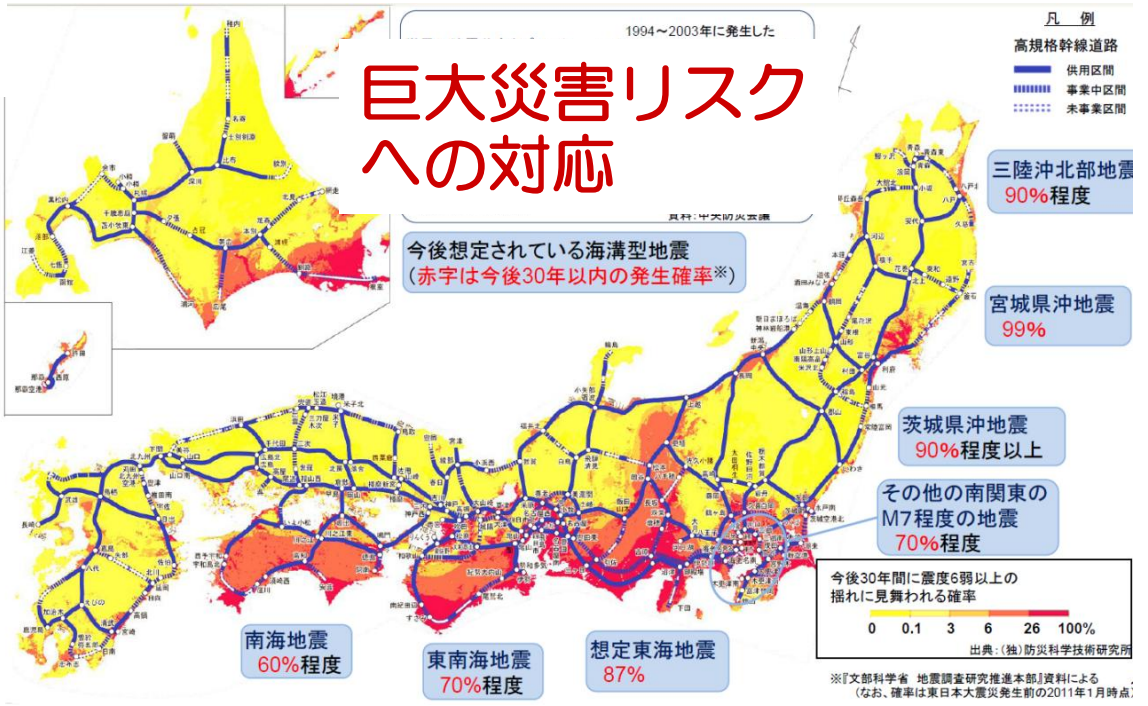
次世代インフラへの道
東京2020

羽藤英二
hato0816@gmail.com
東京大学教授
（社会基盤学/都市工学専攻）

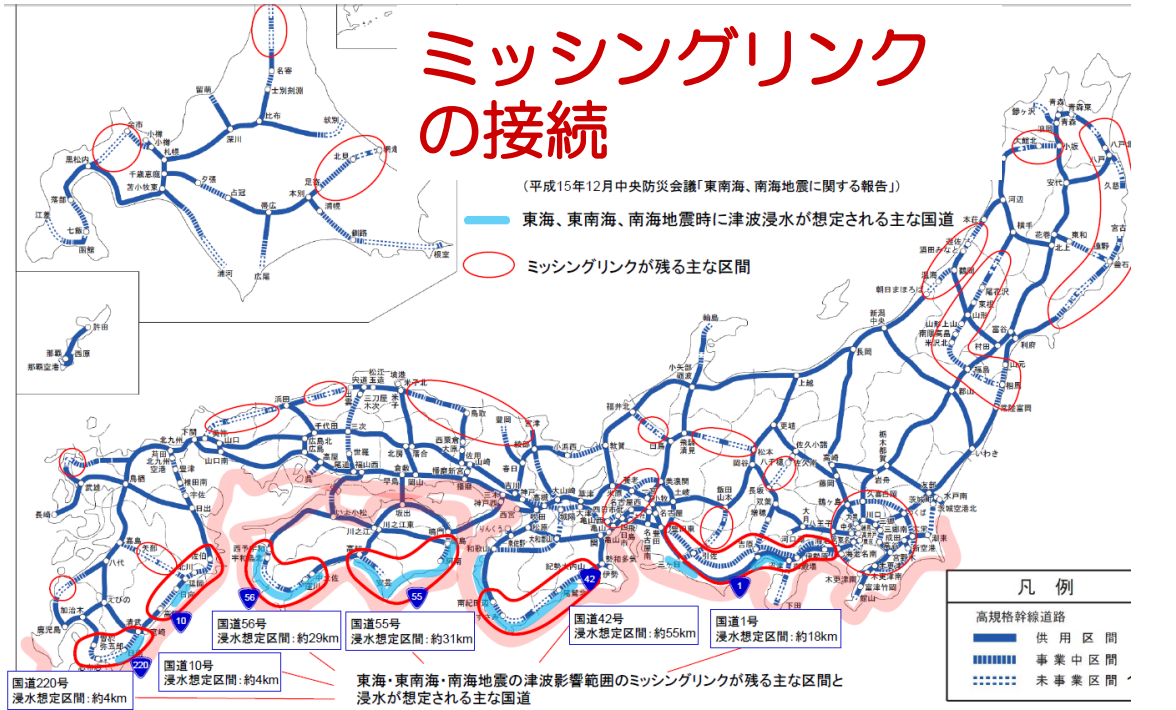
地方部道路の改良事業

国道4号から各路線経由で
国道45号及び国道6号までの啓開状況

巨大災害リスクへの対応



ミッシングリンクの接続

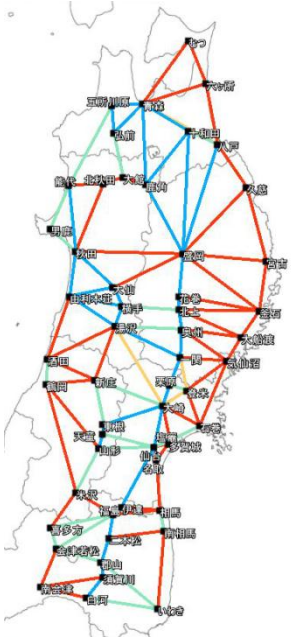


防災機能の暫定評価手法

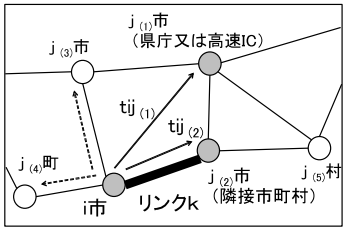
①**必要性評価**：**主要都市・拠点間**を、「耐災害性」「多重性」の視点から**A～Dに定性評価**（東北：120リンク）

②**有効性評価**：主要地方道以上の各リンクを、**各市町村と県庁所在地・高速道路IC・隣接までの到達時間**をベースに、**各リンク**の「**弱点度**」「**改善度**」を**定量評価**（東北：286リンク）し、整備の優先順位付け。

①必要性評価の際のネットワーク



②有効性評価の際のネットワーク



リンクkを整備する場合、

$tij_{(1)}$：i市からj (1)市（県庁所在地又は背骨となる高速道路IC）までの到達時間

$tij_{(2)}$：i市からj (2)市（隣接市町村等）までの到達時間

- $t_{ij(n)}$ を合計 $T_{o_1}^{k} = \sum_{i} \sum_{j} t_{ij(n)} \delta_{ij(n)}$

i からj のルートがリンクkを通る時：1
そうでない時：0

弱点度: $\alpha_w^k = \frac{T_w^k}{T_{o_1}^k}$　改善度: $K^k = \frac{\alpha_o^k}{\alpha_w^k}$

