

## 特集 数理情報

## 原著論文

## 共創場原理をベースとする群集行動モデルの構築

杉野隆三郎\*・三宅修平\*\*

近年、生物や社会における群集行動が注目され、マルチエージェント技術を用いることで昆虫類の群行動や災害避難時における人間の群集行動等を分析し、生物や人間の集団現象の制御方法や安全な人工物や持続可能な環境の設計に応用する研究が増えている。しかし、認知・判断・行動から成り立つ群集行動のプロセスを実際の生物や人間の行動からデータ抽出をして数理モデルを構築し、それを用いて実現象を定量的かつ定性的に調べるような研究は存在していない。本研究では、生物や人間の群集行動に関する定量的データを収集し、自他非分離な共創原理を用いて集団現象を解析・再解釈することで、数理情報学的視点に立った新しい群集行動モデルを提案する。本論文において、自由境界を有する Grad-Shafranov 方程式を満足するレベルセット関数の移流運動を用いた群集行動の数理、そしてその数理モデルによる計算機シミュレーションの定式化や実際の生物や人間の群集行動の解析にどのように適用するかを議論する。

キーワード：共創システム，群集行動，自他非分離，自由境界，数理モデル，LSM 計算

## Development of Crowd Behavior Model Based on Co-creation Principle

Ryuzaburo SUGINO\* and Shuhei MIYAKE\*\*

In recent years, the crowd behaviors of animate nature and human society has been getting themselves, and the researchers are going on increasing in which they apply to the method of crowd control about animate being and human being and design for the safe artifact and the sustainable environment. The researchers analyze the crowd behaviors using the multiagent technique about the insect group action, the people group action in disaster evacuation and so on. However, there are no quantitative and qualitative studies in which a mathematical model is building using the extract data from the actual living things and human behaviors that the process of crowd behavior involves the cognition, judgment and action. In this study, we propose to a new crowd behavior model that has a perspectives of mathematical and informatics. We collect the quantitative data of crowd behavior of living thing and human, and the collective phenomena are analyzed and reinterpreting based on no self-other alternation co-creation principle, In this paper, we discuss about the basic mathematical frame about the advection movement of the level set function satisfying the Grad-Shafranov equation having the free boundary. And, the computer simulation method using the mathematical model and its applications of the obtained real crowd behaviors are discussed.

Keywords: Co-creation system, Crowd behavior, No self-other alternation, Free boundary, Mathematical model, Level set computation

\*阿南工業高等専門学校 創造技術工学科

Department of Creative Technology Engineering, National Institute of Technology, Anan College

\*\*東京情報大学 総合情報学部

Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences

2017年5月15日受付

2017年7月14日受理

## 1. はじめに

群集行動の科学は、生物や人間の環境との関わりを深く考察して持続可能な社会を上げるために重要な科学であり、これまでも観察事実からの定性的な議論は各分野でなされているが、複雑性の高い現実的な問題についての定量的な研究はほとんど存在しない。一方、場における集団的気づき創出プロセスのコンセプトモデルとして東京工業大学の三宅美博等が提唱する「共創場理論」はシステム工学分野で持続可能な新しい人工物システムを構築するために有効とされる（清水ほか 2000）[1]。しかしながら、その背景やメカニズムを探る数理情報学的な研究が圧倒的に不足しているため、共創システムをベースにした実問題に対する具体的な数理モデルやシミュレーションモデルの研究は未だなされていない。また、我々はこれまで、カオス・フラクタル理論を基礎とした魚群行動モデルに関する実験的研究（井出ほか 2007）[12]と数理的研究、ならびに大都市周辺の人口移動による自己組織化現象に関する計算機シミュレーション的研究を展開し、以下の研究成果を得ている。

- ① 魚類の複雑な遊泳行動パターンをカオス指数・フラクタル指数で分類可能であることを実証（杉野ほか 2009）[13]
- ② 魚群行動パターンを再現するゆらぎ・行動律速モデルの構築とそのロボットシステムへの有効性を実証（福田ほか 2007）[15]
- ③ 都市間の人口動態における群集行動による自己組織モデルの構築とその有効性の実証（杉野ほか 2007）[11]

実フィールドにおける魚群行動や人間の群集行動の研究は多数存在（フィッシャー 2012）[3]、（ミラー 2010）[4]、（ウィルソン 1999）[5]しているが、いずれも群集行動を目視観察により計数して行動パターンを推測、変量の単純な平均や分散程度の統計計算で分析しているに過ぎない。また、数値シミュレーションによる研究も多数（服部ほか 1999）[7]あるが、実際の群集行動から特徴量を取得し、数值的に詳細な比較検討することにより、実フィールドから取得されたデータと定性的かつ定量的に比較検討された事例はほとんど見当たらない。さらに、生物や人間の群行動パターンの解析において、個体行

動モデルに重畳するかたちで共創場を用いた群行動モデルを構築し、実際の漁法やイベント企画への応用を目指した計算機シミュレーションは実施するような研究は世界的にみても存在していない。従って、本研究は生物や人間の群集行動の精密科学化とその利用技術開発を伴う研究として高いオリジナリティと産業応用上の有用性を有しているものと考えられる。

