

モデル方程式に現れる 空間非一様性の解析



池田幸太 IKEDA Kota

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学大学院先端数理科学研究科特任講師

専門・学位： 数学，博士（理学）・東北大学

研究内容： 反応拡散方程式，パターン形成問題の数理的解析

研究概要

（１）ギーラー・マインハルト方程式のシャドウ系におけるスポットパターンの形成過程の解析

スポットパターンを生成する方程式として知られるギーラー・マインハルト系に対して、シャドウ系を考える。この系はチューリング不安定性に類似した性質を持つため、複数の不安定モードを持つ。これは多数のスポットパターンが形成され得ることを意味しているが、最終的にはスポットが１つだけ現れる空間パターンしか現れない。本研究では、複数個のスポットパターンが成長し、やがて１つのスポットに収束する過程を扱った。スポットの振幅だけを未知関数に持つ常微分方程式を、偏微分方程式から形式的に導出し、解析を行った。スポットがちょうど２つ存在し、その振幅が異なる場合、最終的には１つのスポットを持つ空間パターンに収束することが証明できた。また、全ての平衡点の線形安定性解析を実行し、Hopf 分岐点をパラメータで表示することに成功した。

（２）南極淡水湖沼に見られるコケ-藻類群集の空間分布

南極淡水湖沼に見られるコケ-藻類群集、いわゆる「コケ坊主」が存在する地帯を俯瞰すると、同一の湖沼であっても、コケ坊主が林立する深さによって大きさや等間隔性が異なる。本研究では、数理モデルを用いてコケ坊主の空間的な配置と湖沼の深さの関係性を明らかにし、コケ坊主が等間隔に並ぶ要因を模索した。コケ坊主の出現率と影の影響を考慮し数値解析を行った結果、影の影響が小さい場合、新たなコケ坊主が出現する確率が高いと等間隔になりやすく、影の影響が大きい場合、出現率が高いと等間隔性が失われることが示唆された。コケ坊主は蘚類と藻類が複数種混在することで形成されており、これらの種の競争関係と強光の成長阻害の違いが観測されている。等間隔性を決定する要因として掲げたコケ坊主の出現率は、複数種の成長戦略と湖沼の深さの関係から決められると考えている。したがって、種の成長戦略を明らかにすることで、等間隔性を説明できるであろう。

生物・無生物の 集団が形成する秩序パターン



末松 J. 信彦 SUEMATSU J. Nobuhiko

所属・役職：先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学大学院先端数理科学研究科特任講師

専門・学位：物理化学，博士（理学）・筑波大学

研究内容：微生物の集団運動による巨視的な時空間パターン，無生物系自律運動粒子の集団運動，神経軸索の結合系における確率共鳴

研究概要

アリの行列や魚の群れ，渡り鳥の隊列など，生物では集団運動による時空間パターンの形成が認められます。これらの集団パターンは遺伝子にプログラムされているわけでも，個体の運動特性が複雑なわけでもありません。単純な個体の運動特性から集団の秩序構造が生まれる機構の解明は，生命現象を理解する一つの有効な手段です。本研究では，単体の挙動が比較的単純な，微生物や自発的に運動する無生物さらには化学反応波を対象として，それらの集団運動を観察し，発現される時空間パターンの形成機構の解明を試んでいます。

ミドリムシという微生物は光に対して応答します。強い光を照射すると，光源を避ける方向に遊泳する「負の走光性」を示します。この微生物の培養液を密閉した薄い容器に閉じ込めて，下から強い光を照射すると，細胞密度の高い領域がスポット状に形成されます。この細胞密度の時空間パターンは対流により形成されています。重要なのは，この対流パターンが局所的に形成されるということです。この局在化がどのような機構で引き起こされるのかを明らかにするために，対流パターンの光強度依存性について調べています。その結果，光強度が高くなると空間周期が短くなることが分かりました（図1）。これらの結果を数理モデルと比較し，局在化の機構解明を進めています。

無生物系では，水面を自発的に滑走する樟脳船に着目しています。既に，樟脳船を1次元水路に多数浮かべると，交通流に類似した挙動が確認できる事，および塊で滑走するクラスターモードを実験的に確認し，前者については数理モデルで理論的な解析を行っておりました。今年度は，後者のクラスターモードについて，広島大学の西森拓教授とその大学院生と共同で数理的な解析を進めました。現在は，その結果を受けて実験でクラスターモードが現れる条件を探索しています。さらに，2次元に拡張し，樟脳粒の集団が運動と停止を繰り返す集団間欠運動を観察しました（図2）。この現象はつまり，単体では現れなかった時間的秩序が集団で発現された集団運動となります。

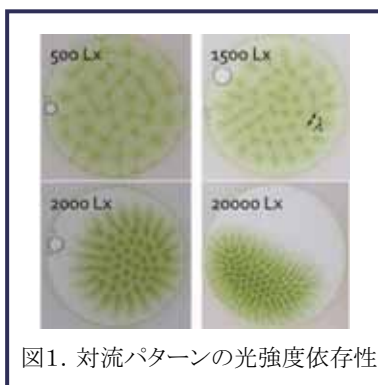


図1. 対流パターンの光強度依存性

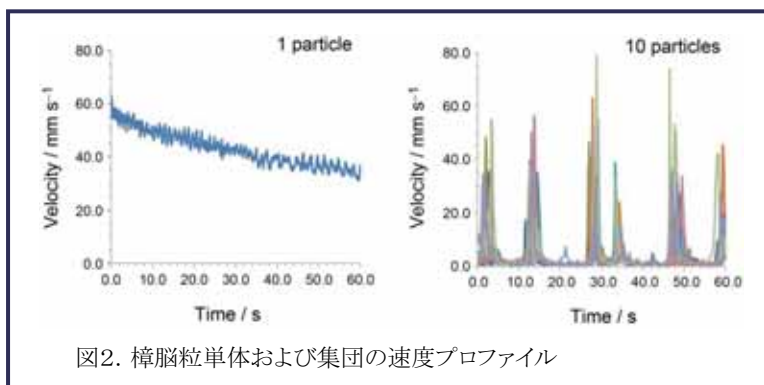


図2. 樟脳粒単体および集団の速度プロファイル

非線形時系列解析手法の適用による 工学・経済データ解析



中村和幸 NAKAMURA Kazuyuki

所属・役職：先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学大学院先端数理科学研究科特任講師

専門・学位：統計科学，博士（学術）・総合研究大学院大学

研究内容：時系列，時空間データの統計的モデリングと解析，
地球物理学・地盤工学・生命科学におけるデータ同化

研究概要

本年度は、粒子フィルタとそれに基づくデータ同化の具体的な応用，ならびに経済時系列解析を中心に研究を進めた。

データ同化とは、実際の現象を模倣する計算機シミュレーションと、現実を観測されたデータを統合して新たな知見を獲得し、また実現象の予測精度を向上する手法である。近年の情報通信技術と計算技術の発達に伴って、幅広い分野で応用されるようになってきている。

本年度も昨年度に引き続き、粒子フィルタによるデータ同化について研究を進めた。非線形時系列解析手法である粒子フィルタは、データ同化適用における有力な手法の一つである。しかし、多量の計算機資源を必要とするために、例は増えてきているものの未だ十分ではない。本年度は、地盤工学データ同化と経済物理学モデルデータ同化への適用についてさらに研究を進めた。

地盤工学データ同化については、地盤データ解析の研究を京都大学・岡山大学の研究者と前年度に引き続き進めた。特に、これまで進めてきた SIS 法による弾塑性地盤変形データ同化について網羅的な解析を行い、その有効性・適用性を予測性能とパラメータ推定の両面で確認した。研究成果は共著論文として投稿中である。

経済物理学モデルである PUCK モデルについては、前年度に引き続き、粒子フィルタによるポテンシャル中心と状態の直接推定アルゴリズムについて研究を進めた。加えて、市場状態に適した分布の構成と粒子フィルタを組み合わせることで、高速に市場の状態を推定するアルゴリズムを、東工大高安准教授ならびに由良嘉啓氏とともに新たに開発した。当該手法については共同で特許出願するとともに、高安秀樹客員教授も加わって論文文化を進め投稿した。

経済時系列解析については、中国元の為替時系列ならびに BRICs 諸国の株価時系列に対して KM_2O -ランジュヴァン方程式論方程式論に基づく解析を行った。手法面では、2種類の新しい解析手法を大学院生とともに開発した。一つめは、ダイナミクス解析の結果をクラスタリングすることで、類似時系列間のダイナミクスの違いを発見する手法であり、もう一つは、因果解析とトレンドモデルを用いた分離を組み合わせることで、長期スケールの因果性と短期スケールの因果性に分離する手法である。前者を中国元の対各国時系列に適用することで、香港ドルに対する挙動の違いを明らかにした。さらに、中国の地価政策による影響の示唆も得た。後者は資源価格と BRICs 諸国の間の因果解析に用いられ、諸国間で影響の強さだけでなく、時間スケールの違いがあることも明らかにした。

閾値ダイナミクスを用いた、 ダイナミクスを特徴づける 遺伝子ネットワーク構造の解析



木下修一 KINOSHITA Shu-ichi

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（共同研究員）
GCOE-現象数理 SPD

専門・学位： 数理生命科学，博士（理学）・新潟大学

研究内容： 遺伝子ネットワークと遺伝子発現パターンの関係，
遺伝子ネットワークの進化

研究概要

近年、発生や細胞の機能解明の観点から遺伝子ネットワーク構造と遺伝子発現の関係を明らかにする研究が数多く行われている。その中でも本研究では現象数理学の1つの特徴でもある単純なモデルを用い遺伝子ネットワーク構造と遺伝子発現の関係を明らかにする事を目指し、特に遺伝子発現に影響を与える遺伝子ネットワークの役割を明らかにした。本研究では昨年度(2010年度)に引き続き、E.Coli(k-12)の遺伝子データベース(RegulonDB version6.0 <http://regulondb.ccg.unam.mx/>)から抽出した遺伝子制御ネットワーク(GRNs)を用い、遺伝子発現ダイナミクスとしてはF.Li等(*Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 4782 (2004))が提案した閾値ダイナミクスを採用した。F.Li等はYeast菌の細胞周期を制御する遺伝子ネットワークを用い、上記の閾値ダイナミクス解析からアトラクター数、basinの大きさ、basinの構造等を調べる事で、細胞周期がノイズに対してロバストであることを明らかにしている。閾値ダイナミクスにおいて、ある遺伝子が他の遺伝子に与える影響は総和的に扱われ、比較的大きなサイズのネットワークを用いても計算コストが大きくなり過ぎないという利点がある。これまで、我々はランダムブーリアンダイナミクス(RBD)を用い人工的なネットワーク(スケールフリーネットワーク)上、及びE.Coliの遺伝子ネットワーク上でのアトラクター解析を行っている。そこで、培った研究手法を用い、閾値ダイナミクスとRBDのアトラクターの特徴、特にコアネットワークの推定を行った。

