海外の水道事業におけるダイナミック・プライシング導入事例のサーベイ

森　　由 美 子*

Survey of examples of dynamic pricing implementation in overseas water utilities

Yumiko MORI

Abstract

The purpose of this paper is to conduct a survey of papers that analyze examples of the introduction of dynamic pricing in overseas water utilities, and to summarize their characteristics and effects. Major examples of its introduction overseas include Spain, Brazil, Australia, the United Kingdom, Swiss,China, and Iran. The term scarcity pricing is often used instead of peak load pricing, and by introducing smart meters, data will be collected to determine how much impact the application of time-of-day and seasonal charges has on changes in user behavior collected and analyzed. In this paper, we will discuss Ito, K., Ida, T., and Tanaka, M. (2018), which is an analysis example in the Japanese electric power business, and Lopez-Nicolas.A. et al. (2018), which is an analysis example of an introduction case in Spain. (2018), and Marzano, R., Rouge, C., et al. (2020), which are analysis cases of the United States and Canada, will discuss the details of the model. Using the methods of these previous studies as a reference, we will connect them to experimental methods for introduction into Japan's water supply business, and discuss the possibility of introduction.

＊東海大学政治経済学部経済学科教授

1．はじめに

1980年代にピークロード料金[1)]が導入された電力事業では，2000年代に入って検針業務の代行を目的にスマートメーターの運用が広がった。電力利用量の増減について，利用者も把握できるようになったことから，行動経済学のナッジの手法[2)]を使った道徳的勧告や経済的インセンティブ[3)]を与え，エネルギー節約を促す実験・実運用が行われるようになった。

その後，2010年以降，水道事業についても，スマートメーター導入の実験や実運用が行われるようになり，検針，漏水検知の把握，ひいては高齢者の見守りサービスへの適用に加え，水需要に関して利用者の節約行動を促し，設備投資の削減の可能性についても言及されるようになった。

海外の水道事業の分析例では，ピークロードプライシングという方法ではなく，scarcity pricing[4)]という方法が多用され，時間帯別，季節別料金の適用によって，利用者の行動の変化にどのくらい影響を与えるのか，スマートメーターからデータを収集し，分析している。

本論の目的は，海外の水道事業のおもにダイナミック・プライシングの導入事例について分析した論文のサーベイを行い，その特徴と効果についてまとめることである。海外での主な導入事例は，スペイン，ブラジル，オーストラリア，アメリカ，カナダ，イギリス，スイス，中国，イランなどで見られる。本論では，Ito,K.,Ida,T.,and Tanaka,M.(2018)による日本の電力事業での分析例とスペインの水道事業の分析事例である Lopez-Nicolas. A. et al.(2018)，アメリカ・カナダの分析事例である Marzano,R.,Rouge,C.,et al.(2020）について，モデルの詳細を取り上げる。これらの先行研究の手法を参考に，日本の水道事業への導入の実験手法につなげ，その導入の可能性について考察する。

2．海外のダイナミック・プライシング導入事例分析のサーベイ

海外では，水道事業においてスマートメーターの実運用導入が日本より進んでおり，ダイナミック・プライシングの適用を意識した論文もいくつか見られる。主な論文に，スペインの Lopez-Nicolas. A.et al.(2018)，Cominola, A., Giuliani, M., et al.(2021)，Garrone, P., Grilli, R., and Marzano, R.(2020)，Vidal, P.L., Popartan, A., et al.(2022）ブラジルの Castro, D., Gobbo, C., and Fabian, N.(2020)，オーストラリアの Sahin, O., Bertone, E., and A. Rodney(2018)，イギリスの Rouge, C. et al.(2018)，アメリカ・カナダの Marzano, R.,

Rouge, C., et al.（2020），Garrone, P., Grilli, R., and Marzano, R.（2020）などがある。

Lopez-Nicolas. A. et al.（2018）は，スペインのバレンシア地方で43万世帯についてスマートメーターを設置し，実験を行っている。結果として，0.35ユーロ／m^3の追加料金を課した場合，18％，0.14ユーロ／m^3の場合，8％，0.04ユーロ／m^3の場合，3％の水道使用量の削減が行われたことが報告されている。

Castro, D., Gobbo, C., and Fabian, N.（2020）は，ブラジル南部のフロリアノポリスの202の回答者についてアンケートを行い，2018年の８月20日から９月20日のデータで，効用ロジスティックモデル[5]で分析を行った。結果として，エネルギー，水の使用量のコントロールについて，裕福な居住者は，興味を抱いていること，女性や財産があまり多くない人々は，スマートメーターの高額な出費について，厭わない傾向にあることを結論付けている。

Sahin, O., Bertone, E., and A. Rodney（2018）は，オーストラリアのクィーンランド地域で，水需要に対する制限と scarcity pricing 戦略や効用と顧客に対する費用の制限，顧客の水利用に与える価格の影響などを考慮に入れた System Dynamics Modelling アプローチ[6]を使い，６～11％，水道使用量の削減が行われたことを明らかにしている。オーストラリアでは，厳しい干ばつ，人口増加，変化しやすい降雨量，インフラの老朽化などの問題を抱えている。

Rouge, C. et al.（2018）は，イギリス・ロンドンの1500万世帯について，家庭用の水道料金を基本料金の150％に値上げすることで，22～63％の水道使用量の削減が行われたことを明らかにしている。

Cominola, A., Giuliani, M., et al.（2021）は，スペイン・バレンシアの334の世帯について，３年間のデータを使い，分析を行っている。スマートメーターを設置することで，８％の水使用量の節約が行われた可能性があることを明らかにしている。

その他，Darby（2006, 2010）によると，イギリスでスマートメーターを設置すると，５％から15％の間でエネルギー節約があったと報告されている。

Marzano, R., Rouge, C., et al.（2020）は，アメリカ，カナダの回答者を対象に，この論文は，時間帯別料金に直面したときのエンドユーザーの水消費の意思を測定し，価格設定と水不足に対する意識との相互作用を調査するオンライン実験の設計と結果について報告している。

Garrone, P., Grilli, R., and Marzano, R.（2020）は，スイスのティチアーノにおいて，2015年の10月15日から11月31日までの期間で，ソプラセネリーナ電力会社の顧客にスマートメーターを設置し，462世帯の電気を含むサービスについてアンケート調査を行った。スペインにおいては，2016年４月１日から６月30日の期間で，バレンシアの水道事業会社

