

Kanagawa University Economic Society
Discussion Paper No. 2022-02

エージェントベースシミュレーションによる決
済方法とレジ選択方法を考慮したレジ待ち時
間の推定

2022/12/19

小川 浩

1. はじめに

キャッシュレス決済、特に非接触 IC カードタイプの決済時間が現金決済と比較して短いことは [(株) ジェーシービー, 2019] [関田, 2019]などに示されているようによく知られている。この決済時間の短さから、[(社) キャッシュレス推進協議会, 2020]や [伊藤, 畔柳, 櫛, 滝山, 神垣, 2016]では取引の迅速化や効率化が導かれるとしている。しかしながら、電子マネーの利用意向に関する消費者の意識調査では、「お店での支払が迅速」という変数は電子マネーの利用促進には明確な効果がないという結果が得られており、決済時間の短さが利用者にとってのメリットとして実感はされていない [渡部 岩崎, 2009] [渡部 岩崎, 2011] [渡部, 岩崎, 梅原, 2014]。

この矛盾について、本論文では消費者からみた取引時間は消費者本人の取引にかかる時間だけではなくレジ処理を待つ時間も含むと考えることによって説明することを試みる。そのためには、決済方法と到着した顧客のレジへの割り付け方法によってレジ待ち時間がどのように変わるかについての分析を行う必要がある。

本論文では、[関田, 2019]での実測データを用いたエージェントベースシミュレーションを行うことで、現金決済とキャッシュレス決済のレジ待ち時間の分布を求め、以下のような結果を得た。

1. 現金決済時間の分布は複雑な混合分布となっており、先行研究で用いられている指数分布や対数正規分布では適切に近似できない。実測データの分布から逆関数法で生成した場合より、対数正規分布ではレジ待ち時間が長くなる傾向があった。
2. 現金決済とキャッシュレス決済の混在している共用レジでは、キャッシュレス決済増で決済時間が短くなったことによる待ち時間の短縮は、現金決済の人にも同様に生じる。そのため、共用レジで使っている限りキャッシュレス決済を選択してもレジ待ち時間は短くならない。
3. キャッシュレス決済増で得られるレジ処理時間の増加は、レジ待ち時間の短縮だけではなくレジ数の減少に使う事もできる。
4. キャッシュレス決済専用レジを設定することで、キャッシュレス決済の人だけレジ待ち時間を短くすることが可能となる。

2. データ

2.1. データの概要¹

本論文で使用している [関田, 2019] のデータ収集期間は 2019 年 11 月 8 日～2019 年 11 月 29 日、収集時間は大学生協のレジが昼食の買い物で混雑する 12:40～13:00 である。収集された有効データ件数は 443 件。データとして記録している内容はスキャン開始時刻、スキャン終了時刻 (= 決済開始時刻)、決済終了時刻、さらに決済方法 (現金、iD、PayPay、交通系 IC カード、クレジットカード) となっている。先行研究ではレジ処理時間に店員による袋詰め時間が含まれていることが多いが、ここでのデータ計測対象としたレジでは店員による袋詰めは行われていない。

データの概要を表 1 に示す。クレジットカード以外はスキャン時間が約 5 秒とほぼ揃っている²。しかしながら、決済時間は決済方法によって大きく異なっていることが分かる。交通系 IC カードや iD は平均も標準偏差も小さいが、現金は平均も標準偏差も大きいことが特徴的である³。

表 1 計測データの概要

決済方法	有効件数	スキャン時間 (秒)		決済時間 (秒)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
現金	304	5.60	4.06	15.18	7.09
クレジットカード	5	10.42	6.12	12.58	10.62
交通系 IC カード	40	4.41	2.05	5.76	4.48
iD	52	5.05	2.81	7.59	4.55
PayPay	42	5.01	4.00	9.66	5.27

(資料) [関田, 2019] を再集計

同様に決済時間を計測している [(株) ジェーシービー, 2019] では決済時間の短い方から非接触型 (8 秒)、クレジットカード (12 秒)、QR コード (17 秒)、現金 (28 秒) (括弧内

¹ 本論文での分析に用いた cleansing 済みデータは、作成者の許可を得て、CC BY 4.0 ライセンス下で公開している (<https://github.com/santa-o/casher>)

² クレジットカードについては購入点数が多く、購入金額も大きいため選択された可能性があるが、購入点数を計測していないため正確なことは不明である。

³ クレジットカードについてはデータが 5 件しかないため、評価が難しい。

は平均時間)となって非接触型が速く現金が遅いという傾向は一致している。この調査では標準偏差は公表されていないが、最大時間－最小時間で比較すると、非接触型は 4 秒であるのに対し、現金は 25 秒となっている。非接触型では決済時間のバラ付きが小さいが、現金ではバラ付きが大きいことは両調査で共通していることが分かる。

2.2. 計測方法

データ計測は計測者がレジの横に立って目視・手動で行った。スキャン開始時刻は、1 点目の商品を店員が手に取った時刻、スキャン終了時刻は店員から口頭で総額が伝えられた時刻、決済終了時刻は利用者がレシートを受け取った時刻である。決済方法の区別は計測者が決済方法を見て判断している。

これらのデータは GAS (Google Apps Script) を用いた計測用 Web アプリでスマートフォン内部時刻 (1/1000 秒単位) と、Google にデータが送られた時点のサーバー側時刻を記録している (図 1)。図中の SCAN_START, SCAN_FINISH, PAYMENT_FINISH が計測に使ったスマートフォン側の時刻、DATETIME が Google のサーバー側時刻である。計測者が操作ミスに気付いた場合は、Web アプリ側でキャンセル操作を行うと VALID 欄が VOID になる。

ID	SCAN_START	SCAN_FINISH	PAYMENT_METHOD	PAYMENT_FINISH	DATETIME	VALID
1	1573184062472	1573184069004	Cash	1573184078150	2019/11/8 12:34	VOID
2	1573184830253	1573184843531	Cash	1573184844870	2019/11/8 12:47	VOID
3	1573184849325	1573184856648	Cash	1573184866615	2019/11/8 12:47	VOID
4	1573184855960	1573184860948	Cash	1573184875620	2019/11/8 12:47	VOID
5	1573184925662	1573184934381	ID	1573184936996	2019/11/8 12:48	
6	1573184965299	1573184970679	Cash	1573184988167	2019/11/8 12:49	
7	1573184978287	1573184987031	Cash	1573185021801	2019/11/8 12:50	
8	1573185022700	1573185025471	Cash	1573185049492	2019/11/8 12:50	

図 1 Google Sheets に収集したデータの例

3. モデル

3.1. 顧客

本モデルで、顧客 C_m ($1 \leq m \leq M$) は以下の 5 つの属性を持ったエージェントとして乱数的に生成される。実際のレジ処理ではスキャン時間と決済時間はレジで決定されるが、本モデルではレジ店員は均質であると仮定するため、購入点数と決済方法が決まればどのレジに並んでも同じ確率分布に従って決まる。

1. 会計に来る時刻 (arrival) (A_m)

2. 購入点数 (Items) (I_m)
3. 決済方法 (Payment Method) (PM_m)
4. スキャン時間 ($SCAN_m$)
5. 決済時間 (PAY_m)

3.1.1. 会計に来る時刻 (A_m)

顧客の到着タイミングについての先行研究を見ると、実際のデータから推定しているものとしては [Williams, Karaki, Lammers, 2002] が挙げられる。この論文では実際の店舗の状況を録画した画像から計測した結果を用いて到着時間の間隔が指数分布になるとしている。 [Wang Zhou, 2018] でも同様に録画画像から計測を行っており、シミュレーションではポワソン分布に従い到着が発生すると仮定している⁴。その他の先行研究でも到着については指数分布 (ポワソン分布) を仮定しているものが多い⁵。

