

マルチエージェント分析による 顧客主導予約調整メカニズムの有効性の検証

篠原 敏夫[†] 川村 秀憲^{†,‡} 山本 雅人^{†,‡} 大内 東^{†,‡}

[†] 北海道大学大学院工学研究科

〒 060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

[‡] 有限会社ソリューションテクノロジー

〒 062-0932 北海道札幌市豊平区平岸 2 条 9 丁目

E-mail: †{tshino,kawamura,masahito,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 航空券、コンサートチケット等の予約は、先に訪れた顧客から順に予約という資源を配分していく資源配分方法である。本稿ではこの資源配分方法において、顧客主導で予約調整を行う資源配分調整メカニズムを提案し、マルチエージェントシミュレーションによって様々な需要構造に対するメカニズムの有効性を検証する。

キーワード 資源配分, 顧客主導, 予約調整, マルチエージェントシステム

Verification on Effectiveness of Customer-driven Reservation Adjustment Mechanism by Multiagent Analysis

Toshio SHINOHARA[†], Hidenori KAWAMURA^{†,‡}, Masahito YAMAMOTO^{†,‡}, and Azuma OHUCHI^{†,‡}

[†] Hokkaido University Graduate School of Engineering

Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628, Japan

[‡] Solution Technology Co., Ltd.

Hiragishi 2-9, Toyohira-ku, Sapporo, 062-0932, Japan

E-mail: †{tshino,kawamura,masahito,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp

Abstract Reservation systems, such as an airline ticket and a concert ticket, are first-come first-served resource allocation mechanisms. In this paper, we propose a resource allocation adjustment mechanism which performs reservation adjustment by customer driven, and verify effectiveness of the mechanism for various demand structures by the multi-agent simulation.

Key words resource allocation, customer-driven, reservation adjustment, multi-agent system

1. はじめに

航空券、コンサートチケット等の予約は、先に訪れた顧客から順に予約という資源を配分していく資源配分方法と捉えることができる。飛行機の座席やコンサート会場の収容人数には限りがある為、座席以上、或いは収容人数以上の顧客が訪れた場合、後に訪れた顧客が予約できないという状況がしばしば起こりうる。

既に予約をしている顧客よりも、予約をできなかった顧客の方が予約を高く評価している場合、既に予約をしている顧客と予約をできなかった顧客が友人同士であれば、融通を利かせる

といった予約という資源の配分調整が可能であるが、他人同士である場合は、この資源配分方法には資源配分調整の機能は存在しない。

この資源配分調整を担う存在としてダフ屋と呼ばれる違法の業者が存在する。ダフ屋は、より高く予約を評価している顧客に予約を移転させているので、資源配分調整メカニズムとして有効に機能していると考えられるが、価格付けの主導権をダフ屋が握っているため、安く買い、高く売って利ざやを稼ぐという投機的行為をとろうというインセンティブが働き、正常な価格付けが行われないという問題がある。

そこで本稿では、上記の資源配分方法において、ダフ屋が

行っている価格付けを顧客が行うことで正常な価格付けがなされ、投機的行為が起こりにくい資源配分調整メカニズムを提案する。

近年、情報インフラの普及が急速に進み、ワイヤレス通信やPDA(Personal Digital Assistant)、携帯電話などのモバイル端末を用いたユビキタスコンピューティング環境が現実のものとなりつつある。このような情報インフラを利用した資源配分調整に関する研究がなされてきている [5]。本稿で提案する資源配分調整メカニズムも、情報インフラの普及を前提とする。

航空券の販売に関しては、レベニュー＝マネジメントと呼ばれる手法が1960年代頃から研究されている [4]。しかしこの手法は販売する側からの視点であるため、資源配分に関する研究は行われていない。

資源配分方法の研究としては、オークション [2]、市場指向モデル [6] 等が存在するが、本稿で扱う資源配分方法のように、先に訪れた顧客から順に資源を配分していく方法は一般的にパレート最適 [8] な資源配分を実現する方法ではない為 [7]、資源配分方法の研究対象として扱われていない。

しかし、現実の社会ではこの資源配分方法は広く使われている。そこで本稿ではこの資源配分方法を前提として、資源配分を調整するメカニズムを導入することでパレート最適に近い資源配分を実現することを目指す。

