

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

長尾一輝¹・中山晶一郎²・高山純一³・円山琢也⁴

¹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 東北支店駐在
(〒984-0065 宮城県仙台市若林区土樋104 OC仙台ビル)

金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻博士後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: nagao-kz@oriconsul.com

²正会員 金沢大学大学院准教授 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: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp

³フェロー会員 金沢大学大学院教授 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: takayama@t.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 熊本大学准教授 政策創造研究教育センター (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-3-1)

E-mail: takumaru@kumamoto-u.ac.jp

道路交通と対比して、鉄道やLRTなどの軌道系交通機関の特徴の一つとして所要時間の正確性が挙げられる。一般に軌道系交通機関を都市圏に導入する場合の効果进行分析するには、所要時間の正確性を考慮しなければ、導入効果を過小評価する可能性があると考えられる。つまり、軌道系交通機関の導入効果やその影響をより正確に分析するためには、道路交通の旅行時間の不確実性を考慮するとともに、道路交通と軌道系公共交通との分担及び配分を統一的行うことが必要と考えられる。そこで、本研究では、道路旅行時間の不確実性を考慮した交通手段分担及び配分を同時に行うネットワーク均衡モデルを提案する。そして、それをを用いた適用例として、軌道系公共交通の金沢都市圏への導入に対する道路交通への影響分析を例に提案モデルの試算例を示す。

Key Words : *combined network equilibrium, travel time reliably, public transportation*

1. はじめに

近年、地方中核都市においては中心市街地の活性化対策や道路混雑の緩和（環境問題対策）のために LRT（Light Railway Transit）などの軌道系公共交通の導入への関心が高まり、多くの都市においてその導入計画が検討されている。

都市圏での鉄道や軌道系公共交通の導入効果を分析するには、単に鉄道もしくは軌道系公共交通の需要推定や経営効率性、道路交通からの転換等を検討するだけでは十分ではなく、軌道系交通機関の持つ特徴を踏まえつつ、ネットワーク全体としての評価を行うことが重要になると考えられる。

道路交通と対比して、鉄道や（専用軌道を持つ）LRT

などの軌道系交通機関の特徴の一つとして所要時間の正確性を上げることができる。鉄道や軌道系交通機関は毎日ほぼ定時で運行し、旅行時間の不確実性はほとんど無いと考えられる。一方で、自動車（道路交通）の旅行時間は道路の交通量変動に影響されるため、その旅行時間の不確実性は大きく、特に混雑時はそれが顕著になる。また、バス交通を考えると、バスレーンが無い場合は自動車と同様であるが、バスレーンがある場合は交通量の変動による影響を受けにくいいため、自動車と比較して旅行時間の不確実性は小さくなると考えられる。

軌道系交通機関と自動車を含む交通手段選択では、このような旅行時間の不確実性の影響は大きいと考えられ、道路交通の旅行時間の不確実性を考慮して交通手段分担を行うことが重要である。よって、軌道系交通機関を都

市圏に導入する場合の効果进行分析するには、道路交通の旅行時間の不確実性、軌道系交通機関の持つ所要時間の正確性を考慮しなければ、導入効果を過小評価する可能性があると考えられる。また、公共交通に関する政策の評価を行う場合も、単に期待旅行時間（旅行時間の平均のみ）を考慮するだけではなく、その不確実性をも考えることによって、より精緻で多面的な政策評価が可能になると考えられる。

鉄道や軌道系公共交通などの公共交通と道路交通を統一的に扱う枠組みとして、交通ネットワーク均衡モデルがある。一般にこの均衡モデルを用いれば、道路交通と公共交通との手段分担や配分を整合的に扱うことが可能となるため、交通ネットワーク均衡モデルを活用することは一つの重要なアプローチと言える。

道路交通と公共交通を統一的に扱った分担・配分統合均衡モデルについては、以下に述べるように従来から多くの研究がなされてきている。

河上・溝上¹⁾は、リンク走行コストや経路選択規範の異なる多種の交通手段が同一の道路ネットワークを共有する場合の交通機関分担プロセスと配分プロセスとを結合した交通需要予測手法、ならびに、その手法を用いた最適バスサービスレベルの設計手法を開発し、単純なネットワークへの適用を行った。河上・溝上²⁾はそれを更に発展させ、中京都市圏のネットワークへの適用を行い、モデルの実用性を示した。従来アンケート調査の集計データから推定されていた交通手段選択関数のパラメータについて、一部の観測可能な手段別交通量を利用して均衡交通量と同時に推定できるモデルを開発している点も注目すべき点である。

河上・高田³⁾は、従来の変動需要型利用者均衡に、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、かつバス旅行時間が道路網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、より実際に近い交通現象を再現した。

Fernandez *et al.*⁵⁾は、経路の途中で手段の変更がある場合の複合交通手段選択を考慮したモデルを構築した。宮城・水口⁶⁾はこのモデルよりも一般性のあるモデルとして、ネスティッド構造を反映した端末交通手段選択、鉄道駅やバス停留所の選択、そして自動車との競合をも考慮した交通ネットワーク均衡モデルを提案した。

Safwat and Magnanti⁷⁾は、リンク間に相互干渉の無い発生・分布・分担・配分4段階統合モデルの構築を行った。最近の研究として、円山ら⁸⁾は、発生・分布・分担・配

分統合型交通均衡モデルをトリップ目的別のモデルへ拡張し、大規模都市圏へ適用を行った。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発展が行われているが、そのほとんどが旅行時間等を確定的に扱うものである。そこで、本研究で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する。

道路の交通量や旅行時間が変動する原因として、事故や災害などが発生していない通常の交通では、交通需要が不確実である（確率的に変動している）ことが一つの大きな原因と考えられる。そこで、著者らは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⁹⁾¹⁰⁾。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¹¹⁾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OD交通量を確率的な交通量として配分するものである¹²⁾。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となる。

本研究ではこのモデルを拡張し、実用的に用いることが可能な、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する。そして、提案した均衡モデルを金沢都市圏ネットワークに実際に適用する。このようなモデルを利用することによって、公共交通を含んだ交通ネットワークにおいて、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となる。

2. 交通量の分布

本研究では、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。この考え方は、以前著者らが提案した確率ネットワーク均衡モデル⁹⁾¹⁰⁾に基づくものである。このような配分を実際のネットワークに適用する場合、一つの問題が生じる。現在のところ、確定的なOD交通量のデータは各種調査結果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。しかし、OD交通量の分散に関してはデータを得ることが極めて困難である。そこで、著者らが提案した確率ネットワーク均衡モデル⁹⁾¹⁰⁾では、以下に概説するように、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置く¹³⁾ことによって確率的な経路交通量及びOD交通量を与えており、本研究のモデルも同じ考え方に従うものとする。

ODペア rs 間におけるOD交通量を確率変数 Q^s とし、

その平均と分散をそれぞれ $E[Q^{rs}]$, $\text{Var}[Q^{rs}]$ とする. ここで, OD 交通量 Q^{rs} の分散 $\text{Var}[Q^{rs}]$ 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. ただし, η は正のパラメータである. なお, 分散 $\text{Var}[Q^{rs}]$ を $\eta E[Q^{rs}]$ より複雑な式に仮定することも可能であり, そのように仮定しても以下, 同様なモデル化が可能であるが, 本稿では単純化のため上のように仮定する.

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 $\eta \mu_k^{rs}$ 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.

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

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, $M[\mu_k^{rs}, \eta \mu_k^{rs}]$ は平均 μ_k^{rs} , 分散 $\eta \mu_k^{rs}$ を持つ正規分布を表す.

