

その九 フグの模様で種判別

魚をみていると様々な色や模様をもっており、その多様さや美しさに感心することがあります。魚の模様の代表的なものは、水玉模様などの斑点模様や、縞模様などですが、そのどちらにも属さないような模様も多くみられます。

今回のふく通信では、フグの模様ができるしくみから解説し、フグの模様を用いてフグ種の鑑別ができるのかという話をしたいと思います。

1. 魚の模様ができるしくみ

魚をはじめとした動物の模様はどのようなしくみで生まれるのか、という疑問について最初にその答えを示したのが、イギリスの数学者のアラン・チューリングです。チューリングは、第二次世界大戦中にドイツの暗号を解読したことで有名な人物で、コンピュータモデルの基礎的な概念モデル（チューリングマシン）を提唱したことで有名です。

アラン・チューリングが1952年に発表した論文で、簡単な2つの微分方程式を解くと、空間上に斑点模様や縞模様が形成されることを示しました。この模様はチューリングパターンと呼ばれています。図1に計算により求められたチューリングパターンの例を示します。アラン・チューリングの示した方程式は、現在では反応拡散方程式と呼ばれる方程式の一種で、活性因子（反応を活性化する因子）と抑制因子（反応を抑制する因子）の相互作用により、空間パターンを生み出すものです。チューリング自身も、動物の形態形成を説明することをねらってこの方程式を考えたようです。



図1. チューリングパターン

しかしその後長らく、図1のようなチューリングパターンが本当に動物の模様と同じものであるのかという点については不明のままでした。その疑問に答えを示したのが、大阪大学の近藤滋先生で、タテジマキンチャクダイの体表面の模様を注意深く観察し、その成長する過程での模様の変化が、チューリングパターンに特有にみられるパターンの変化と一致することを明らかにしました。これにより、タテジマキンチャクダイの体模様がチューリングパターンであることが確認されたのです。

さらに、大阪大学の宮澤清太先生は、サケ科の魚の純粋種と雑種の模様を比較し、それぞれの模様がチューリングの方程式を解くことで説明でき、雑種の模様を再現する方程式のパラメータ（式の係数）が純粋種の模様のパラメータの中間値をとることで再現できることを示しました。

このように、魚の体模様がチューリングのつくった方程式で説明できることが明らかになってきました。しかし、魚の模様は単純な斑点模様や縞模様だけではなく、複雑で多様な模様があります。これらの全ての模様がチューリングパターンモデルで説明できるのかは、まだ詳しくわかっていません。

2. フグの模様のなぞ

それでは、フグの模様をチューリングモデルの視点でみるとどのようなことがわかってくるのでしょうか。フグの仲間のなかで、トラフグ属という分類（20種類ほどいます）に注目してみます。このトラフグ属は、前号のふく通信で解説されていたように、遺伝子的には非常に近い種にもかかわらず、多様な生活様式や形態をもっています。体模様に着目しても、斑点模様や、縞模様など多様です。わずかな遺伝子の相違しかないのに、このような多様な模様が出現することは驚きです。

フグの模様をトラフグを例にもう少し詳しくみましょう。図2に示すように、トラフグは胸びれの横に大きな黒い斑点模様が特徴的です。さらにその黒班に白い縁取りがみられます。そして黒班以外の部分は、斑点模様となっているようです。またお腹の部分は白くなっています。

しかし他の種類のフグをみると、黒班が無いものもあれば、薄い黒班があるものもあります。また黒班以外の模様も、黒地に白い斑点模様もあれば、白地に黒い斑点模様もおり、さらに縞模様もあります。縞模様があるフグの中には、シマフグのようにきれいな横線の模様もあります。アカメフグは、ほとんど模様がみられないフグです。



図2. トコブシの模様

20種類ほどのトコブシ属に限ってもこのように多様な模様に分かれています。それでは、これらのトコブシの体模様もチューリングパターンのモデルで説明がつくのでしょうか。

胸びれの横の大きな黒斑以外の部分は、比較的単純な斑点模様や縞模様となっており、これはチューリングパターンの典型であり、これらの模様はチューリングパターンの方程式で再現できそうです。しかし、胸びれや背びれの部分の大きな黒斑は、全体の模様とはすこし違っているように見えます。

3. トコブシの模様を再現するコンピュータモデルをつくる

筆者の研究室では、コンピュータでトコブシの模様を再現する研究に取り組んでいます。なるべく簡単なモデルで、様々なトコブシの模様を統一的に再現できる方法を探っています。

トコブシ模様をコンピュータ上で計算するためには、さきほど述べたチューリングパターンの微分方程式を解けばいいのですが、この方程式は、2次方程式を公式で解くようにして答えを求めることが難しいため、コンピュータで近似解を求めていくことが必要になります。また、この方程式を解くだけでは、斑点模様や縞模様などの単純な模様は再現することができるのですが、トコブシの黒い大きな斑紋などを再現することが難しいと考えられます。

