土木学会論文集 No.0/I–1, pp.1–9, 2013.7

目的地までの所要時間に着目した交通ネットワークの評価値算出モデルの構築

茂呂　浩平[1]・仙田　満[2]

[1]学生会員　千葉大学大学院　工学研究科建築・都市科学専攻（〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33）
E-mail: adfa3285@chiba-u.jp
[2]正会員　株式会社環境デザイン研究所（〒 106-0032 東京都港区六本木 5-12-22）
E-mail: msenda@ms-edi.co.jp

電車や路線バス等の運行時刻と経路が予め定められている公共交通機関を利用して移動する時，利用可能な便および経路が制限される．また，移動を開始する場所，時刻により利用可能な便が複数存在する場合にいずれかの便を選択必要が発生する．利用可能な便と経路の複数の組み合わせから 1 個だけ選択する場合，運賃等の金銭的費用が同一ならば目的地までの所要時間が短い候補を選択する傾向があることを前提とする．そして，選択した便で移動した時の平均的な所要時間を求め，この所要時間が短いほど利便性が高いサービスが提供されていると判断できる．そこで，目的地までの所要時間により利用者が便，経路を選択する行動モデルから交通ネットワークの評価値を算出するモデルの構築を試みる．

Key Words : 経路選択, 出発時刻選択, 交通ネットワーク分析

1.　はじめに

交通ネットワークの評価方法として，道路ネットワークに関する Wardrop 均衡の状態での最少所要時間での評価が知られている[1)]．しかし，予め決められたスケジュールに従って運行される公共交通機関を利用する場合のネットワークでは，利用者均衡状態になるよう事後的に運行スケジュールを調整することが困難である．また，時刻表を必要としないで利用できる程度の利便性が高いサービスが提供されている場合，大凡のスケジュールを把握してどの経路を利用して目的地へ向かうか選択を行う．この時，スケジュールを大凡にしか把握していないので，便を選択する時に想定した目的地への到達時刻と，実際に移動した場合の到達時刻にある程度の差異が発生することも想定して便を選択している．大凡にスケジュールを把握した状態で目的地までの最適経路を探索する手法は，Häme，Hakula [2)] で提案されている．また，提示されたスケジュールと運行時に実際に生じた時間のずれ（不確実性）に由来する負担に関しては，Bates，Polak，Jones，Cook [3)] で詳しく論じられている．そこで，当研究では次のように公共交通ネットワークの利便性を評価する数理モデルの構築を試みる．

移動するときに感じる時間に関する負担の「抵抗感」が小さければ利便性が高く，大きければ利便性が低いと評価できると仮定する．この仮定は，直感的に妥当であると考えられるので公理的な前提条件として扱う．ただし，駅で待つことによる時間の消費の方が列車等での移動に時間を消費するよりも「抵抗感」が大きいと感じることを条件として付与する．そして，起点から目的地までの移動をするのに感じる「抵抗感」を電気回路の「電気抵抗」と同じような数理モデルにより構築できると仮定し，実際に「抵抗感」を求める数理モデルの構築を試みる．さらに，特定の 1 時点に移動を開始する場合の最適経路検索を行うのではなく，特定の時間帯におけるネットワーク全体の利便性を評価することを試みる．

2.　移動コストの定義

予め運行スケジュールが提示されている輸送手段を利用して，人が移動する場合に感じる負担（抵抗感) を時間と等価な数値として表現する．この数値を「移動コスト」と定義する．

(1)　移動者のパーソナリティ

目的地まで，なるべく早く移動することを要求する移動者を想定して移動コストを算出する．そして，運行スケジュールを，それほど正確ではなく，大まかに把握している状態で移動を開始すると仮定する．駅での待ち時間は，最大の時間（最悪の状態）を想定して抵抗感を判断する．さらに，目的地までの経路が複数存在する場合，次の性質を備えていると仮定する．

- 「駅で待つことにより時間を消費する」ことを「列

車等での移動に時間を消費する」よりも嫌う傾向がある．

- 乗換を嫌う傾向がある．

つまり，待ち時間、所要時間（乗車時間）が短いほどコストが小さくなり，目的地に早く到着する経路ほどコストが小さくなる．また，目的地への到達予定時刻が同じである経路が複数存在する場合，待ち時間が短い経路ほどコストが小さくなる．

(2)　移動コスト

移動コストとしては，運賃の負担，駅での待ち時間（待ち時間コスト），電車やバスの乗車時間（乗車時間コスト），乗換が必要な場合の負担（乗換えコスト），駅環境に由来する負担，乗車中の車内環境に由来する負担，提示された運行スケジュールと運行時に実際に生じた時間のずれ（不確実性）に由来する負担等が考えられる．

ここでは簡単のために，駅環境に由来する負担，乗車中の車内環境に由来する負担，提示された運行スケジュールと運行時に実際に生じた時間のずれに由来する負担を算出の対象外とする．さらに，運賃の負担も算出の対象外とする．以上から，待ち時間，乗車時間，乗換えの負担のみを議論の対象とすることになる．そして，乗り換えの負担も待ち時間，乗車時間と同様に時間コストとして扱う．

