

志津川湾における貧酸素水塊の発生と 台風通過後の西風に伴う水質変動

ANOXIC WATER FORMATION AND WATER QUALITY CHANGES BY WESTERN WIND IN SHIZUKAWA BAY

山本潤¹・田中仁²・高崎みつる³・佐伯信哉⁴

Jun YAMAMOTO, Hitoshi TANAKA, Mitsuru TAKASAKI and Shinya SAEKI

¹正会員 工修 (独)水産総合研究センター 水産工学研究科 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎 7620-7)

²フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

³正会員 工博 石巻専修大学教授 理工学部生物生産工学科 (〒986-8580 石巻市南境新水戸一番地)

⁴正会員 (株) 荒谷建設コンサルタント 四国支社 (〒790-0045 愛媛県松山市余戸中 2-1-2)

Anoxic water is frequently seen in Shizukawa Bay, which causes severe damage to the aquaculture in the enclosed bay, especially in summer. On the other hand, it is known that wind-driven current affects flow structures inside the bay. Since the wind-driven current encourages the water exchange of the bay, this effect is important for bay water quality to recover. In the present field study, anoxic water formation was observed in the bay during summer, and thereafter DO in the bay recovered suddenly due to bay water exchange during strong western wind. This observed phenomenon is reproduced by numerical simulation considering wind-driven current induced by western wind.

Key Words: anoxic water, wind-driven current, aquaculture, enclosed bay

1. はじめに

我が国の内湾域では、その静穏な水域を養殖水面として活用する例が多い。しかし、水域が閉鎖性であるために外海との海水交流が不足しやすく、養殖に伴う自家汚染によって漁場が劣化し、赤潮や貧酸素水塊発生等の水質問題が生じている。将来にわたって良好な漁場環境を保全し、生産性の維持・向上を図っていくため、各地で水域の利用調整や水質改善対策等が検討されている。より効率的な施策に資するため、それぞれの水域において流動・水質変動機構の詳細な解明が求められている。

三陸海岸の南端に位置する宮城県志津川湾は、カキ、ホタテ等の貝類や寒冷地大型魚等を主要種とする優良な海面養殖漁場として活用されている。1976年頃より始まったギンザケ養殖に伴う自家汚染により、生産のピークであった1986年頃には湾内の水質汚染が深刻であった。近年、チリ産の安価な輸入ギンザケの流通によりその経営が悪化し、生産の低下及び餌の改良等により湾内水質が改善傾向にある。一方、志津川湾は津軽暖流や黒潮、

親潮の影響を受ける他、西風の吹送流に伴う湧昇流等が湾内水の交換をもたらす等の報告^{1)~5)}がある。

本研究では、近年の志津川湾の水環境の追跡調査とこれまでの知見の検証のため、より多くの計測機器を湾内に配置して湾外水の侵入過程や湾奥の貧酸素化等の詳細なデータを取得した。特に8月下旬には、ADCPと底層に設置した水質計で貧酸素水塊の発生と台風時の外海水流入、これに伴う急激な水質の回復が捉えられたので、それらの観測結果を報告するとともに、当水域の海水交換における西風の影響を数値計算等により検証した。

2. 現地観測の内容

図-1に志津川湾の調査位置図を示す。志津川湾は湾軸長さ約10km、幅約5km程度の湾で、湾口部は東側の太平洋に面している。湾口部の北側st.1と南側st.2および湾奥部st.3には、図-2に示す係留系を設置した。それぞれの水深は約25m、25m、10m程度である。この係留系には水温計、塩分計、DOメータ(ワイパー式、蛍

