

情報提供による分岐のある道路における交通流の最適化

今井, 武晃
東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

西成, 活裕
東京大学先端科学技術研究センター

<https://doi.org/10.15017/1807775>

出版情報：応用力学研究所研究集会報告. 26A0-S2 (25), pp.139-144, 2015-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

応用力学研究所研究集会報告 No.26AO-S2
「非線形波動研究の現状 — 課題と展望を探る—」 (研究代表者 増田 哲)

Reports of RIAM Symposium No.26AO-S2

State of arts and perspectives of nonlinear wave science

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, October 30 - November 1, 2014

Article No. 25 (pp. 139 - 144)

情報提供による分岐のある道路における交通流の最適化

今井 武晃 (IMAI Takeaki), 西成 活裕 (NISHINARI
Katsuhiko)

(Received 15 January 2015; accepted 16 March 2015)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2015

情報提供による分岐のある道路における交通流の最適化

東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

今井 武晃 (IMAI Takeaki)

東京大学 先端科学技術研究センター

西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

概要 分岐のある道路では、ナビゲーションシステムがドライバーの意思決定の手助けをする。しかし、不適切な情報を与えてしまうとハンチング現象と呼ばれるような交通渋滞をかえって引き起こしてしまうことがある。本研究では Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) を用いた分岐モデルを作り、なぜハンチング現象が起こるのかを提供する情報の内容と時間遅れの観点から分析した。また、数学モデルを作り、交通状況の良し悪しを情報の普及率という点から分析した。本発表ではそれらの成果を紹介する。

1 はじめに

情報というのは、多くの社会システムにおいて重要な役割を果たしている。現実の交通ではドライバーはリアルタイムの情報を ITS やカーナビゲーションシステムなどを用いることで手に入れることができ、ルート選択の手助けをしている。そのため、交通情報がドライバーや実際の交通状況に与える影響については従来様々な研究がなされている。[1, 2] 情報によるナビゲーションは交通流をスムーズにするために重要だが、不適切な情報はかえって交通状況を悪化する場合がある。2 分岐道路で、情報によって道路混雑が一つの道路に集中し、混雑を 2 つの道路で交互に繰り返す振動現象がみられることがある。これをハンチング現象と呼び、交通量の多い時期などにみられている。

しかし、ハンチング現象のメカニズムについて物理的に詳しく分析している研究はない。交通流を模したセルオートマトンのモデル [3, 4] は様々あるが、本研究では最もシンプルな ASEP[5] を用い、ハンチング現象の原因について情報の提供内容と情報の時間遅れという 2 つの観点から解析する。加えて、全ドライバーのうちドライバーが情報を得られている割合 (share rate と呼ぶ) にも着目する。実際の交通状況でもすべての人がナビゲーションシステムを持ち、従うわけではないため、share rate は非常に重要な指標である。実際に share rate を導入している研究例はあるが [6]、焦点をおき交通状況の挙動を分析した研究は数少ない。本研究では、share rate が交通状況に与える影響についても、ASEP と数学モデルを用いることでミクロ・マクロ両方の視点から解析する。

2 モデル

ASEP を用いて、分岐路のモデルを考える。(図 1) 確率 α で流入し、ドライバーが分岐路まで到着すると次のルートを選ばなければならない。分岐路はルート A それぞれ L 個のセルから構成される。それぞれのルート内で右にホップする確率は等しく $p = 1$ とし右端まで到着するとそれぞれ確率 β_1, β_2 で退出する。ドライバーには情報を受け取ることができそれに必ず従う dynamic driver と情報を受け取れずランダムに道を選ぶ static driver の 2 種類が存在し、その両者の割合を share rate r と定義する。

ドライバーに与える情報の内容には 3 種類ある。

1. ルート内の平均速度

平均速度は、ルート内の粒子の総数 N_{all} と 1 ステップの間に動いた粒子の数 N_{move} を用いて $V_{\text{mean}} = \frac{N_{\text{move}}}{N_{\text{all}}}$ と書ける。

