

道路旅行時間の不確実性を考慮した時間帯別均衡配分モデル及びその金沢都市圏におけるLRT導入計画への適用

| | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 著者 | 中井 惇弥, 中山 晶一朗, 高山 純一, 長尾 一輝 |
| 著者別表示 | Nakai Junya, Nakayama Shoichiro, Takayama Junichi, Nagao Kazuki |
| 雑誌名 | 土木学会論文集D3 (土木計画学) = Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management) |
| 巻 | 67 |
| 号 | 5 |
| ページ | 67_I_465-67_I_472 |
| 発行年 | 2011-01-01 |
| URL | http://doi.org/10.24517/00008372 |

doi: 10.2208/jscejipm.67.67_I_465



道路旅行時間の不確実性を考慮した時間帯別均衡配分モデル及びその金沢都市圏におけるLRT導入計画への適用

中井 惇弥¹・中山 晶一朗²・高山 純一³・長尾 一輝⁴

¹学生員 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: jun6627@stu.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学准教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp

³フェロー会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@t.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 社会環境事業部 東北支店在住
(〒984-0065 宮城県仙台市若林区土桶1040C仙台)
E-mail: nagao-kz@oriconsul.com

LRTなどの軌道系交通機関を含む交通ネットワークやその施策を評価する際には、道路交通が持つ旅行時間の不確実性に対する軌道系交通機関が持つ旅行時間の正確性を考慮することは重要である。このような旅行時間の正確性と不確実性の差を明確に考慮しなければ、LRT導入等の効果を適切に把握できない部分があると考えられる。また、現実の交通状況は時刻によって大きく変化するため、特に朝ラッシュ・夕ラッシュ等の混雑の表現は重要であろう。本研究では、これらを考慮するため、旅行時間の不確実性を考慮した時間帯別均衡配分モデルを提案する。そして、提案したモデルを金沢都市圏の道路ネットワークに適用することにより、金沢都市圏へのLRT導入による効果分析、道路交通への影響を時間帯別に示す。

Key Words : *semi-dynamic traffic assignment, travel time reliability, network equilibrium, LRT*

1. はじめに

近年、大気汚染や騒音の発生など環境問題への意識が高まっている。また、慢性的な交通渋滞や交通事故の改善も都市部においては依然として解決すべき課題である。一方、公共交通利用者は年々減少し、公共交通サービスの低下が進んでいる。地方都市における中心市街地活性化への期待を合わせて、近年、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、定時性が高いこと、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LRTを含めた公共交通の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、自動車やバスといった交通機関に比べてLRTがもつ旅行時間の正確性はLRTの重要な利点であり、LRTの導入効果を考える上では、旅行時間の不確実性/正確性を考慮することは重要であろう。通勤や業務など到着制約や希望唐尺時刻があるトリップについては、その到着制約や希望到着時刻から遅れると様々な損失が生じるため、旅行時間が不確実な場合、早めに出発することになる。このように早めに出発すると、時間損失が発生するため、旅行時間の不確実性/正確性は交通行動に大きな影響を及ぼすものと考えられる^{1,2)}。利用者の交通手段選択においては、専用軌道を持つLRTの運行時間の正確性に対する道路交通における不確実性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をより精緻に行うことができると考えられる。

また、現在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・タラッシュのピーク時での多大な交通量に対し、深夜における交通量は激減する。時刻で大きく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ととする。動的な交通量配分における大きな問題の一つとして、モデルを現実ネットワークに適用する上で、詳細なOD交通量のデータを入手する難しさがある。実務で用いることも考慮すれば、詳細な動的なODデータ交通量のデータを入手することは困難であり、時間帯別でのOD交通量のデータが比較的入手可能なものとして限界に近いものであることが多いと考えられる。よって、本研究では、時間帯別配分を用いることとする。

LRTを含めた公共交通の交通機関分担を考慮するためには通常の交通量配分に交通機関選択を導入する必要がある。道路交通と公共交通を統一的に扱った分担・配分統合配分モデルについてはこれまで多くの研究がなされてきており、実際の交通ネットワークへの適用例もいくつかある。

