車両制約下における循環コミュニティバスの双方向化の成立条件と性能比較

Feasibility Conditions and Performance Comparison of Bidirectional Conversion of Circular Community Bus Routes under Vehicle Constraints

桑野 将司*
Masashi Kuwano*

This study evaluates the bidirectional conversion of circular community bus routes as a supply design problem under fixed demand and vehicle constraints. The proposed method integrates stop selection based on Pareto dominance, staged stop reduction with coverage constraints, and route optimization using both TSP- and OD-based approaches. A case study of the Kururi bus system in Tottori City shows that OD-based optimization improves travel time by 1.3–1.5 minutes over TSP-based routing. A three-course bidirectional configuration improves travel time by about 1 minute under the random-arrival assumption and by 2.5 minutes under a realistic assumption, while a two-course configuration results in longer travel time. Sensitivity analysis shows that outcomes depend strongly on waiting time assumptions, highlighting the trade-off between increased headway and reduced in-vehicle time.

Keywords: Circular community bus, Bidirectional operation, Route optimization, Stop selection
循環コミュニティバス，双方向運行，路線最適化，停留所選択

1. はじめに

地方部では，人口減少や自動車利用の進展を背景として，乗合バスの利用者は長期的に減少傾向にあり，近年においてもコロナ禍以前の水準には回復していない[1]．このような状況の下，コミュニティバスは交通空白地域の移動手段として全国の多くの自治体に導入されている[2]．2020 年の地域公共交通活性化再生法の改正により，地方公共団体による地域公共交通計画の作成が努力義務化され，利用実績データに基づく定量的な路線評価が求められるようになった[3]．交通系 IC カードデータはこうした評価の有力な手段として注目されており[4]，国内でも地域公共交通計画への活用が進みつつあるが，路線再編に実際に活用している自治体は約 30%にとどまる[5]．

コミュニティバスの運行形態の一つに循環型路線がある[6]．武蔵野市のムーバスや金沢ふらっとバス，鳥取市くる梨などにみられるように，日本各地で循環運行が広く導入されている．循環運行には片方向と双方向の形態が存在し，限られた車両で効率的な運用を行う観点から，片方向循環を採用する事例もある．片方向循環は 1 台の車両で一方向のサービスを完結できる利点を有する一方，逆方向への移動には，乗車区間および運用形態によっては，ほぼ 1 周分の乗車を要しうる．このため，往復利用が構造的に抑制される可能性がある．双方向循環はこの制約を緩和するが，車両台数が限られる場合には各方向の運行間隔が増大し，結果として待ち時間が増加する可能性がある．

片方向循環バスの双方向化を検討するには，路線網設計と停留所配置の双方を考慮する必要がある．路線網設計については，Ceder・Wilson[7]が路線設計・運行頻度設定・車両配分を段階的に解く枠組みを提案し，Kepaptsoglou・Karlaftis[8]，Ibarra-Rojas et al.[9]がバス路線網設計問題の包括的レビューを行い，車両台数制約下でのサービス設計の課題を整理している．路線再編に伴う乗換拠点の整備課題については長瀬ほか[10]が報告している．停留所配置については，Church・ReVelle[11]の最大被覆立地問題（MCLP）が知られている．停留所間隔に関しては，Furth・Rahbee[12]がアクセス時間と車内時間のトレードオフに基づく最適間隔の理論的導出を行っており，Ibeas et al.[13]は同様の枠組みから都市部では 300〜400 m が妥当であることを実証した．El-Geneidy et al.[14]は停留所統廃合の実証研究で，統廃合後も旅客数に有意な減少がなく走行時間が約6%短縮されたことを報告しており，停留所削減がサービス改善に寄与しうることを示した．一方通行・双方向通行の組合せによる街路網構成を扱った Drezner・Wesolowsky[15]や，直線型の両方向 BRT を対象として運行間隔と停留所数を同時最適化した Guo et al.[16]など，運行方向または停留所数を扱った研究もみられる．これらが線形の街路網・路線を対象とするのに対し，本研究は，車両台数を一定とし，運行間隔を所定の上限内に保つ条件の下で，双方向化に必要となる 1 周時間の短縮と停留所削減を路線再編に組み込み，徒歩・待ち・乗車・乗換時間の変化を統合的に評価する点に独自性がある．

本研究は，循環コミュニティバスの双方向化を，需要を所与とした供給設計問題として評価することを目的とする．すなわち，本研究は需要予測を目的とするものではなく，現行の利用実績に基づく OD 需要を固定した上で，車両制約下における路線再編の成立条件および性能変化を明らかにするものである．本研究では観測 OD を基準として固定した上で，双方向化により顕在化しうる潜在需要を復路転換率 p により観測 OD に上乗せする．双方向化は逆方向移動の利便性向上が期待される一方で，限られた車両台数の下では運行間隔の増大を伴う．このため，その効果は単純な所要時間の短縮としてではなく，期待待ち時間と乗車時間のトレードオフとして現れる．本研究では，この構造的関係を明示的に捉え，停留所削減と路線再編を統合的に扱う評価枠組みを提示する．

* 正会員 鳥取大学大学院工学研究科（Tottori University）

片方向で運用されている循環バスを双方向化するためには，本研究で設定した運用制約の下では停留所の削減が必要となり，どの停留所を削減するかの判断が求められる．ここで，本研究では，各コースの1周時間上限，車両台数一定，および平均走行速度・歩行速度・徒歩乗継上限を運用制約とする．利用件数のみ，あるいは近接距離のみといった単一指標による判断では，主要停留所の喪失や孤立地点の不適切な削減を招きうる．多基準意思決定におけるパレート支配[17]は，評価指標間の主観的な重み付けを導入せず，非支配関係から選択肢を分類する手法であり，この問題に適している．提案手法は，パレート支配による停留所の効率性評価，停留所の段階的削減による実行可能性判定とカバレッジ半径の導出，TSP 最適化および OD 需要に基づく総所要時間評価の 3 段階で構成される．本研究の新規性は，車両制約下での双方向化評価において停留所削減と運行方向再編を統合して扱う点，停留所削減の優先順位付けにおいて指標間の主観的重み付けを回避した評価手法を提案する点，実データにより所要時間と徒歩負担のトレードオフを定量的に把握する点にある．

