

京都大学大学院経済学研究科  
再生可能エネルギー経済学講座  
ディスカッションペーパー

ドイツにおける発送電分離が再生可能エネルギーの導入に与えた影響  
—送電会社の所有分離のインパクト—

Ownership unbundling of transmission system operator and renewable energy  
development in Germany



2019年7月16日

16<sup>th</sup> July 2019

京都大学大学院経済学研究科  
博士後期課程  
杉本康太

**Kota Sugimoto**  
Graduate School of Economics,  
Kyoto University



## ドイツにおける発送電分離が再生可能エネルギーの導入に与えた影響 —送電会社の所有分離のインパクト—

### Ownership unbundling of transmission system operator and renewable energy development in Germany

京都大学大学院経済学研究科 博士後期課程

杉本康太 (Kota Sugimoto)

Graduate School of Economics, Kyoto University

#### Abstract:

In Japan, Vertically Integrated electric Utility (VIU) will legally unbundle its transmission and distribution company by 2020. Meanwhile, many European countries have already implemented ownership unbundling of Transmission System Operator (TSO) from incumbent utilities. A holding company, former VIU, can still control and influence decision making of subsidiary's transmission companies under legal unbundling. Consequently, renewable energy development by non-utility generation companies may be prevented, which was one of the concern European Commission favored ownership unbundling over legal unbundling.

This paper uses Difference-in-Difference estimator combined with Propensity Score Matching and Mahalanobis Distance Matching to estimate causal effect of ownership unbundling of TSO in Germany. I exploit the fact that there is an ownership unbundled TSO, TenneT and two other legally unbundled TSOs, Amprion and Transnet BW, operating in 9 states after 2010. The result indicates that the ownership unbundling by TenneT from E-ON did not increase solar and biomass power plant deployment but did increase on-shore wind power generation after 4-5 years of implementation. The rapid growth of wind energy development in Germany, especially in Tennet area, can be explained not only by national policies such as priority connection, shallow cost system for necessary grid upgrades by renewable interconnection, and compensation of missed revenue by curtailment in Renewable Energy Act, but also by ownership unbundling.

**Keywords:** vertical separation, transmission unbundling, renewable energy generation, propensity score matching, difference-in-difference

#### 要旨

日本では、2020年までに従来垂直統合であった電力会社の送配電部門を別会社させる法的分離の実施が予定されている。一方でヨーロッパの多くでは、送電会社を第三者に売却する所有分離が行われた。法的分離では、垂直統合事業者に自らの保有する送電会社の送電線を用いて自社の発電会社を優遇し、他社の発電事業を差別的に取り扱うインセンティブを残すため、新規に参入する発電事業者は系統接続および系統運用面で差別を受け、結果的に再エネ導入が阻害される可能性がある。

本研究では、発送電分離の程度が異なる東西の送電会社（TenneT社と Amprion社と Transnet BW社の運用エリア）が系統運用を行うドイツの9つの州を分析対象に、傾向スコアマッチングおよびマハラノビス距離によるマッチングと差の差の分析を組み合わせることで、所有分離の実施による再生可能エネルギー導入への影響評価を行った。分析の結果、ドイツにおいて所有分離の実施は、太陽光発電に関しては、法的分離を強化した送電会社（Amprion社と Transnet BW社）が運用するエリアでの導入容量と統計的に有意な差がないことがわかった。しかし所有分離は、バイオマス発電の導入を減少させ、実施から5年前後に陸上風力発電を増加させていることがわかった。

キーワード： 発送電分離、所有分離、再生可能エネルギー、傾向スコアマッチング、差の差の分析

(2019年7月1日受理)

## 1. はじめに

東日本大震災後の電力システム改革の結果、日本では2020年までに発電・送電・配電・小売をこれまで一貫して担っていた垂直統合型の電力会社の送配電部門を別会社（別法人化）させる法的分離の実施が予定されている。一方で、欧米では法的分離以上の発送電分離が既に実施されている。米国では、送電の運用を新たに設立した非営利組織に自主的に委ねさせた（機能分離と呼ばれる）のに対し、ヨーロッパでは2009年の第三次欧州指令で、送電系統運用者(Transmission System Operator: TSO)を第三者に売却する「所有（権）分離<sup>1</sup>」の実施が求められた。

法的分離は、垂直統合事業者に自らの保有する送電会社の送電線を用いて自社の系列内の発電会社を優遇し、他社の発電事業者を差別的に取り扱うインセンティブを残す(Newbery 2000; van Koten and Ortmann 2008)。火力発電や原子力発電が抱える外部費用の不十分な内部化が、再生可能エネルギー（以下、再エネ）電源投資への阻害要因になっていることは広く知られている(Neuhoff 2005; Hu et al. 2018; Newbery et al. 2018)。しかし、垂直統合事業者が保有する発電会社と、独立した発電会社との間の公平な競争環境の未整備もまた、再エネ導入への阻害要因になり得る。したがって、これから法的分離を実施する日本にとって、法的分離が不十分だという反省から欧州で実施された所有分離が、再エネの導入に与えた影響を解明する意義は大きい。

日本の法的分離実施後のデータは現状は利用可能でないものの、欧米では法的分離以上の分離を既に終えているため、分離前後のデータを用いた観察研究が可能である。Sugimoto (2019)では、アメリカの機能分離を行った州と未実施の州を比較することで、機能分離が陸上風力の導入と正の相関があることを明らかにした。本研究では、ドイツを対象に、傾向スコアマッチングと差の差の分析(Difference-in-Difference: DID)を組み合わせることで、所有分離の実施による再エネ導入への影響評価を行う。

欧州連合(EU)加盟国においてTSOを所有分離した国は多いが、もともと国営の電力会社が保有していたケースが多い(Meletiou, Cambini, and Masera 2018)。民営の電力会社を持つ日本にとっては、そのような事例はあまり参考にならない可能性が高い。一方でドイツには複数の民間経営のTSOがあり、発送電分離の実施度合いに差があるので、その差を生かして発送電分離の影響を識別できる。これがドイツを分析対象に選んだ理由だ。

発送電分離は再エネに効果がないと示す先行研究が1国単位の集計データを用いる中で(後藤・丸山 2012; Gugler, et al. 2017)、本研究は郡単位のマイクロデータを用いて、再エネの電源種別ごとに所有分離の効果を識別した初めての実証研究である。さらに再エネの導入容量と共変量の間関数形の仮定を必要としないセミパラメトリ

<sup>1</sup> 所有分離の一般的なメリット・デメリットについては水谷(2013)、Pollitt(2008)や Brunekreeft(2015)を参照。



ックな方法を用い、DID に複数のマッチング手法を組み合わせたことでより信頼性の高い因果推論を実施した点も本研究の特色である。

世界全体に目を転じると、発送電分離を本格的に実施していない国は多く、送電会社の所有と運用のあり方がどのように再エネの導入に影響を与えるのかは学術的にまだ明らかになっていない(Chawla and Pollitt 2013)。また、再エネの導入を直接的に図る政策の効果に比べて、規制緩和や市場競争が再エネの導入に与える影響については見過ごされがちである(Haas et al. 2011)。そこで本研究は、今後再エネの大量導入を目指す国々のエネルギー政策担当者に示唆を与える、発送電分離の影響についてのエビデンスを提示する。

本稿の以下の通りである。第 2 節では発送電分離という構造規制の背景について説明する。第 3 節では本分野の先行文献について述べる。第 4 節では分析に使用したデータと方法を説明する。第 5 節では分析結果を述べる。第 6 節では結論を述べる。

## 2. 背景

垂直統合された電力会社は、自身の保有する既存電源の販売電力シェアが減少し、自身の所有・運用する送電システムに変更をもたらすことが懸念されるとき、再エネの導入を阻害するインセンティブを持つ(Jacobsson and Bergek 2004; Neuhoff 2005; Sovacool 2009)。その場合、例えば新規参入者の発電所の系統接続に高額な接続費用を請求し、系統接続に時間をかけることで、実質的な参入障壁を築くことができる<sup>2</sup>。また、新規参入者との発電部門での競争を増加させるような送電線や連系線の投資にも消極的になると考えられる(Moselle 2008; van Koten and Ortman 2008; Puga and Lesser 2009)。

欧州では、2003 年の第 2 次欧州指令で送電会社の法的分離後が義務づけられた。しかし 2005 年に欧州委員会の競争総局により実施された Sector Inquiry (エネルギー事業者へのヒアリング調査) は、垂直統合事業者による送電を用いた他社への差別的行為などの競争阻害行為の存在が、依然として新規参入事業者、そして再エネ導入にとって問題となっていることを明らかにした(European Commission 2005; Eikeland 2011)。そこで欧州委員会は、2009 年の第三次指令で所有分離の実施を目指すことになった。

ただし、このとき欧州委員会は所有分離を加盟国に義務付けたわけではない。ドイツやフランス政府などが所有分離に反対した結果、所有分離か機能分離、または既存の法的分離に行為規制を加えた独立送電運用者 (Independent Transmission Operator: ITO) 化の 3 つの選択肢から選択することが求められた (European Commission 2010; 岡田・丸山 2014)。後藤ら (2013) は、ITO 化の下では、従来の法的分離に加えて様々な行為規制が課されているため、様々な親会社は送電事業に対

<sup>2</sup> フランスやスウェーデンでの事例としては Mignon and Bergek (2016)を参照。

して戦略的影響を及ぼすことができず、実質的に所有権分離との違いはほとんどないと述べている。現在のところ、欧州では ITO 化を強化し、機能分離か所有分離を強制するべきだとは考えていない (CEER 2016)。

しかしドイツの垂直統合事業者のうち 2 社は、結局送電会社の所有分離を実施した。そのうちの 1 社である E-ON 社は、欧州委員会の競争総局に不法カルテル行為を疑われ、調停交渉の結果、子会社の送電会社をオランダの国有企業 TenneT に売却することを 2009 年 11 月に発表し、2010 年 2 月に実施 (所有分離) した<sup>3</sup>。スウェーデンの国有企業である Vattenfall 社も、2010 年 3 月に送電会社をベルギーの民間 TSO である Elia とオーストラリアのインフラファンドである Industry Funds Management に対して売却し、送電会社は 50Hertz に改称された。所有分離の結果、どちらの送電会社も外国の資本によって所有・運用されていることになる。

もう 2 社の垂直統合事業者は、所有分離ではなく ITO 化を選択した。RWE 社は、子会社の Amprion 社の株式の 74.9%をドイツのメガバンクである Commerz 銀行グループ傘下の Commerz Real を主とする保険会社や、特別年金基金などから成るドイツの機関投資家コンソーシアムに売却することを 2011 年 7 月に発表し、2011 年 9 月に完了した (井上 2016)。この状態は完全に RWE から送電会社が所有分離したわけではないため、法的分離の強化とみされる。EnBW 社は TSO である Transnet BW を完全子会社として保有し続けている。図 2 をみると、ドイツ東部の送電系統を担う 2 社は所有分離、西部の 2 社は ITO 化を経験したことがわかる。本研究では、発送電分離の程度が異なる東西の境 (TenneT 社と Amprion 社および Transnet BW の運用エリア) に注目する。

