

A novel mobility consumption theory for road user charging

Bliemer, M. C., Loder, A., & Zheng, Z. (2024). A novel mobility consumption theory for road user charging. *Transportation Research Part B: Methodological*, 189, 102998.

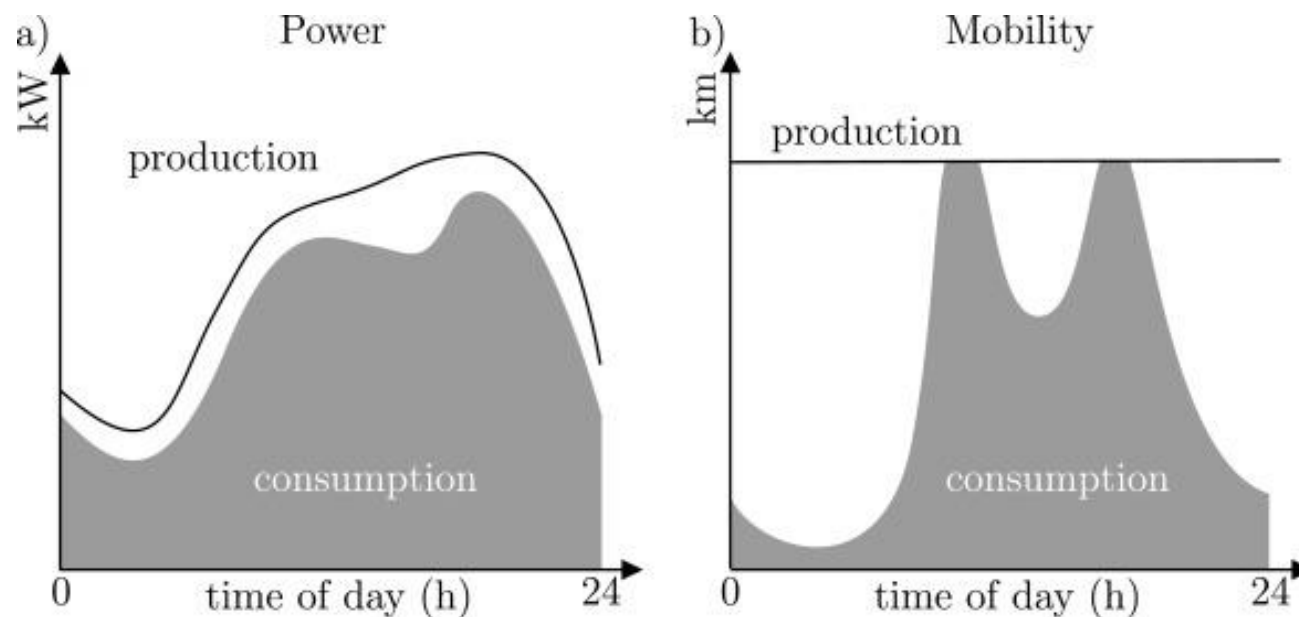
理論談話会#2, 2025/05/08

M2 古橋郁一

研究の概要

サマリ

- 電力のアナロジーから**道路利用量**を定量化する新理論を提案 (Mobility Consumption; MC)
- さらに、MCを測定しやすい形 (総旅行時間・総移動距離) で定義
- **MCベースの道路利用料課金**を提案
- **出発時刻選択と経路選択**でMCベース課金の効果を実証



研究の概要

• 新規性

- 電力系統とのアナロジーを用い、"*Mobility Consumption*" (MC)を定義
- MCは[kmh]あたりの道路使用量を表現
- MCに基づく新しい道路利用料の枠組みを提案

• 有用性

- 時空間両面の道路利用量を直接評価可能で、既存の時間のみ/空間のみの課金法に対する優位性を確認
- 走行距離計と走行時間計のみで実装可能で、既存車両にも容易に適用可能！

• 信頼性

- ケーススタディ（出発時間選択・経路選択）
- 実データ（NGSIM I-80）を使用したMCの実証評価

なぜこの論文を選んだのか

きっかけ: HKSTS2024でのKeynote

論文選択の理由:

- 道路利用の貨幣価値換算
 - 追従/FDベースの交通流理論に対し効用構造を導入するブレークスルー？（MFDぽい）
 - ゲーム, ドローン, 歩行者流にも応用可能？
 - 時空間セル（林さん）とも近い概念
- 論文構成が癖がある
 - 提案手法→ケーススタディ①→②
 - 比較研究ではないので、提案手法の説得力の持たせ方に工夫
- （B4には）スタートアップゼミの復習

著者略歴

Michiel Bliemer

- **2012年1月 – 現在 (13年5ヶ月)**
Chair in Transport Planning & Modelling
Institute of Transport & Logistics Studies, University of Sydney
Sydney, Australia
- **2008年8月 – 2012年1月 (3年6ヶ月)**
Senior Consultant, Transport Innovation & Modelling
Goudappel Coffeng
Deventer, The Netherlands
- **1996年4月 – 2012年1月 (15年10ヶ月)**
Associate Professor, Transport Modeling
Delft University of Technology
Delft Area, The Netherlands
- **2003年11月 – 2010年12月 (7年2ヶ月)**
Adjunct Professor
University of Sydney
Sydney, Australia



学歴

 **Delft University of Technology**
PhD, Traffic Engineering
1996年 - 2001年

 **Rijksuniversiteit Groningen**
MSc, Econometrics, Operation research
1991年 - 1996年

PhD@DU

Hoogendoornが2000年に
PhD@DUなので関連... ?

学士(OR)@フローニンゲン



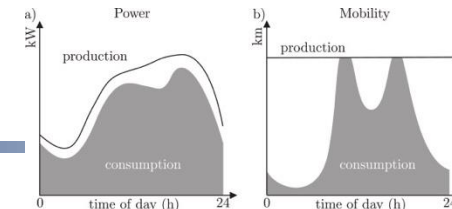
引用数

TITLE		CITED BY	YEAR
Constructing efficient stated choice experimental designs JM Rose, MCJ Bliemer Transport reviews 29 (5), 587-617	行動モデル	1000	2009
Designing efficient stated choice experiments in the presence of reference alternatives JM Rose, MCJ Bliemer, DA Hensher, AT Collins Transportation research part B: Methodological 42 (4), 395-406	行動モデル	680	2008
Construction of experimental designs for mixed logit models allowing for correlation across choice observations MCJ Bliemer, JM Rose Transportation Research Part B: Methodological 44 (6), 720-734	行動モデル	446	2010
A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations AJ Pel, MCJ Bliemer, SP Hoogendoorn Transportation 39, 97-123	行動モデル	423	2012
Sample size requirements for stated choice experiments JM Rose, MCJ Bliemer Transportation 40, 1021-1041	行動モデル	370	2013
Experimental design influences on stated choice outputs: an empirical study in air travel choice MCJ Bliemer, JM Rose Transportation Research Part A: Policy and Practice 45 (1), 63-79	行動モデル	332	2011
The scientific literature on Coronaviruses, COVID-19 and its associated safety-related research dimensions: A scientometric analysis and scoping review M Haghani, MCJ Bliemer, F Goerlandt, J Li Safety science 129, 104806	行動モデル	331	2020
Approximation of Bayesian efficiency in experimental choice designs MCJ Bliemer, JM Rose, S Hess Journal of choice modelling 1 (1), 98-126	行動モデル	291	2008
Stated preference experimental design strategies JM Rose, MCJ Bliemer Handbook of transport modelling 1, 151-180	行動モデル	246	2007
Efficient stated choice experiments for estimating nested logit models MCJ Bliemer, JM Rose, DA Hensher Transportation Research Part B: Methodological 43 (1), 19-35	行動モデル	217	2009

近年

TITLE		CITED BY	YEAR
Extended macroscopic node model for multilane traffic X Gong, MCJ Bliemer, MPH Raadsen Transportation Research Part B: Methodological 195, 103208	交通流		2025
Mobility consumption and trip production in urban road networks with area-based control A Loder, MCJ Bliemer Transportation Research Symposium 25-28 May 2025, Rotterdam	交通流		2025
PCR169 Novel Models Accounting for Social Interactions on Individual Choice Behavior L Pili, M Bliemer, B Donkers, E de Bekker-Grob, J Swait Value in Health 27 (12), S539	行動モデル		2024
Models of Social Influence on Individual Choice Behavior L Pili, M Bliemer, B Donkers, EW de Bekker-Grob, J Swait PATIENT-PATIENT CENTERED OUTCOMES RESEARCH 17 (6), 726-726	行動モデル		2024
Data driven origin–destination matrix estimation on large networks—A joint origin–destination-path-choice formulation Y Cao, H van Lint, P Krishnakumari, M Bliemer Transportation Research Part C: Emerging Technologies 168, 104850	NW		2024
A novel mobility consumption theory for road user charging MCJ Bliemer, A Loder, Z Zheng Transportation Research Part B: Methodological 189, 102998	交通流		2024
Incorporation of Endogenous Exit Capacities in Node Models with Various Movement Exit Speeds X Gong, MPH Raadsen, MCJ Bliemer	交通流		2024
A Systematic Review of Node Models for Macroscopic Network Loading of Traffic Flows X Gong, MPH Raadsen, MCJ Bliemer	交通流		2024
Incorporation of non-persistent delays at signalised intersections in the link transmission model M Bliemer, X Gong, M Raadsen Available at SSRN 5008569	交通流		2024
Effects of passing rates on driving behaviour in variable speed limit-controlled highways: Evidence of external pressure from a driving simulator study Y Ali, MPH Raadsen, MCJ Bliemer Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 104, 488-505	交通流 ³		2024

論文の構成



導入

1. Introduction

- ・ 背景と動機
- ・ 目的: 新理論の必要性の提示

2. An analogy between transport and electricity systems

- ・ 電力と“mobility”のアナロジーを提示
- ・ 供給, 需要の観点から議論

3. A novel mobility consumption theory

- ・ mobility消費の定義
- ・ 基礎集計とパラメータ推定
- ・ mobilityに基づく料金制度を提案

4. Application to road user charging

5. Impact of mobility-based charging on travel behaviour and congestion

ケーススタディ①: 理論

- ・ 出発時間選択
- ・ 経路選択

6. Technology innovation's impact on mobility consumption

ケーススタディ②: 応用

- ・ CAV, V2V通信
- ・ エンジン性能, 燃費

7. Discussion and conclusions

定式化

ケーススタディ

まとめ

1. Introduction

Introduction

Road Pricing:

- 交通需要のマネジメント
 - 渋滞制御
 - 排ガス削減
- として研究が進む

理想: First-best Pricing

...道路利用に伴う外部費用を含めた社会的限界費用分の料金を利用者に課すことでパレート最適を達成

しかし技術的制約...

- リアルタイムな交通状況把握が必要
- 各車両の詳細なデータ取得が必要

New York City Welcomes Congestion Pricing With Fanfare and Complaints

The program had defied many obstacles over the course of decades. It debuted over the weekend on what seemed to be a successful first day.

▶ Listen to this article · 8:44 min [Learn more](#)

🎁 Share full article ↗ 📌



現実: Second-best Pricing

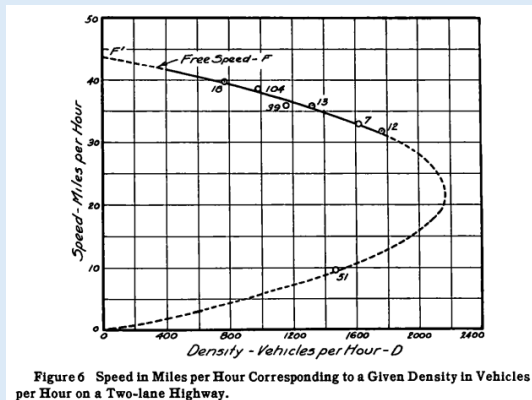
- エリアベース
 - ニューヨーク（中止）など
- 距離ベース
 - 自動車税
 - 燃料費への課税
 - （欧州では）大型車向けの距離課金など

Introduction

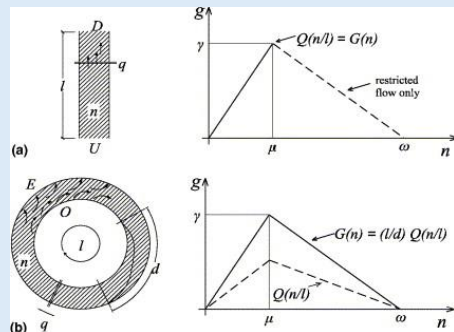
主張: 距離ベース課金は時間次元を無視するため道路利用の不完全な尺度である。

交通行動は時空間単位に依存

例1. Greenshields 1935



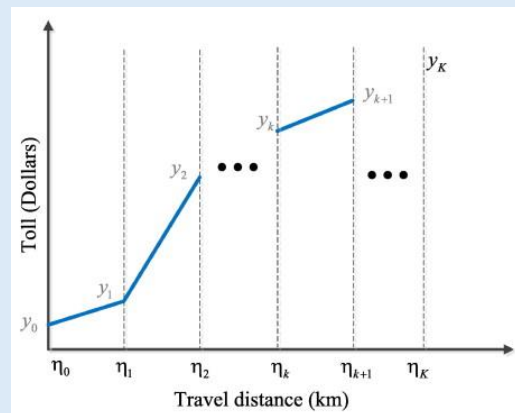
例2. Daganzo 2007



研究のコンセプト: 利用者は道路空間を“消費”している
= 移動時間 & 移動距離による課金

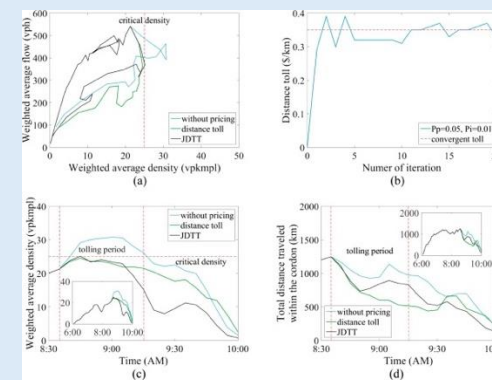
既往研究例.

Liu et al. 2014



Gu et al. 2018

JDTT (Joint distance and delay toll)



課題: 距離・時間にそれぞれ課金 → 時空間を統一的に扱っていない

💡 電力消費

アナロジー

🚗 道路消費

Mobility Consumption

2. An analogy between transport and electricity systems

2.1 Energy versus mobility

👁️ 発電システムと交通システムのアナロジーを提案

Table 1
Comparison of power systems and transport systems.

