

# IMES DISCUSSION PAPER SERIES

## CO<sub>2</sub>排出量と企業パフォーマンス: Double Machine Learningを用いた日本の実証研究

あるが りょう ごしまけいichi ち ば たかし  
有賀 涼・五島圭一・千葉貴司

Discussion Paper No. 2021-J-11

# IMES

INSTITUTE FOR MONETARY AND ECONOMIC STUDIES

BANK OF JAPAN

日本銀行金融研究所

〒103-8660 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1

日本銀行金融研究所が刊行している論文等はホームページからダウンロードできます。

<https://www.imes.boj.or.jp>

無断での転載・複製はご遠慮下さい。

備考：日本銀行金融研究所ディスカッション・ペーパー・シリーズは、金融研究所スタッフおよび外部研究者による研究成果をとりまとめたもので、学界、研究機関等、関連する方々から幅広くコメントを頂戴することを意図している。ただし、ディスカッション・ペーパーの内容や意見は、執筆者個人に属し、日本銀行あるいは金融研究所の公式見解を示すものではない。

## CO<sub>2</sub>排出量と企業パフォーマンス： Double Machine Learningを用いた日本の実証研究

あるが りょう ごしまけいichi ち ば たかし  
有賀 涼\*・五島圭一\*\*・千葉貴司\*\*\*

### 要 旨

本研究では、2011 年度から 2019 年度において CO<sub>2</sub> 排出量が取得可能な東証一部上場企業を対象に、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係について、長期パフォーマンス、短期パフォーマンスおよび資本コストの側面から実証分析を通じて評価を行った。その際、先行研究で用いられている手法の潜在的なバイアスに対処するため、Chernozhukov *et al.*[2018]が提案する Double Machine Learning を採用したセミパラメトリック・モデルによる分析を行った。分析の結果、CO<sub>2</sub> 排出量の少ない企業ほど (1) 長期的な企業パフォーマンスが良好となること、(2) 株主資本コストが低くなること、が確認された。これは、CO<sub>2</sub> 排出量の少ない企業に対して投資家が将来の経営リスクを低く見積もり、リスク・プレミアムを低めに設定することで、当該企業の市場価値が高くなることを映じた結果と解釈できる。また、CO<sub>2</sub> 排出量の少ない企業ほど短期的なパフォーマンスが高いことや、負債コストが低いことも示唆されたが、それと同時に、これらの関係性について、先行研究の多くで用いられている推計手法の結果はバイアスを含む可能性があり、その評価に注意が必要であることも示された。

キーワード：CO<sub>2</sub> 排出量、企業パフォーマンス、Double Machine Learning  
JEL classification: G30、M14、Q54

\* 日本銀行金融研究所主査 (E-mail: ryou.aruga@boj.or.jp)

\*\* 早稲田大学商学部講師、日本銀行金融研究所 (現 東京大学エコノミックコンサルティング、早稲田大学産業経営研究所招聘研究員、E-mail: keiichi@utecon.net)

\*\*\* 日本銀行金融研究所 (現 三井住友銀行、E-mail: Chiba\_Takashi @dn.smbc.co.jp)

本稿の作成に当たっては、北村行伸教授 (立正大学)、新谷元嗣教授 (東京大学)、渡部敏明教授 (一橋大学)、広田真一教授 (早稲田大学)、渡辺安虎教授 (東京大学)、湯山智教氏 (金融庁)、Hitotsubashi Summer Institute 2021、日本経済学会 2021 年度秋季大会、日本銀行金融研究所主催ファイナンス・ワークショップ (2021 年 11 月 5 日) の参加者ならびに日本銀行のスタッフ等から有益なコメントを頂いた。ここに記して感謝したい。ただし、本稿に示されている意見は、筆者たち個人に属し、日本銀行の公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りはすべて筆者たち個人に属する。

## 1. はじめに

持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）への関心の高まりを受けて、地球温暖化に起因する気候変動リスクに対する注目が集まっている。Intergovernmental Panel on Climate Change [2014]では、主要な気候変動リスクとして海面水位の上昇、内陸洪水、インフラ機能の停止、極端な暑熱、食糧不足、水不足、海洋生態系破壊、陸上生態系破壊の8つを挙げている。また、Carney [2015]は、気候変動が物理的リスク、責任リスクおよび移行リスクの3つの経路を通じて金融システムに影響を及ぼす可能性に言及している。こうした気候変動リスクを軽減するために、地球温暖化の主たる要因とされる温室効果ガス（Greenhouse Gas: GHG）、とりわけ二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出量削減は長年の課題であり、気候変動に関する国際連合枠組条約（1994年3月発効）のもと、京都議定書（2005年2月発効）やパリ協定（2016年11月発効）といった国際的な合意形成が進められてきた。

このような世界的な潮流を背景に、わが国においても、京都議定書の採択を受けて制定した地球温暖化対策推進法（1998年10月公布）を皮切りとしてCO<sub>2</sub>排出量削減に向けた対応を進めてきている。2020年10月には、2050年までにカーボン・ニュートラルを目指すことを政府が表明するなど、本邦企業においてもCO<sub>2</sub>排出量削減に対する社会的要請が一段と強まることが想定される。しかしながら、企業によるCO<sub>2</sub>排出量削減の取組みは、社会全体にとっては価値があるものの、企業自身や企業に与信を行う金融機関、企業への投資家等にとって好ましいものであるか、換言すれば、CO<sub>2</sub>排出量が少ない（多い）企業ほどパフォーマンスが高い（低い）かについては、学術的にコンセンサスが得られていない。

理論的には、CO<sub>2</sub>排出量と同様の文脈で議論される企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility: CSR）活動に関する先行研究を援用すると、CO<sub>2</sub>排出量と企業パフォーマンスの関係は正負のいずれにもなり得る点が挙げられる<sup>1</sup>。両者が正の関係であると主張するものは、環境対策投資等の企業のCSR活動は企業にとっての追加的なコストであり、利益水準の低下を通じて、企業の価値を下押しすると考える立場に立っている（Friedman [1970]）。両者が負の関係であると主張するものは、CSR活動が、利害関係者との関係改善やエージェンシー費用の低下を通じて企業価値を高めると考える立場に立っている（Jensen and Meckling [1976]、Porter and Van der Linde [1995]、Ambec and Lanoie [2008]、Freeman [2010]）。さらに、CO<sub>2</sub>排出量を削減することが、将来起こりうる移行リ

---

<sup>1</sup> 正の関係とは、CO<sub>2</sub>排出量が少ない（多い）と企業パフォーマンスが低い（高い）ことを示し、負の関係は、CO<sub>2</sub>排出量が少ない（多い）と企業パフォーマンスが高い（低い）ことを示す。以降同じ。

スクに先行して対処しているものだと考えれば、将来的な規制対応コストや訴訟リスクが抑制され、企業パフォーマンスが向上する可能性もある（Ambec and Lanoie [2008]）。

CO<sub>2</sub> 排出量の削減が企業価値や利益率の向上につながるのであれば、企業にとっては、CO<sub>2</sub> 排出量を自発的に削減するインセンティブが存在する。また、投資家にとっても、CO<sub>2</sub> 排出量の削減を進める企業に投資するインセンティブが生まれ、グリーン投資が加速するきっかけとなり得る。一方で、CO<sub>2</sub> 排出量の削減が必ずしも企業価値や利益率の向上に結びつかないのであれば、企業が CO<sub>2</sub> 排出量を主体的に削減するインセンティブは生まれず、投資家が CO<sub>2</sub> 排出量の削減に取り組む企業に投資するという行動にもつながらない。このため、気候変動リスクを軽減するには、企業による CO<sub>2</sub> 排出量の削減を誘引するような枠組みを構築する必要があるだろう。こうした点を踏まえると、企業の CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係は、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に向けた取組みの方向性を考えるうえで重要な論点といえる。

そこで、本研究では、わが国企業を対象として、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係について、実証分析を通じて多面的な評価を行う。具体的には、東証一部上場企業のうち、CO<sub>2</sub> 排出量を開示している企業を分析対象とし、2010 年度から 2019 年度のデータを用いて、企業パフォーマンスとの関係を長期的なパフォーマンス、短期的なパフォーマンスおよび資本コストの観点から分析する。その際、本研究では、多くの先行研究で使用されている線形回帰モデルの潜在的なバイアスに対処するため、Chernozhukov *et al.* [2018]にて提案された Double Machine Learning (DML) を実証分析手法として採用する。DML とは、セミパラメトリック・モデルに対して機械学習を利用して政策処置効果を推定する手法であり、特に、本研究で目的変数とする企業パフォーマンスのように、共変量として多数の候補が考えられる場合に有効な手法である。詳細は 3 節で説明する。

本稿の構成は次のとおりである。2 節では、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスに関する先行研究を概観する。3 節では分析に利用するモデル等について説明し、4 節では本研究で用いるデータと変数の定義を示す。5 節では分析結果を述べる。6 節では本稿のまとめを行う。

## 2. 先行研究

本節では、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係について、これまで報告された実証研究の結果をまとめる<sup>2</sup>。先行研究では、企業パフォーマンスを測る指標として、市場ベースの指標（トービンの  $q$  や株式時価総額等）や会計ベースの指標（ROA、ROE 等）を設定したうえで、様々な年代や地域を対象として分析が行われている。また、企業に要求されるリスク・プレミアムの観点から、資本コスト（株主資本コストや負債コスト）に注目した研究もみられる。

以下では、日本を対象とした研究、海外を対象とした研究、および資本コストとの関係に注目した研究に大別して結果を紹介する。結果を概観すると、日本を対象とした研究では、CO<sub>2</sub> 排出量は企業パフォーマンスと負の関係にあるという報告が多いものの、海外を対象とした研究では結果が一意ではなく、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係についてコンセンサスが得られていない状況となっている。なお、資本コストを対象とした研究では、CO<sub>2</sub> 排出量と概ね正の関係、すなわち CO<sub>2</sub> 排出量が少ない企業ほど資本コストが低い関係にあることが指摘されている。

### (1) 日本を対象とした研究

ここでは、日本を分析対象とした主な先行研究を概観する（一覧は表 1）。Nishitani and Kokubu [2012]、Fujii *et al.* [2013]および Lee *et al.* [2015]は、CO<sub>2</sub> または GHG 排出量と企業パフォーマンスが負の関係を示すことを報告している。Nishitani and Kokubu [2012]は、東証一部に上場している日本の製造業 641 社を対象として、単位 CO<sub>2</sub> 排出量当たりの売上高とトービンの  $q$  の関係を分析している。同論文では、市場規範の影響を考察するため、ISO14001（環境マネジメントシステムに関する国際規格）の取得前後の企業パフォーマンスの違いに着目した分析を行い、分析対象企業が、ISO14001 を取得した後に単位 CO<sub>2</sub> 排出量当たりの売上高を向上させ、企業価値（トービンの  $q$ ）を高めた可能性を指摘している。Fujii *et al.* [2013]は、日本の製造業を対象として単位 CO<sub>2</sub> 排出量当たりの売上高と ROA の関係を分析し、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない企業ほど ROA が高いという結果を報告している。また、Lee *et al.* [2015]は、日本の製造業 362 社を対象として単位総資産額当たりの CO<sub>2</sub> 排出量とトービンの  $q$  や ROA との関係を分析し、

---

<sup>2</sup> 先行研究で用いられている説明変数は、企業の CO<sub>2</sub> や GHG 排出量に注目し、各企業の排出量を売上高や総資産額で除した値を利用する場合と、企業の環境に対するパフォーマンスに注目し、各企業の売上高等を CO<sub>2</sub> や GHG 排出量で除した値を利用する場合がみられる。もっとも、本節で研究を紹介する際には、わかりやすさの観点から、各論文の手法にかかわらず、脚注 1 に示した定義にしたがって結果を整理する。

