

# 季節変動を有する都市間旅客交通の 遊休回避のための最適モデルアプローチ

吉田 智貴<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻  
(〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

E-mail: tomoki.yoshida.q2@dc.tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所  
(〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

E-mail: mokmr@tohoku.ac.jp

都市間旅客交通では、季節により需要パターンが変動するという特徴がある。この変動に対して、繁忙期に合わせた量の車両や人員を用意すると、閑散期に遊休が生じて資産の効率性が低下する危険性がある。これに対して、車両等の資産の柔軟な融通や旅客運賃の季節別設定が、遊休の回避に役立つと考えられる。本研究は、これらの遊休回避策の効果を最適化モデルを用いて定量的に分析する方法を提案する。先行研究の総消費者余剰最大化モデルにおいて、需要パターンの異なる複数の季節を考慮し、ネットワーク上の運行区間、運行系統ごとの頻度、運賃、を季節別の変数として扱う。車両等の運行系統間の融通の可否と運賃の季節別変更の可否の組み合わせを考え、総消費者余剰などの値を比較して、遊休回避策の効果を導出する。

**Key Words :** *intercity railway, rolling stock, idle, seasonal fare, optimization model*

## 1. はじめに

都市間旅客交通では、季節により需要パターンが大きく変化するという特徴がある。例えば航空であれば、沖縄便の需要は夏季は大きく冬季は小さい一方、北海道便の需要は夏季は小さく冬季は大きい。この季節変動に対して、繁忙期に合わせた量の車両や人員を用意すると、閑散期に遊休が生じて資産の効率性が低下する危険性がある。この際、車両等の柔軟な融通や旅客運賃の季節別設定が、遊休の回避に役立つと考えられる。本研究は、これらの遊休回避策の効果を最適化モデルを用いて定量的に分析する方法を提案する。

先行研究の総消費者余剰最大化モデルにおいて、需要パターンの異なる複数季節を考慮するとともに、運行頻度を変数に加える。車両等の運行系統間の融通の可否と運賃の季節別変更の可否の組み合わせを考え、目的関数である総消費者余剰の値を比較して、遊休回避策の効果を導出する。

本論文の構成は以下のようである。2.では、都市間交通ネットワークの評価・最適化に関する既往研究を概説する。3.では、本研究で用いるモデルの定式化を解説す

る。4.では、仮想ネットワークにおける車両融通の効果と季節別運賃の効果の分析を述べる。最後に5.で本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 都市間交通ネットワークの評価・最適化に関する既往研究

都市間交通の特徴と研究課題に関するレビュー論文<sup>1)</sup>に示されているように、都市間旅行需要の季節変動は、これまで交通行動分析・需要分析の分野を中心に研究されてきた。また需要の季節変動に併せたサービス改善施策として運賃の柔軟な設定に関する研究も行われている<sup>2)</sup>。他方、都市間旅客交通ネットワーク構造の最適化に対する数理計画法によるアプローチとして、Okumura et al.<sup>3)</sup>は複数モード間の乗継交通を考慮して、総一般化費用とネットワークの運営費用の和を最小化するMulti-modal Network Planning (MNP) モデルを提案し、環境制約や災害時の途絶リスクの考慮などの拡張がなされてきた<sup>4)</sup>。細・奥村<sup>5)</sup>はOD間のサービス改善が需要を喚起する可能性を考慮するため、線形の需要関数を仮定して消費者余剰を最大化する二次計画問題を定式化し、凸二次錐

制約に変換して計算する方法<sup>7)</sup>を提案した。さらに吉田・奥村<sup>8)</sup>は、ネットワーク構造と運賃構造の同時最適化ができるようモデルを拡張した。

$$Q_{kls} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} X_{il}^{klms} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (6)$$