E.Coliの遺伝子ネットワーク上で閾値ダイナミクスを実行し1000個の初期サンプルを取りアトラクターを調べた結果、RBDのアトラクターと異なり閾値ダイナミクスでは初期値サンプル程度のアトラクターがみつかった。この事はコアネットワークの推定がRBDと閾値ダイナミクスでは大きく異なる事を意味する。さらに、アトラクターの特徴を詳しく調べるために、全てのアトラクターサンプルにおいてある一定の値を取り続ける固定ノードを見つけ、固定ノード以外のノードの状態を変化させる事でアトラクターのbasinの大きさを測る直す。これはアトラクターを構成するノードの中でアトラクターの性質に関わるコアネットワークを明らかにする事に繋がる。その結果、固定ノード以外のノードはbasinの大きさを大きく変化させることが分かった。この結果から、固定ノード以外のノードはアトラクターにとって重要な役割を演じている事が明らかになった。

上記の手法を用いて、遺伝子ネットワーク構造を小さくしコアネットワークを見出す事で状態空間を圧縮し遺伝子ネットワーク上でのアトラクターの特徴を明らかにする事を今後の課題とする。特に生物学的に重要な意味を持つと考えられる大きなBasinをもつアトラクターを引き出し、その力学的特徴を捉える研究へと進展する事を目指す。

私はこれまで人工的なネットワークを調べ、ネットワーク構造の違いがアトラクターの特徴の違いをもたらす事を明らかにした。さらに、このアトラクターの特徴の違いがICLと呼ばれるコアネットワークに現れる事を明らかにした。そこで、これらの知見を生かし、現実の遺伝子データベースからネットワーク構造を取り出し、単純なモデルを幾つか用いそれぞれのダイナミクスにとって重要なネットワーク構造(コアネットワーク)を取り出す。そして、それらのコアネットワークを比較しモデルの詳細に関わらず重要なネットワーク構造を見つけ出す。私は既に大腸菌の遺伝子制御系のデータベースであるRegulonDB(ver.6.0)を用い遺伝子ネットワークを取り出し、ネットワーク構造解析、ランダムブーリアンダイナミクス(RBD)に基づくアトラクター解析、コアネットワークの抽出を行っている。この研究をさらに進め、RBD以外に閾値ダイナミクスや連続値モデルを用いアトラクターの解析を進め、コアネットワークの抽出を試みる。さらに、これらのコアネットワークが実際の細胞にとって重要なものであるか否かについて現実の細胞との対応も考察する。

上記の目的に従い、E.Coliの遺伝子ネットワーク上で閾値ダイナミクスを実行した。1000個の初期サンプルを取りアトラクターを調べた結果、Booleanダイナミクスのアトラクターと異なり閾値ダイナミクスでは初期値サンプル程度のアトラクターがみつかった。この事はコアネットワークの推定がBooleanダイナミクスと閾値ダイナミクスでは大きく異なる事を意味している。そこで、アトラクターの特徴を詳しく調べるために全てのアトラクターサンプルにおいて共通してある一定の値を取り続ける、固定ノードを見つけ固定ノード以外のノードの状態を変化させアトラクターのベシンの大きさを測る。これは、圧縮されたE.Coliの遺伝子ネットワークの全状態空間ですら、 $N=2^{35}$ の状態数があると言う事から確実に必要となる手段である。状態空間を絞って遺伝子ネットワーク上に存在するアトラクターの特徴を調べる事で、大きなBasinをもつアトラクターを引き出し、その力学的特徴を捉える研究へと進展する事が出来る。さらに一定の成果が出た際には生物学者とそのアトラクターの意味付けについて議論する事へとつながる。

制約された形質からの適応 ：陸生巻貝の殻形態



岡 薦 亮 子 OKAJIMA Ryoko

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 数理生物学，博士（生命科学）・東北大学

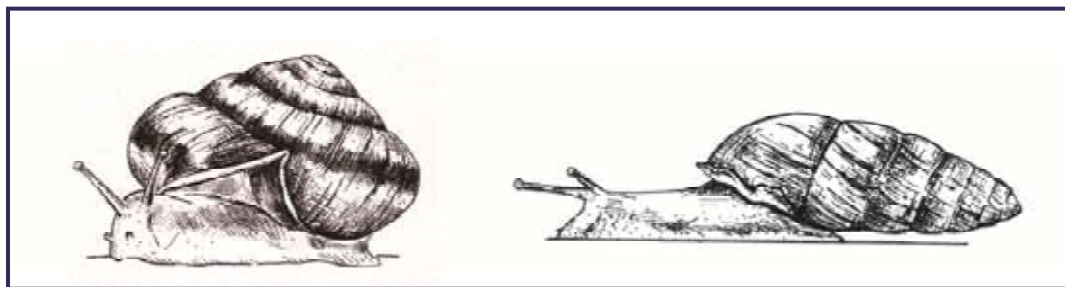
研究内容： 数理生物学，理論形態学，バイオメカニクス

研究概要

生物の形態は、その機能や制約といった要因の中で、どのように決定されるのだろうか。この問題に迫るため、陸生巻貝の殻形態：殻の傾きに焦点をあてて研究を行った。陸生巻貝の殻形態は、それぞれの生育環境におけるバランスによく適応していることが示されてきた。更に、巻殻の形成様式から生ずる幾何学的制約も、殻のアウトラインに影響していることが明らかとなっている。制約と機能的要請がどのように絡み合い、その中で、生物形態がどのように実現されているのかという問題は、進化学や古生物学の分野などで様々な議論が成されてきた。しかし、実際の生物において制約と適応をそれぞれ定量化し、比較するような試みはほとんど成されてこなかった。また、殻の傾きは、陸生巻貝ではバランスを、水生巻貝では流体抵抗などを左右するような非常に重要な要素であるにもかかわらず、研究がほとんど成されていない。

そこで、陸生巻貝の殻の傾きには、幾何学的に制約された形状から、バランスに適応的となるような補正をすることで陸上環境に適応してきたという作業仮説をたて、これを検証した。まず、Okamoto モデルを用いて、一定のルールで成長するような基本的な形態の巻殻を理論的に描き、その傾きを計測した。次に、各形状の殻にとってバランスが最適となるような傾きを、物理モデルによって推定した。この結果、巻殻が幾何学的に取りやすい傾き(制約)は、バランスへの適応値(機能的要請)と逆の傾向をもつことが分かった。

では、実際の貝は制約によって、バランスの悪い角度に殻を傾けて移動しているのだろうか。それとも、何らかの補正によって、バランスに適した角度で殻を運んでいるのだろうか。この問題を検証するため、貝殻の形態計測と、陸生巻貝の行動観察を行った。その結果、貝はその殻の最後の一巻きにおいて、バランスに適した向きに近づくような振り(殻形成における補正)をもつこと、更に移動中には、軟体部によって殻がバランスに適した向きに傾くこと(行動による補正)が明らかとなった。本研究の結果により、制約から適応的な形質へと近づけるような補正が、実際の生物の発生過程や行動において、初めて定量的に検出された。



構造化生態系モデルの研究



今 隆助 KON Ryusuke

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 数理生物学，博士（理学）・静岡大学

研究内容： 数理生物学，力学系理論の応用

研究概要

Lotka-Volterra 方程式や Kolmogorov 方程式のような、いわゆる古典的な生態系モデルでは、各生物種の種内構造が無視されている。つまり、各生物種の空間分布や年齢分布などは無視されており、同一種の個体群は均一の個体によって構成されていると仮定されている。この仮定は、容易に分かるように、多くの生物に対して当てはまらない。例えば昆虫であれば、同一種の個体でも、成虫は繁殖するが卵、幼虫、蛹は繁殖しないためである。これまで生物の個体数変動のパターンを説明するために研究されてきた生態系モデルの多くは、種内構造を無視している。そのため、種内構造が個体数変動に決定的な影響を及ぼす場合には現象の本質を捉えることが出来ない。そこで、現在、種内構造を考慮した生態系モデル(以下では、構造化生態系モデルと呼ぶ)を構築し、その特徴を研究している。

種内構造の中でも、Semelparous と呼ばれる年齢構造を仮定したとき、構造化生態系モデルは Lotka-Volterra 方程式によって近似することができる。そこで、この近似によって登場する Lotka-Volterra 方程式のダイナミクスを分類することにより、種内構造が生態系の安定性に与える影響を調べた。種内構造と種間構造を独立に扱った従来の研究から、構造化生態系モデルが不安定化する2つの要因は明らかである。1つは種間相互作用によって起こる不安定化、そしてもう一つは種内相互作用によって起こる不安定化である。今回、Lotka-Volterra 方程式を用いた解析により、構造化生態系モデルを不安定化させる3つ目の要因が明らかになった。この不安定化は、2種間の生活史の長さが調和的などきにだけ起こり、種間相互作用と種内相互作用を別々に見ていたのでは分からない現象である。

また、この3つ目の不安定化が起こるための必要条件を調べた。この条件は Lotka-Volterra 方程式の研究成果を用いることにより、一般的な形で得ることができた。具体的には、各生物種の生活史の長さが互いに素であれば、第三の不安定化は起こらないという結果である。現在は、不安定化が起こるための十分条件を調べている。また、構造化生態系モデルの研究で得た一般的な結果を応用し、アメリカ東部に生息する周期ゼミの具体的な問題の解決を目指している。これまでの研究から、周期ゼミの周期的な大発生を引き起こす新しいメカニズムが明らかとなった。

以上の研究成果は、8th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology, 第21回数理生物学会大会, 日本数学会 2011 年度秋季総合分科会, 第8回「生物数学の理論とその応用」, 第43回種生物学シンポジウムなどで発表した。また、学術雑誌への投稿は現在準備中である。

