時間帯別均衡配分モデルを用いた金沢都市圏への LRT 導入効果分析*

LRT Introduction Effect Analysis That Uses Time-of-Day Traffic Equilibrium Assignment Model To The Kanazawa Urban Area*

中井惇弥**・中山晶一朗***・髙山純一****・長尾一輝*****

By Jun-ya NAKAI**・Shoichiro NAKAYAMA***・Jun-ichi TAKAYAMA****・Kazuki NAGAO

1. はじめに

近年，自動車交通の急激な普及により，慢性的な交通渋滞の発生や交通事故の増加といった問題が発生している．その上，大気汚染や騒音の発生など環境問題も深刻となっている．さらに，公共交通利用者の減少，バス路線の廃止や便数の減少など，サービスの低下が顕著となっている．

以上のような問題を解決する方法として，現在 LRT（Light Rail Transit）の導入が注目されており，多くの都市において，その導入計画が検討されている．LRT の特徴は建設コストが比較的低く，都市の成長などに応じたネットワークが形成できること，バス以上の輸送力を持ち，定時制が高いこと，動力が電気のために環境に対する負荷が小さいことなどから有効な交通システムの一つだといえる．

本研究において，公共交通の利用を促すために，バス以外にも新交通 LRT を含めた交通機関分担を考慮し，LRT 導入前後における公共交通利用意向の変化を明らかにする．LRT を都市圏に導入する際には道路交通の旅行時間の不確実性，LRT の持つ旅行時間の正確性を考慮する必要がある．本来，旅行時間は遅刻及び早着の損失も考慮され，決定されるものである．なので，利用者の手段選択においては，道路交通における不確実性の差が当然考慮されるべきであり，これを考慮して配分を行うことができれば，LRT 導入による効果の分析に有用であると考えられる．

また，近年実務において利用される日単位の配分は，一日の交通量が定常状態であると仮定し，一日の平均的な交通量を求めている．しかし，現実の交通量は時々刻々と変化しており，通勤による朝ラッシュ・夕ラッシュのピーク時での多大な交通量に対し，深夜においての交通量は激減する．時々刻々と変化する交通流を取り扱うために，本研究では一日を時間単位に分割し，配分を行う時間帯別配分モデルを適用する．

これまでに高速道路と一般道路の選択を考慮した時間帯別配分が提案されている．本研究では，道路と交通機関の機関選択を対象とする．旅行時間の不確実性を考慮した，手段分担・配分統合モデル [1]（静的配分）について，OD 修正法 [2]を導入した．時間帯別の準動的な手段分担・配分統合モデルに拡張し，それを金沢ネットワークへの適用を行うこと，金沢都市圏への LRT 導入の有効性を検証することが本研究の目的である．

2. 本研究におけるモデルの概要

本研究において，OD 交通量は確率変数として表し，正規分布の OD 交通量を配分する．不確実性を考慮した交通量の考え方，それに基づく，不確実性を表現した旅行時間，一般化費用の計算方法について説明する．

(1) 交通量の考え方

本研究のモデルでは，正規分布の OD 交通量を正規分布の交通量として配分する．本研究では中山 [3]らが提案した考え方に基づき，以下で示すように，道路ネットワークの経路交通量が互いに独立な正規分布に従い，その分散は平均値の定数倍であると仮定する．

OD ペア rs 間における OD 交通量を確率変数 Q_{rs} とし，その平均と分散をそれぞれ $E[Q_{rs}]$，$Var[Q_{rs}]$ とする．ここで，OD 交通量 Q_{rs} の分散 $Var[Q_{rs}]$ は $\eta E[Q_{rs}]$ と仮定する．つまり，OD 交通量について平均 $E[Q_{rs}]$ に比例して分散が決まると仮定する．ここで η は正のパラメータである．

