

太陽光発電の出力抑制と時間前取引

Effects of Solar Power Curtailment in the Intraday Market : An Empirical Study in Kyushu, Japan

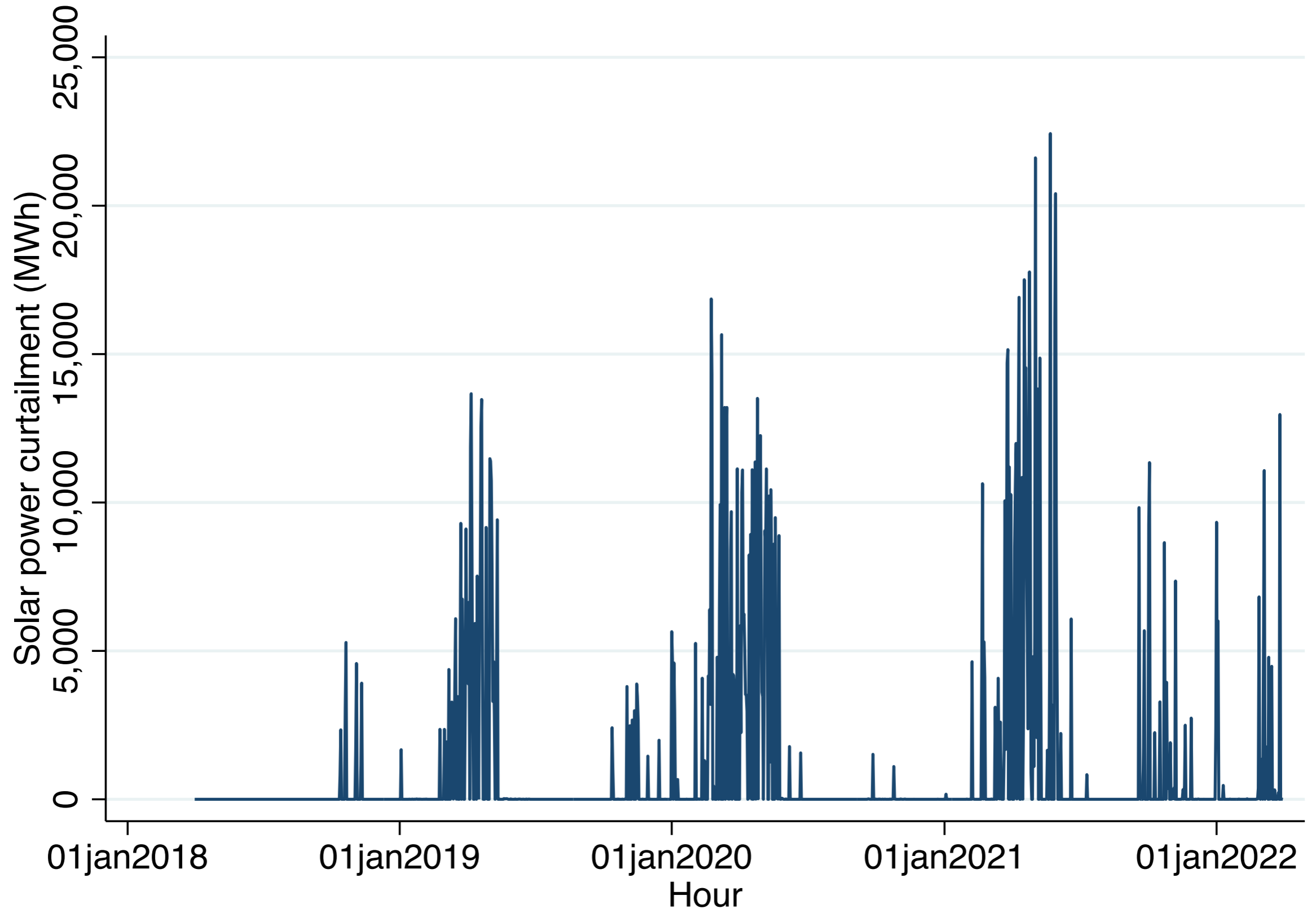
馬 騰; 2023年4月24日

第7回再エネ講座公開研究会

背景・論点

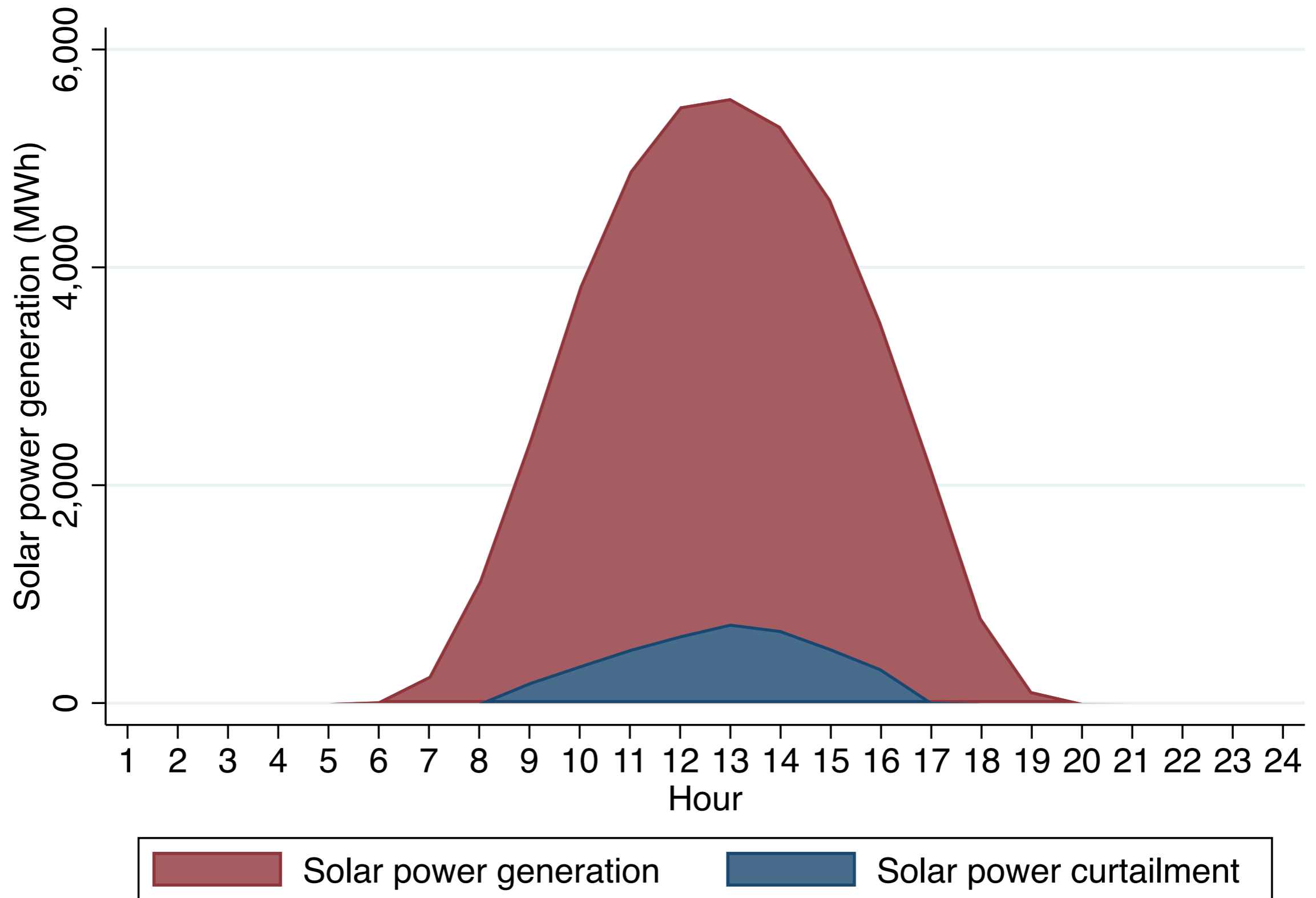
- 日本の再エネ出力抑制が主に**東北地方（風力発電）**と**九州地域（太陽光発電）**に発生
- 2018年10月に最初の太陽光出力抑制が九州地域に発生した以来、出力抑制の抑制量と発生頻度が多くなっている
- 太陽光出力抑制量は太陽光発電量に占める平均シェア：約6%、最大シェア：約86%（2021年4月18日午後2時）
- 太陽光出力抑制の低減に：**1.出力抑制の効率化（発電設備のオンライン化）**、**2.供給対策（30日ルール、新ルール）**、**3.需要対策（揚水）**、**4.系統対策（連系線）** (METI, 2021)
- オンライン制御の抑制量は前日16時に確定し、当日2時間前調整が可能（時間前市場に取引することが可能）