いずれも、両者が負の関係を示すとの結果を報告している。

一方、Iwata and Okada [2011]は、分析対象とする指標により結果が異なることを報告している。同論文では、日本の製造業を対象として、単位売上高当たりの GHG 排出量と企業パフォーマンス (ROE やトービンの  $q$  など) の関係を分析し、GHG 排出量が ROE と負の関係を示す一方、トービンの  $q$  と正の関係を示す結果を報告している。

以上で紹介した先行研究の多くでは、企業パフォーマンスと  $\text{CO}_2$  排出量以外の説明変数 (コントロール変数) との間に線形性を仮定した、線形回帰モデルを採用している。本研究では、企業パフォーマンスとコントロール変数の間の線形性の仮定によるバイアスに対処した分析を行うが、企業パフォーマンスと  $\text{CO}_2$  排出量の関係については引き続き、線形性を仮定する (具体的な定式化は 3 節を参照)。なお、企業パフォーマンスと  $\text{CO}_2$  排出量に非線形な関係が存在することを指摘する数少ない研究としては、Kimbara [2010]がある。同論文は、日本の化学セクターおよび食品セクターの上場企業を対象とした分析の結果、単位  $\text{CO}_2$  排出量当たりの売上高と ROA の間に逆 U 字型の関係が存在することを報告している。

表 1：主な先行研究のまとめ (日本を分析対象としたもの)

| 関係  | 論文                             | 対象                    | 期間              | 目的変数             |        |
|-----|--------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|--------|
| 負   | Nishitani and Kokubu<br>[2012] | 製造業<br>641 社          | 2006～<br>2008 年 | トービンの $q$        |        |
|     | Fujii <i>et al.</i><br>[2013]  | 758 社                 | 2006～<br>2008 年 | ROA              |        |
|     | Lee <i>et al.</i><br>[2015]    | 製造業<br>362 社          | 2004～<br>2008 年 | トービンの $q$<br>ROA |        |
| 混在  | Iwata and Okada<br>[2011]      | 製造業<br>268 社          | 2004～<br>2008 年 | ROE<br>トービンの $q$ | 負<br>正 |
| 非線形 | Kimbara<br>[2012]              | 化学・食品<br>セクター<br>94 社 | 2006 年          | ROA              |        |

備考：ここでは脚注 1 に示した定義にしたがって、各論文を主な結果毎に分類している。なお、「混在」は目的変数によって異なる結果が得られている論文であり、目的変数の右側に GHG または  $\text{CO}_2$  排出量との関係を示している。

## (2) 海外を対象とした研究

ここでは、海外を分析対象とした主な先行研究を概観する（一覧は表 2）。海外の企業を対象として CO<sub>2</sub> または GHG 排出量と企業パフォーマンスについて負の関係を報告している主な研究として、Aggarwal and Dow [2012]、Matsumura *et al.* [2014]、Ganda and Milondzo [2018]や Tzouvanas *et al.* [2020]が挙げられる。Aggarwal and Dow [2012]は、米国企業 500 社を対象として、GHG 排出量と Tobin の  $q$  が負の関係を示すことを報告している。Matsumura *et al.* [2014]は、S&P500 指数を構成する企業を対象として CO<sub>2</sub> 排出量と株式時価総額の関係を分析し、両者が負の関係を示すことを報告している。また、同論文では CO<sub>2</sub> 排出量に関する情報開示の有無が株式時価総額に与える影響についても分析を行っており、開示している企業に比べて、開示していない企業が市場から追加的なペナルティを受けていることも指摘している。Ganda and Milondzo [2018]は、CDP（Carbon Disclosure Project）が 2015 年に公表したリストに含まれる南アフリカの企業 63 社を対象として分析を行い、GHG 排出量と ROE が負の関係を示すことを指摘している<sup>3</sup>。Tzouvanas *et al.* [2020]は、欧州の製造業を対象として GHG 排出量と ROA や ROE の関係を分析し、いずれも負の関係を示すとの結果を報告している。

有意な関係がみられないとの結果や正負が混在するとの結果については、Busch and Hoffmann [2011]、Gallego-Álvarez *et al.* [2014]や Delmas *et al.* [2015]が報告している。Busch and Hoffmann [2011]は、Dow Jones Global Index 構成企業のうち時価総額が上位の企業を対象として、GHG 排出量をもとに定義した環境パフォーマンスと企業パフォーマンス（トービンの  $q$ 、ROA および ROE）の関係を分析し、GHG 排出量とトービンの  $q$  は負の関係を示した一方で、ROA や ROE との間には有意な関係が見いだされなかったことを報告している。Gallego-Álvarez *et al.* [2014]は、世界各国の企業を対象として単位売上高当たりの CO<sub>2</sub> 排出量と ROA の関係を分析し、両者に有意な関係がみられなかったことを報告している。Delmas *et al.* [2015]は、企業パフォーマンスの指標により相反する結果が得られたことを報告している。同論文では、米国企業を対象として分析し、GHG 排出量と ROA が正の関係を示す一方、トービンの  $q$  とは負の関係を示すとの結果を報告している。この結果について同論文は、短期的には GHG 排出量の削減対応にかかる費用が発生することにより、会計上の指標である ROA との間に正の関係が生じる一方で、長期的には企業の潜在的な競争力の高さが市場から評価されることにより、長期的な市場評価を織り込んだ指標であるトービ

---

<sup>3</sup> CDP とは、気候変動をはじめとする環境問題に取り組む国際 NGO で、世界の主要企業の気候変動関連情報を集積・公表している。



ンの  $q$  との間には負の関係が生じるとの解釈を与えている。

もっとも、Busch *et al.* [2020]は、Delmas *et al.* [2015]のデータを可能な限り再現した分析を行い、GHG 排出量と ROA の間には正の関係がみられた一方で、トービンの  $q$  との間には有意な関係が得られなかったことを報告している。Delmas *et al.* [2015]の結果と差異が生じた理由について、同論文は、分析対象とする期間に結果が依存する可能性を指摘している。また、同論文では、分析対象として欧州企業を追加した分析を行い、GHG 排出量と ROA やトービンの  $q$  の間に正の関係があることを報告している。Busch *et al.* [2020]と同様に、GHG 排出量と企業パフォーマンスに正の関係を見出した研究としては、Wang *et al.* [2014]が挙げられる。同論文は、豪州市場に上場された製造業 69 社を対象として GHG 排出量とトービンの  $q$  との関係を分析し、両者に正の関係があることを報告している。この結果について、同論文は、鉱業のシェアが大きい豪州特有の産業構造が影響している可能性を指摘している。

企業パフォーマンスと CO<sub>2</sub> または GHG 排出量に非線形な関係が存在することを主張した研究としては、Misani and Pogutz [2015]や Trumpp and Guenther [2017]が挙げられる。Misani and Pogutz [2015]は、CDP が公表した 19 か国における上場企業 127 社を対象として分析を行い、CO<sub>2</sub> 排出量と売上高から算出した指標とトービンの  $q$  の間に非線形の関係があることを報告している。また、Trumpp and Guenther [2017]も、世界各国の 696 社を対象として分析を行い、CO<sub>2</sub> 排出量と売上高から算出した指標と ROA の間に非線形の関係があることを報告している。

表 2：主な先行研究のまとめ（海外を分析対象としたもの）

| 関係      | 論文                                      | 対象                                       | 期間              | 目的変数                  |                     |
|---------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| 負       | Aggarwal and Dow<br>[2012]              | 米国企業<br>500 社                            | 2009 年          | トービンの q               |                     |
|         | Matsumura <i>et al.</i><br>[2014]       | S&P500 指数<br>構成企業                        | 2006～<br>2008 年 | 株式時価総額                |                     |
|         | Ganda and Milondzo<br>[2018]            | 南アフリカ<br>企業 63 社                         | 2015 年          | ROE                   |                     |
|         | Tzouvanas <i>et al.</i><br>[2020]       | 欧州の製造業<br>288 社                          | 2005～<br>2016 年 | ROA<br>ROE            |                     |
| 混在      | Busch and Hoffmann<br>[2011]            | Dow Jones<br>Global Index 構<br>成企業 174 社 | 2006 年          | トービンの q<br>ROA<br>ROE | 負<br>有意でない<br>有意でない |
|         | Gallego-Álvarez <i>et al.</i><br>[2014] | 各国の企業<br>855 社                           | 2006～<br>2009 年 | ROA                   | 有意でない               |
|         | Delmas <i>et al.</i><br>[2015]          | 米国企業<br>1,095 社                          | 2004～<br>2008 年 | ROA<br>トービンの q        | 正<br>負              |
|         | Busch <i>et al.</i><br>[2020]           | Delmas <i>et al.</i><br>[2015]と同じ        | 2005～<br>2008 年 | ROA<br>トービンの q        | 正<br>有意でない          |
|         |                                         | 米国・欧州企<br>業 5,663 社                      | 2005～<br>2014 年 | ROA<br>トービンの q        | 正<br>正              |
|         | Wang <i>et al.</i><br>[2014]            | 豪州の上場製<br>造業 69 社                        | 2010 年          | トービンの q               |                     |
| 非線<br>形 | Misani and Pogutz<br>[2015]             | 19 か国の上<br>場企業 127 社                     | 2007～<br>2013 年 | トービンの q               |                     |
|         | Trumpp and Guenther<br>[2017]           | 各国の企業<br>696 社                           | 2008～<br>2012 年 | ROA                   |                     |

備考：表 1 を参照。

### (3) 資本コストを対象とした研究

ここでは、企業が要求されるリスク・プレミアムの観点から、CO<sub>2</sub>排出量と資本コストの関係について分析した主な先行研究を概観する（一覧は表3）。

Chen and Gao [2012]は、米国市場に上場する電力セクター企業を対象としてCO<sub>2</sub>排出量と株主資本コストや負債コストの関係を分析し、両者ともCO<sub>2</sub>排出量と正の関係があることを指摘している。Kim *et al.* [2015]は、韓国企業379社についてGHG排出量と株主資本コストの関係を分析し、両者に正の関係があるとの結果を得ている。また、同論文ではサステナビリティレポート等でGHG排出量を自主的に開示することの影響についても分析を行い、開示の有無は両者の関係に影響しないことを指摘している。Jung *et al.* [2018]は、豪州企業を対象として、CO<sub>2</sub>排出量と負債コストが正の関係を示すことを報告している。Bui *et al.* [2020]は、34か国の企業を対象としてGHG排出量と株主資本コストの関係を分析し、両者が正の関係を示すことを指摘している。また、同論文ではCDPによる評価スコア（Carbon Disclosure Score, 以下CDS）が株主資本コストに与える影響についても分析を行い、CDSが高い企業ほど、GHG排出量が株主資本コストに与える影響がより小さくなるとの結果を得ている。

表3：主な先行研究のまとめ（資本コストを分析対象としたもの）

| 関係 | 論文                           | 対象             | 期間                        | 目的変数             |
|----|------------------------------|----------------|---------------------------|------------------|
| 正  | Chen and Gao<br>[2012]       | 米国電力セク<br>ター企業 | 2002、2003、<br>2006、2008 年 | 株主資本コスト<br>負債コスト |
|    | Kim <i>et al.</i><br>[2015]  | 韓国企業<br>379 社  | 2007～<br>2011 年           | 株主資本コスト          |
|    | Jung <i>et al.</i><br>[2018] | 豪州企業           | 2009～<br>2013 年           | 負債コスト            |
|    | Bui <i>et al.</i><br>[2020]  | 34 か国の<br>企業   | 2010～<br>2015 年           | 株主資本コスト          |