本論文で述べる研究は、阿南工業高等専門学校と東京情報大学が徳島県水産研究所や千葉県の民間イベント会社と連携し、次の目標を達成することを目指して日本学術振興会の平成28年度科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究に採択されており、最先端の学術分野において対外的にも注目されている研究テーマのひとつと言えるだろう。

### ① 群集制御における共創場・群集行動モデルの構築

魚類群集行動とイベント群集行動の実データを水槽実験とフィールド調査から取得する。さらに、群集の認知・判断・行動を自他非分離共創原理に基づいて数学的に定式化を試み、汎用的なスマート・スワームモデル（杉野 2006）[10]を構築する。

### ② 共創場・群集行動モデルの実問題応用

ゆらぎ・行動律速モデルとレベルセット法を結合的に用いたスマート・スワームモデル（Sugino 2009）[14]のコンピュータシミュレーション・コードを開発し、漁業者やイベント企画会社と協働してLED灯火による新型漁法や、ICT関連イベント企画等における実際の生物や人間が展開する群集行動の産業応用への適用性を検証する。

本研究は、挑戦的なテーマとしてその研究プロセスの入り口にあり、これから実証実験を繰り返して着想した数理モデルの精密化とその数値シミュレーションによる有効性の検証を展開していくことになる。そこで本論文では、これまで共創場原理に基づいて構築してきた数理モデルの数理情報学的概念と基礎的な定式化を述べるとともに、本研究で用いる数値計算手法のベースとなる離散化アルゴリズムとそれに基づいて開発された計算コードのベンチマーク結果と本論で述べる数理情報モデルが応用可能な実フィールドの問題を紹介する。

## 2. 群集行動と共創場の数理

### 2.1 群集行動の数理

群行動の数理的研究は古くから存在しているが、目視観察など精度の低いデータから行動パターンを類推して制御系モデルや質点系モデルに帰着させることが多く（ストロガッツ 2005）[6]、その妥当性を平均や分散などの統計量で検証しているに過ぎない。本研究では、実フィールドにおける数百から数千の個体で形成される「共創的な群行動」に対し、その個体群を支配し包摂するスカラー場を適用することで、図1にあるようにレベルセット法を用いて個別の群行動をとる群集を包含する「自由境界（共創境界）」として抽出、その境界面の自己組織化パターンをレベルセット関数の分布とその運動で調べるアプローチをとる。

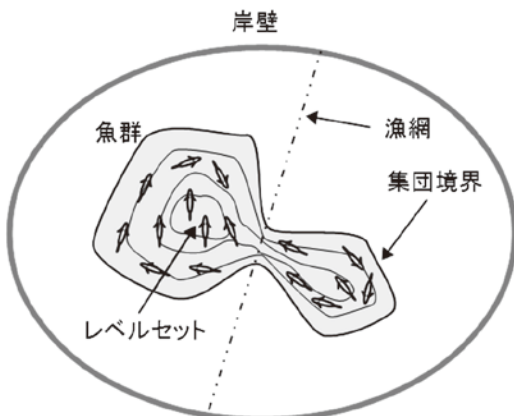


図1 魚群行動とレベルセット

この定式化を用いると、群集を構成する個体が発現する個別性を捨象し、知的な認知判断を伴う生物や人間の「集団的気付きに基づく行動総和」と考えられる群集行動の「共創的機能と性質」を数学的な量で把握できる可能性がある。このように群集行動を図2にあるようなスカラー関数のランドスケープとそのレベルセットでモデリングする手法は、共創システム理論の精密化に大きく貢献するものであり、未だ具体的な提案が成されていないネイチャー・インターフェース技術やソーシャル・インターフェース技術を数理学あるいは情報学の視点から論じ、かつ設計できる可能性を有する未踏領域の研究である。

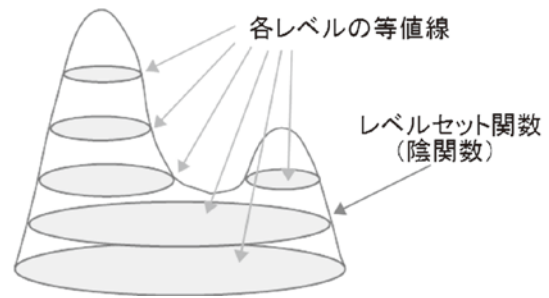


図2 共創場の陰関数

さらに、解析対象とする実問題を漁業従事者・イベント企画会社から提供してもらい、協働して魚類や人間行動の実データとの検証をする。この種の数理性が高い課題を数理工学者やシステム工学者と複数の産業界と密接に連携して行う研究はほとんど存在しないので、本研究は科学研究と産業応用を伴う研究として高い斬新性とチャレンジ性を有していると考えている。

