

車両の分割・併合可能な公共交通システムの 地方都市への導入可能性と課題の検討

森 竜佑¹・榊原 弘之²

¹ 非会員 山口大学 大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

² 正会員 山口大学 大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: sakaki@yamaguchi-u.ac.jp (Corresponding Author)

本研究では、車両の分割・併合が可能な公共交通システムを地方都市に導入し、効率的な公共交通を実現できるかを検討することを目的として検討を行った。ヒアリング調査から、車両と人員を一体として捉える従来のバス事業者の車両・人員運用からの転換の必要性があることが明らかとなった。次にモデル分析の結果から、人員の節減が生じるための条件は複数系統の重複区間の存在であり、郊外部の放射系統を複数設定する上では、環状系統との分割・併合が有効的であることが示された。さらに、運行間隔及び折り返しのタイミングをネットワーク全体で整合させる必要があることが明らかとなった。実在の都市を想定したケーススタディでは、大幅な人員節減効果が認められた。また、必要人員を追加確保することなく新たなシステムを設定できる可能性も示された。

Key Words: *Public transportation, Shortage of drivers, Vehicle and personnel operation plan, Division/Merger, Tact diagram,*

1. はじめに

地方部を中心に公共交通サービスの維持が困難となってきた。地方都市の公共交通では、利用者数の減少及び運行を担う人材の不足から、便数の削減等のサービス低下を選択せざるを得ず、その結果として利用者数がいっそう低下する悪循環に陥っている。利用者の視点からは、等間隔・高頻度の運行ダイヤ等の利便性の高い公共交通サービスの実現が望ましいが、苦境にある地方部の公共交通においてその実現は困難である。

公共交通が抱える課題のうち、近年顕著となっているのが、サービスを担う人材の不足である。特に運転士については、車両の運行に不可欠である一方、バス、タクシーでは恒常的に不足している事業者は多いとされる¹⁾。バスにおいては人件費が運行に要する費用の半分以上を占めるとされており²⁾、人材、費用の両面から、運転士不足の課題解決が公共交通サービスの維持、拡充に不可欠であるといえる。公共交通の需要が相対的に小さい地方部においては、同程度のサービスをより少ない人員で実現することが特に求められている。

そのような状況下で、自動運転と隊列走行を用いた

BRTの実証実験が実施されている³⁾。一般的に、バス車両の隊列走行が可能となった場合、以下の利点が生じると考えられる。

- ① 先頭車のみ運転士が乗車し、後続車が追従することにより、後続車の運転士が不要となる。
- ② 目的地が異なる系統の複数の車両を重複区間で併合した状態で隊列走行させ、途中から別方面に向かうような運用も可能となる。

このうち、②はバス車両を用いて鉄道車両と同様の分割・併合が可能なことを意味する。これにより、ネットワークを面的に拡大することができ、各系統の重複区間では隊列走行とすることで、①の必要人員数の節減が期待される。一方、車両の分割・併合を前提としたとき、効率的な運用のためには、路線間の運行間隔の調整が必要となり、タクトダイヤ⁴⁾のような、ネットワークとダイヤを一体的に検討する発想が求められると考えられる。

本研究は、車両の分割・併合が可能な公共交通システムを地方都市に導入し、効率的で持続可能な公共交通を実現できるかを検討することを目的としている。具体的には、車両の分割・併合が可能な公共交通システムを前提として、地方公共交通の運転士不足解消や利便性を高

めるための、効率的な車両や乗務員の運用方法について考察する。そのために、まず仮想都市の公共交通ネットワークを設定し、ダイヤとネットワークを一体として検討するモデル分析を行う。さらに、実際の都市への導入可能性についても検討する。これらの検討を通じて、車両の分割・併合が可能な公共交通システムを機能させるためにネットワーク、ダイヤに求められる要件や、地域公共交通運営の観点から想定される利点についても議論する。

2. 鉄道・バス交通における車両と人員の運用

今泉⁹⁾は日本の鉄道業では車両の時刻表上の列車への割り当てや車両のやりくりのことを「車両運用」と称し、その計画立案はダイヤ作成と表裏一体の重要なものと位置付けられている、と説明している。また、車両運用計画のみならず乗務員運用計画やダイヤ乱れ時の車両や乗務員の運用修正等、鉄道における計画立案や意思決定は多岐に渡っているとした上で、それらを作成する際に考慮すべき条件などに関して解説している。

以上のように、鉄道車両の運用方法に関しては理論が確立されており、モデルや数理的な分析手法が体系化されている。一方で、BRTは使用される車両自体はバスと同様でありながら、速達性や定時性、輸送力を強化するため、バスとは異なり、むしろ鉄道に近い運用が必要となると考えられる。特に、分割・併合を前提としたBRTでは、併合（隊列）走行時と分割（独立）走行時で必要な人員数が異なるため、一般のバスのような車両・人員の一体運用は困難であると予想される。一方、BRTにおいてはバス事業者が運行の中心的な役割を担うと考えられるため、導入に際しては、事業者のネットワーク・ダイヤ設定に対する考え方の転換を求められる可能性がある。

以上の問題意識に基づいて、交通事業者2者に対してヒアリング調査を実施した。自動運転・隊列走行BRTの開発元であるJR西日本に対しては、開発した当事者としての立場で本技術の詳細や想定している活用法などについてヒアリングした。一方でバス事業者Aに、今現在の現場で行われているバスの運用方法の実態についてヒアリングを実施した。以下その要約を示す。