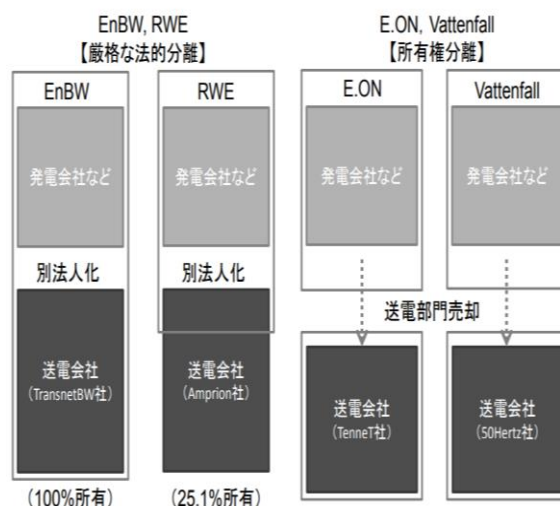


図 1 ドイツの 4 つの TSO の発送電分離の状況

(出所：後藤 et al. 2013)

<sup>3</sup> 以下の記述は Brunekreeft et al. (2014) および井上 (2016) を参照。

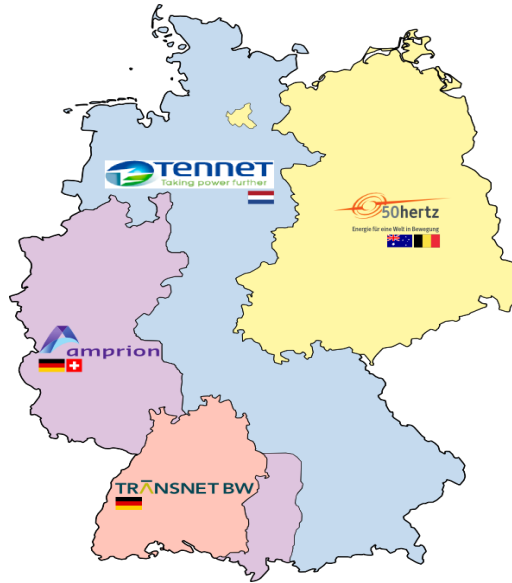


図2 各TSOの運用エリア

図3に示すように、ドイツは再エネの導入量が大幅に伸び続けており、エネルギー転換を着実に実現しようとしている。特に太陽光発電、バイオマス発電（以下の図ではバイオガスと表記されている緑色の部分）<sup>4</sup>、陸上風力発電の成長が近年特に著しい。本論文では、この3種類の再エネの導入容量に所有分離が影響を与えているかを検証する。

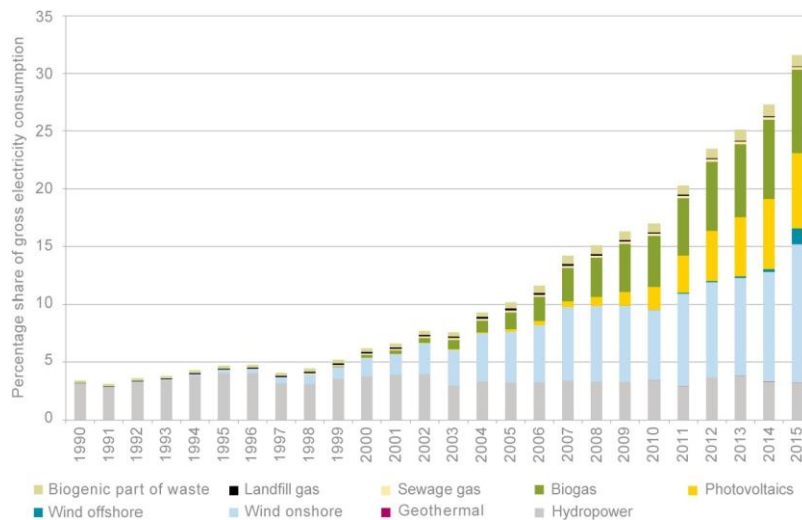


図3 ドイツの電源種別再エネ導入容量

(出所：Matschoss et al. 2019)

<sup>4</sup> ドイツのバイオマス発電で主体となるのは、バイオガスである。バイオガスは、農業や畜産で排出される家畜の糞尿やトウモロコシなどのエネルギー穀物などの有機系廃棄物を混ぜ、バクテリアの力で発酵させて作られるメタンと二酸化炭素入りのガスだ（梶山 2015）。数は多くないが、林業の製材所で余った木の屑をガス化させたり、木質ペレットを燃焼させて発電するケースもある（BMW 2019）。バイオガスは大抵熱電併給システム（Combined Heat and Power: CHP）で燃やされるため、熱エネルギーも生産している。

さらに特筆すべき点として、ドイツでは非垂直統合事業者であるサードパーティーの再エネ事業（市場）への参加が著しい。2013年時点で、太陽光発電と陸上風力発電の導入容量の3割は家庭や協同組合などの既存の電力会社以外の主体によって担われている(Brunekreeft, Buchmann, and Meyer 2016)。更にドイツでは営利企業だけではなく、立地地域の農家や協同組合による風車の所有が多い(Toke, Breukers, and Wolsink 2008)。対照的に、既存事業者による再エネ電源の所有は12%を占めるのみだ。既存の電力事業者が再エネを導入するインセンティブをあまり持たない理由は、「置換効果（共喰い効果）」で説明できる。既に火力発電所や原子力発電所を保有している事業者にとって、再エネの導入は既存の発電所の置き換えにしかならず、売電収入が劇的に増えることは望めないからだ。

では所有分離の実施は、送電会社のインセンティブを変化を通して再エネの増加をもたらしたのだろうか。全く影響がない可能性もある。ドイツでは、分散型再エネ電源の大半は配電線に接続されるため、系統への接続において重要な役割を果たすのは配電会社（Distribution System Operator: DSO）であって送電会社ではないとも考えられる<sup>5</sup>。竹濱（2015）によると、TSOが系統運用を担当するのは380kVと220kVの特別高圧送電線のみである（図4）。他方でDSOは高圧に分類される110kVと中圧の20kV、10kV、35kVの配電線、そして低圧である400V、230Vの配電線の系統接続を担当している。そしてヨーロッパでは、10万人以上の顧客を持つ配電会社は、第三次欧州指令により垂直統合事業者からの法的分離を実施している（European Commission 2010）。

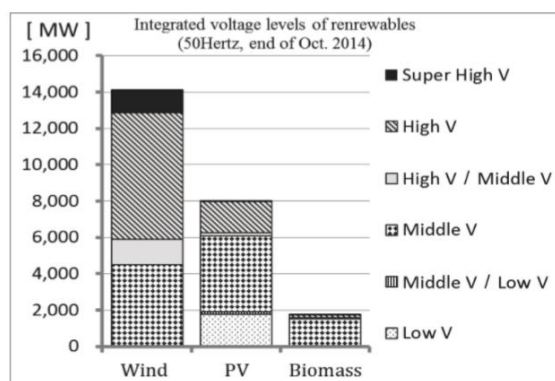


Fig.4 Voltage levels of renewables (50Hertz, Oct.2014).

#### 図4 陸上風力・太陽光発電・バイオマスが接続する系統の電圧

出所：竹濱（2015）

他にも、ドイツの再生可能エネルギー法（Erneuerbare-Energien-Gesetz: EEG）に定められている再エネ電源の優先接続規定（竹濱 2016）や、接続に伴う系統増強

<sup>5</sup> 日本と異なり、ヨーロッパでは送電会社と配電会社が分かれているケースが一般的である。



費用を発電事業者ではなく送電系統運用者が主に負担するシャロー方式 (Neuhoff 2005; 諸富 2015; 安田 2017)、出力抑制に対する逸失収入の補償などがあれば、発送電分離は法的分離に留まっても再エネは大幅に増加した可能性がある。実際、筆者が 2019 年に実施したドイツ・イギリスでの研究者へのヒアリングでは、上記の制度・規制があれば ITO に留まっても再エネの導入には問題ないだろうと予想する意見が多かった。

### 3. 先行研究のサーベイ

ヨーロッパの国単位で所有分離の影響を分析した Gugler, Rammerstorfer, and Schmitt (2013)では、従属変数に発電・送電・配電資産の合計投資額が用いられており、再エネの普及への影響は明らかにされていない。ヨーロッパの企業レベルのデータを用いて発送電分離がどの程度垂直統合の持つ費用節約を損なうか分析した Gugler et al. (2017)は、再エネの導入にとっては、垂直統合の便益を活用した方がいいと主張している。ただし分離前は社内で行われていた発電・送電間の協調関係が、電力システム改革で作り出される数々の電力取引市場によって代替された場合、推定されているほどの費用損失は実際には起こらない可能性がある。

ドイツの郡を対象に固定価格買取制度 (Feed-in-Tariff: FIT) が陸上風力発電の導入に与えた影響を実証した重要な先行研究である Hitaj and Löschel (2019)では、送電線の長さに郡の面積の比率を取ることで定義される「グリッド密度」を変数の一つに使用している。分析の結果、グリッド密度は 1996~1999 年の期間でのみ風力の導入容量と正の相関があるが、以後の期間 (~2010 年) では無相関であることを明らかにした。Hitaj の解釈では、「2000 年の EEG 改正により、再エネ発電事業者は系統への接続が保証され、TSO が必要な系統増強費用を負担することも義務付けられたため、2000 年以後は開発者が風力の立地場所を決定する際に系統接続費用はもはや考慮されなくなったためだ」という。つまり、いくら社会的に系統接続費用が高い地点でも、風さえ吹いていればディベロッパは開発を実施したということだ。その結果、ドイツでは風況の比較的良い北部を中心に、風車が満遍なく立地している。TSO が法的分離された状態でも、EEG の規定が強力に風力の開発を後押ししたという見方だ。

Goetzke and Rave (2016)や Lauf et al. (2019)も、ドイツの郡単位のデータを用いて風力発電の導入要因を分析し、風力開発のための土地の利用可能度や、エリアごとの風の強さを加味した風力発電事業の期待収益性が風力開発のパターンを説明する重要な要因であることを明らかにしている。

アメリカを対象にして同様のアプローチをとった研究では、グリッド密度が 1998 年から 2007 年の観察期間中、陸上風力発電の導入容量と正の相関があることを明らかにした(Hitaj 2013)。この結果について Hitaj は、アメリカではドイツとは対照的に再エネ開発者に系統増強費の大半の負担が課されているため、風力開発者は送電線



の密度が高いエリアを立地場所を選んでいると解釈している。また、この研究では既存の垂直統合事業者の代わりに非営利の広域送電系統運用組織（Regional Transmission Operator: RTO）が運用する送電線の長さや陸上風力発電の導入容量の間にも正の相関があることも明らかにされており、アメリカでは送電系統の機能・運用分離により、再エネが増加していることが示唆される。

Schaffer and Brun (2015)や Dharshing (2017)は、ドイツの太陽光発電の導入水準の決定要因を空間計量経済学の方法を用いて分析し、家庭用の太陽光発電の導入にはエリアごとの日射量や期待収益率だけではなく、地域の住宅密度、所得、教育水準、低い失業率に相関があることを明らかにしている。さらに興味深い点として、Dharshing (2017)や Rode and Weber (2016)は、ドイツの家庭用の屋根置太陽光発電の導入が特定の地域に集中して立地している現象は、ピア効果（peer effect）や波及効果（spillover effect）で説明できることも示している。すなわち近隣の住民が太陽光を設置していると、他の住民も真似して太陽光発電を導入しやすいということだ。

