

日本経営工学会 2023年春季大会 (青山学院大学青山キャンパス, 2023/06/03-04)
提示資料 (web公開版)

消費者の内的参照価格・支払意思額の推定

対人的マルコフ連鎖シミュレーションによる集合知形成の試み

株式会社インサイト・ファクトリー

小野 滋

- 背景と目的
- 提案手法：対人的MCMC
- 提案手法の根拠
- 関連手法との比較
- シミュレーション
- 適用例
- まとめ

背景と目的

- 製品・サービスの価格に対する消費者の知覚(受容性)・反応を理解する

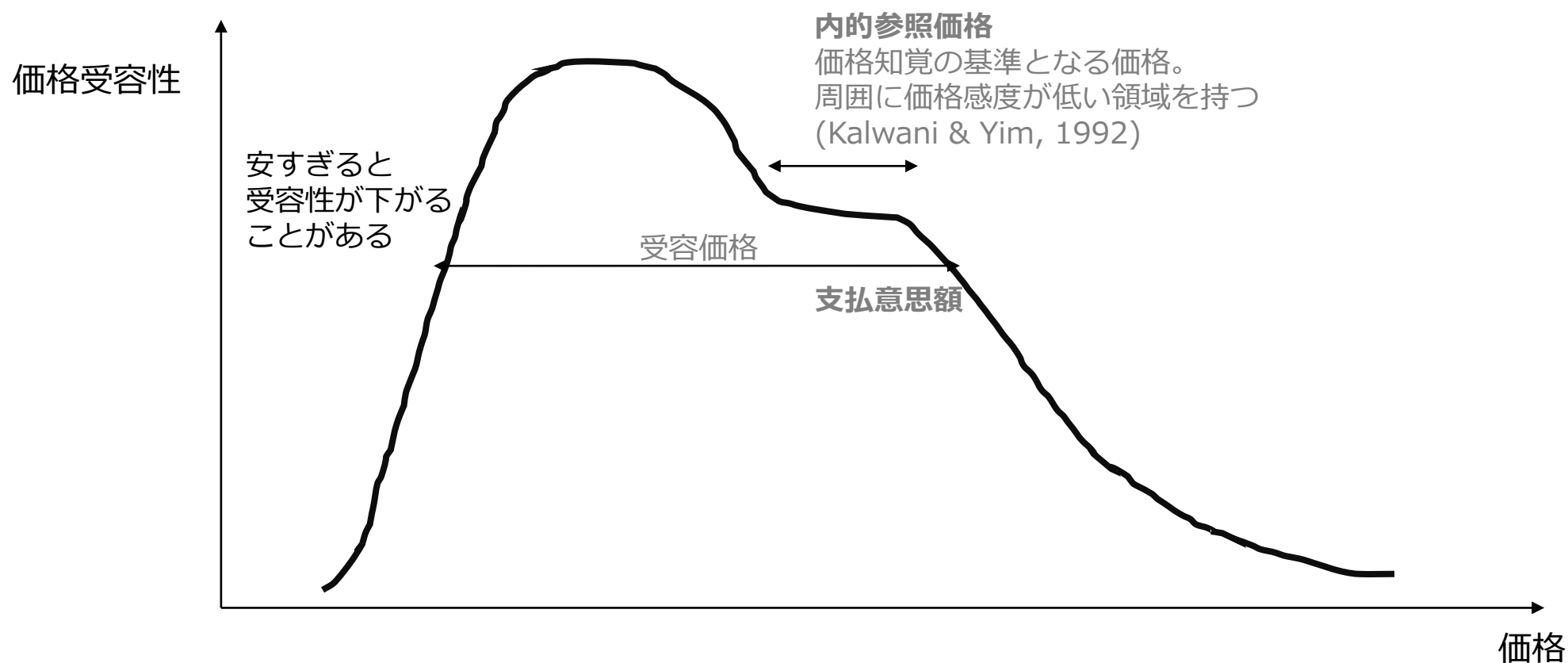


- マーケティング戦略立案のための重要な基盤
- 必要とされる典型的な状況
 - 製品・サービス開発の初期段階
 - 製品・サービスの上市・リニューアル前の売上予測
 - 価格プロモーション戦略の策定

← 本研究の焦点

消費者の価格受容性は、一般に以下の特徴を持つと考えられている (cf. 太宰, 2008; Le Gall-Elly, 2009)

- 価格に対し、右側の裾が長い逆U字型の形状を示す。対数正規分布に近い (Gabor & Granger, 1966)
- かならずしも滑らかな曲線ではない (端数価格の効果. cf. Stiving & Winner, 1997)



- 行動
 - 累積レベル ... 過去の価格と売上
 - 個人レベル ... パネルの購買行動データ
- 実験
 - 実験室実験
 - フィールド実験
- 調査
 - 直接測定
 - 間接測定

← 本研究の焦点

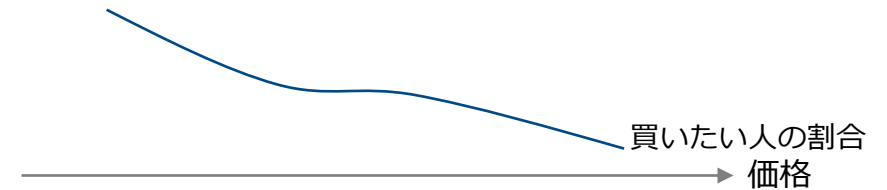
- 直接測定

- 価格について直接に聴取する
- 主要手法

- Gabor-Granger法 (Gabor & Granger, 1966)
 - 設問例 (Paczkowski(2019)による)

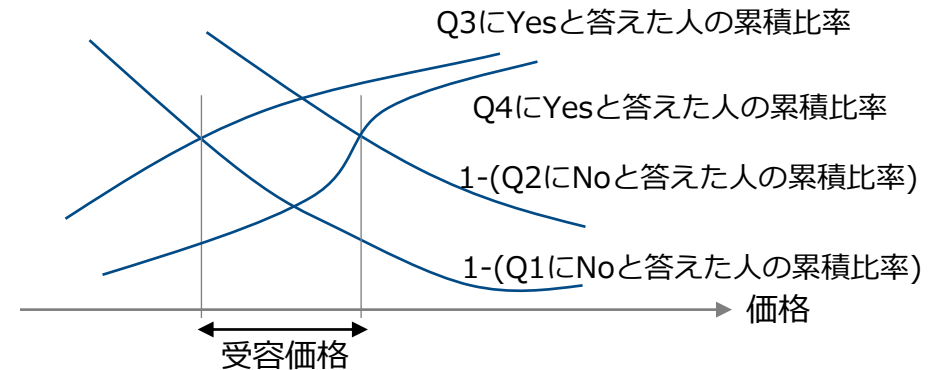
その製品がこの価格だったら、あなたは買いますか？

(同一の調査対象者に、価格を変えて反復聴取)



- PSM (Price Sensitivity Meter) (van Westendorp, 1976)
 - 設問例 (上田(2005)による)

Q1. どの価格であなたは、その製品があまりにも安いので品質に不安を感じ始めますか。
Q2. どの価格であなたは、品質に不安はないが、安いと感じ始めますか。
Q3. どの価格であなたは、その品質ゆえ、買う価値があるが、高いと感じ始めますか。
Q4. どの価格であなたは、その製品があまりにも高いので品質が良いにも関わらず、買う価値がないと感じ始めますか。



- 限界

- 課題が認知的に困難
- 価格に過度な注目が向けられる

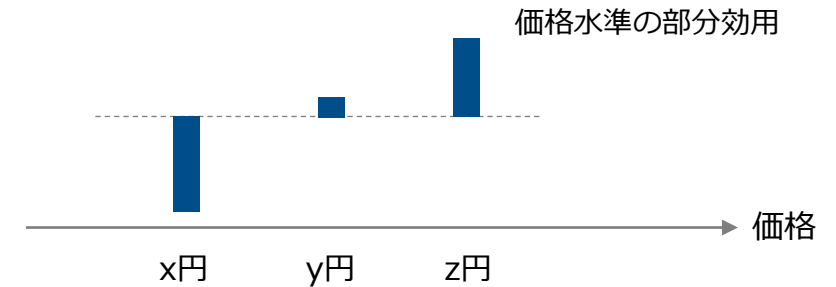
- 間接測定

- 価格が付与された製品・サービスについて聴取する
- 主要手法
 - コンジョイント分析
 - 特に選択型コンジョイント分析が広く用いられている
 - 設問例

下に製品が並んでいます。あなたが買いたいものをひとつ選んでください。

- ブランドA, x円
- ブランドB, y円
- ブランドC, z円
- どれも選ばない

(同一の調査対象者に、製品プロファイルを変えて反復聴取)



- 限界

- 回答負荷が高い
- 少数の価格水準についてしか検討できない

- 主要手法の特徴

	調査参加者からみた特徴			調査者からみた特徴	
	課題の容易さ	価格への適度の注目	回答負荷の低さ	多くの価格水準について検討できる	回答者属性による事後の層別分析が可能
Gabor-Granger	○	×	○	○	○
PSM	×	×	×	○	○
選択型コンジョイント分析	○	○	×	×	○

- 価格受容性を推定するための新しい調査手法の開発
 - 調査参加者からみて容易な課題であること
 - 価格についての直接聴取ではなく、選択課題が望ましい
 - 価格に過度な注目を集めないこと
 - 価格についての直接聴取や、価格を変動させた個人内反復を避けたい
 - 回答負荷が低いこと
 - マイクロ・サーヴェイ (1~2問のみの調査) への適応
 - 多くの価格水準について検討できること
 - 端数価格効果も検討したい

提案手法：对人的MCMC

- 調査対象となる製品・サービスについて、検討したい価格水準 $\{1, 2, \dots, J\}$ を設定する
 - 調査対象はカテゴリないしコンセプト。既存かつ既知の製品・サービスは除く
 - 等間隔な金額を設定しても、そうでなくてもよい
- ある価格水準 j が与えられた下で、別の価格水準 $k (\neq j)$ をランダムに選ぶための離散確率分布(**提案分布**) $q(k|j)$ を設定する
 - 適切な提案分布の例：一様分布。すなわち、他の価格水準を等確率で選ぶ

	k=1	k=2	k=3	...	k=J
j=1	0	$q(2 1)$	$q(3 1)$	...	$q(J 1)$
j=2	$q(1 2)$	0	$q(3 2)$	...	$q(J 2)$
j=3	$q(1 3)$	$q(2 3)$	0	...	$q(J 3)$
...	...	...	...	...	...
j=J	$q(1 J)$	$q(2 J)$	$q(3 J)$	...	0

<提案分布に求められる性質>

左図の行列について、

- 全ての要素は0以上1以下, 行の和は1
- $q(k|k) = 0$ (対角要素は0)
- $q(k|j) = q(j|k)$ (対称行列)
- この行列を遷移行列とする離散状態マルコフ連鎖が既約性・非周期性を持つこと



- 各調査参加者にカテゴリ名ないしコンセプトを提示。価格のみ異なる2つの選択肢を示し、買いたい方を選んでもらう
 - 現在価格 j**
 - 直前に回答を終えた調査参加者が選んだ価格水準とする
 - 最初の調査参加者では、すべての価格水準から等確率にランダムに選ぶ
 - 提案価格 k ($\neq j$)**
 - 提案分布 $q(k|j)$ に従ってランダムに選ぶ

Q. 1リットル紙パックの牛乳が2種類あります。あなたはどちらの商品を買いたいですか？

A. 198円 (税別)

B. 258円 (税別)

← 一方は、**直前に回答を終えた調査参加者が選んだ価格**
他方は、それ以外の価格水準のなかからランダムに選んだ価格

設問イメージ



- 収集した回答を、以下の2つの方法のいずれかを用いて分析する
 - **単純集計**
 - 調査参加者が選択した価格水準の**頻度分布**を、価格に対する受容性の分布として解釈する
 - 「その価格水準が提示された際の選択率」ではない
 - **BT推定**
 - 調査参加者の回答に**Bradley-Terryモデル**をあてはめ、各価格水準の受容性を推定する
 - Bradley-Terryモデル: 一対比較データ分析のための代表的モデル

提案手法の根拠

以下のように仮定する：

- **仮定1.** 価格水準 $j(= 1, \dots, J)$ に対し、すべての調査参加者が共通の価格受容性 $f(j) > 0$ を持つ
 - 合計が1になるようにスケーリングし、 $p(j) = f(j) / \sum_{k=1}^J f(k)$ とする
 - $p(\cdot)$ は離散確率分布と捉えることができる
- **仮定2.** 2つの価格水準 j, k を提示されたとき、調査参加者が k を選択する確率 $r(j, k)$ は下式に従う：

$$r(j, k) = \frac{f(k)}{f(j) + f(k)} = \frac{p(k)}{p(j) + p(k)}$$

- 「Luceの選択公理」として知られている
- 選択行動を説明する標準的なモデルとして広く用いられている

- 前頁の仮定のもとで、 t 番目の調査参加者が選択する価格水準 X_t は離散状態マルコフ過程に従う
 - 価格水準 j から $k (\neq j)$ への遷移確率は

$$P(X_{t+1} = k | X_t = j) = P_{jk} = q(k|j) \frac{p(k)}{p(j) + p(k)} \quad \text{for } j \neq k$$

