

回転水槽を用いた密度流拡散 の内湾水理模型実験

指導教官: 藤野 正隆 教授

佐藤 徹 助教授

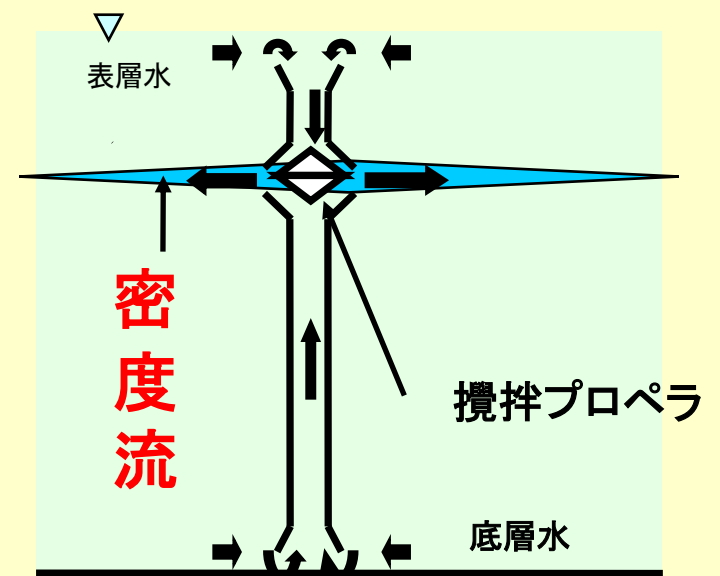
多部田 茂 助教授

80376 江原健太郎

研究の背景

- ・近年成層化した閉鎖性内湾等で貧酸素水塊や赤潮が多発しており、それを解決するため水質改善装置の実験的導入が始まっている。その実例として三重県の五ヶ所湾と長崎県の大村湾があり、五ヶ所湾においては水質改善などの現象がみられている。
- ・複雑な沿岸海洋域での海水の流動や拡散などを把握するには、現地観測・水理模型実験・数値シミュレーションを組み合わせることが有効であり、その中で水理模型実験は必要不可欠な存在となっている。
- ・成層があって回転し、実海域地形の模型を入れた水理模型実験は今までにない。

五ヶ所湾の水質改善装置のイメージ



研究目的

- 回転水槽を用いて、五ヶ所湾模型と大村湾模型について密度流吹き出し実験を行い、潮汐あるいは回転を加えた場合の密度流拡散について知見を得ること

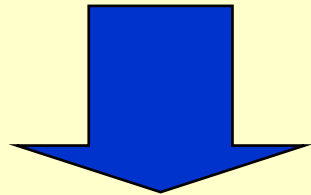
相似則1 (歪み模型の基礎理論)

一般相似則

$$\left(\frac{gH}{U^2}\right)_p = \left(\frac{gH}{U^2}\right)_m \dots \text{フルードの相似則}$$

$$\left(\frac{C_f L}{H}\right)_p = \left(\frac{C_f L}{H}\right)_m \dots \text{摩擦に関する相似則}$$

$$\left(\frac{D}{LU}\right)_p = \left(\frac{D}{LU}\right)_m \dots \text{拡散に関する相似則}$$



+リチャードソンの4/3乗測

$$H_r = L_r^{2/3}$$

$$Q_r = L_r^2$$

$$t_r = L_r^{2/3}$$

$$C_{f_r} = L_r^{-1/3}$$

$$U_r = L_r^{1/3}$$

U : 代表的な流速

L : 代表的な水平長さ

H : 代表的な鉛直長さ、

D : 代表的な拡散係数

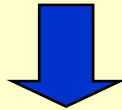
C_f : 海底摩擦係数

添え字 p 、 m はそれぞれ
実海域と模型の量に、
添え字 r は模型と実海域の
量の比に付し、
例えば $H_r = H_m / H_p$
である。

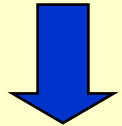
各量の縮率が求まる

相似則2（「密度流吹き出し量の相似則」）

- 実際の海域と模型実験の成層強さが異なる場合、それぞれの密度流の速度が異なってくる。
- 「密度流吹き出し量の相似則」を定義し、密度流の速さを等しくするため、吹き出し流量に補正を加える



密度流の速さの縮率と、代表流速の速さの縮率を合わせる



⇒ 補正吹き出し流量 Q_r は

$$Q_r = \frac{L_r^2 h_r}{T_r} = \frac{L_r^2}{\rho_r} \text{となる}$$

ただし $\bar{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$

$\Delta\rho$: 成層の上層と下層の密度差

ρ_0 : 成層境界の密度

一般の相似則から求めた流量を $\bar{\rho}_r$ で割る

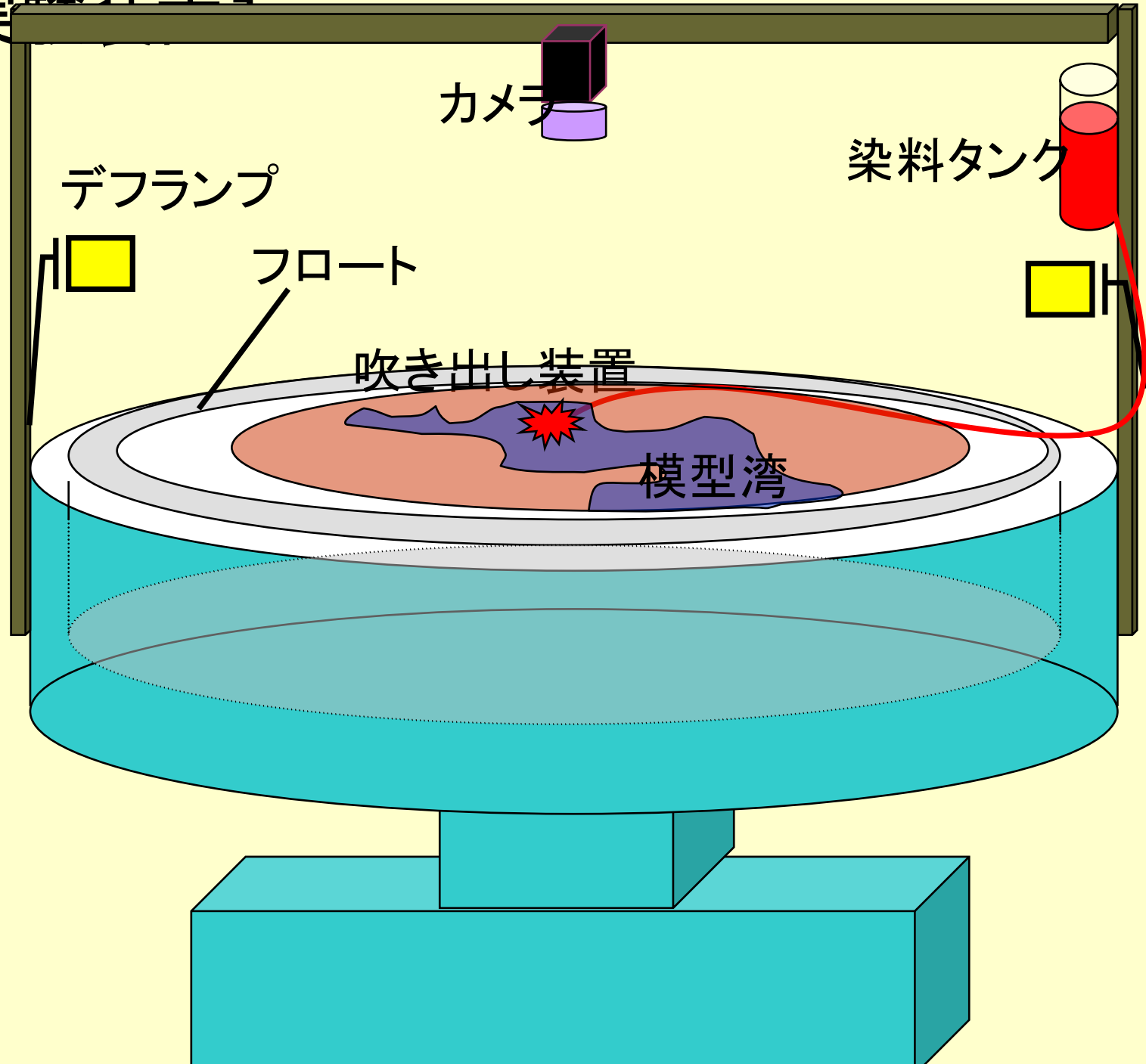
実海域と模型の各量の比較 (五ヶ所湾)