西日本旅客鉄道株式会社

2022年10月5日、オンライン形式

鉄道では乗員の途中交代は一般的であり、車両の運用計画と人員運用計画は別個に策定しているため、BRTも鉄道に近い運用を想定している。

バス事業者A

2022年9月2日、対面形式

バスは1人の運転士が1台のバスを乗り通すのが一般的であり、車両と人員は一体的に運用計画が策定されている。

車両の分割・併合を前提とした運用を考える際には、路線の途中で運転士の交代や、車両の併合後に降車した運転士のその後の任務、あるいは車両の分割後に新たに乗車する運転士をどのようにして確保するのかについて考慮する必要があると考えられる。すなわち、分割・併合が可能な公共交通システムを運営するためには、従来のバス事業者の車両・人員運用では困難ではないかというのが本研究の着眼点である。

3. 基本モデルを用いた公共交通システムのダイヤ及び車両・人員運用の検討

(1) モデル分析の想定

本章では、分割・併合が可能な公共交通システムの実在都市への導入の想定に先立ち、現実の多くの都市が一般的に有する属性を考慮した仮想都市を想定する。その上で、仮想都市の公共交通ネットワークとして基本モデルを作成し、この基本モデルで必要車両・人員数を算出する。これによって、分割・併合が可能な公共交通システムの特性を明らかにすることを目指す。

一般性を有する都市像として、単一の中心地とそれを取り囲む郊外部を有する構造を想定する。このとき、もっとも一般性を有するのはアロンゾモデル⁹⁾と同様の同心円状の都市であると考えられ、その場合中心地から放射状に公共交通のネットワークが設定可能である。一方、本研究で分割・併合が可能な公共交通システムの導入対象として想定するのは、鉄道等の大量輸送が可能な公共交通の維持が困難な地方都市である。そのため、四方に放射状の幹線が設定されるようなネットワークは、本研究で想定する地方都市としては規模が過大であると考えられる。

そこで本研究では、図-1に示す公共交通ネットワークを想定する。中心駅から郊外部に、2方向の放射状の路線を設定する。便宜上、そのうち一方の終端を「東駅」、他方の終端を「北駅」と呼称する。中心駅と東駅、北駅間の距離は異なってもよいものとする。これは、実際の都市における地形上の制約等を考慮している。また、各放射状路線の中途に「中間接続点」を設定する。中心駅から中間接続点までの距離はともに同一とする。そのうえで、放射状路線とは別に、両中間接続点を結ぶ路線を設定し、中心駅から環状運転が可能なものとする。これは、単一中心地の周辺に周辺に人口密度の高いエリアが徒歩圏を上回る一定の空間規模で存在して、そのエリ

ア内の移動に公共交通が必要となることを想定している。図-1で正方形上に示す環状系統の各辺は等距離と仮定する。本研究では、以上の図-1に示すネットワークにおいて、中心駅と東駅、北駅を結ぶ2種類の放射系統、中心駅から2か所の中間接続点を経由して中心駅に戻る時計回り、反時計回りの環状系統を想定する。

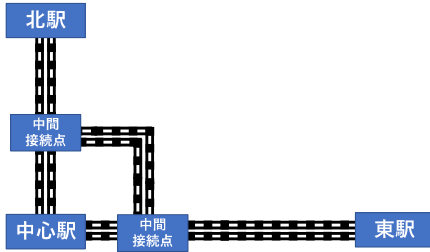


図-1 本研究で想定する公共交通ネットワーク

(2) 運行体制の設定

以下の分析の前提条件として、図-1に示すモデル内で運用される全車両は自動運転・隊列走行の新技术を搭載しており、車両の分割・併合が可能であるとする。また、ダイヤ設定については、ネットワーク全体に等間隔ダイヤを適用し、可能な限り簡略かつ明解となるよう設定した。以下に分析における各車両の動きの流れを時系列的に示す。

- ① 隊列を組んだ2両編成の2組が中心駅から東駅方面、北駅方面に同時発車する。
 - ② 各中間接続点で分割を行う。
 - ③ 2両編成のうち、先頭車は環状系統に乗り入れ、1両単独で走行する。
 - ④ 2両編成のうち、後続車には運転士が新たに乗車し、放射系統へ1両単独で走行する。
 - ⑤ 東駅方面の中間接続点に進んでいた先頭車は反時計回りに、北駅方面の中間接続点に進んでいた先頭車は時計まわりに次の中間接続点まで走行する。
 - ⑥ 放射系統に進んでいた後続車は終着駅である東駅と北駅に到着後は折り返して②で分割した中間接続点まで戻った後、運転士は降車する。
 - ⑦ 次の中間接続点に到着した環状系統の車両と、折り返してきた放射系統の車両の併合を行う。
 - ⑧ 隊列を組んだ2両編成の2組が各中間接続点から中心駅に向かって走行し、中心駅に到着する。
- 以降①～⑧を繰り返す。

また、本研究における必要車両台数と必要人員数の定義は、①～⑧の運行を等間隔ダイヤで一定時間継続した状態において、任意の時点でネットワーク上で走行している車両台数及び乗務している人員数を合計した必要最小限の数とする。したがって実際の公共交通事業者が考慮する必要がある、保守・点検中の待機車両台数等を含

めた必要車両台数や、休憩中あるいはバックアップの乗務員等を含めた必要人員数とは異なる点に留意する必要がある。

さらに、本研究では、隊列走行のための車両間のペア形成について、どの車両同士でもペアを形成できるような運用方法を「ペア循環型」と呼ぶ。一方で特定のグループの車両同士のみがペアを形成できるような運用方法を「ペア固定型」と呼ぶ。その上で、ペア循環型、ペア固定型それぞれの運用方法で必要車両台数・必要人員数に差が生じるのか、検証した。

