

相互結合型ネットワーク網をシミュレートする ハイブリッド・セルオートマトンモデルの提案

A Hybrid Cellular Automata Proposition for
Interconnection Network Simulation

岩 田 英 朗
Iwata, Hideaki

ABSTRACT

In this paper, I propose the use of hybrid cellular automata (CA) for interconnected information network telecommunication simulators. This hybrid model has a two-layer structure, the upper layer comprising routers CA and the lower layer comprising buffer-columns CA. I also advocate adopting the average speed function $Sv_{(t)}$ for a based evaluation function of the information network. This function is easy to calculate compared with conventional methods and does not cause time-lag.

Three different experiments have confirmed that this hybrid CA is a high-performance simulator similar to conventional methods. This model is more flexible because of its hierarchical structure. Experiments have confirmed that this characteristic is linked to a diversity of simulation scenarios. Moreover, these experiments demonstrate the usefulness of $Sv_{(t)}$ as a based evaluation function.

1. はじめに

セルオートマトン (cellular automata : 以下 CA) は, セルと呼ばれる区分領域が格子状に繋がる構造を有する。個々のセルは有限個の内部状態を持つが, 時間 t における内部状態は, 近傍セルの内部状態および自身の過去の内部状態により規定される状態遷移関数に基づいて決定される。従って, CA では時間

は離散的な存在として扱われ、各セルは並列に情報処理を行うのが一般的である。

1940年代に Stanislaw marcin Ulam と John von Neumann によって考案された自己複製機械 (Universal copier and constructor)^[1] に端を発する CA は、これまでに様々なモデルが提案されている。John Horton Conway が考案したライフゲーム^[2] もその一つであるが、中でも Stephen Wolfram が 1980 年代に行った一連の研究^[3] によって、複雑な事象や現象が CA を用いることによって本質を保ちながらモデル化できることが明らかとなった。その結果、現代では複雑系と呼称される研究分野において、CA によるモデル化は問題解明の有力な手法と見做されている。例えば、格子気体法 (Lattice Gas Cellular Automata)^[4] および格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Models)^[5] は、流体の解析を目的とした CA によるモデル化手法として有名である。

近年では、自動車交通網における交通流を CA によってモデル化し、交通流の特性を解明する研究も多数行われている。^{[6],[7],[8]} また横田らは文献 [9] において、相互に結合された情報通信ネットワーク網 (以下、ネットワーク網) の CA によるモデル化によって、系の挙動解明を試みている。

特に文献 [9] では、予め定められた経路上を対象物が移動し、対象物の相互干渉によって輻輳現象が生じるという自動車交通網とネットワーク網の類似性に着目し、交通流の CA モデル化を参考に大規模相互結合ネットワーク網のモデル化および輻輳現象の解明を行っている。

そこで本論文ではネットワーク網を対象に、横田らが提案した CA モデル (以下、横田モデル) の改良モデルを提示し、その有用性について議論する。

2. ハイブリッド CA モデル提示の意義

本論文で議論するシミュレータおよびそのベースとなる CA モデルは、横田モデルに準拠する。しかし、信号機制御に重点を置く交通シミュレータの特性を内包する目的で、文献 [10] を参考にルータ層とバッファ列層によるハイブ

リッドな CA モデルを提案している。本論文が提案するハイブリッド CA を導入することにより、シミュレート結果の人間による感覚的理解が一層容易となるほか、様々なシミュレートシナリオを柔軟かつ簡単に再現できるようになることが期待できる。

3. ルータ層 CA モデルの概要

本研究が想定するネットワーク網を図 1 に示す。x 軸方向（水平方向：右にプラス）および y 軸方向（垂直方向：下にプラス）にそれぞれ L 個のルータ（router）が配置された 2 次元トーラス網とし、各ルータは 2 本の結線によりノイマン近傍のルータと相互接続される。結線が存在する隣接ルータ間の距離は全て等しいと仮定し、その長さを 1 ルータ距離と呼ぶ。各パケットは結線を通して一方向にのみルータ間転送されるが、転送方向は結線毎に予め定めておく。これは、自動車交通網における片側一車線対面通行帯と同じ構図であり、ルータが交差点と同じ機能を果たす点で、横田モデルとの構造的相違となる。

