行研究をそれぞれ説明し、本研究の目的である潮流が沿岸生態系に与える影響を理解する重要性を述べた。

第 2 章では、研究で使用した非静水圧海洋モデル KINACO の設定と、厚岸湾を再現するための海底地形が組み込まれた理想実験 1、海底地形を平坦にした理想実験 2 の詳細について説明する。

第3章では、理想実験1の結果について、物理場(塩分、流れ場)と生物場(栄養塩濃度、植物プランクトン濃度)に分けて示し、植物プランクトンの増殖メカニズムについて考察する。

第4章では、理想実験2の結果について、実験ごとに物理場(塩分、流れ場)と生物場(栄養塩濃度、植物プランクトン濃度)に分けて示し、植物プランクトンの増殖メカニズムについて考察する。

第5章では、上記の内容を総括し本論文の結論とする。



図 1.1. 左が河川プリュームを上から見た図、右が河川プリュームを横から見た図。矢印は河川水が流れる方向を示している。



図 1.2. 厚岸湾の地図。河川水は別寒辺牛川から厚岸湖と通じて厚岸湾へと流出する。そして、厚岸湾と厚岸湖の間で強い潮汐振動が発生し流れの方向が時間変化している。

2 章 厚岸湾を模した数値実験の設定

2.1 理想実験 1

2.1.1 物理場

本研究では、厚岸湾の特徴を模した数値モデルで河川水が流入する沿岸域を再現した実験を行う。外洋を対象とした海洋モデルを構築する場合では、水平スケールに対して鉛直スケールが非常に小さいため、静水圧近似を用いて計算負荷を軽減させることが一般的である。しかし、沿岸域に注目した場合は鉛直方向の流れも計算結果に大きな影響を与えるため、非静水圧モデルを用いる方が適切である。そこで、本研究では非静水圧海洋モデルである KINACO(Matsumura and Hasumi, 2008)を使用した鉛直 2 次元モデルを構築する。鉛直 2 次元モデルにしたのは、高解像で 3 次元モデルを解くことは計算負荷が大きいためである。

モデル領域は、水平距離 12 km、鉛直距離 32 m に設定し、厚岸湖の河口から厚岸湾の湾口までの流路(およそ 12 km)と湾口の深度に合わせた。水深は河口から 4 km の地点から河口にかけて徐々に浅くなり、河口の深度は 8 m である。解像度は水平方向と鉛直方向いずれも 1 m とした。水平方向を河口から沖合へ向かう方向を +x 軸、鉛直方向を海底から海面へ向かう流れを +z 軸とする。

物理パラメータとして水温・塩分・水平流速・鉛直流速を解く。ここで、水温と塩分の値については厚岸湾での観測データに基づき、海水は低温高塩分、河川水は高温低塩分とした。モデル内の初期状態は海水だけが存在し、実験開始後に側面境界条件から河川水を河口から流入させる。側面境界条件として、河口と沖合で潮流と背景流を模した流速を強制する。河口における強制流 U_{riv} は以下の通りである。

$$U_{riv} = 0.4 \sin \frac{t}{43200} + 0.1 \quad (\text{Eq.1})$$

ここで、 t は実験の経過時間を示す。強制流 U_{riv} は半日周期の潮流を模した流れと定常な背景流の組み合わせである。現地での観測結果から潮流の振幅は 0.4 m/s、背景流の大きさは常に 0.1 m/s とする。沖合における強制流 U_{sea} は以下の通りである。

$$U_{sea} = 0.1 \sin \frac{t}{43200} + 0.025 \quad (\text{Eq.2})$$

沖合の水深は河口の 4 倍に設定されているため、河口と同じ強制流を与えると計算領域内における水の体積が保存されない。そこで、水深が深い沖合においては正弦関数の振幅を 0.1 m/s に設定しモデル領域内の水量は一定にした。側面境界条件に加えて、沖合ではリストア条件を設ける。これは計算領域の左端に河川プルームが衝突し、その一部分が河口に向かった流れとならない

ようにする。本実験ではリストア条件による緩和時間を 1 時間とした。海水と河川水の混合を陽に再現するため、粘性係数と拡散係数は鉛直・水平方向ともに Smagorinsky スキームを採用し、速度勾配が大きい場合にこれらの係数の値が伴って大きくなるように設定する。モデル計算は 3 日間行い、3 日後の植物プランクトン濃度を中心に物理場・生物場の時間変化を評価する。今後、上記の設定を理想実験 1 と呼ぶ。

2.1.2 生態系モデル

生態系モデルとして NPZD モデルを用いる(Onitsuka and Yanagi, 2005)。NPZD モデルは栄養塩濃度・植物プランクトン濃度・動物プランクトン濃度・各プランクトンの死骸、の 4 つの生物パラメータを解くモデルである。しかし、本研究では簡略化のため植物プランクトン濃度と栄養塩濃度だけを定義し、さらに捕食・死滅等による植物プランクトン濃度の減少や死骸からの栄養塩輸送による栄養塩濃度の上昇は再現せず、モデル内における植物プランクトンの光合成のみを考慮する。よって、植物プランクトンは光合成を行える環境であれば単調に増殖し、光合成を行えない環境においては現状の濃度を保つ。

光合成による植物プランクトンの増殖は時間の経過とともに初期値から指数関数的に増殖するように定義されている。

$$P(t) = P_0 e^{\alpha t} \quad (\text{Eq.3})$$

ここで、 t は時刻、 $P(t)$ は時刻 t における植物プランクトン濃度、 P_0 は植物プランクトン濃度の初期値、 α は増殖率を示す。また、増殖率 α は以下の式で定義される。

$$\alpha = V_{\max} \frac{DIN}{DIN + K_{DIN}} e^{kT} \frac{I_x}{I_{opt}} e^{1 - \frac{I_x}{I_{opt}}} \quad (\text{Eq.4})$$

ここで、 $V_{\max}$ は水温 0°C における植物プランクトンの最大光合成速度(0.6 /d)、 DIN は栄養塩濃度、 K_{DIN} は植物プランクトンの半飽和定数($1.5 \times 10^{-3} \text{ mol N/m}^3$)、 T は水温、 I_x は日射量、 I_{opt} は最適日射量(70 W/m^2)を示す。本実験では海面における日射量を 100 W/m^2 としており、この値は水深が深くなるほど減衰する。Eq.4 から、水温と栄養塩濃度が高いほど、また最適日射量に近いほど増殖率 α の値は大きくなる。

本実験における生物パラメータの値は海水の栄養塩濃度が 0 mol N/m^3 、植物プランクトン濃度が $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol N/m}^3$ 、河川水の栄養塩濃度が $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol N/m}^3$ 、植物プランクトン濃度が $1.0 \times 10^{-6} \text{ mol N/m}^3$ に設定した(表 2.1.)。海水は植物プランクトン濃度が高いが栄養塩は溶存していないため、海水中では植物プランクトンの増殖は起こらない。その一方で、河川水の植物プランクトン濃度は海水の 1 割しかないが栄養塩が多く溶存している。河川水中では植物プランクトンが光合成を行える環境ではあるが、溶存している植物プランクトンが少ないため、植物プランクトン

の増殖は非常に遅く、海水と河川水のどちらも植物プランクトンの増殖に適した環境ではない。植物プランクトンが増殖するのは海水と河川水が混合した場合である。混合すると、植物プランクトンと栄養塩がともに十分量存在する環境となるため、植物プランクトンが活発に光合成を行うことが可能になる。河川プリュームが形成される沿岸域において、海水と河川水の混合は河川プリュームのフロント域であるため、本実験では河川プリュームのフロントが位置する領域において特に植物プランクトンが活発に増殖すると期待される。

2.2 理想実験 2

理想実験 1 として構築した鉛直 2 次元モデルには再現性を低下させる要因として、水の収束効果があることが明らかになった。詳細は次章に述べるが、本来、河口から流出した河川水は水平方向に拡散し河川プリュームは薄く広がるが、鉛直 2 次元モデルでは水平方向の拡散を再現できないため、現場観測による結果と比べて河川プリュームが過度に厚くなってしまう。Yuan and Horner-Devine (2013)では、横方向に閉じられた流れと閉じられていない流れを室内実験によって比較し、横方向へ広がる自由度がある方が河川プリュームは薄くなることを示している。つまり、理想実験 1 では沿岸プリュームの再現性が不十分な可能性がある。

理想実験 2 では、水深を一律 16 m に設定する。水深を一律にすることで水深の変化による水の収束効果を回避するためである。また計算領域の長さを理想実験 1 の 2 倍である 24 km に伸ばし、河口から 18 km～24 km の領域にリストア条件を設ける。河口から 18 km～21 km の領域では沖合側ほどリストアの強さが線形的に強くなるように設定し、河口から 21 km の地点より沖合側ではリストア条件による緩和時間を 1 時間とした。側面境界条件として、河口と沖合で流速を強制する。本実験は水深が一律であるため、河口と沖合ともに Eq.1 を用いて流速を強制する。さらに、強制する流速を変えて 3 通りの実験を行う。理想実験 1 では潮流と背景流を併せて強制したが、それに加えて潮流のみの実験、背景流のみの実験、も行う。潮流のみの実験では河口と沖合で U_{tid} を強制する。

$$U_{tid} = 0.4 \sin \frac{t}{43200} \quad (\text{Eq.5})$$

背景流のみの実験では河口と沖合で U_{uni} を強制する。

$$U_{uni} = 0.1 \quad (\text{Eq.6})$$

解析範囲は理想実験 1 と同様に河口から 12 km までの領域である。上記の設定以外は生態系モデルを含めて全て理想実験 1 と同じである。

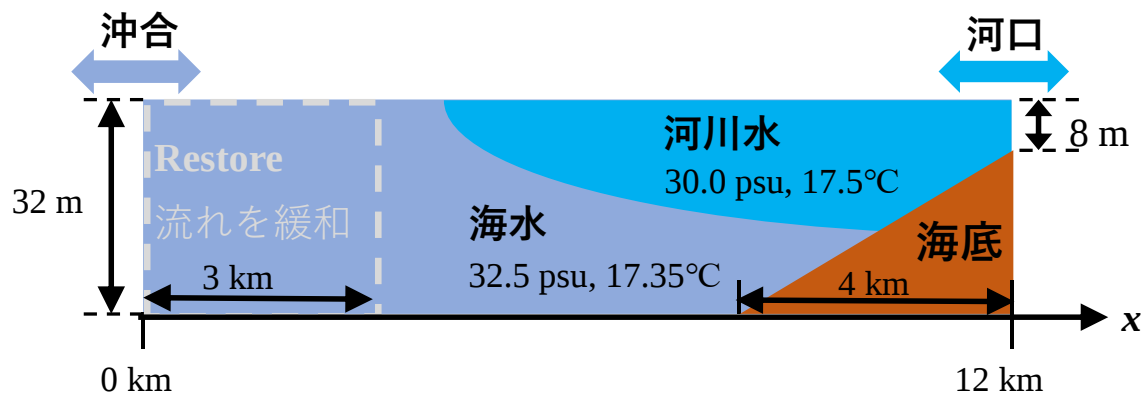


図 2.1. 理想実験 1 で構築した鉛直 2 次元モデルの模式図

表 2.1. 海水と河川水それぞれの生物パラメータの値

	植物プランクトン濃度 [mol N/m ³]	栄養塩濃度 [mol N/m ³]
海水	1.0×10^{-5}	0.0
河川水	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-3}

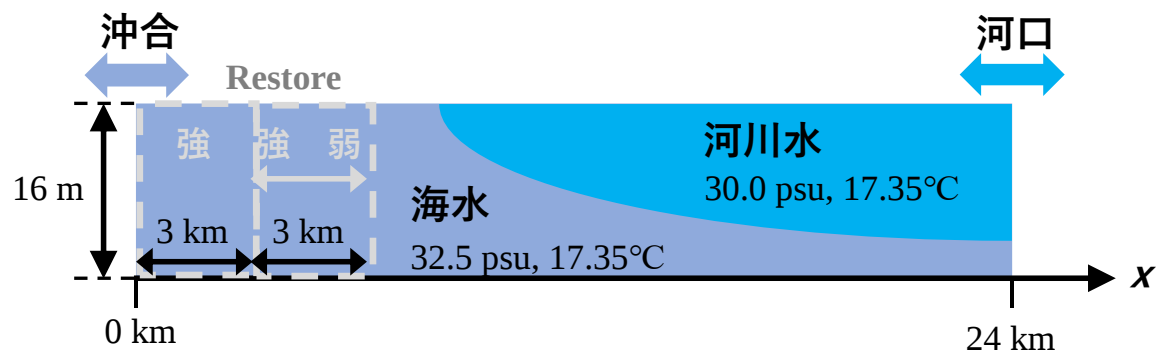


図 2.2. 理想実験 2 で構築した鉛直 2 次元モデルの模式図

3 章 モデル結果：理想実験 1

3.1 塩分・流れ場

実験を開始して 12 時間後までの塩分の時間変化を 3 時間おきに示す(図 3.1.)。実験を開始すると、河口から低塩分である河川水が流入し(図 3.1.a)、6 時間後には低塩分水が海面から水深 10 m 付近まで河川プリュームを形成した(図 3.1.b)。実験開始から 6 時間後までは下げ潮の時間帯であり、河川プリュームは時間の経過とともに沖合へと進行した。6 時間後の時点では、河川プリュームの先端は河口から 7~8 km 程度まで進行していた。一方で 6 時間後から 12 時間後は上げ潮の時間帯であり、下げ潮時に流出した河川水の一部が河口方向へと戻り、時間の経過とともに河川プリュームの深度は浅くなった(図 3.1.c)。12 時間後には水深 10 m より浅い領域だけに河川プリュームが存在した(図 3.1.d)。その後、実験を開始して 2 日後には塩分場がおよそ定常状態に達し、半日周期で同じ挙動を繰り返していた。

2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す(図 3.2.)。流速場は、下げ潮の極大時に沖合方向、上げ潮の極大時に河口方向の水平流速場の潮汐振動を示していた。2 日目から 6 時間後までは下げ潮の時間帯であるため、下げ潮のピークにあたる 3 時間後は領域全体で沖合方向の流れが生じていた。その中でも河口において特に大きな流れが生じており、最大で 0.4 m/s を上回っていた。その後、下げ潮から上げ潮へと切り替わる 6 時間後においては上層で沖合方向の流れ、下層では河口方向の流れが生じていた。特に、上層においては沖合ほど流れが速く、最大で約 0.4 m/s であった。6 時間後から 12 時間後までは上げ潮の時間帯であるため、上げ潮のピークにあたる 9 時間後は下層だけでなく河口付近でも沖合方向の流れが生じていた。そして、河口で流れが最も速く 0.3 m/s を上回っていた。その後、上げ潮から下げ潮へと切り替わる 12 時間後においては上層で沖合方向、下層で河口方向の流れが生じていたものの、多くの領域で流れの速さが 0.1 m/s を下回っていた。

平均場(2 日 0~12 時間後)を見ると、水平流速は、上層では沖合方向の平均流が生じていた一方で、下層では河口方向の平均流が生じており、ちょうど真ん中あたりの水深 15 m 付近で平均流の方向が入れ替わっていた(図 3.4.b)。平均流の鉛直分布は上層における平均流の極大が海面に位置しており、その大きさは 0.2 m/s を上回った。下層における平均流の極大は海面に位置しており、その大きさは約 0.15 m/s と上層より小さかった。一方、塩分は海面に近いほど値が低かった(図 3.3.(a))。また水平方向にみると海面近傍では河口程塩分が低い傾向があるが、他の水深では水平方向にほぼ一様であった。水深 15 m より深い領域は全て海水で満たされていることから、河川水はこの深度まで殆ど到達していなかったと考えられる。

3.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度

次に栄養塩濃度の時間変化を調べ、栄養塩が上層から下層へ輸送される過程を調べる。3 時間おきの断面図を見ると栄養塩は低塩分である河川水に多く溶存しているため、基本的には塩分が低い領域において栄養塩濃度が高かった(図 3.4.)。3 時間後は栄養塩濃度の高い水が水深 10 m 付近まで到達していたが、6 時間後においては、下げ潮によってさらに深い深度 15 m 付近まで到達していた。また水深 15 m 以深においても、僅かではあるが栄養塩が確認できた。上げ潮時の 9 時間

後においては、沖合の水深 20 m 以深において栄養塩濃度が局所的に高まっている領域があり、12 時間後にはこの栄養塩濃度の高い水塊が河口方向へ約 1 km 移動していた。

