

メタフロンティア DEA モデルの政策への応用 —中国の石炭火力発電所を例に—

江口 昌伍

中国は年間 90 億トン以上の CO₂ を排出する世界最大の排出国である。その主な要因として、中国国内では電源構成比の大部分を石炭火力に依存していることが挙げられる。本研究では、メタフロンティア Data Envelopment Analysis の手法を応用し、2009 年から 2011 年にかけての中国の石炭火力発電所の非効率性の要因を、発電所の規模、立地する地域、マネジメント面での非効率性の三つの要素に要因分解し、分析を行う。研究結果から、発電所の規模や立地する地域によって、発電の非効率性の要因が大きく異なることが明らかになった。本研究では、これらの結果を踏まえ、中国国内の石炭火力発電所のスクラップ政策について議論する。

キーワード：Data Envelopment Analysis, メタフロンティア, 中国, 石炭火力発電

1. はじめに

産業革命以来、世界の CO₂ 排出量は一貫して増加傾向にあり、2015 年における化石燃料起源の CO₂ 排出量は世界全体で約 323 億トンと推計されているが、国別にみると中国が約 92 億トンの CO₂ を排出しており、世界最大の排出国である [1]。その主な要因として、中国は世界最大の石炭産出国であり、2015 年の中国の電源構成を見ると、火力発電が 80% 近くを占め、さらにそのうち 70% 以上が石炭火力によって発電された電力である [2, 3]。

CO₂ 排出量削減に向けて、中国はパリ協定において 2005 年比で GDP あたりの CO₂ 排出量を 2030 年までに 60~65% 削減するという目標を掲げた [4] もの、今後増加すると予想されるエネルギー需要に対応するために、石炭火力による発電量を維持していくことを明言している [5]。一方で、近年、中国では再生可能エネルギーの発電容量は劇的に増加しており、2018 年の国内の総発電量に占める再生可能エネルギーの割合は 26.7% にまで上昇した [6]。再生可能エネルギーのこの急速な増加により、石炭火力発電所の稼働率は著しく低下し、石炭火力発電所の赤字問題を生み出した。これらの問題を解決するために、中国政府は過剰生産能力の縮小に向けた取り組みを始め、2017 年に入り建設途中だった火力発電所も含めて 104 カ所の石炭火力発電所の新規建設を中断した [7]。

中国政府がこれらの地球温暖化緩和に向けた環境政

策を執り行ううえでは、石炭火力発電所の過剰生産能力の縮小（すなわち、既存の石炭火力発電所のスクラップ）や、石炭火力発電所の効率的運営（すなわち、発電効率性の改善）が必要であり、中国国内の主要な電源である石炭火力発電所の詳細な発電効率性を把握することが決定的に重要である。しかしながら、既存研究では、中国国内の省単位の発電・エネルギー効率性の分析を行っている研究は数多く存在するものの、石炭火力発電所を単位とした効率性分析は、データの入手の困難さから多くは行われていない。

発電所単位のデータを利用した数少ない既存研究である Zhang and Choi [8] は、2005 年から 2010 年にかけての石炭火力発電所の発電効率性の経年変化を分析しているものの、サンプルサイズが 93 と限定的である。Yang and Pollitt [9] は 582 カ所の石炭火力発電所のデータを用いているが、分析年が 2002 年のみであり、技術変化の動態を捉えられておらず、また、地域間でどの程度の発電効率性の格差が存在するのかも分析されていない。一方で、Wang et al. [10] では、2009 年から 2012 年にかけて、389 カ所の石炭火力発電所のデータを用いて Coal intensity（石炭消費量 ÷ 電力生産量）の動態を分析し、中部地域に立地する発電所が最も大きく Coal intensity を改善させており、また、小規模な発電所ほど Coal intensity の改善度が大きいことを明らかにした。しかしながら、当該論文では、単一のフロンティアを用いて発電所の規模や地域別の平均的な Coal intensity の動態分析を行っているため、発電所の規模や地域間の不均質性が発電の非効率性にどの程度の影響を与えているのかの詳細は明らかになっていない。

したがって、本研究では、合計 1,643 の石炭火力発

えぐち しょうご
福岡大学経済学部
〒 814-0180 福岡市城南区七隈 8 丁目 19-1
eguchi43@fukuoka-u.ac.jp

電所のサンプルから構成される 2009 年から 2011 年にかけてのプールデータにメタフロンティア Data Envelopment Analysis (以下 DEA) のフレームワークを適用することで、石炭火力発電所単位での発電効率が分析期間においてどの程度改善されてきたのかを明らかにするだけでなく、発電所の規模や地域間でどの程度発電効率性の技術格差が存在するのかを総合的に分析し、中国の石炭火力発電に起因する CO₂ 排出量削減に向けた技術改善策や石炭火力発電所のスクラップ政策を議論する。

