



●核融合科学研究会ニュース 58●



平成28年度総会



平成28年度特別講演会

CONTENTS

核融合科学研究会 平成28年度総会開催される	2
核融合科学研究会 平成28年度特別講演会 「統計力学を使って生物や社会における 多様性の起源を探る」 講師 名古屋大学教授 時田 恵一郎 先生	3
核融合科学研究会会長の交代	12

核融合科学研究会 平成28年度総会開催される

核融合科学研究会の平成28年度総会が、平成28年6月9日（木）、岐阜県土岐市の核融合科学研究所管理棟4階第一会議室において、鈴木健一会長（中部電力株式会社 専務執行役員 技術開発本部長）をはじめとして、会員会社、関係者をお招きし、出席者19名および表決委任者15名（総会成立要件満足）で開催されました。

本研究会会長を務められておられる鈴木健一氏からご挨拶をいただいた後、本総会の議長選任が行われ、満場一致で鈴木会長に決定されました。

はじめに今川信作運営委員会委員長（核融合科学研究所教授・研究統括主幹）より、第1号議案である平成27年度事業報告及び決算報告について、資料に基づき内容の詳細な説明がありました。平成27年度の主な事業としては、核融合科学研究会主催の講演会の開催（平成27年6月16日に特別講演会を、平成28年3月15日に第27回講演会を開催）、第25回見学会の実施（平成27年9月3日～4日）、また国内外研究交流の推進として、核融合科学研究所主催の第25回国際土岐コンファレンス（平成27年11月3日～6日にセラトピア土岐にて開催）、第8回磁場核融合閉じ込め装置定常運転に関するIAEA（国際原子力機関）技術会合の開催援助（平成27年5月16日～19日奈良春日野国際フォーラムにて開催）を、また第17回レーザー応用プラズマ診断に関する国際シンポジウム（平成27年9月27日～10月1日ガトーキングダムサッポロにて開催）の開催援助を行いました。広報活動としては、核融合科学研究会ニュース『融會』（No.55,56,57）の発行、平成27年度事業報告書の発行、核融合科学研究所オープンキャンパス（平成27年10月24日開催）への支援、また総合研究大学院大学（総研大）核融合科学専攻が開催した「夏の体験入学」（平成27年8月24日～28日）への助成を行いました。また、若手研究者の育成として、総研大核融合科学専攻の学生12名に対する奨学金の支給、特別共同利用研究員に対する研究連絡打合せ旅費の援助を行ったこと等が報告されました。最後に、平成27年度決算報告、財産目録の説明がなされました。引き続き、監事を務める伊藤俊之氏（株式会社北野製作所代表取締役）より会計監査結果の報告がなされ、第1号議案は承認されました。

続いて、今川運営委員会委員長より第2号議案の説明がありました。第2号議案では、平成28年度事業計画及び収支予算について提案がなされました。核融合科学に関する技術動向の調査や産業界との情報交換、産学連携等を進めるため、講演会や見学会を企画、実施すること、若手研究者の育成を推進するため総研大核融合科学専攻の学生や特別共同利用研究員を支援していくこと、核融合科学研究所が運営を務める第26回IAEA国際核融合エネルギー会議をはじめとする核融合関連の国際シンポジウム等の開催を支援すること、広報活動の一環として核融合科学研究所の

オープンキャンパスの支援や、本研究会の活動報告として定期的に刊行物を発行していくこと等について、平成28年度予算案とともに提案され、本議案は承認されました。

第3号議案では、今川運営委員会委員長より、平成28年度の理事、監事、評議委員についての提案がなされました。その結果、理事として、竹入康彦氏（核融合科学研究所長）、今川信作氏、下妻隆氏（核融合科学研究所教授）の3名が就任すること、また監事として伊藤俊之氏が留任すること、会員企業より7名の方々が評議委員に就任することが承認されました。

議事終了後、本総会をもって会長職を退任される鈴木健一会長より退任のご挨拶が、また新たに会長に就任される澤岡昭先生（大同大学学長）より、就任に当たってのご挨拶がなされました。

以上の会務終了後、核融合科学研究所の竹入康彦所長より、核融合科学研究所の近況について報告がなされました。研究所の体制について説明がされた後、各研究プロジェクトの現状と最新の成果、今後の展望について報告がなされました。大型ヘリカル装置（LHD）実験においてこれまで得られている成果等について報告がなされました。また、平成28年度のLHD重水素実験開始に向けて、加熱、計測機器等の整備が順調に進められていること、安全、監視体制の確立が進められていること、さらに平成28年度の実験スケジュールについて説明がありました。また数値実験炉研究プロジェクトおよび核融合工学研究プロジェクトの最新の成果についても説明がなされました。会員の関心は高く、熱心に説明に聞き入っていました。

続いて特別講演会が開催されました。講師には、名古屋大学大学院、情報科学研究科の時田恵一郎教授をお迎えし、「統計力学を使って生物や社会における多様性の起源を探る」と題して、生態系の多様性、複雑性、安定性、種の豊富さのパターンがどのようなメカニズムによって実現されるのかなどについて大変興味深いご講演をしていただきました。ご講演の詳しい内容については、別掲記事をご参照ください。

特別講演会終了後、総会出席者のほかに核融合科学研究所の職員、総合研究大学院大学の大学院生、その他関係者等も集い、懇親会が開催されました。会員と研究所員との相互の交流が図られ、盛会のうちに終了しました。

（文責：下妻 隆
核融合科学研究所ヘリカル研究部
プラズマ加熱物理研究系 教授）

核融合科学研究会 平成28年度特別講演会 「統計力学を使って生物や社会における多様性の起源を探る」

講師 名古屋大学 教授 時田 恵一郎 先生

時田恵一郎先生は東京大学大学院理学系研究科で相関理化学を専攻され、博士号を取得されました。その後、大阪大学、米国ハーバード大学で、情報科学、統計数理学、大規模計算科学等をご専門とした研究に従事されました。現在は、名古屋大学 情報科学研究科 複雑科学専攻の教授を務められており、また、同大学の情報文化学部の教授もご併任されております。

最近では生物多様性環境問題が様々な場面で話題になっておりますので、本日はそのあたりのお話をご紹介できればと思います。日本でも、生態学会という会員数3000人を超えるような大きなコミュニティもあり、また、他にも非常にアクティブなグループもたくさんあって、盛んに研究が行われています。それらに関連する研究を全て紹介するのは不可能ですので、本日は、物理出身の理論屋の目から見て、このような研究分野のどういったところが面白いのかをご紹介できればと思います。まず、多様性の科学に対して、私がどういったスタンスで研究に携わっているのかを紹介させていただきます。その後、最近、特に実証研究が進んできた、種の豊富さのパターンに関連したトピックを紹介いたします。

生態学者は、どういう生き物がどれだけいるか、といったことを数えてきているのですが、実はそれが割と単純な法則に従っているということが、昔から知られておりました。そういった法則を物理・数学のモデルで、説明できないかを研究している分野があります。私もその路線で研究をしてきました。今世紀に入ってから、理論研究も実証研究も進んだ中立モデルといったものがあります。分子の世界では中立といった考え方が確立しているのですが、実はそれが生物の集団にも適用されるのではないかと言い出した研究者がいます。最近では、中立モデルを基にした理論予測が、実証研究に対して適合性が高いと言われ始めており、そのあたりのお話を紹介させていただきます。そしてもう一つ、力学系を使ったモデル解析の研究を紹介させていただきます。