- 提案分布の性質より、マルコフ連鎖 X_t は既約かつ非周期的であり、従って唯一の定常分布を持つ

	k=1	k=2	k=3	...	k=J
j=1	$1 - \sum_{l \neq 1} q(l 1)r(1,l)$	$q(2 1)r(1,2)$	$q(3 1)r(1,3)$	...	$q(J 1)r(1,J)$
j=2	$q(1 2)r(2,1)$	$1 - \sum_{l \neq 2} q(l 2)r(2,l)$	$q(3 2)r(2,3)$	...	$q(J 2)r(2,J)$
j=3	$q(1 3)r(3,1)$	$q(2 3)r(3,2)$	$1 - \sum_{l \neq 3} q(l 3)r(3,l)$	...	$q(J 3)r(3,J)$
...	...	...	...	...	...
j=J	$q(1 J)r(J,1)$	$q(2 J)r(J,2)$	$q(3 J)r(J,3)$	...	$1 - \sum_{l \neq J} q(l J)r(J,l)$

$$r(j,k) = \frac{p_i(k)}{p_i(j) + p_i(k)}$$

マルコフ連鎖の遷移行列

- $p(\cdot)$ はマルコフ連鎖 X_t の定常分布である
 - 任意の j, k について、提案分布の性質 $q(k|j) = q(j|k)$ より

$$p(j)P_{jk} = p(j)q(k|j) \frac{p(k)}{p(j) + p(k)} = p(k)q(j|k) \frac{p(j)}{p(j) + p(k)} = p(k)P_{kj}$$

- 従って

$$\sum_{k=1}^J p(k)P_{kj} = \sum_{k=1}^J p(j)P_{jk} = p(j) \sum_{k=1}^J P_{jk} = p(j)$$

- いいかえれば、**調査参加者数を十分にとれば、選択された価格の頻度分布は価格受容性の分布に近づく**

- Bradley-Terryモデルとは
 - 一対比較データ分析の代表的モデル
 - 刺激ペア (j, k) を提示したときに j が選択される確率を次のように定式化する

$$r(j, k) = \text{logistic}(\beta_k - \beta_j) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_k + \beta_j)} = \frac{\exp(\beta_k)}{\exp(\beta_j) + \exp(\beta_k)}$$

- パラメータ β_j は刺激 j の選ばれやすさを表す
 - 解釈にあたっては $\exp(\beta_j)$ の推定値に関心が向けられることも多い
- 本研究の仮定1,2に整合する
 - $\exp(\beta_j)$ が本研究における価格受容性 $p(j)$ に相当する
- 通常、パラメータ $\beta_1, \dots, \beta_J$ は最尤法で推定される
 - 刺激 j の提示回数を増やせば、 β_j の推定誤差は小さくなる

- 一般的な一対比較法の場合
 - パラメータ $\beta_1, \dots, \beta_J$ に等しく関心がある
 - → 提示回数を、すべての刺激に等しく配分するのが効率的
- いっぽう、本研究の文脈では
 - $\exp(\beta_1), \dots, \exp(\beta_J)$ に関心がある
 - β_j が大きいとき(すなわち $\exp(\beta_j)$ が大きいとき)、 $\exp(\beta_j)$ の推定誤差も大きくなる
 - → **提示回数を、 $\exp(\beta_j)$ が大きい刺激に多く配分するのが効率的**
- 提案手法はこの配分を実現している
 - 価格水準 j がある対象者に提示される確率は、 $\exp(\beta_j) = p(j)$ が大きいときに大きくなる
 - マルコフ連鎖が定常分布に収束していれば $p(j) + \sum_{k \neq j} p(k)q(j|k)$
 - 例. 提案分布 $q(j|k)$ が一様分布であるとき $p(j) + (1 - p(j))/(J - 1)$
 - 提案分布の設定によって調整できる

関連手法との比較

提案手法と密接に関連する手法として、以下の3つが挙げられる：

- MCMC
- MCMCP
- 一対比較法

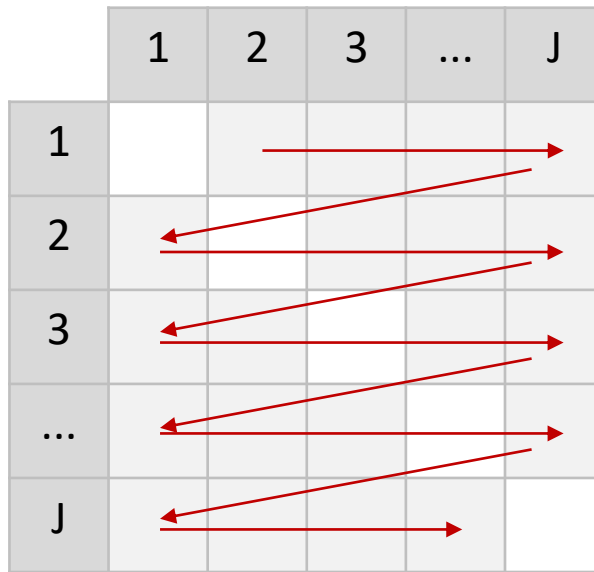
- 確率分布から標本を効率的に得る方法
 - 統計科学において広く用いられている
- 古典的なMCMCアルゴリズム (Metropolisアルゴリズム)
 - 目標とする確率密度関数 $p(x)$ に比例した関数を $h(x)$ とする
 - 統計モデルのベイズ推定では、尤度と事前確率の積を用いる
 - $q(y|x) = q(x|y)$ を満たす適切な提案分布 $q(y|x)$ を定める
 - 現在状態 x の初期値を定める
 1. $q(y|x)$ から提案状態 y をドローする
 2. 確率 $r(x, y) = h(y)/h(x)$ で提案状態を受理し、現在状態とする
 3. 1. に戻る
- 提案手法(単純集計)は、Metropolisアルゴリズムに近い。ただし、
 - 受理確率として、Luceの選択公理 $r(x, y) = h(y)/(h(x) + h(y))$ を仮定する
 - 60年代に提案されたBarker アルゴリズム (Latuszynski, Roberts, & Goncalves, 2017) に相当する
 - $h(x)$ を直接評価するのではなく、**調査参加者による受理/不受理の選択結果を用いる**

- 人間を対象にしたMCMC
 - 心的カテゴリ表象を特定する手法
 - 心理学者 Sanborn らによって提案
 - Sanborn & Griffiths(2007), Sanborn, Griffiths, & Shiffrin(2009), Martin, Griffiths, & Sanborn (2012), Hsu, Martin, Sanborn, & Griffiths(2019)
- MCMCPの手続き
 - 多数の多次元的刺激(例, 顔画像)を用意
 - 被験者に2つの刺激を提示する。一方(現在刺激)は前の試行で選択した刺激、他方(提案刺激)は現在刺激の下で提案分布からドロースた刺激とする
 - 2つの刺激のうち、測定対象である心的カテゴリにあてはまるほうを選ばせる
 - 例, 「どちらの顔がhappyな顔ですか」
 - これを同一の被験者について多数繰り返す。刺激に対する選択回数の分布を、刺激空間における心的カテゴリの分布とみなす

- 提案手法(単純集計)は、多くの点でMCMCPに近い。ただし以下の点が異なる：
 - 多次元的な刺激ではなく、一次元的な刺激 (価格) を用いる
 - 個人の心的カテゴリ表象ではなく、集団の選択行動の要約 (価格受容性) に関心を持つ
 - 各調査参加者に多数の対比較試行を求めるのではなく、**ひとり1試行のみ**を求める

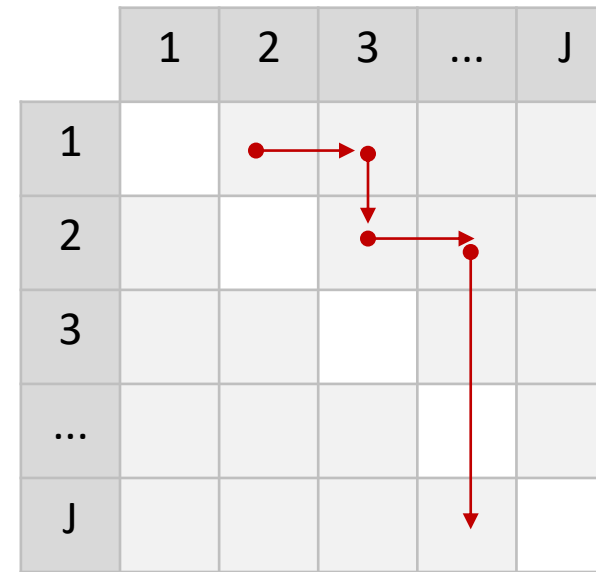
- 刺激が一次元的な心理量 (例, 主観的価値) を持つと考えられるとき、その量を測定するための手法
 - 心理学において長い伝統を持つ
 - マーケティング・リサーチにおいても用いられている (例, 製品の官能評価)
 - しかし、価格調査においてはほとんど用いられていない
- 一対比較法の標準的な手続き
 - 実験計画に従い、刺激集合から2つを取り出したペアを提示し、いずれかを選ばせる
 - 回答に確率モデルをあてはめ、各刺激が持つ量を推定する
 - 代表的な確率モデル: Bradley-Terryモデル
- 実験計画 (誰になにを提示するか)
 - 通常は事前に決める
 - 推定精度を最大化する実験計画を採用することが多い
 - ひとり1試行の場合、すべてのペアにできるだけ均等な人数を割り当てる
 - 適応的実験計画も提案されている
 - ベイジアン最適実験計画法によるアプローチ (Glickman & Jensen, 2005)
 - 複雑な計算が必要

- 提案手法(BT推定)は、標準的な一対比較法手続きと比べて以下の点が異なる：
 - 標準的な手続きでは、すべての刺激ペアにできるだけ均等な人数を割り当てる
 - 提示刺激ペアを系統巡回連鎖を用いて静的に決定していると捉えることもできる
 - 本提案では、マルコフ連鎖を用いて**提示刺激ペアを適応的に決定する**



一対比較法の標準的手続き

すべての刺激ペアに、できるだけ均等に人数を割り付ける。上図の行列上を系統的に巡回しているとみられることもできる



提案手法

直前の調査参加者の回答に従って移動する。選択率が高い刺激がより多く提示される

シミュレーション

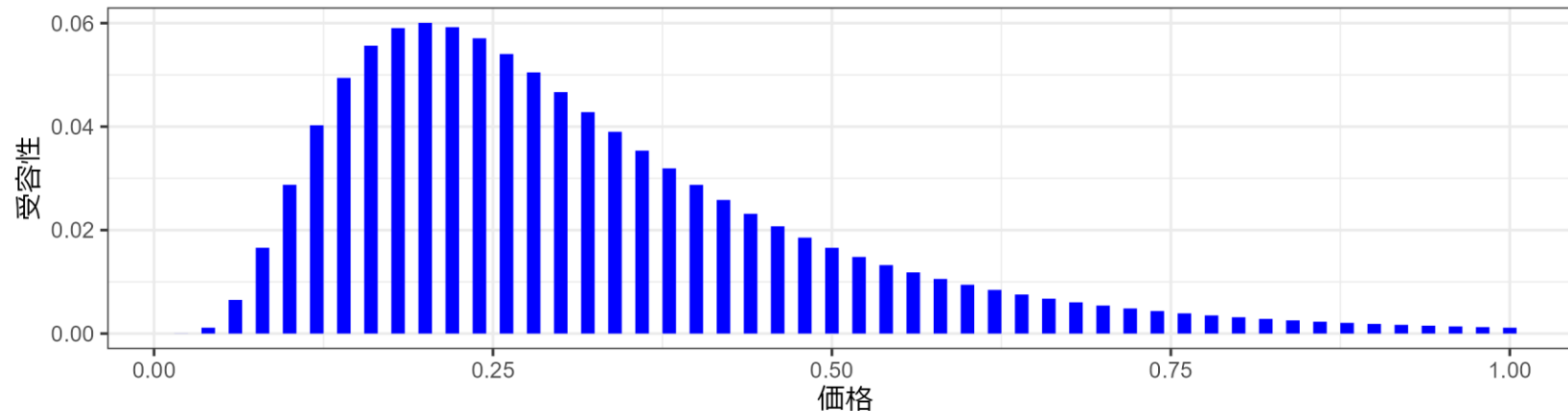
提案手法の性質について、4つのシミュレーション実験を通じて検討する

	価格受容性 (全体)	価格受容性 の異質性	価格水準数	提示刺激の 決定方法	価格受容性 の推定方法	試行あたり 標本サイズ	推定性能の 評価
実験1	固定	なし	固定	操作 (4種類)	操作 (2種類)	～10000	全体, 価格水 準別
実験2	固定	なし	操作 (3水準)	操作 (4種類)	操作 (2種類)	～5000	全体
実験3	操作 (3x3=9 水準)	なし	固定	操作 (4種類)	操作 (2種類)	～5000	全体
実験4	固定	操作 (2x2=4 水準)	固定	操作 (4種類)	操作 (2種類)	～5000	全体

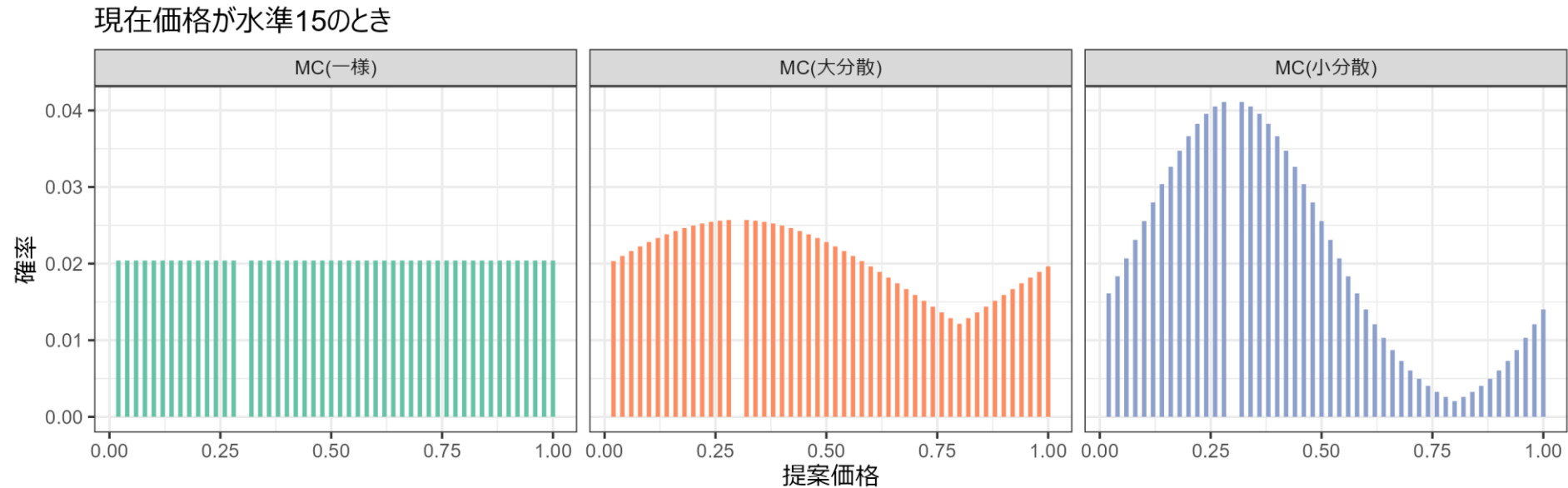
架空の価格受容性を設定し、モンテカルロ・シミュレーションを行った

<設定>

- 価格水準
 - 50水準。区間[0,1]を50等分し、各区間の右端を価格水準とした
- 価格受容性
 - 価格水準 j の価格受容性 $p(j)$ を下図のように設定した
 - 対数正規分布の確率密度に従って設定した
 - もっとも価格受容性が高い価格水準を0.2、50個の価格受容性のSDを0.02とした



