

渋滞のない道路交通システムのデザイン

- *Smart City*・自動運転車は
渋滞を解消できるか？ -

赤松 隆

(東北大学 大学院 情報科学研究科
工学部 建築社会環境工学科
都市システム計画コース)

「スマート・シティ」を構成する基本機能

“実物世界”（例：道路網の交通流）で

● 情報収集

（例：Probe車情報，路側感知器情報，モバイル(GPS)端末情報 etc.）

● (リアルタイム)制御

（例：流入制御・情報提供等の混雑制御）

無線/有線高速ネットワーク

“仮想世界”（Cloud Computers）で

● 情報を整理・統合

（例：道路網全体の交通状態（交通量，速度，事故状況 etc.）の把握）

● 情報を分析

（例：交通量パターンの予測，制御操作情報の計算）

「スマート・シティ」を構成する対象別システム

- **Smart Traffic(交通)**
 - プローブ情報 → 交通量把握 → 交通量予測 → 渋滞解消
- **Smart Grid(電力・エネルギー)**
- **Smart Housing&Building(オフィス/住宅等の建物)**
- **Smart Water Management(水道/水災害管理)**
- **Smart Security(公共安全)**
- **Smart Government(行政サービス)**
- 等々

Smart City (Smart Traffic), ITS

**ライド・シェアリング + 自動運転車 (SAVs) は
本当に渋滞を解消できるのか??**

容量増強のパラドクス (1)

- 交通需要:

- ◆ 1000 [台/時]

- 所要時間:

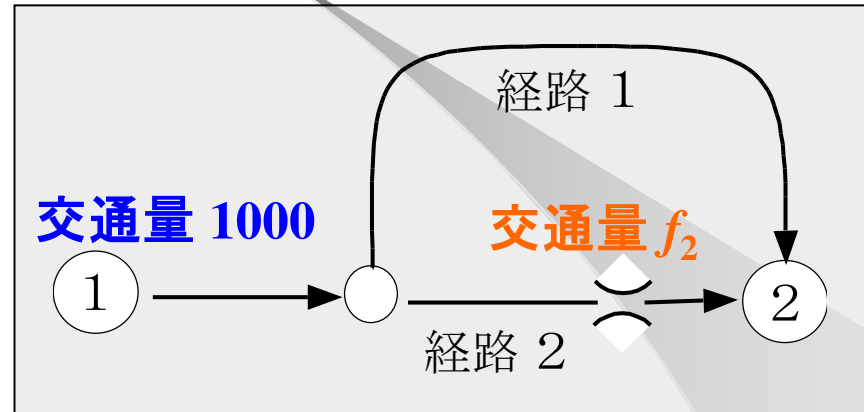
- ◆ 経路1: $C_1 = 15$ [分]

- ◆ 経路2: $C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / \gamma)$ [分], $\gamma = 500$

- 利用者の選択行動: 所要時間が小さい経路を選択

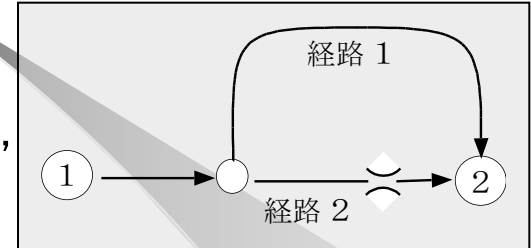
... もし $f_2 = 0$ なら, $C_1 > C_2 = 10 \rightarrow$ 経路2を選択

$f_2 = 1000$ なら, $C_1 < C_2 = 30 \rightarrow$ 経路1を選択



容量増強のパラドクス (2)