2. 分析手法

2.1 Slacks-Based Measure (SBM)

DEA は Charnes et al. [11] で初めて考案されたノンパラメトリックな分析手法であり、生産関数型を仮定せずに、複数の投入・産出項目を考慮しながら分析対象の Decision Making Unit (以下 DMU) とフロンティアラインとの相対距離によって、効率性を評価することができる。Charnes et al. [11] の DEA モデルはラディアル型と呼ばれ、フロンティアラインに対する投入項目の一律な最大削減可能率（あるいは産出項目の一律な最大増加可能率）をもとに DMU の相対的な効率性を推計する。ラディアル型の DEA モデルは、複数の投入・産出項目を考慮することはできるものの、各投入・産出項目のスラック変数が効率性スコアに反映されず、DMU の効率性を過大に評価する場合がある [12]。

本研究では、Tone [13] で考案された DEA モデルである Slacks-Based Measure (以下 SBM) モデルを用いて、中国国内の石炭火力発電所の発電効率性を分析した。SBM モデルはノンラディアル型の DEA モデルであり、各投入・産出項目のスラック変数を考慮することで、前述のラディアル型の DEA モデルの問題点を解消する。本研究では投入指向型 SBM モデルを用いて分析を行い、分析対象である DMU_z の発電効率性スコア ρ_z^* は以下の式 (1) で推計される。

$$\rho_z^* = \min 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{iz}^-}{x_{iz}}$$

$$s.t.$$

$$x_{iz} = \sum_{j=1}^N x_{ij} \lambda_j + s_{iz}^- \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$y_{rz} = \sum_{j=1}^N y_{rj} \lambda_j - s_{rz}^+ \quad (r = 1, \dots, s)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, s_{iz}^- \geq 0, s_{rz}^+ \geq 0 \quad (1)$$

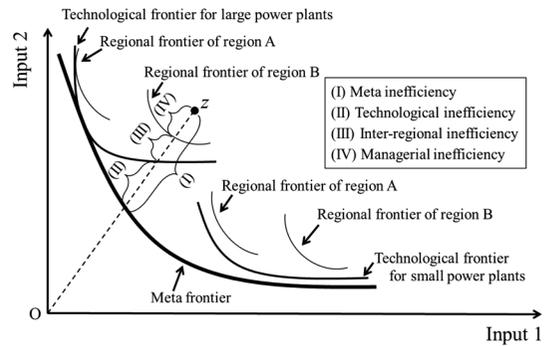


図 1 メタフロンティア分析の概念図

ここで、 x_{iz} , y_{rz} はそれぞれ DMU_z の投入、産出ベクトルの成分を表す。 x_{ij} , y_{rj} はそれぞれ、全 DMU の要素からなる投入行列と産出行列の成分である。 N は分析期間すべてにおける総 DMU をプールしたサンプルサイズであり、 m は投入項目の数、 s は産出項目の数をそれぞれ表す。また、 λ_j は DMU_j のウェイトを表す変数であり、 s_i^- は投入スラック、 s_r^+ は産出スラックであり、これらは (1) 式を解くことで内生的に求められる。 ρ_z^* は投入・産出スラックをもとに算出される効率性スコアであり、 $\rho_z^* = 1$ の DMU は効率的な投入産出構造をもつ DMU である。非効率的な DMU については、 $\rho_z^* = 1$ の DMU を結合したフロンティアを基準として相対的な効率性スコアが推計され、効率性スコア ρ_z^* は必ず $0 < \rho_z^* \leq 1$ の範囲の値を取り、1 に近づくほど高い効率性を示す。また、本研究では、規模に関する収穫可変 (VRS) の制約を設けた [14]。本研究では投入項目として石炭火力発電所ごとの発電容量と実際の年間稼働時間を乗じて算出した発電可能量と石炭消費量の二つを、産出項目として実際の総発電量から発電に用いた電力量を差し引いたネットの発電量を用いた。したがって、 $m = 2$, $s = 1$ である。また、分析期間は 2009 年から 2011 年である。

2.2 メタフロンティア分析

図 1 は、本研究で用いる多層型メタフロンティア分析の概念を示している。図 1 における Meta frontier は、分析期間である 2009 年から 2011 年までのすべての DMU のプールデータから構成されるフロンティアを意味する。したがって、式 (1) によって求められた DMU_z の効率性スコアを用いて、図 1 における Meta inefficiency は以下の式 (2) によって求められる。

$$\text{Meta inefficiency}_z = 1 - \rho_z^* \quad (2)$$

Meta inefficiency は、ネットの電力生産量に対する

理論上の発電可能量と石炭投入量の比によって算出される電力生産の非効率性と解釈できる。したがって、本研究では、Wang et al. [10] の結果をもとに、式 (2) によって求められた Meta inefficiency を発電所の規模の違いによる非効率性、地域間格差による非効率性、マネジメントの差による非効率性の三つの要因に分解を行う。図 1 に示すように、Meta inefficiency は、発電所の規模の違いによる非効率性である Technological inefficiency¹、同程度の規模の発電所のグループ内における地域間の技術の差による非効率性である Inter-regional inefficiency、規模が同程度で同地域内に立地する発電所のグループ内におけるマネジメントの差による非効率性である Managerial inefficiency に分解が可能である。このメタフロンティア分析のフレームワークを用いることで、単一のフロンティアのみを用いた DEA ではわからなかった非効率性の要因を特定することができる。

