Ｂ－１２　　　平成18年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第63号

網走湖の青潮発生に及ぼす風速・風向、密度鉛直分布の影響

Influence of wind velocity,wind direction and vertical density distribution on Aoshio occurrence in Abashiri Lake

北見工業大学大学院　○学生員　佃　知樹　(Tomoki Thukuda)
北見工業大学工学部　フェロー　佐渡公明　(Kimiteru Sado)
北見工業大学大学院　学生員　杉山一郎　(Ichiro Sugiyama)

1.　はじめに

道東の汽水湖を代表する網走湖は、富栄養化の影響による水質悪化が問題となっており、青潮やアオコの発生は湖内の生物等に大きな被害を与えている[1]。そこで水質改善にあたり、そのメカニズムを解明することが必要となり、湖内の鉛直流や鉛直密度分布を計算できる三次元密度流の数値解析を行った[2),3),4)]。

本研究では数値解析にあたり、モデルの基礎式として、非圧縮性粘性流体の連続式、水平方向の運動方程式、静水圧分布近似の鉛直方向運動方程式を用い、密度の拡散方程式については Cubic-Interpolated Pseudo-Particle(CIP)法を適用した。網走湖における数値解析プログラムについては FORTRAN を用いて開発した。以上から風速・風向、密度鉛直分布に対する青潮発生条件の検討を行った。なお、数値解析を行うにあたり流れに関しては差分法を用いて陰解法で計算した。

2.　三次元密度流の数値解析法[2)]

2.1　運動方程式・連続式

初めに、座標軸の原点を水面にとりセル番号 i, j はそれぞれ x, y の増加する方向に, k は深さ方向に番号付けするものとする。

Navier-Stokes の運動方程式より水平(x,y)方向の流速成分(u,v)を計算する際，すべての流速と水位を陰形式で差分を用いて表現すると、これらの式により構成される未知数の係数マトリックスは膨大な次数となり連立一次方程式から答えを導き出すことは難しい。そこで最初に水平方向の運動方程式を鉛直方向に積分して得られた式(1)より水平方向の線流量 $M^{(n+1)}$, $N^{(n+1)}$を全領域で求める。

