出発時刻選択問題に対する トライアンドエラー課金

瀬尾亨*　Yafeng Yin**

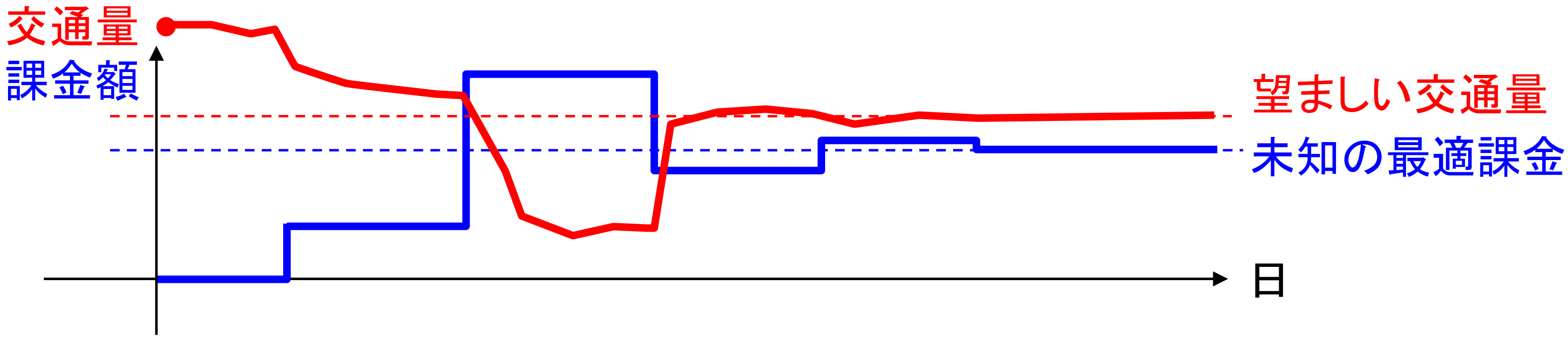
*東京大学
**ミシガン大学

2018-11-24
秋大会＠大分

背景

- 交通混雑は適切な混雑課金によって解消できる
  - 例: 単一ボトルネックでの出発時刻選択問題(Vickrey 1969)
- 適切な混雑課金を直接実施するためには，道路利用者の選好が必要となる
  - 時間価値，スケジュールコスト，需要関数
- しかし，利用者の選好の観測は困難
  - サービス管理者と利用者の間の情報の非対称性
- 観測容易な情報のみに基づく混雑課金が望ましい
  - 交通量
  - 旅行時間

既往研究



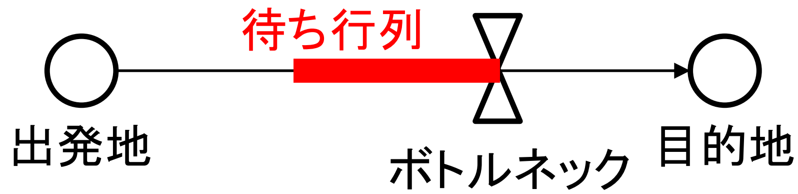
- トライアンドエラー手法：観測可能な情報のみに基づく試行錯誤により最適課金を達成する
  - 適当な課金を実施し，その結果実現する交通状態を観測し，課金額を調整して再実施し，その結果実現する交通状態を観測し，・・・
  - Yang et al. (2004)：静的ネットワーク交通流への適用
  - 動的な交通への適用はなされていない

- 通行券取引：自由市場に供給を調整させる
  - 赤松 (2007)：一般の動的ネットワーク交通流への適用
  - 和田・赤松 (2010)：単一ボトルネック出発時刻選択問題でのday-to-dayダイナミクスの収束性証明
  - システムが複雑