### 3. 分析方法

2 節で述べたとおり、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係については多くの先行研究が存在するものの、正の関係を指摘するもの、負の関係を指摘するもの、有意な関係はないとするもの、条件によって正負が逆転すると主張するものまで、結果にばらつきがある。その要因としては、対象地域や期間の違いのほかに、多くの先行研究で採用されている線形回帰モデルに由来する 2 つのバイアスの問題が考えられる。

1 つ目のバイアスは、目的変数とコントロール変数が非線形の関係を持つ可能性があるにも関わらず、線形関係を仮定していることから生じ得るバイアスである。2 つ目は、欠落変数バイアスである。すなわち、企業のパフォーマンスを目的変数、CO<sub>2</sub> 排出量を説明変数とする場合、コントロールすべき交絡因子 (confounder) の候補は無数に存在するが、線形回帰モデルでは単純に全ての変数を採用することができない。先行研究では、特定のコントロール変数を選択的に採用しているが、この場合、欠落変数バイアスに十分に対処することは困難である<sup>4</sup>。

そこで本研究では、多くの先行研究と同様に線形回帰モデルによる共分散分析を試行するとともに、目的変数とコントロール変数の線形関係の仮定に起因するバイアスと欠落変数バイアスに対処するため、Chernozhukov *et al.* [2018] が提案した DML を用いたセミパラメトリック・モデルによる分析もあわせて行う。

以下、本研究の推定手法を (1) および (2) で説明する。なお、目的変数と説明変数には双方向の因果性が存在する可能性が考えられるが、この点については、説明変数から目的変数への因果性に注目するため、多くの先行研究と同様に、目的変数に対して説明変数やコントロール変数を一期遅行させる。

#### (1) 線形回帰モデル

1 つめの手法として、(1)式で表される線形回帰モデルを推定する。

$$Y_{i,t} = \theta D_{i,t-1} + f(X_{i,t-1}) + e_{i,t}, \quad E(e_{i,t} | D_{i,t-1}, X_{i,t-1}) = 0. \quad (1)$$

ここで、 $Y$  は目的変数である企業パフォーマンス、 $D$  は CO<sub>2</sub> 排出量を表す変数で

---

<sup>4</sup> パネルデータを使用した先行研究の多くでは、時間の固定効果 (年度ダミー) と産業ダミーを導入しているものの、企業レベルの固定効果は導入していないため、コントロールすべきファクターが残存している可能性が考えられる。

ある。 $X$ はコントロール変数群であり、 $f(\cdot)$ には線形関数を仮定している。 $i$ と $t$ はそれぞれ企業と時間を表し、推定値の有意性の検定には、 $i$ および $t$ についてのクラスタロバストな標準誤差を使用する。なお、 $X$ には、先行研究を踏まえてコントロール変数を採用する（詳細は4節(4)の表6を参照）。

## (2) DMLによるセミパラメトリック・モデル

DMLの基本的なアイデアは、Robinson [1988]が提案したセミパラメトリック・モデルと共通している。セミパラメトリック・モデルは、(1)式における線形関数 $f(\cdot)$ を、ノンパラメトリックな関数 $g(\cdot)$ に置き換えた(2)式として表される。

$$Y_{i,t} = \theta D_{i,t-1} + g(X_{i,t-1}) + e_{i,t}, \quad E(e_{i,t} | D_{i,t-1}, X_{i,t-1}) = 0. \quad (2)$$

ここで、(2)式の両辺について $X_{i,t-1}$ の条件付期待値を取ると、繰り返し期待値の法則から、(3)式が得られる。

$$\begin{aligned} E(Y_{i,t} | X_{i,t-1}) &= E(\theta D_{i,t-1} | X_{i,t-1}) + E(g(X_{i,t-1}) | X_{i,t-1}) + E(e_{i,t} | X_{i,t-1}) \\ &= E(D_{i,t-1} | X_{i,t-1})\theta + g(X_{i,t-1}). \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、(2)式と(3)式の差分を取ると、(4)式が得られる。

$$Y_{i,t} - E(Y_{i,t} | X_{i,t-1}) = [D_{i,t-1} - E(D_{i,t-1} | X_{i,t-1})]\theta + e_{i,t}. \quad (4)$$

(4)式より、 $Y_{i,t} - E(Y_{i,t} | X_{i,t-1})$ および $D_{i,t-1} - E(D_{i,t-1} | X_{i,t-1})$ が分かれば、両者をOLS推定することで、最終的に $\theta$ の推定量 $\hat{\theta}$ が得られることがわかる。ここで、両者は $Y_{i,t}$ と $D_{i,t-1}$ を $X_{i,t-1}$ でそれぞれノンパラメトリック推定した際の残差 $\hat{U}_{i,t}$ および $\hat{V}_{i,t}$ と考えることができ、その関数を $\hat{l}(\cdot)$ および $\hat{m}(\cdot)$ とおく。すなわち、以下の関係が成立する。

$$Y_{i,t} = \hat{l}(X_{i,t-1}) + \hat{U}_{i,t}. \quad (5)$$

$$D_{i,t-1} = \hat{m}(X_{i,t-1}) + \hat{V}_{i,t}. \quad (6)$$

DMLでは、 $\hat{l}(\cdot)$ と $\hat{m}(\cdot)$ の推定に機械学習を用いる。 $\hat{l}(\cdot)$ と $\hat{m}(\cdot)$ の推定は、 $X_{i,t-1}$ を用いて $Y_{i,t}$ と $D_{i,t-1}$ を予測する問題とみなせるため、高次元データによる予測問題を得意とする機械学習を利用することが有用であることに加え、機械学習モデルを適切に選択すれば、目的変数とコントロール変数との間の非線形性にも十分対応することが可能となる。本研究ではLasso、Ridge、SVR (Support Vector

Regression)、RF (Random Forest) の 4 つの機械学習モデルを試行する。なお、各機械学習モデルのハイパー・パラメータは、グリッド・サーチとクロス・バリデーションによって最適化する。

本手法を採用することで、線形関数に起因するバイアスと欠落変数バイアスへの対処が可能となる<sup>5</sup>。5 節では、線形回帰モデルと同じコントロール変数を使用して、線形関数に起因するバイアスのみを対処した手法(以下、DML+partial)に加えて、より広範な財務情報や定性情報をコントロール変数に取り入れることで、線形関数に起因するバイアスに加えて欠落変数バイアスにも可能な限り対処した手法(以下、DML+all)による結果も報告する。

## 4. データおよび変数

本節では、本研究で分析に用いたデータおよび変数について説明する。(1) ではデータの入手元、分析対象および期間、(2) から (4) では目的変数、説明変数およびコントロール変数について説明する。(5) では分析の際に行った処理や分析データの基本統計量を示す。

### (1) 利用データ

本研究は、わが国企業の CO<sub>2</sub> 排出量と当該企業のパフォーマンスの関係を実証的に明らかにすることを目的としている。そのため、2020 年 12 月時点で東証一部に上場している企業のうち、CO<sub>2</sub> 排出量のデータが取得できる企業 591 社を分析対象とし、Bloomberg が提供している年度毎の CO<sub>2</sub> 排出量を利用する。この CO<sub>2</sub> 排出量は、直接的な CO<sub>2</sub> 排出量と間接的な CO<sub>2</sub> 排出量を合計したものであり、各企業がアニュアル・レポートや CSR 報告書等で開示した情報に基づいている<sup>6</sup>。また、各企業の財務情報についても Bloomberg が提供しているデータを利用する。分析期間は、各年度において CO<sub>2</sub> 排出量が取得可能な企業が一定以上存在することを踏まえて、2011 年度から 2019 年度とする。

---

<sup>5</sup> DML を使用することで生じるバイアスの 1 つに過適合によるバイアスがあるが、これは機械学習モデル  $\hat{l}(\cdot)$  および  $\hat{m}(\cdot)$  と  $\hat{\theta}$  を別々のサンプルで推定する(クロス・フィッティング)ことで対処する。具体的な推定方法は補論 1 を参照。なお、サンプル分割する際の疑似乱数のシード値を変えても、同様の結果が得られることを確認している。

<sup>6</sup> 本研究で用いる間接排出量は、企業が生産活動に使用する電力の発電等の際に発生する CO<sub>2</sub> 排出量のことであり、サプライチェーンの CO<sub>2</sub> 排出量は含まない。

## (2) 目的変数

本研究では、先行研究に準じて、株価純資産倍率、トービンの  $q$ 、ROE、ROA、株主資本コストおよび負債コストを目的変数として分析を行う。株価純資産倍率とトービンの  $q$  は、企業の市場価値を反映していることから企業の長期的なパフォーマンスに関する指標である一方、ROE や ROA は会計ベースの指標であり、企業の短期的なパフォーマンスを反映していると解釈できる (Delmas *et al.* [2015])。また、株主資本コストや負債コストは、投資家や金融機関が企業に要求するリスク・プレミアムを表す。本研究では、こうした様々な指標を目的変数に用いることで、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係を多面的に分析する。

なお、株価純資産倍率、トービンの  $q$ 、ROE、ROA および負債コストは企業の財務データから算出し、株主資本コストは、条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデル (Fama and French [1997]) と CAPM (Sharpe [1964]、Lintner [1965]) を用いて推定した。株主資本コストの具体的な算出方法は補論 2 を参照されたい。本研究で使用する各目的変数の定義は表 4 のとおりである。

表 4：目的変数一覧

| 変数         | 定義                                                                                                              |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P/B        | 株価純資産倍率の自然対数值。具体的には、<br>$\ln(\text{株価} / \text{一株当たり純資産})$ 。                                                    |
| $q$        | トービンの $q$ の自然対数值。具体的には、<br>$\ln \{(\text{株式時価総額} + \text{負債総額} + \text{優先株式} + \text{少数株主持分}) / \text{総資産}\}$ 。 |
| ROE        | 純利益 / 普通株主資本 (平残)                                                                                               |
| ROA        | 純利益 / 総資産 (平残)                                                                                                  |
| $r_{FF97}$ | 条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルによる株主資本コストの推定値                                                                         |
| $r_{CAPM}$ | CAPM による株主資本コストの推定値                                                                                             |
| $r_D$      | 負債コスト。具体的には、支払利息 / 有利子負債 (平残)                                                                                   |

備考：トービンの  $q$  は非有利子負債を除いて算出。負債コストは、金融業および計算結果が異常値 (20%超) を示すサンプルを除外して算出。

## (3) 説明変数

説明変数についても、先行研究に準じて、CO<sub>2</sub> 排出量に関連した 2 つの変数を使用する。1 つ目は、CO<sub>2</sub> 排出量を売上高で除した、単位売上高当たりの CO<sub>2</sub> 排出量である。この変数は企業が単位当たりの生産活動を行ううえで生じる CO<sub>2</sub> 排出量と解釈でき、実際に多くの先行研究が、CO<sub>2</sub> 排出量と売上高等の比を説明

変数として使用している。2 つ目は、CO<sub>2</sub> 排出量の水準である。環境規制の議論では CO<sub>2</sub> 排出量の水準自体が注目されることに加えて、Bolton and Kacperczyk [2021]が指摘するように、単位売上高当たりの CO<sub>2</sub> 排出量と CO<sub>2</sub> 排出量の水準では異なる結論が導かれる可能性があるため、CO<sub>2</sub> 排出量の自然対数値を説明変数とした分析も行う。各説明変数の定義は表 5 のとおりである。

