

マルチスペクトル衛星データを併用した東京湾における貧酸素水塊推定

- featuring Filament-Shaped Methodology -

日本大学(院)	学生会員	○岡田 健一
日本大学	正会員	青山 定敬
日本大学	正会員	岩下 圭之
UCSB	非会員	J.C.Dozier

1. はじめに

総量規制の開始以後の 30 年間で、東京湾流域からもたらされる COD(有機物)及び窒素、リンの発生負荷量は、それぞれ当初の値から 40%, 55%, 34%にまで大幅に削減されたと見積もられている。しかしながら、未だに夏期における赤潮や青潮などの発生状況は依然として改善傾向が認められない。これは、東京湾内の有機汚濁物質に占める負荷割合が陸域からの流入負荷よりも赤潮由来の影響が大きいことがあり、底泥からの窒素やリンの溶出は富栄養化による慢性的な赤潮が発生する。これにより、水質や底質の水環境を悪化させ、溶存酸素量(dissolved oxygen: 以降 DO と記す)の減少を引き起こし、貧酸素水塊の発生の起因となっているため「湾底層の貧酸素現象」の対策が必要な海域である。

本研究はその継続研究の一環であり、東京湾奥部を対象にして定点観測日と同期した衛星データから得られる表層の Chl.a の推定値を媒介にして既存の流動・貧酸素水塊解析モデルを考慮した、東京湾底層貧酸素水塊推定モデルによるモニタリングならびに現地観測データと ALOS AVNIR2 衛星データを使用した貧酸素水塊分布の評価を目的とした。

2. 東京湾の貧酸素の現況

本学は「衛星データによる評価」を主務として他研究機関と協力して、東京湾内および印旛沼、手賀沼(図-1)の定点において永年の公共用水域水質測定データベース構築に取り組み、特にリモートセンシング技術により水質の時系列、空間的情報からリアルタイム水質情報 WEB システムへ寄与してきた。前述のとおり東京湾は、窒素・リン濃度は低下傾向にあるが、国内の他の閉鎖性海域に比べて高い状態に

