

Vickrey, W.S.,

Congestion Theory and Transport Investment

The American Economic Review,
Vol.59, pp,251-260, 1969

理論談話会2019 #5

M1 出原昇馬

2019/5/31

- 新たな交通事業をおこなう際、事業の過大評価/過小評価がなされてしまうと意図しない影響を生じる恐れがある。
- 特に道路混雑解消施策においては、**システム全体を考慮せず、利用者便益を局所的に扱ってしまう**と、事業の失敗につながってしまう。
- 本論文では**混雑(congestion)のメカニズムを定式化**し、混雑への対処として**容量拡張などのハード的な施策から、経路課金施策などのソフト的な施策**による対応策を検討し、評価を行う。

1. Simple interaction

- 二車間の距離が近く，衝突を回避するために減速.
- 低密度の時に生じやすい.
- 総遅延(total delay)は交通量の2乗に比例.
- **交通流への参加による遅延の増分 = 自身が受ける遅延**

2. Multiple interaction

- 密度が高く，容量が不足しているとき.
- 平均遅延時間は

$$z = t - t_0 = \frac{1}{s} - \frac{1}{s_0} = ax^k$$

z : 単位車両あたり平均遅延時間

t : 実条件下での単位距離所要時間

t_0 : 非混雑時の単位距離所要時間

s : 平均速度(= $f(x)$)

x : 交通量

a, k : パラメータ

- **交通流への参加による遅延の増分 = 自身 + 周囲に与えるの遅延**

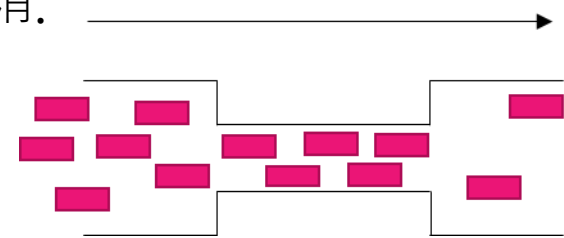
$$\frac{d(zx)}{dx} = z + x \frac{dz}{dx} = ax^k + xakx^{k-1} = \underline{(1+k)z}$$

総遅延の増分

他者に対しても kz の遅延が負荷

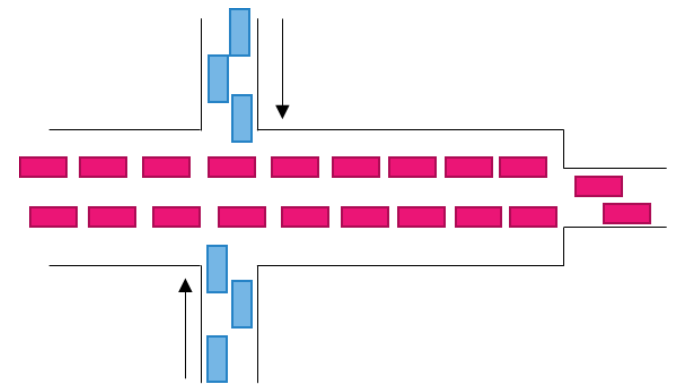
3. Bottleneck

- ある区間が前後の区間と比べて交通需要に対して容量が小さいとき.
- **ボトルネックの容量を超過する交通量が継続する場合, 待ち行列(queue)が発生.**
- ピーク経過 or 通過時刻・経路の変更により解消.



4. Triggerneck

- ボトルネックから生じた待ち行列が周囲の交通流を妨げる.
- **交通の循環が完全に停止.**



5. Network and control congestion

- ピーク時の交通量に対する規制措置（標識，通行規制，信号制御）がオフピーク時に混雑，遅延を生じてしまう．

6. General density

- 長期的な混雑コストは，対象地域内での全ての交通手段，全ての経路における交通密度の関数．
- 新規の交通整備は既存交通基盤により何かしらの制約を受けているのに加え，将来の交通整備に影響を及ぼす（＝建設コスト増）．