	実海域	模型(相似則)	模型 (実際に用いた値)
水平スケール L	4.167(Km)	2.5(m)	2.5(m)
水深 H 潮汐振幅 ΔH 吹き出し深さ h	15(m) 2(m) 3(m)	10.7(cm) 14(cm) 2.0(cm)	10.7(cm) 14(cm) 2.0(cm)
時間スケール T 潮汐周期 t	24(h) 12(h)	10(min) 5(min)	10(min) 5(min)
回転速度 Ω	6.9×10^{-4} (rpm)	0.056(rpm)	0(rpm)
吹き出し流量 Q	12万(m ³ /day)	2.9(cc/min)	4.5(cc/min)

実海域と模型の各量の比較 (大村湾)

	実海域	模型 (相似則)	模型 (実際に用いた値)
水平スケール L	40(Km)	2.5(m)	2.5(m)
水深 H 潮汐振幅 ΔH 吹き出し深さ h	19(m) 50(cm) 6.25(m)	7.6(cm) 2(cm) 2.5(cm)	7.6(cm) 2(cm) 2.5(cm)
時間スケール T 潮汐周期 t	24(h) 12(h)	85(sec) 43(sec)	85(sec) 43(sec)
回転速度 Ω	6.9×10^{-4} (rpm)	0.39(rpm)	0.39(rpm)
吹き出し流量 Q	30 (m ³ /min)	$7,41 \times 10^{-3}$ (cc/min)	4.5(cc/min)

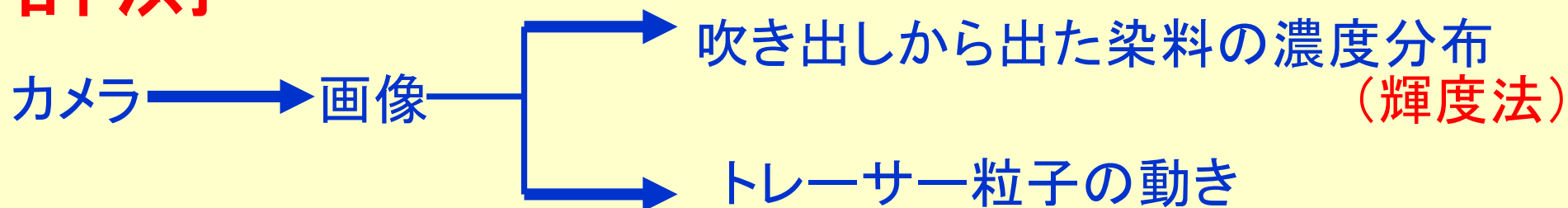
実験装置



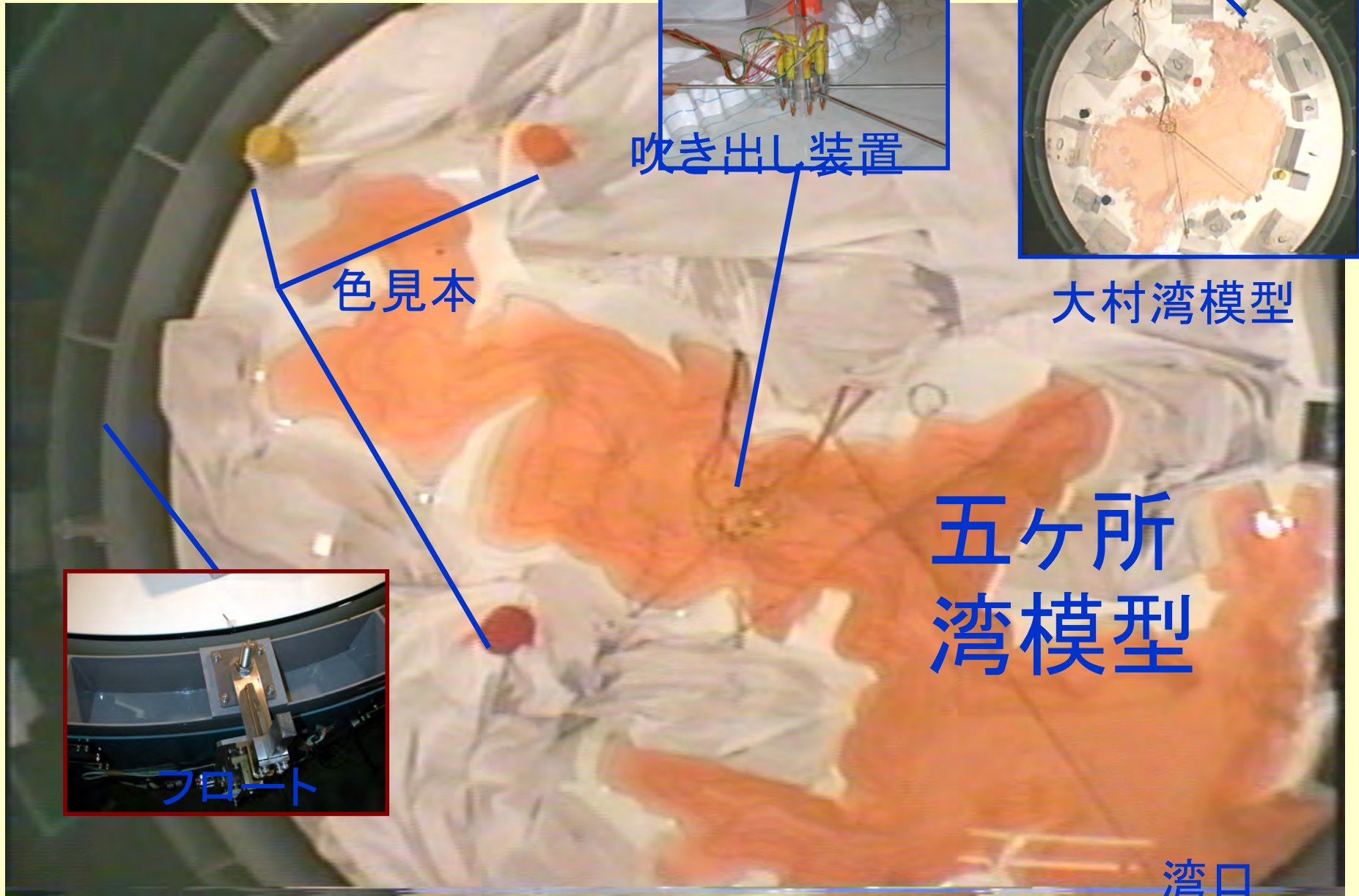
実験装置2



計測



•実験装置3



湾口

吹き出し装置

色見本

大村湾模型

五ヶ所
湾模型

フロート

湾口

相似則1 (歪み模型の基礎理論) の検証

流速の比較: トレーサー粒子をつかって模型での流速を計測し、実海域と模型の流速を同じ位置で満潮と干潮において比較した(五ヶ所湾模型)



実海域—満潮: 1.5~2.8cm/s、干潮 1.4~4.0cm/s

模型—満潮: 3.27cm/s、2.45cm/s (2回計測)

(実海域換算
値)

干潮: 2.90cm/s、1.85cm/s (2回計測)