ここで、Group t ($t = 1, \dots, T$) における DMU $_z$ に関する Technological inefficiency を推計するために、発電所の規模によって分類されたグループごとに特有な Technological frontier を導出し、Group t における DMU $_z$ の効率性スコアを推計する必要がある。Group t における DMU $_z$ の効率性スコアは SBM モデルによって式 (3) のように求められる。

$$\begin{aligned} \rho_z^{t*} &= \min 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{iz}^-}{x_{iz}} \\ \text{s.t.} \\ x_{iz} &= \sum_{j=1}^{N^t} x_{ij} \lambda_j + s_{iz}^- \quad (i = 1, \dots, m) \\ y_{rz} &= \sum_{j=1}^{N^t} y_{rj} \lambda_j - s_{rz}^+ \quad (r = 1, \dots, s) \\ \sum_{j=1}^{N^t} \lambda_j &= 1, \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) において、 N^t は Group t における DMU の数を表す。本研究では、発電所の規模を発電可能容量に従って大・中・小規模の 3 グループに分類したため $T = 3$ である。式 (3) の結果と式 (1) の結果によって、Group t における DMU $_z$ の Technological inefficiency は以下の式 (4) のように推計される [15]。

$$\text{Technological inefficiency}_z^t = \rho_z^{t*} - \rho_z^* \quad (4)$$

次に、Group t の地域 p ($p = 1, \dots, P$) における DMU $_z$ に関する Inter-regional inefficiency を推計する。本研究では、各石炭火力発電所が立地する中国国内の省を東部・中部・西部の 3 グループに区分し、地域間でどの程度発電技術の差が存在するのかを、それぞれの地域ごとの Regional frontier と Group t における Technological frontier 間の距離を測定し、Inter-regional inefficiency を推計することで明らかにする。Group t における DMU $_z$ の効率性スコアは SBM モデルによって以下の式 (5) のように推計される。

$$\begin{aligned} \rho_z^{p,t*} &= \min 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{iz}^-}{x_{iz}} \\ \text{s.t.} \\ x_{iz} &= \sum_{j=1}^{N^{p,t}} x_{ij} \lambda_j + s_{iz}^- \quad (i = 1, \dots, m) \\ y_{rz} &= \sum_{j=1}^{N^{p,t}} y_{rj} \lambda_j - s_{rz}^+ \quad (r = 1, \dots, s) \\ \sum_{j=1}^{N^{p,t}} \lambda_j &= 1, \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $N^{p,t}$ は Group t における地域 p に属する DMU の数を表す。前述のように、本研究では中国国内の地域を 3 グループに分けるため、 $P = 3$ となる。式 (5) と式 (3) の結果によって、Group t における地域 p に属する DMU $_z$ の Inter-regional inefficiency は以下の式 (6) によって推計される [15]。

$$\text{Inter-regional inefficiency}_z^{p,t} = \rho_z^{p,t*} - \rho_z^{t*} \quad (6)$$

また、Regional frontier は Technological frontier の、Technological frontier は Meta frontier のそれぞれ部分集合であるため、 $\rho_z^* \leq \rho_z^{t*} \leq \rho_z^{p,t*}$ が必ず成り立つことに留意されたい [15, 16]。

加えて、Managerial inefficiency は以下の式 (7) のように推計される [15, 16]。

$$\text{Managerial inefficiency}_z^{p,t} = 1 - \rho_z^{p,t*} \quad (7)$$

Managerial inefficiency は、同一規模・同一地域グループ内における非効率性と解釈でき、主に発電所の管理運営面でのマネジメントに関する非効率性であると解釈できる²。最終的に、DMU $_z$ の Meta inefficiency は以下の式 (8) のように分解される。

¹ Technology を表す変数としてはほかにもプラント設備の年式などが考えられるが、年式に関するデータの制約もあり、本研究では、発電所の規模（すなわち発電容量）を Technology を表す変数として用いている。

表 1 投入・産出項目に関する記述統計量

年	統計量	Input		Output	サンプルサイズ
		稼働可能量 (million KWh)	石炭消費量 (thousand ton)	ネットの発電量 (million KWh)	
2009	Avg.	3688.6	1759.4	3345.0	567
	Max.	26232.0	13658.9	25077.9	
	Min.	1.5	0.02	0.05	
2010	Avg.	4204.4	2041.2	3839.8	569
	Max.	26611.2	13649.9	25466.3	
	Min.	0.4	0.3	0.3	
2011	Avg.	4728.6	2358.5	4306.6	507
	Max.	29505.6	15653.1	28236.9	
	Min.	0.8	1.3	0.7	

$$\begin{aligned}
 & \text{Meta inefficiency}_z \\
 &= \text{Technological inefficiency}_z^t \\
 & \quad + \text{Inter-regional inefficiency}_z^{p,t} \\
 & \quad + \text{Managerial inefficiency}_z^{p,t} \quad (8)
 \end{aligned}$$