- 本研究の目的：出発時刻選択問題へのトライアンドエラー手法の開発

問題設定

- まずは最も単純な出発時刻選択問題を考える（Vickrey 1969）



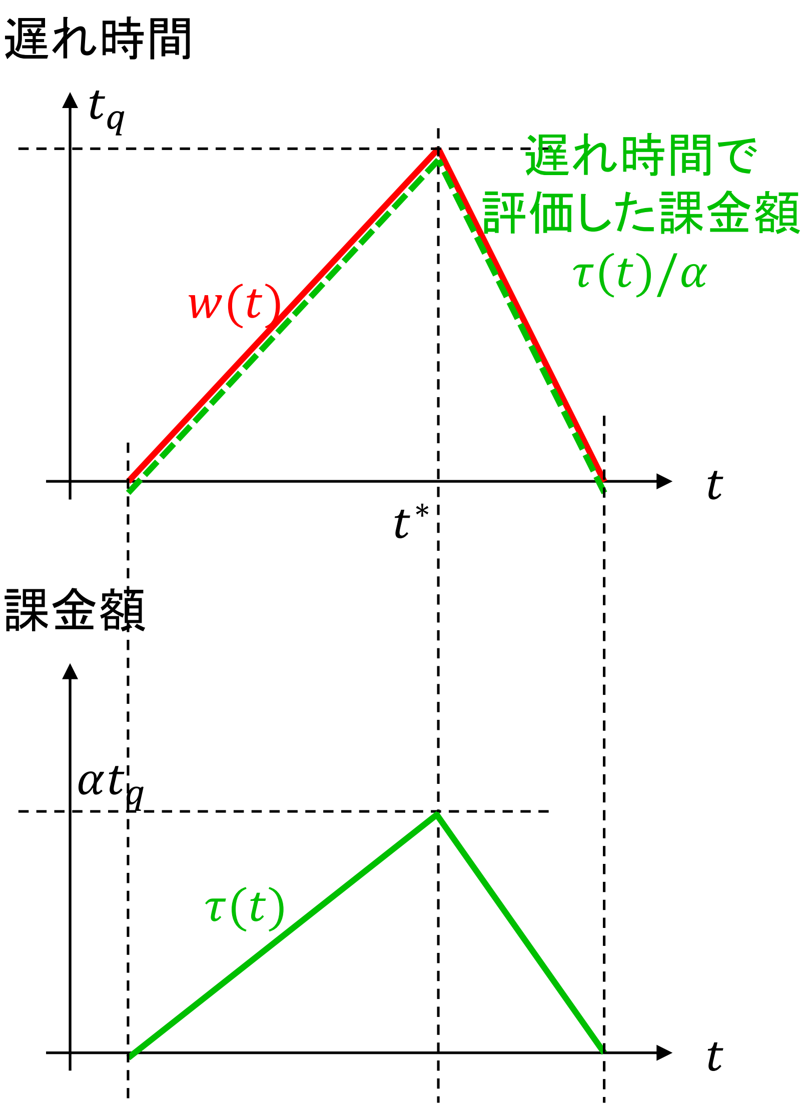
- 単一リンク，単一ボトルネックの道路で均一な旅行者が通勤する
  - ボトルネック容量μ
  - 自由旅行時間ゼロ
  - 総需要一定N
- 旅行者のコスト関数はα-β-γモデル
  - 時間tに目的地に到着する旅行者のコストは

$$c(t) = \alpha w(t) + \beta(t^* - t) + \tau(t) \quad （早着時：t < t^*）$$
$$c(t) = \alpha w(t) + \gamma(t - t^*) + \tau(t) \quad （遅着時：t > t^*）$$

  - ただし，
    - α：時間価値
    - β：早着コスト
    - γ：遅着コスト
    - t^*：希望到着時刻
    - $w(t)$：時刻tの遅れ時間
    - $\tau(t)$：時刻tの混雑課金額

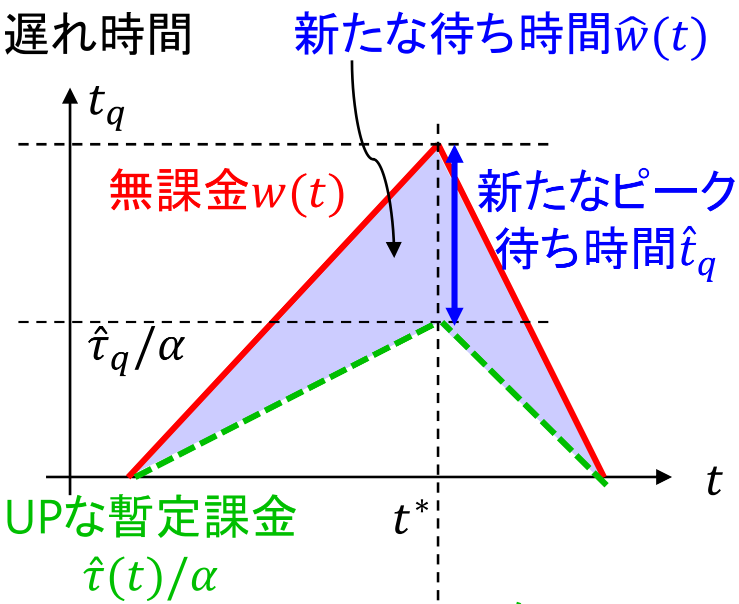
- 交通は常に均衡状態にあると仮定する＝day-to-dayダイナミクスは考慮しない
  - 均衡は不安定との結果（Iryo 2018）が出ているが，本報告ではスコープ外

