

日本の製紙業におけるイノベーション効果の分析

—大王製紙のケース—

上 田 雅 弘

本稿では、日本の製紙業に関するイノベーションについて、大王製紙を例に理論的、実証的な分析を試みた。近年、製紙業ではバイオマス発電やセルロースナノファイバー（CNF）など新素材開発のイノベーションが目覚ましい。製紙業の将来について、理論実証分析を行うために、まず寡占市場におけるクールノー・モデルで外部性を持つ技術への投資が市場を拡大して生産量を増大させること、さらに実証分析では大王製紙を取り上げて、シミュレーションから得られた将来の産出と投入のデータを用いた DEA による費用効率評価を試みた。その結果、CNF の開発等による新市場の開拓は、長期的に製紙企業の費用効率性を向上させる効果があり、大王製紙のケースでは、2050 年時点の効率性は、好景気であった 1990 年において実現されていた効率水準に並ぶことが明らかになった。

製紙業界では、従来の本業である洋紙の需要低迷が、新市場開拓のインセンティブとなり、範囲の経済性を発揮できる新素材開発へのイノベーションを実現している。今後、CNF の製造技術の発展によって製造コストの低減を実現し多様な用途の開発ができれば、市場をさらに拡大することが可能となる。製紙業界においては、既来实现されている発電やバイオマス・エネルギーが活用され、本稿が想定した 2050 年時点では、CNF が多様な財に広く利用されているだろう。カーボンニュートラルの達成とともに、製紙企業は従来の本業を上回る収益力を獲得することが期待される。

1 序

日本の製紙業は、ペーパーレス化やデジタルコンテンツの進展に加え、世界的な感染症の拡大による事業のオンライン化により、大きな転換期を迎えている。そもそも製紙業は大型装置産業であり、大量のエネルギーを使って生産が営まれるが、近年では紙の製造工程で発生する廃棄物をバイオマス燃料として自家発電に利用し、大幅な省エネルギーを達成している。さらにはセルロースナノファイバーなどの新素材開発によって、将来、市場の拡大が期待される新市場を開拓し継続的な研究開発が活発である。

本稿では、製紙業界の新市場開拓に向けたイノベーションの効果について寡占市場を前提に理論的に捉え、新市場の拡大が企業の生産性・効率性にどのように影響するの

か、大王製紙を例にしてシミュレーション・データによる実証分析を試みる。

そこで以下の2節では製紙業における新素材の可能性を探り、3節では新市場に向けたイノベーションがもたらす効果を理論モデルによって把握する。さらに4節では開拓された新市場の将来収益と費用についてシミュレーションを行い、5節で効率性の変化をDEAによって捉える。最後に6節で結論を述べる。

2 製紙業のイノベーションと新素材の可能性

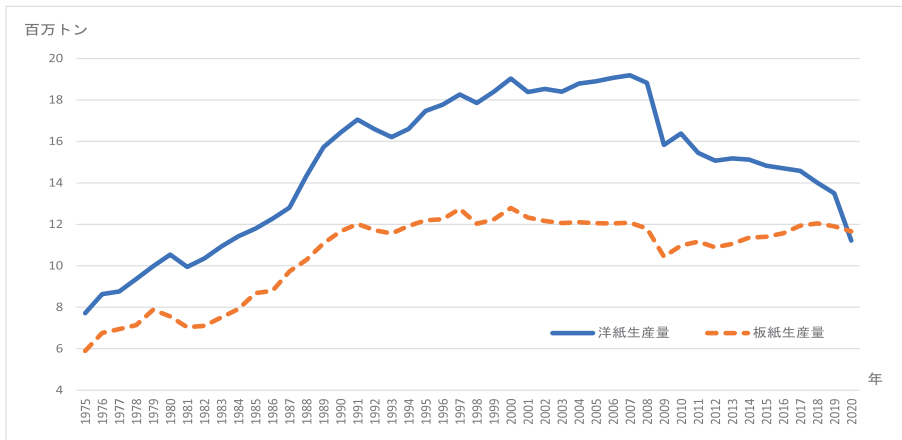
紙を大別すると、新聞用紙、印刷用紙・包装用紙、衛生用紙、雑種紙などに用途がある「洋紙」と、段ボール厚紙・紙器用板紙などの「板紙」に大別される。紙の生産量は1990年以降低迷しており、とりわけ2008年のいわゆるリーマン・ショックを期に生産量が大きく落ち込んだ。その後も洋紙の生産量は減少し続けているが、板紙の生産量は流通市場の拡大に伴い、梱包用として近年ではやや増加傾向にある。

ここで1975年から2020年までの長期にわたる洋紙と板紙の生産量の推移を図1で確認する。1970年代後半から1980年にかけては、1970年代初頭の第一次オイルショック時の不況からの需要回復を背景に、洋紙・板紙ともに生産量は順調に増大している。1980年代初頭には、第2次オイルショックによる不況の影響で、一時、生産量は停滞するが、その後は1990年に至るまで、紙の旺盛な需要を背景に洋紙・板紙の生産量は増加傾向を辿る。

しかし、1990年代初頭のいわゆるバブル崩壊による不況によって紙の需要は減少する。洋紙の生産量は1993年に再び増加基調となるが、板紙の生産量はその後一定であり、1200万トン前後で停滞している。洋紙の生産量も2007年をピークにその後は大きく減少して、2020年時点では、洋紙の生産量が板紙の生産量を下回る水準にまで落ち込んでいる。洋紙においては、特に新聞用紙、印刷・情報用紙、包装用紙の需要が一貫して減少しているが、この原因はICT導入によるペーパーレス化の流れや、紙媒体以外のコンテンツの拡大、包装の合理化などがあげられる。衛生用紙は代替が難しい生活必需品であるため激減はせず、また板紙の需要はインターネット通販の拡大に支えられ堅調である。

このような紙需要の低迷に対して、製紙業界では新たな市場開拓と新技術の開発が活発である。具体的には、バイオマス燃料の積極的な活用、製造工程で出た廃棄物の燃料としての再利用、発電に伴って生じる蒸気エネルギーの製造利用などの取り組みが進め

図1 洋紙と板紙の年生産量の推移



られている。また従来、プラスチックで製造されてきたものを、それ以外の素材に置き換えようという流れが広まっており、その中で注目を浴びているのが長い歴史を持つ紙という素材である。容器や食器類などをプラスチックから紙へ置き換える動きが、ここ数年で本格化している。

紙の製造過程では、さまざまな物質・エネルギーが投入され排出されている。化石燃料（石炭・重油）の利用を削減するため、古紙・廃プラスチックを原料とする固形燃料や廃タイヤ、製造過程で生じる黒液、木くず、ペーパースラッジなどが発電燃料として利用されている。

