通勤路線における快速電車の運行計画

輿　幸大(沼田一道　助教授)

1．はじめに

近年さまざまな理由により遠隔地から通勤せざるを得ない人が多い．遠隔地通勤者の圧倒的多数が利用しているのは電車である．その理由としては安価であること，到着時間の正確性などがあげられるが，一番大きな理由は他の交通手段に比べて通勤所要時間が小さいことであろう．特に遠隔地からの通勤者にとって快速電車の存在は欠かせない．快速電車は通勤所要時間を短縮するだけでなく，遠隔地からの乗客を優先して運ぶことにより，通勤範囲を広げる役割もある．

2．研究目的

快速電車の導入で遠隔地通勤者の所要時間は短縮されるが，一方，都心の乗客は快速の通過待ちで所要時間が増してしまうという面もある．このことは，快速電車の運行割合や停車駅をどのようにするかという快速電車の運行計画に大きく関係する．郊外から都心に向かう路線の通勤時において，快速電車の運行割合と停車駅を決定する問題を扱った研究に文献[1]がある．[1]はネットワーク上の混合整数計画問題としてこの問題を定式化している．しかし，そこで用いられる仮定にはやや現実的でないものもあり，また，最適解を1つ求めるというアプローチなので結果を利用しづらいところもある．本研究では，シミュレーションにより各駅からの乗客の所要時間を求めることで，誰（各駅からの乗客）にとって，どのように満足／不満なのかを検討できるモデルを提案する．

3．モデル

郊外から都心へ向かう路線において，通勤時に各乗客が電車に乗ってから目的地に着くまでの所要時間を最小とする快速電車の運行割合と停車駅を見出すモデルを考える．

図1　　電車路線

図1のような，通勤方向を駅1から駅mとする単一路線を考える．電車には快速電車と普通電車があり，両方とも駅1を出発して駅mまで行くものとする．電車の出発順序は駅1をn本の普通電車が出発した後に快速電車が1本出発し，出発間隔はそれぞれ等間隔とする．快速電車は駅1と駅mでは必ず停車するものとする．各駅（1，・・・，$m-1$）では乗客が乗車するものとする．各駅で停車することのできる電車は，快速電車・普通電車に関係なく2台までとする．

3．1　前提条件

このモデルでの前提条件を以下に示す．

①乗客は駅（1，…，$m-1$）で乗車し，全員駅mで降りる．②駅に乗客許容数はない（乗客は全員駅に入れる)．③乗客は前の駅には戻らず電車の進行方向と同じ方に進む．④電車に乗客許容数はない（乗客は全員電車に乗れる)．⑤乗客は乗車駅からもっとも早い行き方を選択し駅mに行く．

3．2　電車の走行に関する仮定

電車の走行に関しては，以下のように仮定する．快速電車の停車駅の集合をS_0とし，快速電車の通

過駅の集合をS_1とする．普通電車の駅jから$j+1$への走行時間をT_{1j}とし，快速電車の駅jから$j+1$への走行時間をT_{0j}とする．電車は駅において停車し，停車時間をT_sとする．T_sは定数とする．普通電車は快速電車に追い越される時通過待ちをし，通過待ち時間をTTとする．

3．3　追い越しの条件

普通電車がある駅に到着した時，快速電車がその駅までT_s時間以内の位置にいたら追い越されるとする．普通電車の追い越される駅は，S_0に属する駅でもS_1に属する駅でもかまわない．また，普通電車は追い越された後，快速電車が出発したT_s時間後に出発する．