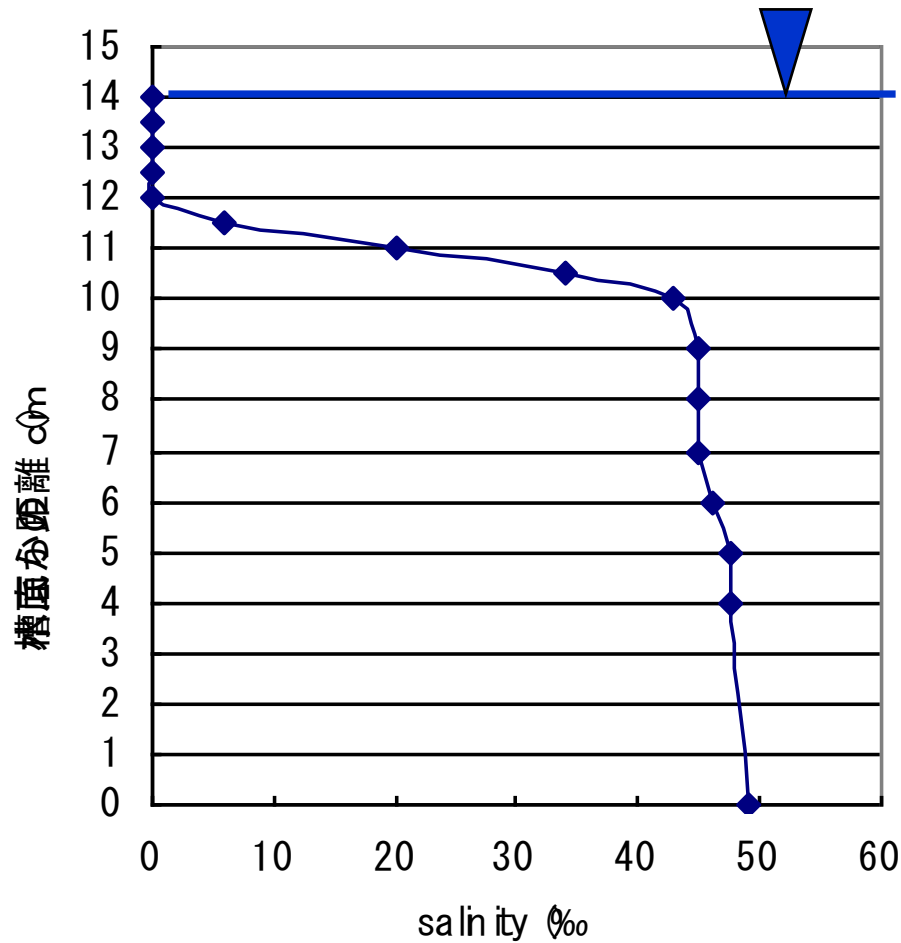
 流速の再現性を確認

実験準備

- 2層成層を作成し、定常になってから
- 成層確認を行った

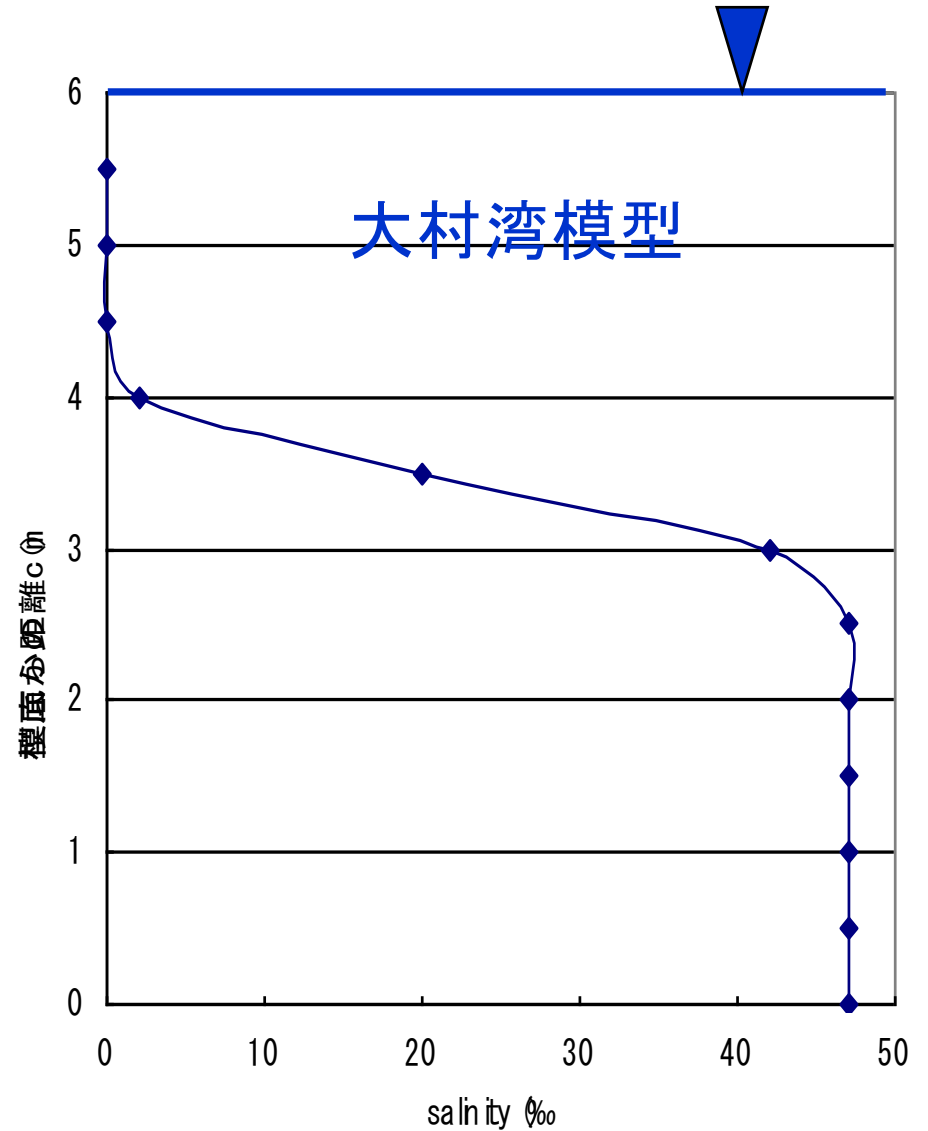
before 11/9 潮満 3 2 5

五ヶ所湾模型

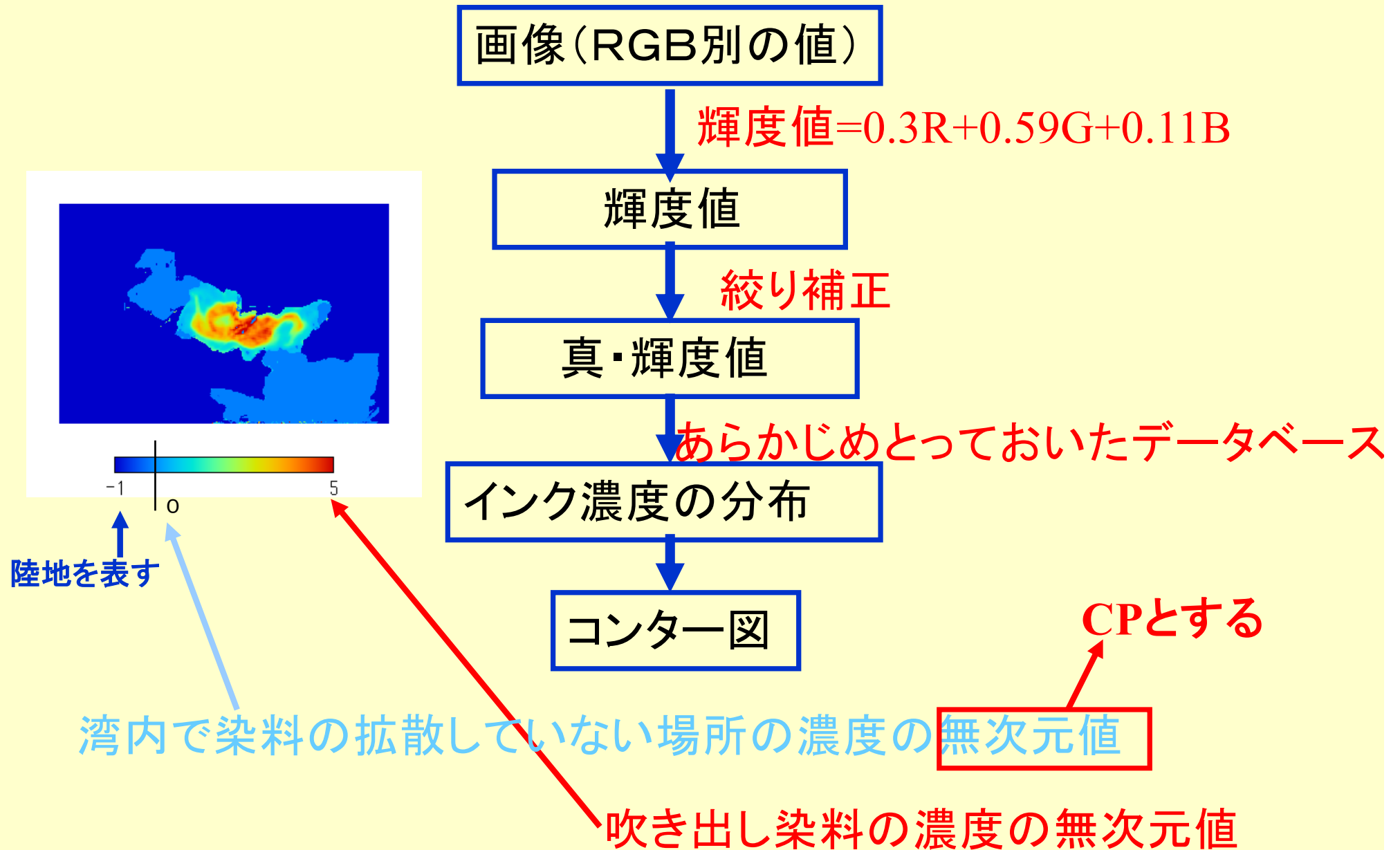


12/22 before 潮満 40

大村湾模型



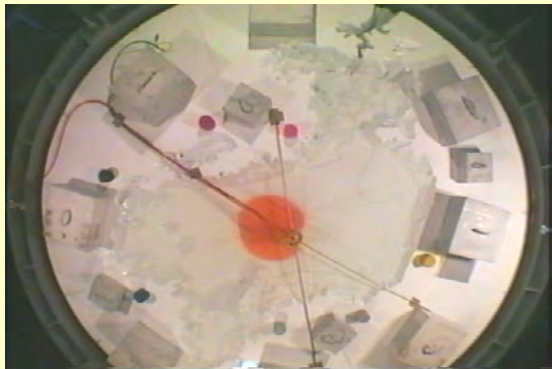
輝度法：輝度値から濃度分布を知る



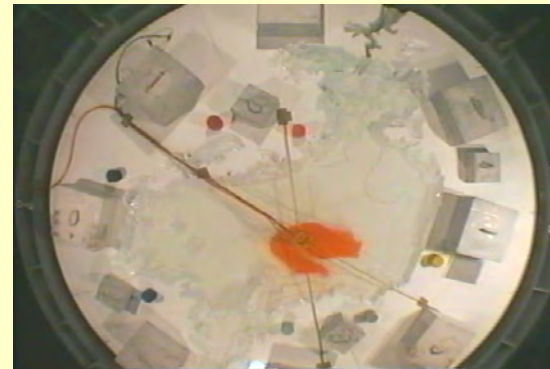
相似則2(「密度流吹き出し量の相似則」)の検証

「密度流吹き出し量の相似則」に従って、A(上層水、下層5%塩水)とB(上層水、下層2.5%塩水)が同じ拡散をするように、流量を設定

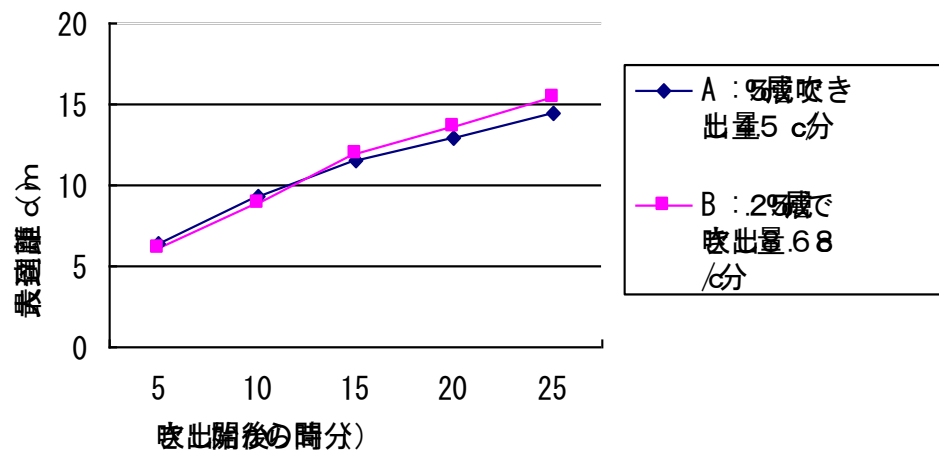
A: 5%成層で吹き出し量4.5cc/分



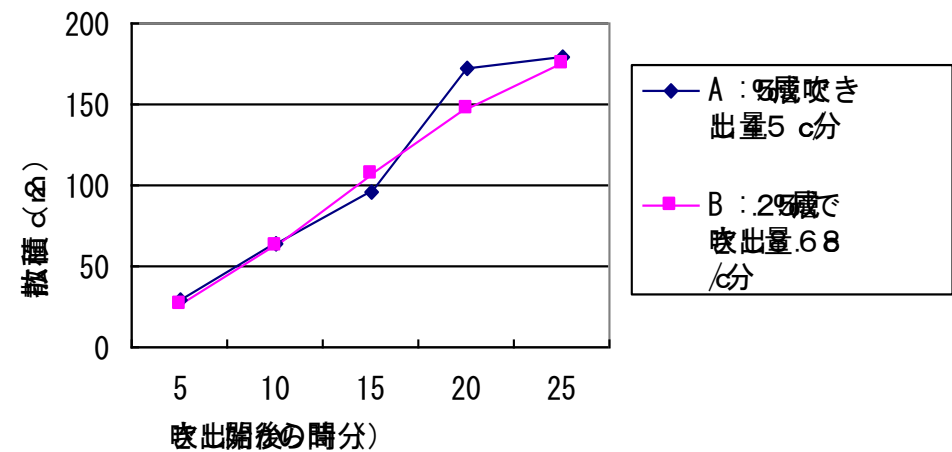
B: 2.5%成層で8.68cc/分



密度流到達距離



拡散散積



実験条件(五ヶ所湾模型)

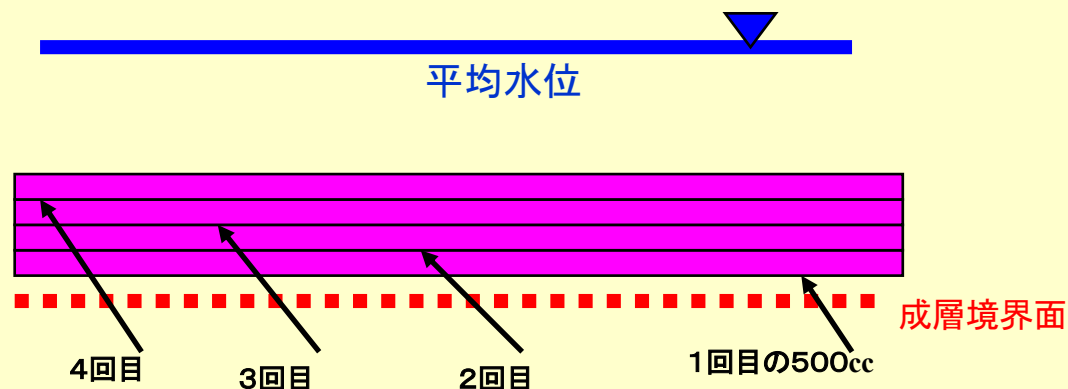