これは、Wilsonという非常に著名な学者が著した本の表紙で、熱帯雨林で樹木を燻蒸した時にぱらぱらと落ちてきた昆虫を捕まえる様子を表しています(図1)。こういった採取に何度か行った際には、必ず新種が見つかると言われていています。このことは、まだ地球上には、分類されていない、わかっていない種がたくさんいるということを意味しています。こちらと同じ本の中にある図ですが、分類群ごとにどれくらいの種を持っているのかを、その種の数に比例した大きさに生物の絵を描いているものです(図2)。これを見ると昆虫がとにかくたくさんいることがわかります。あとは蟹ですね。節足動物だけで地球の生物多様性の



図1. 熱帯雨林での昆虫採取
(ご講演資料より)



図2. 種の数で比例した大きさに描いた生物
(ご講演資料より)

ほとんどが保たれていることとなります。他には、貝などの軟体動物や菌類も多いですね。植物も、もちろんたくさん存在していますが、哺乳類は非常に少ないということが分かります。これに関連した、進化生態学者の有名なエピソードがあります。当時は進化論を口にすると教会から怒られる時代だったのですが、ある時、この生態学者が教会の催し物に呼ばれて、あなたはいったい神様のことをどう思っているんだ、と聞かれました。その時その生態学者は、『神はことのほか昆虫がお好きで』と答えたそうです。地球上にいる生物を眺めてみると昆虫が異常に多いわけですね。

最近では、土の中や海水の中にいる微生物の多様性、つまり環境DNAを、次世代シーケンサーを使って、調べることができるようになってきました。昔はシャーレに株を植え付けて、そこから生えてきたものに対して、いろいろと実験を行って、新しい菌かどうかの議論をしていました。ところが、最近では、直接DNAを解析することによって、環境中にどうい微生物がいるのかを調べられるようになってきました。そういったことをすると、これはもう、ジャングルで虫を捕まえるのと同じで、何度調べても今まで知られてなかった遺伝子が発見されます。地球上にいる生物は、今後にわたって分類され尽くされることは無いのではないと言われるくらい、非常に多様なものが地球上にいるわけです。

生物学者は、このような最先端の情報科学の技術を使って、複雑な生物の集まりがどのように構成されているのかを調べています。こちらは、我々の体の中で起こっている代謝、化学反応の中で、わかっているものを全て示した図です(図3, 左)。これはもう、どうなっているのかわからないくらい複雑で、とてつもない数の反応が我々の一個の細胞の中で起こっています。こういったマイクロな世界でも生物は巨大なネットワークを作っているわけです。タンパク質だけを取り出してそれらが反応するもの同士を線で結ぶということをしたのがこのネットワークです(図3, 中)。タンパク質だけでもこれだけ多くの繋がりがあ

ますが、しかもその繋がりが一様ではなくて、非常に多くの相手と繋がるたんぱく質もあればたった一つのたんぱく質と繋がるものもあります。そういう反応ネットワークの特性が解明されつつあります。これは、よくある食物網です(図3, 右上)。アメリカにある湖中の生物の、食べたり食べられたりの関係を線で表して図にしたものです。一番下に並んでいるのが植物プランクトンで、それを動物プランクトンが食べて、それをさらにカニや小魚が食べると、そういった、食べる食べられるの関係を表すとこのような複雑なネットワークになります。最近では、このようなネットワークが分子レベルからマクロな生態系のレベルに至るまで存在することが発見されてきています。ところがこういったネットワークはダイナミクスが非常に安定していて、例えば、ある細胞の中で、あるたんぱく質だけが増えて、他のたんぱく質を圧迫して細胞が死ぬということはありませんし、生態系も通常は安定していて、ある種が突然増えたり、絶滅したり、といったことは一般的にはありません。一方で、数理的なモデルを適当なパラメータを与えて解くと、そのような安定な結果にはなりません。例えばこれは3種類の生物間での、食べたり食べられたりの関係をモデル化したものです(図3, 右下)。非線形のシンプルな方程式でシミュレーションをすると簡単にカオスになってしまい、個体数が爆発的に増えたり、あるいは、ほとんどいなくなってしまうたりと、非常にドラスティックな変化を見せます。ところが、現実の複雑な生物ネットワークではこういった変動はほとんど見せません。もちろん、時々バツが大発生して植物がたくさん食べられてしまうという事はありますが、例えば、熱帯雨林や湖では非常に多くの種が安定に共存しています。そういった現実の生物ネットワークにおいて、その背景には非線形の不安定要因を持っているにもかかわらず、安定に保たれているのはなぜか、安定ファクターは何か、ということが、生態学会でも長い間問題になっています。

こういった非常に多様なものが集まって、いろいろなダイナミクスが展開するシステムを眺めたときに、生物のネットワークというものは今まで物理や数理科学が扱ってきた対象としては、実は毛色の変ったものなのではないかと考えています。例えば統計力学では、元来、原子や分子といった一種類ものを主体として、それらがたくさん集まった時に、全体としてどのような振る舞いをするのかを考えます。ところが最近では物理の分野でも少し変わったものが扱われるようになってきております。例えばスピングラスといわれる合金です。金に鉄を混ぜると少し変わった物性を示すのですが、実は、それが脳の神経回路網のモデルとそっくりな形をしていることが指摘されています。神経回路網の分野では30-40年くらい前から今に至るまで、盛んにこのような研究が行われています。そこでは、主

複雑な生物ネットワークのダイナミクス

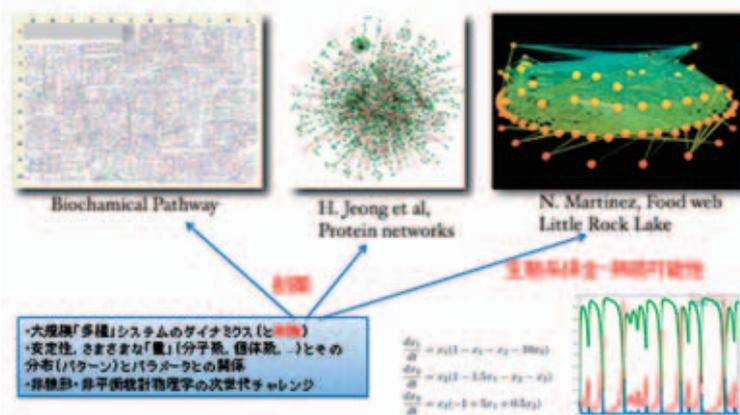


図3. 複雑な生物ネットワークのダイナミクス (ご講演資料より)