2. 提案手法

本章では，循環コミュニティバスの双方向化を評価する手法を提案する．対象とする問題は，K コースの片方向循環路線を M 台の車両で運行しているバス路線について，同じ M 台の車両で双方向循環に再編する場合の利用者の総所要時間の変化を評価することである．なお，本手法では，1 周時間の上限，平均走行速度，歩行速度，徒歩乗り継ぎ上限等の運用パラメータを所与とする．ここで，徒歩乗り継ぎとは，異なるコースの停留所間を，所与の徒歩乗継上限内で徒歩移動して乗り換えることをいう．

(1) 問題の設定

停留所数 N，車両台数 M の循環路線を考える．片方向循環では各コース k に n_k 台の車両を配置し，運行間隔は $h_k = C_k/n_k$（C_k は1周時間）で決まる．双方向化後は，各再編コースに配分される車両を両方向に配車する必要があるため，1方向当たりの配車余力は片方向運行時より小さくなり，間隔が増大する．間隔の増大を抑えるには 1 周時間を短縮する必要があり，そのためには停留所の削減が求められる．本手法では，どの停留所を削減するかを需要と供給の両面から評価し，停留所削減に伴う利用者の追加徒歩負担を，最寄りの維持停留所までの距離として定量化する．

(2) パレート支配による停留所の効率性評価

停留所削減の妥当性は，需要面の影響と空間的代替可能性の両側面から評価する必要がある．本研究では，実務で取得容易かつ解釈容易な最小限の指標として，停留所利用件数と最近接停留所までの距離を採用した．利用件数のみで判断すると代替停留所のない孤立した低利用停留所を不適切に削減するリスクがあり，距離のみで判断すると高利用停留所を削減してしまう．本研究では，この基礎的2側面を同時に考慮するため，各停留所 i について以下の2指標を定義する．

$$x_i = 1/\bar{q}_i, \quad y_i = 1/d_{\min,i} \tag{1}$$

$\bar{q}_i$ は停留所 i の日平均利用件数（乗降合計），$d_{\min,i}$ は最近接停留所との直線距離（m）である．x_i は利用が少ないほど大きく（需要面で削減しやすい），y_i は代替停留所が近いほど大きい（供給面で削減しやすい）．逆数変換は「値が大きいほど削減しやすい」という向きを統一するための順序保存的変換であり，支配関係そのものを変更しない．なお，$d_{\min,i}$ は全停留所集合における最近接停留所までの距離であり，削減候補の優先度を定める指標として分析開始時に一度だけ算出する．このため，相互に最近接となる複数の停留所が同一のパレート層に含まれる場合がある．

停留所 i が j にパレート支配される条件は，$x_j \geq x_i$ かつ $y_j \geq y_i$（少なくとも一方は厳密不等号）である．パレート支配により，両指標で劣る停留所を指標間の明示的な重み付けなしに削減候補として識別できる．パレートフロンティア（非支配集合）を反復的に抽出し，第1層 L_1，第2層 L_2，…と層別化する．層が浅いほど「削減しやすい」と判定する．

(3) 段階的削減とカバレッジ半径の導出

提案手法では，パレートフロンティアを段階的に削減し，各段階で双方向ルートの実行可能性を判定する．ここで「実行可能」とは，全双方向コースについて1周時間の上限 $C_{\max,k}$ を満たす巡回ルートが構成できることを指す．

まず L_s の停留所を削減し，カバレッジ半径 R_s を削減停留所から最寄りの維持停留所までの距離の最大値として導出する．

$$R_s = \max_{i \in \bigcup_{j=1}^{s} L_j} \min_{i' \notin \bigcup_{j=1}^{s} L_j} d_{ii'} \tag{2}$$

R_s は「第 s 段階までの停留所削減で利用者に求められる最大追加徒歩距離」を表す．相互に最近接となる複数の停留所が同時に削減される場合も，式(2)では削減停留所を除いた維持停留所集合を対象として最寄り停留所を求めるため，追加徒歩距離は削減後に残る停留所までの距離として評価される．

維持停留所の集合に対してルート探索（後述）を行い，所与のバス台数で，各コースがコース別の1周時間上限 $C_{\max,k}$ を満たすかを判定する．実行可能であれば，R_s と引き換えに双方向化が実現可能である．実行不可能であれば L_{s+1} を追加削減し，R_{s+1} を導出して再度判定する．実行可能解が得られるまでこれを繰り返す．

R_s は外生的に設定する設計パラメータではなく，パレート分類の結果として導出される値であり，「第 s 段階の削減コスト」として解釈される．計画者は各段階の削減停留所数と最大追加徒歩距離 R_s を確認しながら，受容可能性を判断できる．

(4) ルート最適化と評価指標

双方向シナリオのルート設計は，維持停留所集合 V（$|V|$地点）を K 個のグループ $\{G_1, \ldots, G_K\}$ に分割し，各グループの巡回順序を決定する問題である．最適化は2段階で行う．第1段階では，各コースの巡回距離の総和を最小化する（以降，TSP

最適化，式 (3))．第2段階では，TSP最適化の結果を初期解として，OD需要で加重した平均総所要時間 $\bar{T}$ を最小化する（以降，OD最適化，式 (4)）．

$$\min \sum_{k=1}^{K} l_{\mathrm{TSP}}(G_k) \quad \text{s.t.} \quad C_k \le C_{\max,k} \tag{3}$$

$l_{\mathrm{TSP}}(G_k)$ はコース k の巡回距離 C_k は $l_{\mathrm{TSP}}(G_k)$ を停車時間込みの平均走行速度で時間換算した1周時間である．$C_{\max,k}$ はコース k の1周時間の上限である．

第2段階のOD最適化（式 (4)）では，式 (3) で得られたコース分割を初期解として $\bar{T}$ を最小化する．

$$\min_{G_1,\ldots,G_K} \bar{T} = \frac{\sum_{(o,d)} q_{od} \cdot T_{od}}{\sum_{(o,d)} q_{od}} \quad \text{s.t.} \quad C_k \le C_{\max,k} \tag{4}$$

ここで q_{od} はODペア (o,d) の日平均利用件数，T_{od} は各ODの総所要時間である．$\bar{T}$は利用者の総所要時間の需要加重平均であり，待ち時間・乗車時間・徒歩時間・乗換時間を含む．T_{od} は式 (5) で構成される．

$$T_{od} = T_{\mathrm{wait}} + T_{\mathrm{ride}} + T_{\mathrm{walk}} + T_{\mathrm{transfer}} \tag{5}$$