(3)　コストの算出モデル

選択する便に従って移動する場合，駅での待ち時間，乗車時間が長くなるほど負担が増加する．故に，移動コストは待ち時間，所要時間の各々に比例すると考える．また，乗換が必要な場合は「乗換コスト」が加算される．さらに，残りの経路を移動するために乗継便に関する「待ち時間コスト」,「所要時間コスト」が追加される．つまり，乗換を繰り返す毎に該当する乗換コスト，待ち時間コスト，所要時間コストが加算されると考える．

a)　待ち時間コスト

出発地点に着く時刻により，選択する経路の次の便が出発する時刻までの時間にバラつきが発生するが，当モデルでは最大の待ち時間として該当する経路の運行間隔を「待ち時間コスト」とする．また，運行間隔にもバラつきが存在することを想定し，運行間隔の平均値を「待ち時間コスト」とする．ただし，運行間隔は予め時刻表等で提示された情報を使用する．

b)　所要時間コスト

乗車する区間の所要時間を「所要時間コスト」とする．ただし，所要時間は予め時刻表等で提示された情報を使用する．

c)　乗換コスト

乗換をする時，下車した地点から次の便に乗車する地点への移動が必要になることが多い．このため，乗換時の移動に要する時間が発生する．また，乗換の行為を行うことによる肉体的，あるいは心理的な負担が発生する．これらの余分に発生した時間，負担を合わせて，時間の尺度で表現したものを「乗換コスト」とする．

d)　待ち時間コストと所要時間コストの相違点

移動時に選択可能な経路が複数存在する場合,「待ち時間コスト」と「所要時間コスト」には次のような相違がある．

- 「待ち時間コスト」は，経路の選択肢が増えるに従い乗車可能な便の本数が増えるため減少する傾向がある．
- 「所要時間コスト」は，経路の選択肢が増えても所要時間が減少することは無く，経路固有の所要時間を保ったままである．

このことから，移動コストを算出するときには「待ち時間コスト」と「所要時間コスト」を個別に扱う方が望ましい．そして，経路の選択肢が増えることは,「待ち時間コスト」の算出に与える影響は大きいと考えられる．一方,「所要時間コスト」の算出には，余り影響を与えないと言える．

ただし，経路の選択肢が増えた場合には，所要時間のより小さい経路を選択する傾向があると考えられる．

3.　ネットワークの形状を考慮した移動コスト

移動経路を電気回路に見立て，移動コストを電気回路の電気抵抗と同様に求める方法を考える．

(1)　ネットワークの形状の対応

経路 i の移動コストを T_i とする．

a)　乗継が発生する場合

目的地まで移動するために経路 1 と経路 2 を乗り継ぐ必要がある場合，移動コスト T を以下のように考える．

$$T = T_1 + T_2 \tag{1}$$

b)　複数の経路が選択可能な場合

目的地まで移動するために複数の経路 $1, \ldots, n$ を選択可能な場合，移動コスト T を以下のようになることを想定する．

$$T = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{T_i} \right)^{-1} \tag{2}$$

しかし，移動時間が極端に大きく，かつ等しい経路を２つ選択可能な場合，移動コストが半分になってしま

うことが妥当であるとは考えにくい．例えば，乗車時間が 10 時間もある経路を考えてみると，選択肢が 2 倍になっただけで移動コストが半分の 5 時間になるとは考えにくい．そこで，移動時間を「待ち時間 (W)」と「乗車時間、乗換時間 (D)」に分けて考える．

$$T = W + D \tag{3}$$

待ち時間に限定して考えた場合，式 (2) と同様に求められるとする．ただし,「貢献度（Contribution）」の概念を導入して，以下のとおりとする．

$$W = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{Contribution_i}{W_i} \right)^{-1} \tag{4}$$

乗車時間，乗換時間に限定して考えた場合は，乗車時間が最少の経路の時間を基本とし，その他の経路に関しては該当経路の乗車時間と最少の乗車時間との差異に「貢献度」を考慮して,「経路 i における貢献度を考慮した超過時間（$OverTime_i$)」により以下のとおりとする．

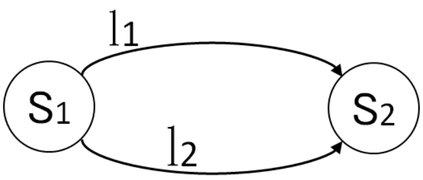
$$D = \min_i D_i + \sum_{i=1}^{n} OverTime_i \tag{5}$$

4. 利便性評価の数理モデル

モデルの基本的な性質は項 3.(1)b) に従うと仮定するが，本章では「貢献度」の具体的な算出方法について記述する．

(1) 並列区間について

図 1 のように，駅 S_1 と S_2 を結ぶ経路が複数 (l_1，l_2) 存在する時，並列区間として扱う．



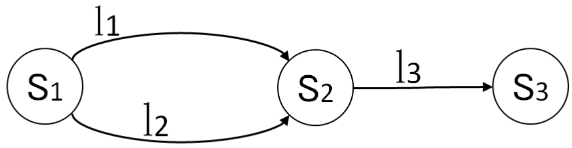
図–1 並列区間　例 1

(2) 並列区間の範囲

図 2 のように，駅 S_1 と S_3 を結ぶ経路において，S_2 と S_3 の間のリンク (l_3) が 1 個に合流している場合でも S_1 と S_3 を結ぶ並列する経路 R_1，R_2 として扱う．

