

CA を用いた列車のダイヤ復旧シミュレーション

龍谷大学 理工学部 数理情報学科

藤井健介, 西成活裕

1 はじめに

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[1]。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、使用した閉塞は図1のような閉塞システムである。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。

セルオートマトン(CA)[3]を用いた場合、様々なモデルをシミュレートできる[4]。CAを用い、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。そして、本研究ではCAによるダイヤの復旧や列車運行の最適化などを考えた。

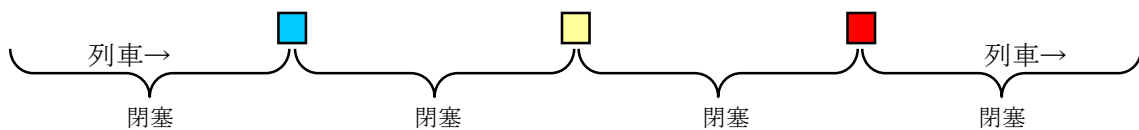


図1: 閉塞システムの概要

2 モデルについて

セルは一次元配列で開放系とし、全体で123セルとした。信号は4セル毎に1箇所、駅は14セル毎に1箇所、駅の両側に信号を設置した。また、列車と駅の長さは1セルとした。

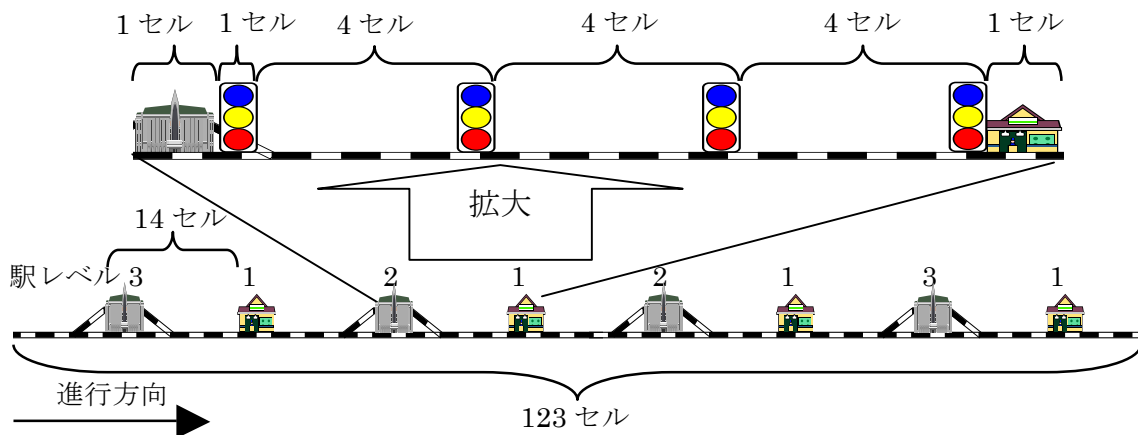


図2: シミュレーションモデルの設定

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。初期条件では列車は無いものとし、時刻 $t=1$ の時に普通、 $t=5$ の時に特急、 $t=9$ の時に急行を左端から発生させ、時刻 t が24たつごとに、繰り返し発生させるものとした。

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車両がある。

2.3 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、各駅には待避線のあるなしも設定した。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。駅での退避の例は図3のようになる。上段には、信号、駅、退避中の列車が表示され、下段には、走行中の列車が表示される。

