

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

計測法の違いによる海中粒子サイズ分布の比較

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-09-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 王, 歓 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/971

修士学位論文

計測法の違いによる海中粒子サイズ分布の比較

平成 23 年度
(2011 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋環境保全学専攻

王 歆

修士学位論文内容要旨
Abstract

専攻 Major	海洋環境保全学専攻	氏名 Name	王 歡
論文題目 Title	計測法の違いによる海中粒子サイズ分布の比較		

現場海域の粒子は凝集などにより複雑で広範囲な粒径組成をしている。正確な粒径分布の把握は、海中粒子の挙動・循環を知る上で不可欠な情報である。海中粒子サイズの光学計測機器として、現場粒径分布計(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry、以下; LISST)は主に植物プランクトン、レーザー光学プランクトン・カウンタ(Laser Optical Plankton Counter、以下; LOPC)は主に動物プランクトンのようなそれぞれに適した粒径計測範囲を持っており、広範囲なサイズ分布を把握しているとはいえない。本研究では、第1に上述した光学計測機器(LISSTおよびLOPC)の計測特性を比較し、広範囲の粒径分布の計測手法を確立し、第2にこの手法を利用して東京湾の粒子サイズの分布と変化を検討した。

粒子サイズの計測機として LISST-100X(Type C、測定範囲: 2.5-500 μm)、LOPC (測定範囲: 100-35000 μm)、およびコールター・カウンタ(測定範囲: 2.5~62.4 μm)を用いた。現場観測は、2010年5月と9月に東京湾湾奥から湾口にかけて、東京海洋大学青鷹丸に乗船して行った。5月と9月の観測点数はそれぞれ15点および8点であった。CTD SBE19 (Sea Bird 社製)と LISST、LOPC および光束透過率計 C-Star (Wet. Lab 社製) をフレーム枠に抱き合わせて海中粒子計測システムを構築して、観測した。計測と同時にニスキンボトルにより、表層、水深10mおよび20mから採水した。サンプルを分取しコールター・カウンタによる粒径測定、顕微鏡観察、SS濃度、Chl. *a*濃度、光束消散係数の測定を行った。

結果は以下のようであった。(1)東京湾での粒子体積の粒径分布を見ると、LISSTの計測では2~500 μm の範囲で粒子が見られ、5月と9月の湾奥表層は17 μm と33 μm 付近に極大が見られた。LOPCの粒径分布では105-3735 μm の範囲で粒子が計測された。またコールター・カウンタでは2.5~62.4 μm の範囲で粒子が見られ、5月湾奥表層では17 μm 付近に極大が見られた。(2)粒子体積とSS濃度、Chl. *a*および光束消散係数との関係はコールター・カウンタで最も相関が高かった。(3)LISSTおよびLOPCは105~500 μm で、計測範囲が重なる。この範囲のうち計測値の安定した144~201 μm の粒子体積で基準化して、両粒径分布を結合した。5月の東京湾湾口における粒径分布は表層では400 μm 付近に極大が見られる。湾奥の海面では17 μm および400 μm 付近に極大が見られた。顕微鏡観察によると、5月の湾奥で17 μm 付近の極大は植物プランクトン優占種 *Prorocentrum minimum* (平均直径18.36 μm)によるものと思われた。400 μm 付近に動物プランクトンは観察されなかった。すなわち、この極大の主な粒子は大型凝集粒子であると考えられた。

目次

第1章 序論	・・・1
第2章 材料と方法	
2-1 粒径計測機器	・・・3
2-2 現場観測	・・・3
2-2-1 LISST、LOPCによる現場観測	
2-2-2 サンプル分析	
第3章 結果	
3-1 粒径計測手法別の粒径分布	・・・7
3-1-1 LISST計測による粒径分布	
3-1-2 LOPC計測による粒径分布	
3-1-3 Coulter Counterによる粒径分布	
3-1-4 顕微鏡観察による粒径分布	
3-2 粒径分布と環境諸元との関係	・・・8
3-2-1 SSと各計測による粒子体積との関係	
3-2-2 Chl. <i>a</i> と各計測法による粒子体積との関係	
3-2-3 光束消散係数と粒子体積との関係	
第4章 考察	
4-1 異なる計測法による粒子サイズ分布の比較	・・・17
4-1-1 計測値の問題点	
4-1-2 5月と9月の粒子サイズとその組成	
4-2 広範囲粒径分布の作成	・・・19
4-2-1 LISSTデータとLOPCデータの統合	
4-2-2 東京湾における粒径分布とその変化	
4-3 今後のサイズ計測の重要性	・・・21
謝辞	
引用文献	

第1章 序論

海中には多くの種類、サイズ、形状の粒子が存在する。それらの粒子の中には単独で存在するものばかりでなく、様々な粒子同士が凝集体を形成しているものがある。また、それら粒子は、長時間水中に懸濁して浮遊するものや数時間から数日以内に海底まで沈降する粒子があり、後者は栄養塩の鉛直輸送に重要な役割を果たしていることが報告されている(角皆、1981；半田・田上、1980)。これは海中粒子の挙動が粒子の種類やサイズで異なることに起因していると考えられる。

海中粒子の挙動は、粒子のサイズに大きな影響を受けるため、その粒子サイズを正確に計測することが求められている。海中粒子のサイズを測定する手法として、実体的な手法と光学的な手法がある。実体的な手法では、顕微鏡観察(篠村ら、1999)、コールター・カウンタ法(コールター・カウンタ、以下、Coulter Counter；Sheldon *et al.* 1972)、エメリー管法(青ら、1957)などがあり、それぞれサンプル海水を採取し測定する。一方、光学的な手法では、レーザー光(波長 670nm)を照射し、粒子による散乱光を測定する機器として、現場粒径分布計(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry、以下、LISST；鷲見、2007)とレーザー光(波長 679nm)を照射し、粒子による光量変化を測定するレーザー光学プランクトン・カウンタ(Laser Optical Plankton Counter、以下、LOPC；Herman *et al.*，2004)やカメラ撮影による方法(Akiba *et al.*，2000；市川、2008)が開発されており、現場海中での計測が可能であることから注目されている。

実体的な手法では、粒子の種類、サイズおよび形状を詳細に検討することが可能であるが、分析作業に時間と労力を要する。Johnson *et al.* (1994)は、採水現場から分析を行う実験室までの移動の間のタイムラグおよび採水サンプルの取り扱いにより、サンプル中の粒子が崩壊する場合があります、Coulter Counterのデータからは現場海中と異なった粒径分布が得られてしまう可能性があるとして指摘している。

光学的な手法では、上記の粒子崩壊による粒径分布のバイアスの問題が解決されているが、機器により計測原理が異なり、粒径の測定範囲が制限される側面がある。

現在、代表的な粒径計測機器として、LISSTやLOPCなどが挙げられる。鷲見(2007)は、LISST-100X (Type B、測定レンジ：1.25～250 μ m)が沿岸域の比較的高濁度の観測に適しており、懸濁態粒子の挙動を詳しく検討できることを報告した。

また、山下ら(2007)は、LOPC(測定レンジ：0.1～35mm)を用いて北海道噴火湾において動物プランクトン海水中で調査を行い、LOPCデータから動物プランクトンのバイオマスを推定するとともに、そのサイズ構造を明らかにした。

しかしながら、計測範囲の都合上、LISSTは植物プランクトンなどの比較的小さな粒子、LOPCは動物プランクトンなどの比較的大きな粒子に適した粒径計測範囲を持っており、現場海域の複雑な粒径構成をすべて同時に把握できているとはいえない。さらに、東京湾のような高濁度

海域においては粒子の凝集が無視できず、単一の機器での計測だけでは海中の粒子サイズの様子をどのくらい再現できているのか不明である。

そこで本研究は、第1に海中粒子サイズの光学計測機器 (LISSTおよび LOPC) の計測特性を比較し、広範囲の粒径分布の計測手法を確立した。第2にこの手法を利用して東京湾の粒子サイズの分布と変化を調べた。さらに本手法によって得られるサイズ分布から現場海域における粒子の凝集状況に関して検討した。

第2章 材料と方法

2-1 粒径計測機器

光学的な粒径計測機器として、現場粒径分布計 LISST-100X (Type C, Sequoia 社製)および LOPC(Brooke Ocean Technology 社製)を用いた。LISST-100X は、レーザー回折の原理を基に、水中における懸濁物質からの散乱光角度分布を解析し、現場海水中の粒径スペクトルを計測する機器である。測定および計算項目は粒径分布、VSF (Volume Scattering Function)、透過度、水圧、水温である。計測される粒径範囲は $2.5\sim 500\mu\text{m}$ であり、対数スケールで 32 分割して表示する。分画した粒径範囲の中央粒径は $2.72\mu\text{m}$ から 1.18 倍ずつとし、 $460\mu\text{m}$ までである。測定濃度は $1\sim 750\text{mg/L}$ で、分解能は 1mg/L 以下である。

LOPC の基本的な計測原理は、OPC (Optical Plankton Counter, Herman 1988, 1992; Herman *et al.*, 1993)と同様であり、光源で作る計測面を粒子が通過する際に生じる光量の変化を測定し、その強度から通過粒子のサイズと数を計測する。さらに LOPC では、光源に指向性が強く減衰の少ないレーザー光を使用し、受光部にフォトダイオードアレイを用いることで計測精度を向上させている。また、マイクロプロセッサを組み込んだ LOPC 本体をアーマードケーブルで曳航することにより、リアルタイム計測が可能である。

LOPC での粒径分布の解析には、解析ソフト (LOPC Post-Processing) を利用した。この解析ソフトは、観測した粒子について 0.5 秒ごとに球体換算直径 (Equivalent Spherical Diameter, $15\mu\text{m}$ 幅, 以下 ESD) から粒子体積を算出し、ESD クラスごとの計数値 (プランクトン数) を連続データとして出力できる。

実体的な計測手法として、Coulter Counter による計測と顕微鏡観察を行った。

Coulter Counter はコールター原理に基づく粒径分布測定機器である。コールター原理は、粒子が細孔を通過する際に生じる 2 電極間の電気抵抗の変化を測定する。Coulter Counter として Multisizer 2 型 (ベックマン・コールタ社) を使用し、 $100\mu\text{m}$ のアパチャーチューブ装着することにより、 $2.5\sim 62.4\mu\text{m}$ を測定範囲とした。

2-2 現場観測

2-2-1 LISST, LOPC による現場観測

現場観測は、2010 年 5 月 17~18 日と 9 月 9~10 日に東京湾湾奥から湾口にかけて、東京海洋大学青鷹丸に乗船して行った。5 月と 9 月の観測点数はそれぞれ 15 点および 8 点であり、観測場所は Fig. 1 の通りである。観測点番号は観測点の下に表示する。

CTD SBE19 (Sea Bird 社製) と LISST、LOPC および光束透過率計 C-Star (Wet. Lab 社製) をフレーム枠に抱き合わせて海中粒子計測システムを構築した。このシステムを舷側から垂下し、海面から海底付近もしくは水深 50m まで連続的に観測した。システムを降ろすときのスピードは 1m/sec 、上げる時のスピードは 0.5m/sec とし、上げる時には水深 10m 間隔で 30 sec 静止

させた。LISST および LOPC はともに静止から上げた 5 秒のデータを解析に使用した。ただし、LOPC では 5 月の Sta. 1, 2, 3, 4, 9, 14 および 9 月の Sta. 6 で欠測(機器の不具合)である。

同時にニスキンボトルにより、各観測点の表層、水深 10m および 20m から採水した。ただし、5 月の観測は Sta. 1, 3 および 11 の水深が浅いため、水深 20m は欠測である。サンプルを分取し、Coulter Counter および LISST による粒径測定、顕微鏡観察(5 月のみ)、SS(懸濁粒子濃度)、Chl. *a* 濃度の測定を行った。

