

CA を用いた列車の運行シミュレーションでのクラスタの形成

龍谷大学 理工学研究科 藤井健介, 飯田晋司

東京大学 工学系研究科 西成活裕

1 はじめに

セルオートマトン(CA)[1]を用いた交通流の研究は、車やバスでは数多くなされているにも関わらず、重要な交通手段の1つである鉄道の研究はあまりなされていなかった。現在の鉄道では、事故や故障などで列車のダイヤが乱れた時、ダイヤの復旧はその路線のダイヤや車両、運転手まで熟知した人の手によって行われている所がほとんどである[2]。コンピュータを用いたダイヤの復旧は複雑な上にリアルタイム性や正確性が求められるため、現状では難しいとされている。本研究では、CAによる列車の運行モデルを作り、ダイヤの乱れがどのように発生し、拡大していくかのメカニズムを調べた。このような研究から最終的にはダイヤの自動復旧や列車運行の自動最適化のアルゴリズムを得たいと考えている。CAを用いた場合、複雑な系の本質を損なわず簡単に、様々なモデルをシミュレートできるため[3]、交通流や、生態系の研究などで、成果をあげている。鉄道の線路という複雑な空間をセルに分け、ルールを決めて各列車を動かし、信号の色を変えることによって、列車の動きを単純化してシミュレートできるので、様々な状況を作り出し、その後の動きなどを調べることが容易にできる。車と比べ鉄道は、信号の使い方が全く違う、同じ種類の列車は追い越さないなどの違いがある。

前回、路線の一部を開放系と考えたモデルを紹介した[4]。今回はより現実的な、折り返し駅を含めた路線全体をシミュレートできるモデルを作成できたので、結果を報告する。定常運行は安定的であると思われるが、少しでもダイヤの乱れが発生すると、列車のクラスタが発生し、その状態が維持されることが確認できた。

2 モデルについて

セルは一次元配列で周期系とし、両端で折り返すようにした。両端辺り以外の信号は3セル毎に1箇所、駅は14セル毎に1箇所設置した(図1)。ルールの詳細は以下の通りである。

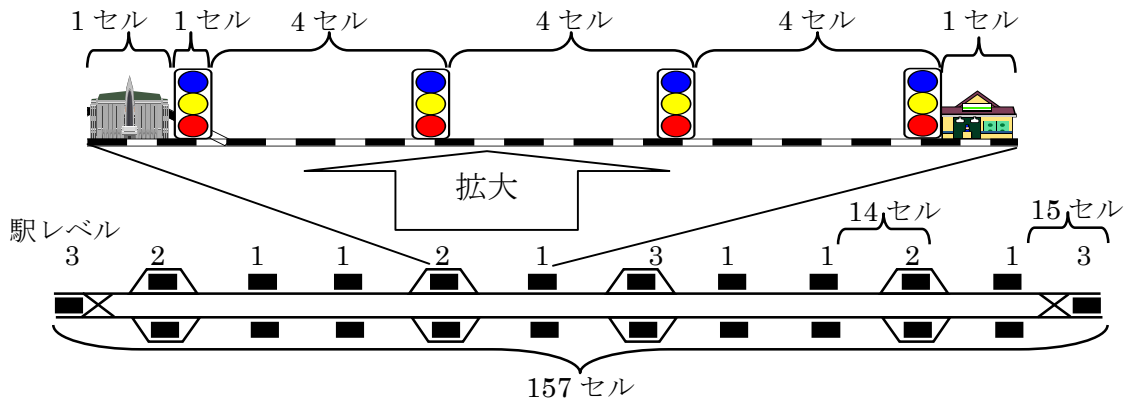


図1: シミュレーションモデルの設定

現在、多くの鉄道は閉塞というものを使用し、そのルールに従って運行されている[5]。このモデルでも、列車の動きと信号の変化は、基本的には閉塞のルールに従っている。閉塞とは、ある区間ごとを区切り、その1区間に1列車しか進入することができないシステムである。今回、使用したのは図2のような閉塞システムである。

