

混雑における満足度のプライシング

大塚一路¹

西成活裕²

要旨: 本研究はファイナンス理論の枠組みを用いて「人混みに値段をつける」ことを目標としている。そこで我々は混雑における人の満足度が顧客一人あたりに与えられるパーソナルスペースと同等であると仮定してサービス価値の変化を正味現在価値(NPV) 法と呼ばれる資産価値評価理論によって評価した。また、新たな試みとしてサービスの価値(顧客の効用)が待ち時間の増加に伴って割引かれるという概念を導入し、空港の出国管理場で測定したデータに対する実証分析も行った。実証分析の結果から、今回導入した指標は待ち時間の増加やスペースの減少と連動して効用が小さくなる指標であることが確認された。

JEL 分類番号: L91, E40

キーワード: 顧客満足度、正味現在価値法、時間割引率、混雑ダイナミクス

1. Introduction

人混みは、現代の社会において我々にストレスを及ぼす大きな要因の一つである。近年、混雑発生メカニズムは物理学的な観点からも徐々に解明されつつあるが混雑そのものをうまくコントロール・評価する手法を我々はまだ持ち合わせていない。そこで、我々は金融工学における正味現在価値法(NPV法; Net Present value Method)の考え方を応用して混雑具合を定量的に評価する手法/指標を本報告書で提案したい。金融工学では、有価証券の売買に関する約束事や投資タイミングのように形のないものに値段をつける術がデリバティブ理論として確立されており(Hull, 2005)、この手法は近年、実物資産やプロジェクトの価値評価に対しても適用され、リアルオプション理論として発展を遂げている(Dixit, 1994)。この理論の長所は、将来の混雑状況を考慮した上で、その価値を算出できる点にある。しかし、評価量の選択や理論構築の際に現れる割引率の解釈や実際の混雑データへの適用方法など幾つかの問題点も残っていた。そこで、これまでの理論を実際のインフラや顧客満足度(CS; Consumer Satisfaction)に適用することを目指し、人が許容できる待ち時間を制限時間と解釈して混雑価値の定量化を行った。具体的には、ある混雑スペースにおける流入・流出の時間変化をロジスティック方程式として表現し、その現在価値の定量的な評価からインフラの価値を決定する。本報告書の構成は、次節で混雑のモデル化および評価式の導出を行い、3節で割引率の推定、4節でインフラ評価の実証分析、5節で結論を述べる。

¹東京大学先端科学技術センター、内閣府 経済社会総合研究所

Email: tukacyf@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

²東京大学先端科学技術センター、JST さきがけ

Email: tknishi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

2. 混雑の NPV の算出

本節では、サービス提供時に待ち時間を要する CS の定義を行う。待ち時間伴う CS は提供されるサービス環境に依存する傾向にあるので (Pruyn and Smidts, 1998)、本研究では顧客の感じる効用は、人によって占有されていないリースペース c_1 と同義であるとして

$$\begin{aligned} c_1(t) &= N_{\max} - \left(X_{\text{in}}(t) - X_{\text{out}}(t_0) \right) + \mu(t - t_0) \\ &= N_{\max} - N_{t=t_0} + X_{\text{in}}(t_0) - X_{\text{in}}(t) + \mu(t - t_0), \end{aligned} \quad (1)$$

である。これは Fruin (1971) の研究でも採用されている顧客に割り当て可能なパーソナルスペースが CS と等価であるという考え方を採用した定義である。ここに t_0 はサービスを受ける顧客が待ちを開始する時刻、 N_{\max} は評価するサービス環境の許容人数、 $N_{t=t_0}$ は $t=t_0$ におけるサービス環境内の滞在人数、 $X_{\text{in}}(t)$ 、 $X_{\text{out}}(t)$ はスペースへの累積流入/流出人数、 μ は待ち行列理論における平均サービス率なので $\mu(t-t_0)$ は顧客が時刻 t まで待っている間に何人がスペースから退出したかを示している (図 1 参照)。式 (1) では、実証分析の都合上 c_1 の単位は面積でなく人数としている。

サービスを受けるまでに提供されていたスペースの時間平均を顧客の受けたサービスの CS と仮定すると $t=t_0$ にサービス環境に到着して待ち時間 T の後にサービスを提供された顧客の CS はリースペースを積分した以下の式によって見積もることが出来る

$$\overline{\text{CS}}(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} c_1(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{[I_{t=t_0} - X_{\text{in}}(t) + \frac{N_{t=t_0}(t-t_0)}{T}]}{T} dt, \quad (2)$$