太陽光発電出力抑制の抑制量と頻度の推移



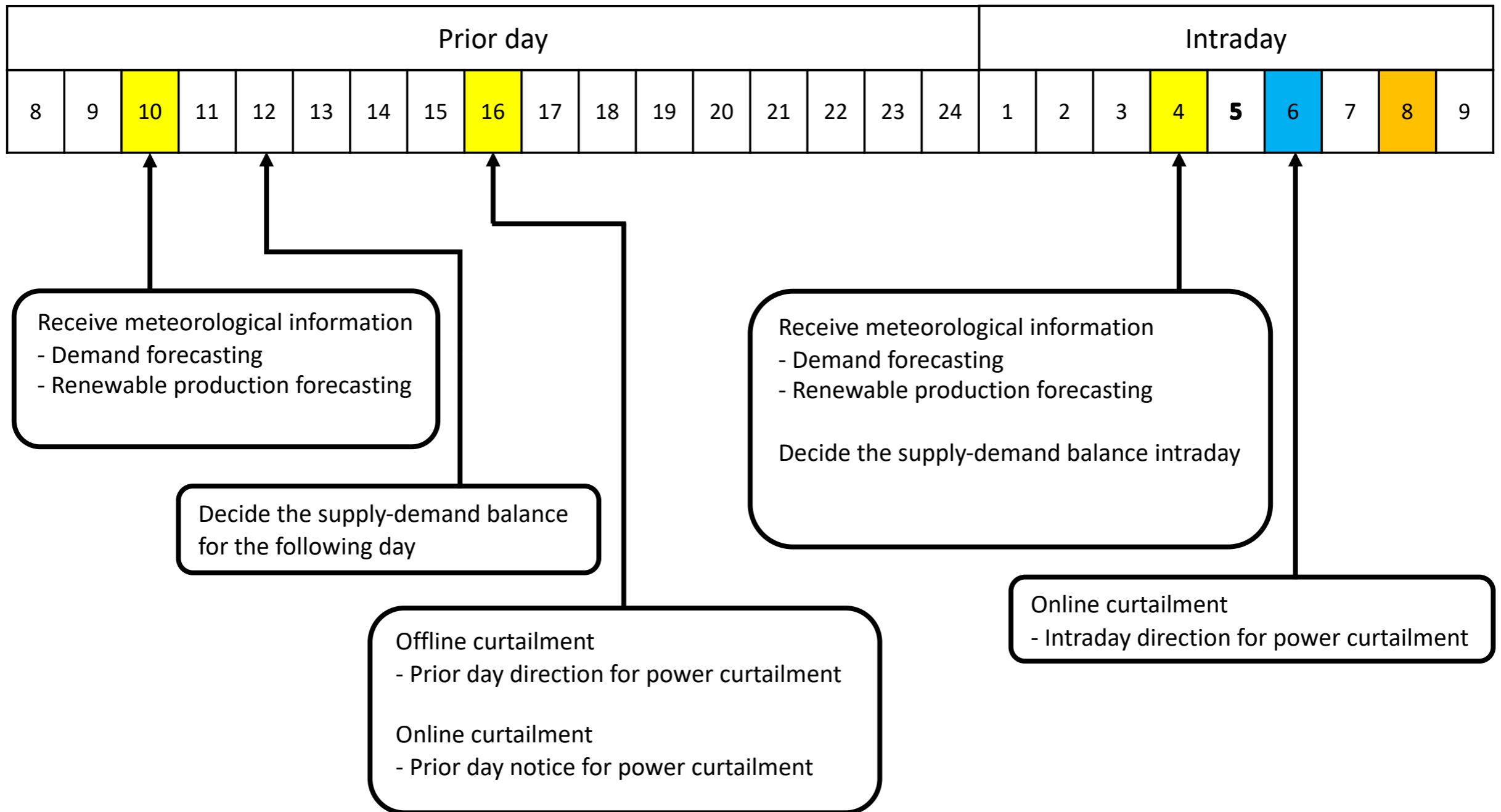
Source: Kyushu EPCO, n.d..

