

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。

波床・中川は、Rail2000 実施前後の利便性について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を示している¹⁾。また、スイスと地理的な規模のよく似た九州とを比較し、九州の鉄道ネットワークは運行頻度や乗継ぎ利便性が低く、スイスに比べて期待所要時間が長い区間が多いことを明らかにしている²⁾。

わが国においてスイスの Rail2000 のような幹線鉄道システムを導入する場合、公共交通ネットワークを分析しなければならない。だが、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た分析方法は、あまり発達していないのが現状である。

本研究では、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とはどのようなものを分析する方法について考察するものである。

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たが、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を分析する方法については、議論が始まったばかりである。

3. 公共交通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 $t_P^{(Dep)}$ に出発するとする。

$$t_P^{(Dep)} = n T_P + K_P \quad [1]$$

ここに、 T_P は運行間隔 [周期]、 K_P は基準となる時刻からのズレ (例えば正時からのズレ) [位相]、 n は整数である。この列車の Q への到着時刻 $t_Q^{(Arr)}$ は次のようになる。

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

ここに、 L_{PQ} は P Q 間の走行時間である。

具体的例を示すと、表 1 のように毎時 4 本運行されていて、10・25・40・55 分にそれぞれ P を出発し、20 分走行して 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。

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	$15m + 0$

*キーワード: 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
(京都市左京区吉田本町, Tel: 075-753-5138,
E-mail: nakagawa@utel.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

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

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

ここに、 m は整数である。

4. 公共交通リンクの直列接続時の利便性

(1) 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1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指標としては、「実運行時損失時間 (= Real Operation Loss Time 以下、ROLTime)」が提案されており¹⁾、乗継ぎの良否だけを分析する場合はこちらの方が便利である。

本章で考察しようとしているようなすべての便が同じ走行時間であるような場合、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るため、図1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。

さらに、ズレ [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、Pの出発時刻 (= Qへの到着時刻) を [3] のように、Qの出発時刻 (= Rへの到着時刻) を [4] のように表現することもできる。

$$t_P^{(Dep)} = t_Q^{(Arr)} = nT_P \quad [3]$$

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

つまり、乗継ぎの良否を示すROLTimeは、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 [位相] の差である K の3要素により決まる。

(2) 運行間隔の組み合わせおよび位相差の影響

図1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を算出して分析する。

図2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。また、 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。

図2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2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いる場合には、この仮定は概ね妥当である。

図2を詳しく分析すると、 $K=0$ に関するグラフは、何か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っているという共通の特徴を持っている。

また、 $T_Q = 30$ 分に注目すると、 $K=0$ 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。

(3) 乗継ぎ待ち時間の「うなり」

図3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4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れており、周期の異なる波動を重ねた

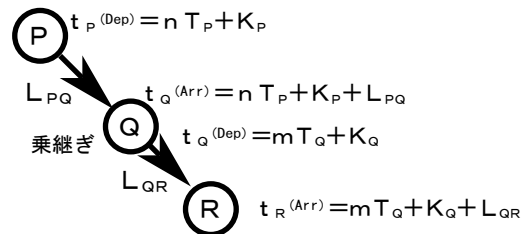


図1 乗継ぎ (公共交通リンクの直列接続)

