

審査の結果の要旨

氏名 江崎 貴裕

道路交通網や航空網といったネットワークは効率的な輸送を行うための重要な要素である。こうしたネットワーク上で起こる複雑な流れを理解し、そして制御することは社会的にも工学的にも大変重要な課題である。学位申請者はこの問題に取り組み、簡単なモデルを利用して現象の理論的な分析を行った。それにより、局所的に起こる渋滞現象とは異なる、ネットワークレベルでの「マクロな渋滞」についてその発生条件を数理的に明らかにした。また、そこで得られた知見をもとに、ネットワークの流れを制御することでマクロな渋滞を緩和することができることを示した。これらの結果をまとめた学位論文「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)」は以下の六章からなっている。

第一章ではニュートンの法則に従わない自己駆動粒子の流れの特性（密度依存性）について既存研究を紹介しながらその特性を説明した。その上で、ネットワーク上の密度依存輸送と交通網の関連性やその重要性について論じている。加えて、これまでの自己駆動粒子の研究におけるアプローチは粒子一つ一つのミクロな特性から流れのマクロな性質を理解するというものであったが、本論文ではその流れのマクロな性質を出発点にして、それをネットワーク上で考えたときのさらにマクロな振る舞いを明らかにするという方針を述べている。

第二章では、本論文で考察する一般的な数理モデルを定式化している。モデルはネットワーク上の連続の式を元にした自然なものであり、妥当なものであると考えられる。その上でネットワークにある条件（広義釣り合い条件）を課すことにより、定常な流れが存在して一意に定まることを理論的に示している。この条件は以後の議論の基礎として重要な意味をもつ。

第三章ではマクロな渋滞現象を理論的に解析している。まずネットワークの中の一つのノードにおける密度変化の様子を調べ、マクロな渋滞現象の基礎を明らかにした。その後、ネットワーク全体でのマクロな渋滞が起こる条件を数理的に求めた。これにより、ネットワーク全体での平均密度（混雑度）がある点を超えると自発的に密度が不均一化し、流量が低下することが示された。

第四章はここまでの内容を踏襲しながら、このモデルを実データを用いて実際の空港ネットワークに適用することで、流れのダイナミクスについて議論している。これにより、一部の空港に混雑が集中しやすいこと、またそのダイナミクスには空港の大きさ（ネットワークにおける次数）が大きく影響している

ことが明らかになった。この渋滞現象はこれまでに航空網で知られている遅れの伝播とは異なり、実際の航空機の遅れを理解するにあたり新たな知見を与えているといえる。

第五章では、流れの制御がシステムに与える影響を研究している。渋滞現象を緩和するため、実際のシステムではしばしば交通の集中を緩和する方策がとられる。たとえば航空網では行き先の空港が混雑している場合、出発時刻を遅らせるという方法がある。このような制御を行った時に流れのダイナミクスにどのような変化が現れるのか、またその有効性について理解することは応用上非常に重要であるといえる。本研究で提案する制御は、混雑しているノードへのルートに対応するリンクを一時的に閉鎖することにより、混雑集中を緩和するというものである。この制御により三種類の相（自由流相、制御相、閉塞相）が現れ、流れの様子が大きく変化することが明らかになった。制御相ではネットワーク上の流れが改善される一方、閉塞相では流れが完全に止まってしまう。本論文ではこうした特性がどのようにしてもたらされるのか、どのようなパラメータ領域で制御相から閉塞相への相転移が起こるのかを理論的に明らかにしている。

最後に第六章では、以上の結果をまとめ、本研究の有用性、有効範囲、そして今後の発展可能性について、広い意味での関連研究を挙げながら丁寧に論じている。

以上の研究成果は、問題設定の有意義さ、アプローチの新規性、および結果や理論の妥当性、のいずれも十分な水準にあると認められる。本研究は新たな流体力学の応用としても高く評価でき、また一つの応用先として論じられている航空網の流れに関する知見は、航空管制の分野にも資すると考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。