

3. 拠点メンバー・研究概要の紹介

2010年度

明治大学グローバルCOEプログラム



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	KM2O-ランジュヴァン方程式論とそれに基づく複雑系現象と数学現象の確率解析
向殿政男	コンピュータを用いた安全性実現のためのモデル化の研究
刈屋武昭	金融経済現象のモデリングとリスクマネジメント
森啓之	スマートグリッドのインテリジェント多目的最適化の研究
小林亮	生物の形態形成と運動の研究
荒川薫	感性と視覚情報システム
西森拓	うごきゆらぐ要素集団のダイナミクスと機能の解明
高安秀樹	社会・経済現象をデータに基づく科学にする
柴田達夫	フィジカルバイオロジー
若野友一郎	生物進化の研究：理論と応用

数理解析班

リーダー

砂田利一	Topological Crystallography
三村昌泰	生物、化学系に現れる自己組織化パターンのモデル支援解析
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	非線形構造とパターンの数理

シミュレーション班

リーダー

草野完也	マルチスケール現象のシミュレーション研究
杉原厚吉	立体錯視の数理モデリングとその応用～計算錯覚学を目指して～
上山大信	自己組織的パターン形成機構のメッシュ生成への応用

研究協力者

池田幸太	反応拡散方程式系におけるパターン形成問題
末松 J. 信彦	集団が形作る秩序パターンの発見と解析
中村和幸	高頻度データの非線形時系列解析とデータ同化手法の開発と 経済・地盤工学・地球科学への応用
木下修一	E.Coli の遺伝子ネットワーク構造とコアネットワークの抽出
占部千由	生物系における大規模集団運動の数理
友枝明保	錯視現象から見る渋滞緩和策
中橋渉	人類進化の 3 大問題の理論的研究
野津裕史	特性曲線法に基づく流体数値計算法の構築
堀内史朗	地域間交流が創る新文化
若狭徹	接触抑制モデルの解析
SIEW Hai-Yen	Modulated renewal processes for inter-event times of aftershocks
西村信一郎	細胞遊走の数理モデル

MIMS Ph.D プログラム学生

2009 年度入学

吉川満	進化ゲーム理論における理論研究とそれを用いた金融市場のミクロ構造
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
ZU Jian	Evolutionary diversification and the influence of Allee effect in a predator-prey system

2010 年度入学

青谷章弘	バクテリアコロニーパターンの多様性についての理解
飯坂達也	風力発電予測手法とその信頼区間の推定方法
向殿和弘	マーケットマイクロストラクチャーにおける市場分析
山口将大	反応拡散系の自己組織化機構を利用したメッシュ生成手法の開発
CHEN Yan-Yu	Asymptotic behavior of solutions of reaction-diffusion equations
POH Ai Ling Amy	スマートグリッドシステムに関する情報セキュリティ基準の開発

KM₂O-ランジュヴァン方程式論と それに基づく 複雑系現象と数学現象の確率解析



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
明治大学理工学部教授

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 時系列解析の研究

複雑系現象の時系列データを研究対象とし，その背後に潜む非線形な構造を抽出する研究を行う。複雑系現象としては，オーロラ・太陽風・地磁気・地震・エルニーニョ等の地球物理現象，株・為替・マネーサプライ・GDP等の経済現象，脳波・脈波・血圧・心電図等の生命現象，電力等の工学現象を扱い，それらの背後に潜む非線形な構造として，定常性・異常性・決定性・因果性・ダイナミクス・分離性等の定性的な性質に注目し，離散時間の確率過程に対するKM₂O-ランジュヴァン方程式論に基づく時系列の解析技術を用いて，「データからモデル」の姿勢で研究を行う。

② 正規定常過程に付随する確率解析の研究

マルコフ過程に対する確率解析の中で，Kolmogorovによる拡散過程とそれに付随する拡散方程式の研究や伊藤清による拡散過程とそれに付随する確率微分方程式の研究，伊藤の公式によって確率微分方程式と拡散方程式を結びつける研究は基本的なものである。本研究では，Kolmogorovと伊藤清の研究に対応して，私がこれまで展開してきた1次元の連続時間の正規定常過程に対するKM₂O-ランジュヴァン方程式論を発展させる。さらに，多次元の連続時間の正規定常過程の局所的な時間発展を記述する確率微分方程式(連続時間のKM₂O-ランジュヴァン方程式)を導く。これに伊藤の公式を適用し，多次元の正規定常過程に付随する時間遅れのある2階楕円型の線形偏微分方程式を導くことによって，多次元の正規定常過程に対する確率解析の基礎を構築し，その応用を研究する。

③ リーマンのゼータ関数の定常過程論からの研究

離散時間の確率過程に対するKM₂O-ランジュヴァン方程式論の源であるT-正値性を満たす連続時間の正規定常過程に対するKM₂O-ランジュヴァン方程式論を用いて，解析数論の分野で未解決問題であるリーマン予想の対象となるリーマンのゼータ関数を定常過程論的に研究する新たな切り口から，リーマンのゼータ関数の奥に潜む確率過程論的な性質を調べる。これによって，リーマン予想に新しい方法論として挑戦し，確立することを目的としている。

コンピュータを用いた 安全性実現のためのモデル化の研究



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
明治大学理工学部教授

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

コンピュータと安全との関係は、大きく分けて二つの側面がある。一つは、コンピュータを内部や外部の危険源から守り、コンピュータを正常に稼働させ続けることを目的とする“コンピュータのための安全”であり、二つは、他のシステムの安全を維持する機能をコンピュータで実現させようとする“コンピュータによる安全”である。前者がコンピュータ安全と呼ばれる分野であり、後者の典型例として機能安全と呼ばれる新しい安全の分野がある。

