

ASEAN諸国における太陽光・風力発電の導入可能性

一般財団法人日本エネルギー経済研究所

計量分析ユニット 主任研究員
尾羽 秀晃

ASEANのカーボンニュートラル (CN*)実現に向けて、再生可能エネルギーが期待されているが、**適切な電源**の立地誘導を行わない場合、**乱開発が進むリスク**が危惧される。

森林の斜面地に設置された太陽光発電システム(日本)



出典:Google map

居住地周辺の太陽光発電システム(日本)



出典:Google map

ASEANにおいても電源を**優先的に導入すべき場所**を検討し、適切な導入目標の策定と普及拡大を図ることが求められる。

ASEANにおける太陽光発電の立地状況

ASEANにおける政府主導のプロジェクト等では、未利用地や建物屋根などといった、設置に関わる**環境影響**や**社会的影響**が**小さい場所**への導入が進められている。

インドネシアの州政府所有企業が
太陽光発電の設置を計画している廃鉱山



出典: Google map

未利用地を対象とした導入促進[1]
(マレーシアでも同様の動き[2])

シンガポールのSolarNovaプログラム
によって導入された太陽光発電



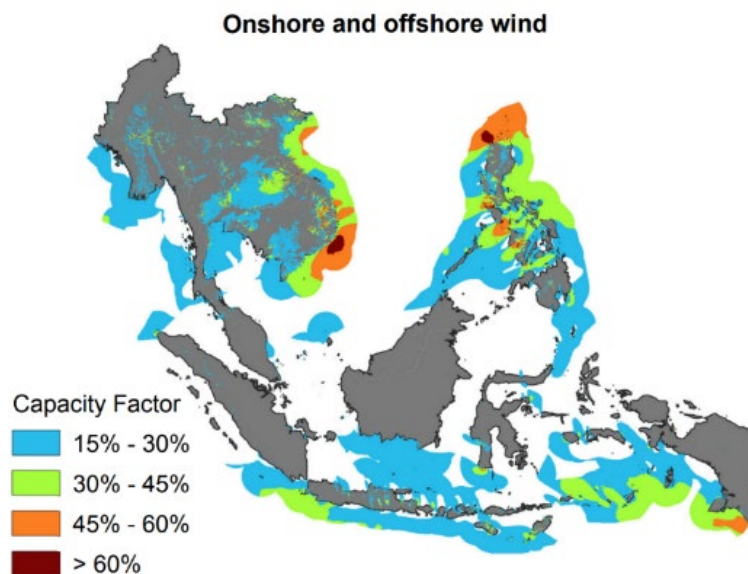
出典: Housing development board [3]

建物屋根を対象とした導入促進[3]
(ブルネイでも同様[4])

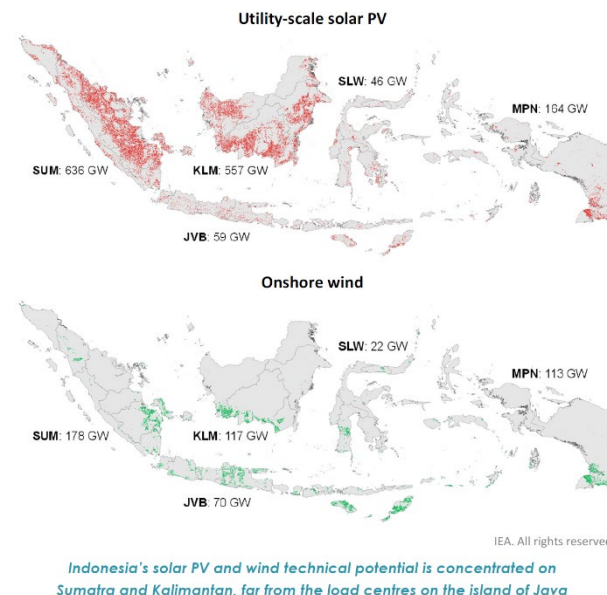
ASEANを対象とした導入ポテンシャルの既往研究(1)