T_{wait} はランダム到着を仮定した期待待ち時間 $(= h_k/2)$，T_{ride} は乗車時間，T_{walk} は削減停留所の利用者が最寄り維持停留所まで歩く時間である．T_{transfer} は乗換が必要な場合の乗換先コースの期待待ち時間 $(= h_{k'}/2)$ であり，直通の場合は $T_{\mathrm{transfer}} = 0$ である．T_{od} は直通・乗換の経路のうち最小のものを採用する．

なお，本手法のルート探索はヒューリスティック手法に基づくものであり，厳密最適解を保証するものではない．しかしながら，複数の初期解に対する反復的な局所探索により，実務的に利用可能な候補解を得ることができる．解の安定性については3章で検証する．

3. ケーススタディ（鳥取市くる梨）

(1) 対象路線の概要と利用実態

くる梨は鳥取市中心部を運行する100円均一の循環コミュニティバスであり，4コース（赤・緑・青A・青B）をM=6台の車両で片方向運行している（表-1，図-1）．

本ケーススタディでは，ターミナル（鳥取駅バスターミナル，以降BT）を全コースの起終点として固定する．運用パラメータとして，平均走行速度 $v = 10.3$ km/h（GTFSダイヤデータから推定，停車時間込み），歩行速度 $v_w = 80$ m/分（4.8 km/h），徒歩乗り継ぎ上限 $D_{\mathrm{walk}} = 200$ m とした．1周時間の上限 $C_{\max,k}$ は，1方向当たり1台を配車するコースで30分とし，各方向2台を配車するS1の大コースは同一の運行間隔を2台で分担するため60分とした．30分は現行の20分間隔（赤，緑コース）と40分間隔（青A，青Bコース）を踏まえ，再編後も概ね現行水準以内に収めることを目安に設定した．

分析にはICカード利用履歴69,707件（2023年4月～2026年2月，約35か月）を使用する．乗車時刻記録ありかつ乗降停留所が異なる44,912件（64.4%）をOD分析の対象とする．

表-1　現行運行パラメータ

コース	車両 n_k	間隔 h_k	便数/日	停留所数
赤	2台	20分	31	19
緑	2台	20分	31	21
青A	1台	40分	16	17
青B	1台	40分	15	20

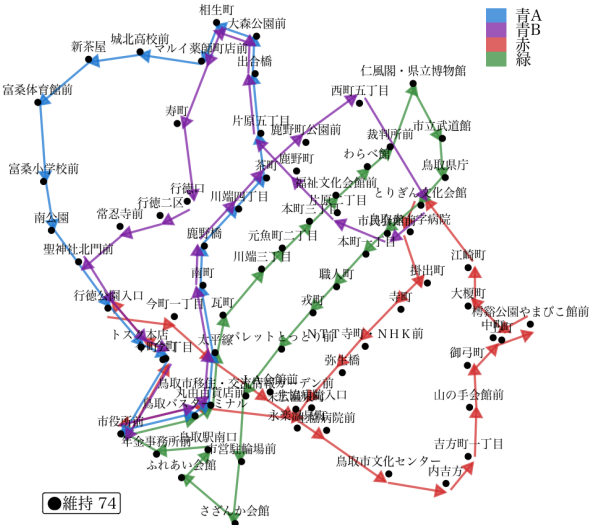


図-1　現行ルート（S0）

表-2　1日あたりの利用回数分布

利用回数	件数	割合
1回	38,473	72.5%
2回	12,986	24.5%
3回以上	1,605	3.0%

なお，分析対象はICカード利用に限定されており，現金利用者を含む全利用者の行動を完全には反映していない．コミュニティバスでは高齢者の現金利用比率が高い場合があり，観測需要に偏りが含まれる可能性がある．

停留所は，GTFS上の77個のstop_idを同一名称の停留所（道路の両側に設置されたペア等）で統合し，分析単位は $N = 74$ 地点とした．

1日あたりの利用回数を集計すると，1日1回利用が72.5%を占め，往復利用（2回）は24.5%にとどまった（表-2）．片方向循環では，乗車区間および運用形態によっては逆方向への移動にほぼ1周分の乗車を要しうるため，往復利用が抑制されている可能性がある．1日2回利用者のうち，2回の乗車で利用コースが同一であった割合は71.1%，異なるコースであった割合は28.9%であった．なお，普通運賃利用者がBTで降車して次便に乗車する場合は，それぞれの乗車に100円の運賃が生じる．異コースの組み合わせは青A-青B（31.2%）と赤-緑（29.6%）に集中しており，運行エリアが重なるコース間での乗り継ぎ利用がみられる．

各ODについて，現行の運行方向に沿った乗車時間と，現行方向および逆方向のうち短い方の乗車時間との差を遠回り損失とした．この遠回り損失をOD需要で加重平均した値は1.1分であった．全利用の31.3%は逆方向の方が短い経路で乗車しており，これらの利用者は片方向循環のために遠回りを強いられている．ただし，加重平均の遠回り損失が1.1分と小さいの

は，片方向循環では逆方向移動が不便なために利用者が逆方向の OD を避けており，遠回りの大きい OD ペアの需要自体が観測データに現れにくいためと考えられる．

くる梨における利用実態の空間分布を図-2 に示す．停留所の円サイズは日平均利用件数を表し，OD ライン（上位 20 件）は出発・到着ペアごとの利用件数を線の太さで示している．BT 関連を灰色，非 BT 関連を濃色で区別している．図-2 より，BT が圧倒的なハブとして機能し，上位 20OD のうち 14 本が BT を発着点とする需要であることが確認される．残り 6 本はいずれも緑コース内の非 BT 間需要であり，仁風閣・県立博物館，鳥取県庁，市立武道館といった緑コース北側の停留所から，鳥取市移住・交流情報ガーデン前や鳥取駅南口に向かう移動である．これら 2 つの到着停留所は BT から直線距離でそれぞれ 238 m，151 m と徒歩圏内に位置する．緑コースは片方向循環であり，北側の停留所から BT に直接到達するには南側の停留所群を経由する必要があり，仁風閣からの乗車時間は約 20.0 分に達する．これに対し，途中の移住・交流情報ガーデン前で降車すれば乗車は約 9.8 分で済み，徒歩約 3 分（238 m）を加えても約 13 分と，10 分以上の短縮となる．すなわちこれら非 BT 間 OD の少なからぬ割合は，真の目的地が BT・鳥取駅周辺であるにもかかわらず，片方向循環の迂回を避けるために意図的に手前で降車し徒歩で補完する行動を反映していると解釈される．これは，観測データ上の遠回り損失が加重平均 1.1 分と小さい一因，すなわち迂回の大きい需要が徒歩等の代替行動に吸収され観測データに現れにくいという具体的な顕在例でもある．さらに，主要 15 地点（日平均利用 ≥1.0 件/日）は BT およびその周辺の中心市街地に集中しており，外縁部には低利用の停留所が広がる空間構造が確認される．以上より，本対象路線は，BT を中心とするハブ型の需要集中，および片方向循環の迂回を回避する早期降車＋徒歩補完行動の顕在化，という非対称な OD 構造を有する．本研究は，このような需要構造を持つ路線を対象としてケーススタディを行うものである．