このような仮定をおくことによって, OD 交通量と経路交通量の間には, 次式に示すような (確率変数としての) フロー保存則が成立する.

$$Q^{rs} = \sum_{k \in K^{rs}} F_k^{rs} \quad \forall r \quad \forall s \quad (2)$$

$$E[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs} \quad \text{Var}[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} (\sigma_k^{rs})^2 \quad \forall r \quad \forall s \quad (3)$$

上で述べたように経路交通量は独立と仮定したが, リンク間で, 特に隣接するリンク間では同一の経路交通量が流れることがあるため, 本来ならばリンク交通量は独立ではないが, 実際のネットワークへの適用上, 計算量の削減及びモデルの簡便性などを考え, ここで各リンク交通量は独立であると仮定する. 複雑な計算などを厭わない場合はリンク及び経路交通量の独立性を仮定しないことも可能である¹²⁾. このとき, 独立な正規変数の和は正規変数になるため, 式(4)の通り, リンク a の交通量の確率変数 X_a は正規分布に従う (独立な) 経路交通量 F_k^{rs} の和となり, それは式(5)に示す正規分布となる.

$$X_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \quad (4)$$

$$X_a \sim M \left[\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs}, \eta \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs} \right] \quad (5)$$

ここで, $\delta_{a,k}^{rs}$ は OD ペア rs 間第 k 経路がリンク a を含むとき 1 であり, そうでないときは 0 である.

3. 旅行時間と一般化費用

(1) 自動車の旅行時間

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³⁾. したがって, 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, それを計算するためには $E[X_a^\beta]$ が計算できれば良い. ここで, X は交通量の確率変数である. $E[X^n]$ の計算には積率母関数 $M_a(s)$ を用いることができる. 積率母関数の性質から $E[(X_a)^n]$ は $d^n M_a(s) / ds^n |_{s=0}$ として計算される¹³⁾. ゆえに期待リンク旅行時間は以下の式となる.

$$E[T_a] = t_{a0} + \alpha \cdot \frac{1}{C_a^\beta} \cdot \left. \frac{d^\beta M_a(s)}{ds^\beta} \right|_{s=0} \quad (6)$$

ただし, T_a はリンク a の (リンク) 旅行時間の確率変数である.

前節で述べたように交通量は正規分布に従うため, X_a は正規変数である. 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, $\mu_a (= \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs})$ は正規分布の平均, $\sigma_a^2 (= \eta \mu_a)$ はその分散である. ゆえに期待リンク旅行時間関数 $E[T_a]$ は μ_a の式で表される. ここで, μ_a の関数であることを明示するために $E[T_a]$ を $g_a(\mu_a)$ と表記すると, $\beta=4$ のとき g_a は次式となる.

$$g_a(\mu_a) = t_{a0} [1 + \alpha \{3(\eta \mu_a)^2 + 6\mu_a^2 (\eta \mu_a) + \mu_a^4\} / C_a^4] \quad (7)$$

経路旅行時間の期待値 $E[T_k^{rs}]$ は次式となる.

$$E[T_k^{rs}] = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} E[T_a] \quad (8)$$

ここで A はリンクの集合である.

リンク旅行時間の分散 $\text{Var}[T_a]$ は $E[(T_a)^2] - E[T_a]^2$ であり, $E[(X_a)^2]$ 及び $E[(X_a)^1]$ を用いれば計算することができる. なお, それらも積率母関数を用いて計算することができる.

また, 経路旅行時間の分散 $\text{Var}[T_k^{rs}]$ も以下の式のように計算できる.

$$\text{Var}[T_k^{rs}] = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} \text{Var}[T_a] \quad (9)$$

リンク交通量の独立性を仮定しない場合, 上式の右辺に共分散の項が付加される. しかし, その場合経路旅行時間の分散はリンク単位に分解できない. ゆえに, コストに後述する実効旅行時間を用いると計算が大変煩雑になる. そのため本研究では共分散の項を無視して考える. つまり, リンク交通量は独立と仮定している. 金沢都市圏の道路ネットワークを対象にした場合, 共分散の項を考慮した場合 (リンク交通量の独立を仮定しない場合) と共分散を考慮しない場合での旅行時間の分散の相関係数は 0.85 と比較的高く, ある程度の信頼性はあるものと推測することができるため, 実用的な適用を考えると共分散の除外はやむを得ないと判断した.

(2) 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^{3,4)}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.

よって, 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 $\text{Var}[T_a^{(bus)}]$ は以下の式で示される.

$$E[T_a^{(bus)}] = \psi E[T_a] \quad (10)$$

$$\text{Var}[T_a^{(bus)}] = \text{Var}[T_a] \quad (11)$$

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, $\psi > 1.0$ 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) 実効旅行時間

著者らが提案した確率ネットワークモデル^{9,10)}では, 期待旅行時間だけでなく, 旅行時間の分散も算出可能

である. そこで, 期待旅行時間の代わりに以下に示す実効旅行時間を用いて, 利用者の旅行時間の不確実性への態度 (リスク態度) を考慮したモデルへ拡張する. 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¹⁴⁾. このようなセイフティ・マージンが必要な場合, 利用者は出発時刻をその分早めるため, その利用者が必要としたトータルの時間が実効旅行時間である. 到着制約時刻がある場合, 到着時刻から出発時刻を引いたものが実効旅行時間に対応し, その利用者が移動に関連して消費した時間となる. 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. なお, 本研究では公共交通の経路は各 OD に対し代表的な経路 1 つのみとする.

$$V_k^{rs,c} = E[T_k^{rs,c}] + \gamma \text{Var}[T_k^{rs,c}] \quad (12)$$

$$V_{rs}^{tran} = E[T_{rs}^{tran}] + \gamma \text{Var}[T_{rs}^{tran}] \quad (13)$$

$V_k^{rs,c}$: 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

$E[T_k^{rs,c}]$: 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

$\text{Var}[T_k^{rs,c}]$: 自動車の旅行時間の分散

$\text{Var}[T_{rs}^{tran}]$: 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

($\gamma > 0$ 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)

なお, 通常実効旅行時間には旅行時間のばらつきとして標準偏差が用いられる¹⁴⁾が, 本モデルでは計算の簡略化のため分散を用いる.

(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, 本研究では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. 通常用いられる一般化費用は旅行時間と運賃だけのものであるが, 本研究では実効旅行時間を用いるため, 通常用いられる一般化費用に加えて旅行時間の分散 (セイフティ・マージン) に関するものが含まれている. これは到着遅れを回避するために早めた出発時刻と解釈することが可能である.

本研究では, 交通量や旅行時間が確率変動する状況での配分を行うが, 利用者は, 旅行時間のばらつきの情報を含んだこの一般化費用という確定値に基づいて, 交通

機関選択及び経路選択を行うものとする。

実効旅行時間以外に経路一般化費用に含まれるものとして、自動車交通では自動車の維持費などとして説明できる定数項、公共交通ではバスの運賃、待ち時間、アクセス・イグレス時間を考える。

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。

$$c_k^{rs,c} = \tau V_k^{rs,c} + \xi \quad (14)$$

$$c_{rs}^{tran} = \tau(V_{rs}^{tran} + w_{rs} + l_{rs}) + m_{rs} \quad (15)$$

$c_k^{rs,c}$: 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)

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)

4. モデルの定式化

(1) 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。この考え方は、河上ら³⁾⁴⁾のモデルと同様である。

実際には、自動車利用者の中には公共交通との手段選択を行わない業務車の利用者も存在しているが、本研究ではモデルの複雑化を避け、全ての自動車利用者が手段選択を行うと仮定する。また、公共交通に関しては、その容量は十分にありと仮定し、公共交通の車両内の混雑などは考慮しない。

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。

$$P_{rs}^c = \frac{1}{1 + \exp\{-\theta(c_{rs}^{tran} - \lambda_{rs}^c)\}} \quad \forall r \quad \forall s \quad (16)$$

