

河川基金助成事業

「河川汽水域における魚卵の浮遊・孵化挙動の
解明とその手法に関する研究」

助成番号：2020-5211-062

東京都立大学 都市環境学部
教授 横山 勝英

2020年度

目 次

1. 序論	1
1.1 研究目的	1
1.2 研究対象地	2
2. エツ <i>Coilia nasus</i> の卵の特性	3
2.1 既往の研究	3
2.2 エツ卵の物性調査方法	3
2.3 エツ卵の密度と粒径	6
3. 三次元流体シミュレーションの構築	8
3.1 シミュレーションの基礎方程式	8
3.2 斜面干出の処理 (Wet-Dry)	9
3.3 局所高解像度格子	10
3.4 粒子追跡モデル	11
3.5 計算の精度検証	13
4. シミュレーションによるエツ卵の挙動解析	14
4.1 最適塩分の評価方法	14
4.2 計算ケースの設定	15
4.3 計算結果と考察	16
5. まとめ	24
参考文献	25

1. 序論

1.1 研究目的

河川汽水域は海水と河川水が混合する場であり，一次生産が内湾や河川よりも高く，生物の資源量が多い．また，魚類の初期生育場としても重要である．汽水性の生物は，塩分耐性によって生存できる領域が異なるため，河川改修が塩水遡上の様態を変化させると，水域生物にも影響が及ぶ．そのため，生態系の保全や魚類等の資源管理を行う上では，塩分と生態系の応答特性を把握することが必要である．

河川汽水域では潮汐・流量によって塩分が時間変化しており，また，塩水遡上の混合型により空間的な変化も大きく，スナップショット的な塩分状態と生物の生息状況を対応づけても生息場の評価はできない．浮遊性の生物（プランクトン，卵，浮遊幼生，仔稚魚）の場合は，浮遊する過程での塩分との接触履歴が損耗や成長に大きく影響する．これを現地調査で解明することはほぼ不可能であるため，塩水遡上シミュレーションを用いる必要がある．

海域や湾内で数値シミュレーションに基づく研究は多く行われており，例えば末永ら¹⁾は佐渡湾海峡周辺海域においてマガレイ卵，仔魚を想定した粒子の挙動を解析し，浮遊期が終わる30日後までに着底場まで輸送されることを明らかにした．また，笠毛ら²⁾は，大阪湾において低次生態系・粒子追跡モデルを用いてカタクチシラスの挙動を再現し，シラスの生産性に寄与する要因について検討を行っている．一方，河川汽水域ではシジミに関する研究例は多いものの，それ以外の生物種については分布に関する情報がある程度で，塩水遡上との対応関係はあまり調べられていない．

そこで本研究では，筑後川の特産汽水魚のエツ *Coilia nasus*の卵を対象として，感潮域での粒状生物の挙動を解析できる三次元シミュレーションを構築し，平水時の時空間的な挙動特性を考察した．そして，その解析結果から時々刻々変化する粒状生物周辺の塩分変化について分析し，塩分環境が粒状生物の生存率に与える影響について検討した．

キーワード：汽水域，塩水遡上，汽水魚，エツ，三次元シミュレーション

1.2 研究対象地

図1.1に筑後川河口域の平面図を示す．筑後川は九州最大の一級河川であり，流域面積 $2,860\text{ km}^2$ ，幹線流路延長 143 km ，河口の干満差は最大で約 6 m である．河口から 23 km に筑後大堰が設置されており，そこまでの感潮区間となる．感潮区間には本川と分流する主要支川が2つあり，河口から $1\text{ km}\sim 6\text{ km}$ の間では早津江川に分流し，また $7\text{ km}\sim 9\text{ km}$ の間で諸富川に分流している．低水路幅は筑後大堰付近では 150 m ，河口では $1,500\text{ m}$ 程度あり，干潟の滞筋の幅は $500\text{ m}\sim 1,000\text{ m}$ である．

河川構造物としては， 23 km 地点の筑後大堰， 17.4 km 地点の床固め（固定堰），河口から 6 km までの導流堤がある． 17.4 km 床固めと河口導流堤は満潮時には水没し，干潮時には露出するため，これらが潮汐流動におよぼす影響を考慮することは重要と考えられる．平水流量は $54\text{ m}^3/\text{s}$ であるのに対して，潮汐流量は大潮時に $1,650\text{ m}^3/\text{s}$ であり，淡水流量に比べて潮汐流量が支配的な場所である³⁾．

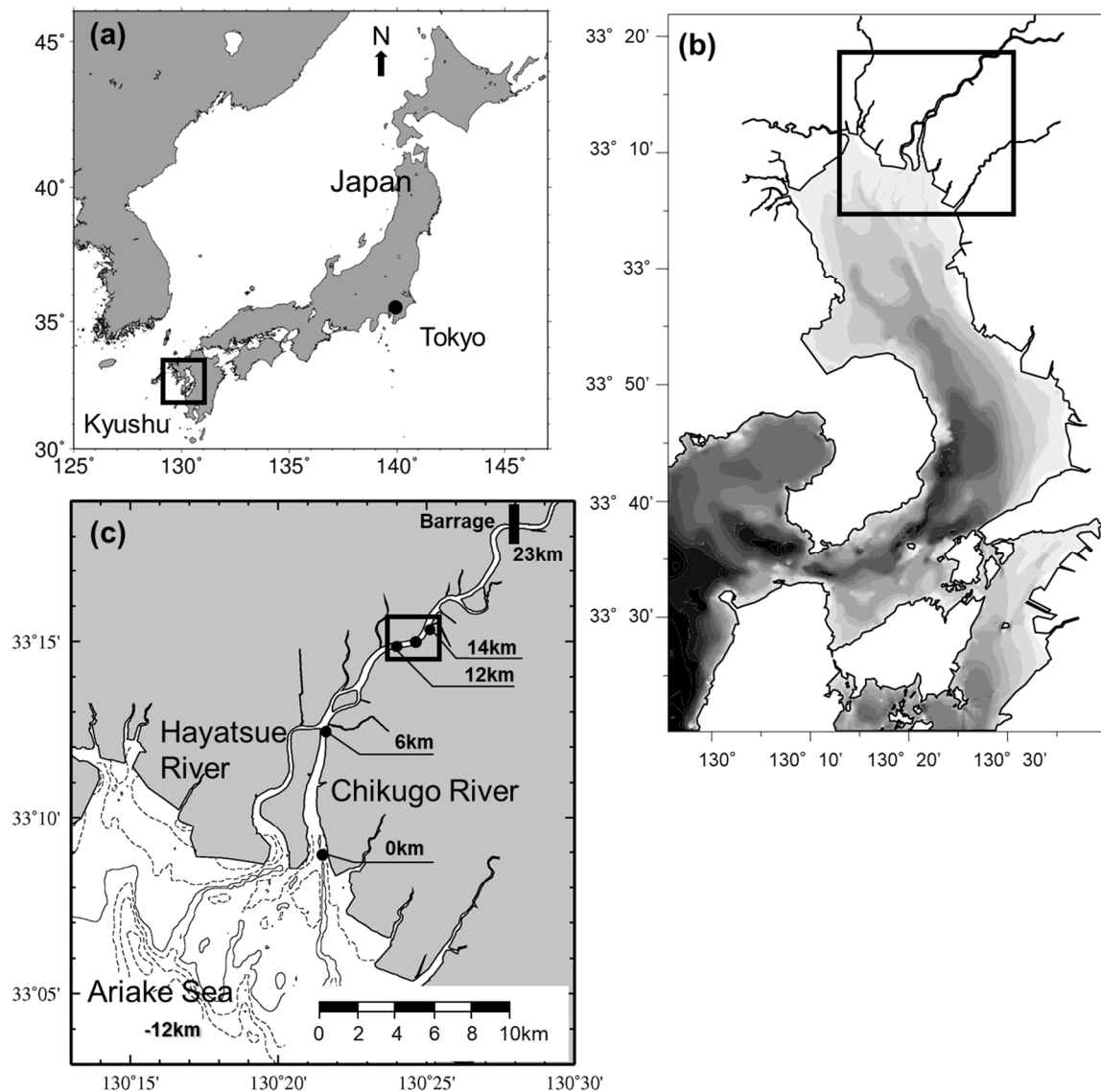


図1.1 筑後川河口域の平面図

2. エツ *Coilia nasus* の卵の特性

2.1 既往の研究

エツ属はカタクチイワシ科に属し、アジア東部および東南部に分布しており、日本ではエツ *Coilia nasus* だけが有明海と有明海に流入するいくつかの河川に生息している。筑後川では産卵遡上群を対象とした流し刺し網により漁獲されており、重要な漁獲対象種となっている。しかし、流し刺し網漁船によるエツの漁獲量は数十年前から減少しており、1974年には174 tであったが2000年以降では20 t前後まで減少している。

筑後川におけるエツの生態については、現地調査と実験に基づく研究が行われてきた。エツの産卵場について、林ら⁴⁾は流速、エツの卵の採集量ピーク、産卵推定時刻から、河口19~20 km付近で、夕刻に産卵が行われていると推定している。石田ら⁵⁾は、海域から3 kmおきに9定点を設け、仔魚および卵の採集を毎月行って、卵は塩分濃度が0~0.2‰（塩分0~0.2）の場所で多く採れ、卵の99 %が0~1‰（塩分0~1）での塩分濃度で採集されたと報告している。さらに、仔魚は塩分濃度0.4‰（塩分0.4）以下で多く取れることを示した。

エツの生育について、エツの卵は水温22~23℃において受精後30.5 時間で孵化するという実験結果がある⁶⁾。松井ら⁷⁾は、塩分濃度33.9 ‰（塩分33.9）の海水を真水で希釈した塩水をいくつか用意して、人工授精したエツの卵の生残状況の時間経過を調べた結果、1/3海水から1/8海水では順調に成長することを示した。

さらに、エツの孵化養殖を行っている下筑後川漁協にヒアリングした結果、淡水では孵化率が悪く、淡水に若干の塩を投入しているとのことであった。

2.2 エツ卵の物性調査方法

流動シミュレーションによりエツの卵の浮遊挙動を解析するには、密度と粒径の情報が必要である。そこで、下筑後川漁協に協力を依頼して、エツの産卵時期である6月下旬から7月上旬にかけて、以下の調査を実施した。

