

氏 名 やました かずや
山下 和也

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 富理工博乙第32号

学位授与年月日 平成30年3月23日

専攻名 数理・ヒューマンシステム科学専攻

学位授与の要件 富山大学学位規則第3条第4項該当

学位論文題目 セルオートマトンとその応用に関する研究

論文審査委員
(委員長) 長谷川英之
参沢 匡将
唐 政
中 茂樹
広瀬 貞樹

【学位論文要旨】

計算機の発展に伴い、様々な自然現象や社会現象のメカニズムが計算機実験により解明されている。しかし、脳の機能、地球規模の気候変動、経済活動などのように非常に複雑な振る舞いをする現象が数多く存在し、そのメカニズムは未だ明らかにされていない。これらの現象のように、相互作用する多くの要素で構成され、局所的な相互作用によって大域的に複雑な振る舞いをする系を複雑系とよぶ。複雑系の計算モデルの一つであるセルオートマトンは、セルとよばれる同一の有限オートマトンを格子上に並べた空間に対して、隣接するセルの状態を入力とした単純な規則で状態遷移を繰り返す離散的計算モデルである。セルオートマトンに関する問題は数多く存在するが、本論文では、不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類、雪の結晶の類似パターン生成、セルオートマトン上で定義される一斉射撃問題の拡張の三つの問題に対して一定の解を与えることを目的とした。

本論文は、以下に示す全 6 章で構成した。

第 1 章では、セルオートマトンの歴史、背景および本論文の目的について述べた。また、本論文の章構成について述べた。

第 2 章では、セルオートマトンの定義について述べた。特に本論文で用いる 1 次元セルオートマトンと 2 次元セルオートマトンについて述べ、セルオートマトンが局所的な相互作用によって複雑な振る舞いすることを示した。

第 3 章では、Fatès 等の定義した不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類について述べた。通常セルオートマトンは全てのセルが同期して状態遷移するが、不完全な同期下のセルオートマトンは遷移確率によってランダムに状態遷移する。しかし、不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンについてはまだ詳しく研究されていなかった。そこで、完全に同期した単純セルオートマトンの時空間パターンや完全に非同期な単純セルオートマトンの時空間パターンと比較することで、不完全な同期下の単純セルオートマトンの時空間パターンを 5 つのグループに分類した。また、不完全な同期下のセルオートマトンにおける遷移関数と時空間パターンの特徴との関係を明らかにするとともに、非同期セルオートマトンとの時空間パターンの相違が、不完全な同期下のセルオートマトンにおける局所的な同期によって引き起こされることを明らかにした。

第 4 章では、雪の結晶の類似パターン生成について述べた。轡田等は、六角格子上の 2

次元セルオートマトンを用いて、一定環境下で成長してできる角板、扇状六花、広幅六花、樹枝状六花などの2次元的な構造をした雪の結晶の類似パターンを生成した。しかし、成長過程で環境が大きく変化してできる複雑な形をした結晶や、大気中の塵等が結晶に付着して空気抵抗が微妙に変わり結晶の各辺の成長速度が変化してできる六方非対称な結晶の類似パターンは轡田のモデルでは生成できなかった。そこで、環境の大きな変化を遷移関数の入れ換えに対応させ、遷移規則から六方対称性を放棄したモデルを提案した。提案モデルを用いることで、環境変化してできる結晶や六方非対称な結晶等の複雑な形をした雪の結晶の類似パターンが生成できることを示した。

第5章では、セルオートマトンに関する有名な問題の1つである一斉射撃問題の拡張について述べた。これまで一斉射撃問題の拡張問題はいくつも提起されているが、7セグメントディスプレイ上の数字パターンの一斉射撃問題、16セグメントディスプレイ上の英字パターンの一斉射撃問題、副将軍のいる一斉射撃問題をそれぞれ提起した。7セグメントディスプレイ上の数字パターンの一斉射撃問題について、いくつかの問題が特殊なセルによって等間隔に区切られたセグメント列の一斉射撃問題へ帰着できることを示して解を与えた。16セグメントディスプレイ上の英字パターンの一斉射撃問題について、いくつかの問題が1-2セグメント木とよばれる特殊な木の一斉射撃問題に一般化できることを示して解を与えた。副将軍のいる一斉射撃問題について、特に副将軍セルが1つある一斉射撃問題に解を与えた。セグメント列の一斉射撃問題と副将軍のいる一斉射撃問題について最小時間を示し、全ての長さについて最小時間で射撃させるような最小時間解は存在しないことを示した。

