マイクロシミュレーションによる交通施策の評価 :その可能性と実用性

第三回環境部会

2003年12月22日

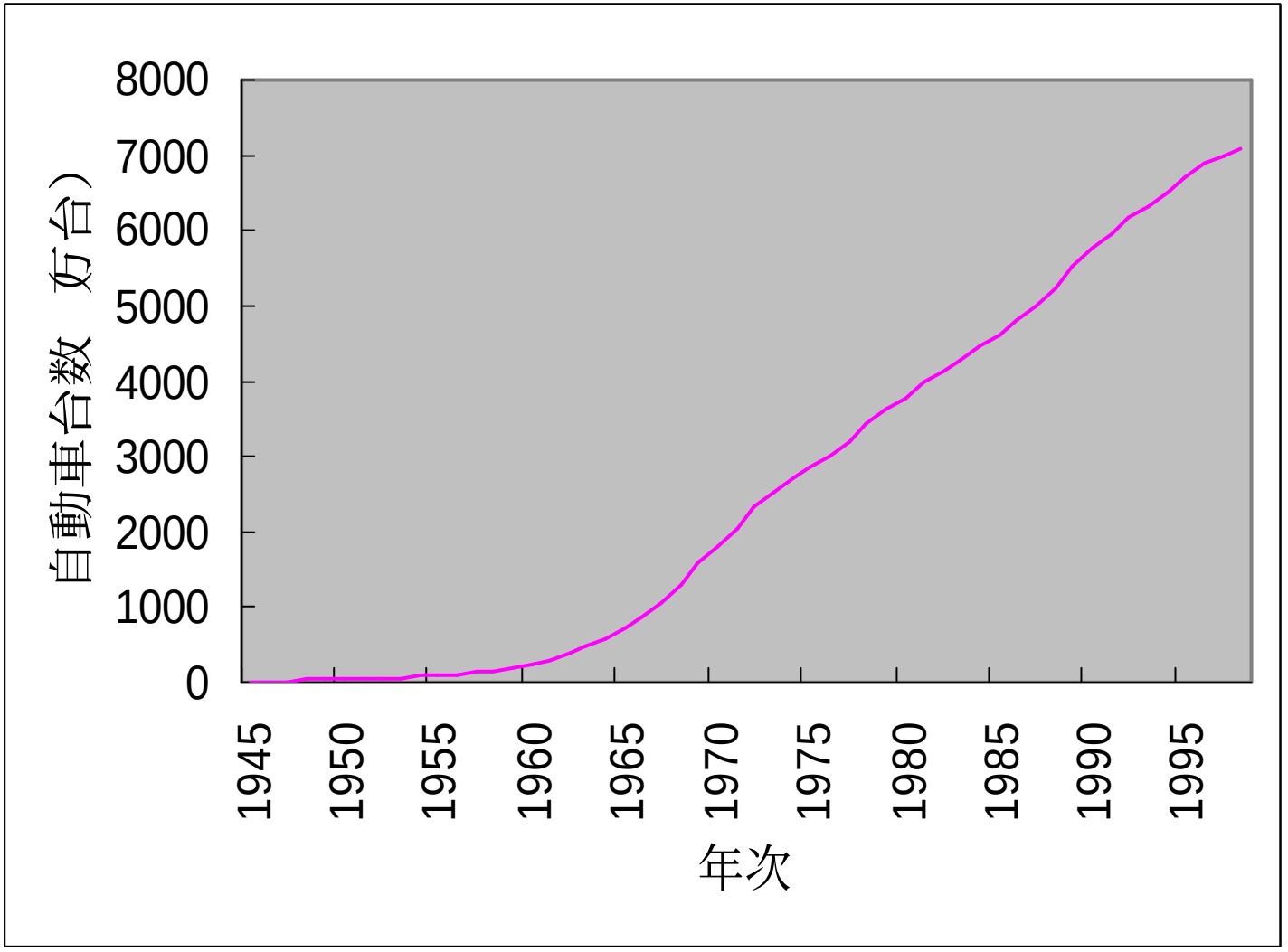
京都大学大学院工学研究科

北村隆一

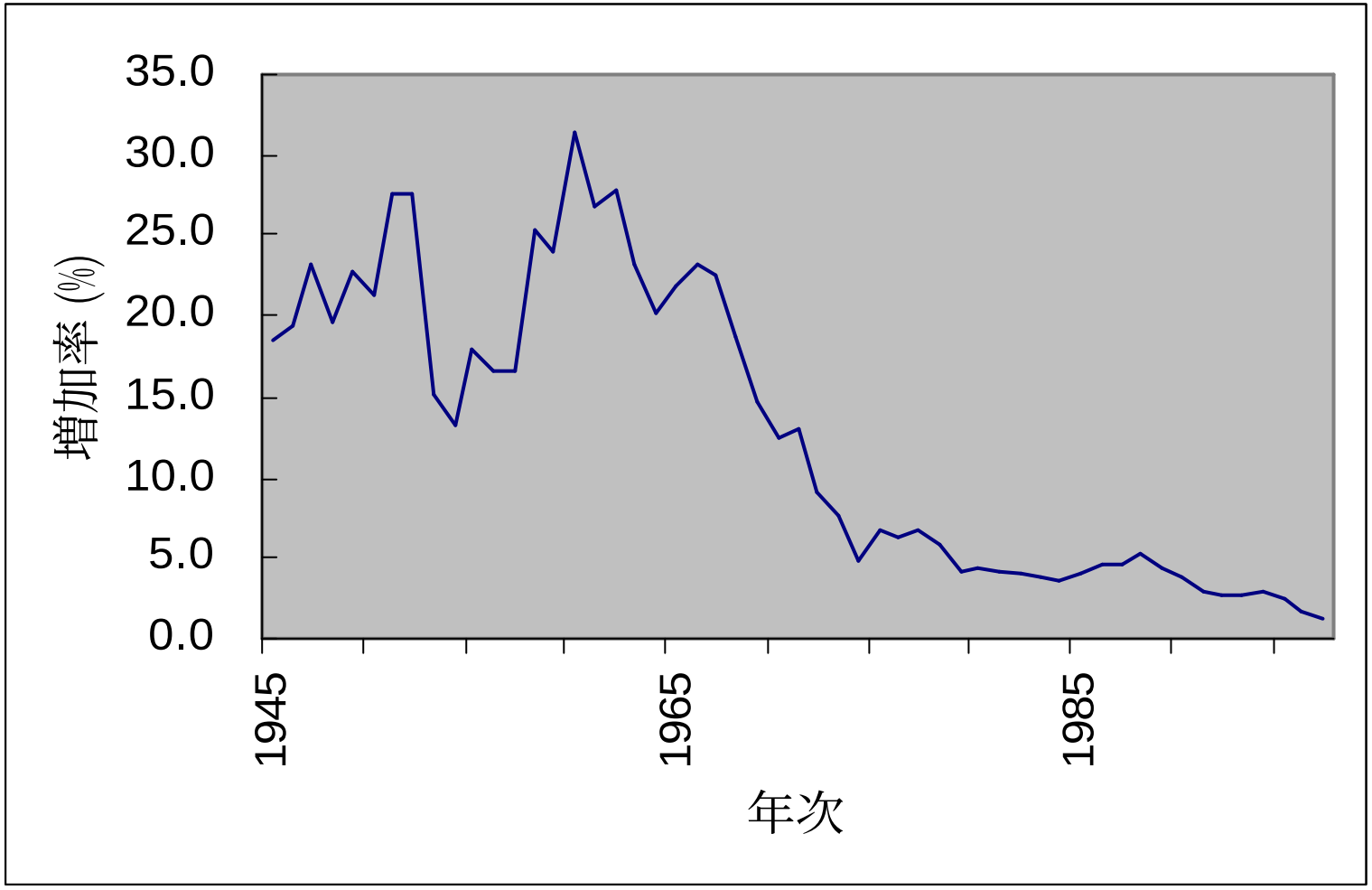
戦後の動向：
Motorization と Suburbanization

- 1955年から1995年への40年間で：
  - 人口 x 1.4
  - GNP x 9.8
  - 免許保有者数 x 18.1
  - 自動車保有台数 x 70
  - 自動車走行距離 x 49.3
  - 鉄道分担率（人・キロ）は90.0%から34.0%へと低下.
  - 自動車分担率は0.6%から51.7%へと激増.

登録自動車台数の推移


8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
自動車台数（万台）
1945
1950
1955
1960
1965
1970
1975
1980
1985
1990
1995
年次

自動車増加率の推移

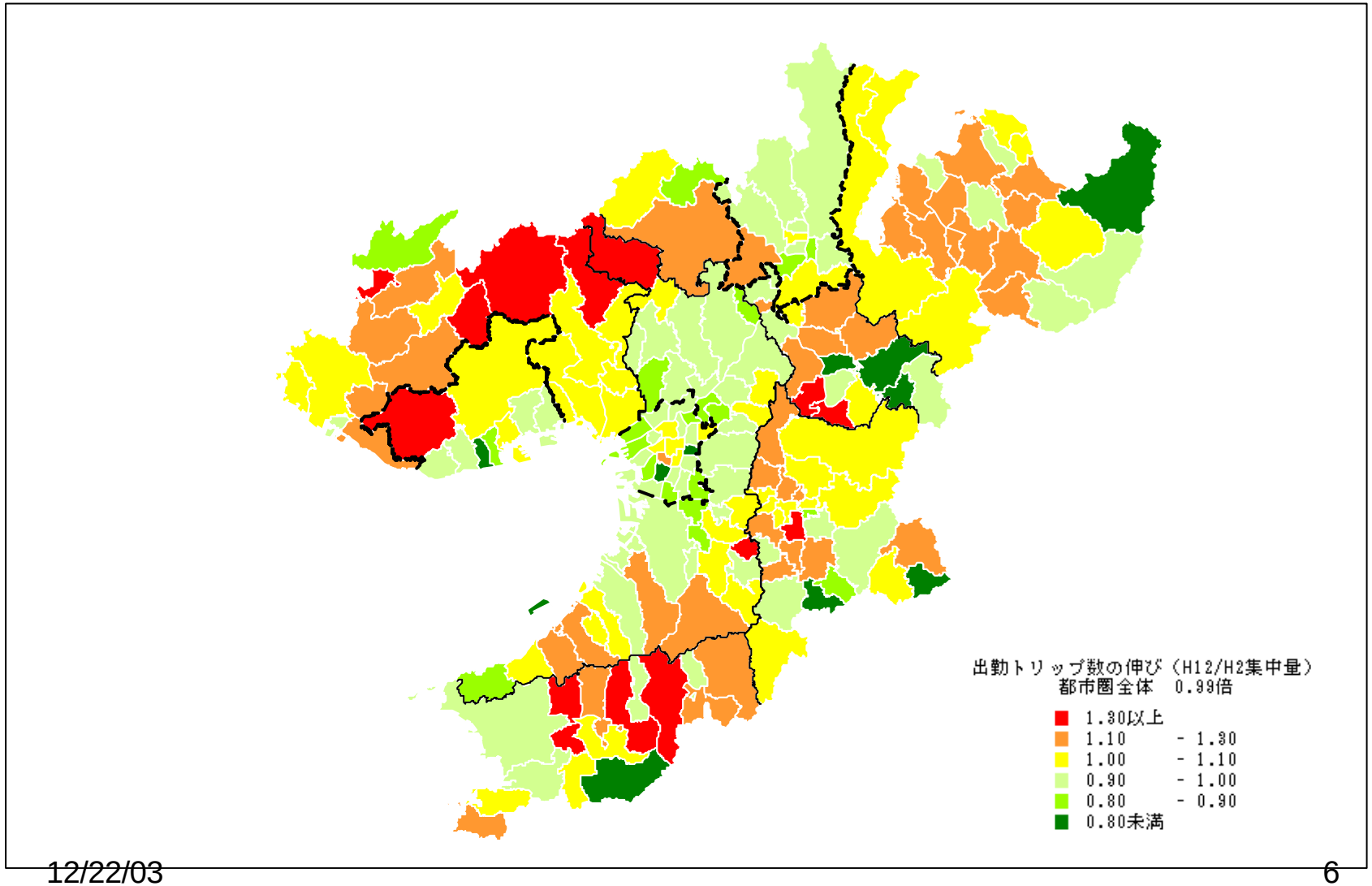


運輸部門エネルギー消費の拡大：
1955 - 1995

- 旅客輸送人 •キロ　　x 7.09
- 貨物輸送トン •キロ　　x 6.81
- エネルギー消費量　　x 11.39

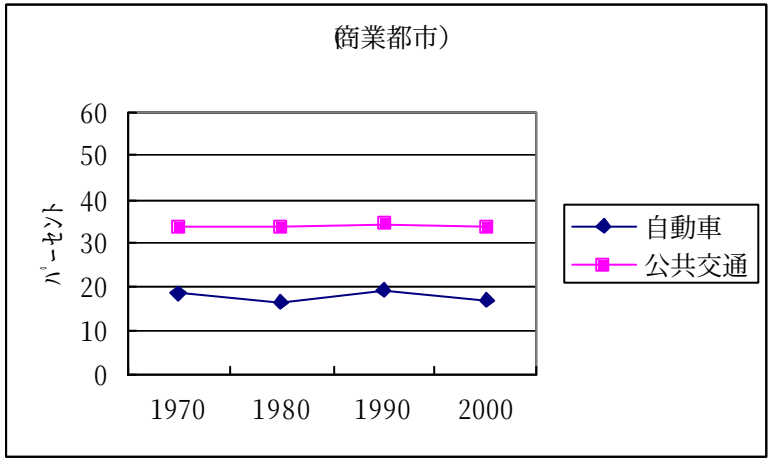
- 産業部門は x 7.25, 民生部門は x 8.76

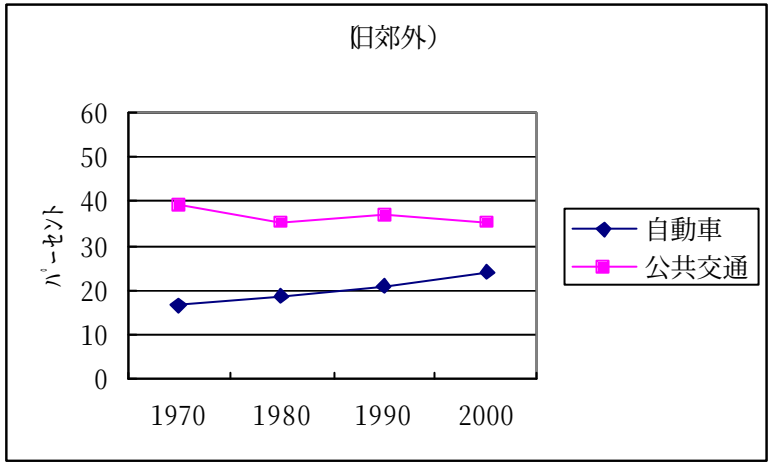
地域別通勤トリップ発生量の変化：
京阪神都市圏, 1990 - 2000



Motorization進行の都市圏内でのばらつき

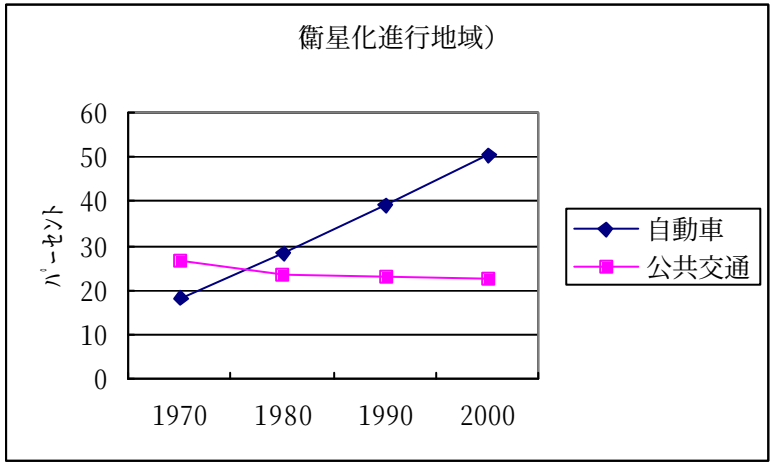
旧都市部での自動車利用率の変遷

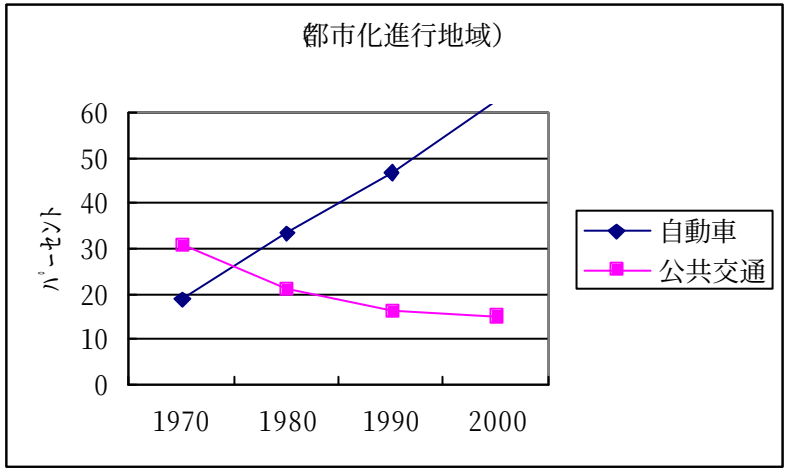




Motorization進行の都市圏内でのばらつき

都市圏周辺部での自動車利用率の変遷





Motorizationと古典的都心

- 中小都市圏でより急速なmotorization
  - 自動車分担率は三大都市圏で 33.1%, 中小都市圏では 51.5%.
- 周辺部の比重の高まり, 古典的都心の衰退.
  - 1970年以前は新規ショッピング・センターの60.1%が中心商業地, 28.4%が周辺商業地, 11.5%が遠郊. 1991－1994ではこれが各々21.1%, 25.8%, 53.1%と逆転.
- One-to-manyの交通パターンから many-to-manyの交通パターンへ.
  - 公共交通の機能低下.
  - Positive feedback の形成－Motorizationが更なるmotorizationを呼ぶという図式.