エツ漁は夕方から夜間にかけて実施されるので、その際に“笹舟”に同乗させていただく。漁師は流し刺し網（目合40 mm，網丈2.5 m）を川幅一杯に張り（図2.1），潮汐流にのせて14.6 km地点から16 km地点の間を1時間程度かけて浮流させ、これを一日に数回繰り返す。操業期間は毎年5月1日から7月20日までとなっている。この時に植物プランクトンネットを上下させて浮遊卵の採取を試みたが、卵を得ることは出来なかった。

漁師はエツが採れると、即座にメスから採卵して、オスの精子を振りかけて人工授精させる（図2.2）。そして受精卵を漁協の水槽に移し、増殖を行う。そこで、受精卵を分けていただき、漁協の事務所にて密度と粒径を分析した。

密度試験は、塩分を0~2の範囲で0.1ごとに变化させた塩水を調製し、この塩水をビーカーに入れて、スポイトで吸い取った受精卵を塩水の中に投入した（図2.3）。投入する個数は20~50個である。そして、各ビーカーの中で、①水面に浮遊した個数、②水中で中立している個数、③底に沈んだ個数をカウントした。なお、半透明の卵は生きており、白濁したものは死んでいるため、生きている受精卵のみをカウントした。

粒径試験は、受精卵300個を顕微鏡観察し、直径をスケールにて読み取った（図2.4）。



図2.1 エツ流し網漁の様子



図2.2 採取されたエツと採卵・受精の様子

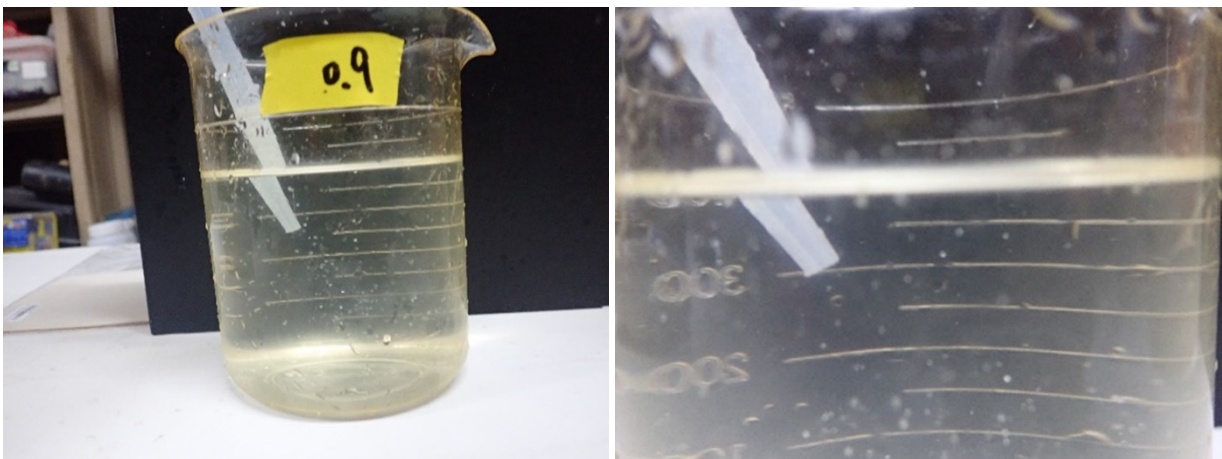


図2.3 塩水にエツ卵を投入して浮遊状態から密度を推定する（塩分0.9のビーカー）

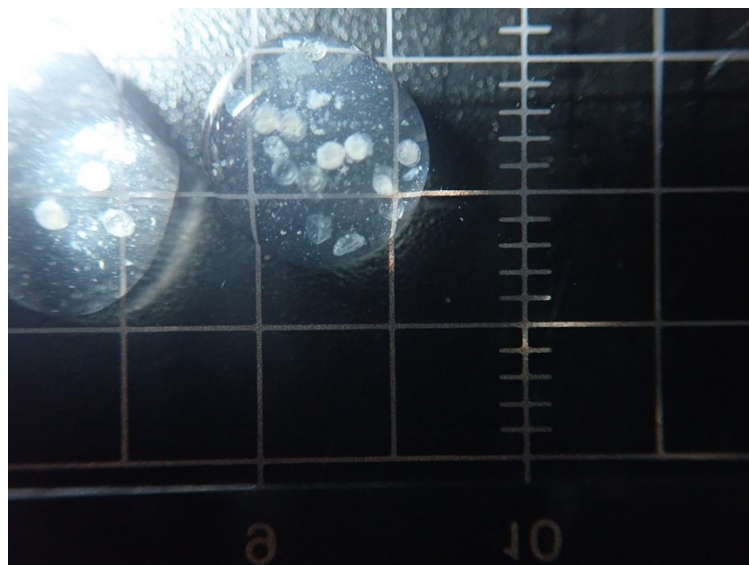


図2.4 エツ卵の顕微鏡写真

2.3 エツ卵の密度と粒径

受精卵は3回取得できたため、それらの合計を図2.5～図2.6に示す。図2.5上はエツ卵の等価塩分と浮遊状態の関係であり、淡水（塩分0）ではほとんど80%がビーカーの底に沈み、汽水（塩分2）では、逆に80%が水面に浮遊した。中立状態が最も良く現れたのは塩分0.8～1.2であり、中立浮遊粒子の存在率（図2.5下）から、中央等価塩分として0.927が得られた。