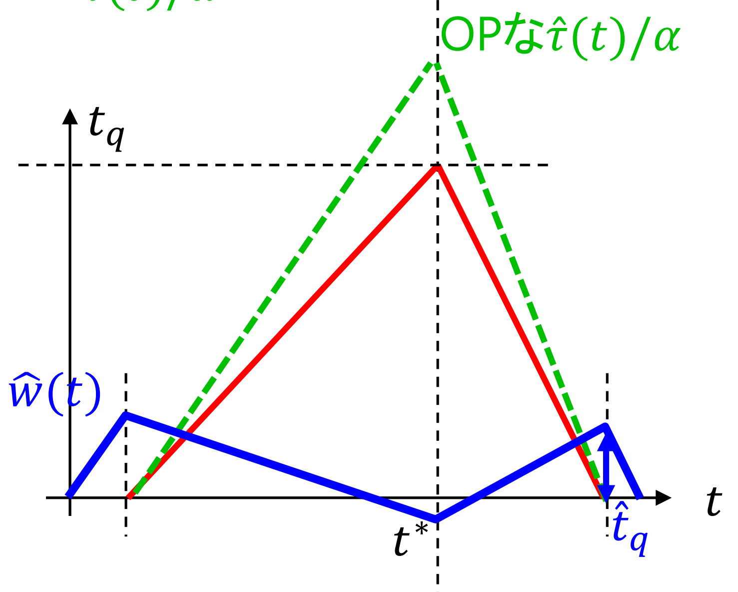
非課金UEとSO



- 基本的な知見（Vickrey 1969）
- 課金額がゼロのとき，UEでは三角形状の渋滞が起きる
  - ピーク時待ち時間：t_q
- SOを達成するには，ピーク時課金額$\tau_q = \alpha t_q$で三角形状の混雑課金を実施し，渋滞をなくす
  - 課金と非課金UEの待ち時間は同価値
- 情報の非対称性
  - αは未知なので，直接SOは達成できない！
  - $w(t)$は観測可

