

2015 年度 卒業論文

上水道事業の技術効率性

慶應義塾大学 経済学部
石橋孝次研究会 第 16 期生

窪田 悠介

目次

序章	1
第1章 上水道事業の構造と技術効率性の概念	2
1.1 上水道事業の構造	2
1.2 技術効率性の概念	6
第2章 上水道事業の現状と制度的な問題点	8
2.1 上水道事業の価格規制	8
2.1.1 上水道事業の規制内容	8
2.1.2 総括原価方式による価格規制が誘発する非効率性	9
2.2 上水道事業の水利権配分	10
2.2.1 水利権	10
2.2.2 水利権の内容	11
2.2.3 権利の安定性による水利権の分類	12
2.2.4 取水の優先劣後	13
2.2.5 渇水調整と取水の優先劣後	14
2.2.6 水利権過剰保有のインセンティブが誘発する非効率性	16
第3章 水利権過剰保有の理論分析	17
第4章 上水道事業の技術効率性の評価	22
4.1 先行研究の紹介	22
4.1.1 原田(2004)の紹介	22
4.1.2 佐藤(2013)の紹介	26
4.2 効率性の測定	30
4.2.1 包絡分析法と確率的フロンティア分析法	30
4.2.2 包絡分析法の解説	31
4.2.3 確率的フロンティア分析法の解説	35
4.2.4 実証結果と考察	42
4.3 水道事業の効率性に影響を与える要因の分析	48

4.3.1	モデルの設定	48
4.3.2	実証結果と考察	51
第 5 章	結論	53
参考文献		54

序章

2013年の時点において、日本に上水道事業は1352個存在する。これらは全て地方公営企業法の適用を受け、公営企業（具体的には市町村など）が運営している。また、上水道事業には地域独占が認められており、競争が働く環境にない。つまり、1つの市や町に対して上水道事業体は1個であり、（通常は）複数存在しない。競争相手がいないことから、上水道事業体は、必ずしも効率的な経営を行わずとも事業を存続することができる。すなわち、非効率な生産が行われている可能性がある。

本論文の目的は、上水道事業における非効率性の発生要因を分析し、包絡分析法（DEA）と確率的フロンティア分析法（SFA）という2つの計量的手法を用いて効率性の値を測定することにある。論文の構成は以下の通りである。

第1章ではまず、上水道事業に関して、事業内容や運営方法、給水形態などの基本的な産業構造について説明する。また、本論文のタイトルにもあるように、（技術）効率性の言葉の意味を正確に定義する。

第2章では、上水道事業において実施されている総括原価方式による水道料金の価格規制と、上水道事業における水利権過剰保有のインセンティブの2つについて説明する。そして、それぞれが上水道事業の（技術）非効率性を誘発する可能性について述べる。

第3章ではBurness and Quirk (1979)を参考にして、各水道事業体が渇水に備えて自らの期待利潤を最大化するように振舞うとき、水利権を過剰保有するインセンティブが生じることを理論的に導く。そしてこれが（技術）非効率性の要因になることを説明する。

第4章では、上水道事業の（技術）効率性の測定を行う。効率性の測定方法としては、包絡分析法（DEA）と確率的フロンティア分析法（SFA）を用いる。また、算出された効率性を被説明変数として用いて効率性に影響を与える要因の分析を行う。

第5章では、論文全体を通しての結論を述べる。

第 1 章 上水道事業の構造と技術効率性の概念

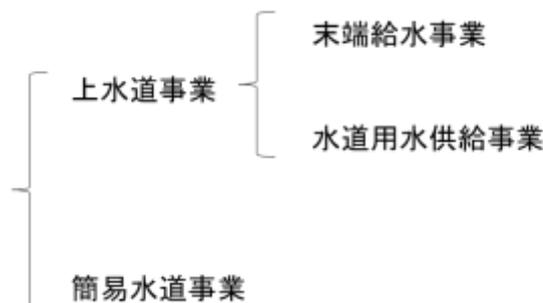
本論文の目的は、上水道事業における技術効率性を分析することにある。そのためにはまず、上水道事業と技術効率性の概念についてそれぞれ説明しておく必要がある。そこで第 1 章の 1 節では上水道事業に関して、事業内容や運営方法、給水形態などの基本的な産業構造について説明する。そして 2 節では技術効率性の概念を説明する。

1.1 上水道事業の構造

水資源は、その利用目的によって生活用水、工業用水、農業用水の 3 つに大別される。上水道事業とは、そのうちの生活用水を供給する水道事業から、下水道事業を除いたもののことである。日本の上水道事業はすべて地方公営企業によって運営されている。地方公営企業とは、日本の地方公共団体が経営する官業のうち、地方公営企業法の適用を受ける事業のことである。地方公営企業は原則として都道府県および市町村が経営する。法人格を持たないためいわゆる社内カンパニーにあたり、一般会計とは切り離された特別会計での独立採算制を採る。また、地方公営企業法によって定められているところの上水道事業とは、給水人口 5001 人以上のものを指す。給水人口 5000 人以下の場合は簡易水道事業と呼ばれるものの、地方公営企業法の適用を（基本的に）受けられないため、上水道事業には含まれない。そのため本論文では、給水人口 5001 人以上の上水道事業体のみを取り扱う。

上水道事業は、末端給水を行う水道事業体と、末端給水を行う水道事業体に水道水を供給する水道用水供給事業体の 2 つに分けられる。

図 1-1：上水道事業の分類



出所：地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）

末端給水事業体は、市町村によって経営され（ごく一部は都県営）、最終消費者に直接

生活用水を供給する小売業者であると解釈される。一方、水道用水供給事業体は都道府県や複数の市町村による企業団によって運営され、小売業者である末端給水事業体に対して、浄水済みの水を供給する卸売業者であると解釈される。2013年の時点における上水道事業体の数は1352個である。そのうち、末端給水事業体は1279個あり、水道用水供給事業体は70個ある。詳細は表1-1にまとめた。

表 1-1：上水道事業体の数

上水道事業			
	末端給水事業	都及び指定都市	20
		給水人口 30 万人以上の事業	47
		" 15 万人以上 30 万人未満の事業	77
		" 10 万人以上 15 万人未満の事業	89
		" 5 万人以上 10 万人未満の事業	221
		" 3 万人以上 5 万人未満の事業	197
		" 1.5 万人以上 3 万人未満の事業	265
		" 1.5 万人未満の事業	363
	水道用水供給事業		70
	建設中の事業		3
計			1352

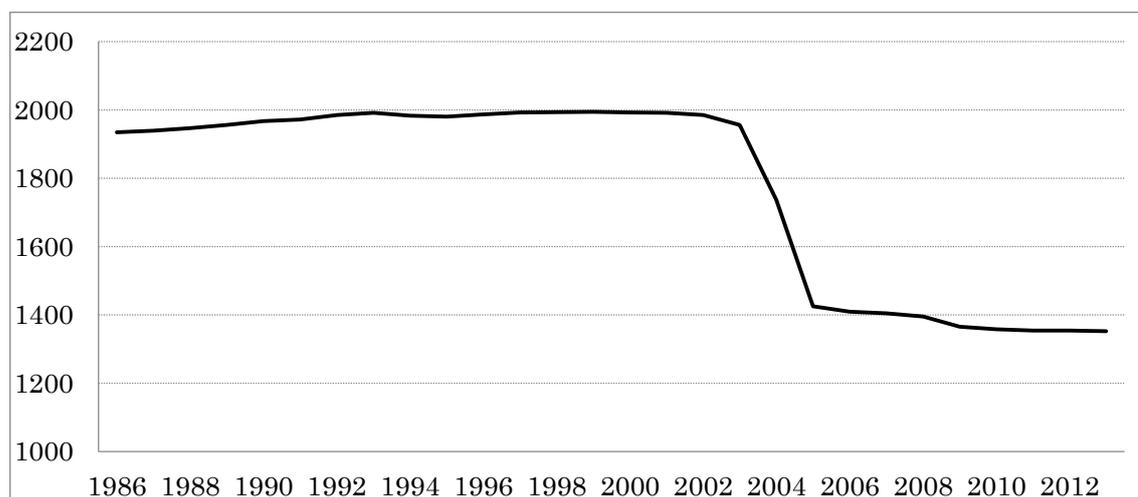
出所：地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）

次に、上水道事業体数の推移を図 1-2 に示す。近年、上水道事業では広域化が進められており、事業体数は減少傾向にある。広域化の根拠の 1 つは、上水道事業における規模の経済の享受である。規模の経済とは生産要素のすべてを同率で増加させたときに、生産量がそれ以上の率で増加することである。これは同時に、生産量を増加させたときに、平均費用（ $1m^3$ あたりの給水原価）が逡減することを指す。参考までに、データが得られた 1278 個の末端給水事業体について、横軸に給水人口、縦軸に $1m^3$ あたりの給水原価の平均値をとってグラフにしたものが図 1-3 である。図 1-3 を見ると、給水人口の規模が増えるにつれて平均費用が逡減する傾向が示されており、規模の経済が働いているように思われる。

ただし、この図を持って上水道事業に規模の経済が存在すると断言するのは少し安易である。高田・茂野（1998）は、上水道事業の費用構造を規定する要因として、規

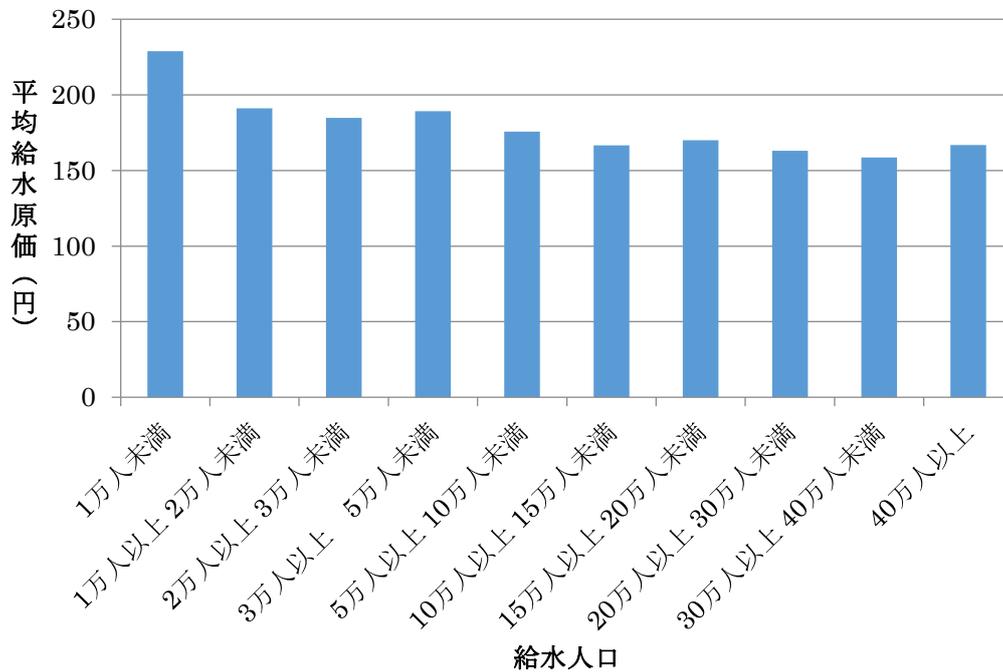
模の経済性以外にも投入要素の価格差、人口密度等の立地条件、技術効率性を挙げており、給水人口の規模に対して平均費用が低減する傾向はこれらの影響が合成して発現しているのであると指摘している。そして高田・茂野（1998）や Mizutani and Urakami（2001）などの研究によると、日本の上水道事業では規模の経済の影響はほとんど見受けられず、密度の経済の影響が強いという実証結果が得られている。密度の経済とは、たとえば給水人口が同じ地域同士で比較した場合でも、人口密度の低い地域は広範囲に水道管を敷設しなければならず、水道管の敷設費用、維持費用が費用を増大させてしまうのに対し、人口密度の高い地域では費用を安く抑えられることをいう。

図 1-2：上水道事業体数の推移



出所：地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）より作成

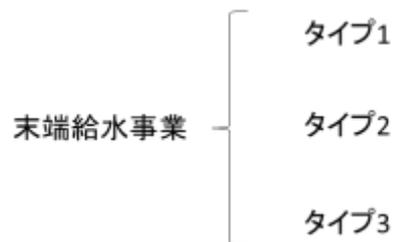
図 1-3：給水人口規模と1m³あたりの給水原価の平均値



出所：地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）より作成

さて、ここまで末端給水事業と水道用水供給事業について説明してきたが、末端給水事業体と水道用水供給事業体では事業の目的や形態が異なると考えられるため、本論文では以後、末端給水事業体のみを分析対象として扱い、とくに断りが無い限り、水道事業体＝末端給水事業体を意味するものとする。末端給水事業体は3つのタイプに分類することができる。

図 1-4：末端給水事業体のタイプ



- ・タイプ 1：十分な設備を持ち、供給量の 100%に関して、自らが取水・浄水・配水を行う自己水タイプ
- ・タイプ 2：供給量の一部に関しては自らが取水・浄水・配水を行うものの、需要を

満たすための不足分に関しては、浄水済みの水を卸売業者である水道用水供給事業者から購入（＝受水）することで供給を行う中間タイプ

・タイプ 3：供給量の 100%に関して、自らは取水・浄水を一切行わず、浄水済みの水を水道用水供給事業者から受水することで供給を行う受水タイプ

地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）掲載の末端給水事業者のうち、十分なデータが得られた 1250 個の事業者についてタイプ別に数をカウントしてみたところ、タイプ 1 は 607 個あり、タイプ 2 と 3 は 2 つのタイプを合わせて 643 個あることがわかった¹。

1.2 技術効率性の概念

企業行動の効率性は、技術効率性（Technical Efficiency）と配分効率性（Allocative Efficiency）の 2 つの概念に分けることができる。それらの概念を中山（2002）と粕谷（1989）を参考にしながら説明する。説明をするにあたり、まずは非効率性の概念から説明したほうが分かりやすい。非効率性は文字通り効率性の対になる概念であり、非効率性にも技術非効率性と配分非効率性の 2 つの概念が存在する。技術非効率性は、ある所与の生産要素を投入した場合、技術的に最大限に得られる産出量が得られないときに発生する。配分非効率性は、生産については技術効率的であるが、費用を最小化するような生産要素の比率が取られていない場合に発生する。技術非効率性と配分非効率性を合わせたものを経済非効率性と呼ぶ。

これらの非効率性について図 1-5 を用いて視覚的に説明する。ここでは 2 つの生産要素 1,2 を用いて 1 つの財を生産するような、2 投入・1 出力の場合を考える。生産要素価格を所与とし、ある一定の産出量を産出するとしよう。図 1.5 の曲線はそのときの等産出量曲線を表している。右下がりの直線は企業の等費用線である。図 1.5 の点 A が実際に観察された点であるとする。ここで、原点 O と点 A を結ぶ線分 OA 上の点は、点 A における生産要素投入比率と同一の比率を持つ生産要素の組み合わせを示している。このとき、交点 B では、投入比率を変えないまま、点 A と同じ生産量を達成できる。この AB 部分は、生産要素の浪費によって発生した技術的な非効率性による追加的費用であり、点 B で生産を行えば生産量 1 単位当たりの費用を OB/OA の割合で削減できることを意味する。したがって、技術効率性は OB/OA で表される。