### 2.2 共創場の数理

吉田善章等が集団現象の数理として核融合の分野で見出したGrad-Shafranov方程式(1)という線形な偏微分方程式がある（吉田1995）[2]。

$$-\Delta\phi = dW(\phi) \text{ in } \Omega, \phi = 0 \text{ on } \partial\Omega \quad (1)$$

ここで、 $\phi$ はプラズマの密度、 $dW(\phi)$ は磁気圧 $B(\phi)$ とプラズマ圧力 $P(\phi)$ の線形和で記述される関数を $dW$ とする。さらに、 $\Omega$ は解析領域を示し、 $\partial\Omega$ は領域の境界を示すものとする。

図2に最も典型的なGrad-Shafranov方程式が支配するプラズマの状態を示す。ここで、隔壁内に閉じ込められたプラズマ領域が浮遊し、非プラズマ領域に包み込まれた自由境界によりプラズマを構成する荷電粒子群を分離する自由境界が存在する。このプラズマ領域での物理量の分布に応じて等値面の集合（レベルセット）を形成することがわかる。

式(1)を用いることで、個々の荷電粒子が呈する挙動を知ることなく、「自由境界」を有するプラズマの挙動を関数 $\phi$ の等高線すなわちレベルセットを解析することで調べられるが、系全体に非常に強い対称性と線形化を設定しなくてはならず、この定式化を用いたバクテリアのコロニー形成など低知能な生物行動への応用すら未だ存在しない。

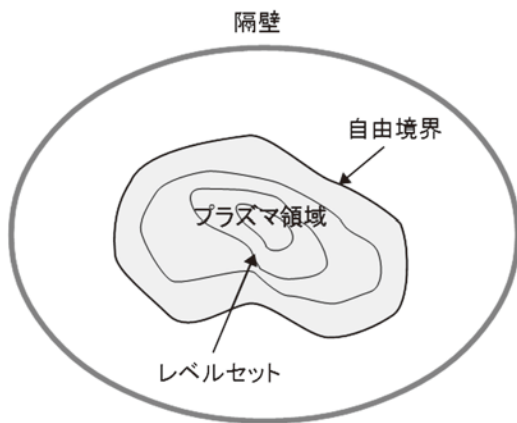


図2 プラズマ運動とレベルセット

そこで、我々は式 (1) を次のように拡張することを提案する。

$$\begin{aligned}
 -\Delta\phi &= DW(\psi_i, \phi) \text{ in } \Omega, \\
 \phi &= d\psi_j \cup \psi_i \text{ on } \partial\Omega
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

本研究の着想点は、群集の時空間パターンを形成する関数  $\phi$  に行動や環境の共創性を記述する新たなスカラー関数群  $\psi_i$  を追加し、図 3 に示すような共創システムによる考察に基づいて系全体を満足する陰関数  $\phi$  を構成することにある。ここで、 $\psi_1$  と  $\psi_2$  はそれぞれの個体グループを包含するスカラー関数、 $d\psi$  はそれらから形成される境界ゾーンを包含するスカラー関数を表し、これらは群集行動の科学から得られる群集あるいは異なる群集が接触するゾーンで発現する特徴的な性質から生成されるスカラー関数である。

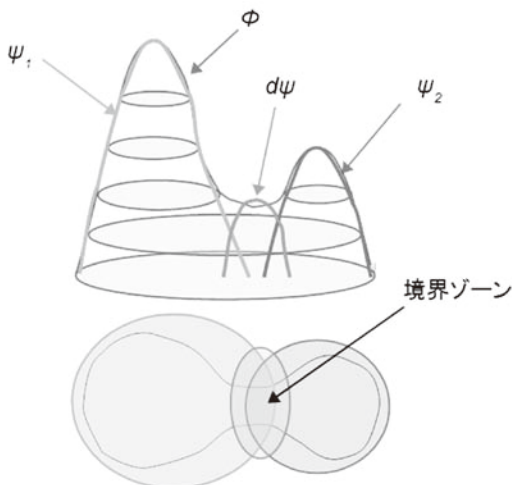


図3 重畳するレベルセット関数と境界ゾーンの生成

さらに、式 (2) から共創境界を抽出するため、移流方程式 (3) に移流速度  $V(\psi, \phi)$  を導入してスカラー関数の分布  $\phi$  を移流させ、群集パターンが意味を持ち得るスカラー関数のレベルを決めることでその等値面を決定する。すなわち、適切な離散化手法により等値面の界面 (インターフェース) を抽出することができれば、個体行動や環境情報から駆動される群集の時空間パターンを「移動する境界 = 変形する曲線」として抽出し、決定することが可能となる。

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + V(\psi, \phi) \cdot \nabla\phi = 0
 \tag{3}$$

ここで、 $\phi, \psi$  はスカラー関数を示し、 $t$  は時間変数を示すものとする。

換言すれば、式 (3) により、群集行動をパターン化できるスカラー関数のレベルセットを共創場の条件で動かすことができ、移動境界をレベルセット法によるインターフェース抽出法による数値計算を実行することにより、簡単に群集行動のパターンを計算機シミュレーションすることができる。

