

公共交通網におけるパルスタイムテーブルシステム成立条件に関する研究*

A Study on Conditions for Realizing Pulse Timetable System on Public Transportation Network*

波床 正敏**・中川 大***

By Masatoshi HATOKO**, Dai NAKAGAWA***

1. はじめに

新たな時代における日本の幹線鉄道網はどうあるべきかについて考える際、スイスの幹線鉄道政策 Rail 2000 プロジェクト (Bahn 2000) は注目すべき方策である。

その政策目標は「より頻繁に、より速く、乗換を少なく、より快適に」であり、旅行時間の短縮、乗継ぎ拠点での接続の改善、終日 30 分間隔の長距離列車運行などにより、新たな公共交通利用者を得ようとするものである。

乗継ぎの利便性を確保するため、近代化された高速走行対応の車両とインフラを整備し、たとえば、主要な区間の所要時間を 30 分の倍数より若干短い時間で結ぶように時間短縮が実施されている。Rail2000 実施の結果、列車本数が 12%、列車キロは 14%、それぞれ増加するとともに、ネットワーク全体で旅客数が平均 8%、改良が実施された路線で約 20%増加するなど¹⁾、大きな効果を上げている。

また、波床・中川の研究²⁾では、Rail2000 実施前後の 1987 年と 2005 年について、スイス主要都市間の交通利便性を期待所要時間などを用いて計測し、乗継ぎ利便性の向上がネットワーク全体の利便性向上に大きく寄与していることが明らかになっている。

スイスの Rail2000 では、主要駅間を 30 分の倍数程度で結ぶとともに、30 分間隔の列車運行という方法で乗継ぎ利便性向上を図っているが、わが国でこのような幹線鉄道システムを導入する場合、どのような条件を満たせばどこでも便利に乗継ぎができるネットワークを形成できるかについての一般的条件は明確ではない。

本研究では、間欠運行や乗継ぎの可否などといった公共交通独特のネットワークの特徴を考慮しながら、乗継ぎ利便性の高いネットワークの一般的条件について考察することを目的とする。

2. パルスタイムテーブルシステムについて

スイスでは、幹線鉄道においてパターン化されたダイ

ヤの構築が行われるとともに、異なる幹線相互間の主要拠点駅における乗継ぎ利便性が良好である。また、アクセス手段となるバス・私鉄線・フェリーなども含めて、幹線鉄道の運行にあわせたダイヤ設定が実現されており、公共交通システムの成功例として注目されている³⁾。

このように一定間隔の脈動がネットワーク上を次々と伝わってゆくようなイメージで、公共交通網において円滑に乗継ぎが行えるように設定された運行ダイヤを「パルスタイムテーブル」と呼ぶことがある。

スイスでは、同期をとった公共交通輸送体系実現のため、前述のように一定の目標を設けて幹線鉄道改良を行ってきているが、わが国でこのような交通システムを導入するには、具体的にどのような施策が必要かを分析しなくてはならない。だが、すでに存在するネットワークに関する分析手法は進展してきているが、理想的なネットワークとはどのようなものであるかについては、議論が始まったばかりである。

3. 公共交通運行ダイヤの基本的表現について

交通ネットワークの分析ではグラフが利用されるが、単にリンクとノードで表現したネットワークでは公共交通の路線網の幾何形状を表現しているに過ぎず、これだけでは実際の利便性を分析することができない。本研究ではネットワークにおけるパターン化されたダイヤに関する分析であるので、次のような基本的表現を用いることとした。

例えば、パターンダイヤに基づいて運行されている列車が P を時刻 $t_p^{(n)}$ に出発する場合、物理学の単振動の表現を参考に、次のような表現が可能である。

$$t_p^{(n)} = n T_p + K_p \quad [1]$$

ここに、 T_p は運行間隔 [周期] である、 K_p は基準となる時刻からのズレ (例えば毎正時からのズレ) である [初期位相]、 n は [1] が表現しようとしている運行便が第 n 便目

表 1 パターンダイヤの基本表現

	1 便	2 便	3 便	4 便	表現
A 発: 毎時	10 分	25 分	40 分	55 分	$15n + 10$
走行時間	20 分	20 分	20 分	20 分	---
B 着: 毎時	30 分	45 分	00 分	15 分	$15m + 0$

* キーワーズ: パルスタイムテーブル, 交通網計画, 鉄道計画, Rail2000

** 正員, 博士 (工), 大阪産業大学工学部都市創造工学科
(大阪府大東市中垣内 3-1-1, Tel: 072-875-3001 (ex.3722),
E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp)

*** 正員, 工博, 京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂, Tel: 075-383-3225,
E-mail: nakagawa@urban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

であることを表す整数である。このとき、列車がQへ到着する時刻 $t_Q^{(Arr)}$ は次のようになる。

$$t_Q^{(Arr)} = t_P^{(Dep)} + L_{PQ} = n T_P + K_P + L_{PQ} \quad [2]$$

ここに、 L_{PQ} はP Q間の走行時間である。

具体的に例を示すと、表1のように毎時4本運行されていて、毎時10・25・40・55分にそれぞれPを出発し、20分間走行してQに到着する場合、 $T_P = 15$ 、 $K_P = 10$ 、 $L_{PQ} = 20$ であるので、次のように表現できる。

$$t_P^{(Dep)} = 15n + 10 \quad [1']$$

$$t_Q^{(Arr)} = t_P^{(Dep)} + 20 = 15(n+2) + 0 = 15m + 0 \quad [2']$$

なお、整数 m は $n+2$ を置き換えたものであるが、[2'] が表現しようとする運行便が第 m 便目であることを表す。

4. 公共交通リンクの直列接続時の利便性

(1) 期待所要時間と実運行時損失時間 (ROLTime)

公共交通利用による2点間の所要時間は、一般的には利用する便ごとに乗車時間が異なるので、各便の出発時刻においては図1の●点のように示される。また、他の時刻を出発時刻とした場合は、次便までの待ち時間が加わり、図中の斜め線のようになる。旅行開始時刻に対して目的地に最も早く着くことを想定すると、斜め線のうち実線部分をつなぎ合わせたノコギリ状のグラフが時刻に対する所要時間の変化を表している。この場合、鎖線部分はより早く到着する便があるので利用されない。このノコギリ状のグラフを平均して所要時間相当の指標としたものが期待所要時間である。期待所要時間は、各便の所要時間が小さく、運行頻度が高いほど小さな値となり、また各便の所要時間や運行本数が同じ場合でも、団子運転のような実質的な利便性が低い場合には値が大きくなる。実際のダイヤに沿って算出することで、乗継ぎの良否も考慮できる。なお、EVGC(期待一般化費用)⁴⁾ は図の縦軸を一般化費用としたものである。