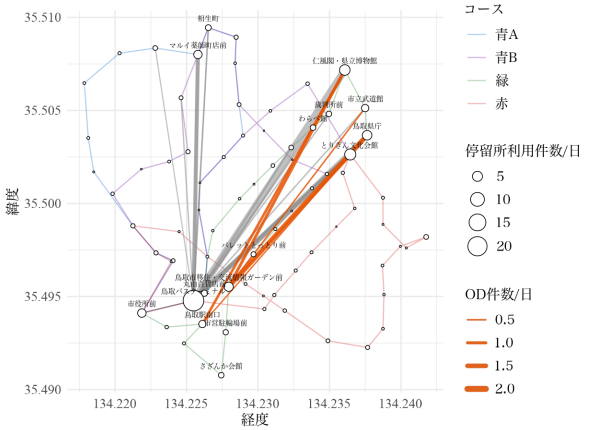


図-2　くる梨の停留所利用量と主要 OD 構造

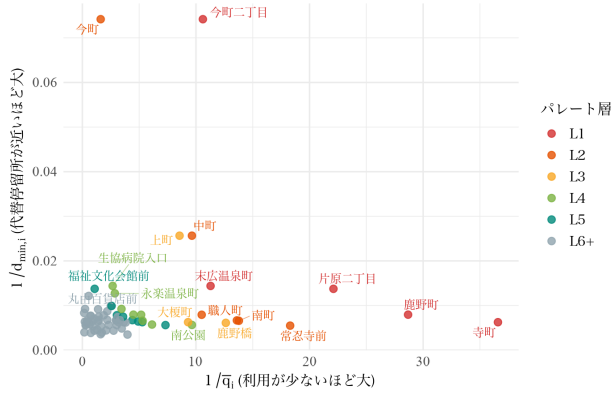


図-3　パレート支配による停留所の層別分類

(2) 停留所の効率性評価結果

BT を除く 73 地点に対してパレート支配による層別分類（2 章(2)）を適用した（図-3）．パレートフロンティア第 1 層（L_1，5 地点）は全て日平均 0.1 件未満の極低利用停留所であり，第 2 層（L_2，6 地点）は最大 0.62 件/日であった．主要バス停（日平均利用 ≥ 1.0 件/日，15 地点）はいずれも深い層（L_7以降）に位置し，初期削減の対象外となった．

提案手法の特性を確認するため，利用件数のみで削減する手法（B: 利用最少順）と，最近接距離のみで削減する手法（C: 代替容易順）との比較を行った（表-3）．5 地点削減では 3 手法に大きな差はないが，削減数が増えるにつれて単独指標の限界が顕在化する．利用最少順（B）は代替停留所のない孤立した低利用地点まで削減し，最大追加徒歩距離が増大する．代替容易順（C）は主要停留所を失い（14 地点で 13/15），削減利用計も 9.8 件/日に達する．提案手法（A）は指標間の主観的な重み付けを導入せず，全段階で主要停留所を全 15 地点維持しつつ最大追加徒歩距離を 200 m 以内に抑制できていることがわかる．

(3) 双方向シナリオの設計と TSP 最適化

現行 4 コース片方向（S0）に対し，2 つの双方向シナリオを設定した．S1（2 コース双方向）は，6 台を大コース 4 台（各方向 2 台）と小コース 2 台（各方向 1 台）に配分する非対称構成である．S2（3 コース双方向）は，6 台を 3 コースに均等配分（各 2 台，各方向 1 台）する構成である．

ルート探索は，各コースへの停留所の割当とコース内の巡回順序を，運行制約の下で決定する多スタート局所探索により行った．初期のコース分割は，停留所座標に基づく K-means 法，

表-3　停留所選択手法の比較

手法	削減数	最大追加徒歩距離	主要停留所維持	削減利用計
5 地点削減（L_1 相当）				
A: 提案手法	5	160 m	15/15	0.3 件/日
B: 利用最少順	5	182 m	15/15	0.2 件/日
C: 代替容易順	5	161 m	15/15	1.0 件/日
11 地点削減（$L_1 + L_2$ 相当）				
A: 提案手法	11	182 m	15/15	1.3 件/日
B: 利用最少順	11	200 m	15/15	0.8 件/日
C: 代替容易順	11	161 m	14/15	4.9 件/日
14 地点削減（$L_1 \sim L_3$ 相当）				
A: 提案手法	14	200 m	15/15	1.6 件/日
B: 利用最少順	14	200 m	15/15	1.1 件/日
C: 代替容易順	14	225 m	13/15	9.8 件/日

BT からの距離または方位に基づく分割，およびランダム分割の 3 種のいずれかで生成する．これを初期解として，目的関数（TSP 最適化では巡回距離，OD 最適化では$\bar{T}$）が改善しかつ運行制約を満たす限り，停留所を 1 つずつコース間で移動させる局所探索により改善した．コース内の巡回順序は最近傍法と 2-opt 法で求めた．全コースの起終点であるバスターミナル（BT）はコース分割の対象から除外し，分割後に全コースへ共通して付与する共有停留所として固定した．S1 の K-means 法による初期分割では，得られた 2 群のうち停留所数の少ない方を小コース（各方向 1 台），多い方を大コース（各方向 2 台）とした．各クラスタの停留所数は事前に指定しておらず，その後のルート探索によって各コースの停留所構成を決定した．本手法は厳密最適解を保証するものではないが，停留所削減と路線再編を同時に扱う組合せ問題に対し，実務的に利用可能な候補解を得るためのヒューリスティック手法である．

