

## セルオートマトンによる鉄道ネットワークシミュレーション

友枝, 明保  
明治大学大学院先端数理科学研究科

小松, 満仁  
東京大学大学院工学系研究科

兪, 逸淵  
東京大学大学院工学系研究科

高山, 糧  
東京大学先端科学技術研究センター

他

<https://doi.org/10.15017/18703>

---

出版情報：応用力学研究所研究集会報告. 21ME-S7 (13), 2010-03. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：

応用力学研究所研究集会報告 No.21ME-S7

「非線形波動研究の現状と将来 — 次の10年への展望」 (研究代表者 矢嶋 徹)

共催 九州大学グローバル COE プログラム

「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

Reports of RIAM Symposium No.21ME-S7

*Current and Future Research on Nonlinear Waves —  
Perspectives for the Next Decade*

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,  
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 19 - 21, 2009

Co-organized by

*Kyushu University Global COE Program*

*Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry*

Article No. 13 (pp. 88-93)

# セルオートマトンによる 鉄道ネットワークシミュレーション

友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu), 小松 満仁 (KOMATSU  
Mitsuhito), 兪 逸淵 (YU Iruyon), 高山 糧 (TAKAYAMA  
Ryo), 姜 銳 (JIANG Rui), 西成 活裕 (NISHINARI  
Katsuhiro)

(Received January 31, 2010)



Research Institute for Applied Mechanics  
Kyushu University  
March, 2010

# セルオートマトンによる鉄道ネットワークシミュレーション

明治大学先端数理，東京大学先端研	友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu)
東京大学工学系研究科	小松 満仁 (KOMATSU Mitsuhiro)
東京大学工学系研究科	兪 逸淵 (YU Iruyon)
東京大学先端研	高山 糧 (TAKAYAMA Ryo)
中国科学技術大学	姜 銳 (JIANG Rui)
東京大学先端研，(独) さきがけ	西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

**概要** 公共交通における定時運行は企業・乗客の双方にとって最も重要なポイントである．特に鉄道ネットワークの場合，一旦アクシデントが生じると乗客の流れのパターンが変化しネットワーク全体に擾乱が広がってしまい，車両の定時運行を維持することは困難となる．この場合，ネットワーク上の乗客の流れの変化を見積もることが重要となり，本稿では，確率セルオートマトンモデルに基づく Public Conveyance Model を用いて乗客流を見積もる鉄道シミュレーター”KUTTY”を構築したので報告する．それに加えて，本稿では混雑した車両を緩和するための運行制御方法も提案し，その効果についても議論する．

## 1 Introduction

朝の通勤時間帯，鉄道がダイヤ通りに運行されていないことがしばしばある．人身事故，信号や車両の設備不良などがその要因として考えられるが，乗客の乗り降りによるちょっとした遅れの積み重ねによって大きな遅れが生じていることもある [1]．このような場合，鉄道会社はどのように車両制御をしているのであろうか？一般的な方法として，鉄道会社は路線上に閉塞区間を設けることで，車両が等間隔になるように制御しており，路線上にいる乗客流の流量パターン変化は考慮されていない．これでは乗客の流量パターンが路線上で不均一のままであり，ふたたびその乗客数の揺らぎによって車両の等間隔運行は乱れてしまうのである．鉄道ネットワークの研究は，複雑系ネットワークとして捉えることで様々なモデルが提案されている [2, 3, 4, 5] が，残念ながらこれらのモデルでも乗客の振る舞いは考慮されておらず，実際のネットワーク上の乗客流の変化までは捉えられていない．また近年，セルオートマトンモデル (Cellular Automaton: CA) による複雑系システムの研究が幅広く活発に行われている [6, 7]．CA モデルはルールベースによる記述であることと離散状態をとることから，微分方程式で記述される数理モデルよりも容易にコンピュータシミュレーションを行うことができるという利点がある．

そこで本稿では，文献 [8] で提案した乗客の乗り降りを考慮した確率セルオートマトンモデルである Public Conveyance Model (PCM) を鉄道ネットワークに応用する．従来の PCM は，一次元道路を走行するバスシステムをモデル化したものであり，簡単化のため乗客の Origin-Destination (OD) 交通は考慮されていなかった．そのため，OD 交通データに基づく乗客の振る舞いを数理モデルに組み込むことで，乗客の流量パターンをリアルタイムに見積もることのできる鉄道ネットワークシミュレーター”KUTTY”へと発展させた [9]．さらに，混雑した車両を緩和するための運行制御方法も提案し，その効果についても議論する．