本研究では、コンピュータを用いた安全性実現のためのモデルとして、後者の機能安全の在り方について考察を行った。コンピュータを用いて、他のシステムの安全を監視し、システムを安全に制御し、必要ならば安全のためにシステムを止めるという、いわゆる安全装置の役割をコンピュータに果たさせて、いかにコンピュータで安全を守るかという側面から、コンピュータ安全と機能安全の考え方と技法を中心に研究し、その違いとお互いの関係を明らかにした。

これまで、情報関係やソフトウェア関係の技術者は、安全に関して深く考える必要がなかったかもしれないが、人命に係るようなシステムの組み込みソフトに従事する技術者は、安全設計についてを十分に理解して、システム構築をしなければならないことを明らかにした。なぜならば、制御対象のハードウェアの特性と人間が望む安全の内容とレベルを知らない限り、真の安全を実現することは出来ないが、組み込みソフト開発の技術者は、コンピュータ側からすると機械設備と人間とに最も近いところに位置するからである。

参考文献

- 1) 向殿政男監修，日本機械工業連合会編，川池襄，宮崎浩一著，機械・設備のリスクアセスメント，日本規格協会，308 ページ，2011-2
- 2) 向殿政男，北野大，小松原明哲，菊池雅史，山本俊哉，大武義人著，なぜ，製品事故は起こるのか～身近な製品の安全を考える～ 研成社，214 ページ，2011-3
- 3) 向殿政男，安全技術面からみた変遷と今後の展望，安全と健康，vol.12 No.1 2011，pp.29-32，中央労働災害防止協会，2011-1
- 4) 向殿政男コンピュータ安全と機能安全，IEICE Fundamentals Review, Vol.4, No.2, pp.129-135，電子情報通信学会，2010-10
- 5) 経年劣化を防ぐ安全設計，生活安全 ジャーナル 第 10 号，pp.8-11，独立行政法人 製品評価技術基盤機構，2010-10

金融経済現象のモデリングと リスクマネジメント



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

金融現象を思考し、モデル化するという現実的な立場から、金融数理科学にかかわる諸問題を研究対象にする。また経済社会現象のモデル化も研究対象にする。

現在、MIMSのもとで金利分析研究チームを作り、Kariya and Tsuda(95)に基づいた国債価格モデルに基づいて、金融危機前後の金利の期間構造の変動の分析をしている（下図は国債価格からの金利変動）。

また、金融危機の時の変

動構造の特徴として、金

融資産価格が市場の下

方変動に対して相関が

強くなる現象のモデル

化を行う研究をしてい

る。これは、現在の金融

リスクマネジメントが

この点を考慮していな

いので、VaRなどの計

測法に重要な問題である。さらに、一つの企業のビジネスは、複数の業種に関係してビジネスを行って

いる点を考慮した、社債価格モデルの実証化を進めている。この結果導出される倒産確率の期間構造を

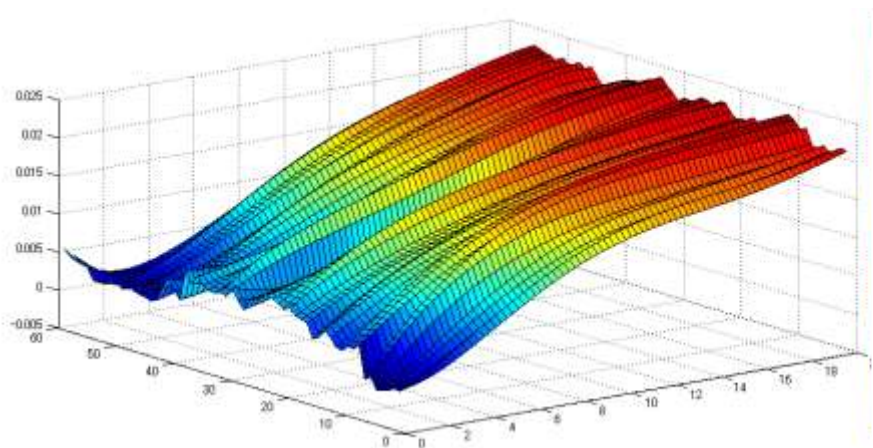
利用して、さまざまな信用リスク商品のプライシングが可能になることが期待される。また金融危機の

