一般財団法人日本エネルギー経済研究所
第３回 エネルギー・環境論文コンテスト佳作論文

カーボンプライシング制度と補助金が企業の CO_2 排出に与える政策評価
―欧州製造業企業における実証分析―

榎田堅大
東京大学公共政策大学院公共政策学専攻修士１年

1. はじめに

気候変動緩和に向けた国際的な取り組みにもかかわらず、現行政策が継続された場合、2100 年までに約 3.2℃の気温上昇が予測されており（IPCC 2023）、気温上昇を産業革命以前と比べて 1.5℃以内に抑えるというパリ協定の目標との間には大きな乖離が存在する(UNFCCC 2015)。COP29 でも、気候変動対策に万能な解決策はなく、各国の社会的・経済的条件に応じた政策と、企業を含む非国家主体の参加が重要であることが示された（UNFCCC 2024）。このため、国ごとの条件を踏まえ、企業の排出行動を変化させる政策を検討する必要がある。

既存研究では、炭素税や排出量取引制度（ETS）の排出削減効果が検証されてきたが、単一国を対象とする研究(e.g., Andersson, 2019)や、複数国の国・産業レベルの集計データを用いる研究が中心である(e.g., Bayer and El Aklin 2020; Best et al. 2020; Rafaty et al. 2025; Tello 2025)。そのため、複数国の企業データを用いて、炭素税、ETS および環境補助金を同一の枠組みで比較した研究は限られている。また、炭素価格が環境技術のイノベーションを促すことは示されているものの(Aghion et al. 2016)、政策が企業の技術・エネルギー選択を通じて排出削減につながる経路は十分に検証されていない。

欧州は炭素税や ETS を早期から導入した地域であるとともに、一定の制度的共通性を持ちながら、炭素価格、産業構造および経済規模に国ごとの差があり、複数の政策手段を比較する上で適している(Dechezleprêtre and Sato 2017)。また、製造業は世界の CO_2 排出の約 23%を占める一方（IEA 2020）、技術導入、電化等による削減余地が大きく、炭素価格制度の主たる対象として、企業行動を検討する上で重要な部門である。

本研究は、2018 年から 2024 年までの欧州 19 か国の製造業企業を対象に、炭素税、ETS および環境補助金と企業の CO_2 排出強度との関係を検証する。加えて、国の経済規模による関係の異質性と、再生可能エネルギー利用を介した間接経路を分析する。

本研究の貢献は三点ある。第一に、Mundlak-hybrid model を環境政策評価に応用し、各国内の政策水準の変化を表す Within 効果と、国ごとに持続する平均的な政策環境の差を表す Between 効果を区別する分析枠組みを提示する。第二に、欧州の複数国における企業レベルのデータを用い、炭素税、ETS および環境補助金を同一の枠組みで比較する。第三に、再生可能エネルギー利用に注目し、環境政策と企業の CO_2 排出強度を結ぶ間接経路を検証する。

2. 研究仮説

2.1 理論的背景

環境政策と企業行動の関係を説明する理論として、ポーター仮説が挙げられる。Porter and Van Der Linde (1995)は、適切に設計された環境政策が企業のイノベーションを促し、環境パフォーマンスを改善し得ると論じている。本研究は企業の競争力ではなく、政策による技術・エネルギー選択の変化を検証するため、環境規制がイノベーションを誘発するという弱いポーター仮説を理論的基盤とする(Ambec et al. 2013)。

方向づけられた技術変化（Directed Technological Change：DTC）理論は、技術革新の方向が相対価格、政策的誘因および市場規模によって内生的に決まると説明する(Acemoglu et al. 2012)。環境政策によって汚染集約的技術の費用が上昇すれば、企業の技術開発と導入は低炭素側へ誘導される。実際に、先行研究では環境税を含む燃料価格の上昇が自動車企業のクリーン技術に関するイノベーションを促すことが示されている(Aghion et al. 2016)。本研究は、これらの理論に基づき、環境政策と企業の CO_2 排出強度との関係を検証する。

2.2 研究仮説

2.2.1 政策手段別の CO_2 排出削減効果

炭素税と ETS は、排出に価格を付けることで企業に継続的な削減インセンティブを与える。一方、補助金は低炭素投資の初期費用を軽減するが、長期的には過剰参入などの非効率性を生じさせる可能性がある(Segerson 2013)。そこで、同一国内の政策水準の変化と、国ごとに持続する平均的な政策環境の差において、政策手段ごとの関係を検証する。

仮説 1：炭素価格制度は、一時的な政策効果と構造的な政策効果の両方を通じて CO_2 排出削減に寄与する一方、補助金の排出削減効果は持続的な構造的差異よりも一時的な政策変動によって CO_2 排出削減に寄与する。

2.2.2 国の経済規模による調整効果

国際競争下では、大規模な国ほど国内産業の競争力を維持するために補助金を選択し、小規模な国ほど環境税を選択する誘因が強いとされる (Vidal-Meliá et al. 2023)。この主張に基づき、政策と企業の CO_2 排出強度との関係は経済規模によって異なると予測する。

仮説 2：経済規模が大きい国ほど環境補助金による排出削減効果が強く、経済規模が小さい国ほど炭素税による排出削減効果が強い。

2.2.3 複合政策の相乗効果

補助金は低炭素技術の導入費用を軽減するため、排出費用を高める炭素価格制度と組み

合わせることで効果が強まる可能性がある(van den Bergh et al. 2021; Stechemesser et al. 2024)。以上から、次の仮説を設定する。

仮説 3：環境補助金は炭素税と組み合わせて実施された場合、単独で実施された場合よりも企業の CO_2 排出強度を強く低下させる。

2.2.4 再生可能エネルギー利用を介した影響経路

DTC 理論によれば、炭素税による相対価格の変化は、企業の技術・エネルギー選択を低炭素側へ誘導する。このため、炭素税は再生可能エネルギー利用を促し、それを通じて CO_2 排出強度と関係すると考えられる。