3 日後の植物プランクトン濃度は、主に水深 15 m 付近において徐々に上昇していた。しかし海水の植物プランクトン濃度の初期値 $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol N/m}^3$ と比べてその変化量は小さく、海水と海面付近にある河川水との差の方が大きい(図 3.5.a)。河川水は元々植物プランクトン濃度が低いため、河川水の割合が高い海面付近では植物プランクトン濃度が低くなるためである。そこで、河川水の下領域における植物プランクトン濃度の上昇を詳細に調べるため、海水の植物プランクトン濃度の初期値からの増加分のみに注目すると(図 3.5.b)、下層において植物プランクトン濃度が最大で初期値から約 0.2~0.3% 程度上昇していたことが分かった。本来、海水には栄養塩が含まれていないため、もし河川水との混合が起きていなかったら植物プランクトンが増殖し得る環境ではない。つまり植物プランクトン濃度の上昇は、河川水由来の栄養塩が下層へ確かに輸送されていることを示している。

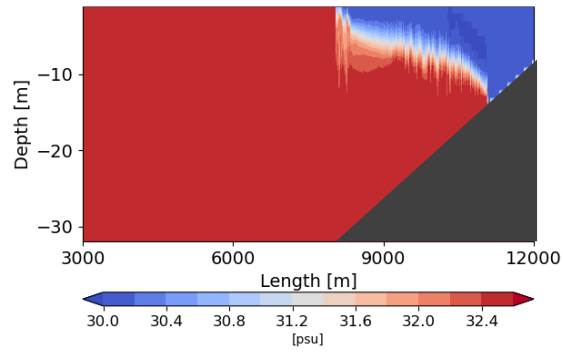
3.3 考察

栄養塩が下層へ輸送されるプロセスとして、上げ潮時において確認された沖合の局所的な栄養塩濃度の上昇が挙げられる。そこで、沖合の下層に注目して鉛直下向きの拡散や移流の強さを検証し、栄養塩が輸送されるメカニズムを調べる。9 時間後における Smagorinsky スキームから求められる鉛直拡散係数の大きさは、沖合の上層では値が $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$ を上回っていたが、沖合の下層においては $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ を下回っていた(図 3.6.)。仮に拡散係数の値が $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ である場合を仮定すると、約 7 時間で 5 m 程度の水柱が混合する強さが想定され、これでは深度 10 m 以上の水塊混合を引き起こす効果としては不十分である。また、鉛直流速の平均場は領域全体で鉛直上向きを示しており、特に拡散係数の大きかった上層では 0.005 m/s を上回る流れが発生していた(図 3.7.)。沖合の下層における鉛直下向きの平均流は弱い。つまり、栄養塩を下層へ輸送するプロセスとして拡散や移流以外の原因が存在すると考えられる。

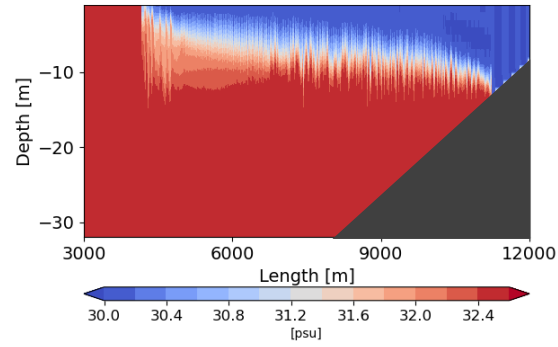
沖合の下層 (河口から 7.1 km~7.3 km、水深 10 m~32 m)における上げ潮時(9 時間後)の栄養塩濃度を詳細にみると、栄養塩濃度の高い水が海底近くまで貫入していることがわかる(図 3.8.)。そこでさらに詳細に栄養塩濃度をみると、波状の空間分布に加えて栄養塩濃度の高い水が低い水の下に潜り込む様子が確認できた(図 3.9.)。これは沖合の下層において内部波が発生し、その内部波が壊れることで上層から下層への栄養塩輸送促進されるプロセス、つまり沖合の下層においてケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生していたことが示唆される。

そこで、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生している可能性を、リチャードソン数を求めることで定量的な評価を試みた。リチャードソン数は流れと成層強度を比較して示す指標であり、この値が 0.25 を下回るとケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生しうる。解析から、上げ潮時におけるリチャードソン数の値は、栄養塩分布が波状になっている領域周辺で 0.25 を下回っており(図 3.10.)、その下回っている領域と栄養塩の境界域は確かに一致していた(図 3.11.)。この結果は、沖合ではケルビン・ヘルムホルツ不安定を通じて栄養塩が下層へと輸送され、それが下層における植物プランクトンの増殖を促したことを示している。

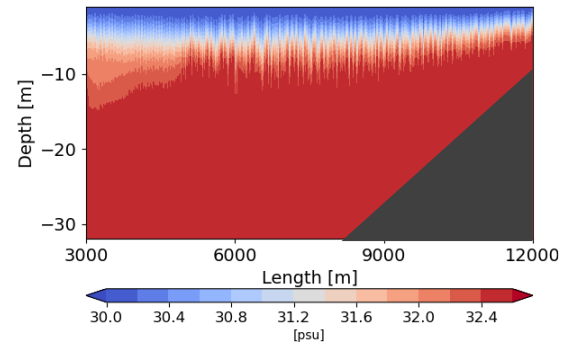
(a)



(b)



(c)



(d)

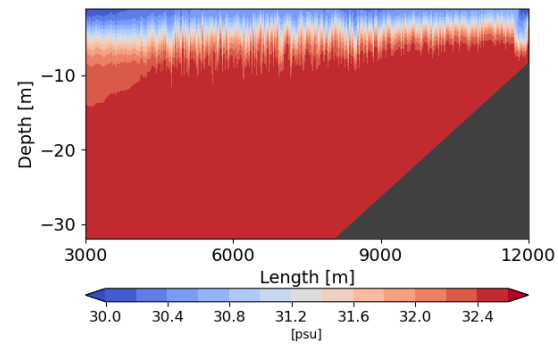
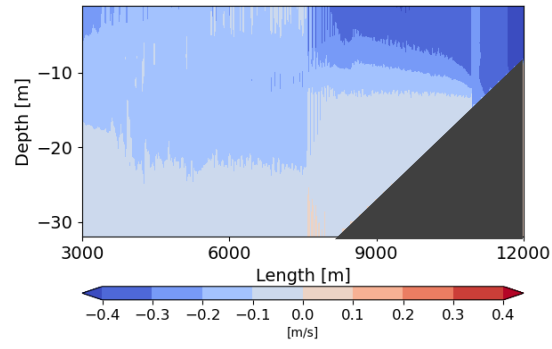
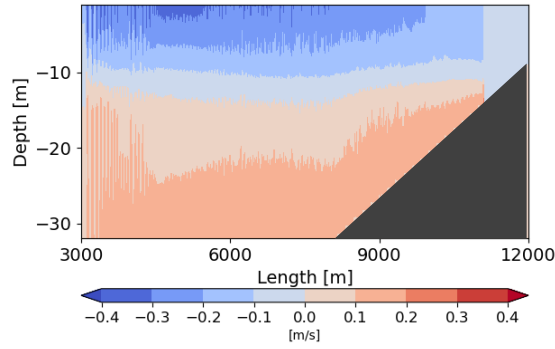


図 3.1. 塩分の時間変化を 3 時間おきに示す。リストア領域を除く計算領域全体を示しており、図の右側が河口、左側が沖合である。縦軸は深度、横軸は厚岸湾湾口からの水平距離を示す。青が濃いほど塩分が低い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の塩分を示す。

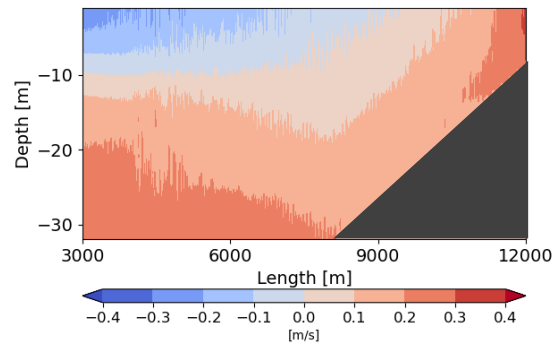
(a)



(b)



(c)



(d)

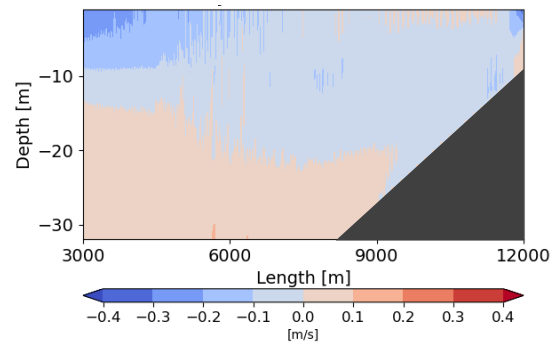
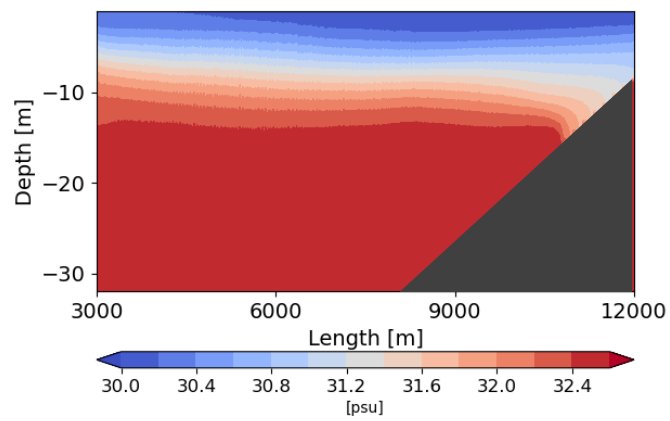


図 3.2.2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど河口方向の流速が大きい。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の水平流速を示す。

(a)



(b)

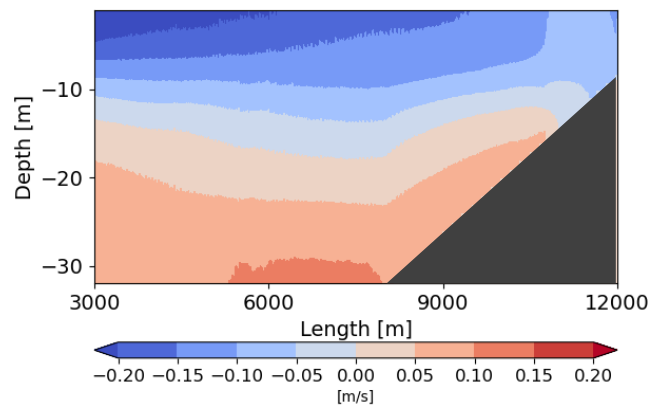
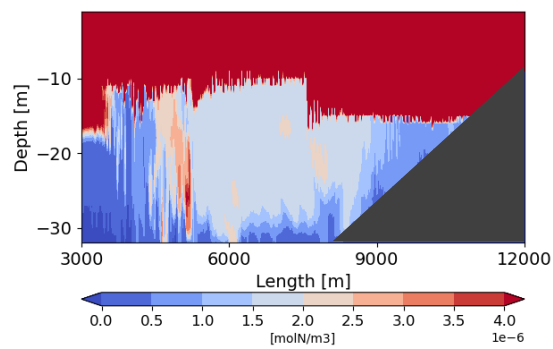
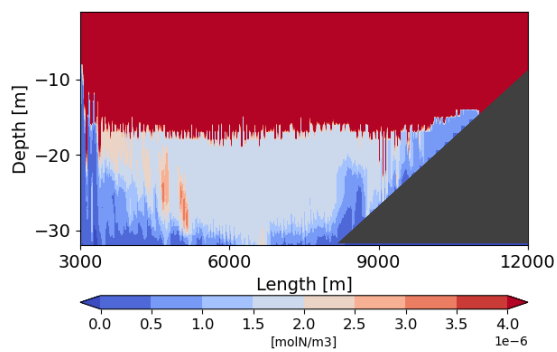


図 3.3.2 日目から 12 時間後までの平均場。(a)は塩分、(b)は水平流速の平均場を示す。

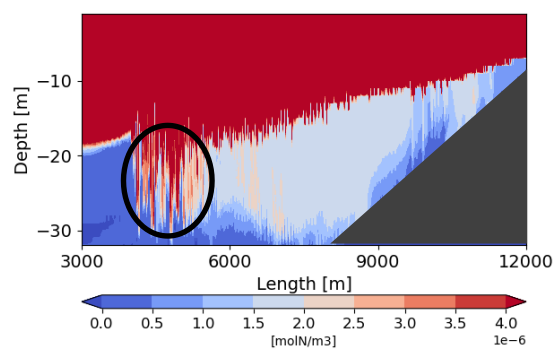
(a)



(b)



(c)



(d)

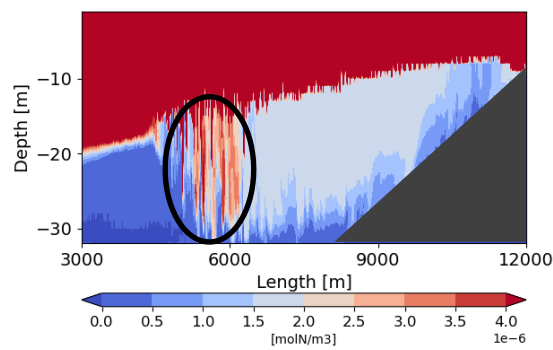
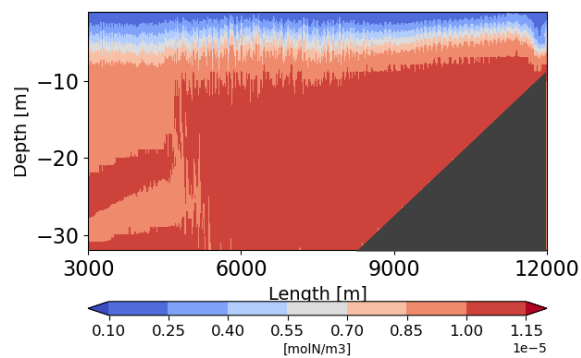


図 3.4.2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

(a)



(b)

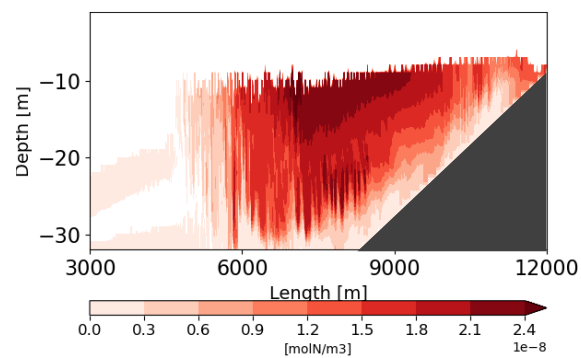


図 3.5.3 日後における植物プランクトン濃度を示す。赤が濃いほど植物プランクトン濃度が高い。(a)は瞬間値、(b)は海水の初期値($1.0 \times 10^{-5} \text{ mol N/m}^3$)からの変化を示しており、(b)は初期値から濃度が上昇した領域だけ着色している。

