

# 持続可能な地下水利用のための最適な料金制度の提案 熊本地域に於けるケーススタディ

Optimum Price of Groundwater for Sustainable Use  
– Case Study in Kumamoto Region –

02M43165 清木 真明

指導教官 日引 聡  
増井 利彦

## SYNOPSIS

In Kumamoto region, the groundwater is utilized for the water supply. The groundwater has many benefits to use. For example, they are good in taste, cold in summer and warm in winter, contributes to reducing the cost of the water supply and so on. Recently, the level of the ground water has been sinking due to overuse of the water. The rice field contributes to make the water reserve in Kumamoto region. However, since this externality is not internalized, the land use is not optimum and the allocation of the land use for the rice field becomes insufficient. In addition, since the water is supplied by the government, the water price is likely to be lower than the optimum and hence the overuse of the water is made. In this paper, we show the optimum condition for land use and water use and the optimum policy theoretically. Then the household water demand function and the municipal water supply cost function are estimated and the optimum water prices in each area and the optimum subsidy to the land use for the rice field as the optimum policy are calculated.

## 1. 研究の背景と目的

熊本県は、生活用水の大部分を地下水でまかなっている。中でも、熊本市を中心とする熊本地域（16市町村）は、生活用水の全てを地下水に依存するという、全国的に極めて珍しい地域である。地下水には、水質の良さと、年間を通しての温度差が少ないこと、等の特徴があり、生活用水としては飲料用・炊事用などに、また工業用としては、部品の洗浄用などに適している。しかし近年、地下水位の低下が熊本地域に於いて問題となってきている。地下水を生み出す水田の面積が、市街地化によって減少する一方、地下水の汲み上げ量は横這いを続けているため、地下水の水収支がマイナスになってきたのである。

人間の経済活動が水収支に及ぼす影響は、水利用のための地下水の汲み上げと、土地利用による水田、畑・林地の拡大・縮小がある。水資源の枯渇に対処するために何らかの政策的な介入が必要となる背景には、二つの要因がある。一つは、水料金が最適な水準と比較して低く設定されているために、過剰な水利用が生じている可能性があること。もう一つは、涵養地域の土地利用は、水資源の供給という点で外部経済効果をもつにもかかわらず、土地利用に関して、そのことが内部化されていないという点である。

本研究では、熊本地域における地下水利用を持続可能なものにするための最適な政策のあり方を理論的および定量的に明らかにすることを目的としている。

以下では、第2節において、熊本地域に於ける水収支のメカニズムと水利用の現状について説明する。第3節では、簡単な理論モデルを用いて、特定の土地利用が外部性を持つ場合における、土地利用および水資源の利用に関する動学的に最適な資源配分の条件について分析し最適な資源配分を達成するための政策について検討する。この節では、水田としての土地利用に外部性が存在する場合、水料金（上水および下水料金）を水供給の限界費用（上水及び下水道事業の費用）を上回る水準に引き上げ、さらに、水道事業が

ら得られる収益を財源として、水田としての土地利用に対して補助金を与える政策パッケージが最適資源配分達成の条件となることが明らかにされる。第4節および第5節では、最適な水料金と補助金を定量的に求めるために、熊本県における水の需要関数および水道事業における水供給に関する費用関数を推定する。第6節では、第4節と第5節の推計結果を用いて、最適な水利用と土地利用を達成するための水料金の水準と水田に対する補助金を定量的に推計し、熊本県における水および土地利用に関する政策のあり方について分析する。第7節では、本稿の結論と今後の課題が要約される。

## 2. 水収支のメカニズムと水道事業

熊本地域及びその周辺地域に降った雨水が地中に浸透すると、地下水脈を経て、帯水層に溜まる。一方、帯水層に溜まった水は、一部が地域内の湧き水から湧き水として地表に出たり、更に地下水脈を流れて他地域に流出するなどして自然に失われ、帯水層から流出せずに残った地下水が熊本地域内における水道用水、農業用水、工業用水として汲み上げられている。