2-2-2 サンプル分析

LISST、Coulter Counter および濁度計での測定のために分取されたサンプル(250mL)はその日のうちに研究室へ持ち帰り冷蔵した。1~2 日後、それら容器を取り出し、数回振って攪拌した。LISST のチャンバーに静かに注いで粒径分布を計測した。Coulter Counter 計測はそれぞれのサンプルについて 4 回ずつ行なった。濁度の測定ではサンプルを C-star に接続した測定チューブに注ぎ計測した。

顕微鏡観察は以下のように行なった。各観測点の表層水 500mL に 2mL のルゴール液を添加し、遮光して持ち帰った。保存したサンプルを 100mL ずつにメスシリンダーに分取し、3 日間放置して粒子を沈殿させた。上澄み 90mL をホールピペットで取り除き、残りの 10mL を顕微鏡(ケイエスオリンパス製、デジタルシステム: Moticam2000)で観察し、サンプル中の粒子およびプランクトンの種類とサイズ、種類ごとの数が計測された。代表種については、写真撮影を行った。以下の(1)および(2)式を用いて各粒子を球および円柱と仮定した際の等体積球相当半径 R_1 、 R_2 を算出し、(3)および(4)式を用いて各粒子の体積 V_1 および V_2 を算出した。

$$R_1 = \frac{D}{2} \quad (\text{球形の場合}) \quad (1)$$

$$R_2 = \left(\frac{3hd^2}{16} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{円柱体状の場合}) \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{4\pi}{3} R_1^3 \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{4\pi}{3} R_2^3 \quad (4)$$

(球形プランクトンは直径 D 、円柱体状プランクトンは長さ h と直径 d を計測した)

SS および Chl. *a* 濃度の分析は、以下のように行なった。SS の分析は、各観測点の表層、10m および 20m から採取したサンプルを用いて、直ちに船上で行った。サンプルをミリポア HA フィルターで吸引ろ過し、炭酸アンモニウム水溶液によって脱塩した。ろ過後のフィルターは 60°C で 72 時間乾燥させて秤量した。ろ過前後のフィルターの重量差とろ過量から SS を算出した(植松ら、1978)。

Chl. *a* 濃度の分析はサンプルをグラスファイバー・フィルター (GF/F) で吸引ろ過後、DMF (N, N-Dimethyl-formamide) で色素を抽出し、蛍光光度計 (Turner Designs、Model 10-005R) により測定を行った(Suzuki and Ishimaru, 1990)。

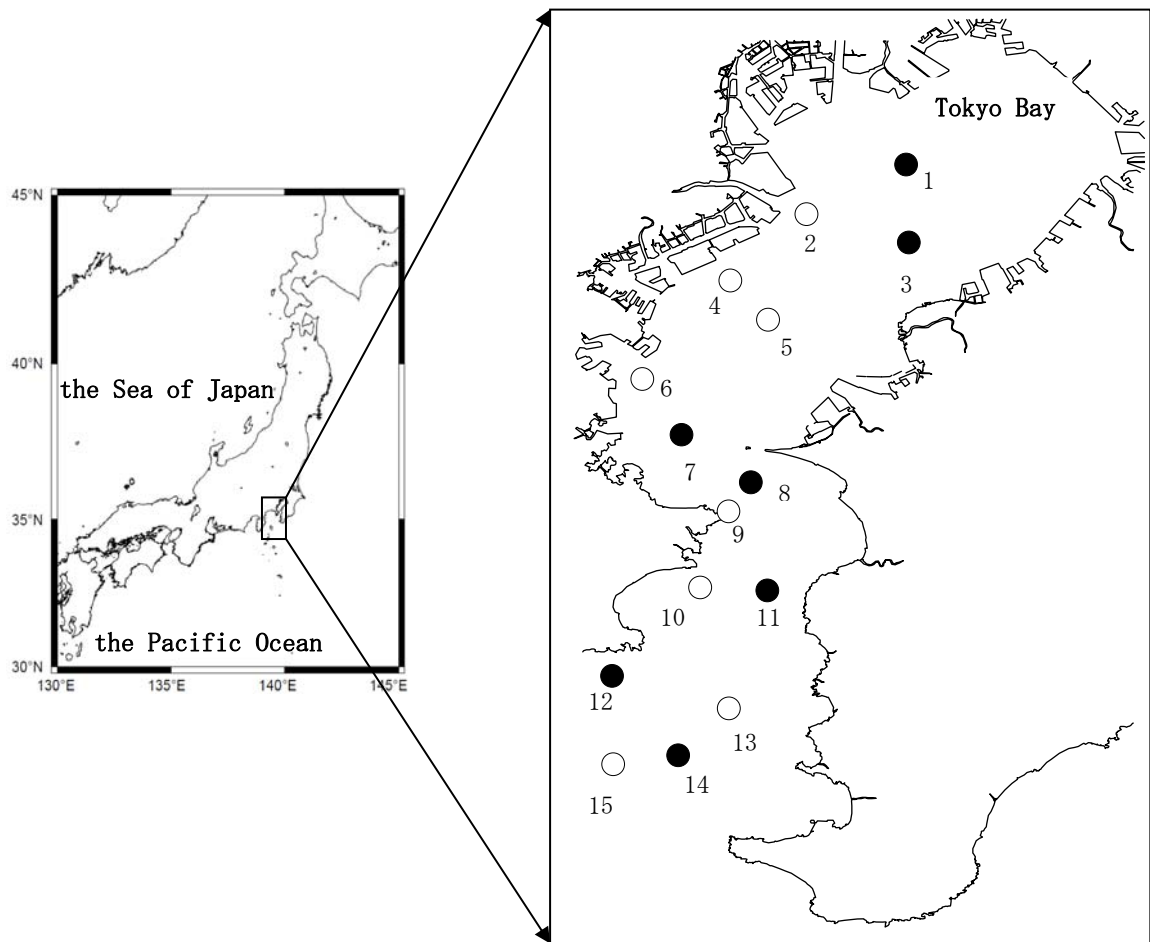


Fig.1 東京湾の観測点 (5月 ; ○と●, 9月 ; ○)

第3章 結果

3-1 粒径計測手法別の粒径分布

3-1-1 LISST 計測による粒径分布

LISST による計測結果では $2.72\sim 460\mu\text{m}$ の範囲に粒子が見られた。Fig. 2 に 5 月と 9 月の湾奥 (Sta. 5) と湾口 (Sta. 13) の粒径分布を示した。5 月の湾奥の表層 0m の粒径分布は、 $2.72\mu\text{m}$ の小さな粒径で高い濃度を示し、 $7.33\mu\text{m}$ で極小を示した。これ以上では、粒径とともに濃度は次第に高くなり、 $17\mu\text{m}$ 付近で極大が見られた。 $30\sim 300\mu\text{m}$ では、一定の濃度で推移し、それ以上のサイズでやや高くなった。湾奥の水深 20 m では顕著な極大が見られなかった。湾口の表層は、湾奥と比べ体積濃度が減少しているが、分布の形状は類似していた。

9 月では湾奥表層 0m では、 $7.33\mu\text{m}$ にかけて体積濃度が急激に減少し、 $7.33\mu\text{m}$ 付近に極小を示し、 $30\mu\text{m}$ 付近で小さな極大が見れた。これ以上の粒径では次第に濃度が高くなった。20 m では $7.33\mu\text{m}$ 付近の極小は見られず、粒径増大とともに高くなった。湾口では、体積濃度が比較的 low、表層と水深 20 m で共に $7\mu\text{m}$ 付近に極小を示し、粒径の増加に伴いわずかに濃度も高くなった。

3-1-2 LOPC 計測による粒径分布

LOPC による観測では、取得したデータを解析ソフト (LOPC Post-Processing) 用いて解析し、 $75\mu\text{m}$ から $3735\mu\text{m}$ までの $15\mu\text{m}$ 間隔の粒子数と粒子体積データなどが出力された。本研究は計測値の安定した $105\mu\text{m}$ からの粒子数データを使用し、粒子を球形と仮定して体積を計算した。この場合、大きな粒径において粒子数が数個程度であると粒径分布の表記が困難である。そこで、本研究では、LOPC のデータを LISST の区分に対応させ、対数スケールで 22 分割した。分画した粒径範囲の中央粒径は $104\mu\text{m}$ から 1.18 倍ずつとし、 $3355\mu\text{m}$ までである。

Fig. 3 は、LOPC で計測した 5 月と 9 月の粒径分布を示す。5 月の表層 0m (湾奥と湾口) の粒子の粒径範囲は、 $104\sim 2843\mu\text{m}$ まで見られた。体積濃度は、小さい粒径ほど低く、 $400\mu\text{m}$ 付近で極大が見られ、さらに大きな粒径では低下した。20m では、 $104\sim 2041\mu\text{m}$ の範囲で粒子が見られ、湾口は $400\mu\text{m}$ 付近で大きな極大が見られるが、湾奥には $300\sim 400\mu\text{m}$ に小さな極大が見られた。

9 月の表層では、湾奥と湾口で粒子の粒径範囲は $104\sim 3355\mu\text{m}$ まで見られるのに対し、水深 20m では $1053\mu\text{m}$ 以上の粒子は、見られなかった。湾奥の表層、水深 20m、湾口水深 20m の粒径分布は $300\sim 400\mu\text{m}$ に極大があるのに対し、湾口表層は粒子サイズが大きいほど高くなった。

3-1-3 Coulter Counter による粒径分布

Coulter Counter の計測結果は、 $2.5\sim 62.4\mu\text{m}$ の粒径範囲で 234 区分に分割されて出力され

る。このため、各粒径区分の体積濃度が他の計測法に比べ低くなり、また $30\ \mu\text{m}$ を超えると粒子数が数個程度に低下した場合、LOPC と同様に粒径分布の表記が困難である。そこで、Coulter Counter の出力粒径区分を LISST の区分に合わせて解析した。Fig. 4 に Coulter Counter で計測した 5 月と 9 月の粒径分布を示す。5 月表層では $2.72\sim 53.5\ \mu\text{m}$ の粒径範囲の粒子が計測された。水深 20m では $2.72\sim 63.1\ \mu\text{m}$ 範囲にみられた。5 月湾奥表層で $17\ \mu\text{m}$ 付近に顕著な極大が見られた。

9 月では湾奥表層に $15\sim 30\ \mu\text{m}$ 付近で小さな極大が見られたが、湾奥水深 20m および湾口では粒径に対してほぼ一定の粒子体積を示した。

3-1-4 顕微鏡観察の結果

Fig. 5 に顕微鏡観察によって解析した 5 月表層の全粒子の粒径分布とプランクトンの粒径分布を示す。5 月湾奥の表層では粒子として、 $4.46\sim 460\ \mu\text{m}$ の範囲の粒子がみられた。粒子の体積濃度は $4.46\sim 12.1\ \mu\text{m}$ で低く、それ以上では粒径増加とともに増加している傾向が見られる。

湾奥のプランクトンの粒径分布は、 $19.8\ \mu\text{m}$ 、 $45.3\ \mu\text{m}$ 、 $63.1\ \mu\text{m}$ に極大が見られた。湾口では、 $32.5\ \mu\text{m}$ 、 $53.5\ \mu\text{m}$ に極大が見られた。 $19.8\ \mu\text{m}$ の極大を示す主要な組成は、植物プランクトン優占種は *Prorocentrum minimum* (平均直径 $18.36(\pm 1.50)\ \mu\text{m}$) であった。