仮説 4：炭素税は、企業の再生可能エネルギー導入比率を高めることを通じて、CO_2 排出強度を低下させる。

3. 分析方法および使用データ

3.1 分析方法

3.1.1 Mundlak-hybrid model

本研究では、脱炭素政策と企業の CO_2 排出強度との関係を検証するため、相関ランダム効果モデルとも呼ばれる Mundlak-hybrid model を用いる(Mundlak 1978, Schunck 2013)。企業固定効果モデルは、時間不変の企業特性を統制できる一方、推定は同一企業内の変化に基づく Within 効果に限定される。本研究では各企業が一つの国に所属するため、分析期間中の国別平均政策水準は企業固定効果に吸収され、国ごとの政策環境の差を推定できない。

これに対して Mundlak-hybrid model は、政策変数を国別平均からの乖離を表す Within 成分と、分析期間中の国別平均を表す Between 成分に分解する。これにより、本モデルの強みである、同一国内の政策水準の変化と平均的な政策水準が異なる国の間の差を同時に推定が可能となる。また、時間変化する企業属性の企業別平均を加えることで、観測されない企業個別効果と説明変数との相関を考慮する。推定式は次のとおりである。

$$\ln(Y_{i,j,t}) = \beta_0 + \sum_{k=1}^{K} \beta_{W,k} \left(Policy_{k,j,t-1} - \overline{Policy_{k,j}}\right) + \sum_{k=1}^{K} \beta_{B,k} \overline{Policy_{k,j}} + \beta'_B \left(\overline{CarbonTax_j} \times \overline{Subsidy_j}\right) + \sum_{m=1}^{M} \eta_{W,m} \left(Control_{m,i,t} - \overline{Control_{m,i}}\right) + \sum_{m=1}^{M} \eta_{B,m} \overline{Control_{m,i}} + \lambda_t + \varepsilon_{i,j,t}$$

ここで、(i)は企業、(j)は国、(t)は年を表す。$(Y_{i,j,t})$は CO_2 排出強度であり、(λ_t)は年固定効果、$(\varepsilon_{i,j,t})$は誤差項である。政策変数$(Policy_{k,j,t-1})$には炭素税導入ダミー、法定炭素税

価格、ETS 価格および環境補助金割合を用いる。政策変更が企業行動に反映されるまでに時間を要する可能性を考慮し、政策変数には 1 年のラグを設ける。 $(\mathrm{Control}_{m,i,t})$は企業レベルのコントロール変数を表す。複合政策の相乗効果を検証するため、炭素税の Between 成分と環境補助金の Between 成分との交差項である、$\left(\overline{\mathrm{CarbonTax}_j} \times \overline{\mathrm{Subsidy}_j}\right)$を導入する。交差項は多重共線性を緩和するため残差中心化を施す。ETS は EU、イギリス、スイスという限られた制度間の差によって識別される一方、炭素税率と環境補助金にはより大きな国家間の差が存在するため、複合政策の分析は炭素税と環境補助金に限定する。連続する政策変数は比較のため Z 標準化する。

国の経済規模による関係の違いは、次の拡張モデルにより検証する。

$$\begin{aligned}\ln(Y_{i,j,t}) = \beta_0 &+ \sum_{k=1}^{K} \beta_{W,k}\left(\mathrm{Policy}_{k,j,t-1} - \overline{\mathrm{Policy}_{k,j}}\right) + \sum_{k=1}^{K} \beta_{B,k}\,\overline{\mathrm{Policy}_{k,j}} \\ &+ \sum_{k=1}^{K} \delta_k\left(\left(\mathrm{Policy}_{k,j,t-1} - \overline{\mathrm{Policy}_{k,j}}\right) \times \overline{\ln(\mathrm{GDP})_j}\right) + \gamma\overline{\ln(\mathrm{GDP})_j} \\ &+ \sum_{m=1}^{M} \eta_{W,m}\left(\mathrm{Control}_{m,i,t} - \overline{\mathrm{Control}_{m,i}}\right) + \sum_{m=1}^{M} \eta_{B,m}\,\overline{\mathrm{Control}_{m,i}} + \lambda_t + \varepsilon_{i,j,t}\end{aligned}$$

交差項の係数である(δ_k)は、各国内の政策水準の変化と CO_2排出強度との関係が、国の平均的な経済規模によってどのように異なるかを表す。

また、政策変数は国単位で決定され、同一国内の企業間で誤差項が相関する可能性がある。これを無視すると標準誤差が過小評価され、統計的有意性が過大に示される可能性があるため(Colin Cameron and Miller 2015)、標準誤差は国レベルでクラスタリングする。

3.1.2 パス解析

環境政策と CO_2排出強度を結ぶ経路を検討するため、企業の再生可能エネルギー利用比率を媒介変数とし、Product 法によるパス解析を行う。具体的には、第一段階で環境政策と再生可能エネルギー利用比率との関係（経路(a)）を推定し、第二段階で環境政策をコントロールした上で、再生可能エネルギー利用比率と CO_2排出強度との関係（経路(b)）および環境政策の直接経路（経路(c')）を推定する（Baron and Kenny (1986)；Mackinnon et al. (2002)）。推定式は次のとおりである。

$$\mathrm{M}_{i,t} = \alpha_i + \sum \mathrm{a}_k \mathrm{Policy}_{k,j,t-1} + \sum \mathrm{r}_m \mathrm{Control}_{m,i,t} + \lambda_t + \eta_{i,t}$$

$$\ln(\mathrm{Y}_{i,t}) = \alpha'_i + \sum \mathrm{c'}_k \mathrm{Policy}_{k,j,t-1} + \mathrm{bM}_{i,t} + \sum \mathrm{r'}_m \mathrm{Control}_{m,i,t} + \lambda'_t + \epsilon_{i,t}$$

ここで、 $(\mathrm{M}_{i,t})$は企業の再生可能エネルギー利用比率、(α_i)および(α'_i)は企業固定効果、(λ_t)および(λ'_t)は年固定効果を表す。各政策(k)の間接効果は、政策から再生可能エネルギー利用比率への経路(a_k)と、再生可能エネルギー利用比率から CO_2排出強度への経路(b)の係数の積$(a_k \times b)$として算出する。