河上・高田³⁾は、従来の需要変動型利用者均衡に、公共交通の運賃や運行回数が考慮できるように自動車、公共交通利用者の時間価値を区別した一般化費用の概念を取り入れ、かつバスの旅行時間が道路の混雑の影響を受けるようなモデルを提案し、提案したモデルの名古屋市ネットワークへの適用可能性を検討した。河上・石⁴⁾は、自動車と公共交通のネットワーク上での相互影響を考慮することと公共交通利用者の時間価値を細分することによって、より現況再現性を高めたと言える。

円山⁵⁾はトリップ目的別の枠組みで発生・分布・分担・配分統合型確率的交通ネットワーク均衡モデルを交通し、東京都市圏を対象として適用検討を行った。この研究は統合モデルの一つの発展例と言える。

分担・配分統合モデルは以上のように、様々な形態への展開が行われているが、そのほとんどが日単位を定常状態と仮定した配分である。本研究では、既に述べたように時間帯別配分を用いる。時間帯別均衡配分に関する研究も今まで進められているが、それらの均衡モデルの計算手法も様々である。

藤田⁶⁾や宮城・牧村⁷⁾は時間内で目的地に到着できない交通量を次の時間帯のOD交通量を次の時間帯のOD交通量に加算するモデルを提案した。これらのモデルは計算アルゴリズムも比較的簡単であり、各時間帯の計算時間も通常の日単位の配分の計算時間と同程度になると考えられる。しかし、OD修正法では配分交通量をOD単位で修正するため、道路利用者のトリップ長が長い場合等、交通混雑の空間移動を適切に表現できないといった問題点もある。

さらに、藤田⁸⁾は高速道路と一般道路の選択を考慮した転換率内生型時間帯別均衡モデルを提案し、名古屋都市圏ネットワークに適用し、精度検証を行った。このモデルは一般道利用と高速道利用をそれぞれ別のモードとみなした場合の分担・配分統合モデルに相当し、時間帯別配分ということで一つの重要な研究例と言える。

ここまで、手段・分担統合配分モデルや時間帯別配分モデルの研究を示してきたが、それらの研究では旅行時間等を確定的に扱うものがほとんどである。しかし、本研究では、専用軌道を持つLRTの自動車交通に対する運行の正確性を考慮するため、自動車交通の旅行時間の不確実性を取り扱う必要がある。

道路の交通量や旅行時間が変動する原因として、交通需要が確率的に変動していることが一つの大きな原因であると考えられる。中山⁹⁾はOD交通量が正規分布に従うと仮定し、正規分布に従う交通量を配分する確率的な交通ネットワーク均衡モデルを提案している。この確率的な均衡モデルは従来までのワードロップ利用者均衡や確率的利用者均衡が確定値であるOD交通量を確定的に配分していた点を拡張し、確率的な交通量を配分するものである。この均衡モデルによって、交通ネットワークの旅行時間の不確実性や時間信頼性を評価することが可能になった。長尾¹⁰⁾は旅行時間の不確実性を考慮した分担・配分統合モデルを提案し、その均衡モデルを金沢都市圏の交通ネットワークに適用し、軌道系公共交通導入時の道路交通への影響分析を行った。

本研究では、上記の長尾らの機関選択を対象とした分担・配分統合モデルを時間帯別均衡配分モデルに拡張する。その均衡モデルを金沢都市圏の交通ネットワークに適用し、軌道系公共交通（LRT）導入による道路交通への影響を時間帯別に分析する。

2. 確率変動する交通量と旅行時間

(1) 交通量の考え方

本研究では、道路ネットワークにおける旅行時間の不確実性・確率変動を考慮する。道路ネットワークの旅行時間が確率変動する原因には様々なものが考えられるが、その一つの大きな原因としては、交通需要の変動が考えられる。本研究では、交通需要、つまり、OD交通量の確率変動によってネットワークの旅行時間が変動することを前提とする。この設定は中山¹¹⁾が提案した確率ネットワーク均衡モデルと同様である。

確定的なOD交通量のデータは各種調査から算出することが可能であり、それをOD交通量の平均に適用することができる。それに対し、OD交通量の分散はそのデータを得ることが困難な場合が多い。そこで、中山らが