混雑コストとしての事故

混雑コスト

1. 遅延コスト

：混雑による時間損失

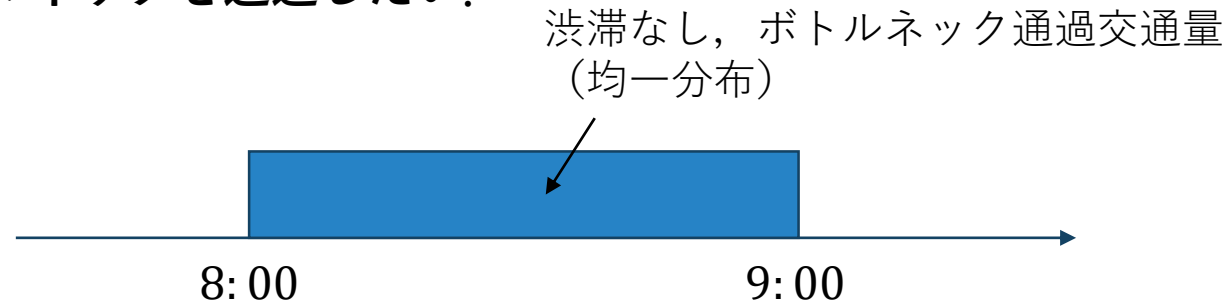
2. 事故コスト

：混雑により車両間の相互作用が増すと事故の頻度も増加.

交通量の増加や、公共交通機関から自動車への転換に対する安全性を考慮する必要性

想定するシチュエーション

- $N=7200$ 台の通勤者がボトルネック部分を通過.
- 目的地に各自の希望到達時刻に到着するために、 $t_a = 8:00$ から $t_b = 9:00$ の間にボトルネックを通過したい.



- ボトルネック容量が120台/分以上あれば渋滞は起こらない ($7200 \text{台} \div 60 \text{分}$) .
これを下回ると渋滞発生.
- **渋滞発生時**は全員が希望到達時刻に目的地に到達することは不可能
= **目的地到着が早まる or 遅くなる**
- 例えば,
希望到達時刻に到着したい人：待ち行列にいる時間長い
希望到達時刻より早い到着を選択した人：待ち行列にいる時間短い + 目的地で暇

ボトルネック通過時刻変化に対する渋滞待ち時間の変化

- すべての通勤者は**均一な時間価値**をもつ
 - $w_h = 2 \text{ cent/min}$ (家)
 - $w_o = w_p = 1 \text{ cent/min}$ (勤務地, 始業時刻前)
 - $w_o = w_j = 4 \text{ cent/min}$ (勤務地, 始業時刻後)
 - $w_q = 0 \text{ cent/min}$ (待ち行列)

個人は時間価値の総和を最大にしようとする.

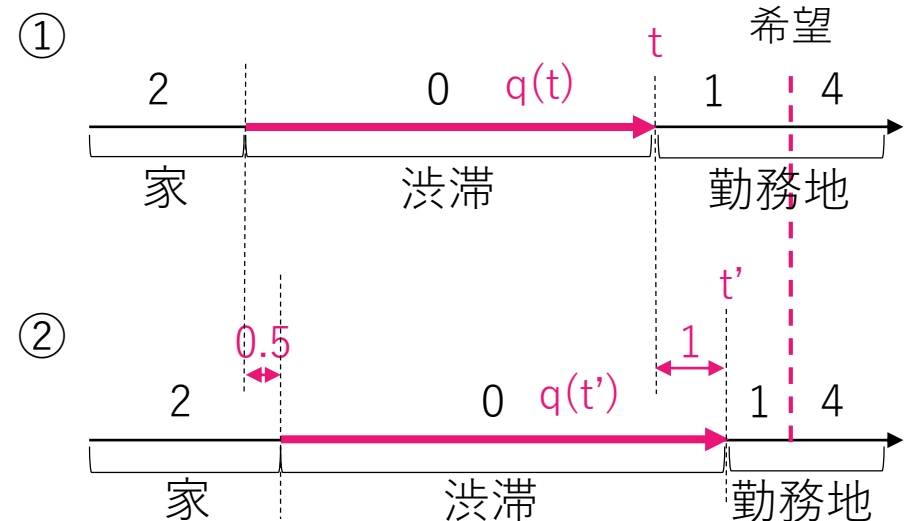
||

何時に渋滞に加わる人も全体の価値は一定

- 希望通過時刻より前に渋滞を抜ける場合**

- ①と②の時間価値の総和は等しい.
- 渋滞抜け時刻 t が単位時間遅れると($t \rightarrow t'$), **渋滞待ち時間 $q(t)$ は0.5分増える.**