ただしこれらの研究<sup>6</sup>では、いずれも発送電分離をモデルに含めていない。風力に関して Hitaj and Löschel (2019)は「TSOは、EEGの規定を遵守してディベロッパの接続要求と費用負担に応じてきた」と想定している。しかし法的分離下では、垂直統合事業者の子会社である TSO は、他社による再エネの導入に消極的であった可能性がある。逆に言えば、送電会社を垂直統合事業者から所有分離した場合、送電会社がより再エネの導入に積極的になった可能性があるが、この仮説を統計的に検証した研究はない。そこで本研究では、ドイツでは送電会社（TSO）のうち2社が所有分離を実施し、もう2社は法的分離を選択したという状況に注目し、以下に述べる方法で分析を行う。

## 4. データと分析方法

### 4.1 データ

本研究では、2010年に所有分離を実施した TSO である TenneT と、所有分離を実施しなかった TSO である Amprion と Transnet BW の両方が州内で系統運用を行っている9つの州（バイエルン州、ヘッセン州、ノルトライン・ウェストファーレン州、ニーダーザクセン州、バーデンビュルテンベルク州、シュレスヴィヒホルスタイン州、ラインラント・プファルツ州、ザールラント州、ブレーメン州）を分析対象にする（図2、図5）。Tennet がドイツで系統の運用をカバーする面積は約14万km<sup>2</sup>、Amprion と Transnet BW がカバーする面積はそれぞれ約8万km<sup>2</sup>と約3.5万km<sup>2</sup>であり、合計するとちょうど比較対象である Tennet と同様の面積になる。ブランデンブルク州、ザクセン州、ザクセン-アンハルト州、チューリンゲン州、ベルリン州、メクレンブルク・フォアポンメルン州の6つの州をカバーし、合計の面積は約10.5万km<sup>2</sup>を管

<sup>6</sup> ドイツのバイオマス（バイオガス）発電所の立地場所の決定要因について計量経済学的手法を用いて分析した先行研究は、著者の調べた限りでは存在しなかった。

轄する 50Hertz を除き、この 3 社の TSO でドイツ全体の 7 割に当たる国土をカバーしている<sup>7</sup>。



図5 Amprion の系統運用担当エリア

出所: Amprion, Annual report 2016, p5

分析期間は 2005 年～2016 年の 12 年間だ。この方法をとることで、ドイツ全土で再エネの導入を推進する効果があると考えられる再生可能エネルギー法 (EEG) や、規制機関であるネットワーク規制庁創設などの国レベルの重要な要因を除いた上で、発送電分離の影響を識別できる。

結果変数には、ドイツの各送電会社が公開している再エネ発電所の新規導入容量 (kW) のデータを郡 (County、ドイツ語では Kreis または Kreisfreie Stadt) 単位に集計し、運転開始日を基準に年単位に集計したものを用いる (Netztransparenz.de 2019)。この 9 州には 2016 年時点で郡が 323 個存在する。郡単位でパネルデータを定義するためには、ある郡は所有分離を受けているか受けていないかのどちらか片方でなければならないため、この中で郡内に TenneT と Amprion または Transnet BW の運用する送電線がどちらも存在する市町村は分析から除いた。そのような郡は、太

<sup>7</sup> なおドイツ全土の面積約 357,400km<sup>2</sup>は、日本の国土約 378,000km<sup>2</sup>と近い。

陽光発電では 36 個、バイオマス発電では 25 個、風力発電では 14 個あった。ロバストチェックとして、これらの郡も含めた分析も行った。そこで得られた結果は、本文で報告する分析結果と同様のものではあった（分析結果は付録を参照）。

このデータに郡単位の人口密度、GDP、4 年に 1 回開催される連邦議会選挙における緑の党得票率、地価、消費電力量などの共変量データをドイツ連邦・州統計局から入手し、結合することでパネルデータを構築した。共変量の中で一部欠けているデータに対しては、前後のデータを用いて線形に内挿した。期間中郡の統廃合が行われたケースでは、2016 年度の状態を基準にデータを修正した。

表 1 は結果変数と共変量の記述統計量を表す。いずれの再エネでも、処置群（トリートメントグループ）である Tennet エリアの方が導入容量の平均値が高いことがわかる。人口密度や消費電力量は、制御群（コントロールグループ）である Amprion と Transnet BW エリアの方が大きい。GDP や緑の党得票率は、両グループでそれほど大きい差はない。

表 1 記述統計量

Variable	Treatment group					Control group				
	標本数	Mean	Std. Dev.	Min	Max	標本数	Mean	Std. Dev.	Min	Max
kW <sub>solar</sub>	1,656	7326.917	11518.58	11.36	132532	1,908	6,034.67	8,705.93	0.00	93,269
人口密度	1,656	0.44	0.62	0.04	4.71	1,908	0.72	0.74	0.06	3.33
GDP	1,656	5.42	8.92	0.87	109.57	1,908	7.91	7.31	1.00	63.46
緑の党	1,656	8.69	3.01	3.00	20.70	1,908	9.34	3.43	3.60	26.20
地価	1,656	0.10	0.13	0.00	2.15	1,908	0.15	0.11	0.00	0.98
消費電力量	1,644	1.44	2.29	0.08	22.35	1,908	2.88	4.03	0.00	34.71
kW <sub>biomass</sub>	1,740	1,320.58	2,683.51	0.00	29,288	1,836	680.33	1,752.34	0.00	20,370
人口密度	1,740	0.43	0.61	0.04	5	1,836	0.73	0.74	0.06	3.33
GDP	1,740	5.44	8.71	0.87	109.57	1,836	7.88	7.36	1.00	63.46
緑の党	1,740	8.63	2.99	3.00	20.70	1,836	9.34	3.44	3.60	26.20
地価	1,740	0.10	0.13	0.00	2.15	1,836	0.15	0.11	0.00	0.98
消費電力量	1,728	1.46	2.24	0.08	22.35	1,836	2.90	4.10	0.00	34.71
kW <sub>wind</sub>	1,836	6,575.50	24,606.49	0.00	576,788	1,884	3,205.79	10,139.84	0.00	131,945
人口密度	1,836	0.44	0.62	0.04	4.71	1,884	0.71	0.74	0.06	3
GDP	1,836	5.69	9.58	0.87	110	1,884	7.82	7.28	1.00	63.46
緑の党	1,836	8.65	3.02	3.00	20.70	1,884	9.28	3.42	3.60	26.20
地価	1,836	0.11	0.13	0.00	2.15	1,884	0.15	0.11	0.00	0.98
消費電力量	1,824	1.48	2.22	0.08	22.35	1,884	2.92	4.06	0.00	34.71

人口密度の単位は 1000 人/m<sup>2</sup>、GDP の単位は 100 万ユーロ、緑の党得票率は%、平均地価の単位は 1000 ユーロ、消費電力量の単位は 100 万 MWh。トリートメントグループの消費電力量については、ニーダーザクセン州のヴォルフスブルク郡のデータが欠損しているため 12 個少なくなっている。



## 4.2 分析方法

本研究における処置 (Treatment) を、「9つの州に属するある郡  $i$  で送電網の系統運用を行う TSO (TenneT 社) が所有分離されたこと」と定義する。ここで  $D_i = \{0,1\}$  を、ある郡  $i$  が所有分離された TSO による系統接続・系統運用を受けたか否かを示すダミー変数とする。そして本研究における潜在的結果変数  $Y_i(D_i)$  を、郡  $i$  が所有分離された TSO により系統接続・系統運用を1年間受けた場合の再エネの導入容量を  $Y_i(1)$ 、所有分離されなかった TSO による系統接続・系統運用を1年間受けた場合の再エネの導入容量を  $Y_i(0)$  と定義する。本分析における処置効果は、比較対象である Amprion 社および Transnet BW 社が観察期間である 2005 年から 2016 年の間に所有分離を実施しなかったため、「発送電分離をベースとなる法的分離から所有分離に強化した場合の再エネの導入容量への影響」と定義される。

郡  $i$  が処置を受けた場合の処置効果  $Y_i(1) - Y_i(0)$  を把握するための根本的な問題は、郡  $i$  が処置を受けた場合の結果  $Y_i(1)$  と、受けなかった場合の結果  $Y_i(0)$  が、現実には片方しか観察できないという問題である。処置の割り当てをランダム化した比較実験ができれば、個体  $i$  の集合である集団の平均処置効果 ATE は、期待値をとって  $E[Y_i(1) - Y_i(0)]$  で計算できる。また、処置群における平均処置効果 (Average Treatment Effect on Treated: ATT) は、

$$ATT = E[Y_i(1) - Y_i(0)|D_i = 1] = E[Y_i(1)|D_i = 1] - E[Y_i(0)|D_i = 1] \quad (1)$$

となる。ランダム化されていない観察データでは、式 (1) 第二項の「処置群がもし処置を受けなかった場合の潜在的な結果の期待値」  $E[Y_i(0)|D_i = 1]$  は観察できないため、観察できる  $E[Y_i(0)|D_i = 0]$  で置き換えると、

$$\begin{aligned} ATT &= E[Y_i(1) - Y_i(0)|D_i = 1] \\ &= E[Y_i(1)|D_i = 1] - E[Y_i(0)|D_i = 0] \\ &\quad + \{E[Y_i(0)|D_i = 0] - E[Y_i(0)|D_i = 1]\} \quad (2) \end{aligned}$$

となる。しかし、 $\{E[Y_i(0)|D_i = 1] - E[Y_i(0)|D_i = 0]\}$  の部分が 0 にならない限り、推定値にバイアスが生じる。Rosenbaum and Rubin (1983) のアイデアは、 $E[Y(0)|D = 1]$  という観察できない欠損データを、制御群のうち共変量が処置群とできるだけ近いサンプルを探し出して代替値として補完するというものであった。この方法を用いれば、セレクションバイアス  $E[Y(0)|D = 1] - E[Y(0)|D = 0]$  を避け、観察できるデータだけを用いて ATT を推定できる (Caliendo and Kopeinig 2008; Dehejia and Wahba 1999)。ただし、この方法で ATT を推定するためには、「強く無視できる割り当て条件」と呼ばれる以下の仮定が成立する必要がある。

$$Y(1), Y(0) \perp D | X \quad (3)$$

かつ

$$0 < P(D = 1|X) < 1 \quad (4)$$

ここで、1つ目の条件は Unconfoundedness や条件付き独立などと呼ぶ。共変量  $X$  が等しい集団については、処置を受けるかどうか完全にランダムであることを意味する（星野・田中 2016）。2つ目をオーバーラップ条件という。これらが満たされているとき、セレクションバイアスを除去することができる。

Rosenbaum and Rubin (1983)は、上の2つの仮定が成り立つ場合、ある主体が処置を受ける確率  $P(D=1|X)$ を共変量を説明変数として用いて計算した傾向スコア  $P(X)$ で条件付けた場合にも、潜在的な結果変数と処置の割り当てが独立になることを示した。式で表すと以下のようなになる。

$$Y(1), Y(0) \perp D | P(X) \quad (5)$$

傾向スコアの使用により、処置群と制御群から共変量が似通ったサンプル同士を抽出する際に共変量が多いときに直面する「次元の呪い」を回避することができる。そして、傾向スコアマッチングを用いた  $ATT_{PSM}$  は、

$$ATT_{PSM} = E_{CP}\{E[Y(1)|D = 1, P(X)] - E[Y(0)|D = 0, P(X)]\} \quad (6)$$

と表せる。上記の CP とは、コモンサポートを意味し、処置群と対照群における傾向スコアのオーバーラップが存在する区間を意味する。傾向スコアマッチングとは、ロジットまたはプロビットモデルで推定したこのスコアが「近い」サンプル同士をマッチングさせ、ペアごとに結果変数の差をとり、ペアの数で平均を計算することによって因果効果を求める方法だ。