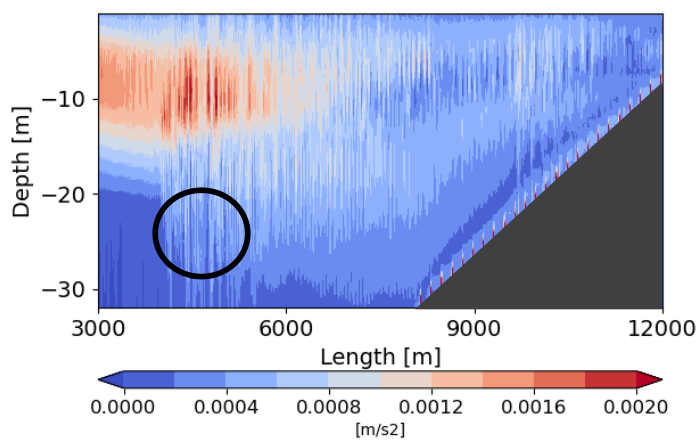


図 3.6. 開始から 9 時間後における鉛直拡散係数。黒丸は栄養塩濃度が局所的に上昇していた領域を示す。

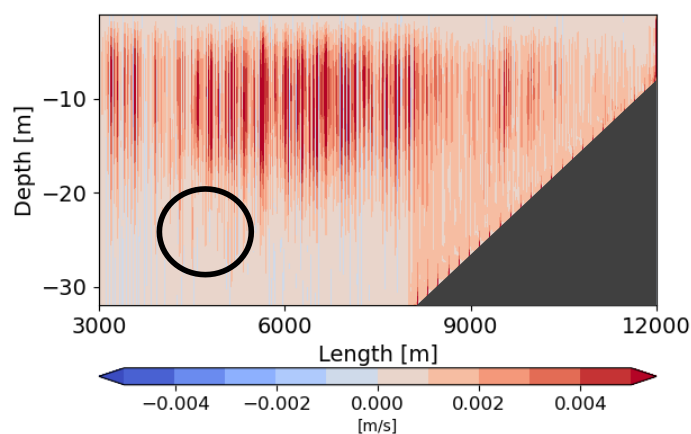


図 3.7. 鉛直流速の平均場。黒丸は栄養塩濃度が局所的に上昇していた領域を示す。

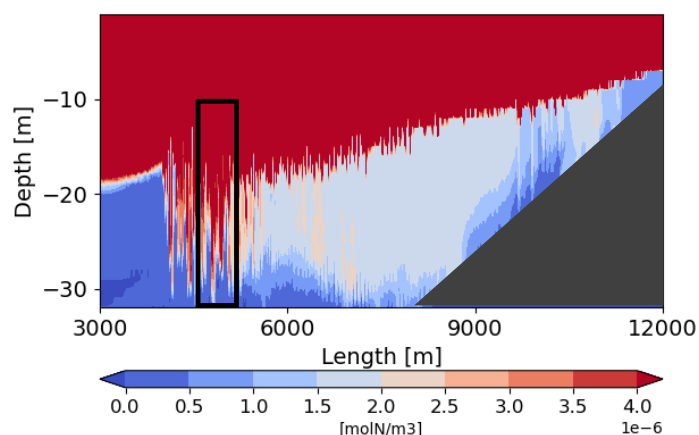


図 3.8. 黒枠で囲った領域(河口から 7.1 km~7.3 km、水深 10 m~32 m)に限定して解析を行う。図は 9 時間後の栄養塩濃度を示している。

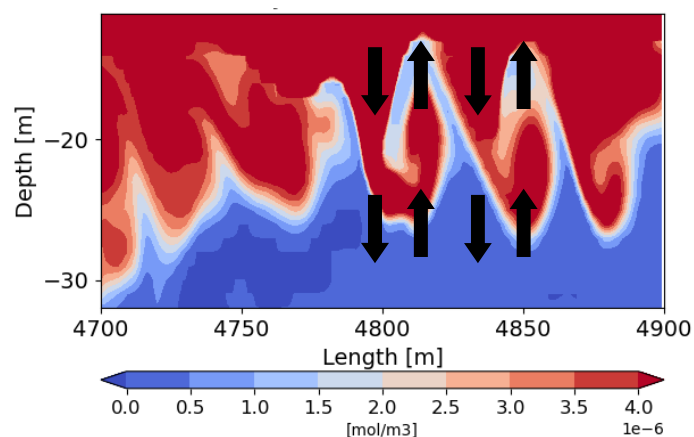


図 3.9. 9 時間後における黒枠内の栄養塩濃度。黒矢印は同時刻における鉛直流の方向を示している。

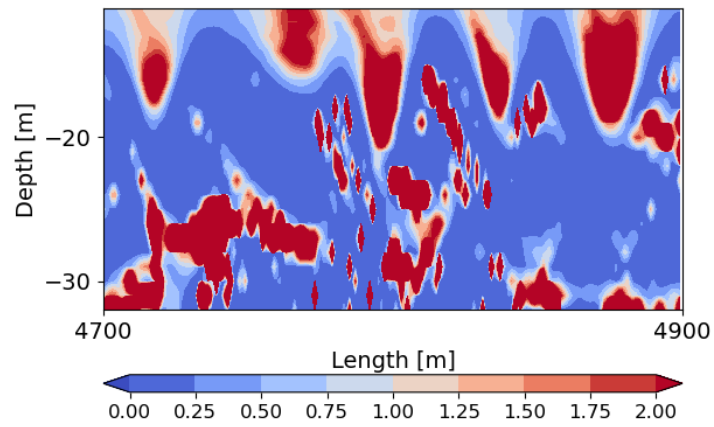


図 3.10. 9 時間後における黒枠内のリチャードソン数。青が濃いほどリチャードソン数の値が小さい。

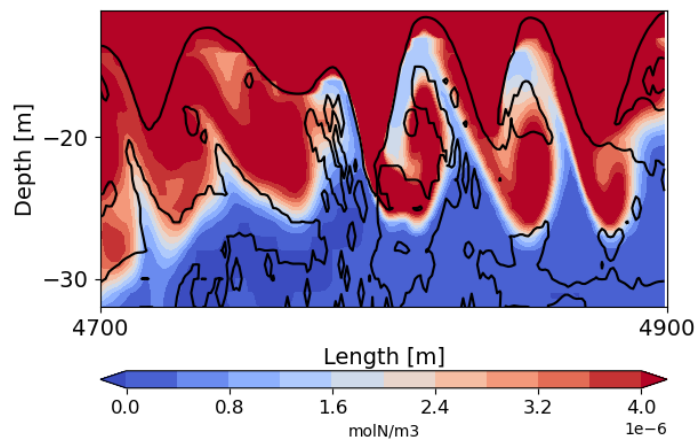


図 3.11. 9 時間後における黒枠内の栄養塩濃度。黒線上はリチャードソン数の値が 0.25 である。

第4章 モデル結果：理想実験2

理想実験1では河川プリュームの下層における植物プランクトン濃度の上昇が、ケルビン・ヘルムホルツ不安定を通じて上層から輸送された栄養塩によって生じる可能性を示した。しかし、この輸送過程は河口から離れた沖合で発生していることに加え、水深が一定になる領域に形成された非現実的な分厚い河川水の層によって発生した可能性がある。海底地形が深くなると水平流速の鉛直平均値は減少する必要があるため、海底斜面がある理想実験1では水深が一定になる地点で河川水が収束し、厚くなることが予想される。そこで、数値モデルから海底斜面を除いた理想実験2を実施した。

4.1 潮流のみの実験

4.1.1 塩分・流れ場

実験を開始してから12時間後までの塩分の時間変化を3時間おきに示す(図4.1.)。実験を開始してから6時間後までは下げ潮の時間帯であることから、低塩分水が河口から流入し、海面に広がり河川プリュームを形成した(図4.1.a)。その後、6時間後までには河川プリュームが河口から約10 km 進行した(図4.2.b)。6時間後から12時間後までは上げ潮の時間帯であることから、河口付近の流れは逆になり、沖から河口へと向かう。そのため、9時間後には河口付近における河川プリュームの深度は浅くなった(図4.1.c)。また、下げ潮の時間帯では河口付近に鉛直一様に存在していた低塩分水は、12時間後の上げ潮から下げ潮へと転じる時間帯には下層から高塩分水が潜り込むことで下層ほど塩分が高くなった(図4.1.d)。なお、上げ潮の時間帯において、海面近くにある河川プリュームの先端は殆ど進行していなかった。理想実験2では海底斜面がもたらす収束効果が抑制できていると思われる。

次に、2日目からの水平流速の時間変化を3時間おきに示す(図4.2.)。6時間後までは下げ潮の時間帯であり流れは沖合方向であるため、流速が最大となる3時間後は領域全体で沖合方向の流れが生じていた。海面に近いほど速く、0.5 m/s を上回っていた。下げ潮から上げ潮へと転じる6時間後は上層で沖合方向の流れが生じていた一方で、下層では河口方向の流れが生じていた。そして、上層と下層の速さはどちらも最大約0.4 m/s であった。6時間後から12時間後までは上げ潮の時間帯であり、流れは河口方向である。上げ潮のピークである9時間後には領域全体で河口方向の流れが生じていた。下げ潮のピークとは異なり、海底に近いほど速く、最大で0.5 m/s を上回っていた。上げ潮から下げ潮に転じる12時間後には6時間後と同様に上層で沖合方向、下層で河口方向の流れが生じており、上層と下層のどちらにおいても最大約0.4 m/s であった。

平均場(2日0~12時間)は、上層では沖合方向、下層では河口方向の平均流が生じていた(図4.3.b)。海面と海底の間である水深8 m 付近で平均流の方向は逆転し、平均流の大きさは上層と下層で大きな差はなく、極大値の大きさは約0.4 m/s であった。理想実験1と比較すると、上層と下層それぞれの極大値の大きさはどちらも同じ程度である。一方、塩分は上層ほど低く、水平方向にはどの深度においても沖合と比べて河口の方が塩分の値は低かった(図4.3.a)。理想実験1と比べて低塩分である河川水がより下層まで到達していた。

4.1.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度

次に、2日目からの栄養塩濃度の時間変化を3時間おきに示す(図 4.4.)。低塩分である河川水には栄養塩が多く含まれるため、栄養塩濃度の分布は塩分の分布がほぼ反転したような分布になる。3時間後には、河口から5 km 程度離れた海面における栄養塩濃度が低くなっていた(図 4.4.a)。河川プリュームが潮汐振動にあわせてパルスのように沖合へと進行するため、この領域は河川プリュームの先端である一方、前の潮汐サイクルで発生した河川プリュームの後端にも相当する。河川プリュームの先端にある栄養塩濃度の高い水は海面付近にのみ存在するが、河口に近づくほど深くまで存在し、河口付近では鉛直一様であった。下げ潮から上げ潮へと転じる6時間後には、3時間後と比べてより広い領域まで栄養塩濃度の高い水が広がっている(図 4.4.b)。6時間後以降は上げ潮の時間帯となり、流れは河口方向になるため、9時間後には河口付近において栄養塩濃度が低下していた(図 4.4.c)。しかし、沖合においては上げ潮の時間帯で栄養塩濃度が大きく変化しなかった(図 4.4.c, d)。

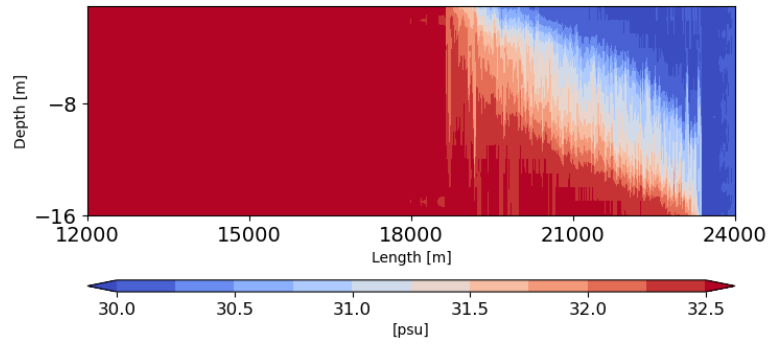
植物プランクトン濃度変化の平均場を示す(図 4.5.)。本実験においても、河川水の下層において植物プランクトン濃度は徐々に上昇しており、特に河口から12 km 離れた領域で最も濃度が上昇している。一方で、海面付近は河川水の割合が高く、河川水にはそもそも植物プランクトンが存在していない設定のため、植物プランクトン濃度は上昇しない。また、河口から沖合12 km あたりまでは、沖合ほど浅い深度で植物プランクトン濃度が上昇していた。

4.1.3 考察

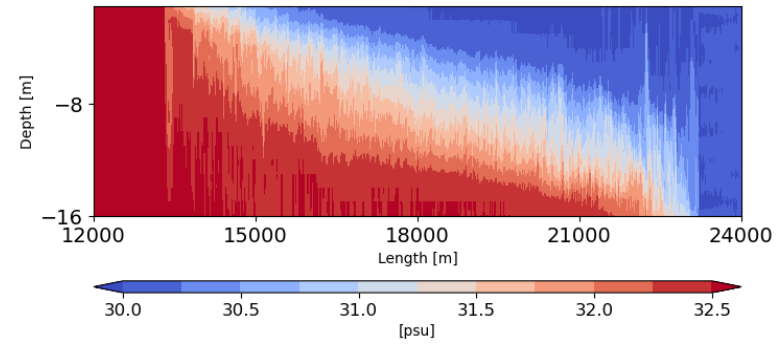
平均場において植物プランクトン濃度が上昇した領域に注目し、栄養塩が下層に輸送された原因を探る(図 4.6)。数十 m スケールの波や渦を目視できるように高解像で栄養塩の空間分布を確認すると、3時間後では海面においても河川プリュームの先端にあたる部分で栄養塩濃度が低く、大きな波長の内部波が生じていた(図 4.6.a)。河川プリュームが通過した後の時間帯においても成層が乱れており、6時間後、9時間後の栄養塩濃度における栄養塩濃度も波状の様子が確認できた(図 4.7.)。この領域では多くの時間帯で内部波の破碎を通じて海水と河川水の混合が促進され、栄養塩が上層から下層へと輸送されていた可能性が高い。

海水の割合が高い下層は植物プランクトン濃度が高いため、上層から栄養塩が輸送されると植物プランクトンが活発に増殖し得る環境となる。しかし、混合が強く河川水の割合が増えると植物プランクトン濃度は減少する。そのため、混合が活発に起きる河川水の真下では植物プランクトン濃度は上昇していない。

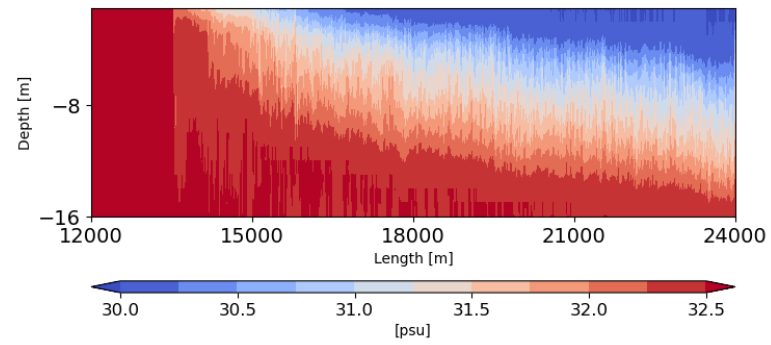
(a)



(b)



(c)



(d)

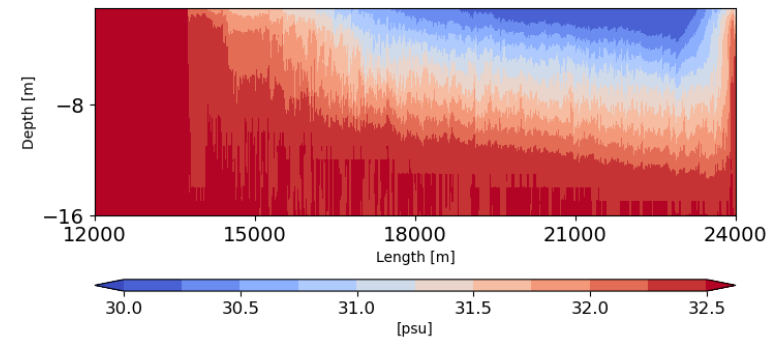
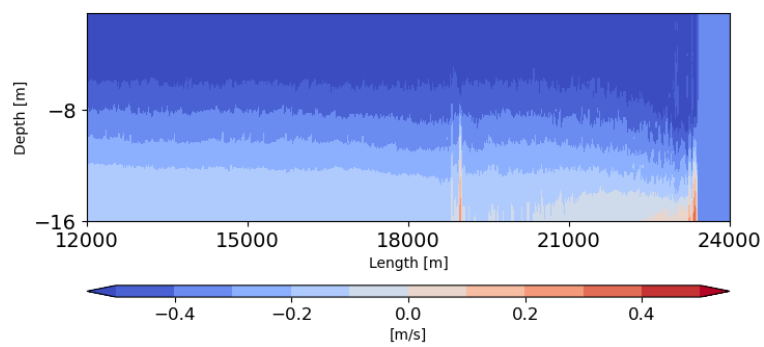
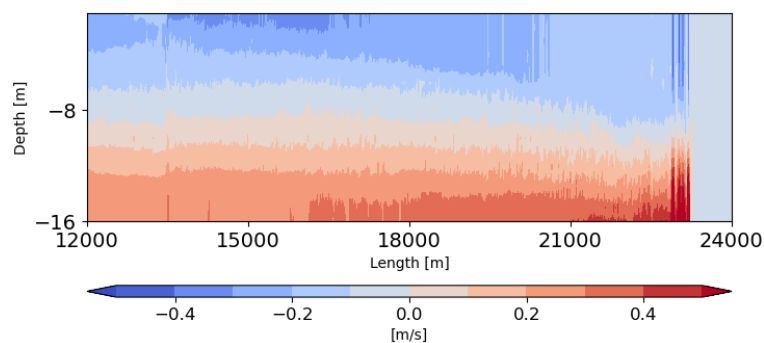


