

# 非同期セルオートマトンに基づく計算論的オートポイエーシスモデル

## Computational Autopoiesis implemented as an asynchronous cellular automaton

松田吉広 有田隆也  
Yoshihiro Matuda Takaya Arita

名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nagoya University

The methodology of conversion from particle-based models to cellular automata (CA) models is presented based on the case study on computational autopoiesis as an example of artificial chemistries. We show that the converted model has an equivalent computational capability for handling particle classes and these interactions. Also, this paper discusses the properties of artificial chemistries under the class of asynchronous CA.

### 1. はじめに

オープンエンドな進化システムの構築は人工生命における主要な問題の一つである [Bedau 00]. Taylor はこの様なシステムの要件として、組織体が置かれる広義の環境が満たすべき条件に焦点を当てた議論を展開しており、特に組織体間の豊かな相互作用、競合空間への埋め込み、物質性について論じている [Taylor 01]. この要件を充足可能なモデルの構築環境として、セルオートマトン (Cellular Automaton: CA) が候補に挙げられる。CA は局所的な遷移規則によって多様な現象を作り出すことができることに加え、遷移規則を一次元配列として書き下せるといった特徴を有する。このため、遺伝的アルゴリズムなどの探索アルゴリズムの導入も進んでおり [Mitchell 93]、複雑な現象を探るのに有効であると考えられる。一方、複雑な現象を再生する遷移規則を求めることは逆問題を解くことに相当し、探索アルゴリズムを用いない際のモデル化に困難性があることも事実である。そこで本研究では、粒子ベースで記述されている人工化学モデルの一つを CA 形式に書き下す過程を例にとり、化学反応規則を CA の遷移規則に変換する方法論を示すと共に、CA 表現による制約条件がもたらす性質を明らかにしていくことを目的とする。

粒子ベースモデルの題材としては、McMullin による Substrate Catalyst Links (SCL) モデル [McMullin 97a, b] を取り上げる。このモデルは計算論的オートポイエーシスの一種として物質性の要件を満たしており、今後の課題として複製機構の導入が挙げられている。一方、関連する研究として近年自己複製を行うセルのモデルが報告されており、これは CA で実現されたものである [Hutton 07]。両モデルの統合を検討する上で記述形式を CA の遷移規則として揃えておくことは都合がよい。このことが、SCL モデルを取り上げる理由の一つとなっている。

本稿ではこの SCL モデルを Asynchronous Cellular Automaton (ACA) によって同等の機能を有する様に設計を行ったモデルを扱うが、モデルの設計法の相違による挙動への影響に着目する。

### 2. Substrate Catalyst Links モデル

SCL モデルとは、Varela らの計算論的オートポイエーシスのオリジナルモデルに関する記述 [Varela 74] を基に、チリの政変によって失われていたアルゴリズムを復元し、更にオリジナルの不具合に修正を加えたものである。McMullin がこの SCL モデルを設計した動機も複雑性の増大を可能にするオープンエンドな進化と関連するものであり、外乱に弱い von Neumann の自己複製オートマトンと、自己修復機能を有する Varela らの計算論的オートポイエーシスモデルを統合することが目標とされる。

SCL モデルは正方形格子状二次元空間に規定され、3 種類の粒子 (基質粒子: S, 触媒粒子: K, 接続粒子: L) がこの空間をラン

ダムウォークしているものである。そして、各粒子は決められた規則に従って移動や反応を起こす。この二次元空間という設定により、L 粒子オリゴマーの線状鎖が領域を分離する境界となり、区画化をもたらす現象の観察を行うことができる。また、S 粒子のみにこの境界の選択透過を許すことで、L 粒子の閉鎖は K 粒子を内側に閉じ込め、閉鎖内部において生成される L 粒子を高密度に保持するといったシステムが確認される。この K 粒子を取り囲む L 粒子の膜状オリゴマー形態がオートポイエーシス・システムの表現として考えられている。

#### 2.1 反応規則

SCL モデルは以下に示す 6 つの反応規則から実現される。

1. 生成反応:  $2S + K \rightarrow L + K$
2. 分解反応:  $L \rightarrow S + S$
3. 結合反応:  $L + L \rightarrow L \cdot L$
4. 結合崩壊反応:  $L \cdot L \rightarrow L + L$
5. 吸収反応:  $L + S \rightarrow L'$
6. 放出反応:  $L' \rightarrow L + S$

