

名古屋港の夏季の流況と貧酸素化に関する研究

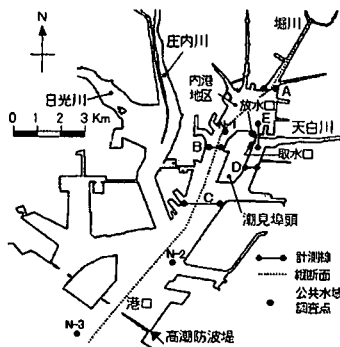
千葉 賢*・杉山 陽一**・松尾 直規***

名古屋港は閉鎖性が強い海域で、夏季には中底層が貧酸素または無酸素化するなど、深刻な水質環境の問題を抱えている。本研究では、2000 年夏季の 2 ヶ月間に對する 3 次元数値流動解析を実施して、流動・塩分・水温・溶存酸素濃度の時空間変化を詳細に調べた。解析には独自の数値モデルを使用した。計算値と観測値の一致度は良く、モデルの信頼性が検証された。解析により、鉛直循環が正循環（表層流出・底層流入）と逆循環（表層流入・底層流出）を周期的に繰り返すことが示された。この変動の主たる原因は港外中底層の高塩分水塊の移動とみられ、港外の海域との相互作用が港内の流動や貧酸素水塊の位置や規模に強く影響していることが明らかになった。

1. はじめに

名古屋港は伊勢湾の北部に位置する海域で、図一1のような細長い形状を持つ。航路確保のために水深は全域で凡そ 10~14 m の範囲に維持されている。高潮防波堤が港口に存在し、港奥部には水路を塞ぐような形で埋立地（潮見埠頭）が存在する。これらの地形は港内の循環と港内外間の海水交換を弱めて、海域の閉鎖性を高めていると考えられる。潮見埠頭北側の海域は内港地区と呼ばれるが、ここに堀川などの小河川が流入し、埠頭内の火力発電所の温排水が放出されている。庄内川・日光川などの中河川は港の中央部に流入している。

公共用水域調査データによれば、名古屋港の貧酸素状態は夏季に悪化し、特に内港地区（N-1）の状況が悪い。そして、この貧酸素状態は 20 数年間にわたり大きな変化はない。杉山ら（2001）は水質と流況の観測を実施して、名古屋港の貧酸素化の過程について考察した。著者らは、この研究を引き継ぎ、3 次元数値流動解析を実行して、観測だけでは把握できない流況特性と貧酸素化の特徴や原因を探った。解析期間は夏季の 2 ヶ月間（2000 年 8 月と 9 月）である。本論文は、この結果について述べる。



図一1 名古屋港の地形・地名・観測点・縦断面

2. 数値解析法

流れ場の支配方程式は、静水圧近似とブシネスク近似を施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と、水温・塩分・溶存酸素（以下 DO）濃度の移流拡散方程式である。また乱流モデルには Mellor と Yamada のレベル 2（1982）を採用した。名古屋港は複数の河川の河口域にあり、感潮域が港内の流動と水質に影響している。また細いが流動検討上無視できない水路や港口の防波堤などの複雑な地形を持つ。そのため、基礎方程式の数値解析法に一般曲線座標系に基づく有限差分法（千葉ら、1999, 2000）を適用した。ここでは計算法の概略を述べる。

まず座標系を図二に示す。時間発展計算を効率的に行うために時間分離解法を採用する。流体運動を内部モードと外部モードに分けて解析し、3 次元方程式となる前者を長い時間間隔で、平面 2 次元の方程式に従う後者を短い時間間隔で積分する。最初に内部モードの時間積分式を示す。以下では、変数右上の添字は時刻の指標を表し、 n と $\#$ は内部モードの時間ステップ、 m は外部モードの時間ステップを表す。 $\#$ は仮の時間ステップとする。