### 3. モデルの概説

本研究では、吉田・奥村<sup>8)</sup>で提案した需要内生型のMNPモデルをさらに季節ごとの変動を表現できるように拡張して用いる。

このモデルでは、個々の利用者は完全な情報を持ち最小費用の経路のみを選択すると仮定する。一つの最小費用経路の輸送容量が満杯になると次に一般化費用の小さい経路を用いるように、複数の経路の運賃を調整できると仮定して計算を単純化する。ここでは混雑や渋滞時間を無視しているため、ある形状のネットワーク構造の上では経路選択に外部性が存在しない。従って事業者が最適に設定した運賃に関する完全情報に基づいて、分権的な利用者の経路選択行動によりシステム最適解が実現できると考えている。

本モデルにおける集合・変数・パラメータとその意味は表-1の通りである。

#### a) 需要関数の設定

本研究では、季節 $s$ ごとに、 $OD(k, l)$ の需要関数を式(1)のように線形関数で定義し、消費者余剰 $CS_{kls}$ を式(2)のように置く。

$$C_{kls} = c_{kls}^{\max} - \beta_{kls} \cdot Q_{kls} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (1)$$

$$CS_{kls} = \frac{1}{2} (c_{kls}^{\max} - C_{kls}) \cdot Q_{kls} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (2)$$

本モデルでは、事業者にはゼロ利潤を仮定し、社会的に見て最も効率的な交通サービスの実現をめざす。そのため、本研究の目的関数は、式(2)の消費者余剰 $CS_{kls}$ の和である総消費者余剰を、季節 $s$ の構成比率 $\theta_s$ に集計した式(3)の期待総消費者余剰であり、その最大化を行う。

$$\max_{X, F, Q, C, CS, P} \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} CS_{kls} \quad (3)$$

#### b) 交通量保存則

式(4)が出发点ノード、式(5)が途中ノード、式(6)が目的地ノードに関する交通量保存に関する制約である。

$$Q_{kls} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in N} X_{kj}^{klms} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in N} X_{in}^{klms} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in N} X_{nj}^{klms} \quad \forall k \in K, l \in K, i \in N - \{k, l\}, s \in S \quad (5)$$

表-1 変数・パラメータとその意味

変数	意味
$N$	ノードの集合
$K$	起点(終点)ノードの集合, $K \subset N$
$M$	モードの集合
$S$	季節(需要パターン)の集合
$A_m$	モードごとの運行システムの集合
$B_{ij}^m$	リンク $ij$ を運行するモード $m$ の運行システムの集合
$Q_{kls}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ 間の交通量
$C_{kls}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ 間の一人当たり一般化費用
$\bar{C}_{kl}$	$OD(k, l)$ 間の一人当たり一般化費用の年間値
$CS_{kls}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ 間の消費者余剰総額
$X_{ij}^{klms}$	季節 $s$ ごとのリンク $ij$ でモード $m$ を利用する $OD(k, l)$ 別のリンク交通量
$Z_{ij}^m$	リンク $ij$ でのモード $m$ の有無を示す $\{0,1\}$ 変数
$F_a^{ms}$	季節 $s$ ごとのモード $m$ の運行システム $a$ の運行本数
$p_{klms}$	季節 $s$ ごとのモード $m$ に対する $OD(k, l)$ 別の運賃負担総額
$R_a^m$	モード $m$ の運行システム $a$ の車両調達数
$\bar{R}^m$	モード $m$ の車両調達数
$U^m$	モード $m$ のインフラ周りの固定費用
$V^m$	モード $m$ の車両調達費用
$W^m$	モード $m$ の運行費用
$QQ_{kls}$	$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2$ として定義する操作変数
$q_{kls}^{\max}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ での上限交通量
$c_{kls}^{\max}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ の旅客の支払意思額の最大値
$\beta_{kls}$	季節 $s$ ごとの $OD(k, l)$ での逆需要関数の傾き
$\theta_s$	季節 $s$ の構成比率
$g_{ij}^m$	リンク $ij$ でのモード $m$ の設定可能頻度
$h_a^m$	モード $m$ の運行システム $a$ の一番あたりの座席数
$t_{ij}^m$	リンク $ij$ でのモード $m$ の所要時間
$r_a^m$	モード $m$ の運行システム $a$ の車両拘束時間
$\varphi$	時間価値
$d_{ij}^m$	リンク $ij$ でモード $m$ を運営するための固定費用
$e_a^m$	モード $m$ の運行システム $a$ の運行本数当たりの単位運行費用
$\xi_a^m$	モード $m$ の運行システム $a$ 用の車両調達費用
$\bar{\xi}^m$	モード $m$ の車両調達費用