#### 2.2 挙動

ステップの初期、反応規則 1 により L 粒子が次々と生成され、K 粒子の周辺で反応規則 3 により鎖状のオリゴマーを形成していく。やがてこのオリゴマーの端と端が結合することにより閉鎖となり、膜構造が出現する。反応規則 5, 6 により実現される膜の選択透過によって浸透してきた S 粒子から膜内部で L 粒子が生成され備蓄される。膜内の空間的制約が許す限り L 粒子の生成が進行し、反応規則 2 又は 4 により膜の破裂が起こった際内側の直近に位置する L 粒子が結合反応を行い、再び閉鎖構造を復元する。この様に修復を促す性質を有するという点で、このシステムは自己の安定性を能動的に高めていると見ることができる。

### 3. 非同期セルオートマトンによる実現

本モデルは周期的境界条件を採用した正方形格子状二次元空間において、SCL モデルの反応スキームを遷移規則による記述で実現したものとなる。各セルは SCL モデルにおける 3 種類の化学的粒子の占有とその状態、又は粒子の不在とその状態を表現している。なお本モデルにおいて状態の総数は 85913 と膨大になるため、命名規則を規定して、それに沿った操作を行うものとする。

物理、化学現象の様な物質性 (保存則等) を考慮したモデルを CA で再現する際、粒子が行う移動や各反応の表現において複数のセルを同期させる必要性が生じてくる。そして、同期を図る上では何らかの情報伝達が必要といえる。通常このための情報は他の因子と共に各セルがとり得る状態の中に埋没しているが、本研究ではこのための表現を明示的に分離して、通信という概念を用いて取り扱う。具体的には、各粒子がアクションを行う際には、2

種類の信号 (offer/accept signal) の通信が成され、その可否を決定するものとする。offer 信号とは移動や反応に先行して通信される他セルの操作信号のことであり、この信号の受信側は操作内容が受諾可能であれば、それに従い自セルの状態を変え、同時に accept 信号を offer 信号送信側に返信するものとする。offer 信号送信側は accept 信号の受諾と共に自セルに対してその信号に対応した操作を施し、offer 信号の送信を終了する。

この際、同期 CA においては各粒子が互いに offer 信号を送信しあい、offer が全てキャンセルされる状況が想定される。特に K 粒子近傍における生成反応の抑制に対する影響はオートポイエーシス・システムの実現を困難にさせる要因になるとの考慮から、本モデルは非同期セルオートマトン (ACA) の形態をとる。更新規則に関しては、総セル数分の更新を 1 離散時間ステップと規定し、厳密に 1 ステップに 1 回ずつ各セルが更新されるように設定を行うものとする。更新順序は無作為に選択する。

また、通信内容と実際の遷移を同期させる段階において信号発信時間の制御機構を組み込む必要があり、これを司るものとして signal counter を導入している。本モデルにおいては統一して信号発信時にカウント 1、次ステップにおいてカウント 2 (accept 信号の受諾時は通信終了)、そしてその次のステップにおいてカウントは 0 に戻され通信を終了するものとする。この信号発信時間に関する規定は微妙なバランスの上に成立しており、他の人工化学系モデルの変換の際には注意を要する部分となる。

### 3.1 命名規則

操作信号による反応規則の表現に際して、必要な状態数は 8 万以上に上る。そこで、利便性のために状態の命名規則を定義する。状態名には 10 進数の配列表記を用い、本モデルにおいては要素 1~3 において粒子の区分と結合状態を、要素 4~6 において offer 信号の状態を、要素 7~9 において accept 信号の状態を、要素 10~13 において結合反応に特化した信号の状態を、それぞれ機能ごとに区分した定義づけを行う。各要素の説明を表 1 に、実際の番号対応を表 2 に示す。

表 1: 要素番号の概要

要素 1	粒子の大きな区分
要素 2	1 つ目の結合状態
要素 3	2 つ目の結合状態
要素 4	offer 信号の内容
要素 5	offer 信号の送信方向
要素 6	offer 信号のカウント
要素 7	accept 信号の内容
要素 8	accept 信号の送信方向
要素 9	accept 信号のカウント
要素 10	1 つ目の bond offer 信号の送信方向
要素 11	1 つ目の bond 信号のカウント
要素 12	2 つ目の bond offer 信号の送信方向
要素 13	2 つ目の bond 信号のカウント