$$u_n^{\#} = u_n^n + \Delta t (f_{n1}^{\#} + f_{n2}^{\#}) \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{n1} = -(u \cdot \nabla) u_n - (g/\rho_0) \int_z^{\eta} \nabla_h \rho dz + \nabla_h \cdot \sigma_{hh} + f_c \dots\dots\dots (2)$$

$$f_{n2} = \partial \sigma_{nz} / \partial z \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $u = (u_x, u_y, u_z)^t$: 3 次元流速、 $u_h = (u_x, u_y)^t$: 水平流速、 $f_h = (f_x, f_y)^t$: 水平加速度、 g : 重力加速度、 ρ_0 : 基準密度、 η : 水位、 ρ : 密度、 $f_c = (c_c u_y, -c_c u_x)^t$: コリオリ力、 c_c : コリオリ係数である。また、 ∇ : 勾配演算子、 $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^t$: 水平勾配演算子、 Δt : 内部モードの計算時間刻み、である。(1) 式の鉛直粘性項には陰解法が適用されている。応力項は次式で表す。

$$\sigma_{hh} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}, \sigma_{nz} = \nu_z (\partial u_x / \partial z, \partial u_y / \partial z)^t$$

* 正会員 博(工) 四日市大学教授環境情報学部環境情報学科
** 正会員 博(工) 中部電力株式会社電力技術研究所 研究員
*** 正会員 工 博 中部大学教授工学部土木工学科

$$\sigma_{xx} = 2\nu_h \partial u_x / \partial x, \quad \sigma_{yy} = 2\nu_h \partial u_y / \partial y,$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \nu_h (\partial u_y / \partial x + \partial u_x / \partial y)$$

ここで、 ν_h と ν_z : 水平と鉛直渦動粘性係数、である。

次に外部モードの時間積分について述べる。まず流速を水深方向に積分して線流量 $q_h = (q_x, q_y)^t$ を得る。

$$q_h^n = \int_{-h}^{\eta^n} u_h^n dz \cdots (4), \quad q_h^n = \int_{-h}^{\eta^n} u_h^n dz \cdots (5)$$

そして、内部モードの n ステップ目のデータを外部モードの 1 ステップ目の値とする。外部モードの計算では、区別のために変数名を変更する。

$$\theta_h^1 = q_h^n, \quad \phi^1 = \eta^n, \quad \psi^1 = \dot{\eta}^n$$

その後、以下の時間積分を mm ステップ間繰り返す。

$$\begin{aligned} \phi^{m+1} &= \phi^m + \Delta t_s g \nabla_h (\phi^m + h) \nabla_h \phi^m \\ &\quad - A - \alpha \Delta t_s (\phi^m + \nabla_h \cdot \theta^m) \cdots \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

$$\phi^{m+1} = \phi^m + \Delta t_s \psi^{m+1} \cdots \cdots \cdots (7)$$

$$\theta_h^{m+1} = \theta_h^m - \Delta t_s g (\phi^{m+1} + h) \nabla_h \phi^{m+1} + A \cdots \cdots \cdots (8)$$

ここで、 $\Delta t_s (= \Delta t / mm)$: 外部モードの計算時間刻み、 $A = (\Delta t_s / \Delta t) (q_h^n - q_h^n)$: 補正項である。(6)、(7)式は時間に関する 2 階の波動方程式である。一般的には線流量の発散を直接に水位の時間変化率に置き換えるが、本研究では準レギュラー格子系を用いるために、市松模様の数値振動が発生してしまう。2 階の波動方程式はこの振動を抑える効果を持つ。(6)式の右辺の第 4 項は数値誤差の累積を抑える項で、経験的に $\alpha = 1/(5\Delta t_s)$ 程度とする。

外部モードの時間積分終了後のデータを用いて、内部モードの次ステップの値を次のように決める。

$$\left. \begin{aligned} q_h^{n+1} &= \theta_h^{mm}, \quad \eta^{n+1} = \phi^{mm}, \quad \dot{\eta}^{n+1} = \psi^{mm} \\ u_h^{n+1} &= u_h^n (\eta^n + h) / (\eta^{n+1} + h) \\ &\quad + (q_h^{n+1} - q_h^n) / (\eta^{n+1} + h) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (9)$$