広域道路ネットワークの耐災害信頼性評価システム

< INPUT >

ハザードの設定

- ハザード1: 地震・津波
- ハザード2: 豪雨
- ハザード3: 雪害
- ハザード i …

地域の実情に応じて複数のハザードを設定可能とする

リンクダメージの設定

ハザードiに対するリンクjの遮断可能性(脆弱性)評価

物理的リンク脆弱性の評価手法

※別途研究成果より移転

分析データベース

- ノード、道路リンク情報
- 道路構造物に関する情報…

ネットワーク構築

(1)平常時NW
(2)ハザード時NW

主要地方道をベースに実情に応じて追加

< INPUT >

評価対象ODの設定

- 県庁、市町村役場
- 高速IC
- 自衛隊基地、災害拠点病院
- 港湾、空港…

地域の実情に応じて選定し、OD重みも考慮可能とする

評価結果

【数値ベース指標】
都市間脆弱度・改善度
リンク脆弱度・改善度

【カテゴリーベース指標】
都市間改善度・脆弱度
リンク脆弱度・改善度

< OUTPUT >

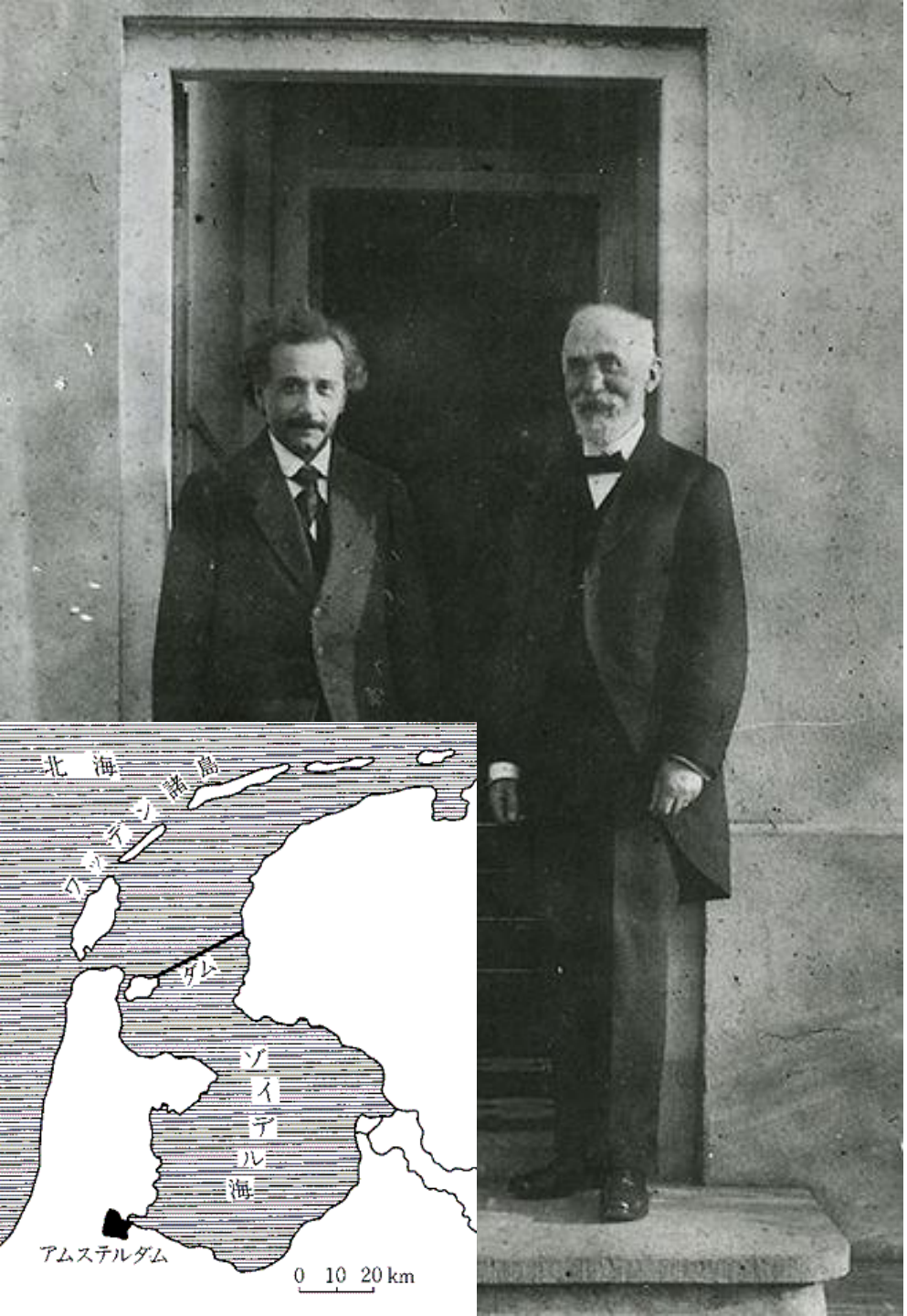
結果の表現

設定ハザード毎に出力

自動作表、順位づけ、自動マッピング

ローレンツ堤防

Zuidersee 1658



Hendrik Antoon Lorentz(1853-1928)

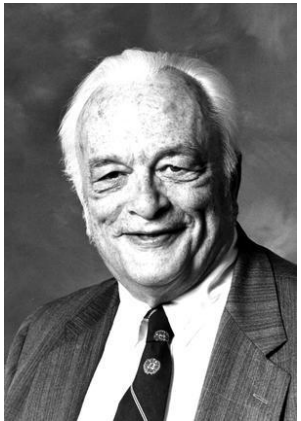
- Lorentz put a whole section of engineering on a scientific foundation.
- After the Zuidersee we know that even in very complicated cases it is possible to stick to a strictly theoretical method, that approximations, which are always necessary, should be justified and their consequences checked.
- Many operations were jumps in the dark indeed. . . . . Now this is calculated in advance. . . . . .

次世代インフラに関わる
（主に都市交通分野の）理論研究の源流

1. ネットワークモデル（全体）
   – ネットワークフローを記述するモデル
   – ネットワークデザイン
2. 行動モデル（個人）
   – 個人の意思決定を記述するモデル
   – Choice Architectureデザイン
3. ゲーム理論（関係性）
   – 調整過程を記述するモデル
   – 市場のメカニズムデザイン