図2.6は粒度分布であり、エツの卵は0.6～1.6 mmの範囲に分布し、最頻値は0.9 mmであった。累加曲線から、中央粒径として0.858 mmが得られた。

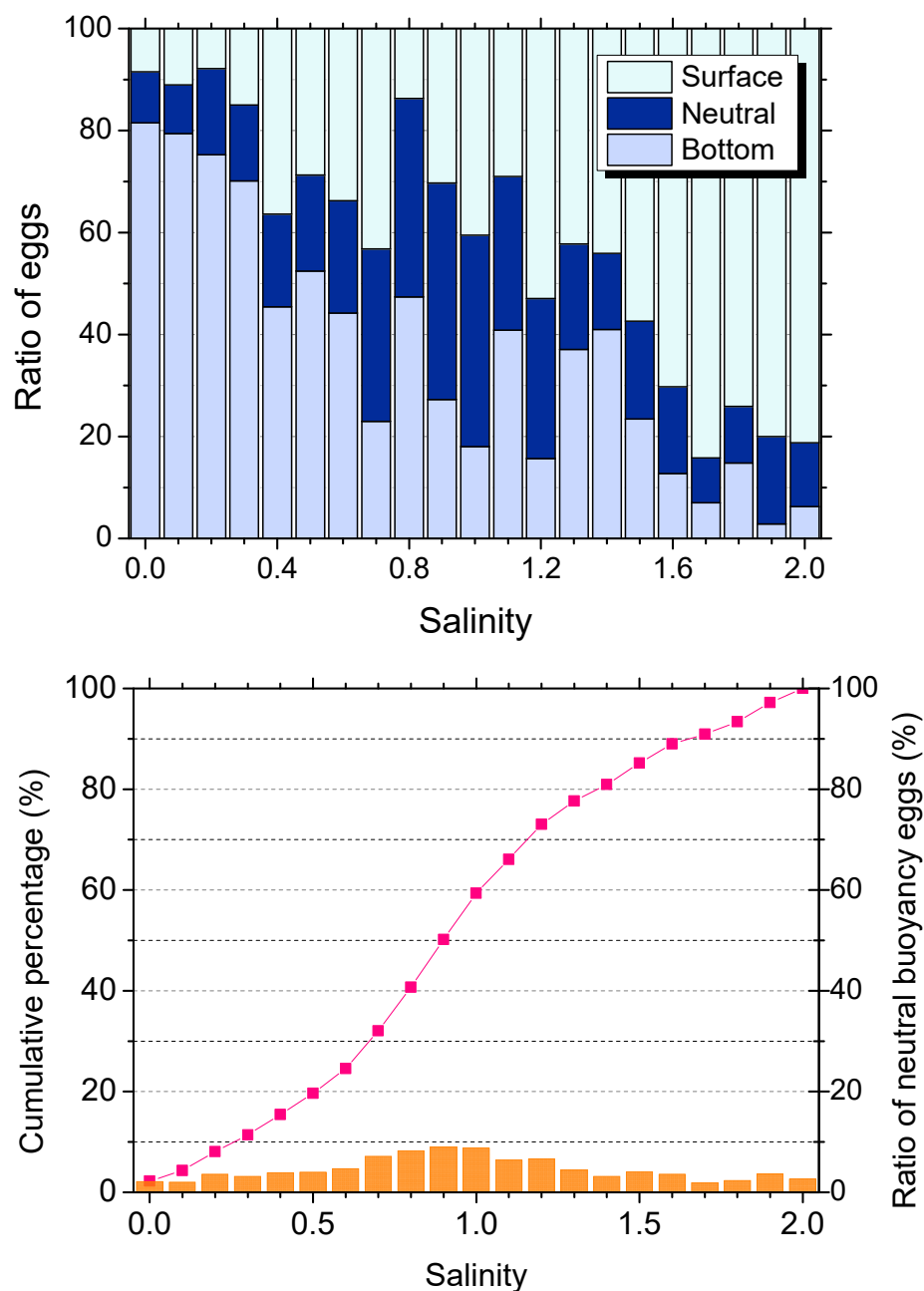


図2.5 エツ卵の希釈塩水中での浮遊割合

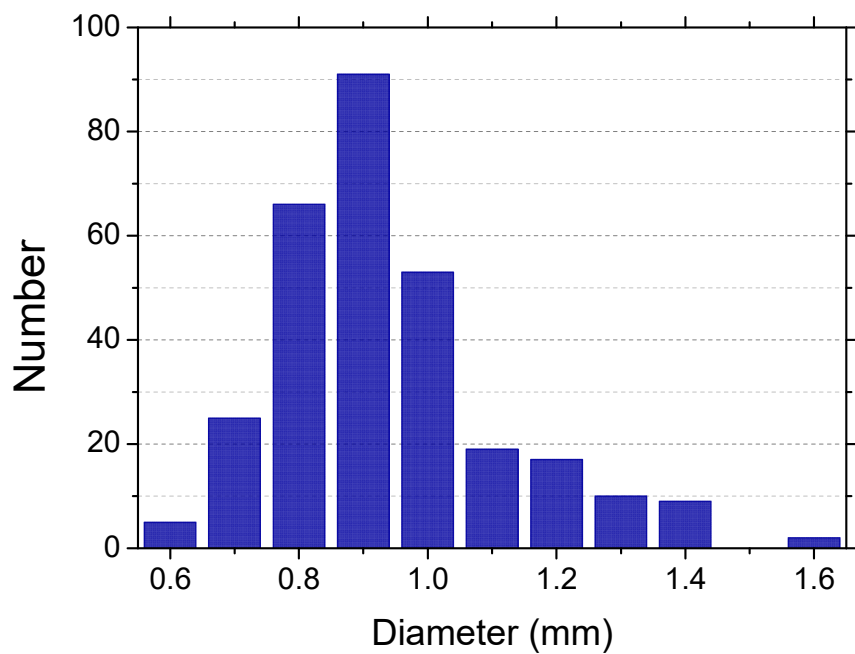
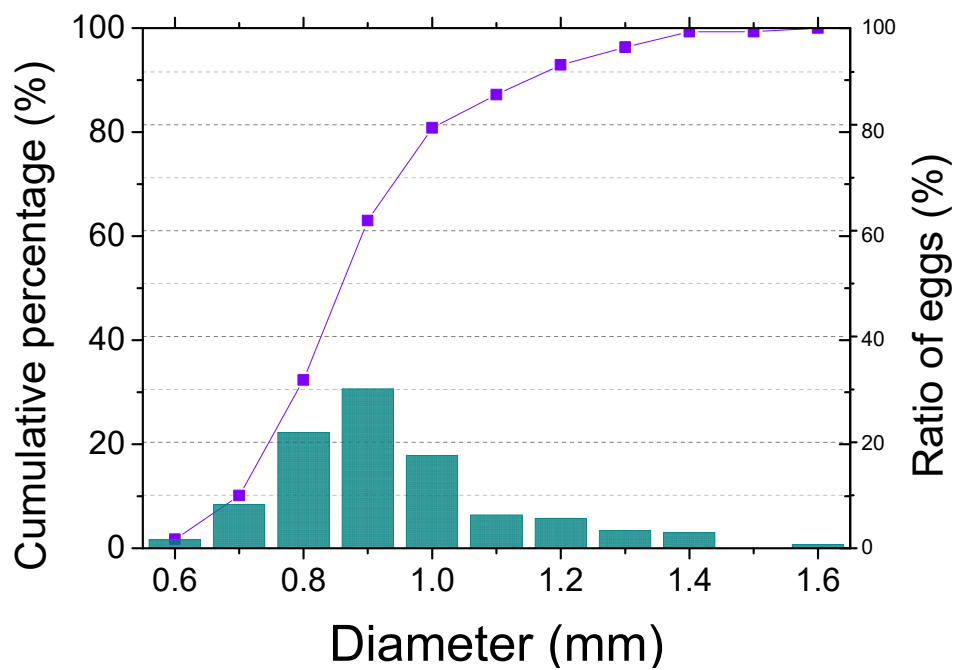


図 2.6 エツ卵の粒度分布

3. 三次元流体シミュレーションの構築

3.1 シミュレーションの基礎方程式

本研究で使用したモデルは、新谷⁸⁾が開発したFantom Refinedである。本シミュレーターでは、支配方程式に現れる各項の役割を独立したパーツ（オブジェクト）に分担させることで、本研究で活用する局所高解像度化（Local Mesh Refinement : LMR）などの複雑なアルゴリズムを柔軟に実現している。

基礎方程式は、連続式(1)と、非圧縮とブジネスク近似、静水圧近似を施した3次元Navier-Stokes式(2)～(4)である。塩分・DO濃度の輸送方程式は式(5)の通りである。離散化手法は、コロケート格子有限体積法であり、時間進行は2次精度、移流項は3次精度で離散化している。鉛直方向の渦粘性・渦拡散係数の算定には、一般化された2方程式乱流モデルであるGLS乱流クロージャーを用いた。この2方程式として多くの選択肢があるが、本計算ではK-OMEGAと安定化係数（Stability function）を選択した。GLS乱流クロージャーモデルの詳細については、新谷⁹⁾に記述されている。

連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

基礎方程式：3次元 Navier-Stokes 式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} (\rho_0 + \rho) \quad (4)$$

ρ_0 ：参照密度， $\rho_0 + \rho$ ：密度

$f(= 2\omega \sin \phi)$ ：コリオリ係数， ϕ ：緯度， ω ：角速度

v_H ：水平方向の渦粘性係数， v_V ：鉛直方向の渦粘性係数

塩分・DO 濃度の輸送方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} K_y \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_z \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (5)$$

C ：塩分濃度または DO 濃度

K_x, K_y, K_z ：拡散係数

3.2 斜面干出の処理 (Wet-Dry)

河口域は河岸が緩斜面となっており，潮汐によって水面標高が短時間に变化する．水位下降時には上のセルの水が干上がって，下のセルに水が移動するが，下のセルに移動する直前に上のセルの水深が極端に浅くなると計算が発散する．水位上昇時には下のセルが満たされて1つ上のセルに移動するが，上のセルに移動した直後に水深が極端に浅いと計算が発散する．

これを防ぐために，Wet-Dryスキームを組み込んだ（図3.1）．水位低下時には，水面位置にある鉛直セル内の水位が限界水位（limit-depth）よりも下回った場合，1つ下のセルと結合する．水位上昇時には，セル内水位がlimit-depthを下回っている場合，水面位置にある鉛直セルは1つ下のセルと結合されているが，水位がlimit-depthを超えると，セルは分裂する．このように，水面位置にある鉛直セルを水面変動に伴って結合・分裂させ，水域の変化を再現した．また，鉛直方向の空間離散化には，パーシャルステップが組み込まれている．

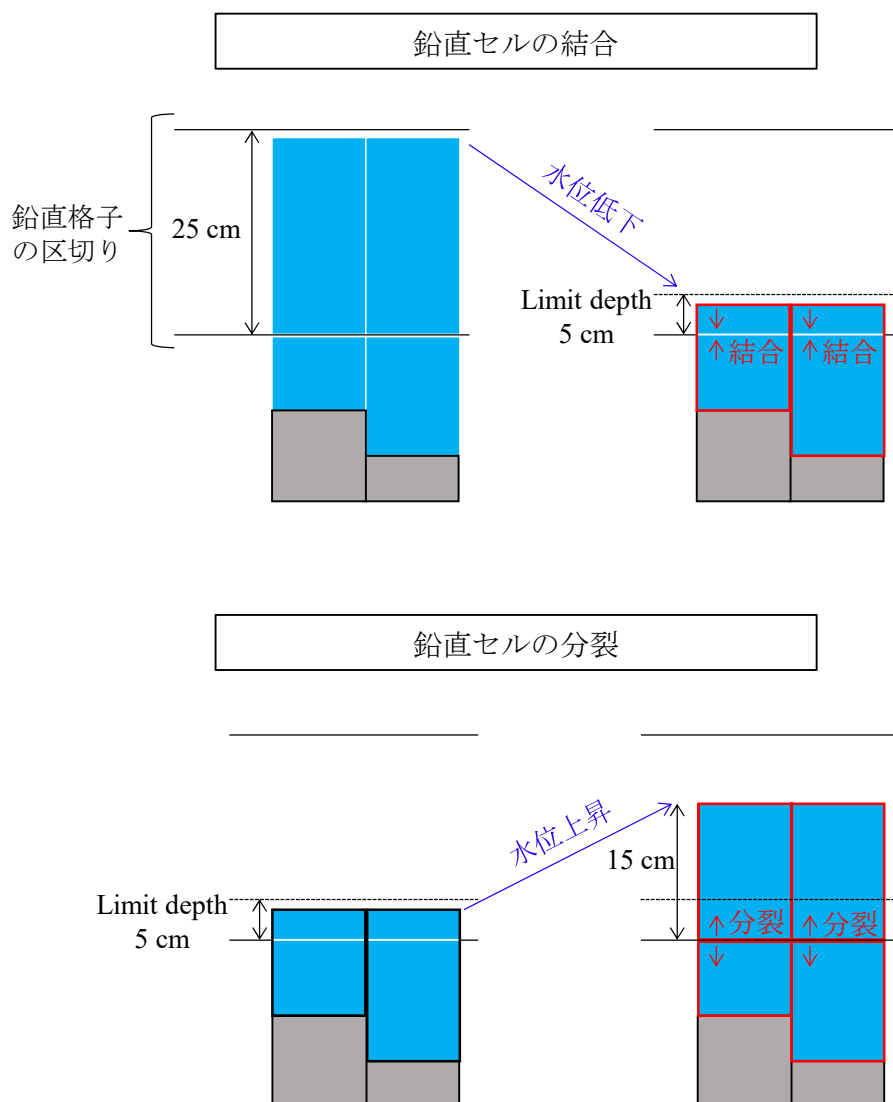


図3.1 鉛直方向のWet-Dry扱い

3.3 局所高解像度格子

水平格子に関して、本モデルでは構造格子を領域ごとに自由に分割できる局所高解像度化手法（Local Mesh Refinement : LMR）を適用し、空間をマクロに捉えるための“コンテナ”とミクロに捉える“セルコラム”の2段階の空間分割で柔軟なLMRを実現した（図3.2）。

河川の地形や流れを適切に表現するための高解像度格子（小格子，図2.3(a)）と，沖合海域の地形や流れを必要最低限表現するための低解像度の格子（大格子，図2.3(b), (c)）を考える．低解像度格子がコンテナであり，各コンテナに指定するセルコラムの個数（分割数）を変化させることで局所的な水平解像度を調整できる．

局所高解像度化は，X，Y方向の分割数を指定することで実現する．コンテナ内の分割数は任意であるが，コンテナサイズが 2^n となっていれば， $n+1$ 段階解像度を変化させることができる．例えば，コンテナのX方向について， $n=5$ の場合はセルコラムが32個含まれており，分割数を1，2，4，8，16，32と6段階に変更することが可能である．X方向とY方向の分割数は自由に変更できるため，長方形格子を生成することも可能である．

これまでの研究で，蛇行した河川などでは分割数は水域を最低でも10分割することが必要であることが分かっている．筑後川では感潮域上流部の川幅が150～200 mであるため，20 m格子を採用し，河口部では40 m格子とした（図3.3）．沖合では最大1,280 mの格子（＝コンテナサイズ）として，計算時間を短縮した．