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

θ : (正の) パラメータ

なお、本研究では、バスと鉄道は同じ公共交通として一括りとして扱い、公共交通ネットワークの中にバスリンクと鉄道 (軌道系公共交通) リンクが混在している。また、公共交通経路は各 OD に対し代表的な経路 1 経路のみとしている。そのため、式(16)は、各 OD に対し公共交通の代表経路と自動車の (最小一般化費用) 経路のうちどちらかを選ぶ単純なモデルである。ただし、これを拡張し、同一 OD 内における複数の公共交通経路の設定や、バスと鉄道を区別したモデルや端末交通手段の選択も考慮したモデルへの発展も可能である。

(2) 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。

ワードロップ均衡の基本的な考え方¹⁾は、利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいかせいぜい等しいというものである。よって、経路選択行動はこのワードロップ均衡を拡張した考え方に従うものとする。具体的には、期待経路交通量が 0 より大きい経路を利用される経路とし、利用される経路の一般化費用は皆等しく、利用されない経路 (期待経路交通量が 0 の経路) のそれよりも小さいかせいぜい等しいとする。ただし、この一般化費用は既に述べたように、旅行時間のばらつき (セーフティ・マージン) も考慮したものであり、一般的な確定的ワードロップ均衡とその点が異なる。

よって、自動車利用に関する経路選択行動については、以下の式で表される利用者均衡が満たされている。

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

$$c_k^{rs,c} \geq \lambda_{rs}^c, \mu_k^{rs,c} \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (18)$$

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

ここで、

q_{rs}^c : ODペア rs 間の自動車分担交通量の平均値

$\mu_k^{rs,c}$: OD ペア rs 間第 k 経路における自動車交通量の平均値
 $c_k^{rs,c}$: OD ペア rs 間第 k 経路における自動車の経路一般化費用

なお、公共交通に関しては、既に述べたように各 OD 間では 1 つの代表的経路のみとしているため、公共交通経路間における経路選択は発生しない。

(3) 均衡概念

前節及び前々節から、本研究におけるネットワーク均衡の均衡概念をまとめると以下の通りとなる。

交通手段選択のレベルにおいては、一般化費用に加え、(通勤手当や駐車場などの非観測の) 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従うものとする。自動車利用における経路選択のレベルにおいては最小一般化費用経路選択が行われる。したがって、交通機関分担交通量の配分はロジットモデルに従い、自動車経路交通量配分は(拡張した)ワードロップ均衡条件(期待経路交通量が 0 より大きい経路を利用される経路とし、利用される経路の一般化費用は皆等しく、利用されない経路のそれよりも小さいかせいぜい等しい)が成立するのが本均衡配分である。

自分のみが一方的に交通手段変更をすることによって、旅行時間がばらつくことに対するセイフティ・マージンや公共交通の料金・自動車維持等の固定費用を含んだ一般化費用に(通勤手当や駐車場の有無などの非観測の)個人的要因を付加した効用を改善することができないとともに、自動車利用者については、一方的に(自動車の)経路を変更することによって一般化費用を減少させることができない状況が本均衡と言えよう。なお、公共交通では経路選択はなく、一つの代表経路のみを選択するものとなっている。

以上をまとめると、本研究での均衡は、以下の等式・不等式を満たす期待自動車分担交通量・期待自動車経路交通量・期待公共交通分担交通量を求めることになる。なお、既に記載されている式にはもともと式番号を記載している。

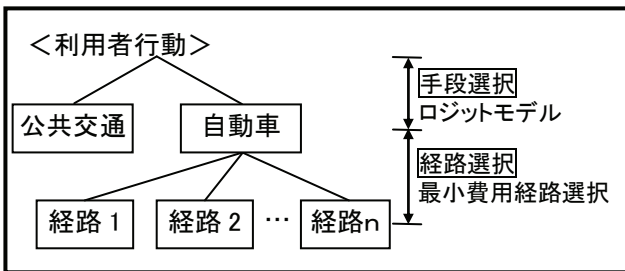


図-1 本研究のネットワーク均衡における利用者行動

$$q_{rs}^c = \frac{q_{rs}}{1 + \exp\{-\theta(c_{rs}^{tran} - \lambda_{rs}^c)\}} \quad \forall r, \forall s \quad (20)$$

$$q_{rs} = q_{rs}^c + q_{rs}^{tran} \quad \forall r, \forall s \quad (21)$$

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

$$c_k^{rs,c} \geq \lambda_{rs}^c \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (22)$$

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

$$q_{rs}^c, q_{rs}^{tran} \geq 0 \quad \forall r, \forall s \quad (23)$$

$$\mu_k^{rs,c} \geq 0 \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (24)$$

$$c_k^{rs,c} = \tau V_k^{rs,c} + \xi \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (14)$$

$$c_{rs}^{tran} = \tau(V_{rs}^{tran} + w_{rs} + t_{rs}) + m_{rs} \quad \forall r, \forall s \quad (15)$$

$$V_k^{rs,c} = E[T_k^{rs}] + \gamma \text{Var}[T_k^{rs}] \quad \forall r, \forall s, \forall k \quad (12)$$

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

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

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

ここで、

q_{rs} : OD ペア rs 間の OD 交通量の平均値

q_{rs}^{tran} : OD ペア rs 間の公共交通分担交通量の平均値

$h_a(\mu_a)$: リンク a の旅行時間分散を算出する関数

期待分担交通量は公共交通及び自動車の一般化費用から式(20)及び(21)により算出される。ただし、式(23)の通り非負である。また、自動車の期待経路交通量は式(17)及び(22)、そして、非負条件の式(24)により求められる。なお、公共交通については代表 1 経路のみとし、経路選択を考えない。期待分担交通量及び自動車の期待分担交通量は、式(14)もしくは(15)で表される一般化費用により求まるが、この一般化費用は実効旅行時間が含まれており、この実効旅行時間は式(12)及び(25)で表されているように、旅行時間の平均のみならず分散も考慮され、ばらつきに対するセイフティ・マージンを含んでいる。このような一般化費用は式(26)及び(27)で表したように、リンクの平均交通量により求めることができるものとなっている。つまり、旅行時間関数で表される混雑を考慮したものとなっている。以上のように、本均衡は旅行時間の不確実

性を考慮したものであるものの、リンクの平均交通量のみを用い、分散を用いる必要がないため、通常の（確定的な）統合均衡配分と同様な取り扱いが可能となっている。

本均衡は以下の変分不等式として定式化することができる（証明は付録参照）。

$$\begin{aligned} & \text{Find } (\boldsymbol{\mu}^*, \mathbf{q}^*) \in \Omega \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} c_{rs,k}^c (\mu_{rs,k}^c - \mu_{rs,k}^{c*}) + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} c_{rs}^{tran*} (q_{rs}^{tran} - q_{rs}^{tran*}) \\ & + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \ln q_{rs}^c (q_{rs}^c - q_{rs}^{c*}) \\ & + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \ln q_{rs}^{tran*} (q_{rs}^{tran} - q_{rs}^{tran*}) \geq 0 \\ & \forall (\boldsymbol{\mu}, \mathbf{q}) \in \Omega \quad (28) \end{aligned}$$

ここで

Ω : 期待経路交通量・期待分担交通量パターンの実行可能集合 ($\boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}, \mathbf{q}^c \geq \mathbf{0}, \mathbf{q}^{tran} \geq \mathbf{0}, \mathbf{q}^c = \Gamma \boldsymbol{\mu}, \mathbf{q}^{od} = \mathbf{q}^c + \mathbf{q}^{tran}$)