- **利用者均衡 (User Equilibrium) 状態:**
どの利用者也、自分だけ経路を変更しても、自分の所要時間を改善できない状態。



$$C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / \gamma)$$

- $\gamma = 500$ の場合の均衡状態:

$$f_2 = 250, f_1 = 750, \quad C_1 = C_2 = 15$$

- $\gamma = 1000$ の (**経路2の容量を改善した**) 均衡状態

$$f_2 = 500, f_1 = 500, \quad C_1 = C_2 = 15$$

⇒ えーっ! 利用者が費やす時間は全く改善されない!!
混雑緩和のために容量増強(お金を投資)したのに... orz

類似した様々な交通パラドクス

● バイパス道路建設のパラドクス

- ◆ いつも混雑する区間を迂回する新たな道路を建設
⇒ **どの経路の所要時間も悪化することがある。**

● インテリジェント信号制御のパラドクス

- ◆ 1つの旧式信号を“インテリジェント信号”に改良
(その交差点の交通需要に応じて青時間を最適に調整)
⇒ **交通網全体では総走行時間が悪化する。**

● 交通情報提供(経路誘導)のパラドクス

- ◆ 情報受信機を装備した利用者を最適経路へ誘導
⇒ **交通網全体の総走行時間, さらには, 情報受信者の所要時間も(誘導前より)悪化する。**

“個”の最適化 vs. “全体”の最適化 (1)

● システム最適(SO)状態 … “中央集権的” 配分

- ◆ 道路管理者が、各利用者(車両)の経路を決定
- ◆ ネットワーク全体での交通費用の総和をもはや改善できない(総交通費用を最小化する)状態

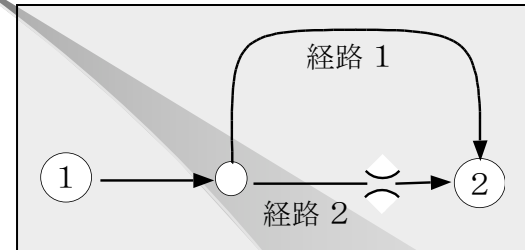
cf. 利用者均衡(UE)状態 … “自律分散的” 配分

- ◆ 個々の利用者が、自由に経路を選択
 - ◆ 利用者が自分の交通費用をもはや改善できない(自分の交通費用を最小化する)状態
- ⇒ 混雑が生じないなら, 総交通費用も最小化される
(“個”の最適化 ⇔ “システム全体”の最適化)

“個”の最適化 vs. “全体”の最適化 (2)

容量増強パラドクス問題での例:

- ◆ 交通需要: 1000 [台/時]
- ◆ 経路1: $C_1 = 15$ [分]
- ◆ 経路2: $C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / 500)$ [分]



● 利用者均衡 (UE) 状態:

$$C_1 = C_2 = 15, \quad f_2 = 250, \quad f_1 = 750$$

$$\rightarrow \text{総所要時間: } TC = 15 \times 1000 = \underline{15000}$$

● システム最適 (SO) 状態:

$$C_1 = 15, \quad C_2 = 12.5, \quad f_2 = 125, \quad f_1 = 875$$

$$\rightarrow \text{総所要時間: } TC = 15 \times 875 + 12.5 \times 125 = \underline{14687.5}$$

“個”の最適化 vs. “全体”の最適化 (3)

- **SAVs (Shared Autonomous Vehicles)** が普及すれば、SO状態となる様に、各車の利用経路を制御可能では？
⇒ 混雑問題を解消/緩和できそうに思えるが...
- **問題点**
 - ◆ SO状態では、各経路の所要時間は不均等
⇒ 利用者間で不公平 (e.g., 特定の利用者だけ遠回り)
 - ◆ 複数のMobility Service (MS) 供給者が存在する場合、ネットワーク全体でのSO配分の達成は困難
 - ◆ “中央集権的” 制御 では、計算負荷が膨大 (動的な混雑を考慮したSO制御モデルは、解を求めるだけでも難しい)
⇒ Scalability がなく、大都市では実現困難

パラドクスと混雑料金 (1)

- **パラドクスが生じる根本的原因:**

交通混雑が引き起こす“外部不経済”

- ◆ 混雑した道路に1台の車に加わると、他の車にも所要時間の増加を強制.
- ◆ 各利用者は**自分の交通費用**を最小化するよう行動.
 - … 他車に及ぼす所要時間の増分(**社会的限界費用**)を(経路選択の際に)考慮しない.