提案した確率ネットワーク均衡モデルでは、道路ネットワークの経路交通量は互いに独立な正規分布に従うとともに、その分散は平均の定数倍であるという仮定を設けることによって、確率的に変動するOD交通量を与えている。このような単純な方法では精緻に不確実性を扱うことはできない部分はあるものの、現況のデータ状況を考えると、実務的な適用の観点から、本研究でもそれを採用する。

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。

また、経路交通量の分散 $(\alpha_k^{rs})^2$ を $\eta \mu_k^{rs}$ とする。ここで、 $\mu_k^{rs} (= E[F_k^{rs}])$ 及び $(\alpha_k^{rs})^2 (= Var[F_k^{rs}])$ 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、 F_k^{rs} は OD ペア rs 間の経路 k の経路交通量の確率変数、 D 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、経路交通量の確率変数は以下で表すことができる。

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs}, \eta \mu_k^{rs}] \quad (1)$$

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 μ_k^{rs} 、分散 $\eta \mu_k^{rs}$ 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、川上・石⁴⁾と同様にバスの台数は自動車の台数に比べて十分小さいとして無視する。よって、リンク a の自動車の期待旅行時間は $E[t_{a0} \{1 + \alpha(X_a/C_a)^\beta\}]$ であり、リンク a の交通量 X_a に対する積率母関数 $M_a(s)$ を用いると、期待リンク旅行時間は以下の式となる¹¹⁾。

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

ただし、 T_a はリンク旅行時間の確率変数であり、 $M_a(s)$ はリンク a の交通量の平均と分散をその平均と分散を持つ正規分布の積率母関数である。既に述べたとおり、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、 μ_a はリンク a の交通量の平均、 σ_a^2 はその分散である。

また、リンク旅行時間の分散は以下の式で算出される。

$$Var[T_a] = E[(T_a^2)] - E[T_a]^2 \quad (3)$$

ここで、 T_a はリンク a の旅行時間の確率変数である。経路旅行時間の期待値 $E[T_k^{rs}]$ は次式で表される。

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

ここで、 T_k^{rs} は OD ペア rs 間の経路 k の経路旅行時間の確率変数、 A はリンクの集合、 $\delta_{a,k}^{rs}$ はリンク a と OD ペア rs 経路 k の接続変数である。

計算コストの面からリンク交通量の独立性を仮定すると、経路旅行時間の分散は以下の式で算出される。

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

なお、計算コストを考える必要がない場合は、積率母関数を用いてリンク間の共分散を計算することが可能である¹¹⁾。

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・高田³⁾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 を乗じた値とする。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 $E[T_a^{(bus)}]$ 及び旅行時間の分散 $Var[T_a^{(bus)}]$ は以下の式で示される。

$$E[T_a^{(bus)}] = \psi E[T_a] \quad (6)$$

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

ここで $T_a^{(bus)}$ はバスのリンク a の旅行時間の確率変数であり、 ψ は、停留所への停車の影響などを含めたものであり、 $\psi > 1.0$ となる。

（専用軌道をもつ LRT を含め）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。また、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. 交通手段選択と旅行時間確率変動を考慮した時間帯別均衡配分モデル

(1) 経路・交通手段選択行動

本研究では、時間帯別配分に際し、自動車利用もしく

は公共交通利用の交通機関選択行動を考える。利用者は（一般化）費用のみを考慮して交通手段選択を行うと考えることは妥当であると思われるが、交通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との間の交通手段選択はロジットモデルによって求めることにする。

一方、自動車利用に関する経路選択行動については、旅行時間や費用以外の影響は交通手段選択と比較して少ないと考えられるため、以下に定義する不効用（旅行時間の確率変動を考慮した一般化費用）が最小となる経路が選択されるものとする。また、本研究では、地方都市への適用を考えているため、公共交通の経路は各 OD で一つのみ（代表経路のみ考える）とする。

自動車利用もしくは公共交通利用の選択にロジットモデルを適用するにあたり、自動車利用及び公共交通利用のそれぞれの効用を定義する必要がある。効用は、旅行時間に関する項とアクセス/イグレスや公共交通の待ち時間というその他の時間に関するものと公共交通の料金や自動車維持費という費用に関するものの3種類から構成されるものとする。旅行時間についてはその確率変動を考えており、通常、旅行時間の分散が小さいほど望ましいことになる。つまり、旅行時間分散が小さいほど不効用は小さい。なお、効用の符号を逆にしたものを不効用とする。不効用は通常、効用と同様で単位は存在しない。旅行時間の分散を利用者がどのように評価するのかという旅行時間の不確実性への態度を本研究ではリスク態度と呼ぶことにし、このようなリスク態度を考慮する。