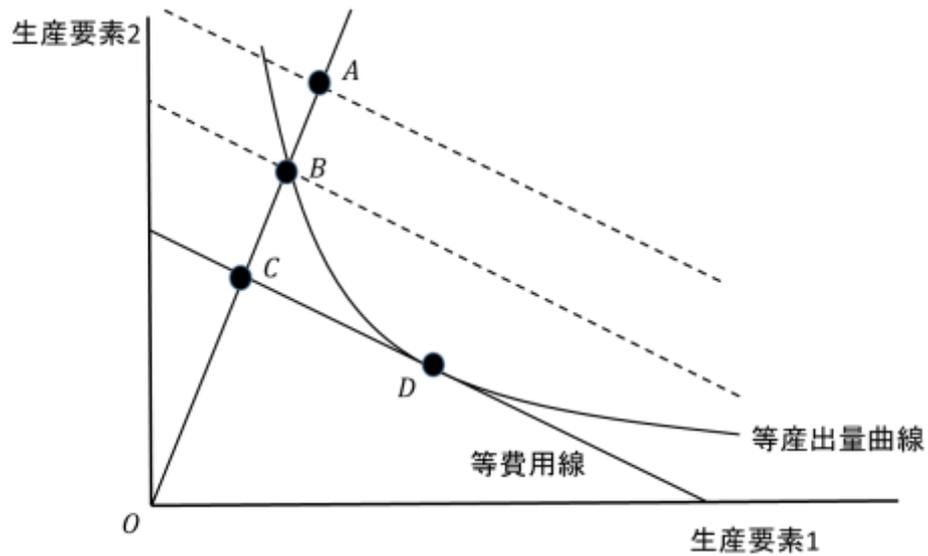
次に、点 D が所与の生産要素価格の下で費用を最小化している生産要素の組み合わ

¹ タイプ 2 と 3 については、両者を明確に分離できるだけの情報が得られなかった。

せを表しているとする。仮に技術非効率性を解消して点 B で生産を行ったとしても、さらに生産要素の比率が OD の傾きを採用することによって、点 C で示される生産要素投入量によるのと同じ費用で生産が可能である。それゆえ、BC の部分は最適ではない生産要素配分上の非効率性を示しており、配分効率性は OC/OB で表される。整理すると、技術効率性は OB/OA 、配分効率性は OC/OB で表される。また、両者を合わせた経済効率性は $OC/OA(=OB/OA \times OC/OB)$ となる。

本論文は上水道事業における技術効率性を分析することを目的としているため、以後とくに断りがない限り、単に効率性と表記すればそれは技術効率性を指すものとする。

図 1-5：技術効率性と配分効率性



出所：中山（2002）

第2章 上水道事業の現状と制度的な問題点

第2章では、上水道事業において実施されている総括原価方式による水道料金の価格規制と、上水道事業における水利権過剰保有のインセンティブの2つについて説明する。そして、それぞれが上水道事業の非効率性を誘発する可能性について述べる。

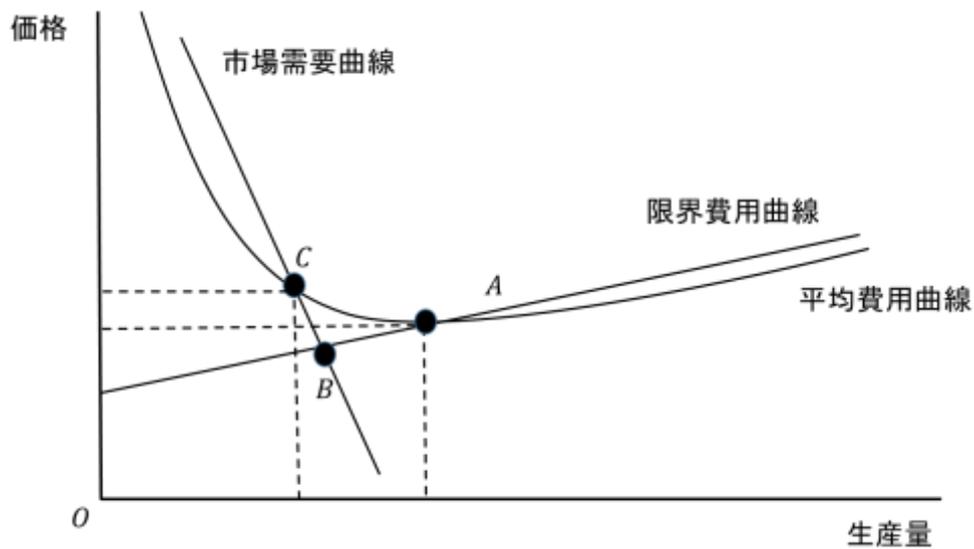
2.1 上水道事業の価格規制

上水道事業では、前述のとおり、総括原価方式と呼ばれる水道料金の価格規制が実施されている。本節では総括原価方式による価格規制の内容について説明し、総括原価方式による価格規制が上水道事業の非効率性を誘発する可能性について述べる。

2.1.1 上水道事業の規制内容

まずは、そもそも価格規制とは何かを神取（2014）を参考にしながら、図2-1を用いて説明する。一般的に、上水道事業のように巨大な固定費用が必要な産業では、生産量が増加するにつれて平均費用が減少する規模の経済の範囲が広いと考えられる。そのため、平均費用曲線が右下がりの部分（=点C）で市場需要曲線と交わる。このとき、市場の需要に見合った生産量を2企業以上で分割して生産するよりも、1企業が単独で生産したほうが低い総費用で生産できる。したがって、費用の効率性の観点からすると、いくつもの事業体が巨大な固定費用を支払って乱立するよりも独占のほうが望ましいことになる。しかし一方で市場競争による効率性達成の観点からは、企業数は多いほうが望ましい。両者のトレードオフにうまく折り合いをつけるための解決策として、独占を許す代わりに価格（の上限）を設定することで、独占企業が価格を吊り上げるのを防ぐ政策が採用されることが多い。これが価格規制である。上水道事業では、前述の通り総括原価方式に基づいて水道料金が規制されている。総括原価方式とは、平均費用価格規制（=1単位当たりの価格=平均費用となるように価格を規制すること）の考え方を基にした規制方法である。しかし、価格=平均費用をそのまま適用すると利益は0になってしまう。そこで正常な利潤を費用の一部とみなして総括原価（=事業費用+正常利潤）を計算し、総括原価を予想需要量で割ることで、1単位当たりの価格=総括原価/予想需要量となるように価格を規制したものが総括原価方式である。

図 2-1：総括原価方式による価格規制



出所：神取（2014）

具体的な水道料金の設定の仕方は、公益社会法人日本水道協会が作成した水道料金算定要領に記載されている。これによると、料金算定期間は、事業計画及び経済情勢の推移等を十分に考慮し、概ね将来の3年から5年を基準に設定される。水道料金については、能率的な経営をしている場合の適正な営業費用に、事業を健全に運営していくために必要な資本費用を加えて総括原価を算出している。営業費用は人件費、薬品費、動力費、修繕費、受水費、減価償却費、資産減耗費、その他維持管理費の合計額から控除項目の額を控除した額である。資本費用は支払い利息及び施設全体の維持等に必要とされる資産維持費の合計額である。このように個々の費用を足し合わせて必要な料金を算出する方法を、総括原価方式のうちの費用積み上げ方式という。

2.1.2 総括原価方式による価格規制が誘発する非効率性

総括原価方式の費用積み上げ方式で価格規制を行う場合、主に2つの問題点が挙げられ、上水道事業の非効率性を誘発する要因となりうる。

(i) X 非効率性

規制によって独占が認められた事業者は、競争相手が存在しないために、必ずしも効率的な生産を行わずとも市場に存続できる。最小限の費用で生産を行わず、費用水準が増大してしまう傾向のことを（Leibenstein の）X 非効率性と呼ぶ。総括原価方式による価格規制では、消費者がすべての費用を負担するような価格設定になってい

るため、営業費用の上昇は被規制事業体の総収益を増加させることになる。したがって営業費用を削減して効率的な生産を行うインセンティブがうまく働かず、X 非効率が発生しやすい。X 非効率性が存在すると、もっと低い費用で生産できる機会があったにも関わらず、効率的な生産に比べ高い費用をかけてしまっており、それだけ資源を浪費してしまっていることになるので、技術非効率性が生じていると言える。

(ii) 動態的非効率性

総括原価方式による規制では、十分な投資を行って技術革新を行わずとも一定の利益が保証されている。そのため技術革新のインセンティブが弱められ、長期的には生産性の成長率が、競争的な産業に比べて低くなるかもしれない。これを動態的非効率性と呼ぶ。ただし動態的非効率性そのものは、技術非効率性には当たらない。技術非効率性は動態的な概念ではなく、静態的な概念であるからである。しかしながら、動態的非効率性が生じると技術革新が遅れていることを意味するので、結果的に古い事業体ほど非効率的な生産方法を用いて資源を浪費し、技術効率性を損ねている可能性があると言える。

2.2 上水道事業の水利権配分

上水道事業では河川から水を取水する場合、河川の流水使用許可を得なければならない。河川の流水を使用する権利のことを水利権と呼ぶ。本節では水利権の内容や性質について説明し、水道事業における水利権過剰保有のインセンティブが上水道事業の非効率性を誘発する可能性について述べる。本節での説明は主に、長谷部（2004）、長谷部（2005）、国土交通省ホームページを参考にしている。

2.2.1 水利権

水利権とは、前述のとおり河川の流水を占有する権利のことである。流水の占有(水利権)の許可は、流水を占有しようとする者の申請に基づいて行われる。そのために、流水を占有(具体的には取水など)しようとする者は、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ河川管理者に対して流水占有の許可の申請を行わなければならない²。

²例外的に河川法に基づく取水の許可申請を行うことなく、社会的に承認された水利権も存在し、これは慣行水利権と呼ばれる。しかし、慣行水利権は農業用水に関わるものであり、上水道事業において慣行水利権は存在しないため、考慮しない。

水利権を許可された者は、実質的に水を独占的に支配して利用すること、それを妨げるものを排除することなど、排他的な支配機能を得ると理解され、上流での新たな取水や汚染排水などにより水利使用が妨害されたときは、その中止や損害賠償を求めることができる。なお、水利権は河川法上の河川の流水を占有する権利に限定されており、河川法上の河川ではない普通河川や溜池からの取水、地下水や海水の取水は水利権の対象にはならない。

2.2.2 水利権の内容

河川の流水を占有する権利である水利権の具体的な内容は、その許可に附された「水利使用規則」によって定まっている。通常、この水利使用規則においては、1.目的、2.占有の場所、3.許可期間、4.取水量等、5.取水及び流水貯留の条件、6.工作物及び土地の占有場所及び使用面積、7.工事の条件、8.取水量の測定義務、9.排水量及び排水の水質、10.ポンプ施設の取水能力の変更承認、などに関する事項が規定されている。許可を受けた利水者は、自らに課された水利使用規則が許す範囲内で水利権を行使しなければならない。ここでは、1.目的、2.占有の場所、3.許可期間について説明する。

1.目的とは河川の流水を占有する目的のことである。水利使用規則において、水力発電、かんがい、水道、工業用水、鉱業用水、養魚、し尿処理等の区分で表示されている。流水の占有の目的は水利権の内容となるので、占有の量が同じであっても目的が異なれば、別の水利権となる。

2.占有の場所は、取水を行う場所のことである。河川の上流での取水は、下流の水利権者に対して事実上の優先的地位を取得することとなる。また、蛇行河川では、たとえ取水口が河口から同一距離にある場合でも左右岸によって取水の優劣が事実上異なることがある。

3.許可期間は、水利権の許可期間のことである。水道事業の場合、許可期間は概ね10年として実務上処理されているが、水利権の更新許可の申請があれば再度許可される。

なお、水利権を自由に他の事業体に譲渡したり、事業者間で売買したりすることは許されない。水利権の譲渡に当たっては、河川管理者の承認を受けなければならない。そして譲渡の承認を受ける際には、譲り受けようとする者の事業計画を説明しなければならないなどの、細かなステップを踏む必要がある。これは、水利権の財産性を認めつつも、水利権が私的な財産として取引されることを防ぐためである。

2.2.3 権利の安定性による水利権の分類

水利権は(i)安定水利権、(ii)豊水水利権、(iii)暫定豊水水利権の3つに分類することができ、通常、水利権とは安定水利権のことを指す。これら3つの水利権について、図2-2を用いて説明する。

(i)安定水利権

新規の水利権を許可する際、申請された取水量が既得水利権を侵害したり、流水の正常な機能維持に支障を与えたりすることなく安定的に取水できる量であるかを確認する必要がある。安定的であるかどうかは、10年に1度の渇水が起こった年にも通年にわたり取水が可能であるかどうかで判断する。すなわち、基準渇水流量³から既得権利者の水利権量及び、河川管理上必要な水量（＝河川維持流量）を控除し、この控除した結果得られた残余の流量に対して、申請された取水量が当該流量の範囲内である場合に、新規に水利権を許可している。このようにして許可された水利権は、取水が安定的に継続されることから、安定水利権と呼ばれる。（安定）水利権は一度取得すれば許可水量を取水している限り保持することができるが、実取水量が水利権で許可された取水量を下回っている場合には、遊休化した分の水利権は失効する。遊休水利権は河川の有効な利用を妨げると考えられているため、それに充てられていた水は自然の姿に戻るのが原則である。

(ii)豊水水利権

豊水水利権とは、河川の流量が基準渇水流量を超える場合に限り取水できるとされている水利権のことであるが、これは原則認められない。なぜなら豊水水利権を認めると、渇水時などにおいて取水量が不足して水利使用の目的を十分に達成できなくなったり、既得水利を侵害したり、河川の正常な機能に支障を与えてしまったりする恐れがあるからである⁴。

(iii)暫定豊水水利権

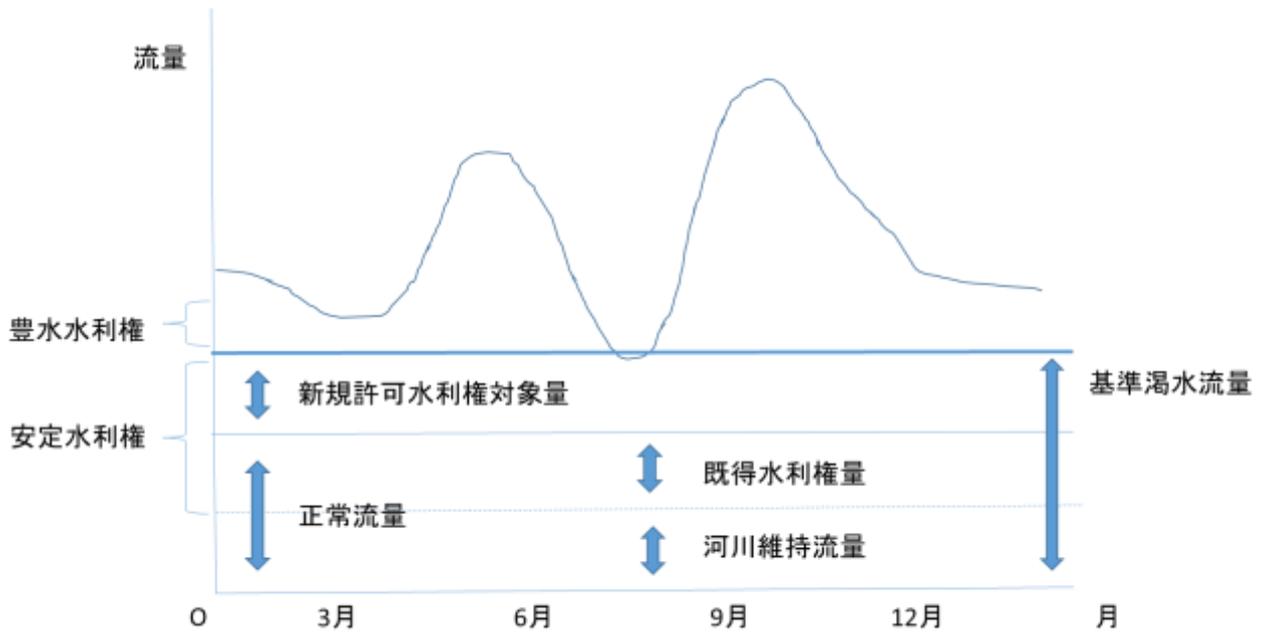
ダム等によって生み出される水量を期待して水利権申請を予定しているところ、ダムがまだ完成していないことから、水道用水等の需要が現実に発生しているにも拘らず、安定的な水利使用が行えない場合がある。このように社会的要請により緊急に用