表 5：説明変数

| 変数                     | 定義                                                               |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> /Sales | 単位売上高当たりの CO <sub>2</sub> 排出量。具体的には、<br>CO <sub>2</sub> 排出量／売上高  |
| CO <sub>2</sub>        | CO <sub>2</sub> 排出量の水準（自然対数値）。具体的には、<br>ln (CO <sub>2</sub> 排出量) |

備考：CO<sub>2</sub> 排出量の単位は 1,000 メートルトン、売上高の単位は 100 万円。

#### (4) コントロール変数

本研究では、3 節のとおり、従来の線形回帰モデルによる分析に加えて、DML の手法を用いた 2 つの分析（DML+partial、DML+all）も行う。線形回帰モデルおよび DML+partial の分析では、Morck *et al.* [1988]、Russo and Fouts [1997]、Konar and Cohen [2001]、King and Lenox [2002]、Bebchuk and Cohen [2005]、Francis *et al.* [2005]、El Ghoul *et al.* [2011]および Valta [2012]を参考として、表 6 に示したコントロール変数を採用する。また DML+all では、コントロール変数として、表 6 に示した変数に加えて、より広範な財務情報や定性情報を採用する（変数の一覧は補論 3 を参照）。さらに、長期パフォーマンス（トービンの *q*、株価純資産倍率）に関する分析では短期パフォーマンス（ROE、ROA）と資本コスト（株主資本コスト、負債コスト）を、短期パフォーマンスに関する分析では長期パフォーマンスと資本コストを、資本コストに関する分析では長期と短期のパフォーマンスをそれぞれコントロール変数に含める。



表 6：コントロール変数一覧（線形回帰モデル、DML+partial）

| 変数                   | 定義                                                                                                     | 採用の有無    |            |                          |       |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|--------------------------|-------|
|                      |                                                                                                        | P/B<br>q | ROE<br>ROA | $r_{FF97}$<br>$r_{CAPM}$ | $r_D$ |
| Total Assets         | ln (総資産)                                                                                               | ✓        | ✓          | ✓                        | ✓     |
| Leverage             | 有利子負債／普通株主資本                                                                                           | ✓        | ✓          | ✓                        | ✓     |
| R&D Expenses         | 研究開発費／総資産                                                                                              | ✓        | ✓          |                          |       |
| Advertising Expenses | 広告宣伝費／総資産                                                                                              | ✓        | ✓          |                          |       |
| Capital Expenditures | 資本的支出／総資産                                                                                              | ✓        | ✓          |                          |       |
| Sales Growth         | 売上高成長率（1 年）                                                                                            | ✓        | ✓          |                          |       |
| Operating Margin     | 営業利益／売上高                                                                                               | ✓        |            |                          |       |
| P/B                  | ln (株価／一株当たり純資産)                                                                                       |          |            | ✓                        |       |
| ROA                  | 純利益／総資産（平残）                                                                                            |          |            | ✓                        |       |
| Volatility           | 過去 360 営業日の株価ボラティリティ                                                                                   |          |            | ✓                        |       |
| EBITDA/Assets        | EBITDA／総資産                                                                                             |          |            |                          | ✓     |
| Altman's Z-Score     | 1.2 * (運転資本／有形資産) +<br>1.4 * (利益剰余金／有形資産)<br>+ 3.3 * (EBIT／有形資産) +<br>0.6 * (株式時価総額／負債総額) + (売上高／有形資産) |          |            |                          | ✓     |
| Fixed Asset Ratio    | 固定資産／総資産                                                                                               |          |            |                          | ✓     |
| Industry Dummy       | MSCI 社の世界産業分類基準に基づく産業ダミー                                                                               | ✓        | ✓          | ✓                        | ✓     |
| Fiscal Year Dummy    | 年度ダミー                                                                                                  | ✓        | ✓          | ✓                        | ✓     |

備考：各目的変数を用いた分析において、コントロール変数として採用しているものにチェックを付している。

## (5) その他

分析を行う際には、外れ値の影響を緩和するため、各変数について片側 0.5% 点でウィンソライズを行う。欠損値処理については、サンプル数の減少を防ぐため、欠損値をもつサンプルを除外するのではなく、欠損値ダミー変数を作成した

うえで、該当箇所に当該変数の平均値を入力する。また、DML による分析では、コントロール変数を標準化する。

(2) から (4) で説明した各変数の基本統計量は、表 7 のとおりである。なお、統計量はすべてウィンソライズ後の値である。

表 7：基本統計量

| 変数                     | 観測数   | 平均      | 標準偏差   | 最小値                  | 最大値     |
|------------------------|-------|---------|--------|----------------------|---------|
| P/B                    | 4,194 | 0.0344  | 0.5489 | -1.2537              | 1.7633  |
| q                      | 4,190 | 0.0571  | 0.4013 | -0.8844              | 1.5296  |
| ROE                    | 4,192 | 0.0669  | 0.0824 | -0.4735              | 0.3461  |
| ROA                    | 4,204 | 0.0318  | 0.0327 | -0.1215              | 0.1460  |
| $r_{FF97}$             | 4,143 | 0.0151  | 0.0261 | -0.0714              | 0.1120  |
| $r_{CAPM}$             | 4,186 | 0.0532  | 0.0214 | 0.0072               | 0.1131  |
| $r_D$                  | 3,872 | 0.0138  | 0.0097 | 0.0012               | 0.0737  |
| CO <sub>2</sub> /Sales | 4,256 | 0.0017  | 0.0049 | $0.8 \times 10^{-5}$ | 0.0355  |
| CO <sub>2</sub>        | 4,256 | 4.7938  | 2.1788 | -0.5659              | 11.0905 |
| Total Assets           | 4,256 | 12.8264 | 1.6256 | 9.6629               | 19.0563 |
| Leverage               | 4,253 | 0.7527  | 1.1865 | 0.0000               | 8.7043  |
| R&D Expenses           | 2,905 | 0.0221  | 0.0252 | 0.0000               | 0.1306  |
| Advertising Expenses   | 730   | 0.0287  | 0.0415 | 0.0001               | 0.3449  |
| Capital Expenditures   | 4,256 | -0.0389 | 0.0271 | -0.1574              | -0.0003 |
| Sales Growth           | 4,248 | 0.0410  | 0.0962 | -0.2456              | 0.5227  |
| Operating Margin       | 4,256 | 0.0720  | 0.0733 | -0.0791              | 0.4843  |
| P/B (control)          | 4,238 | 0.0442  | 0.5313 | -1.1953              | 1.8020  |
| ROA(control)           | 4,248 | 0.0316  | 0.0321 | -0.1161              | 0.1489  |
| Volatility             | 4,205 | 0.3276  | 0.0923 | 0.1400               | 0.6792  |
| EBITDA/Assets          | 4,159 | 0.0882  | 0.0394 | -0.0185              | 0.2257  |
| Altman's Z-Score       | 4,111 | 0.0301  | 0.0197 | 0.0045               | 0.1476  |
| Fixed Asset Ratio      | 4,256 | 0.3027  | 0.1679 | 0.0049               | 0.8168  |

備考：各変数の定義は、表 4～6 を参照。

## 5. 分析結果

本節では分析結果を説明する。(1) では企業の長期パフォーマンスとして株価純資産倍率とトービンの  $q$ 、(2) では短期的なパフォーマンスとして ROE と ROA、(3) では資金調達コストとして株主資本コストと負債コストを目的変数として分析した結果を示すとともに、結果について考察を加える。

### (1) 長期的なパフォーマンスとの関係

ここでは、CO<sub>2</sub> 排出量と長期的な企業パフォーマンス（株価純資産倍率およびトービンの  $q$ ）の関係を分析した結果を示す。表 8 は線形回帰モデルを用いた場合、表 9 は DML+partial を用いた場合、表 10 は DML+all を用いた場合の結果である。

表 8 をみると、線形回帰モデルを用いた分析では、トービンの  $q$  と CO<sub>2</sub> 排出量の水準を組み合わせた場合（(4)列）を除き、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値はすべて有意に負となっている。また、表 9 では、DML+partial による分析でも、目的変数と説明変数の組み合わせや DML に採用した機械学習手法によらず、CO<sub>2</sub> 排出量について有意に負の推定値が得られているほか、その多くは 1%水準で有意であることが確認できる<sup>7</sup>。表 10 では、DML+all による分析でも、機械学習手法として SVR を使用した推定の一部で有意でない結果が得られているものの、概ね有意に負となる結果が得られている。なお、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値の水準について、同じ目的変数と説明変数の組み合わせで分析手法間を比較すると、いずれの分析手法でも概ね同じ結果が得られていることが分かる。

以上の結果を踏まえると、CO<sub>2</sub> 排出量と長期的な企業パフォーマンスが負の関係にあるとの結論はかなり頑健であると言える。すなわち、従来の線形回帰モデルによる分析のほか、DML を利用した場合でも、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない（多い）企業ほど長期的なパフォーマンスが高い（低い）という結果が支持されており、これは本邦企業を対象とした多くの先行研究と整合的である。また、線形回帰モデルと DML を用いた場合で、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値の有意性や水準に大きな差異がみられなかったことから、企業の長期的なパフォーマンスとの関係を分析する際には、線形回帰モデルを使用することに伴うバイアスの影響は必ずしも大きくないことが窺われる。

---

<sup>7</sup> 表 9 の有意性検定の結果は、補論 1 に示した方法で算出したものを記載しているが、ノンパラメトリック・ブートストラップ法を用いた場合でも有意水準に大きな差異がないことを確認している。以下、表 10、12、13、15 および 16 も同様。

表 8：線形回帰モデルによる分析結果（長期的なパフォーマンス）

|                         | (1)                   | (2)                   | (3)                   | (4)                   |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                         | P/B                   | P/B                   | q                     | q                     |
| CO <sub>2</sub> /Sales  | -8.3099**<br>(3.9430) |                       | -3.5667**<br>(1.8032) |                       |
| CO <sub>2</sub>         |                       | -0.0238*<br>(0.0144)  |                       | -0.0088<br>(0.0099)   |
| Total Assets            | 0.0267<br>(0.0165)    | 0.0495*<br>(0.0262)   | 0.0206*<br>(0.0119)   | 0.0288<br>(0.0186)    |
| Leverage                | 0.0699***<br>(0.0217) | 0.0680***<br>(0.0218) | 0.0354***<br>(0.0103) | 0.0346***<br>(0.0103) |
| R&D Expenses            | 3.6139***<br>(0.7946) | 3.7511***<br>(0.7889) | 3.0286***<br>(0.6602) | 3.0869***<br>(0.6560) |
| Advertising Expenses    | 4.1113***<br>(1.0898) | 3.9778***<br>(1.0464) | 3.6358***<br>(0.9920) | 3.5847***<br>(0.9705) |
| Capital Expenditures    | -0.0129<br>(0.5334)   | -0.3173<br>(0.5650)   | -0.1058<br>(0.3551)   | -0.2118<br>(0.3653)   |
| Sales Growth            | 0.4310***<br>(0.0612) | 0.4267***<br>(0.0622) | 0.3523***<br>(0.0525) | 0.3507***<br>(0.0513) |
| Operating Margin        | 2.1085***<br>(0.4230) | 2.0569***<br>(0.4115) | 1.7209***<br>(0.3075) | 1.7034***<br>(0.3013) |
| N                       | 4,194                 | 4,194                 | 4,190                 | 4,190                 |
| Adjusted R <sup>2</sup> | 0.3887                | 0.3879                | 0.3906                | 0.3901                |

