

〈自由論文〉

## 科学技術開発の効率性に関する国際比較

—DEA と SFA による実証分析—

### **An International Comparison of the Efficiency of Science and Technology Development**

**-An Empirical Analysis Using DEA and SFA-**

小林 稔

Minoru Kobayashi

#### **[Abstract]**

The arrival of the U.S. fleet led by Perry in 1853 in Uruga (present-day Yokosuka City, Kanagawa Prefecture) marked the beginning of Japan's entry into the international community after more than 200 years of national isolation. At that time, Japan was mainly a handicraft-based country, and the gap between Japan and the West, which had already introduced science and technology to its industries through the Industrial Revolution in the late 18th century, was widening. In this context, Japan began to focus on the introduction of advanced science and technology and research and development in an effort to catch up with Europe and the United States.

This was an appropriate course of action given Japan's resource-poor situation. Japan placed emphasis on the application of science and technology to society and industry, positioning science and technology as the foundation of the nation and planning for its subsequent development. For example, the Tomioka Silk Mill, which opened in 1872, contributed to technological innovation in the silk industry as a full-scale mechanical spinning mill. The Yawata Ironworks, which started operation in 1901, was a full-scale ironworks responsible for iron production. The Meiji government actively promoted science and technology as the center of its industrial development policy. The subsequent development of science and technology in Japan has been remarkable. After World War I, Japan ranked third in the world in shipbuilding capacity after the United States and the United Kingdom. In 1940, the Japanese Imperial Navy adopted the Zero fighter aircraft, which astonished the world with its 3,000 km range, sophisticated aerodynamic design, and lightweight fuselage combined with a 1,000-horsepower engine. Japan's recovery from the devastation of World War II was backed by the development of science and technology: in the 1950s, the textile industry, with its modern facilities, expanded exports; in the 1960s and 1970s, steel, nonferrous metals, and chemicals drove the economy; from the late 1970s, general machinery, automobiles and other transportation equipment, home appliances, and semiconductors dominated the world. In the 1980s, Japan ranked first in the world in the production of TVs, VTRs, and semiconductors, and the share of Japanese cars in the U.S. rose to about 30%, leading to trade friction. In the 1990s, however, the situation was changing drastically with the bursting of the so-called bubble economy. The share of the semiconductor market declined, and production of TVs shifted to South Korea, China, and

other Asian countries. In addition, some companies in Japan have continued to struggle with the production of LCD devices. And the country has lagged behind in the transition to a digital society and is far behind the world leaders in the fields of semiconductors and software, where it was once the world's best. In this paper, we examine this situation related to scientific and technological development by measuring the efficiency of scientific and technological development using DEA and SFA. Then, international comparisons will be made based on the results. In other words, based on the results of the measurement of the efficiency of scientific and technological development, various problems related to science and technology will be found, and issues to be considered for the future will be presented.

### 【キーワード】

科学技術, 効率性, 付加価値, DEA, SFA, 確率的フロンティア, 国際比較

## 1. はじめに

1853年にペリーが率いた米国海軍インド艦隊が、浦賀（現在の神奈川県横須賀市）に来航したことを契機として、翌年には日米和親条約、その後1858年には日米修好通商条約が締結された。江戸幕府による200年以上にわたる鎖国が解かれ日本は国際社会の中へ進出することになった。ペリーが率いた米国海軍インド艦隊は蒸気船を主力とし、当時は黒船と呼ばれてその威容にわが国の民衆は驚愕した。

その当時の日本は手工業が中心であり、既に18世紀後半から産業革命により科学技術を産業に導入していた欧米との格差は歴然としていた。その中で、日本は当時の列強に追いつくべく最先端の科学技術の導入と研究開発に注力するようになった。資源の乏しい日本の状況を踏まえた適切な舵取りであった。

例えば、工部大学校（後の帝国大学工学部、東京大学工学部）の設置は、海外から最先端の科学技術の導入と人材の育成に大いに資することとなった。ちなみに、自然科学の法則を社会、産業へ適用するための応用学問である工学は、当時の欧米ではまだ学問としての地位は必ずしも獲得しておらず、総合大学の主要な学部として工学部を設置したのは帝国大学（後の東京帝国大学、東京大学）が世界で初めてであった。欧米の多くの国

では、自然科学は理学部として総合大学に設置されているが、工学に関しては、マサチューセッツ工科大学、カリフォルニア工科大学、ミュンヘン工科大学など総合大学ではなく、工科大学として19世紀後半になって設立されている。つまり、わが国では科学技術を社会、産業へ応用することに重きを置き、科学技術を国の礎と位置付けてその後の発展を企図していたのである。

帝国大学の設置は、東京を初めとして京都、東北、九州、北海道、京城、台北、大阪、名古屋と続き、また明治後期から全国に官立の高等工業学校（後にその多くが国立大学の工学部へ改組）が設置され、科学技術に関する研究開発ならびに高等教育の体制が作られていった。

ペリー来航当時は、欧米と大きな格差があった日本の科学技術の水準は、当時の明治政府の政策によって急速に高まり、例えば、1872年に開業した富岡製糸場は本格的な機械製糸工場として絹産業の技術革新に貢献し、1901年に操業を開始した八幡製鐵所は産業の米と呼ばれた鉄の生産を担う本格的な製鐵所であった。明治政府が進めていた殖産興業の中心として科学技術の積極的な振興が進められていた。

その後の日本の科学技術の発展には目を見張るものがあり、第一次世界大戦後には船舶の建造能力で、米国、英国に次ぐ世界第3位となった。その後は航空機製造にも積極的に取り組み1940年に当時の日本帝国海軍に採用された零式艦上戦闘

機は、3000 km の航続距離、洗練された空力設計と軽量化された機体に1000馬力級のエンジンが組み合わされ、優れた運動性能を実現し世界を驚愕させた。

第二次世界大戦後、焼け野原になった日本の復興は科学技術の発展に裏付けされたものであった。1950年代は、近代的な設備による繊維産業が輸出を拡大した。1960～70年代には鉄鋼、非鉄金属、化学が経済を牽引し、70年代後半以降は一般機械や自動車などの輸送用機械、家電製品や半導体などの電気機械が世界を席卷した。80年代は、テレビ、VTR、半導体の生産で世界のシェアはトップとなり、米国では日本車のシェアが30%程度まで高まったことで貿易摩擦に発展した。また、2000年代以降は輸送用機械がリードするとともに鉄鋼業や化学も存在感を示している。

このように、戦後の日本経済の成長は科学技術の発展に支えられたものと言って良いだろう。また、戦後の科学技術の発展はそれを支える研究開発体制、国や企業の研究開発費、さらに、先に記した通り全国に配置された国立大学工学部を中心とした技術者の育成と供給が行われた総合的な結果である。

しかし、1990年代に入り、いわゆるバブル経済の崩壊とともに状況が一変しつつある。半導体のシェアが低下し、テレビは韓国、中国などのアジア諸国に生産が移行し、その後も液晶デバイスの生産では苦戦している。また、デジタル社会への移行に遅れ、かつては世界一だった半導体やソフトウェアの分野で世界のトップの後塵を拝している。最近では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と三菱重工業が次期基幹ロケットとして開発中のH3ロケット試験機の打ち上げ失敗や、三菱重工が国産初のジェット旅客機「スペースジェット(SJ,旧MRJ)」の開発を断念するなど、科学技術立国らしからぬ状況が続いている。

本稿では、このような科学技術開発に関わる状況を検証するために、科学技術開発の効率性をDEAとSFAにより計測し、その結果から国際比較を行う。つまり、科学技術開発の効率性の計測結果から、科学技術に関わる様々な問題点を見

出し、将来へ向けた検討課題を提示していく。

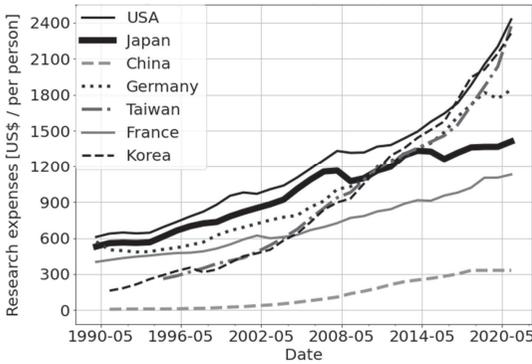
## 2. 科学技術開発の現状

ここでは、科学技術に関わるデータから国際的な科学技術の現状を概観する。まず、OECD<sup>1)</sup>が公表している研究者一人当たりの研究開発費をFig.2.1.に示す。1990年代初頭は、日本の研究者一人当たり研究開発費は、主要な先進国の中でも高い水準にあったが、その後の増加のペースは米国、ドイツ、韓国、台湾、フランスと比較して低く、2010年頃には韓国、ドイツ、台湾に追い越されている。韓国、台湾は、研究者一人当たり研究開発費の増加ペースが速く、2020年には米国と同水準に達している。半導体やICTなど先端分野における技術力および世界的なシェアの高さを裏付ける数値である。中国は、全体の研究開発費は高い水準で増加しているが、研究者一人当たりの研究開発費でみるとまだ低い。米国は、1990年代から一貫して研究者一人当たりの研究開発費を拡大させており、ICTやバイオ、航空宇宙などの先端科学技術の分野で引き続き強みを維持している。