次に，経路交通量は互いに独立であると仮定する．また，経路交通量の分散 $(\sigma_k^{rs})^2$ を $\eta\mu_k^r$ と仮定する．ここで，μ_k^{rs} 及び $(\sigma_k^{rs})^2$ はそれぞれ OD ペア rs 間の経路 k の経路交通量の平均及び分散，OD ペア rs 間の経路 k の集合を K_{rs}，OD ペア rs の起点ノード及び終点ノードの集合をそれぞれ R, S とする．この時，経路交通量は以下の確率分布で表すことができる．

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs},\ \eta\mu_k^{rs}] \tag{1}$$

---

*キーワード：交通ネットワーク分析，時間帯別均衡配分

**学生員，金沢大学大学院自然科学研究科

（石川県金沢市角間町，E-mail：jun6627@stu.kanazawa-u.ac.jp）

***正会員，博(工)，金沢大学環境デザイン学系

（TEL：076-423-4614，E-mail：snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp）

****フェロー会員，工博，同上

（TEL：076-423-4613，E-mail：takayama@t.kanazawa-u.ac.jp）

*****正会員，修（工），オリエンタルコンサルタンツ東北支店

（E-mail：nagao-kz@oriconsul.com）

ここで，F_k^{rs} は OD ペア rs 間の経路 k の経路交通量の確率変数，$N[\mu_k^{rs}, \eta\mu_k^{rs}]$は平均$\mu_k^{rs}$，分散$\eta\mu_k^{r}$を持つ正規分布を表す．

(2) 旅行時間の考え方

a)自動車の旅行時間

旅行時間は通常の BPR 関数に従うものとする．交通量が確率分布を持つため，旅行時間も確率分布を持つ．

道路リンクの走行時間が BPR 関数に従うと仮定すると，自動車のリンク旅行時間 t_a^c は$t_{a0}\{1+\alpha(x_a/C_a)^\beta\}$で表される．ただし，$t_a^c$はリンク a の自動車旅行時間，t_{a0}は自由走行時間，C_aは交通容量（固定値），x_aは自動車交通量，α，β は BPR 関数のパラメータである．道路上にはバスも走行するが，バスの台数は自動車の台数に比べ十分小さいとして無視する [2]．したがって，リンク a の自動車の期待旅行時間は $\mathrm{E}[t_{a0}\{1+\alpha(X_a/C_a)^\beta\}]$ であり，積率母関数 $Ma(s)$を用いると，期待リンク旅行時間は以下の式となる．

$$E[T_a] = t_{a0} + \alpha \cdot \frac{1}{C_a^\beta} \cdot \left. \frac{d^\chi M_a(s)}{ds^\beta} \right|_{s=0} \tag{2}$$

ただし，T_aはリンク旅行時間の確率変数である．

すでに述べたとおり，交通量は正規分布に従うため，X_aは正規変数であり，正規分布の積率母関数$M_a(s)$は$\exp(\mu_a s+\sigma_a^2 s^2/2)$である．ただし，$\mu_a$は交通量の平均，$\sigma_a^2$は交通量の分散である．

また，リンク旅行時間の分散は以下の式で算出される．

$$Var[T_a] = E[(T_a^2)] - E[T_a]^2 \tag{3}$$

経路旅行時間の期待値$E[T_k^{rs}]$は次式で表される．

$$E[T_k^{rs}] = \sum_{a\in A} \delta_{a,k}^{rs} E[T_a] \tag{4}$$

ここでAはリンクの集合である．

リンク交通量の独立性を仮定する場合，経路旅行時間の分散は以下の式で算出される．

$$Var[T_k^{rs}] = \sum_{a\in A} \delta_{a,k}^{rs} Var[T_a] \tag{5}$$

b)公共交通の旅行時間

バスの旅行時間は道路交通量の影響を受けるものとする．具体的には，河上ら [4]の考えに基づき，期待旅行時間は自動車（乗用車）の旅行時間にパラメータ ψ を掛けた値とする．また，旅行時間の分散は自動車の旅行時間の分散と同じとする．

