



京大再エネ講座
研究会
部門A

2022年10月31日(月)

2021年欧州電力市場価格高騰の影響度分析 ～スペイン、フランス、ドイツ、デンマーク、英国の市場分析～

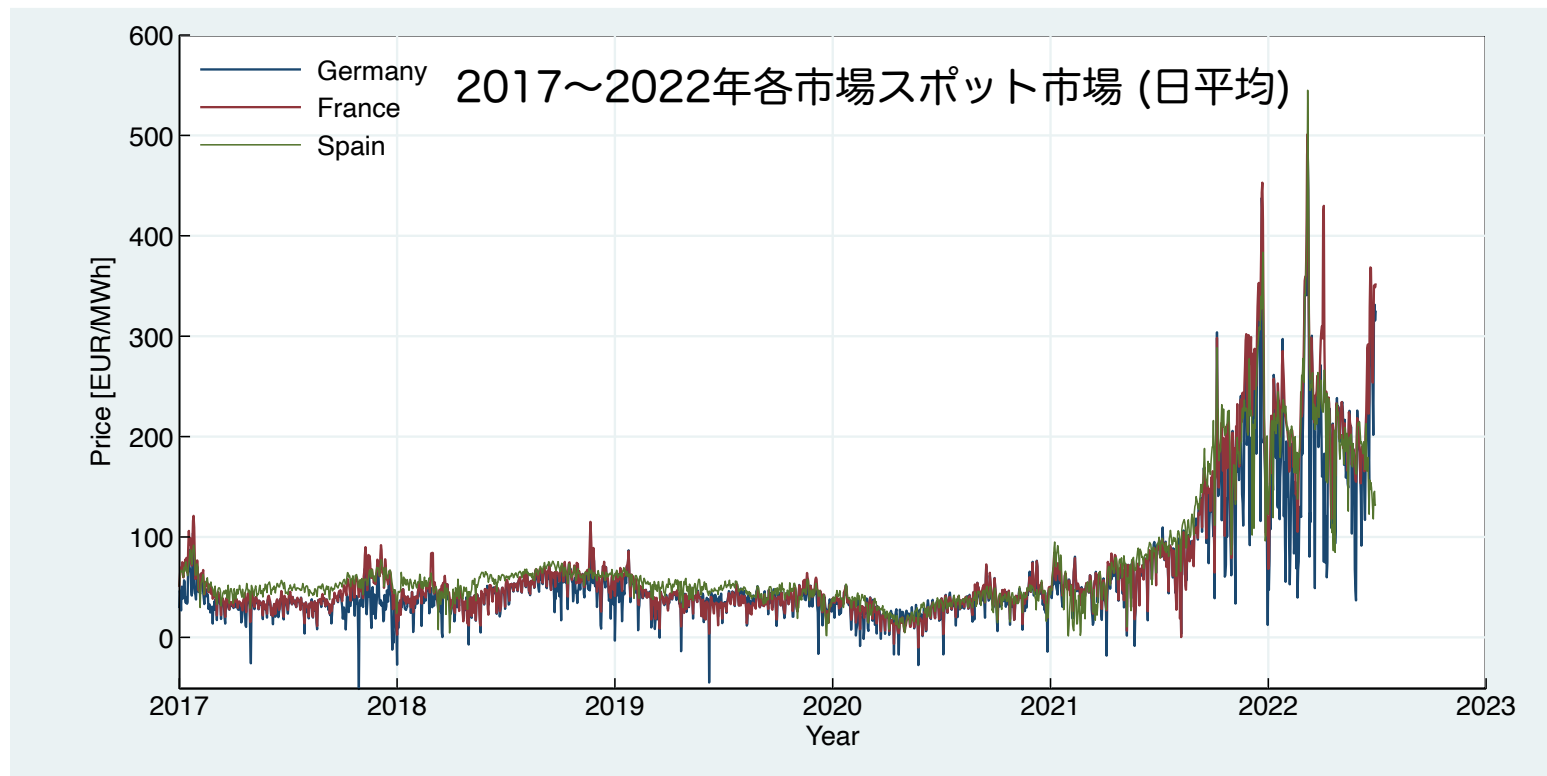


京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座特任教授

安田 陽

+ 背景と目的

- 2021年秋季に欧州全体で電力市場価格が高騰
- 一部のメディアで「風が弱かったから」との論調が相次ぐ
- 価格高騰の**影響度**を定量評価する





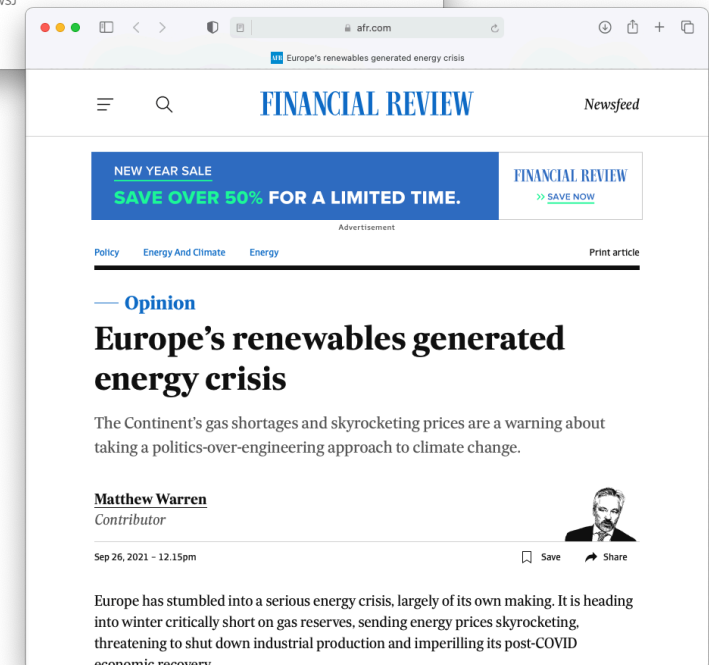
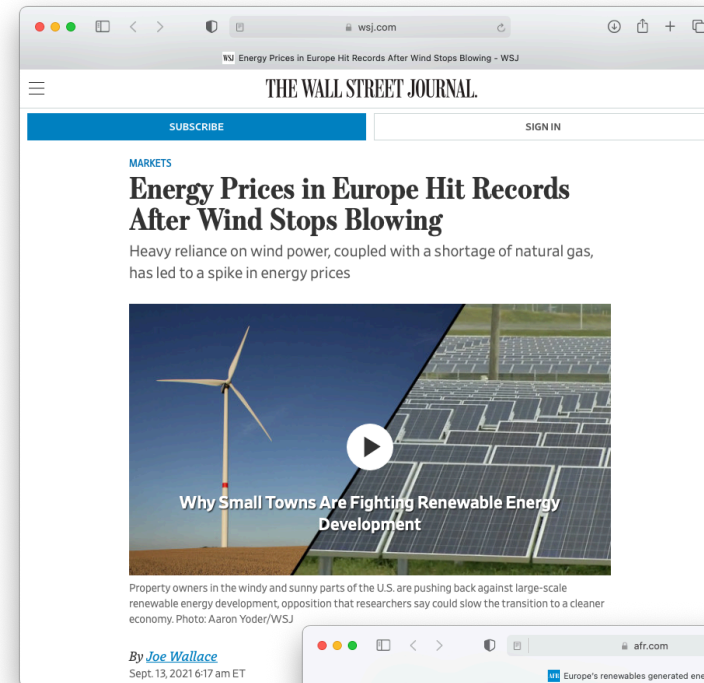
メディアによる言説

■ “Energy Prices in Europe Hit Records After Wind Stops Blowing”

- (source) Joe Wallace: Energy Prices in Europe Hit Records After Wind Stops Blowing, The Wall Street Journal, Sep 13, 2021

■ “Europe’s renewables generated energy crisis”

- (source) Matthew Warren: Europe’s renewables generated energy crisis, Financial Review, Sept 26, 2021