紙製品の用途を広げる技術開発は日本の製紙業界で活発に行われている。例えば、大王製紙はナイフにも使える硬さを持つ厚紙や、硬さに加えて水や油にも強く、電子レンジに対応できる容器を製造できる厚紙を開発している。

なかでも新素材として注目すべきであるのが、セルロースナノファイバー（以下CNF）である¹⁾。CNFは、木を構成する繊維をナノレベルまで細かくほぐすことで生まれる最先端のバイオマス素材である。植物繊維由来であることから、生産・廃棄に関する環境負荷が小さく、将来の低炭素社会の実現にも貢献できる素材であると考えている。CNFは鋼鉄の5分の1という軽量であるが鋼鉄の5倍以上の高強度を有しており、弾性率は高強度繊維で知られるアラミド繊維並に高く、温度変化に伴う伸縮はガラス並みであるため、電化製品や建物、自動車、航空機など、非常に広範な分野に応用が期待されている。またCNFはプラスチックなどに比べて微生物による分解が容易で、燃やしてもCO₂を排出しないという利点も有している。

既に CNF を用いた電気自動車も開発されており、車体のボンネット、ドア、スポイラーなどの外装だけではなく、内装パネルやドアミラーにも活用されている。また、塗料への CNF 配合により、顔料分散性やガラスへの密着性が高くなり、立体感のある重ね描きや曲面への塗布等の高機能化が可能となっている。さらには CNF が有している粘度特性は、高保湿性や低曳糸性も兼ね備えているため、化粧品添加剤用途への利用も期待されている。CNF をコンクリートへ配合してひび割れの低減を達成でき、食品等の包装においてもガスバリア性を生かして、バイオマス由来のバリア包装資材への転換が可能となる。さらには、フィルムに CNF を塗工した後、紙を貼り合せて加熱乾燥した積層シートで、非常に高い酸素バリア性を持たせることができる²⁾。

以下では CNF に代表される製紙業界の新技術導入の効果を、寡占市場の理論的枠組みで解釈するために、関連した先行研究を整理して分析の焦点を探る。

3 寡占市場におけるイノベーションの効果

発電や CNF の開発にあげられる製紙業におけるイノベーションは、従来の生産財である紙の製造過程で生じたさまざまな素材や技術の外部効果を活用して開発しており、もとは植物繊維の分解する過程で生じた製造技術を生かしたものである。その意味では「範囲の経済性」を発揮した技術であると解釈できる。

このような状況を寡占市場の理論で説明した中島 (1990) は、企業の業務多角化の要因として経済の外部性を考慮したモデルを展開している。いま 2 種類の業務が存在し、それぞれの生産が次のような 2 つの業務間の外部性を考慮した生産関数に基づいてなされるものと想定する。

$$y_1 = f_1(X_{1m}) \cdot g_1(X_{2n}) \quad (1)$$

$$y_2 = f_2(X_{2n}) \cdot g_2(X_{1m}) \quad (2)$$

ここで y_1 は、製紙業で例えると従来の本業である製紙であり、その生産要素ベクトルは $X_{1m} = (x_{11}, \dots, x_{1m})$ で表現されている。 y_2 は CNF などの新素材の生産と解釈でき、その生産要素ベクトルは、 $X_{2n} = (x_{21}, \dots, x_{2n})$ で表される。したがって、 f_1 は本業である製紙業の生産関数、 g_1 は製紙業に新素材の生産が与える外部効果を示す関数である。また、 f_2 は新素材の生産関数であるが、従来の本業である製紙業も新素材の生産に与

える外部効果をもつことから、 g_2 でこれを表現している。

いまそれぞれの業務を企業 A の利潤と企業 B の 2 企業が独立に行うならば、企業 A と企業 B の利潤は以下の式で表される。

$$\pi_A = p_1 f_1(X_{1m}) \cdot g_1(X_{2n}) - \sum w_{1i} x_{1i} \quad (3)$$

$$\pi_B = p_2 f_2(X_{2n}) \cdot g_2(X_{1m}) - \sum w_{2j} x_{2j} \quad (4)$$

ここで、 p_1 と p_2 は 2 つの生産物価格、 w は生産要素 x の価格である。この定式化のもと、中島 (1990) は、一般的なクールノー・モデルの場合、戦略的代替関係から相手企業が生産量を増やしたときは自企業が生産量を減らすが、外部性を取り入れたクールノー・モデルの場合、相手企業が生産量を増やしても、自企業は生産量を増やす余地があるとしている。つまり、外部性の大きさによって戦略的補完のケースが発生することを理論的に証明している。外部性の大きさがプラスならば企業 A は企業 B にとって外部経済であり、両企業の生産量が増大して市場が拡大するため、反応曲線は右上がりとなる。逆にマイナスならば反応曲線は右下がりとなる³⁾。

製紙業は大規模装置産業であるため、「規模の経済性」の実現に加えて、パルプや古紙といった共通の原料で多品種の紙を生産するため、「範囲の経済性」が発揮される。発電や CNF などの新技術も、もとは生産プロセスの中で生じる原料や廃材を活用し、従来、紙を生産する過程で必要な技術を応用できるという意味で、正の外部経済効果が生じる。中島 (1990) のモデルはこうした外部効果を反映している。

外部性のモデルとは独立に、寡占市場における新技術の導入を理論的に分析した先行研究は内外で展開されている⁴⁾。Mills and Smith (1996) は、2 つの企業が第一段階で旧技術と新技術のどちらを採用するかを同時に選択し、第二段階でクールノー競争を行なうモデルを構築した。新技術は固定費用が高いが限界費用は低い。理論モデルの帰結は、一方の企業が新技術を採用し、他方の企業はそれを採用しないという状況が均衡になることを示している。また Elberfeld (2003) は Mills and Smith (1996) のモデルを寡占に拡張し、全ての企業が必ずしも新技術を採用するわけではないことを確認したうえで、市場に 3 企業以上が存在する場合には、新技術を採用する企業が過剰に生じることを明らかにしている。さらに Elberfeld and Nti (2004) は Elberfeld (2003) のモデルで新技術の限界費用水準に不確実性を導入し、不確実性が大きくなるほど研究開発投資費用は高まり、新技術への投資を行なう企業数が増加するという帰結を提示している。

また市場の競争形態と新技術の導入に着目した Hattori and Tanaka (2016) では、クールノー市場に比べて競争度が弱いシュタツケルベルク市場における新技術導入を理論的に検討している。その結果、シュタツケルベルク市場の方が経済厚生観点から見て新技術の導入が過少になる可能性があることを指摘している。こうした状況に対しては、政府による新技術導入への補助金政策が必要であることを主張している。