	成層	潮汐	吹き出し流量	備考
①キャリブレーションⅠ	上層:水 下層:5%塩水	——	——	データベースづくり
②キャリブレーションⅡ	上層:水 下層:5%塩水	——	——	「Beer-Lambert」の法則の検証
③成層有り	上層:水 下層:5%塩水	——	4.5cc/分	
④潮汐有り	上層:水 下層:5%塩水	○	4.5cc/分	
⑤成層有り+潮汐有り	上層:水 下層:5%塩水	○	4.5cc/分	

データベースの作り方

キャリブレーションの方法

I : 基本濃度Pの染料500cc(大村湾模型650cc)を注射器にて、出来るだけ湾全体で均等になるように成層境界面に流し込み、定常になるまで待って撮影。これを4回繰り返す。

II : 濃度 $1/2P$ の染料1000cc(大村湾模型1300cc)についてIと同じ行程を2回繰り返す。



キャリブレーションの概念図

基本濃度P:

塩分2%の塩水1000ccに対し、赤インク1ccを入れた時の濃度

「Beer-Lambertの法則」

透過光において

$$I = I_0 e^{-k d}$$

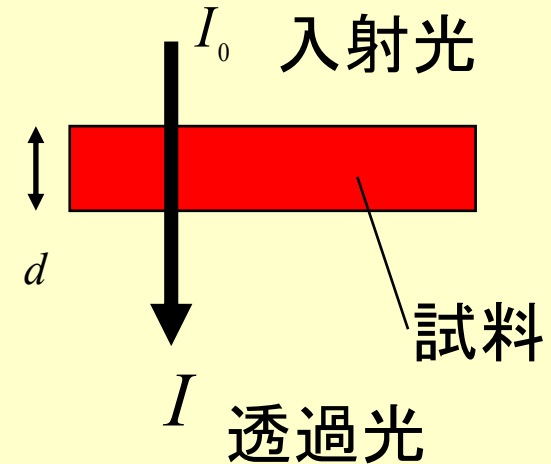
I_0 : 入射強度

d : 試料の厚さ

$k := 2.303\varepsilon$

ε : モル吸光係数 (試料に依存)