- IEA[5]は、ASEANを対象に技術的に設置に適した場所(technically suitable)を抽出し、この場所の全てに太陽光・風力発電を設置した場合の設備容量を計**20TW**と推計した。
- IEA[6]は、上記とは別の報告でインドネシアにおける同設備容量を、事業用太陽光**1,500GW**、陸上風力**500GW**と推計した。

IEA[5]による評価例



インドネシアを対象にしたIEA[6]による評価例



ASEANを対象とした導入ポテンシャルの既往研究(2)

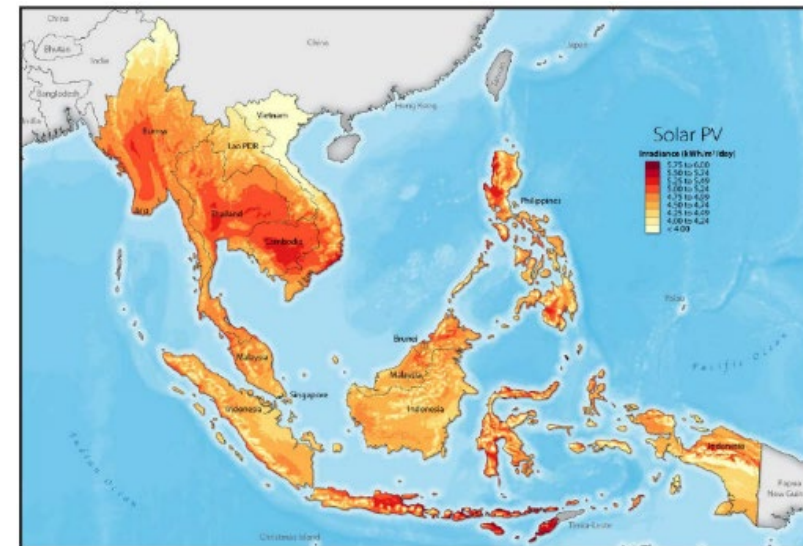
- IRENA[7]は、1kmメッシュの地理情報データを用いて、保護区域や森林、都市部、湿地、農地、斜面地を除外することによりポテンシャルを太陽光**15.6TW**, 陸上風力**0.1TW**, 洋上風力**1.1TW**と推計した。
- Lee et al.[8]は、1kmメッシュの地理情報データを用いて、土地利用に関わるシナリオ別のtechnical potentialを推計した。

IRENA[7]による評価例

Table 11 ASEAN's renewable energy potential for power generation

	RENEWABLE ENERGY RESOURCES (GW)					
	PV	ONSHORE WIND	OFFSHORE WIND	BIOMASS	HYDRO	GEOTHERMAL
Brunei Darussalam	1.9	-	-	-	0.1	-
Indonesia	2 896	19.6	589	43.3	94.6	29.5
Cambodia	1 597	2.5	88.8	-	10	-
Lao PDR	983	11.9	-	1.2	26	0.1
Myanmar	5 310	2.4	-	1	40.4	-
Malaysia	337	-	53.3	4.2	29	-
Philippines	1 225	3.5	69.4	0.2	10.5	4
Singapore	0.3	0.1	-	-	-	-
Thailand	3 509	32.4	29.6	18	15	-
Viet Nam	844	31.1	322.1	8.6	35	0.3