Motorization と環境問題

- カリフォルニアではガソリン1ガロン当たり$1.50相当の環境への被害との推定.
- ヨーロッパではCOの90%, NO_xの30-40%, HCの40%が自動車から.
- 日本では運輸部門のCO_2排出量は全体の約20%.
- 大気汚染基準が達成できず.
- 幹線道路沿いの環境問題が顕在化.

TCM/TDM施策の提唱へ

- TCM (Transportation Control Measure) の対象：
  - 都市構造・土地利用
  - 交通施設
  - 交通需要
  - 交通機関のエネルギー効率・汚染物質排出量
- 広範な施策が存在
  - 長期的ー短期的
  - 直接的効果のみならず, 2次的, 3次的効果の存在
  - 施策の効果を総体として評価することが必要.
- 現存の評価手法（特に後述の「四段階推定法」）の有効性が疑問視される.

都市構造・土地利用を対象とする施策

- 都市の高密化と混合土地利用の展開を目指す.
- 成長境界線 (Urban Growth Boundary) ― オレゴン州ポートランド市.
- 徒歩志向, 職住近接の住区開発 ― New Urbanism.
- 交通機関の整備に適合した企業立地の推進 ― オランダの ABC Policy
- 都心 ⇔ 郊外 競合の図式の解消が必要.
- すでに高密度で混合土地利用を持つ日本の都市圏での「コンパクトシティ」の有効性？
- 交通－土地利用間の相互作用が未知.

自動車交通施設整備施策

- 道路, 駐車場等の自動車交通施設の整備がもたらす効果について明確な結論は得られていない.
  - 誘発交通（後述）や更なる自動車依存の進行に関する知見が不十分.
  - 交通施設整備と土地利用変化に関する知見も不十分.
  - ダウンズ・トマソンのパラドックス：公共交通と自動車交通が共存する交通体系では, 道路整備は交通サービス水準の低下をもたらす.

自動車からの転換を促す施策

- 代替交通手段の施設整備
  - バス・HOV 優先車線
  - Park & Ride 施設
  - 自転車 •歩行者施設の整備
  - 駐輪場など乗り継ぎ施設の整備, 等々
- 代替交通手段のサービス向上
  - バスの定時性の向上, 到着情報の提供
  - 乗り換えの無料化等運賃体系の改訂
  - 一元的な公共輸送機関情報の提供
  - 優先車線, 優先信号, 優先駐車スペース等によるバス, 相乗りの推奨
  - 始終発時間帯の延長, 等々
- 単純な施策には交通手段選択モデルが適用されてきた.
  - トリップごとの解析のため, 直接効果の推定のみにとどまる.

狭義の交通需要マネジメント施策

- トリップそのものを減らす施策
  - 自宅勤務 ― Telecommuting, teleworking
  - 週四日制 ― ロス･アンジェルス市
- トリップの時間分布を変えるもの
  - 時差出勤，フレックスタイム
  - 混雑料金制
- 旧来の予測モデルが対象としてこなかった範疇.
  - 出発時刻選択モデルなどが単独で開発されてきた.
  - しかし4段階推定法は時間軸を含まないため，これらモデルの導入は困難.

狭義の交通需要マネジメント施策（続）

- 自動車からの誘引 (“pull”) 策
  - 代替交通手段のサービス向上（前述）
- “Push” 策
  - 通勤自動車利用規制 ― LA 都市圏のRegulation XV
  - 新規登録総台数規制 ― シンガポール
  - ナンバープレートによる自動車利用規制
  - 駐車賦課金, 炭素税, 排出量・燃費に基づく登録税
  - Road pricing/congestion pricing
- Push/Pull 策
  - 自動車流入規制 ＋ トランジット・モール等, 道路空間の歩行者化
  - 歩行者最優先道路（ボンネルフ等）
  - トラフィック・カーミング
- 旧来のモデルで表せない施策が大半.

車両の改善

- 公共輸送機関の人 •キロ当りのエネルギー効率, 汚染物質排出量は利用度に依存.
- LEV, ZEVへの転換の推進
  - 乗用車の車群エネルギー効率は日本では低下.
  - ハイブリッドの普及進展.
- 自動車のエネルギー効率は運転の仕方，タイヤ空気圧等々に依存.
- 自動車保有モデルへの関心は日本では薄かった.
  - 海外ではZEV選択モデルなどが開発.
  - 日本でも車検が乗用車保有期間, 買換えに与える影響などの分析.

TCMの施策効果の評価

1. TCMが交通需要に及ぼす影響の推定
   - 施策は個々のトリップの発生時刻, 交通手段, 目的地, 経路などに影響を与える.
   - 個々のトリップの属性変化は, 一日の交通パターン全体に影響を与えうる.
   - トリップは相互に連関していることの認識が重要.
2. 汚染物質排出量の推定
   - 排出量は走行状態に依存.
   - 排出量特性は汚染物質により異なる.
   - 排出量の空間分布が重要.
   - Cold startの把握のためには, 出発-到着時刻の推定が必要.
   - 光化学反応は汚染物質の排出時刻に依存.

参考：交通需要の特性

- ヒトとモノの移動
  - 都市内旅客交通需要については第二次大戦以前より調査解析手法が開発されている．代表的なものとして四段階推定法.
  - 物流については統一的な手法が不在.
- ヒトの移動の単位＝「トリップ」
  - 活動を遂行するための移動をトリップ.
- 「トリップ」の属性
  - 目的
  - 起点 (origin), 終点 (destination)
  - 出発・到着時刻
  - 交通手段, 経路, etc.

参考: 四段階推定法

- 世界中で最も広く適用されている標準的な交通需要予測手法.
- 発生・分布・機関分担・配分の四段階.
- 50 ～ 60 年代に主として米国で開発.
- 背景に
  - Motorization, suburbanizationの急速な進展.
  - 地域間人口移動.
  - 極めて限られた計算・データ処理能力，統計解析手法（1954年のデトロイトの調査結果は手回し計算機で解析された）.

MTC判決 :誘発交通の重要性

- Sierra Club Legal Defense Fund と Citizens for a Better Environmentが, 都市圏交通計画作成に当たりMetropolitan Transportation Commission (MTC, SF-SJ 都市圏のMPO)の需要解析に不備があるとして, MTCとカリフォルニア州を連邦地方裁判所に提訴.
- 提訴の理由は多岐にわたるが, 争点となったのは：
  - 交通システムと地域の人口 ･経済成長との関係
  - Emissions factors
  - TCMs の実施
  - モデルの検定
  - “Hot spots”の分析

MTC判決 :誘発交通の重要性 続）

- 原告はMTCの需要解析は誘発需要を考慮していないため，交通施設拡充が環境質に与える影響を過小評価するものであると主張.
  - 「MTCは道路容量の追加に伴う域外空の流入によってベイ・エアリア地域で生じるであろう成長」の度合いを把握するための解析を行う意図がなく，結果として「道路拡張に伴う汚染物質排出量の予測値は過少に求められ，道路建設を行わない場合の排出量は（相対的に）過大評価されている.」
- 判決では「MTCが容量の追加に伴う成長を解析しなかったことは事情を鑑みるに尤もである」と，原告側の主張は退けられた. 理由として以下の点が挙げられている:
  - この主張を立証するに足るデータが存在しない.
  - 「地域の成長が道路容量にどれほど依存するかを把握した計量的モデルが存在しない.」

MTC判決 :誘発交通の重要性 続）

- しかし, MTC判決文は 長期的にはEPAは道路が地域の成長の与える影響を何らかの形で考慮することを義務づけるかもしれぬ」と記す.
- 四段階推定法が法廷に持ち込まれた 恐らく世界で最初の）事例は, 誘発交通の的確な推定が交通需要予測の緊急の課題として認識される契機となる.
  - これに対応して連邦道路局 (FHWA) は1991年12月にメリーランド州Bethesdaで 交通施設容量の増加の影響」と題した会議を開催.
  - これに先行し, 1990年12月に “Transportation, Urban Form and the Environment” に関する会議が開かれている.
  - Travel Model Improvement Program (TMIP) の設立, TRANSIMSの開発へ.

これまでの誘発交通の取り扱い

- 個人（あるいは世帯）が一日に生成するトリップ数は，年齢，自動車・免許保有などの属性が与えられたとして，一定と考えられてきた．
  - 土地利用や交通サービス水準はトリップ生成量に影響を与えないという仮定．
  - アクセシビリティ（土地利用，交通体系を反映）がトリップ生成に与える影響についての知見は合致せず．
- 結果として，既存のトリップ生成モデルはTCMに対して極めて鈍感，誘発交通を反映する仕組みは皆無．
- 土地利用－交通体系－交通需要間の相互関係についての実証的知見は限られている．

Trip Chaining の重要性

- 四段階推定法をはじめとする旧来の需要予測手法はトリップを解析の単位としてきた.
  - トリップ間の連関を一切無視.
- 人々の一日の動きは一連の トリップからなる.
  - 例：自宅 → 職場 → レストラン → バー → 自宅.
- トリップ･チェイン ＝ 自宅を出てから自宅に戻るまでのトリップの連鎖.
- チェイン内の トリップ間には強い関連性.
  - あるトリップの目的地 ＝ 次の トリップの出発地.
  - 自宅を自家用車で出た場合, 続くトリップは自動車による確率が極めて高い.

TCM の二次的影響

- チェイン内トリップ間の強い関連性

↓

- TCMが直接影響を与えるトリップの属性変化 → 他のトリップへ波及 → 一日の交通パターン全体の変化.
- TDM施策の多くが通勤交通を対象とするが,
  - TDM施策により通勤交通手段が変化 → 続くトリップの交通手段も変化 → 目的地, 出発時刻なども変化.
- 施策の効果を総合的に評価するためには一日の交通パターン全体を解析することが不可欠.

TCM の二次的影響 •時間利用 •誘発交通

- TCMによる交通パターンの変化に伴い時間利用パターンが変化
  - 活動, 交通に割くことのできる時間が増加, あるいは減少.
  - 活動, 交通需要の変化：より多くの活動, より遠い目的地への移動, 等々.
- 可処分時間の増減に着目することにより誘発交通量把握の可能性.
  - 交通容量増大による節約交通時間の殆どが新たな交通に費やされるという主張.
  - 筆者らの推計では, 通勤者の場合その割合は約10%, 大半は家庭内活動に割かれる.

車種, 走行状況と汚染物質排出量

- CO_2
  - ディーゼル乗用車はガソリン乗用車より排出量が平均で約13%少ない.
  - ディーゼル貨物車からのトンーキロ当りの排出量は, 平均車速が70 km/h 付近で最小, 速度低下に伴い著しく増加.
  - 急発進や急加速が排出量に大きく影響を与える.
- ディーゼル・エンジンは CO, CO_2, HC について優れているが, PM と NO_x の排出に関してガソリンエンジンに劣る.

車種, 走行状況と汚染物質排出量　続）

- NO_x
  - ディーゼル貨物車, バスの場合, 60km/h付近で最小, 高速での増加が著しい.
  - ガソリンエンジンの場合, 排出量は速度ともに増加. CO_2と同様, エンジンに強い負荷のかかる加速状態で NO_x 排出量が増加.
- CO, HC
  - ガソリンエンジンの場合, 排出量は速度に伴い減少.
- SPM
  - 発進時に排出量が増大（データが不足）.
- 騒音
  - 個別車輌からの騒音は速度と共に増大.
  - 総騒音量は交通量と共に増大.
  - 渋滞の場合, 交通量は少ないことに留意.

時刻の重要性

- 光化学反応を孕む大気汚染に関しては，NO_x等の化学物質の時刻別排出量を知ることが重要.
  - NOはオゾンによりNO_2となるが，この反応には太陽紫外線強度が影響を与える.
  - 朝のピーク時に排出されるNO_xは，夕方のピーク時に排出されるNO_xより影響が甚大.
- CO（大半が自動車から排出される）は交通量の多い交差点などで局地的に集中.
  - 時間帯別の交通量の空間的分布の把握が不可欠.

時刻の重要性（続）

- Cold Start
  - 触媒コンバーターを登載した車輌では，エンジンが冷えた状態（エンジン停止後1時間以上）で始動した場合，エンジンが冷め切っていない状態での再始動 (hot start) に比べ多大の汚染物質が排出される.
  - エンジン停止後の冷却期間にも汚染物質が排出される (hot soak).
  - 車両ごとにトリップの開始・終了時刻を推定できることが肝要.
- 需要面では peak-spreading 施策への対応.
- 一方，四段階推定法には時間軸が欠落，環境へのインパクト解析には不適格.

ここまでの要旨：
TCM評価に際し予測モデルが満たすべき要件

- 多様な施策に対応できること.
- 誘発交通を含め, 施策への反応が的確に捉えられていること.
- 二次的効果も含め, 一日を通じた交通需要への影響の総体が捉えられていること.
- 車種, 走行状況別に汚染物質の排出量が推定できること.
- 時刻が明示的にモデル構造に組み込まれていること.
- 交通, 汚染物質排出量の時間 •空間的分布が把握できること.

長期的な課題（参考）

- 拡散モデルとの結合
- 自動車購入, 車種選択モデルなどの導入
- 住宅 •企業の立地のモデル化
- 物流交通のモデル化
- 多数の actors 間の相互作用の取り込み
- 土地利用－交通体系－交通需要間の相互関係の導入

アプローチ

- マイクロ･シミュレーションによる交通行動とネットワーク交通流の再現
  - 近年の計算能力の増大, 費用の低減に着目
- モデル要素
  - PCATS: 一日の交通行動を総体的に時間軸上で再現
  - DEBNetS: 道路ネットワーク上の交通流を動的に再現
- 開発済みの能力
  - 説明変数の将来値をシミュレーションにより予測
  - 人造 (synthetic) サンプルの活用

個人の行動シミュレータ：PCATS

- Prism-Constrained Activity-Travel Simulator
- 一日が解析単位.
- 「自由時間帯」と「固定時間帯」を想定.
- 自由時間帯内の個人の交通行動を時間・空間軸上で再現.
- 交通行動を Hägerstrandのプリズム，交通手段制約および目的地認知条件下で再現.
- 活動選択モデル，目的地・交通手段選択モデル，活動時間モデルより構成される.
- 逐次的意志決定過程を想定.
  - 生成されるトリップの時刻，手段，目的地，滞在時間を逐次シミュレート.