$\boldsymbol{\mu}$: 自動車の経路交通量の平均値のベクトル（その要素は $\mu_{rs,k}^c$ ）

$\boldsymbol{\mu}^*$: 均衡解の自動車の交通量の平均値のベクトル

\mathbf{q}^c : 自動車分担交通量の平均値のベクトル（その要素は $q_{rs}^c = P_{rs}^c q_{rs}$ ）

\mathbf{q}^{tran} : 公共交通分担交通量の平均値のベクトル（その要素は $q_{rs}^{tran} = (1 - P_{rs}^c) q_{rs}$ ）

\mathbf{q}^{od} : OD交通量の平均値のベクトル（その要素は q_{rs} ）

\mathbf{q} : 期待分担交通量のベクトル ($\mathbf{q}^c, \mathbf{q}^{tran}$)^T

\mathbf{q}^* : 均衡解の期待分担交通量のベクトル

Γ : OD経路接続行列

^T : 行列やベクトルの転置

$\mathbf{0}$: 零ベクトル

ここで、自動車と公共交通の一般化費用関数が対称ならば、上式は数理最適化問題として定式化することが可能である。しかし、本稿では、公共交通のうちバスのリンクコストについては式(10)で示した関係が成立している。すなわち、自動車と公共交通双方のリンクコスト関数の相互干渉が非対称となる。よって、数理最適化問題としては定式化できず、上式のような変分不等式問題によって定式化している。また、このコスト関数の非対称性のために、必ずしも解が一意であるとは限らないと考えられる。

(4) 緩和法を用いた解法

本モデルでは、式(28)のように変分不等式により定式化したため、緩和法を用いることによって配分を行う。

緩和法についての詳細は土木学会¹⁵⁾を参照されたい。

緩和法のアルゴリズムは以下の通りとなる¹⁵⁾。

ステップ1: 初期解をつくる

初期実行可能解 $q_{rs}^{od(1)}, q_{rs}^{tran(1)}, \mu_k^{ns(1)}$ の設定を行う。

$q_{rs}^{od(1)}$ は各 OD の全 OD 交通量の平均値、 $\mu_k^{ns(1)}$ は自動車ネットワークに全 OD を配分して得られた均衡解から導いた経路交通量の平均値を用いる。 $q_{rs}^{tran(1)}$ は 0 とする。

ステップ2: 緩和問題を解く

（公共交通の一般化費用を前回のステップで得られた一般化費用として固定した）以下の緩和問題を解く。

$$\begin{aligned} \min_{(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{q}) \in \Omega} Z = & \tau \sum_{a \in A^c} \int_0^{\mu_a} V_a(w) dw + \xi \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \mu_{rs,k}^c \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^{tran} c_{rs}^{tran(m)} + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^c \ln q_{rs}^c \\ & + \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^{tran} \ln q_{rs}^{tran} \quad (29) \end{aligned}$$

ここで、 V_a はリンク a の実効旅行時間、 $c_{rs}^{tran(m)}$ が前回のステップで得られた $\boldsymbol{\mu}^{(m)}$ 及び $\mathbf{q}^{(m)}$ を用いて計算した公共交通の一般化費用である。上記の問題を解き、 $\boldsymbol{\mu}^{(m+1)} = \boldsymbol{\mu}^{(m)}$ 、 $\mathbf{q}^{(m+1)} = \mathbf{q}^{(m)}$ とする。

ステップ3: 収束判定

未収束ならステップ2へ戻る。

ステップ2の緩和問題を解くアルゴリズムは以下のようになる。

ステップ2-1: 緩和問題の初期解

式(29)で示した緩和問題を解くための初期解を設定する。

$$\boldsymbol{\mu}^{(m,1)} = \boldsymbol{\mu}^{(m)}$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu}^{(m,1)}$ は緩和問題の初期解、 $\boldsymbol{\mu}^{(m)}$ は $m-1$ 回目の緩和問題の解である ($m-1$ 回目の最後に $\boldsymbol{\mu}^{(m)} = \boldsymbol{\mu}^{(m-1)}$ と更新しているため、 $\boldsymbol{\mu}^{(m)}$ が $m-1$ 回目の緩和問題の解)。

前回の計算ステップにおける平均交通量ベクトルを用いて $c_k^{ns(m,1)}$ を計算する。なお、公共交通の費用に関しては、緩和問題内では固定値である $c_{rs}^{tran(m)}$ を用いる。

ステップ2-2: 一般化費用の計算

前回の計算ステップ($n-1$ 回)における平均交通量ベクトルを用いて、 $c_k^{rs(m,n)}$ を計算する。

ステップ 2-3 : 降下方向の探索

- (a) 自動車の各 OD ペア間におけるコスト最小経路を探索し、最小コスト $\lambda_{rs}^{c(m,n)}$ を求める。
- (b) 次のルールにより、OD 交通量の平均値の補助変数 $v_{rs}^{(m,n)}$, $v_{rs}^{c(m,n)}$ を求める。

$$v_{rs}^{(m,n)} = E[Q^{rs}] \frac{1}{1 + \exp[-\theta(\lambda_{rs}^{c(m,n)} - c_{rs}^{tran(m)})]}$$

$$v_{rs}^{c(m,n)} = E[Q^{rs}] - v_{rs}^{(m,n)}$$

- (c) $\{v_{rs}^{(m,n)}\}$ を自動車ネットワークの最短経路へ流し、リンク交通量の平均値の降下方向を求めるための補助変数 $y_a^{(m,n)}$ を得る。

ステップ 2-4 : 1次元探索

$$\mu^{(m,n+1)} = \mu^{(m,n)} + \zeta(y^{(m,n)} - \mu^{(m,n)})$$

$$q^{c(m,n+1)} = q^{c(m,n)} + \zeta(v^{(m,n)} - q^{c(m,n)})$$

$$q^{trn(m,n+1)} = q^{trn(m,n)} + \zeta(v^{trn(m,n)} - q^{trn(m,n)})$$

とおく。ここで、 $\mu^{(m,n)}$, $q^{c(m,n)}$, $q^{trn(m,n)}$ はそれぞれ m 回目の緩和問題を解くための計算ステップ n におけるリンク交通量、自動車の OD 交通量、公共交通の OD 交通量の平均のベクトルである。 $y^{(m,n)}$, $v^{(m,n)}$, $v^{trn(m,n)}$ はそれぞれの補助変数のベクトルであり、目的関数式 Z を最小化するための降下方向ベクトルは、それぞれ $\{y^{(m,n)} - \mu^{(m,n)}\}$, $\{v^{(m,n)} - q^{c(m,n)}\}$, $\{v^{trn(m,n)} - q^{trn(m,n)}\}$ となる。第 n 回目のステップの計算内では $\mu^{(m,n)}$, $q^{c(m,n)}$, $q^{trn(m,n)}$, $y^{(m,n)}$, $v^{(m,n)}$, $v^{trn(m,n)}$ は定数とみなすため、目的関数式 Z にそれらを代入すると、 Z は ζ の式で表せる。 ζ の 1次元探索によって $Z(\zeta)$ を最小にするステップサイズ ζ を求め、 $\mu^{(m,n+1)}$, $q^{c(m,n+1)}$, $q^{trn(m,n+1)}$ を得る。

ステップ 2-5 : 収束判定

未収束ならば 2-2 へ戻る。収束していれば、次へ進む。

5. 単純なネットワークへの適用

図-2 に示す 1つの OD ペアを道路と鉄道で結んだ単純なネットワークに、上述の確率ネットワーク均衡を適用した。リンクパフォーマンス関数には通常の BPR 関数 ($\alpha=0.15$, $\beta=4$) を用いる。道路リンクの自由走行時間は 20 分、交通容量は 1000 台、鉄道の旅行時間は 30 分で、常に定時で運行することにする。自動車は道路リンクの交通量によって旅行時間が変化するため旅行時間の