I : 透過後観測される光強度

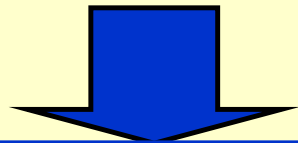


模式図

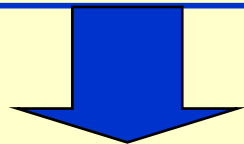
「透過光において、試料の濃度と層の厚さの積が等しければ、輝度は等しい」

キャリブレーションⅡ

本実験にて「Beer-Lambertの法則」
が成立するかの検証



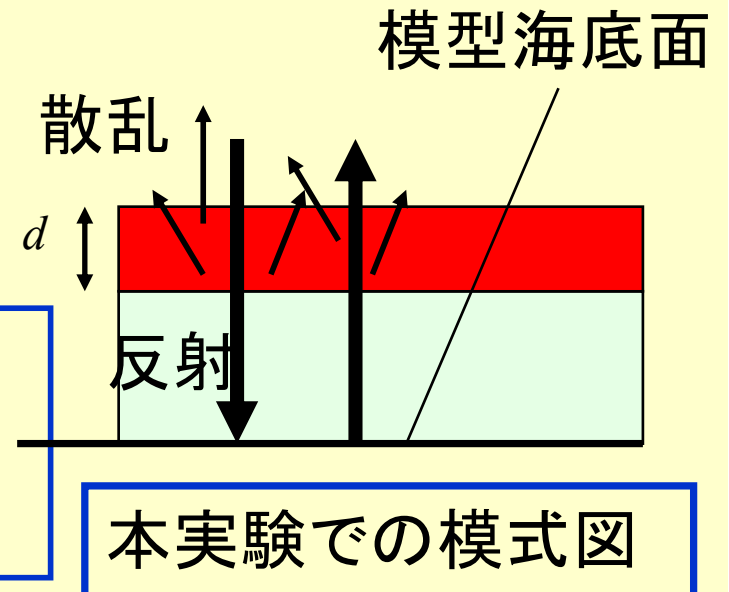
試料の濃度と層の厚さの積が等しい2つ
のサンプルを比較し、輝度が等しくなる
か調べる



キャリブレーションⅠの1層目(:A)とキャリブレーションⅡの1層目(:B)
キャリブレーションⅠの2層目(:P)とキャリブレーションⅡの2層目(:Q) } となると

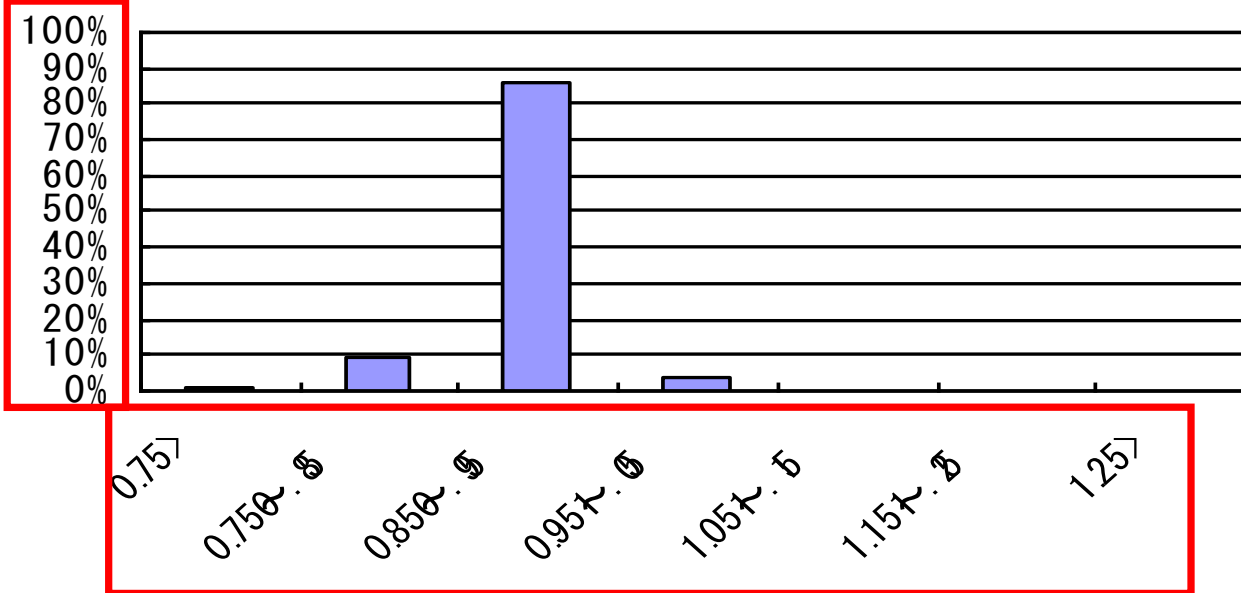
(Aの輝度値) / (Bの輝度値) = 1, あるいは (Pの輝度値) / (Qの輝度値) = 1

で検証される



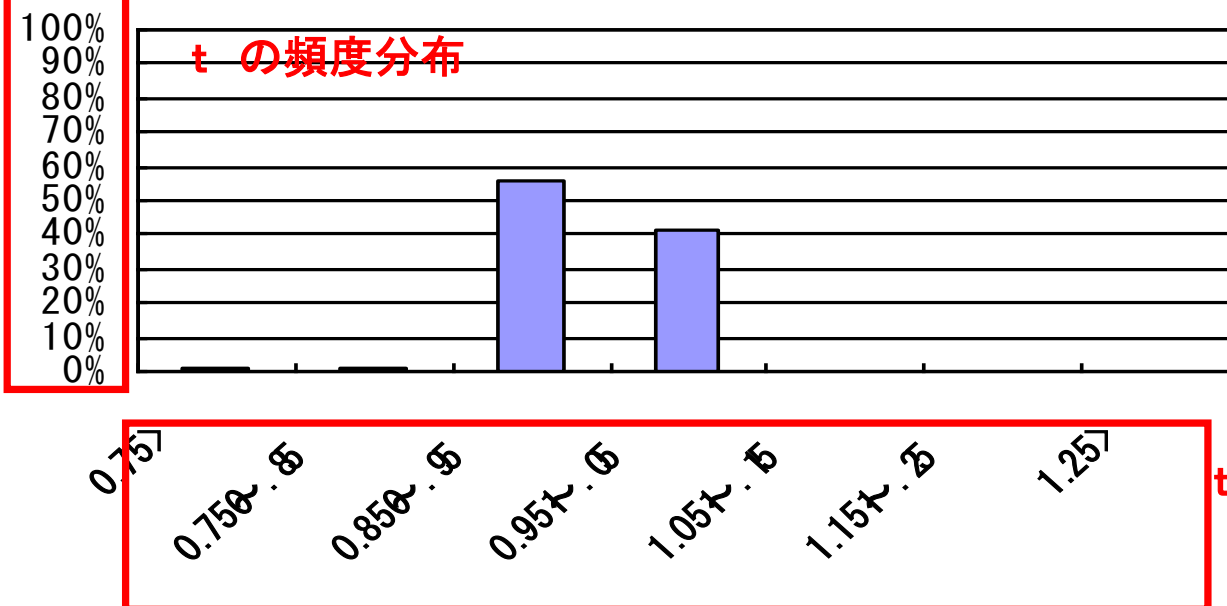
検証結果

s の頻度分布



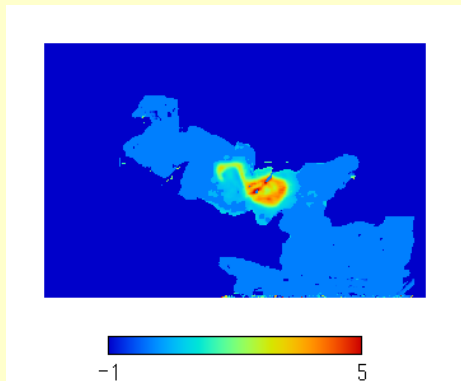
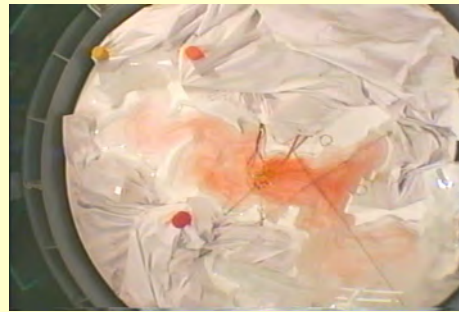
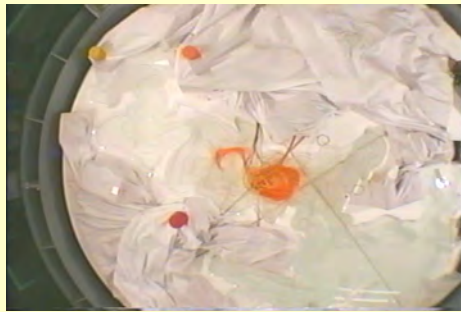
$$s = (\text{Aの輝度値}) / (\text{Bの輝度値})$$

t の頻度分布

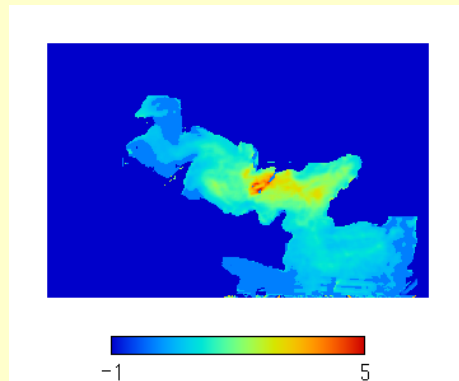


$$t = (\text{Pの輝度値}) / (\text{Qの輝度値})$$

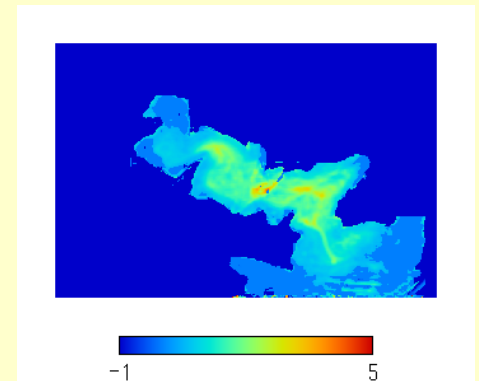
結果例一五ヶ所湾模型20分後 (2日後)



