

Terra/ASTER データによる東京湾の流入河川の影響評価
-Chl. a 数量化モデルを基本とした多変量解析による土地利用形態との関わり-

岩下圭之 (土木工学科)、大木宜章 (土木工学科)、J.C.Dozier (UCSB)

Introduction

本プロジェクト開始当初より手がけてきた低解像度Terra/AQUAを対象とした複合ラジオメトリック補正法ならびに昨年度完成・導入したChl. a 数量化モデルによりChl. a を基本とした全国レベルの水質状況のアーカイブを行ってきた。その過程において、我々の間近に存在する東京湾の慢性的な富栄養化ならびに有機汚濁がクローズアップされた。

東京湾においては、昭和 55 年度にスタートした『東京湾総量削減計画』による COD の濃度規制、総量規制などにより、東京湾の水質は改善されてきたが、富栄養化の状態は改善されず、その対策として、2002 年から窒素・リンの総量規制が行われてきた。東京湾はいまだに富栄養化の状態が続いており、毎年赤潮が発生している。東京湾の COD は、夏季においては植物プランクトンに起因する二次汚濁が原因で、環境基準を超過する場合が多い。また、2003 年頃からは船橋市沿岸で赤潮・青潮が発生し魚介類に被害をもたらす現象も見られており、きめ細かな水質モニタリングが重要である。

本研究は、局所的に東京湾内湾部の流入河川河口周辺沿岸域を対象として、これまで構築してきた水質評価のためのアルゴリズムならびに考え方を高解像度 Terra/ASTER VNIR データに応用し、東京湾における汚濁パターンの時系列的な評価と流入河川河口周辺におけるその汚濁水塊の流入メカニズムおよび拡散分布パターンの評価を目的として行ったものである。

2 研究対象海域における現地調査の概況

本研究で対象とした東京湾への流入河川が位置する流域は、その大半が昭和 40 年代初頭より、都市開発などにより著しく土地利用が変化し、流域内の様々な環境が河川水の水質に影響を与えているといわれている。図-1 は、東京湾を取り巻く河川環境の概況を示したものである。現地調査は、大学キャンパス内における基礎実験による知見を基本に、千葉県ならびに本学が衛星 (ASTER or LANDSAT)

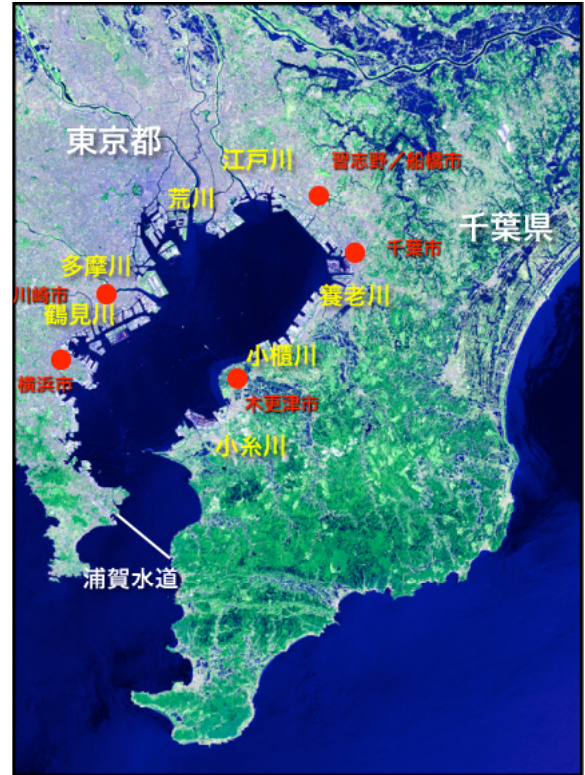


図-1 東京湾内湾部への主要流入河川

観測日と同期して定期的に行っている定点観測データより、2009 前期 5 月、6 月および 7 月の測定データを利用した。9 カ所の千葉県側流入河川河口部調査地点に加え、この定期観測においては内湾上の 36 ヶ所の調査地点における船上から直接、8 項目の水質測定、試料水の採取ならびにスペクトル測定を行いデータの蓄積を行っている。