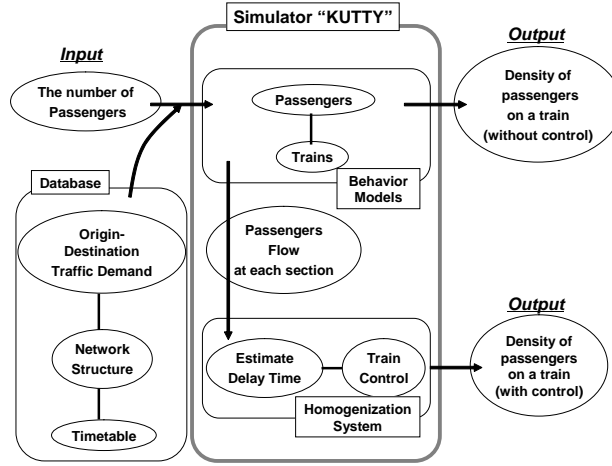


図 1: The design flow diagram of our simulator “KUTTY”.

## 2 Models

我々のシミュレーターは東京メトロの 8 路線 138 駅からなるネットワークを対象としている．このシミュレーターは入力データの他に，ネットワーク構造や乗客の OD データをデータベース化し，それも利用していることを注意しておく (図 1)．

### 2.1 Route choice model

ある乗客  $p$  が駅に着いたとき，OD データに基づいて乗客の行き先駅が確率的に決定される．その行き先までのすべての経路集合を  $S(p)$  とし，ある時刻  $t$  での各ルート  $s \in S(p)$  を次式 (2.1) を用いて評価する．

$$E(T(p,s), C(p,s), D(p,s,t)) = aT(p,s)^\alpha + bC(p,s)^\beta - cD(p,s,t)^{-\gamma}, \quad (2.1)$$

ここで， $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$  は正値のパラメーターとする．この式 (2.1) において， $T(p,s)$  はルート  $s$  の旅行時間であり， $0 \leq C(p,s) \leq 2$  はルート  $s$  の乗換回数である．東京メトロのネットワーク構造では，どの 2 つの駅に対しても最大 2 回の乗り換えで到達が可能であるため，本研究では乗換回数は最大 2 回までと限定する． $T(p,s)$  は  $T(p,s) = nT_t + C(p,s)T_c$  で計算され， $n$  はルート上の駅の数， $T_t$  は駅間移動時間で 2 分とする． $T_c$  は同一駅における乗換時間であり，1 分とした．第 2 項  $bC(p,s)^\beta$  は乗客が乗換に気乗りしない効果を表しており，乗客は乗換の回数を減らすために，旅行時間が長い方を選択することもある． $D(p,s,t)$  はある時刻  $t$  でのルート上の最大密度を表している．(2.1) に基づいて計算された評価関数を正規化することで，乗客  $p$  がルート  $s$  を選択する確率は  $k_e$  (本稿では  $k_e = 1$ ) をパラメーターとして次のように表わされる．

$$P(p,s,t) = \frac{\exp[-k_e E(p,s,t)]}{\sum_{s_i \in S(p)} \exp[-k_e E(p,s_i,t)]}, \quad (2.2)$$

(2.1) をふまえると，コスト  $E(p,s,t)$  が高いほど乗客はそのルートを選択しないので，(2.2) はコストが小さいほど，とりうる確率が高いことを意味する．

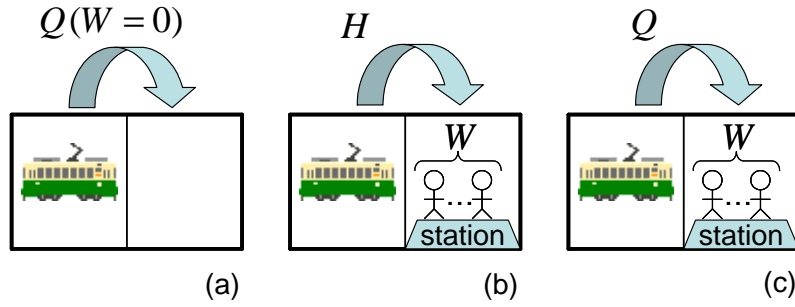


図 2: All cases of the hopping probability of a train. (a) hop into a non-platform cell (b) hop into a platform cell (first time) (c) hop into a platform cell after one stop in the case of (b).

