

連載 理学のキーワード 第7回



「基本再生産数」

稲葉 寿 (数学科 准教授)

1人の女性が生まれてから各歳まで生き延びる確率(生残率)とその年齢における年齢別女兒出生率の積を全年齢について総和したものが人口の「基本再生産数」(basic reproduction number)である。これは1人の女性が生涯にもつ女兒数の期待値であり、人口学や疫学では R_0 と表される。これを約2.08倍すると男女込みの平均出生児数が得られるが、それが少子高齢化の議論で紙上に頻出する合計特殊出生率(TFR)である。

与えられた出生率と死亡率のもとでは、基本再生産数は母親世代とその娘世代の総数比に等しく、 R_0 が1より大きければ、人口は世代単位でみて拡大再生産されるが、1より小さければ縮小再生産される。人口は異なる年に生まれた多数の世代の集合であるから、世代単位でみた再生産の動きとただちに同じように運動するわけではないが、長期的にみれば、 $R_0 > 1$ であれば、人口は増加するし、 $R_0 < 1$ で

あれば人口減少がおきる。すなわち、基本再生産数が1となる出生と死亡の水準が、人口の長期的な増減をきめる臨界的な条件になっている。少子化が心配される日本人口の2005年の R_0 は0.61で、これは母親世代の人口の6割程度の数の娘しか生まれてこないことを意味している。等比級数の公式を用いればすぐにわかるように、このような縮小再生産が将来も続くとする、未来永劫までに生まれてくる女性子孫の総数は、初期の女性人口の総娘数の $1/(1-0.61) = 2.56$ 倍でしかない。

基本再生産数は人口学で生まれた概念であるが、感染症疫学でもキーとなる基本的概念である。ちょうど子供の再生産と同じように、感染症では、1人の感染者が感受性人口に侵入したときに、その全感染性期間において再生産する2次感染者の平均数を基本再生産数と定義している。このときも $R_0 > 1$ なら流行の拡

大がおこるが、 $R_0 < 1$ ならば流行は自然消滅する。そこで感染症根絶のためには、 $R_0 < 1$ となるようにワクチン接種や隔離をおこなわなければならないことがわかる。たとえば麻疹などのように R_0 が10をこえる感染症では、90パーセント以上の人口にワクチンを接種して免疫化しないと根絶できないことが示される。 R_0 は感染症の侵入の条件を与えるが、ある感染症が風土病化して定着するかどうか、というような長期的な動態をしばしば決定している。感染症のダイナミクスを数理モデルを使って理解して予測や予防・制圧に役立てることが、数理疫学の役割である。

数理科学研究科の稲葉研究室では、人口学や疫学の数理モデルの研究をおこなうとともに、理学部学部教育特別プログラムのひとつであるアクチュアリー・統計プログラムにおいて、人口学の講義を開講している。



「共生」

川口 正代司 (生物科学専攻 准教授)

共生とは、相互に利益を与えあいながら共に生きていく現象である。それが成しえた象徴として私は「花」をよく思う。「花」は植物と昆虫や鳥などの長い相互作用の歴史が導いた美しく安定した器官である。どのように共生的かといえば、植物は昆虫や鳥などに花粉や蜜を提供するのに対し、これらの動物はその高い移動能力を利用して植物の花粉媒介を助けているからである。「花」は実に多様な形や香りを持ち、色彩も豊かであるが、それらはどれも昆虫や鳥などの多様な相互作用と深い関わりをもっている。

しかし生物間の相互作用はもちろん美しいものばかりでない。植物と微生物の相互作用を例にとっても、ウイルスや菌類など病原性のものが圧倒的に多く、共生菌はごく一部の種に限られる。また一般に共生菌と言われるものの中にも、病

