

報告

2003年東京湾に発生した繊毛虫 *Mesodinium rubrum* による 赤潮と水生生物の大量死の連関に関する調査事例

Correlations among red tide due to *Mesodinium rubrum*, and mass mortality of aquatic organisms at Tokyo Bay in 2003

古川 恵太*・中山 恵介**・水尾 寛己***

Keita FURUKAWA, Keisuke NAKAYAMA and Hiromi MIZUO

要旨: 2003年5月末に東京湾西岸の横浜を中心として、水生生物の大量死が発生した。本報告では、その原因を探るために開催されたワークショップでの議論を紹介するとともに、内湾域におけるイベントの連鎖的な発生機構に着目して行ったシナリオ検証的解析の結果を報告する。その結果、*Mesodinium rubrum*による赤潮が移流していく過程で沈降分解し、水塊の貧酸素化を引き起こし、生物の大量死に連鎖した可能性が示され、観測とモデルを組み合わせたモニタリングの重要性が示唆された。

キーワード: *Mesodinium rubrum*, 東京湾, 赤潮, 貧酸素水塊, 水生生物, 大量斃死

1. はじめに

東京湾は、水面積約 960km²、平均水深 15m の閉鎖性の内湾域である。高い汚濁負荷量 (COD で約 300t day⁻¹) を受け、湾奥には高濃度の有機泥が堆積し、湾内の富栄養化、植物プランクトンの増殖などに影響を及ぼしている (岡田ら, 2001)。

東京湾の海水交換速度は、淡水流入量、湾内循環の様相、地形、潮汐などに左右され、夏場 20 日、冬場 40 日~90 日程度である (宇野木・岸野, 1977; 高尾ら, 2004)。夏季には成層化が進み、上下層で異なるバロクリニックな循環構造となるエスチュアリー循環を呈し、冬季に成層が破壊され、バロトロピック成分がバロクリニック成分とともに流動構造を形成する (高尾ら, 2004)。

漁獲対象種からみると、1960 年代のピーク以後、えび・かに・いか・たこ等の漁獲量の減少が始まり、貝類の急激な減少も受け、一時 10 万トン

を超えていた漁獲量は、1990 年代には約 2 万トン程度となり、現在は横ばい状態となっている (清水, 2003)。

東京湾再生推進会議 (2003) においては、【首都圏にふさわしい「東京湾」を創出する】ために、陸域負荷削減の推進、海域における環境改善対策の推進とともに、東京湾のモニタリングの重要性が謳われており、底層 DO や底生生物のモニタリングの充実の重要性が指摘されている。

本論文では、2003 年 5 月末の水生生物の大量死について、その原因を探るとともに、その中で明らかになってきた内湾域におけるイベントの連鎖的な発生機構の検討を行い、こうした生物の大量死につながるようなイベントの発生や、種の組成の変化等の生態系の変化をモニタリングする意義や有効な手法をケーススタディとして検討する。報告する内容は以下の通りである。

* 正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部, ** 非会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部,

*** 非会員 横浜市環境創造局環境科学研究所 基礎研究部門

今回のイベントにおいては、*Mesodinium rubrum* 赤潮の発生、貧酸素水塊の発生が関与していたことが示唆されたので、まず、今までの赤潮・貧酸素水塊の発生状況についてまとめた。次に、東京湾の環境をモニタリング・研究している関係者が集まり生物の大量死に関する情報をワークショップ形式で意見交換、検討を進めることで、イベントの全容を把握する試みを行った内容を報告する。最後に、そのワークショップで示唆された生物の大量死の発生機構について、数値計算を主体として仮説を検証した結果を提示する。

2. 東京湾での赤潮・貧酸素水塊の発生状況

2.1 赤潮発生状況

東京湾における赤潮は、春季から秋季を中心に年間 15~20 回程度の発生頻度で湾奥部を中心に発生しているが(図-1)、時に湾口部の相模灘の沿岸部から外湾にかけて夜光虫や *Prorocentrum* 赤潮が発生することがある。東京湾における赤潮の記録などを取りまとめた岡市(1987)によれば、1900 年前後に *Gymnodinium* 赤潮が記録され、魚類(うなぎ、すずき等)の大量死の記録がある。また、1936 年には深川沖で大発生した *Mesodinium rubrum* 赤潮の報告(松江, 1934)があり、透明度の低い(0.5-1.0m)状況が記録されているものの、生物の大量死の被害はなかったようである。さらに、赤潮発生が頻発するようになった 1950 年から 1960 年頃までは、主に *Gymnodinium* 赤潮が多かったものの、その後、夏季の *Rhodomonas*, *Prorocentrum* による赤潮、秋季の *Gymnodinium* spp.による赤潮が例年同じように見られる期間が続いた。さらに珪藻赤潮である *Skeletonema costatum* に関しては、夏以外に厳冬期にも出現していた。