自動車利用の各経路の不効用及び公共交通の不効用は以下の通りである。

$$u_k^{rs,c} = \tau(E[T_k^{rs,c}] + \gamma Var[T_k^{rs,c}]) + \xi \quad (8)$$

$$u_{rs}^{tran} = \tau(E[T_{rs}^{tran}] + \gamma Var[T_{rs}^{tran}] + w_{rs} + l_{rs}) + m_{rs} \quad (9)$$

$u_k^{rs,c}$: ODペア rs 間第 k 経路における自動車の不効用

u_{rs}^{tran} : 公共交通の経路の不効用

$E[T_k^{rs,c}]$: 自動車の期待旅行時間

$E[T_{rs}^{tran}]$: 公共交通の期待旅行時間

$Var[T_k^{rs,c}]$: 自動車の旅行時間の分散

$Var[T_{rs}^{tran}]$: 公共交通の旅行時間の分散

$T_k^{rs,c}$: 自動車の旅行時間の確率変数

T_{rs}^{tran} : 公共交通の旅行時間の確率変数

w_{rs} : 公共交通の待ち時間(運行間隔の 1/2)

l_{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)

γ : リスク態度を表すパラメータ

なお、旅行時間の分散に対するリスク態度を表すパラメータ γ については、 $\gamma > 0$ ならばリスク回避、 $\gamma = 0$ ならばリスク中立、 $\gamma < 0$ ならばリスク選好を意味する。不効用のうち旅行時間に関する項について以下のようにまとめることとする。

$$V_k^{rs,c} = E[T_k^{rs,c}] + \gamma Var[T_k^{rs,c}] \quad (10)$$

$$V_{rs}^{tran} = E[T_{rs}^{tran}] + \gamma Var[T_{rs}^{tran}] \quad (11)$$

$V_k^{rs,c}$: ODペア rs 間の経路 k の自動車の部分不効用

V_{rs}^{tran} : 公共交通の部分不効用

自動車利用と公共交通利用の選択確率は以下の式であらわされる。本研究では、自動車と公共交通の分担関係のみを考えており、自転車や徒歩への転換は考えていない。

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

P_{rs}^c : ODペア rs 間における自動車の選択確率

c_{rs}^c : ODペア rs 間における自動車利用者の不効用の最小値

u_{rs}^{tran} : ODペア rs 間における公共交通利用者の不効用

θ : 正のパラメータ

$$P_{rs}^{tran} = 1 - P_{rs}^c \quad \forall r \forall s \quad (13)$$

P_{rs}^{tran} : ODペア rs 間における公共交通の選択確率

(2) 時間帯別均衡配分モデルの仮定

理論的には OD 単位で残留交通量を考えるなど問題点もあるものの、最も実用的であるため、本研究では、OD 修正法⁹⁾を用いてモデルの時間帯別化を行う。(自動車交通のみの) 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⁹⁾。

仮定 1: 各時間帯において交通流は定常状態にあり、かつ、ワードロップ利用者均衡が成り立っている。

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、本研究では、交通手段選択を OD 修正法の時間帯別配分に導入した手段分担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、経路選択は最小不効用経路選択）が成り立っている。

上述した通り、手段選択をロジット型で、経路選択を最小不効用経路選択で行われるとすると、モデルの構造は図-1 のようになる

(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 修正法の概念図は図-2 のようになる。

本研究の適用ネットワークでは OD 間で公共交通が存在しない区間があるため、また、計算の簡略化のため、残留交通量の修正には自動車交通の旅行時間を用いている。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + Q_{rs}^n - \frac{\lambda_{rs}}{2T} Q_{rs}^n \quad (14)$$

Q_{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_{rs} : OD ペア rs 間での自動車の最短経路旅行時間

