

遊休設備の存在する場合の生産関数の推計： 日本の石油火力発電のケース

鳥 居 昭 夫

1. 序

この報告では、外生的に与えられた設備稼働率（以下CUと略す）が十分でなく設備の一部が遊休している場合の生産関数の推計方法について論じる。それぞれのプラントが、稼働するしないを個別に決定できる場合には、それらのプラントはそれぞれ異なる需要条件ならびに技術的制約の下で効率が最大となるように行動することができる。この最大化行動によって、投入産出の関係は短期生産関数ないしは費用関数として表現できるのである。しかしながら、それぞれのプラントが大きな生産・供給ネットワークの一つの構成要素として操業している場合には、各プラントは独立に行動できるわけではなく、ネットワーク全体の効率性を高めることを目的として具体的な操業内容が決定されているだろう。そのような場合には、プラント個々の効率性の達成とネットワークの効率性のために要求される操業内容とが食い違ってしまう可能性がある。すなわち、プラントレベルの個別最適化が行われているとは限らないので、投入と産出との関係は不安定なものとなることが予想される。たとえば、ネットワークの効率的な操業のために、あるプラントが突然のシャットダウンや立ち上げを要求されることがあるだろうし、非常に非効率な低レベルでの操業を強いられることもあるだろう。このような不安定性が予想されるため、プラントレベルでの生産関数・費用関数の推計にあたっては、通常計測のために仮定される滑らかな関数型を仮定することができない。

しかしながら、プラントレベルにおいては生産活動における投入産出関係は、ネットワークレベルよりもはるかに工学的に確定されているはずであるから、何らかの生産関数が実体として存在することは確かであろう。この報告では、上記のような不安定性がある場合に、プラントレベルにおける生産関数の推計を試みている。したがって、生産関数を推計するにあたって最適化行動や投入産出間の安定的な関係を前提とすることはない。この意味で、推計される生産関数は短期生産関数には分類されない。遊休設備が存在する場合の生産関数を推計するためにこれまで使われてきた方法においては、CUのレベルを表す変数を生産関数の説明変数として導入する方法が一般的であった。しかし、ここではそれら従来からの方法を用いなかった。なぜならCUのレベルを生産関数の要素として用いる方法は、最適化行動によって安定な投入産出関係を仮定するに等しいからである。ここで用いる方法は、正規分布とは限らない合成された誤差項を持ったフロンティア生産関数をパラメトリックに推計する方法である。この方法は、

技術非効率(TI)の存在が仮定される場合に生産関数を推計するために用いられてきた。ただし、ここではTIをア・プリオリに仮定することはしない。

この報告では、ネットワーク効率性がプラント効率性よりも優先される産業の典型として、電力産業を例にとって実際に推計を試みている。電力産業においては、他の産業に比べてCUはプラントにとってより外生的であると考えられるからである。各発電プラントの操業は、気候変化などの自然条件や経済的環境の下で生じてくる不安的な需要を満たすべく、全ネットワークの効率性と安定性を考慮して決定される。したがって、各プラントに要求されるCUは時間毎、日毎、季節毎に変動するが、停電や異常潮流を避けるために何をにおいても対応されなければならない。当然、立ち上げやシャットダウンを繰り返すことはそのプラントの操業の効率性を著しく損なうであろう。このように、プラントレベルにおいては効率性は外生変数としてのCUに著しく依存して決定されるのである。もし、発電プラントの大きさに比べて全ネットワークの規模がそれほど大きくは無いならば、両者の効率性が甚だしく乖離してしまう事態はそれほど考えられず、CUの外生性も大きくはないかもしれない。しかし、特に日本の電力産業においては企業規模が米国に比べ大きく、発電・送電・配電が垂直的に統合されているので、プラントレベルにおけるCUの外生性がより強いと思われる。この理由によってここでは実際に推計を行う対象として、日本の電力産業を選んだのである。

しかしながら当然のことに、ここで提示した方法の適用可能性は電力産業に限られない。一般に大きな生産・供給ネットワークの中で操業するプラントの投入産出関係を推計する場合に有用な方法である。また、日本の電力産業を扱うことによって、近年提示されてきたネットワークレベルでの規模の経済性の枯渇という現象がプラントレベルにおいても検証することができる。幾つかの研究によると、企業レベルにおいては発電部門の規模の経済性はもはや存在しないということが報告されている一方で、発電の現場においてはプラントレベルの規模の経済性が確信されているという報告もある。またこれ以外にも、ここでは考察の対象としてはいないがアヴァーチ・ジョンソン効果の検証といった興味深い問題等に有用な方法を提示できる可能性がある。

これまで電力産業の生産・費用構造を分析した研究の多くは、Christensen and Greene (1976)が採用した標準的方法にしたがって、企業レベルで集計された投入産出変数間の関係を費用関数として推計してきた。生産関数でなく費用関数を推計することには、大きく2つのメリットがある。第1には、要素価格および生産物の価格を外生変数として扱えること、第2に、Shepardのレンマによって示唆されるコスト・シェア関数を同時推計することによって、推計の精度を上昇させることができることである。しかしながら、ここで扱うような産業に対して適用すると、これらのメリットは幾つかの技術的な問題を発生させてしまうのである。第1に、可変費用関数を推計する場合でも、費用関数を推計するためには何らかの最適化行動を仮定しなければならない。企業レベルの場合には、企業はいくつかの調整手段を持っているので、外生的な価格の変動に合わせて投入要素比率の適切な対応を仮定することには合理的な理由づけが可能である。しかし、外生的なCUに対応しなければならないプラントレベルにおいては、ネットワークの制御行動に比べ操業において可能な調整手段ははるかに少ないであろう。したがって、最適化行動の仮定には無理がある。