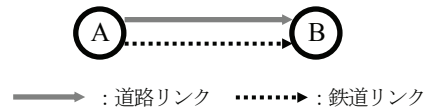


図-2 単純なネットワーク

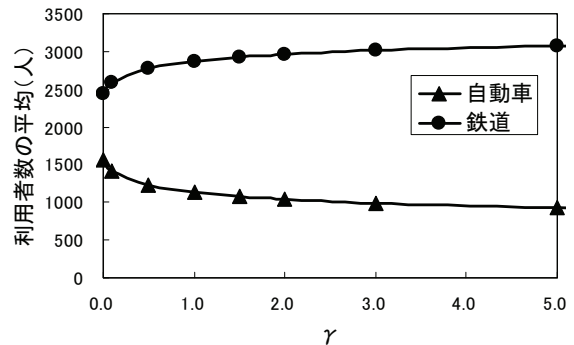


図-3 γ とリンク交通量の平均の関係

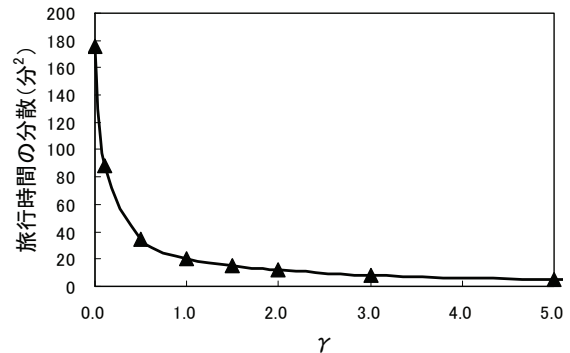


図-4 γ と道路リンクの旅行時間の分散の関係

不確実性が大きい。一方、鉄道は定時で走行するので旅行時間の不確実性は無い。OD 交通量は平均 4000 人、分散 168000 人² (標準偏差 409.9 人) の正規分布に従うとする。

その他の条件設定は以下に示す通りである。

- 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。
- 鉄道の車内において混雑は発生しない。
- 鉄道の運賃は 200 (円) とする。
- 鉄道の待ち時間は 0 (分) とする。
- ロジットモデルのパラメータ $\theta=0.002$ とする。

図-3 は、式(12)及び(13)でのリスク態度 γ を変化させた場合におけるそれぞれのリンクの交通量の平均値を示したものである。 γ が大きくなる、つまりリスク回避の傾向が大きくなるほど、不確実性の大きい自動車を選択する利用者が減少し、不確実性の小さい鉄道を選択する利用者が増えている。この結果から、旅行時間の不確実性が手段分担に影響を与えている状況を再現できていることが分かる。

図-4 は、 γ を変化させた場合の道路リンクの旅行時間

の分散である。γが大きくなるほど利用者が自動車から鉄道にシフトし、自動車を選択する利用者が減少するため、道路リンクの交通量が減少し、それに伴い道路リンクの旅行時間の分散（不確実性）が減少することが分かる。

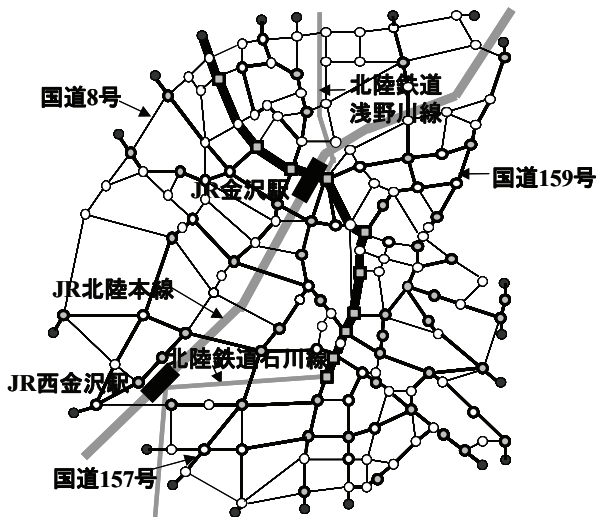
6. 金沢都市圏の公共交通を含むネットワークへの適用及び軌道系公共交通の導入を例とした応用

(1) 概要

本研究の均衡モデルを金沢都市圏の現況の公共交通を含むネットワークに適用し、モデルの現況再現性を検証する。続いて、本研究のモデルの応用として、金沢都心軸に LRT などの軌道系公共交通が導入された場合のネットワークに適用し、導入による道路交通等への影響評価の試算結果を示す。

OD 交通量（自動車利用の OD 交通量と公共交通としてのバス利用の OD 交通量）の平均は、平成 7 年の第 3 回パーソントリップ調査における平日の朝 7 時～8 時（1 時間分）のデータを基に設定した。OD ペア数は 1369 ペアである。OD 交通量の分散はリンク交通量の実測値からパラメータ η を推定することによって設定するが、金沢市内の交通量の実測値から η=42.0 とした⁵⁾。

また、旅行時間関数（BPR 関数）での自由走行時間



<凡例>

- : セントロイド ●: エリア外との連結ノード
- : バス停 —: バス路線
- : 軌道系公共交通の駅 ■: 軌道系公共交通の路線

図-5 金沢都市圏の公共交通を含むネットワーク
(軌道系公共交通が導入された場合)

t_{a0} 及び交通容量 C_a は、制限速度、車線数や車線幅をもとに設定した。また、本稿では BPR 関数のパラメータ設定に焦点を当てていないため、BPR 関数のパラメータは標準値を用いた。つまり、旅行時間関数は、 $t_a = t_{a0} [1 + 0.15(x/C_a)^4]$ である。旅行時間関数のパラメータを最適値に設定することで、後述のモデル値と観測値との相関係数はより高くなると考えられる。

緩和法の収束基準は、経路期待交通量の最大変化率 $\epsilon < 0.01$ とした⁶⁾。

その他の条件設定は以下に示す通りである。

- ・ 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。
- ・ 公共交通はバスと軌道系公共交通のみとし、JR 線、私鉄（北陸鉄道）から軌道系公共交通への転換は考えない。
- ・ 公共交通の車内において混雑は発生しない（公共交通の容量は十分にある）。
- ・ バスの期待旅行時間を定めるパラメータ ψ は 1.5 とする³⁾。
- ・ 軌道系公共交通は表定速度 25km/h で走行すると仮定し、旅行時間を定数で与える。
- ・ バスの運行間隔は 10 分、軌道系公共交通の運行間隔は 5 分とし、待ち時間は運行間隔の 1/2 とする。
- ・ 公共交通のアクセス・イグレスは徒歩とし、セントロイドとバス停間の距離などを考慮した所要時間を定数で与える。
- ・ バス同士、バスから軌道系公共交通、軌道系公共交通からバスへの乗り継ぎが生じる場合は、それぞれの乗り継ぎは 1 回のみ可とした。

(2) モデルの現況再現性

まず、現況のネットワークにおいて、実際の分担交通量とモデルの適用結果の期待分担交通量を比較することにより、モデルの現況再現性を検証した。

表-1 は、実際の分担交通量と適用結果の期待分担交通量の相関係数である。リスク態度パラメータは $\gamma=1.0$ と設定した⁵⁾。ロジットモデルのパラメータ θ と自動車の一般化費用の定数項 ζ については実際の分担交通量か

表-1 実際の分担交通量と適用結果の期待分担交通量の相関係数 ($\theta=0.003, \zeta=200, \gamma=1.0$)

	自動車	公共交通	全体
相関係数	0.949	0.409	0.923

※実際の分担交通量：パーソントリップ調査による自動車、公共交通それぞれの OD 交通量

※適用結果の期待分担交通量：適用結果の OD ごとの自動車、公共交通の期待交通量

ら推定した。具体的には、 θ と ξ の値を変化させて数パターンでの適用を行い、実際の分担交通量と適用結果の期待分担交通量の相関係数が高いパラメータを採用することとした。その結果、本モデルにおいて再現性がやや低い公共交通について再現性が最も高かった $\theta=0.003$, $\xi=200$ を採用した。

