

応用力学研究所研究集会報告 No.18ME-S5
「非線形波動現象における基礎理論, 数値計算および実験のクロスオーバー」
(研究代表者 西成 活裕)

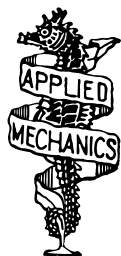
Reports of RIAM Symposium No.18ME-S5
Crossover among theoretical, numerical and experimental studies on nonlinear waves
Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 6 - 8, 2006

Article No. 23

バスルートモデルとクラスター形成の 解析

友枝明保 (TOMOEDA Akiyasu), 西成活裕 (NISHINARI
Katsuhiko)

(Received February 28, 2007)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
May, 2007

バスルートモデルとクラスター形成の解析

東京大学大学院工学系研究科 友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu)
西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

概要

本研究では、従来の Bus-Route-Model を拡張したセルオートマトンモデルである Public-Conveyance-Model を紹介する。このモデルは電車やバスといった公共交通に対して応用できるモデルであり、今回バス交通に適用することで、バスのダンゴ運転が形成されるのを再現し、バスのシステム効率を計算することができた。また、このシミュレーション結果は平均場近似による計算との整合性が確認された。さらに、バス停に Information を持たせバス同士の間隔を調整することで、バスのクラスターが分散されることも示し、このことがより良いシステムにつながるということがわかった。

1 Introduction

バスや電車といった交通は、事故などがなくても遅れることがある。その際に、同じ方面行きの車両が続けて来ることがある。この現象はだんご運転と呼ばれ、公共交通機関において大きな問題となっている。

あるバス停でバスに乗り込む乗客の数が多いと、そのバスの停車時間が長くなってしまい、前のバスとの距離が長くなり、後ろのバスとの距離は短くなってしまう。すると、次のバス停で乗せる乗客が増えてしまい、さらにバス停での停車時間が増え、結果的にこの連鎖によって、バスのクラスターが形成される。これがだんご運転の仕組みである。

そこで本研究では、従来の Bus-Route-Model(BRM)[1, 2] を拡張した確率セルオートマトンモデルである Public-Conveyance-Model(PCM) を紹介する。このモデルは、運ぶ粒子と運ばれる粒子が存在するシンプルなモデルであり、バス以外の一般的な公共交通システムの渋滞現象にも応用できる。

2 A stochastic cellular automaton model for bus traffic

道路を L セルに区切り、そのうちの S セルに等間隔にバス停を設置するものとする。つまり $S = L$ のときは、すべてのセルにバス停が設置された状態であるので *Hail-and-Ride* システム¹ と呼ばれるシステムになる。さらに、ある単位時間に乗客がバス停に到着する確率を f とすると、バス停が S ケ所あるので、一ヶ所当たりのバス停に到着する確率は f/S となる。バスの前進 (hop) 確率を H とし、以下のように二つのモデル (Model A & Model B) に対してそれぞれ決める (図 1)。

Model A では、次のように hop 確率 H を定める。

$$H = \begin{cases} Q & \text{no waiting passengers} \\ q & \text{waiting passengers exist} \end{cases} \quad (1)$$

¹Hail-and-Ride システムは、バスがある決まったルートを走り、乗客は自由に手を挙げてバスを止めて乗り込むという、実質バス停を設ける必要のない運行 System のことである。

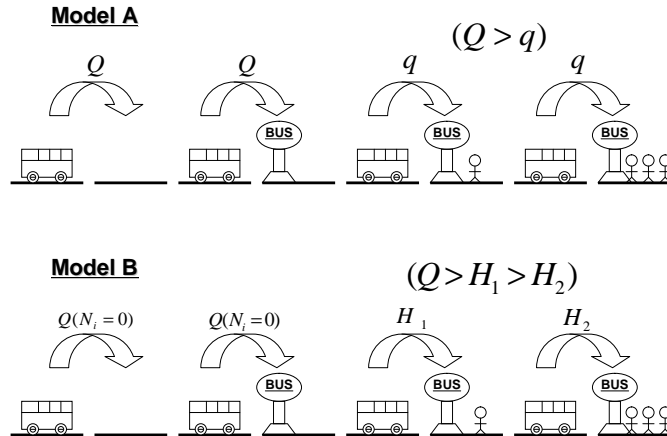


図 1: Model A と Model B の hop 確率の図解. 上が Model A であり, 下が Model B である. Model A ではバス停のお客さんの数に依存せず hop 確率は q なのに対して, Model B ではバス停のお客さんの数に依存した hop 確率になり, 待っている乗客が多いほど hop 確率は下がるモデルである. すなわち, バス停で待っているお客さんに依存する hop 確率を図のように H_1, H_2 とすると, $H_1 > H_2$ が成り立つ.