本論文で利用した計測データ ([関田, 2019]) では到着タイミングについて計測していないため、先行研究に倣い、買い物が終わって会計に来る到着間隔は指数分布に従い発生すると仮定し、シミュレーション内では 1 秒ごとの到着人数をポワソン分布に従うように生成し、 A_m として設定している。

ここでのシミュレーションで明らかにしたいことは、決済方法による待ち時間の変化である。そのため、適度にレジが混雑してレジ待ちがある程度発生するような到着間隔のパラメータ μ を決定する必要がある。これについては後述のように待ちキューの長さに制限を付けた上で、シミュレーションで決定している。

3.1.2. 購入点数 (I_m)

IC タグなどで購入品の情報を一括して読み込めるケースでなければ、購入点数は商品スキャン時間に影響があると考えられる。先行研究の多くは購入点数のバラつきまで含め、スキャン時間と決済時間や袋詰め時間を合計した処理時間をさまざまな分布で推計しているため、明示的に購入点数を生成していない。

⁴ [Wang Zhou, 2018] ではデータから到着間隔についての推計を明示していない。

⁵ たとえば [Miwa Takakuwa, 2008], [Bramson, Lu, Prabhakar, 2010], [Aghajani, Li, Ramanan, 2015], [Gaku Takakuwa, 2015], [Priyangika Cooray, 2016], [Cheong Chia, 2019], [Antczak, Weron, Zabawa, 2020], [Liu Chen, 2022], [Mitzenmacher Dell'Amico, 2022] など。

シミュレーションで購入点数を明示的に生成している先行研究では、分析に使っている売上データ (POS データその他) に含まれる購入点数のリサンプリング [Miwa Takakuwa, 2008] [Cheong Chia, 2019] [Antczak, Weron, Zabawa, 2020] や幾何分布 [Alvarado Pulido, 2008]、対数正規分布 [Sorensen, ほか, 2017] などの方法が用いられている。

本論文では分析の元になったデータが購入点数を含んでいないことと、日本のスーパーマーケットでのレジをシミュレーション対象としているため、[(社) 全国スーパーマーケット協会, 2021] の集計データをもとに購入点数を生成している。日本でのスーパーマーケット平均売場面積 (1336.4 平方メートル) が入る売場面積階級 (1200~1600 平方メートル) での土日祝日の 1 人あたり購入点数平均 11.5 点と中央値 11.6 点である。先行研究で用いられているような右裾が長い分布を仮定すると平均が中央値より大きくなるはずであるが、日本のデータでは平均の方が若干小さいもののほぼ同じとなっている⁶。そのため、左右対称な分布として正規分布 ($N(11.5, \sqrt{11.5}^2)$) を仮定して生成した正規乱数を四捨五入して購入点数とした⁷。

3.1.3. 決済方法 (PM_m)

本論文のシミュレーションでは決済方法として現金決済とキャッシュレス決済の 2 種類を想定している。使用される決済方法の割合を変えたときにレジ待ち時間がどのように変化するかが興味の対象であるため、この 2 つの決済方法はシミュレーションに外生的に与えた現金決済の割合 (r) と、キャッシュレス決済の割合 ($1-r$) で乱数的に割り付けている。

3.1.4. スキャン時間 ($SCAN_m$)

上述のようにレジでの処理時間を細かく分解して個別に生成している先行研究は少ない。[Miwa Takakuwa, 2008] [Gaku Takakuwa, 2015] では観察されたスキャン時間を購入点数で線形回帰し、そこから得られたパラメータを用いて三角分布に従いスキャン時間を生成

⁶ 売場面積や平日・土日祝日の違いによって平均や中央値は若干異なるが、平均と中央値に大きな差がないことは一貫している ([(社) 全国スーパーマーケット協会, 2021] 図表 8-34)。

⁷ 生成した購入点数が 0 以下となった場合は再生成しているため、正確には左が断ち切られた正規分布となる。

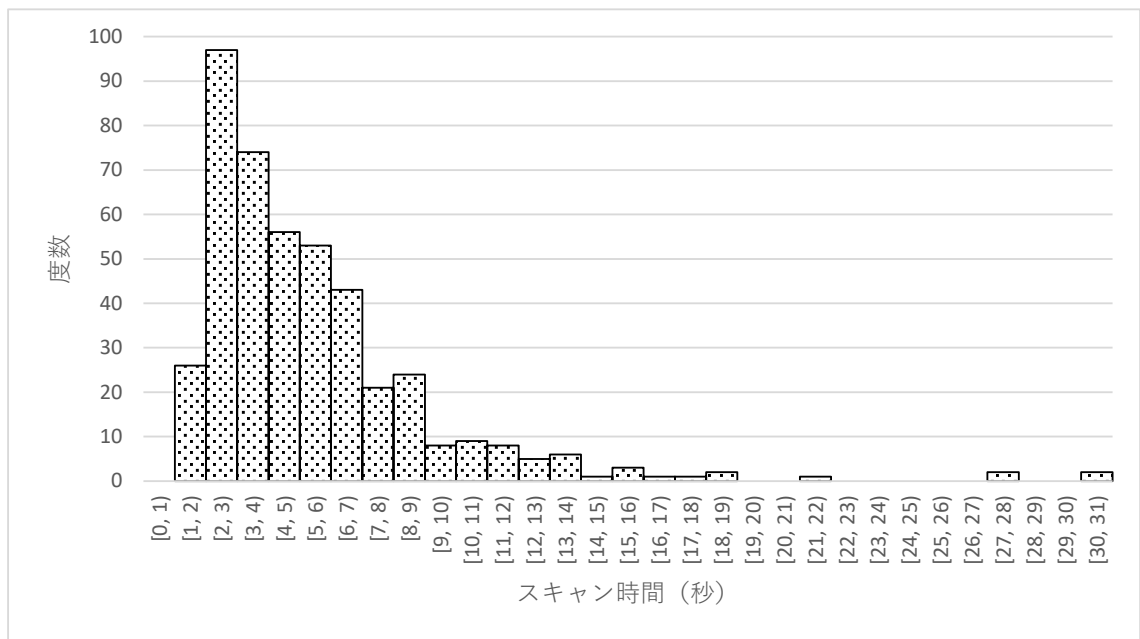
している。本研究ではデータソース（大学生協のレジ）と分析対象（スーパーマーケットのレジ）で購入点数などが大幅に異なるため、これらのアプローチは採用できない。

レジでのスキャン動作を考えると、買い物籠の中から商品を取り出しスキャンするという操作を購入点数繰り返すことになる。つまり、商品 1 点あたりのスキャン時間 s が何らかの分布 S に従うと仮定すると、購入点数 I 個での合計スキャン時間は、

$$SCAN = \sum_{i=1}^I s_i \quad (1)$$

と表せるはずである。この考え方でスキャン時間を生成している例としては [Cheong Chia, 2019] が挙げられ、データのリサンプリングで生成した購入点数と 1 点あたりのスキャン時間から総スキャン時間を生成している。

[関田, 2019]でのスキャン時間分布は図 2 のようになっており、式 (1) から予想されるように単純な三角分布や指数分布ではなく、複数のピークを持った分布となっていることがわかる。これらのピークは購入点数の違いに対応するものと予想されるが、[関田, 2019]のデータには購入点数が含まれていないため、購入点数不明の総スキャン時間の分布から、商品 1 点あたりのスキャン時間の分布を推定する必要がある。



(資料) [関田, 2019]のデータより作成

図 2 レジでのスキャン時間分布

スキャンを担当する店員のスキルレベルが一定であれば、商品 1 点あたりのスキャン時間は平均周りに左右対称に分布すると期待されるため、ここでは S が正規分布に従うと仮定

し、混合正規分布としてフィッティングを行った⁸。

[Miwa Takakuwa, 2008]で商品点数からスキャン時間の線形回帰を行った際の係数が2.43であったことから、平均の初期値としては2.5秒、標準偏差の初期値は1秒で計算し、表2のような結果を得た。