Electricity system	Transport system
Electrical energy (kWh)	Mobility (kmh)
Power	Road space
Run electrical device	Transport need
Power plant	Road infrastructure
Power generator	Lane
Blackout	Congestion, Gridlock
Electron	Vehicle
Heat	Delay

Mobility Consumptionの概念

- Mobility（可移動性） := “the ability to move” と定義
- 道路：Mobilityを毎時生産
- 道路利用者：移動によってMobilityを消費している

2.2 Supply, 2.3 Demand

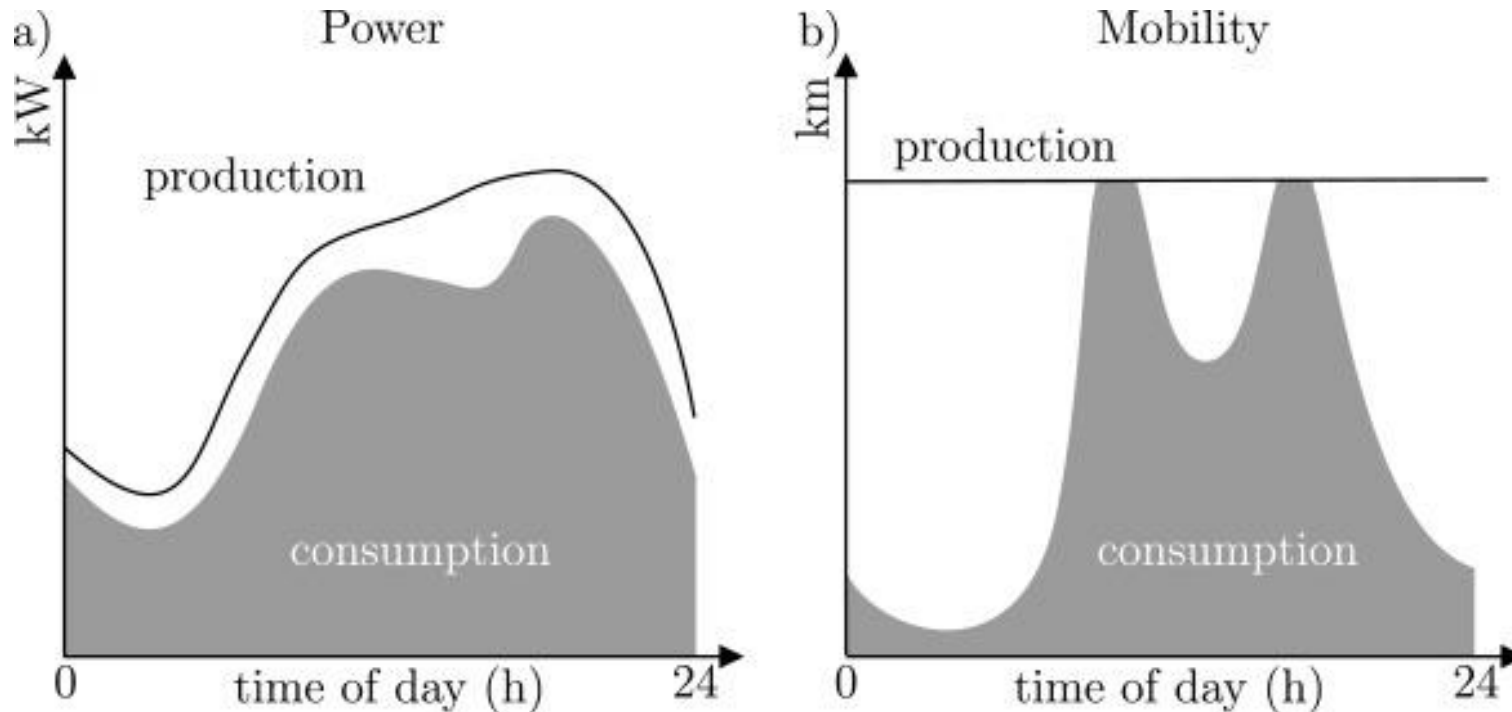


Fig. 1. Graphical illustration of power and mobility production and consumption rates.

電力エネルギー

- 需要に対して供給が可変
- 両者はほぼ一致



道路インフラ

- 供給量（道路容量）は容易には変えられない
- ピーク時（渋滞時）に需要量が供給量に到達

2.4 Energy and mobility loss

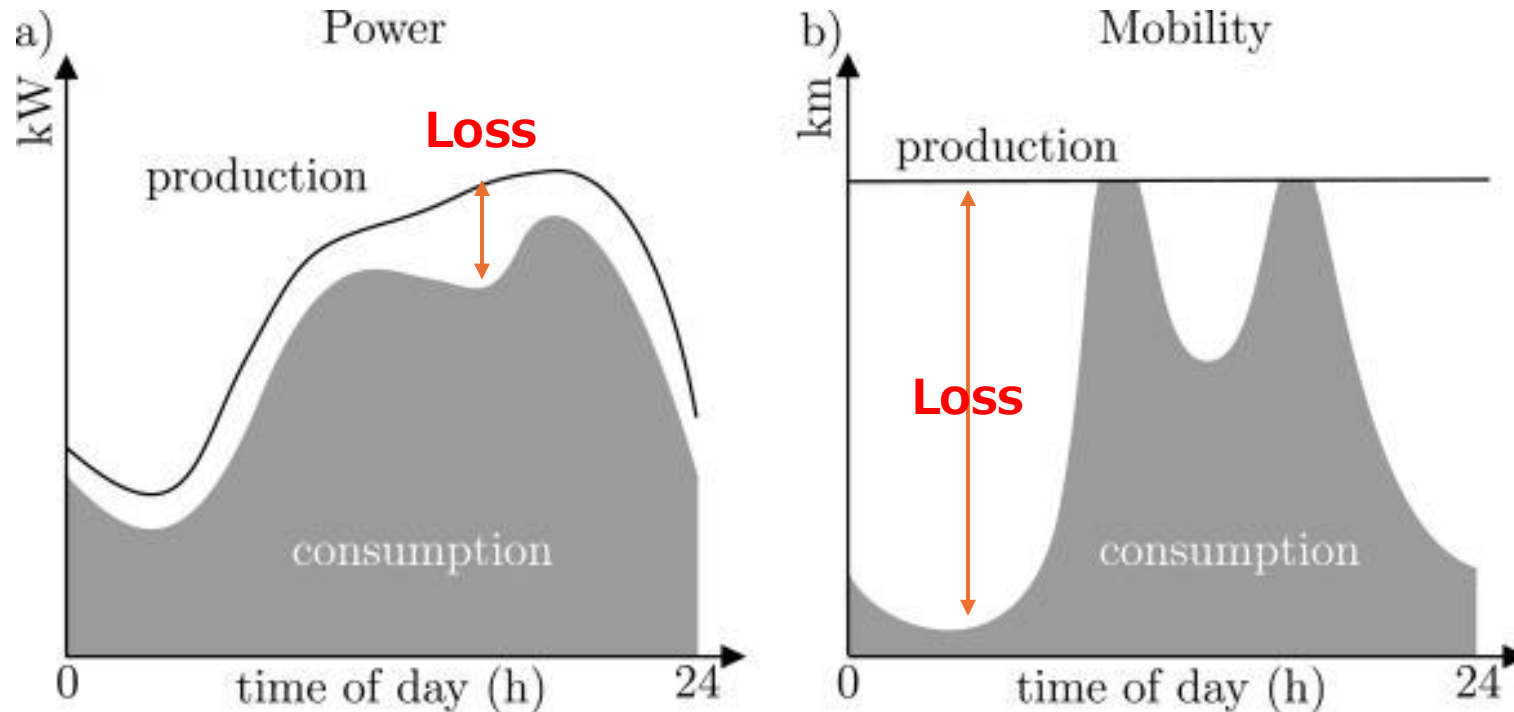


Fig. 1. Graphical illustration of power and mobility production and consumption rates.

電力

- 消費されない分は失われる
- 熱などの伝送ロス（LEDでは70%が熱エネルギー）



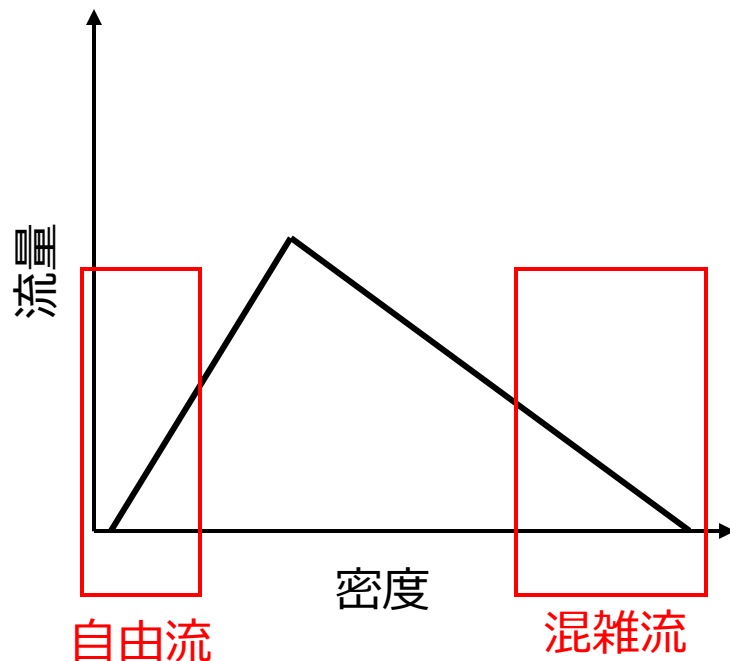
Mobility

- 電池のように蓄積することは**不可能**
- 伝送ロス
 - ボトルネックや交差点での遅延
 - 運転行動（長い車間）
- 非効率性損失
 - タクシーが乗客なしで運転する

3. A novel mobility consumption theory

Preliminary

Fundamental Diagram



流量 = 密度 × 速度
FD: 密度・速度の関係

Car-Following



車両の運動を車間距離の微分方程式で記述
例: GHRモデル

$$a_n(t + \tau) = \lambda \frac{\Delta v}{\Delta x^l} v_n^m$$

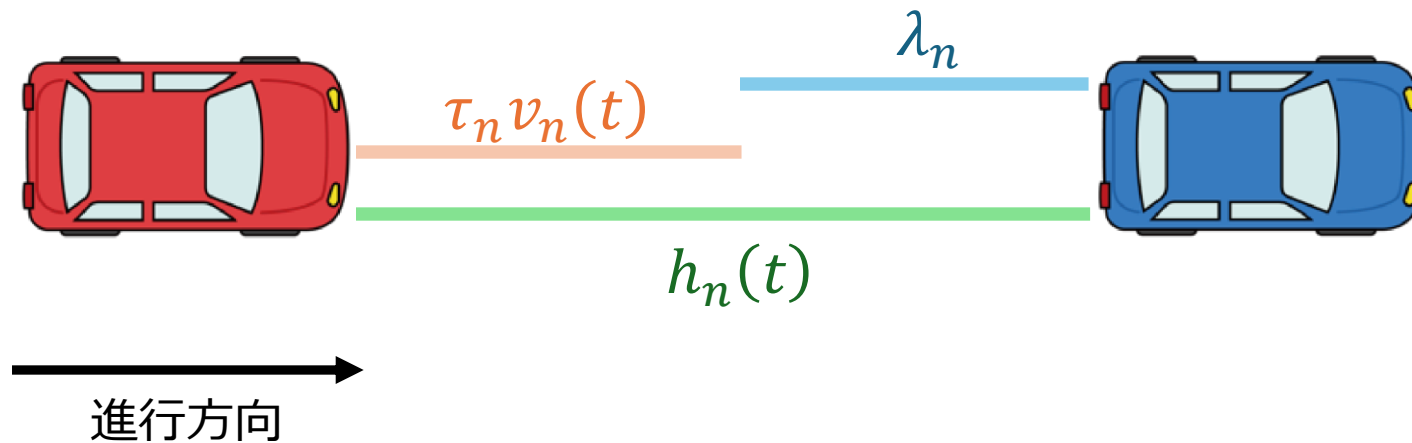
その他IDM, OVなど複数存在

3.1 Safe space headway and mobility consumption

★ 車間距離からMCを定義

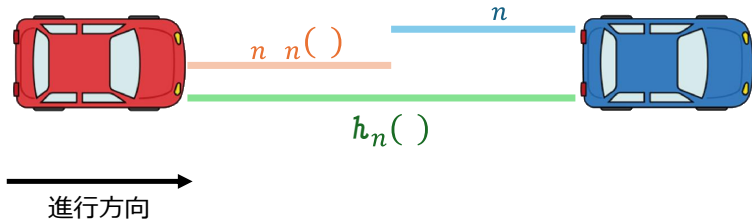
$$h_n(t) = \lambda_n + \tau_n v_n(t)$$

$h_n(t)$	: 時刻 t , 車両 n の車間距離
λ_n	: 車両 n の最小車間距離
τ_n	: 車両 n の反応時間
$v_n(t)$	: 時刻 t , 車両 n の速度



3.1 Safe space headway and mobility consumption

★ 車間距離からMCを定義



$$h_n(t) = \lambda_n + \tau_n v_n(t)$$

$h_n(t)$	: 時刻 t , 車両 n の車間距離
λ_n	: 車両 n の最小車間距離
τ_n	: 車両 n の反応時間
$v_n(t)$	: 時刻 t , 車両 n の速度

Definition of *Mobility Consumption* (MC)

M_n	: 車両 n の移動消費量
t_n^0	: 車両 n の旅行開始時間
T_n	: 車両 n の旅行 <u>時間</u>
D_n	: 車両 n の旅行 <u>距離</u>

$$M_n = \int_{t_n^0}^{t_n^0 + T_n} h_n(t) dt = \lambda_n T_n + \tau_n D_n$$

※MCは旅行時間、旅行距離、旅行者属性により定義される

3.1 Safe space headway and mobility consumption

★ 車間距離からMCを定義

$$M_n = \int_{t_n^0}^{t_n^0 + T_n} h_n(t) dt = \lambda_n T_n + \tau_n D_n$$

M_n	: 車両 n の移動消費量
t_n^0	: 車両 n の旅行開始時間
T_n	: 車両 n の旅行時間
D_n	: 車両 n の旅行距離

図解すると...

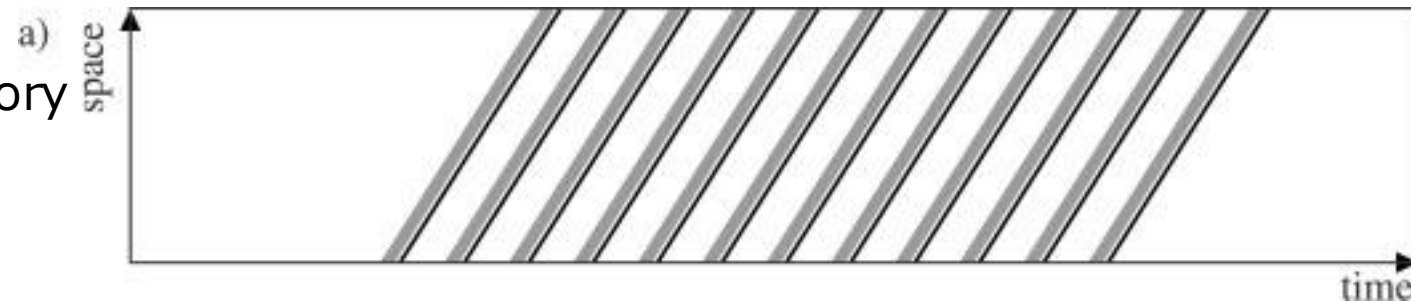
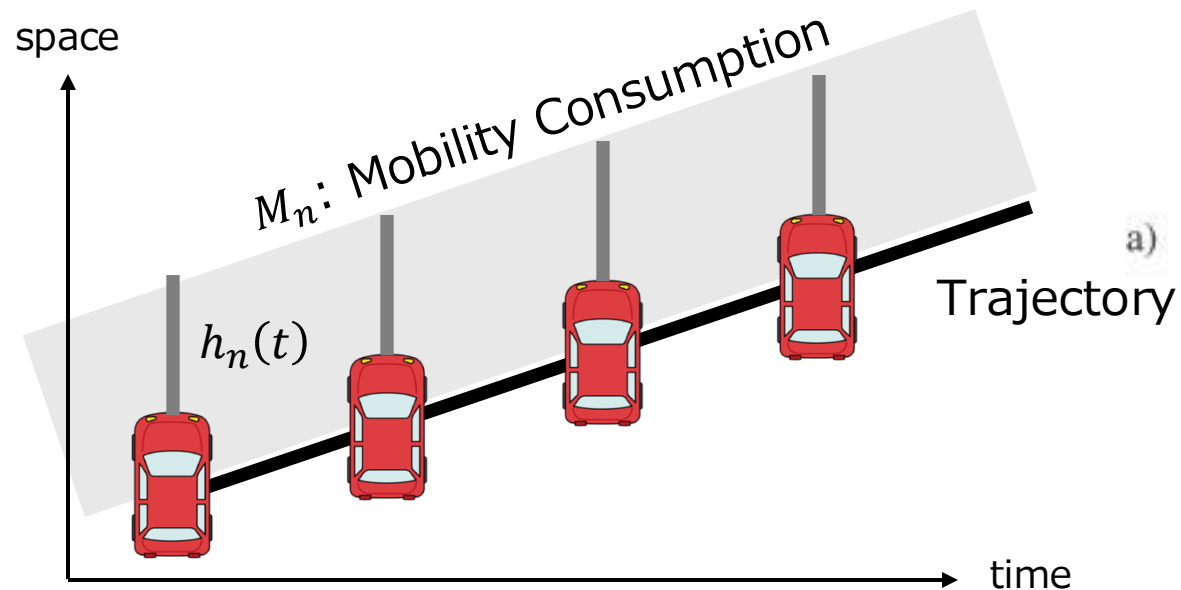


Fig. 3. Reserved road space in free-flow.

