交通サブスクリプションの経済厚生分析

織田澤 利守[1]・中村 温樹[2]・片井 拓真[3]

[1]正会員　神戸大学大学院教授　工学研究科市民工学専攻（〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: ota@opal.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)
[2]学生会員　神戸大学大学院　工学研究科市民工学専攻 （同上）
E-mail: 209t119t@stu.kobe-u.ac.jp
[3]学生会員　神戸大学大学院　工学研究科市民工学専攻 （同上）
E-mail: 221t109t@stu.kobe-u.ac.jp

本研究では，公共交通におけるサブスクリプション型運賃方式の導入が経済厚生に及ぼす影響について分析を行うための理論的枠組みを構築する．交通市場の特性として，利用者による交通手段選択と道路混雑を考慮した数理モデルを定式化し，交通事業者によって決定される価格水準と社会的最適な価格水準をそれぞれ導出して比較を行う．分析の結果，交通事業者が決定する価格水準は社会的最適水準を上回ること，社会的最適なサブスクリプションパスの（1 日当たりの）価格は限界費用を下回ることが明らかとなった．

Key Words : *subscription, profit maximization, welfare, marginal cost pricing, MaaS*

1.　はじめに

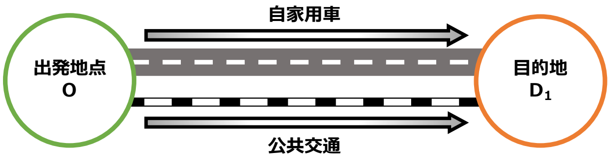
近年，サブスクリプション型サービスの市場が拡大している．サブスクリプションとは，利用者が定額料金を事前に支払うことによって一定期間に渡ってサービスが受けることができる料金体系である．交通分野においても，新たなモビリティサービスとして注目されている MaaS（Mobility as a Service）の中で，サブスクリプション型運賃方式は重要な機能の１つとして位置付けられている．海外では，フィンランドのヘルシンキやイギリスのウエストミッドランドなどにおいて，サブスクリプション型運賃方式を採用したサービス「Whim」の提供が 2016 年から開始されている [3)]．我が国では本格的な導入事例は未だ報告されていないものの，富山市内の鉄道，路線バス，路面電車で利用可能なサブスクリプションパス（年間乗り放題パス）を発行する社会実験が 2021 年に実施されるなど各地で導入に向けた取り組みが進められている．また，公共交通を取り巻く社会経済情勢が大きく変化する中，国土交通省は鉄道の運賃及び料金設定の自由度向上や多様化を進めるための検討を開始したところである [4)]．

公共交通サブスクリプションの導入は，利便性向上による利用者の厚生改善や自家用車から公共交通へのモーダルシフトに伴う交通混雑の解消，環境負荷の低減といった効果をもたらすことが期待される．しかし，公共交通サブスクリプションの導入による影響を分析した既往研究は筆者の知る限りほとんど存在せず，期待されるような効果が現れるか否かは明らかではない．そこで，本研究では，交通市場の特性として道路混雑と利用者の交通手段選択を明示的に扱ったモデルを構築し，公共交通サブスクリプションの導入が経済厚生に及ぼす影響を分析する．その際，価格設定のあり方について議論を行う点が本研究の特徴であると言える．

2.　本研究の基本的な考え方

(1)　既往研究の整理

近年，MaaS に関する研究の報告が徐々に増加している [5),6)]．村井・塩見 [7)] は，路線バスを対象にサブスクリプション型運賃方式を採用した場合の事業採算性について分析を行っている．伊藤ら [8)] は，サブスクリプション型運賃制度を利用した広域的な路線バスサービスの維持方策を検討している．また，田淵・福田 [9)] は，交通行動モデルを用いて，サブスクリプション型 MaaS の料金と利用可能範囲の関係を定量的に評価する枠組みを提案している．一方で，サブスクリプション型運賃方式の経済的特性に着目した研究は数少ない．Glazer et al.(1982)[10)] は，サブスクリプションの経済効果について独占的企業によって供給される雑誌の定期購読を例に分析を行った．そこでは，財に関する情報が消費者にとって不確実であるという側面に着目し，サブスクリプション方式の導入が社会厚生に及ぼす影響について分析を行っている．分析の結果，財の情報が不確実な場合，サブスクリプション方式の導入は社会全体の厚生を増加させるものの，そのほとんどが利潤の増加として企業側に吸収されることが明らかとなっ



図–1 数理モデルの枠組み

た．Hörcher et al.(2020)[11] は，混雑について考慮した経済モデルを用いてマルチモーダルパスが経済的な観点から効率的かどうかを数値的に検証した．このモデルではピーク時とオフピーク時の 2 つの市場環境，公共交通，自家用車，カーシェアの 3 つの交通機関選択を想定している．分析の結果として，サブスクリプションによる限界運賃の低下により，パス所有者が公共交通やカーシェアリングを過剰に利用すること，公共交通またはカーシェアリングシステムの導入により交通機関の混雑が生じ，導入前と比較して社会全体の効用を引き下げる可能性があることが明らかとなった．ただし，公共交通事業者の行動はモデル化されておらず，サブスクリプションパス料金は外生的に与えた上で分析を行なっている．

(2) 本研究の位置付け

本研究では，公共交通におけるサブスクリプション型運賃方式の導入が経済厚生に及ぼす影響について分析を行う．交通市場の特性として，利用者による交通手段選択と道路混雑を考慮した数理モデルを定式化し，公共交通事業者によるサブスクリプション価格の決定とその効率性について分析する．なお，鉄道や乗合バスといった公共交通の運賃設定においては，利用者利益の保護や利便性の確保の観点から総括原価方式が採用されている．しかし，社会情勢の変化や利用者ニーズの多様化に柔軟に対応するために，現行制度そのものの見直しも含めた検討が始まっている．こうした動向を踏まえ，本研究では，まず，料金設定に関する規制が存在しない，すなわち，交通事業者が自由に料金を設定できる状況を想定し分析を進める．また，社会的に最適な価格の設定についても併せて分析を行う．なお，総括原価方式（平均費用価格形成）などのより現実的な状況を想定したケースについては，今後，数値分析を実施し検討する．