信用リスクの変動構造を把握することを狙う。

別な研究として、ドクターの学生と一緒にしている研究「上司と部下の権限優位性と情報スクリーニ

ングに関するゲームの問題」を行う。ビジネスと気温の関係など事業リスクマネジメントも研究対象と

する。経済時系列分析ハンドブックを編集集中である。



スマートグリッドの インテリジェント多目的最適化の研究



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
明治大学理工学部教授

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

本年度は、スマートグリッドのインテリジェント最適化の研究として、スマートグリッドのネットワーク面で要となる送電ネットワークと配電ネットワークのインテリジェント多目的最適化について研究した。まず、送電ネットワークにおいては、火力発電機出力を多目的最適化する ELD (Economic Load Dispatching) について研究した。ELD とは、送電ネットワークに要求される火力発電機出力の総和を満足する条件下で火力発電機の燃料コストの総和を最小化し、どの発電機にどの程度の発電出力を割り当てるかを決定する制約付最適化問題である。ここでは、火力発電機の燃料コストの総和を最小化することに加えて、同時に火力発電機の二酸化炭素の排出量を最小化する問題を検討した。このような解の集合はパレート解集合と呼ばれ、従来、直接的に求めることが困難であったが、ここでは、メタヒューリスティクスの一つである PSO (Particle Swarm Optimization) に基づいた手法で解集合を評価する手法について検討した。メタヒューリスティクスとは、単純なルールや発見的手法を反復的に用いることにより、大域的最適解の高精度近似解を求める最適化手法である。PSO は、鳥や魚やミツバチなどの群れがえさを求めて移動する様子を模倣した多点探索ルールを持つ発見的最適化手法である。PSO のパラメータ調整を適応的にした EPSO (Evolutionally Particle Swarm Optimization) を多目的最適化に拡張し、さらに SPEA2(Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm)の戦略を取り入れた手法を開発し、良好な結果を得た。次に、配電ネットワークにおいて電圧制御機器である SVR(Step Voltage Regulator)の最適配置問題を多目的最適化問題として定式化することについて研究した。近年の電力自由化に伴って、需要家は経済性と信頼度、品質などの観点から電力会社を選択できるようになってきている。一方、供給者側にとっては、配電ネットワークの複雑化と多様化によって、より高度な安定供給が必要になってきている。また、再生可能エネルギーを利用した分散電源による確率的な逆潮流は、負荷の不確定性をもたらす。負荷の不確定性は、電力系統における規定電圧維持への支障が懸念されている。ここで目的関数は、ノード電圧の偏差の最小化と SVR の設置コストの最小化を検討した。また、配電ネットワークのノード量の相関を考慮したモンテカルロシミュレーションで負荷のシナリオを作成し、柔軟な SVR の最適配置を決定した。多目的最適化問題を解く手法として、多目的メタヒューリスティクスである SPEA2(Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm)に着目した。従って、本稿は複数の系統計画解を得ることができ、運用者にトレードオフを考慮した計画解の選択権を与え、またモンテカルロシミュレーションによりネットワーク計画者に対し、効果的な SVR の配置箇所を示した。

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： 現象数理学，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

現在 CREST でプロジェクト研究を行っている。プロジェクトの目標は、生物に学ぶことにより、生物並みにしなやかにロバストに、複雑で不確定な現実の環境の中を動き回れるロボットを作ることである。そのために生物学者・数学者・工学者からなるチームを編成した。目標達成のためにはロボットに大自由度を与え、かつそれをうまく制御しなければならない。これを達成するためにキーとなるのは、自律分散制御と自己組織化によるロコモーション生成である。しかし、現状では自律分散制御には自律個と全体を結ぶ「設計原理」が欠落している。我々は、粘菌やアメーバのような単細胞生物に立ち返って、この設計原理を抽出することを試みる。単細胞生物のロコモーションには、中枢が無い故に自律分散制御がもっとも端的な形で現れているからである。これらの生物を起点に、より複雑な多細胞生物のロコモーションにアタックしていくのが、我々のプロジェクトの道筋である。

真正粘菌変形体の運動のモデルから抽出された齟齬関数の概念を用いて、完全な自律分散制御で動くアメーバ様ロボットを設計した。原型質量保存による大域相互作用・齟齬による位相のシフトを通して、適応的な運動が自発的に生成されることをシミュレーションによって示した。

ヘビの運動の理解と再現は、身体を持つ大自由度の使いこなし、上位からの制御と自律分散制御のバランスを考える上で、非常に示唆に富み、プロジェクトの重要なターゲットである。結合振動子系をコントローラとする枠組みの元で、齟齬関数による Phasic な制御と Tonic な制御を併用した自律分散制御則によるシミュレーションを行ない、その有効性を確認した。また、その妥当性を検証するために、ヘビ型ロボットを製作した。実験の結果、スムーズな蛇行運動の発現のみならず、各体節の動きの位相関係と筋緊張度を状況依存的に連関させることで、優れた環境適応能力と耐故障性も併せ持つことが示された。

前年度に提案した卵割モデルは、中心体の運動が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コントロールされるという仮説に基づいている。質量分析の専門家の協力を得て、実際のウニ卵におけるモルフォゲンの探索を開始した。また、形状変化まで含めた現実的な卵割の過程を数理的に記述するために、多細胞型フェーズフィールドを用いたモデリングを行った。

感性と視覚情報システム



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
明治大学理工学部教授

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

感性と視覚情報システムについて，次の二つの研究を行った。

- (1) 人の主観評価を考慮した画像処理法の提案
- (2) 文章黙読時における脳波解析による感性評価

(1) としては，カラー画像におけるインパルス性雑音の除去システムと顔画像の小顔美観化システムについて，昨年に行っている研究に対して特性改善を行った。これらは共に，インタラクティブ進化計算を用いることにより，人の主観に基づき最適な画像処理を行うものである。まず，カラー画像のインパルス性雑音除去については，昨年度は，各画素周辺の複数の局所的特徴量を総合的に考慮したスイッチングメディアンフィルタをインタラクティブ進化計算により最適設計する方式を提案したが，雑音の発生確率が低い場合は，メディアンフィルタより補間法の方が効果的であることが知られている。そこで，各画素周辺の雑音の発生確率を推定し，スイッチングメディアンフィルタと補間法を切り替えて用いることにより，画像のボケが少なく，且つ効果的に雑音除去を行う方式を新たに提案し，その有効性を示した。このシステムも，インタラクティブ進化計算を用いることにより，画像に対する人間の主観評価を考慮しながら効果的な最適設定がなされる。

一方，顔画像に対しては，昨年度開発した，顔画像小顔美観化処理システムに対する感性評価実験，およびiアプリ実装のための計算量削減法に関して研究を行った。まず，20代，50代の二名の女性が，自分で化粧をした顔とプロのメイクアップアーティストにより化粧を施した顔，および，それらをこの小顔美観化処理システムによって美観化した結果の顔画像を用意し，20名の被験者により主観評価を行った。その結果，プロのメイクアップアーティストによる化粧顔より，本方式の処理結果の方が好ましいと評価されることが示された。また，iアプリ実装用に，二次元 ε フィルタを水平垂直一次元 ε フィルタの組み合わせで実現し，処理の高速化を図った。