3.2 Mobility consumption in space–time diagrams

3.1では自由流→**渋滞状況**ではどうなる？

自由流

流量 = 容量

渋滞！

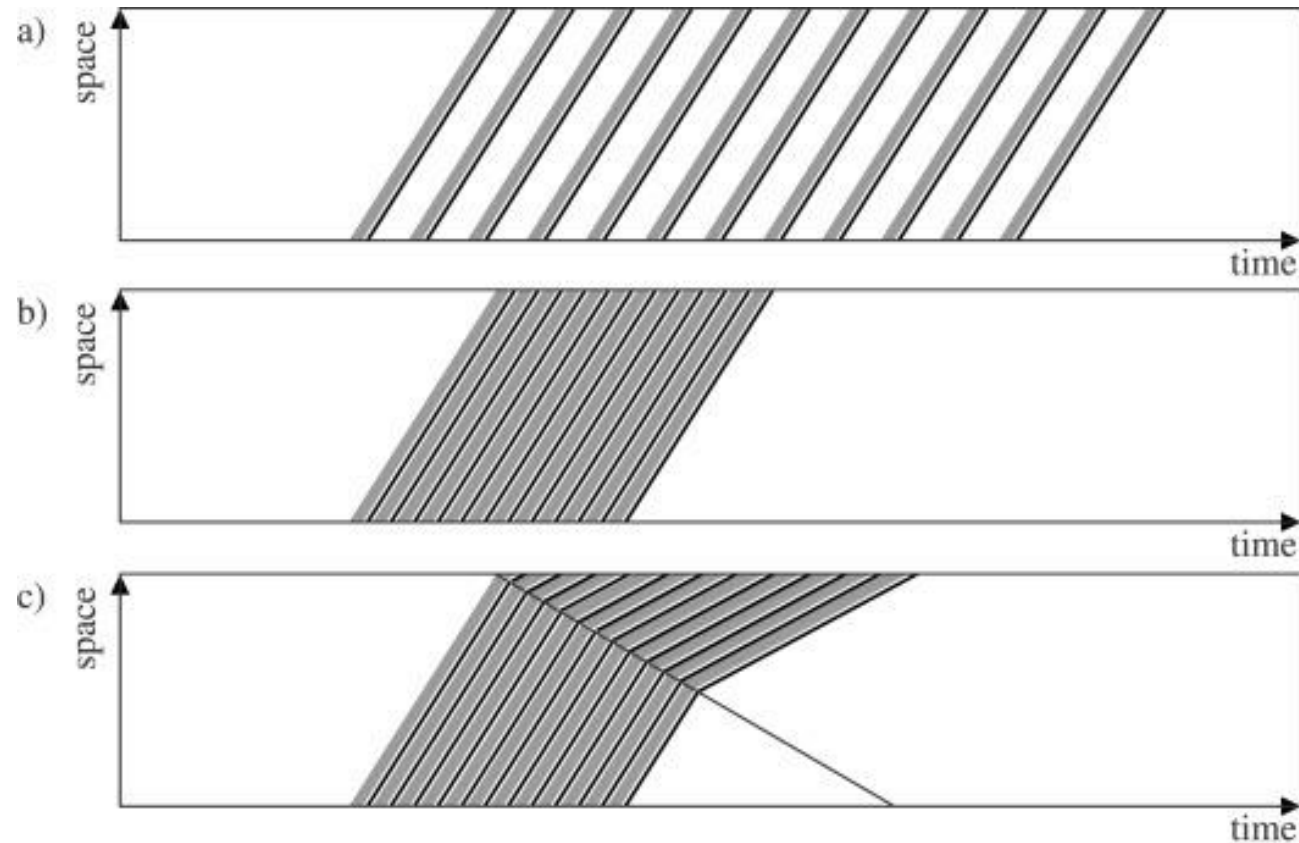


Fig. 3. Reserved road space a) in free-flow, b) at flow capacity, c) in congestion

3.2 Mobility consumption in space–time diagrams

3.1では自由流→**渋滞状況**ではどうなる？

→**最小消費エリア I** と**過剰消費エリア II**を導入

$$M_n = M_n^I + M_n^{II}$$

where $M_n^I = \lambda_n T_n^0 + \tau_n D_n$ and $M_n^{II} = \lambda_n (T_n - T_n^0)$

λ_n : 車両 n の最小車間距離
 τ_n : 車両 n の反応時間
 T_n : 車両 n の旅行時間
 T_n^0 : 車両 n の自由流における旅行時間
 D_n : 車両 n の旅行距離

※ M_n により、MCの時間推移を計算可能！（Fig. 3e）

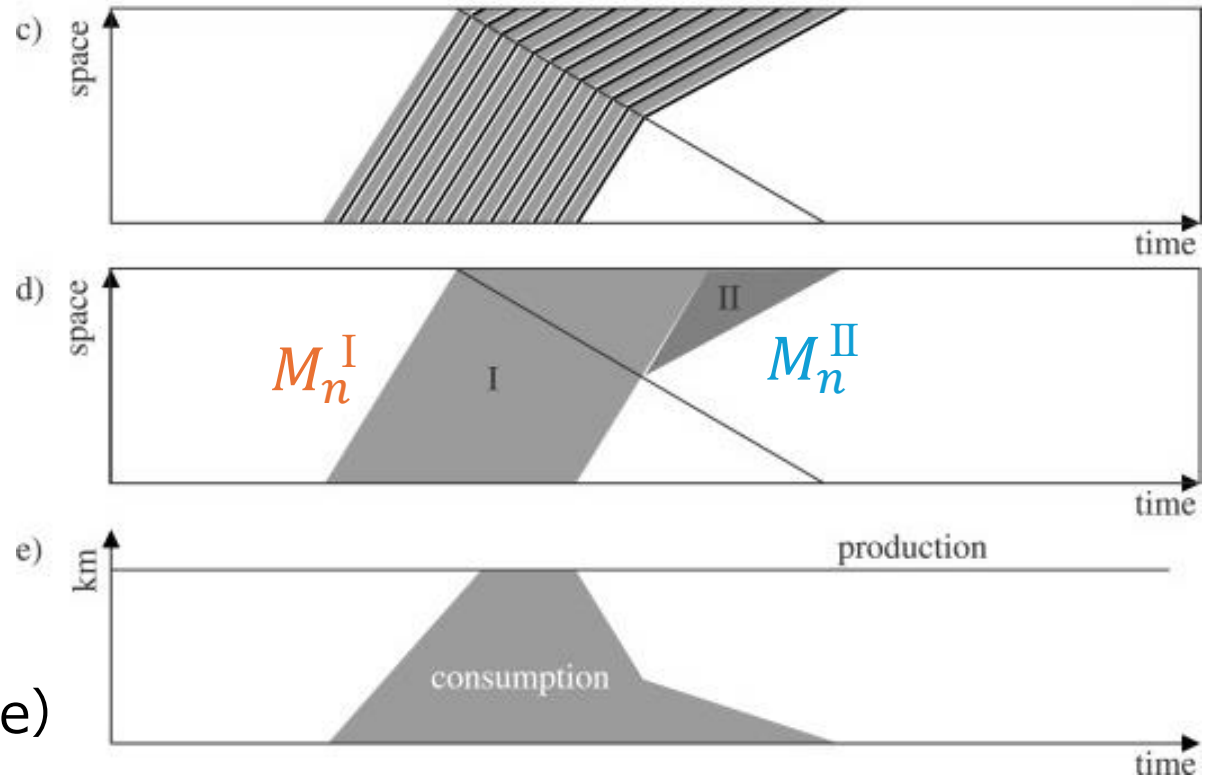


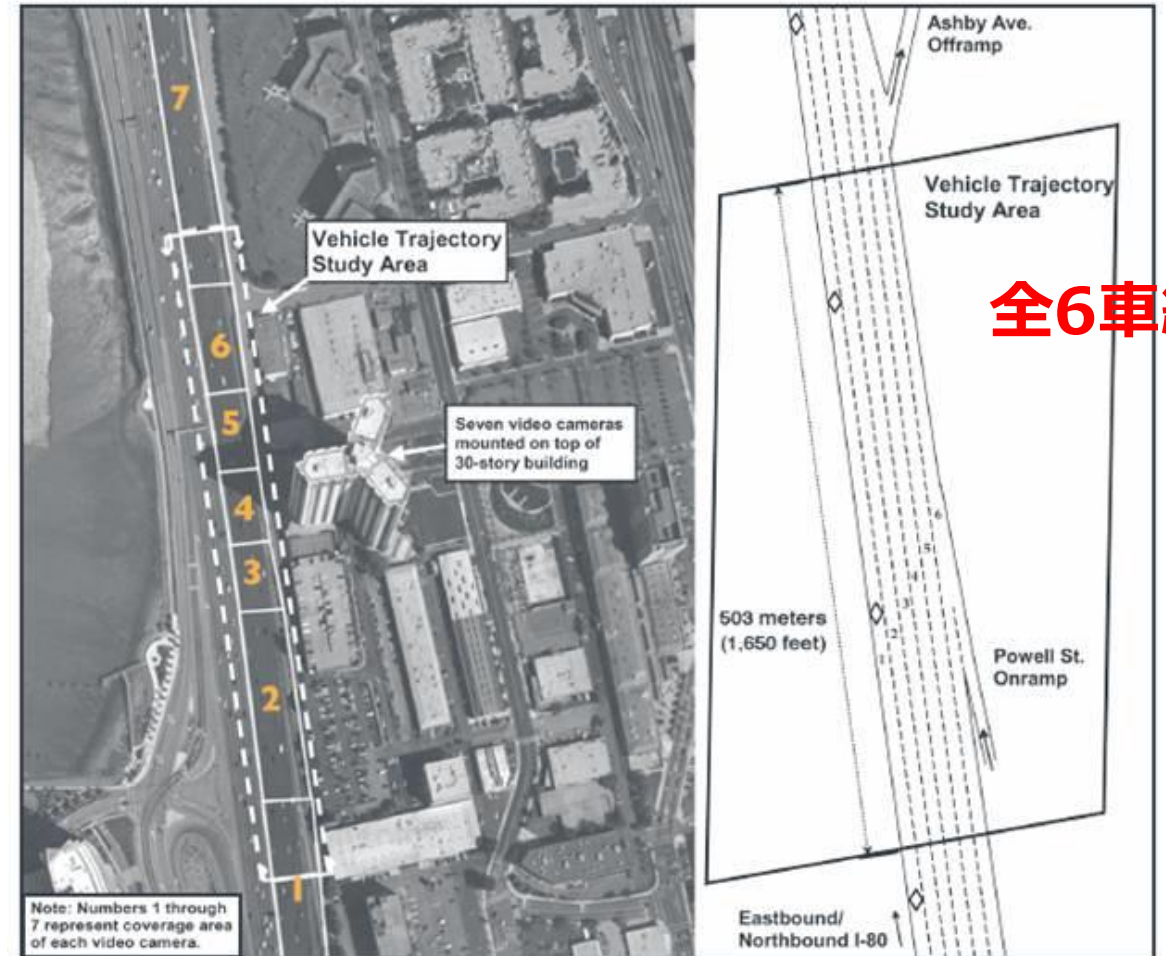
Fig. 3. Reserved road space c) in congestion, d) at minimum (area I) and additional (area II); (e) mobility production and consumption rate over time.

3.2 Mobility consumption in space-time diagrams

👁️ 実データでの検証→NGSIM i-80

Next Generation SIMulation (NGSIM)

...2005年にサンフランシスコの州間高速道路80号線 (i80)において収集された、高速道路における車両軌道データセット



全6車線

3.2 Mobility consumption in space-time diagrams

実データでの検証→NGSIM i-

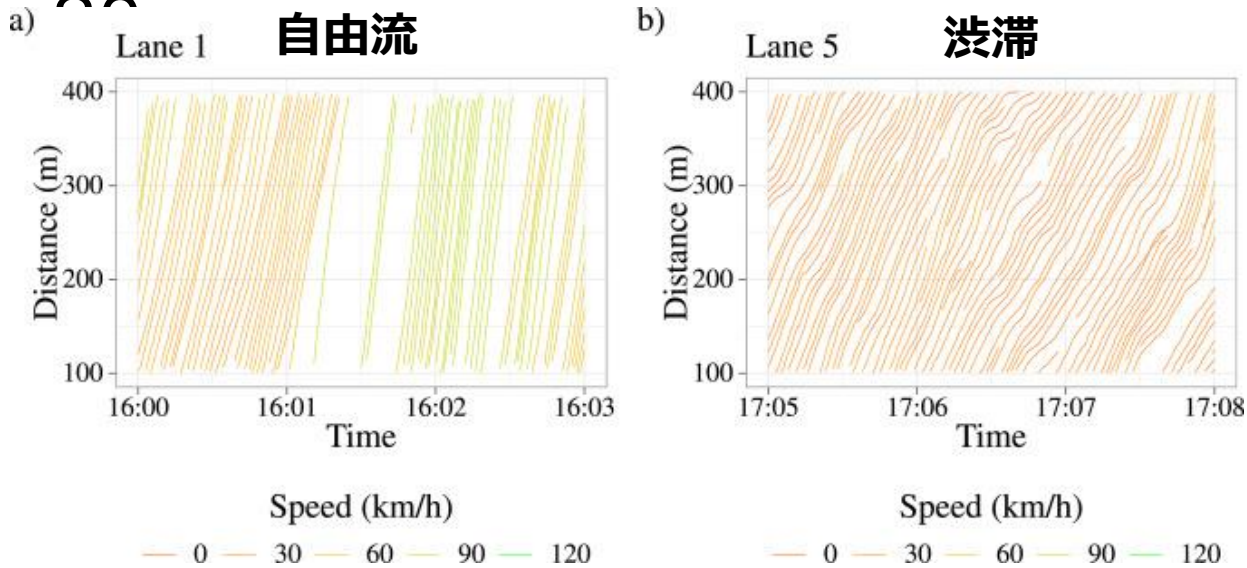


Fig. 4. Trajectories from the NGSIM Interstate 80 data

Fig. 4.において...

- ・道路区間: $\Delta x = 0.3$ km
- ・時間幅: $\Delta t = 0.05$ h

ゆえに、*Mobility Supply* (生産量)は、
 $\Delta x \Delta t = 0.015$ [kmh]

3.2 Mobility consumption in space-time diagrams

実データでの検証→NGSIM i-80

黒: 移動消費量 (M)

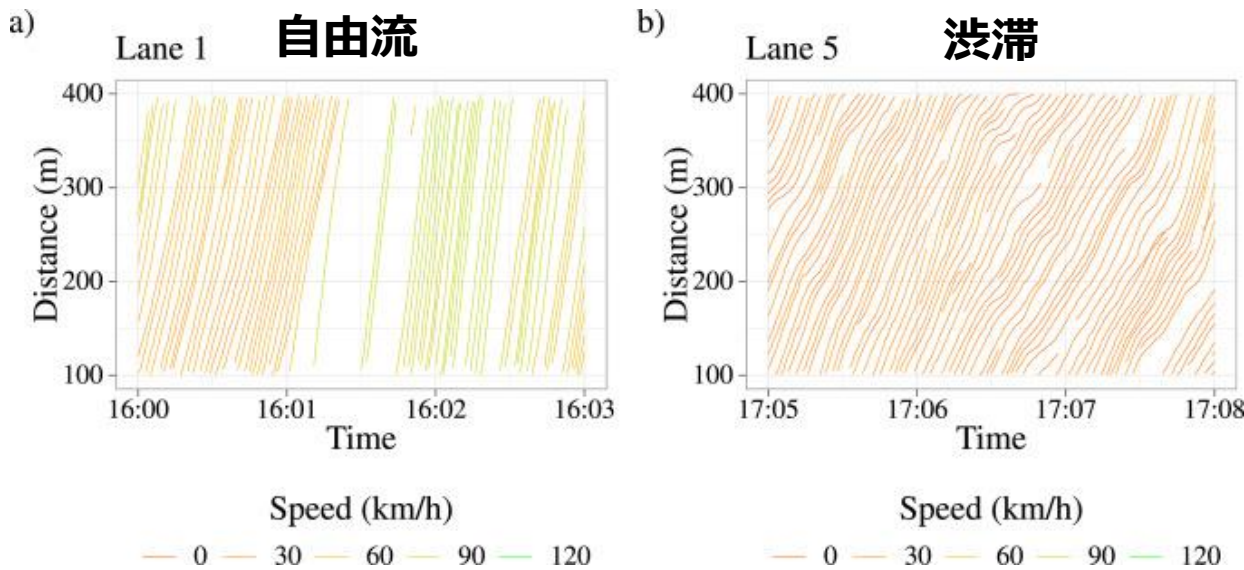


Fig. 4. Trajectories from the NGSIM Interstate 80 data

Fig. 4.において...