EMIVASAの顧客295人に対して，アンケート調査を行った。ティチアーノは，水が潤沢であるが，バレンシアは，気候条件により慢性的に干ばつ状態である。バレンシアは，衛星都市だが，ティチアーノは田舎の地域であるため，異なる水需要が期待された。水需要の19％から25％を占め，利用する顧客が自ら使用量を調節することができるシャワー利用量について，アンケートを行っている。スイスでは，料金上昇とご褒美，スペインでは，料金上昇と金銭的報酬により，インセンティブを用意した。シャワー利用量の削減を被説明変数として，料金，ご褒美，金銭的報酬，水の希少性がどのくらい影響を与えているかを，最小二乗法で推計している。スイスの回答者は，シャワータイムを平均で6.58分削減すること，6.25％から７％の間で削減することが報告されている。スペインの回答者は，平均で7.59分削減し，7.6％削減するという結果となっている。

Vidal, P. L., Popartan, A., et al.（2022）は，スペインの事業体で，TOUT（Time-of-Use Tariffs）[7] 時間帯別料金システムを導入し，水の利用を17.2％削減させた。低所得の家計は，水の使用量の25％を削減し最も高かったが，金銭的な節約は最も低い9.3％だった。高所得の家計は，最も大きな金銭的節約である11.9％を達成したが，水の使用量削減は10.4％で最も低かった。オフピーク，中段階，ピークの３つのタイプで，料金を分けている。水利用の用途について，３タイプ（①重要，②大切，しかし，変化可能，③重要でない）に識別している。①は，飲料水，料理用，トイレや手洗いの使用であり，②は，シャワー，皿洗い，食洗器で，③は，プールや園芸である。2021年に，スペインの人口が１万から１万5000人の213の都市の住民の中から，スペインの２つの大都市330万人のマドリッドと163万人のバルセロナの間の規模となる，合計で258万人の住民を対象に行っている。低所得のレベルは，月収938ドル，中間レベルは938～2502ドル，高所得は2502ドル以上に設定している。

Ali, M. A., and Farjami, Y.（2021）は，1000世帯，5000人の人口の乾燥地帯であるイランのヤード地方デーノを対象に，2009年から2019年にかけて，水の使用量を比較した。スマートメーターの利用により，すべての利用者が20％の水使用を削減した。

Hu, X., Li, Y., et al.（2022）は，水が希少な中国の大連を対象に，都市の水需要管理のための生活用水と工業用水の許可取引枠組みを提案している。この研究は，都市内産業セクター間の水取引を可能にすることは，都市の水供給の安全性を確保しながら経済的利益を向上させるために都市の水資源を再分配する効果的な手段であることを示している。３つの価格設定のシナリオで，消費量の変化を確認している。最も高い価格を設定した３つめのシナリオでは，貯蓄できる水量は，10.16Mm^{3}で，水の貯蓄率は3.7％，住民の水利用の13.72％について，交換可能であり，住民に9100万元の利益をもたらし，工業用水の利用者に水資源費用の5667万元の貯蓄をもたらす。価格設定による水価格の上昇は，交換可能

な水量を44.33Mm^{3}に増加させ，16.10％に増加させることができることも報告されている。

サーベイした10件の事例のうち，実運用はRouge, C. et al.(2018)，Vidal, P. L., Popartan, A., et al.(2022）のわずか２件であり，残り８件は実験事例であった。Scarcity Pricingモデルは，10件のうち７件となっており，時間帯別は３件，季節別料金は３件であった。

表１． 海外の水道事業におけるダイナミック・プライシング適用事例のサーベイのまとめ

論文名	実運用 or 実験	対象国	推計期間	方法	推計目的	推計結果
LopezNicolas. A. et al.(2018)	実験	スペイン・バレンシア地方 43 万世帯	1980 年～2012 年	Scarcity Pricing (SM)	水がめにおける水の価値の推計に基づいたscarcity pricingを考慮した経済的に効率的で財政的に安定的な都市の水道料金の新しい計画と査定を提案すること。	0.35ユーロ／m3の場合、18%、0.14ユーロ／m３の場合、8%、0.04ユーロ／m3の場合、3%の水道使用量の削減
Castro, D., Gobbo, C., and Fabian, N.(2020)	実験	ブラジル南部のフロリアノポリスの 202 の回答者	2018 年 8 月 20 日～9 月 20 日	効用ロジスティックモデル アンケート調査(SM)	電気、水道、ガス	裕福な居住者は、興味を抱いていること、女性や財産があまり多くない人々は、スマートメーターの高額な出費について、厭わない傾向にあることを結論付けている。
Sahin, O., Bertone, E., and A. Rodney(2018)	実験	オーストラリア・クィーンランド地域	2013 年～2015 年	System Dynamics Modelling アプローチ	季節別料金	すべてのシナリオで、6～11%の水道使用量の削減が行われた。
Rouge, C. et al.(2018)	実運用	イギリス・ロンドンの 1500 万世帯	1920 年～2004 年	Scarcity Pricing	IRAS シュミレーションモデル	家庭用の水道料金を基本料金の150%に値上げすることで、22～63%の水道使用量の削減が行われた
Cominola, A., Giuliani, M., et al.(2021)	実験	スペイン・バレンシアの 334 の世帯		SM	時間帯による料金変化に伴う水の消費	スマートメーターを設置することで、8%の水使用量の節約が行われた。
Marzano, R., Rouge, C., et al.(2020)	実験	アメリカ、カナダの 424 の回答者		Scarcity Pricing 差の差の分析	時間帯による料金変化に伴う水の消費量の変化	5 から 10 セントの価格変化は、約 15%水需要を削減する。

Garrone,P.,Grilli,R.,and Marzano,R.(2020)	実験	スイス・ティチアーノ スペイン・バレンシア	2016年4月15日～6月30日	アンケート調査（SM） ScarcityPricing 最小二乗法	水利用者の反応を通して水道事業体と地域の役割について経済的インセンティブの効率性を示唆すること。	スイスの回答者は、シャワータイムを平均で6.58分削減すること、6.2５から 7%の間で削減することが分かった。スペインの回答者は、平均で7.59分削減し、7.6%削減するという結果となった。
Vidal,P.L.,Popartan,A.,et al.（2022）	実運用	スペイン	2021年	TOUT時間帯別料金システム ABMモデル[8]	TOUTシステムを考慮したスマートウォーターの分析に新たな見通しを提案すること。	水の利用を17.2%削減させた。低所得の家計は、最も高い25%を削減したが、節約は最も低い9.3%だった。高所得の家計は、最も大きな節約11.9%を達成したが、最も低い水の使用削減は10.4%だった。
Ali,M.A.,and Farjami,Y.(2021)	実験	イラン・ヤード地方デーノ1000世帯500人	2009年～2019年	SM	都会の地下水の持続可能性を推進するため。	スマートメーターの利用により、すべての利用者が 20%の水使用を削減した。
Hu,X.,Li,Y.,et al.(2022)	実験	中国・大連	2020年	Scarcity Pricing	国内の工業用水と、都会の水需要経営の枠組みとを交換することに関する効果の分析	最も高い価格を設定した３つめのシナリオでは、貯蓄できる水量は、10.16Mm3で、水の貯蓄率は3.7%、住民の水利用の 13.72%について、交換可能であり、住民に 9100 万元の利益をもたらし、工業用水の利用者に水資源費用の 5667 万元の貯蓄をもたらす。