鉛直流速成分は連続条件に基づく次式で計算する。

$$u_z^{n+1} = - \int_{-h}^z \nabla_h \cdot u_h^{n+1} dz \cdots \cdots \cdots (10)$$

以上の (1) から (10) 式までを繰り返して時間発展解を得る。空間方向の離散化については本論文では触れないが、以上の方程式をデカルト座標系 (x, y, z, t) から一般曲線座標系 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \tau)$ へ変換した後に差分化する。本研究では質量保存に関係する各式に保存形の変換を、その他に非保存形の変換を施した。変換法の詳細は例えば Thompson (1985) に記述がある。なお、内部モードと外部モードを分離する解法は POM (Blumberg, 1998) にも採用されている。

計算格子上的各変数の配置は、 η と $\dot{\eta}$ を水面に接する計算セルの上面中央に、他の変数を格子点に置く。著者らはこれを準レギュラー格子系と呼んでいる。この格子系は非直交で良いために、複雑形状に対応し易く、格子の生成と境界条件の設定が容易になるという特色を持つ。

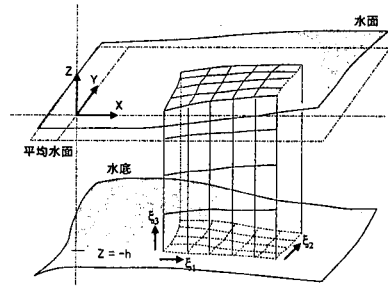


図-2 座標系 (z と ξ_3 は鉛直上向き)

水温と塩分と DO 濃度の移流拡散方程式の扱いは、運動方程式の内部モードの解析と同様であるため省略する。なお、DO 濃度の計算では底泥による消費と水面での再曝気を考慮し、植物プランクトンによる DO の生産は無視した。これは密度成層の抑制効果のために表層で生産された DO が中・底層に移流拡散しにくく、短期的な貧酸素化過程の検討には省略可能と考えたためである。密度の状態方程式、短波と長波放射による熱伝達、潜熱・顕熱輸送、飽和酸素濃度などの計算には、一般的な経験式 (横山, 1993, 近藤, 1994) を適用した。

3. 解析条件と計算格子

解析は杉山ら (2001) が観測を実施した 2000 年の 8 月 4 日～9 月 30 日を対象に行った。8 月 4 日に観測された 27 測点のデータを補間して、解析領域全体の塩分・水温・DO 濃度の初期値を決定した。速度と水位の初期値はゼロとした。沖合境界における塩分・水温・DO 濃度の値は、杉山らの 1 週間毎の観測値と、国土交通省の観測値 (2001) から定めた。図-3 に塩分と DO 濃度の期間内変化を示す。沖合境界の水位には名古屋港管理組合の潮位観測値を適用し、流速は自然流出条件で計算した。

河川流量は観測値と集水域の面積比などで決定し、河川流入境界における流速をこの流量から定めた。河川水温は日平均気温と同一とし、塩分はゼロ、DO は飽和しているとした。火力発電所の取放水口における流速、放水口の水温は表-1 に従い与え、塩分と DO 濃度は取放水口で値が変わらないとした。その他の海岸線境界と海底境界における速度の条件にはノンスリップ、水位・塩分・水温・DO 濃度には法線方向の微分がゼロの条件を用いた。

気象関連データ (気温、相対湿度、全日射量、風速、風向、全雲量) には名古屋地方気象台の観測値を用いた。水面における速度と水温の境界条件は、これらの値に従い与えた。他の解析パラメータを、まとめて表-1 に示す。

