

# 日本全国の自治体における屋上太陽光発電とEVの統合による脱炭素化ポテンシャル

日本全国1741の自治体における屋上太陽光発電（PV）とEV（電気自動車）を統合したシステムの脱炭素化ポテンシャルについて分析した研究結果を紹介する。この研究は、東北大学を中心とした研究チームによって実施された。

On the decarbonization potentials of rooftop PVs integrated with EVs as battery for all the municipalities of Japan<sup>☆,☆☆</sup>

Nguyen Thi Quynh Trang<sup>a,\*</sup>, Koharu Okada<sup>a</sup>, Yusei Sugiyama<sup>b</sup>, Takahiro Yoshida<sup>c</sup>, Yujiro Hirano<sup>d</sup>, Peraphan Jittrapirom<sup>e</sup>, Tosiya Nakaegawa<sup>f</sup>, Takuro Kobashi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 468-1, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8572, Japan

<sup>b</sup> School of Engineering, Tohoku University, 6-6, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>c</sup> Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

<sup>d</sup> National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

<sup>e</sup> Radboud University, Heyendaalseweg 141, 6525 Aj Nijmegen, the Netherlands

<sup>f</sup> Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

国際学術誌 *Applied Energy* に、今年掲載されました。

Volume 393, 1 September 2025, 126067

東北大学大学院環境科学研究科  
准教授 小端拓郎

# 自己紹介

出身：静岡県三島市

1994年-1998年、北海道大学資源開発工学科 卒業（学士）

1998年-2001年、テキサスA&M大学地質・地球物理学学科 卒業（修士号）

2001年-2007年、カリフォルニア大学サンディエゴ校・スクリプス海洋研究所 卒業（Ph.D.）

2007年-2010年、地球環境戦略機関(IGES)

2010年-2014年、国立極地研究所（第52次南極地域観測隊参加）

2014年-2016年、スイス・ベルン大学

2016年-2019年、自然エネルギー財団

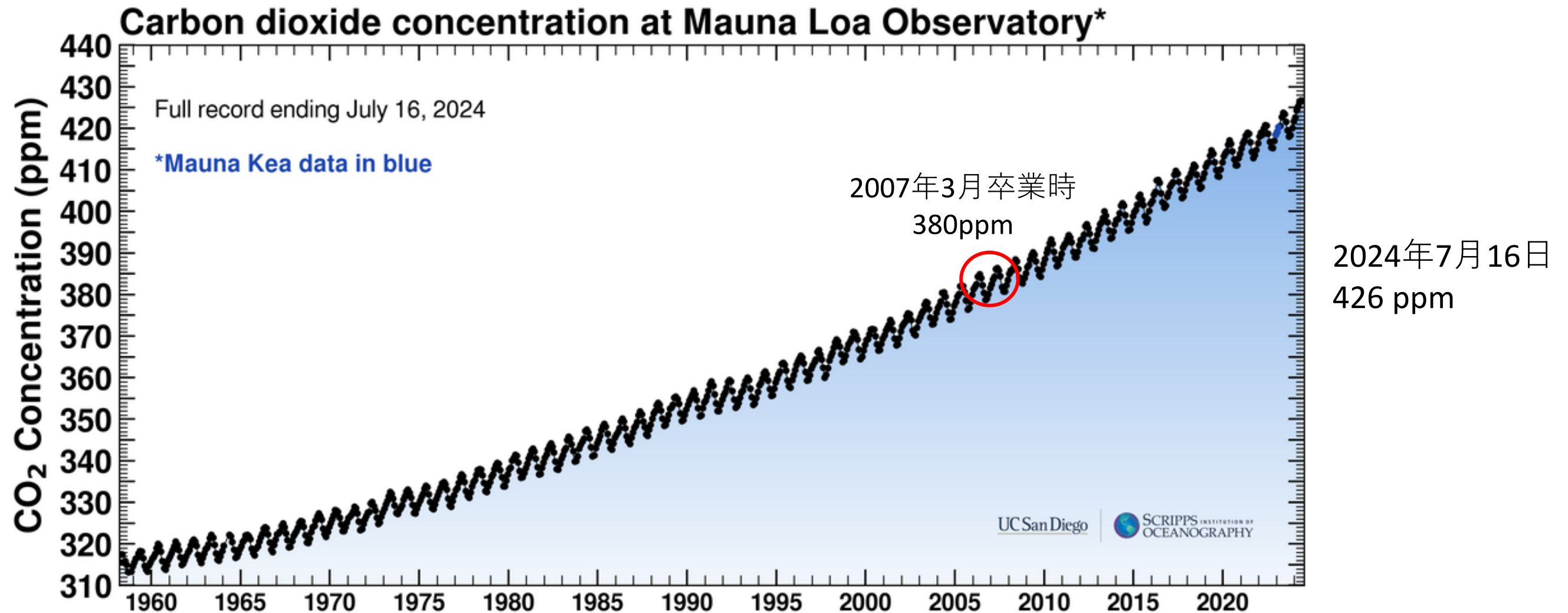
2019年-2022年、国立環境研究所

2022年4月-現在、東北大学大学院環境科学研究科

研究テーマ；都市の脱炭素化、気候変動

# キーリングカーブ

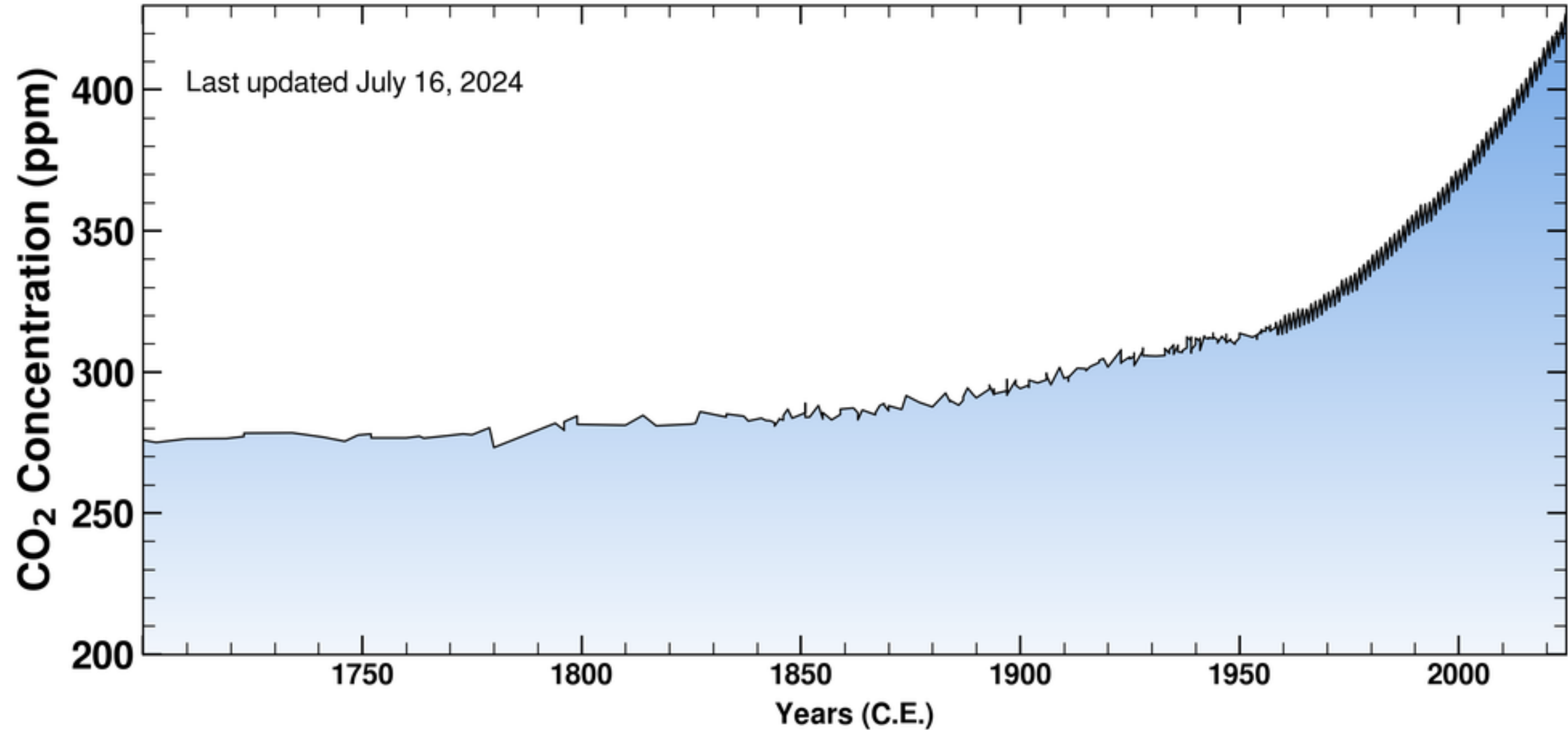
大気中CO<sub>2</sub>濃度の増加



<https://keelingcurve.ucsd.edu/>

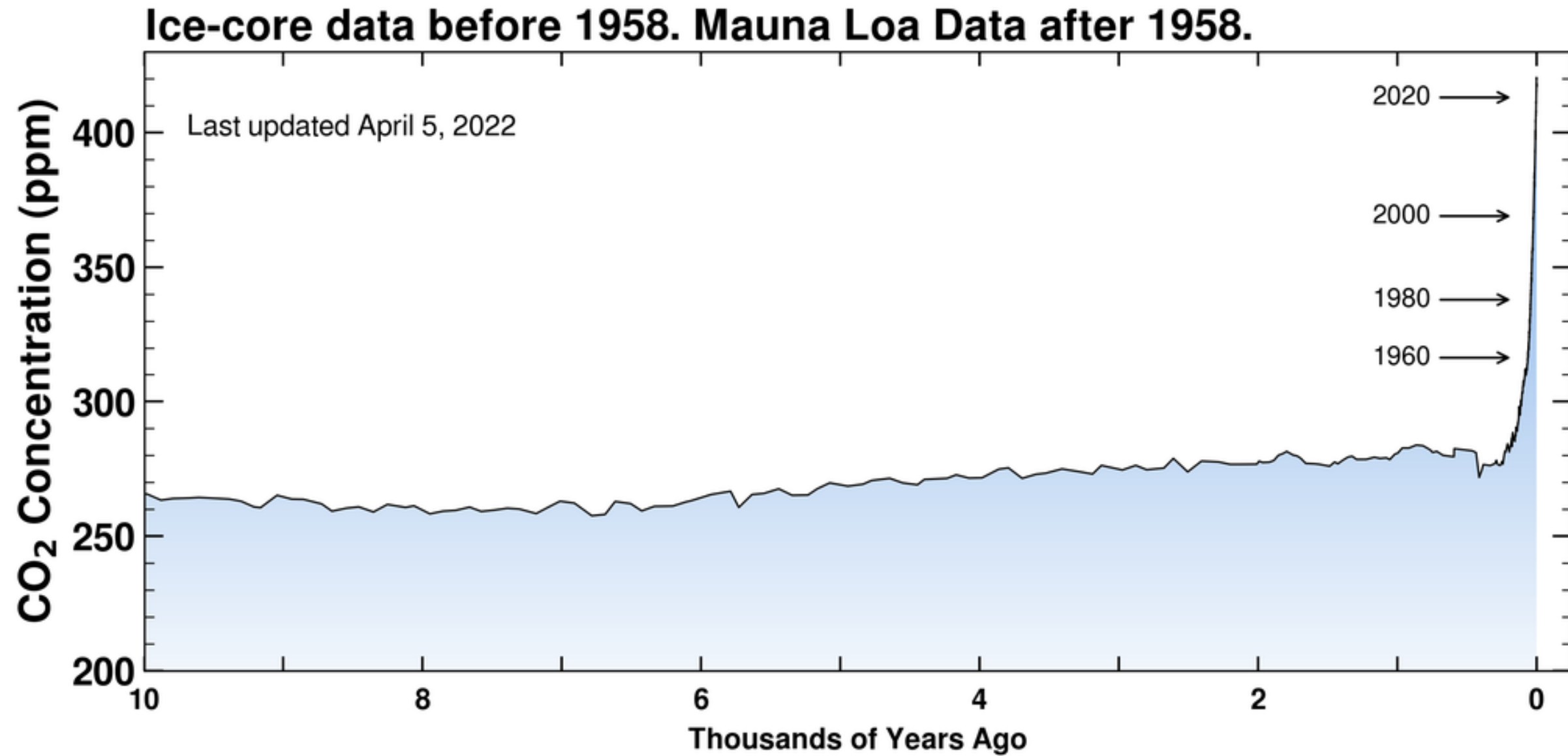
- スクリプス海洋研究所のチャールズ・キーリング博士は、1958年に大気中の二酸化炭素の高精度測定を開始した。
- Revelle and Suess(1957)は「人類は今、過去には起こり得なかったし、未来に再現できないような大規模な地球物理学的実験を行っている」と評した。

# 西暦1700年から現在の大気CO<sub>2</sub>濃度



1850年ごろから上昇が開始し、1950年以降上昇が加速する。

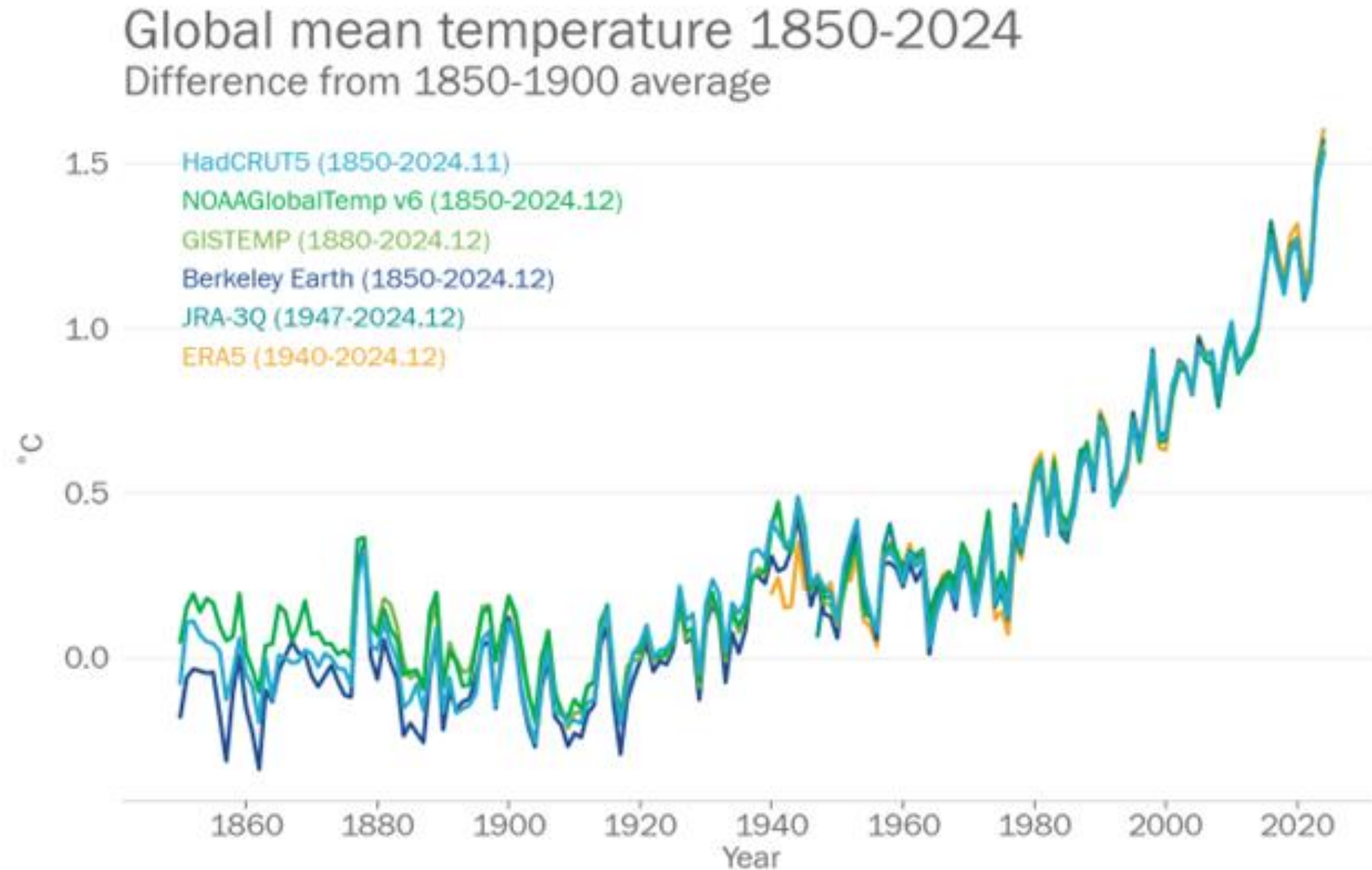
# 過去10,000年間の大気中CO<sub>2</sub>濃度



<https://keelingcurve.ucsd.edu/>

- 産業革命前の過去1万年間、大気中CO<sub>2</sub>濃度は260~280ppmでした。
- 過去10,000年とは、1世代20年として500世代になる。