体はスピンの場合では、一種類から複数のものを考えます。脳のニューロンも何種類かの細胞があります。そういった少数種のもが多数集まった時に全体としてどういったふるまいを示すのかを表す理論が充実してきています。そこでは相互作用が重要となります。こういった系を対象とした理論が徐々に確立してきた中で、さらに最近では、たんぱく質の振る舞いに対する理論が研究されてきています。タンパク質はアミノ酸が数珠つなぎになっている構造をしています。人間の場合は20種類のアミノ酸が連なって高分子を構成しています。それら20種類のアミノ酸の間で、様々な相互作用の力が働いていることが分かっています。20種類のアミノ酸の並びで、数千種類の異なるたんぱく質を作っています。一般的な生物ネットワークを眺めてみると、主体となるものは、代謝反応であれば代謝物質で、数千種類あります。タンパク質も数千種類あります。さらに、我々の体の中には非常にたくさんの細胞があります。こういったものが群れると、全体として複雑な挙動を示すようになり、それ自体が非常に多様であると言えます。その多様性に合わせて、それらの間に働く力も多様になります。主体も多様、相互作用も多様なものを何とか物理の範疇で扱えそうな時代になってきているように思います。ですが、実はそれらは本質的に非線形なシステムであり、また、非平衡系でもあります。このような系は、統計力学が、まだターゲットとして到達していないものですので、こういったものを上手く取り扱うことができれば、物理へのフィードバックも期待できるものと考えています。

ただ、こういった多様性といったものに対して、どのようにアプローチしていけば良いのかが悩みどころでもあります。こういった非線形・非平衡系の研究の歴史を振り返った時に、こういったものに研究者が注目してきたかを見てみたいと思います(図4)。例えばこれは有名なペロウソフ・ジャボチンスキー反応で、シャーレの中で化学反応を起こさせると、変わったパターンが発生して、さらにそのパターンが複雑に動きます。こちらは、九州と済州島です。済州島の南側に渦ができています。もっと大きいスケール

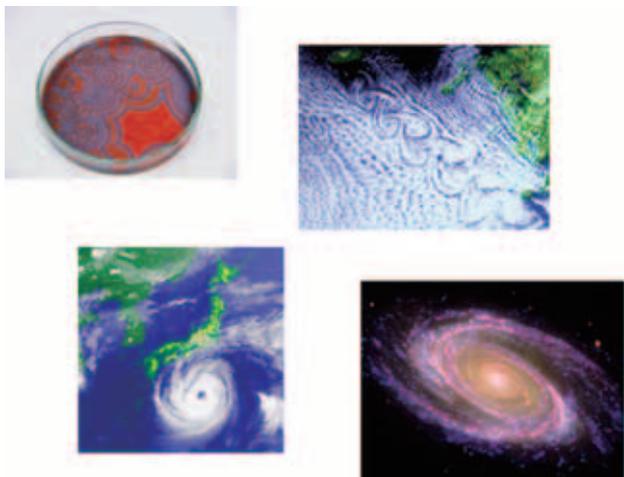


図4. 自然界に存在する類似する複雑なパターン (ご講演資料より)

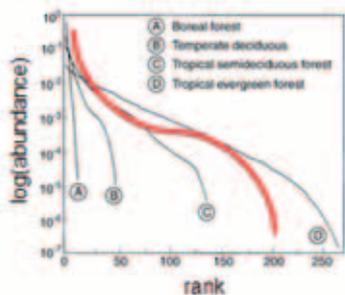
では台風、さらに大きいスケールだと銀河ですね。すなわち、まずは、見た目の構造が似ている、という見方があって、そういった構造が頻出するパターンの背景にある物理を探る、ということを行ってきているのかなと思います。必ずしもそれらの背後にあるメカニズムが、同じとは限りませんが、何か一つ法則がわかると、他のスケールのもを理解する助けにもなると、ということもあります。

それでは、生物に対してもそのような頻出するパターンがあるのではないか、ということで、ここ十数年ほどこだわっています。こういった生物が何種類いるのかを表す分布関数というものがあります。群集生物学者はいろいろな所に出かけて行って、この島にはどういった植物が何本生えているとか、このジャングルにはどういった昆虫が何種類いて何匹ずついるのかを、頑張って数えるといったことをしてきています。それに対して、理論家が、それはこういう関数に似ているんじゃないか、と言うわけです。種の分布が単純な関数に当てはまるんじゃないか、と最初に言ったのは、実は、おそらく日本人で、東北大におられた元村先生という方です。その先生が、分布が幾何級数だと、主張したのが始まりだと思います。その後、統計学者として有名なFisherが、ある群集は対数級数で分布していると主張したり、他の研究者は、いや、対数正規分布に従っているんだとか、言ったりしました。ノーベル経済学賞の受賞者で、人工知能の研究でも有名なSimonという研究者は、べき分布になる場合、これはZipfの法則も従うと主張しています。最も有名なZipfの法則の例としては、本の中にある単語の分布が挙げられます。昔、Zipfという研究者が、都市の人口分布はべき分布になっていて、しかも、その指数の値がある決まった値に近くなることが多いということを主張しましたので、Zipfの法則と言われていました。Simonは、そういった分布を生み出すメカニズムを理論的なアプローチで研究しています。他には、生態学者として有名なMacArthurという研究者が、分布が指数型をしていることの背景を研究しています。ガラスの細い棒をポーンと投げた時に、地面に落ちてバラバラに割れる、その時の破片の長さが実は指数分布をしているのですが、そういったものと種の分布が同じものなんじゃないかと言っています。また、Mayという非常に著名な研究者もそのような研究をしています。この人は、例えばロジスティックカオスを最初に発見し、また、数理生物学という分野を最初に作った研究者で、イギリスの王立協会の会長も務めていました。種の分布からある面積にどれくらい種がいるかという、種数面積関係というのを生態学者は調べているのですが、Mayは、それらに関係があるということを主張しています。さらに最近になると、Hubbellという研究者が、中立モデルというものを提唱して、生物群集は、実は相互作用が無いと仮定しても、現実の分布を説明できると主張しました。一方、生物の種類が多い系で、それらが食べたり食べられたり、そういった相互作用を仮定した上で、様々な関数が導出されるという話はあまりありませ

ん。ダイナミックなモデルもいくつか研究されていますが、基本的には問題を初めから一体化して、その解を求めるというアプローチが多いのですが、我々は、初めからたくさん種がいて、それらが相互作用している時に、その平衡状態、あるいは定常状態がどうなるかを、最近充実してきた統計力学的手法を使って解くということを行っています。今日では、生態学者も、中立モデルが本当に現実の生態系の分布が適合するのかをチェックすることも行っています。そのあたりのお話と、私たちが行っている研究である非線形動力学モデルについて紹介していきたいと思えます。

先ほど述べましたように、最初に種の分布が幾何級数だと主張したのが元村先生の論文です。これは日本語書かれていて、旧仮名遣いなどが使われているような古い論文ですが、これが実は群集生態学の分野では、大変有名で、非常にたくさん引用されています。この論文の中に有名な図が描いてあって、現実のデータではありませんが、種の分布が幾何級数じゃないかということを目指したわけです。それでは、実際のデータはどんなものかというところ、これはHubbellが森に生えている木の種類とその本数をいろいろと数えた結果を示しています(図5)。縦軸がその本数のログをとったもので、横軸が一番多いものから並べた時の順位です。この中のAが、Boreal forestとあって、亜寒帯のタイガとか北方の樹林の一番数の多い種から少ない種まで数えたものです。定義上、右下がりの曲線になりますが、こういった環境の厳しい所では、非常にたくさん生えているものから珍しいものまで共存しているのですが、全体としては共存している種は少ないということになります。ところが、温帯とか熱帯の場合は、非常にたくさんの種、これは270くらいの種が共存しているわけですが、それが程良く個体数を分布させています。これは樹林のデータですが、昆虫や、鳥などさまざまなデータがあって、その生態系ごとにこのようなsigmoidalなカーブになっており、普遍的に観測されてきました。これは進化のシミュレーションを行った結果ですが、少ない種数からどんどん進化