第6章では、不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類、雪の結晶の類似パターン生成、セルオートマトン上で定義される一斉射撃問題の拡張に対して得られた結果から結論を述べた。

【審査結果要旨】

当博士学位論文審査委員会は、本論文を詳細に査読し、かつ博士学位論文公聴会を平成30年2月2日（金）に実施し、詳細な質疑と応答ならびに最終審査を行った。以下に、審査結果を要約する。

セルオートマトンは複雑な振る舞いをする現象の解明に有効な手段であり、そのメカニズムを明確にすることは、様々な自然・社会現象の解明に繋がる。セルオートマトンに関する問題は数多く存在するが、本論文では、「不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類」、「セルオートマトンを用いた雪の結晶の類似パターン生成」、「セルオートマトン上で定義される一斉射撃問題の拡張」の三つの問題に対して解を与えるとともに理論的考察を行っている。

第一に、Fatès 等の定義した不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類を明らかにしている。通常のセルオートマトンのように全てのセルが同期して状態遷移するのではなく、遷移確率によってランダムに状態遷移する不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターンの分類は未解決問題であった。本論文では、完全に同期した単純セルオートマトンの時空間パターンや完全に非同期な単純セルオートマトンの時空間パターンと比較することで、不完全な同期下の単純セルオートマトンの時空間パターンを5つのグループに分類している。また、不完全な同期下のセルオートマトンにおける遷移関数と時空間パターンの特徴との関係を明らかにするとともに、非同期セルオートマトンの時空間パターンの相違が、不完全な同期下のセルオートマトンにおける局所的な同期によって引き起こされることを明らかにしている。

第二に、セルオートマトンを用いて、環境が大きく変化してできる複雑な形をした雪の結晶や、六方非対称な形をした雪の結晶の類似パターンを生成している。雪の結晶の類似パターンを生成するモデルとして2次元セルオートマトンを用いたモデルが知られており、一定環境下で成長してできる角板、扇状六花、広幅六花、樹枝状六花などの2次元的な構造をした雪の結晶の類似パターンが生成できることが示されている。しかし、従来のモデルでは類似パターンを生成することができない結晶が存在する。例えば、成長過程で環境が大きく変化してできる複雑な形をした結晶や、大気中の塵等が結晶に付着して空気抵抗が微妙に変わり結晶の各辺の成長速度が変化してできる六方非対称な形をした結晶の類似パターン生成は未解決問題であった。本論文では、環境の大きな変化を遷移関数の入

れ換えにより対応させた点，遷移関数から六方対称性を放棄した点の2点を拡張したモデルを提案している．提案モデルを用いることで，環境が大きく変化してできる複雑な形をした結晶や，六方非対称な形をした結晶の類似パターンを生成している．

第三に，セルオートマトンに関する有名な問題の1つである一斉射撃問題の拡張について述べている．一斉射撃問題は同一クロックで動作するシステムの同期問題であり，これまで様々な拡張問題が提起されている．本論文では，7セグメントディスプレイ上の数字パターンの一斉射撃問題，16セグメントディスプレイ上の英字パターンの一斉射撃問題，副将軍のいる一斉射撃問題をそれぞれ提起している．7セグメントディスプレイ上の数字パターンの一斉射撃問題では，新たに導入したジョイント状態のセルによって等間隔に区切られたセグメント列の一斉射撃問題へ帰着できることを示して解を与えている．16セグメントディスプレイ上の英字パターンの一斉射撃問題では，1-2セグメント木とよばれる特殊な木の一斉射撃問題に帰着できることを示して解を与えている．副将軍のいる一斉射撃問題では，特に副将軍セルが1つある一斉射撃問題に解を与えている．また，セグメント列の一斉射撃問題と副将軍のいる一斉射撃問題について最小時間を示し，全ての長さについて最小時間で射撃させるような最小時間解は存在しないことを示している．

以上，要するに本論文は，不完全な同期下のセルオートマトンにおける遷移関数と時空間パターンの特徴を明らかにし，一斉射撃問題において副将軍を導入することにより拡張し，理論的考察を行っている．また，具体的な例として，雪の結晶の成長過程における環境の変化を取り入れた手法を導入することにより，より現実的な結晶の類似パターンの生成に成功している．本論文は，セルオートマトンに関する未解決問題に解を与えるとともに，その機能拡張を行い，シミュレーション実験を通じて有効性を示したものであり，工学的応用のみならず，学術的にも価値が高い．よって，当博士学位論文審査委員会は，本論文が博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定した．