多値CAで表される二車線交通流モデルにおける準安定状態と車の流れ

中日本自動車短大　福井　稔　　龍谷大・理工学部 西成活裕
早稲田大・理工学部 高橋 大輔　愛知淑徳大　　石橋　善弘

1. はじめに

西成・高橋は，超離散の手法を使って，バーガース方程式をセルオートマトン（CA）のルール１８４に変換できることを示し，連続運動方程式を離散形へ変換できる道を示した[1,2]。そして，この離散形のバーガースCA（BCA）を多近傍に拡張したモデルをいくつか提案した[3]。ここでは，その中で拡張BCA（EBCA１）と名付けているモデルを取り上げた。EBCA１モデルにおける拡張は，セルを多値化（０－L）し，例えば多車線を表すことができるようになり，多近傍まで拡張して高速度（V＝２）の車を扱うことができるようになった。そして特に，このモデルで準安定分技が得られていることが注目される。　最近交通流の実測データから，Kerner らは，交通流には，自由流，渋滞流という２つの流れの状態の他に，同調流（synchronized Phase）相という中間的相があると指摘している[4,5]。　この同調流では，車線間で車の相互作用によって，同期的，一体的流れの状態が発生しているという。またこの相は準安定状態で，局所的，動的であるともいっている。　本研究では，EBCA１モデルを，２車線交通流CAモデルに具体化して，車線上において車の進行状況を調べ，準安定分枝上における車の運行と同調流との関連を調べる。

２．EBCA１モデルと等価な二車線交通流モデル

EBCA1 モデルでは、格子上の車数 U_j^t は

$$U_j^{t+1} = U_j^t + b_{j-1}^t - b_j^t + \min(b_{j-2}^t, L-U_j^t - b_{j-1}^t + b_j^t) - \min(b_{j-1}^t, L-U_{j+1}^t - b_j^t + b_{j+1}^t)$$

$$b_j^t \equiv \min(,U_j^t, L-U_{j+1}^t)$$

と表わされる[３]。ここで、セルの多値数 L を車線数と解釈し、各道路格子上に存在できる最大車数を１として、L=２の場合を二車線交通流モデルに構成する。

EBCA1 のルールと等価な二車線交通流モデルにおける車の前進ルールは、

第１ステップとして，

(a)全車は，もし前の格子が空いておれば，一格子前進する。

(b)塞がれているとき，斜め前の隣のレーンの格子が空いておれば，その格子へ移動する。すなわち車線変更する。

(c)そこも塞がれていれば，その格子にとどまる。直進は車線変更に優先するとし、二つのレーン、A レーン、B レーンについて同等に前進する。

第２ステップとして，第１ステップで停止した車はそのまま停止して，移動した車についてのみ第一ステップのルールに従って前進する。(図１)

この二つのステップでもって，１単位時間とする。すると単位時間に二格子進むことができるので，速度を２まで拡張したモデルとなる。

３．シミュレーションと交通流基本図

二車線道路のサーキット上を上のルールにしたがって車を動かすシミュレーションを行った。得られた交通流の基本図を図２（格子長:K=24 の場合）に示す。　流量は２車線の平均流量をとった。　その結果として，人字型の準安定分枝を示す交通流基本図（自由流領域＝直線 OA と渋滞領域 DE）がえられた。その他に同調流が存在すると指摘されている領域に，多数の準安定状態が存在することがわかった。　それらの流れを分類整理すると、

1）　１つの直線と　平行四辺形の内部で平行な多数の直線上に分布する点と　それらの直線から外れて分布する点と　がある。

2）　この直線は、線分 BC である。　他の直線は、直線 DE に平行で，線分 DB を K／6 に等分割するような（K/６－１）本の平行線である。平行線の端の線分ＧＦは線分ＤＢと平行である。流量点は、これらの平行四辺形ＢＦＧＤ内に含まれるの直線上に $\rho=1/(2\mathrm{K})$ の等間隔で分布して、2 次元格子を作っている。道路長Ｋが大きくなるにつれて、格子点間隔は小さくなり、この平行四辺形内部は、準連続的に塗りつぶされる。

3）　これらの直線から外れる点が多数ある。直線上の点は、時間的に変動しなくて安定であるのに対して、この点は、時間的に変動し、非常に永い周期を持つ変化をする。　図３に、平均流量が長周期変化する場合の、Ａレーンの流量、Ｂレーンの流量、平均流量の時間変化を示した。　この図で注目すべき点は、平均流量は非常に永い周期をもつ変動を示すが、Ａレーン，Ｂレーン各レーンの流量の変動は、より大きく、より長周期の変化をするということを示している。Ａレーン，Ｂレーンの変動の周期は同じで、平均流量の周期の整数倍になっているという極めて注目すべき結果を表している。　図４に、Ａレーン、Ｂレーン、それぞれの流量基本図を示す。