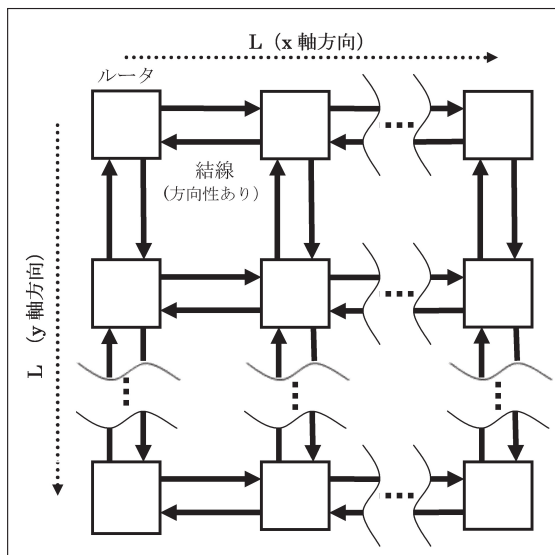


図 1 ネットワーク網の概要（ルータ層 CA）

ネットワーク網を構成する任意のルータ (sx, sy) 上では, 伝達情報を格納したパケットが必要に応じて生成される。1つの情報は必ず一個のパケットに格納され, 一個のパケットはバッファ1区画に収まる大きさとする。全てのパケットは生成時に, 1ルータ距離以上離れた最終目的ルータ (tx, ty) と優先進行方向 (垂直優先はV, 水平優先はH) が指定される。また, いずれの情報もパケット消滅まで変更を認めない。生成されたパケットは, 新規生成用バッファ列のルータ側 (先頭バッファ) から順にストックされるが, バッファ1区画が保持できるパケット数は1に限定されるため, バッファ列末尾 (末尾バッファ) が占有されている場合はパケット生成を行うことができない。

図2はルータの概要を表している。隣接するルータから受け取ったパケットおよび自ルータが生成したパケットは, 結線が存在する全ての方角のルータに対し, 表1の規則に従いルーティング可能とする。なお, ルーティング実行ルータを搬出ルータ, パケットを受け入れるルータを受領ルータと呼称する。また, パケットの最終目的地が自ルータであった場合は, 当該パケットを自動的に消

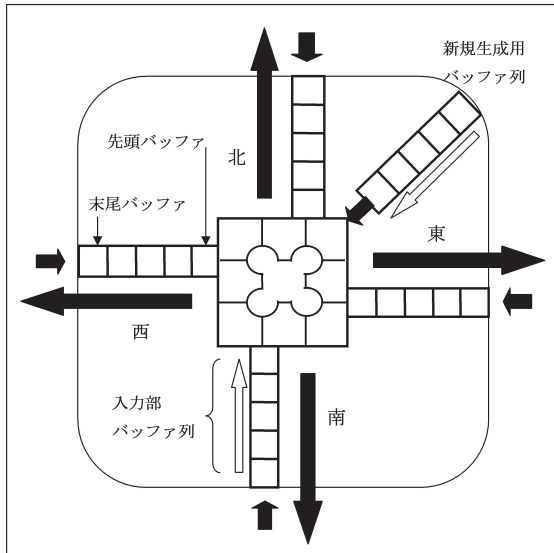


図2 ルータの詳細図

表 1 ルーティング規則の一覧

搬出ルータ			受領ルータ		
x 座標	y 座標	搬出方角	x 座標	y 座標	受領方角
x	y	東	x+1	y	西
		西	x-1	y	東
		南	x	y+1	北
		北	x	y-1	南

減させる（自身で消費する）機能を有する。

各ルータは、新規パケット用バッファ列とは別に、結線の入力部それぞれに独立した複数区画のバッファ（入力部バッファ列）を備えるが、バッファ1区画に1パケットしか保持できない点は新規生成バッファ列と同じである。また、ルーティングおよび消費の対象となるパケットは、ルータに最も近い先頭バッファに格納されたパケットのみとする。

パケットの伝達経路を決定するルーティングに際しては、その時点におけるパケットの優先進行方向に従い、常に最短ルータ距離で最終目的ルータに到着する様、受領ルータの座標および搬出方角を決定する。例えば $(sx, sy) = (1, 1)$, $(tx, ty) = (3, 2)$ の場合、優先進行方向が常に V であれば経路は $(1, 1) \rightarrow$ 南 $\rightarrow (1, 2) \rightarrow$ 東 $\rightarrow (2, 2) \rightarrow$ 東 $\rightarrow (3, 2)$ となり、H では $(1, 1) \rightarrow$ 東 $\rightarrow (2, 1) \rightarrow$ 東 $\rightarrow (3, 1) \rightarrow$ 南 $\rightarrow (3, 2)$ となる。ただし、受領ルータの受領方角に当たる入力部バッファ列末尾が空でない場合はルーティングを行わず、当該パケットは既バッファ上に留まる。

入力部バッファ列および新規生成用バッファ列は複数のバッファ区画で構成されるため、隣り合うバッファの距離を1バッファ距離と定める。パケットはバッファ列上を一方方向に限り移動可能であるが、前方パケットの追い抜き移動はできない。また移動に際しては、動作一回で1パケット全てが隣接バッファに移動する。当該ルータがパケットの最終目的地でありパケットを消費する必要が生じた場合、および搬出ルータの搬出方角バッファ列先頭から受領ルータ

の受領方角バッファ列末尾にルーティングが行われた場合も、1 バッファ距離を移動したと見做す。ただし、単位時間あたりに移動可能なバッファ距離は別に定める。

本モデルでは、ネットワーク網におけるルータは、自動車交通網における信号機付交差点に類似した存在と定義している。文献 [11] では信号機を一個のエージェントと捉え、マルチエージェントモデルによる自律的信号機制御法を提案している。ルータを一個のエージェントと仮定し、近傍ルータの状態や自身の過去の状態を参考に状態遷移を行うことによって、よりスムーズな情報通信を可能とするならば、図2で著わされるルータを一個のセルと考える必要がある。その様な発展性を考慮し、ルータを一つのセルとしてネットワーク網を図1の様に表現するルータ層 CA を設定し、ハイブリッドモデルにおける上位層と定めた。