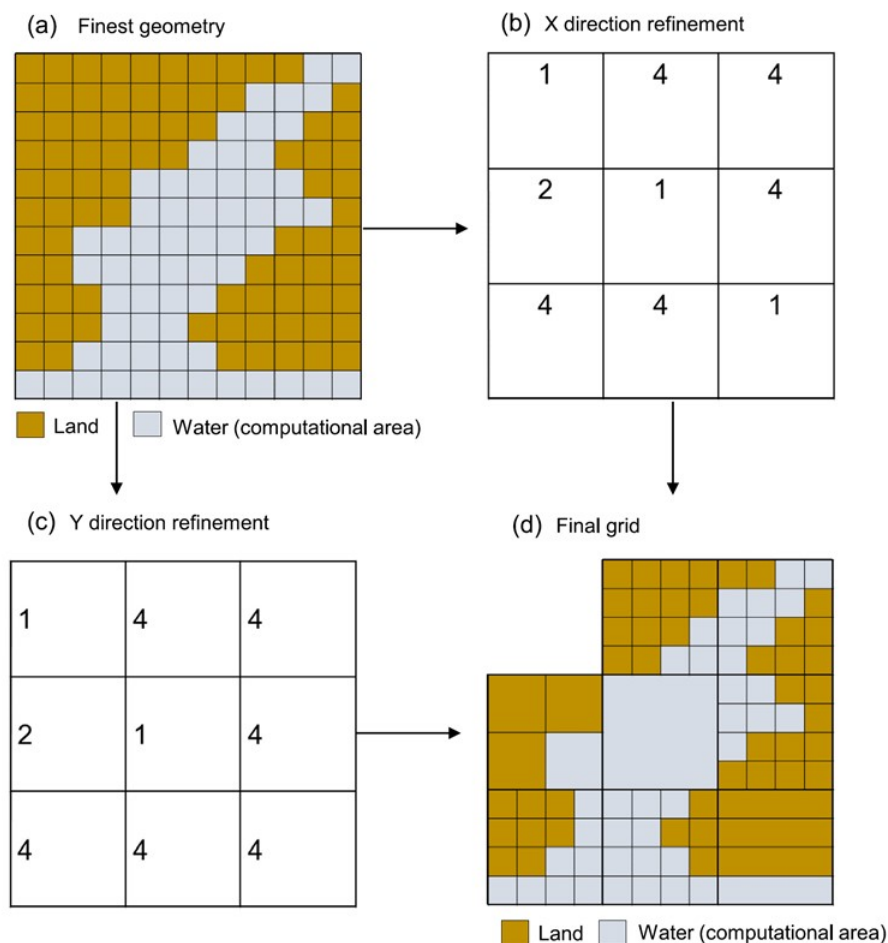


図3.2 局所高解像度格子（LMR）の設定方法

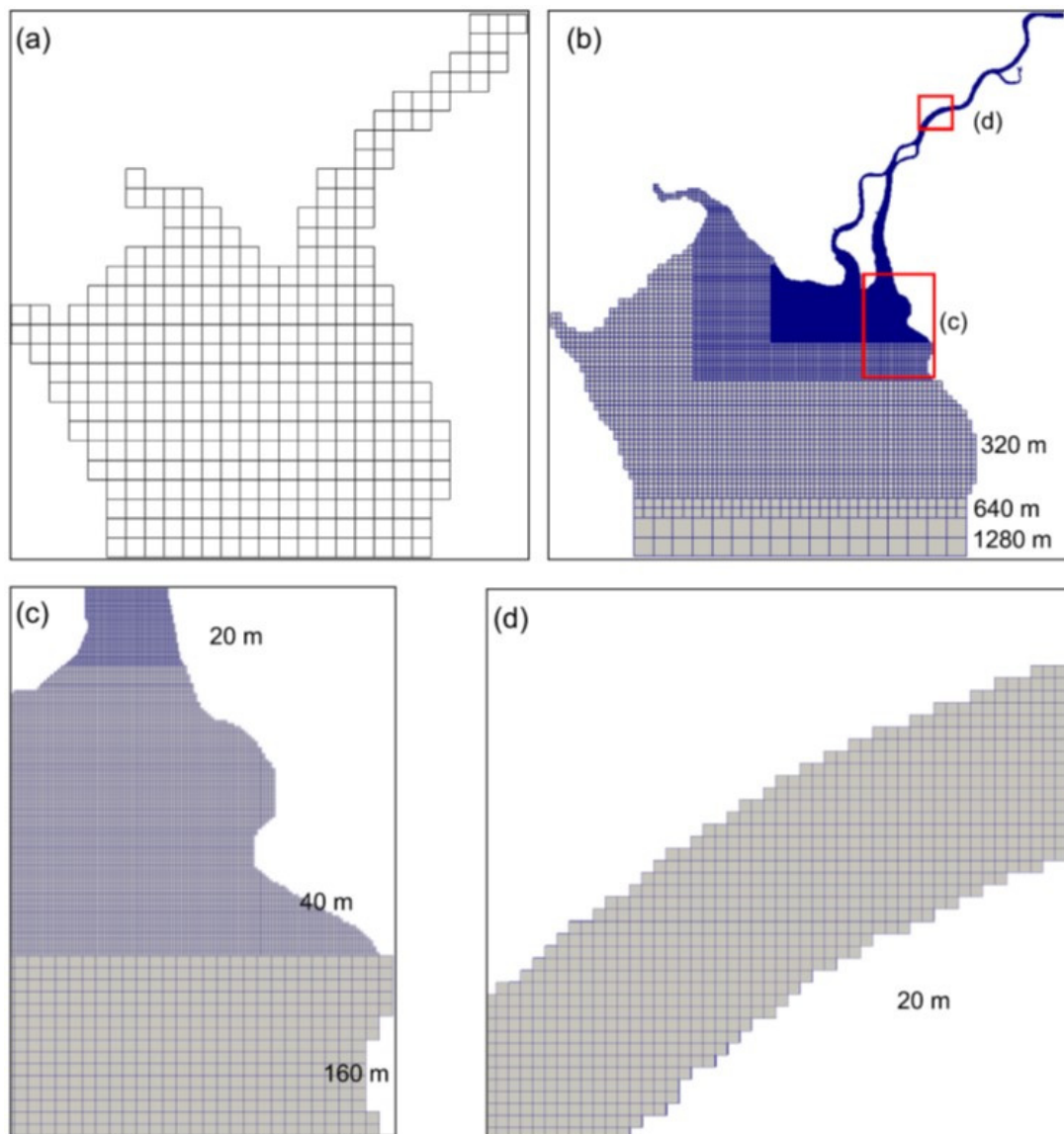


図3.3 筑後川河口域の計算格子サイズ

3.4 粒子追跡モデル

筑後川・有明海の流動シミュレーションは，計算ステップ dt が2～3秒であり，計算時間は実時間と同程度を要する．そこに粒子追跡モデルを追加して， dt ごとに計算すると負荷が大きくなり計算速度が低下する．そのため，流速・塩分等の計算データを5～10分おきに出力・保存し，流動計算が全て完了してから，出力データ（流速ベクトル）を用いて粒子追跡計算を実行した．この際，4次精度Runge-Kutta法により，流速を時空間的に補間した．

$$\begin{aligned}
 k_1 &= f(t_n, x_n) \\
 k_2 &= f(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_1) \\
 k_3 &= f(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_2) \\
 k_4 &= f(t_n + h, x_n + hk_3) \\
 x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)
 \end{aligned} \tag{6}$$

粒子の浮上沈降速度は，エツの卵と周囲水の密度差を用いて，Stokes式から算出した．

$$w_0 = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{\mu} \tag{7}$$

本解析では，鉛直座標系に z -coordinateを用いているため，底面直上を移動する粒子は隣のセルの側面にトラップされて，それ以上動けなくなる場合がある．また，沈降によって河床内に入り込む粒子も存在し，これらの計算上の取り扱いにより底面近傍を移動する粒子を適切に再現することができない．

そこで，粒子追跡を計算する際に，図3.4に示すようなアルゴリズムを組み込んだ．●の粒子は，次のステップに移行する際に壁に引っかかって動けない．しかし，強制的に計算を実行すると，(a)河床セル内に移流する場合と，(b)河床セルを横切って次の水中セルに移流する場合がある．(a)については，セルの内部に貫入した●の粒子を，水中に出るように鉛直上方に引き上げた（○の位置）．(b)では，河床セルを横切ることを許可して，水中セルに移動させた．

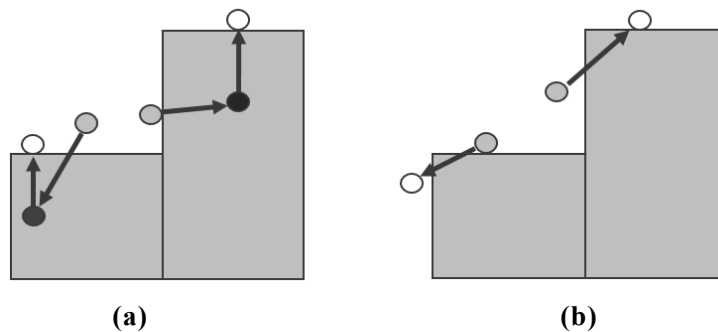


図3.4 河床セルに阻まれる粒子の扱い

3.5 流動計算の精度検証

精度検証のための計算は2010年9月9日から9月11日の期間で行い、9月11日を対象として、河口から1.0 km, 6.5 km, 14.6 km, 21.0 kmの水位の観測結果と比較した。一方、粒子追跡計算の検証期間は、2010年5月から7月に行われたエツの漁獲調査を参考にして¹⁰⁾、CPUE（単位努力あたり漁獲量）が高く、筑後大堰からの流量が少ない平水時の6月9日06:00～6月13日21:00のシミュレーションを行った。

上流端境界は筑後大堰（23 km）であり、ここから河川流量と塩分0を一時間間隔で与えた。また、下流端境界は沖合20 kmとし、大浦港実測潮位と一定塩分（31.7）を鉛直一様に与えた。気象には、佐賀気象台の観測データ（風速・風向、気温、湿度、短波放射、大気圧、雲量）を使用した。塩水は大潮期に強混合で遡上するため、初期塩分は満潮時の塩分分布を水平方向に与え、水深方向には一様とした。