本稿では売り手、各顧客をエージェントと捉え、マルチエージェントシステムとしてモデル化し、エージェントベースシミュレーションによって分析を行う。

2. モデル化

2.1 構成要素の設定

モデルの構成要素は予約、顧客、売り手の3種類である。

予約は m 種類存在し、各予約のユニット数を $q = (q_1, \dots, q_m)$ とする。 $q_j, j = 1, \dots, m$ は定数である。

顧客の集合を A とする。各顧客は順に訪れ、全部で T 人訪れる。第 t 番目の顧客 i が訪れ、売り手から予約 j 1 ユニットの入手を目指す 1 サイクルをステップ t とする。顧客 i がステップ t 終了時において所持している予約のユニット数を $qb^i(t) = (qb_1^i(t), \dots, qb_m^i(t))$ とする。顧客 i が予約 j を入手するのに支払ってもよいと思う最大限の価格を評価値 v_j^i とする。顧客の予約に対する評価値は、他の顧客の評価値とは独立で、曖昧無く知っている個人価値 [3] とする。また顧客 i の余剰 u^i を、入手した予約に対する評価値とそれに支払う価格の差分とし、予約を入手しない場合は 0 とする。

売り手は 1 人で、予約の価格 $p = (p_1, \dots, p_m)$ を最初に決定し、顧客からの予約を受け付ける。売り手がステップ t 終了時において所持している予約のユニット数を $qs(t) = (qs_1(t), \dots, qs_m(t))$ とする。 $qs(0) = q$ とする。

2.2 売買モデル

2.2.1 概要

顧客は余剰に基づき予約希望を売り手に通知し、売り手はそれを受け、予約を顧客に渡す。以下、ステップ t の各エージェントの行動を述べる。

2.2.2 訪れた顧客 i の行動

訪れた顧客 i は、売り手が所持している予約の中で、余剰が正で、最大となる予約 j の入手希望を売り手に通知する。

$$j = \arg \max_k (v_k^i - p_k \mid v_k^i - p_k \wedge qs_k(t-1) > 0)$$

余剰が正となる予約がない場合、予約の入手希望を通知しないで去る。予約 j を入手した場合、 $qb_j^i(t) \leftarrow 1$ とし、支払う価格は p_j となる。

2.2.3 売り手の行動

売り手は、顧客 i から予約 j の入手希望の通知があれば、 $qs_j(t-1) > 0$ であることを確認し、予約 j を顧客 i に渡し、 $qs_j(t) \leftarrow qs_j(t-1) - 1$ とする。

2.3 顧客主導予約調整メカニズムに基づく売買モデル

2.3.1 概要

ステップ t に訪れた顧客 i が、 $qs_l(t-1) = 0$ である予約 l を入手する可能性をもたらすメカニズムとして、顧客主導予約調整メカニズム (Customer-driven Reservation Adjustment Mechanism) を提案する。以下、顧客主導予約調整メカニズム導入時の売買モデルにおけるステップ t の各エージェントの行動を述べる。

2.3.2 訪れた顧客 i の行動

• 売り手が所持している予約の中で、余剰が正となるものがある場合

(1) 余剰が最大となる予約 j の入手希望を売り手に通知する。

$$j = \arg \max_k (v_k^i - p_k \mid v_k^i - p_k \wedge qs_k(t-1) > 0)$$

(2) 予約 j を入手した場合、 $qb_j^i(t) \leftarrow 1$ とし、支払う価格は p_j となる。

• 売り手が所持している予約の中で、余剰が正となるものがなく、売り手が所持していない予約がある場合

(1) 売り手が所持していない予約の中で評価値が最大の予約 l の入手希望と、希望購入価格 w を売り手に通知する。希望購入価格は顧客 i の予約 l に対する評価値 v_l^i とする。