４．二車線上における車の流れと車の配置構造

流量基本図の直線上の点は、時間的に安定である。各レーン個別の流量も一定である。これは、各レーンから他のレーンへの車線変更が起こっていなく、各々のレーン上で定常的流れが続いていることを示している。　そこで、各点に対応する二車線上における車の流れの配列パターンをＫ＝２４について議論する。点Ｄ（D_{00} と記す）は平均密度 $\rho=1/3$ であるので、最も規則的配列は、

Ａレーン・・・100100100・・・　Ｂレーン・・・100100100・・・　A+B＝・・・200200200・・・　Ｄ点

点Ａ（D_{80}）では、$\rho=1/2$ で、

Ａレーン・・・10101010・・・　Ｂレーン・・・10101010・・・　A+B＝・・・20202020・・・　Ａ点

点Ｄから点Ａへ向って直線上を動くと、例えばＡレーン上の 100100 のブロックが１つずつ 101010 のブロックに換わると理解できる。そこで、線分ＤＡの中点Ｂ(D_{40})では、

Ａレーン・・・10101010・・・　Ｂレーン・・・100100100・・・　A+B＝・・・201110・・・　Ｂ点

点Ｂから点Ｃへ向っては、Ａレーンの配列は 101010・・・そのままで、Ｂレーンの　100 のブロックが、101 のブロックに置き換わった配列になっている。　点 F では、B レーンの 100 ブロックは全て 101 に置き換わって，202102・・・となる。さらに点 C（$D_{4,16}$）へ向って、１が加わり 101 が 111 に換わる。端点 C では、B レーンには全て１が並ぶ。

Ａレーン・・・10101010・・・　Ｂレーン・・・11111111・・・　A+B＝・・・21212121・・・　Ｃ点

一般に平行四辺形の中の点 D_{mn} の配列は、D_{00} を基本に A レーンの 100100 のブロックをｍ個、101010 のブロックで置き換え、Ｂレーンの 100 ブロックをｎ個、101 のブロックで置き換えた配列になっていると考えれば良い。この点を注目すれば、基本図で直線 BF より上と、GF より右に、この種の点が存在しないのが理解できる。

直線上に位置する点が、各車線上の定常的な流れに対応しているのに対して、これから外れる点は、時間的にゆらいでいて、各車線上の流れも密度も大きくゆらいでいる。これは、頻繁に車の車線変更が起こっていることに起因し、車の配列も一定でなく、頻繁に変化している。

５．流れの安定性と同調流

直線 DA 上の点では、A レーン、B レーン共に速度は２の自由流であるが、密度 $\rho = 1/3$ 以上で、準安定状態にある。すなわち、この状態にある流れは、流れのゆらぎに対して不安定で、より安定な状態へ緩和する。例えばある車線上で,1 台の車が速度を落したとする、配列では･･･01･･･の１が１サイト後ろへ下がり、01 が 10 と変わる。両レーンでいえば、･･･21･･･または･･･12･･･が発生すると、直線 BA 上の点は、BF 上の点へ落ちてくる。また平行四辺形ＢＦＧＤ内の点であれば、同じ密度の一つ下の点へ落ちる。　しかし、それらの点も、また準安定状態である。即ち、自由流から準安定状態へ転移する。　さらにゆらぎが起これぱさらに下の準安定状態へ移る。　もし、ゆらぎによって、･･･22･･･が１ヶ所でも発生すれば、その局所的渋滞は広がり、一挙に最低安定な渋滞状態の直線 DE 上の点へ転移する。即ち，自由流から渋滞流へ，または，準安定流から渋滞流への転移が起こる。

所で、平行四辺形 BFGD 内や直線 BC 上の点では、･･･21･･･または･･･12･･･の配列が存在する。これは１つの車線内では 2 台の車が連なっていることで、後ろの車は前に進めないし、車線変更も、隣の車線に車が丁度存在して、車線変更もできないという、局所的渋滞がおこっている状態を表している。　即ちこの点では局所的渋滞が発生しても、隣の車線の流れとの相互作用により車線変更できなくて、一応の安定状態を保っている。　その結果、大局的渋滞より高い流量を維持している。　このようなレーン間の流れの相互作用は、直線 BC 上では顕著で、C 点では、B レーンは全線車で詰まっていて、A レーンは半分空いていても B から A へ車線変更ができない。しかしこの方が、全流量は高い。