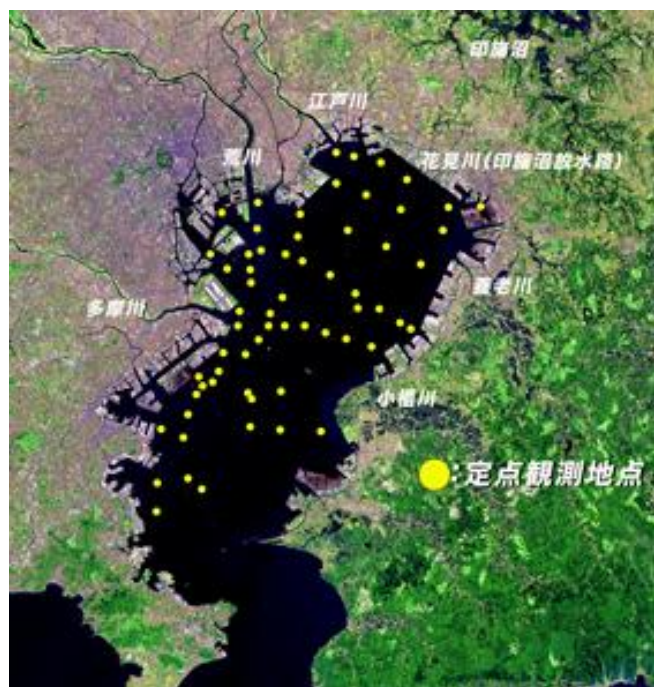


図-1 東京湾内および印旛沼、手賀沼に設置された定点水質観測点

あり、赤潮も頻繁に発生している。

大量発生した赤潮プランクトンは、やがて死滅して海底に堆積し、有機物を多く含むヘドロとなる。ヘドロに含まれる有機物は、バクテリアが水中の酸素が消費しながら分解することにより、底層の海水が貧酸素や無酸素状態になる。また、底層から表層における貧酸素化は、海底付近の窪地などに停滞していた無酸素の海水が、気温の上昇とともに温度の上昇した表層の海水との温度差により形成される層が発達することで表層の海水と底層の海水密度差が生じることから鉛直混合が起これにくくなり、陸域から海域へ吹く風によって海岸付近に引き上げられる。そして海面に浮上した無酸素の海水は、空気中の酸素によって化学変化が起きて海面が青白く変化してしまうことが「青潮」の主要因となっている。

キーワード 貧酸素, Nakata&Candi モデル, マルチスペクトルリモートセンシング

連絡先 〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1 日本大学生産工学部土木工学科岩下研究室 TEL 047-474-2471

東京湾では、毎年夏期になると貧酸素水塊が湾奥部全体に広がり、海岸付近に生息する水生生物が大きな被害を受ける。水生生物の死滅は、生物による浄化作用を低下・喪失させる。また、生物の遺骸は、新たな有機汚濁物質となり、慢性的に水質や底質を悪化させるとともに、蓄積したヘドロから窒素やリンから海水中に放出することにより Chl.a の増殖を促進する。

図-2は、青潮発生前 48 時間内における 15 分ピッチで測定した風向きと風速の時系変化を示したものであるが、前述のように陸域から海域に吹く風向きが集中した時に、青潮は起きやすいということを示している。

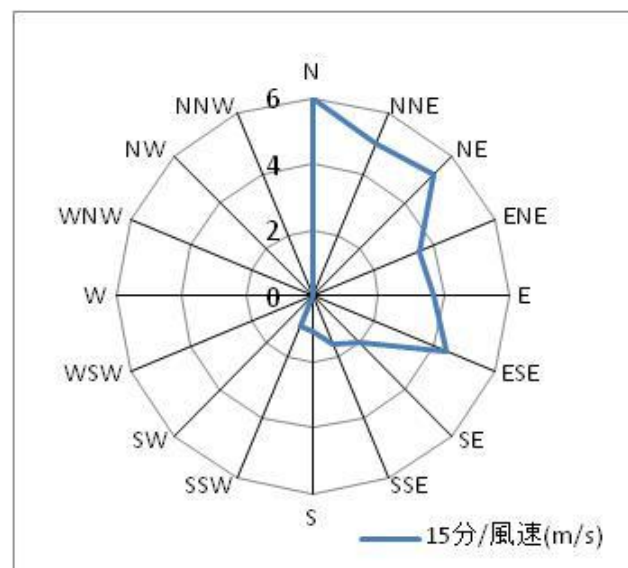


図-2 48 時間内における風向きと風速
2009/5/28～2009/5/29

3. 表層 Chl.a と表層 DO との関係

衛星データ観測日と同期した「水質に関わるデータ収集」は蓄積データおよびブイなどの固定計測データより行い、2009 年 5 月 29 日から 2009 年 5 月 31 日にかけて発生した青潮を対象に解析を行った。

ここで、青潮発生の主要因である DO は、表層 Chl.a の発生と大きく関係する。図-3は、2004 年から 2009 年に青潮が発生した前後の、表層 Chl.a と表層 DO との関係を示したものである。

これにより、相関係数 $R^2=0.8853$ と良好な正の相関を得る事ができた。これは、Chl.a などの有機汚濁物質を起因した汚濁は、表層で植物性プランクトンが光合成を行う過程において発生する酸素により DO は増加する。その後、表層で増殖した植物性プランクトンが死滅し、底質部に沈降・蓄積した有機物がバクテリアにより分解され大量に酸素を消費する。このため、酸素含有量の少ない海水の塊である貧酸素水塊を形成する。したがって、表層からの沈降流速を考慮すれば、表層の Chl.a 分布から底層の貧酸素水塊を推定する事ができる。