4. バッファ列層 CA モデルと実装方法

本研究におけるネットワーク網シミュレーションでは、図3の様にバッファ1区画を一つのセルと捉え、個々のセルは隣接するセルの状態によりパケットの有無という内部状態を変化させるという CA を実装レベルで採用している。これがバッファ列層 CA であり、ルータ層 CA の下位層となる。

しかし自動車交通シミュレータとは異なり、全てのバッファ（セル）は列単位でルータの制御下に置かれている。これは、上位のルータ層と下位のバッファ列層それぞれが CA を構成し、両者が連携しながら状態遷移を繰り返す点で、文献 [10] において石田が提示したハイブリッド型自己複製 CA モデルに類似する。

ハイブリッド CA の実装に際しては、以下の3つの phase から構成される1単位時間（ステップ）を有限回繰り返すことにより、時間の進行に伴うパケットの移動状況をシミュレートするという工夫を施している。

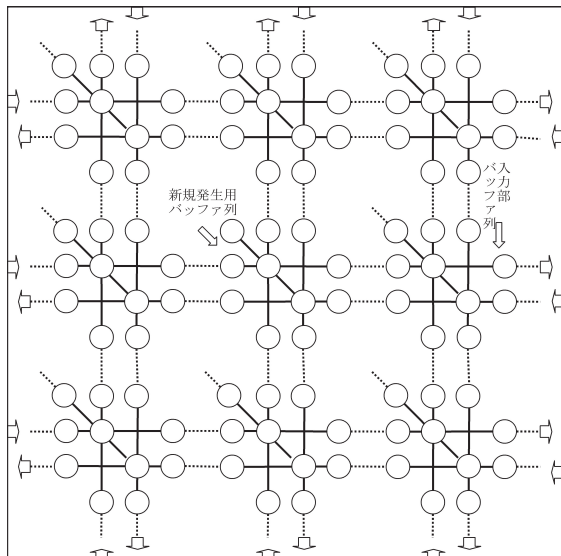


図3 バッファ列に着眼したネットワーク網のモデル化 (バッファ列層)

1. 新規パケット生成 phase
2. ルータ層 CA に着目したルーティング実施 phase
3. バッファ列層 CA に着目したパケット移動 phase

Phase-1 では、予め定めた 1 ステップあたりのパケット生成数 P_t と同じ回数だけ新規パケット生成ルーチンを繰り返す。新規パケット生成ルーチンでは、パケット個々の s_x, s_y, t_x, t_y 値 (ただし, $0 \leq s_x < L, 0 \leq s_y < L, 0 \leq t_x < L, 0 \leq t_y < L$) および優先進行方向 H または V の別を決定する。いずれも乱数を用いて決定するが, $s_x = t_x$ かつ $s_y = t_y$ は認めず, V と H は 1/2 の確率とする。

図4 は、ある乱数列を用いた際に $L = 15$ 環境下で生成した 72000 のパケットについて、横軸に $|s_x - t_x| + |s_y - t_y|$ を、縦軸にパケット数を取ったグラフである。生成ルータから最終目的ルータまでの平均ルータ距離は 10.042 であり、標準偏差は 4.992 であった。また生成された全てのパケットには、生成順が明らかとなる固有の番号を振ることとした。

ネットワーク網を構成する全てのルータには、入力部および新規生成用バッ

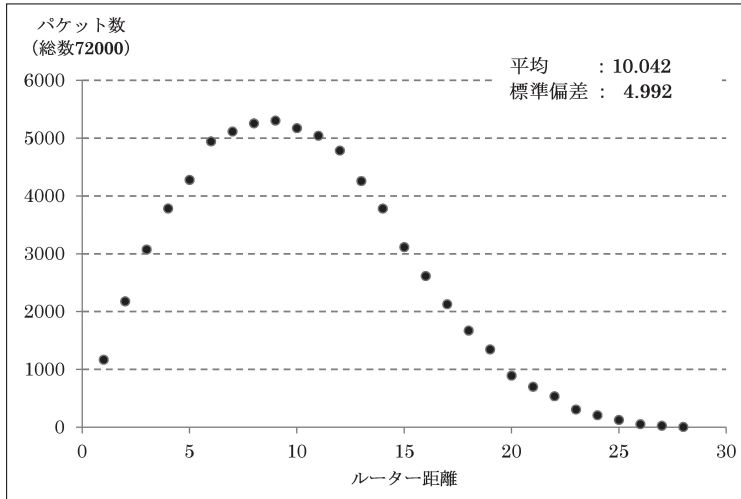


図4 L = 15 における，生成パケットのルータ距離分布

ファ列の先頭バッファに格納されているパケットを対象に，ルーティングの機会がステップ内に一度だけ与えられる。この作業が Phase-2 であるが，パケットが隣接ルータのバッファ列に移動する可能性が認められるため，CA の離散特性ゆえにバッファ列単位での並列処理は許されない。そこで Phase-2 ではルータ層に着目しルータ 1 つを順に選出した上でルーティングを行うものとする。しかし選出順序が全てのステップで同一であった場合，構造的デッドロックが固定化される可能性が高まる。そこで，乱数を用いて選出順序をステップ毎に変更し，構造的デッドロックの発生確率を最小化している。

