

学 位 論 文 題 名

LOPC (Laser Optical Plankton Counter) を 用いた動物プランクトンの計測に関する研究

学位論文内容の要旨

漁業資源の変動機構を解明するためには、単に漁獲量や漁獲強度を把握するだけでなく、漁業資源の生息域を網羅する広い海域において、水温、塩分、海流などの物理的から餌環境などの生物的環境までを定量的に把握し、長期間にわたりデータを蓄積していく必要がある。すなわち、時・空間的にできるだけ広範囲な領域からの、効率的かつ詳細なデータの取得が求められる。海洋生物の直接計測手法として主に利用されているのは、採集具を用いる採集計測や、計量魚群探知機を用いる音響計測であり、特に音響計測は広い海域を効率よく計測する手法である。しかし、動物プランクトンなどの小型生物の計測においては、その解析手法は現在でも研究課題となっており、また、種判別のための標本測定は多大な労力を必要とするため、その効率化も求められている。

こうしたことから、動物プランクトンを対象とした自動計測機器である OPC (Optical Plankton Counter) 等が注目されている。OPC は LED 光源で計測面をつくり、プランクトン (粒子) が計測面を通過する際に生じる光量変化を読み取ることで、直接通過粒子の数や大きさを算出する仕組みを持つ。このため、迅速なプランクトン分布の計測が期待できるが、計測生物を直接確認できないことが課題となっている。近年では、その光源や計測システムの構造が改良され、計測精度の向上とプランクトン形状の再現を可能とした LOPC (Laser - OPC) が開発されたが、計測対象種の特定には課題が残されている。したがって、現状では各研究者の経験にもとづいて LOPC データの解析がなされているのが実情であり、その計測手法はいまだ発展途上といえる。

本研究では、LOPC を用いた種別動物プランクトンの計測手法を確立することを目的とし、海上試験により種別動物プランクトン計測の有効性を検討するとともに、水槽実験によってプランクトンに対する計測特性を調べ、LOPC による計測データの新たな解析法を提案した。また、本手法を用いて知床周辺半島における動物プランクトンの計測を行い、その有効性を示した。

1. LOPC を用いた種別動物プランクトン計測の有効性

LOPC を用いた種別動物プランクトン計測の有効性を検討するため、網口口径 80 cm のリングネットの網口に LOPC を取り付け、北海道知床半島周辺海域の 17 地点において採集計測を行い、LOPC によって計測された生物量 (LOPC バイオマス) とリングネットによるプランクトン採集量を比較した。計測方法は、水深 30 m から表層までの水深帯において線速 0.5 m/s 鉛直曳きとした。LOPC バイオマスと採集量それぞれの総量の間には強い相関は見られなかったが、カイアシ類が優占的に

採集された調査点 (計 5 点) に限ると、特定の ESD(Equivalent Spherical Diameter) の範囲 ($10^{3.2} - 10^{3.5}$ μm) における LOPC バイオマスとカイアシ類量との間に強い相関 ($R = 0.909 \sim 0.973$) が示された。しかし、ゼラチン状生物が優占的に採集された調査点ではこのような傾向はみられなかった。また、LOPC による計測粒子の中には、小さな ESD に対して非常に大きな計測面通過方向の長さ (FL , Forward Length) をもつ粒子が多数みられ、半透明な体を持つクラゲなどゼラチン状生物を計測したものであると考えられた。これらより、LOPC を用いて種別分布量を計測するには、対象海域の生物種組成をあらかじめ把握しておく必要があることが明らかとなった。