備考：\*\*\*、\*\*、\*はそれぞれ、両側確率 1%、5%、10%で推定結果が有意であることを示す。

括弧内は標準誤差である。コントロール変数として、上記以外に年度ダミー、産業ダミーおよび各変数の欠損値ダミーを使用している。標準誤差の算出には、企業と年度についてクラスタロバストな標準誤差を利用している。

表 9 : DML+partial による分析結果 (長期的なパフォーマンス)

| モデル               |                        | (1)<br>P/B              | (2)<br>P/B             | (3)<br>q               | (4)<br>q               |
|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | -8.4800***<br>(1.7370)  |                        | -3.9182***<br>(0.9709) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                         | -0.0243***<br>(0.0069) |                        | -0.0093*<br>(0.0049)   |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | -8.3445***<br>(1.7274)  |                        | -3.7752***<br>(0.9565) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                         | -0.0253***<br>(0.0067) |                        | -0.0105**<br>(0.0048)  |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | -8.2686***<br>(1.7219)  |                        | -4.0931***<br>(0.9134) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                         | -0.0251***<br>(0.0068) |                        | -0.0101**<br>(0.0049)  |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | -9.1780***<br>(1.9744)  |                        | -4.5190***<br>(1.0444) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                         | -0.0381***<br>(0.0069) |                        | -0.0151***<br>(0.0049) |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | -12.5695***<br>(2.8398) |                        | -6.9734***<br>(1.5440) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                         | -0.0339***<br>(0.0073) |                        | -0.0222***<br>(0.0052) |
| N                 |                        | 4,194                   | 4,194                  | 4,190                  | 4,190                  |

備考：\*\*\*、\*\*、\*はそれぞれ、両側確率 1%、5%、10%で推定結果が有意であることを示している。括弧内は標準誤差である。モデルの SVR+Linear、SVR+Gaussian はそれぞれ線形カーネル関数とガウシアン・カーネル関数を用いた SVR モデルを示す。各モデルの推定に際しては、コントロール変数として、線形回帰モデルと同じものを利用している。

表 10 : DML+all による分析結果 (長期的なパフォーマンス)

| モデル               |                        | (1)<br>P/B             | (2)<br>P/B             | (3)<br>q               | (4)<br>q               |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | -6.7890***<br>(1.9495) |                        | -3.0882***<br>(1.0387) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0328***<br>(0.0062) |                        | -0.0086**<br>(0.0039)  |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | -6.5206***<br>(1.8881) |                        | -3.2023***<br>(1.0263) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0331***<br>(0.0060) |                        | -0.0105***<br>(0.0037) |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | -3.5416*<br>(1.9551)   |                        | -2.2861**<br>(1.0128)  |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0292***<br>(0.0063) |                        | -0.0049<br>(0.0039)    |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | -3.4802<br>(2.2683)    |                        | -2.6844**<br>(1.1352)  |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0026<br>(0.0080)    |                        | -0.0032<br>(0.0057)    |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | -7.2650***<br>(2.7158) |                        | -2.6093**<br>(1.2412)  |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0254***<br>(0.0069) |                        | -0.0105**<br>(0.0045)  |
| N                 |                        | 4,194                  | 4,194                  | 4,190                  | 4,190                  |

備考：\*\*\*、\*\*、\*はそれぞれ、両側確率 1%、5%、10%で推定結果が有意であることを示している。括弧内は標準誤差である。モデルの SVR+Linear、SVR+Gaussian はそれぞれ線形カーネル関数とガウシアン・カーネル関数を用いた SVR モデルを示す。各モデルの推定に際しては、コントロール変数として、線形回帰モデルと同じものに加えて、補論 3 で示したすべての変数を利用している。

## (2) 短期的なパフォーマンスとの関係

ここでは、CO<sub>2</sub>排出量と短期的な企業パフォーマンス（ROE および ROA）の関係を分析した結果を示す。表 11 は線形回帰モデルを用いた場合、表 12 は DML+partial を用いた場合、表 13 は DML+all を用いた場合の結果である。

表 11 をみると、線形回帰モデルを用いた分析では、目的変数と説明変数の組み合わせによらず、CO<sub>2</sub>排出量にかかる推定値が有意に負であることが確認できる。また、表 12 をみると、DML+partial による分析でも、目的変数と説明変数の組み合わせや、DML に採用した機械学習手法によらず、CO<sub>2</sub>排出量にかかる推定値が有意に負となっているほか、その多くは 1%水準で有意である。一方、表 13 をみると、DML+all による分析では、CO<sub>2</sub>排出量にかかる推定値は概ね有意に負となっているものの、説明変数に単位売上高当たりの CO<sub>2</sub>排出量を使用した場合では、線形回帰モデルや DML+partial に比べて、推定値が有意にならないケースが多くなっている。なお、CO<sub>2</sub>排出量にかかる推定値の水準について、同じ目的変数と説明変数の組み合わせで分析手法間を比較すると、DML+partial による推定値は線形回帰モデルと概ね同程度であった一方で、DML+all による推定では線形回帰モデルや DML+partial に比べて推定値の絶対値が小さくなっていることがみてとれる。

以上の結果を踏まえると、短期的なパフォーマンスについても、CO<sub>2</sub>排出量が少ない（多い）企業ほど高い（低い）という関係が示唆されたと言える。もっとも、DML+all とそれ以外では推定値の有意性や水準が相応に異なることから、企業の短期的なパフォーマンスとの関係を分析する際には、線形回帰モデルを使用することに伴う欠落変数バイアスの影響を無視できない可能性が示唆される<sup>8</sup>。

---

<sup>8</sup> 説明変数を単位売上高当たり CO<sub>2</sub>排出量とした分析において、Lasso で採用されたコントロール変数を DML+partial と DML+all で比較すると、DML+all では、負債コストやサステイナブル成長率、5年運転資本成長率等が追加的に採用されていることが確認された。

表 11：線形回帰モデルによる分析結果（短期的なパフォーマンス）

|                         | (1)<br>ROE            | (2)<br>ROE             | (3)<br>ROA             | (4)<br>ROA             |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| CO <sub>2</sub> /Sales  | -1.8661**<br>(0.8281) |                        | -0.5983**<br>(0.2522)  |                        |
| CO <sub>2</sub>         |                       | -0.0059***<br>(0.0021) |                        | -0.0032***<br>(0.0009) |
| Total Assets            | 0.0026<br>(0.0022)    | 0.0084***<br>(0.0027)  | -0.0010<br>(0.0010)    | 0.0023<br>(0.0015)     |
| Leverage                | -0.0016<br>(0.0027)   | -0.0019<br>(0.0026)    | -0.0062***<br>(0.0010) | -0.0062***<br>(0.0009) |
| R&D Expenses            | 0.1560<br>(0.1165)    | 0.1843*<br>(0.1116)    | 0.1539***<br>(0.0593)  | 0.1625***<br>(0.0584)  |
| Advertising Expenses    | 0.0429<br>(0.1371)    | 0.0100<br>(0.1368)     | 0.0286<br>(0.0670)     | 0.0125<br>(0.0669)     |
| Capital Expenditures    | 0.1831**<br>(0.0772)  | 0.1084<br>(0.0822)     | 0.0338<br>(0.0388)     | -0.0115<br>(0.0377)    |
| Sales Growth            | 0.1078***<br>(0.0210) | 0.1053***<br>(0.0204)  | 0.0600***<br>(0.0091)  | 0.0583***<br>(0.0084)  |
| N                       | 4,192                 | 4,192                  | 4,204                  | 4,204                  |
| Adjusted R <sup>2</sup> | 0.0801                | 0.0795                 | 0.1996                 | 0.2063                 |

備考：表 8 を参照。



表 12 : DML+partial による分析結果 (短期的なパフォーマンス)

| モデル               |                        | (1)<br>ROE             | (2)<br>ROE             | (3)<br>ROA             | (4)<br>ROA             |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.6366***<br>(0.4537) |                        | -0.5298***<br>(0.1461) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0056***<br>(0.0013) |                        | -0.0031***<br>(0.0005) |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.6457***<br>(0.4602) |                        | -0.5215***<br>(0.1466) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0057***<br>(0.0013) |                        | -0.0031***<br>(0.0005) |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.8864***<br>(0.4552) |                        | -0.6060***<br>(0.1470) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0058***<br>(0.0014) |                        | -0.0032***<br>(0.0005) |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.9658***<br>(0.4957) |                        | -0.6575***<br>(0.1564) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0064***<br>(0.0014) |                        | -0.0033***<br>(0.0005) |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.8272***<br>(0.6998) |                        | -0.5315**<br>(0.2151)  |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                        | -0.0047***<br>(0.0016) |                        | -0.0025***<br>(0.0005) |
| N                 |                        | 4,192                  | 4,192                  | 4,204                  | 4,204                  |

備考：表 9 を参照。

表 13 : DML+all による分析結果 (短期的なパフォーマンス)

| モデル               |                        | (1)<br>ROE            | (2)<br>ROE             | (3)<br>ROA            | (4)<br>ROA             |
|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | -0.8575<br>(0.5256)   |                        | -0.2026<br>(0.1495)   |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | -0.0043***<br>(0.0013) |                       | -0.0016***<br>(0.0004) |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | -0.6066<br>(0.5110)   |                        | -0.1496<br>(0.1443)   |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | -0.0045***<br>(0.0013) |                       | -0.0016***<br>(0.0004) |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.0469*<br>(0.5867)  |                        | -0.0572<br>(0.1636)   |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | -0.0040***<br>(0.0013) |                       | -0.0014***<br>(0.0005) |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.4150*<br>(0.7836)  |                        | -0.4018**<br>(0.1923) |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | -0.0044**<br>(0.0022)  |                       | -0.0020***<br>(0.0006) |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | -1.4375**<br>(0.7283) |                        | -0.3119*<br>(0.1842)  |                        |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | -0.0016<br>(0.0015)    |                       | -0.0013***<br>(0.0004) |
| N                 |                        | 4,192                 | 4,192                  | 4,204                 | 4,204                  |

備考：表 10 を参照。

### (3) 資本コストとの関係

ここでは、CO<sub>2</sub>排出量と資本コスト（株主資本コストおよび負債コスト）の関係を分析した結果を示す。表 14 は線形回帰モデルを用いた場合、表 15 は DML+partial を用いた場合、表 16 は DML+all を用いた場合の結果である。以下、(a) では株主資本コストを目的関数とした場合の結果、(b) では負債コストを目的関数とした場合の結果について説明する。

#### (a) 株主資本コスト

表 14 をみると、株主資本コスト ( $r_{FF97}$ 、 $r_{CAPM}$ ) に関する線形回帰モデルによる分析では、CAPM による株主資本コストと単位売上高当たりの CO<sub>2</sub> 排出量の組み合わせ ((3)列) を除き、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値は、いずれも有意に正であることが確認できる。表 15 をみると、DML+partial による分析でも、目的変数と説明変数の組み合わせや、DML に採用した機械学習手法によらず、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値はいずれも有意に正となっている。表 16 をみると、DML+all による分析でも、CAPM による株主資本コストを目的変数とした推定の一部で有意でない結果が得られているものの、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値は多くのケースで有意に正との結果が得られている。なお、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値の水準について、同じ目的変数と説明変数の組み合わせで比較すると、いずれの分析手法でも概ね同じ結果が得られていることがわかる。