雨水が地中に浸透しやすい地域を涵養地域と呼ぶが、これは主に水田、畑、林などの地域である。その他、河川の川底や山林、都市部からもわずかながら水が浸透する。

地下水の帯水層にはある程度の水量が蓄えられているため、流出量が流入量を上回っても、すぐに地下水が利用できなくなることはない。しかしこの水収支が負になる状態が継続して起こると、地下水位の低下、すなわち帯水層の水量の減少につながり、やがては水資源が枯渇する。

地下水の流れを模式的に説明すると、図1のようになる。熊本地域の水田や畑・林地などから浸透していく水の量をA、山地部からの浸透をBとする。ここでは、地下に浸透していく水の合計、A+Bを地下水の流入量と呼ぶことにする。一方、帯水層から汲み上げる地下水の量をD、湧き水

として地表にあらわれる水の量を E、他地域へ流出していく水の量を F とする。

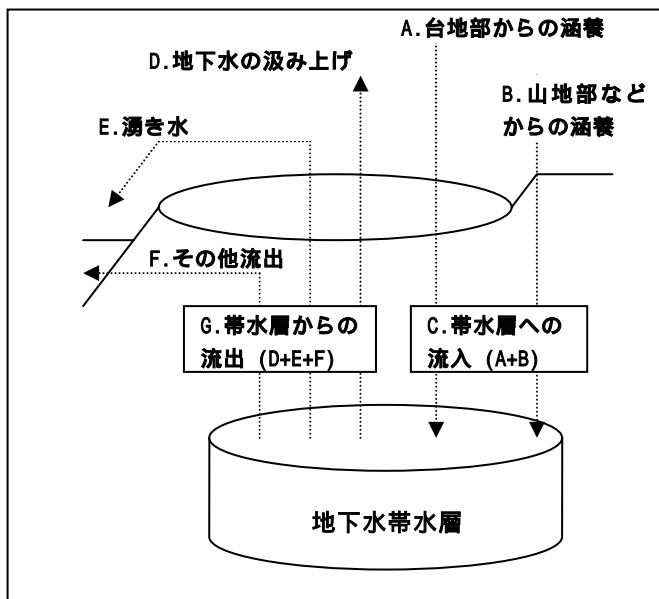


図 1 地下水の流れ

これらの合計、D+E+F が、地下水の流出量である。また、人為的でなく自然に流出していく E+F の量を特に自然流出量と呼ぶ。これらの量の数値を示したものが表 1 である。

表 1 地下水の水収支

単位：[百万 m <sup>3</sup> ]		平成 02 年	平成 10 年
流入量	台地部(A)	610.2	574.0
	山地等(B)	95.3	92.1
	<b>流入計(C)</b>	<b>705.5</b>	<b>666.1</b>
流出量	汲上量(D)	235.4	219.6
	湧水量(E)	354.5	341.5
	その他(F)	128.2	125.4
	<b>流出計(G)</b>	<b>718.1</b>	<b>686.5</b>
<b>水収支</b>		<b>-12.6</b>	<b>-20.4</b>

表 1 によると、水収支は平成 2 年値でマイナスとなっており、平成 10 年には更にマイナスの量が大きくなっている。水収支がマイナスになる要因は、地下水の流入量、中でもとりわけ台地部での流入量の減少が影響している。これを増やすためには、台地部の涵養地域を増やす必要がある。表 3 では、涵養地域ごとの涵養量の内訳を示しているが、単位当たりの涵養量を見てみると、特に水田が多量の水を涵養していることが分かる。

表 2 涵養量の内訳

平成 2 年値		涵養量 [百万 m <sup>3</sup> ]	涵養割合 [百万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ]
台地部 内訳	水田	355.5	<b>3.802</b>
	畑・林	287.7	<b>0.756</b>
山地等 内訳	山地	91.1	<b>0.231</b>
	漏水	4.2	-
<b>計</b>		705.5	-

ところで、地下水収支の表を見ると、地下水を採取する以外にも、多量の水が帯水層から流出していることが分かる。特に、中でも湧水の量は多く、地下水の汲み上げ量以上の水量がある。これらの湧水は、地域内を流れる河川の水源となっているが、近年、湧水量の低下により、河川の水量が減り、水辺の生物の生態系も心配されている。