地球磁気圏の諸現象に関する 非線形時系列解析およびモデリング



徳永旭将 TOKUNAGA Terumasa

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 超高層物理学，博士(理学)・九州大学

研究内容： 地球磁気圏の諸現象に関する時系列解析・モデリング、
オーロラ嵐の前兆検出

研究概要

オーロラサブストーム電流系の生成機構解明に向けて、地上磁場データセットからサブストーム電流系開始時刻を自動推定するアルゴリズムの開発を行なった。地上磁場データについては、九州大学宙空環境研究センターより提供を受けた。本アルゴリズムの中核を成す技術は、非線形時系列解析分野で発展した特異スペクトル分析（SSA）に基づく変化点検出法である。SSA では、時系列データより生成したハンケル行列の特異値分解を経由して、時系列が持つ主要な構造を基底として抽出する。SSA を用いた変化点検出法では、現在時刻近傍から抽出した基底によって張られる部分空間の挙動を監視することで、時系列に顕れる微小な変動の開始時刻を捉えることができる。本研究では、夜側中低緯度に位置する複数の地上観測点で観測された磁場変動から、サブストーム電流系の形成開始のタイミングについて本アルゴリズムにより決定し、電流系形成開始のタイミングについて統計的な調査を行なった。

前述の統計解析の結果、サブストーム電流系はオーロラ爆発と呼ばれるオーロラの急激な増光現象の、およそ4分前に形成され始めることが明らかになった。この結果に関連する報告として、Moriola et al.[2010]によるオーロラ加速電場の時間発展がある。森岡らは、オーロラを発光させるもととなるオーロラ粒子加速域の時空間発展について、Polar 衛星で得られた電場観測データの解析を行なった。その結果、①オーロラ爆発と同期して高度 12,000km ほどの領域に沿磁力線方向の加速電場が爆発的に増強すること、②その約4分前から高度 6,000km ほどの領域に微弱な沿磁力線加速電場が形成されること、の2点が報告されている。本研究で得られた結果を森岡らの報告と突き合わせると、サブストーム電流系の形成とオーロラ加速電場の増強は、ほぼ同時に開始することが間接的に推論される。これはすなわち、オーロラ粒子を加速させる沿磁力線電場の形成と、磁気圏・電離圏を結合するグローバルなサブストーム電流系の形成過程は、システマティックに連動していることを示唆している。さらに、オーロラ電流系の生成機構には、オーロラ爆発4分前に始まる微弱な沿磁力線電場の形成が重要な役割を話していると考えられる。本研究成果については、国際会議を含む複数の研究集会で発表した。今後の課題としては、サブストーム開始プロセスに関して、一連の解析結果をうまく説明できる磁気圏・電離圏結合モデルを構築することである。

ニューベキアの葉の フラクタル構造のモデリング



中益 朗子 NAKAMASU Akiko

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 発生生物学，博士（理学）・お茶の水女子大学
研究内容： 反応拡散システム，パターン形成，発生生物学

研究概要

生物の世界は、様々な形が展開することによって変化に富んだものとなっている。数学者の A. Turing は、こうした多様性を生み出す形態形成の問題に対して、1952 年に拡散誘導不安定性を提唱した。彼の理論が、実際の生物の形態形成においてどのようなかたちで適用できるのかは、魅力的な問題である。この問題にアプローチするために、私は植物の葉の形態形成に着目して研究を行っている。

植物の葉は、主に二次元平面に展開する形態である。つまり、より高次の形態形成を考える上で単純化された系であるといえることができる。そこで、ニューベキアと呼ばれるアブラナ科の水生植物を用いて葉の形態形成機構を調べている。ニューベキアは、生育環境に応じて図1のような表現型可塑性を示す。複葉においては、共通フラクタル構造が見られる。つまり、ニューベキアの示す、このような形態の多様性は、共通の基本原理によって記述できる可能性が高い。

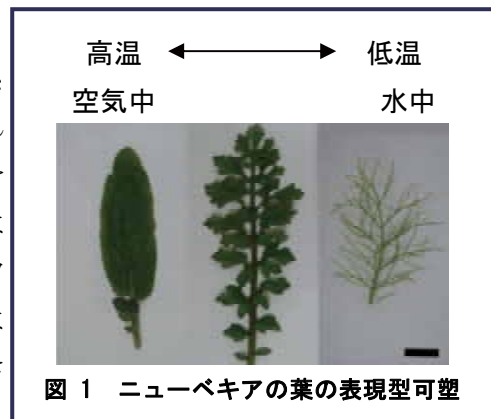


図 1 ニューベキアの葉の表現型可塑

そこで、シロイヌナズナの鋸歯構造を記述するモデル[2011 Bilborough *et al.*]を改変して、ニューベキアの複葉における形態の特徴であるフラクタル状の分枝構造を再現した。ここでは bpm (Boundary propagation method) と呼ばれる、葉の境界領域での形態形成に着目したモデルを用いている。つまり、葉縁を模した一次元のリング上で、反応拡散モデルによりチューリングパターンの形成を起こし、パターンのピーク依存的にリングを外側へ成長させた。そして、成長により拡張した葉縁でさらにパターン形成をおこした。この単純なルールの繰り返しにより、図2のような分枝構造の発達がシミュレートできた。さらにこのリングを成長させると、入れ子の自己相似形が示された。このとき N 番目の枝が、 $N-i$ 番目の $i-1$ 番目のサイドブランチと一緒に生じる ($N \geq 3, i = 2, \dots, N-1$) といった、規則性が見られた。今後、シミュレーションで見られた分枝のルールと、実際のニューベキアの形態形成で見られる分枝構造との比較が課題として残っている。

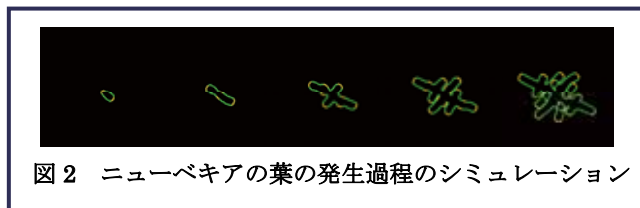


図 2 ニューベキアの葉の発生過程のシミュレーション

災害ユートピアの理論的研究 ～修正タカハトゲームによる分析～



堀内史郎 HORIUCHI Shiro

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 数理社会学，博士（理学）・京都大学

研究内容： 集団サイズの研究，集団間関係の研究

研究概要

2011年3月11日、巨大な地震と、それにともなう津波が東日本一円を襲った。建物は崩壊し、電気・ガスなどのインフラも失われる異常事態の中、多くの地域では人々は互いに助け合い、危機を乗り切った。日本全国で義捐金やボランティアなどの支援が見られた。このように災害時に人々が助け合いのコミュニティを創造することは、すでに Solnit (2009)などが指摘していた。だが、それらは事例報告にすぎず、どのようなメカニズムによって人々が助け合いのコミュニティを作り出すのか、そのための条件はなにか、などの理論的研究はなされていなかった。

そこで本研究では、複数のエージェントが一回きりのゲームを繰り返す中で、どのような戦略が集団を支配するか、タカハトゲームを改変した数理モデルを通じて分析した。ゲームの中で分析の対象とした戦略は、つねに資源を奪おうとする**タカ派戦略**、資源を相手と分割しようとする**ハト派戦略**、自分が先に資源を見つけた場合はタカ派的に、後で見つけた場合はハト派的に振舞う**ブルジョワ戦略**、そして常に相手と資源を分割しようとするが相手がタカ派的に振舞ってきたら応酬する**シェアリング戦略**である。資源の発見確率が二者間で等しい、戦った場合の勝率が等しい、資源を得る利得をV、戦いに負けた場合のコストをCと設定した。ハト派戦略とシェアリング戦略が集団を支配すれば、現象的には助け合いのコミュニティが生成したことになる。

分析の結果、 V/C が1より小さい場合は、ブルジョワ戦略が集団を支配するようになり、その支配体制は頑強であることが分かった。 V/C が1より大きい場合は、シェアリング戦略とハト派戦略が集団をするようになるが、ハト派が増えすぎるとタカ派、ブルジョワが集団中に侵入し、秩序が崩壊する。しかし再びシェアリングが集団支配を回復する、という傾向がみられた（下図参照）。この研究は、すでに論文としてまとめており、近日中に『理論と方法』誌に“Emergence and Persistence of Communities: Analyses by means of a revised Hawk-Dove game”として掲載される予定である。

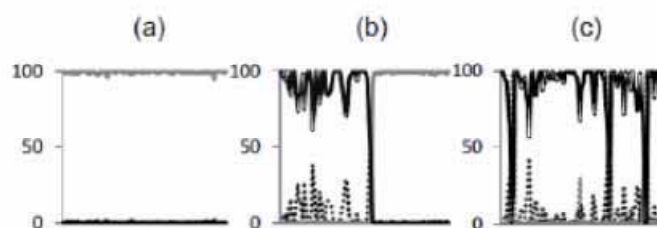


Figure 3. Dynamics of the four strategies in ABM. Hawk: gray dotted. Dove: black dotted. Bourgeois: gray solid. Sharing: black solid. (a) $V/C = 0.5$. (b) $V/C = 0.5$. (c) $V/C = 2.0$.