## 2.2 Train movement model

鉄道の動きのダイナミクスは確率セルオートマトンを用いてモデル化する [8] . 車両はある確率  $H$  によって次のセルに移動し (図 2), 移動確率  $H$  は  $a'$  をパラメーターとして次のように決める .

$$H = \min \left( \frac{1}{a' \min(W, W_{\max}) + 1}, Q \right). \quad (2.3)$$

ここで,  $W, W_{\max}$  は各セルでの待っている乗客の人数と車両の定員であり,  $Q$  は自由移動確率である . すべてのセルで待っている乗客がない場合,  $H = Q$  となり ASEP [10] に帰着する . 本研究では, 車両が確率的に止まってしまった場合, 鉄道システムが信号で制御されていることを踏まえ, 次の時刻では確率  $Q$  で進めるようにした . またパラメーターは  $a' = 0.2, Q = 1$  とした .

## 2.3 Homogenization reschedule

鉄道のダンゴ運転は微小な車両間隔の乱れが増幅して生じるものである . つまり, 車両間隔が等間隔であった状態からずれが生じると, 乗せる乗客数のバランスがくずれ, 余計に車両間隔のずれが大きくなるのである . そこで, 鉄道会社は車両の間隔を等間隔にすることで擾乱を抑える制御を行っている . しかし, この制御方法は乗せる乗客が空間的に等分布である場合に有効な制御であり, 現実的に考えると, 乗客の空間的な分布の偏りを考えて制御するべきである . そこで本研究では, 乗客の流量パターンに注目し, その乗客分布が均等になるような新しい鉄道制御方法を提案する .

図 3 において  $P_B, P_A$  をそれぞれ, 車両  $B, A$  に乗っている乗客の数とおく .  $P_S$  は次の駅のプラットフォームで待っている乗客を表し,  $E_B, E_A$  は次の駅で降りる乗客数,  $I$  は単位時間に駅に到着する人数を表している . それぞれの車両の次の駅までにかかる時間を  $T_B$  と  $T_A$  で表わす . 我々のアイデアは  $B, A$  の車両に乗っている乗客数を等しくするために, 到着までの時間を  $T_B$  から  $X$  へと伸ばすことを考える .  $X$  は次の関係式から求められる .

$$P_B + (P_S + IX) - E_B = P_A + I(T_A - X) - E_A. \quad (2.4)$$

左辺 (右辺) は駅を過ぎた後に  $B(A)$  に乗っている乗客の数を表している . 車両  $B$  の遅れ時間  $T_D$  は

$$T_D = X - T_B, \quad (2.5)$$

として計算される .

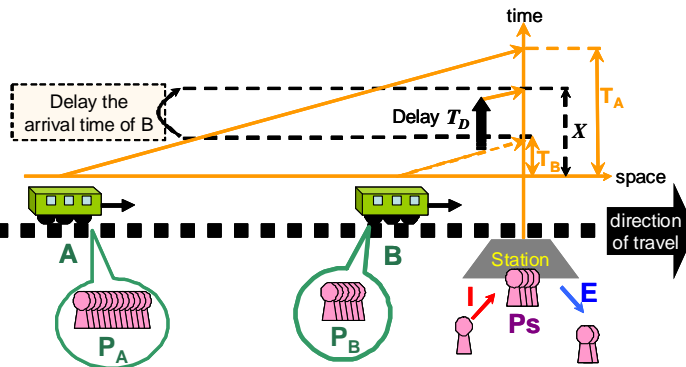


図 3: Schematic view of our homogenization system.