計算格子は図-4 に示すように、名古屋港の人工的な海岸線に沿った形状で作成し、流況と水質に影響を持つ

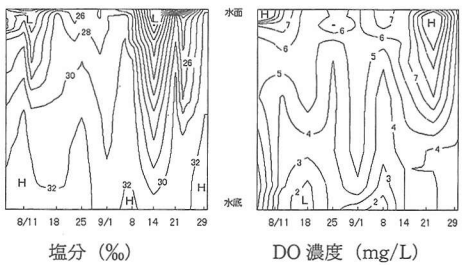


図-3 沖合境界における塩分と DO 濃度の変化

表-1 解析パラメータ

項目	説明
火力発電所	取放水量：38 m ³ /s (表層放水，深層取水)，放水水温：取水水温+7℃
底泥の酸素消費速度	1.69 (内港区域)，1.64 (港中央)，1.33 (港口) g/day/m ² (観測値)
渦粘性係数	水平：0.01 m ² /s，鉛直 (下限値)：5.0×10 ⁻⁶ m ² /s
渦拡散係数	水平：0.01 m ² /s，鉛直 (下限値)：1.0×10 ⁻⁶ m ² /s
海水中的の光の消散係数	4.0 m ⁻¹ (表層)，2.0 m ⁻¹ (中層)，1.0 m ⁻¹ (底層) (観測値)
その他	海底の粗度係数：0.025 (マニング)，海面のアルベド：0.93，海面と大気の摩擦係数：1.83×10 ⁻⁶ ，再曝気係数：0.15 day ⁻¹
計算時間刻み	20 s (内部モード)，2 s (外部モード)

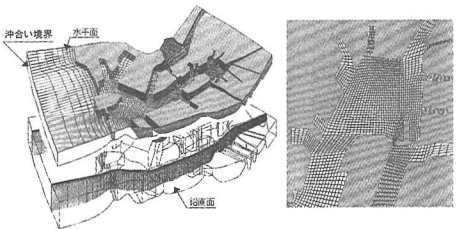


図-4 計算格子全体図と港奥部の水平面の格子，格子数は 151 (湾軸方向)，85 (港幅方向)，25 (水深方向)

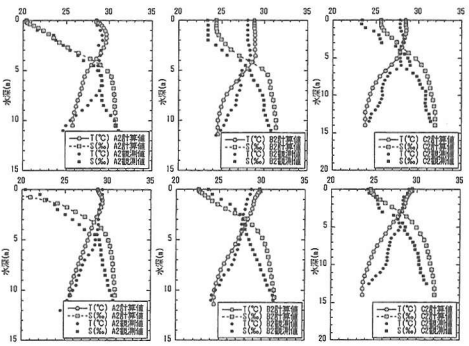
と考えられる細い水路や河川感潮域などを再現した。また，港口における海水交換を自然な形で行わせるために，沖合境界は港口から離して (約 4 km) 配置した。

鉛直面の格子は水面方向に向かって格子幅が狭くなるように設定した。このような可変幅格子は，水面から躍層までの塩分・水温の鉛直分布を高精度に解析するために，またリバーブルームを捕捉して鉛直シアー拡散を計算に反映させるために用いた。図中の灰色に塗りつぶした部分はマスク領域であり，この内部では計算は行わず，領域周囲で境界条件を与えた。水深データは海図 (海上保安庁，2000) に基づき設定した。

4. 解析結果と考察

(1) 8月21日の観測データとの比較

計算開始 (8月4日) から 17 日目にあたる 8月21日の計算結果を観測値と比較する。杉山らは同日に図-1の A～E 測線において水温・塩分の観測と ADCP による流



(a) A 測線中央 (b) B 測線中央 (c) C 測線中央
図-5 8月21日午前6時 (上げ潮，上図) と正午 (下げ潮，下図) の水温と塩分

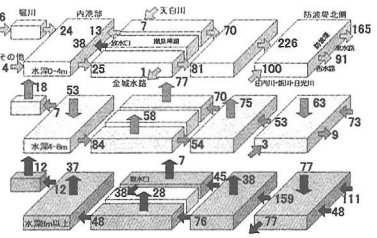


図-6 8月21日の流量収支 (24時間平均値，m³/s)