原菌的な振る舞いをするものもある。

視点をわれわれの世界に転じてみれば、人間は大自然の動植物にしる、民族間にしる、これまでにどれほど多くの破壊や悲劇をもたらしてきたことか。それは今日も決して終わることなく、複雑化する世界の中でますます拡大しているように見える。だから昨今、共生という語は生物間の相互作用のみならず、自然との共生、社会との共生、アジアとの共生など、いたるところで使われるようになった。もし共生を深く理解し、それを導く何かを見つめることができたならば、私たちの未来はもっと良くなるのかもしれない。しかしどうか誤解しないでほしい。私がここで言いたいのは、共生の思想とか理念ということではなくて、共生をサイエンスとして理解することの重要性である。もう少し具体的に言えば、「生物間の相

互作用が、生物に潜むどのような可塑性を導き出し、それによって両者はどのように相互依存の関係へと発展していくか」を解明することである。あるいは「ゆるぎ生物の相利関係を安定化させるものがあるとするれば、それは何か」を見つけることである。

「花」の多様性の進化には、昆虫や鳥などの相互作用が欠かせないが、同時に植物のもつ発生や代謝レベルの可塑性も欠かせない。

生物の可塑性を踏まえて共生の仕組みを解き明かすことは、今世紀の人類に課せられた主要なテーマの一つと捉えている。理学系研究科では、生物科学専攻の森岡瑞枝助教がアブラムシと細胞内微生物の共生を、川口がミヤコグサを用いて根粒菌や菌根菌との共生の研究を行っている。



「オーロラ」

岩上 直幹 (地球惑星科学専攻 准教授)

オーロラは南北極域の電離圏 (高度 100 ~ 300 km, 地磁気緯度 65 度付近) に現れる発光現象であり, おそらくもっとも衝撃を感じる自然現象のひとつであろう。運良く激しいオーロラに出会えば, 腰の抜けるような感動を味わうことができる。しかし, いまにその生成過程には多くの謎が残されている。たとえば, 「オーロラ粒子はいかにして加速されるか?」, あるいは「なぜ薄いカーテン状でヒラヒラ動くのか?」など。

オーロラの発光は, 磁気圏 (太陽風中における地球磁場の勢力範囲, 彗星の頭部のような吹流し構造) から降ってくる高速の電子・陽子によって, 大気分子・原子が励起されることによる。エネルギーの源は太陽風にあるはずだが, 太陽風粒子が直接入ってくるのではなく, それらは磁気圏尾部 (反太陽方向に吹き流された部分) に一度貯められ, しかも加速されて降ってくる。オーロラ粒子の運動エネルギーは 1 ~ 10 keV 程度あるのに対し, 太陽風粒子の

それは 0.1 ~ 0.3 keV しかない。加速機構はプラズマの波とオーロラ粒子の相互作用あたりにあるのだろうが, いまだに決着していない。生成過程の説明として, しばしばテレビのブラウン管が引き合いに出される。そこでは電子銃で発生させた電子ビームを偏向板で操作し, 蛍光面に当てて発光させる。オーロラでは磁気圏尾部が電子銃に, 磁気圏磁場・電場が偏向板に, 大気が蛍光面に対応する。

通常, 見られるオーロラにも 2 種類ある。ひとつは毎晩同じように現れる定常成分であり, もうひとつは不定期に出現する爆発成分である。オーロラを見に行くからには爆発をみたいが, これは毎晩あるとは限らず, しかも見どころは 10 分間しかない。定常成分は太陽風が地球の双極型磁場に当たって生じる朝方から夕方向きの誘導起電力が, 磁力線を通じて電離圏でショートしていると解釈できる。いっぽう爆発成分は, 磁気圏尾部に磁場の形で蓄えられていた太陽風

のエネルギーが, パチンコのゴムを放した時のように解放される現象と考えられる。多くは夜半頃, それまで静かだった定常オーロラに不穏な動きが始まり, あれよあれよという間に全天を覆い尽くし, 10 分後には衰退を始め, 数時間後に基底状態に戻る。この爆発過程も衛星による観測で理解は進んでいるが, 予報までには至っていない。理学系研究科では地球惑星科学専攻の宇宙惑星科学講座に関連する研究を行っている。