3. モデル

(1) 設定

出発地と目的地がそれぞれ 1 地点ずつの交通ネットワーク（**図–1**）を想定し，N 人の消費者による m 日間の交通行動をモデル化する．第 i $(= 1, \cdots, m)$ 日目に消費者が目的地 D を訪問することによって得られる価値を $\tilde{p}_i$ と表す．訪問価値 $\tilde{p}_i$ は，m 日間を通じた平均価値 p と日毎の変動を表す確率変数 ε_i を用いて，

$$\tilde{p}_i = p + \varepsilon_i \tag{1}$$

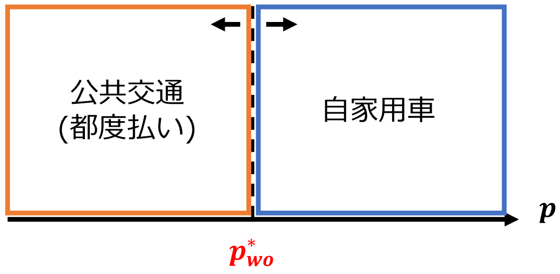
と表される．ただし，平均訪問価値 p は各消費者によって異なり，確率密度関数 $h(p)$ 及び確率分布関数 $H(p)$ に従って分布するものとする．ε_i は p には依存せず，i について互いに独立で平均 0 の確率変数であり，確率密度関数 $g(\varepsilon)$ 及び確率分布関数 $G(\varepsilon)$ に従う．なお，ε_i の値は事前には確定せず，消費者は訪問価値 $\tilde{p}_i$ の値を当日に初めて正確に知ることができるものとする．

OD 間を移動する際，消費者が利用可能な交通手段は公共交通と自家用車の 2 つである．公共交通サービスは，消費者が利用の度に運賃を払う都度払いと m 日間有効なサブスクリプションという 2 種類の価格で提供されるものとする．ここで，都度払いパスの価格を t, サブスクリプションパスの 1 日当たりの価格を q とそれぞれ表す．なお，公共交通サービスの限界費用を c（固定），固定費用を C とする．一方，自家用車の利用には，自動車を保有するための（1 日当たりに換算した）固定費用 i_c と道路交通量 x に応じて生じる混雑費用 $f \cdot x$ を要する．なお，f は混雑費用パラメータである．消費者は公共交通を利用するか自家用車を利用するか，また，公共交通を利用する場合には，サブスクリプションパスを購入するか否かを事前に決定する．

公共交通の運営方式として，民営方式と公営方式の 2 つを想定して分析を行う．前者では独占的な民間事業者が自らの利潤を最大化するように公共交通サービスの価格体系を決定し，後者では公的セクターが社会厚生を最大化するように決定するものとする．モデルに用いる変数を**表–1** に整理する．

表–1 変数一覧

	変数	変数の説明
消費者	N	消費者数
	p	消費者にとっての目的地 D の平均訪問価値
	$h(p)$	p の確率密度関数
	$H(p)$	p の確率分布関数
	ε	訪問価値の日変動（互いに独立な確率変数）
	$g(\varepsilon)$	ε の確率密度関数
	$G(\varepsilon)$	ε の確率分布関数
公共交通	t	都度払いパスの価格
	q	サブスクリプションパスの 1 日当たりの価格
	c	公共交通サービスの限界費用
	C	公共交通サービスの固定費用
	$K(q,t)$	都度払いパスを利用する消費者の割合（後ほど導出）
自家用車	x	道路交通量
	f	混雑費用パラメータ
	i_c	1 日当たりの自動車保有コスト
	β	サブスク利用に対する自家用車利用の分担率（後述）



図–2 交通手段選択の構造（w/o ケース）

(2) サブスクリプションパス導入なしのケース (w/o ケース)

a) 交通手段の選択

サブスクリプションパスは導入されず，公共交通サービスが都度払いパスのみで提供されるケースについて考える．消費者は，公共交通を都度払いパスで利用するか，自家用車を利用するかのいずれかを期首の時点に選択する．ここで，平均訪問価値が p である消費者が期首の時点で各交通手段を選択した場合の期待利得を導出する．

都度払いパスで公共交通を利用する場合，消費者は当日（第 i 日目）に明らかとなる訪問価値 $\tilde{p_i}$ が都度払い価格 t_{wo} を上回る場合に目的地を訪問し，下回る場合には訪問を行わない．これより，m 日間における期待利得 $V^{wo}_{pe}(p)$ は，次のように表される．

$$V^{wo}_{pe}(p) = m\int_{t_{wo}-p}^{\infty}(\varepsilon + p - t_{wo})g(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (2)$$

一方，自家用車を利用する場合，消費者は自動車の保有費用と道路混雑費用を負担する必要がある．ここで，議論の過度な複雑化を避けるため，期首の時点で自家用車の利用を選択した消費者は訪問価値の日変動に寄らず，必ず目的地へのトリップを行うものとする[1]．この仮定の下で自家用車を利用する場合の期待利得 $V^{wo}_{car}(p)$ は，

$$V^{wo}_{car}(p) = m(p - f\cdot x - i_c) \qquad (3)$$

と表される．平均訪問価値 p をもつ消費者は式 (2) と (3) を比較し，より大きな期待効用をもたらす交通手段を選択する．このとき，$V^{wo}_{pe}(p_{wo}) = V^{wo}_{car}(p_{wo})$ を満たす平均訪問価値の閾値 p_{wo} が存在し，$p < p_{wo}$ を満たす消費者は都度払いパスでの公共交通利用を，$p > p_{wo}$ を満たす消費者は自家用車の利用をそれぞれ選択する（**図–2**）．