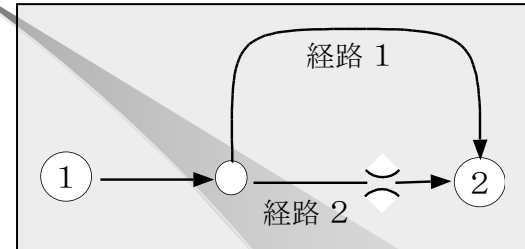
- **解決策:** 社会的限界費用に相当する「混雑料金」を賦課

- … 市場がないために「価格」がついていない
「道路サービス利用」に対する「**適正価格**」の代替物

パラドクスと混雑料金 (2)

容量増強パラドクス問題での例:

- ◆ 交通需要: 1000 [台/時]
- ◆ 経路1: $C_1 = 15$ [分]
- ◆ 経路2: $C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / 500)$ [分]



● なにもしない均衡状態:

$$C_1 = C_2 = 15, \quad f_2 = 250, \quad f_1 = 750$$

→ 総所要時間: $TC = \underline{15000}$

● 経路2に 2.5分相当の混雑料金を賦課した均衡状態:

$$C_1 = 15, \quad C_2 = 12.5, \quad f_2 = 125, \quad f_1 = 875$$

($C_1 = 15 = C_2 + 2.5$: 料金込みの経路費用に関して均衡)

→ 総所要時間: $TC = \underline{14687.5}$

⇒ システム最適状態が“自律分散的”に実現!

パラドクスと混雑料金 (3)

容量増強パラドクス問題での例:

- ◆ 経路2の所要時間関数

$$\begin{cases} \text{容量増強前: } C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / 500) \text{ [分]} \\ \text{容量増強後: } C_2 = 10 + 10 \times (f_2 / 1000) \text{ [分]} \end{cases}$$

- **混雑料金を賦課し, 容量増強した場合の均衡状態:**

$$C_1 = 15, C_2 = 12.5, f_2 = 250, f_1 = 750$$

$$\rightarrow \text{総所要時間: } TC = 15 \times 750 + 12.5 \times 250 = \underline{14375}$$

- 総交通費用 TC を比較すると...

	混雑料金なし	混雑料金導入
初期状態	15000	14687.5
容量増強	15000	14375

容量増強によって
TC が減少(改善)!

「混雑料金」制度の難点（1）

- **交通渋滞解消のための「混雑料金制」**

- … 理論的には、混雑外部性を解消する優れた制度

- **混雑料金制が機能するための前提条件**

- 効率的な料金徴収法 … ETCシステムの普及で解決

- 最適な料金を設定するためには、様々な利用者の「**需要関数**」情報を正確に把握する必要 がある

eg. 潜在的な利用者数, 希望到着時刻（時刻別利用者数）, 時間価値 etc.



誤った需要情報に基づいて、高/低 過ぎる料金を賦課すると、交通需要の抑制/許容し過ぎによる **経済損失が発生する！**

「混雑料金」制度の難点（2）

- **Mobility Sharing Service の動的料金システム**
 - **Uber の “Surge Pricing”**: サービス需要(乗車希望者)の多い区域・時間帯では、高い料金を設定
 - ⇒ 混雑料金制をより精緻化したものと考えれば、混雑の解消/緩和効果が期待できそうに思えるが...
 - **実際に生じた問題**: 高料金の区域・時間帯に、Uber 運転手(登録車)が過剰に集まり、道路の混雑状況が悪化!



混雑外部性がある状況で、モビリティ・サービス(MS)の需要と供給を一致させ、かつ、混雑を解消/緩和する適切な動的料金を設定することは容易ではない...