Fig.2.2.は、UNESCO<sup>2)</sup>が公開している人口100万人当たりの研究者数である。研究者数でみると日本は1990～2000年代前半までは、人口100万人当たり5000人前後と先進国の中でも高い水準にあったが、その後の伸びは見られない。一方、韓国、台湾は研究者数を急速に増加させており、2010年頃に日本を追い抜いている。その後も韓国は急速に研究者数を増加させており、2018年には人口100万人当たり8000人を超えている。一方、ドイツ、フランス、米国も増加のペースは日本よりも高く、ドイツは2019年に5400人弱となり日本を追い越している。

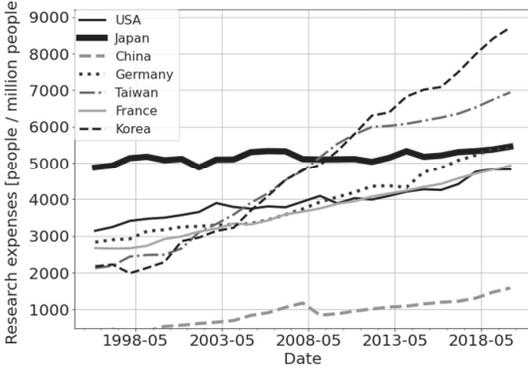
Fig.2.3.は、WIPO<sup>3)</sup>が公表している全分野の国際特許出願数<sup>4)</sup>である。国際特許出願数をみると、1990年代以降、日本は米国と同様に高い増加率を維持している。しかし、2010年頃から中国の出願数が急増し、2017年頃には日本、米国を追い越しトップの位置にある。韓国も2000

Fig.2.1. Research expenses per person



(出典) OECD, 単位: USドル, USドルへの換算: PPPレート(購買力平価)ベース, 独自のプログラムで作成。

Fig.2.2. Number of researchers per million people



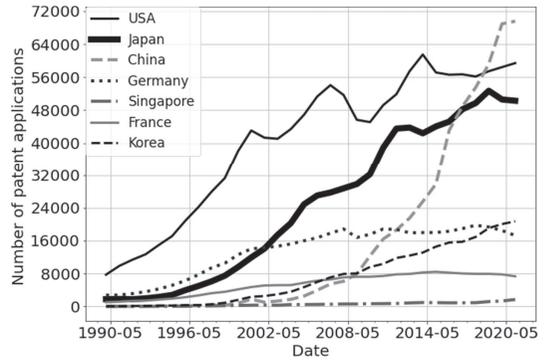
(出典) UNESCO, 単位: 人/100万人, 独自のプログラムで作成。

年以降は、早いペースで増加している。

Fig.2.4. は、NSF<sup>5)</sup> が公表している科学全分野の論文の発表数である。科学全分野の論文の発表数は、2000年以降、米国が着実に増加させている。一方、日本は横ばいから低下傾向を示している。2000年以降に、論文の発表数を急拡大させているのが中国である。中国は、2005年頃には日本を追い越し、さらに2015年には米国を追い越してトップとなっている。また、韓国、台湾も着実に論文の発表数を増加させている。このように、科学全分野の論文の発表数の推移から、中国、米国と日本は異なる傾向が見られ、科学研究の現場における日本の停滞感が読み取れる。

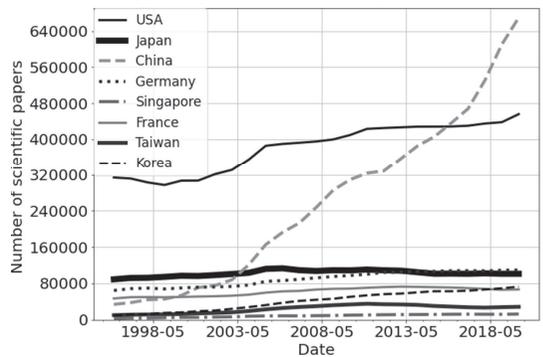
Fig.2.5. は、科学系博士学位の取得者数である。日本は、年間6000～7000人程度の取得者数であ

Fig.2.3. Number of international patent applications in all fields



(出典) WIPO, 単位: 件, 独自のプログラムで作成。

Fig.2.4. Number of scientific papers in all fields



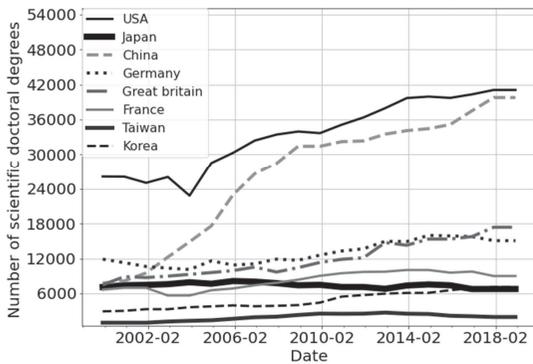
(出典) NSF, 単位: 件, 独自のプログラムで作成。

り、近年は低下傾向が見られる。一方、米国、中国は2000年代前半から博士号取得者を急速に増加させており年間4万人に達している。また、イギリス、ドイツも着実に博士号取得者を増加させている。

Fig.2.5. から日本は、科学技術開発を担う人材の育成に苦慮している様子が窺える。また、先端的な研究開発の現場において専門的な人材不足が懸念される。

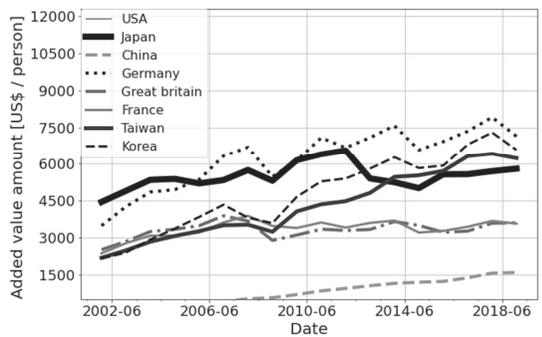
Fig.2.6. は、知識技術集約型産業の付加価値額である。2000年当時は、日本の知識技術集約型産業の付加価値は6000億ドル弱と他の先進各国と比較して高水準であったが、その後の伸びはほとんどなく、横ばいから若干の低下傾向を示している。一方、米国は右肩上がり付加価値を拡大させている。また、中国は2005年以降に急速に

Fig.2.5. Number of science doctoral degrees



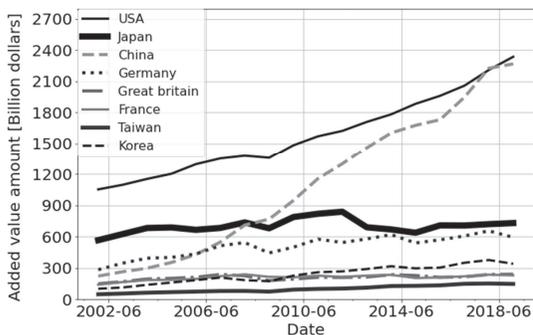
(出典) NSF, 単位：人, 独自のプログラムで作成。

Fig.2.7. Value added in KT industries per person



(出典) NSFの知識技術集約型産業の付加価値額を国連が公開している各国の人口から算出した, 単位：ドル/人, 独自のプログラムで作成。

Fig.2.6. Value added in knowledge-intensive industries



(出典) NSF, 単位：100万ドル, 独自のプログラムで作成。

付加価値を拡大させており、2018年には知識技術集約型産業の付加価値額は2兆2000億円を超えて米国を追い越している。中国は、2009年にGDPで日本を追い越し世界第2位の経済大国となっているが、それを裏付ける数値である。

Fig.2.7. は、一人当たりの知識技術集約型産業の付加価値額の推移である。日本は、2010年以降は横ばいから若干の低下であり、低迷している状況が見られる。一方、韓国、台湾は2010年以降に急速に一人当たり付加価値額を拡大させており、2015年頃に日本を追い越している。また、ドイツは着実に一人当たり付加価値額を増加させており、韓国、台湾を抑えてトップを走っている。このように、ドイツ、韓国、台湾が科学技術開発での強みを発揮して一人当たりの知識技術集約型産業の付加価値額を拡大させている。他方、日本は、数字からみる限り苦戦を強いられている。

### 3. 科学技術開発の効率性

#### 3.1. 科学技術開発の効率性の計測

ここでは、主要国の科学技術開発に関わる取り組みが、国際特許出願数や科学分野の論文発表数、さらには付加価値額の産出にどのように影響を与えているのかを効率性の計測から検証する。具体的には、研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数、国際特許出願数、科学系論文の発表数を投入量として、また、産出量を国際特許出願数、科学系論文の発表数、付加価値額として投入量に対する産出量との関係から効率性を計測する。