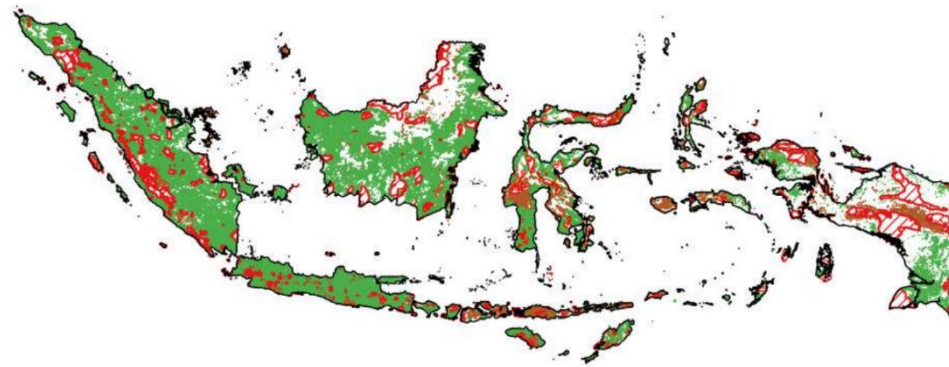
Lee et al.[8]による評価例



ASEANを対象とした導入ポテンシャルの既往研究(3)

- Siala et al.[9]は、高解像度の**日射量データ**を基にASEANにおける太陽光発電の発電電力量の評価を行った。
- Vidinopoulos et al.[10]は、森林、農地、都市部以外の場所に設置する前提とし、各面積に関わる**統計値**を基にtechnical potentialを推計した。
- これらに加え、ASEANの特定地域のみを対象とした研究が複数存在する[11]-[16]。

インドネシアを対象にしたISERによる評価例[14]

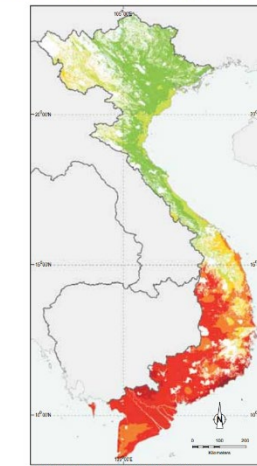


Indonesia's solar PV suitable area map (Scenario 1)

- Suitable Land
- Suitable Land Use with Unsuitable Slope
- Restricted Land Use
- ▨ Protected Areas

メコンデルタを対象にしたWorld bankによる評価例[15]

Map 8.1: Areas Potentially Suitable for Solar Photovoltaic Development: Viet Nam



- CLASSES of Global horizontal irradiation, average sum of long-term climatic average, period 1950-2011 (kWh/m²/yr)
- <1350
 - 1350-1400
 - 1400-1450
 - 1450-1500
 - 1500-1550
 - 1550-1600
 - 1600-1650
 - 1650-1700
 - 1700-1750
 - 1750-1800
 - 1800-1850
 - 1850-1900
 - 1900-1950
 - 1950-2000
 - 2000+

Sources: GeoModel Solar; Lahmeyer International.

既往研究の課題

これまでの研究では、電力需要に対して膨大な導入ポテンシャルが存在することを示唆しているものの、以下のような課題があった。

① 導入障壁の考慮の不足

系統接続の難易度や、国家情勢、屋根の構造的制約、世帯の所得水準、太陽光と風力発電の競合といった、実際に生じうる**導入障壁による影響**が十分に考慮されていない。

② 建物屋根の空間的精度の不足

特定地域を対象とした研究では、統計データやDSM（数値表層モデル）を用いて屋根面積を詳細に推計した事例も見られるが[14][16]、広域の評価は行われていない。

ASEAN全体を対象とした研究では、主に1kmメッシュの土地利用区分データに基づく推計が中心であり、**広域における建物単位での屋根面積の把握**が不十分である。

