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

A Combined Network Equilibrium Model Considering Travel Time Uncertainly

長尾一輝[1], 中山晶一朗[2], 高山純一[3]

Kazuki Nagao , Shoichiro Nakayama, Jun-ichi Takayama

1.はじめに

自動車交通と対比して, 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旅行時間の正確性を挙げることができる. 鉄道やＬＲＴなどの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, マイカー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い.

ゆえに, 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. 交通利用者が旅行時間の不確実性も考慮して経路を選択していると考えると, 旅行時間の不確実性が交通手段の選択に影響を与えている可能性は高いと考えられる. 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 LRT 等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, 従来から多くの研究がなされてきているが, そのほとんどが旅行時間等を確定的に扱うものであり, 旅行時間の不確実性を考慮したモデルの開発及び適用を行わなければならないのが現状であると思われる.

道路の交通量や旅行時間が変動し, ばらつく原因には様々なものが考えられるが, 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であろう. 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ネットワーク均衡モデルを提案している[1),2)]. 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ネットワークなどの実際のネットワークに適用し, その妥当性･実用性などを確認する. このようなモデルを利用することによって, 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, LRT の導入などの政策評価において, より有効な評価が可能になると考える.

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[1),2)]に基づくものである.

まず, OD ペア rs 間の交通量の分散$(\sigma^{rs})^2$は, $\eta\mu$

Key Words: 交通ネットワーク均衡, 確率的 OD 交通量

1 正会員, 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支社
〒984-0065 宮城県仙台市若林区土樋 104 OC 仙台ビル
Tel:022-215-5522 , Fax:022-213-5622
2 正会員, 博(工), 金沢大学大学院自然科学研究科
〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20
Tel: 076-234-4614, Fax: 076-234-4632
3 正会員, 工博, 金沢大学大学院自然科学研究科

^{rs}と仮定する．つまり，OD 交通量について，平均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．次に，経路交通量についても，その分散 $Var[F_k^{rs}]$は$\eta E[F_k^{rs}]$と仮定する．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，$E[\cdot]$及び $Var[\cdot]$はそれぞれ平均及び分散の演算である．ゆえに経路交通量は以下の確率分布で表すことが出来る．

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

ここで，$N[E[F_k^{rs}],\ \eta\, E[F_k^{rs}]]$は平均 $E[F_k^{rs}]$，分散$\eta E[F_k^{rs}]$を持つ正規分布を表す．以上に加えて，各経路交通量は独立と仮定する．このとき，リンク a の交通量 x_a は正規分布に従う（独立な）経路交通量F_k^{rs} の和 $\Sigma_r\Sigma_s\Sigma_k\ \delta_k^{rs}F_k^{rs}$ となり，それは以下の正規分布となる．

$$N[\Sigma_r\Sigma_s\Sigma_k\ \delta_k^{rs}E[F_k^{rs}],\ \eta\Sigma_r\Sigma_s\Sigma_k\ \delta_k^{rs}E[F_k^{rs}]] \tag{2}$$

3.旅行時間と一般化費用

(1) マイカーの旅行時間

道路リンクの走行時間が BPR 関数に従うと仮定すると，マイカーのリンク旅行時間 $t^c{}_a$ は$t_{a0}\{1+\alpha(x/C_a)^\beta\}$で表される．ただし，$t^c{}_a$はリンク a のマイカー旅行時間，t_{a0}は自由走行時間，C_aは交通容量，x はマイカー交通量である．道路上にはバスも走行するが，バスの台数はマイカー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 の期待旅行時間は $t_{a0}+\alpha \mathrm{E}[X^\beta]/C_a^\beta$ であり，それを計算するためには $\mathrm{E}[X^\beta]$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．$\mathrm{E}[X^n]$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 $\mathrm{E}[(X_a)^n]$は$d^nM_a(s)/ds^n\big|_{s=0}$として計算される．ゆえに期待リンク旅行時間は以下の式となる．

$$E[T_a]=\alpha+\beta\cdot\left.\frac{d^nM_a(s)}{ds^n}\right|_{s=0} \tag{3}$$

ただし，T_aは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 は正規変数であり，その積率母関数 $M_a(\mathrm{s})$は$\exp(\mu_a s+\sigma_a{}^2s^2/2)$である．ただし，$\mu_a(=\Sigma_i\Sigma_j\delta_{a\ j}\mu_j{}^{rs})$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 g_aは μ_aの式で表される．β=4 のとき，g_a は次式となる．期待リンク旅行時間関数 g_aは μ_aの式で表され，β=4 のとき，g_aは次式となる．