2. ルート内の渋滞列の長さ

ルートの右端から止まっている粒子の数を数え上げることで求めることができる。

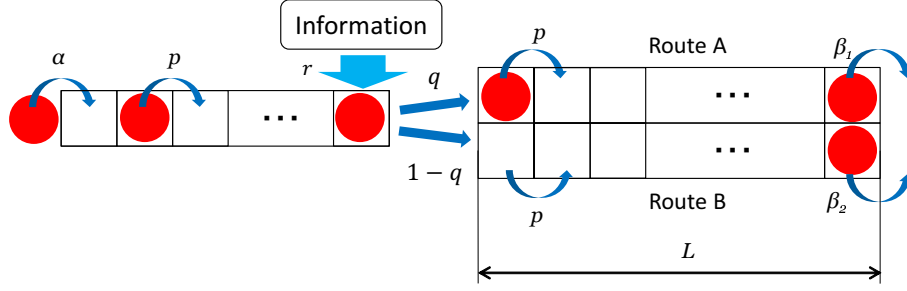


図 1: 分岐 ASEP モデル。分岐前のセルは 30 セルに固定。

3. ルート内の密度

$\rho = \frac{N_{\text{all}}}{L}$ と書ける。

全ドライバー中 r の割合の dynamic driver は上記の 2 ルート分の情報を得て、自分が有利な方を必ず選択する。一方で static driver は情報を得られないので完全にランダムにルート選択を行う。情報の内容に加えて、与える情報を情報の時間遅れにより分類した。速度と渋滞列の情報は過去 (300 ステップ前) 情報、現在の情報に加えて予測情報の 3 種に分類し、密度情報に関しては過去と現在の情報の 2 種に分類した。交通流の予測情報は、定常状態を仮定し平均場近似を用いて計算を行った。図 2 を用いると、粒子が入ってから T_1 秒後に渋滞列の最後尾に到達する。そのとき、渋滞列長は流出確率 β^* を使って $l = N_0 - T_1 \beta^*$ と表される。この式は $l > 0$ のときのみ意味をなす。すなわち、 l_{est} は

$$l_{\text{est}} = \max(l, 1). \quad (2.1)$$

となる。このとき、 N_{cr} は行列に並ぶか並ばないかの臨界状態の条件式

$$\frac{L - N_{\text{cr}}}{p - \beta^*} = \frac{L - 1}{p}. \quad (2.2)$$

により

$$N_{\text{cr}} = \frac{p - \beta^* + \beta^* L}{p}. \quad (2.3)$$

と得られる。左辺は行列に並ぶとき、右辺は行列がない状態のときである。これにより、粒子が $L - l_{\text{est}}$ だけ移動したことがわかる。 l_{est} が求められると、行列の最後尾までに並ぶ時間 T_1 を求めることができ、

$$T_1 = \frac{L - l_{\text{est}}}{p}, \quad (2.4)$$

$$T_1 = \begin{cases} \frac{L-1}{p} & (N_0 < N_{\text{cr}}) \\ \frac{L-N_0}{p-\beta^*} & (N_0 \geq N_{\text{cr}}). \end{cases} \quad (2.5)$$

となる。

l_{est} は (2.5) を用いることで得られる。次に、渋滞列に並んでから渋滞を抜けるまでの時間 T_2 を求める。渋滞に並んだあとは流出確率 β^* で粒子が動くので、

$$T_2 = \frac{l_{\text{est}}}{\beta^*} = \begin{cases} \frac{1}{\beta^*} & (N_0 < N_{\text{cr}}) \\ \frac{N_0}{\beta^*} - T_1 & (N_0 \geq N_{\text{cr}}). \end{cases} \quad (2.6)$$

となる。したがって、最終的にルートに入ってから抜けるまでの時間 T_{est} は

$$T_{\text{est}} = T_1 + T_2 = \begin{cases} \frac{1}{\beta^*} + \frac{L-1}{p} & (N_0 < N_{\text{cr}}) \\ \frac{N_0}{\beta^*} & (N_0 \geq N_{\text{cr}}). \end{cases} \quad (2.7)$$