(2) については，脳波を用いて紙媒体と電子ディスプレイ各々における文章黙読時のヒトの感性・精神的負荷の客観的評価を行った。すなわち，紙媒体と電子ディスプレイにおいて文字の大きさが異なる文章を黙読している最中の脳波を採取し， α 波と β 波の特徴量を求めた。この結果，文章黙読時において小さな文字を読む場合に β 波が多く出る傾向があること，また特に電子ディスプレイにおいて，小さな文字を読んだ時に β 波含有率/ α 波含有率が高くなり，大きな文字を読んだ場合に対して有意差が表れた。 β 波含有率/ α 波含有率はヒトの精神的負荷を表すことが，他者の研究においても紹介されており，紙媒体では，文字の大小による負荷の度合はそれほど違わないが，電子ディスプレイの場合は小さな文字に対して，精神的負荷が高くなる傾向にあるということが示された。

うごきゆらぐ要素集団の 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。このように、群れの運動は、個々の構成要素の運動からは想像もできない複雑性や多様性をもつ。群れ運動に関する従来の理論研究の多くは、構成要素の運動を比較的単純なルールで表現し、群れ全体として現れる複雑な運動との対比を考察してきたが、現実のシステムでは、構成要素自身の持つ複雑な内部自由度が、群れ全体の運動に重大な影響を与える場合も多い。そこで、2010年度は、群れ全体としての運動や機能と、構成要素の内部自由度の関係に着目して、次の4つの研究を進めた。

1. アリの集団採餌行動における、各個体の化学情報と視覚情報の利用の優先順位決定機構の解明
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. 確率共鳴を起こす素子集団における、各素子に付与するゆらぎの非一様性と、全体としての共鳴効率の数理解析
4. 円環状水路内の樟脳船集団の交通流と渋滞の実験と数理模型による解析

1に関しては、アリ(トビイロケアリ)がフェロモンによる化学情報だけでなく、視覚情報も利用し、採餌を行っていることを実験、実験データの画像解析、数理模型の組み合わせによって定量的に示し、さらに、二種類の情報が状況に応じてどのように使い分けられるか考察を行った。2に関しては、環境パラメータの変化に応じて、異なる形状の砂丘が順次形成されていく機構を、力学系の分岐現象と捉えて説明することに成功した。3に関しては、神経の発火ダイナミクスを模倣する複数のFHN素子の外部刺激への応答に関して、要素毎に異なった振幅の白色ノイズを付加することで、高い共鳴度を持つ確率共鳴現象が実現されることを示した。4に関しては、本GCOEプログラム博士研究員(現明治大学特任講師・GCOE研究協力者)の末松信彦氏らとともに、前後の表面張力差で自己駆動する樟脳船を水路に並べ、高速道路上で起こる自動車の渋滞現象と類似した渋滞状態を作り出し、数理模型により現象の基本機構を説明する事に成功した。また、自動車の渋滞では見られない、新たな形の集団運動モード=クラスター状態を実験で見だし、その機構の理論的な解明を行った。以上の成果は、日本物理学会や米国物理学会の論文誌に掲載されたほか、日経新聞や科学新聞などでも、広く紹介された。

社会・経済現象を データに基づく科学にする



高安秀樹 TAKAYASU Hideki

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・知財戦略機構客員教授
ソニーコンピュータサイエンス研究所・シニアリサーチャー

専門・学位： 非線形物理学，理学博士・名古屋大学

研究内容： 経済物理学の基礎から応用まで

研究概要

21世紀に入り，社会の高度情報化が進み，これまでは正確な記録を残すことができなかったような人間の集団的な経済活動の詳細な記録が研究者でも入手できるようになってきた。このような詳細なデータを元に，人間集団の動きの特性を数理モデル化する研究が経済物理学である。1990年代の後半に，私を含めた理論物理学者らが研究の対象を経済現象にまで広げる形で，この研究分野が生まれ，データの増加とともに，研究対象も研究者人口も増加している。

経済物理学の中で最も研究が進んでいるのは，外国為替市場や株式市場などの金融市場の研究である。従来は，人間が直接顔を見合せながら取引していた金融市場は，高度情報化によって，コンピュータネットワークを介して売買が行われるようになり，今では，ほとんどの市場において千分の1秒単位を争うアルゴリズム取引がシェアを増やしている。また，データとしても，売買の取引が成立した価格だけでなく，板情報とよばれる取引が成立する前の売り注文と買い注文の分布までもが観測できるようになっている。このようなデータを分析する方法も開発されつつあり，数理モデルもいろいろなアプローチから構築されている。どのようにデータを処理してどのようなモデルでパラメータを推定し，それに基づいてどのような予測を立てるか，という道筋がだいぶ見えて来た，という段階である。また，金融市場以外にも，企業の取引ネットワークや売上の変動の統計性や消費者の商品ひとつひとつの購買行動が観察できるPOSデータなどの研究も進展している。

現象を数理的に記述することができるようになると，次には，予測や制御といった応用の研究に重点が移っていく。実際，経済物理学の研究の最前線では，様々な応用的な研究が試行錯誤されている。例えば，金融市場でも，変動を予測して利益を上げるという誰にでもわかりやすい目標の他に，どうすれば金融市場の過剰な変動を抑制することができるのか，あるいは，金融市場に集まったお金をどうすれば实体经济の方に流すことができるようになるのか，という問題設定がある。データに基づいた高度な数理モデルを駆使して，このような新しい応用を実現することができれば，大げさでなく，数理科学が社会を変えていくことになるだろう。

