

3. 拠点メンバー・研究概要の紹介

2009年度

明治大学グローバルCOEプログラム

DEEPEN

現象数理学の形成と発展

モデリング班

リーダー

岡部靖憲	KM ₂ O-ランジュヴァン方程式論とそれに基づく時系列解析
向殿政男	安全確保における機械と人間とのリスク分担に関する研究
刈屋武昭	(1)社債価格プライシングモデルとその応用 (2)百貨店ブランドと価値創造経営と価値評価 (3)環境CSRと自己循環型リサイクルモデル
森啓之	スマートグリッドのための最適化、予測、ルール発見の研究
小林亮	生物の形態形成と運動の研究
荒川薫	人間の感性を考慮した映像音響処理 —インタラクティブ進化計算による劣化画像復元及び美観化—
西森拓	移動する要素集団のダイナミクスと機能の解明
柴田達夫	細胞の情報処理や初期発生転写調節のフィジカルバイオロジー
若野友一郎	数理モデルによる生物進化の解明

数理解析班

リーダー

砂田利一	量子ウォーク —量子の世界で動き回ること—
三村昌泰	自己組織化現象の数理解明
玉木久夫	組み合わせ最適化の理論的基礎と現象数理学への応用
二宮広和	拡散・伝播現象やパターン構造の数理

シミュレーション班

リーダー

草野完也	シミュレーションによる太陽フレア発生過程の再現
杉原厚吉	錯視効果を組み込んだアート創作支援システムの開発： 「君もエッシャーになれる」プロジェクト
上山大信	化学反応沈殿系に現れるパターン形成メカニズムの解明

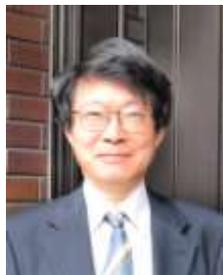
研究協力者

中村和幸	データにもとづく推論と予測：データ同化と非線形SSA
池田幸太	反応拡散方程式系に現れる空間パターンの解析
占部千由	生物系における大規模集団運動の現象数理
木下修一	遺伝子ネットワークのループ構造が発現ダイナミクスに与える影響
中橋渉	学習能力の進化の理論的研究
友枝明保	渋滞現象の解明と緩和策
堀内史朗	コミュニティ形成の理論・実証的研究
末松J.信彦	生物・無生物の集団運動により生まれる時空間パターン
西村信一郎	細胞遊走のシミュレーション

MIMS Ph.Dプログラム学生

吉川満	金融市場のマイクロ構造における進化ゲーム理論からのアプローチ
土居英一	市場データを用いた国債価格推定モデルの実証研究
藤間真	3種の競合する個体群の螺旋状をした動的な共存状態の研究
日高徹司	実験計画法と時系列解析を用いた広告の効果測定手法の開発
祖建	Evolution of phenotypic traits in a predator-prey community

KM₂O-ランジュヴァン方程式論と それに基づく時系列解析



岡部靖憲 OKABE Yasunori モデリング班リーダー

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学工学部教授

専門・学位： 確率過程論と時系列解析, 理学博士・大阪大学

研究内容： 時系列データのモデリングおよび解析

研究概要

- (1) 複雑系現象の時系列解析として、「複雑系現象の時系列解析」の研究集会を駿河台のキャンパスで7月より隔月に行い通算5回開催した。私は太陽風・磁気嵐・オーロラ・地震の地球物理現象の時系列に対し、それらの現象のイベントが発生する前後のダイナミクスの構造がどのように変化しているかを調べるために、KM₂O-ランジュヴァン方程式論に基づく時系列解析のダイナミクス性のTest (DYN)を適用した。特にオーロラの現象に対しては、局所非線形(6, 2)型のダイナミクス関数のグラフを見ると、同じイベントに対してオーロラは3回発生するが、1回目の発生の前後はグラフの変動が激しく、2回目と3回目の発生の前後はグラフの変動に変化がないという特徴があることが分かった。来年度は他のオーロラのイベントを調べ、地球物理現象の専門家である九大の湯元教授と議論を行い、オーロラのダイナミクスに関する未解決問題に新たな知見を与えたい。
- (2) KM₂O-ランジュヴァン方程式論の理論的研究として、連続時間の正規定常過程の局所的ダイナミクスを記述するKM₂O-ランジュヴァン方程式の係数である揺動散逸系と共分散関数の間に成り立つ非線形の揺動散逸方程式系を、共分散関数が与えられたとして、解く定理を証明した。さらに、上記のKM₂O-ランジュヴァン方程式に伊藤の公式を適用して、時間遅れのある2階楕円型の偏微分方程式を導いた。これは、拡散性を持つ確率過程に付随する2階楕円型方程式に対応するもので、定常性を持つ確率過程に対しては今まで知られていない。
- (3) KM₂O-ランジュヴァン方程式論の解析数論への応用として、リーマンのゼータ関数は鏡映正值性を満たす連続時間の正規定常過程の共分散関数となることに注目し、(2)で述べた非線形の揺動散逸方程式系を用いて、リーマンのゼータ関数が時間遅れのある常微分方程式を満たすことを証明した。これはヒルベルトが1900年にパリで開かれた第2回国際数学会議で、リーマン予想と関連して、リーマンのゼータ関数は代数的な常微分方程式を満たさないことを示したこと、に対する注意すべき結果である。

安全確保における 機械と人間との リスク分担に関する研究



向殿政男 MUKAIDONO Masao

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート副所長
明治大学工学部教授

専門・学位： 安全学，工学博士・明治大学

研究内容： 不確定なシステムのモデリングおよび解析

研究概要

人間が設計，製作，管理，利用する“モノ”を中心にしたモノづくりの安全，すなわち“モノづくり安全”について研究をしている。そのためには，安全の考え方と安全の定義について考えてみる必要がある。まず，リスクの概念に基づき，安全を定量的に，合理的に，客観的に定義する。また，“モノの安全”を通して安全を考えることは，技術的に作るという側面だけではなく，組織や制度，更には人の心理・行動まで考えざるを得ないから，必然的に，更に広い意味の安全に対しても，例えば，都市における安全や犯罪の防止等まで，極端なことを言えば安全保障等の領域まで含めた幅広い分野に対して，共通した安全の枠組みを見出すことが必要になる。本年度は，これら安全の理念的側面と共に安全の包括的な構造について考察した⁽¹⁾。

現代社会では，高度な技術に基づいた各種の製品や機械が，家庭や職場や地域等に広く入り込んでいる。その利便性を享受する一方で，私たちの生活の安全が脅かされる事故も多発している。本研究では，これまでの我が国における安全と安全技術に対する考え方を概観すると共に，世界の流れをサーベイし，例を通して，我々一般の消費者や利用者は，どのような時に安全と考え，安心できないと感じ，どのように事故に対して反応しているかなど，事故と責任の問題と事故調査のあり方に触れると共に，サービスロボットを例にして，リスクと便益性を持った製品は，どのような考え方と仕組みを構築すれば，安全な製品として社会に受容される様になるかについて考察した⁽²⁾。

一方，技術的アプローチに関しては，国際安全規格 ISO，IEC の基本的概念に基き，未然防止に対する新たな考え方（ニューアプローチ）が重要であり，存在するすべての危険源を科学的，工学的に捉え，事前に同定し，取り去る考え方，つまり，安全化はすべてリスクアセスメントベースで考えるべきであることを主張し⁽³⁾，この観点から，最近の自動車のリコールやヒューマンインターフェースの問題等について，提案をした⁽⁴⁾。

参考文献

- (1) 向殿政男，安全の理念，学術の動向，Vol. 14, No. 9, pp. 14-19, 日本学術会議，2009-9
- (2) 向殿政男，安全技術の現代的課題と社会的受容性，精密工学会誌，Vol. 75, No. 9, pp. 1041-1044, 精密工学会，2009-9
- (3) 杉原健治，向殿政男，安全設計の基本概念，品質，Vol. 39, No. 4, pp. 7-15, 品質管理学会，2009-10
- (4) 向殿政男，ユーザー視点で安全を再考せよ，不具合連鎖～「プリウス」リコールからの警鐘～，トヨタリコール問題取材班，日経 BP 社，pp. 130-135, 2010-3

(1)社債価格プライシングモデルとその応用

(2)百貨店ブランドと価値創造経営と価値評価

(3)環境 CSR と自己循環型リサイクルモデル



刈屋武昭 KARIYA Takeaki

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学グローバル・ビジネス研究科教授
一橋大学名誉教授

専門・学位： 金融工学, PhD・ミネソタ大学, 理学博士・九州大学
研究内容： 金融のモデリングおよび解析

研究概要

(1) 社債価格プライシングモデルとその応用

昨年度に引き続き、複数の事業リスクを持つ企業を前提とした社債モデルの定式化をさらに進めた。特に、モデルの持つ意味を明確にし、数理ファイナンスでのモデルとの違いを指摘し、提案するモデルの現実性をモデルの構造に従って、議論した。推定問題では、相関行列が導出しようとする倒産確率の期間構造のパラメータに依存するため、一般化最小二乗法の最適化を提案。また、応用として、銀行の信用リスクマネジメントやCDSのプライシングを議論した。

(2) 百貨店ブランドと価値創造経営と価値評価

日本の百貨店のビジネスモデルの特徴としての委託取引制度がある。本稿では、この制度から得られる選択肢を経営上の重要な戦略的オプションとして理解し、それを有効利用する経営問題を考察する。特に、このオプションをブランド価値創造経営の視点から考察・分析し、ブランドに関する価値創造ERM(エンタープライズ・リスクマネジメント)経営のあり方と価値評価法を議論する。評価では、商業用不動産賃貸ビジネスと比較し、その視点から委託取引に根差したリスク・リターンに関する収益還元価値による経営のあり方、またブランドの視点から、商品品揃えポートフォリオの選択について、ブランドによるプレミアム価値を考察した。

(3) 環境 CSR と自己循環型リサイクルモデル

環境CSR(Corporate Social Responsibility, 企業の社会的責任)の無形資産化による企業価値創造プロセスの考え方の問題を考察し、具体的事例として清涼飲料水産業における生産過程で残渣となった排出物(バイオマス資源)の自己循環型リサイクルモデルの可能性を扱い、バイオマス資源を活性炭にして利活用する定量的モデルを定式化した。そして、そのモデルに基づいて、この自己循環型リサイクルモデルを実践する場合のコスト・ベネフィット分析を行い、シミュレーションにより価値評価すること。実践的意味を与えるため、事例としてはコカ・コーラ社を想定し、データは公開されているもののみを利用して、分析した。