(3) 変数の設定

本研究のモデル分析で操作可能な変数と潜在的な変数を表-1に示す。

表-1 モデルで操作可能な変数と潜在変数

モデルで操作可能な変数	文字	単位	説明
基本運行間隔	I	min	各系統の中心駅からの発車間隔
駅間所要時間	aI	min	a は無次元の実数 中心駅～各中間接続点間の区間所要時間
	$bI, b'I$		b, b' は無次元の実数 各中間接続点～各終着駅までの区間所要時間
モデルの潜在変数	文字	単位	説明
駅間距離	d_A	km	中心駅から各中間接続点までの距離
	$d_B, d_{B'}$		各中間接続点から各終着駅までの距離
平均車両速度	v_A	km/min	中心駅～各中間接続点、各中間接続点間の環状部内の運行速度
	$v_B, v_{B'}$		各中間接続点～各終着駅間の運行速度

表-1より、環状部内の駅間所要時間 aI は環状部内の駅間距離 d_A 、平均車両速度 v_A より

$$aI = \frac{d_A}{v_A} \tag{1}$$

と表すことができる。従って、無次元の係数 a は

$$a = \frac{d_A}{v_A \times I} \tag{2}$$

と導かれる。従って距離と速度、運行間隔より所要時間を規定する a を求めることができる。

同様に b 及び b' は

$$b = \frac{d_B}{v_B \times I}, b' = \frac{d_{B'}}{v_{B'} \times I} \tag{3}$$

と与えられる。(2)式及び(3)式より、各区間の平均速度が同等であれば、 a, b, b' は各区間の距離、ひいては都市規模を規定する変数となる。

ここで、モデルの諸変数の階層構造について以下の図-2で整理する。図-2より、モデルの諸変数は階層構造を成しており、下部の変数が上部の変数を規定していることがわかる。今回作成したモデルにおいて操作できるのは運行間隔 I より上部に示された変数のみであり、 I から下部の変数は潜在的に規定されている変数である。

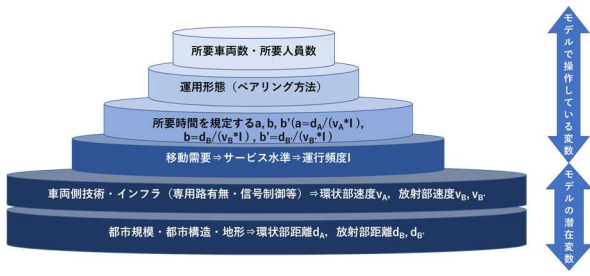


図-2 モデルの諸変数の階層構造

(4) $b = b'$ の場合の必要車両数及び人員数の算出結果

(1)～(3)に示した設定の下で、必要車両数及び人員数を算出した結果を以下に示す。本節における算出条件を以下に示す。

$$a = 0.5, I = 20 \text{ (分)}, b = b'$$

$b = b'$ であることから、東駅方向及び北駅方向に同程度に郊外部が発達した扇状の都市を想定していることを意味する。

このとき、ペア固定型およびペア循環型の(2)に示した定義に基づく必要車両数は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \text{必要車両数 (ペア固定型)} &= 4 * \text{ceil}(2(a + \text{Max}(a, b, b'))) \quad (4) \\ \text{必要車両数 (ペア循環型)} &= \text{ceil}(4a + w_1/I) + \text{ceil}(4a + w_2/I) + \text{ceil}(2(a+b)) \\ &\quad + \text{ceil}(2(a+b)) \quad (5) \end{aligned}$$

ここで $\text{ceil}(\cdot)$ は天井関数、 w_1 及び w_2 は中間接続点における時計回り、反時計回りの環状系統の車両の待ち時間である。(2)の⑤で環状系統の車両が中間接続点に到着した時点で放射系統の車両が到着していない場合、環状系統の車両は中間接続点で待ち時間が生じる。その結果、中心駅への到着(2)の⑧が遅れ、必要車両数の増加につながる。

図-3 に b, b' を 0 から 4 まで 0.1 ずつ変動させた場合の必要車両数の変化を示す。横軸の $b/a, b'/a$ は市街部に対する郊外部の規模の比率であることから、都市規模の指標とみなすことができる。青線はペア固定型、赤線はペア循環型の結果を示している。まずペア固定型とペア循環型の必要車両数を比較すると、 $b/a, b'/a < 1$ のケースを除き、ペア循環型のほうが必要車両数が少ないことがわかる。ペア固定型においては、同一グループの車両同士のみ分割・併合が可能である。そのため、郊外部の規模が大きく ($b/a, b'/a > 1$) になると、中間接続点で環状系統の車両が放射系統の車両の到着を待つ必要が生じ、非効率な運用となる。したがって、分割・併合が可能な公共交通システムを考える場合、効率的な運用の実現のためには、どの車両同士でもペアを形成できるようなペア循環型の運用が可能である必要があるといえる。

次にペア循環型の結果に注目すると、 $b/a, b'/a$ が整数値を取るとき、前後と比較して必要車両数が小さい値となった。この理由について考察を行う。隊列走行の先頭

車として中心駅を出発(2)の①した環状系統の車両が中間接続点で分割後環状線に乗り入れ(2)の③)、もう一方の中間接続点の到着(2)の⑤)するまでの所要時間は $3al$ である。一方で後続車として中心駅を出発した放射系統の車両が終着駅である東駅または北駅で折り返し、中間接続点まで戻る(2)の⑥)のに要する時間は $(a+2b)I$ である(本節では $b = b'$)。両者の差が I の整数倍となるとき、すなわち $2|b-a|$ が整数であるとき、環状系統と放射系統の車両が同時に中間接続点に到着し、直ちに併合の上中心駅に向かうことができる。このとき w_1 及び w_2 は 0 となる。一方 $2|b-a|$ が整数でない場合は、環状系統の車両が中間接続点に到着した時点で放射系統の車両は到着しておらず、環状系統の車両に待ち時間が生じる ($w_1, w_2 > 0$)。その結果、環状系統の総所要時間及び必要車両数が増加する。