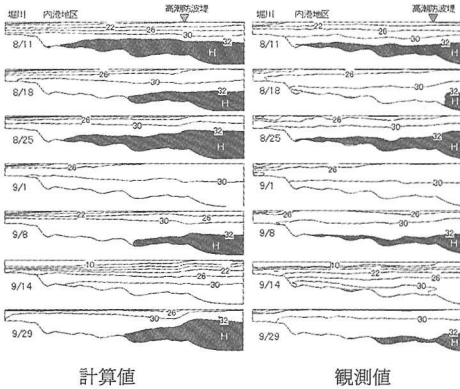
速観測を実施した。図-5 に午前 6 時と正午の水温・塩分のデータを示す。絶対値については僅かな差がみられるが，水深方向の変化傾向や躍層位置について，計算値と観測値の一致度は高く，計算結果の全般的な精度の高さが確認される。杉山らは 1 潮汐間の残差流を求めて，測線 B と C において，底層流入 (北上流) で表層流出 (南下流) が顕著であったと報告した。図-6 に 8月21日の流量収支の 24 時間平均値を示すが，計算値も底層流入と表層流出となった。

(2) 解析期間内の流動と水質変化

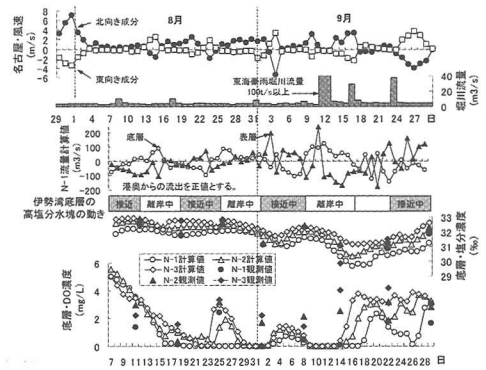
解析期間内の縦断面 (図-1 参照) の塩分と DO 濃度の変化を図-7 と 8 に，風速，堀川流量，内港地区の流入流出量，塩分，DO 濃度などを図-9 に示す。図-7 と 8 の観測値は，観測点のデータを空間補間して作成した。

最初に塩分変化について述べる。8 月上旬は降雨の影響で表層の塩分が低く，その後は乾燥が続いて表層の塩分は上昇した。9月11日と12日は記録的な雨量を観測した東海豪雨にあたり，多量の淡水が流入して強い塩分成層を形成した。この塩分低下は約 2 週間後の 9月29日には解消され，豪雨前の状態に戻った。図-7 と 9 に示されるように，全解析期間を通じて計算値は観測値を良く再現した。

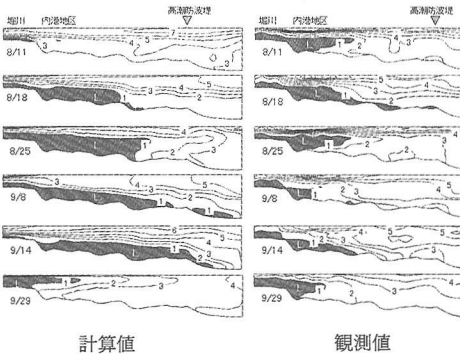
次に名古屋港底層の塩分の反復的な増減変化について



図一七 縦断面の塩分変化 (8/11~9/29), 単位 (%)



図一九 解析期間内 (2000 年 8~9 月) の風速、堀川流量、流量計算値 (N-1 を含む水路横断面を通過する流量)、港外高塩分水塊の動き、塩分・DO 濃度 (N-1~3 地点) の計算値と観測値



図一八 縦断面の DO 濃度変化 (8/11~9/29), 単位 (mg/L)