³基準渇水流量：10年に1度の渇水が起こった場合でも、1年のうち355日を下回らない程度の流量

⁴ただし、水力発電については、常に同出力で発電を続ける必要はなく、また利用した河川水はほぼ同量が河川に還流するため、豊水を取水する発電が許可されている。

水を必要とする場合には、許可期限が到来したら失効する旨の失効条項及び基準渇水流量を超える場合に限りその超える部分の範囲内で取水することができる旨の豊水条項を附して、暫定的な水利権が許可されることがある。このような水利権を、暫定豊水水利権と呼ぶ。

図 2-2：水利権の許可



出所：国土交通省ホームページより作成

2.2.4 取水の優先劣後

(i) 取水行為の優先劣後

水利用の秩序を保つため、流水利用の順位には、①後発の水利権は、先発の水利権に影響を与えてはならない、②流域内に複数の事業計画がある場合は、先発計画が優先する、という基本的なルールが存在する。実際、水利使用許可に当たっては、取水量などが既存の水利使用に支障を与えないことを確認するほか、一般に「取水は、この水利使用に係る権原の発生前にその権原が生じた他の水利使用及び漁業に支障が生じないようにしなければならない」という条件を付している。つまり、新たな取水は既存の水利権に対して劣後の関係にあり、時間的に古い水利使用のほうが優先的に取水・貯留できるという秩序が確立しているのである。

(ii) 取水場所の優先劣後

蛇行河川では、たとえ取水口が河口から同一距離の場所にある場合でも左右岸によ

って取水の優劣が事実上異なることがある。そして、河口から（ほぼ）同一距離の場所にある事業者同士で比較した場合、先発の事業者は自らが有利となる場所で取水を行うであろうし、後発の事業者は先発の事業者の水利使用に支障が生じないように、相対的に不利な場所で取水しなければならないだろうと考えられる。このことから、取水の場所についても、取水場所に関する優先劣後の関係が生じている可能性がある。

2.2.5 渇水調整と取水の優先劣後

前節では、水利用の秩序を保つために取水行為には優先劣後の関係が存在し、時間的に古い水利使用のほうが優先的に取水・貯留できるルールがあることを述べた。優先劣後のルールを設けて、後発の事業者による先発の事業者の水利使用侵害を防ぐことで、水利用に関して一定の秩序を保つことができる。しかし、水利用秩序の真価が問われるのは渇水時などの緊急時であり、このとき問題の本質が現れやすい。たとえば、異常渇水（＝通常想定されている10年に1度の渇水を上回る渇水）が発生した場合、優先劣後のルールを守って取水を行っていけば後発の事業者の中には取水が不可能となり、致命的な打撃を被る者が出てくるかもしれない。一方、優先劣後のルールを侵してわれ先に取水しようとする者が現れた場合にも水利用秩序の混乱が生じるだろう。

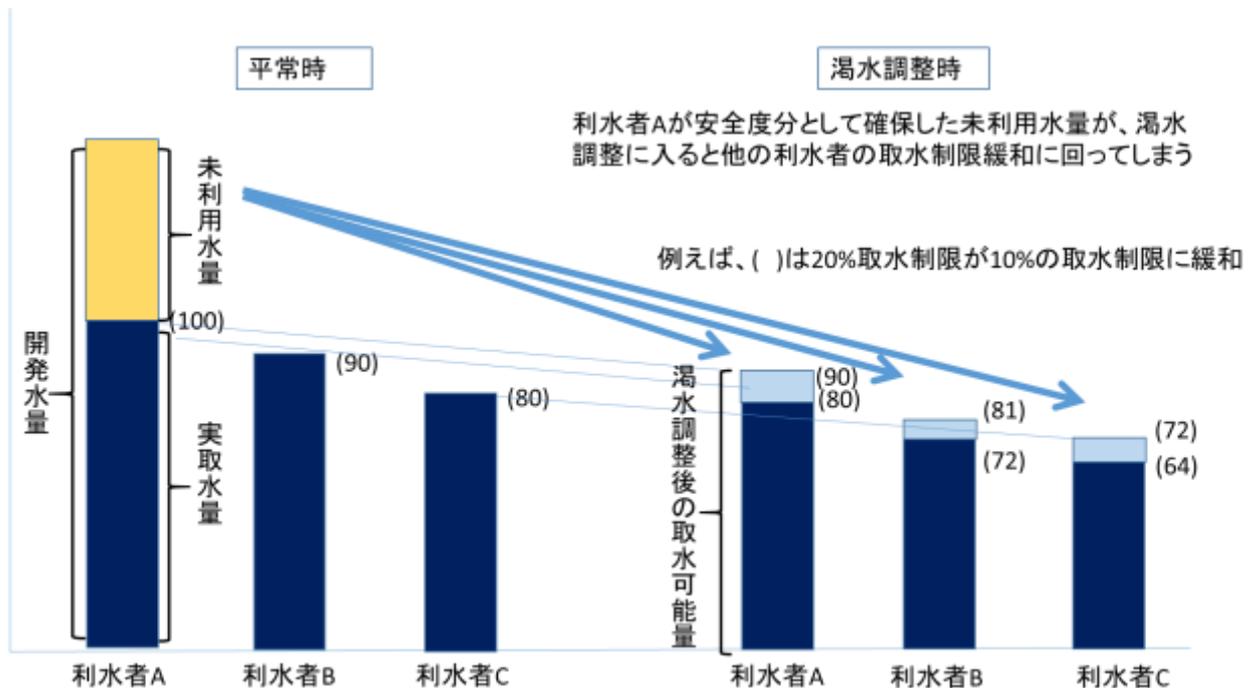
そこで河川法の第53条には、異常渇水が発生した場合の渇水調整に関するおおまかな規定が示されている。それによるとまず、異常な渇水が発生した場合、利水者は相互にその水利使用の調整について必要な協議を行うように努めなければならない、その協議にあたっては相互に他の水利使用を尊重しなければならない。次に、河川管理者は当該協議が円滑に行われるようにするため、水利使用の調整に関して必要な情報の提供に努めなくてはならない。また、河川管理者は、水利使用の調整に関して必要なあっせん又は調停を行うことができる。最後に、渇水時における水利使用の特例として、水利使用が困難となった利水者に対して、他の利水者が河川管理者の承認を受けて、自己の水利使用を水利使用が困難になった利水者に行わせることができる。そして河川管理者は、各水利使用の範囲内で利水者相互間の水融通を円滑なものとするため、その承服に際しては、簡易な審査を行い、関係行政機関との協議等を要しないとされている。

つまり、異常渇水時には、通常時における取水行為の優先劣後ルールが一時的に見直され、利水者間の協議によって形成された通常と異なる水利用のルールが新たな秩序になるのである。なお、渇水調整はあらかじめ明確なルールを定めておいて対応す

るような性質のものではなく、状況に応じた実効ある措置が求められる。そして、異常渇水時に円滑な水利調整を行うためには、平常時から関係者が相互に理解を深めることが重要となる。しかし一方で、社会経済の発展による水需要の増加は利水者の増加や水利使用の広域化、複雑化を招き、利水者間の渇水調整を次第に困難にしつつあるのも現状である。

実際に行われている渇水調整ルールでは、許可水利権量又は実取水量をベースに取水制限をかける形が多い。なお、第2章2節3項で説明したとおり、実取水量が許可水利権量を下回っている場合は遊休化した分の水利権は失効するので、通常、許可水利権量と実取水量は（ほぼ）一致する。図2-3を用いて説明すると、利水者A, B, Cがそれぞれ100, 90, 80の実取水量を取水している場合、実取水量をベースにした20%の取水制限が行われると、渇水調整後の取水可能量はそれぞれ80, 72, 64となる。また、もし利水者Aがダム等の水源開発を行っているのであれば、渇水調整の際、その貯留水は他の利水者の取水制限緩和に回される。貯留水は流水であることに変わりはなく、また、ダム建設そのものが水利用秩序への参入でもあるから、これは当然のことである。しかし一方で、利水者Aが水源開発に参画して安全度を高めても、渇水調整に入ると利水者Aの未利用貯留水が水系の利用者全体のプールとして使われてしまい、利水者Aが水源開発努力に見合った安全度を得られないという不合理も生じる。

図 2-3：渇水調整ルール



出所：国土交通省ホームページより作成

2.2.6 水利権過剰保有のインセンティブが誘発する非効率性

水道事業では水利権を過剰に保有しようとするインセンティブが働く。水利権を過剰保有するインセンティブの発生源は主に2つある。

(i)水道事業体は、水の安定供給を行う必要があるため、将来の最大需要量を多く見積もっているのであれば、水利権を多く保有するインセンティブを持つ。

(ii)渇水調整が許可水利権量又は実取水量をベースに行われるのであれば、水利権を多く保有する事業体ほど取水制限による被害を最小限に抑えられる。それゆえ、渇水に備えて水利権を過剰に保有するインセンティブを持つ。

理由が何であれ、水利権を過剰に保有する事業体は、総じて許可水量を下回ることはないように取水を行うことになる。なぜならば、実取水量が水利権で許可された取水量を下回っている場合には、遊休化した分の水利権は失効してしまうからである。水利権は一度手放すと再度手に入れるときには、時間的・経費的コストが大きい。ゆえに、たとえ必要性が低くても許可水量を下回ることはないように取水することになるのである。このとき、取水量をできるだけ節約するような効率的な生産を行わないだろうと考えられ、上水道事業の技術非効率性を誘発する可能性がある。

第3章 水利権過剰保有の理論分析

第2章で説明したとおり、水道事業では水利権を過剰保有するインセンティブが働く。このとき、取水量をできるだけ節約するような効率的な生産を行わないだろうと考えられるため、技術非効率性を誘発する可能性がある。第3章では Burness and Quirk (1979) を参考にして、各水道事業体が渇水に備えて自らの期待利潤を最大化するように振舞うとき、水利権を過剰保有するインセンティブが生じることを理論的に導く。理論モデルは以下ようになる。

ある水系において、河口から(ほぼ)同一距離の流域に N 個の水道事業体が存在するとする。この流域には1年間あたり、 xm^3 の自然流量が流れているとする。ただし正確には、 x は自然流量そのものではなく、自然流量から河川維持流量を控除した流量を表している。 x は確率変数であり、確率密度 $f(x)$ の分布に従うものとする。 x の累積密度関数は $F(x)$ と表すことにする。したがって、以下の式が成立する。

$$f(x) \geq 0 \text{ for } x \geq 0, f(x) = 0 \text{ for } x < 0$$

$$F(x) = \int_0^x f(c)dc$$

$$F(0) = 0 \text{ and } \lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$$

さらに単純化のために x は定常状態にあり、時系列相関はないものとする。このとき、 i 番目の水道事業体が年間 $a_i m^3$ の水を取水するためには、少なくとも $a_i m^3$ のキャパシティを持つ取水設備(能力)が必要である。故に、水道事業体 i の取水量を a_i 、取水設備を \bar{a}_i 、利潤関数を $\pi^i(a_i, \bar{a}_i)$ としたとき、 $a_i \leq \bar{a}_i$ でなければならない。なお、単純化のために取水量 a_i と取水設備 \bar{a}_i 以外の生産要素は考慮しない。取水行為に対する使用料の請求は発生しないので、取水量 a_i について、

$$\pi_1^i = \frac{\partial \pi^i}{\partial a_i} > 0 \text{ for } 0 \leq a_i \leq \bar{a}_i$$

を仮定する。また、2階の条件は、

$$\pi_{11}^i = \frac{\partial^2 \pi^i}{\partial a_i^2} < 0$$

とする。取水設備 \bar{a}_i については、

$$\pi_2^i = \frac{\partial \pi^i}{\partial \bar{a}_i} < 0 \text{ for } \bar{a}_i \geq 0$$

を仮定する。2 階の条件については、閾値 \bar{a}_i^* を超えない範囲 ($0 \leq a_i \leq \bar{a}_i^*$) では、

$$\pi_{22}^i = \frac{\partial^2 \pi^i}{\partial \bar{a}_i^2} > 0$$

であるが、閾値 \bar{a}_i^* を超える範囲 ($a_i \geq \bar{a}_i$) では、

$$\pi_{22}^i = \frac{\partial^2 \pi^i}{\partial \bar{a}_i^2} < 0$$

であるとする。最後に、取水設備は時間の経過によってのみ老朽化するものとし、取水行為によって生じる劣化はないものとする。したがって、

$$\pi_{12}^i = \frac{\partial^2 \pi^i}{\partial a_i \partial \bar{a}_i} = 0$$

とする。 $\pi_{12}^i = 0$ の仮定を用いると、利潤関数 $\pi^i(a_i, \bar{a}_i)$ は、 a_i の関数と \bar{a}_i の関数に分離することができる。すなわち、

$$\pi^i(a_i, \bar{a}_i) = R^i(a_i) - C^i(\bar{a}_i)$$

と書き表すことができる。ただし、 $R^i(a_i)$ は水道事業体 i の収入関数、 $C^i(\bar{a}_i)$ は費用関数である。全ての水道事業体はリスク中立的で、同一の利潤関数を持つものとし、期待利潤最大化を目的に行動するものとする。また、先に水利権を取得した事業体から順番に番号を振って表記するものとする。それゆえ、事業体 1 が時系列的に最初の水利権獲得者であり、次いで事業体 2 が 2 番目の水利権獲得者であり、事業体 i は i 番目の水利権獲得者であることを意味する。長期的な視点で見たとき、期待利潤最大化を目的とする事業体は、水利権で許可された取水量を上回る取水設備を持たない。併せて、取水設備能力を上回る水利権の保有は認められない。それゆえ、取水設備 \bar{a}_i は水利権で許可された取水量に一致するものとみなす⁵。さらにまた、湧水などで取水が

⁵ 現実には両者が一致することはなく、通常は取水設備 \bar{a}_i のほうが大きい。もし一致すれば水の安定供給の面から見て問題があると言える。日本の末端給水事業では、施設の最大稼働率の平均値は約 7 割となっており、ふだんは使われない遊休設備が存在することがわかる。単純化のため、両者は一致するものとみなしても支障はない。

困難な場合を除いて、水利権で許可された取水量と（実際の）取水量 a_i は（ほぼ）一致する。なぜならば、実取水量が水利権で許可された取水量を下回っている場合には、遊休化した分の水利権は失効してしまうからである。ここで、事業体 1 から i がそれぞれ持つ取水設備の合計を、

$$A_i = \sum_{j=1}^i \bar{a}_j$$

と表すことにする。ただし、 $A_0 = 0$ とする。取水設備 \bar{a}_i =水利権で許可された取水量が成立することを前提に、それぞれの事業体に与えられた水利権をベクトル $(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_N)$ を用いて表すことにする。ここで、次のような 2 段階の動学的なゲームを考える。