Table 1 に顕微鏡でみられた植物プランクトンの種類、等体積球相当径や体積濃度などを示した。5 月の湾奥の優先種は *Rhizosolenia setigera*、*Prorocentrum minimum* であり、それらの等体積球相当径はそれぞれ $32.12(\pm 3.90)\ \mu\text{m}$ および $18.36(\pm 1.50)\ \mu\text{m}$ であった。また湾口の優占種は *R. setigera*、*Guiniarda striata*、*Pseudo-nitzschia seriata* であり、それらの等体積球相当径はそれぞれ $32.12(\pm 3.90)\ \mu\text{m}$ 、 $52.24(\pm 6.18)\ \mu\text{m}$ および $33.89(\pm 8.55)\ \mu\text{m}$ であった。Table 2 には 5 月の St. 5 と St. 13 に出現した主要なプランクトンの種類を示した。湾奥 Sta. 5 では、珪藻が 19 種、渦鞭毛藻は 5 種。湾口 Sta. 13 では、珪藻は 9 種、渦鞭毛藻は 9 種をそれぞれ確認できた。

3-2 粒径分布と環境諸元 (SS、Chl. *a*、光束消散係数) との関係

3-2-1 SS と各計測による粒子体積との関係

5 月と 9 月の SS と各計測による粒子体積濃度との関係を Table 3 に示す。

LISST で計測した粒子体積濃度と SS との関係では、弱い相関が見られた。LOPC では相関が見られなかった。また Coulter Counter で計測した粒子体積濃度と SS との相関係数は 5 月および 9 月でそれぞれ 0.93 および 0.88 であり、強い相関が得られた。

各粒子体積濃度と SS との関係式の傾きは各計測法で測定されている粒子の密度を反映する。Coulter Counter によって測定された粒子体積濃度と SS の関係の傾きは 1 よりわずかに小さい。このことから Coulter Counter によって測定された粒子の密度は $1\text{mg}/\mu\text{L}$ に近いといえる。一方、LISST によって測定されたときの関係式の傾きは顕著に大きい。このことから、LISST に

よる測定された粒子は平均密度が $1\text{mg}/\mu\text{L}$ より非常に低いと言える。

3-2-2 Chl. *a* と各計測法による粒子体積との関係

5月と9月の Chl. *a* と各計測による粒子体積濃度との関係を Table 4 に示す。

LISST および LOPC で計測した粒子体積濃度と Chl. *a* との関係は有意ではなかった。一方、Coulter Counter で計測した粒子体積濃度と SS との相関係数は5月および9月でそれぞれ0.86 および0.95 であり、強い相関が得られた。

LISST および LOPC で計測される粒子体積濃度は、その中に植物プランクトンの体積の割合が小さいことを示している。Coulter Counter で計測される粒径範囲の粒子体積濃度と Chl. *a* との関係式の傾きは5月に0.24であったが、9月に2.49と変化した。これは9月において Coulter Counter が計測した粒子体積は、その中に植物プランクトン体積の割合が増加したことを示している。

3-2-3 光束消散係数と粒子体積との関係

5月と9月の光束消散係数と各計測による粒子体積濃度との関係を Table 5 に示す。

LISST で計測した粒子体積濃度と光束消散係数との関係は5月および9月ともに有意な相関が得られなかった。LOPC で計測した粒子体積濃度と光束消散係数との関係は、5月 ($r=0.76$, $P<0.01$) で強い相関、9月 ($r=0.49$, $P<0.05$) では弱い相関が見られた。また Coulter Counter で計測した粒子体積濃度と光束消散係数との相関係数は5月および9月ともに0.81であり、強い相関が得られた。

このことから、LISST で計測される粒子より、LOPC で計測される粒子が光束消散係数への寄与が大きいことがわかる。また、Coulter Counter では9月で傾きがほぼ1であることから、これらの粒子が濁度とよく対応することがわかる。

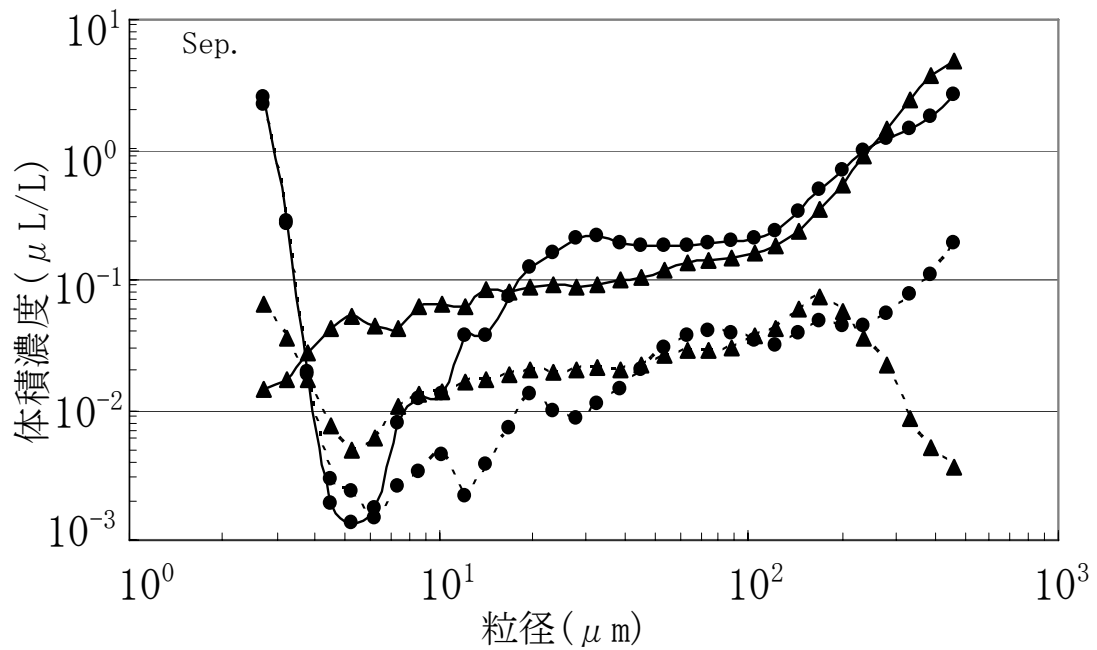
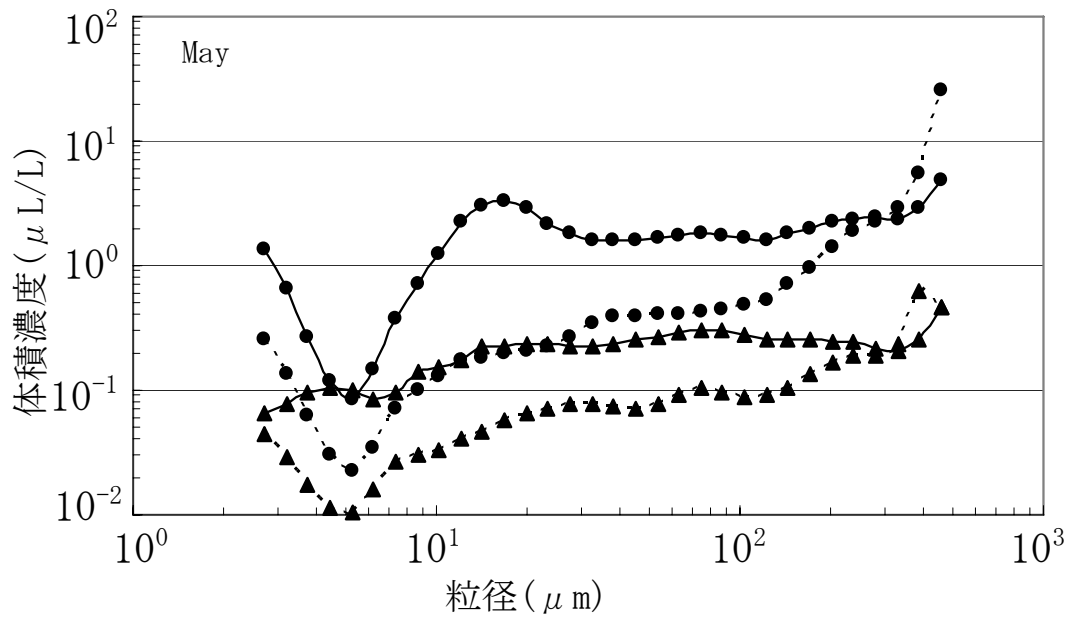


Fig.2 LISSTで計測した5月と9月の粒径分布

実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●および▲はそれぞれ 0m および 20m を示す。

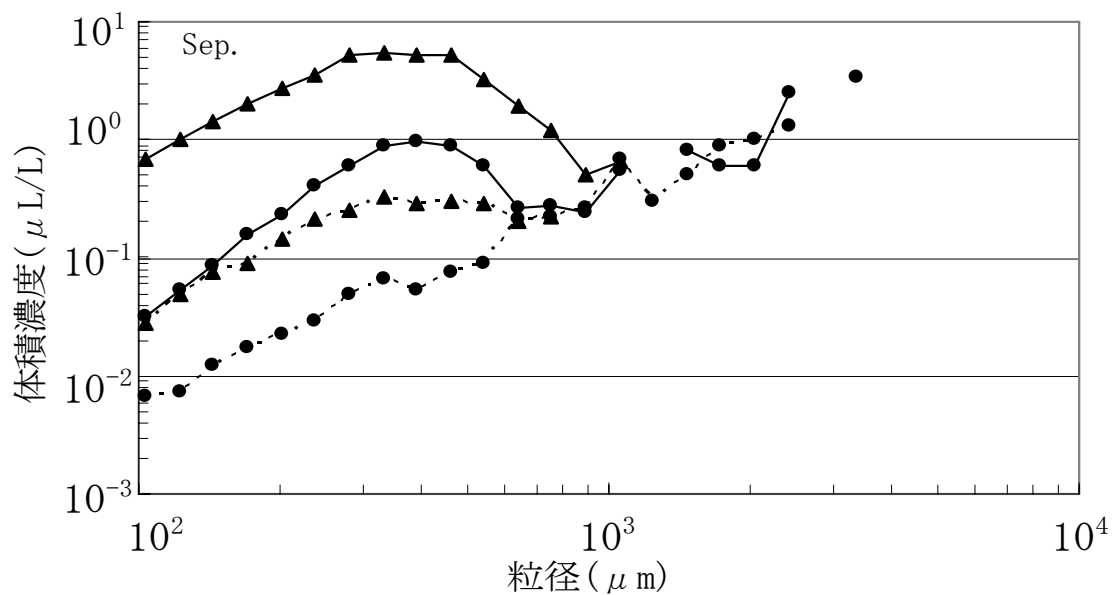
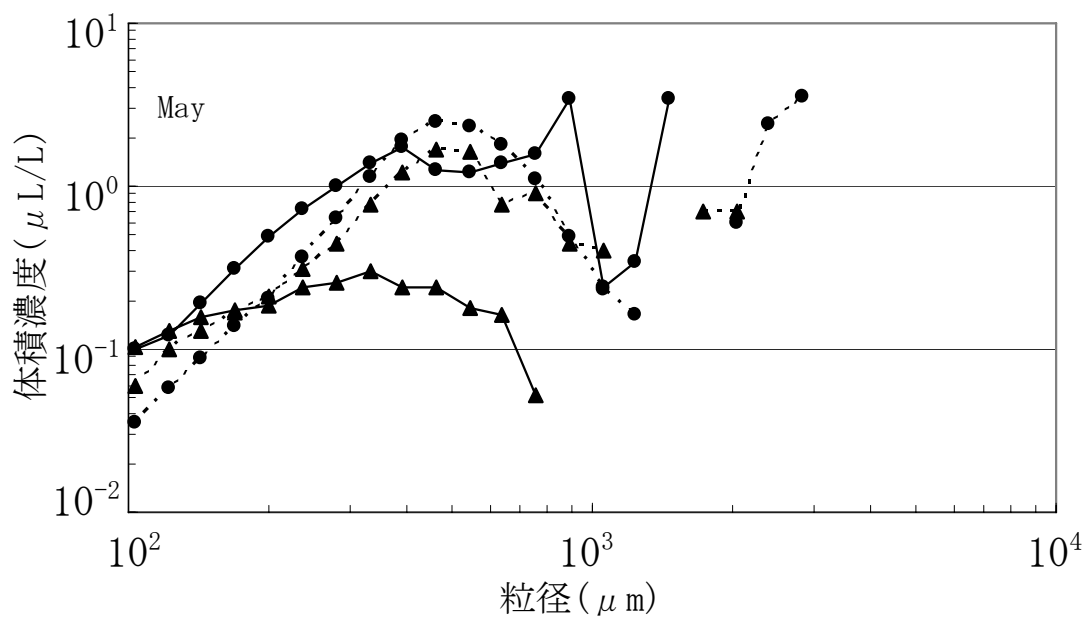


