

交通流モデル研究へのエネルギー・環境影響評価的視点の導入

梅村界渡¹, 蛭名邦禎²

¹ 神戸大学大学院 総合人間科学研究科

² 神戸大学 発達科学部

² 神戸大学大学院 自然科学研究科

概要

著者は交通流に伴うエネルギーの振舞いについて研究することは物理的・応用的に重要であると考えている。また自身が環境科学を専攻していることから、排出ガス等の環境影響評価にも理論研究が応用されるべきであるとも考えている。本稿は著者がこれまで行ってきた交通流に伴うエネルギー散逸をモデル化する研究についての紹介を通して、交通流モデル研究にこれまでなかった上の2つのテーマの導入を提案するものである。

Energy dissipation in traffic system: Introducing the environmental assessment points of view to traffic flow research

Kaito Umemura¹, Kuniyoshi Ebina²

¹ Graduate School of Cross Cultural Studies and Human Science, Kobe University

² Faculty of Human Development, Kobe University

² Graduate School of Science and Technology, Kobe University

Abstract

We authors argue that the research of traffic flow should contain the viewpoints of environmental assessment where the energy dissipation and exhaust emission is important. In this paper, we outline our continuing research of the energy dissipation model of traffic flow and indicate a new direction of the traffic flow research.

1 はじめに

著者は環境問題に関心があり、それにかかわる現象を物理的に理解することを志している。モデル化による交通流の研究は古くは1950年代のヨーロッパで始まり今では日本でも盛んに行われている分野である[1, 2, 3]。しかしこの分野の先行研究では交通流のダイナミクスを記述しようとする試みは盛んだが、それらの研究をエネルギーや環境影響評価に論点を拡張して扱ったものは見当たらない。そのため、自分がそれをしてみようと思うに至り、現在は交通流のエネルギー散逸についての研究をしている[4]。これまでの研究で、車1台のエネルギー散逸をモデル化し、駆動モデルに周期系OV modelを用いてシステム全体のエネルギー散逸のふるまいを数値計算によって見積もることを行ってきた。以下ではその内容について紹介するとともに、今後著者がどのような研究をしていきたいか、どのような研究をこの分野で行うべきかについて述べる。

2 車のエネルギー散逸のモデル化

交通流はエネルギーの注入・貯留・散逸を行うことによって、車の空間的な再配置を行うシステムであると考られる。そこで個々の車のエネルギー散逸についてモデル化し、数値計算によって個々の車とシステム全体についてそのふるまいを見ることにする。車の駆動モデルには以下のような OV model を用いる [5, 6]。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a[V(\Delta x) - v] \quad (1)$$

$$V(\Delta x) = \frac{v_{\max}}{2} \left[\tanh\left(\frac{\Delta x - c}{w}\right) + \tanh\left(\frac{c - d}{w}\right) \right] \quad (2)$$

ここで、 $x, v, \Delta x$ はそれぞれ車の位置、速度、前方車間であり、 a は感応度パラメータ、 v_{\max}, c, d, w は最適速度関数 $V(\Delta x)$ の形を決めるパラメータである。車の持つ運動エネルギーは空気抵抗、タイヤ・駆動系にかかる摩擦、ブレーキなどによって空気中に熱として散逸していくと考えられる。従って 1 台の車の単位時間当たりのエネルギー散逸（エネルギー散逸 rate） j_q を、車の速度 v と車にかかる全抵抗力 F_r の積で定義する。

$$j_q = F_r v \quad (3)$$

F_r の内訳はシンプルに、空気抵抗、摩擦、ブレーキの 3 種類とする。

$$\begin{aligned} F_r &= F_a + F_f + F_b \\ &= (\alpha v + \beta v^2) + f + F_b. \end{aligned} \quad (4)$$

F_a は空気抵抗を表し、車の速度の 2 次関数形で与えられるとしている。 F_f はタイヤと地面との間のころがり摩擦や車内部の駆動系の摩擦などを含む全摩擦抵抗を想定し、その値は定数 f で与えられるとしている。 F_b はブレーキによる抵抗力を表し、この項は車が減速するときのみある値をとって現れ、その他の場合は 0 であるとする [7, 8]。ここで問題なのは F_b の形をどのように設定するかである。モデルの簡便さを保つために速度や車間などの車の状態量の関数として表したいが、ドライバーは F_b の値をコントロールすることで間接的に車の減速を制御しているので、 F_a, F_f のように直ちには関数形が思いつかない。この問題を解決するために車の運動方程式と OV model について考える。車の質量を M 、車のエンジンによる駆動力を F_e とおくと、車の運動方程式は、