図-3の結果より、ペア循環型で効率的な運行を実現するためには、 $2|b-a|$ が整数となるような調整が必要となることがわかる。 $2|b-a|$ が整数とならない場合は、放射系統の車両が終着駅の東駅、北駅で一定時間待機した上で折り返すことで bb' を増加させ、必要車両数を低減することができる。図-3には調整時のペア循環型の結果を緑色のプロットで示している。この結果より、ペア循環型は常にペア固定型と同数またはそれ以下の車両での運行が可能となることがわかる。

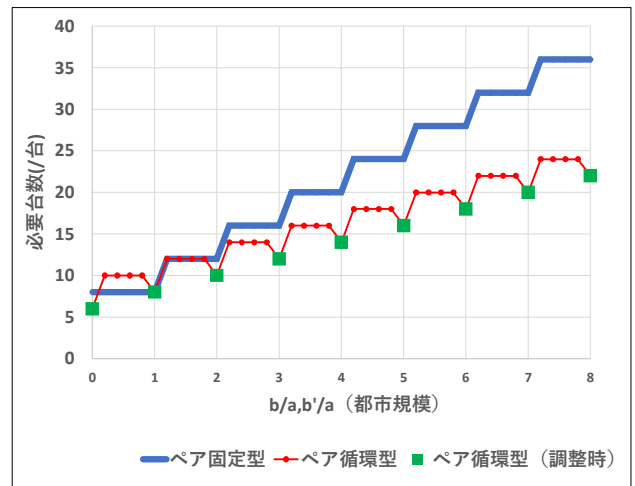


図-3 必要車両数 ($a=0.5, b=b', I=20$)

次に必要人員数の算出結果を示す。(2)に示した定義に基づく必要人員数は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \text{必要人員数 (ペア固定型)} &= \text{ceil}(2(a + \text{Max}(a, b))) + \text{ceil}(2(a + \text{Max}(a, b'))) \\ &\quad + \text{ceil}(2b) + \text{ceil}(2b') \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{必要人員数 (ペア循環型)} &= \text{ceil}(4a + w_1/I) + \text{ceil}(4a + w_2/I) + \text{ceil}(2b) + \text{ceil}(2b') \quad (7) \end{aligned}$$

図-4 に b, b' を 0 から 4 まで 0.1 ずつ変動させた場合の

必要車両数の変化を示す。(2)の設定では、環状系統の車両には常に運転士が乗務する必要があるのに対し、放射系統の車両では中間接続点—東駅、北駅の区間のみ運転士の乗務が必要となる。(6)式、(7)式ではこの点が第3項、第4項で考慮されている。必要車両数と同様、ペア循環型において $2b-a$ が整数であるとき、前後と比較して必要人員数が少なくなり、効率的な運行となる。

本節で想定する都市規模、運行頻度、系統設定で、通常のバス車両による運行を行った場合、必要人員数は図-3の必要車両数に一致する。従って図-3の必要車両数と図-4の必要人員数の差分が、分割・併合可能な公共交通システム導入による人員節減効果であると考えられる。本節の設定条件の下では、ペア循環型の場合の人員節減効果は $b/a, b'/a$ に関わらず常に2人となった。

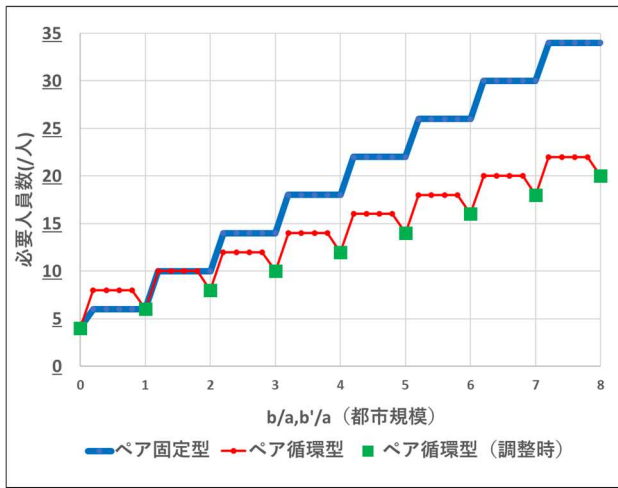


図4 必要人員数($a=0.5, b=b', I=20$)

(5) $b \neq b'$ の場合の必要車両数及び人員数の算出結果

本節では前節の扇状の都市からの発展型として、放射部の2系統の距離を異なるものとして ($b \neq b'$) 設定することで、より現実に即した都市モデルを表現した。例えば、ある方向は発展しており路線ネットワークが充実している一方で、それ以外の方向は地形要因または都市構造的に発展していないというような都市を想定できるようにした。

今回は $a=0.5, b=2$ と固定して環状系統(市街部)の規模と東駅方面の放射系統(郊外部)の規模を一定とした上で、 b' を0から4の範囲で0.1ずつ変動させて北駅方面の放射系統(郊外部)を拡張させつつ、必要となる車両台数と人員数を求めた。各系統の運行頻度は前節同様すべて $I=20$ (分)とした。必要車両数は前節の(4), (5)式、必要人員数は(6), (7)式を用いることができる。算出された必要車両台数・必要人員数を図-5及び図-6に示す。凡例は前節と同様である。

