

(宮城先生 還暦記念)

東北大学・都市システム研究フロンティア・プロジェクト
第1回：交通ネットワーク研究のフロンティア

ネットワーク研究の課題

2008年12月12日

赤松 隆

(東北大学 大学院情報科学研究科)

交通ネットワーク理論の過去

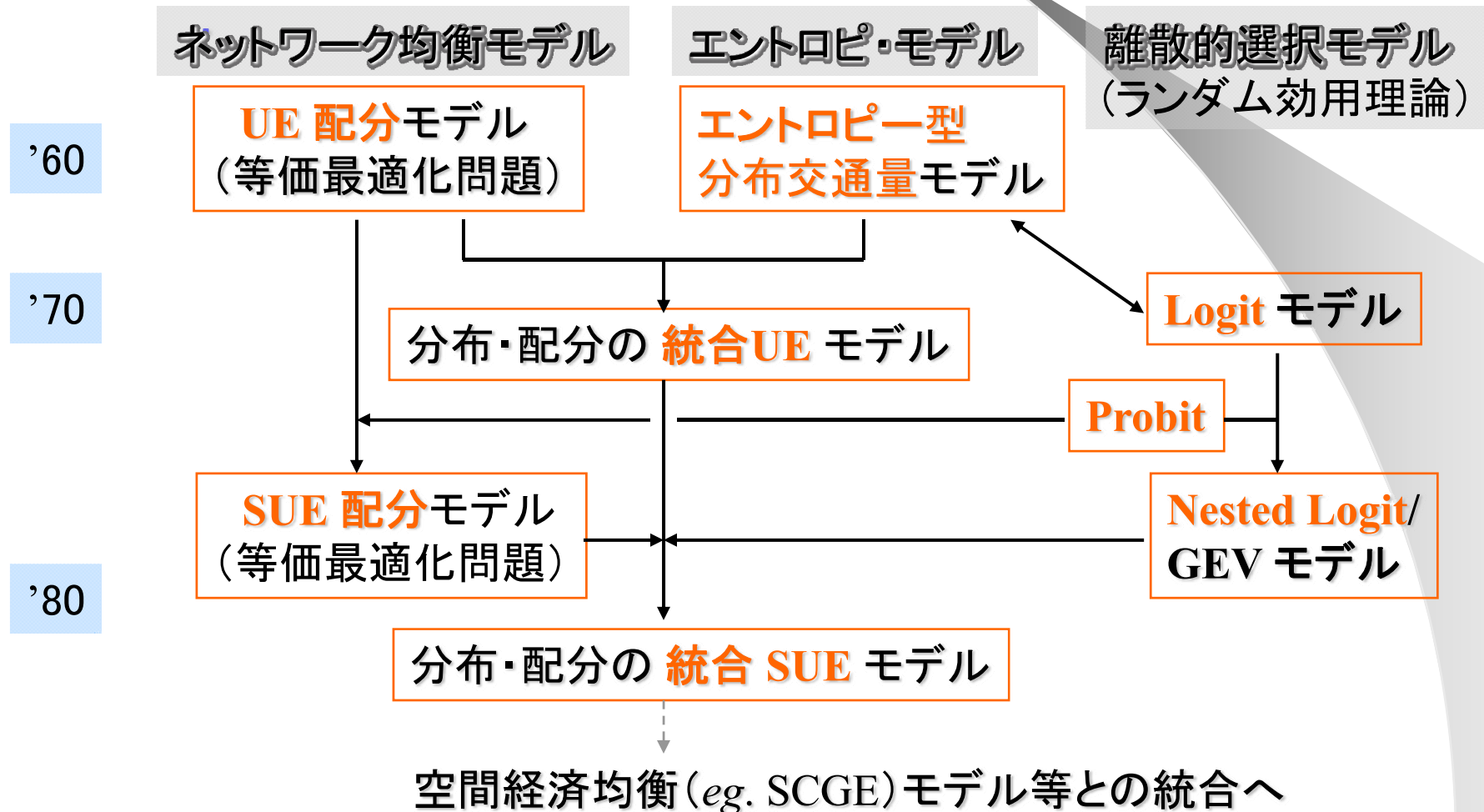
● 交通ネットワーク理論に関連する研究年譜

- ・利用者均衡原則: *Wardrop* (1952) *cf.* Nash均衡 (1950)
- ・等価ポテンシャル: *Beckmann* (1955) *cf.* Kuhn-Tucker条件 (1951)
- ・交通密度波・衝撃波理論: *Lighthill-Whitham* (1955), *Richrads* (1956)
- ・車両追従理論: *Chandler-Herman-Montrol* (1958), *Kometani-Sasaki* (1958)
- ・最短経路探索法: *Moore* (1957), *Dijkstra* (1959)
- ・マルコフ連鎖配分: *Sasaki* (1965)
- ・エントロピー・モデル: *Wilson* (1967), *Sasaki* (1968)
- ・Frank-Wolfe (1956) 法: *Bruynooghe et al.* (1968), *Murchland* (1969),
LeBlanc (1973,74), *Nguyen* (1973,74)
- ・ランダム効用理論: *McFadden* (1973)
- ・分布・配分統合均衡モデル: *Florian-Nguyen* (1975), *Evans* (1976)
- ・Cost-Efficiency 原理: *T.E.Smith* (1978,83,88)
- ・確率的利用者均衡配分: *Sheffi-Daganzo* (1977,78,80), *Fisk* (1979)
- ・変分不等式型均衡配分: *M.J.Smith* (1979), *Dafermos* (1980)

....

静学的な交通均衡配分の発展経緯

● 統合均衡モデル - ランダム効用理論と均衡配分の融合



“土木計画学”と“経済システム工学”

- 従来の土木計画学で発展してきた“経済システム工学”的な研究分野：
 - ➡ ミクロ需要理論・マーケティング理論（＋ 確率・統計理論）
行動計量分析（*eg.* 非集計行動モデル）
 - ➡ 空間経済（*eg.* 交通・立地）理論（＋ 数理計画/OR理論）
交通ネットワーク・空間価格・立地均衡モデル
 - ➡ 一般均衡理論・産業連関分析（＋ 数理計画理論）
CGEモデル ＋ 空間経済理論 SCGEモデル
 - ➡ 厚生・公共経済学（＋ 計量経済学）
費用便益分析

従来の“経済システム工学”の限界