期待所要時間を説明した図1では、4本の列車のうち列車4の所要時間が最小である。さらに、複数の路線を乗り継がなければならない場合において、このような最速便を経路上の各路線ですべて乗り継がたと仮定すると、そのような仮想的な所要時間(以下、仮想最速所要時間)と期待所要時間との差は、一般的には次の各項目により構成される。これを、実運行時損失時間(= Real Operation Loss Time 以下、ROLTime)と定義する。²⁾

- (I) 先行列車や単線運転の対向列車、駅ホームの制約等により、列車の走行時間を延ばさざるを得なくなる損失(経路変更に伴う迂回等含む)
- (II) 出発時利用路線の運行頻度の大小に伴う、列車の平均的な待ち時間に関する損失
- (III) 乗継ぎ時の接続待ちに伴う時間的損失

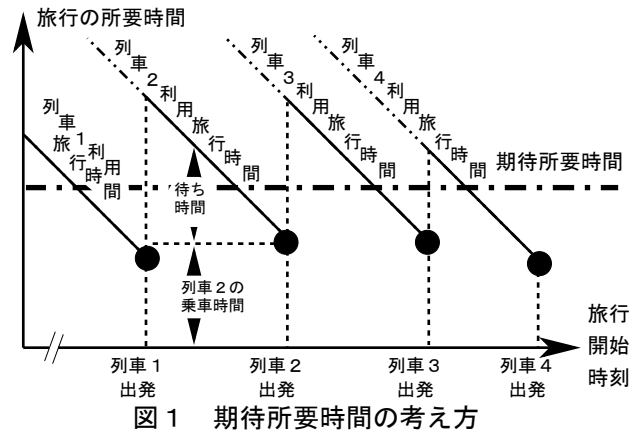


図1 期待所要時間の考え方

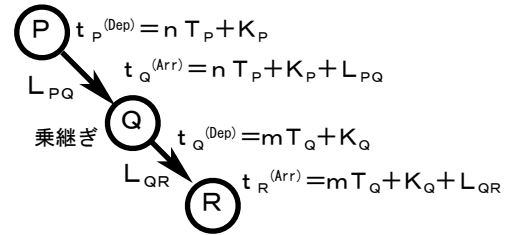


図2 乗継ぎ(公共交通リンクの直列接続)

(2) 乗継ぎ利便性を決定する要素

パルスタイムテーブルの実現への基本的な課題として、2つの公共交通機関の乗継ぎがある。最も基本的な状況として、図2のように地点Pを出発し、地点Qで乗り換え、地点Rに行く場合を想定する。

このとき、PからRまでの利便性の評価方法としては、公共交通機関であるので前述の「期待所要時間」が適している。期待所要時間は走行時間だけでなく、運行頻度や乗継ぎの良否も考慮できる指標である。また、公共交通機関の乗継ぎの良否を判断する方法としては、ROLTimeを使った次のような方法が考えられる。

もし、全便が同じ走行時間であるとする、定義上、ROLTime は期待所要時間から走行時間の合計を除いた値となり、図2に関するROLTimeは、 $L_{PQ} = L_{QR} = 0$ として期待所要時間を求めた場合と同じとなる。このとき、Pの出発時刻 $t_P^{(Dep)}$ 、Qへの到着時刻 $t_Q^{(Arr)}$ 、Qの出発時刻 $t_Q^{(Dep)}$ 、Rへの到着時刻 $t_R^{(Arr)}$ はそれぞれ次のようになる。

$$t_P^{(Dep)} = t_Q^{(Arr)} = n T_P + K_P \quad [3]$$

$$t_Q^{(Dep)} = t_R^{(Arr)} = m T_Q + K_Q \quad [4]$$

ここに、 n および m は、それぞれ[3]または[4]が表現しようとしている運行便が第 n 便目または第 m 便目であることを表す整数である。 T_P はPの出発時刻間隔[周期]、 T_Q はQの出発時刻間隔[周期]である。

さらに、ズレ[初期位相]をはかる基準となる時刻を全体的に K_P だけずらして、すなわち、[3]の K_P が0となるような基準を採用すると、次のようになる。

$$t_P^{(Dep)} = t_Q^{(Arr)} = n T_P + (K_P - K_P) = n T_P \quad [3']$$

$$\begin{aligned} t_Q^{(Dep)} = t_R^{(Arr)} &= mT_Q + (K_Q - K_P) \\ &= mT_Q + K \end{aligned} \quad [4']$$

ここに、 $t_P^{(Dep)}$ などは、[3]の K_P が0となるような基準を採用した場合における出発時刻の表現であり、例えば、次式を満たす。

$$t_P^{(Dep)} = t_P^{(Dep)} - K_P \quad [5]$$

[3'] [4']における n および m は、[3] [4]におけるものと同様に[3'] [4']が表現しようとしている運行便が第 n 便目または第 m 便目であることを表す整数である。 T_P や T_Q はそれぞれ P や Q の出発時刻間隔[周期]である。また、 K は K_P と K_Q の差つまり初期位相差である。

全便が同じ走行時間であるという条件下では、ROLTimeは前節(II)および(III)のような内容により構成され、乗継ぎの良否を示す指標として利用できる。具体的には、[3']のような路線と[4']のような路線を乗り継ぐ場合における期待所要時間を計測することによりROLTimeが算出される。乗継ぎ元と乗継ぎ先のそれぞれの運行間隔[周期]である T_P と T_Q 、およびズレ[初期位相]の差である K [初期位相差]の3要素により決まる。

(3) 運行間隔の組み合わせおよび初期位相差の影響

全便が同じ走行時間であるという条件下では、図2のような乗継ぎにおいて、 $L_{PQ} = L_{QR} = 0$ として期待所要時間を求めることにより、乗継ぎの良否を示すROLTimeが算出できる。

例えば、 $T_P = 30$ 分、 $T_Q = 40$ 分、 $K = 10$ 分の場合、 P の発時刻 $t_P^{(Dep)}$ (= Q の着時刻 $t_Q^{(Arr)}$)は0, 30, 60, 90 …、

表2 ROLTimeの計算方法

時刻(t)	$t_P^{(Dep)}$	$t_Q^{(Arr)}$	$t_Q^{(Dep)}$	$t_R^{(Arr)}$	$t_R^{(Arr)} - t$
0	0	0	10	10	10
1	30	30	50	50	49
2	30	30	50	50	48
3	30	30	50	50	47
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	30	30	50	50	21
30	30	30	50	50	20
31	60	60	90	90	59
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	60	60	90	90	31
60	60	60	90	90	30
61	90	90	90	90	29
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
89	90	90	90	90	1
90	90	90	90	90	0
91	120	120	130	130	39
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
119	120	120	130	130	11
120	120	120	130	130	10
121	150	150	170	170	49
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
720	720	720	730	730	10
平均 (ROLTime)	---	---	---	---	29.5