ただし上記の条件付き独立の仮定(式3)は現実に成立することは考えづらいため、本研究ではこの仮定を弱めた上で  $ATT$  が推定できる  $DID$  を用いる(Heckman, Ichimura, and Todd 1997; Smith and Todd 2005)。これにより、観察できない時間不変の共変量が処置の割り当てと結果変数に影響を与える可能性を許容する。このとき  $ATT_{DID}^{PSM}$  を推定するために必要な仮定は、以下のように表すことができる（星野 2009）。

$$E[Y_b(0) - Y_a | D = 1, P(X)] = E[Y_b(0) - Y_a | D = 0, P(X)] \quad (7)$$

ここで  $Y_b$ 、 $Y_a$  はそれぞれ処置前後の結果変数の値を表す。この仮定は、「観察できる共変量で条件づけたとき、郡  $i$  が処置の対象にならなかったときの経時変化が、2つのグループの間で等しい」という条件を意味する。

本研究では TenneT が所有分離を実施する前年の 2009 年の共変量データを用いて



ロジット分析で傾向スコアを計算し、最近傍 (Nearest-Neighbor) マッチングを用いて処置群と制御群をマッチングさせる。本研究では 2011 年以降の再エネの導入容量を、所有分離が行われた 2010 年の値との差分をとったものを結果変数に用いて  $ATT_{DID}^{PSM}$  を推定する。最近傍マッチングでは 1:1 マッチングを、リプレースメントありで行った。さらに結果の頑健性をみるために、傾向スコアではなくマハラノビス距離を用いたマッチング (Mahalanobis Distance Matching: MDM) による  $ATT_{DID}^{MDM}$  も推定する。STATA のコマンドは `teffects psmatch` および `teffects nnmatch` を使用した。さらにロバストチェックのため、Abadie (2005) が提案したセミパラメトリックに DID を推定する方法 (ABS) を実装したコマンド `absdid` も使用して  $ATT_{DID}^{ABS}$  も求めた (Houngbedji 2016)。

マッチングにより 2 群間の共変量がバランスしているかどうかテストするため、そしてオーバーラップをチェックするために `psmatch2` および `pstest` を使用した。バランステストの結果が表 2、3、4 である。最近傍マッチングの結果、多くの変数でバイアスが 10% 未満に減り、両群の共変量の平均値にも有意な差がなくなっていることがわかる。

表 2 太陽光発電の最近傍マッチングバランステスト結果

Solar	Unmatched (U)	Mean		%bias	%bias reduction	t-test	
	Matched (M)	Treated	Control			t-value	p-value
人口密度	U	0.44	0.72	-41.7		-3.55	0
	M	0.44	0.39	6.9	83.5	0.67	0.505
緑の党	U	10.48	10.90	-12.8		-1.1	0.274
	M	10.41	9.92	15	-16.8	1.42	0.158
地価	U	0.10	0.14	-43.4		-3.74	0
	M	0.10	0.09	6.5	85	0.57	0.567
GDP	U	4.88	7.25	-32.2		-2.78	0.006
	M	4.91	4.62	3.9	88	0.36	0.716
消費電力量	U	1.32	2.55	-42.1		-3.55	0
	M	1.33	1.45	-4.1	90.3	-0.43	0.667

**表 3 バイオマス発電の最近傍マッチングバランステスト結果**

Biomass	Unmatched (U)	Mean		%bias	%bias reduction	t-test	
	Matched (M)	Treated	Control			t-value	p-value
人口密度	U	0.43	0.73	-44.4		-3.81	0
	M	0.43	0.42	2.6	94.2	0.25	0.8
緑の党	U	10.40	10.90	-15.1		-1.29	0.197
	M	10.33	9.74	18.1	-20.1	1.71	0.087
地価	U	0.10	0.14	-43.8		-3.78	0
	M	0.10	0.08	15.1	65.6	1.46	0.144
GDP	U	4.90	7.23	-31.9		-2.76	0.006
	M	4.95	4.25	9.5	70.3	0.98	0.328
消費電力量	U	1.35	2.57	-41.7		-3.56	0
	M	1.36	1.57	-7.2	82.6	-0.79	0.429

**表 4 風力発電の最近傍マッチングバランステスト結果**

Wind	Unmatched (U)	Mean		%bias	%bias reduction	t-test	
	Matched (M)	Treated	Control			t-value	p-value
人口密度	U	0.43	0.71	-40.9		-3.59	0
	M	0.45	0.46	-1.7	95.8	-0.17	0.868
緑の党	U	10.43	10.83	-12.3		-1.08	0.28
	M	10.30	10.80	-15.2	-23.2	-1.24	0.217
地価	U	0.10	0.14	-34.2		-3.01	0.003
	M	0.11	0.10	3.6	89.4	0.32	0.752
GDP	U	5.15	7.17	-26		-2.29	0.022
	M	5.19	4.95	3.1	88.1	0.3	0.761
消費電力量	U	1.37	2.59	-42		-3.67	0
	M	1.41	1.43	-0.6	98.5	-0.08	0.94

DID を実施する上では、式 (7) の平行トレンドの仮定が成立していることが重要な前提条件になる (伊藤 2017)。以下の 3 つの図は、2005 年～2016 年の間に新規に導入された再エネ発電容量の年ごとの合計値をグループごとに表している。これを見ると、三者三様のトレンドが観察できる。

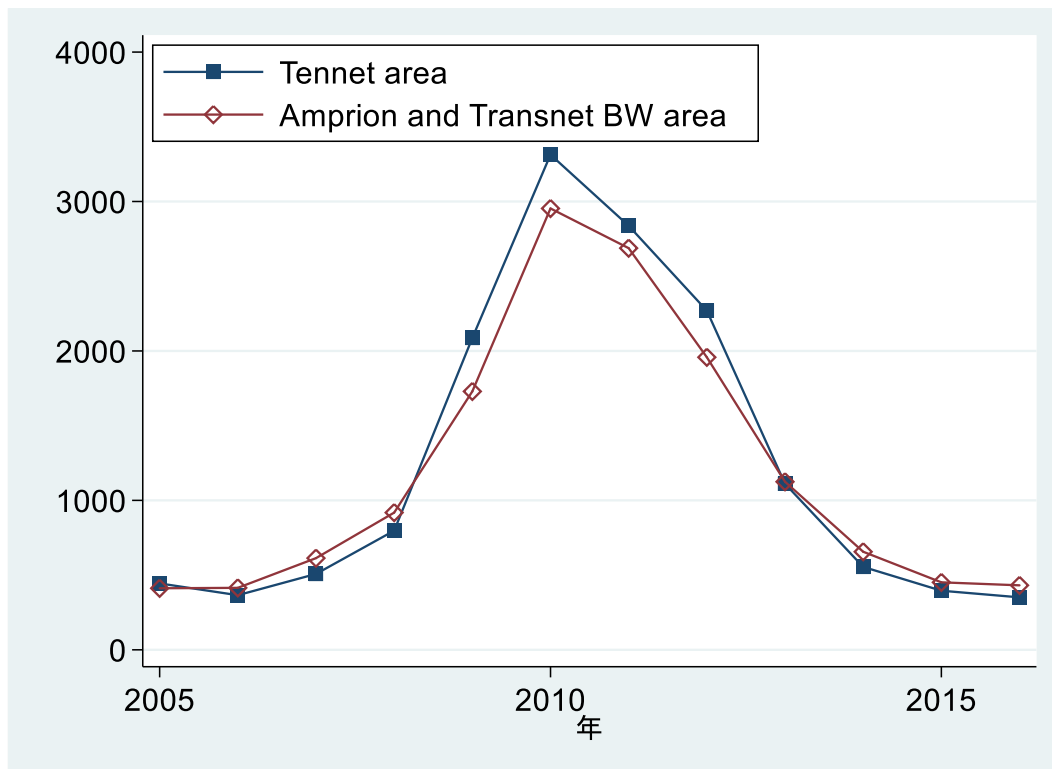


図 6 太陽光発電の新規導入容量 (MW)

太陽光発電に関しては、処置群である TenneT の送電運用エリアにおける導入容量のトレンドと、制御群である Amprion+Transnet BW の送電運用エリアにおける導入容量のトレンドが、ほとんど一致していることがわかる (図 6)。そして年間導入容量が 3GW にものぼるピークはどちらのグループも 2010 年であり、2010 年以前にかけて徐々に上昇した導入容量が、2010 年を境に減少している。2009 から 2012 年の間は、わずかに処置群の方が導入容量が多い。



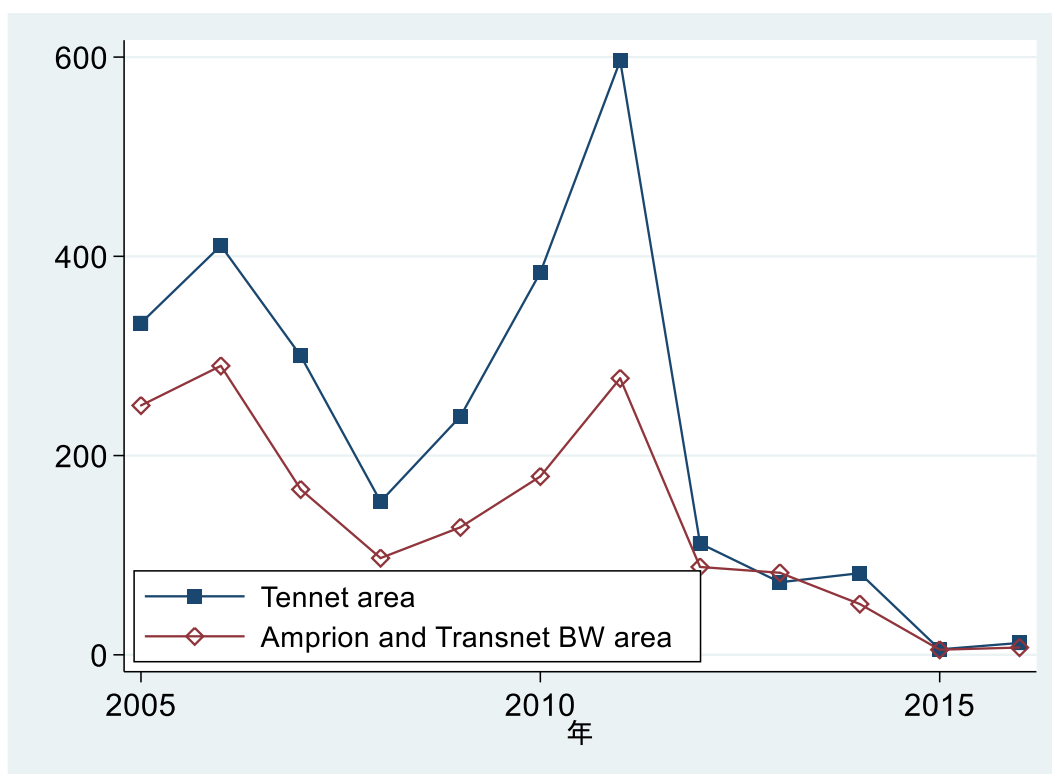


図7 バイオマス発電の新規導入容量 (MW)