動的ネットワーク・シミュレータ：DEBNetS

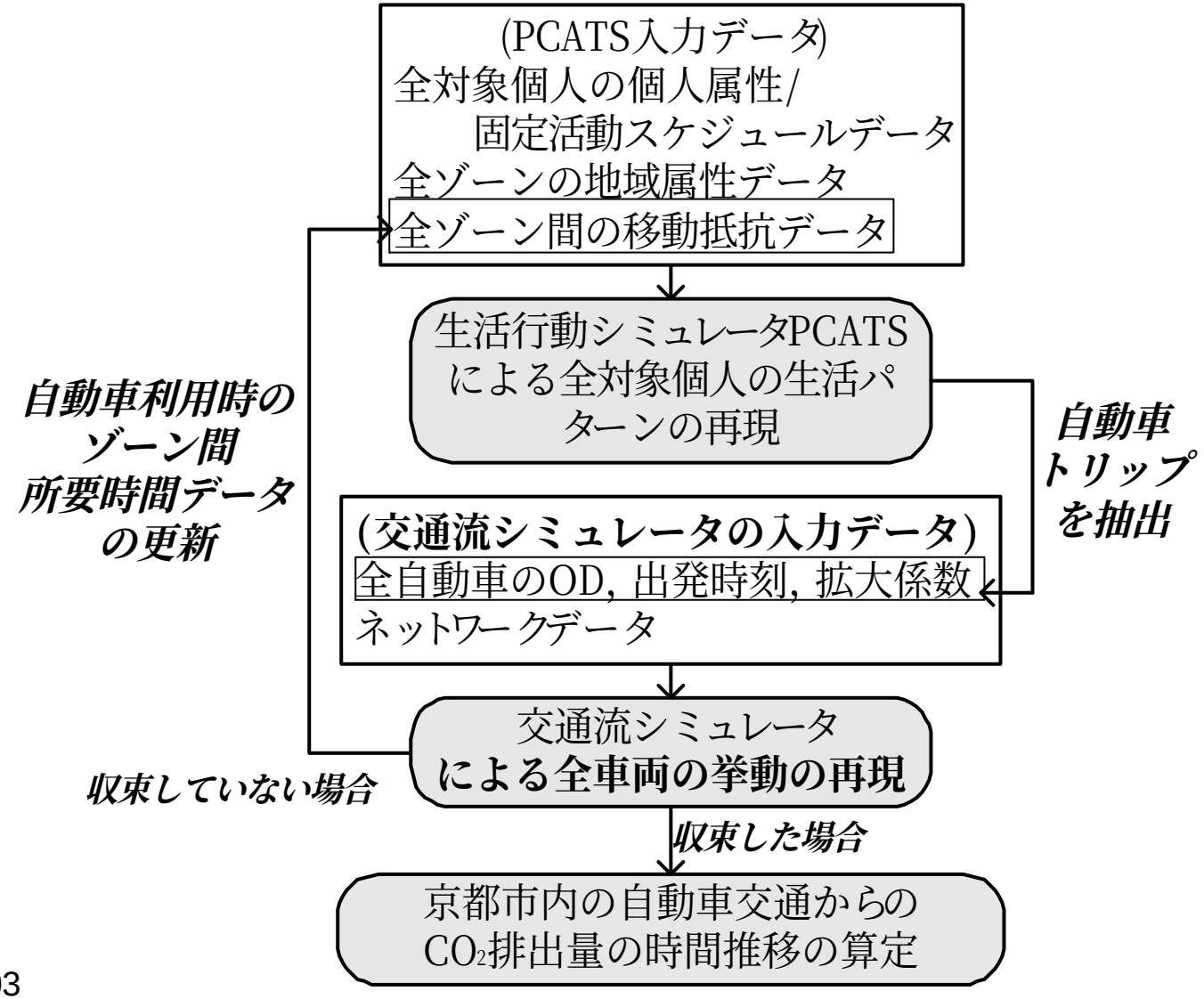
- Dynamic Event-Based Network Simulator
- イベント・ベースのシミュレーター.
  - 必要計算量の削減.
- トリップは時間軸上で随時ネットワークに導入.
- リンクを小区間に分割, 各区間内で均一な交通流を想定.
- 区間通過時間　（＋時刻）を K-V　密度-速度）式により推定.
- 各交差点で, その時点での最短経路の選択.
- 最短経路は 15 分毎に更新.
- 交通流の平均速度に基づくCO_2排出量の推定.

- PCATS と DEBNetS 間で収束計算を遂行.

京都市での代替施策の評価

- COP3に向けてのCO_2排出量削減目標設定の一助.
- 京都住民および来訪者の交通行動を再現.
- 平日交通を対象.
- 商業車交通（物流が中心），通過交通は観測値に固定.
- 「京阪神パーソン・トリップ調査」のデータを利用；土地利用データなどを補完.
  - 21,458 市居住者と8,346 市外居住者を抽出.
- PCATS により行動予測，「拡大」(~ x40)後 DEBNetS へ.
- 中規模ネットワークモデルの採用.
  - リンク数 ＝ 510，ノード数 ＝ 326，ゾーン数 ＝ 163
- 結果は柔軟に集計可能.
- TDM 施策に伴う費用・便益の分配の解析が可能.

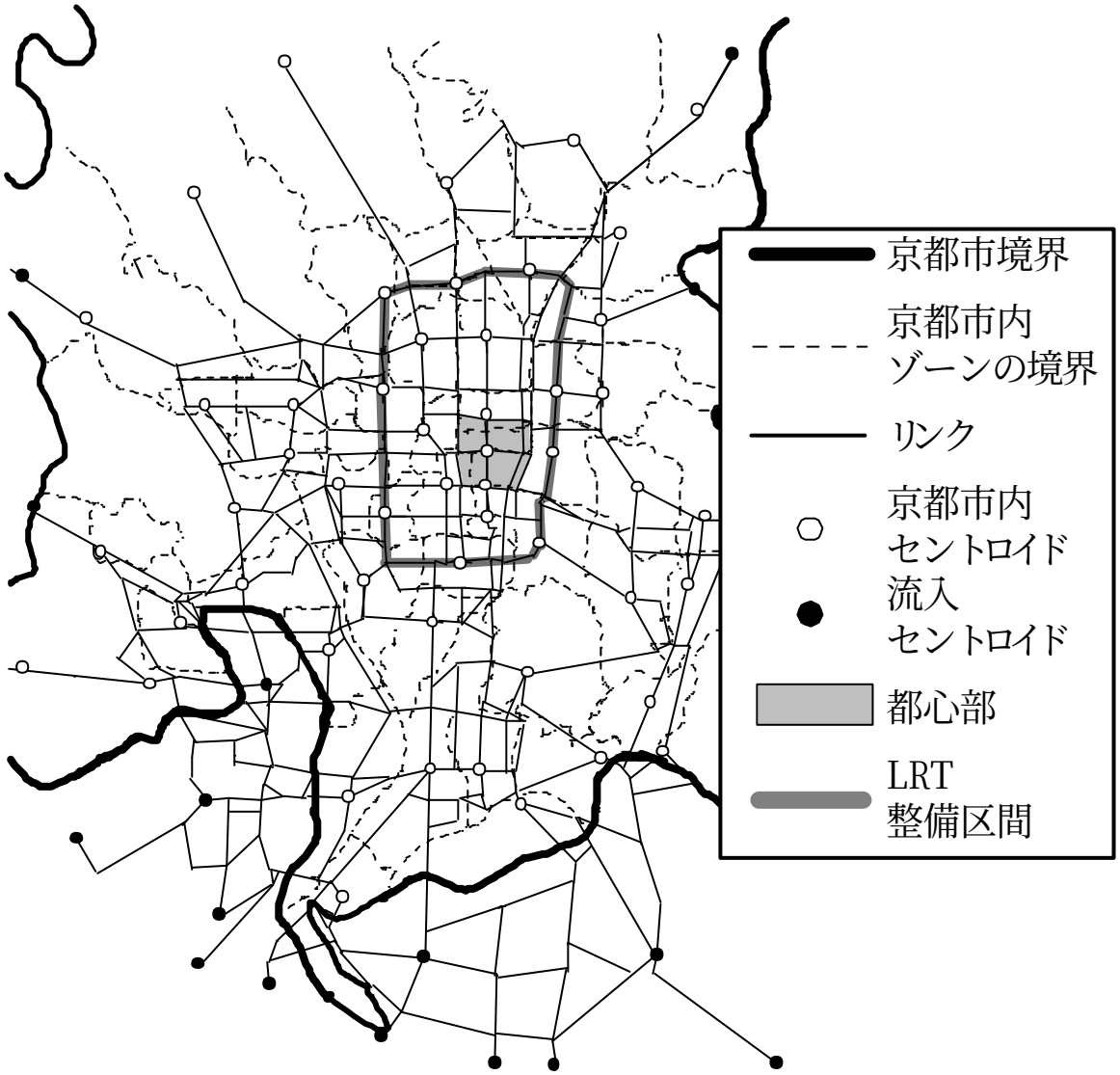
PCATS-DEBNetS モデル系のフロー



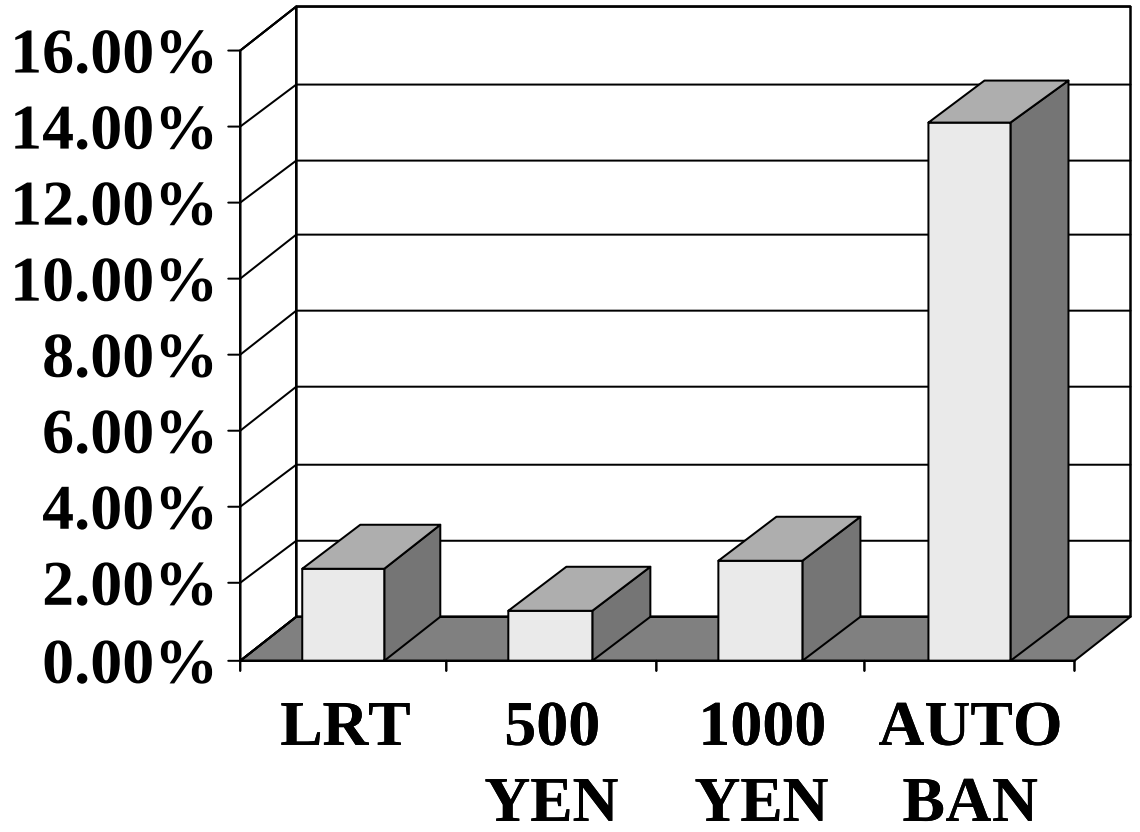
対象とした交通政策

- 政策1. 環状路面電車の導入
  - 東山, 北大路, 西大路, 九条通りを経路とする.
  - 市バスと同一料金, 無料乗り継ぎ, 平均速度 25 km/h を仮定.
- 政策2. 都心部での駐車税の導入
  - 川端, 御池, 堀川, 五条通りで囲まれる地域を対象.
  - 一回駐車毎に駐車時間に関わりなく課税.
  - ￥500 と￥1,000 の 2 レベルを想定.
- 政策3. 都心部への自動車流入規制
  - 上記地域で終日規制