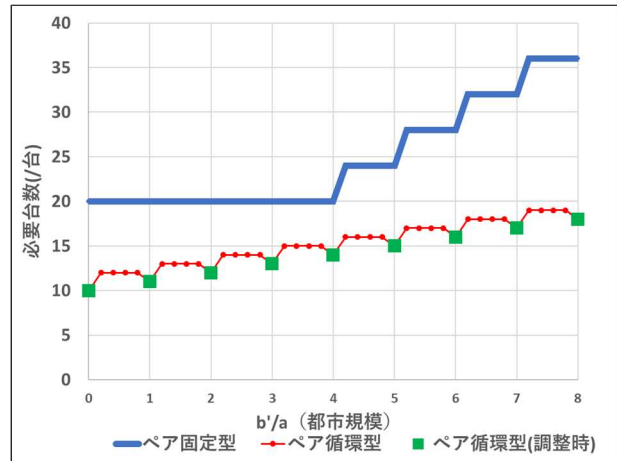


図5 必要車両数($a=0.5, b=2, I=20, b' \neq b$)

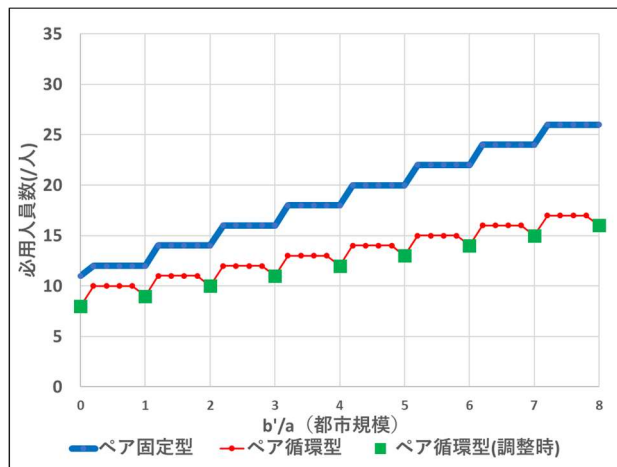


図6 必要人員数($a=0.5, b=2, I=20, b' \neq b$)

図-5及び図-6から明らかになった点を以下に示す。

- ペア循環型の方がペア固定型よりも必要な車両台数・人員数を節減でき、都市規模が拡大するにつれて両タイプの差が大きくなることが前節同様に示された。
- ペア循環型においては、中間接続点での環状系統車両の待機時間を0とするため、 $2b'-a$ を整数となるよう調整することで、必要車両数、人員数ともに効率的な運行を実現できることが前節同様に示された。
- ペア固定型は郊外部のより長い放射系統の車両が中間接続点まで戻ってくるのを待つ必要が生じるため、非常に非効率的である。
- 都市規模 b/a が0-4においてペア固定型の必要車両数は20台で一定となっている。これは、ペア固定型の場合、放射部がより長い系統で運行される車両が中間接続点や中心駅に戻ってくるまでに、放射系統がより短い系統で運用される車両が待機する必要が生じることによるものである。

(6) 考察

本章では、車両の分割・併合が可能な公共交通システム

ムを機能させるためにネットワーク、ダイヤに求められる要件を明らかにするためにモデル分析を実施した。まず、このような公共交通システムが持ち得る利点として、市街部を走行する環状系統と、郊外部を走行する放射系統の重複区間（中心駅～中間接続点）で 2 系統を併合することによる運転士の必要数の節減が挙げられる。人員の節減が生じるための条件は、複数系統の重複区間の存在であり、環状系統の存在は必須ではない。ただし、郊外部の放射系統を複数設定する上では環状系統との分割・併合が有効であることが本章の分析で示された。重複区間で隊列走行を組む 2 台の車両のうち、牽引車の役目を果たす先頭車が環状系統を担い、後続の車両が放射系統を担う。これにより市街部の環状系統の運転士は環状線区間に専念し、放射系統の運転士は中間接続点から郊外部の終着駅までの往復運行に専念することができる。放射系統が複数存在する際には、環状系統の車両が一方の放射系統の車両を中間接続点まで併合して牽引し、分割後異なる中間接続点まで環状線を走行したうえで、もう一方の放射系統の車両を次の中間接続点で併合して中心駅まで牽引するという運用が可能となる。

次に、効率的な運用の実現のためには、どの車両同士でもペアを形成できるようなペア循環型の運用が必要であることが示された。(4)及び(5)の結果から、ペア固定型では著しい非効率性が生じ、特に都市規模が比較的大きい場合にシステムとしての有効性が低下することが明らかとなった。

また、本章のモデル分析の結果から、分割・併合が可能な公共交通システムを機能させるためには、中間接続点で再併合時の待ち時間を生じさせないため、環状系統と放射系統の運行頻度とともに、放射系統の折り返しのタイミングも整合させたダイヤ編成とする必要性が示された。放射系統の車両が終着駅に到着後直ちに折り返すのではなく、中間接続点での環状系統との待ち合わせの待機時間を低減するために、終着駅で必要時待機して、時間調整する必要がある。

4. 地方都市を対象としたケーススタディ

(1) B市のバス路線ネットワーク概要

本章では、3.のモデル分析の考え方を実際の地方都市 B 市を対象に適用し、分割・併合が可能な公共交通システムの導入可能性や期待される効果について検討を行う。B 市は人口約 25 万人の地方都市であり、中心駅をターミナルとしてバス路線ネットワークが形成されている。

B 市のバス路線のネットワークの抜粋を図-7 に示す。実際のネットワークはより多くの系統、路線を含み複雑であるが、本研究の分析のために主要と考えられる部分

のみを抜粋した。図-7 において①が B 市の中心駅であり、B 市の第一の交通結節点となっている。一方④も鉄道に接続する交通結節点であり、①と④の間には經由地の異なる複数の系統が運行されている。さらに東部郊外の⑧へ向かう系統も設定されている。B 市の地域公共交通網形成計画においては、①、④、⑦、⑧等が乗り継ぎ拠点として挙げられている。