企業が発行主体となるバスケット型の複合通貨システムや金利を想定しない融資システムなど，私が独自で進めている応用研究の他に，東日本大震災の復興プランのためのお金の流し方の数理モデルに基づく解析など，新たにに取り組むべきテーマは無尽蔵である。

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（～2010年9月）
専門・学位： 数理生命科学，博士（学術）・東京大学
研究内容： 細胞および発生の理論的・実験的研究

研究概要

計測技術の発達で、発生や再生に関わる細胞や組織の構造形成や情報処理などの機能発現のダイナミックなプロセスが見えてきました。生きた細胞や細胞の集団が示す、真に生物らしいダイナミックな現象は、分子や遺伝子などの多くの要素が協力して働くことで生み出されています。そのような、多くの要素が協力して生み出す、生物の複雑な現象の動作原理や設計原理の理解を目指す、統合的でシステム論的な研究の必要性が高まっています。そのためには、高度な計測技術と連動する数理的な方法論の発展が必要です。こうした新しい生命科学の課題に、物理学や数理科学などの数理的な発想や方法論を用いて解明することを目指しています。

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-空間的構造形成が起こることが多数報告されています。それらには時間的振動、空間パターン、多安定性などが含まれ、それぞれの文脈で重要な機能を担っています。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ります。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、一見相反する性質を兼ね備えています。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ます。

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ります。組織の構造形成には細胞を基本単位とする粘弾性体のような力学過程が関与しており、それがさらに遺伝子やシグナルなどの反応拡散過程と相互に作用しあっています。発生再生総合科学研究センターや広島大学のグループと協力して、発生過程を数理的、定量的な手法を用いて理解する取り組みをしています。

生物進化の研究：理論と応用



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

本年度も引き続き、生物進化現象に対する数理モデル研究を行った。現在私は、2つの大きなプロジェクトを実行している。

理論面：JST さきがけ（生命モデル領域）「生物進化の2大理論の統一的理解」

応用面：科学研究費（新学術領域研究）「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相」

理論面プロジェクトでは、包括適応度理論(IFT) と Adaptive Dynamics 理論(ADT)との統一的理解が目標である。特に近年の IFT の目覚ましい発展は、一方で血縁選択とは何かというやや哲学的な問題を提起し、Nature 誌上などで活発な議論が行われている。IFT に対する誤解も、未だに存在する可能性も高い。IFT の正体を明らかにし、その長所短所を明らかにするため、従来直感的な記述がされてきた IFT を、数学理論として再構築する作業を行った[1]。

応用面では、人類進化の大型プロジェクトに参加している。これは、5万年前ごろに起きたネアンデルタールからサピエンスへの交替劇を扱うプロジェクトで、化石人骨を扱う自然人類学者だけでなく、遺跡調査を行う考古学者、サピエンスに特有の学習能力を探る脳科学者、当時の環境を計算する古気候学者、現在の狩猟採集民族を研究する文化人類学者など、多岐にわたる研究者が参加する学際的プロジェクトである。このプロジェクトの骨子は、「サピエンスは優れた個体学習能力によりネアンデルタールを駆逐した」という学習仮説であって、これは理論研究から生まれた仮説である。この仮説は、サピエンスの時代以降に石器が急速に変化（発展）することから、間接的には支持されているが、では何故サピエンスにだけ高い個体学習能力が進化したのかについては、明らかではない。私は、青木や中橋らと共同で、学習能力の進化モデルの研究を続けてきており、これらの経験を活かして、分布拡大中における遺伝子と文化の頻度ダイナミクスを表現するモデルを、反応拡散方程式によってモデリングした。その結果、急速な分布拡大が起るときには、個体学習能力が進化しやすいことが示された[2]。サピエンスの進化の歴史は、その半分近くが、出アフリカ以後の数万年間であることと考えあわせると、このモデルは「出アフリカが高い個体学習能力を進化させた」という学習仮説を支持すると考えられる。

[1] Wakano JY, Ohtsuki H, Kobayashi Y. Non-experts' guide to the inclusive fitness theory: a mathematical description. (Submitted)

[2] Wakano JY, Kawasaki K, Shigesada N, Aoki K. Coexistence of individual and social learners during range-expansion. (Submitted)

Topological Crystallography



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
明治大学理工学部教授

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

It is said that geometry in ancient Greece started from the curiosity of mathematicians about the shapes of crystals. Indeed their curiosity culminated in the classification of regular convex polyhedra which is addressed in the final volume of Euclid's Element. Since then, geometry had taken its own path, and the study of crystals had not been the central theme in mathematics (an exception is the work of Johannes Kepler on snowflake). It is only in the 19th century that mathematics began to play a role in crystallography; that is, group theory became matured enough to be applied to the morphology of crystals. Crystallographic groups introduced to describe macroscopic symmetry of crystals have been a basic tool in classical crystallography even after Raue's discovery of crystal structures by the diffraction of X-rays.

This study follows the Greek tradition in the sense that we seek beautiful shapes like regular convex polyhedra. Our primary aim was to use algebraic topology to explore the rich world of crystal structures. More specifically, we employ graph theory, homology theory and the theory of covering maps to introduce the notion of topological crystal which retains, in an abstract way, all the information on the connectivity of atoms in the crystal. This explains the reason why this study is entitled "Topological Crystallography".