効率性の計測手法としては、ノンパラメトリックな効率性の計測手法であるDEA (Data Envelopment Analysis: 包絡分析法) およびパラメトリックな計測手法であるSFA (Stochastic Frontier Analysis: 確率的フロンティア分析) の2つの計測法を用いる。

DEAは、多入力多出力系の相対的効率性を計測でき、また投入量の余剰をスラックとして計測できるため非効率な部分の改良点を指摘できるなどのメリットがある。しかし、データに含まれるノイズ成分などの確率的な要因による影響を除去することができないといったデメリットが指摘されている<sup>6)</sup>。

一方、SFAは確率的にデータやフロンティアが変動するものとしてパラメトリックにフロン

ティアを推計するため、計測結果を外的要因、確率的なノイズ成分、非効率性に分解することができる。その一方で、多出力に対応することが困難であり、事前に関数型と分布を仮定する必要があるなどのデメリットがある。双方の分析手法を適用して計測結果を比較検討することによって、分析手法の長所短所を相互に補間し、より精緻な検証が可能となる。本稿ではDEA, SFAの2つの分析手法を適用することで信頼性の高い分析結果を示す。

本稿では、対象とする主要国の一人当たりの知識・技術集約型産業の付加価値額あるいは実質GDPを産出量とし、研究者一人当たりの研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、国際特許全分野の国際特許出願件数、科学系博士号取得者数、科学系論文の発表数を投入量として、DEA, SFAを用いて科学技術開発に関わる効率性を計測する。

### 3.2. DEAを用いた効率性の分析

本稿では、DEAの基本的なモデルであるCCRおよびBCCモデルを使用して分析を行なった。CCRモデルは、Charnes, Cooper and Rhodes (1978)によって提示されたモデルであり、生産活動における投入量と生産量の相関において規模に関する収穫一定を仮定している。一方、BCCモデルは、Banker, Charnes and Cooper (1984)によって提示されたモデルであり、規模に関する収穫一定を仮定せず、規模に関する収穫逓増、収穫一定、収穫逓減のいずれにも対応している。CCRモデルとBCCモデルの両方を用いることによってCCRモデルの計測結果から規模による効果を分離して正味の技術的効率性を計測できる。

### 3.3. DEAによる効率性の計測法

DEAでは、個々の分析対象はDMU (Decision Making Unit) と呼ばれる。DEAは、あるDMUの投入と産出にかかる適当なウエイトを算出し、 $D$ 効率値という産出/投入の値で効率性を示す。この際のウエイトは、制約条件の下で当該DMUの $D$ 効率値が最大となるように決められる。

ここで、 $D$ 効率値 $\theta$ は $0 \leq \theta \leq 1$ であり、 $\theta = 1$ のとき、効率的であると判断される。

ここで、DMUの数を $n$ 個、投入要素と産出要素の数をそれぞれ $m$ 個、 $s$ 個とし、効率値を測定するDMUを $DMU_o$ とし、その $D$ 効率値を $\theta_o$ とするとCCRモデルは、(式3.1)の分数計画問題として表現できる。ここで、(式3.1)の右辺の分母を1とする制約条件を加えて線形問題に変換してその双対問題を解く。つまり、

$$\begin{aligned} & \max \theta_o \\ & = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} \dots (3.1) \\ & \text{s.t.} \quad \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} \leq 1 \\ & u \geq 0, v \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

(式3.1)の双対問題は、 $\theta_o$ を実数、 $\lambda$ を変数のベクトル、 $X$ 、 $Y$ をそれぞれすべてのDMUの投入、産出要素の行列とし、 $x_o$ 、 $y_o$ をそれぞれ $DMU_o$ の投入、産出のベクトルとすると(式3.2)と書くことができる。

$$\begin{aligned} & \min \theta_o \dots (3.2) \\ & \text{s.t.} \quad \theta_o x_o - X\lambda \geq 0, \\ & \quad y_o - Y\lambda \leq 0, \\ & \quad \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

(式3.2)を制約条件の下で解くことによって得られた $\min \theta_o$ が $D$ 効率値である。

さらに、投入、産出の Slack が存在する可能性を考慮して以下の(式3.3)を制約条件の下で解いて Slack を求める。

$$\begin{aligned} & \max \omega = e s_x + e s_y \dots (3.3) \\ & \text{s.t.} \quad s x = \theta^* x_o - X\lambda, \quad s_y = Y\lambda - y_o \\ & \quad \lambda \geq 0, \quad s_x \geq 0, \quad s_y \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、 $e$  はすべての成分が1の行ベクトル、 $S_x, S_y$  はそれぞれ投入、産出のスラック、 $\theta^*$  は(式3.2)を解くことによって得られた当該DMUのD効率値である。

例えば、ある財の産出量1単位に要する投入要素量(投入1, 投入2)がA, B, Cの各企業においてFig.3.1.のとおりであったとすると、企業Bと企業Cにおいては $\theta = 1$ であり、また、線分BC上の点はすべて $\theta = 1$ である。一方、企業Aの $\theta$ は、

$$\theta = OP / OA (< 1) \dots (3.4)$$

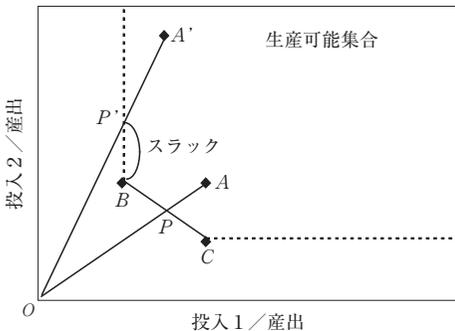
と計算される。つまり、企業Aは企業B, Cに比べて同一産出量を得るために必要な投入量が多かったため、効率が悪かったと判断されるのである。この際、企業Aが効率的(すなわち $\theta = 1$ )となるためには、投入1と投入2をそれぞれ $\theta$ 倍して、点Pの投入量とすればよい。

同様に、産出量1単位に要する投入量が企業A'のとおりであった場合は

$$\theta = OP' / OA' (< 1) \dots (3.5)$$

となる。投入1と投入2を $\theta$ 倍するとP'に移動して、 $\theta$ の値は1となる。ただし、Fig.3.1.からわかるとおり、企業BはP'よりさらに投入2が少ない。したがって企業A'が真に効率的となるためには、投入2をさらにP'Bだけ削減することが必要である。この削減量P'Bがスラックで

Fig.3.1. スラックの概念図



ある。スラックは、他の要素と同じ割合で削減可能なものではなく、D効率値 $\theta$ で示される削減量と比べると、より「余剰」としての意味合いが強い。

一方、規模の効果を考慮したBCCモデルは、(式3.1)の右辺の分子に定数項 $u_0$ を入れた(式3.6)で表現される。つまり、定数項 $u_0$ がないCCRモデルでは、(式3.1)の右辺の分子の投入量と分子の産出量と同じ倍率で拡大しても、(式3.1)の左辺 $\theta_0$ の数値に変化はない。したがって、規模が変化してもD効率値の値は変化しない。一方、(式3.6)のように、右辺の分子に定数項 $u_0$ を入れて分子の投入量と分子の産出量と同じ倍率で拡大すると、分子の定数項 $u_0$ の効果によって(式3.6)の左辺 $\theta_0$ の数値は変化する。つまり、規模によってD効率値の値は変化するようになる。

したがって、定数項 $u_0$ は、規模の経済性を反映したものとなる。つまり、定数項 $u_0 = 1$ の場合は、規模に関する収穫一定であり、定数項 $u_0 > 1$ の場合は、規模に関する収穫逓増、定数項 $u_0 < 1$ の場合は、規模に関する収穫逓減であることを示している。

$$\begin{aligned} & \max \theta_0 \\ & = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{so} - u_0}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} \dots (3.6) \\ & \text{s.t. } \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_s y_{sj} - u_0}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} \leq 1 \end{aligned}$$

(式3.6)の双対問題は、(式3.7)となり、実際にはこの双対問題を解いてD効率値を求める。

$$\begin{aligned} & \min \theta_0 \dots (3.7) \\ & \text{s.t. } \theta_0 x_o - X \lambda \geq 0, \quad y_o - Y \lambda \leq 0, \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda \geq 0, \quad \lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n) \end{aligned}$$

(式3.7)で示すとおり、BCCモデルの双対問題は、(式3.2)で示したCCRモデルの双対問題に(式3.8)の制約条件を加えたものである。

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \cdots (3.8)$$

ここで、BCCモデルの効率値 $\theta_{BCC}$ は、CCRモデルの効率値 $\theta_{CCR}$ 以上になる。 $\theta_{CCR}$ には規模の効果を含んでいるから全体効率性と考える。一方、 $\theta_{BCC}$ を規模の効果を除いた技術効率性と考えると、両者の差分は規模の効率性によるものとなる。