太陽光発電の出力抑制



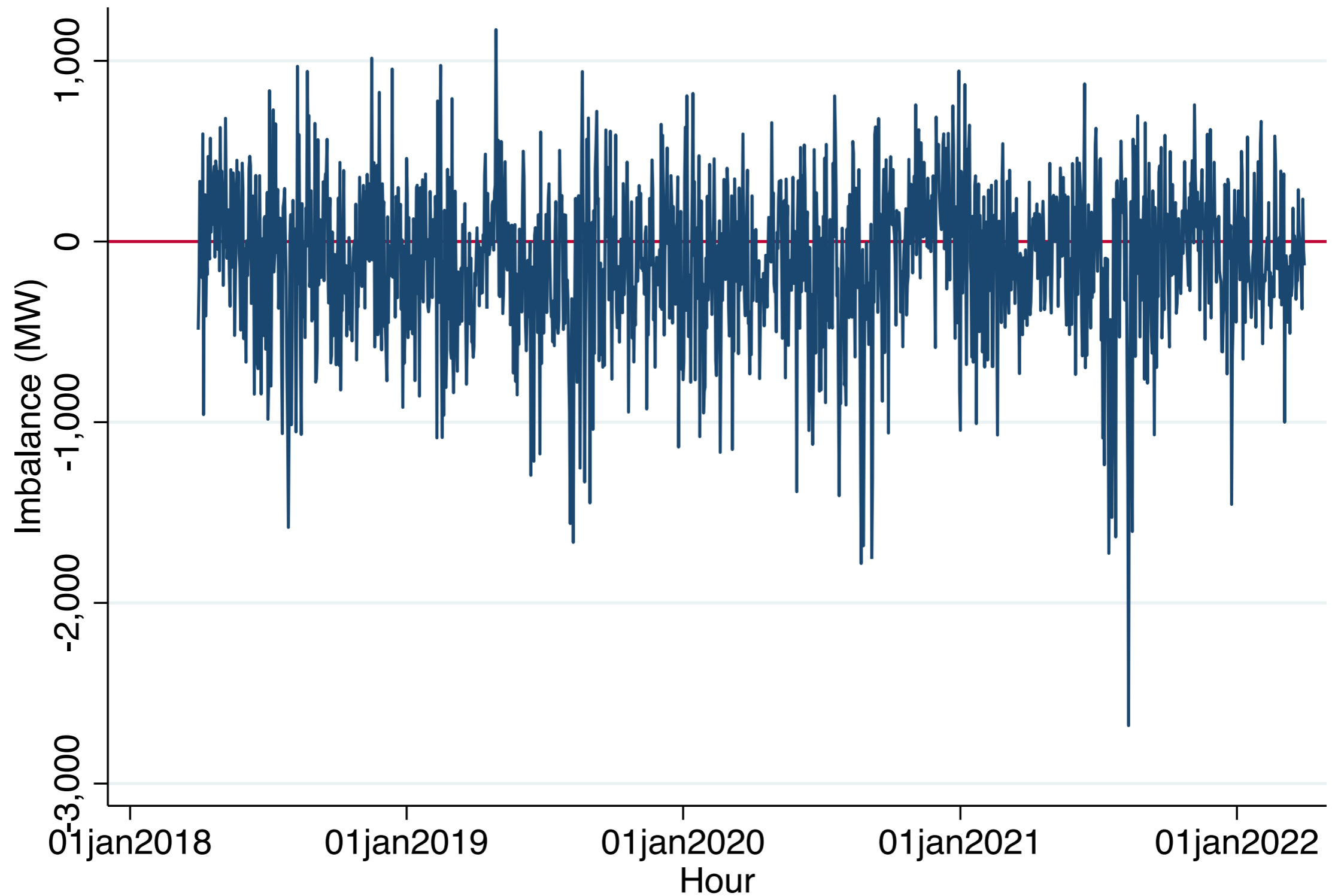
Source: Kyushu EPCO, n.d..

太陽光出力抑制ルール



Source: REI (2020).

アンバランスの電力需給関係



Source: OCCTO, n.d..