$$l = \arg \max_k (v_k^i \mid qs_k(t-1) = 0), \quad w = v_l^i$$

(2) 予約 l を入手した場合、 $qb_l^i(t) \leftarrow 1$ とし、支払う価格は w となる。

• 売り手が所持している予約の中で、余剰が正となるものがなく、売り手が所持していない予約がない場合は予約の入手希望を通知しないで去る。

2.3.3 売り手の行動

• 顧客 i から $qs_j(t-1) > 0$ である予約 j の入手希望が通知された場合

(1) 予約 j を顧客 i に渡す。

(2) $qs_j(t) \leftarrow qs_j(t-1) - 1$

• 顧客 i から $qs_l(t-1) = 0$ である予約の入手希望と、希望購入価格 w が通知された場合

(1) ステップ t 以前に訪れて予約 l を入手した複数の顧客に w を伝え、予約移譲を依頼する。

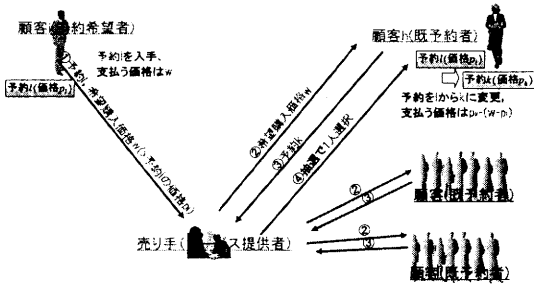


図1 顧客主導予約調整メカニズム

(2) 複数の顧客から移譲に応じるとの連絡があった場合、抽選で1人の顧客 h を選択、顧客 h の予約 l を顧客 i に移譲し、顧客 h から希望のあった予約 k を顧客 h に渡す。

$$(3) \quad qs_k(t) \leftarrow qs_k(t-1) - 1$$

2.3.4 予約移譲を依頼された顧客 h の行動

移譲によって余剰が大きくなるならば、最も余剰が大きくなる予約 k を売り手に通知する。

$$\exists j \left((v_j^h + w) - (v_l^h + p_j(t)) > 0 \wedge qs_j(t) > 0 \right) \\ \rightarrow k = \arg \max_j (v_j^h - p_j(t) \wedge qs_j(t) > 0)$$

抽選によって選択された場合、 $qb_l^h(t) \leftarrow 0$, $qb_k^h(t) \leftarrow 1$ とし、支払う価格は $p_k - (w - p_l)$ となる。

顧客主導予約調整メカニズム (以下 CRA メカニズム) により、顧客 i は希望する予約 l を入手、顧客 h は余剰が上昇、売り手は販売率が上昇する。

CRA メカニズムの特徴としては、顧客が価格付けを行い、ダフ屋のような顧客でも売り手でもない第三者をはさまない為、正常な価格付けが行われるという点、予約の売買はできず、既予約者は予約の変更しかできない為、投機的行為が起きにくいという点、売り手は仲介しか行わない為、顧客の情報収集コストが低く、現実社会への適用可能性が高いと考えられる点が挙げられる。

3. CRA メカニズム有効性の尺度

CRA メカニズムの目的は、よりよい資源配分を実現することにある。資源配分のよさは、売り手、個々の顧客という各主体にとってそれぞれ別個のものであり、全ての主体にとってのよさを考慮することが望まれるが、個々の主体にとってのよさは他の主体のよさとの複雑なトレードオフの関係に有る為、全ての主体それぞれのよさを取り扱うことは困難である。そこで本稿では、各主体の余剰の単純な線形和である社会的余剰を、CRA メカニズム有効性の尺度とする。各余剰は以下の式で表される。

売り手の余剰は、ステップ T 終了時における販売価格の合計とする。

$$p \cdot (q - qs(T))$$

顧客の総余剰は、ステップ T 終了時における各顧客の余剰の合計とする。

$$\sum_{i \in A} u^i = \sum_{i \in A} qb^i(T)(v^i - p)$$

社会的余剰は、売り手の余剰と顧客の総余剰の合計とする。

$$p \cdot (q - qs(T)) + \sum_{i \in A} qb^i(T)(v^i - p) = \sum_{i \in A} v^i \cdot qb^i(T)$$

社会的余剰は、オークション、市場指向モデル等、資源配分方法を研究する分野で、有効性の尺度として一般的に扱われている [5] [6] [7] [9]。また CRA メカニズムを導入するのは売り手であり、売り手にとって、顧客の満足度も導入を検討する際に重要な要素となると考えられることから、売り手の余剰、顧客の総余剰の変化も検証する。

4. 実験設定

本節では実験設定を述べる。予約の種類 $m = 20$ 、各予約 j のユニット数 $q_j = 400$, $j = 1, \dots, m$ とした。ステップ数、つまり訪れる顧客の人数は、予約の全ユニット数 $400 \times 20 = 8,000$ の2倍である $16,000$ とした。価格は、 $p_j = p = 1$, $j = 1, \dots, m$ とした。