R_1 : $S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_3} S_3$
R_2 : $S_1 \xrightarrow{l_2} S_2 \xrightarrow{l_3} S_3$

ここで，R_1，R_2 は以下のような形状となる．



図–2 並列区間　例 2

「l_1 と l_2 の並列区間」と l_3 の直列区間としては扱わない．これは，リンク l_1 を利用して S_2 に到着した場合とリンク l_2 を利用して S_2 に到着した場合では，リンク l_3 へ乗り継ぐ待ち時間の条件が異なるので (例えば，l_1 から l_3 への乗り継ぎでの待ち時間が殆どなく接続するスケジュールが設定されているが，l_2 から l_3 への乗り継ぎで大きな待ち時間が必要な場合など)，S_2 における乗継時間に関して l_1 を利用した場合と l_2 を利用した場合の条件の差異を考慮した「乗継時間」を改めて求める必要が生じてしまうからである．

以上のように並列経路を考えると，駅 S_{n_1} と S_{n_k} を結ぶ経路が複数存在する場合，組み合わせ可能な全経路を移動コストの計算対象とする必要がある．ただし，項 3.(1)b) で導入した「貢献度」の概念により，貢献度が小さい経路を計算対象から除外可能である．つまり，貢献度が大きな経路に関してのみ移動コストを計算すればよい．

(3) 複数の経路を選択可能な場合の移動コスト

次に，目的地まで複数の経路を選択可能な場合の移動コストの算出について考える．

a) 並列接続の区間の移動コスト

所要時間コストが $T_1, \ldots, T_n$ の経路のいずれを利用しても移動できる区間（並列区間）の移動コストは，式 (2) のように算出する．これは，基本的に電気回路の抵抗を並列接続した場合と同様に扱うと言うことである。

b) 所要時間が同じ経路が複数存在する場合の移動コスト

選択可能な経路が増えれば待ち時間が減少するので，待ち時間コストも減少することが考えられる．そこで，同じ待ち時間の経路が 2 個存在する場合を想定する．単純に考えて，同じ待ち時間で同じ所要時間の経路が 2 個に増えれば，待ち時間が $\frac{1}{2}$ になったことと同じであるといえる．

そこで，各経路の待ち時間コストを W(分)，所要時間コストを T(分) であるとして考える．

最初に，経路が 1 個だけの場合の移動コストを求めると以下のようになる．

$$Cost_{init} = W + T \tag{6}$$

次に，待ち時間コストが $\frac{1}{2}$ の場合の移動コストを求めると以下のようになる．

$$Cost_{HalfWait} = \frac{W}{2} + T \tag{7}$$

式 (6) を操作して式 (7) と同じ値にするには，次のように待ち時間コストに関して電気回路の抵抗を並列に繋いだ場合と同様に，経路の容量が２倍になったと考えることができる．

$$Cost_{HalfWait} = \frac{1}{\frac{1}{W} + \frac{1}{W}} + T \tag{8}$$

c) 所要時間が異なる複数の経路が存在する場合の待ち時間コスト

今度は，所要時間が異なる複数の経路が存在する場合の移動コストの算出について考える．

まず，所要時間が極端に異なる経路が１個ずつ存在する場合を考える．所要時間が極端に異なる場合には，所要時間が短い経路を選択するのは明らかである．

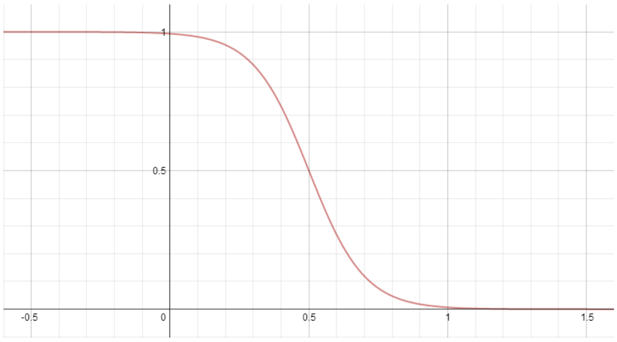
ここで，所要時間が短い方の経路の便に乗り遅れた場合を想定する．この時，次の便に乗って移動することになるが,「次の便」とは所要時間の短い経路の便であろうか，それとも所要時間の長い経路の便であろうか．目的地に早く到着する便を利用するためには，短い所要時間の経路との所要時間の差異と所要時間が短い経路の運転間隔から次のように考える。

$$\begin{cases} \text{所要時間が短い経路} \\ \quad \Leftarrow \mathit{if} \quad (\text{運転間隔} \leq \text{所要時間の差異}) \\ \text{所要時間が長い経路} \\ \quad \Leftarrow \mathit{otherwise} \quad (\text{運転間隔} > \text{所要時間の差異}) \end{cases}$$

