〔農業経済研究　第81巻，第3号，2009〕

農業排水管理における非線形灌漑用水料金制の利用

武　藤　幸　雄*

1. は　じ　め　に

米国カリフォルニア州のBroadview用水区（Broadview Water District）の農地から流れ出る農業排水は1983年からSan Joaquin川に流れ込むようになったが，それから間もなく，その川の付近の流域で野生生物の奇形が多数発見され社会問題化した．奇形が発生した要因は，同用水区の農地に有害物質（セレン，モリブデンなど）が含まれていて，そこからSan Joaquin川に流れ込む農業排水にも有害物質が高い濃度で含まれていたことだった．この因果関係が明るみになってから，同用水区は農業排水の処理と排水排出量の削減を政府機関から要請されるようになった（Wichelns〔10〕，〔11〕）．

Broadview用水区では，それまで線形の灌漑用水料金制が採用されていた（註1）．その水価格の高さは，灌漑料金収入によって灌漑用水供給の可変費用を回収できる水準に定められ，作物の種類に依らず均一であった．上の要請を受けて，同用水区は，'88年から灌漑料金として作物別に二段階の逓増型ブロック料金制を課すことを決めた．この料金制では，作物別に水投入量の閾値が設けられ，水投入量がその閾値に満たないときの水の限界価格が従来の水価格の高さ（16ドル/acre feet）に等しく設定され，水投入量がその閾値を超えるときの水の限界価格が従来の水価格の2.5倍（40ドル/acre feet）に設定された．作物別の水投入量の閾値は，作物ごとに過去の作付面積あたり水投入量の時系列平均を算出し，その時系列平均の9割に一致するように定められた．従来この閾値よりも多い水を投入する傾向を持っていた生産者は，割高な限界価格（40ドル/acre feet）によって水投入節減のインセンティブを与えられるようになった．同用水区では，この料金改革以前はサイフォンチューブを用いた畝間灌漑が大半の農地で行われていたが，改革から数年のうちに，節水に適した灌漑設備であるスプリンクラーやゲーティッド・パイプの普及が急速に進んだ．そして，改革の狙い通り，各作物の作付面積あたり水投入量が大きな減少をみせるようになった（註2）．

Broadview用水区では，各圃場からの排水排出量を測定するのに極めて高い費用がかかるため，生産者に排水排出量を一定以下に抑えるように規準を課したり，排水排出量に応じた課徴金を賦課したりすることができなかった．このように排水自体を直接の規制ターゲットにできない場合に灌漑料金に逓増型ブロック料金制を採用し，排水が環境に及ぼす負荷をコントロールしながら社会的厚生をいかに高められるか，という問題は，上のような事例の存在にもかかわらず，これまで詳しく分析されていない．Caswell，Lichtenberg，and Zilberman〔2〕，Khanna，Isik，and Zilberman〔6〕は，農業排水の排出量管理のための政策手段として排水排出量に応じた課徴金賦課などを取り上げ，その効果を分析している．彼らは，排水排出量管理に向けられる政策が農業生産者の意思決定に及ぼす影響には，i）農地を農業生産に用いるかどうかの決定を変える効果（外延的マージン効果），ii）畝間灌漑やスプリンクラー灌漑等の間で灌漑技術を切り替える効果（スイッチング効果），iii）灌漑技術を所与としたときの水投入量を変える効果（内包的マージン効果），が含まれることを指摘している．そして，彼らの取り上げる政策手段が農地の特性（例，傾斜度や土壌の水分保持力）に依存しながら，これらの効果をいかに引き起こすかを説明している．しかし，Broadview用水区のように非線形の灌漑料金制を用いて排水排出量を管理するケースは，彼らの分析対象に含まれていない（註3）．

本稿の課題は，環境への負荷のような社会的費用を伴った農業排水の排出量管理が，排水の測定費用の高さのために灌漑料金の調整を通じて行われる場合，逓増型ブロック料金制を灌漑料金として用いて社会的厚生をいかに高められるか，を分析することである．本稿は，灌漑料金形態が変わるとき上述の三効果がどのように発現するかに注意を向けながら，この分析を進める．

次節では，作物生産と排水排出についてモデル化し，作物生産における水需要や灌漑技術の決まり方を説明する．第3節では，Broadview用水区の事例で観察されるように，二段階の逓増型ブロック料金制が採用され，用水多消費段階での水の限界価格の高さが調整される状況を想定する．そして，その限界価格の調整によって，灌漑技術選択や社会的厚生が受ける影響について分析する．第4節では，線形料金制に代わって逓増型ブロック料金制を灌漑料金に採用することによって社会的

*京都大学

厚生を改善できるための条件を分析する．第3節と第4節の分析内容に関する例示を第5節で行う．第6節では分析結果を要約し，残された課題を述べる．

2. モ　デ　ル

ある地域で1種類の作物が生産され，その生産者向けに灌漑用水が水利組織によって供給される状況を考える．地域内の農地から流出する排水は汚染物質を含み，排水の流れ込む河川の環境や流域住民の厚生に対して負の影響を及ぼす．しかし，各圃場からの排水排出量を測定するのに禁止的費用がかかるため，政府には，生産者に対して排水排出量を一定以下に抑えるように規準を課したり，排水排出量に応じた課徴金を賦課したりすることはできない．代わりに，灌漑用水料金形態の調整を通じて排水排出量の管理が図られる場合を，ここでは想定する．

初めに，Caswell and Zilberman〔1〕，Caswell, Lichtenberg, and Zilberman〔2〕に依拠しながら作物生産をモデル化する．地域内の作物生産は収穫一定である．作物生産で投入される水を投入水（applied water）と呼ぶ．また，投入水のうち，作物の生育に寄与する部分を，有効水（effective water）と呼ぶ．投入水のうち有効水にならない部分は，蒸発したり，地中に浸透して排水になったりする．有効水の投入水に対する比率を灌漑効率性と呼ぶことにする．投入水の量と灌漑効率性がそれぞれ x，η に等しいとき，有効水の量は $e = \eta x$ に等しくなる．作付面積あたりの作物生産量は，有効水量 e の関数 $f(e)$ によって表される．ただし，f は二階連続微分可能で，$f'(e) > 0$，$f''(e) < 0$ を満たす．

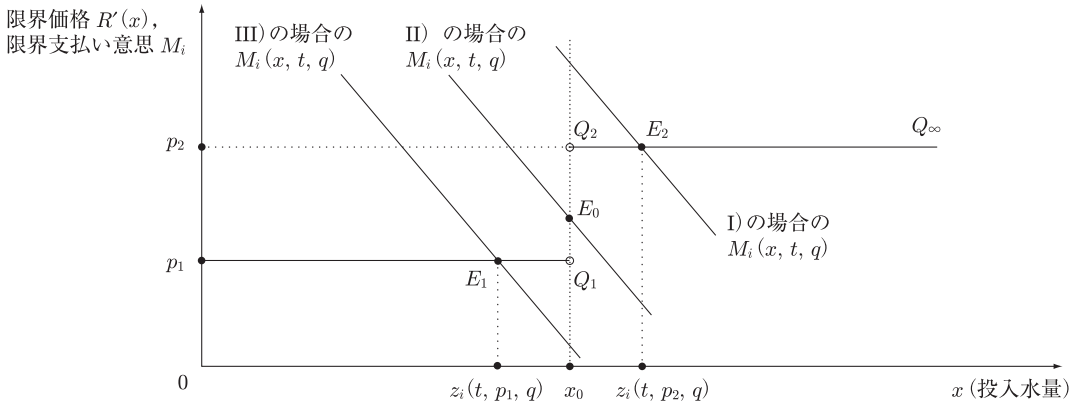
灌漑効率性は，使用される灌漑技術と農地の質に依存する．サイフォンチューブを使う伝統的な畝間灌漑に代わって，スプリンクラーやゲーティッド・パイプ等を導入し灌漑を行うようになると，灌漑効率性は一般に高まる．また，傾斜度の低い農地や，粘土質で土壌の水分保持力が高い農地では，畝間灌漑を行うときの灌漑効率性が高くなる傾向があり，傾斜度の高い農地や，砂質で土壌の水分保持力が低い農地では，その反対の傾向がみられる．

本稿のモデルでは，灌漑技術の種類を変数 i で表し，$i = A$ は伝統的な畝間灌漑を用いる場合に，$i = B$ はスプリンクラー灌漑に代表される近代的灌漑技術を用いる場合に対応する．一方，灌漑効率性に影響する農地の質を変数 t で表し，t を質指数と呼ぶことにする．t は区間 $[0, 1]$ 上で連続的に分布する確率変数で，その分布関数 $G(t)$ は連続的微分可能である．t の密度関数を $g(t) = G'(t)$ と置く．質指数が t である農地において技術 i が使われるとき，そこでの灌漑効率性は $\eta_i(t)$ に等しくなるものとする．以下では，質指数が t である農地において技術 A 使用時の灌漑効率性が t に等しくなること，つまり，$\eta_A(t) = t$ を仮定する．農地の質に対する灌漑効率性の依存性については上述のような傾向がみられるので，この仮定は，質指数が高い（低い）農地ほど，傾斜度の低い（高い）農地や，土壌の水分保持力が高い（低い）農地によく対応することを意味する．一方，$\eta_B(t)$ は，t に関して二階連続的微分可能で，狭義単調増加で狭義凹であるものとする（$\eta'_B(t) > 0$，$\eta''_B(t) < 0$ を満たす）．また，$\eta_B(0) = 0$ と $\eta_B(1) = 1$ が成り立ち，$0 < t < 1$ のとき $\eta_A(t) = t < \eta_B(t)$ が成り立つものとする．この仮定は，技術 A 使用時の灌漑効率性が 0 か 1 に等しい農地（つまり，質指数が 0 か 1 に等しい農地）では，技術を A から B に切り替えても灌漑効率性が変化しないが，他の農地では技術を A から B へ切り替えると灌漑効率性が高まることを意味する．

技術 i を用いるとき水散布にかかる動力費は，水 1 単位あたり v_i に等しいものとする．伝統的な畝間灌漑ではサイフォンチューブを用いて農地に水が引かれ，水散布に動力費はかからないが，スプリンクラー灌漑では，水路から水を汲み上げ散水する際に動力費がかかる．これらを考慮し，$v_B > v_A = 0$ を仮定する．技術 i が使われるときの作物生産における面積あたり固定費は，h_i で表す．近代的灌漑技術を使用する際は灌漑設備の資本費が嵩むことから，$h_B > h_A > 0$ を仮定する（註4）．

次に排水排出についてモデル化する．Khanna, Isik, and Zilberman〔6, Section 4〕と同様に，本稿は，投入水から生成される排水の量が元の投入水の量に比例すると仮定し，投入水量 1 単位あたりの排水量を排水係数と呼ぶことにする．質指数が t である農地において技術 i が用いられるとき，そこでの排水係数は $\xi_i(t)$ に等しくなるものとする．ただし，$\xi_i(t)$ は t について連続的微分可能である．排水は投入水のうち有効水にならない部分の中から生成されるので，$\xi_i(t) \leq 1 - \eta_i(t)$ が成り立つ．Hanemann et al.〔5〕は，畝間灌漑からスプリンクラー灌漑へ切り替えた農地で排水係数が低下することを示す実験結果を報告している．また，Wichelns〔10〕は，土壌の水分保持力の低い農地ほど，投入水が地中に浸透しやすく，排水がより多く生成される傾向があると指摘している．これらを考慮し，$0 < t < 1$ のとき $\xi_A(t) > \xi_B(t)$，$\xi'_A(t) < 0$，$\xi'_B(t) < 0$ が成り立つと仮定する．この仮定は，灌漑技術が A から B へ切り替わったり，灌漑技術を維持したまま農地の質指数が上昇したりすることによって灌漑効率性が高まる際，同時に排水係数の低下が起こることを意味する．