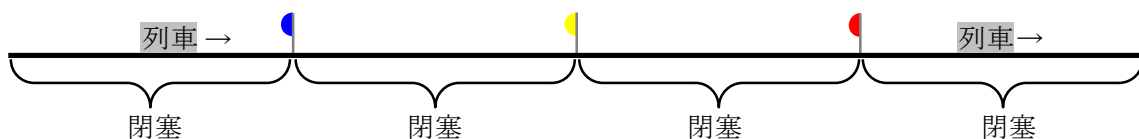


図2: 閉塞システム

2.1 列車のルール

列車には普通(1)、急行(2)、特急(3)の 3 つのレベルを設定し、レベルに関係なく全ての列車の最高速度は 2 セルとした。また、段階的な加減速を設け速度 0→2、2→0 にはならないようにした。列車は 2 セル前方までにある信号を見て速度を決め、信号が見えない所では、現在の速度を維持するよう設定した。青信号なら速度 2、黄信号なら速度 1、赤信号なら速度 1 で信号の 1 セル手前まで進み、信号が赤以外に変わるまで停止するようにした。

2.2 信号のルール

青信号：1 つ前の信号が、青又は黄で、その信号との間(前の閉塞区間)に列車がない。

黄信号：1 つ前の信号が、赤で、その信号との間に列車がない。

赤信号：1 つ前の信号との間に列車がある。

2.3 途中駅のルール

駅には、普通列車のみ停車(1)、急行と普通列車が停車(2)、全ての列車が停車(3)の 3 つのレベルがあり、各駅にはその駅以下のレベルの列車が停車するようにした。また、レベル 2 以上の駅には待避線を設け、各レベル別の列車のダイヤが設定されている。列車が駅まで 3 セル未満になると、その列車を判断して、停車させるか通過させるかを決定し、停車させる場合は駅直前の信号を黄(前の閉塞に列車が無い時)、駅直後の信号を赤に変更する。待避線のある駅に停車する場合は、その列車が駅まで 1 セルになると、その列車の後方 8 セルを確認し、停車列車よりもレベルの高い列車がある場合は、待避線へ入れる。また、待避した列車は、駅の本線と前の閉塞区間に列車が無く、後 7 セル以内に退避列車よりもレベルの高い列車が無い、又は退避列車以下のレベルの列車が後にある時に発車させる。また、しばらく列車が来ないと乗客がたまり、乗降時間が増加するとし、発車時間を過ぎると時刻 t が 5 たつごとに、停車時間が 1 増えるものとし、停車時間の最大は 5 とした。

2.4 折り返し駅のルール

折り返し駅では、ポイント部分を考慮し、その部分には列車は 1 台のみしか進入できないものとした。左端の駅では、普通を時刻 $t=29$ の時に、急行を $t=15$ の時に、特急を $t=25$ の時に、右端の駅では、普通を $t=11$ の時に、急行を $t=17$ の時に、特急を $t=24$ の時に発車させ、時刻 t が 30 たつごとに発車するよう設定した。また、ダイヤ通り運行している時の停車時間は、左端の駅では、普通：8、急行：19、特急：3、右端の駅では、普通：16、急行：16、特急：6 となっている。

