



海に生息する魚種間にはたらく 複雑な関係性を捉えることに成功： 緩い種間関係と種の多様性が生態系を安定化

要点のまとめ

- 非線形力学理論を利用して開発した新しい数理的データ解析手法により、舞鶴湾での過去 12 年間の生物個体数変動データを分析
- 15 種の生物の間に働く複雑な関係性(目には見えない力)が刻々と時間変化する様子を捉えることに成功
- 生態系の安定化には、出現する生物種が多いことや、種間におよぼしあう影響が緩やかになることが大きな役割を果たしていることを新たに発見
- 生態系観測によって「自然のバランス」の変化を捉える新技術の開発に繋がる期待

龍谷大学の近藤倫生教授、京都大学の潮雅之研究員、益田玲爾准教授らの国際研究グループ(日本・台湾・アメリカ)は舞鶴湾での過去 12 年間におよぶ魚類とクラゲを含む 15 種の生物の個体数変動データを解析することで、種間の関係性が時間によって変動する様子を詳細に捉えることに成功しました。また、これに基づいて、種間の関係性と種多様性が生態系安定化の鍵であることを突き止めました。

野外の生態系における生物種間には、ある生物種の個体数が増減すると他の生物の個体数もその影響を受けて増減する、種間相互作用と呼ばれる力が働いていると考えられています。また、多様な生物種が相互作用する生物群集(注1)にはその動態を安定化させる仕組み(注2)が備わっており、環境が多少変化しても想定外の大変動や破綻が生じにくくなっているのではないかと考えられてきました。しかし、野外において種間相互作用(=種間に働く力)を観察したり、個体数変動の安定性を測ったりすることはいずれも困難なため、多種の間に働く非常に多くの種間相互作用を詳細に描き出し、それが生物群集の安定性におよぼす影響を野外で検証した研究は過去に例がありませんでした。

本研究では、京都府の舞鶴湾で 12 年間に渡って続けられた潜水調査データ(注3)を、新しく開発した数理的手法(注4)で分析しました。その結果、① 湾内に生息する主要な 15 種の生物(14 種の魚とクラゲ)の間に働く相互作用を捉えることに成功しました。さらに、② 舞鶴湾の魚類群集は夏季に安定になり、冬季に不安定になるという季節変動を示すこと、③ 舞鶴湾の魚類群集は、魚種の種類が多くなり、種間相互作用が弱められることで安定になることを突き止めました。

本研究で開発した数理手法の利用により、他の生態系でも生物種間に働く相互作用を検出することが可能です。また、過去の観測データが種間相互作用や群集安定性を検出する鍵となったことから、生態系の維持や反応を理解する上で、長期生態系観測が非常に有効であることが示されました。

本研究成果は 2018 年 2 月 8 日(木) 3:00(日本時間)に英国科学雑誌「Nature」で公開されました。

<研究プロジェクトについて>

事業名： 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)

研究領域： 海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出

研究課題名： 環境DNA分析に基づく魚類群集の定量モニタリングと生態系評価手法の開発

研究代表者： 近藤 倫生(龍谷大学 理工学部 教授)

研究期間： 2013(平成 25)年 10 月～2018(平成 30)年 3 月

<研究の背景>

生態系には様々な種類の生物が共に生活していますが、いかなる生物の個体数(人口)も時と共に変動します(個体数変動)。自然界における個体数は変動していただきたい一定の範囲に収まる安定性を有していて、個体数がゼロになってしまうような「絶滅」現象や、特定の生物種の個体数のみが急激に増加する「大発生」現象は、頻繁には生じません。また、生物の個体数は無秩序に増減することは滅多になく、いつ頃増えて、いつ頃減少するといった「変動の規則性」が見られるのが普通です。このような個体変動に見られる「安定性」がもたらされる仕組みの解明は、生態学における重要な課題です。