評価値の設定

実験において評価値を設定する際、顧客 i の各予約に対する評価値が現実にもどのような値をとるのかを実際に観測することは困難であるが、ある予約 j に対する各顧客の評価値の分布は、一般的な評価値の分布の特徴 [1] を全て満たすことが望ましいと考えられる。

そこで本稿では、航空券に対する評価値の分布には正規分布が近似曲線としてよく当てはまることが知られていることから [4]、各予約 j に対する顧客の評価値の分布を平均 μ_j 、標準偏差 σ_j の正規分布とし、顧客 i の予約 j に対する評価値は、そこから発生させた乱数とした。

$$v_j^i = \mu_j + \xi_j^i \cdot \sigma_j, \quad j = 1, \dots, m$$

ここで ξ_j^i は標準正規乱数である。個々の顧客の評価値の違いを ξ_j^i で表現し、顧客の評価値の全体の傾向を μ_j, σ_j で表すこととした。

本稿における実験は、需要量の大小、需要の偏りといった必要構造の違いによる CRA メカニズムの有効性を検証することを目的とする。そこで評価値のパラメータは、様々な需要構造を実現する為以下のように定めた。

$$\mu_j = p \cdot \left\{ a + \frac{b}{m-1} \cdot \left(j - \frac{m+1}{2} \right) \right\}, \\ \sigma_j = 0.2p, \quad j = 1, \dots, m,$$

$$a = 0.50, 0.52, \dots, 0.80, \quad b = 0, 0.1, 0.2, 0.3.$$

a の値は $\frac{1}{m} \sum_j \mu_j$ と一致し、 b の値は μ_1 と μ_m との差を表している。価格が一定である為、評価値が高くなれば各予約に対する顧客全体の需要量が増加し、評価値の値に偏りがあれば顧客全体の予約に対する需要量に偏りができる。 a が顧客の需要

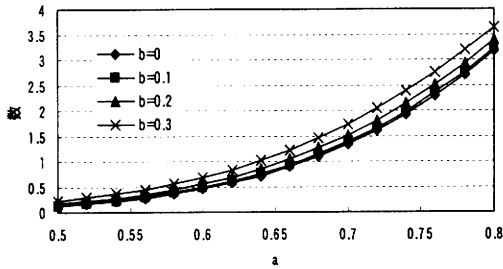


図2 評価値が価格を超える予約の数

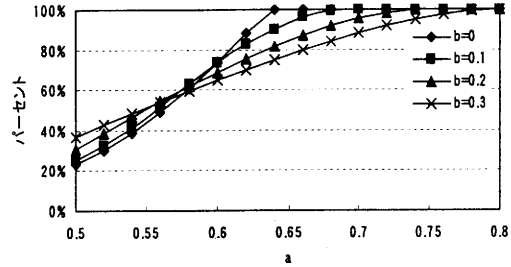


図5 CRA メカニズム非導入時の販売率

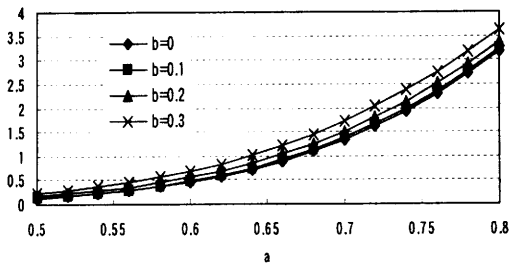


図3 評価値が価格を超える予約の数の分散

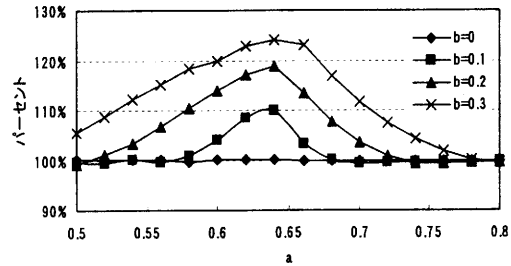


図6 社会的余剰(メカニズム導入時/メカニズム非導入時)

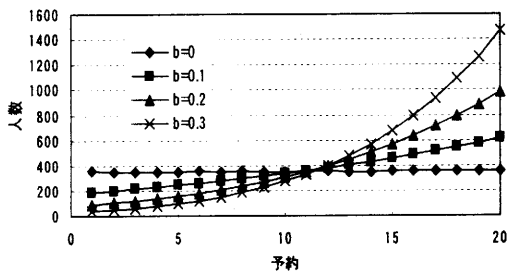


図4 評価値と価格の差が正で最大となる顧客の人数 (a=0.62)