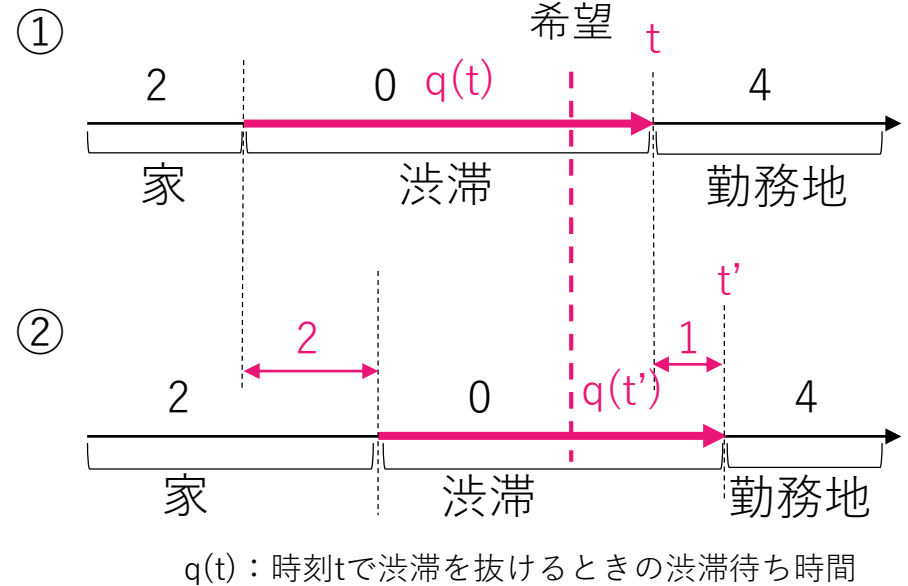
左の例では, ① \rightarrow ②で勤務地到着が1分遅れる($1 \times 1 \text{ min} = 1$ の価値減少)の代わりに, 家出発が0.5分遅れる($2 \times 0.5 \text{ min} = 1$ の価値増加).



$q(t)$: 時刻 t で渋滞を抜けるときの渋滞待ち時間

- 希望通過時刻より後に渋滞を抜ける場合

- ①と②の時間価値の総和は等しい.
 - 渋滞抜け時刻 t が単位時間遅れると($t \rightarrow t'$), **渋滞待ち時間 $q(t)$ は1分減る.**
- 左の例では, ① \rightarrow ②で勤務地到着が1分遅れる($4 \times 1\text{min} = 1$ の価値減少)の代わりに, 家出発が2分遅れる($2 \times 2\text{min} = 4$ の価値増加).