混雑問題に対する従来方策のまとめ

1. 道路建設・容量増強

- × 莫大な予算が必要
- × 必ずしも混雑解消しない(“パラドクス”の発生)

2. ITSによる情報提供

- (比較的)低予算で実施可能
- × 必ずしも混雑解消しない(“パラドクス”の発生)

3. ITS (ETC) を活用した混雑料金

- (比較的)低予算で実施可能
- (理論上は)混雑減少効果あり
- × 最適な料金の設定が難しい
- × 渋滞解消のための動的料金設定は、さらに難しい

混雑問題に対する従来方策のまとめ

4. Mobility Sharing Service の動的料金

- × 混雑の外部性があるため、サービス提供者の私的な利潤最大化原則による料金設定では混雑を解消する適正料金レベルは実現しない

5. 自動運転による制御

- 高速道路での Sag 渋滞や Stop&Go の制御
- × 全利用者の経路の“独裁的”制御は困難
 - ・自動運転車の制御主体は単一ではない
 - ・SO状態は、利用者間で経路費用が不公平化)
- × “中央集権的”制御法は Scalability がない
(大都市では、計算処理面で破綻)

交通渋滞解消のための
近未来型のしくみ

T N P

Tradeable Network Permits

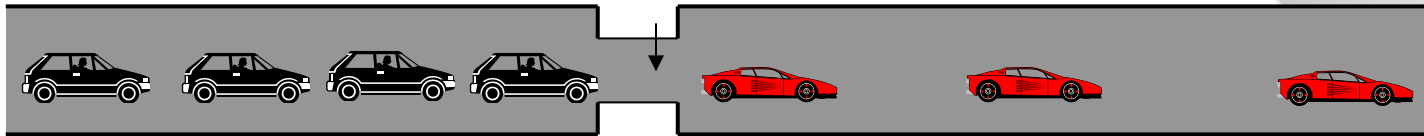
「ネットワーク通行権取引制度」

道路の「渋滞」と「交通容量」

● 渋滞:

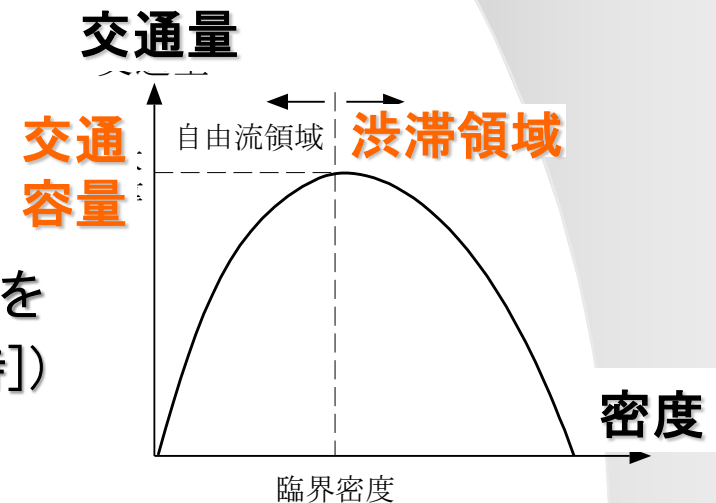
ある道路区間を通過しようとする車の台数 (**交通需要**) が、その道路区間を単位時間内に通過できる車の台数 (**交通容量**) を超過し、超過分が**超過地点**から上流に滞留する現象。

“ボトルネック”



⇒ **ボトルネックの交通需要が容量以下なら渋滞は発生しない**

(交通容量: 単位時間内にその道路区間を通過できる車両台数の上限値 [台/時])



通行権取引制度 (1)

- 飛行機や新幹線では, 乗客の“渋滞”は発生しない
 - 各便の座席数(=交通容量) \geq 各便の乗客数(=交通需要)
 - 指定席: ある便(時刻)のある座席(空間)の利用権の予約
 - 道路の「ボトルネック通行権」の設定と発行
 - ボトルネック通行権(Bottleneck Permit) :
特定のボトルネック地点を, 特定の時間帯に通行できる権利
 - 道路管理者は, 時間帯別の通行権を設定
(*i.e.*, 時間帯 t には, “時間帯 t の通行権” を所有している
道路利用者のみが, ボトルネックを通行可能)
- ⇒ 通行権の発行枚数をボトルネック容量以下にすれば,
原理的に, 渋滞は発生しない(混雑問題解消!)