本研究の目的

本研究は、未利用地や建物屋根、洋上空間などに関する地理的情報を統合し、導入障壁を考慮した**太陽光・風力発電の導入可能性**を評価することを目的とする。

(1) 土地利用データ



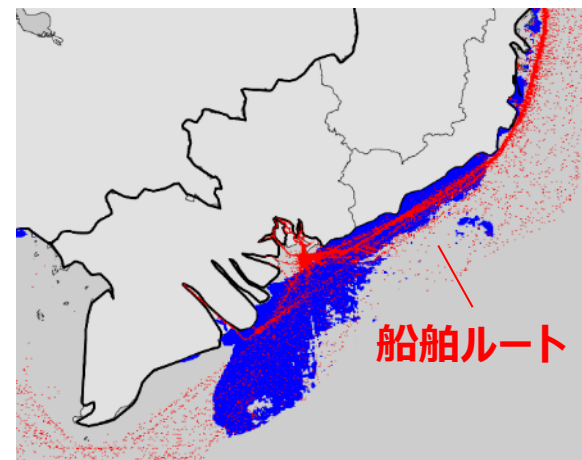
→ 未利用地における
系統接続の可能性を考慮

(2) 建物データ



→ 衛星データに基づく
詳細な**建物情報**を反映

(3) 海域データ



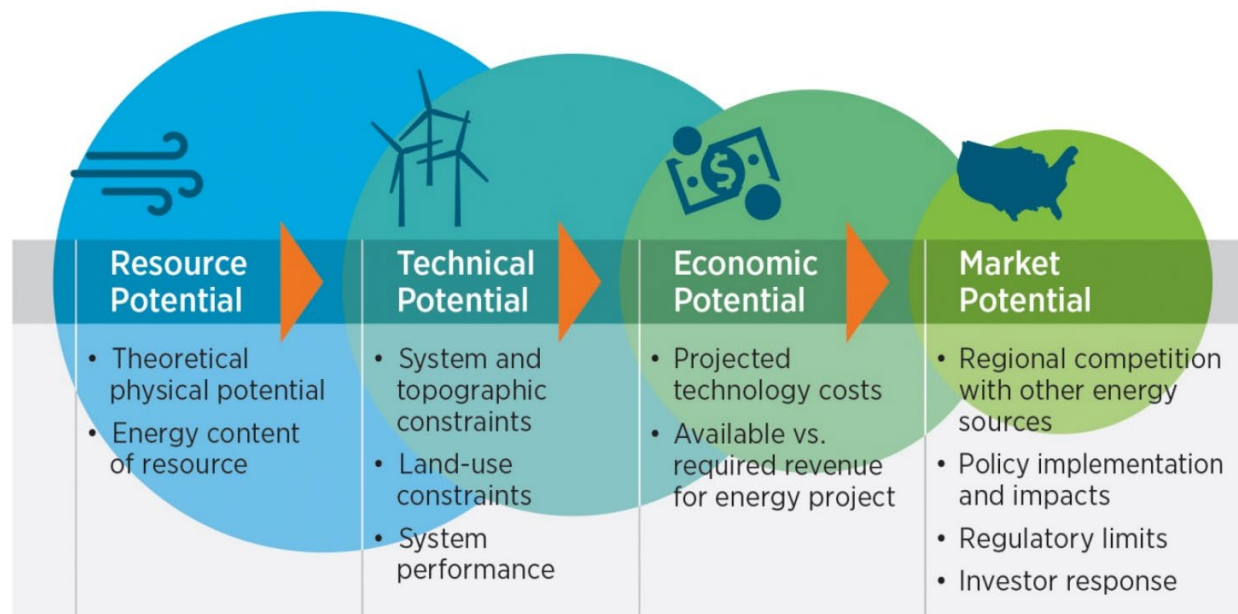
→ **船舶との競合が生じにくい**
海域を考慮

太陽光・風力発電の導入を優先すべき場所に焦点を当て、様々な導入障壁に関わる分析を通じて、導入拡大に向けた**政策的課題と対応の方向性**を明らかにする。

本研究におけるTechnical potentialの定義

- 本研究では、Lopez et al.[17]の考え方に基づいて、システム・地形上の制約や土地利用、システムパフォーマンスを考慮した**Technical potential**（導入ポテンシャル）を評価の対象とした。
- 本研究では、経済的制約や社会的制約、および生態系影響については不問とし、将来の土地利用変化などの時系列変化は考慮しないものとした。

Brown et al.によるPotentialの分類[18]