成層有り



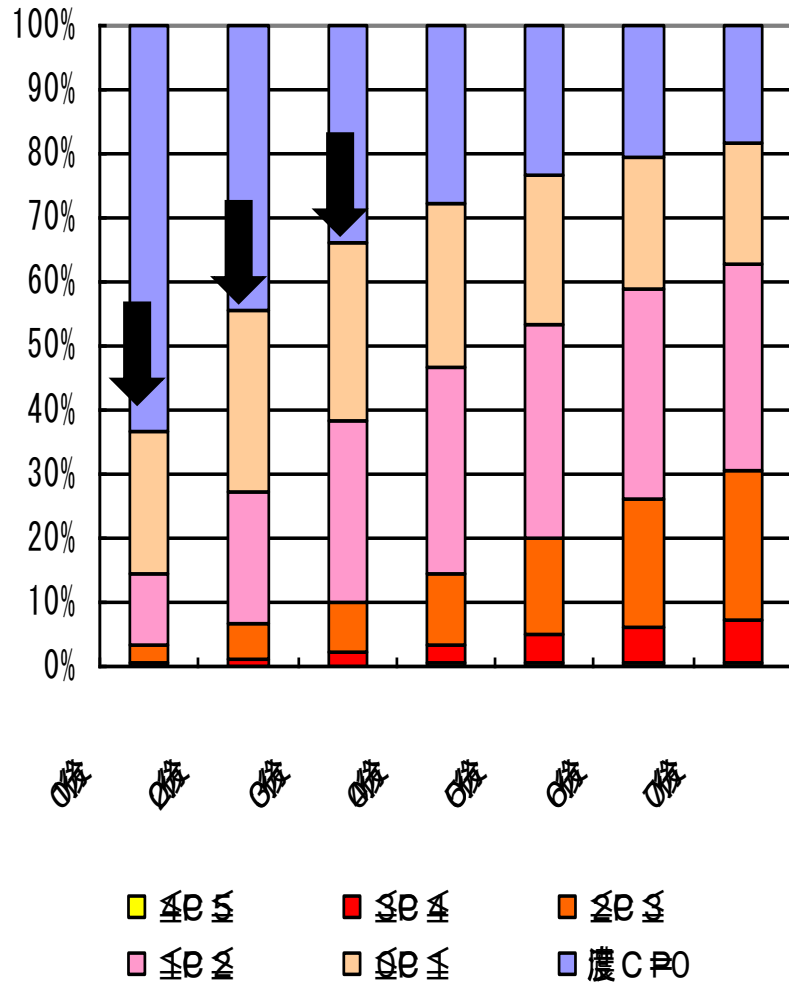
潮汐有り



成層有り+潮汐有り

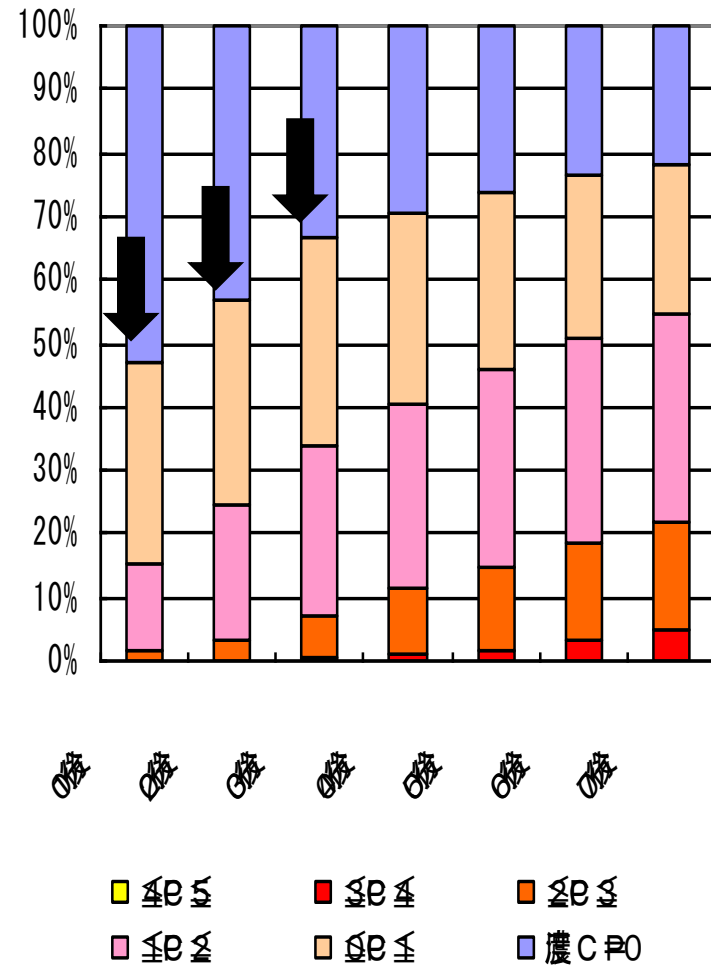
五ヶ所湾考察 — 拡散面積の比較

あ濃染料散積湾面積割合
潮汐



潮汐有り

あ濃染料散積湾面積割合
成層+潮汐



成層有り+潮汐有り

1. 湾全体の拡散には潮汐の影響が大きい

2. 30分後までは「成層有り+潮汐有り」の方が「潮汐有り」より拡散面積が大きく、染料の最大到達距離も長い

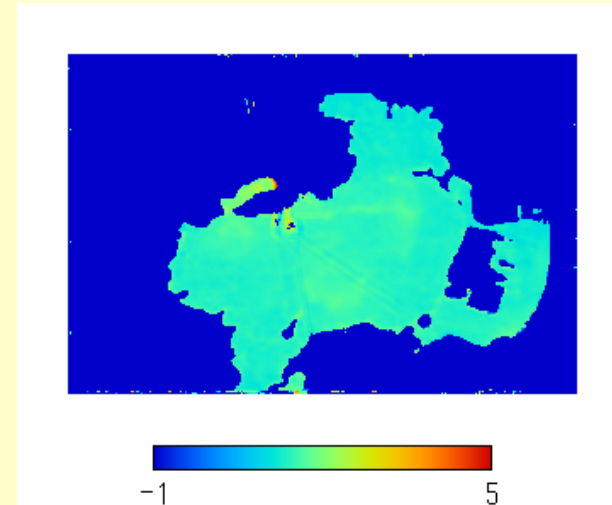
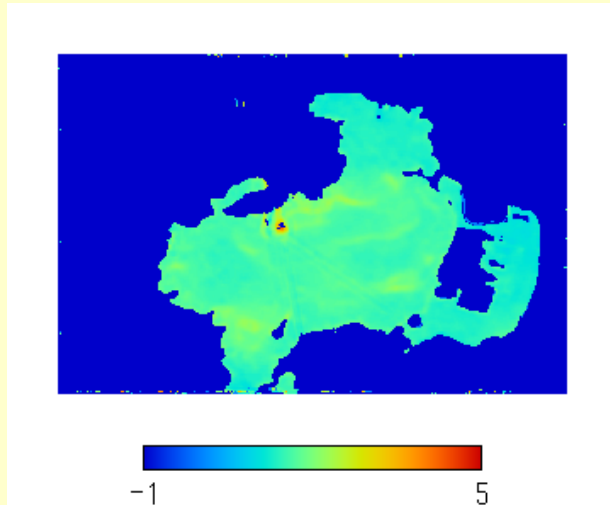
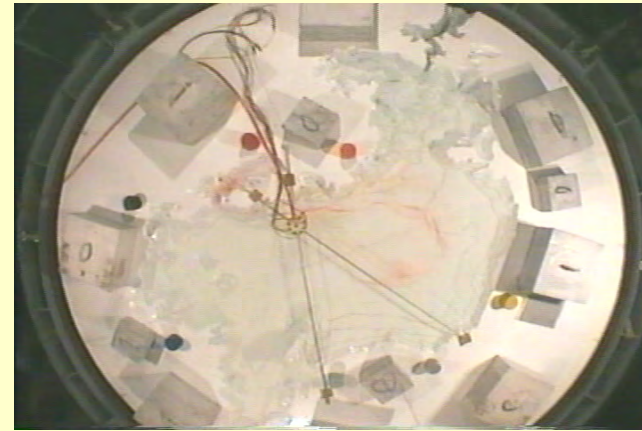
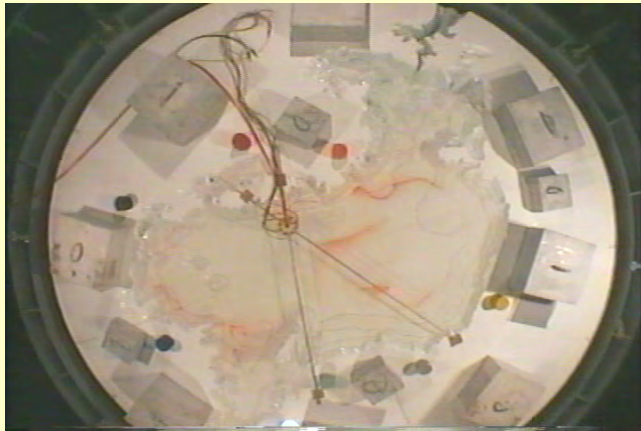
3. 密度流は360度均等ではなく、入り込みやすい方向に進んでいく性質がある