通行権取引制度 (2)

● ボトルネック通行権の配布/配分 - 市場取引

- ▶ 通行権を売買取引できる「通行権取引市場」を創設
- ▶ 道路管理者: 時間帯別に, ボトルネック容量以下の枚数の通行権を市場で発行 ⇒ 渋滞は原理的に起こらない!!
- ▶ 道路利用者: 通行権取引市場で自分の希望する時間帯の通行権を市場で購入(売買)
 - ⇒ 混雑料金制の「最適料金」に対応する「適正価格」が市場取引過程で自律分散的に決まる
 - ⇒ 混雑料金制では道路管理者に要求される「詳細な需要情報」は全く不要!!

「通行権取引制度」の理論的特性

- 単一ボトルネック(時刻のみ選択)を対象とした **TBP (Tradable Bottleneck Permit)** 制度:
 - ◆ TBP 制度導入により, 利用者全員および道路管理者の状態が改善(**パレート改善**)される
 - ◆ TBP 導入下の均衡状態で実現する通行権配分は, **社会的な交通費用を最小化する配分** を達成可能
- 一般ネットワーク(時刻と経路を選択)を対象とした **TNP (Tradable Network Permit)** 制度:
 - ◆ TNP 導入下の均衡状態は, **社会的な交通費用を最小化**
 - ◆ TNP は, 混雑料金よりも“**情報節約的**”で, 詳細な利用者情報なしに(渋滞を解消した)社会的最適状態を達成可能.

TNP 実装のための課題

● TNP の基礎理論で残された課題

- ▶ **課題1**: TNP制度は、道路管理者の負荷は少ないが、利用者に煩雑な取引を要請してしまう・・・



- ・ モビリティ・サービス (MS) 事業者が TNP を購入
- ・ 交通利用者は、単に、MS を利用 (購入)

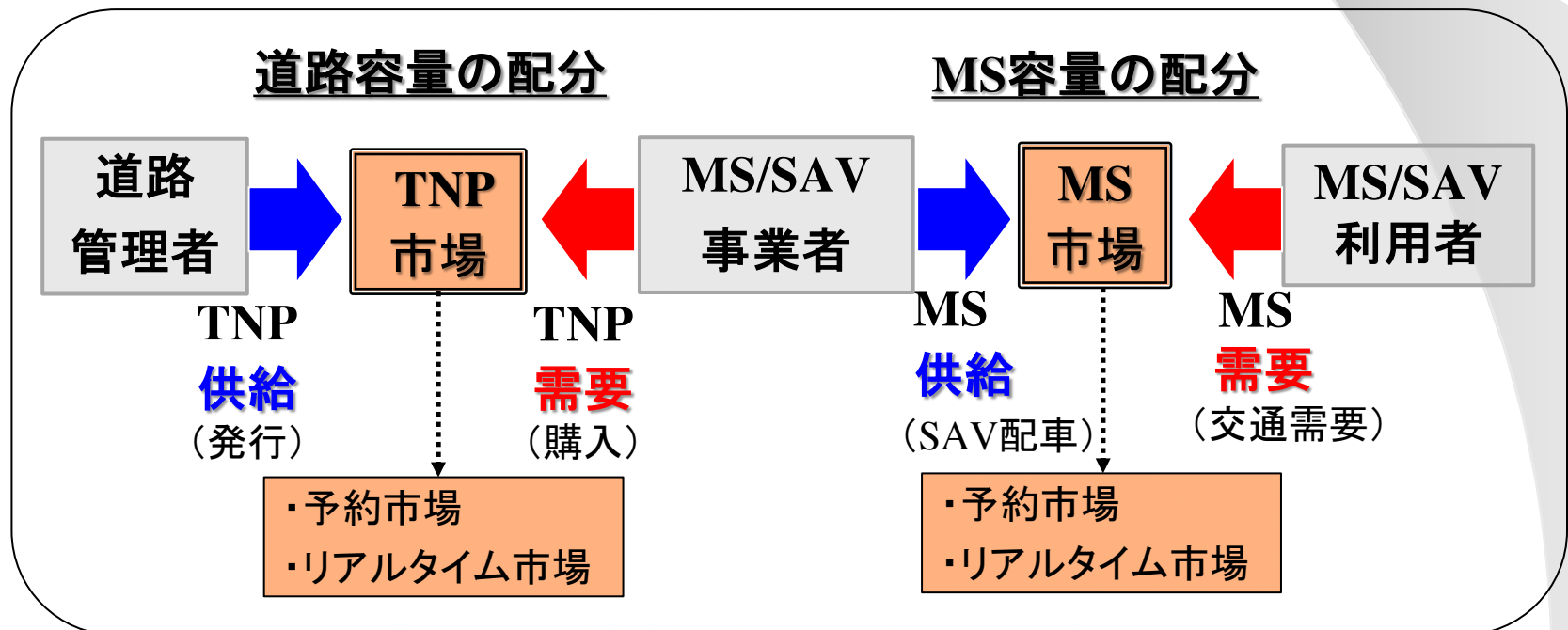
- ▶ **課題2**: 均衡状態へ到達するための過程や市場取引の具体的な仕組・ルールが示されていない