結合に関する反応のみ通信機構を区別してあるのは、結合反応と、吸収反応或いは放出反応は、同時生起可能な反応であるとして独立した処理が許されるからである。これに対して、同じ通信機構の内部にまとめられている 4 つの命令はそれぞれ排他的な関係にある。また、結合に関する通信機構は 1 つの結合価のための新たな要素割当てが 2 つで済んでいる (本当であれば 6 つ必要)。これは offer 通信機構と accept 通信機構を併合し (両者の区別の為には結合状態を表す要素 2, 3 を使用)、更に結合反応に対応する要素番号が各粒子に共有されているのを利用して、内容部の省略を行っているからである。

### 3.2 通信規則

信号の発信という表現は、実際には通信機構部位の内容部、方向部、カウンタ部にそれぞれ対応する番号を割当てることを意味する。offer 信号は他セルの粒子区分及び結合状態 (要素 1~3) に対する操作と accept 信号の誘起 (要素 7~9, 11, 13 に対する操作) を指令するものであり、accept 信号は他セルの粒子区分及び結合状態への操作と offer 信号の停止 (要素 4~6 を [0, 0, 0] へと変更) を強制的に喚起する役割を果たす。各信号には発信可

能な粒子と受信可能な粒子 (及び hole) が規定されており、操作内容と併せてその対応関係を表 3 に示す。

表 3: 各信号の送受信対応関係及び操作内容

	発信可能	accept 受信時の自セル操作	受信可能	offer 受信時の自セル操作
1. 移動	if S	change to H	then H and L	add offer number
2. 生成	if K and L	change to L	then H	change to H
3. 分解	L	change to S	H	change to S
4. 放出	L(L')	change to L	H	change to S
5. 結合	L	bond	L	bond

H:hole (粒子が何も占有していない状態)

### 3.3 基本的挙動

挙動に関する分析を行うため、各反応の生起確率を制御するパラメータを導入し、特に L 粒子の生成速度、膜の発生頻度とサイズに関する分析実験を行った。各反応生起確率に対応するパラメータと基本設定値を表 4 に、実験のスナップショットを図 1 に、結果を図 2, 3 において示す。なお、セル空間のサイズは  $30 \times 30$  としている。

表 4: パラメータと設定値

制御対象	パラメータ名	生成速度分析時の値	膜の安定性分析時の値
S 粒子の密度	$P_{den}$	0.5	0.5
K 粒子の移動	$P_{kmov}$	1.0	0.01
S 粒子の移動	$P_{smov}$	1.0	1.0
L, L' 粒子の移動	$P_{lmov}$	1.0	1.0
生成	$P_{prd}$	1.0	1.0
崩壊	$P_{dis}$	0	0.001
放出	$P_{emi}$	0	0.7
結合	$P_{bnd}$	0	0.5
結合崩壊	$P_{dcy}$	0	0.001

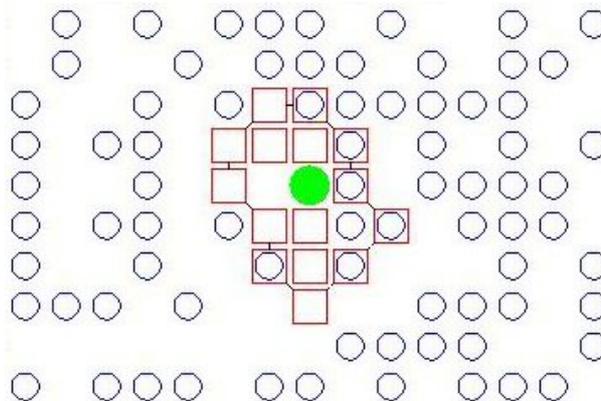


図 1: 膜が生成している様子 青丸:S 緑丸:K 赤四角:L

L 粒子生成反応ダイナミクスの様相としては、初期ステップにおいては K 粒子周辺の豊富な S 粒子により速い傾向にある生成速度が L 粒子の増加に伴い徐々に鈍ってくる、といったものである。概して、生成速度は K 粒子近傍の S 粒子の数に比例する。図 2 は各ステップにおける L 粒子の個数をプロットしたものであり、赤の線が一次、緑の線が三次近似を表している。以後この一次近似式の傾きを生成速度と呼ぶ。図 2 より、基本パラメータ適用時の生成速度は約 0.0245 程度であることが分かる。この時の設定条件において、初期の S 粒子の数は 450 個、理論的に可能な L 粒子の最大数は 225 個。更に放出反応が抑制されている状況を鑑みると、5000 ステップ目で L 粒子の数が 140 個辺りに収束している結果は妥当かと思われる。