リンク a におけるバスの期待旅行時間 $\mathrm{E}[T_a^{(bus)}]$及び旅行時間の分散 $\mathrm{Var}[T_a^{(bus)}]$は以下の式で示される．

$$\mathrm{E}[T_a^{(bus)}] = \psi\, \mathrm{E}[T_a] \tag{6}$$

$$\mathrm{Var}[T_a^{(bus)}] = \mathrm{Var}[T_a] \tag{7}$$

ここでψは，停留所への停車の影響などを含めたものであり，ψ>1.0 となる．

鉄道の旅行時間は，道路交通に影響されず，定数として与える．よって，鉄道の旅行時間の分散は 0 である．バス停留所や鉄道駅とのアクセスリンク，イグレスリンクは，徒歩リンクとして旅行時間を定数で与える．

(3) 実行旅行時間

利用者の旅行時間の不確実性への態度（リスク態度）を考慮するため，以下に示す実効旅行時間を導入する．実効旅行時間は期待旅行時間に加え旅行時間のばらつきに関するものが含まれており，これは遅刻を回避するために必要な旅行時間（セイフティ・マージン）と解釈することができる．自動車，公共交通それぞれを利用した場合の経路実効旅行時間を以下に示す．

$$V_k^{rs,c} = \mathrm{E}[T_k^{rs,c}] + \gamma\, \mathrm{Var}[T_k^{rs,c}] \tag{8}$$

$$V_{rs}^{tran} = \mathrm{E}[T_{rs}^{tran}] + \gamma\, \mathrm{Var}[T_{rs}^{tran}] \tag{9}$$

$V_k^{rs,c}$: OD ペア rs 経路 k の自動車の実効旅行時間

V_{rs}^{tran}: OD ペア rs の公共交通の実効旅行時間

$\mathrm{E}[T_k^{rs,c}]$: 自動車の期待旅行時間

$\mathrm{E}[T_{rs}^{tran}]$: 公共交通の期待旅行時間

$\mathrm{Var}[T_k^{rs,c}]$: 自動車の旅行時間の分散

$\mathrm{Var}[T_{rs}^{tran}]$: 公共交通の旅行時間の分散

γ :リスク態度を表すパラメータ

(γ>0 ならばリスク回避，γ=0 ならばリスク中立，γ<0 ならばリスク選好)

(4) 一般化費用

自動車交通と公共交通の統合モデルを構築するためには，旅行時間やバスの運賃などの単位を揃えて取り扱う必要がある．そこで，時間価値を用いて実効旅行時間を貨幣価値に換算し，更にバスの運賃などを含めた一般化費用を用いる．

自動車と公共交通の一般化費用は，それぞれ次のように表すことができる．

$$c_k^{rs,c} = \tau V_k^{rs,c} + \xi \tag{10}$$

$$c_{rs}^{tran} = \tau(V_{rs}^{tran} + w_{rs} + \iota_{rs}) + m_{rs} \tag{11}$$

$c_k^{rs,c}$:OD ペア rs 間第 k 経路における自動車の経路一般化費用

c_{rs}^{tran}: 公共交通の経路一般化費用

$V_k^{rs,c}$: 自動車の実効旅行時間

V_{rs}^{tran}: 公共交通の実効旅行時間

w_{rs}: 公共交通の待ち時間(運行間隔の 1/2)

t_{rs}: 公共交通のアクセス・イグレス時間

m_{rs}: 公共交通の運賃

τ: 時間価値

ξ: 定数項(自動車の維持費などを表したもの)

3. 時間帯別均衡配分モデルへの拡張

交通流の時間変化等を比較的簡便に予測する手法として, 従来から OD 修正法 [5]や渋滞内生化モデル [6]といった時間帯別均衡モデルの提案が行われている. OD 修正法はリンク単位での渋滞状況を表現できないという限界はあるものの, モデルの定式化や求解は比較的容易であると考えられる [2]. そこで本稿では, OD 修正法を用いて既存モデル [1]を時間帯別均衡配分モデルに拡張する.