- 道路区間: $\Delta x = 0.3$ km
- 時間幅: $\Delta t = 0.05$ h

ゆえに、*Mobility Supply* (生産量)は、
 $\Delta x \Delta t = 0.015$ [kmh]

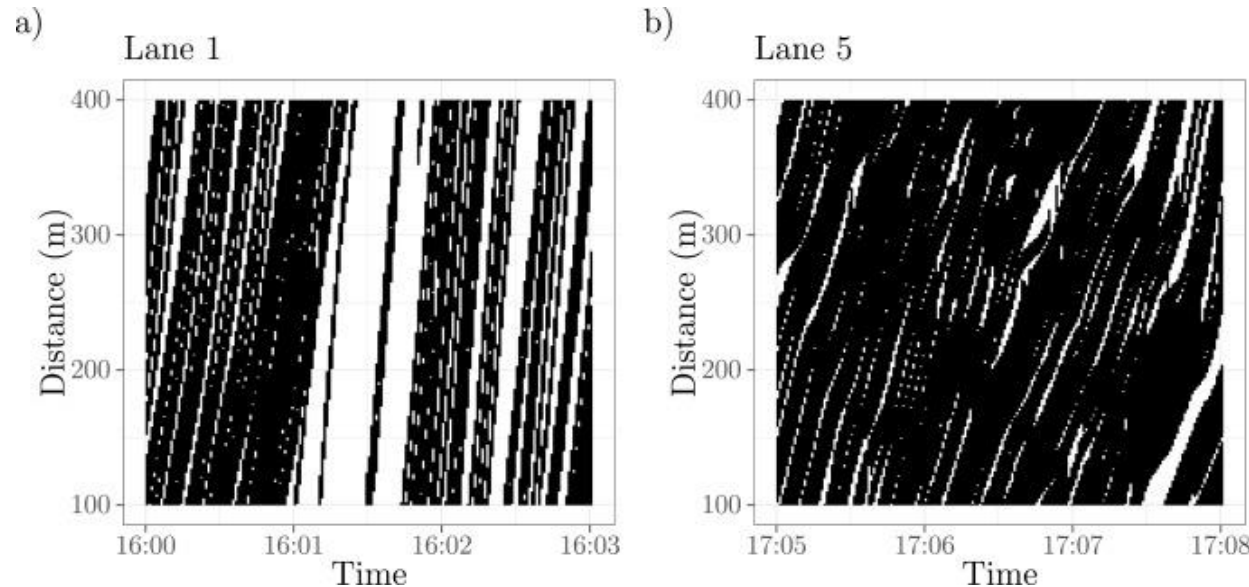


Fig. 5. Mobility consumption based on trajectories from the NGSIM Interstate 80 data. Black colouring indicates that the respective space-time cell has been consumed for mobility.

- a) 自由流→Mobilityが消費されきっていない
- b) 渋滞 →Mobilityがほとんど消費

3.3 Travel time and distance factors

👁👁 実際のパラメータ値 (λ_n, τ_n) は？

Table 3

Average values of spacing, vehicle size, and reaction time based on NGSIM I-80 data.

Parameter	Unit	Value
Average bumper-to-bumper spacing, taken from Ma and Ahn (2008)	m	6.25
Average bumper-to-bumper spacing, derived from the data	m	5.76
Average vehicle size, derived from the data	m	4.87
Average reaction time, taken from Ma and Ahn (2008)	s	1.23

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \text{平均車長} + \text{平均バンパー間距離} = 4.87 + 6.25 \\ &= 11.12 [m] = \mathbf{0.01112 [km]}\end{aligned}$$

$$\tau_n = \text{反応時間} = 1.23 [s] = \mathbf{0.00034 [h]}$$

3.3 Travel time and distance factors

👁️ 実際のパラメータ値 (λ_n, τ_n) は？

Table 3

Average values of spacing, vehicle size, and reaction time based on NGSIM I-80 data.

Parameter	Unit	Value
Average bumper-to-bumper spacing, taken from Ma and Ahn (2008)	m	6.25
Average bumper-to-bumper spacing, derived from the data	m	5.76
Average vehicle size, derived from the data	m	4.87
Average reaction time, taken from Ma and Ahn (2008)	s	1.23

- ・車両/ドライバーの異質性(車長, 反応速度)
 - ・車線変更などによる動的な車間の変化
- とはいえ平均的な値がわかれば良いので、既存のパラメータ値でも問題ない

“Nevertheless, the analysis in this section shows in a real-world situation that heterogeneity and complexity of traffic require that λ_n and τ_n are set appropriately to obtain a good approximation of mobility consumption.”

やや強引な気もする...

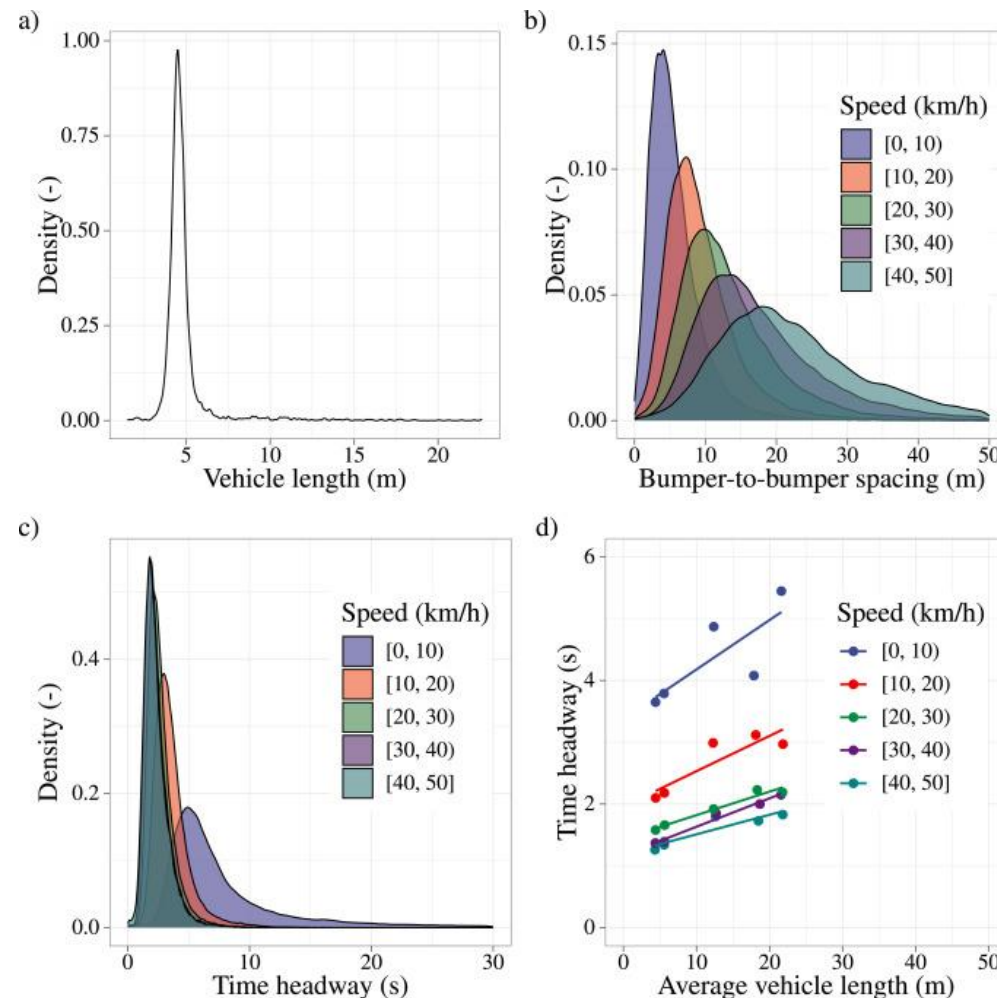


Fig. 6. Distribution of variables derived from the Interstate 80 section in NGSIM data that are relevant for determining values of λ_n and τ_n .

4. Application to road user charging

4.1 Existing road pricing scheme

既存のRoad Pricing方法

- 年間登録料, 自動車税
- 燃料税
- 通行料

①燃料税

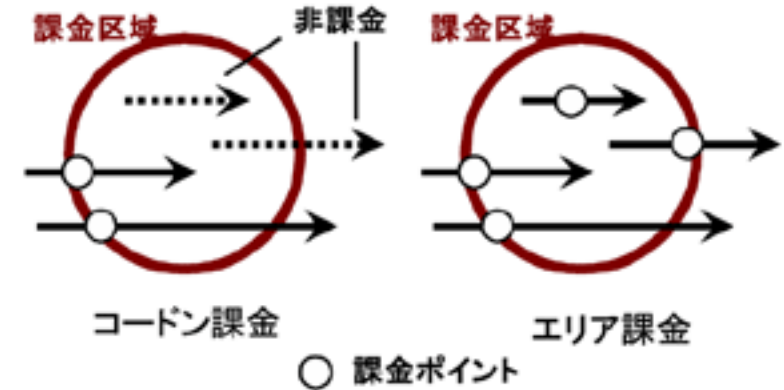
- EVの普及→財源減少で持続不可能
- 不公平性: 自動車の性能依存 = 高機能な自動車を購入できない低所得者層が不利
- 効率性: 時間帯別による価格の変動が難しい（渋滞ピークに対応不可）

②年間登録料

- 不公平性: 低所得者・短距離通勤者の負担率高

③通行料

- 効率性: ダイナミックプライシングが可能も、課金可能は一部道路のみ



<https://kico.kumamoto-u.ac.jp/seeds/files/206/print.html> より

既存の課金スキームの適用例

- コードン/エリア課金
シンガポール, ロンドン, スtockホルム
- 距離課金
ドイツ, ベルギー

論文の主張:

- 時間次元を欠くので不完全！
- **時空間**の道路消費ベースの課金手法が必要

4.2. Mobility-based charging

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

c_n : 車両 n の移動消費量あたりの課金額
 $\mu_n = c_n \lambda_n$: 旅行時間あたりの課金額 [\$/h]
 $\delta_n = c_n \tau_n$: 旅行距離あたりの課金額 [\$/km]

提案手法の利点

1. **距離・時間を統合**し、実際の道路利用を正確に反映
2. 走行距離計と走行時間計で**容易に計測可能**
3. 混雑時の走行を自動的に高く課金 → **混雑抑制効果**
4. 経路選択への柔軟性 (cf. 5章)
 - 短くて遅い or 長くて早い のバランスを取れる
 - ※距離だけ, 時間だけだと不可能
5. **車両特性**への対応 (c_n を調整すれば良い)
など...

4.2. Mobility-based charging

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

具体的な計算例: シドニー

シドニーの一般的なドライバーは、

- 自動車税など: A\$1,200
- 年間走行距離: 13,700 [km]
- 平均走行速度: 59.6 [km/h]
- 平均走行時間: 230 [h]

MC課金を適用したとき、kmhあたりいくら課金される？

3.3節での $\lambda_n = \frac{1.12}{1000} \text{ km}$, $\tau_n = \frac{1.23}{3600} \text{ h}$ を用いると、

$M =$

c_n : 車両 n の移動消費量あたりの課金額

$\mu_n = c_n \lambda_n$: 旅行時間あたりの課金額 [\$/h]

$\delta_n = c_n \tau_n$: 旅行距離あたりの課金額 [\$/km]

4.2. Mobility-based charging

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

具体的な計算例: シドニー

シドニーの一般的なドライバーは、

- 自動車税など: A\$1,200
- 年間走行距離: 13,700 [km]
- 平均走行速度: 59.6 [km/h]
- 平均走行時間: 230 [h]

MC課金を適用したとき、kmhあたりいくら課金される？

3.3節での $\lambda_n = \frac{1.12}{1000}$ km, $\tau_n = \frac{1.23}{3600}$ hを用いると、

$$\begin{aligned} M &= \frac{1.12}{1000} [\text{km}] \cdot 230 [\text{h}] + \frac{1.23}{3600} [\text{h}] \cdot 13700 [\text{km}] \\ &= 2.56 + \mathbf{4.68} = 7.24 \text{ kmh} \end{aligned}$$

走行距離偏重

c_n : 車両 n の移動消費量あたりの課金額

$\mu_n = c_n \lambda_n$: 旅行時間あたりの課金額 [\$/h]

$\delta_n = c_n \tau_n$: 旅行距離あたりの課金額 [\$/km]

4.2. Mobility-based charging

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

具体的な計算例: シドニー

シドニーの一般的なドライバーは、

- 自動車税など: A\$1,200
- 年間走行距離: 13,700 [km]
- 平均走行速度: 59.6 [km/h]
- 平均走行時間: 230 [h]

MC課金を適用したとき、kmhあたりいくら課金される？

3.3節での $\lambda_n = \frac{1.12}{1000}$ km, $\tau_n = \frac{1.23}{3600}$ hを用いると、

$$\begin{aligned} M &= \frac{1.12}{1000} [\text{km}] \cdot 230 [\text{h}] + \frac{1.23}{3600} [\text{h}] \cdot 13700 [\text{km}] \\ &= 2.56 + 4.68 = 7.24 \text{ kmh} \\ &\quad \text{走行距離偏重} \end{aligned}$$

自動車税等と比較して考えると、現在の移動消費量あたり支払額 c は、

$$c = \frac{\text{A\$1200}}{M} = \text{A\$166} [/\text{kmh}]$$

c_n : 車両 n の移動消費量あたりの課金額

$\mu_n = c_n \lambda_n$: 旅行時間あたりの課金額 [\$/h]

$\delta_n = c_n \tau_n$: 旅行距離あたりの課金額 [\$/km]

4.2. Mobility-based charging

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

具体的な計算例: シドニー

シドニーの一般的なドライバーは、

- 自動車税など: A\$1,200
- 年間走行距離: 13,700 [km]
- 平均走行速度: 59.6 [km/h]
- 平均走行時間: 230 [h]

MC課金を適用したとき、kmhあたりいくら課金される？

3.3節での $\lambda_n = \frac{1.12}{1000}$ km, $\tau_n = \frac{1.23}{3600}$ hを用いると、

$$M = \frac{1.12}{1000} [\text{km}] \cdot 230 [\text{h}] + \frac{1.23}{3600} [\text{h}] \cdot 13700 [\text{km}]$$
$$= 2.56 + 4.68 = 7.24 \text{ kmh}$$

走行距離偏重

自動車税等と比較して考えると、現在の移動消費量あたり支払額 c は、

$$c = \frac{\text{A\$1200}}{M} = \text{A\$166} [/\text{kmh}]$$

c_n : 車両 n の移動消費量あたりの課金額

$\mu_n = c_n \lambda_n$: 旅行時間あたりの課金額 [\$/h]

$\delta_n = c_n \tau_n$: 旅行距離あたりの課金額 [\$/km]

このとき、

$$\mu_n = 1.846 [\text{A\$}/\text{h}]$$

$$\delta_n = 0.0567 [\text{A\$}/\text{km}]$$

に相当し、距離:時間費用比=1.82:1

※課金額の距離:時間費用費についての既往研究は、

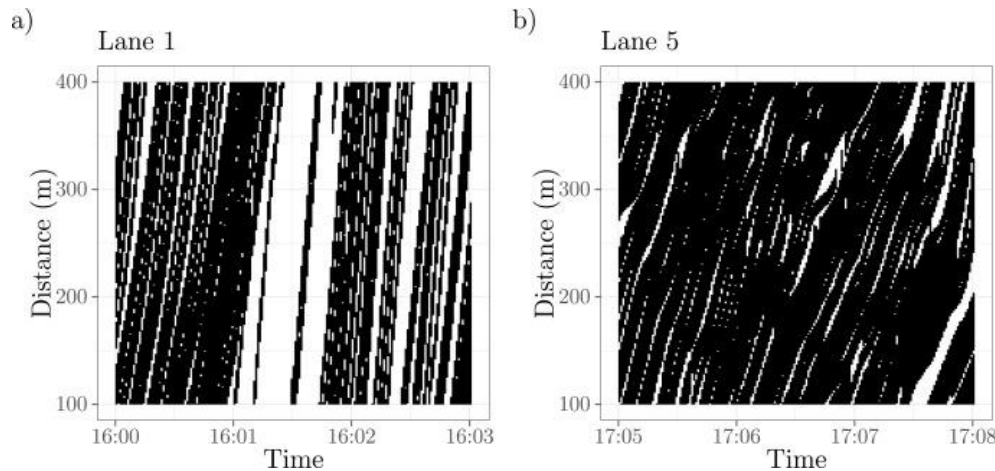
- O'Mahony et al.(2000)は**1.5:1**
 - ※距離が重視されるべきという理由のみ
- Gu et al.(2018)は**2.32:1**
 - このとき渋滞緩和されることを示すを提案している