第2の問題は上記の問題と密接に関連している。ネットワークに対する需要に応じてネットワーク管理者は、どのプラントをどの程度操業させるか、どのプラントをシャットダウンする

かという調整によって投入要素を最適に配分しなければならない。すなわち、需要が与えられると最適化行動によってそのネットワークが達成しうる最大の効率性水準も決定される。この時、ネットワークのCUもimplicitに決定されているから、結局全体の投入産出関係がこのCUを一つの明示的な要素変数とする生産関数として表現されるのである。この性質を用いてCoville (1974) は生産性がCUの特殊な関数の形で決定されると仮定して生産関数の推計を行うことができた。また、Tawada and Katayama (1990) は日本の電力産業においてアヴァーチ・ジョンソン効果を検定するために、企業レベルの生産関数を推計している。彼らを用いたのは、燃料の実際の使用量を効率性等価な燃料使用量に変換するという方法である。もしCUが1未満であれば、燃料の効率性を考えると実際の投入量以下の燃料しか投入されなかったに等しいと仮定した。この効率性等価な燃料投入に変換するためある特定の関数型が仮定されている。この変換はCUのそれぞれの値にある特定の最大効率性を結びつけるという仮定に等しいことに注意されたい。したがって、これらの試みは企業レベルにおける最適化行動の仮定の下での短期生産関数の推計と等しいのである¹。もし最適な調整過程を仮定できなければ、投入産出関係はより不安定になり、短期生産関数を推計することはできない。以上の理由により、これまでCUを扱ってきた方法は、あくまで企業レベルにおける推計に用いるためのものであり、プラントレベルでの生産関数の推計には用いることができないものであることがわかる。したがって、他の方法を考案しなければならない。ここでは、ネットワークによる個々のプラントへの要求はあまりに不安定で、観察されるのは実現されたCUの値そのものだけであると仮定する。この報告においてはCUの実現値は、最小の効率性しか規定しない。しかしこの仮定によって、投入産出関係は正規分布とならない残差項を持つ生産フロンティアを用いて表現されるのである。

ここまで筆者はCUを定義なしに用いてきた。Nelson (1989) は日常的に用いられているCUと経済学で用いられるCUの関係を厳密に区別した。前者は実際の生産量の供給容量に対する比であり、後者は同じく最小最適規模に対する比である。彼は両者が非常に弱い関連しか持たないことを指摘している。この報告では、以下においてCUを前者の日常的な意味で用いる。なぜなら、後者のCUを生産関数の推計に先立って独立に推計することは不可能だからである。第2節では、CUのデータに含まれている情報を最大限に用いて生産関数を推計する方法について論じる。第3節では、日本の石油火力発電所の生産関数を推計することによって、第2節で紹介した方法の有効性を証明する。OLS法では曖昧な凸性しか観測できないにもかかわらず、ここで紹介する方法は生産関数の明らかな凹性を示すことができることが示される。

¹ Fuss and Waverman (1991, 1992) の研究も、これらの研究の流れの中に位置づけられる。彼らはCUを明示的な生産要素の一つとして含む、一国レベルで集計された自動車産業の生産関数を推計している。

2. Composite errorモデル

推計する生産関数の投入要素としてとらえるのは資本および燃料投入である²。最初に以下の変数を定義する。

Y 時間 $[0, 1]$ の間に発電された電力量,

Y^* 認可発電容量,

K 投下資本,

T プラントの運開年度,

$V_B \{p \mid 0 \leq p(t) \leq B, 0 \leq t \leq 1\}$ となる連続有界関数の集合, ただし B は正の定数

$f(t)$ 時間にしたがって投入された燃料の量を表す関数, ただし $f \in V_{\bar{f}}(K, T)$, ここで $\bar{f}(K, T)$ は年度 T に運開された投下資本量 K のプラントへの最大限可能な瞬間燃料投入量である。

F 時間 $[0, 1]$ の間に投入された燃料の合計. したがって $F = I(f)$ である. ただし

$$I(f) \equiv \int_0^1 f(t) dt,$$

U CUの値.

次に以下の仮定をおく.

仮定1 時間 $[0, 1]$ の間に発電された電力の合計は以下の連続関数で示することができる:

$$Y = Y(f(t); F = I(f), K, T).$$

仮定2 所与の K および F の下で, 産出 Y を最大にする以下の関数 f^* が存在する.

$$Y(f^*(t); F = I(f^*), K, T) \geq Y(f(t); F = I(f), K, T), \text{ for all } f(\cdot).$$

仮定3 $y^*(F; K, T) \equiv Y(f^*(t; K, T); F = I(f^*), K, T)$, とすると関数 y^* はほとんどすべての点で連続かつ微分可能である. さらに,

$$y^*(\lambda F; K, T) = \lambda y^*(F; K, T),$$

である. ここで $0 \leq F \leq \bar{f}(K, T), 0 \leq \lambda F \leq \bar{f}(K, T)$, (F について1次同次).

