

沖縄沿岸域での内部波による表層水と深層水の交換現象

Exchange phenomenon of surface water and deep water by internal wave in Okinawa coastal zone

北海道大学工学研究科環境資源工学専攻 ○学生員 東佳史 (Yoshifumi Higashi)
北海道大学助教授工学研究科環境資源工学専攻 正会員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. 序論

1.1 はじめに

海水は上層が表層水、下層が深層水と、二成層状態を形成している。この二層は海水の密度の差からなり、その境目は一般には、500m～1000mの間に存在する。

深層水は一般に表層水より温度が低く、成分も表層水のそれより高栄養であることから密度差が生じ、二成層分布が生じている。またそのほかにも清浄性で優れているなどの特性があげられる。それらの特性により様々な活用があり、深層水は今日高く評価され、専門的にも広く使われている。

深層水は非常に利便性の高いものであるが、はるか深海にあるがため、ポンプで引き上げる、もしくは自然の条件が整わない限り浮上してこない。

この条件を、浮上する深層水の計算を行うことで、条件を計算から明確に導き出す。これにより、二成層状態の交換現象を明らかにすることが出来ると期待している。

1.2 概要・目的

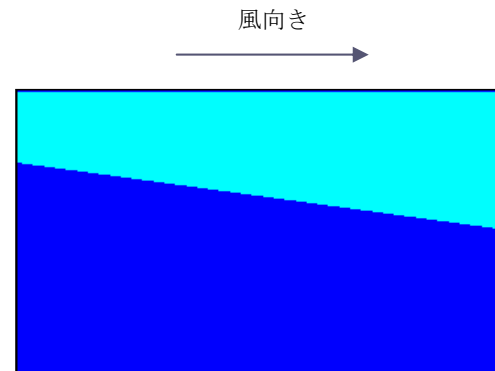
沖縄沿岸では複雑な地形の分布、さらにはさんご礁の存在により、先に述べた二成層の境目は、80m付近に存在しており、温度では5℃、密度では、 2.0kg/m^3 の差が生じている。この密度差は温度差によって生じているが、ほかには栄養塩の濃度差によるものも考えられる。この栄養塩によりこの一帯は様々な生物の営み、特に、ジンベイザメなどの大型魚の回遊域となっていて好漁場にもなっていることなどが知られている。

よって、沖縄沿岸での海域の生態系を考えたとき、これはもっとも重要な要因の一つであり、本研究では、風により発生する海水の流れを計算することで、目で見ることの出来ない流れを再現し、さらには実際のデータと比較し、これらの条件、現象を明らかにしようとするものである。

2. 現象および計算方法

2.1 現象

流体の密度が不均一な時、軽い流体には浮力が、重い



図—1 風により二層が移動したときの模式図

流体には沈む力が発生し、二成層状態が形成されるのであるが、ここに風が発生すると、せん断力により、図—1のように上層の流体が風下側に移動し、同時に二層の境界面にもせん断力が作用するので、下層が風上側に移動することになる。それらは重力と釣り合うまで傾きつづけ、風がやんだときお互いに元の位置に戻ろうとするため、流れが誘起される。この流れは吹送流と呼ばれ、内部波を引き起こす要因の一つに挙げられる。

本研究ではこの吹送流によって誘起される流れによって発生する二層間の交換現象を考え、計算を実行する。

2.2 計算方法

簡略のため、図—2のような完全に二成層形成で理想的な二層内部波の計算を行う。

未知数はx方向速度u、y方向速度v、水中の圧力p、そして塩水の密度ρである。

○流れの計算

・連続の式

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

・流体の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - g \quad (3)$$

・ 温度の拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = K_t \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

・ 物質輸送の式

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

・ 温度変化と濃度変化を考慮した浮力項の表現

これは、運動方程式の浮力の項に作用するのであるが、その浮力の項は、

$$-g \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -g \left[\beta (T_0 - T) + \frac{\rho_w}{\rho} (c - c_0) \right] \quad (6)$$

また、 β は、

$$\beta = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho - \rho_0}{T - T_0} \text{ である.}$$

(ρ_w は水の密度、 c_0 は濃度の初期値、 T_0 は温度の初期値、 g は重力加速度、 t は時間、 ρ_0 は密度の初期値、 ν は渦動粘性係数、 K_t 、 D は温度、濃度の拡散係数、 T は水温、 x 、 y はそれぞれ水平方向、鉛直方向の座標を表している.)