野村(1998)による最近の東京湾における赤潮プランクトンの変遷のまとめによれば、1970 年代

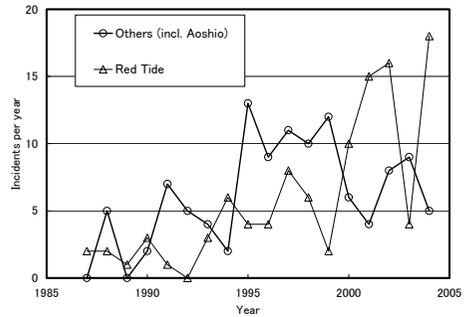


図-1 東京湾における赤潮発生件数の推移
(海上保安白書のまとめによる)

に入って *Gymnodinium* が優占の赤潮が少なくなるという赤潮生物相の変化が見られ、小型鞭毛藻類や珪藻類の赤潮が見られるようになり、*Skeletonema* 赤潮が頻繁に見られるようになった。ラフィド藻類の *Heterosigma akashiwo* が最初に記録されたのもこの時期である。ただし、*H. akashiwo* の記録が無いのは、ホルマリン固定によるサンプリングに問題があったせいであり、それまでの赤潮形成種でなかったと断定できないと指摘されている。

その後 1980 年以降、水質が良くなってきたことを反映し、1992 年頃に赤潮の発生件数が減少したという評価もあったが、その後の海上保安庁の調査結果等を見ても、青潮を含むその他の海洋汚染の発生件数とともに、変動が大きく全体としては、横這いか増加傾向にある(図-1)。

1995 年頃からは、東京湾内で *M. rubrum* が *Noctiluca scintillans* とともに、赤潮の優占種として認識されるようになってきている。これらの種は、パッチ状の分布を取ることが知られており、表層に *N. scintillans*, その数 m 下に重層的に *M. rubrum* が分布するような状況も観測されている(東京湾ワークショップ, 2004)。

さて、2003 年には、5 月 6 日に湾域全体で *Skeletonema costatum* の赤潮が発生し、栄養塩が枯渇した。その後、5 月 12 日の降雨により表層での

低塩分が観測され、5月14日に内湾の広い範囲で *M. rubrum* の赤潮が確認されていた（千葉県水産総合研究センター，2005）。この *M. rubrum* の発生については、例年観測されていた濃度より高かったという特徴が報告されている（東京湾ワークショップ，2004）。

2.2 貧酸素水塊（青潮）発生状況

東京湾における青潮は、基本的に底層水の滞留や酸素消費といった物理・化学的な働きにより生成された貧酸素水塊が、底質からの硫黄分とともに表面に湧昇し着色する現象である（佐々木ら，1996；小倉ら，1994）。本論文では、青潮も貧酸素水塊としてまとめて記述するものとする。

貧酸素水塊の現況把握のために、東京湾においては千葉県水産総合研究センター（編集とりまとめ）、神奈川県水産総合研究所、内湾底びき網連絡協議会が主体となり、海上保安庁海洋情報部、千葉県環境研究センター、東京都環境局の協力により貧酸素水塊速報が発行されている。そうしたモニタリング結果によれば、貧酸素水塊は5月後半から10月を中心に発生しており（図-2）、青潮は7-9月に年数回の発生が観測されている。

湾奥部では、夏季の成層期に底層のDO（溶存酸素）が年間数回程度貧酸素化・無酸素化し、カレイ等の底魚が夏季に湾奥部を逃れ湾口部に生息域を移動するとともに、底層生物がいなくなる現象が見られる（石井，1992）。青潮として海表面に広がると、浅海域に生息するアサリやノリの幼芽などが被害を受ける。アサリの産卵期が東京湾においては、7-8月と9-11月の2回に分かれたピークを持ち、後半の秋着底群の成長が良好であり、漁業資源を形成することからも、夏季の青潮などの一過性の環境悪化がアサリの定着・生長に関係している可能性も指摘されている（柿野・鳥羽，1990）。

2003年においては、5月16-19日と9月22-

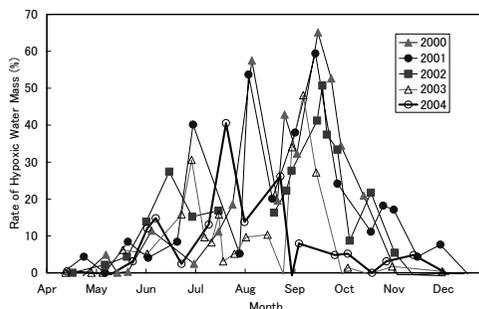


図-2 東京湾における貧酸素水塊の発生状況（千葉県水産総合研究センターのまとめによる。貧酸素水塊の発生割合は、湾軸に沿った断面内における貧酸素(2.5ml/L)以下の発生している面積の割合で算出している)

24日の2回青潮が湾奥の千葉港前面～浦安地先で発生しており、東京湾奥での貧酸素水塊の継続的な発生は4月28日～11月5日であった。これは、例年とほぼ同期間、同規模であるが、7月までは例年並、8月は冷夏のため小規模、9月に1度大規模化といった変化をたどり規模の大きい期間が短い年であった（千葉県水産総合研究センター，2005）。

