

# 循環バスのシステム総コストと社会的便益を考慮した 最適運行計画モデルの開発

柳沢吉保\*\* 高山純一\*\*\* 中野泰啓\*\*\*\* 中村加奈\*\*\*\*\*

Optimization of Community Bus System with Total system Cost and Net Social Benefit \*

Yoshiyasu YANAGISAWA, Jun-ichi TAKAYAMA, Yasuhiro NAKANO and Kana NAKAMURA

It is important to offer the high bus service of the level in order to improve the mobility in a center business area. In other words, it is necessary to decide service level of buses where are run according to the traffic demand. Each item that the circular route, that is the bus line, the interval of bus stops, the running interval time are defined for that needs to be optimized. In this study, we propose a deciding system of circular bus route in considering the trade off between the running cost and user cost. The application of this system is confirmed by using the actual road network in Nagano city.

キーワード：循環バスシステム、システム総コスト最小化問題、社会的便益最大化問題

## 1. まえがき

中心市街地の活性化を目的に、市内循環バス（コミュニティバス）を運行する都市（武蔵野市、金沢市、長野市など）が近年増加してきている。これらのバスに共通する特徴は、一方通行循環型のバス路線、ワンコイン（100円）、小型低床バスの使用であり、市街地の公共交通システムによるモビリティの確保が主な運行目的である。

モビリティを向上させるためには、きめの細かいバスサービスを提供することが必要であり、最適な運行ルート（バス路線）、運行時間帯、運行間隔、バス停留所間隔など、バスのサービスレベルを決める各項目をバス需要に応じて決定することが重要である。

一般に、運行エリア内の運行ゾーン（セル）を増加させて、エリア内を細かく回る運行ルートを作成すると、1サイクルあたりの運行距離が増大するので、運行管理コストは増加する。しかし循環バスの利用者にとってみれば、バス停を降りてからセル内の目的地まで歩く距離が短くなるので、一般に利用者コスト（バス停へのアクセス、目的地までのイグレス

などのコスト）は減少する。またバスの運行間隔を短くするとバス停での待ち時間が減少するので、利用者コストは減少するが、逆に投入するバス台数が増加するので、運行管理コストは増加する。すなわち運行管理コストと利用者コストにはトレードオフの関係があり、実際のバス運行計画の決定にあたっては、両者のバランスを考慮することが必要不可欠である。

山口ら<sup>1)</sup>は、全国で導入されているコミュニティバスのうち22地域（54路線）を対象として、バス停留間隔や運行間隔・運行ルートに対する満足度からバス交通のサービス改善のための提言を行っている。中島ら<sup>2)</sup>は、金沢市のふらっとバスを対象に現状の利用状況とその経済効果の試算を行っている。新田ら<sup>3)</sup>は、高齢者対応型バスに着目し、一般化時間を組み込んだ交通手段選択と需要予測を行っている。橋本ら<sup>4)</sup>は、路線候補を6路線あげ、路線毎に通勤時と業務時を対象としたコミュニティバスの費用便益の比較分析を行っている。秋山ら<sup>5)</sup>は、福祉送迎との融合、交通不便地域の解消、交通弱者の利便性向上などの観点から路線を4通り設定し、需要予測と費用便益分析を行っている。

しかし循環バスの最適運行計画を検討する研究はあまり見られない。そこで本研究では交通セル方式の導入が予定されている長野市中心市街地循環バスを対象に、理論的なアプローチにより、運行距離、運行間隔、運行時間帯、バス停留間隔などのバスサービスからなる運行管理者コストと利用者コストとの

\* 第24回土木計画学研究発表会・講演集にて一部発表

\*\* 長野工業高等専門学校環境都市工学科 助教授

\*\*\* 金沢大学工学部土木建設工学科 教授

\*\*\*\* 金沢大学大学院自然科学研究科 学生

\*\*\*\*\* 国際観光専門学校 学生

原稿受付 2001年9月28日

トレードオフ関係を分析する。具体的には、システムコストと社会的便益の両面から、循環バス最適運行計画検討モデルを提案し、それぞれの評価指標から得られた最適な運行特性を理論的に比較検討し、より有効なサービスレベルを明らかにすることを目標としている。

第2章では、長野市中心市街地における市内循環バスの利用実態と循環バスに対する運行改善要望と、循環バスの最適運行計画を検討するためのモデルネットワークの条件を示す。第3章、第4章、第5章はそれぞれ循環バスの運行管理コストと利用者コストの構築、ならびに最適運行コストを求めるための最適化の方法と運行コストパラメータの結果を示す。第6章、第7章では循環バス運行による利益と社会的便益の構築と、最適な運行条件を求めるための、最適化の方法を示す。