また Q の発時刻 $t_Q^{(Dep)}$ (= R の着時刻 $t_R^{(Arr)}$)は10, 30, 50, 70…であるので、図1における旅行開始時刻を0, 1, 2, 3…720と1分ずつ変化させた場合における R への着時刻 $t_R^{(Arr)}$ は表2の右から2番目の欄のように変化する。このとき、旅行開始時刻に対応した旅行時間 $t_R^{(Arr)} - t$ は表2の右端のように変化する。この右端の旅行時間の平均値が期待所要時間であるが、 $L_{PQ} = L_{QR} = 0$ であるので、そのままROLTimeの値になる。

図3は、乗継ぎ元の運行間隔[周期]を $T_P = 30$ 分に固定し、乗継ぎ先の運行間隔[周期] T_Q を1~60分の範囲で1分刻みで変化させたものである。横軸は T_Q 、縦軸はROLTimeである。ROLTimeは上述の方法で算出した。また、初期位相差 K についても値を10分刻みで変化させた。計測時間帯幅は720分(=12時間)とした。 T_Q や K の値を変更するたびに表2のような計算を行い、その計算結果であるROLTimeの値のみをプロットしている。

図3によると、基本的傾向としては、 K の値によらずROLTimeは、概ね T_P と T_Q の合計の半分程度の値で推移している(図中の二点鎖線)。都市交通などを取り扱う研究では、しばしば運行間隔の半分を平均待ち時間として所要時間に加える場合があるが、図3から判断すると、乗継ぎ前後の運行間隔が互いに独立しており、確率的に運行間隔が決まるような場合には、このような仮定は概ね妥当と思われる。

図3を詳しく分析すると、 $K = 0$ に関するグラフは、何力所かで値が局地的に大きく低下している。最も顕著なのは $T_Q = T_P = 30$ 分の時であり、前後のROLTimeが約30分であるのに対し、 $T_Q = 30$ 分ではROLTime=15分である。また、 T_Q の値が10, 15, 20, 45, 60分などにおいても局地的に値が小さくなっている。これらはいずれも、乗継ぎ元である $T_Q = 30$ 分との最小公倍数が比較的小さい値となるという共通の特徴を持っている。

また、 $T_Q = 30$ 分に着目すると、 $K = 0$ の場合はROLTimeが15分であるものの、 $K = 10$ の場合は25分、 $K = 20$ の場合は35分であり、特に $K = 20$ においては前述した二点鎖線よりも大きな値となっている。これは、単に乗継ぎ元と乗継ぎ先の運行間隔をそろえるだけでは不十分であることを示している。つまり、乗継ぎ元から乗

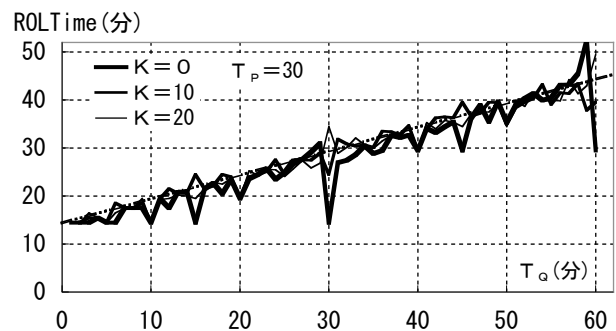


図3 T_Q を変化させた場合のROLTimeの変化

り継いだら、速やかに出発できるダイヤ設定でなければ、かえって利便性を悪化させる可能性があることを示している。

(4) 乗継ぎ待ち時間の「うなり」

図4は $T_P = T_Q = 15$ 分、 $K = 7.5$ 分とした場合の時間軸(時刻)に沿った乗継ぎ待ち時間(Pを出発する際の待ち時間とQにおける乗継ぎ時の待ち時間の合計)の変化を図示したものである。図5は $T_P = 15$ 分、 $T_Q = 20$ 分、 $K = 0$ 分の場合である。両者とも、 $ROLTime = 15$ 分となっている。

前者は周期15分の単調な変化の繰り返しであるのに対し、後者は周期60分(15分と20分の最小公倍数)のゆっくりとした変化と周期15分の小さな変化が組み合わさっており、周期の異なる波動を重ねた際に生じる「うなり」のような現象を生じている。

前者は、乗継ぎ元の15分ごとに運行される便のどれを利用して乗継ぎ待ち時間はすべて同じ条件であるが、後者では、利用する便によっては乗継ぎ待ち時間が極めて短い場合もあれば、乗継ぎ先の便が無くて長時間待たされる場合もあり、乗継ぎ待ち時間はすべて異なる。

パターンダイヤの目的は、どの時間帯においても同じ交通サービスを提供することにある。だが、上記のように平均的な待ち時間を示す $ROLTime$ の値が同じでも、乗る便によって利便性が大きく異なることは、パターンダイヤの趣旨に反することになり、適切なシステムとは言えない。

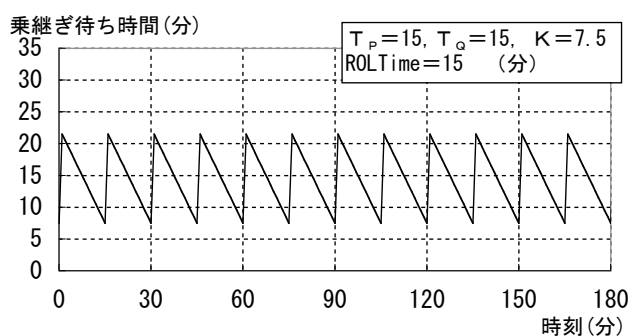


図4 $T_P = T_Q$ の場合の乗継ぎ待ち時間の変動

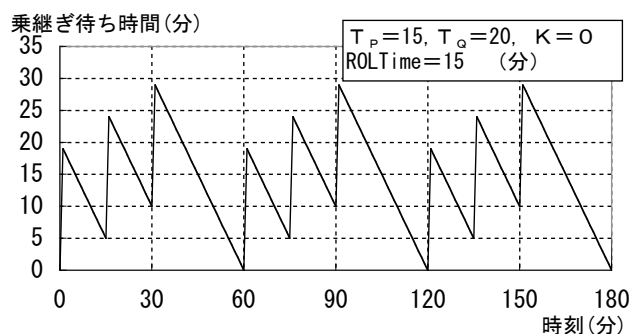


図5 $T_P \neq T_Q$ の場合の乗継ぎ待ち時間の変動

5. 一般的なネットワークにおける実現の基礎条件

(1) スイスにおける実現方法

前章では最も基礎的な2つの公共交通を乗り継ぐケースについて分析したが、現実の交通ネットワークは複雑に入り組んでいる。幹線鉄道網において、パルスタイムテーブルシステムを成功させる方法の一つとしては、スイスのRail 2000で実践されている方法があり、拠点駅間を一定時間(30分や60分の倍数)内で結ぶとともに、毎時同じパターンの運行を行うものである。これは一つの確実な方法ではあるが、必ずしも一般的な条件ではない。