3. 東京湾ワークショップによる水生生物大量死の概要の整理

3.1 東京湾ワークショップの開催

2003年5月末に東京湾西岸の横浜市沿岸域を中心として水生生物の大量死が発生した。しかし、発生当初から断片的な情報が錯綜し、現象の全体像の把握が困難であった。

そこで、東京湾の環境をモニタリング・研究している関係機関が集まり生物の大量死に関する情報をワークショップ形式で意見交換、検討を進めることとした（表-1）。当該の東京湾ワークショップは、2003年11月8日、2004年2月14日、2004年6月1日に合計3回開催した。第1回では、国総研から横浜市沿岸域における大規模な湧昇による貧酸素化（青潮）の発生の可能性を数値的に検

討したレポートや、現地での観測状況等が報告された。第2回においては、先行して発生した *Mesodinium rubrum* 赤潮との関連を示唆する修正案が議論され、補強の情報、関連情報などが提供された。第3回には、参加者間で合意できる生物の大量死のシナリオについて議論され、今回のまとめの骨子となる部分が検討された。

以下に、東京湾シンポジウムにおいて交換された情報をとりまとめて報告する。

3.2 水生生物大量死を含めた経過とその被害

2003年5月から6月における経過を収集された情報を時系列で整理したものを図-3に、空間的に整理したものを図-4に示す。5月5日から9日までの5日間には、*M. rubrum* まじりの *S. costatum* による赤潮が発生しており、その後、5月12、13日と、東京港中央防波堤、横浜港内の大黒埠頭とみなとみらい付近、大岡川河口から1.5kmまで *M. rubrum* による赤潮が観測され、隅田川河口では、3880個体/mlが確認されている(水尾ら, 2004)。この赤潮に引き続いて、下記のような臭気および生物の大量死が発生した。

- 5月23日、大岡川付近でアミン等の窒素化合物のような臭気
- 5月23日から27日にかけて、横浜港内、金沢湾で硫化水素臭が発生および魚介類の大量死
- 5月26日、磯子区市民からの臭気と魚の浮上の連絡
- 6月1日、野島海岸でアマモ・コアマモ群落の枯死・消滅、二枚貝を中心にベントスの大量死の確認

生物の大量死の様相は、青潮による魚介類被害に類似していたので、当初、横浜市沿岸水域で青潮発生との情報、解釈がなされていた。しかし、当時、東京湾奥部の東京港を中心とする貧酸素水塊が存在したものの、横浜市沿岸・沖合域には貧

表-1 東京湾ワークショップの参加機関

参加機関 (あいうえお順)	
海辺つくり研究会	千葉県環境研究センター
海をつくる会	千葉県水産研究センター
大阪市立大学	株式会社東京ソイルリサーチ
神奈川県環境農政部	東京工業大学
神奈川県水産総合研究所	東京都環境局
関東地方整備局	東京都水産試験場
独立行政法人港湾空港技術研究所	東京都立大学
国土技術政策総合研究所	東洋建設株式会社
特定非営利活動法人 三番瀬環境市民センター	横浜国立大学
三洋テクノマリン	横浜市環境科学研究所
SHIP & OCEAN FOUNDATION	横浜市立大学大学院

酸素水塊が広がっていなかったこと(平成15年6月10日発表の東京湾海況情報 15-03より)、イベント発生直後に測定した溶存酸素濃度が底層で高かった(横浜市環境科学研究所による調査)、ことなどから、今回の生物の大量死の原因は、局所的な湧昇現象は生じていた可能性があるもの、大規模に底層から貧酸素水塊が湧昇し青白色化現象が生じる様な、いわゆる「青潮」ではなく、*M. rubrum* による赤潮発生、死亡後の貧酸素化が関連している見解が大勢を占めた(東京湾ワークショップ, 2004)。

3.3 赤潮の発生時期の環境

上記の赤潮が発生していた期間における水質変化の特徴について、水尾ら(2004b)は、5月22日1時から27日24時までの横浜市本牧常時監視局(図-4: 水面下5m(水深約11m)のところからのポンプ採水)のDO、クロロフィルa濃度、CODの時系列変化図(図-5)から明らかにしている。

DO濃度については、22日の0時から明け方の9時頃にかけて低下し、その後増し、13時から14時頃に最大値となり、19時頃に急減して1mg/lを示した。日中、DOが上昇したのは *M. rubrum* に共生している藻類による炭酸同化作用によるものと考えられる。その後、23日13時まで0から2mg/lの範囲で変動し、19時に上昇して4mg/l



図-3 2003年5月末を中心とする赤潮一生物の大量死に関する情報

になり、すぐに低下した。24日3時から7時頃までのDOは0mg/lで、11時頃に上昇し3mg/lになり、その後下降した。25日0時頃から26日11時頃までの約35時間DOは0mg/lの状態になっていた。12時には回復し始め、2から4mg/lの値で変動した。

クロロフィルa濃度は、22日12時頃から上昇し最大で140 μg/lを示し、日中には90 μg/l前後で夜間には40 μg/lまで下がった。23日に最大値は80 μg/lで、日中50 μg/l前後で夜間は30 μg/lぐらいまで下がっていた。24日には20から60 μg/lの範囲で変動していた。25日3時頃からクロロフィルa濃度は5 μg/l以下で27日13時まで続いていた。