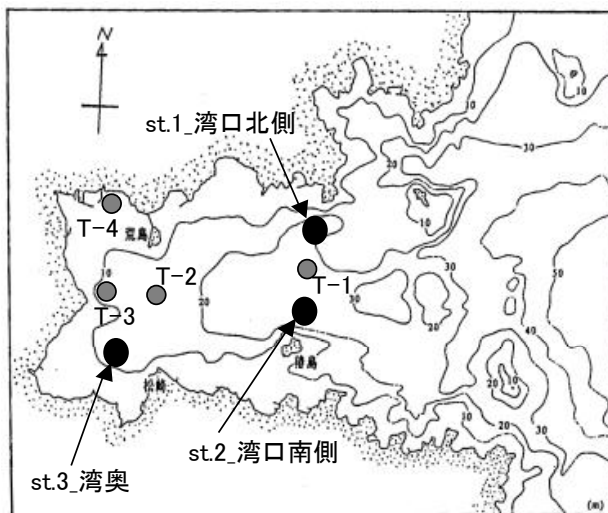


図-1 調査位置図

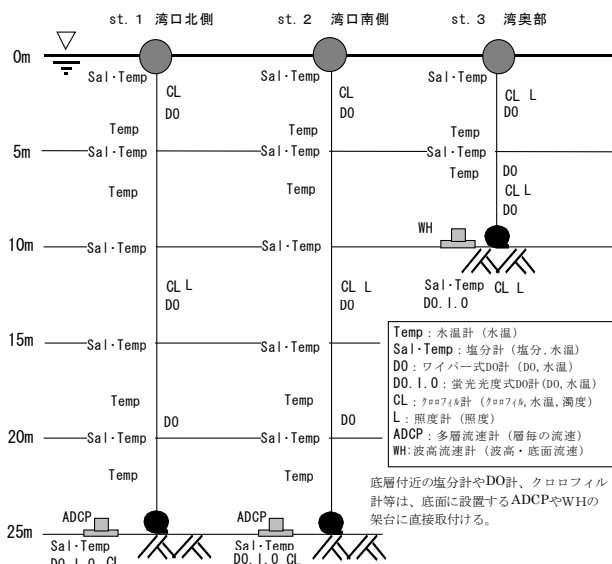


図-2 自記式水質計配置図

光光度式), 水中照度計, クロロフィル計を鉛直方向に適宜配置し, 2004 年 7 月 24 日から 8 月 19 日までの 36 日間, 10 分間隔で鉛直分布の連続観測を行った. 台風の来襲が懸念された 8 月 20 日から 9 月 15 日までの 16 日間は上, 中層の係留系を避難させ, 底層のみの水質連続観測を行った. 湾口部の北側 st.1 と南側 st.2 の近傍には超音波ドップラー流速計 (ADCP, Workhorse) を設置し, 流速分布を層厚 1 m で全期間同様に計測した. st.1 の ADCP には水圧計を増設し, 波高と潮位も観測した. st.3 には波高流速計 (Wave Hunter) を設置し, 波高と底面流速を計測した. 設置時, 回収時, 中間メンテナンス時には, 図-1 の st.1~3 及び T1~4 において, 垂下水質計による観測と採水・採泥等を行った. 風向, 風速等の気象データについては志津川のアメダスより, 海面気圧, 全天日射量等は石巻の気象観測原簿特別値より, 台風経路図は気象庁電子閲覧室より引用した.