T: 時間帯幅

(4) 定式化とアルゴリズム

本研究での均衡では以下が成り立つ。

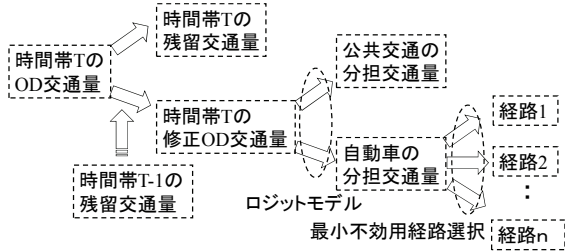


図-1 モデルの構造<最小不効用経路選択>

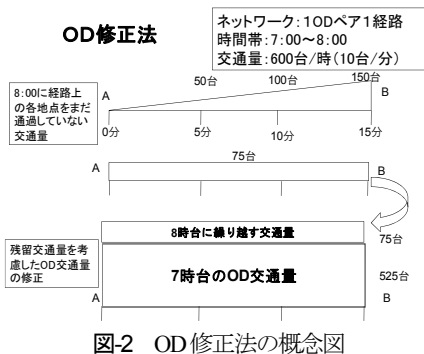


図-2 OD 修正法の概念図

$$q_{rs}^{c,T} = \frac{q_{rs}^T}{1 + \exp\{-\theta(u_{rs}^{tran,T} - c_{rs}^{c,T})\}} \quad \forall r, \forall s \quad (15)$$

$$q_{rs}^T = q_{rs}^{c,T} + q_{rs}^{tran,T} \quad \forall r, \forall s \quad (16)$$

$$\mu_k^{rs,c,T} (c_k^{rs,c,T} - \lambda_{rs}^{c,T}) = 0 \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (17)$$

$$c_k^{rs,c,T} \geq \lambda_{rs}^{c,T} \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs,c,T} = q_{rs}^{c,T} \quad \forall r, \forall s \quad (19)$$

$$q_{rs}^{c,T}, q_{rs}^{tran,T} \geq 0 \quad \forall r, \forall s \quad (20)$$

$$\mu_k^{rs,c,T} \geq 0 \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (21)$$

$$u_k^{rs,c,T} = \tau V_k^{rs,c,T} + \xi \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (22)$$

$$u_{rs}^{tran,T} = \tau (V_{rs}^{tran,T} + w_{rs}^T + t_{rs}) + m_{rs} \quad \forall r, \forall s \quad (23)$$

$$V_k^{rs,c,T} = E[T_k^{rs,T}] + \gamma Var[T_k^{rs,T}] \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (24)$$

$$V_{rs}^{tran,T} = \psi E[T_k^{rs,T}] + \gamma Var[T_k^{rs,T}] \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (25)$$

$$E[T_k^{rs,T}] = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} g_a(\mu_a^T) \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (26)$$

$$Var[T_k^{rs,T}] = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} h_a(\mu_a^T) \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (27)$$

$$q_{rs}^T = \tilde{q}_{rs}^{T-1} + Q_{rs}^T - \frac{\lambda_{rs}^T}{2\tau T_w} Q_{rs}^T \quad (28)$$

本研究のモデルでは、バスと自動車という非対称な交通が混在するため、均衡解を得るための等価な数理最適化問題を与えることができない。よって、上式が成り立つ均衡解は以下の相補性問題によって与える。

$$\text{Find. } \mathbf{z} = (\mathbf{f}_t, \mathbf{q}_t, \mathbf{y}_t, \boldsymbol{\kappa}_t, \boldsymbol{\lambda}_t)^T$$

$$\text{s.t. } \langle \mathbf{z}, \widehat{\Phi}(\mathbf{z}) \rangle = 0, \mathbf{z} \geq \mathbf{0}, \widehat{\Phi}(\mathbf{z}) \geq \mathbf{0}.$$

ここで、

$$\widehat{\Phi}(\mathbf{z}) = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{f}_t) - \Gamma^T \boldsymbol{\lambda}_t \\ \boldsymbol{\lambda}_t^c + \frac{1}{\theta} \ln \mathbf{y}_t^c - \boldsymbol{\kappa}_t \\ \boldsymbol{\lambda}_t^{tr} + \frac{1}{\theta} \ln \mathbf{y}_t^{tran} - \boldsymbol{\kappa}_t \\ \mathbf{q}_t - \mathbf{h}_t(\boldsymbol{\lambda}_t) \\ \mathbf{y}_t - \Gamma \mathbf{f}_t \\ \mathbf{q}_t - \mathbf{y}_t^c - \mathbf{y}_t^{tr} \end{pmatrix} \quad (29)$$