昭和基地でみられた珍しい赤いカーテン状オーロラ。国立極地研究所准教授・田口真博士撮影



「スーパークリーン物質」

福山 寛 (物理学専攻 教授)

「最近, 物性物理のほうで『スーパークリーン物質』って言葉を耳にするけど, それって何?」「たぶん不純物が極端に少ない超純粋物質のことじゃない?」おおよそ正解である。例として液体ヘリウムをみてみよう。極低温では大きな量子効果のためにヘリウムだけが液体状態にとどまり, うまい具合に自動精製する。これをスペースシャトルで無重力環境に打ち上げると, 超流動転移温度 (約 2 K) に何と 9 桁もの精度で (温度差 2 nK 以内に) 肉薄して比熱のラムダ発散が測定できる。相転移の理論をこんな桁外れの精度で検証できる物質は他にない。レーザー冷却された希薄原子気体もその仲間だ。レーザー一周波数を原子固有の状態遷移に同調させるので, 狙った原子種以外は冷却・捕獲されない。そしてやはり超低温で超流動

状態になる。超流体を回転させると, 流れの循環が量子化された「量子渦」が発生する。量子渦の生成・消滅・もつれなどのダイナミクスは, 不純物ピニングのないスーパークリーン超流体でしか調べようがない。これらはビッグバン以後の真空の相転移や流体力学の乱流などのモデル系として盛んに研究されている。ビッグバンを何度も起こして実験できるようなものである。

ただし, この用語のきちんとした定義は「空間次元, 幾何学構造, 粒子相関を制御して低温極限で新奇な量子相や量子相転移が発現する系」と小難しい (発案した私もそう思う)。たとえば, パラメータをうまく制御して絶対零度付近で原子集団や物質中の電子が局在しかかっていると。そこは相互作用の競合やフラストレーション

が生む新奇な量子相の宝庫なのだが, 系にわずかな乱れがあると見慣れた状態へ簡単に移ってしまう。しかし, 系が十分にクリーンなとき, 一見何の関係もなさそうな有機化合物と 2 次元ヘリウムで「ギャップレス量子スピン液体」という共通のエキゾチック磁性が姿を現す。

物質の多様性を超えてそれらの背後に共通する物理の新概念を探る「スーパークリーン物質」研究は, 新世代の物性物理学の重要なキーワードである。本研究科では筆者の他に, 物理学専攻の岡本徹准教授のグループが実験的に, 小形正男准教授や宮下精工教授のグループが理論的に研究しており, また物性研究所の久保田実准教授 (協力講座教員として本研究科物理学専攻を担当) も実験的な研究を行なっている。



「日震学」

柴橋 博資 (天文学専攻 教授)

星の研究は、天文学の基本である。が、望遠鏡で星の観測をしても、星の内部を見る事はできない。20世紀前半を代表する天文学者のエディントンは、「一体、どんな装置で星の中を調べられるというのか？」と反語的に書いている。彼の用意した答えは、「理論」だったわけだが、それから四分の三世紀を経た今日の私たちは、「星の振動を使って、目では見えないはずの星の内部を見る」という答えを探し出した。

星の振動というのは、古くから、明るさが周期的に変化する変光星として知られていた。この変光の仕組みは、エンジンや熱機関と似ている。今、星を収縮させたとする。すると普通の星の場合には、温度が上がって、星から外界への光の放射が増えてしまい、それによるエネルギー損失のために収縮が転じて膨張に転じても元に戻りきらず、振動が長続き

することはない。ところが、収縮の際に温度が上がっても放射を外に逃がさずに貯めておき、膨張に転ずる時にそれを吐き出すエンジンのような仕掛けがあれば、星は自立的に振動しだすわけだ。こういった仕組みは、特定の大気温度の星でしか起こらない。それら特定の星というのが古典的変光星なわけである。