Rank-abundance relations



• Typical sigmoid curves are universally observed.
 [1] S.P. Hubbell, *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography* (Princeton Univ. Press)

図5. 様々な環境下での樹木数と種のランクの関係 (ご講演資料より)

して、大きな集団ができた時に、それぞれの個体数がどうなっているのかというモデルで計算してみると、やはりsigmoidalな結果になります。このRank-abundance関係は、どういう種が何匹いるのかという分布関数の、累積になっていますので、このカーブの逆関数をとって微分したものは、実は、どういう種が何匹ずついるのかという分布に一对一に対応します(図6)。

一つ、非常に有名な研究をご紹介します。パナマ運河を作った時に、熱帯雨林が水没したのですが、一部、水没しないで残った島があります。そこにはもう一般人は入れないようにしておいて、生態学者がどういう木が何本生えているのかをずっと数えています。おそらくこれが、どういう種が何本・何匹いるかというデータの中で、最も信頼性の高いものの一つだと思います。この棒グラフが実データです(図7)。横軸が個体数になっていて、ログをとったスケールごとに、まとめて何種類ずついるかという結果が、描かれています。そういうまとめ方でグラフを書いてみると、実は対数正規分布に非常に適合する結果になります。その一方で、中立モデルの予測の方が、実は良く適合するという結果も出て、非常に話題になりました。こ

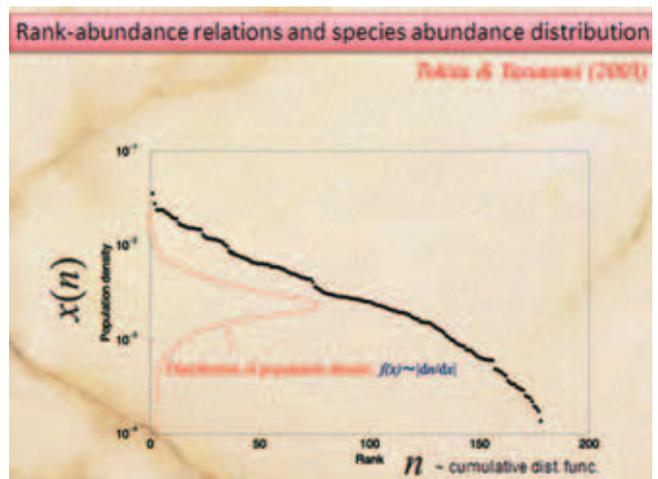


図6. Rank-abundance関係と個体数との対応 (ご講演資料より)

Species abundance distribution (SAD)

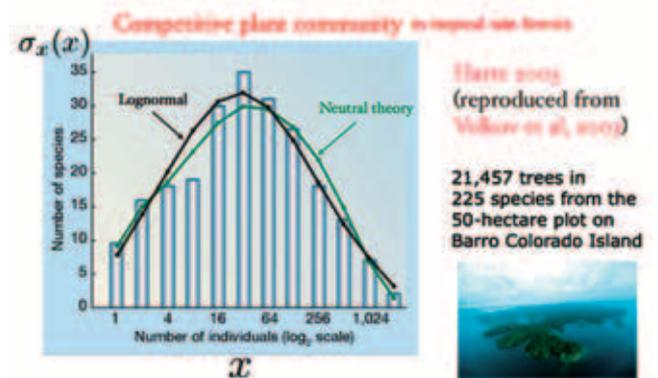


図7. 孤島群における種の個体数と種の数の関係 (ご講演資料より)

これは韓国の生態学者がまとめたデータですが、韓国の1970か所の川にサーバーネットと呼ばれる箱を使って、カニ等の川底にいる生物を採取しています。そこで捕まった687種類の、節足動物を含む無脊椎動物の分布を示しています(図8)。これを見ると若干、種の珍しい側の方に太った、Left-skewedな分布になっているとわかります。こういった分布がどういう個体群動態に従って出てくるのかを解明したいと考えています。

実はこのような関数は、マクロな生態系だけで観測されるものではありません。これは細胞の中のタンパク質の数の分布を調べた実験の結果です(図9)。最近、タンパク質に、光るタンパクを付けて、その光の強度で量を測ることができます。図の横軸が光の強度で、そのたんぱく質が何個あるのかの指標になっています。その数を持つたんぱく質の種類がどれだけあるのかを調べると、実験開始から何日間か経つと分布は変わってきて、最終的に対数正規分布的になると、ということが報告されています。こちらは経済商品のデータです。ヒースローとヨークの駐車場に止まっている車の分布を示していますが、これらも対数正規分布に近いものになっていると言われています。おそらく、

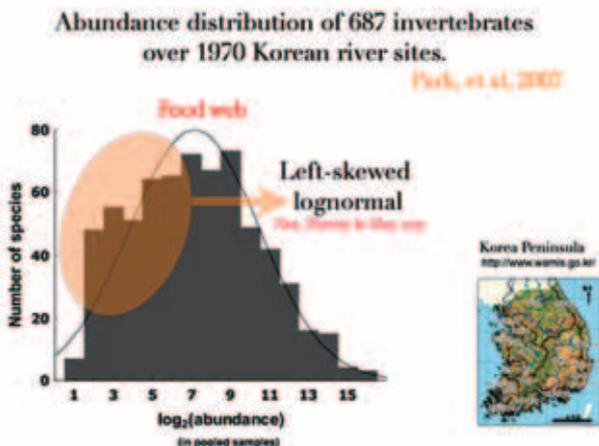


図8. 韓国の河川における無脊椎動物の分布 (ご講演資料より)

生物ネットワークとこういう経済商品のネットワークはミクロのダイナミクスは異なると思いますが、多くの種類のもが進化的な淘汰を受けて残存するというダイナミクスを経ると、似たような分布を示すという例になっています。

最近、日本の酒蔵の、酒の醸造石高のデータを使って似たような図を作ってみたのですが、やはり似たような曲線が現れました(図10)。1961年には酒蔵が3000種類くらいありました。その時は、先ほどの熱帯雨林に近いような分布になっていて、たくさんの酒蔵が共存していて、その石高は酒蔵ごとに大きな違いは無いという群集だったことがみてとれます。しかし、30年後、酒蔵は半分以下になってしまいました。すると今度は、環境の厳しい北方樹林に対応するような、非常にたくさん作っている酒蔵さんと少ししか作っていない酒蔵さんが共存するような分布になり、しかも全体として多様性も下がっているような群集パターンになっています。昭和時代は酒蔵もログノーマルに近い分布をしていたのですが、最近では対数級数に近いものになっているということがわかります。これも生物ネットワークが示す種の分布に対応する経済システムのデータかと思っています。ところが、ワインの国別の生産高を見てみるとこれは全く異なった分布になっており、直線状に並んでしまいます。これはべき分布に対応していて、ワインに関しては、世界的には典型的な生産高の蔵があるわけではないということになります。あらゆる作り方、生産量の国があるということになります。ヨーロッパでもたくさん作っている国もあればほとんど作っていない国もあります。

