

トランスログ型一般化費用関数と 確率的フロンティア関数による 製紙業の費用効率性分析

上 田 雅 弘

- I 序
- II 一般化費用関数による配分非効率性推計の理論
- III 製紙業界の再編と一般化費用関数を用いた非効率性の検証
- IV トランスログ型確率的費用フロンティアモデルを用いた非効率性の推定
- V 結論

I 序

非効率性の推計に関するアプローチは、Aigner, Lovell and Schmidt (1977) や Meeusen and Van den Broeck (1977) らによって提示されたパラメトリックな方法としての確率的フロンティアモデル (Stochastic Frontier Analysis; 以下 SFA) と、Charnes, Cooper and Rhode (1978) によって提唱されたノンパラメトリックな手法である包絡線分析法 (Data Envelopment Analysis; 以下, DEA) に大別される。こうした手法を 1990 年代以降、業界の再編が進む日本の製紙業界に適用し、大型合併に伴う規模の経済性や生産の多角化による範囲の経済性の効果と非効率性の検証を試みてきた。

非効率性は、理論的には投入と産出の関係における技術的な非効率と、生産要素価格比と技術的限界代替率との不一致を示す配分の非効率に分類される。生産面からのアプローチでは、一般に技術非効率性が計測される。SFA を用いる場合には生産関数を特定化してフロンティアを推計し、DEA では投入と産出の関係からフロンティアを描き、フロンティアからの乖離を技術非効率性として算出する。

しかし生産面からのアプローチは、要素投入の過剰分で非効率性を説明するため、要素価格の変化による非効率性、すなわち資源配分の非効率性を捉えることができない。他方、費用面からアプローチは、総費用を生産物と要素価格の変化で説明するため、生産要素の代替に関する非効率性を検出することができる。

こうした点を考慮して、Ueda (2019) では、DEA-New Cost モデルを用いた費用効率の効率性を捉え、合併後消滅した企業についてのシミュレーション・データを駆使して、費用面から合併の効率性を検証している。その結果からは、市場のリーダーとなる

大企業には規模の経済性が強く働き、中堅企業においても多品種生産を行う企業には、範囲の経済性が働くことによる効率性の向上が推察される。

規模と範囲の経済性の計測については、伝統的にはパラメトリックに費用関数を推計し、係数値から判断する手法が採用されてきた。しかし、通常の計測では、費用関数に配分非効率性の概念は含まれていない。これを計測する方法としては、一般化費用関数があげられる。しかし一般化費用関数の推定はモデルが複雑であり、計測において配分の非効率性を推計することが極めて困難である。また、個別企業の非効率性をパラメトリックに捉える手法としては SFA があるものの、これまでトランスログ型確率的費用フロンティアモデルでは関数がうまく収束せず計測することができなかった。

本稿ではこれらの技術的な問題を克服し、トランスログ型の一般化費用関数と確率的費用フロンティアモデルによる製紙業界の非効率性の推定を行った。さらに、本稿の独自で新規な成果は、製紙業界における企業レベルの一般化費用関数から得られる生産要素の非効率性と、トランスログ型確率的費用フロンティアモデルから得られる各企業の非効率性の関係を明示したことである。以下のⅡ節では一般化費用関数の理論モデルを展開し、Ⅲ節でその計測結果を提示する。さらにⅣ節では確率的費用フロンティアモデルによる非効率性の推定手法と結果を示し、一般化費用関数の計測から得られた配分の非効率と SFA によって算出された非効率性の関係を検証する。最後にⅤ節で結論を述べる。

Ⅱ 一般化費用関数による配分非効率推計の理論

要素価格の変化に従って生産要素が柔軟に代替されない場合や、そもそも要素価格が硬直的である場合、企業の費用最小化は実現されず、資源配分に歪みが発生し生産活動に非効率に伴う。通常、生産関数や費用関数を用いて実証分析を試みる場合には、こうした資源配分の非効率性は考慮されていない。経済理論に従えば、資源配分の非効率性は、要素価格と限界代替率が等しくならない状況で説明される。この実証分析の嚆矢となる Lau and Yotopolous (1971) は Cobb-Douglas 型の利潤関数を定式化し、投入と産出の技術的な関係である技術非効率と要素価格と限界代替率の不一致から生じる資源配分の非効率性を区別して計測を試みた。さらに Toda (1976) では Diewert (1971) によって提案された一般化レオンチェフ型費用関数を用いて、産業レベルの費用関数による配分の非効率性を推計している。これを複数生産物と生産要素に拡張して計測したのは Lovell and Sickles (1983) である。こうした一連の研究に大きな進展を与えたのが、トランスログ型の一般化費用関数モデルによって資源配分の非効率性を固定的な係数で捉え、限界代替率と価格比の乖離を表すパラメータとして推計した Atkinson and Hal-

vorsen（1984）である。企業は非効率性を含めた仮想的なシャドーコストを最小化する投入を選択し、その際に想定される要素価格はシャドー価格と解釈される。

Atkinson and Halvorsen（1984）の手法は、企業ごとの非効率性を推計した Atkinson and Halvorsen（1990）に展開され、そこでは米国の民間電力会社のデータを用いて、住宅用出力の価格は限界コストよりも低く、商業・工業用出力価格は限界コストよりも高いことが示されている。さらに米国の航空会社について分析した Atkinson and Halvorsen（1994）では、パネルデータを用いた技術効率性と資源配分の効率性を計測するモデルに拡張されている。

一般化費用関数を用いた実証分析は規制産業に適用されることが多い。これは規制された産業は概して費用最小化行動を行わず、新古典派的な費用関数による特定化をすると歪みが生じるからである。規制された公益事業体においては、規制による配分の非効率性を検出することができない。いわゆる Averch-Johnson 効果の存在を確かめるために、一般化費用関数によるアプローチが用いられてきた。

Atkinson and Halvorsen（1984）のモデルをもとに、日本の産業を対象にした研究には、電力産業を分析した小林（1996）や、都市ガス産業の配分の非効率性を検出した衣笠（2002）、また水道事業を分析対象にした中山（2003）がある。しかし、一般化費用関数を用いた分析はモデルが複雑であり、非効率性を表す係数値を求めるには計測上の工夫を要するため、一般的なトランスログ費用関数を用いた効率性の実証研究に比べると数が圧倒的に少ない。

そこで本稿では、1990年代に合併や統合が相次いだ製紙業界の生産性と効率性について行ってきた一連の研究に一般化費用関数による分析を適用し、規模の経済性の有無と企業レベルでの資源配分の非効率性の検出を試みる¹。

新古典派経済理論においては、技術的条件である生産関数が投入要素ベクトルを X として $Y = F(X)$ で与えられたとき、生産要素間の技術的限界代替率と要素価格比が等しいことが企業の利潤最大化条件となる。

$$\frac{F_i}{F_j} = \frac{w_i}{w_j} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (1)$$

ここで F_i は限界生産力 $F_i = \frac{\partial F(X)}{\partial X_i}$ であり、 w_i は要素価格を表す。この条件の下では、企業にとって費用最小化が実現している。しかし、現実には資源配分の非効率性が生じているとすれば、生産要素間の技術的限界代替率は要素価格比に等しくならない。これを表現するために、Lau and Yotopolous（1971）にならい、非効率性を θ_i としてシ

1 一般化費用関数に関する理論展開は、Atkinson and Halvorsen（1984）をもとにした小林（1996）と衣笠（2005）に従っている。

シャドー価格 w_i^s を次式のように設定する。

$$w_i^s = \theta_i w_i \quad (2)$$

θ は現実の市場価格との乖離を表すダイバージェンス・パラメータである。投入要素の配分の非効率性が存在しない場合、シャドー価格は市場価格に等しいと考えられる。このとき $w_i^s = w_i$ であり $\theta_i = 1$ となる。配分の非効率性が存在する場合、 $\theta_i \neq 1$ となる。もし θ_i が 1 より大きければ $w_i^s > w_i$ となり、投入要素 X_i は過小投入されているということになる。逆にもし θ_i が 1 より小さければ $w_i^s < w_i$ となり、投入要素 X_i は過大投入されていることがわかる。そこで (1) 式を非効率性を含まかたちで書き換えると、次のように表現できる。

$$\frac{F_i}{F_j} = \frac{w_i^s}{w_j^s} \quad i, j = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (3)$$