4. 貧酸素水塊マッピング

4-1. 貧酸素水塊分布解析モデルによる評価

海面上では、植物性プランクトンの光合成により DO が増加し、海底表面上では有機物をバクテリアが分解する際に海水中の酸素を大量に消費するために、基本的に表層面付近と底層の溶存酸素濃度 (DO) との間には負の相関関係が存在する。また、東京湾

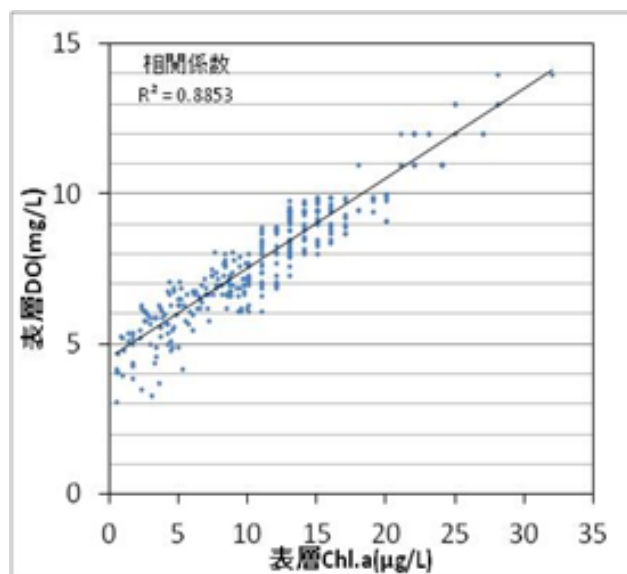


図-3 現地調査結果より得られた実測の
表層 Chl.a と表層 DO の相関

は貧酸素水塊の形成を希釈・抑制する一因と考えられる潮流の動きが極端に小さい。そのため、増殖した植物プランクトンが沈降し、湾底質の DO 濃度が Chl.a の増加から 12～24 時間遅れて減少しはじめた現地観測データより貧酸素水塊分布を予測するところ、海底で酸化分解を行う際に再び大量の酸素が消費されることになる。このため、貧酸素状態が改善されにくい。手法として、これまで最も利用されてきた表層の Chl.a 濃度から底層の酸素消費量を推定する Nakata¹⁾モデルの堆積物(底泥)による酸素消費