# 世界気温の上昇

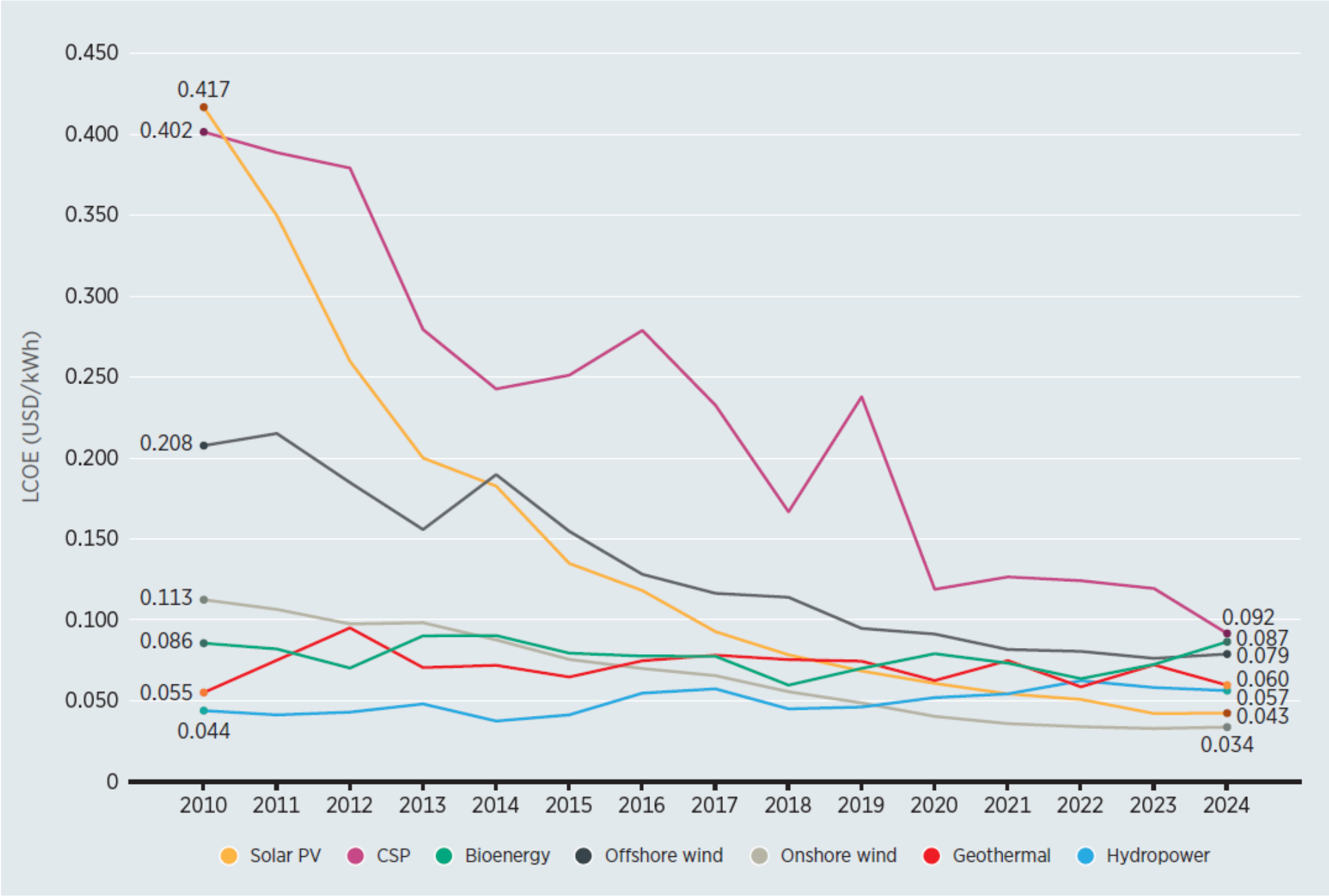


2024年は、温暖化の新しい記録を作った年であった。

WMO, 2025



**Figure 1.2** Global weighted-average LCOE from newly commissioned utility-scale renewable power technologies, 2010-2024



**太陽光発電システムのコストの推移**

黄色が、太陽光発電、急速にコストが下がっているのがわかる。

これに伴い、世界的に急速に普及している。

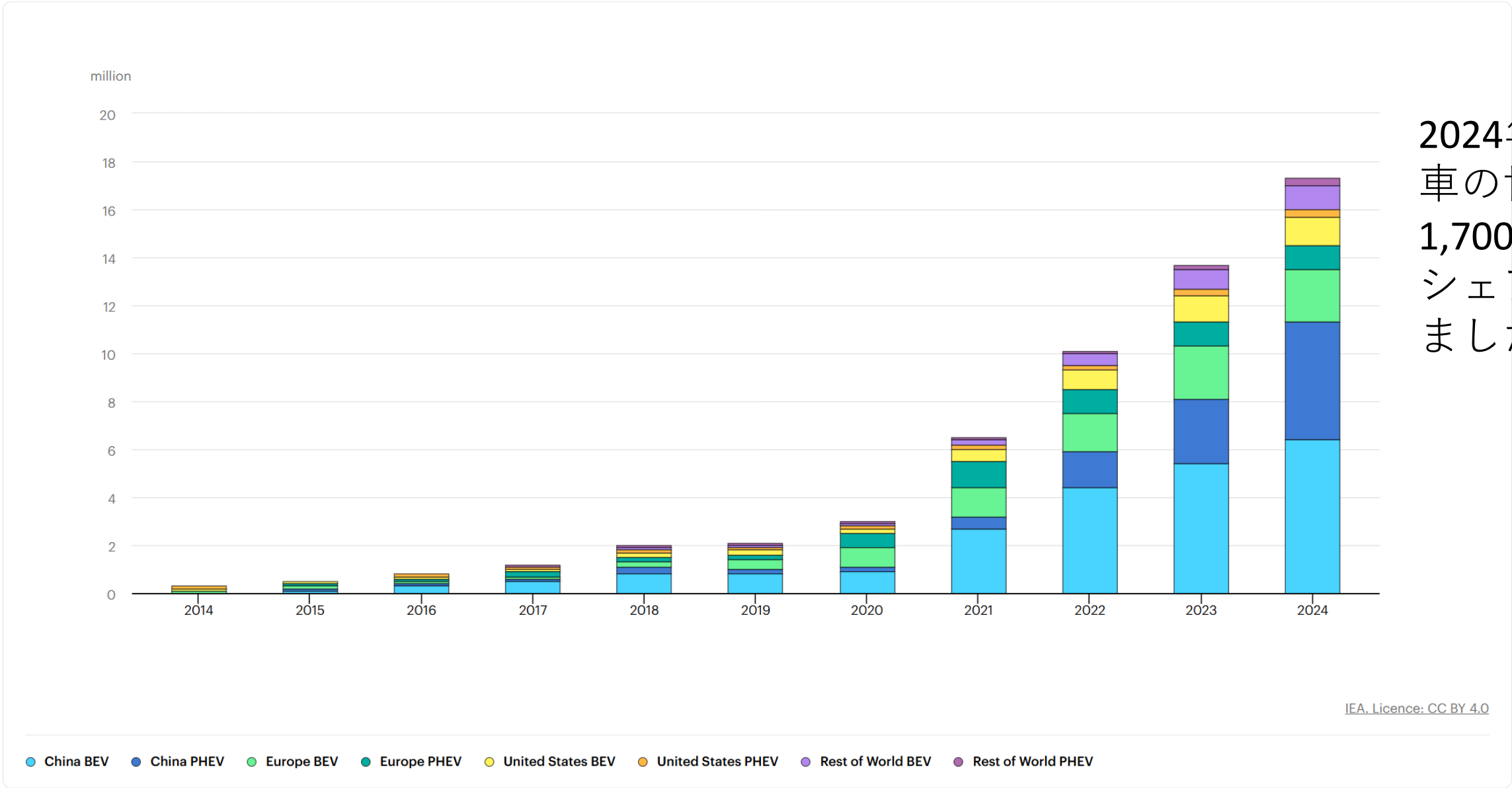
**Notes:** CSP = concentrating solar power; kWh = kilowatt hour; LCOE = levelised cost of electricity; PV = photovoltaic; USD = United States dollar.

# Global electric car sales, 2014-2024

Last updated 1 Apr 2025

Download chart ↓

Cite   Share



2024年には、電気自動車の世界販売台数が1,700万台を超え、販売シェアは20%以上に達しました。



# SolarEVシティ構想とは？

SolarEVシティ構想は、分散型電源としての屋上太陽光発電（PV）と、移動式蓄電池としての電気自動車（EV）を組み合わせることで、都市のエネルギー自給率を高め、脱炭素化を加速する新しい都市モデルである。

このコンセプトは、建物の屋根で発電された電力をEVに充電し、余剰電力を他の用途に活用することで、地域全体のエネルギー効率とレジリエンスを向上させることを目指す。

これまで、東北大学を中心とした研究グループが進めてきた。



# V2H, V2B , V2C : Vehicle to Home, Building, Community

車に電気をため、バッテリーの電気を家、ビル、コミュニティで使う。



Svari Energija,  
[https://www.svarienergija.lt/?attachment\\_id=2446](https://www.svarienergija.lt/?attachment_id=2446)

- 固定バッテリーは小容量（通常10kW以下）で高額である（経済性が見合わない）。
- EVには、大きなバッテリー(例えばリーフ40kWh)がある。
- PVと組み合わせることで自動車と家電の脱炭素化およびエネルギーコストの節約につながる。
- PV+EVシステムによる格安の電気で、家庭での暖房や給湯の電化につなげる。

# これまでのSolarEVシティ研究

これまでに、京都を皮切りに、深圳、ソウル、パリ、ジャカルタ、バンコク、日本の都市のSolarEV City研究を行い、各都市の特性に応じた脱炭素化ポテンシャルが明らかになりました。

## 京都

歴史的な街並みと観光地としての特性を考慮し、分散型エネルギーシステムの導入による景観保全と環境負荷低減の可能性を評価。

## 深圳

先進的なテクノロジー都市として、EV普及率の高さと大規模な屋上PV導入による高いエネルギー自給率達成のポテンシャルを分析。

## ソウル

高密度な都市環境における限られた屋上面積でのPV最適配置と、公共交通とEVの連携による効率的なエネルギーマネジメントの重要性を強調。

## パリ

既存建築物へのPV導入とEV充電インフラの整備、市民参加型のエネルギーコミュニティ形成を通じた脱炭素化への貢献度を評価。

## ジャカルタ

急速な都市化と電力需要の増大に対応するため、PVとEVを組み合わせたレジリエンス強化とCO2排出削減の緊急性を考察。

## バンコク

交通渋滞と大気汚染の問題解決に向けて、EV導入と再生可能エネルギーの統合がもたらす都市環境改善と経済的便益を分析。

## 日本の他都市

地方都市や中小規模の自治体における屋上PVとEVの導入障壁と促進要因を特定し、地域ごとの特性に合わせた政策提言の基礎を構築。

# 研究の主要な問い

- 1 日本全国の自治体における「PV + EV」システムの脱炭素化ポテンシャルはどの程度か？
- 2 気候や都市化などの要因が脱炭素化ポテンシャルの差異にどのように影響しているか？
- 3 これらの差異が日本のエネルギー転換にどのような影響を与えるか？

本研究は、先行研究で分析された日本の9つの都市部（東京特別区、札幌市、仙台市、新潟市、郡山市、岡山市、広島市、川崎市、京都市）の分析を日本全国の自治体に拡張したものである。

# 研究方法

1

## 技術経済分析

各自治体を「統合エネルギーシステム」と見なし、屋上PVとEVを蓄電池として統合したシステムの技術経済分析を実施。PVの変動発電、需要と供給の時間単位のマッチング、電気料金、FIT（固定価格買取制度）、PVと蓄電池の劣化、システムコストなどを考慮。

2

## 気象データと発電量推計

NASAの再解析データ「MERRA-2」を使用して日本全国の自治体の時間単位の発電量をシミュレーション。各自治体の代表地点（市役所など）の緯度経度に基づいて気象ファイルを割り当て。

3

## 屋上面積と電力需要の推計

国土地理院の建物フットプリントデータから屋上面積を計算。屋上面積の70%がPV設置に利用可能と仮定。各自治体の時間単位の電力需要は、電力会社の地域別時間需要と推計年間電力需要から算出。

# 研究方法（続き）

1

## EVの想定

2030年までにすべての乗用車がEVに転換すると仮定。EV蓄電池容量の半分（95～50%のSOC）をPVの柔軟性のために使用。車両は1日3時間使用され、年間走行距離は6,368kmと想定。

2

## 脱炭素化指標

「自己消費率」「自給率」「エネルギー充足率」「CO2排出削減率」「コスト削減率」「投資回収期間」「内部収益率（IRR）」などの指標を用いて脱炭素化ポテンシャルを評価。

3

## シナリオ分析

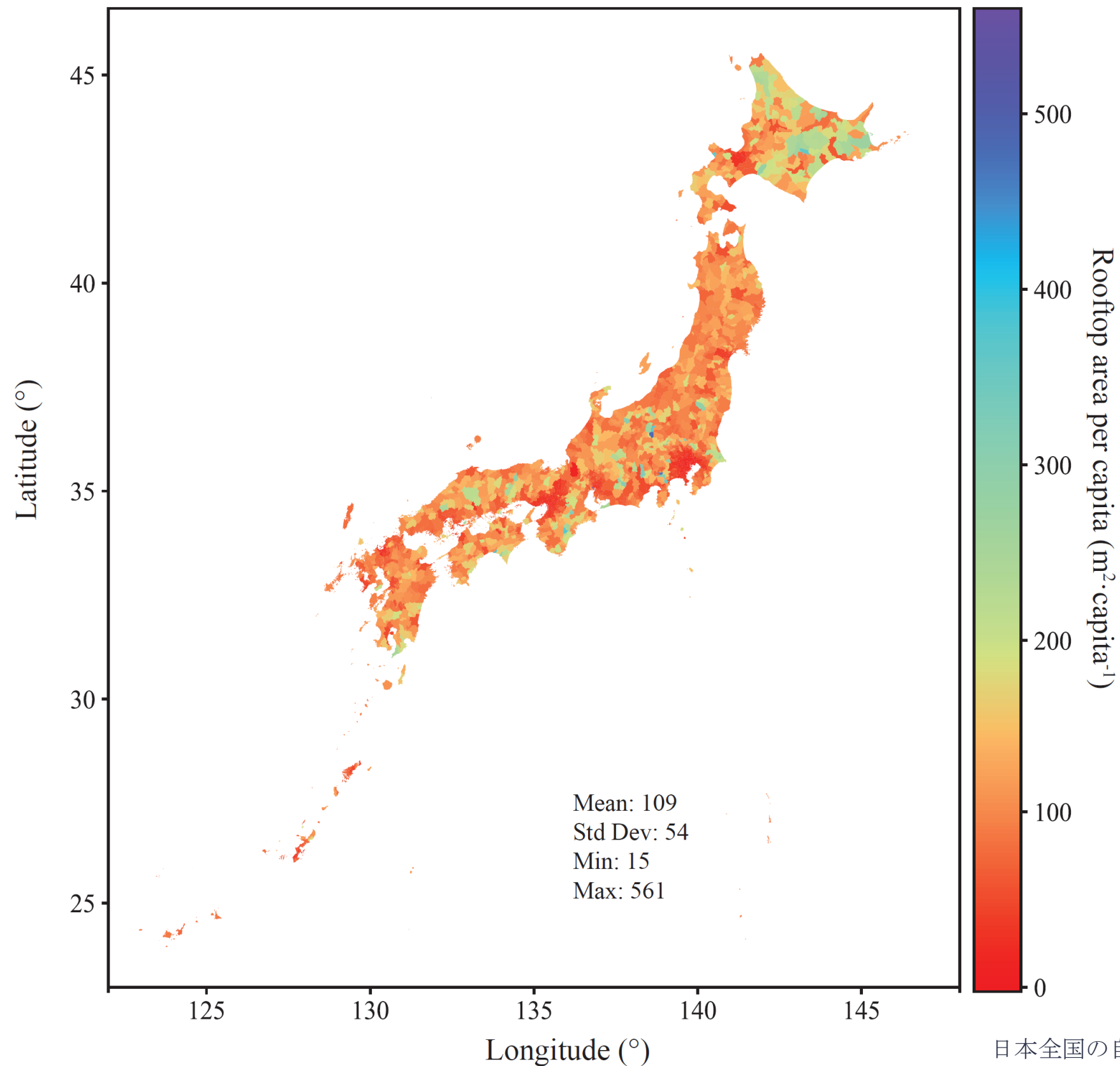
「PVのみ」と「PV + EV」の2つの技術組み合わせを分析。また、「売電あり」と「売電なし」のケース、2019年と2030年のコスト想定でも分析を実施。