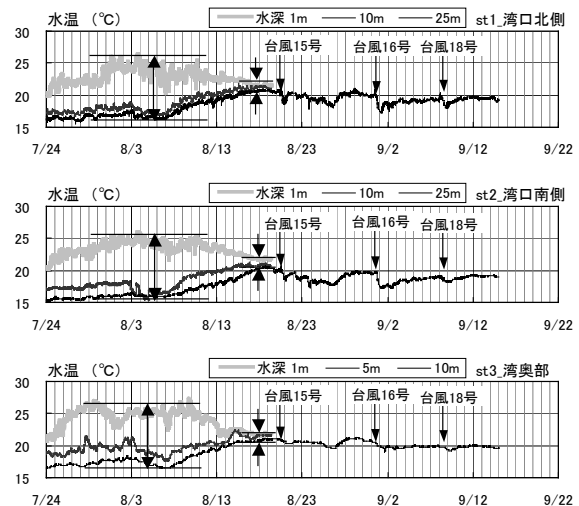


図-3 水温の経時変化

3. 現地観測の結果

(1) 水温の経時変化

湾口北側 st.1, 南側 st.2, 湾奥部 st.3 における水温の経時変化を図-3 に示す. 観測地点は各図の右肩に示した. 凡例は水温センサーの設置水深である. 7 月末から 8 月初旬には表層と底層で 10°C 近くの水温差が生じたが, 8 月 8, 9 日頃より底層の水温が徐々に上昇するとともに, 8 月 11 日頃より表層の水温が徐々に低下し始め, 8 月 17~19 日には表層と底層とで水温差が約 1°C 程度となった. この現象は st.1~3 のすべてにおいてほぼ同様に生じている. 8 月 19 日以降は台風来襲による係留系避難のため, 底層のデータのみである.

8 月 20 日以降の底層の水温データを見ると, 8 月 20 日に台風 15 号, 8 月 31 日に台風 16 号, 9 月 8 日に台風 18 号の影響で, 特に両湾口部 st.1 と st.2 において水温の低下が見られる. このことは, 外海水が湾口部底層に流入したことを意味している.

(2) DO の経時変化

湾口北側 st.1, 南側 st.2, 湾奥部 st.3 における DO の経時変化を図-4 に示す. 湾口北側 st.1 では, 8 月 19 日までは全層で溶存酸素が飽和状態であった. 8 月 20 日以降も, 底層で飽和状態が継続していたため, 観測期間全体を通じて全層で溶存酸素濃度は概ね飽和状態であったといえる. これは湾外水が常時流入し, 湾内水の影響を受けなかったためと考えられる. 一方, 湾奥部 st.3 では底層で貧酸素水塊の発生が認められた. 特に 8 月後半と 9 月前半に 1.0mg/l を下回る極めて低い値が観測されている. 湾口南側 st.2 では, 湾口北側 st.1 と湾奥部 st.3 の中間の傾向が見られ, st.3 の貧酸素水塊が st.2 に影響していることが示唆される. このことは, 湾内に反時計回りの流れが存在するとの過去の知見⁴⁾と矛盾しない.