こういったことを説明するために、様々な理論が提唱されています。中立モデルでは、最近是非平衡統計物理学の手法を使って、数学的に厳密に扱えるようになってきています。しかしこれは、固着性の生物、植物とかサンゴ礁とか、場所を占める生き物の群集に対する理論です。すなわち、特に空気が無い、枯れたらすぐに別の植物の種が飛んできて生える、飽和した、というのですが、そういった群集に対する理論です。一方、私が行っているのはニッチ理

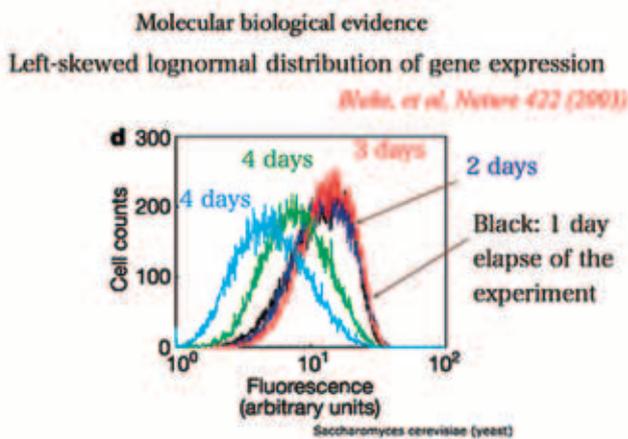


図9. 細胞内のたんぱく質数の分布 (ご講演資料より)

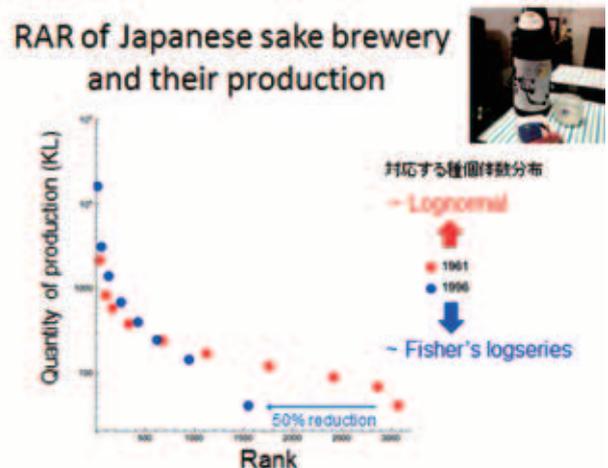


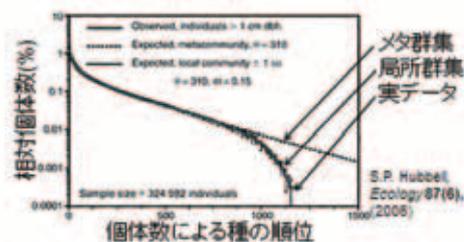
図10. 日本酒の生産石高と酒蔵数の関係 (ご講演資料より)

論という研究で、平衡統計力学や非平衡統計力学等の手法を使います。様々な生物の間の相互作用が中立ではなく、食べたり食べられたりとか、いじめたり助けられたりとか、そういった相互作用を持つ群集を観察して、どういう分布が出てくるのかを調べる理論です。

まず、中立モデルですが、提唱したHubbell自身は生態学者で、あまり数学や物理は得意ではないので、主にシミュレーションを行っていました。それで、対数正規分布と比べてどっちが合うとか合わないとかの論争をしてきたのですが、最近、物理学者と共同研究を行って、彼のモデルの厳密解が導出されました。そして、その厳密解を使ってみたところ、実は対数正規分布よりも適合性が高いということが示されました。そこで、最近では、フィールドの生態学者も自分の調べているシステムが中立仮説に合うのか合わないのかを調べるようなことも行っています。私も群集生態学シリーズという本の中で中立モデルと動力学モデルの理論の話を記述しました。また、最近、複雑ネットワーク理論の研究が進んできておりますので、その数学的な基礎もこの本に書きましたので、ご興味を持たれた方は読んでいただければと思います。

まず、中立モデルとはどういうものかという、メタコミュニティという大陸に対応するものがある、そこでは、各個体が死んだり、ある新種が現れるということが起こっているとします。そして個体が死んだら、そこにまた種が飛んできて新しく個体が出現します。その中で、ごく一部の局所群集というものを考えます。生態学者は大陸全部の生態系を調べることはできませんので、現実のデータは、局所群集のサンプルにすぎないわけです。サンプリングの理論として、局所群集の中に、どういう種が何匹いるのかというのをメタ群集のサイズや、移入の効果、大陸全体からどれくらいの割合で新しい種が入ってくるとか、そういったパラメータに依存して、どういう分布が出現するのかを考える理論です。これは平均場的な取り扱いができて、厳密解が導出されます。その厳密解と現実の群集のデータとの比較を行います。一方、平均場として扱うことは、それはそれで良いのですが、現実の生態系は、やはり、二次元の空間中に木が生えて、それが枯れたらどこから種が飛んできてまた生える、といったことをしているわけです。空間の効果を無視することはできません。ただし、空間が有限次元であるこの手の問題は、数学的に厳密に扱うのは大変なので、基本的にはシミュレーションでモデルの予測を導くということを行います。これは現実のデータですが、適合度が最大になるようなパラメータを選ぶと中立モデルはほぼ完全にこの分布と一致します(図11)。ただし、生態学者は基本的に全ての種が中立であるということは受け入れることはできません。生物は種ごとに違った暮らし方をしているわけですし、中立モデルが前提とするような様々なパラメータが全部同じという仮定は受け入れがたいのですが、こういうデータにフィットする理論モデルというのが今まで無かったため、批判はされているので

中立モデルの結果と実データ(種個体数分布)との比較



- 現実のデータを定量的にも再現。
- 微視的な個体群動態に基づく定量的予測が可能。少数種モデルの1つ。

図11. 中立モデルと実データとの比較結果 (ご講演資料より)

すが、非常に適合するというので、様々な群集に対して、適合度のチェックが行われています。

集団遺伝学というお話をしましたが、Hubbellの中立モデルというのは集団遺伝学の分野で確立した理論とほぼ一対一の関係になっていて、それをマクロな生態系の問題へと拡張したようなものになっています。もともと集団遺伝学の分野では、確率過程の理論が非常に充実していましたので、それを援用して理論を作ったわけです。具体的には、例えばある一種に注目して、その一種の個体数が n だしたら、それが新しく生まれてくる効果によって一匹増える確率や、もしくは、死んでしまって減ってしまう確率を表現することができます。変わらない確率は、それらを1から引いたものになります。そうすると、対応するマスター方程式を記述できます。これは状態に依存する遷移確率をもったランダムウォークになっていて、Hubbell自身はこの方程式を解くことができなかったのですが、共同研究を行った物理学者が解を求めました。これは個体数が n 匹いる種が何種類いるかを示した期待値が、大域から局所群集に入ってくる移入率 m 、そして θ というのが重要なパラメータですが、メタ群集の総個体数や、進化率といったパ