#### c) リンクサービス設定のための制約

リンクのサービスは、物理的に連続する一つあるいは複数のリンクを跨ぐ運行系統ごとに双方向同じ頻度の運行が設定される。これに対応して、双方向同時に運営されることを示す式(7)、運行系統ごとの頻度設定に関する式(8)、リンクごとの輸送容量を示す式(9)を設定する。

$$Z_{ij}^m = Z_{ji}^m \quad \forall i \in N, j \in N, m \in M \quad (7)$$

$$\sum_{a \in B_{ij}^m} F_a^{ms} \leq g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K} X_{ij}^{klms} \leq \sum_{a \in B_{ij}^m} h_a^m \cdot F_a^{ms} \quad (9)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M, s \in S$$

#### d) ODごとの一般化費用に関する制約

旅客の経路やOD交通量はOD間一般化費用で決まる一方、時間費用はリンクごとに与えられるため、OD間一般化費用とリンク一般化費用をつなげるための制約を式(10)のように定式化する。なお、所要時間には時間価値 $\varphi$ を乗じている。また、運賃が通年同一の場合は、一般化費用が通年的に一定であることを意味する式(11)を制約に加える。

$$C_{kls} \cdot Q_{kls} \geq \sum_{m \in M} p^{klms} + \varphi \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klms} \quad (10)$$

$$\forall k \in K, l \in K, s \in S$$

$$C_{kls} = \bar{C}_{kl} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (11)$$

### (3) 車両調達数を含んだ必要費用を示すための改良

本研究では、運行本数を操作変数に加え、インフラ周りの固定費用、車両調達費用、運行費用を分けて表現できるように改良した。

#### a) 車両必要数の表現

車両必要数は運行本数と各リンクの所要時間で求められ、(i)運行系統ごとに別の車両が必要な場合には、どの季節においても各々の必要数を上回る数を用意する必要があり、通期の必要数は以下の式(12)のように表現できる。(ii)運行系統間で車両を融通可能な場合には、通期の必要数は式(13)のように表せる。

$$R_a^m = r_a^m \cdot F_a^{ms} \quad \forall m \in M, s \in S, a \in A_m \quad (12)$$

$$\bar{R}^m \geq \sum_{a \in A_m} r_a^m \cdot F_a^{ms} \quad (13)$$

$$\forall m \in M, s \in S$$

#### b) 各種必要費用の表現

固定費用の総和は式(14)のように表せる。車両調達費用は、(i)運行系統ごとに別の車両が必要な場合は、通期の調達数 $R_a^m$ と調達費用 $\xi_a^m$ との積を全ての運行系統について加算した式(15)により与えられる。(ii)運行系統間で車両を融通可能な場合は、モード $m$ の車両調達数 $R^m$ とモード $m$ の車両調達費用 $\bar{\xi}^m$ の積となり、式(16)で与えられる。また運行費用は、運行本数に比例する可変費用の総和を、季節 $s$ の構成比率 $\theta_s$ を乗じて求めた期待値として、式(17)のように表現できる。

$$U^m \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (14)$$

$$\forall m \in M$$

$$V^m \geq \sum_{a \in A_m} \xi_a^m \cdot R_a^m \quad (15)$$

$$\forall m \in M$$

$$V^m \geq \bar{\xi}^m \cdot \bar{R}^m \quad (16)$$

$$\forall m \in M$$

$$W^m \geq \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{a \in A_m} e_a^m \cdot F_a^{ms} \quad (17)$$

