

## 沿岸海域において透明度を低下させる原因物質の解明（その2）

奥田 哲士

龍谷大学 理工学部 環境ソリューション工学  
(申請時：広島大学環境安全センター・助教)

平成28年5月

### 【研究目的】

沿岸生態系における一次生産は、主に水中の植物プランクトンが担っているため、それらの増殖に必要な光の透過性に関わる知見は重要である。昨年を含めた過去の研究では、TSSによる光減衰を溶存物質と浮遊物質、後者は更に生物（有機粒子）・非生物（無機粒子）の因子に分画して評価を行っている。本研究では、浮遊物質による光減衰因子として粒子径や粒子の性状に注力した調査を行い、光減衰への粒子の影響を掘り下げて把握することで、沿岸域における光減衰の要因を解明することを目的とした。そこで本年度は、

- ① 無機粒子を用いた室内実験で粒子径の違いが光減衰にどれほど影響を及ぼすのか、
  - ② 大阪湾での TSS による光減衰に大きく寄与している粒子特性（粒子種、粒径の影響）、
  - ③ オンサイト粒度分布測定とサンプリング後に研究室で測定する粒径の差異、
- を明らかにした。

### 【成果概要】

無機粒子を用いた室内実験で粒子径の違いが光減衰にどれほど影響を及ぼすのか（目的①）については、波長 400～700 nm での吸光度における吸光度の積分値は TSS 濃度と高い正の相関を示し、積分値の大きさは粒径 1.0  $\mu\text{m}$  付近にピークをもつ事を明らかにした。

大阪湾での TSS による光減衰に大きく寄与している粒子特性を明らかにする（目的②）点については、大阪湾を含む 3 海域において懸濁物質の組成や粒度分布や生物種などの詳細分析を行う野外調査を行い、SS 量に比べ粒径に応じた光遮蔽（散乱を含む）性を加重した指標を用いることで光減衰係数との相関の改善をみたが、粒子種の影響に比べると弱い事がわかった。

採水後のサンプル保管の粒度分布への影響を排除する（目的③）点については、サンプリング後の保管により数百  $\mu\text{m}$  の粒子が微細化、数  $\mu\text{m}$  程度の粒子が増加する可能性が示唆された。

### 【背景】

河口域では、河川から流入する豊富な栄養塩を利用して植物プランクトンによる活発な一次生産が行われており、河口以外の沿岸域でも魚類等の生息場にもなるアマモや底質表面の微細付着藻類が一次生産を担っている。それらの増殖に必要な光を透過させる指標である透明度は、一次生産の健全性の重要な指標である。過去の研究において、水中の光減衰における要因としては有色溶存有機物（CDOM）や植物プランクトンなどの懸濁物質が報告されており、大きな河川が存在する場合フミン物質を主成分とする CDOM が主となる可能性もある。大阪湾では経年的な透明度の改善がみられているが、さらなる改善の為に藻類繁殖（初夏）

時以外の沿岸域の透明度を制限する因子を特定、河川等の影響を把握する必要がある。加えて近年、ナノ粒子の測定技術が向上しており、ナノ粒子サイズの透明度への影響も検討できる状況になっている。

## 【研究方法】

まず懸濁態物質（本研究では  $1 \mu\text{m}$  未満の粒子も含む）の粒径の光減衰への影響を検証するため、直径が既知の球状シリカ粒子を超純水にて希釈し、TSS 濃度が濁度および吸光度に及ぼす影響を室内実験により検討した。使用するシリカ粒子としては直径  $0.1$ 、 $0.3$ 、 $0.6$ 、 $1.0$ 、 $3.0$ 、 $5.0$ 、 $10 \mu\text{m}$  のものを用い、TSS 濃度は  $0\sim 100 \text{ mg/L}$  として吸光度を測定した。

海域での微粒子と光減衰の関係調査のため、大阪湾（大規模都市：高負荷河川）では 2015 年 9 月 1 日、11 月 2 日、11 月 10 日（神戸大学）、2016 年 1 月 4 日-5 日の 4 回、調査を行った。これに加え、比較対象として広島湾（通常規模の都市）で 2 回、周防灘（小規模の都市）で 1 回、広湾（小規模都市の雨天時）で 1 回調査を行った。