ここで、これらの式で、(1)、(2)、(3)、(6) から4つの未値数を導く。

○吹送流の計算

次に、吹送流についての式を表す。先に述べたように、風が吹くと、水面、内部にせん断力が生じる。風による応力 w_x と、せん断力 τ_{yx} は同値であり、これらは次式で表される。

・ 風の応力の式

$$W_x = \gamma^2 \rho_a W \quad (7)$$

・ 水面でのせん断力の式

$$\tau_{yx} = W_x \quad (8)$$

・ 内部（境界面）でのせん断力の式

$$\tau_{yx} = \nu \rho \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

・ 河床でのせん断力の式

$$\tau_{yx} = u_* |u_*| = C_b u |u| \quad (10)$$

ここで、 γ は 0.01~0.03 の定数、 ρ_a は空気の密度、 W は風速、 ν は渦動粘性係数、 u_* は摩擦速度、 C_b は河床の摩擦係数、 x 、 y はそれぞれ水平方向、鉛直方向の座標を表し、

(10)式に絶対値が含まれるのは今右に吹く風を正としているので左に吹く風は負となるので、二乗によって負の項が消えるのを防ぐためである。

さらに、これらの項を、基礎方程式のどの部分に作用させるかであるが、これらは運動方程式の粘性項に作用することになる。

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yx}}{\rho} \right) \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &\approx \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_{xy}}{\nu} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yx}}{\rho} \right) \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &\approx \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

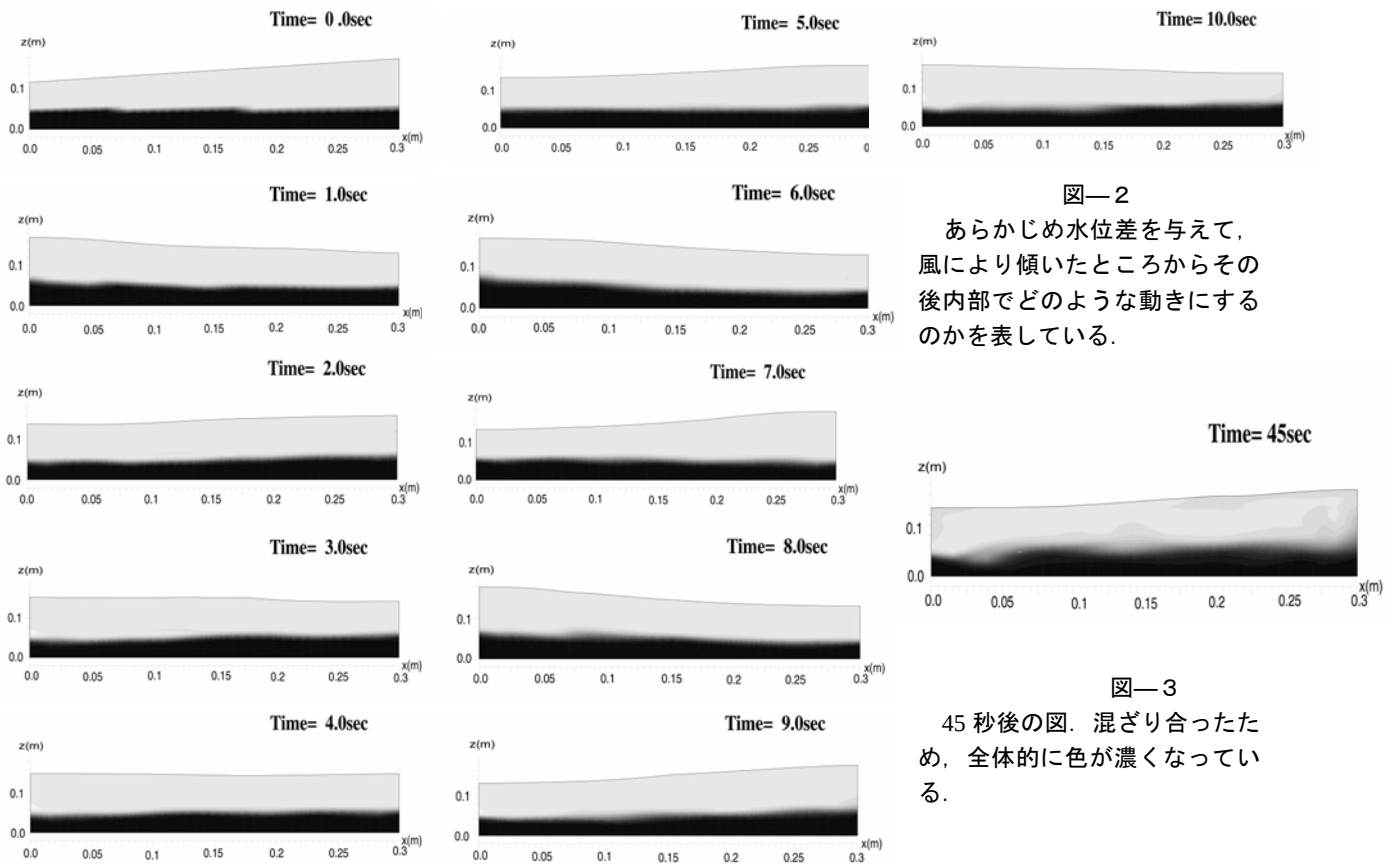
(2)、(3)式の右辺はもともと上記の応力表示を簡略化したもので、直接はここに代入して計算する。