Topological crystals are "living in the logical world, not in space". This leads us to the issue on how to place (realize) them "canonically" in space. We proposed the notion of standard realizations of topological crystals in space which are characterized by a certain minimal principle, and include, as typical examples, the crystal structures of Diamond and Lonsdaleite. Standard realizations are the most symmetric placements so that, if we take for granted the belief that beauty is bound up with symmetry, then the standard realizations may deserve to be called most beautiful.

We also gave a mathematical view to the standard realizations by relating them to asymptotic behaviors of random walks and harmonic maps. Furthermore, we observed that a discrete analogue of algebraic geometry is linked to the standard realizations.

Applications of our discussion include not only a systematic enumeration of crystal structures, an area of considerable scientific interest for many years, but also the architectural design of lightweight rigid structure.

生物，化学系に現れる 自己組織化パターンの モデル支援解析



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

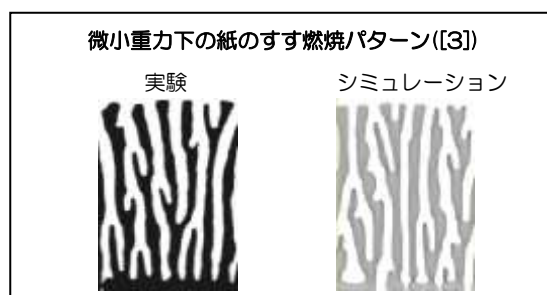
研究内容：非線形非平衡現象の数理解析

研究概要

本研究課題に沿って，この1年間で得られた主な成果は次の2点である。

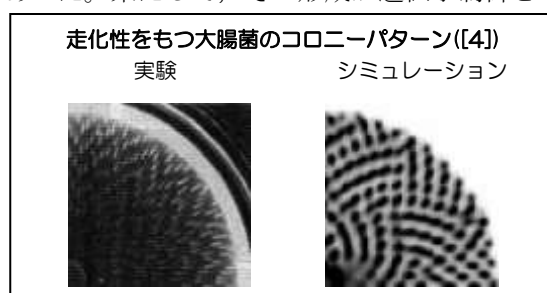
1) 微小重力環境でのすす燃焼に現れる燃焼パターンの多様性

米国 NASA においては微小重力環境 (μg) 下での燃焼実験がスペースシャトル内で行われており，特に注目すべきことは，1998 年フィルター紙の1点からゆっくりと燃焼させると，通常の重力(1g)下と異なり，予測出来ない複雑な燃焼伝播が出現することが報告された。今回の研究は「微小重力環境での燃焼伝播の予測は現象数理学の視点から可能か？」という問題を取り上げ，すす燃焼過程をゆっくり進行する発熱反応として単純化することから，モデル構築を行った。一連の成果から，複雑な燃焼伝播パターンは可燃性物質の「供給」と燃焼という「消費」のバランスから非線形非平衡状態が生じ，パターンの多様性はそこに現れる自己組織化機構であることを明らかにした ([3])



2) 走化性を持つ大腸菌が示すコロニーパターン

1995 年 7 月 Nature の表紙に花のような不思議な美しい模様が載せられ，驚いたことに，それは大腸菌が1点接種から成長，分裂によって作ったコロニーであった。果たして，その形成が遺伝子制御というトップダウンなのか，あるいは自己組織化というボトムアップなのかが問題であった。実験者によって前者の可能性は否定されたが，後者がその理由であることの説明が残された問題となった。我々は，モデル及びそのシミュレーション解析から，自己組織化機構から生まれることを示唆した([4])。



2010年度に発表した論文は以下である。

- [1] J. Zu, M. Mimura and J. Y. Wakano: The evolution of phenotypic traits in a predator-prey system subject to Allee effect. , J. Theor. Biol. 262, 528-543 (2010)
- [2] M. Bertsch, R. Dal Passo and M. Mimura: A free boundary problem arising in a simplified tumour growth model of contact inhibition, Interfaces and Free Boundaries, 12, 235-250 (2010)
- [3] A. Fasano, M. Mimura and M. Primicerio: Modeling a slow smoldering combustion process, Math. Meth. Appl. Sci., 33, 1211-1220 (2010)
- [4] A. Aotani, M. Mimura and T. Mollee: A model aided understanding of spot pattern formation in chemotactic E. coli colonies, Japan J. Industrial and Applied Mathematics, 27, 5-22 (2010)

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
明治大学理工学部教授
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、有向グラフの有向パス幅決定問題に取り組んで成果を挙げた。有向グラフ G のパス幅とは、 G の全頂点の列で、そのどのプレフィックスを取ってもそのプレフィックスに属する頂点集合の入り次数が k 以下になるものが存在するような、最小の k のことを言う。これまで、 k が定数の場合でも与えられた有向グラフのパス幅が k 以下であることを決定する多項式時間アルゴリズムは知られていなかった。この研究で、そのような多項式時間アルゴリズムを初めて開発した。具体的には、 G の頂点数を n 、辺の数を m とするとき、このアルゴリズムの実行時間は $O(mnk+1)$ である。有向グラフの有向パス幅決定問題は、無向グラフのパス幅決定問題をその特別な場合として含む。ここで開発したアルゴリズムは無向グラフのパス幅決定問題のアルゴリズムとしても優れた点を持っている。この問題に対する理論的な最良のアルゴリズムは、Bodlaender によるもので n に関して線形であるが、 k^3 に指数関数的に依存する。したがって、 n と k の値によっては、我々のアルゴリズムの方が高速である。また、Bodlaender のアルゴリズムが非常に複雑で、実装が困難であると言われていたのに対して、我々のアルゴリズムは極めて単純で実装も容易である。この結果は、WG2011 (Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science) に採録されて発表予定である。