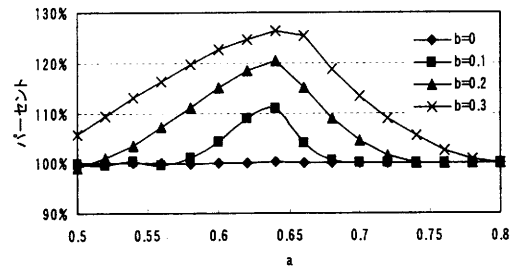


図7 売り手の余剰(メカニズム導入時/メカニズム非導入時)

量を、 b が需要の偏りをそれぞれコントロールするパラメータとなっている。

a , b を変更することで、様々な需要構造のもとでの CRA メカニズムの有効性を検証した。実験は各設定で 100 回行い、平均を求めた。

5. 実験結果

前節で定めた設定で実験を行った。以下その結果を述べる。

5.1 実験結果 1

図 2 から図 5 は、パラメータ a , b を設定した際の、顧客の需要構造、販売率を表している。図 2, 3 はそれぞれ、各顧客の、評価値が価格を超える予約の数の平均と分散を表している。 a の値が大きくなるにしたがって値が大きくなる事が分かる。その結果、顧客全体の需要量も大きくなる。

また図 4 は、各予約に対して、評価値と価格の差が正で、そ

の値が最大となる顧客の人数を表している。この図は $a = 0.62$ の場合の図である。 b の値が大きくなるに従い、需要構造の偏りが大きくなる様子が分かる。

図 5 は、 a , b を設定した際の、CRA メカニズム非導入時の販売率を表している。横軸には a を、縦軸には販売率をとり、 b の違いによって 4 本の折れ線を示している。 a が上昇するに従い販売率が上昇すること、 b が小さいほどその傾きが急であることが読み取れる。以下、このような需要構造、販売率の下での、CRA メカニズム導入による各余剰の変化を示す。

5.2 実験結果 2

図 6 から図 9 は、余剰に関する実験結果である。

図 6 は、社会的余剰の、CRA メカニズム導入時と非導入時の比を表している。メカニズム導入時は、需要構造によって 10% から 20% 以上の上昇が見られる。特に $a = 0.64$ 付近で上昇率が高い。また b の値が大きいかほど、上昇率が高い。図 7, 8

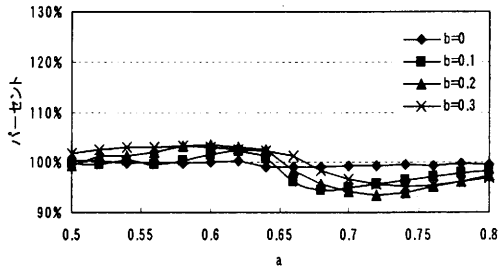


図8 顧客の総余剰 (メカニズム導入時/メカニズム非導入時)

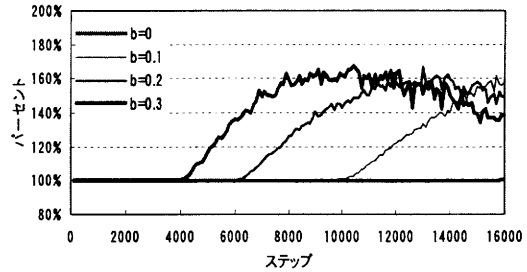


図10 顧客の予約入手率 (メカニズム導入時/メカニズム非導入時)

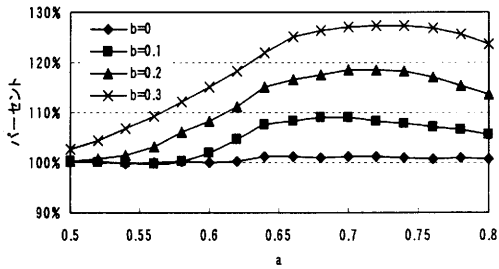


図9 顧客の余剰の平均 (メカニズム導入時, 普通に入手/メカニズム非導入時)