$$\forall m \in M$$

#### c) 運賃の表現

本研究では、柔軟な費用負担を可能にするため、モード別のリンク利用者に対してOD別に異なる運賃を負担させることを許し、OD別のリンク費用負担総額を変数として扱う。ネットワーク上でサービスが設定されたリンクにはインフラ周りの固定費用、車両調達費用、運行費用が必要となる。これを利用者が支払う運賃でカバーして収支を均衡させ、事業者に利潤や損失が発生しないことを仮定する。そのため運賃の制約は以下の式(18)のように表現できる。

$$\sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} p^{klms} \geq U^m + V^m + W^m \quad (18)$$

$$\forall m \in M$$

#### c) 非負制約

各操作変数の定義域を式(19)の通りに定める。

$$Z_{ij}^m \in \{0,1\}$$

$$Q_{kls}, C_{kls}, CS_{kls}, X_{ij}^{klms}, F_a^{ms}, p^{klms}, R_a^m, \bar{R}^m, U^m, V^m, W^m \geq 0 \quad (19)$$

$$\forall n, i, j \in N, k, l \in K, m \in M, s \in S, a \in A_m$$

#### (4) 二次錐制約問題への変換と計算方法

以上のモデルは、式(2)、式(10)という非線形式を含む。これらに式変形を施し、0-1変数を含む凸二次錐計画問題に変換して計算を行う。

まず、需要関数である式(1)を式(2)、式(10)に代入して変数 $C_{kls}$ を消去し、式(20)、式(21)のように変形する。

$$CS_{kls} = \frac{1}{2} (c_{kls}^{\max} - C_{kls}) \cdot Q_{kls}$$

$$= \frac{1}{2} \beta_{kls} \cdot (Q_{kls})^2 \quad (20)$$

$$C_{kls} \cdot Q_{kls} = \{c_{kls}^{\max} \cdot Q_{kls} - \beta_{kls} \cdot (Q_{kls})^2\}$$

$$\geq (\text{式(10)右辺}) \quad (21)$$

ここで、凸二次制約である式(22)を満たすように新たな変数  $QQ_{kls}$  を定義し、式(20)と式(21)をそれぞれ式(23)、式(24)のように置き換える。これにより目的関数を、線形式として表現できる。

$$QQ_{kls} \geq (Q_{kls})^2 \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (22)$$

$$CS_{kls} = \frac{1}{2} \beta_{kls} \cdot QQ_{kls} \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (23)$$

$$c_{kls}^{\max} \cdot Q_{kls} - \beta_{kls} \cdot QQ_{kls} \geq (\text{式(10)右辺}) \quad \forall k \in K, l \in K, s \in S \quad (24)$$

式(23)から、目的関数の最大化のためには変数  $QQ_{kls}$  を最大化することが望ましいが、式(19)は下限しか与えない。しかし式(24)から変数  $QQ_{kl}$  に上限が与えられ、式(22)、(24)は実際には等式として成立することになる。よって式(3)の目的関数は式(25)のように置き換えられる。

$$\max_{X,F,Q,C,CS,P} \sum_{s \in S} \theta_s \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \frac{1}{2} \beta_{kls} \cdot QQ_{kls} \quad (25)$$

操作変数の定義域は以下のようになる。

$$Z_{ij}^m \in \{0,1\}$$

$$Q_{kls}, QQ_{kls}, C_{kls}, CS_{kls}, X_{ij}^{klms}, F_a^{ms}, P^{klms}, R_a^m, \bar{R}^m, U^m, V^m, W^m, \geq 0 \quad (26)$$

$$\forall n, i, j \in N, k, l \in K, m \in M, s \in S, a \in A_m$$

最終的に本モデルは、式(25)を目的関数として、式(1)、式(4)～式(9)、式(11)、式(12)もしくは式(13)、式(14)、式(15)もしくは式(16)、式(17)～式(18)、式(22)～式(24)、式(26)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。