このとき、企業がすべての生産要素について、シャドーコスト $\sum_{i=1}^n (\theta_i w_i) X_i$ を最小化することを費用最小化条件と考えることができる。これを前提に、複数の生産要素 X から生産物 Y を生み出すケースのシャドー費用関数は、生産要素価格ベクトルを W^s とすれば、 $C^s = f(Y, W^s)$ と表記できる。すると企業の実際の要素需要関数は、シャドー費用関数に Shephard のレンマを適用して次のように求めることができる。

$$\frac{\partial C^s}{\partial \theta_i w_i} = X_i \quad (4)$$

つまり、企業の実際の総費用 C^A は次のように表現できる。

$$C^A = \sum_i w_i X_i = \sum_i w_i \left(\frac{\partial C^s}{\partial \theta_i w_i} \right) \quad (5)$$

また、第 i 要素のシャドーコストシェア S_i^s は次式で表される。

$$S_i^s = \frac{w_i^s X_i}{C^s} = \frac{\theta_i w_i X_i}{C^s} \quad (6)$$

これより、

2 Shephard のレンマは、企業の需要関数がある生産要素の価格で偏微分すると、その要素需要関数が得られるという補題である。

$$X_i = \frac{S_i^s C^s}{\theta_i w_i} \quad (7)$$

となるので、(7) 式を (5) 式に代入すると、次の (8) 式が得られる。

$$C^A = C^s \sum_i \frac{S_i^s}{\theta_i} \quad (8)$$

(8) 式の両辺に対数をとると、以下のようになる。

$$\ln C^A = \ln C^s + \ln \left(\sum_i \frac{S_i^s}{\theta_i} \right) \quad (9)$$

ここで計測のために、シャドー費用関数 $C^s = f(Y, W^s)$ をテーラー展開して2次近似し特定化すると、次のようなトランスログ型のシャドー費用関数を得ることができる。

$$\begin{aligned} \ln C^s = & \alpha_0 + \alpha_Y (\ln Y) + \sum_i \alpha_i (\ln \theta_i w_i) + \frac{1}{2} \beta_{YY} (\ln Y)(\ln Y) \\ & + \sum_i \beta_{iY} (\ln \theta_i w_i)(\ln Y) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} (\ln \theta_i w_i)(\ln \theta_j w_j) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、ここではこの関数に Young の定理を適用しているため、 $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ である³。また、シャドー費用関数の要素価格に関する一次同次性を仮定するため、その条件は以下のようになる。

$$\sum_i \alpha_i = 1, \quad \sum_i \beta_{iY} = 0, \quad \sum_i \beta_{ij} = 0 \quad i, j = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (11)$$

さらに、(10) 式をシャドー価格に関して対数微分し、Shephard のレンマを適用すると、コストシェア方程式が次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln C^s}{\partial (\theta_i w_i)} &= \frac{\theta_i w_i}{C^s} \frac{\partial C^s}{\partial \theta_i w_i} = \frac{\theta_i w_i X_i}{C^s} \\ &= S_i^s = \alpha_i + \sum_i \beta_{ij} (\ln \theta_j w_j) + \beta_{iY} (\ln Y) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、現実の総費用関数 C^A を対数表記で $\ln C^A$ と定義した (9) 式に、これまで展開したシャドー費用関数 (10) 式と非効率性を表した (12) 式を代入すると、次のようなトランスログ型の現実総費用関数を得る。

3 ここで言う Young の定理とは、多変数関数において偏微分を行う順序を交換できるという、二階導関数の対称性を意味する定理である。

$$\ln C^s = \alpha_0 + \alpha_Y (\ln Y) + \sum_i \alpha_i (\ln \theta_i w_i) + \frac{1}{2} \beta_{YY} (\ln Y) (\ln Y) + \sum_i \beta_{iY} (\ln \theta_i w_i) (\ln Y) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} (\ln \theta_i w_i) (\ln \theta_j w_j) + \ln \left(\sum_i \frac{\alpha_i + \sum_j \beta_{ij} (\ln \theta_j w_j) + \beta_{iY} (\ln Y)}{\theta_i} \right) \quad (13)$$

これらの定式化を前提にすると、現実の要素シェア $S_i^A = \frac{w_i X_i}{C^A}$ は、(7) 式と (8) 式を代入すると次のように表すことができる。

$$S_i^A = \frac{S_i^s / \theta_i}{\sum_i S_i^s / \theta_i} \quad (14)$$

これに (12) 式を用いて置き換えると、現実のシェア方程式を次のように表現できる。

$$S_i^A = \frac{\frac{\alpha_i + \sum_j \beta_{ij} (\ln \theta_j w_j) + \beta_{iY} (\ln Y)}{\theta_i}}{\sum_i \frac{\alpha_i + \sum_j \beta_{ij} (\ln \theta_j w_j) + \beta_{iY} (\ln Y)}{\theta_i}} \quad (15)$$

こうして、配分の非効率性を含めた一般化費用関数は、現実の総費用関数 (13) 式とコストシェア方程式 (15) 式を連立させた体系によって計測される。コストシェア方程式をすべて足し合わせると 1 になるため、実際の計測ではいずれか 1 本の方程式を除いて行うことになる。

これらの計測式を用いれば、規模の経済性と Allen-Uzawa の偏代替弾力性を算出して生産要素間の代替性を確かめることができる。規模の経済性は、生産量に対する現実の総費用の弾力性で表されるため、次のように定義できる。

$$\frac{\partial \ln C^A}{\partial \ln Y} = \alpha_Y + \beta_{YY} (\ln Y) + \sum_i \beta_{iY} (\ln \theta_i w_i) + \frac{\sum_i \beta_{iY} / \theta_i}{\sum_i S_i^s / \theta_i} \quad (16)$$

したがって、(16) 式から得られる値が 1 以下であるとき、規模の経済性が存在すると確認できる。また、Allen-Uzawa の偏代替の弾力性は、複数の生産要素間の代替可能性を表し、投入物の要素価格比率が 1% 上昇したときに、投入比率が何% 変化するかを表している。偏代替弾力性を σ_{ij} と表すと、2 つの投入要素が代替的であれば σ_{ij} は正の値となり、補完的であれば σ_{ij} は負の値をとる。いま生産要素 i に対する需要の自己価格弾力性を η_{ii} で定義し、これに (7) 式を代入すると次のように表すことができる。

$$\eta_{ii} = \frac{\partial X_i / X_i}{\partial w_i / w_i} = \frac{\partial X_i w_i}{\partial w_i X_i} = \frac{S_i^s (S_i^s - 1) + \beta_{ii}}{S_i^s} \quad (17)$$

となる。また、交叉弾力性も同様に定義すると次のようになる。

$$\eta_{ij} = \frac{\partial X_j / X_j}{\partial w_i / w_i} = \frac{\partial X_j w_i}{\partial w_i X_j} = \frac{S_i^s S_j^s + \beta_{ij}}{S_i^s} \quad (18)$$

さらに、Allen-Uzawa の偏代替の弾力性は、次式で定義される。

$$\sigma_{ii} = \frac{\eta_{ii}}{S_i^s} = \frac{\beta_{ii} + S_i^{s^2} - S_i^s}{S_i^{s^2}}, \quad \sigma_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{S_i^s} = \frac{\beta_{ij} + S_i^s S_j^s}{S_i^s S_j^s} \quad (19)$$