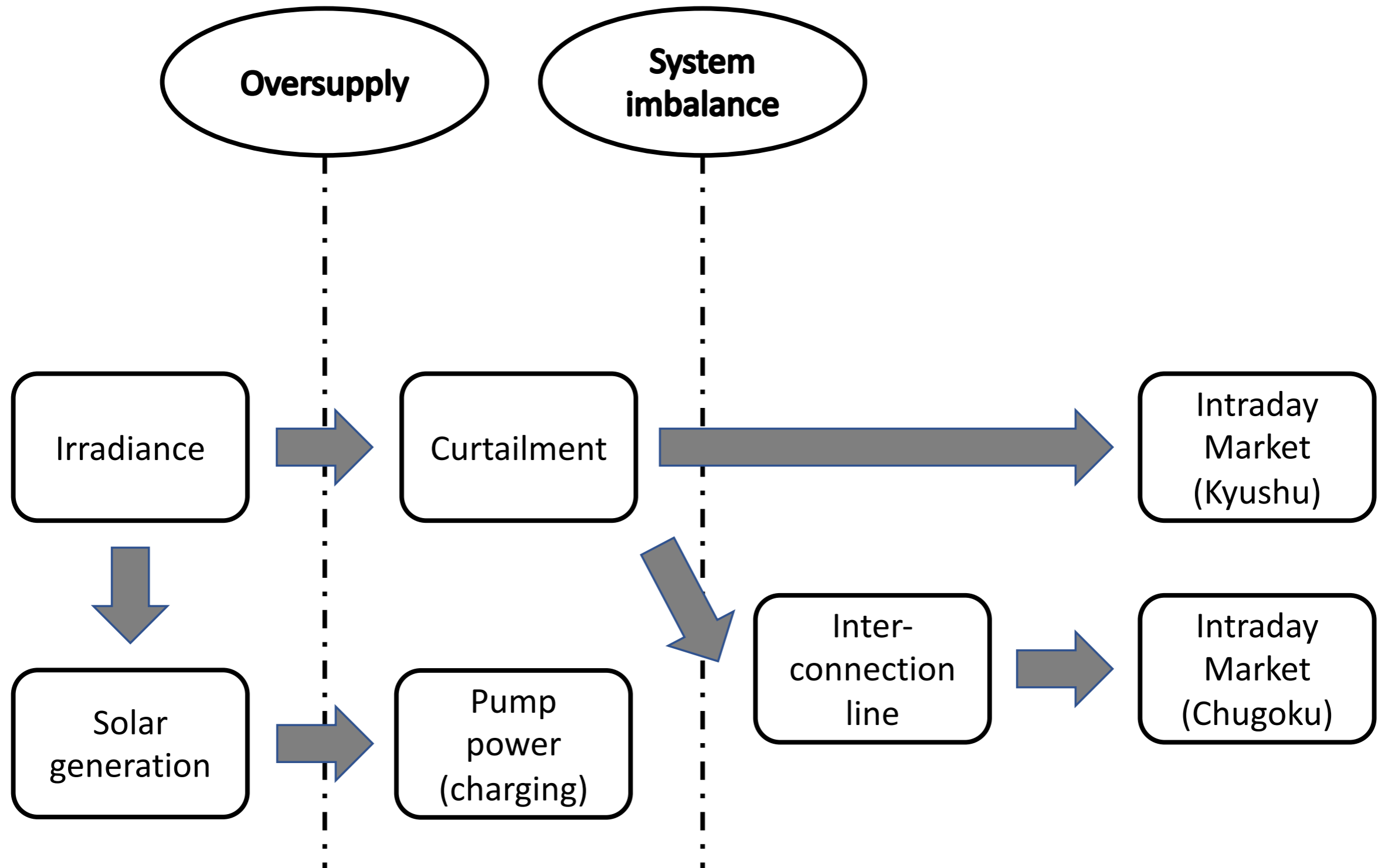
先行研究

- 九州地域の出力抑制の削減については：①翌日需給バランス測定ミス；②週末の需要変動；③特定な時間帯(9時-15時)の間に注目すべきなどを指摘（Dumlao and Ishihara, 2020）
- 太陽光出力抑制と揚水発電の関係を検討、揚水発電の出力抑制削減効果を指摘（Ichimura, 2020）

目的・意義

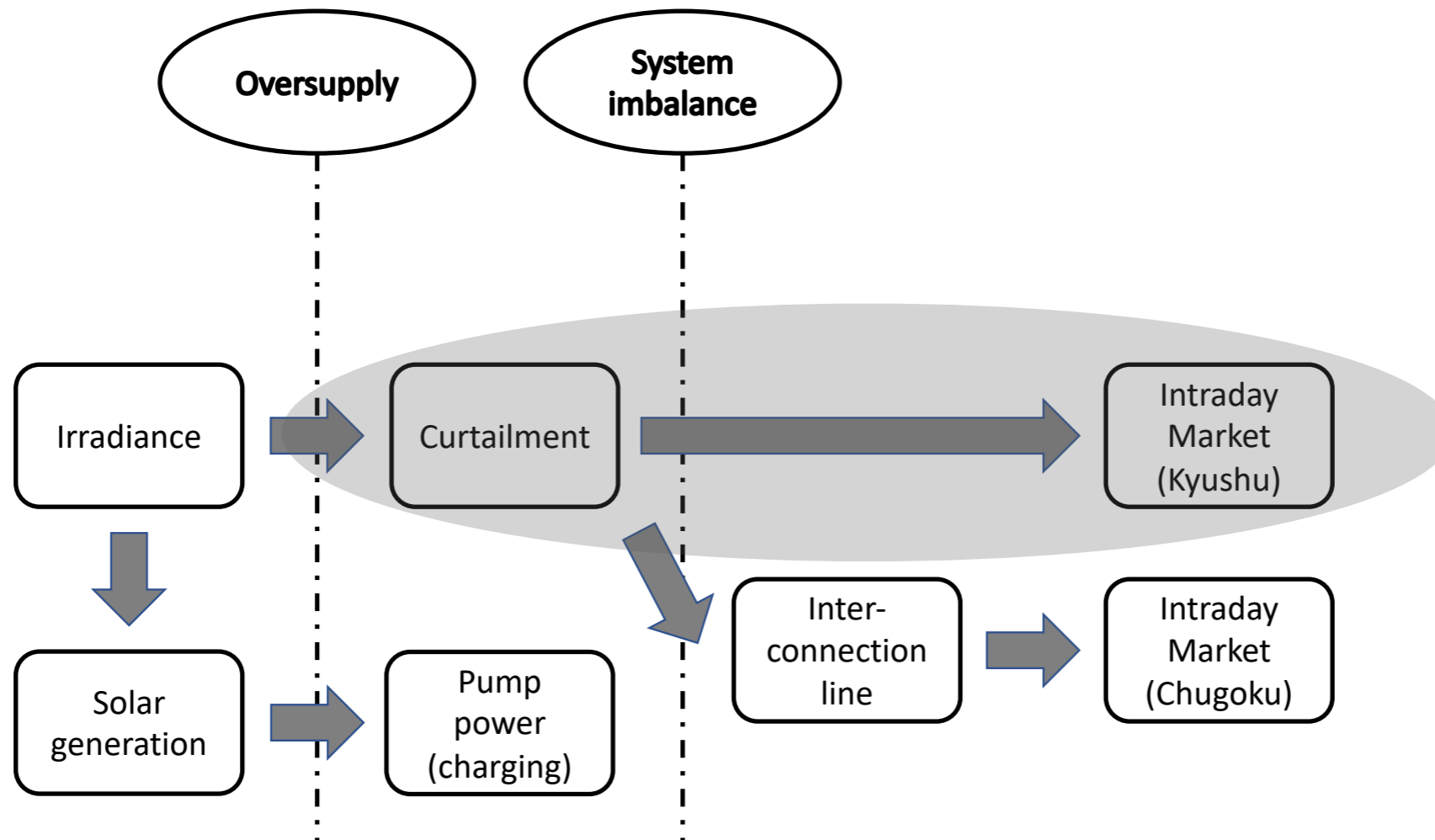
- 九州地域の太陽光発電出力抑制が時間前市場価格に与える影響を明らかにすること
- 太陽光発電の出力抑制が関門連系線による電力調達された分が時間前市場価格に与える影響を明らかにすること