ルータ個々に目を向けると，最大 5 つのバッファ列が各ルータには存在するため，同一ステップにおける最大ルーティング回数は 5 となり，競合の発生が予想される。そこで，次のようなバッファ別ルーティング順序をルータ内に導入した。

- 対象パケットが先頭バッファに到着した時間 t の昇順にソーティング
- t が同一の場合は，パケットの生成順（昇順）にソーティング

Phase-2 の終了により，同一ステップ内でルーティング可能なパケットは存

在しない。そこで Phase-3 では、ルーティング対象とならなかったその他のパケット全てについて移動の是非を検証し、移動が可能であれば隣接バッファに移動させる。つまり、末尾バッファ以外のバッファに相当するセルを対象に、隣接セルの状態に従ってルータに近いセルから順にパケットの有無を決定していく。ただし、Phase-3 ではパケットはルータを跨いで移動することがないため、バッファ列単位での並列処理が可能である。

なお、本論文におけるシミュレーションでは、入力部バッファ列および新規生成用バッファ列のいずれも、区画数を 5 で固定した。また、パケットの単位時間あたりの最大移動距離は 1 バッファ距離とした。

5. ネットワーク網の状態評価関数

ネットワーク網の状態を効果的に表現する手法として、横田らは文献 [9] において式 (1) によって求まる系のエントロピー E という概念を提案している。

$$E_{(\Delta t)} = \sum_{h=1}^{\Delta t} \frac{n_h}{N} \log_2 h \quad (1)$$

Δt ... 一定の単位時間(一定ステップ数)

h ... パケットの移動距離(バッファ距離)

ただし、パケットは 1 単位時間につき最大 1 バッファ距離しか移動できないと予め定めているため、 $0 \leq h \leq \Delta t$

N ... パケット総数

n_h ... 移動距離 h を持つパケット数

そこで本モデルにおいても、系の状況を分析する手段として $\Delta t=5$ におけるエントロピー E ($\Delta t=5$) を求めることとする。 Δt を 5 に設定しているため、全てのパケットが 1 ステップあたり 1 バッファ距離を常に移動する環境下では、 E は最大値の $\log_2 5 \doteq 2.321928$ を示す。従ってこの値に近ければ近いほどパケットはスムーズに伝達され、渋滞発生頻度は極小の環境だと判断できる。一方、 E の低下はパケット伝達に滞りが発生している証左であり、渋滞の発生が想定できる。 E が最小値の 0 となった環境は、ネットワーク網全域に渋滞が広がっ

た結果、全てのパケットの移動が不可能な状態と言える。

6. ネットワーク網における輻輳状態および輻輳崩壊

特定の入力部バッファ列に対し、近傍ルータより同時に複数のパケット搬出要求があった場合、競合解決アルゴリズムに則った勝者1パケット以外は既バッファ列先頭に留まる。同一バッファ列上では前に位置するパケットを追い抜くことができないため、先頭バッファ内パケットが消費またはルーティングされない限り、バッファ列はブロックされる。ネットワーク網上のパケット数が増加すれば競合発生率も上昇し、ブロックされるバッファ列も増加するため、全区画にパケットを格納したバッファ列が時間と共に増加する。パケットで満杯となったバッファ列は新たなパケットを受領できないため、バッファ列ブロックは連鎖的に周辺ルータに広がり、系の通信性能を低下させる。

輻輳とは、通信要求の過多によってネットワーク網における通信が困難となる現象を指し、単位時間あたりの通信負荷(ネットワーク網に投入されたパケット数: offered traffic) と単位時間あたりの通信量(実際に通信が完了したパケット数: accepted traffic) の関係によって語る事ができる。また、ネットワーク網が持つ通信許容量を上回る offered traffic が続くことでネットワーク網が飽和状態となり、通信効率が極端に低下する状態を輻輳崩壊と呼ぶ。

輻輳崩壊を起こしたネットワーク網が自然に復旧することは一般的ではなく、バッファ列ブロックを引き起こしているパケット全てを強制的にネットワーク上から取り除く必要が生じる。輻輳崩壊からの復旧において最も効果的な手法はネットワーク全体の再起動(リセット)とされるが、リセットによってネットワーク網上の全ての配送中パケットも消滅するため、究極の対応策と言える。情報通信において輻輳現象の発生を極力避けようとするのは、輻輳崩壊の発生確率を限りなくゼロに近づける努力の一環である。

7. 実験 1 の概要および結果・考察

最初に、本シミュレータにおいて輻輳現象および輻輳崩壊が再現できることを確認する目的で、ネットワーク網 $L=15$ において、1 ステップあたりの生成パケット数 P_t を 30 から 45 まで 5 刻みで変化させ、各々における E の時系列変化を計測する実験を行った。実験では同一乱数列を用い、3000 ステップを上限とした。図 5 および表 2 はその結果である。