- 提示刺激の決定方法: 以下の4種類を比較する
 - ベンチマーク手法
 - 系統巡回:** 価格水準のすべてのペアをランダムな順に並べ、調査参加者を1名ずつランダム順に割り当てる。これを繰り返す
 - 提案手法
 - MC(一様):** 提案分布 $q(k|j)$ は $j (\neq k)$ に対する一様分布とする
 - MC(大分散):** 提案分布 $q(k|j)$ は、価格水準を等間隔に並べた円周上の正規分布(SD 0.4)から生成
 - MC(小分散):** 提案分布 $q(k|j)$ は、価格水準を等間隔に並べた円周上の正規分布(SD 0.2)から生成

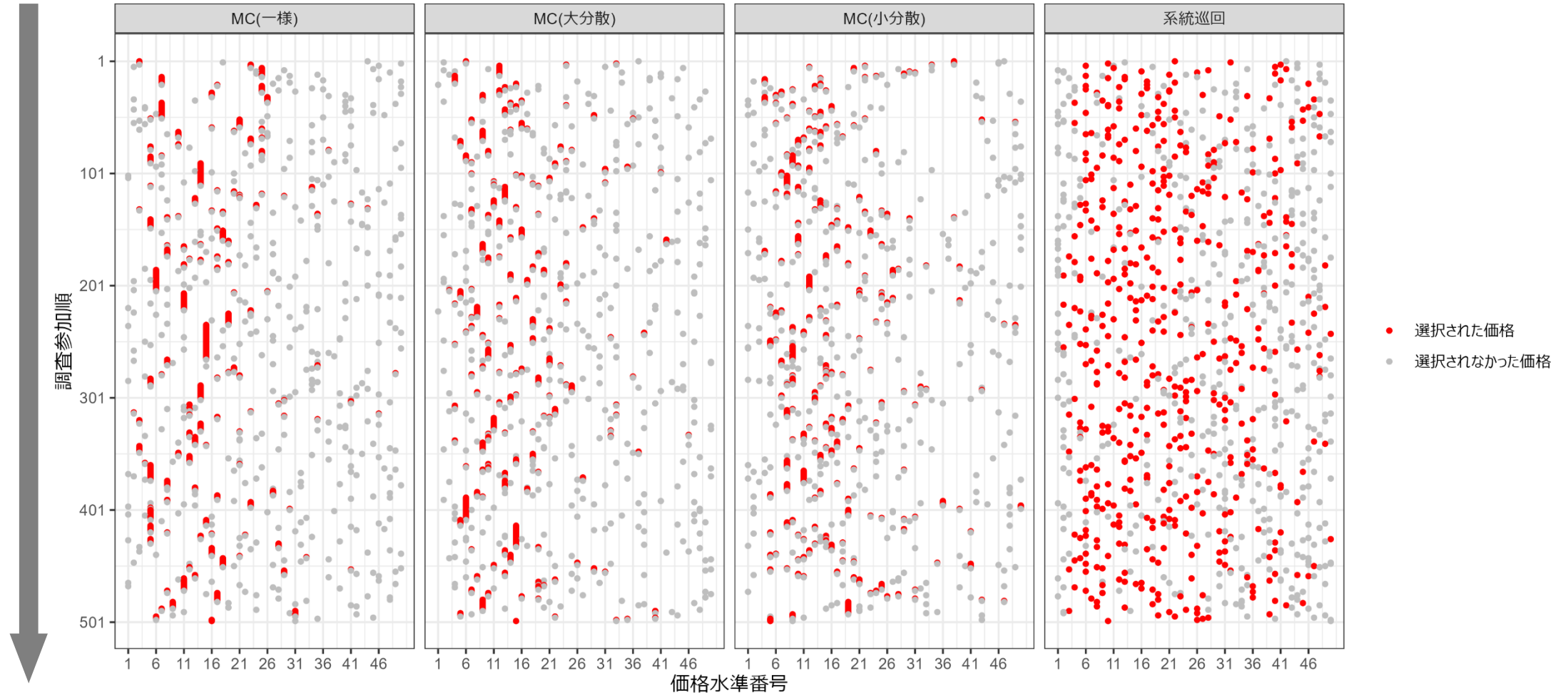


<手続き>

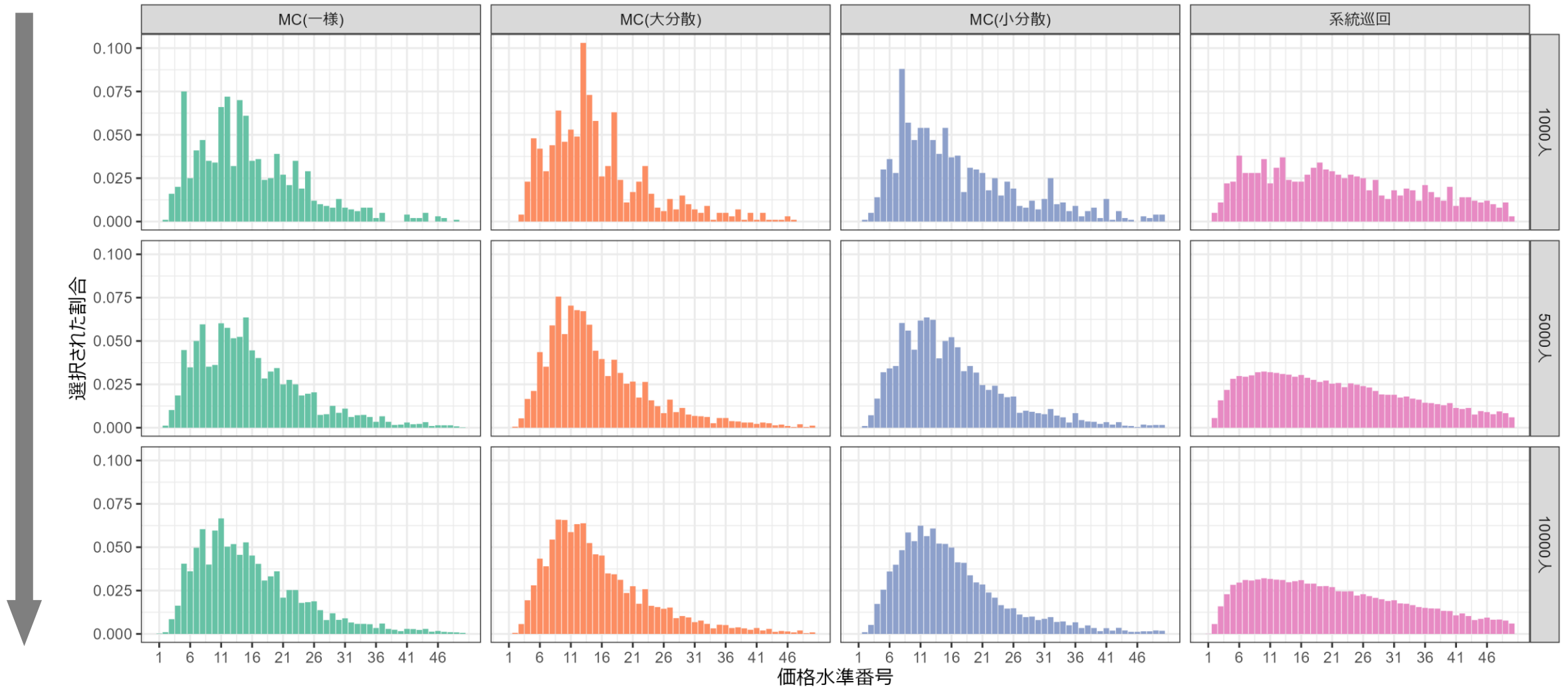
- 提示刺激の決定方法(4水準)のそれぞれについて
 - 価格水準のすべてのペアについて、一対比較の選択率を求めた
 - 選択率行列に基づき、一対比較選択のマルコフ連鎖ないし独立巡回連鎖を生成した
 - 500試行を行った
 - 各試行における標本サイズ(調査参加者数) は10000人とした

ある試行について、調査参加者が回答する様子を示す

- 提案分布の分散を小さくすると、受容性の高い価格水準が提示されやすくなる

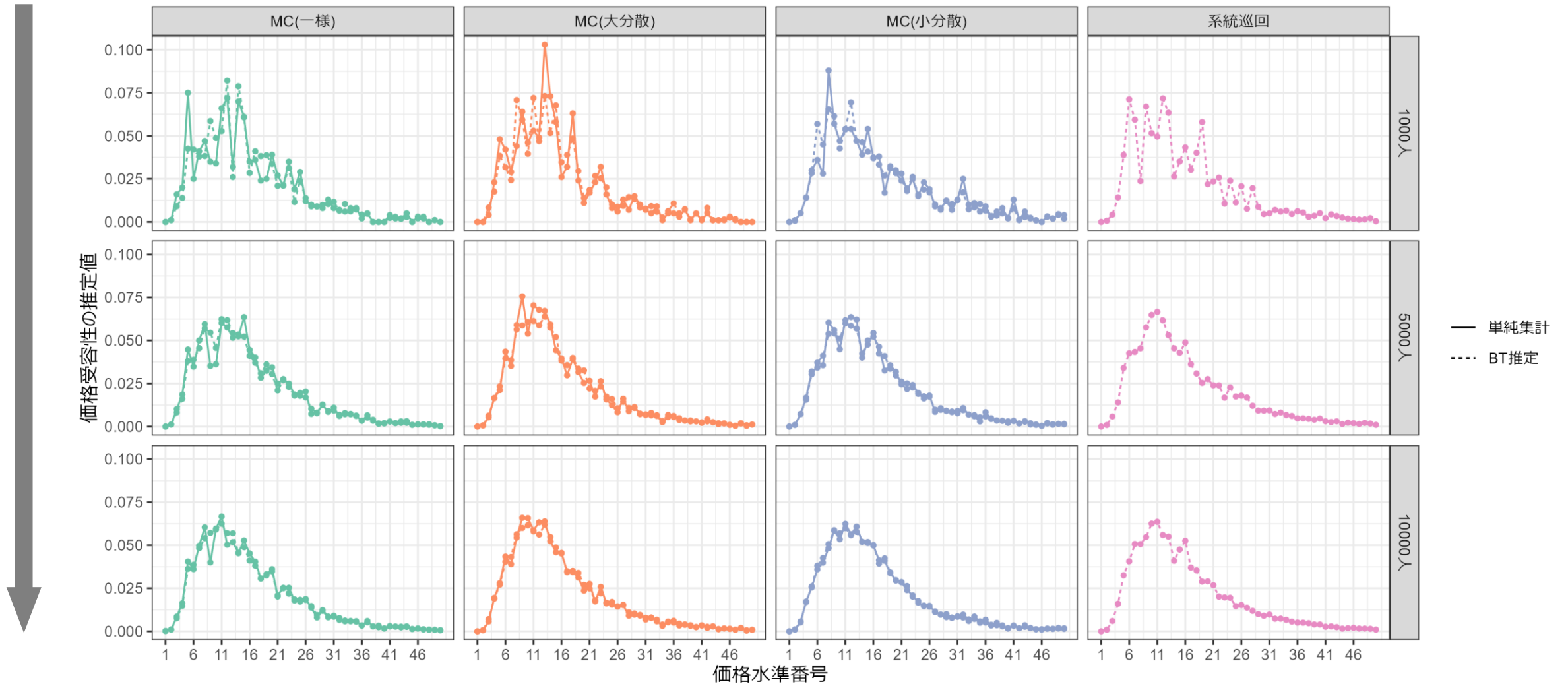


前頁の試行について、選択された価格の分布が標本サイズの増大によって変化する様子を示す



- 各試行において、調査参加者{1000, 2000, ..., 10000}人を得た時点で、価格受容性を2種類の方法で推定した
 - **BT推定** (ベンチマーク手法, 提案手法)
 - 観察された選択にBradley-Terryモデルをあてはめ、パラメータ β_j の最尤推定値 $\hat{\beta}_j$ を得る
 - $\exp(\hat{\beta}_j)$ を合計1にスケーリングし、価格受容性の推定値とする
 - **単純集計** (提案手法のみ)
 - 観察された選択においてある価格水準が占める割合を、その価格水準の受容性の推定値とみなす

前々頁の試行について、価格受容性の推定値が標本サイズの増大によって変化する様子を示す



<推定性能の評価>

- 提示刺激の決定方法(4水準) x 試行(500) x 標本サイズ(10) ごとに、価格受容性の推定性能を評価した
- 性能評価のための指標として以下の2つを用いた。価格水準 j に対する受容性 $p(j)$ の推定値を $\hat{p}(j)$ として、