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

経路旅行時間の期待値 $\mathrm{E}[T_j{}^i]$は $\Sigma_a\delta_{a,j}\mathrm{E}[T_a]$となる．リンク旅行時間の分散 $\mathrm{Var}[T_a]$ は$\mathrm{E}[(T_a)^2]-\mathrm{E}[T_a]^2$ であり，$\mathrm{E}[(X_a)^{2n}]$，$\mathrm{E}[(X_a)^n]$を用いれば計算することができる．また，経路旅行時間の分散 $\mathrm{Var}[T_k{}^{rs}]$も以下の式のように計算できる．

$$\mathrm{Var}[T_k{}^{rs}]=\Sigma_a\delta_{a,k}\mathrm{Var}[T_a] \tag{5}$$

(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]の考えに基づき，期待旅行時間は道路旅行時間にパラメータψを掛けた値とする．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る．旅行時間の分散はマイカーの旅行時間の分散と同値とする．

鉄道の旅行時間は，道路交通に影響されないので定数として与える．つまり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[1),2)]では，期待旅行時間だけではなく，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できる．一例として，マイカーにおける実効旅行時間を以下に示す．

$$V_k{}^{i,c}=\mathrm{E}[T_k{}^{i,c}]+\gamma\ \mathrm{Var}[T_k{}^{i,c}] \tag{6}$$

$V_k^{i,c}$は OD ペア i の経路 k のマイカー実効旅行時間，$T_k^{i,c}$ はその経路のマイカー旅行時間の確率変数，$\mathrm{E}[T_k^{i,c}]$ はマイカー旅行時間の期待値，$\mathrm{Var}[T_k^{i,c}]$は分散である．γはﾘｽｸ態度を表すﾊﾟﾗﾒｰﾀであり，γ>0 ならばﾘｽｸ回避，γ=0 ならばﾘｽｸ中立，γ<0 ならばﾘｽｸ選好である．

⑷ 一般化費用

マイカー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を，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の概念を用いる．

マイカー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出来る．

$$c_k^{rs,c} = \tau V_k^{rs,c} + \xi \tag{7}$$

$$c_k^{rs,tran} = \tau (V_k^{rs,tran} + w_k^{rs}) + m_k^{rs} \tag{8}$$

$c_k^{rs,c}$：OD ペア rs 間第 k 経路におけるマイカーの経路一般化費用

$c_k^{rs,tran}$： 公共交通の経路一般化費用

$V_k^{rs,c}$：マイカーの実効旅行時間

$V_k^{rs,tran}$：公共交通の実効旅行時間

w_k^{rs}：公共交通の待ち時間（運行間隔の 1/2）

m_k^{rs}：公共交通の運賃

τ：時間価値

ξ：定数項（マイカー利用者の，マイカーの維持費などを表したもの）

4.モデルの定式化

⑴ 手段分担モデル

本研究は，河上ら[3),4)]と同様，マイカー利用者と公共交通利用者間の分担関係はロジットモデルによって求められるとする．よって，マイカーと公共交通を選ぶ際のマイカーの選択確率は，以下の式で表される．

$$P_k^{rs,c} = \frac{1}{1+\exp\left\{-\theta\left(c_k^{rs,tran} - c_k^{rs,c}\right)\right\}} \tag{9}$$

ここで

$c_k^{rs,c}$：OD ペア rs 間第 k 経路のマイカー利用者の一般化費用

$c_k^{rs,tran}$：OD ペア rs 間第 k 経路の公共交通利用者の一般化費用

P_k^{rs}：OD ペア rs 間第 k 経路のマイカー選択確率

θ：ﾊﾟﾗﾒｰﾀ

⑵ 定式化

以上のような均衡は下のような等価最適化問題として定式化することができる．

$$\min . Z = \sum_a \int_0^{x_a} c_a(w)dw + \sum_{r\in R}\sum_{s\in S} E[F_k^{rs,tran}]c_k^{rs,tran} + \frac{1}{\theta}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} q_{rs}^c \ln q_{rs}^c + \frac{1}{\theta}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} q_{rs}^{tran} \ln q_{rs}^{tran} \tag{10a}$$

subject to

$$Q_{rs}=q_{rs}^{c}+q_{rs}^{tran} \tag{10b}$$

$$q_{rs}^{c}=\Sigma_r\Sigma_s\Sigma_k E[F_k^{rs,c}] \quad \forall k\in K_{rs}\ \forall r\in R\ \forall s\in S \tag{10c}$$