(2) 閉ループを持たないネットワークの場合

パルスタイムテーブルシステムを導入しようとしている公共交通ネットワークが、図6のように、唯一の乗り換え拠点しか持たないネットワークの場合は、周期さえそろえておけば、各リンクの所要時間に関する制約は全くない。例えば、A-Fいずれかを出発してXを経由し、A-Fのいずれかに向かう場合、Xへの到着時刻さえ決めれば、A-Fの出発時刻あるいは到着時刻はAX-FXの各リンクの所要時間だけを用いて決めることができる。

(3) 閉ループを持つネットワークの場合

パルスタイムテーブルシステムが実現した状態では、すべての地点で速やかに乗継ぎ可能である。もし、図7のような閉じたループを持つネットワークの場合は次のような関係が成立する。

例えば、公共交通の運行間隔を T とし、ある地点Pで時刻 $t_P^{(dep)}$ に出発し、閉ループに沿って一周し、もとのPまで戻ってくることを考える。4章の分析結果を考慮し、経路上のすべての運行間隔[周期]を T_P とする。

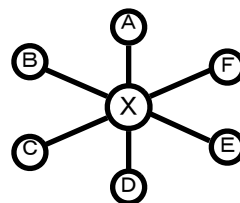


図6 閉ループを持たないネットワーク

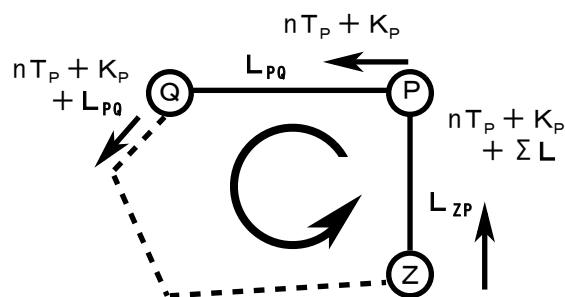


図7 閉ループを持つネットワーク

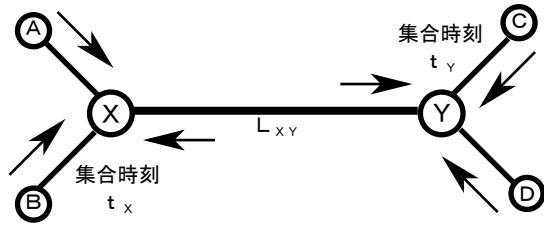


図8 交通結節点間のリンク長の条件

$$t_P^{(Dep)} = n T_P + K_P \quad [6]$$

n は、[6]が表現しようとしている運行便が第 n 便目であることを表す整数である。また、 K_P は初期位相である。リンク PQ の走行時間を L_{PQ} とすると、 Q の着時刻 $t_Q^{(Arr)}$ は次のようになる。

$$t_Q^{(Arr)} = t_P^{(Dep)} + L_{PQ} = n T_P + K_P + L_{PQ} \quad [7]$$

Q への到着と同時に Q を出発したとすると、次のようになる。

$$t_Q^{(Dep)} = t_Q^{(Arr)} \quad [8]$$

以下、同様の考え方で閉ループを一周して最初に出発した P の手前の Z まで達した時の Z への到着時刻を $t_Z^{(Arr)}$ ($= t_Z^{(Dep)}$)とすると、一周して、もとの P に到着する時刻 $t_P^{(Arr)}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} t_P^{(Arr)} &= t_Z^{(Arr)} + L_{ZP} \\ &= n T_P + K_P + L_{PQ} + \dots + L_{ZP} \\ &= n T_P + K_P + \Sigma L \end{aligned} \quad [9]$$

ここに、 ΣL は閉ループを一周する際の各リンク走行時間の総和である。パルスタイムテーブルシステムが実現した状態では、再び P に戻った際にも速やかに乗継ぎが行われなければならないので、[6]の右辺と[9]の右辺は等しくなる。このため、次の条件を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} t_P^{(Arr)} = t_P^{(Dep)} &= n T_P + K_P = n' T_P + K_P + \Sigma L \\ \therefore m T_P &= \Sigma L \end{aligned} \quad [10]$$

n および n' は、 P の出発時刻を表現する際の運行便番号(第 n 便目および第 n' 便目を意味し、 $n < n'$)、整数 m は n' と n の差であり、一周する際のリンク走行時間の合計 ΣL は運行間隔[周期] T_P の整数倍でなければならないことを示している。

(4) 複数の交通結節点を持つネットワーク

図8のように複数の交通結節点[ハブ]を持つ場合を想定する。このとき、それぞれの交通結節点だけについて着目すれば、(2)で述べたように各交通結節点への集合時刻さえ決めておけば各リンク間の相互の円滑な乗継ぎが可能である。ところが、図8のように複数の交通結節点を持つ場合では、次のような関係が存在している。

$$t_Y^{(Arr)} = t_X^{(Dep)} + L_{XY} \quad [11]$$

$$t_X^{(Arr)} = t_Y^{(Dep)} + L_{YX} \quad [12]$$

また、 X の出発時刻 $t_X^{(Dep)}$ は運行周期 T と初期位相 K 、便番号 n を用いて次のように表現される。

$$t_X^{(Dep)} = n T + K \quad [13]$$

このとき、到着したらすぐに出発できるものとする、

$$t_X^{(Arr)} = t_X^{(Dep)} \quad [14]$$

$$t_Y^{(Arr)} = t_Y^{(Dep)} \quad [15]$$

であり、リンク XY の往路と復路の所要時間が同じであるとすると、

$$L_{XY} = L_{YX} \quad [16]$$

である。[11][13]より、

$$t_Y^{(Arr)} = t_X^{(Dep)} + L_{XY} = n T + K + L_{XY} \quad [17]$$

また、[12][13][15]より、

$$t_X^{(Arr)} = t_X^{(Dep)} = n' T + K = t_Y^{(Dep)} + L_{YX} \quad [18]$$

となる。 n' は便番号である。[15][17][18]より次の条件が導かれる。

$$\begin{aligned} n' T + K &= n T + K + 2 L_{XY} \\ \therefore m T &= 2 L_{XY} \end{aligned} \quad [19]$$

整数 m は n' と n の差であり、[19]は交通結節点間の往復時間は運行周期 T の整数倍でなければならないことを示している。

(5) より複雑なネットワークについて

実際の公共交通ネットワークは図6～図8に示した形状よりも複雑である。しかし、各公共交通リンクの同期をとるための基本的要素は、基本的には第4章および第5章の考え方で十分であると考えられる。

図9のように、公共交通ネットワークを構成するリンクは、まず、図の左部分のような閉ループの一部であるものと、そうではないものに分けられる。閉ループの一部を構成するリンクについては、(3)節で示した考え方がそのまま適用される。また、閉ループ上に複数の交通結節点[ハブ]がある場合には(4)節で示した考え方も重ねて適用される。