本分析では、企業の時間不変な特性と各年に共通するショックをコントロールするため、企業固定効果と年固定効果を含む二方向固定効果モデルを用いる。各経路の推定では、同一企業内の誤差相関を考慮し、標準誤差を企業レベルでクラスタリングし、間接効果の信頼区間は、企業を再標本化単位とする 5,000 回の Bootstrap 法によって算出する (Imai et al. 2010)。

3.2　使用データ

初期サンプルは、2018 年から 2024 年までに少なくとも 1 年の観測値を有する欧州 19 か国の製造業企業 2,586 社、16,310 企業・年観測である。全期間の観測値を有する企業に限定し、該当企業が 3 社未満の国を除外した完全パネルデータを構築した結果、主分析の最終サンプルは 19 か国 584 社、4,088 企業・年観測となった。パス解析は、再生可能エネルギー利用比率を全期間について開示する 15 か国 280 社、1,960 企業・年観測を対象とする。国別の企業数は付録 A に示す。

被説明変数には、企業の Scope1 および Scope2 の CO_2排出量を売上高で除した CO_2排出強度の対数値を用いる。国レベルの政策・経済データは World Bank Carbon Pricing Dashboard、World Bank、Eurostat および英国政府資料から、企業の環境・財務データは Bloomberg および LSEG Workspace から取得した。変数の定義と出所は表 1 に示す。推定前に、CO_2排出強度と企業規模を対数変換し、負債株式比率に逆双曲線正弦変換、ROA に $\pm 3\sigma$ でのウィンザー化を施した。分析に用いたデータの記述統計は付録 B に示す。

表 1. 各変数とデータソース

	定義	単位・変換	出所
被説明変数			
CO_2排出強度	Scope 1 および Scope 2 の CO_2排出量を売上高で除した値	ln（tCO_2／百万米ドル）	Bloomberg
説明変数			
炭素税導入ダミー	炭素税が導入されている場合は 1、導入されていない場合は 0	ダミー変数	世界銀行
炭素税価格	各年 4 月 1 日時点の法定炭素税率を、CO_2排出量 1 トン当たりの米ドル価格に換算した値	米ドル/tCO_2	世界銀行
ETS 価格	各年 4 月 1 日時点における ETS 排出枠価格	米ドル/tCO_2	世界銀行
環境補助金割合	環境補助金支出を政府総支出で除した値	‰（政府総支出比）	Eurostat, Defra（イギリス）, DESNZ（イギリス）
コントロール変数			
企業規模	売上高	ln（売上高，米ドル）	Bloomberg
負債株式比率	総負債を総株式で除した値	%（逆双曲線正弦変換）	Bloomberg
ROA	総資産利益率	比率	Bloomberg
海外売上比率	海外売上高を総売上高で除した値	比率	Bloomberg, LSEG Workspace
国有企業ダミー	国有企業の場合は 1、それ以外は 0	ダミー	LSEG Workspace
媒介変数			
再生可能エネルギー利用比率	総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギー利用量の割合	比率	Bloomberg

モデレーター変数			
GDP	総 GDP（米ドル）	ln（総 GDP，米ドル）	World Bank

4. 結果と考察

4.1 政策手段別の CO_2 排出削減効果

表 2 に Mundlak-hybrid model の推定結果を示す。炭素税の Between 効果は 5%水準、ETS の Between 効果は 1%水準で有意に負であった。すなわち、分析期間中の平均的な炭素税価格または ETS 価格が高い国ほど、企業の CO_2 排出強度が低い傾向が確認された。一方、炭素税の Within 効果、環境補助金の Within および Between 効果、および炭素税と補助金の交差項は有意ではなかった。したがって、仮説 1 は炭素価格制度の Between 効果についてのみ部分的に支持され、複合政策の相乗効果を予測した仮説 3 は支持されなかった。

標準化した係数を元の価格単位に換算すると、平均炭素税価格が 1 米ドル／tCO_2 高い国では企業の CO_2 排出強度が約 0.9 (= -0.3746 / 41.718 × 100)%、平均 ETS 価格が 1 米ドル／tCO_2 高い国では約 0.15 (= -0.0522 / 34.066 × 100)%低いと推定される。ただし、両制度では対象部門、価格形成、免除および無償配分が異なるため、この差だけから炭素税が ETS より優れているとは判断できない。

Between 効果にのみ明確な負の関係が確認された背景には、製造業の設備更新や低炭素技術への投資に多額の初期費用と長い計画期間を要することが考えられる。企業は単年度の価格変化よりも、将来にわたり維持されると予想する政策環境を投資判断に反映する可能性がある(Compernolle et al. 2022; Newell et al. 2014)。ただし、Between 係数には政策水準と相関する国固有の要因も含まれ得るため、炭素価格の因果効果ではなく、国ごとの政策環境と CO_2 排出強度との構造的な関係として解釈する必要がある。

また、環境補助金の非有意性は、補助金全般の効果を否定するものではない。本研究の指標は、目的や対象が異なる国全体の環境補助金を集計したものであり、製造業企業による実際の受給額や用途を把握していない。この測定上の制約により、企業の排出削減との関係が希薄化した可能性がある。

表 2. 環境政策手段と企業の CO_2 排出強度との関係

効果区分	変数	CO_2 排出強度
Between	炭素税導入ダミー	0.0627
	炭素税	-0.3746^{**}
	ETS	-0.0522^{***}
	環境補助金割合	0.1005
	GDP	-0.2435^{**}
	ROA	-0.0183^{**}
	負債株式比率	0.0432
	企業規模（売上高）	0.1006
	海外売上比率	1.3178^{***}
	国有企業ダミー	1.0886
Within	炭素税	0.0004
	環境補助金割合	−0.0003
	ROA	-0.0049^{***}
	負債株式比率	0.0090
	企業規模（売上高）	-0.3152^{***}
	海外売上比率	−0.0861
	国有企業ダミー	0.000^{*}
Between × Between	炭素税×環境補助金	0.1885
定数項		5.829^{***}
年固定効果		あり
観測数		4,088
決定係数（R^2）		0.095