トライアンドエラー手法



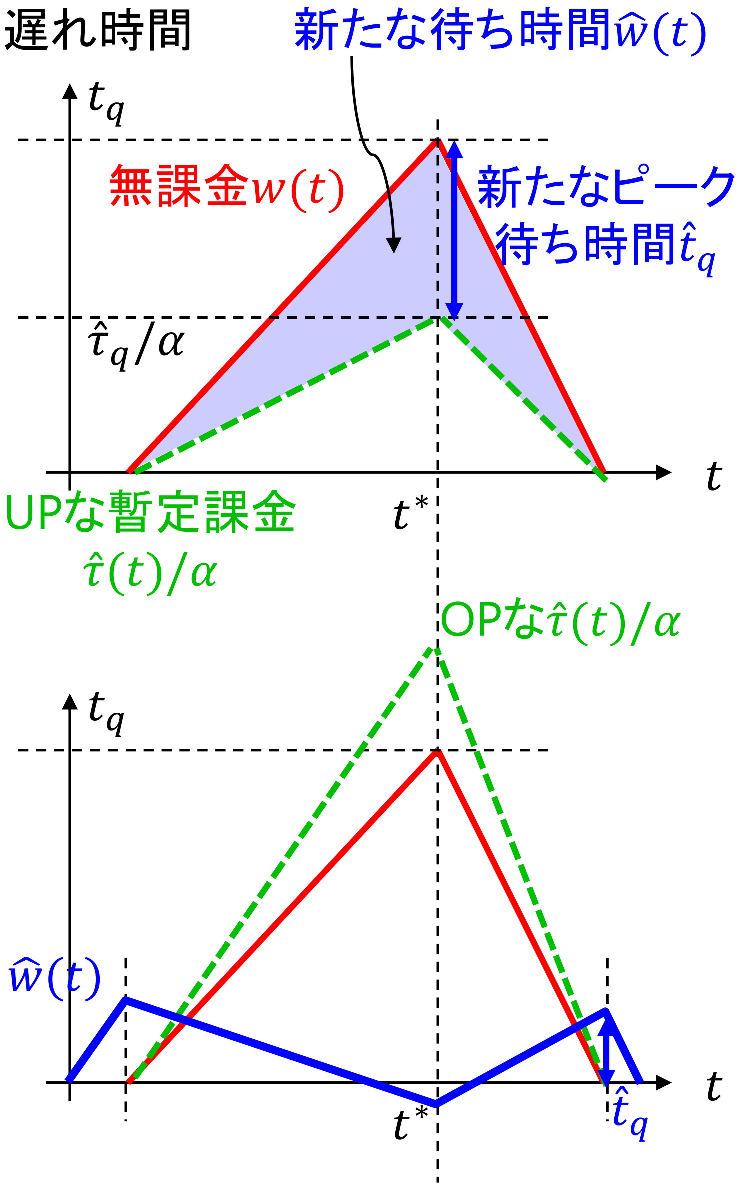


- 三角形状で適当な高さ$\hat{\tau}_q$の暫定課金を考える
- 以下の3つに場合分けできる
  - 最適課金
  - 安すぎる課金（UP: underpriced）
  - 高すぎる課金（OP: overpriced）

- UPの場合（$\hat{\tau}_q/\alpha < t_q$）
  - 混雑は完全には解消されない
  - 新たな三角形状渋滞が発生する：ピーク$\hat{t}_q$
  - $t_q = \hat{t}_q + \frac{\hat{\tau}_q}{\alpha} \Leftrightarrow \alpha = \frac{1}{t_q - \hat{t}_q}\hat{\tau}_q$

- OPの場合
  - ピーク時には課金額が高すぎて交通が流れなくなる
  - 課金開始時と終了時をピークとした二つの待ち行列が発生する
  - $\alpha = \frac{t_q - \hat{t}_q}{t_q^2}\hat{\tau}_q$

トライアンドエラー手法



- UP，OPいずれも，課金前・後の旅行時間と課金額から時間価値αを導出できる
- 次のステップでSO課金を実施できる
- 本手法は，1回のトライを経て最適課金を必ず達成する
  - 理論上最小のトライ回数であり，効率的
  - とても単純な手法だが，過度な単純化はない

拡張：単純な場合

- 異なる希望到着時刻
  - ほぼそのまま適用できる
  - OPになった時のαの算出法は変える必要

- 関数形が未知の非線形スケジュールコスト
  - ほぼそのまま適用できる
  - OPになった時のαの算出法は変える必要

- 関数形が未知の非線形待ち時間コスト
  - 1トライアルで区分近似なSO課金を発見できる
  - ただし，トライ課金がUPである必要

- 未知の弾性需要のもとでの1ステップ（次善）課金
  - 1トライアルでαを算出できる
  - 総需要の最適化はYang et al. (2004)同様の繰り返しアルゴリズムを適用＝実時間がかかる

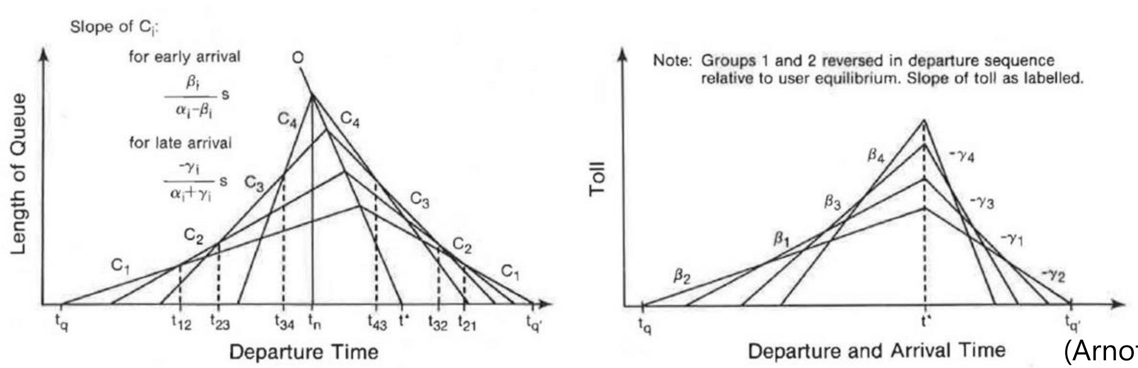
拡張：α, β, γに異質性がある場合

- それぞれの旅行者が異なる選好を持っている場合
  - 旅行者の異質性を直接観測するのは非常に困難

- ホワイトカラー vs ブルーカラー異質性（Arnott et al. 1988）
  - 早着コストと遅着コストの比は全旅行者で同一と仮定：$\frac{\beta_m}{\gamma_m} = \frac{\beta_l}{\gamma_l}$
  - つまり，全旅行者は早着より遅着を同じ程度に嫌う
  - 希望到着時刻は同一