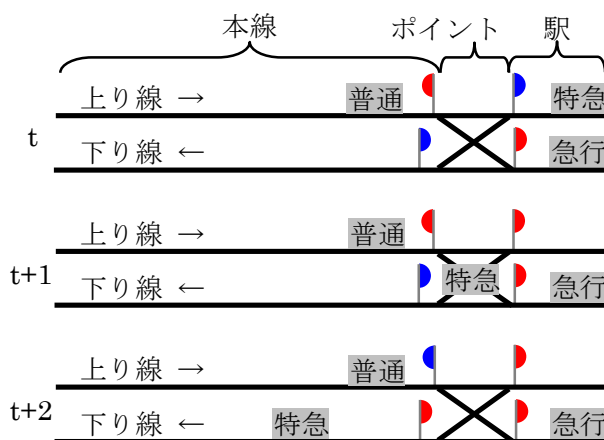


図 3：折り返し駅の運行例

3 列車の運行シミュレーションでのクラスタの発生

時刻 $t=501$ で左から 8 個目の信号が赤のまま変わらない故障を想定し、 $t=531$ で信号故障が回復した時の、その後の列車の流れの観測を行った。流れ図の各列車の色は、普通：青、急行：緑、特急：赤で、黒い縦線は、折り返し駅を表している。左半分を上り線、右半分を下り線とした。赤色の矢印はレベル 3 の駅、緑色の矢印はレベル 2 の駅を表している。他にレベル 1 の駅もある。