出所：各論文のサーベイを元に，筆者作成。

３．日本の電力事業におけるダイナミック・プライシング適用モデル

Ito, K., Ida, T., and Tanaka, M.(2018）は，日本の電力事業において季節別料金を導入したモデルによる分析を行っている。

(1) 概要

このモデルでは，企業と政府において，しばしば，経済的活動についての固有で付帯的な動機に影響を与える道義的勧告と経済的インセンティブを使っている。そのような介入の持続性を調査するために，ピーク需要の時間の間，家計についてエネルギー保全を刺激する道義的勧告とダイナミック・プライシングを，無作為に割り当てる。重要な道義的勧

告の慣習と非慣習を探し，トリートメント効果は，繰り返しの介入の後で，減少させ，しかし，介入間の十分なインターバルにより，オリジナルの水準に回復することができた。経済的インセンティブは，より大きなトリートメント効果（慣れと重要な慣習の形成）を誘引する。結果は，道徳的勧告と経済的インセンティブが物理的に異なる短期と長期の政策効果を作り出すことを報告している。

(2) 分析対象

京阪奈地区の1659の参加者から，学生，自家発電を行っている顧客，インターネットに接続のない顧客を除いて，691の家計が参加した。自己選択の参加者については，無作為比較対照法（Random Control Trial:RCT）[9]を適用している。

(3) トリートメント手法

最初のトリートメントは，政策立案者が社会的な行動を生じさせるための固有の動機に影響を与えようとすることによる道徳的勧告である。第２のトリートメントは，政策立案者が標準的な需要理論を元にした付帯的な動機に影響を与えることを目的とする経済的インセンティブである。無作為に，家計を３つのグループ（道徳的勧告グループ，経済的インセンティブグループ，そして，コントロール・グループ）のうちの１つに割り当て，30分間隔の家計の電気消費データを使い，いかに，トリートメントが，電気の限界費用が他の時間より物理的に高い需要がピークの時の電気利用に影響を与えるかを，検討している。

道徳的勧告について，具体的には，エネルギー保全が必要なこと，夏と冬のピーク需要の日のピーク需要時間帯に社会にとって必要なこと，電力供給が需要に対して限られること，をメッセージとして送り，金銭的なインセンティブは行わない。夏の午後１時～４時と，冬の午後６時～９時までの時間帯で，夏の31度を超える時間と冬の14度を下回る時間帯に実施する。例えば，トリートメントを行う日を８月21日と決め，その前の日８月20日に，スマートフォンかコンピューターに，メッセージを送る。

経済的インセンティブについては，ピーク需要の日のピーク需要の時間帯に，高い価格を設定する。前日に，高い価格を設定することを知らせ，電気使用量を減少させるよう節約を促す。25円から65円，85円，105円まで実施する。

道徳的勧告グループは，ピーク需要の時間帯の間（夏季は午後１時から４時の間，冬季は午後５時から８時の間），任意のエネルギー保全を要求するメッセージを受け取る。

経済的インセンティブグループは，同じピーク需要の期間に，このメッセージを受け取らず，電気の３つの高い限界価格のうちの１つをつける。

(4) 実験計画

３つの主な仮説を検定するために，実験を計画する。第１に，２つのトリートメントの慣習を検定するために，多くの日にわたってトリートメントを繰り返す。第２に，介入をしばらく中断してから再開することにより，トリートメントの再開によって，脱習慣が生じるかどうかをテストする。習慣によって低下した反応は，元のレベルに戻る可能性がある。

コントロールグループ（C）は153の顧客で，高度な電気メーターを設置し参加することで，ご褒美を受け取る。

道徳的勧告グループ（M）は，154の顧客で，高度な電気メーターを設置し参加することで，ご褒美を受け取る。その上，エネルギー保全のための道徳的勧告を受け取る。

経済的インセンティブ（E）は，384の顧客で，高度な電気メーターを設置し参加することで，ご褒美を受け取る。エネルギー保全を行うために経済的インセンティブを受け取る。30分間隔のデータで，2012年の夏から2013年の春の利用データに加え，３つの調査によるデータも収集している。

最初の調査は，トリートメントの割り当てに先立って行われ，人口統計の情報を収集した。第２に，彼らの見解の背後にあるメカニズムを探るための実験の完了を超える調査を行った。第３に，実験標本の外部的妥当性を調査するための領域で717の家計の無作為標本について調査を行っている。

(5) モデル

モデルについては，以下のようになり，最小二乗法で推計している。

$$\ln xit = \beta Mit + \gamma Eit + \theta i + \lambda t + \eta it$$

xit：家計 i の30分おきの電気使用量

M ：道徳的勧告を受け容れる家計は1に等しい。

Eit：経済的インセンティブを受け容れる家計は1に等しい。

θ i：固定効果

λ t：時間的固定効果

(6) 結果

結果として，道徳的勧告は，夏のトリートメント期間の電力使用ピーク時に3.1％減少させ，冬のトリートメント期間のピーク時に3.2％減少させることが報告されている。３％の消費の減少は，ピーク時の電力の限界費用が高くなるため，経済的に重要である。

経済的インセンティブの効果は，夏で16.7％，平均で15.4％，冬で17.3％，平均で15.9％

となることが報告されている。

さらに，実験からいくつかの知見を提出している。第１に，道徳的勧告は，電気使用において短期の削減を誘引し，効果は，強い慣習が示すように繰り返す介入により，素早く減退する。

第２に，経済的インセンティブがより大きく持続的な効果を作り出すことが，分かった。経済的インセンティブグループは，もっとも低いクリティカルピーク価格について14％の使用削減を示し，もっとも高いクリティカルピーク価格について17％の使用削減を示した。その上，この効果は，繰り返しの介入についてより大きな持続性があることが分かった。

第３に，習慣化された反応を元のレベルに戻せるかどうかを見るために，脱習慣を調べる。夏の実験の後，冬に介入を再開する前に，意図的に３ヶ月の間隔を世帯に与える。道徳的勧告に対する習慣的な反応は，リセットされることが分かった。

第４に，トリートメントを中止した後に収集したデータを使用してトリートメント効果を推定することで，潜在的な習慣形成を検定する。経済的インセンティブグループでは，顕著な習慣形成が見られたが，道徳的勧告グループでは習慣形成が見られなかった。トリートメントを中断した後，道徳的勧告グループの慣用は，コントロール・グループの慣用と区別がつかない。しかし，経済的インセンティブグループは，インセンティブが撤回した後もエネルギーを節約し続ける。