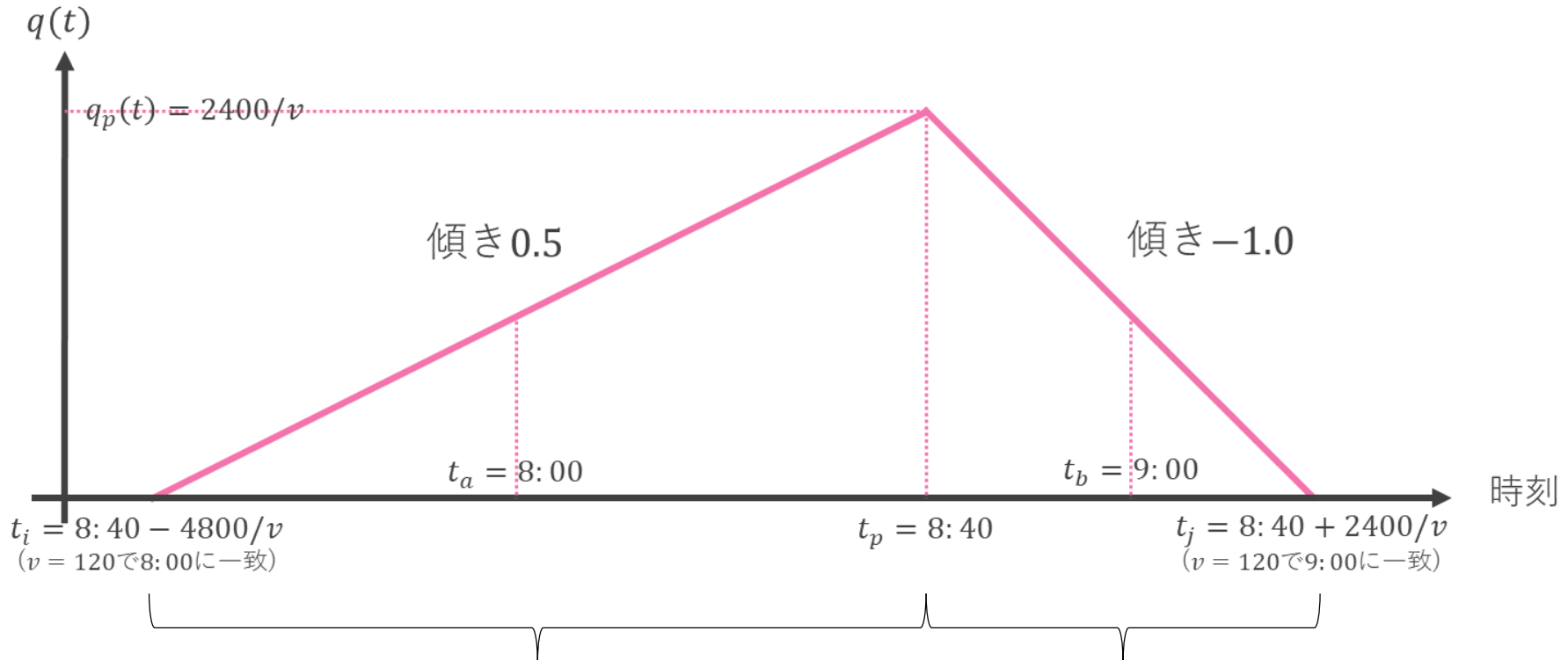


- 渋滞が形成される総時間は, 交通容量 v に対して7200台が掃ける時間

$$\frac{N}{v} = \frac{7200}{v}$$

- 以上より渋滞待ち時間と渋滞抜け時刻のグラフは

渋滞待ち時間



各自の希望到達時刻かそれ以前に通過 各自の希望到達時刻かそれ以降に通過

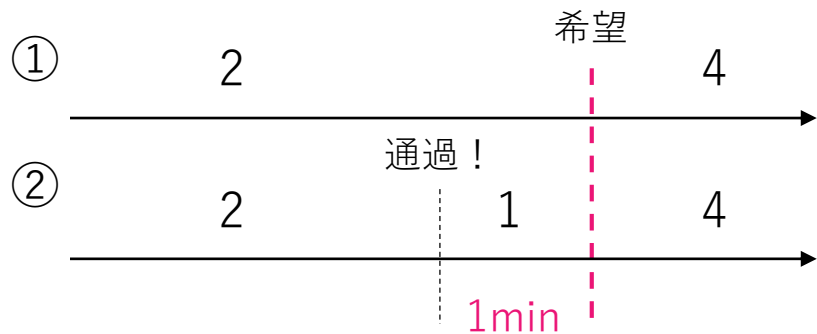
- このモデルでは $v=120$ 付近で不連続となるので、近傍の扱いに注意.
- 一様な需要分布が現実とは離れている可能性がある点も注意.

交通課金施策の検討

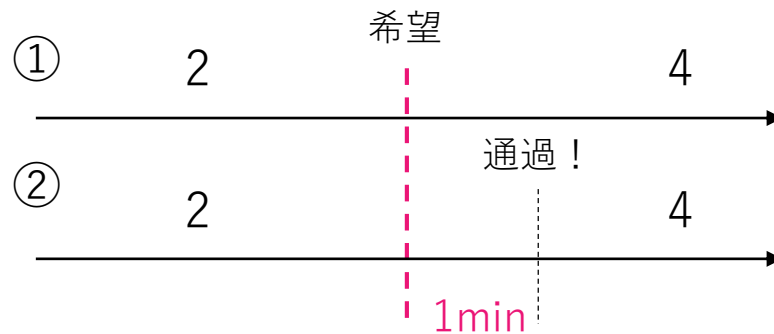
- 現実的には道路交通需要は年々変化しており、需要に応じた容量増加施策などは過大投資/過少投資に陥る可能性がある。
- 道路インフラの利用をコントロールする仕組みが必要
→ **調整が容易である交通課金施策(pricing)の有効性**