仮定1では, 一定の年度に建設され運開されたプラントに体化されている技術は, そのプラントの運用期間にわたって不変であるというパティ・クレイ型の技術を仮定している. また同

² ここでは労働投入が無視されている。なぜなら, 労働投入を示すデータとして使用可能なのはプラント毎に割り振られている人員の配置であるが, 実際に得られるデータが真の労働投入を表したものではない可能性があるからである。もしここで推計される生産関数が企業レベルのものであれば, 集計された従業員数はそれなりの意味があろう。しかしながら, プラント毎に配置された人員数の時系列データをみる限りかなりの不安定性に気づかざるを得ない。この不安定性は生産上の調整というよりも何らかの人事管理のための特定の配置によると見ざるを得ないだろう。Tawada and Katayama (1990) も労働投入を生産要素として付加した場合の係数の推計値の不安定性を報告している。形式上は, 労働投入を生産関数の上で無視するということは, 労働が資本などの他の生産要素と一定の比率で投入されると仮定することに等しい。

時期に建設され運開されたプラントは同じ技術を体化しているとする。仮定2では効率的な燃料消費パターンの存在を仮定している。この燃料消費パターンの下で仮定3のように所与の燃料投入量で最大の発電を行うことができる。仮定3において、 F と K に関してではなく、 F のみに関して1次同次となるという仮定は、通常はCUが1以下であるという前提及び f^* が存在するという仮定と整合的である。たとえばある関数 h ：

$$h = \begin{cases} \bar{f}, & \text{when } 0 \leq t \leq F/\bar{f} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

が、

$$Y(f^*(t); F=I(f^*), K, T) = Y(h(t); F=I(h), K, T),$$

を満たす最適投入パターンであるとき、 F に関して1次同次が満たされるのは明らかであろう。遊休設備の存在によって、最適投入パターンの繰り返しを行うことが可能になるのである。ただし、繰り返しが可能なのは最適投入パターンのみである。なぜなら、最も効率的な状態とは無駄が存在しないことを意味するが、無駄が無いからこそ投入・産出のパターンを確定することができるのである。もし、投入パターンが最適ではなく何らかの無駄が存在する場合には、燃料投入を2倍にしたとき、2倍にする前と後でどちらに無駄が多いかによって、発電量は2倍以下になってしまうかもしれないし、2倍以上になるかもしれない。

関数 y^* はフロンティア生産関数となる。すなわち、定義により：

$$y^*(F; K, T) \geq y_f(F; K, T), \text{ for all } f \text{ such that } f \in V_{\bar{f}(K, T)}, \text{ and } F = I(f), \quad (1)$$

となる。ただしここで $y_f(F; K, T)$ は $Y(f(t); K, F=I(f), T)$ を表すものとする。関数 y_f はある観測された投入産出関係を示している。

ここで関数 g を $g(t) \in V_{\bar{f}(K, T)}$, $I(g) = F$, となるある任意の燃料投入パターン、また $F^*(K, T)$ を方程式 $Y^* = y^*(F; K, T)$, の解すなわち認可容量 Y^* を発電するために必要な最小の燃料投入量とする。この時、不等式(1)および仮定3により：

$$U = \frac{y_g(F; K, T)}{Y^*} = \frac{y_g(F; K, T)}{y^*(F^*(K, T); K, T)} \leq \frac{y^*(F; K, T)}{y^*(F^*(K, T); K, T)} = \frac{F}{F^*(K, T)} \quad (2)$$

となる。したがって：

$$\frac{y_g(F; K, T)}{F} \leq \frac{y^*(F^*(K, T); K, T)}{F^*(K, T)} \quad (3)$$

を得る。この不等式は燃料生産性の上限を示している。

一方、燃料生産性の下限が関数 $f(t)$ に依存することは確かであるが、一般に燃料をいくらでも無駄に使用することは可能であるので、0以外の下限値はこれ以上に仮定を付加しない限り設定することはできない。ここでまず次のような仮定4'をおいた場合の帰結を考えよう。

仮定4' $F^* = \bar{f}$, for all K and T ,

この仮定は最大認可電力は最大限投入可能な燃料 \bar{f} を連続的に投入し続けた場合に実現されるとしている。この時 $F^* = \bar{f} \geq F$ であるから、

$$\frac{Y}{F} = U \cdot \frac{Y^*}{F} = U \cdot \frac{Y^*}{F^*} \cdot \frac{F^*}{F} \geq U \cdot \frac{Y^*}{F^*}$$

よりCUの値が小さいほど燃料生産性の下限は低いことがわかる。ここで $U=1$ の時、不等式(3)により下限と上限は一致し、 $Y/F = Y^*/F^*$ となる。すなわち、供給容量がすべて使用される時、最大限の燃料生産性が自動的に実現される。しかしながら、突然の立ち上げ要求のような要請があった場合、瞬間的には過剰な燃料が投入される事態は十分に予想されるため、この仮定は強すぎるきらいがあるかもしれない。したがって、実際には $F^* < \bar{f}$ という仮定の方が実体に即している可能性が高いだろう。さらに、ネットワーク運営のために非効率的な燃料投入を行わざるを得ない可能性を考えると、このような下限を設定することは難しいかもしれない。しかしながら最大認可電力量を連続的に発電するとき最も効率的な操業をできるという示唆は考慮に値する。したがってここでは仮定4'よりも実効上幾分弱い次の仮定：

$$\text{仮定 4} \quad \frac{Y}{F} \geq \frac{Y^*}{F^*} \cdot m(U), m'(x) > 0 \text{ for } 0 \leq x \leq 1, m(0) \geq 0, \text{ and } m(1) = 1$$

をおくこととする。すなわち、CUの値が小さいほど関数 $f(\cdot)$ の任意性が薄れ、燃料生産性の不確定性も減少すると仮定するのである。

仮定(1)-(4)に基づき、計量分析のために次の確率モデルを設定する。すなわち：

$$\log\left(\frac{Y}{F}\right) = \log\left(\frac{y^*(F^*(K, T); K, T)}{F^*(K, T)}\right) - u + v, \quad u \geq 0, \quad (4)$$