2.1 汚濁の電磁波スペクトル特性

複数の水質測定項目より、富栄養化のパロメータのひとつである濁度、Chl. a を対象に解析を行った。2009 年の前期 3 回の現地調査における 45 箇所の観測点における試料海水の化学分析結果と同地点の海水が示すスペクトル特性との相関解析を行った結果、以下のような知見を得た。

- 1) 主に溶存態有機物および懸濁物に起因した濁度の判読には、その濃度に応じて可視赤 (VR; 675nm 近辺) における反射強度が強

くなる性質が確認された。

- 2) 図-2 は、Chl. a 濃度の違いに応じたスペクトル反射特性の変化を示したものである。図から $100 \mu\text{g/l}$ 近辺を境として VR 近辺における吸収が顕著となり、逆に近赤外(NIR)のローバンド域(700-730nm)の反射が強くなるという「植物的」なレスポンスを確認できる。
- 3) $100 \mu\text{g/l}$ を超過する超高濃度 Chl. a を対象にスペクトル評価を行う場合 RVI 法(NIR/VR) を利用する方が適切である。
- 4) 図-3 は、Chl. a 濃度が $100 \mu\text{g/l}$ 以下の場合は Gordon 法および $100 \mu\text{g/l}$ 以上の場合は RVI 法による関係を示したものである。

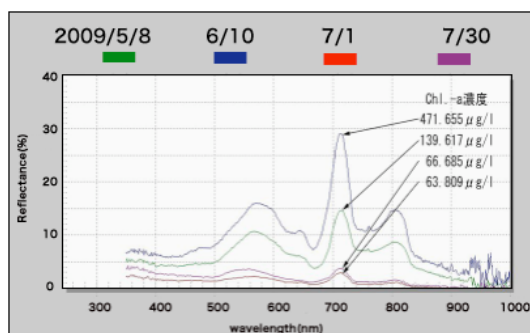


図-2 高分解能スペクトル分光計による Chl. a 含有水の濃度別のスペクトル反射特性

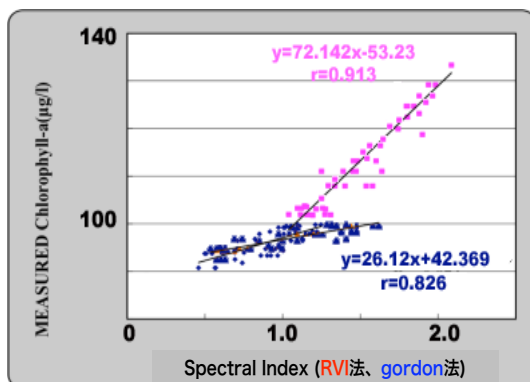


図-3 Chl. a 実測濃度と分光特性との関係

2.2 河川流域の地被状況との関係

図-4 は、本研究で対象とした千葉県側の 9 河川(真間川, 海老川, 花見川, 都川, 村田川, 養老川, 小櫃川, 小糸川, 湊川)流域の市街化率の変化を示したものである。都市化が進行する前の昭和 30 年頃の千葉県側の流入河川流域は、平均して 20% 程度の市街化であったものが現在では 65% と急激に都市化が進行してきた。樹林地やのうちが多かった時代には降雨の多くは一旦土壌に浸透し、地下水流出として徐々に流れ出していたために、平

常時に河川水は非常にきれいであった。市街化の進行により、山林等自然の面積は減少し、加えて急激な都市化に排水施設等の整備が追いついていないことなど、生活雑排水が河川へ流入することで河川の水質が悪化する要因も増えていったことも事実である。