$$
\begin{aligned}
&\frac{M^{(n+1)}_{i-(1/2),j}-M^{(n)}_{i-(1/2),j}}{\Delta t}+\\
&\sum_{k=1}^{K}\left\{\frac{h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\Delta x_{i-1+a}}u^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\left(u^{(n)}_{i-(1/2)+a,j,k}-u^{(n)}_{i-(3/2)+a,j,k}\right)\right\}\\
&+\sum_{k=1}^{K}\left\{\frac{h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\Delta y_{j-(1/2)+b}}v^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\left(u^{(n)}_{i-(1/2),j+b,k}-u^{(n)}_{i-(1/2),j-1+b,k}\right)\right\}\\
&-f\sum_{k=1}^{K}\left(h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}v^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\right)\\
&+H^{(n)}_{i-(1/2),j}\frac{g\Delta t}{\Delta x_{i-(1/2)}}\left\{\frac{M^{(n+1)}_{i-(1/2),j}-M^{(n+1)}_{i+(1/2),j}}{\Delta x_i}\right.\\
&+\frac{N^{(n+1)}_{i,j-(1/2)}-N^{(n+1)}_{i,j+(1/2)}}{\Delta y_j}-\frac{M^{(n+1)}_{i-(3/2),j}-M^{(n+1)}_{i-(1/2),j}}{\Delta x_{i-1}}\\
&\left.-\frac{N^{(n+1)}_{i-1,j-(1/2)}-N^{(n+1)}_{i-1,j+(1/2)}}{\Delta y_j}\right\}+\frac{(p^{(n)}_{ai,j}-p^{(n)}_{ai-1,j})}{\Delta x_{i-(1/2)}}\sum_{k=1}^{K}\frac{h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\rho^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}\\
&+g\rho^{(n)}_{i-(1/2),j,1}\frac{(\zeta^{(n)}_{i,j}-\zeta^{(n)}_{i-1,j})}{\Delta x_{i-(1/2)}}\sum_{k=1}^{K}\frac{h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\rho^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}\\
&+\frac{g}{\Delta x_{i-(1/2)}}\sum_{k=1}^{K}\frac{h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\rho^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}\left\{\sum_{l=1}^{k-1}(\rho^{(n)}_{i,j,l}-\rho^{(n)}_{i-1,j,l})h^{(n)}_{i-(1/2),j,l}\right.\\
&\left.+\frac{1}{2}(\rho^{(n)}_{i,j,k}-\rho^{(n)}_{i-1,j,k})h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\right\}\\
&-\sum_{k=1}^{K}\frac{1}{\rho^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}\left(\tau^{(n)}_{i-(1/2),j,k-(1/2)}-\tau^{(n)}_{i-(1/2),j,k+(1/2)}\right)\\
&-\frac{1}{\Delta x_{i-(1/2)}}\sum_{k=1}^{K}\left\{A_{xk}h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\left(\frac{u^{(n)}_{i+(1/2),j,k}-u^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\Delta x_i}\right.\right.\\
&\left.\left.-\frac{u^{(n)}_{i-(1/2),j,k}-u^{(n)}_{i-(3/2),j,k}}{\Delta x_{i-1}}\right)\right\}\\
&-\frac{1}{\Delta y_j}\sum_{k=1}^{K}\left\{A_{yk}h^{(n)}_{i-(1/2),j,k}\left(\frac{u^{(n)}_{i+(1/2),j+1,k}-u^{(n)}_{i-(1/2),j,k}}{\Delta y_{j+(1/2)}}\right.\right.\\
&\left.\left.-\frac{u^{(n)}_{i-(1/2),j,k}-u^{(n)}_{i-(1/2),j-1,k}}{\Delta y_{j-(1/2)}}\right)\right\}\\
&=0\quad at(i-(1/2),j)\qquad\cdots(1)
\end{aligned}
$$

ここに、M,N : x,y 方向線流量,
Δx, Δy, Δz,Δt : 差分における空間の格子間隔,時間間隔,
u,v,w : x,y,z 軸方向の流速,　t : 時間=$n\Delta t$,
h : 各格子の層厚,　f : コリオリ係数,　H : 全水深,
p_a : 大気圧,　g : 重力加速度,　ζ : 基準水平面からの水位,
ρ : 水密度,　τ : せん断応力
A_{xk},A_{yk} : 第 k 層の水平渦動粘性係数
a,b,d,e : 上流差分をとるためのパラメータ

非圧縮性連続式を鉛直方向に積分し，差分にした式(2)を用いて $M^{(n+1)}$, $N^{(n+1)}$から水位$\zeta^{(n+1)}$を計算する.

$$
\zeta^{(n+1)}_{i,j}=\zeta^{(n)}_{i,j}+\Delta t\left(\frac{M^{(n+1)}_{i-(1/2),j}-M^{(n+1)}_{i+(1/2),j}}{\Delta x_i}+\frac{N^{(n+1)}_{i,j-(1/2)}-N^{(n+1)}_{i,j+(1/2)}}{\Delta y_j}\right)\qquad\cdots(2)
$$

Navier-Stokes の運動方程式を差分で表し、k から $k+1$ を引いた式と線流量の定義式で作った連立一次方程式を解き流速 $u^{(n+1)}$ 、$v^{(n+1)}$ を求める。

さらに，求められた $u^{(n+1)}$，$v^{(n+1)}$，$\zeta^{(n+1)}$を連続式より変形して得られた式に代入することによって下層位より順次 $w^{(n+1)}$を求めることができる。