# 経済・技術パラメータ

パラメータ	単位	数値
電気料金	\$/kWh	0.18
FIT	\$/kWh	0.08
メンテナンスコスト	\$/kW・年	31.4
プロジェクト期間	年	25
割引率	%	3
V2H充電電力	kW	6
EV蓄電池容量	kWh/車両	40
ガソリン車効率	km/L	12.6
EV効率	km/kWh	5.3

分析には、高圧・低圧の加重平均電気料金（0.18\$/kWh）を使用。FIT価格は0.08\$/kWhに設定。EVの追加コストは、同様のモデルのICE車とEVの価格差として計算。

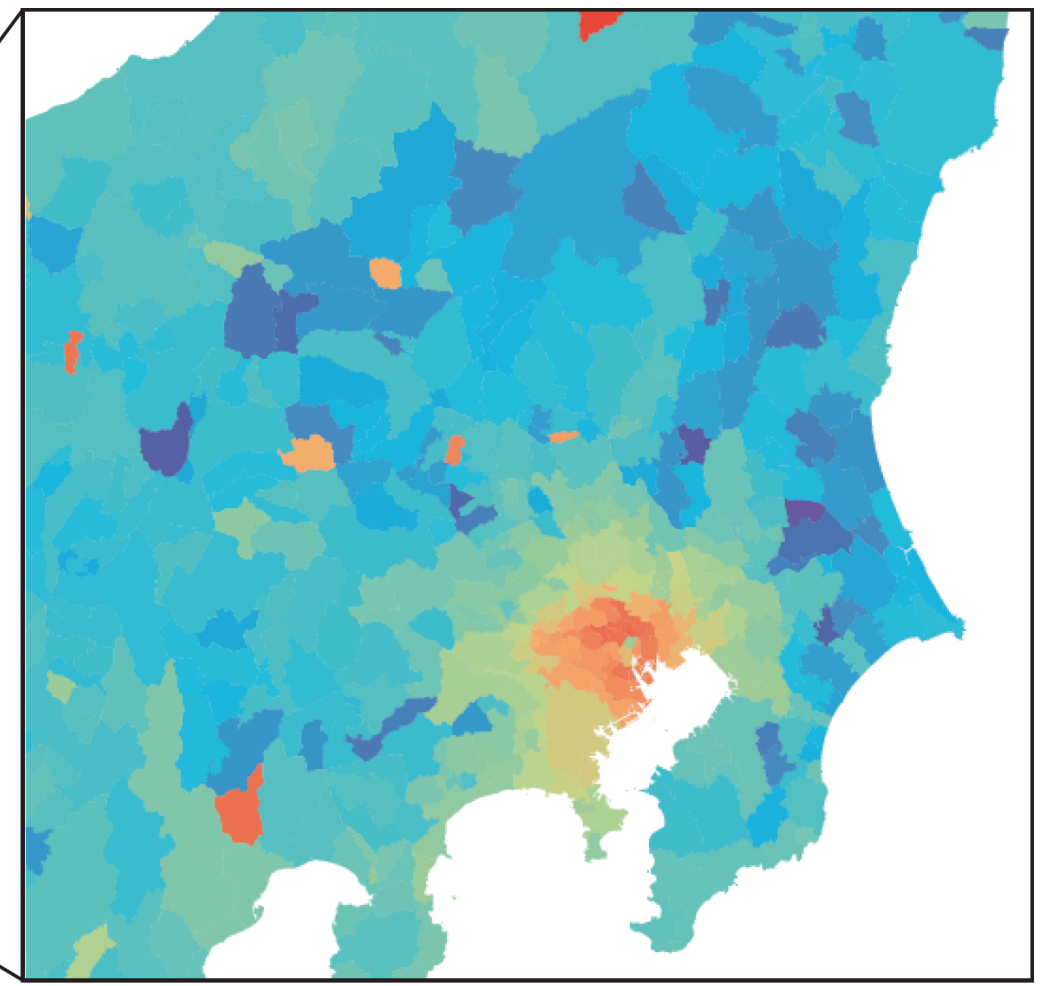
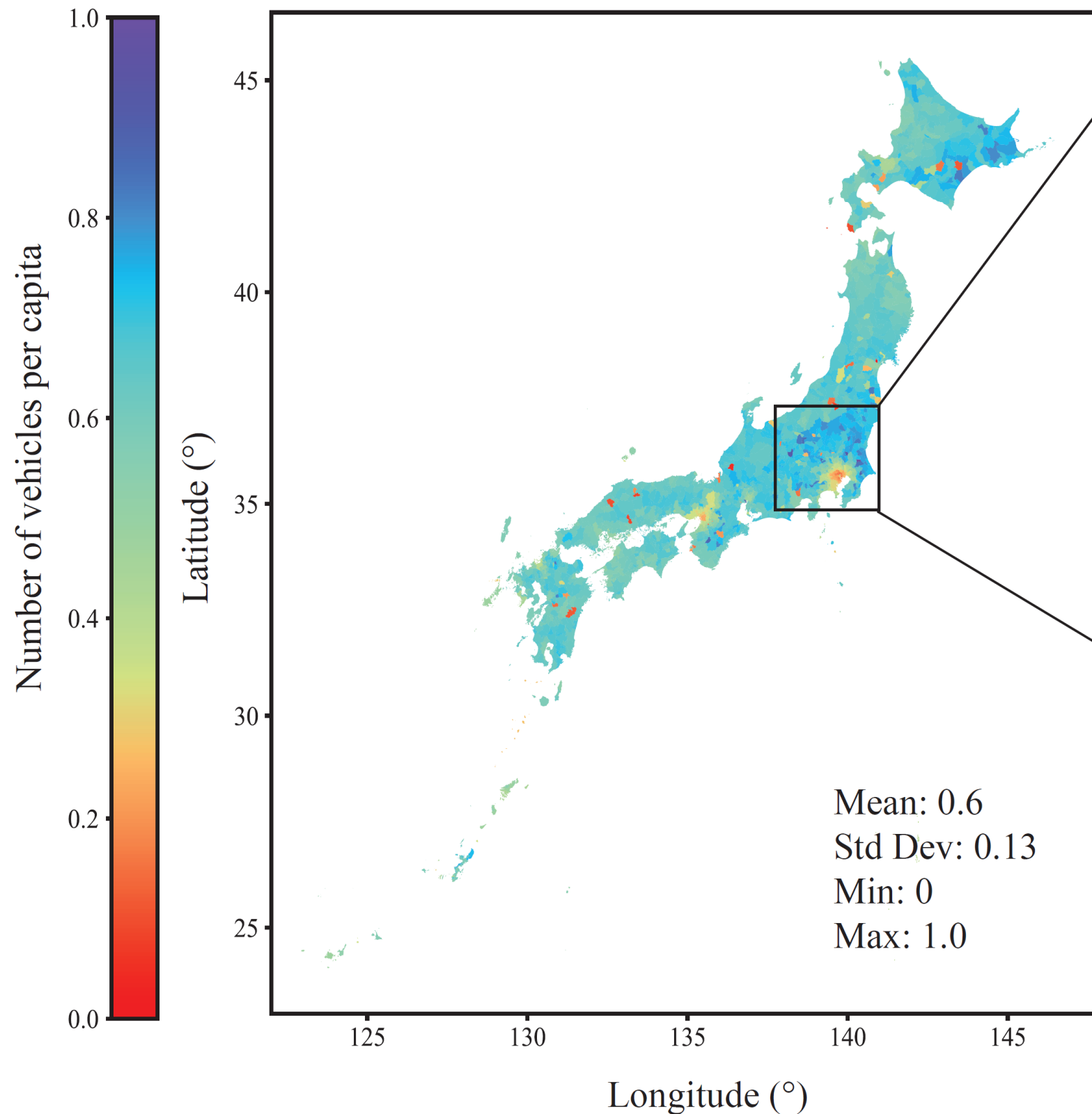




# 人口あたりの屋上面積

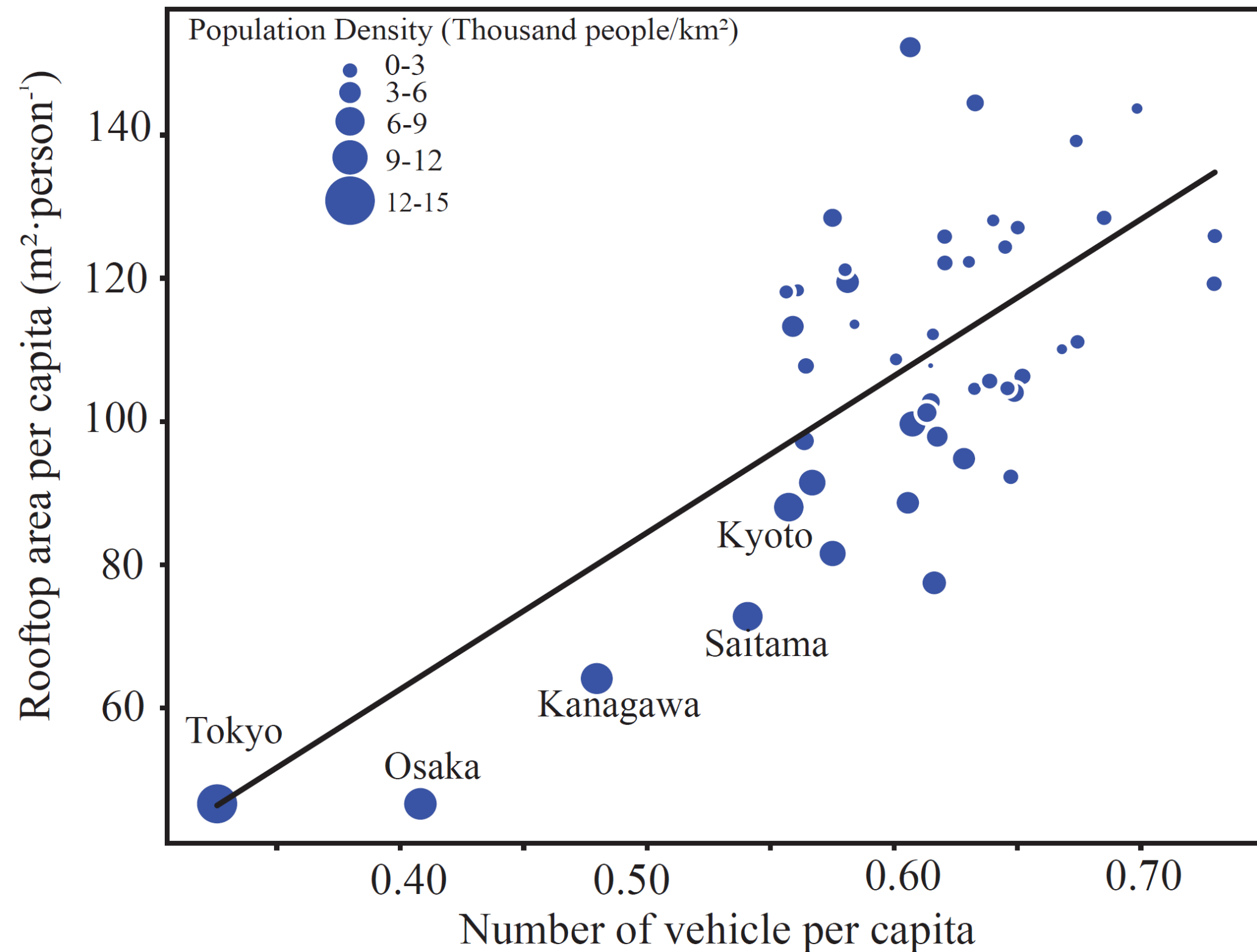
屋上PVとEVを統合したシステムの効率は都市化のレベルに依存する。高度に都市化された地域は一般的に高層ビルが多く屋上面積が小さく、単位面積あたりのエネルギー需要が大きく、駐車スペースが少ない。

自治体の「人口あたりの屋上面積」と「人口あたりの車両数」は都市化を表す重要な指標である。人口あたりの屋上面積は自治体間で大きく異なり、1741自治体の平均は $103 \pm 56 \text{m}^2/\text{人}$ である。大都市は小都市よりも人口あたりの屋上面積が小さい傾向がある。



## 人口あたりの車両数

人口あたりの車両数も人口あたりの屋上面積と同様の傾向を示し、平均は $0.60 \pm 0.14$ 台/人である。人口あたりの屋上面積と人口あたりの車両数の間には都道府県レベルで有意な相関関係 ( $r = 0.69$ 、 $p$ 値  $< 0.001$ ) がある。



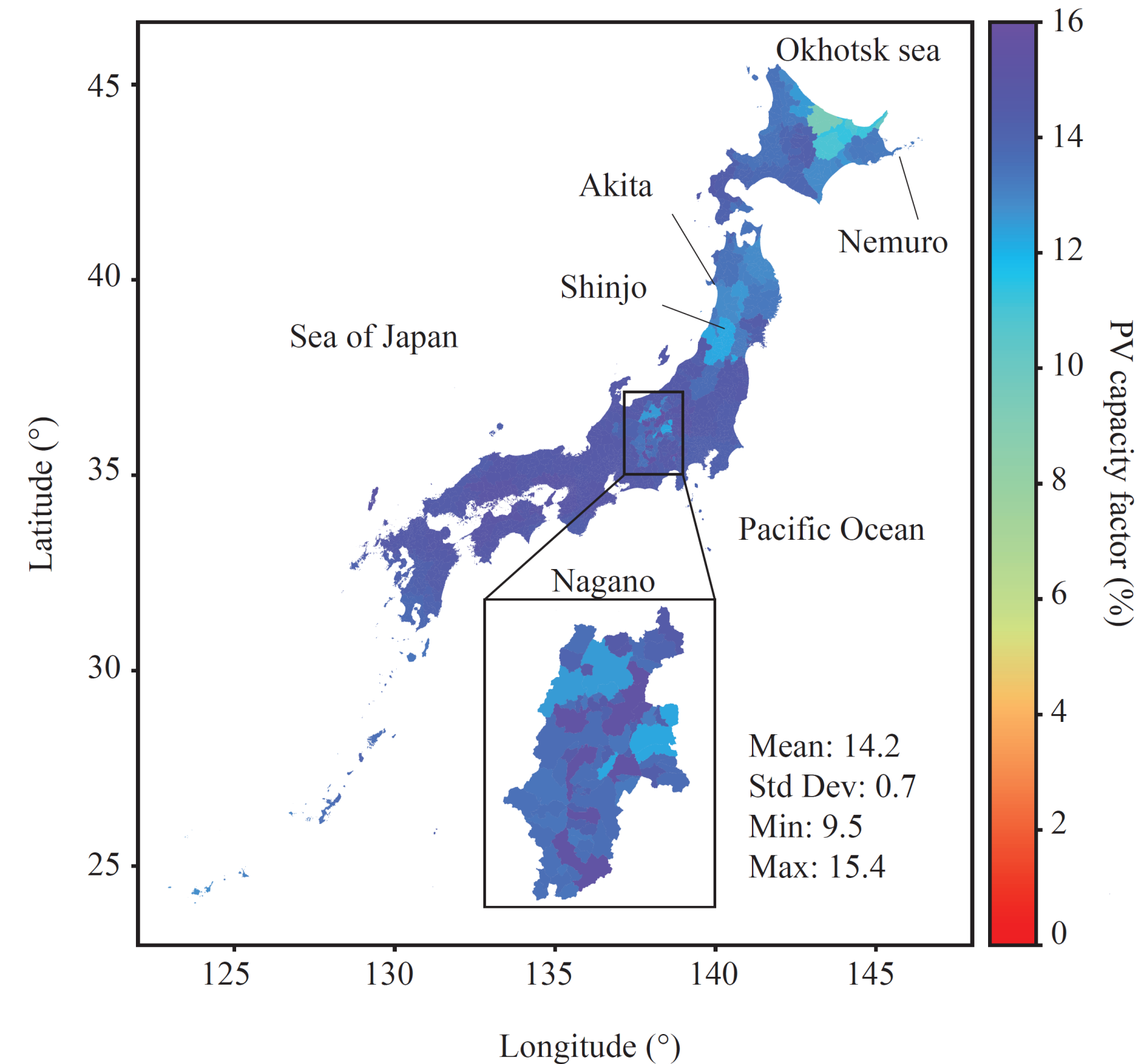
一人当たり屋根面積（Y軸）と一人当たり自動車台数（X軸）

地方都市がどちらも高い値となる。つまり、**SolarEV City**の効率が高い。

# PV設備利用率

屋上「PV + EV」システムの効率に影響を与えるもう一つの重要な要因は日本の気候である。一般的に、日本の南部は北部よりもPV設備利用率が高い。これは北半球では低緯度（南部）の方が高緯度（北部）よりも太陽光の入射角が小さいためである。