閉ループに含まれないリンクについては、さらに、交

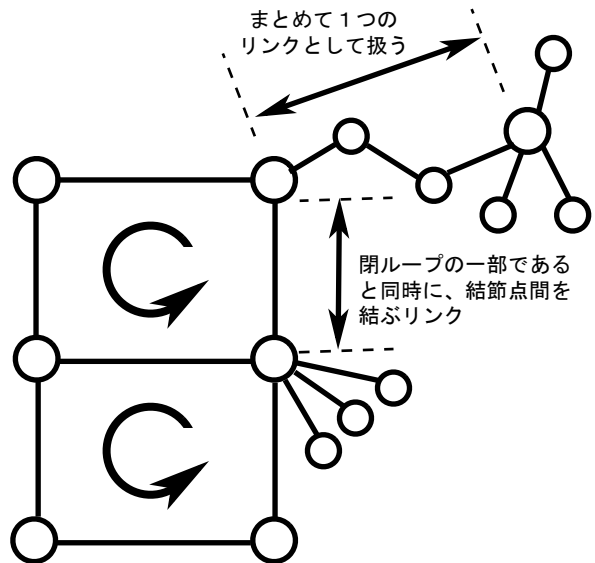


図9 より複雑なネットワーク

通結節点間を結ぶリンクと、そうではないものに分けられる。直接的に交通結節点間を結んでいなくとも、途中でのグラフの分岐がない場合には、まとめて1つのリンクとして取り扱いが可能である。このようにすることで、(4)節で示した考え方が適用可能となる。

最後に、閉ループの一部でもなければ交通結節点間を結ぶリンクでもない場合、(2)節の図6におけるAX~FXの各リンクや(4)節の図8におけるAXやBXなどの考え方、すなわち(2)節で示した交通結節点への集合時刻にあわせて運行するという方法を採用すればよい。

(6) 具体的なシステム構築方法について

公共交通網においてパルスタイムテーブルを構築するために、具体的にどのリンクをどれだけの所要時間にしなければならないかを決定するには、原則としてすべての交通結節点[ハブ]に対して集合時刻を設定するとともに、ネットワーク上のあらゆる任意の2つの交通結節点間について(4)節で示した条件を満たすようにリンク走行時間を設定し、さらにネットワーク上のあらゆる閉ループについて(3)節で示した条件を満たさなければならない。

実際の作業としては、次の4段階の作業により、第4章および第5章で示した各条件を満たすネットワークが完成する。なお、②および③における調整の程度は、状況に応じてリンク交通量などの重視すべき価値観に基づく重み付けにより優先順位がつけられることになると考えられる。

- ①全体の運行周期Tを決め、この半分であるT/2を計算する。
- ②末端部分を除く全てのリンク走行時間を、それぞれこのT/2の整数倍になるように調整する。これにより、必ず任意の2つの交通結節点間について(4)節で示した条件を満たすようになる。
- ③閉ループに含まれるリンクが少なくとも1度は計算対象となるように留意しながら、任意の閉ループに沿ってリンク走行時間の総和を計算する。この総和がT/2の偶数倍になるように、いずれかのリンク走行時間をT/2ずつ増減して調整する。この調整作業は、(4)節で示した条件を常に保持する。
- ④末端部分のリンクについては、リンク走行時間の制限はない。

図9には小さな閉ループが上下2つあり、中央の1本のリンクを共有している。また、これら2つのループにまたがって、外側に大きな閉ループが1つ存在する。このような場合でも③の方法による調整で十分であり、例えば2つの小さな閉ループに関する調整だけで、同時に外側の大きな閉ループに関する調整も同時に完了する。

いま、上側の小ループのリンク走行時間の総和を

ΣL_U 、上側の小ループのリンク走行時間の総和を ΣL_L とすると、それぞれの小ループに関して③の調整が終了した段階では ΣL_U 、 ΣL_L ともにT/2の偶数倍になっている。また、両小ループが共用しているリンク(図の中央)の走行時間を L_C とすると、 L_C は②を満たすように調整されているので、T/2の整数倍になっている。

このとき、外側の大ループについてのリンク走行時間の総和は $\Sigma L_U + \Sigma L_L - 2L_C$ であり、これはT/2の偶数倍、すなわち運行周期Tの整数倍になっており、(3)節の条件を満たす。閉ループが多数存在する場合においても、同様の考え方を繰り返し適用可能なので、③の方法で十分である。

6. 現実的対応に関する補足事項

(1) 階層的なネットワーク構成について

現実の公共交通網では長距離の全国的都市間交通から中距離の都市圏内交通、短距離の末端アクセス的交通まで様々な階層の交通により構成されている。これら異なる目的の公共交通を相互に連絡させる際にも、基本的には前章までで説明した方法で対応可能である。

だが、実際には運行頻度が路線により異なったり、乗継ぎを円滑に行うためだけの長時間停車が難しかったり、あるいは、上位階層ネットワーク上の主要ではない結節点において下位階層ネットワークと接続しなければならない場合があるなどの課題が存在している。以下は、これらに関する考え方の説明である。

(2) 運行頻度が異なるリンクが含まれる場合

現実の公共交通網では、路線ごとの運行頻度が同じとは限らない。例えば、図8のような路線網において、パルスタイムテーブルが構築された場合を模式的に表すと図10のようになる。図10は横軸に時刻をとり、縦方向は地点を表す。ただし、縦軸は概念的なものであり、実際の距離や位置関係を示すものではない。