である。ここで u は U が大きいほど小さい分散となる確率変数であり、 v は u と独立な対称的誤差項である。燃料生産性 Y/F は標本空間

$$\bigcup_{0 \leq x \leq \max_{K, T} \bar{f}(K, T)} V_x$$

上の確率変数となる。

式(4)は投入生産構造が、生産フロンティアとフロンティアからの下方への乖離とからなる一つのcomposite error modelで表されることを示している。この性質を用いて実際の燃料投入パターン $f(\cdot)$ について詳しい情報無しに生産フロンティアを推計することができる。この生産フロンティアにトランス・ログ型を仮定すると：

$$\begin{aligned} \log e_i &= a_0 + a_K \log K_i + \frac{a_{KK}}{2} (\log K_i)^2 + a_T \log T_i \\ &+ \frac{a_{TT}}{2} (\log T_i)^2 + a_{KT} \log K_i \log T_i - u_i + v_i, (i=1, \dots, N) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで添字はプラントを表し、 y/F は e を示すものとする。さらに：

$$\begin{aligned} \text{Cov}(u_i, u_j) &= \text{Cov}(u_i, v_i) = \text{Cov}(u_i, v_j) = \text{Cov}(v_i, v_j) = 0, \text{ for } i \neq j, v_i \sim N(0, \sigma^2) \\ E(u_i) &= \alpha |U_i - 1|^\gamma \text{ and } \text{Var}(u_i) = \beta |U_i - 1|^{2\gamma} \end{aligned} \quad (6)$$

この仮定の後半は、後に説明する分散不均一性の問題を特定化して考えるためのものである。仮定4より、 $U_i=1$ の時には、 $E(u_i)=\text{Var}(u_i)=0$ となり、 U_i が1から減少するに従って平均の非効率性と非効率性の分散値は上昇するが、これらの性質はこの仮定と整合的となっている。

式(5)で示された構造は、長年にわたる研究の蓄積を用いることができるTIモデルと非常に似たものとなっている。この種のモデルを推計するためによく知られた推計方法として最尤法がある。しかし、最尤法を実行するためには u_i の分布を特定しなければならない。TIの場合には半正規分布や Γ 分布などの0でない歪度を持つ分布を u に仮定することができた。しかも、これらの分布を正当なものとするモデルを提示する試みも行われている³。しかしながら、TIの場合とは異なり、 u の分布に関してはここでは U の値と相関を持つという以外の情報を持っていない。CUが1以下となるために生じる擾乱は0でない歪度を示すかもしれないし、そうではないかもしれない。このような理由でここでは最尤法を用いることはできない。

ここで採用した方法はAigner et al. (1977) およびMeeusen and Broeck (1977) において示唆されているCOLS (Corrected OLS) と呼ばれる方法である。正規分布でない擾乱項の下ではOLS推定量は一般にその卓越した特性を維持してはいない。しかし、OLS推定量は切片の推計値を除いて有効ではないが不偏な推定量となることも知られている。実際、フロンティア生産関数を u の期待値だけ平行移動することによって、統計モデルを残差項の正規性だけを除いて推計上好ましい形に変換することができる。すなわち：

$$\log e_i = a_0 - \bar{u} + a_K \log K_i + \dots + a_{KT} \log K_i \log T_i - (u_i - \bar{u}) + v_i$$

と変換することができる。ここで \bar{u} は u_i (for $i=1, \dots, N$) の期待値である。ただし、説明変数、特に K が確率変数となり誤差項 u と相関を持っている可能性があることに注意しなければならない。この相関がある場合には推計値にはバイアスが生じてしまう。しかしながら、 U_i が K_i や T_i と相関を持たない場合には係数の不偏推定量を得ることができるのである。

しかしまださらにCUと $\text{Var}(u)$ とが相関を持つことによって、 U_i の値によって残差項 $-(u_i - \bar{u}) + v_i$ が異なる分散を生じてしまうという分散不均一性の問題が残っている。実際、残差項の分散の期待値は：

$$\begin{aligned} E(-(u_i - \bar{u}) + v_i)^2 &= E(u_i - \bar{u})^2 + \sigma^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \left\{ (N-1)^2 E(u_i^2) - 2(N-1) E\left(\sum_{j \neq i} u_i u_j\right) + E\left(\sum_{j \neq i} u_j\right)^2 \right\} + \sigma^2 \\ &= \frac{(N-1)^2}{N^2} \left\{ (E(u_i))^2 + \text{Var}(u_i) \right\} - 2E(u_i)\lambda + \frac{\mu}{N-1} + \lambda^2 + \sigma^2 \quad (7) \end{aligned}$$

である。ここで $\lambda \equiv E(u_j)$ 、および $\mu \equiv \text{Var}(u_j)$ である。 U_j には特定の値を仮定していない。このように発生する分散不均一性の下で、所与の U_i の下での分散の期待値は：

$$E(-(u_i - \bar{u}) + v_i)^2 = \delta_1 + \delta_2 |U_i - 1|^\gamma + \delta_3 |U_i - 1|^{2\gamma} \quad (8)$$

³ Torii (1992) を参照せよ。

となる。ここで：

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \sigma^2 + \frac{(N-1)(\mu + \lambda(N-1))}{N^2} > 0, \\ \delta_2 &= -\frac{2\alpha(N-1)^2}{N^2} < 0, \\ \delta_3 &= \frac{(\alpha^2 + \beta)(N-1)^2}{N^2} > 0\end{aligned}$$

である。次節で各 $\delta_i (i=1, 2, 3)$ をOLS残差から推計する一種のAitken推定量ないしは実行可能GLS推定量の推計について論じる。