述べる。図一七と九には反復周期が10日から2週間前後の底層の塩分変化が観察される。図一九の底層塩分計算値の時間変化を観察すると、位相のずれが存在し、港外 (N-3) の塩分変化が発生してから、港中央 (N-2)、内港地区 (N-1) へと影響が伝わっている。その間の時間遅れは約2日である。この変化は移流によってのみ説明可能である。約2日の時間遅れは、港外と内港地区間の底層水の移動に要する時間である。具体的には図一三に示すように、8月11と25日、9月8日と29日に港外中底層の塩分上昇があり、このために港外中底層の圧力が高まって港外底層の高塩分水が港内底層に侵入したとみられる。また、8月18日と9月1日には港外の中底層の塩分が低下し、港外からの圧力が降下して、港内底層の高塩分水が港外へ排出したか、または鉛直拡散により減少したとみられる。

次に DO 濃度について述べる。図一八と九に示すように、貧酸素水塊の挙動が計算結果に概ね再現された。全体的に計算値の DO 濃度が観測値に比べて低い傾向にあるが、これは光合成による DO の生成を無視したためと推定される。図一八を観察すると、底層水の侵入があった

と考えられる8月11日、25日と9月29日のデータにおいて、港奥に存在する DO 濃度 2 mg/L 以下の貧酸素水塊が中層に浮上している。これは、DO 濃度の相対的に高い水塊が下層に入り込んだためであろう。底層水の侵入があったとみられる9月8日の観測値において、貧酸素水塊が浮上していないのは、港外の底層水の DO 濃度が 2 mg/L 以下であったためと考えられる。8月18日のデータは港内全域の底層部で 2 mg/L 以下の貧酸素状態になっているが、これは底層水の排出の際に港奥部の貧酸素水が港口へと流れて貧酸素化を助長したためと推定される。伊勢湾の底層水が間欠的に名古屋港の底層に侵入することにより、中層貧酸素水塊と港内全域に広がる底層貧酸素水塊を交互に生じさせていることが、以上の検討で明らかになった。

(3) 名古屋港の鉛直循環と貧酸素化に関する考察

港外の中底層の塩分変化に従って、底層水の侵入と排出が生じていることを述べた。この現象をさらに考察する。図一九に内港地区南西側の水路断面 (N-1 を含む東西方向の横断面) を通過する表層 (水深 4 m 以浅) と底層 (水深 8 m 以深) の流量計算値と底層塩分の変化を示す。このデータを観察すると、港外の底層塩分が上昇傾向にある場合に底層流量は負値 (流入) で、港外の底層塩分が低下傾向にある場合は正值 (流出) であることが概略読み取れる。表層流量については、さらにバラツキが大きい。このデータは、底層水の侵入が港全体の鉛直循環を変化させていることを示唆している。図一六と同様な流量収支を解析期間全体にわたり調べた結果、鉛直循環の逆転が繰り返し生じていることがわかった。具体的には8月11日、25日、9月1日、14日は表層流入・底層流出、8月21日、9月8日、22日、29日は表層流出・定

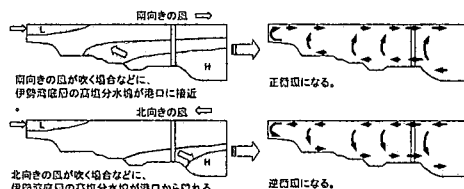


図-10 港外の高塩分水塊の位置と鉛直循環の模式図

層流入であった。杉山らは8月21日の観測結果に基づいて、夏季の名古屋港は表層流出・底層流入であると判断したが、それは交番変化する鉛直循環の瞬間を捉えたものと考えられる。なお、解析した2ヶ月間の流量収支の平均値としては、明瞭な鉛直循環は存在しなかった。