閾値 p_{wo} を用れば，道路交通量 x_{wo} を以下のように得られる．

$$x_{wo} = NPr(p > p_{wo}) = N\big(1 - H(p_{wo})\big) \qquad (4)$$

これより，式 (3), (4) より，自家用車で利用する場合の期待利得は，

$$V^{wo}_{car}(p) = m\{p - fN\big(1 - H(p_{wo})\big) - i_c\} \qquad (5)$$

となる．したがって，閾値 p_{wo} において以下の等式が成立する．

$$\int_{t_{wo}-p_{wo}}^{\infty}(\varepsilon + p_{wo} - t_{wo})g(\varepsilon)d\varepsilon = p_{wo} - fN\big(1 - H(p_{wo})\big) - i_c \qquad (6)$$

ここで，都度払い価格 t_{wo} が交通手段選択に及ぼす影響について調べよう．式 (6) の両辺を t_{wo} で偏微分して整理すると次式を得る．

$$\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}} = \frac{G(t_{wo} - p_{wo}) - 1}{fNh(p_{wo}) + G(t_{wo} - p_{wo})} < 0 \qquad (7)$$

式 (4) の両辺を t_{wo} で偏微分し，不等式 (7) を利用すれば以下の関係を導くことができる．

$$\frac{\partial x_{wo}}{\partial t_{wo}} = -Nh(p_{wo})\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}} > 0 \qquad (8)$$

不等式 (7) 及び (8) は，都度払いパス価格 t_{wo} の上昇に伴って公共交通の利用者が減少し，道路交通量が増加することを示している．

b) 民間事業者による利潤最大化行動

公共交通サービスが民間事業者によって提供される場合を想定しよう．まず，消費者が公共交通を利用して移動するのは，自家用車の利用を選択せず ($p < p_{wo}$)，かつその日の訪問価値が都度払いパスの価格を上回る場合 ($p + \varepsilon > t_{wo}$) である．したがって，都度払いパスで公共交通を利用する消費者の割合 $K(p_{wo}, t_{wo})$ は，

$$\begin{aligned} K(p_{wo}, t_{wo}) =& Pr(p < p_{wo},\ \varepsilon > t_{wo} - p) \\ =& \int_0^{p_{wo}}\int_{t_{wo}-p}^{\infty} g(\varepsilon)h(p)d\varepsilon dp \\ =& \int_0^{p_{wo}}\big(1 - G(t_{wo} - p)\big)h(p)dp \end{aligned} \qquad (9)$$

と表される．よって，m 日間の交通事業者の利潤 π_{wo} は，公共交通サービスの限界費用 c および固定費用 C を用いて以下のように表される．

$$\begin{aligned} \pi_{wo} =& mNK(p_{wo}, t_{wo})(t_{wo} - c) - C \\ =& mN\int_0^{p_{wo}}\big(1 - G(t_{wo} - p)\big)h(p)dp\cdot(t_{wo} - c) - C \end{aligned} \qquad (10)$$

独占的な交通事業者が利潤 π_{wo} を最大とするように都度払いパスの価格 t^*_{wo} を決定する．利潤最大化の一階

[1] この仮定は，$p + \varepsilon - f\cdot x_{wo} > 0$ が常に成立することを意味する．自家用車の利用に要する費用のうち，(一日当たりの）保有費用 i_c が支配的であること（$i_c \gg f\cdot x_{wo}$）を想定すると，一般性を大きく損なう仮定ではないことがわかる．

条件：$\dfrac{\partial \pi_{wo}}{\partial t_{wo}} = 0$ より，t^*_{wo} は次の等式を満たす．

$$\begin{aligned}&\left\{\big(1-G(t^*_{wo}-p^*_{wo})\big)h(p^*_{wo})\left.\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\right|_{t_{wo}=t^*_{wo}}\right.\\&\quad\left.-\int_0^{p^*_{wo}} g(t^*_{wo}-p)h(p)dp\right\}(t^*_{wo}-c)\\&\quad+\int_0^{p^*_{wo}}\big(1-G(t^*_{wo}-p)\big)h(p)dp=0\end{aligned} \tag{11}$$

なお，p^*_{wo} は，$t_{wo}=t^*_{wo}$ のときの閾値を表す．ここで，式 (11) の左辺第 1 項は自家用車への手段転換に伴う利潤の変化，第 2 項は料金値上げによる収益の増加をそれぞれ表す．不等式 (7) を用いて各項の符号を整理すると，

$$t^*_{wo}-c>0 \tag{12}$$

を満たす必要がある．つまり，民間交通事業者は都度払い価格 t_{wo} を限界費用 c よりも高い値に設定することがわかった．

c) 社会厚生最大化問題

社会厚生関数を以下のように定義する．

$$SW_{wo}=\sum V^{wo}_{pe}+\sum V^{wo}_{car}+\pi_{wo} \tag{13}$$

ここで，$\sum V^{wo}_{pe}$ は公共交通利用者の期待利得の合計，$\sum V^{wo}_{car}$ は自家用車利用者の期待利得の合計であり，それぞれ以下のように表される．

$$\sum V^{wo}_{pe}=mN\int_0^{p_{wo}}\int_{t_{wo}-p}^{\infty}(p+\varepsilon-t_{wo})g(\varepsilon)h(p)d\varepsilon dp \tag{14}$$

$$\sum V^{wo}_{car}=mN\int_{p_{wo}}^{\infty}\big\{p-fN\big(1-H(p_{wo})\big)-i_c\big\}h(p)dp \tag{15}$$