図 4.1. 塩分の時間変化を 3 時間おきに示す。解析対象は河口から 12 km までであり、青が濃いほど塩分が低い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の塩分を示す。

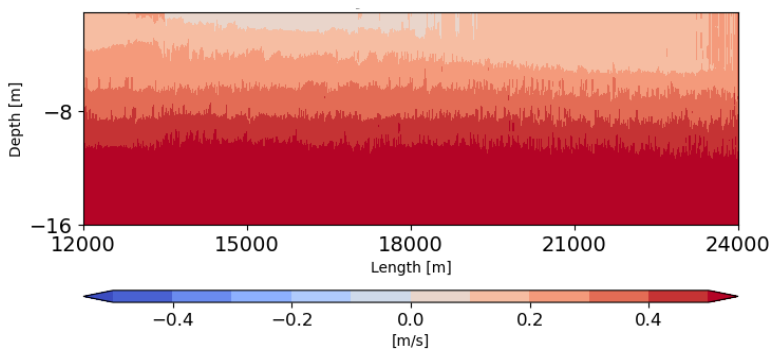
(a)



(b)



(c)



(d)

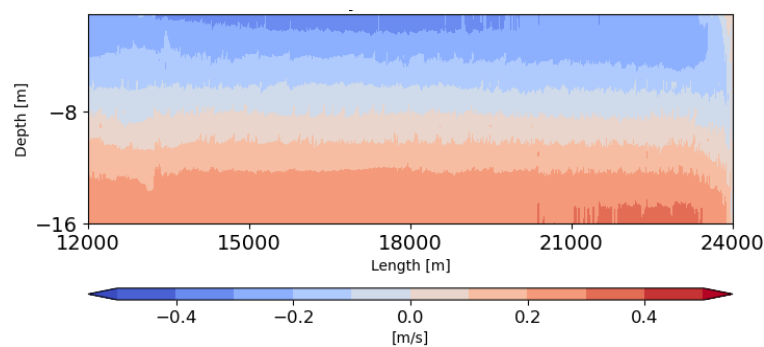
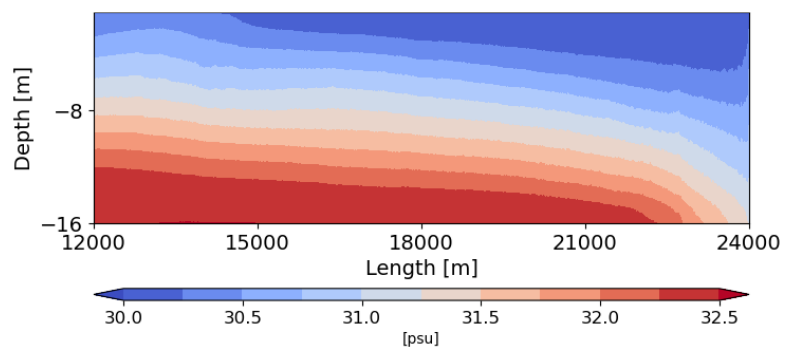


図 4.2.2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど河口方向の流速が大きい。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の水平流速を示す。

(a)



(b)

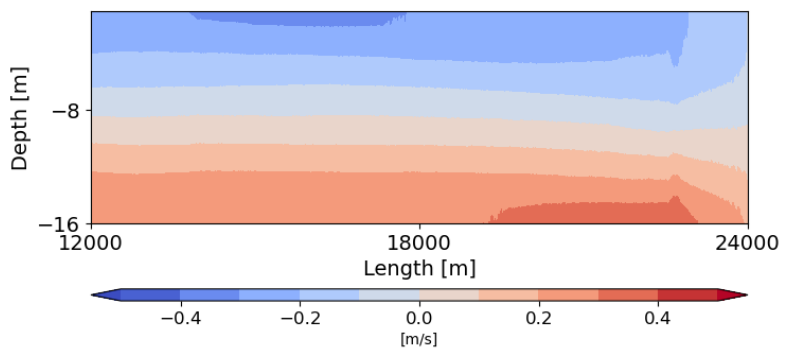
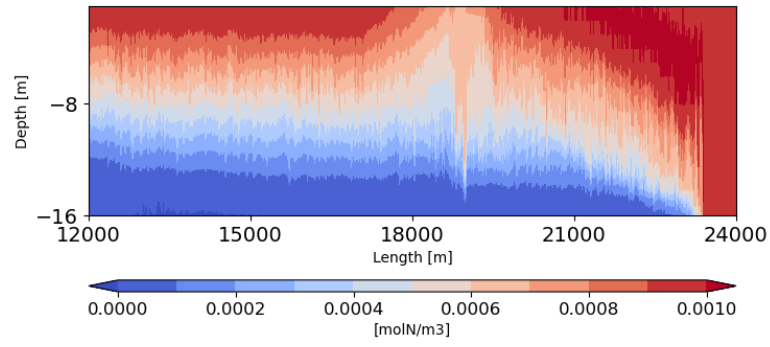
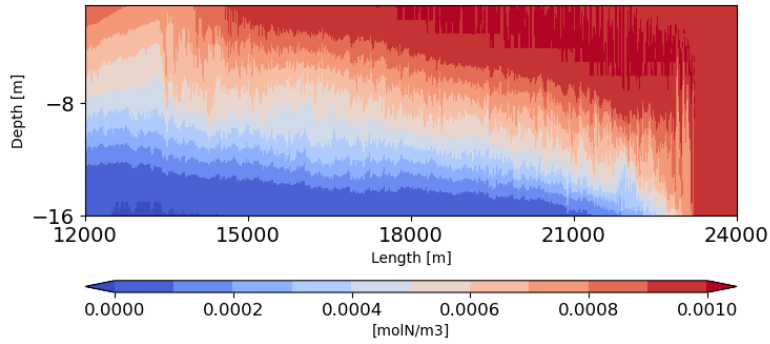


図 4.3.2 日目から 12 時間後までの平均場。(a)は塩分、(b)は水平流速の平均場を示す。

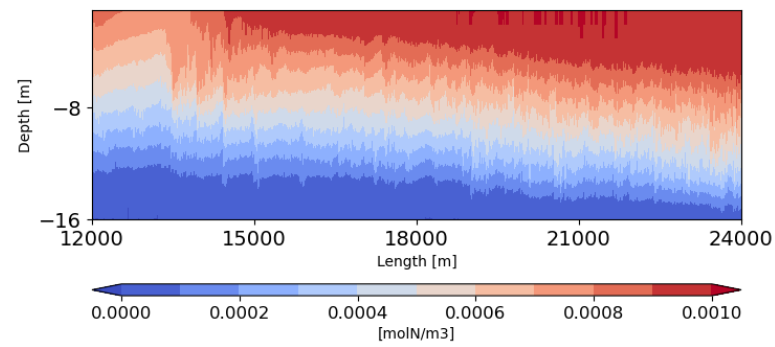
(a)



(b)



(c)



(d)

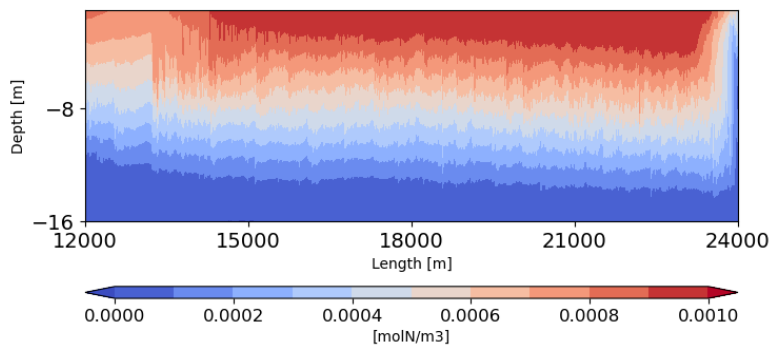


図 4.4.2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

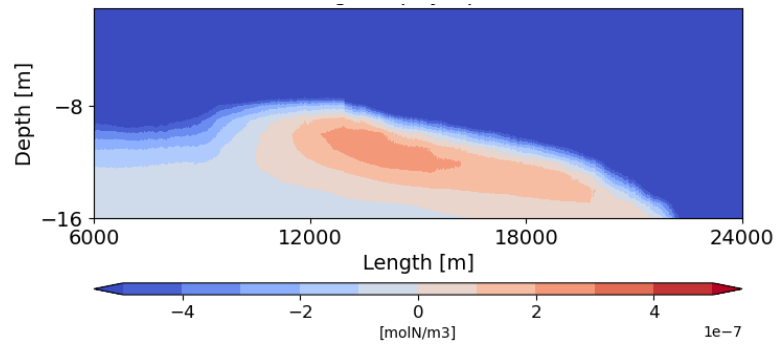


図 4.5.植物プランクトン濃度変化の平均場。赤が濃いほど植物プランクトン濃度が高い。

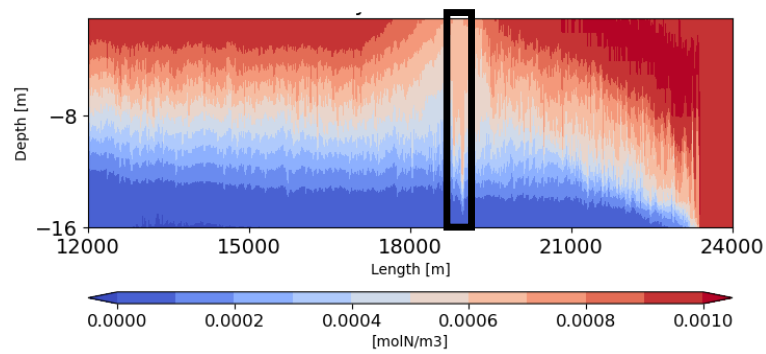
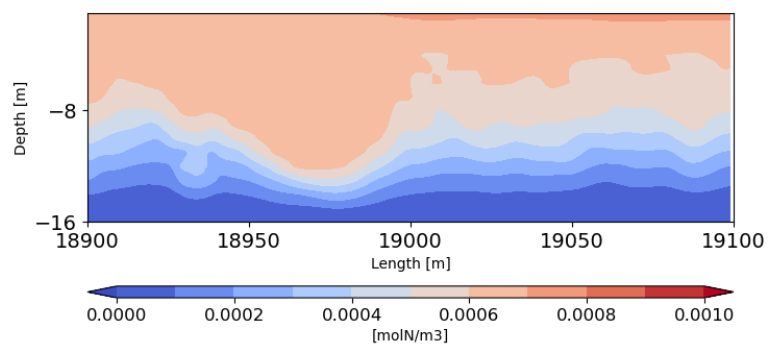
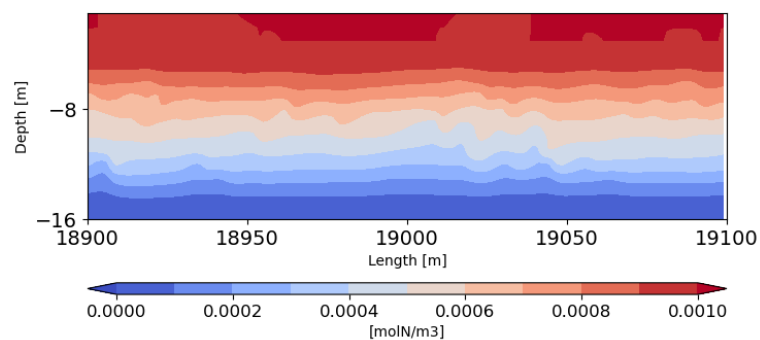


図 4.6. 黒枠で囲った領域(河口から 4.9 km～5.1 km)に限定して解析を行う。図は 3 時間後の栄養塩濃度を示している。

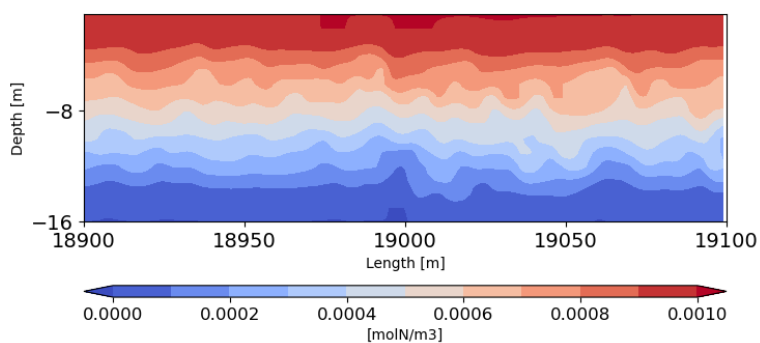
(a)



(b)



(c)



(d)

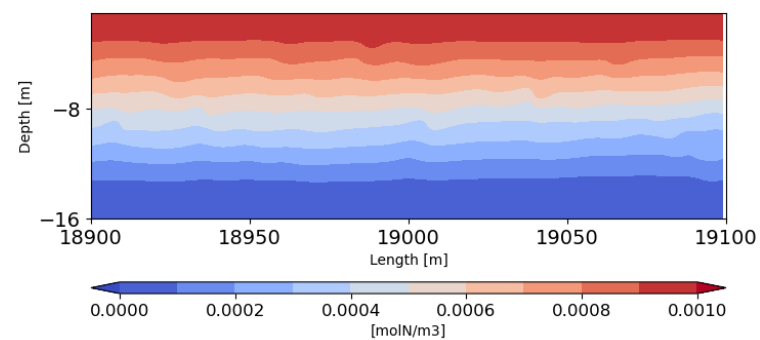


図 4.7. 黒枠で囲った領域に限定し、2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

4.2 背景流のみの実験

4.2.1 塩分・流れ場

実験を開始してから 12 時間後までの塩分の時間変化を 3 時間おきに示す(図 4.8.)。実験を開始すると河口から河川水が流入し、沖合に向けて進行した(図 4.8.a)。しかし、強制している流速の大きさは時間変化しないため、河川プリュームはおよそ一定の速度で沖合へと進行し続けた(図 4.8.b)。9 時間後の時点で河川プリュームは河口から約 12 km 進行していた(図 4.8.c)。潮流のみの実験では塩分が 30.0 の低塩分水が沖合にも存在したが、本実験では河口付近にのみ存在し、沖合ほど河川プリューム内の塩分は高くなっていた(図 4.8.d)。

次に、2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す(図 4.9.)。本実験では定常流で強制しているため、水平流速の方向は常に上層で沖合方向、下層で河口方向であった。そして、2 日目以降はおおよそ定常状態に達しており、上層では最大で約 0.5 m/s、下層では最大で約 0.4 m/s と、上層と比べて下層における流れは弱かった。

平均場(2 日 0~12 時間)は、定常状態になった 2 日目の状況とほぼ同じである(図 4.10.b)。潮流のみの実験と比較すると(図 4.3.b)、海面の沖合方向の流れは速く、海底の河口方向の流れは弱かった。一方、海面付近の塩分は低く、海底付近は大きかった(図 4.10.a)。

4.2.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度

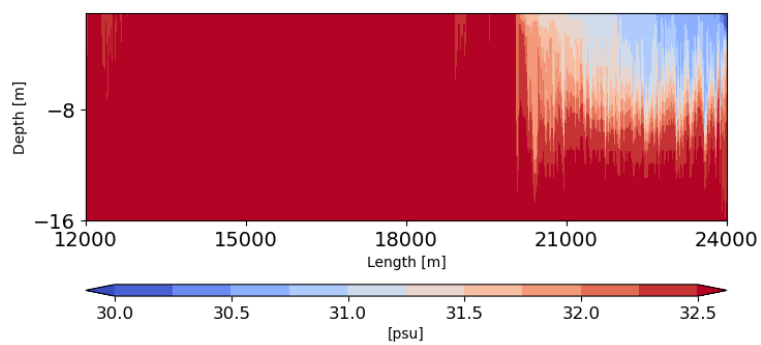
2 日目以降の栄養塩濃度場は時間が経過しても大きく変化しなかった(図 4.11.)。水深 8 m までは鉛直方向に一様であったが、下層においては水深が深くなるほど栄養塩濃度が低くなった。また塩分場の傾向と同様に、潮流のみの実験と比べて海面付近において栄養塩濃度が低かった。海面では河口付近ほど栄養塩濃度が高く、沖合ほど低い。下層では同じ深度において潮流のみの実験より栄養塩濃度は高い。