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_e - F_r \quad (5)$$

のように与えられる。(4) 式で与えられる F_r の式を代入し、車は OV model に従って走行すると仮定して、この式の左辺の $\frac{d^2x}{dt^2}$ を (1) 式の右辺で置き換えて整理すると、OV model と矛盾しないためには、

$$F_e - F_b = (\alpha v + \beta v^2) + f + Ma[V(\Delta x) - v] \quad (6)$$

とならなければいけないことがわかる。車が減速する時以外では $F_b = 0$ なので F_e の関数形が決まる。しかし、車の減速時は F_e と F_b に任意性がある。そこで F_e, F_b の分担について、以下のような 2 つのタイプを仮定して考える。すなわち、

(model type 1)

$$F_b = -Ma[V(\Delta x) - v] \quad (7)$$

$$F_e = (\alpha v + \beta v^2) + f \quad (8)$$

(model type 2)

$$F_b = -(\alpha v + \beta v^2) - Ma[V(\Delta x) - v] \quad (9)$$

$$F_e = f \quad (10)$$

である。タイプ1では、車の駆動力 F_e は車の速度のみによって決まり、加速の際以外は常に空気抵抗と摩擦につりあう。そして F_b は車を減速させるための力の全てを担うことを表している。一方タイプ2では、車の減速にブレーキと空気抵抗が用いられ、その際にエンジンの力 F_e は摩擦のみを担当することを表している。(6)式から車が動くためのエンジンの最低出力は f であると考えられるので、タイプ1・タイプ2それぞれは、車が減速する際のエンジン出力の上限・下限を表すモデルであると捉えられる。これら2つのタイプの F_r のモデルを用いた計算を比較することで、計算結果の妥当性を考えることができる。結果的に導入する F_r の関数形は以下のように整理される。

$$\begin{aligned} & \text{(when accelerating or moving with constant speed)} \\ & F_r^{(n)} = F_a + F_f \\ & = (\alpha v_n + \beta v_n^2) + f_n \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \text{(when decelerating by } F_b \text{ of type 1)} \\ & F_r^{(n)} = F_a + F_f + F_b \\ & = (\alpha v_n + \beta v_n^2) + f_n - M_n a [V(\Delta x_n) - v_n] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \text{(when decelerating by } F_b \text{ of type 2)} \\ & F_r^{(n)} = F_a + F_f + F_b \\ & = f_n - M_n a [V(\Delta x_n) - v_n]. \end{aligned} \quad (13)$$

ここで添え字の n は車の並び順を表し、 M_n , v_n および f_n はそれぞれ n 台目の車の質量、速度、摩擦である。

以上より、1台の車およびシステム全体についての単位時間当たりのエネルギー散逸 j_q, J_q と、車の輸送距離あたりのエネルギー散逸（エネルギー効率） e を以下の式を用いて計算する。

$$j_q^{(n)} = F_r^{(n)} v_n \quad (14)$$

$$J_q = \sum_n j_q^{(n)} = \sum_n (F_r^{(n)} v_n) \quad (15)$$

$$e = \int J_q dt / (\text{sum of reached distance of all vehicles}) \quad (16)$$

エネルギー効率 e は値が小さいほど輸送効率が良いことを表す。以下では車の輸送フラックスと e について、パラメータ・初期条件依存性の相違について述べる。

3 数値計算の結果

図1は周期系 OV model (サーキット長: 5000m) で車を一定時間走らせた場合の、システムにおける車両輸送フラックス (単位: 台数/s) と輸送エネルギー効率 (単位: kJ/m) を OV model の感応度と車の台数という2つのパラメータ空間上でどのような値をとるかの分布をとった図である。計算では、車の初期位置はサーキット上に等間隔に配置したものにランダムな変動を与えて、そのアンサンブル平均をとっている。そのためパラメータ空間のある領域内 (図の下半分の中央あたり) において系内に渋滞クラスタが発生している状況の分布図になっている。車両輸送フラックスの大きさは初期条件に依存しないが、エネルギー効率の大きさは初期条件によって大きく変化する特徴があることが、いくつかの計算結果から分かっている。