第 1 段階

先発の事業体 1 から $i-1$ までが、それぞれ水利権 $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_{i-1}$ を獲得し、取水設備 $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_{i-1}$ をつくって取水 a_1, a_2, \dots, a_{i-1} を行う。

第 2 段階

後発の事業体 i が、水利権 \bar{a}_i を獲得し、取水設備 \bar{a}_i をつくる。取水行為の優先劣後により、事業体 i は、既存の水利使用に支障を与えないことを確認しながら取水 a_i を行う。

このとき、事業体 i の期待利潤を $E^i \pi$ と表すことにすると、 $E^i \pi$ は次のように表すことができる。

$$E^i \pi = F(A_{i-1})\pi(0, \bar{a}_i) + \int_{A_{i-1}}^{A_i} \pi(x - A_{i-1}, \bar{a}_i) f(x) dx + [1 - F(A_i)]\pi(\bar{a}_i, \bar{a}_i) \quad (3.1)$$

(3.1)の式の意味は次のように解釈できる。

(i)第 1 項： $F(A_{i-1})\pi(0, \bar{a}_i)$ について

第 1 項は $x \leq A_{i-1}$ の場合、つまり渇水が起こった場合に相当する。第 2 章 2 節 5 項で説明したとおり、異常な渇水が発生した際には、一時的に取水行為の優先劣後のルールが見直され、水道事業体は相互にその水利使用の調整について必要な協議を行うように努めなければならないとされている。しかしながら、取水行為の優先列後のルールが一時的に見直されたとしても、河口から（ほぼ）同一距離の場所にある事業体

同士で比較した場合、第 2 章の 2 節 4 項で説明したとおり、取水場所に関する優先劣後の関係が存在していると考えられる。後発の事業体は先発の事業体に比べて、相対的に不利な場所で取水を行わなければならないだろうと考えられるから、異常渇水が発生した場合真っ先に取水が困難となり大打撃を被るのは後発の事業体であると思われる。そうなれば後発の事業体は河川管理者の承認を受けて、他の事業体から水を融通してもらうなどの措置を取らなければならない。そこで、このとき発生する交渉・取引費用を差し引いた利潤を、($x \leq A_{i-1}$ の場合には)、 $\pi(0, \bar{a}_i) < 0$ と近似する。これは $F(A_{i-1})$ の確率で生じる。

(ii)第 2 項： $\int_{A_{i-1}}^{A_i} \pi(x - A_{i-1}, \bar{a}_i)f(x)dx$ について

第 2 項は $A_{i-1} < x \leq A_i$ の場合、つまり第 1 項のときと比べて程度は低いものの、渇水が起こった場合に相当する。こちらも第 1 項のときと同様の理由により、渇水調整に伴って発生する交渉・取引費用を差し引いた利潤を、($A_{i-1} < x \leq A_i$ の場合には)、 $\pi(x - A_{i-1}, \bar{a}_i)$ と近似する。このときの期待利潤は $\int_{A_{i-1}}^{A_i} \pi(x - A_{i-1}, \bar{a}_i)f(x)dx$ で表される。

(iii)第 3 項： $[1 - F(A_i)]\pi(\bar{a}_i, \bar{a}_i)$ について

第 3 項は、 $x > A_i$ の場合、つまり河川の流量が十分に存在する場合に相当する。このとき、事業体 i は水利権で許可された取水量を下回ることはないように取水を行うので、利潤は $\pi(\bar{a}_i, \bar{a}_i)$ となる。これは $[1 - F(A_i)]$ の確率で生じる。

期待利潤 $E^i \pi$ 最大化の 1 階条件は、

$$\begin{aligned} \frac{dE^i \pi}{d\bar{a}_i} &= F(A_{i-1})\pi_2(0, \bar{a}_i) + \int_{A_{i-1}}^{A_i} \pi_2(x - A_{i-1}, \bar{a}_i)f(x)dx \\ &+ [1 - F(A_i)][\pi_1(\bar{a}_i, \bar{a}_i) + \pi_2(\bar{a}_i, \bar{a}_i)] \end{aligned} \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで、 $\pi_{12}^i = 0$ の仮定により、利潤関数 $\pi^i(a_i, \bar{a}_i)$ は a_i の関数と \bar{a}_i の関数に分離可能であるから、

$$\pi_1(z, w) = \pi_1(z), \quad \pi_2(z, w) = \pi_2(w)$$

と書き換えることができる。これを(3.2)に代入することで、

$$\begin{aligned} &F(A_{i-1})\pi_2(0, \bar{a}_i) + \int_{A_{i-1}}^{A_i} \pi_2(x - A_{i-1}, \bar{a}_i)f(x)dx + [1 - F(A_i)][\pi_1(\bar{a}_i, \bar{a}_i) + \pi_2(\bar{a}_i, \bar{a}_i)] \\ &= F(A_{i-1})\pi_2(\bar{a}_i) + F(A_i)\pi_2(\bar{a}_i) - F(A_{i-1})\pi_2(\bar{a}_i) + [1 - F(A_i)][\pi_1(\bar{a}_i) + \pi_2(\bar{a}_i)] \\ &= \pi_2(\bar{a}_i) + [1 - F(A_i)]\pi_1(\bar{a}_i) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

を得る。(3.3)において、 $F(A_i)$ を $F(A_{i-1} + \bar{a}_i)$ に書き換えた式を

$$M_i(\bar{a}_i) = \pi_2(\bar{a}_i) + [1 - F(A_{i-1} + \bar{a}_i)]\pi_1(\bar{a}_i) = 0 \quad (3.4)$$

と定義する。 $M_i(\bar{a}_i)$ を A_{i-1} で偏微分すると、

$$\left(\frac{\partial M_i(\bar{a}_i)}{\partial A_{i-1}} \right)_{\bar{a}_i \text{ constant}} = -\pi_1(\bar{a}_i)f(A_i) < 0 \quad (3.5)$$

が導かれる。(3.5)の符号がマイナスであることから、戦略的代替であることが伺える。つまり、戦略 (= 水利権量) を増やすことは先発の事業体の期待利潤を上げることになる一方で、後発の事業体の期待利潤を下げることに繋がる。そして、各水道事業体が渇水に備えて自らの期待利潤を最大化するように振舞うのであれば、先発の事業体が後発の事業と比べて、より多くの水利権及び取水設備を保有することがナッシュ均衡になる。

水利権を過剰に保有する事業体は、第2章2節6項で説明したとおり、総じて許可水量を下回ることはないように取水を行うことになる。なぜならば、実取水量が水利権で許可された取水量を下回っている場合には、遊休化した分の水利権は失効してしまうからである。水利権は一度手放すと再度手に入れるときには、時間的・経費的コストが大きい。ゆえに、たとえ必要性が低くても許可水量を下回ることはないように取水することになるのである。このとき、取水量をできるだけ節約するような効率的な生産を行わないだろうと考えられ、上水道事業の技術非効率性を誘発する可能性があると言える。

第 4 章 上水道事業の技術効率性の評価

第 4 章では、上水道事業の技術効率性の測定を行う。効率値の測定方法としては、包絡分析法 (DEA) と確率的フロンティア分析法 (SFA) を用いる。そして次に、算出された効率値を被説明変数として用いて効率性に影響を与える要因の分析を行う。まず 4 章の 1 節では、日本の上水道事業において技術効率性を測定した先行研究を紹介する。2 節では DEA と SFA の具体的な計量手法を説明した後、先行研究を参考にしながら効率値を算出する。3 節では、2 節で得られた効率値を被説明変数として用いて、効率性に影響を与える要因を分析する。

4.1 先行研究紹介

本節では、日本の上水道事業において技術効率性を測定した先行研究を 2 つ紹介する。最初に紹介する原田 (2004) は、計量経済学の方法論に重点を置いた研究であり、包絡分析法 DEA と確率的フロンティア分析法 SFA の両方を用いて効率値を算出した後、順序プロビットモデルを用いて効率性に影響を与える要因の分析を行っている。次に紹介する佐藤 (2013) は、上水道事業の産業特性を考慮した研究であり、効率値を算出する方法としては DEA のみを採用しているものの、水利権の配分問題を考慮した分析を行っている。なお、DEA 及び SFA の具体的な解説は次節で行うものとする。

4.1.1 原田 (2004) の紹介

原田 (2004) では、DEA と SFA の両方を用いて水道事業の技術効率性を測定している。この研究のサンプルデータは、地方公営企業年鑑 (平成 13 年度版) 掲載の水道事業のうち用水供給事業と簡易水道事業を除いた末端給水事業から、データに欠損のあった事業を除く 1900 事業である。DEA 及び SFA の具体的な計量手法は次節に回すことにするが、どちらの場合も技術効率値を算出するためには、まず、最も効率的に事業経営を行なった場合に達成可能となる投入量と産出量の組み合わせ、すなわち、生産フロンティアの推定を行う必要があることに留意する。このとき、DEA は誤差項を考慮しない推定を行うのに対し、SFA では誤差項による (生産フロンティアの) 変動が確率的に発生することを考慮して推定を行う。DEA の場合、技術非効率性は、推定した生産フロンティアと実際に観察された生産行動との乖離として表されることになる。SFA の場合は、生産フロンティアと実際の生産量の乖離を誤差と非効率性の

合成と捉え、これを分離することで効率性の推定を行う。

ここでは、生産フロンティアを推定する際、投入要素として労働、資本、その他投入財の3つを選定し、産出としては有取水量を用いている。労働は職員数（単位：人）を用いており、損益勘定所属職員数と資本勘定所属職員数の合計の数値である。資本は有形固定資産額（単位：千円）を用いている。その他投入財については動力費、光熱水費、通信運搬費、修繕費、材料費、薬品費、路面復旧費、委託費、受水費から資本相当分を除いたもの、その他の和（単位：千円）である。有取水量は年間総有収水量（単位：千 m^3 ）である。効率値の推定結果は以下の通りである。なお、効率値は0から1の間で算出され、1に近いほど効率的であることを意味する。また、DEAに関しては、生産フロンティアに対する仮定の違いにより、CCRモデルとBCCモデルの2つの場合についてそれぞれ効率値が算出されている。

表 4-1：DEA による技術効率性の計測結果

	CCR モデル	BCC モデル
平均	0.3668	0.4404
標準偏差	0.1547	0.1796
最大値	1.0000	1.0000
最小値	0.0171	0.0957

出所：原田（2004）

表 4-2：SFA による技術効率性の計測結果

平均	0.7386
標準偏差	0.1051
最大値	0.9366
最小値	0.0044

出所：原田（2004）

DEA と SFA によってそれぞれ算出された効率値について、効率性と順位的相关係数を計算したものが表 4.3 である。

表 4-3 : 各手法における効率性と順位的相关係数

CCR モデルと SFA		BCC モデルと SFA	
効率性	順位	効率性	順位
0.7667	0.8444	0.6002	0.7118

出所：原田（2004）

次に算出された効率値を用いて、非効率性に影響を与える要因を分析している。この際、宮良・福重（2002）にならい、DEA による効率性評価が単位の取り方に影響を受けることを考慮して、（DEA から得られた効率値については）順序プロビットモデルを用いて分析を行っている。なお、SFA で得られた効率値については、最小 2 乗法を用いて非効率性の要因を分析している。順序プロビットモデルを用いる際の順序ダミーとしては、効率値の高い分類から順に 0 から 5 までのダミーを与えている。ただし、BCC モデルでは CCR モデルと比べて効率性が高くなるため、0 から 4 までとしている。効率性による分類と順序ダミーは表 4-4 の通りである。

表 4-4 : 効率値の順序ダミー

CCR モデル		効率性による分割	BCC モデル	
事業体数	順序ダミー		順序ダミー	事業体数
11	0	効率的の事業体 1	0	53
25	1	効率性の高い事業体 0.8 以上 1 未満	1	52
95	2	効率性のやや高い事業体 0.6 以上 0.8 未満	2	192
532	3	平均的な効率性の事業体 0.4 以上 0.6 未満	3	680
1027	4	効率性のやや低い事業体 0.2 以上 0.4 未満	4	863
210	5	効率性の低い事業体 0.2 未満		60

出所：原田（2004）

次に、順序プロビットモデルを当てはめる際、潜在変数 $order^*$ を、

$$\begin{aligned}
order^* = & c + \beta_1 \ln \text{価格} + \beta_2 \text{補助率} + \beta_3 \text{施設利用率} + \beta_4 \text{普及率} \\
& + \beta_5 \text{その他表流水率} + \beta_6 \text{ダム率} + \beta_7 \text{受水率} \\
& + \beta_8 \text{水利権率} + \beta_9 \text{都道府県営ダミー} \\
& + \beta_{10} \text{政令指定都市営ダミー} + \beta_{11} \text{市営ダミー} \\
& + \beta_{12} \text{企業団営ダミー}
\end{aligned}$$

と設定している。SFAに基づく非効率性の要因分析については、被説明変数を非効率値（= 1 - 効率値）とし、DEAと同じ説明変数を用いて推定を行っている。推定結果は表4-5の通りである。

表4-5：非効率性に影響を与える要因分析

	CCR モデル	BCC モデル	SFA
定数項	-11.4171***	-10.1482***	-0.7120***
ln 価格	3.1012***	2.3811***	0.2175***
補助率	4.8050***	2.0785***	0.0165
施設利用率	-0.8331***	-0.2960	-0.0796***
普及率	-0.2052	0.7373***	-0.1132***
その他表流水率	-0.2023	0.0496	0.0218***
ダム率	0.4111**	-0.0521	0.0496***
受水率	-1.0452***	-0.5522***	0.0110**
水利権率	0.0028	-0.0401	-0.0042
県営ダミー	-0.0278	-2.3931***	-0.0649
政令指定都市ダミー	-0.2382	-2.3027***	-0.0188
市営ダミー	-0.0242	-0.0661	-0.0256***
企業団体ダミー	0.2278	0.3628*	0.0151
Scaled R ²	0.5599	0.3511	0.6607

(注) ***は1%有意、**は5%有意、*は10%有意であることを示している。

出所：原田（2004）

ただし、効率性の高い分類から順に順序ダミーを作っているため、係数が正の値をとる説明変数は効率性に負の影響を与えており、非効率性の要因と言える。SFAに基づく非効率性の要因分析についても、被説明変数に非効率値（1 - 効率値）を用いてい

るので、係数が正の値をとる説明変数は効率性に負の影響を与えていることを意味する。

4.1.2 佐藤 (2013) の紹介

佐藤 (2013) は、DEA を用いて水道事業の技術効率性を測定している。原田 (2004) が計量経済学の方法論に重点を置いた研究を行っているのに対して、佐藤 (2013) では、上水道事業の産業特性を考慮した研究を行っている。佐藤 (2013) は、上水道事業の非効率性に影響を与える重要な要因として、水利権の硬直性をあげている。水利権の硬直性とは、①水利権配分は先行取得主義で決定されるため、水道事業体は新規取得が非常に困難になっていること、②水道事業体間で水利権を取引することが認められていないこと、などの理由から、水利権配分が固定的になっていることを意味する。そして水利権の硬直性のもとでは、2つの場合から非効率性が発生する可能性があることを指摘している。

第1に水道事業体が需要に対して水利権を過剰に保有している場合である。水道事業体は水の安定供給をする必要があるため最大需要量を想定している。現在の需要に関わらず需要を高く見積もっていれば、水利権を保持するインセンティブを強く持つ。このとき水道事業体は水利権を保持し続けるため、取水量をできるだけ節約するような効率的な最新技術を導入しない可能性がある。そのため、給水人口一人当たりの取水量が相対的に大きい事業体では、効率的な生産が行われていないだろうと推測できる。