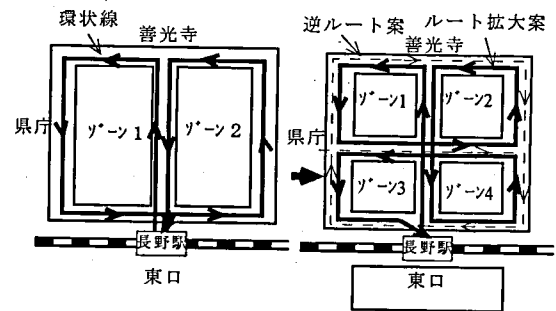
## 2. 循環バスモデルネットワーク

2000年4月から長野市中心市街地に導入された市内循環バス（ぐるりん号）の利用実態を把握するために、2000年7月にアンケート調査（総配布数2000部、回収総数411、回収率20.6%）を実施した。調査結果より、循環バスを利用したことがある（現在利用している人を含む）人は約3割であり、予想より少ない結果であった。この原因は、現在の運行条件（6章、表1）が必ずしも市民の潜在需要を満たしていない結果であり、運行条件を改善すれば、利用者が増加する可能性があるものと考えられる。そこで、運行条件の改善要望を聞いたところ、「運行ルート」については、ルートの拡大（34%）、逆ルートが必要（28%）、「運行間隔」については、15分間隔（40%）、10分間隔（34%）、「始発時刻」については、8:00（37%）、7:00（21%）、7:30（15%）、「終発時刻」については、19:00（33%）、20:00（28%）、21:00（25%）、18:30（12%）の運行改善要望が明らかとなった。これらの改善要望を考慮するために、本研究では長野市中心市街地を走行する循環バスを例として、ネットワークと運行時間帯を設定する。

### (1) ネットワークの設定

現在、長野市中心市街地循環バスは図1(a)に示すように、中心市街地外周部にある環状線と、長野駅から善光寺前までの中央通りを運行している。ここで中心市街地環状線で囲まれる区域を循環バス運行エリアと定義する。また運行エリア内において、循環バス路線で分割される小区域を、運行ゾーンと

定義する。したがって現行の長野市循環バスのネットワークは2ゾーンからなる。



(a) 現行ネットワーク (b) モデルネットワーク例

図1 ネットワークの設定

運行ルートの設定は、循環バスのサービス向上に大きく影響する。まず、長野駅の東口まで運行エリアを広げるなど、循環バス需要の大きな運行ゾーンを新たに設けるとともに、より遠方まで移動できるようにルート拡大を行うことが考えられる。また、点線で示すように、現行ルートに対して逆ルートの設定を行うなどして、中心市街地内の移動時間を短縮する設定も考えられる。さらに図1(b)で示したネットワーク例のように、エリア内を細かくゾーン分けし、循環バスが各ゾーンの周囲を運行することで、エリア内を隈無く走行するようなサービス向上につなげる設定も考えられる。

### (2) 運行時間帯の設定

運行時間帯に関する改善要望として、始発・終発時間の延長がある。現行の運行時間帯は9:00～17:30であるが、始発・終発の時間延長に対しては、通勤と帰宅目的などの、循環バスに対する新しい潜在需要と考えられる。そこで、現行の時間帯とは別の時間帯として、終発・始発の延長によって生じる需要を扱った方が、より需要の時刻変化に対応できる循環バスのモデル化が行える。そこで時間帯の設定例として、 $t=1$ は現行の時間帯9:00～17:30、 $t=2$ は始発時間帯7:00～9:00、 $t=3$ は終発時間帯17:00～19:00の3つの時間帯を設定することが考えられる。また現行の運行時間帯に対しても需要の時刻変動に対して時間帯を細かく設定できる。

以上、ネットワークと運行時間帯の設定に基づいた循環バス運行のモデル化を行う。

## 3. 循環バスの運行管理コスト

### (1) 運行管理に関する各変数

(a) 運行距離  $L$ : 運行距離は運行エリアの広さと運行エリア内で設定される運行ゾーン数に比例する。同じ運行エリア面積でもゾーン数が多くなると運行

距離も長くなると考えられる。そこでエリア内運行距離は以下のように表す。

$$L = \kappa A^\gamma \cdot n_z^\eta \quad (3.1)$$

A: 運行エリア面積、 $n_z$ : ゾーン数、 $\kappa, \gamma, \eta$ : 運行エリア面積とゾーン数を運行距離に変換する係数である。 $n_z$  個のゾーンからなる面積 A の運行エリアについて、すべてのゾーン面積がほぼ等しく分割されると仮定すると、1つのゾーン面積は  $(A/n_z)$  である。ゾーンの形状が正方形と仮定すると、1辺の長さは  $(A/n_z)^{0.5}$  となる。したがってすべてのゾーンの周辺4辺を循環バスが走行する場合、その運行距離は、

$$L = 4 \times n_z \times (A/n_z)^{0.5} = 4 \times (A \cdot n_z)^{0.5} \quad (3.2)$$

