

## コンピュータシミュレーションによる海洋生物 資源解明に関するプロジェクトの策定調査

(財)日本海洋科学振興財団 島 茂樹

近年、海洋生物資源に対する各国の関心が高まり、世界中で漁業資源の枯渇が懸念されるに至っている。漁業資源は、適切に利用されるならば、永続的利用が可能な人類共有の資源である。

その「適切な利用」を阻んでいる大きな理由として次の3点を挙げることができる。

第1の理由は、漁業資源の成り立ち、すなわち「魚の生活史」がほとんど分かっていない点にある。成魚の分布や行動に関する知見は漁業を通じてかなり蓄積されてきているものの、産卵親魚の行動、卵・仔稚魚の分布や行動に関する情報となると極めて限定されたものしかない。

第2の理由は、海流によって水塊が時々刻々その場所を変えてしまう点にある。たとえ産卵が行われている場所が分かったとしても、その水塊がどこに運ばれてしまうのか見当がつかない。陸上では畑が移動することは無い。農業との大きな相違点がここにある。

第3の理由は、海洋は地球表面の70%以上の広さを持ち、その調査には大きな船を用いねばならず、多額の費用と長い時間がかかる点にある。とりわけ、生物資源に関する調査では産卵から次の産卵までの周期が長く、長時間を必要とする。

これら3つの問題点を効果的に解決し、海洋生物資源の永続的利用を可能とする方途を探るため、本研究では、コンピュータシミュレーションを用いた調査・研究手法の可能性を具体的事例で提示し、それを基に今後の方向性について検討した。

海洋物理関係の研究者は海洋環境の予測に向けて理論研究の深化、観測データの積み重ねを営々と行ってきた。こうした背景の中で、コンピュータ技術の驚異的發展があり、研究者は時々刻々変動する広大な海洋環境をコンピュータ内に作り上げることに成功した。シミュレーション結果を基に資源生物の生活史に関する実験的研究を進めるなら、短時間の内にいくつもの大きな「示唆」が得られる。ここで得られた「示唆」は健全な物理学的背景を持っており、結果を検証するための「設計された調査」が可能となる。海洋調査に掛かる費用の膨大さを考えれば、海洋シミュレーション結果の活用は相対的にわずかな費用と時間で多くの新しい事実、知見を生み出すことにつながる。

本研究では、このシミュレーションによって作り出された「仮想海洋」を用いて海洋生物資源に関する実験的研究を進めた。モデルの空間分解能は従来のものに比べ格段に高く、水平解像度は東西方向に1/6°、南北方向に1/8°である。鉛直方向にも78層を取り、そのうち62層を海面から500mまでの間に取った。このように表層に多くの層を取った理由は、表層混合層や密度躍層の構造をより良く再現するためである。現実の海洋と仮想海洋との対比を常に心がけ、両者には高い整合性があることを確認した。

シミュレーションによって求めた海流場に卵・仔稚魚に見立てた仮想粒子を投入し、その軌跡を求め、発生初期の生物の挙動や環境を可視化した。

ここでは対象生物をウナギに絞って、その発生初期段階の挙動を明らかにしようとした。ウナギを選んだ理由は、この仔魚が半年ものあいだ外洋を漂流し海流の影響を強く受けること、

多くの生物学的知見がそろっていること、特に日本人の食習慣に馴染みが深く、社会的にも研究的にも話題性を持っているからである。

ウナギに見立てた粒子の追跡には、2つの方法を用いた。第1の方法は、ある地点に置いた粒子が流れによって順次どこに運ばれて行くかを見るための手法（順追跡法）であり、第2の方法は、ある地点に存在する粒子がどこから来たのかを知るための方法で、時間と流れをさかのぼって発生源となり得る場所を探索する方法（逆追跡法）である。

本研究ではまず産卵場をもっともらしい場所に仮定し、ウナギの仔稚魚がどのように運ばれ、分布してゆくかを見た。ついで、シラスウナギが河口部に到達した時点から逆追跡を行い、それらがどこから来たのか（産卵域はどこなのか）を計算した。種々の現場データに基づく研究結果はウナギの産卵が6ヶ月以上の長期に及ぶとしているから、流動や環境に関しては全て年平均値を算出して用いた。

現時点で最も確からしいウナギの産卵場はグアム島西方の海山群だとされている。そこで、北赤道海流を完全に横断するように、10°Nから18°Nの緯度帯で141°Eから145°Eの範囲を産卵場と仮定して、各格子から粒子を放流した。