次に図7のバイオマス発電をみると、介入年である2010年以前はどちらのグループもほぼ平行なトレンドが観察できる。太陽光発電と異なり、2008年に一度導入容量がどちらのグループでも大きく減少している。その後再び導入容量は上昇し、2011年には処置群では600MWが導入されたのに対し、制御群では約300MWと大きく差がついている。E-ONが子会社の送電会社をオランダの国有企業TenneTに売却したのは2010年2月であり、所有分離の実施がTenneTエリアでのバイオマス発電導入容量を一時的に増加させた可能性がある。

しかし2012年以降は、どちらのグループでも導入容量を大きく減少させ、2015年にはほぼ0近くになっている。この低調な開発動向は、2014年の再生可能エネルギー法の改正で、FITの支払い対象になる新設バイオマス発電所の容量が年間最大100MWまでに制限されたことが一因だと考えられる(Moris 2015)。再エネの中で太陽光発電や風力発電に比べ、バイオマス発電の発電費用が比較的高いことも背景にある(Appunn 2016)。FITは小型のバイオマス発電ほど買取価格が高くなるように設定されており、近年のバイオマス発電は小型化が進んでいる。このことも導入容量の伸びを著しく落とすことにつながっている。

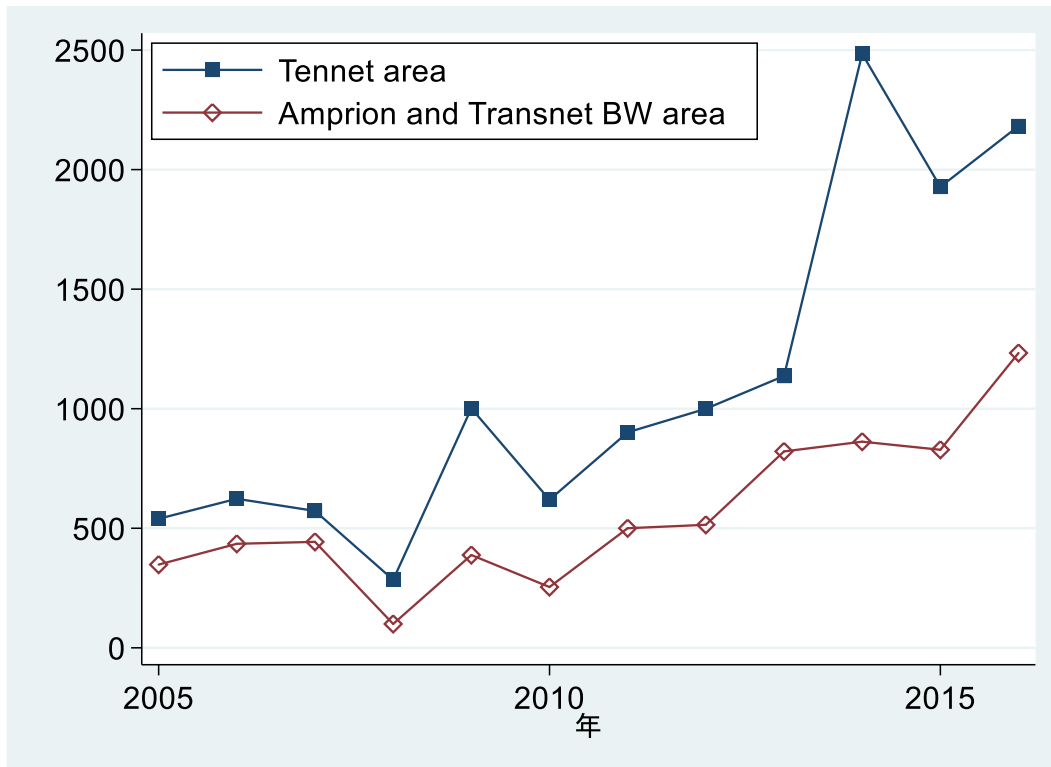


図 8 陸上風力発電の新規導入容量 (MW)

最後に、図 8 の陸上風力発電の導入容量をみると、どちらのグループも一貫して導入容量を増加させているのがわかる。期間中平行なトレンドがみられるが、処置群では 2014 年に大きく導入容量をスパイクさせている (2.5GW) のが観察できる。制御群と比べると、2 倍以上の差がある。

以上をまとめると、いずれの再エネでも介入年である 2010 年以前は両グループに共通して平行なトレンドが観察できた。太陽光発電とバイオマス発電は介入年後に導入容量を減少させているが、バイオマス発電と風力発電は 2010 年以降に処置群でのみ大きく導入容量を増加させている。この差が所有分離で説明できるかどうかを以下の分析では統計的に検証する。

## 5. 分析結果

1:1 でペアをつくる最近傍マッチングを行った結果、コモンサポートを満たさない処置群の郡は太陽光発電の分析では 1 個、バイオマス発電の分析では 2 個、風力発電の分析では 7 個あった。これらを取り除き、太陽光発電では 295 個(処置群 159 個、制御群 136 個)、バイオマス発電は 295 個(処置群 153 個、制御群 142 個)、風力発電は 302 個(処置群 157 個、制御群 145 個)の郡のデータを用いて DID を行った。各再エネにおける、両グループのオーバーラップテストの結果は、図 9～図 11 を参照。