メディアによる言説

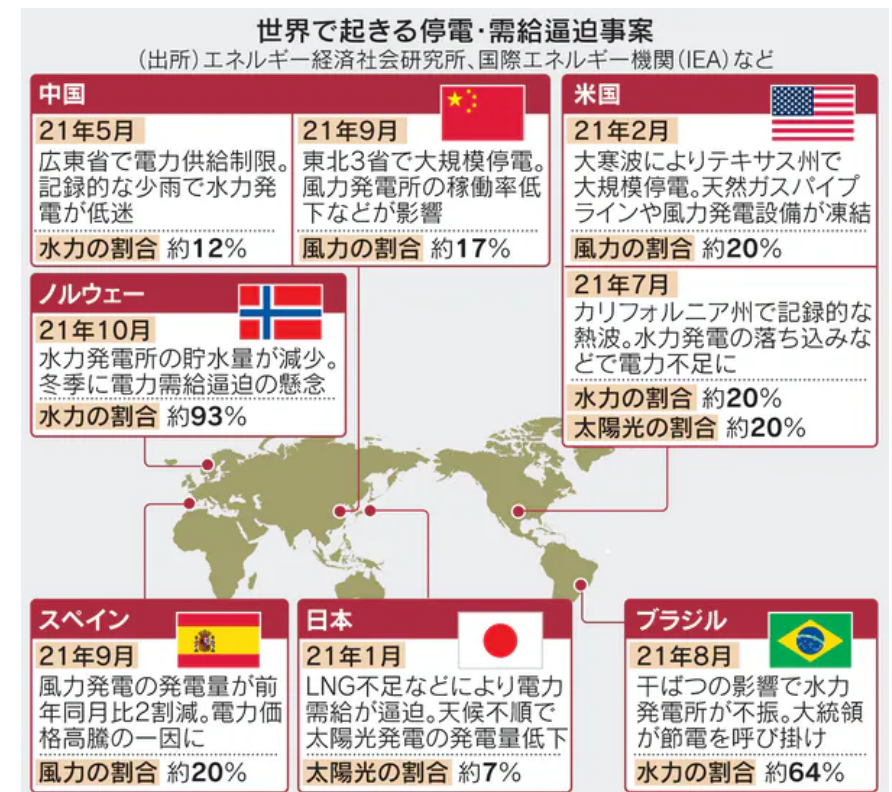


- 「脱炭素先進国」のスペインがエネルギー危機に見舞われている。同国の風力発電の発電量が前年同月に比べ2割減るなど欧州の風が弱まったことが天然ガス価格高騰の発端の一つにもなった。

- (出典) 日本経済新聞: 風吹かぬスペインの教訓 再生エネ拡大、日本にも難題, 2021年10月17日

- 風力が電源構成の約2割を占めるスペインでは9月の風力発電量が前年同月比20%減。風力の発電量減少分を天然ガスで補おうとしたことで電力の価格が高騰した。

- (出典) 日本経済新聞: 再エネ発電、天候不順が打撃 脱炭素の足かせに, 2022年1月9日

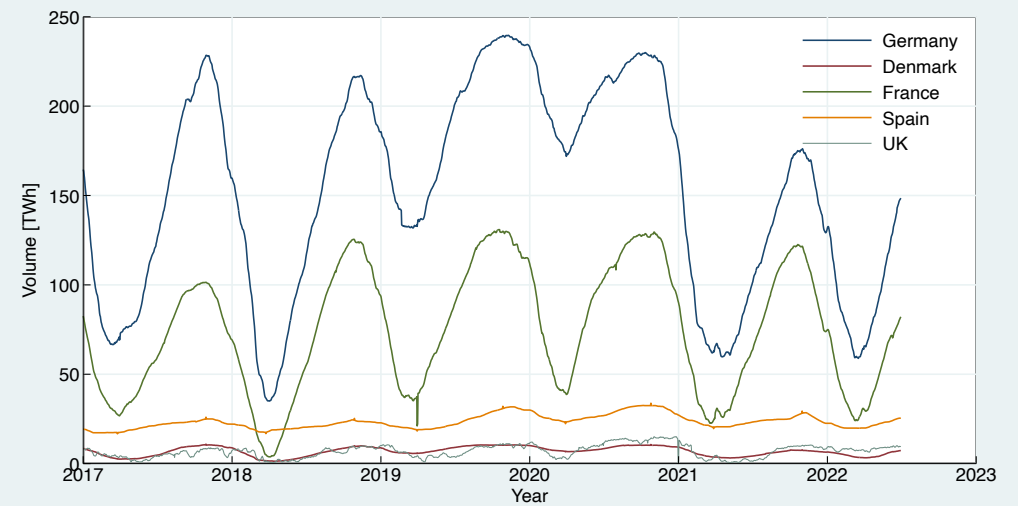
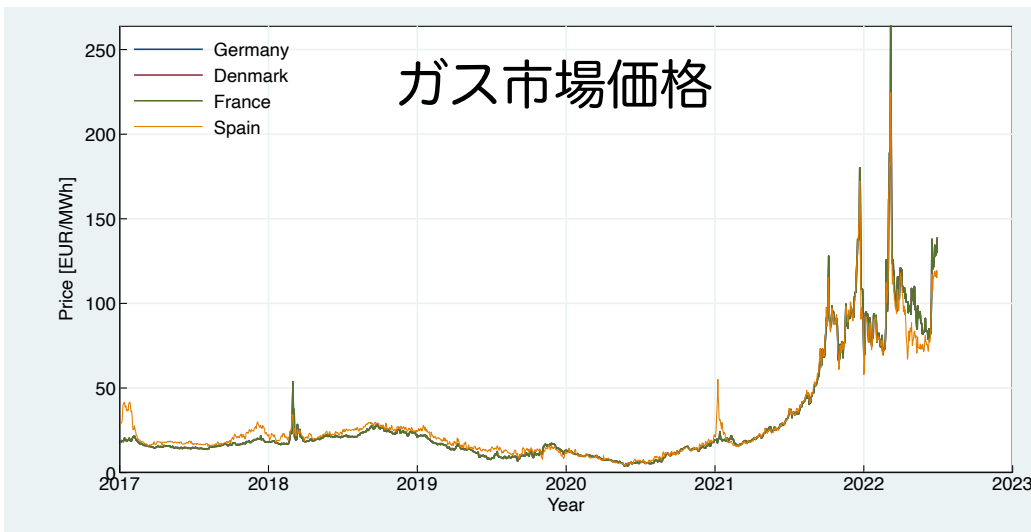




各種データ時系列



ガス貯蔵量





エビデンスのレベルと階層



高い
↑
エビデンスレベル
↓
低い

メタ
アナリシス

複数のランダム化比較試験を統合したもの。最も確実に因果関係を証明することができる。

ランダム化
比較試験

対象をランダムに介入群と対照群に割り付けることで、因果関係を評価する方法。因果推論の理想形。

自然実験と
擬似実験

世の中にある「実験室のような状況」をうまく利用することで、因果関係を評価する方法。

回帰分析

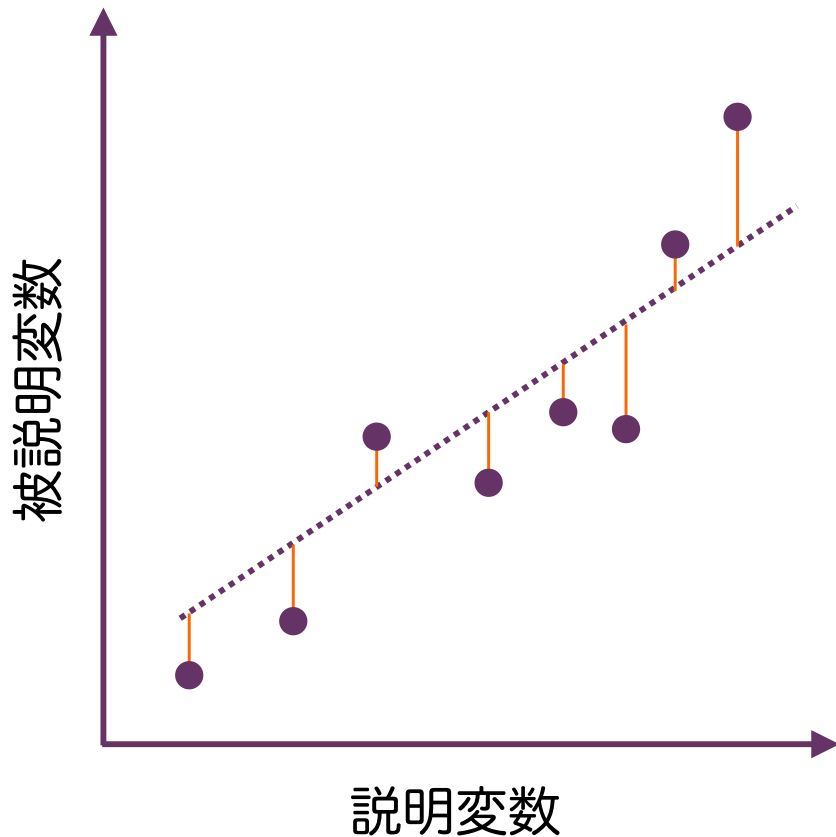
すでに手元にあるデータがあるときによく用いられる方法・交絡因子のデータが手元があれば、その影響を取り除くことができる。