生物の個体数は他種からの影響(種間相互作用)を受けて変動することが知られています。種間相互作用は、捕食-被食関係、助け合う関係、競争関係などの様々な生物間の関わりに由来すると考えられます。個体数変動の仕組みやその安定性を理解する上で、種間相互作用を把握することは必須です。しかし、種間相互作用は、ちょうど地球が私たちを引っ張る重力が目には見えないのと同様に、直接に観察することはできません。したがって、その強さや種類を知るには、大規模な野外実験などを行って推定するしかありませんでした。さらに、種間相互作用自体も変動するので、自然の中に共存する多様な生物の間に働く種間相互作用を正しく検出することは、非常に困難であると考えられています。

生態系に共存する生物種が多様だと、生物の個体数変動が安定化するという仮説があります。安定化のメカニズムには、種間相互作用が何らかの役割を果たしていると考えられていますが、役割の中身はよく分かっていませんでした。その理由として、第1に、自然生態系には多くの種類の生物種が存在し、それらの間の種間相互作用を正しく同時に評価することが困難であること、第2に、野外における個体数変動の安定性を評価することが困難であること、第3に、種多様性・種間相互作用・個体数変動の安定性の間の因果関係を明らかにすることが困難だったことがあります。

<研究の内容>

本研究では、舞鶴湾の14種の魚と1種のクラゲに注目しました。マアジ、シロメバル、アミメハギ、カタクチイワシ、ゴンズイ、メジナ、ホシササノハベラ、キュウセン、ドロメ、ホンベラ、チャガラ、アカオビシマハゼ、アイゴ、アカカマス、ミズクラゲです。これら15種の生物を2週間に一度の頻度で観測した過去12年分の個体数変動データ(注3)を、新しく開発した数理的手法(注4)で解析することで、直接に見て

観察することはできない生物種間相互作用の検出に成功しました。データ解析をさらに進めることで、生物群集の安定性が大きく変動していることや、群集安定性が高くなる時、種の豊富さと種間相互作用の緩やかさが重要な役割を果たしていることが分かりました。以下に詳細を説明します。

15種の生物の間から、様々な強さや符号(正負)の計14の種間相互作用が検出されました。従来は、種間相互作用の強さや符号(正負)は時間とともに大きく変動しないと仮定されていましたが、本研究から見てきたのは全く異なる様相でした。多くの種間相互作用は、その強さが時間とともに大きく変動し、ときにはその符号(正負)までもが時間によって逆転するケースも見られました。

また、得られた種間相互作用を基に「局所リアプノフ安定性」と呼ばれる生物群集の安定性評価のための指標を計算することができます。局所リアプノフ安定性とは、生態系の状態(種組成)が本来の変化から少し外れてしまったときに、元の軌道に戻れるかどうかを表す指標です。舞鶴湾の生物群集を解析した結果、種間相互作用の季節変化が、群集の安定性に影響をおよぼしていることが分かりました。夏になると舞鶴湾に生息する生物の種数が増えます。すると、種間相互作用の力が複数の生物種に分散されて弱まる希釈作用が働いて、個々の種間相互作用は冬に比べて緩やかになります。その結果、群集の安定性は夏に高く、冬になると低くなるという季節周期を示すのです。これまで生態学の仮説によって予想されていたように、複雑な動物群集において、種多様性が高まった結果として、群集の安定性が高まる証拠を示すことに初めて成功しました。また、これまで種の多様性が群集安定性を高める際に種間相互作用が果たす役割はほとんど分かっていませんでしたが、本研究によって、種間相互作用が緩やかになることが安定性を高める役割を果たしていることが発見されました。

<本研究の意義と今後の展開>

本研究には大きく分けて3つの意義と今後に向けての展開が考えられます。

1つ目は、野外における生物種間の複雑な相互作用(種間相互作用)をその時間変化も含めて「ありのまま」捉えることに成功したことです。野外における種間相互作用の検出には、これまでは大掛かりな操作実験を行うなど、多大な労力を必要としてきました。したがって、多くの生物種間の相互作用を同時に評価することは難しく、また、相互作用の時間変化を調べることは実質的に不可能でした。しかし本研究では、個体数変動のデータのみから多種間の相互作用を検出する数理的手法の利用により、複数の生物種間の相互作用を検出するだけでなく、その時間変動を示すことにも成功しました。種間相互作用は生物の個体数変動を理解する重要な要素です。本手法を他の様々な生態系に対しても広く用い、その結果を比較することで、野外における種間相互作用やその変動に関するより一般的なルールを見つけることができるかもしれません。