なお，本手法は複数の初期解からの反復探索により安定した解が得られることが期待される．解のばらつきおよび結果の頑健性については，後述する通り，乱数シードを変えた 100 回の試行により検証を行う．

各シナリオについて，パレート層の浅い順に停留所を段階的に削減し，維持停留所による TSP 最適化（式 (3)）を行い，各コースがコース別の 1 周時間上限 $C_{\max,k}$ を満たすかを判定した（表-4）．L_1 のみの削減（5 地点，$R_1 = 160\text{m}$）では，S1・S2 とも実行不可能であった．維持停留所が 69 地点と多く，双方向の 1 周時間が制約を超えるためである． L_2 を追加した 11 地点の削減（ R_2=182 m）により，S1 が実行可能となった．S2 は L_3 （14 地点）， L_4 （22 地点）まで削減しても実行不可能であり， L_5 まで（30 地点， R_5=284 m）の削減で初めて実行可能となった．主要バス停 15 地点は L_1〜L_5 に含まれないため，S1・S2 ともに全て維持された．カバレッジ半径 R はパレート分類から自動的に導出されるため，計画者は R_1=160 m， R_2=182 m と段階的にコストの増大を確認しながら受容可能な水準を判断できる．

実行可能解が得られた S1（11 地点削減）と S2（30 地点削減）の TSP 最適化ルートを図-4，図-5 に示す．

(4) OD 最適化による再探索

TSP 最適化は巡回距離を最小化するものであり，利用者の需要パターンは考慮されない．そこで，本研究では需要の不確実性に対応するため，設計問題と評価問題を分離する枠組みを採用する．具体的には，設計段階では双方向化により顕在化し得る潜在需要を考慮した条件を用い，評価段階では複数の需要シナリオにより性能を比較する．この潜在需要は後述する復路転換率 p により表現する．

OD 最適化に用いる OD 表については以下のように設定した．3 章(1)で示した通り，現行の片方向循環では 1 日 1 回（片道のみ）利用が 72.5%を占めており，観測 OD は片方向運行を前提とした利用パターンに偏っている．双方向化により逆方向の利便性が向上すれば，現在片道のみの利用者の一部が復路もバスを利用する可能性がある．この効果を表すため，1 日に 1 回のみ利用した利用者（以下，片道利用者）のうち往復利用に転換する割合を復路転換率 p と定義する．

以上を踏まえ，設計段階では双方向化の潜在便益を最大限に反映するため，感度分析の上限ケースとして$p = 100\%$（片道利用者全員が往復に転換）の OD 表を用いて最適化を行い，評価段階では復路転換率 p を外生的に変化させた複数シナリオにより性能を比較する．なお，S1 の OD 最適化では，大コースにおける遠回りの発生を抑制することを意図し，主要 OD の発着点である鳥取県庁を大コースと小コースの双方に重複して含め，共有停留所として固定した．

具体的には，TSP 最適化で実行可能と判定された維持停留所の集合に対し，OD 需要で加重した平均総所要時間 $\bar{T}$ を最小化するよう，停留所を 1 つずつコース間で移動させる局所探索

表-4　段階的削減と実行可能性

段階	削減地点数	維持地点数	カバレッジ半径R	S1	S2
L_1	5	69	160 m	不可能	不可能
$L_1 + L_2$	11	63	182 m	可能	不可能
$L_1 \sim L_3$	14	60	200 m	—	不可能
$L_1 \sim L_4$	22	52	269 m	—	不可能
$L_1 \sim L_5$	30	44	284 m	—	可能