▲Sasaki（配分原理の開発）

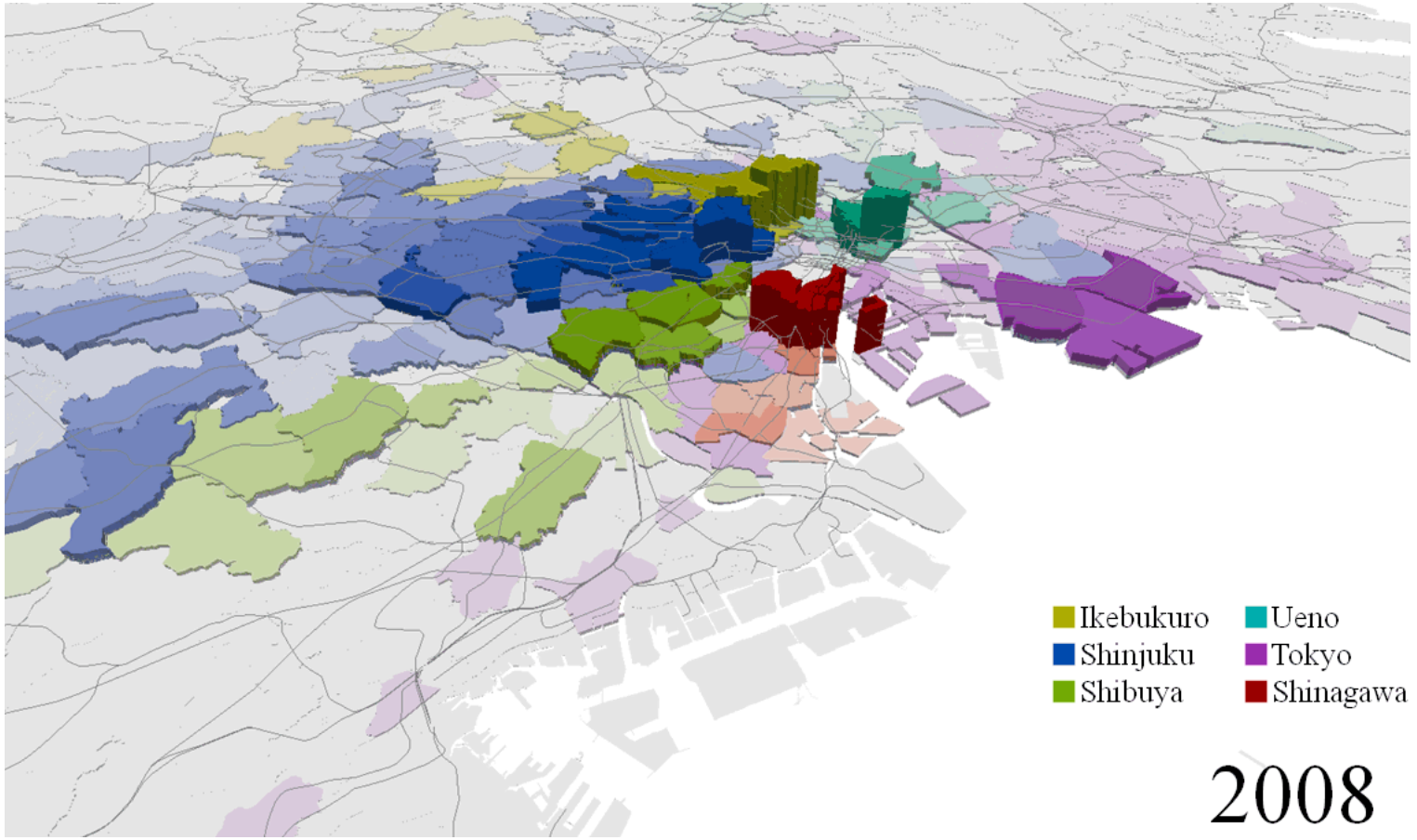
▲McFadden（ロジットモデル）



▲Vickrey
（ﾛｰﾄﾞﾌﾟﾗｲｼﾝｸﾞｵｰｸｼｮﾝ理論）

東京2060

- 将来の東京像の構築とインフラの動的制御が必要

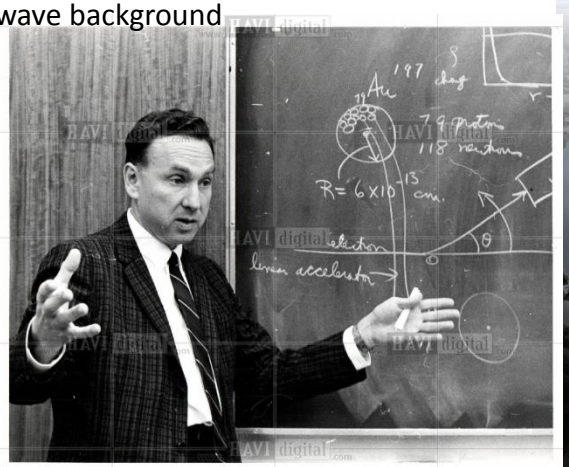


- 拡都のための超高規格高速道路
- 都市一道路事業
- 環日本海高速道路網
- 整備新幹線と高速道路網の接続による環の国土構造
- １００の界隈
- 山手線ネックレス
- ロジスティクス連動型３環状稼働率制御

（様々な）次世代インフラの個人的評価

- （交通工学の中に昔からサイエンスがあった）
- Headstream of Transportation Modeling：Ilya Prigogine
- ITSの社会実装が出来つつある.
- （課金，維持管理，都市戦略とダイレクトには結びついていない）
- 低炭素都市，インフラ維持マネジメント，防災・減災計画，ビッグデータ解析については多くの研究成果は既にある.
- （散発的で次世代社会基盤としての展開力がないのでは）

The Prigogine-Herman kinetic model
ボルツマン方程式による交通流モデル
Robert Hofstadter
線形加速器による高エネルギー電子散乱
Penzias and Wilson
Cosmic microwave background



鄭州新都市コンペ(磯崎新-羽藤英二)

研究上の問題意識

1. 次世代インフラ分野でコンピュータを早くする/使えるようになっているか？
2. データオリエンテッドな数理的社会基盤計画の理論体系はあるか？

社会基盤計画の中の計算科学

都市インフラ（交通基盤）整備のための観測手法と理論体系

1960s　PT調査 – 紙調査票回答，ゾーン単位，集計モデル（四段階推定法）
(1955 CATS, 1967 広島都市圏など)

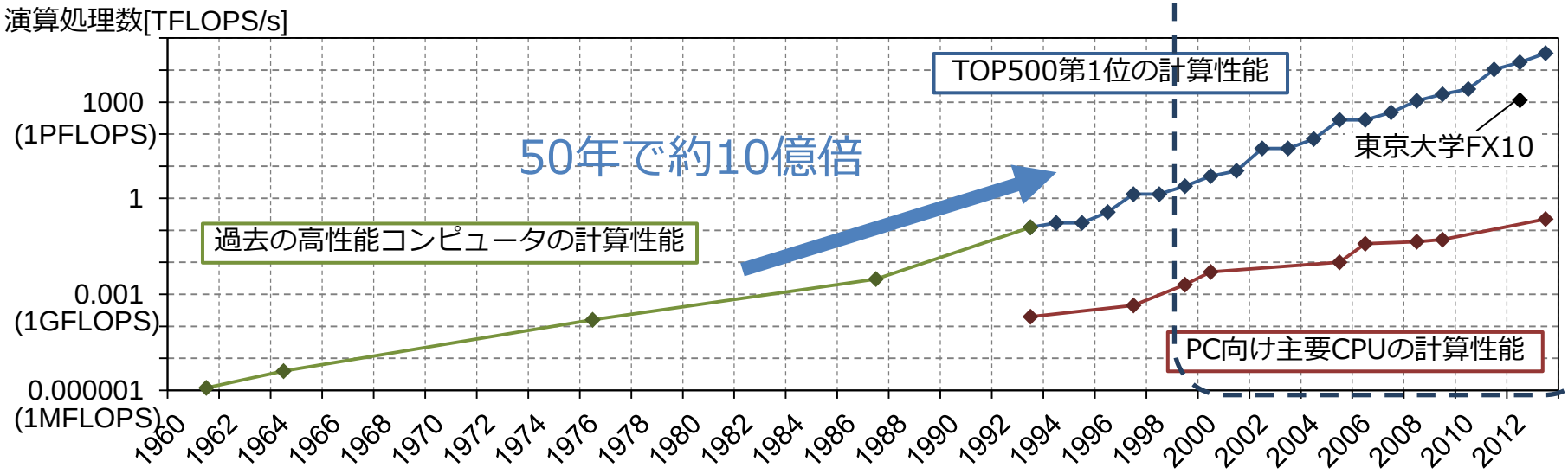
1980s　Activity based model – 非集計モデル
(McFadden, 1978; Ben-Akiva and Lerman, 1985など)

2000s　PP調査 – GPS観測，ドット単位，非集計モデル
(羽藤・朝倉, 2000など)