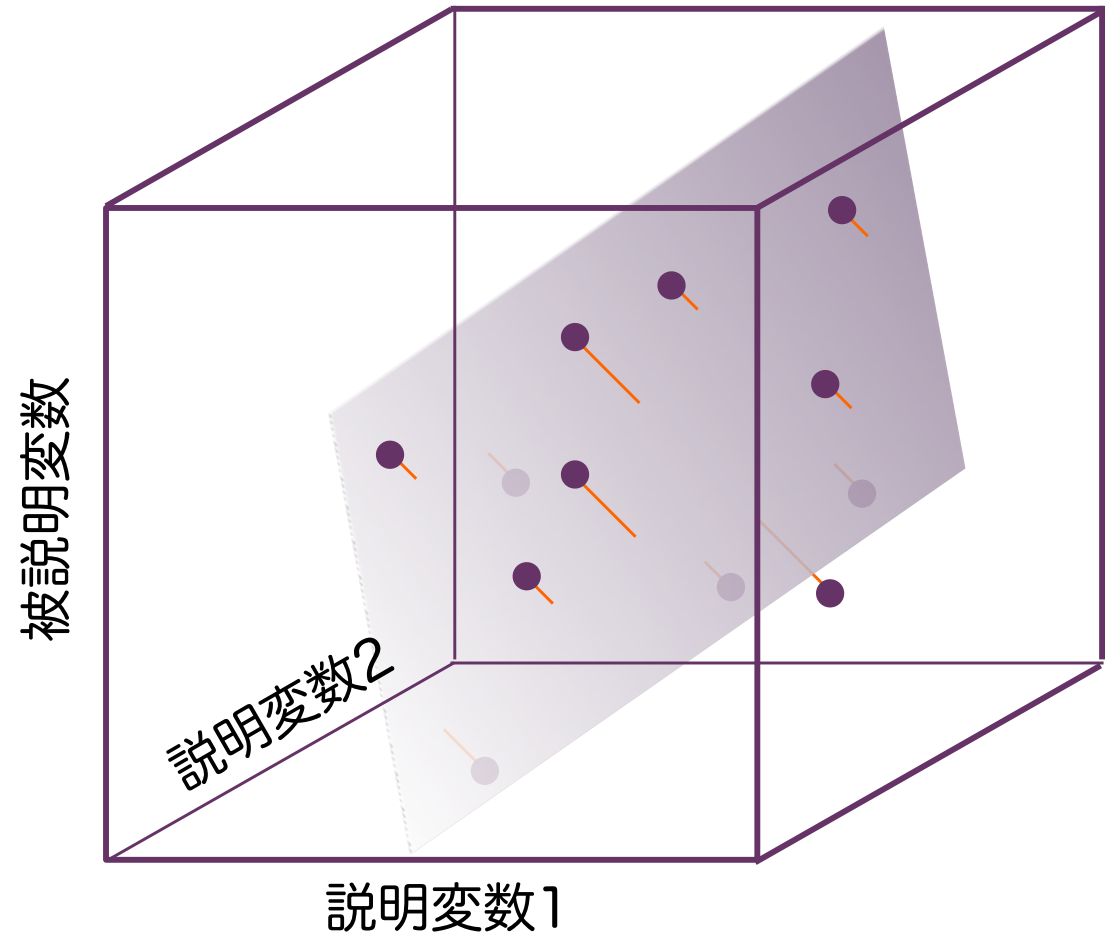
最小二乗法(OLS)による回帰分析



説明変数1つ \rightarrow 2次元



説明変数 n 個 $\rightarrow n+1$ 次元



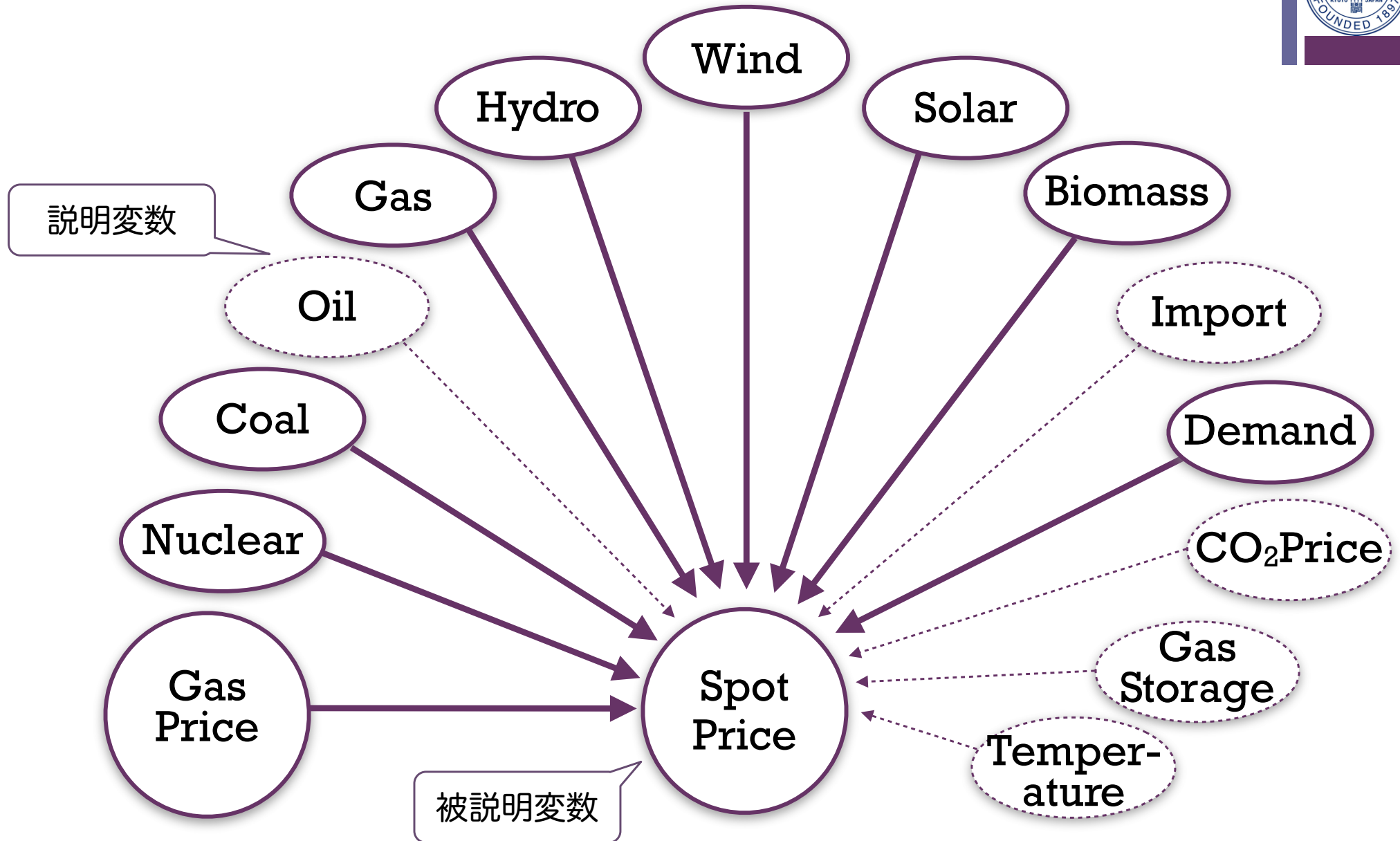
+ モデル推定式の変数



変数	名称	単位	備考	データソース				
				ドイツ	デンマーク	フランス	スペイン	英国
<i>SpotPrice</i>	電力市場 スポット価格	[EUR/MWh] (日平均)	被説明 変数	EPEX (2022)	NordPool (2022)	EPEX (2022)	OMIE (2022)	NordPool (2022)
<i>GasPrice</i>	ガス市場 スポット価格	[EUR/Therm]	説明 変数	Thomson Reuters (2022)	Energinet (2022)	Thomson Reuters (2022)	MIBGAS (2022)	Thomson Reuters (2022)
<i>Nuclear</i>	原子力 発電電力量	[MWh/h] (日平均)		ENTSO-E (2022)	ELEXON (2022)			
<i>Coal</i>	石炭火力 発電電力量							
<i>Gas</i>	ガス火力 発電電力量							
<i>Hydro</i>	水力 発電電力量							
<i>Wind</i>	風力 発電電力量							
<i>Solar</i>	太陽 発電電力量							
<i>Biomass</i>	バイオマス 発電電力量							
<i>CHPconsum</i>	揚水動力							
<i>Demand</i>	需要							
<i>Oil</i>	石油火力 発電電力量		本モデ ルでは 採用せ ず			ICAP (2022)		
<i>Import</i>	輸入電力量							
<i>CO2Price</i>	CO ₂ 市場 価格	[EUR/t]		GIE (2022)				
<i>GasStorage</i>	ガス貯蔵量	[TWh]						
<i>Temp</i>	首都気温	[°C](日平均)		Visualcrossing (2022)				



重回帰分析モデル①(単純線形)





重回帰分析(MRA)結果例

Research Question:
各説明変数の
「影響度」を
どのように定量的に
評価するか？



ドイツ(2017~2022年上半期)

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	2,007
Model	6618671.98	10	661867.198	F(10, 1996)	=	2211.80
Residual	597290.042	1,996	299.243508	Prob > F	=	0.0000
Total	7215962.02	2,006	3597.18944	R-squared	=	0.9172
				Adj R-squared	=	0.9168
				Root MSE	=	17.299

決定
係数

偏回帰係数(PRC)

t 値

P値

標準偏回帰係数(SPRC)

被説明変数

説明変数

SpotPrice	Coefficient	Std. err.	t	P> t	Beta
