

## 論文の内容の要旨

論文題目 Theory of density-dependent transport on networks  
(ネットワーク上における密度依存輸送の理論)

氏 名 江崎 貴裕

我々の社会は人やモノの流れによって支えられている。こうした「流れ」を理解・制御するためにそれぞれの対象について、工学や情報学、物理学といった様々な分野で研究がおこなわれてきた。特に近年では物理学の分野でモノや人間、車などを粒子とみなすことによってその流れの特性を理解する取り組みが進んでいる。こうした研究は粒子一つ一つのミクロな性質から流れのマクロな性質が明らかにしてきた。一方で、これらの知見を実世界に応用するにはネットワーク的な視点が不可欠である。現実の人やモノの流れの経路は道路網、航空網といったネットワークをなしているからである。このネットワーク構造により効率的な輸送が可能となる。本論文では、既知のマクロな流れの特性から出発し、ネットワークレベルでのさらに一段マクロな系の性質を明らかにすることを目指した。

大きさを持つモノの流れの「流量」は単位時間当たりにある地点を通過したモノの個数で定義される。空間の単位長さあたりに存在するモノの個数で定義される「密度」が小さいときには、流量は密度の増加に応じて増加する。しかし、密度がある点を超えると渋滞が起こり、密度の増加によって流量が低下する。こうした関係は人間、車、航空機など様々なモノの流れに広くみられる。本論文ではこの流量・密度関係を既知のものとして、密度の情報を持つノードをつなぎ合わせたネットワークを考えた。ノード間はリンク上に定義される流れを通してモノが輸送される。この道路網や航空網に対応する理論モデルを用いて、流れのマクロなダイナミクスを調べた。

本モデルで明らかになった顕著な特徴はマクロな渋滞現象の存在である。ネットワーク全体の平均密度がある点を超えると、系の密度分布が不均一になり、密度が高いノードと低いノードへの分離が起こる。この現象はネットワークレベルで初めて起こる渋滞

現象であり、既知のノードの内部の流量・密度関係で特徴づけられるマイクロな渋滞とは全く異なるものである。この不安定化が起これるとネットワーク全体の流量が著しく低下する。そこでこの渋滞現象を理解、あるいは緩和することが必要となる。

本論文ではまず、ネットワークに含まれる一つのノードのダイナミクスに着目し、微小擾乱に対する応答、及び有限の擾乱に対する応答について理論的に明らかにした。さらに系の安定性の議論をネットワーク全体に拡張し、マクロな渋滞が起こるパラメータ領域を理論的に明らかにした。ここまではマクロな渋滞が起こるメカニズムに焦点を当てたものである。渋滞が起きた後のダイナミクスは系の詳細に依存するが、本研究では空港のネットワークについて調べた。空港においても地上の混雑具合とテイクオフ数（流出量）の間に自由流・渋滞流に対応する単峰形の関係が存在することが知られている。提案モデルを実データを使いながら米国の空港ネットワークに適用することにより、(1)航空機が一部の空港に集中しやすいこと（マクロな渋滞）、および(2)混雑度のダイナミクス、密度分布は空港のサイズ（ネットワークにおける次数）によって説明できることが分かった。こうした流れのダイナミクスを考慮した航空交通の研究はあまり例がないが、本研究では航空網で議論されてきた遅れの伝播現象とは異なるタイプの流れの不安定化を示した。

マクロな渋滞がネットワークの流れを大きく損ねることが分かったが、こうした状況を緩和するため、現実の世界ではしばしば対応策がとられる。たとえば、米国の航空網ではGround Delay Programという取り決めがあり、行き先の空港が混雑すると予想される場合に便の出発を遅らせることがある。したがって、輸送ネットワークに何らかの制御則を課した時に、結果としてどのような振る舞いが起こり得るのかを知ることは極めて重要な課題であるといえる。本研究では、非常に単純な制御側を考えることにより、そうした制御が本質的に系に与える影響について理解することを目指した。マクロな渋滞が起きると、混雑したノードはさらに混雑しやすくなり、自発的に低密度自由流を回復することができない。そこで以下のような制御則を考える。(1)混雑したノードに流入するリンクを一時的に切断し密度が低下するのを待つ。(2)その後、所定の密度まで混雑が解消したところでリンクをつなぎなおす。この制御ルールを導入することにより、3つの異なる相（自由流相・制御相・閉塞層）が生じることが分かった。とくに制御相では、ネットワークの渋滞をうまく分散させることができ、全体の流量をマクロな渋滞が起きていないときと同程度まで回復することができることが分かった。一方でその代償に、閉塞層という流れが完全にストップしてしまう相も生じる。本論文ではこのような系の振る舞いがなぜ・どのようにして起こるのか、またどのパラメータ領域・密度領域で制御相から閉塞層への相転移が起こるのかを理論的に明らかにした。

以上の理論は現実の輸送ネットワークを理解・制御するための基盤を与えるものである。本研究は今後、こうした輸送をよりよく制御するためにはどうすればよいか、また個別の問題に対してどうアプローチするかなど様々な方面で発展が期待される。