3. 計算の実行および結果

以上の式から計算を実行するわけだが、まずこれらを実行する前に図—2に示す計算を行った。これは、風によりあらかじめ水面が傾いており、風がやんだ瞬間、つまり、水位差が生じている場合の流体の動きである。上層の色が薄い部分が表層水を、下層の色の濃い部分は深層水をそれぞれ想定している。条件としては、両端を壁で固定して、初めの水位差を 0.15m で与えている。また、密度差は濃度で与えており、3%の差を与えている。スケールは図に示す通りである。

0秒から45秒まで計算し、10秒後に至るまでの単位秒ごとの結果を示したものが図—2であり、計算の45秒後の最終形を示しているものが図—3である。

境界にせん断力が作用するため下層も運動しているのがわかる。また図—3下層の流体が浮上して二層が混ざり合っている様も見てとれる。



図—2

あらかじめ水位差を与えて、風により傾いたところからその後内部でどのような動きにするのかを表している。

図—3

45 秒後の図。混ざり合ったため、全体的に色が濃くなっている。

よって、水位差の振動による交換現象が示せた。

次に図—4、図—5に示すのは初めから完全に分離した理想的な二層に分かれた流体が、風によりどのような振る舞いを見せるかを表したものである。

条件として共通しているのは水面に風速を 5m/s で左から右に風を吹かせていること、密度差も図—2と同じく濃度差を 3%として計算していること、さらには、スケールでも同じにしている。違う点は図—4では両端を固定しているところを、図—5では右側は開放しているというところである。

この両者の条件の違いが何を示唆しているかという、両端固定条件は、池や湖沼、さらには湾内等、閉鎖的な場所を考えた時に扱う。例えば、網走湖での青潮の発生現象などの計算に用いることができる。対して右端開放の条件であるが、これは外洋に面した開放性海岸の計算をするときに用いることができる。つまり、沿岸から直接外洋に面している沖縄での内部波の計算ではこの条件を考える。

ここで、図—4図—5で、計算は 150 秒ずつ図示している。これはさきほどの水位差の振動と違ってなかなか動き出さないからである。

図—4の両端固定では、初めの流れが右に動くわけだが右端が壁であるからそこで渦が発生する。そして次第に対流が発生し、そうして 450 秒後に示すように混ざり合う。両端固定の条件下では、今回計算を行ったスケールが小さ

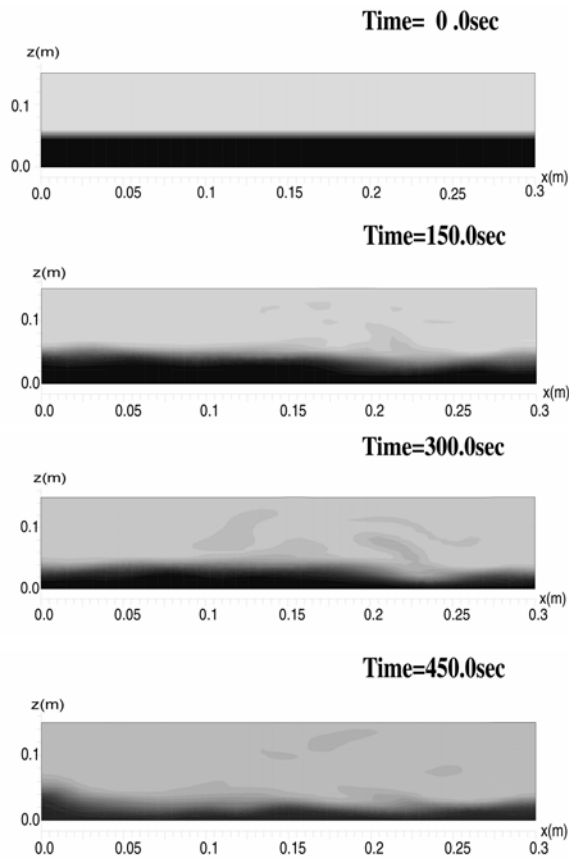
いせいもあるが、対流が発生するので図—2に示すような水位差は生じないで混ざり合った。しかし、内部波が発生し、交換現象が生じたところから、池や湖沼、閉鎖性海岸などでの現象が示せた。

