

車のクラスタリングと交通渋滞

静岡大学工学部 長谷 隆

要旨 高速道路や都市交通網における車の流れを1次元、2次元のセルオートマトンモデルによって計算機シミュレーションを行なう。セルオートマトン184 (パラレルダイナミクスによる1次元非対称排除モデル) とBiham-Middleton-Levineの2次元モデルを拡張して以下の問題を取り扱う。

- (I A) 2車線道路における車の流れ及び交通事故による交通渋滞の発生。
- (I B) 交差点による交通渋滞の発生と車の流れ。
- (I C) 速度差による車のクラスタリング (CAR BUNCHING) とスケーリング。
- (I D) 車の流入、流出を伴う1次元流れにおける交通渋滞と自己組織化臨界現象 (self-organized criticality)。
- (I I A) 非等方的な2次元交通流と交通渋滞。
- (I I B) 2次元交通流における交通事故による交通渋滞の発生。
- (I I C) 混雑した道路をもつ2次元交通流。
- (I I D) 横断道路による交通渋滞の発生。
- (I I E) 立体交差による交通渋滞の緩和とパーコレーション。
- (I I F) 交通渋滞におよぼす車の回避運転。

(I A) 2車線道路における車の流れ及び交通事故による交通渋滞の発生

セルオートマトン184 を2車線に拡張する。第一車線において車が前方の車によってブロックされたとき、確率 p_t で第二車線へシフトする。 $p_t = 1$ (決定論的セルオートマトン) のときと $p_t < 1$ (確率的セルオートマトン) のときは異なった挙動を示す。2車線確率的セルオートマトンモデルにおいて、第一車線が交通事故車によってブロックされたときの交通流と交通渋滞の発生を計算をする。

図1はシフト確率 $p_t = 0, 5$ で第一車線と第二車線の初期密度 $p_{0,1}$ 、 $p_{0,2}$ が等しい場合の車の平均速度 $\langle v \rangle$ と平均流量 $\langle J \rangle$ を示す。3種類の異なった相が出現する。第一相: $0 < p_{0,1} < 0.25$, $\langle v \rangle = 1$, $\langle J_1 \rangle = 0$, $\langle J_2 \rangle = 2p_{0,1}$, すべての車が最大速度1で流れる。第二相: $0.25 < p_{0,1} < 0.75$, $\langle J \rangle = 0.5$, 事故車による交通渋滞が発生する。図2にフローパターンを示す。車の流量は一定となる。第三相: $0.75 < p_{0,1} < 1$ 、車の流れは事故車によって影響されず、セルオートマトン184 と一致する。

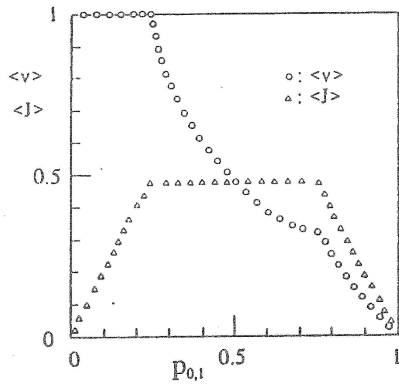


Fig.1 The plot of the mean velocity $\langle v \rangle$ and the mean current $\langle J \rangle$ against the initial density $p_{0,1}$ for $p_{0,2}=p_{0,1}$, $p_1=0.5$ and the system size 2×500 . The circle and triangle indicate respectively $\langle v \rangle$ and $\langle J \rangle$. The data points are averaged over 50 runs. The first transition from the maximal-velocity phase (the phase 1) to the maximal-current phase (the phase 2) occurs at $p_{1,c}=0.25 \pm 0.02$. The second transition from the maximal-current phase to the high-density phase (the phase 3) occurs at $p_{2,c}=0.75 \pm 0.02$.