- 各価格水準における絶対誤差

$$AE_j = |p(j) - \hat{p}(j)|$$

- 推定性能が高いときに0に近づく

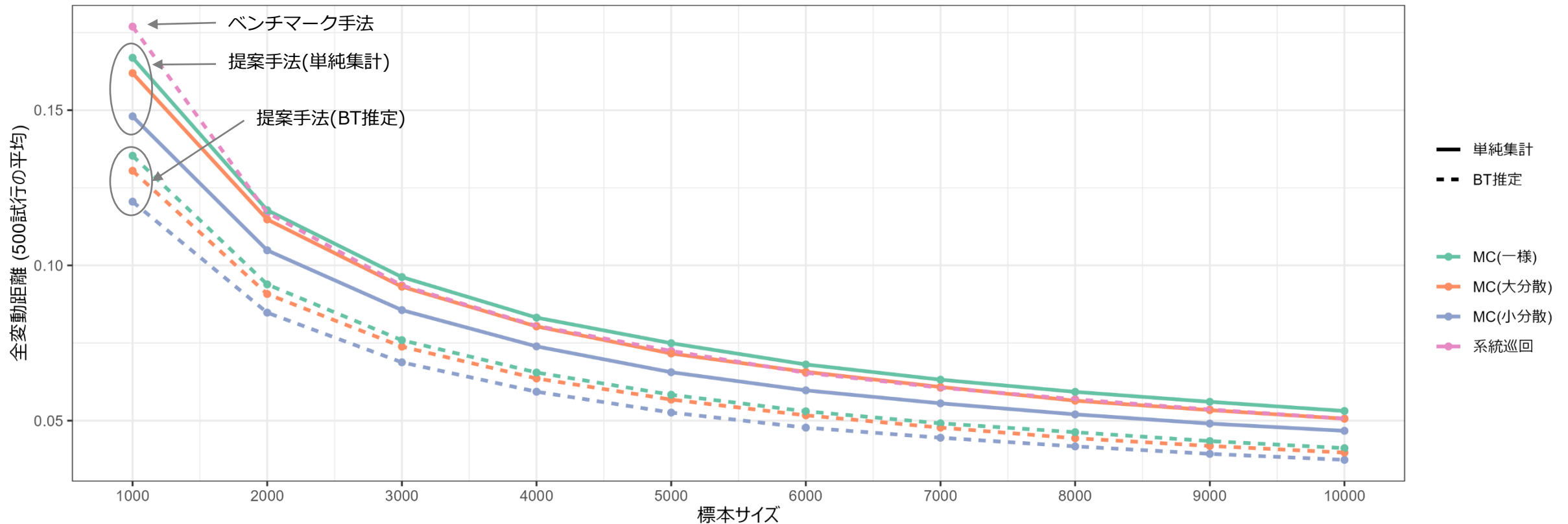
- 全変動距離

$$D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J |p(j) - \hat{p}(j)|$$

- 0から1の間の値をとり、推定性能が高いときに0に近づく

＜結果＞ 提案手法(BT推定)は、ベンチマーク手法(系統巡回+BT推定)と比べて高い推定性能を示した

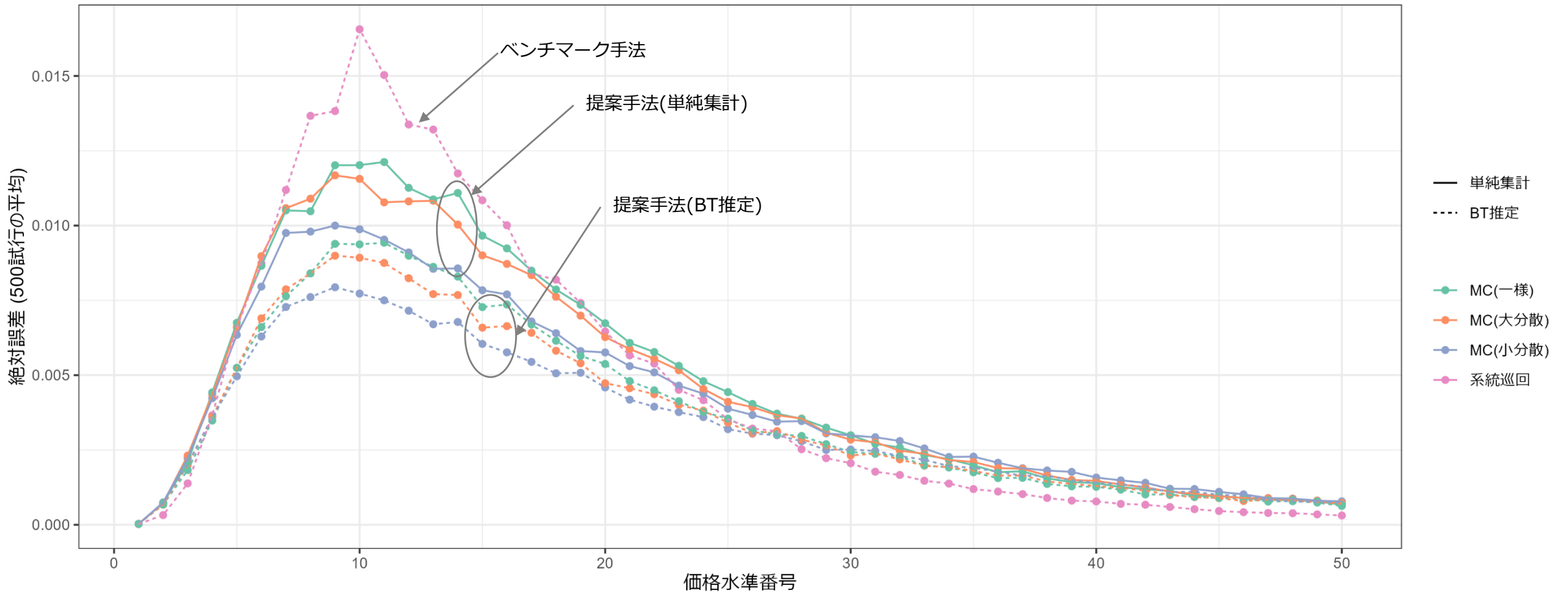
- 提案手法(単純集計)は、ベンチマーク手法に匹敵する推定性能を示した
- 提示刺激の決定方法としてはMC(小分散)が優れていた



標本サイズ1000・MC(小分散) では、0.2%の試行でBT推定が不能であった。除外して集計した

提案手法(単純集計, BT推定)は、特に強い関心がもたれる領域(受容性のピークの右側)において、ベンチマーク手法に比べて高い推定性能を示した

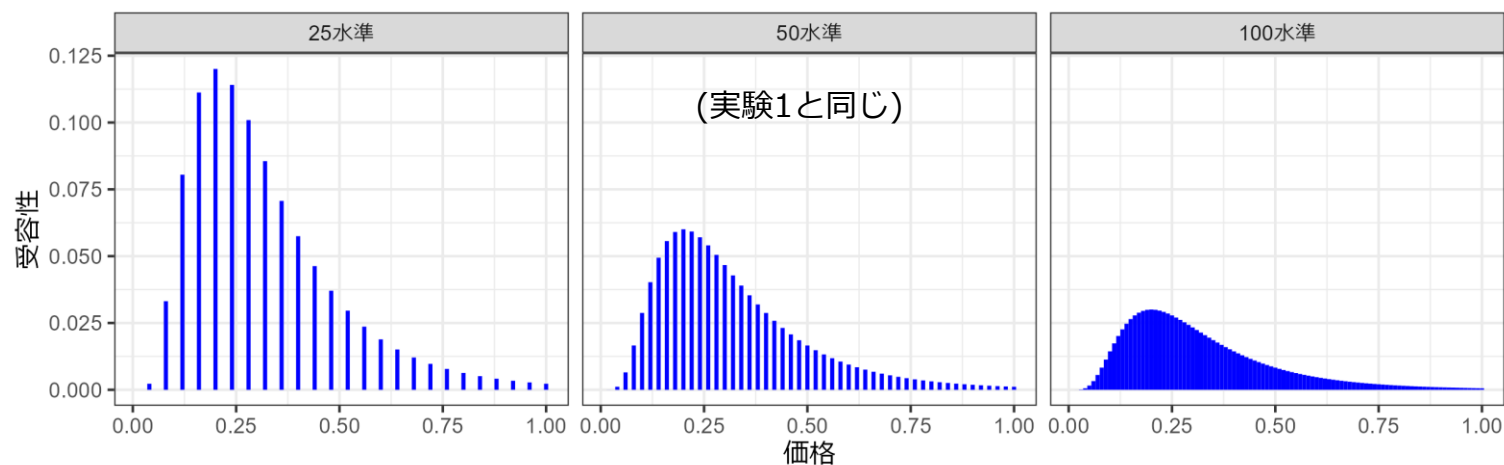
標本サイズ: 2000人



提案手法の性能と**価格水準数**との関連性について検討する

<実験1からの変更点>

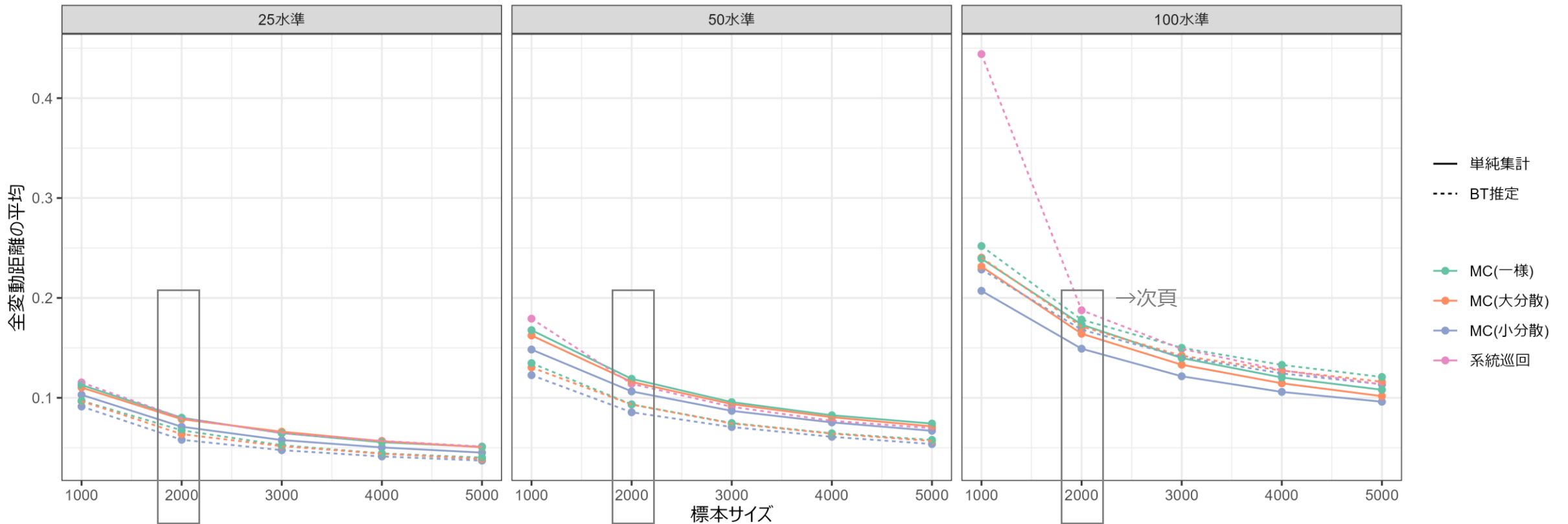
- 価格水準数: {25水準, 50水準, 100水準} の3種類について検討する
 - 実験1と同一の対数正規分布に基づいて生成した
 - 水準数が多いほど、価格受容性のSDは小さくなる



- 試行数を100, 試行あたり標本サイズを5000人とする
- 推定性能の評価には全変動距離を用いる

＜結果＞ 提案手法はベンチマーク手法より優れた性能を示した

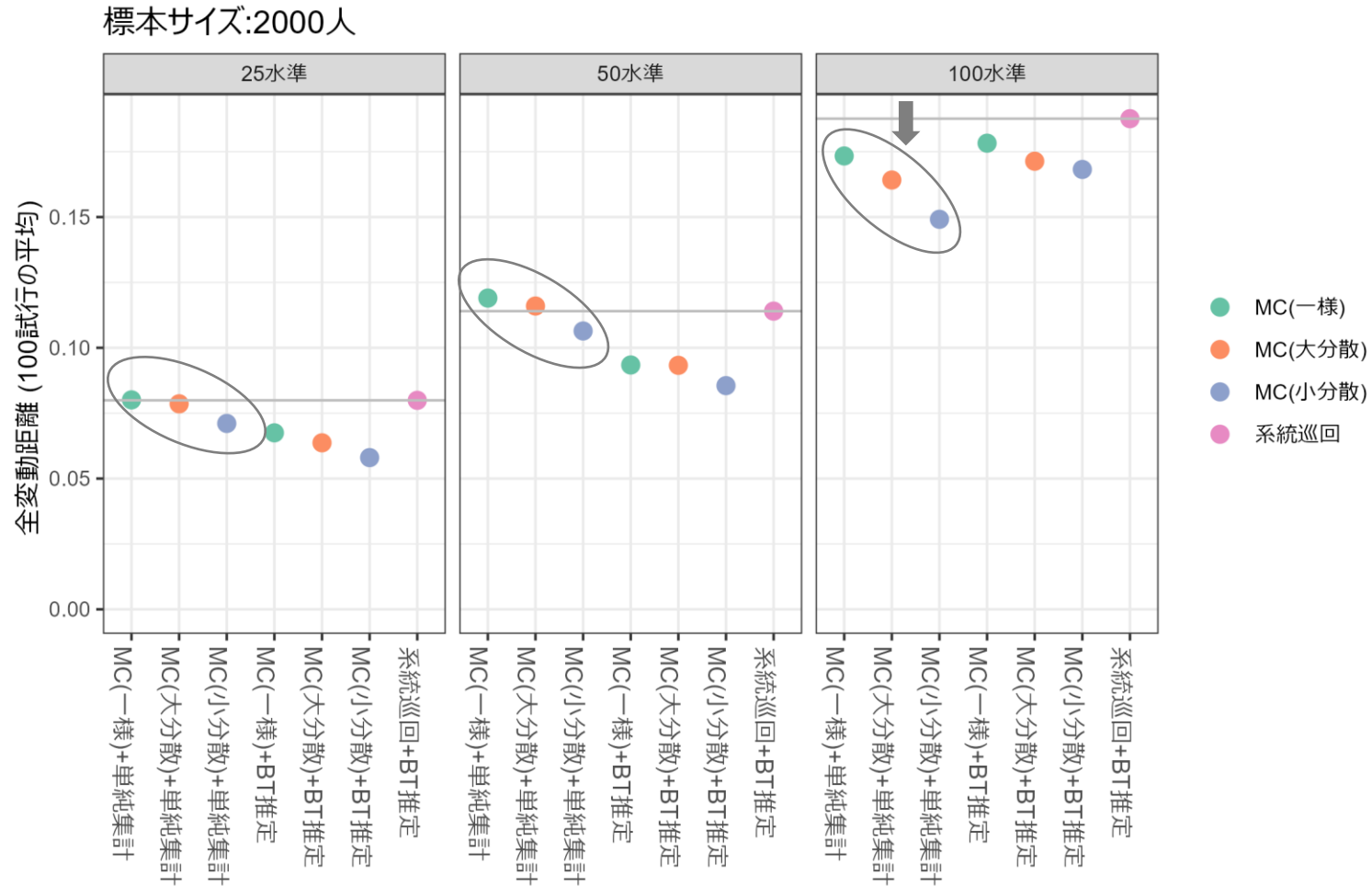
- 水準数が多く標本サイズが小さいとき、ベンチマーク手法の推定性能は著しく低下するが、提案手法は一定の性能を保っている



