相乗り通勤を考慮したボトルネックモデル

頓所　燎

TAKAYAMA Lab.
金沢大学　理工学域　地球社会基盤学類

1. 研究背景と目的

交通需要の増加による激しい交通渋滞の発生が問題視されています．そこで，近年，交通渋滞を緩和する代替交通手段として"相乗り"が注目されています．"相乗り"とは，同じ目的地あるいは目的地までの道中に他の目的地がある人同士が同じ自動車を利用することです．これにより，渋滞緩和が期待されています．

ボトルネックモデルは，通勤ピーク時の交通渋滞を表現できるモデルです．このモデルはシンプルな枠組みにより多様な政策の影響を分析できるという特徴を有します．それゆえ，現在までに多くの研究がされてきました．しかし，ボトルネックモデルと相乗り通勤を統合した研究は多くありません．

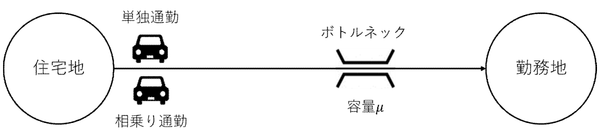
そこで本研究では，相乗り通勤と利用者が多ければ利用しやすい，規模の経済を考慮したモデルを構築し，安定均衡状態の特性を，ポテンシャル関数を用いて明らかにします．そして，社会的最適状態を達成するために混雑料金を導入し，導入後の安定均衡状態の特性を調べることで政策の実現可能性を確認します．

相乗りのイメージ

ライドシェアサービスを提供するUber

2. 出発時刻・通勤手段選択モデル

総数Nの通勤者が住宅地から勤務地への通勤する状況を考えます．住宅地と勤務地を結ぶ道路には，容量μのボトルネックが存在します．本モデルでは，全ての通勤者は同一の勤務開始時刻t^*のもと，1人で通勤するか，2人で相乗り通勤する（各通勤者数：N_s, N_p）かを選択します．



単独ボトルネックを持つネットワーク

ここで，相乗り通勤を行う場合は通勤費用に追加的な費用θ/N_pが生じると仮定します．θに想定されるものとしては，同じ目的地の相乗り通勤者とマッチングする待ち時間や他人との空間を共有することによるプライバシーへの抵抗などがあげられます．また，これはN_pの単調減少関数なので，利用者が多ければ利用しやすいという規模の経済を考慮した項となっています．これを踏まえ，各通勤費用は以下のようになります．

単独通勤費用

$$c_s(t) = \begin{cases} q(t) + \beta(t^* - t) + c_{fuel} & \text{if } t^* \geq t \\ q(t) + \gamma(t - t^*) + c_{fuel} & \text{if } t^* \leq t \end{cases}$$

t：ボトルネック通過時刻　t^*: 勤務開始時刻
$q(t)$: 渋滞待ち時間コスト　c_{fuel}：自動車の燃料費
β, γ：単位時間当たりの早着・遅刻によるスケジュールコスト

相乗り通勤費用

$$c_p(t) = \begin{cases} q(t) + \beta(t^* - t) + \dfrac{c_{fuel}}{2} + \dfrac{\theta}{N_p} & \text{if } t^* \geq t \\ q(t) + \gamma(t - t^*) + \dfrac{c_{fuel}}{2} + \dfrac{\theta}{N_p} & \text{if } t^* \leq t \end{cases}$$

θ: 相乗り不便コスト（相乗りをマッチングするまでの待ち時間や他人と空間を共有することのよりプライバシーの抵抗など

3. 均衡状態の安定性解析

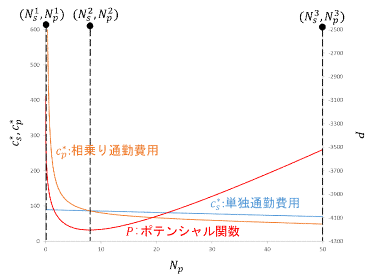
本モデルでは，2段階の均衡状態を考えます．まず，通勤者は手段別の利用者数を既知として，通勤費用を最小とする勤務地到着時刻を選択します（出発時刻選択均衡状態）．そうすることで各均衡通勤費用c_s^*, c_p^*が求まります．次に，通勤者は勤務地到着時刻を既知として，通勤手段を選択します（手段選択均衡状態）．これにより各利用者数がわかります．なお，出発時刻選択均衡状態はただ1つに定まりますが，手段選択均衡状態は複数存在するため，安定性の解析が必要となります．

安定均衡状態の解析手法として，ポテンシャル関数を用います．このポテンシャル関数Pが存在する場合，Pを局所的に最大化するN_s, N_pが安定となることが知られています．そこで，本研究では，構築したモデルに次のポテンシャル関数が存在することを利用して，安定均衡状態の性質を調べます．

ポテンシャル関数

$$P(\boldsymbol{N}) = -\left(\frac{3\delta}{4\mu}N^2 + c_{fuel}\left(N - \frac{N_p}{2}\right) + \theta \ln[N_p]\right)$$

安定均衡状態の結果，全員が単独あるいは相乗り通勤する状態の2つが安定均衡状態であることがわかりました．したがって，単独・相乗り通勤者数 の初期値に応じてどちらかの状態が実現します．



通勤費用とポテンシャル関数

$N^{*1} = (N, 0)$ …安定

$N^{*2} = \left(N - \dfrac{2\theta}{c_{fuel}}, \dfrac{2\theta}{c_{fuel}}\right)$ …不安定

$N^{*3} = (0, N)$ …安定

各パラメータ
$N = 50$　$\beta = 0.8$
$\gamma = 100$,　$\mu = 1$
$c_{fuel} = 50$,　$\theta = 200$

均衡状態での通勤者分布(N_s, N_p)

4. 最適な動的混雑料金

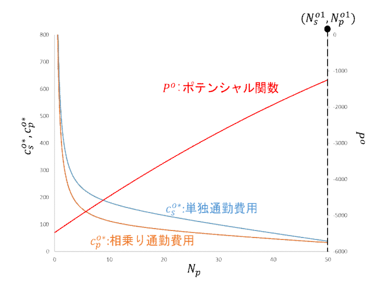
今回，構築したモデルの均衡状態は外部性により，一般的には効率的とは言えません．そこで，総費用最小化問題を解くことにより社会的最適状態（社会全体の費用が最小）が達成されます．

上記の問題を解くことにより，均衡状態と社会的最適状態を一致させるためには，自動車1台当たりに動的な混雑料金$\nu(t)$と規模の経済の影響を内部化するための料金p^lを課します．その後同様に，均衡状態の安定性解析を行います．

ポテンシャル関数

$$P(\boldsymbol{N}) = -\left\{\left(\frac{3}{2}N_s^2 + N_sN_p\right)\frac{\delta}{\mu} + c_{fuel}\left(N - \frac{N_p}{2}\right)\right\}$$

混雑料金導入後もポテンシャル関数の存在を確認でき，同様に安定性解析を行った結果，社会的最適状態が唯一の均衡状態であることが確認できました．したがって，動的な混雑料金導入政策が有効であることがわかりました．



通勤費用とポテンシャル関数

$N^{o1} = (0, N)$ …安定

※今回はパラメータの関係で相乗り通勤が社会的最適状態となりましたが，必ずしも相乗りが最適状態とは限りません．

各パラメータ
$N = 50$　$\beta = 0.8$
$\gamma = 100$,　$\mu = 1$
$c_{fuel} = 50$,　$\theta = 200$

均衡状態での通勤者分布(N_s, N_p)