

非同期セルオートマトンを用いた SCL モデルの表現

*松田 吉広 有田 隆也

名古屋大学 大学院情報科学研究科

〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

hee-haw@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract: 本研究は複製過程を有するオートポイエーシス・システムをセルオートマトン (CA) 上で遺伝的アルゴリズムにより探索するための予備的研究である。まず, McMullin による Substrate Catalyst Links (SCL) モデルを非同期セルオートマトン (ACA) で表現した。これに基づき, SCL モデルが前提としている物質性を考察し, CA 表現におけるその実現法に言及した。最後に, 細粒度の人工化学系に探索空間を絞り込むために必要な拘束条件に関して触れた。

1 はじめに

進化において永続的に新しい変化を生み出すメカニズムの全貌は未だ解明されておらず, いわゆる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として挙げられる [Bedau 00]。進化には少なくとも自己複製, 変異, 淘汰の 3 条件が必要であるが, 更にオープンエンドな進化システムの構築を考える際には, 変異の蓄積に耐え, 自己複製能を維持できるだけのロバスト性が個体に求められることになる。

ロバストな自己複製体の構築に関する先行研究としては, McMullin によるオートポイエーシス・システムを基盤としたアプローチが存在する。オートポイエーシスとは自己の構成要素を産出し続けるシステムであり, 自己維持機能を司る代謝系を有するものである。この代謝系としての特徴を進化の単位体に取り込むために, McMullin 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 [Varela 74] から出発した。オリジナルモデルで示されたオートポイエーシス体は膜状構造を形成する。McMullin はこのモデルへの分裂過程の導入を目指し, オリジナルモデルの再現に主眼を当てた Substrate Catalyst Links (SCL) モデル [McMullin 97a, b], 及び SCL モデルを拡張し膜状構造体の成長を実現した SCL-GRO モデル [McMullin 01] を段階的に発表してきた。ところが現在までに, 分裂過程の組み込みに成功したという報告は未だなされていない。

SCL モデルにおいて実現されるオートポイエーシス・システムを基盤として分裂過程の導入を検討する際のアプローチの一つに, 計算機を用いた自動探索が考えられる。この方面では, 例えばセルオートマトン (Cellular Automaton: CA) のルールを遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) によって最適化する Mitchell らの研究が参考となる [Mitchell 93]。ところが CA 上で複製機能を有するオートポイエーシス体を探索する際問題となるのが, CA においては通常, そのままでは物質性 (この言葉の意味については 3 章で述べる) が保証されていないという点である。このため, 妥当な領域に探索を絞り込むためには, 事前にモデルに必要なとされる物質性を検討し, 何らかの拘束条件を組み込んでおく必要がある。

本稿では分裂の過程を含むオートポイエーシス体を CA 上で自動探索する条件を整えるため, まずは従来粒子ベースで設計されてきた計算論的オートポイエーシスモデルの CA 上での実現法に関して触れ, 続いてそこで前提とされている物質性を特定すると共に, 探索の際に必要な拘束条件に関する議論を行う。

2 SCL モデルの CA 表現

2.1 SCL モデル

計算論的オートポイエーシスのモデルとしては McMullin の SCL モデルを扱う。この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) が空間中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ものである。

このモデルは実際に, 次ページに示す 6 つの反応規則から実現される。

2.2 CA による表現法

SCL モデルの反応スキームを CA で表現する際、状態の総数が膨大となることは明白である (本設計において最終的に状態数は 85913 に上った)。従って、利便性を考慮して命名規則を規定しておく。後に見るようにこのことが構造をもたらし、物質性に關与する部分の分離や、同一形式の操作を適用する対象区分などに寄与することになる。

又、保存則を考慮する際、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須といえる。本研究ではこのための表現を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いることに注意を払う必要がある。

2.2.1 状態の意味づけと細分化

状態名には 10 進数の配列表記を用い、各要素が司る役割を明示化する。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、それぞれ担うものとして割当てを行っている。各要素の具体的説明と番号対応を表 1 に示す。

表 1: 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	broken L'	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	カウント 0	accept 信号なし	信号なし	カウント 0	
番号 1	カウント 1	move(absorption)	信号方向 (左)	カウント 1	
番号 2	カウント 2	production	信号方向 (下)	カウント 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	カウント 0	bond offer 信号なし	カウント 0	
番号 1	信号方向 (左)	カウント 1	信号方向 (左)	カウント 1	
番号 2	信号方向 (下)	カウント 2	信号方向 (下)	カウント 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)		

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、同じ通信機構の内容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。

2.2.2 通信規則

信号の発信という表現は，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。移動の際の具体的な通信の例を図1に示す。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2に示す。

表 2: 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 受託時の自セル操作
1. 移動	if S	change to H	then H and L	add offer
吸収	if K and L		then H	particle number
2. 生成	S	change to L	S	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)

2.3 挙動

変換前の SCL モデルと同等の振る舞いを再現することに成功した。具体的な挙動は以下の通りである。ステップの初期，生成反応により L 粒子が次々と生成され，K 粒子の周辺で結合反応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って閉鎖となり，膜構造が出現する。吸収，放出反応で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，分解反応又は結合崩壊反応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。膜が発生している際の様子を図2に示す。