標本サイズ1000・MC(小分散) では、50水準の試行のうち1%, 100水準の試行のうち16%で、BT推定が不能であった。除外して集計した

価格水準数が大きいとき、BT推定より単純集計の性能が高くなった

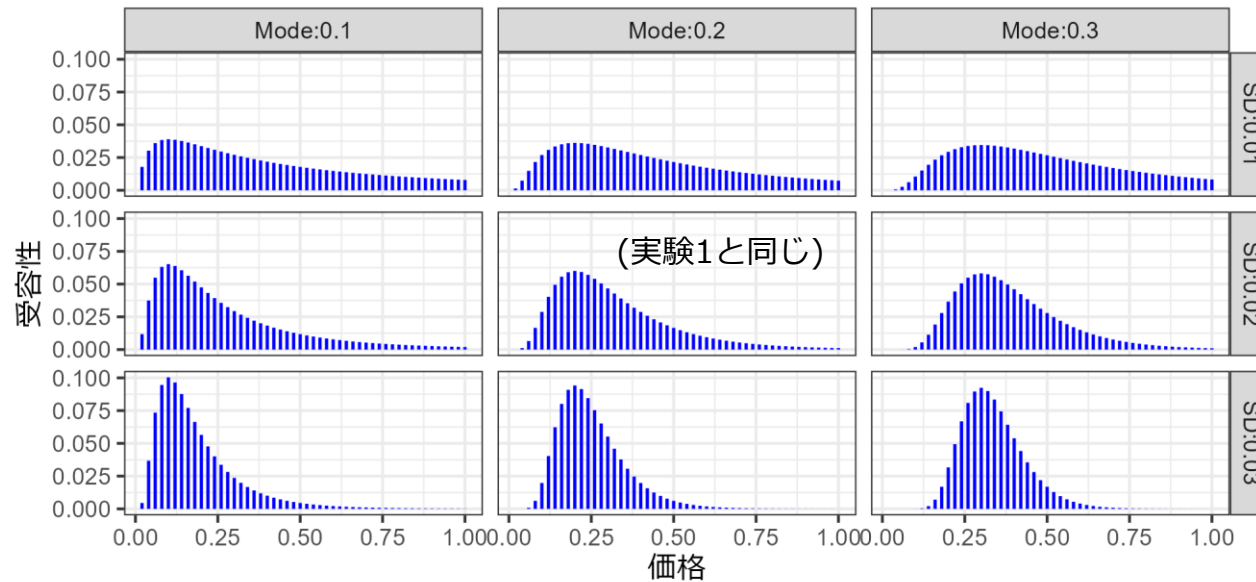
- Bradley-Terryモデルのパラメータ推定精度が、パラメータ数の増大に伴って低下するためと思われる



提案手法の性能と、**価格受容性の分布の形状**との関連性について検討する

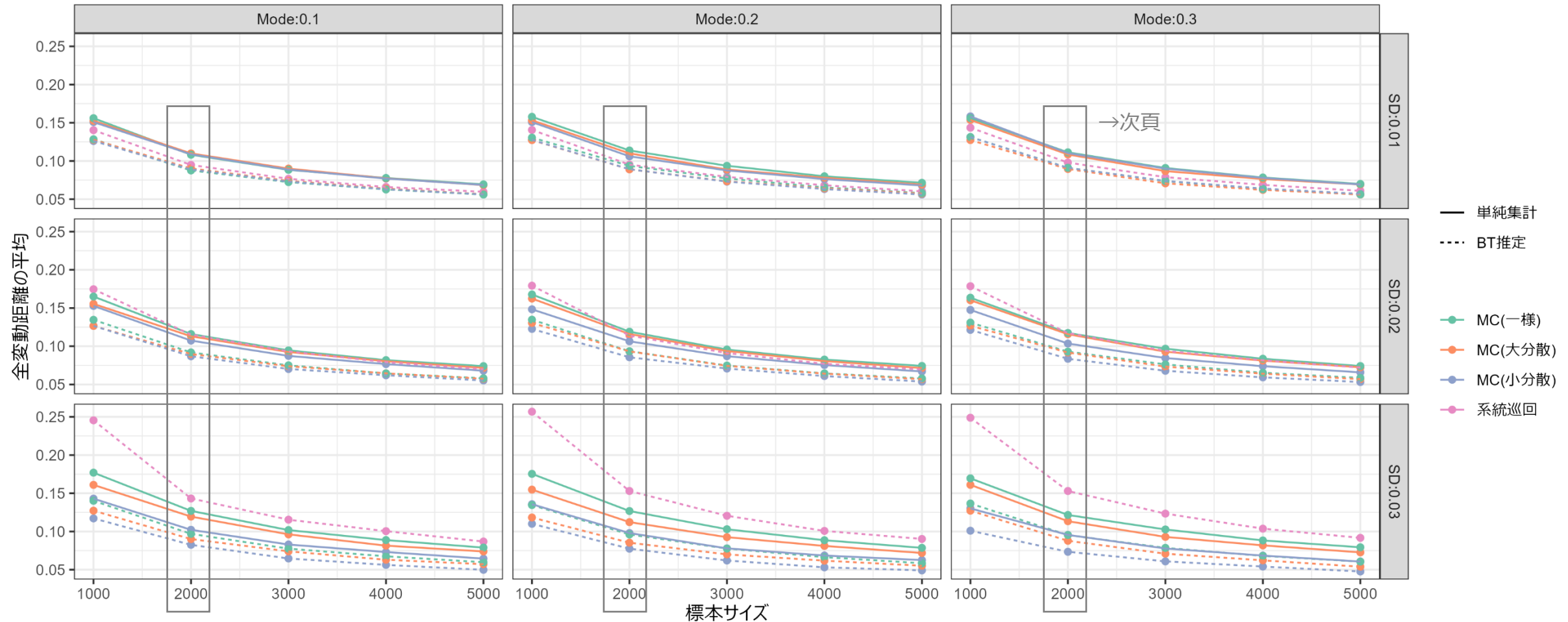
<実験1からの変更点>

- 価格受容性: もっとも受容性が高い価格水準と価格受容性のSDを操作し、 $3 \times 3 = 9$ 個の分布について検討する
 - いずれも対数正規分布の確率密度に従う



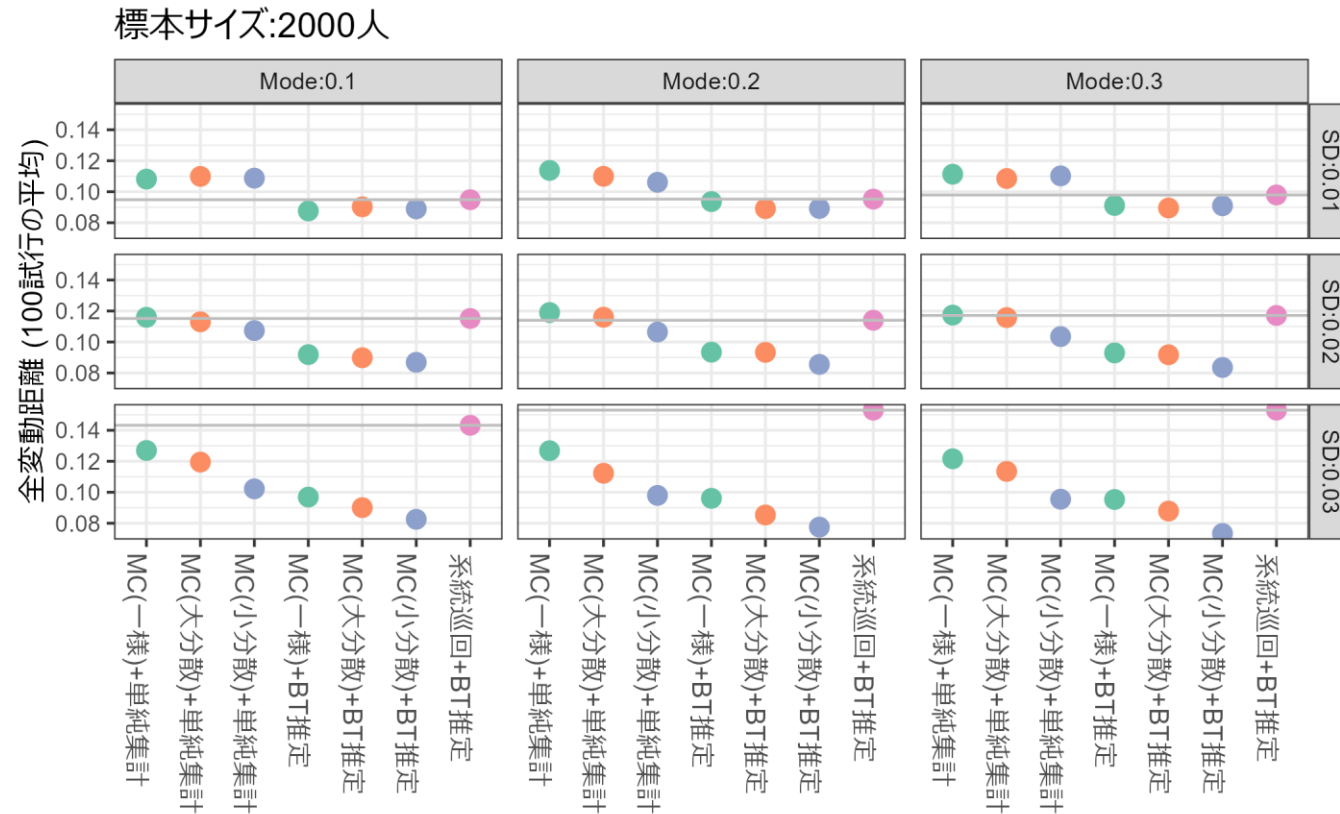
- 試行数を100, 試行あたり標本サイズを5000人とする
- 推定性能の評価には全変動距離を用いる

＜結果＞ 提案手法(BT推定)は、すべての条件下でベンチマーク手法よりも優れた性能を示した



標本サイズ1000, Mode={0.1,0.2,0.3},SD=0.03,MC(小分散)の試行のうち{1%, 6%, 6%}でBT推定が不能であった。除外して集計した

- 価格受容性のSDが大きいとき、提案手法とベンチマーク手法の推定性能の差が大きくなる。また、分散が小さい提案分布がより有利になる
- BT推定は単純集計より優れる
- 受容性が高い価格水準の位置は、推定性能に影響しない



提案手法の性能と、**価格受容性の個人間異質性**との関連性について検討する

<背景>

- 実験1-3では、価格受容性が調査対象者間で共通であると仮定した
- しかし現実の市場においては、消費者の価格受容性には個人差がみられる。たとえば、
 - より低価格/高価格を好む消費者が存在する
 - 価格に対してより敏感/鈍感な消費者が存在する

<個人間異質性があるときのマルコフ連鎖の性質>

価格受容性の個人間異質性を考慮し、以下のように仮定する：

- **仮定1.** 価格水準 $j(= 1, \dots, J)$ に対し、対象者 i は価格受容性 $f_i(j) > 0$ を持つ
 - 合計が1になるようにスケーリングし、 $p_i(j) = f_i(j) / \sum_{k=1}^J f_i(k)$ とする
- **仮定2.** 2つの価格水準 j, k を提示されたとき、任意の対象者が k を選択する確率は下式に従う：

$$\tilde{r}(j, k) = E_i \left[\frac{p_i(k)}{p_i(j) + p_i(k)} \right]$$

- 仮定1,2のもとで、 t 番目の対象者が選択する価格水準 X_t は離散状態マルコフ過程に従う
 - 遷移確率は：

$$P(X_{t+1} = k | X_t = j) = P_{jk} = q(k|j)\tilde{r}(j, k) \quad \text{for } j \neq k$$