### 3 地下水および土地の最適利用条件の導出と最適政策

本節では、理論モデルを使って、動的に最適な水利用、土地利用を達成するための条件について検討する。

以下では、単純化のために次のような仮定を前提とする。

1. 土地利用には、涵養地の代表としての水田利用と、非涵養地の代表としての市街地としての土地利用の 2 み種類だけであるとする。

2. 自然流出量の流入量に対する割合は常に一定である。言い換えれば、流入量に対して一定の割合の水が汲み上げ可能な地下水として地下水帯水層に溜まるということである。

$t$  期における水需要量（地下水汲み上げ量）を  $Q_t$ 、水供給の限界費用関数、水需要関数をそれぞれ  $MC_t=f(Q_t)$ 、 $MB_t=g(Q_t)$  で表す。 $Q^0$  は、現段階で水収支が均衡するための、汲上量の上限である。また、地域全体の土地面積を  $L$  とする。 $t$  期において、涵養地域である水田の面積は  $l_t$ 、非涵養地域である市街地の面積は  $L-l_t$  である。水田としての土地利用に対する需要関数、市街地としての土地利用に対する需要関数をそれぞれ  $n(l_t)$ 、 $m(L-l_t)$  とする。

以下では、水田に、涵養機能という外部性がある場合について、最適な資源配分の条件、すなわち最適な水利用及び最適な土地利用の条件について検討しよう

水田は一単位当たり一定量の水を吸収した後に、一定量の汲み上げ可能な水を生み出す。その値を  $\alpha$  とおく。つまり、水田が  $t$  期に  $l_t$  の面積であったならば、 $t$  期に地下水帯水層に溜まる地下水の量は  $\alpha l_t$  となる。なお、 $t$  期に、地下水帯水層に存在する水量は  $R_t$  であるとする。

$t$  期において、地下水を  $Q_t$  汲み上げ、土地の総面積  $L$  のうち  $l_t$  を水田、 $L-l_t$  を市街地として利用するときの水利用及び土地利用からの便益はそれぞれ以下のように表される。 $WB_t$  は  $t$  期の社会全体の水利用純便益、 $LB_t$  は  $t$  期の社会全体の土地利用純便益である。

$$WB_t = \int_0^{Q_t} (f(Q) - g(Q))dQ,$$

$$LB_t = \int_0^{l_t} n(l)dl + \int_0^{L-l_t} m(l)dl$$

水利用及び土地利用から生じる社会的総余剰現在価値合計  $SB$  は以下のように表される。

$$SB = \int_0^{\infty} \{WB_t + LB_t\} \exp(-\rho t) dt$$

ここで、 $\rho$  は割引率である。また、地下水帯水層の水量  $R_t$  に関して以下の式が成り立つ。

$$\dot{R}_t = \alpha l_t - Q_t \quad (1)$$

以上から、最適な資源配分の条件は、(1)式の制約条件の下で、 $SB$  の最大化条件を求めると、

$$m(L-l_t) = n(l_t) + \alpha(f(Q_t) - g(Q_t)) \quad (2)$$

$$\lambda_i - \rho \lambda_i = -\frac{\partial H_i}{\partial R_i} = 0$$

ただし、 $\lambda_i$  は  $R_i$  のシャドープライスであり、帯水層の水の社会的価値を表している。

さらに、以下において、定常状態における最適解を考えると、 $R_i=0$  より、

$$Q_i = \alpha(l_i)$$

以上から、土地利用の最適配分を図示すると、図2の通りである。点Aにおいて最適化条件が満たされる結果、水田の最適利用量は  $l^*$ 、市街地のそれは  $L-l^*$  となる。