図10のように、AまたはBを出発して一定の集合時刻にXに集まり、XY間を移動し、Yについても同様に集合時

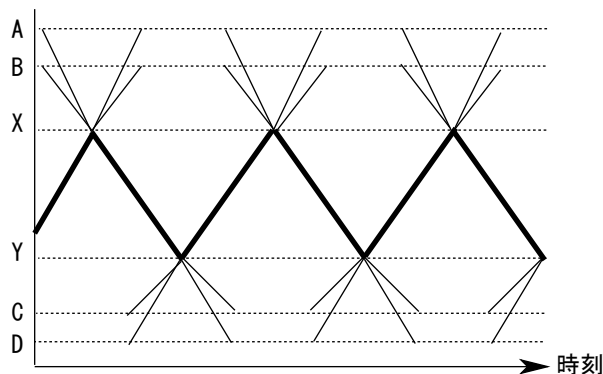


図10 パルスタイムテーブル構築成功

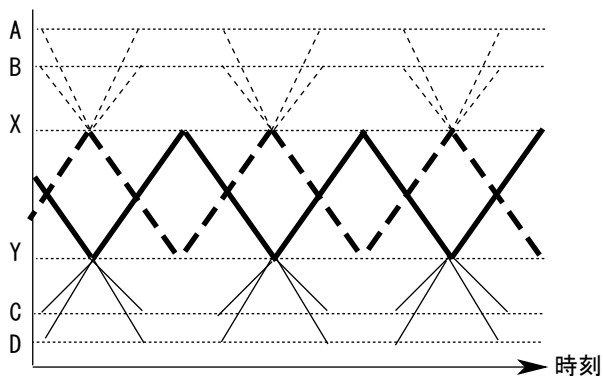


図 11 パルスタイムテーブル構築失敗

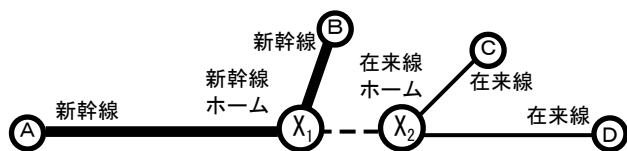


図 12 新幹線に関する乗継ぎ（ネットワーク）

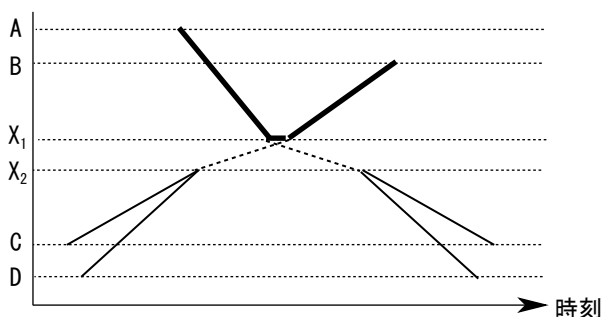


図 13 新幹線に関する乗継ぎ（ダイヤグラム）

刻を定めることによって、A、B、C、Dすべてについて、無用な待ち時間無く相互に結ぶことができる。

一方、図 11 のように XY 間の運行頻度がその他の区間の倍であったとする。このとき、A と B は XY 間の点線で示された系統の便に接続し、C と D は実線で示された系統の便に接続したとすると、A または B から C または D へ向かう場合には、必ず X もしくは Y において待ち時間が発生する。逆向きの場合も同様である。

このように、運行頻度が部分的に高い場合、ネットワーク全体でパルスタイムテーブルを構築するには、パルスタイムテーブル構築用の系統と、単に XY 間を結ぶだけの系統とを分けて考慮する必要がある。

(3) 乗継ぎのための停車時間確保が難しい場合

多数の大都市を結ぶ新幹線列車のような場合、乗継ぎ拠点駅といえども、長時間停車して各路線間相互の乗継ぎが完了するのを待つのが難しい。例えば図 12 のように A-X₁-B 間を結ぶ新幹線路線があり、図 13（作図方法は図 10 や図 11 と同様）のように新幹線ホーム X₁ にはごく短時間しか停車できない場合、C や D からの在来線は X₁-X₂ 間の乗継ぎ時間（在来線ホームと新幹線ホーム相互間の移動時間[片道分]）の分だけ早めに乗継ぎ拠点駅に到着

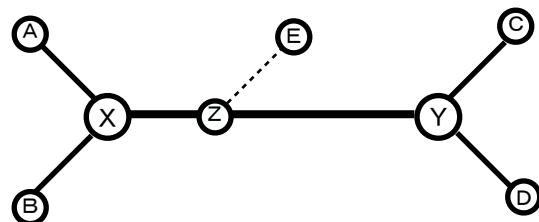


図 14 非主要結節点へのアクセス

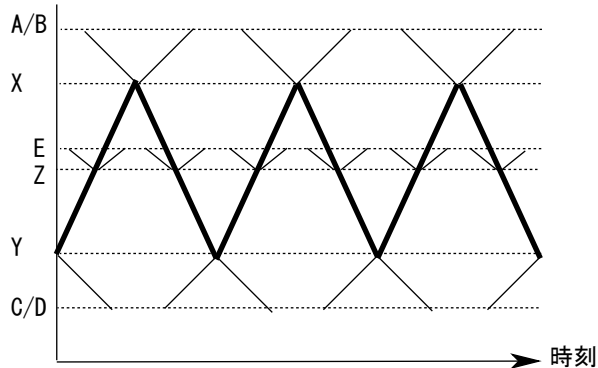


図 15 非主要結節点へのアクセス

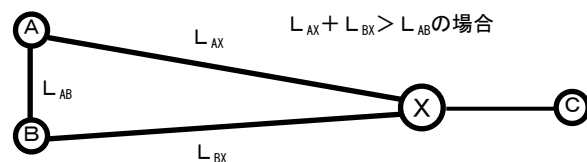


図 16 一部の乗継ぎを考慮する必要がない場合

する必要が生じる。だが、C-X₂-D のような在来線相互の乗継ぎには X₁-X₂ 間の往復に相当する長さの乗継ぎ時間を要するようになる。

(4) 上位階層の非主要結節点で接続する場合

図 8 のネットワークでは交通結節点 X および Y での乗継ぎを確実にするために、運行周期 T と XY 間の所要時間の間に一定の関係を持たせた。だが、現実のネットワークでは、図 14 のように、アクセス交通などのより下位の交通ネットワークが接続するだけの小規模な結節点 Z が XY 間に存在することがある。

理想的には XZ 間および ZY 間についても前章 (4) のような関係を満たすことが望ましいが、アクセス交通のためだけに X-Z-Y 間の路線の改良等を行うことが困難な場合がある。このような場合には、図 15（作図方法は図 10、図 11、図 13 と同様）のようにアクセス交通である EZ 間の運行頻度を増大させることにより対応可能である（運行間隔は必ずしも一定ではない）。

ただし、E から先に複雑なアクセス交通網が接続される場合には、XZ 間および ZY 間についても前章 (4) のような関係を満たさない限り、アクセス交通網全体の運行頻度を増す必要がある。

(5) 乗継ぎを意図する必要がない場合

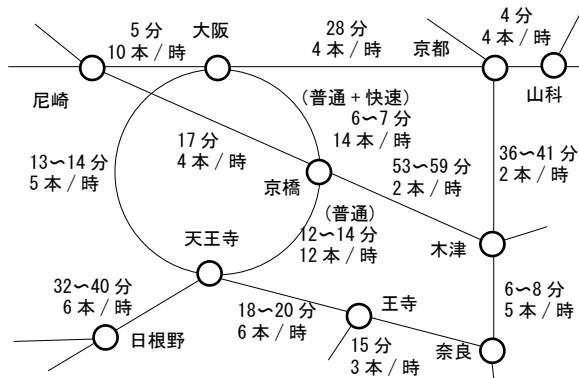


図 17 大阪近郊 JR 線快速電車ネットワークの本数（片道）と所要時間

図 16 のように、A と B が乗継ぎ拠点 X を介して結ばれるとともに、A と B が直接結ばれており、あらゆる場合において X を経由するよりも AB 間を直接移動した方が利便性が高いような場合には、X において A 方面の路線と B 方面の路線の乗継ぎを考慮する必然性がない。この場合は、C-X-A や C-X-B の経路だけを考慮すればよい。