水利組織が生産者に灌漑用水を供給する際，その用水供給の限界費用は，正の定数 c_w に等しくなるも



第 1 図　$p_1 < p_2$ のときの $x_i(t, P, q)$ の決まり方

のとする．一方，地域内の総排水排出量が W 単位のときに排水から生じる社会的費用の大きさは，関数 $D(W)$ で表されるものとする．ただし，D は微分可能で，$D'(W) > 0$ を満たす．この排水の社会的費用には，排水の流れ込む河川流域の環境や流域住民の厚生が排水によって悪影響を受けることで生じる損害や，水利組織が排水処理のために費やす費用などが含まれる．

圃場において面積あたり x 単位の灌漑用水が投入されるとき，水利組織によって面積あたり $R(x)$ だけの灌漑用水料金が課されるものとする．本稿は R が次の関数形を取る場合を想定する．

$$R(x) = \begin{cases} p_1 x & if\ 0 \le x \le x_0, \\ p_1 x_0 + p_2(x - x_0) & if\ x_0 \le x \end{cases} \quad (1)$$

ただし，$0 < p_1 \le p_2$，$x_0 > 0$ を仮定する．R の関数形を記述するパラメータをまとめて，ベクトル $P = (p_1, p_2, x_0)$ で表す．p_1 と p_2 はそれぞれ，投入水量が x_0 未満のときと，x_0 より大きいときの水の限界価格を表す．$p_1 = p_2$ のとき，(1) は線形料金制になり，$p_1 < p_2$ のとき，(1) は逓増型ブロック料金制になる．後者の場合，R は $x = x_0$ で微分可能でないが，$x = x_0$ で連続であることに注意する．

作物価格を $q > 0$ で表す．ここで考察対象とする作物の地域内での生産量は市場規模に比べて十分に小さく，その変動が q に及ぼす影響は無視できるものとする．質指数が t である農地において技術 i を使って生産が行われるとき，そこでの（面積あたり）水需要と準地代はそれぞれ，最大化問題

$$\max_{x \ge 0} \pi_i(x, t, P, q) \equiv qf(\eta_i(t)x) - v_i x - R(x) - h_i \quad (2)$$

の解と最大値に等しくなる．問題 (2) の解（水需要）を，関数 $x_i(t, P, q) = x_i(t, p_1, p_2, x_0, q)$ で表し，その最大値（準地代）を，関数 $Y_i(t, P, q) = Y_i(t, p_1, p_2, x_0, q)$ で表すことにする．

作物生産に投入されない農地での準地代はゼロになる．質指数が t に等しい農地を生産者がいかに利用するかは，$Y_A(t, P, q)$，$Y_B(t, P, q)$，0 のうち，どれが最も大きいかに依拠して決まる．これら三者のうち $Y_i(t, P, q)$ が最も大きい場合（$i = A$ or B），生産者はそこで技術 i を使って作物生産を行うことを決める．また，$Y_A(t, P, q)$ と $Y_B(t, P, q)$ がともに負で，三者の最大値が 0 である場合，生産者はそこで作物生産を行わないことを決める．

以上がモデルの基本設定である．本節の残りでは，水需要 x_i と準地代 Y_i の決まり方を論じた後，農地の質指数と灌漑技術の関係を説明し，最後に，社会的厚生関数を定義する．

関数 $M_i(x, t, q) \equiv qf'(\eta_i(t)x)\eta_i(t) - v_i$ は，質指数が t に等しい農地において技術 i を使う生産者が水を追加的に 1 単位得るためにどれだけ支払う意思があるか，つまり，水に対する彼らの限界支払い意思額を測る．$f'' < 0$ より $M_i(x, t, q)$ は x について単調減少だから，$M_i(x, t, q) = p > 0$ を満たす x の値は一意に定まる．この x の値を関数 $z_i(t, p, q)$ によって表そう．すると，$f'' < 0$ より，$\partial_p z_i(t, p, q) < 0$ が得られる（註 5）．特に $p_1 = p_2 = p$ が成り立つときは，$x_i(t, P, q) = z_i(t, p, q)$ も得られる．

仮定 $p_1 \le p_2$ より，所与の t，P，q に対して，I) $M_i(x_0, t, q) > p_2$ のとき，II) $p_1 \le M_i(x_0, t, q) \le p_2$ のとき，III) $M_i(x_0, t, q) < p_1$ のとき，のいずれかが起こる（註 6）．$x < x_0$ のとき $\partial_x \pi_i(x, t, P, q) = M_i(x, t, q) - p_1$ であり，$x > x_0$ のとき $\partial_x \pi_i(x, t, P, q) = M_i(x, t, q) - p_2$ であることに注意しよう．上の I) の場合，連続性より，x が x_0 よりも限界的に大きいとき $M_i(x, t, q) > p_2$ が成り立つ．よって，x が x_0 から限界的に上昇するとき π_i は増える．また，$x < x_0$ のとき，$M_i(x, t, q) > M_i(x_0, t, q) > p_2 \ge p_1$ が成り立つため，π_i は x について単調増加で

ある．π_i が $x = x_0$ 上で x について連続になるから，この場合，問題（2）の解は x_0 を上回り，$x_i(t,P,q) = z_i(t,p_2,q) > x_0$ が成立する．一方，II）の場合，$x < x_0$ のとき，$M_i(x,t,q) > M_i(x_0,t,q) \geq p_1$ を得るので，π_i は x について単調増加である．また，$x > x_0$ のとき，$M_i(x,t,q) < M_i(x_0,t,q) \leq p_2$ が成り立つので，π_i は x について単調減少になる．π_i は $x = x_0$ 上で x について連続なので，この場合，π_i は $x = x_0$ のとき最大になり，$x_i(t,P,q) = x_0$ が成り立つ．他方で，III）の場合，x が x_0 から限界的に低下すると π_i は増える．また，$x > x_0$ のとき，$M_i(x,t,q) < p_1 \leq p_2$ なので，π_i は x について単調減少である．よって，問題（2）の解は x_0 を下回り，$x_i(t,P,q) = z_i(t,p_1,q) < x_0$ が成立する．第1図では $p_1 < p_2$ のときの x_i の決まり方が例示されている．上のI）の場合，$M_i(x,t,q)$ のグラフと線分 Q_2Q_∞ の交点の x 座標が $x_i(t,P,q)$ を与える（点 E_2 参照）．II）の場合，$M_i(x,t,q)$ のグラフが線分 Q_1Q_2 と交わり，$x_i(t,P,q) = x_0$ が成立している（点 E_0 参照）．III）の場合は，$M_i(x,t,q)$ のグラフと線分 p_1Q_1 の交点の x 座標が $x_i(t,P,q)$ を与える（点 E_1 参照）．

問題（2）の最大値である Y_i は，上の各ケースの x_i の表現と（1）を用いることによって，

$$Y_i(t,P,q) = \begin{cases} qf(\eta_i(t)z_i(t,p_2,q)) - v_i z_i(t,p_2,q) \\ \quad -p_2\{z_i(t,p_2,q) - x_0\} - p_1 x_0 - h_i \\ \qquad\qquad \text{if } M_i(x_0,t,q) > p_2, \\ qf(\eta_i(t)x_0) - (v_i + p_1)x_0 - h_i \\ \qquad\qquad \text{if } p_1 \leq M_i(x_0,t,q) \leq p_2, \\ qf(\eta_i(t)z_i(t,p_1,q)) \\ \quad -(v_i + p_1)z_i(t,p_1,q) - h_i \\ \qquad\qquad \text{if } M_i(x_0,t,q) < p_1 \end{cases} \tag{3}$$

と場合分けして表せる．この式表現は，$p_1 < p_2$ のときと $p_1 = p_2$ のときのいずれにも成立する．次節では偏導関数 $\partial_{p_2} Y_i$ を分析に用いるが，これは，式（3）や上の議論より，

$$\partial_{p_2} Y_i(t,P,q) = \begin{cases} x_0 - z_i(t,p_2,q) \\ \qquad\qquad \text{if } M_i(x_0,t,q) > p_2 \\ \qquad\qquad (\Leftrightarrow x_i(t,P,q) > x_0), \\ 0 \qquad\quad \text{if } M_i(x_0,t,q) \leq p_2 \\ \qquad\qquad (\Leftrightarrow x_i(t,P,q) \leq x_0) \end{cases} \tag{4}$$

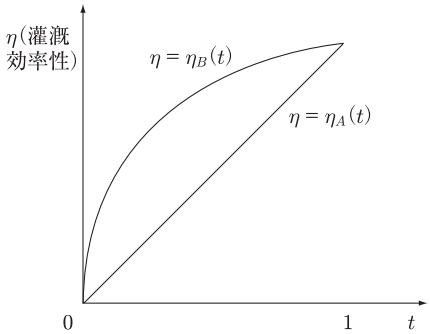
と場合分けして表せる．$x_i(t,P,q) > x_0$ のとき，$x_0 - z_i(t,p_2,q) = x_0 - x_i(t,P,q) < 0$ が得られる．式（4）は，$x_i(t,P,q) > x_0$ が成り立つときに限って $\partial_{p_2} Y_i(t,P,q)$ が負になることを意味する．

Broadview 用水区が位置する San Joaquin Valley では，傾斜度の低い農地や土壌の水分保持力の高い農地で畝間灌漑がよく用いられ，傾斜度の高い農地や土壌の水分保持力の低い農地でスプリンクラー灌漑を含む近代的灌漑技術がよく用いられる傾向があることが，Dinar, Campbell, and Zilberman〔3〕によって実証されている．本稿のモデルにおいて，このように農地の質に依存して灌漑技術が使い分けられる状況がいかに成立するかを次に説明しよう．条件 $h_B > h_A$，$v_B > v_A = 0$ は，生産者が技術 A を採用すると，技術 B 採用時に比べて固定費と動力費を節約できることを意味する．質指数が1に等しい農地では，技術を A から B に切り替えても灌漑効率性を改善できないから，これらの条件より技術 A 採用時の方が高い準地代が実現する．つまり，$Y_A(1,P,q) > Y_B(1,P,q)$ が成り立つ．以下では，質指数が1に等しい農地において技術 B を採用するとき正の準地代が実現すること，すなわち，$Y_B(1,P,q) > 0$ を仮定する．