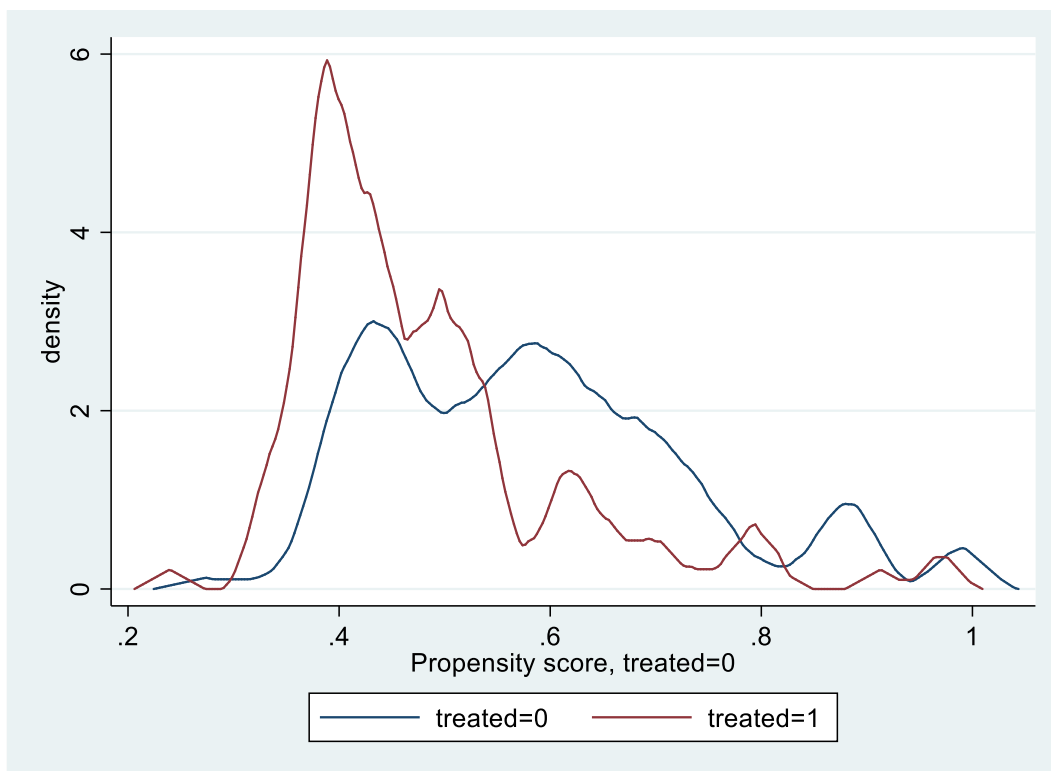


図9 オーバーラップのテスト：傾向スコアの密度分布（太陽光発電）

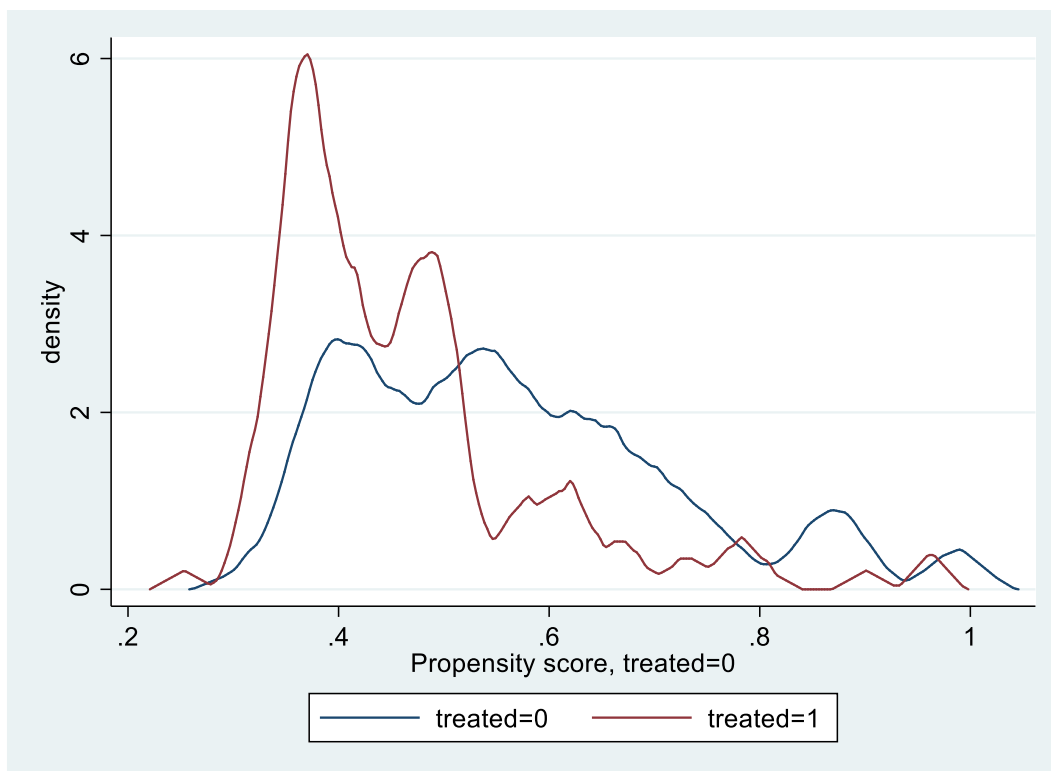


図10 オーバーラップのテスト：傾向スコアの密度分布（バイオマス発電）

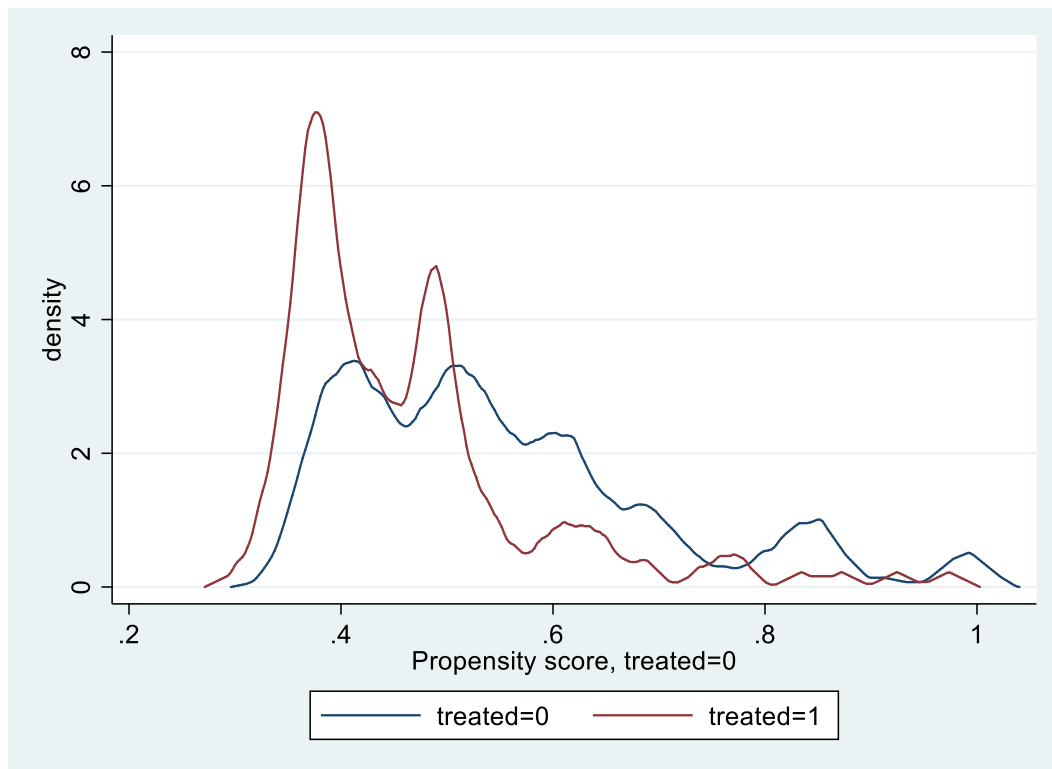


図 11 オーバーラップのテスト：傾向スコアの密度分布（陸上風力発電）

次に、所有分離前後の再エネ導入容量の差分をとった結果変数を用いて、 $ATT_{DID}^{PSM}$  および  $ATT_{DID}^{MDM}$  として  $ATT_{DID}^{ABS}$  を計算した。その結果が表 5～表 7 である。1 列目から順に所有分離から 1 年後、2 年後、3 年後の再エネの導入容量と 2010 年時点での導入容量の差を結果変数に用いている。

表 5(図 12)より、PSM を用いた DID では、所有分離は実施 1 年後から 5 年後の太陽光発電の導入を増加させる効果はないことがわかった。MDM・ABS を用いた分析では、所有分離から 3 年後、4 年後、5 年後の太陽光発電を減少させる（1 郡当たり約 4 MW）という分析結果が得られている。処置群は 136 個あるので、9 州全体では年間約 500MW の減少効果を意味する。ただしこれはロバストな結果ではなかった（付録の複数の TSO が系統運用を行う郡の標本を含めた分析の結果も参照）。

表 5 太陽光発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
$ATT_{DID}^{PSM}$	-173.63	309.01	-4198.37*	-3337.58	-3649.21	-3390.31
[標準誤差]	[1815.85]	[2051.34]	[2321.85]	[2702.68]	[2499.23]	[2865.65]
$ATT_{DID}^{MDM}$	-1072.85	-693.89	-4504.89**	-5168.25**	-5054.97**	-4859.59*
[標準誤差]	[1710.41]	[1954.37]	[2195.40]	[2591.54]	[2535.73]	[2658.17]
$ATT_{DID}^{ABS}$	-1294.02	-697.2	-3151.38*	-3828.72**	-3683.13*	-4011.67**
[標準誤差]	[1173.72]	[1287.56]	[1763.20]	[1895.43]	[1950.49]	[1982.66]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。

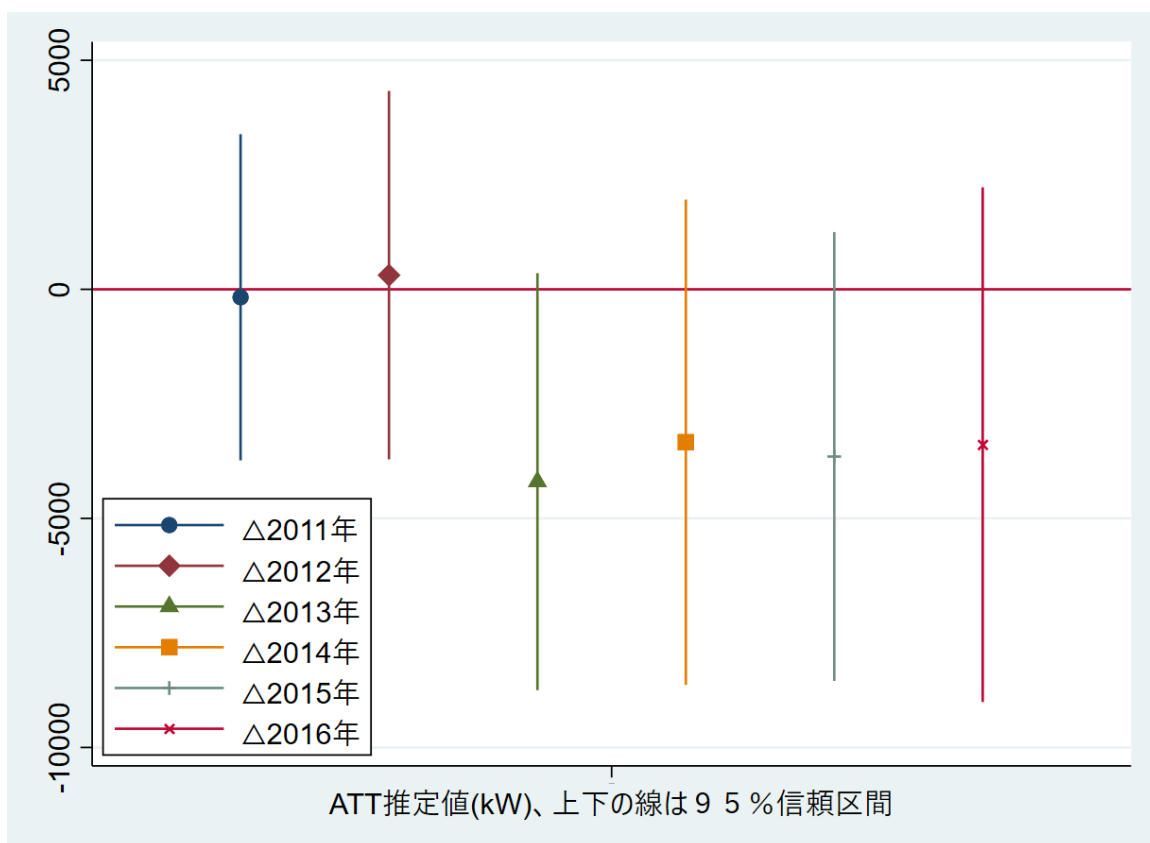


図 12 太陽光発電の PSM-DID 分析結果

表 6 (図 13) から、所有分離は、導入 1 年後にのみバイオマス発電の導入容量を増加させる傾向があることがわかった。ただし PSM では有意水準を満たす分析結果ではなかった。しかし Tennet の経験した所有分離は、2 年後以降には、分析方法に関わらず一貫してバイオマス発電の導入を減少させていることがわかった。郡当たり年間約 1.5MW のバイオマス発電が減少している（処置群は 153 個あるので、9 つの州全体では約 200MW）。この結果は一見直観に反しており解釈が難しいが、ドイツでは 2010 年頃までに経済的にバイオマス発電を導入できるポテンシャルを開発し尽くしてしまった点が一因ではないかと考えられる。

表 6 バイオマス発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
ATT <sub>DID</sub> <sup>PSM</sup>	505.91	-1458.66***	-1458.60***	-1255.62***	-1635.10***	-1572.86***
[標準誤差]	[315.96]	[389.25]	[370.57]	[337.42]	[341.35]	[346.03]
ATT <sub>DID</sub> <sup>MDM</sup>	905.26***	-1067.88***	-1404.97***	-1076.41***	-1361.45***	-1324.16***
[標準誤差]	[317.85]	[406.90]	[363.85]	[359.48]	[354.78]	[355.19]
ATT <sub>DID</sub> <sup>ABS</sup>	600.98**	-1146.70***	-1210.17***	-1021.48***	-1285.17***	-1246.20***
[標準誤差]	[261.37]	[335.45]	[323.13]	[329.36]	[323.69]	[326.13]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。

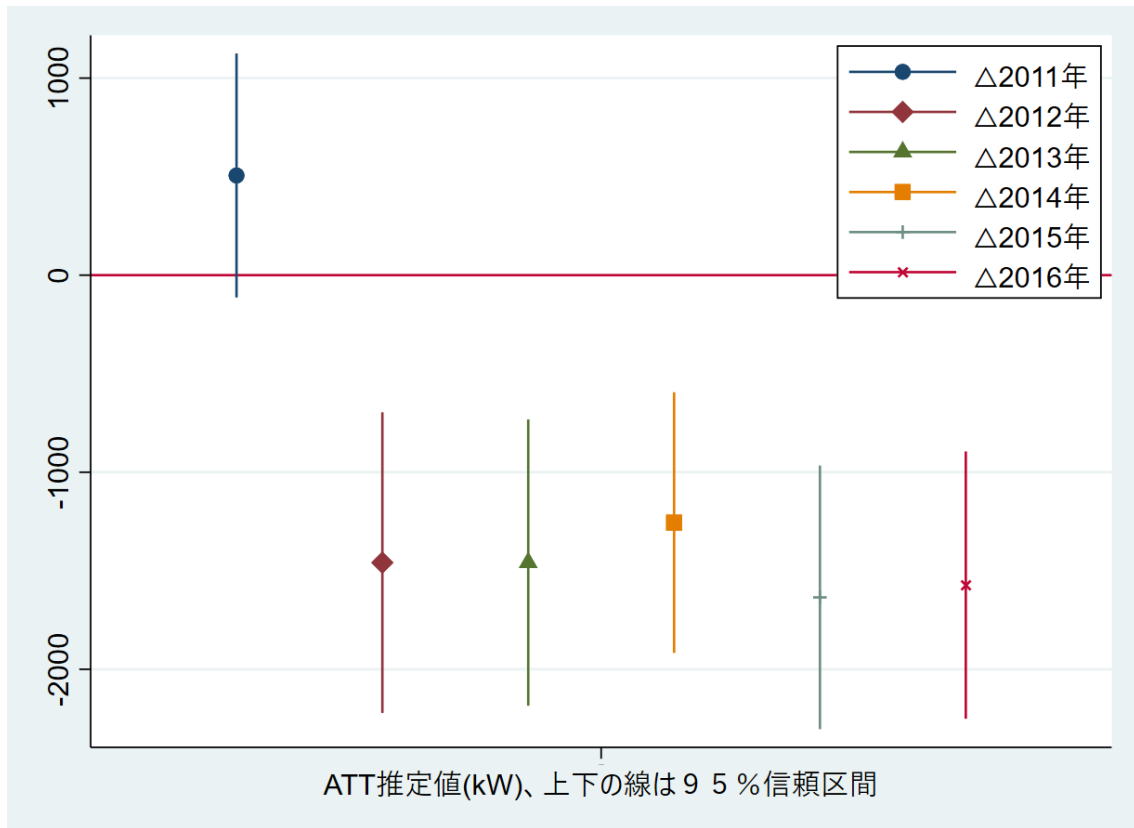


図 13 バイオマス発電の PSM-DID 分析結果

表 7 (図 14) から、所有分離は実施から 5 年前後の時点で、陸上風力発電の導入容量を増加させる効果があったことがわかる。いずれのマッチング方法を用いた場合でも、また ABS を用いた場合でも同様の結果が得られた (付録の複数の TS0 が系統運用を行う郡の標本を含めた分析の結果も参照)。所有分離を実施した郡当たりで、年間約 5~8MW の導入増加効果があることがわかる。処置群は 145 個あるので、9 州全体では 1 年間で 700MW~1.1GW という大きなインパクトを意味する。風力発電の導入は計画から運転開始までおよそ 5 年かかるため、所有分離後に新規に導入計画を立てた案件が 5 年後に運転開始した可能性は高いと考えられる。