最も低いPV設備利用率はオホーツク総合振興局（網走を含む）で観測された。これは主にシベリアからの寒気団によって形成される大陸性の雪雲による冬季の持続的な雲量が原因である。日本海側北部地域の低い設備利用率も同様の理由による。



# 建物の屋根上太陽光発電

- 建物の屋根は、建物の強度、日当たり、景観、立て替えの予定、現在の使用（空調の室外機など）、経済性によって、**PV**の利用は制約される。
- しかし、十年単位で見ると多くの課題は技術、経済、社会的解決法（イノベーション）によって克服しうる。
- 建物の屋根を**PV**に使用しなければ、平地のどこかを犠牲にしなければならない。
- 屋根上太陽光発電は、最も自然侵略性の少ない再生可能エネルギー（**Least Invasive Renewable Energy: LiRE**）と考えることが出来る。

# 日本全国レベルでの屋上PVとEVの統合による脱炭素化ポテンシャル

日本の推計総屋上面積は8,090km<sup>2</sup>で、日本の総土地面積の約2%である。係数7m<sup>2</sup>/kW（屋上面積の約70%）を用いると、屋上PVポテンシャル（変換効率20%）は日本全国で1,155GWとなる。

2019年の気象データでは、日本の1,155GW PVは平均PV設備利用率14.2±0.7%で1,017TWhの電力を生成する。これは2022年度の日本の総発電量834.8TWhの1.2倍である。

したがって、日本の屋上PVはカーボンニュートラルに向けて大きなポテンシャルを持つが、屋上PVのポテンシャルを効率的に活用するためには相当量のエネルギー貯蔵が必要である。

8,090

総屋上面積（km<sup>2</sup>）

日本の総土地面積の約2%

1,155

屋上PVポテンシャル（GW）

変換効率20%、屋上面積の70%利用を想定

1,017

発電量（TWh）

2022年度の日本の総発電量の1.2倍

# シナリオ別の日本の脱炭素化ポテンシャル

## 2019年から2030年への改善

PVシステムの価格低下により、2030年に向けて日本の最適PV容量が拡大し、脱炭素化指標が全般的に改善する。2019年には、PVシステムの高コストにより小規模なPVシステムとなり、自己消費率は高いが、自給率、エネルギー充足率、CO2排出削減率、コスト削減率、IRRは低く、投資回収期間は長くなる。

## 売電の影響

売電(10円/kWh程度)の導入は経済的に最適なPV容量の拡大を促進する。2030年には、低コスト技術により、売電ありのケースでは最適PV容量がほぼ最大値の1,133GWに達する。

## EVとの統合効果

PVシステムをEVと蓄電池として統合すると、PVシステムの脱炭素化ポテンシャルは大幅に向上する。2030年のFITありのケースでは、PV + EVの自己消費率はPVのみのケースからほぼ倍増する。自給率は85%に達し、PV + EVシステムが日本の電力需要の85%を供給できることを示している。



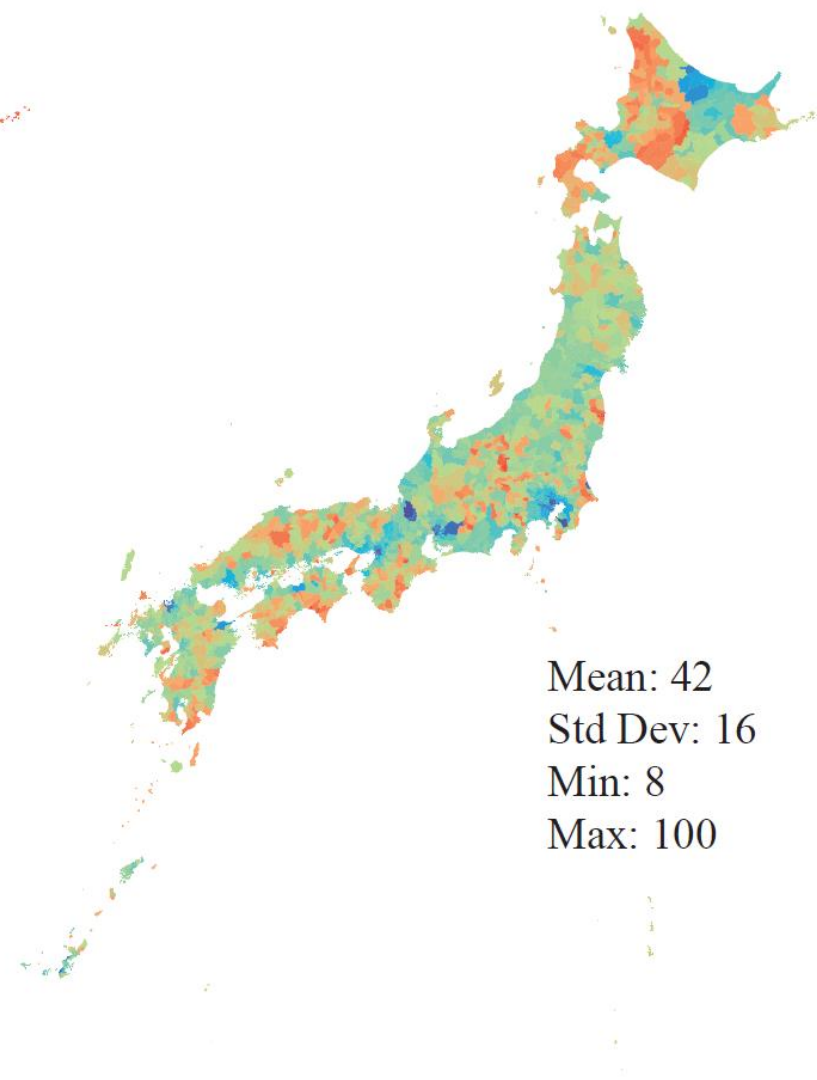
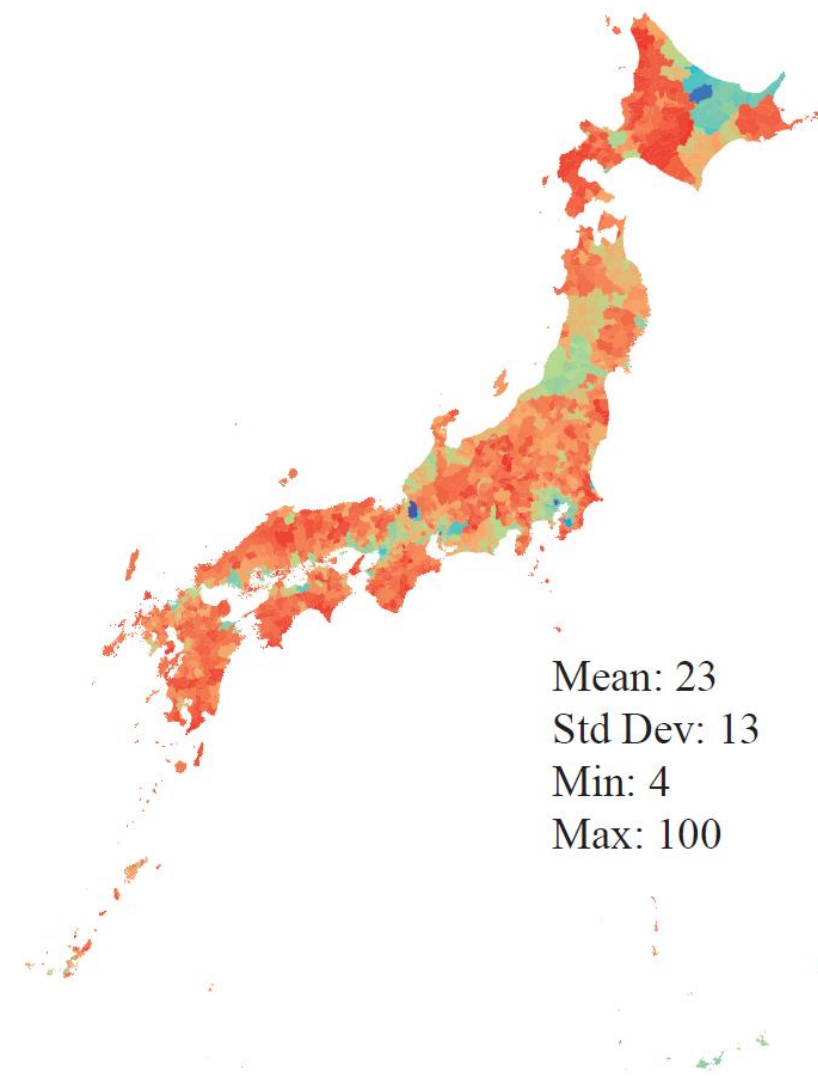
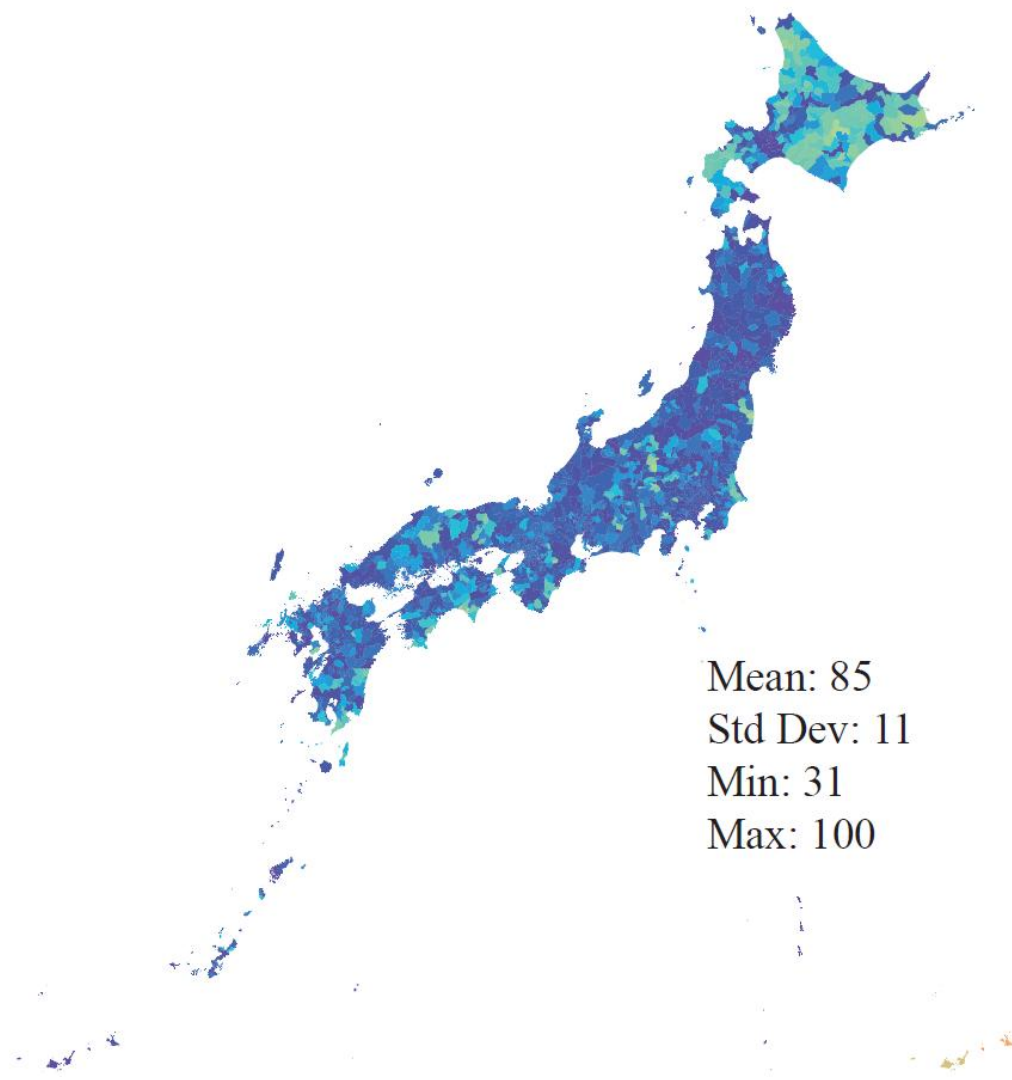
売電あり

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(a)



Self consumption (%)