以下ではこの一般化費用関数を日本の製紙業界に適用し、配分非効率性の計測を試みる。

Ⅲ 製紙業界の再編と一般化費用関数を用いた非効率性の検証

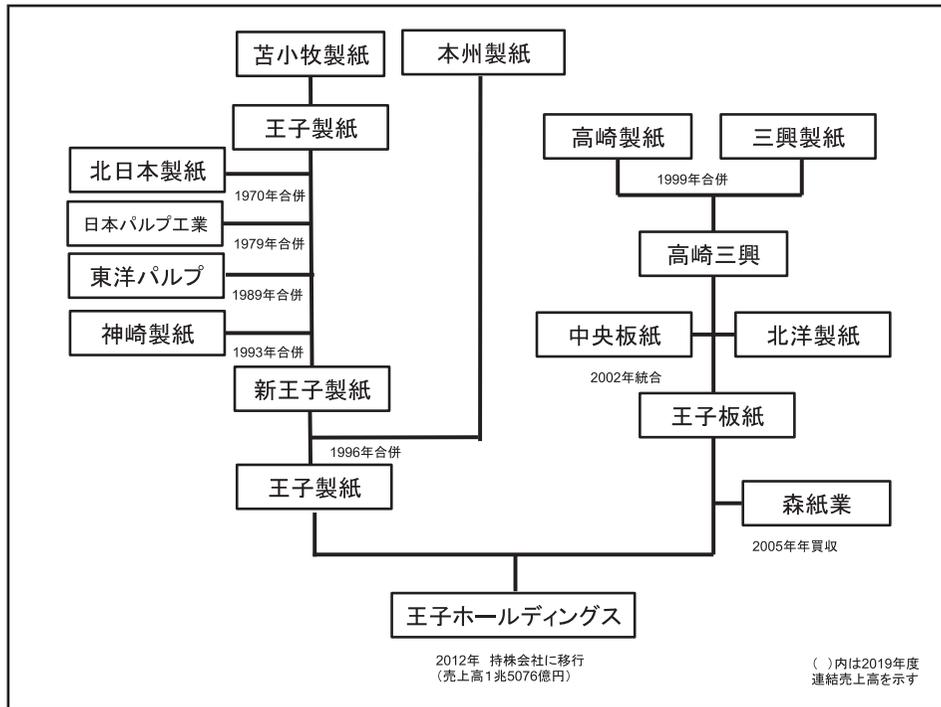
日本の製紙業界では1990年代以降、合併による規模の経済性を追求する一方で、過剰設備を廃棄してきたが、不況による国内需要の低迷で持続的な余剰設備を抱えている。製紙各社は国内需要の減退を海外事業で補ってきたが、化学分野や電力事業などへの多角化も展開している。2010年以降は大きな業界再編の動きは見られず、最大手の王子ホールディングス、2位の日本製紙に続いて、大王製紙、北越紀州製紙、三菱製紙などが業務提携を通じて緩やかな共同事業を試みる程度である。

ここで分析の焦点を明らかにするため、製紙業界再編の流れを概観する。図1から図3に、製紙業界再編の沿革を掲載している。戦前には国内市場をほぼ独占していた王子製紙が戦後分割され、苫小牧製紙、十條製紙、本州製紙の3つの企業が設立された。苫小牧製紙は1960年に他社との合併を期に王子製紙と改名し、その後も数社と合併したが、1990年代初頭からの大不況の影響で、1993年10月には神崎製紙と合併し新王子製紙となった。十條製紙も小規模の合併を繰り返した後、1993年4月には山陽国策パルプとの大型合併を行い日本製紙と改名した。さらに本州製紙は1996年10月、新王子製紙との合併し、再び王子製紙の社名が復活した。

さらに日本製紙は2001年4月、大昭和製紙と統合して持株会社を設立後、2012年10月には板紙部門と加工紙・化学製品分野を再編成し、2013年4月には日本製紙グループ本社として現在に至っている。また王子製紙もグループ関連の板紙企業を統合再編した後、2012年10月には持株会社である王子ホールディングスを設立した。

中堅企業では、2007年7月に東海パルプと特種製紙が持株会社方式で経営統合の後、2010年4月に正式合併し特種東海製紙が発足している。また北越製紙は2009年に紀州

図1 王子製紙の変遷



製紙を完全子会社化し、2011年4月には吸収合併している。三菱製紙、中越パルプ工業、特種東海製紙は存続しているものの、王子ホールディングスはそれら企業の大株主となっている。

製紙業界の上位企業6社の規模を2019年度連結売上高でみると、王子ホールディングスは1兆5076億円であり業界1位である。業界2位の日本製紙は売上高が1兆439億円、3位のレンゴーは板紙専門企業であり、売上高は6838億円である。業界4位の大王製紙の連結売上高は5464億円、5位の北越紀州製紙の売上高は2646億円であり、これに並ぶ三菱製紙の売上高は1950億円となっている。

こうした製紙業界の合併については、これまで生産性と費用効率の面から実証研究を積み重ねてきた。たとえば上田(2009)では、合併前後の製紙企業の多角化度の変化を考慮して、DEA-Super Efficiencyモデルを用いた生産面からの効率性について検証を行っている。また上田(2010)では、DEA-New Costモデルを用いて費用効率の面からの効率性を捉え、さらに、Ueda(2019)では、このモデルを用いて、合併後消滅した企業データをシミュレーションし、費用面からの合併効率を検証している。

4 北越製紙は2009年10月に紀州製紙と合併し北越紀州製紙となり、2018年4月には北越コーポレーションと社名を変更しているが、本稿では北越紀州製紙として記述する。王子ホールディングスもこれと同様に、王子製紙と記述している。