3. 日本の火力発電所における生産フロンティア関数の推計と規模の経済性

3.1 変数

この節では前節で展開した方法に基づいて日本において石油を主な燃料とする火力発電所の生産フロンティア関数を推計する。観測の対象とした1992年には56のサンプルをとることができた。燃料投入量と発電電力量は年間について集計したものをを用いる。日本のいくつかの過去の研究では企業レベルで逡減的な凹の平均費用関数（生産関数ではない）が報告されている⁴。すなわち、規模の経済性が存在し、規模の経済性は規模が大きいかほど大きくなる傾向がある。発電プラントの数が非常に少数の場合には、個々のプラントの費用関数は凸型でも、プールされたものの包絡線をとると凹型になる可能性があるかもしれない⁵。しかし、日本の各電力会社は少なくともそれ以上の発電プラントを有している。これらの奇妙な結果とは異なりこの節で示される結果はプラントレベルで、規模の経済性があるがその経済性は規模とともに逡減している、という教科書的な生産関数の姿をはっきりと示すことができる。

推計のために用いられた変数は付録1にまとめられている。注意してほしいのは投下資本量の推計である。ここでは、投下資本量を示す変数として2種類を用意した。第1には認可発電量であり、第2には固定資本に対する投資の現在価値量を集計したものである。通常投資された資本量は時間とともに一定の割合で消却されるという仮定が用いられる。すなわち：

$$k(\tau, t) = \theta k(\tau, t-1)$$

である。ここで $k(\tau, t)$ は現在を t とおいたときに時間 τ に投下された資本の価値であるとする。 θ は定数である。しかしながら、Griliches (1986) が指摘しているように投下された資本が現在利益に与える貢献が、定率法や定額法による償却で表されるような形で時間とともに提言していくという根拠は何もない。彼は過去の投資の現在利益に対する貢献が投資時点から間もな

⁴ Nemoto et al. (1993) を見よ。Shinjo and Kitasaka (1989) では、同様な結果が報告されているが、彼らは小規模の発電では未だに規模の経済性が実現できるような規模にさえ達していないということに対応していると説明している。しかし、たとえば米国においてはChristensen and Greene (1976) や Nelson (1989) において凹の生産関数が報告されている。

⁵ Krautmann and Solow (1988) を参照のこと。

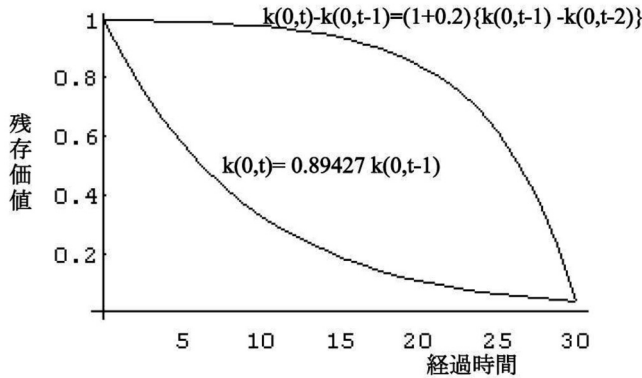


図1

いときにはほとんど低下を見せないことを示した。発電プラントの場合にはしばしば資本の代理変数として供給容量が用いられることが多いが、この措置はグリリケスの考え方にそぐったものである。ここでは、類似しているが新しい方法を試みる。すなわち：

$$k(\tau, t) - k(\tau, t-1) = (1 + \theta) \{k(\tau, t-1) - k(\tau, t-2)\}. \quad (9)$$

で示されるように現在価値の低下分が時間の経過とともに減少するのではなく、増大すると仮定している。この方法によると現在価値の低下は初期にはごく小さく末期にはかなりの大きさとなる。図1は通常の方法による結果と比較している。図の二つの曲線は時間0において投資された資本の償却の様子を示している。どちらの方法についても、償却には日本における発電プラントの設備更新期間の平均値である30年かかるとしている。また、償却が終了したときには固定資産のうちの土地の値段の割合である3.5%が残存していると仮定している⁶。

二つの曲線のうち下方の曲線は通常の償却法の結果を示している。ここに、 $0.89427^{30} \approx 0.035$ である。もう一つの曲線はここで導入した方法を示している。上記の2つの仮定の他に、償却分の年々の増加率 θ が20%であると仮定している。図に示されているように、この方法によると初期には償却は無視できるほど小さい。

3.2 推計及び推計結果

最初にCOLS法を前節で説明した形で使用できる条件すなわち、 U_i と K_i 、および U_i と T_i との間に相関がないこと、および U_i と $\text{Var}(u)$ とが負の相関を持つこと、の2つの条件が満たされているかどうかを確かめなければならない。CUと建設年度との単純相関係数は0.035、一方CUと投下資本量との相関は0.129であった。したがって、ここではこれらの相関を無視できる。次に、OLS残差と U_i との関係を散布図として表すと図2のようになる。この図は統計モデルに仮定した分散不均一の関係を示している。これらの予備的な考察により、前節で説明した方法を採用できることが保証される。

⁶ 使用した発電プラントへの投下資本の時系列データは土地への投資を含んだものである。

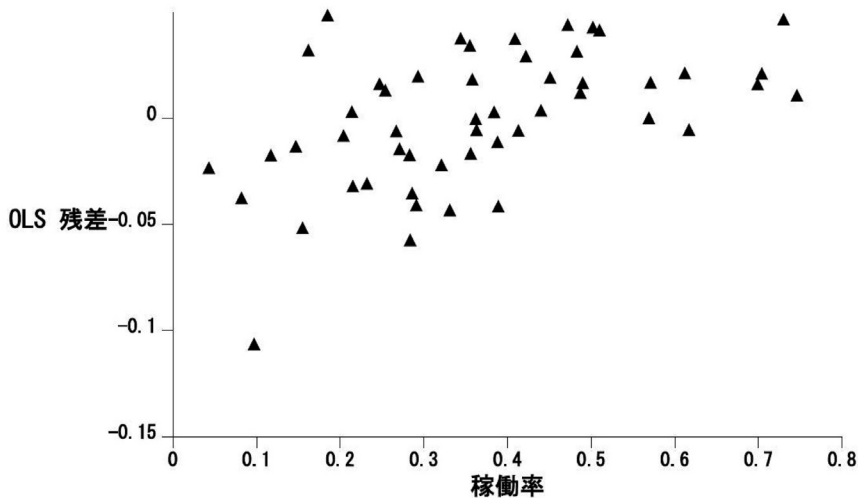


図2 OLS残差と稼働率との間の相関を示す散布図

推計の具体的な作業は逐次法による。すなわちまず、

- [1] OLSを実行する、
- [2] 残差を用いて(8)式における δ'_i の値を回帰分析によって求める、
- [3] (8)式で示唆された分散の推計値から計算された加重を用いてWLSを実行する、
- [4] もし $|\delta - \delta_{-1}|^2 > C|\delta|^2$ であれば[2]に戻る。