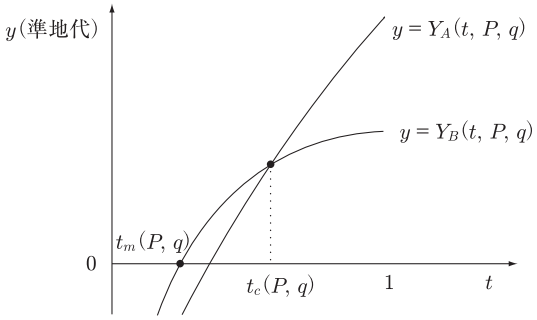
問題（2）に包絡線定理を適用すると，次の式を得る．

$$\partial_t Y_i(t,P,q) = qf'(\eta_i(t)x_i(t,P,q))x_i(t,P,q)\eta_i'(t) > 0$$

これより，使用技術を所与としたときの準地代は，農地の質指数が1より低下するにつれて減少する．また，$\eta_B'(t)$ が $\eta_A'(t) = 1$ より十分小さいとき，$\partial_t Y_B(t,P,q) < \partial_t Y_A(t,P,q)$ が成立するようになる．ここで，t が比較的高いときに，$\eta_B'(t)$ が $\eta_A'(t) = 1$ よりも十分小さいために $\partial_t Y_B(t,P,q) < \partial_t Y_A(t,P,q)$ が成立すると仮定しよう（第2図，第3図参照）．この状況では，t が1から低下するにつれて $\eta_B(t)$ と $\eta_A(t)$ の間に大きな開きが生じ，$Y_A(t,P,q)$ が $Y_B(t,P,q)$ よりも速く減少する．よって，t があまり高くないとき $Y_A(t,P,q) < Y_B(t,P,q)$ が成立し得る．この不等式を満たす質指数を持つ農地では，技術 A を用いるときの灌漑効率性が技術 B 使用時のそれに比べてかなり劣るため，技術 A の採用によって固定費と動力費を節約できるにもかかわらず，技術 B 使用時の方が高い準地代が実現する．第3図に描かれるように，Y_A と Y_B のグラフは，$y > 0$ を満たす領域で，ただ1点で交わるものとする．このとき $Y_A(t,P,q) = Y_B(t,P,q) > 0$ を満たす t の値を，関数 $t_c(P,q) = t_c(p_1,p_2,x_0,q)$ によって表す．このほか，$\eta_B(0) = 0$ と $h_B > 0$ より $Y_B(0,P,q) < 0$ が成り立つので，$Y_B(t,P,q) = 0$ を満たす t の値が一意に存在する．この t の値は，関数 $t_m(P,q) = t_m(p_1,p_2,x_0,q)$ によって表すことにする．生産者は，Y_A，Y_B，0 の大小関係を考慮して農地の利用方法を決めるため，ここで述べるケースでは，質指数が $t_m(P,q)$ 未満である農地は生産に使われなくなる．また，質指数が $t_m(P,q)$ から $t_c(P,q)$ までの範囲にある農地では技術 B を使って生産が行われ，質指数が



第 2 図　灌漑効率性と農地の質指数の関係



第 3 図　準地代と農地の質指数の関係

$t_c(P,q)$ より高い農地では技術 A を使って生産が行われる．こうして，Dinar，Campbell，and Zilberman〔3〕で示された傾向に対応しながら，2 つの技術が農地の質に応じて使い分けられるようになる（註 7）．

本稿は，農地の質に応じて上のように灌漑技術が使い分けられる場合を想定し，課題の分析を進める．この場合，$t_c(P,q)$ は，技術 A，B の採用が無差別になる農地の質指数を表し，$t_m(P,q)$ は，限界地の質指数を表す．地域内の総農地面積を 1 に規準化すると，このときの地域内の総排水排出量は，下の関数 $W(P,q) = W(p_1,p_2,x_0,q)$ のように表せる．

$$W(P,q) = \int_{t_c(P,\ q)}^{1} \xi_A(t)x_A(t,P,q)g(t)dt + \int_{t_m(P,q)}^{t_c(P,q)} \xi_B(t)x_B(t,P,q)g(t)dt \quad (5)$$

地域内の農地における準地代の総和と水利組織の得る灌漑料金収入との和から，灌漑用水供給の可変費用と排水の社会的費用を控除したものが，社会的厚生の大きさとして定義される．上述の状況での社会的厚生の大きさを関数 $V(P,q) = V(p_1,p_2,x_0,q)$ によって表すと，次の表現が可能である．

$$\begin{aligned} V(P,q) = &\int_{t_c(P,q)}^{1} \{qf(\eta_A(t)x_A(t,P,q)) - h_A \\ &-c_w x_A(t,P,q)\}g(t)dt \\ &+\int_{t_m(P,q)}^{t_c(P,q)} \{qf(\eta_B(t)x_B(t,P,q)) - h_B \\ &-(v_B + c_w)x_B(t,P,q)\}g(t)dt \\ &-D(W(P,q)) \end{aligned} \quad (6)$$

上の導出では，生産者の灌漑料金支払いと水利組織の得る灌漑料金収入とが相殺し合うことを用いている．次節では，V を用いて，灌漑料金の変化が社会的厚生に及ぼす影響について分析する．

3. 限界価格 p_2 の変動が社会的厚生に及ぼす影響

Broadview 用水区では，線形料金制から二段階の逓増型ブロック料金制へ灌漑料金を切り替えた際，用水多消費段階での水の限界価格（本稿のモデルの p_2 に相当）を従来の水価格より高く設定して，生産者の水投入抑制を図った．本節では，本稿のモデル上で p_2 を変化させるとき，生産者の水需要や灌漑技術選択への影響を介して，社会的厚生 V に対しどのように影響が及ぶかを分析する．

有効水の限界生産力の弾力性 ϵ_f は，$\epsilon_f(e) \equiv -ef''(e)/f'(e)$ によって定義される．Caswell，Lichtenberg，and Zilberman〔2〕，Khanna，Isik，and Zilberman〔6〕は，この弾力性が 1 を超える状態で作物生産が行われるときに排水課徴金等の排水規制がもたらす影響を分析している．以下では，これらと同じく，

$$\begin{aligned} &t \in [t_c(P,q),1] \text{ のとき } \epsilon_f(\eta_A(t)x_A(t,P,q)) > 1, \\ &t \in [t_m(P,q),t_c(P,q)] \text{ のとき } \epsilon_f(\eta_B(t)x_B(t,P,q)) > 1 \end{aligned} \quad (7)$$

が成立すること，つまり，料金制（1）が敷かれるとき，生産が行われる各農地で有効水の限界生産力の弾力性が 1 を上回ることを仮定する．この仮定の含意について説明しよう．初めに，（1）が線形料金制であるとき（7）が成り立つ場合を考える．$p_1 = p_2 = p$ のとき，前述のように $x_i(t,P,q) = z_i(t,p,q)$ が成り立つ．よって，$M_i(z_i(t,p,q),t,q) = p$ を t について全微分して，（7）より，次を導ける．

$$\begin{aligned} &\partial_t x_i(t,P,q) = \partial_t z_i(t,p,q) \\ &\quad = -\{1-\epsilon_f(\eta_i z_i)\}f'(\eta_i z_i)\eta_i'(t)/\eta_i^2(t)f''(\eta_i z_i) < 0 \\ &\qquad \forall t \in T_i \quad (i = A,B) \end{aligned}$$

ただし，$T_A \equiv [t_c(P,q),1]$，$T_B \equiv [t_m(P,q),t_c(P,q)]$ である．よって，（1）が線形料金制であるとき（7）が成立すれば，同じ技術が使われる農地どうしでは，高い質指数を持つ農地ほど水需要が小さくなる．

次に，(1) が $p_1 < p_2$ を満たす逓増型ブロック料金制であるときに (7) が成り立つ場合を考える．この場合，t が T_i に含まれ $x_i(t,P,q) > x_0$ と $M_i(x_0,t,q) > p_2$ を満たすならば，(7) より $\partial_t x_i(t,P,q) = \partial_t z_i(t,p_2,q) < 0$ を得る．よって，$x_i(t,P,q)$ は t の上昇とともに低下し x_0 に近づく（第1図では点 E_2 が t の上昇とともに点 Q_2 に近づく）．このように $x_i(t,P,q)$ が t の上昇とともに低下していって x_0 に等しくなるとき，$M_i(x_0,t,q) = p_2$ が成立する．一方，t が T_i に含まれ，$p_1 \leq M_i(x_0,t,q) \leq p_2$ を満たす場合，$x_i(t,P,q) = x_0$ なので，(7) から $\partial_t M_i(x_0,t,q) = \{1-\epsilon_f(\eta_i x_0)\}f'(\eta_i x_0)\eta_i'(t) < 0$ を得る．この場合，$M_i(x_0,t,q)$ は t の上昇とともに低下し，$M_i(x_0,t,q)$ が p_1 に等しくなるまで $x_i(t,P,q) = x_0$ が成立し続ける（第1図では点 E_0 が t の上昇とともに点 Q_1 へ近づく）．そして，$M_i(x_0,t,q)$ が p_1 に達した状態から t が限界的に上昇すると，$M_i(x_0,t,q) < p_1$ が成立し，$x_i(t,P,q)$ は x_0 を下回るようになる．t が T_i に含まれ，$x_i(t,P,q) < x_0$ と $M_i(x_0,t,q) < p_1$ を満たす場合，(7) より $\partial_t x_i(t,P,q) = \partial_t z_i(t,p_1,q) < 0$ を得るので，$x_i(t,P,q)$ は t について単調減少である（第1図では点 E_1 が t の上昇とともに左方へ移動する）．以上の議論より，$p_1 < p_2$ と (7) が成り立つ場合，$x_i(t,P,q)$ は区間 T_i 上で t について非増加で，特に $x_i(t,P,q) \neq x_0$ のとき t について単調減少になる（この性質は，$i = A, B$ に対して成り立つ）．

条件 (7) が成立する場合，上の考察より，料金パラメータ P が $p_1 = p_2$ を満たすときであれ，$p_1 < p_2$ を満たすときであれ，$x_A(t_c(P,q),P,q)$ は，技術Aが使われる農地での水需要の最大値を与える．また，$x_B(t_m(P,q),P,q)$ は，技術Bが使われる農地での水需要の最大値を与える．質指数が $t_c(P,q)$ に等しい農地において灌漑技術をAからBへ切り替えることによって水需要が減少するとき，$x_B(t_c(P,q),P,q) < x_A(t_c(P,q),P,q)$ が成り立つ．このとき，$x_B(t_c(P,q),P,q)$ と $x_B(t_m(P,q),P,q)$ の差が比較的小さければ，$x_B(t_m(P,q),P,q) < x_A(t_c(P,q),P,q)$ が成立しやすい．後者の不等式が成り立つとき，$x_A(t_c(P,q),P,q)$ は全農地での水需要の最大値を与えることになる．以下では，x_0 が，この最大値よりも小さくて，$x_B(t_m(P,q),P,q)$ 以上の大きさに設定される場合，つまり，

$$x_B(t_m(P,q),P,q) \leq x_0 < x_A(t_c(P,q),P,q) \quad (8)$$

が満たされる状況を仮定する．そして，仮定 (7)，(8) のもとで p_2 の変動が関数 t_m，t_c，V の値に及ぼす影響について分析する．

$x_B(t_m(P,q),P,q) \leq x_0$ ならば，(4) より，$\partial_{p_2} Y_B(t_m(P,q),P,q) = 0$ が得られる．よって，$Y_B(t_m(P,q),P,q) = 0$ を p_2 について全微分して，$\partial_{p_2} t_m(P,q) = \partial_{p_2} t_m(p_1,p_2,x_0,q) = 0$ を導出できる．この場合，p_2 が限界的に変化しても，限界地の準地代には影響が及ばないため，限界地の質指数 t_m が一定にとどまる．