本研究において、Technological inefficiency は、石炭火力発電所の規模に関する非効率性である。したがって、Technological inefficiency を改善するためには、スクラップアンドビルドなどで発電所の規模を変える必要があり、非効率性の改善可能性は低い。Inter-regional inefficiency は、地域間での発電に使用される石炭の質や工場設備の違いに起因する非効率性であり、非効率性の改善可能性は、Technological inefficiency よりも高いと考えられる。最後に、Managerial inefficiency は、主に発電所の管理運営面でのマネジメントに関する非効率性であり、最も改善可能性が高いと考えられる。したがって、本研究の提案するメタフロンティア DEA 分析のフレームワークを用いることで、石炭火力発電所の非効率性の要因が発電所の規模や立地する地域によってどのように違うかを分析できるだけでなく、非効率性の改善やスクラップ政策に関して、より詳細に議論することが可能となる。

3. 分析データ

本研究では、投入項目として発電容量と実際の年間

² 実際には、Managerial inefficiency は、年式やオーナーシップなどの要素によってさらに分解可能であるが、データの制約によって本研究ではこれ以上の分解ができなかった。メタフロンティア DEA を用いる際には、階層を増やすほどサブグループごとのサンプルサイズが小さくなり、計算上の問題を被ることについても留意する必要がある [17].

稼働時間を乗じて算出した理論上の発電可能量 (KWh) と石炭消費量 (トン) の二つを、産出項目として実際の総発電量から発電に用いた電力量を差し引いたネットの発電量 (KWh) を用いた。これは、石炭火力発電所の非効率性の主要な原因は、発電可能量と実際の発電量との比である設備利用率と、石炭投入量と実際の発電量との比である Coal intensity であり、この二つの要因を総合的に考慮した発電効率性を推計するためである。Wang et al. [10] は発電可能量を計算する際に、省ごとの平均的なプラントの稼働時間を用いているが、本研究ではプラントごとの実際の稼働時間を利用しているため、より正確な発電効率性を推計することができる。本研究で用いた投入・産出データは China Electricity Council [18] から入手した。分析期間は 2009 年から 2011 年である。

また、分析データを用いるにあたって、外れ値をもつ DMU を分析から除外した。まず、1 年間の稼働時間が 8,760 時間 (24 時間 × 365 日) を超える DMU と、実際の電力生産量が理論上の発電可能上限を上回る DMU を分析から除外した。加えて、四分位範囲の 1.5 倍以上のエネルギー効率性の値をもつ DMU も外れ値として分析から除外した。各石炭火力発電所を大・中・小規模の 3 グループに分類するにあたっては、火力発電所の規模に関する明確な基準がないため、Wang et al. [10] に従って、分析期間における全サンプルの発電容量を 1/3 ずつに区切ってグループ分けを行った。

表 1 は、本研究で用いた投入・産出項目に関する記述統計量を示している。表 1 から、2009 年と 2011 年と比較すると、すべての投入・産出項目に関して平均値と最大値が上昇していることが読み取れ、中国国内の石炭

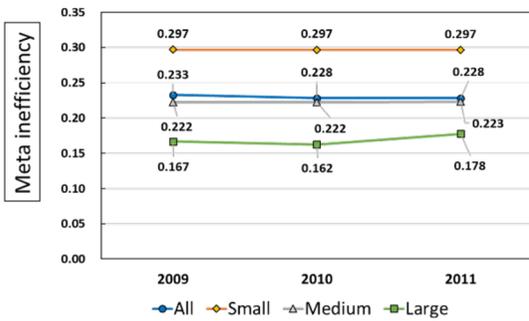


図2 Meta inefficiency の変化

火力発電所の大型化の傾向を示している。また、分析期間全体のプールデータのサンプルサイズは1,643であり、年次によってサンプルサイズが異なっていることにも留意されたい。

4. 分析結果

4.1 分析期間における Meta inefficiency の変化

図2は、推計された Meta inefficiency の分析期間における変化を示している。図2より、2009年における分析対象すべてのDMUの Meta inefficiency の平均値は0.233であり、これは2009年の全DMUの電力生産に関して、メタフロンティアと比較して平均約23%の非効率性が存在していることを意味している。また、2011年には全DMUの Meta inefficiency の平均値は0.228へと低下しており、分析期間において平均して発電効率が0.5%改善したことを示している。一方で、発電所の規模ごとに集計した Meta inefficiency の平均値を見ると、2009年においては、小規模発電所が0.297である一方で、大規模発電所は0.167であり、大規模と小規模発電所の間には、発電効率性に約13%の格差が存在することが明らかとなった。また、分析期間において、中・小規模の発電所の Meta inefficiency の平均値はほとんど変化していない一方で、大規模な発電所の Meta inefficiency の平均値は分析期間中に1.1%悪化している。上述のように、分析期間における Meta inefficiency の変化は小さいため、次節では2011年だけに着目してメタフロンティア要因分解分析の結果を示す。

4.2 メタフロンティア要因分解分析の結果

図3は、2011年における、発電所の規模によってグループ分けされた発電所ごとの Technological inefficiency を箱ひげ図として表したものである。グループごとの Technological inefficiency の平均値を比較すると、大規模な発電所が属するグループの平均値が