注：連続する政策変数は、推定前に平均 0、標準偏差 1 となるよう Z 標準化した。交差項は、多重共線性を緩和するため、残差中心化した成分を用いて作成した。標準誤差は国レベルでクラスタリングした。

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

4.2 経済規模による政策効果の異質性

表 3 に GDP との交差項を導入した結果を示す。第 1 列では炭素税の Within 成分と GDP の Between 成分との交差項を、第 2 列では環境補助金の Within 成分と GDP の Between 成分との交差項を導入した結果を表す。炭素税の Within 成分と GDP の Between 成分との交差項は正であり、5%水準で有意であった。付録 C の限界効果によれば、国の経済規模が大きくなるほど、炭素税による排出削減効果は逓減する傾向が確認された。一方、環境補助金と GDP の交差項は有意ではなかった。したがって、仮説 2 は炭素税について支持された

が、補助金については支持されず、全体として部分的に支持された。

この結果には、大規模経済における制度運営の複雑性が関係している可能性がある。企業数や産業構造が複雑になるほど、課税対象の把握、遵守状況の監視および制度執行に要する費用が増加する可能性がある(Slemrod and Yitzhaki 2002)。また、産業・雇用への配慮から免税や軽減措置が設けられれば、法定税率の上昇が企業の実効的な排出費用に十分反映されない可能性がある。

表 3. 経済規模による政策効果の異質性

効果区分	変数	(1)	(2)
Between	炭素税導入ダミー	0.1604	0.1604
	炭素税	−0.0091**	−0.0091**
	ETS	−0.0452**	−0.0452***
	環境補助金割合	0.0282	0.0282
	GDP	−0.2144*	−0.2144*
	ROA	−0.0183**	−0.0183**
	負債株式比率	0.0432	0.0432
	企業規模（売上高）	0.1006	0.1006
	海外売上比率	1.3178***	1.3178***
	国有企業ダミー	1.0886	1.0886
Within	炭素税	0.0017**	0.0004
	環境補助金割合	−0.0009	−0.0007
	ROA	−0.0050***	−0.0049***
	負債株式比率	0.0084	0.0090
	企業規模（売上高）	−0.3142***	−0.3153***
	海外売上比率	−0.0861	−0.0864
	国有企業ダミー	0.000	0.000*
Within × Between	炭素税×GDP	0.0020**	
	環境補助金×GDP		0.0007
定数項		5.7850***	5.7829***
年固定効果		Yes	Yes
観測数		4,088	4,088
決定係数（R^2）		0.095	0.095

注：連続する政策変数は、推定前に平均 0、標準偏差 1 となるよう Z 標準化した。交差項は、多重共線性を緩和するため、残差中心化した成分を用いて作成した。標準誤差は国レベルでクラスタリングした。

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

4.3　再生可能エネルギー利用を介した間接経路

表 4 に Product 法によるパス解析の結果を示す。経路(a)は各政策と企業の再生可能エネルギー利用比率との関係を、経路(b)は再生可能エネルギー利用比率と企業の CO_2排出強度との関係を表す。経路(a)では、炭素税導入ダミーが 10%水準で統計的に有意に負であり、炭素税の係数は 5%水準で統計的に有意に正であった。また、経路(b)では再生可能エネルギー利用比率の係数が 1%水準で統計的に有意に負であった。企業レベルの Bootstrap による信頼区間は、両係数の積である炭素税の間接効果についてゼロを含まなかった。一方、ETS 価格と環境補助金の間接効果については、信頼区間がゼロを含んだ。詳細な Bootstrap の推定結果は付録 D に示す。したがって、仮説 4 は支持され、炭素税が企業の再生可能エネルギー使用比率を高めることで、CO_2排出強度低下に与える間接経路を明らかにした。

炭素税の負の間接経路は、相対価格の変化が企業の技術・エネルギー選択を低炭素側へ誘導するという DTC 理論と整合的である。ETS は、省エネルギー、燃料転換、生産調整、排出枠の購入など、再生可能エネルギー利用以外の経路を通じて企業行動に関係する可能性がある。また、補助金については、企業による実際の受給額や用途を把握できないことが結果に影響した可能性がある。

図 1 は、以上の推定結果をパス図として示している。実線は統計的に有意な経路、破線は有意でない経路を表す。

表 4. 再生可能エネルギー利用を介した環境政策のパス解析

変数	経路 a	経路 b・c’
炭素税導入ダミー	−0.0573*	−0.0474
炭素税	0.0014**	−0.0002
ETS	−0.0006	0.0010
環境補助金割合	0.0027	−0.0053
再生可能エネルギー利用比率		−0.4586***
GDP	−0.1335	−0.0008
ROA	0.0010	−0.0100*
負債株式比率	0.0017	0.0151
企業規模（売上高）	0.0047	−0.3984**
海外売上比率	0.1231	−0.1475
国有企業ダミー	−0.0793**	1.4075***
定数項	3.9226	11.5602*
年固定効果	あり	あり
企業固定効果	あり	あり
観測数	1,960	1,960

決定係数（$\mathbf{R^2}$）	0.7761	0.9662

注：標準誤差は企業レベルでクラスタリングした。間接効果の統計的推定には、企業を再標本化単位とする 5,000 回のノンパラメトリック Bootstrap を用いた。