表-1 を見ると、ある程度現況を再現できていることが分かる。自動車の分担交通量の再現性は高い。しかし、公共交通の分担交通量の再現性がやや低い状況である⁹⁾。

(3) 軌道系公共交通が導入された場合のネットワークへの適用

次に、本研究のモデルを用いた応用の一例として、金沢都心軸に軌道系公共交通が導入された場合のネットワークにモデルを適用する。そして、軌道系公共交通の導入前と導入後の計算結果を比較することにより、導入効果の試算結果を示す。

表-2 は、軌道系公共交通の導入前後における分担交通量の変化として、交通量の合計及び自動車、公共交通それぞれにおける利用経路の期待経路交通量の平均を比較したものである。なお、期待経路交通量の平均とは全経路の期待経路交通量の和を経路数で除したものであり、期待経路交通量は中山ら⁹⁾の簡易方法を用いて計算した。表-3 は、期待旅行時間や一般化費用の変化、表-4 は、旅行時間の分散や実効旅行時間の変化を示したものである。

表-2 を見ると、軌道系公共交通を導入したことによって公共交通の利用者が増加し、自動車の利用者が減少している。公共交通のサービスレベルが向上することによって、利用者が自動車から公共交通にシフトする状況が表現されている。

軌道系公共交通を導入することによって、公共交通（軌道系公共交通）利用では、渋滞によって旅行時間が大きかった中心市街地へ旅行時間が大幅に減少することになった。表-3 を見ると、軌道系公共交通を導入したことによって、公共交通のみならず自動車の期待旅行時間、一般化費用がともに減少している。バスより旅行時間が短い軌道系公共交通への転換により、自動車利用者が減少し、交通渋滞が緩和され、自動車の期待旅行時間も減少し、全体的に利用者の旅行時間が短縮され、費用負担が低減されていることが分かる。

本研究のモデルでは旅行時間の分散を算出できるので、旅行時間の期待値的な評価だけでなく、その安定性（時間信頼性）も評価可能である。表-4 を見ると、軌道系公共交通を導入したことによって、自動車、公共交通双方の旅行時間の分散、実効旅行時間が減少しており、軌道系公共交通の導入によって単に旅行時間の短縮、費

表-2 軌道系公共交通の導入前後における期待交通量の変化 ($\theta=0.003$, $\xi=200$, $\gamma=1.0$)

	期待分担交通量 (10 ³ 人)		経路期待交通量の 平均(人) [*]	
	自動車	公共交通	自動車	公共交通
軌道系公共交通導入前	48.0	8.3	14.52	6.96
軌道系公共交通導入後	42.5	13.9	12.88	11.56
導入前後の差	-5.5	5.5	-1.64	4.59

^{*}期待経路交通量の平均
= (全経路の期待経路交通量の和) / (経路数)

表-3 軌道系公共交通の導入前後における期待旅行時間、ならびに一般化費用の変化($\theta=0.003$, $\xi=200$, $\gamma=1.0$)

	経路期待旅行時間の 平均(分)		経路一般化費用の 平均(円)	
	自動車	公共交通	自動車	公共交通
軌道系公共交通導入前	15.37	23.54	1184.77	1813.43
軌道系公共交通導入後	12.58	14.81	880.38	1132.01
導入前後の差	-2.78	-8.73	-304.39	-681.42

表-4 軌道系公共交通の導入前後における旅行時間の分散、ならびに実効旅行時間の変化($\theta=0.003$, $\xi=200$, $\gamma=1.0$)

	経路旅行時間の分散 の平均(分 ²)		経路実効旅行時間の 平均	
	自動車	公共交通	自動車	公共交通
軌道系公共交通導入前	9.25	5.28	24.62	28.83
軌道系公共交通導入後	4.43	2.04	17.01	16.85
導入前後の差	-4.83	-3.25	-7.61	-11.98

用負担の低減が望めるだけでなく、旅行時間の不確実性の減少、遅刻などのリスクを考慮した実効旅行時間の圧縮も見込めることが分かる。こうした旅行時間の不確実性に関する評価も可能になった点が本研究の大きな特色である。

公共交通の導入政策評価などに対して旅行時間の不確実性を考慮することの意義は少なくなく、今回の適用によって、今後の公共交通の導入政策評価などに対して本研究の考え方を応用していくことが一つの重要なアプローチであることを示せたと考える。

ただし、今回の適用は軌道系公共交通の導入効果検討としては簡易的な内容であり、軌道系公共交通の導入効果分析を目的としているというより、むしろ旅行時間の不確実性を考慮した分担統合モデルの提案及び実ネットワークへの適用を目的としている。実際に軌道系公共交通の導入効果を分析していくにあたっては、軌道系公共交通の路線選定やサービス水準、誘発需要などの検討、さらに費用効果分析などについて、より詳細な検討が必要となる。

7. おわりに

本研究では、著者ら⁹⁾¹⁰⁾が提案した、OD 交通量が正規分布であり交通量を正規分布とした旅行時間の不確実性を考慮する交通ネットワーク均衡モデルを分担・配分

統合モデルに拡張し、定式化を行った。その上で、単純なネットワーク及び金沢都市圏の公共交通を含むネットワークに本研究のモデルを適用した。その結果、公共交通の導入政策評価などに対する本研究のモデルの重要性を示した。本研究のモデルを利用することによって、LRTなどの軌道系公共交通の導入をはじめ、他にもバスレーンの拡大、バス路線網の再編、PTPS、パークアンドライドなどの政策評価において、より精緻な評価が可能になると期待できる。

今後の課題を整理すると以下の通りとなる。

- a) 本稿のモデルの特性に関する項目
 - ・ 本研究で仮定した OD 交通量の確率分布の検証（現実の OD 交通量の変動について、より詳細な把握が必要）。
 - ・ 計算結果の旅行時間の不確実性の検証（現実のネットワークでの不確実性との比較が必要）。
- b) 実際のネットワークへの適用に関する項目
 - ・ 公共交通の分担交通量の再現性向上など、推計の精度向上（モデルの構築において単純な仮定をおいた部分の精緻化を図ることが必要）。
 - ・ より現実を詳細に反映した計算設定（軌道系公共交通の利用意識や転換行動の詳細な分析や通過交通など、軌道系公共交通へ転換しない自動車交通量の捕捉を行い、軌道系公共交通導入効果をより現実的に評価することが必要）。

今後は上記の課題について取り組むことによって、より有用性の高いモデルを構築する予定である。

謝辞：本稿の査読過程において、複数の査読者及び編集委員から貴重な助言・コメントを頂いた。また、本研究は、科学研究費補助金 18760387（若手研究 B, 研究代表・中山晶一郎）の援助により行われているものである。ここに記し、感謝の意を表します。

注

- [1] 確率的利用者均衡は、配分された交通量や経路・リンク旅行時間は確定値となる。一方、著者らが以前提案した確率ネットワーク均衡モデル⁹⁾¹⁰⁾では、配分された交通量や経路・リンク旅行時間は、ともに確率的な値となる。
- [2] このような仮定を置くことによって、確率変数としての経路交通量、OD 交通量やリンク旅行時間、経路旅行時間を期待リンク交通量とパラメータ η を用いて表現することが可能となる利点がある。