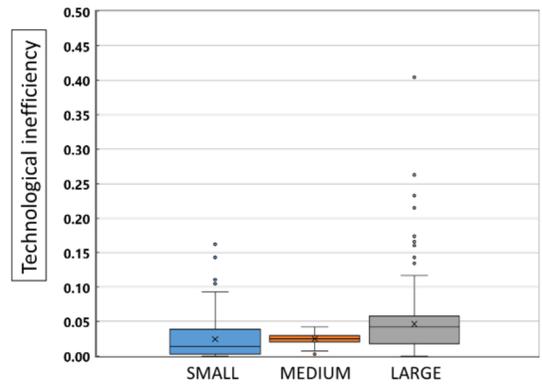


図3 2011年における発電所の規模ごとの Technological inefficiency

0.047と最も高く、一方で、小規模な発電所が属するグループの平均値が0.024と最も低く、大規模な発電所が属するグループと小規模な発電所が属するグループの Technological frontier の間には、平均2.3%の技術格差が存在している。これらの結果から、メタフロンティアとの技術の格差が最も小さいのは小規模な発電所が属するグループのフロンティアであり、反対に、大規模な発電所が属するグループはメタフロンティアに対して技術の格差が相対的に大きい。しかしながら、後述するように、各規模グループ間での Technological inefficiency の格差は、ほかの要因（すなわち Inter-regional inefficiency と Managerial inefficiency）と比較すると非常に小さい。

図4は、2011年における、発電所の規模と地域によってグループ分けされた発電所ごとの Inter-regional inefficiency を箱ひげ図として表したものである。まず、大規模な発電所が属するグループに着目すると、当該グループの中では西部地域における Inter-regional inefficiency の平均値が最も高いことがわかる。この結果は、中国国内全体の大規模な発電所によって構成される Technological frontier を基準としたとき、西部地域に立地する大規模な発電所のフロンティアの技術が著しく低いということを示している。一方で、大規模な発電所が属するグループの中では、東部地域に立地する発電所が最も Inter-regional inefficiency の平均値が低く、この結果は、中国国内に立地する大規模な発電所の中でも、東部地域に最先端の技術をもつ発電所が最も多く集中しているということを示している。次に、小規模な発電所が属するグループに目を向けると、先ほどの結果とは対照的に、東部地域における Inter-regional inefficiency の平均値が最も高くなっており、発電所の規模によって結果の傾向が異なってい

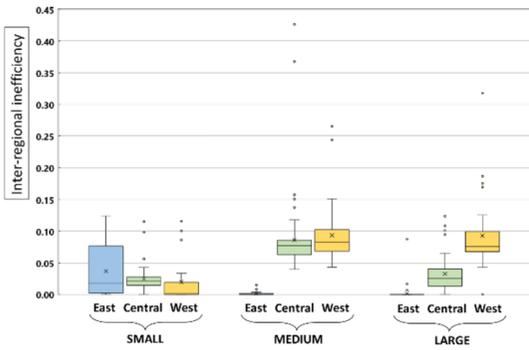


図 4 2011 年における規模別・地域別の Inter-regional inefficiency

ることがわかる。

これらの Inter-regional inefficiency の地域間における傾向の違いの要因として、各地域における経済発展度が影響していることが考えられる。Xie et al. [19] は、経済発展が石炭火力発電所の新規建設の誘発要因となっていることを明らかにした。彼らの分析結果に基づくと、中国国内において、東部地域は最も経済発展度が高いエリアであるため、東部地域における電力需要の高まりが最先端設備をもつ新規の大規模プラントの建設を誘発し、大規模な発電所が属するグループにおける東部地域の Inter-regional inefficiency の低減に貢献したと考えられる。一方で、西部地域は中国国内では経済発展度が低く電力需要が小さいエリアであるため、最先端設備をもつ大規模発電所の建設が少なく旧式の発電所が多く残存しているため、大規模な発電所が属するグループにおける西部地域の Inter-regional inefficiency が高くなっていると考えられる。

また、地域によって発電に用いられる石炭の質が異なることも Inter-regional inefficiency の地域間における傾向の違いの要因となっていると考えられる。三浦 [20] によると、中国で採掘される石炭は主に高灰分の低品質炭である。一方で、オーストラリアやインドネシアで採掘される石炭は、主に低灰分の高品質炭である。International Energy Agency [2] によると、2010 年において、中国はインドネシアから 5,630 万トン、オーストラリアから 1,516 万トンの石炭を輸入しており、これらの合計は 2010 年の中国の総石炭輸入量の 52% を占める。したがって、広東省や福建省など東部地域の沿岸部に輸入された高品質の石炭が、輸送コストの低い東部地域内で主に消費されたことが、中・大規模な発電所が属するグループにおける東部地域の Inter-regional inefficiency の低減に貢献した可能性がある。