植物プランクトン濃度変化の平均場を示す(図 4.12.)。潮流のみの実験と同様に、下層において植物プランクトン濃度は上昇したが、より深い深度で上昇していた。また河口に近いほど上昇しており、海水の初期値から約 5% 上昇していた。この値は潮流のみの実験より大きかった。

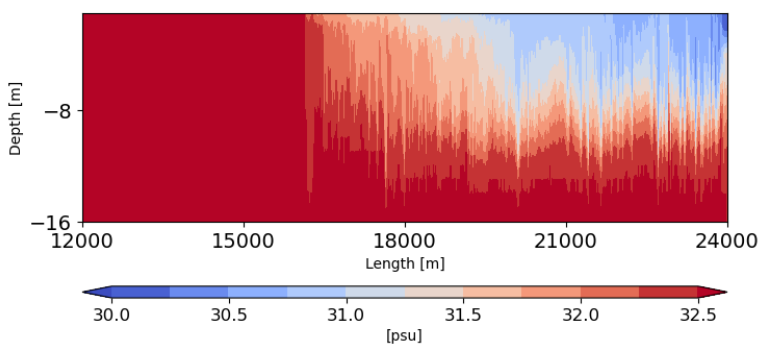
4.2.3 考察

平均場において植物プランクトン濃度が上昇していた河口から 200 m までの領域に注目し、栄養塩が下層まで輸送された原因を探る(図 4.14)。この領域をより詳細に解析すると、この領域では常に不規則な波長の内部波が生じ続けており、これらの波が破碎している。特に 3 時間後や 12 時間後にこの破碎する過程が空間分布より確認できた。よって、本実験では河口下の領域で内部波が壊れることによって海水と河川水の混合が促進され、植物プランクトン濃度を上昇させていた可能性が高い。

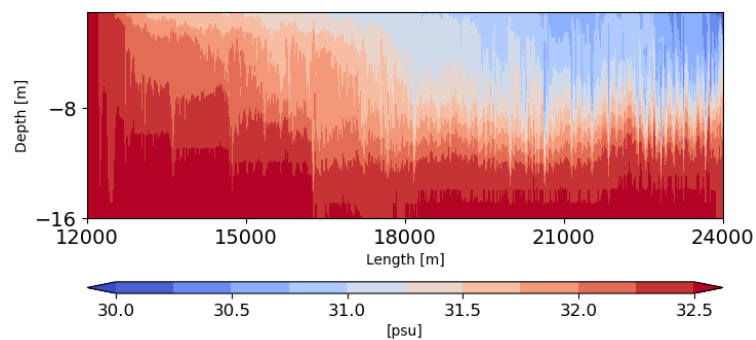
(a)



(b)



(c)



(d)

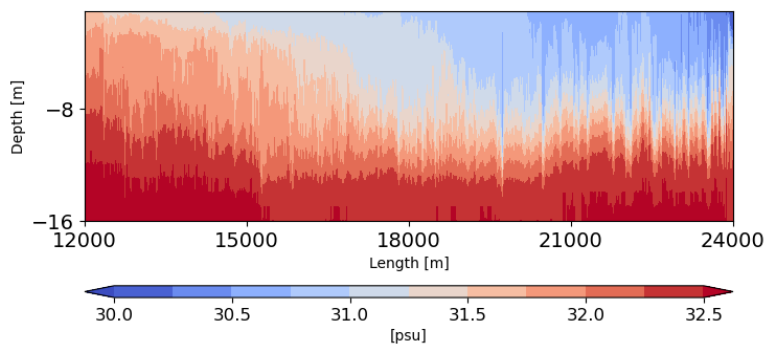
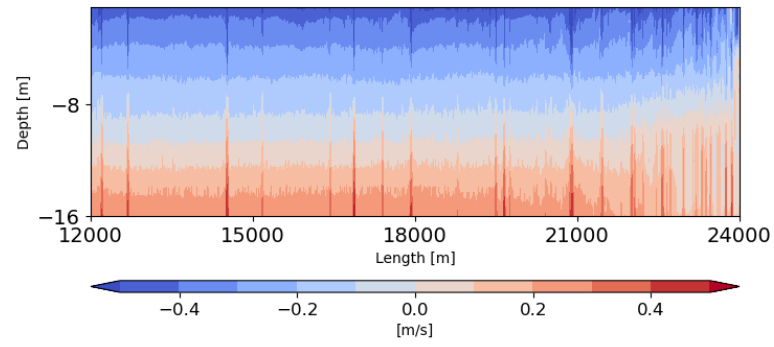
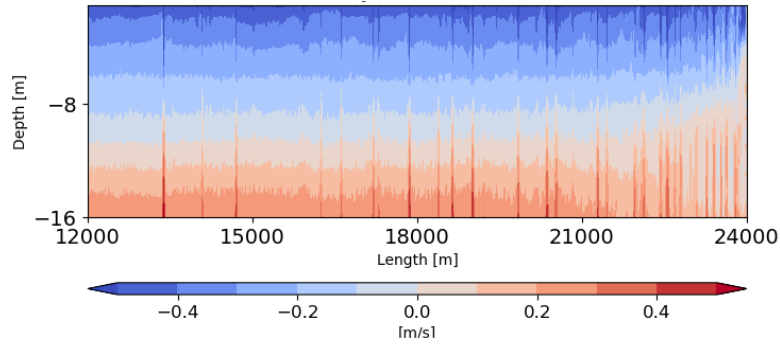


図 4.8.塩分の時間変化を 3 時間おきに示す。解析対象は河口から 12 km までであり、青が濃いほど塩分が低い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の塩分を示す。

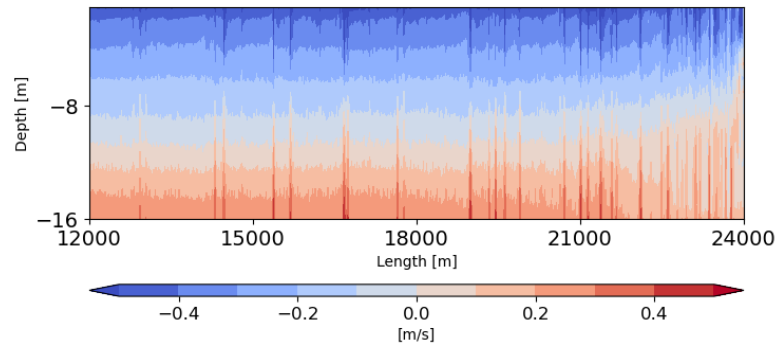
(a)



(b)



(c)



(d)

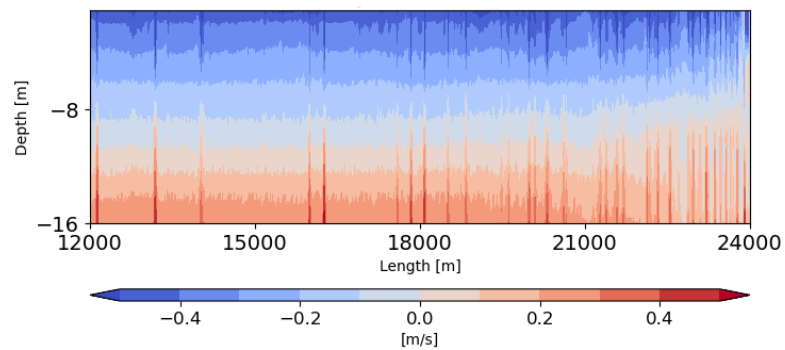
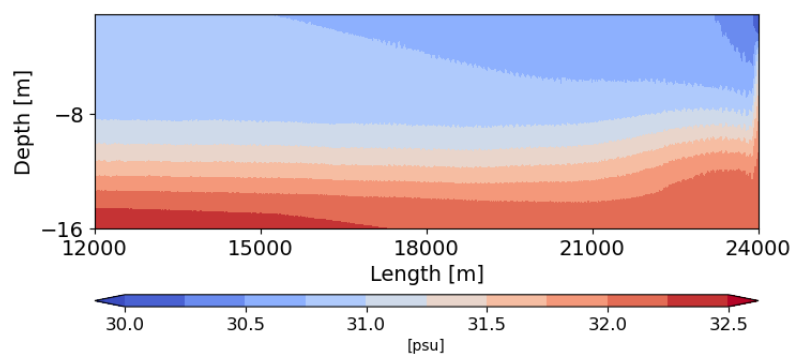


図 4.9.2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど河口方向の流速が大きい。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の水平流速を示す。

(a)



(b)

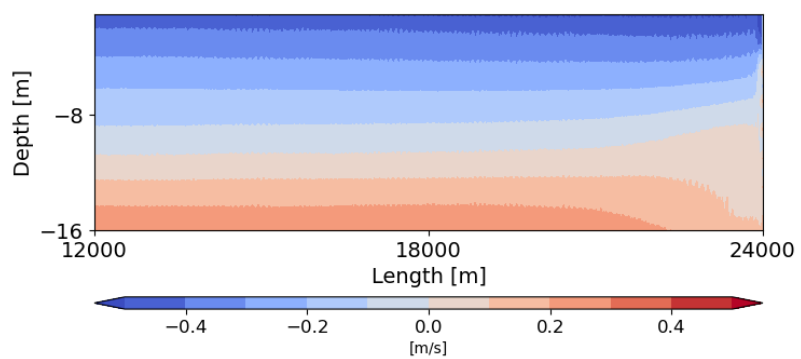
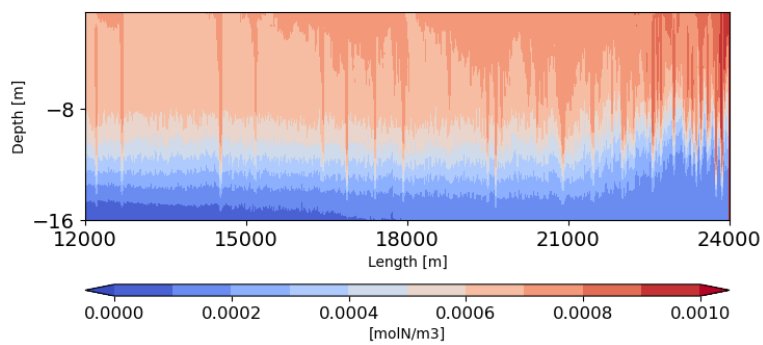
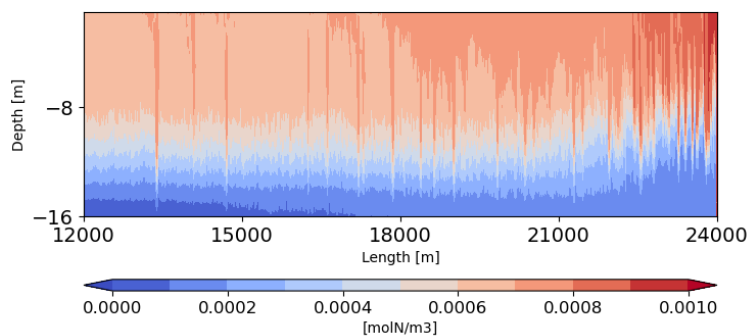


図 4.10. 2 日目から 12 時間後までの平均場。(a)は塩分、(b)は水平流速の平均場を示す。

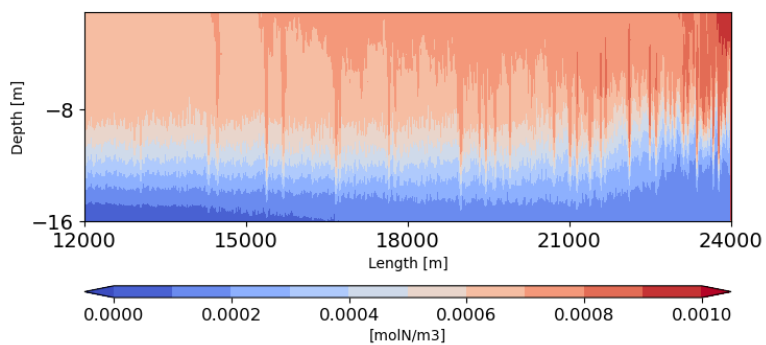
(a)



(b)



(c)



(d)

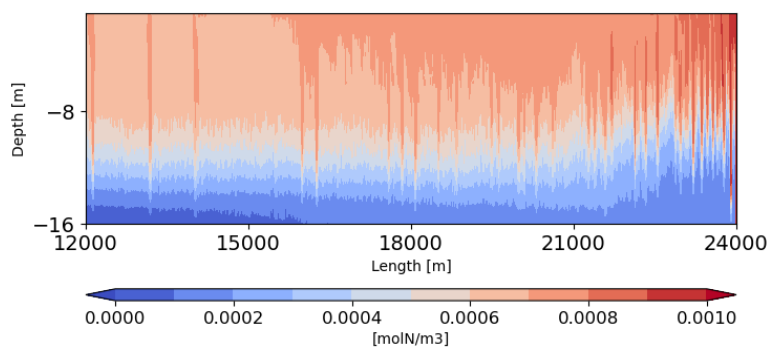


図 4.11. 2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

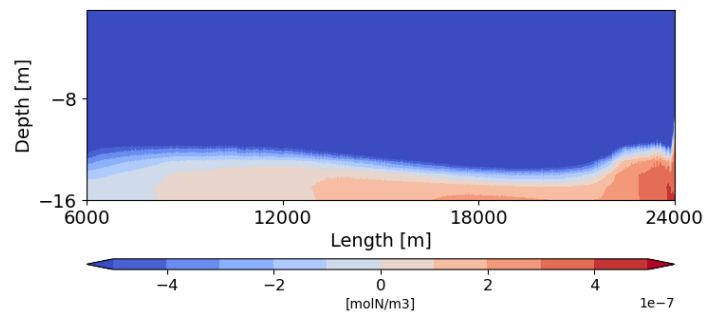


図 4.12. 植物プランクトン濃度変化の平均場。赤が濃いほど植物プランクトン濃度が高い。

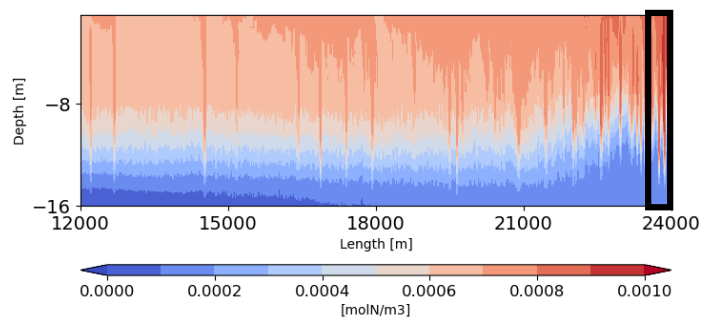
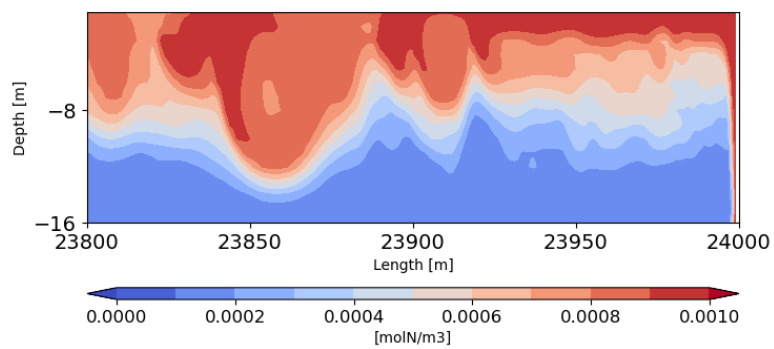
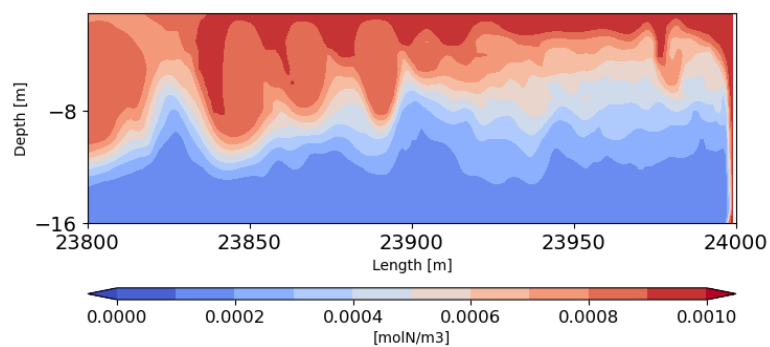