地域内消費率

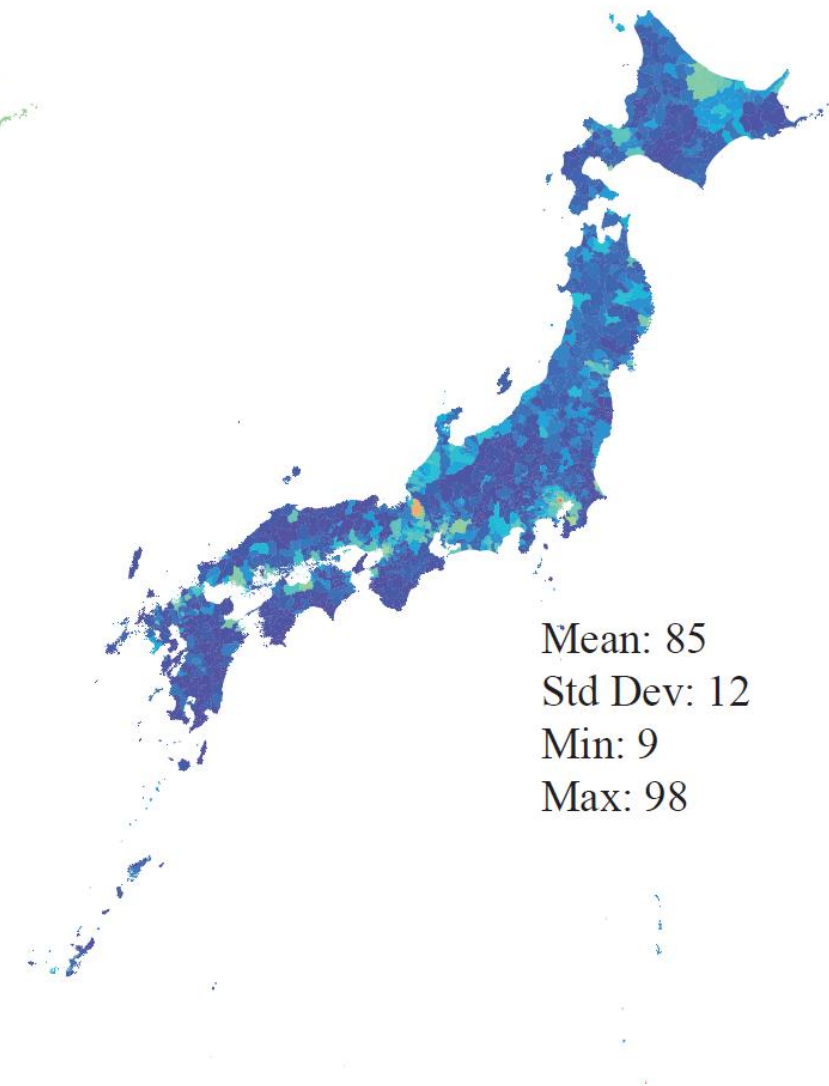
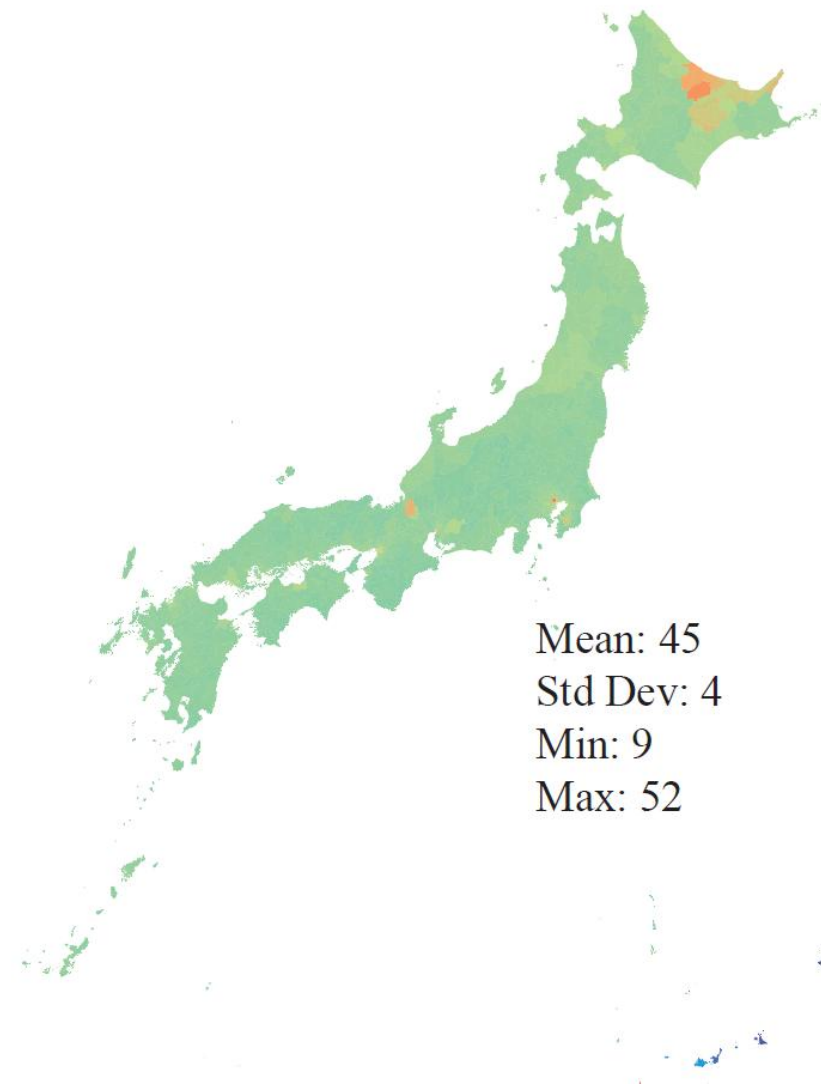
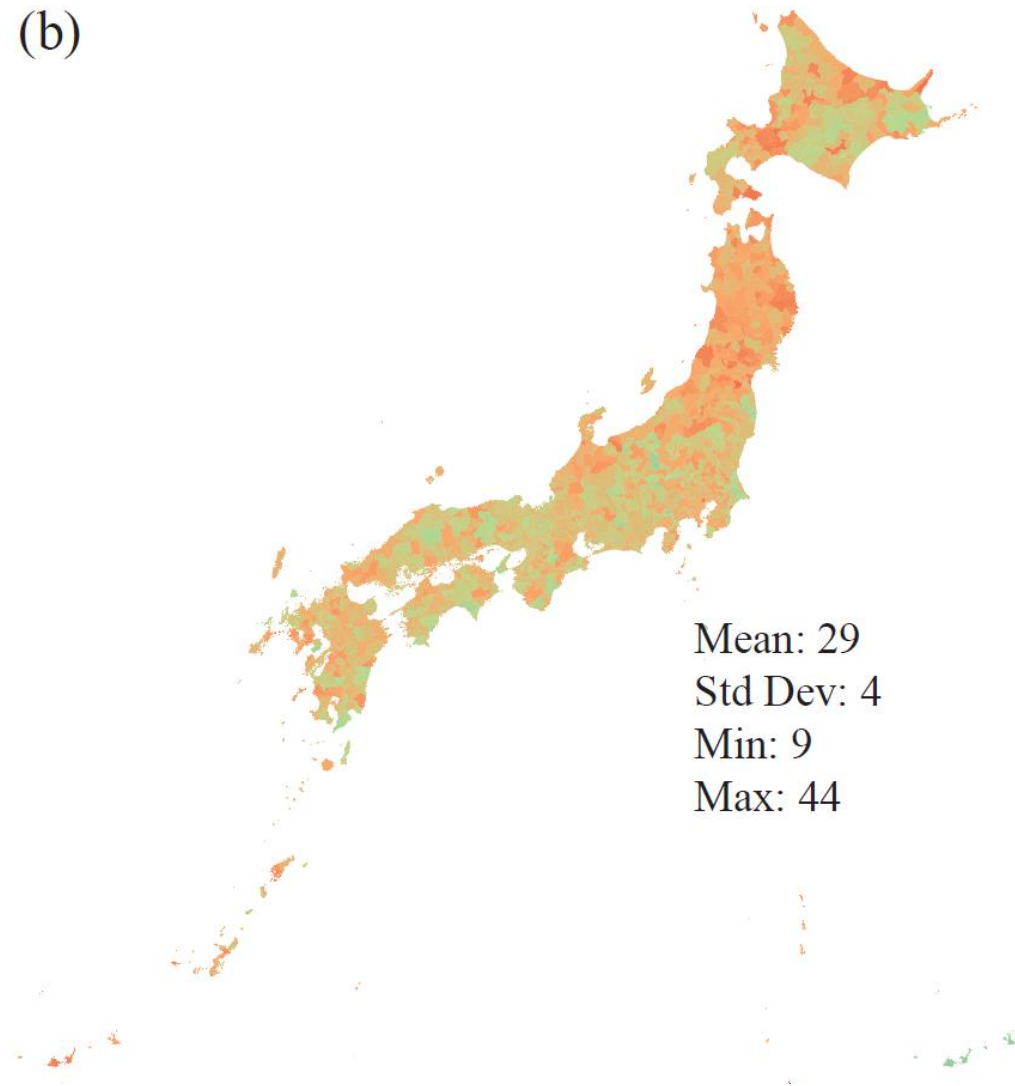
売電あり

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(b)



Self sufficiency (%)



地域内自給率

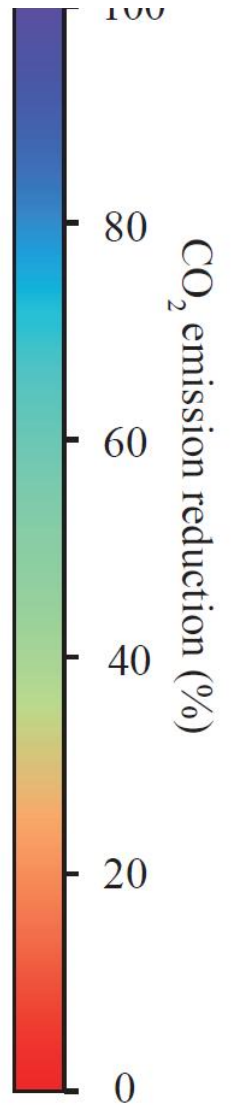
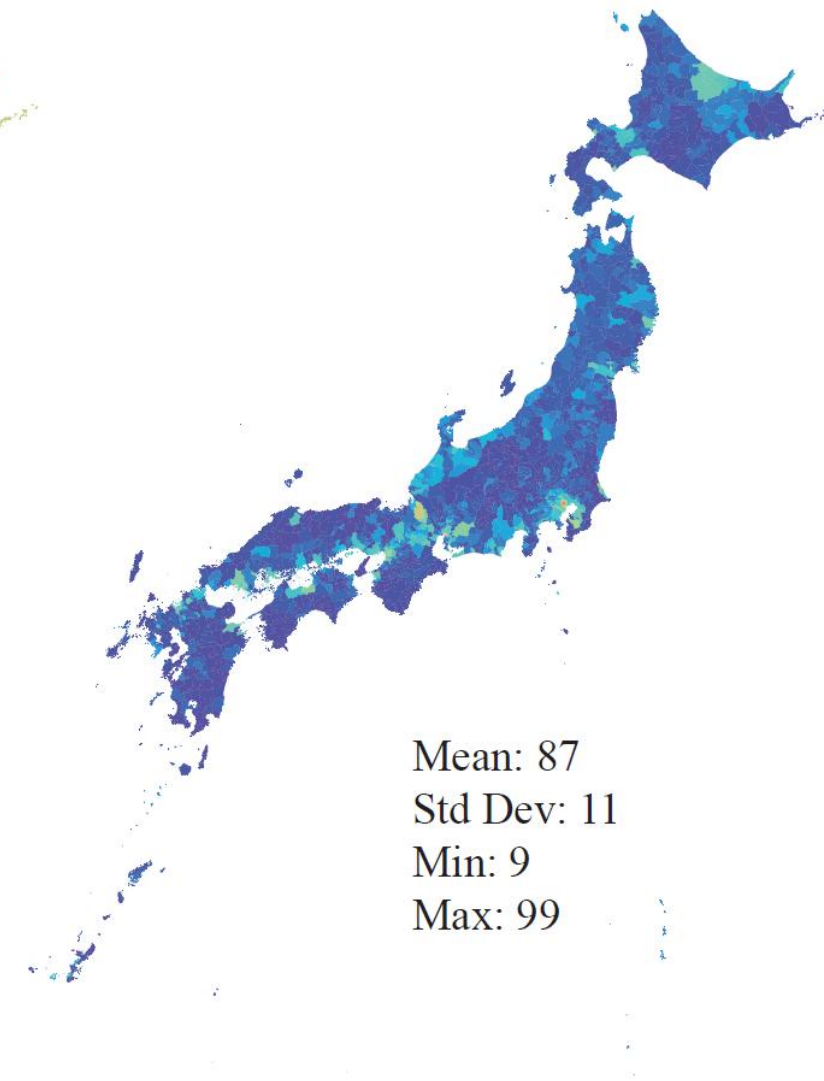
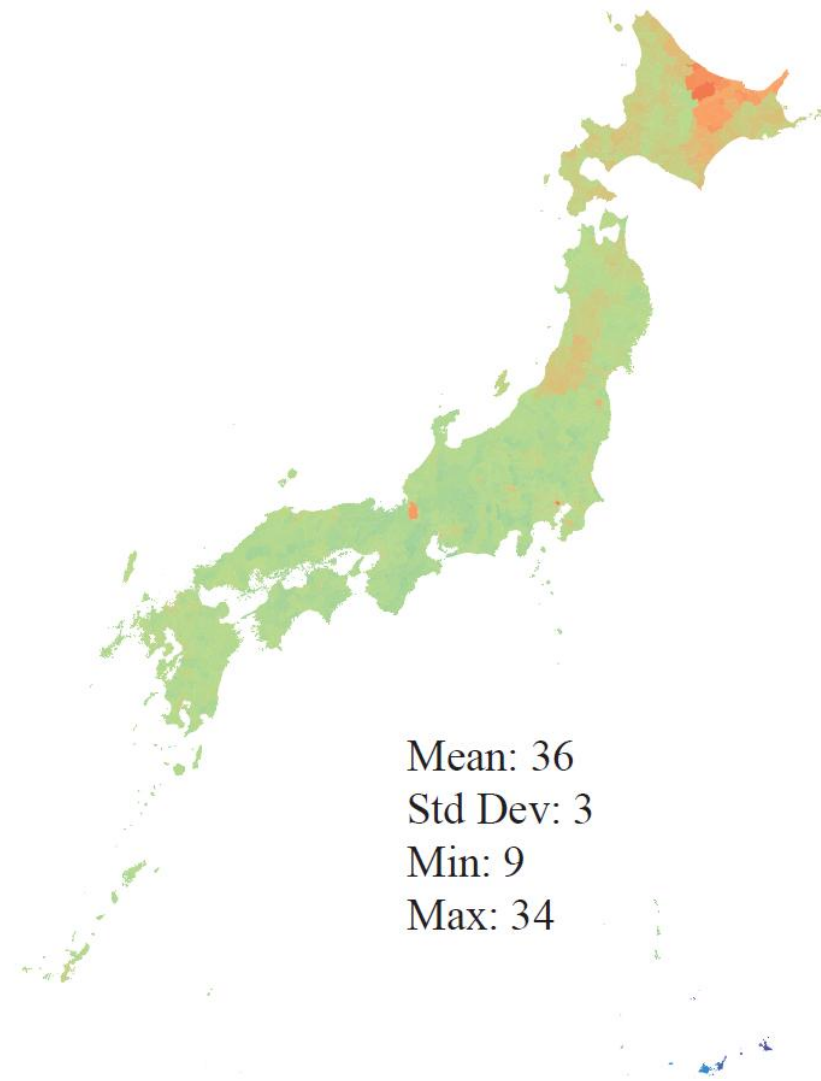
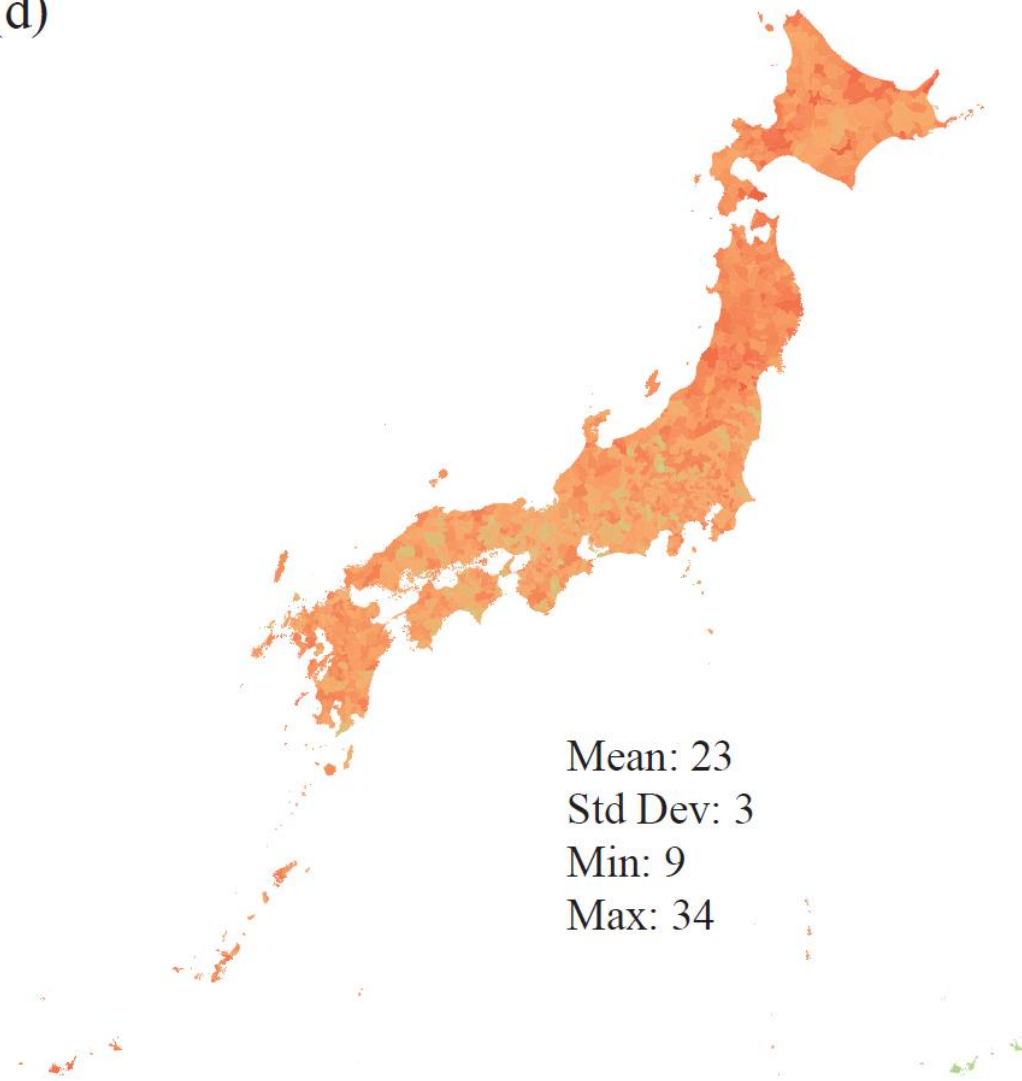
売電あり