ここで、規模の効率性 (Scale efficiency) :  $Se$  は、

$$Se = \frac{\theta_{CCR}}{\theta_{BCC}} \cdots (3.9)$$

と定義する。すると、

$$CCR \text{ (全体効率性)} = BCC \text{ (技術効率性)} \\ \times Se \text{ (規模の効率性)} \cdots (3.10)$$

となる。

規模の効率性 $Se$ が1に近く、CCR(全体効率性)、BCC(技術効率性)双方で $D$ 効率値が1に近い分析対象は、規模に見合った最も効率的な状態である。

一方、規模の効率性 $Se$ が1より小さい分析対象は、BCCモデルで大幅に改善が見られたことになる。つまり、規模の影響で規模の効率性が悪化する可能性がある。他方、BCCモデルで改善の程度が小さかった分析対象は、規模の効果が小さく規模の効率性 $Se$ が高くなる。この分析対象は、さらなる改良策を講じることによって効率的な状態へ移行することが期待できる。

### 3.4. SFAによる効率性の計測の概要

SFA(確率的フロンティア分析)もDEAと同様に最も効率的な事業体が達成できる投入量と産

出量の関係をフロンティアとして推定する。DEAでは、確率的なノイズ成分を分離せずにフロンティアを推定したのに対して、SFAでは、確率的なノイズ成分を考慮してフロンティアを推定する。つまり、フロンティアと実際の生産量の乖離を確率的なノイズ成分と非効率性の合成と考えて、それぞれを推定することで効率性を計測する。

ここで、 $n$ 個の生産要素の投入によって1の生産物を算出する事業体 $i$ の生産関数を(3.11式)とする。ここで、確率的なノイズを表す誤差項と事業体 $i$ の技術効率を $TE_i$ とすれば、(3.12式)のように表すことができる<sup>7)</sup>。

$$Y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}) \cdots (3.11)$$

$$Y_i \\ = f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}) \exp(v_i) TE_i \cdots (3.12)$$

(3.13式)は確率的な誤差項を含む確率的な生産関数であり、技術効率 $TE_i$ は(3.14式)で求められる。

$$Y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}) \exp(v_i) \cdots (3.13)$$

$$TE_i = \frac{Y_i}{f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}) \exp(v_i)} \cdots (3.14)$$

ここで、 $TE_i$ は、1以下の正の値を取るので(式3.15)と定義する。つまり、 $u_i = 0$ で $TE_i = 1$ となり、 $u_i = \infty$ で $TE_i = 0$ となる。

本稿では、生産関数 $f$ としてコブダグラス型を用いる。すると生産関数 $f$ は、(3.16式)となり、対数線形をとれば(3.17式)となる。ここで、 $\beta$ は、(3.18式)で示すベクトルである。また、 $u_i$ は、事業体 $i$ の技術非効率性を示す。

$$TE_i = \exp(-u_i), \quad u_i \geq 0 \cdots (3.15)$$

$$Y_i = e^{\alpha_0} \cdot e^{v_i} \cdot e^{-u_i} \cdot x_i^\beta \cdots (3.16)$$

$$\ln Y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot \ln x_{ji} + v_i - u_i \cdots (3.17)$$

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n) \cdots (3.18)$$

SFAでは、確率的なノイズ成分  $v$  と非効率性  $u$  に確率分布を仮定する。本稿では、誤差項を確率的なノイズ成分と非効率性の合計として (3.19式) で表現する。

$$\varepsilon_i = v_i - u_i \cdots (3.19)$$

ここで、確率的なノイズ成分  $v$  と非効率性  $u$  は独立である。また、 $v_i$  には正規分布、 $u_i$  には半正規分布、つまり、(3.20式)、(3.21式)を仮定する。

$$v_i = \text{Normal}(0, \sigma_v^2) \cdots (3.20)$$

$$-\infty < v_i < \infty$$

$$u_i = \text{Normal}(0, \sigma_u^2) \cdots (3.21)$$

$$0 < v_i < \infty$$

収集したデータから (3.15式) のパラメータを推定して (3.17式) を求めて、さらに確率的なノイズ成分  $v$  と非効率性  $u$  を分離して効率性を計測する。

#### 4. 分析に用いたデータ

本稿で分析に用いたデータは、以下の通りである。まず、投入量に関わるデータとして、OECDが公開している研究者一人当たり研究開発費の年次データ、研究者数はUNESCOが公開している人口100万人当たりの研究者数の年次データを用いた。また、国際特許出願は、WIPOが公開している特許協力条約 (Patent Cooperation Treaty, PCT) に基づく特許の国際出願件数の全分野の

合計を、国連が公開している各国の人口のデータを使用して人口100万人当たりに変換して、年次データとして作成し使用した。

科学論文の発表数は、NSFが公開している「文献データベース Scopus」に収録され発表された全分野の論文の合計を、国際特許出願数と同じく国連が公開している各国の人口のデータを使用して人口100万人当たりに変換して、年次データとして作成し使用した。

科学系博士号取得者数は、NSFが公開しているISCED 2011のLEVEL8ベースの学位の全分野の合計値を、やはり国連が公開している人口データで人口100万人当たりに変換して、年次データとして作成および使用した。

一方、産出に関わる付加価値額については、NSFが公開している知識技術集約型産業の付加価値額と国連が公開している2016年USドルベースの実質GDPのデータを、国連の人口データを使用して一人当たりの付加価値額として年次データを作成して使用した。なお、ここで知識技術集約型産業<sup>8)</sup>とは、航空宇宙、医薬品、コンピューター・エレクトロニクス・光学機器、科学的研究開発サービス、ソフトウェア出版産業、兵器・武器、自動車、医療機器、機械装置、化学、電気機器、鉄道・輸送機器、IT・情報関連サービス産業などが含まれている。

以上のように、投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、同じく人口100万人当たりの国際特許出願数、人口100万人当たりの科学系博士号取得者数、人口100万人当たりの科学論文の発表数の5種類のデータを用いた。一方、産出量は、知識技術集約型産業の付加価値額と実質GDPの2種類である。

ただし、研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、人口100万人当たりの科学系博士号取得者数を投入量として、産出量を人口100万人当たりの国際特許出願数および人口100万人当たりの科学論文の発表数とした分析も行なった。つまり、研究開発費、研究者数、博士号取得数を投入として、どの程度の国際特許出願数や科学系論文の発表数が産出されているのか

を分析した。産出量として経済的な付加価値額とは異なる特許や論文といった知的生産物が効率的に産出されているか計測するためである。ただし、この場合は、産出量が2つであり複数のためDEAによる分析に限られる。

なお、本稿で分析対象としたのは、NSFが公表している2019年における知識技術集約型産業の付加価値額上位10位内であり、本稿の分析に必要なデータが得られる米国、中国、日本、ドイツ、韓国、英国、フランス、イタリアの8カ国に、国家としての人口は少ないものの、OECDが公表する人口一人当たり研究開発費で上位10カ国に入りかつ日本より上位にあるシンガポールとスウェーデンを加えた10カ国とした。しかし、今回の分析で用いたデータの内、いくつかのデータは分析対象国では公開されていないものがある。

そのため、投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、同じく人口100万人当たりの国際特許出願数、人口100万人当たりの科学系論文の発表数の4種類のデータを用いたケースも分析した。

これは、データの公開の関係で、博士号取得数を除くことによって分析対象としてシンガポールを加えることができるためである。また、付加価値額については、知識技術集約型産業の付加価値額とした場合は、やはりデータの公開の関係でスウェーデンが分析対象から除外される。しかし、付加価値額を実質GDPとした場合は、今回選択した10カ国全てが分析対象となる。このように、本稿では選択した分析データによって分析対象国が異なる複数のケースで分析を行なった。

具体的には、投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、同じく人口100万人当たりの国際特許出願数、人口100万人当たりの科学系博士号取得者数、人口100万人当たりの科学系論文の発表数の5種類のデータを用いて、産出量は、知識技術集約型産業の付加価値額とし、分析対象国を8カ国としたケース1。同じく投入量は5種類のデータを用いて、産出量は、実質GDPを用いて分析対象を9カ国としたケース2。さらに、投入量として研究

Table4.1. ケース1～4の投入要素と産出要素および分析対象国の数

	投入 or 産出要素	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
投入要素	研究者数	○	○	○	○
	研究開発費	○	○	○	○
	国際特許出願数	○	○		○
	科学系博士号取得者数	○	○	○	
	科学系論文の発表数	○	○		○
産出要素	知識技術集約型産業の付加価値額	○			
	実質GDP		○		○
	国際特許出願数			○	
	科学系論文の発表数			○	
分析対象国の数		8	9	9	10

者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、人口100万人当たりの科学系博士号取得者数、産出量として、人口100万人当たりの国際特許出願数および人口100万人当たりの科学系論文の発表数とし分析対象を9カ国にしたケース3。

投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、同じく人口100万人当たりの国際特許出願数、人口100万人当たりの科学系論文の発表数の4種類のデータを、産出量は実質GDPを用いて分析対象を10カ国としたケース4。以上の4つのケースを分析した。