ここで $\delta_i(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ であり、 δ_{-1} は直前の[3]において求められた δ の値である。また、 C は定数 10^6 である。以上の過程は $\gamma = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$ のそれぞれの値において実行される。

表1は各 γ の値における推計値をOLSの結果と比較したものである。表2は δ_i の推計値を示している。表1に示されたOLSの結果を見ると、係数の推計値は有意ではないが $a_{KK} > 0$ という結果に見られるように生産フロンティアの弱い凸性を示している。ここで、生産フロンティアの被説明変数となっているのは燃料生産性 Y/F であることに注意すれば、この凸性は規模の経済性が存在し、しかも規模の経済性の程度が規模とともに上昇していることを示唆していることがわかるのでこの結果は奇妙である。一方、ここで導入したGLSの結果は生産フロンティアが、 $a_{KT} \neq 0$ の場合を除いて各 γ の値について明白な凹型となっていることを示している。すなわち、ここではこの凹性は規模の経済性が存在し、しかもその程度が規模とともに逓減していることを示唆している。どちらの姿が実体を反映しているのかを直接に確かめる方法はここには無い。しかしながら、後者のGLSの結果の方がシェパードのレンマとともに同時推計した費用関数の結果と矛盾しない。表3及び表4は投下資本を示す変数として認可最大電力量を用いた場合の推計結果を示している。累積投資の現在価値を用いた場合に比べて係数の推計値の有意性は低いと同じ傾向を示している。

γ	a_0	a_K	a_{KK}	a_T	a_{TT}	a_{TK}	\overline{R}^2 F
OLS	6.94	0.00412 (0.03)	0.00116 (0.02)	0.00122 (1.94)			0.519 19.0
1.00 GLS	4.62	0.253 (3.48)	-0.0124 (3.12)	0.00206 (4.46)			0.346 9.83
1.25 GLS	4.91	0.222 (2.76)	-0.0107 (2.76)	0.00202 (3.59)			0.434 12.0
1.50 GLS	5.00	0.213 (2.44)	-0.0102 (2.11)	0.00195 (3.39)			0.457 13.2
1.75 GLS	5.06	0.206 (2.25)	-0.00989 (1.94)	0.00192 (3.33)			0.471 13.9
2.00 GLS	5.13	0.200 (2.10)	-0.00957 (1.80)	0.00190 (3.31)			0.480 14.5
OLS	6.78	-0.00864 (0.067)	0.00196 (0.27)	0.0123 (2.39)	-2.38×10^{-4} (2.16)		0.590 16.5
1.00 GLS ^{b)}	5.41	0.124 (9.87)	-0.00546 (8.18)	0.0193 (11.7)	-3.53×10^{-4} (10.2)		0.482 10.7
1.25 GLS ^{c)}	N.A.						
1.50 GLS ^{a)}	4.54	0.232 (3.25)	-0.0111 (2.84)	0.0130 (2.30)	-2.25×10^{-4} (1.90)		0.432 8.75
1.75 GLS	4.61	0.220 (2.95)	-0.0105 (2.54)	0.0144 (2.78)	-2.59×10^{-4} (2.37)		0.465 9.99
2.00 GLS	4.69	0.211 (2.67)	-0.0100 (2.28)	0.0153 (3.27)	-2.82×10^{-4} (2.85)		0.493 11.2
OLS	6.91	-0.0660 (0.47)	0.00835 (0.86)	0.0283 (1.65)	-1.24×10^{-4} (0.77)	-0.00119 (0.98)	0.598 13.4
1.00 GLS ^{c)}	N.A.						
1.25 GLS ^{b)}	4.28	0.204 (2.84)	-0.00487 (0.90)	0.0350 (2.35)	-2.56×10^{-5} (0.16)	-0.00185 (1.87)	0.383 5.59
1.50 GLS ^{a)}	4.71	0.143 (1.76)	-0.00126 (0.21)	0.0400 (2.90)	-6.38×10^{-5} (0.44)	-0.00192 (1.97)	0.474 8.12
1.75 GLS	4.72	0.131 (1.55)	0.000517 (0.08)	0.0436 (3.00)	-3.18×10^{-6} (0.20)	-0.00230 (2.22)	0.444 7.19
2.00 GLS	4.96	0.0928 (1.04)	0.00313 (0.46)	0.0481 (3.61)	-1.69×10^{-5} (0.12)	-0.00250 (2.63)	0.426 8.43

表1 生産フロンティア関数の係数推計値

注：括弧内はAsymptotic t-value. N.A. は該当無しを示す。a)： δ の値が収束しないのCで 10^4 をに緩和した結果。b)： δ の値が収束しないのでCを 10^3 に緩和した結果。c)：Cを 10^3 に緩和しても収束しない。