４．水道事業における Scarcity Pricing モデル

水道事業において Lopez-Nicolas. A.etal.(2018)，Sahin, O., Bertone, E., and A. Rodney (2018)，Rouge, C. et al.(2018)，Marzano, R., Rouge, C., et al.(2020) では，Scarcity Pricing を適用したモデルで分析を行っている。

この章では，Lopez-Nicolas. A. et al.(2018) と Marzano, R., Rouge, C., et al.(2020) を元に Scarcity Pricing のモデルについて説明する。

(1) 季節別料金による実運用（Lopez-Nicolas. A. et al.（2018））

この論文は，渇水時に二段階料金制を実施することで，経済的インセンティブ効果を狙った実験である。モデルは以下のようになる。

$$R = \sum_{S=1}^{m} Cs \qquad [1]$$

R（M, €/year）：収入,

Cs（M, €/year）：費用

都会の水供給のためのそれぞれの水源についての費用の合計となっている。

２つのブロック料金，収入は次のように与えられる。

$$R = \lambda_1 \sum^{6} Vi + \lambda_2 \sum Vj + FI \qquad [2]$$

λ_1 ：はじめのブロックについての限界価格

λ_2 ：２番目のブロックについて限界価格

FI ：固定料金からの収入 （M, €/year）
サービスとサービスの維持のための

Vi ：第１の水の供給量

Vj ：第２の水の供給量（m^3/bi − monthly）

各々の費用は次のように表される。

$$Cs = FC + \sum (Vi / E) \cdot VC \qquad [3]$$

ここで，S は各々の水源を表す。

FC ：固定費用

E ：それぞれのネットワークの効率パラメーター
各々の水源からの水の損失を表す。

VC ：可変費用
（水トリートメントと分布と結びついた）

表２． Dynamic urban water tariff

水の価値	λ1	λ2	Annual demand reductions
0.35	0.44	0.78	18%
0.14	0.44	0.66	8%
0.04	0.44	0.60	3%
0	0.44	0.56	−

１段階めについて説明する。まず，各時間についての貯蔵の関数として水量をプロットする。次に，事前に定義した貯蔵水準の臨界点として使う異なるグループの値をひとまとめにする。各グループの平均値に基づいた scarcity based ステップ[10] の価格政策となっている。

使用水量によって，料金を２段階に設定する方法は，２段階目の料金は，貯蔵水量状態によって３段階に設定して，水需要の反応について，計測を行っている。

(2) 時間帯別料金による実験（Marzano,R.,Rouge,C.,et al.(2020)）

この論文は，時間帯による料金変化に直面した時の利用者の水の消費量決定をオンラインにより計測する実験の計画と結果について報告し，料金と水の希少性への意識との相互関係を調査している。

この論文は，時間帯別料金に直面したときのエンドユーザーの水消費の意思を測定し，価格設定と水不足に対する意識との相互作用を調査するオンライン実験の設計と結果について報告している。

より高い料金は利用量を低下させ，実験がダイナミック・プライシング効果をみつけるという理論を裏付ける以上に，より低い料金にさらされた利用者は，より強く所与の価格に反応する。これは，短期の住宅価格の増加が，水保護の免疫力を高めるのに，効果的であることを示唆している。以下の２点について検定している。

① 利用者がダイナミック・プライシングに直面した時，価格効果がより大きいか，より小さいか，

② 水不足への意識が価格への影響をどのように緩和するか，

(実験手法)

424人のプレーヤーを募集し，少額の寄付金を使って水道水を購入し，仮定のシャワーを浴びるよう依頼する。このグループは，水の単位価格の増加に直面し，コントロール・グループは，安定した価格で水を購入することが許される。実験の計画は，静学的な価格の効果（シャワー時間の短縮が料金の高さと関係する）と，ダイナミック・プライシングの効果（価格上昇に伴うシャワー時間の短縮）を見分けることで可能となる。サブグループは，架空の水不足のシナリオにさらされており，水の希少性の認識が，ダイナミック・プライシング効果を拡大するのか縮小するのか，を判断することが可能になる。

価格効果（PE）は，コントロール・グループの平均のシャワー時間の変化をトリートメント・グループの平均のシャワー時間の変化から差し引くことから得られる”差の差”である。

価格効果については，以下の（１）式で表される。

$$PE(p_{low}, p_{high}) = [ST(p_{low})|_{baseline} - ST(p_{high})|_{endline}]|_{Treatment} - [ST(p_{low})|_{baseline} - ST(p_{high})|_{endline}]|_{Control} \quad (1)$$

静学的な価格効果については，以下の（２）式で表される。

$$SPE(p_{low}, p_{high}) = [ST(p_{low})|_{baseline}]|_{Treatment} - [ST(p_{high})|_{baseline}]|_{Control} \quad (2)$$

全体の価格効果については，以下の（３）式で表される。

$$PE(p_{low}, p_{high}) = SPE(p_{low}, p_{high}) + DPC(p_{high}) \quad (3)$$

ダイナミック価格要因については，以下の（４）式で表される。

$$DPC(p_{high}) = [ST(p_{high})|_{endline}]|_{Control} - [ST(p_{high})|_{endline}]|_{Treatment} \quad (4)$$

グループの割り当てにより，プレーヤーが受け取る最初の水道料金単価と，エンドラインのシャワー時間を選択する際，どのような水不足シナリオにさらされるかが決まる。

コントロール・グループについては，最初と最後のシャワー１分についての料金単価を10セントで固定する。トリートメント・グループについては，最初は５セント，最後は10セントに値上げする。

金銭的インセンティブに関しては，回答者は実験終了時に，自分の意思決定に関するフィードバックを受け，最初の1.5ドルの寄付金からお金を貯め，そのシャワーから満足を得ることで報酬を得られると知らされている。

アンケートの回答には最低２ドルが割り当てられ，変動部分は実験的質問に対する回答によって決まる。６分から８分のシャワータイムは，最大2.4ドルの支払いを生む。

基本のクエッションについての２つのトリートメント・グループの回答の違いにより測定される平均のトリートメント効果は，静学的な価格効果を提供する。

全体の価格効果は，静学的な価格効果と追加的な動学的価格要因の合計となる。

なぜ，１つの特定の水用途，シャワーに焦点を当てるのかには３つの理由がある。１つは，シャワー利用がもっとも多い家庭の水消費行動のうちの１つであり，19％から25％の範囲であることである。第２に，多くのほかの水利用にはなく，シャワーは，潜在的なプレーヤーの大多数により実行され，シャワータイムは完全に支配下にあることである。第３に，家庭の水利用の中でシャワーの次に多く使うトイレで使用する水の量と違って，シャワーの水量は，プレーヤーが継続的に調整できるということである。