2m深と100m深相当の2深度に粒子を配置し、各深度で見られる軌跡の特徴を比較した。

単一の名称で呼ばれる北赤道海流ではあるが、実態としては東西に長く伸びた3つの循環系で構成されていることが明確となった。

- ・北赤道海流の北部で産卵された場合、北上流成分によって亜熱帯反流循環系に取り込まれ、一旦東に運ばれてから黒潮反流によって再び西へ向かう。移動速度も緩やかなため、この循環系に取り込まれた仔稚魚はなかなか沿岸域には到達できない。
- ・北赤道海流の南部に産卵された場合、6ヶ月以内にフィリピン諸島沿岸、スールー海、セレベス海に到達する。従来この海域はウナギの棲息できない海域として取り扱われて来ているが、環境等を考慮しても棲息海域となる可能性は十分にある。この循環系は比較的小規模で、1年程度で一巡する。フィリピン近海から出発した産卵親魚が仮定されている産卵場に戻るとした場合、半年もあれば戻ることができる。
- ・北赤道海流中央部のごく限られた水帯だけが黒潮に接続して行く（黒潮の大部分は広義の黒潮反流によって涵養されている）。このため、海山のように地理的に固定された部分で産卵が行われるような場合、海流の南北移動が生じると黒潮域に輸送される仔稚魚の量は大きく変動してしまうことが考えられる。

粒子追跡が示したもう一つの大きな結果は、産卵想定海域から放流した粒子が沿岸水域と呼ばれる部分に進入して行かないことである。これが意味するところは、台湾や九州、四国と言った黒潮が直接岸を洗うような部分にはウナギの稚魚（シラスウナギ）が供給され得るものの、その他の沿岸海域には供給されないことを示している。東アジアの広範な沿岸域でシラスウナギが見られるにも関わらず、である。

この疑問を解くため、シラスウナギが分布すると思われる沿岸域全体に粒子を配置し、逆追跡によって、粒子の発生源を調べた。河口で採捕されたシラスウナギの日齢（産卵後の経過日数）は150日から180日のものが大半を占めるため、180日間の逆追跡の結果たどり着いた地点を推定産卵場として計算を行ってみた。その結果は意外であって、各沿岸海域からさほど離れていない海域が推定産卵域となった。各沿岸水域には固有の沿岸循環系が見られ、粒子はこの循環系の中に長期にとどまっている傾向が強かった。この結果はウナギの産卵域が特定の地点にあるのではなく、西太平洋の沿岸水域に広く存在している可能性を示唆している。

黒潮は単に強い流れを作っているだけでなく、沿岸水と沖合水を区分する顕著な前線を形成している。沖合水（黒潮の沖側の水）の中に放流された粒子が沿岸水域に進入して来ないことは物理的には理解し易い話である。

最近、海で一生涯を過ごすウナギ（海うなぎ）がいることが発見され、これらが成熟したウナギ（ギンウナギ）で資源の再生産に重要な貢献していることが指摘されている（Tsukamoto and Arai, 2001）。

上記の生物学的発見と本研究で得られた結果とは、相互に相互の結果を支持するものとなっている。本研究で得られた結果は、今後の現場観測の立案に重要な指針を与えるものと確信している。

コンピュータ・シミュレーションによって創り出された「仮想海洋」を利用することが、今後の生物資源の保全や永続的利用に関する研究を進める上で強力な手段となることを示せたと考えている。一方で、次のような課題も見えてきた。

ここで用いた流動場（水温、塩分も）は、年平均値で、場所による流れの変化はあっても時間的に変化することのないものであった。モンスーン支配下にある西太平洋沿岸域の流動場は、季節的に顕著な変化を示す。変動する流動場（水温、塩分場）を用いて粒子追跡を行うなら、新たな発見と豊かな示唆が得られることであろう。

沿岸水（黒潮前線と陸岸の間の水）が、海域ごとに固有の循環系を作っていることが示唆された。この沿岸水域はアジ、サバ、イワシと言った重要水産資源の多くが生息しており、これらの資源の挙動を理解するには、現行よりもさらに高解像で、淡水流入なども考慮したモデルを作り上げる必要がある。この沿岸水の循環系が再現できるようになった段階で、海洋生物資源に対する流動シミュレーションの貢献度は飛躍的に大きくなる。

海洋生物資源の研究はもっぱら現場観測に頼ってきたが、この研究を通じ、資源研究に全く新しい展開の方法—コンピュータ海洋生物資源学—が成立し得ることの一端を提示した。今後この手法が実りあるものとなるためには、対象生物に関する種々の良質なパラメータが必要となる。例えば、「稚魚の生残率に関する温度依存性」などと言ったものである。こうしたパラメータは、現場観測から決して得られるものではなく、適正に管理された実験によってのみ得られるものである。