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

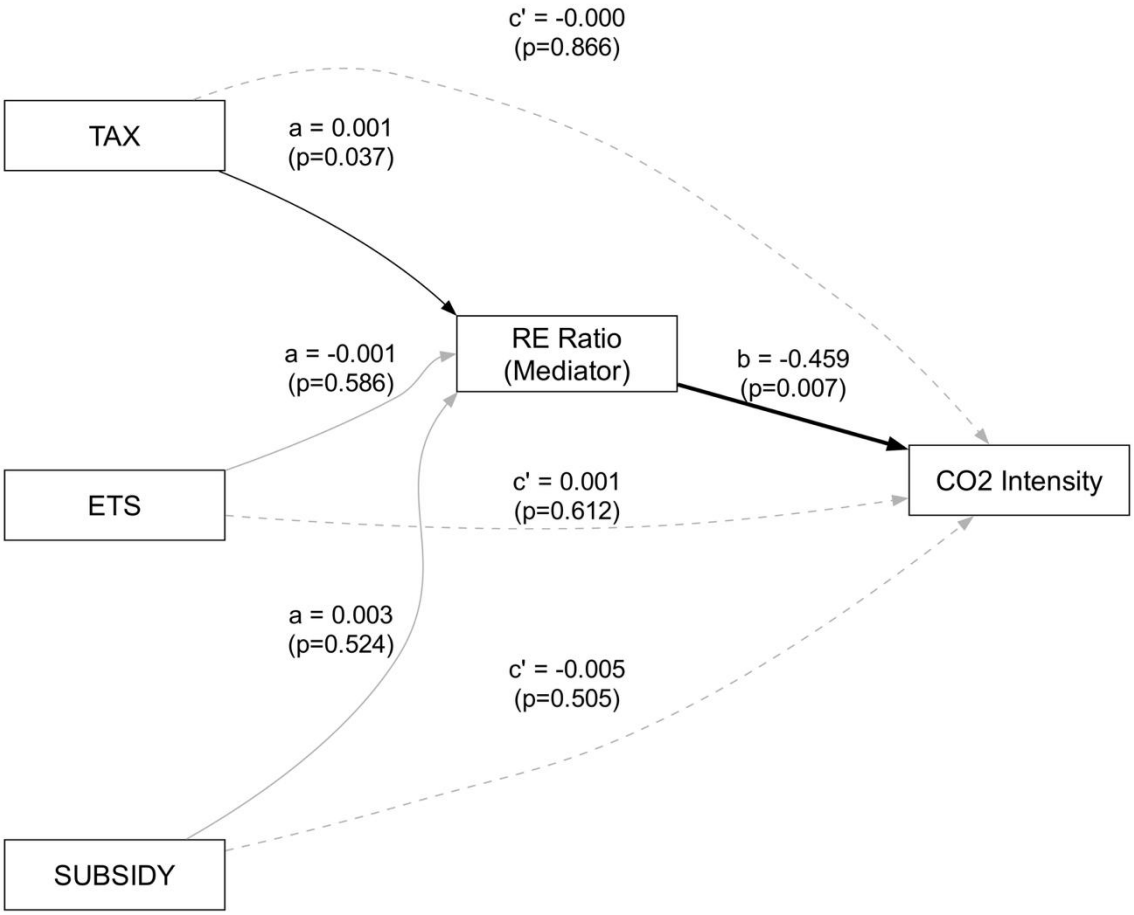


図 1. 環境政策から企業の CO_2 排出強度に至る経路

注：本図は、環境政策、企業の再生可能エネルギー利用比率および CO_2 排出強度の間のパス構造を示す。係数（a）は各政策と再生可能エネルギー利用比率との関係、係数（b）は再生可能エネルギー利用比率と CO_2 排出強度との関係、係数（c'）は再生可能エネルギー利用比率をコントロールした後の各政策と CO_2 排出強度との直接経路を表す。係数はすべて非標準化係数である。実線は 1%または 5%水準で有意な経路、破線は有意でない経路を示す。すべての推定に企業レベルのコントロール変数、企業固定効果および年固定効果を含む。

4.4　ロバストネスチェック

本研究では、企業規模の代理変数として売上高を用いている。しかし、被説明変数である CO_2排出強度も排出量を売上高で除して算出されるため、変数の共線性が推定結果に影響する可能性がある。そこで、企業規模を総資産の対数値に置き換えて再推定した。その結果、炭素税および ETS の Between 係数は引き続き負で有意となり、炭素税と GDP の交差項も正で有意であった。一方、補助金および複合政策については有意な関係が確認されず、主要な結論は企業規模の定義を変更しても維持された（付録 E)。

さらに、パス解析に用いた再生可能エネルギー利用比率の開示企業にサンプルを限定し、主分析を再推定した。各政策変数の係数の符号は主分析とおおむね一致したものの、統計的有意性は確認されなかった。この結果には、サンプル数の減少による検出力の低下に加え、再生可能エネルギー情報を開示する企業が企業全体を代表していない可能性が関係していると考えられる（付録 F)。したがって、主分析の結果は企業規模の定義に対しては頑健である一方、再エネ開示企業への一般化には慎重な解釈が必要である。

5. 結論・政策提言

5.1　結論

本研究は、2018 年から 2024 年までの欧州 19 か国の製造業企業を対象に、脱炭素政策と企業の CO_2排出強度との関係を検証した。

分析から三つの結果を得た。第一に、炭素税と ETS の Between 係数は負で有意であり、平均的な炭素価格が高い国ほど企業の CO_2排出強度が低い傾向が確認された。一方、炭素税の Within 係数、環境補助金および炭素税と補助金の交差項は有意ではなかった。第二に、炭素税と GDP の交差項は正であり、炭素税と CO_2排出強度との負の関係は経済規模が大きいほど弱まる傾向が示された。一方、環境補助金と GDP の交差項は有意ではなかった。第三に、炭素税について、再生可能エネルギー利用の増加を介した負の間接経路が確認され、DTC 理論と整合的な結果が得られた。

5.2　政策的示唆

本研究の結果から政策提言を三点行う。

第一に、炭素価格制度は、企業が将来の炭素費用を設備投資に織り込めるよう、安定的かつ予見可能に運用する必要がある。炭素税では複数年の課税計画を提示し、ETS では価格変動や無償配分に関する不確実性を抑え、低炭素投資を継続的に促す価格シグナルを形成することが重要である。

第二に、炭素税の価格経路は、他国の水準だけでなく、各国の経済規模、制度運営コストおよび企業の反応を踏まえて設定する必要がある。特に大規模経済では、制度上の摩擦による価格シグナルの減衰を考慮し、より高い税率が必要な可能性があるが、税率の調整以外にも課税範囲、免除・還付措置および監視・執行体制を一体として設計することが求