1. 未利用地における地上設置型太陽光・陸上風力の評価

2. 建物屋根における屋根設置型太陽光発電の評価

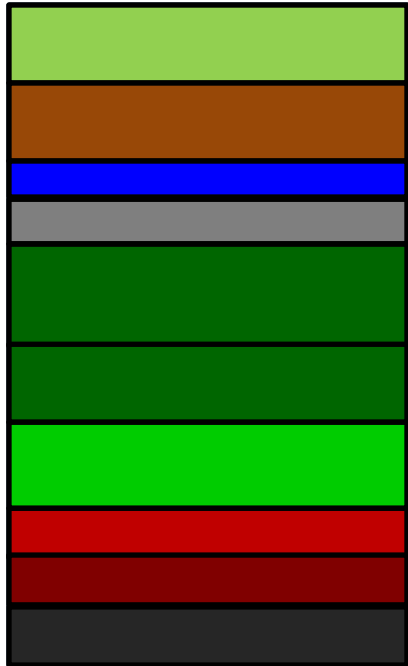
3. 洋上風力の導入ポテンシャル評価

4. 政策的示唆

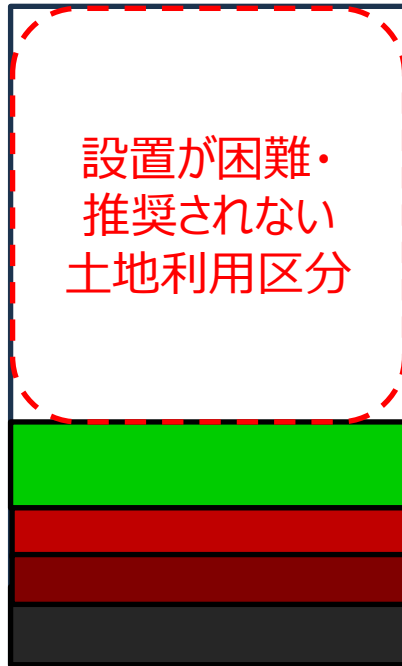
本研究における設置対象場所の考え方

- 本研究ではObane et al.[19]に基づき、地上設置型太陽光発電と陸上風力発電の設置対象場所を以下の通り評価した。
- ASEANを対象とした既往研究と比較し、**電源間の競合**を考慮した点が異なる。

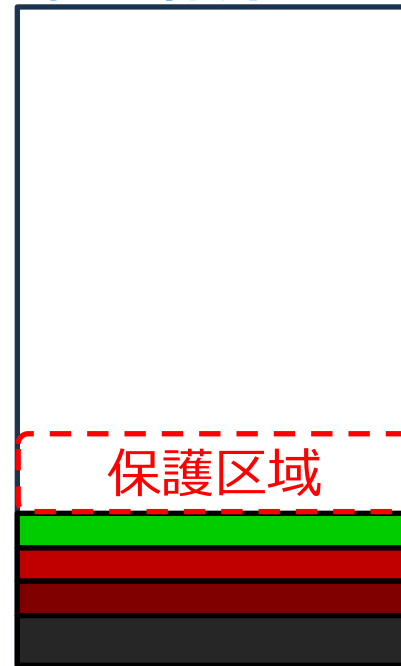
① 土地利用区分の分類



② 設置困難な土地利用区分の除外



③ 保護区域などの除外



④ 太陽光・風力発電の競合場所の特定



設置対象場所

土地利用区分の分類

ASEAN各国における法制度などを参考に、以下の通り土地利用区分を分類した。

本研究における土地利用の分類

区分	土地利用	備考
設置困難 非推奨	Forest	環境保全の観点から発電設備の設置が推奨されない。
	Tree open	Forestよりも木の密度が低い土地利用区分。 Forestと同様に環境保全の観点から発電設備の設置が推奨されない場所とした。
	Farm land	農作物の生産との両立が必要であり、本研究では評価の対象外とした。
	Water bodies	地上設置型太陽光発電は物理的に発電設備の設置が困難。
	Wetland	環境保全の観点から発電設備の設置が推奨されない。
	Urban	道路など建物以外の用地。物理的に発電設備の設置が困難。
	Snow/Ice	物理的に発電設備の設置困難。
設置対象	Gravel	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	Herbaceous	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	Sand	環境影響などが小さいことが想定される。
	Shrub	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	Buildings	屋根設置型太陽光発電の設置対象