以下ではこうした正の外部性による効果を前提に、同質財を生産する対称的な2つの企業、企業 A と企業 B があるときのクールノー・モデルを構築する。いま企業間の情報は完全であり、他社の参入退出が生じない短期市場を想定する。一般的な市場の逆需要関数は $p = a - bQ$ 、各企業の費用関数は、 $C_i = cq_i$ で与えられるものとする。ただし、 $q_i (i = A, B)$ は各企業の生産量、 p は価格、 Q は市場全体の需要量 ($Q = q_A + q_B$) である。このとき企業 A について利潤の最大化を考える。企業 A の利潤は次のように定式化できる。

$$\pi_A = p(q_A + q_B)q_A \cdot \theta(F) - c_A q_A - F \quad (5)$$

ここで F は生産技術に正の外部性をもつ新技術 $\theta(F)$ を導入する際の初期費用 F が外部性を通じて生産物の増大をもたらす効果を表し、 $\partial\theta/\partial F \geq 1$ と想定する。正の外部効果 $\theta(F)$ が大きくなれば、新技術による生産性増大効果が大きくなることを意味しており、収益性も向上する。ここで企業 A の利潤を最大化させる生産量を求めるために、次のように利潤関数 π_A を q_A に関して偏微分しゼロと置く。

$$\frac{\partial\pi_A}{\partial q_A} = (a - 2bq_A - bq_B)\theta - c_A = 0 \quad (6)$$

となる。企業 B についても同様に、

$$\frac{\partial\pi_B}{\partial q_B} = (a - 2bq_B - bq_A)\theta - c_B = 0 \quad (7)$$

となる。ここで (6) 式を解くと、次のような企業 A の反応関数を求めることができる。

$$q_A = \frac{\theta a - \theta b q_B - c_A}{2\theta b} \quad (8)$$

同様に (7) 式を展開して、企業 B の反応関数を得る。

$$q_B = \frac{\theta a - \theta b q_A - c_B}{2\theta b} \quad (9)$$

ここで (8) 式で表された企業 A の反応関数に、企業 B の反応関数 (9) 式を代入し、ナッシュ均衡時の企業 A の最適な生産量を、次式のようにパラメータ表示する。

$$q_A^* = \frac{ab - 2bc_A/\theta + bc_B/\theta}{3b^2} \quad (10)$$

各企業の費用条件に技術格差がある場合は、この (10) 式で表現された関係が意味を持つ。外部効果である θ の増大は、 $c_B \cong c_A < 2c_B$ である限りは、右辺第2項の $-2c_A/\theta$ が小さくなる効果の影響が強くなるため、当該企業の生産量増大をもたらす。いま企業 A と企業 B の生産技術は対称的であると想定しており、 $c_A = c_B$ となるため、この条件を考慮すると企業 A のナッシュ均衡における最適生産量を、次のようにさらに単純に表現できる。

$$q_A^* = \frac{\theta^2 ab - \theta bc}{3\theta^2 b^2} = \frac{ab - \frac{bc}{\theta}}{3b^2} \quad (11)$$

このとき、新技術の外部効果 θ が大きいほど、 bc/θ の値が小さくなるため、均衡生産量は大きくなる。したがって、各企業の限界費用 c が小さく、外部効果 θ が大きいほど、企業 A の生産量が増大することがわかる。また、企業 B の均衡生産量は、対称的な企業を仮定しているため企業 A と同じになる。すると、市場全体の生産量は $Q = q_A + q_B$ なので、(11) 式を2企業について足し合わせた次のようなかたちになる。

$$Q = \frac{2}{3} \left(\frac{\theta^2 ab - \theta bc}{\theta^2 b^2} \right) \quad (12)$$

いま、逆需要関数は $p = a - bQ$ であるので、市場全体の生産量をこれに代入すると、

$$p = a - b \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{\theta^2 ab - \theta bc}{\theta^2 b} \right) \quad (13)$$

となる。したがって、企業 A の利潤関数をパラメータ表示すると次のようになる。

$$\pi_A = \left(\frac{\theta^2 ab - \theta bc}{3\theta^2 b^2} \right) \left[\left\{ a - b \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{\theta^2 ab - \theta bc}{\theta^2 b} \right) \right\} \cdot \theta(F) - c \right] - F \quad (14)$$

この (14) 式の左辺を利潤率のかたちにして、イノベーション効果の収益性を検討すると、正の外部性を仮定しているため自明ではあるが、

$$\frac{\pi_A}{pq_A} = \theta(F) - \frac{c_A}{p(q_A + q_B)} - \frac{F}{p(q_A + q_B)q_A} \quad (15)$$

と表現できる。既存の技術開発による費用効率の改善は c_A が小さくなることを意味するので、売上高利益率は向上すると言える。また、新技術の外部効果 $\theta(F)$ が大きくなるほど、他の条件が一定であれば、利潤率は高くなるのがわかる。

4 イノベーション効果のシミュレーション

本稿では 1970 年代から 2020 年に至るまで、製紙業界において大型合併を行っていない大王製紙を製紙業におけるイノベーション効果の分析対象とする。大王製紙の三島工場は、敷地面積は 167 万平方キロメートルを誇り、世界でも有数の大規模臨海製紙工場である。2021 年度時点で、紙・板紙の生産量は年間 210 万トンで国内需要の 8 パーセントを担っており、コスト競争力がある⁵⁾。紙の原料となるクラフトパルプの生産においても国内最大の設備が併存し、パルプの生産量も国内トップレベルである。また三島工場は、臨海立地であることから、木材チップ調達コストも軽減でき、国際貿易港を通じてアジア諸国への物流コストにも優位性がある。

また大王製紙は 2050 年のカーボンニュートラルへの実現計画を策定しており、従来のエネルギー効率化やバイオマス燃料の活用に加え、さまざまな環境配慮の取り組みを進めている。また多種多様な燃料を利用できるノウハウや新技術の導入によって、積極的に化石燃料の削減に取り組む施策を講じている。目標達成に向けて、三島工場では 2020 年高効率黒液回収ボイラーを設置し、パルプ排水からバイオガスを取り出す処理設備を稼働させている。また 2021 年には重油の一部を低炭素燃料である LNG に転換する設備も開発され、近年カーボンニュートラルの実現に向けた研究開発と設備の増強が活発である。

三島工場以外でも新技術の導入は盛んである。いわき大王製紙では、木くずや廃プラスチックを燃料とするリサイクルボイラーが2023年度には稼働予定であり、自家発電100%の工場となる。余剰となった電力は、隣接の福島工場に送ることで購入電力も削減できる。リサイクルボイラーは三島工場にも新設し、石炭ボイラーを順次削減する計画が進められている。さらに、バイオマスや廃棄物由来燃料を有効利用することで石炭への依存度を下げ、2050年までに石炭の使用量ゼロを達成し、カーボンニュートラルの実現を目標としている。