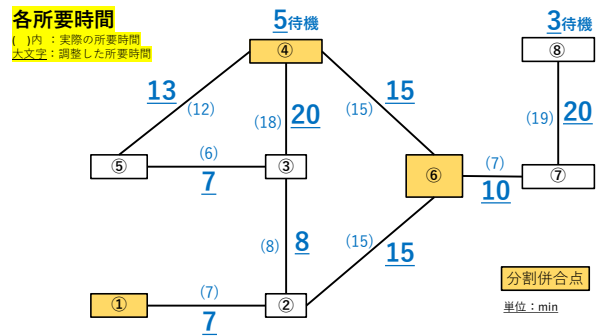


図-7 B市のバス路線ネットワーク抜粋

ケーススタディにおいては、B 市のバス路線の時刻表を参考に、図-7 の青字で示すように各区間の所要時間を設定した。カッコ内の数値は B 市における実際の所要時間であり、大文字で強調した数値は本研究の分析に当たり調整した所要時間である。また、ケーススタディでは車両の分割・併合は①、④、⑥で実施することとした。

B 市のバスネットワークに分割・併合可能な公共交通システムを導入すると仮定した場合に、3.の扇状都市モデルに当てはめると、①は中心駅の役割を担い、①と結ぶ複数のルートが分岐する④、及び④へ向かう系統と⑧へ向かう系統の分岐点の⑥を中間接続点とし、⑧を放射系統の終着駅とみなすことができる。3.のモデルには放射系統が 2 系統設定されていたが、B 市におけるケーススタディでは放射系統は⑧に向かう 1 系統のみとした。

(2) 系統の設定

本節では B 市内の主要拠点を結ぶバス路線のうち、前節で示した各路線に分割・併合可能な公共交通システムを導入すると仮定した場合の系統を設定する。複数系統が重複する区間で隊列走行を実施することにより、必要人員の節減が可能となるような路線設定を行った。すなわち、通常の単独運行のバス車両による走行を行う場合と同程度のサービス水準をより少ない人数で実現できるのか、という観点からの検証である。

図-8～図-14 に本研究で設定した計 7 系統の經由地、運行形態、所要時間等を図解して示す。W1, W2, E1, E2 系統の中間点である④は分割・併合を実施する地点であると同時に、他の公共交通機関との結節点の役割を有する重要拠点でもあるため、終着駅としての要素もあ

ると考えた。そこで図-7 に示したように 5 分の調整時間を設定した。これにより W1, W2, E1, E2 系統の周回に必要な時間は走行時間 72 分に 5 分を加えて 77 分となり、①における待機時間を含め 80 分とした。

W1, W2, E1, E2 系統の車両は、隊列走行時は先頭車となるため、常に運転士が乗務する状態となる。つまりこれらの系統においては車両と運転士の動きは一致する。一方、B 系統に関しては放射区間の⑥-⑧間では運転士が乗務するが、隊列走行区間の①-⑥間では後続車となり運転士は乗務せず、車両と運転士の運用を分離して考える必要がある。また、C1, C2 系統の車両は常に隊列走行の後続車となり、運転士は一度も乗務しない。