個人の移動-活動を記述する理論や観測手法が構築されてきた

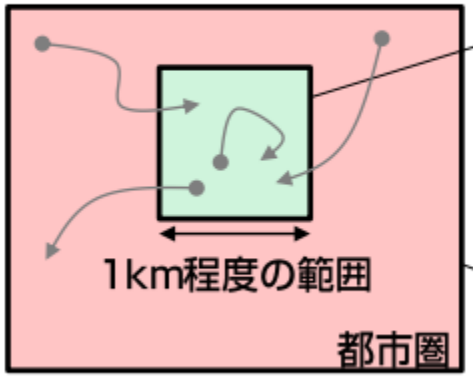
都市の問題を記述・評価
可能なシステムの提案

計算機性能の向上



東京2020→2060のモデル

評価したい政策と交通行動



政策
- 駐車場/施設の配置
- 街路空間の改変
- 交通結節点のデザイン

対象
東京都市圏3000万人

意思決定と政策変数

マクロレベル ･･･都市圏レベル
- 誰がどこからやってくるか（活動場所選択）
- どうやってやってくるか（マクロな経路選択）

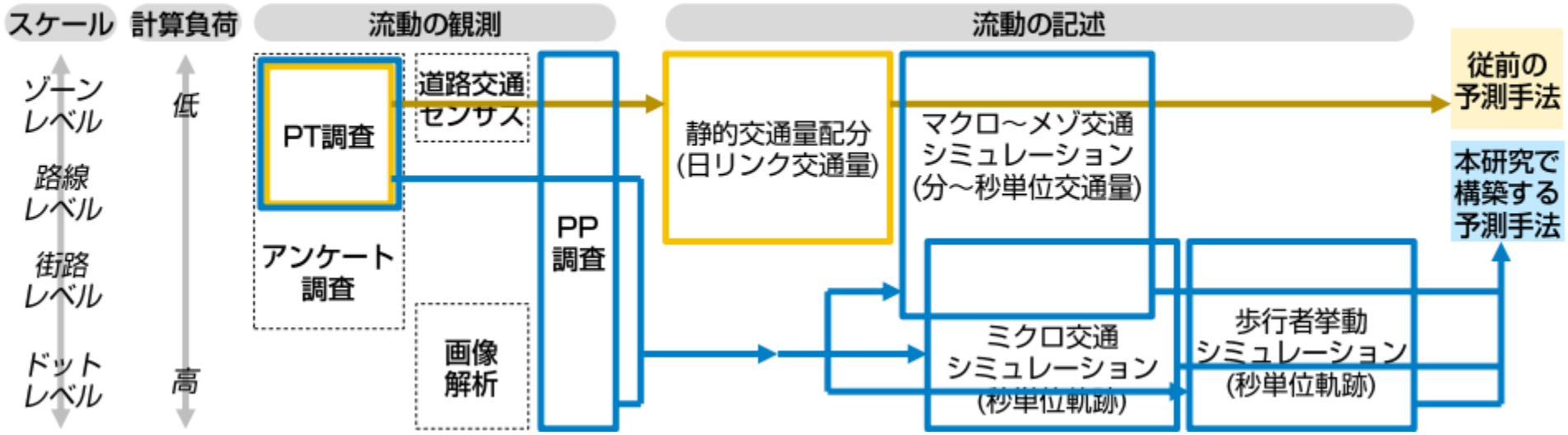
変数：交通サービス、土地利用、交通混雑

相互に影響する

ミクロレベル ･･･ゾーン内レベル
- どこで滞在するのか（活動場所選択）
- どのように動くのか（ミクロな挙動選択）

変数：街路環境、道路の属性、他者の挙動、賑わい

交通行動の観測と記述のスケール



センサスとＰＰの融合

個人の1日の行動 ⟷ 個人の1日の行動

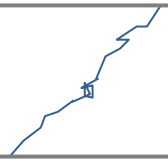
※ 同一個人ではないデータ

PPデータ

GPSによる個人別日別の
時系列位置データ
信頼性、解像度の高いデータ

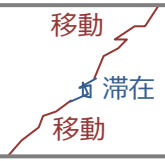
パーティクルフィルタによる位置補正

補正時系列位置データ
GPS測位誤差を補正



移動滞在判別

個人別日別の
活動パターンデータ



センサスデータ

紙の回答票による移動-活動の記録
母集団代表性を持つデータ

抜け落ち推定モデル

パターンi'がiと観測される確率 $\Pr_n(i \mid i')$

$$\Pr_n(i \mid i') = \sum_{\delta_{i'} \in \Delta_{i'i}} \prod_j \left(\Pr_n(a_{i'j})\right)^{\delta_{i'j}} \left(1 - \Pr_n(a_{i'j})\right)^{(1-\delta_{i'j})}$$

実際の活動パターン　H − W − O - H

観測活動パターン　H − W −　- H

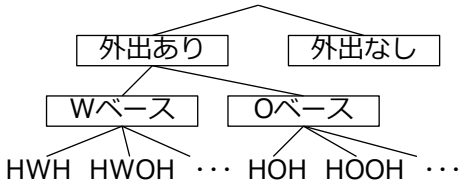
調査における活動の観測漏れを考慮

活動パターン選択モデル

パターンi (ベースパターンk)の選択確率 $\Pr_n(i)$

$$\Pr_n(i) = \Pr_n(i \mid k)\Pr_n(k) \quad (i \in k)$$

$$= \frac{\exp(V_{ni})}{\sum_{i' \in k} \exp(V_{ni'})} \frac{\exp(\mu_{nk} V_{nk})}{\sum_{k \in K} \exp(\mu_{nk} V_{nk'})}$$



センサス/PP両データを用いたパラメータ推定

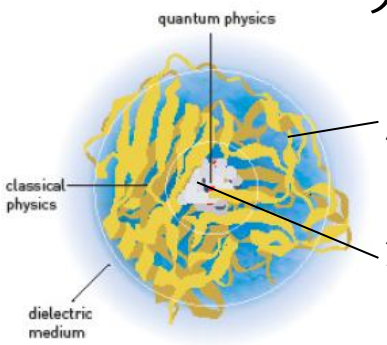
※活動パターン
1日の活動(活動内容と時間)の列
義務(W), 非義務(O), 帰宅(H)で内容を分類

マルチスケールシミュレーションの実装

異なる尺度や異なるモデルを組み合わせて計算を実行するシミュレーション

量子化学 (QM/MM法)

分子間の作用を計算する

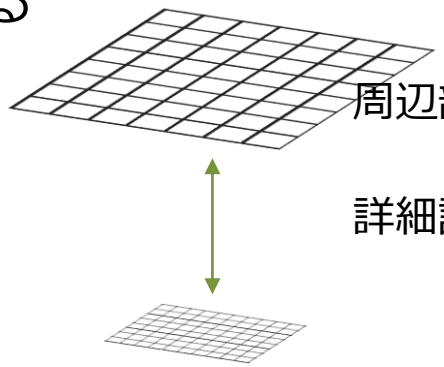


(Nobelprize.org)

周辺部分：
分子力学(マクロ)

注目したい活性部位：
量子化学(ミクロ)

地球科学 (気象モデル)



周辺部分：
全球モデル(マクロ)

詳細計算したい地域：
都市スケールモデル
(ミクロ)

スマートシティのマルチスケールシミュレーション

相互に影響

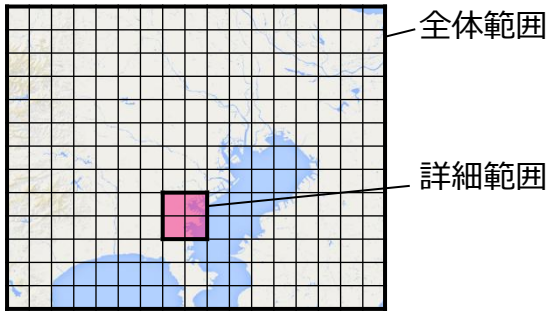
マクロレベルのシミュレーション(周辺 数十～100km四方)