次に，所要時間の差異が各経路の運転間隔と比較して小さい場合を考える．つまり，早く出発する便が所要時間の長い経路の便であっても，１便見送って所要時間の短い経路の便を利用した場合と比較して到着時刻がそれほど遅くならない場合である．この場合，選択した経路の所要時間の長短に関わらず早く出発する便を利用することが想定される.「それほど遅くならない」という曖昧さを表現するために，次のようにシグモイド関数を利用して貢献度 (*Contribution*) を導入する．

貢献度としてシグモイド関数を導入する理由は以下のとおりである．

- 該当する経路が貢献する（利用される）場合を１，貢献しない（利用されない）場合を０とした２値をとることを前提とする．



図–3 シグモイド曲線の例

- 貢献度の境界点が「運転間隔」と「所要時間の差異」が等しくなる１点付近の狭い範囲に存在する．
- 貢献度の境界点から十分離れた点では，０または１のいずれかの値となる．
- 貢献度の境界点付近では，貢献する／しないの曖昧さが残るので，曖昧な範囲では確率的に２値のいずれかをとると考える。
- 確率的な性質として，扱いが容易な正規分布で確率分布を近似する．
- 確率分布として正規分布で近似するため，曖昧な範囲の貢献度の期待値をシグモイド曲線で表現する。

d) 貢献度算出式の定義

駅 S_i と S_j を結ぶ経路 R_k の貢献度 $Con^k_{i,j}$ の算出式を以下のとおりに定義する．

$$Twt_{i,j} \stackrel{\text{def.}}{=} \left\{ W^k_{i,j} \mid k \ s.t. \ \min_k T^k_{i,j} \right\} \tag{9a}$$

$$\mathit{diff}^k_{i,j} \stackrel{\text{def.}}{=} T^k - \min_k T^k_{i,j} \tag{9b}$$

$$E(w, d) \stackrel{\text{def.}}{=} \exp\bigl(-5 \times (2 \times d/w - 1)\bigr) \tag{9c}$$

$$Con^k_{i,j} \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{E(Twt_{i,j}, \mathit{diff}^k_{i,j})}{1 + E(Twt_{i,j}, \mathit{diff}^k_{i,j})} \tag{9d}$$

$$\begin{cases} \lim_{T^k_{i,j} \to \min_k T^k_{i,j}} Con^k_{i,j} = 1 \\ \lim_{T^k_{i,j} \to Twt_{i,j}} Con^k_{i,j} = 0 \end{cases}$$

この場合，貢献度は [0,1] の値をとる．

この貢献度を使用して，待ち時間コストを次のように定義する．すなわち，式 (2) において，待ち時間コストの重みとして貢献度を乗じる．

$$CostW_{i,j} \stackrel{\text{def.}}{=} \left(\sum^k DistW^k_{i,j} \right)^{-1} \tag{10}$$

$$DistW^k_{i,j} \stackrel{\text{def.}}{=} \begin{cases} \frac{1}{W^k_{i,j}} & \mathit{if} \quad T^k = \min_i T^i \\ \frac{Con^k_{i,j}}{W^k_{i,j}} & \mathit{othewise} \end{cases}$$

e)　所要時間が異なる複数の経路が存在する場合の所要時間コスト

所要時間が最小の経路を利用する傾向があるので，利用者は基本的に最小の所要時間の経路を選択する．他の経路に関しては，最小の所要時間と当該経路の所要時間の差異に「全経路の貢献度の総和に対する当該経路の貢献度の割合」を乗じた値を求めて，最小の所要時間に加算する．『所要時間の差異に「全経路の貢献度の総和に対する当該経路の貢献度の割合」を乗じる』ことにより，最小の所要時間から大きく乖離した経路の所要時間の影響を大幅に減少させている．

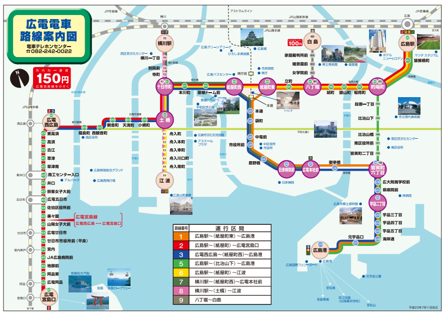
$$CostM_{i,j} \overset{\text{def.}}{=} \sum^{k} Dur(T^k_{i,j}) \tag{11}$$

$$Dur(T^k) \overset{\text{def.}}{=} \begin{cases} T^k & if \quad T^k = \min_i T^i \\ \frac{Con^k_{i,j} \times diff^k}{\sum^k Con^k_{i,j}} & otherwise \end{cases} \tag{12}$$

