

1-3  
渋滞学とは何だろう

# 自然渋滞が発生する直前に現れる特異な状態



車の基本図を再び見てみよう。それはよく見ると単純な山形というよりも、漢字の「人」の形のように見える。つまり渋滞していない部分が少し突出したような形になっている。これは極めて重要な車の流れの性質で、人やアリの基本図には見られないものだ。人やアリの場合、基本図はただの丸い山形をしており、人型のような形ではない。なぜこのような違いがあるのだろうか。



**準安定状態は、ちょっとしたきっかけで渋滞に変わる不安定な状態**

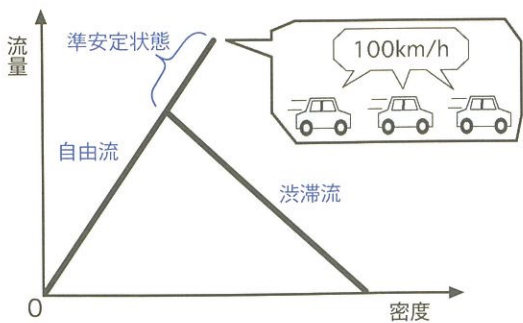
これを考えるためのヒントが物理学にある。先ほど水を冷やすと0℃で氷になると書いたが、本当にぴったり0℃で氷になるのだろうか。実は0℃以下になっても氷にならない「過冷却」\*といわれる状態も存在する。本来ならば氷になる温度なのだが、ゆっくり静かに冷やしていくと、このような状態を作ることができる。

これはよく手品の種として使われる。手品はかなりハイテクな科学技術を使っている場合が多い。0℃以下の過冷却状態の水は、今にも氷になろうとしている不安定な

**\*過冷却**

液体から固体への相転移は通常はある決まった臨界温度で起こるが、この臨界温度以下に冷やしてもまだ液体のままている準安定な状態。この準安定状態が見られるような相転移を1次相転移と呼ぶ。

図1-9 準安定状態がある場合の基本図の模式図



準安定な部分は自由流部分が伸びた部分で、これは車間距離を詰めて高速で走っている危ない状態だ

基本図は全体として漢字の「人」の形をしている。西洋では漢字はないので「逆ラムダ( $\lambda$ )」型と呼んでいる

状態だ。そのため、ちょっと振動を加えて刺激するだけで、急に氷になるのだ。したがって、目の前に水の入った透明の容器があり、それをちょっと振るだけで氷になる、という手品は、たいていの場合この原理を使っている。

車の場合、基本図で自由流が突出した部分は、この過冷却状態と同じように考えることができる。温度を下げる、という操作が、車の場合は密度を上げるというものに対応している。したがって、自由に流れている状態から車を増やして密度を上げていくと、ある密度で渋滞が起こる。しかし、そっと車を増やしつづければ、渋滞せずにうまく流れている状態を作り出すことができるだろう。つまり、車間距離が40メートル以下になっても、うまく走れば速度を落とさずに走れる可能性がある。

たしかに、運転に慣れたドライバーどうしなら、車間距離をかなり詰めても、時速100キロメートル近くで走ることができると。しかし、それが何台も連なった状態は極めて危険であることが想像できるだろう。誰かがちょっとでもブレーキランプを点滅させると大事故になりかねない。普通の人々が自由走行の時速100キロメートルを維持したまま、安定に走ることができる車間距離の限界は、通常40メートルだが、実際は自然にこれより少しだけ詰まってしまいうこともあるだろう。この状態こそが自由走行が突出した部分の正体なのだ。

これはとても不安定な状態で、ブレーキランプなどのちょっとしたきっかけで渋滞に変わってしまう。したがって通常は長くても10分程度の寿命しかない。

渋滞学では、この突出した部分を「準安定」部分と呼んでいる。これは物理学において、0℃以下になっても氷にならないで水のままでいる状態を準安定状態と呼んでいることに由来する。本来ならば渋滞しているはずの密度なのに、自由走行状態のままでいる状態が準安定状態なのだ。