CODはクロロフィルa濃度と同様な変動を示し、クロロフィルa濃度の高かった22日12時頃はCODは19mg/lを示し、クロロフィルa濃度が

5 μg/l以下を示した25日3時頃のCODは8.1mg/lで27日には2.8mg/lまで低下していた。22日から25日にかけてのCODが高かったのは、クロロフィルa濃度が高かったことから、赤潮プランクトンによるものと思われる。

25日頃から急激に見られたクロロフィルa濃度の低下と無酸素化の状態については、異常発生した*M. rubrum*が死滅によりクロロフィルa濃度が低下したと共に、バクテリアにより分解される過程で酸素が消費され、嫌氣的になったのではないかと推定される。

4. 東京湾西岸における赤潮の集中発生メカニズム

赤潮・貧酸素水塊・生物の大量死が時間的、空間的に、ある部分は同時に、またある部分は離散的に発生している状況が示されたので、こうし

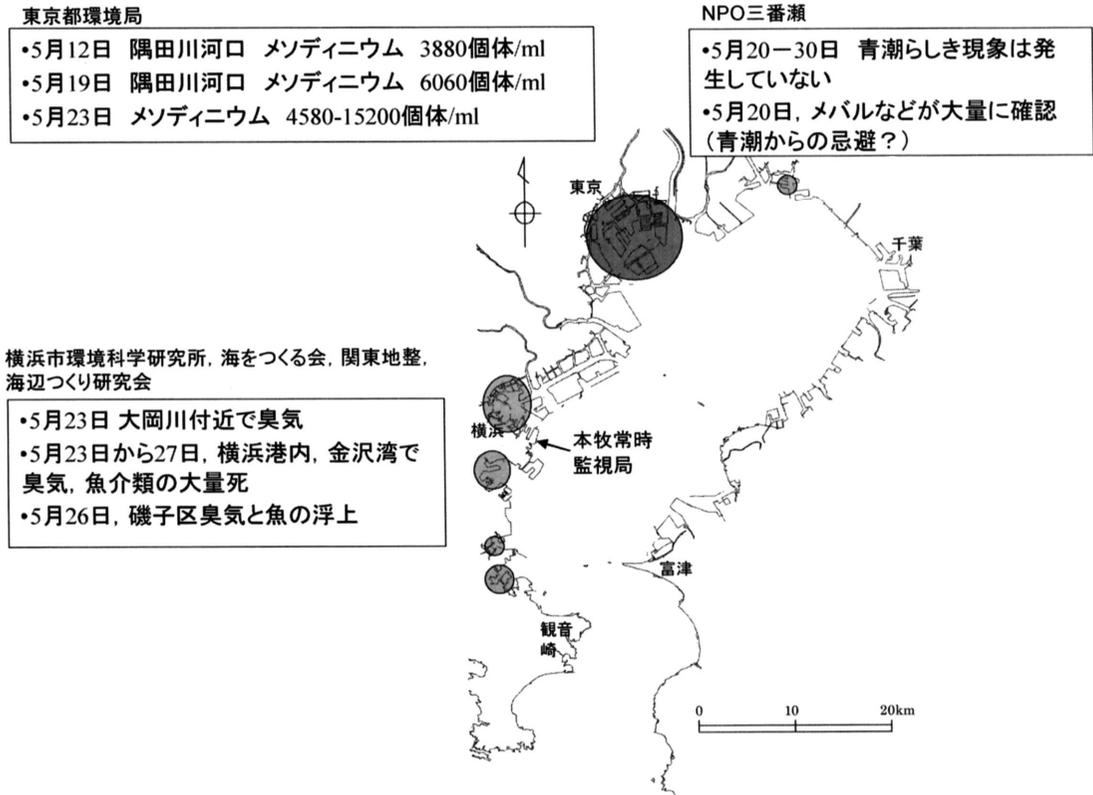


図-4 2003年5月の赤潮-生物大量死の発生に関する情報の地理的配置

た現象を湾内の循環と連携して解析するために、三次元非静水圧沿岸域流動モデルを用いた流動解析を行った(Nakayama et al., 2001; Nakayama et al., 2005; Nakayama, 2005)。計算条件は、表-2に示すとおりである。

数値解析は、2つの現象の発生可能性を検討するために行われた。まず、水生生物大量死が発生する前に、東京港を中心とする貧酸素水塊の存在(平成15年6月10日発表の東京湾海況情報15-03で確認されている5月19日現在の分布状況を参考とした)を初期条件とし、横浜市沿岸域への到達可能性を検討した。そして、赤潮のもとであるプランクトンが東京港で発生し、横浜市沿岸・沖合域まで到達する可能性を検討した。検討項目が、流動が精度よく再現されるということを前提としているため、数値解析モデルには、以下