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(d)



CO<sub>2</sub> 排出削減率

売電あり

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(e)

Mean: 3  
Std Dev: 1  
Min: -13  
Max: 5

Mean: 17  
Std Dev: 4  
Min: 3  
Max: 41

Mean: 33  
Std Dev: 6  
Min: 4  
Max: 61

Cost saving (%)

60

40

20

0

-20

エネルギーコスト  
削減率



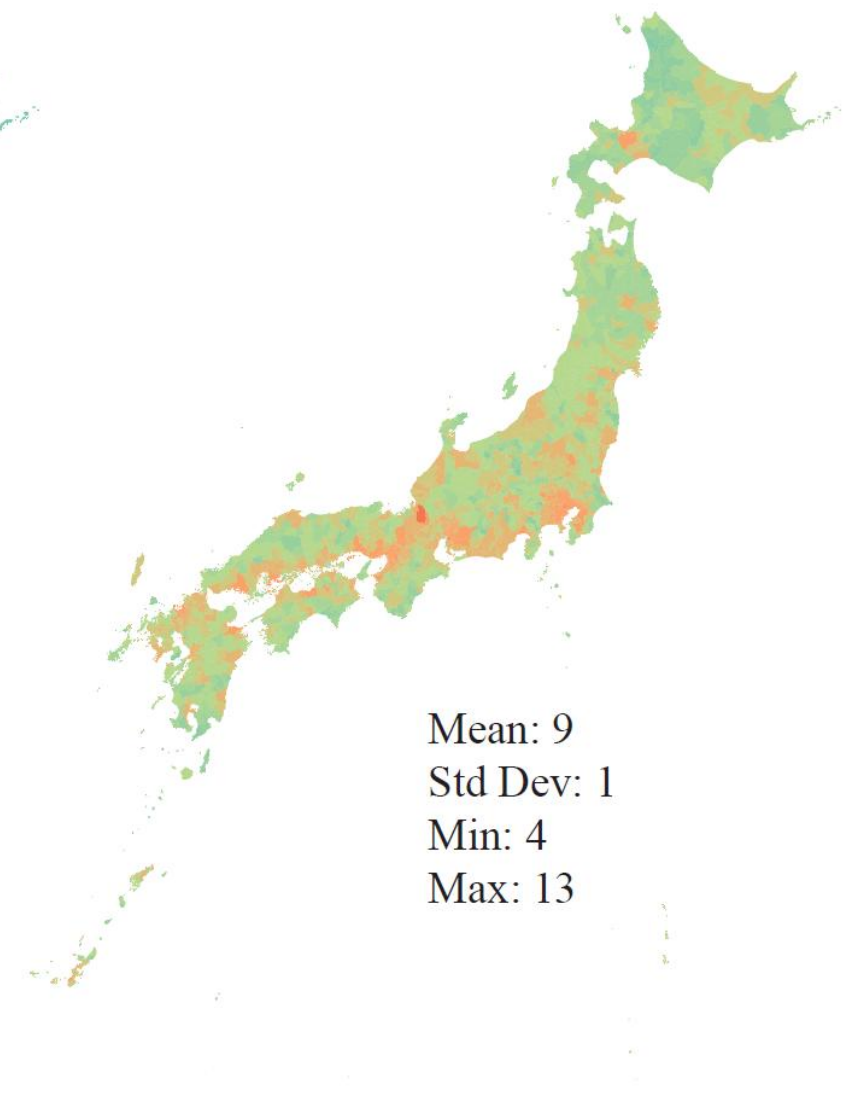
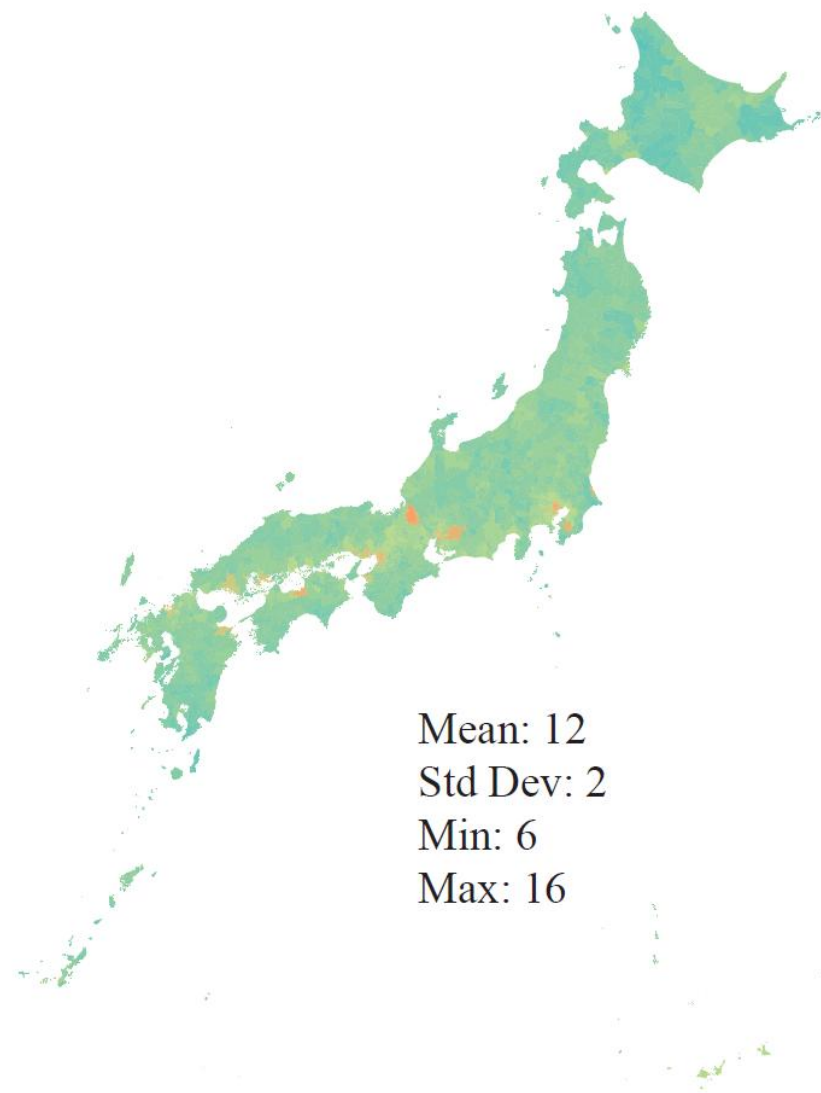
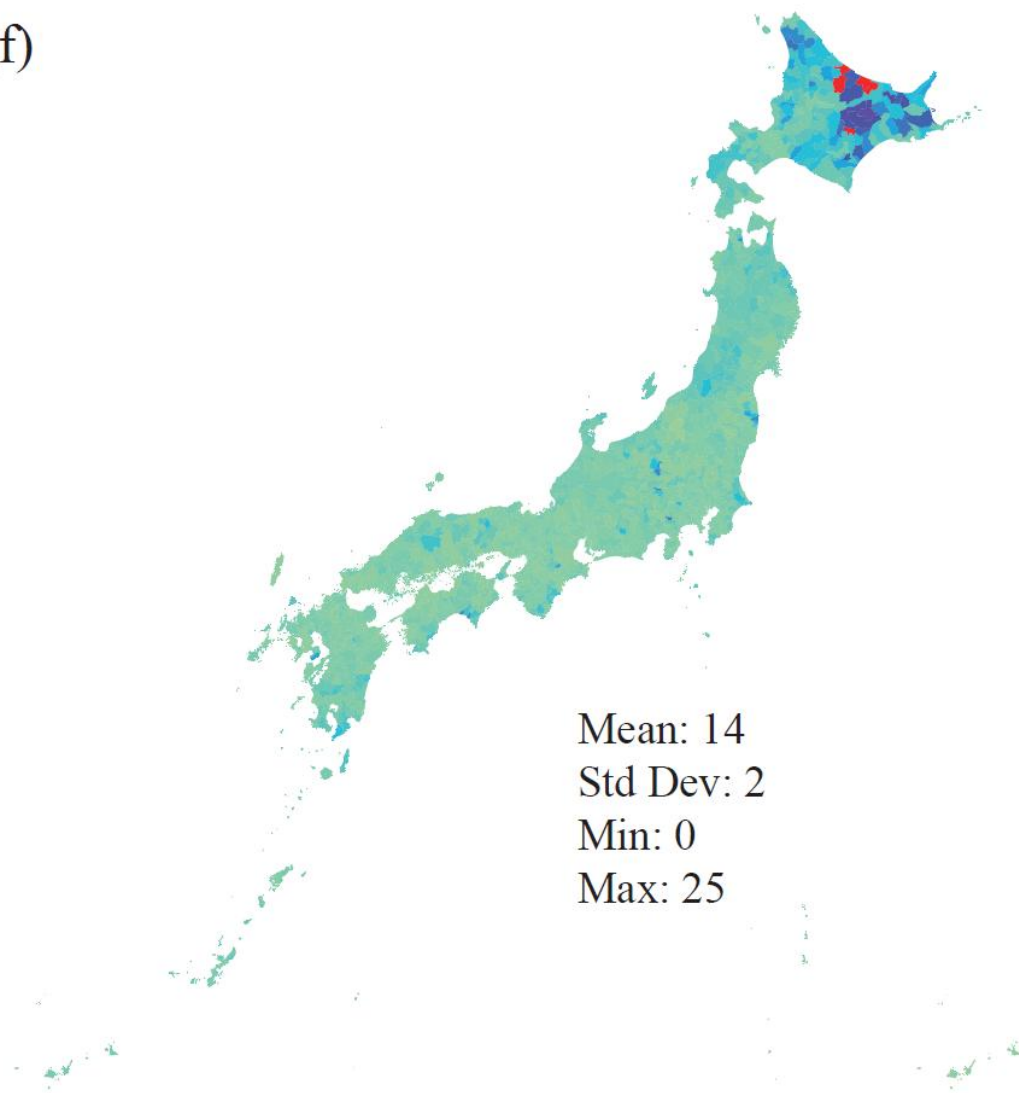
売電あり

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(f)



Payback period (year)

25

20

15

10

5

0

コスト回収期間

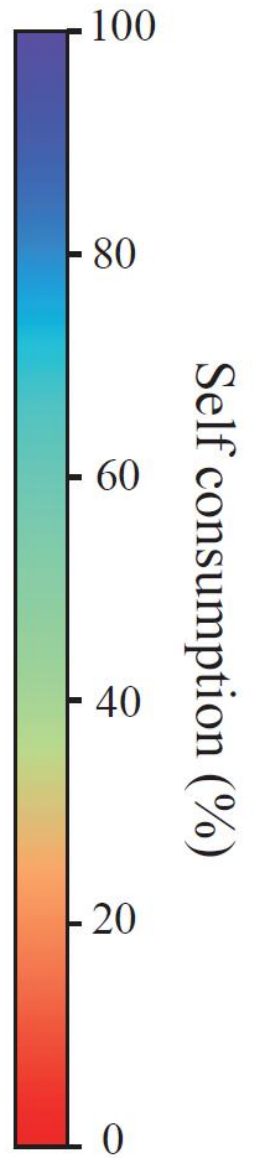
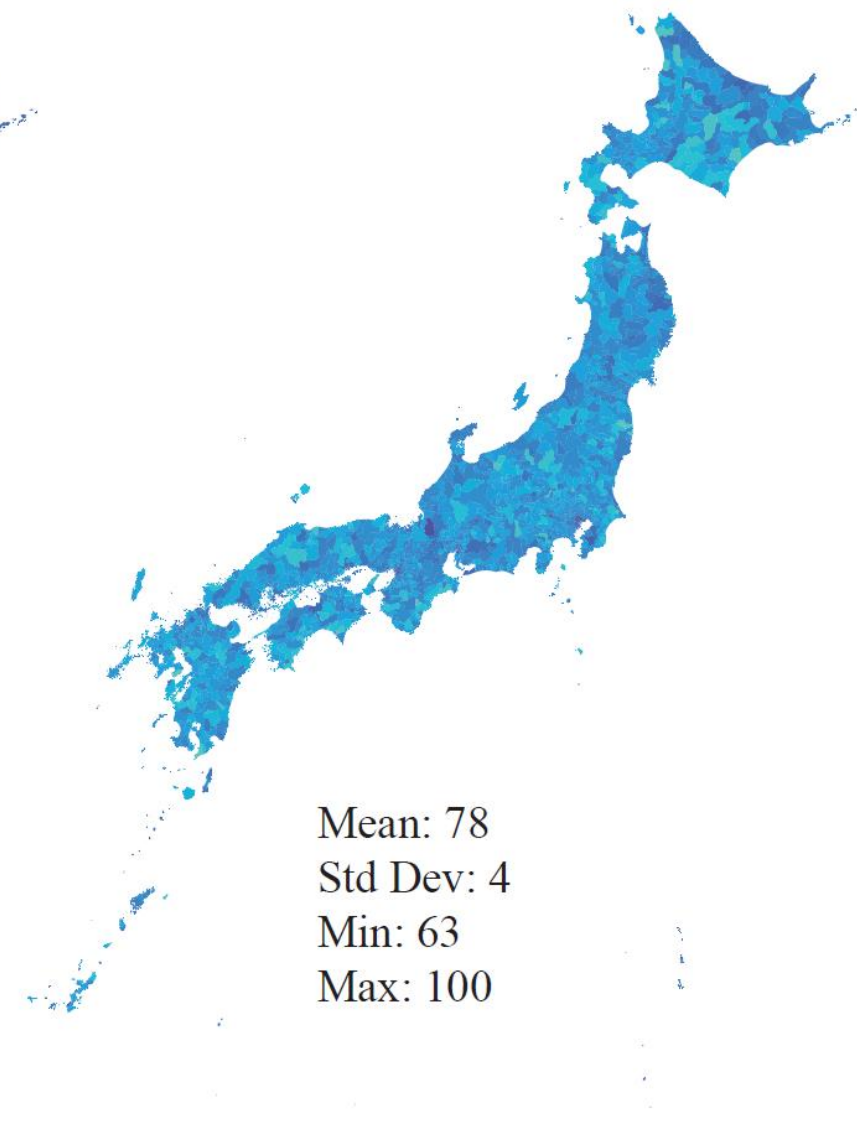
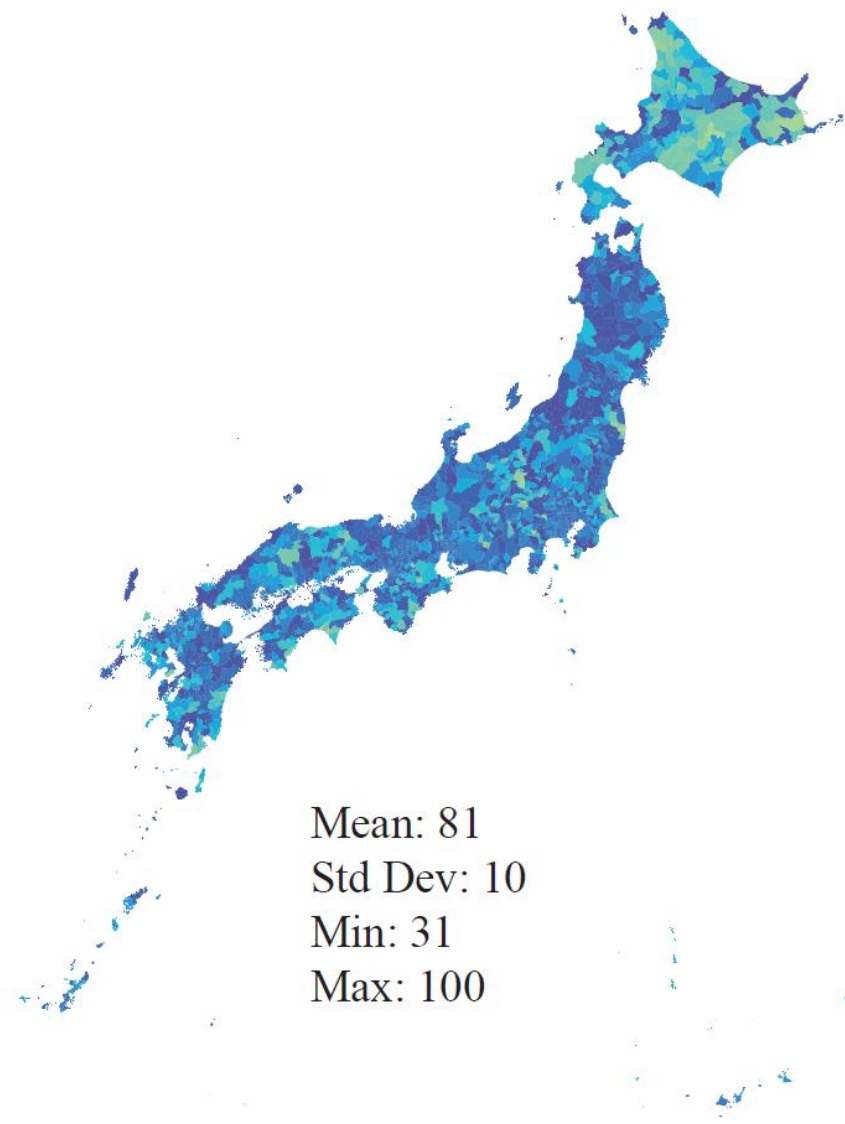
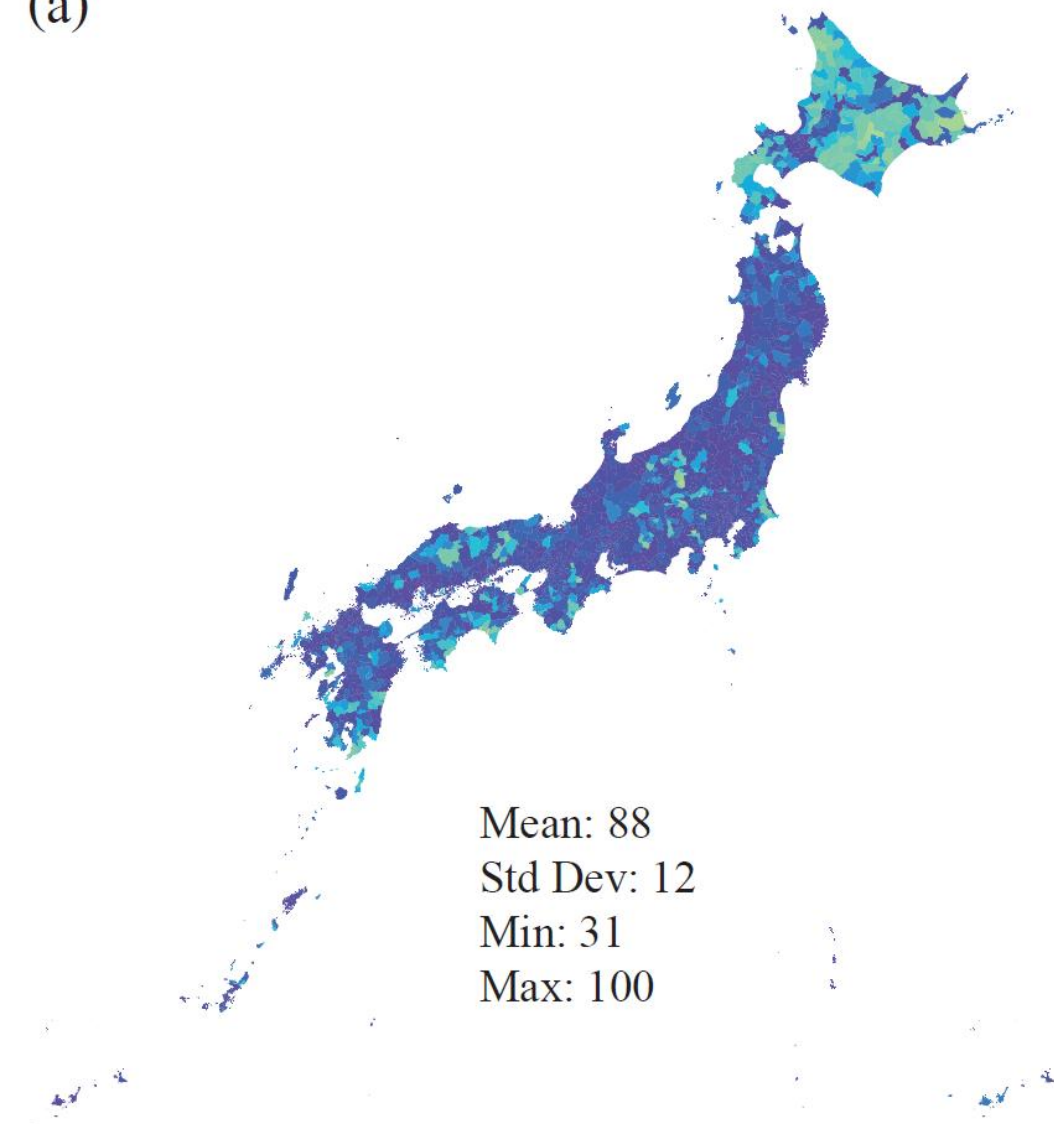
売電なし