### 3. レベルセット関数の移流運動

#### 3.1 レベルセット法と陰関数

レベルセット法は、1980年代にアメリカの数学者 S. Osher, J. Sethian 等により開発された移動境界問題の数値的解法の一つ (Osher & Sethian ほか 1991) [8] であり、界面を直接取り扱うことなく、界面を実数値関数の等高線の部分集合 (レベルセット) と考え、この関数を数値的に計算することでこのレベルセット関数のランドスケープから界面を抽出する数値解析手法である。具体的には、抽出する界面の進行条件である移流方程式 (3) を数値的に解くことにより陰関数のランドスケープを時間進展させ、そのゼロ値等値面  $\phi = 0$  を界面すなわち 'interface' とするレベルセット関数  $\phi$  を動的に取り扱うことになる。図 4 に示すように、考えている空間より 1 次元高い空間中に陰関数  $\phi$  を構成することで、その断面を界面と捉える極めて数理的な画像処理手法である (八木・齋藤 2008) [9]。

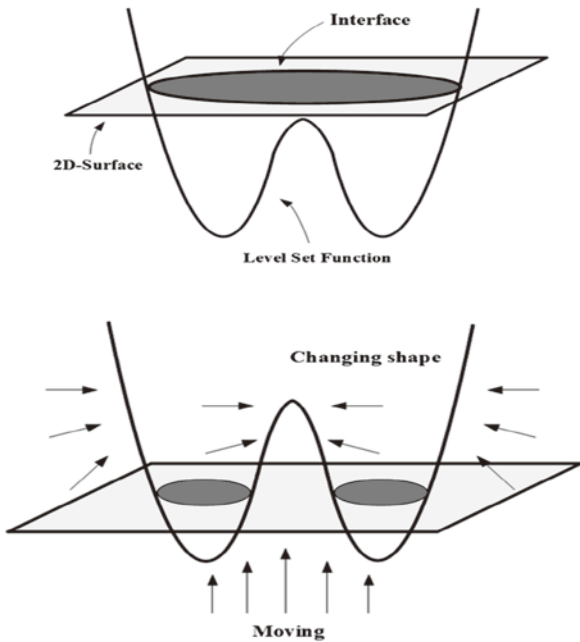


図4 スカラー関数の分布変化に応じた界面形状の変化

同じ移動境界問題の数値的解法の一つである界面直接追跡法は界面を折れ線や折れ面で表し、その時間変化を頂点・辺素・面素の運動を観測することで移動メッシュ計算する方法である。この手法は、各幾何学要素の接続性などを恒に考える必要があり、パラメーター空間の次元が増えるほど困難な数値計算アルゴリズムが要求される。これに対して、レベルセット法は通常の固定メッシュで界面の大変形を計算可能で多次元への拡張が容易である。また複数界面の重なりに対応でき、界面の結合や分離などの位相変化に対応できるなど、分断不可能なエネルギー関数を考えて界面の再構成を行うため位相変化に対応できない active tube 法の類よりも有用である。しかし、レベルセット法といえども、問題が本質的に有する非線形性から生じる数値誤差や不安定性の対処法、多次元反復計算におけるCPUコストなど偏微分方程式を扱う際の数値解析学上の解決すべき問題が存在しているので、慎重な離散化が求められることは指摘しておく。

### 3.2 LSM計算の実装例

ここでは、我々が開発してきたレベルセット法 'Level Set Method' の数値計算アルゴリズムの実装例と数値実験の例を示す。まず、先に紹介した式(3)で用いる移流速度を簡単のため  $V(\psi, \phi) = (u, v)$  とすると、解析すべき偏微分方程式は空間2次元問題

に対して式(4)のようになる。ただし、時間に関する変数を  $t$ 、空間に関する変数  $x, y$  とする。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

また、陰関数の複雑なランドスケープによる特異性の除去や種々の計算量をメモリすることの計算コストを低減するために、図5に示すように注目する界面近傍に計算ゾーンとしてバンド幅の計算格子数をコントロールする。これはナローバンド構造と呼ばれる計算スキーム(リュプケほか2011)[24]であるが、本研究では単なる数値計算上のテクニックを超えて、図3に示したような複雑な個体間あるいは個体-環境間の相互作用を記述するために導入した複数のスカラー関数が重畳して全体の共創場を構成する必要があるので、界面近傍にゾーンを設定するナローバンド構造は重要な計算テクノロジーとなる。

次に式(4)の離散化で用いる偏微分方程式計算のスキームだが、本研究では物理的な界面構造の精度を必要としないので、取扱いが簡単でかつ数値計算がロバストである1次風上差分スキームを用いて離散化する。もし、高精度なレベルセット計算が必要な場合は3次精度の移流計算が有効であることも研究してきた(杉野・角田2008)[22]。