スマートグリッドのための 最適化, 予測, ルール発見の研究



森啓之 MORI Hiroyuki

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学工学部教授

専門・学位： 知能情報学, 工学博士・早稲田大学

研究内容： インテリジェントシステムのモデリングおよび解析

研究概要

2009年度は主に、スマートグリッド環境下の配電ネットワークと送電ネットワークにおいて、次の3つのことについて研究した。

- (1) スマートグリッド環境下における配電ネットワークの拡張計画
- (2) スマートグリッド環境下における発電機の起動停止計画
- (3) スマートグリッド環境下における送電ネットワークにおける電圧安定度解析

上記の(1)では、分散電源の再生可能エネルギーである風力発電ユニット出力とノード負荷が確率的に変動スマートグリッド環境下において、ネットワーク計画を効率良く行うために、3つの多目的関数(新規設備コスト、配電ネットワーク損失、電力品質)を最適化し、パレート解集合を効率よく求める研究を行った。従来のGA (Genetic Algorithm) をベースにするアルゴリズムでは、大域的最適化として解の精度、パレート解集合としての解の分布に関して必ずしも良好な結果が得られないため、GAと局所探索を組み合わせたMA (Memetic Algorithm) について検討した。風力発電ユニット出力とノード負荷などの配電ネットワークにおける不確定性を考慮するために、モンテカルロシミュレーション (MCS) を行い、尤もらしい配電系統拡張計画パターン評価について研究した。さらに、MCSの解の収束特性を高めるために、ネットワークのノード指定値間の相関を考慮したMCSを適用し、良好な結果を得た。

上記の(2)では、スマートグリッド環境下における24時間の48断面で発電機の起動停止問題を解くために、ハイブリッドメタヒューリスティクス手法を提案した。起動停止問題は、離散数と連続数の変数から構成される混合整数計画問題であり、従来法では解くことが容易でないことが知られている。そこで、本研究では、実行可能解である初期値を生成するためにGRASPアルゴリズムを使用し、また、混合整数計画問題を解くために、二層のメタヒューリスティクス手法を考案した。第一層は、発電機の起動停止状態を求めるTS (TabuSearch) であり、第二層は、発電機出力を求めるPSO (Particle Swarm Intelligence) から構成される。二層のメタヒューリスティクス手法の性能を向上させるために、TSには、戦略として、優先リストTSと可変近傍を導入し、他方、PSOには、パラメータ調整を適応的にするためにEPSOを導入、良い結果が得られた。

上記の(3)では、ランダムに発生された大量の送電ネットワークのネットワーク状態に対して、電圧安定度の限界点へのマージンを連続型潮流計算を求め、学習データを生成した後、任意のネットワーク状態をニューラルネットワークで限界点へのマージンを推定する手法を検討した。限界点のマージンの推定精度を改善するために、作成した学習データをデータマイニング手法のCARTでデータをクラスタに分類し、各クラスタにニューラルネットワークを構築した。各クラスタには、ネットワーク状態のIf-thenルールが格納され、そのクラスタの特徴抽出が可能である。

生物の形態形成と運動の研究



小林亮 KOBAYASHI Ryo 副リーダー

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
広島大学大学院理学研究科教授

専門・学位： 現象数学, 博士 (数理科学)・東京大学

研究内容： 生物の構造形成・運動・情報処理の数理的研究

研究概要

鉄道網・道路網・電力網・電話網・インターネットなど、人・物・エネルギー・情報を輸送するネットワークにおいては、効率・コスト・対故障性といった複数の基準をバランス良く満たす必要がある。生物の作るネットワークは長年の淘汰を生き抜いてきたものであるため、優れたネットワークをデザインするための指針となることが期待できる。我々は、真正粘菌変形体に東京圏の鉄道網を作らせ、実際の鉄道網と同程度の（場合によってはそれ以上の）ネットワークを形成することを示した。さらに、粘菌のネットワーク形成の数理モデルを用いて、粘菌や実際の鉄道網より優れたネットワークをデザインできることを示した。

アメーバプロテウスの運動において、後部収縮による運動機構を数理モデル化した。シミュレーションにより、定速度進行とリズム進行が、尾部の進行速度をパラメーターとして切り替わることがわかった。実験においては、この2つの運動モードを選択的に出すことに成功していなかったが、飢餓処理をして活性度を下げればリズム進行が出るということをこのモデルによって予言し、それは実験によって確認された。

ジャパンスネークセンターに協力を依頼し、ヘビの運動データの収集を行った。ヘビは状況に応じて様々な運動モードを使い分け、時には混在させて、極めて高度な運動を行っていることが明らかになってきた。これに平行して、ヘビの運動の数理モデルを構築し、齟齬関数による自律分散制御則を用いたシミュレーションを行なった。

アメーバ様ロボットを製作し、齟齬関数による自律分散制御の有効性を検証した。ロボットを狭窄空間突入させるシミュレーションを行い、完全な自律分散制御にもかかわらず、原型質量保存則に起因する遠隔相互作用を活用することで自発的な位相調整が行われ、環境依存的な適応的運動機能が創発することを示した。

卵割、特にウニ卵の卵割過程を記述する数理モデルを提案した。植物極と動物極で生成される拡散性の2種のモルフォゲンにより、中心体の運動がコントロールされるという仮説をもとにモデルを構成した。シミュレーションにより、第4卵割までの正常卵割および摂動実験の結果を、不等割まで含めて再現することができた。この結果はモルフォゲンの複雑な分布を仮定せずとも、両極でのモルフォゲンの生成のタイミングの制御だけで、卵割面の方向や位置をコントロールできることを示している。

人間の感性を考慮した映像音響処理 —インタラクティブ進化計算による 劣化画像復元及び美観化—



荒川薫 ARAKAWA Kaoru

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学工学部教授

専門・学位： 画像・音声信号処理, 工学博士・東京大学

研究内容： 知覚システムのモデリングおよび解析

研究概要

人の嗜好や主観評価を考慮した新しい画像処理システムの研究を行った。

具体的にはインタラクティブ進化計算により、人の主観に基づき最適な雑音除去や先鋭化を行うシステム、また、人の顔画像に対して美肌化・小顔化処理を行い、顔画像を人の理想に近づける画像処理システムを提案した。まず、カラー画像に重畳したインパルス性雑音除去を効果的に行う非線形フィルタシステムをインタラクティブ進化計算により設計する方式を提案した。画像信号にインパルス性雑音が重畳した場合、一般にメディアンフィルタにより雑音を除去することができるが、画像成分にも劣化が生じる。そこで、雑音重畳画像の局所的特徴量を求め、その大きさにより、雑音重畳部と非重畳部を識別し、雑音重畳部にのみメディアンフィルタ処理を施すことが考えられる。しかし、この雑音重畳部を正確に識別するのは難しく、各画素周辺における複数の特徴量を用いた複数のルールを適用する必要がある。この場合、複雑なルールを表す多数のパラメータを最適に設定する必要が生じるが、従来の方式ではこの最適設定が困難であった。そこで、インタラクティブ進化計算を新たに導入し、効果的に、しかも、画像に対する人間の主観評価を考慮しながら最適設定を行うことができることを明らかにした。画像信号に重畳した比較的振幅の大きな白色ガウス性雑音の除去に対しても同様にインタラクティブ進化計算による設計が有用であることを示し、良好な処理特性を得ることができた。この際、人間の目には、ぼけた画像より、多少ざらつき感が残っても鮮明な画像を好むという傾向があることが示された。

顔画像に対しては、従来本研究者が研究してきた、非線形フィルタバンクによる肌の不要凹凸成分の除去に加え、輝度コントラストを強調することにより陰影を強くし、これにより肌を滑らかに見せるだけでなく、顔を小さく見せることができることを示した。このコントラストの強度と非線形フィルタバンクの平滑度に関する複数のパラメータをインタラクティブ進化計算により設計し、人の主観評価や嗜好を考慮した顔画像美肌化・小顔化システムを実現した。

さらに、音響信号については、混合ガウスモデルに基づく非定常ウィナーフィルタにより、音声からのインパクト雑音除去を効果的に実現することができた。また、窓選択型メディアンフィルタにより、経年劣化映像からのスクラッチ除去を効果的に行う方式を提案した。

移動する要素集団の ダイナミクスと機能の解明



西森拓 NISHIMORI Hiraku

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
広島大学大学院理学研究科教授

専門・学位： 非平衡物理学, 理学博士・東京工業大学

研究内容： 協同現象のモデリングおよび解析

研究概要

我々を取り囲む自然の中には様々なタイプの群れがある。魚の群れや、鳥の群れ、昆虫の群れなどが身近な例である。また、人間社会の中でも、多種の群れ運動がある。車の群れ、歩行者の群れなどについては、それらの流量や渋滞度が社会全体の生産性に大きく関連してくる。また、バルハンと呼ばれる孤立砂丘は群れを作って運動することで、道路やパイプラインなどの人造物に甚大な被害を与える。これらの群れ運動に関して、観測や実験データに基づいた現象数理模型を構成し、数値実験や解析を通じて理解していくのが我々の研究内容である。2009年度は次の3点に焦点を絞って議論を進めた。

1. 昆虫の走化性や走光性に関する知見を利用した粒子集団の流れ模型の構築と解析。
2. バルハン・横列砂丘の形成や運動を統一的に捉えるための新しい数理模型の構築。
3. 群れのダイナミクスにおよぼすゆらぎの影響の数理的解析。

1 に関しては、広島大・理・数理分子生命理学専攻博士前期課程大学院生の藤井雅史氏らと共同で、アリの走化性をヒントにして、従来の対面通行歩行者流の数理模型に、フェロモンの分泌・誘因の要素を組み入れた数理模型を研究してきた。2008年度には、歩行者の密度やフェロモンの蒸発量に依存してフェロモンによる作用が渋滞を事前に食い止め流量を向上させ得ることを数値的に示したが、2009年度には、渋滞を起こした空間領域を「クラスター」と名付け、クラスターサイズの時間発展をランジュバン方程式として表すことで、前年までの結果が見通しよく解釈できることを示した。具体例として、非渋滞-渋滞の転移を、(渋滞クラスターサイズに関する)サドル-ノード分岐として解釈できることを示した。また、世界でもまだ希少な「群れ運動の定量的実験」として、樟脳ボート集団の運動を本グローバル COE 博士研究員(広島大・理・数理分子生命理学専攻)の末松信彦氏が行っているが、末松氏らと共同で円環状の水槽内での樟脳集団運動に関して、樟脳ボート密度に依存して、非渋滞-渋滞転移が発生することを示し、対応する数理模型を構成し実験との定量的一致を見た。また従来の交通流の模型の範疇では収まらない、新しい集団運動モード(クラスターモード)を発見した。