- 従来の“経済システム工学”の守備範囲：
 - ↓ 計画立案に際して必要とされる「現象記述・予測」
(or「計画案の評価」) のための理論
 - ↓ 「計画案の *implementation*」のための方法論
(eg. 「政策・制度のデザイン」や「管理・運営」
のための技術)までは, 十分に提供できない
 - … 古典的な経済学理論の限界
(eg. Black-Box としての市場均衡概念)

交通ネットワーク理論の“研究フロンティア”

● *Planning* から *Management* へ:

- *Normative Theory*: 従来の 静学・確定論的 な “予測 → 評価” パラダイム(道路を 作る ための理論)を超える 動学・確率論的 な交通流 制御・管理 の理論(道路を 使いこなす ための理論)
- *Positive Theory*: “ミクロな状態変数” と “マクロな状態変数” の関係をより精密につなぐ理論 (“確率過程” としての状態記述)

● 周辺分野(eg.情報科学)での理論的進展の活用:

- 最近の情報科学やゲーム理論分野では, (土木計画・交通分野の研究進展に比べて) 著しい速度で理論が進展している.
- 交通ネットワーク理論は, ゲーム理論や情報科学分野で近年進展してきた理論と相性が良い.

[補足] 計算機科学とゲーム理論の邂逅(その1)

- 大規模システムの “分散制御”メカニズム の必要性

- ➡ ゲーム理論：ポテンシャル・ゲーム，ネットワーク均衡
＋ *Computer Science* (通信網管理・計算理論)

Computational Network Resource Management

- 動的環境下での “自律的適応行動”メカニズム の必要性

- ➡ ゲーム理論： 進化・学習ゲーム理論，数理生態学，
 (“*Learning in Games*”, *Evolutionary Games*)
＋ *Computer Science* (確率過程論・統計学・AI・計算論的予測理論)

Multi-Agent Learning Theory

[補足] 計算機科学とゲーム理論の邂逅(その2)

- e-Market 創設・運営のための方法論の必要性

- ➡ ゲーム理論： メカニズム・デザイン, 情報の経済学
→ オークション理論, 市場・制度設計論
+ *Computer Science* (離散凸解析, 計算量理論, 数理計画理論)
Computational Mechanism Design

- ➡ ゲーム理論： 提携形成・マッチング理論,
(“*Games on Networks*”, *Network Formation*)
+ *Computer Science* + 統計力学・物性物理学
Network Science

[補足] 計算機科学とゲーム理論の邂逅(その3)