- ボトルネックの緩和のための交通課金は可変。
- 交通課金により得られた収益は、既存の有料道路の通行料金を削減するのに用いられるのが、車利用者にとって望ましい。

- 渋滞がない状況においてボトルネック通過時刻をずらした人とそうでない人との間に発生する**時間価値の差分を課金により解消**

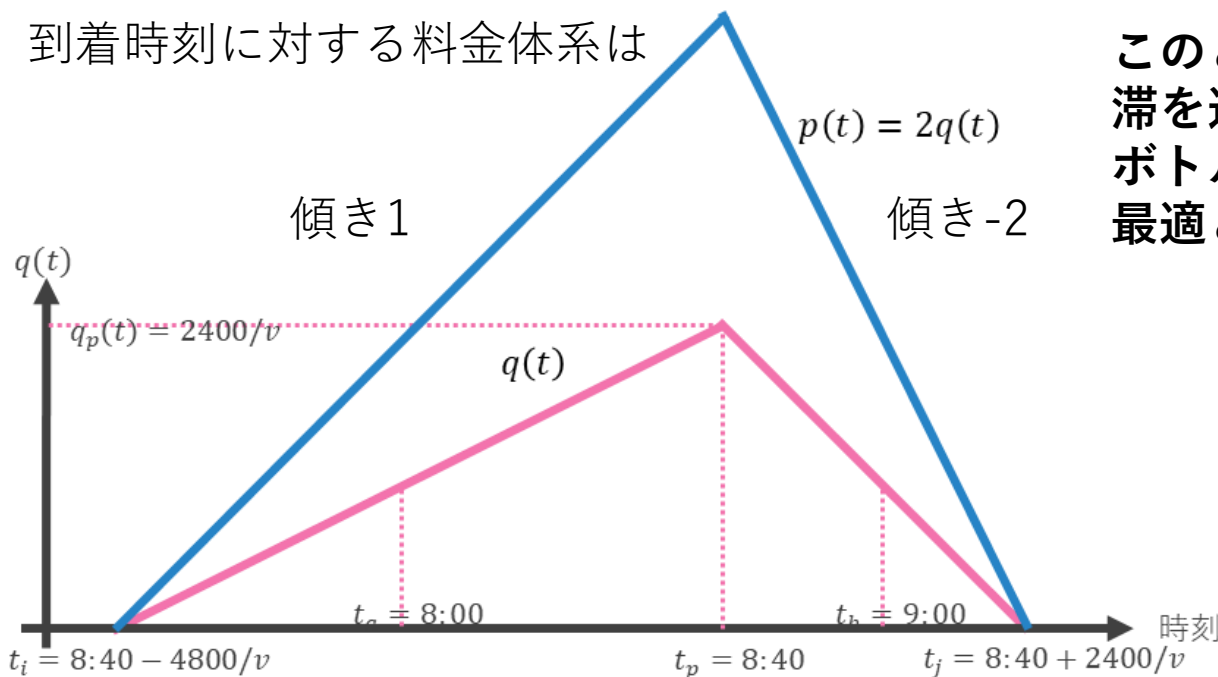


通過時刻をずらすことで時間価値が1減少



通過時刻をずらすことで時間価値が2減少

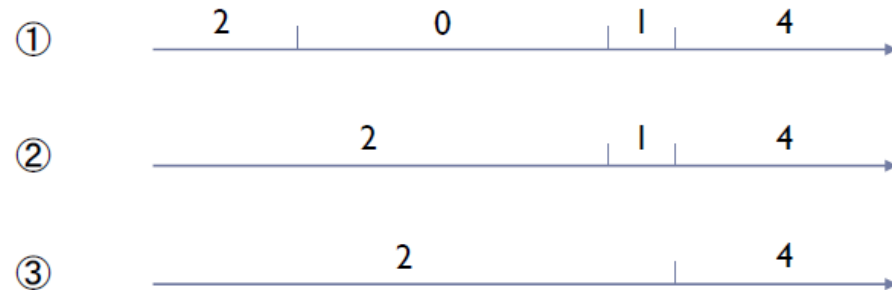
- 到着時刻に対する料金体系は



このとき課金のない場合に渋滞を通過する時刻と同時刻にボトルネックを通過するのが最適となる。

渋滞待ち + 課金なし
↓
渋滞なし + 課金あり

- これまでの状況を整理すると



- ①: 課金なし + 渋滞待ち (**waiting in queue**) (× 希望時刻通過 (**displaced arrival**))
- ②: 課金あり (**toll rev.**) + 渋滞なし (× 希望時刻通過 (**displaced arrival**))
- ③: ボトルネック容量の拡大により希望到達時刻に近づく