と表される。ここに $\mu = N_{t=t_0}/T$ 、 $I_{t=t_0} = N_{\max} - N_{t=t_0} + X_{\text{in}}(t_0)$ とした。上記積分を実行するにあたり、累積流入人数の従うダイナミクスをロジスティック方程式であると仮定すると、従うべき方程式と解は

$$\frac{dX_{\text{in}}(t)}{dt} = aX_{\text{in}}(t) - bX_{\text{in}}^2(t), \quad X_{\text{in}}(t) = \frac{aX_0 \exp(at)}{a + bX_0[\exp(at) - 1]}, \quad (3)$$

で与えられる。ここに X_0 は観測を始めた時刻 $t=0$ においてインフラ内に滞在していた人数、 a 、 b は実データより推定されるべきパラメータである。式(3) を式(2) に代入して積分を実行すると

$$\overline{\text{CS}}(t_0, T) = I_{t=t_0} + \frac{N_{t=t_0}}{2} - \frac{a}{b} - \frac{1}{bT} \left[\log \frac{1+c \exp(-a(t_0+T))}{1+c \exp(-at_0)} \right],$$

が得られる。ここに $c = (a - bX_0) / (bX_0)$, である。次に今回の新たな試みとして、先ほど定義された人が感じる満足度は待ち時間が増加すると共に指数関数的に「割り引かれる」と仮定すると先ほどのインフラの価値は、CS の現在価値評価という意味で NPV 法を用いて

$$\begin{aligned} \overline{CS}(t_0, T, r) &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} c_1(t) \exp[-r(t - t_0)] dt \\ &= \frac{I_{t=t_0} \{1 - \exp(-rT)\}}{rT} - \frac{a \exp[rt_0 + (a - r)(t_0 + T)]}{bT} \left[\frac{{}_2F_1\left[1, 1 - \frac{r}{a}, 2 - \frac{r}{a}, -\frac{e^{a(t_0+T)}}{c}\right]}{c(a - r)} \right] \end{aligned}$$

となる。ここに ${}_2F_1[. . . .]$ は超幾何関数である。上式において我々は CS を時間経過で割り引くことによって、面積という客観的なサービス指標を顧客が感じる主観的な指標へと変換している。行動経済学的な研究では、ストレスや時間消費に対する補償はお金として定量化されることが多いが(Groot and Brink 1999; Rajagopal and Rha 2009) 、今回はサービス環境の「ゆたたりさ」を表すスペースでストレスを補うモデルとなっている。