- ・ 利用者・MS 事業者の取引行動を代行する Agent Software 達の自律的な選択行動、およびミクロな市場取引メカニズムを適切に組合わせた Multi-agent System を設計

課題1: SAVs を前提とした渋滞解消メカニズム

- **TNP(通行権取引)市場** – “卸売市場”:
道路管理者とMS/SAV事業者の間でTNPを売買
- **MS(モビリティ・サービス)市場** – “小売市場”:
MS/SAV事業者と消費者の間でMSを売買



課題 2 : TNP 実装のための Multi-agent System

● Multi-Agent System の設計要件

- ▶ 個々のエージェント(ソフトウェア)の**行動の自律性**:
中央制御センターからの指示なしに, 局所的情報と市場情報のみで経路決定(TNP/MS売買)戦略を決定できる.
- ▶ エージェント**行動ルールの簡潔性**:
戦略決定・変更(日々の経験による学習)に必要な計算量・情報量が少く, リアルタイム計算可能.
- ▶ エージェント群行動**ダイナミクスの安定性**:
個々のエージェントの行動から集計的に決定される交通流の“*Evolutionary Dynamics*”が, 必ず均衡解に収束し, かつ収束が速い.
- ▶ ネットワーク**総交通費用の最小化**:
ダイナミクスの安定状態が, TNP-MS 市場制度下の均衡(社会的費用最小化)状態と一致.

システム設計のための理論的枠組 (1)