最後に図—5であるが、図でみてわかるようにしばらく変化しない。しかし、300 秒後の図で下層がわずかにではあるが傾いてきているのがわかる。そして次に示す 450 秒後の図で混ざりはじめる。よって本研究における沖縄沿岸などの開放性海岸においても風による交換現象が示せた。

5 おわりに

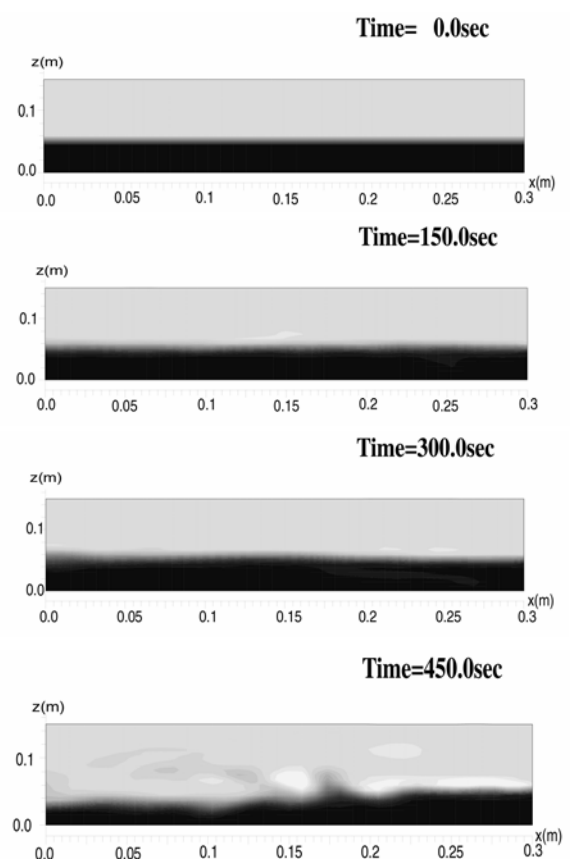
湾内などの閉鎖性海岸で水質があまりよくならないのは流入する海水が少なく、かわりにそこにずっとある海水が混ざり合い続けているからだということがわかった。だからといって開放性なのをいいことに、外洋に流れていくからと保全をそっちのけで考えてしまうことも避けなければならない。

本研究は風により局所的に発生する内部波を明らかにするべく取り組んでいるわけであるが、これは人間活動の影響を受けて著しく変化してしまった沖縄沿岸の生態系を保全するために、必要不可欠なものだといえる。そして、



図—4

両端固定で右向きに風を与え吹送流の計算を行ったもの



図—5

右側開放で右向きに風を与え吹送流の計算を行ったもの

本研究は生態系を維持するために、水理学的に考えた保全のほんの一例である。

今回のプログラムは深層水の例に限らず、二成層状態を形成する様々な流体にたいしても（例えば、網走湖のように海水と真水の二成層状態が、）適用でき、非常に有用なものであると期待する。

また、本研究により、はるか深海にある深層水が浮上してくることを期待できるので、深層水という恩恵をさらに効率よく受けることができるようになることも期待している。

参考文献

- 1)北村康司，仲座栄三，津嘉山正光，玉城幸治，Shark RAHAMAN：沖縄本島残波海域における潮流及び内部波に関する研究，土木学会論文集 No.768/II-68, 131-146, 2004. 8
- 2)川村洋，土方邦夫：熱と流れのシュミレーション，丸善株式会社，1995
- 3)池永均，向山公人，大島伸介，吉本健太郎，山田正：網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較，土木学会論文集， No.775/II-69, 11-27, 2004.11