研究目標



研究手法

- Linear Unobserved Effects Panel Data Modelを採用
- 抑制された太陽光発電が時間前市場に与える影響を分析



基本モデル

$$Price_{it} = \beta_0 + \beta_2 Price_{i,t-1} + \beta_3 Curtailment_{it} + \beta_4 Control_{it} + \xi_t + v_i + \varepsilon_{it},$$

- i : 日; t : 時間
- $Price_{it}$: 時間前市場の取引価格
- $Curtailment_{it}$: 太陽光発電出力抑制の速報値
- $Control_{it}$: スポット価格($SpotPrice_{it}$)、時間前市場の取引量($TradingVolume_{it}$)、供給力に対する予想電力の割合($Utilization_{it}$)、関門系結線による電力輸送量($Transmission_{it}$)
- ξ_t : 時間効果; v_i : 個人効果; ε_{it} : 残差

データ

- 研究期間：2018年度－2021年度、太陽光発電出力抑制が発生した日、8 am. ~ 6 pm.
- サンプル数：4,070
- データの出所：

市場情報に関するデータ：

日本卸電力取引所のホームページ

電力供給と需要に関するデータ：

大手電力会社のホームページ、

電力広域的運営推進機関の系統情報サービスシステム

基礎統計量

Variables	Unit	N	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>Price_{it}</i>	yen/kWh	4,070	7.866	5.991	0.015	80.25
<i>Curtailement_{it}</i>	MWh	4,070	352.8	592.8	0	3,481
<i>SpotPrice_{it}</i>	yen/kWh	4,070	7.318	5.716	0.010	80
<i>TradingVolume_{it}</i>	kWh	4,070	716.5	601.3	9	7,250
<i>CapacityRealUsed_{it}</i>	10MW	4,070	901.9	116.3	626	1,423
<i>Forecast_{it}</i>	10MW	4,070	910.5	117.7	600	1,450
<i>Utilization_{it}</i>	%	4,070	77.99	4.442	63.11	88.78
<i>Transmission_{it}</i>	MWh	4,070	2,033	481.3	452	3,122