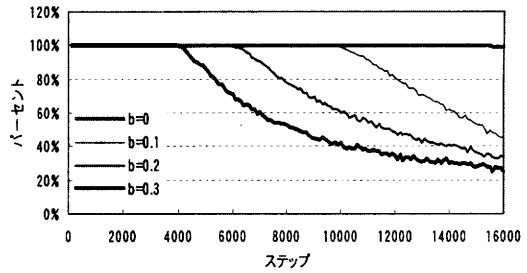


図11 顧客の予約入手率 (メカニズム導入時, 普通に入手/メカニズム非導入時)

は、売り手の余剰と、顧客の総余剰の、メカニズム導入時と非導入時の比を表している。売り手の余剰はほぼ社会的余剰と同様の傾向を示している。本稿のモデルでは費用を考慮していない。費用を考慮して利益を観察すれば、その上昇率は図7で示される売り手の余剰の上昇率よりもはるかに高くなる為、売り手がCRAメカニズムを導入するインセンティブは十分にあると考えられる。

一方、顧客の総余剰には大きな上昇は見られず、販売率が高い状況では減少している。

CRAメカニズム導入による顧客のメリットは2種類ある。先に訪れ、メカニズム非導入時と同様の方法で普通に予約を入手した顧客は、予約移譲に応じるにより余剰上昇というメリットを受け、後から訪れた顧客は、移譲により予約を入手することによって、予約入手率が上昇するというメリットを受けると考えられる。そこで余剰上昇というメリットを受ける顧客に着目し、メカニズム導入時の顧客の総余剰を、予約を普通に入手した人数で割った値と、メカニズム非導入時の顧客の総余剰を、予約を入手した人数で割った値との比を図9で示した。この図から、普通に予約を入手した顧客の余剰は、メカニズム非導入時と比較して上昇していることが分かる。特に販売率が高い場合にその上昇率は高い。

5.3 実験結果3

図10, 11は、ステップ毎の入手率についての実験結果を表した図である。 $a = 0.62$ である。図10は、ステップ毎の、訪れた顧客の予約入手率のメカニズム導入時と非導入時の比を表

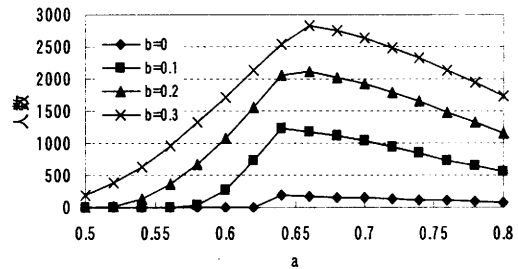


図12 移譲により予約を入手した人数

している。100ステップ毎に平均をとった値を示している。この図から、ステップ後半では予約入手率が50%前後上昇していることが分かる。このことから後の方に訪れた顧客は、メカニズム導入により、予約入手率上昇というメリットがあると考えられる。

一方図11は、メカニズム導入時の、予約を普通に入手した割合と、メカニズム非導入時の予約入手率との比を表している。この図より、ステップ後半では予約を普通に入手する割合は大きく落ち込むことが分かる。つまりメカニズム導入によって、普通に入手することが困難になることを示している。また図12は移譲により予約を入手した顧客の人数を表しているが、状況によっては全予約のユニット数の4分の1以上が移譲により入手されていることが分かる。

こうしたことから、メカニズム導入に際してはその利便性の

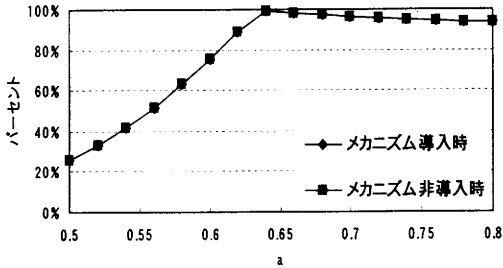


図 13 パレート最適な資源配分との比較 (b=0)

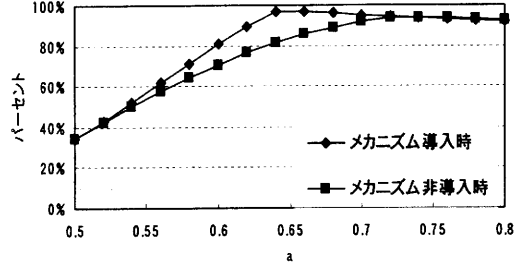


図 15 パレート最適な資源配分との比較 (b=0.2)