に示される特徴をもつモデル(MEL3D)を用いた。

乱流エネルギーは、「1方程式モデル」に準ずるものとして水平拡散係数を算出し(Deardorff, 1975 and 1980; Klemp and Wilhelmson, 1978)、成層状態における鉛直拡散係数の変化は、代数方程式化し定常状態を仮定した「2方程式モデル」から得られる乱流プラントル数を用いて考慮することとした(Lilly et al., 1967; Schmidt and Schumann, 1989)。沿岸流動モデルでは、時間積分に Time Splitting を用いて予測子、修正子を計算し、CIP法(Yabe et al., 1990; Yabe et al., 1991)を組み合わせるものを用いる。表面波による非線形な影響は、東京湾の計算において小さいため、表面波による CFL 条件が1以上でも計算できるように、完全陰解法により表面波を解いている。空間微分に関して、拡散項は保存型の有限体積法に基づき計算されている。

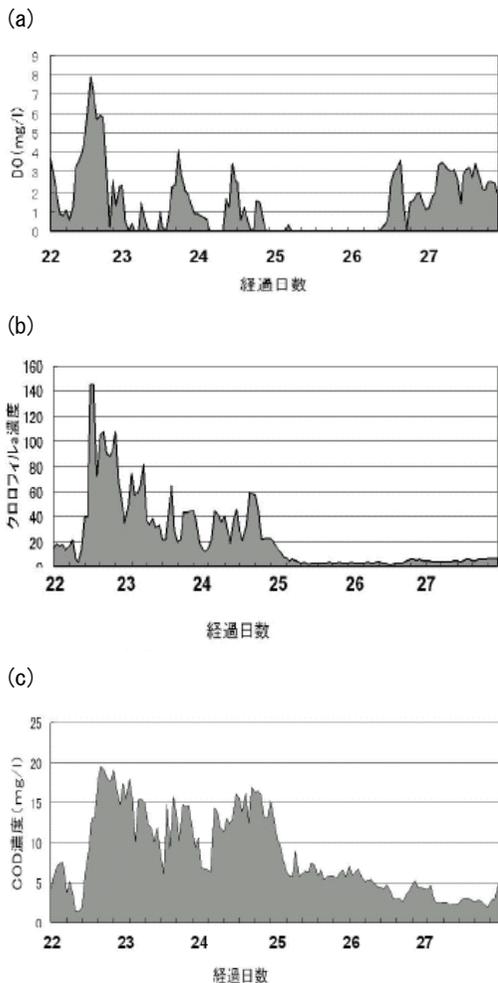


図-5 本牧における水質変化(2003年5月22日～27日), (a) DO, (b)クロロフィル a, (c)COD 濃度

対流項は CIP 法による。非静水圧成分を計算する際のポアソン方程式の解法には、残差切除法 (Tamura et al., 1997) を用いている。残差切除法は、繰り返し計算による収束性を高める方法である。その際、近似解を得るために、SOR 法を用いた。水面は ALE 法 (Hirt et al., 1972) により計算されている。

最初に、東京湾の湾奥の貧酸素水塊の横浜市沿岸・沖合域への到達可能性について示す。計算は、5月19日0:00から5月25日0:00にかけて、東京湾の湾奥水深一様に酸素濃度ゼロの水塊が発生し

表-2 計算条件の一覧

条件	適用
モデル	3次元非静水圧沿岸域流動モデル
計算条件	非定常
メッシュ数	65 × 45 × 50
空間メッシュ範囲	65km × 45km
鉛直層圧	表層4mまで1m毎, 以下4m毎
潮汐条件	潮汐(4分潮合成)
河川流入	江戸川, 荒川, 多摩川, 鶴見川の4河川を1次元モデルで再現
平均流入量	江戸川, 荒川, 多摩川, 鶴見川に対し, 100 m ³ /s, 90 m ³ /s, 40 m ³ /s, 7 m ³ /s を平均流量として設定
時間間隔	36s
計算期間	2003年5月19日～5月25日
気象条件	横浜の気象条件を湾域一様に与える

たととして行われた。この計算条件は、平成 15 年 6 月 10 日発表の東京湾海況情報 15-03 で確認されている 5 月 19 日現在の分布状況を参考としているものの、分布を過大評価した状態である (図-6a)。期間中の潮汐は主要 4 分潮の合成、風は横浜地方気象台の時系列データを東京湾全域に一様に与えた。

6 日後の計算結果により、図-6 に示されるように、金沢湾沖における東京湾の湾奥から輸送される貧酸素水塊の濃度は低いことが分かり、東京湾の湾奥で発生した貧酸素水塊の横浜市沿岸・沖合域への移流可能性は、流れの数値解析からは否定された。

続いて、赤潮との連関に関する検討について述べる。東京港で赤潮が大量発生したのが 18 日前後であることから、5 月 19 日 0:00 から 5 月 25 日 0:00 まで計算を行った。赤潮のもとであるプランクトンは自己増殖を行う。そのため、赤潮の移流、拡散を計算する場合、貧酸素水塊の検討の際に用いたような溶存態としての取り扱い是不適当である。そこで、赤潮の移流、拡散を再現するために、図-7 に示す点東京港上層から粒子を投入し、それ