表 7 陸上風力発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
ATT <sub>DID</sub> <sup>PSM</sup>	-426.79	97.61	-1050.64	7467.56	5129.33*	6269.02**
[標準誤差]	[1884.38]	[1857.66]	[3109.51]	[4778.60]	[2736.07]	[2703.40]
ATT <sub>DID</sub> <sup>MDM</sup>	-1117.61	1057.67	-821.48	8888.72**	5651.42**	-376.69
[標準誤差]	[2018.36]	[1313.72]	[3035.94]	[4433.47]	[2802.33]	[4389.17]
ATT <sub>DID</sub> <sup>ABS</sup>	-48.05	644.07	-698.64	8009.88*	4015.2	2841.95
[標準誤差]	[1205.49]	[1101.55]	[1780.67]	[4223.53]	[2459.64]	[2267.11]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。

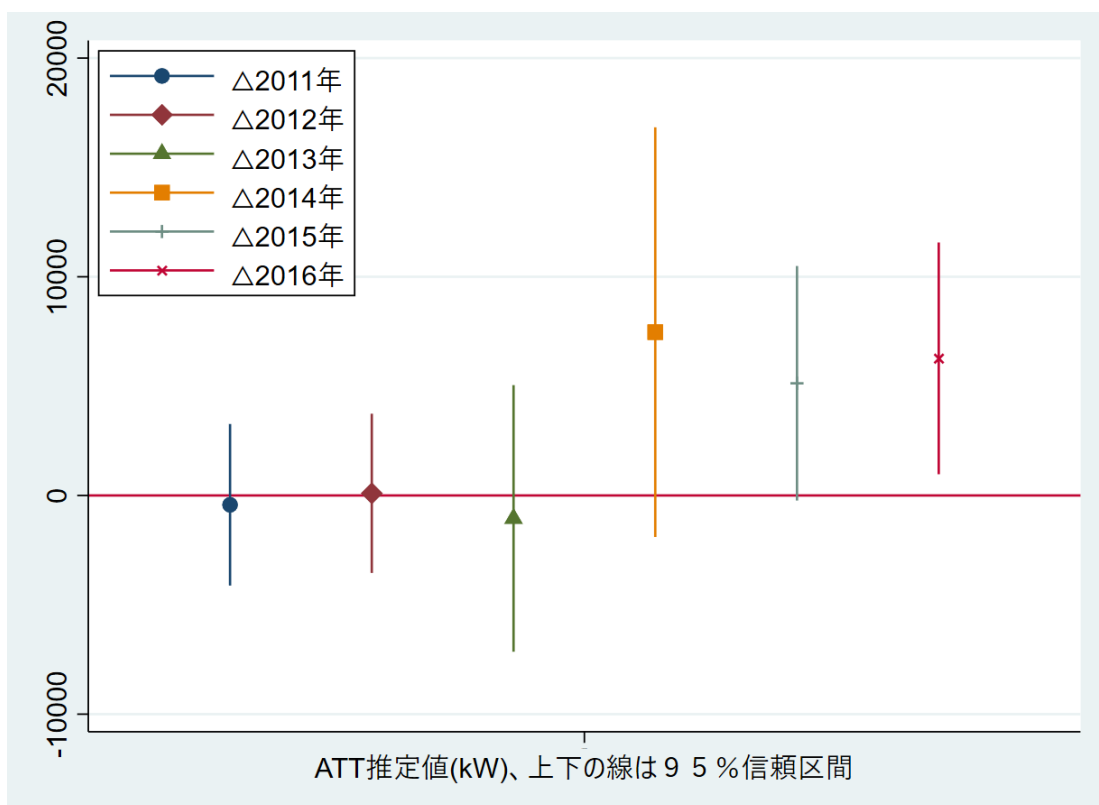


図 14 風力発電の PSM-DID 分析結果

## 6. 議論・結論

本研究では、ドイツの送電会社の1つである Tennet 社が 2010 年に経験した垂直統合事業者 E-ON 社からの所有分離の影響を、傾向スコアマッチングおよびマハラノビス距離によるマッチングと DID を組み合わせて推定した。再エネの電源ごとに分析した結果、所有分離の効果には異質性があることが明らかになった。

太陽光発電は、傾向スコアマッチングの場合は所有分離から 3~4 年後に減少が起こるといふ分析結果が出たものの、ロバストな結果ではなかった。言い換えると、第三次欧州指令で ITO 化を選んだ送電会社 Amprion および Transnet BW のエリアと、所有分離した TenneT のエリアの太陽光発電の導入容量には、2010 年以降も統計的に有意な差はみられなかった。

驚くことに、所有分離はバイオマス発電の導入を実施から 2 年後以降、毎年減少させる効果があることがわかった。なぜこのような結果が出たのかの解明は、今後の課題としたい。しかし少なくとも開発ポテンシャルが枯渇し、FIT の支援も打ち切られるという状況下では、所有分離をしたところでバイオマス発電の導入が増加することは期待できないと考えられる。ドイツ経済産業省 (BMWi 2019) は「バイオマスエネルギー開発のための技術的なポテンシャルはあるが、今度導入を進めるためには高い費用が必要となる」と述べている。実際、バイオマスエネルギーの 2050 年におけるドイツの利用状況をシミュレーションする研究では、バイオマスは発電用に利用さ



れるよりも、熱または輸送用の利用が大半を占めるだろうというシナリオを出しているものが多い(Szarka et al. 2017)。

陸上風力発電の導入容量は、所有分離から約5年後に増加していることがわかった。この結果はPSMを用いた場合でもMDMを用いた場合でも共通していた。なぜ所有分離は太陽光発電やバイオマス発電は増加させないのにも関わらず、陸上風力発電だけを増加させる効果があるのか。本研究で行った計量経済学的な分析から発送電分離の作用メカニズムを解明することはできていないが、Nicolli and Vona (2016)を参考にしながら考案した仮説を以下に提示したい。

発電用の再エネ技術には、市場参入能力の高い電源と低い電源が存在する。前者の代表として、発電出力の比較的小さい太陽光発電やバイオマス発電がある。後者には陸上風力発電や、洋上風力発電、大型水力発電などがある。ある電源の市場参入能力には、その再エネ発電機を設置するための予想イニシャルコストや、事業計画を開始してから系統接続・売電開始までに要する時間が関わっている。発送電分離は、再エネ事業に関与する投資家の予想イニシャルコストやプロジェクトの期待収益率に影響を与えることで、全ての電源の市場参入障壁を大きく下げる。

比較的高い参入能力の電源である太陽光やバイオマスにとっては、法的分離(ITO化)だけでも既に十分参入できるだけの市場環境が実現していた。したがって所有分離を実施してもプラスの効果はなかった。しかし参入能力の低い電源である陸上風力にとっては、所有分離の実施によってようやく容易に参入できるレベルまで参入障壁が低下した。そのため、所有分離は陸上風力発電のみを増加させる効果が出たのではないかと考えられる。

本研究の分析結果は、EEGが規定する再エネ発電事業者の系統への接続保証や系統増強費用のシャロー方式などのHitaj and Löschel (2019)が明らかにした要因以外に加えて、所有分離も風力発電の増加をもたらした可能性があるという指摘できる。ただし、現時点でデータを手に入できなかったものの先行研究では有力な要因とされている、時間可変かつ地点ごとに異なる変数(例:FIT価格、再エネのポテンシャル量、送電線の長さ、小売価格など)を使用できれば、平行トレンドの仮定の妥当性が上がり、推定結果も変わる可能性がある。

本研究の分析結果は、今後法的分離を実施する日本のエネルギー政策にとって以下の示唆を与える。第三次欧州指令のITOのように適切な行為規制が垂直統合事業者およびTSOに課されていれば、そしてドイツの再生可能エネルギー法のように再エネの優先接続ルールやグリッド増強の費用を薄く広くグリッド料金で回収する制度があれば、法的分離のままであっても再エネを導入できる可能性がある。このような制度がない場合は、風力発電に関しては所有分離の実施により更に導入容量が増加する可能性がある<sup>8</sup>。ただし、所有分離はバイオマス発電のような他の再エネ電源の導

<sup>8</sup> ただし、送電会社の所有分離は再エネの導入を目的とする政策ではなく、発電部門での公平な競争を保証するための構造規制である。日本で導入が検討されるとすれば、法的分離では発電部門で新規参入事業者と既存事業者の間での公平な競争環境が十分に保証されていないという事態が明らかになった場合だろう。



入に負の影響をもたらす可能性があることにも注意する必要がある。しかし陸上風力発電は、日本やドイツにおいて発電コスト面および開発ポテンシャル面でバイオマス発電に対して優位性を持っていると考えられるので、バイオマス発電の導入減少効果を加味した上でも、容量ベースでは所有分離の純再エネ発電導入効果は正になると考えられる。

## 付録

表 A1 複数の TS0 が系統運用を行う郡の標本を含む太陽光発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
ATT <sub>DID</sub> <sup>PSM</sup>	-426.95	643.78	-891.48	-1225.16	-1034.8	-733.21
[標準誤差]	[1238.28]	[1510.61]	[1963.68]	[2306.08]	[2337.56]	[2502.10]
ATT <sub>DID</sub> <sup>MDM</sup>	70.46	279.56	-3650.58**	-4282.55**	-4507.52**	-4345.28**
[標準誤差]	[1210.00]	[1386.17]	[1681.46]	[1952.28]	[1969.22]	[2067.57]
ATT <sub>DID</sub> <sup>ABS</sup>	-896.48	-206.83	-2275.01	-2947.64*	-2733.7	-2884.62
[標準誤差]	[1004.92]	[1180.05]	[1605.44]	[1758.81]	[1808.96]	[1845.38]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。

表 A2 複数の TS0 が系統運用を行う郡の標本を含むバイオマス発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
ATT <sub>DID</sub> <sup>PSM</sup>	526.94*	-835.82**	-1180.32***	-833.29**	-1069.60***	-1039.37***
[標準誤差]	[307.04]	[370.71]	[364.11]	[353.82]	[348.08]	[353.54]
ATT <sub>DID</sub> <sup>MDM</sup>	836.70***	-950.54***	-1489.30***	-1032.74***	-1310.36***	-1280.49***
[標準誤差]	[314.24]	[339.46]	[325.21]	[318.19]	[310.74]	[316.62]
ATT <sub>DID</sub> <sup>ABS</sup>	665.57***	-968.53***	-1169.04***	-891.97***	-1122.34***	-1095.19***
[標準誤差]	[253.64]	[308.14]	[302.45]	[305.39]	[303.09]	[304.62]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。