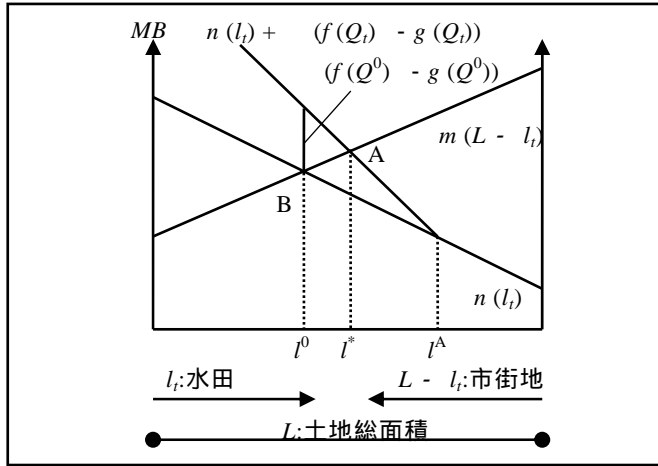


図2 土地利用の決定

水田による土地利用から発生する限界外部便益は、 $\{f(Q^*)-g(Q^*)\}$  である。水田による土地利用を一単位増加させると、同時に土地一単位分 ( ) の新たな地下水の汲上可能量が発生し、地下水利用による社会的便益が増加する。水利用量が一単位増加することによる社会的純便益の増加は  $\{f(Q^*)-g(Q^*)\}$  であるから、水田による土地利用から発生する限界外部便益は、 $\{f(Q^*)-g(Q^*)\}$  である。従って(2)式は、水田利用による限界外部便益と限界生産物価値の合計と市街地利用による限界生産物価格が等しくなることが最適な土地利用の条件であることを示している。

このとき、定常状態においては、水収支が均衡するように水の利用量を決定することが最適になるので、地下水の汲上量を  $Q^*(= l^*)$  とすることが最適となる。図3は、水田としての土地利用が最適である場合の、水市場における最適な水利用を表している。

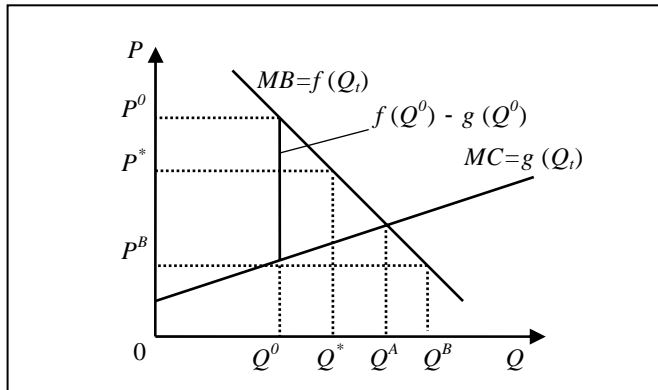


図3 水の最適利用

ここで、外部便益が内部化されない場合、市場均衡に於ける土地利用の配分は、点Bで決定されるため、水田面積は  $l^0$  となる。水田としての土地利用は過小となる。このとき水収支が均衡する水利用量を  $Q^0$  とすると、 $Q^0= l^0$  となっている。ここで、水の価格が  $P^B$  であるとする、水利用量は  $Q^B$  となる。以上から、水田の土地利用が過小であることと、さらには、水価格が最適な水準よりも低く設定されている場合には水利用が過大となるため、水収支がマイナスとなり、地下水の水位が低下することになる。

したがって、最適な資源配分を達成するためには、水料金を  $P^*$  に設定するとともに、水料金を、限界費用を上回って設定することによって発生する収益を財源として、土地利用1単位当たり、 $(P^* - \text{水供給限界費用})$  の補助金を、水田としての土地利用者に与えることが最適な政策となる。

#### 4. 需要関数の推計

以下では、平成元~13年の、熊本県における35地域のパネルデータを用いて、水の需要関数を推計する。水の需要関数の推計に関する研究には、清水(1991)、Billings(1982)などがある。これらの研究では、いずれも Difference Variables という概念を変数として用いて定式化している。これは、水料金がブロック料金となっており、水の限界価格は一定でなく、使用水量に応じて限界価格が段階的に変化していくからである。ただし、限界価格とは、水の総使用量が属する料金ブロック(最終消費ブロック)における水の料金である。このことから、Difference Variables は、全ての水消費量を限界価格で支払ったと仮定した場合の金額から実際の総支払金額を差し引いたものと定義される。