2.2 CIP 法による密度の拡散方程式

密度の拡散方程式を解く場合、風上差分を使うと数値拡散を起こす[5]。そこで、本研究は密度の傾きを三次補間することにより数値拡散を少なくすることが出来る CIP 法による解法を試みた[6]。CIP 法で三次元移流方程式を解く場合、三次関数の係数を式(3)のように 20 個の未知数で表すことが出来る。20 個の未知数 A1~E4 は隣り合う 8 つの格子点に対する 20 個の連立一次方程式を解くことにより、次式のように求まる。

$$
\begin{aligned}
c^{*}_{i,j,k} &= A1 + B1x + C1x^2 + D1x^3 + E1y + A2xy \\
&\quad + B2x^2y + C2y^2 + D2xy^2 + E2y^3 + A3z \\
&\quad + B3xz + C3x^2z + D3yz + E3xyz + A4y^2z \\
&\quad + B4z^2 + C4xz^2 + D4yz^2 + E4z^3
\end{aligned}
\qquad \cdots(3)
$$

$$A1 = c_{i,j,k}$$

$$B1 = c_{x\,i,j,k}$$

$$C1 = \left(-3c_{i,j,k} + 3c_{i+1,j,k} - 2\Delta x c_{x\,i,j,k} - c_{x\,i+1,j,k}\Delta x\right)/\Delta x^2$$

$$D1 = \left(2c_{i,j,k} - 2c_{i+1,j,k} + c_{x\,i,j,k}\Delta x + c_{x\,i+1,j,k}\Delta x\right)/\Delta x^3$$

$$E1 = c_{y\,i,j,k}y$$

$$
\begin{aligned}
A2 = \Bigg\{&\left(\frac{-c_{i,j,k}}{\Delta y}\right) + \left(\frac{c_{i+1,j,k}}{\Delta y}\right) + \left(\frac{c_{i,j+1,k}}{\Delta y}\right) - \left(\frac{c_{i+1,j+1,k}}{\Delta y}\right) \\
&- \left(\frac{c_{x\,i,j,k}\Delta x}{\Delta y}\right) + \left(\frac{c_{x\,i,j+1,k}\Delta x}{\Delta y}\right) - c_{y\,i,j,k} + c_{y\,i+1,j,k}\Bigg\}/\Delta x
\end{aligned}
$$

$$B2 = \left(c_{i,j,k} - c_{i+1,j,k} - c_{i,j+1,k} + c_{i+1,j+1,k} + c_{x\,i,j,k}\Delta x - c_{x\,i,j+1,k}\Delta x\right)/\Delta x\Delta y^2$$

$$C2 = \left(-3c_{i,j,k} + 3c_{i,j+1,k} - 2c_{y\,i,j,k}\Delta y - c_{y\,i,j,k}\Delta y - c_{y\,i,j+1,k}\Delta y\right)/\Delta y^2$$

$$
\begin{aligned}
D2 = \Bigg\{&\left(\frac{c_{i,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{c_{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{c_{i,j+1,k}}{\Delta x}\right) + \left(\frac{c_{i+1,j+1.k}}{\Delta x}\right) \\
&+ \left(\frac{c_{y\,i,j,k}\Delta y}{\Delta x}\right) - \left(\frac{c_{y\,i+1,j,k}\Delta y}{\Delta x}\right)\Bigg\}/\Delta y^2
\end{aligned}
$$

$$E2 = \left(2c_{i,j,k} - 2c_{i,j+1,k} + c_{y\,i,j,k}\Delta y + c_{y\,i,j+1,k}\Delta y\right)/\Delta y^3$$