2 に関しては、各砂丘がほぼ独立して移動していく「バルハン」と呼ばれるタイプの孤立砂丘と、「横列型砂丘」と呼ばれる横方向に尾根が長く伸びた砂丘の運動を統一的に扱う連立常微分方程式を新たに導出した。これらの成果は、2009年度内には査読付きの会議録で発表された。

3 に関しては、広島大・理・数理分子生命理学専攻博士前期課程大学院生河合良介氏らと共同で、複数素子からなる系の確率共鳴の数理模型の研究をすすめ、素子毎に異なる大きさの白色ノイズを外部信号に付与することで神経系の応答特性が大きく向上することを神経系の数理模型で示した。

細胞の情報処理や初期発生転写調節の フィジカルバイオロジー



柴田達夫 SHIBATA Tatsuo

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
広島大学大学院理学研究科准教授

専門・学位： 数理生命科学, 博士 (学術)・東京大学

研究内容： 細胞内プロセスおよび細胞間プロセスのモデリングおよび解析

研究概要

細胞は大きさが1から数10マイクロメートル程度のきわめて小さいシステムだが、環境の変化に応答したり、必要なことを記憶したりといったおおよそ生物に必要な機能の多くを備えている。実験技術の発達で、細胞の内部で起こっている構造形成、情報処理、機能発現の、ゆらぎのともなうダイナミカルなプロセスが見えてきた。また分子生物学の発展で細胞プロセスを構成している分子や反応の情報が膨大に蓄積してきた。細胞のダイナミカルなプロセスの仕組みを解明するためには、これらの情報を統合し、定量性の高い実験に数理科学の知識を総合的に用いたデータ解析、数理モデル、理論解析の必要性が高まってきている。

近年、細胞内部において反応拡散系的な仕組みによって時間-空間的構造や細胞の多様性の形成されることが多数報告されている。力学系の観点から見れば、時間的振動、空間パターン、多安定性などが起こっていて、それぞれの文脈で重要な機能を担っている。細胞のスケールでは反応の確率的性格は顕著だから、それらの構造形成の仕組みは確率的なノイズに対して頑強である必要がある。一方で構造形成の仕組みは、素過程の確率性を巨視的スケールに増幅し細胞の振る舞いに多様性をもたらすという、一見相反する性質を兼ね備える。これらがどのようにして可能になるかを実際の1細胞蛍光イメージデータの解析や数理モデルの構築・解析を通じて研究を進めている。その結果、運動性を持つ真核細胞が極性を自発的に形成し、運動するための仕組みが数理的な視点から少しずつわかってきた。

また、発生は細胞内の反応プログラムを正確に作動させて、1細胞から様々な種類からなる細胞を生成し空間的に調和のとれた構造を形成する過程である。細胞スケールの遺伝子や蛋白質の機能発現過程は確率的にゆらいでおり、発生過程においてそのゆらぎがどの程度で、またどのように制御されているかは発生生物学上の大きな課題である。このテーマに実験と理論からアプローチするために、広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻の山本卓教授のグループと共同して発生過程の遺伝子の働きを時間的にモニターする方法を開発している。発生の初期における複数の遺伝子の転写を調べ、統計的な解析を進めたところ、いくつかの遺伝子が同調的に働いている様子がわかりはじめてきた。

数理モデルによる生物進化の解明



若野友一郎 WAKANO Joe Yuichiro

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学研究・知財戦略機構特任准教授

専門・学位： 数理生物学，博士（理学）・京都大学

研究内容： マクロ生物系・生態系のモデリングおよび解析

研究概要

昔から人類は、生物の持つ美しさ、複雑さ、精緻さに惹かれてきた。物理現象が神の意思ではなく、科学によって説明できることが明らかとなったあとでも、生物現象だけは理屈では説明できない神聖なもの、という認識が長く続いた。一方で人類は、植物や家畜は品種改良を繰り返すことで、その姿や性質が変化することを知っており、それを利用してきた。ここで重要なことは、姿や性質の変化が、次世代へと遺伝することである。現在の言葉で言えば、遺伝子に変化が起きるのが、品種改良である。このような人為的な品種改良によって、数千年程度で大きな遺伝子の変化が起こるならば、より長い時間をかければ、いまある全ての生物種は自然に起こった品種改良、すなわち進化の結果なのではないか、と説いたのがダーウィンである。

ダーウィンは自分の理論の論理的な正しさの保証として、数学を用いることが出来なかった。言葉による議論は、つねに曖昧さや誤解の種を生む。実際ダーウィンの著書「種の起源」は、激しい批判に対応・反論するために改訂に次ぐ改訂を重ねている。当時に比べ現在の進化生物学は、論理展開に数理モデルを用いることによって、論理の正しさを数学の力を借りることで保証できる。我々研究者は進化の問題を、現実はどうなのかという問題（数理モデルと現実との対応）と、そのモデルはどういう振る舞いをするのか（数理モデルの論理構造、数理解析）とに分けて考えることができるのである。

私は、現実の現象から数理モデルを構築する作業と、数理モデルそのものの解析の両方を行っている。このアプローチは、現象数理学の理念と完全に一致するものであり、本拠点の他の研究者と協力しながら各種の研究を進めている。本年度は、二次元空間上の生態的公共財ゲームにおける協力行動の進化に関する研究論文を発表した[1]。また、複数人囚人のジレンマゲームにおける寛容さの進化、Allee効果を持つ被食捕食系における形質の進化に関する数理的研究も行った。また、2009年からJST さきがけ事業に採択された研究課題「生物進化の2大理論の統一的理解」は、進化数理モデルとして広く適用されてきた包括適応度理論とAdaptiveDynamics理論が、数理モデルの観点から見れば統一的に理解できるのではないか、という視点に立った理論的研究である。今後も、積極的に数理科学の研究者と意見交流を図りつつ、数学の力を駆使して進化現象の理解を深めるとい現象数理学の理念に沿った研究を続けていく。

[1] Wakano JY, Nowak MA & Hauert C (2009) Spatial Dynamics of Ecological Public Goods. Proceedings of National Academy of Sciences of the USA 106:7910-7914

量子ウォーク

—量子の世界で動き回ること—



砂田利一 SUNADA Toshikazu 数理解析班リーダー

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学工学部教授

専門・学位： 離散幾何解析学，理学博士・東京大学

研究内容： ネットワークシステムの解析

研究概要

ランダム・ウォークは、ネットワーク（グラフ）の上の確率過程であり、前世紀から様々な応用を組み込みながら研究されてきた。特に、位相的結晶（結晶格子）上のランダム・ウォークについては、1次元格子上的ラプラスド・モアブルの定理を代表的モデルにして、様々な極限定理が成り立つことが知られている（例えば中心極限定理、局所極限定理、大偏差の性質）。そして、幾何学的観点を加味することにより、極限定理が位相的結晶自身の構造と関連すること、例えば位相的結晶の最も大きい対称性を持つ実現（標準的实现）が、中心極限定理と深く関わるのが小谷・砂田の理論において明らかにされた。その手法は、砂田が開発した離散幾何解析学とよばれる分野で培われたものである。

量子ウォークは、ランダム（古典）・ウォークの「量子版」である。古典ウォークが、賽投げのような「外部」からのランダムネスを必要とするのに対して、量子ウォークは量子力学自身が持つ確率的様相が引き起こすウォークであり、近年量子コンピュータの研究に伴って大きく進展してきた分野である。例えば、1次元格子上の量子ウォークは、1次元ディラック方程式の解の離散化として定義される。量子ウォークの場合には、左右へ移動する確率がスピノールに作用する2行2列の行列で置き換えられ、従って、量子ウォークは「表面上」は古典ウォークの「非可換化」と考えられる。そして、今野氏の研究により明らかにされたように、1次元量子ウォークに対する推移確率の分布は、（適切なスケール変換の下で）ある連続な確率分布に法則収束することが分かる。

本研究では、1次元の場合に今野氏の結果の部分的精密化を与えた。これは、古典ウォークの場合の大偏差的漸近挙動の類似としても捉えられるが、他方では古典ウォークとはまったく異なる漸近挙動を示す結果である。

さらに、一般のグラフ上の量子ウォークの適切な定義を与え、一見「非可換的」な様相を持つ量子ウォークが実際には「可換な世界」で扱われることを明らかにした。すなわち、ベクトル値の量子ウォークをスカラー値の量子ウォークに帰着させることができるのである。また、位相的結晶上の量子ウォークの漸近挙動を離散幾何解析の観点から研究し、1次元の場合を部分的に一般化した結果を導くことに成功した（現在、論文を執筆中である）。しかし、未解明な問題が数多く残されており、現在も研究を続行している。

自己組織化の数理的解明



三村昌泰 MIMURA Masayasu リーダー（研究統括）

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所長
 明治大学理工学部教授

専門・学位： 現象数理学，工学博士・京都大学

研究内容： 非線形非平衡現象の数理解析

研究の背景と概要

自己組織化という言葉は1947年、精神科医であり、サイバネティクスの先駆者である R. Ashby によって用いられたのが最初であろうが、その考えをとり入れた数学モデルが1952年に登場した。イギリスの数学者 A. Turing は、当時の生物現象の中で謎であった形態形成の仕組みを単純な微分方程式を用いて説明し、「拡散は空間非一様化を促進する」という拡散パラドックスを示したのである。このことは、生物現象は必ずしも遺伝子命令というトップダウンだけではなく、複数の形態因子の拡散と相互作用の間に適度なバランスがあれば、自発的に起こりうるという示唆であり、まさしく自己組織化的な考え方であった。だが、当時の生物界は分子生物学や分子遺伝学が誕生したばかりで、この考えは認められなかったのである。その理由は、彼の用いたモデルは生物系そのものを記述したのではなく、本質のみを取り出すというメタファー（隠喩）であったためである。同じ年、イギリスの神経生理学者の A. L. Hodgkin と A. Huxley は神経軸索上を一定速度で伝搬する膜電位差パルス波に対してイオン説を提唱し、それに基づいて、数学モデルを導出した。しかしながら、当時の解析手法では解くことが出来なかったが、彼等にとって幸運であったのは、当時としては大規模高速計算機が登場したことから、モデルは実験で観察されたパルス波を見事に再現したのであった。こうして、「拡散は反応と結合することから、波を発生する」という第2の拡散パラドックスが生まれたのである。その後、自然、社会科学分野に現れる様々な複雑現象から、これらのパラドックスは自己組織化を引き起こす本質的な機構であることが明らかになってきた。以上のような背景が研究の発端になっている。自己組織化現象の数理に関連して2009年度に発表した論文は以下である。