(1)利用者行動の仮定

手段分担・配分統合モデルにおける利用者行動の仮定については, 以下の通りとする.

a)手段選択行動の仮定

利用者は一般化費用を考慮して手段選択を行うが, 手段選択では自家用車の有無や公共交通への通勤手当など様々な外生的な個人的要因の影響も大きいと考えられる. よって, 自動車利用者と公共交通利用者間の分担関係は, そうした個人的要因の影響が分担結果に考慮されるロジットモデルによって求めることにする.

よって, 自動車と公共交通を選ぶ際の自動車の選択確率は, 以下の式で表される.

$$P_{rs}^{c} = \frac{1}{1+\exp\{-\theta(c_{rs}^{tran} - \lambda_{rs}^{c})\}} \qquad \forall r\ \forall s \qquad (12)$$

ここで,

P_{rs}^{c}:OD ペア rs 間における自動車の選択確率

λ_{rs}^{c}:OD ペア rs 間における自動車利用者の一般化費用の最小値

c_{rs}^{tran}:OD ペア rs 間における公共交通利用者の一般化費用

θ: 正のパラメータ

b)経路選択行動の仮定

自動車利用に関する経路選択行動については, 外生的な個人的要因の影響は手段選択と比較して少ないと考えられるため, 一般化費用に従ってワードロップ的に経路選択が行われるものとする. すなわち, 最小の一般化費用の経路を選択するものとする.

(2)時間帯別均衡配分モデルの仮定

本稿では OD 修正法を用いてモデルの拡張を行う. OD 修正法における時間帯別利用者均衡モデルの仮定は以下の通りとなる [2].

仮定 1: 各時間帯において交通流は定常状態にあり, かつ, 利用者均衡条件(ワードロップの第一条件)が成り立っている.

仮定 2: 時間帯幅は OD 間旅行時間よりも十分に長い.

仮定 3: 各 OD 間の交通量は, その時間帯において出発地ノードから一様に出発し, 目的地ノードに向かう経路上に一様に分布する.

仮定 4: ある時間帯に目的地に到達できなかった残留交通量は, 後続時間帯にネットワーク上を流れて目的地に到達する.

ここで本稿では, 手段分担との統合モデルを構築するため, 仮定 1 を以下のように修正する.

仮定 1': 各時間帯において交通流は定常状態にあり, かつ, (1) 利用者行動の仮定で示した均衡条件 (手段分担はロジット型, 経路選択は最小一般化費用経路選択) が成り立っている.

(3)OD 修正法

OD 修正法を適用するにあたり, 前述の仮定 2, 仮定 3 を満たす必要がある.

この仮定のもと残留交通量 (次の時間帯に繰り越す交通量) を算出する. n 時間帯に実際に配分する OD ペア rs 間の OD 交通量は以下の式で表される. また OD 修正法の概念図を図-1 に示す.

$$g_{rs}^{n} = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^{n} - \frac{\lambda}{2T} G_{rs}^{n} \qquad (13)$$

ここで

G_{rs}^{n}: n 時間帯に発生する OD ペア rs 間での OD 交通量

q_{rs}^{n-1}: n-1 時間帯からの残留交通量(n 時間帯では定数)

g_{rs}^{n}: n 時間帯での OD ペア rs 間の残留交通量修正後の OD 交通量

λ :OD ペア rs 間での最短経路旅行時間

T_w:時間帯幅

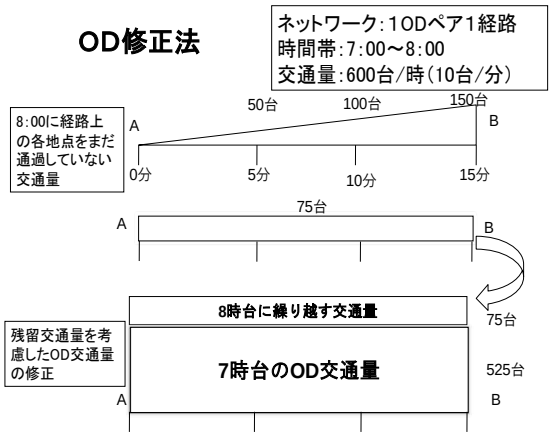

図-1　ＯＤ修正法の概念図

(4)モデルの構造

本研究におけるモデルの構造を図にまとめると次の図-2 のようになる． すでに述べたとおり，公共交通と自動車の手段分担選択はロジット型で，自動車の経路選択は最少費用経路選択で行うものとする．