（モデル）

モデルは以下のようになり，ベースラインの価格を p_{low} に設定し，エンドラインの価格を p_{high} に設定し，差の差の分析[11] を行っている。

$$STit = \beta_0 + \beta_1 Treatmenti + \beta_2 Endlinet + \beta_3 (Treatmenti*Endlinet) + \beta_4 Scarcityi + \beta_5 (Treatmenti*Scarcityi) + \delta Xi + \varepsilon it \quad (5)$$

STit：　ベースラインとエンドラインに対応する，報告された参加者 i の１分間のシャワータイム

Treatment：　トリートメントダミー，トリートメント・グループに決められるプレーヤーは値１を取り，コントロール・グループに決められるプレーヤーは値０を取る。

エンドライン：　エンドラインを選択すると値１を取り，ベースラインを選択すると値０を取る。

（Treatment*Endline）：単独と，Treatment との相互作用。

Scarcity：　希少性のシナリオを表すダミー

（Treatment*Scarcity）：単独と Treatment との相互作用。

Xi：　参加者レベルでのコントロール要因

シャワータイムは15分までの検閲された従属変数として，トービットを使う。
トービットパネルモデル（１），（２），（３），と線形パネルモデル（４）を推計する。
係数 β の解釈としては，式（１）から（４）となる。

β_0：モデルの定数項，[ST（phigh）|baseline]|Control を表す。

β_1：ベースラインでのトリートメント・グループとコントロール・グループの参加者の間のシャワータイムの差

[ST（plow）| baseline]| Treatment − [ST（phigh）| baseline]| Control　　式（２）

β_2：エンドラインでのトリートメント・グループとコントロール・グループの参加者の間のシャワータイムの差

β_3：全体の効果

β_4：コントロール・グループの参加者に関して水の希少性について考慮した効果。

β_5：トリートメント・グループの参加者に関して水の希少性の増分効果。

表３． 主なモデルの推定値

従属変数：ST	トービットモデル（1）	トービットモデル(2)	トービットモデル（3）	線形モデル（4）
Treatment（β1）	0.574*(0.321)	0.537*(0.296)	0.620**(0.298)	0.591**(0.284)
Endline（β2）	_ 0.579**(0.247)	_ 0.530**(0.245)	_ 0.540**(0.246)	_ 0.503**(0.235)
TreatmentEndline(β3)	_ 1.238***(0.349)	_ 1.271***(0.346)	_ 1.276***(0.348)	_ 1.252***(0.333)
Scarcity(β4)	_ 1.593***(0.333)	_ 1.691***(0.327)	_ 1.689***(0.329)	_ 1.676***(0.315)
TreatmentScarcity(β5)	0.656(0.470)	0.719(0.462)	0.739(0.465)	0.759*(0.445)
Showers		_ 0.082(0.054)	_ 0.096*(0.055)	_ 0.087*(0.052)
Satisfaction		0.208***(0.023)	0.214***_ (0.024)	0.205***_ (0.022)
Female			0.017(0.278)	0.006(0.266)
Age			0.065(0.074)	0.064(0.070)
Age2			_ 0.001(0.001)	_ 0.001(0.001)
Education			0.147(0.103)	0.142(0.098)
Constant	7.922***_ (0.227)	6.080(0.441)	4.206***_ (1.308)	4.205***_ (1.249)
Observations	827	827	821	821
Players	414	414	411	411

出所：Marzano,R.,Rouge,C.,etal.（2020）より，抜粋。

トービットパネル[12)]（１）は，トリートメントダミーのみを含む特定化したモデル，トービットパネル（２）は，回答者のシャワーの慣習やシャワーから得られる満足度を考慮したモデル，トービットパネル（３）は，追加的な参加者の特性（ジェンダー，年齢，年齢２乗，教育水準）をコントロールしたモデルである。

トリートメントと結びついた係数β_1は，３つの特定化で重要である。

ベースラインでのクエッションでより低い価格に直面したとき，すなわち，トリートメント・グループに所属し，価格変化が行われる前，参加者はより多いシャワーの水を選ぶ。これは静学的な価格効果である。平均的なシャワータイムがより高い価格で削減されることを意味し，0.54から0.62の範囲の値で，より高い削減がもっとも完全な特定化で行われている。

表４．トリートメント・グループとコントロール・グループ

Table 1
Treatment and Control groups.

Distribution of players across Treatment and Control groups			
	Water availability scenarios		
	Scarcity	*Regular*	*TOTAL*
Treatment	108	105	213
Control	105	106	211
TOTAL	213	211	424

The table illustrates the distribution of players across four groups generated by the combination of the Treatments and Control groups with two water availability scenarios.

出所：Marzano,R.,Rouge,C.,et al.（2020）より，抜粋。

（結果）

水の単位価格の変化のすべての効果（PE）は，交差項 Treatment*Endline の係数 β_3により与えられる。特定化に関係なく，PE は負で統計的にＩ％水準で有意である。これは，トリートメント・グループの参加者が，すなわち，時間をとおして価格が増加し，より低い価格からより高い価格へ切り替わる時，シャワータイムを削減することができることを意味する。この効果の大きさは，特定化をとおして同様に平均でシャワータイムを1.27分削減した。

トリートメント・グループのベースラインの質問で平均のシャワータイムが，8.39分であるため，５から10セントの価格変化は，約15％の水需要を削減した。

価格変化の全体的な効果（PE）は，大きさと有意さの両方で，静学的な価格効果より小さい。その差は，10％の統計水準で，有意に０とは異なる。この効果は，２つの効果の差を考慮する動学的な価格要因（DPC）の存在を示唆する。これは，動学的な価格増加が静学的な価格差より水の保全により強い影響を与えることを示唆する。

実験の見解が，ベースラインの価格からエンドラインの価格に急に上昇し価格変化することは，価格変化のない状況での同じ価格差に関する平均の消費との差により予測されたことより，大きな平均需要の変化が原因となっていることである。

図１は，シャワー時間の短縮による払い戻し金額の関数を表している。１分～２分の間では払い戻し金額が２ドルであるが，２分～６分の間では，払い戻し金額が２ドルから2.4ドルまで増加する。６分～８分の間のシャワー時間の短縮による払い戻し金額が，2.4ドルと最も大きく，８分～12分の間では払い戻し金額が2.4ドルから２ドルまで減少していき，12分～15分では２ドルとなるように設計されていることを表している。