また、図-5 は、対象とした 9 河川における平常時における流量饒波んかを示したものである。図から、昭和 30 年頃と比べると、水質が良好な地下水等からの流量は平均 20% ほど少なくなっているが、逆に図-6 に示したとおり生活雑排水のような人工系の流量の影響でトータルでは 30% ほど多くなっているのが現状である。したがって、水質基準や排出規制等の法的な規制と同時に「市街化」という環境保全とは相反する都市開発が、河川水の最終集結地である東京湾の水質改善の妨げとなっていることは明白である。

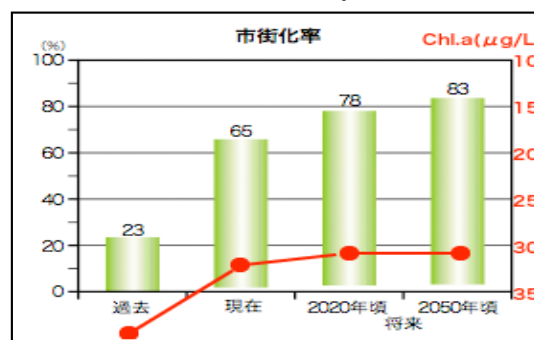


図-4 対象河川流域の平均市街率の推移

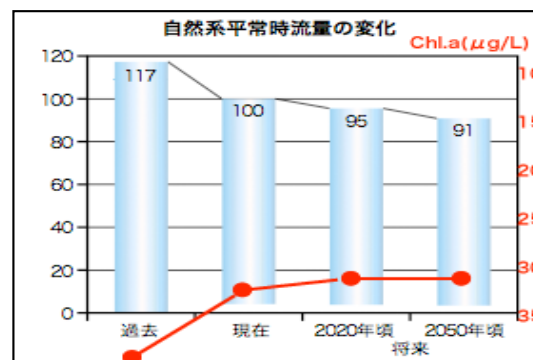


図-5 対象河川流域の平均自然系流量の推移

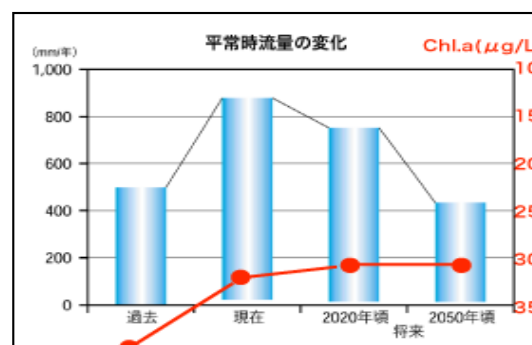


図-6 対象河川流域の平均人工系流量の推移

3. 衛星データによる内湾の相対濁度分布

現地調査の結果より、濁度の判読にはVR;675nm 近辺による評価が最も有効であることが確認されたことから、以降、衛星データの同波長帯を利用して濁度分布の判読を試みた。

3.1 内湾の濁度の時系列的評価

図-7 は、東京湾流域で衛星観測 3 日前まで降雨が記録されなかった昭和 59 年 8 月 16 日から平成 16 年 8 月 4 日の同季節に観測され、本プロジェクトで構築した複合ラジオメトリック補正処理を入念に施した Landsat/TM センサおよび Landsat/ETM センサの Band-3 (可視赤波長帯) データをシュードカラーカラー表示処理によって可視化された東京湾・内湾の相対濁度分布を判読したものである。これは、濁度のレベルに応じて可視赤波長域(0.600~0.690 μm)における反射が正変化する特徴を有することから、濁度の高～低に赤～紫のレインボーカラーの変化で表示することにより、相対的な濁度分布を視覚化する事ができる。なお、全てのデータに対して Filament-Shaped 法による複合ラジオメトリック補正効果により、全てのデータの海域が示すヒストグラムの上限と下限値を同一になるようパラレル化処理しているので同一レベルで評価することができる。これら多時期の画像から、次のような事が考察できる。

