

1.はじめに 著者らは北海道東部に位置する網走湖とそれを含む流域内の水循環の長期的・短期的挙動を知る目的で過去10年間に約30回におよぶ現地観測と数値計算を用いた水文学的・水文学的観点からの総合調査を実施してきた。本研究では、現地観測結果と連成振動型の一次元線形波動方程式を導出して網走湖における風に対する界面の応答について考察を行った。

2.連成振動型の一次元線形波動方程式の導出 本研究では図-1に示すような網走湖と同程度の空間スケールと類似の密度構造を有する一次元の矩形断面水域を設定した。この水域の上層と下層に線形・長波近似を施した運動方程式(1)、(2)式と連続式(3)、(4)式を適用する。また τ_0 は風により湖面に作用するせん断力であり(5)式を用いて算定した。 τ_0 (風応力)を強制外力項とする ξ と η に関して連成振動に似た一次元の線形波動方程式が得られる。非定常の場合、(6)、(7)式を、定常の場合は(8)式と(9)式を基礎式として数値計算を行った。(12)、(13)式の T_s は水面の変動周期、 T_i は界面の変動周期、 n は内部波のモード($=1$)である。

3.解析結果と考察 本研究では主流風速の風向をX軸にとり、一次元計算を行った。初期条件は水面変動量 ξ 、界面変動量 η のいずれも0で、境界条件は反射条件とした。解析に用いた計算諸元を表-1に示す。

3.1.界面の変動特性 図-2(a)、(b)、(c)は、矩形断面水域の水面に一定方向から15m/sの風が吹き続けたときの界面の挙動を示したものである。なお、15m/sという風速値は、1995/11/8に網走市内(地上約10mの地点)で記録された青潮発生時の平均風速に相当する。図中には、慣性力に起因する変動成分の大きさを把握するため、定常計算の結果を破線にて併記している。界面の変動は、風に反応して吹送方向に基本モードの形態で生じている。図-3は図-2(a)、(b)、(c)における界面の変動過程を模式的に示したものである。界面が水平(①、図-2(a)の0min)から風上側に上昇する時、界面形状は一直線の形状ではなく、界面の両端から風上側に勾配が生じる形状(②、図-2(a)の30、60、90min)を有することがわかった。界面変動量がピーク(⑤、図-2(a)の240min)を迎えた後、界面は下降し(⑥～⑧、図-2(b)の270～450min)一時的に水平に戻る(①、図-2(b)の496min)。その後界面は再び風上側に上昇し(②、図-2(c)の510min)、①～⑧の変動過程を繰り返す。この一連の界面変動過程において、界面が風下側に上昇することはなかった。図-4(a)は1994/8/6における網走湖の塩淡境界面を長軸方向に魚群探知機を用いて可視化したものである。塩淡境界面が風上側に楔状の中間層を形成しながら上昇し、楔内部には筋状の強い反応が現れている。図-4(b)は同

時刻における塩分濃度、溶存酸素(界面変動は①～⑧の過程を繰り返し、両端から風上側に勾配が生じる形状を有する)の実測結果を示したものである。これより図-4(a)に見られる筋状の強い反応部位は溶存酸素と塩分濃度の急

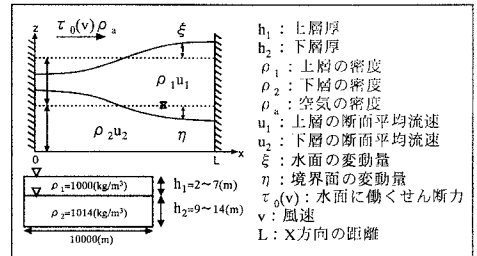


図-1 座標の設定

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1 h_1} \tau_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\tau_0 = C_D \rho_a V_{10}^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - g h_1 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - g h_2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = g h_2 \frac{\bar{n}_1}{\rho_2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (7)$$

$$g h_1 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} \quad (8)$$

$$g h_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = g h_2 \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\xi = \frac{\tau_0}{\rho_1 g h_1} \left(x - \frac{L}{2} \right), \quad \eta = \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \xi \quad (11)$$

$$T_s = \frac{2L}{\sqrt{g(h_1 + h_2)}} \quad (12)$$

$$T_i = \frac{2L}{n} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \frac{h_1 + h_2}{g h_2}} \quad (13)$$