Table4.1.にケース1から4の投入要素、産出要素、分析対象国の数を示す。

他方、分析期間については、投入量、産出量として使用するデータによって公開期間が異なるため、全てのデータが公開されている2004年から2019年までとした。ただし、科学技術開発は、投入して産出が得られるまでには相当の期間が必要であると考え、一般的な研究期間として4年を要すると仮定して、投入量、産出量とも4年間のデータの平均値を用いた。つまり、分析期間は、2004-2007年、2008-2011年、2012-2015年、2016-2019年の4期間とした。この4期間に対して、それぞれ上記で説明したケース1から4の分析を行なった。

## 5. DEA および SFA のモデルの解法

ここでは、3.2. および 3.3. で構築した DEA と SFA のモデルに 4. で概略を説明したデータを適用してモデルを解き、分析対象とした各国の科学技術開発に関わる効率性を分析する。

まず、DEA のモデルについては、CCR モデル、BCC モデルのそれぞれについて与えられたデータを用いて  $D$  効率値およびスラックを算出した。

具体的には、CCR モデルと BCC モデルの両方ともソルバーには、GLPK<sup>9)</sup> (GNU Linear Programming Kit) を、モデリングツールには pyomo<sup>10)</sup> を使い、python によって独自のプログラムを作成して (式 3.2), (式 3.3), (式 3.7) を解き、 $D$  効率値およびスラックを計測した。

SFA については、(式 3.17) 式のパラメータを (式 3.18), (式 3.19) の制約条件を加味して推定して、効率値を求めていく。本稿では推定法として最尤法を用いた<sup>11)</sup>。最尤法を用いるためには、対数尤度関数を導出して最適化問題を解く必要がある。本稿では、SFA については独自のプログラムを作成せず、Tim Coelli 氏によって作成されたアプリケーションである FRONTIER Ver.4.1<sup>12)</sup> を用いた。しかし、FRONTIER Ver.4.1 は 1996 年版が最新版であり、オペレーティングシステムが DOS であるため、データハンドリングなどの点で問題がある。実際には FRONTIER Ver.4.1 を R のライブラリーとして移植した Package 'frontier'<sup>13)</sup> を R ベースで使用した。R ベースに移植されたことで、オペレーティングシステムに依存せず分析が可能になった。Package 'frontier' と 4. で説明したデータにより SFA を用いた効率性の分析を行なった。

なお、推定した生産関数の確率的なノイズ成分  $v$  と非効率性を表す  $u$  の標準偏差をそれぞれ  $\sigma_v$  と  $\sigma_u$  とすると、(式 5.1) は  $\Gamma$  (ガンマ)、(式 5.2) は  $\sigma$  (シグマ) と呼ばれ、非効率性  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  を検定し、確率的フロンティアモデルの妥当性の確認に使われる<sup>14)</sup>。

$$\Gamma (\text{ガンマ}) = \frac{\sigma_u}{(\sigma_u + \sigma_v)} \dots (5.1)$$

$$\sigma (\text{シグマ}) = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)^{\frac{1}{2}} \dots (5.2)$$

ここで、 $\Gamma$  (ガンマ) は非負であるから通常の  $t$  検定ではなく片側検定になる。この  $t$  値の検定は  $z$  検定と呼ばれ、検定統計量は、 $z$ -value である。

## 6. 科学技術開発の効率性の分析結果

ここでは、4. で説明したケース別に、DEA、SFA のそれぞれの分析結果を示すとともに分析結果を考察することから得られる知見を示していく。

### 6.1. ケース 1 の分析結果

まず、投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口 100 万人当たりの研究者数、人口 100 万人当たりの国際特許出願数、人口 100 万人当たりの科学系博士号取得者数、人口 100 万人当たりの科学系論文の発表数の 5 種類のデータを、産出量は、一人当たりの知識技術集約型産業の付加価値額とし、分析対象国を 8 カ国としたケース 1 の分析結果を Table.6.1. に示す。

Table.6.1. からまず CCR モデルの効率値をみると、イギリス、フランスは 2007 年から 2019 年までの 4 つの分析期間で効率値は 0.7 ~ 0.8 であり、非効率という計測結果となった。また、韓国も 2011 年以降の効率値は 0.7 ~ 0.8 であり、非効率という結果である。米国は、2004 年 ~ 2010 年は 0.7 ~ 0.9 であり非効率であったが、2011 年以降の  $D$  効率値は 1 であり効率的な状態へ移行している。Fig.6.1. から BCC モデルの  $D$  効率値をみると、傾向は CCR モデルとほぼ同じであり、イギリスは 2004 ~ 2007 年が効率的であった以外はほぼ非効率な状態であり、またイギリスとフランスは CCR と同じく分析期間全体を通して非効率であった。韓国も 2010 年以降は、非効率な状態が継続している。一方、日本は CCR モデル、

BCC モデルともに  $D$  効率値はすべての分析期間で1であり効率的な状態であった。

(式 3.9) で示した規模の効率性  $Se$  を計算すると、2016-2019 年で韓国が 0.9 程度と低い値であり、韓国が BCC モデルで効率値が改善していることが分かる。韓国は 2. で概観した通り 2010 年以降は、研究者数や研究開発費を拡大させており、規模の効率性  $Se$  の値から、科学技術開発に関して規模の経済による効果があったことが推測される。しかし、投入量の増加に見合った産出量が得られていないため、効率値を低下させていると考えられる。日本の  $Se$  は分析期間を通して1であり、この期間の日本は科学技術開発に関して効率的な状態であるとともに規模による収穫一定であったことが確認できる。

Table.6.1. から、CCR モデルと BCC モデルの分析結果の傾向はほぼ同じであり、特に非効率である分析対象国と分析期間はほぼ一致している。

2016-2019 年の CCR モデルからスラックを計算した結果が Table.6.2. である。Table.6.2. からイギリスでは、研究者数、研究開発費、博士号取得数、フランスでは研究者数、博士号取得数でスラックが算出された。すなわち、スラックが算出された投入要素は、産出にあまり貢献できていないことを示唆している。

次に、SFA の分析結果をみると 2016-2019 年の分析期間は、分析対象国の全てでほぼ効率的と計測された。しかし、2004 年から 2015 年の分析結果では、ほとんど全ての分析対象国で非効率な状態となっていた。なお、非効率を表す  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  の  $z$ -value および (式 5.1) で示した  $\Gamma$  (ガンマ) の値は、2004-2007 年はそれぞれ 3.7, 0.99 と高かったが、その後は低下し 2016-2019 年は 0.002, 0 と低くなっている。つまり、2016-2019 年は非効率を表す  $u$  は有意ではなく、Table.6.1. から分かるようにすべての分析対象国は効率的であった。

(注) Table.6.1. ~ 6.8. で使用されている記号は以下の通りである。

国名 GB: イギリス, IT: イタリア, KR: 韓国, CN: 中国, DE: ドイツ, JP: 日本, FR: フラ

ンス, US: 米国, SE: スウェーデン, SG: シンガポール

R.N: 研究者数, R&D.E: 研究開発費, D.D:

Table.6.1. DEA & SFA Efficiency value: CASE\_1

Country	(KTVadd. 5input, loutput)			
CCR	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	0.8262	0.7631	0.8013	0.8357
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	1.0000	0.8272	0.9135	0.8947
CN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
DE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
JP	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.8135	0.8024	0.7383	0.7546
US	0.8728	0.9014	1.0000	1.0000
BCC	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	1.0000	0.7861	0.9744	0.8522
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	1.0000	0.8339	0.9520	0.9933
CN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
DE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
JP	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.8152	0.8081	0.7421	0.7752
US	0.8829	0.9527	1.0000	1.0000
SFA	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	0.9918	0.9908	0.9653	0.9993
IT	0.9948	0.9675	0.9376	0.9993
KR	0.9620	0.9268	0.9842	0.9993
CN	0.9001	0.9832	0.9917	0.9993
DE	0.8912	0.9511	0.9874	0.9993
JP	0.9702	0.9899	0.8223	0.9993
FR	0.8593	0.8962	0.7620	0.9993
US	0.7374	0.8669	0.9502	0.9993

Table.6.2. DEA CCR KT\_VAD: Slack in 2016-2019y: CASE\_1:

Country	R.N	R&D.E	D.D	P.A	P.N	KTVadd
GB	1010.29	211.97	113.97	(0.00)	(0.00)	0.00
IT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	(0.00)
KR	1679.54	13.06	(0.00)	(0.00)	(0.00)	0.00
CN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	(0.00)
DE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
JP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FR	542.18	0.00	37.69	0.29	0.00	(0.00)
US	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	(0.00)
in5, out1	x1	x2	x3	x4	x5	y1

科学系博士号取得者数,  $P.A$ : 国際特許出願数,  
 $P.N$ : 科学系論文発表数,  $KTVadd$ : 知識技術集  
 約型産業の付加価値額,  $R\_GDP$ : 実質 GDP  
 いずれも人口あたりのデータである。