(1) 1984 年から 2004 年に観測された多時期同季節の Landsat データを利用した内湾全域の濁度分布から、相対的にこの 20 年間はかなり水環境が改善され、法的規制や環境負荷削減計画等行政努力の様子を判読する事ができる。

(2) 全ての画像より、内湾最奥部において埋立地等の開発がさらに海流の交換が悪化させ、慢性的に特定箇所(大井埠頭沖、多摩川河口部、荒川河口部、三番瀬)における汚濁水塊の滞留域が慢性的に存在しており、長い年月の間に同域に相当量の栄養塩系土粒子が沈殿し底質の「貧酸素状態」が懸念されているとの環境庁の報告を裏付けている。

3.2 内湾の流入河川が示す土砂流出

図-8 は、千葉県北西部で 170mm 前後、千葉県南部で 220mm 前後の大雨が降った直後の 2006 年 12 月 27 日に Terra 衛星の ASTER/AVNIR センサによって観測された Band-1(可視光緑波長域)・Band-2(可視光赤波長域)・Band-3(近赤外線波長域)データに Filament-Shaped 法による前処理を施した赤外カラー合成画像で可視化した内湾の流入河川が示す土砂流出画像を示したものである。画像から判読される流入河川の土砂流出の様子は以下のとおりである。

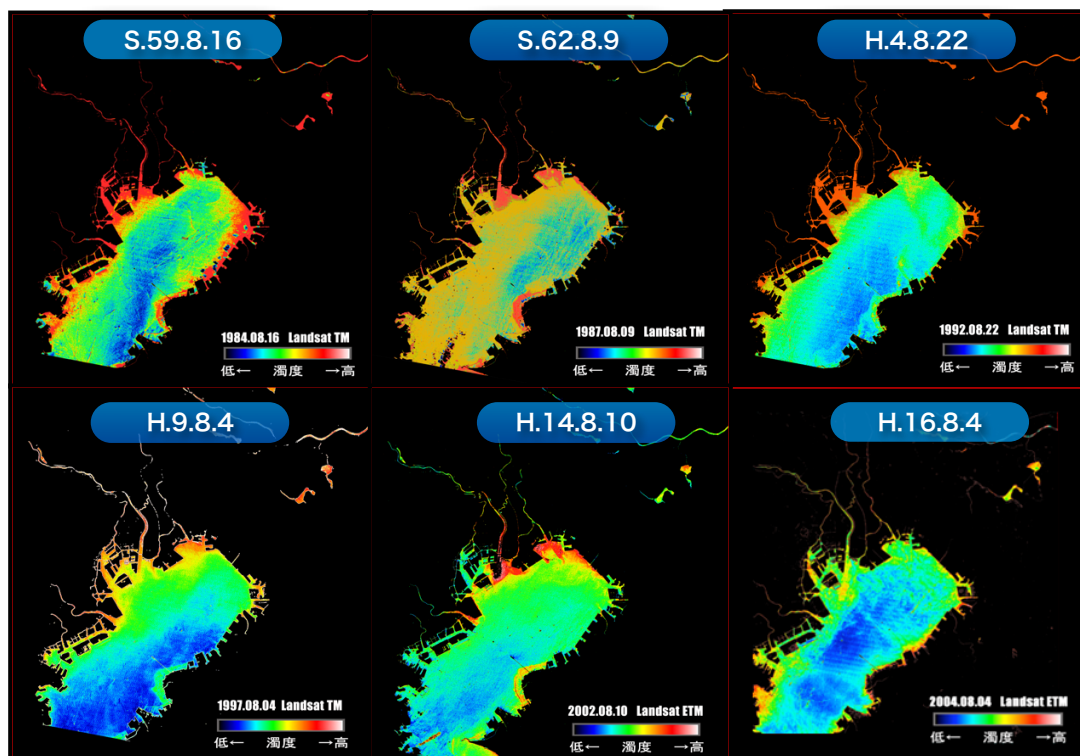


図-7 高解像度衛星データによる東京湾内湾部の濁度分布の時系列的変化

1) 乳白色で示される土砂密度の高い河口部では千葉県側の流入河川に多く、衛星観測時が冬季であることから当該流域の水田はほとんどが裸地になっており、降雨流出流が大量の土砂を運んできたものと判読することができる。