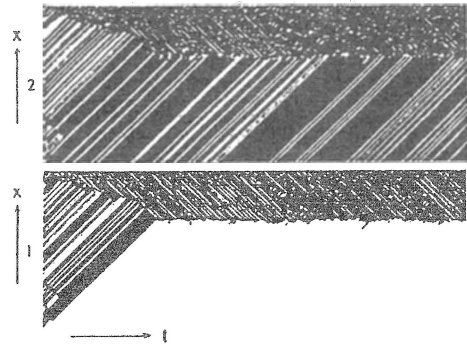


Fig.2 The typical traffic-flow pattern on the first and second lanes before odd time steps for $p_{0,1}=p_{0,2}=0.4$, $p_1=0.5$ and the system size 2×190 until 1000 time steps. The patterns on the down and the up indicate respectively those on the first and second lanes. The car is indicated by a dot. We call the traffic-flow pattern the phase 2. The phase 2 is characterized by the shock formation and the maximal current.

(I B) 交差点による交通渋滞の発生と車の流れ

交差する2つの1次元格子上でセルオートマトン184を考える。交差点によって2つの格子上的粒子はお互いに相互作用を及ぼす。図3はモデルを示す。図4は第一格子上的平均流量 J_1 を第一格子上的粒子密度 p_1 に対してプロットしたものである。第二格子上的密度 p_2 が0.5以下ではすべての粒子速度は1であり、第一格子上的流量はセルオートマトン184と一致する。第二格子上的粒子密度が0.5より大きくなったとき第一格子上でshockが発生し、交通渋滞が起こる。図5に $p_1 = 0.5$ 、 $p_2 = 0.8$ のときのフローパターンを示す。また図6に相図を示す。

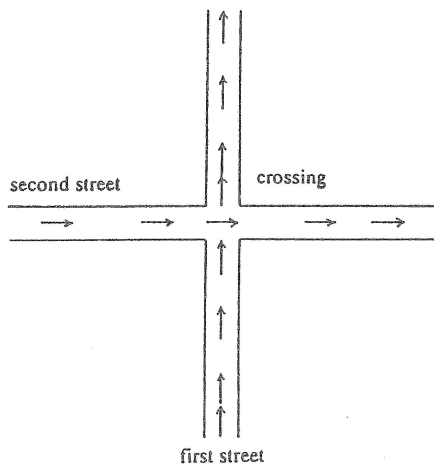


Fig.3 The schematic representation of traffic flow on two crossing streets. The arrow pointing up (right) represents the car moving up (right). A car on the first (second) street at the crossing prevents cars on the second (first) street from going ahead.

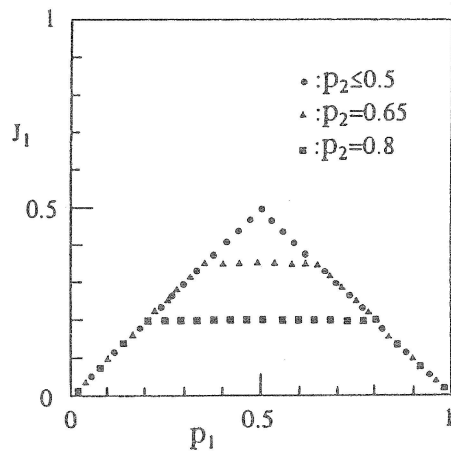


Fig.4 The plot of the mean traffic-current J_1 on the first street against the car density p_1 on the first street for $p_2 \leq 0.5$ (circles), $p_2 = 0.65$ (triangles) and $p_2 = 0.8$ (squares).

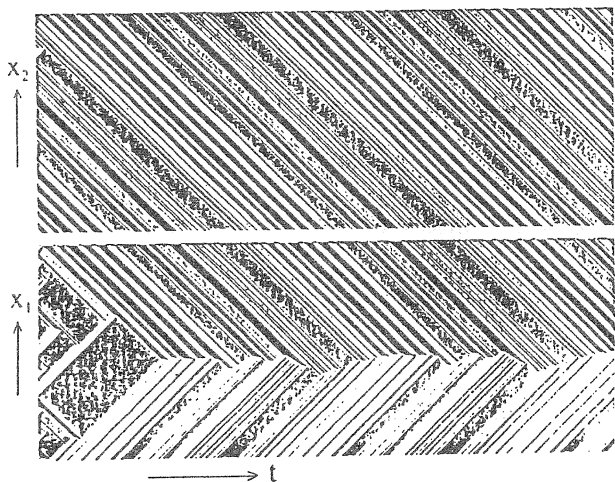


Fig.5

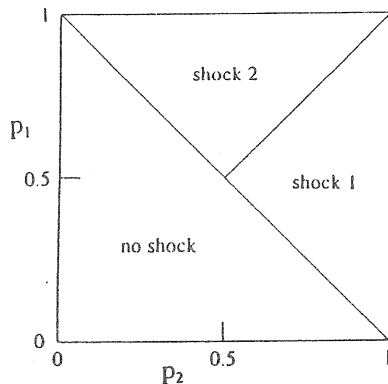


Fig.6 The phase diagram between p_1 and p_2 . The region in which a shock appears on the first (second) street is indicated by 'shock 1' (shock 2).