で表すことができる。本研究では、この T_{est} と l_{est} を予測旅行時間と予測渋滞列長として用いる。

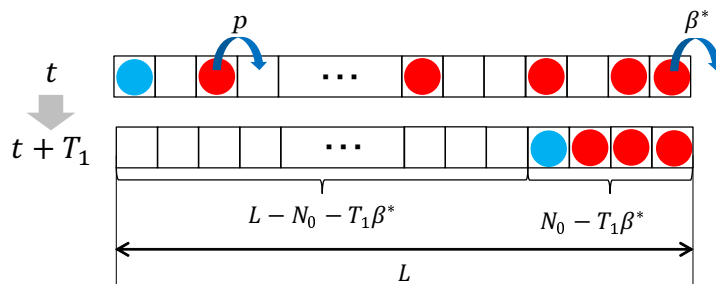


図 2: 旅行時間の予測のための模式図

3 シミュレーション結果

上記のモデルを用いてシミュレーションを実行した。それぞれのパラメータにおいて 30000 ステップのシミュレーションを 100 回繰り返し、ドライバーがルート A 及びルート B に流入してから流出するまでの時間、つまり旅行時間の平均値を交通状況の指標として用いた。つまり、旅行時間の値が小さいほど交通状況は良いということになる。

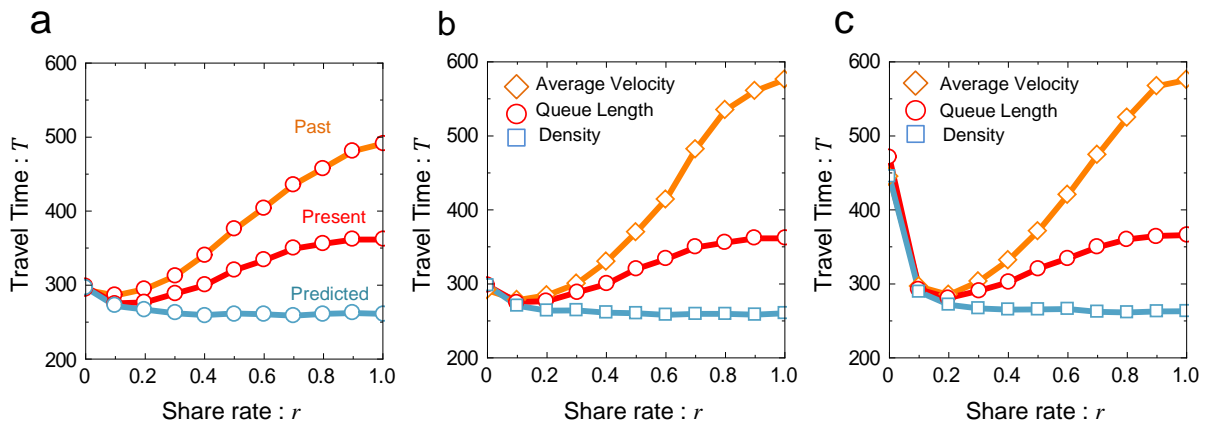


図 3: r に対する旅行時間の振る舞い。(a) 過去・現在・未来の情報による比較。対称な流出確率 ($\beta_1 = \beta_2$) で、情報のタイプは渋滞列長。(b) 異なるタイプをもつ情報の比較。対称な流出確率 ($\beta_1 = \beta_2$) で、すべて現在情報。(c) 異なるタイプを持つ情報の比較。非対称な流出確率 ($\beta_1 < \beta_2$) で、情報のタイプは渋滞列長。

図 3 (a) は r に対する旅行時間の振る舞いを示したグラフで、オレンジが過去の情報、赤が現在の情報、青が予測情報を示している。すべての情報は渋滞列の長さの情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。同じ情報の内容が与えられても、情報の時間遅れがあれば平均旅行時間は長くなり交通状況は悪化するということがわかる。図 3(b) は r に対する travel time の振る舞いを示したグラフで、ひし形が速度の情報、丸が渋滞列の長さの情報、四角が密度の情報を示している。すべての情報は現在の情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。グラフから、速度情報、渋滞列の長さの情報、密度情報の順に交通状況が良くなっていくことがわかる。この結果は、速度情報と渋滞列の長さの情報自体が内在的に情報遅れを含んでいることに起因する。分岐点において渋滞列の情報をドライバーは受け取るが、その情報は実際に自分が渋滞の最後尾に並ぶ時の長さとは違う。2 章で予測した渋滞列の情報が自分が経験する情報だとすれば、現在の渋滞列情報は自分が渋滞の最後尾に並ぶまでの時間分の遅れを内在的に含むことになる。これは、図 2 を見れば明らかで、渋滞列長は本来自分が経験するべき渋滞列の情報に比べて T_1 の遅れを含んでいる。図 3(c) は、 r に対する travel