表-1 計算諸元

格子間隔 Δx		100(m)
計算間隔 Δt		5 秒
密度	上層 ρ_1	1000 (kg/m ³)
	下層 ρ_2	1014 (kg/m ³)
	空氣 ρ_a	1.225 (kg/m ³)
水面抵抗係数 Cd		0.0016
吹送距離 L		10000(m)
上層水深 h1		2~7(m)
下層水深 h2		9~14 (m)
風速(地上 10m) V10		1~20 (m/s)

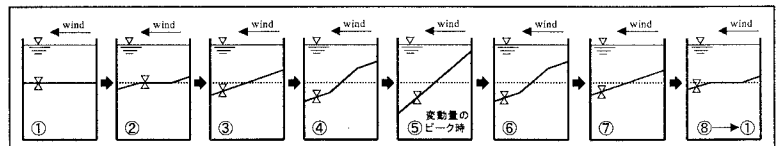


図-3 界面挙動の模式図

時刻における塩分濃度、溶存酸素(界面変動は①～⑧の過程を繰り返し、両端から風上側に勾配が生じる形状を有する)の実測結果を示したものである。これより図-4(a)に見られる筋状の強い反応部位は溶存酸素と塩分濃度の急

キーワード: 塩淡二成層, 界面変動, 連成振動

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1805 FAX 03-3817-1803

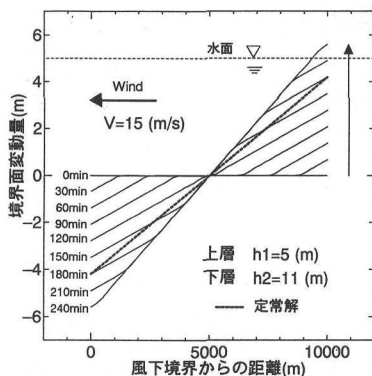


図-2(a) 境界面の変動量(0~240min)
(界面の変動は吹送方向に基本モードの形態で生じている。界面変動量は定常解に比べ非定常解の方が大きくなる。)

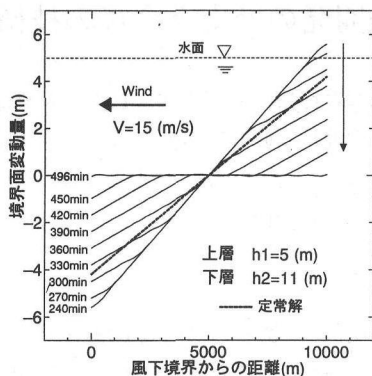


図-2(b) 境界面の変動量(240~460min)
(界面形状は一直線状ではなく、界面の両端から風上側に勾配が生じる形状を有する。)

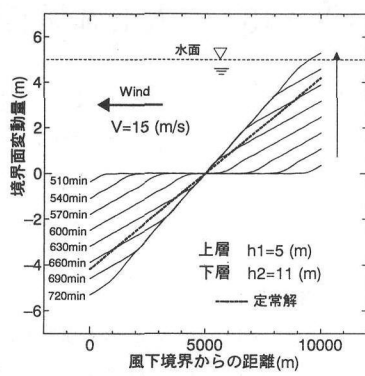


図-2(c) 境界面の変動量(510~720min)
(界面変動量がピークを迎えた後も、界面は風上側に上昇することはなかった。)

変部に対応することがわかる。したがって、筋状の強い反応は界面変動の遍歴を示していると考えられることから、界面は風上端から勾配が生じ、上昇している事がわかる。図-4(a)の界面形状と図-2(a)のそれを比較すると、非定常解は実現象における界面形状の特徴を良好に捉えている。このことから、実現象においても強風の連吹時には界面が風下側に上昇しないことが推察される。図-2(a)より非定常解では風上側の界面上昇量は3時間半後(210min)に水面に達していることがわかる。これは実現象と同様に青潮が発生していることを意味する。しかしながら定常解では界面は水面まで到達しないことから、実現象に反して青潮は発生しない。図-5は界面変動量の差(非定常解から定常解を引いた差)と風速の関係を示したものである。風速が増加するに従い両解の界面変動量の差は2次関数的に増大する。これは、定常解では風速に起因する慣性力の効果が界面の上昇過程に現れず、非定常解ではその効果が同過程に風速の2乗で現れるためである。風速15m/sの風が連吹すると界面変動量は両解で1.5mの差が生じる。この差は上層水深が5mの場合(1995/11/8では5.2m)、青潮発生の有無を決定付ける重要な差となる。これより界面の変位を求めるには非定常解析が有効である。