活動場所選択、(大域的)行動の選択
(自動車、公共交通)

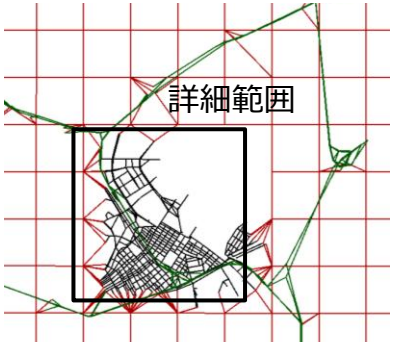
ミクロレベルのシミュレーション(重要な部分 1km四方)

車線変更、追従、街路の選択
(自動車)　(歩行者)

スケールの切り分けとネットワーク/空間データの生成



空間を任意の単位のセルで分割し
全体範囲と詳細範囲に切り分ける

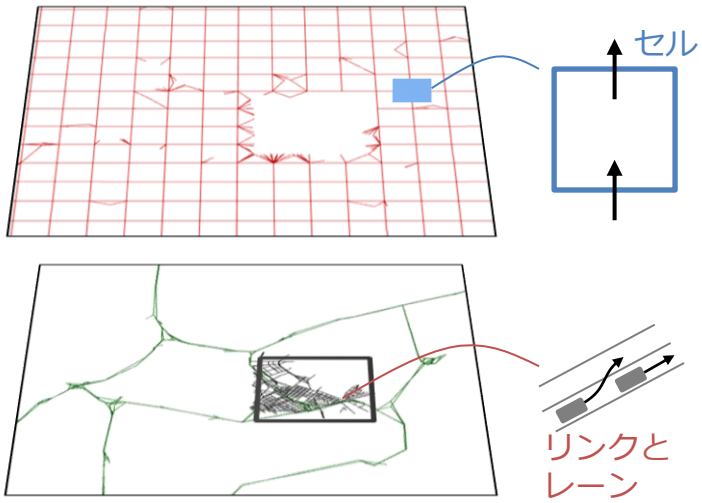


ー 一般道路実リンク
ー 高速道路リンク
ー VNリンク

・詳細範囲
一般道，高速道路とも実リンク
境界部で外側と接続する

・全体範囲
一般道： セル間を結ぶリンクで
縮約する（VN）
高速道路：実リンク
(計算負荷の軽減)

ミクロ/マクロレベルのフローモデル



ネットワーク/空間データを用いた活動場所、経路選択

マクロモデル　セルごとの集計量からコストを計算

セルc の通過時間　$t_c = t_{c0}\left(1.0 + \alpha\left(\frac{Vol_c}{Cap_c}\right)^{\beta}\right)$

交通量
受け渡し

ミクロモデル　1台1台の車両の動きを計算

車両n の位置，加速度，速度　$x_{n,t} = x_{n,t-1} + v_{n,t}\Delta t \quad v_{n,t} = v_{n,t-1} + a_{n,t-1}\Delta t \quad a_{n,t} = OV_{n,t} - v_{n,t-1}$

車両n の最適速度　$OV_{n,t} = v_{\max} \cdot \frac{\tanh(\Delta x_{n,t} dsc - 2.0) + \tanh(2.0)}{1 + \tanh(2.0)}$

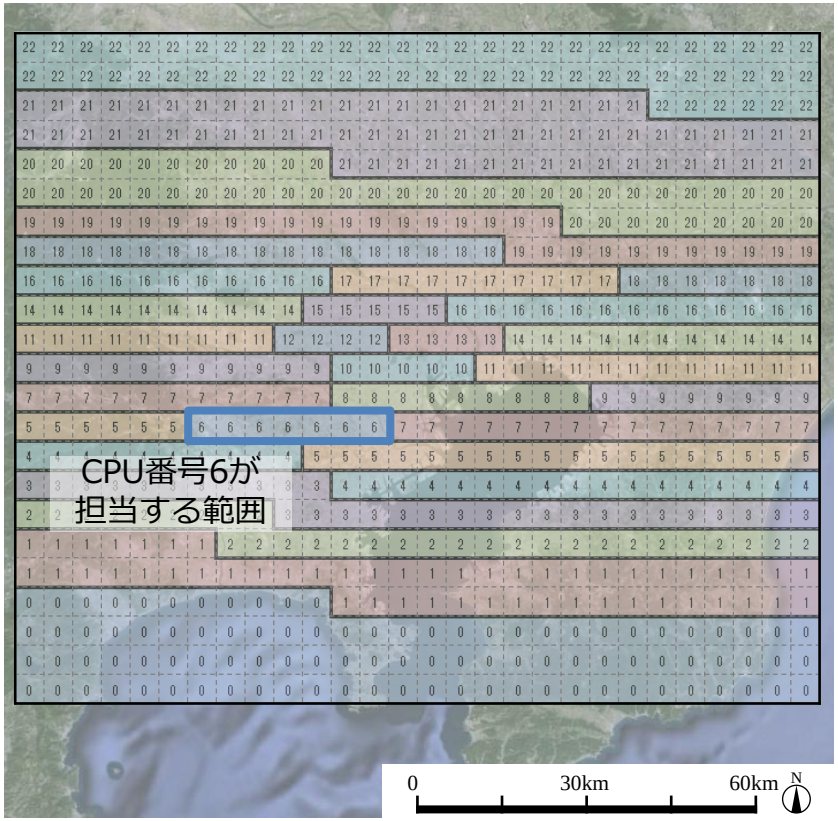
(承継）並列計算である程度早くなるわけだが.