GasPrice	1.807562	.0204471	88.40	0.000	.9215715
Nuclear	-.0003979	.0003311	-1.20	0.230	-.0109686
Coal	-.0011913	.0001448	-8.23	0.000	-.1334858
Gas	.0027847	.000239	11.65	0.000	.1185366
Hydro	-.0005466	.0010211	-0.54	0.593	-.0044772
Wind	-.0018649	.000119	-15.68	0.000	-.2894956
Solar	-.0009991	.0002089	-4.78	0.000	-.0543552
Biomass	.0007685	.0017663	0.44	0.664	.0040099
PHSconsum	-.0099495	.0012978	-7.67	0.000	-.0662957
Demand	.0013879	.0001501	9.24	0.000	.1547197
_cons	-19.63306	9.95809	-1.97	0.049	.

+ 反実仮想法による影響度(DOI)評価



重回帰分析(線形結合)によって再現された関数

$$\hat{f}(x) = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 g_1(x) + \hat{\alpha}_2 g_2(x) + \dots + \hat{\alpha}_n g_n(x) + \hat{\varepsilon}_x$$

反実仮想モデル(微小変化 δ を仮想的に追加)

$$f_{cf}(x) = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 g_1(x) (1 + \delta_{g1}) + \hat{\alpha}_2 g_2(x) + \dots + \hat{\alpha}_n g_n(x) + \hat{\varepsilon}_x$$

$$\delta_f(x) = \frac{f_{cf}(x) - \hat{f}(x)}{\hat{f}(x)} = \frac{\hat{\alpha}_1 g_1(x) (1 + \delta_{g1}) - \hat{\alpha}_1 g_1(x)}{\hat{f}(x)}$$

$$= \frac{\hat{\alpha}_1 g_1(x) \delta_{g1}}{\hat{f}(x)}$$



影響度

$$\frac{\delta_f(x)}{\delta_{gn}} = \hat{\alpha}_1 \frac{g_n(x)}{\hat{f}(x)}$$

$g_n(x)$ が 1% 変化した場合に
 $f(x)$ が何% 変化するか?



ドイツの影響度(DOI)分析結果 (95%信頼区間エラーバー付き)



ドイツ

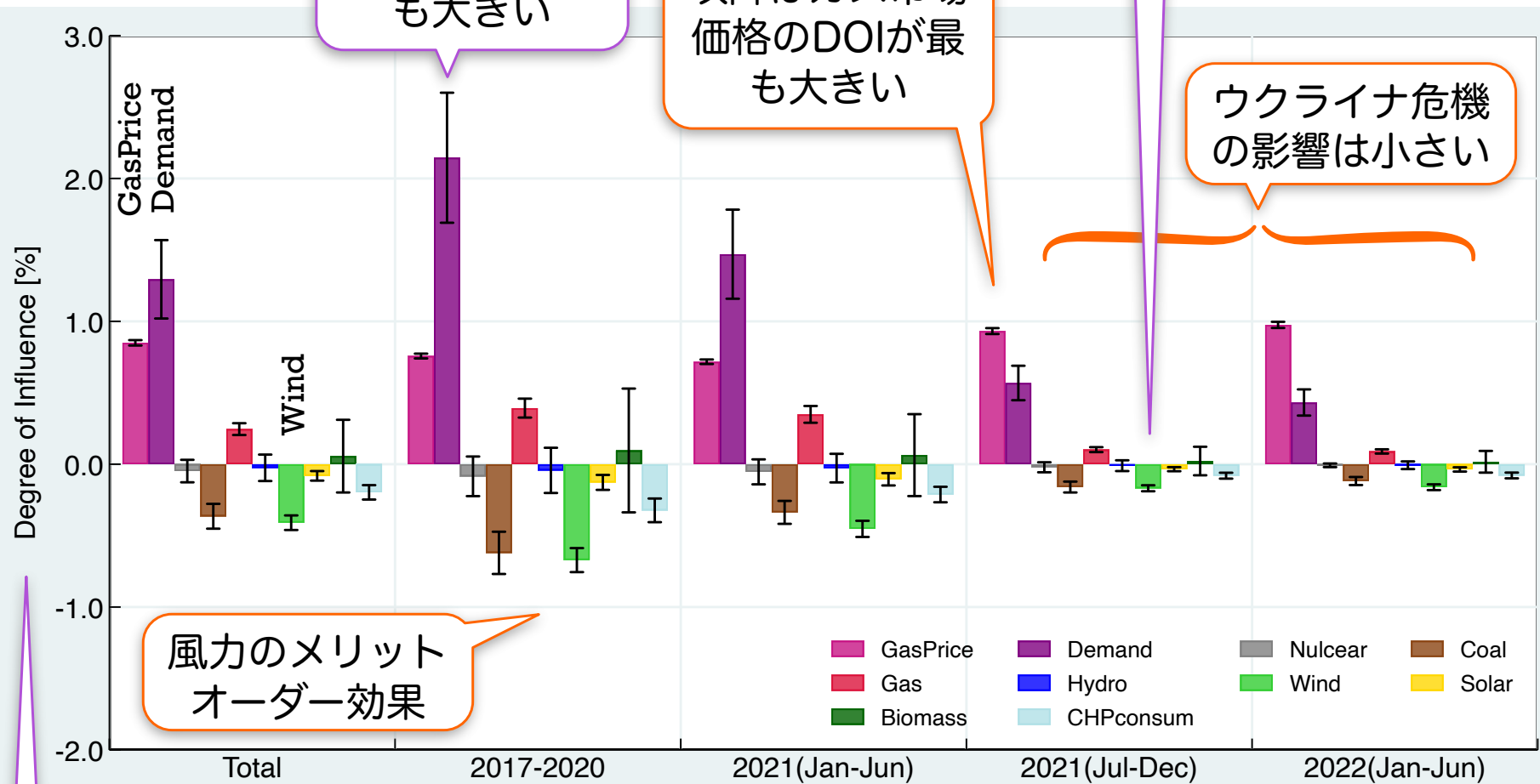
2020年以前は
需要のDOIが最
も大きい

2021年下半期
以降はガス市場
価格のDOIが最
も大きい

2021年下半期以降
は風力のDOIは寧ろ
相対的に小さい

ウクライナ危機
の影響は小さい

風力のメリット
オーダー効果



各操作変数を仮想的に1%変化させた場合の被説明変数の変化(%)