$$q_{rs}^{tran}=\Sigma_r\Sigma_s\Sigma_k E[F_k^{rs,tran}] \quad \forall k\in K_{rs}\ \forall r\in R\ \forall s\in S \tag{10d}$$

$$E[x_a]=\Sigma_j \delta_k^{rs}\cdot E[F_k^{rs,c}] \quad \forall k\in K_{rs}\ \forall r\in R\ \forall s\in S\ \forall a\in A \tag{10f}$$

$$E[x_a]\geq 0,\ E[F_k^{rs,tran}]\geq 0 \quad \forall k\in K_{rs}\ \forall r\in R\ \forall s\in S\ \forall a\in A \tag{10g}$$

ここで

$c_a(\cdot)$：ﾘﾝｸ a のマイカーの一般化費用関数

Q_{rs}：OD 利用者数

q_{rs}^{c} ：OD ペア rs 間のマイカー利用者数

q_{rs}^{tran} ：OD ペア rs 間の公共交通利用者数

$E[x_a]$：ﾘﾝｸ交通量の期待値

$E[F_k^{rs,c}]$：OD ペア rs 間第 k 経路のマイカー交通量の期待値

$E[F_k^{rs,tran}]$：OD ペア rs 間第 k 経路の公共交通利用者数の期待値

θ：ﾊﾟﾗﾒｰﾀ

式(10)は土木学会[5)]に記載されている分担･配分統合モデルの基本的な解法を用いて解くことが出来る.

5.単純なネットワークへの適用

図-1 に示す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 BPR 関数(α=0.15, β=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,LRT の A から B までの旅行時間は 30 分で,常に定時で運行することにする.OD 交通は平均 4000 人,分散 168000 人^{2}の正規分布に従うとする.

マイカーの乗車人員は 1.0(人/台)とする.時間価値は 40(円/分)とする.LRT 車内において混雑は発生しなく,運賃は 200(円),待ち時間は 0(分)とする.また,ロジットモデルのパラメータθ=0.002 とする.

図-2 は,式(6)でのリスク態度γを変化させた場合のそれぞれのリンクの交通量の平均である.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,不確実性の大きいマイカーを選択する利用者が減少し,不確実性の小さい LRT 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が再現されていることが分かる.

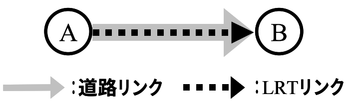

図-1 適用ネットワーク

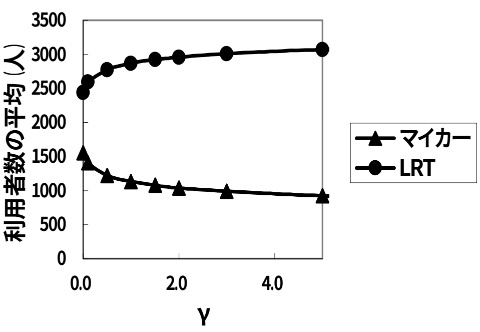

図-2 γとリンク交通量の平均の関係

6.金沢都市圏の公共交通を含むネットワークへの適用

本研究の均衡モデルを金沢都市圏の公共交通を含むネットワークに適用し,現実のネットワークとの適合性を確認するとともに,LRT の金沢都市圏への導入効果分析を行う.図-4 に LRT が導入された場合の適用ネットワークを示す.

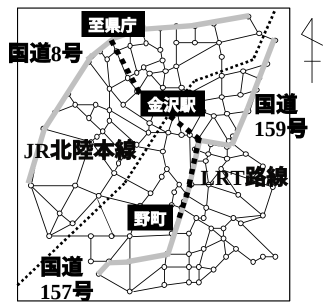

図-4 金沢都市圏の公共交通を含むネットワーク

7.おわりに

本研究では,旅行時間の不確実性を考慮した分担･配分統合交通ネットワーク均衡モデルを構築した.金沢都市圏の公共交通を含むネットワークへの適用結果は講演時に発表する.

謝辞:本論文の統合モデル構築に当たって,東京大学大学院圓山琢也助手から多くの貴重なアドバイスを頂いた.ここに記して謝意を示します.

参考文献

1) 中山晶一朗,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,投稿中.
2) 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会講演概要集,on CD-ROM,2004.
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) 土木学会:交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-,1998