以上のモデルは0-1変数を含む凸二次錐計画問題であり、最近の商用最適化ソルバーを用いて求解が可能である。実際の計算ではGurobi Optimizer 8.1を用いた。

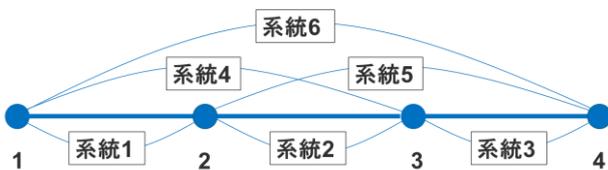


図-1 仮想ネットワーク

## 4. 柔軟な車両融通の効果分析

### (1) 仮想ネットワークの設定

本研究では柔軟な車両融通と季節別の運賃設定の効果を分析する。この効果を分析するために、以下の図-1のような仮想のネットワークに本モデルを適用する。そして柔軟な車両融通が不可能な場合と可能な場合とを比較し、それぞれの場合において、運賃を同年同一にした場合と季節別に設定した場合とを比較する。

仮想ネットワークは4つのノードと1つのモード（鉄道）から成る単純な構造のネットワークで、ODペア(1,2)とODペア(3,4)の需要が季節変動するものとする。これにより、季節別に需要量が異なるOD間での車両融通の発生の有無が明確に確認できる。各季節の構成比率  $\theta_s$  はそれぞれ0.5とする。各リンクの所要時間  $t_{ij}^m$  はいずれも60(分)。鉄道の各種パラメータの値は表-2のように与える。各運行系統ごとのパラメータは表-3のように与える。季節1におけるODごとの上限交通量  $q_{kl}^{\max}$  を表-4、季節2におけるODごとの上限交通量  $q_{kl}^{\max}$  を表-5のように与える。支払意思額の最大値  $c_{kl}^{\max}$  を表-6に示す。旅客の時間価値  $v$  は一律に50(円/分)とする。

### (2) 車両融通の有無と季節別運賃の有無による効果

表-5において  $a = 2$  ( $q_{kl}^{\max} = 1000$ ) のときの総車両調達数は表-7、目的関数である期待総消費者余剰の値は表-8のようになった。

車両調達数は、車両融通を可能にした場合の方が小さく抑えられた。その結果、目的関数である期待総消費者余剰も大きくなった。一方、運賃の季節別の有無は総車両調達数および期待総消費者余剰の値は変化しなかった。

以上から、この設定では車両調達数が減るほど期待消費者余剰が大きくなり、車両融通の効果を確認することができたが、季節別の運賃設定の効果は確認できなかった。

## 5. まとめ

### (1) 本研究のまとめ

本研究では、都市間旅客交通ネットワーク計画において、車両融通を同年で決定するケースと季節別に定めるケースを考え、目的関数の値を比較して、遊休回避の効果を導出する最適モデルアプローチを提案した。

次に、仮想ネットワークの計算を通して、車両融通を季節別に定めることが、総車両調達数を削減でき目的関数である期待総消費者余剰を最大化できることが分かった。この結果から季節別の柔軟な車両融通は遊休回避に効果的であることが確認できた。

表-2 鉄道に関するパラメータ

モード	リンク 固定費用 (円/ link/day)	一便あたりの 座席数 (席/便)	設定可能頻度 (便/day)	車両調達費用 (円/便)
鉄道	120,000	400	100	200,000/18

表-3 運行系統別のパラメータ (分)

系統	運行費用 (円/day)	車両拘束時 間 (分)
1	3000	240
2	3000	240
3	3000	240
4	4000	360
5	4000	360
6	5000	480

表-4 季節1の上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4
1	0	5,000	500	375
2	5,000	0	500	500
3	500	500	0	500
4	375	500	500	0