- 前述のトライアンドエラー手法は使えない
  - 課金なしの場合と最適課金の場合で旅行者の到着順序が一般には異なるため

- 以後，早着の場合のみを考える
  - 早着と遅着は対称であり，同様の議論が成り立つので省略
  - 遅着が許されず，一般の異質性がある場合とも解釈できる

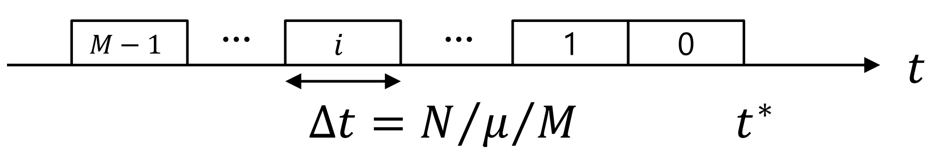


(Arnott et al. 1988)

問題設定

- 旅行者をMクラスに分ける
  - クラスmの構成者は同一の$\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$を持つ
  - 各クラスの構成人数は同一で，そのうちN人が早着する
  - クラス間でα, β, γが異なるとは限らない
    - よって，一般の構成人数を近似できる
    - が，議論を単純にするため異なると仮定する
  - クラス番号mはβ_mが大きい順につける

- 時間をM個の枠に分ける
  - 時間帯番号iは遅い方から順番につける
  - i番目の時間帯に属する時間の集合をT_iとする
  - 無課金UEやSOの場合，各枠内で単一クラスが到着する
  - SOの場合，mが小さいほど遅く到着する

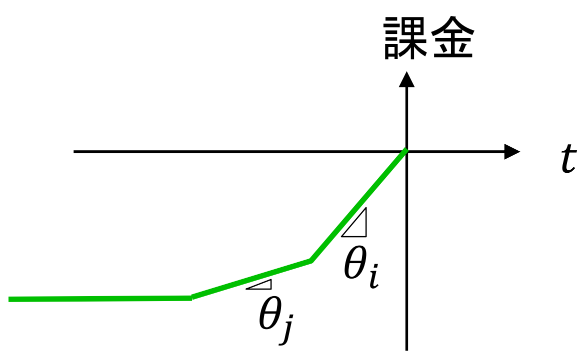


準備：課金を考慮したisocost curve

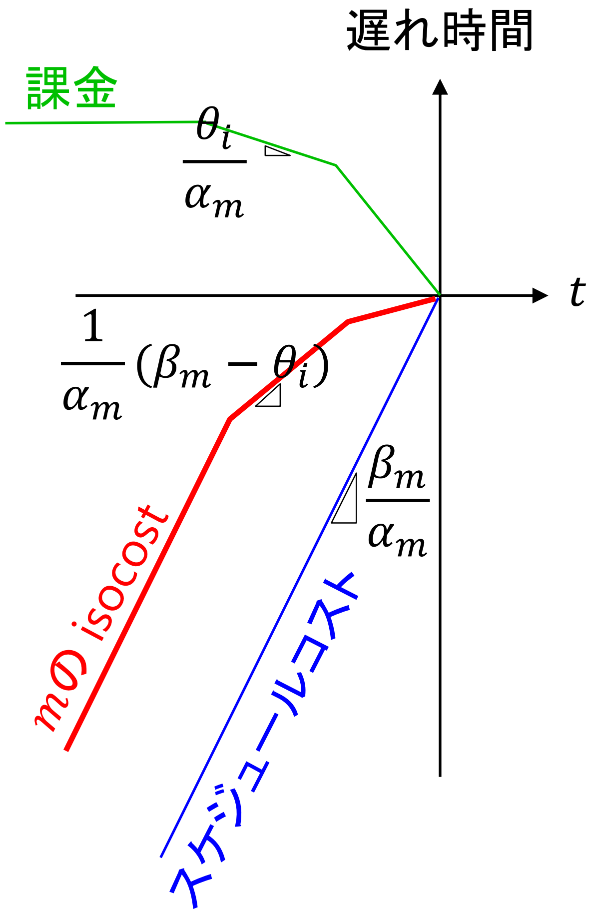
- トライアンドエラー手法では，非SOな課金の下でのUEを求める必要があるので，そのための手法を用意する