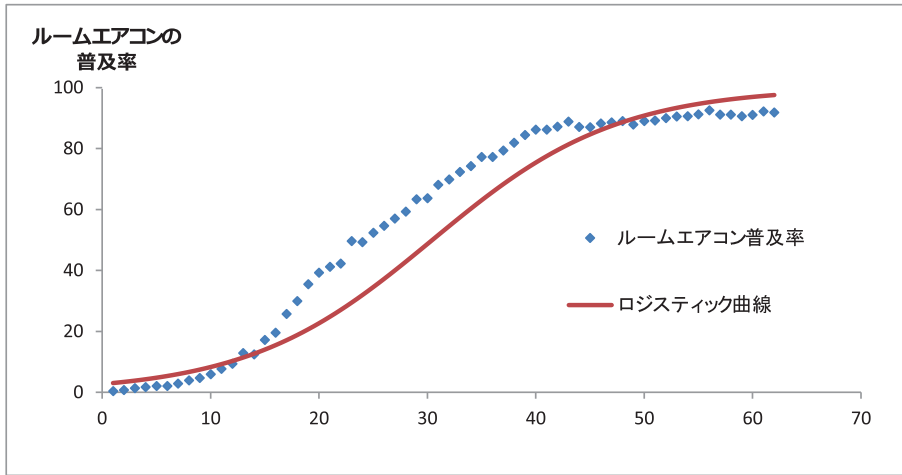
また、セルロースナノファイバー（CNF）の早期事業化にも成功している。先にも説明したように、CNFは木材繊維（パルプ）を微細化したものであり、大王製紙でもその特性を生かした開発が進められている。CO₂削減に向けたニーズから自動車部品やフィルム、フィルター、紙分野など様々な応用が期待されている。新素材であるCNFの実用化と開発に向け、大王製紙は2021年度に新たにCNF複合樹脂のパイロットプラントを稼働させ、一貫製造プロセス構築による生産性の飛躍的な向上を企図している。

このように大王製紙では、新素材の開発と実用に向けた取り組みが活発である。2007年には名古屋パルプの吸収合併を行ったため、実証分析する際にはデータの変動に注意しなければならないが、1990年代から製紙業界で盛んに行われた大型合併にも加わっておらず、長期分析を行う意味ではデータが比較的安定している。本稿では2050年にカーボンニュートラルの実現を目標に製品の開発と設備増強を行う大王製紙を対象に、製紙業におけるイノベーションによる生産性や効率性の向上がどの程度達成されるのか、Data Envelopment Analysis（包絡分析法、以下DEA）を用いた分析を試みる。

生産性は一般に、実際に観測された投入（入力）に対してどれだけの産出（出力）が達成されるかという、入力に対する出力の比率として解釈される。この生産効率をもとに複数の投入と複数の産出の対応を実測できる手法がDEAである。したがって、DEAを実行するためには、産出と投入を規定し、それらのデータを作成しなければならない。DEAは費用効率を分析することも可能である。ここでは売上高をアウトプットとして、これを増大させようとするインプットに、資本設備、労働力、原材料等を想定した技術的効率性を想定した費用効率分析を試みる。そこでまず、DEAによる実証分析に必需となる変数の作成手順を以下で説明する。

製紙業界におけるイノベーションと言える新素材CNSの市場が拡大すれば、幅広い用途への使用が期待できる。その趨勢を過去に広く普及した財を例にしてシミュレーション

図2 ルームエアコンの普及率販売量と単価



ョンを行うため、内閣府の「消費動向調査」にある普及率のデータを参照した。すると過去 60 年の長期にわたって、ルームエアコンの普及率のデータが最も詳細に掲載されている。これを用いて経年的な傾向を認識するために、次のようなロジスティック曲線でエアコンの普及率についてパラメータを推定した。

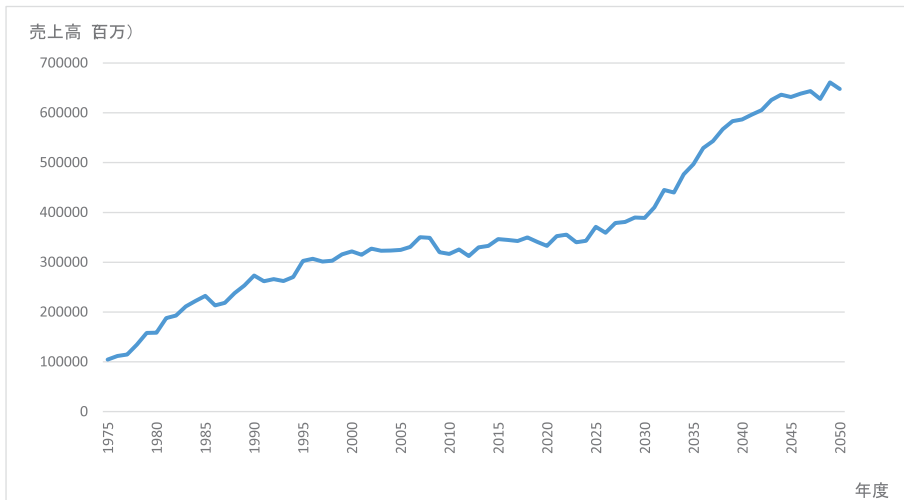
$$y = \frac{K}{1 + \beta \cdot \exp^{-\alpha x}} \quad (16)$$

ロジスティック曲線の形状は図2に描いた通りである。ここで市場規模については100パーセントを意味するように $K = 100$ とおきロジスティック曲線を推定すると、パラメータ α と β は次のようになった。

$$\alpha = 0.1174 \quad \beta = 35.674 \quad R^2 = 0.893 \quad (17)$$

CNF がルームエアコンと同様のスピードで普及すると想定すれば、ロジスティック曲線の推定値を企業の売上高にあてはめて、将来における売上高の予測値を得ることができる。ここでは1975年度から2020年度にわたる大王製紙の売上高を、紙・パルプの企業物価指数（2015年基準を2000年基準に加工）でデフレートして実質化し、2021年以降の売上高にエアコンのロジスティック曲線の推定値を適用して2050年までの予測値を得た⁶⁾。

図3 大王製紙の売上高シミュレーション（2021年以降）



さらにロジスティック曲線を用いた予測値がランダムなデータになるように、モンテカルロ・シミュレーションを予測値に適用している。具体的には、ロジスティック曲線の予測値を平均とし、標準偏差を10,000と設定した正規乱数を、ロジスティック曲線で得た予測値に乗じたシミュレーションにより10,000個のデータを生成している⁷⁾。ここでは生成された乱数に初出する値を売上高の予測値として採用した。得られたシミュレーション・データは図3に描いたような動きをしている（2020年までの実質売上高は現実値）。