められる。

第三に、環境補助金は支出総額ではなく、企業の削減成果に基づいて評価すべきである。対象を再生可能エネルギー、省エネルギー設備および生産工程の低炭素化に限定し、受給企業、資金用途および排出削減実績を追跡した上で、支援の継続または終了を判断する仕組みが必要である。

以上より、移行初期には対象と期間を限定した補助金により低炭素技術とグリーン産業の形成を支援し、技術の普及に伴って政策の中心をカーボンプライシングへ移すことが望ましい。初期段階では移行費用の軽減を、長期的には予見可能な炭素価格による効率的な排出削減を重視する段階的な政策設計が求められる。

5.3　研究上の限界と今後の課題

本研究には三つの限界がある。第一に、炭素税を製造業企業に一律に対応させており、企業・業種ごとに異なる制度の適用範囲、免除措置およびETS排出枠の無償配分を考慮できていない。第二に、環境情報を継続的に開示する企業を対象としているため、サンプルに選択バイアスが存在する可能性がある。第三に、補助金変数が国全体の環境支出を表す指標であり、企業による実際の受給額や用途を把握できない。今後は、企業別の政策曝露度と補助金受給データを用いるとともに、再生可能エネルギー以外の削減経路も検証する必要がある。

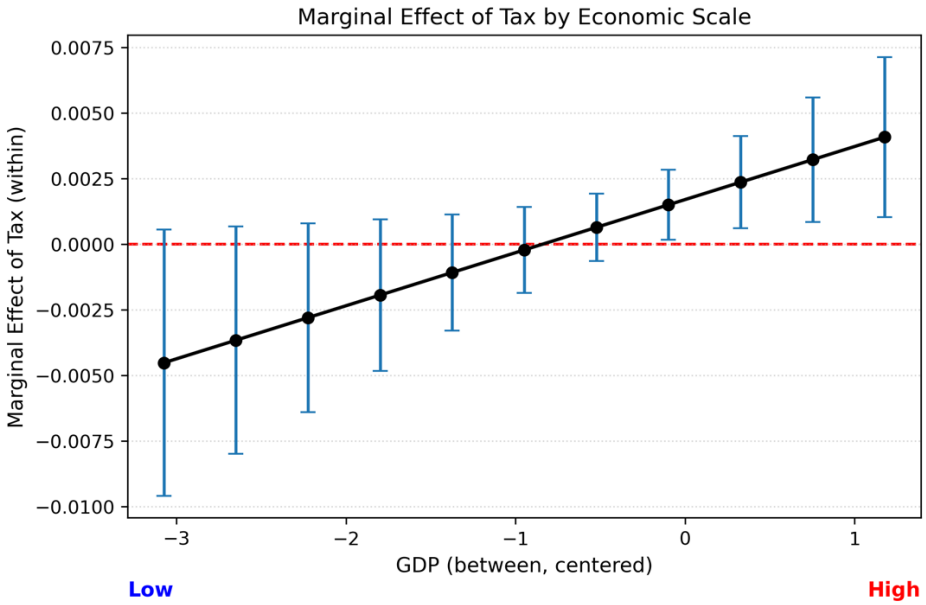
付録 A. 国別の分析対象企業数

国名	主分析	パス解析
オーストリア	14	7
ベルギー	14	11
イギリス	114	35
デンマーク	27	18
フィンランド	28	14
フランス	55	25
ドイツ	71	32
ギリシャ	4	0
アイルランド	18	13
イタリア	50	30
ルクセンブルク	5	0
オランダ	15	8
ノルウェー	19	7
ポーランド	7	0
ポルトガル	5	3
スロベニア	3	0
スペイン	28	11
スウェーデン	53	33
スイス	54	33
合計	584	280

付録 B.　記述統計

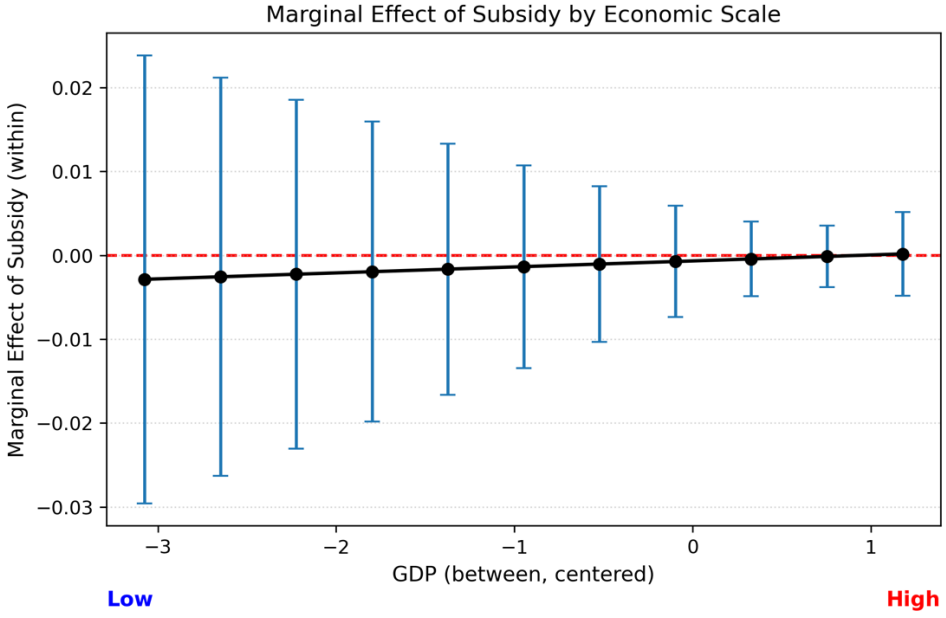
変数	平均値	標準偏差	最小値	最大値	観測数
CO_2排出強度（対数値）	3.519	1.782	-12.278	9.631	4,088
炭素税導入ダミー	0.662	0.475	0	1	84
炭素税	48.216	41.718	0	141.155	84
ETS	40.407	34.066	5.645	98.558	21
環境補助金割合（×1000）	1.878	3.296	0	14.343	133
企業規模（総売上高の対数値）	21.407	1.709	16.517	26.517	4,088
負債株式比率（IHS 変換後）	4.296	1.693	-10.446	10.744	4,088
ROA	4.991	7.726	-35.795	46.030	4,088
海外売上比率	0.715	0.266	0	1	4,088
国有企業ダミー	0.0086	0.092	0	1	4,088
再生可能エネルギー利用比率	0.302	0.250	0	1	1,960
GDP（総 GDP の対数値）	27.130	0.098	24.701	29.170	133