限界効果(弾性値)の算出結果 (部分)



- STATAでは“`margins, eyex(*)`” コマンドで算出可能

```
. margins if AreaNo == 1, eyex(*)
```

Average marginal effects
Model VCE: OLS

Number of obs = 2,007

Expression: Linear prediction, predict()

ey/ex wrt: GasPrice Demand Nuclear Coal Gas Hydro Wind Solar Biomass PHSconsum

ただし、margins コマンドだとP値が大きく統計的に有意でない結果となる場合も

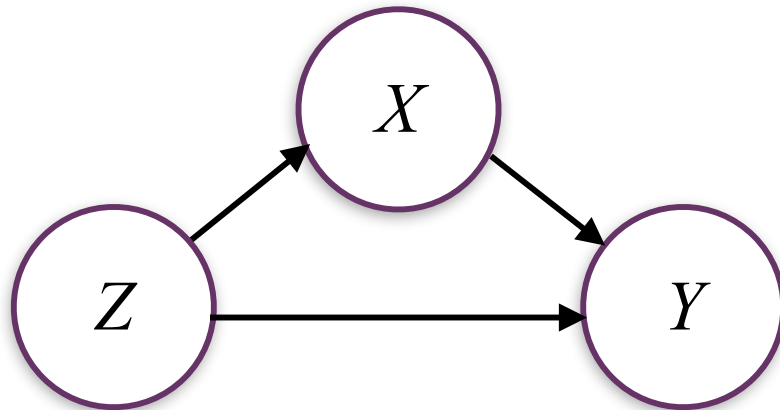
	Delta-method ey/ex	std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
GasPrice	.8091616	2.74208	0.30	0.768	-4.568477	6.1868
Demand	1.877468	9.028342	0.21	0.835	-15.82849	19.58343
Nuclear	-.0752321	.300052	-0.25	0.802	-.66368	.5132158
Coal	-.4753753	1.59753	-0.30	0.766	-3.608377	2.657626
Gas	.3609392	.8548651	0.42	0.673	-1.315582	2.037461
Hydro	-.0364446	.2246601	-0.16	0.871	-.4770374	.4041483
Wind	-.7142469	5.891791	-0.12	0.904	-12.26895	10.84046
Solar	-.0990087	.6677973	-0.15	0.882	-1.408661	1.210644
Biomass	.0792455	.4522171	0.18	0.861	-.8076215	.9661125
PHSconsum	-.2730626	2.06214	-0.13	0.895	-4.317235	3.77111