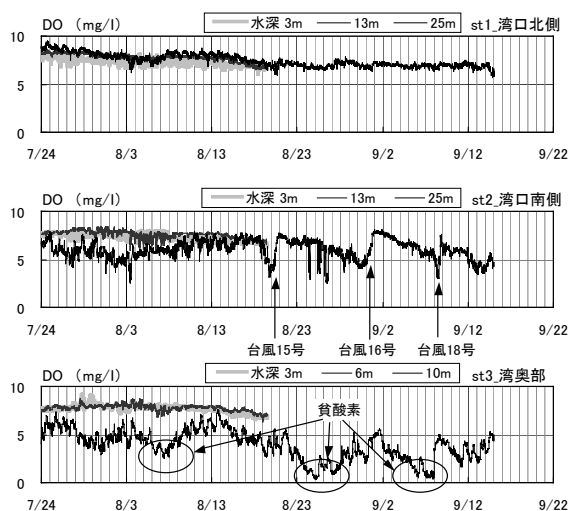


図-4 DOの経時変化

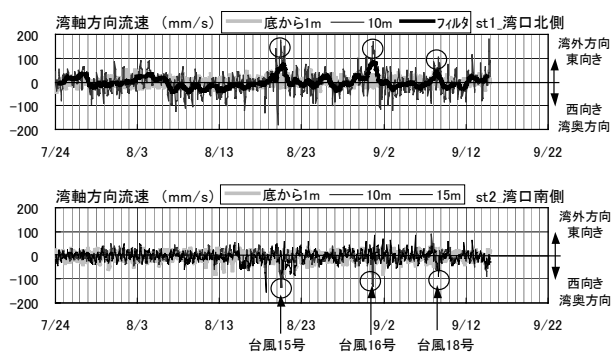


図-5 流速の経時変化

(3) 流速の経時変化

図-5に湾口北側st.1と湾口南側st.2に設置したADC Pで観測した湾軸方向流速を示す。湾外方向が正である。st.2では流出過多の傾向は確認出来なかったものの、st.1では、底面上10m 値に24時間フィルタをかけた太実線において台風時を除き若干の流入過多の傾向が見られ、通常時の反時計回りの流れが存在する可能性が概ね認められる。一方、台風時には図中の丸印や後述の通り、st.2で外海水の流入を意味する湾内方向の流れが認められるとともに、st.1では逆に湾外方向の流れが見られ、通常時とは逆の時計回りの流れが生じている。

(4) 水質・底質

図-6に水質鉛直分布を示す。図中の凡例は各観測地点である。水温と塩分値から、連続成層の傾向が見られる。クロロフィル値から、プランクトンの集積は見られない。DOは底層まで高い値を示し、図-4左端の観測開始時の結果とほぼ一致している。

水質分析結果を表-1に示す。CODについては湾口北側st.1で2.0mg/l以下の値を示している。これは、環境基準⑨の類型Aに該当する。それ以外では2.0mg/l以上3.0mg/l以下の類型Bに該当する。一方、全窒素では底

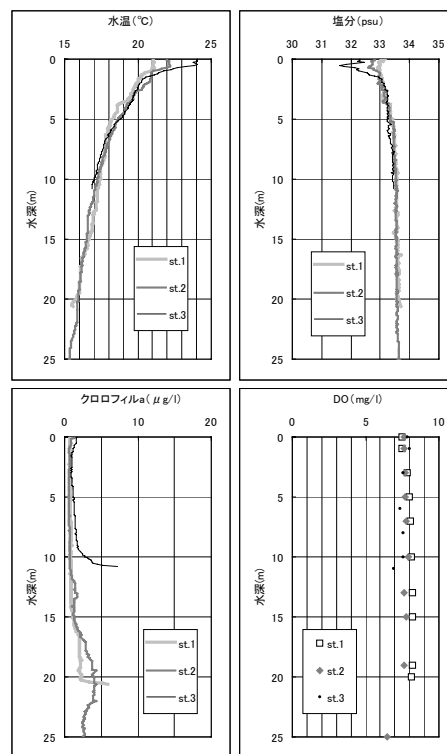


図-6 水質鉛直分布の例(2004年7月24日)

層で高い値を示し、類型3に該当する。全リンは概ね低いものの、底層でやや高めの傾向にある。ただし、養殖の盛んな閉鎖性内湾としては深刻な値ではなかった。

表-2の底質分析結果では、湾奥部に位置するst.3, T2, T3, T4においてCODや強熱減量等の項目が水産用水基準⑨に示される基準値をクリアしているものの、有機汚濁の傾向を示している。湾内の貧酸素化が底質によるものが主因だとすれば、この周辺が発生源である可能性がある。湾口南側st.2のCODは低く、底質粒径も粗く、st.1と同様に外海の影響を受けている様であるが、強熱減量や硫化物が高く、底質の有機汚濁の進行状況の判断は付きにくい。この地点の底質汚濁の原因は、周囲の養殖施設が直接影響したこと、湾奥由来の汚濁負荷が湾内の反時計回りの流れに乗って当地点に到達したことの2つと考えられる。

表-1 水質分析結果(2004年7月24日採取)

湾口北側 st.1				
水深(m)	COD(mg/l)	SiO ₂	全窒素	全リン
0	1.36	0.499	0.145	0.001
10	1.43	0.754	0.197	0.003
20	0.71	0.396	0.326	0.001
湾口南側 st.2				
水深(m)	COD(mg/l)	SiO ₂	全窒素	全リン
0	2.13	0.514	0.127	0.011
10	2.06	0.319	0.185	0.007
24	2.20	1.261	0.557	0.024
湾奥部 st.3				
水深(m)	COD(mg/l)	SiO ₂	全窒素	全リン
0	2.17	0.624	0.213	0.002
5	2.30	0.501	0.228	0.001
11	2.16	1.216	0.250	0.024