すなわち, バス停のないところ及びバス停でお客さんがいない場合の hop 確率は Q であり, お客さんがいる場合のバス停への hop 確率は q である. q は待っているお客さんの数に依存せず一定であるものとし, $Q > q$ を満たす. この hop 確率の決め方 (1) はもともと O'Loan らが [2] において BRM を構成したときに使われているものと同じである.

それとは対照的に, Model B では次のように hop 確率 H を決める.

$$H = \frac{Q}{N_i + 1}, \quad (2)$$

ここで, N_i は各バス停 $i (i = 1, \dots, S)$ である瞬間に待っているお客さんの数を表す. (2) の形はバス停で待っているお客さんの乗り込む時間の効果を考慮したモデルであり, 待っているお客さんがいない場合 ($N_i = 0$) なら $H = Q$ となり, 従来のモデルの hop 確率に一致する. さらに, Information という概念をモデルに組み込んだ. これは, 電車で言うところの閉塞区間にあたる. 今回のモデルでは, 全体のバスの数をバス停数で割った平均分布台数を閉塞区間におけるバスの容量と決め, 各閉塞区間にはその台数以上のバスは入れず, バス停で強制的に止めるものとする.

すなわち, 今回の PCM において従来のモデルから拡張した点は, 以下の通りである.

- [1] バス停の数を決められるようにし, これにより従来のシステム (Hail-and-Ride system) とのモデルの選択を可能にした.
- [2] 従来のモデルではバス停へのお客さんの到着確率が f であったのに対し, バス停へのお客さんの到着率を f/S とした.
- [3] バスの定員数 (N_{max}) を決めた.
- [4] バス停への hop 確率を二通り考えた (Model A&Model B).

[5] バスのだんご運転を解消するために, Information という概念を導入した.

3 Simulations

シミュレーション条件として $L = 500, Q = 0.9, q = 0.5, N_{max} = 60$ とし, 周期境界条件を採用する.

図 2 が Model A におけるバスの平均 hop 確率とバス停での平均待ち人数を密度に対して plot したものである. これを見ると, Model A では到着率の f によらず低密度でのバスの平均速度は高く, バスのだんご運転は再現できていないことがわかる.

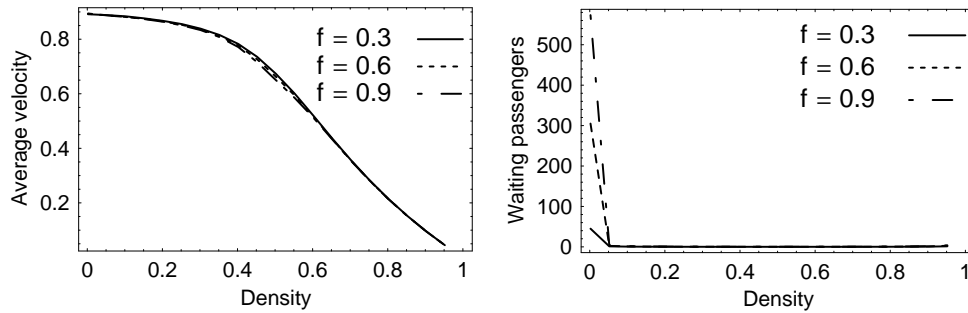


図 2: Model A で $S = 5$ とした場合の各到着率 $f = 0.3, 0.6, 0.9$ に対する plot. 平均 hop 確率 (上) と平均待ち人数 (下) が縦軸であり, 横軸がバスの密度をあらわす.

図 3 が Model B におけるバスの平均 hop 確率とバス停での待ち人数の密度に対する plot である. これを見ると Model A ではバスのだんご運転が再現できなかったのに対し, 低密度において到着率 f が高いほど hop 確率が落ち込み, だんご運転を再現できていることがわかった.