- 提案分布の性質より、マルコフ連鎖 X_t は既約かつ非周期的であり、従って唯一の定常分布を持つ
- では、定常分布はどのような分布か？

	k=1	k=2	k=3	...	k=J
j=1	$1 - \sum_{l \neq 1} q(l 1)\tilde{r}(1, l)$	$q(2 1)\tilde{r}(1, 2)$	$q(3 1)\tilde{r}(1, 3)$	...	$q(J 1)\tilde{r}(1, J)$
j=2	$q(1 2)\tilde{r}(2, 1)$	$1 - \sum_{l \neq 2} q(l 2)\tilde{r}(2, l)$	$q(3 2)\tilde{r}(2, 3)$	...	$q(J 2)\tilde{r}(2, J)$
j=3	$q(1 3)\tilde{r}(3, 1)$	$q(2 3)\tilde{r}(3, 2)$	$1 - \sum_{l \neq 3} q(l 3)\tilde{r}(3, l)$	...	$q(J 3)\tilde{r}(3, J)$
...	...	...	...	...	...
j=J	$q(1 J)\tilde{r}(J, 1)$	$q(2 J)\tilde{r}(J, 2)$	$q(3 J)\tilde{r}(J, 3)$	...	$1 - \sum_{l \neq J} q(l J)\tilde{r}(J, l)$

$$\tilde{r}(j, k) = E_i \left[\frac{p_i(k)}{p_i(j) + p_i(k)} \right]$$

マルコフ連鎖の遷移行列

- マルコフ連鎖の定常分布は提案分布によって異なる
 - 価格水準別の受容性の平均 $E_i[p_i(\cdot)]$ とも、Bradley-Terryモデルによる推定の期待値とも異なる

数値例:

価格受容性		価格水準				合計
		1	2	3	4	
群	1	0.40	0.30	0.20	0.10	1.00
	2	0.05	0.30	0.20	0.45	1.00
全体		0.225	0.300	0.200	0.275	1.00

(群1, 2のサイズは等しいものとする)

受容性の平均

一対比較における選択率 (列側が選択される確率)

群1		価格水準			
		1	2	3	4
価格水準	1	0.400		0.429	0.333
	2	0.300	0.571		0.400
	3	0.200	0.667	0.600	
	4	0.100	0.800	0.750	0.667

群2		価格水準			
		1	2	3	4
価格水準	1	0.050		0.857	0.800
	2	0.300	0.143		0.400
	3	0.200	0.200	0.600	
	4	0.450	0.100	0.400	0.308

全体		価格水準			
		1	2	3	4
価格水準	1		0.643	0.567	0.550
	2	0.357		0.400	0.425
	3	0.433	0.600		0.513
	4	0.450	0.575	0.487	

推定量の期待値

群1		1	2	3	4
系統巡回+BT推定(最尤推定量の期待値)		0.400	0.300	0.200	0.100
MC (提案分布: 一様) の定常分布		0.400	0.300	0.200	0.100
MC (提案分布: より小分散) の定常分布		0.400	0.300	0.200	0.100

定常分布は価格受容性と一致する

群2		1	2	3	4
系統巡回+BT推定(最尤推定量の期待値)		0.050	0.300	0.200	0.450
MC (提案分布: 一様) の定常分布		0.050	0.300	0.200	0.450
MC (提案分布: より小分散) の定常分布		0.050	0.300	0.200	0.450

全体		1	2	3	4
系統巡回+BT推定(最尤推定量の期待値)		0.188	0.338	0.233	0.241
MC (提案分布: 一様) の定常分布		0.188	0.338	0.232	0.242
MC (提案分布: より小分散) の定常分布		0.189	0.340	0.231	0.241

Bradley-Terryモデルによる推定の期待値

定常分布は提案分布によって異なる

提案分布(より小分散な分布)

	1	2	3	4
1		0.40	0.20	0.40
2	0.40		0.40	0.20
3	0.20	0.40		0.40
4	0.40	0.20	0.40	

<推定対象についての想定>

この実験では、推定の目標を

累積レベルの一対比較データに対して、(価格受容性の異質性を考慮せずに)Bradley-Terryモデルをあてはめたときの価格受容性の推定量の期待値

と想定し、提案手法をこの量の推定方法と捉えて、その推定性能について検討する。

理由:

- マーケターは、異なる価格に対する市場の反応のちがいに興味を持つ。従って、個人の価格受容性の平均より、むしろ累積レベルの選択率そのものに関心を持たれる
- 上記の量は、その心理学的な意味ははっきりしないが、累積レベルの選択率の要約的記述となっている

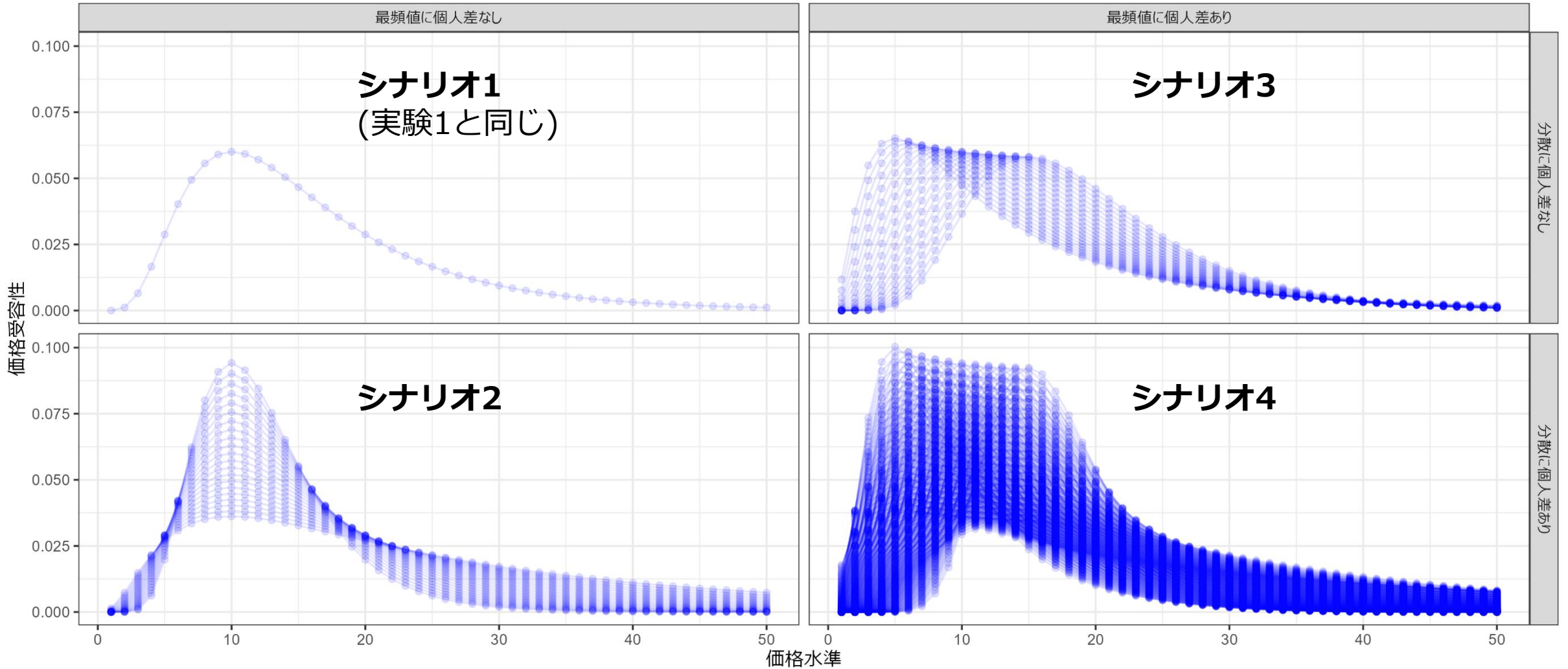
<実験1からの変更点>

- 価格受容性
 - 調査参加者 i , 価格水準 j の価格受容性 $p_i(j)$ を以下のように生成した
 - 区間 $[0,1]$ を50等分し、各区間の右端 $(0.02, 0.04, \dots, 1.00)$ を価格水準 $j(= 1, 2, \dots, J)$ の値 x_j とする
 - 個人のパラメータ m_i, s_i を以下とする

	m_i	s_i	注
シナリオ1	0.2	0.02	実験1と同じ
シナリオ2	0.2	(0.010, 0.011, ..., 0.030) から等確率で ドロー	価格の高さへの選好に個人差がある
シナリオ3	(0.10, 0.11, 0.12, ..., 0.30) から等確率で ドロー	0.02	価格への敏感さに個人差がある
シナリオ4	(0.10, 0.11, 0.12, ..., 0.30) から等確率で ドロー	(0.010, 0.011, ..., 0.030) から等確率で ドロー	両方に個人差がある

- 個人 i , 価格水準 j の価格受容性 $p_i(j)$ を以下のように設定した:
 - 最頻値が m_i である対数正規分布の確率密度に基づく
 - 50個の価格受容性のSDが s_i となる

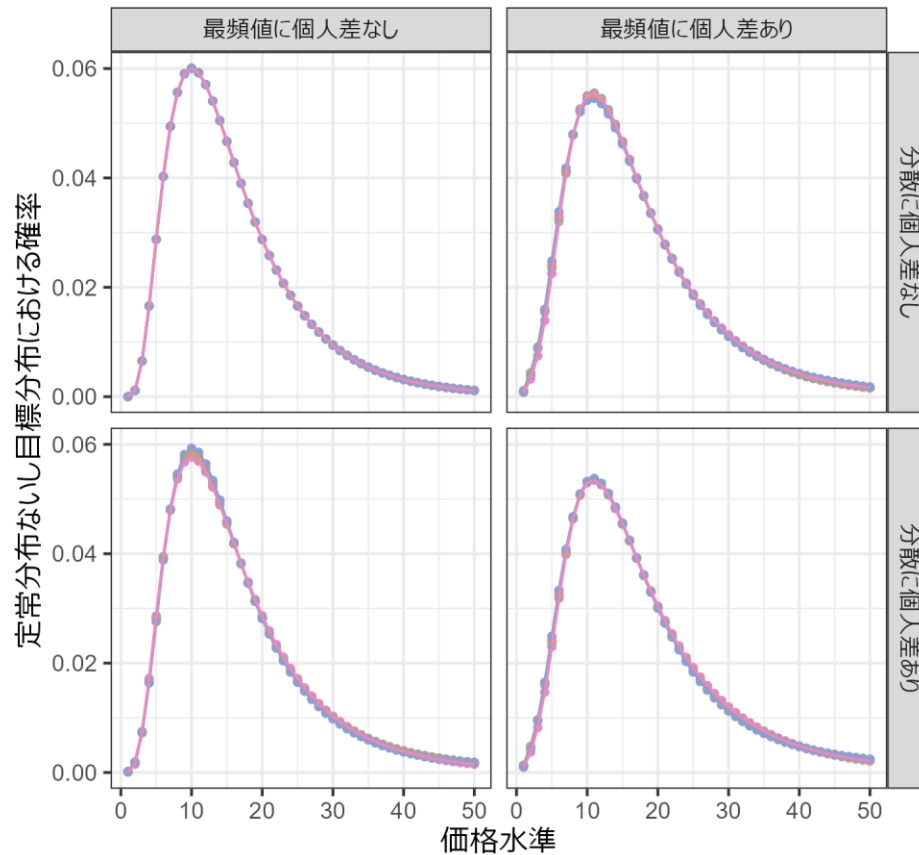
各シナリオにおける価格受容性を示す



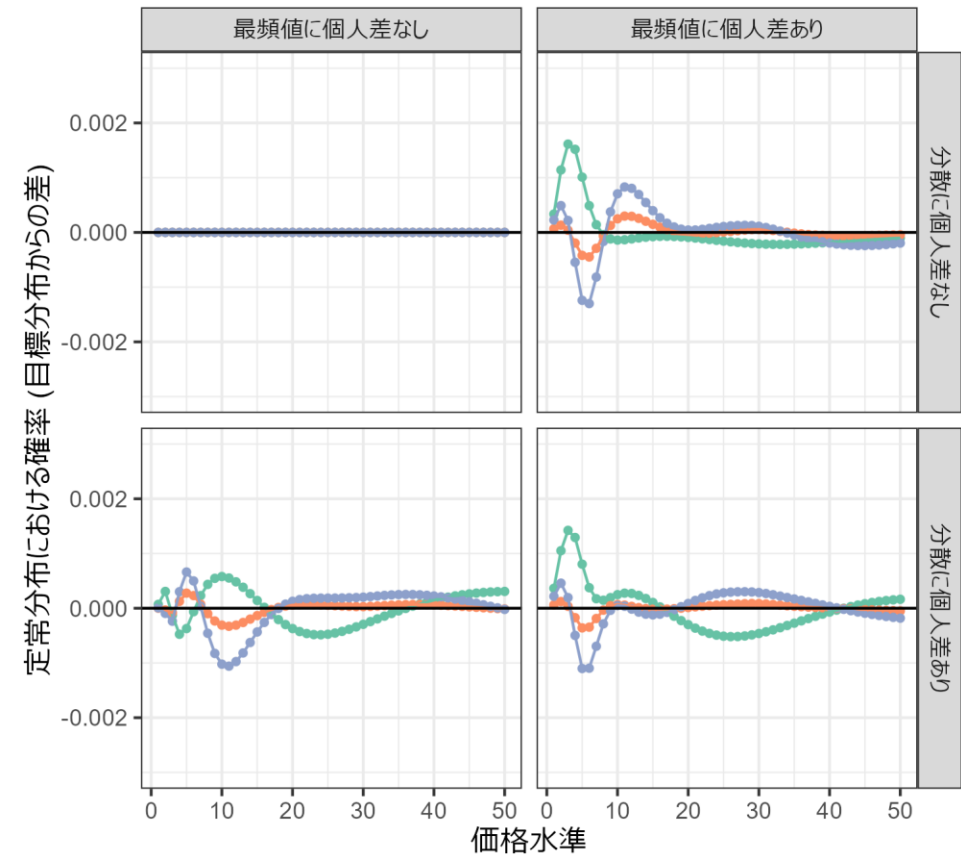
- シミュレーションの手続き
 - 試行数を100, 試行あたり標本サイズを5000人とする
 - 推定性能の評価には全変動距離を用いる
- 目標分布
 - シミュレーションとは別に、各シナリオにおいて累積レベルの一对比較選択率にBradley-Terryモデルを当てはめたときの、各価格水準の受容性の最尤推定値を求めた
- 定常分布
 - シミュレーションとは別に、各シナリオ・提案分布におけるマルコフ連鎖の定常分布を求めた