第2に、水道事業体が需要を満たすほどの水利権を保有していないとき、水道管が社会的に非効率な資本となる可能性がある。需要を満たすほど十分に水利権を保持していない水道事業体は、たとえ豊富な水量の水源に近くとも水利権を持っていないため受水をしなければならない。受水するためには、水道用水供給事業者まで水道管を敷設する必要がある。水道用水供給事業者の浄水場まで地理的に離れていればそれだけ水道管を敷設するので、水道事業体の立地によっては相対的に長大な水道管敷設が社会的に非効率な資本になりうる。

つまり、需要に対して水利権が過剰であれば、取水量をできるだけ節約するような効率的な最新技術を用いないことで非効率性が発生する。一方、需要に対して水利権が過少であれば水道事業体の立地によっては相対的に過剰な水道管敷設になり、非効率となる。

分析に用いたサンプルデータは、地方公営企業年鑑（平成 20 年度版）掲載の水道

事業のうち用水供給事業と簡易水道事業を除いた末端給水事業から、不完備データを除く 1263 事業である。技術効率値の推定方法としては、DEA の BCC モデルを用いている。その際、投入要素として、資本 K 、労働 L 、取水 WR 、受水 PW の 4 つを選定し、産出としては年間配水量 y を用いている。分析に用いた変数は表 4-6 の通りである。

表 4-6：変数定義

変数	平均	標準偏差	定義
y	9.930	25.977	年間配水量(十億 m^3)
K	772.67	1852.8	有形固定資産額(百万円)
L	0.031	0.103	職員数(百万人)
PW	5.176	18.072	年間受水量(百万 m^3)
WR	8.029	45.596	水利権で規定された取水量(百万 m^3)
$P op$	7.633	19.523	給水人口(百万人)
$P Dens$	0.084	0.159	人口密度(百万人/ km^2)
$Cover$	28.903	80.355	配水池あたりの面積(km^2)
$D Dens$	35.901	34.643	配水密度(千 m^3/km)
Age	51.767	18.472	設立年数
$DC D$	0.586	0.493	一般会計繰入金があるとき 1、その他ならば 0 をとるダミー変数
CRD	0.004	0.063	流動負債が流動資産を上回っているとき 1、その他ならば 0 をとるダミー変数
IRD	0.314	0.464	減価償却費が企業債償還元金を上回っているならば 1、その他ならば 0 をとるダミー変数
X	0.773	1.164	給水人口 1 人あたりの水利権で規定された取水量((千 m^3 /人)
$Price$	1.469	0.516	10 m^3 あたりの水道料金(千円)

出所：佐藤 (2013)

DEA の BCC モデルによる推定結果によると、33 事業体が技術効率的となった。技術効率値の平均は 0.402、標準偏差は 0.186 であった。次に、算出された効率値を用い

て、効率性に影響を与える要因を分析している。推定式は次のとおりである。

$$\hat{\theta}_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_i + \alpha_2 X_i^2 + \alpha_3 P Dens_i + \alpha_4 Cover_i + \alpha_5 D Dens_i + \alpha_6 Age_i \\ + \alpha_7 DCD_i + \alpha_8 CRD_i + \alpha_9 IRD_i + \varepsilon_i$$

$\hat{\theta}_i$ は DEA で算出された効率値である。 X は給水人口 1 人あたりの水利権で規定された取水量である。前述の理由から、給水人口 1 人あたり水利権と技術非効率性は単純な線型関係ではないことが予想されるので、 X の 2 乗項も説明変数に加え、水利権で規定される取水量と技術効率性との間の非線型関係を捉えることにしている。推定結果は表 4-7 の通りである。

表 4-7：効率性に影響を与える要因分析

変数	(1)	(2)	(3)
<i>Const</i>	0.4426*** (0.0018)	0.4696*** (0.0018)	0.4473*** (0.0020)
<i>X</i>	0.1921*** (0.0016)	0.1260*** (0.0015)	0.3087*** (0.0019)
<i>X</i> ²	-0.0766*** (0.0006)	-0.0456*** (0.0005)	-0.1265*** (0.0007)
<i>P Dens</i>	0.0463*** (0.0041)	0.0716*** (0.0036)	0.0351*** (0.0047)
<i>Cover</i>	0.0002*** (0.0000)	0.0002*** (0.0000)	0.0014*** (0.0001)
<i>D Dens</i>	0.0007*** (0.0000)		0.0002*** (0.0000)
<i>Age</i>	-0.0004*** (0.0000)	-0.0007*** (0.0000)	-0.0010*** (0.0000)
<i>DCD</i>	-0.0560*** (0.0011)	-0.0436*** (0.0012)	-0.0488*** (0.0012)
<i>CRD</i>	-0.2433*** (0.0109)	-0.1226*** (0.0118)	
<i>IRD</i>	-0.0143*** (0.0012)	-0.0130*** (0.0012)	-0.0195*** (0.0013)

(注) ***は 1%有意、**は 5%有意、*は 10%有意であることを示している。

() 内は標準誤差である。

出所：佐藤 (2013)

注目すべきは X と X^2 の係数の符号である。 X の係数の符号は正であるが、 X^2 の係数の符号は負である。これは、技術効率値が給水人口 1 人当たりの水利権の単純な線形関数ではなく、凹関数になっていることを意味する。したがって、需要に対して水利権が過剰であれば非効率性が発生し、需要に対して水利権が過少であれば水利権保有量を増やすことで非効率性を解消できる可能性を示している。

4.2 効率性の測定

前節で軽く触れたように、効率性を測定する代表的な方法には、包絡分析法(DEA) と確率的フロンティア分析法(SFA) がある。本節ではまず、DEA 及び SFA の具体的な計量手法について説明する。その上で、先行研究を参考にしながら上水道事業における技術効率性(Technical Efficiency) を測定する。

4.2.1 包絡分析法と確率的フロンティア分析法

前述の通り、効率性を評価する代表的な手法には、包絡分析法(Data Envelopment Analysis)と確率的フロンティア分析法(Stochastic Frontier Analysis)がある。どちらの場合も出発点は同じで、技術効率性を算出するためにはまず、最も効率的に事業経営を行なった場合に達成可能となる投入量と産出量の組み合わせ、すなわち、生産フロンティアの推定を行う。このとき、DEA は誤差項を考慮しない推定を行うのに対し、SFA では誤差項による(生産フロンティアの)変動が確率的に発生することを考慮して推定を行う。DEA の場合、技術非効率性は、推定した生産フロンティアと実際に観察された生産行動との乖離として表されることになる。SFA の場合は、生産フロンティアと実際の生産量の乖離を誤差と非効率性の合成と捉え、これを分離することで効率性の推定を行う。

DEA はノンパラメトリックな手法であり、メリットとしては(1)生産フロンティアの関数形を特定化する必要がないこと、(2)比較的少数のサンプルデータからでも推定が可能であること、(3)生産活動が多入力・多出力のケースでも分析可能であることなどが挙げられる。DEA のデメリットとしては、(1)誤差項を考慮しない推定方法であるため、サンプルデータの観測誤差によっては効率値が変動してしまうこと、(2)統計的な仮説検定ができないことなどが挙げられる。

一方で SFA はパラメトリックな手法であり、メリットとしては(1)誤差の影響を考慮した生産フロンティアの推定ができること、(2)統計的な仮説検定ができることなどが挙げられる。確率的フロンティア分析法のデメリットとしては、(1)推定を行う際に生産フロンティアの形状や効率値が従う確率分布を仮定しなければならないこと、(2)統計的に十分な自由度を確保するために、相応のサンプルデータ数が必要になることなどが挙げられる。

DEA と SFA はどちらも一長一短であり、DEA のデメリットは SFA のメリットとなり、DEA のメリットは SFA のデメリットとなる。それゆえ、どちらか一方のみを用いて効率性を評価するのはやや信頼性に欠けるものと言える。そこで、本論文では

DEA と SFA の両方を用いて水道事業の技術効率性を測定する。両方を比較して同様な結果が得られれば、その結果はより頑健なものであると言える。

4.2.2 包絡分析法の解説

刀根 (1993) を参考にして、包絡分析法(Data Envelopment Analysis)の説明をする。DEA では、分析対象をDMU(Decision Making Unit)という。 n 個の事業体があるとして、それらを $DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$ と番号付ける。DEA は、同種の産出と投入を持つ n 個の事業体に対して、

$$\frac{\text{産出}}{\text{投入}}$$

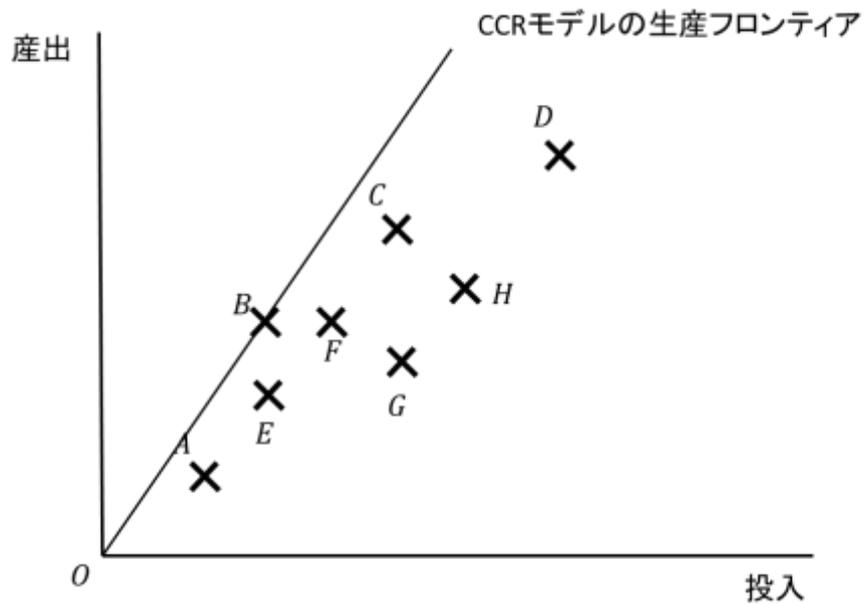
という比率尺度から、事業体の効率性を相対比較する経営分析の手法である。比率尺度の根底には、より少ない投入でより大きな産出を得ている事業体ほどより効率的であるという考え方がある。DEA では、生産効率的な投入と産出の組み合わせを持つ事業体群を選んで生産フロンティアを構成し、それを基準として他の事業体を相対評価するのである。効率値は 0 から 1 の間で算出され、1 に近いほど効率的であることを意味する。

(i)CCR モデルと BCC モデル

DEA には代表的な計測モデルとして、規模に関して収穫一定のモデル (CCR モデル) と規模に関して収穫可変のモデル (BCC モデル) の 2 つがある。

まずは、規模に関して収穫一定のモデル (CCR モデル) の原理を、1 投入・1 出力の例で説明する。図 4-1 のように横軸に投入量、縦軸に産出量を取る。×印は観察された各事業体とする。このとき CCR モデルでは、産出/投入の比率が最も大きい事業体 B を効率的とみなす。規模に関して収穫一定を仮定しているので、投入量の大小に関わらず、常に事業体 B と同じ産出/投入の比率で生産を行える事業体だけが効率的であると考えられる。したがって、原点 O と点 B 結んで生産フロンティアを構成し、この生産フロンティア上の事業体の効率値は 1 となる。一方で、境界も含めた生産フロンティアの内側の領域は生産可能集合と呼ばれる。フロンティア上にない事業体はすべて技術非効率となる。

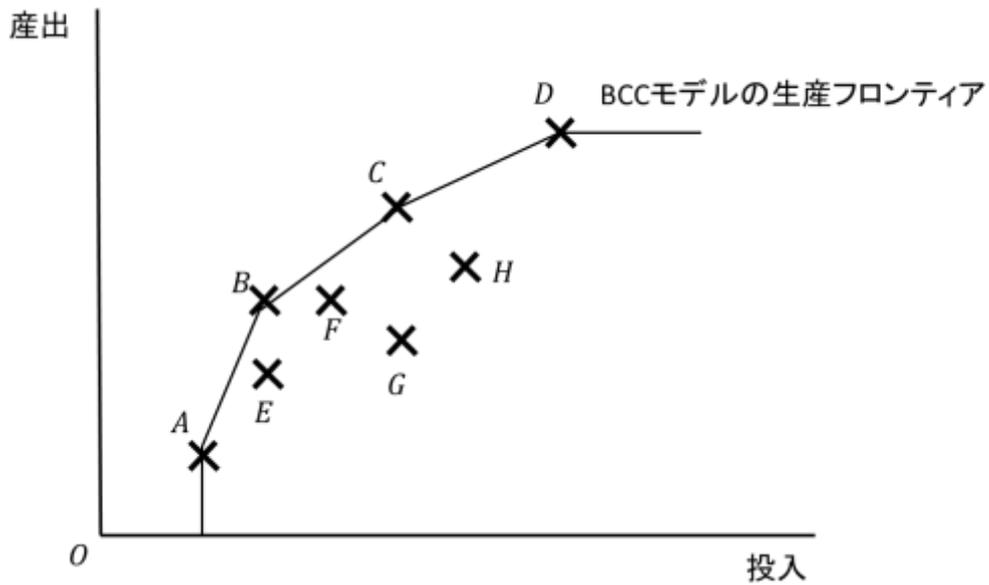
図 4-1 : CCR モデルの生産フロンティア



出所 : 刀根 (1993)

次に BCC モデルについて説明する。BCC モデルでは (投入量の) 規模に応じて生産関数が収穫可変であることを仮定し、図 4-2 のように、一番外側にある事業体 A, B, C, D を効率的とみなす。それゆえ A, B, C, D を結んだ折れ線と A から下ろした垂線、および D から水平右向きにのびる直線で生産フロンティアを構成する。CCR モデルのときと同様に生産フロンティア上の事業体の効率値は 1 となり、フロンティア上にない事業体はすべて技術非効率となる。

図 4-2 : BCC モデルの生産フロンティア



出所：刀根（1993）

(ii) 生産可能集合について

m 投入・ s 出力の場合を考える。DMU $_j$ の入力データを、

$$\mathbf{x}_j = \begin{pmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \vdots \\ x_{mj} \end{pmatrix}$$

とし、出力データを、

$$\mathbf{y}_j = \begin{pmatrix} y_{1j} \\ y_{2j} \\ \vdots \\ y_{sj} \end{pmatrix}$$

とする。各 DMU のデータを並べて行列を作り、入力データ行列 \mathbf{X} と出力データ行列 \mathbf{Y} とする。 \mathbf{X} は $(m \times n)$ 型、 \mathbf{Y} は $(s \times n)$ 型である。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{s1} & \cdots & y_{sn} \end{pmatrix}$$

入力 $\mathbf{x} \in R^m$ と出力 $\mathbf{y} \in R^s$ の対を活動と呼び、 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) とする。生産可能集合を P と表すことにすると、CCR モデルにおける生産可能集合は次の(1)~(4)の仮定を満たす。

- (1) 現在の各 DMU の活動 $(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) は P に属する
- (2) P に属する活動 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) に対して、それを k 倍した活動 $(k\mathbf{x}, k\mathbf{y})$ も P に属する
- (3) P に属する任意の活動 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) に対して、 $\bar{\mathbf{x}} \geq \mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}} \leq \mathbf{y}$ を満たす活動 $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}})$ も P に属する
- (4) P に属する活動 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) の非負結合も P に属する

(1)~(4)の仮定を満たす集合 P を作れば、CCR モデルの生産可能集合は、

$$P = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in R^{m+s} \mid \mathbf{x} \geq X\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{y} \leq Y\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}\} \quad (4.1)$$