time の振る舞いを示したグラフで、図 3(b) とプロットの種類は同じであり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = 0.09, \beta_2 = 0.11$ である。いずれの情報も、 r が小さいところで旅行時間が伸びていて、 r を大きくしていくとある値 r_{cr} で極値がみられることがわかる。これは、情報が足りなさすぎて道路にフィードバックを行えていないから起こる現象である。この極値をとる臨界普及率 r_{cr} は 4 章の数学モデルを用い求めることができる。

情報が交通状況に与える影響について詳細に調べるために、時系列データを取って考察を行った。図 4 の時系列プロットはそれぞれ $r = 1.0$ における (a) 過去 (b) 現在 (c) 予測の情報を与えた時のルート A, B の密度の時系列データを示している。(a) では粒子の数が一方に偏り振動していることがわかる。この現象をハンチング現象と呼ぶ。(b) でもハンチングは起こっているがその周期は短い。(c) ではハンチングは見られず、交通状況は最も良かった。この結果から、時間遅れがあればハンチングが生じ、そのため交通状況が悪化することがわかる。同様のことが図 5 にも言える。図 5 はそれぞれ $r = 1.0$ における (a) 速度 (b) 渋滞列の長さ (c) 密度の情報を与えた時のルート A, B の密度の時系列データを示している。(a), (b), (c) の順に交通状況は良くなり、交通状況が最も悪くなる速度情報のハンチングの周期が最も長くなっている。これらの結果からも、速度や渋滞列長の情報にはハンチングの原因となる時間遅れを内在しているということがわかる。

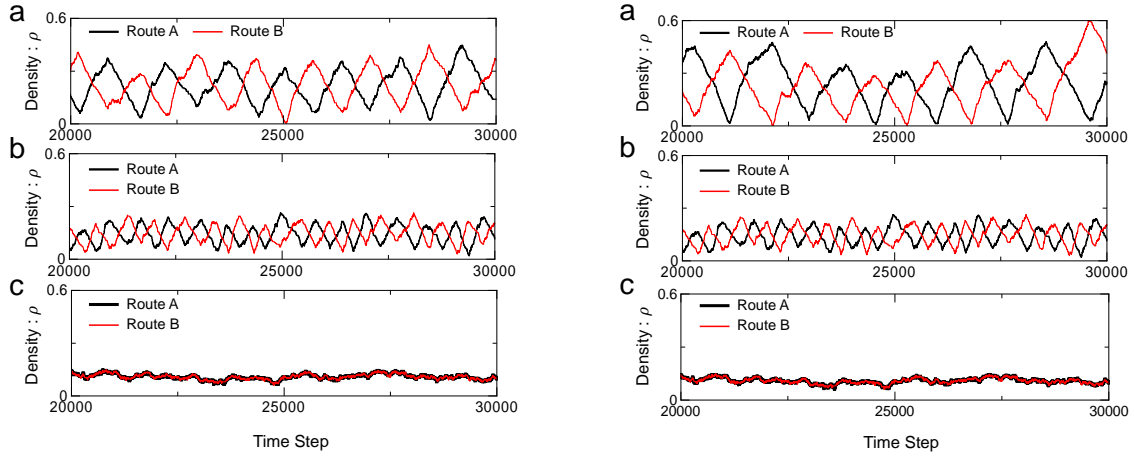


図 4: $r = 1.0, \alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ における (a) 過去 (b) 現在の情報を与えた時のルート A, B の密度の時系列データ。すべての情報は渋滞列の長さの情報を与えている。
 図 5: $r = 1.0, \alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ における (a) 速度 (b) 渋滞列 (c) 密度の情報を与えた時のルート A, B の密度の時系列データ。すべての情報は現在の情報を与えている。