透明度と光減衰係数の説明要因として、有色溶存有機物（CDOM）、および浮遊物質（TSS）について水質調査を行った。ここでは TSS の組成を非生物無機粒子（ $\text{SS}_{\text{IT}}$ ）、非生物有機粒子（ $\text{SS}_{\text{OT}}$ ）、および植物プランクトン（ $\text{SS}_{\text{PHY}}$ ）の 3 種に分けることも行った。調査は、先に示した人為的負荷の程度が異なる 4 海域（周防灘、広島湾、広湾、および大阪湾）において、河川から沖合に向けて調査地点を設け、鉛直的な多項目水質計および粒径粒度分布記録計を用いた観測、および鉛直採水を行った。各調査地点間では、多項目水質計による観測および表層水採取を行った。持ち帰った水サンプルは、CDOM 濃度（CDOM:  $440 \text{ nm}$  における吸光度）、Chl. *a* 濃度、TSS 濃度、強熱減量による粒状態有機物濃度の測定、および EEM（励起・蛍光マトリックス）による溶存有機物の成分分析を行った。光減衰の指標としては、 $400\sim 700 \text{ nm}$  の波長の光の光減衰係数  $K_d (\text{m}^{-1})$  を算出した。 $K_d$  はランベルト・ベールの式により求められ、水 ( $K_{\text{WATER}}: 0.038 \text{ m}^{-1}$ )、および CDOM ( $K_{\text{CDOM}}: 0.221 \times \text{CDOM}_{440} \text{ m}^{-1}$ ) の光減衰係数を用いて TSS ( $K_{\text{TSS}}$ ) の光減衰係数を算出することにより  $K_d$  に対する各光減衰要因の寄与率を算出した。

海水中の粒度分布としては、数  $\mu\text{m}$  以上および以下を現場測定可能な水中設置型粒度・粒径分布測定記録計（米国セコイア・サイエンティフィック社製：L I S S T-100X）をレンタルして測定した。採水しての測定や持ち帰っての測定の他、オンサイトでも測定した。

## 【実験結果および考察】

懸濁態物質の粒径の光減衰への影響については、図 1 に示すように TSS 濃度が増加するとともに、濁度が増加する高い正の相関が得られたが、 $0.1 \mu\text{m}$  の粒子は TSS 濃度が増加しても濁度は 0 で一定であり、粒子径が大きいほど傾きが大きくなった。ここで透明度に関わると考えられる波長  $400 \text{ nm}\sim 700 \text{ nm}$  での吸光度の積分値で比較すると、全ての粒子径において吸光度は TSS 濃度の増加に伴って増加した。その波長幅での吸光度における吸光度の積分値は TSS 濃度と高い正の相関を示し、積分値の大きさは粒径  $1.0 \mu\text{m}$  付近にピークをもつ事がわかった。これは粒子の大きさと波長の比が 1 に近い、すなわち波長と粒子直径が近いとその波長の光を吸収しやすいためと考えた。各粒子径では、SS がほぼ  $100 \text{ mg/L}$  まで直線近似で

きると考えられ、各粒子径の直線の傾き（吸光度積分量/SS：CA/SS値）が光減衰への重みづけになると考えた。この重みづけについては以下で述べる。

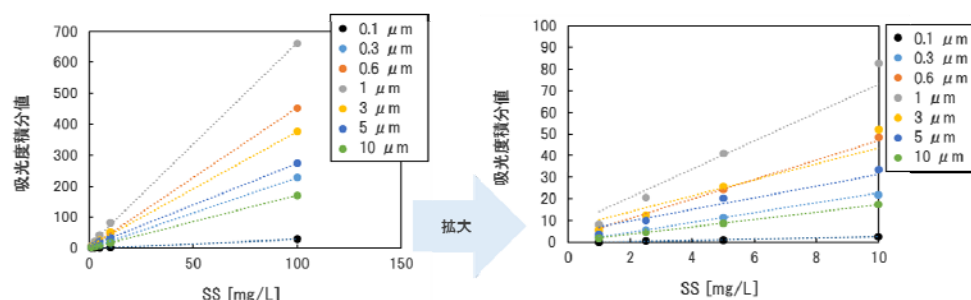


図1 各粒子径におけるシリカ粒子の吸光度積算値(波長：400～700 nm 光合成有効放射)

現場調査について、3海域（周防灘、広島湾および大阪湾）における昨年も含めた調査により、水中の光減衰に対するCDOMおよびTSSの寄与はそれぞれ、3～40%（平均16%）および33～91%（平均71%）であることがわかった。CDOMの動態としては、海域を問わず河口に近いほど濃度が高く（最大 $1.98 \text{ m}^{-1}$ ）、夏季に上昇する傾向であった。

上記結果より、光減衰に対するTSSの寄与率は高いことが明らかとなったため、先ほど述べた粒子径の光減衰過程への影響（粒径の重みづけ）を加味した解析を行う事とした。その結果が表1であるが、単純にSS量での相関を取った場合では相関が見られなかったものが、TSSの組成を重量ベースで藻類由来(Chl-a量を元に算出)、有機物由来(強熱減量より算出)、無機物由来(残渣)の3種類に分画することで、大阪湾においては0.50まで決定係数が上昇した。これにさらに粒径の重みづけを加えた結果、さらに0.02の上昇がみられた。

表1  $K_{TSS}$ とSSの相関の重回帰分析結果

項目 / 決定係数 $R^2$	大阪湾
SS [mg/L]	0.01
SS+粒径効果	0.32
SS+3種類分画	0.50
SS+3種類分画+粒径効果	0.52

同様の解析を大阪湾以外の海域の結果、さらに雨天で濁度の高い日を狙ってサンプリングできた（大学最寄りの海域である）広湾の結果を含めて、幅広い $K_{TSS}$ での結果が図2であるが、SSの種類分画、さらに粒子径での重みづけにより決定係数が明らかに上昇することがわかった。しかしながら、粒径重みづけのみと種類の効果では後者の影響が大きく、目的によってはSSの種類分画程度でも良い場合もあると考えられる。尚、重みづけの解析方法については現在も改良を続けており、粒径の重要度については更に向上する可能性がある。