分析対象区間で被説明変数に0または負の値が含まれるため

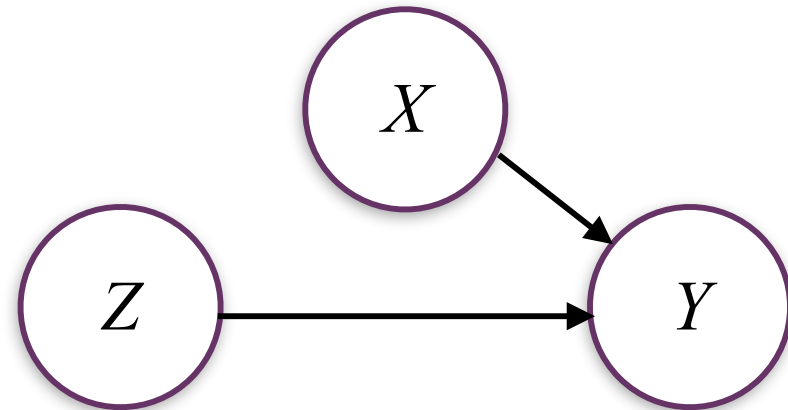
DOI算出方法に理論的にさらなる検証が必要



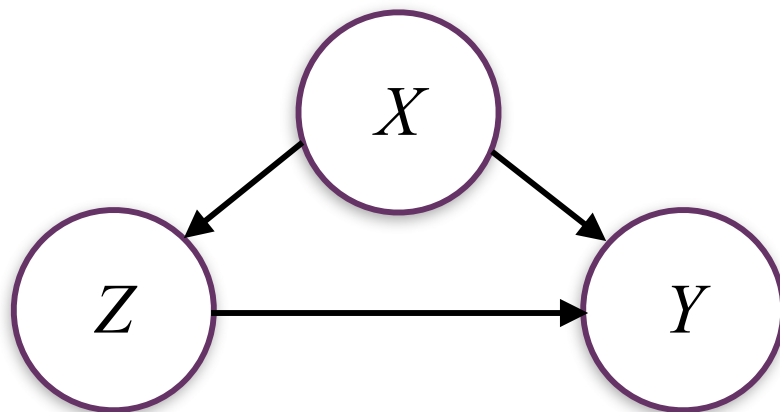
交絡性の考慮



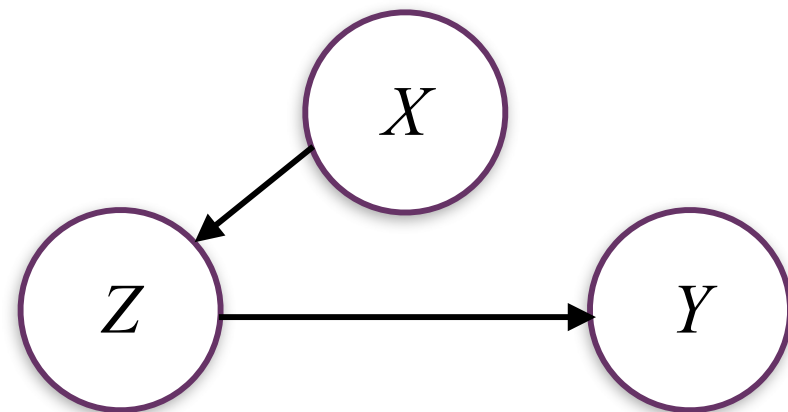
(a) X is a modifier



(b) X is an intermediate variable



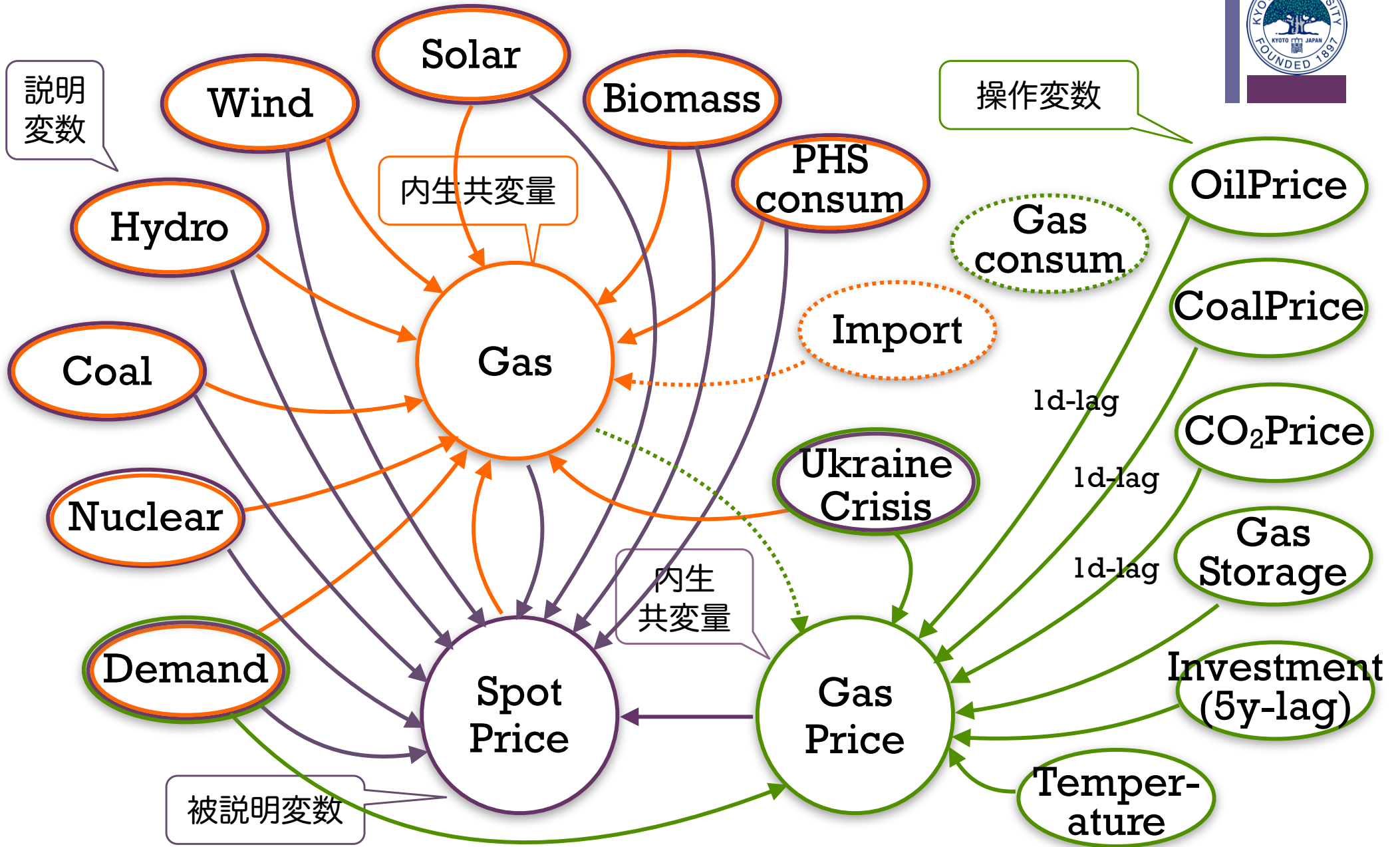
(c) X is a control variable



(d) X is a confounding factor



重回帰分析モデル② (交絡性考慮)



+ モデル②推定式

操作変数法の一つ。操作変数を用いて因果関係のある程度示すことが可能。

16



■ 3段階最小二乗法(3LS)

$$\begin{aligned} \text{SpotPrice}_t = & \alpha_1 \text{GasPrice}^*_t + \alpha_2 \text{Nuclear}_t + \alpha_3 \text{Coal}_t \\ & + \alpha_4 \text{Gas}^*_t + \alpha_5 \text{Hydro}_t + \alpha_6 \text{Wind}_t \\ & + \alpha_7 \text{Solar}_t + \alpha_8 \text{Biomass}_t + \alpha_9 \text{Demand}_t \\ & + \alpha_{10} \text{UkraineCrisis}(\text{Dummy}) + \alpha_0 + \varepsilon_1 \end{aligned}$$

被説明変数

説明変数

here,

$$\begin{aligned} \text{GasPrice}^*_t = & \beta_1 \text{OilPrice}_{t-1} + \beta_2 \text{CoalPrice}_{t-1} \\ & + \beta_3 \text{CO}_2\text{Price}_{t-1} + \beta_4 \text{GasImportRU2EU}_{t-1} \\ & + \beta_5 \text{Investment}_{y-5} + \beta_6 \text{Temperature}_t \\ & + \beta_7 \text{Demand}_t + \beta_8 \text{UkraineCrisis} + \beta_0 + \varepsilon_2 \end{aligned}$$

内生共変量

操作変数

$$\begin{aligned} \text{Gas}^*_t = & \gamma_1 \text{SpotPrice}_t + \gamma_2 \text{Nuclear}_t + \gamma_3 \text{Coal}_t \\ & + \gamma_4 \text{Hydro}_t + \gamma_5 \text{Wind}_t + \gamma_6 \text{Biomass}_t \\ & + \gamma_7 \text{Demand}_t + \gamma_0 + \varepsilon_3 \end{aligned}$$

内生共変量



3LS法(モデル②)分析結果 (部分)



Three-stage least-squares regression

Equation	Obs	Params	RMSE	"R-squared"	chi2	P>chi2
SpotPrice	2,006	11	17.67299	0.9132	19887.08	0.0000
GasPrice	2,006	8	9.891309	0.8954	17155.95	0.0000
Gas	2,006	10	1488.763	0.6597	3917.88	0.0000

被説明変数

説明変数

内生共変量

	Coefficient	Std. err.	z	P> z	[95% conf. interval]	
SpotPrice						
GasPrice	1.770992	.0288104	61.47	0.000	1.714524	1.827459
Demand	.0004286	.0001911	2.24	0.025	.0000541	.0008031
Nuclear	2.76e-06	.0003549	0.01	0.994	-.0006927	.0006983
Coal	-.0004283	.0001726	-2.48	0.013	-.0007665	-.0000901
Gas	.0050947	.0003617	14.09	0.000	.0043858	.0058036
Hydro	.0008025	.0010628	0.76	0.450	-.0012805	.0028855
Wind	-.0010738	.0001511	-7.11	0.000	-.0013699	-.0007777
Solar	-.0001181	.0002416	-0.49	0.625	-.0005916	.0003555
Biomass	-.0015974	.0019405	-0.82	0.410	-.0054008	.0022059
PHSconsum	-.0124929	.0013368	-9.35	0.000	-.0151129	-.0098729
UkraineCrisis	.2162485	2.618251	0.08	0.934	-4.915429	5.347926
_cons	1.316872	10.95254	0.12	0.904	-20.14972	22.78346
GasPrice						
OilPrice						
L1.	-.1862083	.0267991	-6.95	0.000	-.2387337	-.1336829



限界効果(弾性値)の算出結果 (部分)



- STATAでは“`margins, eyex(*)`” コマンドで算出可能

```

Average marginal effects                                Number of obs = 2,006

ey/ex wrt: GasPrice Demand Nuclear Coal Gas Hydro Wind Solar Biomass PHSconsum UkraineCrisis
           L.DR_GasTransRU2EU DR_Invest5yLag Temp SpotPrice Import

1._predict: Linear prediction, predict(xb equation(SpotPrice))
2._predict: Linear prediction, predict(xb equation(GasPrice))
3._predict: Linear prediction, predict(xb equation(Gas))

```

ただし、margins コマンドだとP値が大きく統計的に有意でない結果となる場合も

		Delta-method				
	ey/ex	std. err.	z	P> z	[95% conf. interval]	
GasPrice	_predict					
	1	.9096235	.7813887	1.16	0.244	-.6218703 2.441117
	2	0	(empty)			
	3	0	(empty)			
Demand	_predict					
	1	.6615499	1.109307	0.60	0.551	-1.512652 2.835752
	2	.4150897	.161421	2.57	0.010	.0987104 .731469
	3	7.574212	.2417169	31.34	0.000	7.100455 8.047968
Nuclear	_predict					
	1	.0005755	.0737287	0.01	0.994	-.14393 .1450811
	2	0	(empty)			
	3	-.7516148	.0569628	-13.19	0.000	-.8632598 -.6399698

分析対象区間で被説明変数に0または負の値が含まれるため

DOI算出方法に理論的にさらなる検証が必要

marginsコマンドだと操作変数の影響が評価できない(?)