と表すことができる。このとき  $\kappa$  は4、 $\gamma$  と  $\eta$  は0.5となる。ここで用いる  $\kappa$  の値は、実際に設定されているゾーンの形状や大きさを考慮した補正値  $\kappa$  を用いる。

運行エリア面積とゾーン数を時間帯  $t$ 、ルート  $r$  ごとに設定する場合、運行距離は  $L_r(t)$  と表すこともできる。

(b) 停留所数  $g_r(t)$ : 停留所数は循環バスの運行距離  $L_r(t)$  と停留所間距離  $l$  に関係するので、次式で表される。

$$g_r(t) = L_r(t)/l \quad (3.3)$$

ただし、運行ルートは1周回する間に、同一の停留所に立ち寄らないように設定している。

(c) 運行エリア内周回時間  $T_{R,r}(t)$ : 走行速度は、時間帯によって循環バスルートにかかる交通量に左右されると考えられる。そこで停留所間平均走行速度は時間帯、ルート別に  $V_r(t)$  と表す。また周回時間は停留所における停車時間の影響も受けるため、停留所数  $g_r(t)$  が大きいほど大きくなると考えられる。エリア内運行距離が  $L_r(t)$  なので、運行エリア内周回時間は次式で表す。

$$T_{R,r}(t) = L_r(t)/V_r(t) + \nu \cdot g_r(t) \quad (3.4)$$

ここで、 $\nu$  は1停留所における平均停車時間である。

(d) 循環バス運行台数  $w_{B,r}(t)$ : 運行間隔を  $h$  とすると、周回時間  $T_{R,r}(t)$  を用いて次式で求められる。

$$w_{B,r}(t) = T_{R,r}(t)/h \quad (3.5)$$

(2) 運行管理コスト  $C_0$

単位時間あたりの運行コストを  $c_r$  とする。周回時間が  $T_{R,r}(t)$  なので、1時間に運行エリアを周回する回数は  $(1/T_{R,r}(t))$  となる。ある時間帯  $t$  の時間幅を  $T_L(t)$  とすると、 $t$  時間帯に循環バス1台当たりが運行エリアを周回する回数は、次式で表すことができる。

$$m_{R,r}(t) = T_L(t)/T_{R,r}(t) \quad (3.6)$$

よって、運行管理コストは、次式で表すことができる。

$$C_0 = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T c_r \cdot w_{B,r}(t) \cdot m_{R,r}(t) \cdot T_{R,r}(t) \quad (3.7)$$

#### 4. 循環バスの利用者コスト

循環バス利用者にアンケート調査を行ったところ、長野市郊外など中心市街地環状線（現運行エリア）の外側からと循環バス路線沿線にある商店・事務所からのトリップがほとんどであった。ここでは、環状線外の起点と循環バス沿線間の交通行動は、起点の位置や利用手段は非常に複数の組み合わせが考えられ、本コスト関数の中で同時に表現することは煩雑なことから、循環バス利用実態が、循環バス利用者数の日データのみであることから、(i) 循環バス路線沿線と中心市街地内に点在する目的地間の循環バスによる移動コストに限定したモデル化を行う、(ii) 循環バス需要は、路線沿線と中心市街地内の目的地で一様に発生すると仮定する。郊外から運行エリア沿線までの手段別行動は別途扱うものとする。

本研究では、先に示した仮定にしたがって循環バス路線沿線上に一様に発生する循環バス需要を、時間帯  $t$  におけるルート  $r$  の単位時間当たりの利用者数  $x_r(t)$  として与える。したがって時間帯  $t$  の長さを  $T_L(t)$  とすると、循環バスの総需要量は以下の通りである。

$$X_r(t) = T_L(t) \cdot x_r(t) \quad (4.1)$$

(1) 停留所アクセスコスト

停留所間隔が短いほど循環バス利用者にとって利便性が高いと考えられる。一般に、循環バス停留所間隔長は限られていること、沿線上で最も近い停留所を選ぶ事を考慮し、循環バス停留所間で循環バス利用者は一様に発生すると仮定する。したがって、路線沿線のある点で発生した循環バス需要の、ある地点から上下流側にある循環バス停留所までの平均アクセス距離は  $l/4$  である。アクセスについては徒歩で行われるとし、徒歩速度を  $v_w$  とすると、停留所までの平均アクセス時間は  $(l/4v_w)$  である。一般的に停留所の位置は変わらないので、平均アクセス距離も時間帯ごとに変わらない。ここで、アクセスに関するコスト換算係数を  $c_a$  とすると、循環バス利用者の総平均停留所アクセスコストは次式で表せる。

$$C_A = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T c_a \cdot T_L(t) \cdot x_r(t) \cdot \{l/(4v_w)\} \quad (4.2)$$