Fig. 3 LOPC で計測した 5 月と 9 月の粒径分布

実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●および▲はそれぞれ 0m および 20m を示す。

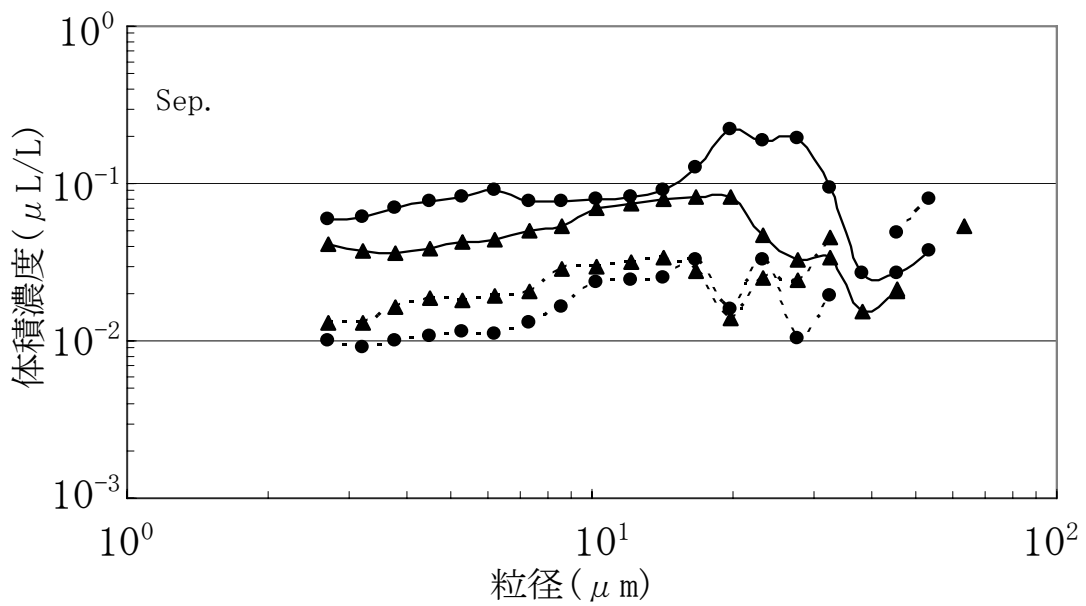
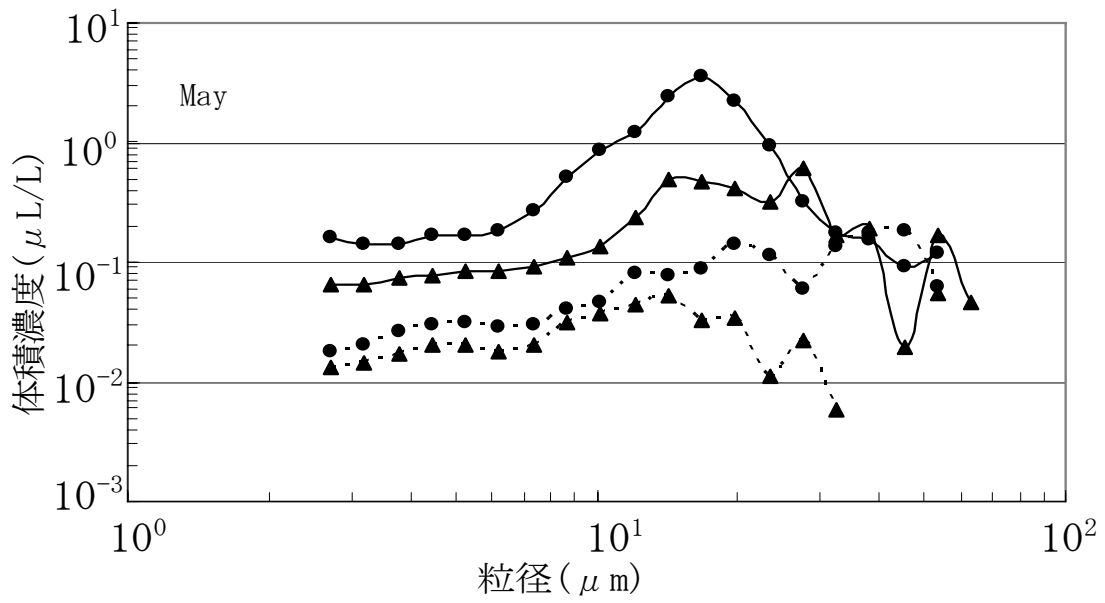


Fig. 4 Coulter Counter で計測した 5 月と 9 月の粒径分布
 実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●および▲はそれぞれ
 0m および 20m を示す。

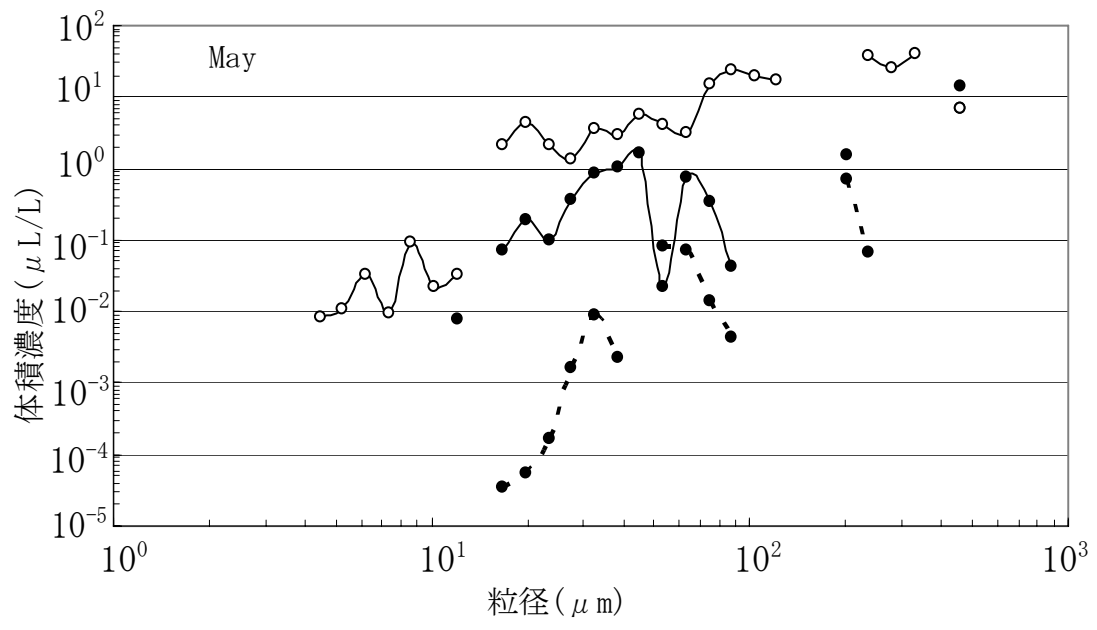


Fig. 5 顕微鏡で計測した5月粒径分布

実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●は表層プランクトン粒径分布を示す。○は表層全粒子の粒径分布を示す。

Table 1 5月の湾奥(Sta. 5)と湾口(Sta. 13)の優占していたプランクトンの長さ、直径、等体積球相当径、細胞濃度、体積濃度

優占種	長さ (\pm SD) (μ m)	直径 (\pm SD) (μ m)	等体積球相当径 (\pm SD) (μ m)	Sta. 5 細胞 濃度(個/mL)	Sta. 5 体積 濃度(μ L/L)	St. 13 細胞 濃度(個/mL)	Sta. 13 体積 濃度(μ L/L)
<i>Rhizosolenia setigera</i>	196.13(28.84)	10.65(1.46)	32.12(3.90)	215	3.73	0.5	0.01
<i>Prorocentrum minimum</i>	—	18.36(1.50)	18.36(1.50)	707	2.29	—	—
<i>Guiniarda striata</i>	100.29(16.89)	30.96(4.46)	52.24(6.18)	—	—	1.1	0.12
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	370.79(17.64)	8.59(3.30)	33.89(8.55)	—	—	0.5	0.01

Table 2 5月における湾奥と湾口に出現した主要なプランクトンの種類
湾奥 (Sta. 5)

珪藻	渦鞭毛藻
<i>Cerataulina pelagica</i>	<i>Gymnodinium</i> sp.
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Noctiluca scintillans</i>
<i>Chaetoceros danicus</i>	<i>Polykrikos schwarzii</i>
<i>Chaetoceros loranzius</i>	<i>Prorocentrum minimum</i>
<i>Chaetoceros laciniosus</i>	<i>Protoperidinium conicum</i>
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	
<i>Cylindrotheca closterium</i>	
<i>Ditylum brightwelli</i>	
<i>Eucampia zodiacus</i>	
<i>Guiniardia striata</i>	
<i>Navicula</i> spp.	
<i>Pleurosigma angulatum</i>	
<i>Pleurosigma</i> spp.	
<i>Pseudo-nitzschia longissima</i>	
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	
<i>Rhizosolenia imbricata</i>	
<i>Rhizosolenia setigera</i>	
<i>Rhizosolenia pungens</i>	
<i>Rhizosolenia bergonii</i>	

湾口 (Sta. 13)

珪藻	渦鞭毛藻
<i>Cerataulina pelagica</i>	<i>Alexandrium</i> sp.
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Ceratium furca</i>
<i>Chaetoceros danicus</i>	<i>Ceratium fusus</i>
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	<i>Dinophysis accuminata</i>
<i>Guiniarda striata</i>	<i>Gyrodinium spirale</i>
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	<i>Noctiluca scintillans</i>
<i>Rhizosolenia imbricata</i>	<i>Oxytoxum challengeroides</i>
<i>Rhizosolenia setigera</i>	<i>Prorocentrum minimum</i>
<i>Skeletonema</i> sp.	<i>Pyrocystis lunata</i>

Table 3 5月と9月におけるSSと体積濃度との関係

計測機器	月	N	回帰直線	相関係数
LISST	5月	41	$y=23.90x+34.16$	0.36*
	9月	23	$y=3.82x+2.16$	0.42*
LOPC	5月	26	$y=0.54x+16.11$	0.13
	9月	24	$y=3.19x+4.60$	0.29
Coulter Counter	5月	41	$y=0.96x-1.00$	0.93**
	9月	24	$y=0.97x-0.66$	0.88**

**、*はそれぞれ1%および5%で有意である。

Table 4 5月と9月におけるクロロフィルaと体積濃度との関係

計測機器	月	N	回帰直線	相関係数
LISST	5月	41	$y=4.23x+115.11$	0.24
	9月	23	$y=5.64x+6.82$	0.26
LOPC	5月	26	$y=-0.01x+18.40$	-0.01
	9月	24	$y=-1.58x+10.76$	-0.06
Coulter Counter	5月	41	$y=0.24x+1.73$	0.86**
	9月	24	$y=2.49x+0.20$	0.95**

**は1%で有意である。

Table 5 5月と9月における光束消散係数と体積濃度との関係

計測機器	月	N	回帰直線	相関係数
LISST	5月	41	$y=25.45x+94.10$	0.21
	9月	23	$y=4.36x+3.76$	0.4
LOPC	5月	26	$y=1.18x+0.73$	0.76**
	9月	24	$y=6.58x+2.64$	0.49*
Coulter Counter	5月	41	$y=1.59x+0.24$	0.81**
	9月	24	$y=1.06x-0.18$	0.81**