(I C) 速度差による車のクラスタリングとスケーリング

各々の車が固有速度 v_i で走行する場合を考える。セルオートマトン184 において、各粒子にそれぞれ固有の遷移確率 p_i を与える。 p_i は固有速度 v_i に対応する。このとき高い固有速度をもつ車は低い固有速度をもつ車によってブロックされ、低い速度になる。車は走行するにしたがってクラスタリング (car bunching) が起こる。図7に初期密度 $p_0 = 0, 1$ のときのフローパターンを示す。また図8に平均車間距離 $\langle l \rangle$ の時間変化を示す。時間と共に車のクラスタリングが起こり、平均車間距離は時間と共に増大する。低密度のとき、平均車間距離 $\langle l \rangle$ は以下のようにスケールされる：

$$\langle l \rangle \approx t^{0.48 \pm 0.03}$$

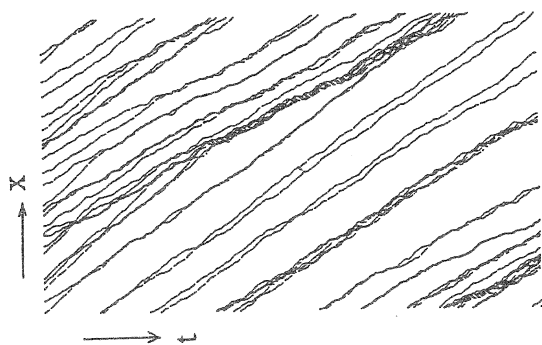


Fig.7

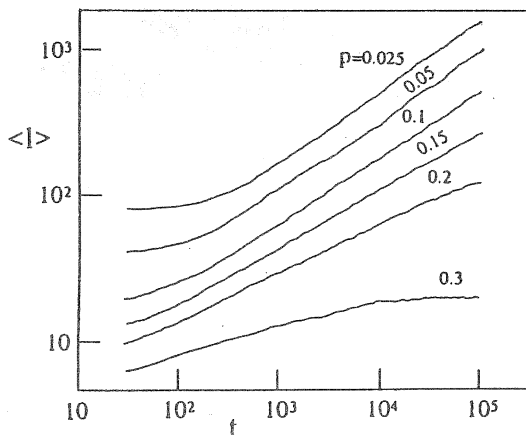


Fig.8

(ID) 車の流入、流出を伴う1次元流れにおける交通渋滞と自己組織化臨界現象 (self-organized criticality)

1次元格子上的各点から車が流入あるいは流出する場合を考える。セルオートマトン184をランダムな粒子の注入、抽出を伴うように拡張する。図9にフローパターンを示す。また図10に粒子密度 ρ の時間変化を示す。初期密度 ρ_0 にかかわらず密度 ρ は臨界値 $\rho_c = 0.5$ にぜんきんする。図9の左上から右下に向かう黒い斜線の部分が車の一時停車が起こった所であり、交通渋滞を表わす。渋滞は後方へ伝播し、空白の部分と衝突して消滅する。いろいろなサイズの渋滞が出現する。その他の領域では車は最大速度1で走行する。渋滞のサイズはシステムサイズに強く依存する。図11は渋滞の平均寿命 $\langle m \rangle$ をシステムサイズに対してLOG-LOG PLOTしたものである。平均寿命 $\langle m \rangle$ は次のようにスケールされる：