## (2) 循環バス待ち時間コスト

循環バス路線沿線上で交通需要は時刻経過に対して一様に発生すると仮定する。運行間隔が  $h$  なので、循環バス待ち時間は  $0 \sim h$  である。したがって平均待ち時間は  $h/2$  である。待ち時間コスト換算係数を  $c_w$  とすると、循環バス利用者の総平均待ち時間コストは、次式で表せる。

$$C_w = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T c_w \cdot T_L(t) \cdot x_r(t) \cdot (h/2) \quad (4.3)$$

## (3) 循環バス平均移動（乗車）時間コスト

現状の基本ルートでの循環バス利用者の平均移動時間を  $T_{mr}(t)$  とする。ここで運行エリア内のバス運行ゾーン数を増やすと、運行距離も増加することから、利用者の平均移動範囲も拡大すると考えられる。また運行エリアを拡大することによっても、循環バス利用者の移動範囲が増すと考えられる。そこでゾーン数を増加させたり、運行エリアを拡大したことによる移動距離の割り増し係数を  $\phi_{mr}(t)$  とする。移動距離のコスト換算係数を  $c_m$  とすると、循環バス利用者の総平均移動時間コストは次式で表す。

$$C_m = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T c_m \cdot T_L(t) \cdot x_r(t) \cdot \{\phi_{mr}(t) \cdot T_{mr}(t)\} \quad (4.4)$$

ここで割り増し係数は、(i) 循環バス停間需要は路線上一様に発生する、(ii) 運行エリア面積は変わらず、限られた空間内でゾーン数の増加などによって運行距離が増加する場合は、循環バス利用者の平均的な乗車距離が、現運行距離との比に比例して一様に長くなると仮定し、ゾーン数や運行エリアを含む(3.1)式で表される運行距離を用い、現状の運行距離  $\bar{L}$  に対し、新たに設定された運行距離  $L_r(t)$  との比に基づき、(4.5)式と与えた。

$$\phi_{mr}(t) = \alpha (L_r(t) / \bar{L}) \quad (4.5)$$

$\alpha$  は運行エリアや運行ルートの形状を考慮した、運行距離の増加率に対する移動距離の割り増し係数である。

## (4) ゾーン内部イグレスコスト

循環バスの停留所からゾーン内の目的地までの移動コストは、運行ゾーンの面積が小さいほど、またバス停間距離が短いほど、バスを降りてから目的地までの距離が短くなると考えられる。ゾーンの形状は正方形で、ゾーン内道路網の形状が格子型とすると、目的地に最も近い停留所で降りたトリップは、ゾーン中心方向と、循環バス路線と平行な道路を使って、目的地まで移動することになる。ここで、1

ゾーン当たりの面積は  $(A/n_z)$  であり、形状を正方形と仮定しているため、一辺の長さは  $(A/n_z)^{0.5}$  となる。目的地までのゾーン中心方向のイグレス距離をゾーン一辺の長さに基づいて換算する係数を  $\Delta_0$  とおく。また、循環バス路線と平行な道路を用いたイグレス距離を停留所間距離に基づいて換算する係数を  $\Delta_1$  とおく。イグレスも徒歩で行われるとし、徒歩速度  $v_s$  を用いると、ゾーン内部イグレスコストは次式で表すことができる。

$$C_A = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T c_A \cdot T_L(t) \cdot x_r(t) \cdot [\{\Delta_0 (A/n_z)^{0.5} + \Delta_1 h\} / v_s] \quad (4.6)$$

ここでゾーン内に循環バス利用者が必要としている目的地が一様に分布しているとする。循環バス路線沿線からゾーン中心部までの距離は、ゾーンの一辺の長さが  $(A/n_z)^{0.5}$  なので、 $0.5(A/n_z)^{0.5}$  となり、ゾーン中心方向の平均イグレス距離は  $0.5 \times 0.5(A/n_z)^{0.5}$  となる。また、目的地に近い停留所で降りることを仮定しているため、循環バス路線沿線と平行な道路を用いた平均イグレス距離は  $0.5 \times 0.5h$  となる。したがって  $\Delta_0$  と  $\Delta_1$  はともに  $0.25$  となる。