この予測値によると、2050年の時点の売上高は、2020年のおよそ2倍になる。この値は決して的外れなものではない。実際に大王製紙が公表している事業計画では、2021年度実績で過去最高となる連結ベースで売上高6123億円を達成し、2026年には8000億円から1兆円に拡大することを目標としている。この目標値を前提にすれば、カーボンニュートラルの実現を目指した2050年に売上高が2倍になるという想定は、むしろかなり控えめな予想である。

次に資本設備、労働力、原材料等の投入に関するデータを作成する。まず資本設備 K には償却対象有形固定資産を用い、GDPデフレーターとともに内閣府が公表している民間企業設備のデフレーター（2015年基準を2000年基準に加工）を用いて実質化している。減価償却累計額 d も同じデフレーターで実質化した。さらに、実質償却対象有形固定資産 K を減価償却累計額 d で割った値を、資本設備の要素価格 w_K とする。

労働 L は期末従業員数で定義するが、会計基準の変更によって、2012年以降の事務

職従業員の人件費と、生産に関わる従業員の労務費を財務データから得ることができない。そこで、販売費及び一般管理費 W を期末従業員 L で割った値を、ここでは労働の要素価格 w_L と定義した。

原材料 M についても、会計基準の変更で2012年以降のデータを入手できないため、ここでは売上原価で代用し、この実質化には紙パルプ投入物価指数（日本銀行）を用いている。さらにこの実質売上原価を実質売上高で割った値を原材料要素価格 w_M として使用する。以上をまとめると、変数のノーテーションは次のようになる。

Y : 売上高／紙パルプ企業物価指数

(2021年以降はロジスティック曲線によるシミュレーション・データ作成)

K : 償却対象有形固定資産／民間企業設備のデフレーター

d : 減価償却費／民間企業設備のデフレーター

L : 期末従業員数

W : 販管費／紙パルプ企業物価指数

M : 売上原価／紙パルプ投入物価指数

w_K : 減価償却累計額／償却対象有形固定資産

w_L : 販管費／紙パルプ投入物価指数／従業員数

w_M : 売上原価／売上高

ここで投入に用いるそれぞれの変数についても、2021年以降の予測値を産出する方法を説明する。まず、償却対象有形固定資産 K は、工業統計表に掲載されている紙製造業の固定資産（年末）を民間企業設備のデフレーターで実質化した値とし、1975年から2019年までの長期にわたる動向を図4に示している。そして予測値については、今後の設備増強を想定して、最も市場が拡大している時期となる1985年から1998年までのデータを用いる。この期間について時間を t とする経年的な推移を、対数関数 $K = \alpha + \beta \ln t$ によって推計した。その結果、統計的に1%有意で、次のような計測結果となった。

$$K = (1E + 06) + 498126 \ln t \quad R^2 = 0.9593 \quad (18)$$

この係数値を大王製紙の実質化した2020年の償却対象有形固定資産を初期時点とし

図4 工業統計表（紙製造業）実質固定資産額の推移

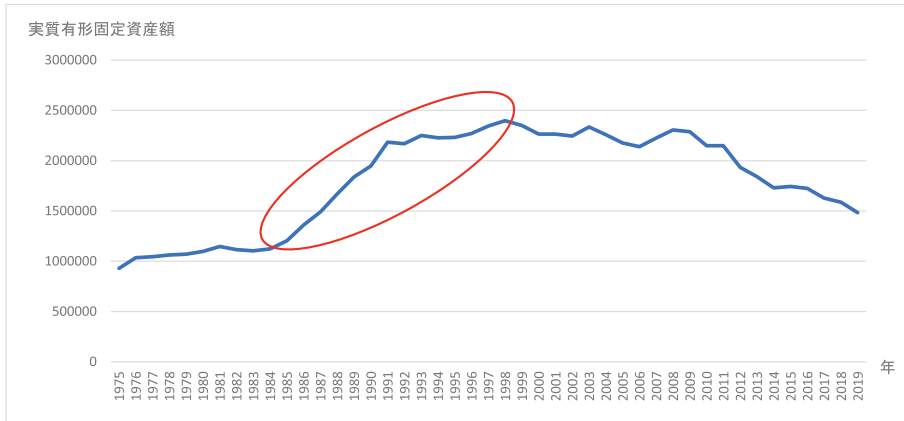
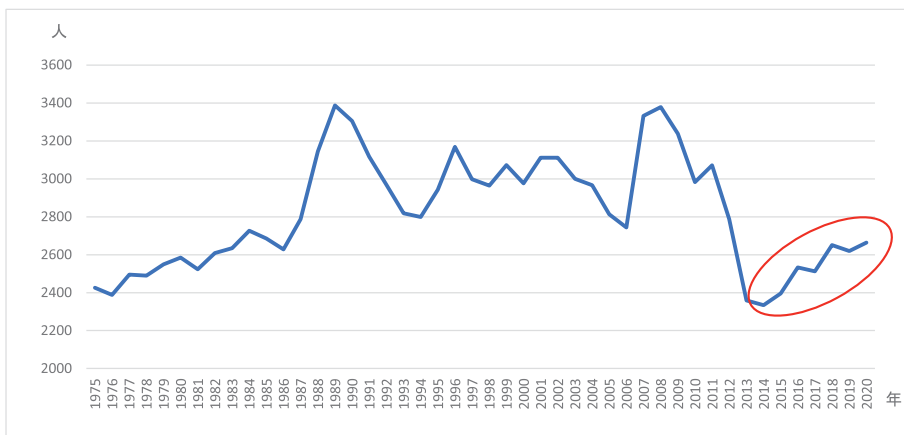
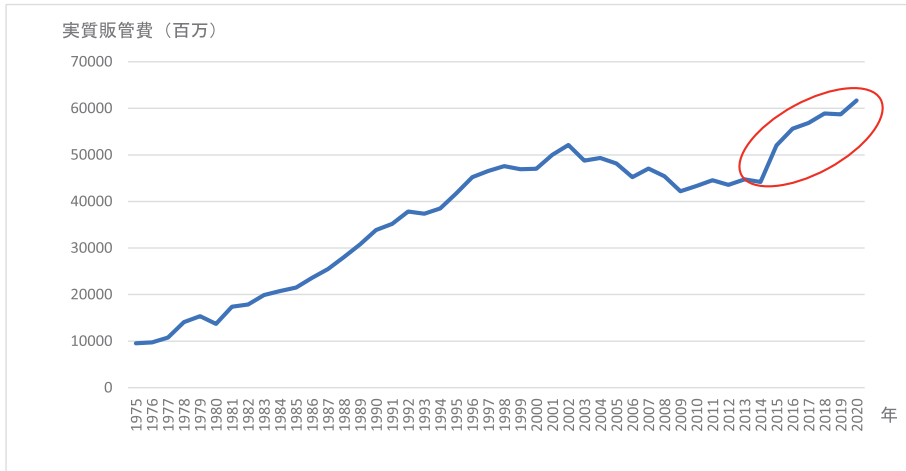