図 4.13. 黒枠で囲った領域(河口から 0.0 km～0.2 km)に限定して解析を行う。図は 3 時間後の栄養塩濃度を示している。

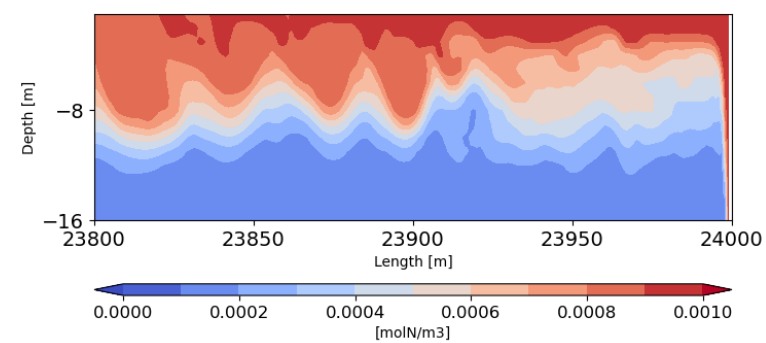
(a)



(b)



(c)



(d)

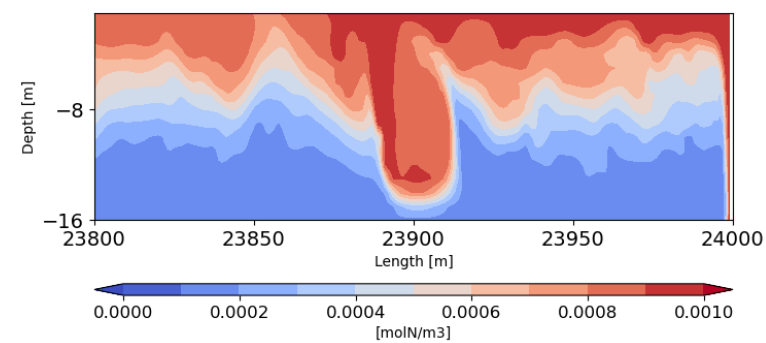


図 4.14. 黒枠で囲った領域に限定し、2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

4.3 潮流と背景流を併せた実験

4.3.1 塩分・流れ場

実験を開始してから 12 時間後までの塩分の時間変化を 3 時間おきに示す(図 4.15.)。実験を開始すると河口から河川水が流入し、海水の上に広がって河川プリュームを形成した。6 時間後までは下げ潮の時間帯にあたるため、時間の経過とともに河川水が海水の上に広がりながら沖合へと進行した(図 4.15.a)。6 時間後の時点では河川プリュームが河口から約 12 km 進行していた(図 4.15.b)。潮流に加えて沖合方向の背景流があるため、潮流のみの実験と比べると河川プリュームの進行は速く、約 2~3 km 沖合に到達していた。また、多くの河川水が流入することで河口から約 3 km 離れた領域まで鉛直一様に低塩分となった。一方で、上げ潮の時間帯になると流れが河口方向になるため、河口付近の低塩分水がモデルの領域外へと流出していた。9 時間後の時点では河口下に海水が戻り始め(図 4.15.c)、12 時間後には下層全体で塩分が上昇していた(図 4.15.d)。

次に、2 日目からの水平流速の時間変化を 3 時間おきに示す(図 4.18.)。潮流のみの実験(図 4.2.)と同様に潮流にあわせて流れ場が変動するものの、沖合方向の流れがより速くなる傾向があった。2 日目から 6 時間後までは下げ潮の時間帯であるため、流れは沖合方向である。そのため、3 時間後は領域全体で沖合方向に流れており、水深が浅いほど流れは速かった(図 4.16.a)。沖合方向の背景流を併せて強制しているため潮流のみの実験と比べて沖合方向の流れが速く、水深 8 m より浅い領域では 0.5 m/s を上回っていた。6 時間後には上層で沖合方向、下層で河口方向の流れであり、上層では最大で約 0.4 m/s、下層では最大で約 0.3 m/s と、上層の流れが速かった(図 4.16.b)。また、潮流のみの実験では海面と海底の間である水深 8 m において水平流速の方向が逆転していたが、本実験ではより深い深度で水平流速の方向が逆転していた。河口付近では低塩分水が鉛直一様に沖合方向への弱い流れを形成していた。6 時間後から 12 時間後までは上げ潮であり、流れは河口方向である。そのため、9 時間後は領域全体で河口方向の流れが生じており、水深が深いほど流れは速かった(図 4.16.c)。特に、海底付近では 0.5 m/s を上回る速い流れが生じていた。12 時間後には上層で沖合方向、下層で河口方向の流れが生じていた(図 4.16.d)。6 時間後の流れ場と同様に最大値は上層で約 0.4 m/s、下層で約 0.3 m/s であった。

平均場(2 日 0~12 時間後)は、これまでの実験と同様に上層では沖合方向、下層では河口方向の流れだった(図 4.17.b)。沖合方向の平均流の最大値は、潮流のみの実験と平家移流のみの実験のおよそ中間の約 0.4 m/s であった。一方、河口方向の平均流の最大値は背景流のみの実験と同じ程度であり、約 0.3 m/s であった。潮流のみの実験と比べて領域全体において沖合方向の流れが強まっていた。つまり本実験は潮流と背景流を併せて強制しているが、流れに関しては潮流のみの実験と背景流のみの実験の線形和とはならなかった。塩分は潮流のみの実験と同様に水深が浅いほど低塩分となったが、領域全体で塩分が低くなった(図 4.17.a)。水平方向には、沖合に比べて河口の方が低塩分であり、特に下層においてこの傾向が強かった。

4.3.2 栄養塩濃度・植物プランクトン濃度

次に、2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す(図 4.18.)。これまでの実験と同様に、河川水の割合が高い上層ほど栄養塩濃度は高いが、本実験では潮流のみの実験のように河川プリュームがパルス状に沖合へ侵入し、かつより深い深度まで栄養塩が到達していた。3 時間後

の時点には河口から 6 km 付近の海面にその先端が到達していた(図 4.18.a)。また、下げ潮の時間帯では河口付近においてほぼ鉛直一様に栄養塩濃度は高くなっていた(図 4.18.b)。一方、上げ潮時は河口方向の流れとなり、栄養塩濃度の高い水が河口からモデル領域外へ流出しはじめ(図 4.18.c)、12 時間後には河口付近の栄養塩濃度は低くなった(図 4.18.d)。塩分場と同様に沖合の栄養塩濃度の鉛直分布は下げ潮時には大きく変化しなかった。

植物プランクトン濃度変化の平均場を示す(図 4.19.)。これまでの実験と同様に、河川水の割合が高い上層では植物プランクトン濃度は上昇していなかった。また、沖合ほど植物プランクトン濃度が上昇している深度が浅くなっていた。潮流のみの実験より深い深度で、また背景流のみの実験より沖合で植物プランクトン濃度が上昇する傾向があった。潮流のみの実験とは逆に河口に近いほど値が大きくなる傾向があり、これは背景流のみの実験に近い。

4.3.3 考察

本実験で植物プランクトン濃度が沖合で 3 日間かけて上昇した要因を調査するため、河口から 6.0 km~6.2 km における栄養塩濃度の時間変化を 2 日目から 3 時間おきに調べる。3 時間後の時点では、潮流のみの実験と同様に河川プリュームの先端が河口から 6.0 km~6.2 km に達しており、海面付近において栄養塩濃度が低く、その先端では特に大きな波長の波が生じていた(図 4.21.a)。下げ潮が続く 6 時間後においても不規則な内部波が確認でき(図 4.21.b)、上げ潮の時間帯にあたる 9 時間後には穏やかになるものの(図 4.21.c)、12 時間後に再び不規則になっていることから(図 4.21.d)、下げ潮の時間帯を中心に成層が不安定になっている可能性が高い。潮流のみの実験と同様、本実験では下層で発生した内部波が主に下げ潮の時間帯に壊れることで、海水と河川水の混合が促進されていたと考えられる。

海水と河川水の混合過程が潮流のみの実験と似ているにも関わらず、なぜ背景流が加わると植物プランクトンが上昇する空間分布は変化するのだろうか。河口から 6 km の地点における水平流速・栄養塩濃度・植物プランクトン濃度の平均場の鉛直プロファイルを実験間で比較すると、下層の水深 13 m において本実験では潮流のみの実験と比べ栄養塩濃度が高い(図 4.22.b)。背景流が加わると、より深い深度にまで栄養塩が到達している。背景流のみの実験では、本実験と比べ海底近くでは栄養塩濃度が高いことから(図 4.22.b)、潮流の影響が支配的であるほど栄養塩が下層へ輸送されにくく、背景流が支配的であるほど下層へ輸送されることが示唆される。植物プランクトン濃度を比較すると、潮流のみの実験が最も浅い深度で、背景流のみの実験が最も深い深度で植物プランクトン濃度が上昇している。この応答の違いは栄養塩が輸送される水深の違いを反映していることが分かる。

栄養塩の輸送過程が本実験における植物プランクトン濃度の上昇につながる。しかし一方で、全ての実験において海水と河川水がよく混合した水塊では植物プランクトン濃度が上昇しておらず、河川水の割合が低い水塊中で植物プランクトン濃度が最も上昇した(図 4.23)。本来であれば、栄養塩濃度が高い海水ほど植物プランクトン濃度は高くなると予想されるが、このような結果になるのは本実験では河川水中に含まれる植物プランクトン濃度が海水よりも一桁低いためである。海水と河川水が混合するだけでは植物プランクトン濃度は減少する。植物プランクトンの増殖が混合の効果を上回る深度でのみ植物プランクトン濃度は上昇するのである。潮流のみ、背景流の

み、本実験では植物プランクトン濃度が増加している深度がそれぞれ 13 m、16 m、15~16 m であり、これは河川水が 1~2 割程度混合した(栄養塩濃度 = $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ mol N/m³ 程度)深度である。つまりモデル結果はこの光合成の効果が混合の効果を上回るのは、およそ河川水が 1~2 割程度混合した水塊中であることを示している。

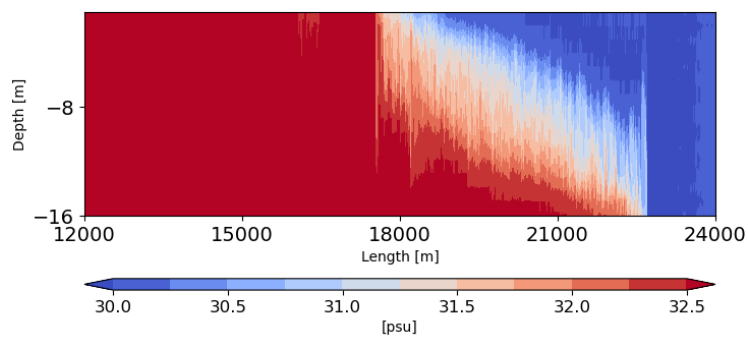
植物プランクトン濃度が上昇した空間分布を実験間で比較すると、潮流のみの実験が最も沖合側に位置しており、背景流のみの実験が最も河口側に位置していた。この原因として実験間で植物プランクトン濃度が上昇していた深度における水平流速に注目すると、潮流のみ、背景流のみ、の実験では河口方向の流れがそれぞれ約 0.07 m/s、約 0.23 m/s となっている(図 4.22.a)。つまり河口方向の平均流が生じている深度において植物プランクトン濃度が上昇しており、海水が河口方向へと移流する過程の違いが実験間の植物プランクトン濃度の空間分布の違いを決めている可能性がある(図 4.23.)。

前述したように、植物プランクトンの増殖は海水と河川水が 9:1 の割合で混合した水塊で起きている。もし栄養塩が十分にある環境であれば、混合水中では光合成の式(Eq.3)より半日後には植物プランクトン濃度は初期値から約 6% 上昇する。これは本実験で再現された 3 日後の植物プランクトン濃度の増加分とほぼ同等の値である。そこでこの混合水の滞留時間が植物プランクトン濃度に与える影響についてより詳細に調べる。潮流のみの実験では河口から 6~12 km の範囲では水深 10 m 程度から河口へと進む水塊の速さはおよそ 0.1 m/s で、1 日後にはおよそ約 6 km 程度河口方向へ進み、この間では確かに植物プランクトンが上昇している。しかし、6 km より河口側では濃度が減少している。この点については次の段落で議論する。より流れの速い下層では水塊の移動距離が大きくなるため、増殖がより河口近くで大きくなっている。一方、背景流のみ、または潮流と背景流を併せた実験では植物プランクトン濃度が上昇しているのは流れが 0.1 m/s よりやや速い深度である。そのため、潮流のみの実験における海底付近のように、河口ほど植物プランクトン濃度が大きくなる分布を示している。

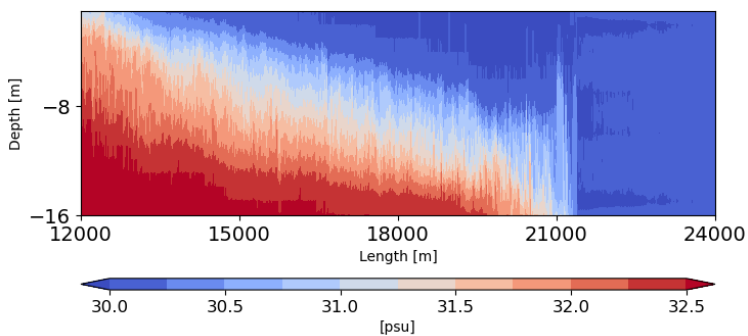
潮流のみの実験では水深 10 m、12 m 付近で植物プランクトン濃度が最も上昇し、この深度では河口に近づくほど植物プランクトン濃度が減少している。この植物プランクトン濃度の減少は、河川水との混合が強まったためだと思われる。栄養塩濃度の空間分布の等値線が潮流のみの実験ほど急勾配であり、鉛直混合が活発であることを示唆している(図 4.24.)。背景流のみの実験では勾配が穏やかであり、鉛直混合が弱いため植物プランクトン濃度は河口近辺ほど増殖が大きい。しかし潮流と背景流を併せた実験では栄養塩濃度の等値線が河口近くで勾配が急になっているように、河口近くでは混合が起き、その結果植物プランクトン濃度の上昇が河口から約 4 km の地点で終わっており、これは潮流のみの実験の海底近くの空間分布と似ている。

本実験から、背景流に潮流が加わることで植物プランクトン濃度が上昇する領域が大きく変わり、河口からより沖合側へ移動すること、そしてより浅い深度で増殖することに繋がることが示唆された。これは潮流が支配的な流れ場になるほど河口への流れがより浅い深度、かつ流れが弱い海域で植物プランクトンの増殖が起きるためだと考えられる。

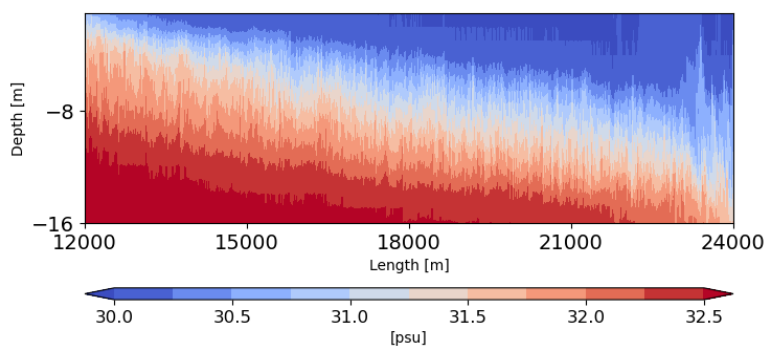
(a)



(b)



(c)



(d)