## (5) 循環バス利用者コスト

上記の(4.1)～(4.6)のコストの和が総利用者コストとなる。したがって、利用者コストは次式となる。

$$C_U = C_A + C_w + C_m + C_A^1 \quad (4.7)$$

## 5. 循環バスシステムの最適運行コスト

### (1) 循環バスシステム総コスト

最適な運行計画を考案するため、循環バスシステム総コストを最小化することを考える。システム総コストは運行管理コストと利用者コストからなる。したがってシステム総コストは(5.1)式で表される。

$$C = C_0 + C_U \quad (5.1)$$

この(5.1)式を最小化することを考える。

### (2) 循環バスの最適運行計画

ここではシステム総コストを最小化する運行間隔、停留所間隔、ゾーン数などの最適なサービス案を長野市中心市街地で運行されている循環バスの運行条件に基づいて検討する。システム総コスト最小化を行う場合、時間帯とルートに対して循環バス需要を固定して扱う場合と、変動を考慮する場合の2通りの扱いがある。ただし、分析対象の長野市循環バスは導入されたばかりで、運行条件の変更はあまりなされていないため、運行サービス改善後の利用者数の増加など、需要の変動に関することは現時点で不明である。したがってここでは循環バス需要は固定型として扱う。循環バスの現行の運行条件は、

1 ルートのみの運行である。また、循環バスの1時間ごとのOD需要は明らかではないので、9:00から17:30までの1つの時間帯における、単位時間当たりの平均需要量はxと与える。そこで、システム総コストは、 $\phi = \alpha (L/\bar{L})$ であることも考慮すると、次式で表される。

$$C = C_r + (C_a + C_w + C_m + C_s) \\ = c_r (T_R/h) T_R + [c_a \{1/(4v_a)\} + c_w (h/2) \\ + c_m \alpha (L/\bar{L}) T_m + c_s \{\Delta_0 (A/n_z)^{0.5} + \Delta_1 l\} / v_a] T_L x \quad (5.2)$$

(a) 最適運行間隔 h\*

最適な運行間隔を求めるために、(5.2)式について  $\partial C/\partial h=0$  を計算すと、

$$\frac{\partial C}{\partial h} = -c_r \frac{T_R}{h^2} + c_w \frac{x}{2} = 0 \quad (5.3)$$

となる。(5.3)式よりhは、次式となる。

$$h^* = \left( \frac{2c_r \cdot T_R}{c_w \cdot x} \right)^{0.5} \quad (5.4)$$

(b) 最適停留所間隔 l

最適な停留所間隔を求める。ここでは、運行エリアAと運行距離Lはlとは関係なく一定値と仮定する。そこで、(5.2)式について  $\partial C/\partial l=0$  を計算すると、

$$\frac{\partial C}{\partial l} = -c_r \frac{v \cdot L}{h \cdot l^2} + c_s (1/4 + \Delta_1) \frac{x}{v_a} = 0 \quad (5.5)$$

となる。(5.5)式よりlは、次式となる。

$$l^* = \left( \frac{c_r \cdot v \cdot L \cdot v_a}{c_s \cdot h \cdot (1/4 + \Delta_1) x} \right)^{0.5} \quad (5.6)$$

(c) 最適ゾーン数 n\_z\*

最適な運行ゾーン数を求めるために、 $\partial C/\partial n_z=0$  を計算する。ここでは、運行エリアAがn\_zとは関係なく一定値とし、運行間隔hと停留所間隔lもゾーン数とは独立と仮定する。周回時間T\_Rが(3.4)式で、運行距離Lが(3.2)式で表されることに注意すると、 $\partial C/\partial n_z=0$ は、

$$\frac{\partial C}{\partial n_z} = c_r \frac{1}{h} \left( \frac{1}{V} + \frac{v}{l} \right) (0.5 \kappa \cdot n_z^{-0.5}) \\ + (c_m \cdot \alpha \frac{0.5 \kappa \cdot n_z^{-0.5}}{\bar{L}} T_m - c_s \Delta_0 \frac{n_z^{-1.5}}{2v_a}) x \quad (5.7)$$

となる。(5.7)式より最適なゾーン数は次式となる。

$$n_z^* = \frac{\Lambda}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \quad (5.8)$$

ここで、 $\Lambda$ と $\Gamma$ は次式で表される。

$$\Lambda = c_s \Delta_0 \frac{1}{2v_a} x \quad (5.9)$$

$$\Gamma_1 = c_r \frac{0.5 \kappa}{h} \left( \frac{1}{V} + \frac{v}{l} \right) \quad (5.10)$$

$$\Gamma_2 = c_m \cdot \alpha \frac{0.5 \kappa}{\bar{L}} T_m \cdot x \quad (5.11)$$