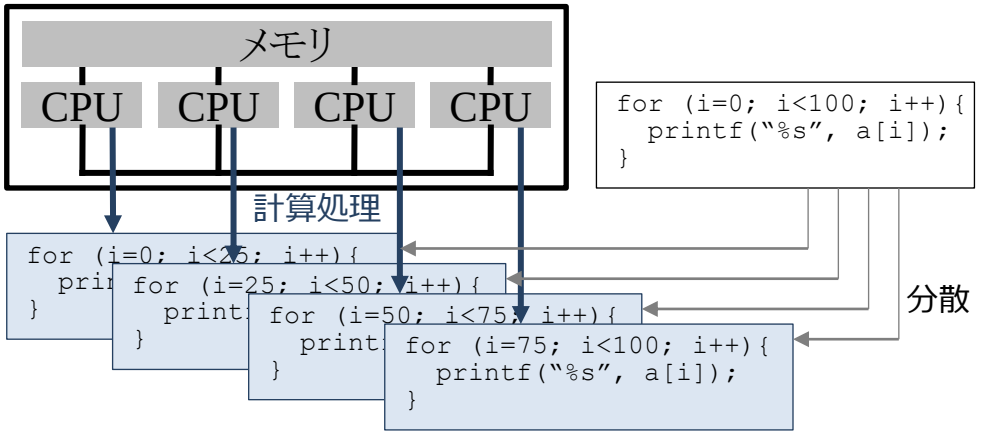
並列計算：

複数CPUで処理を分散して実行する計算

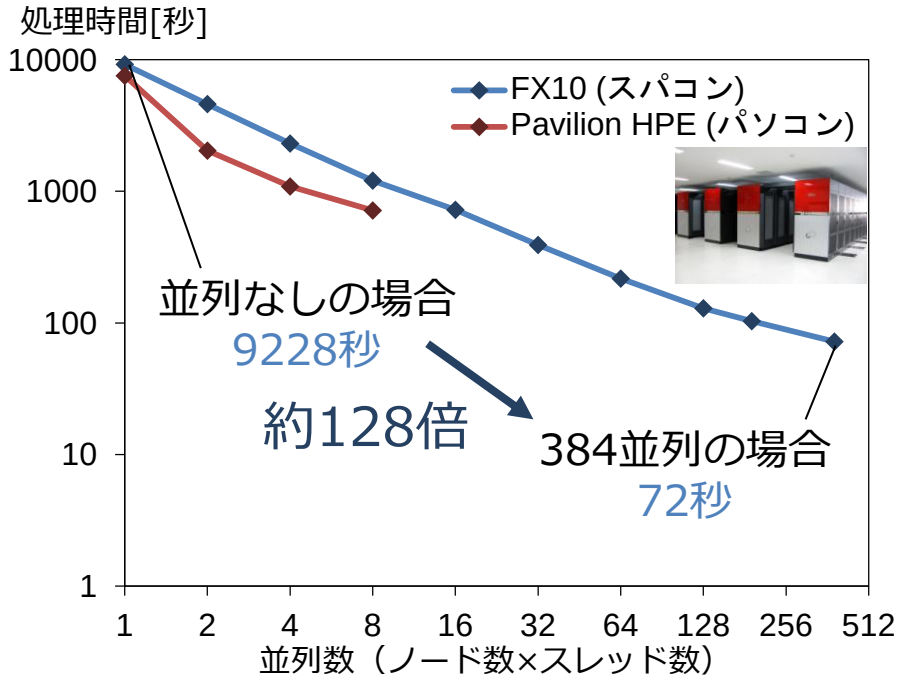
交通行動の計算は、各個人に同一の
モデルを適用するため、並列化向き

空間をセルで分割して、CPUごとに
人口按分で担当する領域を決める

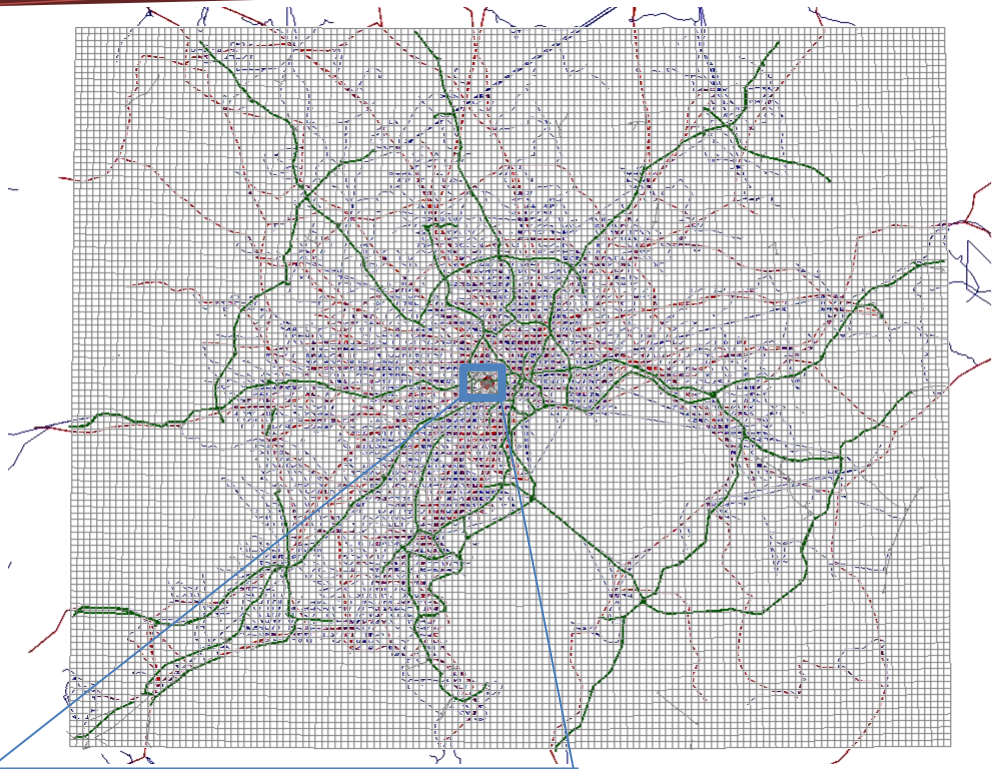


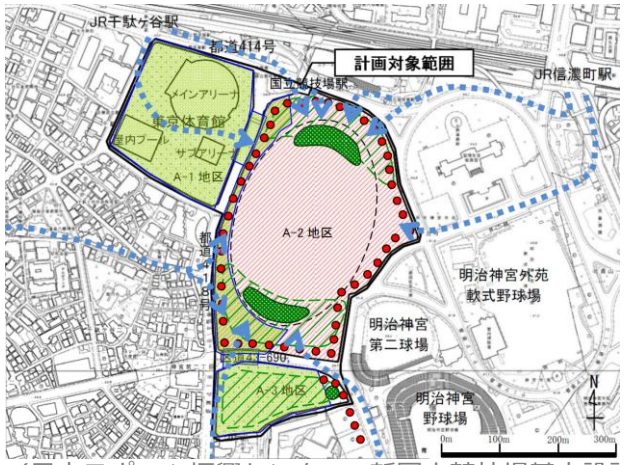


東京圏3091万人の活動パターンを生成する計算時間



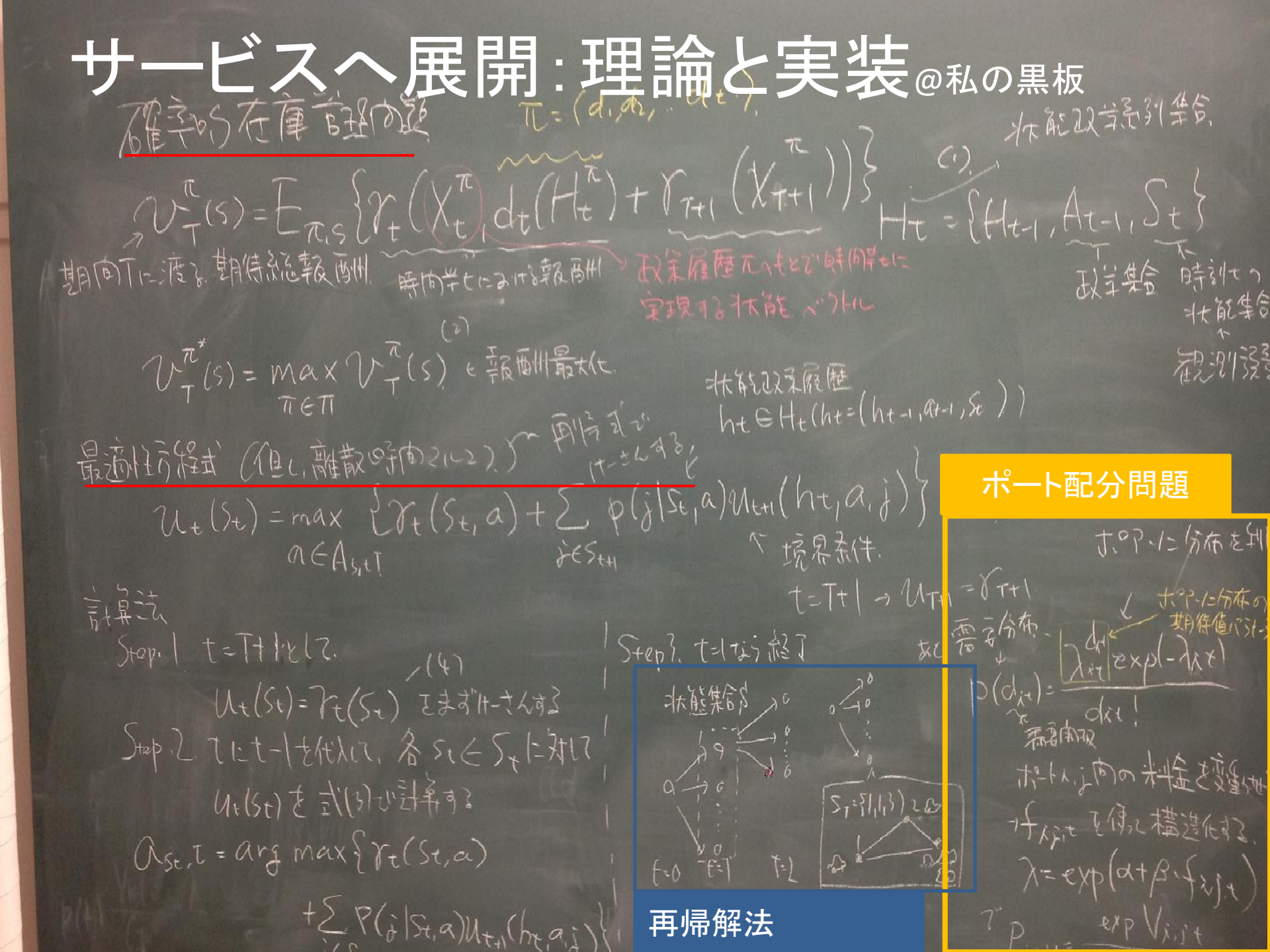
東京2020におけるオリンピックレーン制御モデル





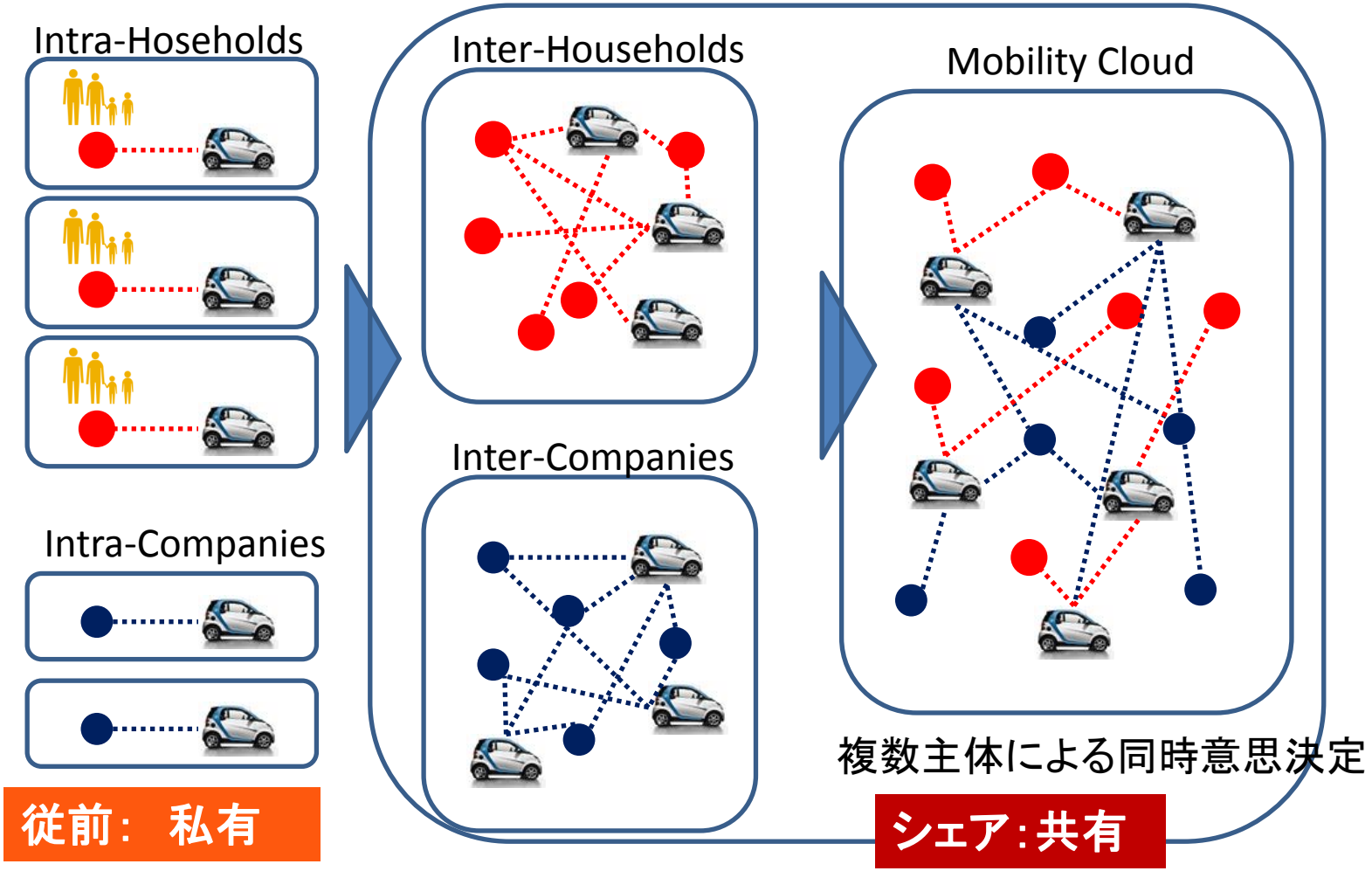
(日本スポーツ振興センター：新国立競技場基本設計要件（案）

サービスへ展開：理論と実装@私の黒板

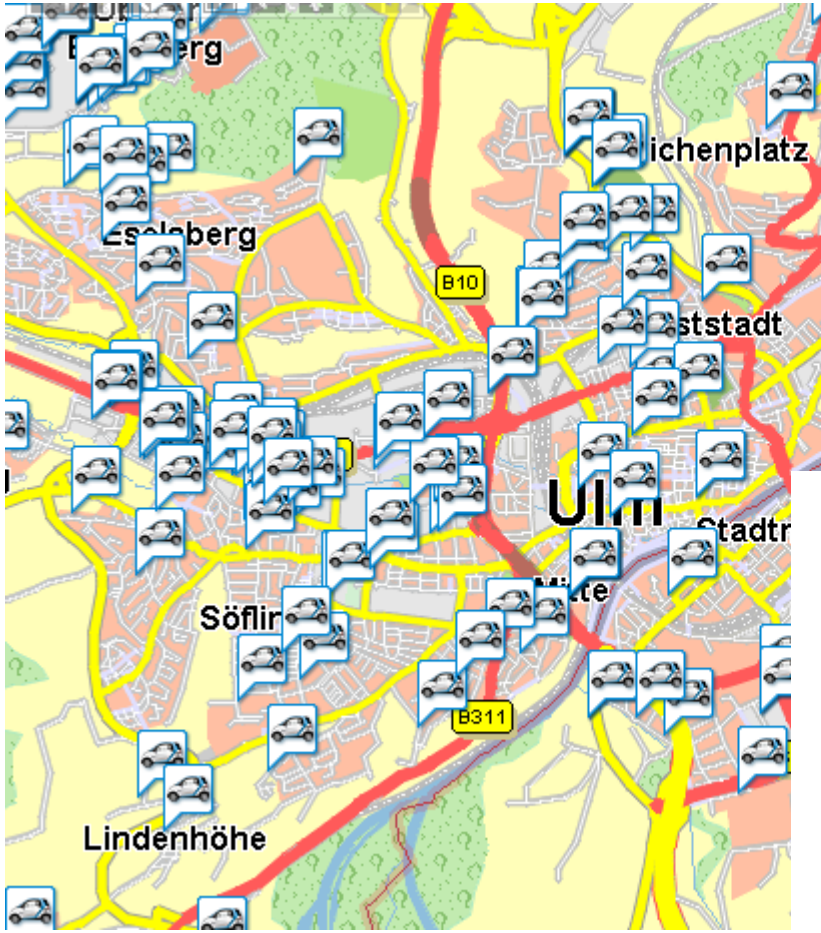


Share the City，理論から社会実験へ，そして実装へ

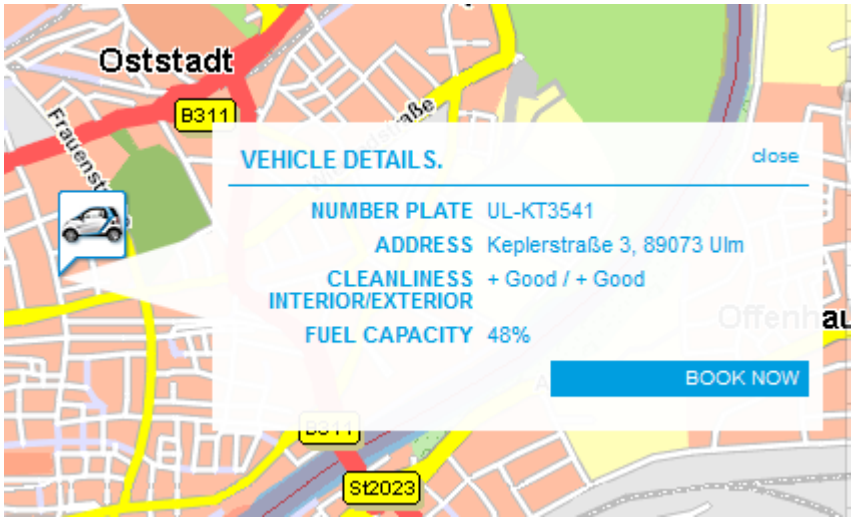
シェア：都市における所有概念の変化



Daimler Car2Go @ Dusseldorf



