

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500231

研究課題名（和文）グラフオートマトンにおける自己組織原理の研究

研究課題名（英文） Self-organizing principles in graph-rewriting automata

## 研究代表者

富田 康治 (TOMITA KOHJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：80357574

研究成果の概要（和文）：グラフオートマトンは、構造を変化させるルールと、ルールの適用を制約する構造との間の相互作用を記述する数理モデルである。この枠組みの上で、自己組織的な振舞いとしてクラスタリングに関する数理的検討を行い、単純な規則に基づく振る舞いをシミュレーションで確認し、安定性に関して評価した。また、グラフ間の書換え可能性に関する性質を示すとともに、可逆性に対する拡張に関して検討を行った。

研究成果の概要（英文）： Graph-rewriting automata define symbol dynamics on graphs where application of rewriting rules modifies the graph structure and the structure restricts rule applications. On this framework we consider state clustering as a typical behavior of self-organization, and evaluated stability on state change errors. In addition, we showed a reachability property on graph rewriting, and considered an extension for reversibility.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：グラフ、セルオートマトン、自己組織化、複雑系、動的ネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

自己組織化の理論的な研究としては、例えばLangtonの $\lambda$ パラメータやBakらの自己組織化臨界の研究などがあり、多数の構成要素からなるシステムにおいて、階層の創発や複雑性の獲得などの問題が扱われてきた。そのようなシステムの離散的モデル化手法として、従来、セルオートマトンが広く使われ成功を

納めている。これは、一様な格子空間上での状態遷移のみを考慮するという単純さによるところが大きい。また空間も通常、理論的な取扱いの容易な無限またはトーラス空間が用いられ、境界条件はあまり扱われない。

しかしながら生物等の一般のシステムを扱う場合には、対象となる要素は有限であり、それらの間の相互作用により要素数は変わり、

その間の結合関係(トポロジー)も変化する。また、有限の空間が対象なので、境界条件も重要となる。これまで、提案者はこのようなシステムを扱うのに適したグラフオートマトンという枠組を提案し研究を行って来た。グラフオートマトンは、一様な格子空間ではなく、各ノードが3個の隣接するノードをもつグラフ構造を扱う。セルオートマトンは固定された格子空間上での状態遷移のみを扱うが、グラフオートマトンではこの仕組みに加えて、図1に示すようなグラフ構造の単純な書き換え規則を導入し、構造変化も扱う。この枠組の上で、計算万能性や構成万能性、自己複製ルールの自動生成、記述に基づく自己複製、非同期実行による同期実行のシミュレーションといった基礎的な研究をこれまで進めて来た。

これまでの研究によりグラフオートマトンの枠組は、一般的であり表現力も豊かで、階層構造も自然に表現できることがわかってきた。このことからセルオートマトンに基づく方法に比べ、自己組織化を研究するのに適しているといえる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、グラフオートマトンの枠組において自己組織原理を研究することにより、動作を行って構造を変更するルールと、ルールの適用を制約する構造との間の相互作用によるダイナミクスとしてのネットワークの自己組織原理の理解に資することである。

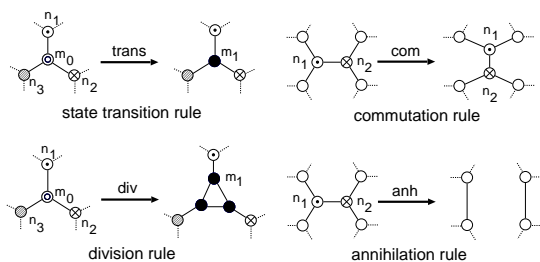


図1 グラフオートマトンの書換え規則

## 3. 研究の方法

これまでの研究では、主として閉じた系を想定し、その上での一般的な性質や、目的とするグラフ発展のためのルール設計を中心に研究を進めて来た。本研究では、主として、ノードの内部状態の誤りなどを想定し、これに応じたグラフ構造の自己組織化を扱う。これに関して、適当なルールを想定し、シミュレーションでグラフの性質などを評価する。また、関連する数理的解析を行う。

## 4. 研究成果

主な研究成果は次の3点である。

### (1) クラスタ化の解析

単純な場合における自己組織的な振舞いとしてクラスタリングに関する数理的検討を行った。クラスタ間の相互作用を検討することは、階層的な自己組織化のために、グラフの発展過程をメゾスコピックに捉える点で重要であると考えられる。ここでは、同一の内部状態をもつ極大連結ノード群を一つのクラスタとする。グラフの発展は、任意に選択したリンクに対してルールを適用することを繰り返すことにより行われる。ただし、各ノードの取り得る内部状態は2状態とし、ノード数を増減させないルール2種類を想定する。これらのルールは、局所的なノードの配置によって、クラスタ数に対して異なる影響を与える。具体的には、接続する状態の異なるリンクをランダムに選び、2種類の書換え規則(図2)を適用することを繰り返す。