表-2 底質分析結果(2004年9月15日採取)

場所	COD (mg/g)	強熱減量 (%)	中央粒径 (mm)
st. 1	3.39	6.65	1.70
st. 2	1.82	8.60	1.64
st. 3	6.21	8.35	0.23
T2	5.16	5.92	0.06
T3	10.17	3.33	0.06
T4	5.11	9.79	0.27

4. 台風通過に伴う湾内水質の変化

図-7に台風15～18号の経路図を示す。どの台風も対象地域の西から北方向を進んだ。図-8にはその期間の各種データを示す。図-8(a)では、台風最接近時に海面気圧が低下し、波高の増大が見られる。通常、台風が図-7の経路を進む場合には、当地域では台風通過直後に強い西風が吹く傾向があり、それは風速6m/s以上の西風が見られる図-8(b)で確認できる。この時、st.2では湾内方向の流れが生じ(同図(c))、悪化傾向にあったst.2底層のDOが急激に回復した(同図(d))ことがわかる。ただし、西風が止むと再びDOが減少し始め、数日後には貧酸素状態に戻ってしまう。

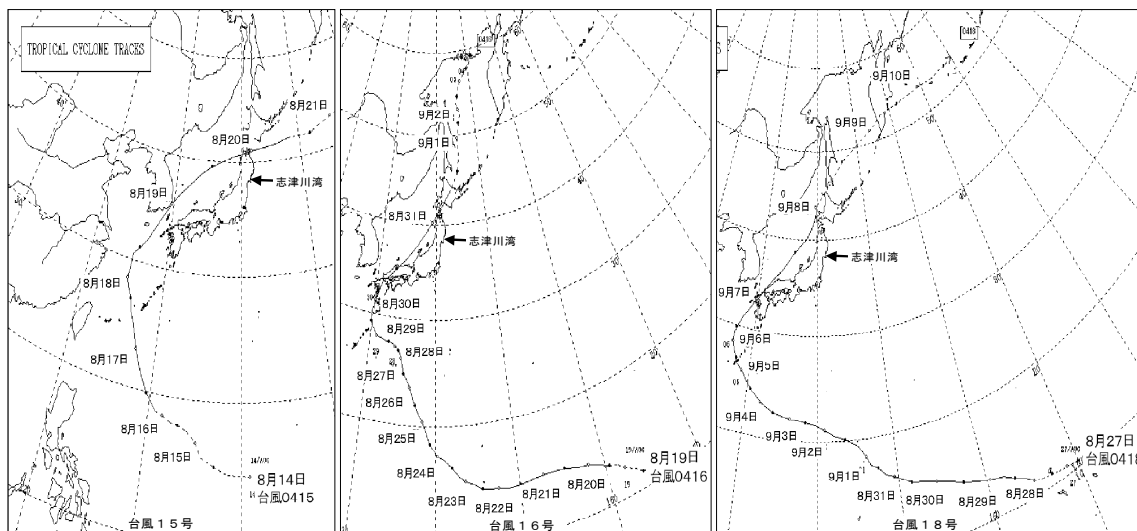


図-7 台風15, 16, 18号経路図

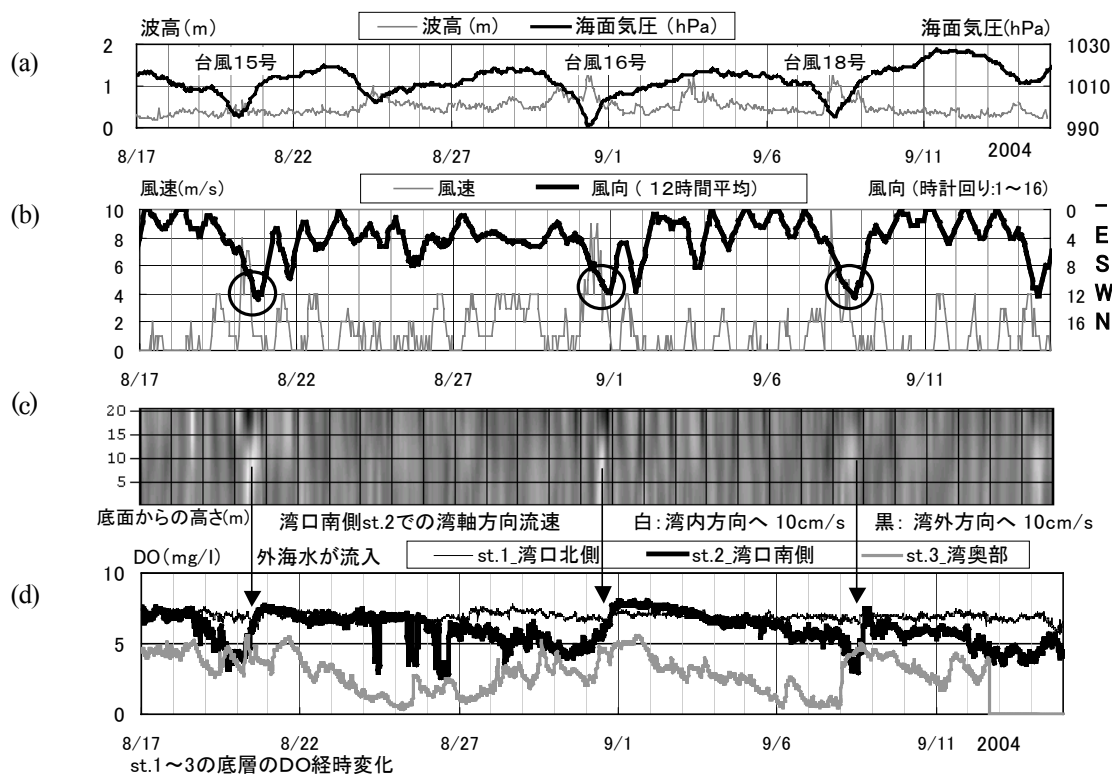


図-8 台風通過前後の流況と底層のDO

5. 数値計算による海水交換の検証

(1) 計算方法

西風に伴う吹送流が湾内の海水交換にどの程度寄与しているかについて検討することを目的に、湾内の水の流れと水質変動について数値計算を行った。

志津川湾を 50m×50m、鉛直 2m の格子に切り、マルチレベルモデルで現象を再現した。南北方向に x 軸、東西方向に y 軸、鉛直方向に z 軸をとり、それぞれ南向き、東向き、上向きを正とした。N.S.の運動方程式(1)、(2)は水平方向のみを陽解法で解き、鉛直方向は静水圧近似とし、鉛直流速は連続式(3)より求めた。時間ステップは C.F.L.条件を満たすように 1.5 秒とした。潮汐は観測値を各時間ステップ毎に沖側の開境界に入力した。風の影響は、(4)、(5)式で評価した。水温、塩分、DOは、それぞれ(6)~(8)の移流拡散式で解いた。貧酸素水塊の発生を再現するために、観測された水温と塩分濃度の他に、湾口北側 st.1 での DO 鉛直分布の観測値を鉛直及び時間的に補間し、各時間ステップ毎に開境界へ境界条件として入力するとともに、全体の初期条件としても使用した。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} +$$

$$f \cdot v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$- f \cdot u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\tau_x = \rho_a C_d U \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$\tau_y = \rho_a C_d V \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$+ A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y} - w \frac{\partial S}{\partial z}$$