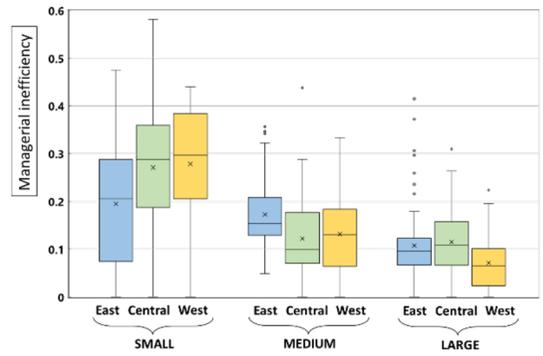


図 5 2011 年における規模別・地域別の Managerial inefficiency

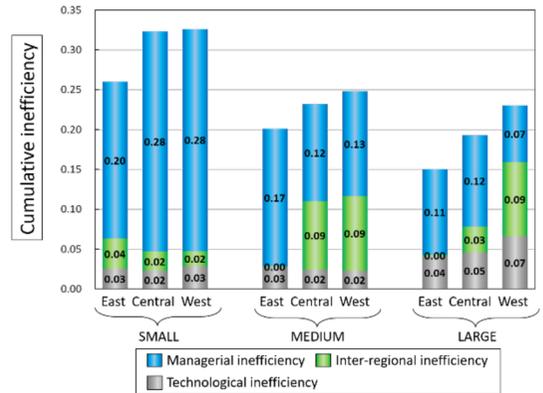


図 6 2011 年における規模別・地域別の各非効率性の平均値の積み上げグラフ

次に、図 5 は、2011 年における、発電所の規模と地域によってグループ分けされた発電所ごとの Managerial inefficiency を箱ひげ図として表したものである。図 5 より、小規模発電所が属するグループの全地域における Managerial inefficiency が大・中規模の発電所が属するグループと比較して著しく高いことがわかる。したがって、小規模発電所の属するグループは、メタフロンティアとの技術格差は小さく、また、地域間での技術の格差も小さい一方で、グループ内におけるマネジメントの面で大きな格差が存在していることが Managerial inefficiency の平均値を高める結果につながっているといえる。また、大規模発電所が属するグループを見ると、東部・中部地域における Managerial inefficiency が西部地域と比較して高いことがわかる。

マネジメント面での非効率性の改善には、Coal intensity の改善に加えて、所内率の改善も必要である。まず、Coal intensity の改善に関しては、先述のように発電に用いられる石炭の質は地域によって異なっているものの、選炭 (Coal cleaning) と呼ばれる技術

用いることによって、1 トンあたり 2-3 ドルという低コストで、石炭の質を改善することが可能である [20]. 所内率の改善に関しては、ボイラーやタービン、所内の照明設備などの電力利用状況の見直しが必要である。

最後に、図 6 は 2011 年における規模別・地域別の各非効率性の平均値を積み上げ棒グラフとして表したものである。図 6 の規模別・地域別の三つの非効率性の平均値を足し合わせた値が Meta inefficiency の平均値と一致することに留意されたい。図 6 より、小規模な発電所の Meta inefficiency が大・中規模発電所に比べて高く、特に、中・西部地域に大きな非効率性が存在しており、その大部分は Managerial inefficiency が占めていることがわかる。一方で、大規模発電所に関しては西部地域に最も大きな非効率性が存在し、その主な要因は Inter-regional inefficiency である。また、大規模発電所に関しては、中部地域に 2 番目に大きな非効率性が存在しているが、その主要な要因は Managerial inefficiency であり、同じ大規模発電所が属するグループの中でも、地域によって非効率性の要因が異なっていることがわかる。

本研究によって、小規模発電所における大きな非効率性の存在が明らかになったが、石炭火力発電所からの CO₂ 排出量削減を目指すうえで、石炭投入量の多い大規模な発電所の発電効率性を高め、あるいは著しく非効率的な大規模発電所についてのスクラップ政策を議論することが重要である。したがって、次節では、本研究のメタフロンティア要因分解分析によって得られた結果を基に、大規模発電所に焦点を当ててスクラップ政策について議論する。

4.3 分析結果の大規模発電所のスクラップ政策に関する議論への応用

本節では、分析対象の中でも大規模なプラント（設備容量の大きさが上位 3 分の 1 のプラントグループ）に焦点を当てて、火力発電所のスクラップ政策に関する議論を行う。本研究のメタフロンティア DEA モデルでは、各発電所の Meta inefficiency を定量化し、Meta inefficiency を三つの要因 (Technological inefficiency, Inter-regional inefficiency, Managerial inefficiency) に分解した。Technological inefficiency は、発電所の規模の違いに起因する非効率性を表している。Inter-regional inefficiency は、地域の違いに起因する非効率性を表している。Managerial inefficiency は、主にマネジメント面での非効率性を表している。

Technological inefficiency を改善するためには石炭火力発電所の設備容量を変更する必要があることから、

Technological inefficiency の改善可能性は低いといえる。Inter-regional inefficiency は地域ごとの経済発展度の違いや、用いる石炭の質の違いに起因するものである。つまり、ほかの地域で導入されている最先端の設備を配置したり、石炭もほかの地域で流通しているような質の高いものを使用することで、これらに起因する非効率性は改善可能であるといえる。以上の理由から、本研究では Technological inefficiency と比較すると、Inter-regional inefficiency の方が改善可能性は高いと判断する。一方で、Managerial inefficiency は同程度の規模・同地域のプラントと比較した主にマネジメント面に関する非効率性であり、改善可能性は最も高いといえる。したがって、本研究では、中国の石炭火力発電所のスクラップ政策を議論するにあたって、Technological inefficiency が Meta inefficiency に占める割合が大きなプラントのスクラップ優先度が最も高く、Managerial inefficiency が Meta inefficiency に占める割合が大きなプラントのスクラップ優先度が最も低いと判断する。