- u : 時間帯 t の自動車の不効用
- Γ : 経路・OD 接続行列
- λ_t : 時間帯 t のラグランジュ乗数
- λ_t^c : 時間帯 t の自動車の最小不効用
- θ : 正のパラメータ
- y_t^c : 時間帯 t の自動車の OD 交通量
- κ_t : 時間帯 t の自動車と公共交通を含めたラグランジュ乗数
- y_t^{pub} : 時間帯 t の公共交通の OD 交通量
- y_t : 時間帯 t の自動車と公共交通の OD 交通量の和
- f_t : 時間帯 t の自動車の経路交通量
- h_t : 時間帯 t の自動車の残留交通量

上述の相補性問題を解くために、本研究では緩和法¹²⁾を用いる。本研究の均衡問題における緩和問題は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 \min_{(\mu, q) \in \Omega} Z = & \tau \sum_{a \in A^c} \int_0^{\mu_a} V_a^T(w) dw + \xi \sum_{r \in R_S} \sum_{k \in S} \mu_{rs,k}^{c,T} \\
 & + \sum_{r \in R_S} \sum_{s \in S} q_{rs}^{tran,T} c_{rs}^{tran,T(m)} + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R_S} \sum_{s \in S} q_{rs}^{c,T} \ln q_{rs}^{c,T} \\
 & + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R_S} \sum_{s \in S} q_{rs}^{tran,T} \ln q_{rs}^{tran,T} \\
 & - \sum_{r \in R_S} \sum_{s \in S} \int_0^{q_{rs}^T} \left\{ \frac{2\tau T}{q_{rs}^T} (\tilde{q}_{rs}^{T-1} + q_{rs}^T - w) \right\} dw \quad (30)
 \end{aligned}$$

上式の緩和問題を逐次解くことによって、均衡解を得ることができる。このアルゴリズムは長尾ら¹⁰⁾と同様である。

4. 金沢都市圏道路ネットワークへの適用

(1) 概要

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、導入前と導入後と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。適用ネットワークはノード数 178、リンク数 489 である。ここで、北陸鉄道石川線は鶴来駅（石川県白山市）から野町駅までであり、金沢駅までは接続していない。また、LRT は専用軌道であり、道路混雑の影響を受けないと想定する。なお、LRT の専用軌道を確保するため、導入区間においては車線が半減することとする。

道路の旅行時間は標準 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 $\eta=42.0$ を用いることとする。

(2) OD データ

用いた OD データは第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。今回対象とする朝ピークの時間帯別の OD データの概略を表-1に示す。集計した OD データのトリップ目的は通勤・通学が8割~9割を占めている。本研究では以上のようなデータを用い、6時台、7時台、8時台において、交通量配分を行うこととする。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者数の変化や導入による道路交通等への影響を考察する。

(3) 計算における条件設定

- ・自動車の乗車人員を 1.0 (人/台) とする。
- ・時間価値は 40 (円/分) とする。
- ・時間帯幅は 60 (分) とする。
- ・自動車の旅行時間の BPR 関数は標準 BPR 関数 ($\alpha=0.15, \beta=4$) を用いる。
- ・自動車とバスの旅行時間の分散の値は同値、LRT は 0 (定時性) とする。
- ・運賃はバス・LRT とともに一律 200 円とする。
- ・乗り換えによるコストは考慮しない。

表-1 OD 表(6時台~8時台)

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



図-3 金沢都市圏の交通ネットワーク図

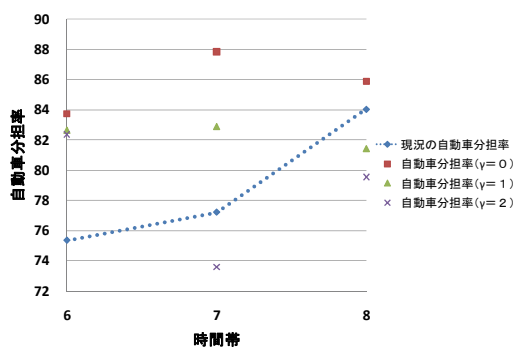


図4 リスク態度パラメータと自動車分担率の関係

- ・バス・LRTの待ち時間は10分とする。
- ・アクセス・イグレス時間はそれぞれ2分とする。
- ・バスの期待旅行時間は自動車の ψ 倍とし、LRTは駅間旅行時間として定数で与える。
- ・LRT敷設区間は交通容量を1/2とする。
- ・公共交通の車内において混雑は発生しない。