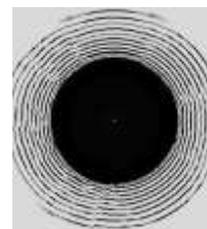
[1] X.-C. Chen, S.-I. Ei and M. Mimura: Self-motion of camphor discs: Model and analysis, *Networks and Heterogeneous Media* 4, 1-17 (2009)

[2] D. Hilhorst, R. van der Hout, M. Mimura and I. Ohnishi: A mathematical study of the one dimensional Keller and Rubinow model for Liesegang bands, *J. Statistical Physics*, 135, 107-132 (2009)

[3] D. Hilhorst, M. Mimura and H. Ninomiya: Fast reaction limit of competition diffusion systems, to be pressed in *Handbook of Differential Equations: Evolutionary Differential Equations*, vol. 5, eds. C. Dafermos and M. Pokorný, Elsevier, 105-168 (2009)



実験に現れるリーセガンクスパイラル



シミュレーションによるリーセガンクスパイラル

組み合わせ最適化の理論的基礎と 現象数学への応用



玉木久夫 TAMAKI Hisao

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学工学部教授

専門・学位： 計算の理論, PhD・トロント大学

研究内容： 計算とアルゴリズム理論

研究概要

組み合わせ最適化について、理論的基礎から応用まで幅広く研究した。

理論的側面では、巨大近傍局所探索法の基礎としてグラフの分枝分割についての研究に力を入れている。全体の構想については、前年度の報告で述べた。2009年度は、Simon Fraser 大学の Qianping Gu 教授とともに、平面グラフの分枝分割の近似アルゴリズムや、平面グラフの分枝幅の最大格子マイナーの大きさに対する比の新しい上限などについての研究に努力を集中した。グラフ G の分枝幅を $bw(G)$ 、 G が $g \times g$ 格子をマイナーとして持つような最大の g の値を $gm(G)$ であらわすとき、平面グラフ G に対しては、 $bw(G) \leq 3gm(G) + 1$ が成り立つことを示した。これは、Robertson, Seymour と Thomas による不等式 $bw(G) \leq 4gm(G) + 1$ の改良である。右辺の定数は、この不等式に基づいた多くのアルゴリズムの実行時間を表す関数の指数部に現れるので、この改良は重要である。この結果については、証明の詳細を2編のテクニカルレポートとしてまとめ、それを総合したものを国際会議に投稿中である。また、この不等式の構成的な証明をアルゴリズム的に掘り下げて、平面グラフに対する最小幅の分枝分割を求める問題および最大の格子マイナーを求める問題の双方に対して $O(n^{1+\epsilon})$ 時間の定数近似アルゴリズムを開発した。この結果は、2009年12月の International Symposium on Algorithms and Computation で発表した。

応用面では、グラフ描画などの計算機科学的な応用についての研究を進める一方で、現象数学、特にシミュレーションへの応用を模索して来た。前年度の報告で述べた、太陽磁場における180度の不定性を取り除く問題に対して巨大近傍アプローチのプログラムを完成し、サンプル入力に対して、目的関数の値をかなり下げることができることを確認したが、本格的な評価はこれからである。また、遺伝子ネットワークのモデルとして研究されているブーリアンネットワークの解析に分枝分割が応用できるかどうかを検討した。その結果、分枝分割を直接応用する方法を見出すことはできなかったが、関連した概念である有向パス分割を用いることによって、従来はシミュレーションによるサンプリングで行うことしかできなかった解析を厳密に行うことができる場合があることを見出した。このアプローチについては現在論文としてまとめているところである。

また、分枝分割とは独立な問題として、無向グラフの各辺を一方向に向き付けし、頂点間の有向距離をできるだけ小さく保つという問題についても研究を行った。この問題は、工場や市場における一方通行の設定の仕方が動機になっている。この結果の一部は2009年12月の International Symposium on Algorithms and Computation で発表した。

拡散・伝播現象やパターン構造の数理



二宮広和 NINOMIYA Hirokazu

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
 明治大学工学部准教授

専門・学位： 非線形偏微分方程式，博士（理学）・京都大学

研究内容： 拡散・伝播現象やパターン構造の数理

研究概要

拡散現象とは、化学物質や粒子などがランダムに運動することを表しており、次第に一様化する効果や不可逆性をもっている。しかし、拡散効果は、反応との関係でさまざまな役割を果たすことが知られている。1952年 A. Turing によって、「拡散は空間非一様化を促進する」という現象が発見され、規則的なパターン形成の要因を説明した。これは、拡散不安定性として、パターンを作るひとつのメカニズムとして現在でも重要な考え方の一つになっている。

有限時間に解が無限に発散することを爆発という。我々は、爆発が起きないような反応系（常微分方程式系）に拡散現象を加えると爆発が起きることを1998年に発見し、拡散誘導爆発と名付けた。このような拡散と反応の相互作用によって何が引き起こされるのか、相互作用を引き起こす要因について研究している。

一方、拡散と反応の相互作用によって伝播現象もよく観察される。伝染病や化学物質の伝播を考えると想像しやすい。伝染病などが空間的に広がっていく際、一定の形状を保って、広がっていくことが多い。このような解は進行波解と呼ばれ、パターン形成にも重要な役割を果たしている。特に伝播の速度や伝播の形状が問題となる。現在、多次元空間における進行波解の構成を行っている。伝播している境界の形状が、V字型であるV字型進行波解、指状に伸びていく指状進行波解、孤立した状態で移動していくスポット進行波解の構成を行っている。

以上のように、拡散をさまざまな側面から調べることによって、非線形構造の解明を行っている。

2009年度研究業績

1. D. Hilhorst, M. Mimura, H. Ninomiya: Fast Reaction Limit of Competition-Diffusion Systems. In: C.M. Dafermos and Milan Pokorny, editors: Evolutionary Equations, Vol 5, Handbook of Differential Equations, Hungary: North-Holland (2009), 105-168
2. J.-S. Guo, H. Ninomiya and J.-C. Tsai: Existence and uniqueness of stabilized propagating wave segments in wave front interaction model, Physica D: Nonlinear Phenomena 239 (2010) No. 3-4, 230-239

シミュレーションによる 太陽フレア発生過程の再現



草野完也 KUSANO Kanya シミュレーション班リーダー

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員

明治大学理工学研究科客員教授

海洋研究開発機構地球シミュレータセンター・プログラムディレクター

専門・学位： シミュレーション科学，理学博士・広島大学

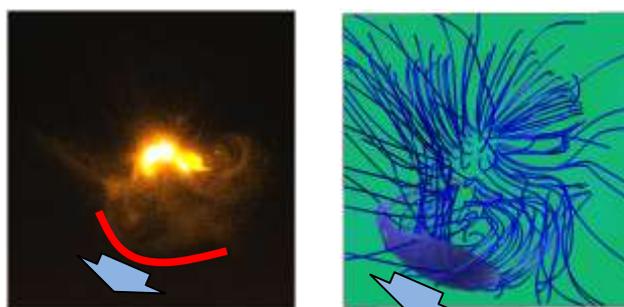
研究内容： 大規模階層系のモデリングおよびシミュレーション

研究概要

太陽系最大の爆発現象である太陽フレアは、太陽黒点の周辺に蓄積された磁気エネルギーの解放過程であると考えられている。また、その発生が突発的であることから、地震や雪崩など蓄積解放型のカタストロフ現象と共通するメカニズムを持つことが示唆されている。しかし、未だにその発生原因を十分に説明する理論モデルは確立していない。我々は、我が国が打ち上げた最新の太陽観測衛星「ひので」によって2006年12月13日に観測された、太陽表面磁場の精密データに基づき、実際の太陽フレアを再現する数値シミュレーションの実現に初めて成功した。

この研究では、第1に太陽磁場データを境界条件として太陽コロナの3次元磁場を、平衡方程式に基づいて数値的に求めた。第2に得られた平衡磁場に様々な擾乱を与えることで、その3次元安定性を地球シミュレータを利用して解析した。その結果、フレアが発生した領域の太陽表面に一定の運動を加えた場合、平衡磁場が不安定化し、フレアに対応するプラズマの噴出が発生することをシミュレーションによって再現することができた。プラズマ噴出の結果、太陽から惑星間空間へ向かう衝撃波が形成されることも計算から求めることができた。これらの結果は、「ひので」衛星がX線で観測したプラズマの急速な運動と一致しており、現実のフレア現象に対応するものである。

太陽フレアは人工衛星や宇宙通信、地上電力網などの様々なインフラに甚大な被害を及ぼす可能性があるため、本研究はそうした激しい宇宙天気現象の数値予報へ向けた重要な成果でもある。本研究の成果は朝日新聞、京都新聞、産経新聞、中日新聞、日刊工業新聞、毎日新聞、及び読売新聞など各紙で取り上げられた。



図：左は「ひので」衛星が捉えられた太陽フレアのX線像。赤線の構造が急速に矢印の方向へ伝播する様子が観測された。右はシミュレーションで再現された磁力線と衝撃波面。

錯視効果を組み込んだ アート創作支援システムの開発： 「君もエッシャーになれる」プロジェクト



杉原厚吉 SUGIHARA Kokichi

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート副所長
明治大学研究・知財戦略機構・特任教授

専門・学位： 幾何数理工学，工学博士・東京大学

研究内容： 物理現象・生体現象・社会現象の計算数理

研究概要

オランダの版画家エッシャーの作品を例に取り，芸術創作を支援する図形生成アルゴリズムを開発した。ここで取り上げたのは，一種類のタイルで平面を埋め尽くすタイルングアート，タイルの連続変形と図と地の反転を組み合わせたモーフィングアート，あり得ない立体を素材に用いた不可能図形の3種類の作品群である。

エッシャーはその作品作りにタイルングなどの数学的構造を陽に用いているため，それに似たパターンを数理的に生成することは比較的容易である。しかし，単に数理的構造をまねたのでは，無機質なパターンが得られるだけで，芸術からは程遠い。この数学と芸術のギャップを埋めるものは，エッシャーの場合は，錯覚を利用した視覚効果であるというのが私の見解である。

この見解に基づいて，数理的な図形生成アルゴリズムに，視覚効果のモデリングとその最適化という要素を加えるという方針で，3種類の作品群のそれぞれに対して，エッシャー風図形パターンを生成する計算機支援システムを試作した。