＜結果＞ 提案手法におけるマルコフ連鎖の定常分布は、目標分布と異なるが、差はごく小さい

- すなわち、価格受容性に個人差があるとき、提案手法(単純集計)による推定は一致性を持たないが、バイアスは小さい

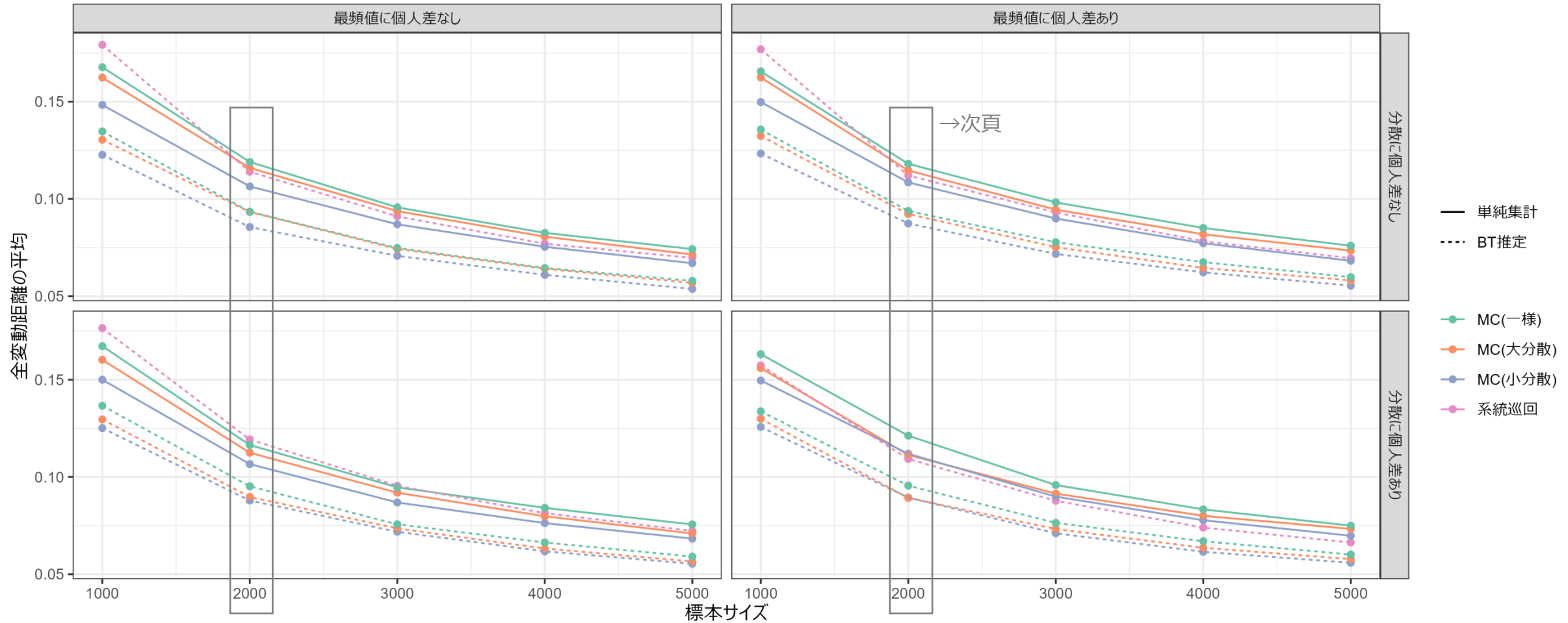


MC(一様)
 MC(分散大)
 MC(分散小)
 目標分布

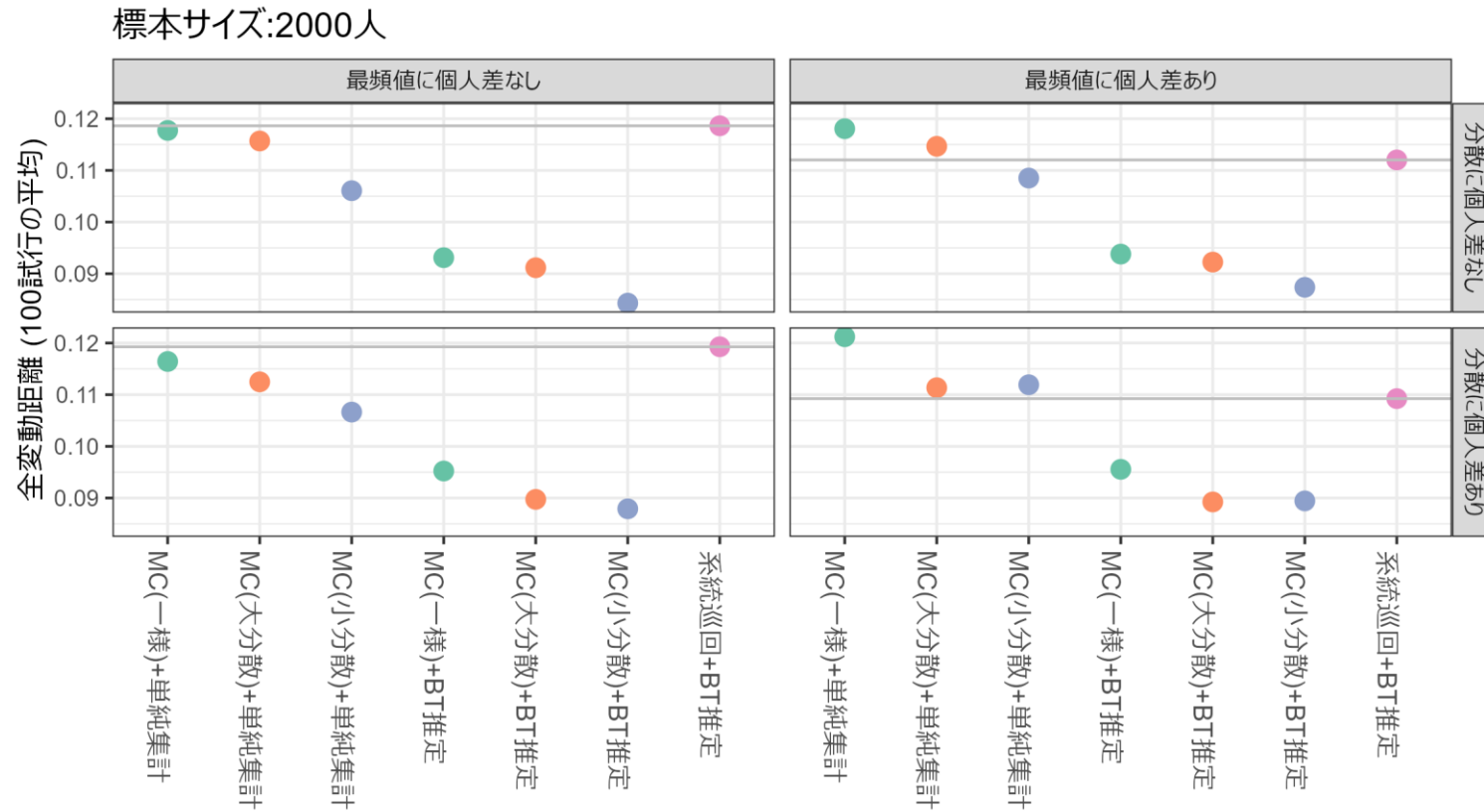


MC(一様)
 MC(分散大)
 MC(分散小)

提案手法(BT推定)は、ベンチマーク手法よりも優れた性能を示した



- 受容性のピークに個人差があるとき(シナリオ3, 4)、提案手法(単純集計, BT推定)とベンチマーク手法との性能差は縮まる。しかし、BT推定は依然としてベンチマーク手法より優れている



実験から以下の知見が得られた：

- **提案手法(BT推定)は、標準的な一対比較法と比べ、価格受容性の推定性能が高い(実験1-4)**
 - 特に、強い関心が持たれる領域である受容性のピークの右側における推定性能が高い (実験1)
 - 価格水準数に照らして標本サイズが小さいときも、推定性能があまり低下しない(実験2)
 - 価格受容性の分散が大きいとき、推定性能が優れる(実験3)
- **提案手法(単純集計)は、その簡便さにも関わらず、標準的な一対比較法に匹敵する推定性能を示す(実験1-4)**
 - 価格水準数に照らして標本サイズが小さいとき、提案手法(BT推定)の推定性能を上回ることがある(実験2)
 - 価格受容性に個人差があるときにはわずかなバイアスを持つ (実験4)
 - 価格受容性の分散が小さいとき、ないし価格受容性に個人差があるとき、推定性能は標準的な一対比較法を下回る(実験3,4)
- 提案分布は、より分散が小さい分布のほうが、推定性能が高くなる(実験1)
 - 特に、価格受容性の分散が高いときにはこの差が大きくなる (実験3)
 - 提案分布の分散を小さくしすぎると、価格水準数に照らして標本サイズが小さいとき、BT推定が不能になる場合がある (実験1-3)

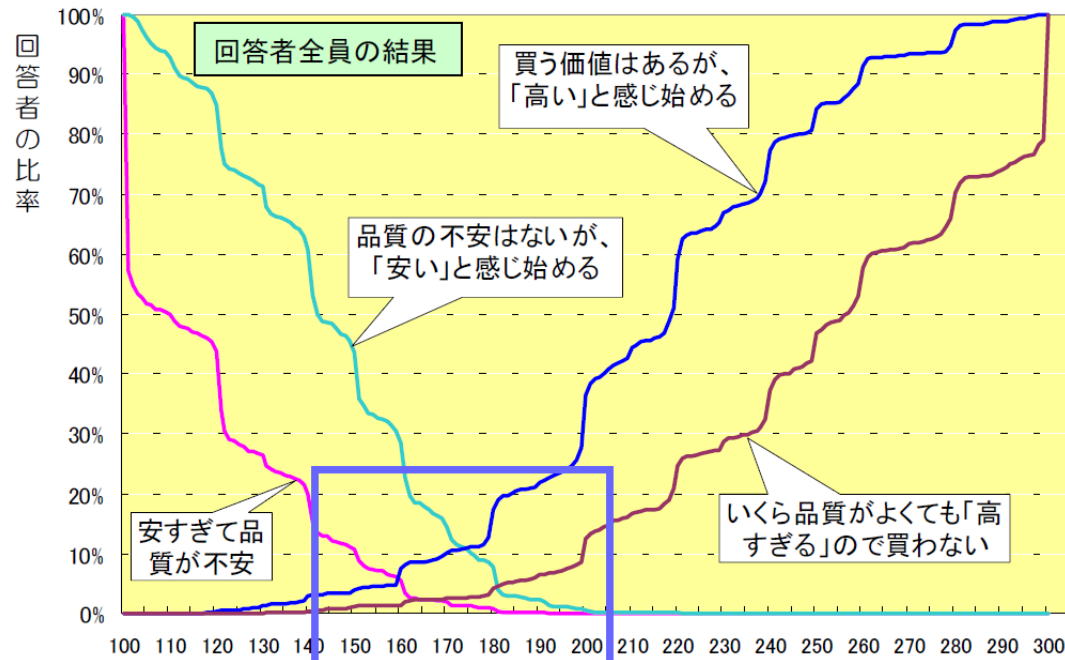
以上の知見から、次のように示唆される。

- 推定手法について
 - 原則として、単純集計よりも**BT推定を用いたほうが良い**
 - 単純集計のメリット：
 - 価格水準数が大きくても一定の推定性能が得られる
 - 分析が容易
- 提案分布について
 - (一様分布よりも) **分散が小さい分布が優れている**
 - 特に、消費者の価格への敏感性が高いと考えられるときには、分散をより小さくしたほうがよい
 - ただし、価格水準数が多く標本サイズが少ないときには、分散を小さくしすぎると提示されない価格水準が生じてしまい、BT推定が不能になるおそれがある

適用例

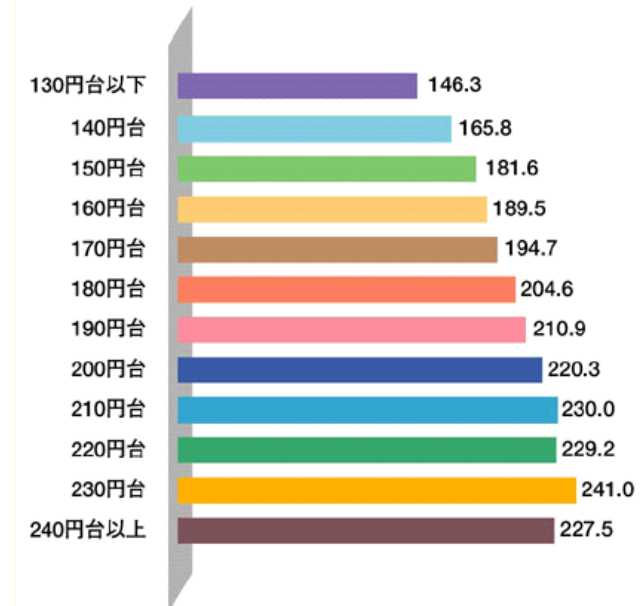
提案手法の適用事例を示す

・ 課題：牛乳の価格受容性



PSMによる推定 (上田, 2003)

図10 消費者の価格受容範囲 (妥当価格別に見た上限価格)



受容範囲上限の推定 (農畜産業振興事業団, 2003)