である．式 (10), (14), (15) を式 (13) に代入して整理すると，

$$\begin{aligned}SW_{wo}=mN\Bigg[&\int_0^{p_{wo}}\int_{t_{wo}-p}^{\infty}(p+\varepsilon)g(\varepsilon)h(p)d\varepsilon dp\\&-c\int_0^{p_{wo}}\big(1-G(t_{wo}-p)\big)h(p)dp\\&+\int_{p_{wo}}^{\infty}\big\{p-fN(1-H(p_{wo}))-i_c\big\}h(p)dp\Bigg]\end{aligned} \tag{16}$$

と表すことができる．社会厚生を最大とする都度払いパスの料金 t°_{wo} を導出する．社会厚生関数 SW_{wo} を t_{wo} で偏微分すれば，

$$\begin{aligned}\frac{\partial SW_{wo}}{\partial t_{wo}}=mN\Bigg[&\int_{t_{wo}-p_{wo}}^{\infty}(p_{wo}+\varepsilon)g(\varepsilon)d\varepsilon h(p_{wo})\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\\&-(t_{wo}-c)\int_0^{p_{wo}} g(t_{wo}-p)h(p)dp\\&-c\big(1-G(t_{wo}-p_{wo})\big)h(p_{wo})\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\\&-\big\{p_{wo}-fN(1-H(p_{wo}))-i_c\big\}h(p_{wo})\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\\&+fN\big(1-H(p_{wo})\big)h(p_{wo})\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\Bigg]\end{aligned} \tag{17}$$

となる．ここで，臨界点 p_{wo} では式 (6) が成立することを利用すれば，社会厚生最大化の一階条件：$\dfrac{\partial SW_{wo}}{\partial t_{wo}}=0$ より，t°_{wo} は次の等式を満たす．

$$\begin{aligned}&\left\{\big(1-G(t^{\circ}_{wo}-p^{\circ}_{wo})\big)h(p^{\circ}_{wo})\left.\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\right|_{t_{wo}=t^{\circ}_{wo}}\right.\\&\quad\left.-\int_0^{p^{\circ}_{wo}} g(t^{\circ}_{wo}-p)h(p)dp\right\}(t^{\circ}_{wo}-c)\\&\quad+fN\big(1-H(p^{\circ}_{wo})\big)h(p^{\circ}_{wo})\left.\frac{\partial p_{wo}}{\partial t_{wo}}\right|_{t_{wo}=t^{\circ}_{wo}}=0\end{aligned} \tag{18}$$

なお，p°_{wo} は，$t_{wo}=t^{\circ}_{wo}$ のときの閾値を表す．ここで，式 (18) の左辺第 1 項は自家用車への手段転換に伴う事業者利潤の変化，第 2 項は道路混雑による伴う厚生損失を表す．先ほどと同様に，不等式 (7) を用いて各項の符号を整理すると，

$$t^{\circ}_{wo}-c<0 \tag{19}$$

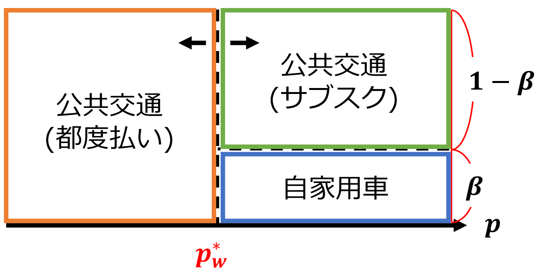
となる．つまり，社会厚生の最大化を図るためには，道路混雑と公共交通利用者のトリップ取り止めによる厚生損失を考慮して，都度払い価格 t_{wo} を限界費用 c よりも低く設定する必要があることが明らかとなった．

(3) サブスクリプション導入有りのケース (w ケース)

a) 設定

公共交通事業者が都度払いパスに加えて，m 日有効なサブスクリプションパスを販売するケースを想定する．いま，都度払い価格を t_w，サブスクリプションパスの 1 日当たりの価格を q と表す．消費者がサブスクリプションパスを購入するための条件は，$t_w>q$ である（詳細は**付録 A** を参照）．以下では，この条件が成立するものとして議論を進める．

平均訪問価値が p である消費者が都度払いパスで公共交通を利用する場合の期待効用 $V^w_{pe}(p)$ 及び自家用車を利用する場合の期待効用 $V^w_{car}(p)$ は，前節と同様にそ



図–3 交通手段選択の構造（w ケース）

れぞれ以下の式で表される[2].

$$V_{pe}^w(p) = m\int_{t_w-p}^{\infty}(\varepsilon + p - t_w)g(\varepsilon)d\varepsilon \tag{20}$$

$$V_{car}^w(p) = m(p - f\cdot x_w - i_c) \tag{21}$$

また，サブスクリプションパスで公共交通を利用する場合の期待利得 $V_{ps}^w(p)$ は次式で表される．

$$V_{ps}^w(p) = m(p-q) \tag{22}$$

平均訪問価値 p をもつ消費者は $V_{pe}^w(p), V_{car}^w(p)$ 及び $V_{ps}^w(p)$ を比較し，期待効用が最大となる選択を行う．式 (21) 及び (22) より，自家用車利用とサブスクリプションパスでの公共交通利用の間の選択は平均訪問価値 p に依存せず，自家用車の交通量 x_w のみに依存することがわかる．一方，前節の議論を踏まえると，都度払いパスでの公共交通利用と自家用車利用（もしくは，サブスクリプションパスでの公共交通利用）の間の選択では，両者の期待効用が等しくなる平均訪問価値の閾値が存在し，平均訪問価値 p がその閾値を上回る消費者は自家用車，もしくは，サブスクリプションパスの公共交通を，下回る消費者は都度払いパスで公共交通を利用する．以上のことから，すべての選択肢が利用されている均衡状態は**図–3** に示す選択構造を持つ．ここで，都度払いパスでの公共交通利用を選択するか否かに関する平均訪問価値の閾値を p_w，都度払いパスでの公共交通利用を選択しなかった消費者のうち，自家用車を利用する割合を β で表す．

