

時系列マルチスペクトルリモートセンシングデータによる米国チェサピーク湾の水質評価
- 複合ラジオメトリック補正を施したCBRSP航空機データを併用して -

日大生産工(院) ○内田裕貴 日大生産工 岩下圭之
日大生産工 工藤勝輝 UCSB Jeff C. Dozier

1. Back Ground

近年、世界の先進国において産業の発展、人口の増加に伴う流入負荷の増大によりそれらの最終集結地である閉鎖性水域の水質汚濁が、新たな環境問題として議論されている。各国共に環境負荷物質の総量規制など軽減努力は行っているものの、慢性的な汚濁は一向に減少していないというのが現状である。環境復元のモデルケースとして、約20年近い取り組みの末に昨年完了した米国東海岸チェサピーク湾の環境修復事業がある。この1987年に様々な視点から豊かな自然環境を取り戻すことを目標とした「チェサピーク湾におけるリプログラム」は、環境保護庁 (EPA)、米国海洋大気局 (NOAA)、米国航空宇宙局 (NASA)、大学研究機関、NGO 組織など多くの関連機関が参加した国家的な取り組みであり、科学的なデータ収集が可能なりモートセンシング分野の有効利用が期待されてきた。

本研究は、劇的に環境修復が行われた背景を有するこのチェサピーク湾プログラムにおいて本学が関わったリモートセンシング技術を利用した水質 (Chl-a) 評価結果の推移を報告ならびに分析するとともに、我国における閉鎖性水域の環境修復および将来戦略の分析への指針を見いだすことを目的とした。

2. Environments for the Chesapeake Bay

2-1. チェサピーク湾の概況

本研究で対象としたチェサピーク湾はアメリカ東岸メリーランド州に位置し、6州+首都にまたがっている世界でも2番目の規模を持つ湾である。流域面積166,534km² (おおよそ瀬戸内海の3.5倍)、流域人口1,660万人を有しその集水面積は日本国土面積の40%にもおよび、湾長300km (奥行き30km)、平均水深 6.4mも極めて浅いのが特長である (Fig.1)。この湾は集水域の人口が増加するのに伴い、徐々に豊かな自然生態系が破壊されていった経緯があり、1970年代頃より水環境の悪化が問題となり、地域で様々な取組みが展開されてきたが個別の対応で大きな効果は出なかった。そこで、1983年、連邦政府をはじめ行政側、研究機関、NPOなど数多くの団体がそれらを連携させる

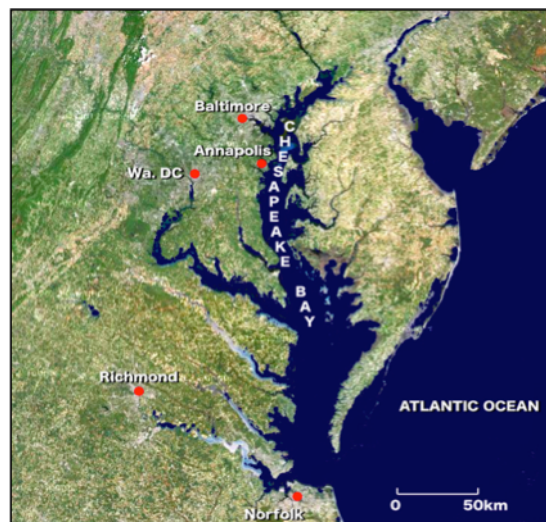


Fig.1 The Chesapeake Bay Remote Sensing Program (CBRSP) has produced a > 20-year set of 'ocean color' measurements from light aircraft to estimate chlorophyll (Chl-a) concentrations in Chesapeake Bay, covering the period from 1989 through 2011.

広域パートナーシップとして、「チェサピーク湾環境再生プログラム」がスタートした。また、2000年には今後10年の環境修復努力を盛り込んだ国家的包括的協定である『チェサピーク湾2000年協定 (Chesapeake Bay 2000 Agreement)』が結ばれ、複雑で無秩序になる可能性のあるこのプロジェクトに共通の原則と期限付きの目標を定めた。特に、窒素・リン負荷の40%低減による大幅な改善を示唆した。

2-2. チェサピーク湾の環境再生に向けたプログラム

上記のチェサピーク湾2000年協定締結以降、このプログラムは大きく進展し、湾内の環境保護・回復に寄与してきた。このプログラムは、さまざまな理論、詳細な知識、モニター、モデルを組み合わせた包括的な科学研究の実施が基本となっており、米国研究機関と共同で本学は2001年より新たな補正理論に基づくリモートセンシング技術を利用した観測/評価法を新たに取り入れ、定期的な観測を行ってきた。