以上の結果から、CO<sub>2</sub> 排出量が株主資本コストと正の関係にあることがかなり頑健に確認されたと言える。この背景として、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない（多い）企業に対して、投資家は、将来的な経営リスク（環境規制への対応コストや、グリーン投資を重視する投資家の資金引き上げなど）が低い（高い）と判断し、リスク・プレミアムを小さく（大きく）設定している可能性が考えられる。また、線形回帰モデルと DML を用いた場合で CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値の有意性や水準に大きな差異はみられなかったことから、株主資本コストとの関係を分析する際には、長期の企業パフォーマンスと同様に、線形回帰モデルを使用することに伴うバイアスの影響は必ずしも大きくないことが窺われる。

#### (b) 負債コスト

表 14 をみると、負債コスト ( $r_D$ ) に関する線形回帰モデルによる分析では、いずれの説明変数を使用した場合でも、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値は有意に正であることが確認できる。表 15 をみると、DML+partial による分析でも、目的変数と説明変数の組み合わせや、DML に採用した機械学習手法によらず、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値は有意に正となっている。その一方で、表 16 をみると、

DML+all による分析では、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値は多くのケースで有意に正となっているものの、単位売上高当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を説明変数とした推定の一部で有意でない結果が得られている。なお、CO<sub>2</sub> 排出量にかかる推定値の水準については、分析手法間で大きな差異はみられなかった。

以上の結果を踏まえると、負債コストに関しても、CO<sub>2</sub> 排出量と正の関係を持つことが示唆されたと言える。もっとも、DML+all とそれ以外では、推定値の有意性に差異がみられたことから、負債コストとの関係を分析する際には、短期の企業パフォーマンスと同様に、線形回帰モデルを使用することに伴う欠落変数バイアスの影響が無視できない可能性が示唆される<sup>9</sup>。

また、株主資本コストと負債コストに関する分析について、同じ説明変数を使用した場合の結果を比較すると、株主資本コストに対する推定値の水準が、負債コストに関する推定値の水準に比べて明確に大きいことがわかる。このことから、株主資本コストの方が負債コストに比べて CO<sub>2</sub> 排出量と定量的に大きな関係を持つことが窺える。

---

<sup>9</sup> 説明変数を単位売上高当たり CO<sub>2</sub> 排出量とした分析において、Lasso で採用されたコントロール変数を DML+partial と DML+all で比較すると、DML+all では、EBIDA 成長率や 5 年有利子負債成長率、現金比率、従業員一人当たりの人件費等が追加的に採用されていることが確認された。

表 14：線形回帰モデルによる分析結果（資本コスト）

|                        | (1)                    | (2)                    | (3)                    | (4)                    | (5)                              | (6)                   |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|
|                        | $r_{FF97}$             | $r_{FF97}$             | $r_{CAPM}$             | $r_{CAPM}$             | $r_D$                            | $r_D$                 |
| CO <sub>2</sub> /Sales | 0.5051**<br>(0.2308)   |                        | 0.1829<br>(0.1289)     |                        | 0.1746**<br>(0.0805)             |                       |
| CO <sub>2</sub>        |                        | 0.0010**<br>(0.0005)   |                        | 0.0011***<br>(0.0004)  |                                  | 0.0007**<br>(0.0003)  |
| Total Assets           | -0.0020***<br>(0.0007) | -0.0029***<br>(0.0008) | 0.0037***<br>(0.0004)  | 0.0025***<br>(0.0006)  | 0.6×10 <sup>-4</sup><br>(0.0002) | -0.0006<br>(0.0004)   |
| Leverage               | 0.0007<br>(0.0007)     | 0.0008<br>(0.0007)     | 0.0008<br>(0.0005)     | 0.0008<br>(0.0005)     | 0.0009***<br>(0.0003)            | 0.0010***<br>(0.0002) |
| ROA                    | -0.0125***<br>(0.0015) | -0.0126***<br>(0.0015) | -0.0051***<br>(0.0014) | -0.0051***<br>(0.0014) |                                  |                       |
| P/B                    | -0.0587**<br>(0.0282)  | -0.0586**<br>(0.0290)  | 0.0141<br>(0.0143)     | 0.0165<br>(0.0144)     |                                  |                       |
| Volatility             | 0.0232*<br>(0.0137)    | 0.0237*<br>(0.0130)    | 0.1162***<br>(0.0066)  | 0.1148***<br>(0.0067)  |                                  |                       |
| EBITDA/Assets          |                        |                        |                        |                        | 0.0020<br>(0.0106)               | -0.0030<br>(0.0116)   |
| Altman's Z-Score       |                        |                        |                        |                        | 0.1314***<br>(0.0416)            | 0.1413***<br>(0.0427) |
| Fixed Asset Ratio      |                        |                        |                        |                        | -0.0066**<br>(0.0028)            | -0.0076**<br>(0.0029) |
| N                      | 4,143                  | 4,143                  | 4,186                  | 4,186                  | 3,872                            | 3,872                 |
| Adjusted $R^2$         | 0.2139                 | 0.2112                 | 0.5121                 | 0.5144                 | 0.0801                           | 0.0811                |

備考：表 8 を参照。

表 15 : DML+partial による分析結果 (資本コスト)

| モデル               |                        | (1)<br>$r_{FF97}$     | (2)<br>$r_{FF97}$     | (3)<br>$r_{CAPM}$     | (4)<br>$r_{CAPM}$     | (5)<br>$r_D$          | (6)<br>$r_D$          |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.5174***<br>(0.1403) |                       | 0.1960***<br>(0.0637) |                       | 0.1844***<br>(0.0526) |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0009***<br>(0.0003) |                       | 0.0011***<br>(0.0002) |                       | 0.0007***<br>(0.0002) |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.5003***<br>(0.1424) |                       | 0.1989***<br>(0.0638) |                       | 0.1802***<br>(0.0525) |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0009***<br>(0.0003) |                       | 0.0011***<br>(0.0002) |                       | 0.0007***<br>(0.0002) |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.4620***<br>(0.1321) |                       | 0.1134*<br>(0.0602)   |                       | 0.1125**<br>(0.0551)  |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0008**<br>(0.0003)  |                       | 0.0010***<br>(0.0002) |                       | 0.0007***<br>(0.0002) |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.4909***<br>(0.1345) |                       | 0.2661***<br>(0.0603) |                       | 0.1544**<br>(0.0609)  |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0006*<br>(0.0003)   |                       | 0.0012***<br>(0.0002) |                       | 0.0008***<br>(0.0002) |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.4416***<br>(0.1540) |                       | 0.2138***<br>(0.0804) |                       | 0.3642***<br>(0.0583) |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0007*<br>(0.0004)   |                       | 0.0004*<br>(0.0002)   |                       | 0.0008***<br>(0.0002) |
| N                 |                        | 4,142                 | 4,142                 | 4,186                 | 4,186                 | 3,872                 | 3,872                 |

備考：表 9 を参照。

表 16 : DML+all による分析結果 (資本コスト)

| モデル               |                        | (1)<br>$r_{FF97}$     | (2)<br>$r_{FF97}$     | (3)<br>$r_{CAPM}$     | (4)<br>$r_{CAPM}$                | (5)<br>$r_D$          | (6)<br>$r_D$          |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Lasso             | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.5727***<br>(0.1655) |                       | 0.1927**<br>(0.0835)  |                                  | 0.1801***<br>(0.0541) |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0012***<br>(0.0004) |                       | 0.0002<br>(0.0003)               |                       | 0.0007***<br>(0.0002) |
| Ridge             | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.5751***<br>(0.1605) |                       | 0.1907**<br>(0.0790)  |                                  | 0.1888***<br>(0.0544) |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0009**<br>(0.0004)  |                       | 0.0003<br>(0.0002)               |                       | 0.0008***<br>(0.0002) |
| SVR<br>+ Linear   | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.6582***<br>(0.1598) |                       | 0.3403***<br>(0.0868) |                                  | 0.0442<br>(0.0564)    |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0015***<br>(0.0005) |                       | 0.0005*<br>(0.0003)              |                       | 0.0007***<br>(0.0002) |
| SVR<br>+ Gaussian | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.7005***<br>(0.1812) |                       | 0.1909**<br>(0.0837)  |                                  | 0.1325**<br>(0.0630)  |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0017***<br>(0.0005) |                       | 0.3×10 <sup>-4</sup><br>(0.0003) |                       | 0.0004**<br>(0.0002)  |
| RF                | CO <sub>2</sub> /Sales | 0.3470**<br>(0.1486)  |                       | 0.2941***<br>(0.0901) |                                  | 0.0738<br>(0.0540)    |                       |
|                   | CO <sub>2</sub>        |                       | 0.0002<br>(0.0004)    |                       | 0.0004<br>(0.0003)               |                       | 0.0002<br>(0.0002)    |
| N                 |                        | 4,142                 | 4,142                 | 4,186                 | 4,186                            | 3,872                 | 3,872                 |

備考：表 10 を参照。

## 6. まとめ

本研究では、2011～2019 年度において CO<sub>2</sub> 排出量が取得可能な東証一部上場企業を対象に、CO<sub>2</sub> 排出量と企業パフォーマンスの関係について、長期パフォーマンス、短期パフォーマンスおよび資本コストの側面から実証分析による評価を行った。また、実証分析の手法について、多くの先行研究で用いられる線形回帰モデルによる共分散分析に加えて、Chernozhukov *et al.*[2018]が提案する DML の手法を採用したセミパラメトリック・モデルによる分析も行い、結果を比較した。

分析の結果、いずれの手法においても、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない企業ほど (1) 長期的な企業パフォーマンスが高いこと、(2) 株主資本コストが低いことが確認された。これは、CO<sub>2</sub> 排出量の少ない企業について、投資家が将来の経営リスクを低く見積もり、リスク・プレミアムを低めに設定する結果、当該企業の市場価値が高くなることを映じた結果と解釈できる。また、分析では、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない企業ほど短期的なパフォーマンスが高いことや、負債コストが低いことも示唆された。ただし、コントロール変数を拡張した DML による分析では、線形回帰モデルと異なり、推定値が有意でなくなるケースが幾つか見られた。これは、CO<sub>2</sub> 排出量と企業の短期的なパフォーマンスや負債コストとの関係を分析する場合、線形回帰モデルの結果は欠落変数バイアスを含む可能性があり、評価に注意を要することを示唆している。

今後の課題としては、以下の 3 点が挙げられる。第一に、CO<sub>2</sub> 排出量に対する社会的な注目は日々高まっており、将来的に排出量規制等が導入される可能性がある。そうした環境の変化が推定結果に与える影響を観察することは意義深いと考えられる。第二に、本研究の結論は、CO<sub>2</sub> 排出量を開示している企業のみを対象とした実証結果に基づいているが、補論 4 で示しているとおりに、分析期間や対象となる企業が広がった場合には異なる含意が得られる可能性に留意する必要がある。第三に、CO<sub>2</sub> 排出量に対する企業パフォーマンスの感応度がセクター毎に異なる可能性があるため、その差異に着目した分析に取り組むことは有用と考えられる。



## 補論 1. Double Machine Learning の推定手順

- (1) データセットをランダムに 2 つのサブセットに分割する。
- (2) 1 つめのサブセットを使用して、機械学習モデル  $\hat{l}_1(\cdot)$ 、 $\hat{m}_1(\cdot)$  を推定する。

$$\begin{aligned} Y_1 &= \hat{l}_1(X_1) + \hat{U}_{1,1}, \\ D_1 &= \hat{m}_1(X_1) + \hat{V}_{1,1}. \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

- (3) 2 つめのサブセットに対して、(2) で推定した機械学習モデルを適用し、残差  $\hat{V}_{1,2}$  と  $\hat{U}_{1,2}$  を得る。

$$\begin{aligned} \hat{U}_{1,2} &= Y_2 - \hat{l}_1(X_2), \\ \hat{V}_{1,2} &= D_2 - \hat{m}_1(X_2). \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