表2 スキャン時間の混合正規分布分解

	分布1	分布2	分布3	分布4
重み	0.35	0.48	0.15	0.01
平均 (秒)	2.73	5.38	10.25	28.76
標準偏差 (秒)	0.74	1.75	3.86	1.53

(資料) [関田, 2019]のデータより推計

ウェイトの大きい分布1と分布2の平均が2.73秒と5.38秒とほぼ2倍になっていることと、分布1の平均2.73秒が[Miwa Takakuwa, 2008]での1点あたり2.43秒という回帰推定値と比較的近い値になっていることから、ここでは分布1と分布2がそれぞれ購入数1と2に相当すると考える⁹。この結果から、1個あたりのスキャン時間 s は $N(2.73, 0.74^2)$ に従うものとして扱い、購入点数 I_m から式(1)を用いてスキャン時間 $SCAN_m$ を生成する。

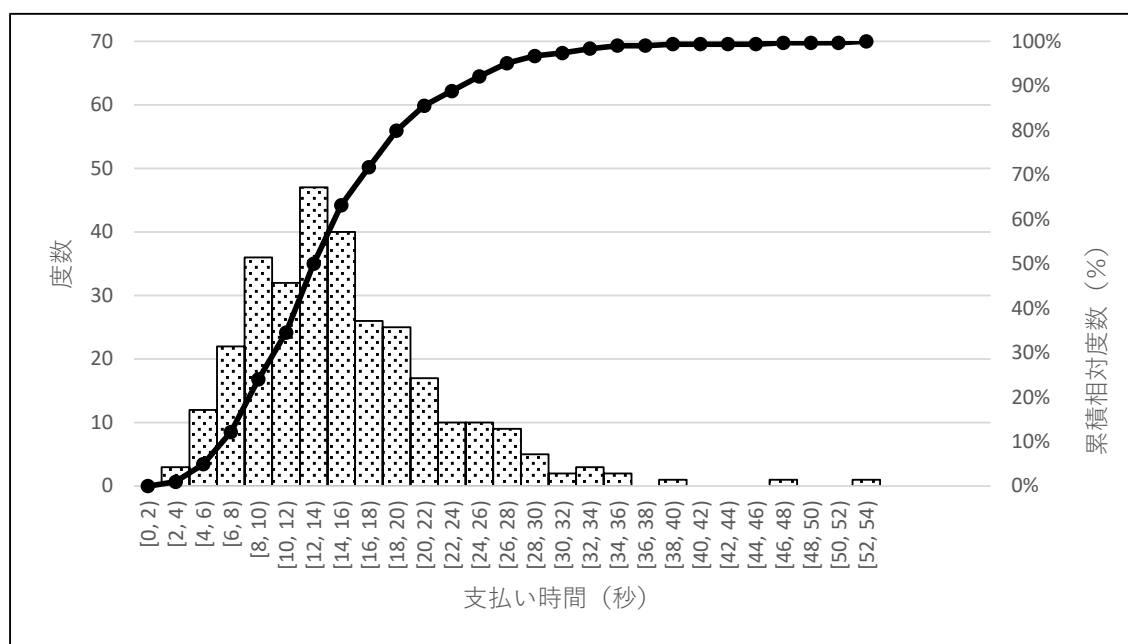
3.1.5. 決済時間 (PAY_m)

決済時間については、表1に示したように決済方法によって大幅に異なることが予想される。[Cheong Chia, 2019]ではデータのリサンプリングによって決済時間を生成しているが、決済方法については区別していない。[Alvarado Pulido, 2008]では現金、デビットカード、クレジットカード、その他を区別して扱い、現金は指数分布、その他の決済方法は三角分布を仮定して推定したパラメータを用いて決済時間を生成している。

⁸ Rのmixtoolsパッケージ(1.2.0)に含まれるnormalmixEM関数を用いた。

⁹ [関田, 2019]のデータは大学生協での昼食時購入データであるため購入点数は比較的少ない。弁当のみ、あるいは弁当と飲み物という組み合わせが多い。混合分布の推定は初期値平均2~3、混合している正規分布の数は3と4で計算してみたが、分布1と分布2が購入数1と2にそれぞれ対応している(分布2の平均が分布1の平均のほぼ倍)点は変わらなかった。

[関田, 2019]での現金決済時間の分布は図 3 のようになっている。現金の場合、おつりが切りのいい金額になるよう小銭を探す人と、おつりを気にせず紙幣を出す人など行動パターンが多様になる事が予想されるため、本来は何らかの混合分布になることが予想される。しかしながら、スキャン時間と同様に混合正規分布で分解しようとしたところ、初期値の与え方で結果が不安定であることが明らかとなったため採用しなかった。



(資料) [関田, 2019]のデータより作成

図 3 現金決済時間の分布

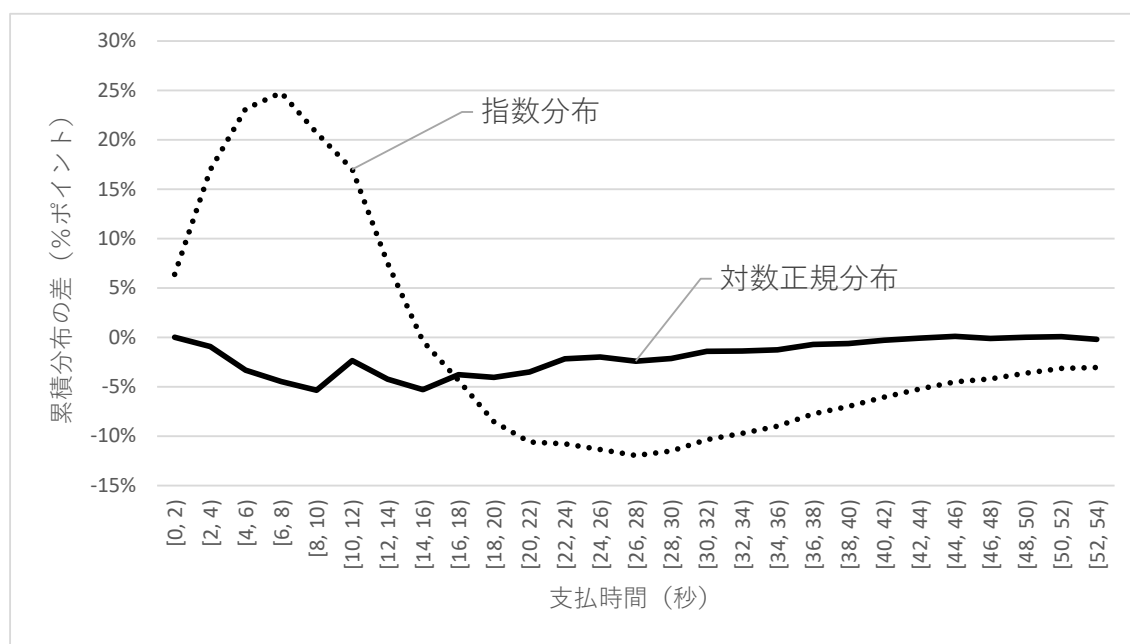
次に単純な分布について検討してみる。[Alvarado Pulido, 2008]で現金決済での決済時間分布として仮定されていた指数分布であるが、図 3 の分布は指数分布に従っているようには見えない。[Wang Zhou, 2018]で処理時間全体の分布として選ばれている対数正規分布も含めて、現金決済の特性値(表 1)を用いて生成した分布関数の値から実際の分布から得られた累積相対度数分布の値を減じた差を図 4 に示す。

対数正規分布と指数分布では、対数正規分布の方が実際の分布との差が小さくなっており、パラメトリックな分布で近似するのであれば、対数正規分布の方が適切である。ただし、対数正規分布では支払時間が短い部分でウェイトが小さく、右裾が長くなっている。そのため、待ち時間のシミュレーションに用いた場合は待ち時間が長めに出ることが予想される。