現在、室内実験を通じた魚類の養殖技術は日進月歩で高度化しており、現場調査では得られない貴重なデータや情報を次々ともたらしている。研究者たちは完全養殖（親魚に産卵させ、その卵を産卵親魚にまで育て上げる）を目指しており、自然界と同じ条件下で生育させようとは必ずしも考えていない。ここにも、海洋生物研究の新しいパラダイムが展開されている。生物実験系の技術向上は、コンピュータ海洋生物資源学の研究戦略上欠かすことのできないものである。

現場観測は室内実験やシミュレーション結果を確認する上で必要不可欠なものであるが、従来の海洋生物調査では生物の行動調査が著しく遅れている。対象生物が水中にいるため、電波を使えず、音波には必ずと到達範囲に制約があり、光の照射は自然の行動をゆがめるといった具合で困難の種は尽きない。生物の行動調査のための何らかの技術的突破口が、求められている。生物行動に関する映像データが重要となってきた。例えば魚類の群行動などをモデル化するためには、この種のデータが欠かせない。

シミュレーション技術の発展は、やがて生物資源の存在状況を手に取るように明らかにしていくことであろう。しかし、無主物である生物資源をいきなりこうした状況下におくなら、コンピュータ海洋生物資源学は本来の意に反して資源の絶滅に貢献する結果につながりかねない。したがって、コンピュータ海洋生物資源学では学問的発展を進めると同時に、社会科学的な取り組みも必要となってくる。

シミュレーション系、生物実験系、観測系および社会科学系の4系列のネットワーク化したプロジェクトの組み立てが重要となる。図に構想の概要を示す。

# 今後の海洋研究の発展に向けて一学際領域としてのコンピュータ海洋生物資源学

【海洋生物資源の保全・安定供給のため】

GLOBEC・水産総合研究センターなどの研究プロジェクトの成果との融合

## 全海洋生物資源の挙動解析・予測

将来の方向性

### 浮遊性卵および遊泳力を有さない弱仔稚魚を対象とする海洋生物資源の挙動解析・予測

#### 更なる発展のため

1. 海洋生物の集団構造
2. 遊泳力を有するもの行動パターン解析
3. 行動様式の数値モデル化
4. 数値モデルの研究

ポンプアップがクレーンアップによる取得情報の多様化・高度化

#### 生物実験系+観測系

◎資源生物の飼育実験

1. 産卵、孵化条件
2. 養育と日齢の関係 → 付加情報 耳石日周輪のSr/CaあるいはMg/Caによる水温推定可能性
3. 遊泳力の把握
4. 生息海域での目視観察
5. 仔稚魚生残率の支配要因分析
6. 成長モデルの構築

- ◎室内：野外実験を支える基礎技術の開発
1. 種の迅速同定(遺伝子解析の自動化など)
  2. 耳石解析の自動化
  3. その他有効な生化学的検査項目及びその手法の自動化

ゲノム解析・半等体の表面分析手法などの活用

#### シミュレーション系+観測系

- ◎高解像度海洋同化モデル
- ◎沿岸域高解像度同化数値モデル
1. 時間・空間スケールの細かな現象のモデル化研究
  2. 沿岸向け大気-海洋結合モデル化

地球シミュレータの活用

- ◎同化手法を組み込んだ生態系数値モデルの開発
- ◎データ同化のための観測機器の整備とシミュレーション結果に基づく最適観測網の構築

- ・係留式ブイ (トライアンブイの技術転用・小型化、大量生産)
- ・流れの面的な観測 (HPLC-データなどのリモートセンシング技術)
- ・衛星データの沿岸域での利用に向けた研究(沿岸域でも何らかの現象を捉えている)

◎観測データの共有化

#### 人文科学系

◎社会科学的な問題の検討

1. 資源はだれのもの
  2. 排他的経済水域が産卵場とされた場合の法的対応
  3. 有効な資源保護対策としての社会・経済学的な問題点の解明など
- ◎生産者側の資源保護への意識向上
1. 資源の枯渇などに対する認知度の向上
  2. そのためにすべきことの啓蒙
  3. 必要な情報収集活動へのボランティア

◎国際関係の連携確立

1. 法制度上の問題点
2. 各国間の規制に関する問題点
3. 国際協力のあり方
4. 新たな枠組みの確立など

## ウナギの研究成果をベースに

図 全体構想

注：すでに実施されている項目も含まれる