$$A3 = f_{z\,i,j,k}z$$

$$
\begin{aligned}
B3 = \Bigg\{&\left(\frac{-c_{i,j,k}}{\Delta x}\right) + \left(\frac{c_{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) + \left(\frac{c_{i,j,k+1}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{c_{i+1,j,k+1}}{\Delta x}\right) - f_{x\,i,j,k} \\
&+ f_{x\,i,j,k+1} - \left(\frac{c_{z\,i,j,k}\Delta z}{\Delta x}\right) + \left(\frac{c_{z\,i+1,j,k}\Delta z}{\Delta x}\right)\Bigg\}/\Delta z
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C3 = \Bigg\{&\left(\frac{c_{i,j,k}}{\Delta z}\right) - \left(\frac{c_{i+1,j,k}}{\Delta z}\right) - \left(\frac{c_{i,j,k+1}}{\Delta z}\right) + \left(\frac{c_{i+1,j,k+1}}{\Delta z}\right) \\
&+ \left(\frac{c_{x\,i,j,k}\Delta x}{\Delta z}\right) - \left(\frac{c_{x\,i,j,k+1}\Delta x}{\Delta z}\right)\Bigg\}/\Delta x^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
D3 = \Bigg\{&\left(\frac{-c_{i,j,k}}{\Delta z}\right) + \left(\frac{c_{i,j+1,k}}{\Delta z}\right) + \left(\frac{c_{i,j,k+1}}{\Delta z}\right) - \left(\frac{c_{i,j+1,k+1}}{\Delta z}\right) \\
&- \left(\frac{c_{y\,i,j,k}\Delta y}{\Delta z}\right) + \left(\frac{c_{y\,i,j,k+1}\Delta y}{\Delta z}\right) - c_{z\,i,j,k} + c_{z\,i,j+1,k}\Bigg\}/\Delta y
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
E3 = \big(&-c_{i,j,k}c_{i+1,j+1,k+1} - c_{i+1,j+1,k} + c_{i+1,j,k} - c_{i,j+1,k+1} \\
&+ c_{i,j+1,k} - c_{i+1,j,k+1} + c_{i,j,k+1}\big)/\Delta x\Delta y\Delta z
\end{aligned}
$$

$$A4 = \left(c_{i,j,k} - c_{i,j+1,k} - c_{i,j,k+1} + c_{y\,i,j,k}\Delta y - c_{y\,i,j,k+1}\Delta y\right)/\Delta y^2\Delta z$$

$$B4 = \left(-3c_{i,j,k} + 3c_{i,j,k+1} - 2c_{z\,i,j,k}\Delta z - c_{z\,i,j,k+1}\Delta z\right)/\Delta z^2$$

$$C4 = \left(c_{i,j,k} - c_{i+1,j,k} - c_{i,j,k+1} + c_{i+1,j,k+1} + c_{z\,i,j,k}\Delta z - c_{z\,i,j,k}\Delta z\right)/\Delta x\Delta z^2$$

$$
\begin{aligned}
D4 = \Bigg\{&\left(\frac{c_{i,j,k}}{\Delta y}\right) - \left(\frac{c_{i.j+1,k}}{\Delta y}\right) - \left(\frac{c_{i,j,k+1}}{\Delta y}\right) + \left(\frac{c_{i,j+1,k+1}}{\Delta y}\right) \\
&+ \left(\frac{c_{z\,i,j,k}\Delta z}{\Delta y}\right) - \left(\frac{c_{z\,i,j+1,k}\Delta z}{\Delta y}\right)/\Delta z^2\Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$E4 = \left(2c_{i,j,k} - 2c_{i,j,k+1} + c_{z\,i,j,k}\Delta z + c_{z\,i,j,k+1}\Delta z\right)/\Delta z^3$$

D_{xk}, D_{yk}, D_{zk}：第 k 層の拡散係数

同様に $c^{*}_{i,j,k}$ を x,y,z で微分した $c^{*}_{x\,i,j,k}$, $c^{*}_{y\,i,j,k}$, $c^{*}_{z\,i,j,k}$ を求める。$c^{*}_{i,j,k}$ に拡散項を加え $c^{(n+1)}_{i,j,k}$ を求める。最後に $c^{*}_{x\,i,j,k}$, $c^{*}_{y\,i,j,k}$, $c^{*}_{z\,i,j,k}$, $c^{(n+1)}_{i,j,k}$, $c^{(n)}_{i,j,k}$ より $c^{(n+1)}_{x\,i,j,k}$ $c^{(n+1)}_{y\,i,j,k}$ $c^{(n+1)}_{z\,i,j,k}$ を求める。以上の手順を図 1 に示す。