一種類のタイルによるタイルングでは，ユーザが与えたシルエット図形に対して，それに最も近いタイルング可能図形を探索する問題を，対称行列の最大固有値を求める問題に帰着することができた。これにより，従来は，膨大な探索時間を要していたタイル生成計算を，非常に短時間に行うことができるようになった。

第二のモーフィングアートに対しては，図形ではさまれた隙間を新たな図形とみなして図形間の最短連続変形を求めることにより，図と地の反転をスムーズに実現するモーフィングパターンの生成に成功した。エッシャーは，2種類のタイルによる中間パターンから出発して作品作りを行ったが，本手法ではその手順を逆転させて，二つの目標図形をまず与えて，その中間を自動的に埋めることができるようになった。これにより，ユーザの意図がより素直に作品作りに反映できるようになった。

第三の不可能図形生成支援システムは，その立体化手法とともに以前から開発してきたものであるが，性能を改良するとともに，そのシステムを使って動きを伴う不可能立体の新作を多数創作した。これは，エッシャーの2次元アートを3次元化するものであり，エッシャーを超える創作活動を，数理的手法によって実現したということもできる。

以上のような研究活動を通して，エッシャー芸術の背景に潜む数理構造を明らかにし，それを芸術的創作に利用するという新しい学問領域「エッシャー数理学」のスタートを切ることができた。

化学反応沈殿系に現れるパターン形成メカニズムの解明



上山大信 UHEYAMA Daishin

所属・役職： 先端数理科学インスティテュート所員
明治大学理工学部准教授

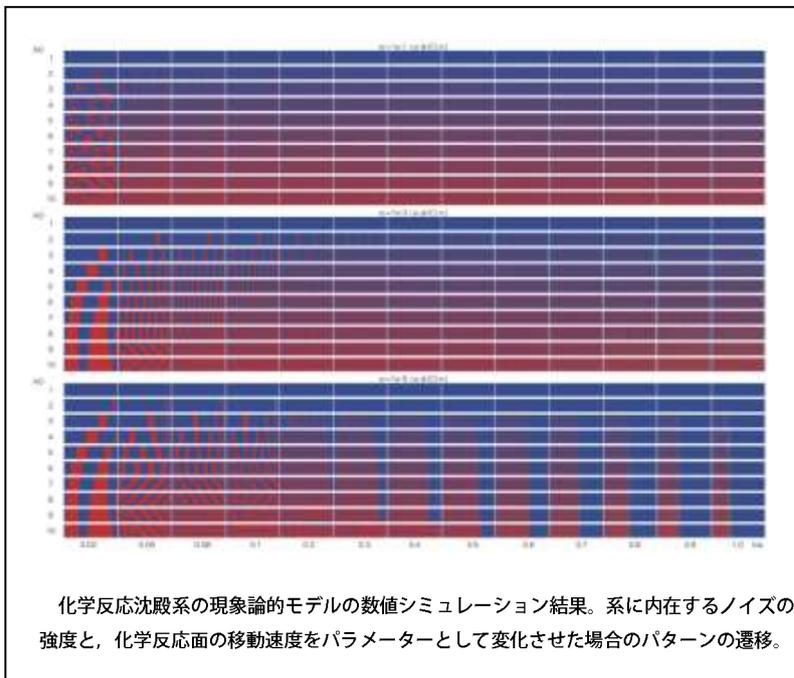
専門・学位： 現象数学, 博士(理学) ・ 北海道大学

研究内容： シミュレーション支援解析

研究概要

化学反応沈殿系(リーゼガング現象として有名)に関して、現象論的モデルの構築およびそのシミュレーションの両面からの研究を行った。これに関連して、2009年より2年間ハンガリー-日本の研究プロジェクトの日本側代表者として参加し、2009年7月には国際ワークショップ「International Workshop on Self-organization in Chemical and Biological Systems: Modeling, Analysis and Simulation」を開催した。ワークショップには、ハンガリーから3名、アメリカより1名、フランスより1名の研究者を招聘し、国内の研究者と共に、化学反応系、生物系に見られる自己組織化現象に対して、活発な意見交換を行った。

現在、パターン形成の問題は、その理論的な発展に加えてパターン自己組織化機構を利用した物作りに興味を持たれている。例えば、現在私が扱っている化学反応沈殿系が生み出す規則正しいパターンは、微小スケールの物作りの基礎原理として応用が期待されており、今後モデルとそのシミュレーションを活用して、応用研究を進める予定である。そのためには、自己組織化機構の外場からの刺激に対する応答を理解する必要があり、これらの問題には、モデリングおよびシミュレーションからのアプローチが大変有効である。



化学反応沈殿系の現象論的モデルの数値シミュレーション結果。系に内在するノイズの強度と、化学反応面の移動速度をパラメーターとして変化させた場合のパターンの遷移。

- Pattern transition between periodic Liesegang pattern and crystal growth regime in reaction-diffusion systems, I. Lagzi and D. Ueyama, Chemical Physics Letters 468 (2009), pp.188-192.

データにもとづく推論と予測： データ同化と非線形 SSA



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
明治大学研究・知財戦略機構・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

時系列・時空間データに基づく推論と予測を通じた現象理解を目指し、そのためのモデリングの技法としてデータ同化ならびに非線形 SSA の二手法を採用して研究を進めている。これまでに、データ同化についてはイベント駆動型システムのデータ同化モデリング、非線形 SSA については現象理解に必要な新拡張の提案を行った。

データ同化とは、物理法則や経験則に基づく偏微分方程式を含む諸方程式から導かれる数値シミュレーションと、実現象で観測されるデータを結びつける手法である。これまでに、地盤変形問題や介入を伴う実験等で現れる、イベント駆動型システムのデータ同化の研究を進めた。イベント駆動型システムとは、動的システムの状態変数に瞬間的に大きな外乱が加えられ、さらに観測データとして状態変数の一部が誤差を伴って得られるシステムである。

現実のイベント駆動型システムでは、外乱が加えられる大まかな時点と規模は分かっているものの、その精密な値を知りたいという場合が多い。そこで、この「大まかな情報」を統計モデルで定式化し、観測データを得る毎に時点と規模の推定精度が上がる統計的モデリングを検討した。その結果、時点と規模のパラメータを一様な事前分布とし、パラメータを状態ベクトル内に含ませる、いわゆる自己組織化モデルによって推定可能であることを確認した。さらに、逐次的に精度を上げていくオンライン推定を行うためには、粒子フィルタを修正した近似アルゴリズムが必要であることがわかり、簡易推定を行うアルゴリズムを得た。これらのモデリングと推定アルゴリズムを、数値実験モデルである Lorenz 96 モデルに対して適用して、その有効性を確認した。

一方、非線形 SSA に関する研究では、GCOE 若手プロジェクトの一環として、経済・工学・理学時系列に対して、異常が発生した時点を検出する高性能なシステムの開発を目指した。サブテーマの一つである「非線形 SSA 版 Test (ABN) の開発」では、これまでに KM20-ランジュヴァン方程式論において展開され開発されている非線形情報解析について、高頻度時系列に対応可能となる新たなパラメータ付けを提案した。これにより、近年の経済・工学時系列に見られる高頻度サンプリングデータに対して、非線形 SSA 版 Test (ABN) の適用が可能となり、精密な異常検出と知識発見の可能性を広げた。もう一方のサブテーマである「SSA によるトレンド除去を利用した異常検出」では、トレンド除去のためのシフト付き局所 SSA 解析を開発し、高頻度データに対する適用を新たに提案した。さらに、低周波成分を含む地震波時系列に対する数値実験を通じて、シフト付き局所 SSA 理論の有効性を確認した。

反応拡散方程式系に現れる 空間パターンの解析



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 SPD

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

様々な現象に現れる空間パターンを再現するため、数多くの反応拡散方程式系が提唱されている。パターン形成問題における主な研究テーマは、空間パターンが持つ数理的な性質を解明することだが、研究テーマは大きく2つに分けられ、空間パターンを再現するために必要な条件を求めることと、複雑な空間パターンを再現できる方程式系を探すことが重要である。

前者の研究テーマに関する研究に、凸領域における未知関数を1つだけ持つ反応拡散方程式系は安定で空間非一様な定常解を持たない、という数学の結果がある。この結果から、空間パターンを再現するには単純な方程式系は不十分であると言える。一方、未知関数を2つ持つ反応拡散方程式系は複雑な空間パターンを再現し得る。ただし再現される空間パターンは非常に複雑である。数理的研究を推進するにはより単純な空間パターンを対象にし、適当な条件を課すべきである。そこで拡散係数の比が非常に大きい状況に相当するシャドウ系を考え、多重スポットの不安定性を一般的に示した。

2つの生物種が競争する様子を記述したLotka-Volterra方程式系では、競争が強い状況で領域を凸に選ぶと、線形の拡散効果を加えても種の共存が期待できない。したがって種が共存するには、例えば領域を非凸にするべきである。実際、ある非凸領域では種は共存する。さらに強い仮定の下では、偏微分方程式を常微分方程式系に縮約できる。この事実は数学的に示されているが、生態学ではあまり知られていない。そこで、本学の若野氏、三村氏、台湾大学の三木氏とともに共同研究を行い、この数学的な事実を生態学に普及したいと考えた。我々は比較的現実的なパラメータを選択しても同様の結果が成り立つことを数値計算によって確かめた。

後者の研究テーマに関する研究では、共同研究者の三村昌泰氏によって提唱された燃焼のモデル方程式の数理的研究を行っている。この方程式系は、実験に現れ、かつ未だ厳密解析では得られていない空間パターンを再現できる。詳しく述べると、あるパラメータを変化させると、一様燃焼面、波状の燃焼面、指状の燃焼面が現れたり、燃焼の反射現象が観測されたりする。これらの空間パターンには共通点があり、1次元進行波解が重要な役割を果たす。そこで、1次元進行波解を構成し、安定であることを示した。今後は本研究を推進し、前述の様々な空間パターンを再現する解を構成することが目標である。

生物系における 大規模集団運動の現象数理



占部千由 URABE Chiyori

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

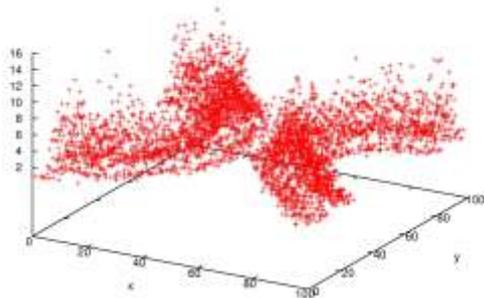
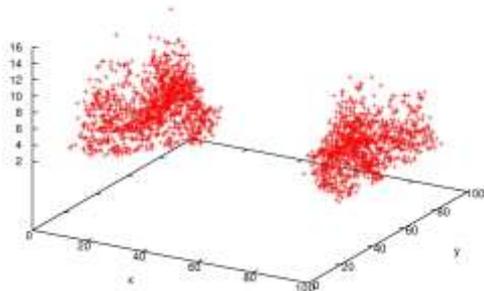
専門・学位： 非平衡統計物理学，博士（人間・環境学）・京都大学