- (4) (3) で得られた  $\hat{U}_{1,2}$  と  $\hat{V}_{1,2}$  を使用して線形回帰モデルを推定し、推定量  $\hat{\theta}_1$  を得る。

$$\hat{U}_{1,2} = a + \hat{\theta}_1 \times \hat{V}_{1,2} + \hat{\varepsilon}_1. \quad (\text{A-3})$$

- (5) サブセットを入れ替えて (2) ~ (4) を繰り返し、推定量  $\hat{\theta}_2$  を得る。

$$\hat{U}_{2,1} = b + \hat{\theta}_2 \times \hat{V}_{2,1} + \hat{\varepsilon}_2. \quad (\text{A-4})$$

- (6)  $\hat{\theta}_1$  と  $\hat{\theta}_2$  の平均をとり、推定量  $\hat{\theta}$  を得る。

$$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2)/2. \quad (\text{A-5})$$

なお、推定量  $\hat{\theta}$  の標準誤差  $\hat{se}$  は下記で与えられる (Chernozhukov *et al.* [2016])。

$$\begin{aligned} \hat{se} &= \hat{\sigma} / \sqrt{N}, \\ \hat{\sigma}^2 &= \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{V}_i^2 \right)^{-2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{V}_i^2 \hat{\zeta}_i^2, \\ \hat{V}_i &:= D_i - \hat{m}(X_i, I_{k(i)}^c), \\ \hat{\zeta}_i &:= \left( Y_i - \hat{l}(X_i, I_{k(i)}^c) \right) - \left( D_i - \hat{m}(X_i, I_{k(i)}^c) \right) \hat{\theta}, \\ k(i) &:= \{k \in \{1, 2\} : i \in I_k\}. \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

有意性の検定は、帰無仮説を  $\theta = 0$  と置き、下記の統計量が漸近的に標準正規分布に従うものとして行う。

$$\frac{\hat{\theta} - 0}{\hat{se}} \sim N(0, 1). \quad (\text{A-7})$$

## 補論 2. 株主資本コストの推定方法

本研究で分析に用いた株主資本コストは、Sharpe [1964]や Lintner [1965]が提案した CAPM、および Fama and French [1997]が提案した条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルを用いて推定した。各モデルは(A-8)式および(A-9)式のとおりである。それぞれのモデルの株主資本コストは、各モデルで推定したパラメータを(A-10)式および(A-11)式に代入して算出した。

$$r_{j,t} - r_{f,t} = \alpha_j + \beta_j(r_{M,t} - r_{f,t}) + \varepsilon_t. \quad (\text{A-8})$$

$$\begin{aligned} r_{j,t} - r_{f,t} = & \alpha_j + \beta_j(r_{M,t} - r_{f,t}) \\ & + \gamma_{0,j}SMB_t + \gamma_{1,j}\left(SMB_t \cdot \ln(mv_{j,t-1})\right) \\ & + \delta_{0,j}HML_t + \delta_{1,j}\left(HML_t \cdot \ln(pbr_{j,t-1})\right) + \varepsilon_t. \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

$$r_{CAPM,t} = r_{f,t} + \beta_j \cdot E[MP]. \quad (\text{A-10})$$

$$\begin{aligned} r_{FF97,t} = & r_{f,t} + \beta_j \cdot E[MP] \\ & + \gamma_{0,j} \cdot E[SMB] + \gamma_{1,j}\left(E[SMB] \cdot \ln(mv_{j,t-1})\right) \\ & + \delta_{0,j} \cdot E[HML] + \delta_{1,j}\left(E[HML] \cdot \ln(pbr_{j,t-1})\right). \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

ここで、各式の変数の定義は以下とおりである。

|              |                                                                 |
|--------------|-----------------------------------------------------------------|
| $r_{j,t}$    | : 時点 $t$ における株式 $j$ のリターン                                       |
| $r_{M,t}$    | : 時点 $t$ における市場ポートフォリオのリターン                                     |
| $r_{f,t}$    | : 時点 $t$ における安全利子率                                              |
| $SMB_t$      | : 時点 $t$ における SMB ファクター・リターン (小型株式ポートフォリオと大型株式ポートフォリオのリターンの差)   |
| $HML_t$      | : 時点 $t$ における HML ファクター・リターン (バリュー株ポートフォリオとグロース株ポートフォリオのリターンの差) |
| $mv_{j,t}$   | : 時点 $t$ における企業 $j$ の株式時価総額                                     |
| $pbr_{j,t}$  | : 時点 $t$ における企業 $j$ の純資産株価倍率                                    |
| $r_{CAPM,t}$ | : 時点 $t$ における株主資本コスト (CAPM)                                     |
| $r_{FF97,t}$ | : 時点 $t$ における株主資本コスト (条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデル)                |
| $E[MP]$      | : マーケット・プレミアムの期待値                                               |
| $E[SMB]$     | : SMB プレミアムの期待値                                                 |
| $E[HML]$     | : HML プレミアムの期待値                                                 |

各モデルのパラメータ推定には、株主資本コストの推定時点を基準に、過去 36 ヶ月から最大で 60 ヶ月分の月次データを使用した。推定に用いる各企業の株式データは Bloomberg より取得した。安全利子率の代理変数には、長期国債（10 年物）の応募者平均利回りを使用し、データは財務省ホームページから取得した<sup>10</sup>。市場ポートフォリオ、SMB ファクター、および HML ファクターの各リターンは、Kenneth R. French 氏のホームページから取得し、Federal Reserve Economic Data (FRED) から取得した為替データを用いて円換算して使用した<sup>11,12</sup>。また、(A-9)式の条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルは、ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルのパラメータ  $\gamma_j$  および  $\delta_j$  が時間変化するとの考えに基づき、企業の株式時価総額および純資産株価倍率を組み込んだモデルとなっている<sup>13</sup>。株式時価総額および純資産株価倍率のデータは、Fama and French [1997] に準じた方法で作成している。

株主資本コストの推定時にはリスク・プレミアムを代入する必要があるが、CAPM モデルでは、Damodaran [2020] による推定値 5.1%（年率）を採用した。また、条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルの推定に際しては、Kenneth R. French 氏のホームページで公開されている 1990 年 7 月から 2020 年 6 月までのデータを用いて、マーケットリスク・プレミアム、SMB プレミアムおよび HML プレミアムの推定値をそれぞれ 0.38%、0.49%、2.77%とした。

<sup>10</sup> <https://www.mof.go.jp/jgbs/reference/appendix/index.htm>（最終閲覧日：2021 年 4 月 16 日）

<sup>11</sup> [https://mba.tuck.dartmouth.edu/pages/faculty/ken.french/data\\_library.html](https://mba.tuck.dartmouth.edu/pages/faculty/ken.french/data_library.html)（最終閲覧日：2021 年 4 月 16 日）

<sup>12</sup> <https://fred.stlouisfed.org/>（最終閲覧日：2021 年 4 月 16 日）

<sup>13</sup> ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルとして一般的に使用されるアセット・プライシングモデルは、(A-12)式で表される（Fama and French [1993]）。一方、企業の株主資本コストを推定するに当たっては当該企業の長期ヒストリカルデータを使用するが、(A-12)式のモデルでは、企業の収益性やビジネスモデルの変化を反映できないという欠点が指摘されている（久保田・竹原 [2007]）。そこで本研究では、(A-9)式の条件付ファーマ=フレンチの 3 ファクター・モデルを採用し、株主資本コストを推定した。

$$r_{j,t} - r_{f,t} = \alpha_j + \beta_j(r_{M,t} - r_{f,t}) + \gamma_j SMB_t + \delta_j HML_t. \quad (A-12)$$

### 補論 3. DML+all で追加的に採用したコントロール変数の一覧

---

Gross Margin  
EBITDA Margin  
Pre-Tax Income to Net Sales  
Profit Margin  
Dividend Payout Ratio  
Sustainable Growth Rate  
EBITDA Growth (1 year)  
Operating Income Growth (1 year)  
Dividend per Share Growth (1 year)  
Inventory Growth (1 year)  
Fixed Assets Growth (1 year)  
Total Assets Growth (1 year)  
Working Capital Growth (1 year)  
Employees Growth (1 year)  
Accounts Payable Growth (1 year)  
Short Term Debt Growth (1 year)  
Short and Long Term Debt Growth (1 year)  
Total Equity Growth (1 year)  
Total Capital Growth (1 year)  
Book Value per Share Growth (1 year)  
Operating Cash Flow Growth (1 year)  
Capital Expenditure Growth (1 year)  
Free Cash Flow Growth (1 year)  
Sales Growth (5 years)  
EBITDA Growth (5 years)  
Operating Income Growth (5 years)  
Dividend per Share Growth (5 years)  
Inventory Growth (5 years)  
Fixed Assets Growth (5 years)  
Total Assets Growth (5 years)  
Working Capital Growth (5 years)  
Employees Growth (5 years)  
Accounts Payable Growth (5 years)  
Short Term Debt Growth (5 years)  
Short and Long Term Debt Growth (5 years)

Total Equity Growth (5 years)  
 Total Capital Growth (5 years)  
 Book Value per Share Growth (5 years)  
 Operating Cash Flow Growth (5 years)  
 Free Cash Flow Growth (5 years)  
 Total Debt / EBITDA  
 Net Debt / EBITDA  
 Total Debt / EBIT  
 Net Debt / EBIT  
 EBITDA / Interest Expense  
 (EBITDA - Capital Expenditure) / Interest Expense  
 EBIT / Interest Expense  
 EBITDA / Cash Paid for Interest on Debt  
 EBITDA after Capital Expenditure/ Cash Paid for Interest on Debt  
 EBIT / Cash Paid for Interest on Debt  
 Common Equity / Total Assets  
 Long Term Debt / Common Equity  
 Long Term Debt / Total Capital  
 Long Term Debt / Total Assets  
 Total Debt / Total Capital  
 Total Debt / Total Assets  
 Net Debt / Total Equity  
 Net Debt / Total Capital  
 Cash Ratio  
 Current Ratio  
 Quick Ratio  
 Operating Cash Flow / Average Current Liabilities  
 Operating Cash Flow / Total Debt  
 Accounts Receivable Turnover  
 Inventory Turnover  
 Accounts Payable Turnover Days  
 Cash Conversion Cycle  
 Free Cash Flow Yield  
 Shareholder Yield  
 Net Income per Employee  
 Cash Flow per Employee

Personnel Expenses per Employee

Non-Executive Director Ratio

Independent Director Ratio

Woman Ratio on Board

Female Executive Ratio

Board Age Range

Board Average Age

Independent Directors Board Meeting Attendance Ratio

Foreign Ownership Ratio

Weighted Average Cost of Capital

---

備考：Weighted Average Cost of Capital は、長期および短期のパフォーマンス指標に関する分析時のみ採用。

## 補論 4. 分析対象企業と対象外企業の比較

4 節 (1) で述べたとおり、本研究は、2020 年 12 月時点で東証一部に上場している企業 2,186 社のうち、CO<sub>2</sub> 排出量のデータが取得できる 591 社を分析対象としている。現在、わが国では CO<sub>2</sub> 排出量の開示は各企業の自発的な取り組みに委ねられており、本研究の結果はサンプルの偏りを反映している可能性がある。