(4) リスク態度パラメータ

図4に各時間帯におけるリスク態度パラメータと自動車分担率の関係を示した。本研究におけるモデルの再現性の検証として、各時間帯における現況の自動車分担率とリスク態度パラメータ $\gamma=0, \gamma=1, \gamma=2$ それぞれの場合における配分結果の自動車分担率を比較した。6時台においては旅行時間の分散項の値が極めて小さいため、分散項に乗じるリスク態度パラメータの変動による再現性の検証は困難であった。7時台においては $\gamma=1 \sim \gamma=2$ 、8時台においては $\gamma=0 \sim \gamma=1$ の間で道路利用者が交通行動を行っていることと推定することができる。今回の適用結果では、7時台において、リスク態度パラメータが高い結果となった。よって、7時台の道路利用者は最もリスク回避意識が高いと考えられる。また、旅行時間の分散は自動車・公共交通ともに同値であり、期待旅行時間は公共交通の方が大きいため、 γ の変化による影響は自動車の方が受けやすい。なお、この計算結果においては、まだLRTの導入は考慮していない。

(5) LRT導入効果分析

表2、表3、表4にLRT導入前後における分散を考慮した不効用の差を示した。本研究では、効用の符号を逆にしたものを入効用とし、旅行時間の分散が小さいほど不効用は小さい。交通量の少ない6時台においてはLRT導入の効果は小さいと考えられる。この理由は6時台は交通量自体が少なく、交通混雑があまりなく、LRT導入によって、自動車からLRT（公共交通）に転換があまりないためである。一方で、交通量の多い7時台と8時台においては導入前後において不効用の差は顕著に表れた。

表2 分散を考慮した不効用（6時台）

| 6時台 | $\gamma=0$ | $\gamma=1$ | $\gamma=2$ |
|---------------|------------|------------|------------|
| LRTなし(バスのみ) | 977.18 | 987.23 | 991.09 |
| LRTあり(バス+LRT) | 976.79 | 980.17 | 985.03 |
| 導入前後の差 | -0.40 | -7.05 | -6.05 |

表3 分散を考慮した不効用（7時台）

| 7時台 | $\gamma=0$ | $\gamma=1$ | $\gamma=2$ |
|---------------|------------|------------|------------|
| LRTなし(バスのみ) | 1493.71 | 1854.55 | 2271.54 |
| LRTあり(バス+LRT) | 1189.79 | 1628.16 | 1854.33 |
| 導入前後の差 | -303.92 | -226.39 | -417.21 |

表4 分散を考慮した不効用（8時台）

| 8時台 | $\gamma=0$ | $\gamma=1$ | $\gamma=2$ |
|---------------|------------|------------|------------|
| LRTなし(バスのみ) | 1519.95 | 2450.70 | 2917.59 |
| LRTあり(バス+LRT) | 1388.18 | 1913.11 | 2494.91 |
| 導入前後の差 | -131.77 | -537.60 | -422.68 |

表5 LRT導入前後の分担率の推移 ($\gamma=1$)

| LRTなし(バスのみ) | 6時台 | 7時台 | 8時台 |
|---------------|-------|-------|-------|
| 自動車分担率 | 82.67 | 82.84 | 81.07 |
| 公共交通分担率 | 17.33 | 17.16 | 18.93 |
| LRTあり(バス+LRT) | 6時台 | 7時台 | 8時台 |
| 自動車分担率 | 82.40 | 77.29 | 77.17 |
| 公共交通分担率 | 17.60 | 22.71 | 22.83 |