と書き表せる。ただし、 $\boldsymbol{\lambda}$ は非負の n 次元列ベクトルである。これに対して、 $\mathbf{e}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{1}$ の仮定を加えたものが BCC モデルの生産可能集合となり、

$$P = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in R^{m+s} \mid \mathbf{x} \geq X\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{y} \leq Y\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \mathbf{e}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{1}\} \quad (4.2)$$

となる。ただし、 \mathbf{e} はすべての要素が 1 の行ベクトルである。

(iii) 効率値の算出方法

n 個の活動それぞれについて比率尺度で効率性を測定していくが、対象になっている活動を代表的に記号 o とし DMU_o と書くことにする。記号 o は $1, 2, \dots, n$ のどれかを指している。入力につける重みを v_i ($i = 1, \dots, m$)、出力につける重みを u_r ($r = 1, \dots, s$) とする。CCR モデルでは、技術効率値 TE を次の分数計画問題を解くことによって求める。

$$\begin{aligned} \max \quad TE &= \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \cdots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \cdots + v_m x_{mo}} \\ \text{subject to} \quad &\frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \cdots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \cdots + v_m x_{mj}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, n) \\ &v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \\ &u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

(4.3)における制約式の意味は、すべての DMU に対する効率を同じ重み v_i, u_r を用いて計算するとしたときに、仮想的入力と出力の比 (=効率値) がすべての活動について 1 を超えないということである。その上で、判定対象とする DMU_o の比率尺度 TE を最大化するように、 v_i, u_r を決める。したがって、最適な TE の値 TE^* は高々1 である。(4.3)の分数計画問題は、次の線形計画問題に変形できる。

$$\begin{aligned}
 & \max \quad TE = u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \cdots + u_s y_{so} \\
 & \text{subject to} \quad v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \cdots + v_m x_{mo} = 1 \\
 & u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \cdots + u_s y_{sj} \leq v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \cdots + v_m x_{mj} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (4.4) \\
 & v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \\
 & u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0
 \end{aligned}$$

線形計画法の双対定理を用いることで、(4.4)はさらに次の線形計画問題に等しい。効率値はこれを計算することで求める。

$$\begin{aligned}
 & \min \quad TE \\
 & \text{subject to} \quad TE x_{io} - (x_{i1} \lambda_1 + \cdots + x_{in} \lambda_n) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \\
 & (y_{j1} \lambda_1 + \cdots + y_{jn} \lambda_n) - y_{jo} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, s) \\
 & \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \geq 0
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ベクトルを用いて表記すると、

$$\begin{aligned}
 & \min \quad TE \\
 & \text{subject to} \quad TE x_o - X \lambda \geq 0, \quad -Y \lambda + y_o \geq 0, \quad \lambda \geq 0
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。BCC モデルでは制約式に $e\lambda = 1$ の仮定を加えて、効率値を、

$$\begin{aligned}
 & \min \quad TE \\
 & \text{subject to} \quad TE x_o - X \lambda \geq 0, \quad -Y \lambda + y_o \geq 0, \quad e\lambda = 1, \quad \lambda \geq 0
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

の解として求める。

4.2.3 確率的フロンティア分析法の解説

確率的フロンティア分析法(Stochastic Frontier Analysis)の手法を蓑谷 (2010) を参考にして説明する。SFA も DEA のときと同様に、まずは最も効率的に事業経営を行なった場合に達成可能となる投入量と産出量の組み合わせ、すなわち、生産フロン

ティアの推定を行う。このとき DEA は誤差項を考慮せずに推定を行うのに対し、SFA では誤差項による（生産フロンティアの）変動が確率的に発生することを考慮して推定を行う。そして、生産フロンティアと実際の生産量の乖離を誤差と非効率性の合成と捉え、これを分離することで効率性の推定を行うのである。

(i) SFA の仮定

まず、 k 個の生産要素を投入して 1 つの財を産出する場合の事業体 i の生産関数を、

$$Q_i = F(x_{i1}, \dots, x_{ik}) \quad (4.8)$$

とする。前述の通り、SFA では誤差項による変動が確率的に発生することを考慮した分析を行うので、事業体 i の技術効率を TE_i 、確率誤差項を v とすれば、実際の産出量 Y_i は、

$$Y_i = F(x_{i1}, \dots, x_{ik}) \exp(v_i) TE_i \quad (4.9)$$

と表すことができる。

$$Y_i = F(x_{i1}, \dots, x_{ik}) \exp(v_i)$$

は確率的生産関数（Stochastic Production Function）と呼ばれる。このとき技術効率は、

$$TE_i = \frac{Y_i}{F(x_{i1}, \dots, x_{ik}) \exp(v_i)} \quad (4.10)$$

と表すことができる。ただし $0 < TE_i \leq 1$ であり、 TE_i が 1 に近いほど技術効率的であることを意味する。また、 TE_i は $0 < TE_i \leq 1$ を満たさなければならないので、

$$TE_i = \exp(-u_i), \quad u_i \geq 0 \quad (4.11)$$

と定式化する。 $u_i = 0$ のとき $TE_i = 1$ 、 $u_i \rightarrow \infty$ のとき $TE_i \rightarrow 0$ であるから、 u_i は事業体 i の技術非効率を表す。生産関数 F にコブ・ダグラス型を仮定すれば、(4.9) より、

$$\ln Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \ln x_{ij} + v_i - u_i \quad (4.12)$$

が得られる。

確率的フロンティア生産関数においては、確率誤差項 v 、非効率 $u (> 0)$ の確率構造

に対してなんらかの仮定をおく必要がある。そこで(4.12)の誤差項を $\varepsilon_i = v_i - u_i$ とおき、 v_i には正規分布、 u_i には半正規分布を仮定する。また、 v_i は互いに独立、 u_i も互いに独立、 v_i と u_i は独立であると仮定する。すなわちすべての i について、

$$\begin{aligned} v_i &\sim NID(0, \sigma_v^2) & -\infty < v_i < \infty \\ u_i &\sim NID(0, \sigma_u^2) & 0 < u_i < \infty \\ & & v_i \text{ と } u_i \text{ は独立} \end{aligned}$$

が成り立つと仮定する。このとき、 v, u の確率密度はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_V(v) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right) \\ f_U(u) &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_u^2}\right) \\ E(u) &= \sigma_u \sqrt{\frac{2}{\pi}}, & \text{Var}(u) &= \left(\frac{\pi-2}{\pi}\right)\sigma_u^2 \end{aligned}$$

また、 v と u は独立であるから、同時確率密度は次のように表すことができる。

$$\varphi(u, v) = f_U(u)f_V(v) = \frac{2}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right\} \quad (4.13)$$

そして $\varepsilon = v - u$ より、 $v = \varepsilon + u$ を代入することで u と ε の同時確率密度は、

$$h(u, \varepsilon) = \varphi(u, \varepsilon + u)|J| = \frac{2}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{(\varepsilon + u)^2}{2\sigma_v^2}\right\} \quad (4.14)$$

となる。ただし、 $|J|$ は uv 平面上における同時確率密度を $u\varepsilon$ 平面上における同時確率密度に変数変換したことに伴うヤコビアンである。この場合、 $|J| = 1$ となる。

次に $h(u, \varepsilon)$ を用いて ε についての確率密度、すなわち、 ε の周辺確率密度 $g(\varepsilon)$ を求める。これは ε を固定して、 u の定義域上で u についての積分を行えばいい。したがって、

$$g(\varepsilon) = \int_0^{\infty} h(u, \varepsilon) du \quad (4.15)$$

となる。この積分を実行するために、 $h(u, \varepsilon)$ の \exp の { } 内を次のように変形する。

$$\begin{aligned}
-\frac{u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{(\varepsilon + u)^2}{2\sigma_v^2} &= -\frac{u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{\varepsilon^2 + 2u\varepsilon + u^2}{2\sigma_v^2} \\
&= -\frac{(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)u^2 + 2\sigma_u^2\varepsilon u + \sigma_u^2\varepsilon^2}{2\sigma_u^2\sigma_v^2}
\end{aligned}$$

ここで、

$$\lambda = \frac{\sigma_u}{\sigma_v}, \quad \sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$$

とおくと、

$$\sigma^2 = (1 + \lambda^2)\sigma_v^2$$

となる。ゆえに、

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma^2}{1 + \lambda^2}, \quad \sigma_u^2 = \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2}\sigma^2, \quad \sigma_u^2\sigma_v^2 = \frac{\lambda^2\sigma^4}{(1 + \lambda^2)^2}$$

がそれぞれ導かれる。したがって、 $h(u, \varepsilon)$ の \exp の{ }内は、

$$\begin{aligned}
-\frac{\sigma^2 u^2 + 2\frac{\lambda^2\sigma^2\varepsilon}{1 + \lambda^2}u}{2\frac{\lambda^2\sigma^2}{1 + \lambda^2} \cdot \frac{\sigma^2}{1 + \lambda^2}} - \frac{\varepsilon^2}{2\frac{\sigma^2}{1 + \lambda^2}} &= -\frac{u^2 + 2\frac{\lambda^2\sigma^2\varepsilon}{1 + \lambda^2}u}{2\frac{\lambda^2\sigma^2}{1 + \lambda^2} \cdot \frac{\sigma^2}{1 + \lambda^2}} - \frac{(1 + \lambda^2)\varepsilon^2}{2\sigma^2} \\
&= -\frac{\left(u + \frac{\lambda^2\varepsilon}{1 + \lambda^2}\right)^2 - \frac{\lambda^4\varepsilon^2}{(1 + \lambda^2)^2}}{2\frac{\lambda^2}{(1 + \lambda^2)^2}\sigma^2} - \frac{(1 + \lambda^2)\varepsilon^2}{2\sigma^2} \\
&= -\frac{\left(u + \frac{\lambda^2\varepsilon}{1 + \lambda^2}\right)^2}{2\left(\frac{\lambda\varepsilon}{1 + \lambda^2}\right)^2} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}
\end{aligned}$$

となる。ここで、

$$w = \frac{u + \frac{\lambda^2\varepsilon}{1 + \lambda^2}}{\frac{\lambda\varepsilon}{1 + \lambda^2}}$$

とおくと、 $u = 0$ のとき $w = \lambda\varepsilon/\sigma$ 、 $u \rightarrow \infty$ のとき $w \rightarrow \infty$ となる。これを用いると、(4.15)は、

$$g(\varepsilon) = \int_0^\infty h(u, \varepsilon) du$$

$$= \frac{2}{\sigma} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \int_{\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) |J| dw \quad (4.16)$$

と書き換えられる。ただし、 $|J|$ は $u\varepsilon$ 平面上における同時確率密度を $w\varepsilon$ 平面上における同時確率密度に変数変換したことに伴うヤコビアンである。この場合、 $|J| = \left|\frac{\partial u}{\partial w}\right| = \frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}$ である。さらに、

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), \quad \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(z) dz$$

を用いて(4.16)を変形すると、

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\sigma} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \int_{\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) |J| dw \\ &= \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \left\{ 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) dw \right\} \\ &= \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}\right) \right\} \\ &= \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \Phi\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

となる。したがって ε の確率密度は次式で与えられる。

$$g(\varepsilon) = \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \Phi\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}\right) \quad (4.17)$$

(4.17)の $g(\varepsilon)$ は非対称正規分布(Skew Normal Distribution)の確率密度

$$f(x) = 2\varphi(x)\Phi(\gamma x)$$

$$-\infty < x < \infty, \quad -\infty < \gamma < \infty$$

において、 $x = \frac{\varepsilon}{\sigma}$, $\gamma = -\lambda(\gamma < 0)$ とおいた場合に一致する。非対称正規分布に従う確率変数 X のモーメント母関数は、

$$M_X(t) = 2 \exp\left(\frac{t}{2}\right) \Phi(\delta t)$$

$$\delta = \frac{\gamma}{\sqrt{1 + \gamma^2}}$$

によって与えられるから、 $\varepsilon = \sigma x$ のモーメント母関数は、

$$M_\varepsilon(t) = 2 \exp\left(\frac{\sigma^2 t^2}{2}\right) \Phi\left(\frac{-\lambda \sigma t}{\sqrt{1 + \gamma^2}}\right)$$

となる。これを用いると、

$$E(\varepsilon) = M'_\varepsilon(0) = -\sigma_u \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (4.18)$$

$$\text{Var}(\varepsilon) = M''_\varepsilon(0) - M'_\varepsilon(0)^2 = \left(\frac{\pi - 2}{\pi}\right) \sigma_u^2 + \sigma_v^2 \quad (4.19)$$

と計算できる。誤差項 ε は非対称正規分布に従う確率変数であり、 $\sigma_u \neq 0$ の場合には $E(\varepsilon) = -\sigma_u \sqrt{\frac{2}{\pi}} \neq 0$ であるから、ガウス＝マルコフ定理の仮定は満たしていない。生産フロンティアは、最小 2 乗法ではなく、 ε の確率密度 $g(\varepsilon)$ を用いて最尤法で推定する。

(ii) 効率値の算出方法

ε_i から、 ε_i に含まれている u_i に関する情報は、 $E(u_i | \varepsilon_i)$ によって得られる。この推定値を \hat{u}_i とすれば、 $TE_i = \exp(-\hat{u}_i)$ によって TE_i を推定することができる。そこでまず、 ε が与えられたときの u の条件付き分布 $f(u | \varepsilon)$ を求める。 $f(u | \varepsilon)$ は、

$$f(u | \varepsilon) = \frac{h(u, \varepsilon)}{g(\varepsilon)}$$

によって計算することができる。このとき、

$$h(u, \varepsilon) = \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)} \exp\left\{-\frac{\left(u + \frac{\lambda^2\varepsilon}{1+\lambda^2}\right)^2}{2\left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)^2}\right\}$$

$$g(\varepsilon) = \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \Phi\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}\right)$$

であるから、

$$f(u|\varepsilon) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)} \exp\left\{-\frac{\left(u + \frac{\lambda^2\varepsilon}{1+\lambda^2}\right)^2}{2\left(\frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}\right)^2}\right\}}{\Phi\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}\right)} \quad (4.20)$$

が得られる。

$$\mu^* = -\frac{\lambda^2\varepsilon}{1+\lambda^2}, \quad \sigma^* = \frac{\lambda\sigma}{1+\lambda^2}$$

とおくと、

$$\frac{\mu^*}{\sigma^*} = -\frac{\lambda\varepsilon}{\sigma}$$

であるから、

$$f(u|\varepsilon) = \frac{1}{\sigma^*} \varphi\left(\frac{u - \mu^*}{\sigma^*}\right) \left[\Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{0 - \mu^*}{\sigma^*}\right) \right]^{-1} \quad (4.21)$$

と表すことができる。この確率密度は、定義域が $A \leq x \leq B$ で切断された切断正規分布の確率密度

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \left[\Phi\left(\frac{B - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{A - \mu}{\sigma}\right) \right]^{-1}$$

において $A = 0, B \rightarrow \infty$ の場合 (= 半正規分布) に等しい。したがって、

$$E(u|\varepsilon) = \mu^* + \frac{\varphi(-\frac{\mu^*}{\sigma^*})}{1 - \Phi(-\frac{\mu^*}{\sigma^*})} \sigma^* \quad (4.22)$$

が得られる。添字 i を付ければ、

$$E(u_i|\varepsilon_i) = \mu_i^* + \frac{\varphi(-\frac{\mu_i^*}{\sigma^*})}{1 - \Phi(-\frac{\mu_i^*}{\sigma^*})} \sigma^* = -\frac{\lambda^2 \varepsilon_i}{1 + \lambda^2} + \frac{\varphi(\frac{\lambda \varepsilon_i}{\sigma})}{1 - \Phi(\frac{\lambda \varepsilon_i}{\sigma})} \cdot \frac{\lambda \sigma}{1 + \lambda^2} \quad (4.23)$$

