道路ネットワークにおける時間信頼性解析モデル
－実務における交通便益推計を念頭に－

北海道大学大学院　内田賢悦・加藤哲平

発表の内容

- 実務における時間信頼性便益推計
  何が求められているの？
- 時間変動の測度
  標準偏差，分散，パーセンタイル値？
- スケージューリング選好モデル
  理論的行動モデルと整合する時間変動の測度
- ネットワーク均衡モデル
  大ざっぱでも役に立つモデル

はじめに

- 時間信頼性評価に対する社会的関心の高まり
  交通プロジェクトにおける便益推計
  量だけではなく質である定時性も評価したい北海道では，たとえば，冬期交通に関わる施策）．
- 理論的研究の蓄積
  ネットワーク均衡モデルの発展
- 観測データを用いた検証
  ビッグデータの活用

実務における便益推計

- 理論と実践
  「机上の空論」も「フィールド上の空論」もだめ
- 「大ざっぱでも現実に役立つモデルを!」（赤池先生）
  *扱い*やすく、しかも*複雑な現象*を処理できなくてはならない．
  分割配分法は広く使われたが，はたして役立つモデルであったのか？
- 分析モデルを使う人は実務者
  研究者にしか理解できない分析モデルは使われない．

時間変動の測度

- 理論的行動モデルの構築

  便益：効用（人が感じる嬉しさの度合い）を貨幣換算したもの

  移動時間が変動するとき，どのような選択（たとえば出発時刻選択）を行うのか？

  選択した行動と時間変動との関係は（効用関数は）？

  選択した行動と時間変動測度との間に理論的整合性が確保されているか？

時間変動の測度

- データを用いた検証

  どのモデルがデータを一番良く再現できるか？

  （BIC, AIC基準などで判断）

- ネットワーク均衡モデルとの相性

  簡単に解けるのか？

  （机上の空論になっていないか？）

  重要な現象が捨象されていないか？

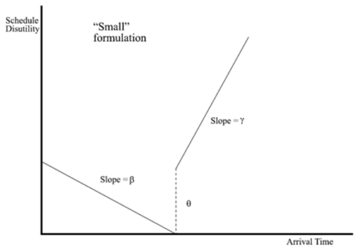
  （フィールド上の空論になっていないか？）

スケジューリング選好モデル

- α－β－γ選好モデル (Vickrey, 1969; Small, 1982)

  早着，遅着，平均時間に伴う不効用を考慮して出発時刻を決定．

  移動時間が独立な指数分布あるいは一様分布に従う場合，時間変動測度は**標準偏差**．

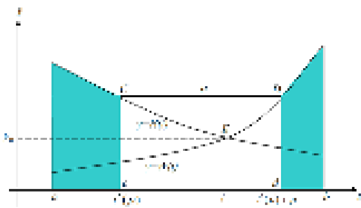


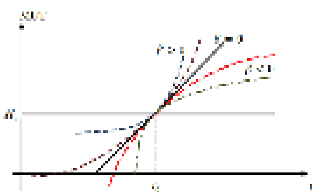
スケジューリング選好モデル

- 時間の限界効用に基づくモデル (Fosgerau and Karlström, 2011; Fosgerau and Engelson, 2011; Engelson, 2011; Engelson and Fosgerau, 2011)

  α－β－γ選好モデルはこのモデルの特殊形

  移動時間が独立な正規分布に従い，トリップの起点での限界効用が定数の場合，時間変動測度は**分散**





スケジューリング選好モデル

- SPデータを用いた検証 (Hjorth et al., 2015)

  BIC (Bayesian Information Criterion) 基準で判断

  exp-expモデルは，パラメータの分散が大きく，信頼に足る結果は得られなかった．

  const-affineモデル(**測度が分散**)の方がconst-stepモデル(**測度が標準偏差**)よりもあてはまりが良かった．

  この結果は，ネットワークモデルにとって，経路コストに**加法性**が成立するため，都合の良い便利な結果である．

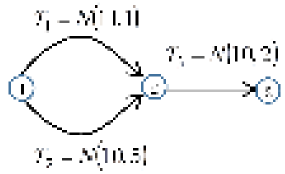
ネットワークモデルにおける加法性

- 加法性が成立しない場合

  時間変動測度に標準偏差を採用した場合 (Cominetti and Torrico, 2013)

  移動時間コスト： $c_r^{sd}(T) = E[T] + r \cdot \sigma(T) \quad (r = 1)$

  加法性が成立しない場合，ネットワークモデ ルで扱いづらい(説明も難しいかも)



$$\min\left(c_r^{sd}(T_1) \quad c_r^{sd}(T_1)\right) = c_r^{sd}(T_1) = 12$$

⇔①，②間の最短経路:リンク1

$$\min\left(c_r^{sd}(T_1+T_3) \quad c_r^{sd}(T_2+T_3)\right) = c_r^{sd}(T_2+T_3)$$
$$= 20 + \sqrt{7}$$