$$+ A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & -u \frac{\partial D}{\partial x} - v \frac{\partial D}{\partial y} - w \frac{\partial D}{\partial z} \\ & + A_c \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial D}{\partial z} \right) \right\} \\ & + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $u, v, w, p, \rho, \rho_a, f, T, S, D, C_d, U, V, A_m, K_m, A_c, K_c$ は、それぞれ、 $x \cdot y \cdot z$ 方向の流速、圧力、海水密度、大気密度、コリオリのパラメータ、水温、塩分濃度、溶存酸素濃度、抵抗係数、 $x \cdot y$ 方向風速、水平・鉛直渦動粘性係数、水平・鉛直拡散係数である。ここでは、海面の抵抗係数を 0.0015、底面 0.0026 とした。水平方向の渦動粘性係数はリチャードソンの 4/3 乗則に基づき、本計算で用いる格子幅に適切と考えられる 1.0m²/s とし、拡散係数を 0.1m²/s とした。鉛直方向の渦動粘性係数及び拡散係数については、成層が発達し鉛直混合が妨げられた状態と考えて、それぞれ 10⁻⁵、10⁻⁶m²/s に設定した。 $D_1 \sim D_6$ は、水中の酸素消費、底質の酸素消費、表層での再曝気、植物プランクトンによる酸素生産、養殖魚の呼吸を指す。溶存酸素消費に関する各種係数は、他の計算で用いられている数値とほぼ同様な数値を用いた。なお、詳細については文献⁸⁾を参照されたい。

(2) 計算結果と考察

図-9 に湾口南側での流速の計算結果を示す。西風の場合、中層及び底層において 0.1m/s 以上の湾内方向の流れが見られた。これは同図右側及び図-5 下段 (st.2 湾口南側)において、台風来襲時の流速値とほぼ同等であり、西風に伴う流況の再現が概ね妥当であるといえる。

図-10 には、湾口北側 st.1 以西の湾内側の全メッシュに配置したマーカーの残留率を示す。6.0m/s の西風を与えた場合、無風と比較し残留率が大きく減少していることがわかる。この計算結果は、西風が海水交換に大きく寄与していることを意味している。

図-11 には、湾奥部 st.3 における DO の計算結果を示す。6.0m/s の西風を与えた場合には、西方向への吹送流が発生し、逆に湾口部底層で湾内方向の流れが生じ、高い DO の水が外部から湾に多量に流れ込む。その結果、湾内の DO は高い状態を維持している。一方、無風状態では、外海からの DO の供給が減り、貧酸素状態になったことが確認出来た。したがって、西風の存在が湾内水質に大きく寄与していることが言える。