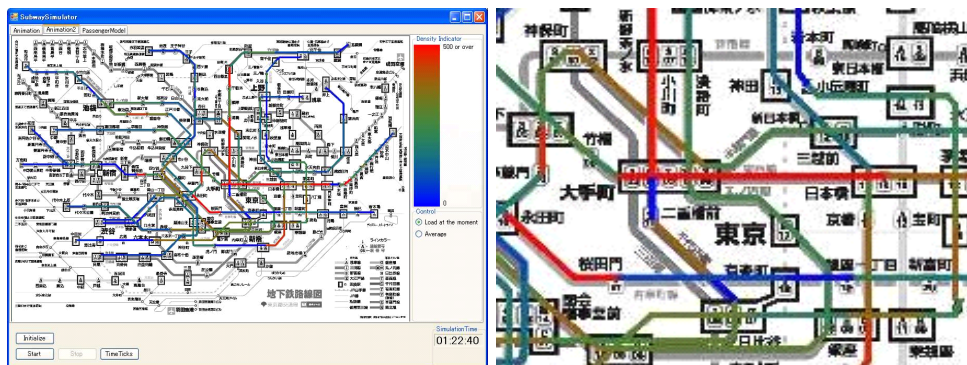


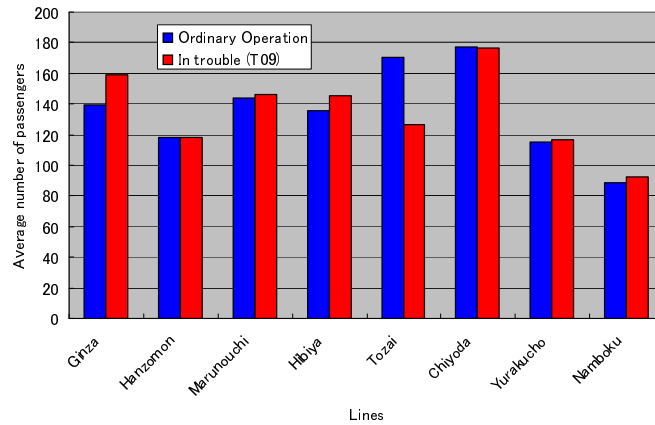
図 4: Snapshots of our simulator “KUTTY”. Left one is entire picture and right one is closeup picture around Otemachi station. In KUTTY, the high flow (low-flow) is painted in red (blue).

### 3 Simulation and Results

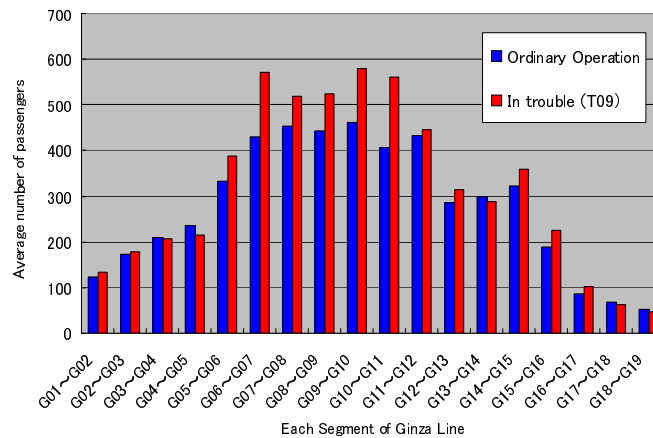
図 4 に我々の構築したシミュレーター“KUTTY”のスナップショットを載せる．このシミュレーションから最も混んでいるエリアは東西線の大手町 (T09) 駅であることがわかった．この結果に基づいて、我々は仮想的に T09 でのみ事故が起こり、T09 でのみ乗客が通れなくなったとし、その際の流量変化を調べ、その結果を図 5(a) に示す．

この図 5(a) から東西線における乗客数は 25% 程度減少していることが分かる．その一方で、銀座線と日比谷線の乗客数がそれぞれ 15%, 10% 程度上昇している．これは、T09 が通れなくなったことによって、乗客が銀座線と日比谷線を利用して迂回したと考えられる．そこで上昇幅の大きい銀座線に注目し、銀座線の各駅間での乗客数をプロットしたものが図 5(b) である．このプロットから G05 から G11 のエリアの乗客数が増えていることがわかる．これは東西線を迂回するために、銀座線の G06 から G11 駅を利用していることを示唆している．

最後に乗客分布に注目した鉄道制御方法のシミュレーション結果について述べる．G03 駅で突然乗客が増えた状況を考え、車両の混雑率を測定したものが図 6 である．この図から、従来の車両間隔を等距離に保つ鉄道制御は何も制御しない場合に比べて混雑をより小さいエリアに抑え込むことに成功している．しかし、我々の乗客分布を均等にする制御は、従来の車両を等間隔に制御する方法よりも影響領域をより狭い範囲へと抑え込むことに成功した．



(a)Each line



(b)Each segment of Ginza Line

図 5: The comparison plot of the number of passengers (a) per train in each line, (b) per segment of the Ginza Line, between normal operation and that with an accident at T09.