以下では、逆関数法 [Knuth, 1981]を用いてデータの分布から生成する方法と、対数正規分布を仮定して生成する方法の 2 つを用いてシミュレーション用の現金決済時間を生成す

ることにした。

現金以外の決済方法については、(1) 平均時間が短い、(2) 標準偏差が小さい、の2つの理由から交通系 IC カードをキャッシュレス決済の代表として扱い、現金決済と同様に逆関数法と対数正規分布で決済時間を生成している。



(資料) [関田, 2019]のデータより筆者作成

図 4 パラメトリックな分布と実際の分布の差

3.2. 個別レジの構造

本論文で考えているスーパーマーケットのレジは、図 5 のようなレジが N 列並んでいる形式である。

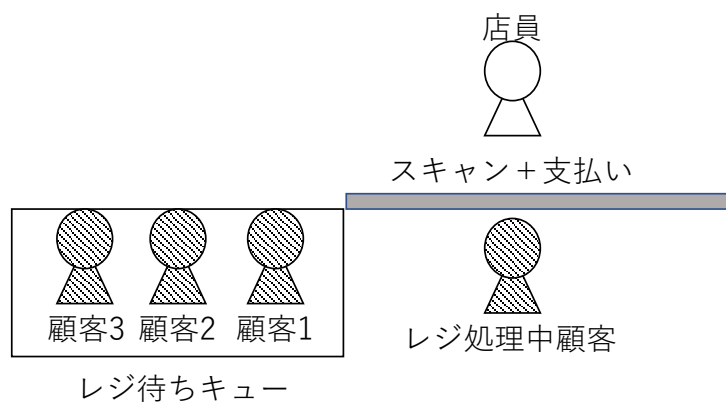


図 5 シミュレーションで前提としている個別レジの構造

図 5 に示すように、個別のレジでは 1 人の店員が商品のスキャンと会計をすべて担当する古典的な形態を想定している。各レジは、 $1 \leq i \leq N$ となる番号 i で区別され、以下では i 番目のレジを R_i と書く。

3.2.1. レジ待ちキュー

R_i は図 5 に示すようにレジでの処理を待つ顧客を保持する 1 本のレジ待ちキュー (Q_i) を持つ。一旦 Q_i に入った顧客は、レジでの処理が始まるまで同一キューに留まると仮定し、途中でのキュー変更は考慮しない。

3.2.2. レジ処理中顧客

レジでの処理時間は、商品のスキャン時間 $SCAN$ と決済時間 PAY の合計で定義する¹⁰。顧客 C_m のレジ処理は、 $T(C_m)$ に開始し、 $T(C_m) + SCAN_m$ にスキャン終了、 $T(C_m) + SCAN_m + PAY_m$ に決済終了となり、レジ処理は終わることになる。

3.2.3. レジ待ち人数

時刻 t に到着した新規顧客から見たレジ R_i の待ち人数は、レジ処理中人数 + キュー Q_i 内の人数となる。 Q_i が空で処理中の人がいなければ 0 人である。

3.2.4. レジ待ち時間

時刻 A_m に到着した新規顧客 C_m から見たレジ R_i の待ち時間 w は、レジ処理中の顧客 k の残り処理時間 $T(C_k) + SCAN_k + PAY_k - A_m$ と、 Q_i に入っている顧客の処理時間合計 $\sum_{j \in Q_i} SCAN_j + PAY_j$ を加えたものとなる。新規に到着した顧客本人の処理時間はレジ待ち時間には含まないため、 Q_i が空で処理中の人がいなければ $w = 0$ となる。

3.3. 到着した顧客のレジへの割り付け

レジに関するシミュレーションの多くは、顧客の割り付け方法による待ち時間の変化などについて分析を行っているため、割り付け方法については非常に多くのバリエーションが存在する。ランダムに抽出した d 本のキューのうち、キュー長が最短であるキューに割り付けていくロードバランスアルゴリズムはよく使われている [Bramson, Lu, Prabhakar,

¹⁰ 先行研究ではバッグ詰め時間も考慮していることが多いが、日本のスーパーマーケットではレジで店員がバッグ詰めまで行うことは少ないためスキャンと決済の 2 工程だけを考えている。

2010] [Aghajani, Li, Ramanan, 2015] [Mitzenmacher Dell'Amico, 2022]。FIFO を使わないような複雑な割り付け方法も提案されているが [Mitzenmacher Dell'Amico, 2022]、処理時間に関する情報が必要となってしまうため、実際のスーパーマーケットのように前に並んでいる人の購入点数すらよくわからない状況では使いづらい。

実際に待ち時間がある程度の精度で推定する方法として [外山 平山, 2017]ではスーパーの買い物籠にセンサーなどを追加して購入点数を推定したり、レジに並んでいる人数を計測したりした結果として 2〜3 割の誤差で待ち時間を推計できたとしているが、このようなシステムはまだ研究段階であり、広く実運用されているわけではない。

[Antczak, Weron, Zabawa, 2020]では複数の割当方法、具体的には (1) ランダム、(2) キュー内人数が最小のキュー、(3) キュー全体の購入点数が最小のキュー、(4) レジタイプごとの平均処理時間×キュー内人数が最小のキュー、(5) キュー内の人ごと購入点数から処理時間を推定した合計が最小のキューという 5 つのシナリオについてシミュレーションを行っている。その結果によると、(1) のランダムは大幅に待ち時間が長い（店舗によるが、1.6〜1.9 倍程度）ものの、(2) 〜 (5) については 2%程度の差に収まっている。

この結果から、本シミュレーションでは、[Antczak, Weron, Zabawa, 2020]で比較的良好な結果が得られている上、特に追加的なセンサーなどを必要としない、キュー内人数が最小のキューに到着した顧客を割り当てるロードバランシングアルゴリズムを採用した¹¹。

4. シミュレーション

4.1. 到着間隔

3.1 で触れたように、到着間隔 μ については適度な待ちが発生するが、待ちが長すぎて顧客が諦めて帰ってしまうような状況は避けるよう設定する必要がある。レジ選択アルゴリズムでレジ待ち人数を使っているため、ここでもレジ待ち人数を μ 決定の条件として利用する。

レジ待ち人数が何人を超えると顧客が諦めて機会損失が発生するかについて明確な基準は存在しない。ここでは [外山 平山, 2017]で紹介されている 3 組以上の買い物客が待っている場合を混雑と判断する基準を採用し、以下の 2 つの条件を満たすようにシミュレーシ

¹¹ キュー内の人数が最小のキューが複数本あった場合は、その中からランダムに割り付け先のキューを決定する。

ョンで求めた。

- 条件 1 レジ待ち人数が 3 人以下の確率が 95%以上
- 条件 2 レジ待ち人数が 6 人以下の確率が 99%以上

最短到着間隔のシミュレーションに使った決済時間は逆関数法で生成したものであり、現金割合 r は 2021 年のスーパーマーケットでの現金決済割合 65%をベースとして用いている [(社) 全国スーパーマーケット協会, 2021]。3.1.5 で述べた通り、現金以外のキャッシュレス決済はすべて交通系 IC カードとして扱っている。レジの数が増えれば処理可能な到着間隔は当然短くなるため、レジ数は 6, 9, 12, 15, 18 台について上記の 2 条件を満たす最小の到着間隔 (秒) を求めた。計算結果を表 3 に示す。

表 3 レジ待ち人数条件を満たす最短到着間隔 (レジ数別)

レジ数	6	9	12	15	18
到着間隔 (秒)	7.81	5.08	3.74	2.98	2.46
平均到着人数 (人/秒)	0.13	0.20	0.27	0.34	0.41

(資料)筆者によるシミュレーション結果

4.2. レジがすべて現金決済とキャッシュレス決済の共用レジである場合

まず、すべてのレジが現金決済とキャッシュレス決済の共用レジであり、現金決済を選択する人も、キャッシュレス決済を選択する人も開設されている全てのレジを利用できる場合についてシミュレーションを行う。

