

## 分割・併合が可能な公共交通システムの地方都市への導入可能性の検討

山口大学大学院 学生非会員 ○森 竜佑  
山口大学大学院 正会員 榊原 弘之

## 1. はじめに

近年、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ている。地方都市の公共交通では、利用者の減少、運行を担う人材の不足から便数を削減せざるを得ず、その結果として利便性がいっそう低下するといった悪循環に陥っている。この解決策の一つとして、2021年9月に実証実験が開始された“自動運転と隊列走行技術を用いたBRT”が挙げられる<sup>1)</sup>。自動運転・隊列走行BRT技術は、異なる自動運転車両がBRT専用道に合流して隊列走行等を可能にする新たな交通システムである。本研究は、車両の“分割・併合”が可能な公共交通システムを導入することで、必要な車両台数・人員数を削減し、効率的で持続可能な公共交通を維持できるのではないかとこの着想に基づいている。

## 2. 鉄道・バス交通における車両と人員の運用

鉄道車両及び人員の運用方法に関してはモデルや数理的な分析手法が体系化されている。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、鉄道に類似した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。

車両の分割・併合を前提とした運用を考える際には、路線の途中での運転士の交代や、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降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徴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と同様の同心円状の都市であると考えられ、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。その上で、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

キーワード 公共交通, 運転士不足, 車両/人員運用計画, 分割・併合, タクトダイヤ

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 TEL 0836-85-9355

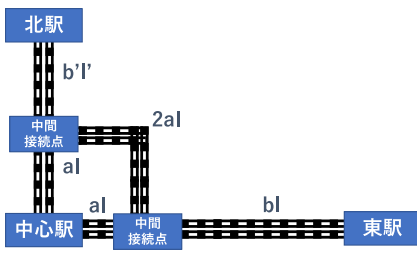


図-1 本研究で想定する公共交通ネットワーク

運転が可能なものとする。これは、単一中心地の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か所の中継接続点を經由して中心駅に戻る時計周り、反時計回りの環状系統を想定する。

(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 各中継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両単独走行する。
- ⑤ 東駅方面の中継接続点に進んでいた先頭車は反時計回りに、北駅方面の中継接続点に進んでいた先頭車は時計回りに次の中継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で分割した中継接続点まで戻った後、運転士は降車する。
- ⑦ 次の中継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組が各中継接続点か

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に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。従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」と呼び、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かについて、検証を行った。

(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 モデルの諸変数

モデルで操作可能な変数	文字	単位	説明
基本運行間隔	$l$	min	各系統の中心駅からの発車間隔
駅間所要時間	$al$	min	$a$ は無次元の実数 中心駅～各中継接続点間の区間所要時間
	$bl$		$b$ は無次元の実数 各中継接続点～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	中心駅から各中継接続点までの距離
	$d_B$		各中継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～各中継接続点、各中継接続点間の環状部内の運行速度
	$v_B$		各中継接続点～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  $al$ ,  $bl$  は環状部内の駅間距離  $d_A$ ,  $d_B$ , 平均車両速度  $v_A$ ,  $v_B$  より

$$al = \frac{d_A}{v_A}, \quad bl = \frac{d_B}{v_B} \tag{1}$$

と表すことができる。従って、無次元の係数  $a$ ,  $b$  は

$$a = \frac{d_A}{v_A \times l}, \quad b = \frac{d_B}{v_B \times l} \tag{2}$$

と与えられる。上式より、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。

(4)  $b = b'$  の場合の必要車両台数及び人員数の算出結果

(1)~(3)に示した設定の下で、必要車両台数及び人員数を算出した結果を以下に示す。

$$a = 0.5, I = 20(\text{分}), b = b'$$

$b = b'$  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、ペア固定型及びペア循環型の(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。

必要車両数 (ペア固定型)  $= 4 \times \text{ceil}(2(a + \text{Max}(a, b, b')))$  (3)

必要車両数 (ペア循環型)

$$= \text{ceil}(4a + w_1/I) + \text{ceil}(4a + w_2/I) + \text{ceil}(2(a + b)) + \text{ceil}(2(a + b')) \quad (4)$$

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-2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な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  $3aI$  である。一方で後続車として中心駅を出発