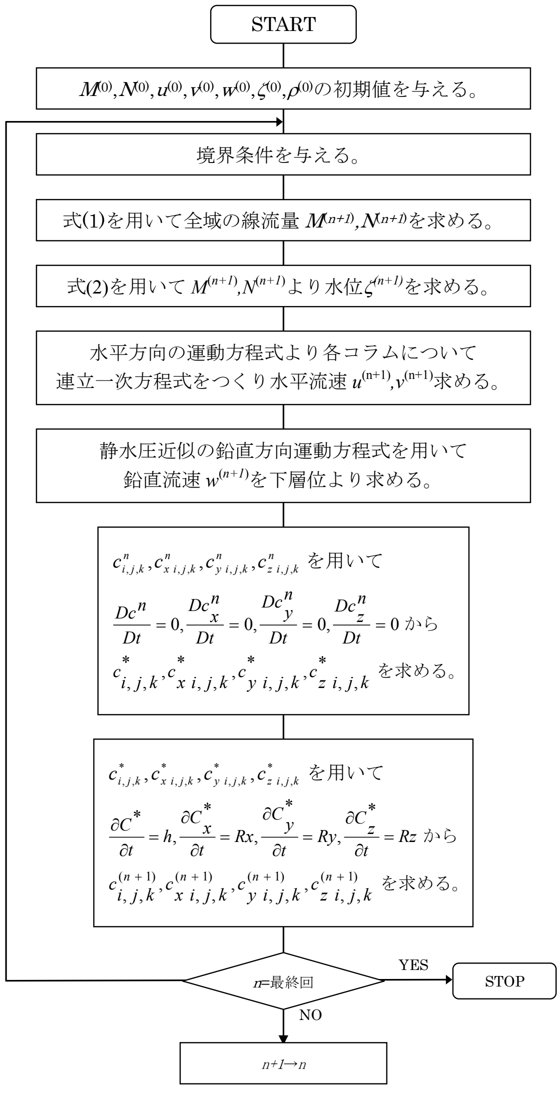


図-1 数値解析フローチャート

3. 青潮発生に関する数値解析

3.1 計算条件

数値計算に必要な諸係数を次のようにする。

表-1 計算条件

格子間隔	$\Delta x=\Delta y=200m$ $\Delta z=0.5m$
タイムステップ	$\Delta t=10s$
抵抗係数	$\gamma^2{}_a=0.0015$ $\gamma^2{}_b=0.0026$ $\gamma^2{}_i=0.005$
水平渦動粘性係数	$A_{sk}=A_{yk}=10cm^2/s$
拡散係数	$Dx=Dy=3.0m^2/s$ $Dz=0.0003\ m^2/s$

図-2 の方向 B-B を長軸、A-A を短軸とし、呼人浦方向からの風と長軸の角度を γ、嘉多山湾方向の風と長軸の角度を θ とする。また、季節ごとの密度分布を図-3 に示す[1]。