そこで研究室では、チューリング模様を再現する別の計算方法として、セルオートマトンモデルと呼ばれる方法を採用しました。セルオートマトンモデルは、空間を細かいメッシュで区分（それぞれの区分を「セル」という）し、時間も連続ではなく、飛び飛びの時間を考えるモデル（難しく言うと「時間と空間を離散化させたモデル」）です。そして、あるセルの次の時間での状態は、隣接するセルの状態をふまえて、「遷移ルール」とよばれる、次にどのような状態へ移り変わるかを定めたルールに従って計算を進めるモデルです。例えば、周囲に状態aのセルが3つ以上あり、状態bが一つ以上あれば、次の時間のセルは、状態cに変化するなどのルールに従って、空間内のセル全てに適用してい

きます。

このセルオートマトンモデルは、様々な物理現象や生体现象の再現に利用されています。そして、このモデルを用いると、遷移ルールを独自に追加したり改変することができ、特定の条件のときだけに適用されるルールを設定するなど、微分方程式では表現できない現象を、コンピュータシミュレーションに盛り込むことができます。このため、より多様な模様を再現できるのではないかと考えられます。

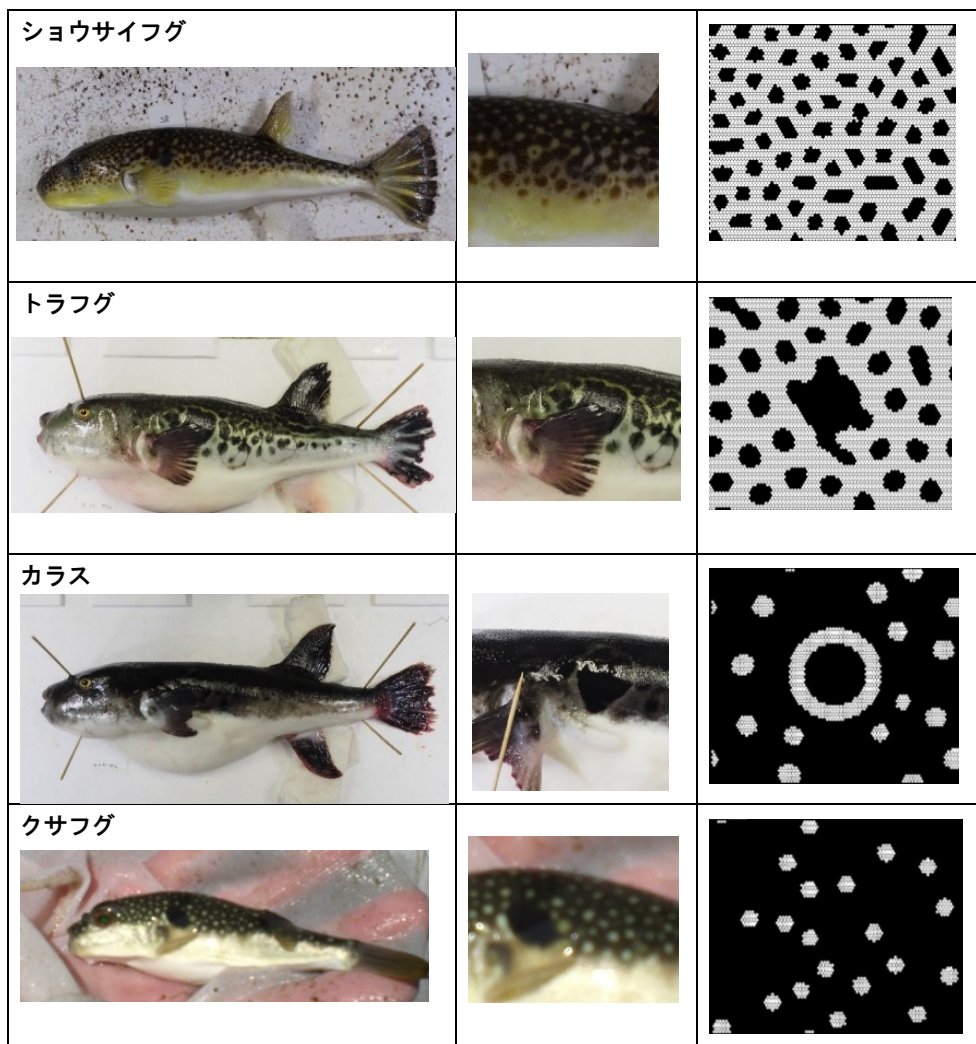


図3 パラメータの制御によるトラフグ属の基本的模様の創出

図3はこの方法により、いくつかのフグ種の模様を再現したものです。図の右側の画像が、コンピュータにより計算した模様で、白と黒の2つの状態で模様を再現しています。これを見るとかなり実際のフグに近い模様をつくりだせることがわかります。

しかし、実際のフグの模様をみると、フグによっては単純な水玉模様ではなく、円環状の模様や数珠状模様など複雑な模様があり、また斑点の大きさも一定しないなど様々です。さらに、大きな黒い斑点があるフグもいれば、無いフグもあります。そしてその黒斑の周りに白い輪郭があるフグもいれば、無いフグもあります。現在、研究室では、このような複雑な模様も数個のパラメータで再現できる改良モデルの構築を進めています。