プログラムの水質再生ポイントは、湾内の魚介類、海洋生物の回復に重点を置き、その

Multi-Spectral Remote Sensing for Water Quality Assessment of the Chesapeake Bay Program, USA
- featuring Filament-Shaped CBRSP Air-borne data -

Yuki UCHIDA, Keishi IWASHITA, Katsuteru KUDOH, and Jeff C. Dozier

活動は、リンを含んだ洗剤の禁止、農業管理の向上、栄養塩の生物除去、下水道、排水規制、住民の環境教育の徹底などが含まれており、また、ミチゲーション事業も実施され、湿地帯復元や藻場の造成も行われた。

2-3. 水質再生に向けたプログラム

チェサピーク湾と同湾に注ぐ河川の流域全体の保全と復元を実現するに当たって、水質の改善は最も重要な要素である。そのなかで、Chl-aに起因した水質汚濁は、水中の窒素とリンの量がバロメータとなっている。Fig. 2 および Fig.3はそれぞれ1989～2010年までの平均的な窒素とリンの排出源率を示したものであるが、特に、農業からの負荷割合が多い。Fig.4は、土地利用カテゴリーから流入する堆積土砂の経年変化を示したものである。

1) 栄養塩及び堆積物；

- ・2010年までにチェサピーク湾と河川域をEPAの水質保全法に基づくチェサピーク湾と同湾に流入する河口周辺の栄養塩と堆積物を制限し、支流地域にそれぞれ荷削減目標を達成維持する。

2) 化学汚染物質；

- ・農業負荷の増大を促している可能性が高い地域における総合的な有害生物管理または個別有害生物管理に関する啓蒙活動を実施することによって、チェサピーク湾に対する潜在的な農業汚染リスクを減少させる。

3) 都市水域に対する優先措置；

- ・連邦政府は、2010年協定書および過去に締結された協定書に記載された生物資源、水質および生育環境に関する目標を達成するために都市型河川に対する汚染物質の負荷を削減する。

3. Methodological Approaches of Ocean Color

このプログラムで対象としたチェサピーク湾のように300kmにわたる広域評価においては、衛星もしくは航空機搭載のOcean Color Sensorを利用するのが最適な手法である。このプログラムにおいて本学が関与したCBRSP(Chesapeake Bay Remote Sensing Project)においては、定期的にかつ確実に高分解能でデータが取得できるNASAゴッダード研究所所有の航空機による計400フライトから得られたマルチスペクトルデータを利用した。このCBRSPフライトにおいては、人工衛星搭載の広域海洋観測走査計(Sea WiFS-2)および中分解能分光放射計(AQUA MODIS)と全く同じコンセプトで作成された2つの海色センサー(SAS-2;Sea Airborne Simulator および AAS-1;AQUA Airborne Simulator)を利用して観測が行われた。なお、2007年から就航したハイパースペクトルセンサを搭載したAAS-1は、Dozier, Carder, Iwashita 等が構築した補正

アルゴリズムにより濁った条件下でのChl-aならびに赤潮の高精度な抽出が可能となった。

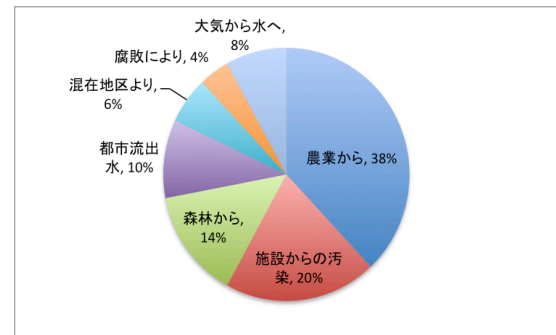


Fig.2 The distribution map of major sources of Nitrogen. Average of 2000 through 2011.

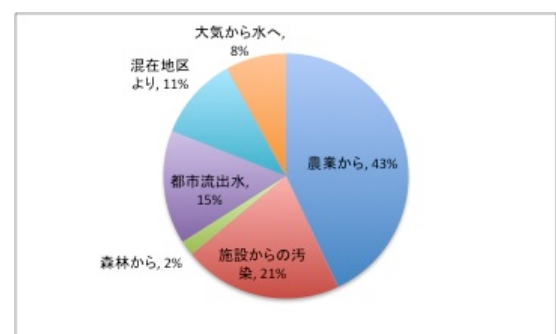


Fig.3 The distribution map of major sources of Phosphoric acid. Average of 2000 through 2011.