図2 日本製紙の変遷

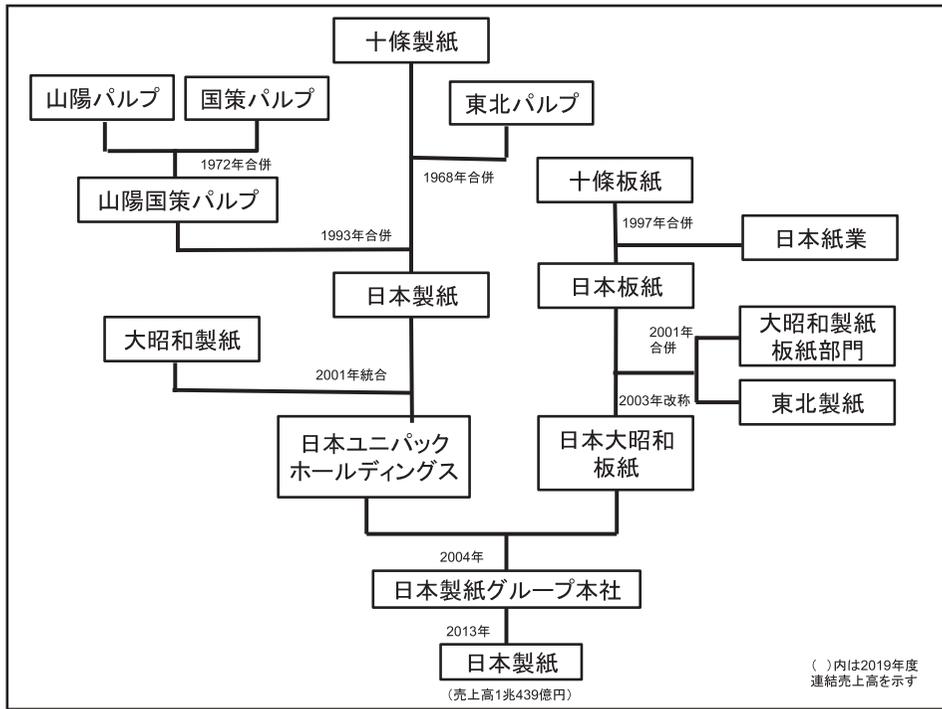


図3 中堅企業の変遷

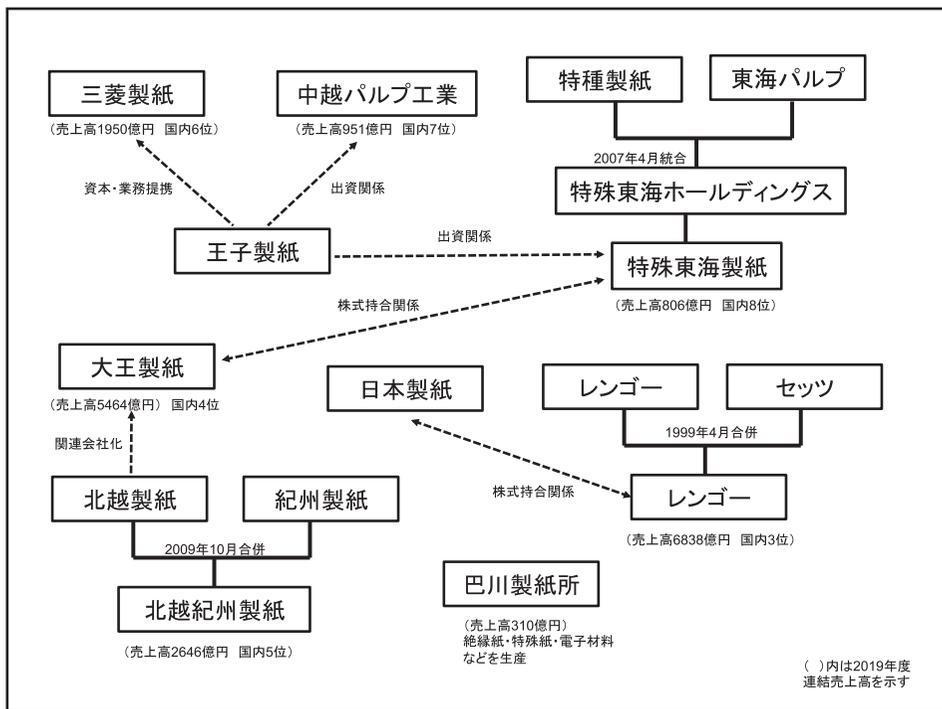


表1 変数の定義

項目	記号	データ	実質化デフレータ
資本設備	(K)	償却対象有形固定資産	民間企業設備デフレータ (日銀)
労働	(L)	期末従業員数	
原材料	(M)	原材料費	紙パルプ投入価格指数 (日銀)
生産物	(Y)	売上高	紙パルプ企業物価指数 (日銀)
資本コスト	(w_K)	減価償却費/償却対象有形固定資産	民間企業設備デフレータ (日銀)
賃金	(w_L)	(人件費+労務費)/期末従業員数	製造業名目賃金指数 (厚労省)
原材料価格	(w_M)	原材料費/売上高	紙パルプ投入価格指数 (日銀)
総費用	(C)	$C = w_K \cdot K + w_L \cdot L + M$	

これら実証研究の結果からは、市場のリーダーとなる大企業には規模の経済性 (Economies of Scale) が強く働き、中堅企業においても多品種生産を行う企業には、範囲の経済性 (Economies of Scope) の発揮が効率性の向上要因となることが確認されている。これらの経済効果について費用関数を用いて計測した研究には、上田 (2006) での静学分析と、上田 (2013) での動学分析がある。

しかし、これまでの研究では、費用関数に自体には配分非効率性の概念は含まれていない。これを計測する方法として一般化費用関数があげられる。ここでは、これまで展開した一般化費用関数の計測モデルを用いて、製紙業界における規模の経済性と配分の非効率性および要素代替の程度を推定する。分析期間は第1次オイルショック後の比較的安定しているデータが得られる1975年度から、日経 NEEDS 財務データで製造原価明細書単独決算のデータが揃う2011年度までとする。分析対象企業は、「紙・板紙統計年報」に掲載されている市場占有率が、分析期間を通じて上位25社以内に持続的に掲載される17社の企業 (計測結果に掲載) である。

計測に使用する変数は次のように加工している。まず生産要素として、資本設備 (K) は貸借対照表の償却対象有形固定資産とし、資本コスト (w_K) は減価償却率 (減価償却/償却対象有形固定資産) で定義し、民間企業設備デフレータ (日銀) で実質化している。労働 (L) は期末従業員数であり、賃金 (w_L) は損益計算書に記載された人件費および福利厚生費に製造原価明細書に記された労務費を足し合わせた金額を、期末従業員数で除した一人あたり賃金を用い、製造業の名目賃金指数 (厚生労働省) で実質化した。物的な原材料 (M) には製造原価明細書に計上された原材料費を、紙・パルプの投入指数 (日銀) で実質化した値を使用する。実際の計測では、原材料価格 (w_M) は実質原材料 (M) を売上高で除した、売上高単位当たりの原材料費で定義している。生産物 (Y) は企業の売上高を紙・パルプの企業物価指数 (日本銀行) で実質化したものを用いている。総費用 (C) を計算する際には、 $C = w_K K + w_L L + M$ で算出している。

表2 一般化費用関数の計測結果（上位5社）

Param	王子製紙		日本製紙		大昭和製紙		本州製紙		大王製紙	
	Coeff	P-value								
α_0	12.566	[.000]	12.459	[.000]	12.247	[.000]	12.326	[.000]	11.774	[.000]
α_Y	1.000	[.000]	0.861	[.000]	0.834	[.000]	0.867	[.000]	0.862	[.000]
α_K	0.141	[.163]	0.066	[.232]	0.076	[.084]	0.052	[.599]	0.092	[.013]
α_L	0.119	[.147]	0.223	[.000]	0.199	[.001]	0.199	[.059]	0.165	[.000]
α_M	0.739	[.000]	0.711	[.000]	0.725	[.000]	0.749	[.000]	0.743	[.000]
β_{YY}	0.016	[.569]	0.070	[.544]	0.052	[.856]	0.062	[.230]	0.111	[.000]
β_{YK}	0.022	[.395]	0.022	[.304]	-0.026	[.829]	-0.017	[.457]	-0.002	[.919]
β_{YL}	-0.019	[.521]	-0.163	[.049]	-0.089	[.795]	-0.093	[.053]	-0.141	[.000]
β_{YM}	-0.003	[.919]	0.141	[.069]	0.115	[.802]	0.111	[.103]	0.143	[.000]
β_{KK}	0.013	[.614]	0.021	[.508]	0.016	[.847]	0.003	[.920]	0.057	[.406]
β_{LL}	0.015	[.558]	0.250	[.000]	0.099	[.807]	0.129	[.073]	0.173	[.000]
β_{MM}	0.120	[.436]	0.241	[.000]	0.193	[.796]	0.209	[.048]	0.229	[.000]
β_{KL}	0.045	[.495]	-0.015	[.518]	0.039	[.778]	0.039	[.517]	-0.001	[.974]
β_{KM}	-0.059	[.422]	-0.007	[.568]	-0.055	[.796]	-0.042	[.628]	-0.056	[.203]
β_{LM}	-0.061	[.473]	-0.235	[.000]	-0.138	[.797]	-0.168	[.002]	-0.172	[.000]
θ_K	0.506	[.587]	0.343	[.325]	0.882	[.903]	1.170	[.722]	0.925	[.368]
θ_L	0.282	[.580]	2.424	[.000]	0.939	[.901]	1.212	[.274]	1.642	[.048]
θ_M	1.000		1.000		1.000		1.000		1.000	
D89									0.001	[.655]
D93	0.000	[.998]	0.017	[.093]						
D96	0.004	[.922]								
D02	0.001	[.934]								
D03			0.025	[.079]						
D07									-0.007	[.151]

上記データを用いた一般化費用関数の計測を試みる。実際の計測では、まず非効率性が伴わない(10)式のトランスログ費用関数に加え、非効率性を想定しない資本と労働の2本のコストシェア方程式を合わせたの3本の方程式を最尤法（完全情報最尤推定法）でシステム計測してそれぞれの係数値を得る。この係数値を初期値として、(13)式の一般化費用関数と(15)式で表された資本と労働の2本のコストシェア方程式を最尤法によってシステム推計しパラメータの係数値を得た。また、それぞれの計測では合併ダミーや異常値のダミー変数を導入している⁵。

一般化費用関数の計測結果を表2から表4に掲載する。規模の経済性の有無は生産物に掛かる係数値で確かめることができる。この計測では一般化費用関数の説明変数を平均値でセンタリングして対数を取っているため、費用関数の近似点を平均値の周りでテラー展開していると考えられる。すると(16)式で表された規模の経済性は $\ln Y = 0$,

5 一般化費用関数の計測は、TSP 5.1を用いている。

表3 一般化費用関数の計測結果 (中堅5社)