図5 大王製紙従業員数の推移



て適用し、2050年までの予測値を算出した。減価償却額についても同様の手法で予測値を得ている。さらに売上高の予測値を計算した際と同様に、これらの予測値を平均値として、固定資産については標準偏差を10,000に、減価償却費については標準偏差を1,000にして、10,000回のモンテカルロ・シミュレーションを行い、算出されたはじめのデータを採用している。労働 L については、1975年から2020年までの期末従業員数 L で定義した。従業員数の推移は図5に示した通りである。直近となる2014年から2020年までの従業員数が増加傾向にあるため、少ないサンプルであるがこれを資本設備と同様に対数関数 $L = \alpha + \beta \ln t$ によって推計した。その結果、やはり統計的には1%有意で、次のような計測値を得た。

図6 大王製紙販管費の推移



$$L = 7.748 + 0.0715 \ln t \quad R^2 = 0.9246 \quad (19)$$

このパラメータを用いて、2050年までの従業員数を推計した。また実質化を施した販管費 W についても同様に、図6で示したように近年の傾向を重視して2014年から2020年までの値を対数関数で推計した。

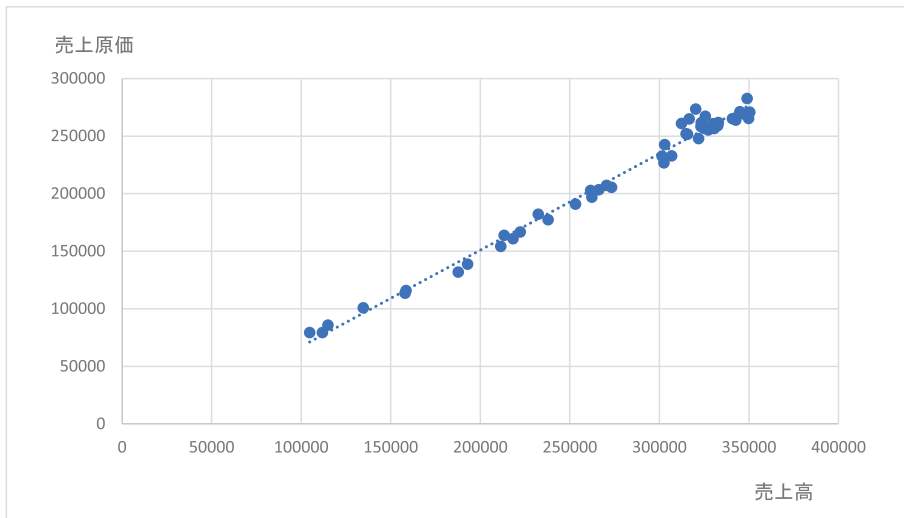
$$W = 45245 + 8368.3 \ln t \quad R^2 = 0.9708 \quad (20)$$

従業員数 L と販管費 W に関するシミュレーションでは、平均値が上記推定値であるが、標準偏差についてはそれぞれデータの単位の10分の1に依存して考慮しており、従業員数 L は100で販管費 W は10,000としている。他の変数同様にモンテカルロ法によって得られた10,000個の数値のうち、ひとつ目に算出された値を計測に採用している。

最後の投入物である原材料 M の代理変数として用いた売上原価は、図7に示したように売上高 Y との相関が強くその傾向は一定である。これを利用して M/Y の相関を回帰分析によって計測すると、次のような係数値を得る (1% 有意)。

$$Y = -16546 + 0.837M \quad R^2 = 0.9864 \quad (21)$$

図7 大王製紙の売上高と売上原価の相関



売上原価 M についてはこの係数値を用いて 2050 年までの値を予測値とした。また他の変数と同様、この予測値を平均値、標準偏差を 10,000 としたモンテカルロ法によるランダムな値を算出している。

このようにして得られた推定値を用いて、以下では製紙業界が CNF の新市場開拓を通じたイノベーションによって、2050 年に売上高を 2020 年時点から 2 倍に拡大させることを前提に、DEA による効率性改善の評価を試みる。

5 費用 DEA によるイノベーション効果の実証分析

DEA は線形計画法の応用であり、複数の事業体の投入と産出の関係について、最も効率的な事業体を結ぶフロンティアを想定し、そこから乖離する部分を「技術非効率」という概念で説明し相対的な生産効率を算出する⁸⁾。さらに DEA による費用効率の測定では、生産要素価格の概念を導入するため、技術非効率に加えて「資源配分の非効率」が考慮された費用効率指標が Farrell (1957) によって提示された。

しかし Tone (2002 b) や Cooper et al. (2005) で指摘されるように、費用効率モデルを使うと、事業体に費用の格差があるにもかかわらず、同一の費用と資源配分の非効率が生じることになる。このように、費用 DEA の基本モデルにおいては、企業間での投入要素の単価の違いを考慮できないが、Tone (2002 b) ではこれを改良する New-Cost

モデルが提示されている⁹⁾。ここでは費用 DEA による効率指標の計測を試みるため、手法として採用する DEA New-Cost モデルを Tone (2002 b) に従って概観する。いま n 社の企業が s 種類の産出物を生産するのに m 種類の投入要素を用いるケースを想定すると、次のような費用ベースの生産可能性集合 P_c を設定できる。

$$P_c = \{(\bar{x}, y) | \bar{x} \geq \bar{X}\lambda, y \leq Y\lambda, \lambda \geq 0\} \quad \lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

$$\bar{X} = \{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n\} \in R^{m \times n}, \quad \bar{x}_j = (c_1x_1, \dots, c_{mj}x_{mj})^T \quad (22)$$

ここで産出は $Y = (y_1, \dots, y_n) \in R^{s \times n}$ であり、投入要素は $C = (c_1, \dots, c_n)$ で表現される。また投入要素は $\bar{X} = \{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n\} \in R^{m \times n}$, $\bar{x}_j = (c_1x_1, \dots, c_{mj}x_{mj})^T$ であり、 \bar{X} と C の行列は非負である。また、 $\bar{x}_{ij} = (c_{ij}x_{ij})(\forall(i, j))$ 要素は同次性を持つ単位となる。この生産可能性集合 P_c に基づいて定義された技術効率性 $\bar{\theta}^*$ は、次のような線形計画法の最適解として得ることができる。