4 数学モデル

シミュレーションに加え数学モデルを作り分析を行った。空間構造を無視することで、それぞれのルート内の粒子の個数の時間変化は以下の式で書き表すことができる。

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = \alpha r q(t - \tau) + \frac{1}{2} \alpha (1 - r) - \beta_1 \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = \alpha r (1 - q(t - \tau)) + \frac{1}{2} \alpha (1 - r) - \beta_2 \end{cases} \quad (4.1)$$

$N_1(t), N_2(t)$ はルート A, B での粒子の個数、 α, β はそれぞれ粒子の流入確率、流出確率を表している。Share rate r の割合の人が dynamic driver として情報を受け取ることができ、確率 q でルートを選ぶ。 q は

$$q(t) = \frac{1}{1 + \theta^n(t)}, \quad \theta = \frac{N_1(t)}{N_2(t)} \quad (4.2)$$

と表される。ここで、 n は情報に対するドライバーの敏感度を表す。 n が大きくなるほど、少しの差でも

粒子の少ないルートを選ぶようになる。シミュレーションでは $n \rightarrow \infty$ とし、すべての dynamic driver が粒子の個数が小さい方のルートを選ぶということになる。 τ は時間遅れである。

(4.1) を用いて、流入確率、流出確率、share rate が交通状況に与える影響についての関係性を記述することができる。言い換えると、どのくらいの割合の人に情報を与えると2つのルートの条件差による交通状況の悪化を防ぐことができるかを求めることができる。ルート A の粒子の個数がルート B より小さいときに、きちんと情報によるフィードバックが行われる、すなわち static driver がランダムにルートを選ぶ時の2ルート間の個数の差を情報によって抑えられる限界の条件は $\frac{dN_1}{dt} = 0$ ($N_1 > N_2$) で表され、式を整理するとその臨界普及率 r_{cr} は、

$$r_{cr} = \frac{\Delta\beta}{\alpha} \quad (\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1) \quad (4.3)$$

と書ける。図 6 は $r, \Delta\beta$ を変数にとり、旅行時間の挙動を分析したシミュレーション結果をプロットしたグラフとなっている。図 6(a) が現在の密度情報、図 6(b) が過去の密度情報である。それぞれ、 $\alpha = 0.2$ としている。白線が式 (5) で表される理論的なクロスオーバーラインとなっており、実際そのライン付近で交通状況が劇的に変化していることがわかる。(b) のグラフでは、一度旅行時間が低下した後再び上昇し、交通状況が悪化している。これは情報の時間遅れが原因でハンチングが起こっていることに起因する。これは、シミュレーションと数学モデルとの密度の時系列グラフ (図 7) をみても確認できる。式 (4.3) は図中一点鎖線で示された直線であり、シミュレーション結果と少し誤差がある。これはシミュレーションにおいて、パラレルアップデート時に起こる排除堆積効果を考慮していないために起こったものである。排除堆積効果を考慮した臨界普及率は

$$r_{cr}^* = \frac{(1 + \frac{2}{\alpha}) \frac{\Delta\beta}{\alpha} - 1}{\frac{\Delta\beta}{\alpha} + (1 + \frac{2}{\alpha})} \quad (4.4)$$

と求めることができ、図中点線であらわされている。同条件のシミュレーション結果と比べるといい一致を示している。これにより、情報の時間遅れがある場合にも最も交通状況が良くなる share rate を見積もることができることがわかる。