2) 乳白色～ピンク色で分布している土砂流出範囲の大きさは、後記する各流入河川の流域面積を考慮すると、土砂流出範囲の大きさから流域面積の相対的相違の判読が可能と思われる。

5) 各流入河川から海域に流出する土砂流の拡散方向から、衛星観測時における湾内を反時計周りに流れる沿岸流の存在が判読することができる。

4. 東京湾流入河川河口部の Chl. a 濃度判読

図-9 は、Chl. a 含有水が示す可視光～近赤外線波長域の電磁波スペクトル反射特性に基づいて以下に示した Chl. a 濃度の数量化アルゴリズムを利用して作成された Chl. a 濃度分布画像を示した。

$$R_{3M} = \text{Log}_{10}(\text{Max of } [(R_{443}/R_{551}) \text{ or } (R_{675}/R_{700})])$$

ここに、Chl. a : 推定濃度 (mg/L),

R443, R551, R675, R700: 443, 551, 675, 700 波長帯の反射率, R3M: (R443/R551) と (R662/R751) とを比較したときの大きい方の値

1) 上総台地の植生域に水源を持ち、河川沿線の沖積層に広がる農耕地を経て流下する養老側・小櫃川・小糸川・湊川などの自然河川は、市街地を流れる真間川・海老川・都川などの都市河川に比べて大量の Chl. a を海に排出している様子が判読できる。

2) 図-xx と比較すると、各流入河川から流出する土砂と Chl. a の拡散パターンはほぼ一致している。なお検証のため、衛星観測日に花見川、養老川、村田川、小櫃川河口付近で採集した試料水が示す濁度と Chl. a 濃度との関係から、土砂の流出濁度とこれら土砂流出流に含まれる Chl. a 濃度の高低とは良好な正の相関が確認されている。