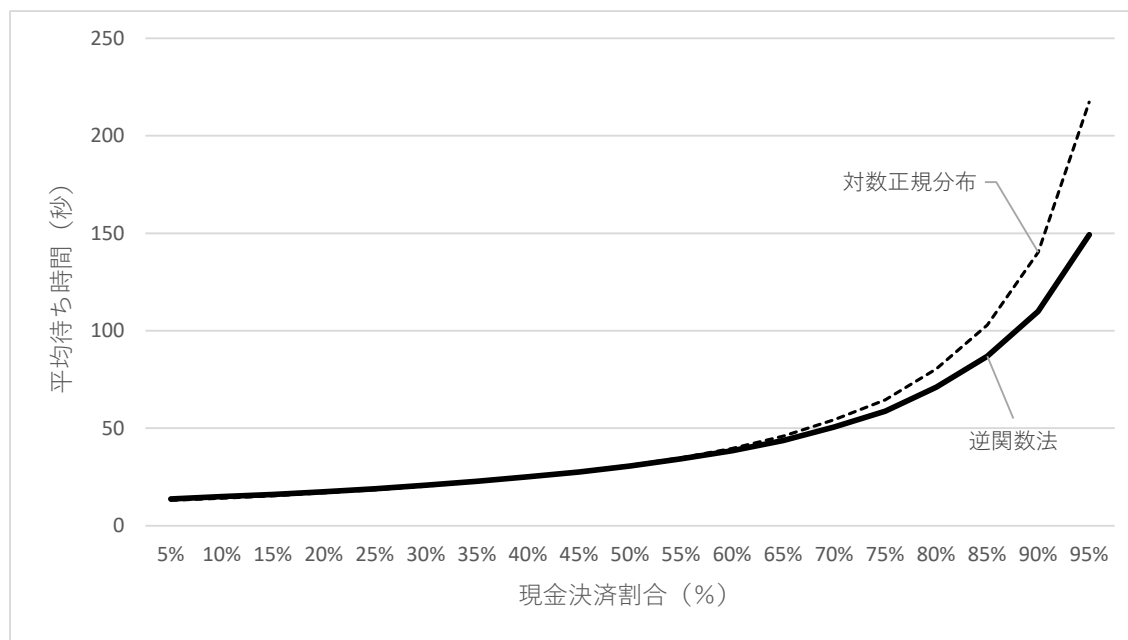
4.2.1. 決済時間生成方法による違い

決済時間を逆関数法と対数正規分布で生成した場合の待ち時間を、レジ数 6 の場合にシミュレーションした結果は図 6 である。現金決済時間の分布の違い (短い決済時間の割合が対数正規分布では少なめに生成される) から予想された対数正規分布での待ち時間増加の影響は現金決済割合が高いほど強く出ており、ほぼ予想通りの結果となっている¹²。

この結果から、現金決済のように複雑な混合分布になっている可能性の高い分布を、単純なパラメトリックな分布で近似する場合は十分な注意が必要と言える。少なくともシミュ

¹² このシミュレーションで使った到着間隔は現金決済割合が 65%の時に待ち人数条件を満たすように調整されているため、遅い現金決済の割合が 65%より高い場合は待ち人数条件を必ずしも満たしていない。

レーションによる分析を行う場合は、本論文での分析のようにパラメトリックな分布ではどのような偏差がでる可能性があるかを事前に評価しておくことが望ましい。



(資料)筆者によるシミュレーション結果

図 6 決済時間生成方法による待ち時間の違い (レジ数=6)

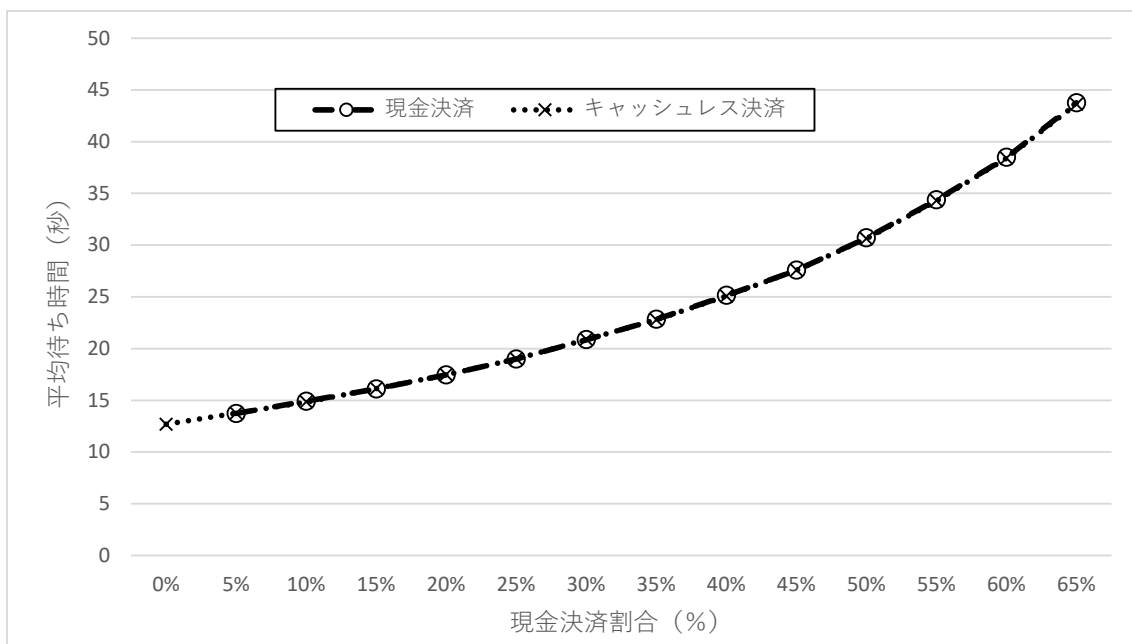
4.2.2. 決済方法によるレジ待ちの違い

顧客の単位時間あたり平均到着間隔を表 3 の値で一定にしたまま、現金決済割合を初期値の 65%から減らした場合、決済手段ごとの平均待ち時間は図 7 のように変化する。現金決済割合が 65%では 44 秒程度であるが、30%まで減ると 20 秒程度まで短くなることがシミュレーションで示された。

レジがすべて現金決済とキャッシュレス決済の共用レジであることから予想される通り、決済方法による平均待ち時間の差はほとんどない。また、レジ待ち人数の分布を見ても、共用レジでは決済方法による差はほとんどない (図 8)。