区間 T_B 上で x_B は t について非増加なので，(8) より，$x_B(t_c(P,q),P,q) \leq x_0$ が得られる．そして，(4) から，$\partial_{p_2} Y_B(t_c(P,q),P,q) = 0$ を導ける．(4) と (8) からは，$\partial_{p_2} Y_A(t_c(P,q),P,q) = x_0 - z_A(t_c(P,q),p_2,q) < 0$ も導ける．前節で説明した Y_A と Y_B の大小関係の下では，$\partial_t Y_A(t_c(P,q),P,q) > \partial_t Y_B(t_c(P,q),P,q)$ が成立する．よって，$Y_A(t_c(P,q),P,q) = Y_B(t_c(P,q),P,q)$ を p_2 について全微分することにより，偏導関数 $\partial_{p_2} t_c(P,q) = \partial_{p_2} t_c(p_1,p_2,x_0,q)$ が，次のように評価できる．

$$\begin{aligned}\partial_{p_2} t_c(P,q) &= \frac{\partial_{p_2} Y_B(t_c,P,q) - \partial_{p_2} Y_A(t_c,P,q)}{\partial_t Y_A(t_c,P,q) - \partial_t Y_B(t_c,P,q)} \\ &= \frac{z_A(t_c,p_2,q) - x_0}{\partial_t Y_A(t_c,P,q) - \partial_t Y_B(t_c,P,q)} > 0\end{aligned} \quad (9)$$

料金制 (1) が敷かれるとき，質指数が $t_c(P,q)$ に等しい農地では，灌漑技術の種類に依らず同じ高さの準地代が実現する．また，そこでの水需要は，技術B使用時には x_0 以下であるが，技術A使用時には x_0 を超える．p_2 が限界的に上昇するとき，そこでは，技術B使用時の準地代が一定にとどまるのに対して，技術A使用時の準地代は低下をみせる（式 (4) を参照）．この結果，そこでは準地代の均衡が破れ，技術Bが選択されるようになる．こうして，技術Aが使われる農地の質指数の下限，つまり，$t_c(P,q)$ が，p_2 の限界的な上昇とともに高くなる．

条件 (7)，(8) が仮定されるとき，偏導関数 $\partial_{p_2} V(P,q) = \partial_{p_2} V(p_1,p_2,x_0,q)$ は，上の考察結果を用いることにより，以下の (10)〜(12) のように表せる（この導出過程の説明は付録を参照）．

$$\partial_{p_2} V(P,q) = \Omega_I(P,q) + \Omega_S(P,q) \quad (10)$$

ただし，

$$\begin{aligned}\Omega_I(P,q) = \int_{\{t\in[t_c,1]:z_A(t,p_2,q)\geq x_0\}} &\{p_2 - c_w \\ &-D'(W)\xi_A(t)\}\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t)dt, \quad (11)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Omega_S(P,q) = [&qf(\eta_B(t_c)x_B(t_c,P,q)) - h_B \\ &-\{v_B + c_w + D'(W)\xi_B(t_c)\}x_B(t_c,P,q) \\ &-qf(\eta_A(t_c)x_A(t_c,P,q)) + h_A + \{c_w \\ &+D'(W)\xi_A(t_c)\}x_A(t_c,P,q)]g(t_c)\partial_{p_2}t_c \end{aligned} \tag{12}$$

式（11），（12）では，縮約のため，$D'(W(P,q))$ と $t_c(P,q)$ が，それぞれ，$D'(W)$ と t_c で表されている．

p_2 の限界的な増加によって生産活動に影響が生じるのは，水需要が x_0 を超える農地に限られる．（7），（8）が満たされるとき，水需要が x_0 を超える農地では技術 A が使用される．p_2 が限界的に増加するとき，（9）より，技術 A，B の採用が無差別になる農地の質指数が上昇するが，その上昇量は限られた大きさにとどまる．このため，水需要が x_0 を超える農地のうち，$t_c(P,q)$ に十分近い質指数を持つ農地では，p_2 の限界的増加とともに技術が A から B へ切り替わり（スイッチング効果），残りの農地では，p_2 の限界的増加とともに技術 A が使われたままで水投入が削減される（内包的マージン効果）．（11）における Ω_I は，p_2 の限界的増加が後者の内包的マージン効果を介して社会的厚生に及ぼす影響を測り，（12）における Ω_S は，p_2 の限界的増加が前者のスイッチング効果を介して社会的厚生に及ぼす影響を測る．（11）の右辺の積分範囲 $\{t \in [t_c,1] : z_A(t,p_2,q) \geq x_0\}$ は，$x_A(t,P,q) = z_A(t,p_2,q) \geq x_0$ を満たす t を区間 $[t_c,1]$ から集めた集合であり，（11）の右辺の被積分関数には，p_2 の限界的変化が引き起こす内包的マージン効果を捉えた偏導関数 $\partial_p z_A(t,p_2,q)$ が含まれる．他方で，（12）の右辺には，p_2 の限界的変化が引き起こすスイッチング効果を捉えた偏導関数 $\partial_{p_2}t_c$ が含まれる．

式（11），（12）に現れる $c_w + D'(W)\xi_i(t)$（$i = A, B$）は次のように解釈できる．技術 i が使われ質指数が t に等しい農地において，生産者の水投入が追加的に 1 単位増えるとき，水利組織の水供給費と排水の社会的費用の和，つまり，生産者以外の主体が負う費用が，$c_w + D'(W)\xi_i(t)$ だけ増える．このことより，$c_w + D'(W)\xi_i(t)$ は，その農地における水投入の社会的限界費用としてみなすことができる．

式（12）の右辺は多くの項を含み，Ω_S の値は多くの要素に基づいて決まるため，その符号は容易には判断しにくいようにみえる．下の命題では，Ω_S が非負になるための十分条件を提示し，さらに，p_2 の限界的増加とともに V が上昇するための十分条件を提示する．

命題 1　$P = (p_1, p_2, x_0)$ と q が条件（7），（8）を満たすと仮定する．このとき，次の 2 つを結論できる．

（i）$c_w + D'(W(P,q))\xi_A(t_c(P,q)) \geq p_2$ ならば，$\Omega_S(P,q)$ は非負で，$g(t_c(P,q))$ と同じ符号を持つ．

（ii）$\Omega_I(P,q) > 0$ ならば，$c_w + D'(W(P,q))\xi_A(t_c(P,q)) > p_2$ と，$\partial_{p_2}V(P,q) > 0$ が成り立つ．

（証明）表記の縮約のため，$D'(W(P,q))$ と $t_c(P,q)$ を，それぞれ，$D'(W)$ と t_c によって表す．

（i）条件（7）が仮定されると，区間 T_B 上で $x_B(t,P,q)$ は t について非増加になるため，条件（8）より，$x_B(t_c,P,q) \leq x_0$ が得られる．これと $x_0 < x_A(t_c,P,q)$ と（1）より，条件 $Y_A(t_c,P,q) = Y_B(t_c,P,q)$ は，

$$\begin{aligned}&qf(\eta_A(t_c)x_A(t_c,P,q)) - h_A \\ &- p_2x_A(t_c,P,q) + (p_2 - p_1)x_0 \\ &= qf(\eta_B(t_c)x_B(t_c,P,q)) - h_B \\ &\quad -(v_B + p_1)x_B(t_c,P,q) \end{aligned} \tag{13}$$

と書き直せる．上の式を（12）に代入すれば，次を導出できる．

$$\begin{aligned}\Omega_S(P,q) = [&\{p_1 - c_w - D'(W)\xi_B(t_c)\}x_B(t_c,P,q) \\ &+\{c_w + D'(W)\xi_A(t_c) - p_2\}x_A(t_c,P,q) \\ &+(p_2 - p_1)x_0]g(t_c)\partial_{p_2}t_c \end{aligned}$$

$g(t_c) = 0$ のとき $\Omega_S(P,q) = 0$ である．一方，$g(t_c) > 0$ の場合，仮定より $c_w + D'(W)\xi_A(t_c) - p_2$ と $p_2 - p_1$ が非負であることと，$x_B(t_c,P,q) \leq x_0 < x_A(t_c,P,q)$ と，式（9）が成り立つことを併せて用いると，

$$\begin{aligned}\Omega_S(P,q) \geq [&\{p_1 - c_w - D'(W)\xi_B(t_c)\}x_B(t_c,P,q) \\ &+\{c_w + D'(W)\xi_A(t_c) - p_2\}x_B(t_c,P,q) \\ &+(p_2 - p_1)x_B(t_c,P,q)]g(t_c)\partial_{p_2}t_c \\ = &D'(W)\{\xi_A(t_c) - \xi_B(t_c)\} \\ &\times x_B(t_c,P,q)g(t_c)\partial_{p_2}t_c > 0 \end{aligned} \tag{14}$$

を示せる．以上の考察より，$\Omega_S(P,q)$ は非負で，$g(t_c(P,q))$ と同じ符号を持つことを結論できる．

（ii）$\Omega_I(P,q) > 0$ を仮定する．このとき，$c_w + D'(W)\xi_A(t_c) \leq p_2$ が成り立つものとすると，$\xi'_A(t) < 0$ より，$c_w + D'(W)\xi_A(t) < p_2$ が区間 $t_c < t \leq 1$ 上で成り立つ．すると，$\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t) \leq 0$ と（11）より，$\Omega_I(P,q) \leq 0$ が成り立つことになって，矛盾が生じる．ゆえに，$c_w + D'(W)\xi_A(t_c) > p_2$ が成り立つ．このとき，（i）より $\Omega_S(P,q)$ が非負になるので，（10）より $\partial_{p_2}V(P,q) > 0$ が得られる（証明終）．

命題 1（i）で仮定された不等式条件は，質指数が $t_c(P,q)$ に等しい農地で，技術 A 使用時の水投入の社会的限界費用が p_2 以上になることを意味する．この仮定と $g(t_c(P,q)) > 0$ が満たされるとき，灌漑技術に応じた水需要と排水係数の違いによって $\Omega_S(P,q) > 0$ が

成り立つことが，上で示されている．

命題1（ii）で仮定された$\Omega_I(P,q)>0$は，$qf'(\eta_A(t)z_A(t,p_2,q))\eta_A(t)=p_2$より，

$$-\int_{I_A} qf'(\eta_A(t)z_A(t,p_2,q))\eta_A(t)\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t)dt < -\int_{I_A}\{c_w+D'(W)\xi_A(t)\}\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t)dt \tag{15}$$