5. 流入河川の影響評価

5.1 千葉県側の状況

東京湾に面する千葉県の流域では、産業構造や都市形態の違いも大きく、汚濁の発生量や下水道整備など各種浄化対策の実施状況も

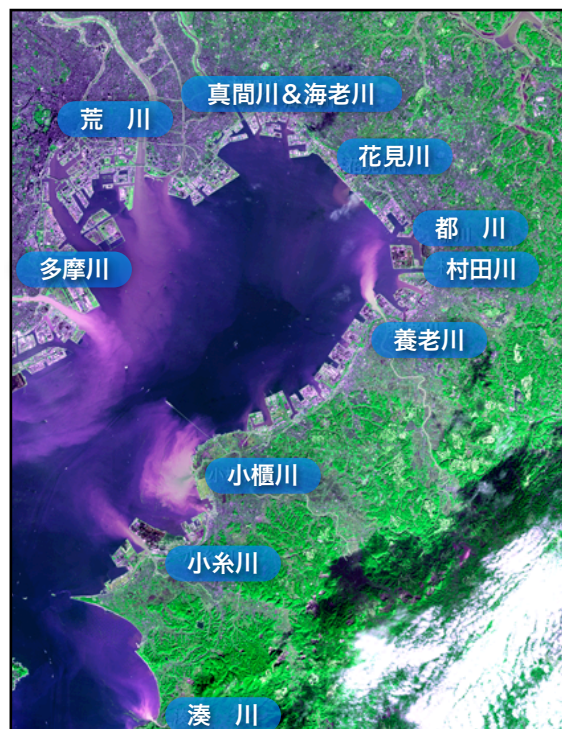


写真-8 複合ラジオメトリック補正処理を施した Terra/ASTER VNIR データによる流入河川からの集中豪雨翌日の土砂流出判読

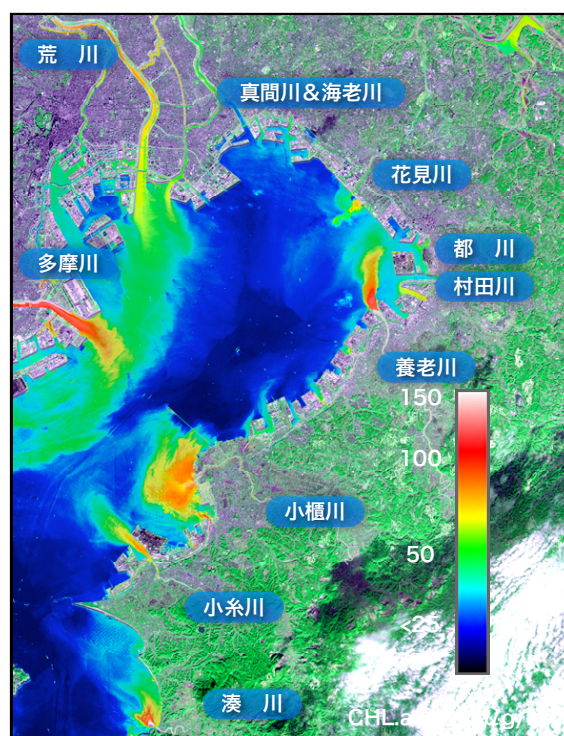


写真-9 Terra 用の Chl. a 数量化モデルにより可視化された流入河川からの集中豪雨翌日の Chl. a 濃度分布判読

異なり、千葉県側の水質汚濁の状況は富津岬を境にして南北で大きな違いを見せている。特に、大雨時には生活排水・工業排水・農業排水・牧畜排水などが処理施設から河川へと越流し、クロロフィル a(以降、Chl.a)や他の有機汚濁物を大量にを含んだ汚濁水が最終集結地である沿岸河口部へと運搬されている。平成18年度の東京湾の水質環境基準達成率を見てもいまだにCOD（化学的酸素要求量）で63.6%、N・Pでは60%となっており、夏季にはこれらに起因したChl.aによる海洋性プランクトンの異常増殖が、赤潮の発生頻度は全国1といわれている主要因ともなっている。近年、可視光～近赤外線波長域の衛星データを用いた富栄養化の指標であるクロロフィルa(以降、Chl.a)濃度を計測するが提案され、海域や湖沼におけるChl.a濃度が定量的に把握できるようになった。

ここでは、千葉県の東京湾流入河川を対象に、富栄養化現象の原因物質である窒素(N)・リン(P)の指標となるクロロフィルa(Chl.a)濃度と流域における下水道普及率を含む土地利用形態との間の重相関解析によって、海域の富栄養化をもたらす流入河川の影響について評価した。

5.2 衛星データから判読した河口部 Chl. a

図-10(a)~(f)に、Chl.a濃度数値化アルゴリズムにより抽出された湾全体のChl.a濃度分布より、さらに各流入河川河口部の沿岸域において環境基準値 $25\mu\text{g/l}$ を超過した濃度をさらに3段階に分類し、レベルスライス処理したものを示した。なお、図中のChl.a濃度はChl.aの濃度分布画像からサンプリングした各流入河川の河口部における3画素($30\text{m}\times 3=90\text{m}^2$)の平均を示したものである。

6. Chl. a 濃度と流域土地利用形態との多変量解析による相関分析

流入河川から排出するChl.a濃度は流域の土地利用形態に大きく相関性があるといわれている。本研究においては、Chl.a濃度に関与すると思われる流域の下水道普及率および土地利用形態(山林、水田、畑・果樹園、その他)を選び、これと衛星データの画像解析で判読されたChl.a濃度との相関性の検討を行った。流入河川河口部のChl.a濃度に対して表-1に示した流域における土地利用形態がどのように影響を及ぼすかを多変量解析手法によって評価し、下水道利用人口率を含んだ土地利用形態