となる。(4.23)から得られる値を \hat{u}_i とすれば、 $TE_i = \exp(-\hat{u}_i)$ によって TE_i を推定することができる。

4.2.4 実証結果と考察

原田（2004）と佐藤（2013）を参考にして、DEA 及び SFA を用いて上水道事業の技術効率性を推定する。サンプルデータは、地方公営企業年鑑（平成 25 年度版）掲載の水道事業のうち用水供給事業と簡易水道事業を除いた末端給水事業から、不完備データを除く 1250 事業である。分析に用いた変数は表 4-8 の通りである。

表 4-8 : 変数定義

変数	平均	標準偏差	定義
<i>y</i>	10628.64	48859.08	年間総有収水量(千 m^3)
<i>K</i>	16800000	74600000	有形固定資産額(千円)
<i>L</i>	32.9584	138.9617	職員数(人)
<i>OI</i>	577131.1	5490507	その他投入財(千円)
<i>WRPC</i>	0.0810909	0.1188728	給水人口 1 人あたりの水利権で規定された取水量(千 m^3)
<i>WPD</i>	0.0097525	0.0059861	水道管密度(千 m /人)
<i>Pop</i>	96166.52	433648.7	給水人口(人)
<i>WI</i>	12283.65	53720.04	(受水を含む) 取水量(千 m^3)
<i>WS</i>	11798.92	51395.52	配水量(千 m^3)
<i>WW</i>	484.736	2598.56	浪費水量(千 m^3)
<i>Age</i>	59.2824	19.29654	設立年数
<i>WWCR</i>	0.1572037	0.1902244	受水費が総費用に占める割合
<i>WWCCR</i>	0.0919824	0.1142276	受水にかかる資本費用が総費用に占める割合
<i>MFOR</i>	0.7221944	0.1384289	最大稼働率
<i>SR</i>	0.0478074	0.0930918	補助率
<i>CR</i>	40.6116	348.4889	流動比率
<i>IR</i>	0.6537896	0.3782489	企業債償還額対減価償却額比率
<i>Price</i>	179.5456	48.23094	有収水量 $1m^3$ あたりの供給単価(円)

DEA 及び SFA を用いて効率値を算出する際、投入要素には資本 *K*、労働 *L*、その他投入財 *OI* の 3 つを選定した。産出には年間総有収水量 *y* を用いている。労働は職員数（単位：人）を用いており、これは損益勘定所属職員数と資本勘定所属職員数の合計の数値である。資本は有形固定資産額（単位：千円）を用いている。その他投入財については動力費、光熱水費、通信運搬費、修繕費、材料費、薬品費、路面復旧費、委託費、その他の和（単位：千円）である。

(i) DEA による効率値の推定結果

DEA による効率値の推定結果は以下の通りである。規模に関して収穫一定を仮定する

CCR モデルよりも、規模に関して収穫可変を仮定する BCC モデルのほうが仮定が緩いので、効率値が高く算出される傾向にある。効率値が 1.0 となった事業体は、CCR モデルでは 9 個、BCC モデルでは 50 個である。

表 4-9 : DEA による技術効率値

	CCR モデル	BCC モデル
平均	0.42680	0.51290
最大値	1.0000	1.0000
最小値	0.05051	0.07627

図 4-3 : CCR モデルの技術効率値 (ヒストグラム)

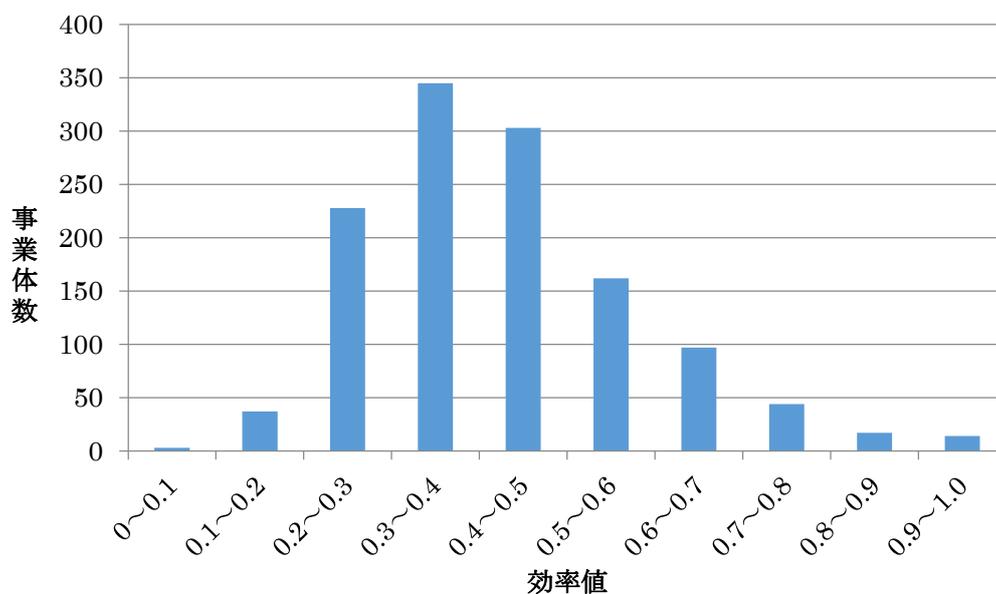
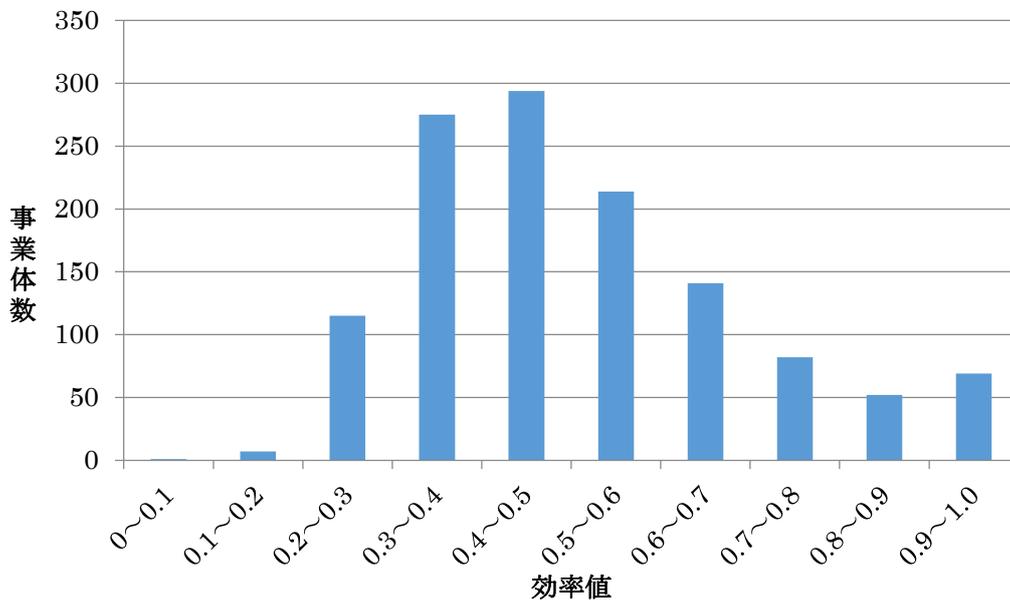


表 4-4 : BCC モデルの技術効率値 (ヒストグラム)



(i) SFA による効率値の推定結果

まずは、SFA による生産フロンティアの推定結果を表 4-10 に示した。なお、比較のために OLS 推定値も示す。 σ^2 と λ は第 4 章 2 節 3 項で定義したとおり、 $\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$ 、 $\lambda = \frac{\sigma_u}{\sigma_v}$ を表している。OLS 推定値に関しては BP test の結果、不均一分散が生じていると判断したため White の一致標準誤差を用いて標準誤差を修正した。SFA による ML 推定値に関しては LR test により帰無仮説 $H_0 : \sigma_u^2 = 0$ の検定を行った。 σ_u^2 は技術非効率 u_i の分散である。 $\sigma_u^2 = 0$ であれば技術非効率 u_i が存在しないため、SFA によらず OLS で一致推定量が得られる。LR test の結果、帰無仮説が棄却されたので、非効率性が存在することが示された。

表 4-10 : SFA による生産フロンティアの推定結果

	OLS 推定値		ML 推定値	
	係数	標準誤差	ML 推定値	標準誤差
定数項	-1.925715***	0.2883684	-1.714892***	0.2762392
<i>lnK</i>	0.2336348***	0.0295927	0.2567959***	0.0251681
<i>lnL</i>	0.3326849***	0.0247749	0.3205795***	0.0227779
<i>lnOI</i>	0.4700867***	0.0346533	0.4516309***	0.0282334
σ^2			0.2406506	0.0201976
λ			1.479951	0.0469376
BP test	chi2(3) = 36.93 Prob > chi2 = 0.0000			
LR test			chibar2(01) = 22.90 Prob>=chibar2 = 0.000	

(注) ***は 1%有意、**は 5%有意、*は 10%有意であることを示している。

表 4-10 の推定結果より、SFA による生産フロンティアは、

$$\ln y = -1.714892 + 0.2567959 \ln K + 0.3205795 \ln L + 0.4516309 \ln OI$$

となる。これはもともとコブ・ダグラス型であり、

$$y = \exp(-1.714892) \cdot K^{0.2567959} \cdot L^{0.3205795} \cdot OI^{0.4516309}$$

と変形できる。*K*, *L*, *OI*の指数に注目してみると、

$$0.2567959 + 0.3205795 + 0.4516309 = 1.0290063$$

であり、この値はほぼ 1 である。このとき、 $0.2567959 + 0.3205795 + 0.4516309 \sim 1$ とすると、任意の $t > 0$, 任意の $(K, L, OI) \neq (0, 0, 0)$ について、

$$\begin{aligned} & \exp(-1.714892) \cdot (tK)^{0.2567959} \cdot (tL)^{0.3205795} \cdot (tOI)^{0.4516309} \\ &= \exp(-1.714892) \cdot t^{0.2567959+0.3205795+0.4516309} \cdot K^{0.2567959} \cdot L^{0.3205795} \cdot OI^{0.4516309} \\ &= \exp(-1.714892) \cdot t \cdot K^{0.2567959} \cdot L^{0.3205795} \cdot OI^{0.4516309} = ty \end{aligned}$$

が成立する。したがって、(生産関数にコブ・ダグラス型を仮定した場合)、上水道事業

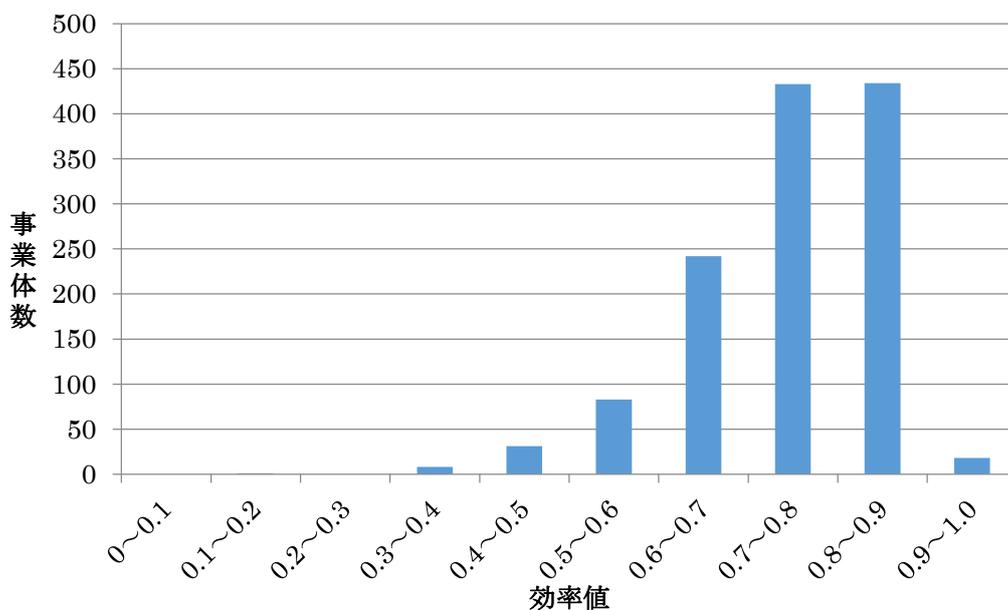
の生産フロンティアは規模に関して収穫一定であるとみなすことができる。この結果は上水道事業が、一般的に考えられているような規模の経済を持たない可能性を示している。これは第 1 章 1 節で軽く紹介した高田・茂野 (1998) や Mizutani and Urakami (2001) などの研究結果とも整合性が取れている。詳述はしないが、彼らの研究によると、日本の上水道事業では、費用構造に関して規模の経済の影響はほとんど見受けられず、密度の経済の影響が強いという実証結果が得られている。密度の経済とは、たとえば給水人口が同じ地域同士で比較した場合でも、人口密度の低い地域は広範囲に水道管を敷設しなければならず、水道管の敷設費用、維持費用が費用を増大させてしまうのに対し、人口密度の高い地域では費用を安く抑えられることをいう。

次に SFA による技術効率値の推定結果を以下に示した。

表 4-11 : SFA による技術効率値

平均	0.744038
標準偏差	0.1083519
最大値	0.9260626
最小値	0.1838056

図 4-5 : SFA の技術効率値 (ヒストグラム)



(iii) DEA と SFA の比較

先程、SFA を用いてコブ-ダグラス型の生産フロンティアを推定した際、生産関数が規模に関して収穫一定であるという結論が得られた。そのため SFA に基づく効率値は、規模に関して収穫可変を課した BCC モデルに基づく効率値よりも、規模に関して収穫一定を課した CCR モデルに基づく効率値により近いものであろうと予想できる。そこで参考までに、BCC モデル、CCR モデル、SFA によってそれぞれ算出された効率値について、pearson の積率相関係数及び spearman の順位相関係数を用いて相関係数を計算した。pearson の積率相関係数は効率値の値に関する相関関係を示すものであるが、spearman の順位相関係数は効率値の順位に関する相関関係を示すものである。表 4-12 の結果を見ると、予想通り、(pearson と spearman のどちらの相関係数で比較した場合でも)、BCC モデルと SFA による相関係数よりも CCR モデルと SFA による相関係数のほうが高い値を示している。以上の結果を踏まえると、今回の分析においては技術効率性を評価するにあたり、BCC モデルは考慮せず、CCR モデルと SFA がより適していると言える。

表 4-12：相関係数の比較

CCR モデルと SFA		BCC モデルと SFA	
pearson	spearman	pearson	spearman
0.8755402	0.9702257	0.6680119	0.7812415

4.3 水道事業の効率性に影響を与える要因の分析

本節では、前節で得られた技術効率値を被説明変数として用いて、効率性に影響を与える要因を分析する。説明変数についても、前節の表 4-8 で定義した変数を引き続き使用する。

4.3.1 モデルの設定

推定するモデルを次のように設定する。

$$TE_i = \beta_0 + (\beta_1 + \beta_2 D)WRPC_i + \beta_3 WPD_i + \beta_4 WWCR_i + \beta_5 WWCCR_i + \beta_6 Age_i + \beta_7 MFOR_i + \beta_8 SR_i + \beta_9 CR_i + \beta_{10} IR_i$$

TE は前節で得られた技術効率値である。 D は $WRPC$ の係数ダミーである。 $WRPC$ は給水人口 1 人あたりの水利権で規定された取水量(km^3)である。係数ダミーについては、需要を満たすだけの十分な水利権を保有し受水に頼らない事業体であれば $D = 1$,