と書き直せる．ただし，$I_A=\{t\in[t_c(P,q),1]: z_A(t,p_2,q)\geq x_0\}$と置かれている．(15)の左辺は，$p_2$が限界的に増加するとき，内包的マージン効果が生じる農地で作物生産物の価値がどれだけ減少するかを表し，右辺は，その内包的マージン効果の発生に伴って水利組織の水供給費と排水の社会的費用の和がどれだけ減少するかを表す．(15)は，前者の減少量よりも後者の減少量の方が大きいことを意味する．前者のような作物生産物の価値の減少は社会的厚生の減少に結びつくのに対し，後者のような水供給費と排水の社会的費用の減少は社会的厚生の増加に結びつく．このため，$\Omega_I(P,q)>0$であれば，p_2の限界的増加が引き起こす内包的マージン効果はネットで社会的厚生の増加に寄与できる．この場合，$g(t_c(P,q))>0$であれば，命題1（i）の適用により，$\Omega_S(P,q)>0$が言える．つまり，p_2の限界的増加がスイッチング効果を介して社会的厚生の増大に寄与できることを予測できる．$\Omega_I(P,q)>0$であれば，p_2の限界的増加が以上の二効果を介して社会的厚生の改善に寄与できる．

ここで，命題1（ii）で扱われていない，$\Omega_I(P,q)\leq 0$が成り立つときの$\partial_{p_2}V(P,q)$の符号について述べよう．$\Omega_I(P,q)\leq 0$であるとき，命題1（ii）のように$c_w+D'(W(P,q))\xi_A(t_c(P,q))$と$p_2$の大小関係を一意に予測することはできない．このとき，$c_w+D'(W(P,q))\xi_A(t_c(P,q))\geq p_2$が成立し，命題1（i）の適用により$\Omega_S(P,q)$が非負になることを予測できる場合と，$c_w+D'(W(P,q))\xi_A(t_c(P,q))<p_2$が成立し，そのような予測ができなくなる場合とが，どちらも起こり得る．このため，$\Omega_S(P,q)$の符号はケースバイケースで判断しなければならなくなる．このとき，$\Omega_I(P,q)$が負で$\Omega_S(P,q)$が正になる場合も起こり得る．その場合の$\partial_{p_2}V(p_1,p_2,x_0,q)$の符号は，$\Omega_S(P,q)$と$\Omega_I(P,q)$の絶対値の大小関係に依存して決まるので，予測が難しくなる．第5節では，$\Omega_I(P,q)<0$と$\Omega_S(P,q)>0$が成り立ち，p_2の高さに応じて$\partial_{p_2}V(P,q)$の符号が正と負の間で切り替わる状況の例が示されている．$\Omega_I(P,q)\leq 0$が成り立つときの$\partial_{p_2}V(P,q)$の符号は，一般に，$\Omega_I(P,q)$と$\Omega_S(P,q)$の組み合わせに依存しながら，ケースバイケースで決まる特徴を持つ．

4. 線形料金制から逓増型ブロック料金制へ移行しながら社会的厚生を改善できるケース

本節では，線形料金制に代わり逓増型ブロック料金制を灌漑料金として採用することによって社会的厚生を改善できるための条件を，前節の結果に依拠しながら分析する．

p_1とp_2がともにある正の数pに等しい場合，料金制（1）は，価格がpに等しい線形水料金制に対応する．この場合，$x_i(t,P,q)$は$z_i(t,p,q)$に等しくなり（第2節参照），x_0とは独立になる．そして，$Y_i(t,P,q)$もx_0から独立になる．関数Y_A，Y_Bに関する条件から定義される$t_c(P,q)$と$t_m(P,q)$の値は，このときx_0に依存しなくなり，pとqの組み合わせで決まるようになる．さらに，(5)と(6)よりそれぞれ定義される$W(P,q)$と$V(P,q)$の値も，このときx_0に依存しなくなり，pとqの組み合わせで決まるようになる．これらに着目し，以下では，p_1とp_2がともにある正の数pに等しい場合の$t_c(P,q)$，$t_m(P,q)$，$W(P,q)$，$V(P,q)$の値を，それぞれ，$\hat{t}_c(p,q)$，$\hat{t}_m(p,q)$，$\hat{W}(p,q)$，$\hat{V}(p,q)$によって表すことにする．

p_1とp_2がともにある正の数pに等しい場合の条件(7)，(8)，$\Omega_I(P,q)>0$は，それぞれ，上の表記を用いて次のように書き表すことができる．

$$t\in[\hat{t}_c(p,q),1]\text{ のとき }\epsilon_f(\eta_A(t)z_A(t,p,q))>1,$$
$$t\in[\hat{t}_m(p,q),\hat{t}_c(p,q)]\text{ のとき }\epsilon_f(\eta_B(t)z_B(t,p,q))>1, \tag{7'}$$

$$z_B(\hat{t}_m(p,q),p,q)\leq x_0<z_A(\hat{t}_c(p,q),p,q), \tag{8'}$$

$$\int_{\{t\in[\hat{t}_c(p,q),1]:z_A(t,p,q)\geq x_0\}}\{p-c_w - D'(\hat{W}(p,q))\xi_A(t)\}\partial_p z_A(t,p,q)g(t)dt>0 \tag{16}$$

次の命題では，所与の線形水料金制よりも高い社会的厚生をもたらす逓増型ブロック料金制が存在するための十分条件を，上の3条件と命題1によって示す．

命題2 ある正の数p'，q'が存在して，$p=p'$，$q=q'$に対して（7′）が成り立つと仮定する．また，p'，q'に依存した集合$K_A(p',q')$を，

$$\begin{aligned}K_A(p',q') &\equiv\{t\in[\hat{t}_c(p',q'),1]: z_A(t,p',q')\\ &\quad\geq z_B(\hat{t}_m(p',q'),p',q'),\\ &\quad c_w+D'(\hat{W}(p',q'))\xi_A(t)\geq p'\}\end{aligned} \tag{17}$$

によって定義するとき，

$$\int_{K_A(p',q')} g(t)dt > 0 \tag{18}$$

が成り立ち，$K_A(p',q')$ に含まれる t が正の割合で存在すると仮定する．このとき，ある数 x_0' が存在して，$p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（8′）と（16）がともに成り立ち，$\partial_{p_2}V(p',p',x_0',q') > 0$ が満たされる．よって，p' よりも限界的に大きい p_2 に対して $V(p',p_2,x_0',q') > V(p',p',x_0',q') = \hat{V}(p',q')$ が成り立つ．この場合，作物価格が q' に等しいならば，$p_1 = p_2 = p'$ を満たす線形料金制から $p_1 = p' < p_2$ を満たす逓増型ブロック料金制へ灌漑料金を切り替えながら，社会的厚生を高めることができる．

（証明）縮約のため，$D'(\hat{W}(p',q'))$ を $D'(\hat{W})$ によって表す．（18）が成り立つとき，$K_A(p',q') \neq \emptyset$ である．$K_A(p',q')$ に含まれる要素の最大値を $\bar{t}$ で表す．つまり，$\bar{t} = \max\{t \mid t \in K_A(p',q')\}$ と置く．定義より，$z_A(\bar{t},p',q') \geq z_B(\hat{t}_m(p',q'),p',q')$ と，$c_w + D'(\hat{W})\xi_A(\bar{t}) \geq p'$ が成り立つ．$\bar{t} = \hat{t}_c(p',q')$ を仮定すると，$K_A(p',q')$ が 1 点から成る集合になり，（18）の左辺が 0 になるので，矛盾が生じる．よって，$\hat{t}_c(p',q') < \bar{t}$ である．$p = p'$，$q = q'$ に対して（7′）が成り立つとき，区間 $\hat{t}_c(p',q') \leq t \leq 1$ において $z_A(t,p',q')$ と $D'(\hat{W})\xi_A(t)$ は t について単調減少である．よって，$\hat{t}_c(p',q') \leq t < \bar{t}$ のとき，$z_A(t,p',q') > z_B(\hat{t}_m(p',q'),p',q')$ と $c_w + D'(\hat{W})\xi_A(t) > p'$ が成立し，$t \in K_A(p',q')$ が得られる．これより，集合 $K_A(p',q')$ は，区間 $\hat{t}_c(p',q') \leq t \leq \bar{t}$ に一致する．そして，（18）から，$G(\bar{t}) - G(\hat{t}_c(p',q')) > 0$ が得られる．ここで，$x_0' = z_A(\bar{t},p',q')$ と置けば，$\hat{t}_c(p',q') < \bar{t}$ より，$z_A(\hat{t}_c(p',q'),p',q') > z_A(\bar{t},p',q') = x_0' \geq z_B(\hat{t}_m(p',q'),p',q')$ を導けるので，$p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（8′）が満たされる．また，集合 $\{t \in [\hat{t}_c(p',q'),1] : z_A(t,p',q') \geq x_0'\}$ は，区間 $\hat{t}_c(p',q') \leq t \leq \bar{t}$ と一致するので，

$$\begin{aligned}
&\int_{\{t\in[\hat{t}_c(p',q'),1]:z_A(t,p',q')\geq x_0'\}} \{p' - c_w \\
&\quad -D'(\hat{W})\xi_A(t)\}\partial_p z_A(t,p',q')g(t)dt \\
&= \int_{\hat{t}_c(p',\ q')}^{\bar{t}} \{p' - c_w - D'(\hat{W})\xi_A(t)\} \\
&\quad \times\partial_p z_A(t,p',q')g(t)dt
\end{aligned}$$

が得られる．$g(t) \geq 0$ と積分法の第一平均値定理より，$\hat{t}_c(p',q') < t^* < \bar{t}$ を満たす t^* が存在して，

$$\begin{aligned}
&\int_{\hat{t}_c(p',q')}^{\bar{t}} \{p' - c_w - D'(\hat{W})\xi_A(t)\}\partial_p z_A(t,p',q')g(t)dt \\
&= \{p' - c_w - D'(\hat{W})\xi_A(t^*)\}\partial_p z_A(t^*,p',q') \\
&\quad \times\int_{\hat{t}_c(p',\ q')}^{\bar{t}} g(t)dt
\end{aligned} \tag{19}$$

が成り立つ．このとき，$\xi_A'(t) < 0$ より，$p' - c_w - D'(\hat{W})\xi_A(t^*) < p' - c_w - D'(\hat{W})\xi_A(\bar{t}) \leq 0$ も成り立つ．そして，$\partial_p z_A(t^*,p',q') < 0$ と $G(\bar{t}) - G(\hat{t}_c(p',q')) > 0$ より（19）の右辺が正になるから，$p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（16）が成り立つ．以上より，命題の仮定の下では $p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（7′），（8′），（16）が全て満たされる．このとき，$P = (p_1,p_2,x_0) = (p',p',x_0')$ と $q = q'$ に対して（7），（8），$\Omega_I(P,q) > 0$ が全て満たされていることになるから，命題 1（ii）より $\partial_{p_2}V(p',p',x_0',q') > 0$ が得られる（証明終）．

$\partial_{p_2}V(p',p',x_0',q')$ は，偏導関数 $\partial_{p_2}V(p_1,p_2,x_0,q)$ が $(p_1,p_2,x_0,q) = (p',p',x_0',q')$ において取る値を表す．命題 2 の主張の前半では，p' と q' がどのような条件を満たすとき，$\partial_{p_2}V(p',p',x_0',q')$ が正の値を取るような x_0' が存在し得るか，が示されている．そのような x_0' が存在するとき，命題 2 の主張の最後に述べるように灌漑料金形態を切り替えながら社会的厚生を高めることができる．