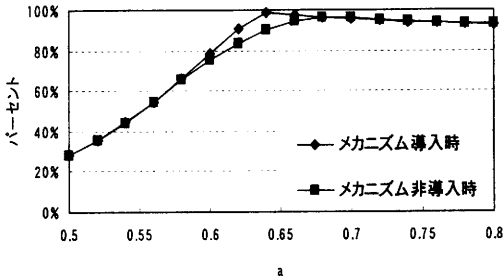


図 14 パレート最適な資源配分との比較 (b=0.1)

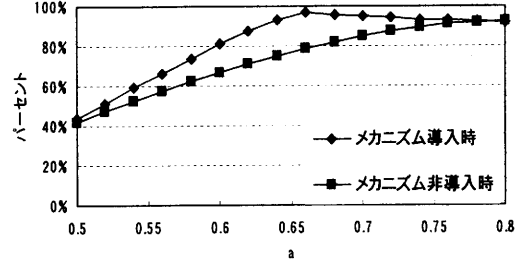


図 16 パレート最適な資源配分との比較 (b=0.3)

向上が課題になると考えられる。

5.4 実験結果 4

本稿における資源配分方法は、先に訪れた顧客から順に配分する方法であり、また顧客は余剰が正となる予約が無い場合は購入しないという、資源配分方法である。この資源配分方法と、16,000人の顧客に $20 \times 400 = 8,000$ の予約を、訪れる順序の制約が無く、また各顧客の余剰が正となるかどうかを無視してパレート最適な資源配分を行った場合との社会的余剰の比を図13から図16で表している。折線は、パレート最適な資源配分における社会的余剰の値を100%とした場合の、メカニズム非導入時の値と、メカニズム導入時の値を示している。本稿における顧客の余剰の設定の下では、パレート最適な配分は社会的余剰の最大化を意味する[10]。bがいずれの値の場合でも、aが0.65付近においては、メカニズム導入により社会的余剰はほぼ最大化されていることが分かる。このことから、本稿で取り扱った資源配分方法は、適切な価格を設定し、本稿で提案したCRAメカニズムを導入することでパレート最適に近い資源配分が実現可能であると考えられる。

6. おわりに

本稿では先に訪れた顧客から順に資源を配分する資源配分方法に有効である資源配分調整メカニズムを提案し、エージェントベースシミュレーションによってその有効性を検証した。

実験では様々な需要構造に対するCRAメカニズムの有効性を検証し、またパレート最適な資源配分との比較も行った。実験の結果、需要構造によってはCRAメカニズムは高い資源配

分調整機能を持ち、社会的余剰をほぼ最大化する資源配分を実現できる可能性があることが判明した。

文 献

- [1] G.Gallego, G.V.Ryzin, "Optimal Dynamic Pricing of Inventories with Stochastic Demand over Finite Horizons", *Management Science*, 40, pp.999-1020, 1994.
- [2] P.Klemperer, "Auction Theory: A Guide to the Literature", *Journal of Economic Surveys* Vol 13, pp.227-286, 1999.
- [3] V.Krishna, "Auction Theory", Academic Press, 2003.
- [4] J.I.McGill and C.J.V.Ryzin, "Revenue Management: Research Overview and Prospects", *Transportation Science*, Vol.33, No.2, pp.233-256, 1999.
- [5] J.E.Prado and P.R.Wurman, "Non-cooperative Planning in Multi-Agent, Resource-Constrained Environments with Markets for Reservations", *AAAI 2002 Workshop on Planning with and for Multiagent Systems*, Edmonton, pp.60-66, 2002.
- [6] M.P.Welman, "A Market-Oriented Programming Environment and Its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems", *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.1, pp.1-22, 1993.
- [7] M.P.Welman and W.E.Walsh, "Auction Protocols for Decentralized Scheduling", *Games and Economic Behavior*, 35, pp.271-303, 2001.
- [8] 鈴木光男, "新ゲーム理論", 勁草書房, 1994.
- [9] 松井知己, 渡辺隆裕, "オークションの設計理論と数理計画", 日本OR学会第49回シンポジウム「数理計画における理論と実装」, pp.7-12, 2002.
- [10] 横尾真, 櫻井裕子, 松原繁夫, "架空名義入札に頑健な複数ユニットオークションプロトコル", *人工知能学会論文誌* 17 巻 4 号 E, pp.390-397, 2002.