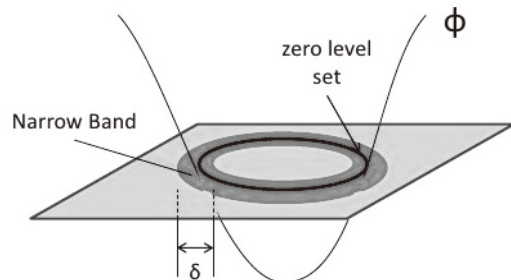


図5 界面近傍に設定するナローバンド構造

ここで、1次精度の移流計算で用いる風上条件4種類を以下に示す。

- ・風上条件1 :  $x$ 方向 = 負 and  $y$ 方向 = 負

$$f_{i,j}^{n+1} = f_{i,j}^n + \frac{u\Delta t}{\Delta x} (f_{i,j}^n - f_{i-1,j}^n) + \frac{v\Delta t}{\Delta y} (f_{i,j}^n - f_{i,j-1}^n) \quad (5)$$

- ・風上条件2 :  $x$ 方向 = 負 and  $y$ 方向 = 正

$$f_{i,j}^{n+1} = f_{i,j}^n + \frac{u\Delta t}{\Delta x} (f_{i,j}^n - f_{i-1,j}^n) + \frac{v\Delta t}{\Delta y} (f_{i,j+1}^n - f_{i,j}^n) \quad (6)$$

・風上条件 3 :  $x$  方向 = 正 and  $y$  方向 = 負

$$f_{i,j}^{n+1} = f_{i,j}^n + \frac{u\Delta t}{\Delta x}(f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n) + \frac{v\Delta t}{\Delta y}(f_{i,j}^n - f_{i,j-1}^n) \quad (7)$$

・風上条件 4 :  $x$  方向 = 正 and  $y$  方向 = 正

$$f_{i,j}^{n+1} = f_{i,j}^n + \frac{u\Delta t}{\Delta x}(f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n) + \frac{v\Delta t}{\Delta y}(f_{i,j+1}^n - f_{i,j}^n) \quad (8)$$

また、偏微分方程式を非定常計算する際の数値安定を保証するため、クーラン数  $c$  が不等式 (9) を満足するように問題に応じて計算パラメーターを調整した。

$$c \leq |V|_{max} \frac{\Delta t}{\Delta x + \Delta y} \quad (9)$$

我々はこれまで、レベルセット法の数理情報学的な可能性を追求することを目指して物理学から画像処理に渡る様々な問題を数値計算してきた (Ishimoto et al. 2009) [23]. 本研究では、魚群などの生物の群行動や人間の群衆行動の実データを取得し、その解析結果と数値シミュレーションで検証する必要がある。したがって、レベルセット法の中でも最も汎用性と計算利得に優れたボクセル空間をベースとする LSM アルゴリズムを採用した。ここで示す数値実験結果は、36 枚の花弁を持つ複雑なターゲット形状を点群により離散的に構成し、それを包含するようにゼロレベル界面の初期値を設定し、移流速度に対して平均曲率流れの条件を与えてターゲット形状に収束させたものを示す。

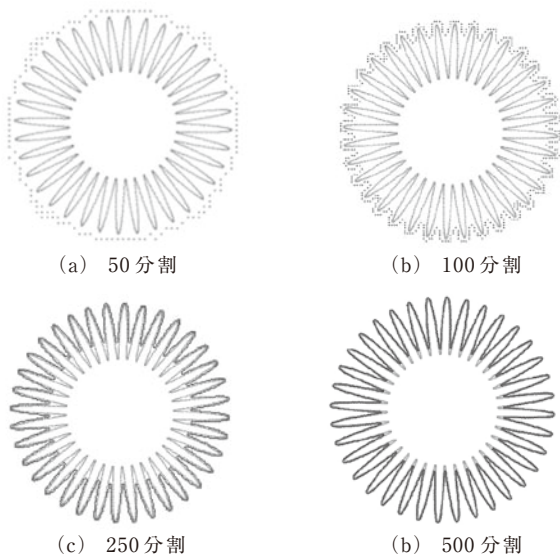


図6 離散分割数の違いによる花弁形状のインターフェース抽出

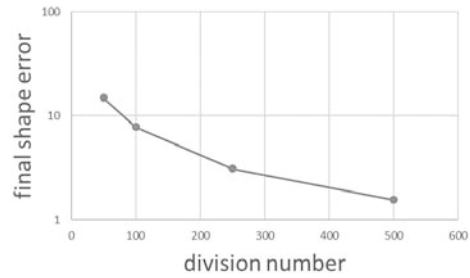


図7 離散分割数による形状誤差の収束

図6を見ると、計算領域を構成するボクセル分割数が多くなるほど、最終的な収束離散点を示すドット・マーカーがターゲット形状を示す実線によくフィッティングすることがわかる。より精密にターゲット形状への収束状況を知るため、図7に示す全体の形状誤差の収束状況を対数グラフで示す。空間分割数が50から500と増えるに従い数値誤差が低減していく様子がよくわかる (坂本ほか 2016) [25].