4 まとめ

これまでの研究で、車輸送フラックスとエネルギー散逸では初期条件 (に応じて安定化する系内の渋滞クラスタ数) に対する応答性に違いがあることが分かった。つまり、エネルギー散逸の大きさは安定化する渋滞

クラスタの数に比例して増加するが、車の輸送効率はクラスタの数に依存しない。抵抗力のモデルのタイプ 1・2 どちらを用いた場合の計算でもこの結果に大差がなかったことから、これは交通流のエネルギー散逸についての特徴であるといつてよい(少なくとも OV model の範囲内では)。今後の課題としては、より定量的に妥当な評価をするために初期条件のアンサンブルをどのように選ぶのが良いかを考えることがある。また、ボトルネックなどの特定の交通状況におけるエネルギー散逸のふるまいを見ることなども検討していきたい。交通流の環境評価のためのモデル、たとえば排出ガスの振舞いのモデル化も現在検討中である。これまでのところ著者は周期系 OV model でしか考えていないので、流体モデルやセルオートマトンなど他のモデルでも類似の研究がなされれば比較ができて良いと思う。

環境影響評価については著者の関心によるところが大きいですが、エネルギー散逸は非平衡系の物理では一般的に扱われるので、交通流モデル研究の分野でもまず活発な議論がなされるべきテーマではないだろうか。現実の問題を考えると、1台1台の車のエネルギー効率 e は実際に測定可能であるが、交通システム全体でそれがどのように振舞うかを測定するのは系が巨大でしかも一様でないため困難である。そのためモデル化とシミュレーションによる研究が重要である。またより広い意味で、現実の渋滞の発生が経済や社会にどの程度影響を与えるのかを明確にするためにも、エネルギーや環境影響評価についての基礎理論は必要である。

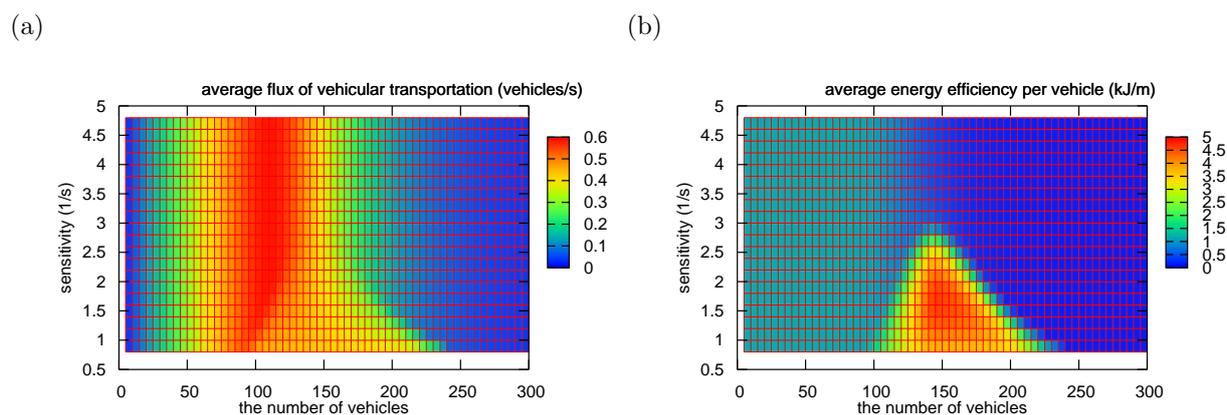


図 1: 系内に複数の渋滞クラスタが発生した場合の、(a) 車輸送フラックス、および、(b) エネルギー効率 e の車台数-感応度依存性。両図とも下半分中央の山型の領域が渋滞発生領域。

参考文献

- [1] D. Helbing, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001)
- [2] D. Chowdhury, L. Saiten, A. Schadschneider, *Phys. Rep.* **329**, 199 (2001)
- [3] 杉山雄規, 交通流の物理, *ながれ* **22**, 95-108 (2003)
- [4] K. Umemura and K. Ebina: physics/0611145
- [5] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, *Phys. Rev. E* **51**, 1035 (1995)
- [6] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, *Jpn. J. Ind. Appl. Math.* **11**, 203 (1994)
- [7] 景山克三, 景山一郎: 『自動車力学』, (理工図書, 1984)
- [8] 竹花有也: 『自動車工学概論』, (理工学社, 1995)