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(a)



地域内消費率

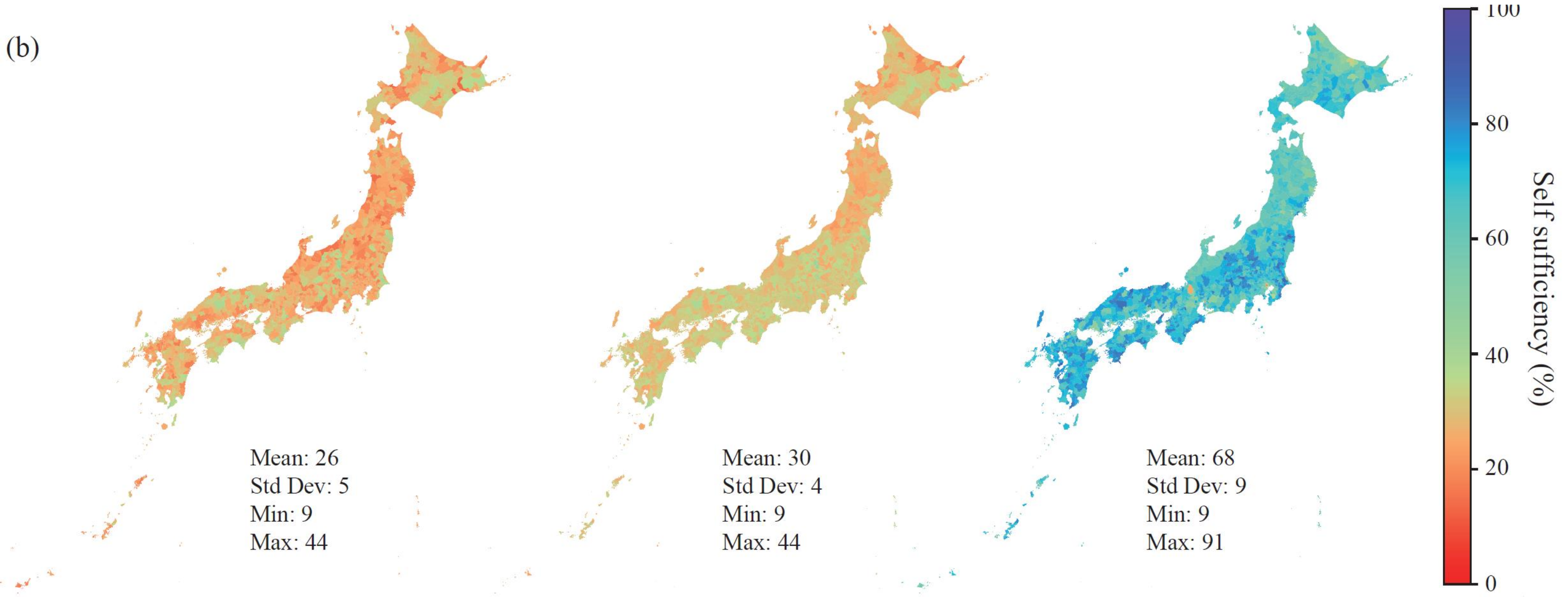
売電なし

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(b)



地域内自給率



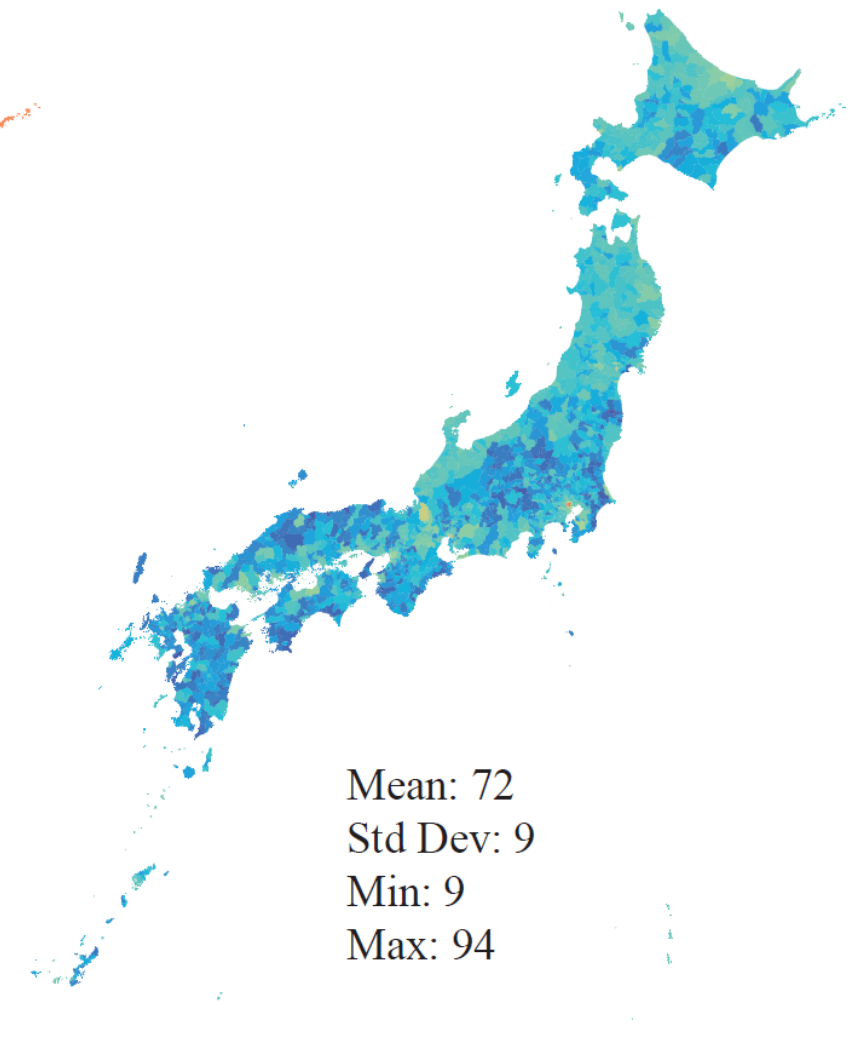
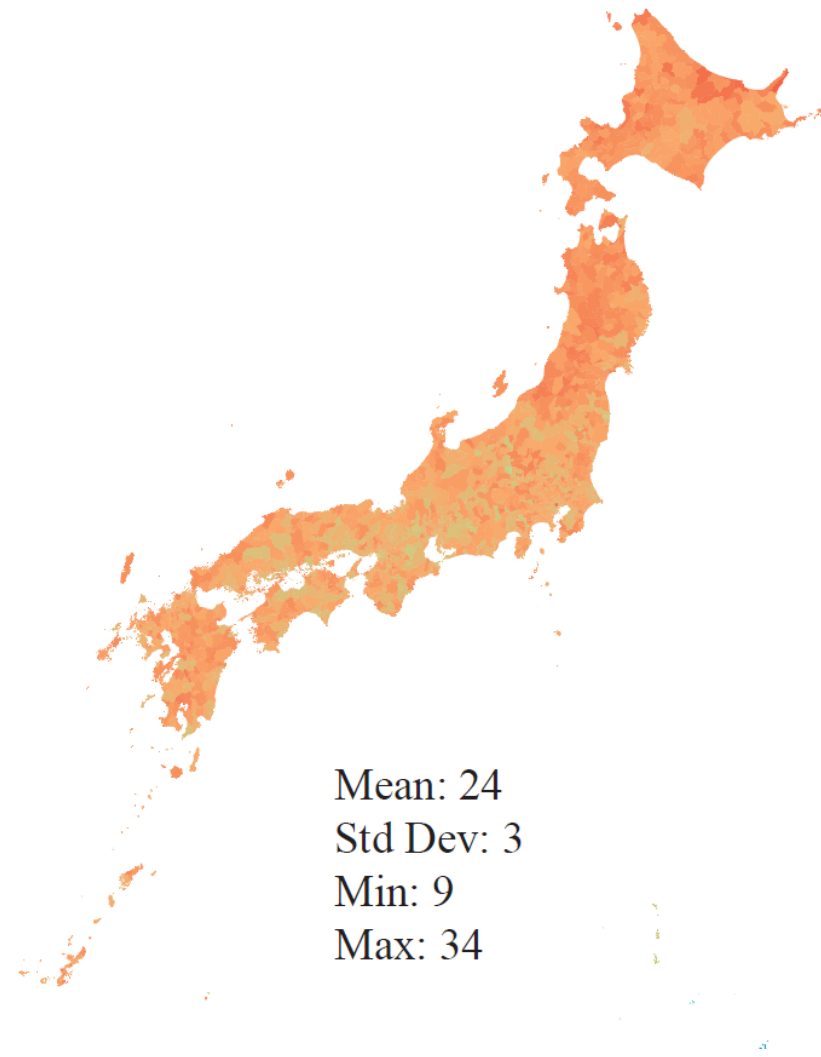
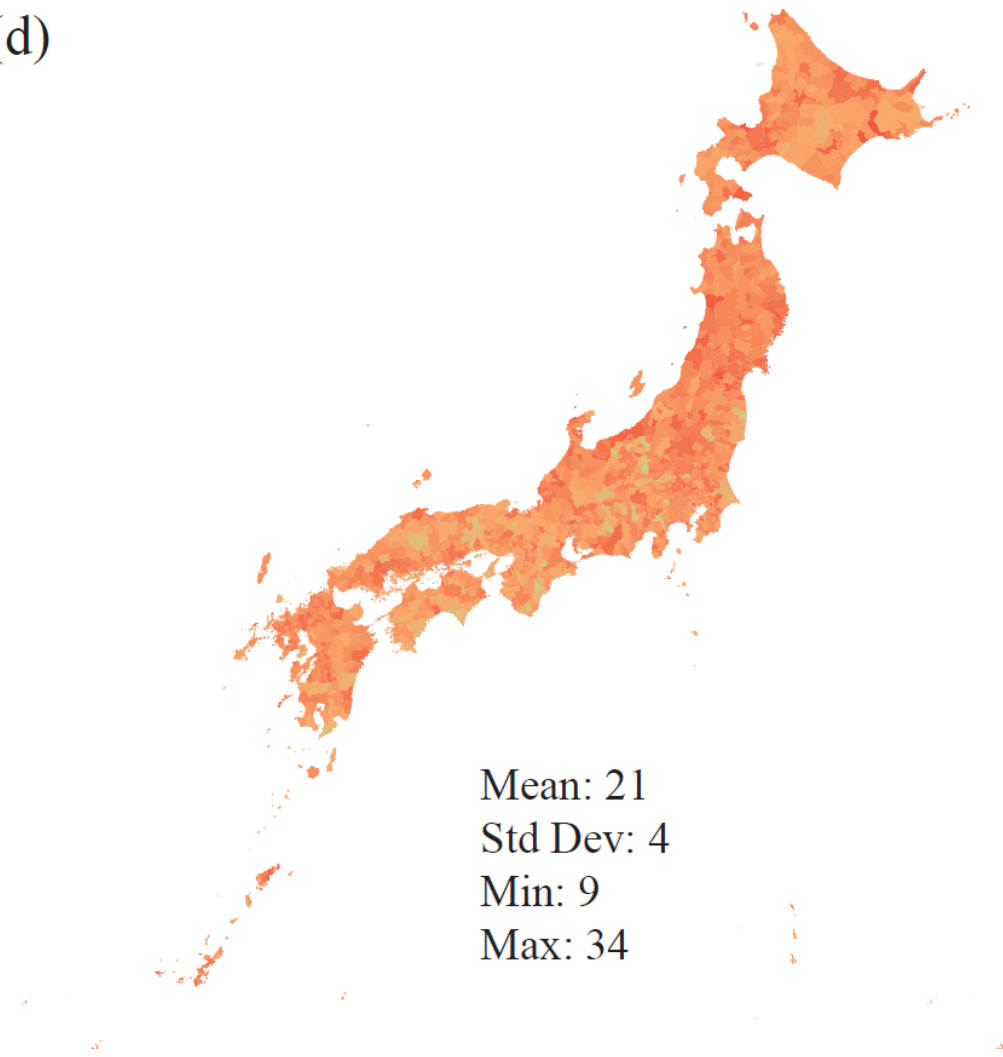
売電なし