研究内容： 感染症伝播の数理

研究概要

近年，SARS，新型インフルエンザなどの新興感染症が出現し，感染症伝播のメカニズムについて更なる研究が求められている。感染症研究は医学・生物分野において歴史が長く多くの研究がなされているが，感染症の伝播のメカニズムを解明し，伝播を抑止するためには数理モデルの構築・解析といった現象数理の手法が有効である。本研究においては，数理モデルを用い，感染症の特性・感受性者密度と伝播の関係について研究を行っている。

感染症伝播の数理モデルとして，2次元格子系における感染症伝播のシミュレーションを行っている。



各粒子はランダムウォークしながら次の4状態を順にとる：感受性者（感染する可能性のある人），潜伏期間にある感染者（感染させる能力はもたない感染者），感染させる能力をもつ感染者，回復者（免疫を持った人等）。但し感受性者から感染者への状態変化は感染者との接触により確率的に起きる。左図はある時刻のスナップショットである。水平面は粒子の位置，鉛直軸は感染者数を表す。上の図は感染伝播の比較的初期，下の図は感染拡大した様子を示す。ここでは空間については周期境界を採用している。このような感染症伝播において，2つの重要なパラメータがある。1つは潜伏期間の長さ T_e 。もうひとつは，初期状態での感受性者数 N である。今回システムサイズを固定しているため N は感受性者密度と比例する。このモデルの数値シミュレーションの結果から，感染症伝播

モデルの数値シミュレーションの結果から，感染症伝播の様子が N と T_e に依存して変化することがわかった。 N が小さい時には， T_e の大小にかかわらず，感染拡大はほとんど起きない。一方で， N が大きい時には感染症伝播は T_e の大きさに依存する。 T_e が小さい時，感染拡大により回復者数が増大し，感染症伝播は終息する。逆に T_e が大きい時には，感染伝播の波の進行速度は比較的遅く，波のピークも時間的に振動するという現象がみられた。これらのことより，これまでの感染症伝播のモデルでさほど重要視されてこなかった潜伏期間の長さが感染症伝播の様子を記述しうる重要なファクターとなる可能性が示唆された。

遺伝子ネットワークのループ構造が 発現ダイナミクスに与える影響



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 PD

専門・学位： 理論生命科学，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

現在、様々な生物の細胞を理解するために DNA が解析され遺伝子が特定されてきつつある。しかし、細胞の多様性や恒常性を理解するためには、遺伝子を特定するだけでは不十分である。例えば、各個体が持つ全ての細胞が同一の遺伝子をもつにも関わらず、多様な種類の細胞を持つ理由は同一の遺伝子であっても遺伝子発現が異なる点にある。遺伝子は転写因子を介し他の遺伝子に影響を与えており、複雑なネットワーク構造（遺伝子ネットワーク）を構成している。発生初期の条件のわずかな違いが、複雑な遺伝子ネットワーク上の遺伝子発現の時系列パターン（遺伝子発現ダイナミクス）の大きな違いを生み出しているのである。そこで、細胞を相互作用する遺伝子ネットワーク上における遺伝子発現ダイナミクスとみなし、その力学的な性質を知る事で細胞を理解しようという研究の重要性が増している (T.Przytycka et. al 2010)。本研究は上記の立場から力学的な性質に基づいた細胞の新しい分類や細胞特性の予測の実現を目指している。特に、近年明らかにされた遺伝子ネットワーク構造の非一様性に注目し、非一様なネットワーク上における遺伝子発現ダイナミクス（スケールフリーランダムネットワーク、以下 SFRBN）と一様なネットワーク上における遺伝子発現ダイナミクス（ランダムブーリアンネットワーク、以下 RBN）を比較し、遺伝子ネットワーク構造と遺伝子発現ダイナミクスの関係を明らかにし、現実の細胞の特徴（特に、細胞の安定性）を説明する事を考えている。

これまでの研究 (S. Kinoshita et. al 2009) により SFRBN は RBN よりも安定である事が分かった。そして、遺伝子ネットワーク構造の中に遺伝子発現ダイナミクスに大きく関与している重要なループ構造（ICL）が存在する事が分かっている。そこで、各エッジが何個のループに所属するのかを表わす量の分布である edge weight 分布を提案し、RBN と SFRBN での違いについて明らかにした。その上で、edge weight の指標に基づき各エッジを分類し、そのエッジを取り除いた時のアトラクターの変化について統計的に調べた。その結果、我々がこれまでの研究で明らかにしてきた ICL がアトラクターの性質にとって本質的である事を追認する事になった。この結果は、ICL に属する少数の遺伝子発現ダイナミクスについて調べる事で、多数の遺伝子を持つ元の遺伝子ネットワークの遺伝子発現ダイナミクスについて理解できる可能性を示唆している。

学習能力の進化の理論的研究



中橋 渉 NAKAHASHI Wataru

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： 理論人類学, 博士 (理学)・東京大学

研究内容： 学習能力の進化, 性淘汰理論

研究概要

数多くの理論研究が社会学習及び個体学習の進化の問題に取り組んできている。ここでいう個体学習とは、他者から行動を学習するのではなく自力で正しい行動を模索することであり、一方社会学習とは他者から行動を学習することである。先行研究では、環境の安定性が学習進化の重要な要因で、環境が不安定なほど遺伝より学習に依存するようになりやすく、そのなかでも環境が比較的安定なら社会学習、不安定なら個体学習に依存しやすくなるという結論が得られていた。

しかしながら、先行研究は学習への依存度の進化を考えており、学習能力自体の進化は考えられていない。ここでいう学習能力とは、具体的には、個体学習において正しい行動や情報を自力で獲得する能力(個体学習能力)、そして社会学習において他者の行動や情報を正確に受け取り模倣する能力(社会学習能力)のことである。一般に、ある能力への依存度が高くなるとその能力の良化・発達が促されると考えられるが、一方で、得意とする能力により依存するという関係も考えられるので、学習能力の進化がどういう状況で起こるのかは必ずしも自明でない。そこで、この問題を調べるための新モデルを作り解析を行った。

本研究では個体学習回数・社会学習回数・個体学習能力・社会学習能力の4つのパラメータの組み合わせを1つの戦略として考え、その進化的に安定な戦略(ESS)を求めた。ここでいう進化的に安定な戦略(ESS)とは、集団の全個体がその戦略を持つ場合、他の戦略をとる突然変異個体が侵入できないような戦略のことである。また、求められたESSが進化の帰結として実際に達成されるか、すなわちESSがCSSであるかどうかを解析的に確認した。

その結果、以下の知見が得られた。個体学習回数は個体学習能力が高く社会学習能力が低いときに増加し、社会学習回数は個体学習能力と社会学習能力が高いときに増加する。そして学習能力の進化は双安定構造を持つ。よって低能力の平衡点が安定である限り、高能力への進化は起きない。低能力の平衡点が不安定化するの環境の激変が起こったときである。また、高い社会学習能力は高い個体学習能力の進化後に獲得される。人類進化において、学習能力の劇的な発達が始まったホモ属の出現期に環境の激変があったことが分かっている。本研究の結果は、この環境の激変がホモ属の学習能力すなわち知能の発達に大きな影響を与えたことを示唆する。

渋滞現象の解明から渋滞緩和へ



友枝明保 TOMOEDA Akiyasu

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）
法人PD

専門・学位： 渋滞学，博士（工学）・東京大学

研究内容： 渋滞現象の解明から錯視を用いた渋滞緩和策

研究概要

我々の身の回りでは様々な渋滞現象が見られる。特に高速道路の渋滞現象において、渋滞を引き起こす最も大きな原因は、サグ部と呼ばれるドライバーが気づかない程度の上り坂にある。上り坂であることが認識できないので、無意識に速度が落ちてしまい、その速度減少が連鎖的に伝わり、最終的には渋滞が形成されてしまうのである。一方、サグ部でドライバーが上り坂であることを正しく認識し加速することができれば、渋滞を緩和することも可能となる。そこで本研究では、渋滞形成メカニズムを数理的に解明すると同時に、ドライバーのサグ部における傾斜誤認を引き起こす要因を探ることを中心に行い、次のような成果を得た。

前者の研究では、渋滞形成メカニズムを記述する数理モデルを構築し、理論解析を行った。この数理モデルはGPSを用いた詳細な追従走行データに基づいており、その解析結果から、密度とともに変化するドライバーの反応遅れ時間こそが安定な渋滞の形成メカニズムに本質的な役割を果たしていることを明らかにした。

後者の研究では、サグ部の渋滞は”縦断勾配錯視”と呼ばれる異なる勾配の連なりが引き起こす錯視現象によるものであると心理学の研究者との議論でわかった。そこで、ドライバーの錯視現象が運転にどのような影響を与えるかを、道路上の錯視ペイントによって検証した。警察からの報告によると、道路上にある形状のペイントを施すことで事故件数が減るというデータがあり、このペイント形状を錯視ペイントとして捉え改良することで、より安全性の高いペイントを提案し、その効果を検証するというものである。実際、警察との共同研究のもとで、道路上に錯視ペイントを施し、走行車の速度を測定することで、ドライバーの錯視現象による影響が定量的なデータとして得られた。この検証では、走行速度を下げる効果があると考えられるツェルナー錯視に基づくペイントを施すことで、走行速度が減速すると予想された。しかし、予想に反し、走行車の速度が上がるという結果になった。これはツェルナー錯視を施す際に同時に生じているデルブーフ錯視が引き起こす整流効果によるものであると考えられ、ドライバーの錯視現象はデルブーフ錯視の方がツェルナー錯視に比べて生じやすい現象であるということを示唆している。この結果は、事故件数減少という交通安全の面のみならず、速度が上がって渋滞緩和できるという点でもたいへん興味深い結果となった。実測データが示すように、ペイントによって走行速度が変化するという事実は、安価な方法でサグ部において加速を促すことができ渋滞緩和を実現しうる可能性があり、優れた研究成果になったと認識している。

コミュニティ形成の理論・実証的研究



堀内史朗 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）
法人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