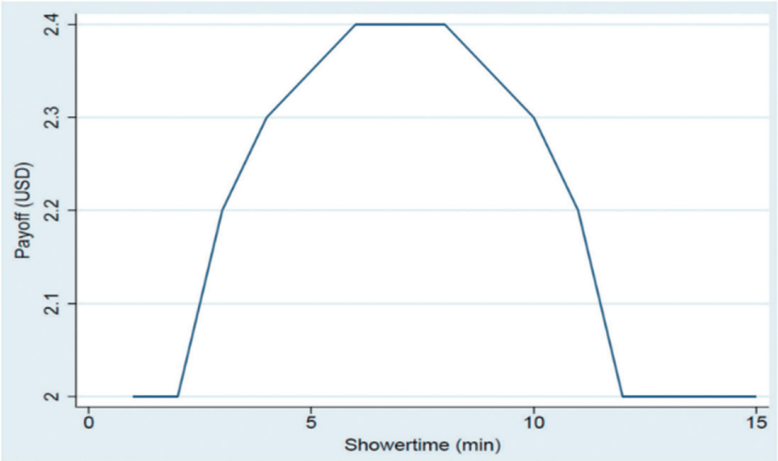


図１． シャワー時間の削減に応じた払い戻し金額の関数

出所：Marzano,R.,Rouge,C.,et al.（2020）より，抜粋。

４．日本の水道事業体への適用

海外の季節別料金導入の事例（2015年時点）については，アメリカのシアトル市，カナダのバンクーバー市，イギリスのバーミンガム市などがあるが，そのうち，スマートメーターの設置を行っているのは，カナダのバンクーバー市のみである[13)]。下記の図２をみると，

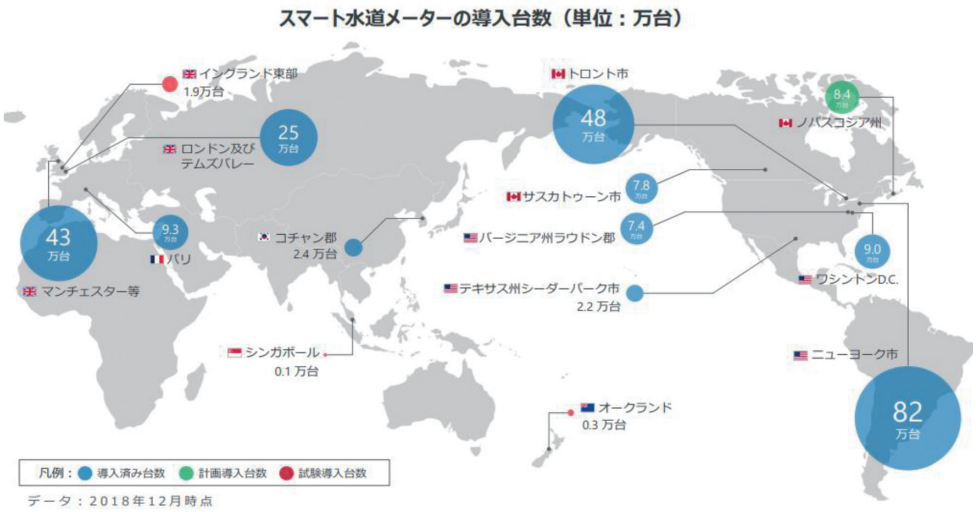


図２． 海外のスマートメーター設置状況

出所：JWRC（2019）より抜粋。

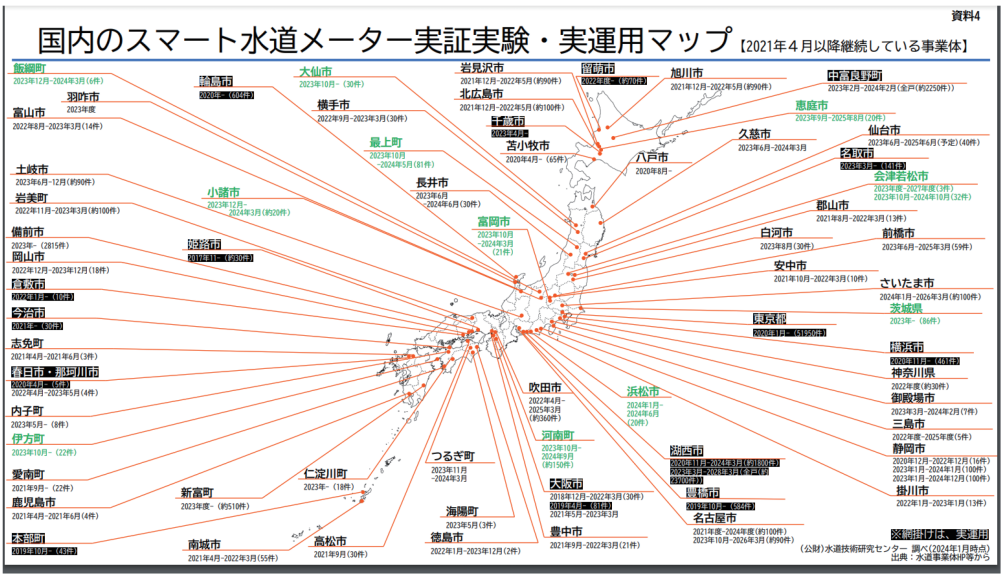


図３． 国内のスマート水道メーター実証実験・実運用マップ

出所：水道技術研究センター主催 New-Smart プロジェクト会議（2024年３月）提供資料から抜粋。
＊緑色表示の記載は，新たに追加となった事業体

スマートメーターを導入している海外の事業体は，2018年12月時点で，アメリカのニューヨーク，カナダのトロント，イギリスのマンチェスター，イギリスのロンドン及びテムズバレー，フランスのパリ，アメリカのワシントン，カナダのサスカトゥーン市など10事業体である。[14)]

日本において，スマートメーターを導入することにより実証実験を行う自治体が，増えている。上記の図３は，日本全国の実証実験・実運用に関する一覧である。

これらの実証実験・実運用に関しては，近年，導入事例が各事業体で増えており，その数は合計で約95自治体（実運用は18件，残りは実験）に上るが，その中でも，とくに先進的な取り組みを行っている，また行う予定の事業体がいくつか見られる。たとえば，湖西市は，スマートメーター導入により電力，ガスとの共同検診を行うことで，社会的な見守りサービスを行うことに加え，さらには，ピークロード料金の導入を行って，利用者の需要行動の変化を測定しようと試みている。また，吹田市においても，スマートメーター導入により時間帯別料金の導入による消費者の行動の変化について，実証実験を行う計画を立てている。

以下は，各事業体において，季節別料金の実証実験の計画があると想定した場合，その可能性の高い事業体（吹田市，湖西市，高松市，東京都，横浜市）に関して，筆者が想定する実験計画ノートである。