渋滞待ちのコスト (**waiting in queue (=toll rev.)**)は

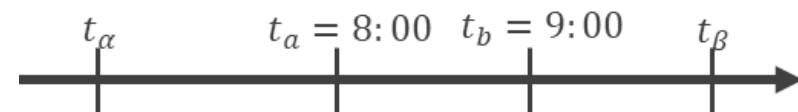
$$\int v \times 2q(t) dt = 2v \times \frac{1}{2} \times \frac{7200}{v} \times \frac{2400}{v} = \frac{17280000}{v}$$

到着時刻のずれのコスト (**displaced arrival**)は

$$Nr(t_a - t_\alpha)(w_h - w_p)/2 + N(1 - r)(t_\beta - t_b)(w_j - w_h)/2$$

$$= N^2 r \frac{1 - r}{2} (w_j - w_p) \left[\frac{1}{v} - \frac{1}{v_w} \right]$$

$$= \$1440 \frac{120 - v}{v}$$



- $(t_a - t_\alpha)/2$: 平均先着時間
- $w_h - w_p$: ずれによる時間価値の喪失分
- $(t_b - t_\beta)/2$: 平均後着時間
- $w_j - w_h$: ずれによる時間価値の喪失分

旅行者はボトルネックを通過するのに以下のコストを支払っていると考えられる。

渋滞待ちのコスト(**waiting in queue (=toll rev.)**)は

$$\int v \times 2q(t) dt = 2v \times \frac{1}{2} \times \frac{7200}{v} \times \frac{2400}{v} = \frac{17280000}{v}$$

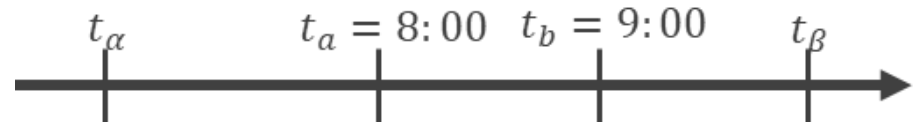
↑ 単位時間台数 (=交通容量) ↑ 課金額

到着時刻のずれのコスト(**displaced arrival**)は

$$Nr(t_a - t_\alpha)(w_h - w_p)/2 + N(1 - r)(t_\beta - t_b)(w_j - w_h)/2$$

$$= N^2 r \frac{1 - r}{2} (w_j - w_p) \left[\frac{1}{v} - \frac{1}{v_w} \right]$$

$$= \$1440 \frac{120 - v}{v}$$



- $(t_a - t_\alpha)/2$: 平均先着時間
- $w_h - w_p$: ずれによる時間価値の喪失分
- $(t_\beta - t_b)/2$: 平均後着時間
- $w_j - w_h$: ずれによる時間価値の喪失分

容量拡大施策 vs 課金施策

TABLE 1

$$\$1440 \frac{120 - v}{v} \quad \$ \frac{17280000}{v}$$

Capacity (cars per minute)	Equivalent Number of Lanes	Duration of Queue or Toll (minutes)	Maximum Wait in Queue (minutes)	Average Toll Rate (cents)	Congestion Cost (\$/day)		
					Displaced Arrival	Waiting in Queue (=toll rev.)	Total without Pricing
50	1.67	144.00	48.00	48.00	2016	3456	5472
60	2.00	120.00	40.00	40.0	1440	2880	4320
70	2.33	102.9	34.29	34.3	1029	2469	3498
80	2.67	90.0	30.00	30.0	720	2160	2880
90	3.00	80.0	26.67	26.7	480	1920	2400
100	3.33	72.0	24.00	24.0	288	1728	2016
110	3.67	65.6	21.91	21.9	131	1571	1708
115	3.83	62.6	20.87	20.9	63	1503	1566
118	3.93	61.0	20.33	20.3	24	1464	1488
119	3.97	60.5	20.17	20.2	12	1452	1464
119.999	4.00-	60.0	20.00	20.0	0.12	1440	1440
120.001	4.00+	0	0	0	0	0	0