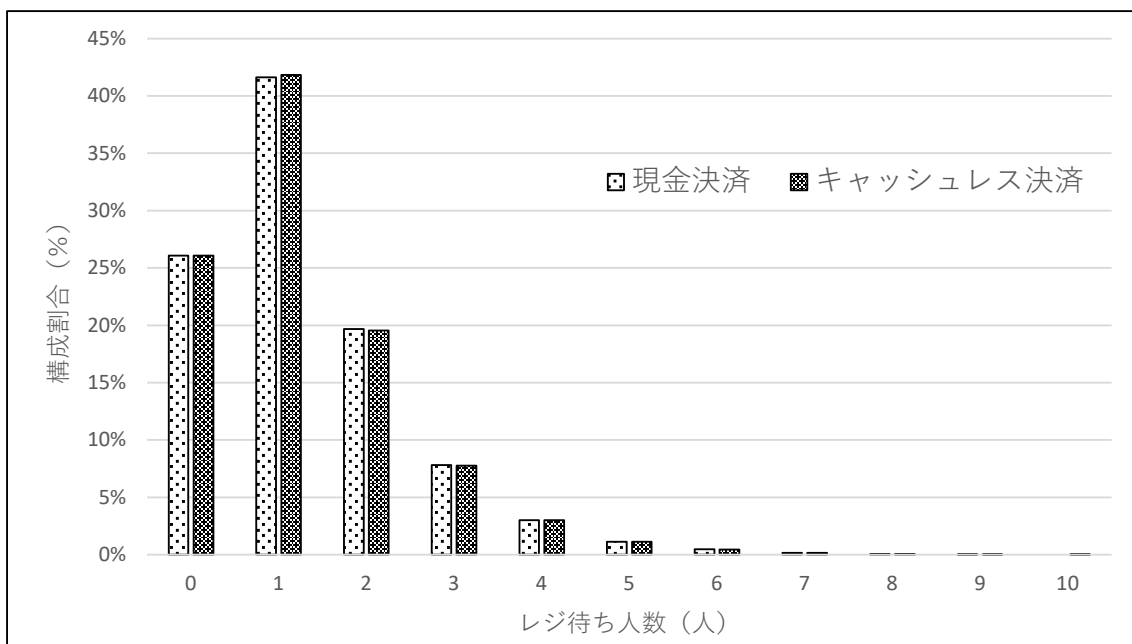
このシミュレーションから以下の 2 つの結果が得られる。

- (結果 1) 顧客の平均到着間隔が一定であれば、現金決済割合を減らすことでレジ待ち時間の平均は減少する。
- (結果 2) 現金決済・キャッシュレス決済の共用レジでは、現金決済割合が減少したことによるレジ待ち時間減少のメリットは、決済手段を変えなかった現金決済の人にも共有される。



(資料) 筆者によるシミュレーション

図 7 現金決済割合と平均待ち時間 (レジ数=6)



(資料) 筆者によるシミュレーション

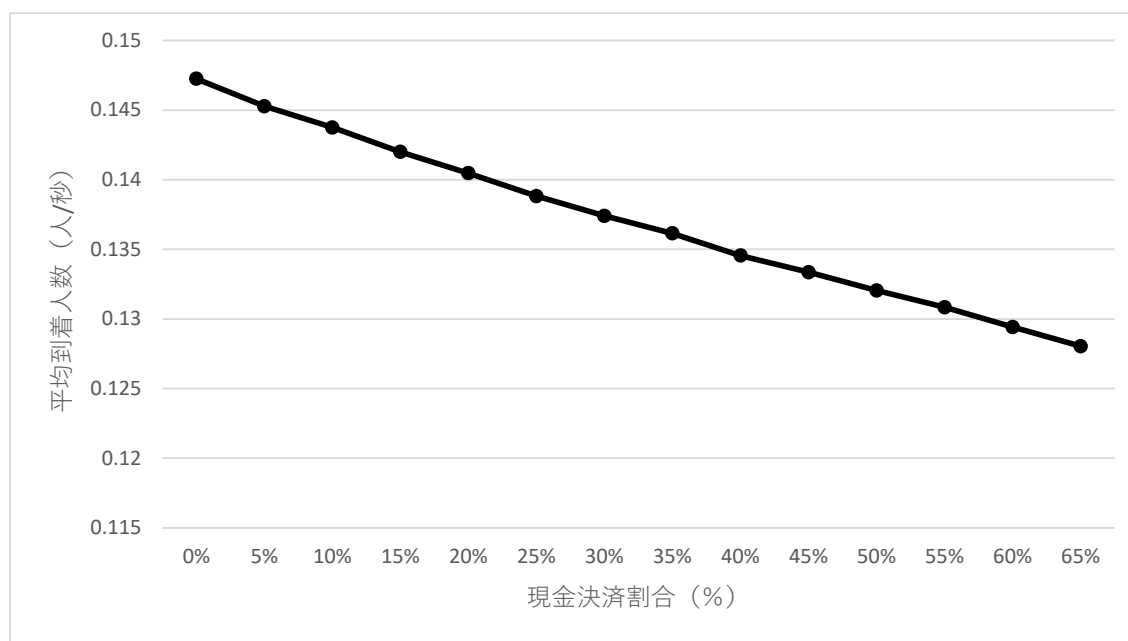
図 8 レジ待ち人数の分布 (現金決済割合=65%、レジ数=6)

4.2.3. 現金割合と平均到着人数

4.2.2 での共通レジ分析は、現金決済割合減少のメリットをすべて消費者側、すなわちレ

ジ待ち時間の減少に振り向けたものであった。しかし、キャッシュレス決済には現金決済には存在しない追加的な決済手数料などのコスト要因もあるため、店舗側のメリットもキャッシュレス決済から導けることが望ましい。

ここでは、キャッシュレス決済増加による決済時間減少で、単位時間あたりの処理可能顧客がどのように変わるかをシミュレーションで示す。



(資料)筆者によるシミュレーション

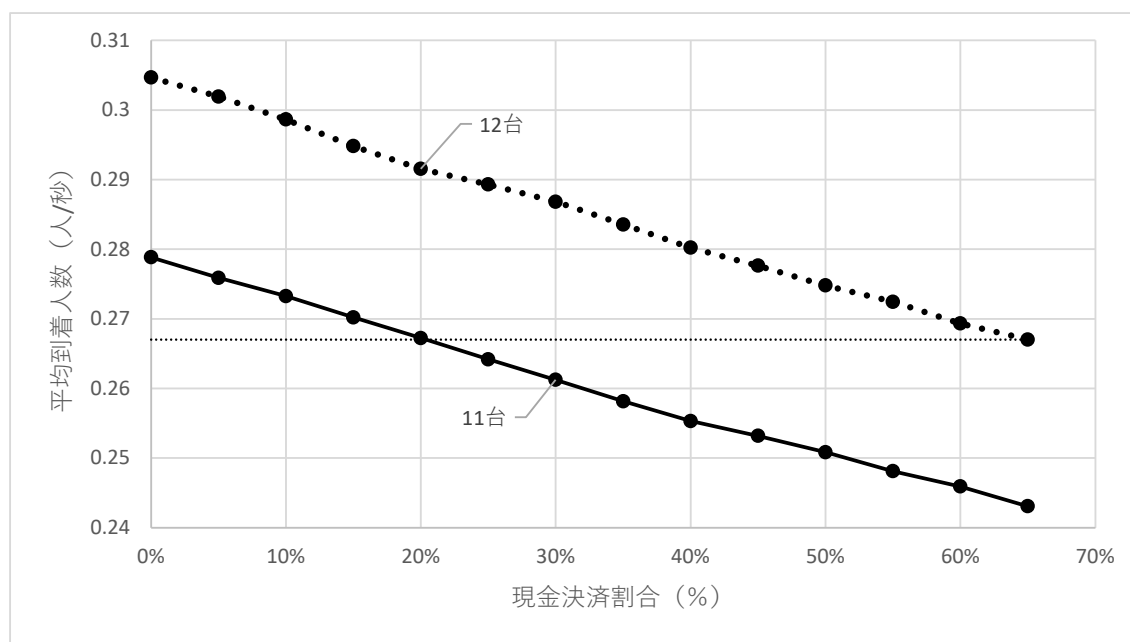
図 9 現金決済割合と平均到着人数（レジ数=6）

図 9 は現金決済割合を変えた時に、レジ待ち人数について 4.1 で設定した 2 つの条件（3 人以下が 95%、6 人以下が 99%）を満たすように平均到着人数を調整した結果を示している。現金決済割合が減少すると、予想通り処理可能な平均到着人数が増加している。現金決済割合が 20%まで減ると、毎秒 0.140 人程度の到着でも処理できるようになる。これは現金決済割合が 65%時の毎秒 0.128 人と比較して 1 割程度多く、現金決済割合の減少がレジ処理能力の向上に繋がっていることが示せた。

4.2.4. 処理能力向上とレジ台数

レジ台数は整数でしか変えられないため、上述のようにレジの処理能力が 10%上昇してもレジの総数が 6 台ではレジの台数を 1 台減らすことはできない。しかし、レジの台数が多い大型店舗であれば、10%の能力差は実際にレジの台数を減らすことによるコストダウンに繋がる可能性がある。この点について、10%の差が 1 台の差になるよう、レジ数 12 台と