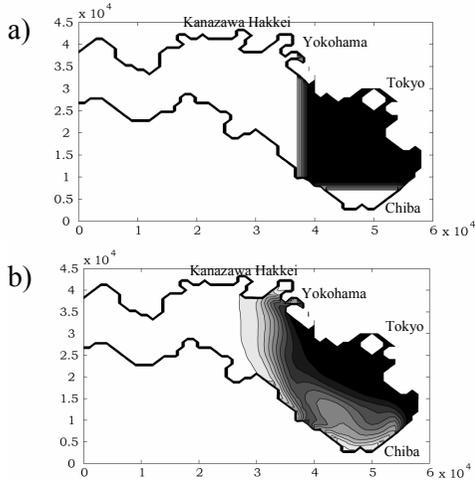


図-6 モデルによる東京湾の湾奥におけるトレーサの移流計算結果、a) 初期条件、b) 6日後（黒が濃度1、白が濃度ゼロに対応する）の分布状況

らをプランクトンとして考え、中立浮遊状態を仮定して移流、拡散計算を行った。拡散の計算にはランダムウォーク理論を用いた。潮流と風の影響により、粒子は横浜港周辺まで約一週間で運ばれる可能性があったことが分かる（図-7）。

5. 水生生物の大量死の原因の推定結果

横浜市沿岸・沖合における生物の大量死の発生の記録は、極めて少ない。1984年に恵比寿運河で底生魚類のカレイやアナゴなどが浮いた事故が記録されており、その時に運河では銅のような色をしていたと記録されており、いわゆる青潮時に見

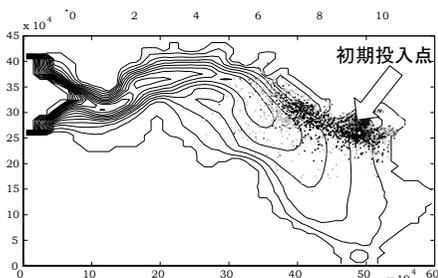


図-7 モデルによる東京港からの赤潮南下メカニズムの検証（初期投入点表層よりトレーサを投入し、6日後の移流地点をプロットした）

られるコロイド状態の青白色化現象と推定される（横浜市公害研究所，1991）。今回の生物の大量死の時にも、横浜港内の一部、本牧、根岸湾、金沢港で海水が青色をしていたことから、海水が千葉県などで見られる青潮と類似の海色を示したと思われる。

しかし、今回横浜市沿岸の一部で見られた青潮化現象は、千葉県沿岸で見られるような底層での大規模な貧酸素化と風による湧昇というメカニズムにより発生したものではないと思われる。局所的に北岸壁になる部分に対して貧酸素水塊の湧昇による青潮の可能性については検討の余地があるものの、大規模な青潮化現象の発生の確証は得られなかった。

青潮化現象の可能性としては貧酸素水塊の湧昇によるのではなく、赤潮生物の死亡・分解により貧酸素水化が進行する場合が考えられる。現象とその根拠、時間軸で整理し直すと以下のようになる。

- (1) 東京港近辺で *M. rubrum* 赤潮が発生、少し遅れて横浜市沿岸域でも *M. rubrum* 赤潮が発生（横浜市環境科学研究所調査、東京都構造改善局より）（5月19日前後）
- (2) 降雨による出水および、風の吹き寄せ効果により赤潮水塊が、東京湾西岸に押し付けられる形で南下。横浜市沿岸付近の赤潮はさらに南下（東京気象台速報および、数値解析結果からの推定）（5月22～25日）
- (3) 根岸沖で中層に貧酸素水塊が確認される（横浜市環境科学研究所調査より）。*M. rubrum* の異常増殖と死亡による沈降・分解が進んだ結果か（東京湾ワークショップでの議論）（5月23日）
- (4) *M. rubrum* の死亡による分解物とそれによる貧酸素水塊が、横浜沿岸を中心とする河川河口部、干潟、浅場に到達（数値解析結果からの推定）（5月25日）、同時に横

浜市沿岸域での *M. rubrum* の死亡による貧酸素水の生成。

- (5) 貧酸素および、粘性のある *M. rubrum* の分解物による直接的な生物への影響および、底層の貧酸素化による硫化水素の発生による魚類、マテ貝、アマモなどの生物影響 (東京湾ワークショップでの議論)

といった赤潮-貧酸素水塊-生物の大量死の連鎖というストーリーが考えられた。(1) から (4) に至る過程の移流に関する可能性は、前節の数値モデルを用いた検討により支持されている。(3) の *M. rubrum* の死亡による沈降・分解での貧酸素化については、*M. rubrum* の沈降過程での酸素消費量が明らかでないので推察の域を出ない。また、(5) については、可能性が否定されていないということであり、断定はできない。

5月23日~27日の横浜港内・金沢湾の魚介類大量死や、カレイやアナゴなどの底生魚、ボラ、スズキなどの中層遊泳魚の死亡原因、マテ貝の死亡やアマモの脱色の原因などについては、裏づけの情報やデータが不足しており、上記のシナリオで十分に説明できない現象として残されている。