6. おわりに

本研究の主要な結論は以下の通りである。

・7月後半から8月前半は表層と底層で最大で約 10℃ 近くの温度差が生じ、連続成層の傾向にあることが確認出

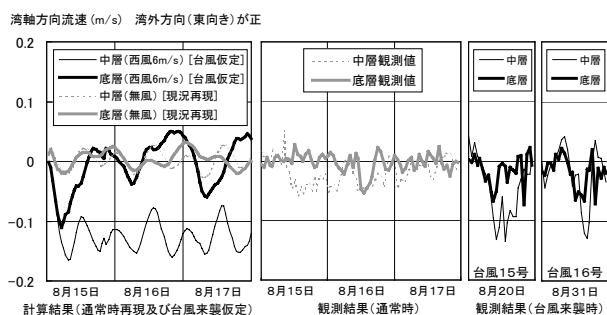


図-9 流速の計算結果（湾口南側 st. 2）

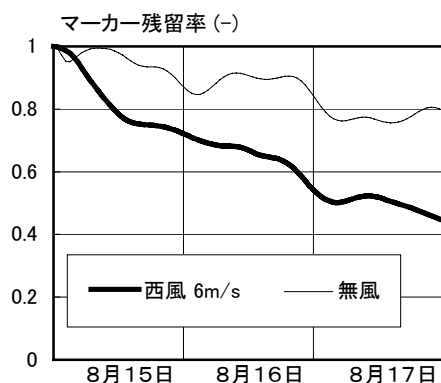


図-10 交換率の計算結果

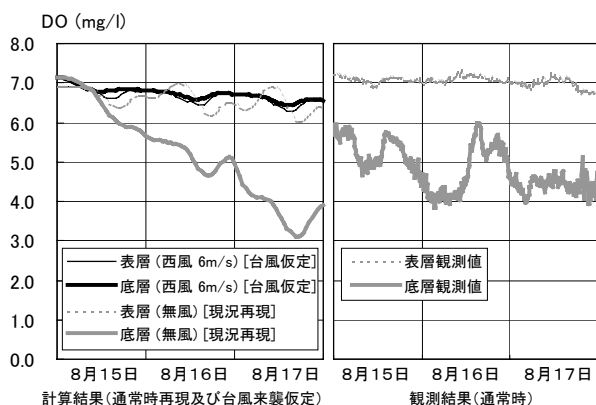


図-11 DO変動の計算結果（湾奥部 st. 3）

来た。

・溶存酸素濃度は、8月後半以降に湾奥部で貧酸素状態を示し、8月25日や9月6、7日には1mg/lを下回る値となった。

・流速の鉛直分布では、通常時は反時計回りの流れが生じている可能性が示唆された。

・通常、外海水が流入する湾口北側では常にDOが飽和状態であった。一方、湾口南側において頻繁にDOの低下が見られた。このことから、貧酸素水塊は主に湾奥を漂いながらやがて反時計回りの湾内流に乗って湾口南側にも影響している可能性がある。

・台風通過直後の強い西風時には、湾内流のパターンが通常時とは逆の時計回りとなり、湾口南側からの外海水の流入が確認された。

・この時に湾口南側及び湾奥部のDOが急激に回復した。これは外海水の流入によるものである。ただし、西風が止んだ後に再び貧酸素化が生じているため、当地域の養殖においては常にDOの変動に注意を払う必要がある。

・上記の現象は、西風による吹送流を再現する数値計算によっても確認された。

謝辞

本調査・研究は、数値計算や理論の基礎部分が運営費交付金「閉鎖性水域における流動・水質変動機構の定量的評価手法の開発」、現地観測等の現場応用的部分が水産基盤整備調査費委託「漁港水域における水質・底質改善技術の開発」により行われた。

本調査を進めるにあたり、志津川町産業振興課海浜高度利用センター勝倉主幹、同及川技師、志津川町漁業協同組合の皆様にご多大なる協力を頂きました。石巻専修大学理工学部生物生産工学科高崎研究室学生諸君には、観測作業と水質分析で協力を頂きました。アイオーテック井戸社長には、本調査に同行され機器の設定等でお世話になりました。紙面にて心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 長尾正之、橋元信裕、今村文彦、首藤伸夫：衛星データを用いた湾内海水交換予測の可能性について、海岸工学論文集、第39巻、pp.921-924、1992。
- 2) 長尾正之、今村文彦、張旭紅、渡辺健二、首藤伸夫：成層構造を有する内湾での水温急変についての現地観測、海岸工学論文集、第40巻、pp.991-995、1993。
- 3) 堀井久義、田中仁、渡辺健二、首藤伸夫：志津川湾における湾水交換の現地観測、海岸工学論文集、第41巻、pp.1091-1095、1994。
- 4) 永澤豪、田中仁、松村勝之、山路弘人：ADCPを用いた志津川湾内流動の観測、海岸工学論文集、第45巻、pp.396-400、1998。
- 5) 野村宗弘、千葉信男、徐開欽、須藤隆一：志津川湾における貧酸素水塊の形成、沿岸海洋研究、第33巻、第2号、pp.203-210、1996。
- 6) 環境庁：水質汚濁に係る環境基準について、生活環境の保全に関する環境基準、昭和46年環境庁告示59号・改正平成15年環告123、2003。
- 7) 日本水産資源保護協会：水産用水基準(2000年版)、pp.88-91、2000。
- 8) 山本潤、時吉 学、佐伯信哉、上野成三：閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測、海岸工学論文集、第50巻、pp.941-945、2003。

(2005.9.30 受付)