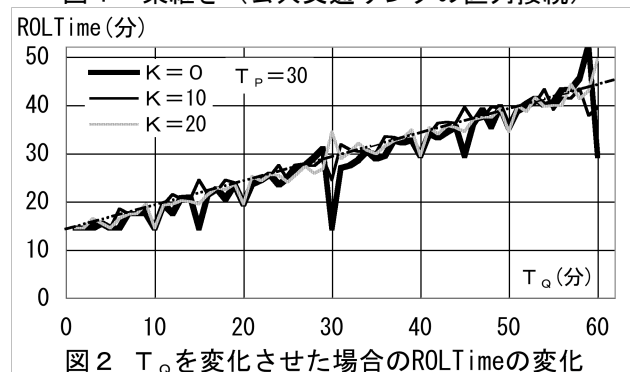
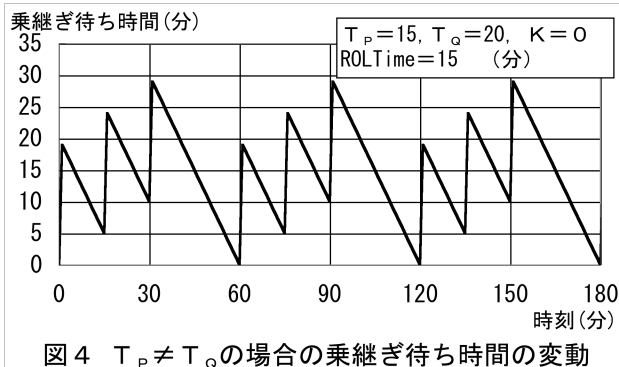
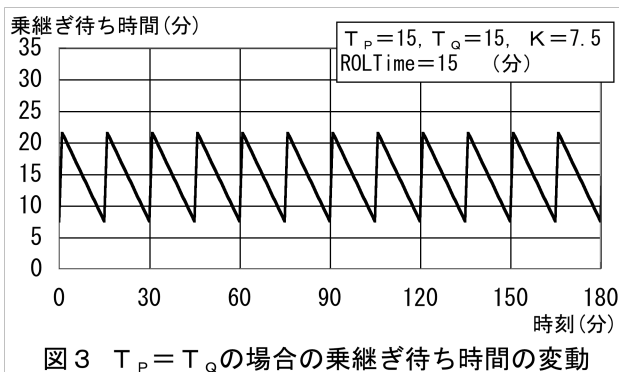


図2 T_Q を変化させた場合のROLtimeの変化



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。

(3) パルスタイムテーブルシステムの構築条件

以上より、パルスタイムテーブル構築のための基礎条件である2つの公共交通機関の乗継ぎに関して、次のことが言える。

- 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

5. 一般的なネットワークにおける実現の条件

(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であり、

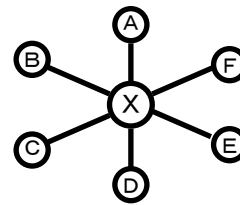


図5 閉ループを持たないネットワーク

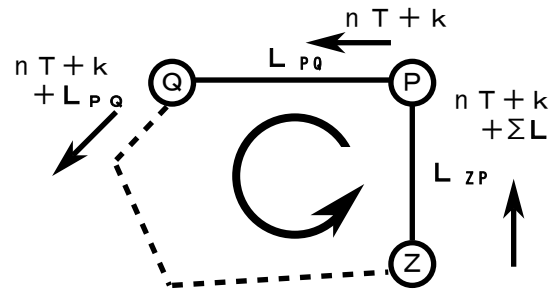


図6 閉ループを持つネットワーク

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。これは一つの解ではあるが、一般的な解については明確でない。

(2) 閉ループを形成し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5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の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) 閉ループを形成する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6のような閉じたループを持つネットワークの場合は継ぎ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を時刻 $t_P^{(Dep)}$ に出発し、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をTとする。

$$t_P^{(Dep)} = nT + K \quad [5]$$

nは整数、Kは位相である。

リンクPQの走行時間を L_{PQ} とすると、Qの着時刻は次のようになる。

$$t_Q^{(Arr)} = t_P^{(Dep)} + L_{PQ} = nT + K + L_{PQ} \quad [6]$$

以下、同様にして一周してもとの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に到着時刻する時刻は次のようになる。

$$\begin{aligned} t_P^{(Arr)} &= t_Z^{(Dep)} + L_{ZP} \\ &= nT + K + L_{PQ} + \dots + L_{ZP} \end{aligned}$$