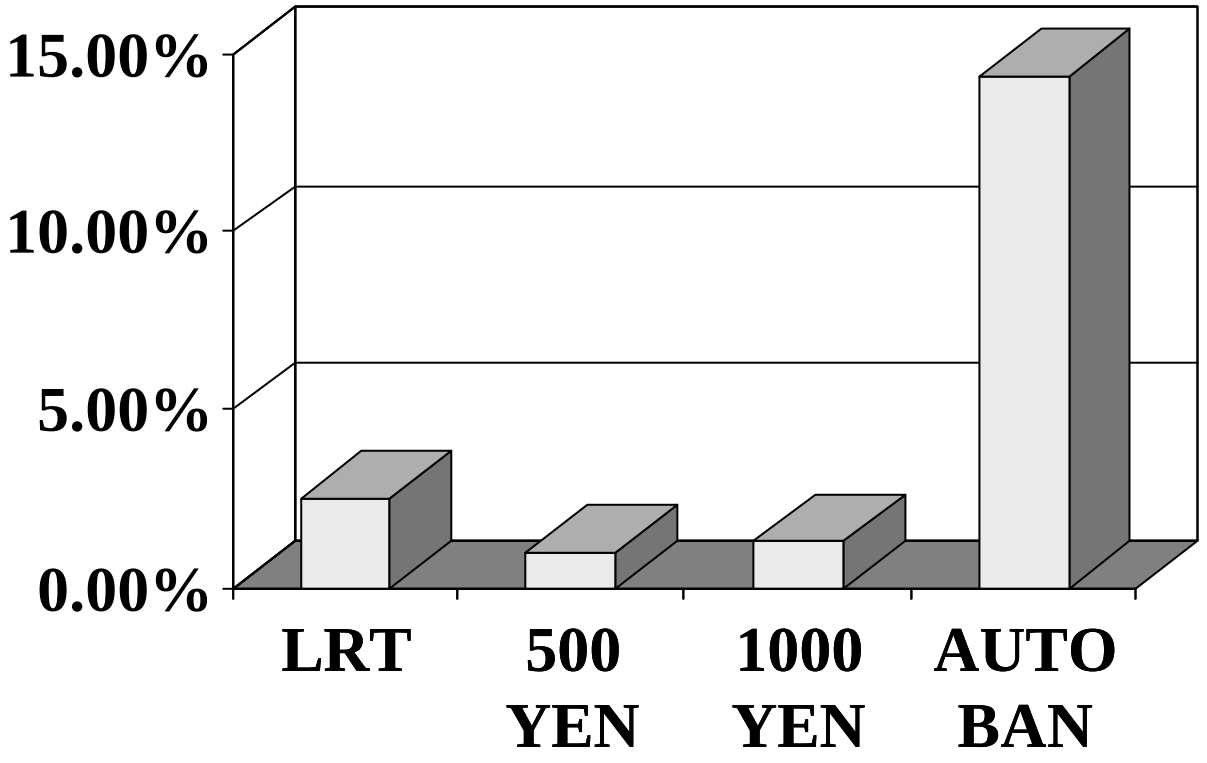
用いた道路ネットワークモデル



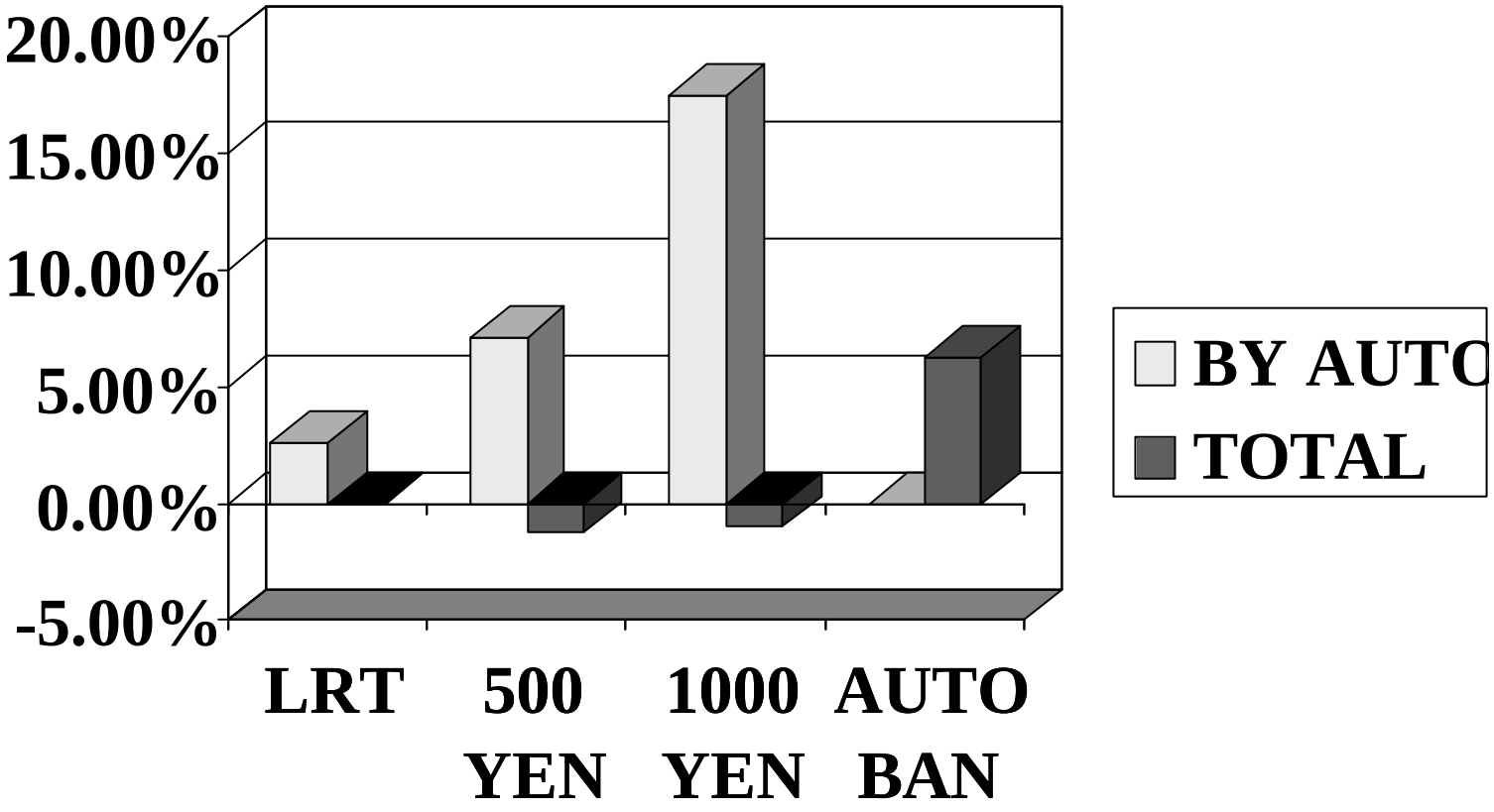
施策下での自動車トリップ削減率



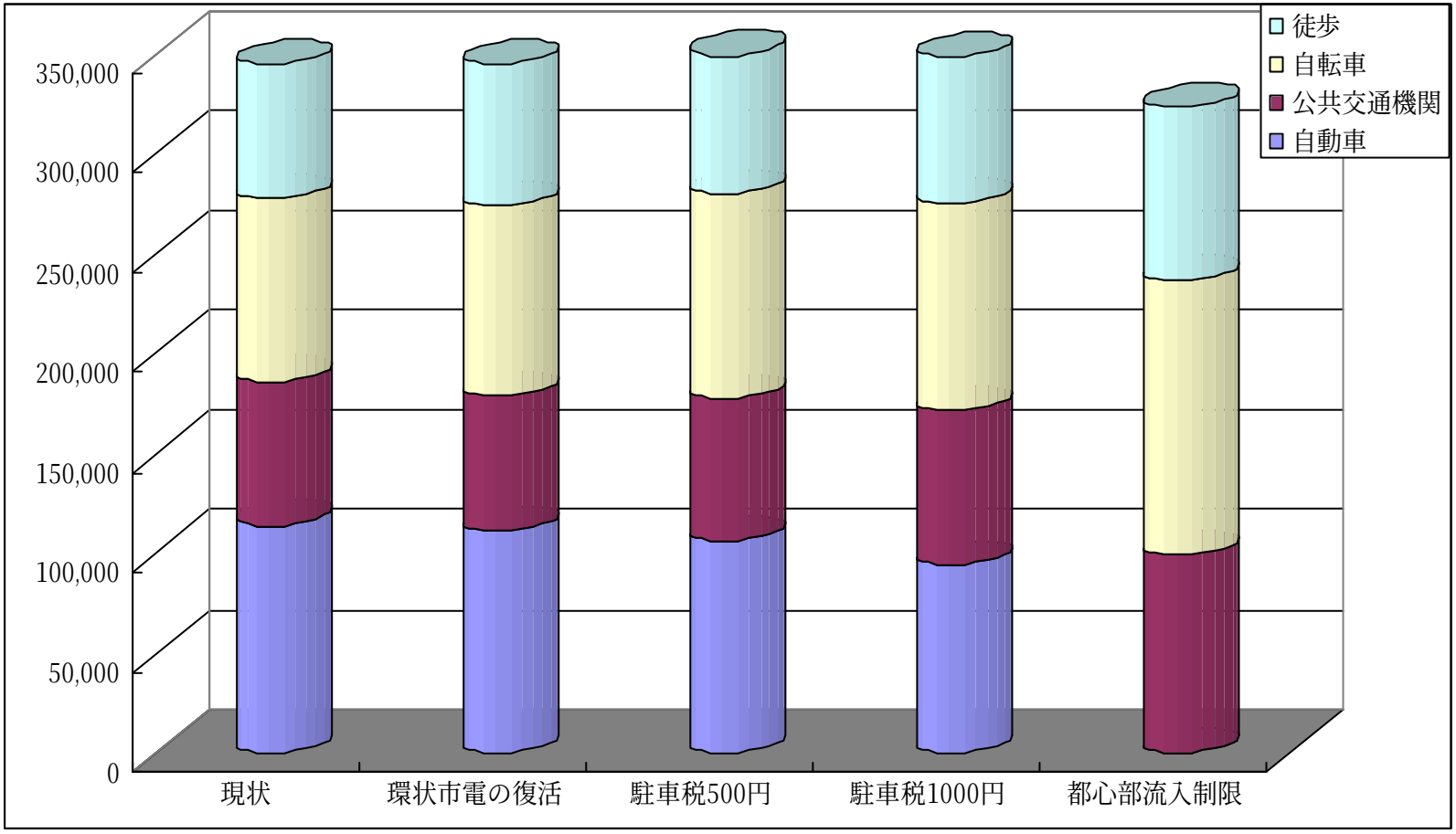
施策下での CO_2 排出量の削減率



施策下での都心へのトリップ数の減少率



施策下での都心部への手段別トリップ数



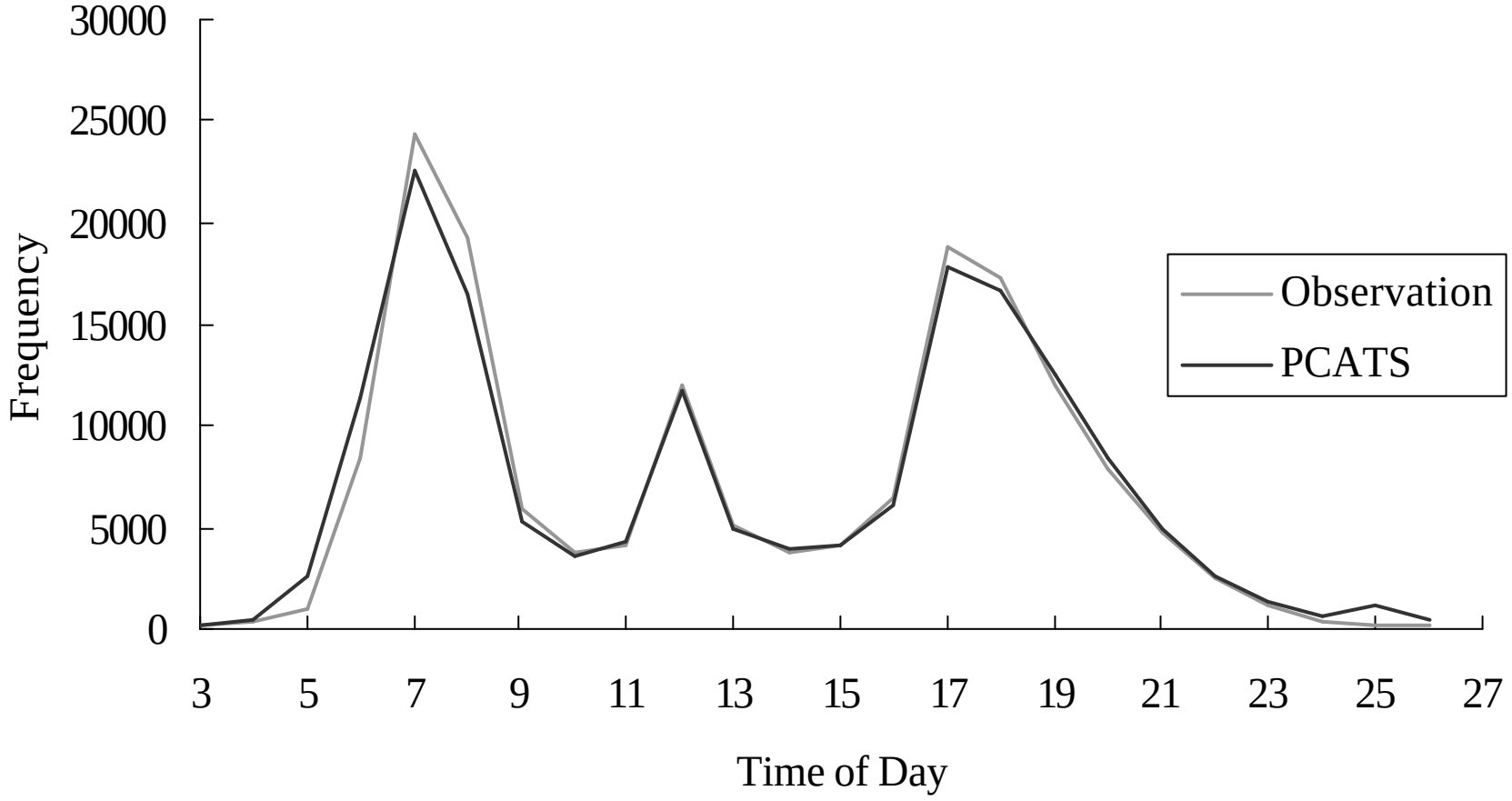
大阪市の交通体系整備計画への適用

- 2020年に向けての長期交通計画代替案の評価:
  - Package 0: Do nothing
  - Package 1: 既存計画のみを遂行
  - Package 2: 既存計画（Package 1）＋ 放射環状道路の整備
  - Package 3: 既存計画（Package 1）＋ 新規鉄道路線, LRT 整備 ＋ 自動車抑制施策の実施
  - Package 4:既存計画（Package 1）＋ 最小限の施設整備 ＋ TDM，CBD 地域での自動車抑制

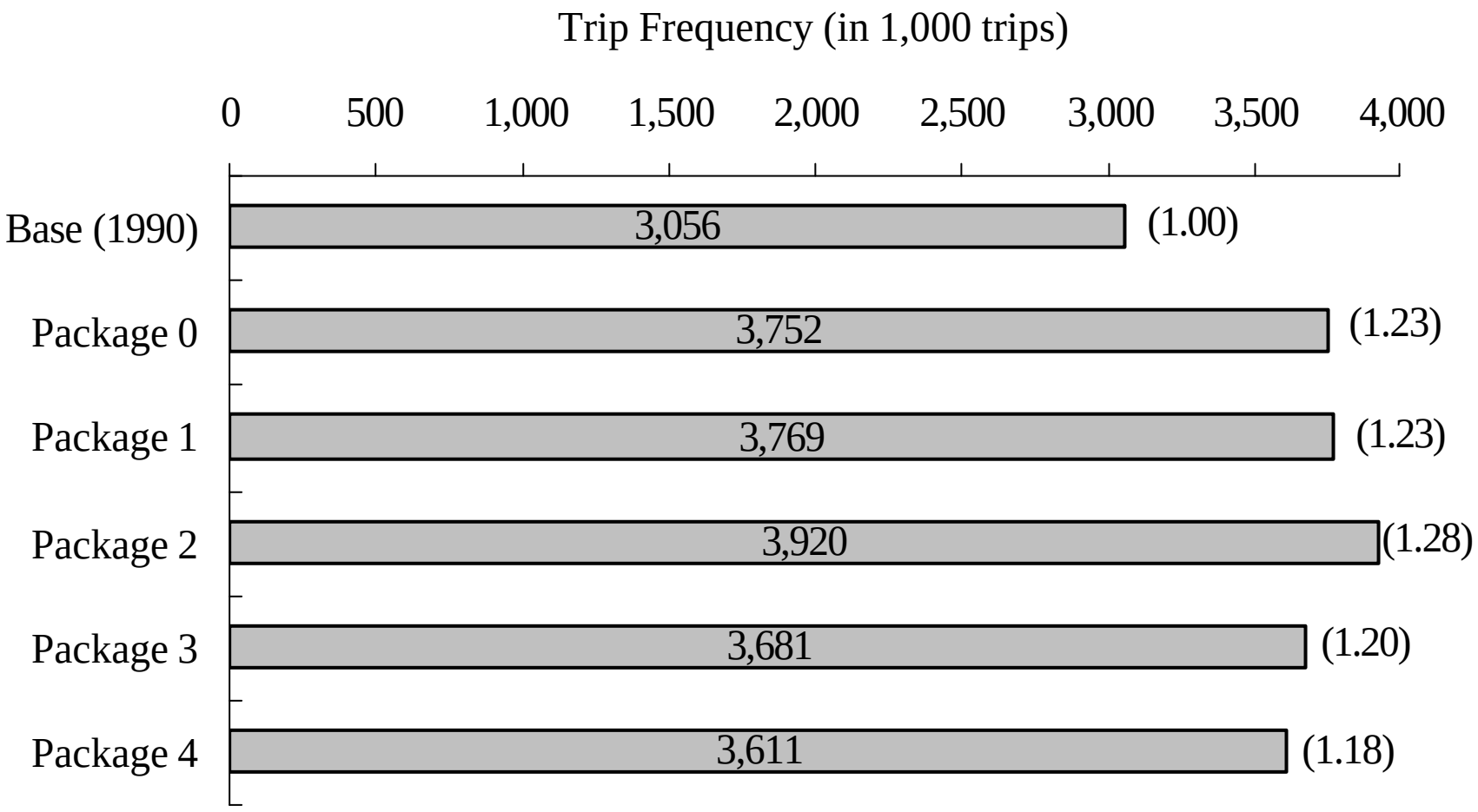
京都市への適用時からの変更点

- モデル要素の改良.
  - より詳細な人口セグメントの採用.
  - Split population survival time models を用いた活動時間の推定.
  - 現況再現のためのモデル微調整.
- 公共交通のサービス水準を静的シミュレーションで推定.
- より大きなネットワークを採用.
  - リンク数＝3,057, ノード数＝1,098, セントロイド数＝289
- Demographic simulator の開発, 適用.