NPV は正の値の時のみ価値があるので

$$\overline{CS}' = \text{Max}[\overline{CS}, 0].$$

を待ち時間を考慮した CS であるとする。以下、簡単のため $\overline{CS}' = \overline{CS}$ と表記する。

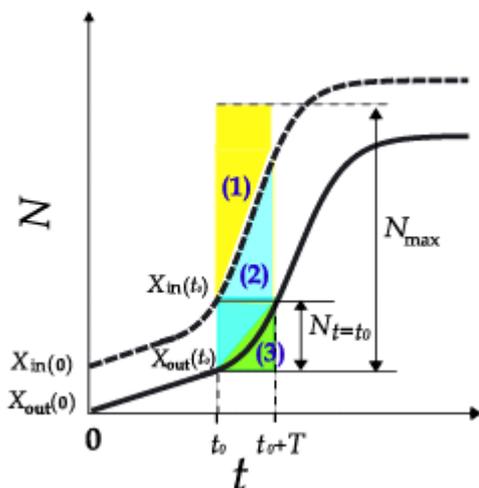


図1 パラメータの概念図(縦軸: 人数、横軸: 時間)
(1) フリースペース、(2) 滞在人数、(3) 退出者数

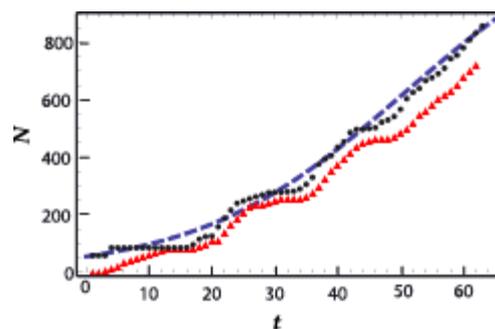


図2 累積流入人数(黒点) と累積流出人数(赤点) の観測値

3. 割引率の推定

本節では、待ち時間の経過によって生じる効用(満足度) の減少を、前節までに導入した割

引率 r によって表現し、アンケート調査によって、これらの値の推定を行った。一般に、信頼性工学の分野では、系に何かしらの問題(イベント)が発生する平均時間間隔 τ の逆数(故障率)はパラメータ $r = 1/\tau$ の指数分布に従うと仮定して、システムの信頼性評価を行っている。ここで、 τ は平均故障間隔(Mean time to failure; MTTF) と呼ばれる量であるが、本稿では τ を顧客がこれ以上我慢出来ない待ち時間として、平均許容時間(Mean time to patience; MTTP) と呼ぶことにする。割引率の推定では、「あなたは以下の混雑を何分まで待つことが出来ますか?」というアンケートを 8 つのケースに対して行った。各質問の有効回答数は 40 人である。この時、信頼水準 $100 \times (1 - \alpha)\%$ の r 、 τ の両側信頼区間は

$$(\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_U) = \left(\frac{2T_1}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2(k+1))}, \frac{2T_1}{\chi^2(1 - \frac{\alpha}{2}, 2k)} \right),$$

となる (Epstein, 1953)。ここに $\chi^2(\cdot, \cdot)$ は χ^2 値、 k は回答者数、 T_1 は回答された許容時間の全回答者に関する総和、添字 U, L は上限と下限を表している。表 1 からイライラしやすい「待ち」ほど割引率が大きい(効用の減少が早い)ことが見て取れる。今回の推定では、最も割引率が大きいものは、駅の券売機待ち($r = 0.24$ 、 $\tau = 4.06$ [min.]) であり、最も割引率が小さいものは、イベント会場の行列($r = 0.027$ 、 $\tau = 36.03$ [min.]) であった。これは、楽しみにしていることや(電車の緊急停車など)仕方がないことに対しては、かなり寛容な値が得られ、逆に ATM や券売機など事務作業や仕事に近いものには厳しい値が得られる事を示している。本理論では、MTTP とその信頼区間は、来客者の満足度が減少する危険な時間帯であると言えるので、いかにサービススペースがゆとりのあるものであったとしても、MTTP を超えれば、そのサービスの提供する価値は著しく減少することになってしまう。

表 1: MTTP と 割引率の推定値および 95% 信頼区間 (表頭の数字は 1. 銀行 ATM
2. 空港の入国審査、3. 駅の券売機、4. イベント会場の行列、5. 電車の緊急停車
6. イベント会場のトイレ、7. 人気飲食店の行列待ちに対応)

Waiting Situation	1	2	3	4	5	6	7
MTTP	9.25	32.19	4.06	36.03	24.42	11.67	20.00
lower values τ	7.18	22.10	3.14	27.95	18.94	9.05	15.51
upper values τ	12.07	37.33	5.29	47.00	31.85	15.22	26.09
discount rate	0.108	0.031	0.24	0.027	0.041	0.086	0.050
lower values r	0.082	0.026	0.18	0.021	0.031	0.065	0.038
upper values r	0.139	0.045	0.31	0.035	0.052	0.111	0.064

4. サービスレベルの実証分析

本節では、導出した CS の実証分析の一例を示す。図 2 は、あるサービススペースへの累積流出および流入人数の時間変化を示している。一般に図中における、累積流入量と累積流出量の差は現在の時刻における滞在人数 $N_{t=0}$ 、二つの直線の水平方向の時間差が待ち時間 T と解釈出来る。累積流入人数は、ロジスティック方程式に従うと仮定しているので観測データより、そのパラメータを仮定すると $(a, b, X_0) = (6.09 \times 10^{-2}, 4.90 \times 10^{-5}, 54.8)$ となる。

我々は、解析データを収集するため 2008 年 3 月 8 日に成田空港の入国審査場のデータ(第一ターミナル南ウイングの入国審査場における旅客の流動/滞留状況)の観測を行った。観測した時刻は、空港業務が多忙となる 13 時 ~ 14 時の時間帯である。今回、評価の対象となるサービススペースは入国審査場のカウンター前にある、旅客が行列を作って入国審査を待つためのスペースとする。また、飛行機の到着後、旅客が到着ゲートから移動して、入国審査場に入ってきた時点を流入時刻、行列待ちの後に入国手続きが済ませ、カウンターを通過した時刻を流出時刻として、これらの通過人数を 1 分ごとに 1 時間記録した。図 3 に待ち時間と施設内における顧客の滞在人数の時系列変化を示す。