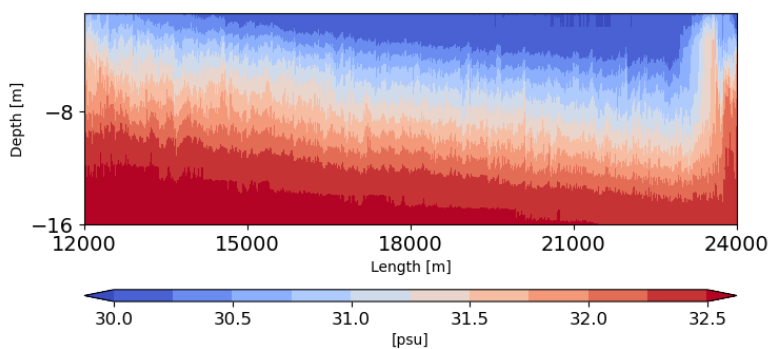
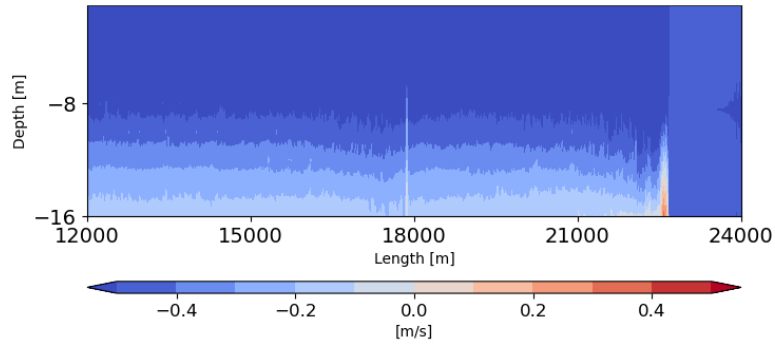
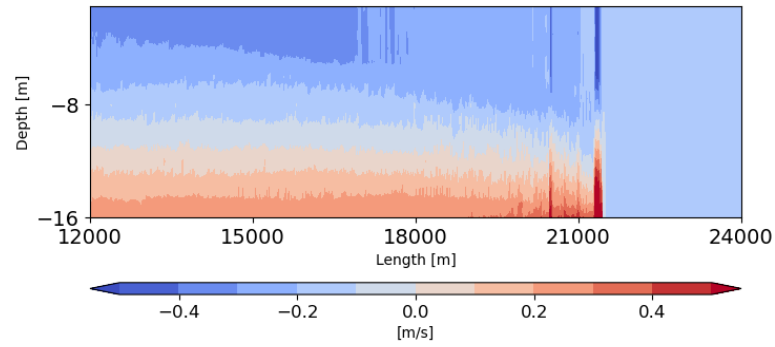


図 4.15.塩分の時間変化を3時間おきに示す。解析対象は河口から12 km までであり、青が濃いほど塩分が低い。(a)が3 時間後、(b)が6 時間後、(c)が9 時間後、(d)が12 時間後の塩分を示す。

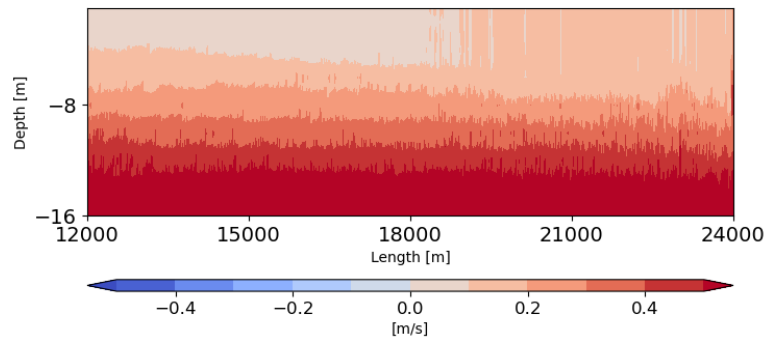
(a)



(b)



(c)



(d)

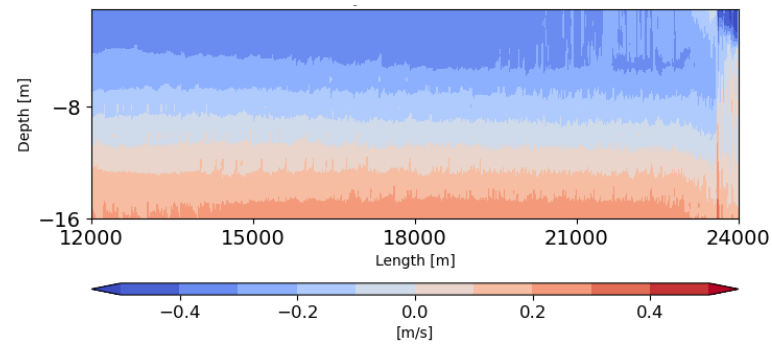


図 4.16. 2 日目からの水平流速場の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど河口方向の流速が大きい。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の水平流速を示す。

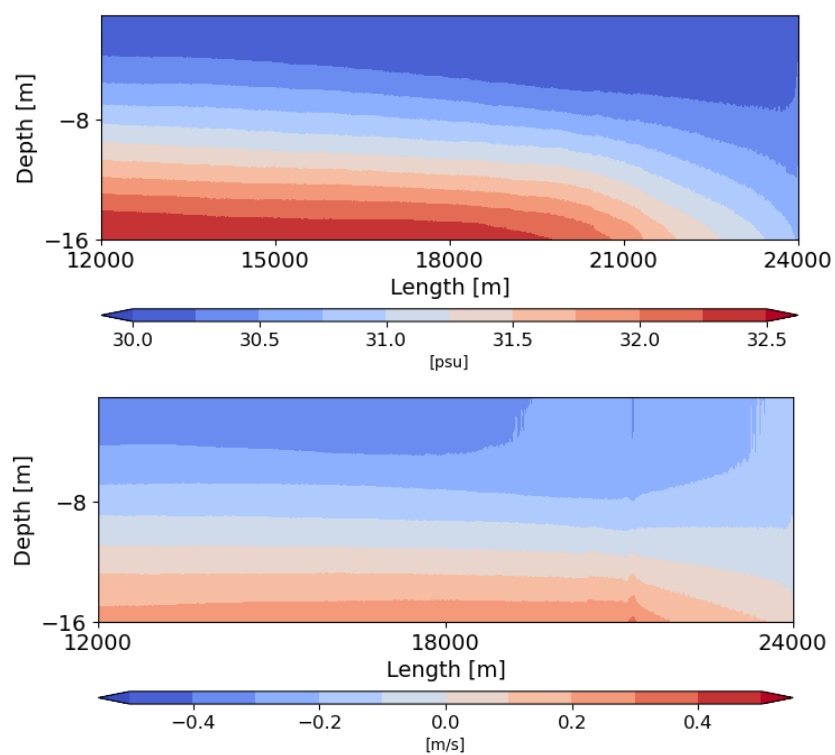
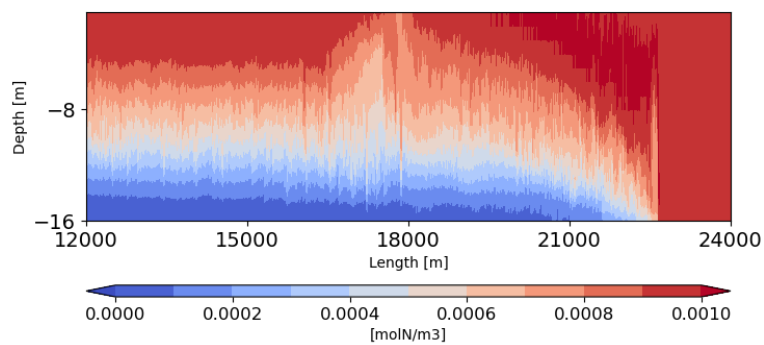
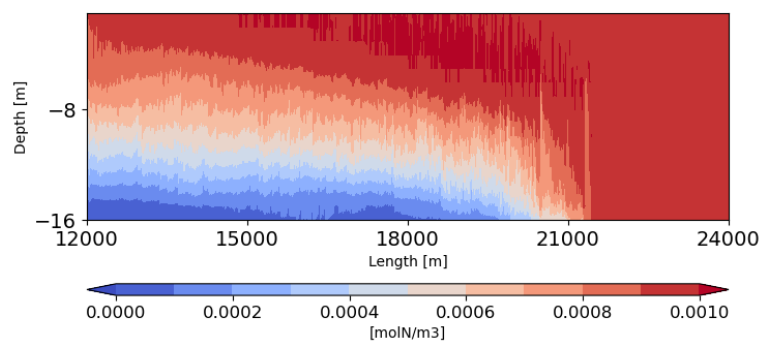


図 4.17.2 日目から 12 時間後までの平均場。(a)は塩分、(b)は水平流速の平均場を示す。

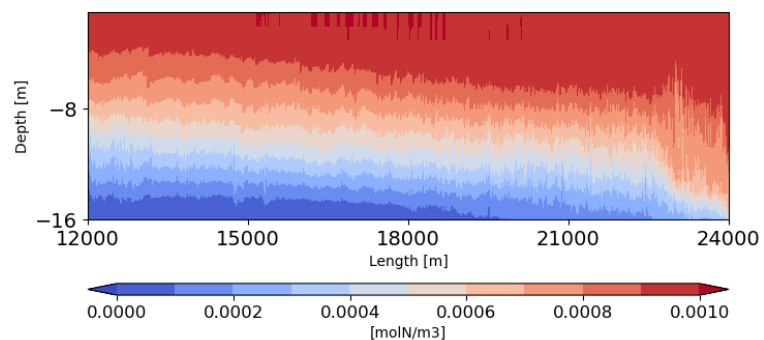
(a)



(b)



(c)



(d)

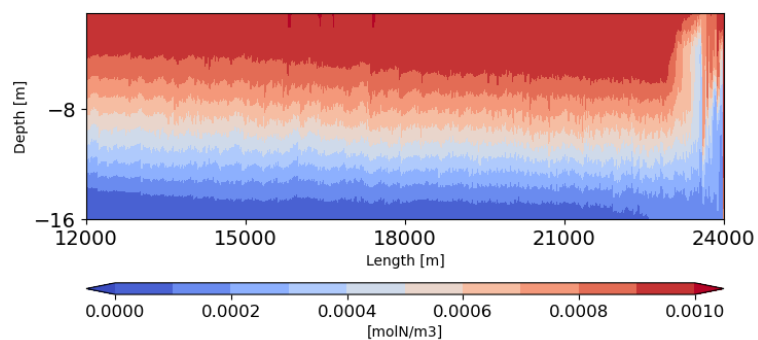


図 4.18. 2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

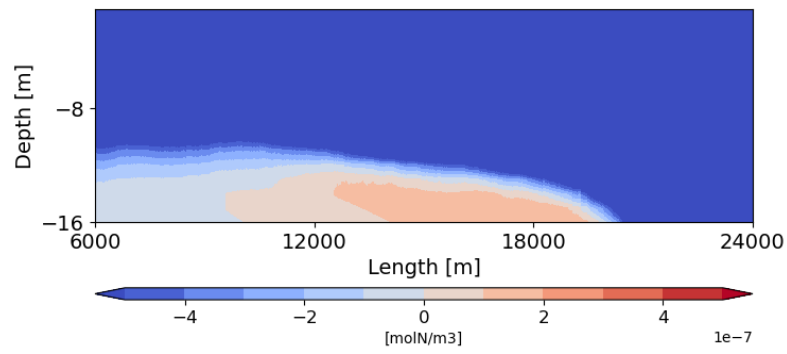


図 4.19. 植物プランクトン濃度変化の平均場。赤が濃いほど植物プランクトン濃度が高い。

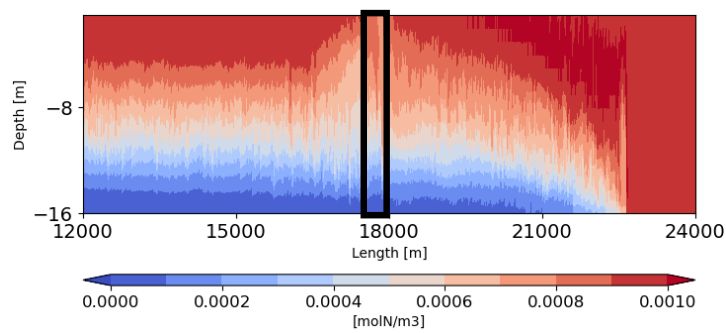
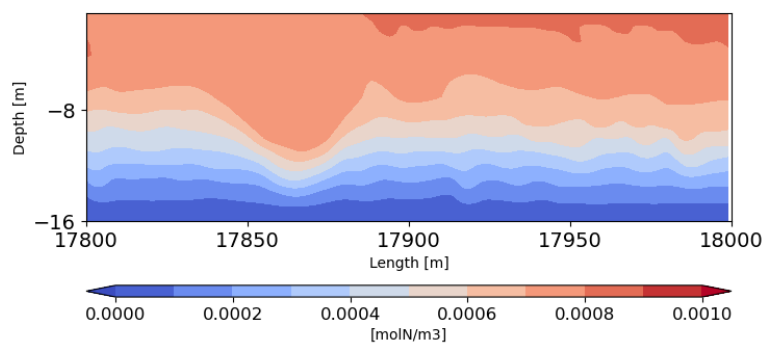
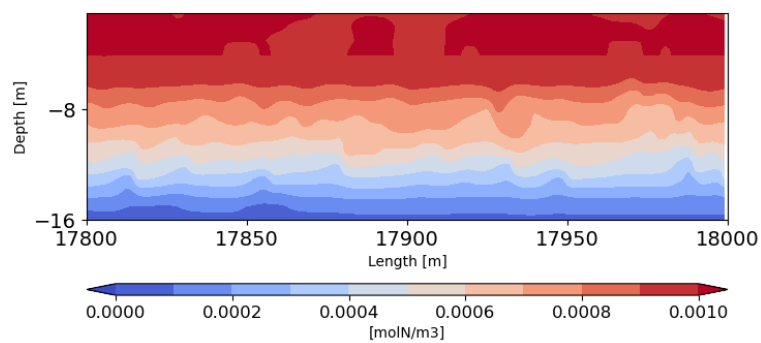


図 4.20. 黒枠で囲った領域(河口から 6.0 km~6.2 km)に限定して解析を行う。図は 3 時間後の栄養塩濃度を示している。

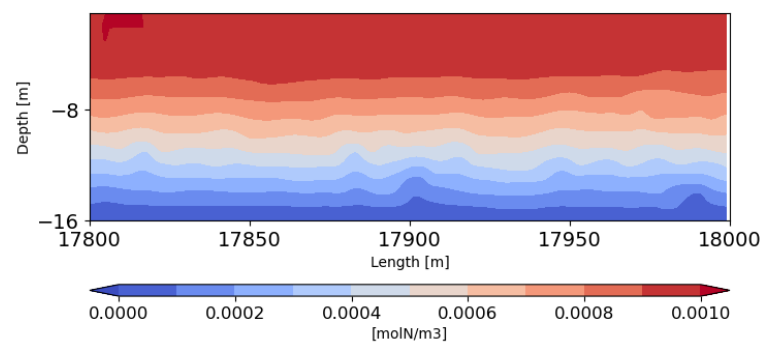
(a)



(b)



(c)



(d)

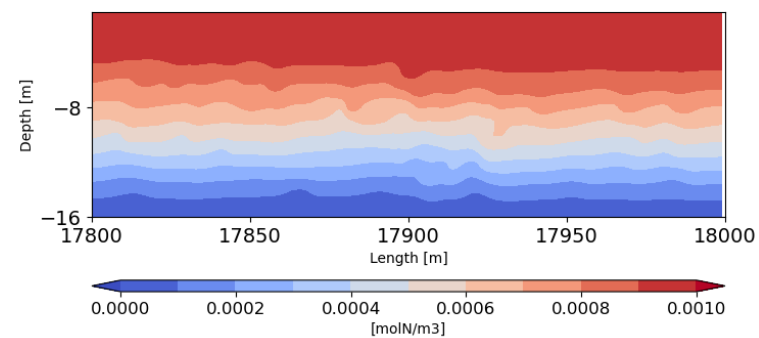
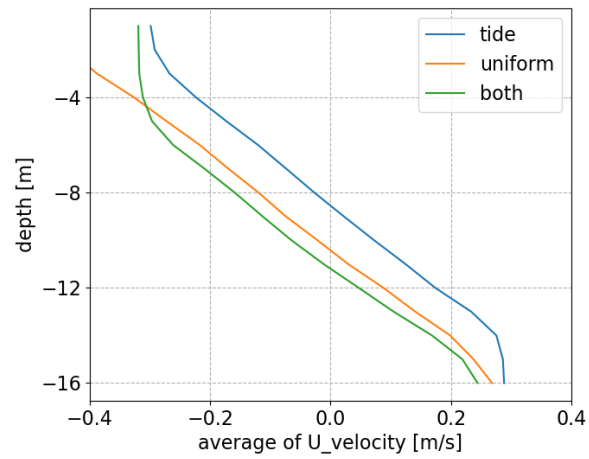


図 4.21. 黒枠で囲った領域に限定し、2 日目からの栄養塩濃度の時間変化を 3 時間おきに示す。赤が濃いほど栄養塩濃度が高い。(a)が 3 時間後、(b)が 6 時間後、(c)が 9 時間後、(d)が 12 時間後の栄養塩濃度を示す。