図 5 は縦軸を E ・横軸を T とするグラフであるが、 $P_t=30$ および $P_t=35$ の場合、1500 ステップを超えても E は 2.3 前後で安定していた。しかし $P_t=40$ では $T=610$ で 2.0 を一旦下回った後、緩やかな上昇傾向を示しながら $T=1005$ まで 2.1 前後を保つ。ただし値は安定せず、大きな変動を繰り返す。続く $T=1094$ で 2.0 を下回った後、 E は急速に低下し、 $T=1301$ 以降は常に 0 となった。 $P_t=45$ では、実験開始直後から E は強い減少傾向を示し、 $T=115$ で早くも 2.0 を下回った後、 $T=308$ 以降は $E=0$ が続いた。

表 2 は、 $T=3000$ における各種パケットの累計数を表している。理論数は

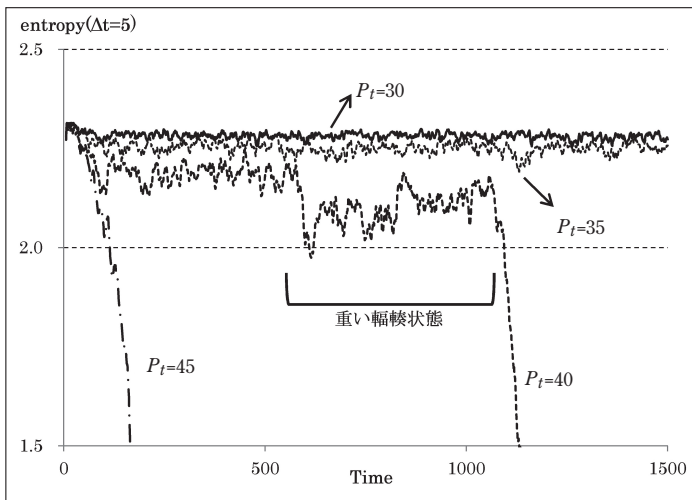


図 5 $L=15$ における、時間 T の経過に伴うエントロピーの変化

表2 L = 15 における, T = 3000 時点でのパケット状況 (累計)

P_t	理論数	出現数		出現不能数		通信完了数	
		実数	%	実数	%	実数	%
30	90000	90000	100.0%	0	0.0%	88459	98.288%
35	105000	104997	99.997%	3	0.003%	103206	98.291%
40	120000	48354	40.295%	71646	59.705%	44283	36.903%
45	135000	10193	7.550%	124807	92.450%	6000	4.444%

Phase-1 における新規パケット生成ルーチンの実行回数累計であり, 出現数と出現不能数の合計となる。新規生成用バッファ列の末尾にパケットが存在したためにパケットの新規生成が許されなかった回数の累計が出現不能数であり, 通信可能数は最終目的地に到着してルータによる消費が行われたパケットの累計数 (accepted traffic の累計) を表す。また各項目のパーセンテージ項は, 理論数を分母とする百分率である。

本実験で注目すべき事象は $P_t = 40$ である。T = 600 から T = 1050 に掛けて重い輻輳現象が継続して発生した結果, T = 1100 を前に輻輳崩壊が起きたと分析できる。それを裏付けるのが, 時間経過に基づく累計通信可能数の変化を示した図6である。

実験開始直後より, 通信完了数累計は時間経過に伴って単調増加するが, T = 1252 を境に横ばいとなる。一方, その時点における理論数累計を分母に, 通信完了数累計を分子とする通信効率に着眼した場合, 開始直後から 0.65 近辺までの区間 A では非常に大きな傾きを持って単調増加する。しかし以降 0.90 近辺までの区間 B では増加率それ自体が徐々に鈍化し, 区間 C では小さな傾きによる単調増加に移行する。最後の区間 D では 0.95 を目前に転送効率は下落に転じ, 以降上昇することはない。

このような現象は, 系に固有の単位時間あたりの飽和通信量および offered traffic と accepted traffic の相互作用の中で発生する。区間 A では飽和通信量が accepted traffic を大きく上回っているため accepted traffic は順調に増加し, 時間経過に比例して急速に通信効率が向上する。しかし飽和通信量と accepted

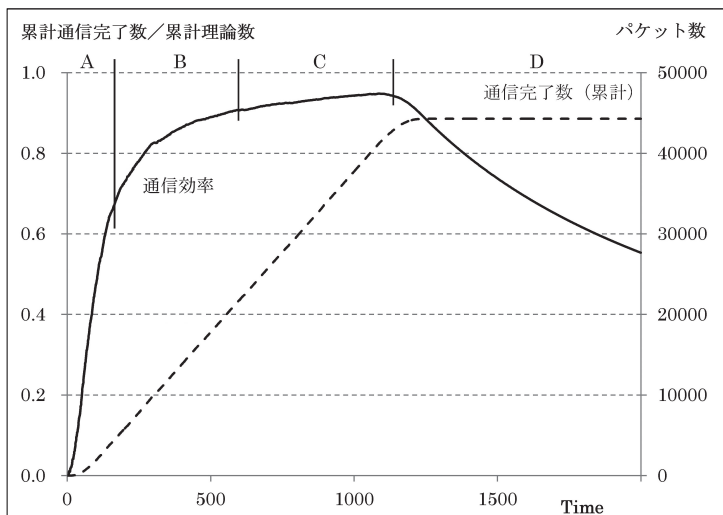


図 6 $L = 15 \cdot P_t = 40$ における、時間 T の経過に伴うパケット状況の変化

traffic の差が減少するにつれて通信効率の増加率は減少せざるを得ないため、区間 B では通信効率は曲線を描く。飽和通信量と accepted traffic が近接するに従って輻轉現象の発生確率も上昇し、小さなキッカケで重い輻轉現象が発生する。輻轉現象の継続的発生によって accepted traffic が制限されているのが区間 C であるが、輻轉崩壊は起こっていないため僅かずつ accepted traffic は上昇し、通信効率も緩やかに単調増加する。以上の過程を経て、offered traffic の累計が系の持つ飽和通信量累計をオーバーすることで輻轉崩壊を起こし、通信効率が極端に悪化している状況が区間 D である。