集団遺伝学との対応

表1: 群集生態学と集団遺伝学における中立理論

特性	群集生態学	集団遺伝学
システム (サイズ)	メタ群集 (J_M)	集団 (N)
サブシステム (サイズ)	局所群集 (J_L)	ゲーム
中立性の単位	個体	遺伝子
多様性の単位	種	可立遺伝子
分岐 (分岐率)	移入 (m)	移住 (m)
滅亡過程	局所消滅	遺伝的浮動
多様性を含む基礎	種分化 (λ) / 種分化率	突然変異 (μ) / 突然変異率
基本生物多様性指数	$\theta = 2J_M \mu$	$\theta = 4N\mu$
基本分岐	$\lambda = 2J_M m$	$\theta = 4Nm$
システムの相対分布指数 (α) (大 J_M 近似)	$\theta^{-1}(1-\alpha)^{-1}$	$\theta^{-1}(1-\alpha)^{-1}$
共通祖先から分岐後の時間 (t) (小 θ 近似)	$J_M(1-\alpha)^{-2} \log(x)$	$N(1-\alpha)^{-2} \log(x)$
観測データ	種個体数	可立遺伝子数
モデル	高の生物地理学モデル	島モデル
この無次元数が種数, SAD, SAR 系統で支配する!	分岐頻度 ($m < 1$)	飛び石モデル
	メタ群集-局所群集	距離による隔離
		大陸-島モデル

図12. 群集生態学と集団遺伝学での中立理論の対応 (ご講演資料より)

ラメータで書かれるパラメータと、局所群集の総個体数をパラメータとして書くことができます(図12)。これが実際の現実の観察データと良く合ってしまいます。こういった生物多様性の理論としては、今の所、最も充実したものの一つとなっています。特に、固着生成物の群集に対しては、これが一番適合する理論と言われています。もちろん、そもそも中立なのかということは、ずっと議論になっていて、私は、中立でないという仮定からスタートして、中立モデルが予測する分布を出せないかということをやっと研究しています。やはりそこでは、有限次元の空間シミュレーションをしないではいけませんので、最近ではGPUをつかってシミュレーションをしています。こういった並列計算機を使うと計算が非常に早くなりますので、ニッチ理論に基づく仮定から中立モデルの予測が導けないかというシミュレーションを行っています。ある種の、完全中立ではないのですが、ほぼ中立といったような仮定のもとでは、完全中立モデルと同じ予測を与えることが分かってきました。こういう非線形の少し変わった確率過程に対して、格子モデルなどを使うと、効率的にシミュレーションができることが分かってきました。

最後に、生物はもともと違っていて、それらの間で複雑な相互作用があったとしたら、その仮定のもとでどのような分布が再現できるか、という理論を紹介したいと思います。かれこれ50-60年ほど前になりますが、熱帯雨林やサンゴ礁などの、非常にたくさんの種が共存している生物ネットワークは非常に安定で、その理由は何かというのが問題になっていました。生態学者達は、それらのネットワークでは、非常に複雑な相互作用があって、しかもたくさんの種が絡んでいるため、それゆえ、そのシステムは安定だと、特に理論的な説明も無く、観察の結果として、主張していました。ところが、先ほども紹介した、Mayという学者は、単純な、しかも線型な常微分方程式系を考えて、非常に単純化した生態系のモデルを提案しました(図13)。この x_i は*i*番目の種の個体数で、 a_{ij} は*j*番目の種が*i*番目の種に与える影響を示しています。これが正だったら食べると

か、負だったら食べられるとか、そういった意味です。行列の中身が生態系の定義になります。Mayはこれがランダム行列と仮定したらどうなるのかを調べました。この線型のシステムの安定性は、このランダム行列の最大固有値が決めるのですが、その最大固有値は完全に決定することができます。WignerのCircular Lawによると、ここで仮定したランダム行列の最大固有値はそのコネクション、行列のゼロでない要素の割合や、ランダム行列の各要素の分散、システムサイズによって記述されます(図14)。安定性はこれが非正であることが条件ですが、これが満たされないとシステムとして不安定になってしまいます。この結果は、生態学的には、システムサイズが大きかったり、コネクタンスが大きかったり、分散が大きかったりすると、システムとしては不安定になるということを示しています。これは完全にそれまでの生態学者の主張、すなわちシステムサイズが大きかったり、複雑だったりするとシステムが安定である、ということとは真逆になっています。実はいまだに、生態学者たちの間で、この矛盾をどう解決するのが議論になっています。もちろん、現実の生態系の相互作用はランダムではないので、何らかの構造があって、それが安定性に寄与していると思います。その特殊な構造を見つけることを目標にして、フィールドの生態学者も理論の生態学者も研究をしています。

Mayの理論は線型解析なので、局所安定解析に対応しています。我々は、それに対応する非線形の群集モデルに対する大域解析を行いました。ここで考えるのは、Replicator力学系と言って、ある種の、何か複製される生物的な実態が、その個体数を増やしたり減らしたりするような、非線形の常微分方程式を考えます(図15)。ここで、 x_i は*i*番目の種の個体数で、 f_i は*i*番目の種の適応度です。適応度は他の種の個体数や、相互作用によって決まります。このような関係は様々な分野で見られますので、この一般的な性質、生物社会ネットワークにおける性質、例えば種-個体数分布を明らかにすることができれば、色々な研究領域にフィードバックできると思います。このランダム行

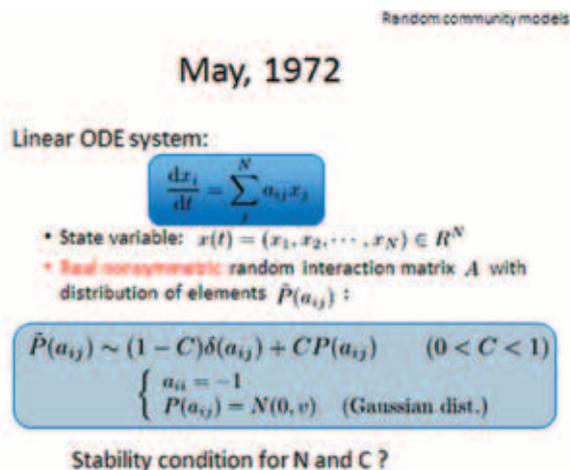


図13. 線型システムを用いた生態系モデル (ご講演資料より)

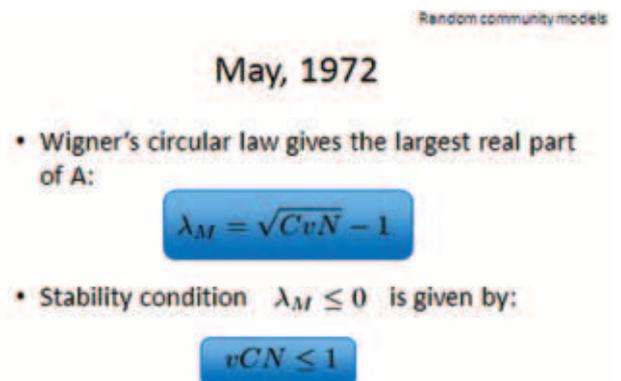


図14. Mayの生態系モデルにおける安定条件 (ご講演資料より)