連成振動解の周期 図-6は風速と連成振動解の周期、図-7は上層水深と連成振動解の周期との関係を示したものである。連成振動解の周期は風速の大きさとは無関係であり、上層水深が増加するほど周期は短くなる。また、理論式から算出した内部静振の周期と連成振動解の周期は1~5分程度の差で一致することがわかる。

まとめ 1)一次元連成振動方程式を数値解析した結果、強風連吹時に界面は風上側に上昇し、非定常解は定常解に比べ界面変動量が大きくなる。2)風速が増加するに従い界面変動量の差は2次関数的に増大する。3)変動時の界面形状は直線形状ではなく界面の両端から風上側に勾配が生じる形状を有する。4)界面変動の解析には慣性力の効果が考慮できる非定常解析が有効である。5)連成振動解の周期と内部静振の周期は一致する。

謝辞 北海道開発局網走開発建設部には現地観測とデータの提供に際し多大な支援を頂いたことをここに感謝の意を表します。

参考文献 1)山田ら：網走湖における塩淡水二成層の形成と挙動に関する研究，水工学論文集第40巻，pp.589-594，1996。

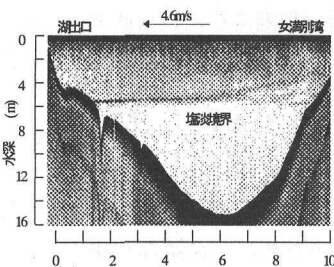


図-4(a) 網走湖縦断面の超音波による映像(1994/8/6 13:17~14:18 風速4.6m/s)塩淡水境界が風上側に楔状の中間層を形成しながら上昇し、楔内部には筋状の強い反応が現れている。

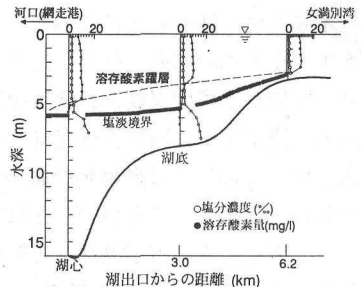


図-4(b) 網走湖における塩分濃度、溶存酸素の鉛直分布(1994/8/6 13:17-14:18) (筋状の強い反応部位は溶存酸素と塩分濃度の急変部に対応する。)

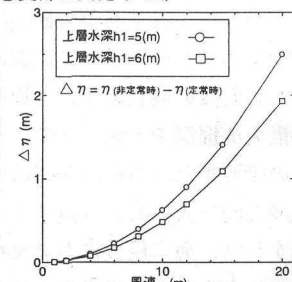


図-5 境界面変動量の差(非定常解一定常解)と風速の関係
(風速が増大するに従い、両解の境界面変動量の差は2次関数的に増大する。)

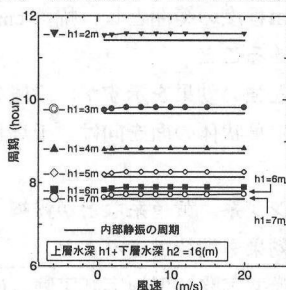


図-6 連成振動解の周期と風速の関係
(連成振動解の周期は風速値と無関係であり、内部静振の周期と一致する。)

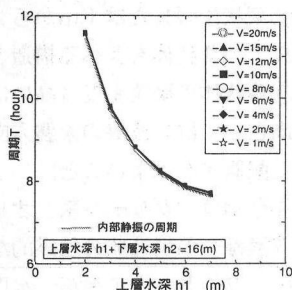


図-7 連成振動解の周期と上層水深の関係
(連成振動解の周期は上層水深が増加するほどその周期は短くなる。)