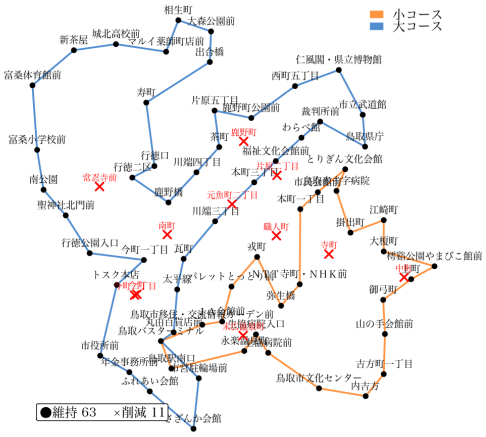


図-4　S1 TSP 最適化ルート

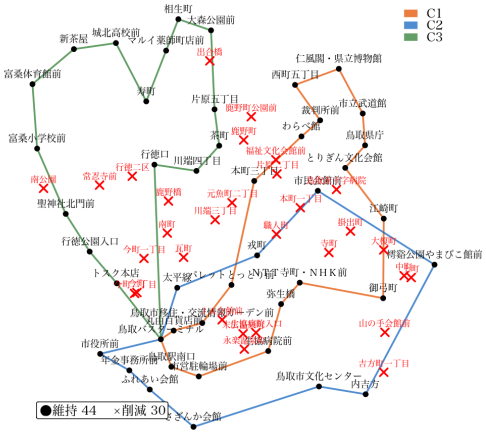


図-5　S2 TSP 最適化ルート

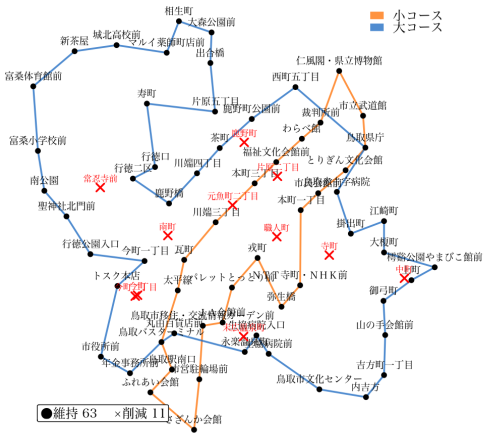


図-6　S1 OD 最適化ルート

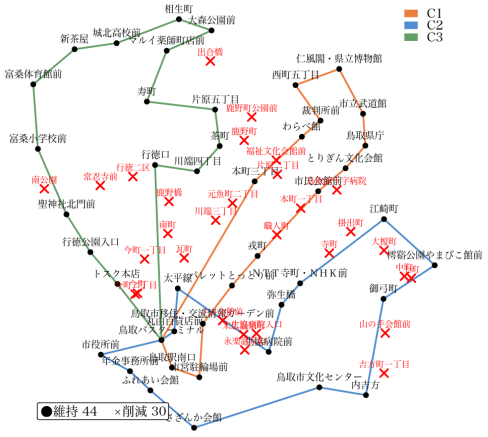


図-7　S2 OD 最適化ルート

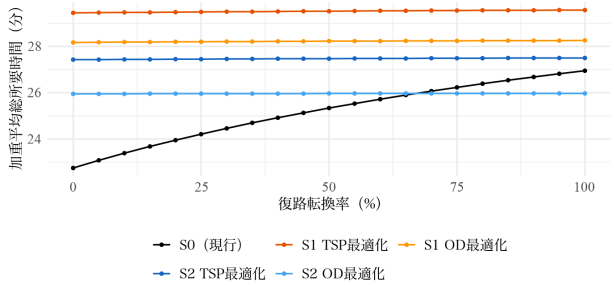


図-8　復路転換率と加重平均総所要時間

表-5　待ち時間係数 α に対する加重平均総所要時間（分）

α	S0	S1 OD	S2 OD	S2−S0
0.25	20.55	20.40	**18.04**	-2.51
0.50	26.95	28.26	**25.97**	-0.98
0.75	**33.33**	36.11	33.91	+0.58

を適用した．$\bar{T}$が改善し，かつ各コースが $C_k \le C_{\max,k}$ を満たす場合のみ受理し，改善がなくなるまで繰り返した．なお，乱数シードを変えた 100 回の試行から最良解を採用した．

OD 最適化の結果（図-6，図-7），TSP 最適化とは異なるコース分割が得られた．TSP 最適化では地理的な連続性が優先され，空間的に近接した停留所が同一コースに配置される傾向が見られる．一方，OD 最適化による路線分割では，利用需要の結びつきが強い停留所群が同一コースにまとめられる傾向が確認された．

⑸ シナリオ比較

双方向化後の需要変化を直接推定することはできないため，復路転換率 p （ $p = 0\%$で現行利用パターンのまま，$p = 100\%$で全片道利用者が往復に転換）を外生的に設定し，各シナリオの $\bar{T}$ を p の関数として比較した（図-8）．

TSP 最適化と OD 最適化の間には明確な差が確認された．$p = 0\%$において，S1 では TSP 最適化 29.45 分に対し OD 最適化 28.17 分，S2 では TSP 最適化 27.43 分に対し OD 最適化 25.95 分となり，OD 最適化は TSP 最適化に対し約 1.3〜1.5 分の改善をもたらした．OD 最適化では，利用者の多い OD ペアが同一コース内に収まるよう停留所の配分が調整され，コース間の結節点（共有停留所や近接停留所）が形成されることで乗り継ぎ利便性が向上する（図-4〜図-7）．この結果は，供給側の効率（走行距離）のみを考慮したルート設計では需要側の利便性が十分に反映されず，IC カードデータ等の OD 情報を活用した設計が重要であることを示している．

S1 は OD 最適化を適用しても，全ての p において S0 より所要時間が長く（ $\Delta T = +1.3$〜$+5.4$分），現行を改善できなかった．これは，現行 4 コースを 2 コースに集約することで各コースの運行間隔が 20 分から 28〜30 分に増大し，期待待ち時間の増加が逆方向乗車時間の短縮を上回るためである．鳥取県庁を共有停留所とした乗り継ぎや，近接停留所間の徒歩乗り継ぎ（ $D_{\text{walk}} = 200$m 以内）を考慮しても，間隔増加の影響を相殺するには至らなかった．

S2（OD 最適化）は $p = 0\%$で 25.95 分（S0 比+3.2分），$p = 100\%$で 25.97 分（S0 比−0.98分）となった．p の増加に伴い S0 と S2 の差が縮小し，$p = 100\%$では S2 が S0 をわずかに改善する．これは，3 コース均等分割（各 14〜15 停留所）により 1 周時間が約 27〜29 分に抑えられ，運行間隔の増加が最小限にとどまることに加え，OD 最適化により利用需要の高い停留所間の所要時間が短縮されたためである．ただし，S2 は 30 停留所の削減（カバレッジ半径$R_5 = 284$m）を伴う．

総所要時間の内訳を成分別にみると（$p = 100\%$），T_{walk}の需要加重平均は S0 で 0 分，S1 で約 0.05 分，S2 で約 0.28 分であった．削減停留所の日平均利用件数の合計は，全停留所合計の S1 で 2.1%，S2 で 9.9%に限られるため，全利用者で平均した徒歩時間の増加は小さい．削減停留所から最寄りの維持停留所までの最大距離R_sは，S1 で 182 m（約 2.3 分），S2 で 284 m（約 3.6 分）である．S0 から S2 への成分変化は，T_{ride}が 4.58 分減少する一方，T_{walk}が 0.28 分，T_{wait}が 0.48 分，T_{transfer}が 2.84 分増加し，差引 0.98 分の改善となった．したがって，S2 の$p = 100\%$の条件では，停留所削減に伴う徒歩負担の増加は比較的小さく，乗車時間の短縮が他の成分の増加を上回った．一方，S1 では総所要時間が S0 より増加しており，双方向化による利便性改善は路線構成や需要等の条件に依存する．

なお，pは仮定値であり実際の転換率は運行形態変更後にしか観測できないため，本結果は短期的・静学的な供給再編効果の比較として解釈する必要がある．

(6) 結果の頑健性検証

以上の結果はヒューリスティック探索および基準的な待ち時間仮定に基づくものであるため, 解の安定性と待ち時間モデルに対する頑健性の2つの観点から結果の信頼性を検証する.

(a) 探索の安定性

3種の初期分割による初期解生成を100回試行した. 各試行は「初期分割→TSP最適化→OD最適化」のパイプラインで構成されており, TSP最適化の段階で$C_{\max,k}$の制約を満たすTSP解が得られたのは, S1で8%, S2で19%であった. 強い1周時間制約の下では, 実行可能性が初期分割に依存する. 一方, TSP段階で実行可能解が得られれば, OD最適化では運行制約を維持して探索するため, 実行可能性は保たれる.