列が、どういう構造を持っていたらどういう分布になるのかを分類した結果をご紹介します。我々は、このランダム行列が対称な場合と、完全反対称な場合、一般的な非対称な場合にそれぞれどういう結果になるのかを調べました。ここで大事なパラメータの一つが、種内競争の度合いを表す u です (図16)。 i 番目の種が i 番目自身に与える影響は常に競争的なものとしします。このパラメータを、種が助け合うような値にするとシステムは非常に不安定になります。もう一つが相互作用行列の対称度合いを表すパラメータ γ です。 γ が1のときは行列は対称行列で、 -1 のときは反対称行列になります。この u と γ という二つのパラメータに対して、システムがどういう振る舞いをするのかを分類しました (図17)。横軸が γ で縦軸が u です。この青色の範囲では、システムは大域的な安定平衡点を持ちます。ところが、この黒い直線を超えるとその平衡点は不安定化してしまい、さらに、この灰色の領域では、カオスやリミットサイクルといった、ありとあらゆる複雑な現象が現れます。安定な領域はアナリティックに分布を計算することができますが、不安定な領域は非常に複雑で、平衡状態に至らないため、全貌はわかっていません。

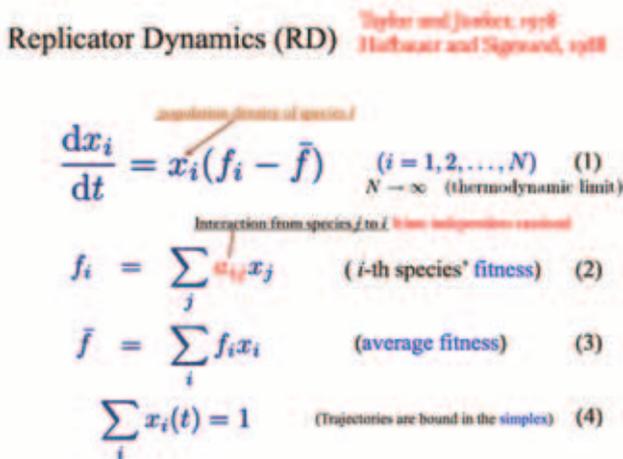


図15. Replicator力学系の支配方程式とパラメータ (ご講演資料より)

一般的には n 種のReplicator力学系に対して、母関数が計算できて、そうすると一体の方程式を導くことができます。ところが、一体化すると簡単になるかという、そうではなく、時間遅れの項や、ノイズの項などが含まれるようになってきますので、あまり得た気分にはなりません。ですが、実はパラメータの領域によっては固定点に到達するということが強く予測されたりする場合もあるので、そういったものや、並進対称な定常状態等を仮定すると、平衡状態の個体数をアナリティックに記述することができます。ただし、平均場理論と同様に、この個体数は、ある種の確率変数の関数になっていて、さらに u や γ といった外部パラメータによって表されることになります。この平均場方程式に対応するものは、これらの式で記述されます (図18)。ここでは、 u と γ は先ほど説明した外部パラメータで、それに対して3つの方程式がでできます。ここで、 q や χ 、 ϕ は、オーダーパラメータと呼ばれるもので、 u と γ の特別な組み合わせ以外では定義できません。そこで、数値的に u と γ を与えて、それらのパラメータを決めます。そうすると、何種類くらいの種が共存できるか、という関数を外部パラメータとオーダーパラメータを

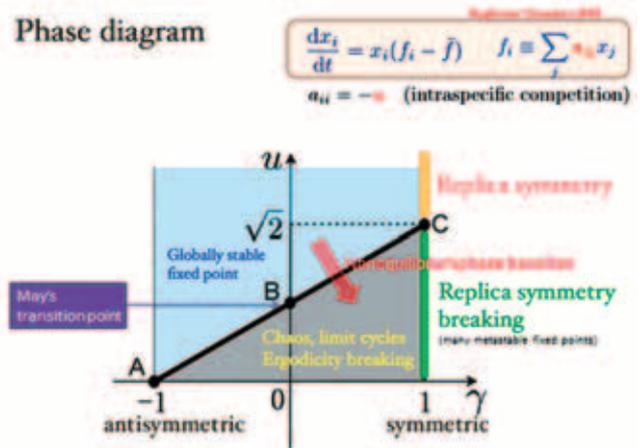


図17. 特性値によるシステムの振る舞いの分類 (ご講演資料より)

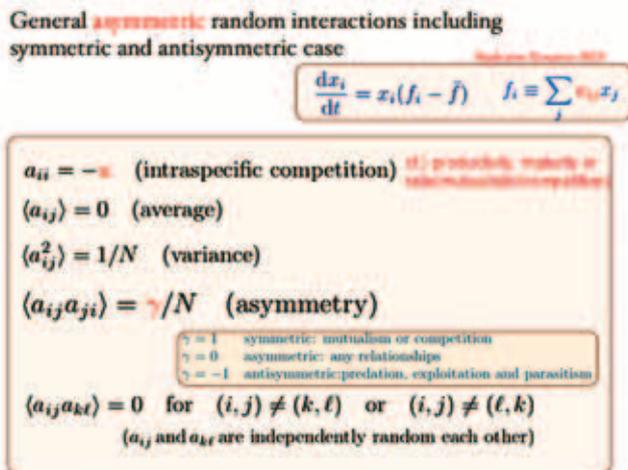


図16. ランダム行列の特性値 (ご講演資料より)

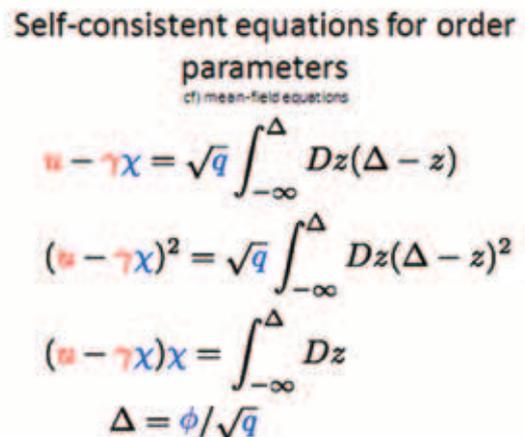


図18. 平衡状態の個体数を記述する方程式 (ご講演資料より)

使って厳密に記述することができます。これは、ある与えられた u に対して、どれくらい種が共存しているのかを描いた図です (図19)。例えば、完全対称な相互作用の場合はあまり共存できませんが、反対称の相互作用の場合は共存できるという結果が得られます。これは実際の生態系における観察と矛盾しない結果です。さらに a が求まると、その逆関数として、Rank-abundance関係を描くことができます (図20)。パラメータに応じて、さまざまな生態系で見られる sigmoidal なカーブが再現されるということが分かります。さらにそれを微分することで、どういう種が何匹ずついるのかという分布関数も外部パラメータとオーダーパラメータを用いて描くことができます (図21)。この理論の範囲内ではガウス分布になりますが、それらしい u と γ の間では、この q と κ が非常に大きな値になりますので、横軸をログスケールにして描いてみると、左にひびく対数正規分布的に見えます。

非常に単純な非線形の常微分方程式系からスタートしましたが、自然界で観察される分布は、ランダム行列を仮定した理論でも再現されるということが示されました。ここでは重要なパラメータとして、相互作用の対称性があり、それが実は共存種数や、安定性、分布の形状を決めていることが分かってきました (図22)。本日はご清聴ありがとうございました。