6.2. ケース 2 の分析結果

次に, ケース 1 と投入量は同じで, 産出である  
 付加価値額を実質 GDP としたケース 2 の分析結  
 果を Table.6.3. に示す。Table.6.3. からまず CCR  
 モデルの効率値をみると韓国, スウェーデン, 中  
 国, ドイツが分析期間を通して非効率となってい  
 る。イギリス, フランスは 2015 年までは非効率  
 であったが, 直近の 2016-2019 年は効率的になっ  
 ている。また, 米国, イタリア, 日本は効率的と  
 計測されている。この傾向は, BCC モデルでも  
 ほぼ同じである。ただし, BCC モデルではイギ  
 リス, 中国は分析期間を通して効率的である。

Table.6.4. は, ケース 2 の 2016-2019 年の CCR  
 モデルからスラックを計算した結果である。CCR  
 モデルで非効率であった韓国, スウェーデン, 中  
 国, ドイツで研究者数のスラックが算出された。  
 特に, 韓国のスラックは 1459 人と大きい。韓国  
 は, 2. で見たように人口 100 万人当たりの研究者  
 数を急速に増加させているが, 必ずしも産出であ  
 る一人当たりの実質 GDP の生産に貢献できてい  
 ない状況を示している。この他, スウェーデンの  
 研究者数, 国際特許出願数のスラックが大きい。

CCR モデル, BCC モデルの結果から (式 3.9)  
 の規模の効率性  $Se$  の値を計算すると, 韓国が  
 0.92, スウェーデンが 0.87, 中国が 0.80 と 1 を大  
 きく下回っており, 規模の経済が確認できる。韓  
 国は, ケース 1 の分析結果でも規模の経済が確認  
 されており, ケース 2 の分析結果はケース 1 の結  
 果と整合性がある。

SFA の分析結果は, ケース 1 とほぼ同じ結果  
 となっており, 2016-2019 年は全ての分析対象国  
 で効率的となっている, しかし, 2004-2015 年は,  
 全ての分析対象国が非効率である。SFA の分析  
 結果をよく確認すると, 米国の非効率性は比較的  
 軽度なものである。ケース 1 やケース 2 の CCR  
 モデル, BCC モデルの分析結果を総合的に考慮

Table.6.3. DEA & SFA Efficiency value: CASE\_2

Country	(RealGDP, 5input, loutput)			
CCR	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	0.8306	0.9402	1.0000	1.0000
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.7377	0.6341	0.5775	0.5422
SE	0.6413	0.6962	0.7162	0.7536
CN	1.0000	0.9619	0.8884	0.7959
DE	0.8661	0.8301	0.7884	0.7706
JP	0.9703	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.9270	0.9387	0.9675	1.0000
US	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
BCC	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.7764	0.6823	0.6133	0.5898
SE	0.6848	0.7376	0.7649	0.8653
CN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
DE	0.8764	0.8429	0.8021	0.7876
JP	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.9318	0.9438	0.9755	1.0000
US	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
SFA	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	0.9996	0.7946	0.9294	0.9989
IT	0.9996	0.8823	0.6859	0.9989
KR	0.9996	0.6859	0.6415	0.9989
SE	0.9996	0.6363	0.5372	0.9989
CN	0.9996	0.8504	0.8138	0.9989
DE	0.9996	0.8778	0.7897	0.9989
JP	0.9996	0.9543	0.8826	0.9989
FR	0.9996	0.9792	0.9685	0.9989
US	0.9996	0.9944	0.9719	0.9989

Table.6.4. DEA CCR Real GDP: Slack in 2016-2019y: CASE\_2:

Country	R.N	R&D.E	D.D	P.A	P.N	R_GDP
GB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	(0.00)
IT	(0.00)	0.00	(0.00)	(0.00)	0.00	0.00
KR	1459.34	0.00	10.98	48.18	0.00	(0.00)
SE	890.30	(0.00)	(0.00)	162.46	0.00	(0.00)
CN	262.05	0.00	0.00	(0.00)	19.39	(0.00)
DE	215.82	(0.00)	37.64	49.88	0.00	(0.00)
JP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
US	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
in5, out1	x1	x2	x3	x4	x5	y1

すると、米国は科学技術開発の効率性に関して良好な状態を維持していることが分かる。

非効率を表す  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  の  $z$ -value および (式 5.1) で示した  $\Gamma$  (ガンマ) の値は、2004-2007 年ではそれぞれ 4.4, 0 と  $z$ -value は高かったが、 $\Gamma$  (ガンマ) はほぼ 0 であった。2008-2011 年はそれぞれ 3.73, 0.99, 2012-2015 年はそれぞれ 3.0, 0.99 であった。また、2016-2019 年はそれぞれ 0.0, 0.0 であった。このように、 $z$ -value と  $\Gamma$  (ガンマ) が共に高い値であった 2008-2011 年および 2012-2015 年は、非効率を表す  $u$  が有意となり、Table.6.2. から分かるように、多くの分析対象国の効率性が低下していることが分かる。一方、2016-2019 年は、非効率を表す  $u$  は有意ではなく、Table.6.2. から全ての分析対象国は効率的であった。

### 6.3. ケース 3 の分析結果

投入量を研究者一人当たり研究開発費、人口 100 万人当たりの研究者数、人口 100 万人当たりの科学系博士号取得者数の 3 種類のデータとし、産出量を人口 100 万人当たりの国際特許出願数、人口 100 万人当たりの科学論文の発表数の 2 種類のデータとした、ケース 3 の分析結果を Table.6.5. に示す。Table.6.5. から CCR モデルの  $D$  効率値をみると、2012-2015 年と 2016-2019 年のイギリスおよび米国、それに加えて分析期間全てで韓国、中国、ドイツ、フランスが非効率となっている。BCC モデルも程度の差はあるものの傾向はほぼ同じであり、韓国、ドイツ、フランスがほとんどの分析期間で非効率になっている。この結果から、韓国、ドイツ、フランスでは、研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数の投入が、国際特許出願数、科学論文の発表数といった科学技術開発に関わる知的生産物の生産に適切に活用できていないことが分かる。

Table.6.6. は、ケース 3 の 2016-2019 年における CCR モデルから算出したスラックの計算結果である。Table.6.6. から韓国は 257 人、フランスは 302 人の研究者数のスラックが、米国で研究者一人当たり 573 ドル、ドイツでも 324 ドルと研究

開発費で大きなスラックが見られる。韓国では、ケース 1、ケース 2 でも研究者数にスラックが見られたことから、分析結果の信頼性は高いものと考えられる。フランスもケース 1 で研究者数のスラックが計測されており、注視すべき結果である。

CCR モデル、BCC モデルの結果から規模の効率性  $Se$  の値を計算すると、イギリスが 0.75、韓国が 0.93、スウェーデンが 0.87、中国が 0.95 と 1

Table.6.5. DEA Efficiency value: CASE\_3

Country	(Real GDP, 3input, 2output)			
CCR	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	1.0000	1.0000	0.8592	0.7082
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.8510	0.9231	0.8043	0.7299
SE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
CN	0.8579	0.9259	0.9135	0.9465
DE	0.9872	0.8509	0.8449	0.8591
JP	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.9102	0.8272	0.7261	0.7080
US	1.0000	1.0000	0.9457	0.8320
BCC	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
GB	1.0000	1.0000	1.0000	0.9386
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.8616	0.9346	0.8597	0.7819
SE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
CN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
DE	1.0000	0.8733	0.8964	0.8665
JP	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.9104	0.8277	0.7605	0.7281
US	1.0000	1.0000	1.0000	0.8386

Table.6.6. DEA CCR Real GDP Slack in 2016-2019y: CASE\_3

Country	R.N	R&D.E	D.D	P.A	P.N
GB	0.00	34.07	68.06	(0.00)	(0.00)
IT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KR	257.29	0.00	(0.00)	0.00	(0.00)
SE	0.00	0.00	0.00	(0.00)	(0.00)
CN	50.04	0.00	0.00	23.63	0.00
DE	0.00	324.18	68.48	(0.00)	(0.00)
JP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FR	302.09	(0.00)	14.23	0.00	(0.00)
US	0.00	573.28	9.50	0.00	(0.00)
in3, out2	x1	x2	x3	y1	y2

を大きく下回っており、規模の経済が確認できる。韓国、中国は、ケース1、ケース2の分析結果でも規模の経済が確認されており、韓国の科学技術開発における規模の経済性の効果については確定的な結果であるといえよう。