γ	δ_0	δ_1	δ_2
1.00 GLS	0.00314 (1.96)	-0.0131 (2.43)	0.0137 (3.11)
1.25 GLS	0.00192 (1.85)	-0.00891 (2.78)	0.0106 (3.03)
1.50 GLS	0.00128 (1.64)	-0.00645 (2.06)	0.00882 (2.96)
1.75 GLS	0.000922 (1.49)	-0.00491 (1.82)	0.00769 (2.84)
2.00 GLS	0.000699 (1.35)	-0.00383 (1.58)	0.00690 (2.70)
1.00 GLS ^{b)}	0.00435 (3.72)	-0.0174 (4.35)	0.0170 (5.15)
1.25 GLS ^{c)}	N.A.		
1.50 GLS ^{a)}	0.00176 (2.15)	-0.00918 (2.78)	0.0119 (3.82)
1.75 GLS	0.00127 (2.02)	-0.00719 (2.63)	0.0105 (3.89)
2.00 GLS	0.000951 (1.92)	-0.00579 (2.51)	0.00942 (3.85)
1.00 GLS ^{c)}	N.A.		
1.25 GLS ^{b)}	0.00278 (2.46)	-0.0131 (3.12)	0.0150 (3.95)
1.50 GLS ^{a)}	0.00200 (2.70)	-0.0102 (3.40)	0.0128 (4.41)
1.75 GLS	0.00152 (2.30)	-0.00843 (2.92)	0.0118 (4.07)
2.00 GLS	0.00116 (2.27)	-0.00691 (2.90)	0.0107 (4.28)

表2 式(8)の推計結果

注：各行は表1に対応している。表1の注を参照せよ。

γ	a_0	a_K	a_{KK}	a_T	a_{TT}	a_{TK}	\overline{R}^2 F
OLS	7.16	-0.0294 (0.47)	0.00848 (0.90)	0.00219 (4.10)			0.551 21.4
1.00 GLS	6.65	0.105 (3.09)	-0.0111 (2.32)	0.00352 (8.19)			0.365 10.6
1.25 GLS	6.73	0.082 (2.05)	-0.00772 (1.32)	0.00329 (6.16)			0.443 14.3
1.50 GLS	6.77	0.0732 (1.68)	-0.00650 (1.00)	0.00316 (5.99)			0.469 15.7
1.75 GLS	6.79	0.0674 (1.48)	-0.00573 (0.84)	0.00309 (5.98)			0.482 16.5
2.00 GLS	6.81	0.0621 (1.32)	-0.00501 (0.70)	0.00305 (6.00)			0.491 17.1
OLS	7.06	-0.0223 (0.36)	0.00736 (0.77)	0.00568 (1.08)	-7.42×10^{-5} (0.67)		0.546 16.0
1.00 GLS ^{b)}	6.62	0.0734 (1.78)	-0.00663 (1.09)	0.00970 (1.85)	-1.38×10^{-4} (1.25)		0.462 11.7
1.25 GLS ^{b)}	6.57	0.0959 (2.68)	-0.00973 (1.91)	0.00790 (1.30)	-9.04×10^{-5} (0.70)		0.381 8.70
1.50 GLS	6.58	0.0842 (2.10)	-0.00807 (1.37)	0.00940 (1.72)	-1.27×10^{-4} (1.11)		0.430 10.4
1.75 GLS	6.59	0.0800 (1.86)	-0.00757 (1.18)	0.00994 (1.96)	-1.42×10^{-4} (1.33)		0.452 11.3
2.00 GLS	6.59	0.0772 (1.72)	-0.00728 (1.08)	0.0102 (2.09)	-1.48×10^{-4} (1.45)		0.464 11.8
OLS	6.80	0.0129 (0.19)	0.0115 (1.15)	0.0118 (1.72)	-2.51×10^{-5} (0.22)	-0.00131 (1.37)	0.554 13.4
1.00 GLS ^{c)}	N.A.						
1.25 GLS ^{c)}	N.A.						
1.50 GLS ^{b)}	6.49	0.105 (1.93)	0.000995 (1.28)	0.00857 (0.85)	-3.43×10^{-4} (1.88)	-0.00302 (2.64)	0.124 2.41
1.75 GLS	6.22	0.130 (3.09)	0.000241 (0.04)	0.0183 (3.06)	-1.36×10^{-5} (0.12)	-0.00215 (2.79)	0.415 8.09
2.00 GLS	6.21	0.129 (2.96)	0.000641 (0.09)	0.0190 (3.46)	-2.62×10^{-5} (0.25)	-0.00220 (2.97)	0.443 8.95

表3 生産フロンティア関数の係数推計値（資本として認可電力量を用いた場合）
注：表1の注を参照せよ。

γ	δ_0	δ_1	δ_2
1.00 GLS	0.00340 (2.22)	-0.0139 (2.67)	0.0142 (3.33)
1.25 GLS	0.00212 (2.25)	-0.00941 (2.67)	0.0107 (3.44)
1.50 GLS	0.00146 (2.10)	-0.00698 (2.48)	0.00896 (3.36)
1.75 GLS	0.00109 (1.96)	-0.00550 (2.27)	0.00792 (3.25)
2.00 GLS	0.000856 (1.83)	-0.00448 (2.05)	0.00722 (3.12)
1.00 GLS ^{b)}	0.00282 (2.79)	-0.0100 (2.92)	0.00930 (3.31)
1.25 GLS ^{b)}	0.00237 (2.38)	-0.0108 (2.91)	0.0125 (3.79)
1.50 GLS	0.00165 (2.38)	-0.00817 (2.91)	0.0105 (3.93)
1.75 GLS	0.00121 (2.23)	-0.00646 (2.73)	0.00925 (3.89)
2.00 GLS	0.000940 (2.08)	-0.00532 (2.52)	0.00850 (3.80)
1.00 GLS ^{c)}	N.A.		
1.25 GLS ^{c)}	N.A.		
1.50 GLS ^{b)}	0.00207 (1.73)	-0.00902 (1.86)	0.0112 (2.53)
1.75 GLS	0.00117 (2.62)	-0.00513 (2.64)	0.00657 (3.35)
2.00 GLS	0.00113 (2.43)	-0.00647 (2.99)	0.00989 (4.32)