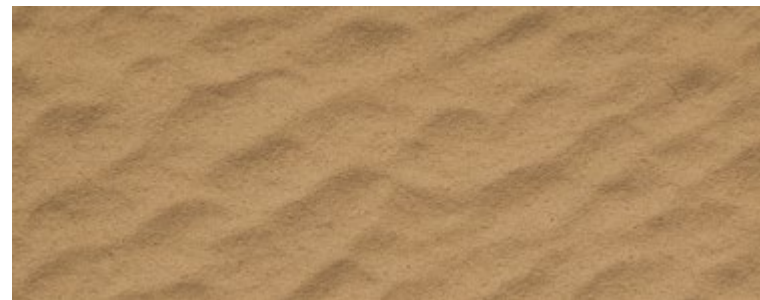
設置対象とした土地利用区分

Milbrandt et al.[20]の考え方を参考に、各電源の設置対象とする土地利用区分を「自然要因・人工的要因によって周縁化された、固有の問題を有する土地」とし、それに準ずる土地利用区分として以下**4種類の土地利用区分を設置対象とした。**

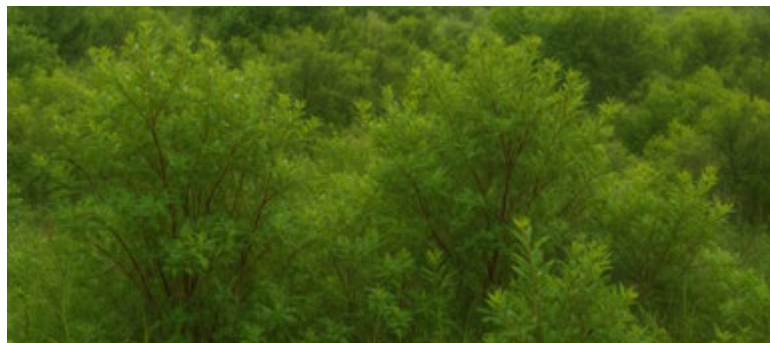
Gravel



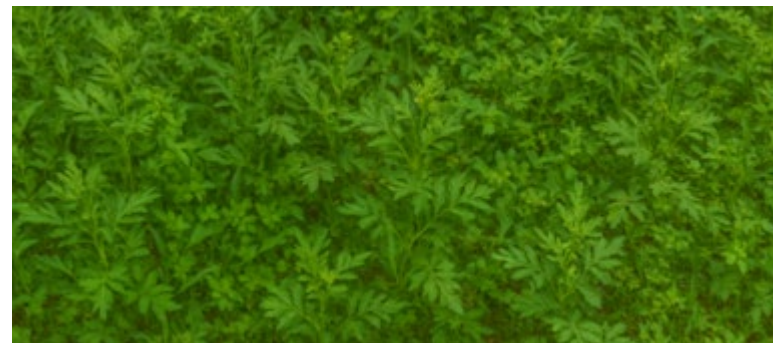
Sand



Shrub



Herbaceous