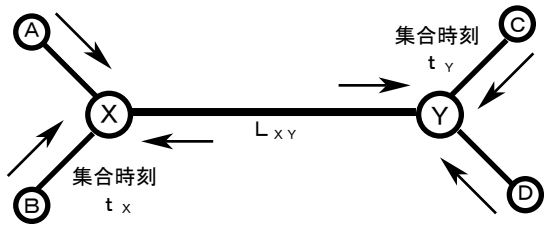


図7 交通結節点間のリンク長の条件

$$= nT + K + \sum L \quad [7]$$

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、[5][7]より、次の条件を満たす必要がある。

$$t_p^{(Dep)} = nT + K = n'T + K + \sum L$$

$$\therefore mT = \sum L \quad [8]$$

n' および m は整数である。

(4) 複数の交通結節点を持つネットワーク

図7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)で述べたように中心となるノード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7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。

$$t_Y^{(Arr)} = t_X^{(Dep)} + L_{XY} \quad [9]$$

$$t_X^{(Arr)} = t_Y^{(Dep)} + L_{YX} \quad [10]$$

$$\text{また、} t_X^{(Dep)} = nT + K \quad [11]$$

[9]と[11]、および[10]と[11]より、 $t_{YX}^{(Arr)} = t_X^{(Dep)}$ 、

$t_Y^{(Arr)} = t_Y^{(Dep)}$ 、 $L_{XY} = L_{YX}$ を考慮すると、

$$t_Y^{(Arr)} = nT + K + L_{XY} \quad [12]$$

$$n'T + K = t_Y^{(Dep)} + L_{XY} \quad [13]$$

となる。したがって、次の条件が導かれる。

$$n'T + K = nT + K + 2L_{XY}$$

$$\therefore mT = 2L_{XY} \quad [14]$$

n' および m は整数である。

(5) パルスタイムテーブルシステムの構築条件

まとめると、パルスタイムテーブルシステムが実現した状態では、次の条件を満たす必要がある。

- ③ 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
- ④ 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

6. ケーススタディ

図8は大阪近郊JR線の快速電車に関するネットワークである。ただし、環状線の右側と一部短距離区間は各駅停車を含めた運転本数である。路線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あわせた15分間隔の

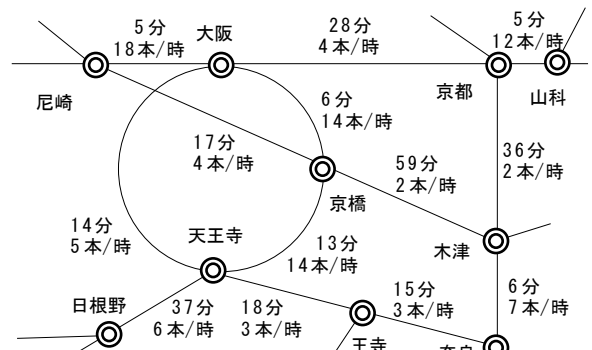


図8 大阪近郊JR快速電車ネットワーク

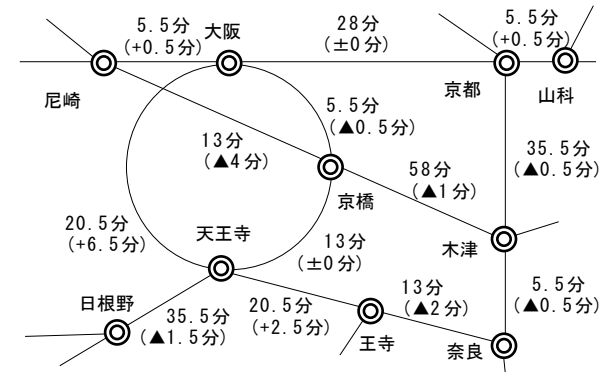


図9 大阪近郊パルスタイムテーブルシステム

パルスタイムテーブルシステム構築を考察する。

- 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：路線間の移動に要する乗継ぎ時間は一律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、一周の所要時間は15分の倍数である
- 条件④： $T=15$ 分なので、乗継ぎ拠点駅間のリンク長は7.5分の倍数でなければならない

以上を考慮すると、図9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で、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。

7. おわりに

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4つの条件について明らかにした。今後は、わが国全土に導入する方法などについての研究を行いたい。

【参考文献】

- 1) 波床正敏・中川大：「幹線鉄道ハブシステム構築政策の効果 - Rail 2000 プロジェクトで便利になったか -」, 土木計画学研究講演集 33, CD-ROM, 2006
- 2) 波床正敏・中川大：「わが国幹線鉄道網の再構築に向けたネットワーク構造の分析 - 幹線鉄道網へのハブシステム導入可能性 -」, 土木計画学研究講演集 33, CD-ROM, 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/>)