(3) 総システムコストの各係数の同定

長野市中心市街地循環バスの運行とネットワーク条件を表1に示す。

表1 循環バス運行条件とネットワーク条件

| ネットワーク条件                       | 運行条件                            |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 運行エリア面積 A:1.25 km <sup>2</sup> | ルート数 R:1                        |
| 運行距離 L:7.5 km                  | 時間帯 T:1 (9:00 ~ 17:40)          |
| 停留所数 n:28                      | 時間帯幅 T_L: 8 時間                  |
| 距離補正係数 $\kappa$ :4.276*        | 走行速度 V:平均 12 km/時               |
| 停留所間隔 l:平均 0.27 km             | 周回時間 T_R:0.78 時間                |
| ゾーン数 n_z:2                     | 運行間隔 h:(1/3) 時間                 |
| 循環バス需要 x:77.9 人/時間 (H12 年度実績)  | 運行台数 n_b:3 台                    |
| 平均移動時間 T_m:約 0.183 時間          | 運行管理費用 c_r:<br>約 0.35 万円/(時間・台) |
| 徒歩速度 v_a:平均 3.6 km/時           | 停留所停車時間 v:<br>約 0.0056 時間       |

\*: 長野市街地面積と環状線距離から回帰分析を用い算出。

以上、表1で示したネットワークと運行条件の下で、平成12年度実際の循環バス需要が達成されている。そこで、表1で示した運行間隔、停留所間隔、ゾーン数が、平成12年度の循環バス需要実績に対する最適解として、待ち時間コストc\_w、アクセスコストc\_a、移動時間コストc\_mを求める。待ち時間コストc\_wは、(5.4)式を用いて次式で求めることができる。

$$c_w = \frac{2c_r \cdot T_R}{h^{*2} \cdot x} \quad (5.12)$$

アクセスコストc\_aは、(5.6)式を用いて次式で求める。

$$c_a = \frac{c_r \cdot v \cdot L \cdot v_a}{l^{*2} \cdot h \cdot (1/4 + \Delta_1) x} \quad (5.13)$$

移動時間コストc\_mは、(5.8)~(5.11)式を用いて次式で求めることができる。割り増し係数 $\alpha$ は、ここでは未知数なので、c\_mは $\alpha$ との積で求める。

$$c_m \alpha = \left( \frac{0.5 \kappa \cdot T_m \cdot x}{\bar{L}} \right)^{-1} \cdot (\Lambda n_z^{*-1} - \Gamma_1) \quad (5.14)$$

ただし、(5.14)式に含まれる、アクセスコストc\_aは、(5.13)式で得られた値を用いることとする。以上、(5.12)~(5.14)式を用いて各係数を求めた結果を表2に示す。

表2 各係数の値(万円/人・時間)

| 待ち時間 c_w | アクセス・イグレス c_a | 移動時間 c_m $\alpha$ |
|----------|---------------|-------------------|
| 0.06310  | 0.05593       | -0.03890          |

表2により、循環バス利用においては、待ち時間とアクセス・イグレスに要する時間が損失として影

響している。とくに待ち時間に関する単位時間当たり損失コストが最も大きいことから、中心市街地のように、比較的短いトリップが頻繁に行われるような空間では、待ち時間を重視していると考えられる。

移動時間に関する係数の符号が負となった。徒歩で消費する時間は損失コストであるが、バスによる移動距離が長くなるほど、目的地近辺まで到達しやすくなるので、徒歩による消費時間が小さくなると考えられる。したがってバスによる移動時間の増加は、目的地までの到達のしやすさとして評価されていると考えられる。

6. 循環バス運行による利益と社会的便益

ここでは、循環バスの運行サービス改善に伴う需要変動を考慮した、運行管理者と利用者の便益に基づいた循環バスの最適運行管理計画検討モデルの構築を行う。

(1) 循環バス需要関数

循環バスの需要関数は以下に示すように、待ち時間、アクセス・イグレス時間、移動時間そして運賃に敏感な線形関数で表されると仮定した。したがって循環バス需要は、(6.1)式のように表される。

$$x = \chi \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \right] \quad (6.1)$$

ここで、 $x$ は単位時間当たりの循環バス需要であり、 $e_s, e_w, e_m, e_c$ は各変数にかかる需要弾性係数、 $k$ は定数項である。

(2) 循環バス運行利益

総収入 $R$ は運賃 $f$ に需要 $x$ を乗じることで得られる。利益 $P$ は総収入 $R$ から運行管理コスト $C$ を引いた値として表される。したがって利益 $P$ は、 $P=R-C$ 。

$$= f \cdot T_L \cdot \chi \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \right] - c_r \frac{T_L}{h} T_r \quad (6.2)$$