2. プランクトンに対する LOPC の計測特性

知床半島周辺海域において優占して採集されたオキアミ類 *Euphausia pacifica* のジュブニル幼生 (平均体長 4.50 mm)、カイアシ類 *Neocalanus plumclius* のコペポダイト 5 期 (平均頭胸長 3.90 mm)、タンキヤク類 *Temist japonica* (平均頭胸長 3.76 mm) を供試標本に用い、小型回流水槽においてプランクトンに対する LOPC の計測特性を調べた。各プランクトン種の形状の差を示すと考えられる ESD と FL の関係および ESD とアスペクト比 (ESD と FL の比) の関係は、種ごとに異なる計測特性を示したが、個々の粒子の値は重複していた。また、いずれの種に関しても計測粒子のアスペクト比は 90 % 以上が 1.0 - 3.6 の範囲の値であり、自然状態で観察された 10.0 以上の大きなアスペクト比を持つ粒子が検出されることはなかった。一方、単一種の計測データからなる ESD 組成分布はプランクトン種によらず、対数正規分布に従う単峰の分布形状を示した。以上より、LOPC 計測量の種別計測量の推定には統計的手法の適用が有効であることが示唆された。

3. 混合正規分布モデルを用いた種ごとの ESD 組成の分解

単一種のプランクトンを計測した ESD 組成が対数正規分布に従うことから、LOPC データに混合正規分布モデルを適用することによって、LOPC 計測量を種別に分解する方法を提案した。LOPC カウントの相対頻度分布 f_p は $\text{LOG}(\text{ESD})$ を変数とする n 個の正規分布の混合分布であるとし、以下の式を用いた。

$$f_p(x) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot g_i(x)$$

$$g_i(x) = N(x | \mu_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (1)$$

ここで、 μ_i , σ_i は正規分布 $g_i(x)$ の平均と標準偏差である。また、 p_i は各分布の混合率であり、次の条件が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2)$$

本方法では、LOPC カウントと LOPC バイオマスの分布曲線を個別に求めるのではなく、LOPC カウントの分布曲線のパラメータ推定時に LOPC バイオマスの ESD 分布を重みとして利用することにより、両者の分布曲線を同時に推定した。これにより、LOPC カウントと LOPC バイオマスの分布の関係性を考慮して両者の分布曲線を推定することが可能となる。同方法により分解された LOPC 計測量は、調査点ごとにわずかに異なる生物サイズにも対応し、採集調査によって計測されたプランクトン分布量とよい相関を示した。

4. 知床半島周辺海域における動物プランクトン分布の計測

LOPC を用いて知床半島周辺海域の動物プランクトン分布を計測し、前章で提案した手法を用いて LOPC 計測量を分解し、採集調査によって確認された優占種であるカイアシ類の種別計測量をある程度正確に推定することができた。さらに、LOPC 計測量を用いることで、カイアシ類の分布について鉛直断面を推定することが可能であることを示した。また、得られたカイアシ類分布の鉛直断面と水温、塩分の鉛直断面との視覚的な比較から、さらに詳細な分布特性を把握することが可能であることを示した。

以上の結果を通して、対象とする種の計測特性があらかじめ把握できれば、本研究で提案した解析方法を用いることで、その種の分布量をある程度広域に計測できるとともに、その詳細な分布構造も把握できるものと考えられる。

本研究で提案された手法を用いることにより、対象海域における優占種の分布を精度良く推定することができると思われる。さらに、これらの解析を通して、対象としたプランクトンの詳細な鉛直分布断面を推定することも可能である。鉛直分布断面を得ることができれば、水温や塩分の断面図と直接比較することができ、例えば画像間演算などの画像情報解析を導入することで生物量と海洋環境の関係をより明らかにすることなども期待できる。また、LOPC のデータは任意の水深について抽出することができるため、音響計測で把握できる魚類の鉛直分布と比較することも可能である。このように、LOPC 計測における本手法の利用は、水産海洋情報の多次元的解析の進展に寄与するものと思われる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	木村 暢夫
副査	教授	齊藤 誠一
副査	准教授	向井 徹
副査	准教授	藤森 康澄
副査	名誉教授	三浦 汀介

学位論文題名

LOPC (Laser Optical Plankton Counter) を 用いた動物プランクトンの計測に関する研究

漁業資源の変動機構を解明するためには、単に漁獲量や漁獲強度を把握するだけでなく、対象資源の親子関係を明らかにする必要がある。しかしながら、親魚量と加入量との関係が明確ではない魚種も多く、こうした場合、産卵後の資源の初期生残の状態を調べなければならない。こうした初期生残は環境要因と餌環境に影響されるため、調査においては対象となる仔稚魚だけでなくその餌となるプランクトン類と海洋環境に関する情報の収集が定量的かつ継続的に行われる必要がある。また、こうした調査は時・空間的にできるだけ広範囲な領域を対象とすることが理想的である。海洋生物の計測手段としては、直接採集法および音響計測手法が一般的に使用されるが、音響計測においても種判別のための標本測定が必要となる。そのため、動物プランクトンのような小型生物を効率的に計測できる方法が求められてきた。