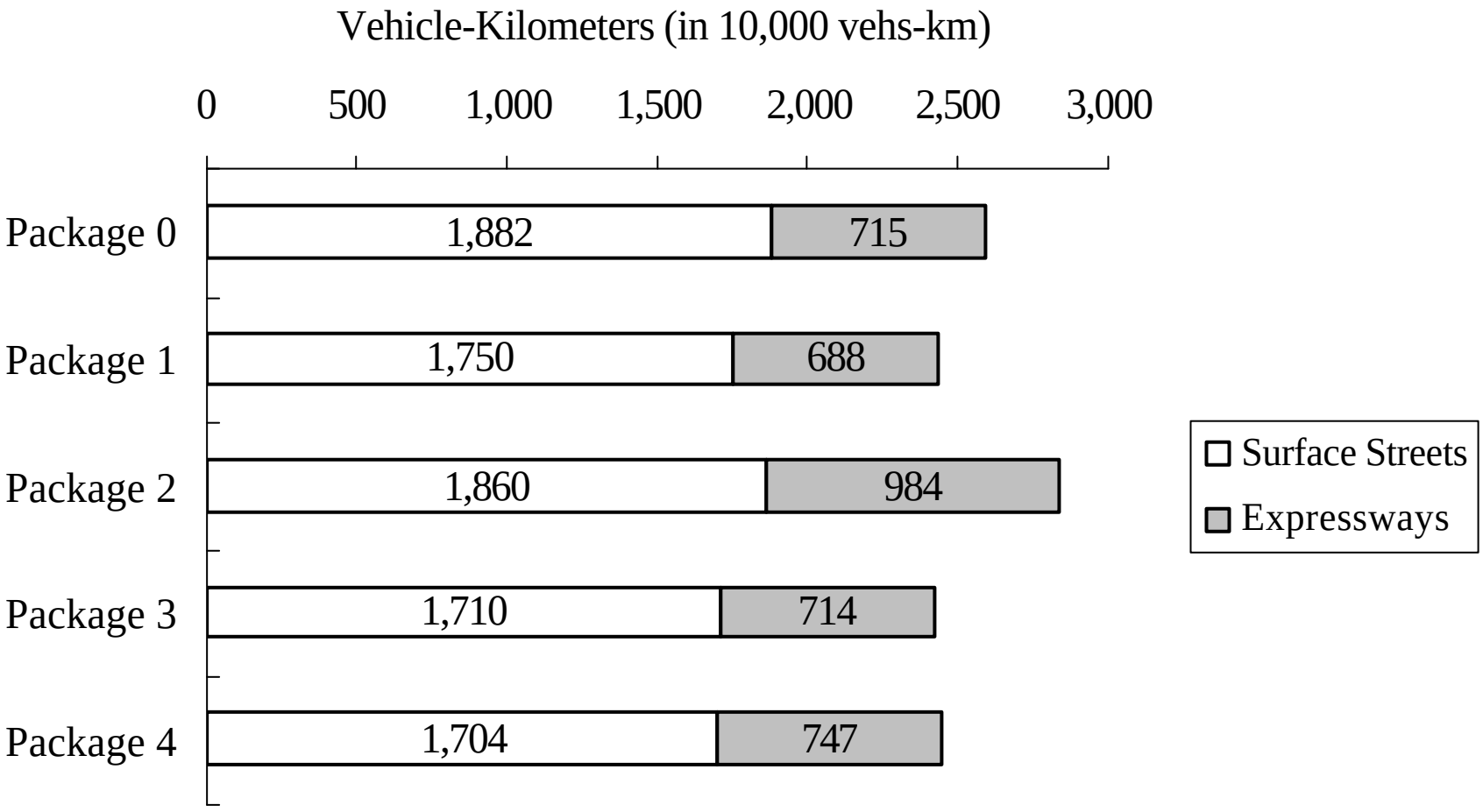
時刻別発生トリップの分布:
観測値 vs. シミュレーション結果



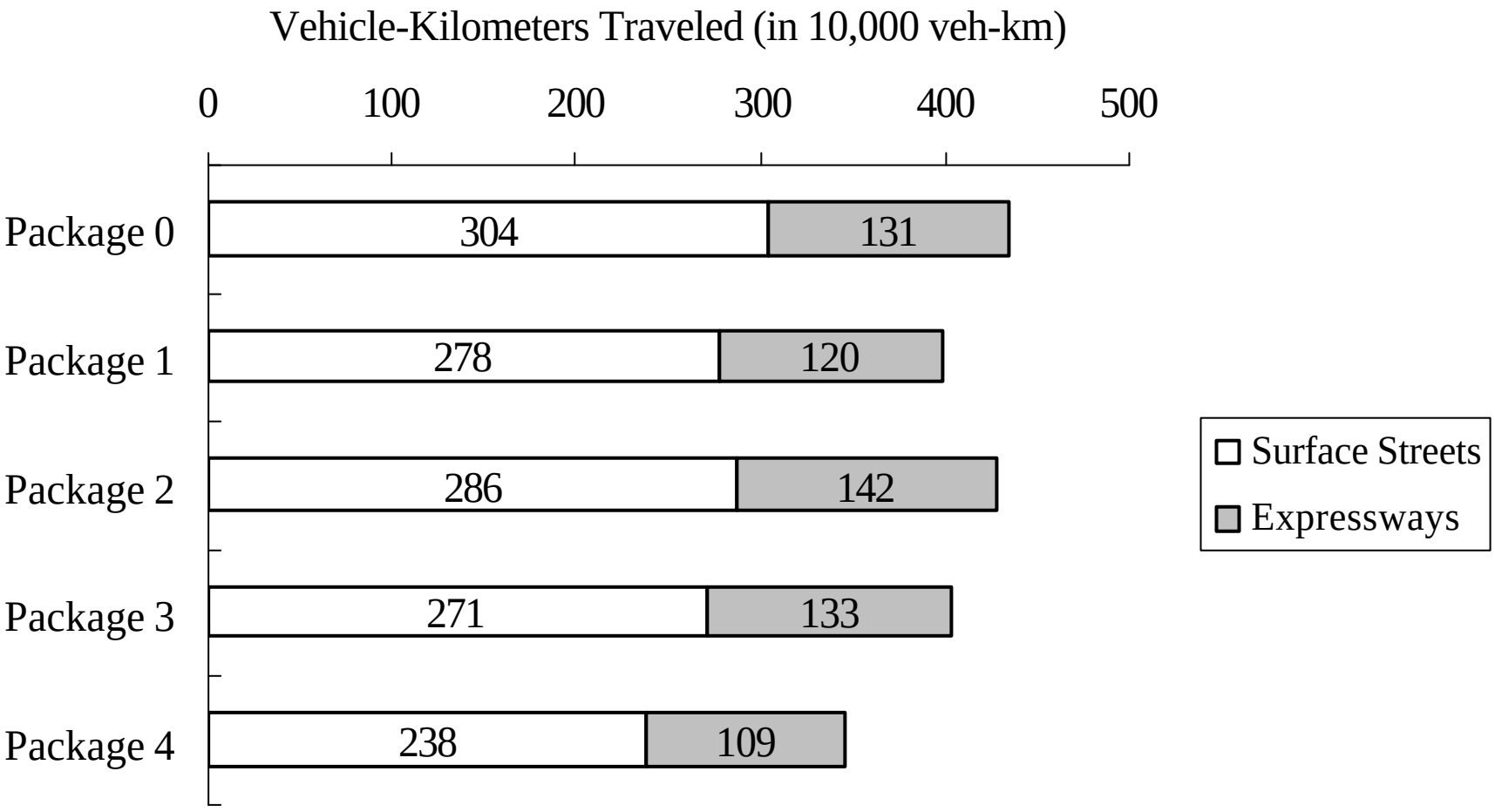
自動車トリップ発生量の施策間比較



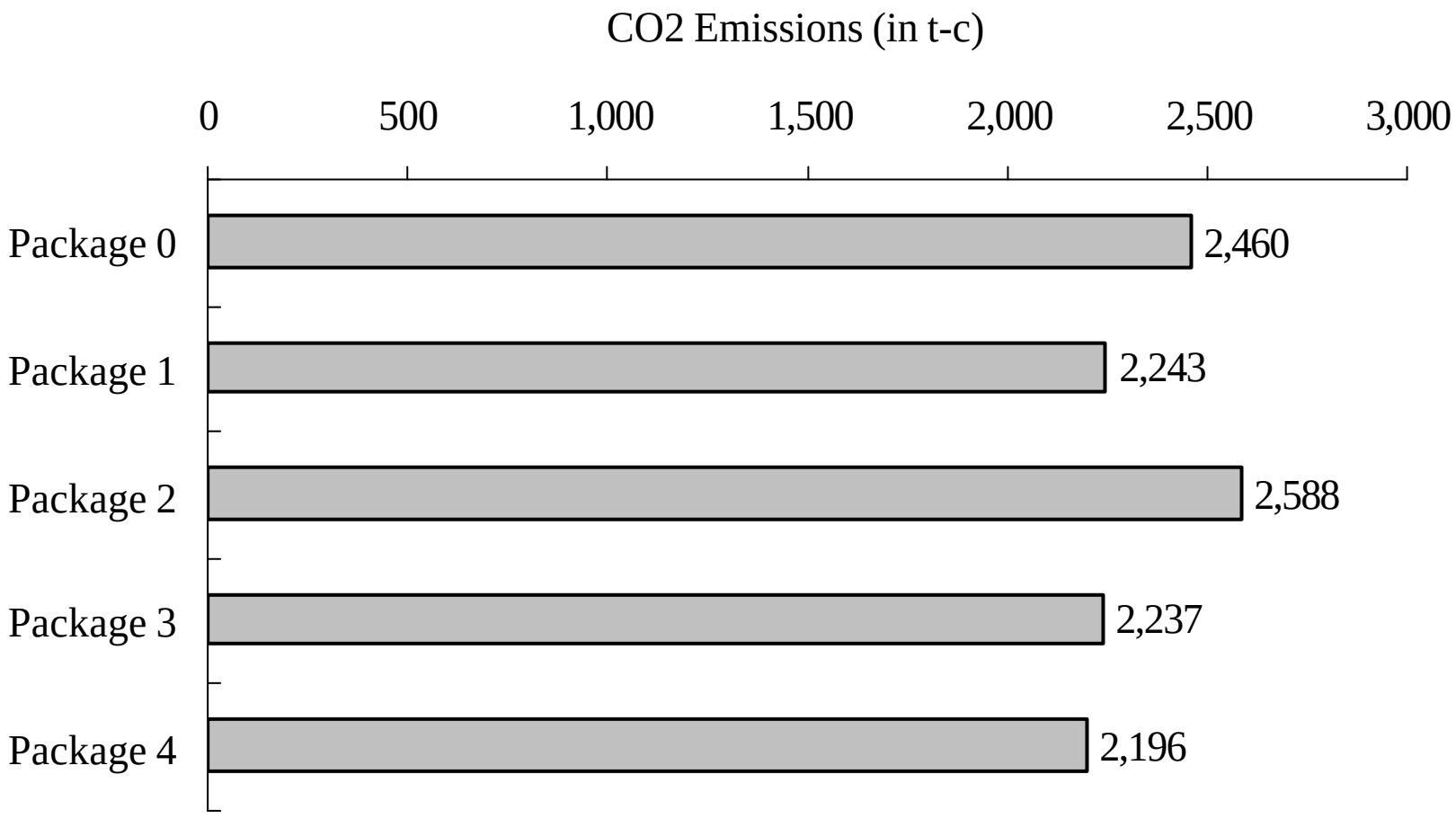
自動車総走行距離の施策間比較



CBD内での自動車走行距離



CO_2 排出量の施策間比較



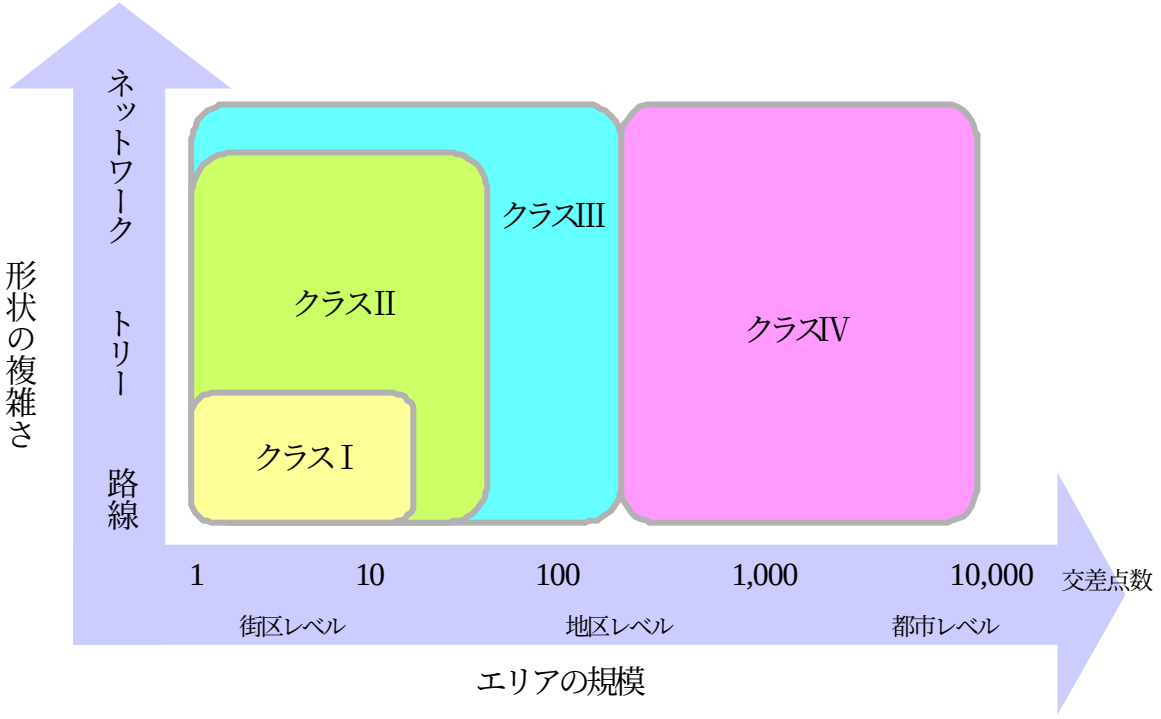
適用事例と課題

- 適用事例
  - 京都　(COP3に関連してTCMの評価)
  - 大阪　(長期予測ー世帯シミュレータの開発)
  - 豊田　(TDM施策評価)
  - 尼崎　(LRT導入)
  - Tampa, Florida　(TDM施策評価, 進行中)
- 課題
  - 現況再現性の緻密な検証.
  - 使いやすさの向上.
  - 微細ゾーンなどを用いたより詳細な空間の表現.
  - より精緻な汚染物質排出モデルの導入.
  - 自動車保有, 住宅地選択, 個人間の相互作用などの導入.