図3.5に実測水位と計算水位を示す。実測水位の特徴として、河口付近1.0 kmの水面変動は正弦波に近い水位変動を示しており、上げ潮時と下げ潮時の波形は左右対称となっている。本川上流に向かうにつれて、水面変動が非対称となり干潮時の位相が遅れる。21 km地点における干潮前後の水位変動は緩やかになっているが、これは河口17.4 kmの地点に存在する床固めの堰止め効果によるものである。数値計算結果は、これらの水位変動の特徴をおおむね再現していることが確認できる。計算と実測の平均誤差は、9月11日の2潮汐において、1 km地点で約0.09 m、6.5 km地点で約0.07 m、14.6 km地点で約0.32 m、21 km地点で約0.12 mであった。河口の潮位変動が約5mであるため、計算誤差は潮位差の1.8～6.4%の範囲にあり、精度は良好だと判断された。

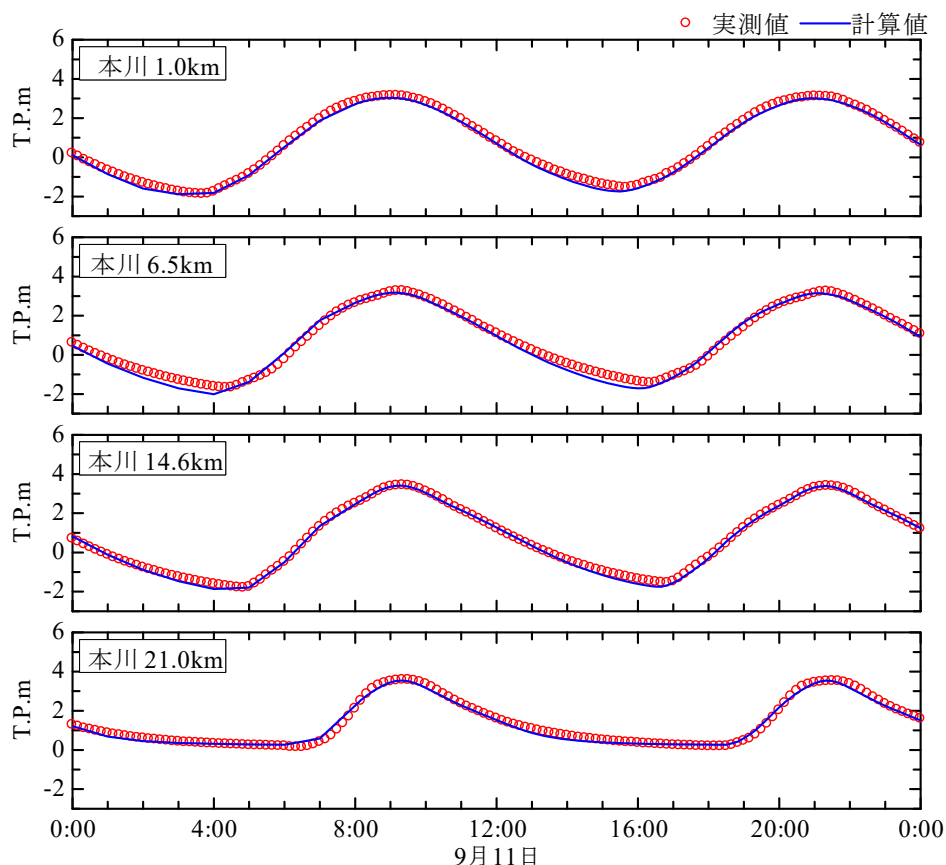


図3.5 各地点の水位による計算精度の検証

4. シミュレーションによるエツ卵の挙動解析

4.1 好適塩分の評価方法

浮遊するエツ卵の生残率を検討するため、浮遊中の塩分の好適性に関する評価関数を設定した。既往の研究（2.1）により、エツはほぼ淡水に近い領域で産卵し、河道を流下するうちに孵化することが分かっている。そこで、孵化までの時間を30.5時間として、孵化する際の好適塩分範囲は0.02～0.4、それ以上の塩分0.4～1.0を準好適塩分範囲と設定した（図4.1）。浮遊粒子の周囲塩分の時間累積値が、この塩分範囲内に収まっているかどうかを判定した。

$$A_{sal} = \int_0^t \frac{Sal_s}{t_s} t dt. \quad (8)$$

ここで、 A_{sal} は累積塩分值、 Sal_s は最終的な好適塩分、 t_s は孵化までの時間、 t は時間である。 Sal_s/t_s は図4.1の傾きを表している。

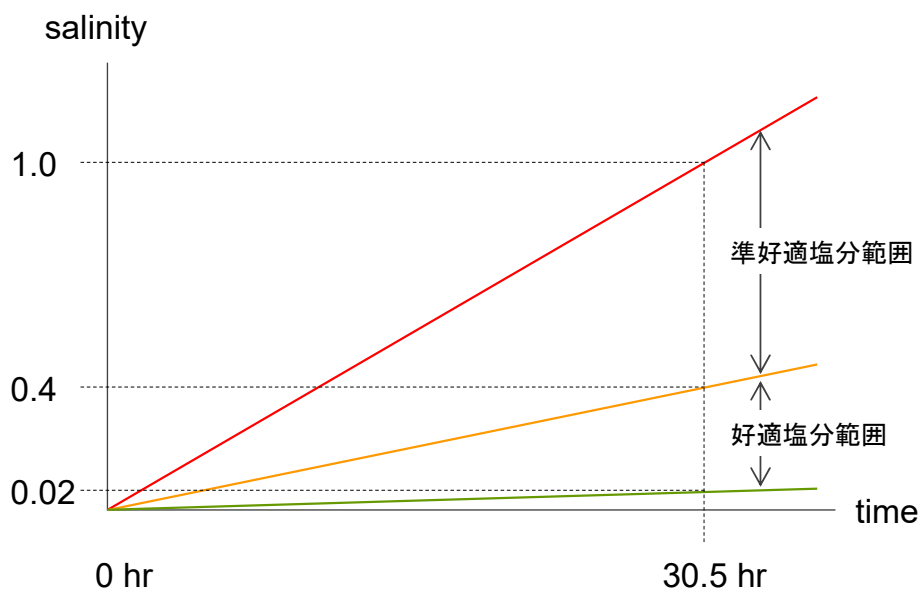


図4.1 エツ卵の好適塩分範囲の設定

4.2 計算ケースの設定

エツ卵の流下に伴う分散状況と、その時が好適塩分範囲に収まっているかどうか検討するため、卵の粒径を変化させたケース、卵の密度（等価塩分）を変化させたケース、河川流量を変化させたケースをそれぞれ実行した（表4.1）。

粒径変化の設定は、図2.6に基づいて粒径範囲を3区分し、下位33%の中央値（累積16.5%）として0.749 mm、中位33%の中央値（累積50%）として0.858 mm、上位33%の中央値（累積83.5%）として1.039 mmを採用した。

卵の密度（等価塩分）も同様の方法で、図2.5に基づいて設定した。流量については、2010年6月の実測データその他、渇水流量として41 m³/s、平水流量として67 m³/s、豊水流量として102 m³/sを設定した。また、エツはちょっとした洪水の後によく採れるという情報もあることから、豊水流量の2倍の204 m³/sのケースも設定した。

粒子の初期配置位置は文献に基づいて19 kmとし、計算期間は産卵開始から30.5時間とした。

表4.1 エツ卵の浮遊シミュレーションのケース設定

	直径 (mm)			等価塩分			流量 (m³/s)				産卵場所	計算期間
粒径 ケース	A 0.749	B 0.858	C 1.039	0.927			実際の流量 (平均: 59.04)				19km	産卵から 30.5 hour
等価塩分 ケース	0.858			A 0.450	B 0.927	C 1.568	実施の流量 (平均: 59.04)					
流量 ケース	0.858			0.927			A 41	B 67	C 102	D 204		

4.3 計算結果と考察

卵の粒径の違いによる分散状況を図4.2と図4.3に示す．産卵から10時間目までは分布範囲は2 km程度で狭く，粒径による違いは明確ではないが，その後，10 km～17 kmの範囲に広がり，小さい粒径ほど下流に流されやすい様子が分かる．

卵の密度（等価塩分）の違いによる分散状況を図4.4と図4.5に示す．こちらも，産卵から10時間目までは分布範囲は2 km程度で狭く，密度による違いは明確ではないが，その後，8 km～16 kmの範囲に広がり，小さい密度ほど下流に流されやすい様子が分かる．

流量の違いによる分散状況を図4.6と図4.7に示す．流量が分散状況に及ぼす影響は顕著で，流量が大きくなるほど卵は下流に移動しやすくなる．渇水流量41 m³/sでは30時間後に13km付近にとどまっており，産卵場所から6kmしか流下していないが，豊水流量102 m³/sでは7km付近まで移動しており，産卵場所から12km流されている．204 m³/sでは河口付近まで移動している．

これらの分散状況と好適塩分範囲の関係を図4.8にまとめた．孵化に要するとされる30時間後の状況として，本研究で測定したエツ卵の粒径範囲および密度範囲では，好適塩分範囲に収まっていることが確認された．すなわち河口から19km付近で母体から放出された卵は，孵化に適した塩分水の中を浮遊していることが確認された．流量に関して，流量が増えるほど分散範囲は下流に移動するものの，それと同時に塩淡水の境界面も下流に移動するため，結果として卵は好適塩分範囲の中を浮遊していることが確認できた．ただし，流量が204 m³/sになると，やや準公的塩分範囲（高塩分側）に卵の分布が食い込んでいる．

以上より，これまでに生物学分野での調査・実験により示されたエツの産卵場所や好適な塩分環境を，三次元流体シミュレーションにより詳細に確認することが出来た．

今後は産卵のタイミング（時刻）と潮汐の関係についてさらに検討を進めるとともに，「洪水の後にエツが遡上して産卵するようだ」という現地情報を裏付けるための流量設定など，様々なケース計算を行い，卵の挙動をより詳細に把握することが必要である．