また、6時台から7時台への残留交通量は比較的少ないが、7時台から8時台への残留交通量は多いため、実際の配分交通量は8時台が最も多い。よって、6時台～8時台のODデータはそれぞれ異なるため、今回の適用条件（パラメータ等）ではこのような結果となる。各時間帯のLRTの導入前後における自動車分担率、公共交通分担率の推移を表5に示した。LRTを導入することによって、比較的交通量の多い7時台と8時台において、自動車利用者が減少し、公共交通利用への転換が見られた。また、比較的交通量の少ない6時台においてはLRT導入前後においては分担率に大きな差がなかった。ピーク時間帯（7時台・8時台）では、トリップ数の総和の5%である3200～3700人の公共交通利用者が増え、その中の約40%である1300～1500人程のLRTの乗車人数増が見込まれる。

よって、道路利用者が多ければ多いほど、LRTを導入することは有効であると考えられる。ゆえに、金沢都市圏の中心部にLRTを導入することによって、道路ネットワーク全体として、交通渋滞の緩和や旅行時間の短縮、安定化が期待される。

5. おわりに

本研究では、長尾ら¹⁰が提案した旅行時間の不確実性を考慮した分担・配分統合モデルを時間帯別均衡配分モ

デルに拡張し、金沢都市圏の公共交通を含むネットワークに適用した。その結果、金沢都市圏における軌道系公共交通機関であるLRTの効果分析を時間帯別に行うことができた。今後、時間帯を考慮した交通施策の評価において、より精緻な評価が可能になると期待できる。

今後の課題としては、次のようなことが挙げられる。

- 時間帯別均衡配分モデルにおける、残留交通量のリンクベースでの計算（残留交通量の再現性の向上）
- 公共交通の再現性の向上、推計精度の向上（モデルの構築の際に、単純な仮定をおいた部分の精緻化が必要）
- LRT導入時のバス路線網の再編を考慮、LRT導入効果をより現実的に評価する必要
- 分担における徒歩や自転車も含めた、より現実的な交通行動の表現

参考文献

- 1) 中山晶一郎：道路の時間信頼性に関する研究レビュー，土木学会論文集 D3，掲載決定，2011.
- 2) 中山晶一郎：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察，土木学会論文集 D3，掲載決定，2011.
- 3) 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.
- 4) 河上省吾，石京：公共交通システム解析のための分担・配分統合モデルの定式化とその実用性に関する研究，土木学会論文集，No.512/IV-27，pp.35-45，1991.
- 5) 円山琢也，原田昇，太田勝敏：大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用，土木計画学研究・論文集，Vol.19，No.3，pp.551-560，2002.
- 6) 藤田素弘，山本幸司，松井寛：渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発，土木学会論文集，No.407/IV-11，pp.129-138，1989.
- 7) 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.17-28，1991.
- 8) 藤田素弘，雲林院康宏，松井寛：高速道路を考慮した時間帯別均衡配分モデルの拡張に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.18，No.3，pp.563-572，2001.
- 9) 中山晶一郎，高山純一，長尾一輝，所俊宏：現実道路ネットワークの時価信頼性評価のための確率的交通均衡配分モデル及びそれを用いた情報提供効果分析，土木学会論文集 D，Vol.62，No.4，pp.526-536，2006.
- 10) 長尾一輝，中山晶一郎，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，Vol.65，No.1，pp.12-25，2009.
- 11) 中山晶一郎，高山純一，長尾一輝，笠嶋崇弘：旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル，土木学会論文集，No.772/IV-65，pp.67-77，2004.
- 12) 土木学会土木計画学委員会：交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—，丸善，東京，1998.

(2011.2.25 受付)

A SEMI-DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL WITH ROAD TRAVEL TIME UNCERTAINTY AND ITS APPLICATION TO LRT INTRODUCTION PLAN FOR KANAZAWA URBAN NETWORK

Junya NAKAI, Sho-ichiro NAKAYAMA, Jun-ichi TAKAYAMA and Kazuki NAGAO

When evaluating transportation policies or plans with public transit such as LRT with exclusive railway, it is important to consider travel time punctuality of railway public transit in comparison with road travel time uncertainty. We cannot assess the effect of introducing LRT appropriately in same cases if we neglect the difference between railway public transit punctuality and road travel time uncertainty. It is also important to consider within-day dynamics of traffic situation, especially morning and evening peak hour. In this study, we propose a semi-dynamic traffic assignment model with road travel time uncertainty and exclusive railway LRT's punctuality. Then, we apply the model to Kanazawa urban network and examine the effect of introducing LRT and its influence to road traffic semi-dynamically.