結　論

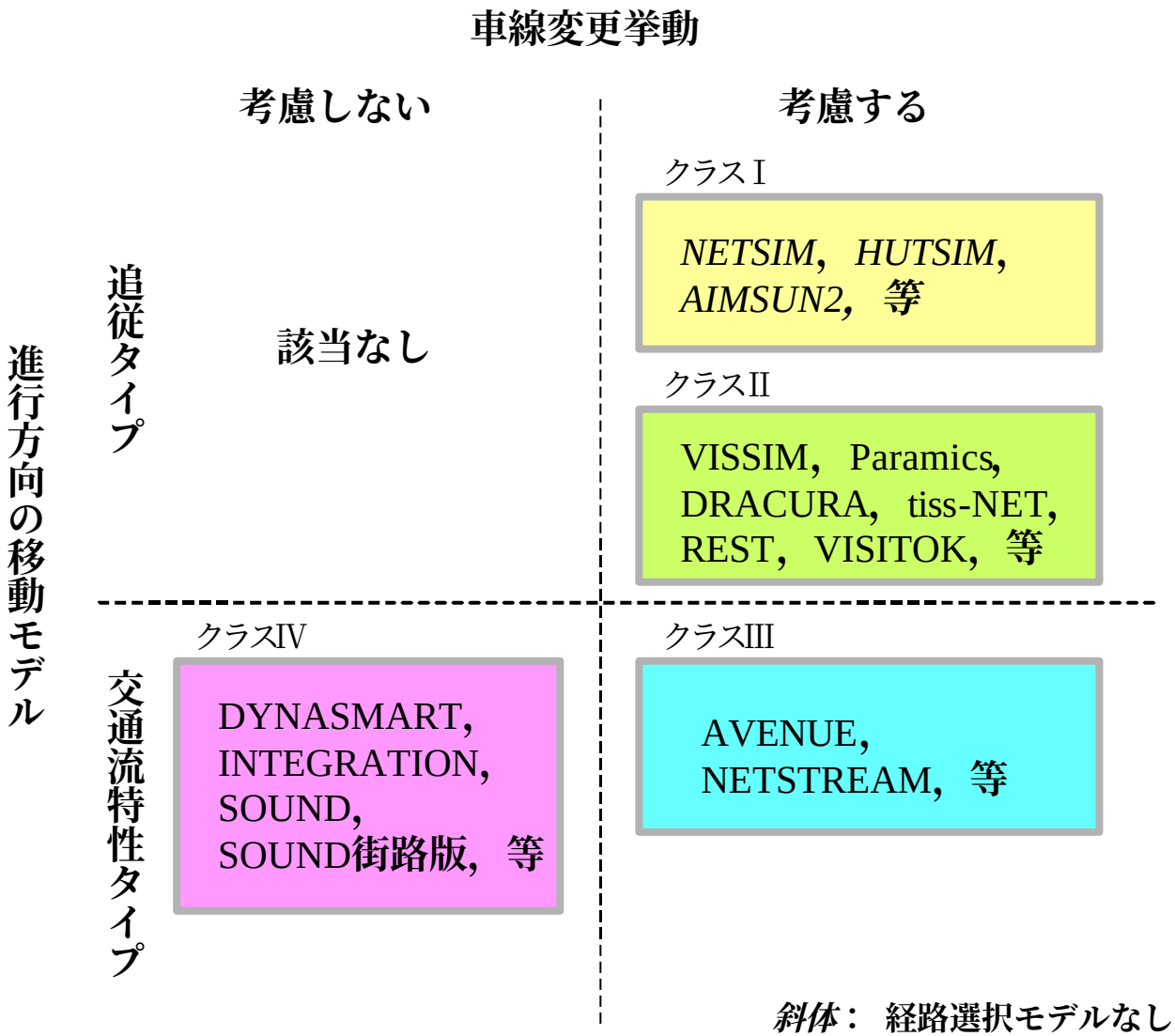
- TCM 評価に当たり, 従来の四段階推定法の限界は明らか.
  - 一日交通量を用いた交通配分では費用便益分析における時間短縮効果さえ正確に推定できない.
- 交通行動分析, データ収集手法, モデル推定手法, 計算速度 ･記憶容量, 等の分野での著しい進展は新たな手法を現実的なものとしている.
- 複雑で動的な交通行動と都市システムを, 非現実的な仮定を導入することなく解析することが可能に.
- 京都市, 大阪市での事例は, マイクロシミュレーションが実際的な需要予測 ･政策評価手法であることを示している.

参考：シミュレーションモデルの分類



	進行方向の車両移動	車線変更挙動	経路選択モデル
クラスI	追従タイプ	考慮する	外生
クラスII	追従タイプ	考慮する	内包
クラスIII	交通流特性タイプ	考慮する	内包
クラスIV	交通流特性タイプ	考慮しない	内包

既存シミュレータの分類



斜体： 経路選択モデルなし

交通環境シミュレーションモデル

- **CO_2（燃料消費量）**

排出量

排出原単位（速度帯別，車種別）を用いて算出（加減速データは用いない）

ほとんどのシミュレーションモデルで出力可能

- **NOx，SPM，HC，COなど**

排出量

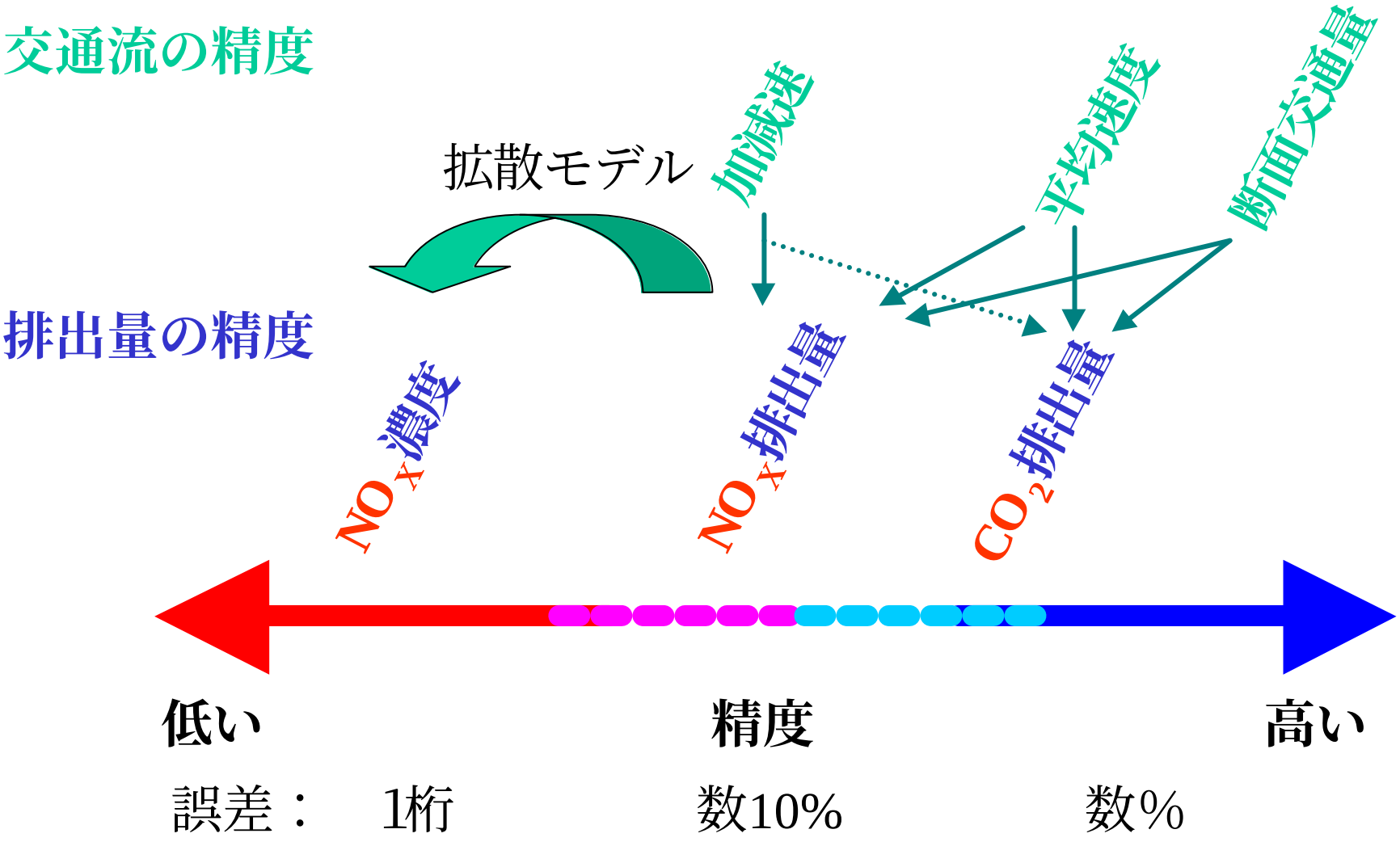
排出原単位（速度帯別，車種別）を用いて算出（加減速データは用いない）

追従タイプのシミュレーションモデルが対応可能

大気拡散の表現

プリュームモデル，線源パフモデル

交通環境シミュレーションモデルの精度



交通環境シミュレーションモデル適用事例

- **CO_2（燃料消費量）**

  多くの事例において追加的に出力

- **NOx, SPM, HC, COなど**

  VISSIM：UK（Maidstone,Kent）で評価

  Paramics（SPM）：メトロマニラでの評価

  いずれも精度には改善の余地あり

  HUTSIM（NOx, NO_2,CO）：プログラム開発済

  SOUND：東京都市圏への適用に向けて準備中

出典：*IATSS Review*, vol. 26, no. 3, 2001, pp. 196-204

環境影響把握のための交通分析手法の進展

北村隆一

交通需要予測の代表的な手法である 4 段階推定法は，交通が環境に及ぼす影響の解析手法としては極めて不十分なものである．特に時間軸の欠落のため，得られる道路網上の自動車交通量の推定値は信頼度が低く，汚染物質の排出量や騒音・振動の推定値は不正確なものとなる．本稿では，自動車からの汚染物質の排出に主眼を置き，環境影響の解析に必要となる要件を明らかとし，新たなアプローチとして，個人の活動とネットワーク上の交通流のシミュレーションモデル系を紹介する．

Development of Transportation Analysis Methods for the Evaluation of Environmental Impacts

Ryuichi Kitamura

The four-step demand forecasting procedure, which has been the principal tool for travel demand forecasting, is extremely limited as a methodology for the evaluation of environmental impacts by urban transportation. Lack of the time dimension in the procedure, in particular, makes the traffic forecasts it produces quite inaccurate, leading to unreliable estimates of pollutant emissions and noise levels. This article focuses on vehicular pollutant emissions, identifies requirements for proper analysis of environmental impacts, then proposes, as a new tool, a simulation model system of individuals' activities and network flow.

1. はじめに

20 世紀は自動車の世紀であった [1]．鉄道王国から自動車王国への転換をいち早く遂げた米国では，1930 年代に自動車社会の素地が確立し，第二次大戦後直ちに急速な自動車化が展開した [2]．日本の諸都市も，戦後の高度成長期以降，米国に見られた自動車化と郊外化の流れに追従した [3]．路面電車はバスに置き換えられ，そのバスも自動車の普及と道路混雑のため機能せず，利用者減少と運賃値上の悪循環に陥っている．日本の自動車保有台数は 1996 年現在 1000 人当り 373 台で，米国の 518 台には及ばないものの，欧州諸国の水準にある [4]．

世界的に見ると，自動車総台数は人口の増加を遥かに凌ぐ率で増え続けている．1950 年に人口 100 人当り約 2 台であったものが，1994 年には約 10 台へと激増し，飽和の兆しは全く見えない [5]．大都市圏では自動車が本来持っていた利便性が交通混雑のため相殺され，大気汚染を始めとする諸問題が誰の目にも明らかとなると同時に，施設拡充により問題を解決することが物理的，財政的，

政治的に極めて困難かつ非効率的となりつつある．

このように交通計画の文脈が変化するとともに，交通分析手法に要請されるものは根本的に異なったものとなった．これまでの交通需要解析の中心的手法であった 4 段階推定法は本来施設拡充のためのものであり，環境への影響把握，政策評価に適用するには極めて不十分なものである．4 段階推定法が孕む問題のうち，TDM などの交通施策評価に関するものについては以前拙稿 [6]で論じている．そこで本稿では，自動車交通に焦点を絞り，汚染物質排出，騒音などを高い精度で推定し，環境への影響を的確に把握するためには，交通分析手法に何が必要とされるかを考えたい．

２．自動車交通が環境に与える影響

交通が環境に与える影響は景観や生態系など，極めて幅広いものを含むが，本稿では地球温暖化ガスを含む汚染物質排出，騒音などの狭い範囲のものに限定する．騒音・振動については，自動車のみならず超高速鉄道が深刻な発生源である．また，鉄道，バスなどの公共交通機関も環境問題に寄与する．しかし，周知のように旅客人キロあるいは貨物トンキロ当たりのエネルギー消費や汚染物質の排出量は自動車において最も高い．また，社会的に適正な水準を超える自動車の利用に伴う公共交通利用の低下が，更なる道路混雑を招くとともに公共交通機関の効率性を阻害しているという側面がある [7]．これらの点から，本稿では都市内交通を念頭に置き，自動車交通に議論の的を絞る．

まず，自動車による汚染物質排出の特性を，雑駁ではあるが，概観することとしよう．一口に汚染物質といっても，環境，人体に異なった影響を与える物質が多種あり，車輌からの排出特性も異なる．二酸化炭素 (CO_2) は主要な温室効果ガスで，日本では運輸部門の排出量は全体の約 20%である [8]．窒素酸化物 (NO_x) は呼吸器に悪影響を与えるとともに，硫黄酸化物 (SO_x) と共に酸性雨の原因物質とされる．また，光化学反応によりオゾン (O_3) などの有害な酸化体となる [9]．NO はオゾンにより NO_2 となるが，この反応には太陽紫外線強度が影響を与える．したがって光化学反応を孕む大気汚染に関しては NO_x 等の化学物質の時刻別排出量を知ることが重要となる．

これらの排出物は大気中に拡散し環境に影響を及ぼすが，大半が自動車から排出される一酸化炭素 (CO) は，交通量の多い交差点などでの局地的集中が問題となる．炭化水素 (HC) は，基本的には燃焼していない石油で，多種の化学物質を含んでいるが，ベンゼンなどのアルデハイドが最も有毒である．浮遊粒子状物質 (SPM) は気道や肺胞に沈着し，健康を阻害する [10]．これらの物質は，時間的，空間的な集中濃度が問題となる．

一口に自動車と言っても，排出物質により，また重量やエンジンの種類により，その排出特性は異なる．例えば主要な温室効果ガスである CO_2 の場合，ディーゼル乗用車の方がガソリン乗用車より排出量が平均約 13%少ない [11]．一般に，ディーゼル・エンジンは CO, CO_2, HC について優れているが，PM と NO_x の排出に関してガソリン･エンジンに劣るとされる [10, 12]．

自動車の走行状態とこれら汚染物質の排出との関係について見ると，CO_2 の場

合ディーゼル貨物車からのトン－キロ当りの排出量は，平均車速が 70 km/h 付近で最小となり，速度低下に伴い著しく増加する．さらに急発進や急加速が排出量に大きく影響を与えることも知られている [11]．NO_x についても，ディーゼル貨物車，バスなどの場合 60km/h 付近で最小となり，高速での増加が著しい．ガソリン・エンジンの場合には，NO_x 排出量が速度ともに増加し [10, 13]，CO や HC の排出は速度に伴い減少する [10]．また，CO_2 と同様，エンジンに強い負荷のかかる加速状態で NO_x 排出量が増加する [11]．SPM の排出状況についてはデータが不足しているが，発進時に排出量が増大することが知られている [11]．最後になるが，騒音については，個別車輌からの騒音は速度と共に増大すること，また総騒音量は交通量と共に増大することが知られている [14]．

３．交通分析手法に必要とされるもの

以上に見たように，自動車の排出物が環境と人体に与える影響とそのメカニズムは多岐多様である．また汚染物質の排出は，自動車の走行状態，車輌の整備状況などとも複雑に関係している．環境への影響を把握するためには，気象学的観点を別にして，

車種，重量，燃料・エンジンの種類
走行速度
加速減速
走行時刻

についての情報が必要とされることは明らかであろう．

4 段階推定法に代表されるこれまでの交通需要予測法は，施設計画の支援を念頭に開発されてきたこともあり，自動車交通が環境に与える影響を的確に評価するのに適したものではない．特に問題となるのが，4 段階推定法は，交通量の時間的変化を予測する構造を持っておらず，一日 OD 交通量のみが出力として得られるに過ぎないという点である．観測リンク交通量に基づく動的 OD 交通量の推定法が研究されてきたが [15, 16]，これらは動的交通量の予測に適用し得るものではない．