小結 (3,4章)

3, 4章=実データでのケーススタディ

3章: MC

$$M_n = \int_{t_n^0}^{t_n^0 + T_n} h_n(t) dt = \lambda_n T_n + \tau_n D_n$$



4章: MC課金

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

具体的な計算例: シドニー

シドニーの一般的なドライバーは、

- 自動車税など: A\$1,200
- 年間走行距離: 13,700 [km]
- 平均走行速度: 59.6 [km/h]
- 平均走行時間: 230 [h]

MC課金を適用したとき、kmhあたりいくら課金される？

Next: 5, 6章

MC課金の理論的性質を検証

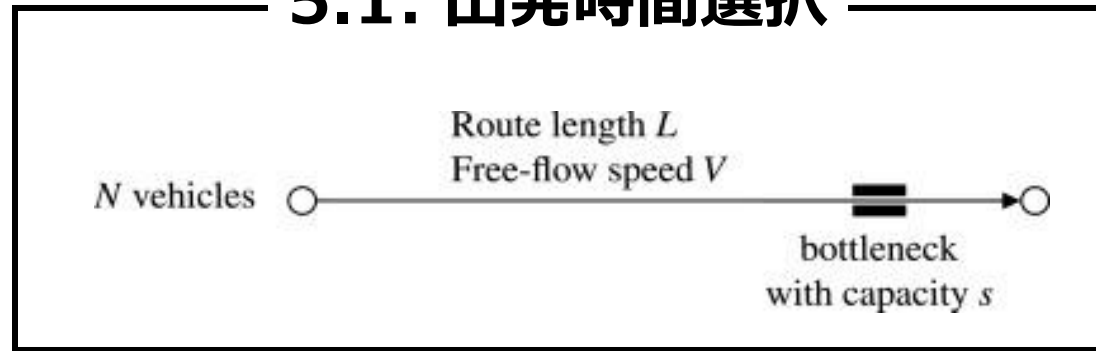
5. Impact of mobility-based charging on travel behaviour and congestion

5. Impact of mobility-based charging on travel behaviour and congestion

Q. MC課金が利用者の選択行動と交通状態にどう影響するか

5章では理論的ケーススタディ

5.1: 出発時間選択



※比較パターン

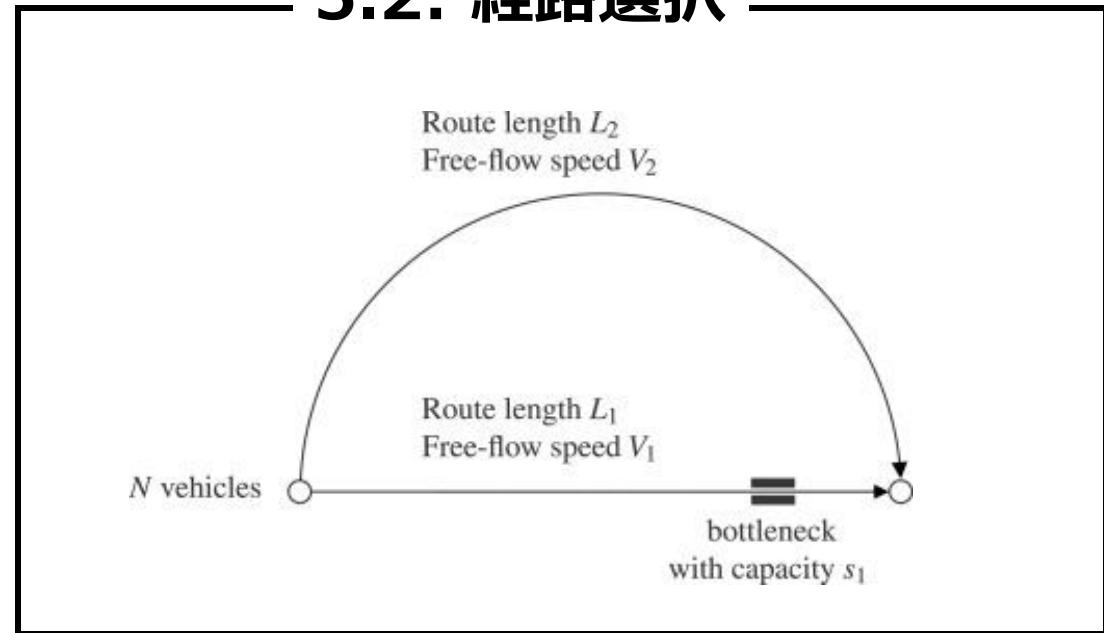
$$c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

MC課金: $\mu_n = (\lambda_n / \tau_n) \delta_n$, $\delta_n > 0$

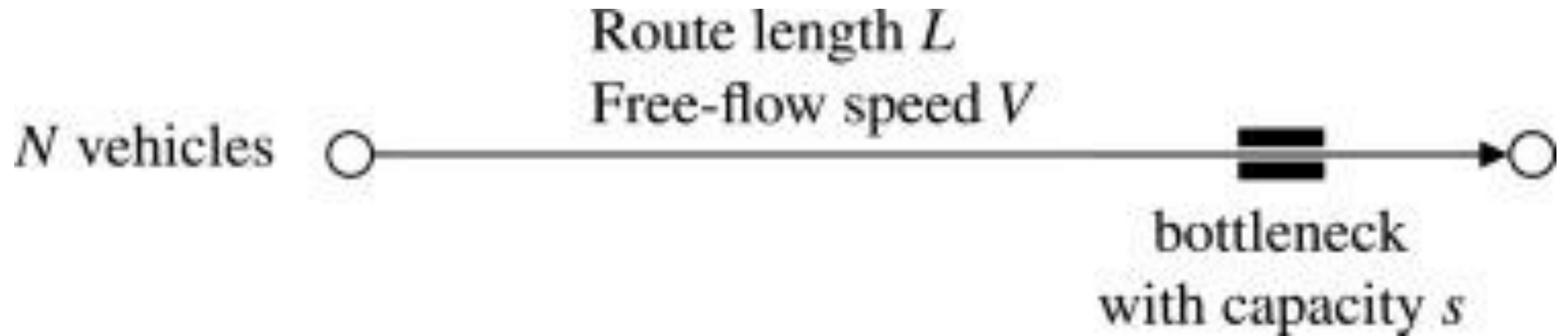
距離課金: $\mu_n = 0$, $\delta_n > 0$

無課金: $\mu_n = 0$, $\delta_n = 0$

5.2: 経路選択



5.1: 出発時間選択



5.1 Impact on departure time choice

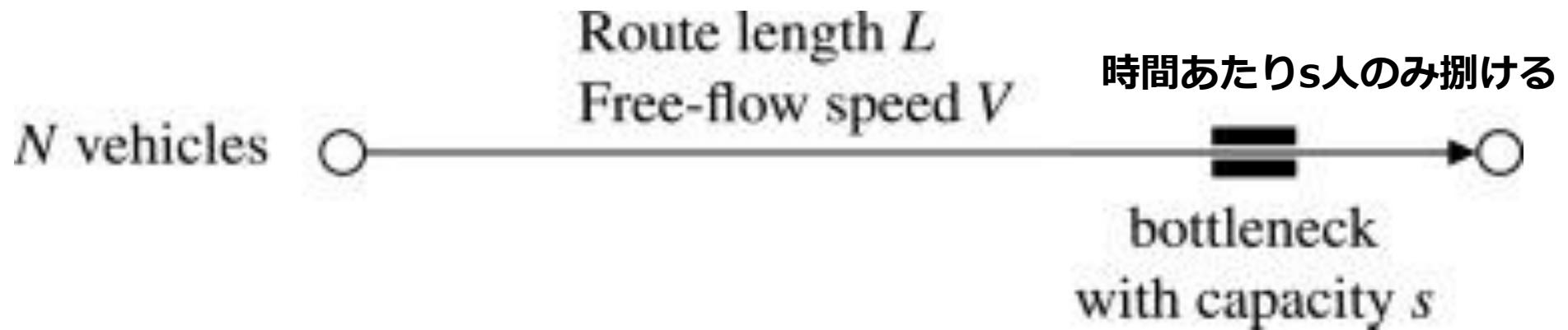


Fig. 7. Single road with a bottleneck.

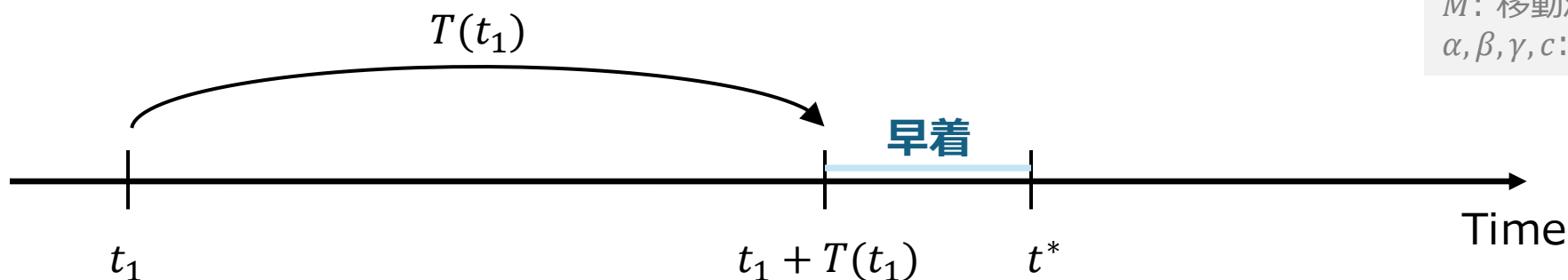
5.1 Impact on departure time choice

出発時刻 t のときの一般化した総旅行コスト $C(t)$

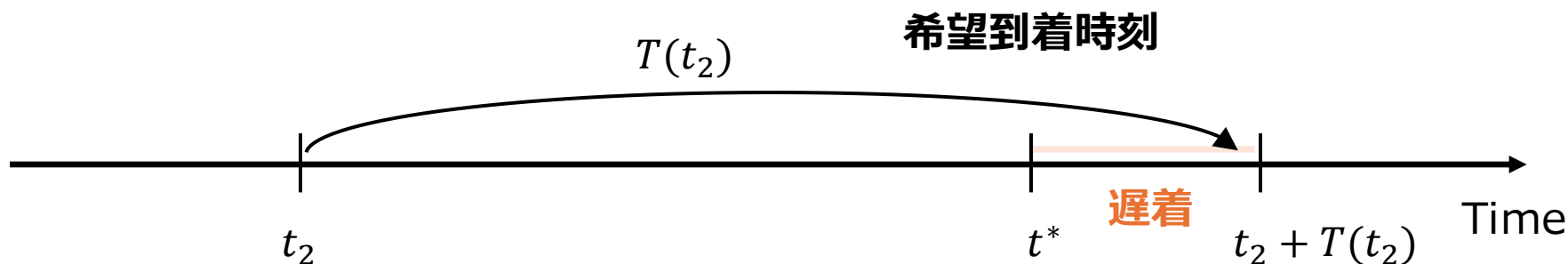
$$C(t) = \underbrace{\alpha T(t)}_{\text{旅行時間コスト}} + \underbrace{\beta \max\{0, t^* - t - T(t)\}}_{\text{早着コスト}} + \underbrace{\gamma \max\{0, t + T(t) - t^*\}}_{\text{遅着コスト}} + \underbrace{cM(t)}_{\text{課金項}}$$

t : 出発時間
 t^* : 希望到着時間
 $T(t)$: 旅行時間
 M : 移動消費量
 α, β, γ, c : パラメータ

早着コスト:



遅着コスト:



5.1 Impact on departure time choice

出発時刻 t のときの一般化した総旅行コスト $C(t)$

$$C(t) = \alpha T(t) + \beta \max\{0, t^* - t - T(t)\} + \gamma \max\{0, t + T(t) - t^*\} + cM(t)$$

旅行時間コスト

早着コスト

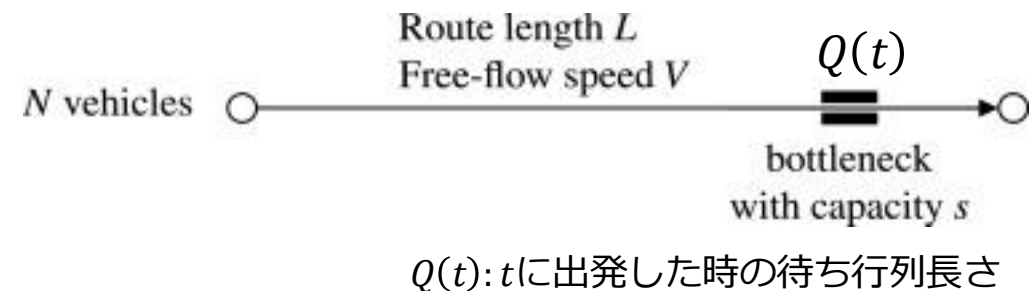
遅着コスト

課金項

MC課金額 $cM(t)$ は、

$$cM(t) = \mu T(t) + \delta L$$

目標: $N, L, V, s, Q(t)$ で書き直して、均衡解を求める



5.1 Impact on departure time choice

出発時刻 t のときの一般化した総旅行コスト $C(t)$

$$C(t) = \alpha T(t) + \beta \max\{0, t^* - t - T(t)\} + \gamma \max\{0, t + T(t) - t^*\} + cM(t)$$

旅行時間コスト

早着コスト

遅着コスト

課金項

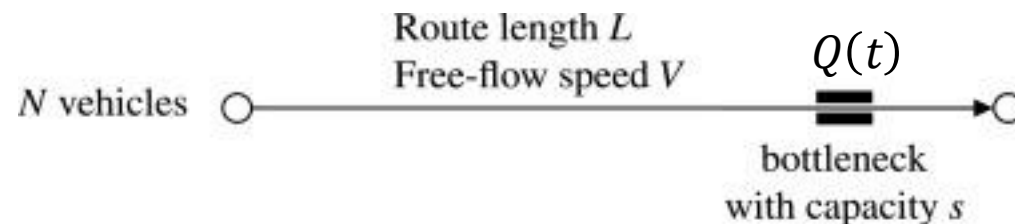
MC課金額 $cM(t)$ は、

$$cM(t) = \mu T(t) + \delta L$$

総旅行時間 $T(t)$ は、“自由流走行時間 + ボトルネックにおける待ち時間”として書ける。

$$T(t) = \frac{L}{V} + \frac{Q(t)}{s}$$

目標: $N, L, V, s, Q(t)$ で書き直して、均衡解を求める



$Q(t)$: t に出発した時の待ち行列長さ

5.1 Impact on departure time choice

出発時刻 t のときの一般化した総旅行コスト $C(t)$

$$C(t) = \underbrace{\alpha T(t)}_{\text{旅行時間コスト}} + \underbrace{\beta \max\{0, t^* - t - T(t)\}}_{\text{早着コスト}} + \underbrace{\gamma \max\{0, t + T(t) - t^*\}}_{\text{遅着コスト}} + \underbrace{cM(t)}_{\text{課金項}}$$