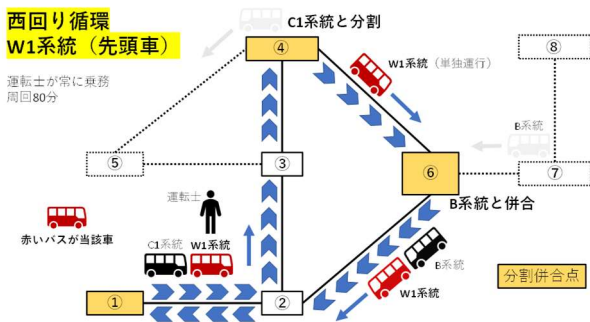


図-8 W1 系統

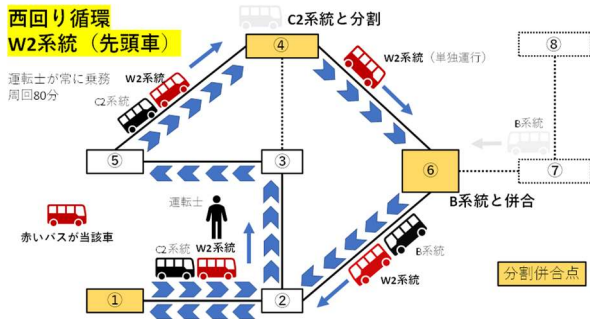


図-9 W2 系統

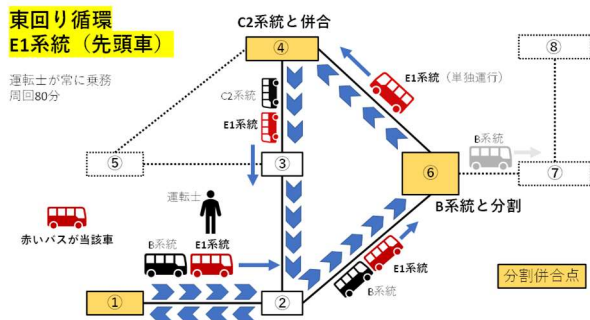


図-10 E1 系統

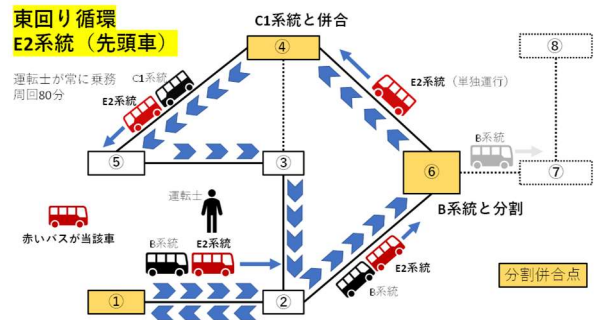


図-11 E2 系統

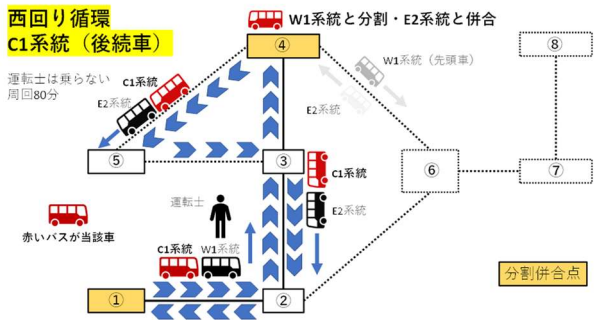


図-12 C1 系統

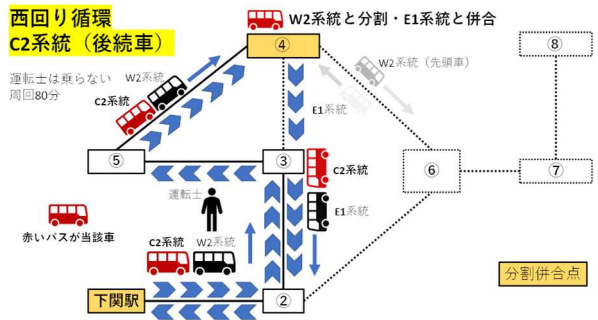


図-13 C2 系統

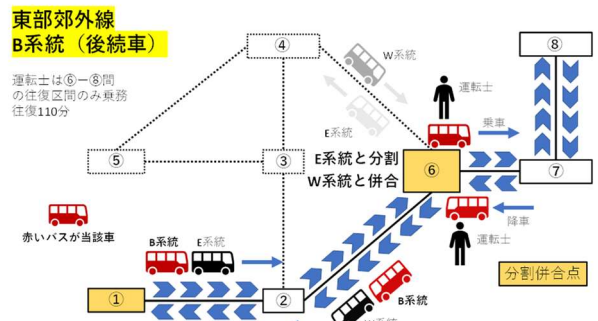


図-14 B 系統

(3) 必要車両台数・必要人員数

前節までの設定に基づいて、必要車両台数と必要人員数を算出した。全系統の運行間隔 I を 10 分に統一し、等間隔ダイヤとした。

W1, W2 系統は、①—③間は 10 分間隔の高頻度を維持しつつ、③から⑤を経由せず④に至る W1 系統と、⑤を経由する W2 系統が交互に運行されるため、③—④間の運行間隔は 20 分となる。④から⑥を経由して運行する以降の区間においては再び 10 分間隔の高頻度運行となる。また E1, E2 系統は①から⑥を経由して④までの区間は 10 分間隔の高頻度運行を維持しつつ、④から⑤を経由して③に至る E2 系統と⑤を経由しない E1 系統が交互に出発するため、④—③間の運行間隔は W1, W2 系統と同じく 20 分となる。さらに B 系統は①から⑥までは E1, E2 系統と隊列を組んで 10 分間隔で運行する想定である。⑥から⑦を経由して⑧まで往復する支線区間も、同じく 10 分間隔で単独走行する。

以上の設定の下で、ある時点における各系統の必要台数と必要人員数を算出した結果を表-2 に示す。

表-2 必要車両数・必要人員数の算出結果

系統	属性	総運行時間	必要車両台数(台)	必要人員数(人)
W1・W2系統	先頭車	80分	8	8
C1・C2系統	後続車	80分	8	0
E1・E2系統	先頭車	80分	8	8
B系統	後続車・単車	110分	11	7
合計			35	23

系統ごとの必要数の内訳を説明する。W1, W2 系統は路線 1 周を運行するのに要する時間が 80 分であり、運行頻度が 10 分間隔のため全体で 8 台が必要なことがわかる。W1, W2 系統は隊列走行時も先頭車となり、常に運転士が乗務しているため台数分の 8 人確保する必要がある。一方 C1, C2 系統は、必要台数は同じく 8 台であるが、常に隊列走行の後続車となるため、運転士は不要となる。E1, E2 系統も W1, W2 系統と同様 8 台及び 8 人が必要である。B 系統は①を出発した後、⑧で折り返して⑥に戻るまでの走行時間の合計は 82 分であるが、⑧で直ちに折り返した場合、⑥における W1, W2 系統との再併合のために 3 分間の待機時間が生じてしまう。そのため⑧で 3 分間あらかじめ待機させることとし、①に帰着後の待機時間を含め、往復に要する総運行時間を 110 分に設定した。B 系統も運行頻度は 10 分間隔のため必要車両数は 11 台となる。一方で必要人員数については、E1, E2 系統や W1, W2 系統との隊列走行区間 (①—⑥間) は後続車であり当該区間の運転士は必要でないため、単独路線区間 (⑥—⑧間) のみ運転士が必要となる。この区間は待機時間を含め往復 63 分を要することから、7 台が同時に運行していると想定されるため、7 人の運転士を確保する必要がある。