反対に需要を満たすだけの十分な水利権を保有せず一部あるいは全てを受水に頼る事業体であれば $D = 0$ と設定する。 $D = 1$ のグループは、取水量をできるだけ節約するような効率的な生産を行わないだろうと考えられ、*WRPC*が大きく水利権を過剰に保有しているほど非効率になると考えられる。ゆえに、*WRPC*の係数($\beta_1 + \beta_2 D$)は負になると予想される。 $D = 0$ のグループは需要に対して水利権が不足しているため、受水をするか水利権を増やさなければならない⁶。受水をする場合には水道用水供給事業体まで水道管を敷設しなければならないが、水利権を増やす(=*WRPC*を増やす)場合にも、取水・浄水設備を設けなければならない。そのため、 $D = 0$ のグループについては、*WRPC*を増やすことの純粋効果 β_1 は正になるか負になるか予想できない。なお、 $D = 1$ のグループに該当する事業体は369個、 $D = 0$ に該当する事業体は $1250 - 369 = 881$ 個である。

その他の変数は以下のようになる。

・ *WPD*

*WPD*は水道管密度(千m/人)である。これは導送配水管延長を現在給水人口で割ったものである。たとえ給水人口が同じ地域同士で比較した場合でも、人口密度の高い地域に比べて人口密度の低い地域は広範囲に水道管を敷設しなければならず、水道管の敷設費用、維持費用が非効率性を招く。すなわち、*WPD*が大きい(=給水人口に比べて水道管の長さが長い)ほど、密度の不経済が発生していると考えられるので、*WPD*の符号は負と予想される。

・ *WWCR*

*WWCR*は受水費が総費用に占める割合である。これは受水依存度を表していると解釈できる。受水をする場合には水道用水供給事業体まで水道管を敷設しなければならないが、一方で水利権を増やして(=*WRPC*を増やして)取水を行う場合にも、取水・浄水設備を設けなければならない。受水をするか取水をするか、どちらが効率的であるかわからないので、*WWCR*の純効果が正になるか負になるか予想できない。なお、受水と取水の両方ともが効率性に正の影響を与える場合も考えられる。

・ *WWCCR*

⁶ ただし、水利権を保有しないものの、受水に頼らない事業体もある。これは(水利権の対象ではない)河川法上の河川ではない普通河川や溜池、地下水から取水を行っているものと思われる。当該事業体は238個存在するが、これらの事業体については、需要を満たすだけの十分な水利権を保有しているわけではないので、 $D = 0$ のグループに含まれる。

WWCCR は受水にかかる資本費用が総費用に占める割合である。前述の通り、受水 *WWCR* の純効果は正になるか負になるか予想できない。しかし、受水にかかる資本費用、すなわち、受水のために水道用水供給事業体まで敷設する水道管の資本費用は効率性に負の影響を与えるはずである。ゆえに、*WWCCR* の符号は負と予想される。

・ *Age*

Age は設立年数である。上水道事業では総括原価方式による価格規制が動態的非効率を誘発している可能性があり、技術革新のインセンティブが弱い。そのため設立が古い事業体ほど非効率的な生産方法を用いて資源を浪費し、技術効率性を損ねていると考えられる。ゆえに、*Age* の符号は負と予想される。

・ *MFOR*

MFOR は最大稼働率である。最大稼働率とは 1 日最大配水量/1 日配水能力であり、最大稼働率が低い場合は一部の施設が遊休状況にあり、投資が過大であることを意味する。利用率が上昇すると非効率性は減少すると思われるので、*MFOR* の符号は正と予想される。ただし、最大稼働率が 100%に近い場合には水の安定供給に問題があるので、最大稼働率が高ければ良いというわけではない。

・ *SR*

SR は補助率である。これは、地方自治体の他会計負担金、他会計補助金、他会計繰入金及び国庫補助金、都道府県補助金の合計額を総費用で割ったものである。補助率の高い事業体ほど資金の投入による救済が期待されるため、ソフトバジェット問題が生じて効率的な経営がなされない可能性がある。ゆえに、*SR* の符号は負と予想される。

・ *CR*

CR は流動比率である。これは流動負債に対する流動資産の割合であり、短期債務に対する支払能力を表している。流動比率は 1 以上であることが必要であり、1 を下回っていれば不良債務が発生していることになる。流動比率が大きい事業体ほど健全な経営状態にあり、非効率性が少ないと考えられる。ゆえに、*CR* の符号は正と予想される。

・ *IR*

IR は企業債償還額対減価償却額比率である。これは、投下資本の回収と再投資とのバランスを見る指標である。この比率が 1 を超えると再投資を行うにあたって企業債等の外部資金に頼らざるを得なくなり、投資の健全性が損なわれることになる。ゆえに、*IR* の符号は負と予想される。

4.3.2 実証結果と考察

推定結果は表 4-13 の通りである。推定にあたって、DEA の CCR モデル及び BCC モデルによって算出された効率値については、効率的な事業体の効率値が 1 に張り付いてしまうことを考慮して、上限が 1 で打ち切られた Tobit モデルによる ML 推定を採用している。SFA によって算出された効率値については、通常の OLS 推定を行った。また、OLS 推定の結果に対して BP test を行ったところ、不均一分散が見受けられたので頑健な標準誤差を用いて修正を行った。

表 4-13：効率性に影響を与える要因分析

	CCR モデル		BCC モデル		SFA	
	係数	z 値	係数	z 値	係数	t 値
定数項	0.5209***	18.588	0.5383***	13.688	0.8130053***	30.43
<i>WRPC</i>	-0.3147***	-4.896	-0.3065***	-3.391	-0.2061936***	-4.63
<i>D・WRPC</i>	0.2030***	3.023	0.2313**	2.448	0.0769286*	1.65
<i>WPD</i>	-5.804***	-7.736	-5.947***	-5.712	-4.927362***	-4.25
<i>WWCR</i>	0.4653***	4.948	0.3851***	2.882	0.2534595***	4.75
<i>WWCCR</i>	-0.3497**	-2.246	-0.2630	-1.189	-0.1841834**	-2.06
<i>Age</i>	-0.0004179**	-2.010	0.0003265	1.116	-0.0002273	-1.42
<i>MFOR</i>	0.002556	0.094	0.02964	0.777	0.0174707	0.81
<i>SR</i>	-0.3073***	-6.837	-0.1087*	-1.718	-0.3470255***	-8.16
<i>CR</i>	0.00001060	0.998	0.00001789	1.179	0.00000842**	2.38
<i>IR</i>	-0.04183***	-4.099	-0.04014***	-2.782	-0.0221011***	-3.09
Adj R ²					0.4319	

(注) ***は 1%有意、**は 5%有意、*は 10%有意であることを示している。

表 4-13 の推定結果について、第 4 章の 2 節 4 項で述べた理由から、CCR モデルと SFA の 2 つに注目して考察を行う。この 2 つについては、一部に 5%有意ではない変数もあるとはいえ、前項で係数の符号を予想していた変数は、すべて予想通りの符号となった。注目すべき変数は *WRPC*、*D・WRPC*、*WPD*、*WWCR*、*WWCCR* なので、これらについて考察を行うこととする。なお、予め注意しておくが、説明変数の平均値が 1 となるように基準化しているわけではないので、異なる変数同士で係数の大きさを比較することに意味はない。各変数の正確な定義、平均値、標準偏差については第

4章2節4項の表4-8を参照して頂きたい。

まずは、 $WRPC$ と $D \cdot WRPC$ について見る。 $D = 1$ のグループでは、 $WRPC$ が大きく水利権を過剰に保有しているほど非効率になると考えられるため、 $WRPC$ の係数 $(\beta_1 + \beta_2 D)$ は負になると予想していた。結果として β_2 は正になったものの、 β_1 の符号が負であり、かつ $(\beta_1 + \beta_2 D)$ 全体の符号が負となったので、予想通りの結果が得られた。 $D = 0$ のグループについては、受水をする場合には水道用水供給事業体まで水道管を敷設しなければならないが、水利権を増やす(= $WRPC$ を増やす)場合にも、取水・浄水設備を設けなければならない。そのため、 $WRPC$ を増やすことの純粋効果 β_1 は正になるか負になるか予想できなかった。結果として β_1 は負になったので、水利権を増やして自ら取水・浄水を行うほど非効率になることがわかった。

WPD について見る前に、 $WWCR$, $WWCCR$ について考察する。先程、 $D = 1$ のグループでも $D = 0$ のグループでも、 $WRPC$ を増やすことの純粋効果は負であり、(グループごとに理由は異なるが)、水利権を増やして自ら取水・浄水を行うほど非効率になることがわかった。一方で $WWCR$ の符号は正になった。これはつまり、自ら取水・浄水を行うほど非効率になり、受水に頼る割合が多くなるほど効率的になることを意味する。ただし、受水自体は効率的に働くものの、 $WWCCR$ の符号が負であるから、受水にかかる資本費用は予想通り効率性に負の影響をもたらしていることがわかる。

最後に WPD について見る。結果は予想通り負となり、値が大きい(=給水人口に比べて水道管の長さが長い)ほど、密度の不経済が発生し、効率性に負の影響をもたらしていることがわかる。

第5章 結論

本論文では、DEA と SFA という 2 つの計量的手法を用いて効率性の値を算出した。また、最後に、算出された効率値を被説明変数として用いて効率性に影響を与える要因の分析を行った。結果は予想通りとなり、第 2 章や第 3 章で説明してきた水利権過剰保有のインセンティブが効率性に負の影響を与えていることがわかった。次に取水と受水の関係について述べる。この 2 つについては当初、取水・浄水設備を設けて取水を行うことと、水道用水供給事業体まで水道管を敷設して受水することのどちらが効率的に働くか、予想できなかった。しかし推定結果から、自ら取水・浄水を行うよりも、受水に頼る割合が多いほど効率的になることがわかった。ただし、受水自体の効果は効率的に働くものの、受水にかかる資本費用（＝水道用水供給事業体まで敷設しなければならない水道管の費用）は効率性に負の影響を与えていることがわかった。

また、分析を進める中で、(コブ-ダグラス型の生産関数を仮定した場合)、上水道事業の生産フロンティアは規模に関して収穫一定であることがわかった。この結果は、上水道事業が一般的に考えられているような、規模の経済を持たない可能性を示している。これは高田・茂野 (1998) や Mizutani and Urakami (2001) などの研究結果とも整合性が取れている。本論文では詳しく取り上げることはしなかったが、彼らの研究によると、日本の上水道事業では、費用構造に関して規模の経済の影響はほとんど見受けられず、密度の経済の影響が強いという実証結果が得られている。密度の経済に関しては、本論文でも水道管密度(千 m /人)を説明変数として用いて効率性に影響を与える要因分析を行った。その結果、水道管密度の値が大きい（＝給水人口に比べて水道管の長さが長い）ほど、効率性に負の影響を与えており、密度の経済の存在が確かめられた。

しかし、課題も残されている。本論文では生産関数にコブ-ダグラス型を仮定した際の推定結果を持って、上水道事業の生産フロンティアが規模に関して収穫一定であることを導いている。これは少し仮定が強く、十分な検証が必要であると思われる。一方、高田・茂野 (1998) や Mizutani and Urakami (2001) では、より一般的なトランスログ型の費用関数を仮定して規模の経済及び密度の経済を推定しているので、より信頼性が高いものと言える。効率値の測定とは少し脱線するものの、本論文でもトランスログ型の費用関数を推定することで、結論を補強するべきであったと思われる。

参考文献

- 神取道宏 (2014), 「ミクロ経済学の力」 日本評論社.
- 佐藤英司 (2013), 「公益事業の広域化規制に関する定量的分析—都市ガス供給区域規制、上水道水利権制限、下水道事業規模に起因する非効率性—」 一橋大学院経済学研究科.
- 社団法人日本水道協会編, (2015) 「平成 27 年度版水道料金算定要領」, 社団法人日本水道協会.
- 高田しのぶ・茂野隆一 (1998), 「水道事業における規模の経済性と密度の経済性」『公益事業研究』1998 年第 50 巻第 1 号, pp37-44.
- 地方公営企業経営研究会, (2014) 『平成 25 年度版地方公営企業年鑑 (総括・水道・工業用水道・交通・電気・ガス)』 地方財政協会.
- 刀根薫 (1993), 「経営効率性の測定と改善-包絡分析法 DEA による-」 日科技連出版社
- 中山徳良 (2002), 「水道事業の経済効率性の計測」, 『日本経済研究』, 第 45 巻, pp. 23-40.
- 長谷部俊治 (2005), 「水利権とダム (1) -水利用のルール-」, 『月刊ダム日本』 日本ダム協会.
- 長谷部俊治 (2006), 「水利権とダム (4) -豊水の利用と渇水調整-」, 『月刊ダム日本』 日本ダム協会.
- 原田禎夫, (2004) 「水道事業の効率性分析」『経済論叢』第 55 巻 4 号, pp.101-133.
- 蓑谷千風彦 (2010), 「応用計量経済学ハンドブック」 朝倉書店
- 宮良いずみ・福重元嗣 (2002), 「公営バス事業の効率性評価」『会計検査研究』Vol.26, pp.25-43
- H. Stuart Burness and James P. Quirk (1979) “Appropriative Water Rights and the Efficient Allocation of Resources,” *American Economic Review*, Vol.69, No.1, pp.25-37.
- Mizutani, F., and T. Urakami, (2001) “Identifying network density and scale economies for Japanese water supply organizations,” *Paper in Regional Science*, Vol.80, pp.211-230
- 国土交通省ホームページ <http://www.mlit.go.jp/>

あとがき

あとがきの1文字目を書いたのは、2016年1月15日8時17分である。かなり追い詰められていたため、まだ寝ていない。そろそろ文章が乱れそうだ。そしてこれから学校に提出しに行かなければならないので大変だ。卒論は3部印刷して、2部（印刷用）はそれぞれ別の封筒に入れて吉野君にわたし、石橋先生に提出するもう1部はクリップで留めていかなければならない。しかしなにはともあれ、ついにこのページまでたどり着けたことに深い感動を覚えている。天辻さんは中間提出が終わってすぐにあとがきを書いたようであるが、それは異端児である。例えるなら、ヘリコプターで登頂して自然の美しさを語るようなものである。山がかawaiiそうだ。ところで山といえば、私はよく尾上くんに「どうして山に登るの？ どうせ下りなきゃいけないよ？」と尋ねることがある。そう、山は登ったら下りなければならない。それはまるで、穴を掘って埋める作業の繰り返しに等しい。しかし卒論は山ではない。一度書いたら消す必要はないのである。実に素晴らしいことである。

さて、冗談はさておき、こうして最後まで論文を書き上げることができたのは、16期の同期や17期の後輩、14期の梶波さん、そして石橋先生のおかげである。16期の同期とは切磋琢磨する一方で、困っているときにはいつも、勉強面でも精神的な面でも助けられた。17期の後輩には私の酷いプレゼンに対して真剣かつ的確にコメントをしてもらい、論文の質を高めることができた。14期の梶波さんには、DEAのやり方を教えていただいた。STATAとRの両方を使いながら作業を進めるのは大変だったが、梶波さんなくしてDEAはできなかった。石橋先生には2年間ネタ扱いにしかされなかったが、いつも私のことを気にかけてくださった。10月に卒論がすべて白紙になるという愉快なことが起こり、圧倒的に遅れを取っていたが、それでも見放さずに最後まで指導していただいたことに心からお礼を申し上げたい。そして最後に、もう一度、私に関わってくれたすべてのみなさんに対してお礼を申し上げたい。本当にありがとうございました。