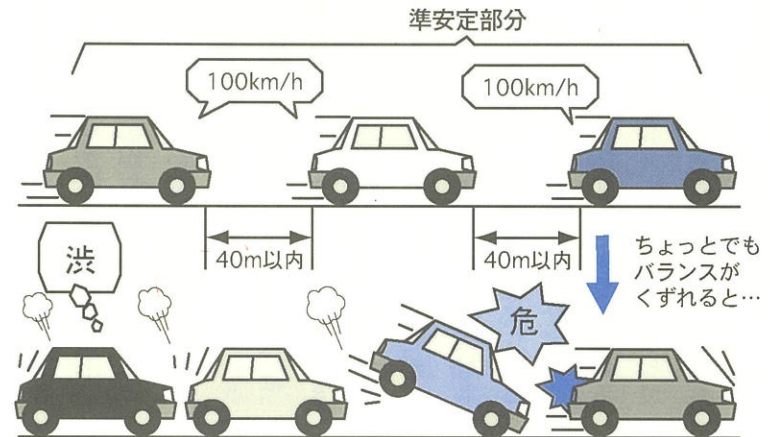


### 準安定状態が見られないケース

人では、このような準安定状態はほとんど見られない。人間は車と違って自分自身の速度をコントロールしやすい。急に止まれるし、急に加速できる。そのため、車のような重い物体とは動き方が異なり、かなり詰めても急に止まれる安心感から、スピードを落とさずに詰めて安定に歩くことができる。

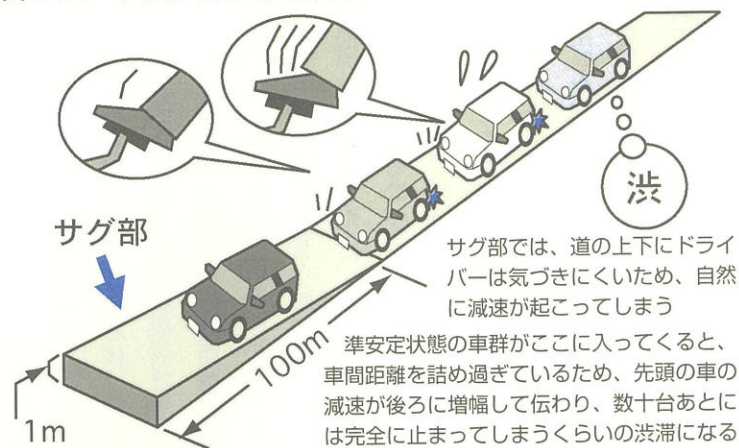
車のように粒子が重く、より急な加減速が難しくなることを「慣性効果」と呼ぶ。人の場合、慣性効果が小さいため、基本図によればお互いおよそ50センチメートルの距離まで接近しても自由走行相になっていることがわかる。こういう場合、密度がだんだん大きくなってきても、不安定な状態をほとんど経由せずに渋滞相に相転移する。したがって準安定な部分は基本図にはふつつ表れない。

図1-10 「準安定状態」は衝突寸前の危ない状態



準安定状態は、安定という名前が付いているので誤解しやすいが、実は危ない不安定な流れの状態、ちょっとでも誰かが減速すると、それが後方に拡大して伝わってしまい、大渋滞を引き起こす

図1-11 サグ部で発生する渋滞



部では一見何も原因がないように見えるのに渋滞が起こるため、ここでの渋滞は「自然渋滞」といわれている。

サグ部の上り坂は、せいぜい100メートル進んで1メートル高くなるような緩やかなものだ。したがって運転手は坂道であることに気づきにくいので、アクセルはそのままだ。しかしいくらかわずかでも上り坂であるため、アクセルを踏み込まないと当然車の速度は徐々に遅くなっていく。このとき後ろの車が追って来れば、この減速により車間が詰まるため、後ろの車はブレーキを踏むかもしれない。するとその後ろの車もブレーキを踏み、その連鎖が後方まで伝わる。すると数十台後ろでは車が完全にストップしてしまうこともある。先頭の

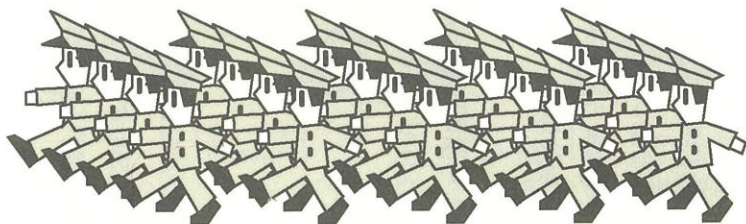
人の動きのこの臨界密度での安定性を利用してのが、軍隊の行進だ。一列にきちんと密に並んで、一糸乱れずに歩調を揃えて行進していく姿は印象的だ。このような密な行進は、たとえば百台の車で実現するのは不可能に近いが、人ならば百人で行進するのは少しトレーニングすれば可能なのだ。



### 準安定状態から渋滞に変わるメカニズム

それでは実際に道路のどのような場所でこの準安定状態ができるのだろうか。

それは緩やかな上り坂、あるいは窪地のような少しへこんだ場所であり、「サグ部」といわれている。サグとは、たわむ、という英語だ。実はこの道路がわずかにたわんだような場所こそが高速道路における渋滞原因の第1位なのだ。事故や工事、あるいは料金所のせいで渋滞しているならばわかりやすいのだが、サグ