図-4・図-5は, 探索で得られた実行可能解のうち目的関数が最良のものである. 乱数シードを変えた100回の試行で得られた実行可能解は, S1で8個, S2で19個であった. 運行時間指標のばらつきは小さく, S1の合計1周時間は平均83.9分・標準偏差1.6分, S2の最大1周時間は平均29.4分・標準偏差0.5分であり, 実行可能な複数のパターンは運行性能の点でほぼ同等であった.

S2の実行可能解19個のうち12個（63%）がS0（26.95分）を下回り, 独立に実施した再探索でも最良値は25.9分と同水準であった. したがって, S2がS0を改善しうるという結果は単一の最良解だけに依存するものではなく, 実行可能解の過半で確認された. ただし, 改善幅は最良解でも約1分であり, 初期値および待ち時間仮定に依存する条件付きの結果である.

(b) 待ち時間モデルに対する頑健性

期待待ち時間を$T_{\text{wait}} = \alpha h$と定義し, 係数$\alpha$を変化させた感度分析を行った. ここで, αの設定には理論的および実証的な根拠がある. まず, $\alpha = 0.5$は利用者がランダムに到着する場合の期待値として広く用いられる基準的な設定である. 一方, 運行間隔が長い路線では利用者が時刻表に基づいて行動する傾向があることが指摘されており[18),19)], $\alpha = 0.25$はそのような計画的到着を反映した現実的な水準に対応する. さらに, $\alpha = 0.75$はバスの遅延による定時性の低下で利用者が早めに停留所に到着する必要がある場合や乗り継ぎに伴う心理的負担により知覚待ち時間が増加する場合を想定した悲観的設定であり, 上限ケースとして位置付けられる.

待ち時間係数αに対する加重平均総所要時間の結果を表-5に示す. シナリオ間の優劣関係はαの設定に応じて変化することが確認された. すなわち, 本研究で対象とする路線再編の評価は, 待ち時間の仮定に対して敏感である. 具体的には, S2は$\alpha = 0.25$および$\alpha = 0.50$においてS0を改善し, 特に$\alpha = 0.25$では約2.5分の改善が得られた. 一方, $\alpha = 0.75$ではS0がS2をわずかに上回る. S1は$\alpha = 0.25$でわずかにS0を下回るものの, $\alpha \geq 0.5$では明確に劣後する. これらの結果は, 運行間隔の大きいシナリオほど待ち時間仮定に対する感度が高いことを示している.

以上より, 双方向化の効果は一意に評価されるものではなく, 利用者の到着行動や待ち時間の知覚に強く依存することが示唆される. 特に, 現実的と考えられる$\alpha = 0.25$付近ではS2は安定してS0を上回る性能を示しており, 適切な需要条件の下では双方向化の便益が期待できる. 一方で, 待ち時間の不利が大きく評価される場合には, その効果が相殺される可能性がある.

4. 考察

本事例から示唆される双方向化の構造的要因として, (a) 現行の運行間隔, (b) 停留所密度, (c) OD需要の方向性の3点が挙げられる.

特に重要なのは, 双方向化に伴う「期待待ち時間の増加」と「乗車時間の短縮」のトレードオフ構造である. 車両制約下では, 双方向化により1方向あたりの運行頻度が低下するため, 期待待ち時間が増加する. 一方で, 逆方向移動の乗車時間は短縮される. くる梨では期待待ち時間が総所要時間の半分以上を占めており, この2つの効果のバランスが結果を支配している. S2（3コース双方向）では, 運行間隔の増加が比較的小さく抑えられるため, OD最適化により乗車時間短縮の効果が運行間隔の増加を上回り, S0をわずかに改善する結果となった. 一方S1（2コース双方向）では運行間隔がより大きく増加するため, 期待待ち時間の増加が乗車時間短縮を上回り, S0を改善できなかった. くる梨は(a)と(c)の両方で双方向化に不利な条件を有する. 現行の赤・緑コースは20分間隔と比較的高頻度であり, 双方向化で同等の間隔を維持するには計12台が必要となる. また1日1回利用が72.5%を占めることから需要の方向性が弱く, 双方向化の便益が限定的となる構造である.

なお, 本研究では期待待ち時間を$T_{\text{wait}} = h/2$（ランダム到着仮定）でモデル化したが, 運行間隔が10分以上の路線では利用者は時刻表に合わせて到着するため, 実際の待ち時間は$h/2$より短くなることが知られている. Bowman・Turnquist[18)]は$h > 10$分の路線における観測データから, 待ち時間が運行間隔に対して頭打ちになる傾向を実証し, Fan・Machemehl[19)]は$h > 15$分の路線で利用者が戦略的待機行動をとるため観測待ち時間は概ね5〜7分にとどまることを示している. 本研究の対象路線は$h \geq 20$分でありGTFSデータも整備されているため, 現実的な待ち時間係数は$\alpha \approx 0.25$程度と推定される. 3章(6)で示した通り, 双方向化の評価は待ち時間仮定に敏感であり, $\alpha = 0.25$および0.50ではS2がS0を改善する一方, $\alpha = 0.75$ではS0の方がS2より所要時間が短い（差0.58分）. したがって, 本研究の結論は単一の待ち時間仮定の下で一意に定まるものではなく, 利用者の到着行動や知覚待ち時間の設定に依存する条件付きの結果として解釈されるべきである.

S2は30停留所の削減（カバレッジ半径$R_5 = 284$ m）を伴い, サービスエリアの縮小は運行計画上の判断を要する. 需要変化を考慮すれば, 往復利用の促進による利用回数の増加等によって評価が変わる可能性があるが, これは本研究の分析対象外である.

本研究のデータは現行片方向システムのICカード利用実績であり, 双方向化後の需要変化は復路転換率pとして外生的にパラメータ化している. pは仮定値であり, 実際の転換率

は運行形態の変更後にしか観測できない. 本研究は需要を固定した供給設計問題としての評価であり, 需要の内生化は今後の課題である. ただし, 本研究の目的は特定の需要予測を行うことではなく, 制約条件下における供給設計の構造を明らかにすることであり, 結果は需要の絶対値に依存するものではなく, 運行間隔, 停留所密度, OD需要の方向性といった要因間の関係として解釈されるべきである.