3．4　ダイアグラム

ここまでの条件のもと，電車を仮想的に駅1から駅mまで動かしてみるとダイアグラムができる．

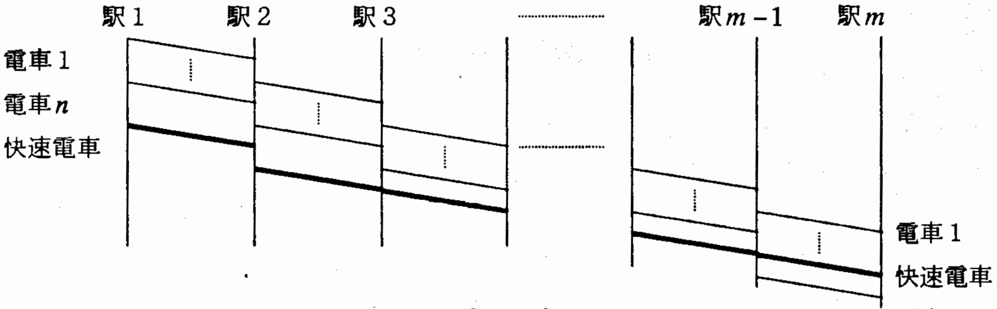

図2　ダイアグラム

ダイアグラムによって目的駅までの各電車の運行状況が分かる．ここで，駅jにおいて電車$h-1$（普通／快速）が出発してから電車h（普通／快速）が出発するまでの時間帯をTZ_{hj}（図3）とする．TZ_{hj}に到着した乗客はダイアグラムによりどの電車に乗れば最も早く目的駅に到着できるのか分かる．また，各駅における，普通電車1が出発してから次の普通電車1が出発するまでの時間帯を1サイクル（図4）とする．1サイクルは$(n+1)*T_w$であり，すべての駅で等しい．

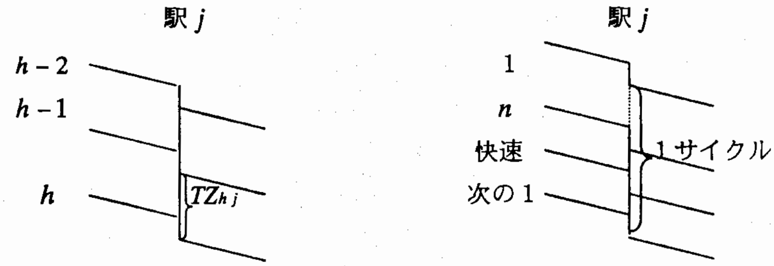

図3　到着時間帯

図4　サイクルの定義

3．5　乗客の行動パターンと所要時間

乗客が目的駅へ行く方法は，S_0，S_1のどちらから乗車するかによって異なり，それぞれ2通り存在する．乗客がS_0に属する駅に到着した場合，快速電車で目的駅まで行けば早く到着するはずだが，快速に乗り合わせず普通電車のみで行くこともある．また，乗客がS_1に属する駅に到着した場合，途中駅で快速に乗り継いで行けば早いが，乗り継ぎがうまく行かずに普通電車のみで行くこともある．結局，乗客が目的駅まで行く方法は以下の4つのいずれかである．

①　S_0に属する駅に到着して普通電車のみで行く

②　S_0に属する駅に到着して快速電車のみで行く

③　S_1に属する駅に到着して普通電車のみで行く

④　S_1に属する駅に到着して途中まで普通電車で行き，快速電車に乗り換える

各乗客は，乗車する駅の種別（S_0／S_1）と到着時刻により，目的駅に最も早く到着できる行き方（①または②／③または④）を選ぶ.

まず，乗客がS_0に属する駅に到着した場合について考える．駅 j （$\in S_0$）から①の方法で行く方が目的駅に早く着く時間帯の添字の集合をI_{p1}とする．1サイクルに①の方法で目的駅まで行く時間帯の割合をα_jとすると，$\alpha_j = \sum_{h \in Ip1} TZ_{hj} / \{(n+1) * T_w\}$と表せる．また，その時②の方法で目的駅まで行く時間帯の割合は$1-\alpha_j$である．駅 j に到着した乗客が①，②の方法で目的駅まで行く時の所要時間をZ_{1j}，Z_{2j}とすると，これらは次の式で表される.

$$Z_{1j} = \alpha_j \left\{ \sum_{l=j}^{m-1} T_{1l} + (m-1-j) T_s \right\} \quad , \quad Z_{2j} = (1-\alpha_j) \left\{ \sum_{l=j}^{m-1} T_{0l} + \left| S_0 \cap \{j+1, \ldots, m-1\} \right| T_s \right\}$$

次に，乗客がS_1に属する駅に到着した場合について考える．同様に駅 j （$\in S_1$）から③（④）の方法で行く方が目的駅まで早く着く時間帯の添字の集合をI_{p3}（I_{p4}）とする．③，④の場合，普通電車は快速電車に追い越される時とそうでない時があるので，快速の通過待ち時間は各電車によって変わる．そこで駅 j から普通電車 h で目的駅まで行く場合の快速待ち時間をTT_{hj}のように表す．駅 j から乗った乗客が③，④の方法で目的駅まで行く時の所要時間をZ_{3j}，Z_{4j}とすると，これらは次の式で表される.

$$Z_{3j} = \sum_{h \in Ip3} TZ_{hj} / \{(n+1) * T_w\} \left\{ \sum_{l=j}^{m-1} T_{1l} + (m-1-j) T_s + TT_{hj} \right\}$$

$$Z_{4j} = \sum_{h \in Ip4} TZ_{hj} / \{(n+1) * T_w\} \left[\left\{ \sum_{l=j}^{k-1} T_{1l} + (k-1-j) T_s + TT_{hj} \right\} + \left\{ \sum_{l=k}^{m-1} T_{0l} + \left| S_0 \cap \{k+1, \ldots, m-1\} \right| T_s \right\} \right]$$

3．6　目的関数

駅 j に1サイクルに到着する乗客をP_j人とすると,すべての乗客の総所要時間は以下のようになる.

$$Z = \sum_{j \in S0} P_j (Z_{1j} + Z_{2j}) + \sum_{j \in S1} P_j (Z_{3j} + Z_{4j})$$

この目的関数Zを最小にすれば良い.