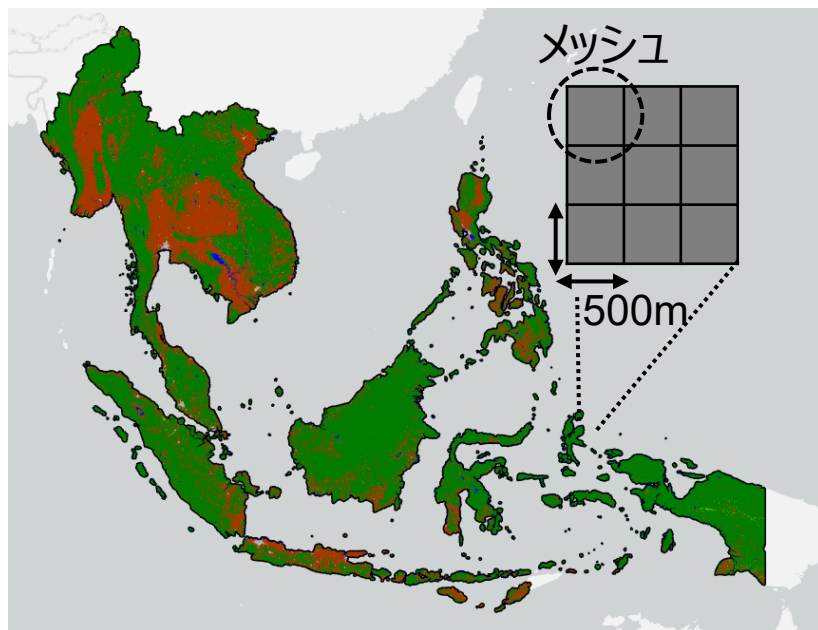


* いずれの図もChatGPT 4oにより生成

地理情報データを用いた評価方法

- 土地利用を500mメッシュに分割し、各メッシュに土地利用区分や保護区域、送電線までの距離といった各種情報を整備した。
- 土地利用区分データは、既往研究で用いられているデータと比較し、**設置対象場所とした土地利用区分の判別精度が高い**GLCNMO ver3を用いた(詳細は付録3)。

ASEANにおける土地利用メッシュ



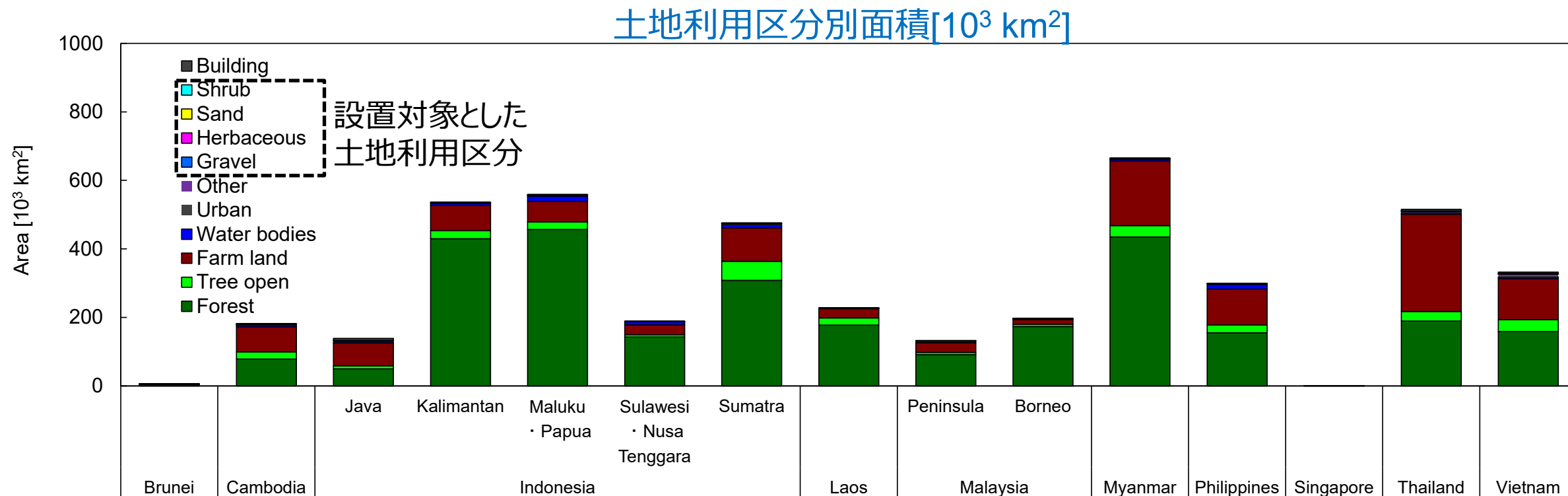
*1 The World Database on Protected Areas