MC課金額 $cM(t)$ は、

$$cM(t) = \mu T(t) + \delta L$$

総旅行時間 $T(t)$ は、“自由流走行時間 + ボトルネックにおける待ち時間”として書ける。

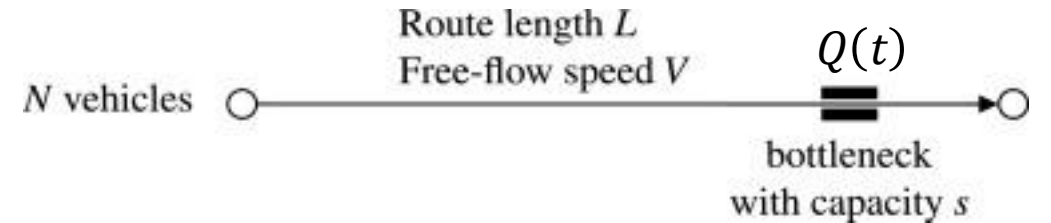
$$T(t) = \frac{L}{V} + \frac{Q(t)}{s}$$

2式より $C(t)$ は以下のように書ける。

$$C(t) = (\alpha + \mu) \frac{Q(t)}{s} + \beta \max\left\{0, t^* - t - \frac{L}{V} - \frac{Q(t)}{s}\right\} + \gamma \max\left\{0, t + \frac{L}{V} + \frac{Q(t)}{s} - t^*\right\} + C^0$$

ただし、 C^0 は最小一般化コスト: $C^0 = (\alpha + \mu) \frac{L}{V} + \delta L$

目標: $N, L, V, s, Q(t)$ で書き直して、均衡解を求める



$Q(t)$: t に出発した時の待ち行列長さ

5.1 Impact on departure time choice

Wardrop (1952) の第一法則を仮定

Wardrop均衡における出発率 $r(t)$ ($\int_t r(t)dt = N$)は以下で表される (詳しくはAppendix. A)。

$$r(t) = \begin{cases} \left(\frac{\alpha + \mu}{\alpha + \mu - \beta} \right) s, & t \in [t', \tilde{t}) \\ \left(\frac{\alpha + \mu}{\alpha + \mu + \gamma} \right) s, & t \in [\tilde{t}, t''] \end{cases}$$

すると総遅延時間 H (Fig.8の灰色部) も計算できる。

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha + \mu} \right) \left(\frac{\gamma}{\beta + \gamma} \right) \left(\frac{N^2}{s} \right)$$

α : 旅行時間コストのパラメータ
 β, γ : 早着, 遅着のパラメータ
 μ : 旅行時間あたりの課金額
 δ : 旅行距離あたりの課金額
 s : ボトルネックの出口容量
 N : 旅行者数

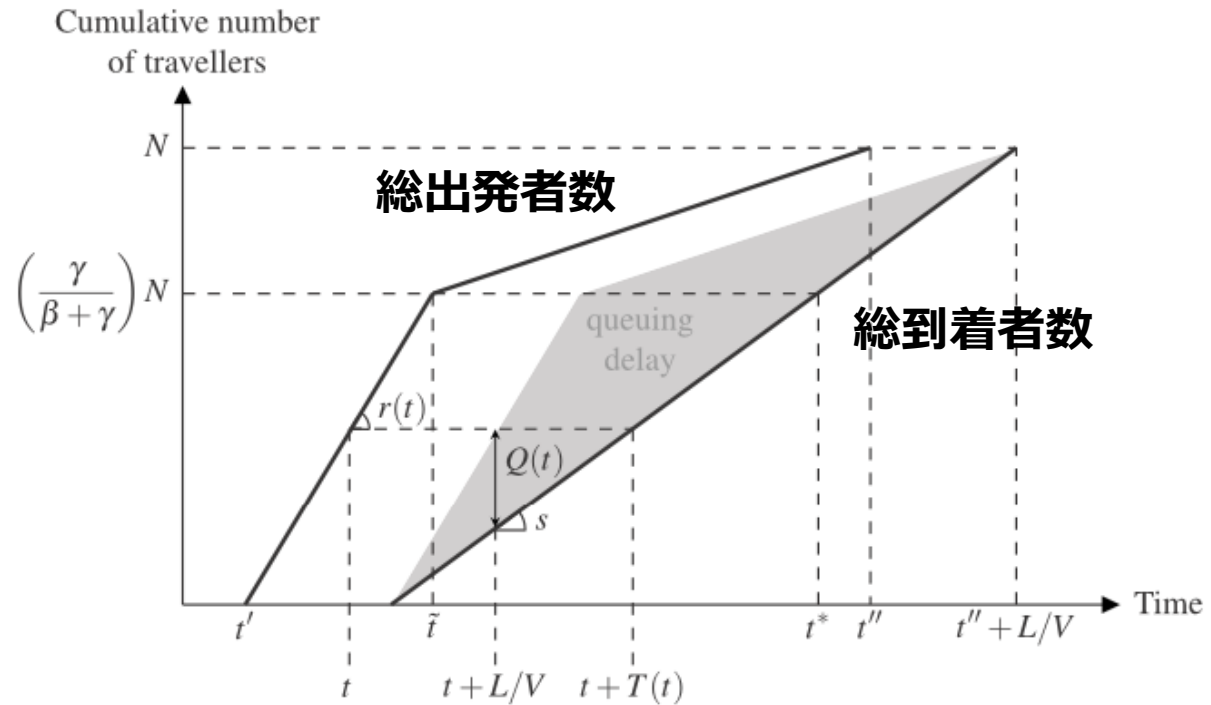


Fig. 8. Cumulative departures and arrivals in bottleneck model.

5.1 Impact on departure time choice

総遅延時間 H (Fig.8の灰色部) も計算できる。

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha + \mu} \right) \left(\frac{\gamma}{\beta + \gamma} \right) \left(\frac{N^2}{s} \right)$$

α : 旅行時間コストのパラメータ
 β, γ : 早着, 遅着のパラメータ
 μ : 旅行時間あたりの課金額
 δ : 旅行距離あたりの課金額
 s : ボトルネックの出口容量
 N : 旅行者数

$$\mu_n = (\lambda_n / \tau_n) \delta_n$$

H は

- μ (時間課金) に依存
- δ (距離課金) に非依存

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

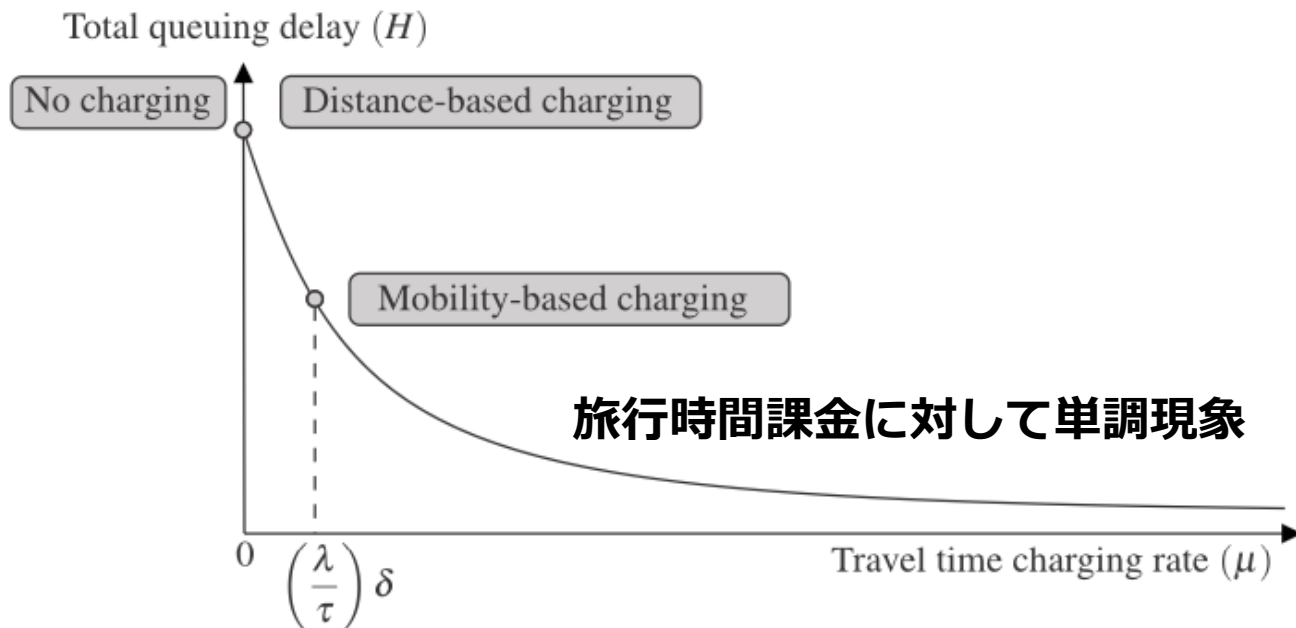


Fig. 9. Total queuing delay depending on the travel time charging rate in the bottleneck model.

5.1 Impact on departure time choice

総遅延時間 H (Fig.8の灰色部) も計算できる。

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha + \mu} \right) \left(\frac{\gamma}{\beta + \gamma} \right) \left(\frac{N^2}{s} \right)$$

α : 旅行時間コストのパラメータ
 β, γ : 早着, 遅着のパラメータ
 μ : 旅行時間あたりの課金額
 δ : 旅行距離あたりの課金額
 s : ボトルネックの出口容量
 N : 旅行者数

$$\mu_n = (\lambda_n / \tau_n) \delta_n$$

H は

- μ (時間課金) に依存
- δ (距離課金) に非依存

つまりこのケースでは...

- 時間課金 μ が遅延時間を抑制する
- 距離課金 δ だけでは遅延時間に影響を与えないことがわかり (!) 、

MC課金は

- 距離課金より常に遅延時間を抑制
- 距離/時間費用比 $(= \frac{\lambda}{\tau})$ が下がるほど遅延時間は減少

$$\text{課金額} = c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$$

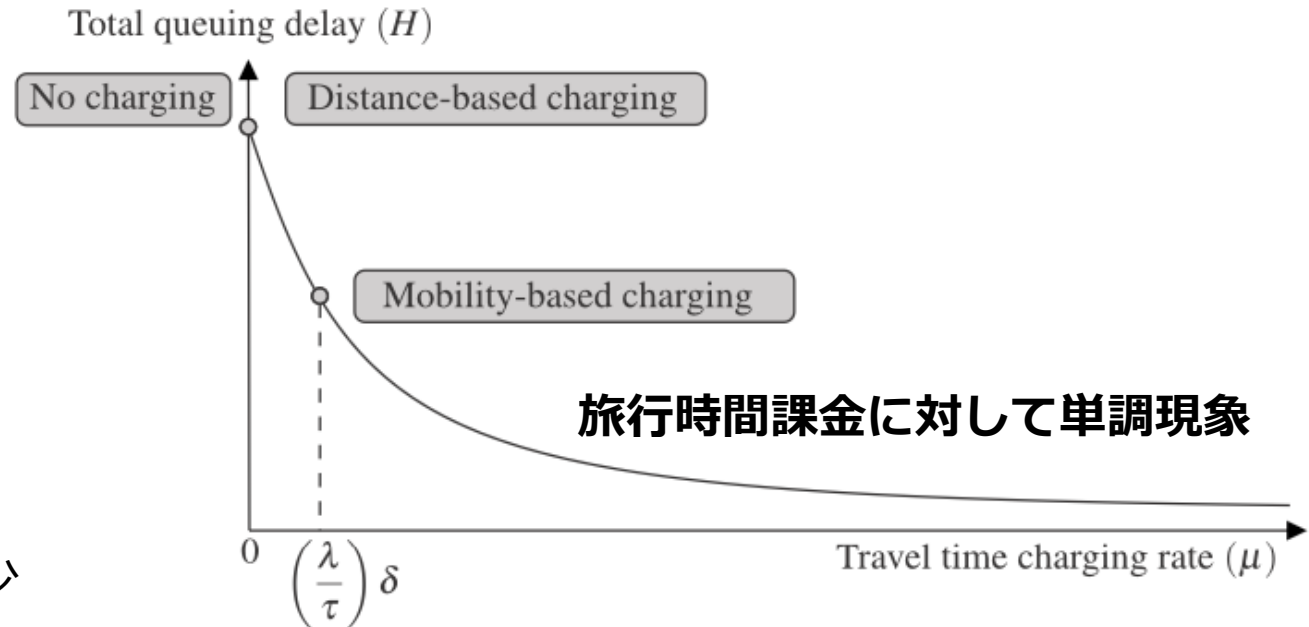
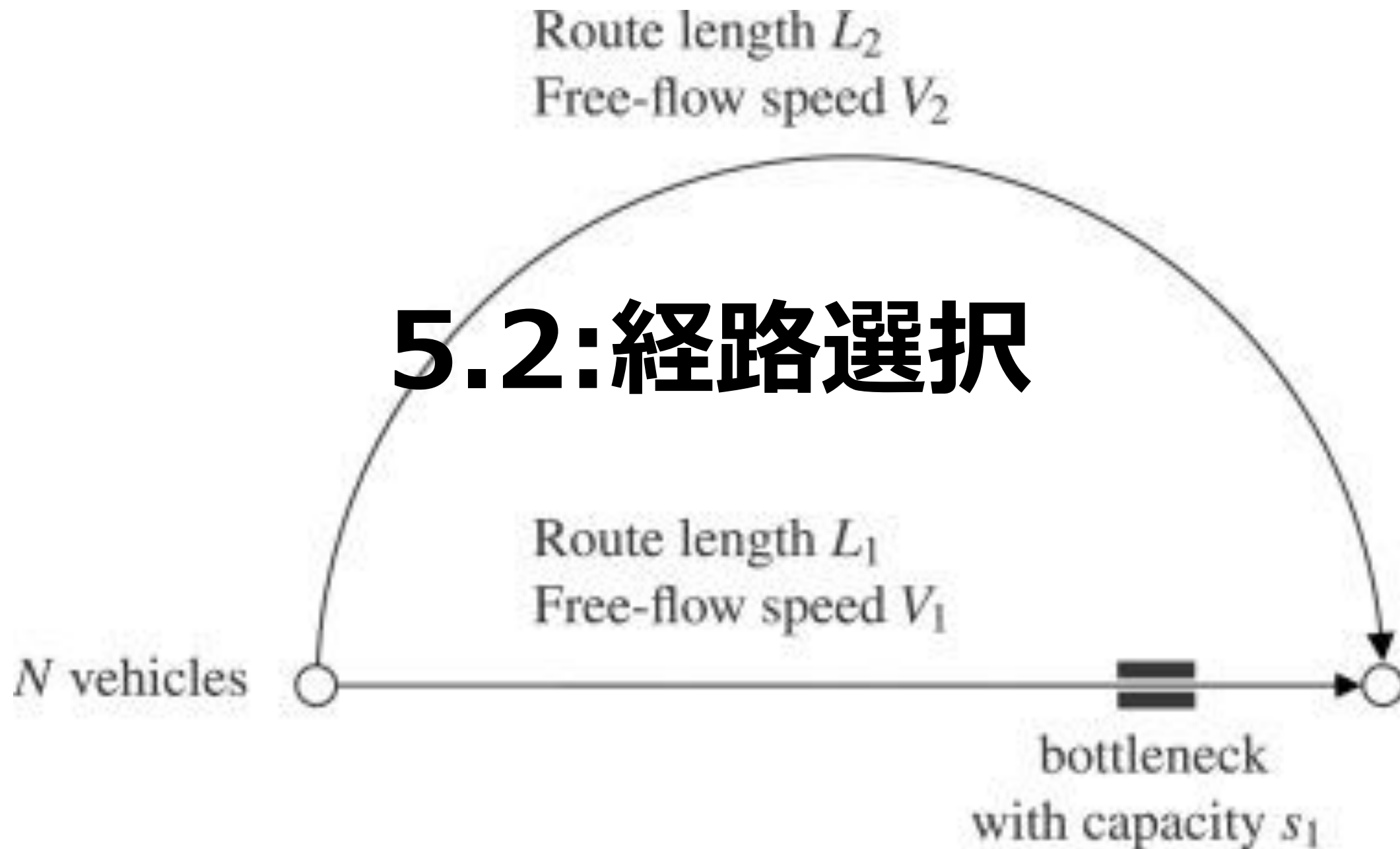


Fig. 9. Total queuing delay depending on the travel time charging rate in the bottleneck model.