したがってこれまでに採られてきた方法は，仮定あるいは経験則に基づき日交通量から時間交通量を割り出し，交通量配分に用いるというものである [17]．最も一般的には，一日交通量を単純に時間交通量に直し，分割配分あるいは均衡配分が行われている．しかし人々の行動には時間的規則性があり，それに伴い交通流にも時間的規則性が存在することは誰の目にも明らかであろう．環境への影響を把握するためにはより精度の高い交通流特性の推定が必要となり，そのためにはより精度の高い動的 OD 交通量の推定が不可欠である．これがなされて始めて，これまでに積み上げられてきた動的配分手法の成果 [18 - 21] の適用が可能となろう．

これに加え，速度を始めとする交通流特性の推定に際して肝要なのが渋滞の発生および延伸の予測であろう．これについても異なった視点からの研究が積み重ねられてきた [22 - 24]．大規模ネットワークへの実用的な適用に向けて，これら手法の実用化が急務である．

次に，道路交通量の予測値が与えられたとして，どのように環境への影響を推定するかという課題に移りたい．道路線形に加え，車輌の特性および加速減速などの走行状態のプロファイルが与えられたとき，燃料消費量を高い精度で推定することは可能であるし，各種の汚染物質の排出量を推定することも不可能ではないであろう．とすれば，微視的に車輌の挙動を再現することが排出量推定のために必要とも考えられる．

この発想から開発されたのが米国で連邦道路局などにより開発されている TRANSIMS で，大規模ネットワーク上で個々の車輌の追従挙動を再現しようとするものである [25]．しかし実際には，cellular automata の適用により車輌の追従挙動を記述しているため，速度は離散的にごく粗く近似されており，汚染物質排出量の算定に耐え得る精度を持つものではない．このことは，現在の計算技術をもってしても，都市圏レベルで微視的に車輌の挙動を再現することにより環境への影響を推定することは非実用的であることを示唆している．さらには，このような微視的な解析により都市圏レベルでの環境への影響を把握しようとすることが効率的であるとも考えられないし，恐らく必要でもないであろう．

環境への影響の推定にあたり，道路交通によるエネルギー消費，汚染物質排出，さらには騒音・振動を，交通解析手法が提供し得る情報に基づき，如何に正確かつ効率的に予測するか，が中心的な課題となる．これまでネットワーク解析から得られる情報は交通量と平均走行速度として集約されてきたが，環境への影響を把握するためにはこれらに加え，リンク毎の時間帯別車種構成が不可欠で，車種別交通量配分が必要となる．また，車輌間の速度分散の指標，および速度の変動を表す指標が望まれる．これらの変数を用い，エネルギー消費，汚染物質排出，騒音・振動などの予測モデルを，実験や観測データに基づき統計的に構築していくことが必要とされる．

ここで注意しなければならないのは，実証的に求められた汚染物質排出量のモデルは，個々の車輌の測定値に基づくことが多く，また，速度についての非線型関数であるという点である．このような非線型モデルに平均走行速度を代入し，交通量を乗じることにより総排出量を推定することは，多大の推定誤差につながり得る．交通流からの総排出量を集約的に求める際には，モデルの非線型性および車輌間の速度のばらつきを考慮することが不可欠である．この意味でも車輌間の速度の分散指標が重要となる．

汚染物質排出量や騒音・振動の推定の精度向上のために時刻別の交通量の推定が重要となるが，このことは CO の集中（いわゆる “hot spot”）や光化学反応による大気汚染の推定にあたって極めて重要である．また，触媒コンバーターを登載した車輌の場合，エンジンが冷えた状態（エンジン停止後 1 時間以上）で始動した場合 (cold start)，エンジンが冷め切っていない状態での再始動 (hot start) に比べ多大の汚染物質が排出される [17]．さらに，エンジン停止後の冷却期間にも汚染物質が排出される (hot soak)．自動車交通量の時間的変動を捉えるためのみならず，これらの諸現象を反映する形で汚染物質排出の時間，空間的分布を推定し，環境への影響を評価するためにも，各々のトリップの開始・終了時刻の予測が重要となる．交通の環境への影響を解析するに当たって，トリッ

プの時刻属性の予測が極めて重要となることを強調したい．

既に述べたように汚染物質排出特性は車種によって異なる．環境への影響を把握するに際しては，これまでのように車体のタイプのみならず，動力のタイプや燃料に基づいて車種を定義することが必要となる．今後，天然ガス車，ハイブリッド電気自動車，電気自動車，あるいは燃料電池車などが普及すると期待されるが，汚染物質排出特性を適切に表し得る車種の定義が肝要である．さらに，これまで実務レベルでの世帯の自動車保有の予測は保有台数のみを考慮してきたが，微視的な解析の場合は世帯の車種選択を，集計的なアプローチを採る場合には車種構成を予測することが極めて重要となる．また，低公害車の普及を加速させることを目的とした施策の有効性を評価し得る手法の開発，適用が重要となろう．これらの課題を視野に収めた世帯の自動車保有行動の解析とモデル化が進展しつつある[26 - 28)]．

最後に物流交通の需要予測に触れたい．ディーゼル・エンジンからの PM や NO_x の排出が沿道住民の健康に与える影響が明らかとなり，ディーゼル車の規制，経路誘導が検討されているが，物流交通生成のメカニズムは複雑で，データの整備およびモデルの開発は，人流に比べ遅れているといわざるをえない．同様の事が業務交通についても言える．その一方で「IT 革命」は製造，流通，販売の全てにおいて，交通生成のメカニズムを根本的に変えつつある．物流･業務交通生成のメカニズムの行動学的解析とモデルの開発が急務といえよう．また，業務部門での自動車保有，車種選択の解析とモデル化も必要とされている．

4．新しいアプローチ

環境への影響を把握することが主目的である場合に有効となる交通流の再現手法はシミュレーションであろう[29 - 31)]．交通流のシミュレーションモデルは，各々の車輌の挙動がどう再現されているかにより，ミクロなものとマクロなものに大別される．前者は個々の車輌の挙動を個別に再現するもの，後者は一群の車輌の平均的挙動を流体モデルなどを用い集約的に表現するものである．前者を適切な排出モデルと組み合わせることにより，混雑した交差点での CO の排出や，高速道路合流部の改良あるいは ETC の導入に伴う汚染物質排出量の変化などを解析することが可能となる．

ミクロなものであれマクロなものであれ，シミュレーションの大きな利点の一つは時間軸を解析に明示的に導入できるという点にあろう．シミュレーションでは個々のトリップあるいはトリップ群が生成する度にそれをネットワークに流入させることが可能である．さらにミクロな解析の場合は，トリップの開始から終了に至るまでの車輌の速度，加速減速などの詳細を時間軸に沿って再現することが可能で，極めて精度の高い汚染物質排出の推定が可能となる．これに加え，個別経路誘導などの ITS 施策や，道路料金などの TDM 施策への運転者の対応行動をモデルに組み込むことが容易で，幅広い政策評価の可能性を持つ解析法ということができる．

この様なシミュレーションモデルと，個人による交通生成を時間軸に沿って再現するモデルを組み合わせることにより，広域ネットワーク上の交通流を再

現し，CO_2や汚染物質の排出を推定することが可能となる．解析事例として，ここではPCATSと呼ばれる個人の交通行動のシミュレータと，DEBNetSと呼ばれる動的ネットワークシミュレータを組み合わせたモデル系を解説したい．

人間の活動には，時間・空間的に制約されたものと，そのような制約を受けないものとがある．これら二種の活動により，活動が先決されている拘束時間帯と，恣意的に活動を選択できる自由時間帯に，一日が分割されると考えよう．PCATS (Prism-Constrained Activity-Travel Simulatorの略) は，拘束的活動が与えられたとして，移動に対する時間・空間的な制約，私的交通手段の利用可能性などを明示的に考慮しつつ，自由時間帯内での個人の交通行動を再現するものである．

PCATSは逐次的構造を持ち，個々人のトリップを時間軸に沿って順次生成する．モデル要素としては，次にどのような活動が営まれるかを決定する活動選択モデル，活動時間モデル，目的地・交通手段選択モデルが含まれる．これらモデルは京阪神パーソントリップ (PT) データなどの観測値に基づき推定されている．活動選択モデルは，個人の属性に加え，時刻，残余自由時間などの関数として諸活動の選択確率を算定し，次の自由活動を確率的に決定する．次に活動時間が時刻などを与件として確率的に決定される．これを受けて諸々の制約条件下で目的地ゾーン，交通手段がシミュレートされる．詳細については文献32), 33) を参照されたい．なお，PCATSのサブモデルで入力として用いられた自動車OD所要時間と，以下に述べるDEBNetSの出力として得られるOD所要時間は一般に一致しないため，モデル系の適用に際してはPCATSとDEBNetSを繰り返し援用し，収束計算を行っている．

DEBNetS (Dynamic Event-Based Network Simulator) は，PCATSにより生成される自動車トリップを，時間軸に沿って順次広域ネットワークに導入し，交通流の再現を計るものである．ネットワーク上のリンクは各々細かな区間に分割され，各々の区間内では交通流は均一と仮定している．各車輌が区間に流入した時点での区間の交通密度に基づき走行速度を定め，その区間からの流出時刻を定めている．各車輌は最短経路を選択するものとし，分岐点となる各ノードで，一定間隔で更新される経路走行時間に基づき経路選択がなされている．詳細については文献34) を参照されたい．

この様に，DEBNetSは各車両の走行状態を，加速減速も含めミクロに再現するものではない．以下に述べる適用例では，CO_2の排出量を平均走行速度の関数として表すモデルにDEBNetSから得られるリンク内の区間平均走行速度を代入，得られたCO_2排出量に区間交通量を乗じ単位時間当たりの区間排出量を求め，されにこれらをネットワーク上の全区間について集計することにより，単位時間当たりの総CO_2排出量を求めている．したがって，加速減速の影響は排出量関数により間接的に反映されていると考えることができる．しかし，交通流内での車輌間の速度分散は考慮されておらず，これによる誤差がどの程度のものか，更なる検討が必要とされる．

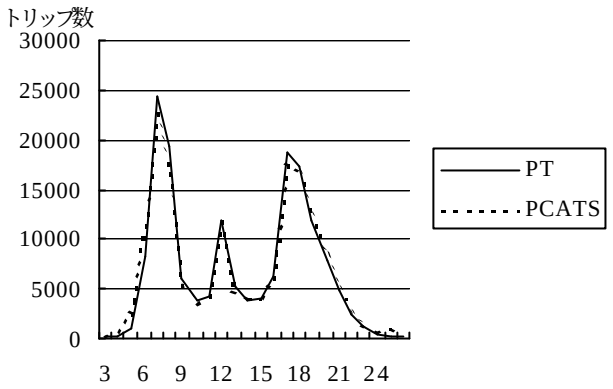
PCATSとDEBNetSを統合したシミュレーション系は，これまでに京都市[35]，大阪市[36]および豊田市[37]に適用されてきた．京都市の適用例では，同市で1997

年に開かれた地球温暖化世界会議 (COP3) に向けて，同市の数値目標策定の一助として，交通制御施策の CO_2 排出削減効果を推定することを目的にシミュレーションがなされた．大阪市の適用例は，交通施設整備・運営政策の長期的評価を目的とするもので，自動車交通優先政策，自動車抑制・公共交通優先政策，自動車・公共交併存型政策の下でシナリオを作成，2020 年までシミュレーションを遂行した．この適用例では，諸非集計モデルの入力となる世帯属性の将来値を世帯レベルで予測するため，世帯属性のシミュレータを開発，適用している [38]．豊田市での適用例は TDM 諸施策の評価を目的としている．

これらの適用例から，モデルの現況再現性を示す結果をかいつまんで紹介したい．PCATS/DEBNetS に含まれる諸モデルには完成に向け継続的に改良が加えられている段階で，以下に示す結果の中にはモデルの不完全性を示すものも含まれている．人間行動やネットワーク上の交通流の挙動をモデル化するに当たっての問題点を提示するものとして解釈していただければ幸いである．

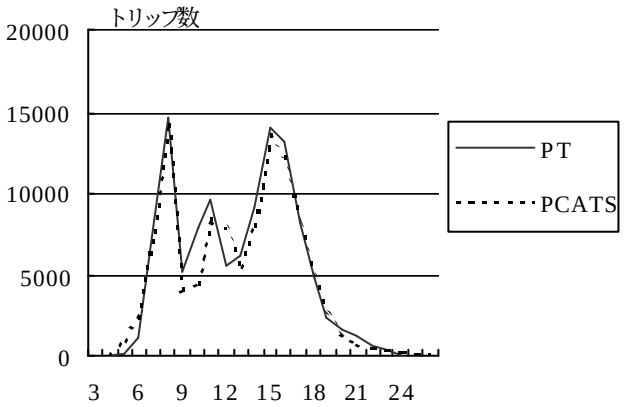
図－1 は大阪市への適用事例から，PCATS により推定されたトリップ開始時刻の分布と，1990 年に実施された第 3 回京阪神 PT 調査データから得られた実測値の分布を，就業者について比較したものである．両者の適合度は高く，PCATS が就業者による交通生成を時間軸上で良好に再現していることが分かる．これに比べて，図－2 に見られる非就業者（学生を含む）の分布の適合度は低い．自明のことではあるが，就業時間により活動が制約されている就業者に比べ，より自由度が高い活動パターンを持つ非就業者の活動を予測することは，より困難であることをこの結果は示している．トリップ生成時刻は主として活動選択モデルと活動時間モデルにより決定されるが，これらモデルの非就業者についての適合度をより詳細に検討することが必要である．また，午前 9 時から午後 2 時にかけて乖離が特に大きいが，これは非就業者による一日の最初のトリップの生成時刻推定に誤差があるためと考えられ，最も早い可能出発時刻の推定誤差が一因と考えられる．これについてはより精緻なモデルが開発されつつある [39]．

集中トリップ数を比較したのが図－3 と図－4 である．PCATS により集中トリップ数が概ね良好に再現されているが，大阪市への集中トリップが過少に，その他の地域へのトリップが過大に推定されていることが分かる．また，交通手段選択では，自動車が過大に，公共交通が過少に推定されている（図－5）．この適用例では，就業者，学生，非就業者の 3 グループの各々に特化して目的地・交通手段選択モデルが同定されているが，各々のグループでは単一のモデルが全てのトリップ目的に適用されている．上述の問題点は，目的別に目的地・交通手段選択モデルを推定することにより解決されると期待される．



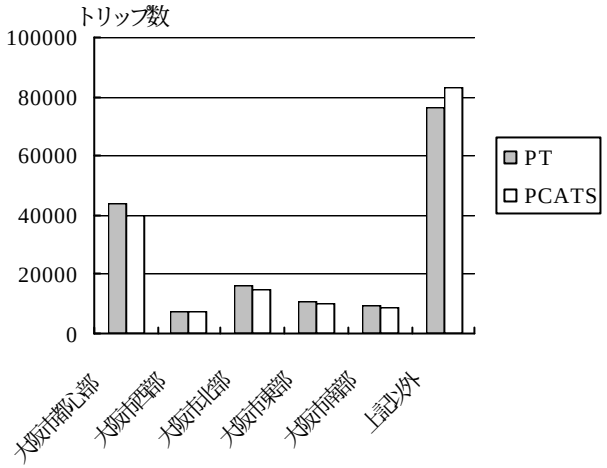
注） PT＝第3回京阪神パートントリップ調査データ
PCATS＝シミュレーション結果
出典）参考文献36