**6.4. ケース4の分析結果**

最後に、投入量として研究者一人当たり研究開発費、人口100万人当たりの研究者数、人口100万人当たりの国際特許出願数、科学論文の発表数の4種類のデータを、産出量は、一人当たり実質GDPとしたケース4の分析結果をTable.6.7.に示す。ケース4では、科学系博士号取得者数を除外することで、同データが公開されていないシンガポールを分析対象として含める。この結果、分析対象国は10カ国となる。Table.6.7.からまずCCRモデルのD効率値をみると、韓国、シンガポール、スウェーデン、中国、ドイツが分析期間を通してほぼ非効率となっている。また、イギリス、日本は、2004-2011年までは非効率であったが、2012-2019年は効率的になっている。フランスは2015年までは非効率であったが、直近の2016-2019年は効率的になっている。また、米国、イタリアは全分析期間を通して効率的と計測されている。この傾向は、BCCモデルでもほぼ同じである。ただし、BCCモデルではイギリス、中国は分析期間を通して効率的である。この結果は、ケース2とほぼ同じ結果である。

Table.6.8.は、ケース4の2016-2019年におけるCCRモデルからスラックを計算した結果である。CCRモデルで非効率であった韓国で1459人、シンガポールで154人、ドイツで215人の研究者数のスラックが算出された。韓国の研究者数のスラックはケース1~3でも計測されており、これまでの結果を追認している。ドイツもケース2でほぼ同じ結果が出ている。2.で見たように、韓国やドイツは、研究者数を増加させているが、実質GDPの生産に十分に貢献できていない状況を示している。この他、スウェーデン、韓国の国際特許出願数のスラックが大きい。

CCRモデル、BCCモデルの結果から規模の効

率性  $Se$  の値を計算すると、韓国が0.92、シンガポールが0.83、スウェーデンが0.86、中国が0.74と1を大きく下回っており、規模の経済が確認できる。韓国、中国は、ケース1、ケース2、ケース3の分析結果でも規模の経済が確認されており、スウェーデンもケース2で規模の経済が確認されている。これまでの分析結果と整合性がある結果となっている。

SFAの分析結果は、ケース1、ケース2とほ

Table.6.7. DEA & SFA Efficiency value: CASE\_4

Country	(Real GDP, 4input, 1output)			
	2007_2004	2011_2008	2015_2012	2019_2016
<b>CCR</b>				
GB	0.8306	0.9402	1.0000	1.0000
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.7377	0.6341	0.5775	0.5422
SG	0.5890	0.7176	0.8129	0.8332
SE	0.6413	0.6962	0.7162	0.7388
CN	1.0000	0.9619	0.8820	0.7376
DE	0.8661	0.8301	0.7884	0.7706
JP	0.9404	0.9614	1.0000	1.0000
FR	0.9270	0.9387	0.9675	1.0000
US	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>BCC</b>				
GB	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
IT	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
KR	0.7764	0.6823	0.6133	0.5898
SG	0.7639	0.8892	1.0000	1.0000
SE	0.6848	0.7376	0.7631	0.8599
CN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
DE	0.8764	0.8429	0.8021	0.7876
JP	0.9610	1.0000	1.0000	1.0000
FR	0.9318	0.9438	0.9755	1.0000
US	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>SFA</b>				
GB	0.9164	0.9045	0.9865	0.9970
IT	0.8739	0.8843	0.6982	0.9970
KR	0.7572	0.7330	0.6761	0.9969
SG	0.7874	0.8630	0.9157	0.9970
SE	0.6028	0.6369	0.5214	0.9969
CN	0.9229	0.8142	0.8171	0.9969
DE	0.7249	0.7963	0.7084	0.9970
JP	0.9425	0.9282	0.8902	0.9970
FR	0.9566	0.9258	0.9488	0.9970
US	0.9674	0.9583	0.9825	0.9970

Table.6.8. DEA CCR Real GDP Slack in 2016-2019y: CASE\_4

Country	R.N	R&D.E	P.A	P.N	R_GDP
GB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KR	1459.34	0.00	48.18	0.00	(0.00)
SG	154.57	0.00	0.00	0.00	(0.00)
SE	(0.00)	(0.00)	143.67	(0.00)	0.00
CN	(0.00)	(0.00)	0.57	(0.00)	0.00
DE	215.82	0.00	49.88	0.00	(0.00)
JP	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	0.00
FR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
US	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
in4, out1	x1	x2	x3	x4	y1

ほぼ同じ結果となっており、2016-2019年は全ての分析対象国で効率的である。しかし、2004-2015年は、全ての分析対象国が非効率である。その中でも米国の非効率性は比較的軽度なものである。このように、これまでの分析結果を総合的に考慮すると米国は、科学技術開発の効率性に関して良好な状態を維持していることが分かる。

コブダグラス型の生産関数において非効率を表す  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  の  $z$ -value および (式 5.1) の  $\Gamma$  (ガンマ) の値は、2004-2007年にそれぞれで 0.25, 0.99 と  $z$ -value は低かったが、 $\Gamma$  (ガンマ) は高い数値であった。2008-2011年はそれぞれ 0.87, 0.31, 2012-2015年はそれぞれ 23.16, 0.99 であった。2016-2019年はそれぞれ 4.1, 0.0 であった。このように、 $z$ -value と  $\Gamma$  (ガンマ) が共に高い値であった 2012-2015年は、非効率を表す  $u$  が有意となり、Table.6.7.からも分かるように、多くの分析対象国の効率性が低下していることが分かる。また、この期間は他の分析期間と比較して効率性が低いことが認められる。一方、2016-2019年は非効率を表す  $u$  は有意ではなく、Table.6.7. から全ての分析対象国は効率的であった。

## 6.5. 分析結果の考察

以上のように、科学技術開発の効率性を計測するために、研究者数、研究開発費、科学系博士号

取得者数、国際特許出願数、科学論文の発表数を投入として、知識技術集約型産業の付加価値額あるいは実質 GDP を産出とした場合の、投入に対する産出の効率性を DEA, SFA によって分析した。効率性の計測では、DEA は確率的なノイズの影響を分離せずに計測するため、確率的なノイズを分離して効率性を計測する SFA と比較して計測した非効率性は、確率的なノイズの分だけ大きなものとなる。また、DEA においても、規模による収穫一定を仮定する CCR モデルと、収穫一定を仮定しない BCC モデルを比較すると、規模の経済の効果を分離して効率性を計測する BCC モデルより CCR モデルの方が、規模の経済の効果の分だけ非効率性の計測結果が大きくなる。今回の分析では、このような理論的な背景を確認することができた。Table.6.1. ~ 6.8. から、効率性の値は概ね以下のような関係が成立していた。

CCR モデル < BCC モデル < SFA モデル

また、効率性の分析では、2. で概略を確認した科学技術開発の状況とは必ずしも一致しない内容を含んでいた。つまり、近年に急速に研究者一人当たり研究費や人口 100 万人あたり研究者数を増加させている韓国や中国、ドイツは、科学技術開発の効率性では必ずしも高くはなかった。特に、韓国は人口 100 万人あたり研究者数で相当のスラックが発生している状況が確認できた。スウェーデンは、国際特許出願数にスラックが確認された。一方、2. では、特段に注目するような状況が見られなかったものの科学技術開発の効率性で良好な結果が出ていたのは、イタリア、日本である。両国は、投入量の目立った増加はなかったが、効率値は安定して高かった。イタリア、日本では、投入である研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数、国際特許出願数、科学論文発表数などが微増あるいは横ばい、場合によっては微減といった状況であったが、産出量も投入量と同様に微増あるいは横ばい、微減といった状況であり、投入量は増やさないが、産出量も大きく変化しないことに特徴がある。つまり、現状維持から縮小均衡の状況にあり、効率性という観点からみ

れば必ずしも悪くはなく安定的に効率性を維持している状態と考えることができる。また、イタリアは、国内で生産される財の内、ブランド品が占める割合が高く、付加価値が高い商品やサービスを多数扱っており、産出に付加価値を設定した今回の分析では良好な結果が得られたのではないだろうか。

一方、米国は、2.でみてきたように投入である研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数、国際特許出願数、科学論文発表数が高い伸びを示している一方で、効率性においても良好な結果となった。同じように、投入に関して高い伸びを示している中国は、科学技術開発の効率性において、甲乙付け難い状況であり、特段に良好な結果は得られていない。米国は、CCR、BCC、SFAのどの分析手法においても、また全ての分析期間においても、科学技術開発の効率性が高いという結果が得られた。これは、長期間にわたって経済成長を実現し、AIやバイオ、航空宇宙など先端的な産業を常に牽引している米国の底力を示す結果である。

## 7. おわりに

本稿では、科学技術開発の状況を踏まえた上で、DEAやSFAといった効率性を計測するための分析ツールを用いて、国際的な科学技術開発における効率性の分析を行なった。その結果、研究者数、研究開発費、博士号取得者数、国際特許出願数、科学論文発表数などを急増させている中国や韓国は、今回の効率性の計測では特に良好な結果は得られなかった。また、韓国やドイツでは、研究者数にスラックが計測され、研究者の増加が、付加価値額や国際特許の出願数、論文の発表数に貢献できていないことが分かった。ただし、韓国、中国、スウェーデン、シンガポールでは、BCCモデルの分析から規模の経済の効果が確認された。つまり、科学技術開発において、規模の拡大による効率性の上昇を実現している。