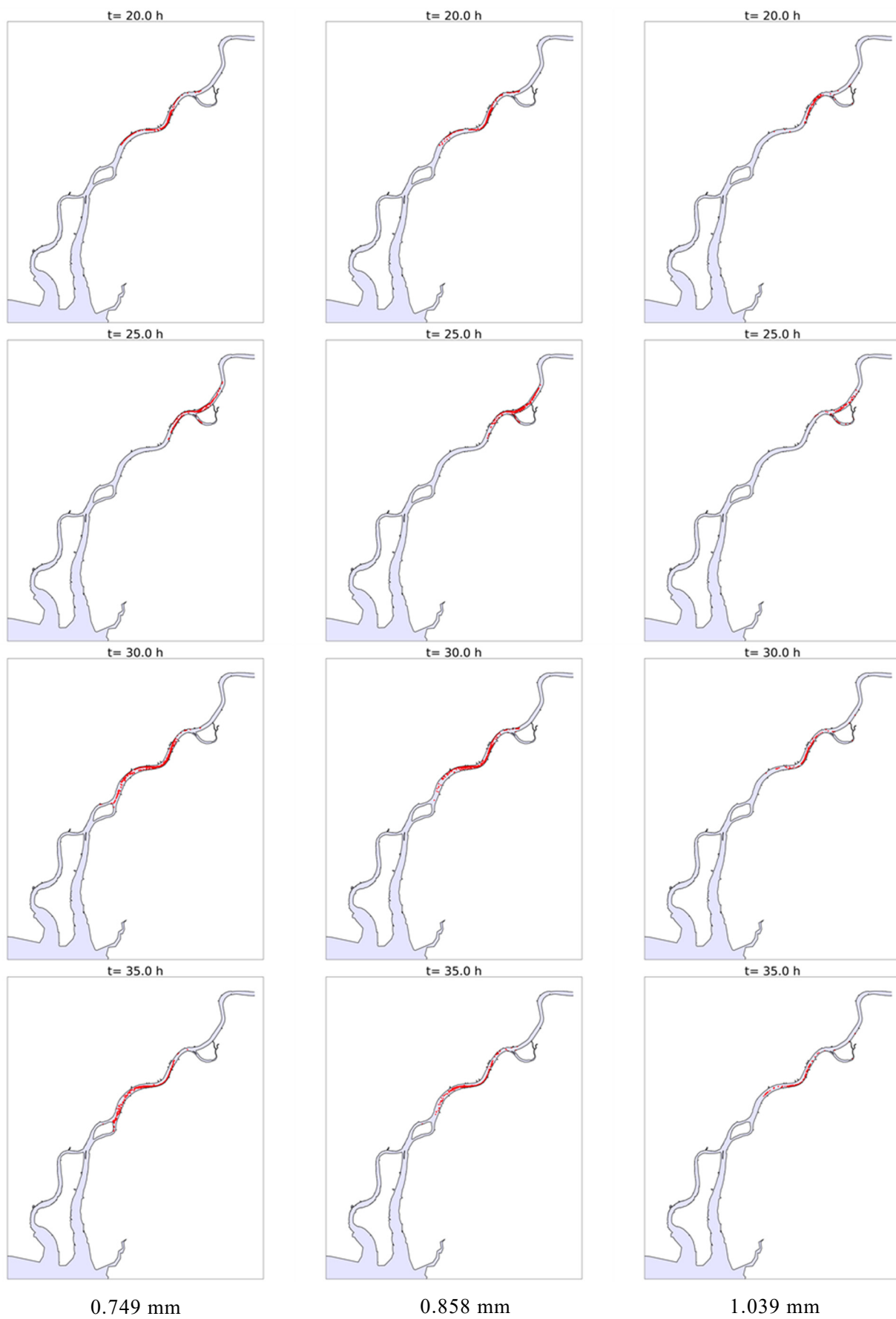


図4.2 卵の粒径変化による分散状況

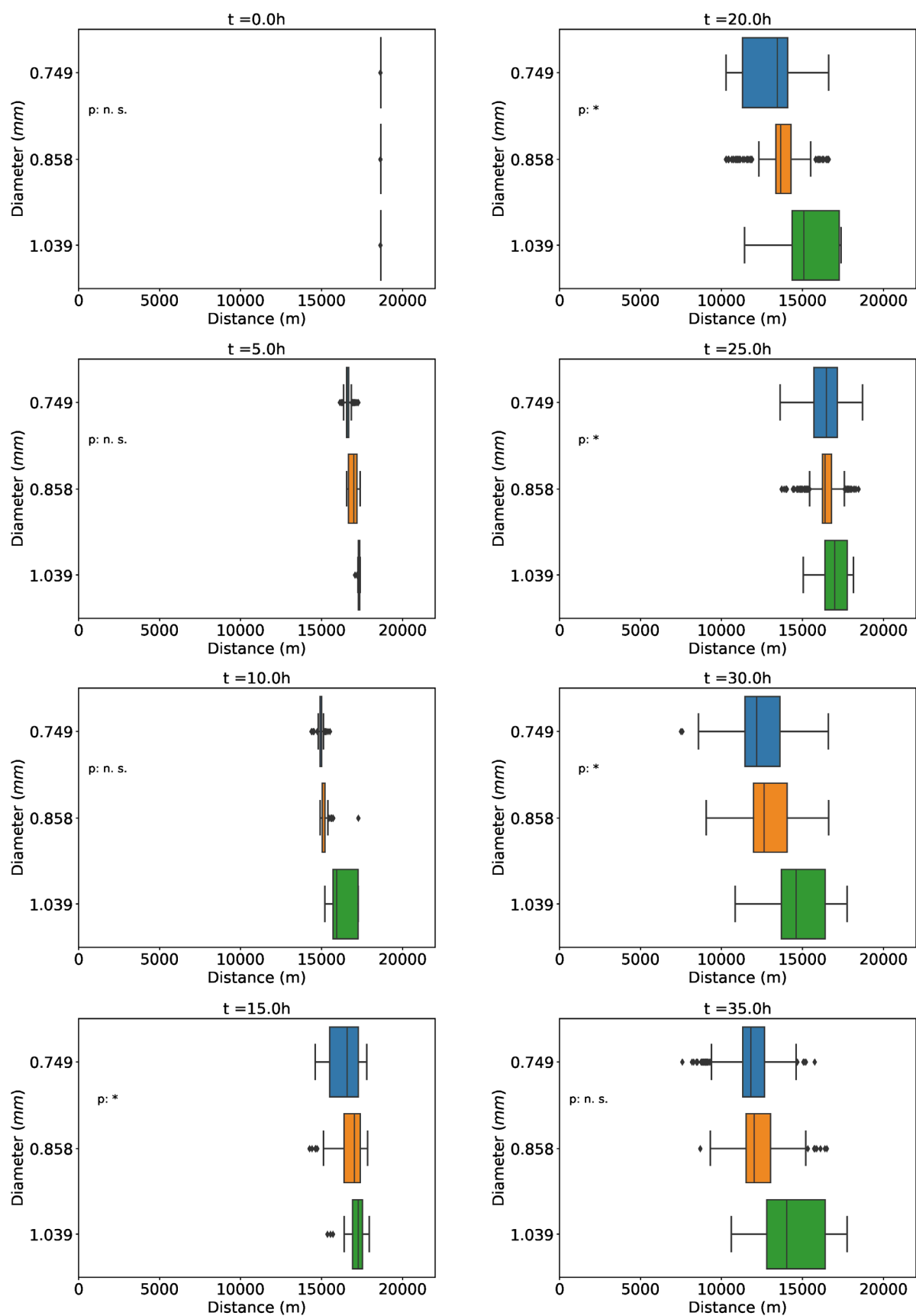


図4.3 卵の粒径変化による分散範囲

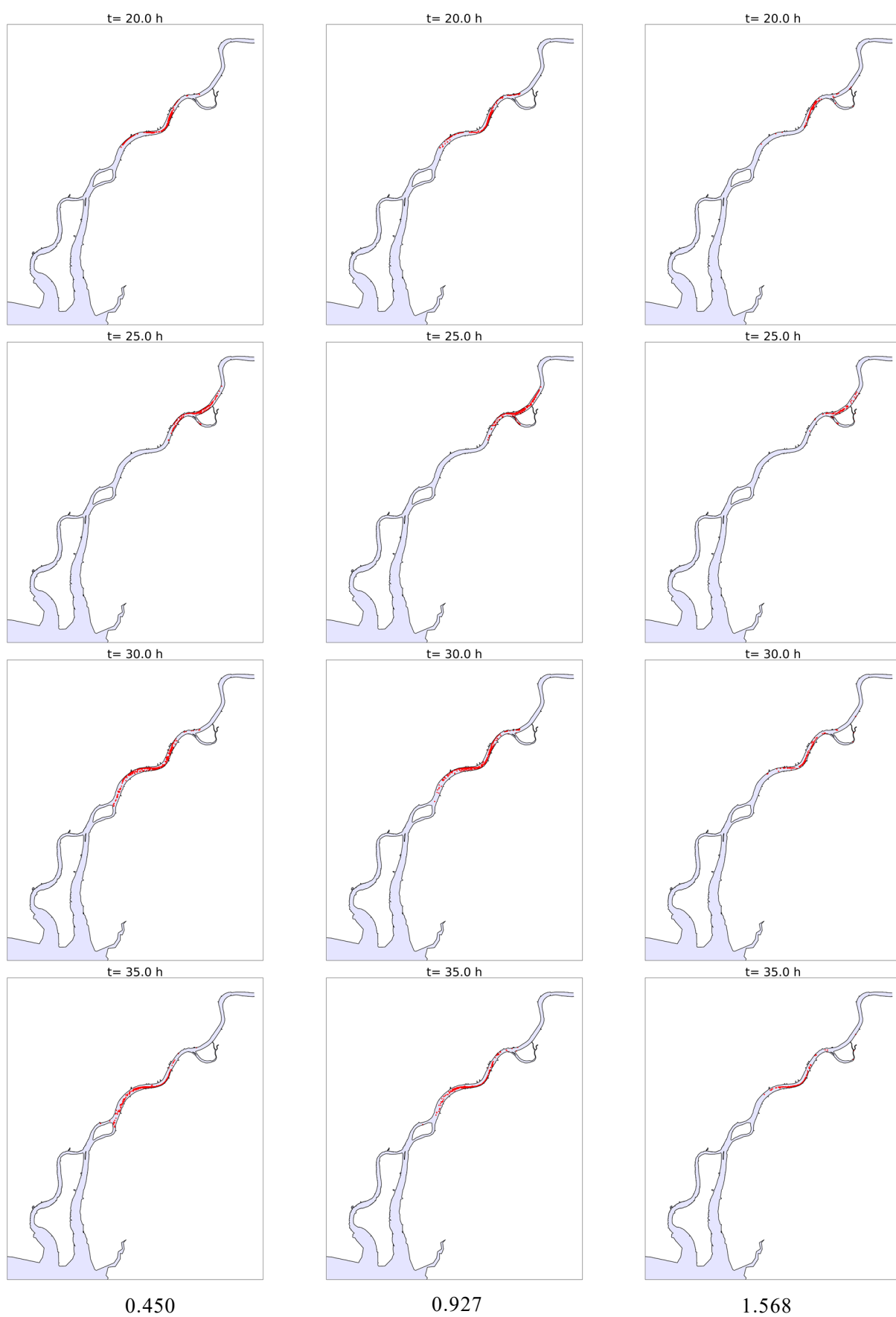


図4.4 卵の密度変化（等価塩分の違い）による分散状況

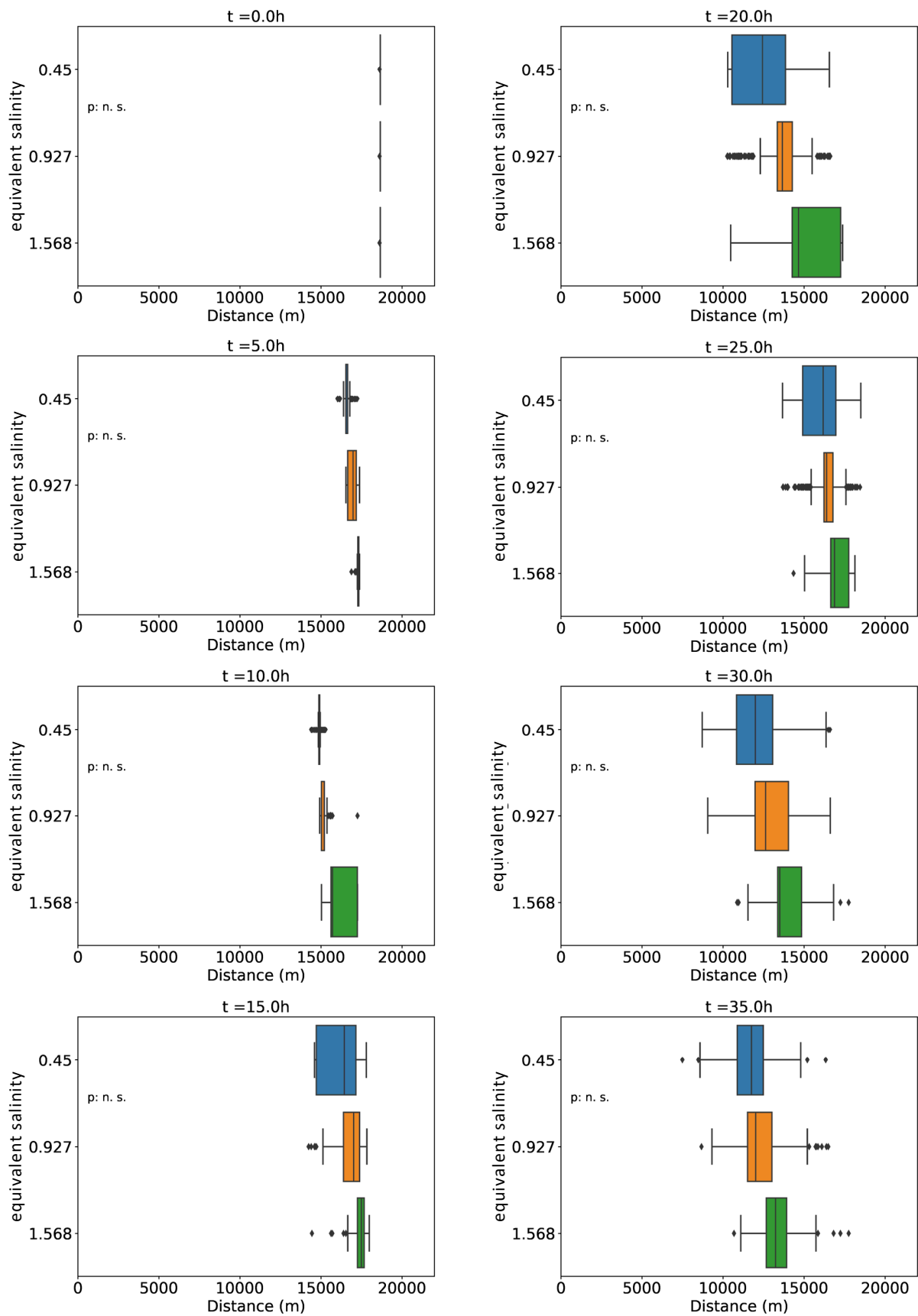


図4.5 卵の密度変化（等価塩分の違い）による分散範囲

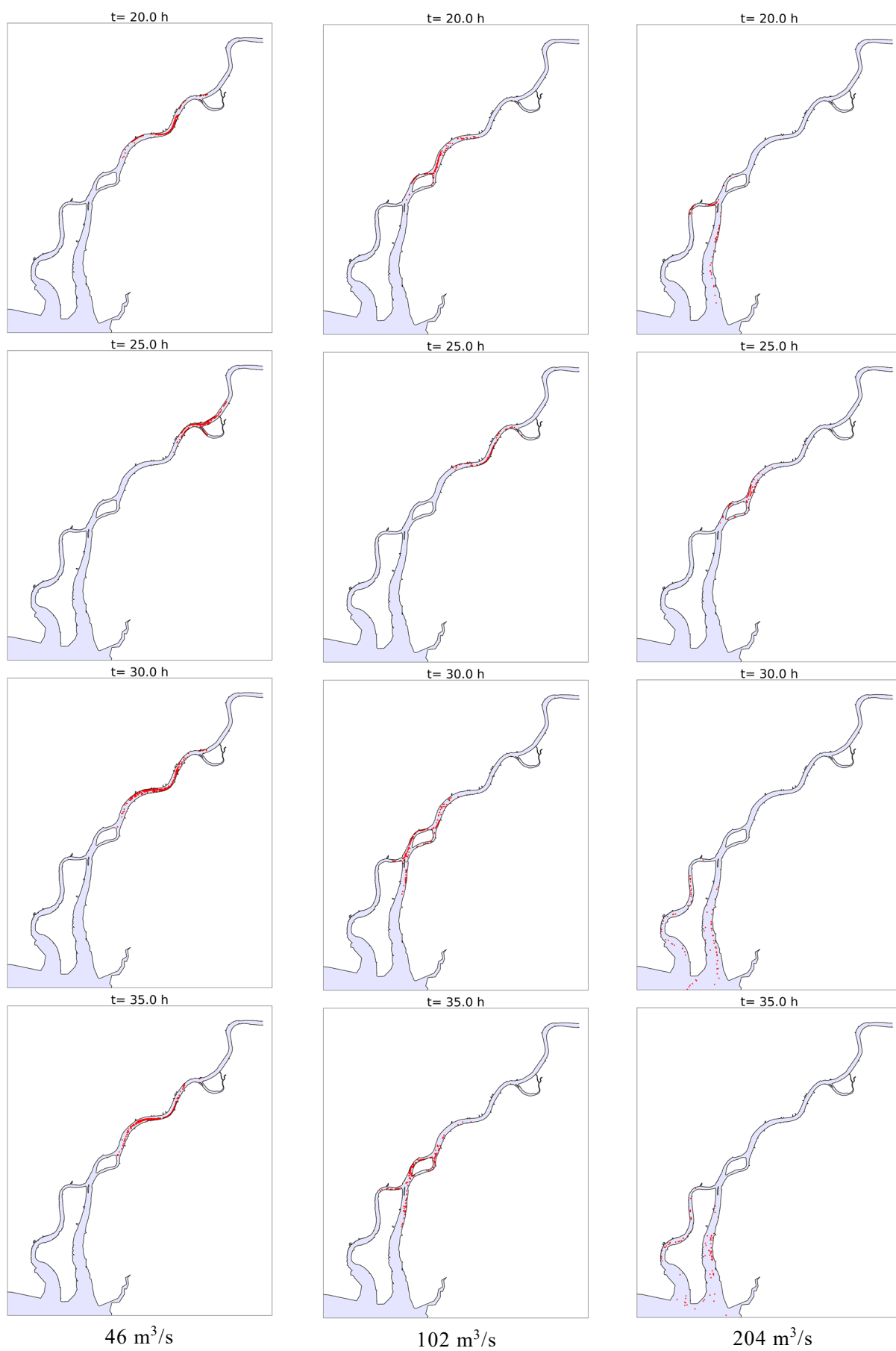


図4.6 河川流量の違いによる分散状況

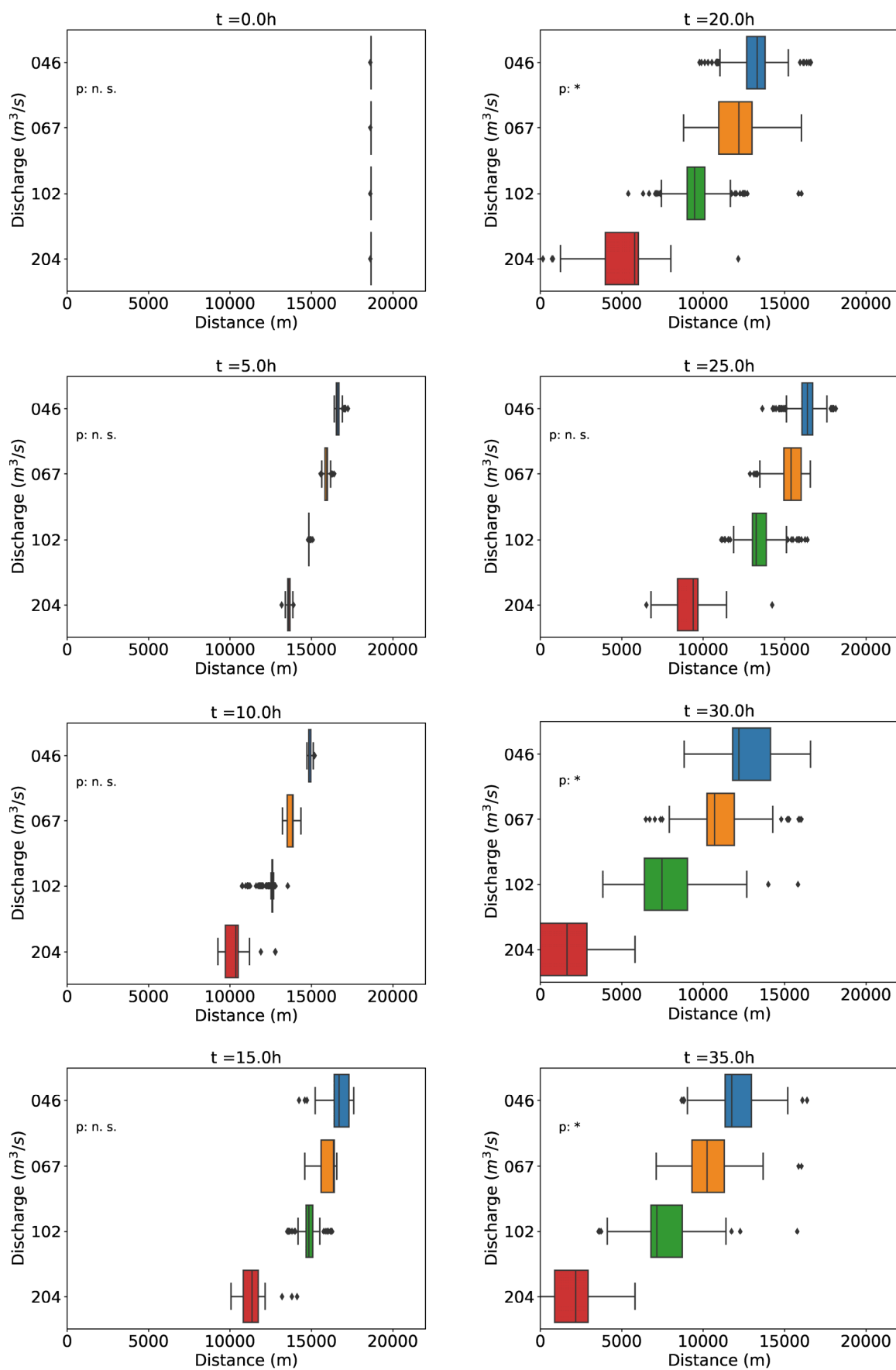


図4.7 河川流量の違いによる分散範囲

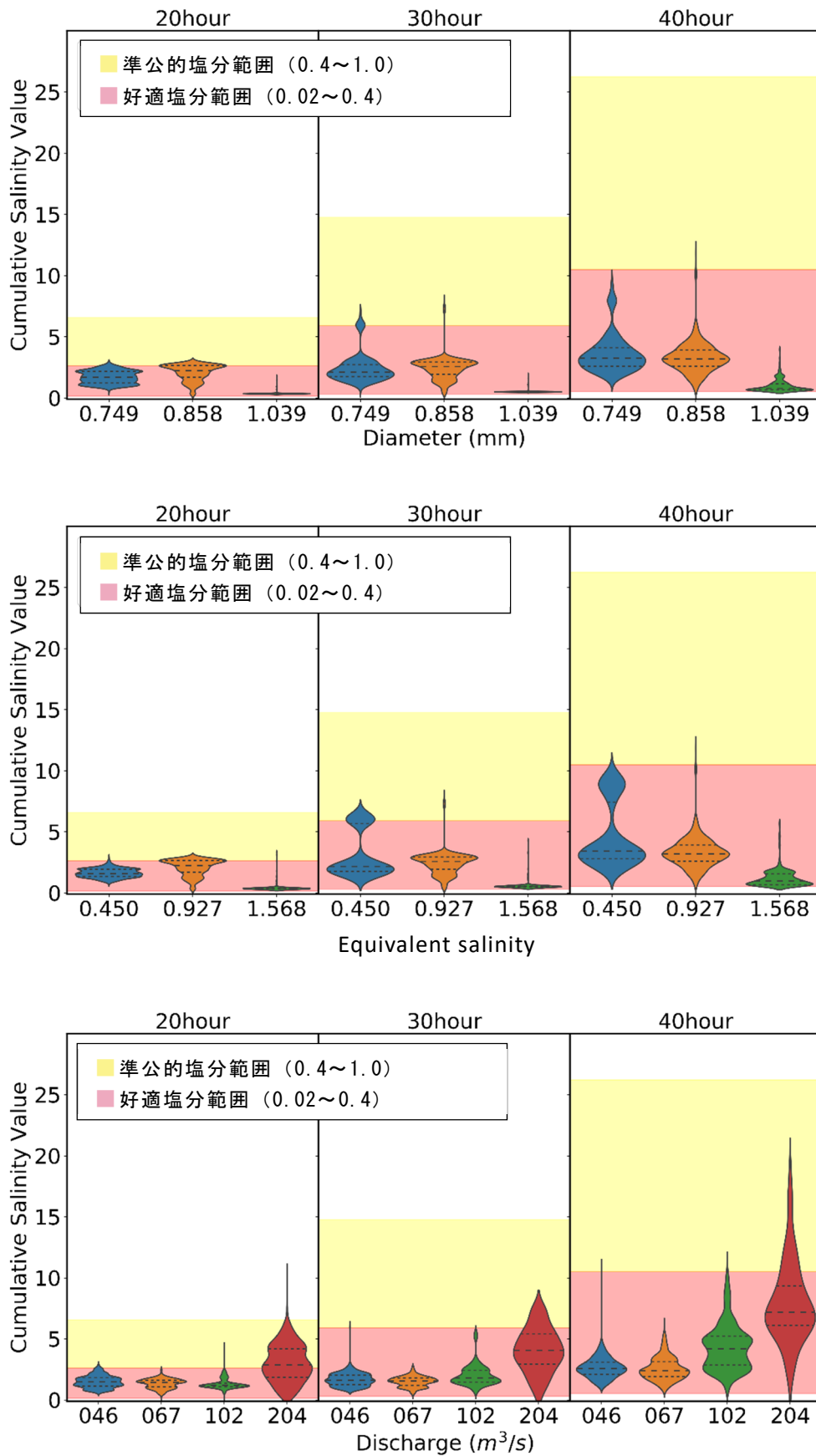


図4.8 好適塩分範囲と卵の分散状況の関係

5. まとめ

筑後川の汽水魚エツは約40年前から生物実験・調査が行われているが、情報が断片的で、相反する論文情報もあり、未だに産卵から孵化までの履歴（場所・流量・潮汐）が分かっていない。本研究はエツ卵の粒径、密度に関する分析を行い、三次元流体シミュレーションに粒子挙動モデルをカップリングし、流量・潮汐の組み合わせを変えて、卵の浮遊移動の様子をシミュレーションした。得られた結果は以下の通りである。

①汽水魚エツの受精卵を漁師から入手して、塩分濃度を0.1ごとに变化させた水の中に粒子を投入し、中立浮遊する粒子個数をカウントして、卵の密度分布図を作成した。淡水（塩分0）ではほとんど80%がビーカーの底に沈み、汽水（塩分2）では、逆に80%が水面に浮遊した。中立状態が最も良く現れたのは塩分0.8~1.2であり、中立浮遊粒子の存在率から、中央等価塩分として0.927が得られた。

②粒径に関しては、エツの卵は0.6~1.6 mmの範囲に分布し、最頻値は0.9 mmであった。累加曲線から、中央粒径として0.858 mmが得られた。