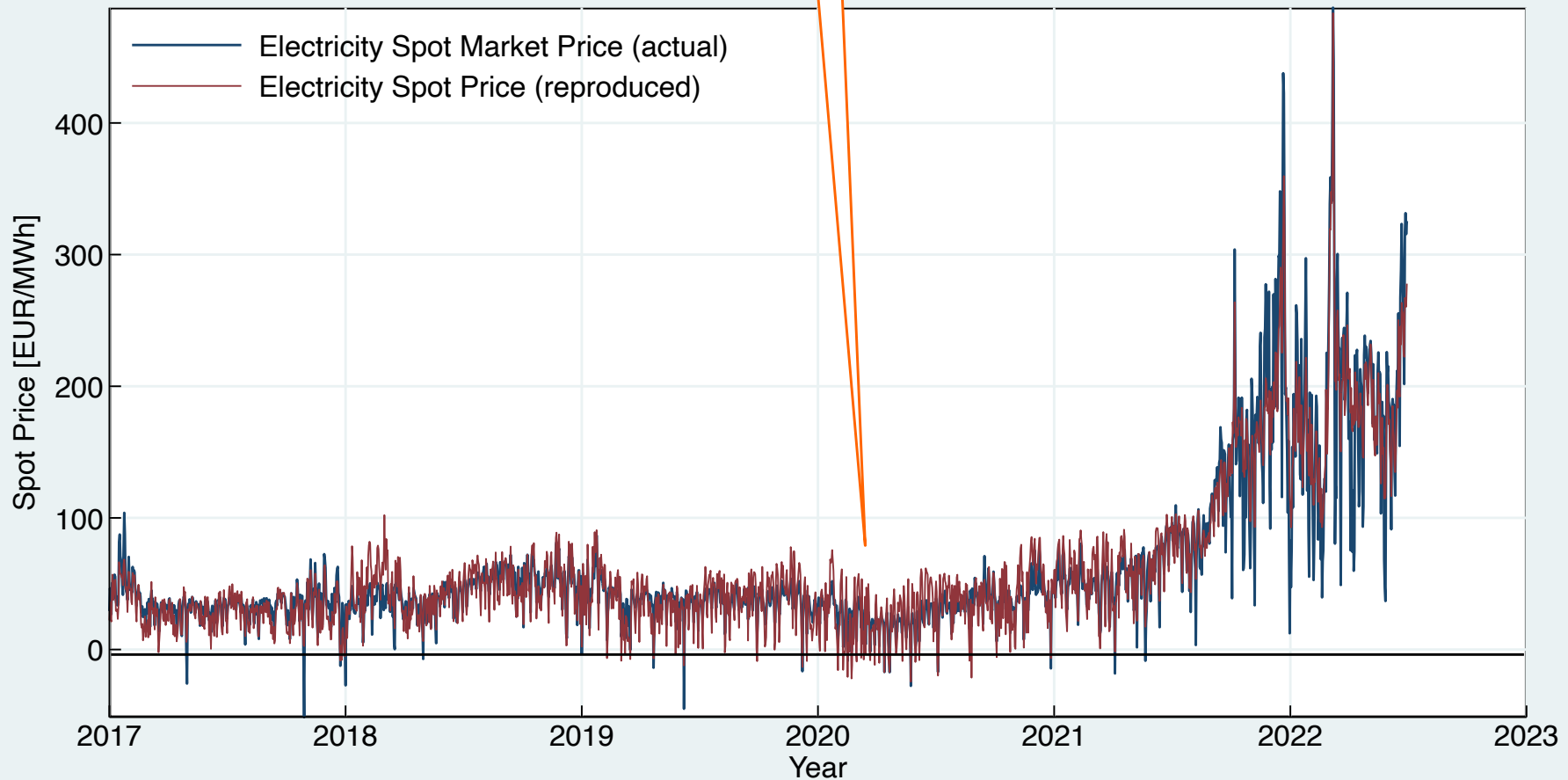


実測値と推定値との比較



被説明変数の推定値に0
または負の値が多い区間
は弾性値がとりづらい

DOI算出方法に
理論的にさらなる
検証が必要



+ ドイツの限界効果(弾性値)分析結果 (3段階最小二乗法)