有向グラフの有向パス幅決定問題は、前年度の研究概要で報告したブーリアンネットワークのアトラクタを列挙する問題のなかから浮上した。すなわち、有向パス幅の小さいブーリアンネットワークについては、有向パス分割を用いることによって素朴な方法よりもはるかに高速にすべてのアトラクタを列挙することができることを示した。この応用について、今年度はより精密な実験を行い、論文としてまとめて ISCIT2010 (International Symposium on Communication and Information Technologies) で発表した。

前年度の研究概要で報告した、平面グラフの分枝幅と最大格子マイナーの大きさの関係、すなわち、「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」という定理については論文の改定を行い、細かい誤りとギャップを取り除いたのみならず、不等式の右辺の $+1$ を取り除くことに成功した。この研究は、サイモン・フレーザー大学の Qian-Ping Gu 教授との共同研究である。

その他、グラフの k 巡回的な向き付けという概念を導入し、与えられたグラフが k 巡回的な向き付けを持つかを決定する問題が、一般のグラフについては 3 以上のすべての k に対して NP 完全、平面グラフに対しては 4 以上のすべての k に対して NP 完全であるが、 $k=3$ の場合は多項式時間アルゴリズムを持つことを示した。この研究は、本学大学院生の小林靖明氏との共同研究である。

非線形構造とパターンの数理



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
明治大学理工学部准教授

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

自然界の現象の多くは，時空間に依存する偏微分方程式で記述されることが多い。さまざまな偏微分方程式があるが，化学反応を含む多くの自然現象，生理現象や数理生態学，数理生物学では，反応拡散系と呼ばれる方程式で記述されることが多い。反応拡散系は，

$$u_{j,t} = d_j \Delta u_j + f_j(u_1, \dots, u_m) \quad (j = 1, \dots, m)$$

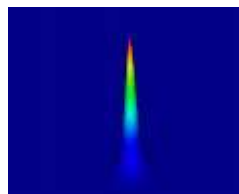
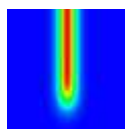
という形をした方程式で，拡散と反応のみからなる方程式である。つまり，ランダムウォークによって運動する粒子とその点での反応によって記述される現象に対応している。

多粒子系における拡散は，1粒子系の拡散とは異なる効果をもたらすことがある。顕著な例が，チューリングによって発見された拡散誘導不安定性である。拡散という空間一様化効果が，周期的なパターンを生み出す現象のことである。溝口・柳田氏との共同研究で，これを拡張して拡散誘導爆発を発見した。これは，解が1点に収束するような“安定”な系でも拡散効果を取り入れることにより，爆発[†]するような例を構成した。逆に，ある種の方程式では拡散によって爆発を食い止めることも可能であることを示した。これは拡散爆発抑止と呼ばれる。

また，生物競争モデルにおいても，劣勢な種が拡散効果によって優勢な種に打ち勝ち，優勢だった種が絶滅することがある拡散誘導絶滅などを調べてきた。このように反応拡散系における拡散の役割に注目して研究を進めている。

以上のように，拡散は粒子の種類が多くなることによってその様相を変化させる。反応と拡散によって，これまで知られていなかった非線形の拡散効果を生み出すことが可能であることを示し，現在のモデリングに数理的アプローチから一石を投じている。

一方，先のチューリングの拡散誘導不安定性に見られるように拡散は形作りにも影響を与えている。V字形状や局在パターンの形成，指状パターンの構成などを行い，非線形性とパターンの関係について研究している。



[†]有限時間で無限に発散することをさす

マルチスケール現象の シミュレーション研究



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
明治大学研究・知財戦略機構客員教授
名古屋大学太陽地球環境研究所教授

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

ミクロスケールとマクロスケールの素過程が相互に関係するマルチスケール現象は様々な自然現象や社会現象として普遍的に現れる。しかし、空間的にも時間的にもスケールの異なる素過程を捉え、その相互作用を理解することは容易ではない。コンピュータシミュレーションはそうした複雑な現象を数値的に再現すると共に、そこに内包されるメカニズムを解き明かす強力な方法論を我々に与えてくれる。

我々は地球を含む大きな宇宙環境の中で発生する様々なマルチスケール現象の理解と予測を目指して、スーパーコンピュータを用いたコンピュータシミュレーションの研究開発を進めている。第1の研究課題は太陽系最大の爆発現象である太陽フレアである。太陽フレアは太陽黒点磁場に蓄積された自由エネルギーの突発的解放過程であると考えられているが、その発生条件は未だに解明されていない。我々は最新の太陽観測衛星「ひので」が観測した精密な太陽表面磁場のデータを基に、太陽フレアの再現シミュレーションを実現することに初めて成功した。その結果、フレア爆発が黒点磁場全体の磁気ヘリシティ（磁力線のねじれ）と太陽表面の局所的な運動の間のマルチスケール相互作用の結果として、発生し得ることを示すことができた。この成果はフレアの前兆現象を捉える可能性を示唆するものであり、フレアに伴う宇宙環境の乱れを予知するための宇宙天気予報研究へ大きな貢献を与えるものである。

第2の課題は雲の精密なコンピュータシミュレーションを開発することにある。雲は大気中の水滴の凝着・衝突成長と大規模な大気運動の相互作用の結果として現れる。しかし、スケールの異なる両者を組み合わせた精密なシミュレーションを実現することはこれまでできていない。我々はプラズマシミュレーションで開発されてきたPIC法を雲に応用することで、雲核となるエアロゾルの化学的性質を正確に取り込むことができる雲シミュレーションの新しいアルゴリズムを開発した。超水滴法と呼ばれるこの計算法は気候変動予測において最も不確定性の大きいエアロゾルの間接効果を精密に計算する新しい方法論として期待されている。