- クラスmの遅れ時間ベースのコスト関数
  - $c_m(t) = w(t) - \frac{\beta_m}{\alpha_m} t + \frac{1}{\alpha_m} \tau(t)$

- 課金額$\tau(t)$は以下を満たす連続な区分線形関数と仮定
  - $\tau(0) = 0$
  - $\tau'(t) = \theta_i \quad (\forall t \in T_i)$
  - $\theta_i \geq 0$
  - $\theta_i \geq \theta_j \quad (\forall i < j)$
- SO課金は$\theta_i = \beta_i \ (\forall i)$のとき

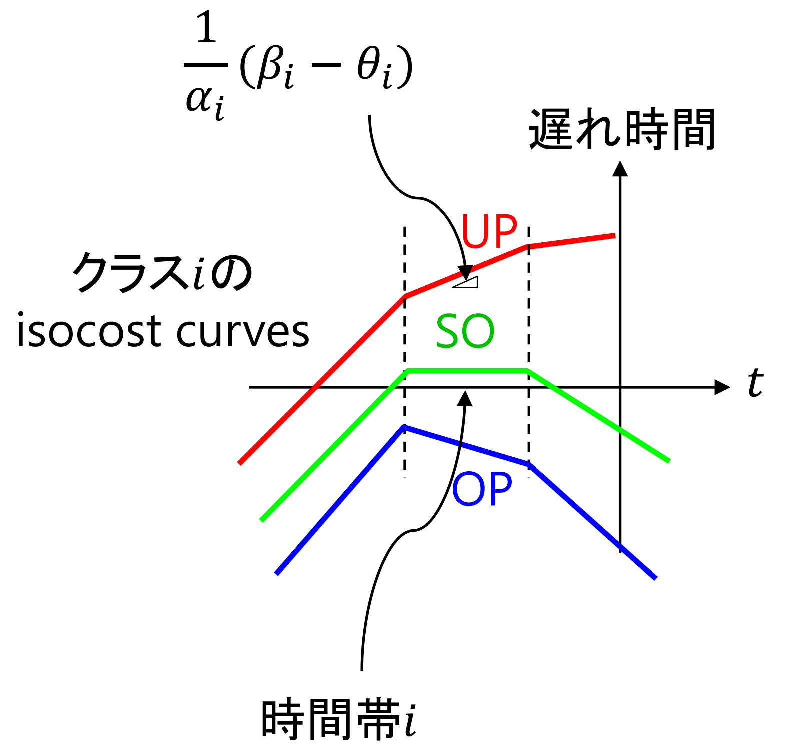


- クラスmの修正isocost curve
  - $d_m(t) = \frac{\beta_m}{\alpha_m} t - \frac{1}{\alpha_m}\tau(t)$
- 以下の性質を持つ
  - $d_m(t) = 0$
  - $d'_m(t) = \frac{1}{\alpha_m}(\beta_m - \theta_i) \quad (\forall t \in T_i)$
  - 上に凸
- これをisocost curveと見なしたマルチクラス出発時刻選択問題は必ず唯一均衡を持つ（Lindsey 2004）
  - よって，トライアルの過程でも必ず均衡解が存在する