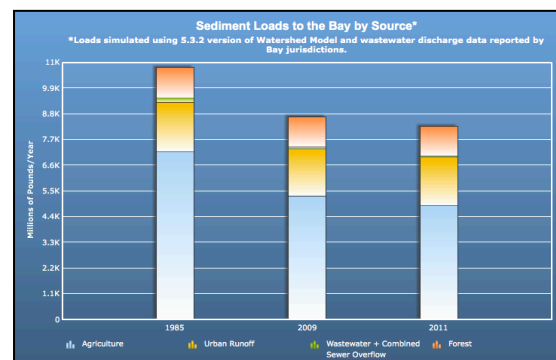


Fig.4 Computer simulations of pollution controls implemented between July 2009 and June 2011, calibrated using monitoring data, indicate that sediment loads to the Bay would have decreased 396 million pounds to 8,279 million*.

4. Time-Series CBRSP Analysis for Chl-a Extraction

Fig.5(a)～(f)に、CBRSPデータを利用して解析された同湾の1989年から5年ピッチでの時系列Chl-a分布画像を示した。それぞれの分類画像は、同年同月のイベントや現地実施調査結果等から、次のとおり評価することができる。

- ・ **1989年7月7日観測：**湾北部(画像上部)における高濃度域は、近接の大都市ボルチ

モア市の影響によるものであり、プログラム発足年という事もあるが環境保全に対する意識の未成熟が表れている。しかしながら、この年は、長く続く干ばつ状態により淡水の流入が少なくなり、Chl-a形成の3要素自体の観測値も低く、他域においては平均15 mg/Lと比較的低濃度と観測されている。

- **1994年8月8日観測**：1989年と比較すると、同年6-7月にかけての数回の豪雨と猛暑の繰り返しにより、Chl-aが異常増殖し、湾全体が高濃度となった。特に、湾中央部左右の広域な農業域から大量に農薬成分を含んだ河川水が流入することから、4-5月増殖期を迎えるChl-aが8月においても異常増殖を促進し、湾中央部に展開する高濃度域（平均75 mg/L）を形成している。
- **1999年7月24日観測 & 2004年8月4日観測**：両年共に、1989年と同様に湾北部のボルチモア市からアナポリス周辺海域に都市型汚染が顕著に判読されているが、平均してその濃度も1999年平均25mg/L、2004年平均12 mg/Lと改善効果が伺われる。特に、大きく異なる事は湾中央部からの農業起源の汚濁が著しく減少しているが、これは2000年に締結した再協定の効果が反映されているものと思われる。
- **2009年7月7日観測 & 2011年8月22日観測**：現地の定点観測のデータからも、2007年以降Chl-aの春季異常増殖という特有のパターンが平均10 mg/L以下に減少しており、両年共に、著しくプログラムによる改善効果が画像より判読できる。

5. Discussion

- **水質改善効果**：湾内エコシステム集中改善項目と指定された100項目において、2008年に28、2010年には31の項目が基準をクリアしていることが、一連の画像からも判読できる。
- **新たな水質問題**：長年の水質汚濁、土壌浸食作用による河口部への土砂堆積、人口構造物による日光の遮断等の要因の蓄積が、水生植物の再生のスローダウンや減少したものの局所的に発生する貧酸素現象が、引き続き課題として残されている。
- **グリーンタイド**：チェサピーク湾では「赤潮」や「青潮」の既成の水質問題が改善していくにつれて、2008年頃より「緑潮」（グリーンタイド）と呼ばれる海藻アオサ属（Fig.6）が異常増殖し海岸線に堆積する現象が沿岸各地で新たな環境負荷として懸念されている。これは同じく東京湾でも報告されているが、海藻の腐敗に伴う悪臭、アサリなどの貝類の死滅など様々な悪影響が懸念されており、各自治体が年間に数千万円もの費用を投じて除去・廃棄を行っているが、抜本的な有効な対策がないのが現状である。

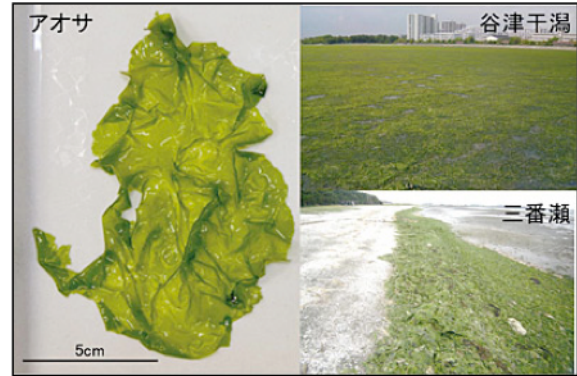


Fig.6 The Green-Tide has been featured as new water environmental issue.