⇔①，③間の最短経路:リンク2＋リンク3

ネットワーク均衡モデル
仮　定

- 確率的O-D交通量Q_iは，平均がq_i=E[Q_i]，分散がvar[Q_i]=(cv_i・q_i)^{2}の互いに独立な確率分布に従う．
- 確率的経路交通量F_{ij}は，O-D交通量に経路選択確率を乗じたもの．
- 確率的リンク交通量V_aは，そのリンクを利用する経路交通量の和となる．
- ドライバーは経路移動時間の**平均**だけではなく，その**分散**も考慮して確定的な経路選択を行う．

  評価値＝平均値＋r・分散 (r：パラメータ)

ネットワーク均衡モデル
移動時間

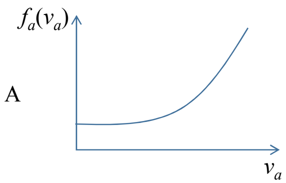
- BPR関数(リンクaの移動時間)

  $t_a(V_a) = t_a^0 + \hat{\gamma}_a \cdot (V_a)^\lambda \quad \forall a \in \mathrm{A}$　　ここで $\hat{\gamma}_a = t_a^0 \cdot \gamma / (c_a)^\lambda$

- リンクaの平均交通量 (E [V_a] =v_a) の周りでテーラー展開．
- O-D交通量の変動係数が一定と仮定．

$$E[t_a(V_a)] = \hat{t}_a(v_a) \quad \forall a \in \mathrm{A}$$

$$\mathrm{cov}[t_a(V_a), t_b(V_b)] = \begin{cases} \sigma_a^2(v_a) & \text{if } a = \mathrm{b} \\ \sigma_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b) & \text{if } a \neq 0 \end{cases} \quad \forall a, b \in \mathrm{A}$$



v_{ab}: リンクaとb両方を通る平均交通量

平均交通量のみで平均移動時間，移動時間の分散・共分散を表現可能！

ネットワーク均衡モデル
定式化

- 隣接リンク間の共分散のみを考慮した目的関数

$$\min \hat{z} = \sum_{a\in A}\left(\int_0^{v_a} g_a(w)dw + \sum_{b\in\theta(a)} \int_0^{v_{ab}} g_{ab}(w, v_a, v_b)dw \right)$$

- 制約条件（平均フロー保存則）

$$\sum_{j\in J_i} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in I$$

経路交通量とOD交通量の関係

$$v_a = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J_i} \delta_{aj}\cdot f_{ij} \qquad v_{ab} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J_i} \delta_{aj}\cdot\delta_{bj}\cdot f_{ij}$$

リンク交通量と経路交通量の関係

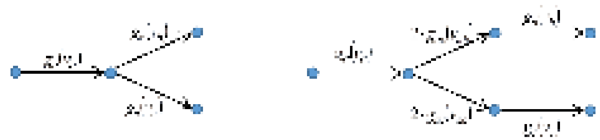
利用される経路の一般化費用（平均値＋r・分散）はすべて等しく，利用されない経路のものよりも小さいか，せいぜい等しい．

ここで $g_a(v_a) = \hat{t}_a(v_a) + r\cdot\sigma_a^2(v_a)$ $\quad g_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b) = r\cdot\sigma_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b)$

定式化に確率変数が現れない！

ネットワーク均衡モデル
ネットワーク表現・解の一意性

- **ネットワーク表現を工夫すると，実務で広く使われている方法で簡単に解ける！**



- リンク間に相互干渉のある問題ではあるが，

$$\frac{\partial g_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b)}{\partial v_{ab}} > \frac{\partial g_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b)}{\partial v_a} + \frac{\partial g_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b)}{\partial v_a} > 0$$

g_{ab}はほとんどv_{ab}によって決まるとみなすことができる．

なる関係が成立するため，**解は１個**（Sheffi, 1985）．

まとめ

- 時間変動の測度
  - 理論的行動モデルと整合する測度
  - ネットワークモデルにおける加法性
- 標準的な利用者均衡配分と同じ問題構造を有する時間信頼性ネットワークモデルの構築
  - 経路移動時間の平均と分散を考慮
  - リンク間相関は，隣接リンク間のみで考慮
- 確率変数を意識せずに計算可能．
  - 利用者均衡配分のプログラムがあれば，計算可能．

参考文献

- Cominetti, R., Torrico, A., 2013. Additive consistency of risk measures and its application to risk-averse routing in networks, arXiv:1312.4193v1 [math.OC].
- Engelson, L., 2011. Properties of expected travel cost function with uncertain travel time. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2254, 151-159.
- Engelson, L., Fosgerau, M., 2011. Additive measures of travel time variability. Transportation Research, Part B 45 (10), 1560-1571.
- Fosgerau, M., Karlström, A., 2010. The value of reliability. Transportation Research, Part B 44 (1), 38-49.
- Fosgerau, M., Engelson, L., 2011. The value of travel time variance. Transportation Research, Part B 45 (1), 1-8.
- Hjorth, K., Börjesson, M, Engelson, L., Fosgerau, M., 2015. Estimating exponential scheduling preferences. Transportation Research Part B (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.014.

参考文献

- Noland, R.B., Small, K., 1995. Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes. Transportation Research Record 1493, 150-158.
- Sheffi, Y., 1986. Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Small, K.A. (1982), The scheduling of consumer activities: work trip, American Economics Review, 72 (3), pp. 467-479.

ご清聴ありがとうございました！