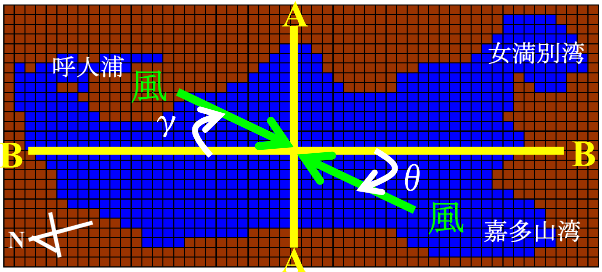


図-2　網走湖の風向に関する定義

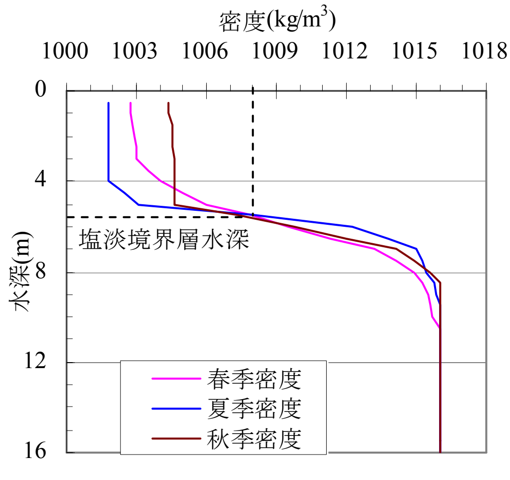


図-3 季節毎の密度鉛直分布

3.2 季節毎の密度分布の影響

春季、夏季、秋季の密度に対し、風速を 8~15m/s、風向 γ=0~90° でそれぞれ網走湖全域において風速を与え、6 時間まで繰り返し計算を行った。このとき初期条件は静水状態から始めた。なお本研究ではコリオリ係数は考慮したが、流れは考慮せず、任意の水面格子の密度が $1008kg/m^3$ に達したとき青潮が発生したと考える。

季節毎の密度分布で風速・風向による青潮発生の有無を図-4 に示す。3 つの季節密度の曲線より右下のカラーの範囲が青潮発生の領域である。γ が大きく(吹送距離が短く)なるにつれ青潮は発生しにくくなり、秋季密度は γ=60° 、夏季密度と春季密度は γ=15° を超えると青潮は発生しなくなる。

秋季密度は春季、夏季密度よりも表層が重く不安定なので秋季がほかよりも格段に早く青潮が発生する結果となった。

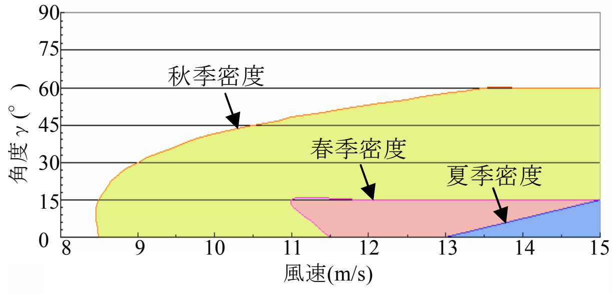


図-4　密度の違いによる青潮発生の比較
(北寄りの風)

秋季の密度分布で風速、風向による青潮発生時間を図-5 に示す。風速が速いと最大と最小の表面水位差が大きく、塩淡境界層の傾きも大きくなるので早く青潮が発生する。また、吹送距離が最も長くなる風向約 15° 付近で最も青潮が発生しやすい。

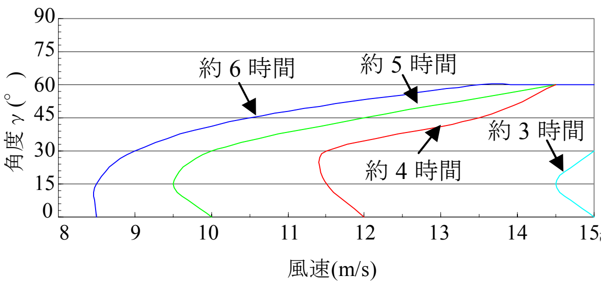
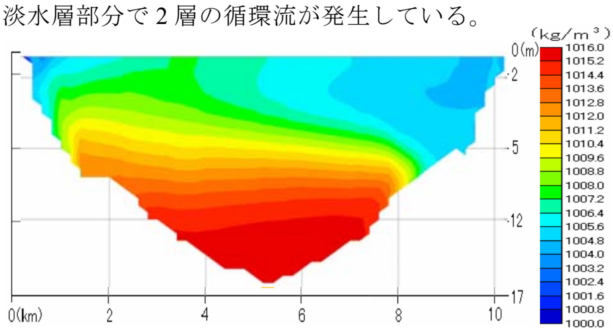