- はじめ2車線で交通容量 $v=60$ のボトルネックを考える。
- 1車線増やすのに\$2000かかる。
- 1車線増やす→\$2000かかり\$1920の総コスト削減：**\$80のロス**
- 2車線増やす→\$4000かかり\$4320の総コスト削減：**\$320のゲイン**
- 車線を増やさず課金tollを導入：**\$2880の削減=事業者の収入**

- 現実にはボトルネック希望通過時刻は一様分布ではない.
- 時間価値も個人によって異なる.
- 交通需要自体も混雑状況や課金額によって変化する.

- but, 交通事業を行う上で, **適切なプライシングによりインフラの効率性を高める**ことができる可能性は考慮すべき点である.

- ボトルネックルートと、容量が大きい迂回路がある場合を考える.
- 課金をしていない状態だと2つのルートのコストが等しくなるように利用者は配分される.
- この場合、ボトルネックの容量を増やしても、迂回路からボトルネックに交通が移動し、渋滞の解消に至らない場合がある.

「交通はときに人口のようにふるまう」

人口：飢餓が起こるまで増加する

交通：混雑が起こるまで増加する

課金以外の選択肢について

- 現状維持
- 都心へのアクセス道路の整備
 - ：交通状況改善という点で投資効果が低い。
- 都心への巨大幹線道路の整備（周囲の交通も加味）
 - ：巨額の整備費用，周辺の生活環境への影響

- **ロードプライシングは需要に合わせて変えられるため，アクセス道路と課金を同時に行うことで，通過交通を迂回させながら都心へのアクセスを確保することが望ましい**

時間価値の相違

- 個人ごと、時刻ごとに時間価値は異なる.
- 容量拡張は道路の使用頻度に依らず、個人に同程度に負担させている
- **ロードプライシングでは自分で支払額を調整することが可能**
(時間価値の低い利用者は迂回する.)
- ただし、プライシングは貧困層を排除しているという批判もある.
→補助金を設けるなどの施策が必要

混雑緩和における投資評価

- 投資評価の明白性が重要

おまけ

ロードプライシングの基本事項



①需要曲線：私的便益 = 支払意思額 = 社会的限界便益

- ・ちょうどその高さの費用を支払えるくらいの便益
- ・ある交通量までの需要曲線の下面積は社会的総便益

②私的費用 = 社会的平均費用

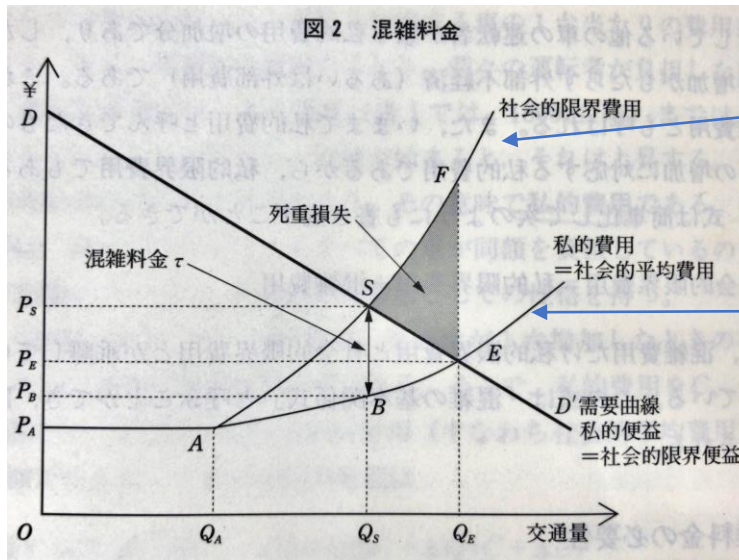
- ・この運転者が負担する費用(金銭的走行費用(円) + 走行時間(分) × 時間価値(円/分))
- ・混雑が始まると上昇を始める(点A)