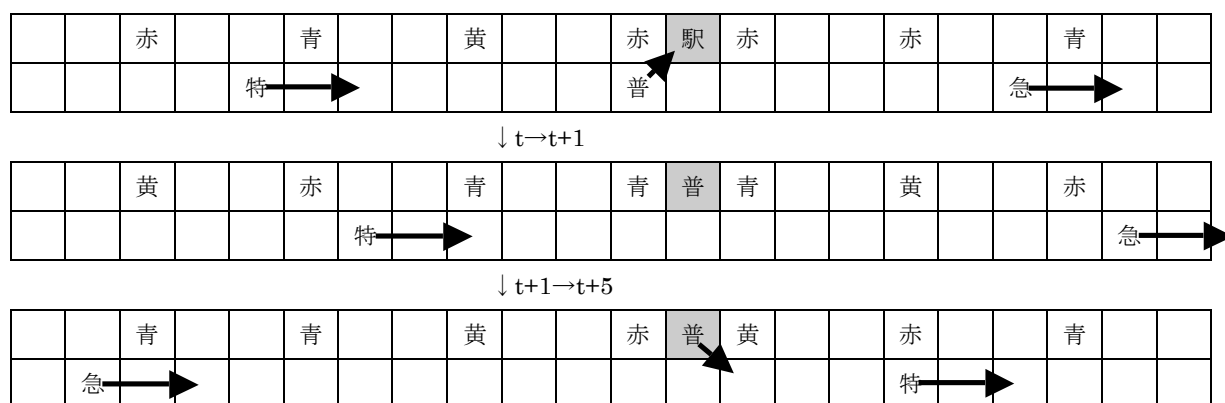


図3：列車運行の例

3 ダイヤ復旧のシミュレーション

時刻 $t=130$ 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、 $t=170$ で信号故障が回復した時の、その後のダイヤが復旧するまでの時間や平均速度などの測定を行った。

図5左の全セル内の普通列車の遅延時間の平均は、普通列車が駅を発車した時点で、設定されているダイヤと比べてどれだけ遅れているかを表しているため、駅を発車するまではこの遅延時間が表れなくなっている。

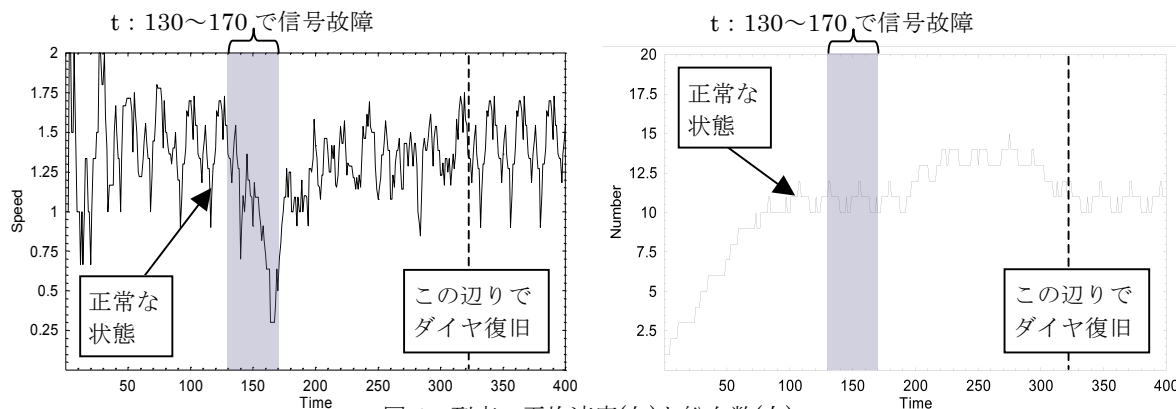


図4：列車の平均速度(左)と総台数(右)