**、*はそれぞれ1%および5%で有意である。

第4章 考察

4-1 異なる計測法による粒子サイズ分布の比較

4-1-1 計測値の問題点

本研究では、LISST、LOPC、Coulter Counter および顕微鏡観察という異なる計測法を用いて、海水中の粒子の粒径分布を比較した。Fig. 6 に5月の湾奥および湾口の表層水の各計測法による粒径分布を示した。湾奥の結果によると、LISST では粒径 $2.72\sim 460\ \mu\text{m}$ の範囲について連続的に粒径分布が測定でき、 $17\ \mu\text{m}$ 付近に極大が見られる。この極大は、顕微鏡による観察で、*Prorocentrum minimum* の寄与が大きかった。また LOPC では粒径 $104\sim 1466\ \mu\text{m}$ の範囲について連続的に粒径分布が測定できている。LISST と LOPC は粒径 $104\sim 460\ \mu\text{m}$ で計測範囲が重なっているが、体積濃度は LISST で高くなっている。この範囲では粒径が大きいほど体積が増大する傾向があり、両計測法で一致している。一方、Coulter Counter は、 $2.72\sim 53.5\ \mu\text{m}$ の範囲について連続的に粒径分布が測定できている。 $8.65\sim 19.8\ \mu\text{m}$ の体積濃度は LISST の体積濃度とよく一致している。しかし、Coulter Counter では粒径の計測範囲の限界($60\ \mu\text{m}$)に近づくほど、粒子数が著しく低下した。Smith(未発表)は LISST が水温躍層において、Schlieren と呼ばれる散乱光を粒子として計測する事を報告している。今後 LISST データに対しての検証が必要である。顕微鏡観察では粒径 $4.46\sim 460\ \mu\text{m}$ の範囲の粒子を計測できた。しかしながら、粒径 $14.2\ \mu\text{m}$ および $144\sim 201\ \mu\text{m}$ の粒子は計測されていない。また LISST と比較して $12.1\ \mu\text{m}$ 以下の体積は小さく、それ以上の粒子は凝集粒子が多く観測されたため、体積濃度は多く見積もられた。これらの原因は、顕微鏡観察では採水やその後の観察処理操作の影響によるものと考えられる。

次に、湾口の結果を比較する。LISST では粒径が大きいほど粒子体積が増大した。LOPC では粒径 $104\sim 460\ \mu\text{m}$ にかけて増加し、それより大きな粒子で低下し $1242\ \mu\text{m}$ で極小を示した。全ての粒径において、LISST で計測された粒子体積は、LOPC で計測されたものより多くなっていた。両者の粒径分布の形状は粒径 $104\sim 460\ \mu\text{m}$ にかけて増加傾向にあり、類似していた。Coulter Counter では粒径 $2.72\sim 53.5\ \mu\text{m}$ の範囲で計測されている。この範囲において、LISST の計測値と比較すると、ほとんど全ての粒径で LISST による粒子体積より低くあらわされている。しかし、粒径 $7.33\ \mu\text{m}$ 以上の体積濃度はともに増えている傾向が見られる。

すなわち、LISST と LOPC は計測範囲の重複する粒径で濃度の違いはあるが、同様の变化傾向を示した。また LISST、Coulter counter や顕微鏡観察の結果を比べると、それらの粒径分布が異なり、採水やその後の計測操作の影響があることが考えられた。

ここで、各計測手法により求められた体積平均粒径について比較する。Table 6 に5月と9月の湾奥(Sta. 5)と湾口(Sta. 13)の表層体積平均粒径を示す。体積平均粒径は Coulter Counter、LISST、LOPC 順に大きくなっている。顕微鏡観察により得られた5月 Sta. 5 表層の体積平均粒径は、LISST と最も近い値であった。また、同じサンプルを計測した場合であっても、計測で

きる粒径が大きいほど平均粒径が大きくなった。このことから、正確に平均粒径を求めるためには、できるだけ広い範囲の粒径を計測する必要があると考えられる。

さらに、Coulter Counter 計測値への採水作業による影響を見てみる。Fig. 7 に LISST の現場での観測結果、採水後に研究室における LISST の計測結果および Coulter Counter による計測結果(Sta. 13 表層)を示す。粒径 $7.33\ \mu\text{m}$ より大きなサイズの粒子ではいずれの観測方法においてもほとんど一致している。しかしながら、粒径 $7.33\ \mu\text{m}$ より小さい粒径では、現場での LISST 計測では、粒子体積が著しく高くなっている。研究室で計測した場合には、LISST 計測のそのサイズでの粒子体積の突出は見られなく、低下した。また Coulter Counter の粒子体積は横ばいになっていた。

Fig. 8 に室内における Coulter Counter と LISST の計測結果(粒径範囲 $3.78\sim 23.4\ \mu\text{m}$ の粒子体積濃度)の比を示した。粒径 2.72 および $3.20\ \mu\text{m}$ のそれぞれの比は、 $51.7(\pm 96.7)$ および $10(\pm 12.8)$ と大きな値であるため、図から削除した。サイズ区分 $3.78\ \mu\text{m}$ の両機器の体積濃度の比の平均値は、1 よりも大きく $3.93(\pm 3.74)$ であった。サイズ区分が大きくなるとともに体積濃度の比の平均値が減少し、サイズ区分 $7.33\ \mu\text{m}$ 以上では、1 に近づき、標準偏差も小さくなった。

これらの結果から、 $7.33\ \mu\text{m}$ 以下の粒子体積の計測値が大きく変動していること、それ以上の粒子体積は安定していることがわかった。しかしながら、この変動の原因が採水による影響なのか計測機器の特性によるものなのかは明らかにならなかった。

鷲見(2007)は LISST(Type B、測定レンジ $1.25\sim 250\ \mu\text{m}$)を用いた研究で、 $3.67\ \mu\text{m}$ 以下の粒径範囲で不安定であると述べ、その原因は現場の水中には扁平な形状や種々の物性(屈折率、透過、吸収、反射)を持つ小さな懸濁態粒子が多く、それらが混在することによる多重散乱が起きていると推測した。 $3.67\ \mu\text{m}$ 以下の粒径範囲は今回研究に使用した Type C の場合、 $7.33\ \mu\text{m}$ 以下の粒径範囲に相当することから、LISST データの $7.33\ \mu\text{m}$ 以下のデータは多くの誤差を含んでいる可能性が否定できない。以下では $7.33\ \mu\text{m}$ 以下の体積濃度データを取り除いて図示する。

4-1-2 5月と9月の粒子サイズとその組成

それぞれ各計測法で求めた粒子体積濃度と SS、Chl. *a*、光束消散係数との関係(Table 3, 4, 5)を見ると、SS との関係は LISST で弱い相関、Coulter Counter で強い相関が見られた。Chl. *a* では LISST および LOPC において、有意な関係が見られなかったが、Coulter Counter で相関が強かった。また光束消散係数との関係では LISST で関係が見られず、LOPC と Coulter Counter で相関が強かった。

これらの関係式を基に各計測で得られた粒径分布が何を表しているのか検討する。SS との関係を見ると、Coulter Counter による体積濃度と相関が強い。これは Coulter Counter での計測が計測粒径範囲は狭いものの、ほぼ全ての粒子の固形部分を計測できると考えられる。また

LISST では弱い相関が見られ、SS に影響の強い粒子は比較的粒径の小さな粒子であると考えられる。これらのことから、LISST および LOPC で計測されている粒子群には凝集粒子が存在すると考えられる。

Ch1. *a* との関係を見ると、Coulter Counter で非常に相関が強く、LISST と LOPC での関係は有意な相関が無い。すなわち、Coulter Counter の計測範囲の粒子には植物プランクトンの粒子が多く含まれていること、LISST および LOPC の粒径範囲には植物プランクトン由来の粒子が少ないことが考えられる。

さらに、光束消散係数との関係を見ると、Coulter Counter との相関は 5 月、9 月ともに強い。Coulter Counter の計測範囲の粒子が光束消散係数へ大きく寄与しているといえる。しかしながら、LISST では相関が無いが、LOPC では 5 月で強い相関が見られることから、5 月では粒径 $500 \mu\text{m}$ 以上の粒子が光束消散係数へ影響を与えていると考えられる。

梶原ら(1988)は、Coulter Counter(アパチャー直径: $100 \mu\text{m}$ 、測定範囲: $1.58\sim 40.3 \mu\text{m}$)による測定された粒子数から総粒子体積濃度の経時変化を求め、光束消散係数(濁度計 Martek model XMS による計算)と総粒子体積濃度の経時変化がほぼ一致していることを明らかにした。すなわち、光束消散係数の変動は、主として懸濁態物質の濃度によってもたらされるということを示した。

4-2 広範囲粒径分布の作成

4-2-1 LISST データと LOPC データの結合

前節で諸物質量と粒子体積濃度の関係を見た結果、Coulter Counter による計測結果で諸物質量との相関が強かった。これは Coulter Counter による計測が粒子の固形分をもらさず計測しているためと考えられた。すなわち、LISST や LOPC 粒径分布と諸物質量の関係を高めるためにはさらに広い範囲での粒径分布を把握する必要があると考えられる。

そこで、LISST と LOPC の粒径分布を統合し、広い範囲の粒径分布を作成することとした。LISST と LOPC の計測範囲は $105\sim 500 \mu\text{m}$ で重なっている。しかしながら両者は粒径区分が異なるため、そのまま比較することが出来ない。LISST は $2.5\sim 500 \mu\text{m}$ の粒径範囲を対数スケールで 32 分割して測定するために、等価粒径に換算した測定粒径は各分面の中央値になる。LOPC は $105 \mu\text{m}$ から $15 \mu\text{m}$ 毎に $3735 \mu\text{m}$ までに出力している。そこで、LISST データと比較するため、前述したように LOPC データを対数スケールで積算した。

Fig. 6 を見ると、両者の粒径分布はどの粒径区分においても LISST で高い値を示される傾向が見られた。この値を合致させるため重なる粒径範囲の体積が一致するものとして、基準化した。Fig. 9 に基準化した $104\sim 460 \mu\text{m}$ の相対値の比 (LOPC/LISST) とその標準偏差を示した。粒径 $144\sim 201 \mu\text{m}$ の範囲では比が 1 に近く、偏差が安定していた。しかし、重なる範囲の外側ほど偏差が大きかった。そこで、LISST の $201 \mu\text{m}$ より大きな粒径のデータと LOPC の $144 \mu\text{m}$ より小さな粒径のデータを削除し、 $144\sim 201 \mu\text{m}$ の体積濃度で基準化して粒径分布を結合した。

この相対値化された分布では粒子濃度の絶対的な変動が把握できないため、LISST 体積濃度データを基準にして粒子量濃度の粒径分布を作成した。

4-2-2 東京湾における粒子の粒径分布とその変化

上述した結合手法に従って東京湾における体積濃度粒径分布を作成し、粒径分布およびその変化を検討した。Fig. 10 に 5 月と 9 月の湾奥 (Sta. 5) および湾口 (Sta. 13) の体積濃度分布を示した。湾奥の表層に粒径 $17 \mu\text{m}$ 付近に極大が見られ、 $30 \sim 300 \mu\text{m}$ までに一定の体積濃度で推移し、その後体積濃度は高くなる。水深 20m の粒子量濃度は表層より低下していた。また湾口表層は湾奥表層と比べ、 $200 \mu\text{m}$ 以上の分布は類似しているが、 $200 \mu\text{m}$ 未満の粒径での体積濃度は低下していた。

次に時間的変化 (5 月と 9 月の相違) を検討した。9 月湾奥の各層に $400 \mu\text{m}$ の付近に極大が見られた。また、 $33 \mu\text{m}$ 付近に小さい極大が見られた。5 月の湾奥と比べ、体積濃度は $200 \mu\text{m}$ 以下の粒径で低かった。9 月の両観測点は表層と水深 20m で体積濃度の差が小さくなっていったため、海水が鉛直混合をしていると推察できる。