以上の分析により、本モデルにおいて輻轉現象および輻轉崩壊が適切にシミュレートされていることが確認できる。

8. 新たな状態評価関数導入の提案

式 (1) に基づく系のエントロピーがネットワーク網の状態を表現できることは、先の実験からも明らかである。しかし、式 (1) は実装に際しいくつか

の問題を含んでいた。一つは、十分な大きさを持った Δt が必要となるため、過去の一時点 $T - \Delta t$ から現在までの所在地情報を継続的に保持しなければならない点である。また、過去の情報を活用している点で、ネットワーク網の状態が数値に反映されるまでには、一定のタイムラグ発生が不可避となる。

更に、離散特性を持つ CA モデルに起因する問題も存在する。 Δt が取り得る最小値は 1 であるが、本モデルでは 1 サイクルあたりの最大パケット移動距離は 1 バッファ距離と定めている。そのため h が取り得る値は 0 または 1 のみであり、 $\log_2 1 = 0$ より $E_{(t)}$ は常に 0 となる。

そこで本論文では、エントロピーに代わり式 (2) で求まる時間 t におけるパケットの平均速度 $Sv_{(t)}$ の利用を提唱する。

$$Sv_{(t)} = \frac{n_1}{N} \quad (2)$$

N … 時間 t においてネットワーク網に存在したパケット数

時間 t においてネットワーク網に存在しうるパケットは、次の 3 種である。

1. 時間 t の Phase-1 に誕生したもの
2. 時間 t の Phase-2 で消滅したもの
3. 時間 $t-1$ に引き続いて存在するもの

1 および 3 は、Phase-2 または Phase-3 中に近傍セルの状況により 1 バッファ距離の移動可否が決定され、2 は無条件に 1 バッファ距離の移動を認めている。従って Phase-3 終了後に、上記 3 種のパケット全ての中で Phase-2 または Phase-3 において 1 バッファ距離の移動を獲得したパケットの割合を求めれば、時間 t における平均速度 (バッファ距離 / サイクル) が求まる。パケットの移動履歴を情報として保持する必要はなく、今サイクル中に得られる情報のみを使って算出するためタイムラグも発生しない。

$Sv_{(t)}$ の有用性を検証する目的で、 $L = 15$ かつ $P_t = 40$ 環境下での E ($\Delta t = 5$) と $Sv_{(t)}$ を比較したのが図 7 である。両者に差異は確認できず、エントロピーの代わりに平均速度を活用しても不都合は無いことが判る。従って今後は、ネッ

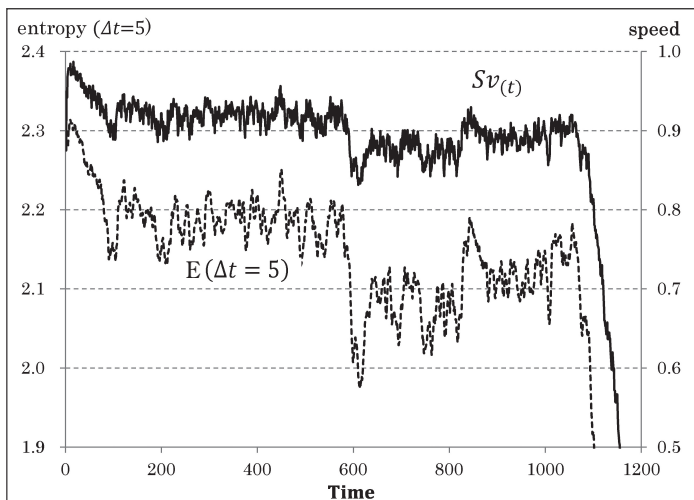


図 7 $L = 15$ かつ $P_t = 40$ 環境下での $E(\Delta t = 5)$ と $Sv(t)$ の時系列変化

トワーク網の状態を表す指標として $Sv(t)$ を用いる。

9. 実験 2 の概要および結果・考察

実験 1 より、輻輳崩壊と密接な関連を持つ飽和通信量の存在が明らかとなっているが、その値はネットワーク網を構成するルータ数に依存すると予想できる。例えば $L = 15$ の場合、単位時間あたりの飽和通信量は $35 < P_t < 40$ の範囲に存在することが図 5 より予想できる。一方、輻輳崩壊を引き起こす P_t の数値は、シミュレーションに用いる乱数列によってばらつく可能性も想定できる。そこで、使用する乱数列が系の飽和通信量に与える影響を明らかにする目的で、20 の異なる乱数列を用いて $L = 15$ における $Sv(t)$ の変化を 3000 サイクルまで観察し、輻輳崩壊を引き起こす P_t の最小値を求めた。