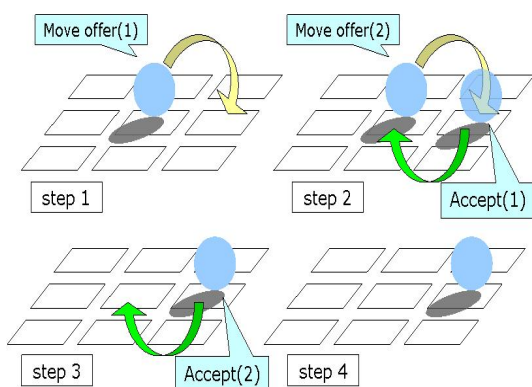


図 1: 通信による移動の例

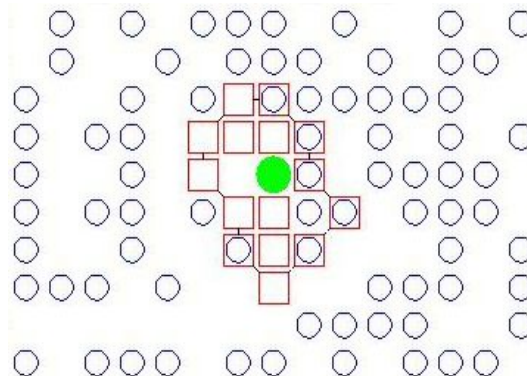


図 2: 膜が発生している様子 青丸: S 緑丸: K 赤四角: L

3 物質性を保証するための拘束条件に関する議論

SCL モデルが前提としている物質性を具体的に述べると，(1) 各粒子は空間的広がりを有する（1つの格子点に粒子の重複を許可しない）(2) 質量保存則が成り立つ（粒子は無から生じない，勝手に消滅しない）(3) 各粒子は反応規則に従う (4) ユークリッド距離の想定（ただし座標において取りうる配置は離散的），と

いったものが挙げられる。(4)は Moore 近傍の参照に基づく遷移規則を用いることで、暗黙的に CA モデルの前提ともなるため問題がない。これに対して、(1)(2)(3)は CA モデルで自動的に満たされない要件であり、ここでは CA モデルにこの3点を組み込む実現法に焦点を当てる。ちなみにこの4点の要件を満たせば、細粒度の人工化学系モデルとみなすことが出来るであろう。

前節で示した ACA モデルでは、SCL モデルの CA 表現に必要な状態を考慮する設計の段階で、状態の意味とその表現に必要な区分を考慮した命名規則により、構造がもたらされている。この構造は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具体的な条件を考慮して特定したものであるが、それを更に拡張して人工化学系モデルにおけるテンプレート構造を推測することが可能である。大別としては、粒子の種類を判別する部位、化学的状态を判別する部位、そして通信機構部位に区分されるが、特に通信機構部位は現象の辻褄を合わせるための機能を担い、3点の要件を満たす上で根幹となる部分である。これらの機構はモデルに組み込まれる粒子の種類数、扱う反応の種類、数によって量的な変化を伴うことが想定されるが、構造の骨格そのものは前節での ACA モデルと同等のものを使用可能であると思われる。ただし、相互作用の範囲を3セル間以上に拡張する際には、化学的状态を判別する部位、或いは通信機構部位の構造を拡張する必要性が生じる。これは、反応の中途状態表現に起因するものである。

又、同モデルの遷移規則は上記の状態構造に基づくものであり、この作動手順は、(a)近傍セルの状態探索(黙示的) offer acceptの確認 自セルの状態更新 (b)近傍セルの状態探索 accept 自セルの状態更新 (c)自セルの状態更新(複数ステップに及ぶ可能性あり) 近傍セルの状態探索、といったパターンに則る。これらの各段階における(α)通信機構部位の更新手順(β)粒子の種類を判別する部位又は化学的状态を判別する部位の更新のタイミング、も限定されており、この形式を満たさなければ、細粒度の人工化学系モデルとして妥当な領域から外れてしまうと考えられる。ちなみに、今回設計した ACA モデルでは更に、(2)と既定された反応規則を満たすために、信号データと指示内容の対応関係は固定されて各セルが共有しているものとしたが、この制限は条件付で緩められる可能性がある。

以上の議論を考慮すると、(1)~(4)の物質性を満たす領域内における探索を可能とするフレームワークとして考えうるものは、粒子の種類を判別する部位、化学的状态を判別する部位、通信機構部位に大別される状態構造の概念を有し、(a)~(c)の遷移規則の作動手順パターンに則り、更にこの各段階における(α)(β)が一定の条件を満たすものである。

4 おわりに

本研究では、McMullinによる Substrate Catalyst Links (SCL) モデルの反応スキーマを非同期セルオートマトン(ACA)で表現し、遷移規則に基づくオートポイエーシス・システムの実現法の一つを示した。また、この設計によって得られた知見により、計算論的オートポイエーシスが前提とする物質性を特定した。同時に、この物質性を保証するためには、命名規則により導出する状態構造に基づく遷移規則の作動手順パターン、更にはこの手順の各段階における通信機構部位の更新規則手順、粒子の種類を判別する部位と化学的状态を判別する部位の更新のタイミングに制約を設ける必要があることを確認した。

今後の課題としては、GAを用いた人工化学系領域の探索を実際に行いうるフレームワークの設計に取り組みと共に、膜の分裂過程を実現するのに必要な反応規則に関する研究報告などを考慮しながら、計算論的オートポイエーシスモデルへの複製過程の導入を目指す。

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).
- [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).
- [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).
- [McMullin 01] McMullin, B., and Gros (Chu), D.: Towards the implementation of evolving autopoietic artificial agents. In J. Kelemen and P. Sos'ik (Eds.), *Advances in artificial life, Proceedings of the 6th European Conference on Artificial Life*, pp. 440-443, ECAL 2001, Prague, Czech Republic, September 2001. Springer-Verlag (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).