本稿でも、Difference Variables を考慮して、以下の3通りのようにモデルを定式化する。

$$\ln q_i^H = \alpha_M \ln MP_i + \alpha_D \ln DV_i + \sum_{k=1}^n \alpha_k \ln X_{ik} + C_i + \varepsilon_i \quad (Q-01)$$

$$q_i^H = \alpha_M \ln MP_i + \alpha_D \ln DV_i + \sum_{k=1}^n \alpha_k \ln X_{ik} + C_i + \varepsilon_i \quad (Q-02)$$

$$q_i^H = \alpha_M MP_i + \alpha_D DV_i + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{kj} X_{ik} X_{ij} + C_i + \varepsilon_i \quad (Q-03)$$

$q_i^H$  は区域 i の世帯水需要量、 $MP_i$  は地域 i における水の限界価格、 $DV_i$  は区域 i における Difference Variables である。 $X_{ik}$  ( $k=1, \dots, n$ ) は  $MP_i, DV_i$  以外の、以下の説明変数である。

$HP_i$ : 世帯人員数  $DN_i$ : 昼夜人口比  $PO_i$ : 人口密度  
 $RA_i$ : 降水量  $TE_i$ : 平均気温  $WE_i$ : 平均湿度  
 $C_i$ : 定数項 / 地域ごとの定数項  $i$ : 地域

パネル推計において、固定効果が棄却され、変数効果が採択された。Q-01 および Q-03 の結果のみを以下に示す。

#### Q-01 推計結果

変数	係数	標準誤差	P 値
$\ln MP$ : 水の限界価格	-0.105	0.0705	0.138
$\ln DV$ : Difference Variable	0.0821	0.0666	0.218
$\ln HI$ : 家計所得	0.130	0.0416	0.002
$\ln RA$ : 年間降水量	-0.0467	0.0117	0.000
$\ln TE$ : 年平均気温	0.0352	0.0726	0.629
$\ln WE$ : 年平均湿度	0.611	0.147	0.000
修正済み決定係数	0.951		

Q-01 では、家計所得と湿度の符号は正、降水量の符号は負であり、期待されたとおりの符号であり、いずれも 1% 有

有意水準で有意となった。限界価格の符号は負、Difference Variable および気温の符号は正であり、期待されたとおりの符号であったが、10%の有意水準でも有意ではなかった。

Q-03 推計結果

変数	係数	標準誤差	P 値
MP:水の限界価格	-0.0324	0.0158	0.041
DV:Difference Variable	0.00347	0.00131	0.009
HP:世帯人員数	31.7	12.9	0.015
DN:昼夜人口比	268	90.4	0.003
HI:家計所得	-0.00776	0.00170	0.000
WE:年平均気温	2.20	0.811	0.007
MP <sup>2</sup>	9.41E-05	3.58E-05	0.009
HP <sup>2</sup>	-7.32	1.98	0.000
DN <sup>2</sup>	-138	49.5	0.006
WE <sup>2</sup>	-0.0154	0.00558	0.006
MP*DV	-1.06E-05	3.41E-06	0.002
HP*HI	0.00250	0.000531	0.000
TE*WE	0.00337	0.00143	0.019
修正済み決定係数	0.969		

Q-03 では、限界価格、Difference Variable、世帯人員数、昼夜人口比、年平均湿度が有意水準 5%において有意であり、符号も期待されたとおりのものであった。

限界価格は、Q-01 では有意な変数ではなく、Q-03 では有意な変数となっており、定式化によってばらつきが見られる。ここで、これらのモデルから計算される水の価格弾力性を求めると、Q-01 においては、0.105 であり、Q-03 では、0.0827 (9 地域の平均値) となる。