- [3] 国道 8 号金沢市二ツ屋における、平成 12 年 4 月から平成 14 年 3 月、平日 7~8 時の交通量データ(トラフィックカウンターによる常時観測データ)を基に、 $\eta=42.0$ とした。
- [4] この収束条件を適用した場合、収束条件を満たすまでの計算回数は、現況のネットワークでは 49 回、LRT が導入されたネットワークでは 132 回であった。
- [5] 対象時間帯が朝の通勤時間帯を設定しているため、多少リスク回避的な経路選択が行われるのではないかと想定するとともに、参考文献¹⁶⁾¹⁷⁾の結果を考慮し、今回は $\gamma=1.0$ と設定し、計算を行った。ただし、パラメータ γ の適正な設定については検討が必要であり、これは今後の課題と考えている。
- [6] 公共交通の分担利用者数の再現性がやや低くなった原因として、本研究における公共交通に関する条件設定(運行間隔)や公共交通経路の設定などが必ずしも現実の状況と合致していないことも考えられる。今後、本研究のモデルを実用的に用いていくためには、パラメータの設定方法の工夫や公共交通に関する設定の精緻化を実施することによってモデルの再現性を向上することが重要であり、これは今後の大きな課題と考えている。

付録 式(28)の変分不等式が本研究における均衡問題と等価であることの証明

式(16)~(19)で示される利用者行動の均衡問題(Network Equilibrium Problem: NEP)は以下の等式・不等式を満たす μ, q を求めることになる。

$$\mu_{rs,k}^c (c_{rs,k}^c - \lambda_{rs}^c) = 0 \quad \forall r \forall s \forall k \quad (30)$$

$$c_{rs,k}^c - \lambda_{rs}^c \geq 0 \quad \forall r \forall s \forall k \quad (31)$$

$$c_{rs}^{tran} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran} - \kappa_{rs} = 0 \quad \forall r \forall s \quad (32)$$

$$\lambda_{rs}^c + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^c - \kappa_{rs} = 0 \quad \forall r \forall s \quad (33)$$

$$q_{rs} = q_{rs}^c + q_{rs}^{tran}, \quad \forall r \forall s \quad (34)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c = q_{rs}^c \quad \forall r \forall s \quad (35)$$

$$q \geq 0 \quad (36)$$

$$\mu \geq 0 \quad (37)$$

ここで、 κ_{rs} は期待最小一般化費用に関する乗数で、

$$\kappa_{rs} = \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^c - \frac{1}{\theta} \ln (\exp(-\theta \lambda_{rs}^c) + \exp(-\theta c_{rs}^{tran})) \text{ となる。}$$

なお、ここでは、分担のロジットモデルの式(16)については式(32)、(33)及び $q_{rs} = q_{rs}^c + q_{rs}^{tran}$ 、各変数の非負条

件により表すことができること¹⁵⁾を用いている。

式(28)の変分不等式 (VIP) が上述の均衡問題 (NEP) と等価であることを示すためには, 「NEP⇒VIP」及び「VIP⇒NEP」を示せば良い。

「NEP⇒VIP」は以下の通り示すことができる。

まず, 式(30)~(37)の均衡問題は, 各変数は非負である条件下での以下の式を満たす相補性問題として表すことができる。

$$q_{rs}^c \left(\lambda_{rs}^c + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^c - \kappa_{rs} \right) = 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (38)$$

$$\lambda_{rs}^c + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^c - \kappa_{rs} \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (39)$$

$$q_{rs}^{tran} \left(c_{rs}^{tran} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran} - \kappa_{rs} \right) = 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (40)$$

$$c_{rs}^{tran} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran} - \kappa_{rs} \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (41)$$

$$\mu_{rs,k}^c (c_{rs,k}^c - \lambda_{rs}^c) = 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (42)$$

$$c_{rs,k}^c - \lambda_{rs}^c \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (43)$$

$$\lambda_{rs}^c \left(\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c - q_{rs}^c \right) = 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (44)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c - q_{rs}^c \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (45)$$

$$\kappa_{rs} (q_{rs}^c + q_{rs}^{tran} - q_{rs}) = 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (46)$$

$$q_{rs}^c + q_{rs}^{tran} - q_{rs} \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad (47)$$

また, 上式は以下の変分不等式と等価となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\mathbf{q}^c, \mathbf{q}^{tran}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}^c, \boldsymbol{\kappa})^T \\ F(\mathbf{x}^*) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) &\geq 0 \\ F(\mathbf{x}) &= \left(\lambda^c + \frac{1}{\theta} \ln \mathbf{q}^c - \boldsymbol{\kappa}, \mathbf{c}^{tran} + \frac{1}{\theta} \ln \mathbf{q}^{tran} - \boldsymbol{\kappa}, \right. \\ &\quad \left. \mathbf{c}^c - \boldsymbol{\lambda}^c, \sum_{k \in K_{rs}} \boldsymbol{\mu}^c - \mathbf{q}^c, \mathbf{q}^c + \mathbf{q}^{tran} - \mathbf{q} \right) \end{aligned} \quad (48)$$

ここで

$\boldsymbol{\lambda}^c$: 自動車利用者の一般化費用の最小値のベクトル

(その要素は λ_{rs}^c)

$\boldsymbol{\kappa}$: 期待最小一般化費用に関するベクトル (その要素は

κ_{rs})

$\ln \mathbf{q}$: $\ln q$ を要素に持つベクトル

$\sum_{k \in K_{rs}} \boldsymbol{\mu}^c$: $\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c$ を要素に持つベクトル

ここで, 定義域を $q_{rs} = q_{rs}^c + q_{rs}^{tran}$ 及び $\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c = q_{rs}^c$ が含まれる Ω とすると, 式(48)は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} &\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (q_{rs}^{c*} - q_{rs}^c) \left(\lambda_{rs}^{c*} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c*} - \kappa_{rs}^* \right) + \\ &\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (q_{rs}^{tran*} - q_{rs}^{tran}) \left(c_{rs}^{tran*} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran*} - \kappa_{rs}^* \right) + \\ &\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} (\mu_{rs,k}^{c*} - \mu_{rs,k}^c) (c_{rs,k}^{c*} - \lambda_{rs}^{c*}) \leq 0 \end{aligned} \quad (49)$$

また, $q_{rs} = q_{rs}^c + q_{rs}^{tran}$ 及び $\sum_{k \in K_{rs}} \mu_{rs,k}^c = q_{rs}^c$ の制約により以下の式が成立する。

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (q_{rs}^{c*} - q_{rs}^c) (-\kappa_{rs}) + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (q_{rs}^{tran*} - q_{rs}^{tran}) (-\kappa_{rs}) = 0 \quad (50)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (q_{rs}^{c*} - q_{rs}^c) + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} (\mu_{rs,k}^{c*} - \mu_{rs,k}^c) (-\lambda_{rs}^c) = 0 \quad (51)$$

ここで, 式(50)及び(51)を式(49)に代入することによって, 式(28)の変分不等式を得ることができる。

次に, 「VIP⇒NEP」は背理法によって以下の通り示すことができる。

VIP を満たすが NEP を満たさない解 $(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{q})$ が存在すると仮定し, それが矛盾を導くことを示せばよい。VIP を満たすが NEP を満たさない解 $(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{q})$ が存在する状況を具体的に示すと, 以下のいずれかとなる。

- (i) 式(32), 式(33)を満たさない $q_{rs}^{c^\circ}$ 及び $q_{rs}^{tran^\circ}$ が存在 (交通手段分担の式(16)が満たされない場合)
- (ii) 式(30), 式(31)を満たさない μ_k^{rs,c° が存在 (自動車の平均経路交通量が利用者均衡とならない場合)

(i)の場合は, 以下のように証明される。

(i)は, 以下のいずれかが成立することと等しい。

$$\lambda_{rs}^{c^\circ} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^\circ} > c_{rs}^{tran^\circ} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^\circ} \quad (i-1)$$

$$\lambda_{rs}^{c^\circ} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^\circ} < c_{rs}^{tran^\circ} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^\circ} \quad (i-2)$$