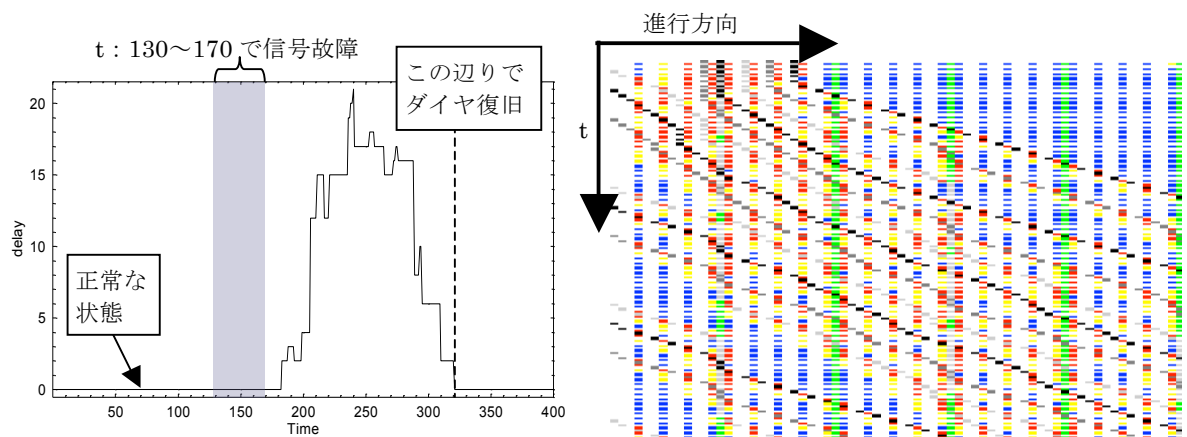


図 5：全セル内の普通列車の遅延時間の平均(左)と時空図の一部(右)

4 列車のレベル変更

通常、列車のダイヤが乱れた時には、本数を減らすことや、列車運行を変更することなどが実施されている。本研究ではレベル変更と題し、列車運行の変更をシミュレートした。列車のレベル変更は、信号故障で動けなくなっている列車の先頭 4 台を信号故障が回復してすぐに、特急(3)、急行(2)、普通(1)の 3 種類に変更した。何も変更しないモデルも含めて 4 パターンとなる。また、乗り降り時間の増加のあるなしも含め、合計 8 パターンとなり、そのすべてのパターンで列車の動きや各グラフの比較を行った。乗り降り時間の増加は、前に同じレベルの列車が発車してからの時間により変化させた。遅延の発生していない時の乗り降り時間は常に 1 で、前に列車が来てからの時間がいくら開いていても最大 5 とした。

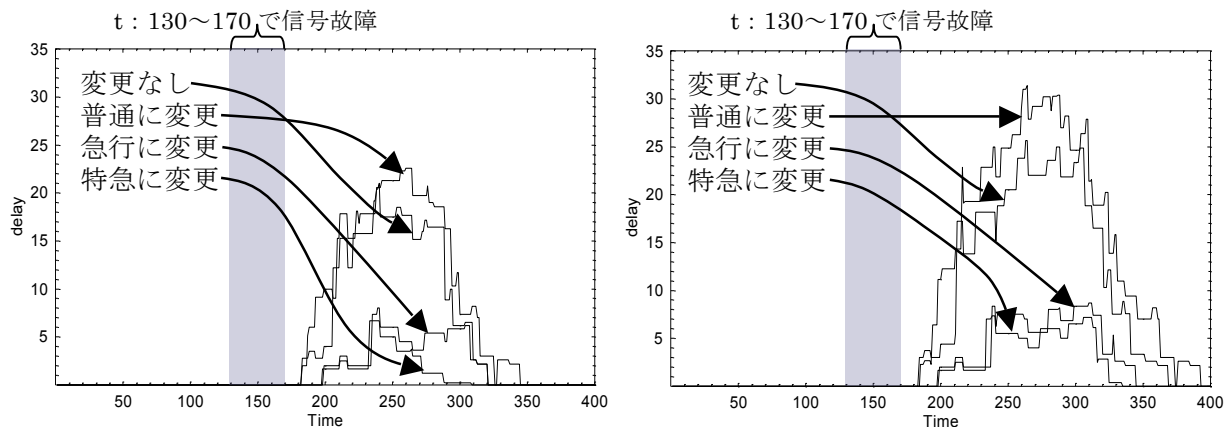


図 6：全セル内の普通列車の遅延時間の平均、乗り降り時間の増加なし(左)と、増加あり(右)

乗り降り時間の増加なしの場合、普通に変更したモデルは、レベル変更しなかったモデルよりも、遅延時間も少し大きく、復旧した時刻も少し遅くなっているため、全体的にダイヤの乱れが少し拡大されたようである。急行に変更したモデルは、レベル変更しなかったモデルと、普通に変更したモデルよりも遅延時間が明らかに小さく、ダイヤの乱れが復旧した時刻も早くなった。特急に変更したモデルは、急行に変更したモデルと遅延時間の大きさも、復旧した時刻もさほど変わらない。