接触抑制モデルの数理解析



若狭徹 WAKASA Tohru

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 数学(大域解析学), 博士(理学)・早稲田大学

研究内容： 反応拡散方程式, 非線形常微分方程式, 楕円型・放物型偏微分方程式, 分岐理論

研究概要

腫瘍の数理解析モデル研究は近年活発に行われており、生命科学や医学的見地からも大きな注目を集めるようになった。数理科学から医学分野への寄与を念頭に、本研究は腫瘍浸潤のプロセスを簡略化し、これより得られる、「接触抑制効果」を伴う2種の細胞集団モデルを用いて、現象数理解析の立場から腫瘍浸潤の本質を抽出することを目的とする。

接触抑制モデルとは、通常細胞及びその突然変異によって生じる異常細胞の2種類の細胞集団の振る舞いを記述するモデルであり、これは2変数の退化拡散項を伴う非線形偏微分方程式により与えられる。ある典型的なパラメータ領域におけるシミュレーションでは、2種の細胞群の完全な分離が観察され、それが進行波解的な振る舞いを示す。このことの正当化として、2010年度までの研究では接触抑制モデルに現れる分離進行波解の速度情報や極限形状について、一定の成果を得ることができた。一方、モデル方程式が有する強い非線形相互作用に起因して、解の数理解析やシミュレーションについて多くの数理的課題が残されている。

2011年度の研究では継続して接触抑制モデルの数理解析に取り組んだ。一連の研究活動の中でも、短期海外出張によるフランス・パリ南大学の滞在・訪問を特筆する点として挙げる。この間、共同研究者である M.Bertsch 教授、D.Hilhorst 教授と密な研究討論を行い協力体制を強化した。これによる研究連携を経て、モデル方程式に対する交差進行波解の存在証明が得られた。これにより、特定のパラメータ条件下において、接触抑制モデルがよく知られた単安定系反応拡散方程式と類似の性質を持つ可能性が示唆される。このことは今後の解析において有用な情報となると思われる。また、これまでの研究内容を含む論文を計3編執筆し(分担執筆)、うち1編については2012年1月に投稿を行った。なお当グローバル COE 教育・研究拠点には10月末日まで在籍し、11月1日より九州工業大学に異動した。異動した後も当課題に関する研究を継続している。

2011年度の当課題に関する研究業績(異動後も含む)について、上述の投稿論文1編に加えて、計5回の口頭発表、ならびに2件のポスター発表を行った。代表例として国際会議「Dutch-Japanese Workshop on "Nonlinear nonequilibrium evolution problems : selected topics on material and life sciences"」(2011年11月、オランダ・アイントホーフェン、ただしGCOE研究費以外による海外出張)で行った口頭発表およびポスター発表は日本およびオランダの研究者に高い評価を得ることができた。

On the effect of focal mechanism to the occurring rate of an earthquake



蕭海燕 SIEW Hai-Yen

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
明治大学研究・知財戦略機構研究推進員（ポスト・ドクター）
GCOE-現象数理 PD

専門・学位： 統計科学，博士（統計科学）・総合研究大学院大学
研究内容： 統計的モデリングおよびデータ解析

研究概要

In my previous study, a new estimation procedure for the modulated renewal processes has been developed, in order to study the survival pattern of an earthquake. The proposed method has updated some existing estimators, such as the Nelsen—Aalen estimator and the partial likelihood estimator for the baseline intensity and the parametric covariate processes, respectively. Assuming that the parametric covariate processes are known, a new estimating equation has been derived from the martingale property of point processes to estimate the cumulative baseline intensity and the estimate of the baseline intensity has been also obtained after smoothing process. On the other hand, the parametric covariate processes are estimated using the maximum likelihood methods, when the baseline intensity is given. The baseline intensity and parametric covariate processes are calculated iteratively until convergence. As applications, the proposed method are applied to 100 sets of simulated data and the aftershocks of Wenchuan earthquake in 2008.

Besides that, I am also interested in predicting the occurrence of the next aftershock after a major earthquake when the information of the focal mechanism of the earthquake are given. The focal mechanism describes the inelastic deformation in the source region that generates the seismic waves. Seismologists treat it as the direction of slip in an earthquake and the orientation of the fault on which it occurs. Therefore, we could collect the directions of azimuth, dip and slip of the fault in our studies. In order to use these information, we initially assume that the joint density of time gaps of two consecutive events, magnitudes, depth and the sines and cosines of the directions of azimuth, dip and slip, following a multivariate powered normal distribution. Applying our method to the data of 2008 Wenchuan earthquake, we first computed the conditional densities of the occurring time and magnitude of one event, given the time, magnitudes, depth and angles of the previous event. From that, we obtained the 95% prediction intervals for each aftershock for time elapsed before the occurrence of the next aftershock as well as the magnitude. We also computed the coverage probability and the average length of the prediction intervals. The result showed that the model gave a good model if we included the information up to lag 4. Furthermore, we found that the lag 4 Wenchuan model gave a prediction on the occurrence of time gaps and magnitude of Tohoku earthquake (2011) with accuracy of 84% and 86%, respectively. This study is continued to figure out the essential elements and conditions for better predictions.

環境に依存した自己駆動粒子の運動の理解と制御



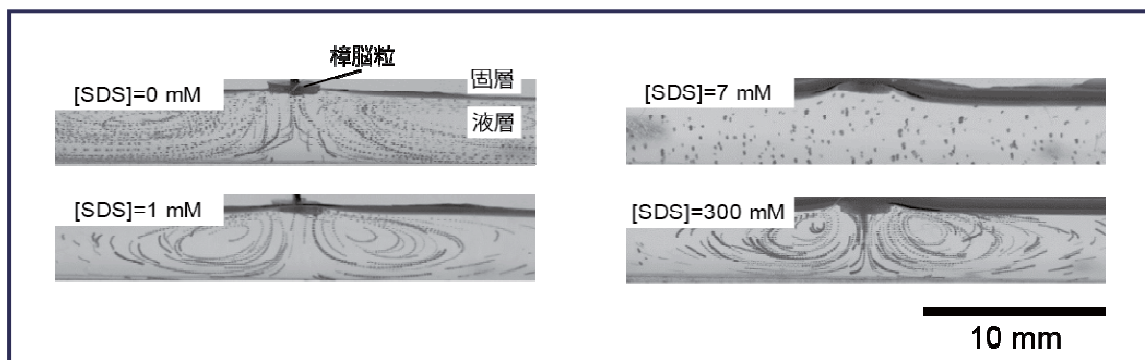
参納弓彦 SANNOU Yumihiko

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻研究員
専門・学位： 現象数理学，博士（理学）・金沢大学
研究内容： 非線形自立運動素子の運動解析と制御

研究概要

界面活性剤の一種である樟脳を純水に浮かべると水面を自走します。この現象は、界面活性剤の一つの特徴である水の表面張力を低下させる効果によって生じることが知られています。つまり、樟脳が水面に展開した際に、表面張力の低い領域と高い領域が生じ、結果的に表面張力が高い方へ樟脳が移動するのです。自分自身が引き起こす表面張力変化によって駆動する粒子(自己駆動粒子)に関する最初の報告は、イギリスのレイリー卿によるもので 100 年以上も過去に遡り、以来、自己駆動粒子は生命が持つ分子モータを模倣した画期的な動力として注目されてきました。この様な分子モータの制御は、生命活動の解明の一つの手かりになると期待できて、いくつも報告がされており、我々も研究課題としています。

一つとして、樟脳駆動のマランゴニ流が、溶液中に添加した硫酸ドデシルナトリウム(SDS)の濃度に依存して特異的に変化することを見出し、協同研究者らの協力のもとで、その機構を実験的・数理的考察から解明しました。SDS は界面活性剤であり溶液の表面張力を低下させるので、樟脳駆動のマランゴニ流は溶液中の SDS 濃度の上昇につれて抑制されることが予想できます。実際、SDS 臨海ミセル濃度付近までは溶液中の SDS 濃度の上昇に伴いマランゴニ流は抑制されていきます。しかし予想に反して、それ以上の SDS 濃度でマランゴニ流が再生する様子が観測されました(下図)。この現象の機構を探るにあたり、マランゴニ流の駆動力が表面張力の樟脳濃度に対する変化率と樟脳濃度の空間勾配によることに注目しました。さらに、臨海ミセル濃度を境に樟脳の SDS 溶液への溶解率が大きく変化すること、どの SDS 濃度の溶液に対しても樟脳が溶け込むことで表面張力が低下することを発見し、注目した駆動力の議論と結び付けて、これらが再生現象に深くかかわっていることを突き止めました。



各 SDS 濃度での流れによる可視化粒子の動き(1 秒間)。容器は長さ 90 mm，幅 5 mm，水深は 5 mm。流れは SDS 濃度の上昇につれて一端抑制された後，再生する。

細胞運動の数理



西村信一郎 NISHIMURA Shin-ichiro

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート研究員
広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻研究員
専門・学位： 理論生物学，博士（学術）・東京大学
研究内容： 細胞遊走，動物の集団運動等に関する理論的研究

研究概要

宇宙空間は時間軸を除けば3次元で構成されている。そのために、生物も3次元空間の中で特定の空間領域を占めなければならず、必然的に移動が伴う。その移動は完全に外的要因（海流、気流、他の生物による移動）か、生物内に蓄えられた化学エネルギーの消費によるものである。植物の種子の移動などは多くの場合前者の移動法にたよっているが、動物などは後者によるものが多い。植物と違い動物は、その個体の移動能が高く、さらに構成している細胞にも自発的移動能がある。植物の細胞には自発的な運動を行う器官がない場合が多く、細胞の相対的位置を容易に変えることができないが、動物の場合は自発的に動き回る。例えば、ヒドラなどは、薬剤などで細胞をバラバラにして再び集合させると、やがて内胚葉と外胚葉の細胞が分離してヒドラに戻っていく。細胞の移動能は動物では複雑な器官を形成維持に必要不可欠である。

動物細胞の祖先は「アメーバ運動」を行うことのできる細胞だったらしく、その機能は免疫細胞の移動などに生かされている。このアメーバ運動を行う細胞を持つ生物は動物だけではない。細胞性粘菌と呼ばれる生物は、アメーバ運動を行う繁殖期と移動体と呼ばれる多細胞体を作る飢餓状態期を持っている。動物とは異なる系統にいる生物で、多細胞化も動物とは別に進化してきたと推測されている。移動体形成は動物の発生に似た現象で、また細胞移動を担う分子は動物細胞との共通性が高く、よく研究されている。

私は、動物細胞や細胞性粘菌の細胞が行う特徴的な「アメーバ運動」についての数理的解析を目指している。アメーバ運動は極めて不思議な運動で、細胞が変形しながら運動するが、二度と同じ形は現れないと言われているほど複雑に変形する。この細胞の形の不定性は、何の意味も持たないようにも見えるが、ある種の統計的性質を持っていることが明らかになっている。高木らは、細胞の重心移動の統計性を調べたところ、細胞のランダムな移動は、単純な拡散過程ではなく異常拡散性を持っていることを明らかにした。細胞の変形はアクチンという分子で制御されているが、さらにそれを制御する沢山の分子群が明らかにされている。私はアクチンを制御する因子を一つ仮定すれば、細胞の複雑な変形を説明でき、さらに高木らが明らかにした重心移動の統計性も説明できることを明らかにした。

ランダムな細胞の移動が通常の拡散過程と異なることは何を意味しているのだろうか？細胞は何かを探索するのに適した移動方法を取っていると思われ、できるだけ広い範囲を探索しようとしていることが統計的解析で現れていると推測できる。私のおこなったシミュレーションでは、障害物がある状況においても、障害物をうまく避けて目的地（シグナル発生源）に到達することが示された。