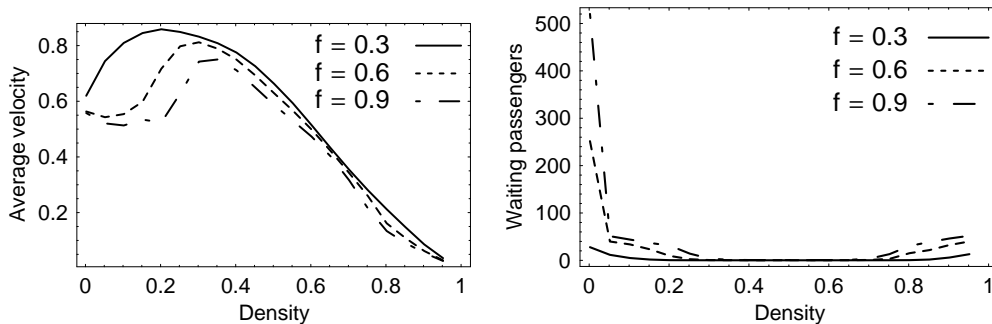


図 3: Model B で $S = 5$ とした場合の各到着率 $f = 0.3, 0.6, 0.9$ に対する plot.

また, 図 2, 図 3 とともに, 密度が大きくなるにつれて hop 確率が下がっているのは, バス自身が渋滞しスムーズに動かなくなったためである.

図 4 が Model B における Information がなくあるときの各時空図を示している. この図を見ると Information がなくある場合は, initial stage では割とスムーズに流れているが, late stage になると, クラスタが形成されていることがわかる. それに対し, Information の概念をモデルに導入すると, initial stage と late stage での差はほとんど見られず, ダンゴ運転を解消できたといえる. また, この

図から、だんご運転は厳密には解消されておらず、大きなクラスターが小さいクラスターに分けられたことがわかる。

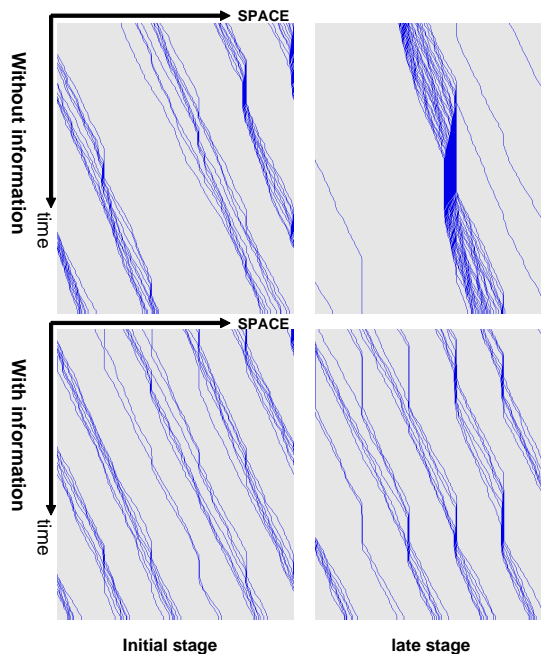


図 4: Model B での時空図. 上図は Information のないモデルの場合であり, 下図は Information を入れたモデルの場合の時空図. 各左図が初期段階 $t = 1000$ から $t = 1500$ までであり, 各右図は $t = 4000$ から $t = 4500$ までの時空図を示している ($f = 0.6, S = 5, m = 30$). Information を導入することで, だんご運転が生じていたモデル (右上図) からだんご運転を解消したモデル (右下図) になったことがわかる.

図 5 が Model B において Information を持ったモデルと持っていないモデルとの比較である. これを見ると明らかに Information を持ったモデルで低密度での hop 確率が上昇し, 待ち人数が減っていることがわかり, よりよいシステムを構築できたと考えられる.

また興味深いのは, 密度が中間相 ($0.3 < \rho < 0.7$) では Information のないモデルの方が hop 確率が高く効率がいいことがわかった. 実際のバスのシステムではなかなか実現できない密度ではあるが, 他の公共交通システムを考えるときに有効であると考えられる.

4 Mean field analysis

平均場近似を用いることで, 低密度での平均 hop 確率 $\langle V \rangle$ を見積もることができる. T をあるバスがシステム一周するのにかかる平均時間とする. Model A では時間 T の間に S セルのバス停セルに hop 確率 q で動き, $L - S$ のバス停のないセルに hop 確率 Q で動くので, 次のように T を近似す