車両の詳細情報



24cents per minutes

300cars

Mobiussmotors @Nairobi

サルコジのグランパリ計画
遅い交通
@2012フランス大統領選挙

グループ・デカルト

「パリ、首都、地域、都市、都市連合」

ガヴァナンス(統治)、交通、居住環境、気候の4つ問題に対し同時進行的・戦略的に行動するため以下の数値目標を設定、実現する。

■20都市によるパリ首都圏

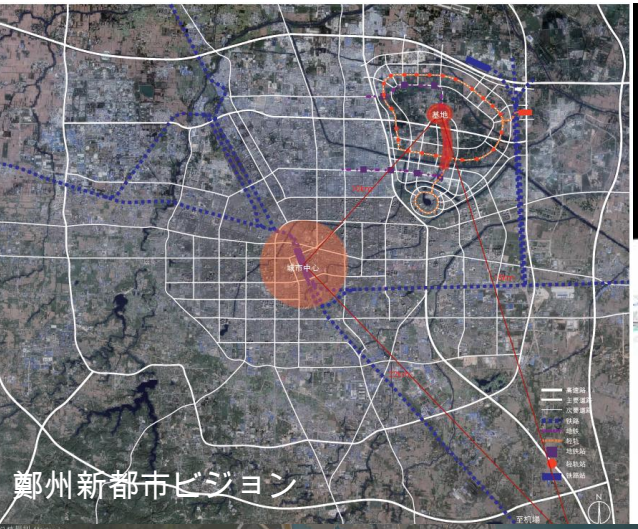
人口11,616,000人のパリ首都圏を、それぞれ人口50万人規模の、20の都市の集合体に再構成する。リヨン、フランクフルト、ロッテルダム、リバプール、オスロ、セビリアなど欧州には50万前後の都市は多く、「持続可能な都市」としての適正規模はここにある。

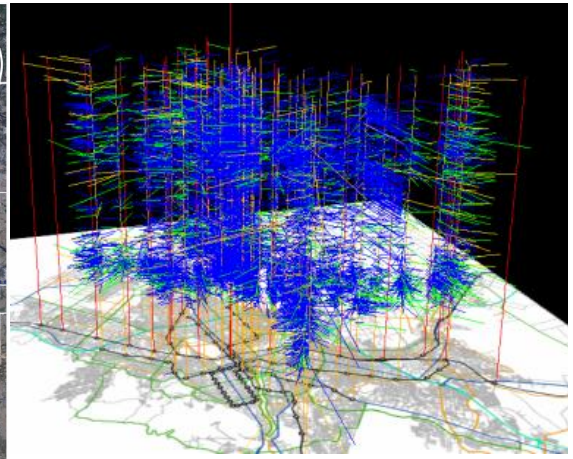
■1住居あたりプラス20㎡

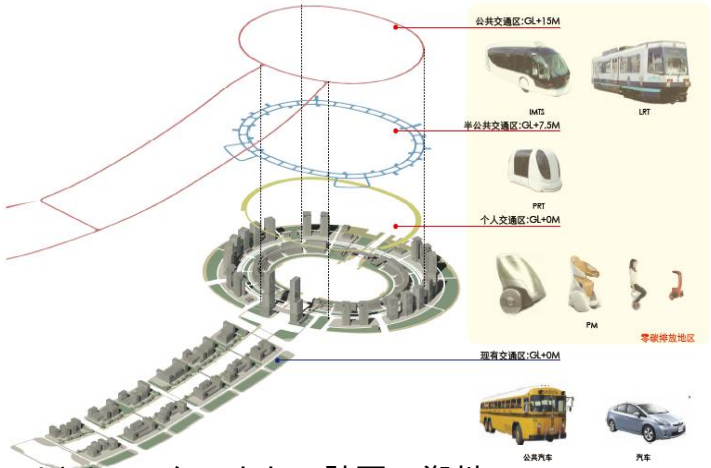
土地価格の高騰により首都から住民が遠ざかる傾向を抑制するため、大規模な用地転換によって土地価格を圧縮し、密度を高め、アーキタイプやプログラムを刷新する。

東京からアジアへ：次世代インフラとSustainability