③エツ卵が孵化するまでに要する時間と塩分環境を線型モデルで表現した。既往の研究により、エツはほぼ淡水に近い領域で産卵し、河道を流下するうちに孵化することが分かっている。そこで、孵化までの時間を30.5時間として、孵化する際の好適塩分範囲は0.02~0.4、それ以上の塩分0.4~1.0を準好適塩分範囲と設定した。

④エツ卵のシミュレーションの結果、孵化に要するとされる30時間後の状況として、本研究で測定したエツ卵の粒径範囲および密度範囲では、好適塩分範囲に収まっていることが確認された。すなわち河口から19km付近で母体から放出された卵は、孵化に適した塩分水の中を浮遊していることが確認された。流量に関して、流量が増えるほど分散範囲は下流に移動するものの、それと同時に塩淡水の境界面も下流に移動するため、結果として卵は好適塩分範囲の中を浮遊していることが確認できた。

⑤以上より、これまでに生物学分野での調査・実験により示されたエツの産卵場所や好適な塩分環境を、三次元流体シミュレーションにより詳細に確認することが出来た。

参考文献

- 1) 末永慶寛, 藤原正幸, 中田英明: マガレイ卵・仔魚の沿岸海域への滞留に対する風および鉛直移動の影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第45巻, pp.1151-1155, 1998.
- 2) 笠毛健生, 白木喜章, 柴木秀之, 柳哲雄: 大阪湾に流入する春季カタクチシラスのモデル化, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第72巻, pp.1381-1386, 2016.
- 3) 横山勝英, 金子祐, 山本浩一: 感潮河道の湾曲部における高濃度水塊の横断分布特性と浮泥層の挙動, 土木学会論文集B1(水工学), 第67巻・第2号, I_1555-I_1560, 2012.
- 4) 林宗徳, 松井誠一, 竹下直彦: 筑後川におけるエツの産卵場と産卵時刻, 水産増殖, 第42巻・第1号, pp.15-23, 1994.