#### 4 Conclusions

本研究では確率セルオートマトンモデルに基づいた Public Conveyance Model に乗客の経路選択の効果を入れることで鉄道シミュレーター“KUTTY”を構築した。“KUTTY”は複雑な鉄道ネットワーク構造を考慮すると同時に、OD 交通データに基づいたシミュレーターになっている。このシミュレーターを用いることで、ネットワーク構造に変化があったときの乗客流のパターン変化を即座に見積もることができるようになった。また、突発的な乗客の増加による擾乱に対して、乗客分布を均等化する車両制御方法を提案し、その効果について検証した。その結果、従来の鉄道間隔を等間隔に保つ制御方法よりも、我々の方法の方が擾乱の影響範囲を狭い範囲に抑え込めることがわかった。

今後の課題として、実際の流量パターンと我々のシミュレーションから得られた流量パターンを比較することが必要である。さらに、OD 交通データを改良する必要もある。特に、ラッシュアワーなどの時間帯依存性や他社路線と同一のプラットフォームを利用している駅などへの対処が挙げられる。最後に、このシミュレーターが他の輸送ネットワークへと応用され、システムが最適

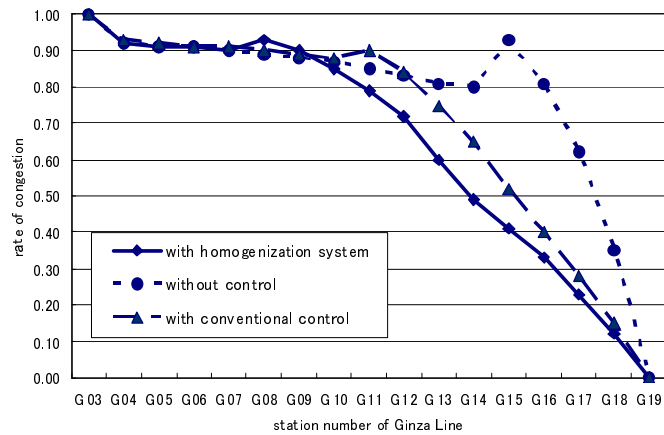


図 6: The comparison plot of the passenger density of train A among the three systems.

化されることの手助けとなることを願う。

## 5 Acknowledgements

The author (A. T.) would like to thank the Meiji University Global COE Program "Formation and Development of Mathematical Sciences Based on Modeling and Analysis" and the Japan Science and Technology Agency for the support.

## 参考文献

- [1] 寺田寅彦, 岩波文庫随筆集, 第二巻
- [2] M. Pursula, Journal of Geographic Information and Decision Analysis **3**, p. 1, 1999.
- [3] V. Latora and M. Marchiori, Physica A, **314**, p. 109, 2002.
- [4] D. J. Watts and S.H. Strogatz, Nature, **393**, p. 440, 1998.
- [5] D. Meignan, O. Simonin and A. Koukam, Simulation Modeling Practice and Theory, **15**, p. 659, 2007.
- [6] D. Chowdhury, L. Santen and A. Schadschneider, Phys. Rep. **329**, p. 199, 2000.
- [7] D. Helbing, Rev. Mod. Phys. **73**, p.1067, 2001.
- [8] A. Tomoeda, K. Nishinari, D. Chowdhury and A. Schadschneider, Physica A, **384**, p. 600, 2007.
- [9] A. Tomoeda, M. Komatsu, I. Y. Yoo, M. Uchida, R. Takayama, R. Jiang and K. Nishinari, GESTS International Transaction on Computer Science and Engineering, **54**, p. 81, 2009.
- [10] B. Derrida, Phys. Rep. **301**, p. 65, 1998.