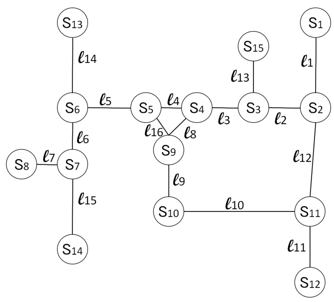
5.　広島の市内電車ネットワークへの適用例

(1)　広島の市内電車ネットワーク

ここで，広島電鉄の鉄道市内線の路線（図 4）[4)]をもとに，次のようなネットワーク（図 5）を定義する．



図–4　広島電鉄鉄道路線図



図–5　ネットワーク図

a)　運行系統

広島電鉄の鉄道市内線には，図 4 のとおり，以下の 8 系統設定されている．ただし，市内線を議論の対象とするので，系統Ｒ２に関しては宮島線は対象外とする．

Ｒ１：広島駅 → 的場町 → 八丁堀 → 紙屋町東 → 本通 → 広電本社前 → 皆実町六丁目 → 広島港

Ｒ２：広島駅 → 的場町 → 八丁堀 → 紙屋町東 → 紙屋町西 → 十日市町 → 土橋 → 広電西広島 (→ 広電宮島口)

Ｒ３：広電西広島 → 土橋 → 十日市町 → 紙屋町西 → 本通 → 広電本社前 → 皆実町六丁目 → 広島港

Ｒ４：広島駅 → 的場町 $\xrightarrow{\text{南区役所前}}$ 皆実町六丁目 → 広島港

Ｒ５：広島駅 → 的場町 → 八丁堀 → 紙屋町東 → 紙屋町西 → 十日市町 → 土橋 → 江波

Ｒ６：横川駅 → 十日市町 → 紙屋町西 → 本通 → 広電本社前

Ｒ７：横川駅 → 十日市町 → 土橋 → 江波

Ｒ８：八丁堀 → 白島

これを図 5 上の経路として表現すると以下のようになる．

Ｒ１：$S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_2} S_3 \xrightarrow{l_3} S_4 \xrightarrow{l_8} S_9 \xrightarrow{l_9} S_{10} \xrightarrow{l_{10}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12}$

Ｒ２：$S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_2} S_3 \xrightarrow{l_3} S_4 \xrightarrow{l_4} S_5 \xrightarrow{l_5} S_6 \xrightarrow{l_6} S_7 \xrightarrow{l_7} S_8$

Ｒ３：$S_8 \xrightarrow{l_7} S_7 \xrightarrow{l_6} S_6 \xrightarrow{l_5} S_5 \xrightarrow{l_{16}} S_9 \xrightarrow{l_9} S_{10} \xrightarrow{l_{10}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12}$

Ｒ４：$S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_{12}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12}$

Ｒ５：$S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_2} S_3 \xrightarrow{l_3} S_4 \xrightarrow{l_4} S_5 \xrightarrow{l_5} S_6 \xrightarrow{l_6} S_7 \xrightarrow{l_{15}} S_{14}$

Ｒ６：$S_{13} \xrightarrow{l_{14}} S_6 \xrightarrow{l_5} S_5 \xrightarrow{l_{16}} S_9 \xrightarrow{l_9} S_{10}$

Ｒ７：$S_{13} \xrightarrow{l_{14}} S_6 \xrightarrow{l_6} S_7 \xrightarrow{l_{16}} S_{14}$

Ｒ８：$S_3 \xrightarrow{l_{13}} S_{15}$

b)　広島駅 (S_1) と広島港 (S_{12}) を結ぶ経路

S_1(広島駅) と S_{12}(広島港) を結ぶ経路は次のようになる．

$$\begin{aligned} R_{1,12} &= \{r^1_{1,12}, r^2_{1,12}, r^3_{1,12}\} \\ r^1_{1,12} &= S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_{12}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12} \\ r^2_{1,12} &= S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_2} S_3 \xrightarrow{l_3} S_4 \\ &\quad \xrightarrow{l_8} S_9 \xrightarrow{l_9} S_{10} \xrightarrow{l_{10}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12} \\ r^3_{1,12} &= S_1 \xrightarrow{l_1} S_2 \xrightarrow{l_2} S_3 \xrightarrow{l_3} S_4 \\ &\quad \xrightarrow{l_4} S_5 \xrightarrow{l_{16}} S_9 \xrightarrow{l_9} S_{10} \xrightarrow{l_{10}} S_{11} \xrightarrow{l_{11}} S_{12} \end{aligned} \tag{13}$$

$r^1_{1,12}$ は系統Ｒ４を利用した移動経路，$r^2_{1,12}$ は系統Ｒ１を利用した移動経路で，$r^3_{1,12}$ は系統Ｒ２またはＲ５を S_5（紙屋町西）迄利用し系統Ｒ３に乗換えた移動経路である．

上記の通り，乗換が必要な場合には移動する経路に関して，起点が同じ系統同士，終点が同じ系統同士は乗換えないことを乗換えの規則とする．

式（13）では区間によって経路を表現しているが，利用する系統によって経路を次のようにも表現できる．

$$\begin{aligned} R_{1,12} =& \{r^1_{1,12}, r^2_{1,12}, r^3_{1,12}\} \\ r^1_{1,12} =& S_1 \xrightarrow[R4]{} S_{12} \\ r^2_{1,12} =& S_1 \xrightarrow[R1]{} S_{12} \\ r^3_{1,12} =& S_1 \xrightarrow[R2,R5]{} S_5 \xrightarrow[R3]{} S_{12} \end{aligned} \tag{14}$$