7. パルスタイムテーブルシステム構築の試み

(1) 分析対象と条件

本章では、これまでに示した諸条件を用いてパルスタイムテーブルシステム構築を試み、諸条件の妥当性を再確認する。

図 17 は大阪近郊 JR 線ネットワーク (2007 年 2 月現在、昼間時) である。図には乗継ぎ拠点となる駅間を結ぶ快速電車の数と所要時間を示している。路線や区間により運行本数が異なっているが、京阪神間の東海道本線における基本的な運行周期である 15 分間隔でネットワーク全体でパルスタイムテーブルシステム構築を試みる。

条件①: パルスタイムテーブルの周期 $T = 15$ 分とする

条件②: 乗継ぎ駅における路線間の移動に要する時間は一律 2 分と設定し、この 2 分は乗継ぎ元リンクの所要時間の一部に含める

条件③: $T = 15$ 分なので、どのような経路で 1 周しても、一周の所要時間が 15 分の倍数となるように駅間所要時間を調整する [第 5 章 (3) の条件に相当]

条件④: $T = 15$ 分なので、隣接する乗継ぎ拠点駅間のリンク長が 7.5 分の倍数となるように駅間所要時間を調整する [第 5 章 (4) の条件に相当]

条件⑤: 各区間の先着便数が、現状において 4 本以上の場合は、パルスタイムテーブルシステムの対象外の便として運行させる [第 6 章 (2) の補足事項に相当]

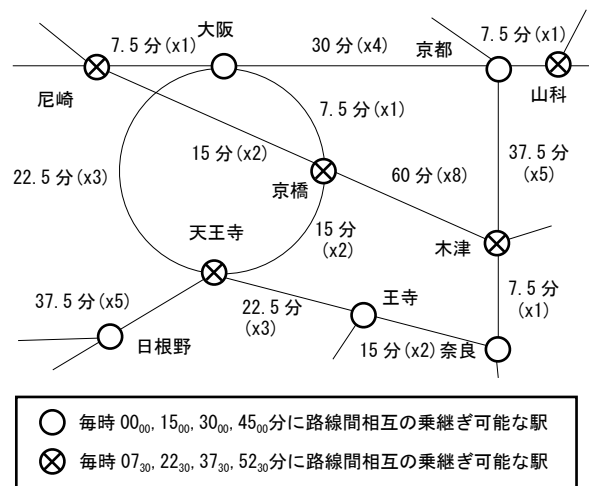


図 18 構築途上（乗継ぎ時間を考慮しない場合）

(2) パルスタイムテーブルシステム構築

条件①③④を考慮し、リンク走行時間を求めたものが図 18 であり、カッコ内の値は 7.5 分に対する倍数を示している。各駅の発時刻については大阪駅が「毎時 00, 15, 30, 45 分」となるように設定した。

条件①③④を満たすリンク走行時間の値は多数存在し、例えば左下の天王寺 - 日根野間については、図中の 37.5 分のほかにも $30 (= 7.5 \times 4)$ 分や $45 (= 7.5 \times 6)$ 分でも条件を満たす。このような多数の解の候補の中から 1 つの値を選択する方法としては、実際には走行時間短縮に要する費用と実施効果を比較して決定するなどの方法が採用されることになるものと考えられる。本研究では単にパルスタイムテーブルシステムの成立条件の考察を目的としているので、現状の走行時間程度となる値を採用した。なお、中央の円状の路線 (大阪環状線) の左半分の所要時間が $15 (= 7.5 \times 2)$ 分ではなく $22.5 (= 7.5 \times 3)$ 分となっているのは、条件③を満たすためである。

図 18 では、各駅における乗継ぎ時間が 0 分であり、現実的ではない。そこで、条件②に示した乗継ぎ時間である 2 分を捻出するため、各リンクの走行時間を一律 2 分短縮したものが図 19 である。図 19 のような区間所要時間として 15 分ごとに電車を運転すれば、すべての乗継ぎ拠点駅において、2 分の接続時間であらゆる路線に乗り換えが可能となる。

なお、尼崎 - 京橋間 (JR 東西線)、王寺 - 奈良間 (関西本線) などにおいて、現状の最速便よりも区間所要時間が短くなっているが、通過駅の設定等で実現可能と考えた。ただし、具体的かつ詳細な所要時間短縮方法や駅における列車の収容方法の検討については、本研究の目的がパルスタイムテーブルシステムの成立条件の考察であるので、研究対象外である。

(3) 実運行時損失時間 (ROLTime) の変化

図 17 のネットワークと図 19 のネットワークについて、

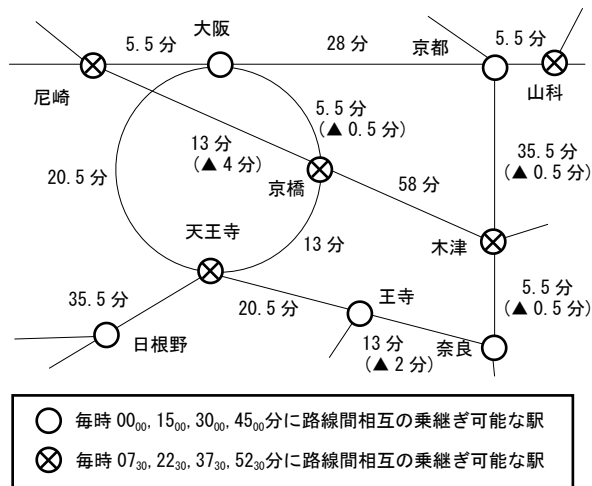


図19 大阪近郊パルスタイムテーブルシステム

乗継ぎの良否を示す指標となる実運行時損失時間 (ROLTime)を計算し、比較できるように示したものが図20である。横軸がパルスタイムテーブルシステム構築前の図17についての値であり、縦軸が構築後の図19についてのものである。

一般的に、システム構築後の値の方が小さな値となっており、乗継ぎはよりスムーズになったと考えられ、パルスタイムテーブルシステムの構築条件の妥当性が明らかとなった。

特に大きく改善されたのは、乗継ぎ回数の多かった比較的長距離の区間や、運行頻度が毎時2〜3本しかなかった路線に関する区間となっており、運行頻度をそろえるとともに区間所要時間の調整によって乗り継ぎ改善を図るというパルスタイムテーブルシステム導入の好影響があらわれている。

一方、図20では一部区間においてROLTimeの値がシステム構築後の方が大きくなっている (改悪されている) が、これは乗継ぎ時間を一律2分という現状よりも長めの設定としたために、現状よりも駅での停車時間や乗継ぎ時間が長くなってしまっていることが影響している。また、パルスタイムテーブルシステムの構築対象を毎時4本としているために、運行本数の多い路線が関係する区間において構築対象外の列車が毎時数本存在することがあり、これらに関する乗継ぎが必ずしも円滑ではない場合があることなども影響している。