表-5 季節2の上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4
1	0	500	500	375
2	500	0	500	500
3	500	500	0	500a
4	375	500	500a	0

表-6 支払意思額の最大値 (円/人/day)

OD	1	2	3	4
1	0	30,000	60,000	90,000
2	30,000	0	30,000	60,000
3	60,000	30,000	0	30,000
4	90,000	60,000	30,000	0

表-7 総車両調達数

総車両調達数	車両：融通不可	車両：融通可能
運賃：通年同一	69.40	67.15
運賃：季節別	69.37	67.11

表-8 目的関数 (期待総消費者余剰)

総車両調達数	車両：融通不可	車両：融通可能
運賃：通年同一	171610	171630
運賃：季節別	171610	171630

**(2) 今後の課題**

発表会に向けて、車両融通の効果のみならず、運賃において季節別設定の効果について分析をしたい。そして、どのような設定だと遊休による非効率が生まれるのか、季節別の旅客運賃設定や柔軟な車両の融通による効果を調べていく必要がある。

さらに、今後はNW構造が変化する場合の検討や鉄道単一のモードではなく航空やバスを含むマルチモーダルなNWでの分析に取り組んでいきたい。

**参考文献**

- 1) 金子雄一郎, 加藤浩徳: 我が国の都市間交通研究の系譜, 土木計画学研究・講演集, Vol. 131, CD-ROM, 2005.
- 2) 紀伊雅敦, 永野雄貴, 中村一樹, 清水裕康: 効率的航空ネットワーク推計方法の開発とアフリカ発着ネットワークへの適用, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 5, pp. I\_821-I\_832, 2016.
- 3) Okumura, M., Tirtom, H. and Yamaguchi, H.: Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012)*, pp. 309-314, 2012.
- 4) Tirtom, H., 山口裕通, 奥村誠, 金進英: 低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 70, No. 5, pp. I\_819-I\_827, 2014.
- 5) Tirtom, H., Okumura, M., Yamaguchi, H. and Das, R.: Network fortification model for intercity passenger transportation, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 11, pp. 75-89, 2015.
- 6) 細正隆, 奥村誠: 最適な都市間交通ネットワーク形状を分析するための需要内生型モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 74, No. 5, pp. I\_779-I\_786, 2018.
- 7) 久保幹雄, ジョア ペドロ ペドロソ, 村松正和, アブドゥール レイス: 新しい数理最適化 Python 言語と Gurobi で解く, 近代科学社, 2012.
- 8) 吉田智貴, 奥村誠, 細正隆: 都市間旅客交通におけるネットワーク構造と費用負担構造の同時最適化, 第60回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2019.
- 9) 吉田 智貴, 奥村 誠: 費用負担スキームを考慮した都市間旅客交通ネットワークの最適構造, 2021.4, 土木学会論文集 D3, 76(5), pp. I\_977-I\_986. DOI: 10.2208/jscejpm.76.5\_I\_977

(Received October 1, 2021)

## AN OPTIMAL MODEL APPROACH FOR AVOIDING IDLENESS IN INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION WITH SEASONAL VARIATIONS

Tomoki YOSHIDA and Makoto OKUMURA

Intercity passenger transportation is characterized by seasonal fluctuations in demand patterns. There is a risk of idleness in the off-season and a decrease in the efficiency of the assets if the amount of rolling stocks such as vehicles and personnel is adjusted to the busy season. This study proposes a method to quantitatively analyze the effects of these idle-avoidance measures using an optimization model. In the total consumer surplus maximization model of the previous study, multiple seasons with different demand patterns are taken into account, and the operation section on the network, the frequency of each operation route, and the fare are treated as season-specific variables. In this study, we consider the combination of the availability of interchangeability of vehicles and the availability of seasonal changes in fares, and compare the values of total consumer surplus and other factors to derive the effect of idle avoidance measures.