- 5) 石田宏一・塚原博: 有明海および筑後川下流域におけるエツの生態について, 九大農芸誌, 第26巻・第1-4号, pp.217-221, 1972.
- 6) 富重信一: エツの増殖に関する研究-Ⅲ幼魚調査, 福岡有明水試研報, pp.85-98, 1983.
- 7) 松井誠一, 富重信一, 塚原博: エツ *Coilia nasus* Temminck et Schlegel の生態的研究 - II. 卵内発生及び仔魚に及ぼす塩分濃度の影響, 九大農芸誌, 第40巻・第4号, pp.229-234, 1986.
- 8) 新谷哲也: 柔軟な局所高解像度化を実現する非構造デカルト格子シミュレーターの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp.I_967-I_972, 2017.
- 9) 新谷哲也: 3次元非構造格子流体シミュレーターへのGLS乱流クロージャーモデルの組み込みと検証, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp. I_667- I_672, 2016.
- 10) 大村拓・横山勝英・鈴木伴征・高島創太郎: 筑後川河口域における汽水魚エツの行動と塩水遡上の関係について, 土木学会論文集B1 (水工学), 第68巻, 第4号, I_715-I_720, 2012.

・助成事業者紹介

横山勝英（研究代表者）

現 職：東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 教授、博士（工学）

主な著書：日本の河口、**25** 章「筑後川」を分担（古今書院、**2010**）

環境水理学、4 章「土砂・懸濁物質の動態」を分担（土木学会、**2015**）

・研究協力者

新谷哲也

現 職：東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 准教授、博士（工学）

専門分野：環境水理学，数値流体工学