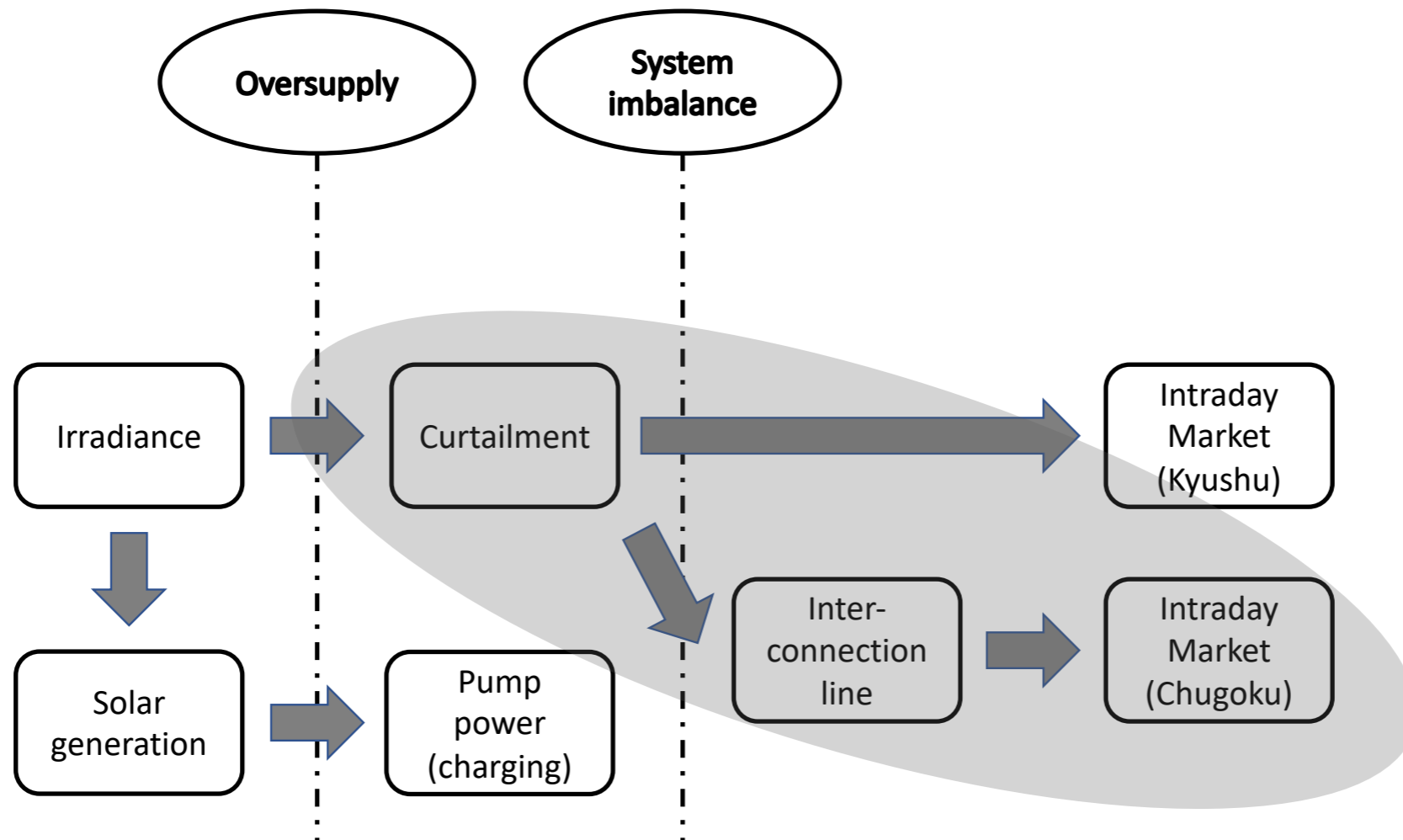
分析結果

$Price_{it}$	(1)	(2)	(3)	(4)
$Price_{i,t-1}$	0.228*** (0.021)	0.222*** (0.021)	0.227*** (0.021)	0.221*** (0.021)
$Curtailment_{it}$	-0.005*** (0.002)	-0.004** (0.002)	-0.004** (0.002)	-0.004* (0.002)
$SpotPrice_{it}$	0.659*** (0.023)	0.651*** (0.026)	0.660*** (0.023)	0.652*** (0.026)
$TradingVolume_{it}$	-0.028*** (0.007)	-0.027*** (0.007)	-0.028*** (0.007)	-0.027*** (0.007)
$Utilization_{it}$		0.003 (0.002)		0.003* (0.002)
$Transmission_{it}$		-0.065*** (0.018)		-0.065*** (0.018)
$Over_{it}$			0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
$Cross_{it}$			-0.000** (0.000)	-0.000** (0.000)
$Constant$	0.500*** (0.061)	0.786*** (0.162)	0.497*** (0.061)	0.758*** (0.162)
Hourly dummies	Y	Y	Y	Y
N	3,700	3,700	3,700	3,700
R^2_{within}	0.834	0.835	0.834	0.835