$P_t = 39$ で輻輳崩壊が観測された乱数列は 4 個、 $P_t = 40$ では 14 個、 $P_t = 41$ は 2 個であったため、 $L = 15$ における単位時間あたりの飽和通信量は $P_t = 40$ 程度と判断できる。図 8 は $P_t = 40$ において特徴的な 3 つの乱数列について、 $Sv(t)$ の時系列変化を表したグラフである。

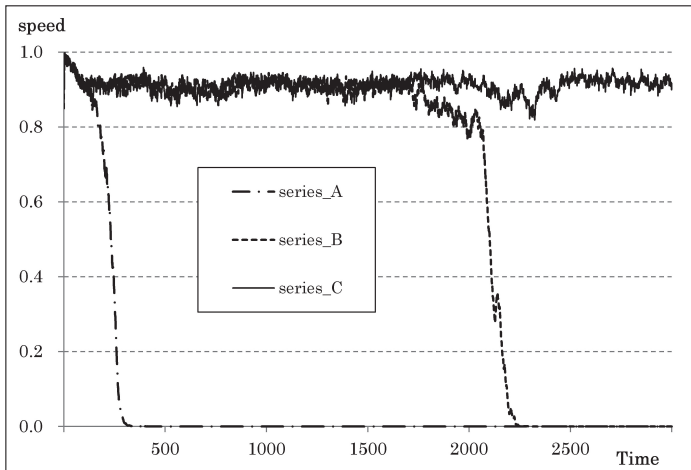


図 8 L = 15 かつ $P_t = 40$ 環境下における，使用乱数列による差異

この様に，同一条件下にあっても利用する乱数列によって時系列変化に一定の差異が発生することが確認できるが，20 の乱数列全てにおいて $P_t = 40 \pm 1$ の範囲内で輻輳崩壊が確認されており，乱数列が飽和通信量に及ぼす影響は限定的だと判断できる。

10. 実験 3 の概要および結果・考察

実験 1 および 2 の結果を踏まえ，「飽和通信量を下回る offered traffic 下において，外的要因によって輻輳崩壊を故意に発生させる」という状況の再現に挑戦することで，本ハイブリット CA の有用性を明らかにする実験を行った。

図 5 から明らかな通り，重い輻輳状態が一定時間継続すると輻輳崩壊が引き起こされる可能性が高まる。そこで，時間経過の中で特定のルータが一定期間，機能不全を起こすというシナリオを設定し，シミュレートを試みた。

具体的には，L = 15 環境下では輻輳崩壊が起きないことを実験 1 で確認済みの $P_t = 35$ において，ネットワーク網の中央に位置するルータ (7, 7) が $T = 500$ から $t(E)$ までの $W_t = t(E) - 500 \pm 1$ サイクル間，ルーティング不能とな

る状況を設定した。実験 1 で使用した乱数列を用い、 $t(E)$ を 510 から 1500 ま
で変化させながら、 $T=2000$ までの $Sv_{(t)}$ 時系列変化分析より、輻輳崩壊発生
の有無を判断した。

その結果、 $P_t=35$ では $t(E)=538$ 以降、つまりルータ (7, 7) に $W_t \geq 39$ のルー
ティング不能期間が発生した場合、輻輳崩壊が必ず発生することが確認できた。
図 9 は、 $t(E)=520$, $t(E)=530$, $t(E)=540$, $t(E)=550$ 各々における $Sv_{(t)}$ 時
系列変化を表したグラフである。

続いて P_t の値を 10 から 30 まで 5 刻みに変化させて同じ実験を行ったところ、
 $P_t=30$ では $t(E)=601$ 以降、 $P_t=25$ では $t(E)=731$ 以降で輻輳崩壊の発
生を確認した。しかし P_t が 20 以下の場合では、それ以上のケースとは異なる
現象が確認できた。 W_t が十分に長い状況に置かれた場合、重い輻輳現象に続
いて $Sv_{(t)}=0$ となる期間が生まれる。その様は輻輳崩壊に酷似しているが、ルー
ティング不能期間の終了後しばらくすると、 $Sv_{(t)}$ は限りなく 1.0 に近づくこと
が判明した。この現象は $P_t \leq 20$ の全ての $t(E)=1500$ で確認されている。従っ
て $P_t \leq 20$ の環境下では、 $W_t \leq 1001$ であれば輻輳崩壊は起きないと判断でき
る。図 10 は、 $L=15$ かつ $W_t \leq 501$ 環境下における $Sv_{(t)}$ の時系列変化について、