図 4 は全ての列車が定常運行しており、定期的に列車が到着、待避、発車しているのが確認できる。また、急行の折り返し駅での停車時間が長いことも確認できる。

その後、信号故障があり、図 5 のようにダイヤが乱れてクラスタを形成していった。

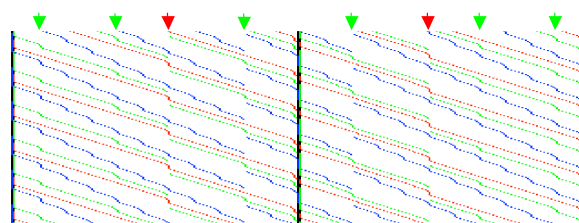


図 4：定常運行時の流れ図

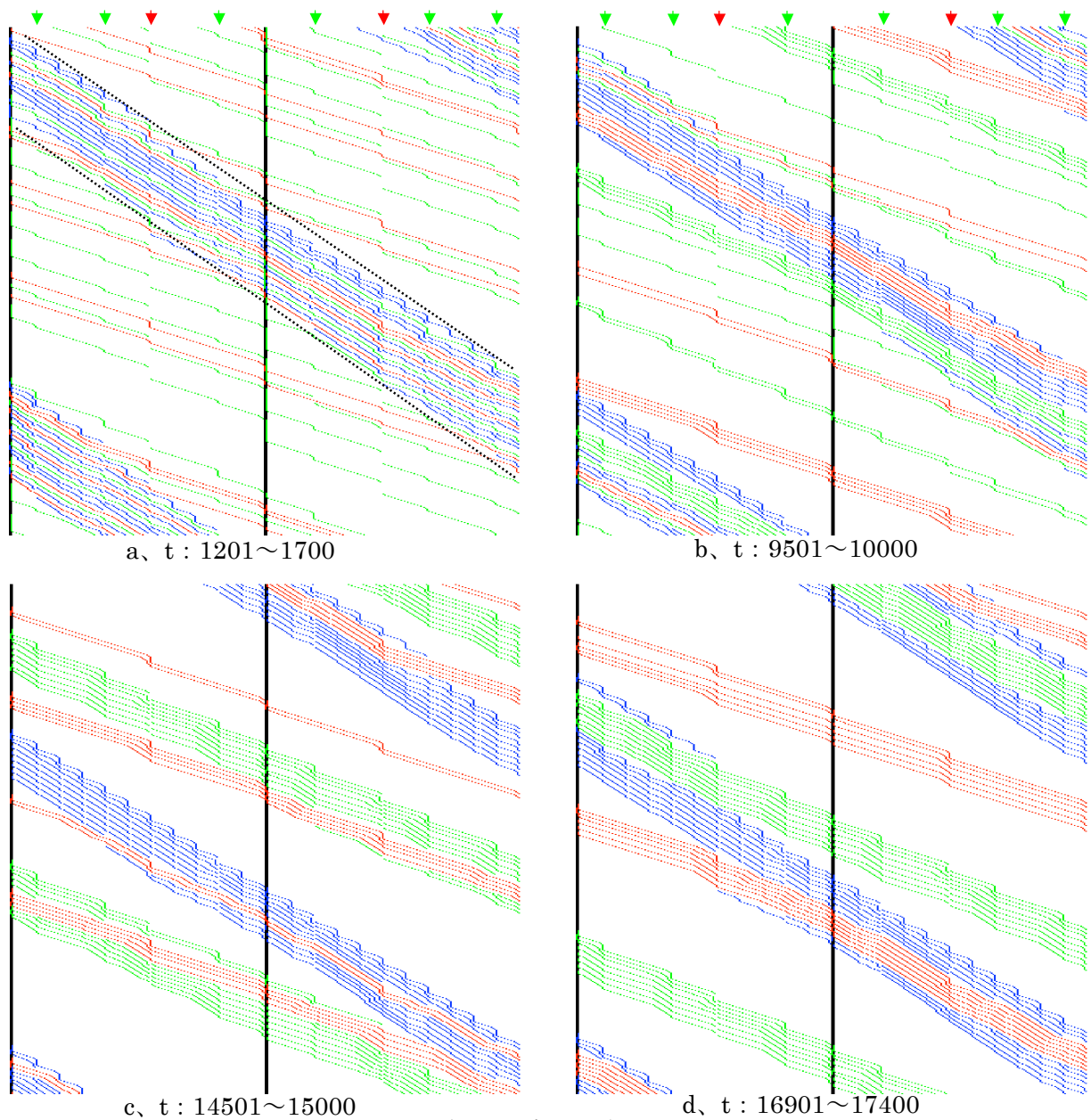


図 5：信号故障後の流れ図

t : 1201~1700 (図 5a)では、普通列車のダイヤが大きく乱れ、クラスタを形成し始めている(点線の内側の領域)。t : 9501~10000 (図 5b)では、各レベル別のクラスタがいくつか形成されているが、一部の急行列車はダイヤ通り運行している。t : 14501~15000 (図 5c)では、特急は2つのクラスタに、それ以外は各レベルで1つのクラスタを形成している。t : 16901~17400 (図 5d)では、特急も1つのクラスタになった。その後は、各レベルの列車はずっと1つのクラスタを形成したままであった。クラスタ同士の追い越しもあったが、クラスタがくずれることは無かった。

上記のような結果が表れた理由は、まず停車駅の多い普通列車のダイヤが乱れ始め、クラスタを形成し、その大きなクラスタを超えるのに時間がかかることによって、他のレベルの列車のダイヤも乱れ始める。そして、各レベル別にクラスタを形成したと考えられる。急行列車のダイヤの乱れの発生が遅かったのは、折り返し駅での停車時間が他のレベルの列車と比べて多く設定していたので、そこでダイヤの乱れが解消されやすかったためと考えられる。遅延時間の発生を小さくするには、定常運行時の駅での停車時間を多く設定するとよいと考えられる。

4 列車に定員を設定したモデルと、していないモデルの遅延時間の比較

前項と同じように $t: 501 \sim 530$ で左から 8 個目の信号が赤のまま変わらない故障を想定し、その後の全列車(計 23 台)の遅延時間の合計と、列車の流れの観測を行った。まず乗客は、時刻 t が 1 たつごとに、各駅に停車する列車の各レベルにつき 1 ずつたまり、各列車の定員は 60 とし、60 より多い場合は積み残しが発生するものとした。よって、定常運行時は定員の半分の乗客が乗車しているものとなる。また、乗客が 30 まではすぐに発車できるが、30 を超えると 5 増えるごとに停車時間が 1 増え、最大停車時間は 5 とした。

定員設定なしの場合は、きれいにクラスタが形成されているが、定員設定ありの場合は、ある程度クラスタが形成されるが、あまりまとまりがない。

表 1: 定員設定ありとなしの遅延時間

時刻 t	遅延時間の合計		差
	定員なし	定員あり	
1000	680	728	48
3000	6482	6823	341
5000	12420	12883	463
10000	27781	28466	685
30000	89057	93940	4883
50000	151683	159134	7451
100000	307420	322673	15253