(a)



(b)

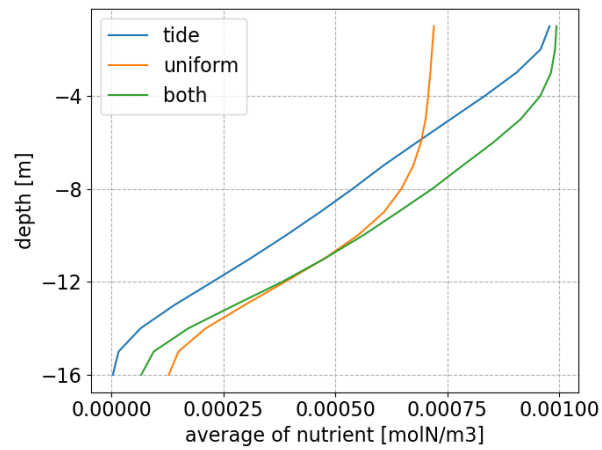


図 4.22. 河口から 6 km における水平流速・栄養塩濃度の平均場の鉛直プロファイルを実験間で比較する。(a)が水平流速、(b)が栄養塩濃度の平均場を示す。

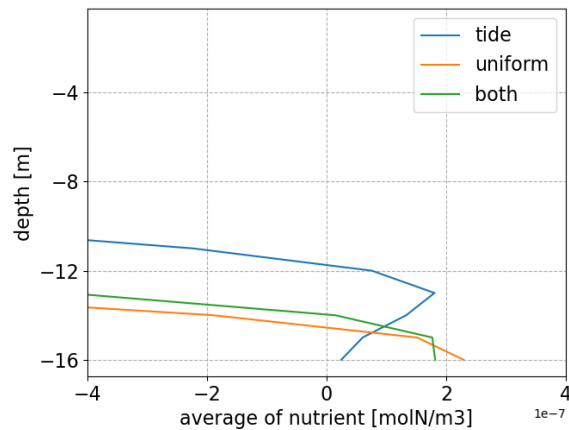


図 4.23. 河口から 6 km における植物プランクトン濃度変化の平均場の鉛直プロファイルを実験間で比較する。海水の初期値からの変化をプロットしている。

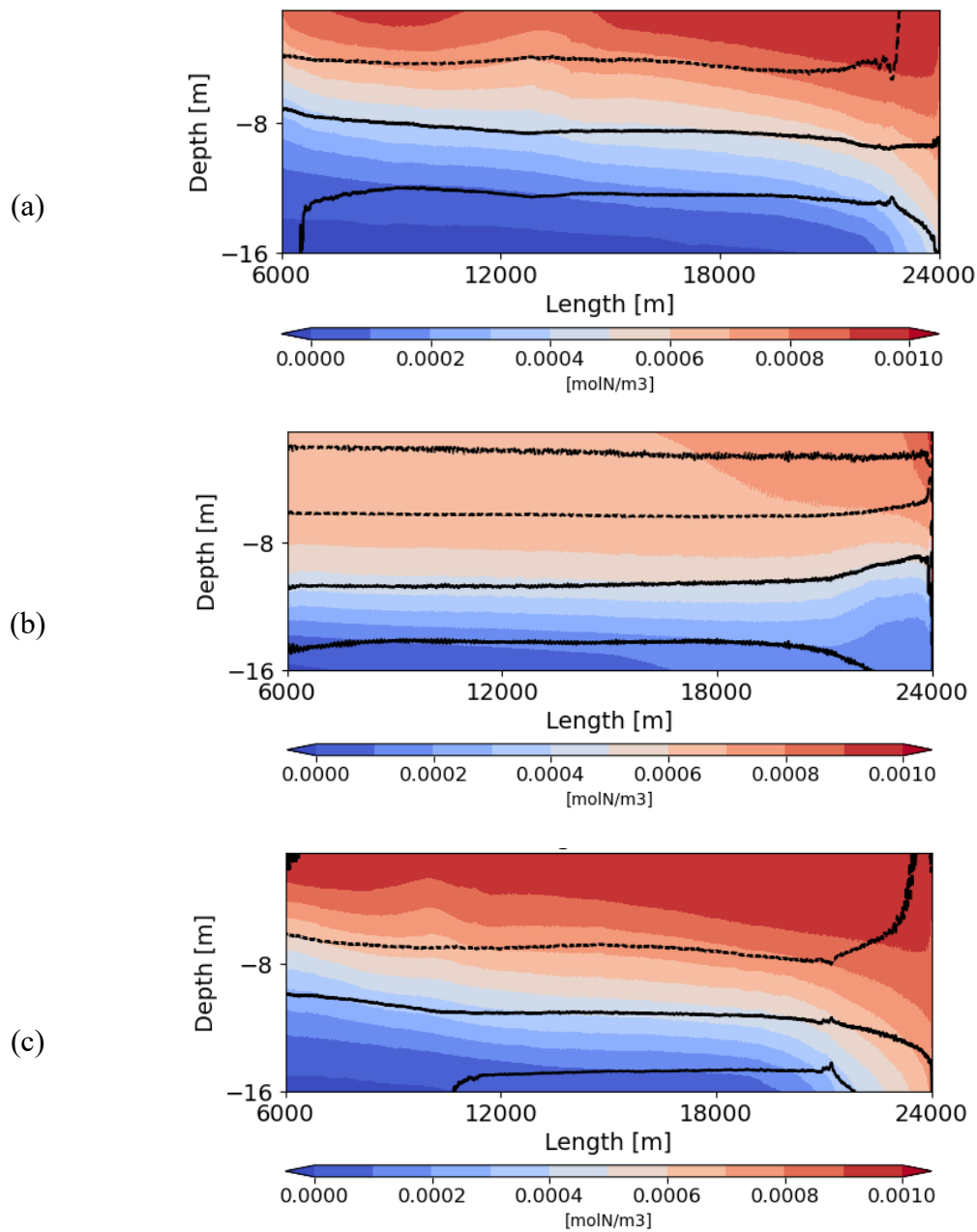


図 4.24. 栄養塩濃度の平均場に水平流速の平均場の等値線を重ねている。水平流速の等値線の間隔は 0.2 m/s であり、負の値(沖合方向)は破線とする。解析対象は河口から 18 km までとする。(a)は潮流のみの実験、(b)は背景流のみの実験、(c)は潮流と背景流を併せた実験の結果を示す。

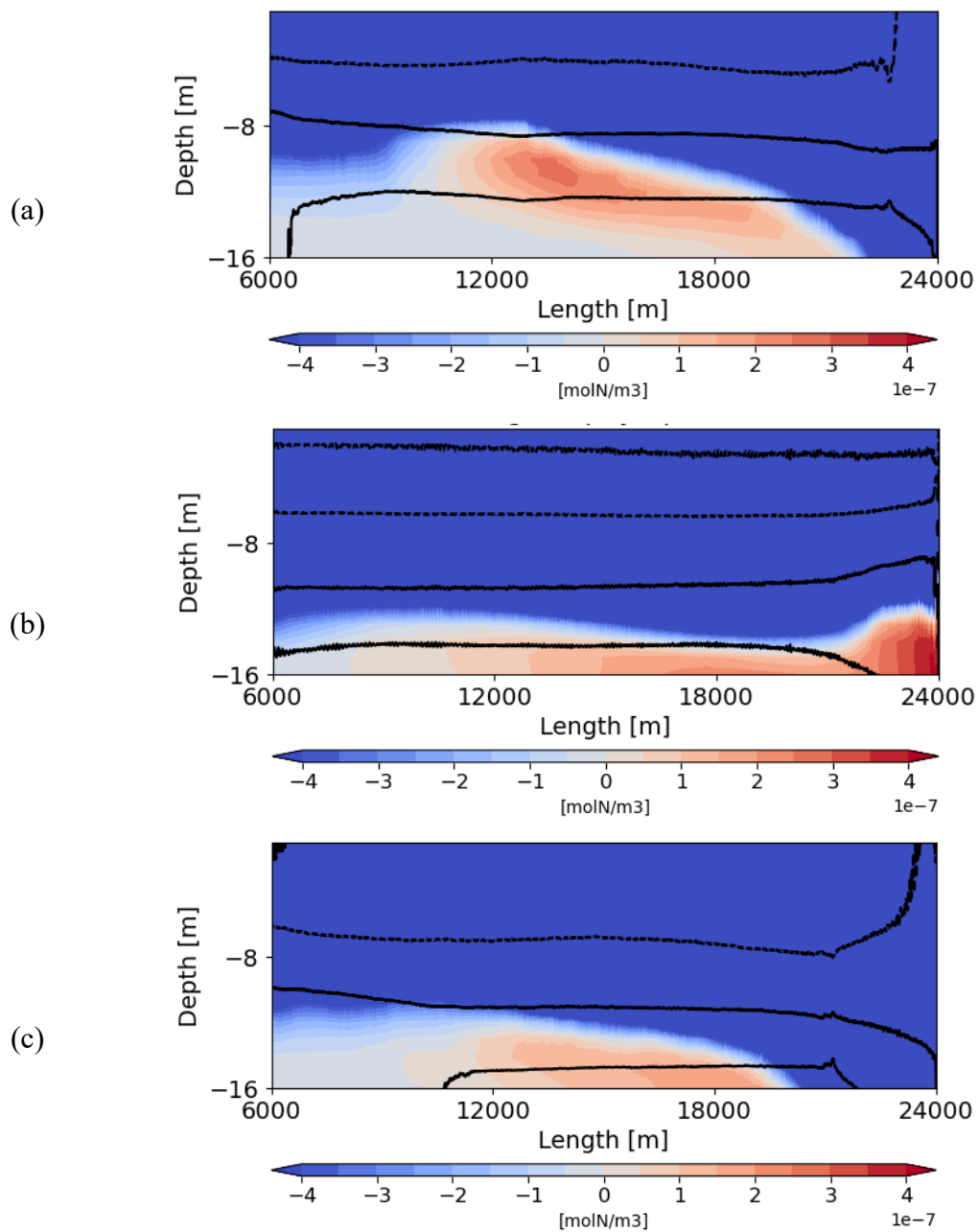


図 4.25. 植物プランクトン濃度の平均場に水平流速の平均場の等値線を重ねている。解析対象は河口から 18 km までとする。(a)は潮流のみの実験、(b)は背景流のみの実験、(c)は潮流と背景流を併せた実験の結果を示す。

第5章 まとめ

本研究では、潮流が河川水の流出を駆動する環境において植物プランクトンが増殖するメカニズムを、数値実験を用いて検証した。始めに、厚岸湾を模した海底斜面が存在する鉛直 2 次元数値モデル(理想実験 1)、次に海底が平らな鉛直 2 次元モデル(理想実験 2)を用いて潮流のみ、背景流のみ、潮流と背景流を併せた実験、と 3 種類の実験を行い、潮流の有無が植物プランクトンの増殖に与える影響を評価した。

理想実験 1 では、河口から流入した河川水が海水の上を広がり河川プルームを再現することに成功した。流れ場は下げ潮時に沖合方向、上げ潮時に河口方向と潮流に合わせて変動するものの、平均流は上層で沖合方向、下層で河口方向となった。生物場は、上げ潮時に沖合の下層において栄養塩濃度が局所的に高まっており、それに応答するように植物プランクトン濃度が高くなっていた。同じ領域においてリチャードソン数の値が十分に小さかったことから、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が発生していたことが推測される。しかし、海底斜面があることで流れ場に収束過程が生じ、それが沖合における流れ場に影響を与えている可能性があったため、次に海底が平らな数値実験を行うことにした。

理想実験 2 では、3 つの実験の全てにおいて水平流速の平均場が上層では沖合方向、下層では河口方向を示した。生物場は、全ての実験で理想実験 1 と同様に下層において植物プランクトン濃度が上昇していたものの、その空間分布は異なっていた。潮流のみの実験は浅い深度、そして沖合で植物プランクトン濃度が上昇していた。背景流のみの実験では海底付近で上昇し、河口に近いほど値が大きくなっていた。河川水の初期植物プランクトン濃度が低いため、混合が活発に起こると植物プランクトン濃度が下がってしまう。そのため、増殖が進んだのは弱く混合した水塊、かつ河口方向へと流れる水塊中である。混合した水は河口へ移動する速さが遅いほど、より沖合から植物プランクトンの増殖が起きるものの、河川水との鉛直混合が活発に起こると、河川水の割合が高くなり植物プランクトンの増殖が抑制されていた。以上から、潮流が河川水の流出を駆動する環境場においては、潮流はより浅い深度、かつ河口よりも沖合にて植物プランクトン濃度が高い領域をつくる効果があることが分かった。

謝辞

本修士論文をまとめるにあたり、研究活動において熱心にご指導ならびにご鞭撻を賜りました九州大学応用力学研究所の木田新一郎准教授に深く感謝の意を表します。学部時代とは異なる専攻に進学し知識も経験も乏しかった私ですが、木田准教授には優しく丁寧なご指導をいただきました。研究活動において、1つの課題に対して根気を持って取り組むことや相手に伝わりやすく説明する方法等、社会人になってからも必要となる能力を身に付けることができました。研究に取り組む際に、将来の自分にとっての糧になると考え、高いモチベーションを持って取り組むことができました。感謝申し上げます。

磯辺篤彦教授には、入学前の研究室訪問からお世話になりました。当時は外部進学に対して不安も抱いていましたが、温かく丁寧に対応していただいたことで、不安を払拭して入学を決意することができました。またご自身の研究活動が多忙を極めているにも関わらず、ゼミで発表した際に的確なアドバイスを何度もいただきました。感謝申し上げます。

上原克人助教授は、研究の進捗発表をいつも真剣に聞いていただきました。特に、入学して間もない頃に研究室のゼミで私が拙い卒業論文発表を行った際にも建設的な質問をしていただいたことは、今でも鮮明に覚えています。また海洋物理学セミナーを毎週開講していただき、海洋に関する研究の話を拝聴する機会を設けていただきました。感謝申し上げます。

東京大学大気海洋研究所の田中潔准教授、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの伊佐田智規准教授、北海道大学低温科学研究所の中村友裕先生、北海道大学厚岸臨海実験所の職員の方々には北海道厚岸湾での観測にご協力いただきました。感謝申し上げます。

研究や学生の日常生活まで幅広く手厚く支援をして頂きました研究室の技術職員の皆様、秘書の皆様に厚く御礼申し上げます。

研究について何度も相談に乗りアドバイスしていただいた博士課程、学術研究員の皆様、研究以外の時間でもともに過ごした修士課程、共創学部の皆様には大変お世話になりました。皆様のおかげで楽しく充実した大学院生活となりました。感謝申し上げます。

そして何より、いつも私を応援してくれた両親に感謝します。経済面や生活面だけでなく精神面など様々な支援をしていただきました。感謝申し上げます。

大学院から九州大学に進学し、専門分野の知識だけでなく社会で活躍するための能力を身に付けることができたと確信しています。大学院を卒業して就職した後も向上心を忘れず社会に貢献できる人間になることを誓い、謝辞といたします。

参考文献

1. Isada, T., Abe, H., Kasai, H., & Nakaoka, M. (2021). Dynamics of nutrients and colored dissolved organic matter absorption in a wetland-influenced subarctic coastal region of Northeastern Japan: contributions from mariculture and eelgrass meadows. *Frontiers in Marine Science*, 1452.
2. Iwanaka, Y., & Isobe, A. (2018). Tidally induced instability processes suppressing river plume spread in a nonrotating and nonhydrostatic regime. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(5), 3545-3562.
3. Matsumura, Y., & Hasumi, H. (2008). A non-hydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver. *Ocean Modelling*, 24(1-2), 15-28.
4. Onitsuka, G., & Yanagi, T. (2005). Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models. *Journal of Oceanography*, 61(3), 415-433.
5. 高見健大朗 (2022): ドローンとラジコンボートによる河川フロントの観測、九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
6. 宇野木早苗, 山本民次, & 清野聡子. (2008). 川と海 流域圏の科学. 築地書館株式会社, 297pp
7. Yankovsky, A. E., & Voulgaris, G. (2019). Response of a Coastal Plume Formed by Tidally Modulated Estuarine Outflow to Light Upwelling-Favorable Wind. *Journal of Physical Oceanography*, 49(3), 691-703.
8. Yuan, Y., & Horner-Devine, A. R. (2013). Laboratory investigation of the impact of lateral spreading on buoyancy flux in a river plume. *Journal of Physical Oceanography*, 43(12), 2588-2610.