と表すことができる。

(3) 循環バスの消費者余剰と社会的便益

(i) 消費者余剰：消費者が環状線内の移動に循環バスを利用せずにはすまずより、循環バスを利用することによって自己の環状線内移動の利便性を高めるために支払うことを辞さない運賃に対し、実際に支払う運賃を越える超過額が消費者余剰と考えられる。

需要関数は(6.1)式で表されるので、運賃 $f$ と需要 $x$ との関係を表す需要曲線は次式で表される。

$$f = \frac{1}{e_c} \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - \frac{x}{\chi} \right] \quad (6.3)$$

需要と運賃の関係を図2に示す。

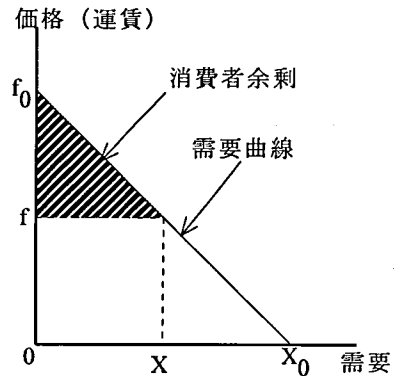


図2 循環バス需要曲線と消費者余剰の概念図

ここで、需要量 $x$ がゼロのときの運賃 $f_0$ は、(6.3)式の需要曲線より、(6.4)式となる。

$$f_0 = \frac{1}{e_c} \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m \right] \quad (6.4)$$

運賃 $f$ がゼロのときの需要量 $x_0$ は、(6.3)式の需要曲線より、(6.5)式となる。

$$x_0 = \chi \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m \right] \quad (6.5)$$

ある任意の循環バス需要が $x$ のとき、消費者余剰は図2の斜線部となる。したがって消費者余剰は、底辺 $x$ 、高さ $(f_0 - f)$ となる斜線部の三角形の面積にもとづいて求めればよい。総消費者余剰は、式(6.6)式で表される。

$$G = T_L x \cdot (f_0 - f) / 2 = \frac{T_L \chi}{2e_c} \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \right]^2 \quad (6.6)$$

(ii) 社会的便益：循環バス運行管理者と利用者の両面から社会的便益を検討する。運行管理者の便益は、総収入から運行管理費を引いた利益 $P$ となる。利用者の便益は前項で検討した消費者余剰 $G$ で表すことができる。したがって、循環バス運行による社会的便益 $Y$ は利益 $P$ と消費者余剰 $G$ の和となる。

$$Y = G + P = \frac{T_L \chi}{2e_c} \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \right]^2 + f \cdot T_L \cdot \chi \left[ k - e_s \left\{ \frac{l_s}{4v_s} + \frac{\Delta_0(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_s}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \right]$$

$$\begin{aligned}
 & - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f ]^2 \\
 & + f \cdot T_L \cdot \chi [k - e_c \cdot \left\{ \frac{l_i}{4v_s} + \frac{\Delta_o(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_i}}{v_s} \right\} \\
 & - e_w \frac{h}{2} - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f ] - c_r \frac{T_L}{h} T_R \quad (6.7)
 \end{aligned}$$

### 7. 運行利益と社会的便益の最大化

ここでは、循環バス利用の便益に大きな影響のある運行間隔  $h$  に着目し、停留所間隔とゾーン数は与件とし、利益と社会的便益を最大化する最適な運行間隔について検討する。

#### (1) 循環バス運行利益の最大化

運行利益を表す(6.2)式について  $\partial P / \partial h = 0$  を求めると、(7.1)式となる。

$$\frac{\partial P}{\partial h} = - \frac{e_w \cdot f \cdot T_L \cdot \chi}{2} + c_r \frac{T_L}{h^2} T_R = 0 \quad (7.1)$$

よって、循環バス運行利益の点からみた最適運行間隔  $h^*$  は次式となる。

$$h^* = \left( \frac{2 \cdot c_r \cdot T_R}{e_w \cdot f \cdot \chi} \right)^{0.5} \quad (7.2)$$

#### (2) 社会的便益の最適化

社会的便益を表す(6.7)式について  $\partial Y / \partial h = 0$  を求めると、次式が得られる。

$$- \frac{e_w \cdot \chi}{2e_c} \Psi - \frac{e_w \cdot f \cdot \chi}{2} + c_r \frac{T_R}{h^2} = 0 \quad (7.3)$$

ここで、 $\Psi$  は(7.4)式に示すとおりである。

$$\begin{aligned}
 \Psi = & k - e_c \cdot \left\{ \frac{l_i}{4v_s} + \frac{\Delta_o(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_i}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h}{2} \\
 & - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \quad (7.4)
 \end{aligned}$$