マーケットマイクロストラクチャーの モデリングと実証分析



吉川満 KIKKAWA Mitsuru

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程3年
チームフェロー : 指導教員 三村昌泰(数理解析班),
松山直樹(モデリング班), 上山大信(シミュレーション班)
研 究 課 題 : 進化ゲーム理論の数理とその応用

研究概要

今年度は実証分析に重点を置き、次の研究を行った。

1. ダブルオークションを用いた市場のモデリングとその実証分析

Chatterjee and Samuelson (1983)を参考にし、板の厚みまで考慮に入れた金融市場のモデルを構築した。

ダブルオークションにおいてベイジアンナッシュ均衡が存在しないことが知られている。これを用いると、市場では投資家は戦略的には行動しておらず、機械的に戦略を選択していることとなる。そのため効率市場仮説と同様に市場には非合理的な戦略で投資を行っているノイズトレーダーが存在していると捉えた。そこでこの投資家の限定合理的な行動を Kikkawa (2009) で導出した非線形戦略を用い、実証分析を行った。その結果投資家の限定合理的な行動や理論研究で導出した関係式を用いることにより、期待利得の分散や出来高の分布が投資家の財に対する評価額の差に比例しているということが実証的に確認された。さらには約定価格と Walras 均衡価格のどちらに価格発見機能(Hasbrouck, 1995)があるのかを調べ、約定価格と比較し、Walras 均衡の方に価格発見機能があることが分かった。

2. 私設取引システムにおける実証分析

私設取引システムは欧米ではすでに投資家の間で浸透しており、取引コストの削減はもちろんのこと、流動性の向上、スプレッドの縮小、ボラティリティの低下が確認されている。近年日本においても法律改正、大手証券会社の参入や SOR が準備されてきており、この私設取引システムが注目され始めている。

そこでこの私設取引システムを東京証券取引所と比較することにより、市場特性を統計的に見出した。具体的には欧米とは異なり、私設取引システムには価格発見機能がなく、板情報は特徴的な分布をしている。また私設取引システムにおける取引の積極性 (Biais, et al., 1995) に着目し、出来高効果 (Parlour, 1998)を考察すると、今までの出来高効果とは異なり、東京証券取引所において売り注文が増えると、私設取引システムの買い注文が増加するという結果を得た。

これらの統計的性質からアルゴリズム取引が関係あると推測され、現在の私設取引システムは東京証券取引所の補完的な役割があるということが推測された。

実証的に有効な JGB 価格付けモデルと 金融危機時の金利の期間構造分析



土居英一 DOI Eiichi

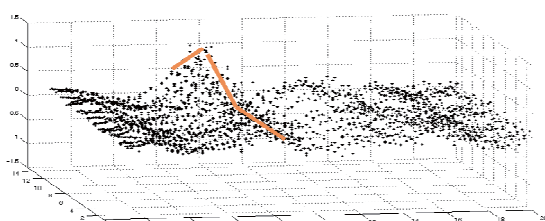
所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程3年
チームフェロー : 指導教員 刈屋武昭 (モデリング班),
砂田利一 (数理解析班), 王京穂, 山村能郎 (シミュレーション班)
研 究 課 題 : 社債データによる業種・格付け別倒産確率の期間構造と
回収率の推定モデルの実証

研究概要

国債 (JGB) 価格付けモデルの割引率を表現するものとして金利の期間構造プロセスは有用であり、特にゼロクーポン債の割引率を表現するものとして表現される。その情報は、基本的に各時点の国債価格全体にある。実際には、多くの国債はクーポン債であり、価格も含めた国債全体の価格の背後にあるイールド全体のプロセスとして表現される。このイールドの導出の仕方も、個別銘柄属性をどの程度考慮するかで結果は大きく異なる。無裁定価格理論では、個別銘柄の属性を無視し、割引債を前提としてスポットレートモデルやフォワードレートモデルなどの特定のモデルによってモデル化し、可能なら解析的に割引率を導出し、未知パラメータをデータから推定する。前者の代表的なモデルは CJR モデルであり、後者の代表的なモデルは HJM モデルである。他方、本研究でのモデルは、銘柄属性を積極的に考慮する刈屋(1995)、Kariya and Tsuda(1994)によるモデル化を基礎とする。その結果、個別銘柄の数自体が資産数となり、非完備な状況を最初から設定することになり、リスク中立測度は一意的に存在しないのであるから、実測度のもとでの評価を対象とする。さらに特定のモデルを前提とせず個別銘柄属性を考慮したフォワードレートの期間構造表現による割引率を平均値とそこからの乖離に分解し、前者を多項式近似し、乖離の部分には確率的な相関構造を想定して一般化最小二乗法により統計的に処理する (図表 1)。国債価格情報は、景気変動についての投資家のフォワードルッキングな評価として将来動向を潜在的に表現した情報の集合として捉えることができるという考えに基づく。更に本研究では、これらの実証として金融危機時周辺のデータを使用し導かれた 6 次の多項式により近似される平均割引率関数を提案すると共にゼロイールド等を叙述 (図表 2)。

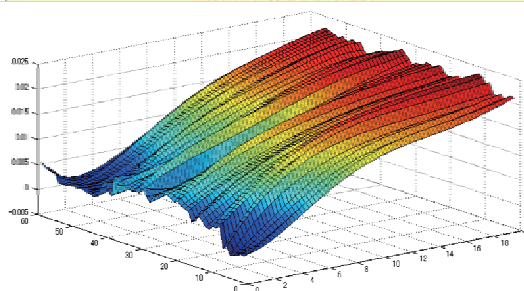
図表 1

金融危機時の個別銘柄の残差パフォーマンス



図表 2

金利の期間構造



弱小種の侵入による競争緩和共存に 起因するパターン形成に関する研究



藤間真 TOHMA Makoto

所 属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程3年
チームフェロー：指導教員 三村昌泰（数理解析班），
若野友一郎（モデリング班），上山大信（シミュレーション班）
研究課題：反応拡散系におけるパターン形成の数理

研究概要

複数の生物種が相互関係の結果、どのような時間的空間的様相を示すかという問題は、生態学において重要な問題である。この問題において、重要な経験則はロシアの生態学者 G. F. Gause によって提唱された「競争排除律」である。競争排除律は、同じ生態学的地位にあつて競合する二種の生物は共存できないと主張する経験則であり、Gause 自身の実験や、Lotka-Volterra 型と呼ばれる数理モデルで確認されている。しかし、現実の自然界では複数の生物種が競争しながらも共存している。この「競争緩和共存」状態について、「多くの種が複雑な競争等によって、複雑なネットワークが生じ、それによって強競争関係が緩和され、共存が可能となるのであろう」という視点から、数理モデルを通じて理解しようと言う研究に従事している。

2011 年度は主に、三種類の生物種が競合しながら拡散する状況を表す数理モデルである、1次元反応拡散系における競争緩和共存問題について、三村教授、上山教授、National Taiwan University の Chun-Chuan Chen 教授、Li-Chang Hung 博士との共同研究に従事した。

その結果、強い種が弱い種を排除する様な二種競合状態に対し、更に弱い第三種が侵入する事によって、空間非一様な三種共存状態があることを意味するパルス状の安定定常パターンの発生を数値的に示すことができた。また、その空間非一様な状態について大域的分岐構造を数値的に検討することにより、空間非一様なパターン形成は、最強種と最弱種の二種のみからなる不安定なパルス状の定常解から分岐した上で更にホップ分岐によって安定化したものであることを明らかにできた。更に、その空間非一様な状態が、ある常微分方程式の解を使うことによって記述できる反応拡散系の Semi-exact 解であることを示すことができた。

上記の研究について、中間結果を『Semi-Exact Equilibrium Solutions of Competition-Diffusion Systems and Competition-Mediated Coexistence』という題目で、2011 年 10 月 4 日の MIMS 現象数理学ポスターセッションで発表した。また、全体像を『Semi-exact equilibrium solutions for three-species competition-diffusion systems』という題目で 2012 年 2 月末に Hiroshima Mathematical Journal に投稿し、同年5月初旬に受理された。

また、関連するテーマとして、二種が競合状態にある中に弱い第三種が侵入する事を表す二次元反応拡散モデルにおいて、数値的に観測される競争緩和共存を表す動的螺旋について、発生するパターンのパラメータ依存性について、対応する一次元問題の進行波との関係と言う視点から三村教授との共同研究を遂行した。2011 年度中には結論を出すには至らなかったため2012年度に継続して検討を進めている。

脳波（Electroencephalogram, EEG）を用いたテレビ番組視聴時の人の情動の判定手法の開発



日高徹司 HIDAKA Tetsuji

所 属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程3年
チームフェロー：指導教員 岡部靖憲（モデリング班），
三村昌泰（数理解析班），中村和幸（シミュレーション班）
研究課題：時系列解析手法を用いた，ブランドの売上や価値に対する
広告効果の研究

研究概要

研究課題に則って，昨年度から脳波（Electroencephalogram, EEG）を用いた人の感情，情動を判読する手法を研究している。昨年度の段階で，測定された EEG に対して高周波フィルタと独立成分分析を適用することによって，筋電位除去処理まではある程度実用に耐える目処が立ったが，処理後のデータから情動に関わる情報を抽出する手法はまだ未 completion であった。そこで，本年度は EEG の周期性，非線形性などの性質を調べる作業から取り組んだ。

昨年度に開発した，KM2O-ランジュヴェン方程式論（KM2O）に基づいた周期性を調べる手法を適用したところ，単純な周期成分のみではなく，非線形成分が重要な成分である可能性が高いことがわかってきた。そこで KM2O の結果とリヤプノフ指数などの他の非線形性（カオス性）指標との比較を行ったところ，EEG に関して両者の指標の相関が高い結果となった。これは，EEG の特徴を表す指標としてカオス性を示す指標が有効である可能性が高いことを意味している。

そこで，実際に被験者によるテレビ番組視聴時の EEG からリヤプノフ指数を計算して情動の判定を試みた。まだ手法の検証段階のため，被験者は一人，大画面テレビの前に座り，EEG を測定するヘッドセットを頭に装着した状態でテレビ番組を一定時間視聴してもらい，EEG を測定した。測定された生データに対してノイズ除去の処理を行い各測定箇所の時系列データのリヤプノフ指数を計算した。多次元のリヤプノフ指数とプリコードされた情動に多項ロジットモデルを適用して推定モデルを構築することを試みた。その結果，7 割程度の推定精度が得られたため，現在検討中の推定手法は有望であると期待できる。