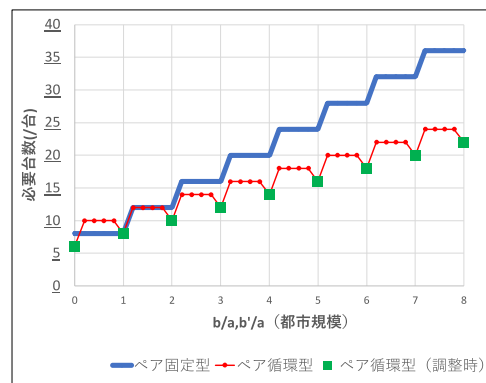


図-2 必要車両数 ( $a = 0.5, b = b', I = 20$ )

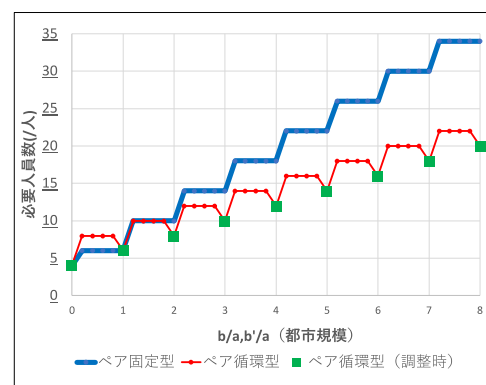


図-3 必要人員数 ( $a = 0.5, b = b', I = 20$ )

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-2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になることがわかる。 $2|b - a|$  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  $b, b'$  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。

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。

必要人員数(ペア固定型)

$$= \text{ceil}(2(a+\text{Max}(a, b))+\text{ceil}(2(a+\text{Max}(a, b')) + \text{ceil}(2b)+\text{ceil}(2b')) \quad (6)$$

必要人員数(ペア循環型)

$$= \text{ceil}(4a+w_1/I)+\text{ceil}(4a+w_2/I)+\text{ceil}(2b)+\text{ceil}(2b') \quad (7)$$

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人員数の変化を示す。(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  $2|b-a|$  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-2の必要車両数に一致する。従って図-2の必要車両数と図-3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。

#### 4. 地方都市を対象としたケーススタディ

本章では、3. のモデル分析の考え方を実在の地方都市 A 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。A 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。

以下図-4は B 市内の主要拠点を結ぶバス路線に自動運転・隊列走行 BRT を導入すると仮定した場合の新バス路線を具体化したものの中の一部である。

全系統の運行間隔を  $I=10$ (分)とした上で、必要車両台数・人員数を算出すると、以下の表-3のようになる。以上の条件下では、任意の時点において全系統に必要な車両台数は 35 台であり、必要人員数は 23 人となった。

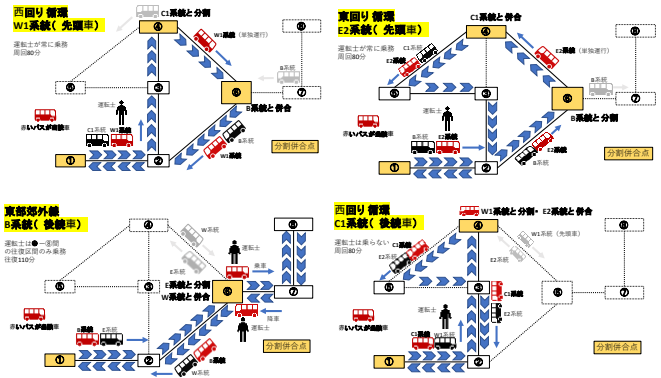


図-4 W1・E2・B・C1 系統の運行路線

表-3 ケーススタディで設定した各系統の必要台数

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

#### 5. おわりに

本研究から、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・併合が有効であることが示された。ケーススタディから、リレー方式で牽引される系統を設定すれば、路線ネットワークの設定次第では必要人員を追加で確保することなく、新たな系統を生み出せることがわかった。また、BRT を都市の路線網全体に導入するためには、各系統間の運行頻度も整合させるべきであり、既存のバスの置き換えのみならず、ダイヤとネットワークの一体的検討の必要性があると考えられる。

#### 参考文献

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](https://www.westjr.co.jp/press/article/items/210927_01_visual.pdf)

(最終参照日 2023年3月22日)