（17）で定義した $K_A(p',q')$ は，$p_1 = p_2 = p'$ を満たす線形水料金制が敷かれ作物価格が q' に等しい場合に，技術 A を用いて $z_B(\hat{t}_m(p',q'),p',q')$ 単位以上の水が投入され，かつ，水投入の社会的限界費用が p' 以上になるような農地の質指数を集めた集合である．条件（18）を仮定するならば，$K_A(p',q')$ に含まれる農地の質指数が正の割合で存在する．これより，$K_A(p',q')$ に含まれる質指数の最大値を $\bar{t}$ と置くと，$\hat{t}_c(p',q') < \bar{t}$ が得られる．

$p_1 = p_2 = p'$ を満たす線形水料金制が敷かれ作物価格が q' に等しい場合，区間 $\hat{t}_c(p',q') < t < \bar{t}$ に含まれる質指数を持つ農地では，技術 A が使用され，水需要が $z_A(\bar{t},p',q')$ 単位を超える．$x_0' = z_A(\bar{t},p',q')$ と置くとき，上で証明されるように，$p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（8′）が満たされる．これより，$P = (p_1,p_2,x_0) = (p',p',x_0')$ と $q = q'$ が成り立つ状態で，不等式（9）が満たされる．その状態から p_2 を限界的に引き上げることにすれば，両技術の採用が無差別になる農地の質指数が $\hat{t}_c(p',q')$ より上昇する．そして，区間 $\hat{t}_c(p',q') < t < \bar{t}$ に含まれる質指数を持つ農地のうち，$\hat{t}_c(p',q')$ に十分近い質指数を持つ農地では使用技術が A から B へ切り替わり（スイッチング効果），残りの農地では技術 A が使われたままで水投入が削減される（内包的マージン効果）．上のように x_0' を定め

第1表　数値シミュレーションの結果

ケース	p^* (\$/AF)	$\hat{V}(p^*,q)$ (\$)	$\hat{t}_m(p^*,q)$	$\hat{t}_c(p^*,q)$	$K_A(p^*,q)$	x_0 (AF)	p_1 (\$/AF)	$p_2^{\max}$ (\$/AF)	$\max_{p_2} V$ (\$)
$D'(W) \equiv 25$	29.7	18.2	0.37	0.51	$0.51 \le t \le 0.59$	4.08	29.7	55.0	19.0
$D'(W) \equiv 50$	31.6	8.3	0.45	0.52	$0.52 \le t \le 0.66$	3.65	31.6	69.6	11.6
$D'(W) \equiv 75$	32.9	0.8	0.52	0.54	$0.54 \le t \le 0.69$	3.46	32.9	82.5	6.9

註：$D'(W)$ の数値単位は，ドル/AF である．

るとき，$p = p'$，$q = q'$，$x_0 = x_0'$ に対して（16）が満たされるので，後者の内包的マージン効果は，命題1（ii）のケースと同じように社会的厚生の増大に寄与できる．また，$g(\hat{t}_c(p',q')) > 0$ が満たされていれば，$P = (p_1, p_2, x_0) = (p', p', x_0')$ と $q = q'$ に対して $\Omega_S(P,q) > 0$ が成り立つため，前者のスイッチング効果も社会的厚生の増大に寄与することができる．上のように p_2 を引き上げると，これらの効果を介して社会的厚生を増やすことができる．このことより，作物価格が q' であるとき，$p_1 = p_2 = p'$ を満たす線形料金制から $p_1 = p' < p_2$ を満たす逓増型ブロック料金制へ灌漑料金を切り替えながら，社会的厚生を改善することができる．

5. 数　値　例

本節は，数値シミュレーションによって，第3節と第4節の考察内容に関する例示を行う．

Khanna，Isik，and Zilberman〔6，Section 4〕は，排水課徴金等の排水規制の効果をシミュレーション分析する際，規制対象地域で綿花生産が行われることを仮定した．そして，San Joaquin Valley での綿花の収量実験の結果（Hanemann et al.〔5〕）に基づき，綿花の生産関数の関数形を特定化した．彼らと同様に，本例では地域内の栽培作物として綿花を想定し，その生産関数が，$f(e) = \max[0, -1589 + 2311e - 462e^2]$（pound/acre）と表せると仮定する．ただし，有効水量 e の単位は，acre feet（AF）である．また，質指数 t の確率密度関数に関して，彼らと同様の次の関数形を仮定する．

$$g(t) = \begin{cases} 0 \\ (0 \le t \le 0.2,\ \text{または},\ 0.8 \le t \le 1\ \text{のとき}), \\ (0.8-t)^2(t-0.2)^2/(0.6)^5 B(3,3) \\ \qquad\qquad (0.2 \le t \le 0.8\ \text{のとき}) \end{cases} \tag{20}$$

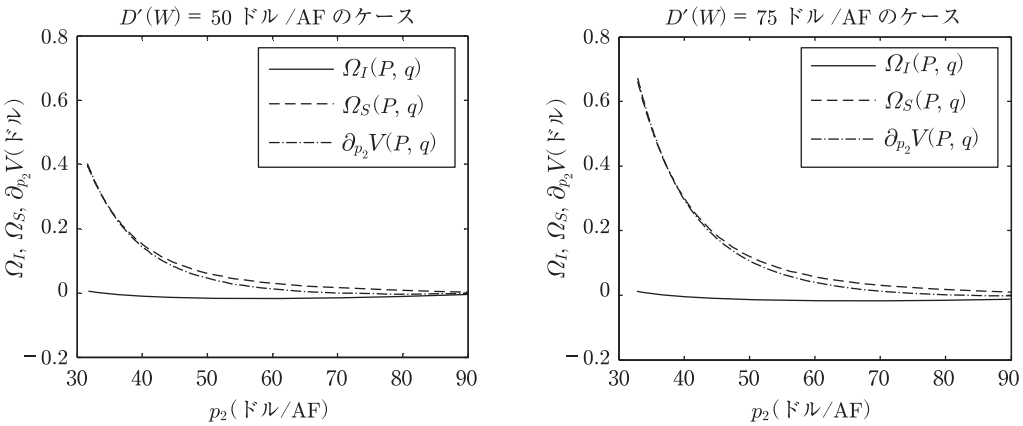
ただし，$B(3,3)$ はパラメータ $(3,3)$ の Beta 関数を表す．この仮定の下では，t を一次変換した変数 $s = (t - 0.2)/0.6$ が，区間 $0 \le s \le 1$ 上でパラメータ $(3,3)$ の Beta 分布に従って分布する．また，t の平均と分散はそれぞれ，0.5 と 0.013 に等しくなり，$g(t)$ のグラフは左右対称な単峰型形状を示す．

スプリンクラー灌漑が使用される農地では，灌漑効率性が 0.8 付近の値を取る傾向がある（Hanemann et al.〔5〕）．本例では，η_B の関数形として，$\eta_B(t) = t^{0.3}$ を仮定する．この場合，t が平均値 0.5 を横切りながら上昇するとき，$\eta_B(t)$ が 0.8 前後の値を取りながら緩やかに増大する（註8）．

Khanna，Isik，and Zilberman〔6，Section 4〕と同様に，排水係数 ξ_i と灌漑効率性 η_i の間に，$\xi_i(t) = \{1 - \eta_i(t)\}^{k_i}$（ただし，$k_i$ は正の定数）という関係があると仮定する．Hanemann et al.〔5〕では，畝間灌漑が行われ灌漑効率性が 0.6 に等しい農地で排水係数が 0.175 になることと，スプリンクラー灌漑が行われ灌漑効率性が 0.8 に等しい農地で排水係数が 0.0875 になることが推計されている．本例では，$\eta_A(t) = 0.6$ を満たす t に対して $\xi_A(t) = 0.175$ が成り立つように，$k_A = 1.902$ と設定し，さらに，$\eta_B(t) = 0.8$ を満たす t に対して $\xi_B(t) = 0.0875$ が成り立つように，$k_B = 1.514$ と設定する．

Hanemann et al.〔5〕は，スプリンクラー灌漑の使用に伴って水散布量 1AF につき 1.3 ドルの動力費がかかることや，綿花生産での1エーカーあたり固定費が，畝間灌漑とスプリンクラー灌漑を使用する農地でそれぞれ，500 ドル，548 ドルになることを見積もっている．これらに対応し，$v_B = 1.3$ ドル/AF，$h_A = 500$ ドル/acre，$h_B = 548$ ドル/acre を仮定する．一方，水供給の限界費用と作物価格はそれぞれ，$c_w = 25$ ドル/AF，$q = 0.5$ ドル/pound であるものとする．このほか，排水の社会的費用が総排水排出量に比例し，$D'(W) = D(W)/W$ が，25，50，75（ドル/AF）の三通りの値を取ると仮定する．

以上の仮定を設け，逓増型ブロック料金制の利用効果に関する分析を行う．$p_1 = p_2 = p$ を満たす線形料金制が敷かれるときの社会的厚生は，前節で導入した関数 $\hat{V}(p,q)$ によって測れる．この関数を最大化する p の値を p^* によって表す．$\hat{V}(p^*,q)$ は，線形料金制の採用時に実現できる社会的厚生の最大値である．第1表には，$D'(W) \equiv 25$，50，75（ドル/AF）の各ケースにおいて p^* と $\hat{V}(p^*,q)$ が取る値のほか，$\hat{t}_m(p^*,q)$ と $\hat{t}_c(p^*,q)$ の計算値や，集合 $K_A(p^*,q)$ に含まれる t の



第 4 図　数値例において p_2 の変動が社会的厚生に及ぼす影響の内訳

領域を掲げた．

各ケースで，条件（7′）が $p = p^*$ と $q = 0.5$ ドル/pound に対して成立することが計算で確かめられた．また，第 1 表が示すように，各ケースで，$K_A(p^*, q)$ に含まれる t の領域が，区間 $0.2 < t < 0.8$ に含まれ存在している．このため，(20) より，各ケースで，条件 (18) が $p' = p^*$ と $q' = 0.5$ ドル/pound に対して成立している．これらの結果と命題 2 より，各ケースで，$\hat{V}(p^*, q)$ よりも高い社会的厚生をもたらす逓増型ブロック料金制が存在する．

次に，$\hat{V}(p^*, q)$ より高い社会的厚生をもたらす逓増型ブロック料金制について調べる．各ケースで，p_1 を p^* に等しく定める．また，前節での x_0' の設定と同じように，$K_A(p^*, q)$ に含まれる要素の最大値を $\bar{t}$ と置き，$x_0 = z_A(\bar{t}, p^*, q)$ によって x_0 を定める（第 1 表にはこうして定めた x_0 の具体的大きさを掲げた）．本研究は，p_1 と x_0 をこのように定めるとき，p_2 が p^* から上昇するにつれて $V(P, q)$ がどのように変化するかを計算で求めた．その結果，各ケースで，p_2 が p^* から上昇するにつれて $V(P, q)$ は単調に増大し，やがて最大に達し，緩やかな減少に向かうことが確かめられた．第 1 表では，このとき $V(P, q)$ が到達する最大値を「$\max_{p_2} V$」の項に掲げ，$V(P, q)$ が最大値を取るときの p_2 の値を「$p_2^{\max}$」の項に掲げた．$D'(W) \equiv 25$ ドル/AF のケースでは，$V(P, q)$ が $p_2 = 55.0$ ドル/AF のとき最大値 19.0 ドルを取るので，$\hat{V}(p^*, q)$（= 18.2 ドル）に比べて 0.8 ドル高い社会的厚生を実現できる．同様に，$D'(W) \equiv 50$，75（ドル/AF）のケースではそれぞれ，$\hat{V}(p^*, q)$ に比べて 3.3 ドル，6.1 ドル高い社会的厚生を実現できる．線形料金制の採用時に実現できる社会的厚生の最大値と比べた社会的厚生の改善幅は，3 ケースのうち $D'(W)$ が高いケースほど大きくなる傾向が観察できる（註 9）．