図：
超水滴法による
積雲の成長と降
雨のコンピュータ
シミュレーション



立体錯視の数理モデリングとその応用 ～計算錯覚学を目指して～



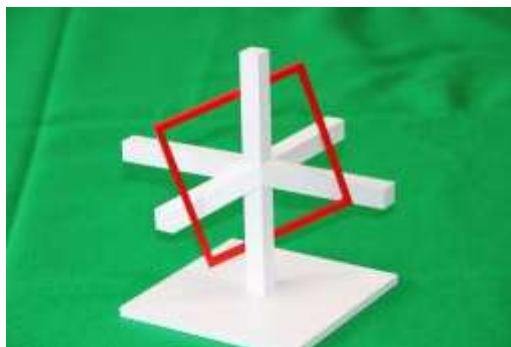
杉原厚吉 SUGIHARA Kokichi

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

2次元画像からそこに写っている3次元立体を知覚する人の視覚認識現象の仕組みを探る中で、特に、立体錯視が生じる仕組みを説明することのできる一つの数理モデルを作った。このモデルは、3段階の情報処理からなる。その第1は、画像から特徴を取り出すことによって、対象立体の頂点・稜線・面の間の接続関係を推測する処理で、従来から考えられているエッジ抽出、領域抽出などの画像処理技術を組み合わせて作ることができる。第2は、その画像と接続関係とを実現するすべての立体の集合を特定する処理である。ここでは、投影逆変換の代数的構造から定まる線形制約集合と、それを求めるための、画像の中の位置ずれなどの数値誤差に対してロバストな計算法とを組み合わせて、目的を達成できた。第3は、可能な立体集合の中から、最もありそうな一つの立体を選択する情報処理である。ここには、光学的物理法則、人の予備知識や先入観などを定量的な制約として組み込み、最適問題を解くという形式の処理に帰着できた。

この数理モデルを利用すると、どのような画像からどのような立体を人が思い浮かべるかを予測することができる。そして、その予測に反した立体を作ることによって、新しい錯視立体を創作することができる。この方法で、不可能立体の絵と呼ばれるだまし絵の立体化に成功しただけではなく、一見すると普通の立体のように見えるが、動きを加えるとあり得ないことが起こっているという印象を持つ不可能モーション錯視も設計することができた。そのようにして作った作品のひとつ「何でも吸引四方向すべり台」は2010年度のベスト錯覚コンテストで1位に選ばれた。このような背景から、「計算錯覚学」という新しい研究分野を開拓するプロジェクト計画がJSTのCREST事業に採択された。



「止まり木と錯覚知恵の輪」



「何でも吸引四方向すべり台」

自己組織的パターン形成機構の メッシュ生成への応用



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

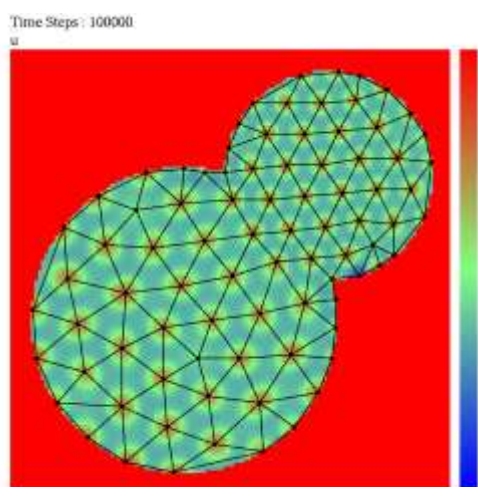
専門・学位： 現象数理学，博士（理学）・北海道大学

研究内容： シミュレーション支援解析

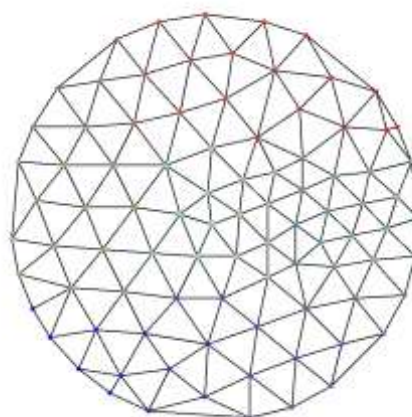
研究概要

反応拡散系に現れるパターン形成は，自己組織的機構によって作り上げられ，その多様性と生物の形作りの理解にヒントを与えるという期待から，様々な分野にまたがり研究が続けられている。私は以前より，反応拡散系におけるパターン形成に関する数理的な理解とともに，応用面の開拓も重要であると考えてきた。本研究では，自己複製パターンとよばれる生き生きとしたパターンダイナミクスを，コンピュータシミュレーション等に用いるメッシュ生成に応用しようというものである。自己複製パターンとは，適当な初期値から時間が経過すると，領域内はスポットで埋め尽くされ，しかもそれらはほぼ等間隔に並ぶ。すなわち本パターンは 2 次元および 3 次元領域におけるスポットの等間隔配置性，および初期値によらず領域形状に合わせた適切なスポット配置は自己複製プロセスを経て自己組織的に行われるという性質を持つ。これらの性質は，自動メッシュ生成法に必要とされる条件を満たすものであり，基礎研究から得られた知識を用いることで，反応拡散系の新たな応用分野を開拓するものである。

本年度は，本グローバル COE プログラムで実行している，現象数理若手プロジェクトとして，GCOE ポスドクの野津氏と，MIMS Ph.D.プログラム博士後期課程の山口氏と共同して研究をおこなった。



メッシュの例 1



メッシュの例 2