乗り降り時間の増加ありの場合、普通に変更したモデルは、レベル変更しなかったモデルよりも、遅延時間が少し大きく、ダイヤが復旧した時刻も少し遅い。急行に変更したモデルは、レベル変更しなかったモデルと、普通に変更したモデルよりも、遅延時間が明らかに小さく、ダイヤが復旧した時刻は少し早い。特急に変更したモデルは、急行に変更したモデルと遅延時間の大きさは、さほど変わらないが、復旧した時刻は少し早い。

5 指数分布による故障回復時間

時刻 $t=130$ 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するが、故障が回復するまでの時間をランダムと考え、故障が回復する確率を $P(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ という確率分布で与えた。ただし、 λ はパラメータである。このモデルを使い、さきほどの 8 パターンでダイヤが復旧するまでの時間 100 回の平均の比較を行った。その時間の一覧が表 1 である。

表 1：ダイヤが復旧するまでの時間(100 回の平均)

乗り降り時間の増加なしの結果は、特急や急行に変更したので停車駅が少なくなり、列車が込み合っている区間から前方の空いている区間へと、列車を早く脱出させることができたためと考えられる。早くダイヤを復旧させる目的では、故障や事故が発生し列車が込み合っている地点から早く列車を遠ざけることが有効であると考えられる。しかし、急行に変更したモデルが最も早かった理由は、停車駅が特急よりも多く、列車同士の間隔がほどよくあいたため、前方でダイヤ通りに走行している列車への影響が少なかったからであると考えられる。

乗り降り時間の増加ありの結果は、レベルを変更しない方が乗り降り人数に見合った停車列車数を指定できたため、駅にたまった乗客をまんべんなく乗せることができたと考えられる。

以上の結果を全て考慮すると、列車の本数を減らしたり、密度を下げたりすることも重要であるが、列車待ちの乗客の人数も考えた、乗客にとっても、列車のダイヤにとっても、最適で無理の無い列車の運行が必要であると考えられる[5]。

乗客の乗り降り 時間の変化	先頭 4 台の列車の レベルの変更	復旧までの時間 t の平均
なし	なし	1 3 4 . 2 9
	普通	1 5 2 . 7 0
	急行	1 0 0 . 7 0
	特急	1 0 7 . 7 9
しばらく同レベル の列車が来ないと、 乗り降り時間を 増加させた	なし	1 6 5 . 5 3
	普通	1 8 5 . 6 4
	急行	1 8 0 . 4 8
	特急	1 7 7 . 2 4

今後の課題

今回は、複線の路線の片側のみという部分的なシミュレートを行ったが、一般的な複線の折り返し線や、環状線など、路線全体をシミュレートできるモデルを作成する。ダイヤの復旧作業では、列車のレベル変更のみを行ったが、実際には、回送や折り返し運転などがあるので、それらへの列車運行の変更にも対応させる。また、乗客のことをあまり考えずにダイヤの復旧作業を行ったが、実際には駅や列車内の乗客がダイヤにも大きく関わっているので、ホームや列車内の乗客の人数や、乗客のストレス度合いも入れて行いたい。その上で、実際の路線をベースにしたモデルを作成し、シミュレートを行い、実際のダイヤや運行状況と比較する。最終的な目標として、ダイヤ復旧の自動化を目指したいと考えている。

参考文献

- [1] 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)
- [2] JR EAST Technical Review No.05 - Autumn2003
- [3] S.Wolfram, "Theory and Applications of Cellular Automata", (World Scientific, Singapore, 1986).
- [4] D.Chowdhury, et al, Physics Reports Vol.329 (2000) pp.199-329.
- [5] 藤井健介「CA を用いた列車のダイヤ復旧シミュレーション」(2004 年度龍谷大学理工学部卒業論文)