ひとまず EEG の特徴を表す指標としてリヤプノフ指数が有効ではないかという感触を得た段階ではあるが，広告効果測定に活用するにはさらなる検証が必要なことはいうまでもない。しかし，EEG に関する先行研究と異なり，KM2O を用いて非線形性の特徴を抽出しているため，カオス性に着目することの理由付けを提供できていると考えられる。さらに，リヤプノフ指数などのカオス性指標は厳密な数値を計算するのが困難だが，KM2O の結果と比較することによって，相対的な値の大小に関しては信頼できることをある程度確認している。通常のカオス性に関するデータ解析ではリヤプノフ指数の正負が重要だが，ここではそのような値そのものは問わず，相対的な大小関係だけを用いているため，リヤプノフ指数の計算の信頼性の問題をクリアしていると考えられる。

バクテリアコロニーパターンの 多様性についての理解



青谷章弘 AOTANI Akihiro

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程2年
チームフェロー : 指導教員 三村昌泰(数理解析班),
小林亮・西森拓(モデリング班), 上山大信(シミュレーション班)
研 究 課 題 : バクテリアコロニーパターンのモデリングおよび解析

研究概要

Budrene, Berg(1991,1995)は, 寒天培地で走化性をもつ大腸菌株(HCB317tsr)を培養する際に, 養分濃度のみを変えることによって, 幾何学的に異なる模様を持つ3種類のコロニーパターン(ディスク状に広がるパターン, 放射状模様のパターン, 擬ヒマワリ模様のパターン(図1))を観察し, それらのパターンが出現する要因として, 養分摂取による増殖, ランダムな運動, 走化性物質の物質, 走化性による移動の4つを挙げた。彼等は, パターン形成は遺伝子制御で行われるのではなく, これら4つの要因の適当なバランスで自己組織的に現れるのではないかと述べているが, 理由は示していない。

この報告に対して, 三村-広山モデル(2002)において, 養分濃度だけを自由パラメータとして, 最終模様および形成過程について実際のコロニーパターンと類似するパターンを再現することができた。この結果から, 大腸菌は養分摂取と走化性移動の適当なバランスによって“自己組織的に”幾何学的な構造を持つコロニーパターンを形成する可能性が示唆された。

また, Budrene, Berg(1991)は, 走化性を持つ大腸菌株(HCB4368tsr)において雁木模様のパターン(図2)を観察している。雁木模様については三村-遠藤(2003)が再現し, クラスタが交互に並ぶ市松構造が本質であることを示唆しているが, 同様に市松構造を持つ擬ヒマワリ模様との違いを作る要因については明らかになっていない。

これらをふまえて, モデルに与えた仮定の妥当性を議論するとともに, モデル解析・シミュレーションから, 走化性大腸菌のコロニーパターン形成の機構に新たな知見を与えることを目的として研究を行っている。

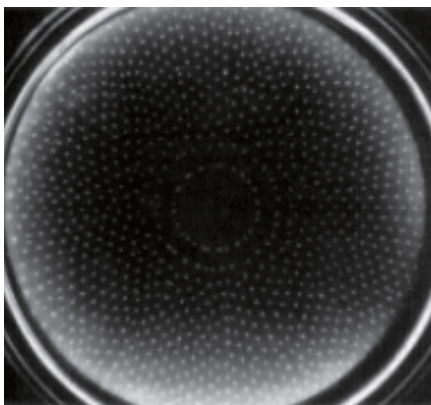


図1 擬ヒマワリ模様のパターン

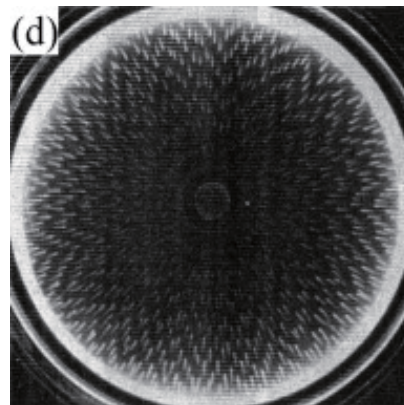


図2 雁木模様のパターン

スマートグリッド需給運用計画のための 予測手法インテリジェント化の研究



飯坂達也 IIZAKA Tatsuya

所 属 : 大学院理工学研究科電気工学専攻博士後期課程2年

チームフェロー : 指導教員 森啓之(モデリング班),
二宮広和(数理解析班), Mohamed El-Sharkawi(シミュレーション班)

研 究 課 題 : 電力系統におけるインテリジェントシステム

研究概要

電力系統では、常に需要と供給(発電)をバランスさせる必要がある。現状は、需給バランスの維持のため、供給側(火力発電機)で制御しているが、火力発電機の起動には時間がかかるため、事前に需要を予測し、供給側(発電機の起動停止)を計画する必要がある。現在、再生可能エネルギーの導入が世界的に行われている。今後、再生可能エネルギーが大量導入されると、その大きな出力変動のため、需給バランスの調整が難しくなる。そのため将来的には、供給側だけでなく、需要と供給の双方を制御する必要がある。これを実現する次世代送配電網はスマートグリッドと呼ばれ、世界的に研究が行われている。

本研究では、スマートグリッドの需給バランス維持のため、需要と供給双方の予測を行うものである。

予測手法の共通技術としてニューラルネットワークの高精度化、および出力結果の説明手法の研究を行った。ニューラルネットワークは人間の脳細胞をモデル化した手法であり、計算機に学習能力を持たすことができる手法である。一方、複雑な手法のため、なぜそのような予測をしたのか従来はその根拠を示すことができなかった。本研究では、これを改善するため新しい構造のニューラルネットワークを提案し、予測結果の根拠を示すことを実現した。

需要側の予測としては、電力会社の供給地域全体の1時間ごとの需要の予測を行った。ニューラルネットワークを適用すること、需要の負荷種別(一般、大口等)ごとに予測を行うこと、および広い地域の多地点の気象を使用することで、従来以上の予測精度を実現した。

供給側の予測としては、水力発電のためのダム流入量、風力発電、太陽光発電を予測した。ダム流入量はニューラルネットワークを適用すること、過去の誤差を補正することで、従来実現できなかった小流量から洪水流量まで予測することを実現している。風力発電は、風車配置に伴う風速の変化などを考慮することで予測精度を向上させている。太陽光発電は、雲量や湿度など上空の多数の因子から地上日射量を予測することを実現している。

本研究では、上述のとおり、スマートグリッドにおける需給運用計画に必要な、需要と主要な供給(発電)の予測を実現した。

マーケットマイクロストラクチャー における市場分析



向殿和弘 MUKAIDONO Kazuhiro

所 属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程2年
チームフェロー：指導教員 刈屋武昭（モデリング班），
乾 孝治（数理解析班），山村能郎（シミュレーション班）
研究課題：マーケットマイクロストラクチャーを用いた市場解析

研究概要

証券市場に関わり続けてきた職務経験を生かしながら、近年発展しつつあるマーケットマイクロストラクチャー分野の研究成果を活用して、国内株式市場および取引所取引における価格形成や取引手法に関わる投資行動を解析することで、市場のボラティリティを高めている要因や制度の問題を考察し成果として発表し、行動ファイナンスに関する要素も勘案しながら株式市場における取引収益機会の更なる発掘とその検証を目的とし行っている。

そこで、自分のビジネス上知り得ているものを用いながらベースとなるような取引収益機会を数多く

発見し、それらの取引収益機会をどのように価格評価してゆけば良いかを検討しながら市場データを用い統計用ソフトや計算手法を用いて可視化するべく研究を続けている。使用する市場データは高頻度データ（ティックデータ）を中心に用いることにより、現在のハイフリークエンシー（高頻度取引）・アルゴリズム取引（自動売買）や各種バスケットトレードに関する分析も検証しながら研究を行っている。

そのために、先行研究論文のサーベイを行いながら、セルサイドブローカーのレポートなども積極的に利用し研究を進めている。これにより、自分では発見できなかったような **Trading Opportunity** を発見できればそれを発展させて自分の経験をあわせることにより更なる発展が期待できる。

研究方法は、主に過去の株価の推移と取引所の取引システム及びルールの関係性を明らかにするために、統計的なデータ解析や確率モデルを使ったシミュレーション分析が中心となっている。そして、この実証分析に先だって、資産価格理論やマーケットマイクロストラクチャー分野の研究サーベイを実施し、分析のためのモデル候補を現在選定している。また、研究の過程において得た成果を基にマーケットにおける最適執行に関しても言及したい。

本研究は、自己の職務経験で得たアイディアを取り入れる点において、従来の効率的な市場を前提とする研究とは、その目的や方法、期待される成果について大きく異なるものである。それ故に期待される成果が得られないというリスクも認識しているが、実務経験上特に重要と思われる取引収益機会（トレーディング・オポチュニティ）に注目した分析から優先的に着手し、実際に利用できる形での研究成果を出すことを目指し、徐々に汎用的で体系的な結果を導き出すように努力を継続していきたい。

拮抗作用が作り出す 骨梁パターン形成の適応的ダイナミクス



山口将大 YAMAGUCHI Masahiro

所 属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程2年

チームフェロー：指導教員 上山大信（シミュレーション班），
三村昌泰（数理解析班），中垣俊之（モデリング班）

研究課題：生物のパターン形成過程にヒントを得た新しい応用モデルの構築

研究概要

生物の形態はしばしば機能的であるといわれている。その形成機構の特徴として、よく使う部位はそれに適応してどんどん発達することを強調されたりする。たとえば、我々の筋肉もそうである。使えば使うほど発達する。植物の茎も風に揺られているうちに強くなる。このような性質は、「適応性」と呼ばれる。本研究は、適応性を鍵に生物の形態形成機構のダイナミクスについて、その本質を理解することを目指した。そのモデル系として、生物形態の機能性をあらわす格好の例として古くから引用され、医学的重要性や細胞生理学的知見の蓄積が存在する、ヒト大腿骨骨頭の海面骨に見られる骨梁パターンを選定した。

骨は、一度できたらずっとその形を保ち続けているわけではなく、動的な平衡状態にあることが知られている。これはリモデリング現象と呼ばれ、骨を壊すプロセスと骨を作るプロセスが常に作用し続けることで、そのバランスによって定常な形をなしている。しかし、リモデリング現象のバランス機構は複雑なので、その理解のため数理モデル化が進められている。細胞生理学的な知見を次々に盛り込んだ数理モデルがいくつか提案されているが、一方で、モデルが複雑すぎて、結局どのようなダイナミクスが効いているのかがはっきりしていない。実験の詳細については、未だ定まりきらない不確定な要素も多いので、どこまで詳細にこだわるか、モデル化の戦略が問われている。詳細な実験事実の変動に依存しないような、現象論的な小変数のモデルもまた有用であろう。そこで、骨梁パターンの適応的機構の基本的ダイナミクスを捉えることを目指し、なるべく単純化した数理モデルを構築した。

骨のリモデリングの生理的な過程は、骨芽細胞による造骨と破骨細胞による破骨の複雑なプロセスからなっている。それらの活性は、主に外部からの負荷(骨にかかる荷重)に依存することが知られている。そこで、骨の成長率を造骨作用と破骨作用に分け、これら2つの適応要素が拮抗し合う相互作用モデルを考えた。骨の成長率を微小領域ごとに考えると、造骨作用と破骨作用は、微小領域中の骨量とそこにかかる負荷の大きさにのみ依存すると仮定した。ヒト大腿骨骨頭の断面図についてトラス構造のランダムメッシュを作成し、その上でこのモデルをコンピュータシミュレーションすると、海面骨の特徴的な骨梁パターンを再現することが確認できた。また、造骨と破骨の活性度パラメータの比を変えることで、骨粗鬆症の進行時に見られる梁の消失過程を再現することもできた。このシンプルなモデルは、骨リモデリング現象のダイナミクスの一部を記述できていると考えている。今後は、このモデルの数理的機構を考察するとともに、応用モデルの構築を行うつもりである。

Study the wave patterns in excitable media by a wave front interaction model.