平均訪問価値が閾値 p_w と等しい消費者にとっては，都度払いパスでの公共交通利用とサブスクリプションパスでの公共交通利用が無差別 ($V_{pe}^w(p_w) = V_{ps}^w(p_w)$) となる．つまり，以下の等式が成立する．

$$\int_{t_w-p_w}^{\infty}(p_w + \varepsilon - t_w)g(\varepsilon)d\varepsilon = p_w - q \tag{23}$$

式 (23) を q 及び t_w で偏微分して整理すると，以下の関係を得る．

$$\frac{\partial p_w}{\partial t_w} = 1 - \frac{1}{G(t_w - p_w)} < 0 \tag{24}$$

$$\frac{\partial p_w}{\partial q} = \frac{1}{G(t_w - p_w)} > 0 \tag{25}$$

式 (24) 及び (25) は，都度払いパスの価格上昇が都度払いパスでの公共交通利用者を減少させる一方，サブスクリプションパスの価格上昇は都度払いパスでの公共交通利用者を増加させることを示している．

続いて，平均訪問価値 p が閾値 p_w を上回る消費者の選択に着目する．ここで，道路交通量 x_w は，

$$x_w = \beta N Pr(p > p_w) = \beta N\big(1 - H(p_w)\big) \tag{26}$$

であり，自家用車を利用する場合の期待効用 $V_{car}^w(p)$ は，

$$V_{car}^w = m\big\{p - f\beta N\big(1 - H(p_w)\big) - i_c\big\} \tag{27}$$

と表される．前述の通り，自家用車利用とサブスクリプションパスでの公共交通利用の間の選択は平均訪問価値 p に依存せず，道路交通量 x_w のみに依存する．どちらも利用されるためには，$V_{ps}^w(p) = V_{car}^w(p)$ が成立する必要がある．式 (22) 及び (27) を等号で結び整理すると，次の等式を得る．

$$q = f\beta N\big(1 - H(p_w)\big) + i_c \tag{28}$$

式 (28) を q 及び t_w で偏微分し，式 (24), (25) を用いれば，以下の関係を得る．

$$\frac{\partial \beta}{\partial t_w} = \frac{\beta h(p_w)}{1 - H(p_w)}\frac{\partial p_w}{\partial t_w} < 0 \tag{29}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial q} = \frac{1}{1 - H(p_w)}\left\{\beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} + \frac{1}{fN}\right\} > 0 \tag{30}$$

不等式 (29) 及び (30) は，都度払いパス価格 t_w の上昇が自家用車の選択割合 β は減少させる一方，サブスクリプションパス価格 q の上昇は β を増加させることを表す．さらに，式 (26) を q 及び t_w で偏微分し，式 (29), (30) を代入して整理すれば，以下を得る．

$$\begin{aligned}\frac{\partial x_w}{\partial t_w} &= N\frac{\partial \beta}{\partial t_w}\big(1 - H(p_w)\big) - N\beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &= N\left\{\beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} - \beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w}\right\} \\ &= 0 \end{aligned}\tag{31}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial x_w}{\partial q} &= N\frac{\partial \beta}{\partial q}\big(1 - H(p_w)\big) - N\beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} \\ &= N\left\{\beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} + \frac{1}{fN} - \beta h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q}\right\} \\ &= \frac{1}{f} > 0 \end{aligned}\tag{32}$$

式 (31) は，都度払いパス価格 t_w の上昇が自家用車の交通量には影響を及ぼさないこと，式 (32) は，サブスクリプションパス価格 q の上昇が道路交通量を増加させることをそれぞれ示している．

[2] 前節と同様に，期首の時点で自家用車の利用を選択した消費者は訪問価値の日変動に寄らず，必ず目的地へのトリップを行うという仮定を置いている．

b) 民間事業者による利潤最大化行動

公共交通サービスを提供する民間事業者は，利潤を最大化するように都度払いパスの価格 t_w^* 及びサブスクリプションパスの価格 q^* を決定する．m 日間の交通事業者の利潤 π_w は都度払いパスの販売による利潤とサブスクリプションパスの販売による利潤の合計から固定費用を差し引いて，以下のように表される．

$$\begin{aligned}\pi_w =& mNK(p_w, t_w)(t_w - c)\\ &+ m(1-\beta)N\big(1-H(p_w)\big)(q-c) - C\\ =& mN\int_0^{p_w}\big(1-G(t_w-p)\big)h(p)dp\cdot(t_w-c)\\ &+ m(1-\beta)N\big(1-H(p_w)\big)(q-c) - C \qquad (33)\end{aligned}$$

利潤最大化の一階条件：$\dfrac{\partial \pi_w}{\partial t_w}=0$ 及び $\dfrac{\partial \pi_w}{\partial q}=0$ より，t_w^*，q^* は次式を満たす．

$$\begin{aligned}&\left\{\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)h(p_w^*)\left.\frac{\partial p_w}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right.\\ &\qquad\left.-\int_0^{p_w^*} g(t_w^*-p)h(p)dp\right\}(t_w^*-c)\\ &-\left\{\big(1-H(p_w^*)\big)\left.\frac{\partial \beta}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right.\\ &\qquad\left.+(1-\beta)h(p_w^*)\left.\frac{\partial p_w}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right\}(q^*-c)\\ &\qquad+\int_0^{p_w^*}\big(1-G(t_w^*-p)\big)h(p)dp=0 \qquad (34)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\left\{\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)h(p_w^*)\left.\frac{\partial p_w}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right\}(t_w^*-c)\\ &-\left\{\big(1-H(p_w^*)\big)\left.\frac{\partial \beta}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right.\\ &\qquad\left.+(1-\beta)h(p_w^*)\left.\frac{\partial p_w}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^*,q=q^*}\right\}(q^*-c)\\ &+(1-\beta)\big(1-H(p_w^*)\big)=0 \qquad (35)\end{aligned}$$