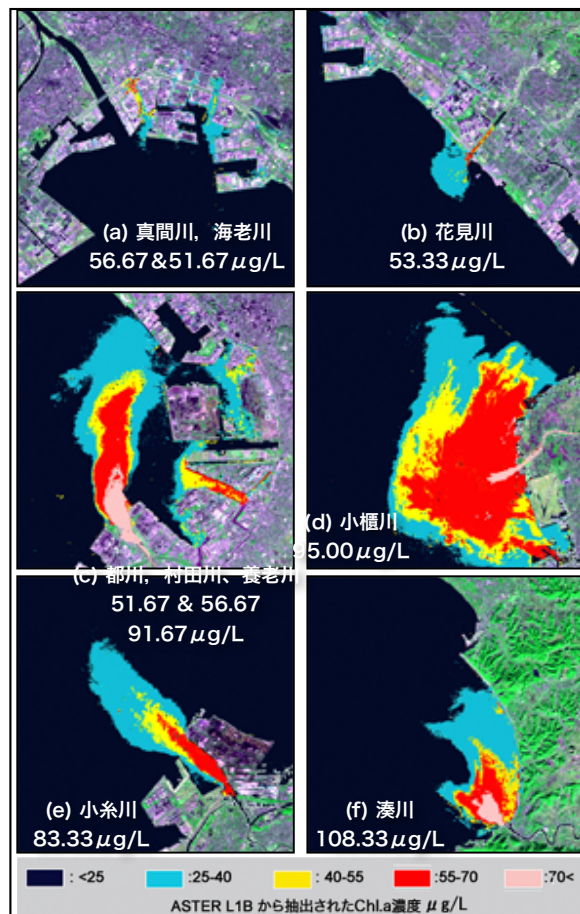


図-10 流入河川河口部の平均 Chl. a 濃度

との重回帰分析で得られた結果を基にして、東京湾の富栄養化に係わる流入河川の影響を評価した。なお、下水道利用人口率は各流域における下水道利用人口を夜間人で除して求めた。

6.1 多変量解析による流入河川の影響度評価

本研究では、流入河川河口部におけるChl.a濃度を目的変数、流入河川流域における下水道利用人口率、土地利用形態別面積(山林、水田、畑・果樹園面積、その他の土地利用形態)を説明変数とし、線形重回帰式(式-1)を設定し、回帰式の有意性および有効性、各説明変数に掛かる偏回帰係数および定数、偏回帰係数の有意性、などについて重回帰分析によって求めたところ、式-2を得た。

$$y = b_0 + a_1(x_1) + a_2(x_2) + a_3(x_3) + a_4(x_4) + a_5(x_5) \quad \text{式1}$$

ここに、y:Chl.a濃度($\mu\text{g/L}$)、 x_1 :下水道利用人口率(%), x_2 :山林面積(km^2)、 x_3 :水田面積(km^2)、 x_4 :畑・果樹園面積(km^2)、 x_5 :その他の土地利用面積(km^2)、 $a_1 \sim a_5$:偏回帰係数、 b_0 :定数

$$Y = 42.972 - 0.166(X_1) + 0.461(X_2) - 0.807(X_3) + 1.556(X_4) + 0.120(X_5) \quad \text{式2}$$

6.2 多変量解析の結果

表-2 は、流入河川河口部の Chl. a 濃度を目的関数、流域の下水道利用人口率を含む土地利用形態別面積を説明関数とする重回帰分析の結果を整理したものである。重回帰分析の結果から、次の用な知見を得た。