石炭火力発電所のスクラップ政策を議論するうえでまず、本研究は Meta inefficiency の大きいプラントを優先的にスクラップすることを提案する。次に、同程度の大きさの Meta inefficiency をもつプラントがあった場合は、Meta inefficiency の三つの要因が Meta inefficiency に占める割合に基づいてスクラップ優先度を決める。つまり、改善可能性が最も低い Technological inefficiency が占める割合の大きなプラントのスクラップ優先度は高く、改善可能性が最も高い Managerial inefficiency が占める割合が大きなプラントのスクラップ優先度は低いということである。本稿では、中国西部地域に立地する大規模プラントに焦点を当てて、上述の考え方に従い、スクラップ政策を議論する。

図 7 は、西部地域に立地する大規模プラントのうち、Meta inefficiency の結果がワースト 20 に入るプラントの Meta inefficiency の大きさとその内訳を可視化したバブル図である。図中の円の大きさは Meta inefficiency の大きさを、横軸は Meta inefficiency に対する Managerial inefficiency の比率を、縦軸は Meta inefficiency に対する Technological inefficiency の比率をそれぞれ示している。また、図中の右上にある円の大きさと数字は、西部地域に立地する大規模プラント全体の平均値を示している。

図 7 の中で、円の大きいプラントほど Meta inefficiency が大きいため、スクラップ優先度は高いといえる。また図 7 中の赤色のエリア（三分割した左上のエリア）

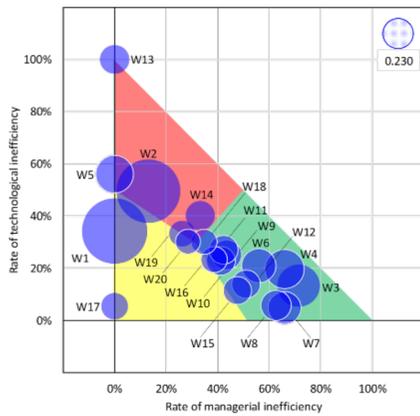


図7 西部地域に立地する大規模プラントの非効率性に関するバブル図

ア)に位置するプラントは Technological inefficiency の比率が大きく、効率性改善の可能性が低いことから、スクラップ優先度は最も高いといえる。一方で、図7中の緑色のエリア(三分割した右下のエリア)に位置するプラントほど Managerial inefficiency の比率が大きく、効率性改善の可能性が高いことから、スクラップ優先度は最も低いといえる。図7中の黄色のエリア(三分割した左下のエリア)に位置するプラントは、Technological inefficiency の比率も、Managerial inefficiency の比率も両方小さい(すなわち Inter-regional inefficiency の比率が高い)ことから、スクラップ優先度は中程度であるといえる。

図7から、西部地域に立地する大規模プラントの Meta inefficiency の構成が多様であることが読み取れる。この結果から、プラント W1, W2 は円のサイズが大きく、円の位置も赤色(左上)あるいは黄色(左下)のエリアにあることから、スクラップ優先度が非常に高いといえる。また、プラント W5 と W6 の円のサイズは同程度である一方、円の位置はそれぞれ赤色(左上)と緑色(右下)のエリアに位置していることから、非効率性の改善可能性の観点から見ると、プラント W5 のスクラップ優先度の方が高いといえる。

本節では、メタフロンティア DEA を用いた分析結果を十分に活用し、Meta inefficiency の大きさと Meta inefficiency の構成の二つの観点から、中国石炭火力発電所のスクラップ政策について議論した。従来の、グループ間の異質性を考慮しない単一のフロンティアを用いる DEA モデルは非効率性の大きさでしかスクラップ政策について議論することはできない。個々の DMU の非効率性の構成に着目して政策の議論を行った研究はわれわれの知る限り存在せず、本節での議論

は本研究の大きな貢献の一つであるといえる。

5. おわりに

本研究では、中国国内の石炭火力発電所単位のデータにメタフロンティア DEA 分析のフレームワークを適用して、2009 年から 2011 年にかけての発電効率性の変化に加えて、発電所の規模や立地する地域、マネジメント面の違いが発電の効率性に与える影響を定量的に分析した。分析結果から、2009 年から 2011 年にかけての Meta inefficiency の改善率は平均 0.5% 程度であり、分析期間における発電効率性の向上は小さいことがわかった。また、発電所の規模別に Meta inefficiency の平均値を計算したところ、大規模な発電所と小規模な発電所の発電効率性に約 13% の格差が存在することが明らかとなった。