付録 C1. 経済規模別にみた炭素税の Within 成分の限界効果



注：本図は、中心化した GDP の Between 成分の各水準において、各国内の炭素税価格の変化から推定される限界効果と 95%信頼区間を示す。推定は表 3 の Mundlak-hybrid model に基づく。標準誤差は国レベルでクラスタリングを実施した。

付録 C2. 経済規模別にみた環境補助金の Within 成分の限界効果



注：本図は、中心化した GDP の Between 成分の各水準において、各国内の環境補助金割合の変化から推定される限界効果と 95%信頼区間を示す。推定は表 3 の Mundlak-hybrid model に基づく。標準誤差は国レベルでクラスタリングを実施した。

付録 D. ブートストラップによる間接効果の推定結果

変数	間接効果（a×b）	95% 信頼区間(下限)	95% 信頼区間(上限)
炭素税	−0.00062	−0.00131	−0.00011
ETS	0.000284	−0.00046	0.00115
環境補助金	−0.00123	−0.00457	0.00159

付録 E. 企業規模の代替指標として総資産を用いたロバストネスチェック

効果区分	変数	(1)	(2)	(3)
Between	炭素税導入ダミー	0.0627	0.1604	0.1604
	炭素税	−0.3746**	−0.0091**	−0.0091**
	ETS	−0.0522***	−0.0452**	−0.0452**
	環境補助金割合	0.1005	0.0282	0.0282
	GDP	−0.2435*	−0.2144*	−0.2144*
	ROA	−0.0161**	−0.0161**	−0.0161**
	負債株式比率	0.0388	0.0388	0.0388
	企業規模（売上高）	0.1344**	0.1344**	0.1344**
	海外売上比率	1.2304***	1.2304***	1.2304***
	国有企業ダミー	1.0574	1.0574	1.0574
Within	炭素税	0.0002	0.0016**	0.0002
	環境補助金割合	0.0012	0.0005	0.0014
	ROA	−0.0078***	−0.0078***	−0.0078***
	負債株式比率	0.0093	0.0086	0.0093
	企業規模（売上高）	−0.0732	−0.0722	−0.0732
	海外売上比率	−0.2917	−0.2892	−0.2915
	国有企業ダミー	−0.0000***	−0.0000***	0.0000***
Between × Between	炭素税 × 補助金	0.1885		
Within × Between	炭素税 × GDP		0.0022**	
	補助金 × GDP			−0.0004
定数項		5.8432***	5.7995***	5.7969***
年固定効果		Yes	Yes	Yes
観測数		4,088	4,088	4,088
決定係数（R^2）		0.101	0.101	0.101

注：列（1）は炭素税と環境補助金割合の交差項、列（2）は炭素税と GDP の交差項、列（3）は環境補助金割合と GDP の交差項を含む。連続する政策変数は、推定前に平均 0、標準偏差 1 となるよう Z 標準化した。交差項は、多重共線性を緩和するため、残差中心化した成分を用いて作成した。標準誤差は国レベルでクラスタリングした。

* p < 0.1、** p < 0.05、*** p < 0.01

付録 F. 再生可能エネルギー利用比率の開示企業に限定したロバストネスチェック

効果区分	変数	(1)	(2)	(3)
Between	炭素税導入ダミー	0.0250	−0.0070	−0.0070
	炭素税	−0.1320	−0.0028	−0.0028
	ETS	−0.0036	−0.0056	−0.0056
	環境補助金割合	−0.0044	0.0256	0.0256
	GDP	−0.1188	−0.1304	−0.1304
	ROA	−0.0334**	−0.0334**	−0.0334**
	負債株式比率	0.0697	0.0697	0.0697
	企業規模（売上高）	−0.0191	−0.0191	−0.0191
	海外売上比率	1.1913**	1.1913**	1.1913**
	国有企業ダミー	0.1560	0.1560	0.1560
Within	炭素税	−0.0010	−0.0010	−0.0010
	環境補助金割合	−0.0044	−0.0044	−0.0084
	ROA	−0.0104**	−0.0104**	−0.0104**
	負債株式比率	0.0142	0.0142	0.0143
	企業規模（売上高）	−0.4006***	−0.4006***	−0.4001***
	海外売上比率	−0.2034	−0.2033	−0.2059
	国有企業ダミー	0.0000*	−0.0000*	0.0000
Between × Between	炭素税 × 補助金	−0.0602		
Within × Between	炭素税 × GDP		0.0000	
	補助金 × GDP			0.0055
定数項		3.9305***	4.1237***	4.1243***
年固定効果		Yes	Yes	Yes
観測数		1,960	1,960	1,960
決定係数（R^2）		0.058	0.058	0.058

注：列（1）は炭素税と環境補助金割合の交差項、列（2）は炭素税と GDP の交差項、列（3）は環境補助金割合と GDP の交差項を含む。連続する政策変数は、推定前に平均 0、標準偏差 1 となるよう Z 標準化した。交差項は、多重共線性を緩和するため、残差中心化した成分を用いて作成した。標準誤差は国レベルでクラスタリングした。

* p < 0.1、** p < 0.05、*** p < 0.01

＜参考文献＞

Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, and David Hemous. 2012. "The Environment and Directed Technical Change." *American Economic Review* 102(1):131–66. doi:10.1257/aer.102.1.131.

Aghion, Philippe, Antoine Dechezleprêtre, David Hémous, Ralf Martin, John Van Reenen, Daron Acemoglu, Robin Burgess, Michael Greenstone, John Hassler, Rebecca Henderson, and Ken Judd. 2016. "Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry." *Journal of Political Economy* 124(1). doi:10.1086/684581.