(1) 夏季に渇水が想定される事業体（吹田市，湖西市，高松市，東京都，横浜市）の料金と使用水量（0.01m³＝100mℓ）

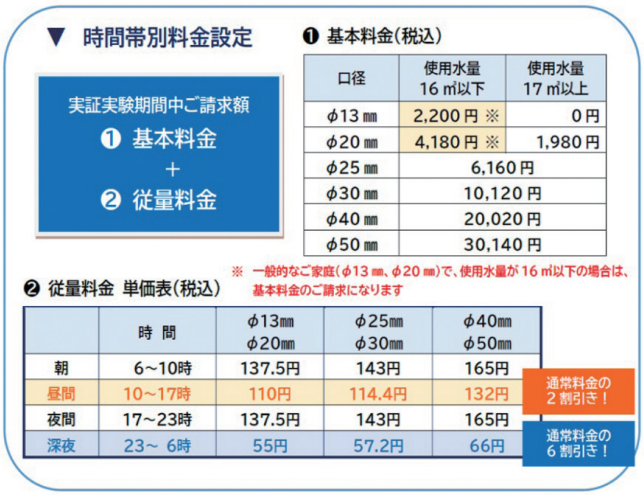
①吹田市

- 一人一日平均配水量　　2015年　314ℓ　1ℓ＝1000mℓ＝1000cm³＝0.001m³
  1m³＝1000000cm³
  314000cm³＝0.314m³
- 平均有収水量
  年間有収水量　39865055m³÷12ヶ月÷367025人（給水人口）
  ＝9.05139409m³／人／月＝9051.39409ℓ／人／月
- 料金　20mm口径　　基本料金　2178円　基本水量

②湖西市

- 一人一日平均配水量　　2019年　0.27m³
- 平均有収水量
  有収水量／月　　1832000m³＋303m³＝1832303m³　　水洗化人口　21306人
  1832303÷21306＝85.999…＝86m³
- 料金　20mm口径　　基本料金4180円　基本水量　16m³
  料金　13mm口径　　基本料金2200円　基本水量　16m³

湖西市については，以下のような時間帯別の料金を設定した実証実験をすでに開始している。令和５年に，知波田・入出地区の1890戸の世帯を対象に，６月16日から10月15日まで実証実験を実施した。結果として，アンケート及び配水量データより，時間帯別料金による使用者への影響（使用時間帯の意識，行動の変化）があり，配水量への影響（安い時間帯の使用量の増加，高い時間帯の使用量の減少）があった可能性がある，また，実証実験期間中，５時台においては特に配水量割合が増加しており，この時間帯での使用行動の変化が促された可能性がある，との報告がなされている[15)]。



③高松市

- 料金　20㎜口径　　基本料金4000円

④東京都

- 一日平均使用水量　4,123,000m^3（2020年）÷13,944,000人（給水人口）
  ＝0.29568273m^3
  0.29568273×60＝17.7409638m^3
- 料金　20㎜口径　　基本料金1230円　基本水量　10m^3
  料金　13㎜口径　　基本料金920円　基本水量5m^3（平成17年（2005年）改定）
  料金　20㎜口径　　基本料金1170円　基本水量5m^3（平成17年（2005年）改定）
- 水源の渇水期……過去の平均値のデータによると，７月から９月。
  平年の平均値でみると54％（３億 m^3）から45％（2.5億 m^3）の間。

たとえば，以下のように，水源の渇水程度に従って，料金をアップさせる方法が考えられる。東京都の場合，基本水量が５m^3～10m^{3}であるため，その前後の範囲で，使用水量が決まった場合，渇水度（％）に応じて追加料金を以下のように設定することができる。

	80％	75％	70％	65％	60％	55％	50％	45％
2m^3	0	0	0	0	0	0	0	0
4m^3	0	0	0	0	0	0	0	＋60
6m^3	0	0	0	0	0	0	＋60	＋70
8m^3	0	0	0	0	0	＋60	＋70	＋80
10m^3	0	0	0	0	＋60円	＋70	＋80	＋90
12m^3	0	0	0	＋60円	＋70	＋80	＋90	＋100
14m^3	0	0	＋60円	＋70	＋80	＋90	＋100	＋110
16m^3	0	＋60円	＋70	＋80	＋90	＋100	＋110	＋120

また，１日の平均使用水量がおよそ0.30m^{3}であることから，その前後0.25～0.35m^{3}の場合に，渇水度に応じて，以下のように追加料金を設定することを計画することができる。

0.01m^3＝100㎖

	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
0.25	0	0	0	0	0	0	0	+5
0.26	0	0	0	0	0	0	+5	+10
0.27	0	0	0	0	0	+5	+10	+15
0.28	0	0	0	0	+5	+10	+15	+20
0.29	0	0	0	+5	+10	+15	+20	+25
0.30	0	0	+5円	+10	+15	+20	+25	+30
0.31	0	+5円	+10	+15	+20	+25	+30	+35
0.32	+5円	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40
0.33	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
0.34	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
0.35	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50	+55

⑤横浜市

- 一日平均使用水量　1,136,938 m^3（2020年）÷3,776,102人（給水人口）
  ＝0.30108774m^3
  1,136,938 m^3（2020年）÷1,907,706（給水戸数）＝0.59597129m^3
- 料金　20㎜口径　基本料金　845円　基本水量なし（令和３年（2021年）７月改定）

(2) 時間帯別料金の導入に関する実験計画メモ

前章の（２）で，サーベイしたMarzano, R., Rouge, C., et al.（2020）のシャワーの水量を節約させる手法が参考になる。前節の「図１．シャワー時間削減に応じた払い戻し金額の関数」でみたように，Marzano, R., Rouge, C., et al.（2020）では，シャワータイムの短縮にともない，払い戻される金額についてグラフで表されていた。この方法を踏襲して，シャワータイムの削減時間と払い戻し金額の関数を作成し，実験に採用する方法が考えられる。Marzano, R., Rouge, C., et al.（2020）にあるように，シャワータイムを採用する理由は，水の使用量が，ほかの用途に比べて多いこと，継続的な使用が見込まれること，使用量が多いため，料金設定などにより，削減する可能性が見込まれることなどをあげることができる。

そのほか，時間帯別料金については，早朝と帰宅直後の夕方，夕食時間帯の使用量が多くなっていることが予測できるので，この時間帯の料金を高めに設定し，生活行動時間外の深夜などの料金を低く設定するなどの，電気料金でも採用されるオーソドックスな方法が考えられる。

5．まとめ

本論では，まず，海外の水道事業におけるダイナミック・プライシングの適用状況について論文のサーベイを行った。多くの渇水に悩む国々での実証実験，実運用が多く見られ，ピークロードプライシングというよりも，scarcity pricing という手法を採用していること，また一定の効果をあげていることが分かった。