$$\langle m \rangle \approx L^{0.65 \pm 0.04}$$

また交通渋滞の寿命の分布を図12に示す。渋滞の分布は次の有限サイズのスケールリングによって表わせる：

$$N_m(L) \approx L^{-1} f(m/L^{0.65})$$

この結果、流入、流出を伴う1次元排除モデルにおける交通流は自己組織化臨界現象を示す。

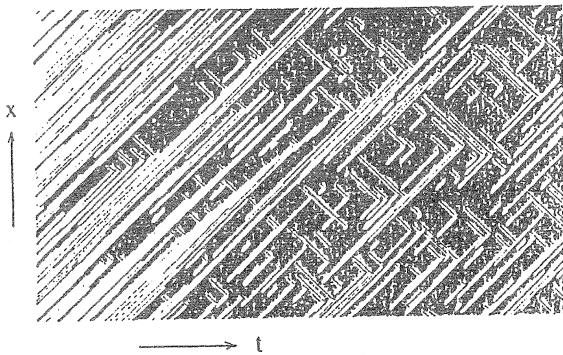


Fig.9

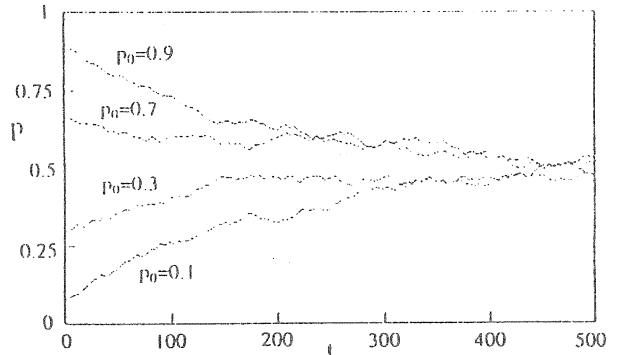


Fig.10

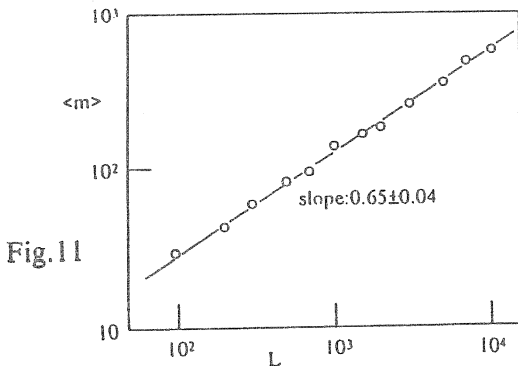


Fig.11

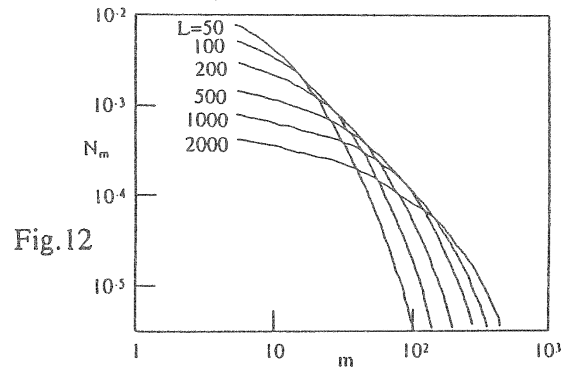


Fig.12

(I I A) 非等方的な 2 次元交通流と交通渋滞

Biham-Middleton-Levineの2次元交通流モデルにおいて、上方(y方向)へ走行する車の密度 $p_y=pf$ と左側(x方向)へ走行する車の密度 $p_x=p(1-f)$ が異なる非等方的な場合を考える。図13は $f=0.9$ のときのx方向とy方向の車の平均速度 $\langle v_x \rangle, \langle v_y \rangle$ を車の密度 p に対してプロットしたものである。Jamming transition point $p_c=0.75$ は等方的な場合($p_c=0.4$)に比べて著しく高密度側へ移る。図14は相図を示す。