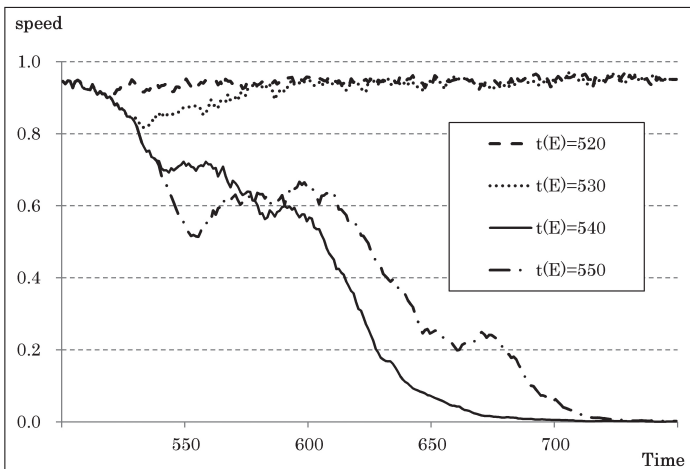


図 9 $L=15$ かつ $P_t=35$ 環境下での障害発生における $Sv_{(t)}$ の時系列変化

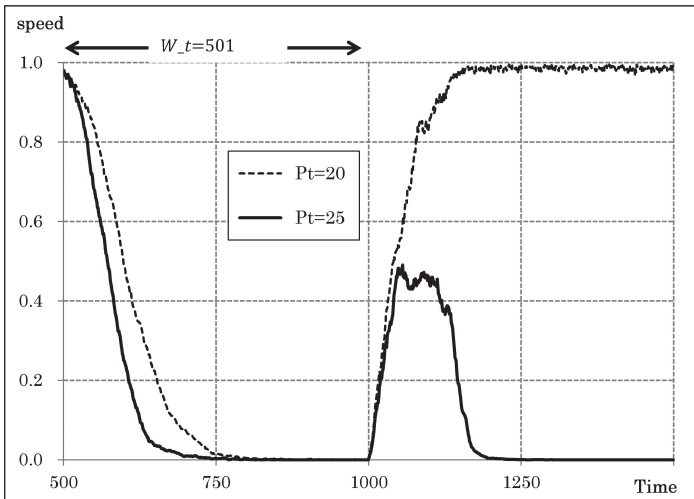


図 10 $L = 15$ かつ $W_t = 501$ 環境下における $Sv_{(t)}$ の時系列変化比

$P_t = 20$ と $P_t = 25$ を比較したグラフである。

本ハイブリッド CA では、ルータ個々に様々な条件を設けた場合であっても、その情報はルータ層からバッファ列層に速やかに伝達されるため、細かなシミュレーションシナリオにも柔軟に対応可能であることが、実験 3 より明らかとなった。モデルの階層化による構造の明確化こそが、本モデルの優位性となる。

11. まとめと今後の課題

本研究では、情報通信ネットワーク網のシミュレーションに際し、ルータ層とバッファ列層という上下 2 層の構造を持ったハイブリッド CA を導入した。また、系の状況を判断する評価関数として、従来手法より計算が安易かつタイムラグ発生の恐れがない平均速度関数を導入することも提唱している。

3 つの異なる実験を通して、従来手法同様、ハイブリッド CA が高い再現性を持つシミュレータであることを確認した。同時に、系の評価関数としての平均速度関数の有用性も証明された。更には、階層構造を持つ CA モデルが有する柔軟性が、シミュレーションシナリオの多様性に繋がることも確認できた。

ハイブリッド CA におけるルータ層の CA モデル化を一層進め、系の accepted traffic が飽和通信量に近づいた場合、ルータ個々のルーティング規則を動的に変更することによって輻輳現象の発生頻度を低減し、ひいては輻輳崩壊の発生を回避する方法を研究するのが、今後の課題である。

謝 辞

本研究は、和歌山大学経済学部経済計測研究所の協力により行われた。ここに謝意を表す。

【参考文献】

- [1]. J. von Neumann, “Theory of Self-reproducing Automata”, Arthur W. Burks ed., The University of Illinois Press, Urbana, 1966.
- [2]. Andrew Adamatzky ed., “Game of Life Cellular Automata”, Springer-Verlag New York Inc, 2010.
- [3]. Stephen Wolfram, “Cellular Automata And Complexity”, Collected Papers, Westview Press, 1994.
- [4]. Gary D. Doolen ed., “Lattice Gas Methods: Theory, Application, and Hardware”, The MIT Press, 1991.
- [5]. Dieter A. Wolf-Gladrow, “Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: An Introduction”, Springer, 2000.
- [6]. 藤井進介ほか, “セルオートマトンによる交通流制御シミュレーションシステムの機能”, 福井大学工学部 研究報告第 51 巻 第 2 号, p.191-198, 2003.
- [7]. 玉城龍洋ほか, “セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション”, 情報処理学会論文誌 Vol.46 No. SIG 10 (TOM 12), p.30-40, 2005.
- [8]. 小松崎俊彦ほか, “セルオートマトンによる都市交通シミュレーション”, 日本機械学会 No.05-15 Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM 論文集, 2005.
- [9]. 横田隆史ほか, “セルオートマトンによる相互結合網の輻輳の解析”, 情報処理学会論文誌 Vol.47 No.SIG 7 (ACS 14), p.21-42, 2006.
- [10]. 石田武志, “人口細胞を形成するための細胞の自己複製セルオートマトンモデル (セルオートマトンモデルとグレイスコットモデルによるハイブリッドモデルの提案)”, 日本機械学会論文集 (C 編) 77 巻 777 号, p.1706-1719, 2011.
- [11]. 白井嵩士ほか, “マルチエージェントモデルによる信号機オフセット制御法の提案”, 人工知能学会論文誌 26 巻 2 号 SP-D, p.324-329, 2011.