そこで、本研究で分析対象とした企業と対象外の企業について目的変数の分布を比較し、選択バイアスの有無を検証した。具体的には、星野 [2009] を参考に、本研究で分析対象とした企業を処置群、分析対象外とした企業を対照群とし、目的変数の平均値の差から算出される平均処置効果 ( $\Delta_{ATE}$ ) のほか、逆確率による重み付け手法 (Inverse Probability Weighting: IPW) や二重にロバストな手法 (Doubly Robust: DR) から推定される平均処置効果 ( $\Delta_{IPW}$ 、 $\Delta_{DR}$ ) を検証した。なお、傾向スコアの算出に利用する共変量には 4 節 (4) で示したコントロール変数を用いた。また、傾向スコアの外れ値による影響を避けるため、スコアが 0.99 以上または 0.01 以下のデータは除外した<sup>14</sup>。

結果は表 A のとおりである。株価純資産倍率、トービンの  $q$ 、ROE および ROA については、対照群に比べて、処置群の値が低い傾向があることが示された。その一方で、資本コストに関しては、 $r_{FF97}$  と  $r_D$  では有意差がみられないうえ、差の水準自体も小さな値となっている。したがって、特に CO<sub>2</sub> 排出量が長期と短期の企業パフォーマンスに与える影響について、本研究の含意を分析対象外の企業まで含めて一般化可能であるかについては、慎重に評価する必要があると考えられる。

表 A：比較結果

|                | (1)                    | (2)                    | (3)                    | (4)                    | (5)                 | (6)                   | (7)                |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
|                | PBR                    | $q$                    | ROE                    | ROA                    | $r_{FF97}$          | $r_{CAPM}$            | $r_D$              |
| $\Delta_{ATE}$ | -0.1341***<br>(0.0110) | -0.1218***<br>(0.0083) | -0.0232***<br>(0.0016) | -0.0138***<br>(0.0007) | 0.0003<br>(0.0005)  | 0.0042***<br>(0.0004) | 0.0003<br>(0.0002) |
| $\Delta_{IPW}$ | -0.1457***<br>(0.0167) | -0.1055***<br>(0.0123) | -0.0160***<br>(0.0020) | -0.0079***<br>(0.0012) | 0.0007<br>(0.0007)  | 0.0011**<br>(0.0005)  | 0.0001<br>(0.0003) |
| $\Delta_{DR}$  | -0.1281***<br>(0.0170) | -0.0955***<br>(0.0122) | -0.0136***<br>(0.0019) | -0.0054***<br>(0.0010) | -0.0001<br>(0.0006) | 0.0009**<br>(0.0005)  | 0.0002<br>(0.0003) |

備考：\*\*\*、\*\*、\*はそれぞれ、両側確率 1%、5%、10%で推定結果が有意であることを示している。括弧内は標準誤差である。標準誤差は、ノンパラメトリック・ブートストラップ手法を用いて、1,000 回の再サンプリングを行って算出した。

<sup>14</sup> 外れ値を除外しない場合でも、概ね同様の結果が得られることを確認している。

## 参考文献

- 久保田敬一・竹原 均、「加重平均資本コスト推定上の諸問題」、『経営財務研究』第 27 巻第 2 号、日本経営財務研究学会、2007 年、2~25 頁
- 星野崇宏、『調査観察データの統計科学—因果推論・選択バイアス・データ融合—』、岩波書店、2009 年
- Aggarwal, Raj, and Sandra Dow, “Corporate Governance and Business Strategies for Climate Change and Environmental Mitigation,” *European Journal of Finance*, 18(3-4), 2012, pp.311-331.
- Ambec, Stefan, and Paul Lanoie, “Does It Pay to Be Green? A Systematic Overview,” *Academy of Management Perspectives*, 22(4), 2008, pp.45-62.
- Bebchuk, Lucian A., and Alma Cohen, “The Costs of Entrenched Boards,” *Journal of Financial Economics*, 78(2), 2005, pp.409-433.
- Bolton, Patrick, and Marcin Kacperczyk, “Do Investors Care about Carbon Risk?” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp.517-549.
- Bui, Binh, Olayinka Moses, and Muhammad N. Houqe, “Carbon Disclosure, Emission Intensity and Cost of Equity Capital: Multi-country Evidence,” *Accounting & Finance*, 60(1), 2020, pp.47-71.
- Busch, Timo, and Volker H. Hoffmann, “How Hot is Your Bottom Line? Linking Carbon and Financial Performance,” *Business & Society*, 50(2), 2011, pp.233-265.
- , Alexander Bassen, Stefen Lewandowski, and Franziska Sump, “Corporate Carbon and Financial Performance Revisited,” *Organization & Environment*, 2020, 1086026620935638.
- Carney, Mark, “Breaking the Tragedy of the Horizon – climate change and financial stability,” speech given at Lloyd’s London, September 29, 2015.
- Chen, Linda H., and Lucia Silva Gao, “The Pricing of Climate Risk,” *Journal of Financial and Economic Practice*, 12(2), 2012, pp.115-131.
- Chernozhukov, Victor, Denis Chetverikov, Mert Demirer, Esther Duflo, Christian Hansen, and Whitney Newey, “Double Machine Learning for Treatment and Causal Parameters,” cemmap working paper No. CWP49/16, University College London, 2016.



- , ———, ———, ———, ———, ———, and James Robins, “Double/debiased Machine Learning for Treatment and Structural Parameters,” *Econometrics Journal*, 21(1), 2018, pp.C1-C68.
- Damodaran, Aswath, “Equity Risk Premiums: Determinants, Estimation and Implications – The 2020 Edition,” 2020 (available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3550293>).
- Delmas, Magali A., Nicholas Nairn-Birch, and Jinghui Lim, “Dynamics of Environmental and Financial Performance: The Case of Greenhouse Gas Emissions,” *Organization & Environment*, 28(4), 2015, pp.374-393.
- El Ghouli, Sadok, Omrane Guedhami, Chuck C. Y. Kwok, and Dev R. Mishra, “Does Corporate Social Responsibility Affect the Cost of Capital?” *Journal of Banking & Finance*, 35(9), 2011, pp.2388-2406.
- Fama, Eugene F., and Kenneth R. French, “Common Risk Factors in the Returns on Stocks and Bonds,” *Journal of Financial Economics*, 33(1), 1993, pp.3-56.
- , and ———, “Industry Costs of Equity,” *Journal of Financial Economics*, 43(2), 1997, pp.153-193.
- Francis, Jere R., Inder K. Khurana, and Raynolde Pereira, “Disclosure Incentives and Effects on Cost of Capital around the World,” *Accounting Review*, 80(4), 2005, pp.1125-1162.
- Freeman, R. Edward, *Strategic Management: A Stakeholder Approach*, Cambridge University Press, 2010.
- Friedman, Milton, “A Friedman Doctrine-- The Social Responsibility of Business Is to Maximise Its Profits,” *New York Times Magazine*, September 13, 1970, p.33.
- Fujii, Hidemichi, Kazuyuki Iwata, Shinji Kaneko, and Shunsuke Managi, “Corporate Environmental and Economic Performance of Japanese Manufacturing Firms: Empirical Study for Sustainable Development,” *Business Strategy and the Environment*, 22(3), 2013, pp.187-201.
- Gallego-Álvarez, Isabel, Isabel M. García-Sánchez, and Cléber da Silva Vieira, “Climate Change and Financial Performance in Times of Crisis,” *Business Strategy and the Environment*, 23(6), 2014, pp.361-374.

- Ganda, Fortune, and Khazamula Samson Milondzo, "The Impact of Carbon Emissions on Corporate Financial Performance: Evidence from the South African Firms," *Sustainability*, 10(7), 2018, p.2398.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014: Synthesis Report*, 2014.
- Iwata, Hiroki, and Keisuke Okada, "How Does Environmental Performance Affect Financial Performance? Evidence from Japanese Manufacturing Firms," *Ecological Economics*, 70(9), 2011, pp.1691-1700.
- Jensen, Michael C., and William H. Meckling, "Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs and Ownership Structure," *Journal of Financial Economics*, 3(4), 1976, pp.305-360.
- Jung, Juhyun, Kathleen Herbohn, and Peter Clarkson, "Carbon Risk, Carbon Risk Awareness and the Cost of Debt Financing," *Journal of Business Ethics*, 150(4), 2018, pp.1151-1171.
- Kim, Yeon-Bok, Hyoung Tae An, and Jong Dae Kim, "The Effect of Carbon Risk on the Cost of Equity Capital," *Journal of Cleaner Production*, 93, 2015, pp.279-287.
- Kimbara, Tatsuo, "An Analysis of the Eco-efficiency and Economic Performance of Japanese Companies," *Asian Business & Management*, 9(2), 2010, pp.209-222.
- King, Andrew, and Michael Lenox, "Exploring the Locus of Profitable Pollution Reduction," *Management Science*, 48(2), 2002, pp.289-299.
- Konar, Shameek, and Mark A. Cohen, "Does the Market Value Environmental Performance?" *Review of Economics and Statistics*, 83(2), 2001, pp.281-289.
- Lee, Ki-Hoon, Byung Min, and Keun-Hyo Yook, "The Impacts of Carbon (CO<sub>2</sub>) Emissions and Environmental Research and Development (R&D) Investment on Firm Performance," *International Journal of Production Economics*, 167, 2015, pp.1-11.
- Lintner, John, "Security Prices, Risk, and Maximal Gains from Diversification," *Journal of Finance*, 20(4), 1965, pp.587-615.
- Matsumura, Ella Mae, Rachna Prakash, and Sandra C. Vera-Muñoz, "Firm-value Effects of Carbon Emissions and Carbon Disclosures," *Accounting Review*, 89(2), 2014, pp.695-724.

- Misani, Nicola, and Stefano Pogutz, "Unraveling the Effects of Environmental Outcomes and Processes on Financial Performance: A Non-linear Approach," *Ecological economics*, 109, 2015, pp.150-160.
- Morck, Randall, Andrei Shleifer, and Robert W. Vishny, "Management Ownership and Market Valuation: An Empirical Analysis," *Journal of Financial Economics*, 20, 1988, pp.293-315.
- Nishitani, Kimitaka, and Katsuhiko Kokubu, "Why Does the Reduction of Greenhouse Gas Emissions Enhance Firm Value? The Case of Japanese Manufacturing Firms," *Business Strategy and the Environment*, 21(8), 2012, pp.517-529.
- Porter, Michael E., and Claas Van der Linde, "Toward a New Conception of the Environment-competitiveness Relationship," *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 1995, pp.97-118.
- Robinson, Peter M., "Root-N-consistent Semiparametric Regression," *Econometrica*, 56(4), 1988, pp.931-954.
- Russo, Michael V., and Paul A. Fouts, "A Resource-based Perspective on Corporate Environmental Performance and Profitability," *Academy of Management Journal*, 40(3), 1997, pp.534-559.
- Sharpe, William F., "Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk," *Journal of Finance*, 19(3), 1964, pp.425-442.
- Trumpp, Christoph, and Thomas Guenther, "Too Little or Too Much? Exploring U-shaped Relationships between Corporate Environmental Performance and Corporate Financial Performance," *Business Strategy and the Environment*, 26(1), 2017, pp.49-68.
- Tzouvanas, Panagiotis, Renatas Kizys, Ioannis Chatziantoniou, and Roza Sagitova, "Environmental and Financial Performance in the European Manufacturing Sector: An Analysis of Extreme Tail Dependency," *British Accounting Review*, 52(6), 2020, p.100863.
- Valta, Philip, "Competition and the Cost of Debt," *Journal of Financial Economics*, 105(3), 2012, pp.661-682.
- Wang, Lei, Steven Li, and Simon Gao, "Do Greenhouse Gas Emissions Affect Financial Performance? – An Empirical Examination of Australian Public Firms," *Business Strategy and the Environment*, 23(8), 2014, pp.505-519.