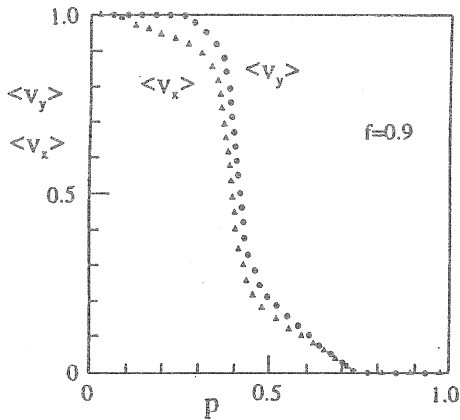


Fig.13

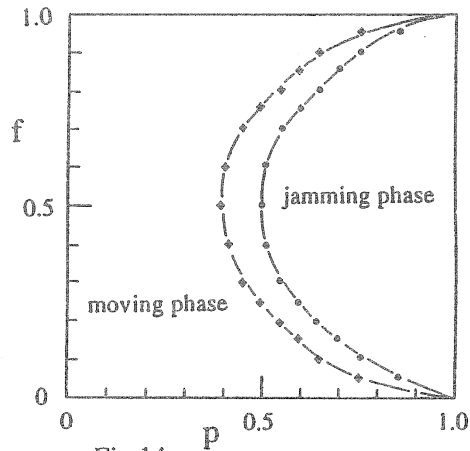


Fig.14

(I I B) 2 次元交通流における交通事故による交通渋滞の発生

Biham-Middleton-Levineモデルにおいてある一ヵ所で交通事故が起こり、その場所を車が通過しにくくなった場合を考える。車が事故の場所に到達したとき、 T time stepsの後その場所を通過できるものとする。図15は待ち時間 T をパラメータとして平均速度 $\langle v \rangle$ を車の密度 p に対してプロットしたものである。待ち時間の増加と共にJamming transition pointは低密度側へ移る。図16に相図を示す。 T 無限大の極限ではすべての車は渋滞を起こし完全にストップする。

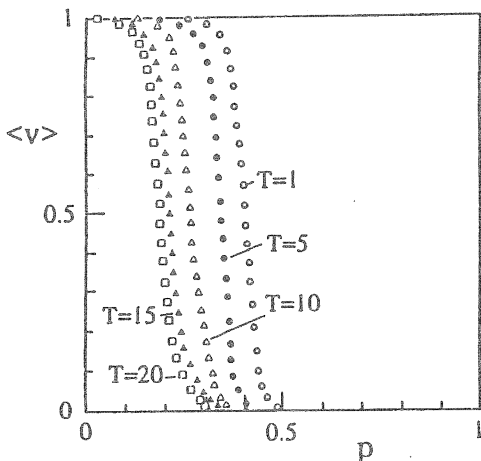


Fig.15

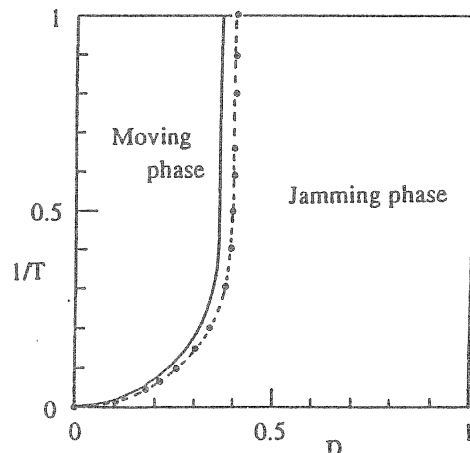


Fig.16

(I I C) 混雑した道路をもつ 2 次元交通流

都市交通網において一ヵ所の道路のみが他よりも特に混雑した場合、その混雑した道路が都市交通網全体にどのように影響を与えるかを考える。Biham-Middleton-Levine モデルにおいて一ヵ所の混雑した道路の密度 c を他の道路の密度 p よりも大きくしてシミュレーションを行なう。図 17 に $c = 0.8$ のときの 3 つの代表的なパターンを示す。車の密度 p が低いとき、渋滞は混雑した道路付近に局在する (パターン (a))。しかしながら車の密度 p の増加とともに混雑した道路付近に発生した渋滞が都市全体に広がり、やがて完全な渋滞 (すべての車がストップ) を引き起こす (パターン (c))。