なお，p_w^* は $t_w=t_w^*$，$q=q^*$ のときの閾値を表す．式 (34) の左辺第 1 項は，都度払いパスの値上げに伴う，都度払いパス利用者減による収益減少分，第 2 項はサブスクリプションパス利用者増による収益増加分，第 3 項は値上げによる増収分をそれぞれ表す．また，式 (35) の左辺第 1 項は，サブスクリプションパスの値上げに伴う，都度払いパス利用者増による増収分，第 2 項はサブスクリプションパス利用者減による減収分，第 3 項は値上げによる増収分を表す．

以下では，都度払いパスの価格 t_w^*，サブスクリプションパスの価格 q^* 及び限界費用 c の大小関係について調べる．式 (34) の第 1 項及び第 2 項の中括弧（$\{\cdot\}$）内の符号が共に負，第 3 項の符号が正であることから，同式が成立するための (t_w^*-c) 及び (q^*-c) の符号条件を**表–2** のように整理できる．

表–2 式 (34) が成立するための符号条件

	$q^*-c>0$	$q^*-c=0$	$q^*-c<0$
$t_w^*-c>0$	○	○	○
$t_w^*-c=0$	×	×	○
$t_w^*-c<0$	×	×	○

また，式 (35) の第 1 項及び第 2 項の中括弧内の符号は共に正，第 3 項の符号は正であることから，(t_w^*-c) 及び (q^*-c) の符号条件は**表–3** の通りである．

表–3 式 (35) が成立するための符号条件

	$q^*-c>0$	$q^*-c=0$	$q^*-c<0$
$t_w^*-c>0$	○	×	×
$t_w^*-c=0$	○	×	×
$t_w^*-c<0$	○	○	○

この段階では，(t_w^*-c) 及び (q^*-c) が共に正，または共に負となる可能性がある．そこで，式 (34) と (35) を変形した上で，式 (24), (25) 及び式 (29), (30) の関係を用いると次式を得る（導出は**付録 B** を参照）．

$$\begin{aligned}&\left\{\int_0^{p_w^*} g(t_w^*-p)h(p)dp\right\}(t_w^*-c)\\ &\quad+\left\{\frac{1}{fN}\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)\right\}(q^*-c)\\ &\quad-(1-\beta)\big(1-H(p_w^*)\big)\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)\\ &\quad-\int_0^{p_w^*}\big(1-G(t_w^*-p)\big)h(p)dp=0 \qquad (36)\end{aligned}$$

式 (36) の第 1 項及び第 2 項の中括弧内の符号は共に正，第 3 項，第 4 項の符号が共に負であることから，同様にして符号条件を整理すれば，**表–4** となる．

表–4 式 (36) が成立するための符号条件

	$q^*-c>0$	$q^*-c=0$	$q^*-c<0$
$t_w^*-c>0$	○	○	○
$t_w^*-c=0$	○	×	×
$t_w^*-c<0$	○	×	×

以上より，t_w^* と q^* は以下の符号条件を満たす．

$$t_w^* > q^* > c$$

すなわち，交通事業者は都度払いパスの価格 t_w とサブスクリプションパスの（1 日当たり）価格 q をともに限界費用 c よりも高く設定することがわかる．

c) 社会厚生最大化問題

サブスクリプションサービスが利用可能な場合の社会厚生関数を次式で定義する．

$$SW_w = \sum V_{pe}^w + \sum V_{ps}^w + \sum V_{car}^w + \pi_w \tag{37}$$

ここで，$\sum V_{pe}^w$ は都度払いパスでの公共交通利用者の期待利得の合計，$\sum V_{ps}^w$ はサブスクリプションパスでの公共交通利用者の期待利得の合計，$\sum V_{car}^w$ は自家用車利用車の期待利得の合計であり，それぞれ以下のように表される．

$$\sum V_{pe}^w = mN \int_0^{p_w} \int_{t_w-p}^{\infty} (p+\varepsilon-t_w) g(\varepsilon) h(p) d\varepsilon dp \tag{38}$$

$$\sum V_{ps}^w = m(1-\beta)N \int_{p_w}^{\infty} (p-q)h(p)dp \tag{39}$$

$$\begin{aligned}\sum V_{car}^w = m\beta N \int_{p_w}^{\infty} \big\{ p - f\beta N\big(1-H(p_w)\big) \\ - i_c \big\} h(p)dp\end{aligned} \tag{40}$$

これらを用いて，社会厚生関数 SW_w を以下のように書き直すことができる．

$$\begin{aligned}SW_w =& mN\Bigg[\int_0^{p_w} \int_{t_w-p}^{\infty} (p+\varepsilon) g(\varepsilon) h(p) d\varepsilon dp \\ &- c\int_0^{p_w} \big(1-G(t_w-p)\big)h(p)dp \\ &+ \beta \int_{p_w}^{\infty} \{p - f\beta N(1-H(p_w)) - i_c\} h(p)dp \\ &+ (1-\beta)\int_{p_w}^{\infty} (p-c)h(p)dp \Bigg]\end{aligned} \tag{41}$$