5. 結論

本研究は, 循環コミュニティバスの双方向化を需要固定下の供給設計問題として捉え, 停留所削減と路線再編を統合的に評価する枠組みを提示した. 提案手法は, パレート支配による停留所の効率性評価（指標間の主観的重み付けを回避）, 段階的削減による実行可能性判定とカバレッジ半径Rの導出, およびOD需要に基づく総所要時間の最適化の3段階で構成され, 計画者に対し双方向化の成立条件と所要時間への影響を定量的に示す.

鳥取市循環バスくる梨（20分間隔2コース・40分間隔2コースの計4コース片方向, 74停留所, 6台）へのケーススタディを通じて, 以下の知見を得た. S1（2コース双方向, 大コース4台・小コース2台の非対称構成）では, パレート層$L_1 + L_2$の11停留所を削減することで各コースが$C_k \leq C_{\max,k}$を満たす双方向ルートが実現可能となった（最大追加徒歩距離182 m, 約2.3分）. S2（3コース双方向, 各コース2台の均等構成）では$L_1 \sim L_5$の30停留所の削減が必要であり, 最大追加徒歩距離は284 m（約3.6分）に達する. S2のOD最適化による加重平均総所要時間は$p = 100\%$で25.97分となり, S0（26.95分）を約1分改善した. 文献的に現実的とされる待ち時間係数（$\alpha = 0.25$）の下ではこの改善幅は約2.5分に達する一方, 最も悲観的な$\alpha = 0.75$ではS0がS2をわずかに上回る. すなわち双方向化のメリットは待ち時間の仮定に条件付きで成立する結果であり, 一意に断定できるものではない. OD最適化はTSP最適化に対しS1・S2ともに約1.3〜1.5分の改善をもたらし, ICカードデータ等のOD情報を活用したルート設計の有効性が確認された.

ケーススタディの結果, 双方向化は逆方向移動の利便性を改善する一方で, 車両制約下では運行間隔の増大を伴い, 期待待ち時間が増加することが明らかとなった. 双方向化の成否は, 運行間隔, 停留所密度, および需要の方向性といった要因に強く左右される構造的問題である. 本研究の貢献は, 双方向化の是非を単一の指標で判断するのではなく, その成立条件とトレードオフ構造を明示的に評価する枠組みを提示した点にある. 本研究の枠組みは事前評価により実装後の失敗を回避するための定量的根拠を提供するものであり, 限られた資源の下での路線再編において, 計画者が現実的な意思決定を行うための基礎的知見を提供する.

なお, 本研究は需要を外生的に扱う静学的な供給設計問題の分析であり, 需要の内生化や行動変化の推定は今後の課題である. 車両台数を増加させた場合の再評価も重要な検討事項である. また, 本研究では停留所間距離をHaversine式による直線距離で近似しており, 削減停留所から維持停留所への徒歩距離は実際の歩行経路より過小評価されている可能性があるため, ネットワーク距離による徒歩負担のより精緻な評価も課題である.

＜謝辞＞

本研究はJSPS科研費23K26331の助成を受けたものである.

【参考文献】

1) 国土交通省 (2023),「地域交通をめぐる現状と課題」, https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001311082.pdf, 2026年3月閲覧
2) 総務省行政評価局 (2022),「地域公共交通の確保等に関する実態調査結果報告書」, https://www.soumu.go.jp/main_content/000789182.pdf, 2026年3月閲覧
3) 参議院常任委員会調査室 (2020),「令和2年改正法による地域公共交通の活性化と再生」, 立法と調査, No.431, pp.87-100
4) Pelletier, M.-P., Trépanier, M. and Morency, C. (2011), "Smart card data use in public transit: A literature review," Transportation Research Part C, 19(4), pp.557-568
5) 牧野浩志・岩倉成志 (2024),「地域公共交通計画・路線再編の検討における交通系ICカードデータの活用実態と課題」, 都市計画報告集, 22(4), pp.725-730
6) 山口隆之・浅野光行 (1999),「地域特性を考慮したコミュニティバスの導入促進に関する研究」, 都市計画論文集, 34, pp.985-990
7) Ceder, A. and Wilson, N.H.M. (1986), "Bus network design," Transportation Research Part B, 20(4), pp.331-344
8) Kepaptsoglou, K. and Karlaftis, M. (2009), "Transit Route Network Design Problem: Review," Journal of Transportation Engineering, 135(8), pp.491-505
9) Ibarra-Rojas, O.J., Delgado, F., Giesen, R. and Munoz, J.C. (2015), "Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review," Transportation Research Part B, 77, pp.38-75
10) 長瀬健介・中井検裕・沼田麻美子 (2018),「地域公共交通再編に伴う交通結節点整備に関する研究−乗換施設の複合化に着目して」, 都市計画論文集, 53(3), pp.565-572
11) Church, R. and ReVelle, C. (1974), "The maximal covering location problem," Papers of the Regional Science Association, 32, pp.101-118
12) Furth, P.G. and Rahbee, A.B. (2000), "Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling," Transportation Research Record, 1731, pp.15-22
13) Ibeas, A., dell'Olio, L., Alonso, B. and Sainz, O. (2010), "Optimizing bus stop spacing in urban areas," Transportation Research Part E, 46(3), pp.446-458
14) El-Geneidy, A.M., Strathman, J.G., Kimpel, T.J. and Crout, D. (2006), "Effects of bus stop consolidation on passenger activity and transit operations," Transportation Research Record, 1971, pp.32-41
15) Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O. (1997), "Selecting an Optimum Configuration of One-Way and Two-Way Routes," Transportation Science, 31(4), pp.386-394
16) Guo, R., Antunes, F., Zhang, J., Yu, J. and Li, W. (2024), "Joint optimization of headway and number of stops for bilateral bus rapid transit," PLoS ONE, 19(3), e0300286
17) Ehrgott, M. (2005), "Multicriteria Optimization," Springer, pp.21-45
18) Bowman, L.A. and Turnquist, M.A. (1981), "Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at urban bus stops," Transportation Research Part A, 15(6), pp.465-471
19) Fan, W. and Machemehl, R.B. (2009), "Do Transit Users Just Wait for Buses or Wait with Strategies?" Transportation Research Record, 2111, pp.169-176

© 2026公益社団法人日本都市計画学会 本論文はクリエイティブ・コモンズ [表示−非営利−改変禁止 4.0 国際] ライセンス
（https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja）のもと出版されており、出典を表示し、元の論文を改変しないこと、
また、非営利であることを条件として、著作権者の許諾を得ることなく配布や複製などの二次利用をすることができる。