5.2: 経路選択



5.2 Impact on route choice

$t \in [t', t'']$ で出発率 $r^* = \frac{N}{t'' - t'}$ で出発する N 人の旅行者が最適なルートを選ぶ。
各ルート i の一般化された旅行コスト $C_i(t)$ は、

$$C_i(t) = \alpha T_i(t) + c M_i(t)$$

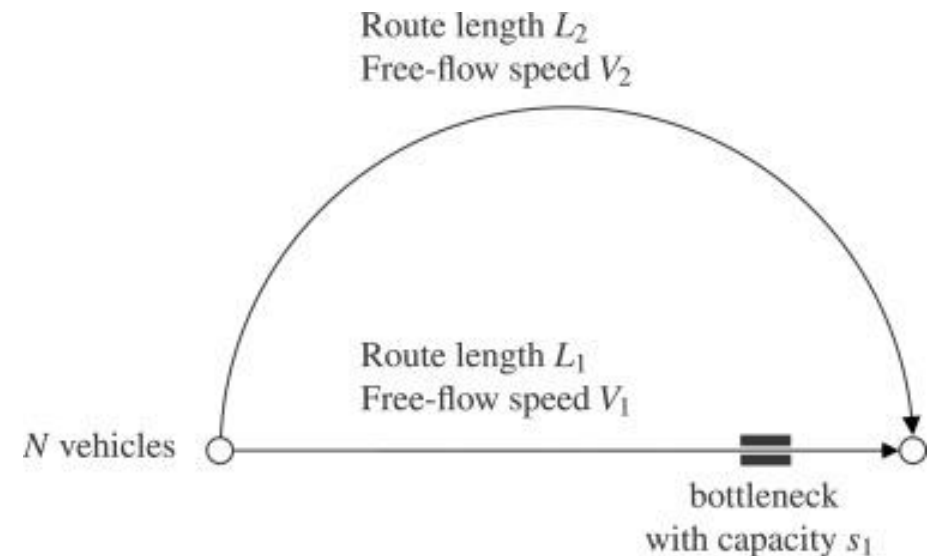


Fig. 10. Dual route network.

5.2 Impact on route choice

$t \in [t', t'']$ で出発率 $r^* = \frac{N}{t'' - t'}$ で出発する N 人の旅行者が最適なルートを選ぶ。
各ルート i の一般化された旅行コスト $C_i(t)$ は、

$$C_i(t) = \alpha T_i(t) + c M_i(t)$$

5.1 同様に、移動消費に対する課金項 $c M_i(t)$ は、

$$c M_i(t) = \mu T_i(t) + \delta L_i$$

ルート 1, 2 の旅行時間は、

$$T_1(t) = \frac{L_1}{V_1} + \frac{Q_1(t)}{s_1} \text{ and } T_2(t) = \frac{L_2}{V_2}$$

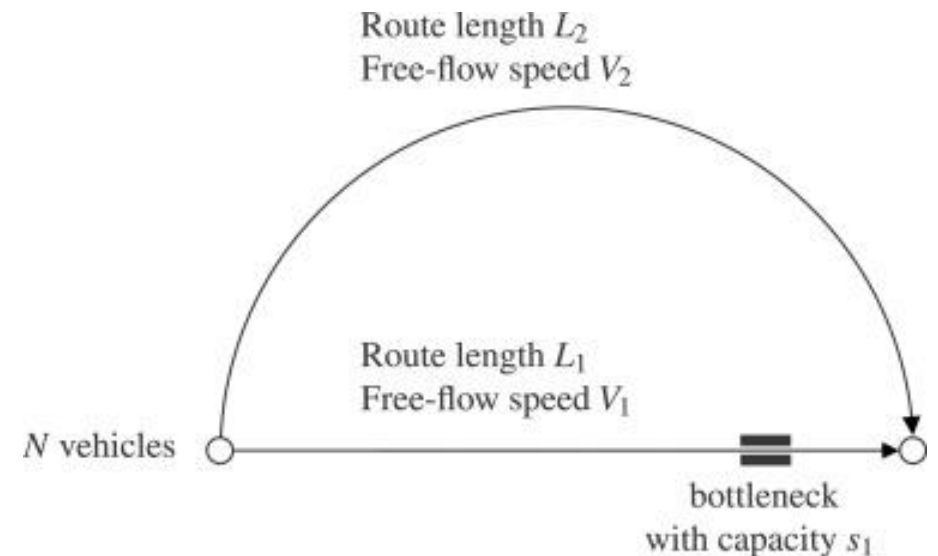


Fig. 10. Dual route network.

5.2 Impact on route choice

$t \in [t', t'']$ で出発率 $r^* = \frac{N}{t'' - t'}$ で出発する N 人の旅行者が最適なルートを選ぶ。

各ルート i の一般化された旅行コスト $C_i(t)$ は、

$$C_i(t) = \alpha T_i(t) + c M_i(t)$$

5.1 同様に、移動消費に対する課金項 $c M_i(t)$ は、

$$c M_i(t) = \mu T_i(t) + \delta L_i$$

ルート 1, 2 の旅行時間は、

$$T_1(t) = \frac{L_1}{V_1} + \frac{Q_1(t)}{s_1} \text{ and } T_2(t) = \frac{L_2}{V_2}$$

このとき、二式によって C_i を書き換えて、

$$\begin{cases} C_1(t) = (\alpha + \mu) \frac{Q_1(t)}{s_1} + C_1^0 \\ C_2(t) = C_2^0 \end{cases}$$

ただし、 $C_i^0 = (\alpha + \mu) \frac{L_i}{V_i} + \delta L_i$

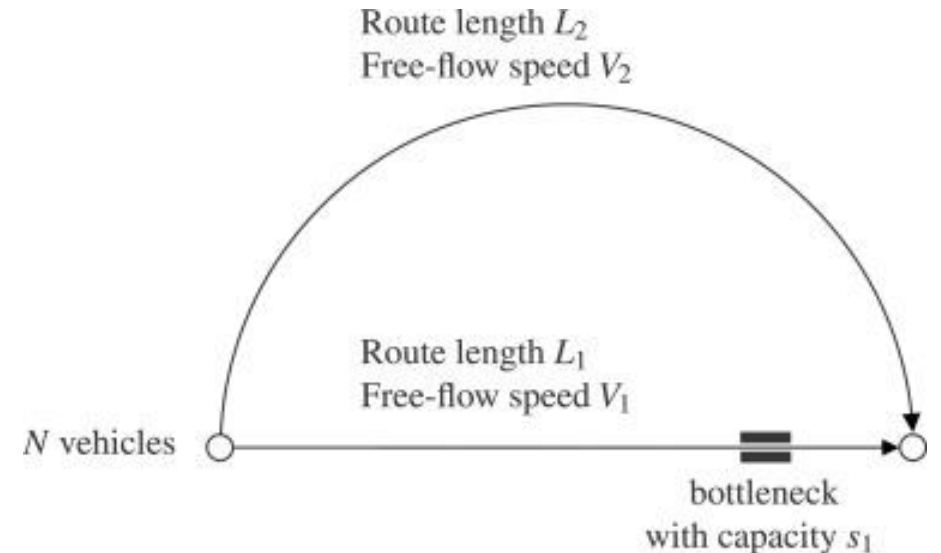


Fig. 10. Dual route network.

5.2 Impact on route choice

$$C_1^0 < C_2^0 \text{ を仮定}$$

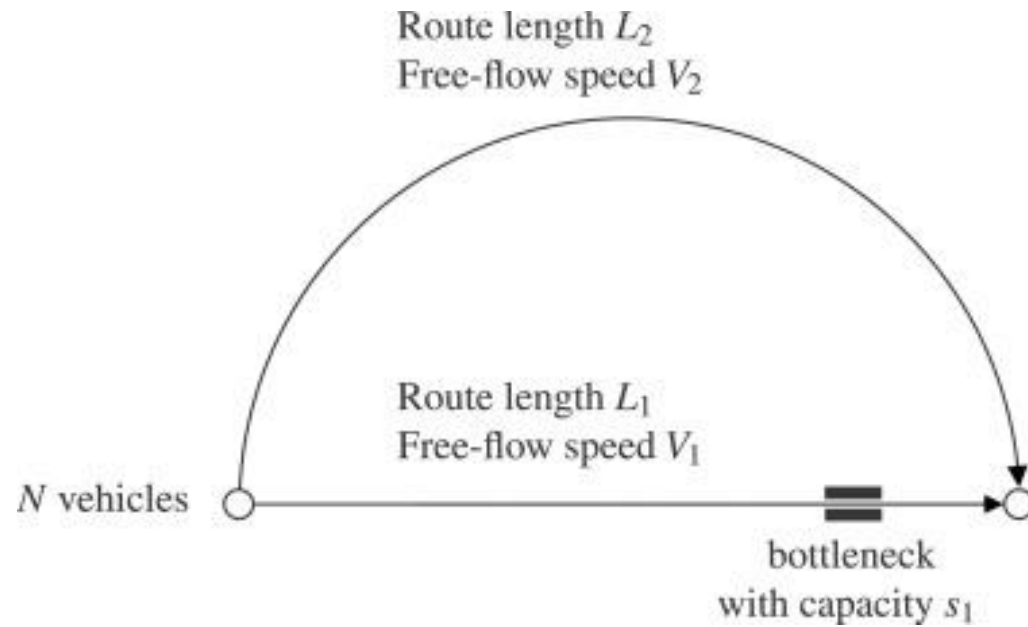
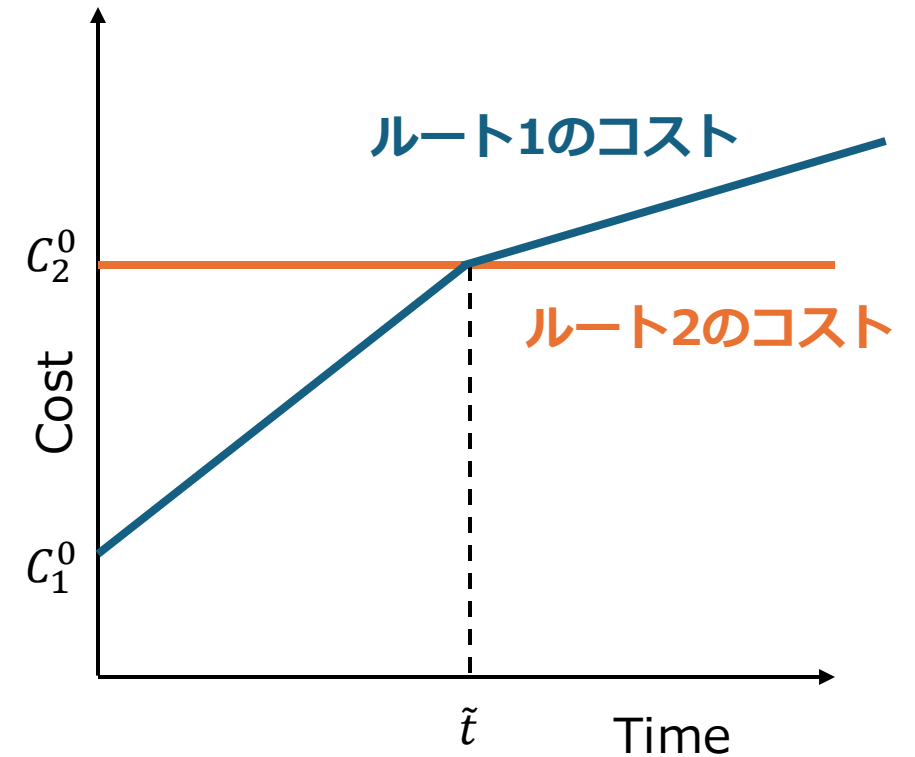


Fig. 10. Dual route network.



5.2 Impact on route choice

各経路ごとに出発率 $r_i(t)$ を考えると、

$$r_1(t) + r_2(t) = r^*$$

Wardrop均衡を各時間に対して適用し、均衡出発率 $r_i(t)$ を考えたい。

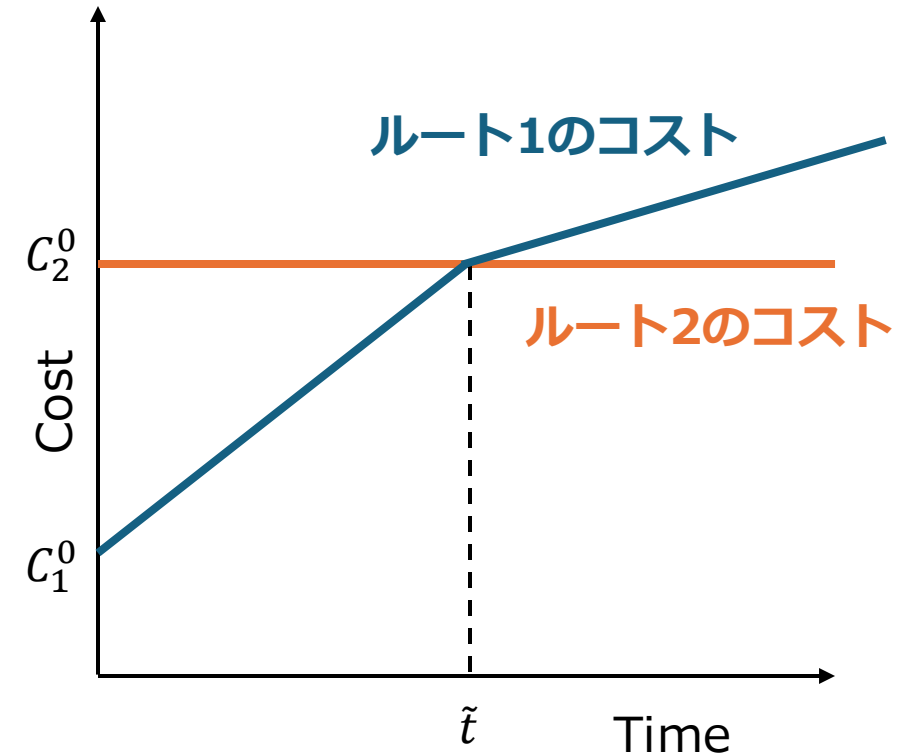
ルート1の初期コスト優位性を $\tilde{t}$ とすると、

$$\tilde{t} = \frac{C_2^0 - C_1^0}{\alpha + \mu} = \frac{L_2}{V_2} - \frac{L_1}{V_1} + \left(\frac{\delta}{\alpha + \mu} \right) (L_2 - L_1)$$

※自由流走行時間の差, 走行距離の差が大きいほどルート1のコストが C_2^0 に到達する時間が長くなると解釈できる。

このとき、3つに場合分けでき、

- | | |
|--|----------|
| Case1: $\tilde{t} \leq 0$ | ルート2のみ |
| Case2: $0 < \tilde{t} < \left(\frac{r^* - s_1}{s_1} \right) \left(\frac{N}{r^*} \right)$ | 両方のルート使用 |
| Case3: $\left(\frac{r^* - s_1}{s_1} \right) \left(\frac{N}{r^*} \right) \leq \tilde{t}$ | ルート1のみ |



初めてルート2が利用される時間: $\tilde{t} \in [t', t'']$ とする。

5.2 Impact on route choice

初めてルート2が利用される時間を $\tilde{t} \in [t', t'']$ とする。
 ルート1の均衡出発率は以下ようになる（詳しくは Appendix B）。

$$r_1(t) = \begin{cases} r^*, & t \in [t', \tilde{t}] \\ s_1, & t \in [\tilde{t}, t''] \end{cases}$$

ただし、

$$\tilde{t} = \begin{cases} t', & \text{Case 1} \\ t' + \left(\frac{s_1}{r^* - s_1} \right) \tilde{T}, & \text{Case 2} \\ t'', & \text{Case 3} \end{cases}$$

このとき、総遅延時間 H は以下で計算される。

$$H = \begin{cases} 0, & \text{Case 1} \\ \left(\frac{N}{r^*} + \frac{(r^* - 2s_1)\tilde{T}}{2(r^* - s_1)} \right) \tilde{T}s_1, & \text{Case 2} \\ \left(\frac{r^* - s_1}{2r^*s_1} \right) N^2, & \text{Case 3} \end{cases}$$

- このとき、3つに場合分けでき、

Case1: $\tilde{T} \leq 0$
 ルート2のみ

Case2: $0 < \tilde{T} < \left(\frac{r^* - s_1}{s_1} \right) \left(\frac{N}{r^*} \right)$
 両方のルート使用

Case3: $\left(\frac{r^* - s_1}{s_1} \right) \left(\frac{N}{r^*} \right) \leq \tilde{T}$
 ルート1のみ