式 (42) を t_w 及び q で偏微分すれば，

$$\begin{aligned}\frac{\partial SW_w}{\partial t_w} =& mN\Bigg[\int_{t_w-p_w}^{\infty} (p_w+\varepsilon)g(\varepsilon)d\varepsilon h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &- (t_w-c)\int_0^{p_w} g(t_w-p)h(p)dp \\ &- c\big(1-G(t_w-p_w)\big)h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &+ \int_{p_w}^{\infty} \big\{p - 2f\beta N(1-H(p_w)) - i_c\big\} h(p)dp \frac{\partial \beta}{\partial t_w} \\ &+ \int_{p_w}^{\infty} (p-q)h(p)dp \frac{\partial \beta}{\partial t_w} \\ &- \beta\big\{p_w - 2f\beta N\big(1-H(p_w)\big) - i_c\big\} h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &- (1-\beta)(p_w-q)h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &- \big(1-H(p_w)\big)(q-c)\frac{\partial \beta}{\partial t_w} \\ &- (1-\beta)h(p_w)(q-c)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \Bigg]\end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial SW_w}{\partial q} =& mN\Bigg[\int_{t_w-p_w}^{\infty} (p_w+\varepsilon)g(\varepsilon)d\varepsilon h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} \\ &- c\big(1-G(t_w-p_w)\big)h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial t_w} \\ &+ \int_{p_w}^{\infty} \big\{p - 2f\beta N(1-H(p_w)) - i_c\big\} h(p)dp \frac{\partial \beta}{\partial q} \\ &+ \int_{p_w}^{\infty} (p-q)h(p)dp \frac{\partial \beta}{\partial q} \\ &- \beta\big\{p_w - 2f\beta N\big(1-H(p_w)\big) - i_c\big\} h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} \\ &- (1-\beta)\big(1-H(p_w)\big) - (1-\beta)(p_w-q)h(p_w)\frac{\partial p_w}{\partial q} \\ &- \big(1-H(p_w)\big)(q-c)\frac{\partial \beta}{\partial q} - (1-\beta)h(p_w)(q-c)\frac{\partial p_w}{\partial q} \\ &+ (1-\beta)\big(1-H(p_w)\big) \Bigg]\end{aligned} \tag{43}$$

を得る．ここで，$V_{pe}^w(p_w) = V_{ps}^w(p_w) = V_{car}^w(p_w)$ 及び式 (24), (25) (29)-(32) を利用すれば，社会厚生最大化の一階条件：$\dfrac{\partial SW_w}{\partial t_w} = 0$，$\dfrac{\partial SW_w}{\partial q} = 0$ はそれぞれ以下のように表される．

$$\begin{aligned}&\Bigg\{ \big(1-G(t_w^\circ - p_w^\circ)\big)h(p_w^\circ) \left.\frac{\partial p_w}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \\ &- \int_0^{p_w^\circ} g(t_w^\circ - p)h(p)dp \Bigg\} (t_w^\circ - c) \\ &- \Bigg\{ \big(1-H(p_w^\circ)\big) \left.\frac{\partial \beta}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \\ &+ (1-\beta)h(p_w^\circ) \left.\frac{\partial p_w}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \Bigg\} (q^\circ - c) = 0\end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}&\Bigg\{ \big(1-G(t_w^\circ - p_w^\circ)\big)h(p_w^\circ) \left.\frac{\partial p_w}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \Bigg\} (t_w^\circ - c) \\ &- \Bigg\{ \big(1-H(p_w^\circ)\big) \left.\frac{\partial \beta}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \\ &\qquad + (1-\beta)h(p_w^\circ) \left.\frac{\partial p_w}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^\circ, q=q^\circ} \Bigg\} (q^\circ - c) \\ &- \beta\big(1-H(p_w^\circ)\big) = 0\end{aligned} \tag{45}$$

なお，p_w° は $t_w = t_w^\circ$，$q = q^\circ$ のときの閾値を表す．ここで，式 (44) 及び (45) は，利潤最大化の一階条件式 (34) 及び (35) を用いて次のように表すことができる．

$$\frac{\partial SW_w}{\partial t_w} = \frac{\partial \pi_w}{\partial t_w} - \int_0^{p_w} \big(1-G(t_w-p)\big)h(p)dp \tag{46}$$

$$\frac{\partial SW_w}{\partial q} = \frac{\partial \pi_w}{\partial q} - \big(1-H(p_w)\big) \tag{47}$$

ここで，式 (46) 及び (47) に事業者の利潤を最大化する価格水準 $t_w = t_w^*$, $q = q^*$ を代入すれば，

$$\left.\frac{\partial SW_w}{\partial t_w}\right|_{t_w=t_w^*, q=q^*} < 0 \tag{48}$$

$$\left.\frac{\partial SW_w}{\partial q}\right|_{t_w=t_w^*, q=q^*} < 0 \tag{49}$$

となる．これより，交通事業者が決定する価格水準が社会的最適水準を上回ることがわかる．

続いて，前節と同様に，都度払いパスの価格 t_w°，サブスクリプションパスの価格 q° 及び限界費用 c の大小関係について調べる．式 (44) の第 1 項及び第 2 項の中括弧内の符号が共に負であることから，同式が成立するための $(t_w^\circ - c)$ 及び $(q^\circ - c)$ の符号条件を**表–5** のように整理できる．

表–5 式 (44) が成立するための符号条件

	$q^\circ - c > 0$	$q^\circ - c = 0$	$q^\circ - c < 0$
$t_w^\circ - c \geq 0$	×	×	○
$t_w^\circ - c = 0$	×	○	×
$t_w^\circ - c < 0$	○	×	×

また，式 (45) の第 1 項及び第 2 項の中括弧内の符号が共に正，第 3 項の符号が負であることから，$(t_w^\circ - c)$ 及び $(q^\circ - c)$ の符号条件は**表–6** の通りである．

表–6 式 (45) が成立するための符号条件

	$q^\circ - c > 0$	$q^\circ - c = 0$	$q^\circ - c < 0$
$t_w^\circ - c > 0$	○	○	○
$t_w^\circ - c = 0$	×	×	○
$t_w^\circ - c < 0$	×	×	○

以上より，社会厚生を最大とする t_w° と q° は，以下の符号条件を満たす．

$$t_w^\circ > c > q^\circ$$

すなわち，社会的最適なサブスクリプションパスの（1 日当たりの）価格は限界費用より低い水準になることが明らかとなった．

4. まとめ

本研究では，公共交通におけるサブスクリプション型運賃方式の導入が経済厚生に及ぼす影響について分析を行うため理論的枠組みを構築し，分析の結果，交通事業者が決定する価格水準は社会的最適水準を上回ること，社会的最適なサブスクリプションパスの（1 日当たりの）価格は限界費用を下回ることを明らかにした．ただし，本稿では，交通事業者が自由に料金を設定できる状況と社会的最適状態のみについて解析的な分析を行うに留まっている．サブスクリプションパスの導入による便益がどの程度生じるか，また，どの主体にどの程度帰着するか，モーダルシフトによる交通混雑の緩和がどの程度起こるかなどについては，数値解析による定量的に分析を行う必要がある．また，総括原価方式（平均費用価格形成）などのより現実的な状況を想定したケースについても，今後，検討を行う予定である．

付録.