(i-1)の場合をまず考える. $\tilde{q}_{rs}^{c^0} = 0$, $\tilde{q}_{rs}^{tran^0} = q_{rs}$ で, それ以外は \mathbf{q}^0 のままである $\tilde{\mathbf{q}}^0$, そして, それにあわせて, OD ペア rs に関する要素 $\tilde{\mu}_k^{rs,c^0}$ のみ μ^0 と異なり, 他の要素は μ^0 と同じである $\tilde{\mu}^0$ による解 $\tilde{\mathbf{x}}^0 = (\tilde{\mu}^0, \tilde{\mathbf{q}}^0)$ 及び $\mathbf{x}^0 = (\mu^0, \mathbf{q}^0)$ を式(28)に代入する.

$$\begin{aligned} & F(\mathbf{x}^0) \cdot (\tilde{\mathbf{x}}^0 - \mathbf{x}^0) \\ &= \sum_{k \in K_{rs}} c_k^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} - \mu_k^{rs,c^0}) + c_{rs}^{tran^0} (\tilde{q}_{rs}^{tran^0} - q_{rs}^{tran^0}) \\ &+ \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^0} (\tilde{q}_{rs}^{c^0} - q_{rs}^{c^0}) + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^0} (\tilde{q}_{rs}^{tran^0} - q_{rs}^{tran^0}) \\ &= \sum_{k \in K_{rs}} c_k^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} - \mu_k^{rs,c^0}) + q_{rs}^{c^0} \left(c_{rs}^{tran^0} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^0} - \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^0} \right) \end{aligned}$$

ここで $\sum_{k \in K_{rs}} \tilde{\mu}_k^{rs,c^0} = \tilde{q}_{rs}^{c^0} = 0$ より,

$$\sum_{k \in K_{rs}} c_k^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} - \mu_k^{rs,c^0}) = - \sum_{k \in K_{rs}} c_k^{rs,c^0} \tilde{\mu}_k^{rs,c^0} = -\lambda_{rs}^{c^0} q_{rs}^{c^0}$$

よって,

$$\begin{aligned} & F(\mathbf{x}^0) \cdot (\tilde{\mathbf{x}}^0 - \mathbf{x}^0) \\ &= -\lambda_{rs}^{c^0} q_{rs}^{c^0} + q_{rs}^{c^0} \left(c_{rs}^{tran^0} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^0} - \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^0} \right) \\ &= q_{rs}^{c^0} \left\{ c_{rs}^{tran^0} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{tran^0} - \left(\lambda_{rs}^{c^0} + \frac{1}{\theta} \ln q_{rs}^{c^0} \right) \right\} < 0 \end{aligned}$$

条件(i-1)より, 明らかに $F(\mathbf{x}^0) \cdot (\tilde{\mathbf{x}}^0 - \mathbf{x}^0) < 0$ となり, これはVIPが成立しているという仮定と矛盾する. また, (i-2)の場合も同様に, 矛盾を導くことができる.

次に, (ii)の場合は, 以下のように証明される.

$c_k^{rs,c^0} < c_l^{rs,c^0}$ となる μ_k^{rs,c^0} , $\mu_l^{rs,c^0} (>0)$ が存在すると仮定する. $\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} = \mu_k^{rs,c^0} + \mu_l^{rs,c^0}$, $\tilde{\mu}_l^{rs,c^0} = 0$ で, それ以外は $\tilde{\mu}^c = \mu^c$, $\tilde{q}^0 = q^0$ である $(\tilde{\mu}^c, \tilde{q}^0)$ を式(28)に代入する.

$$\begin{aligned} & F(\mathbf{x}^0) \cdot (\tilde{\mathbf{x}}^0 - \mathbf{x}^0) \\ &= \sum_{k \in K_{rs}} c_k^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} - \mu_k^{rs,c^0}) \\ &= c_k^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_k^{rs,c^0} - \mu_k^{rs,c^0}) + c_l^{rs,c^0} (\tilde{\mu}_l^{rs,c^0} - \mu_l^{rs,c^0}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= c_k^{rs,c^0} \mu_l^{rs,c^0} - c_l^{rs,c^0} \mu_l^{rs,c^0} \\ &= c_k^{rs,c^0} \mu_l^{rs,c^0} - c_l^{rs,c^0} \mu_l^{rs,c^0} \\ &= \mu_l^{rs,c^0} (c_k^{rs,c^0} - c_l^{rs,c^0}) < 0 \end{aligned}$$

よって, $c_k^{rs,c^0} < c_l^{rs,c^0}$ の仮定により, $F(\mathbf{x}^0) \cdot (\tilde{\mathbf{x}}^0 - \mathbf{x}^0) < 0$ となり, これはVIPが成立しているという仮定と矛盾する.

(i)と(ii)をあわせると, 「VIP⇒NEP」となることが分かる.

以上により, 「NEP⇒VIP」及び「VIP⇒NEP」が示され, 式(28)の変分不等式 (VIP) が本均衡 (NEP) と等しいことが示された.

参考文献

- 1) 河上省吾, 溝上章志: 分担・配分過程結合交通需要結合モデルとそれを用いた最適バス輸送計画策定手法の開発, 土木学会論文集, No.353/IV-2, pp.101-109, 1985.
- 2) 河上省吾, 溝上章志: 手段分担・配分結合モデルを用いた手段選択関数と均衡交通量の同時推定法, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.79-87, 1986.
- 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) Fernandez, E., Joaquin, D. C., Florian, M. and Cabrera, E. E.: Network equilibrium models with combined modes, *Transportation Science*, Vol.28, No.3, pp.182-192, 1994.
- 6) 宮城俊彦, 水口晴男: 複合交通手段を考慮した交通ネットワーク均衡モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.512/IV-27, pp.25-33, 1995.
- 7) Safwat, K. N. and Magnanti, T. L.: A combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model, *Transportation Science*, Vol.18, No.1, pp.14-30, 1988.
- 8) 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.
- 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間信頼性評価のための確率的交通均衡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) 中山晶一郎, 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会講演概要集, on CD-ROM, 2004.
- 11) Wardrop, J. G.: Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*

Part II, pp.325-378, 1952.

- 12) 中山晶一郎, 高山純一: 交通需要と経路選択の確率変動を考慮した確率的交通ネットワーク均衡モデル, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.4, pp.537-547, 2006.
- 13) アルフレッド・アン, ウィルソン・タン: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 1977.
- 14) 飯田恭敬, 内田敬: リスク対応行動を考慮した道路網経路配分, 土木学会論文集, No.464/IV-19, pp.63-72, 1993.
- 15) 土木学会土木計画学委員会交通ネットワーク出版小委員会: 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.
- 16) Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A.: The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research*, Vol.37E, pp.191-229, 2001.
- 17) Brownstone, D. and Small, K.A.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research*, Vol. 39A, pp.279-293, 2005.

(2006. 10. 11 受付)

A COMBINED MODE AND ROUTE CHOICE NETWORK EQUILIBRIUM MODEL
CONSIDERING ROAD TRAVEL TIME UNCERTAINTY:
AN ANALYSIS OF THE EFFECT ON ROAD TRAFFIC OF INTRODUCING A
RAILWAY IN KANAZAWA URBAN AREA

Kazuki NAGAO, Shoichiro NAKAYAMA, Jun-ichi TAKAYAMA
and Takuya MARUYAMA

Travel time of public transport, such as railway and light rail transit (LRT), is more reliable than that of road traffic. When assessing the effect of railway transit, reliability should be considered, else the effect may be underestimated. Thus, we should aim at managing not only the transit and road users simultaneously and consistently but also the travel time uncertainty of cars and reliability (or punctuality) of railway for an exact evaluation. In this study, we propose a network equilibrium model with combined mode and route choice considering road travel time uncertainty. Then, we show an influence analysis on road traffic by introducing a railway into the Kanazawa urban area using the proposed model as a case study.