6. おわりに

2003年5月に東京湾横浜市沿岸域で発生した生物の大量死は、*M. rubrum* 赤潮の発生が引き金となり、連鎖的に、貧酸素水塊、硫化水素の発生から引き起こされた可能性が示された。

こうした、連鎖的な現象の把握、モニタリングには、汀線付近での観測密度の充実、観測情報の効率的な共有化が必要である。そこで、新たな観測システム、情報の共有システムの開発が必要とされる。一方、それらの観測結果を利用し解析する手段として、数値モデルによる再現、予測計算が求められる。そこで、新観測システムと汀線付近の詳細な数値モデルを組み合わせたモニタリングシステムの構築が、今後重要な開発課題となる

ことが示唆された。

また、ワークショップ形式による議論・情報共有は、今回の生物の大量死の原因究明、東京湾において近年発生している現象についての認識の共有などに有効であった。ワークショップという、データを共有するだけでなく、それをもとに議論を進めるといふ発展的な取り組みが、今後のモニタリング体制の確立や調査研究の実施に必要なと感じている。今後、こうした体制の確立に努めてまいりたい。

謝辞

本報告では、東京湾ワークショップに参加いただいた各研究機関、組織、研究者からの情報・議論の多くを引用させていただいた。参加者の方々に厚く感謝いたします。また、本報告の査読をしていただいた匿名の査読者の方々からも貴重なご意見をいただきました。ここに記し、お礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1) Deardorff, J. W.: The development of boundary-layer turbulence models for use in studying the severe storm environment. Proceeding of the SESAME Meeting, Boulder, NOAA-ERL, pp.251-264, 1975.
- 2) Deardorff, J. W.: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. Boundary-Layer Meteorology, 25, pp.495-527, 1980.
- 3) Diaz, R. J. and Rosenberg, R.: Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. Oceanography and Marine Biology: an Annual Review, Vol. 33, pp. 245-303, 1995.
- 4) Hirt, C. W. , Amsden, A. A. and Cook, J. L.: An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow speeds. Journal of Computational Physics, 14, pp.227-253, 1995.
- 5) Klemp J. B. and Wilhelmson, R. B.: The

- simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal of Atmospheric Science*, 35, pp.1070-1096, 1978.
- 6) Lilly, D. K., Waco, D. E. and Adelfang, S. I.: The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments. *Proceedings of IBM Science and Computer Symposium on Environmental Science*, pp.195-210, 1967.
 - 7) Nakayama, K., Okumiya E. and Nakamura Y.: The effect of radiation cooling on convective circulation in a brackish-water lake, 6th Conference on Hydraulics in Civil Engineering, pp.169-176, 2001.
 - 8) Nakayama, K., Okada T. and Nomura M.: Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, *Estuarine Coast and Shelf Science*, in press, 2005.
 - 9) Nakayama, K.: Comparisons of using CIP, compact and CIP-CSL2 schemes for internal solitary waves, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, submitted, 2004.
 - 10) Ogura, H., Iimura, A. and Aisaka, K.: Aoshio in Tokyo Bay, 1994. *Annual Rep. Water Quality Preservation Institute of Chiba Prefecture*, pp. 63-67, 1994.
 - 11) Rabalais, N. N. and Turner, R. E.: Coastal Hypoxia. *American Geophysical Union, Coastal and estuarine studies*, 58, 463 p, 1998.
 - 12) Schmidt, H. and Schumann, U.: Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 200, pp.511-562, 1989.
 - 13) Tamura, A., Kikuchi, K. and Takahashi, T.: Residual cutting method for elliptic boundary value problems: application to poisson's equation. *Journal of Coputational Physics*, 137, pp.247-264, 1997.
 - 14) Yabe, T., Ishikawa, T., Wang, P. Y., Aoki, T., Kadota, Y. and Ikeda, F.: A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation ii. two-dimentional solvers. *Computer Physics Communications*, 66, pp.233-242, 1991.
 - 15) Yabe, T., Takeo, I. and Kadota, Y.: A multidimensional cubic-interpolated pseudoparticle (cip) method without time splitting technique for hyperbolic equations. *Journal of The Physical Society of Japan*, 59, pp.2301-2304, 1990.
 - 16) 石井光廣：東京湾におけるマコガレイの分布・移動，千葉水試研報，No.50, pp.31-36, 1992.
 - 17) 宇野木早苗・岸野元彰：大局的に見た内湾の海水交流，海岸工学講演会論文集，Vol.24, pp.486-490, 1977.
 - 18) 岡市友利：赤潮の科学，恒星社厚生閣，p.294, 1987.
 - 19) 岡田知也・中山恵介・野村宗弘・寶田桂一・宮野仁・古川恵太（2001）：東京湾湾奥部における chl-a（植物プランクトン）空間分布評価モデルに関する検討，港湾技研資料，No.1003, 21 p, 2001.
 - 20) 柿野純・鳥羽光晴：千葉県北部地区におけるアサリ資源の特性について，千葉水試研報，48, pp. 59-71, 1990
 - 21) 環境省：環境白書，Web データ，<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/>, 2005.
 - 22) 国土交通省港湾局・環境省自然環境局：干潟ネットワークの再生に向けて，国立印刷局，118 p, 2004.
 - 23) 佐々木淳・磯辺雅彦・渡辺晃・五明美智男：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，43 巻，pp.1111-1115, 1996
 - 24) 清水誠：漁業資源から見た回復目標，月刊海洋，Vol. 35, No.7, pp. 476-482, 2003.
 - 25) 高尾敏幸・岡田知也・中山恵介・古川恵太：2002 年東京湾広域環境調査に基づく東京湾の滞留時間の季節変化，国土技術政策総合研究所資料，No.169, 78 p, 2004.
 - 26) 千葉県水産総合研究センター：2003（平成 15）年の貧酸素水塊のまとめ，千葉県水産総合研究センター Web ページ，<http://www.agri.pref.chiba.jp/laboratory/fisheries/>, 2005.
 - 27) 東京湾再生推進会議：東京湾再生のための行動計画，東京湾再生推進会議，海上保安庁 Web ページ，<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>, 2003.
 - 28) 東京湾ワークショップ：国総研主催第 1 回，第 2 回東京湾ワークショップにおける議論より，2004.
 - 29) 野村英明：1900 年代における東京湾の赤潮と