それぞれの規則について、ノード数12から1140までのいくつかの初期グラフからの発展過程をシミュレートし、書換え規則1ではクラスタ数は増加し、書換え規則2では減少していくことがわかった(図3, 4)。また、

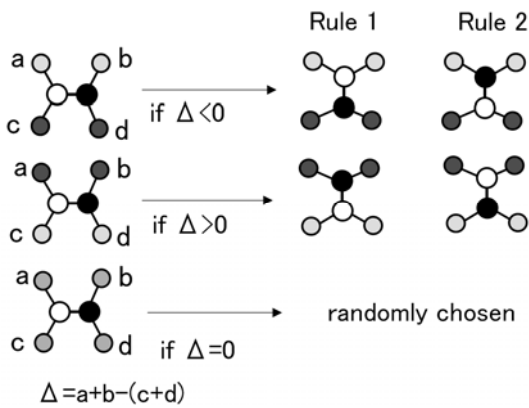


図2 2種類の手換え規則

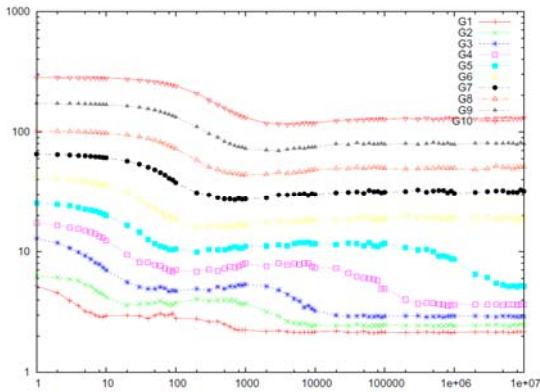


図3 規則1によるノード数の変化

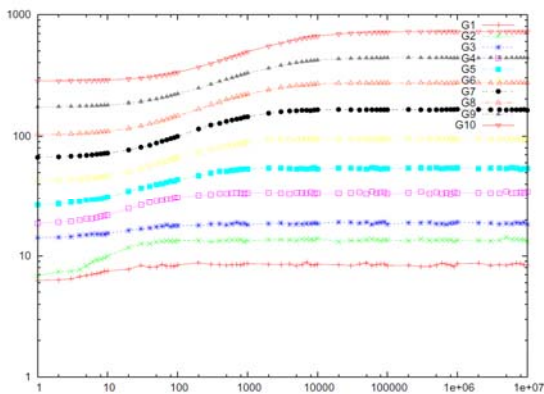


図4 規則2によるノード数の変化

手換え規則1による構造の変化の例を図5に示す。

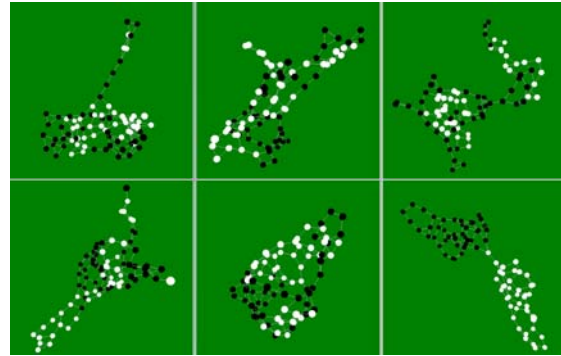


図5 グラフ構造の変化の例

さらに、外乱としてノードの状態がランダムに変更されることを想定して、主として安定性について検討を行った。変更の割合を様々に変化させてシミュレーションを行い、クラスタ数の変化を調べたところ、前述の挙動はこのような外乱のある場合にも比較的安定な振舞いを示すことが確認できた。ただし、初期状態の影響や得られたグローバルな構造については今後さらに検討が必要である。

## (2) 構造手換えに関する性質

状態を考慮しない場合のこのような枠組みの構造的な性質を検討した。上述の構造手換え規則を用いると、状態を持たない平面的な3正規グラフが二つ与えられた時、ノード数が同じであれば、一方から他方に手換えが可能であることを示した。具体的には、そのような任意のグラフから、ノード数の同じ環状梯子グラフ(図6)に手換えが可能(図7)であり、また、逆向きの手換えも可能であることから導かれることを示した。4ノードグラフの場合の例を図8に示す。