なお、図19のネットワークは、基本的には所要時間の大幅な短縮を伴わないようにシステム構築しており、駅間の所要時間が延びてしまっている部分が多数あるが、実際に改良プロジェクトを実施する場合には、適切な設備投資のもとで、駅間所要時間を短縮しながらパルスタイムテーブルシステムを構築することになる。

(3) 遅延に対するネットワークの冗長性について

パルスタイムテーブルシステムは、各路線間の運行の

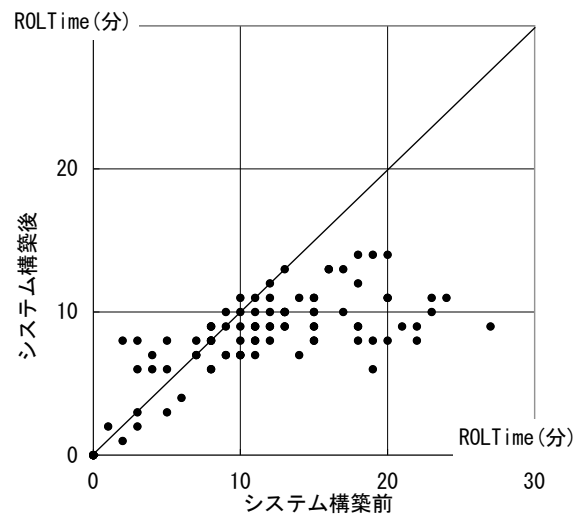


図20 パルスタイムテーブルシステム構築に伴う実運行時損失時間 (ROLTime) の変化

同期をとるシステムであり、基本的には定時運行されることを前提としている。

現実の運行では遅れが生じる可能性があるが、遅れた列車との接続をとるために接続予定の列車の出発時刻を遅らせた場合、これら列車が次の結節点に到着するまでに遅延を回復できないとネットワーク全体に急速に遅延を拡大させる可能性がある。

このため、高い信頼性をともなってパルスタイムテーブルシステムを運営するためには、単に駅での乗継ぎ時間 (例えば図19では2分) を確保するだけでなく、遅延回復に対する余裕を持たせられる程度まで路線改良等の時間短縮策を実施する必要があると考えられる。また、図19で対象とした都市近郊線のような比較的高頻度運転の区間では、遅延した列車に対する接続をあきらめて本来接続をとる列車を出発させてしまう方法も有効である。

なお、上記の遅延に対する考え方は必ずしもパルスタイムテーブルシステム特有のものではなく、公共交通の乗継ぎ一般にあてはまるものと思われる。

8. 本研究の成果と今後の課題

(1) パルスタイムテーブルシステムの成立条件

本研究の結果、パルスタイムテーブルシステムの成立基礎条件として、次の項目が挙げられる。

- ①乗継ぎ元と乗継ぎ先の運行間隔をそろえること
- ②不必要に乗継ぎ先の出発時刻を遅らさないこと
- ③交通結節点が1つだけであり、閉ループが存在しないネットワークについては、交通結節点への集合時刻さえ決めればよい
- ④ネットワーク上の閉ループについて、一周した際のリンク走行時間の総和は、運行周期の整数倍でなければならない

⑤交通結節点間のリンク走行時間は、運行周期の半分の整数倍でなければならない
また、補足的条件については、次のようになる。

⑥部分的に運行頻度が高い場合、パルスタイムテーブルシステムを構成する便の系統とそうではない系統を区別する必要がある

⑦新幹線のような長時間停車が難しい路線の場合、乗継ぎ時間を他路線の所要時間の一部に含めることができるが、他路線相互の乗継ぎ時間は延びてしまう

⑧主要な交通結節点ではない駅へのアクセス交通についても接続の同期をとろうとすると、アクセス交通側の運行頻度を増大させなければならないことがある

⑨別の最短路が存在する場合は、乗継ぎを考慮する必要がない場合がある

(2) パルスタイムテーブルシステム構築の試み

大阪近郊 JR 線の快速・新快速電車ネットワークについて、本研究で明らかにした条件を用いてパルスタイムテーブルシステム構築を試みた結果、ROLTime が減少し、構築条件が妥当であることが確認された。

(3) 今後の課題

本研究では、パルスタイムテーブルシステム構築のために必要な運行間隔とリンク長の関係などに関する条件を明らかにした。全国的な幹線鉄道ネットワークにパルスタイムテーブルシステムを導入するためには、各種の制約条件の下に、区間の所要時間の短縮するという作業が必要であり、今後はより具体的な研究を行うことなどが考えられる。

【参考文献】

- 1) 加藤活徳:「スイスの都市間鉄道サービス改善に向けた取り組み: RAIL2000 プロジェクトとその後の SBB の研究開発」, 運輸政策研究 Vol. 9 No. 2 2006 Summer, pp. 59-061, 運輸政策研究機構, 2006
- 2) 波床正敏・中川大:「幹線鉄道におけるハブシステム構築の効果と意義に関する研究-スイスの鉄道政策 Rail2000 の効果分析を踏まえて-」, 都市計画論文集 No. 41-3, pp. 839-844, 2006
- 3) Standing Committee on Communications, Transport and Microeconomic Reform Tracking Australia: An inquiry into the role of rail in the national transport network, Chapter 6, p. 158 (<http://www.aph.gov.au/house/committee/cita/rail/>)
- 4) Dai Nakagawa, Yoshitaka Aoyama, Tadashi Ito and Hiroyuki Nishizawa: Assessment of Passenger Benefits brought about by International Airport Projects, Transport Policy Vol. 12, pp. 512-524, 2005

公共交通網におけるパルスタイムテーブルシステム成立条件に関する研究

波床 正敏** ・ 中川 大***

スイスの Rail2000 政策では、主要駅間を一定時間内で結ぶとともに、パターンダイヤを導入して乗継ぎ利便性向上を図っているが、わが国でこのようなシステムを導入する場合、便利な乗継ぎを実現するための一般的条件は明確ではない。

本研究では、まず、公共交通独特のネットワークの特徴を考慮しながら、このようなパルスタイムテーブルシステムの成立基礎条件を明らかにした。次に、明らかにした成立条件を使って例として取り上げたネットワーク上でパルスタイムテーブルシステムを構築し、乗継ぎの良否を示す指標を用いて乗継ぎ状況の変化を確認し、成立条件が妥当であることを確認した。

A Study on Conditions for Realizing Pulse Timetable System on Public Transportation Network*

By Masatoshi HATOKO**, Dai NAKAGAWA***

In Switzerland, trains run between major stations in certain time and are operated based on pattern diagram after introducing Rail 2000 Policy. But the general conditions of such convenient system are not clear. It is necessary for installing such policy into Japan.

In this study, we made general conditions for building a pulse timetable system on a public transportation network. Next, we tried to build a pulse timetable system on JR rapid service network in Osaka area, and measured ROLTime (= Real Operation Loss Time) to confirm the conditions are proper. ROLTime is an indicator of loss time of transfer.