今後は本手法により、海中の粒径分布を正確に把握することが可能となった。しかし、得られた粒径分布は体積濃度分布で、粒子量濃度分布、つまり粒子の重さ濃度分布はわからない。なぜなら、粒径ごとに粒子の密度が異なるからである。Kajihara (1971) は大型凝集粒子の密度が粒径の増大とともに減少することを指摘している。粒子の密度が粒径の増大に伴って、指数関数的に減少すると仮定すると、粒径と密度との関係は式 (5) のように表される。

$$\rho = \rho_0 e^{a(x-7.33)} \quad (5)$$

ここで、 ρ は粒子密度、 x は粒径であり、 ρ_0 は粒径 $7.33 \mu\text{m}$ の粒子密度とした。ただし、この粒子密度 ρ および ρ_0 は海水を除いた値である。

谷本 (1982) は海水中の懸濁態粒子の粒径および沈降速度を瀬戸内海において計測し、懸濁粒子の見かけの密度は $1.38 \sim 1.03 \text{ g cm}^{-3}$ の範囲であり、粒径の増加とともに減少すると報告した。ここで見かけの密度 1.38 g cm^{-3} の粒子において、海水の密度を 1.03 g cm^{-3} とすると、その固体部分の密度 ρ は 0.35 g cm^{-3} となる。ここで、粒径 $7.33 \mu\text{m}$ の固体部分の密度が 0.35 g cm^{-3} であるとして、係数 a に種々の数値を入れ、粒径ごとの密度を求めた。この密度に粒子体積を乗じて、粒子量を算出し、SS との関係性を求めた。その結果、以下の関係式において相関係数 (Fig. 11) が最も高かった。

$$\rho = 0.35 e^{-0.018(x-7.33)} \quad (6)$$

密度関数を体積濃度分布に乗じて、作成した 5 月粒子量濃度分布は Fig. 12 に示した。粒径増加とともに粒子量濃度は最初増加し、その後減少している傾向が見られる。この分布から各粒径の粒子が SS に寄与する割合得られる。ただし、SS は海水をろ過し、乾燥して量った重量であったため、得られた密度も粒子から水分を除いた後の密度である。

Vidondo *et al.* (1997) および Zhou (2006) は海域の粒子量の粒径分布は対数変化する事を示している。本結果はこれによく合致しているといえた。

Table 7 に 5 月と 9 月の体積濃度平均粒径を示した。すべての観測点において水深増加とともに平均粒径が減少している傾向が見られ、Sta. 13 において両月の減少は顕著であった。5 月と比べ、9 月が Sta. 13 の 20m の平均粒径が減少しているが、ほかの三層 (Sta. 5 の表層、20m および Sta. 13 の表層) は増加している傾向が見られた。特に Sta. 5 の表層は著しい増加が見られ、原因は懸濁物濃度 (5 月の 16mg/L から 9 月の 2.8mg/L に変化した) の急激な変化にあると考えられる。

前述したように正確な平均粒径を求めるためには、広範囲の粒径を計測する必要がある。LISST、LOPC、Coulter Counter はそれぞれの粒径範囲で粒径分布を計測ができ、平均粒径を求めることができる。しかしながら、求めた粒径は限られた測定範囲内の平均粒径であるため、全粒子の平均粒径とは言えない。本研究は LISST と LOPC データを結合することで、より広い範囲で粒径分布を得られ、より正確に海中各粒子の平均粒径を求めることができる。

5 月の Sta. 5 の表層において、SS、Chl. *a* および光束消散係数は高い値 (SS 濃度: 16mg/L、Chl. *a*: 56.3 $\mu\text{g/L}$ 、光束消散係数: 5.19 m^{-1}) が測定された。Fig. 10 を見ると、Sta. 5 表層は高い粒子量濃度が示しており、特に 17 μm 付近の極大 (植物プランクトンと推定される) が顕著であった。これらの粒子が SS、Chl. *a* および光束消散係数に影響していることが考えられる。

Zhou (2006) は OPC、LOPC、LISST により測定された粒径分布は混合している各種粒子の総粒径分布を表していると指摘した。すなわち、単一種類の粒子状況を把握するために、さらに工夫が必要と思われる。たとえば、Heath *et al.* (1999) は動物プランクトンを調査する目的で、OPC データを補正するために海水サンプルを採取してマリンスノーの存在状況を測定した。また、Edvadsen *et al.* (2002) は OPC を早いスピードで曳航し、マリンスノーを壊して OPC の測定結果への影響を防ごうとした。さらに、Herman (未発表) はカメラを用いて、動物プランクトンバイオマススペクトルからマリンスノーを計算上で効率的に補正できると述べた。今後さらに詳しい海中粒子挙動・循環を知るために、さらなる観測でデータを積み重ねることが必要である。

4-3 今後のサイズ計測の重要性

従来、粒子サイズ計測に関する研究には、Sheldon *et al.* (1972)、谷本ら (1982)、市川 (2008)、鷺見 (2007)、山下ら (2007) がある。Sheldon *et al.* (1972) は Coulter Counter (T 型) を使い、大西洋と太平洋の表層から深層まで粒径分布を計測し、粒径分布は海域および水深で変化していることを指摘した。また、海中において 1 μm から約 10⁶ μm の粒径範囲内の生物粒子の体積濃度がおおむね一致している仮説を立てた。谷本ら (1982) は、海水中で写真撮影した体積濃度の粒径分布と Coulter Counter から得られた体積濃度の粒径分布を比較し、後者は全体的に粒径が小さくなっていることを示している。市川 (2008) は VPRII (Video Plankton Recorder) を使い、動物プランクトンの現存量の把握およびメソ動物プランクトンの詳細な分布構造を有効に観

測できると述べた。

鷺見(2007)は LISST(Type B)を用いて東京湾周辺の河川、汽水域、沿岸域の水中における懸濁粒子を測定し、懸濁態粒子を等体積球相当径で現すことによって、ある程度に鉱物粒子、特徴的な植物プランクトンおよび大型有機体凝集粒子の測定が定量化できると述べた。山下ら(2007)は NBSS (Normalized Biomass Size Spectra) 理論を用い、LOPC データから深度別動物プランクトン量の分布を作成して詳細な動物プランクトンのサイズ構造を得ることが可能であると報告した。

しかしながら、計測範囲の都合上、LISSTでは主に植物プランクトンなどの微細粒子、LOPCでは主に動物プランクトンなどの比較的大きな粒子に適した粒径計測範囲を持っており、現場海域の複雑な粒径構成をすべて同時に把握できているとはいえない。さらに、東京湾のような高濁度海域においては粒子の凝集が無視できず、単一の機器での計測だけでは海中の粒子サイズの様子をどのくらい再現できているのか不明である。

本研究結果より、LISST と LOPC を併用することにより広い範囲の粒子の状態が把握できるようになった。また、海中の粒径体積濃度と粒子量濃度分布を正確に把握することが可能となった。今後、東京湾における詳しい海中粒子挙動・循環を解明するために、本手法を用いてさらなる観測でデータを積み重ねることが必要である。

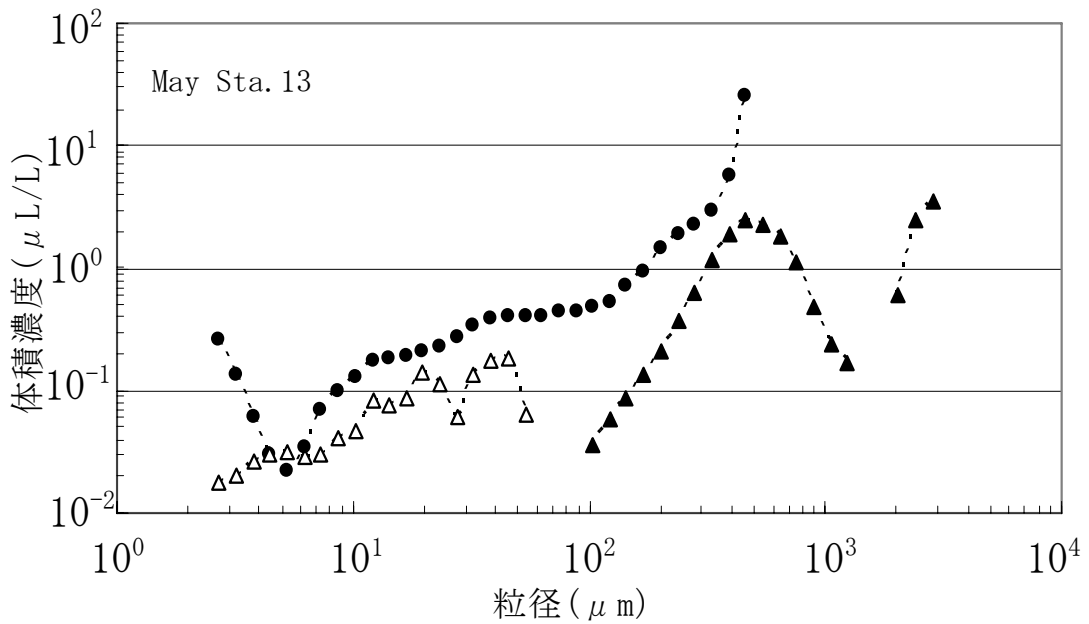
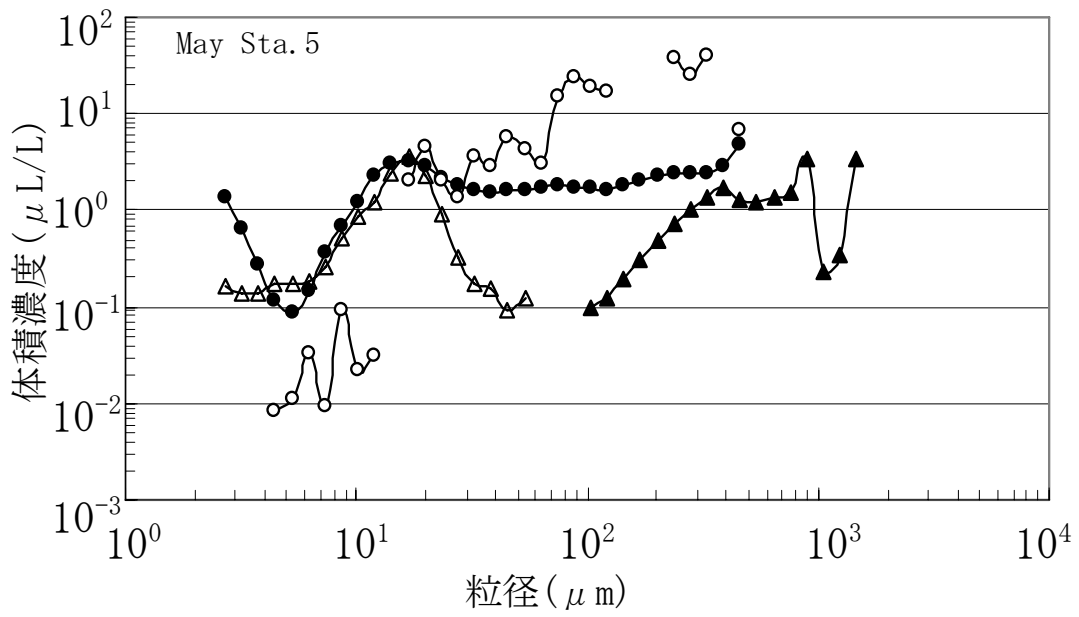


Fig. 6 5月の湾奥 (Sta. 5) と湾口 (Sta. 13) の表層粒径分布の比較
 実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●、▲、△および○は
 それぞれ LISST、LOPC、Coulter Counter および顕微鏡による測定を示す。

Table 6 5月と9月の湾奥(St. 5)および湾口(Sta. 13)の表層体積平均粒径の比較
5月

測定機器	Sta. 5 体積平均径 (μm)	Sta. 13 体積平均径 (μm)
LISST	138	361
LOPC	732	1211
Coulter Counter	16	17
顕微鏡	189	—