次に内港地区を中心とした港奥部の貧酸素化の過程を考察する。港外から侵入する底層水は数日間を経て港奥部へ達する。底泥の酸素消費速度観測値は1.3~1.7 g/day/m²の範囲にあり、仮に海底上方5 mの海水層がこの影響を受けると考えると、港奥部に達するまでにDO濃度は約1 mg/L低下する。鉛直循環の交番周期を約10日とすると、侵入した底層水は港奥部に数日間滞留し、その後排出されることになる。その場合、滞留時間内にさらに1 mg/Lの低下がある。港外底層水が貧酸素化(<3 mg/L)した場合は、港奥部の底層水はほとんど無酸素状態になることが以上の計算で示された。

最後に港外中底層の塩分変化と風向の関係について述べる。図-9を観察すると、南向きの風が吹いた後か、強い北向きの風が止んだ後に、港外の底層塩分が上昇する傾向が多い。これは、風により伊勢湾北部に鉛直循環が生じて、底層の高塩分水塊が移動したものと推察される。以上の考察に基づき名古屋港の鉛直循環の模式図を作成して、図-10に示した。名古屋港に吹く風の影響によっても鉛直循環が生じるが、これは港外の高塩分水塊に起因する鉛直循環を助長していると推察される。

5. 2001年に実施された観測とその結果

杉山らは2001年の夏季にも貧酸素水塊に関する調査を実施した(未発表)。名古屋港中央部(図-1のC測線中央付近)において水質を約3週間にわたり計測した。図-11にその結果を示す。9月8日まで卓越していた南東風が弱まり、北西風に転じる数日間に、濁度が一時的に上昇し、その後に塩分とDO濃度が上昇し、水温が低下している。これは港外からの高塩分水の侵入を示すと見るべきであろう。この観測結果から、高塩分水が港外から間欠的に侵入する現象は、夏季の名古屋港にかなり普遍的なものであることが確認された。

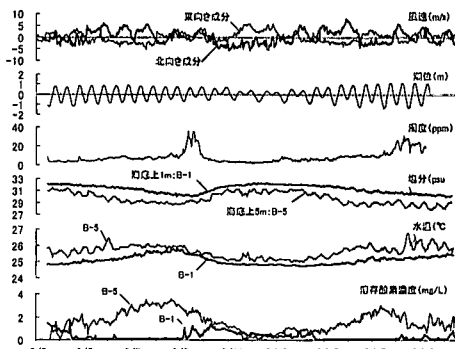


図-11 2001年9月に観測された底層水の侵入現象

6. おわりに

2ヵ年にわたる観測と3次元数値解析結果から、外洋に面していない名古屋港のような小湾においても、港外の海域との強い相互作用が、港内の流動と水質に強く影響していることが明らかになった。本研究で示された鉛直循環の反転を伴う伊勢湾との海水交換率を定量化することが今後の課題であろう。具体的な海水交換率を提示することにより、港への栄養塩や有機物の許容流入量を決定することが出来、覆砂や浚渫などの水質改善策を立案することが可能になると考えられる。

参考文献

- 海上保安庁 (2000): 海図, W1055, 名古屋港北部。
- 国土交通省中部地方整備局他 (2001): 平成12年度名古屋港環境現況調査報告書, 646 p.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学, 朝倉書店, 337 p.
- 杉山陽一・依田 眞・原田一利 (2001): 名古屋港の貧酸素水塊に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1056-1060.
- 千葉 賢・武本行正 (1999): 伊勢湾数値シミュレータの研究・第3報(3次元モデルの開発), 四日市大学環境情報論集, 第3巻, 第1号, pp. 19-60.
- 千葉 賢・武本行正 (2000): 伊勢湾数値シミュレータの研究・第4報(ゼロ方程式鉛直渦粘性・渦拡散モデルの導入と夏季の流動場解析), 四日市大学環境情報論集, 第4巻, 第1号, pp. 33-62.
- 横山長之総合編集 (1993): 海洋環境シミュレーション, 白亜書房, 201 p.
- Mellor G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 20, No. 4, pp. 851-875.
- Mellor G. L. (1998): Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical model, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>
- Thompson J. F., Z. U. A. Warsi and C. Mastin (1985): Numerical grid generation foundation and application, Elsevier, pp. 95-135.