レジ数 11 台で 4.2.3 と同様にレジ待ち人数の条件を満たすように平均到着人数を調整した結果が図 10 である。



(資料)筆者によるシミュレーション

図 10 現金決済割合と平均到着人数（レジ数=11 台, 12 台）

図 10 の破線は、レジ数 12 台、現金決済割合 65%で処理可能な平均到着人数を示している。破線はレジ数 11 台の線と現金決済割合 20%程度の部分で交差しており、現金決済割合が 65%から 20%に減ればレジ数を 1 台減らして 11 台にしても、65%時点での 12 台と同じ処理能力となることがわかる。

ここまでのシミュレーションから、現金決済割合を減らすことで店舗側、顧客側にレジ処理能力向上のメリットが生じることが明らかとなった。特にレジが多い大型店舗ではレジの台数を減らす余地が大きくなるため、現金決済割合を減らすことによるコストダウンが期待できる。

4.3. 現金決済とキャッシュレス決済の共用レジとキャッシュレス専用レジがある場合

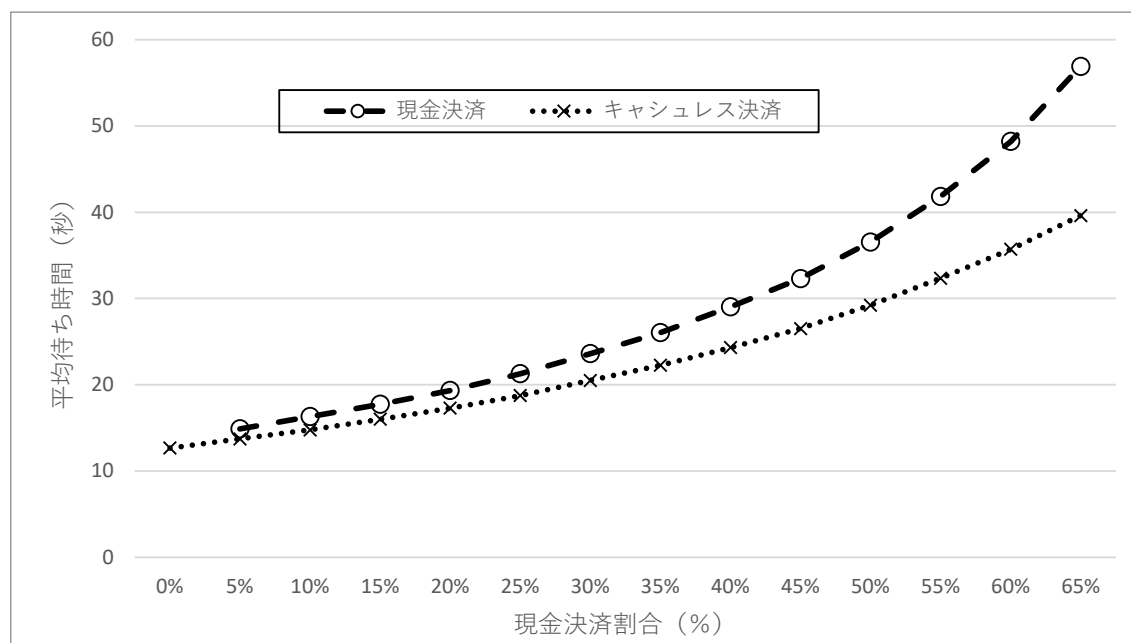
4.2 ではすべてのレジが現金決済とキャッシュレス決済の共用レジであるケースを考えたが、以下では一部のレジをキャッシュレス専用レジとして運用した場合を考える。このようなケースを特に考える理由は、追加的なコストが不要あるいは低コストであると予想されるからである。もし現行のレジが共用レジとして使える機能を持っているのであれば単

純に現金決済を扱わないだけで実行可能である。また、追加でキャッシュレス専用のレジを導入することを考慮しても、現金ハンドリングに必要な複雑で高価な機能が必要ないキャッシュレス専用レジであれば低コストで導入可能である。

4.3.1. 決済方法によるレジ待ちの違い

レジ総数 6 台、現金決済とキャッシュレス決済の共用レジが 5 台、キャッシュレス決済専用レジ 1 台の構成で、キューへの割り付け方法は 4.2 同様にキュー内の人数が最小であるキューに入るケースでシミュレーションを行った。決済にかかる時間が短いキャッシュレス決済に専用レジを設定しているため、キャッシュレス決済の待ちが少なくなることが予想される。

顧客の単位時間あたり平均到着間隔を表 3 の値で一定にしたまま、現金決済割合を初期値の 65%から減らした場合、決済手段ごとの平均待ち時間は図 11 のように変化する。予想された通り、このケースでは現金決済よりキャッシュレス決済の平均待ち時間が短くなっている。

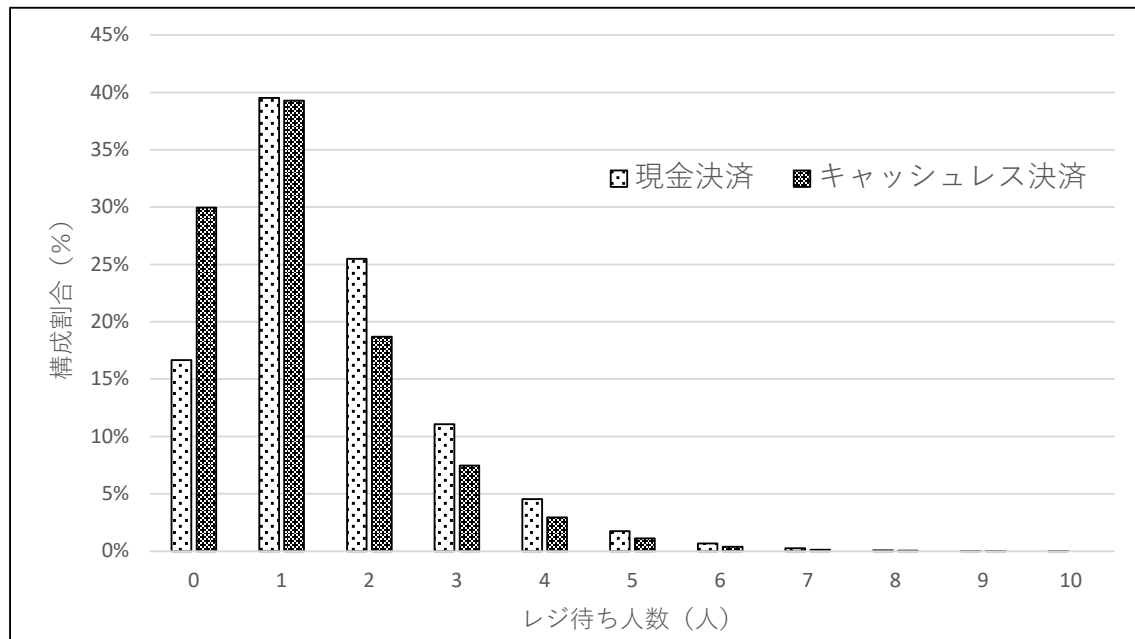


(資料) 筆者によるシミュレーション

図 11 現金決済割合と平均待ち時間 (共用レジ=5, キャッシュレス専用レジ=1)

現金決済割合 65%でのレジ待ち人数の分布を見ると、キャッシュレス決済はレジの待ち人数 0 が 29.9%となっており、現金決済の 16.7%と比較して多くなっている。レジ待ち人

数が 0 の割合が高いことはレジの稼働率が低いことを意味するため、今回のシミュレーションでは排除しているキューに入ってからキュー間移動を可能にすることで稼働率を上げられる可能性がある。