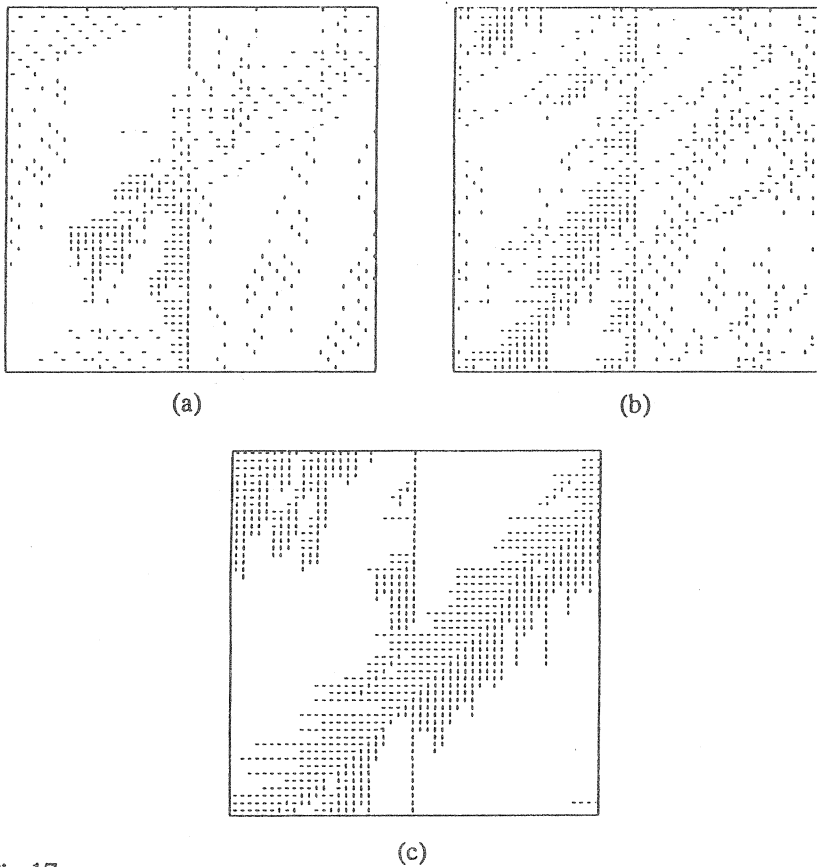


Fig.17 The typical patterns of configurations of cars for the local density $c = 0.8$ of cars on the central street and the system size 50×50 . (a) The pattern obtained for $p = 0.2$. The mean velocities $\langle v_x \rangle = 0.618$ and $\langle v_y \rangle = 0.589$. (b) The pattern obtained for $p = 0.3$. $\langle v_x \rangle = 0.530$ and $\langle v_y \rangle = 0.501$. (c) The pattern obtained for $p = 0.4$. $\langle v_x \rangle = 0$ and $\langle v_y \rangle = 0$.

(I I D) 横断道路による交通渋滞の発生

一本の y 方向の道路が x 方向の道路群を横断する場合の交通流をシミュレーションする。横断道路を走行する車の密度 p_y が低いとき、 x 方向を走行する車は渋滞を起こさず最大速度 1 で走行する (図 18 のパターン (b))。横断道路の密度 p_y が高くなると、 x 方向を走行する車は横断道路を走行する車によって遮蔽され、交通渋滞が発生する (図 18 のパターン (a))。この場合の交通流をセルオートマトン 184 の場合と比較する。

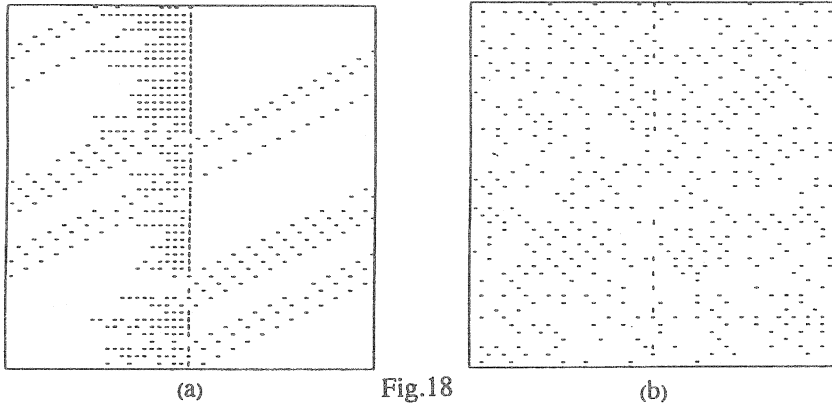


Fig.18

(I I E) 立体交差による交通渋滞の緩和とパーコレーション

Biham-Middleton-Levineモデルの各交差点に確率 c で立体交差点を導入することによって、どのように交通渋滞が緩和されるのかをシミュレーションする。図 19 は立体交差点の割合 c をパラメータとして、車の平均速度 $\langle v \rangle$ を密度 p に対してプロットしたものである。立体交差点の割合 c の増加と共に Jamming transition point は高密度側へシフトし、 $c = 0.7$ より大きい割合では jamming transition は起きない。これは立体交差点が正方格子上でパーコレートするためである。サイトパーコレーションの臨界確率 0.69 とほぼ一致する。図 20 は相図を示す。