A. 条件 $t_w > q$ の成立

消費者がサブスクリプションパスを購入する条件を導くために，サブスクリプションと都度払いそれぞれを選択した場合の消費者の期待利得を比較する（**表–7**）．ケース (i) では，$q > t_w$ なので $p - t_w > p - q$ となり，消費者は都度払いを選択する．ケース (ii) では，$p - q < 0$, $p - t_w > 0$ となるため，同じく消費者は都度払いを選択する．また，ケース (iii) について消費者はサブスクリプションを選択した場合 $p - q$ だけ利得を損失する，都度払いの場合は利得がマイナスになるため移動しない．よって，この時も消費者は都度払いを選択する．以上，各ケースの結果よりサブスクリプションの 1 日当たりの価格 q が都度払い価格 t_w より大きくなる場合には消費者は必ず都度払いを選択する．よって，都度払い価格 t_w は，サブスクリプションの 1 日当たりの価格 q よりも必ず大きく設定される．

表–7 t_w, q の比較

	条件	サブスクでの期待利得	都度払いでの期待利得
(i)	$p > q > t_w$	$p - q > 0$	$p - t_w > 0$
(ii)	$q > p > t_w$	$p - q < 0$	$p - t_w > 0$
(iii)	$q > t_w > p$	$p - q < 0$	0

B. 式 (36) の導出

式 (35) について，式 (25) を左辺の第 3, 4 項に代入して整理すると以下の条件が得られる．

$$\begin{aligned}&\Big\{\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)h(p_w^*)\Big\}(t_w^*-c)\\&\quad-\Big\{G(t_w^*-p_w^*)\big(1-H(p_w^*)\big)\left.\frac{\partial\beta}{\partial q}\right|_{q=q^*}\\&\qquad+(1-\beta)h(p_w^*)\Big\}(q^*-c)\\&+(1-\beta)G(t_w^*-p_w^*)\big(1-H(p_w^*)\big)=0\end{aligned} \tag{50}$$

求めた式 (50) の左辺第 1 項を式 (34) に代入して整理すると，以下の新たな条件が求められる．

$$\left\{\int_0^{p_w^*} g(t_w^*-p)h(p)dp\right\}(t_w^*-c)$$
$$+\big(1-H(p_w^*)\big)\left\{\frac{\partial\beta}{\partial t_w}+\frac{\partial\beta}{\partial q}\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)\right\}(q^*-c)$$
$$-(1-\beta)\big(1-H(p_w^*)\big)\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)$$
$$-\int_0^{p_w^*}\big(1-G(t_w^*-p)\big)h(p)dp=0 \qquad (51)$$

ここで式 (51) の左辺の第一項について，式 (29), 式 (30) を用いて整理すると，

$$\frac{\partial\beta}{\partial t_w}+\frac{\partial\beta}{\partial q}\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)$$
$$=\frac{1}{1-H(p_w^*)}\cdot\frac{1}{fN}\cdot\big(1-G(t_w^*-p_w^*)\big)$$

となる．よって，事業者の利潤を最大化する条件として，新たに式 (36) を得る．

参考文献

1) 川上 昌直, 日本企業が飛びついた「サブスクリプション」の問題, 商大論集, 第 73 巻第 2 号, 2021.
2) 谷守 正行, サブスクリプションモデルの管理会計研究, 専修商学論集, 99-113, 2017.
3) MaaS GLOBAL: Whim travel by MaaS Global, https://maas.global/（最終閲覧日：2022 年 9 月 25 日）.
4) 国土交通省：鉄道運賃・料金制度のあり方に関する小委員会　中間取りまとめ，https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001493180.pdf（最終閲覧日：2022 年 9 月 25 日）.
5) 藤垣 洋平, 高見 淳史, トロンコソパラディ ジアンカルロス, 原田 昇, 大都市圏向け統合モビリティサービス Metro-MaaS の提案と需要評価, 都市計画論文集, Vol.52, No.3, 2017
6) 赤木 大介, 神田 佑亮, 諸星 賢治, 条件不利環境に対応した MaaS の設計と社会 実装に関する実証研究, 土木学会論文集, Vol.76, No.5, 2021.
7) 村井 藤紀, 塩見 康博, 路線バスを対象としたサブスクリプション型運賃制度の 採算性における導入可能性の検討, 土木学会論文集, Vol.75, No.5, 2019
8) 伊藤 将希, 武田 陸, 谷口 守, 広域連携を見据えた路線バス維持方策の提案-サブスクリプション型平準化運賃制度に着目して-, 都市計画論文集, Vol.55, No.3, 2020.
9) 田淵 景子, 福田 大輔, 再帰ロジット型交通行動モデルを用いたサブスクリプ ション型 MaaS の評価に関する基礎的研究, 都市計画論文集, Vol.55, No.3, 2020.
10) Glazer, A., Hassin, R., On the economics of subscriptions, *European Economic Review*, 19(2-3), 343-365, 1982.
11) Hörcher, D., Graham, D. J., MaaS economics: Should we fight car ownership with subscriptions to alternative modes?, *Economics of Transportation*, 22 , 100167, 2020.
12) 国土交通省：日本版 MaaS の推進, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/japanmaas/promotion/（閲覧日：2022 年 9 月 25 日）.

(2022. 9. 30 受付)