表 A3 複数の TS0 が系統運用を行う郡の標本を含む陸上風力発電の分析結果

	kW <sub>2011-2010</sub>	kW <sub>2012-2010</sub>	kW <sub>2013-2010</sub>	kW <sub>2014-2010</sub>	kW <sub>2015-2010</sub>	kW <sub>2016-2010</sub>
ATT <sub>DID</sub> <sup>PSM</sup>	-114.29	428.65	-834.19	5504.44	5793.74**	3432.37
[標準誤差]	[1476.31]	[1467.20]	[2332.79]	[4303.75]	[2458.22]	[2761.56]
ATT <sub>DID</sub> <sup>MDM</sup>	-308.54	2230.94	1295.09	9540.61**	6597.64***	4891
[標準誤差]	[1909.71]	[1584.90]	[3232.08]	[4149.18]	[2467.91]	[4755.01]
ATT <sub>DID</sub> <sup>ABS</sup>	-115.02	687.1	-968.73	7104.67*	4237.51*	3196.7
[標準誤差]	[1139.06]	[1056.27]	[1680.59]	[3887.10]	[2326.29]	[2336.59]

\*p<0.1,\*\*p<0.05,\*\*\*p<0.01。



## 参考文献

- 伊藤公一朗 (2017) データ分析の力 因果関係に迫る思考法 光文社新書
- 井上智弘 (2016) 送電事業の売却がドイツの電気事業者にもたらした影響 電力中央研究所 研究報告書
- 岡田健司・丸山 真弘 (2014) 欧州における発送電分離後の送電系統増強の仕組みとその課題 電力中央研究所 研究報告書
- 梶山恵司 (2015) バイオマスで農家に新しい富 ドイツに学ぶエネルギー活用 事業構想大学院大学
- 後藤 美香・丸山 真弘(2012) 欧州における送電部門アンバンドリングの現状と評価 電力中央研究所 研究報告書
- 後藤 美香・丸山 真弘・服部 徹 (2013) ドイツにおける発送電分離の評価—事業者の対応と課題— 電力中央研究所 研究報告書
- 竹濱朝美 (2015) ドイツにおける風力・太陽光電力の上流送電, 系統連系の制度 風力エネルギー 39 巻 2 号
- 竹濱朝美 (2016) 下方一方向潮流から双方向潮流の電力システムへ: 風力・太陽光の系統連系制度「地域分散型エネルギーシステム」日本評論社
- 星野匡郎・田中久稔 (2016) R による実証分析 回帰分析から因果分析へ オーム社
- 星野崇宏 (2009) 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
- 水谷文俊 (2013) 電力事業における発送電分離, 国民経済雑誌, 207 (3): 15-27
- 諸富徹 (2015) 電力システムの再構築とその費用負担原理「電力システム改革と再生可能エネルギー」 日本評論社
- 安田陽 (2017) 系統連系問題「再生可能エネルギー政策の国際比較 日本の変革のために」京都大学学術出版会
- Abadie, Alberto. 2005. "Semiparametric Difference-in-Differences Estimators." *The Review of Economic Studies* 72(1):1–19.
- Brunekreeft, Gert. 2015. "Network Unbundling and Flawed Coordination: Experience from the Electricity Sector." *Utilities Policy* 34:11–18.
- Brunekreeft, Gert, Marius Buchmann, and Roland Meyer. 2016. "The Rise of Third Parties and the Fall of Incumbents Driven by Large-Scale Integration of Renewable Energies: The Case of Germany." *The Energy Journal* 37(01).
- Caliendo, Marco and Sabine Kopeinig. 2008. "Some Practical Guidance For The Implementation of Propensity Score Matching." *Journal of Economic Surveys* 22(1):31–72.
- Chawla, Mallika and Michael G. Pollitt. 2013. "Global Trends in Electricity Transmission System Operation: Where Does the Future Lie?" *The Electricity Journal* 26(5):65–71.

- Dehejia, Rajeev H. and Sadek Wahba. 1999. “Causal Effects in Nonexperimental Studies: Reevaluating the Evaluation of Training Programs.” *Journal of the American Statistical Association* 94(448):1053.
- Dharshing, Samdrak. 2017. “Household Dynamics of Technology Adoption: A Spatial Econometric Analysis of Residential Solar Photovoltaic (PV) Systems in Germany.” *Energy Research & Social Science* 23:113–24.
- Eikeland, Per Ove. 2011. “The Third Internal Energy Market Package: New Power Relations among Member States, EU Institutions and Non-State Actors?” *JCMS: Journal of Common Market Studies* 49(2):243–63.
- Goetzke, Frank and Tilmann Rave. 2016. “Exploring Heterogeneous Growth of Wind Energy across Germany.” *Utilities Policy* 41:193–205.
- Gugler, Klaus, Mario Liebensteiner, and Stephan Schmitt. 2017. “Vertical Disintegration in the European Electricity Sector: Empirical Evidence on Lost Synergies.” *International Journal of Industrial Organization* 52:450–78.
- Gugler, Klaus, Margarethe Rammerstorfer, and Stephan Schmitt. 2013. “Ownership Unbundling and Investment in Electricity Markets — A Cross Country Study.” *Energy Economics* 40:702–13.
- Haas, Reinhard, Christian Panzer, Gustav Resch, Mario Ragwitz, Gemma Reece, and Anne Held. 2011. “A Historical Review of Promotion Strategies for Electricity from Renewable Energy Sources in EU Countries.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(2):1003–34.
- Heckman, J. J., H. Ichimura, and P. E. Todd. 1997. “Matching As An Econometric Evaluation Estimator: Evidence from Evaluating a Job Training Programme.” *The Review of Economic Studies* 64(4):605–54.
- Hitaj, Claudia. 2013. “Wind Power Development in the United States.” *Journal of Environmental Economics and Management* 65(3):394–410.
- Hitaj, Claudia and Andreas Löschel. 2019. “The Impact of a Feed-in Tariff on Wind Power Development in Germany.” *Resource and Energy Economics* 57:18–35.
- Houngbedji, Kenneth. 2016. “Abadie’s Semiparametric Difference-in-Differences Estimator: EBSCOhost.” *Stata Journal* Vol. 16 Issue 2, p482-490. 9p.
- Hu, Jing, Robert Harmsen, Wina Crijns-Graus, Ernst Worrell, and Machteld van den Broek. 2018. “Identifying Barriers to Large-Scale Integration of Variable Renewable Electricity into the Electricity Market: A Literature Review of Market Design.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:2181–95.
- Jacobsson, S. and Anna Bergek. 2004. “Transforming the Energy Sector: The Evolution of Technological Systems in Renewable Energy Technology.” *Industrial and Corporate Change* 13(5):815–49.



- van Koten, S. and A. Ortmann. 2008. "The Unbundling Regime for Electricity Utilities in the EU: A Case of Legislative and Regulatory Capture?" *Energy Economics* 30(6):3128–40.
- Lauf, Thomas, Kristina Ek, Erik Gawel, Paul Lehmann, and Patrik Söderholm. 2019. "The Regional Heterogeneity of Wind Power Deployment: An Empirical Investigation of Land-Use Policies in Germany and Sweden." *Journal of Environmental Planning and Management* 1–28.
- Matschoss, Patrick, Benjamin Bayer, Heiko Thomas, and Adela Marian. 2019. "The German Incentive Regulation and Its Practical Impact on the Grid Integration of Renewable Energy Systems." *Renewable Energy* 134:727–38.
- Meletiou, Alexis, Carlo Cambini, and Marcelo Masera. 2018. "Regulatory and Ownership Determinants of Unbundling Regime Choice for European Electricity Transmission Utilities." *Utilities Policy* 50:13–25.
- Mignon, Ingrid and Anna Bergek. 2016. "System- and Actor-Level Challenges for Diffusion of Renewable Electricity Technologies: An International Comparison." *Journal of Cleaner Production* 128:105–15.
- Moselle, Boaz. 2008. "Reforming TSOs: Using the 'Third Package' Legislation to Promote Efficiency and Accelerate Regional Integration in EU Wholesale Power Markets." *The Electricity Journal* 21(8):9–17.
- Neuhoff, K. 2005. "Large-Scale Deployment of Renewables for Electricity Generation." *Oxford Review of Economic Policy* 21(1):88–110.
- Newbery, David, Michael G. Pollitt, Robert A. Ritz, and Wadim Strielkowski. 2018. "Market Design for a High-Renewables European Electricity System." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91:695–707.
- Nicolli, Francesco and Francesco Vona. 2016. "Heterogeneous Policies, Heterogeneous Technologies: The Case of Renewable Energy." *Energy Economics* 56:190–204.
- Pollitt, Michael. 2008. "The Arguments for and against Ownership Unbundling of Energy Transmission Networks." *Energy Policy* 36(2):704–13.
- Puga, J. Nicolas and Jonathan A. Lesser. 2009. "Public Policy and Private Interests: Why Transmission Planning and Cost-Allocation Methods Continue to Stifle Renewable Energy Policy Goals." *The Electricity Journal* 22(10):7–19.
- Rode, Johannes and Alexander Weber. 2016. "Does Localized Imitation Drive Technology Adoption? A Case Study on Rooftop Photovoltaic Systems in Germany." *Journal of Environmental Economics and Management* 78:38–48.
- Rosenbaum, Paul R. and Donald B. Rubin. 1983. "The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects." *Biometrika*

- 70(1):41.
- Schaffer, Axel J. and Sebastian Brun. 2015. “Beyond the Sun—Socioeconomic Drivers of the Adoption of Small-Scale Photovoltaic Installations in Germany.” *Energy Research & Social Science* 10:220–27.
- Sovacool, Benjamin K. 2009. “Rejecting Renewables: The Socio-Technical Impediments to Renewable Electricity in the United States.” *Energy Policy* 37(11):4500–4513.
- Sugimoto, Kota. 2019. “Does Transmission Unbundling Increase Wind Power Generation in the United States?” *Energy Policy* 125:307–16.
- Szarka, Nora, Marcus Eichhorn, Ronny Kittler, Alberto Bezama, and Daniela Thrän. 2017. “Interpreting Long-Term Energy Scenarios and the Role of Bioenergy in Germany.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68:1222–33.
- Toke, David, Sylvia Breukers, and Maarten Wolsink. 2008. “Wind Power Deployment Outcomes: How Can We Account for the Differences?” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(4):1129–47.
- Amprion (2016) Annual report.
- Council of European Energy Regulators (2016) Status Review on the Implementation of Transmission System Operators’ Unbundling Provisions of the 3rd Energy Package, CEER Status Review, Ref: C15-LTF-43-04
- Craig Morris (2015) Biomass – the growth is over in Germany. Energy Transition, The Global Energiewende.
- European Commission (2005) DG COMPETITION REPORT ON ENERGY SECTOR INQUIRY
- European Commission (2010) Commission Staff Working Paper Interpretative Note on Directive 2009/72/EC concerning common rules for the internal market in electricity and directive 2009/73/ ec concerning common rules for the internal market in natural gas the unbundling regime
- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (2019) Development of power generation and installed capacity of biomass plants
- Kerstine Appun (2016) Bioenergy - the troubled pillar of the Energiewende. Clean Energy Wire
- Netztransparenz.de. EEG plant master data
- Newbery (2000) Privatization, Restructuring, and Regulation of Network Utilities, The MIT Press.
- Regionaldatenbank Deutschland (ドイツ統計局ウェブサイト, 最終確認 2019 年 7 月 1 日)