これらの数値実験結果より、これまで紹介してきたレベルセット移流計算アルゴリズムの有効性と精度保証がなされていることがわかる。これから取り組む実フィールドにおける魚群行動や人の群衆行動を共創場原理でモデル化し、レベルセット計算でその数理モデルを実証実験することの妥当性が理解できる。

## 4. 実フィールドにおける群集行動

### 4.1 魚群と環境の相互作用

我々はこれまで群集行動の一つとして魚の群行動に注目し、そのコンピュータシミュレーション結果と実際の水槽実験で観測した魚行動のデータと比較して新しい群集行動モデルを開発、その妥当性を検証する研究を徳島県水産研究所と共同研究してきた。図8, 9に実際的水槽実験様子を示す。これらの魚群行動実験は、撮像した動画に画像処理を施して遊泳軌跡の離散データを取得し、その時系列データにカオス・フラクタル解析を試みることで群行動パターンを分類する作業がベースとなっている。この研究は、いわゆる複雑系科学の一角を成す研究であり、特に実フィールド実験が困難な生物行動の解析事例として貴重な研究である。得られたリアプノフ指数や空間的あるいは時間的フラクタル次元の解析により、一目見ただけでは判然としない複雑な魚類の群集行動からカオス・フラクタル指数に明らか

な数値的違いが確認でき、図8に示すような定置網等の海中に存在する環境刺激と強い相関があることが検証できた (Morimoto et al. 2013) [16]. また、図9に示すように、人工物からの刺激としてLED光による環境刺激を魚群行動に与えた場合の群行動パターンを調べ、カオス・フラクタル解析の有効性を確認できた (伊丹ほか 2013, 2016) [17][19]. さらに、魚や昆虫などの生物システムを模擬したロボットの群行動実験の研究 (Onishiほか 2016) [20], (Kawakami et al. 2016) [21] も進めており、数値シ

ミュレーションやフィールド実験だけでは不足する現実世界が有するゆらぎと各個体の個別性を加味した系が呈する群集行動パターンをコントロール可能なロボット実験で検証できることも本研究の強みである. 今後は、図10に示すように魚類の共創的群集行動による産業応用を提案するために、数理モデリングを試み、3節で解説したレベルセット法を併用した数値シミュレーションと実データをこれまでの生物行動の研究で積み上げてきた複雑系データの解析手法を有効に用いて比較検証する予定である.

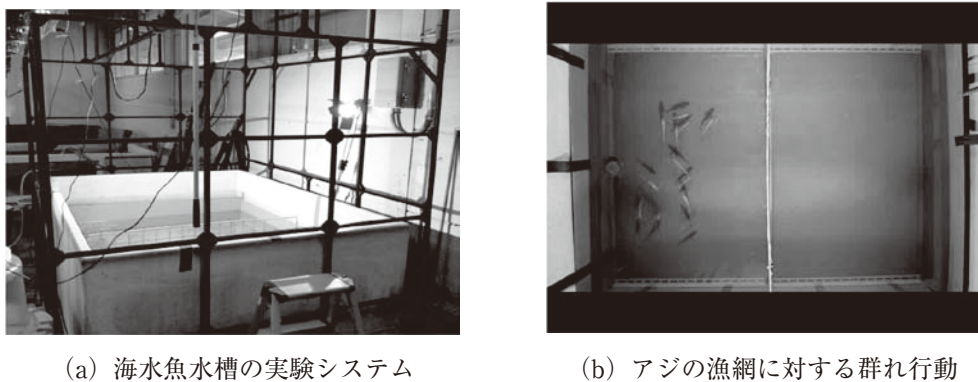


図8 漁網に対する魚群行動の水槽実験 (杉野ほか 2014) [18]