2つ目は、生物群集の安定性を評価し、さらに安定性の季節変動を明らかにしたことです。これまで、種多様性や種間相互作用によって群集の安定性が影響を受けることは推測されていましたが、実際に野外の生態系で種多様性や種間相互作用の変動が、生物群集の安定性におよぼす影響を検証した研究

はほとんどありませんでした。生物群集の安定性が変動するということは、言い換えれば、生態系には外からの攪乱の影響を受けやすいタイミングと受けにくいタイミングがあるということです。同じ攪乱でも、安定性の高い時期であれば生物群集に大きな影響を与えませんが、安定性の低い時期では大きな影響を与えてしまうのです。このタイミングを正しく捉えることができれば、より効果的に生態系を保全したり生物資源を利用したりすることが可能になります。また、種多様性が生態系を安定化しているという発見から、生態系を安定に保つためには種多様性を保全しなくてはいけないという示唆が得られます。

3つ目は、今回の研究は生態系や生物群集の長期にわたる観測が、生態系の変化や駆動原理を明らかにする上で、非常に有用な情報をもたらすことを示しています。今回利用した数理的手法は、時間変動データから多くの情報を取り出すことが可能です。実際、この研究では2週間に一度・12年間の長期・精細な個体数変動データを利用することで、種間相互作用や生物群集安定性、さらには生態系に安定性をもたらす要因の特定することができました。現在、これまでにない速度で生物が絶滅し、生態系の機能不全が進行しています。舞鶴湾で行われてきたような生態系観測をもっと広域・多地点で実施することで、生態系の振る舞いの理解が進み、生態系保全を効果的に進めることが可能になると考えています。