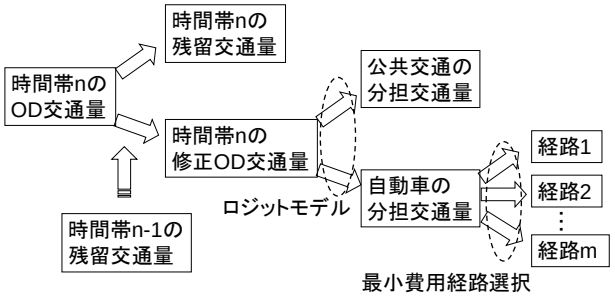

図-2　モデルの構造

4. 金沢ネットワークへの適用

本研究の均衡配分モデルを金沢市の道路ネットワークに適用し，現況再現性を検証する．

金沢市の都心軸に LRT が導入された場合を想定し，本研究のモデルの適用を行い，導入前と導入後を比較することにより導入効果を示す. 図-3 に LRT が導入された場合の適用ネットワークを示した．LRT の導入区間は駅西の県庁前から金沢駅，そして金沢駅から野町駅までとする．ノード数が 178，リンク数が 489 である．

旅行時間は通常の BPR 関数に従うものとし，自由走行時間，交通容量は制限速度，車線数，車道幅員を考慮して設定した．また OD 交通量の分散は金沢市内の断面交通量の実測値から推定された η =42.0 を用いることとする．

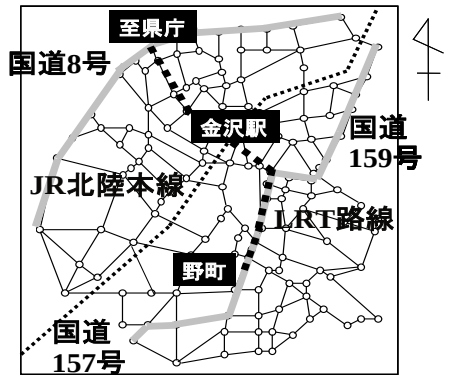

図-3　金沢都市圏の交通ネットワーク図

表-1　用いたＯＤデータ（時間帯別）

		OD数	トリップ数の総和
6時台	マイカー	501	7941
	公共交通	164	2504
7時台	マイカー	3634	57662
	公共交通	1073	17021
8時台	マイカー	3374	54300
	公共交通	641	10230

用いた OD データは平成 7 年度・第 3 回金沢都市圏パーソントリップ調査におけるデータである．時間帯別の OD データを表-1 に示す．本研究では 6 時台，7 時台，8 時台において，交通量配分を行う．得られた時間帯別の交通量配分の結果から LRT 導入前後での公共交通利用意向の変化や導入による道路交通等への影響を考察する．

金沢ネットワークへの適用結果や考察は講演時に発表する．

参考文献

1) 長尾一輝，中山晶一朗，高山純一，円山琢也：旅行時間の不確実性を考慮した分担・配分統合交通ネットワーク均衡モデルに関する研究：金沢都市圏への軌道系公共交通導入時の道路交通への影響分析を例に，土木学会論文集 D，2009.
2) 土木学会土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討小委員会：道路交通需要予測の理論と適用 第Ⅱ編 利用者均衡配分モデルの展開，丸善，東京，2006.
3) 中山晶一朗，高山純一，長尾一輝：：道路利用者のリスク態度を考慮した金沢道路ネットワークの均衡分析，第 59 回土木学会年次学術講演概要集，onCD-ROM，2004.
4) 河上省吾，高田篤：都市圏における公共輸送機関の料金システムおよび輸送計画の評価に関する研究，土木学会論文集，No.431/IV-15，pp.77-86，1991.
5) 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/IV-8，pp.111-119，1988.
6) 赤松隆，牧野幸雄，高橋栄行：時間帯別 OD 需要の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.