実験条件(大村湾模型)

	成層	潮汐	回転	流量
①キャリブレーション I	上層:水 下層:塩水 5%	—	—	—
②キャリブレーション II	上層:水 下層:塩水 5%	—	—	—
③成層有り +潮汐有り +回転有り	上層:水 下層:塩水 5%	○	○	4.5cc/分
④成層有り +潮汐有り	上層:水 下層:塩水 5%	○	—	4.5cc/分

結果例一大村湾模型170秒後 (2日後)

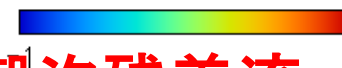
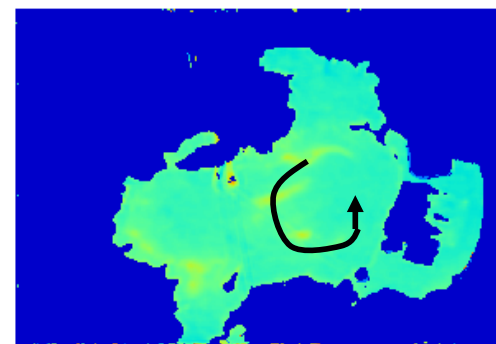
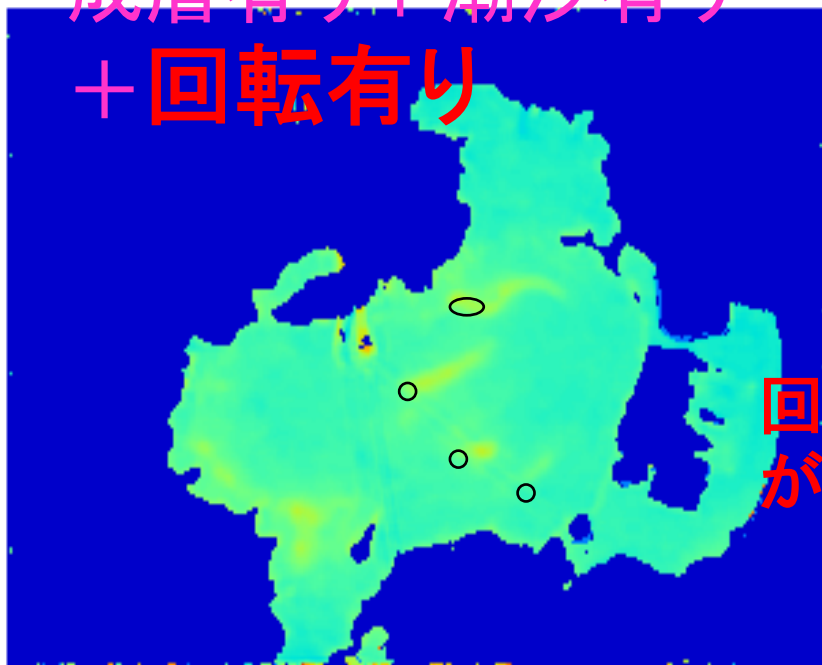


成層有り＋潮汐有り＋回転有り

成層有り＋潮汐有り

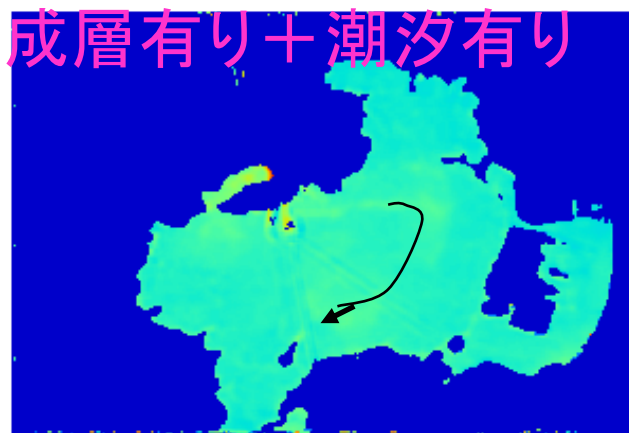
大村湾模型考察

成層有り+潮汐有り
+回転有り



回転の効果により潮汐残差流
が反時計回りになっている

成層有り+潮汐有り



結論

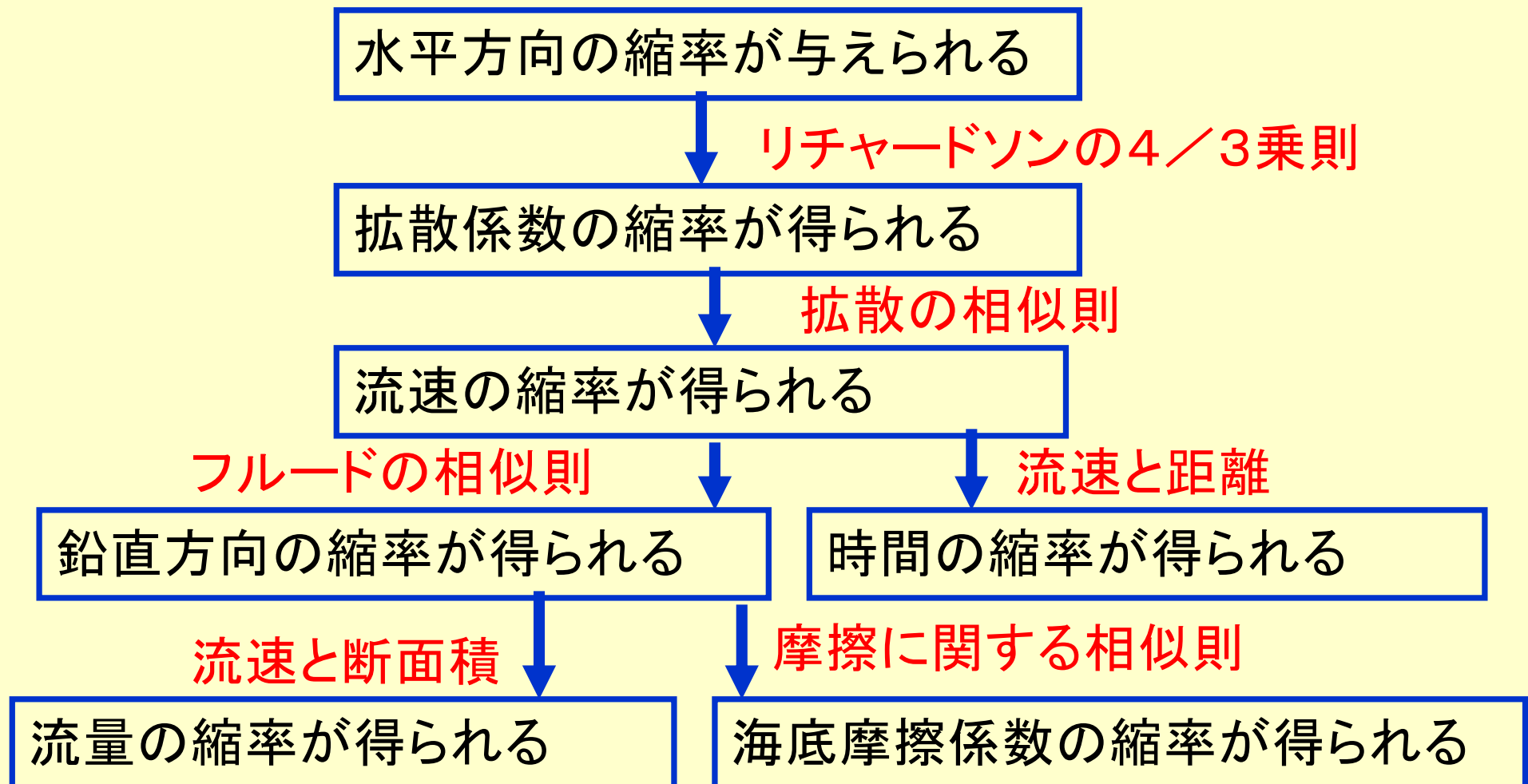
本実験では、成層があって回転し、実海域地形の模型を入れた水理模型実験を行った。その結果次のような知見を得た。