- これらの理論と並行して発展している(応用)数学理論
 - ➡ 離散数学：
eg. Discrete Convex Analysis (離散凸解析)
 - ➡ 代数論：
eg. Idempotent Analysis (eg. Max-Plus代数)
 - ➡ 確率(過程)論：
eg. Large Deviation Analysis (大偏差原理)
 - ➡ 制御理論：
eg. Robust Stochastic Control (Markov Decision Process),
Risk Sensitive Control, Stochastic Impulse Control *etc.*

[補足] “邂逅” から “新・経済システム工学” へ

● “新・経済システム工学” の特徴

- **対象**：多数の主体 (*eg. agent software*) が相互干渉しつつ、自律分散・適応的な行動をとるシステム
- **目標**：古典的な経済理論では “*black box*” であった分散制御のための概念 (*eg. 市場均衡状態*) を **実世界で implementable なメカニズムの設計方法論** を構築
- **学問的基盤**：ゲーム理論，広義の計算機科学
- **参加者**：経済学系のみならず，多数の理工系研究者 (*IEEE, INFORMS, ACM, SIAM etc.* の工学者・応用数学者，物理学者) を巻き込んでいる

Normative Theory: 交通流管理・制御の理論

- **例1: ITS/ICTを活用した Coordination Mechanism 設計**

eg. ボトルネック通行権取引制度の Implementation 理論

- 通行権取引市場ルール設計
 - ... **組合せオークション理論, 離散凸解析理論**
- 限定合理的な利用者を前提としたメカニズム設計
 - ... **進化・学習ゲーム理論, ポテンシャル・ゲーム**

- **例2: リアルタイム観測情報を活用した交通流管理法**

eg. Macroscopic Fundamental Diagramを活用した都心流入制御

- 流入制限ルール設計
 - ... **確率的制御 (Stochastic Impulse Control)**
- マクロ・モデルとミクロ・モデルの関係づけ
 - ... **Idempotent Analysis (Max-Plus 代数上の“線形”モデル)**

Positive Theory:

ミクロとマクロをより精密につなぐ理論

- ミクロ現象 (*eg.* 個々の利用者行動) の確率性と整合的な
マクロ現象 (*eg.* 交通量パターン) の確率的法則性
 - ➔ 従来理論:
 - Entropy 理論 (*Wilson-Sasaki*) ... “Snapshot pattern”
 - Cost-Efficiency 理論 (*Smith*) ... “暗黙の day-to-day dynamics”
 - ⇒ 交通流の二重の動学性 (within-day & day-to-day dynamics)
を明示的な**確率過程の枠組み**で扱う必要がある
 - ➔ 最近の情報科学・確率論分野での理論的進展:
 - **Large Deviation 原理,**
 - **Markov Chain Monte Carlo 技術,**
 - やゲーム理論分野での理論的進展:
 - **進化/学習ゲーム理論 (Evolutionary Game Dynamics) ,**
 - を活用した理論展開が可能.

参考文献

- Cesa-Bianchi, N. and Lugosi, G. (2006): *Prediction, Learning and Games*.
- Courcoubetis, C. and Weber, R. (2003): *Pricing Communication Networks*.
- Cramton, P., Shoham, Y. and Steinberg, R. (2006) : *Combinatorial Auctions*.
- Demange, G. and Wooders, M. (2005): *Group Formation in Economics*.
- Dietrich, B. and Vohra, R.V. (eds.) (2002) : *Mathematics of the Internet*.
- Fudenberg, D. and Levine, D.K. (1998) : *The Theory of Learning in Games*.
- Hahn, R. and Tetlock, P.C. (eds.) (2006): *Information Markets*.
- Milgrom, P. (2004) : *Putting Auction Theory to Work*.
- Mitchell, T.M. (1998): *Machine Learning*.
- Murota, K. (2003): *Discrete Convex Analysis*.
- Newman, M., et al. (2006): *The Structure & Dynamics of Networks*.
- Nisan, K. et al., (2007): *Algorithmic Game Theory*.
- Nowak, M.A. (2006): *Evolutionary Dynamics – Exploring Equations of Life*.
- Roughgarden, T. (2005): *Selfish Routing and the Price of Anarchy*.
- Sandholm, W.H. (2008) : *Population Games and Evolutionary Dynamics*.
- Vega-Redondo, F. (2003) : *Economics and the Theory of Games*.
- Vega-Redondo, F. (2007) : *Complex Social Networks*.
- Young, H.P. (2004): *Strategic Learning and Its Limits*.