以上の条件下では、任意の時点において全系統上に必要となる車両台数は 35 台であり、必要人員数は 23 人となった。

(4) 考察

本章で実施した B 市のケーススタディでは、表-2 に示すように、必要車両台数 35 台に対して必要人員数は 23 人となった。通常の単独走行のバス車両で、(2) に示す各系統で(3)に示す運行頻度の運行を実施した場合の必要人員数は必要車両数と同じ 35 名となる。したがって、分割・併合が可能な公共交通システムの導入により、必要人員数が 12 人節減された。3 のモデル分析では隊列走行区間が短かったため、本技術の有効性が示しづらかったのに対し、本章で設定した路線ネットワーク、系統では環状系統の運行時間・隊列走行区間ともに十分長いいため、人員節減の効果が大きくなったと考えられる。

また本章で得られた新たな知見として、路線ネットワークの設定次第では、C1, C2 系統のように W1, W2 系統と E1, E2 系統の先頭車によりリレー方式で牽引されることによって、追加の人員を導入することなく新たな系統を生み出すことができることが明らかとなった。これは今までの運用想定にはなかったものであるため、隊列走行技術の新たな強みとなる可能性がある。

バス交通においては、B 市の①—②間のような複数系統の重複区間において各系統のバス車両が「団子運転」となり、非効率性が生じる問題が指摘されている。この問題に対して、長大な系統を途中で分割する路線再編がしばしば実行される。しかし、系統の分割は乗り換えの必要性を生じさせ、利用者の利便性低下につながる可能性がある。本章のケーススタディは、複数の系統の車両を併合しての隊列走行がこの問題の解決策となる可能性を示している。隊列走行により直通運行を維持し、サービス水準を維持しつつ、必要人員数を節減できることが期待される。

5. おわりに

以上、本研究では、車両の分割・併合が可能な公共交通システムを地方都市に導入し、効率的で持続可能な公共交通を実現できるかを検討することを目的として、仮想都市の公共交通ネットワークを用いたモデル分析や、実在の地方都市でのケーススタディを通して実際の地方都市への導入可能性について検討を行った。ヒアリング調査から、分割・併合が可能な公共交通システムを運営するためには、車両と人員を一体として捉える従来のバス事業者の車両・人員運用からの転換の必要性があることが明らかとなった。次にモデル分析の結果から、人員の節減が生じるための条件は複数系統の重複区間の存在であり、郊外部の放射系統を複数設定する上では、環状系統との分割・併合が有効的であることが示された。さらに、中間接続点での接続性を高めるため、運行間隔

及び折り返しのタイミングをネットワーク全体で整合させる必要があることが明らかとなった。最後に実在の都市を想定したケーススタディでは、必要車両台数 35 台に対して必要人員数は 23 人となり、大幅な人員節減効果が認められた。また、必要人員を追加確保することなく新たなシステムを設定できる可能性も示された。

本研究の結果は、分割・併合可能な公共交通システムが有効性を発揮するためには、既存のバス、鉄道等を単に置き換えるのみならず、ネットワークおよびダイヤを見直し、新たな交通体系を構築する必要があることを示すものと言える。特に、系統、運行頻度等を十分調整する必要がある。

一方、実際の都市への導入に際しては、以下の課題に対する解決も求められると考えられる。

定時性：車両の併合がダイヤ通りに行われるためには、各系統の定時性確保が必須となる。遅れが頻発する状況では本システムの有効性が低下すると予想される。

実情に即した人員運用：実際の人員運用では、分割・併合作業に要する時間や、休憩時間、途中交代等の要素を考慮する必要がある。

系統別に異なる運行頻度：実際の都市では、需要規模に応じて運行頻度を変えることが一般的であると言える。運行頻度が異なる場合、分割・併合可能な公共交通システムの有効性が低下する可能性がある。

以上の点の検討を今後の課題としたい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21K04302 の助成を受けたものです。付して感謝致します。

REFERENCES

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2020,
<https://www.mlit.go.jp/statistics/hakusyo.mlit.r2.html>
(最終参照日 2023 年 3 月 4 日) [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *WHITE PAPER ON LAND, INFRASTRUCTURE, TRANSPORT AND TOURISM IN JAPAN 2020*]
- 2) 公共交通のトリセツ：バスを走らせるときには、どのような費用が必要ですか？,
<https://text.odokake.co.jp/20200915-1/> (最終参照日 2023 年 3 月 4 日) [Public Transport Manual: *What are the costs for running a bus?*]
- 3) 西日本旅客鉄道株式会社：自動運転・隊列走行 BRT 説明会,
https://www.westjr.co.jp/press/article/items/210927_01_visual.pdf
(最終参照日 2023 年 3 月 4 日) [West Japan Railway Company: *Briefing session on automated driving and platooning BRT*]
- 4) 千葉好史, 中川大, 波床正敏：タクトダイヤによる地方都市間の鉄道の利便性向上に関する研究—スイスと日本を対象にした経年変化の分析—, 第 65 回土木計画学研究・講演集, 2022. [Yoshihumi Chiba, Dai Nakagawa, Masatoshi Hatoko: *A Study on Improvement of Convenience of Railways between Local Cities by Tact Timetables: Analysis of Changes over Time for Swiss and Japanese Cities, Proceedings of Infrastructure Planning, 2022.*]
- 5) 今泉淳：日本の鉄道車両運用計画形成のための数理モデルに関する概観, 東洋大学経営学部・経営論集, Vol.80, pp.21-33, 2017. [Jun Imaizumi: *A Survey of Mathematical Models for Railway Rolling Stock Scheduling in Japan, Journal of Business Administration, Toyo University, Vol.80, pp.21-33, 2017.*]
- 6) 佐々木公明, 文世一：都市経済学の基礎, 有斐閣, 2000. [Komei Sakaki, Mun Se-il: *Fundamentals of Urban Economics*, Yuhikaku, 2000.]

(Received March 6, 2023)

(Accepted March 6, 2023)