図 3 は基本パラメータ適用時の膜発生の遷移を表しており、試行ごとに色を変え、各ステップにおいて膜発生時にはその膜のサイズ (膜を構成する L 粒子の数) を、そうでない時には 0 をプロットしたものである。図 3 の連続したプロットの様子から膜の

表 2: 各配列要素の番号と内容の対応

	要素 1:粒子区分	要素 2:結合状態 1	要素 3:結合状態 2	要素 4:offer 内容	要素 5:offer 方向
番号 0	hole	結合なし	結合なし	offer 信号なし	offer 信号なし
番号 1	K	結合方向 (左)	結合方向 (左)	move(absorption)	信号方向 (左)
番号 2	S	結合方向 (下)	結合方向 (下)	production	信号方向 (下)
番号 3		結合方向 (右)	結合方向 (右)	disintegration	信号方向 (右)
番号 4	L	結合方向 (左上)	結合方向 (左上)	emission	信号方向 (左上)
番号 5	broken L	結合方向 (左下)	結合方向 (左下)		信号方向 (左下)
番号 6	L'	結合方向 (右下)	結合方向 (右下)		信号方向 (右下)
番号 7	brokenL'	結合方向 (右上)	結合方向 (右上)		信号方向 (右上)
番号 8		結合方向 (上)	結合方向 (上)		信号方向 (上)
	要素 6:offer カウンタ	要素 7:accept 内容	要素 8:accept 方向	要素 9:accept カウンタ	
番号 0	カウンタ 0	accept 信号なし	信号なし	カウンタ 0	
番号 1	カウンタ 1	move(absorption)	信号方向 (左)	カウンタ 1	
番号 2	カウンタ 2	production	信号方向 (下)	カウンタ 2	
番号 3		disintegration	信号方向 (右)		
番号 4		emission	信号方向 (左上)		
番号 5			信号方向 (左下)		
番号 6			信号方向 (右下)		
番号 7			信号方向 (右上)		
番号 8			信号方向 (上)		
	要素 10:bond 方向 1	要素 11:bond カウンタ 1	要素 12:bond 方向 2	要素 13:bond カウンタ 2	
番号 0	bond offer 信号なし	カウンタ 0	bond offer 信号なし	カウンタ 0	
番号 1	信号方向 (左)	カウンタ 1	信号方向 (左)	カウンタ 1	
番号 2	信号方向 (下)	カウンタ 2	信号方向 (下)	カウンタ 2	
番号 3	信号方向 (右)		信号方向 (右)		
番号 4	信号方向 (左上)		信号方向 (左上)		
番号 5	信号方向 (左下)		信号方向 (左下)		
番号 6	信号方向 (右下)		信号方向 (右下)		
番号 7	信号方向 (右上)		信号方向 (右上)		
番号 8	信号方向 (上)		信号方向 (上)		

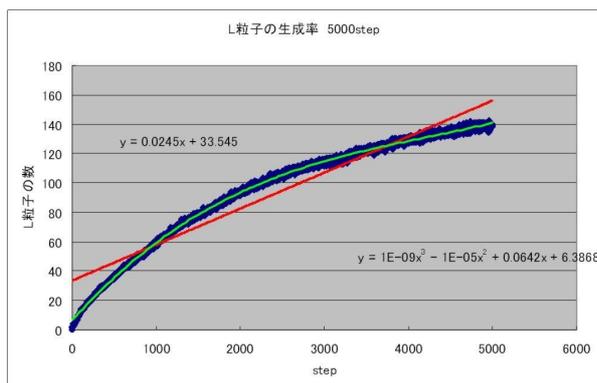


図 2: 設定の値における粒子数の変化

維持が、また同試行の各プロットに着目し、サイズが上昇していく様子から膜の成長が観測できる。このモデルにおいて膜の成長は珍しいが、維持過程はよく見られる。基本設定値において膜が発生している割合は約 30.3%程度、サイズは約 9.21 程度である。

## 4. ACA 表現に関する議論

### 4.1 ACA 表現での SCL モデルの特徴

ここでは命名規則と通信機構を用いた ACA 表現での SCL モデルにおける、設計に関連した特性、及び制約について挙げる。

- 従来の粒子ベースモデルでは各粒子への反応規則の適用を別の機構において制御していたが、ACA 表現ではこれが遷移規則に組み込まれる。
- 1つの粒子が関わる反応が多いほど各反応の生起確率は減少するため、パラメータによる制御が必要となる。各遷移規則の中に表記される反応には、互いに排他的なものが存在する。従って、競合する反応の数によってその生起確率は制約を受けることになる。ただし、この問題は本モデルに付加した様な生起確率を調整するパラメータを導入することによって解決するものであり本質的なものではない。