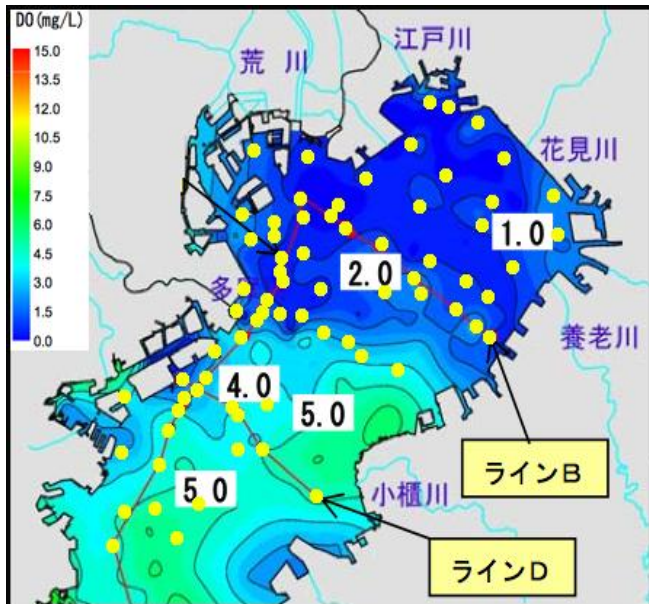


図-4 現地調査結果よりシミュレートされた
底質部貧酸素水塊 DO 分布

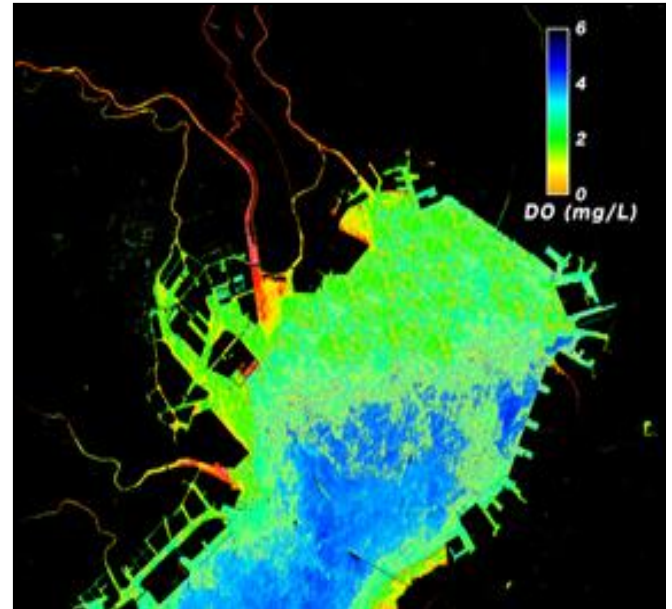


図-5 ALOS AVNIR2 から推定された
底質部貧酸素水塊 DO 分布画像

量 $k(\text{mg}/\text{m}^2/\text{day})$ は、水温 $T(^{\circ}\text{C})$ と $\text{DO}(\text{mg}/\text{L})$ の関数で表現され、消費速度定数 $\alpha(\text{day}^{-1})$ はパラメータで与えているので、流動による有機物の沈降量の変化に直接対応していない。しかしながら、衛星データより得られる表層の Chl.a 濃度からを利用して表層の貧酸素水塊の形成を評価するためには、底層における酸素消費量を考慮に入れたモデルでなければならない。本研究の解析で使用したモデルは Nakata et al.²⁾ の表層解析モデルを、生態域(底層)に関しては Berner & Candi³⁾ の生態系モデルの併用により、流動している表層における Chl.a に代表される有機物による酸素消費量に対して沈降層堆積層の酸素消費量の影響を考慮した。これにより、生態系モデルで計算された有機物の沈降フラックスを続成過程モデルに与え、酸素消費速度を算出する。それを生態系モデルに与えることで間接的に底質における酸素消費量の影響を関連させるモデルである。

Nakata モデルに間接的に有機物の沈降量を消費速度に対応させるために、Berner⁴⁾ の続成方程式(1)を用いた続成過程モデル CANDI(Boudreau, 1996)を使用した。

$$\frac{\partial \phi C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_B \frac{\partial C}{\partial x} - \phi u C \right) \pm \sum R \quad (1)$$

C : Chl.a 濃度 $[\text{mg}/\text{L}]$, t : 経過時間 $[\text{day}]$, ϕ : 空隙率, u : 埋積速度 $[\text{cm}/\text{day}]$, D : 分子拡散係数 $[\text{cm}^2/\text{day}]$, D_B : 生物攪乱係数 $[\text{cm}^2/\text{day}]$

これは本学も関わりの大きい米国環境庁 EPA が東海岸チェサピーク湾における貧酸素現象の評価において活用しているモデルで、観測結果を2層のボックスモデルにより解析し、流動・拡散といった物理過程と、底層における生化学的な酸素消費過程の時間的变化を見積る手法である。

この解析結果より、東京湾水深 10m 下の浅海部底層では半日以内という短時間で貧酸素化が進行していることがわかった。また、東京湾においては DO の減少の原因である有機物は約 85% が鉛直沈降によって、約 15% が水平移流によって供給されている。また、このような直下沈降が主、すなわち希釈の少ない海域において酸素消費速度の急激な増大は、貧酸素水塊の形成速度およびその範囲に大きく寄与していることが判明した。