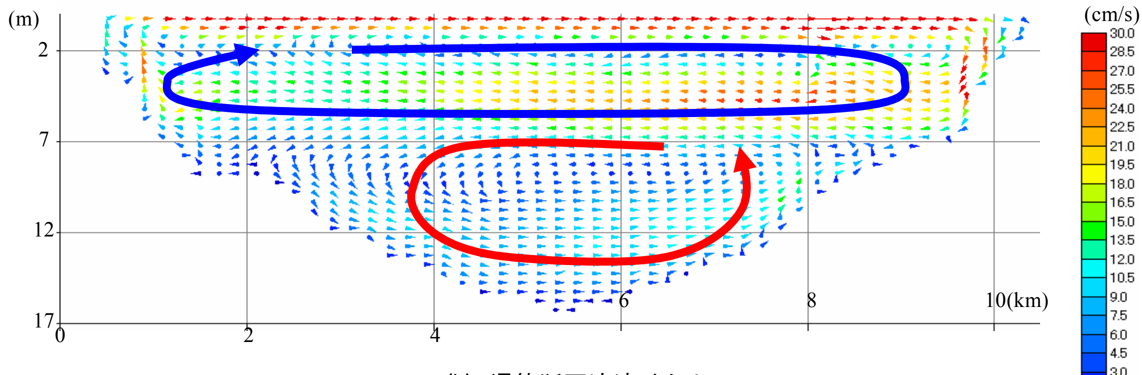
図-5　風向･風速による青潮発生時間の比較
(秋季密度)

次に、秋季密度で風速 8.5m/s、風向 γ=0° の北寄りの風の湖内の流れを見る。澪筋断面の密度分布(図-6(a))を見てみると塩淡境界層(ρ=1008kg/m³)が風上側で上がり風下側では下がっていることが分る。また、図-8 の水位図と比べると水位の高いところで塩淡境界層が下がり、水位の低いところでは塩淡境界層が上がっていて逆位層の関係があることが分かる。

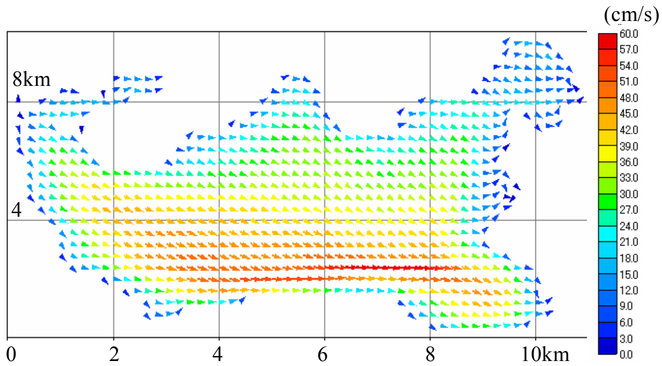
図-6(b)の澪筋断面流速を見ると、風の影響を受け潜った水面密度は重い密度とは混ざりにくく、塩水層部分と淡水層部分で 2 層の循環流が発生している。