植物プランクトン群集の変遷, 海の研究, 7(3), pp.159-178, 1998.

- 30) 水尾寛己・下村光一郎・鳥海三郎・風間真理・岡敬一・小野寺典好・阿久津卓: 東京湾, 横浜市沿岸水域で発生した *M. rubrum* による赤潮及び生物被害, 第 38 回日本水環境学会年會, 講演集, pp.155, 2004.
- 31) 水尾寛己・鳥海三郎・下村光一郎・風間真理・岡敬一・小野寺典好・若林信夫・阿久津卓・御処野博子: 横浜市沿岸域で発生した *Mesodinium rubrum* による赤潮, 横浜市環境科学研究所報, 第 28 号, pp.20-25, 2004.
- 32) 松江吉行: 絨毛虫の激増によって生じたる赤潮, 水産会報, 6(4), pp.242-243, 1934.
- 33) 横浜市公害研究所: 魚の死亡事故の原因究明に関する研究報告書, 公害研資料 No91, 94p, 1991.

著者紹介



古川 恵太 (正会員)

国土交通省国土技術政策総合研究所 (神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1), 昭和 38 年生まれ, 昭和 63 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科修了, 同年 4 月運輸省港湾技術研究所研究官, 主任研究官 (平成 8 年), 環境評価研究室長 (平成 12 年) を経て, 平成 13 年より国土交通省国土技術政策総合研究所海洋環境研究室長 (現職)。平成 6

—8 年に豪州海洋科学研究所に留学。博士 (工学), 土木学会, 国際航路協会, 沿岸域学会会員。

E-mail: furukawa-k92y2@ysk.nilim.go.jp



中山 恵介 (非会員)

国土交通省 国土技術政策総合研究所 (神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1), 昭和 43 年生まれ, 平成 7 年 4 月北海道大学助手, 平成 10 年 12 月 博士 (工学) (北海道大学), 平成 11 年 10 月運輸省 港湾技術研究所 研究官, 平成 13 年 3 月から平成 15 年 3 月西オーストラリア大学 CWR 客員研究員, 平成 13 年 4 月国土交通省 国土技術政策総合研究所 主任研究官, 平成 15 年 4 月東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻 客員助教授, 博士 (工学), 土木学会, 水文水資源学会, 流体力学会, AGU 会員。

E-mail: Nakayama-k92y2@ysk.nilim.go.jp



水尾 寛己 (非会員)

横浜市環境創造局環境科学研究所 (横浜市磯子区滝頭 1-2-15), 昭和 23 年生まれ, 昭和 46 年 3 月横浜市立大学卒業, 昭和 46 年 4 月東北大学農学研究科研究生, 昭和 47 年 4 月横浜市公害対策局技術吏員, 昭和 51 年 4 月横浜市公害研究所所員, 平成 11 年横浜市環境科学研究所 主任, 観音崎自然博物館常務理事 (兼職), 日本リモートセンシング学会, 日本水環境学会, 生態工学会, 日本海洋学会員。

E-mail: hi00-mizuo@city.yokohama.jp

Correlations among red tide due to *Mesodinium rubrum*, and mass mortality of aquatic organisms at Tokyo Bay in 2003

Keita FURUKAWA, Keisuke NAKAYAMA and Hiromi MIZUO

ABSTRACT : Mass mortality of aquatic organisms occurred around the western coast in May 2003, in the Yokohama coastal area, Tokyo Bay. An implementation of “workshop” approach to reveal the mechanism of the mass mortality was introduced. A scenario of a chain reaction from a red-tide occurrence to the mass mortality of organisms had been tested using numerical computation. As a result, a possibility of the anoxic water, which was caused by the decomposition of large amount of *Mesodinium rubrum* transferred from Tokyo Harbor, leading to the mass mortality of aquatic organisms, was presented.

KEYWORDS : *Mesodinium rubrum*, Tokyo Bay, red tide, anoxic water, aquatic organism, mass mortality