Param	山陽国策		神崎製紙		三菱製紙		北越製紙		中越パルプ		東海パルプ	
	Coeff	P-value										
α_0	11.846	[.000]	11.426	[.000]	11.435	[.000]	11.138	[.000]	10.855	[.000]	10.350	[.000]
α_Y	0.480	[.814]	0.783	[.015]	1.135	[.000]	0.986	[.000]	0.891	[.000]	0.933	[.000]
α_K	0.066	[.141]	0.018	[.748]	0.250	[.015]	0.088	[.124]	0.088	[.000]	0.102	[.003]
α_L	0.294	[.445]	0.250	[.011]	0.023	[.862]	0.153	[.152]	0.208	[.000]	0.172	[.005]
α_M	0.641	[.072]	0.732	[.000]	0.727	[.000]	0.759	[.000]	0.705	[.000]	0.726	[.000]
β_{YY}	0.452	[.944]	0.250	[.662]	-0.026	[.783]	0.020	[.450]	0.021	[.435]	0.102	[.269]
β_{YK}	-0.048	[.883]	0.014	[.862]	0.007	[.880]	0.025	[.378]	-0.019	[.099]	-0.068	[.020]
β_{YL}	-0.272	[.944]	-0.248	[.000]	0.080	[.094]	-0.040	[.212]	-0.068	[.043]	0.020	[.761]
β_{YM}	0.320	[.939]	0.235	[.000]	-0.087	[.150]	0.014	[.711]	0.087	[.012]	0.048	[.497]
β_{KK}	0.031	[.892]	0.004	[.911]	-0.022	[.743]	0.036	[.212]	0.017	[.139]	0.061	[.021]
β_{LL}	0.178	[.933]	0.246	[.000]	-0.046	[.499]	0.083	[.635]	0.108	[.000]	0.097	[.333]
β_{MM}	0.223	[.920]	0.259	[.000]	0.252	[.000]	0.145	[.373]	0.239	[.000]	0.176	[.273]
β_{KL}	0.007	[.934]	0.004	[.939]	0.160	[.006]	0.013	[.615]	0.057	[.000]	0.009	[.822]
β_{KM}	-0.038	[.816]	-0.008	[.803]	-0.138	[.000]	-0.049	[.135]	-0.074	[.000]	-0.070	[.251]
β_{LM}	-0.185	[.928]	-0.251	[.000]	-0.114	[.001]	-0.096	[.580]	-0.165	[.000]	-0.106	[.368]
θ_K	0.648	[.964]	0.325	[.616]	3.914	[.079]	0.564	[.210]	1.483	[.034]	0.909	[.527]
θ_L	0.858	[.972]	2.108	[.619]	1.382	[.023]	0.754	[.661]	1.724	[.000]	0.774	[.592]
θ_M	1.000		1.000		1.000		1.000		1.000		1.000	
D93					0.005	[.090]						
D01							-0.005	[.492]				

$w_i = 0$ で評価されるため、規模の弾力性 $\alpha_Y < 1$ ならば規模の経済性の機能が確認できる。⁶

さらにこの計測では、原材料の非効率性を表すダイバージェンス・パラメータ $\theta_M = 1$ を仮定しているため、資本設備の非効率性 θ_K と労働の非効率性 θ_L の程度を、 θ_M との相対的な差で測ることになる。

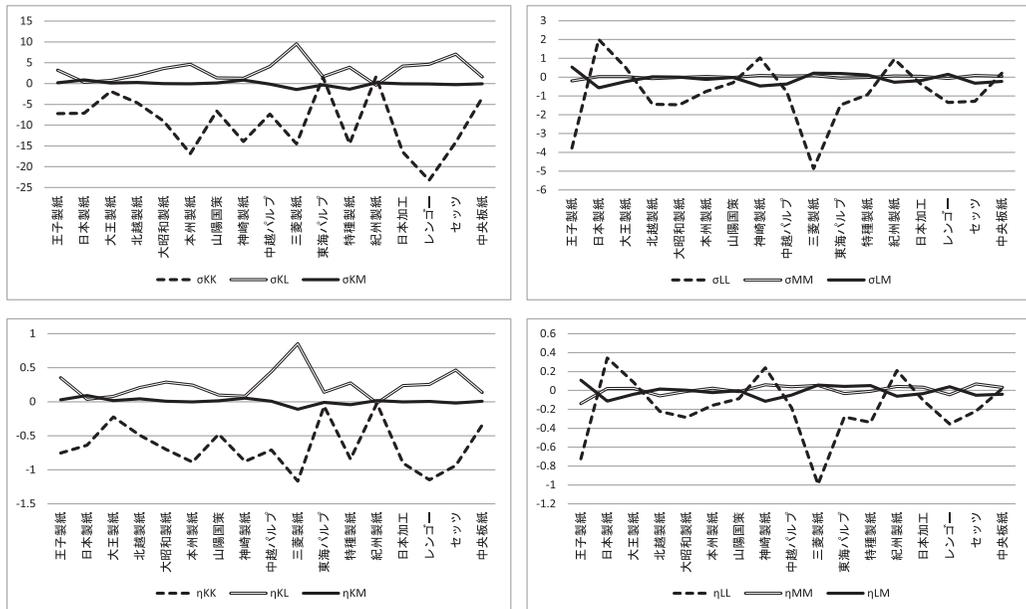
計測結果を検討すると、三菱製紙とセツ以外の企業では生産物 Y の係数値である α_Y は統計的に有意に正で1以下であり、王子製紙ではちょうど1程度という計測値になっている。山陽国策パルプの係数値は統計的な有意性は得られていないものの、ほとんどの企業で規模の経済性の発揮を認めることができる。生産要素に関する1次項の係数値である α_K , α_L , α_M も理論が想定するようにすべて正で有意なものが多いが、資本設備の係数値である α_K に関しては、ほぼ半数となる10社で統計的な有意性が得られていない。2次項についてはそれぞれ様々であり有意性も得られていないものもあるが、費用関数の概形は1次項によって保証されたものと考えられる。

6 トランスログの近似点には平均値を用いて、説明変数は平均からの乖離をとることが多い。また、近似点に変数ごとに異なるとよいことは、広田・筒井 (1992) p.141 など参照。

表4 一般化費用関数の計測結果（板紙専門企業を含む6社）

Param	紀州製紙		特種製紙		日本加工製紙		レンゴー		セッツ		中央板紙	
	Coeff	P-value										
α_0	10.425	[.000]	9.480	[.000]	10.497	[.000]	11.743	[.000]	10.559	[.000]	9.635	[.000]
α_Y	0.954	[.000]	0.636	[.000]	0.702	[.000]	0.832	[.000]	1.012	[.000]	0.734	[.000]
α_K	0.071	[.000]	0.140	[.000]	0.051	[.583]	0.063	[.533]	0.073	[.217]	0.078	[.127]
α_L	0.227	[.000]	0.315	[.000]	0.231	[.001]	0.258	[.073]	0.144	[.041]	0.249	[.000]
α_M	0.702	[.000]	0.545	[.000]	0.718	[.000]	0.679	[.000]	0.783	[.000]	0.674	[.000]
β_{YY}	0.084	[.504]	0.152	[.055]	0.257	[.008]	0.063	[.619]	0.064	[.635]	0.259	[.593]
β_{YK}	-0.044	[.553]	-0.054	[.221]	-0.015	[.815]	0.033	[.098]	0.029	[.713]	-0.082	[.540]
β_{YL}	0.026	[.795]	-0.138	[.004]	-0.232	[.008]	-0.129	[.371]	-0.016	[.807]	-0.114	[.567]
β_{YM}	0.018	[.880]	0.192	[.000]	0.247	[.004]	0.096	[.502]	-0.013	[.923]	0.196	[.128]
β_{KK}	0.055	[.551]	0.004	[.939]	0.002	[.970]	-0.011	[.727]	0.000	[.997]	0.044	[.545]
β_{LL}	0.230	[.061]	0.105	[.000]	0.147	[.067]	0.100	[.492]	0.101	[.028]	0.176	[.431]
β_{MM}	0.244	[.000]	0.243	[.000]	0.229	[.000]	0.190	[.088]	0.232	[.103]	0.242	[.000]
β_{KL}	-0.020	[.639]	0.067	[.067]	0.040	[.431]	0.050	[.117]	0.066	[.479]	0.011	[.936]
β_{KM}	-0.034	[.749]	-0.071	[.000]	-0.042	[.477]	-0.040	[.145]	-0.065	[.155]	-0.055	[.567]
β_{LM}	-0.210	[.025]	-0.172	[.000]	-0.187	[.001]	-0.151	[.258]	-0.167	[.130]	-0.187	[.052]
θ_K	1.272	[.732]	1.262	[.040]	1.315	[.567]	0.718	[.035]	1.840	[.580]	2.044	[.600]
θ_L	1.838	[.004]	0.747	[.002]	1.461	[.131]	0.730	[.487]	1.675	[.640]	2.534	[.097]
θ_M	1.000		1.000		1.000		1.000		1.000		1.000	
D99							0.000	[.921]				