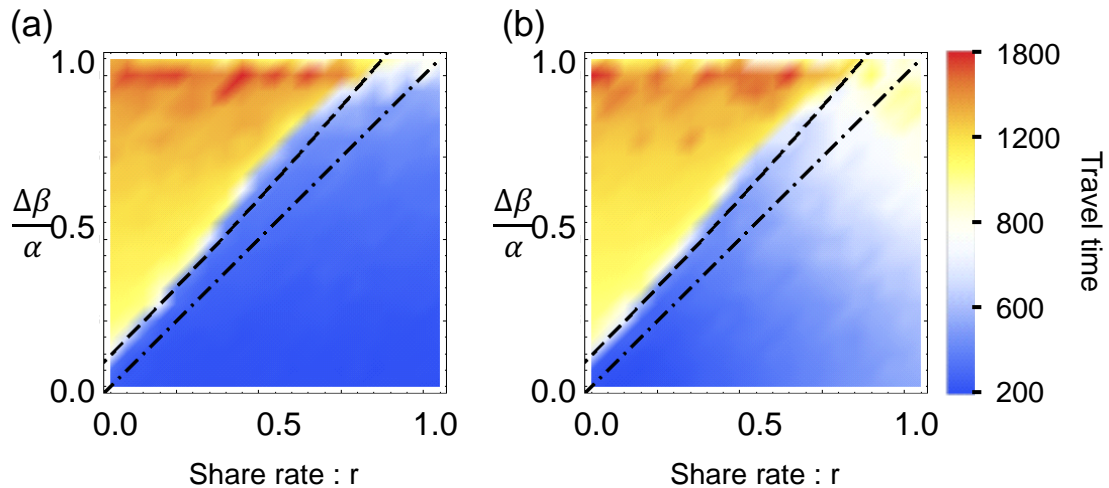


図 6: シミュレーションによる平均旅行時間の 2 次元プロットと、理論分析による臨界情報普及率の比較。横軸は share rate、縦軸は 2 つのルートの流出確率の差を α で規格化したもの。一点鎖線は補正前の安定性解析の結果 (4.3)、点線は排除体積効果を考慮した場合の臨界情報普及率 (4.4) を示している。

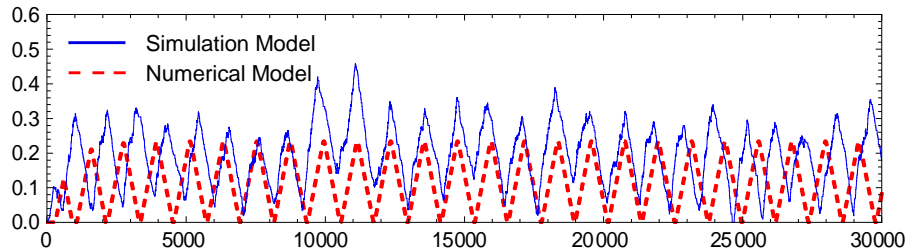


図 7: 異なった流出確率下での密度の時系列グラフの比較。(a) 対称な流出確率 ($\beta_1 = \beta_2 = 0.2$) (b) 非対称な流出確率 ($\beta_1 = 0.09, \beta_2 = 0.11$) パラメータは $\alpha = 0.2, p = 1, r = 1.0$

5 まとめ

交通情報を用いてドライバーは渋滞を避けようとするが、情報によってはハンチング現象を引き起こし交通状況をかえて悪化させる事がある。本研究では情報が交通状況に与える影響を分析し、時間遅れとハンチング現象の関係性を明らかにした。また、数学的アプローチにより、情報の普及率が交通状況に与える影響について詳細に分析することができた。これら 2 つの結果は、実際に分岐における情報提供の方法を考えるにあたり非常に有益であると考えられる。

今後は ASEP ルールをより車に特化したセルオートマトンモデル (NaSch モデルや SOV モデルなど) を用い検証したい。また、すべての人が情報をもらったからといって必ずそれに従うわけではなく、ある程度確率的にルートを選択する。この効果は本研究で導入した数学モデルの情報敏感度 n のパラメータを有限にすることで考察することができる。これにより、より現実に近い交通状況に近づけられるようにモデルを改良していきたい。

参考文献

- [1] J. Wahle, A. Lucia C. Bazzan, F. Klugl, M. Schreckenberg, *Physica A* **287**, 669 (2000).
- [2] W.X. Wang, B.H. Wang, W.C. Zheng, C.Y. Yin and T. Zhou, *Phys. Rev. E* **72**, 066702 (2005).
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg, *J. Physique I* **2**, 2221 (1992).
- [4] K. Nishinari and D. Takahashi, *J. Phys. A; Math. Gen.* **33**, 7709 (2000).
- [5] B. Derrida, *Phys. Rep.* **301**, 65 (1998).
- [6] J. Wahle, A. Lucia, C. Bazzan, F. Klugl, M. Schreckenberg, *Trans. Res. Part C* **10**, 399(2002).