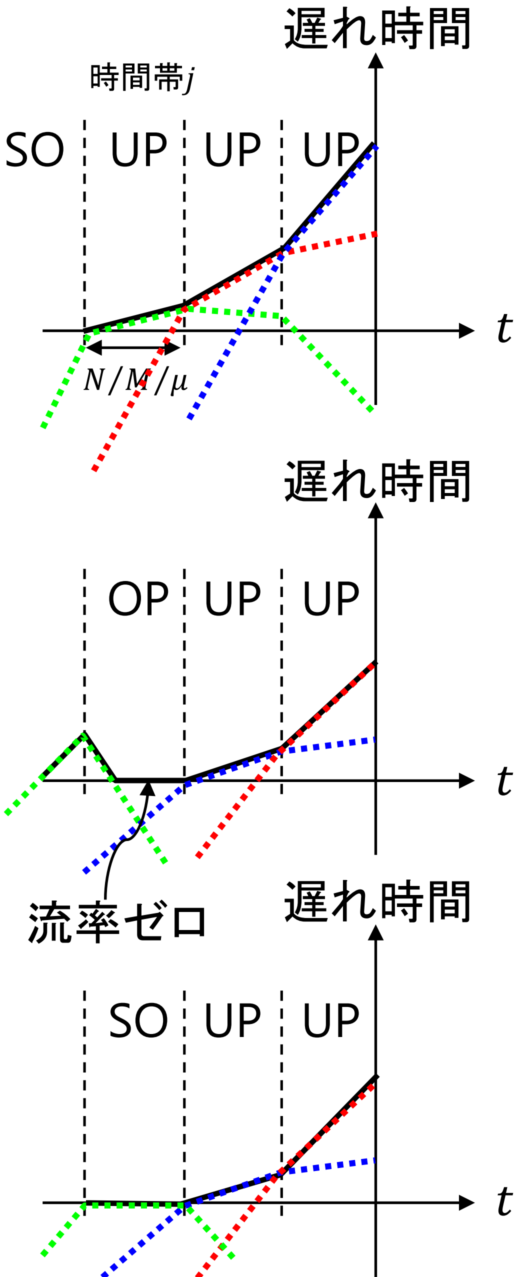
準備：課金を考慮したisocost curve

- クラスmのisocost curve（再掲）
  - $d_m(t) = \frac{\beta_m}{\alpha_m} t - \frac{1}{\alpha_m} \tau(t)$
- 時間帯iが局所的にSO
  - $\theta_i = \beta_i$: SOでそこに到達すべきクラスに対する課金額の傾きがSOと等しい
  - クラスiのisocost curveの傾きd_i'がゼロ
  - 全てのiが局所的SOであれば，全体もSO
- 時間帯iが局所的にOP（overpriced）
  - $\theta_i > \beta_i$
  - 傾きd_i'が負
- 時間帯iが局所的にUP（underpriced）
  - $\theta_i < \beta_i$
  - 傾きd_i'が正



- 性質
  - 時間帯iが局所的OPのとき，それ以降の時間帯のisocost curveの傾きd_j'も負
  - 同UPのとき，それ以前の時間帯の傾きd_j'も正
  - 時間帯iが局所的OPのとき，クラスiより忙しくないクラス（$l > i$）の当該時間帯のisocost curveの傾きd_l'も負
  - 同UPのとき，iより忙しいクラスの傾きd_i'も正

トライアルアンドエラー手法



- 以下の状態を考える
  - 時間帯jより前は局所的SO
  - 時間帯jより後は局所的UP
  - 時間帯jの課金額θ_jを調整したい

- 調整後のθ_jが局所的UPの場合
  - 質的には変化しない
- 調整後のθ_jが局所的OPの場合
  - 流率ゼロの時間が必ず発生する
- 調整後のθ_jが局所的SOの場合
  - 流率＝容量が達成される

- この調整を，t^*から離れた時間帯から繰り返し適用すれば，SO課金に収束する

まとめと今後の課題

- 情報の非対称性のもとでも，基本的な出発時刻選択問題はトライアンドエラー手法で混雑課金を最適化できる
- 均一な旅行者の場合，1回のトライアルを経て最適化できる＝効率的
- β/γが一定の異質性がある場合，繰り返しアルゴリズムで最適化できる
  - 外側（ピーク時から遠い時間帯）から渋滞を消していく手法
  - 内側から渋滞を減らしていく手法は難しい：局所的なOPを識別するのが難しいため
  - 実際には，day-to-dayダイナミクスの収束を待つ必要があるため，（収束するとしても）非現実的な時間がかかる

今後の展開

- 一般の異質性
  - 早着と遅着の間で旅行者が遷移しうるので，本論文のアプローチは使えない
- 異質性のある場合に，より早く収束するアルゴリズムの構築
  - 課金額を外側から順番に調整するだけではなく，内側の課金額も同時に調整する
- day-to-dayダイナミクスの考慮
  - 素朴な手法としては，井料（2017）の安定化課金と併用すればよいが・・・
- 強化学習の検討