いま日本各地の山村で、過疎高齢化に伴う諸インフラの撤退、伝統文化の衰退、土地利用の劣化などの諸弊害が深刻な問題となっている。これらの弊害を克服するものとして、都市住民による山村への観光・移住・ボランティアなどの都市山村交流が果たす役割が期待されている（三井 1994）。しかし、都市住民と山村住民では価値観、生活スタイルなど色々な点で違いがあり、両者の間のトラブルも頻発している（Knight 2000）。

都市住民と山村住民のように、互いに異質な人々が協調できるコミュニティが形成されるためには、両者の仲を取り持つ仲介者が必要であろう。そこで計算機を用いたエージェント・ベース・モデルを作成し、互いに異質なエージェントを繋ぐ仲介者の働きについて考察した。各エージェントは、様々な属性（年代、性別、職業、言語など）について、固有の性質（若者、女性、専門職、関西弁など）を持つ。エージェントたちは一列のトーラス上に並んでおり、両隣のエージェントと相互作用をする。性質が一致する属性が多いほど、より仲良くなることができる。このような状況の下に、性質が一致する属性が一つしかなくても仲良くなろうとする丁寧なエージェントと、性質が一致しなければ別の場所へ移動しようとするエージェントを考え、どちらのタイプのエージェントが大きなコミュニティの形成に貢献するか調べた。分析の結果、属性の数に比して性質の数が多い場合、相互作用する時間が長い場合、エージェントが多様な他者との関係を望んでいる場合には、丁寧ではなく移動するエージェントが活躍することが分かった。このモデルの結論は、社会学で開発されてきた Axelrod モデル（Axelrod 1997）と Schelling モデル（Schelling 1971）の知見を融合的に発展させたものにもなっている。

宮崎県高千穂町で現地調査を行い、都市山村交流によるコミュニティ形成について考察した。同町では室町時代以前から伝わる夜神楽が毎年奉納されており、地元の山村住民と都市からの観光客が共に夜神楽を盛りたてている（福島 2003）。多数の観光客が訪れるにもかかわらず、伝統文化の真正性（Smith 1989）が失われずにいる仕組みを明らかにするため、過去の神楽開催の様子を文献資料で調べ、また11の地区で夜神楽への参与観察および地元住民への聞き取り調査を実施した。調査の結果、一見で地元でストレスを及ぼしかねないマス・ツーリストは公民館で開催される夜神楽を鑑賞し、何度も夜神楽を訪れ振舞い方にも習熟しているリピーターは民家で開催される夜神楽を鑑賞する傾向があることが示唆された。夜神楽を奉納する地区も、公民館あるいは民家の夜神楽どちらかに専門化している。このようにして様々な観光客を迎える仕組みが町全体に備わっているおかげで、都市山村交流による地域活性化がうまく機能している様子が明らかになった。

生物・無生物の 集団運動により生まれる時空間パターン



末松 J. 信彦 SUEMATSU J. Nobuhiko

所属・役職： 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
先端数理科学インスティテュート研究員

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。本研究では，単体の挙動が比較的単純な，微生物および自発的に運動する無生物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みています。

微生物にはミドリムシを用いました。ミドリムシは走光性を示す鞭毛虫で，強い光を照射すると光から逃げる方向へ泳ぎます。このミドリムシの培養液を薄く広げ，下から強い光を照射しました。すると，ミドリムシの数密度が高い領域がスポット状に多数出現し（Figure 1b-d の緑色の点），それらが集まることで斑点状のパターンが局所的に形成されました（Figure 1d）。この時空間パターンは対流により形成されており，各々のスポットでは下降流が起きています。微生物により形成される対流パターンは生物対流と呼ばれ，すでに多くの報告があります。しかし，今回観察されたような局在化パターンはこれまでに例がありません。この様な局在化が起こる機構の解明を目指し，広島大学・栗津明紀助教との共同研究で，光場を想定したノンローカルな相互作用を導入した数理モデルを構築し，現象を再現しました。この結果を踏まえ，ミドリムシ自身の影の影響（shading effect）を考慮した機構を検討中です。

無生物系の実験には，水面を自発的に滑走する樟脳船を採用しました。一次元水路に1-51個の樟脳船を浮かべ，その集団運動を観察しました（Figure 2a）。その結果，交通流の自由相と渋滞相に対応する挙動（Figure 2b, c），および，アリの行列で認められるようなクラスターモードが確認されました。樟脳船は水面に展開される樟脳の濃度場を介して相互作用しています。この相互作用を踏まえ，広島大学・西森拓教授と共同で数理モデルを構築し解析を行いました。その結果，相互作用が2体間に留まる場合に交通流の運動モード，それ以外の場合にクラスターモードが出現可能であることを明らかにしました。

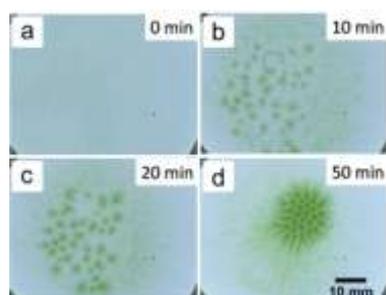


Figure 1. ミドリムシの生物対流。

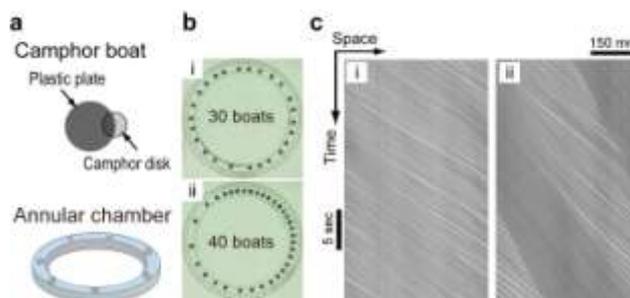


Figure 2. 樟脳船の集団運動。

細胞遊走のシミュレーション



西村信一郎 NISHIMURA Shin I.

所属・役職： 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
先端数理科学インスティテュート研究員

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

ウィルスを除く生物の構成要素は「細胞」です。細胞の中には、自力で動くことができる種類のものがあります。我々のような動物では、自力で動く細胞は不規則に変形しながら動いていきます。これらの細胞を総称して「アメーバ様細胞」と呼びます。例えば、死んだ細胞や外敵となる細菌などを取り込む「マクロファージ」などがアメーバ様細胞です。

このアメーバ様細胞は変形することで動きます。地球上にいる生物が動くときには大抵振動的な運動をします。例えばヒトは歩くときに足を交互に前に振ります。ところが、アメーバ様細胞には振動的な挙動は少なく、とても不規則な運動をします。いったいどのように不規則な運動をしているのでしょうか？また、なぜそのような運動をするのでしょうか？

この難しい問題を解くには、勿論タンパク質などの「部品」がどのような働きをしているのかを調べなければなりません。しかしそれだけでなく、細胞の動きは、それらの部品が協調して生み出している機能ですが、複雑すぎて人間の頭だけでは考えることができません。コンピューターの力を借りなければいけません。コンピューターはプログラムを書かないと何もしてくれないので、現在知られている知見と推測を交えて「モデル」というのを作ります。このモデルはある時点で細胞の形や物質内の状態から次の時間にどのようになるかを決めたルールの集合です。細胞の中にあるタンパク質の種類は膨大で、すべてを考慮するのは現在のところ無理です。モデルには、たった二つの因子だけを過程します。一つは、動力源となるアクチン、もう一つはアクチン重合抑制因子です。アクチンが重合することにより、細胞が前進するがわかっていますが、アメーバ様細胞には前も後ろもありませんので、アクチン重合が細胞のいたるところでおくと進めなくなってしまう。アクチン重合を制限する因子が必要です。このモデルをコンピューターで計算したところ、アメーバ様細胞の変形と運動を再現することができました。このたった二つの因子だけで、アメーバ様細胞の複雑な変形と運動が再現できるのは驚きです。アメーバ様細胞を構成しているタンパク質の種類はとても多いのにも関わらず、このような要素の少ないモデルで再現できることは、どうやら、沢山のタンパク質が協調して働いているため、まるで一つの部品のようになっていて、少ない要素で表現できてしまうのかもしれない。

金融市場のマイクロ構造における 進化ゲーム理論からのアプローチ



吉川満 KIKKAWA Mitsuru

所 属 : 大学院理工学研究科基礎理工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),
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

近年、世界的金融危機の発端となったサブプライム問題、リーマンショックの教訓から金融規制強化の議論が高まっている。果たしてどのような規制をすべきであろうか。このような問題に答えるために、進化ゲーム理論を用いて、金融市場のマイクロ構造を捉える手法の開発とそれを用いた実際の市場で取引するシステムの開発を行っている。

今まで主に進化ゲーム理論の理論研究を行っていた。しかし実際には理論から得られた結論と実際の現象との間に齟齬が存在する。これは経済学ではアノマリーと呼ばれ、このアノマリーを説明するために様々な理論モデルが提案されている。そこで私はこの問題を契機に様々な理論モデルを提案する方向だけではなく、実験などを通じて得られるデータを用いて、目には見えない構造を抽出して、アノマリーを説明しようと考えている。

具体的にはゲーム理論における戦略の離散性とマイクロ計量経済学における選択モデルの類似性に着目し、人間の満足度を推定し、行動を予測しようとしている。ただしここでは既存のゲーム理論の研究をそのままを応用することができないため、ゲーム理論自体の方法論の拡張も行っている。例えばゲーム理論においては一斉にゲームを行っているゲームを統計力学の考え方を用いて定式化した研究や、今まで各主体はリスクに対して中立であったものを、リスクを持たせた研究や、各主体の記憶期間が長い場合は、非合理的な行動を取りやすいなどの理論的な研究も併せて行ってきた。このようにゲーム理論自体を拡張し、データを用いて、実証分析していくという方法で金融市場の諸問題を研究してきた。

また上述の手法が机上の空論にならないためにも、実際の市場で使用してみることが重要だと考えている。そのため金融市場においては板情報といわれる売買情報に着目し、上述の手法を適用して分析し、約定価格の変動の予測に使用した。さらにはある証券会社が公開しているトレーディングツールを使用すると、リアルタイムで板情報が入手可能となるので、Excel を用いて、上述の手法を行うシステムを開発し、実際に使用した。

特に今までのファイナンスの研究においては、ティックデータや板情報が入手できなかったために、これからこのような金融市場におけるミクロ的構造を調べる研究が重要視されると考えている。

市場データを用いた 国債価格推定モデルの実証研究



土居英一 DOI Eiichi

所 属 : 大学院理工学研究科基礎理工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),

砂田利一 (数理解析班), 王京穂 (シミュレーション班)