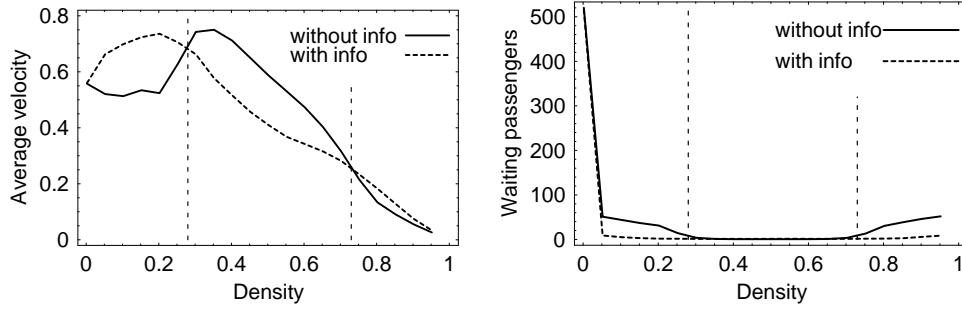


図 5: Model B で $S = 5, f = 0.9$ とし, Information がある場合とない場合の比較プロット. 垂直な破線はそれぞれ左側から $\rho = 0.28, 0.73$ である.

ることが出来る.

$$T = \frac{L-S}{Q} + \frac{S}{q} \quad (3)$$

つまり, 平均 hop 確率は以下のように求められる.

$$\langle V \rangle = \frac{L}{T} = \frac{LQq}{q(L-S) + QS} \quad (4)$$

一方, Model A と同様にして Model B でも低密度 (バスの台数 = m とする) での平均 hop 確率を見積もることが出来る. まず, あるバスが過ぎてから次のバスが来るまでの間にバス停で待っている平均人数 N を求めると以下ようになる.

$$N = \frac{f}{S} \left(\frac{L}{S} - 1 + \frac{1}{q} \right) \frac{S}{m} \quad (5)$$

ここで最初の項 $\frac{f}{S}$ は単位時間あたりに乗客がバス停に到着する確率であり, 第二項 $\frac{L}{S} - 1 + \frac{1}{q}$ はある一つの閉塞区間を通る平均時間であり, 最後の項 $\frac{S}{m}$ はある二台のバスの間にいくつ分の閉塞区間があるかを計算したものである. この N を hop 確率の式 (2) に代入することで hop 確率が求まる. そこで平均 hop 確率 $\langle V \rangle$ を計算することができ,

$$\langle V \rangle = Q - \frac{f}{\rho L} \quad (6)$$

が求まる. ここで ρ は密度を意味しており $\rho = m/L$ と置いた.

パラメータ $S = 50, Q = 0.9, q = 0.5, f = 0.3, m = 1$ の場合にシミュレーションと平均場近時の比較を試みる. すると Model A において, 平均場近似計算では $\langle V \rangle = 0.83$ であり, シミュレーションの結果では 0.84 であり, 一方, Model B では, 平均場近似計算では $\langle V \rangle = 0.60$ であり, シミュレーションの結果では 0.61 と非常にいい近似であることが言えた.

注意すべき条件として, 平均場近似計算するに当たって次の仮定を課している. それは, f は十分小さく, バスは十分一様な分布をしているものとする. 前者の仮定は, f が大きくなると一台のバスに乗り切れずにバス停で待ってしまう乗客が出てきて N の近似計算が成り立たなくなってしまうためである. また後者の仮定は, バスの密度が大きくなるに連れてバス自身がクラスター化してしまい, 平均分布が崩れてしまい近似計算が成り立たなくなるためである.

5 Conclusion

従来のモデルではバスのだんご運転を表現することができず、バスのシステム効率をより詳しく調べることが出来なかった。そこで、今回我々は従来の BRM を含み、より一般的な公共交通に応用できる PCM を構築した。このモデルは、従来の BRM にバス停数・バスの容量・新たな hop 確率を導入したものになっており、だんご運転を再現することが出来るより現実的なモデルになっている。そのため、このモデルを用いて Hail-and-Ride system との比較も可能になった。また、だんご運転を解消するため Information という概念もモデルに導入した。すると大きなクラスターであったバスのクラスターが Information の効果によって小さなクラスターに分かれることがわかった。これによってバス停で待っている乗客の数は減り、バスの hop 確率は上がりより効率のいいシステムを構築できたことがわかった。

さらに、PCM でのシミュレーションは平均場近似計算との整合性も見られたので、より数理的なアプローチがこれから期待できる。

参考文献

- [1] D. Chowdhury, L. Santen and A. Schadschneider, Phys. Rep. **329**, 199 (2000).
- [2] O.J. O’Loan, M.R. Evans and M.E. cates, Phys. Rev. E **58**, 1404 (1998).