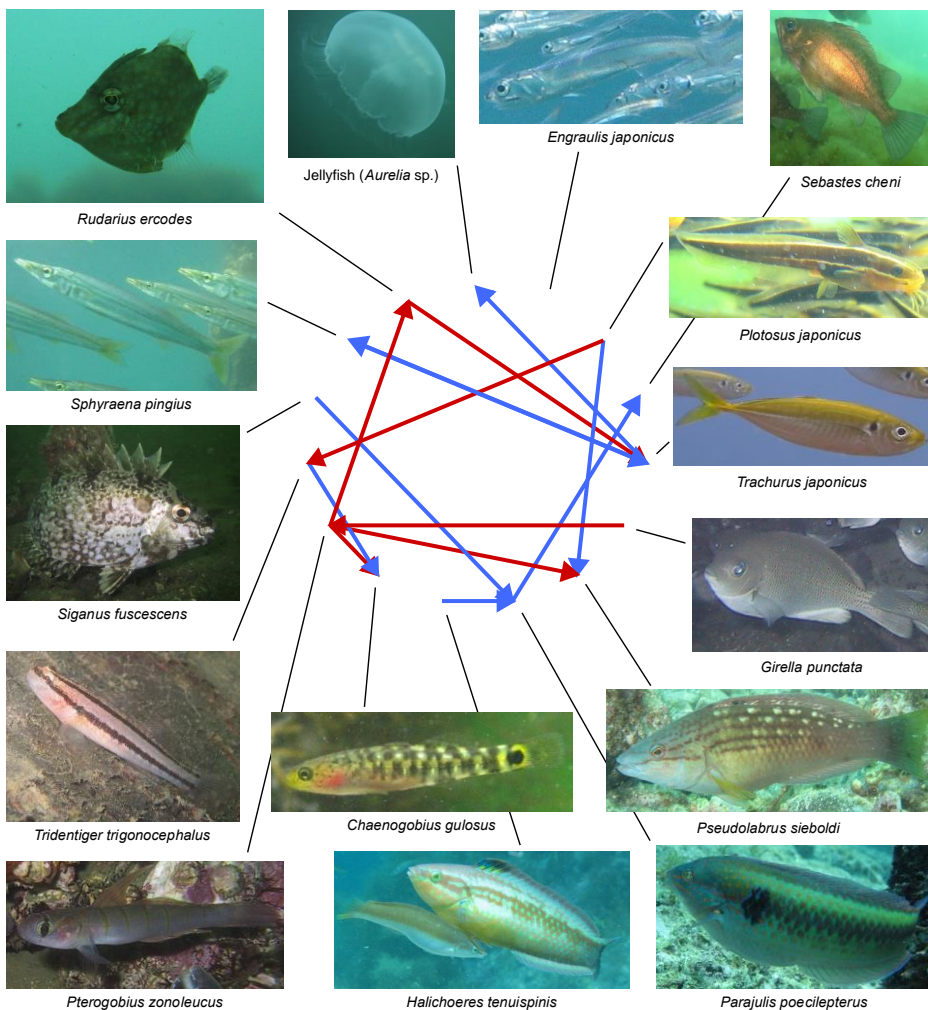


図1. 本研究の対象となった舞鶴湾の15種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性(種間相互作用)。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。色は影響の符号(正負)で、青色(正)は平均的には相手を増やす作用、赤色(負)は平均的には相手を減らす作用を表している。