9月

測定機器	Sta. 5 体積平均径 (μm)	Sta. 13 体積平均径 (μm)
LISST	280	244
LOPC	1685	1591
Coulter Counter	17	26

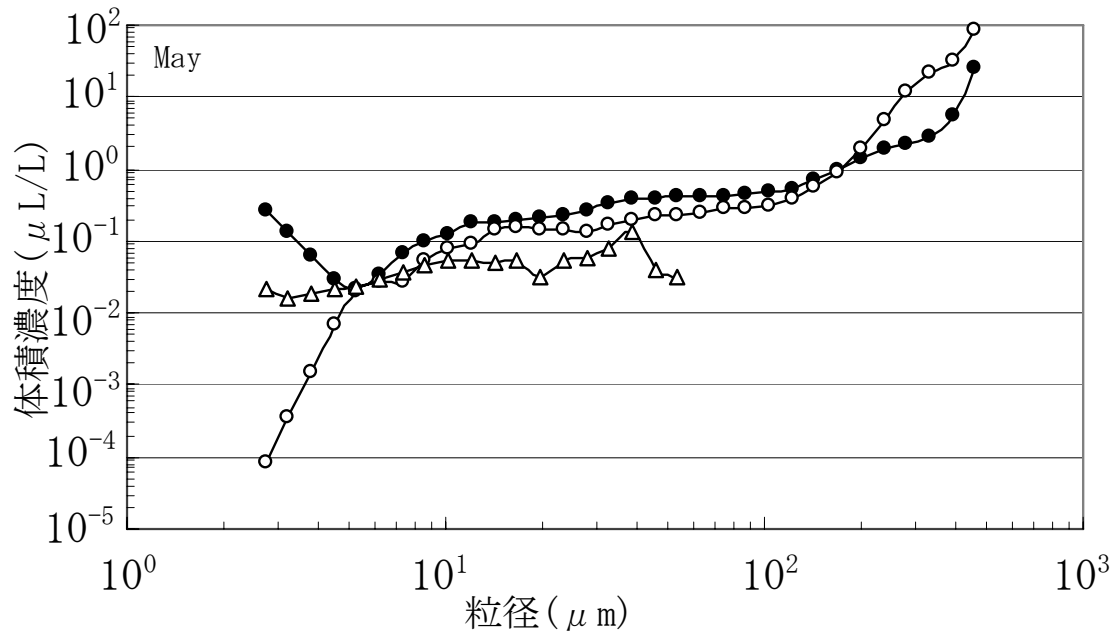


Fig. 7 5月の湾口 (Sta. 13) 表層における採水の前後の粒径変化

●、○および△はそれぞれ現場における LISST(5月18日)、研究室における LISST(5月25日)および Coulter Counter(5月25日)による測定を示した。

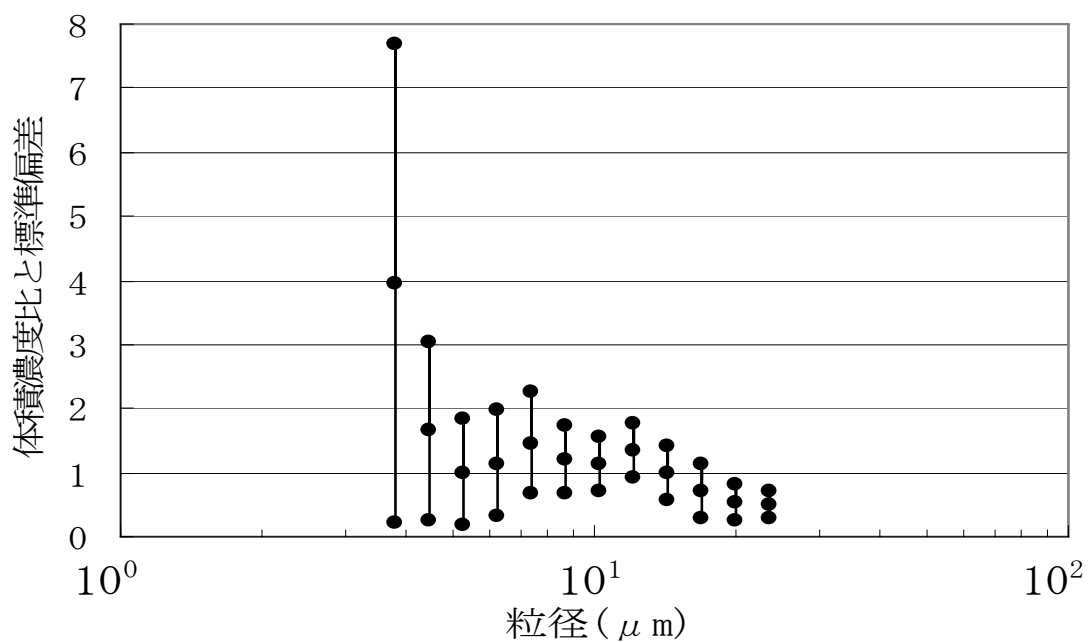


Fig. 8 5月のLISSTとCoulter Counterの測定が重なる範囲(3.78~23.4 μm)の体積濃度の比(Coulter Counter/LISST)およびその標準偏差

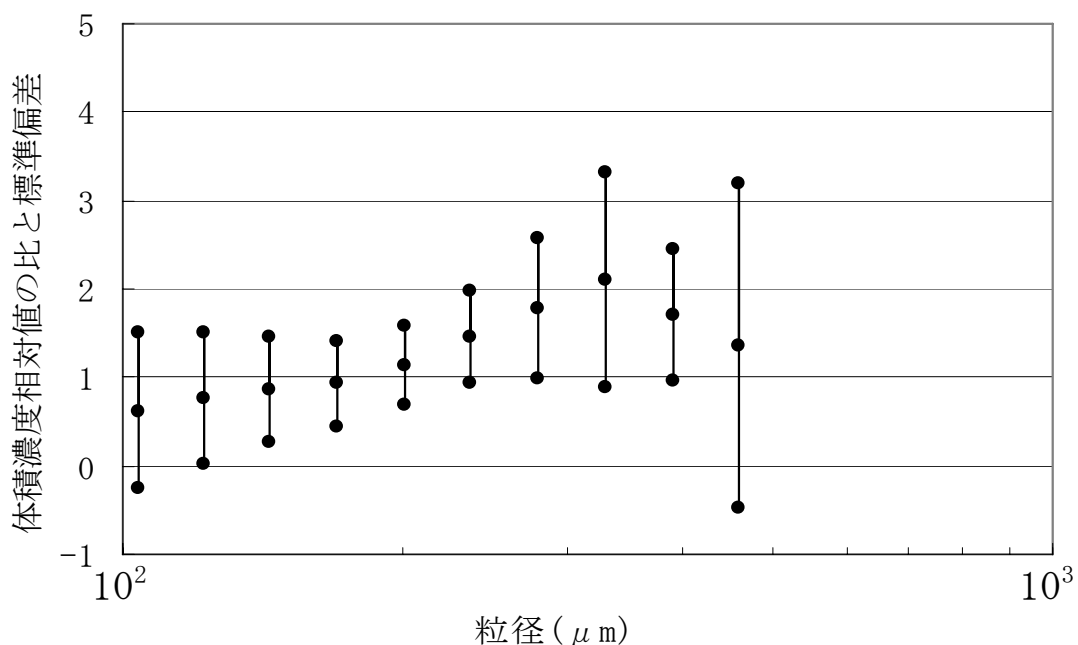


Fig. 9 5月と9月のLISSTおよびLOPCの測定が重なる各粒径(104~460 μm)の体積濃度相対値の比(LOPC/LISST)およびその標準偏差

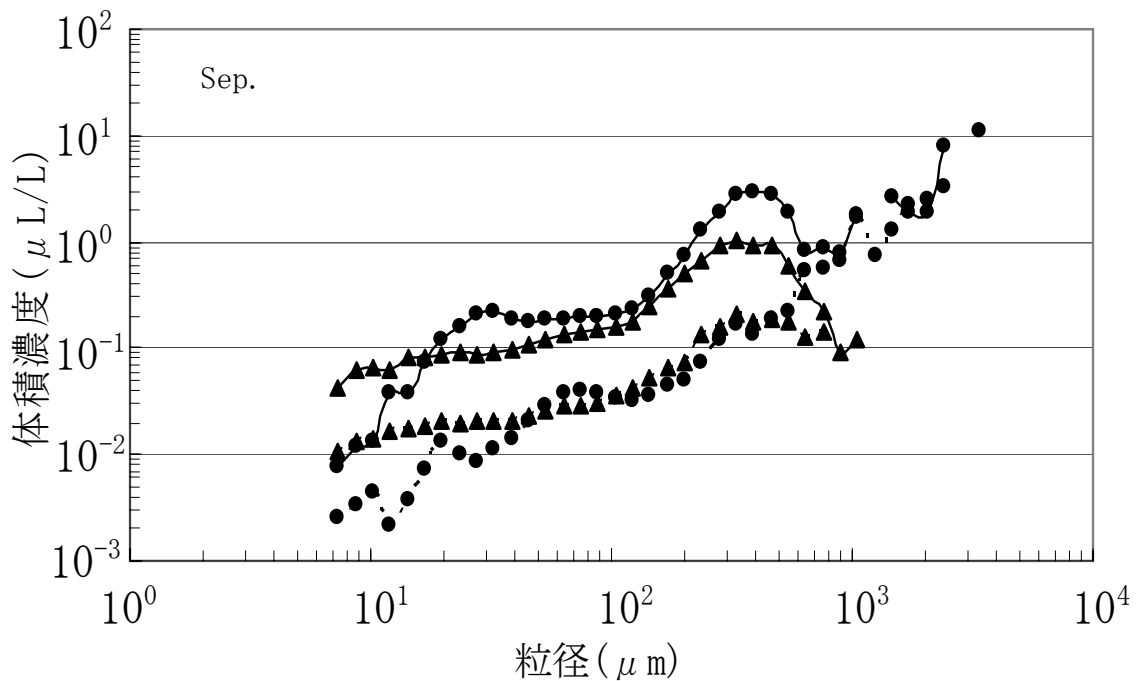
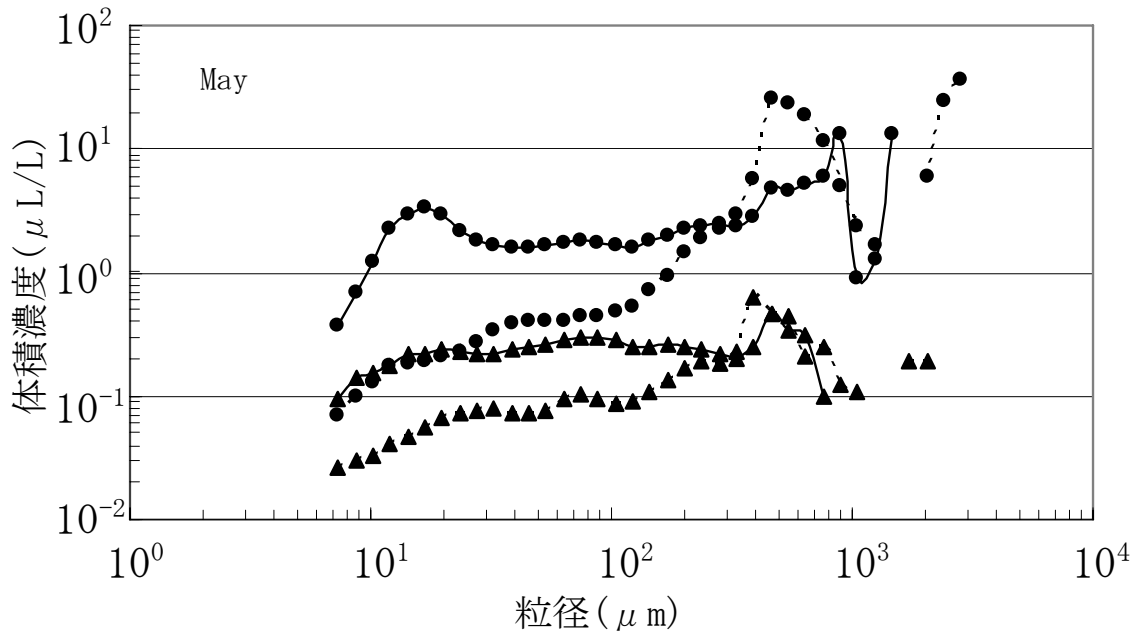