(7.3)式より、運行間隔  $h$  の厳密最適解を得ることは困難なので、近似的に最適解  $h^*$  を求めることとする。そこで、(7.3)式を用いて  $h$  の最適解を、

$$h^* = \left\{ \frac{2c_r \cdot T_R}{e_w \chi (\Psi^*/e_c + f)} \right\}^{0.5} \quad (7.5)$$

とする。ここで、 $\Psi^*$  は(7.4)式に基づき、

$$\begin{aligned}
 \Psi^* = & k - e_c \cdot \left\{ \frac{l_i}{4v_s} + \frac{\Delta_o(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_i}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h^*}{2} \\
 & - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f \quad (7.6)
 \end{aligned}$$

である。(7.5)式、(7.6)式を用いた最適運行間隔の近似解法アルゴリズムは、以下の通りである。

step.1:  $n=1$  として計算を開始する。

step.2: 運行間隔の初期値  $h_n=h_1$  を与える。

step.3: 式(7.6)を用い、 $\Psi_n^*$  を計算する。

$$\begin{aligned}
 \Psi_n^* = & k - e_c \cdot \left\{ \frac{l_i}{4v_s} + \frac{\Delta_o(A/n_s)^{0.5} + \Delta_{il_i}}{v_s} \right\} - e_w \frac{h_n^*}{2} \\
 & - e_m \alpha \frac{L}{L} T_m - e_c \cdot f
 \end{aligned}$$

step.4: 式(7.5)を用いて運行間隔  $h_{n+1}$  を計算する。

$$h_{n+1}^* = \left\{ \frac{2c_r \cdot T_R}{e_w \chi (\Psi_n^*/e_c + f)} \right\}^{0.5}$$

step.5:  $h_{n+1}=h_n$  ならば、収束したので、最適解は  $h^*=h_{n+1}$  として計算を終了する。 $h_{n+1} \neq h_n$  ならば、収束していないので、 $n=n+1$  として step.3へ。

以上示した計算アルゴリズムにより最適な運行間隔を求める。

### 8. まとめ

本研究では、循環バス運行に関する分析方法の提案とその実証的分析を行った。長野市中心市街地循環バスで改善要望の多かった運行条件を考慮したモデル化を行い、運行管理コストと利用者コストのトレードオフ分析により、運行間隔や運行エリア周囲距離などを決定するアプローチを示した。また、長野市循環バスの運行条件を適用した実証分析により、トレードオフ分析の有用性、重要性を明らかにした。得られた知見を以下に示す。

(1) 待ち時間損失に関するコスト係数が最も大きくなった。これはアンケート調査結果とも合致したが、中心市街地のような徒歩でも移動が可能な空間では、停留所での待ち時間が長いと、他の手段へ転換する可能性が一般の路線バスよりも高いと考えられる。(2) 停留所間隔は0.2～0.3kmの範囲であれば、アクセスによる損失は少ない。(3) 乗車時間コストの符号が負となった。利用者は循環バス導入前は徒歩で移動していた場合が多く、循環バスでの移動に要する時間は損失とは考えていない。運行エリア内に目的地が多数点在する場合、エリア内を細かくゾーン分割し、隈無く走行するような運行ルートを設定することでシステム総コストは小さくなる。

提案したモデルでは操作性を考慮し、いくつか仮定を設けたが、今後の課題として、(1) 循環バス需要を停留所間 OD 形式で表現する、(2) 手段選択行動モデルを組み込む、(3) ゾーンの形状も考慮できるルートの設定法の開発、(4) 運行台数の整数化、(5) 需要曲線を構成する各変数の弾性係数の同定、(6) システム総コストと社会的便益の循環バス運行改善策の最適解の比較を、理論的検討とシミュレーションによる検証の両面から行う、(7) 社会的便益とシステム総コストを組み合わせた循環バス運行計画のモデル化を行い、最適な運行サービスを求める。

### 参考文献

- 1) 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、No.34、pp.985-990
- 2) 中島正人、安江雪菜、高山純一(2000)、「金沢市におけるコミュニティバス導入効果（金沢ふらっとバスを事例として）」、都市計画論文集、No.35、pp.181-186
- 3) 新田保次、都君、森康男(1998)、「サービスレベルに応じた高齢者対応型バスへの転換需要モデル構築に案する研究」、都市計画論文集、No.33、pp.211-216
- 4) 橋本浩史、徳永幸之(1999)、「通勤および業務需要から見た都心循環バスシステムの検討」、土木計画学研究・講演集、Vol.22(1)、pp.487-490
- 5) 秋山哲男、他 5 名(1998)、「三鷹市におけるコミュニティバスの導入について」、土木計画学研究・講演集、Vol.21(2)、pp.823-827