図－1 トリップ生成量の時間軸上での分布： 就業者についてのシミュレーション結果と観測値の比較



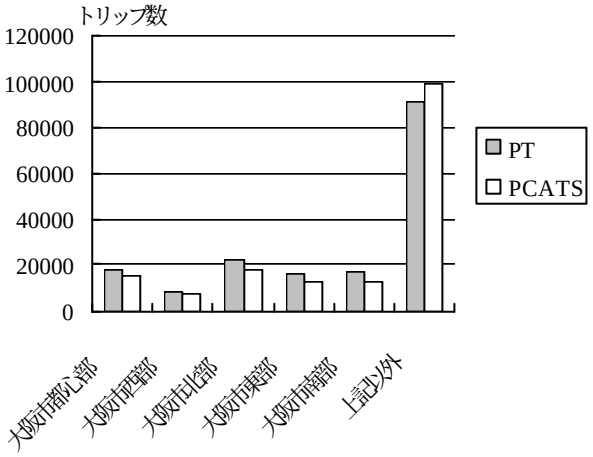
注） PT＝第3回京阪神パートントリップ調査データ
PCATS＝シミュレーション結果
出典）参考文献36

図－2 トリップ生成量の時間軸上での分布： 非就業者についてのシミュレーション結果と観測値の比較



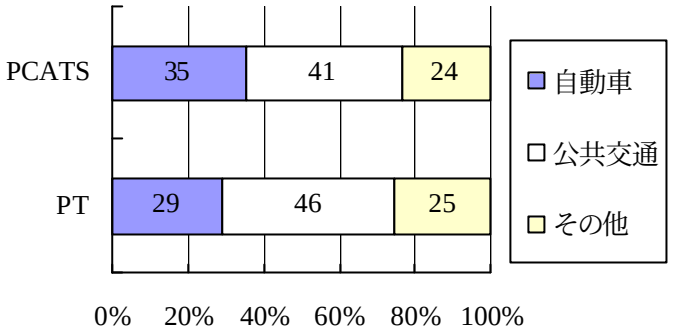
注）　PT＝第 3 回京阪神パートントリップ調査データ
PCATS＝シミュレーション結果
出典）参考文献 36

図－3 トリップ目的地の分布：就業者についてのシミュレーション結果と観測値の比較



注）　PT＝第 3 回京阪神パートントリップ調査データ
PCATS＝シミュレーション結果
出典）参考文献 36

図－4 トリップ目的地の分布：非就業者についてのシミュレーション結果と観測値の比較

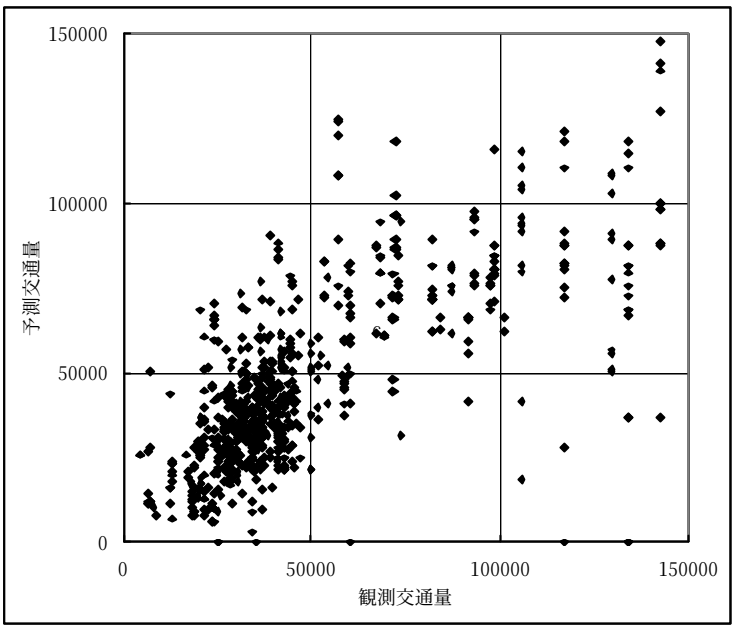


注）　PT＝第 3 回京阪神パートントリップ調査データ
　　PCATS＝シミュレーション結果
出典）　参考文献 36

図－5　交通手段分担率：シミュレーション結果と観測値の比較

現行の DEBNetS は，経路選択に際して単一の時間価値（76 円/分）を用い道路料金を時間に換算し，最短経路探索により有料道路の利用を決定するという方法を採っている．このため高速道路の利用が過小に推定されるという結果となった．運転者の行動により忠実な経路選択原理を導入することが必須と考えられるが，暫定的な措置として，交通量に基づきネットワークのパラメータを調整し，現況再現性の向上を図った[40]．図－6 に観測リンク交通量と推定交通量をプロットしたものを示す．観測交通量と推定交通量間の相関係数は 0.72 で良好な結果といえる．また，平均走行時間は現況を正確に再現するものとなっている．ただし，交通流が大きなリンクで交通量が過小に推定される傾向が未だ見られる．なお，推定交通量が 0 となっているリンクがいくつか見られるが，これはネットワークコーディング上の問題によるものと考えられる．

最後に CO_2 削減に関する結果を図－7 に示す．上述のように，CO_2 の排出量は平均走行速度と CO_2 排出量との関係を示すモデルに，DEBNetS より得られる走行速度を車種別に代入することにより求められている．この京都市の事例では，1990 年の PT 調査から得られた京都市民 21,458 標本，および京都に立ち寄った個人 8,246 標本，計 29,704 標本を用い PCATS によるシミュレーションを行い，これを拡大し（1,434,600 人に相当）生成されたトリップを DEBNetS に導入している．検討された交通制御施策は，① 京都市の都心部を取り巻く延長約 23 km の路面電車 (LRT) を導入，② 都心部（約 1.8 km×1.6 km）での駐車賦課金の導入，および ③ 自動車の都心部流入規制，である．シミュレーション結果は，これら施策に伴う交通手段利用や目的地の変化のみならず，トリップ生成量の変化，さらにはトリップチェインのパターンの変化などを反映するものとなっている．



出典） 参考文献 40

図－6 観測リンク交通量と予測交通量の比較

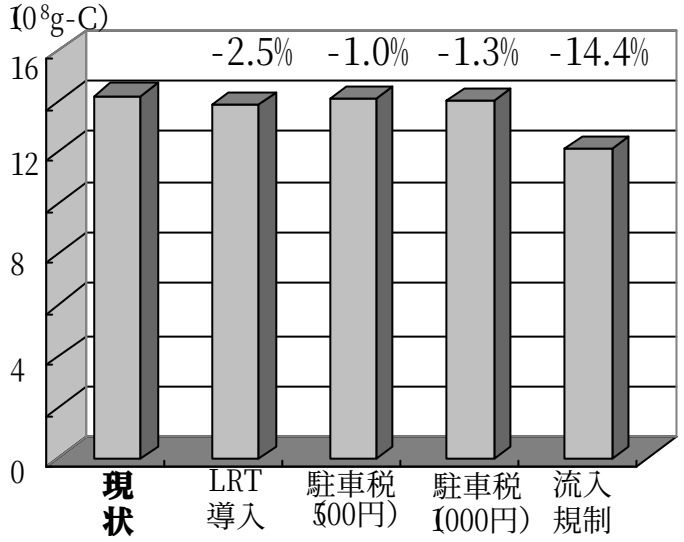
PCATS/DEBNetS を適用し，京都市全体での CO_2 排出量を推定した結果，都心部における 500 円あるいは 1000 円の駐車賦課金は，CO_2 削減にさほど効果を持たないが，LRT の導入と都心部への自動車流入規制は共に自動車分担率の減少をもたらし，より大きな CO_2 削減をもたらすことが示された．特に，約 2.9 km^2 と都市圏全体から見ると小さな地域であるが，都心部への自動車流入規制で大幅な CO_2 排出の削減が可能であることが示されている．ここでの解析はパーク&ライドや，規制地区外で駐車し徒歩で最終目的地に向かうといった対応行動を考慮しておらず，暫定的なものといわざるを得ない．しかしながら，時刻別に動的に推定された交通量に基づき CO_2 の排出量が推定されていること，また，目的地や交通手段選択に留まらず，トリップチェイニングなどの一日の交通行動全体に交通施策が及ぼす影響を把握したものであること，という二点において，4 段階推定法に代表される従来の解析法の弱点を克服するものと考えられる．

５．おわりに

これまでの交通需要予測，施策分析の中心的な手法であった 4 段階推定法は，交通が環境に及ぼす影響の解析手法としては極めて不十分なものである．特に時間軸の欠落のため，この手法により得られる道路網上の自動車交通量の推定値は信頼度の低いものでしかありえない．結果として，走行速度などの交通流特性の推定の精度が低下し，汚染物質の排出量や騒音・振動の推定値は不正確なものとならざるを得ない．

本稿では，環境影響の解析に必要となる要件を明らかとし，それらを満たす

ものとして個人の活動とネットワーク上の交通流のシミュレーションモデル系を紹介した．これは交通需要予測，政策分析における斬新な試みであり，改良すべき点を多々含んでいる．しかし，このようなアプローチが必要とされていることは理論的に明白であると同時に，本稿で紹介した事例は，トリップの生成を時間軸を追って再現し，ネットワーク流を動的にシミュレートすることが実用的な交通分析手法であることを示すものである．このような新たな手法が今後より幅広く適用され，より精緻な需要予測，環境影響の把握，政策分析がなされることを期待する次第である．



出典） 参考文献 35

図－7　交通制御施策別 CO_2 排出量推定値

参考文献

1. 折口透 『自動車の世紀』 岩波書店，1997 年.
2. 北村隆一 「省エネルギーに向けての交通施策」 エネルギー・資源，19 巻
3. 角本良平「車と道路から見た 20 世紀の東京」 運輸と経済，60 巻，5 号，2000 年．4 号，1998 年.
4. 総務庁統計局（編）『世界の統計，1999』 大蔵省印刷局，1999 年.
5. Sperling, D.: Future Drive, Electric Vehicles and Sustainable Transportation. Island Press, Washington, D.C., 1995.
6. 北村隆一 「やさしい交通シミュレーション 5．TDM 評価シミュレーション（その 1）」 交通工学，Vol. 33，No. 2，pp. 79-92，1998 年; 「やさしい交通シミュレーション 6．TDM 評価シミュレーション（その 2）」 交通工学，Vol. 33，No. 3，pp. 87-108，1998 年.
7. Kitamura, R., Nakayama, S., and Yamamoto, T.: Self-reinforcing motorization: Can TDM take us out of the social trap? Journal of Transport Policy, Vol. 6, No. 3, pp.

135-145, 1999.
8. 環境庁（編）『平成 4 年版環境白書，総説』 大蔵省印刷局，1992 年.
9. Small, K.A. and Kazimi, C.: On the costs of air pollution from motor vehicles. Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 29, No. 1, pp. 7-32, 1995.
10. Wright, P.H. and Ashford, N.J.: Transportation Engineering: Planning and Design. Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.
11. 環境にやさしい交通体の形成のための調査委員会（編）『環境と運輸・交通： 環境にやさしい交通体系を目指して』運輸経済研究センター，1994 年.
12. Nieuwenhuis, P. and Wells, P.: The Death of Motoring?: Car Making and Automobility in the 21st Century. John Wiley & Sons, Chichester, 1997.
13. 京都市衛生局環境保全室 『自動車公害関係資料集』 1997 年.
14. 道路投資の評価に関する指針検討委員会（編）『道路投資の評価に関する指針（案）』（財）日本総合研究所，1998 年.
15. 楊海，飯田恭敬，佐佐木綱 「観測リンク交通量を用いた時間 OD 交通量の動的推定法」土木計画学研究・講演集，No. 13，pp. 599-606，1990 年.
16. 松本幸正，藤田素弘，松井寛「交通量観測値に基づく動的 OD 交通量の再帰的推定に関する研究」土木学会論文集，No. 590/IV-39，pp. 63-78，1998 年.
17. 北村隆一「交通需要予測の課題: 次世代手法の構築にむけて」土木学会論文集，No. 530/IV-30, pp. 17-30, 1996 年.
18. 藤田素弘，松井寛，溝上章志「時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究」土木学会論文集，No.389，pp. 111-119，1988 年.
19. 宮城俊彦, 牧村和彦「時間帯別交通配分手法に関する研究」交通工学, Vol.26, No.2，pp. 17-27，1991 年.
20. 土木学会土木計画学研究委員会「交通ネットワーク」出版小委員会（編）『交通ネットワークの均衡分析―最新の理論と解法―』土木学会, 1998 年.
21. 赤松隆「交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論」土木計画学研究・論文集，No.13，pp. 23-48，1996 年.
22. 桑原雅夫，赤松隆「多起点多終点 OD における渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分」土木学会論文集， No.555/IV-34，pp.91-102，1997 年.
23. 赤松隆「時間帯別 OD 需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的交通配分」土木計画学研究・論文集，No.15，pp. 535-545，1998 年.
24. 桑原雅夫「ネットワーク交通流の動的な解析―待ち行列モデルの応用」土木計画学研究・論文集，No.16，pp. 1-17，1999 年.
25. Smith, L., Beckman, R., Baggerly, K., Anson, D. and Williams, M.: Overview of TRANSIMS, the TRansportation Analysis and SIMulation Systems. LA-UR-95-1641, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1995.
26. 山本俊行『連続時間軸上における世帯の自動車保有更新行動及び世帯内での配分・利用行動に関する研究』京都大学博士（工学）学位論文, 2000 年.

27. Yamamoto, T., Kitamura, R. and Fujii, H.: An Analysis of the Effects of a Periodical Vehicle Inspection Program on Household Vehicle Ownership. To be presented at the 9th Conference of the International Association for Travel Behaviour Research, Gold Coast, Queensland, Australia, July, 2000.
28. Golob, T., Brownstone, D., Bunch, D. and Kitamura, R.: Forecasting Electric Vehicle Ownership and Use in the California South Coast Air Basin, final report submitted to the Southern California Edison Company, 1995.
29. May, A.D.: Traffic Flow Fundamentals. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
30. 桑原雅夫「やさしい交通シミュレーション 2．広域ネットワークシミュレーション」交通工学，Vol. 32，No. 5，pp. 25-31，1997 年.
31. 尾崎晴男「やさしい交通シミュレーション 3．交通流のミクロシミュレーション」交通工学，Vol. 32，No. 6，pp. 61-68，1997 年.
32. 藤井　聡，大塚祐一郎，北村隆一，門間俊幸「時間的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するための行動シミュレーションの構築」土木計画学研究・論文集，No. 14, pp. 643-652, 1997 年.
33. Kitamura, R. and Fujii, S. (1998) Two computational process models of activity-travel behavior. In Garling, T., Laitila, T. and Westin, K. (eds.), Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling, Elsevier, New York, pp. 251-279.
34. 藤井　聡，奥嶋政嗣，菊池輝，北村隆一「Event-Based Approach に基づく簡便なミクロ交通流シミュレータの開発:生活行動と動的交通流を考慮した実用的な交通政策評価手法の構築を目指して」土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 4 部，pp. 694-695，1998 年.
35. 藤井　聡，菊池　輝，北村隆一「マイクロシミュレーションによる CO_2 排出量削減に向けた交通施策の検討：京都市の事例」交通工学，2000 年（印刷中）.
36. 飯田祐三，岩辺路由，菊池輝，北村隆一，佐々木邦明，白水靖郎，中川大，波床正敏，藤井聡，森川高行，山本俊行「マイクロシミュレーションアプローチによる都市交通計画のための交通需要予測システムの提案」土木計画学研究・論文集, 2000 年（印刷中）.
37. 菊池輝，北村隆一，倉内慎也，佐々木邦明，花井卓也，藤井聡，森川高行，山本俊行「豊田市を対象とした交通政策導入効果のマイクロシミュレーションを用いた分析」土木計画学研究・講演集，No. 22 (2), pp. 817-820, 1999 年.
38. 西田悟史，山本俊行，藤井聡，北村隆一「非集計交通需要分析のための将来世帯属性生成システムの構築」土木計画学研究・論文集, 2000 年（印刷中）.
39. Kitamura, R., Yamamoto, T. and Kishizawa, K.: Stochastic frontier models of prism vertices. Transportation Research Record , 2000 (forthcoming).
40. 菊池輝，藤井聡，白水靖郎，北村隆一「大規模ネットワークにおける交通流シミュレータ DEBNetS の現況再現性について」第 20 回交通工学研究発表会論文報告集，2000 年（印刷中）.

出典：*IATSS Review*, vol. 26, no. 3, 2001, pp. 196-204