その一方で、中国と競うように研究者数、研究開発費、博士号取得者数、国際特許出願数、科学

論文発表数などを急増させている米国は、科学技術開発の効率性に関して良好な結果を示している。

このように本稿の分析では、米国の科学技術開発は盤石な状態であることが分かった。

日本は、科学技術開発において多くのケースで効率的な状況が計測された。研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数、国際特許出願数、科学論文発表数においては伸び悩んでいるものの、産出である付加価値額や科学論文発表数は横ばいから微減、他方、国際特許出願数では増加しているため、投入と産出のバランスが良好な結果をもたらした要因と考えられる。

以上のように、科学技術開発の効率性においては、研究者数、研究開発費、科学系博士号取得者数を増やすことだけでは、必ずしも良好な結果は得られないことを今回の分析結果は示している。

しかしながら、資源の乏しい日本の未来を考えた時、かつて明治政府が果たしてきた科学技術の振興から学ぶことが少なからずあるだろう。国家が、未来を見据えて積極的に科学技術開発を推進する必要がある。今回の分析結果から、日本は科学技術開発における効率性は比較的良好であるといえる。今こそ、投入と産出のバランスを保持しつつ、規模の拡大を目論むことが必要である。科学技術立国としての地位が危ぶまれている現状で、国際競争力を向上させ再び世界のトップ水準へ回帰するために検討しなければならない。そのためには、単に科学技術開発費を拡大させるだけでなく、科学技術開発の動向や実態を的確に精査し、タイムリーかつ最適な予算配分を実行することが求められる。

同時に、即時的にリターンが見込める研究テーマに限定せず、未来への投資として基礎研究を拡充することを忘れてはならない。本稿の分析では、科学技術開発において投入から産出を得るまでにおおよそ4年を想定していた。しかし、基礎研究においては、成果を得るまでに20～30年というケースも想定される。そのような場合を想定すると、今回の分析では効率的でなかったが、研究者数、研究開発費などの投入を急増させている中国

や韓国が、20～30年の時を経て科学技術開発における大きな成果を得ることになるのかもしれない。基礎研究の推進は、未来永劫にわたって科学技術立国として存続するために必要な投資なのである。

一方、日本の研究開発費総額の約78%<sup>15)</sup>を占める企業の科学技術開発をさらに拡充させることも重要である。特に、半導体などの先端的なデバイスの研究開発には数兆円規模の多額の投資が必要である。しかし、昨今は、短期的な業績や株価などを評価する傾向が強まり、企業の経営者の多くがリスクを嫌い中長期的な投資を回避して、短期的な業績の確保を優先させている。これでは、日本の国際的な競争力はさらに低下するであろう。かつて世界のトップを走っていた半導体は、バブル崩壊後の1990年代に設備投資を回避したことを契機として、国際的な競争力を失うことになった。

科学技術開発に関わる投資を促進するために、企業連合や国家によるサポートを一層強化しなくてはならない。さらに、科学技術開発に携わる有能な人材の育成と供給も重要な課題である。基礎研究や人材の育成を担う大学の拡充も再考すべき時である。科学技術開発は国の礎であることを鑑みて、未来へ向けた科学技術戦略を考究することが求められている。

※本研究はJSPS科研費JP20K01948の助成を受けたものである。

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP20K019

#### 【注】

- 1) Organisation for Economic Co-operation and Development: 経済協力開発機構のことである。本部はフランスのパリに置かれており、加盟国は38か国。
- 2) United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization: 略称: UNESCO, 国際連合の経済社会理事会の下におかれた教育、科学、文化の発展と推進、世界遺産の登録などを目的とした国際協定である。
- 3) 世界知的所有権機関(WIPO)は、国際的な知的財産権(IP)制度の発展を担う国連の専門機関である。
- 4) 特許協力条約(Patent Cooperation Treaty, PCT)に基づ

く特許の国際出願件数(全分野)。各国の件数は出願者の居住地・本店所在地ベースで集計。各年の出願件数は国際出願日ベースで集計。

- 5) アメリカ国立科学財団: National Science Foundation, NSFのことである。
- 6) 北坂真一・菅原千織「確率的フロンティアモデルによる大学の効率性に関する研究: 展望」、『経済学論叢』第63巻第3号 pp. 357-384, 2011年12月, 同志社大学経済学会。
- 7) Battese and Coelli, T. (1995) で非効率性を含めた関数型が示されている。
- 8) OECDの分類定義ベースのハイR&D集約型産業とミディアムハイR&D集約型産業が含まれている。
- 9) オープンソースの混合整数最適化法のソルバーである。<https://www.gnu.org/software/glpk/>
- 10) オープンソースのモデリングツールである。<https://www.pyomo.org/>
- 11) Coelli (1995) は小標本でも非効率性の影響が強ければ、最尤推定量は統計的に優れているとしている。確率的フロンティアモデルの研究では、多くの場合は最尤法が用いられている。
- 12) Centre for Efficiency and Productivity Analysis: CEPA, University of New England, Armidale, NSW, AustraliaのProfessorであるTim Coelli氏によって作成された確率的フロンティアモデルに特化したプログラムである。無料のソフトウェアであり詳細なマニュアルが公開されている。
- 13) Tim Coelli, Arne Henningsenによってマニュアルが公開されている。<https://frontier.r-forge.r-project.org/>
- 14) Battese and Coelli (1992), 北坂真一・菅原千織 (2011) が検定方法としてシグマ, ガンマについて指摘している。
- 15) OECDが公表する世界の主要国の研究開発費に関するデータによると、2021年の日本の研究開発費総額に占める企業の研究開発費は78.56%である。

#### 【参考文献】

- Aigner, D., K. Lovell and P. Schmidt (1977) "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models," *Journal of Econometrics*, Vol. 6, pp. 21-37.
- Charnes, W., W. Cooper and E. Rhodes (1978) "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, Issue 6, pp. 429-444.
- Banker, R., Charnes, A. and Cooper, W. (1984) "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-1092.
- Battese, G. and T. Coelli (1988) "Prediction of Firm-level Technical Efficiencies with a Generalized Frontier Production Function and Panel Data," *Journal of Econometrics*, Vol. 38, pp. 387-399.
- Battese, G. and T. Coelli (1992) "Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data with Application to Paddy Farmers in India," *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 3, pp. 153-169.
- Battese, G. and T. Coelli (1995) "A Model for Technical

- Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Model for Panel Data,” *Empirical Economics*, Vol. 20, pp. 325-332.
- Coelli, T. (1995) “Estimators and Hypothesis Tests for a Stochastic Frontier Function: A Monte Carlo analysis,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 6, pp. 247-268.
- Coelli, T. (1996) “A Guide to FRONTIER Version 4.1: A Computer Program for Stochastic Frontier Production and Cost Function Estimation,” CEPA Working Papers (University of New England, NSW, Australia).
- Coelli, T. and A. Henningsen (2011) “Package ‘frontier’,” <http://frontier.r-forge.r-project.org/>.
- Coelli, T. and S. Perlman (2000) “Technical Efficiency of European Railways: a distance function approach,” *Applied Economics*, 32, pp. 93-103.
- Coelli, T., D. S. P. Rao, C. J. O’Donnell and G. E. Battese (1998) *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Springer. (2nd ed., 2005).
- Cohn, E., S. L. W. Rhine and M. C. Santos (1989) “Institutions of Higher Education as Multi-92 (380) product Firms: Economies of Scale and Scope,” *Review of Economics and Statistics*, Vol. 71, pp. 284-290.
- 廣松毅・栗田学・坪根直毅・小林稔・大平号声「情報装備の労働投入代替効果に関する定量分析」, 『経営情報学会誌』 Vol. 8, No. 4, pp. 49-65, 2000年3月.
- Minoru Kobayashi, Takeshi Hiromatsu, Naoki Tsubone, Manabu Kurita, Gosei Ohira (2003) “Economical Impacts of IT on Industries in Japan”, Working Paper No. 213, pp. 1-28, Center on Japanese Economy and Business, Columbia University.
- 廣松毅・大平号声・小林稔・坪根直毅・栗田学「非生産部門における情報装備の経済効果に関する定量分析」, 『日本社会情報学会会誌』 Vol. 16, No. 1, pp. 43-58, 2004年3月.
- 北坂真一・菅原千織「確率的フロンティアモデルによる大学の効率性に関する研究：展望」, 『経済學論叢』第63巻第3号, pp. 357-384, 同志社大學經濟學會, 2011年12月.
- 上田雅弘「DEA・SFAおよび因子分析を用いた製紙業界の効率性分析」, 『松山大学論集』第18巻第5号, pp. 83-116, 2006年.
- 野田遊「包絡分析法を用いた都道府県財政の効率性の測定」, 『長崎県立大学経済学部論集』第43巻第2号, pp. 31-56, 2009年.

(2023年9月11日 受稿)  
(2023年10月1日 受理)