陳彦宇 CHEN Yan-Yu

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程2年
 チームフェロー : 指導教員 二宮広和 (数理解析班),
 三村昌泰 (モデリング班), Guo Jong-Sheng (シミュレーション班)
 研 究 課 題 : 反応拡散系に現れるパターンの数理的特徴付け

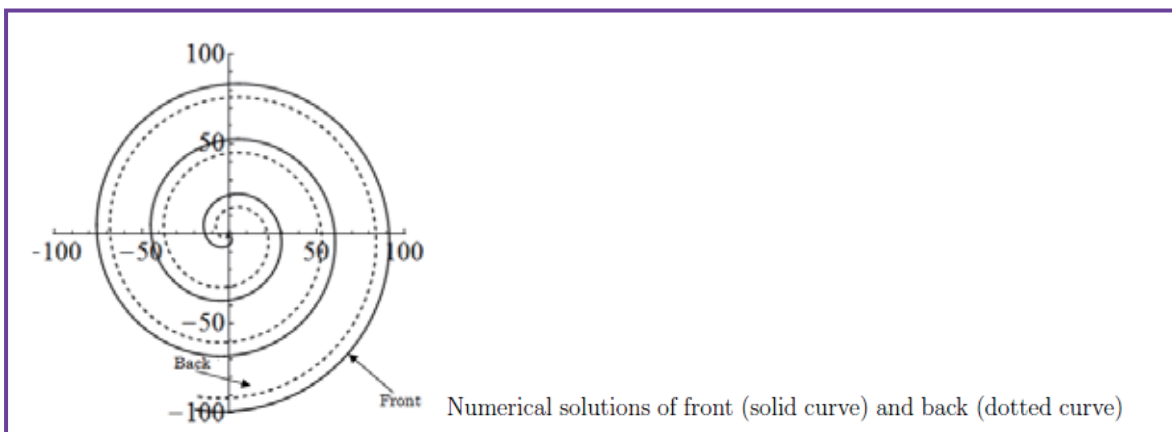
研究概要

Last year I am interested in wave pattern formation in excitable media. This phenomenon has been studied in many fields in physics, chemistry, biology and so on. Among them, I focus on the spiral wave pattern in an unbounded medium. This pattern can be observed in Belousov-Zhabotinsky reaction, cyclic-AMP signaling in social amoeba colonies of *Dictyostelium discoideum*, etc. It is also known that the spiral waves is one of causes of a ventricular fibrillation. Therefore, to understand the mechanism of the appearance of spiral waves is very important.

On the other hand, many researchers studied the spiral wave as a thickless curve in the plane, though most of experiments exhibit thick spiral waves. Under the assumption that the tip is rotating along a circle, namely, the front is perpendicular to the core circle, they derived some information of spiral waves, such as the behavior of the wave and the multiple existence. To study the motion of the tip and the core of the spiral wave, we need more information of the spiral wave, especially near its tip. Therefore, it is meaningful to study it as a thick region to derive the more information of the spiral wave.

In this work, we give a mathematical proof of the existence and the uniqueness of spiral waves which consist of the front and the back by using the system proposed by Zykov. This system is the so-called wave front interaction model. Because the results for the front curve had been shown before, we try to show the global uniqueness of the back curve. Also we study the properties between front and back. We hope it will give us some information about the width of the spiral wave pattern.

First derive some properties of the back by the shooting argument and the comparison principle. Next we show the global existence of the solution of the back. Then we study its asymptotic behavior at infinity. Finally, we prove the uniqueness of the solution. This paper has been submitted to the *Physica D*.



Information Security Systems for the Smart Grid



傅愛玲 POH Ai Ling Amy

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程2年
チームフェロー : 指導教員 向殿政男（モデリング班）,
三村昌泰（数理解析班）, 杉原厚吉（シミュレーション班）
研 究 課 題 : スマートグリッドの情報セキュリティシステム

研究概要

Based on the approaches of Simon Perry (2009) and Tony Flick et al. (2011), through interesting group discussion and study model comparisons we were able to successfully selected the appropriate model to be applied for the project of Information Security System for the Smart Grid; and studied the methods and techniques that supported the selected model. QFD was adopted as the main methodology and fuzzy logic then be applied to enhance the mathematical calculation to validate the effects of the important relationship between the consumer and the functional requirements. This work has been published in the proceedings of *Smart Grid Security and Communications, The 9th International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA-IEEE), Korea, #108: 91-98 and Journal of Convergence, 2(1): 39-46*. Following the results obtained from the earlier paper, a process for information security consumer requirement identification was carried out. 16 requirements were identified via the work of VOC as was a careful literature review based on Hermeneutic Circle Methodology based on Walsham, G. (1996) and Klein, H.K. et al. (1999) approach. This work has been published in *International Journal of Grid Computing & Applications, 2(2): 1-19*. Accordingly, we studied and identified the set of information security functional requirements based on the 16 consumer requirements identified. The study helps reader to gain insight into the trend of future information security systems that will affect smart grid development. This work has been published in *International Journal of Emerging Sciences, 1(3): 371-386*. Then we carried out on a reviewed on the Japan's smart grid practice, this work has been published *Journal of Pervasive Technology, 1(1): 15-22*. We continued with the effort to promote security philosophy important for a sustainable smart grid system, this work has been published in the proceedings of *26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, IEEE, Japan: 29-34*. We also studied the trade-off between “current” and “smart grid” energy supply system, this work has been published in the proceedings of *DC Building Power Asia Conference, 4(6)Taiwan: 142-173*. Then we investigate the natural grid concept and the strategy of asia’s energy-balance pioneer. This work has been published in *Smart Grid Electronics Forum, 5(2), America: 1-25*.

I completed the dissertation and was awarded a Ph.D. Degree with an excellent student prize this year. As a whole, I enjoyed research in the Graduate School of Advanced Mathematical Science, Meiji University in the previous years with the mentor from Professor Sugihara, Professor Mukaidono and Professor Mimura. My research ability was enhanced by continuous improvement in data management, modeling and statistical analysis which laid a good foundation for my future research.

腹足類の這行運動に関する統一的理解



岩本真裕子 IWAMOTO Mayuko

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程 1 年
 チームフェロー : 指導教員 上山大信 (シミュレーション班)
 末松 J. 信彦・小林亮 (モデリング), 三村昌泰 (数理解析班)
 研 究 課 題 : 腹足類の這行運動に関する統一的理解

研究概要

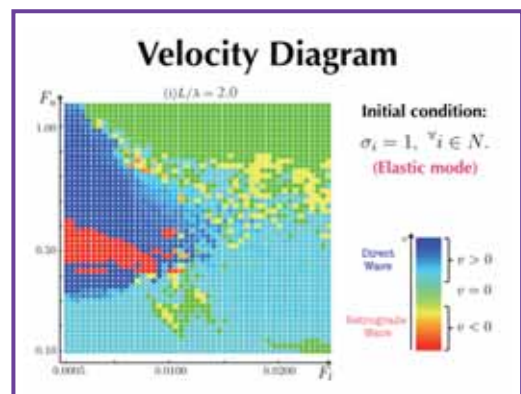
生物は、個体特性や居住環境に応じて、様々な運動様式を獲得しています。その運動機構を解明すべく生物学的研究が進められてきましたが、単純な運動形態のメカニズムでさえ未だ完全には明らかにされていません。本研究は、多様で複雑な運動形態のなかにも基本となる共通のメカニズムが潜んでいると考え、単純な運動機構のひとつである這行運動に焦点を当てて、生物の運動機構の解明を目指しています。

腹足類は、カタツムリやアワビ(右写真)などの巻貝の総称で、軟体動物門で最も多くの種を有します。また、多くの種が這行運動によって移動し、その際、地面と接地した平らな足には、筋収縮の伝播が波として観察できます。この筋収縮波は、運動メカニズムにおいて重要な要素であると考えられ、半世紀以上前から観察が続けられてきました。しかし、筋収縮だけでは這行運動は実現されません。重要なもう一つの要素は、接地面との摩擦制御です。長い間、筋収縮部分を持ち上げて摩擦を制御していると考えられてきましたが、1980年にM. Denny氏が自身の実験をもとに、足から分泌される粘液による摩擦制御説を提唱しました。それ以来、摩擦制御に粘液が重要な役割を果たしていると推測されてきましたが、実際にDennyが発見した粘液の動的粘弾性が、筋収縮波と相互作用することによって移動が実現されるかについては証明されていませんでした。



今年度は、粘液の動的粘弾性と筋収縮波伝播の相互作用によって移動が実現されるか、数理モデルを構築して検証しました。この研究により、筋収縮波の伝播によって発生する弾性力に応じて粘液が弾性と粘性の性質をローカルにスイッチングして摩擦を制御し、体全体としては、這行運動が実現されることが明らかとなりました。また、粘液の性質を特徴づけるパラメータ F_u と F_l によって、Direct wave と Retrograde wave という異なる運動パターンが実現されることがわかりました(右図)。