- ◆ 1. 歪み模型を用いた密度流拡散の実験では、流速に関して観測値と同じオーダーであるという結果が得られた
- ◆ 2. 輝度法を用いた水理模型実験方法を検証し、その有効性を確認した
- ◆ 3. 湾全体への拡散への影響は潮汐が支配的であるが、吹き出し装置近傍においては密度流の効果も同程度に大きいことが確認された。従って実海域における密度流拡散装置は物質の輸送に寄与している可能性がある

結論

- ◆ 4.密度流には，360度に均等ではなく入り込みやすい方向を探し潜り込む性質がある
- ◆ 5.大村湾程度のスケールでは湾全体の循環流が回転によって影響を受けることが、本実験によっても確認された。従ってこのような装置による実験は有効である

(補足) 相似則1 (歪み模型の基礎理論)



(補足)相似則2

(「密度流吹き出し量の相似則」)

「密度流吹き出し量の相似則」

⇒ 実際の海域の密度流の代表速さ V_p と模型の密度流の代表速さ V_m の比である V_r と、
実際の海域の代表流速 U_p と模型の代表流速 U_m の比である U_r とを等しくする。

$$V = 2\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0} g h} = 2\sqrt{\rho_r g h} \quad \rightarrow \quad Vr = \sqrt{\rho_r h_r} \quad \text{ただし} \quad \boxed{\rho_r = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}}$$

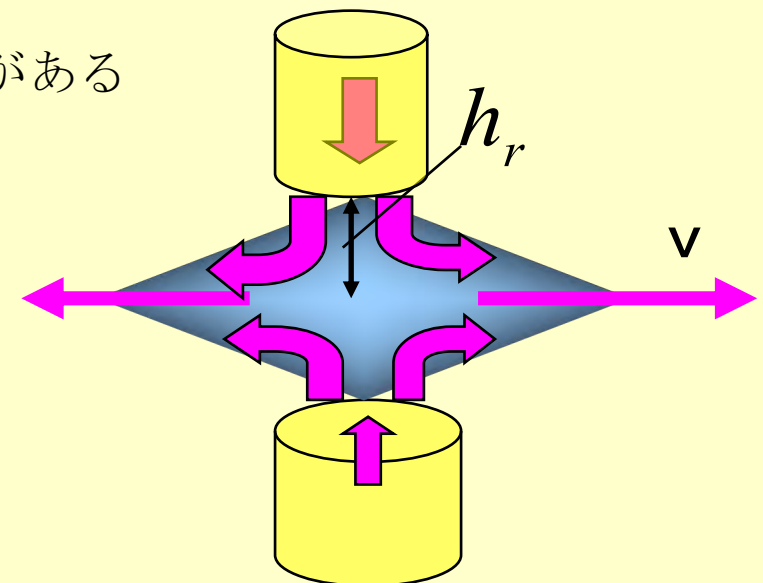
$\Delta\rho$: 成層の上層と下層の密度差

ρ_0 : 成層境界の密度

$V_r = U_r$ となるには $\rightarrow h_r = \frac{L_r^{2/3}}{\rho_r}$ となる必要がある

⇒ 補正吹き出し流量 Q_r は

$$\boxed{Q_r = \frac{L_r^2 h_r}{T_r} = \frac{L_r^2}{\rho_r} \text{ となる}}$$



(補足)解析フローチャート

①ビデオテープに録画した画像をBMP形式でPCに取り込む。

②取り込んだ画像のRGB別の輝度値を、「BMP2CVS Ver.1.2」というソフトを用いて求める。

③ RGB別の輝度値256階調(0~255)を次式に従って合成し、輝度値を求める。

$$\text{Brill} = 0.3R + 0.59G + 0.11B$$

④横(I)720×縦(J)480ピクセルの各ピクセルにつき周囲9×9個の平均をとる。

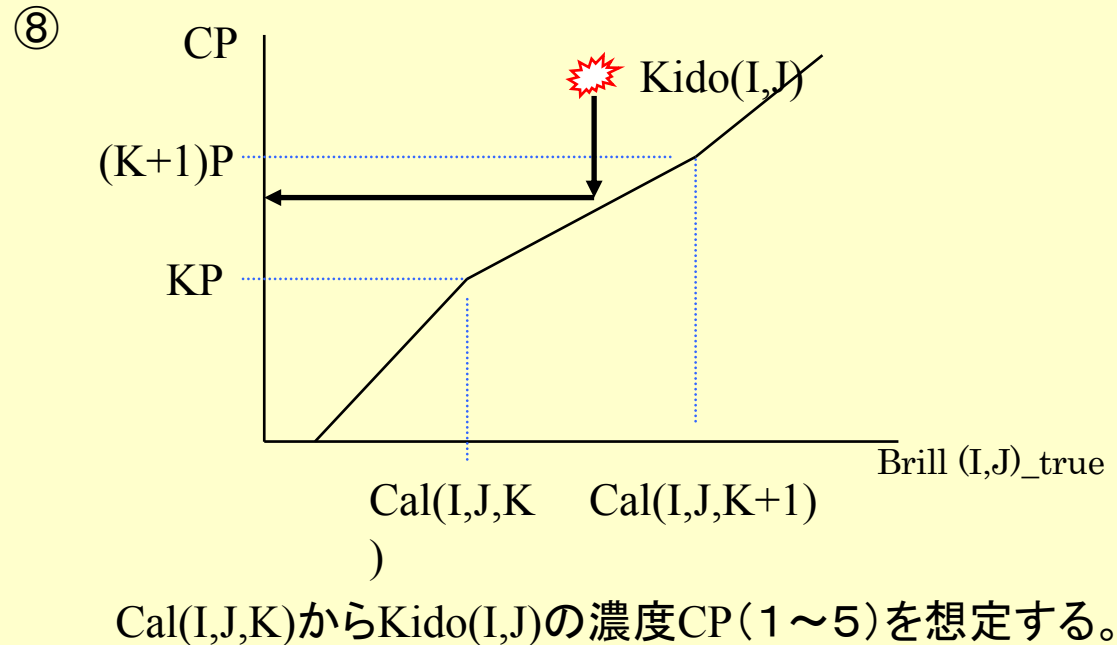
⑤次式を用いてカメラの絞り補正に対する、補正を行う。

$$\text{Brill}(I,J)_{\text{true}} = (\text{Brill}(I,J) - A(I,J)) / (B(I,J) - A(I,J)) \times 100$$

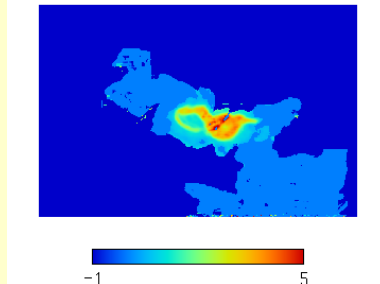
(A,Bは色見本の輝度値)

⑥キャリブレーション I の 1～4層に⑤までの操作を加え、濃度分布データベース $Cal(I,J,K)$, $K=1\sim 4$ を得る。

⑦濃度分布を知りたい画像に⑤までの操作を加え、 $Kido(I,J)$ を得る。



⑨



さらに陸地の $Kido(I,J)$ が $Kido(I,J)=-1$ になるように補正を加え、左図のようなコンター図を得る。

(補足) 回転が定常になるまでの時間

回転流体が定常になるまでの時間Tは

$$T = 3^{-1/2} \Omega^{-1} = 3\nu / \Omega^{-1/2} H^2$$

ただし、 ν : 動粘性係数(m^2 / s)

Ω : 回転数(rpm)

H : 水深(m)

E_k : エクマン定数

から求まるが、これに

$$\nu = 1.0 \times 10^{-6}$$

$$\Omega = 0.38$$

$$H = 0.178$$

を代入すると $T = 45$ (分)が求まる。

(補足)本実験について

- ◆ 成層があって回転し、実海域地形の模型を入れた水理模型実験
- ◆ 輝度値を濃度に変換する際に用いた方法