(文責：高橋裕己 核融合科学研究所ヘリカル研究部
 プラズマ加熱物理研究系 助教、
 総合研究大学院大学物理科学研究科
 核融合科学専攻兼任)

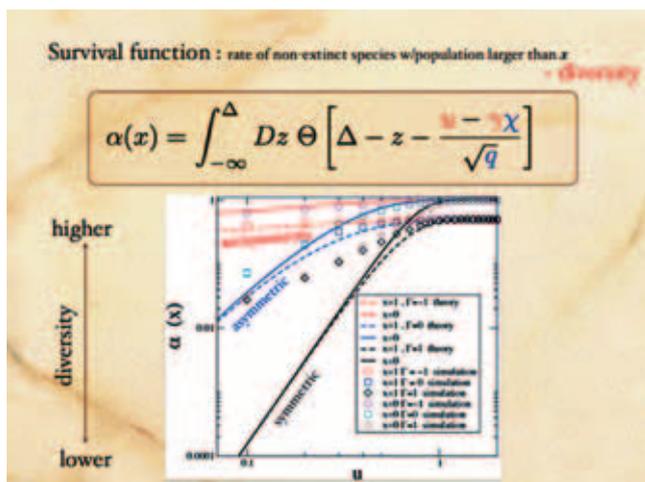


図19. 種の共存に対する外部パラメータ u の影響 (ご講演資料より)

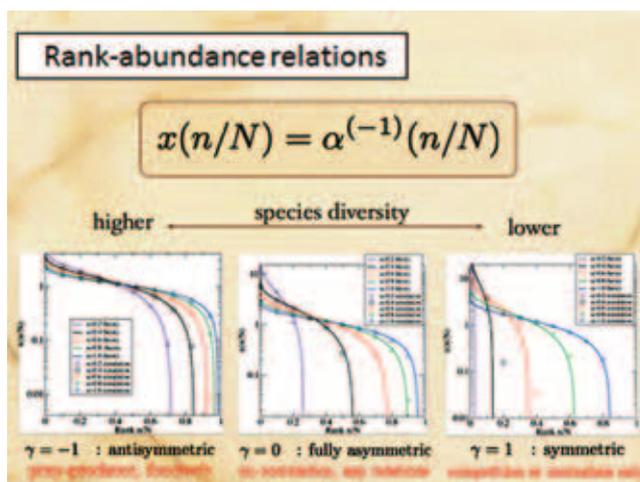


図20. Replicator力学系から得たRank-abundance関係 (ご講演資料より)

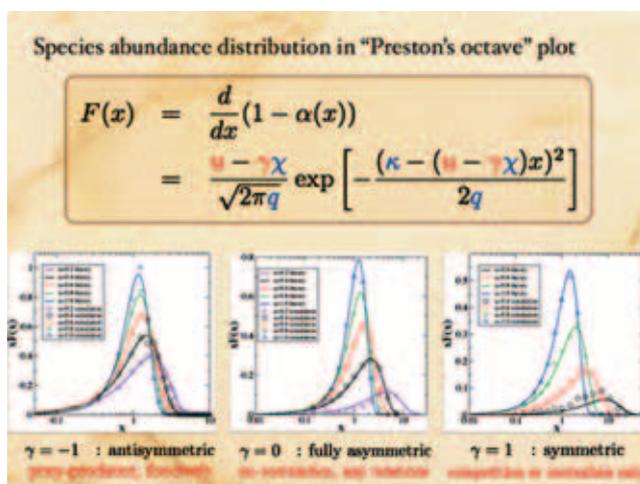


図21. Replicator力学系から得た種の分布関数 (ご講演資料より)

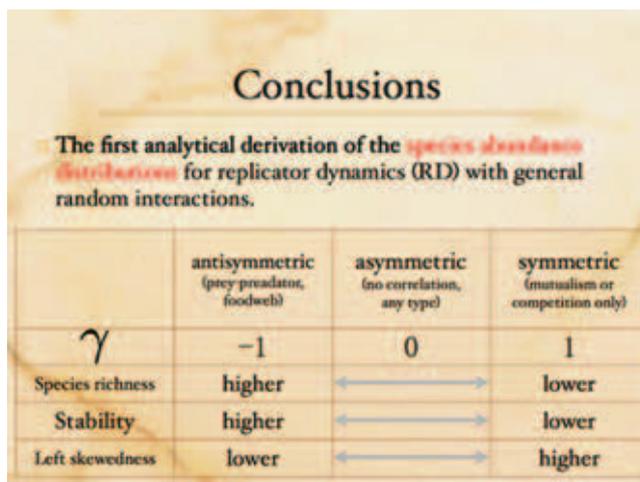


図22. Replicator力学系での種の振る舞いのまとめ (ご講演資料より)

核融合科学研究会会長の交代

核融合科学研究会では、平成28年6月に、会長の交代がございましたのでお知らせ致します。



新会長 澤岡 昭 (さわおか あきら)
役職 大同大学 学長

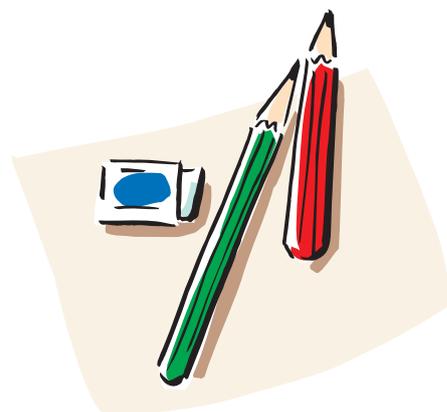
略 歴 昭和40年 北海道大学博士課程中退、大阪大学基礎工学部助手
昭和44年 東京工業大学に異動
工業材料研究所助手、助教授、教授、所長を経て
平成9年 応用セラミックス研究所所長
平成11年 大同工業大学（現：大同大学）学長
現在に至る

これまで、宇宙開発事業団（現：宇宙航空研究開発機構（JAXA））研究統括リーダーとして、スペースシャトルを利用した宇宙実験、国際宇宙ステーション計画などに参画して活躍。現在も、宇宙航空研究開発機構研究統括として、宇宙の産業利用についての推進役を担う。

前会長 鈴木 健一 (すずき けんいち)
現役職 中部電力株式会社 専務執行役員 技術開発本部長

編集後記

平素より、核融合科学研究会の活動に格別のご高配を賜りまして、誠にありがとうございます。平成28年度の会費納入につきましても、お取り計らい下さいまして、深く感謝申し上げます。新会長、新運営委員長の下、平成28年度総会でご承認いただきました事業内容を展開して参ります。今後とも、当研究会ならびに核融合科学研究所へのますますのご理解・ご支援を賜りますよう、よろしく申し上げます。



核融合科学研究会ニュース
第58号（2016年9月）

融 會

編集・発行

特定非営利活動法人核融合科学研究会

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6 TEL 0572-58-0622/FAX 0572-58-0626

E-mail: yu-kwai@tcp-ip.or.jp URL: <http://www.nifs.ac.jp/yu-kwai/index.html>

（融會バックナンバーも掲載しております。是非ともご高覧下さい。）