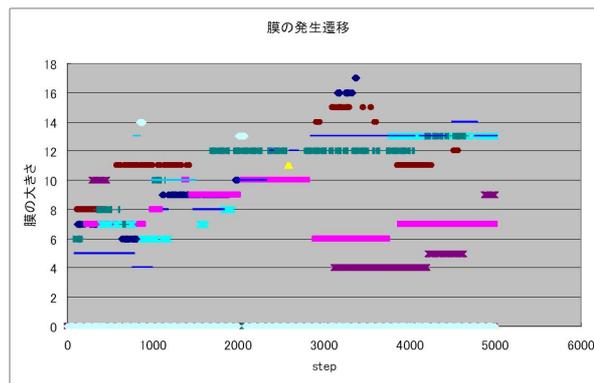


図 3: 設定の値における膜の動態変化

- 通信の過程を通すことで、反応の表現には複数ステップを要する。
- 移動の際など、瞬間的に1つの粒子が2セルに存在している状況が発生する。accept 信号の送信とその受信との瞬間だけ観察すると、質量保存則は崩れる。これは他セルの操作を瞬間に行えないという ACA 表現での制約である。

### 4.2 ACA 表現一般の方法論

ACA 表現でのモデル構築に統一した方法を示す上では、体系ごとに汎用化が可能と思われる必要な状態構造の特定と、相互作用の範囲に応じた通信機構の理論整備が主要な問題であると考えられる。ここまで SCL モデルを題材とすることで、3種類の粒子、6種類の反応規則、2セル間の相互作用という特定の人工化学系モデルにおける ACA 表現法を示した。ここで用いた状態構造を基に、人工化学系のテンプレート構造を規定した後、相互作用の範囲を変更した場合の通信機構の構造に関する議論に移る。

#### 4.2.1 人工化学系モデルの状態構造

##### 1. 粒子種類判別部位

まず、粒子の種類を判別する部位を規定する必要がある。一般化した場合においても、粒子の種類数分のこの部位で判別番号を割当てただけなので、扱える粒子の種類数に制限はない。

ただし、SCLモデルを扱った際には、ベースとなるS, K, L, 3粒子の区分に加え、Lから派生するL', broken L, broken L'を亜種粒子として要素1の中で扱っている。これは圧縮のための工夫であり、イレギュラーなものである。意味的な観点から正確に言えば、亜種粒子とはベース粒子の化学的状態を一部含めた粒子の呼び名であり、この部分をさらに区分して、原子番号に類似した粒子区分を司る要素とその化学的状態を司る要素(結合状態を司るものとして要素2, 3はこれに当たる)とした方が妥当である。

## 2. 化学的状態判別部位

前述した亜種粒子の議論と関連して、反応に起因する粒子の化学的状態変化を判別する部位(SCLを扱ったモデルでは要素2, 3)を規定する必要がある。この部位は各モデルの反応スキーマに依存して構造が変化するものと考えられる。

ちなみにSCLモデルを扱った際には、吸収状態、分解中途状態、結合状態の3種類を含める必要があった。特に中途状態を規定することでofferの失敗時に再試行を継続して行う形式を用いることが可能となる。

## 3. 通信機構部位

他セルとの同期を図るための状態は化学的状態と区別して扱うため、通信機構部位を規定する必要がある。この部位の構造は、モデルに組み込む相互作用の範囲と、独立して生起可能な反応規則群の数に依存する。

SCLモデルを扱った際には、信号内容を判別する部位と発信の方向、時間の制御を行う部位を1セットとし、これが{bond}, {move(absorption), production, disintegration, emission}という2つの独立した反応規則群の数だけ必要となった。なお、後者のグループに関するofferとaccept信号は独立した動作が可能に設計を分離したが、これは冗長となっている。

### 4.2.2 通信の手順

#### 1. 相互作用範囲: 2セル間

相互作用の範囲が2セル間に限定される場合、発信時間を2カウントに固定したoffer, accept 2種の信号を用いる形式で表現が可能。

#### 2. 相互作用範囲: 3セル間

相互作用の範囲が3セル間に拡張される場合、通信経路の違いにより以下の2パターンの実現法が考えられる。

1. offer, accept 信号の送信対象を2つに拡張し、1つのセルが発信、受信の統括をこなす形式
2. offer, accept 信号の送信対象を1つに固定し、線上に信号伝達を行う形式