図-4 は、このシミュレーションシステムを基に推定マッピングされた 2009 年 5 月の東京湾底層部に発生した貧酸素水塊を示したものである。図より、比較的沿岸に近い観測点および羽田空港周辺埋め立て地周辺および生活廃水が含まれる河川の水が流れ込む河口付近では DO が $1\text{mg}/\text{L}$ 以下と低い数値となっており、全体としては内湾奥部を中心として貧酸素水塊が分布している。

4-2. ALOS AVNIR データによる評価

本研究で利用した衛星データは、2009 年 5 月 30 日に観測された ALOS AVNIR2 データである。ALOS オリジナルセットのバンドデータに精密補正を施しまず東京湾の Chl.a 分布を抽出し、これに図-3 における関係ならびに衛星観測日から青潮発生時までに経過時間を考慮し再度画像としてフィードバックし、貧酸素水塊の推定を行った。図-5は、ALOS AVNIR2 データから推定された東京湾の貧酸素水塊 (DO 濃度分布) 画像である。DO の高～低に紫～赤のレインボーカラーを示すことにより濃度別の DO 分布を可視化することができる。図より、Nakata&CANDI モデルでシミュレートされたモデル (図-4) と比較して、湾内の貧酸素水塊の大まかな形状はほぼ一致しており、点情報からのシミュレートモデルと比較して、衛星データによりマッピングされたものは「スペクトル情報」という科学的な根拠に裏付けされたものであることから、その画像を面として捉える事ができるという大きなメリットを有している。

5. まとめ

富栄養化による赤潮発生が貧酸素水塊を発生させる。これは、水生生物の生物浄化作用が著しく低下することで汚濁負荷が増大している。東京湾も全体的に水深が下がるにしたがって DO 濃度が大きく減少しており、貧酸素水塊の発生に水温の成層化が影響を与えていることが分かる。特に、2009 年の 6 月～9 月にかけて、定期的な現地調査および衛星データの解析により得られた Chl.a 濃度、透明度、水の観点からも植物プランクトンの大量発生と活発な光合成が行われ、表層は過飽和状態であると判断される。また、経時的には DO 濃度が大きく変化し、水温の上昇とともに植物プランクトンの大量発生、底層のさらなる貧酸素化が進んでおり、水質・底質を更に悪化させてしまう。

これらの問題の対策は早急に必要であるが完全な解決は非常に難しく、困難である。対策としては、水質・底質改善、生物自身の浄化作用の強化などがあげられる。

東京湾内の変化を迅速に判読できる衛星画像補正は、衛星空間情報による広域におよぶ定期的な観測

が非常に有用である。これは、湾内に設置された限られた測点から DO の推定とは異なり、衛星データから DO の推定は、衛星の空間分解能に由来するため詳細な面的評価を行える。このことは、湾内に発生する貧酸素水塊に対し、ピンポイントの対策が可能である。今後の課題と展望として、本研究の対象とした東京湾以外の閉鎖性海域に適用した貧酸素水塊の抽出モデル構築するとともに、水質汚染に対する負のスパイラル作用のさらなる検証を今後の展望としたい。

謝 辞：この研究を遂行するにあたり前千葉県水産総合研究センターの小倉博士を始めとする研究員の皆様、UCSB のスタッフにはチェサピーク湾における流動モデルに関する熱心なご指導を賜った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Shimazaki, K. and Nakata, T. : Time- predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophysical Research Letters*, vol.7, 279-282, 1980
- 2) Nakata.K,Doi.T,T.taguchi.and Aoki.S. Characterization of Ocean Productivity Using a New Physical-Biologocal Coupled Ocean Model. *J.Mar.Sys.*,16,107-132 ,2004
- 3) Boudreau.B.P. A method-of-line code for Carbon and diagenesis in aquatic sedim- ents. *Computers and Geosciences* 22. 479 -4969, 1996
- 4) Berner. R.A. Early diagenesis a theor- etical approach. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 241, 1980