図4 Allen-Uzawa の偏代替の弾力性



配分の非効率性については、ほとんどの企業で統計的な有意性は得られていないが、資本設備の配分の非効率性 θ_K は、比較的大企業で1以下となっている。つまり、大企業の資本設備が過大に投入されている可能性を示唆する結果となった。他方で中堅企業の資本設備の配分の非効率性 θ_K の値は、統計的な有意性には得られていないが、規模が小さくなるほど1を超えており、計測結果からは資本設備の過少投入が推察される。

また、 θ_L は資本設備の非効率性ほどではないが、企業規模が小さくなるほど1を超えているケースが多いと確認できる。ただ、これに関しても統計的な有意性を満たしていないものが多い。

さらにここでは、一般化費用関数の計測の際に得られた係数値をもとに、Allen-Uzawa の偏代替の弾力性 σ_{ii} と需要の価格弾力性 η_{ii} を算出した。先述の定義通り、自己価格弾力性と交叉弾力性について分析期間内で平均値を取り、その値を図4で示している。投入要素が代替的であれば σ_{ij} は正になり、補完的であれば負になる。計測結果では、資本と労働は代替的であることが特徴的である。また偏代替弾力性を表す σ_{KK} や σ_{LL} では各社の格差が大きい。交叉弾力性 σ_{KL} も σ_{KM} と比べればやや企業間格差が見られる。資本と労働の自己価格弾力性を表す η_{KK} や η_{LL} でも各社の格差は大きく、 η_{KL} の交叉弾力性は企業間格差もやや大きい。全体的に原材料 M が掛かる弾力性については、それぞれの企業で差は見られない。

以下ではこの一般化費用関数の計測によって得られた資本と労働に関する配分の非効率性がそれぞれの相対的な費用効率とどのような関係にあるか、確率的費用フロンティアモデルによって各企業の非効率性を検出し、それらの関係を確認する。

IV トランスログ型確率的費用フロンティアモデル を用いた非効率性の推定

確率的フロンティアモデル (Stochastic Frontier Analysis : 以下 SFA) は、企業の生産性や費用構造の効率性を推計する手法であり、生産関数や費用関数のフロンティアを推計し、そこからの乖離度を非効率性の程度として誤差項で捉えるモデルである。Farrell (1957) が技術非効率として定式化したものは、Leibenstein (1966) によって定義された X 非効率の概念として解釈されるが、Aigner. et al. (1977) や Meeusen and Broeck (1977) らがこれを確率的フロンティアモデルとして推計方法を示した。SFA は 1980 年代半ばから現在まで、さまざまな分野の実証研究において応用されているが、この

7 X 非効率は、たとえば組織の規模が拡大したときに伴うさまざまなコストであり、Leibenstein (1966) によってその概念が定義づけられている。

SFA の世界的普及には、Coelli（1996）で提示された汎用プログラムの貢献が大きい。⁸

日本では、植草・鳥居（1986）や Caves（1992）で、製造業を中心としたいくつかの業種について非効率性の推計とその要因分析を行っているが、粕谷（1989）、本間他（1996）、堀・吉田（1996）、松浦・竹澤（2001）、松浦・戸井（2002）など銀行業の効率性分析に適用した研究が多い。

生産フロンティアは与えられた投入量に対して技術的に可能な最大生産量を示すが、費用フロンティアは所与の生産量に対して最も費用効率的な投入要素の組み合わせと解釈される。ここでは、これまで一連の製紙業界の分析に用いてこなかったトランスログ型確率的費用フロンティアモデルを用い、先の一般化費用関数の分析に合わせて長期の分析期間に適用し、一般化費用関数で算出した生産要素の配分非効率性との対応を検討する。

いま生産要素ベクトルを Y 、投入要素価格ベクトルを W と表記し、費用関数 $C = f(Y, W)$ をテーラー展開して2次近似したトランスログ費用関数を前提とする。この費用関数自体に影響を与える外生的なショックを攪乱項 v で捉え、さらにフロンティアから乖離する部分を技術非効率性 u として捉える。 v と u は互いに独立（無相関）である。トランスログ型確率的費用関数の計測式は以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \alpha_Y (\ln Y) + \alpha_K (\ln w_K) + \alpha_L (\ln w_L) + \alpha_M (\ln w_M) \\ & + \frac{1}{2} \beta_{YY} (\ln Y)^2 + \frac{1}{2} \beta_{KK} (\ln w_K)^2 + \frac{1}{2} \beta_{LL} (\ln w_L)^2 + \frac{1}{2} \beta_{MM} (\ln w_M)^2 \\ & + \beta_{KY} (\ln w_K)(\ln Y) + \beta_{LY} (\ln w_L)(\ln Y) + \beta_{MY} (\ln w_M)(\ln Y) + v + u \end{aligned} \quad (20)$$

ここで C は総費用、 Y は生産物、 w_K は資本コスト、 w_L は賃金率、 w_M は原材料価格を表す。攪乱項 v は正規分布 $N(0, \sigma_v^2)$ に従うと仮定し、技術非効率性 u は平均 μ で切断された非負の正規分布 $|N(\mu, \sigma_u^2)|$ を仮定する。

さらにここではパネルデータによる計測を行うため、各期で非効率性の程度が変化するモデルを用い、 u を $u_{it} = u_i \{\exp[-\eta(t - T)]\}$ と表す。 η は市場全体の効率性の時間経過における変化を表すパラメータである。このとき $\eta > 0$ であれば効率性は改善、 $\eta < 0$ であれば効率性は低下、 $\eta = 0$ であれば効率性は分析期間を通じて一定であることを示している。さらに、 $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ と、 $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ という指標を考慮する。ここで σ_v^2 は誤差項（フロンティア関数自体）の分散を表し、 σ_u^2 は効率性の分散を表している。また、 γ は非効率性による変動部分を表す指標である。非効率の程度は1から

8 SFA を含む生産性および効率性の分析手法については、Coelli, Rao and Battese（1998）に一連の研究手法が詳しくまとめられている。

どれだけ乖離しているかで表されるため、 $0 \leq \gamma \leq 1$ で、効率指標の計測結果が1に近いほど効率性の高い企業である。

この確率的費用フロンティアモデルを用いて、製紙企業の効率性を推計した結果を表5に示す。計測に用いた変数の定義は一般化費用関数の計測で示した表1と同様である。被説明変数は各企業の総費用のデータそのものに対数値を取り、説明変数についてはすべての企業のデータの平均値でセンタリングしたものを対数化しているため、一般化費用関数同様にトランスログ型費用関数が平均値の周りでのテーラー展開と解釈される。したがって、規模の経済性を検討する際にも、規模の弾力性が1以下であるかどうか着目すればよい。

生産物の係数値 α_Y は0.991となっており、パネルデータの計測では規模に関してほぼ収穫一定と解釈できる。これには規模の経済性が発揮されている企業とそうでない企業が混在しているため、全体で見るとこのような結果になったものと考えられる。この事実から、単に規模の経済性をパネルデータによって確認する場合には、規模別で分類した計測が有効であろう。資本、労働、原材料の3つの生産要素の1次項である、 α_K 、 α_L 、 α_M の係数値はすべて正で有意に得られているため、理論の1次条件条件は満たされている。2次項の弾力性はすべて有意に正であり、交叉項はほぼ負となっているが、生産物と原材料の交叉項の係数値のみが正となっている。

切断正規分布の平均値 μ の係数値は0.029で得られているが、統計的な有意性がないため、この計測では平均がゼロでの半正規分布分布を仮定してもよいことになる。 η の値はプラスで有意であるため、経年的に効率性は改善していると解釈できる。