(2)　$Cost_{1,12}$ の値

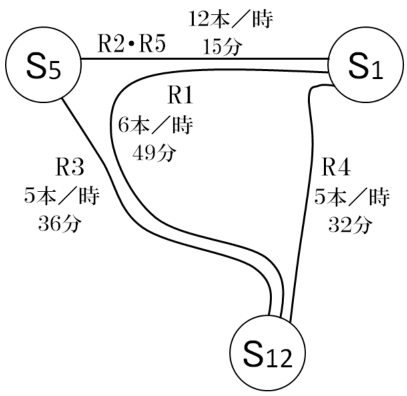
上記で例示した $Cost_{1,12}$ を具体的に求める．

運行本数，所要時間や駅などの混雑等サービス水準は，早朝，深夜の閑散時，朝夕の混雑時，日中の通常時のように一日の中でも異なった設定がされていることが多い．さらに，平日と土日等の休日でも異なったサービス水準が設定されていることが多い．各サービス水準に関して，移動コストを算出し比較することも可能であるが，ここでは同一のサービス水準におけるネットワーク上で算出されたコストを比較することを対象とする．

そこで，対象とするサービス水準を「日中の通常時」として移動コストを算出することにする．

S_5 における乗換えコストを１０（分）とする．

各区間の運行本数，所要時間は図 6 の通りである．



図–6　$Cost_{1,12}$ の移動コスト算出用データ

つまり

$$\begin{aligned} Cost^1_{1,12} &= \frac{1}{5} + 32 \\ Cost^2_{1,12} &= \frac{1}{6} + 49 \\ Cost^3_{1,12} &= \frac{1}{12} + 10 + \frac{1}{5} + 15 + 36 \end{aligned}$$

となる．

以上のように，移動コストを時間（分）と等価であると想定して算出する．

$$\begin{aligned} Cost^1_{1,12} &= \frac{60}{5} + 32 = 44 \\ Cost^2_{1,12} &= \frac{60}{6} + 49 = 59 \\ Cost^3_{1,12} &= \frac{60}{12} + 10 + \frac{60}{5} + 15 + 36 = 68 \end{aligned} \tag{15}$$

以下の議論では，乗換コストを待ち時間コストの一部として議論を行う．

各経路のコストは式 (15) の通りとする。

$$\begin{cases} W^1_{1,12} = \frac{60}{5} = 12 \\ T^1_{1,12} = 32 \\ \mathit{diff}^1_{1,12} = 0 \\ Con^1_{1,12} = 0.99331 \\ \\ W^2_{1,12} = \frac{60}{6} = 10 \\ T^2_{1,12} = 49 \\ \mathit{diff}^2_{1,12} = 17 \\ Con^2_{1,12} = 0.00000 \\ \\ W^3_{1,12} = \frac{60}{12} + \frac{60}{5} = 17 \\ T^3_{1,12} = 15 + 10 + 36 = 61 \\ \mathit{diff}^3_{1,12} = 19 \\ Con^3_{1,12} = 0.00000 \\ \\ W_{1,12} \approx (\frac{1}{12} + \frac{0}{10} + \frac{0}{17})^{-1} = 12 \\ T_{1,12} \approx 32 + 0 \times 17 + 0 \times 19 = 32 \end{cases}$$

$$Cost_{1,12} \approx 12 + 32 = 44 \tag{16}$$

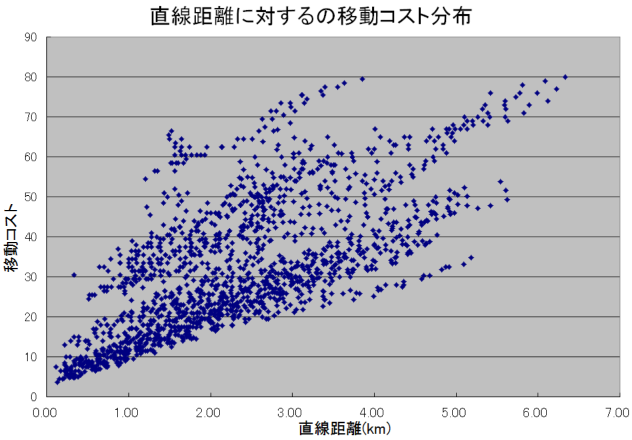
a)　$Cost_{1,12}$ 移動コストのまとめ

移動コスト $Cost_{1,12}$ が系統Ｒ４を利用した経路 $Cost^1_{1,12}$ の移動コストと等しくなっている．これは，Ｒ４以外の経路を利用する場合には，系統Ｒ４を利用する場合と比較して所要時間が大幅に大きくなる．このため，殆どの利用者が系統Ｒ４を選択することを示している．