次に，社会的厚生の改善幅が相対的に大きい $D'(W) \equiv 50$，75（ドル/AF）のケースを選んで，p_2 の上昇が社会的厚生に与える影響の内訳を検討する．これらのケースでは，上のように q，p_1，x_0 を定めると，p_2 が p^* から 90 ドル/AF まで上昇する間，(7) と (8) が常に満たされることが計算で確かめられる．(7) と (8) が満たされると (9)〜(12) が成り立つから，p_2 がそのように変化するときの $\partial_{p_2}V(P, q)$ の値は，$\Omega_I(P, q)$ と $\Omega_S(P, q)$ に分解して評価できる．これらのケースで p_2 が p^* から 90 ドル/AF まで動くときの $\partial_{p_2}V(P, q)$，$\Omega_I(P, q)$，$\Omega_S(P, q)$ の変化を，第 4 図に示した．両ケースで，$\partial_{p_2}V$ と Ω_S は p_2 の上昇とともに大きく低下する性質を持ち，Ω_I は p_2 に依らずゼロに近い値を取り続ける性質を持つ．このときの $\partial_{p_2}V$，Ω_I，Ω_S の符号の変化について詳しく述べる．$D'(W) \equiv 50$ ドル/AF（または，$D'(W) \equiv 75$ ドル/AF）のケースでは，p_2 が 34.4 ドル/AF（または，37.8 ドル/AF）よりも低いとき Ω_S と Ω_I がともに正になり，p_2 がそれを超えるとき Ω_S が正のままで Ω_I は負になることが，計算によって確かめられる．一方，$\partial_{p_2}V$ の符号は，p_2 が 69.6 ドル/AF（または，82.5 ドル/AF）を超えると，正から負に切り替わるようになる（第 1 表の「$p_2^{\max}$」の項を参照）．$D'(W) \equiv 50$ ドル/AF（または，$D'(W) \equiv 75$ ドル/AF）のケースでは，p_2 が 34.4 ドル/AF から 69.6 ドル/AF までの間（または，37.8 ドル/AF から 82.5 ドル/AF までの間）にあるとき，Ω_S が Ω_I の絶対値より大きい値を取ることから，$\partial_{p_2}V$ が正になる．また，p_2 が 69.6 ドル/AF（または，82.5 ドル/AF）を超えるとき，Ω_S が Ω_I の絶対値より小さい値を取ることから，$\partial_{p_2}V$ が負になる．このように，いずれのケースでも，p_2 が十分に高くなると，p_2 の上昇がスイッチング効果を介して社会的厚生に及ぼす影響が相対的に小さくなり，p_2 の上昇は社会的厚生の増加に結びつきにくくなる（第 3 節の最後の議論を参照）．

上の両ケースにおいて，$\partial_{p_2}V$ が正の値を取る間，$\partial_{p_2}V$ が Ω_S にかなり近い値を取る傾向があることが，第4図より観察できる．したがって，両ケースにおいて p_2 の引き上げによって社会的厚生を改善できるとき，p_2 の上昇が社会的厚生に及ぼす影響の内訳は，スイッチング効果を介した影響によって大きく占められる傾向がある．灌漑用水料金の調整によって排水排出量管理を行うときに，水投入が多いときの水の限界価格を引き上げることによって生じるスイッチング効果が，社会的厚生を改善する上で重要な役割を果たし得ることが，ここでの結果より示唆される．

6. 結　　語

本稿では，逓増型ブロック料金制が灌漑料金に使われる場合，用水多消費段階での水の限界価格引き上げが，農業生産者に対し，i）スプリンクラー灌漑等の近代的灌漑技術を新たに導入することや，ii）伝統的な畝間灌漑を採用し続けたままで水投入を節減すること，を促す効果を持つことが指摘された．本稿は，農業排水が環境への負荷などの社会的費用を伴う状況を想定し，これらの灌漑料金調整の効果が社会的厚生の改善に寄与できるための条件について分析した．また，灌漑料金を線形料金制から逓増型ブロック料金制へ切り替えながら社会的厚生を改善できるための条件を示した．上述の灌漑料金調整の効果が現れる農地での水投入の社会的限界費用の大きさや，灌漑技術に応じた水需要の大きさの分布の違いなどが，これらの条件にどのように関わるかを明らかにしたことは，本稿の主要な貢献である．

本稿の終わりに，残された研究課題について述べる．本稿では，分析の複雑化を抑えるためにモデル上で作物の種類が1つに限定されていた．複数種類の作物が作付け可能であれば，灌漑料金の調整が，生産者の作物選択への影響を介しながら社会的厚生の改善に寄与できるようになるかもしれない（Tsur and Dinar〔9〕を参照）．この可能性に関する分析は未解決の課題として残される．本稿では排水管理に向けられる政策手段として灌漑料金の調整のみを想定していたが，このほか，i）水投入削減を進めるための生産計画を生産者が作成するのに際して政府機関が積極的に助言を与えることや，ii）近代的灌漑技術を導入する生産者に政府が投資補助を供与することも，政策手段の候補に挙げられるだろう．これらの政策手段が灌漑料金制とともに排水管理にどのように貢献し得るかを検討することも，未解決の課題に挙げられる．乾燥地農業では，灌漑用水の多投入が地下水位の上昇につながって，農地の塩類集積を引き起こすケースが数多くみられる．逓増型ブロック料金制を灌漑料金に用いることが，灌漑用水投入の抑制を促して農地の塩類集積を避けるのに貢献し得るかどうかを検討することも意義があるように思われる（註10）．

付録：式（10）～（12）の導出過程のスケッチ

表記の縮約のためにいくつか関数を導入する．式（5）の第1項と第2項をそれぞれ，関数 $W_A(P,q)$，$W_B(P,q)$ で表し，式（6）の右辺第1項と第2項をそれぞれ，関数 $I_A(P,q)$，$I_B(P,q)$ によって表すことにする．さらに，関数 N_i を，$N_i(x,t,q) \equiv \{qf(\eta_i(t)x) - h_i - (v_i + c_w)x\}g(t)$ によって定義する（$i = A, B$）．

条件（7），（8）の下では，x_A が区間 T_A 上で t について非増加である．ゆえに，$x_A(1,P,q)$ と x_0 と $x_A(t_c(P,q),P,q)$ の大小関係としては，i）$x_A(1,P,q) < x_0 < x_A(t_c(P,q),P,q)$ のとき，ii）$x_A(1,P,q) = x_0 < x_A(t_c(P,q),P,q)$ のとき，iii）$x_0 < x_A(1,P,q) < x_A(t_c(P,q),P,q)$ のとき，の三通りが考えられる．

上のi）の場合，$z_A(t,p_1,q) = x_0$ を満たす t と，$z_A(t,p_2,q) = x_0$ を満たす t が，区間 $[t_c(P,q),1]$ の内部に存在する．前者と後者の t の値をそれぞれ，$\theta_A(p_1,x_0,q)$，$\theta_A(p_2,x_0,q)$ で表すと，$p_1 \leq p_2$ より，$\theta_A(p_2,x_0,q) \leq \theta_A(p_1,x_0,q)$ が得られる．この場合，$t_c(P,q) \leq t \leq \theta_A(p_2,x_0,q)$ のとき $x_A(t,P,q) = z_A(t,p_2,q)$ であり，$\theta_A(p_2,x_0,q) \leq t \leq \theta_A(p_1,x_0,q)$ のとき $x_A(t,P,q) = x_0$ であり，$\theta_A(p_1,x_0,q) \leq t \leq 1$ のとき $x_A(t,P,q) = z_A(t,p_1,q)$ である．よって，次が成り立つ．

$$
\begin{aligned}
I_A(P,q) = &\int_{\theta_A(p_1,x_0,q)}^{1} N_A(z_A(t,p_1,q),t,q)dt \\
&+ \int_{\theta_A(p_2,x_0,q)}^{\theta_A(p_1,x_0,q)} N_A(x_0,t,q)dt \\
&+ \int_{t_c(P,q)}^{\theta_A(p_2,x_0,q)} N_A(z_A(t,p_2,q),t,q)dt
\end{aligned}
$$

関係式 $\partial_x N_A(z_A(t,p_2,q),t,q) = (p_2 - c_w)g(t)$ に留意して上を p_2 について偏微分すれば，次を導ける．

$$
\begin{aligned}
&\partial_{p_2} I_A(P,q) \\
&= \int_{t_c(P,q)}^{\theta_A(p_2,x_0,q)} (p_2 - c_w)\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t)dt \\
&\quad - N_A(z_A(t_c,p_2,q),t_c,q)\partial_{p_2} t_c
\end{aligned} \tag{21}
$$

i）の場合，区間 $t_c(P,q) \leq t \leq \theta_A(p_2,x_0,q)$ は，集合 $\{t \in [t_c(P,q),1] : z_A(t,p_2,q) \geq x_0\}$ に一致する．条件（8）の下では $x_A(t_c(P,q),P,q) = z_A(t_c(P,q),p_2,q)$ なので，この場合の式（21）は次のように変形できる．

$$\partial_{p_2} I_A(P,q) = \int_{\{t\in[t_c(P,q),1]:z_A(t,p_2,q)\geq x_0\}} (p_2 - c_w) \times \partial_p z_A(t,p_2,q) g(t) dt - N_A(x_A(t_c,P,q),t_c,q)\partial_{p_2} t_c \quad (22)$$

また，上の $N_A(x,t,q)$ を $\xi_A(t)xg(t)$ に置き換えると，$\partial_{p_2} W_A$ が次のように表現可能なことが示せる．

$$\partial_{p_2} W_A(P,q) = \int_{\{t\in[t_c(P,q),1]:z_A(t,p_2,q)\geq x_0\}} \xi_A(t)\partial_p z_A(t,p_2,q) \times g(t)dt - \xi_A(t_c)x_A(t_c,P,q)g(t_c)\partial_{p_2} t_c \quad (23)$$

一方，上のii）の場合，$z_A(t,p_2,q)=x_0$ を満たす t が区間 $(t_c(P,q),1]$ に存在し，その t の値を $\theta_A(p_2,x_0,q)$ によって表すと，次が成り立つ．

$$I_A(P,q) = \int_{\theta_A(p_2,x_0,q)}^{1} N_A(x_0,t,q)dt + \int_{t_c(P,q)}^{\theta_A(p_2,x_0,q)} N_A(z_A(t,p_2,q),t,q)dt$$

上の式を p_2 について偏微分すると（21）と同じ式が得られ，さらに，$\partial_{p_2} I_A(P,q)$ は（22）の形に変形できる．同様に，ii）の場合の $\partial_{p_2} W_A(P,q)$ が（23）の形に表現可能なことが確かめられる．