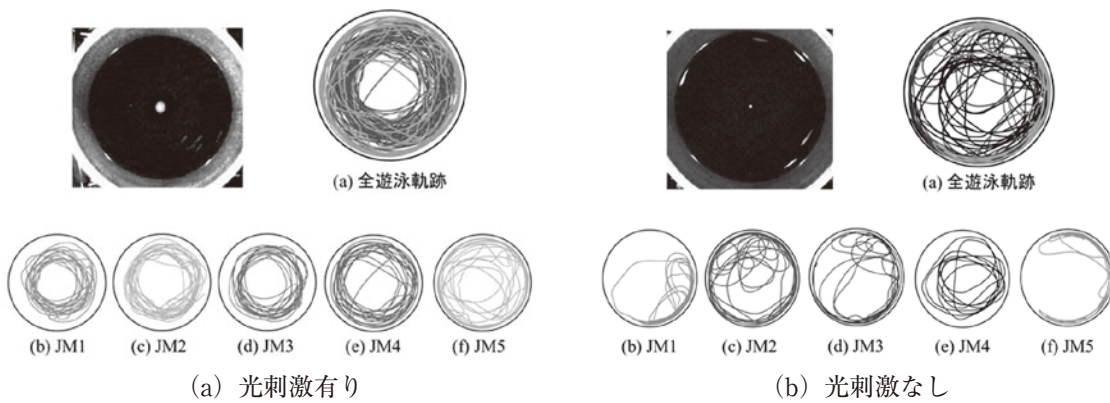


図9 光刺激に対する魚群行動の水槽実験

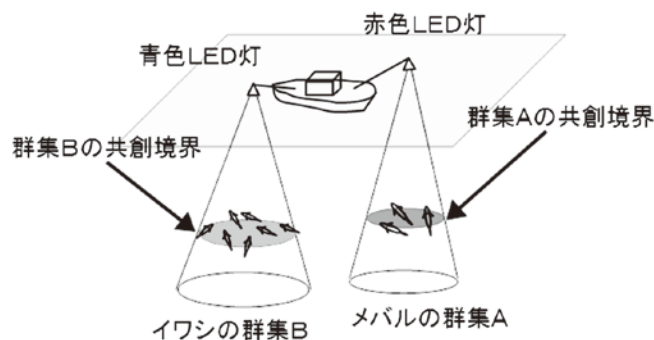


図10 漁法の共創境界とレベルセット

## 4.2 群衆と環境の相互作用

次に本研究で対象とする群集行動は、人間がイベント会場で呈する群衆行動である。これまでも災害時の避難計画や避難施設を最適設計するためにマルチエージェントアルゴリズムで数値シミュレーションした研究は多数存在する。しかし、それらはルールベースモデルを基本とする数理的考察が困難なものが多く、定量的あるいは定性的にも確度が低いものである。そこで、本研究で提案する共創場原理に基づく数理モデリングとその数値解析結果を実際のイベントで取得した群衆行動のデータと精密に比較することで、人が成す群衆の性質と環境との群衆の相互作用などをより数理的あるいは情報学的に検討することを試みる。すでに、阿南高専と東京情報大学で行われた比較的大規模なイベントの実データを取得している。図11に阿南高専のグラウンドで学生がイベントを行った際のスチール写真とその画像に対してOpenCVを用いて射影変換した画像データを示す。射影変換とオプティカルフローの処理を適応的に施すと、鳥瞰的に撮像した画像を真上から観測した「整視2値画像」に変換することができる。この2値画像データと共創レベルセット法による数値シミュレーション解析との比較検討を通じて本研究で提案する数理的枠組みが人間の群集行動にも有効で

あることを検証する。

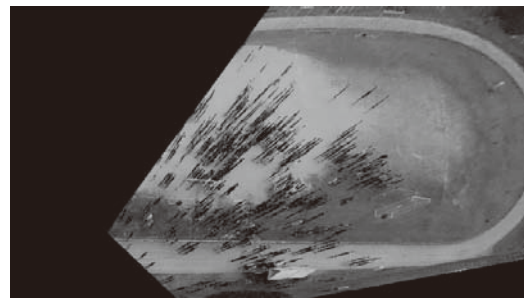
## 5. まとめと今後の展望

本論では、複雑な挙動を呈する生物や人間の群集行動パターンの数理モデルを共創場原理に修正Grad-Shafranov方程式を援用して取り扱う際に必要な基本概念ならびにそのレベルセット法をベースとした数値計算手法の定式化とその漁業分野や商業分野における応用の可能性について論じた。今後は、紹介した魚群行動や商業イベントにおける群集行動の数値シミュレーション結果を実フィールドで観測した群集行動のデータと比較することで提案する群集行動モデルの妥当性を検証する。さらに、共創場原理に基づいた群集行動制御実験も実施して、群集行動システム論に対する「共創場レベルセットモデル」の適用性を検証する。最終的に、本研究による成果が実際の漁法やイベントビジネスの視点からどの程度有効であるかを明らかにする。

まとめると、群集行動を偏微分方程式(2)で解析可能であることを提案するとともに、漁業や商業イベントの実フィールドで得られたデータを共創システム論の立場で分析し、群集行動のレベルセット関数の数値的取扱いを研究する予定である。以下に、本研究を進めることで期待される卓越した研究成果



(a) グラウンドに集まる学生



(b) 射影変換による整視画像データ

図11 イベントで発生する人間の群衆行動とその画像解析

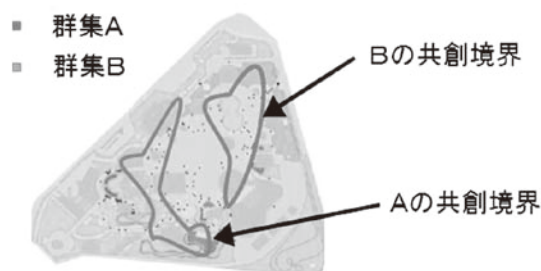


図12 テーマパークの共創境界とレベルセット



を示しておく。

- ① 多数の個体で形成される群集行動を記述する偏微分方程式モデルの確立
- ② 共創場理論ベース・群集行動モデルによる新しい数値シミュレーション手法の確立
- ③ 共創場理論ベース・群集行動モデルを用いた群集制御技術の産業応用提案