ドイツ

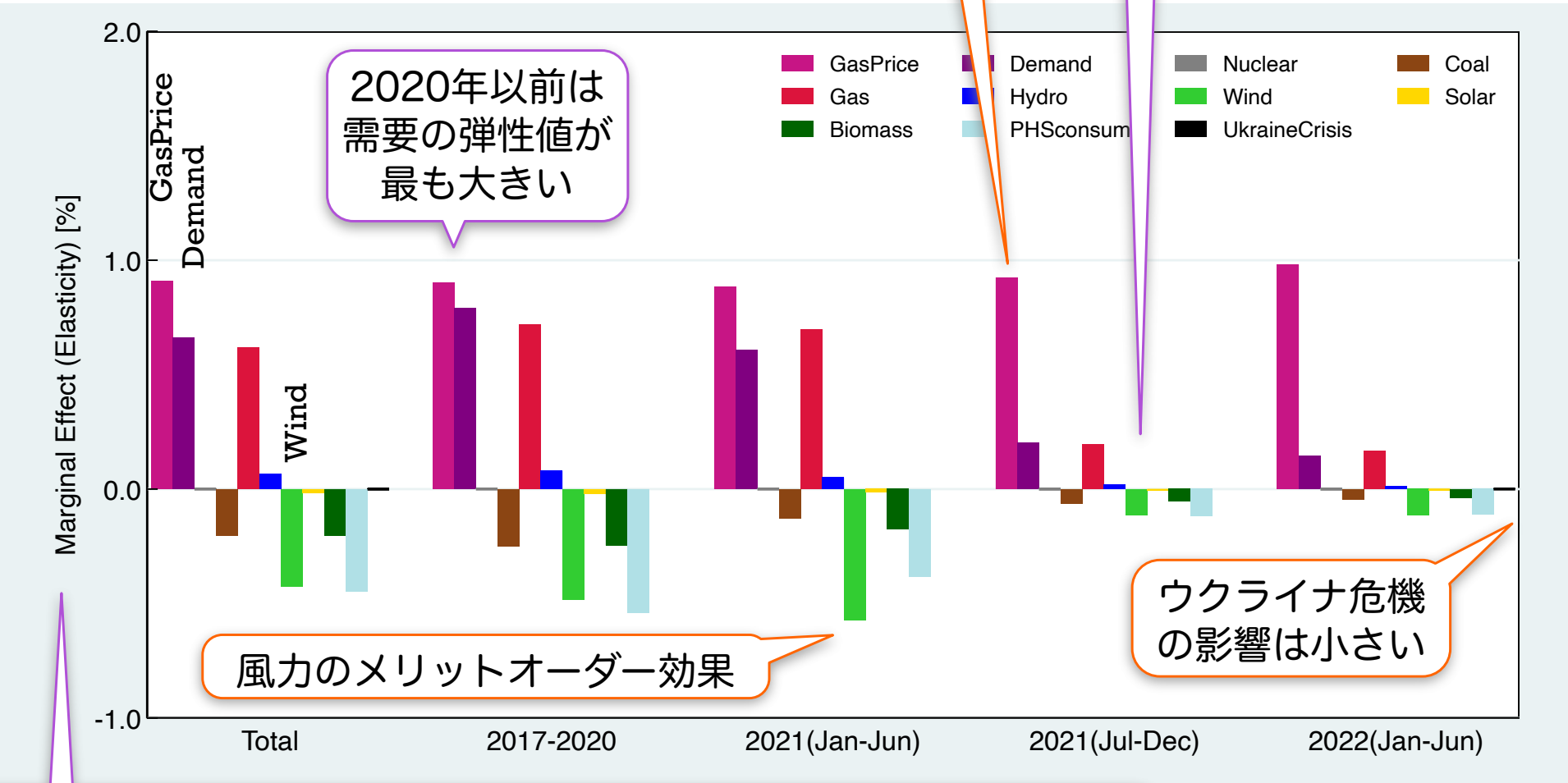
2021年下半年期以降
はガス市場価格の
弾性値が最も大きい

2021年下半年期以降
は風力の弾性値は
寧ろ相対的に小さい

2020年以前は
需要の弾性値が
最も大きい

風力のメリットオーダー効果

ウクライナ危機
の影響は小さい



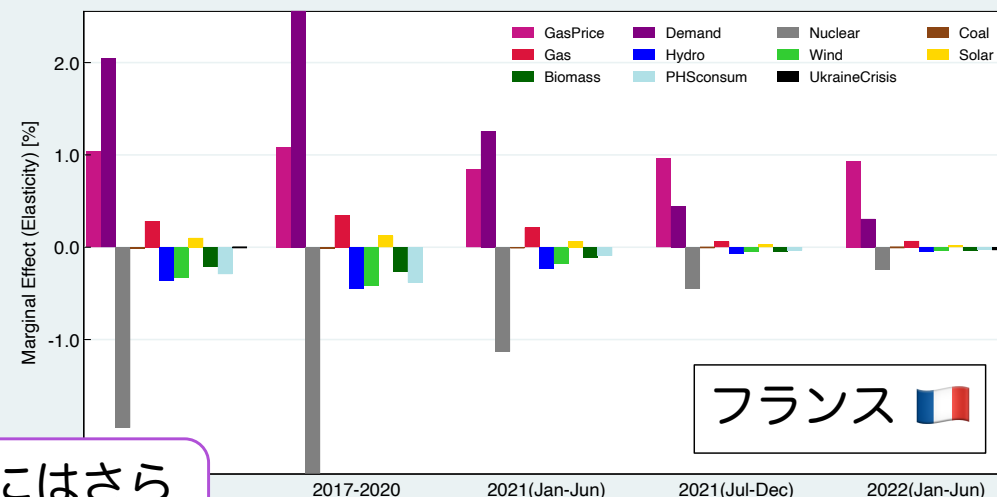
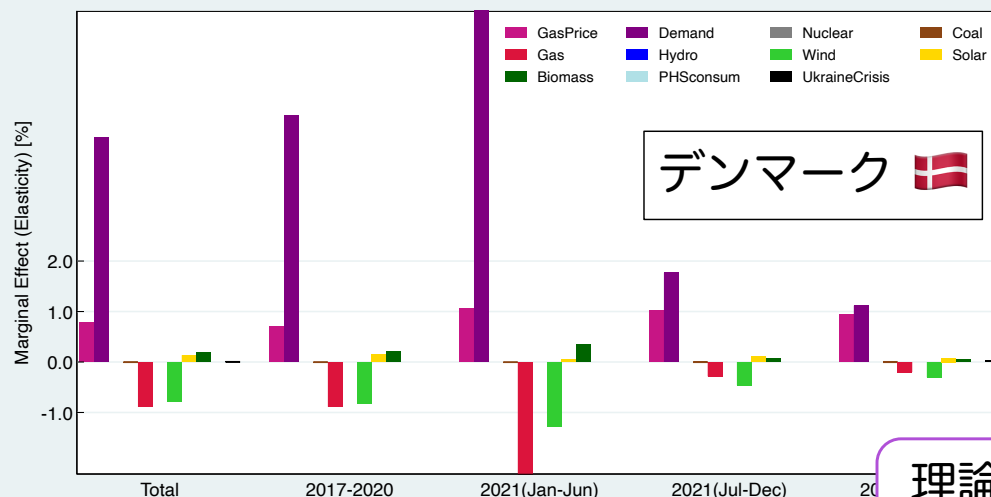
各操作変数を仮想的に1%変化させた場合の被説明変数の変化(%)

+他の欧州市場の弾性値分析結果 (3段階最小二乗法)

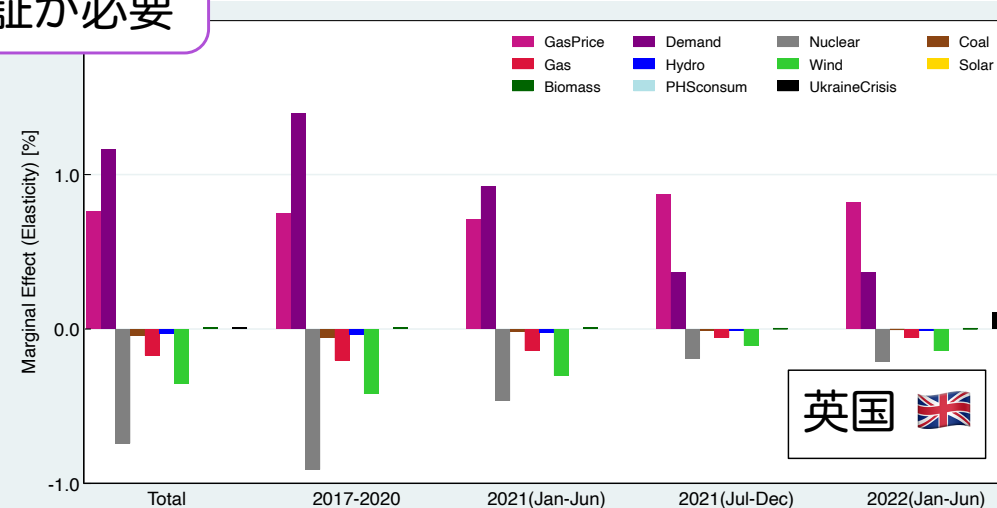
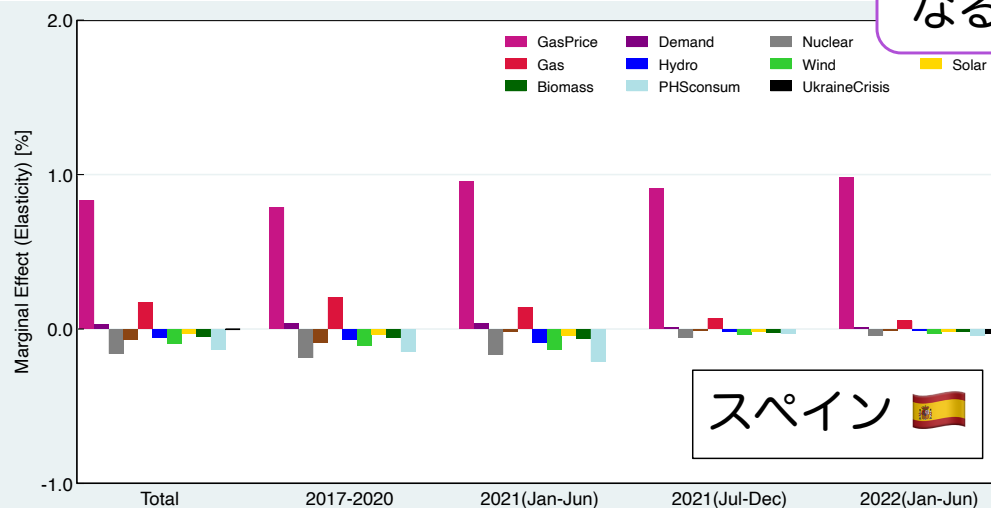


2021年後半以降、最も弾性値が高いのはいずれの市場でもガス市場価格

2021年後半以降、風力の弾性値は多くの市場でも相対的に小さい



理論的にはさらなる検証が必要



+ まとめ



- 2021年以降の欧州電力市場価格高騰の影響を探るために重回帰分析を実施。
- 3段階最小二乗法を用いた因果推論
- 限界効果(弾性値)による影響度の定量評価

理論的には
さらなる
検証が必要



- 2021年下半期以降の電力市場価格はガス市場価格に最も影響を受ける。
- 風力発電出力の電力市場価格に与える影響は限定的で、ガス市場価格に比較して小さい。
- 2021年下半期以降は、風力の影響は寧ろ更に低い



京大再エネ講座
研究会
部門A

2021年欧州電力市場価格高騰の 影響度分析

～スペイン、フランス、ドイツ、
デンマーク、英国の市場分析～

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