太陽は、変光星ではないが、別の仕組みで振動が起きていることがわかってきた。望遠鏡で見ると、太陽表面は粒状斑というブツブツな斑だらけだが、これは太陽表面では、エネルギーを運ぶために乱対流が起きていることを示している。ロケットエンジンから轟音が発生するように、乱流は音波を発生させる。音波が太陽表面の至る所で常時、発生し、それらが太陽全体を伝播し回っているのである。そのために、太陽表面を良く観察すると、乱流以外にも規則的な波動が観測されることがわ

かってきた。太陽は他の星とは違って二次元的な像を見る事ができるので、その振動を太陽上の場所と時間の関数として観測する事ができる。それを解析してやれば、振動を太陽の固有振動モードに分解することができる。これは地球の地震波を解析して地球の固有振動モードを得るのと同じであるが、その上にわれわれ自身が乗っているために全景を細かく捉えられない地球の場合とは違って、太陽の場合是一目瞭然に太陽全体の振動が捉えることができるために、遠方であるにもかかわらず得られる情報はきわめて多く、太陽の内部構造を「見る」ことができるようになったのである(本誌2007年1月号13ページおよび裏表紙を参照)。

こういった手段を使った太陽内部の研究は「日震学」と呼ばれ、いまや目覚ましい進展を遂げている。理学系研究科では、柴橋のグループが関連する研究を行っている。



「MALDI MS」

山垣 亮 (化学専攻 助教)

マトリックス支援レーザー脱離イオン化質量分析(MALDI MS)は、レーザー光を吸収する有機低分子(マトリックス)と試料(タンパク質など)とを混ぜて混晶を作り、パルス状のレーザーを照射することで試料のイオン化を行う手法である。マトリックス分子がレーザーで急速に加熱されて固体表面で爆発・気化およびイオン化が起こる。その際、タンパク質分子は直接イオン化されるわけではなく、マトリックスと共に爆発雲の中に放出され、その中で励起状態のマトリックスイオンとプロトンや電子の授受を行いイオン化が達成される。レーザーを用いたイオン化(レーザー脱着法)は以前から知られていたが、直接タンパク質をイオン化しようとする、バラバラに壊れてしまうのが問題だった。ソフトなイオン化を達成するために、株式会社島津製作所の田中耕一氏は表面積の大きいコ

バルト微粉末をタンパク質と混ぜ、レーザーで急速に加熱することで間接的にタンパク質のイオン化を試みた。そこへグリセロールを(誤って?)添加するときわめて良好にタンパク質をイオン化できることを発見し、2002年ノーベル化学賞を受賞した。

現在、有機低分子をマトリックスとするMALDI MSがおもに利用されているが、この手法はヒレンカンプ(Hillenkamp)教授が田中氏と同時期に開発した手法であり、彼は残念ながらノーベル賞を受賞していない。彼らは世界的に知られるドイツのグループで、1985年にはすでにレーザー脱着法でトリプトファンなどUV吸収をもつ有機低分子が他の有機物のイオン化を支援する事に気がついており、「マトリックス」という概念ももっていた。しかしタンパク質のイオン化に成功したのは田中氏の

方が早く、その当時はそれほど大きなタンパク質を実際にイオン化して飛ばすことは不可能だと考えられていた。田中氏らの発表を知ったヒレンカンプ教授らは、自分たちのアイディアがタンパク質のイオン化へも応用できると確信し、実証した。その後MALDI法はタンパク質の解析に必須の手段となり、現在ではプロテオーム解析など生命科学へ幅広く応用されている。

ヒレンカンプ教授らは科学の常識を充分に知っていたが、その枠を飛び越えることができなかったのではないかと思う。一見、非常識に見える研究も案外科学を飛躍させることがある。今、2人の研究者の胸内は計り知れないが、科学の進歩の陰に人間同士のせめぎあいを垣間見ることができる。