そこで、2011 年に焦点を当て、発電所の規模と発電所が立地する地域によってグルーピングを行い、Meta inefficiency の結果を要因分解分析したところ、Technological inefficiency が最も高いのは大規模なグループに属するプラントであることがわかった。また、大規模な発電所が属するグループに焦点を当てると、たとえば、東部・中部地域では Managerial inefficiency の割合が高く、非効率性の改善のためには、選炭などの技術を導入することや、ボイラーやタービン、所内の照明設備などの電力利用状況の見直しが効果的であると考えられる。一方で、西部地域では、Inter-regional inefficiency の割合が高く、非効率性を改善させるためには、ほかの地域(特に東部)で導入されている最先端の設備を配置したり、ほかの地域(特に沿岸部)で消費されている質の高い輸入炭を用いるの必要があり、東部・中部地域と比較すると、発電の非効率性の改善は困難であるといえる。ここまで述べたように、発電所の規模と立地する地域によって発電効率性の改善に向けて取るべき戦略が異なることが明らかになり、これらは本研究の重要なファインディングであるといえる。

最後に、本研究では、メタフロンティア DEA の結果を十分に活用し、中国石炭火力発電所のスクラップ政策についての議論を行った。4.3 節でも述べたように、個々の DMU の Meta inefficiency の構成に着目して政策の議論を行った研究は、環境・エネルギー分野において、われわれの知る限り存在せず、本研究の大きな貢献の一つであるといえる。また、本研究のメタフロンティア DEA の分析フレームワークは、ほかの環境・エネルギー・経済などの分野における効率性や生産性分析に応用可能であり、政策立案者にとって

有益な情報を提供できることにも言及しておきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19K20511 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] International Energy Agency, CO₂ emissions from fuel combustion: Highlights, 2017, <https://euagenda.eu/upload/publications/untitled-110953-ea.pdf> (2021 年 9 月 27 日閲覧)
- [2] International Energy Agency, Coal information: Overview, 2018, https://webstore.iea.org/download/direct/1136?fileName=Coal_Information_2018_Overview.pdf (2021 年 2 月 15 日閲覧)
- [3] J. Peng, B. Y. Yu, H. Liao and Y. M. Wei, “Marginal abatement costs of CO₂ emissions in the thermal power sector: A regional empirical analysis from China,” *Journal of Cleaner Production*, **171**, pp. 163–174, 2018.
- [4] United Nations, Framework convention on climate change, Paris Agreement, 2016, http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php (2021 年 2 月 15 日閲覧)
- [5] Central Compilation & Translation Press in China, The 13th Five-Year Plan for energy development of the People’s Republic of China (2016–2021), 2016, <https://policy.asiapacificenergy.org/node/2918> (2021 年 2 月 15 日閲覧)
- [6] Renewable Energy World, China’s renewable energy installed capacity grew 12 percent across all sources in 2018, <https://www.renewableenergyworld.com/2019/03/06/chinas-renewable-energy-installed-capacity-grew-12-percent-across-all-sources-in-2018/#gref> (2021 年 7 月 20 日閲覧)
- [7] Unearthed, China suspends 104 planned coal power plants, <https://unearthed.greenpeace.org/2017/01/16/china-coal-power-overcapacity-crackdown/> (2021 年 7 月 20 日閲覧)
- [8] N. Zhang and Y. Choi, “Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China: A metafrontier non-radial Malmquist index analysis,” *Energy Economics*, **40**, pp. 549–559, 2013.
- [9] H. Yang and M. Pollitt, “The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: Environmental performance of Chinese coal-fired power plants,” *Energy Policy*, **38**, pp. 4440–4444, 2010.
- [10] C. Wang, X. Cao, J. Mao and P. Qin, “The changes in coal intensity of electricity generation in Chinese coal-fired power plants,” *Energy Economics*, **80**, pp. 491–501, 2019.
- [11] A. Charnes, W. W. Cooper and E. Rhodes, “Measuring the efficiency of decision making units,” *European Journal of Operational Research*, **2**, pp. 429–444, 1978.
- [12] W. W. Cooper, M. L. Seiford and K. Tone, *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Springer, 2007.
- [13] K. Tone, “A slack-based measure of efficiency in data envelopment analysis,” *European Journal of Operational Research*, **130**, pp. 498–509, 2001.
- [14] D. R. Banker, A. Charnes and W. W. Cooper, “Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis,” *Management Science*, **30**, pp. 1078–1092, 1984.
- [15] C. Feng, H. Zhang and J. B. Huang, “The approach to realizing the potential of emissions reduction in China: An implication from data envelopment analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **71**, pp. 859–872, 2017.
- [16] C. J. O’Donnell, D. S. Prasada Rao and G. E. Battese, “Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios,” *Empirical Economics*, **34**, pp. 231–255, 2008.
- [17] D. R. Banker, A. Charnes, W. W. Cooper, J. Swarts and A. D. Thomas, “An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses,” *Research in Governmental and Non-Profit Accounting*, **5**, pp. 125–163, 1989.
- [18] China Electricity Council, *Statistic Data Compilation of Electricity Power Industry*, SDX Joint Publishing Company, 2014.
- [19] L. Xie, Y. Huang and P. Qin, “Spatial distribution of coal-fired power plants in China,” *Environment and Development Economics*, **23**, pp. 495–515, 2018.
- [20] 三浦孝一監修, (財)石炭エネルギーセンター編, 『石炭利用の最新技術と展望』, シーエムシー出版, 2014.