これらの研究結果は、3 つの学会・シンポジウムにて報告し、明治大学大学院先端数理科学研究科開設シンポジウムでは最優秀ポスター賞を、The 3rd Taiwan-Japan Joint Workshop for Young Scholars in Applied Mathematics では Presentation Excellence Award を受賞しました。



津波遡上の高精度推定法



大家義登 OHYA Yoshito

所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程 1 年
チームフェロー : 指導教員 三村昌泰（数理解析班）
高安秀樹（モデリング班），中村和幸（シミュレーション班）
研 究 課 題 : 津波遡上の高精度推定法

研究概要

本研究は津波の遡上を即時予測するコンピュータシミュレーションにおいて用いられるパラメータに関し、より良い決定方法を確立する事を目指している。

2011 年 3 月 11 日、三陸沖を震源として東北地方太平洋沖地震が発生した。この巨大地震により未曾有の被害が発生した事は記憶に新しい。特に地震動で発生した津波は観測史上最大級の規模であり、その浸水範囲は青森県から千葉まで 500 平方キロメートル以上になる。その津波のエネルギーは、遠く南極にまで到達し氷棚の一部を破壊した事からも明らかである。

現在の津波警報では、沿岸地域での津波の高さを発表している。しかし、この情報では具体的に住民に被害イメージを想起させる事は難しい。これに関して国際測地学・地球物理学連合の第 25 回国際会議では即時浸水予測を行い、浸水警報を発表する事で被害イメージを喚起させる事ができるのではないかと報告された。即時計算において大きな課題は計算時間と計算精度である。この二つの要素は基本的にトレードオフの関係であり、双方一定以上の水準を満たした上で、より速く正確に計算できるようにする事が重要である。

現在、気象庁の扱っている津波の支配方程式は水深がある程度以上深くなければ計算できないため、津波の遡上予測には使えない。津波の挙動を扱う方程式はいくつかの種類に分けられるが、その中でもシンプルな式に、浅水波方程式がある。本研究では、この式に着目しを用いて必要な計算速度を維持しながら予測精度の向上を目指す。

浅水波方程式は底面摩擦をマニング粗度と呼ばれるパラメータで表す。このパラメータは海域では、およそ一つの値に定まっているが、陸上では様々な与え方がある。これに関して横断的な議論が現在なされていない。マニング粗度は流量が一定であるという仮定に基づいた等流の解析からでて来ているが、実用の観点から等流以外の様々な場面で応用されている。津波の場合、各々の研究対象地域では妥当な値になっていると思われるが、その設定方法を他地域に適用した時の妥当性に関しては言及されていない。今次の津波災害において津波遡上の現実のデータが数多く得られて、公に公開されている。本研究では、このデータを用い、マニング粗度の適切な設定方法を確立する。

また、第 67 回に本物理学会年次大会において、マニング粗度の与え方による津波の挙動、特に浸水範囲の広がり方にどの程度影響するのかの調査結果の一部を報告した。

信用リスク分析の新展開と 株式代替市場の効率性



永田真一 NAGATA Shinichi

所 属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程 1 年

チームフェロー：指導教員 刈屋武昭（モデリング班）

乾孝治（数理解析班），三村昌泰（シミュレーション班）

研 究 課 題：金融工学・高頻度データを用いた株式市場分析

研究概要

(1) TARCH-DCC を用いた MES 分析

本研究は、Brownlees and Engle(2011)で提案された TARCH-DCC モデルを応用したリスク評価の手法について実証分析を行う。具体的には、リスクの参照先である銀行の株価と、経済環境変数の代表として東証株価指数(TOPIX)および長期国債先物価格の 3 変量について TARCH-DCC モデルを推定し、モンテカルロシミュレーションにより Expected Shortfall を計測するなどして、その特徴や精度を比較検証する。なお本研究で得られた知見等はオペレーションズ・リサーチ学会の秋季研究発表会で発表することを目標とする。

(2) DCC に MacGyver Method を用いた多変量分析

(1)から得られた知見を拡張し、また問題点に改良を加え、リスク分析の精度を高めることを目標とする。具体的には(1)で用いた TARCH-DCC 分析を、マーケット下落時に相関が上昇するという特徴をとらえた TARCH-Asymmetric DCC 分析に拡張し、尤度関数には MacGyver Method を用いて最大化を行い推定する。そしてモンテカルロシミュレーションにより今度は copula や CoVaR 等のリスク概念を用いてリスク計測を行う。なお本研究で得られた知見等は、日本保険・年金リスク学会で研究発表・論文作成を最終目的とする。

(3) PTS 市場分析

近年 IT 技術の飛躍的発展によりもたらされた株式市場取引の効率化は、従来の取引システムを一変させ市場構造そのものに大きな変革をもたらした。中でもコンピュータ技術を使ったアルゴリズム取引や PTS 市場（私設取引システム）の発展は目覚ましい。そこで本研究は、PTS 市場に関して様々な角度から分析を与え、市場取引の流動性と効率性に関して考察を与えることを目的とする。具体的には、PTS 市場の売買高推移やスプレッド分析等の基本統計量に加えて、PTS 市場の特徴であるアルゴリズム取引の一部であるプログラム取引の分析を行い価格発見の機能を有するか検証する。

Multiscale Approach to Pattern Formation in Reverse Smoldering Combustion



IJIOMA, Ekeoma Rowland

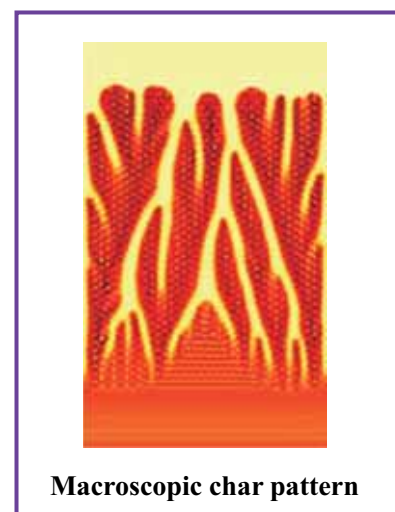
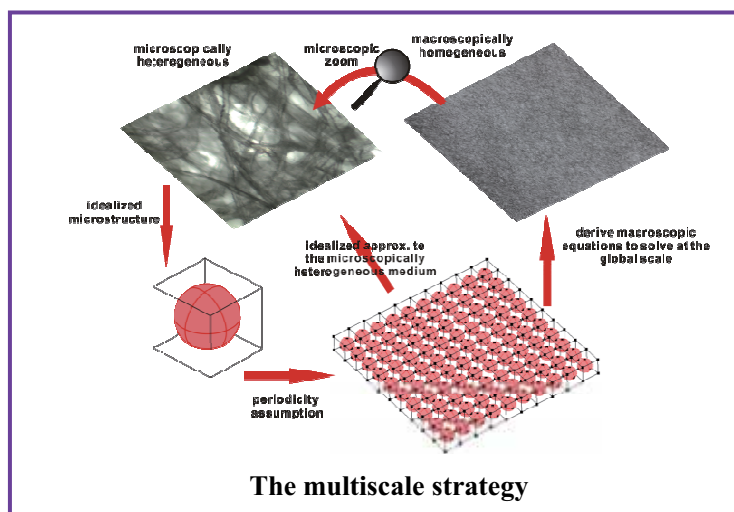
所 属 : 大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程 1 年
チームフェロー : 指導教員 小川知之（シミュレーション班）
池田幸太（数理解析班），三村昌泰（モデリング班）
研究課題 : Multiscale methods and analysis of reaction-diffusion systems.

研究概要

Understanding the mechanism of propagation of macroscopic char pattern over thin porous media, in a slow combustion regime termed *smoldering*, has been a subject of interest over the years. Different approaches to study the phenomenon of the development of fingering patterns arising from a destabilizing effect of oxygen transport have also been given e.g. experimentally and through the use of phenomenological models.

In this study, we approach the problem in a multiscale framework to investigate basically the response at the macroscopic level, the effect of integrating material physical and microstructural properties in the study of the combustion instabilities.

The results of the multiscale technique utilized in this study include systems of macroscopic (i.e. homogenized) combustion models, which are akin to filtration combustion models in porous media, and effective diffusion tensors. The macroscopic models were also investigated in an adiabatic situation to study the development of 2D fingering patterns. We showed the structure of the propagating reaction front in this simple case of adiabatic reverse combustion and also the behavior of various char patterns arising from two equilibrium models that are typically based on contrasting conductivity coefficients.



A Real Options Perspective on Franchising



LUKITO, Adi Nugroho

所属：大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻博士後期課程 1 年
チームフェロー：指導教員 刈屋武昭（モデリング班）
乾孝治（数理解析班），三村昌泰（シミュレーション班）
研究課題：Optimization in Business Format Franchising

研究概要

Recently, franchising has gain popularity as a hybrid organizational form of business operation. Therefore, many scholars have investigated it either using empirical studies or theoretical models to evaluate franchise. However, only few construct dynamic models and take strategic problems into their research. Differing from those previous studies, I try to uses a real options perspective to create dynamic models in order to explain the choice of the governance form and contract design in franchising and also value the decisions of parties involved in franchise contracts.

Dual distribution in franchise

In franchise chain, it is common to observe that the franchisor own several outlets alongside the franchisee's owned outlet. From real options perspective, this dual distribution phenomenon can be seen as franchisor's strategy to expand the network through franchise, but keep the option to own the outlet in the future. Since by expanding through franchising, franchisor can capitalize franchisee's skill to manage risk and share knowledge of the local market while waiting uncertainties to be unfolded in the future. Hence, in this project, I included real option clause (a call option to acquire the franchised outlet) in the franchise contract and consider franchising as an option from franchisor to defer an investment.

Optimal effort within the franchisor-franchisee relationship

In this project I try to prices the options of both the franchisor and the franchisee to participate in franchise. It concentrates on the strategic aspect of the relationship between the parties as regards their optimal choice of effort in order to maximize their option values, in presence of double moral hazard. The association of effort and option value is will be demonstrated through implementation of the model numerically. The results will provide some guidance on contract negotiations and on the designing of the optimal contract for both parties.

With these projects I hope to contribute to an integration of ideas from contract theory, real options analysis and game theory in area of franchise research. By combining analysis from several theories, new insight can be derived from further interdisciplinary research. These projects should be understood as a first step towards more research on the integration of real options into the design of contracts, and vice versa. This seems to be a promising future research area.