### 5 . 費用関数の推計

以下では、平成元～13 年の、熊本地域における 35 区域のパネルデータを用いて、熊本地域における水の需要関数を推計する。

上水道事業の費用関数を扱った既存研究としては、中山 (2001) がある。この研究では、クロスセクションのデータを用いてトランスログ費用関数を推計している。本研究では以下の 3 通りの定式化を行い、13 年分のデータでパネル推計した。

$$\ln TC_i = \sum_{k=1}^n A_k \ln X_{ik} + C_i + \varepsilon_i \quad (C-01)$$

$$TC_i = \sum_{k=1}^n A_k X_{ik} + \sum_{k=1}^n A_{kk} X_{ik}^2 + C_i + \varepsilon_i \quad (C-02)$$

$$TC_i = \sum_{k=1}^n A_k X_{ik} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n A_{kj} X_{ik} X_{ij} + C_i + \varepsilon_i \quad (k \neq j) \quad (C-03)$$

非説明変数は上水同局の総費用  $TC_i$  であり、 $X_{ik}$  は以下の説明変数である。

$Q_i$ : 総配水量       $WP_i$ : 一人当たり賃金  
 $KP_i$ : 資本価格       $ZP_i$ : その他財価格  
 $C_i$ : 地域ごとの定数項       $i$ : 地域

中山(2001)に従い、一人当たり賃金は、職員給与費を損益勘定所属職員数と資本勘定所属職員数の合計で割ることによって求めている。資本価格は、資本費相当額を有形固定資産額で割ることによって求めている。資本費相当額とは、支払利息、減価償却費、受水費の資本費相当分の合計である。その他財の価格はここでは国民経済計算年報の製造デフレーターを代理変数として用い、三種類の式でそれぞ

れパネル分析を行った。

パネル推計において、固定効果が棄却され、変数効果が採択された。C-03 の結果のみを以下に示す。

C-03 推計結果

変数	係数	標準誤差	P 値
$Q^T$ :総配水量	31100	23800	0.192
WP:労働価格	-137	28.2	0.000
ZP:その他財価格	-13000000	2430000	0.000
WP・KP	146	100	0.146
WP・ZP	1.19	0.282	0.000
WP・QT	0.0106	0.001	0.000
KP・ZP	15200000	7190000	0.036
KP・QT	-372000	64300	0.000
修正済み決定係数	0.999		

### 6 . 持続可能な地下水利用のための最適な政策

本節では、4 節、5 節で得られた需要関数と限界費用関数の推計結果を用いて、最適な水利用、土地利用政策について定量的に求める。

各市町村における水利用の限界便益は、需要関数と費用関数の差分をとることによって求まる。これを  $B_i(Q_i)$  とし、以下のように表す。

$$MB_i = f_i(Q_i) - g_i(Q_i)$$

である。地域全体で総余剰を最大化する条件は、

$$MB_i(Q_i) = MB_j(Q_j), \quad Q^* = \sum_{i=1}^9 Q_i$$

であり、これを満たす  $MB_i$  が最適な補助金の額、また、 $f_i(Q_i)$  が最適な各地域の水価格となる。

4 節、5 節で得られた需要関数と限界費用関数の推計結果 (以下では、需要関数については計算の都合上 Q-01、費用関数については C-03 を用いる) を用いて計算すると、最適な各地域の水料金は、各地域の水供給の限界費用に 2900 円を上乗せしたものであり、水田への補助金は 3300 [円/  $m^2 \cdot 年$ ] となる。

### 7 . 結論と課題

本研究では、水田の涵養機能を考慮することによって、最適な水利用と土地利用を達成できることを理論的に示し、また、水の限界便益を推計することによって、短期的にどのくらいの水道料金を設定すればよいかを実証分析より求めた。

本研究の課題点は、次の二つがあげられる。

- ・地下水汲上量の中の、上水道以外の水利用の分析が充分に行えなかったこと。農業用水や工業用水などの需要関数が明らかにされれば、更に正確な資源配分の条件が得られるはずである。

- ・地下水のタイムスパンが不明であることなど、メカニズムが十分解明されていないため、地下水と土地面積の因果関係が不正確である。

#### <参考文献>

- [1] 中山 徳良(2001)「水道事業の一般化費用関数の推定」日本経済政策学会年報 124-131
- [2] 清水 純一(1991)「家庭用水の需要関数の計測」農業総合研究、Vol.45, No.2, pp.27-43
- [3] 熊本県企画振興部土地資源対策課水資源開発室 (2001)「熊本県水資源総合計画」[http://www.pref.kumamoto.jp]