

交通流：物理からのアプローチ

菊池 誠 (阪大理)

はじめに

1992年あたりから、交通流を扱う物理の論文が突然増えだした。もちろん、それ以前にも時おりは交通流を取り上げた論文が見かけられたが、最近の傾向は、この狭い分野を考えればブームと言ってもいいかもしれない。そんなわけで、今回の研究会では、1次元交通流の動力学について、これまでのいきさつと最近の成果についてレビューした。しかし、過去の研究についての詳細なレビューが共同研究者である湯川さんの修士論文の中に書かれているので（「物性研究」掲載予定）、あえて繰り返すのもなだし、本稿では少し（とつても）偏った立場から交通流の研究について書いてみたい。ほとんど与太話である。

交通流は、個々にダイナミクスを持つ離散要素が集合して作られた系、という意味では「要素と全体」からなるダイナミクスの問題と言うにふさわしい。しかし、人間が関与して、「自由意志」の働く余地があるという点で普通の物理系とは著しく異なる。個々の要素は、自ら状況を判断し、制御をし、希望を主張する。問題は、それが現象に現われてくるのかこないのかである。少なくとも私個人はそこが気になっている。

1 次元交通流とその数理モデル

1次元でなぜ渋滞が起きるかと言えば、答はごく簡単で、車が多すぎるからだ。観測から経験的に知られているところでは、車がスムーズに流れうる限界密度があり、車両流率はそこで最大になる。この最大流率は交通容量と呼ばれ、道路を特徴づける基本的な特性量である。実際、いわゆる自然渋滞は、容量の大きい道路から小さい道路への接続部分で発生することが殆どなので、道路設計の際にはこの交通容量が重要な要素となる。物理の立場でいうと、どうもここでは非平衡相転移らしきものが起きているようで、そこがひとつの興味の対象である。

ところで、交通流を物理の問題として見ると、関与する粒子数が極端に少ないことに気づく。仮に地球の大円に車を並べたとしても、せいぜい 1×10^7 台程度が限度である。普通の状況を考える限りは、数万台ですら多いかもしれない。すると、このような問題で安易に熱力学極限をとっていいのか、という疑問が生じる。むしろ、熱力学極限では測度0になって観測されないような現象であっても、現実には観測されたりするのではないだろうか。特に交通容量付近で相転移が起こっているのだとすると、粒子数が少ないことによる影響は大きいであろう。我々のシミュレーションでは、交通容量付近で状態の多様性が急激に増すことがわかっているが、どうも粒子数が増えるにつれて多様な状態が観測されにくくなるように見える（密度の fine tune を必要とするようになる）。しかしながら、それが即現実には観測されないという意味ではなく、むしろ現実の系は粒子数が少ないために、そのような（熱力学極限では測度0の）現象が観測されうる、と考えるべきであろう。

交通流のモデル化の試みは大きく

1. 流体モデル
2. 統計的モデル
3. 追従モデル

に分けられる。流体モデルは、文字通り交通流を連続体近似して流体として扱おうという立場である。その立場に対して、個人的には、車は流体なのか、という素朴な疑問がわいてしまう。統計的モデルのほうでは速度分布関数に対して Boltzmann 方程式を考えるものであり、Prigogine などが用いたが、それ以降あまり発展がないようだ。

手法の正当性(?)とは別に、流体モデルや統計モデルでは交通流のマクロな性質の一部をインプットとして必要とするため、ミクロな立場からのモデルとは言えない。もっとミクロな、個々の車のレベルから

モデルを作ろうとしたのが追従モデルの系列である。各車両が運動方程式を持ち、前の車両との関係から速度や加速度を調節するというのが追従モデルの基本形である。古典的な追従モデルはその名の通り、前方の車に追従することを前提としているので、車の密度が低いといくらでも加速してしまったり、高密度では頻りに衝突したりするという問題があった。その上、観測されているような渋滞層の発生や低密度相と高密度相の間の急激な転移を再現できなかった。

最近、こういった問題の一部または殆どを解消して、一次元交通流をかなりリアルに再現できるモデルがいくつか提唱されている。主なものは、多状態 CA を用いた Nagel らのモデル、微分方程式系の板東らのモデル、そして結合写像による我々のモデルである。それらはすべて、渋滞層の発生を再現できる。モデルの共通点は、追従しないときに固有の速度（希望速度）で走るようにしたことと、その希望速度が車間距離によって変化するようにしたところであろう。つまり、その程度の機構が組み込んであれば、渋滞層を発生させられるらしい。

一方、モデルの細部は異なっており、それ以上にモデル化の方針がかなり違っているように思われる。我々の立場は、まず 1 台の車の運動を現実的にみせるために必要な要素を挙げるところから始めるものだった。その結果、個性・制御・揺らぎのみつつの要素が欠かせないと考えた。従って、希望速度のばらつきや希望速度付近での速度の揺らぎといったランダムネスは、我々のモデルでは出発点から導入されている。板東らのモデルでは、むしろ追従挙動から出発したように見受けられる。そのために個性や揺らぎといったランダムネスは、とりえずモデルから除かれている（もちろん、導入はできる）。ランダムネスがなければ再現できない現象もあるし（低密度でのクラスター化や非渋滞流での密度波伝播など）、なくても再現できるものもある。どれを真っ先に重要なものと思うかは趣味の問題と言ってもいいかもしれないが、立脚点ないしは視点の違いが端的に現れている部分のようでもある。個人的には、車の問題を始めてから、人間の行動に関係することが物理の枠組みでどう捉えられるのかが気になりだしている。そう考えると、個性や揺らぎを無視したモデル化は必然であって、これを除くわけにはいかない。と言ってはみても、ぜんぜん違う立場から出発したモデルが同じようなふるまいをするなら、出発点とか立脚点とか言ってもしょうがないのかなあ。

粉体

交通流は粉体と同じではないか、という指摘は幾度となく受けている。釈然とはしないものの、かといって有効な反論があるわけでもない。ただ、ユニバーサルリティクラスが同じだ、と言われてしまうと、どうも身も蓋もない気がしてしまう。なんたって、粉は状況判断をしないのだし、まして「希望速度」なんていう自由意志に関わるものは持ちあわせていないのだから。と思いつつも、やっぱり似てるなあと感じてしまうのは、そういうことを論じるには、交通流はあまりに束縛条件が強すぎる問題だということなのだろうか。前の車にぶつからないようにについてゆく、という条件下では、所詮できることに限りがあって、人間の頭も粉体程度にしか働きようがないということか。やっぱり、身も蓋もないなあ。

他の物理学者がどういう興味で交通流を取り上げているのか、なにしろ他人の動機なんて本当のところは全然わからない。同床異夢なんだろうと思う。ユニバーサルなほうがうれしい人もいるだろう。私のごくごく個人的な趣味を言えば、やっぱり人間が関与するところに興味があるわけで、ユニバーサルリティを議論するよりも、粉と違う部分にこだわったほうが面白いと思う。

おわりに

と、わけのわからないことを書いたのは、我々の研究成果は湯川さんが書いてくれているし、はじめに書いた通りレビューは湯川さんの修士論文があって、あんまり書くことがないからなのだった。まじめな話は、湯川さんの記事を読んで下さい。