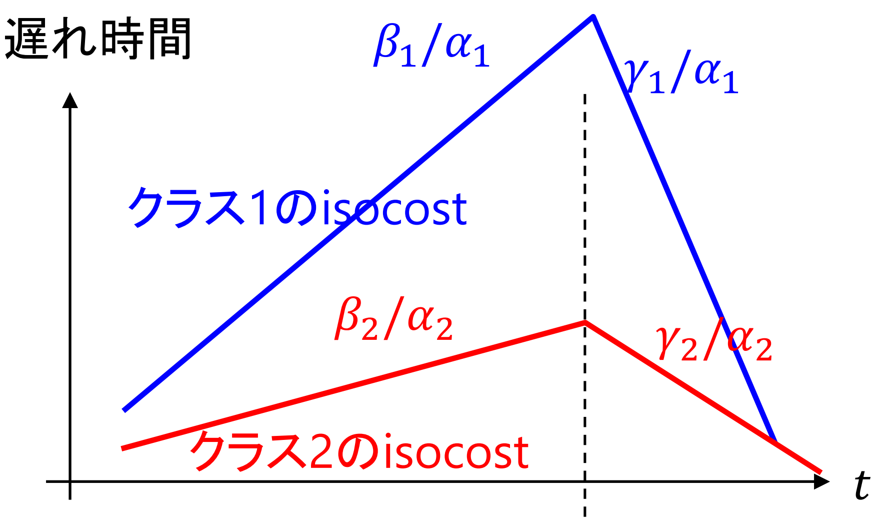
補足：Vickreyは知っていた？

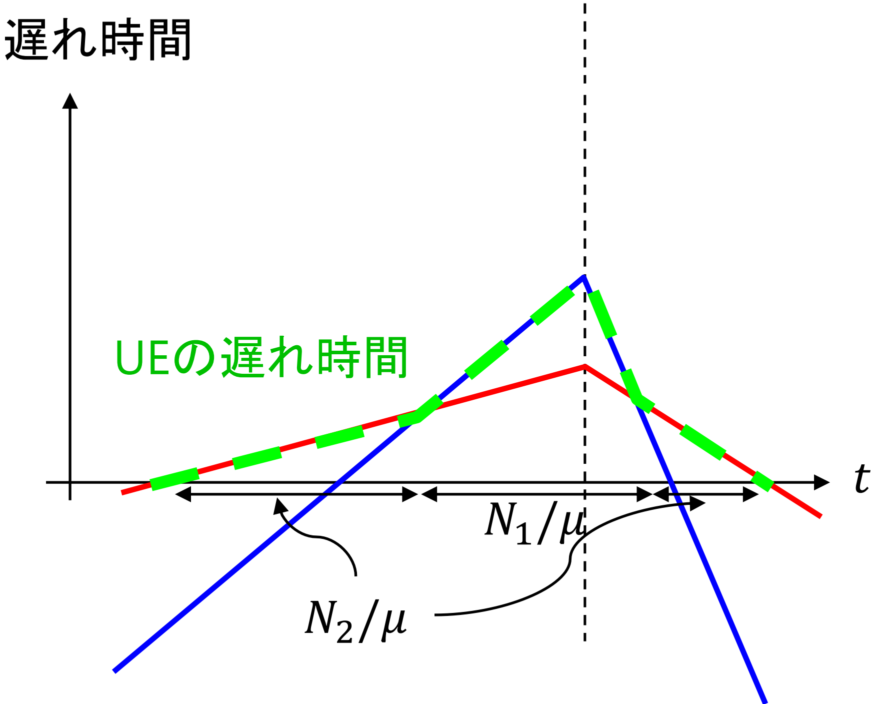
「橋やトンネルで待ち行列が生じている場合，その遅れ時間を適当な時間価値で乗じ，時間変動料金として課す．その後，渋滞が残っている時間帯の料金は高く，流率が容量を下回っている時間帯の料金は安くするよう調整する」

—W.S. Vickrey, 1993

（瀬尾による私訳）

補足：マルチクラス出発時刻選択問題の解法





- isocost curve法
  - 詳細は，例えばLindsey (2004)

- isocost curve：遅れ時間ベースのスケジュールコスト関数を反転したもの
- 課金がない場合，UEでは以下が成立
  - 遅れ時間＝isocost curve-定数
  - これは均衡条件と等価

- マルチクラス問題の解法
  - クラスごとのisocost curveを，適当な高さに描く
  - ある時刻に，最も高く位置するisocost curveが存在する．その時刻は，そのクラスの交通流が流れる
  - 各クラスの総交通量が需要と一致するようにisocost curveの高さを調整する
  - 全isocost curveの上側包絡線が実際の待ち時間になる