- 災害や都市構造の転換を前提とした次世代インフラマネジメント、新材料・エネルギー・モビリティ戦略に基づいた**次世代インフラ研究**の実践（**＋30億と-3000万への対応**）


鄭州新都市ビジョン


空間行動データマイニング



モビリティクラウドの計画（鄭州）

珠海新都市国際コンペ

アーバンデザインセンター設立

鄭州新都市建築-社会基盤計画

個人的に重要だと思っている国際的な研究のトレンド

1. モビリティクラウド研究（自動運転，画像処理，予測技術）
2. ロジスティクス-サプライチェインマネジメント研究（最適化理論）
3. 人-インフラ系動的制御研究（大規模流動インフラセンシング技術）
4. プロジェクト投資政策理論研究（政策実装理論）

5. 計数/応数（Operations Research / Applied Mathematics）
   - シーズとニーズのマッチング
   - 次世代インフラに関する基礎学問領域の確立（信玄堤からNavier-Stokes equationsへ）
6. 次世代インフラとしての道路総合技術の確立
   - アジア展開型インフラと世界展開インフラ（精度保証付インフラ）
   - 社会実装研究の重要性
   - 急がば回れ：チーム編成のバランスと問題設定が重要（仕事の進め方のデザイン）

おまけ

- 「まちづくり」，「広域連携」，「専門家」の壁
- 東京オリンピック社会実装（オリンピックレーンなど）を生かしきること
- アジア次世代インフラ研究センターの設立