確率的費用フロンティアモデルによって推計された各社の非効率性を表6に示している。効率値は経年的に変化するため、ここでは各年に計測された効率値の平均値からの乖離率の平均値を各企業について算出した値を提示している。合併前後の処理については、例えば1993年の王子+神崎=新王子のケースであれば、王子製紙、神崎製紙、新王子製紙それぞれ別企業として効率値を推計しているが、表6ではこれらを王子製紙の効率値とみなし、効率性の平均乖離率の平均値を算出している。これは一般化費用関数の計測で、合併前後の企業を同様にひとつの企業を見なして計測しており、後に行う配分の非効率性とSFA費用効率を対応させる目的がある。

これを見ると、セツツや中央板紙など、板紙専門の企業が上位にランキングされており、東海パルプや本州製紙、北越製紙や大王製紙も洋紙のほかに板紙を生産している企業が上位を占めている。さらに綿密な検証が必要であるが、効率値には洋紙と板紙の収益率の差が反映していること、また範囲の経済性が影響していることなどが推察される。

9 確率的費用フロンティアモデルの計測には、STATA14を利用している。

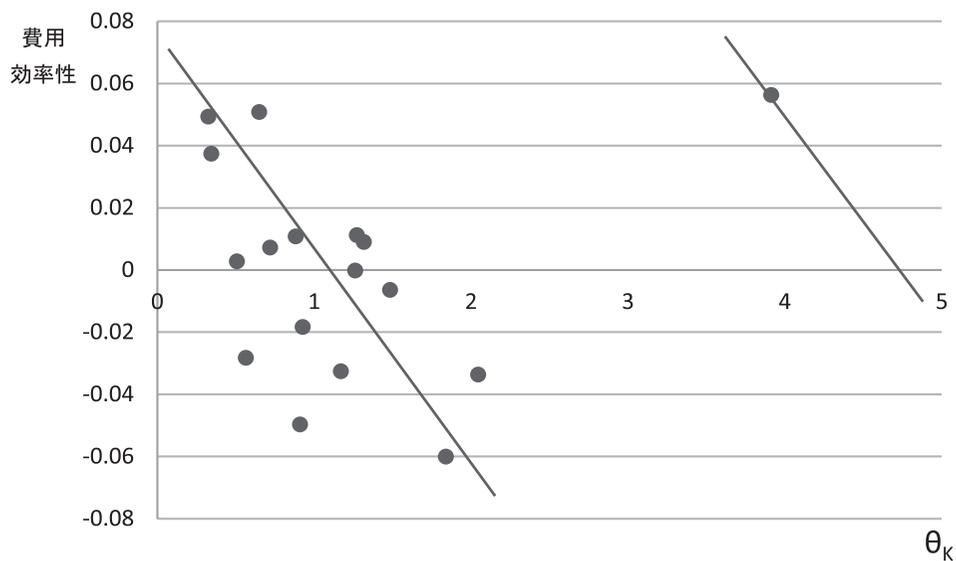
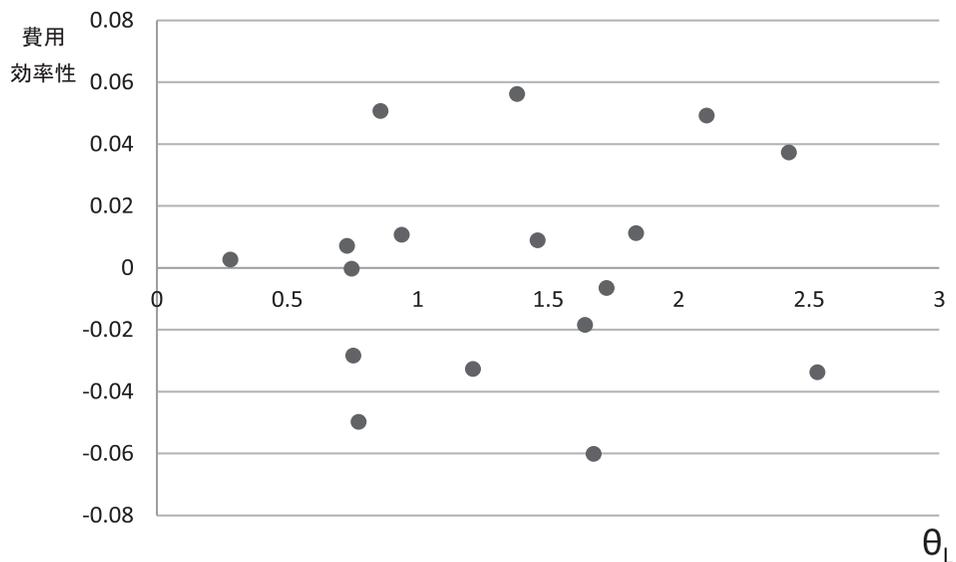
表5 確率的費用フロンティアモデルの計測結果

TC	Coef.	Std.Err.	z	P> z	[95% Conf.Interval]	
α_0	11.525	0.010	1131.100	0.000	11.505	11.545
α_Y	0.991	0.006	165.250	0.000	0.979	1.003
α_K	0.039	0.011	3.430	0.001	0.017	0.061
α_L	0.042	0.020	2.160	0.031	0.004	0.080
α_M	0.787	0.017	45.690	0.000	0.753	0.821
β_{YY}	0.034	0.005	7.440	0.000	0.025	0.042
β_{KK}	0.097	0.031	3.090	0.002	0.036	0.159
β_{LL}	0.042	0.067	0.620	0.533	-0.089	0.172
β_{MM}	0.055	0.043	1.290	0.199	-0.029	0.138
β_{YK}	-0.038	0.013	-2.930	0.003	-0.063	-0.012
β_{YL}	-0.009	0.020	-0.430	0.665	-0.049	0.031
β_{YM}	0.121	0.015	8.150	0.000	0.092	0.150
β_{KL}	-0.054	0.079	-0.680	0.495	-0.209	0.101
β_{KM}	-0.215	0.048	-4.510	0.000	-0.308	-0.122
β_{LM}	-0.207	0.077	-2.680	0.007	-0.359	-0.056
μ	0.029	0.023	1.280	0.201	-0.016	0.074
η	0.037	0.006	5.860	0.000	0.024	0.049
σ^2	0.002	0.001	0.001	0.005	Wald $\chi^2(14) = 42407.46$ L. L = 1003.44 ($\chi^2 = 0.000$)	
γ	0.586	0.156	0.286	0.834		
σ_u^2	0.001	0.001	0.000	0.003		
σ_v^2	0.001	0.000	0.001	0.001		

表6 各社効率性の計測結果

	企業名	効率性平均乖離		企業名	効率性平均乖離
1	セツツ	-0.0601	10	レンゴ	0.0072
2	東海パルプ	-0.0497	11	日本加工製紙	0.0090
3	中央板紙	-0.0337	12	大昭和製紙	0.0108
4	本州製紙	-0.0326	13	紀州製紙	0.0112
5	北越製紙	-0.0283	14	日本製紙	0.0374
6	大王製紙	-0.0184	15	神崎製紙	0.0492
7	中越パルプ	-0.0064	16	山陽国策	0.0507
8	特種製紙	-0.0002	17	三菱製紙	0.0562
9	王子製紙	0.0027			

ここで一般化費用関数によって得られた配分非効率性と、確率的費用フロンティアモデルによって得られた効率値との関係を検証する。図5は各社のSFA効率性と資本の配分非効率性 θ_K の関係を、図6はSFA効率性と労働の配分非効率性 θ_L の関係を散布図に示したものである。図5では三菱製紙の値が右上にプロットされているため、これを異常値としてダミー変数で処理し、SFA非効率性を一般化費用関数から得られた配分非効率性に回帰するかたちで、それぞれOLSによる計測を行った。

図5 各社の SFA 効率性と θ_K の関係図6 各社の SFA 効率性と θ_L の関係

$$EF = 0.0362 - 0.039EK + 0.172D \quad (21)$$

(0.035) (0.014) (0.003)

$$EF = -0.006 + 0.005EL \quad (22)$$

(0.770) (0.736)