先行する調査結果

- 任意参加型Web調査パネルに対するWeb調査
 - 協力: looking up looking up 株式会社
 - 2023年5月実施
- 刺激
 - 1リットル紙パックの牛乳
 - 価格水準: **50円から430円までの5円刻み (75水準)**
- 対象者
 - 20-69歳男女、1リットル紙パックの牛乳を過去1ヶ月間に1本以上買った人
 - 2000人
- 手続き
 - 提案分布として一様分布を使用
 - 対象者を2群にわけ、それぞれの群でマルコフ連鎖を構築
 - 実査の都合上、各マルコフ連鎖において途中分岐を許した。最長の連鎖は647人

- 設問: 2問
 - 本分析では問1について分析する

Q1 [必須]

あなたがお店で、1リットル紙パックの牛乳を買う場面を想像してください。

そのお店はあなたがはじめて利用するお店です。牛乳の棚には、いくつかのブランドの牛乳がありますが、どれもあなたの知らないブランドです。

下に、1リットル紙パックの牛乳が2種類あります。

ブランド A.  65円

ブランド B.  285円

あなたなら、どちらを買いますか？ いずれかひとつを選んでください。

☐ ブランドA.を買う

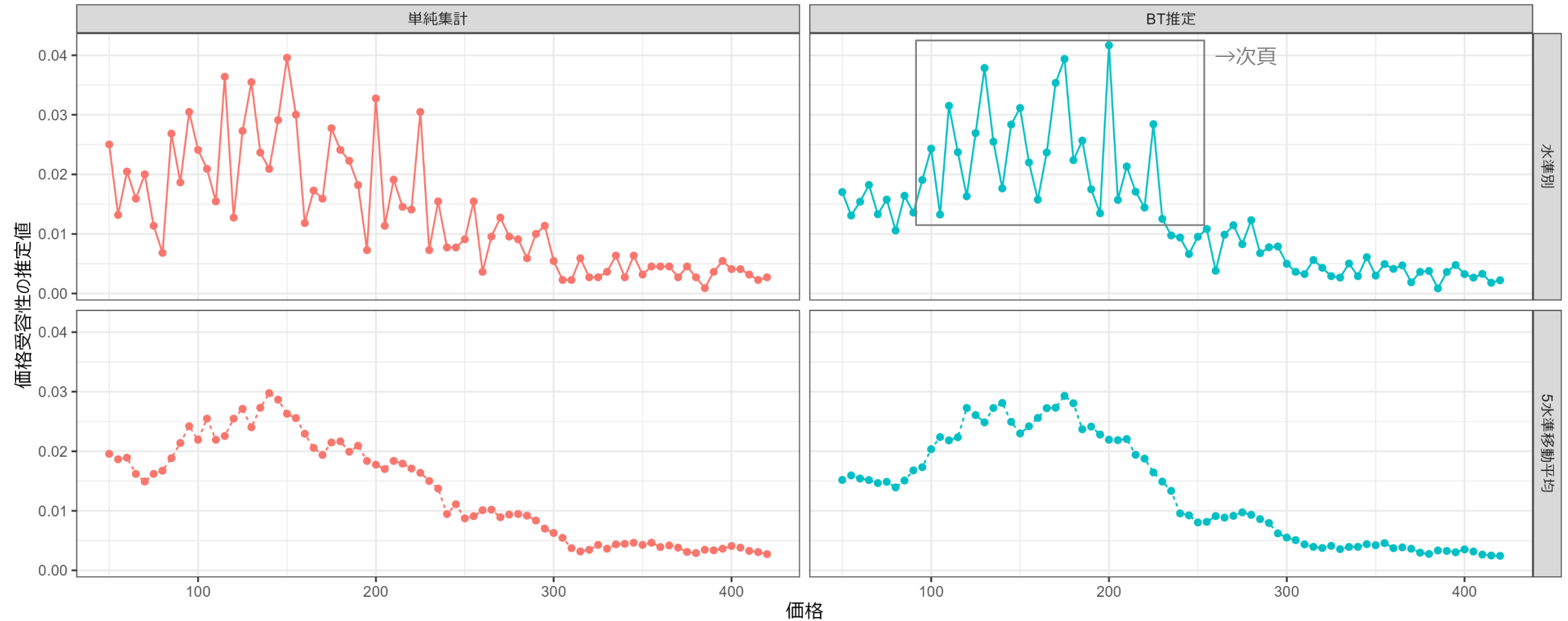
☐ ブランドB.を買う

問1 設問文

商品イメージ画像は色がわずかに異なる4種類から2つを選んで提示した

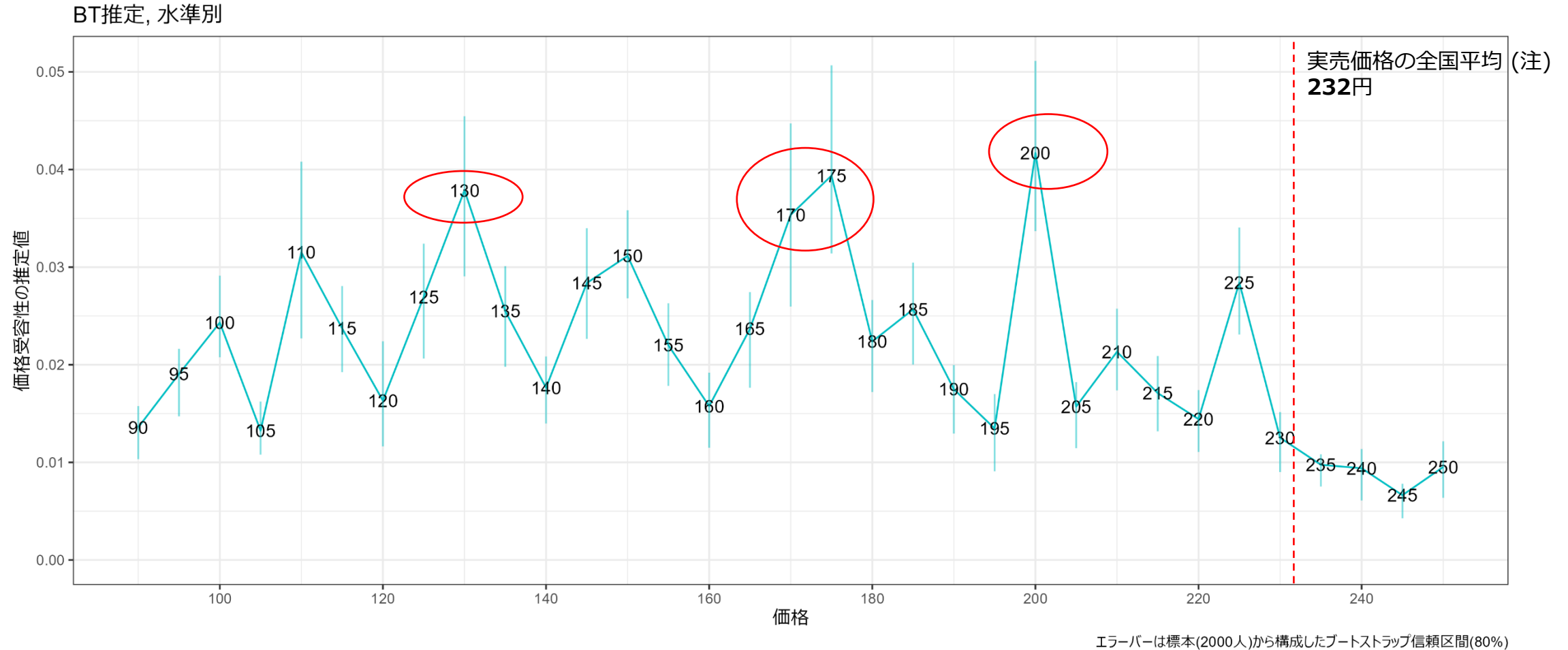
価格受容性のもっともらしい推定値が得られた

- 低価格・高価格による受容性低下は、110円付近より左、200円付近より右で生じているように見える



110円, 130円, 145-150円, 170-175円, 200円の受容性が高い

- 既存の方法では、こうした知見を得るのは難しい



まとめ

- 本研究では、**消費者の価格受容性を理解するための新しい手法** (対人的MCMC) を提案した
- 提案手法の利点
 - 選択課題(一対比較)による間接聴取
 - 調査参加者からみて容易。直接聴取より高い妥当性を期待できる
 - 回答負荷が極端に軽い
 - マイクロ・サーヴェイにおいて活用できる
 - 数多くの価格水準について効率的に推定
 - 幅広い価格範囲について検討できる
 - 簡易なアルゴリズム
 - Web調査システムへの実装が容易
- 提案手法の限界
 - 最適な提案分布の決定が難しい (MCMCと同様)

• 既存の主要手法との比較

	調査参加者からみた特徴			調査者からみた特徴	
	課題の容易さ	価格への適度の注目	回答負荷の低さ	多くの価格水準について検討できる	回答者属性による事後の層別分析が可能
Gabor-Granger	○	×	○	○	○
PSM	×	×	×	○	○
選択型コンジョイント分析	○	○	×	×	○
提案手法	○	○	○	○	○ (BT推定のみ)

- **提案手法の活用**のためには、以下の点についての検討が必要であろう：
 - 対人的MCMCアルゴリズムについて
 - 提案分布の決め方
 - 分散の大きさを調整するための目安が望まれる
 - 定常分布への収束速度
 - burn-in は必要か？
 - 適応的実験計画法としての性能について
 - ベイジアン最適実験計画アプローチとの比較
 - 聴取方法について
 - 2つの価格の一対比較に適した、標準的な設問文・設問設計
 - 価格受容性調査の手法として
 - 購買or売上データを外的基準とした基準関連妥当性の検証

- **さらなる発展**の方向として、以下が考えられる：

- 既存・既知の製品・サービスへの拡張
- 多次元的な刺激への拡張 (例, 価格・ブランド付きの製品・サービス)
 - 選択型コンジョイント課題の動的実験計画に相当
- 売上予測・価格プロモーション戦略立案への活用
 - 価格受容性をなんらかのかたちで購買確率・売上へと変換する必要がある
- 回答のスコアリングによる妥当性向上
 - “surprisingly popular” アルゴリズム(Prelec, Seung, McCoy, 2007)の併用

← **ただいま進行中**

- **調査手法研究**の文脈では
 - インターネット調査が持つ特性（回答の時間的分散と即時的収集）を生かした調査手法開発
 - シミュレーション・機械学習における概念の調査への応用
- **一対比較法**の文脈では
 - 適応的実験計画のシンプルなアルゴリズムを提案
- **製品・サービス開発支援**の文脈では
 - 消費者理解における集合知形成の試み

ご清聴ありがとうございました！

- Gabor, A., Granger, C.W.J. (1966) Price as an indicator of quality: Report on an enquiry. *Economica*, 22(129), 43-70.
- Glickman, M.E., Jensen, S.T., (2005) Adaptive paired comparison design. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 127, 279-293.
- Goncalves, F.B., Latuszynski, K., Roberts, G.O. (2017) Barker's algorithm for Bayesian inference with intractable likelihoods. *Brazilian Journal of Probability and Statistics*. 31(4). 732-745.
- Hsu, A.S., Martin, J.B., Sanborn, A.N., Griffiths, T.L. (2019) Identifying category representations for complex stimuli using discrete Markov chain Monte Carlo with people. *Behavior Research Methods*, 51, 1706-1716.
- Kalwani, M., Yim, C.K. (1992) Consumer price and promotion expectations: An experimental study. *Journal of Marketing Research*, 29(1), 210-224.
- Le Gall-Ely, M. (2009) Definition, measurement and determinants of the consumer's willingness to pay: A critical synthesis and avenues for further research. *Recherche et Applications en Marketing*, 24, 91-112.
- Martin, J.B., Griffiths, T.L., Sanborn, A.N. (2011) Testing the Efficiency of Markov Chain Monte Carlo With People Using Facial Affect Categories. *Cognitive Science*, 36, 150-162.
- Monroe, K.B. (2005) *Pricing: Making profitable decisions*. Third Edition. (International Edition) McGraw-Hill.
- Paczkowski, W.R. (2019) *Pricing analytics: Models and advanced quantitative techniques for product pricing*. Routledge.
- Prelec, D., Seung, H.S., & McCoy, J. (2017) A solution to the single-question crowds wisdom problem. *Nature*, 541, 532-535.
- Sanborn, A.N., Griffiths, T.L. (2007) Markov Chain Monte Carlo with People. *Advances in Neural Information Processing Systems 20 (NIPS 2007)*.
- Sanborn, A. N., Griffiths, T. L., & Shiffrin, R. M. (2010). Uncovering mental representations with Markov chain Monte Carlo. *Cognitive Psychology*, 60(2), 63-106.
- Stiving, M., Winer, R.S., (1997) An empirical analysis of price endings with scanner data. *Journal of Consumer Research*, 24(1), 57-67.
- Van Westendorp, P. (1976) NSS-Price Sensitivity Meter (PSM): A new approach to study consumer perception of price. *Proceedings of the ESOMAR Congress*. (Reprint: <https://archive.researchworld.com/a-new-approach-to-study-consumer-perception-of-price/>)
- 上田隆穂(2003) 牛乳類の受容価格範囲等調査(平成14年度). 「牛乳の価値と価格」報告書. 酪農乳業情報センター. (<https://www.j-milk.jp/report/marketing/8d863s0000003ecx.html>)
- 上田隆穂(2005) 既存データがない場合に消費者の受容価格範囲・最適価格を探る. 杉田善弘・上田隆穂・守口剛(編著)「プライシングサイエンス 価格の不思議を探る」, 12章. 同文館出版.
- 太宰潮(2008) 消費者の価格知覚におけるバランス仮説 - 受容価格の分布に関するモノグラフ. 消費者行動研究, 14(1,2), 43-66.
- 農畜産業振興事業団(2003) 平成14年度 牛乳等の小売価格および牛乳・乳製品等の消費動向調査から. 月報・畜産の情報(国内編). (<https://lin.alic.go.jp/alic/month/dome/2003/jun/INDEX2.HTM>)