(a) 澪筋断面密度分布図



(b) 澪筋断面流速ベクトル



(c) 水面流速ベクトル

図-6　風速 8.5m/s、風向 γ=0°、秋季密度の場合の(a)密度分布、(b)・(c)流速ベクトル

3.3 南北方向の青潮発生比較

3.2 節に述べた条件で南北風向による青潮発生の比較を図-7 に示す。$\gamma = \theta$ =45° より小さいときは北寄りの風のほうが青潮は発生しやすく、$\gamma = \theta$ =45° より大きいときは南寄りの風のほうが青潮は発生しやすい。これは、嘉多山湾、女満別川流入部(図-2 の上の A 付近)等流れが一箇所に集中して集まるところがあると水位が上がりやすく静水圧が大きくなり、それが塩淡境界層水深に影響を与え青潮が発生しやすくなる。例を挙げると秋季密度、風速 8.5m/s と同じ条件で、風向 γ =0° (北寄りの風)と θ =0° (南寄りの風)では最大水位と水面密度最大地点(北寄りの風のときは青潮発生地点)の水位の差は、風向 γ =0° で 4.69cm(青潮発生)、θ =0° では 4.00cm となる。また、風速 12.5m/s、風向 γ =90° 、θ =90° では差がそれぞれ 4.29cm、7.77cm(青潮発生)となる。

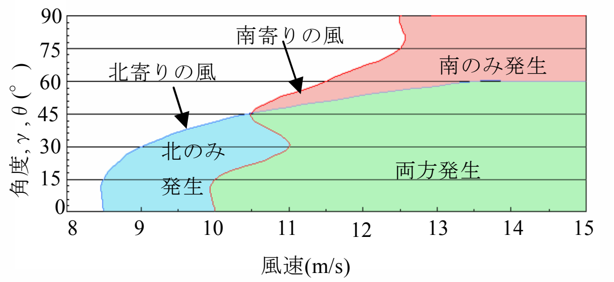


図-7 北寄りの風と南寄りの風の青潮発生比較（秋季密度）

3.4 コリオリ係数による青潮発生比較

コリオリ係数を考慮した場合と、無視した場合の青潮発生地点の変化を図-8 に示す。風向 γ =0° で、コリオリ係数を入れない時には流速が速く真直ぐ長軸方向に進むが、コリオリ係数を入れると図-6(c)のように流速が時計方向に変化するため青潮発生地点に違いが出た。最初の青潮発生地点は同じだが、時間がたつにつれコリオリ係数を入れないほうは 2 箇所で青潮が発生した。

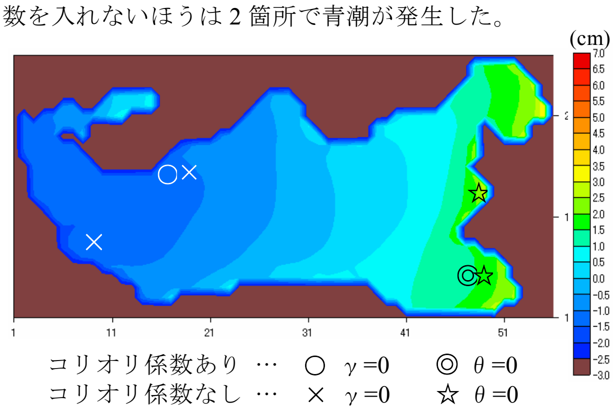


図-8　青潮発生地点に対するコリオリ係数の影響（図の水位は秋季密度 γ=0° の場合）

4.　結　論

今回の研究では網走湖に対し、風向・風速、淡水層密度鉛直分布の違いによる青潮発生条件を示すことができた。

今後はさらに精度を上げ、他の汽水湖への適用や網走湖の水質改善対策に関してのシミュレーション解析を行いたい。

参考文献

1) 網走湖水質保全対策検討委員会：網走湖の水質環境に関する調査報告書，網走開発建設部, 1996.3.
2) 堀江毅：港湾技研資料，No.360，pp.102-119,1980.12.
3) 岩佐義朗：湖沼工学，山海堂，pp.115-129 ,1990.3.
4) 池永均・向山公人・大島伸介・吉本健太郎・山田正：土木学会論文集Ⅱ, No.7755，Ⅱ-69，pp.11-27，2004.11.
5) 吉田諭司・佐渡公明・佃知樹・中尾隆志・杉山一郎：網走湖における青潮発生に関する数値解析，pp1-4 ,2005.2.
6) 矢部孝・内海孝行・尾形陽一：CIP 法原子から宇宙までを解くマルチスケール解法, pp14-121,2003.11.