Fig. 10 5月と9月の湾奥(Sta. 5)および湾口(Sta. 13)の体積濃度分布
 実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●および▲はそれぞれ
 0m および 20m を示す。

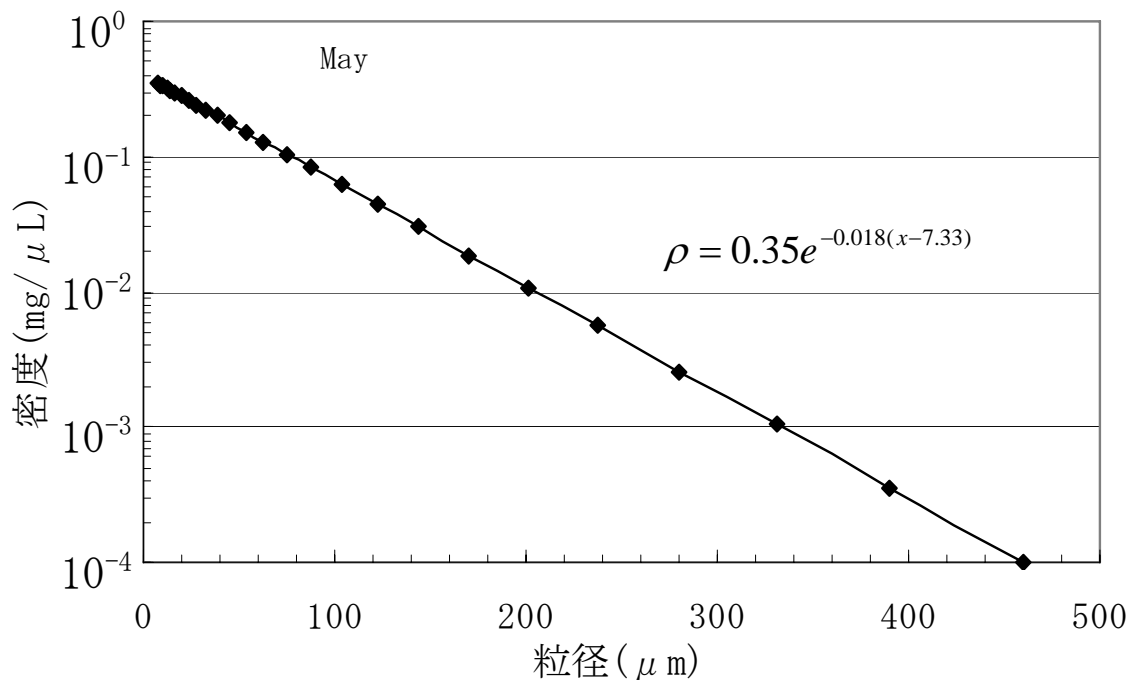


Fig. 11 5月の粒径毎の粒子密度

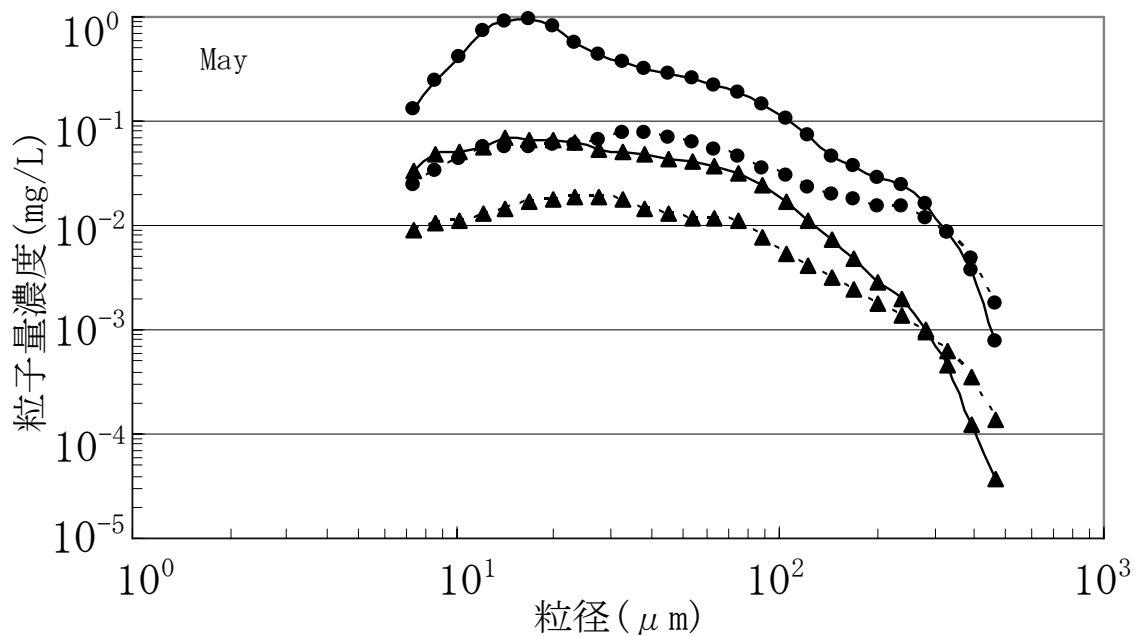


Fig. 12 5月の湾奥 (Sta. 5) および湾口 (Sta. 13) の粒子量濃度分布
 実線および点線はそれぞれ Sta. 5 および Sta. 13 である。●および▲はそれぞれ
 0m および 20m を示す。

Table 7 5月と9月の体積濃度平均粒径の比較

観測点	水深(m)	5月体積濃度平均径(μm)	9月体積濃度平均径(μm)
Sta. 5	0	525	1608
	20	184	314
Sta. 13	0	1330	1562
	20	468	335

謝辞

本研究論文の作成にあたり、終始変わらぬ御指導と御鞭撻を賜った荒川久幸准教授謹んで御礼申し上げます。副指導教員としてご助言を下された大橋英雄教授、北出裕次郎准教授に謹んで感謝を申し上げます。LOPCの貸与およびデータ解析にご協力いただいた北海道大学海洋生物資源科学の藤森康澄教授に厚く御礼を申し上げます。

また、終始励ましてくださった本研究室の森永勤名誉教授に深い感謝の意を表します。LISSTを貸与いただいた(株)EMS および調査に協力いただいた青鷹丸船長ならびに乗組員の皆様に深甚の謝意を表します。

最後に本研究を行うにあたり、労を惜しむことなく御協力と御支援をくださった博士研究員成田美穂様、博士後期課程松本陽様、ジロー・マティアス様、博士前期課程中川雄太君、渡辺隼人君、四年生の伊藤遼君、増尾和彦君、佐保井路子君、重藤沙織君、日仏海洋学会事務員の吉田篤古様、元日仏海洋学会事務員の中川吏子様、そして私の両親、誠にありがとうございます。

引用文献

- 1、角皆静男(1981): セジメントトラップと粒子沈降のメカニズム、内湾・沿岸域における沈降・除去過程(堆積物研究会, 日本水産資源保護協会)、7-26
- 2、半田暢彦・田上英一郎(1980): 海洋における炭素の循環、うみ、18、190-198
- 3、篠村理子・ベアトリス カサレト・鈴木款(1999): 海水中におけるサブミクロン粒子状物質の動態、静岡大学地球科学研究報告 26、71-82
- 4、Sheldon, R. W., Prakash, A. and Sutcliffe, Jr. W. H. (1972): The Size Distribution of Particles in the Ocean. *Limnology and Oceanography* Vol. 17 No. 3, 327-340
- 5、青俊二・五十嵐信夫・片山維新・黒田英夫・佐藤任弘・玉木操(1957): 砂質の粒度分析(特にエメリー管分析について). 水路要報, 54, 1-7
- 6、鷺見栄一(2007): 懸濁態粒子の粒径分布の現地測定(1) 非生物態粒子と生物態粒子の測定、海洋と生物、173 vol. 29 no. 6、627-635
- 7、Herman, A. W., Beanlands, B. and Phillips, E. F. (2004): The next generation of Optical Plankton Counter: the Laser-OPC. *Journal of Plankton Research*, Vol. 26, No. 10, 1135-1145
- 8、Akiba, T., Kakui, Y. (2000): Design and Testing of an Underwater Microscope and Image Processing System for the Study of Zooplankton Distribution. *Ieee Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 25, No. 1
- 9、市川忠史(2008): ビデオプランクトンレコーダーを用いた親潮域～黒潮親潮移行域におけるメソ動物プランクトン群集構造の解析に関する研究、水研センター研報、第24号、23-104
- 10、Johnson, B. D., K. Kranck and D. K. Muschenheim(1994): Physicochemical factors in particle aggregation, in the *Biology of Particle in Aquatic Systems*, edited by R. S. Wotton, Lewis Publishers, pp. 75-96
- 11、山下由起子、藤森康澄、向井徹、岩森利弘、木村信夫、三浦汀輔(2007): Laser Optical Plankton Counter (LOPC) を用いた動物プランクトン生物量の推定、数理水産科学、第5巻(2007)、97-102
- 12、Herman, A. W. (1988): Simultaneous measurement of zooplankton and light attenuation with a new optical plankton counter. *Continental Shelf Research*, 8(2), 205-221
- 13、Herman, A. W. (1992): Design and calibration of a new optical plankton counter capable of sizing small zooplankton. *Deep Sea Research*, 39, 395-415
- 14、Herman, A. W., Cochrane, H. A. and Sameoto, D. D. (1993): Detection and abundance estimation of euphausiids using an optical plankton counter. *Marine Ecology Progress Series*, 94, 165-173
- 15、植松光夫、南川雅男、有田英之、角皆静男(1978): 海中の懸濁粒子量の測定法、北大水産彙報、29(2)、164-172

- 16、Suzuki, R., Himaru, T. (1990) : An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using n, n-dimethylformamide. *J. Oceanogr.*, 46, 190-194
- 17、梶原昌弘・川北倫正・三宅秀男・藤芳義裕・宮本義憲(1988) : 春季サロマ湖の湖底環境、*北大水産彙報*、39(4)、275-285
- 18、Kajihara, M. (1971) : Settling velocity and porosity of large suspended particle. *J. Oceanogr. Sor. Jpn.*, 27, 158-162
- 19、谷本照巳・川名吉一郎(1982) : 現場における懸濁粒子の沈降実験、*中国工業技術試験所報告*、第18巻、1-8
- 20、Vidondo, B., Prairie, Y. T., Blanco, J. M., Duarte, C. M. : Some aspects of the analysis of size spectra in aquatic ecology, *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1, 184-192, (1997)
- 21、Zhou, M. (2006) : What determines the slope of a plankton biomass spectrum? *Journal of Plankton Research*. vol. 28 no. 5, 437-448
- 22、Heath, M. R., Dunn, J., Fraser, J. G., Hay, S. J. and Madden, H. (1999) : Field calibration of the Optical Plankton Counter with respect to *Calanus finmarchicus*. *Fish. Oceanogr.*, 8(Suppl. 1), 13-24
- 23、Edvardsen, A., Zhou, M., Tande, K. S. and Zhu, Y. (2002) : Zooplankton population dynamics: measuring in situ growth and mortality rates using an Optical Plankton Counter. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 227, 205-219