#### \* 高速道路における渋滞原因

東日本の場合の渋滞原因は、平成17年度のデータで

- 1位…サグ部 (35%)
- 2位…事故 (29%)
- 3位…合流部 (28%)
- 4位…料金所 (4%)

と続く。10年前の1位は料金所だったが、ETCの導入でだいぶ渋滞は緩和された。

ちよつとの減速が後ろでは完全停止の渋滞を招くのだ。

もちろんこれは、サグ部に入ってくる車群の車間距離がある程度小さくなくてはならない。車間距離が十分にあれば、前の車のブレーキは後方に何も影響を与えない。しかし臨界密度である車間距離40メートルに近い集団がサグ部にさしかかると、サグの影響でまず先頭の車との車間距離が「そつと」短くなり準安定状態が形成される。これが渋滞の種になり、何かの小さなきっかけで不安定性が成長して、その後方では止まってしまったり、また動いたり、ということを繰り返す大渋滞になる。以上が自然渋滞のメカニズムだ。

よく誤解されるのが、誰かがブレーキを踏んだため、その影響が後ろに伝わり後方で車が停止する、という理屈だ。これは自然渋滞の本質を捉えた説明ではない。走っているときに強くブレーキを踏めば、車間距離が詰まっていなくても、たしかに渋滞になるが、その場合は準安定状態を経て渋滞になっていないため、基本図には自由流が突出した部分は表れず、アリの場合と同じ単なる山形になる。準安定状態という不安定な状態は、ほんのちよつとしたゆらぎがどんどん成長していく状態なので、別に強くブレーキを踏まなくても、たとえばちよつとだけアクセルから足を離すとか、一瞬よそ見をするなど、ほんの些細なきっかけでも渋滞形成には十分なのだ。



### いろいろな場面に見られる準安定状態

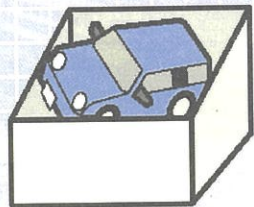
この準安定状態、というものは、実はいろいろな場面に現れている。たとえば、戦争で敵どうしが銃を構えて緊迫して向き合っているような状態も準安定といってもよいだろう。このとき、誰かがちよつとガタンと物音をたてただけで、緊張の糸がプツンと切れて大規模な銃の撃ち合いに発展するかもしれない。

他の例は、コンサートの会場で筆者が何度か経験したことだ。オペラ歌手が非常にきれいなピアノの音を響かせながら、途中の楽章を歌い終わったとたん、会場の誰かが軽く咳払いをする。すると、咳払いの連鎖が始まり、かなり大きな音まで聞こえてくる。歌手は続く楽章をすぐに歌うのではなく、咳払いが収まるのを少し待っている。コンサートの緊張がちよつとしたきっかけで、一気に緩んでいく様子が肌に伝わってくる。



## 第2章

# 新しい渋滞学は こう考える



これらはいずれも準安定状態とその崩壊の例といってもよいだろう。高い緊張状態が、ちょっとしたきっかけにより連鎖反的に崩れていくという現象は、このように自然渋滞だけでなく、いろいろな状況で見られるのだ。

自然渋滞は、人ではあまり見られないと書いたが、実は大人ではなく幼児の列では、準安定状態が起こりやすい。

幼児は、前の人の動きに対してちゃんと注意を払うことができないため追従反応<sup>\*</sup>が遅くなる。そのため、大人のようにお互いの距離を詰めてうまく歩くことができないのだ。したがって、一列に並んで行進させようとしても、何人かで固まって動けないところができたり、前との間隔がだいぶ空いてしまったりという大渋滞状態になることは、保育士なら誰でも知っているに違いない。これは、前の動きに対する追従反応が遅いことにより、実質的に慣性効果が大きくなっているからだ。つまり、機敏に動けないため、ある程度以上詰めてしまうと準安定な状態になってしまい、誰かのちょっとした減速で後ろがストップしてしまうのだ。

このように、自己駆動粒子の慣性効果とは、実際の粒子の重さと、粒子の追従反応の機敏さの両方が関係している。

次の章では、このような渋滞相転移を統一的に扱う新しい理論について説明しよう。

### \*追従反応

前の人や車の加速や減速に対して、自分がどれだけすぐに合わせられるかという反応。通常、大人ではこの反応時間は1秒程度といわれている。