最後に、LISSTによる現場での粒度分析を行い、実験室測定と現場測定の相関をとった結果、概して特に大きめの粒径（百 $\mu\text{m}$ 前後）の体積濃度は現場測定の方が大きく、逆に測定限界である3 $\mu\text{m}$ 程度の濃度は輸送後の測定で高く、サンプリング後の保管が微粒子濃度に影響、すなわち輸送中における粒子の微細化などが起こっている可能性が示唆された。

この現場分析を用いて、水中粒子の体積濃度が沿岸から沖に向けて減少することが確認できた。粒度分布について、大阪湾では他海域に比べ、約 30  $\mu\text{m}$  以上の粒子が多い一方で 10 $\sim$ 30  $\mu\text{m}$  の粒子は少ないという特徴がみられた。また表面積で比較すると、広島湾、周防灘の傾向は似ており、約 10  $\mu\text{m}$  未満の表面積が大きいのに対し、大阪湾は約 100  $\mu\text{m}$  付近の表面積も同様に大きく、約 10 $\sim$ 30  $\mu\text{m}$  の表面積が小さかった。この大阪湾での 10 $\sim$ 30  $\mu\text{m}$  付近の粒子の減少は、河口から離れた地点で顕著に表れていることから、陸域由来の砂や泥が沈降したためではないかと考えた。30  $\mu\text{m}$  以上の粒子群は、デトリタスや植物プランクトンなどの密度が小さいものが主要因となっているために沈降しにくい可能性がある。

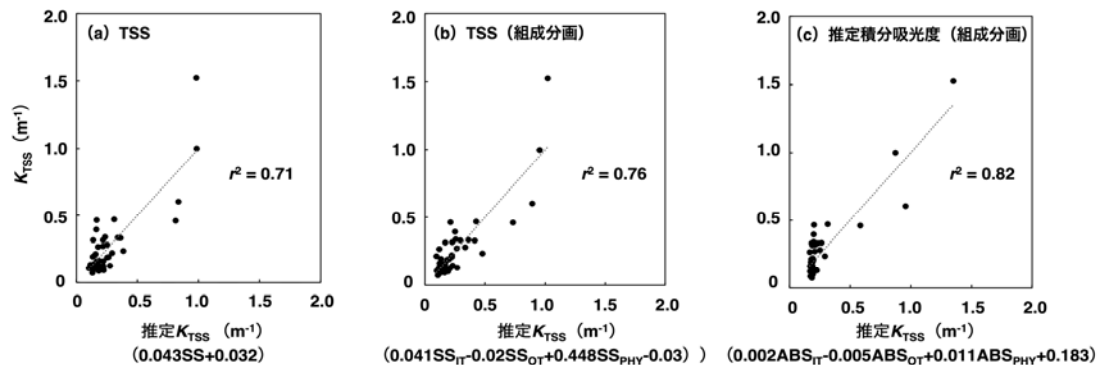


図2 4海域をまとめた重回帰分析による  $K_{TSS}$  の推定値および実測値の関係

(a) TSS 濃度のみの場合、(b) TSS を3分画した場合、(c) さらに粒子径で重みづけしたものの

### 【結論】

10  $\mu\text{m}$  以下の微粒子の中でも、粒径 1.0  $\mu\text{m}$  付近の粒子が重量当たりの光遮蔽効果が最も大きい事がわかり、光遮蔽への影響として現場においては懸濁物質の種（無機や有機等）の影響が大きいものの、無視できない粒径の影響がある事がわかった。また、サンプリング後の保管が、数百  $\mu\text{m}$  付近の粒子の微細化を起こしている可能性が示唆された。

### 【謝辞】

大阪湾の採水に当たっては、共同研究者が所属する神戸大学内海域環境教育研究センター（牛原康博船長他皆様）、および大阪府立環境農林水産総合研究所（水産研究部海域環境グループの中嶋昌紀主幹研究員、山本圭吾主研、秋山諭研究員他皆様）の船に関連する皆様に協力頂いた。広島湾周辺の採水については広島商業高専（芝田浩先他皆様）および広島大学（岩崎貞治技術職員他皆様）の船に関連する皆様の協力を得た。その他協力頂いた漁協の皆様も含め、この場を借りてお礼申し上げる。

研究期間：平成27年4月1日～平成28年2月28日

研究代表者：代表研究者 龍谷大学工学部環境ソリューション工学 奥田哲士

（申請時元：広島大学 環境安全センター）

共同研究者：西嶋 渉（広島大学環境安全センター）・浅岡 聡（神戸大学内海域環境教育研究センター）