(3)　広島の市内電車ネットワークの移動コスト

各電停間の移動コストは，図 7 のとおりになる．

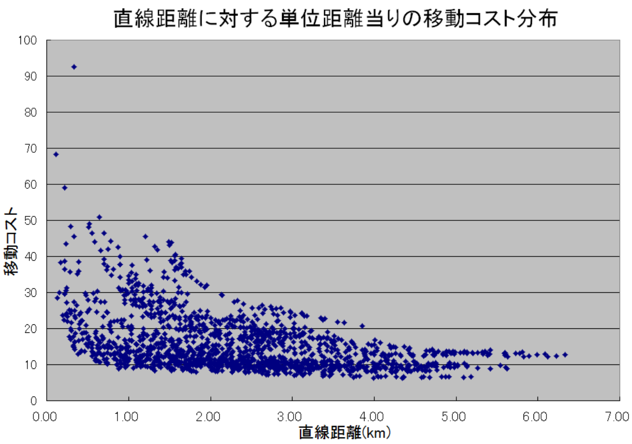
移動コストの分布は，直線距離が小さい電停間に関して大体 3 個に分かれていることが読み取れる．そして，直線距離が大きい電停間に関しては直線距離が小さい電停間の分布における下から 1 番目と 2 番目の分布の中間程度の位置に分布している．



図–7 広島電鉄鉄道市内線 (分)

直線距離が小さい電停間のコストの分布が 3 個に分かれている原因は，下から「乗換なし」,「乗換が 1 回必要」そして「乗換が 2 回必要」である電停間において乗換コストの負担が大きいことであると考えられる．直線距離が大きい電停間では乗換が必要な場合が多くなるので，下から 1 番目の分布よりもコストが大きくなるが，乗車時間が大きくなる．このため，乗換コストの影響が小さくなり，直線距離が小さい電停間のコストの分布ほどはっきりと分かれなくなったと考えられる．

次に，ネットワークの規模の大きさに影響されないで他のネットワークと比較を可能とするため，単位距離（ここでは km）あたりの移動コストを求めた結果が図 8 となる．



図–8 広島電鉄鉄道市内線 (分/km)

すると，公共交通を利用して移動することが考えられる 2km 以上の移動では，10 分/km から 20 分/km を要することが分かる．さらに，長距離の移動をする場合，例えば 4km 以上の距離を移動する場合には，13 分/km 付近に分布が収束していることが分かる．

表–1 渋谷－横浜間の移動経路

	運転間隔 (分)	所要時間 (分)
湘南新宿ライン	(特別快速) 60	24
	(快速) 60	25
	(各駅停車) 30	28
山手線 －東海道線	山手線 4	11
	東海道線 10	19
山手線 －横須賀線	山手線 4	11
	横須賀線 12	23
山手線 －京浜東北線	山手線 4	11
	京浜東北線 6	28

6. 渋谷－横浜間の移動の例

渋谷と横浜の間の移動経路として，ＪＲ線を利用する場合を考える．2012 年 8 月時点では以下のサービスが提供されている．

なお，山手線と東海道線，横須賀線，京浜東北線との乗換は品川駅で行う．渋谷駅と横浜駅との直線距離は 22.65km である．

(1) 移動コスト

品川駅での乗換コストを 5 分として移動コストを算出すると，それぞれの移動経路の移動コストは以下のようになる．

$$\begin{cases} W^{\text{特別快速}} = 60 \\ T^{\text{特別快速}} = 24 \\ \mathit{diff}^{\text{特別快速}} = 0 \\ Con^{\text{特別快速}} = 1 \\ Cost^{\text{特別快速}} = 60 + 24 = 84 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W^{\text{快速}} = 60 \\ T^{\text{快速}} = 25 \\ \mathit{diff}^{\text{快速}} = 1 \\ Con^{\text{快速}} = 0.99210 \\ Cost^{\text{快速}} = 60 + 25 = 85 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W^{\text{各駅停車}} = 30 \\ T^{\text{各駅停車}} = 28 \\ \mathit{diff}^{\text{各駅停車}} = 4 \\ Con^{\text{各駅停車}} = 0.98705 \\ Cost^{\text{各駅停車}} = 30 + 28 = 58 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W^{\text{東海道}} = 4 + 10 \\ T^{\text{東海道}} = 11 + 5 + 19 \\ \mathit{diff}^{\text{東海道}} = 11 \\ Con^{\text{東海道}} = 0.95956 \\ Cost^{\text{東海道}} = 14 + 35 = 49 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W^{\text{横須賀}} = 4 + 12 \\ T^{\text{横須賀}} = 11 + 5 + 23 \\ \mathit{diff}^{\text{横須賀}} = 15 \\ Con^{\text{横須賀}} = 0.92414 \\ Cost^{\text{横須賀}} = 16 + 39 = 55 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W^{\text{京浜東北}} = 4 + 6 \\ T^{\text{京浜東北}} = 11 + 5 + 28 \\ \mathit{diff}^{\text{京浜東北}} = 20 \\ Con^{\text{京浜東北}} = 0.84113 \\ Cost^{\text{京浜東北}} = 10 + 44 = 54 \end{cases}$$