システム最適 (SO)

$$\min Z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} \left(t_a(w) + w \cdot \frac{dt_a(w)}{dw} \right) dw$$

利用者均衡 (UE)

$$\min Z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$



ロードプライシングの基本事項



・私的便益と私的費用との交点Eまで交通が行われる

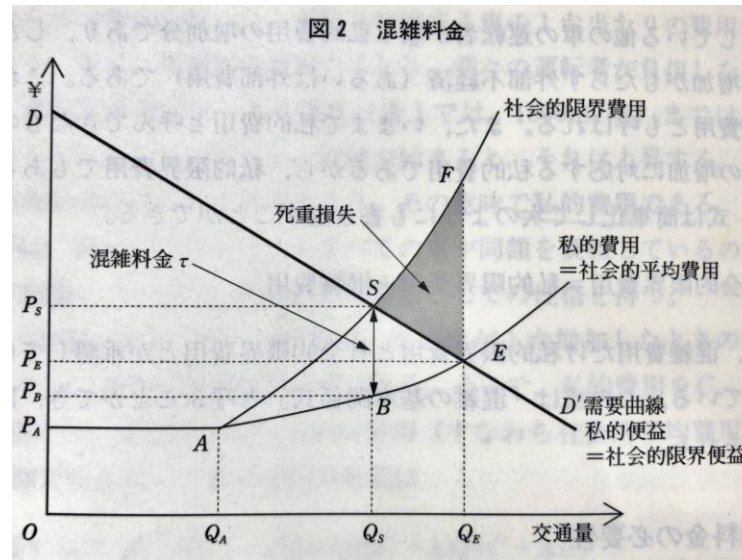
→社会的限界便益 = 私的便益 = 私的限界費用…自由放任の均衡点

・しかし、混雑が発生しているならばこの点是最適点ではない

・交通量の増加により他車への外部不経済(社会的損失(死重損失)EFS)が生じている

→社会的限界便益 = 私的便益 = 社会的限界費用…最適点

→混雑費用BSを混雑料金として賦課することで私的限界費用を社会的限界費用に一致するように引き上げ、均衡点が最適点であるようにする…ロードプライシング

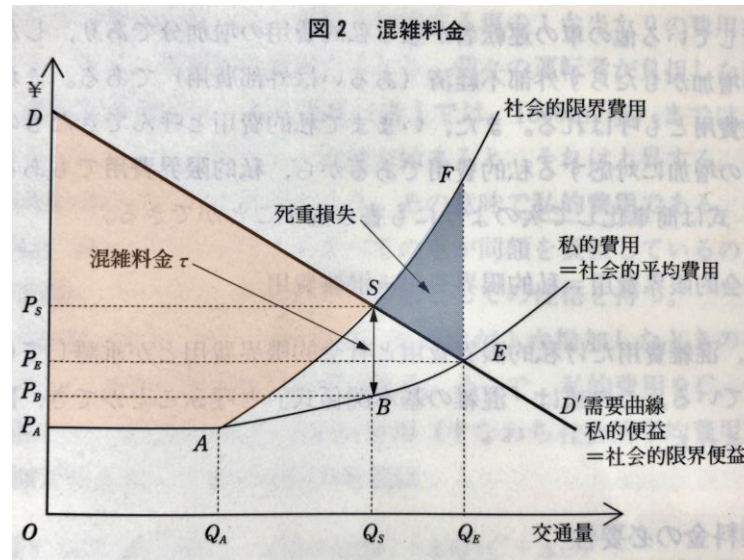


ロードプライシングの基本事項



社会的純便益の変化

- ・ 社会的総便益…需要曲線の下の部分の面積
 - ・ 社会的総費用…社会的限界費用曲線の下の部分の面積
- であるから、
- ・ BSに等しい混雑料金あり(交通量 Q_S) → $DSAP_A$
 - ・ 混雑料金なし(交通量 Q_E) → $DSAP_A - EFS$



ロードプライシングの基本事項



混雑料金賦課による交通量の減少

①交通手段の変更

→公共交通機関，自転車，徒歩など

②時間帯の変更

→ピーク時を避けるなど

③ルートの変更

→混雑料金のない道路への利用変更など

④立地の選択

→混雑のない/少ない地域への住地や職場の移動など