- 1) Chl. a 濃度に対する式 6.3 に示した線形重回帰式の有意 F 値は $0.029 < \text{有意水準 } 0.05$ となり、本研究で設定した回帰式に統計的有意性があることを示した。
- 2) 偏回帰係数の符合から、流入河川の河口部における Chl.a 濃度は下水道利用人口率および水田面積が大きいほど低下することを示し、下水道の整備促進が水質汚濁の軽減効果を確認した。水田面積が大きいほど Chl.a 濃度が低下したのは、衛星による観測時期が冬季であり、水田は土壌が露出しているためと考えられる。
- 3) 偏回帰係数に対する (t 値) の大小は、目的変数 (Chl.a 濃度) への貢献度がもっとも高い説明変数が山林、次位が下水道普及率、次いで畑・果樹園、水田、その他の土地利用、の順であることを示した。山林面積が最も関与しているのは、大雨時には山林からの土砂を含む降雨流出量が土地利用形態の中で最も大きいことが影響しているものと考えられる。

7. まとめ

本研究は、千葉県の大東京湾流入河川から排出される Chl.a の濃度に関与する流域の下水道普及率を含む土地利用形態との関係について、千葉県の大東京湾流入河川を対象とした重回帰分析によって、東京湾の富栄養化をもたらす流入河川の影響について評価した。本研究で明らかにした事項は、以下のとおりである。

- 1) 水域を可視光緑波長域、可視光赤波長域および近赤外線波長域で観測した衛星データにそれぞれ青・赤・緑色を割付けて合成したカラー合成処理で作成した衛星画像には、Chl.a と負の相関関係にある NP 比を可視化できることを示した。
- 2) 流入河川の河口部における Chl.a 濃度および流域における下水道普及率を含む土地利用形態の多変量解析によって、海域の富栄養化をもたらす流入河川の影響を評価することができた。

本研究によって確認した東京湾の富栄養化に対する千葉県の東京湾流入河川における土

地利用形態の影響は、山林が最も大きく、以下に下水道普及率、畑・果樹園、水田、その他の土地利用、と続いた。しかしながら本研究は大雨後に大量の SS を排出している時期であり、また冬季を対象にして解析した結果である。流出量が少ない小降雨期を対象にして解析した場合には山林からの降雨流出や土砂排出は少なく、水田の状態が冬季と異なる水張り期、生育期および収穫期などを対象にした場合には降雨流出や土砂排出の状況は異なると考えられる。流入河川の流域における降雨条件および解析対象時期による影響の検討を含め、他の水質及び同手法を他の河川の影響評価に応用し、更なる蓄積を今後の課題としたい。

表-1 流入河川流域の概要

流入河川	山林(km ²)	水田(km ²)	畑・果樹園(km ²)	その他(km ²)	下水道利用人口率(%)
真間川	2.5	1.3	11	38.5	27.6
海老川	0.6	1.2	3.9	19.5	21
花見川	5.2	1.9	9.4	38.9	91.2
都 川	28	2	5.7	42	90.1
村田川	31.5	15.7	12.3	50.9	58.6
養老川	101.4	42.9	18.1	116.4	47.2
小櫃川	98.7	34.6	12.5	119.9	4
小糸川	51.7	19.1	6.8	64.5	46.7
湊 川	86.5	11.5	4.9	12.9	0

表-2 多変量解析結果

回帰式の統計的有意性(有意F)			0.029
回帰式の重相関係数			0.979
回帰式の有効性(寄与率)			0.887
線形重回帰式	定 数	b ₀	42.972
	偏回帰係数	a ₁	-0.166
		a ₂	0.461
		a ₃	-0.807
		a ₄	1.556
		a ₅	0.120
偏回帰係数の有意性(t値)		t ₁	-2.122
		t ₂	3.221
		t ₃	-1.239
		t ₄	1.746
		t ₅	0.757

謝辞：本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業（平成 17 年度～21 年度）による私学助成を得て実施致しました。また、研究の遂行にあたり、NASA JPL Dr. Gardar より複合ラジオメトリック補正法ならびに Chl.a 数量化アルゴリズムへの構築／検証にあたり適切な助言ならびにご指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。