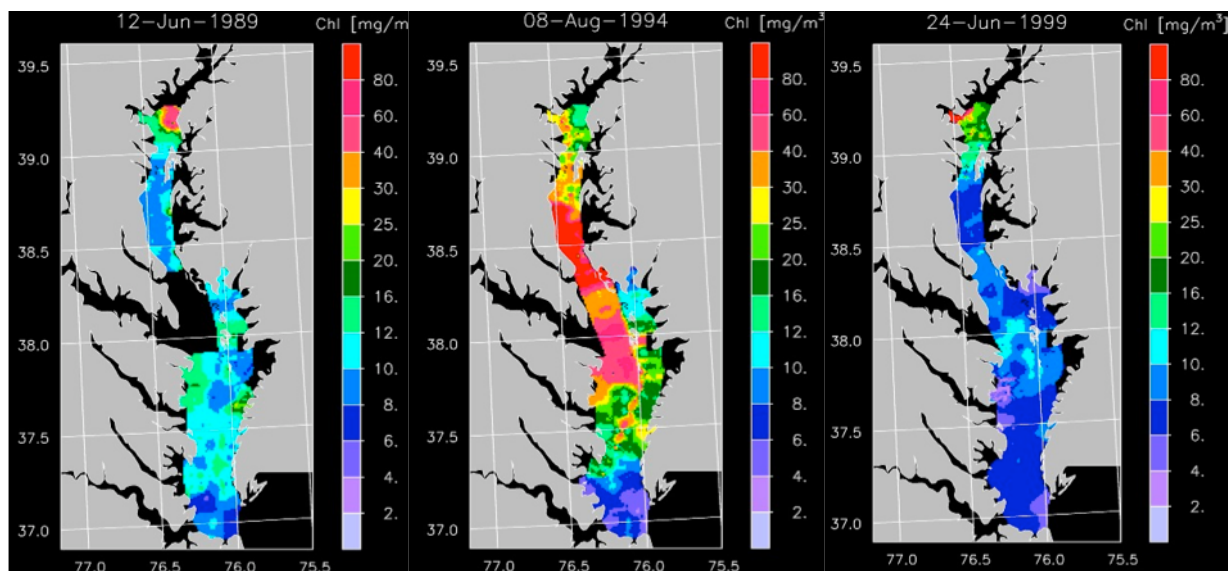
6. Conclusion

我国における代表的な閉鎖性水域である東京湾は、本研究で対象としたチェサピーク湾と類似して、国際貿易と商業の中心地として等しく重要な水域である。東京湾とチェサピーク湾両プロジェクト共に、持続可能な「生態系の健全さと経済拡大との微妙なバランスを保つ」ことは常に困難を伴うが、成功例であるチェサピーク湾の環境修復事業は、地域住民の利害が複雑に絡む地域経済の発展に伴って発生した環境の劣化問題であるということ、環境の復元に関する科学的根拠となりうるデータの不足問題があること、また東京湾との数多くの類似点があるということ等、非常に参考となる。

- 1) 大きく我国と異なるポイントは住民の意識改革への真剣な啓蒙プロジェクトへの取り組みと前進のための様々な創造性に富んだアプローチ
- 2) 環境事業への資金確保は常に困難を伴うが、チェサピーク湾環境修復資金を集めた方策を、東京湾修復プロジェクトにも適用し、可能な案を積極的に取り入れるべきである。
- 3) 我国のケースに求められる事は、行政側の指示系統を簡素化し、全てのプロジェクトがスムーズに動くシステムを構築することである。

[参考文献]