他方で，上述のiii）の場合，$I_A(P,q)$ と $\partial_{p_2} I_A(P,q)$ をそれぞれ次の形に表すことができる．

$$I_A(P,q) = \int_{t_c(P,q)}^{1} N_A(z_A(t,p_2,q),t,q)dt,$$

$$\partial_{p_2} I_A(P,q) = \int_{t_c(P,q)}^{1} (p_2 - c_w)\partial_p z_A(t,p_2,q)g(t)dt - N_A(z_A(t_c,p_2,q),t_c,q)\partial_{p_2} t_c$$

この場合，区間 $t_c(P,q) \leq t \leq 1$ が集合 $\{t \in [t_c(P,q),1] : z_A(t,p_2,q) \geq x_0\}$ に一致するので，上に示す $\partial_{p_2} I_A$ は（22）の形に書き直せる．同様に，iii）の場合の $\partial_{p_2} W_A(P,q)$ が（23）の形に表現可能なことが確かめられる．このため，（22）と（23）は，i），ii），iii）のケース全てで成り立つ．

条件（8）の下では，区間 $t_m(P,q) < t < t_c(P,q)$ 上で $x_B(t,P,q)$ が $z_B(t,p_1,q)$ または x_0 に等しくなり，$\partial_{p_2} x_B(t,P,q)=0$ が成り立つ．これと本文中で示した $\partial_{p_2} t_m(P,q)=0$ を用いれば，$\partial_{p_2} I_B = N_B(x_B(t_c,P,q),t_c,q)\partial_{p_2} t_c$，および，$\partial_{p_2} W_B = \xi_B(t_c)x_B(t_c,P,q)g(t_c)\partial_{p_2} t_c$ を導ける．これらと（22）と（23）を，

$$\partial_{p_2} V(P,q) = \partial_{p_2} I_A(P,q) + \partial_{p_2} I_B(P,q) - D'(W(P,q))\{\partial_{p_2} W_A(P,q) + \partial_{p_2} W_B(P,q)\}$$

に代入すると，（10）〜（12）に示すような $\partial_{p_2} V(P,q)$ の表現が可能である．

（註1）購入量が追加的に1単位増えるときの料金の増額を限界価格と言う．本稿は，限界価格が購入量に依らず一定となる料金制を線形料金制と呼び，限界価格が購入量に応じて変わる料金制を非線形料金制と呼ぶ．OECD〔7〕と丹治〔8〕はそれぞれ，OECD加盟各国と日本における農業用灌漑料金形態を概観している．

（註2）Broadview用水区は，灌漑料金改革に着手した際，'88年以降も線形水料金制を採用し続ける場合には，水価格を従来より約2割引き上げることで排水処理費を回収できると予測していた．その一方で，線形水料金制を採用し続け水価格を約2割引き上げる場合には，生産者に水投入節減のインセンティブをあまり与えられないことも予測していた．同用水区は，排水処理費の回収だけでなく，区内の水投入を大きく削減することも料金改革の目標にしていた．そこで，これらの目標を同時に達成する手段として，線形料金制に代わって逓増型ブロック料金制を導入することに踏み切るようになった．同用水区は，限界価格の変化が3段階以上になる逓増型ブロック料金制は生産者の目にかなり複雑に映る，と判断したため，逓増型ブロック料金制における限界価格の変化を2段階に限定することを決めた（Wichelns〔10〕，〔11〕）．

同用水区は，逓増型ブロック料金制における水投入量の閾値を作物の種類に依らず均一に設定すれば，生育に必要な水量の少ない作物へ生産者の作目選択が大きく偏っていくと予想していた．料金改革の際，同用水区は，この閾値の大きさを作物別に過去の平均的水投入量に連動して調整することに決めたので，実際の作目選択は料金改革からあまり影響を受けなかった．Broadview用水区における灌漑料金改革の経緯と成果に関するより詳しい説明については，Wichelns〔10〕，〔11〕，Wichelns，Houston，and Cone〔12〕，〔13〕を参照．

（註3）Dinar，Knapp，and Letey〔4〕は，線形料金制または逓増型ブロック料金制を灌漑料金に用いて農業排水を管理するとき，それらの料金形態の違いから効率性の差がいかに生じるかを考察しているが，彼らの分析では，農地の質の差異の存在や，灌漑料金形態の変化からスイッチング効果と外延的マージン効果が生じる可能性が認められていない．これらの点で彼らの結果の現実への妥当性には大きな限界があると考えられる．

（註4）本稿のモデルでは，固定費 h_A，h_B の内訳には，作物生産における生産設備の資本費と，労働費と，水投入量と独立な他の投入財の費用が含まれる．単純化のため，固定費 h_A，h_B が農地の質指数と独立な値を取ることを仮定する．Wichelns，Houston，and Cone〔13〕は，Broadview用水区で綿花やトマトを生産するときの作付面積あたり資本費と労働費が，畝間灌漑の導入時よりもスプリンクラー灌漑の導入時の方が高くなることを見積もっている．彼らは，スプリンクラー灌漑の導入時に作付面積あたり労働費がより高くなる理由に，スプリンクラーとパイプなどを圃場に設置するのに大きな労働力が要ることを挙げている．

（註5）本稿は ∂ とその下付き添え字で偏微分を表す（例，$\partial_p z_i(t,p,q)$ は，$z_i(t,p,q)$ の p に関する偏導関数）．

（註6）$p_1 = p_2 = p$ が成り立つ場合，II）の条件 $p_1 \leq M_i(x_0,t,q) \leq p_2$ は，$M_i(x_0,t,q)=p$ を意味する．

（註7）Caswell and Zilberman〔1〕，Caswell，Lichten-

berg, and Zilberman〔2〕は，本稿のように非線形の灌漑料金制が採用される状況を想定していないが，排水課徴金が課されるときなどに農地の質に応じて近代的灌漑技術と伝統的灌漑技術（畝間灌漑）がいかに使い分けられるかを，数値例を交えながら詳しく説明している．農地の質に応じた技術A，Bの使い分けに関する本稿の説明は，彼らの説明に依拠するところが多い．

（註8）$\eta_B(t) = t^{0.3}$ を仮定するとき，$\eta_B(0.3) = 0.70$，$\eta_B(0.4) = 0.76$，$\eta_B(0.5) = 0.81$，$\eta_B(0.6) = 0.86$，$\eta_B(0.7) = 0.90$ が得られる．

（註9）各ケースで，p_2 だけでなく p_1 と x_0 の値についても適当な調整を行えば，第1表の「$\max_{p_2} V$」の項に示した値よりも高い水準へ社会的厚生を引き上げることができる．本稿では，誌面の制約のため，p_1 と x_0 の調整が社会的厚生に与える効果については十分に説明することができない．

（註10）日本では，Broadview 用水区と同様の農業排水問題を抱える地域，つまり，農地に有害物質が含まれるために農業排水が周辺環境に悪影響を及ぼす懸念が持たれる地域は殆ど見あたらない．このため，Broadview 用水区と同じように有害な農業排水の排出量抑制のために灌漑料金の調整が求められる地域は，日本に殆ど無いと思われる．土地改良区などの農業水利組織が番水制を使って農業生産者に水を配分するとき，水の配分時間の長さを選択する機会を各生産者に与え，選択された水配分時間の長さに応じて各生産者に賦課する水料金額を増減できるかもしれない（この例には，水の配分時間が1時間延長される毎に水料金額が一定額ずつ増えるような料金設定が挙げられる）．Wichelns〔11〕は，そのような料金設定が可能な場合，水の配分時間の延長とともに配分時間あたり水料金額が上昇するような価格逓増型の水料金制を用いることによって，水利組織が生産者に節水の誘因を付与し得ることを指摘している．日本の水田灌漑の場合，代掻き・田植え期と穂ばらみ期に水需要がピークを迎え，水の配分に番水制が使われやすい．日本では，これらの時期の水田灌漑用水の需要管理に，Wichelns〔11〕が指摘するような水配分時間に依存した非線形の水料金制がいかに役立てられるかについて検討する余地があるように思われる．

［付記］本稿の作成にあたり，本誌編集委員会，2人の匿名査読者，Dennis Wichelns 氏（Hanover 大学），京都大学大学院農学研究科生物資源経済学専攻国際農村発展論分野の皆さんから有益なコメントをいただいた．ここに謝意を表したい．

引 用 文 献

〔1〕Caswell, M., and D. Zilberman, “The Effects of Well Depth and Land Quality on the Choice of Irrigation Technology,” *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 68, 1986, pp. 798～811.

〔2〕Caswell, M., E. Lichtenberg, and D. Zilberman, “The Effects of Pricing Policies on Water Conservation and Drainage,” *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 72, 1990, pp. 883～890.

〔3〕Dinar, A., M. B. Campbell, and D. Zilberman, “Adoption of Improved Irrigation and Drainage Reduction Technologies under Limiting Environmental Conditions,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 2, 1992, pp. 372～398.

〔4〕Dinar, A., K. C. Knapp, and J. Letey, “Irrigation Water Pricing Policies to Reduce and Finance Subsurface Drainage Disposal,” *Agricultural Water Management*, Vol. 16, 1989, pp. 155～171.

〔5〕Hanemann, W. M., E. Lichtenberg, D. Zilberman, D. Chapman, L. Dixon, G. Ellis, and J. Hukkinen, “Economic Implications of Regulating Agricultural Drainage to the San Joaquin River,” Technical Committee Report to the State Water Resources Control Board. Sacramento, California, 1987.

〔6〕Khanna, M., M. Isik, and D. Zilberman, “Cost Effectiveness of Alternative Green Payment Policies for Conservation Technology Adoption with Heterogeneous Land Quality,” *Agricultural Economics*, Vol. 27, 2002, pp. 157～174.

〔7〕OECD. *Agricultural Water Pricing in OECD Countries.* Paris: OECD, 1999.

〔8〕丹治肇「日本の農業用水の価格と市場形成に関する歴史的考察」『水文・水資源学会誌』第15巻，2002年，pp. 522～532.

〔9〕Tsur, Y., and A. Dinar, “The Relative Efficiency and Implementation Costs of Alternative Methods for Pricing Irrigation Water,” *The World Bank Economic Review,* Vol. 11, 1997, pp. 243～262.

〔10〕Wichelns, D., “Motivating Reductions in Drain Water with Block-Rate Prices for Irrigation Water,” *Water Resources Bulletin,* Vol. 27, 1991, pp. 585～592.

〔11〕Wichelns, D., “Experience in Implementing Economic Incentives to Conserve Water and Improve Environmental Quality in the Broadview Water District, California,” Technical note presented at Water Resource Management Group on Economic Incentives in the World Bank, New York, The World Bank, 2003.

〔12〕Wichelns, D., L. Houston, and D. Cone, “Economic Incentives Reduce Irrigation Deliveries and Drain Water Volume,” *Irrigation Drainage Systems,* Vol. 10, 1996, pp. 131～141.

〔13〕Wichelns, D., L. Houston, and D. Cone, “Economic Analysis of Sprinkler and Siphon Tube Irrigation Systems, with Implications for Public Policies,” *Agricultural Water Management,* Vol. 32, 1997, pp. 259～273.

（2008年8月15日受付，2009年6月23日受理）