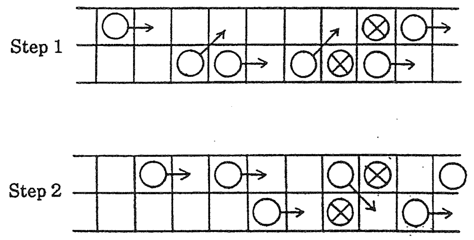

Fig. 1

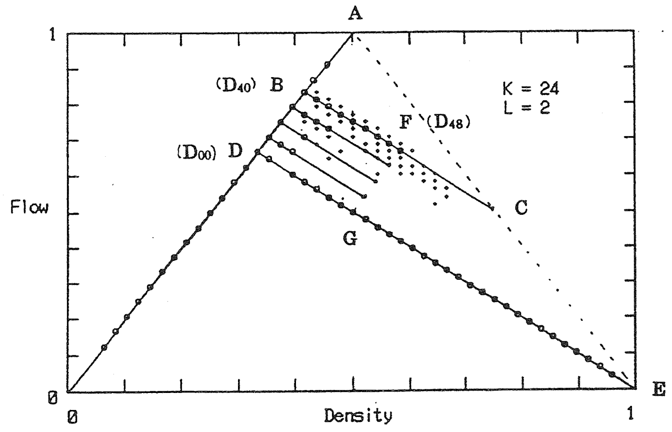

Fig. 2

ケーナーたちの唱えている同調流は，渋滞が発生するような高密度でも，追い越し（車線変更）確率が低くく，高い流量を保つ，準安定的状態であると述べている。さらに，実際は，同調流は，３つの異なった型があるとまで言っている。　密度，速度が時間，空間変化する相の他に，平均速度，密度が空間的に均質で時間的にも安定である相と，速度が均質であって，密度は，空間的，時間的に変動する相があるといっている。　このＥＢＣＡ１モデルに現れる淳安定状態が，ケーナーらの同調流と関連あるか興味深い。これらの同調流については，交通流の実測のデータにもとづいた詳細な解析が待たれる。

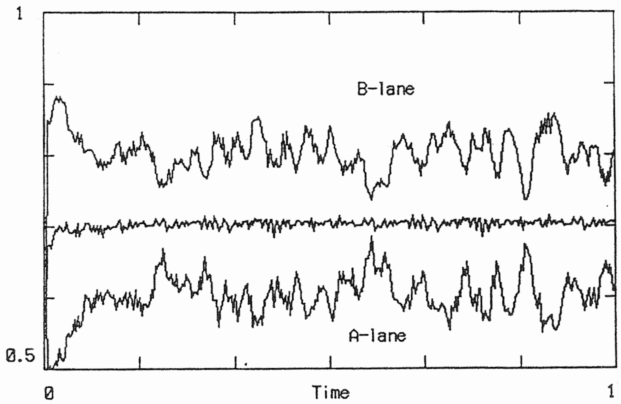

Fig. 3

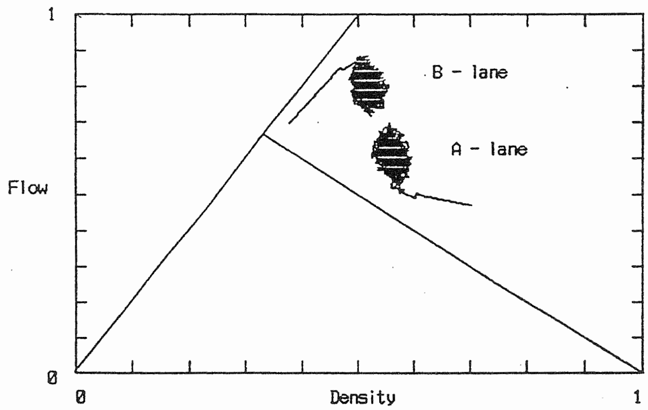

Fig. 4

[1]　K.　Nishinari and　D．Takahashi：Ｊ. Phys.　A，31 (1998)　5439
[2]　K.　Nishinari and　D．Takahashi：Ｊ. Phys.　A，32 (1999)　93
[3]　K.　Nishinari and　D．Takahashi：Ｊ. Phys.　A，33 (2000)
[4]　B.　S．Kerner and H.　Rehborn：Phys. Rev.E，53 (1996) R4275
[5]　B.　S．Kerner：Ｊ. Phys.　A，33 (2000)　L221