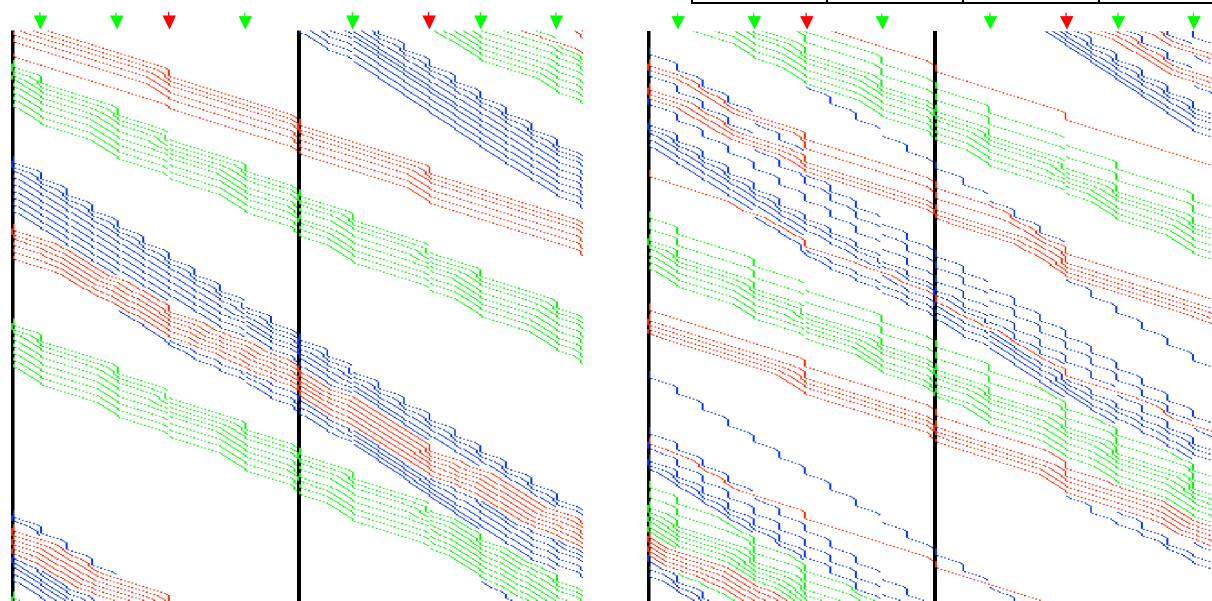


図 6: $t: 49501 \sim 50000$ での定員設定なし(左)とあり(右)の流れ図

本来なら、定員を設定した方が設定していない方と比べて、停車時間が大幅に増え、遅延時間が非常に大きくなると思われたが、この結果では遅延時間の差はさほど見られなかった。この理由は、定員を設定したことによって、発生したクラスタ内に空間ができ、列車同士の追い越しなどがスムーズに行われるようになったことで走行速度が上がり、停車時間が増加したにも関わらず、遅延時間があまり増加しなかったためだと考えられる。

今後の課題

今回は、乗客の到着にランダムな要素を入れていないが、乗客を増やすのにランダムな要素を入れ、乗る人だけでなく、降りる人のことも含めて考えたい。そして、発生したダイヤの乱れを自動的に解消させ、復旧にいたるルールを探ってゆきたい。

参考文献

- [1] S.Wolfram, "Theory and Applications of Cellular Automata", (World Scientific, Singapore, 1986).
- [2] JR EAST Technical Review No.05 - Autumn2003
- [3] D.Chowdhury, et al, Physics Reports Vol.329 (2000) pp.199-329.
- [4] 藤井健介, 第 10 回交通流のシミュレーションシンポジウム予稿集 2004 pp.73-76.
- [5] 三戸祐子「定刻発車 ～日本社会に刷り込まれた鉄道のリズム～」(株交通新聞社, 2001)