一方で、これらのモデルが、フグの体内で模様が形成される時の本当の生化学反応と同じなのかという点が疑問としてわいてきますが、この点についてはよくわかっておらず、さらに研究が必要です。しかし、少ないパラメータで模様が再現できるのであれば、次項で述べるように、実際のフグの写真からフグの種類を判定することが可能となってきます。

4. 模様からフグの種類を鑑別することができるか？

現在の研究の最終目標は、図4のようなフグ種を鑑別する目利きシステムを開発することです。漁業現場において、スマートフォンなどで撮影されたフグ画像をサーバに転送し、そこでフグの種類などを判別して、結果をスマートフォンに返すというシステムで、現場でリアルタイムでのフグ種の判別が可能となるものです。

フグの専門家による目利きは、模様、色、棘などから瞬時にフグの種類や雑種を判別できます。本システムも最終的にはこのような能力をもったものを作りたいと考えています。フグの模様からフグの種類や交雑種の判定を行った研究事例は過去に見られない新しいもので、いわば「コンピュータのフグ目利き」をつくるものです。

目利きシステムを作成する方法としては、現在流行のディープラーニングなどの人工知能による画像解析・認識システムがあります。しかし、フグ種の微妙な模様の差異などを判別するためには、人工知能の学習の作業のための大量の学習用画像が必要であり、フグ画像が大量に必要になり現状では困難です。

このため、フグの模様からフグの種類や交雑種の判定のためには、従来の画像解析に代わる新しい方法、あるいは画像解析を補完する方法を模索していくことが必要です。私たちの研究では、先に述べた、フグの模様の再現モデルを組み合わせることで、フグの種類を鑑別するシステムの構築をしようとしています。

さらにこのシステムでは、フグの純粋種のみではなく、雑種の判別にも利用できるものを検討しています。ふく通信の7号にも説明があるように、近年は、雑種のフグが増えているという報告もあります。フグ鑑別システムをフグの雑種にも適用できるようになれば、漁業現場での作業効率の向上や安全の向上に

寄与できると考えられます。

システムの完成を目指して、現在は、さまざまなルートでフグのサンプルを収集するとともに、その遺伝子解析によりフグ種の特特定を行い、それらのデータをデータベースとしてまとめていく作業も同時に行っています。フグの画像や遺伝データ、毒部位のデータなどが一体となった、従来にないデータベースができると考えています。

実際に、フグ判別モデルを作成していると、同じ種類でもフグの模様の個性がかなり幅広いという印象があり、同じ遺伝子をベースにしながらも個性が創出される不思議を感じつつ、そのような個性を含めて、体模様をみただけで瞬時に判断できる人間の脳の能力の大きさに感慨し、鑑別システムの能力を向上させることに注力しています。

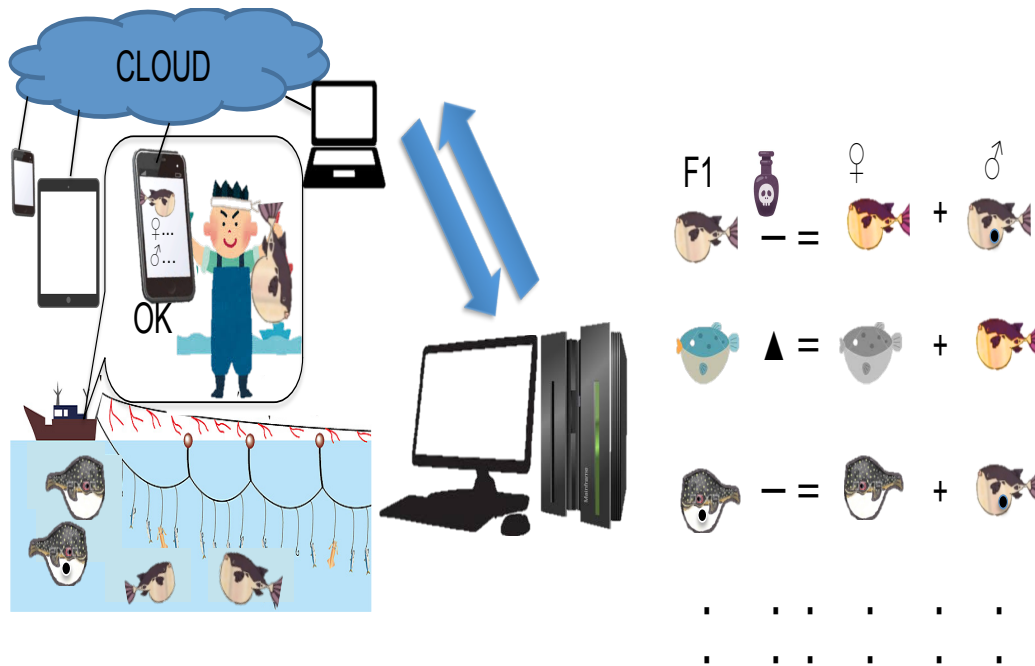


図 4. フグの雑種鑑別目利きシステムの概要

(水産大学校：石田 武志)