Ambec, Stefan, Mark A. Cohen, Stewart Elgie, and Paul Lanoie. 2013. "The Porter Hypothesis at 20: Can Environmental Regulation Enhance Innovation and Competitiveness?" *Review of Environmental Economics and Policy* 7(1):2–22. doi:10.1093/reep/res016.

Andersson, Julius J. 2019. "Carbon Taxes and CO2 Emissions: Sweden as a Case Study." *American Economic Journal: Economic Policy* 11(4):1–30. doi:10.1257/pol.20170144.

Baron, Reuben M., and David A. Kenny. 1986. "The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations." *Journal of Personality and Social Psychology* 51(6):1173–82. doi:10.1037//0022-3514.51.6.1173.

Bayer, Patrick, and Michä El Aklin. 2020. "The European Union Emissions Trading System Reduced CO2 Emissions despite Low Prices." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117:8804–12. doi:10.1073/pnas.1918128117.

van den Bergh, J., J. Castro, S. Drews, F. Exadaktylos, J. Foramitti, F. Klein, T. Konc, and I. Savin. 2021. "Designing an Effective Climate-Policy Mix: Accounting for Instrument Synergy." *Climate Policy* 21(6):745–64. doi:10.1080/14693062.2021.1907276.

Best, Rohan, Paul J. Burke, and Frank Jotzo. 2020. "Carbon Pricing Efficacy: Cross-Country Evidence." *Environmental and Resource Economics* 77(1):69–94. doi:10.1007/s10640-020-00436-x.

Colin Cameron, A., and Douglas L. Miller. 2015. "A Practitioner's Guide to Cluster-Robust Inference." *Journal of Human Resources* 50(2):317–72. doi:10.3368/jhr.50.2.317.

Compernolle, Tine, Peter M. Kort, and Jacco J. J. Thijssen. 2022. "The Effectiveness of Carbon Pricing: The Role of Diversification in a Firm's Investment Decision."

Energy Economics 112. doi:10.1016/j.eneco.2022.106115.

Dechezleprêtre, Antoine, and Misato Sato. 2017. "The Impacts of Environmental Regulations on Competitiveness." *Review of Environmental Economics and Policy* 11(2):183–206. doi:10.1093/reep/rex013.

Imai, Kosuke, Luke Keele, and Teppei Yamamoto. 2010. "Identification, Inference and Sensitivity Analysis for Causal Mediation Effects." *Statistical Science* 25(1):51–71. doi:10.1214/10-STS321.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report.* edited by P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, A. Birt, M. Ha, D. J. A. Orendain, L. Ignon, S. Park, Y. Park, A. Reisinger, D. Cammaramo, A. Fischlin, J. S. Fuglestvedt, G. Hansen, C. Ludden, V. Masson-Delmotte, J. B. R. Matthews, K. Mintenbeck, A. Pirani, E. Poloczanska, N. Leprince-Ringuet, and C. Péan. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

International Energy Agency (IEA). 2020. *The Role of CCUS in Low-Carbon Power Systems*.

Mackinnon, David P., Chondra M. Lockwood, Jeanne M. Hoffman, Stephen G. West, and Virgil Sheets. 2002. "A Comparison of Methods to Test Mediation and Other Intervening Variable Effects." *Psychol Methods* 7:1–35. doi:10.1037/1082-989X.7.1.83.

Mundlak, Yair. 1978. "On the Pooling of Time Series and Cross Section Data ON THE POOLING OF TIME SERIES AND CROSS SECTION DATA'." *Econometrica* 46(1):69–85. doi:https://doi.org/10.2307/1913646.

Newell, Richard G., William A. Pizer, and Daniel Raimi. 2014. "Carbon Markets: Past, Present, and Future." *Annual Review of Resource Economics* 6(1):191–215. doi:10.1146/annurev-resource-100913-012655.

Porter, Michael E., and Claas Van Der Linde. 1995. *Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship*. Vol. 9.

Rafaty, Ryan, Geoffroy Dolphin, and Felix Pretis. 2025. "Carbon Pricing and the Elasticity of CO2 Emissions." *Energy Economics* 144. doi:10.1016/j.eneco.2025.108298.

Schunck, Reinhard. 2013. *Within and between Estimates in Random-Effects Models: Advantages and Drawbacks of Correlated Random Effects and Hybrid Models*. Vol. 13. doi:10.1177/1536867X1301300105.

Segerson, K. 2013. “Price Instruments.” Pp. 185–92 in *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics*. Vols. 3–3. Elsevier Inc.

Slemrod, Joel, and Shlomo Yitzhaki. 2002. “Tax Avoidance, Evasion, and Administration.” *Handbook of Public Economics* 3:1423–70. doi:10.1016/S1573-4420(02)80026-X.

Stechemesser, Annika, Nicolas Koch, Ebba Mark, Elina Dilger, Patrick Klösel, Laura Menicacci, Daniel Nachtigall, Felix Pretis, Nolan Ritter, Moritz Schwarz, Helena Vossen, and Anna Wenzel. 2024. “Climate Policies That Achieved Major Emission Reductions: Global Evidence from Two Decades.” *Science* 385(6711):884–92. doi:10.1126/SCIENCE.ADL6547/SUPPL_FILE/SCIENCE.ADL6547_SM.PDF.

Tello, Witson Peña. 2025. “Policy Interactions and Electricity Generation Sector CO2 Emissions: A Quasi-Experimental Analysis.” *Energy Policy* 198. doi:10.1016/j.enpol.2024.114434.

UNFCCC. 2015. *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement Text English*.

UNFCCC. 2024. *Sharm El-Sheikh Mitigation Ambition and Implementation Work Programme (Decision -/CMA.6)*.

Vidal-Meliá, Lidia, Eva Camacho-Cuena, and Miguel Ginés-Vilar. 2023. “Market Size Asymmetry and Strategic Environmental Policy in a Cournot Model.” *Frontiers in Environmental Economics* 2. doi:10.3389/frevc.2023.1099336.