● エージェント行動メカニズムの設計

進化・学習ゲーム理論の枠組み

micro エージェントの行動ルール

macro 交通流の *Day-to-Day Dynamics*

ダイナミクス
の特性
(eg. 収束性など)
を
理論的に解析可能

均衡状態

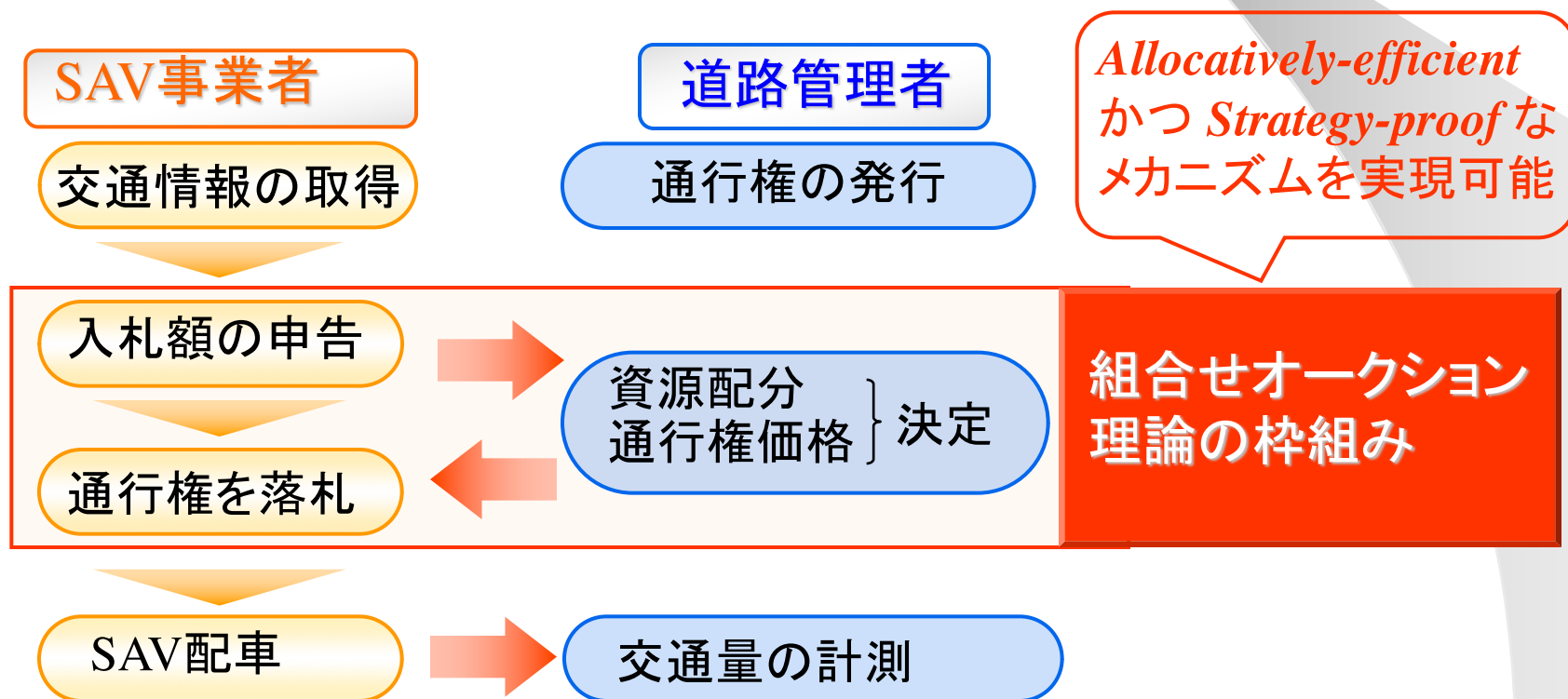
社会的最適状態

ボトルネック通行権取引制度の枠組み

エージェント行動が利己的 (ie. 自分の費用を最小化) かつ, *myopic* でも交通流は, 社会的最適状態へ収束

システム設計のための理論的枠組 (2)

- 通行権市場マイクロ・メカニズムに求められる性質
 - ◆ *Allocatively-efficient*: 効率的な資源配分を達成できる
 - ◆ *Strategy-proof*: 自らの選好を偽るインセンティブが働かない



まとめ

- *Smart Traffic* による渋滞解消のための枠組として
「TNP(ネットワーク通行権取引)市場」の理論を提案
 - 「**交通工学・交通計画**」
 - … 交通流・ネットワーク理論, 交通需要予測法
 - 「**都市・交通・ミクロ経済学**」
 - … 混雑料金の理論, プロジェクト評価法
- TNP 実装のための基礎となるシステムの設計と解析
 - 「**ゲーム理論**」
 - … オークション/メカニズム・デザイン理論, 進化ゲーム理論
 - 「**計算機科学／システム数理工学**」
 - … Multi-agent システム設計論, 計算アルゴリズム論