- 九州地域の太陽光出力抑制が1%を増加すると、時間前市場価格が約0.004%低下（出力抑制が発生した時、電力供給が需要を上まえることを予想される）
- 時間前市場価格がスポット価格と連動している。
- 時間前市場取引量の増加により、市場価格が低下
- 電力需要が供給を上回った時、出力抑制が時間前市場価格に与える影響がさらに大きくなる（インバランス毎10MW増加、太陽光出力抑制が時間前市場価格への影響が0.00015%増加）
- 電源予想利用率の増加により、市場価格が増加
- 関門連系線による中国地域への電力調達により、時間前市場価格が低下

研究手法（地域間電力調達の影響）

- 2 Stage Linear Unobserved Effects Panel Data Modelを採用
- 抑制された太陽光発電が中国地方の時間前市場に与える影響を分析



モデル2

Stage 1:

$$Transmission_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Curtailment_{it} + \gamma_2 Control_{it} + \xi_t + v_i + \tau_{it},$$

- $Transmission_{it}$: 系統連系線による九州地方から中国地方への電力調達量
- $Control_{it}$: 中国地方の供給力に対する予想電力の割合 ($Utilization_{it}$)、中国地方のスポット電力価格

Stage 2:

$$Price_{it} = \beta_0 + \beta_2 Price_{i,t-1} + \beta_3 \widehat{Transmission}_{it} + \beta_4 Control_{it} + \xi_t + v_i + \varepsilon_{it},$$

- $\widehat{Transmission}_{it}$: Stage 1で計算された $Transmission_{it}$ の予測値
- $Control_{it}$: スポット価格($SpotPrice_{it}$)、時間前市場の取引量 ($TradingVolume_{it}$)、供給力に対する予想電力の割合($Utilization_{it}$)、Stage 1の残差項(τ_{it} (電力調達量(太陽光発電出力抑制の影響を除き)))

分析結果（地域間電力調達の影響）（stage 1）

<i>Transmission_{it}</i>	(1)	(2)	(3)
<i>Curtailment_{it}</i>	0.029*** (0.002)	0.007*** (0.003)	0.007** (0.003)
<i>UtilizationCGK_{it}</i>	0.002** (0.001)	0.004*** (0.001)	0.005*** (0.001)
<i>SpotPriceCGK_{it}</i>			-0.019 (0.012)
<i>Constant</i>	7.295*** (0.091)	7.053*** (0.089)	7.057*** (0.090)
Hourly dummies	N	Y	Y
<i>N</i>	4,070	4,070	4,070
<i>R²_{within}</i>	0.157	0.275	0.276

- 太陽光出力抑制量が関門連系線による中国地域への電力調達へ影響を与える。
- 太陽光出力抑制量が1%を増加すると、中国地域への電力調達は0.007%増加

分析結果 (地域間電力調達の影響) (stage 2)

$Price_{it}$	(1)	(2)	(3)	(4)
$Price_{i,t-1}$	0.228*** (0.021)	0.226*** (0.021)	0.226*** (0.021)	0.223*** (0.021)
$\widehat{Transmission}_{it}$	-0.700*** (0.264)	-1.300*** (0.335)	-0.479* (0.287)	-1.061*** (0.363)
$SpotPrice_{it}$	0.659*** (0.023)	0.651*** (0.026)	0.660*** (0.023)	0.652*** (0.026)
$TradingVolume_{it}$	-0.028*** (0.007)	-0.029*** (0.007)	-0.028*** (0.007)	-0.029*** (0.007)
$Utilization_{it}$		0.002 (0.002)		0.002 (0.002)
$Transmission(Other)_{it}$		0.647*** (0.185)		0.624*** (0.190)
$Over(CGK)_{it}$			0.000 (0.000)	0.000 (0.000)
$Cross(CGK)_{it}$			-0.023** (0.011)	-0.023** (0.011)
$Constant$	0.500*** (0.061)	-4.475*** (1.423)	0.498*** (0.061)	-4.322*** (1.474)
Hourly dummies	Y	Y	Y	Y
N	3,700	3,700	3,700	3,700
R^2_{within}	0.834	0.834	0.834	0.834

- 太陽光出力抑制量が関門連系線による中国地域へ調達された分が時間前市場価格へマイナスの影響を与え

- 太陽光出力抑制量が関門経由の調達量が1%を増加すると、時間前市場価格が約0.003%低下 (0.007 * -0.479 = 0.0034)

- 中国地域のインバランス毎10MW増加すると、太陽光出力抑制量が時間前市場価格への影響が0.00016%増加 (0.007 * -0.023 = 0.00016)

結論

- 九州地域の太陽光出力抑制の解除が時間前市場に減価効果を与える（当日調整が重要）
- 連系線による電力調達によって、九州地域の太陽光出力抑制の解除が地域外（中国地域）で取引することが可能