全経路を考慮した移動コストは以下のとおりとなる．

$$\begin{cases} W \approx (\frac{1}{60} + \frac{0.99210}{60} + \frac{0.98705}{30} + \frac{0.95956}{14} \\ \qquad + \frac{0.92414}{16} + \frac{0.84113}{10})^{-1} \\ \qquad = 3.6164 \\ T \approx 24 + \frac{0.99210}{5.7040} \times 1 + \frac{0.98705}{5.7040} \times 4 \\ \qquad + \frac{0.95956}{5.7040} \times 11 + \frac{0.92414}{5.7040} \times 15 \\ \qquad + \frac{0.84113}{5.7040} \times 20 \\ \qquad = 32.096 \\ Cost = W + T = 3.6164 + 32.096 \\ \qquad = 35.712 \end{cases}$$

移動コスト : 35.712 分 (1.5767 分/km)

(2)　湘南新宿ライン新設前後の移動コスト比較

湘南新宿ラインは 2001 年に新設された運行系統である．そこで，運行系統としての湘南新宿ラインが設定される前と比較して，新設された場合に移動コストがどの程度向上したのかを確認する．

湘南新宿ラインが開設された後の移動コストは，節 (1) のとおり 35.712 分 (1.5767 分/km) である．

a)　湘南新宿ライン新設前

湘南新宿ラインが開設される前の品川駅で乗換が必要であった時点での移動コストは以下のようになる．

$$\begin{cases} CostW^{\text{東海道}} = 4 + 10 \\ CostM^{\text{東海道}} = 11 + 5 + 19 \\ \mathit{diff}^{\text{東海道}} = 0 \\ Contribution^{\text{東海道}} = 1 \\ Cost^{\text{東海道}} = 14 + 35 = 49 \end{cases}$$

$$\begin{cases} CostW^{\text{横須賀}} = 4 + 12 \\ CostM^{\text{横須賀}} = 11 + 5 + 23 \\ \mathit{diff}^{\text{横須賀}} = 4 \\ Contribution^{\text{横須賀}} = 0.89500 \\ Cost^{\text{横須賀}} = 16 + 39 = 55 \end{cases}$$

$$\begin{cases} CostW^{\text{京浜東北}} = 4 + 6 \\ CostM^{\text{京浜東北}} = 11 + 5 + 28 \\ \mathit{diff}^{\text{京浜東北}} = 9 \\ Contribution^{\text{京浜東北}} = 0.19332 \\ Cost^{\text{京浜東北}} = 10 + 44 = 54 \end{cases}$$

全経路を考慮した移動コストは、以下の通りとなる。

$$\begin{cases} CostW \approx (\frac{1}{14} + \frac{0.89500}{16} + \frac{0.19332}{10})^{-1} \\ \qquad = 6.8167 \\ CostM \approx 35 + \frac{0.89500}{2.0883} \times 4 + \frac{0.19332}{2.0883} \times 9 \\ \qquad = 37.547 \\ Cost = CostW + CostM = 6.8167 + 37.547 \\ \qquad = 44.364 \end{cases}$$

移動コスト : 44.364 分 (1.9587 分/km)

b)　湘南新宿ライン新設前後の比較結果

湘南新宿ラインが開設されたことにより，移動コストが約 8.6 分減少したことがわかる．これは，従来の経路と比較して湘南新宿ラインを利用すると所要時間が短縮し，かつ乗換が不要なため移動コストが減少したと考えられる．しかし，湘南新宿ラインの新設による最少所要時間の減少ほど移動コストが減少しない原因は，最少所要時間である湘南新宿ラインの特別快速の運転間隔が小さくないためであると考えられる．

7.　おわりに

本研究では，予め決められたスケジュールに従い運行される交通ネットワークの評価に利用する特徴量を交通流の観測データから導出するのではなく，個人の行動選択モデルからボトムアップ形式で導出することを試みた．その結果，交通ネットワークの評価に利用する特徴量として，目的地までの移動に要する時間に

着目して算出する「移動コスト」を導出することができた．また,「渋谷ー横浜間の移動の例」のように，交通ネットワークの変更前後の移動コストを比較することにより，交通ネットワークの改変による利便性の変化を評価することもできた．

(1) 今後の課題

本研究では，個人の行動選択モデルを基にミクロの視点から，電気回路の抵抗値の計算方法に発想を得た「ネットワークをマクロの視点から評価するモデル」を構築した．しかし，ミクロの視点から導出したマクロモデルが現実の世界で導出されることの確認ができていない．また，現実の利便性の評価との整合性を確認するまでには至っていない．このため，行動選択モデルの精緻化し計算機上でのシミュレーションを実行することにより，主観的ではあっても現実の利便性の評価との整合性を容易に説明できるようにすることが今後の課題である．

参考文献

1) 土木学会 土木計画学研究委員会：交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解法-, 土木学会, 1998.
2) Lauri Häme, Harri Hakula: Dynamic Journeying in Scheduled Networks *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Mar. 2013,Vol.14, no. 1,pp.360-369.
3) John Bates, John Polak, Peter Jones, Andrew Cook: The valuation of reliability for personal travel *Transpotation Research Part E*, 2001,Vol.37,pp.191-229.
4) 広島電鉄株式会社: http://www.hiroden.co.jp/train/rosenzu/index.html 電車路線図(2012/1/29 参照).

(????. ?. ?? 受付)