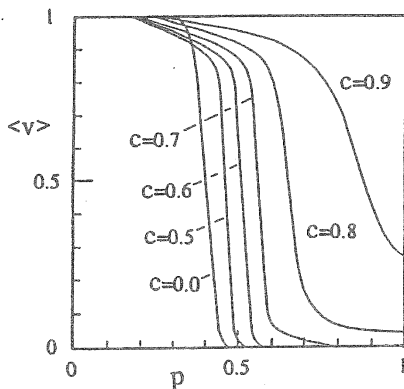


Fig.19

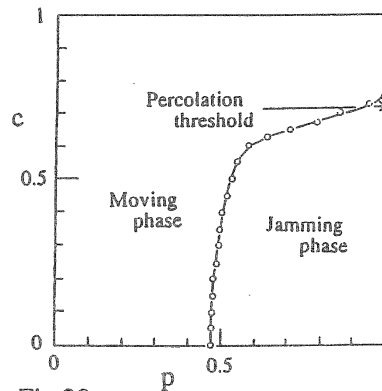


Fig.20

(I I E) 交通渋滞におよぼす車の回避運転

Biham-Middleton-Levineモデルにおいてy方向を走行する車がx方向を走行する車によってブロックされたとき、確率 p_{ja} で横へシフトして渋滞を回避する場合をシミュレーションする。図21は $p_{ja} = 0, 8$ の場合のx方向の車の平均速度 $\langle v_x \rangle$ とy方向の車のy方向への平均速度 $\langle v_y \rangle$ 及び回避運転によるy方向の車のx方向への平均速度 $\langle v_{yx} \rangle$ をプロットしたものである。車の密度 $p = 0, 25$ 付近で回避運転によるシフト速度 $\langle v_{yx} \rangle$ が増大し、同時にy方向の平均速度 $\langle v_y \rangle$ は急激に減少し始める。また回避運転によってJamming transition pointは高密度側へ移る。図22は相図を示す。

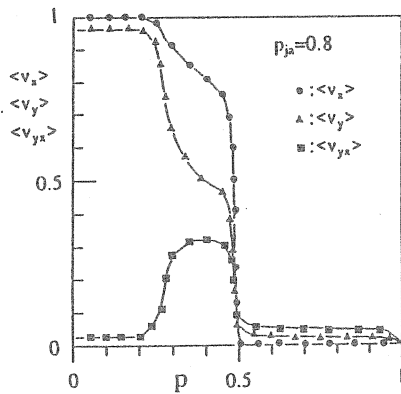


Fig.21

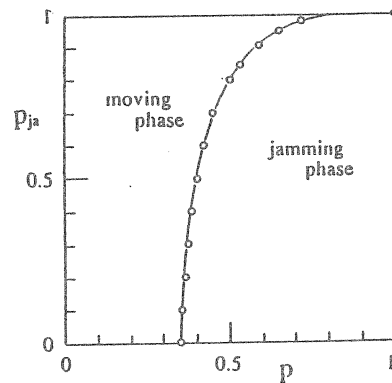


Fig.22

References

- (1) T.Nagatani, *Traffic jam and shock formation in stochastic traffic-flow model of a two-lane roadway*, J.Phys.Soc.Jpn. 63 (1994) 52.
- (2) T.Nagatani, *Shock formation and traffic jam induced by a crossing in the 1D asymmetric exclusion model*, J.Phys.A 26 (1993) 6625.
- (3) T.Nagatani, *Anisotropic effect on jamming transition in traffic-flow model*, J.Phys.Soc.Jpn. 62 (1993) 2656.
- (4) T.Nagatani, *Jamming transition in the traffic-flow model with two-level crossings*, Phys.Rev.E 48 (1993) 3290.
- (5) T.Nagatani, *Jamming transition induced by a stagnant street in a traffic-flow model*, Physica A 198 (1993) 108.