$$\bar{\theta}^* = \min_{\bar{\theta}, \lambda} \bar{\theta}$$

$$\text{subject to} \quad \bar{\theta}\bar{x}_0 \geq \bar{X}\lambda$$

$$y_0 \leq Y\lambda$$

$$\lambda \geq 0 \quad (23)$$

また $e \in R^m$ を成分がすべて 1 となる行ベクトルとし、 \bar{x}^* を次の線形計画問題の最適解と表現する。

$$e\bar{x}_0^* = \min_{\bar{x}, \lambda} e\bar{x}$$

$$\text{subject to} \quad \bar{x} \geq \bar{X}\lambda$$

$$y_0 \leq Y\lambda$$

$$\lambda \geq 0 \quad (24)$$

すると新たな費用効率性 $\bar{\gamma}^*$ は、次のように定義される。

$$\bar{\gamma}^* = \frac{e\bar{x}_0^*}{e\bar{x}_0} \quad (25)$$

このモデルは DEA のなかでも規模に関する収穫一定 (Constant Returns to Scale: CRS) モデルとして知られている。このモデルを Cooper et al. (2005) に提示されているように、次のような定式化を行うと、規模に関する収穫可変 (Variable Returns to Scale: VRS) モデルに拡張することができる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^m c_i x_i \\
 & \text{subject to} \quad x_i \geq \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \\
 & \quad y_{r0} \leq \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \\
 & \quad L \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j \leq U \\
 & \quad \lambda_j \geq 0 \quad \forall j
 \end{aligned} \tag{26}$$

この線形計画問題における最適解である (x^*, λ^*) に基づけば、費用効率性は次のように表すことができる。

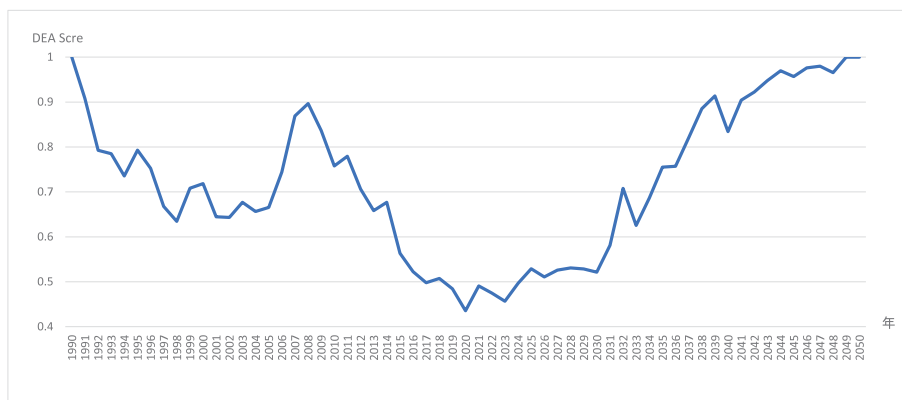
$$E_C = \frac{cx^*}{cx_0} \tag{27}$$

この定式化において、 $L = 0, U = 0$ とおけば、CRS モデルとなる。 $L = U = 1$ と設定して (26) 式を解けば、DEA の New-Cost VRS モデルでの指標を得ることができる。以下の実証分析では、DEA-New-Cost VRS モデルを用いて費用効率指標を算出する。

ここで想定するモデルでは、資本 K 、労働 L 、原材料 M の3つの投入要素から生産量 Y を生み出す生産技術を想定する。さらに費用面の効率性は、総費用 C 、資本コスト w_K 、賃金率 w_L 、原材料価格 w_M を用いて、双対定理によって得られる費用関数 $C = C(Y, w_K, w_L, w_M)$ を想定した投入-産出を規定するので、総費用 C は、 $C = w_K K + w_L L + w_M M$ で定義される。実際に計測で使用するデータは、前節で検討した通りの加工を行い、予測値に関するデータはすべて 10,000 回のモンテカルロ・シミュレーションによってサンプリングしている。

紙の生産量は図1で確認したように、1980年代には順調に増大し、1990年代初頭には一時停滞するものの、その後も合併による供給サイドの合理化が進展するなかで、2007年までは順調に市場が拡大する。しかし、2008年のいわゆるリーマン・ショックを期に生産量が大きく落ち込み、その後は持続的に減退している。この背景には情報通信技術の進展によるペーパーレス化などの経済構造変化の影響もあり、新聞用紙や印

図8 DEA-New-Cost VRS モデルによる効率性評価



刷・情報用紙を中心に、需要の減少に歯止めがかからないことにある。他方、板紙は、段ボール原紙が、加工食品等の食品分野や家電向けなどの安定した需要に加え、電子取引の普及を背景に堅調となっている。2020年時点ではついに洋紙の生産量と板紙の生産量が逆転している。

こうした紙市場の動向を考慮し、生産量の増加傾向がピークとなった1990年を始点に、シミュレーションによって求めた2050年までの分析期間として、DEA New-Cost VRSモデルによって大王製紙の費用効率を評価した。計測の結果を図8に提示している。

これを見ると、1980年代から継続していた紙需要の増加傾向がピークとなった1990年の費用効率は1と算出され、分析期間を通じて最も高い値となっている。その後は効率値が低下し、1996年に景気回復を背景に一時上昇するが、再び1990年代終盤まで効率性は低下する。2000年代初頭にはまた効率値は変動し、2005年以降は上昇に転じている。しかし2008年のリーマン・ショック後は、2020年に至るまで傾向的に大きく効率性を低下させていることがわかる。このように、DEAによる効率指標は分析期間における相対的な評価であるものの、現状を的確に捉えていることが窺える。

2021年以降の売上高のシミュレーション・データは、製紙業におけるイノベーション効果を想定し、CNFの用途が大きく拡大することにより、売上高がロジスティック曲線に沿って増大することを想定した。この予測値によると、2050年の売上高は、2020年のおよそ2倍になるが、この値が控えめな予想であることは先に述べた通りである。

投入要素についてもそれぞれ近年の傾向やピーク時の趨勢をもとに仮想データを作成

しているため、むしろ投入要素は過大に見積もっている。こうした前提条件のもとで2050年までの効率性を見ると、2021年以降、費用効率性は傾向的に改善し、2049年時点で効率値が1に達し、最終年度の2050年の効率値も1となっている。つまり、この分析における控えめな予想のもとでも、大王製紙では新技術の導入が生産性を向上させることが明らかになる。製紙業界では新市場におけるイノベーション効果を成功させた企業の効率性は大きく向上することが期待できる。先の寡占市場における理論モデルが示すように、新市場開拓においては、イノベーションを行った企業においては費用効率性の向上を通じて収益性の改善に繋がることは理論モデルからも明らかである。

6 結 論

本稿では、近年イノベーションが目覚ましい製紙業の将来を、理論的、実証的に分析するために、まず寡占市場におけるクールノー・モデルで外部性を持つ技術への投資が市場を拡大して生産量を増大させること、さらに実証分析では大王製紙を取り上げて、シミュレーションから得られた将来の産出と投入のデータを用いたDEAによる費用効率評価を試みた。その結果、CNFの開発等による新市場の開拓は、長期的に製紙企業の効率性を向上させる効果があり、大王製紙のケースでは、2050年時点の効率性は、好景気であった1990年において実現されていた効率水準に並ぶことが明らかになった。