以上により、本研究を今後進めることにより、応用数理学や情報処理学の分野のみならず、群集行動が存在する様々な分野において有効な解析手法を提供できると考える。

#### 【謝辞】

本研究はJSPS科研費16K1428802の助成を受けたものである。

#### 【引用文献】

- [1] 清水博編, 久米是志, 三輪敬之, 三宅美博, 『場と共創』, NTT出版, (2000)
- [2] 吉田善章, 『集団現象の数理』, 岩波書店, (1995)
- [3] レン・フィッシャー, 『群れはなぜ同じ方向を目指すのか? - 群知能と意志決定の科学 -』, 白揚社, (2012)
- [4] ピーター・ミラー, 『群れのルール』, 東京経済新聞社, (2010)
- [5] エドワード・O・ウィルソン, 『社会生物学』, 新思策社, (1999)
- [6] スティーブン・ストロガッツ, 『SYNC - なぜ自然はシンクロしたがるのか -』, 早川書房, (2005)
- [7] 服部正太, 木村香代子, 『人工社会 - 複雑系とマルチエージェント -』, 共立出版, (1999)
- [8] Osher, S. and Sethian, J. A, "Fronts propagating with curvature-dependent speed algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations", J. Comp. Phys., 79, pp. 12-49, (1991)
- [9] 八木康史, 齋藤秀雄編, コンピュータビジョン最先端ガイド 1 Computer Vision and Image Media, アドコム・メディア社, (2008)
- [10] 杉野隆三郎, 「ボイド法による捕食行動アルゴリズムの開発」, 情報処理学会, 数理モデル化と応用研究報告, MPS-59, pp.49-52, (2006)
- [11] 杉野隆三郎, 三宅修平, 「ゆらぎを考慮した都市発展問題のシミュレーションモデル」, 第26回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp. 157-160, (2007)
- [12] 井出美奈子, 武蔵美緒, 森住昇, 杉野隆三郎, 「カオス・フラクタル理論を用いた魚行動解析手法の開

- 発」, 平成19年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, p.10, (2007)
- [13] 杉野隆三郎, 「田中広志, 生物の行動を探索の道具としてのカオス・フラクタル理論 - 魚行動のカオス解析 -」, 日本数学教育学会高専・大学部会論文誌, 16(1), pp.39-51, (2009)
  - [14] Sugino, R. "Numerical Performance of PSO Algorithm Using the Gradient Method, Theoretical and Applied Mechanics", 57, pp. 461-468, (2009)
  - [15] 福田耕治, 杉野隆三郎, 武蔵美緒, 森住昇, 「魚行動のカオス性と移動ロボットへの適用」, 電子情報通信学会技術研究報告, CAS2010-60, NLP2010-76, pp.147-152, (2010)
  - [16] Morimoto, M., Sugino, R., Fukuda, K., Itami, S. and Morizumi, N., "Development of measurement system and complexity analysis for three-dimensional fish swimming behavior", SICE ANNUALCONFERENCE 2013, CONFERENCE Proceeding, pp. 2245-2248, (2013)
  - [17] 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 「LED点滅光に対する魚類の誘引・忌避行動解析」, 平成25年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.12, (2013)
  - [18] 杉野隆三郎, 伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 守岡佐保, 「魚群サイズの定置網モデルに対するカオス・フラクタル性」, 平成26年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.10, (2014)
  - [19] 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 枝川大二郎, 「LED光刺激に対するマアジの群れ行動のカオス・フラクタル解析」, 平成28年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.23, (2016)
  - [20] Onishi, S., Kawakami, R., Fukuda, K., Itami, S., Sugino, R., "Development of Small Swimming Robot to Control Fish Schooling -Bio-mimic Design and Prototyping-", SICE ANNUALCONFERENCE 2016, Tsukuba International Congress Center, (2016)
  - [21] 1. Kawakami, C., Inouchi, M., Fukuda, K., Sugino, R., "Numerical Simulation for Desktop Swarm Robot System Using Pheromone Communication Algorithm", SICE ANNUAL CONFERENCE 2016, Tsukuba International Congress Center, (2016)
  - [22] 杉野隆三郎, 角田和彦, 「CIPスキームを用いたレベルセット法による界面捕獲の数値精度」, 情報処理学会論文誌, 数理モデル化と応用, 1(1), pp. 1-15, (2008)
  - [23] Ishimoto, H., Sugino, R., Morizumi, N., "Image Reconstruction from Point Cloud Data by CIP-Level Set Method", ICROS-SICE International Joint Conference, pp. 1931-1936, (2009)

- [24] アルノ・イムヴェルデ・リュプケ, 福田耕治, 杉野隆三郎, 「動的陰界面追跡のためのナローバンド・データ構造の実装」, 2011年度計測自動制御学会四国支部学術講演会予稿集, SO1-05, (2011)
- [25] 坂本拓也, 杉野隆三郎, 福田耕治, 「汎用レベルセットアルゴリズムの開発」, 平成28年電気関係学会四国支部連合大会, 徳島大学, (2016)