[EF: SFA 非効率性の平均乖離値 EK: θ_K EL: θ_L 括弧内は p 値]

この結果を見ると、SFA 非効率性の大きさは、資本の配分非効率性 θ_K と統計的に有意な正の係数値が得られた一方で、労働の配分非効率性 θ_L とは相関が見られない。つ

まり、SFA 非効率性の大きさは、労働の配分非効率よりも資本設備の配分非効率性が主要因となっていることがわかる。資本の配分非効率性 θ_k が大きいのは、資本が相対的に過小投入となっていることを意味するため、資本設備の過小装備が SFA 非効率の要因となっている可能性が示唆される。このことから、一連の製紙業界の合併による規模の経済性の発揮は、資本設備の拡大と合理化を同時に進行させることが有効な手段であると考えられる。

V 結 論

本稿は日本の製紙業界における生産性と効率性の実証分析に、費用最小化を行っていない企業の効率性分析に用いられる一般化費用関数を用いて配分の非効率性を検証し、確率的費用フロンティア（SFA）モデルによって得られる非効率性との関係を明らかにした。分析の結果からは、SFA 非効率性の大きさは、労働よりも資本設備の過小投入に帰着することが示され、製紙企業の効率的な操業には、長期的な視点から資本設備の動的調整を行うことが重要であることを示している。同時に、大企業では相対的に過大な資本設備が規模の経済性の発揮につながっているため、製紙業界の再編にも余地が残る。

他方で、一般化費用関数の計測においては、配分の非効率性に統計的な有意性が担保されていないことから、変数の作成方法を改善することや、分析期間の分割、パネルデータの活用などが課題となる。また、配分非効率性の改善が SFA 費用効率性をどの程度変化させるかということについては、シミュレーションを含む多角的な分析が必要になる。

長引く不況で紙需要は急減している。余剰能力を抱えた製紙企業では生産能力の削減を余儀なくされ、収益構造の転換を図るべくさらなる業界再編も不可避となっている。中国や東南アジアに向けた紙の海外需要シフトが進む中で、製紙企業の生産性や費用効率の向上には、バイオマス発電などの新技術の開発とセルロースナノファイバー（CNF）など新素材の実現に向けた本格的なイノベーションによる多角化投資が不可欠となるであろう。

参考文献

- [1] Aigner, D., C. A. Knox Lovell and P. Schmidt (1977) "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production function Models," *Journal of Econometrics*, 6, pp.21-37.
- [2] Atkinson, S. E. and R. Halvorsen (1984) "Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand In U.S. Electric Power Generation," *International Economic Review*, 25, pp.623-638.
- [3] Atkinson, S. E. and R. Halvorsen (1986) "The Relative Efficiency of Public and Private Firms in a Regu-

- lated Environment”, *Journal of Public Economics*, 29, pp.281-294.
- [4] Atkinson, S. E. and R. Halvorsen (1990) “Tests of allocative efficiency in regulated multi-product firms”, *Resources and Energy*, 12, pp.65-77.
- [5] Atkinson, S. E. and C. Cornwell (1994) “Parametric Estimation of Technical and Allocative Inefficiency with Panel Data”, *International Economic Review*, 35, pp.231-243.
- [6] Charnes, A. W. W. Cooper and E. Rhodes (1978) “Measuring the efficiency of decision making units,” *European Journal of Operational Research*, 2, pp.429-444.
- [7] Coelli, T (1996) “A Guide to Frontier Version 4.1: A Computer Program for Stochastic Frontier Production and Cost Function Estimation,” CEPA, Working Papers, No 7.
- [8] Coelli, T., D. S. P. Rao and G. E. Battese, (1998) ‘An Introduction to Efficiency and Production Analysis,’ Kluwaer Academic Publishers.
- [9] Cooper, W., L. M. Seiford and K. Tone (2006) ‘Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses’, With DEA-solver Software and References, *Springer Science and Business Media*.
- [10] Diewert, W. E. (1971) “An Application of the Shepard Duality Theorem: A Generalized Leontief Production Function,” *International Journal of Political Economy*, 79, pp.481-507.
- [11] Farrell, M. J. (1957) “The Measurement of Productive Efficiency”, *Journal of the Royal Statistical Society*, 120, pp.253-82.
- [12] Lau and Yotopolous (1971) “A Test of Relative Efficiency and Application to Indian Agriculture”, *American Economic Review*, 61, pp.94-109.
- [13] Leibenstein, H. (1966) “Allocative Efficiency vs. X-Efficiency,” *American Economic Review*, 66, pp.392-415.
- [14] Lovell, C. A. Knox and R. C. Sickles (1983) “Testing Efficiency Hypotheses in Joint Production: A Parametric Approach”, *Review of Economics and Statistics*, 65, pp.51-58.
- [15] Meeusen, W. and J. Van Den Broeck (1977) “Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error,” *International Economic Review*, 18, pp.435-444.
- [16] Toda, Y. (1976) “Estimation of a Cost Function When Cost is not a Minimum”, *Review of Economics and Statistics*, 58, pp.259-268.
- [17] Ueda, M. (2019) “The Success or Failure of Mergers in Japan’s paper Industry: Evaluation of Merger Effects using DEA and Simulation data,” *International Journal of Economic Policy Studies*, 14, pp.179-197.
- [18] 植草益, 鳥居昭夫 (1995) 「Stochastic Frontier Production Frontier を用いた日本の製造業における技術非度の計測」, 『経済学論集』 53, pp.2-23。
- [19] 上田雅弘 (2006) 「日本の製紙業における規模と範囲の経済性」, 『同志社商学』 第57巻6号, pp.492-510。
- [20] 上田雅弘 (2009) 「DEA-Super Efficiency モデルを用いた製紙業の合併と多角化の生産効率分析」, 『同志社商学』 第61巻3号, pp.127-149。
- [21] 上田雅弘 (2010) 「DEA・SFAによる製紙業の費用効率分析」, 『同志社商学』 第66巻1号, pp.274-291。
- [22] 上田雅弘 (2013) 「動学的要素需要関数による製紙企業の規模と範囲の経済性の計測」, 『社会科学』 第42巻4号, pp.155-176。
- [23] 粕谷宗久 (1993) 『日本の金融機関経営－範囲の経済性, 非効率性, 技術進歩－』, 東洋経済新報社。
- [24] 衣笠達夫 (2002) 「日本の都市ガス産業の Averch-Johnson 効果の分析」, 『公益事業研究』, 第54巻, 第2号, pp.91-100。
- [25] 衣笠達夫 (2005) 『公益事業の生産性分析』, 中央経済社。
- [26] 小林千春 (1996) 「一般化費用関数に基づく配分の非効率性の検定と規模の経済性－日本の電力産

業への適用－』『六甲台論集－経済学編－』第43巻1号 pp.46-59。

- [27] 鳥居昭夫（1995）「技術効率－市場の変化と市場成果－」，植草益編『日本の産業組織－理論と実証のフロンティア』。
- [28] 鳥居昭夫（2001）『日本産業の経営効率』NTT 出版。
- [29] 中山徳良（2003）『日本の水道事業の効率性分析』，多賀出版。
- [30] 広田真一・筒井義郎（1992）「銀行業における範囲の経済性」，堀内昭義・吉野直之編『現代日本の金融分析』第6章所収，東京大学出版会。
- [31] 堀敬一・吉田あつし（1996）「日本の銀行業の費用効率性」，*Japanese Journal of Financial Economics*，第1巻2号，pp.87-110。
- [32] 松浦克己・竹澤康子（2001）「われわれは金融機関をどのように選別すればよいか－フロンティア生産関数による効率性分析－」，松浦克己・竹澤康子・戸井佳奈子著『金融危機と経済主体』第8章所収，日本評論社。
- [33] 松浦克己・戸井佳奈子（2002）「銀行の経営費効率とその要因－銀行破綻，銀行再生政策との関連において－」，林敏彦・松浦克己編著『金融変革の実証分析』第3章所収，日本評論社。
- [34] 『紙・板紙統計年報』日本製紙連合会。
- [35] 『紙パルプ統計年報』経済産業省。
- [36] 『日本マーケット・シェア事典』矢野経済研究所。