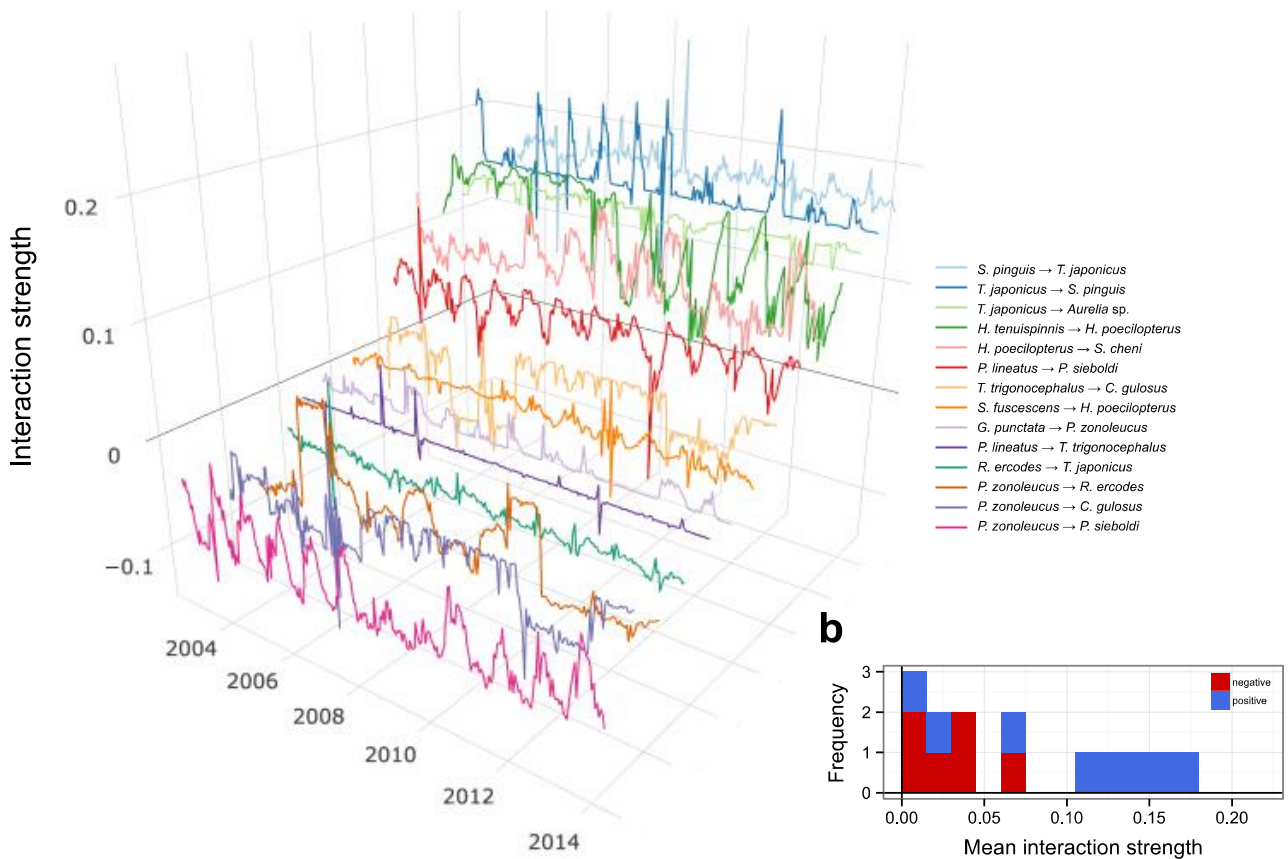


図2. 変動する種間相互作用。(a) 個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性の時間変動。横軸は時間を表し、縦軸は効果の強さ(interaction strength)を表す。正の値は相手を増やす効果、負の値は相手を減らす効果を表す。(b) 異なる強度(mean interaction strength)の種間相互作用の頻度分布。

<発表論文>

英文タイトル: Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community

タイトル和訳: 野外の魚類群集における種間相互作用ネットワークの変動と安定性の時間変動

掲載雑誌: Nature(ネイチャー)

著者: 潮 雅之(京都大学/科学技術振興機構)・Chih-hao Hsieh(国立台湾大学, 台湾)・益田 玲爾(京都大学)・Ethan R. Deyle(スクリプス海洋研究所, 米国)・Hao Ye(スクリプス海洋研究所, 米国)・Chun-Wei Chang(中央研究院, 台湾)・George Sugihara(スクリプス海洋研究所, 米国)・近藤 倫生(龍谷大学)

<用語解説>

注1) 生物群集

生態系には様々な種類の生物と一緒に暮らして(共存して)います。特定の生息地で共存している生物種の集まりのことを生物群集と呼びます。例えば、本研究で注目している舞鶴湾に共存する14種の魚とクラゲは、同じ生物群集に属していると言えます。一般に、同じ生物群集に属する生物種は、捕食-被食関係、互いに助け合う関係、競争関係などの様々な関係性によって、互いの人口動態(個体数変動)に影響をおよぼしあっていると考えられています。、捕食-被食関係で言えば、天敵となる生物種の個体数が

増えると、被食生物種(餌種)の個体数は減りやすくなります。また、互いに敵対し競争関係にある2種がいれば、片方の生物種の個体数増加はもう一方の生物種の個体数減少につながります。

注2) 安定化の仕組み

生物群集ではある生物が増減すると、その影響を受けて他の生物種も増減することになります。したがって、生物群集は多くの生物種が互いの個体数に影響し、また影響される複雑系だと捉えることができます。多種が相互作用する複雑系は維持が難しいことが理論的に示されていますが、現実には、生態系は複雑であるにもかかわらず長い間維持されています。このことから、生態系には、その状態が大きく変化しないように調節する何らかの仕組み(安定化の仕組み)が備わっているのではないかと考えられてきました。

注3) 潜水調査データ(個体数変動データ)

本研究の舞台となった舞鶴湾は、京都府北部に位置する湾口700m、面積23平方キロ、最大水深20mの小さな湾です。舞鶴湾では、本研究にも参加した益田准教授により、2002年より2週間に一度の潜水調査(1回の潜水調査は約1時間)が欠かさず行われています。岸から10mほど離れた場所(水深1-10m)に幅2m・長さ600mの調査ラインが設けられており、益田准教授は潜水したままこの調査ラインに沿って位置を変え、そこに生息するすべての魚種とその数を記録し続けてきました。本研究はこの長期潜水調査で観察された生物のうち15種の生物に着目し、その時間変動データを解析しました。

注4) 新しく開発した数理的手法

潜水調査データは、個々の生物種の個体数の時間変動(人口動態)を表しています。今回新しく開発した非線形力学理論に基づく数理手法を利用することで、個体数変動の背後に隠された情報を取り出せます。具体的には、(1)生物種間の関係性とその時間変動、(2)生物群集の安定性、そして(3)要素(種数や関係性、生物群集の安定性)間の因果関係を調べることができます。