表4 式(8)の推計結果(資本として認可電力量を用いた場合)
注:表1の注を参照せよ。

4. 考察

この報告では、遊休設備がかなりの程度発生している場合の生産関数の推計について論じた。推計においては低い稼働率によって発生する制約について、現実投入された燃料の効率性等価な投入量等に何らかの関数型を設定する等の、特殊な制約をなるべくおかないよう留意した。ここでおいた制約は稼働率の上昇とともに燃料生産性の分散が減少するという傾向の存在である。この仮定は、composite errorを伴う生産フロンティアモデルを構成するためには十分であった。またこの方法によって、日本の石油火力発電所のプラントレベルにおける規模の経済を検証することができた。

もし何らかの方法によって生産フロンティアからの乖離の様子をさらに特定できたとしたら、さらに正確な推計を行うことが可能であろう。たとえば、プラントの立ち上げ、シャットダウンが容易で追加的な費用が顕著でない場合には、需要の要求によってこのプラントがどのように稼働させられるかということは効率的運営の上であまり問題とされず、低い稼働率による生産性の変動はあまり大きな上昇を見せないかもしれない。またもし、プラントの立ち上げ、シャットダウンによって発生する追加的費用の発生パターンが特定できる場合には、生産フロンティアの推計にあたってこの追加的情報を使用することができる。ここで提示した方法は、稼働率の低下に伴って投入産出の関係が非常に不安定になってしまう場合でも十分に適用することができるという意味で一般的な推計値を得ることができる。

しかし、日本の電力産業に適用された場合には明らかに問題を一つ残してしまっている。それは K と T の間の相関による多重共線性の問題である。使用したサンプルについては両変数の単純相関係数は、資本の変数として過去の投資の累積現在価値を用いた場合には0.460であり、認可電力量を用いた場合には0.188であった。この報告で論じた問題とは全く異なる問題であるのでここではこの問題についての対処は何もしていない。何らかの方法を導入することによってここで論じた稼働率が低い場合の対処の効果も改善を見せるかもしれない。

付録：変数表

K 過去30年にわたって当該発電プラントに投下された資本の累積現在価値ないしは最大認可容量。累積現在価値は：

$$\sum_{t=1962}^{1992} \left(1 - \frac{1}{1.2^{t-1962}}\right) \frac{I_t}{p_t}$$

にしたがって計算されている。投下資本量 (I_t) は『電源開発の概要』(DKG) (通産省) より、物価調整項 (p_t) は、『物価統計年報』(日本銀行) の発電機械の項よりとった。本文中の償却式 (9) において、 $\theta = 0.2$, $k(t, t+30) = 0$, および $k(t, t+29) = 1 - 1/(1 + \theta)$ が仮定されている。

T 発電プラントの運開年度DKGより。

Y 年間総発電量 (106kwh), 1992年

F α/ε によって定義される。ここで α は当該発電プラントへの総供給熱量であり、 ε は単

位燃料投入あたりの熱量 (kg or ℓ) である。『電気事業便覧』によると熱効率 (β) は $\beta = Y/\alpha \times \gamma$ によって計算されている。ここで γ は定数である。この式を用いると、 α はDKGに掲載されている Y と β の値を用いて算出することができる。また、 ε の値もDKGに掲載されている。プラントが石油以外の燃料を少量だけ燃焼させている場合には、平均購入価格を用いて等価量に変換した。

e Y/F

U $Y/(Y^* \times 365 \times 24)$, ここで Y^* (10^6 kw) はDKGに掲載されている認可最大電力量である。

References

- Aigner, D., C. A. K. Lovell, and P. Schmidt (1977), Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models, *Journal of Econometrics*, Vol.6, pp.21-37.
- Christensen, L.R., and W. H. Greene (1976). Economics of Scale in U.S. Electric Power Generation, *Journal of Political Economy*, Vol.84, No.4, pp.655-76.
- Courville, L. (1974), Regulation and Efficiency in the Electric Utility Industry, *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol.5, Spring, pp.53-74.
- Griliches, Z. (1986), Economic Data Issues, in Griliches, Z. and M. Intriligator eds. *Handbook of Econometrics*, Vol.3, Elsevier Science Publishers: Amsterdam, pp.1466-1512.
- Krautmann, A., and J.L. Solow (1988), Economies of Scale in Nuclear Power Generation, *Southern Economic Journal*, Vol.55, pp.70-85.
- Meeusen and van den Broeck (1977), Efficiency Estimation of Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error, *International Economic Review*, Vol.18, pp.435-44.
- Nelson, R. A. (1989), On the Measurement of Capacity Utilization, *The Journal of Industrial Economics*, Vol.37, No.3 (March), pp.273-86.
- Nemoto, J., Y. Nakanishi, and S. Madono (1993), Scale Economies and Over-Capitalization in Japanese Electric Utilities, *International Economic Review*, Vol.34, No.2, pp.431-40.
- Tawada, M., and S. Katayama (1990), On the Technical Efficiency under Regulation: A case of the Japanese Electric Industry, *Economic Studies Quarterly*, Vol.41, pp.34-47.
- Torii, A. (1992), Efficiency in Japanese Industries, in R.E. Caves et al. *Industrial Efficiency in Six Nations*, MIT Press: Cambridge, London, pp.31-119.

[とりい あきお 横浜国立大学大学院国際社会科学部教授]

[2008年8月19日受理]