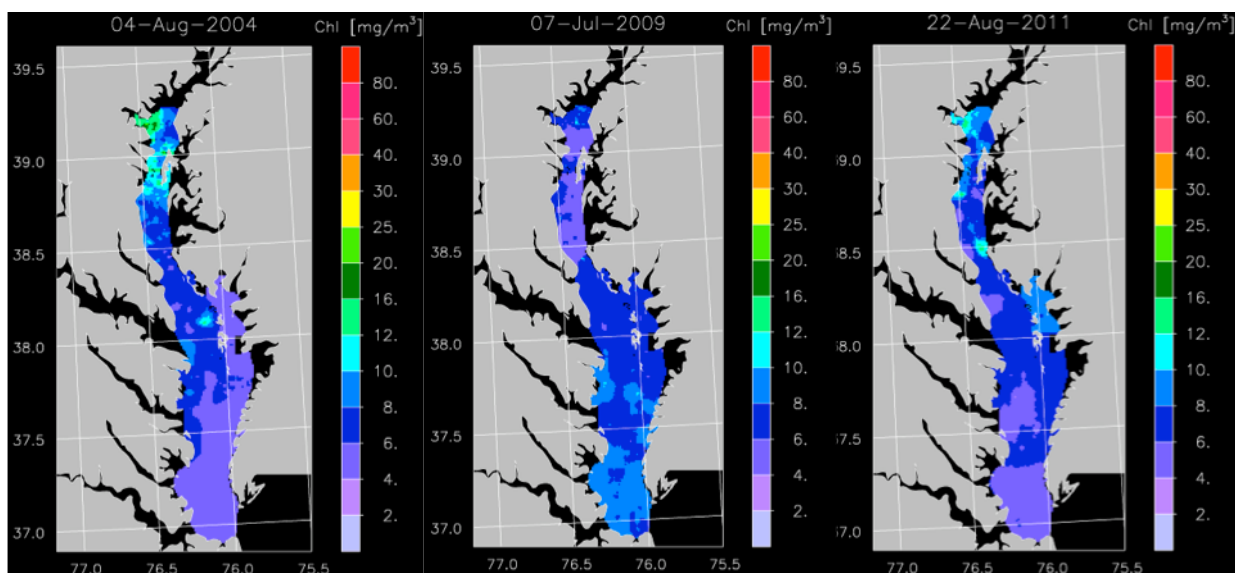
- 1) Banks, W.S.L., Gellis, A.C., and Noe, G., "Sources of Fine-Grained Suspended Sediment in Mill Stream Branch Watershed, Corsica River Basin, A Tributary to the Chesapeake Bay, Maryland, 2009", in Proceedings, 2nd Joint Federal Interagency, Las Vegas, NV, 2010, ISBN 978-0-0779127-3-2, 6B, 12p.
- 2) Carder, K.L., T.Goodmann and K.Iwashita. "2003. Ocean color radiometry from CBRSP. Low altitude measurements from light aircraft", Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Rev. 4, Volume VI: Special Topics Protocols and Appendices. Chap4, p. 79, NASA/TM-211621/rev4-Vol.5 2003.
- 3) Carder, K.L., T.Goodmann and K.Iwashita. "Chlorophyll-Evaluation Using Landsat TM Data", Entire of EPA Star Grant annual report 2004



(a) Pollutant loads to the Bay in any given year are influenced by changes in land-use activities and management practices, as well as the amount of water flowing to the Bay. Higher Chl-a occurred in summer, as evident in imagery for 12 June when concentrations > 20 mg/L were measured.

(b) The spring bloom was extremely long-lived with late April through Sept., imagery showing a continuation of high Chl-a that included localized blooms in the upper Bay found to consist of the dinoflagellate, *Prorocentrum minimum*.

(c) A regional drought characterized 1999 was characterized and freshwater flow was very low, affecting nutrient loading and resulting in much-reduced phytoplankton abundance that was evident in remotely sensed Chl-a data.



(d) Summer Chl-a was also low in much of the Bay, with the exception of the oligohaline and upper mesohaline regions where Chl-a > 20 mg/L occurred in July and August between the mouths of the Patuxent and Patapsco R. A typical decline of Chl-a in fall was detected throughout the Bay.

(e) Data for summer 2009 showed an obvious environmental change and improvement, as shown in imagery with lower Chl-a in the mid-Bay. Later in the season we observed Chl-a > 15 mg/L in the upper Bay, associated with a fairly large bloom of the dinoflagellate, *P. minimum*.

(f) The efficacy from long-term improvement efforts derived clean water back. However, in spite of all of those collective efforts in reducing nutrient inputs into Chesapeake Bay, it is still not perfect goal and also found that newly water quality issue still remains.

Fig.5 The CBRSP classified images with the Filament-shaped correction applied are visualizations of surface chlorophyll (mg/L).