形式1を採用する場合、offer信号を受信したセルは、もう片方のoffer信号受信側の状態変化も考慮に入れる必要がある。従って、accept信号返信後、もう片方の出方が判明するまでは待機状態を取らせておくことになる。この実現法としては2通り考えられ、化学的状態判別部(或いはそれに相当する部位)で中途状態として組み込むか、通信機構部を拡張してその中に組み込むかを選択することができる。後者の形式を採用する場合、相手のofferに対する同意と自分は相手の出方を何うといった内容を伝えるための信号として、新たにagree信号と命名するものを導入する。これに伴い、offer信号は受信者に対して反応生起に関する操作を指令するものと定義を改め、更にacceptとagreeどちらの信号返信を期待するのか(相互作用範囲が2か3かに依存)といった新たな情報の付与を検討する必要性が生じる。この表現における利点としては、反応中途状態のケースの様に遷移規則を新たに設ける必要がないことが挙げられる。

形式2を採用する場合、反応に関与する粒子が全て近傍に存在する場合のみoffer信号が生起するという条件では、生起可能なトポロジ的条件が限られてしまい、形式1との差別化を図る意味がなくなってしまう。そこで、反応に関与する粒子が近傍に揃っていないともoffer信号が生起するという様に制約を緩めてやれば、反応規則表現におけるCAのトポロジ的制約を一挙に解決する有効性を帯びるようになる。このためには、offer

信号生起セル及び信号経由セルの待機状態表現が必要であり、反応中途の粒子鎖の安定性制御を司る新たなパラメータ及び、それに対応した制御カウンタの導入が必要となる。

## 3. 相互作用範囲: 4セル間以上

さて、それでは相互作用範囲が3セル間以上の場合を一挙に議論する。前述した形式1の様に、一度に送信可能な対象数を拡張することによって可能となる相互作用の範囲は、参照可能な近傍の範囲に依存する。一方、形式2において反応中途状態を導入した場合、範囲の制約はなくなるが、これだけでは反応に要するステップ数が莫大となり、反応中途状態にあるセル群の鎖状の固化がモデルに強い影響を及ぼす可能性も出てくる。従って、形式2の表現法によって、モデルに組み込むことができる相互作用の範囲に制限がないことは保証されるが、実際にモデルの構築を行う際には、形式1と形式2のバランスを考慮する必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、McMullinによるSCLモデルの反応スキーマをACAで表現し、オートポイエシス・システムが再現可能であることを確認した。さらに、命名規則による状態の構造化や通信機構による同期制御といったCAで人工化学の設計を行う際に一般に通用する方法論を提案し、同様の設計法により粒子の種類数、反応規則に関わる粒子数が増えた場合にも適用が可能であることを示した。

今後の課題としては、具体的な反応規則の体系を意識した更なる状態構造の整備、及び通信機構の最適設計に関する考察を行い、実装の簡易化を目指すと共に、部分的な遺伝的アルゴリズムの導入による、前提条件となる物質性を保持する領域内における現象の自動探索化に取り組む。

## 参考文献

- [Bedau 00] Bedau, M. A., McCaskill, J. S., Packard, N. H., Rasmussen, S., Adami, C., Green, D. G., Ikegami, T., Kaneko, K., and Ray, T. S.: Open Problems in Artificial Life, *Artificial Life*, 6, pp. 363-376 (2000).
- [Taylor 01] Taylor, T.: Creativity in evolution: Individuals, interactions and environment. In P. Bently, and D. Corne(Eds.), *Creative Evolutionary Systems*, chapter 1, pp. 79-108, Morgan Kaufman (2001).
- [Mitchell 93] Mitchell, M., Hraber, P. T., and Crutchfield, J. P.: Revisiting the edge of chaos: evolving cellular automata to perform computations, *Complex Systems*, 7, pp. 89-130 (1993).
- [McMullin 97a] McMullin, B.: SCL: An artificial chemistry in Swarm, Working Paper 97-01-002, Santa Fe Institute, Santa Fe, NM 87501, USA (1997).
- [McMullin 97b] McMullin, B., and Varela, F. J.: Rediscovering computational autopoiesis. In P. Husbands and I. Harvey (Eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, pp. 38-47, Cambridge, MIT Press (1997).
- [Hutton 07] Hutton, T. J.: Evolvable self-reproducing cells in a two-dimensional artificial chemistry, *Artificial Life* 13(1), pp. 11-30 (2007).
- [Varela 74] Varela, F. J., Maturana, H. R., and Uribe, R.: Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model, *BioSystems*, 5, pp. 187-196 (1974).