研究課題 : 市場データを用いた国債価格推定モデル (CSM) の実証研究

研究概要

経済成長の伸び悩み、税収の伸び悩み、少子高齢化の進展等による財政負担増等が将来的にも重なりうる状況にあって、わが国において国債の果たす役割が小さくなることは考えられない。

本研究は、信用リスクが無いと仮定できる国債の性状の利便性を踏まえ、刈屋 (1995) の国債価格モデルである CSM モデルの実証研究と、これらの結果を踏まえたモデルの拡張等について検討するものである。この CSM モデルの特徴として、国債の属性情報 (クーポン (利率)、償還期間等) の違いにより価格の差異を考慮する点が挙げられる。これらには「クーポン効果」や「満期効果」と呼ばれるもの等があるが、市場において取引される価格を説明するうえで重要な要素と考えられる。CSM モデルでは、国債の理論価格を、将来の確定したキャッシュフローを発生時点ごとの属性依存型確率的割引関数により現在価値化したものの集積と考えている。この属性依存型確率的割引関数の定式化において、上記の国債価格に影響を与えうる属性情報 (クーポンの大きさの違いや満期までの期間の長さの違い等) を説明変数の一部に組み込み、市場価格データを用いて一般化最小二乗法にてパラメータ推定するもの。この際、キャッシュフロー発生時点間の相関等を分散共分散行列により表現したものも使用する。

従来、確率変数である国債価格の理解が正しくないままに価格モデルとして (実務的に) 使用されるケースも多かったが、これにより、国債の理論価格をより合理的に導出することが可能となる。

現在、検討のための定式化、および、検討のベースとなるシステム構築を済ませ、実証研究に着手している。より市場価格の説明力の高いモデルとするため実証と改善、また、従来からの一般的な検討モデルとの比較等を進めている。

併せて、国債の市場取引における「クーポン効果」や「満期効果」等の影響の大きさの検証や、利回りの推移 (イールドカーブ) の検証等についても進めている。

3種の競合する個体群の螺旋状をした動的な共存状態の研究



藤間真 TOHMA Makoto

所属：大学院理工学研究科基礎理工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）、

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

2009年度、報告者は「自然界では競争関係は2種だけでなく、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」という主張の可否を確かめるため、反応拡散系を用いたモデル方程式を用いて、数値実験を中心に研究を進めた。

研究内容について述べる前に研究背景について述べる。

生態系における個体群の相互作用の一つに、同一の資源を奪い合うなどの競争関係がある。ロシアの生態学者 Gause は、原生動物の実験室レベルでの観察により、種間競争が強い個体群同士は共存することはないという「競争排他律」を提唱した。しかし、自然界では種間競争が激しくても共存する個体群が観察されている。この理由として、「空間的棲み分け」「時間的棲み分け」「多くの種の相互作用による種間関係の複雑さに起因する競合緩和」等が挙げられ、研究が進められてきた。

報告者は、中でも、「弱い競争種の侵入による競争緩和」について、特に空間分布の影響が重要な場合について研究を行った。

研究したモデル方程式系は2次元空間の有界凸領域 Ω 上での反応拡散系

$$\frac{\partial}{\partial t} u_i = d_i \Delta u_i + f_i(u_1, \dots, u_N), t > 0, x \in \Omega, (i = 1, \dots, N)$$

に境界条件として反射境界条件、初期条件として適当な非負関数を与えた系である。また、非線形項 f は

$$f_i(u_1, \dots, u_N) = (r_i - a_i u_i - \sum_{j \neq i}^n b_{ij} u_j) u_i$$

に限定している。

この系で $N=2$ の場合は競合排他律が成立していることが知られている。更に $N=2$ として1次元無限区間でこのモデル方程式を扱った場合は、1種が他種を排除する進行波解があることも知られている。さて、 $N=3$ の場合については、競合する3種の強さが同程度でしかも拡散効果を見捨てた場合は競合排他が成立するにも関わらず、拡散項を導入すると棲み分けしている領域が動的なパターンを形成することによって共存が可能となり、しかもそのメカニズムでは先述した $N=2$ での進行波に対応する三本の進行波が三巴となっていることが大きな役割をめている例が Ei Ikota and Mimura (1999) によって発見されている。

さて、近年、侵入する種が拡散の効果を見ない場合は残ることができないという意味で既存の2種より弱い場合でも、動的な螺旋状のパターンが発生して3種ともに死滅しないような共存状態が数値的に発見された。

報告者は、この動的な螺旋形状共存状態について理解を深めるため、先行研究を渉猟すると同時に、1次元無限区間としたときの進行波との関係に留意しながら数値実験を進めた。その結果、この動的共存状態のメカニズムは、Ei Ikota and Mimura における共存状態と違って、 $N=2$ の場合の進行波の関係からは理解できないメカニズムであることを確認した。共存に至る詳細なメカニズムは今後の課題である。

なお、結果の一部は、2010年2月末に開催された Japan-Taiwan Joint Workshop for Graduate Students in Applied Mathematics で発表した。

実験計画法と時系列解析を用いた 広告の効果測定手法の開発



日高徹司 HIDAKA Tetsuji

所 属：大学院理工学研究科基礎理工学専攻博士後期課程 1 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

広告の効果測定研究、特にその中でもホットなテーマである「インターネットメディアを含めた複数メディアの効果の分解」と「広告の長期効果」を研究課題として取り組んでいる。この問題に対して、前者に対しては実験計画法、後者に対しては KM_2 -ランジュヴァン方程式論に基づく時系列解析の応用を試みた。前者の成果については、品質管理学会第 39 回研究大会（10 月 31 日）にて口頭発表をおこない、後者については明治大学 GCOE プログラム【非線形時系列に対する現象数学の発展】シンポジウム「複雑現象の時系列解析」（11 月 19 日）にて口頭発表を行った。

2 つのアプローチともに、広告の効果を測定・抽出することが最終目的だが、得られる結果や用いるデータなどは大きく異なる。実験計画法ではある仮説を検証するために被験者を統制群と実験群に分けて比較することで測定を試みているが、時系列解析ではできるだけ仮説を立てずに販売データなどから知見・仮説を引き出すことを試みている。

実験計画法を用いるアプローチでは、アンケート調査を Web 上で実施した。被験者には広告を見てもらうが、見る前と見た後で商品に対する質問（商品に対する好意や購入意向など）を行う。その際、見てもらう広告素材の種類は実験計画法に基づいて被験者ごとに決定している。ここで問題になるのはサンプリング誤差の扱い方だが、従来の分散分析ではなく「階層ベイズ一般化線形モデル」を適用することによって、サンプリング誤差を考慮したパラメータ推定を可能になる方法を提案した。さらに、調査データと分析結果を用いて、広告予算の最適配分計算などのシミュレーションも可能にした。

時系列解析を用いるアプローチでは、商品の販売データ（POS データ）に対して KM_2 -ランジュヴァン方程式論に基づいて、非線形ダイナミクスに関連する量を時刻ごとに計算し、これに自己組織化マップを適用することによってダイナミクスの変化を可視化する提案をおこなった。このような変化を検出する先行研究のほとんどは線形モデルであるため、一時的な異常値とダイナミクスの変化とを識別できていないが、非線形を取り扱っているためそれが可能になっている。さらに、この変化のタイミングに広告出稿や広告素材変更の有無、広告とダイナミクス変化についての考察を行った。この手法は、マーケティングのみならず、ダイナミクスの変化に着目する多彩な現象に適用可能であると期待される。

Evolution of phenotypic traits in a predator-prey community



祖建 ZU Jian

所属：大学院理工学研究科基礎理工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），
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：生態系解明への現象数理学

研究概要

Evolution through natural selection is often understood to imply improvement and progress. A heritable trait that has a higher fitness will spread within the population. The average fitness of the population would therefore be expected to increase over time. However, this paradigm neglects the evolutionary mechanism: Although the environment selects the adaptations, these adaptations will change the environmental conditions. By moving across a fitness landscape, populations change that landscape, new peaks and valleys form, channeling its further motion. The fitness landscape is shaped by the phenotypic distributions of the involved populations. This viewpoint affects not only the intuition of evolutionary biologists but also their theoretical tools. The theory of adaptive dynamics is an appropriate framework developed for understanding the long-term evolutionary outcomes of small mutations in the traits expressing the phenotypes. If the environmental conditions necessarily coevolve, then the spectrum of possible dynamical behavior becomes a lot richer.

In order to understand the mechanisms of evolutionary diversification and evolutionary extinction, in the last year, I mainly investigated the evolution of phenotypic traits in a predator-prey system subject to Allee effect. With the methods of adaptive dynamics and bifurcation analysis, we investigated the influence of Allee effect on the evolution of phenotypic traits of predators and prey. Firstly, we identified the ecological and evolutionary conditions that allow for continuously stable strategy and evolutionary branching. It was found that prey population undergoes evolutionary branching if the Allee effect of prey population is not strong and the frequency dependence in the competitive interactions and predation efficiency is strong. Secondly, we investigated the conditions that allow for evolutionary suicide and evolutionary cycle. We found that evolutionary suicide occurs deterministically on prey population if prey individuals undergo strong asymmetric competition and are subject to Allee effect. Moreover, by using Hopf bifurcation theorem, we showed that evolutionary cycle is a likely evolutionary outcome, which depends on the strength of Allee effect and the mutation rates of predators and prey. The analysis revealed that how and why prey population becomes extinct during the course of evolution. This paper has been published in *Journal of Theoretical Biology* (2010, 262 (3): 528-543).

In addition, why and how specialist and generalist strategies evolve remain the important questions in evolutionary ecology. In the last year, I also investigated the evolution of foraging-related traits in a predator-prey community with trade-off structure. With the methods of adaptive dynamics and geometrical argument, first, we identified the ecological and evolutionary conditions that select for specialist and generalist strategies. Generally, generalist strategy evolves if there is a switching benefit; if there is a switching cost, both specialists do better than the generalist. Second, we found that if the trade-off curve is globally convex and the switching cost is large, predators always evolve to the closest specialist strategy. However, if the switching cost is small, evolutionary branching in the predator phenotype occurs, predator population eventually branches into two extreme specialists, each completely specializing on a particular prey species. Third, it was found that after branching in predator phenotype, if the trade-off curve is concave-convex-concave, then there exists an evolutionarily stable dimorphism in which two predators can continue to coexist on two competing prey on the long-term evolutionary timescale. The analysis reveals that an attractive dimorphism will always be evolutionarily stable and that no further branching is possible under our model.

Overall, during the past year, I have done some interesting work. I greatly improved my research ability and learned a lot of methods and techniques to deal with the core problems in evolutionary biology.