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(d)



CO<sub>2</sub> emission reduction (%)

100

80

60

40

20

0

CO<sub>2</sub> 排出削減率

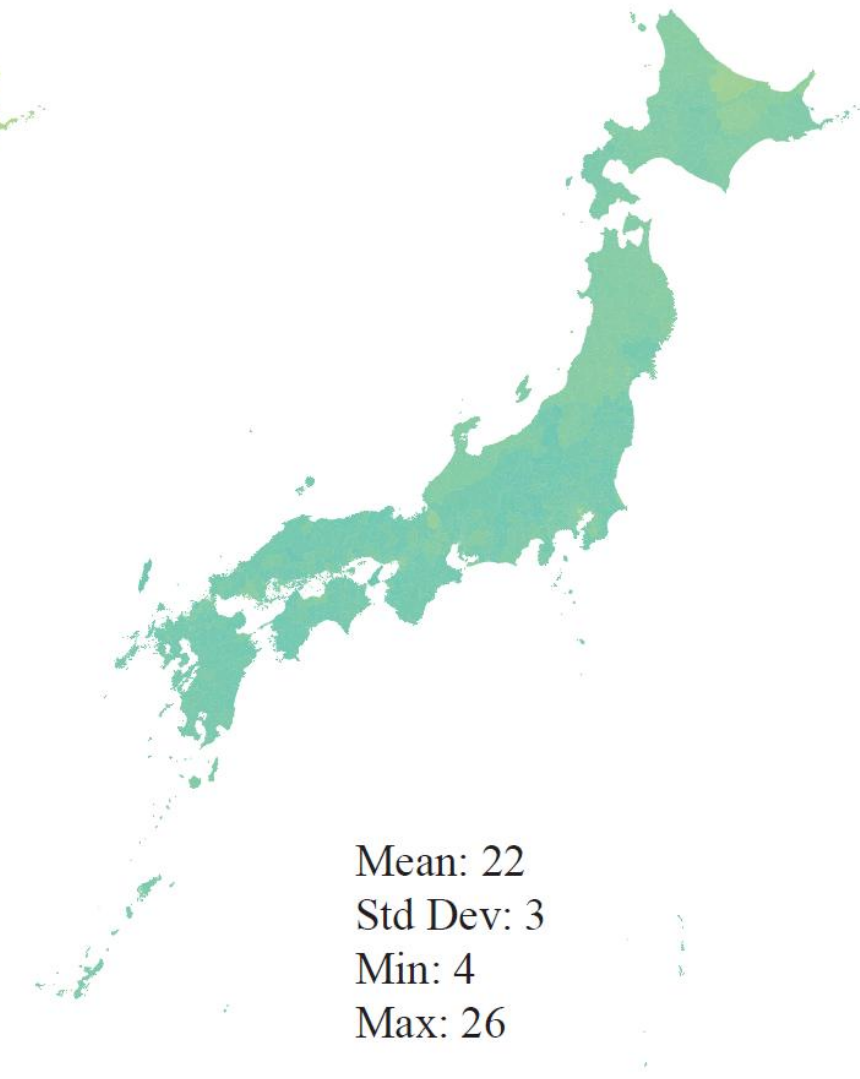
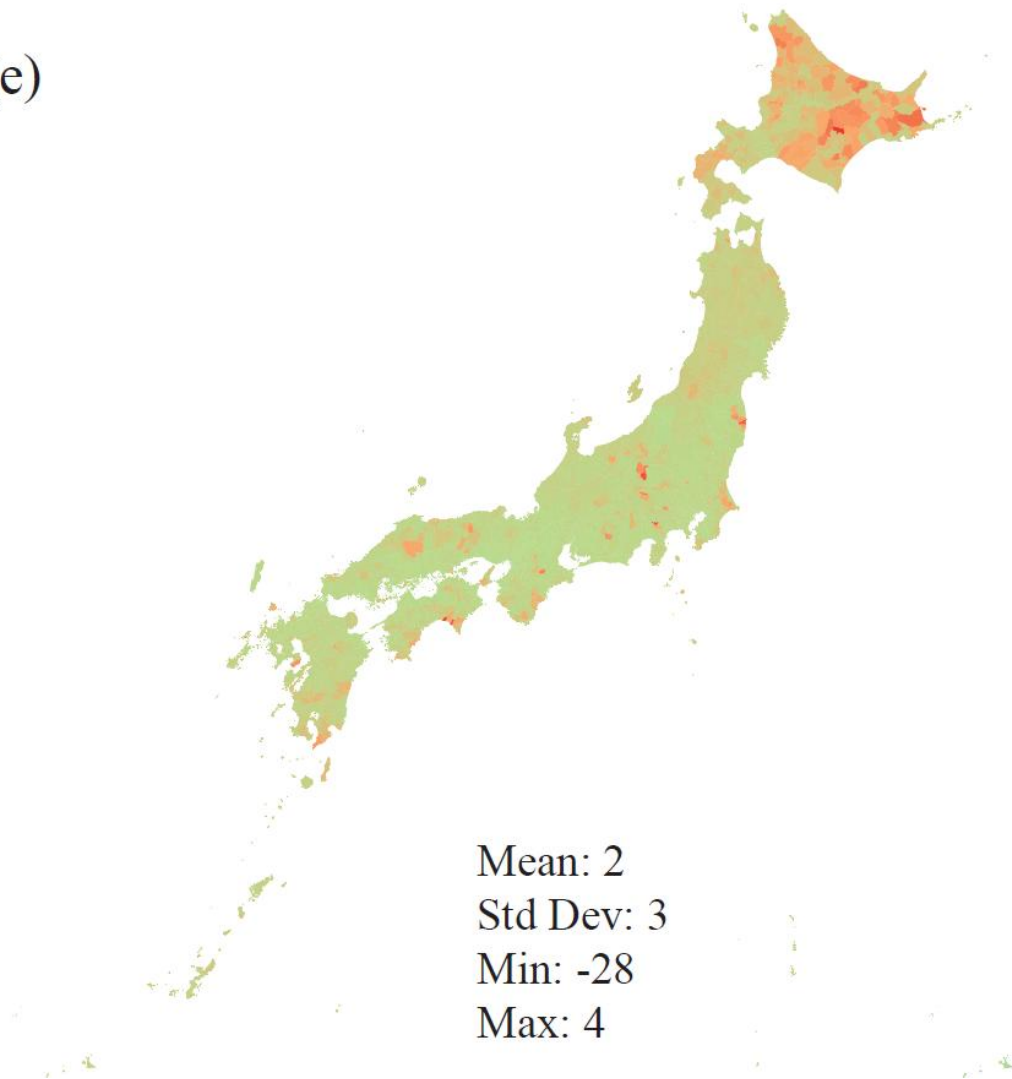
売電なし

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(e)



Cost saving (%)

60  
40  
20  
0  
-20

エネルギーコスト  
削減率

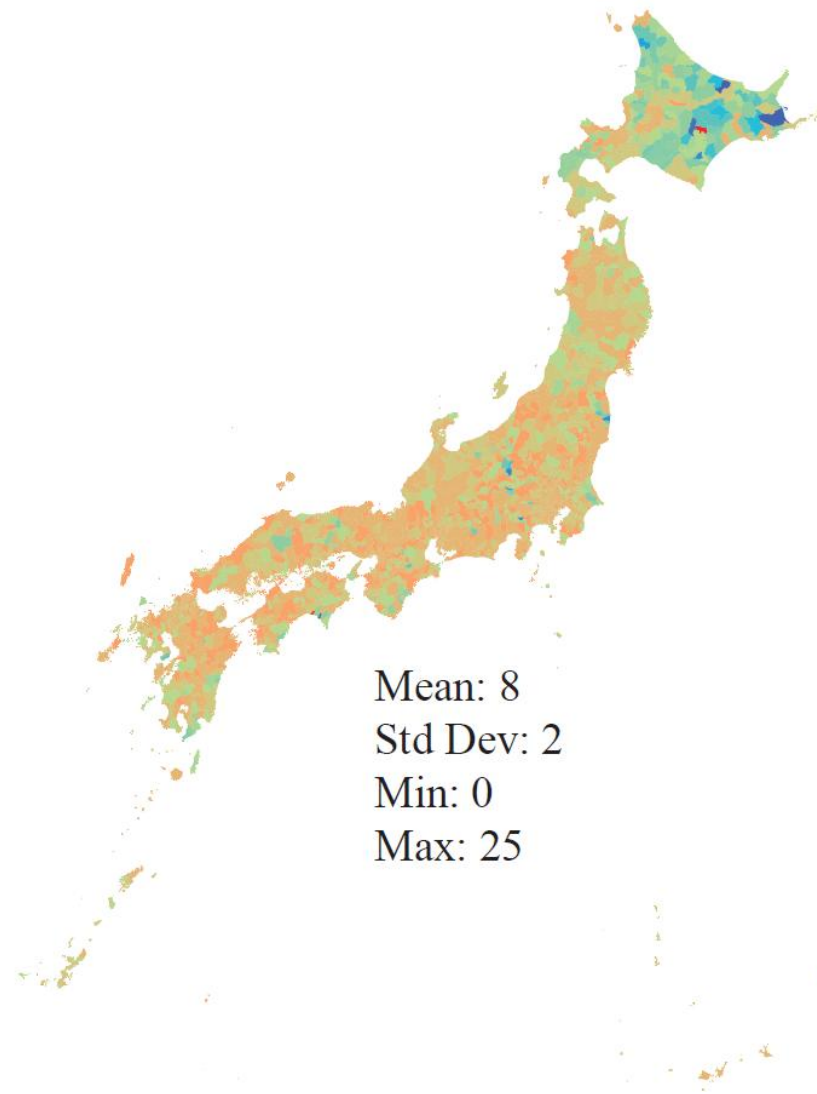
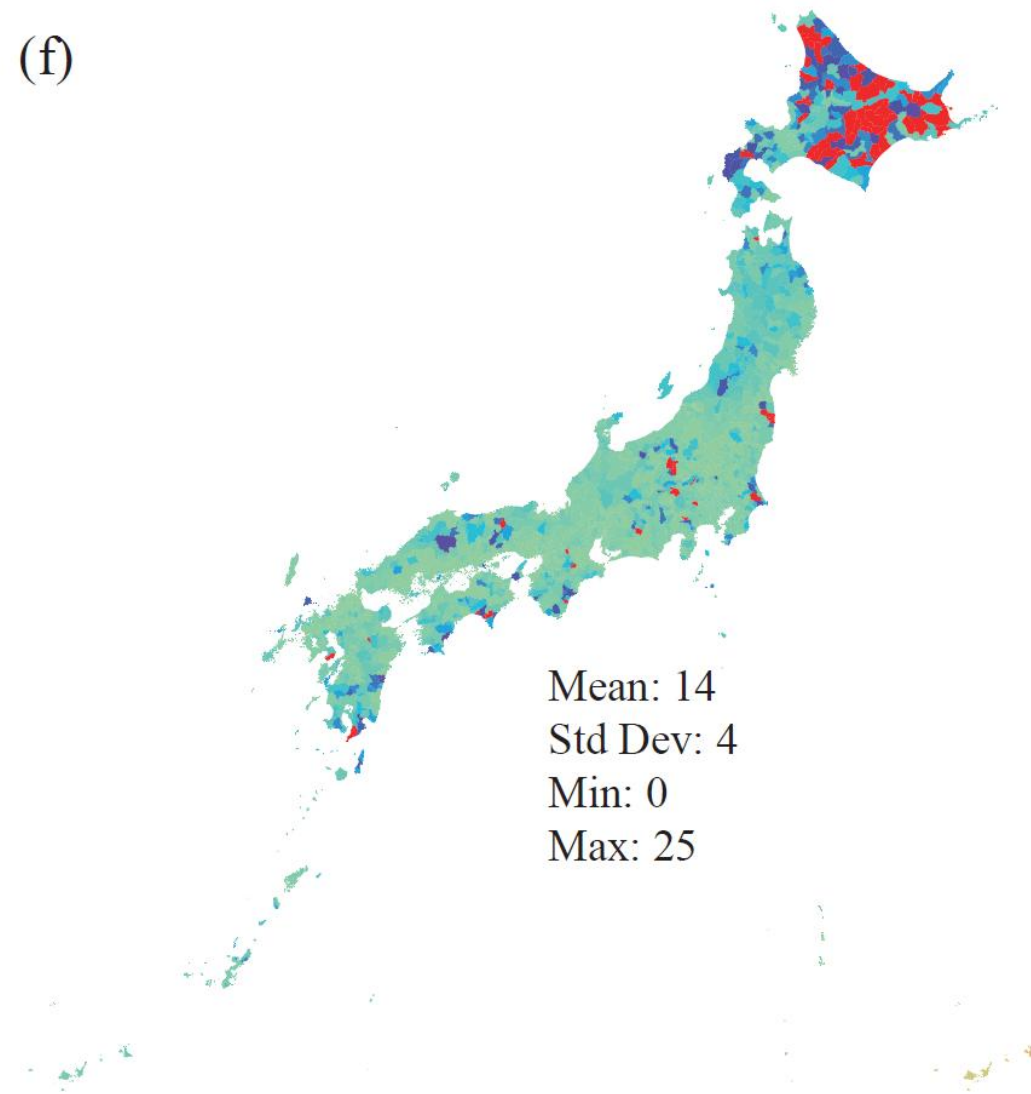
売電なし

2019年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電のみ

2030年太陽光発電とEVバッテリー

(f)



Payback period (year)

20

15

10

5

0

コスト回収期間

# 売電なしケースの特性

PVシステムの普及が進むと、余剰電力の販売は市場価格の低下により困難になる。したがって、売電なしのケースは、水素システムなどの大きな余剰電力需要がない場合、より現実的である可能性がある。

売電なしでは、**PV**経済性は高い自己消費率に依存する。限られた**PV**容量により、**2019**年の自己消費率は高い（平均**88%**）。**2030**年には**PV**システムコストの低下により**PV**容量が増加し、自己消費率は**7～10**ポイント減少する。

**2019**年のFITなしの「**PV**のみ」は、日本のすべての自治体で平均**26%**の自給率を示す。**2030**年の**PV**システムコスト低下は**PV**容量の拡大を促すが、自給率は平均**30%**にしか増加しない。

# 結論と政策提言

## 主要な発見

- 屋上PVをEV蓄電池と統合したシステムは、日本のほとんどの自治体にとって都市エネルギーシステムの脱炭素化に非常にコスト効率の高いソリューションを提供する
- 「PV + EV」システムは、屋上面積の70%をPVで覆うことで、自治体の時間単位の電力需要の平均85%を供給可能
- 2019年のPVシステムコストが高い時期には、北部地域の経済的なPV発電が少ないため、脱炭素化ポテンシャルに明確な南北勾配が生じた

## 政策提言

- 過渡期には北部地域の住民がエネルギー貧困の状態を悪化させる可能性があり、政策的な注目が必要
- 政策立案者は「PV + EV」システムの大きな脱炭素化ポテンシャルを認識し、V2H/V2Gインフラ、R&D、実証プロジェクトに十分な支援を提供すべき



都市環境における増加するEVと屋上PVは、新たな機会の窓を急速に開いている

地域自治体への提言：

地域の全屋根面積の70%を、太陽光発電で覆うことを目標とできないか？

- これにより、太陽光発電の余剰電力をどのように活用するかというビジネスが生まれやすくなる。
- 余剰電力が増えることで、電気の価格が下がり電化が進みやすくなる。
- 誰もが貢献でき、わかりやすいターゲット。
- カーボンニュートラル実現に向けた共通するターゲット持つことで、乗り越えるべき障害を明らかにできる。

この目標を、カーボンニュートラルにつなげるためには、EVバッテリーを活用することが必須。

「カーボンニュートラル」への道は、どの道を選んでも厳しい道のりである。  
「屋根上PVとEV」を最大限活用した**SolarEVシティー構想**による「カーボンニュートラル」への道は、その中で、もっとも実現可能性の高い道であると言える。



ご清聴ありがとうございました。