こうしたことから、動物プランクトンを対象とした自動計測機器である OPC (Optical Plankton Counter) , さらにその発展型である LOPC (Laser-OPC)が注目されている。OPC は LED 光源で計測面をつくり、プランクトン (粒子) が計測面を通過する際に生じる光量変化を読み取ることで、直接通過粒子の数や大きさを算出する仕組みを持つ。さらに、LOPC では光源や計測システムの構造が改良され、計測精度の向上とプランクトン形状の再現を可能となった。ただし、現状では LOPC データの解析は各研究者の経験にもとづいて行われているのが実情であり、その計測手法はいまだ発展途上といえる。

本研究では、LOPC を用いた動物プランクトンの計測手法を確立することを目的とし、海上試験により種別動物プランクトン計測の有効性を検討するとともに、水槽実験によりその計測特性を明らかにし、LOPC による計測データの新たな解析法を提案した。また、本手法を用いて知床周辺半

島における動物プランクトンの計測を行い、その有効性を示した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) LOPC による種別動物プランクトン計測の有効性を検討するため、LOPC 計測量と採集調査によるプランクトン採集量の比較を行い、ESD（等価球直径: Equivalent Spherical Diameter）のサイズを範囲を主観的に決定することで、プランクトン採集量との相関が高くなることを示した。また、このことから、LOPC を用いて種別分布量を計測するためには、LOPC 計測量を客観的方法により種別に分解する方法が必要であることを示した。
- 2) 小型回流水槽を用いてオキアミ類、カイアシ類、タンキョク類の標本を対象とした実験を行い、動物プランクトンに対する LOPC の計測特性を明らかにした。計測粒子の ESD と FL (Forward Length) の関係 (アスペクト比) および ESD サイズなどの計測特性は、プランクトン種ごとに異なる傾向を示したが、動物プランクトン形状の差に比べてこれらの特性値の違いは顕著ではなく、計測特性値そのものから計測対象種を特定することは困難であることが明らかとされた。また、3 種のプランクトンの ESD 組成分布は、供試標本の種類や大きさに関わらず、いずれも対数正規分布に従うことを示した。このことから LOPC 計測量の種別の特定には統計的解析手法の適用が有効であることを示唆した。
- 3) LOPC データに混合正規分布モデルを適用することによって、LOPC 計測量を種別に分解する方法を提案した。同方法では、LOPC カウントと LOPC バイオマスの分布曲線を個別に求めるのではなく、LOPC カウントの分布曲線のパラメータ推定時に LOPC バイオマスの ESD 分布を重みとして利用することにより、両者の分布曲線を同時に推定した。分解された LOPC 計測量は調査点ごとにわずかに異なる生物サイズにも対応し、採集調査によって計測されたプランクトン分布量と高い相関を示し、本方法の有効性が示された。
- 4) LOPC を用いて知床半島周辺海域の動物プランクトン分布を計測し、提案した手法を用いた分布量の推定を行った。その結果、採集調査によって確認された優占種であるカイアシ類の種別計測量を正確に推定できることが示された。さらに、LOPC 計測量を用いることで、カイアシ類の分布について鉛直断面を求めることが可能であり、この手法により海洋環境と対応付けた詳細な分布特性の把握が可能となることを示した。

本研究は、海洋における小型生物の新たな計測手法として注目される LOPC の計測特性を明らかにするとともにデータ解析上の問題点を抽出し、データの適切な解析手法を提案している。さらに、実際の海上試験の結果から同手法の有効性を示すとともに LOPC の利用が今後の海洋計測と資源研究に新たな可能性を与えることを示唆した。よって、審査員一同は申請者が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。