他国と比べて，比較的，水が潤沢な日本においても，四国地方などの一部の地域を中心に空梅雨や日照りの天候が続くことが，年によっては見られ，取水制限や節水制限が実施されることがある。その際，季節別料金制度を導入することで事態を克服することができる可能性があるのではないかと考えられる。

サーベイにより，電力の手法を参考に，その分析方法は複数考えられるため，水道事業にも手法が適用された事例が多く見られた。

今後は，実際に，各自治体とのタッグを組み，日本の状況にあった実験計画を適用することで，実証実験・実運用の実施につなげていきたい。

＊本稿は，基盤研究（B）（２３Ｋ２８２９３）「水資源量に応じたフレキシブルな水需要マネジメントによる水道 DX の推進」の一環から助成を受けている。記して感謝の意を表す。

註）

1）需要量のピークの時間帯，季節に，高い料金を設定し，需要量の低い時間帯，季節に，低い料金を設定することで，利用者の需要行動の変化を通じて，需要量の平準化を実現するための料金制度。

2）ナッジとは，「肘で軽く突く」という意味で，選択を禁じることも強制することもせず，また報酬を与えることもなく，人間の行動をより良い方向へ促す仕掛けや手法のこと。

3）需要量に応じて，料金の設定を行ったり，利用者の需要の削減に金銭的なご褒美を与えることにより，利用者の需要行動に変化を起こす手法。

4）“scarcity”とは，“渇水”を意味する単語で，貯水池，井戸などの水量の変化に伴って，料金を変化させることにより，水需要の平準化を狙う手法。

5）効用ロジスティックモデルとは，利用者の効用最大化を前提に，アンケート結果から集計したデータを使って，分析するモデルである。

6）System Dynamics Modelling とは，個々の特性等の詳細情報を無視し，複雑なシステムを生成する非常に抽象度が高いモデリング方法。

7）依田他（2017）「第１章 スマートグリッドの経済学」によると，「この料金制度は，季節ごとであったり，日中と夜間等の時間帯のブロックごとに異なる料金水準をあらかじめ設定する。」とある。

8）Agent-based modlling の略。人口的な環境で人間の行動とお互いの，あるいは世界と個人

のダイナミックな相互作用の複雑性を捉え，表すことができる方法で，公共政策の目的に有効なモデルとされている。

9）依田他（2017）によると，ランダム化比較試験，無作為比較試験とも呼ばれたりすることもあり，RCT の特徴は，コントロール・グループ（トリートメントの介入を受けないグループ）とトリートメント・グループ（トリートメントの介入が受けるグループ）に分けることである。

10）水の希少性が段階的に複数，設定されている方法。

11）依田他（2017）によると，「トリートメント・グループのトリートメントを受ける前後の差，コントロール・グループの同じ期間の前後の差，さらに，その両方「差の差」をとれば，サイコロのいたずらの影響は大幅に除去することができる」，と説明されている。ここでいう“サイコロのいたずら”とは，グループを割り当てるときにサイコロを振っても完璧に属性が均等になるとは限らない，ことを意味している。

12）トービットモデルは，被説明変数がある限られた範囲しか取らない状況，あるいはなんらかの条件にあてはまったとき，データが観測できないときに，用いられる。

13）JWRC（2016）参照。

14）JWRC 水道の国際比較に関する研究委員会編（2019）参照。

15）湖西市水道課ホームページ
https://www.city.kosai.shizuoka.jp/soshikiichiran/suidoka/1_1/suidosmartmeter/13292.html
参照。

参考文献

Ali, M.A.,and Farjami,Y.(2021),“New hydro-economic system dynamics and agent-based modeling for sustainable urban groundwater management: A case study of Dehno, Yazd Province Iran”, *Sustanabile Cities and Society*,Volume 72, September 2021, 103078.

Castro, D., Gobbo, C., and Fabian, N.(2020), “Configuration of a smart meter for Brazilian customers”, *Energy Policy 139, 111309*.

Cominola, A., Giuliani, M., et al.(2021), “Long-term water conservation is fostered by smart meter-based feedback and digital user engagement, ” *Clean Water*（2021）4:29 ; https://www.nature.com/articles/s41545-021-00119-0

Garrone, P., Grilli, R., and Marzano, R.(2020), “Incentives to water conservation under scarcity: Comparing price and reward effects through stated preferences, ”*Journal of Cleaner Production*, Volume 244, 20 January 2020, 118632.

Hu, X., Li, Y., et al.(2022), “Water permits trading framework for urban water demand management based on smart metering, ”*Journal of Environmental Management 304 (2022) 114208*.

Ito, K., Ida, T., and Tanaka, M.(2018), “Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand”, *AMERICAN ECONOMIC JOURNAL: ECONOMIC POLICY*, VOL.10, NO.1, FEBRUARY 2018.(pp. 240-67)

Lopez-Nicolas.A.et al.(2018), “Design and assessment of an efficient and equitable dynamic

urban water tariff. Application to the city of Valencia, Spain", *Enviromental Modelling Software*, Volume 101, March 2018, Pages 137-145.

Marzano, R., Rouge, C., et al.(2020), "Response of residential water demand to dynamic pricing: Evidence from an online experiment", *Water Resources and Economics*, Volume 32, October 2020, 100169.

Rouge, C. et al.(2018), "Determinants of the price response to residential water tariffs: Meta-analysis and beyond", *Enviromnetal Modelling Software*, Volume 101, March 2018, Pages 236-248.

Sahin, O., Bertone, E., and A. Rodney(2018), "Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics," Modelling & software Vidal, P.L., Popartan, A., et al.(2022), "Agent-based modelling to simulate the socio-economic effects of implementing time-of-use tariffs for domestic water", *Sustanable Cities and Society*, Volume 86, November 2022, 104118.

依田高典・田中誠・伊藤公一朗（2017)『スマートグリッド・エコノミクス―フィールド実験・行動経済学・ビッグデータが拓くエビデンス政策―』有斐閣

水道技術研究センター（2024年）New-Smart プロジェクト会議第３回（2024年３月実施）提供資料「国内のスマート水道メーター実証実験・実運用マップ（2024年１月時点)」

JWRC 水道の国際比較に関する研究委員会編（2019)「海外の水道事業におけるスマートメーターの利用状況」2019年９月
https://www.jwrcnet.or.jp/docs/researchdevelopment/comparison/abroad06.pdf

JWRC（2016)「1.2　国外情報　研究成果①（水道料金）　表１　水道料金の調査結果　一覧表　2015年度末時点の情報」

「Tobit モデル」Applied Econometrics, 2009
https://web.econ.keio.ac.jp/staff/bessho/lecture/09/091104select.pdf
（2024年４月11日アクセス）