(資料)筆者によるシミュレーション

図 12 レジ待ち人数の分布（現金決済割合=65%、共用レジ=5、キャッシュレス専用レジ=1）

- （結果 3）キャッシュレス決済専用レジを設定することで、低コストでキャッシュレス決済選択者のレジ待ち時間を選択的に短くすることが可能である。

5. 結論と考察

決済方法による個別のトランザクション処理時間の計測や、キューへの割り付け方法によるレジ待ち時間変化に関する分析については多くの先行研究があるが、人々が利用する決済方法の構成割合が変化したときのレジ待ち時間の変化については明らかになっていなかった。本論文では実測データを基にしたレジ処理に関するエージェントベースシミュレーションによって、決済が速いキャッシュレス決済の割合を変化させた場合のレジの処理速度（レジ待ち時間）を推定し、以下の 2 点が明らかとなった。

- ① 待ち時間短縮の効果は現金決済を選択する人にも生じる。そのため、キャッシュレス決済利用について消費者側の追加コストが発生する場合、キャッシュレス決済を選択した

人のコスト負担で生じた待ち時間短縮を、コスト負担していない現金決済を選択した人も享受できることになる。このようなフリーライダーはキャッシュレス決済割合を高めていく上で障害となることが予想される。

- ② レジの処理速度上昇は、顧客のレジ待ち時間短縮だけではなく、開設するレジの台数を減らすために使う事も可能である。今回のシミュレーションでは、現金決済割合が 65% から 20%に減少すると、レジの処理速度は 1 割ほど上昇することが明らかになった。レジの台数が多いスーパーであれば、1 割処理速度が上昇することでレジの台数を減らすことが可能となる¹³。キャッシュレス決済では現金決済では生じない決済事業者への手数料支払が発生するため、開設するレジ台数を減らせるような店舗側のメリットが提示できることは重要である。

さらに、キャッシュレス決済専用レジを導入することで、次の点も明らかになった。

- ③ キャッシュレス決済専用レジを導入することで、低コストでキャッシュレス決済選択者のレジ待ち時間を短くすることが出来る。

③の性質を用いると、シミュレーションで明らかになった現金決済者のフリーライドに対してレジ待ち時間が長くなるという形でコスト負担させることが可能になる。また、本論文のシミュレーションでは排除した、一旦キューに入った後でのキュー間移動を考えるとレジの稼働率の向上と待ち時間の短縮の両方が得られる可能性がある。この点については今後の検討課題である。

¹³ レジの台数には整数制約があるため、総台数が少ないスーパーでは 1 割の性能向上では 1 台減らせない。

6. 参考文献

- Aghajani, R., Li, X., Ramanan, K. (2015). "Mean-field Dynamics of Load-Balancing Networks with General Service Distributions," doi:10.48550/ARXIV.1512.05056
- Alvarado, A. J., Pulido, M. (2008). "Simulation and experimental design applied to sizing supermarket cashiers in Colombia," *2008 Winter Simulation Conference* (1356-1361). Miami, FL, USA: IEEE. doi:10.1109/WSC.2008.4736210
- Antczak, T., Weron, R., Zabawa, J. (2020). "Data-Driven Simulation Modeling of the Checkout Process in Supermarkets: Insights for Decision Support in Retail Operations," *IEEE Access*, 8, 228841-228852. doi:10.1109/ACCESS.2020.3045919
- Bramson, M., Lu, Y., Prabhakar, B. (2010). "Randomized Load Balancing with General Service Time Distributions," *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 38(1), 275–286. doi:10.1145/1811099.1811071
- Cheong, L. F. M., Chia, Q.Y. (2019). "Simulation Model to Evaluate Effectiveness of Queue Management Tool in Supermarket Retail Chain," *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, (606-610). doi:10.1109/IEEM44572.2019.8978794
- Gaku, R., Takakuwa, S. (2015). "Big Data-Driven Service Level Analysis for a Retail Store," *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference* (791–799). Huntington Beach, California: IEEE Press. doi:10.5555/2888619.2888709
- Knuth, E. D. (1981). 『準数値算法／乱数 (第 3 巻)』. (渋谷政昭, 訳) サイエンス社.
- Liu, Q., Chen, H. (2022). "Optimization of J Supermarket Cashier Service System Based on M/M/c Model," *Proceedings of the 4th International Conference on Management Science and Industrial Engineering* (478-484). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3535782.3535846
- Mitzenmacher, M., Dell'Amico, M. (2022). "The Supermarket Model With Known and Predicted Service Times," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 33(11), 2740-2751. doi:10.1109/TPDS.2022.3146195
- Miwa, K., Takakuwa, S. (2008). "Simulation Modeling and Analysis for In-Store Merchandizing of Retail Stores with Enhanced Information Technology," *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation* (1702–1710). Miami, Florida: Winter Simulation Conference. doi:10.5555/1516744.1517042
- Priyangika, J.S.K.C, Cooray, T.M.J.A. (2016). "Analysis of the Sales Checkout Operation in Supermarket Using Queuing Theory," *Universal Journal of Management*, 4(7), 393 - 396. doi:10.13189/ujm.2016.040703
- Sorensen, H., Bogomolova, S., Anderson, K., Trinh, G, Sharp, A, Kennedy, R., Wright, M. (2017). "Fundamental patterns of in-store shopper behavior," *Journal of Retailing and Consumer Services*, 37, 182-194. doi:10.1016/j.jretconser.2017.02.003
- Wang, J., Zhou, Y. (2018). "Impact of Queue Configuration on Service Time: Evidences from a Supermarket," *Management Science*, 64(7), 3055-3075. doi:10.1287/mnsc.2017.2781

Williams, E., Karaki, M., Lammers, C. (2002). "Use of Simulation to Determine Cashier Staffing Policy at a Retail Checkout," *Proceedings of the 14th European Simulation Symposium*. Dresden, Germany.

伊藤晶子, 畔柳加奈子, 櫛勝彦, 滝山直樹, 神垣智一. (2016). 「駅構内コンビニにおける IC カード利用促進のための調査研究」 *デザイン学研究*, 62(6), 6_85-6_94. doi:10.11247/jssdj.62.6_85

(社) キャッシュレス推進協議会. (2020). キャッシュレス・ロードマップ 2020. 参照日: 2021 年 3 月 22 日, 参照先: <https://www.paymentsjapan.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2020/06/roadmap2020.pdf>

(株) ジェーシービー. (2019 年 8 月 28 日). 決済速度に関する実証実験結果. 参照先: JCB グローバルサイト: <https://www.global.jcb/ja/press/00000000162855.html>

関田将任. (2019 年 11 月). 「大学生協レジ処理時間調査結果」. 参照先: <https://github.com/santa-o/casher>

(社) 全国スーパーマーケット協会. (2021). スーパーマーケット年次統計調査報告書. 参照日: 2022 年 6 月 6 日, 参照先: <http://www.super.or.jp/wp-content/uploads/2021/10/2021nenji-tokei1.pdf>

外山祥平, 平山雅之. (2017 年 11 月). 「レジ混雑緩和システムの設計と実装」 *電子情報通信学会技術研究報告*, 117(273), 203-208. 参照先: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1520290883209889536>

渡部和雄, 岩崎邦彦. (2009 年 3 月). 「非接触 IC カード型電子マネーに対する消費者の意識と普及の課題--利用者と非利用者, 交通系と流通系, 地域による意識の差異と利用意向の分析」 *経営情報学会誌*, 17(4), 13-36. 参照日: 2020 年 9 月 10 日, 参照先: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1520290883279839232>

渡部和雄, 岩崎邦彦. (2011 年 3 月). 「電子マネーの地域への普及要因と普及促進策--利用者・非利用者の意識に基づく地域別分析と提案」 *経営情報学会誌*, 19(4), 341-359. 参照日: 2020 年 9 月 10 日, 参照先: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1520572359160854784>

渡部和雄, 岩崎邦彦, 梅原英一. (2014 年 9 月). 「電子マネー利用の規定要因と利用頻度・利用意向のモデル化による示唆」 *経営情報学会誌*, 23(2), 105-119. 参照日: 2020 年 9 月 10 日, 参照先: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1520009408074416128>