4．シミュレーション

まず普通電車と快速電車の比（n:1）と快速停車駅の数$a = |S_0|$を決める．nとaはいろいろ変えてみる．a個の要素からなるS_0を1つ固定すると電車のダイアグラムが決まり，Zの値を計算できる．S_0（$|S_0| = a$）を変化させてZが最小になるS_0を求める.

4．1　パラメタの仮定

（1）$T_{0j} \neq T_{1j}$の時，走行中に快速電車が前の普通電車に追いついてしまう事があるので$T_{0j} = T_{1j}$とする.

（2）$T_{0j} = T_{1j} < T_s$の時，駅に電車が数台停車してしまう事があるので$T_{0j} = T_{1j} \geqq T_s$とする.

（3）$T_w \leqq T_s$の時，駅に電車が数台停車してしまう事があるので$T_w > T_s$とする.

5．実験結果と考察

$T_{1j}=T_{0j}=5$，$T_s=2$，$T_w=5$，$P_j=20$（一定），としてmを変えた時の結果を表1に示す．

表1　mを変えた時の総所要時間

mの数 / (n，a)	6 (停車駅)		11 (停車駅)		16 (停車駅)	
普通電車のみ	1900.000		7300.000		16200.000	
(1，1)	1620.000	②	5860.000	⑤	11520.000	⑤
(1，2)	1780.000	②③	5900.000	②③	11680.000	④⑤
(2，1)	1710.667	②	6004.000	②	13098.667	⑦
(2，2)	1806.667	②⑤	5964.000	②③	13160.000	②③
(3，1)	1758.000	②	6135.000	②	13195.000	②
(3，2)	1830.000	②⑤	6340.000	②③	13075.000	②③

この結果から，普通電車のみより快速電車を導入した方が，総所要時間（Z）が明らかに小さくなることが分かる．また，mが変化しても常に（n，a）＝（1，1）の時に，Zが最小となった．nを固定すると，aが小さい方がZが小さくなる傾向がある．$m=16$，$n=3$の時はaが多い方がZが小さくなっているが，この時aをさらに変化させると，3が最も良く，4になると再びZは大きくなった．停車駅（S_0）は，mが多い時やaが1の時はmの総数の中間辺りになるが，それ以外の場合は出発駅に近い駅になる傾向がある．

$m=11$，$T_{1j}=T_{0j}=5$，$T_s=2$，$T_w=5$として，P_jを1つ変えた時（他の$P_j=20$は一定）の結果を表2に示す．

表2　P_jを変えたときの総所要時間

P_jの値 / (n，a)	$P_5=40$ (停車駅)		$P_8=40$ (停車駅)		$P_5=60$ (停車駅)		$P_8=60$ (停車駅)	
(1，1)	6460.000	⑤	6200.000	⑤	7060.000	⑤	6540.000	⑤
(1，2)	6520.000	②③	6280.000	②③	7140.000	②③	6660.000	②③
(2，1)	6636.000	②	6384.000	②	7268.000	②	6764.000	②
(2，2)	6650.667	②③	6304.000	②③	7324.000	②⑤	6644.000	②③

この結果から，ある駅の乗客が多いと快速電車はその駅で優先的に停車するが，その駅が目的駅に近いと停車するとは限らないことが分かる．このシミュレーションでP_8をさらに変化させ190まで増やした時，駅8で快速電車が停車する結果となった．またP_8が多い時，（n，a）＝（2，1）より（2，2）の方が良い値をとっている事が分かる．

6．まとめ

本研究では快速電車の最適な運行割合，停車駅を求めるシミュレーション・モデルを提案し，基礎的な実験を行った．得られた結果は，現実感覚に照らし合わせてほぼ納得できるものであった．目的駅の複数化，電車種別の多様化，走行条件の精密化などにより，モデルをより現実に近づけることは今後の課題である．

7．参考文献

[1]　大山達雄：「最適化モデル分析」，日科技連出版社，1993．