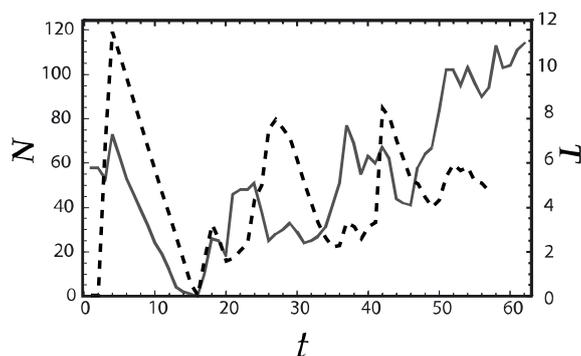


図 3 入国審査場にて観測された滞在人数 N (実線) と待ち時間 T (点線) の時系列

さらに、待ち時間の状況から、 $r=0.24$ (MTTP=4 分) を採用し、 $r=0$ に対する CS の CS 値を図 4 で比較した。すると割引率を導入しない場合は、待ち時間が長くても満足度は比較的大きな正の値をとるが、割引率を導入すると待ち時間が増加と共に満足度は減少するという傾向が確認出来た。これは、これまでに主に採用されていた人の回転率とスペースといった、顧客の気持ちの変化を無視した評価指標とは大きく異なる点であり、我々の直観と一致する結果でもあると言える。

図 4 (a) と (b) は割引率導入の有無による CS 値の違いを示している。図 3 を参照しながら図 4 の 2 つの図を比較してみると、割引率を導入しない図 4(a) においては、待ち時間が長く、滞在人数多い 30 分以降の時間帯であっても、高い満足度が与えられているが、図 3(b) の割引率を導入したケースでは、同様の時間帯における CS 値は小さくなっており、満足度を低下させるファクターがきちんと反映された「サービスの質」の指標となっていることが確認できる。つまり、割引率導入の有無は、心理的要因の反映において非常に重要なファクターであることがこの図から窺い知ることが出来る。

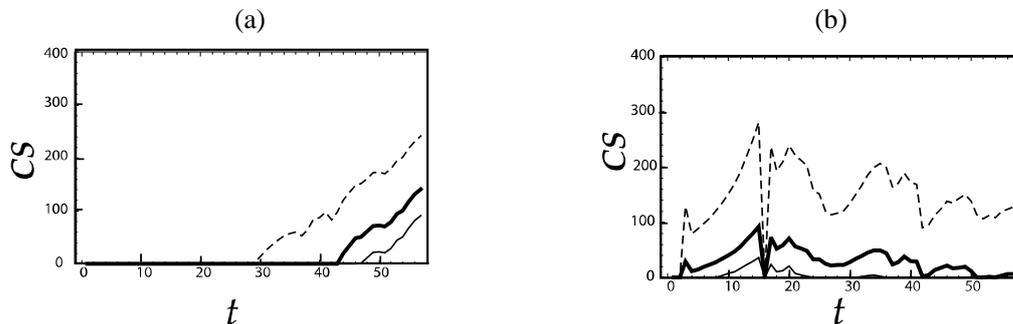


図4 顧客満足度 CS の比較

- (a) 割引なし $r=0$ (N_{max} は細線、太線、点線の順に 450, 500, 600 人)、
 (b) 割引率 $r=0.24$ (N_{max} は(a) と同じ順に 40, 100, 300 人)

5 結論

本研究では、金融工学と行動経済学の理論を用いて、混雑の価値を定量的に評価する手法の導出および実証分析を行った。その結果、インフラにおける顧客の CS を NPV 法より導出することに成功し、実データを用いた実証分析から、我々の直観に沿う形で従来の評価理論を改善することに成功した。この理論の新規性は人の気持ちを数理モデルに組み込んだ点である。また、実証分析の簡便性から本指標はあらゆるインフラに容易に導入出来るので、本研究が実社会におけるインフラに「無意識に感じる快適さ」を組み込む、ささやかなきっかけとなれば幸いである。

参考文献

- Hull, J., 2005, Options, Futures and Other Derivative. 6th ed. Princentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Fruin, J. J., 1971, Designing for pedestrians: a level-of-service concept. Highway Res. Rec., 355, 1-15
- Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, 1994, Investment under uncertainty. Princeton Univ. Press
- Pruyn, Ad. and Ale Smidts, 1998, Effects of waiting on the satisfaction with the service: Beyond objective time measures. Intern. J. Of Research in Marketing, 15, 321-334
- Groot, W. and H. M. van den Brink, 1999, The price of stress, J. Economic Psychology 20, 83-103
- Rajagopal, P. and J-Y Rha, 2009, The mental accounting of time. J. Economic Psychology 30, 772-781
- Epstein, B. and M. Sobel, 1953, Life testing. Journal of the American Statistical Association, 48, 486--502