この結果はもちろん産出の変数である売上高と投入要素の予測値に依存するが、現在の大王製紙が掲げている2030年時点での売上高目標値から判断しても、本稿の予測は控えめな値であり、投入についてもシミュレーション・データ作成の基準にした時点は、すべて製紙市場が拡大していた時期や、直近のインプットが増加傾向にある局面を対象としている。つまり、アウトプットを過大に見積もることなく、またインプットも過小に想定することなく得られた効率性分析の結果である。

製紙業界では、従来の本業である洋紙の需要低迷が、新市場開拓のインセンティブとなり、範囲の経済性を発揮できる新素材開発へのイノベーションを実現している。今後、CNFの製造技術の発展によって製造コストの低減を実現し多様な用途の開発ができれば、市場をさらに拡大することが可能となる。製紙業界においては、既実現されている発電やバイオマス・エネルギーが活用され、本稿が想定した2050年時点では、CNFが多様な財に広く利用されているだろう。カーボンニュートラルの達成とともに、製紙企業は従来の本業を上回る収益力を獲得することが期待される。

注

- 1) CNF 製造技術は 2006 年に東京大学大学院農学生命科学研究科の磯貝明教授が完全分散化セルロースナノファイバーの作製に成功して確立したものである。2007 年からは東京大学と日本製紙などの共同プロジェクトで実用化が模索され、2015 年に世界で初めて CNF を用いた商品として日本製紙クレシアから衛生用品が発売されている。
- 2) CNF の説明については、日本製紙、大王製紙のホームページを参照している。
- 3) この理論的な証明は中島 (1990) pp.3-6 で示されている。
- 4) 野村・大川 (2005) では、この分野の理論研究について論点が明確となるサーベイがなされており、以下の叙述もこれを参考にしている。
- 5) 以下で叙述する大王製紙の現状については、大王製紙のホームページを参照している。
- 6) 以下の分析で用いる財務データについては、すべて日経 NEEDS データを利用している。
- 7) シミュレーションでは標準偏差を 10,000 としているが、財務データ自体の桁数は百万を 1 とした値ですべての計測を行っている。
- 8) DEA の概念について、基本的な説明は刀根 (1993) が詳しい。
- 9) New-Cost モデルの詳細については、Tone (2002 b) や Cooper et al. (2005) pp.246-252 を参照。
- 10) このモデルの記述は Cooper et al. (2005) pp.274-275 に記載されているものを参考にしている。

参考文献

- Coelli, T. J. (1996), "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program", *CEPA Working Papers* Department of Econometrics University of New England Armidale, NSW 2351, Australia.
- Cooper, W. W., L. M. Seiford and K. Tone, (2007) 'Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software', Springer.
- Elberfeld, W. (2003), "A note on technology choice, firm heterogeneity and welfare", *International Journal of Industrial Organization*, 21 (4), pp.593-605.
- Elberfeld, Walter and Kofi O. Nti (2004), "Oligopolistic Competition and New Technology Adoption under Uncertainty", *Journal of Economics*, pp.106-121.
- Farrell, S. (1957) "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol.120, pp.253-281.
- Hattori, M. and Tanaka, Y. (2014) "Incentive for adoption of new technology in duopoly under absolute and relative profit maximization", *Economics Bulletin*, 34. pp.2051-2059.
- Hattori, M. and Tanaka, Y. (2016) "Subsidizing new technology adoption in a Stackelberg duopoly: Cases of substitutes and complements", *Italian Economic Journal*, 2(2), pp.197-215.
- Matsumura, T. and Matsushima N. (2012) "Competitiveness and stability of collusive behavior",

- Bulletin of Economic research*, 64, pp.221-231.
- Matsumura, T., Matsushima, N. and Cato, S. (2013) "Competitiveness and R&D competition revisited", *Economic modelling*, 31, pp.541-547.
- Mills, D. W. Smith (1996) "It pays to be different: Endogenous heterogeneity of firms in an oligopoly", *International Journal of Industrial Organization*, 14(3), pp.317-329.
- Tone, K. (2002 a) "A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis," *European Journal of Operational Research*, Vol.143, pp.32-41.
- Tone, K. (2002 b) "A strange Case of the Cost and Allocative Efficiencies in DEA," *Journal of Operational Research Society* 53, pp.1225-1231.
- Tone, K. and Tsutsui. M. (2010) "Dynamic DEA: A slacks-based measure approach," *Omega*, Vol.38, pp.145-156.
- Tone, K. and Tsutsui. M. (2014) "Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach," *Omega*, Vol.42, pp.124-131.
- 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.
- 伊神満 (2018) 『イノベーターのジレンマの経済学的説明』日経 BP 社。
- 五十川大也・大橋弘 (2012) 「プロダクト・イノベーションにおける波及効果と戦略的關係－わが国のイノベーション政策への示唆」『RIETI Discussion Paper Series 12-J-034』 pp.7-31。
- 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 巻第 4 号, pp.155-176。
- 上田雅弘 (2015) 「製紙業界合併なかりせば：シミュレーション・データと DEA による合併効率性の評価」『同志社商学』第 66 巻 5 号, pp.851-869。
- 上田雅弘 (2010) 「DEA・SFA による製紙業の費用効率分析」『同志社大学商学会 同志社商学』 274-291。
- 岡田羊祐 (2019) 『イノベーションと技術変化の経済学』日本評論社。
- 加藤智章・吉田昌之 (2003) 「我が国紙・パルプ産業の計量分析」『農林業問題研究』第 150 号, pp.178-183。
- 加藤智章・吉田昌之 (2004) 「大規模紙・パルプ企業の生産行動に関する計量分析」『林業経済』第 57 巻 7 号, pp.6-15。
- クレイトン・クリステンセン 玉田俊平太 監修/伊豆原弓 訳 (2020) 『イノベーションのジレンマ』翔泳社。
- 末吉俊幸 (2001) 『DEA－経営効率分析法－』朝倉書店。
- 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。
- 中島隆信 (1990) 「経済の外部性と企業の業務多角化 (I)」『三田商学研究』第 32 巻 6 号, pp.1-10。

- 中西泰夫（2014）『イノベーションの計量経済分析』専修大学出版局。
- 野村良一・大川隆夫（2005）「技術選択と特許の保護範囲」『社会科学研究 特集 経済法・経済規制と産業組織』第56巻 3-4号 pp.103-115
- 服部昌彦（2017）「寡占市場における企業の新技術導入行動と政策分析」同志社大学大学院経済学研究科博士論文。

（第20期第16研究会による成果）