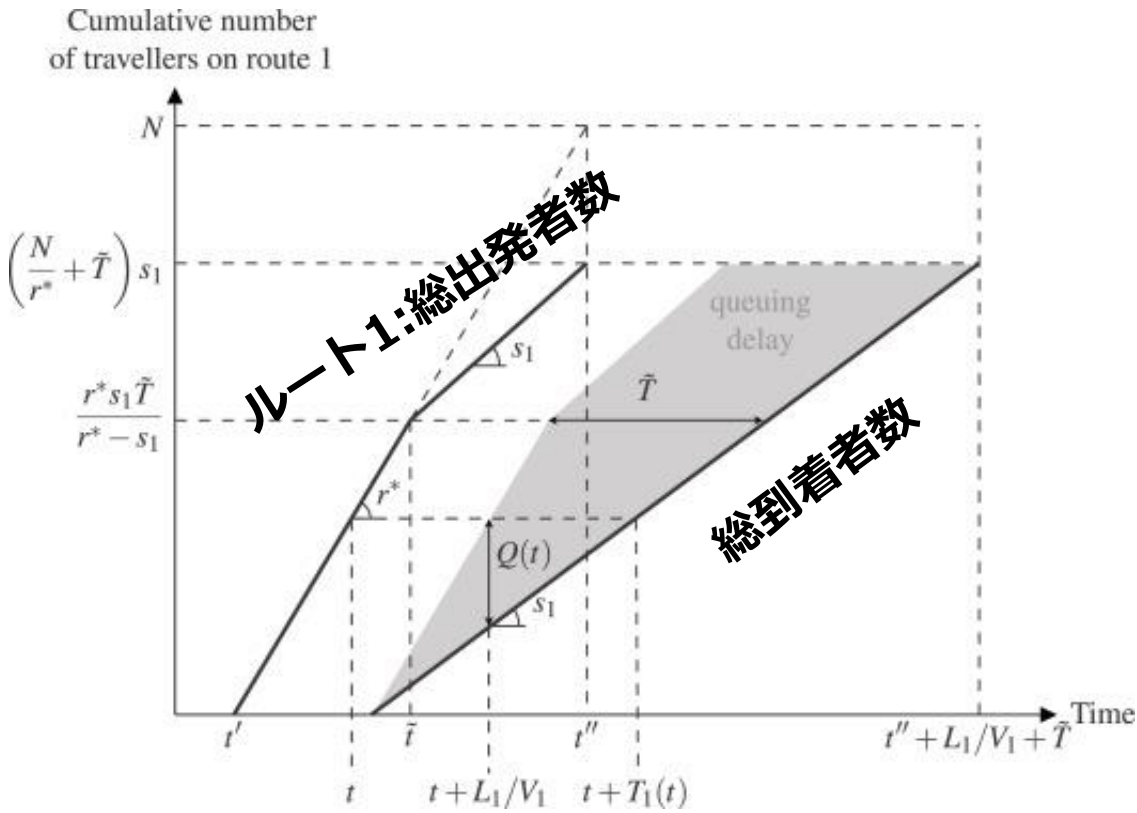


Fig. 11. Cumulative departures and arrivals in route choice model.

5.2 Impact on route choice

このとき、総遅延時間 H は以下で計算される。

$$H = \begin{cases} 0, & \text{Case 1} \\ \left(\frac{N}{r^*} + \frac{(r^* - 2s_1)\tilde{T}}{2(r^* - s_1)} \right) \tilde{T}s_1, & \text{Case 2} \\ \left(\frac{r^* - s}{2r^*s} \right) N^2, & \text{Case 3} \end{cases}$$

ただし、

$$\tilde{T} = \frac{C_2^0 - C_1^0}{\alpha + \mu} = \frac{L_2}{V_2} - \frac{L_1}{V_1} + \left(\frac{\delta}{\alpha + \mu} \right) (L_2 - L_1)$$

つまりこのケースでは...

- **時間課金**が遅延時間を抑制する
 - **距離課金**により遅延時間を**増加**させる (!)
- ことがわかる

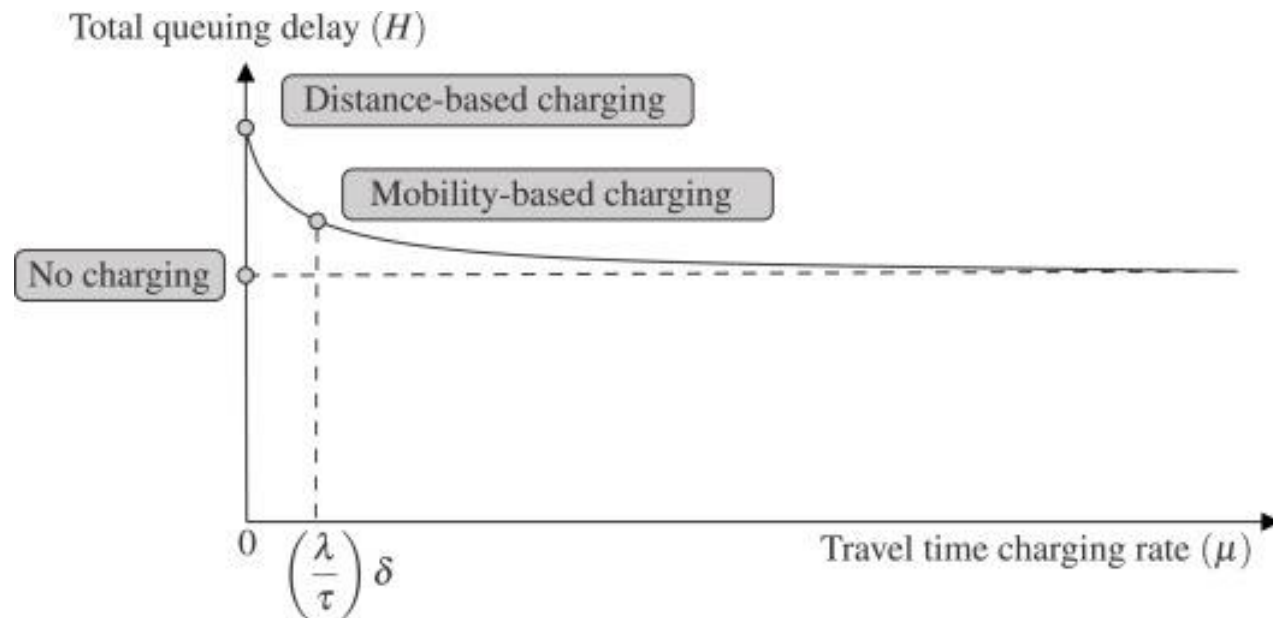


Fig. 12. Total queuing delay depending on the travel time charging rate in case II.

MC課金は

- 距離課金より常に遅延時間を抑制
- 距離/時間費用比(= λ/τ)が下がるほど遅延時間は減少
- 課金なしの場合に漸近

6. Technology innovation's impact on mobility consumption

6.1 Connected and automated vehicles

例. Platooningによる車間距離減少

→ λ_n と τ_n を調整

λ_n : バンパー間隔: 6.25[m]→2[m]

$$\lambda_n = \frac{4.87 + 2}{1000} = 0.00687[km]$$

τ_n : 反応時間: 1.23[sec]→0.5[sec]

$$\tau_n = \frac{0.5}{3600} = 0.000139[h]$$

NGSIMでの道路範囲 (300m, 28s) に基づくと、

$$\frac{(6.25 - 2) \cdot 28 + (1.23 - 0.5) \cdot 300}{11.12 \cdot 28 + 1.23 \cdot 300} \approx 0.50$$

Mobility Consumptionをほぼ半減！

3章.NGSIM

Table 3

Average values of spacing, vehicle size, and reaction time based on NGSIM I-80 data.

Parameter	Unit	Value
Average bumper-to-bumper spacing, taken from Ma and Ahn (2008)	m	6.25
Average bumper-to-bumper spacing, derived from the data	m	5.76
Average vehicle size, derived from the data	m	4.87
Average reaction time, taken from Ma and Ahn (2008)	s	1.23

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \text{平均車長} + \text{平均バンパー間距離} \\ &= 4.87 + 6.25 = 11.12 [m]\end{aligned}$$

$$\tau_n = \text{反応時間} = 1.23 [s]$$



6.1 Connected and automated vehicles

例. 自動-手動車混在流

- 人間運転車を追従する自動運転車：2.5[sec]
- 自動運転車を追従する人間運転車：1.9[sec]
- 人間運転車同士の追従：1.8[sec]

平均反応時間を1.9秒と仮定すると、

$$\frac{(6.25 - 2) \cdot 28 + (1.23 - 1.9) \cdot 300}{11.12 \cdot 28 + 1.23 \cdot 300} \approx -0.12$$

**混在流でMCは12%増
(本文では30%増と指摘?)**

3章.NGSIM

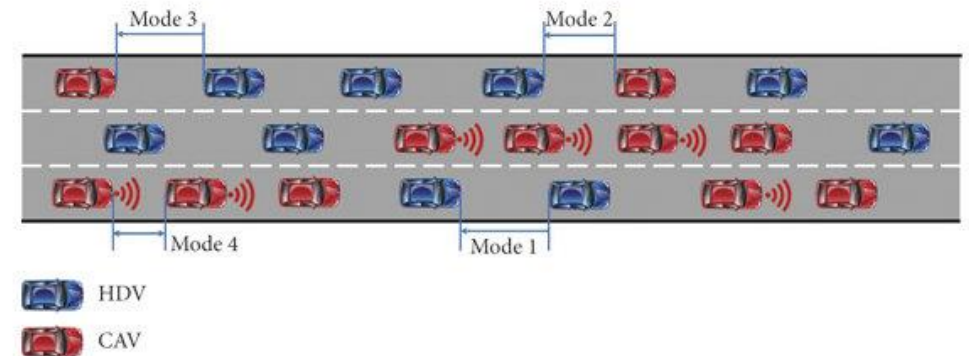
Table 3

Average values of spacing, vehicle size, and reaction time based on NGSIM I-80 data.

Parameter	Unit	Value
Average bumper-to-bumper spacing, taken from Ma and Ahn (2008)	m	6.25
Average bumper-to-bumper spacing, derived from the data	m	5.76
Average vehicle size, derived from the data	m	4.87
Average reaction time, taken from Ma and Ahn (2008)	s	1.23

$$\lambda_n = \text{平均車長} + \text{平均バンパー間距離} \\ = 4.87 + 6.25 = 11.12 [m]$$

$$\tau_n = \text{反応時間} = 1.23 [s]$$



6.2 Engine technologies

例. エンジン性能の向上

単位時間あたりのCO2排出量:

$$e_n = \eta_n^0 + \eta_n^1 v_n(t)$$

η_n^0, η_n^1 : 車両固有パラメータ

v_n : 車速

総排出量は、

$$E_n = \int_{t_n^0}^{t_n^0 + T_n} e_n(t) dt = \eta_n^0 T_n + \eta_n^1 D_n$$

炭素課金もMobility consumptionと同様にかけ、

$$c_n M_n + w_n E_n = (c_n \lambda_n + w_n \eta_n^0) T_n + (c_n \tau_n + w_n \eta_n^1) D_n$$

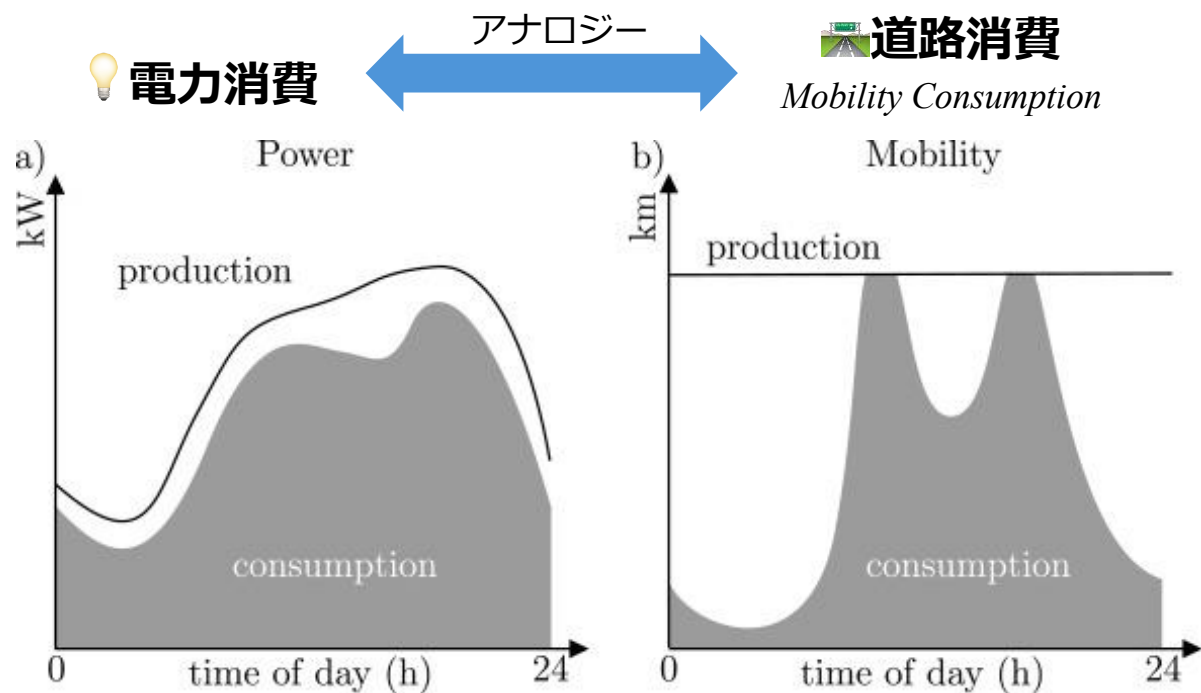
小結:

MCのシンプルな構造によって、各政策・技術評価が極めて簡単に記述可能！

7. Discussion and Conclusions

結論

① Mobility Consumptionの提案

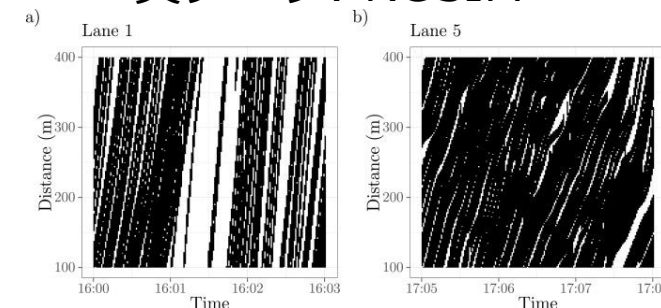


MC: $M_n = \lambda_n T_n + \tau_n D_n$

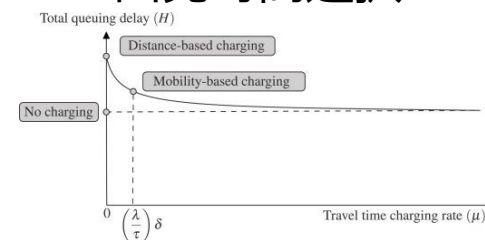
MC課金: $c_n M_n = \mu_n T_n + \delta_n D_n$

① MCの検証

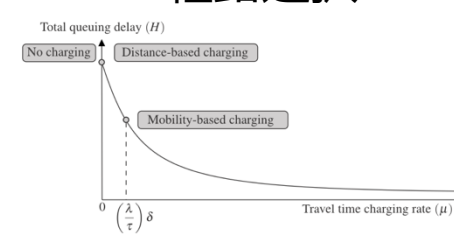
実データ: NGSIM



出発時間選択



経路選択



政策・技術応用



所感

- シンプル（線形和）なのに新しい！
 - 既存のRoad Pricingは時間次元を捉えていない、という着眼点
 - 計測が楽という点も説得力を持たせている
 - いい性質ありそう、ポテンシャルゲームとか
- 明快かつ説得力のある論理展開
 - 難しくはないがかなり分量がある。
 - 出発時間選択/経路選択の時間課金への対比よい
 - 距離課金で遅延増！？みたいな面白い結果もある
- （当たり前だけど）応用はまだまだ
 - 複数車線など状況が複雑化した際に、（メカニズムデザイン等に適用する上で）MCで十分表現できるのか？
 - 6章（政策技術応用）の内容がやや淡白（納得感がある訳ではなかった）