また、状態を持つ図1の手換え規則の場合には、ノード数の増減が可能であり、状態がすべて相異なる二つのグラフの間において

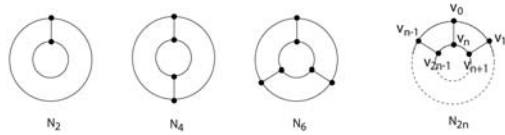


図6 環状梯子グラフ

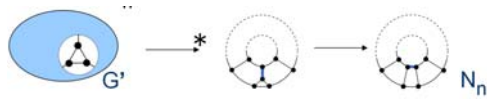


図7 環状梯子グラフへの書換え

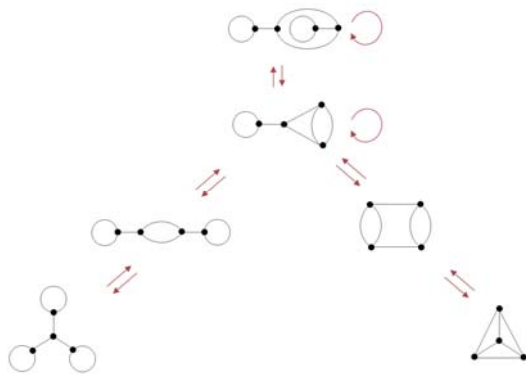


図8 4ノードグラフの書換え

は、4ノードのグラフ構造を経由することにより、同様に相互に書換えが可能である。

### (3) 可逆モデルへの拡張の検討

このようなモデルにおいては、可逆的であること、すなわち遷移後の状態から遷移前の状態が一意に決まることが重要な場合がある。そこで可逆的なシステムへの拡張について検討を行った。ルールに従った実行例を図9に示す。ここでは簡単のため、分割セルオートマトンに倣い各ノードが3つの部分に分割された場合を考えたが、初期的な段階であり、有用な計算を実行させるための拡張などは今後の課題として残った。

グラフオートマトンの上でのルールと構造の相互作用として自己組織化原理を理解する

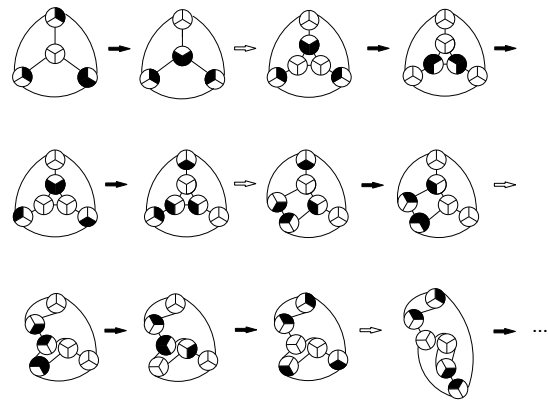


図9 可逆な拡張の例

ことは、生物システムのみならず、社会ネットワーク等の一般の動的構造システムを解析する際にも、またそのようなシステムを人工物として設計、あるいは新たな計算システムとして利用する際にも重要であり、2012年度よりの科研費基盤研究(C)「グラフオートマトンにおける自己組織的な振動生成と構造遷移」において発展させる予定である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Kohji Tomita and Haruhisa Kurokawa: On the reachability of a version of graph-rewriting system, Information Processing Letters, Vol. 109, No. 14, pp. 777-782, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.ipl.2009.03.020

[学会発表] (計3件)

- ① Kohji Tomita, Yasuwo Ikeda and Chiharu Hosono: On Rewriting of Planar 3-Regular Graphs, ICIEIS 2011, 2011年12月15日, マレーシア
- ② Kohji Tomita and Haruhisa Kurokawa: State Clustering and Declustering of 3-regular Graphs with Structural Rewriting, 5th International ICST Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2010), 2010年12月

3日, アメリカ

- ③ Kohji Tomita and Haruhisa Kurokawa:  
Reversibility in graph-rewriting  
automata, 15th International Workshop  
on Cellular Automata and Discrete  
Complex Systems (AUTOMATA 2009), 2009  
年10月10日, ブラジル

[図書] (計1件)

- ① Kohji Tomita, Haruhisa Kurokawa and  
Satoshi Murata: Graph-Rewriting  
Automata as a Natural Extension of  
Cellular Automata, In: Adaptive  
Networks, (Thilo Gross and Hiroki  
Sayama, eds.), Springer, 2009, pp.  
291-309.  
DOI: 10.1007/978-3-642-01284-6\_14

[その他]

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/k.tomita/ga>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

富田 康治 (TOMITA KOHJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能シ  
ステム研究部門・主任研究員

研究者番号: 80357574

### (2) 研究分担者

黒河 治久 (KUROKAWA HARUHISA)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能シ  
ステム研究部門・主任研究員

研究者番号: 70356947