*2 Key Biodiversity Areas

要素	元データ
土地利用区分	GLCNMO ver3 [21]
保護区域	WDPA ^{*1} [22], KBA ^{*2} [23]
年間平均日射量	Global Solar Atlas [24]
年間平均風速	Global Wind Atlas [25]
地形条件	1kmメッシュ平均傾斜角[26]
送電線からの距離	OSM[27]よりAPIで取得した送電線データからの距離を計算
州・郡	HDX[28]におけるadministration level 1, 2の細分地域
メッシュ面積	ArcGISの「測地線」で推計。後述する建物の面積は控除した値。

土地利用別面積

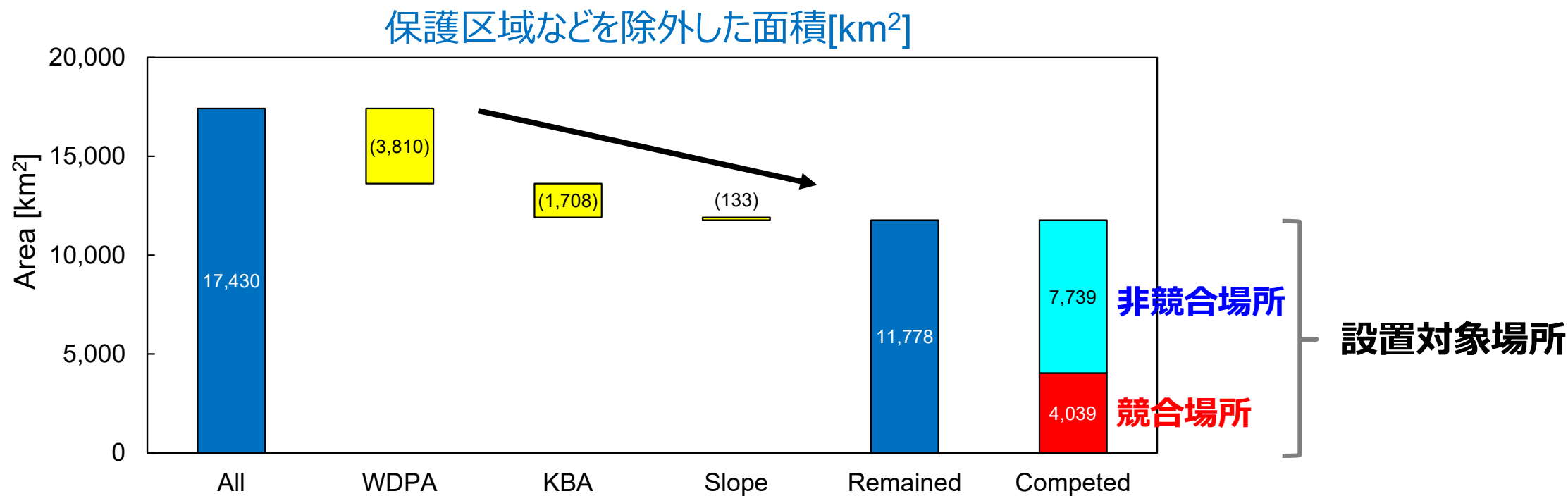
地理情報データ(GIS*データ)を基に、土地利用区分別の面積を推計した結果を示す。



ASEAN全ての国の面積(4,455,782km²)のうち森林が70%, 農地が26%を占めており、太陽光・風力発電の設置に適した雑草地などの面積は0.4%(17,430km²)に留まる。

保護区域などを除外した面積

設置対象とした雑草地などの場所のうち、保護区域(WDPA areas)・生物多様性重要地域(KBA areas)・傾斜角30度以上の場所を除外した場所の面積を推計した。
なお、年間平均風速5.0m/s以上の場所は、太陽光と風力発電が競合する場所とした。

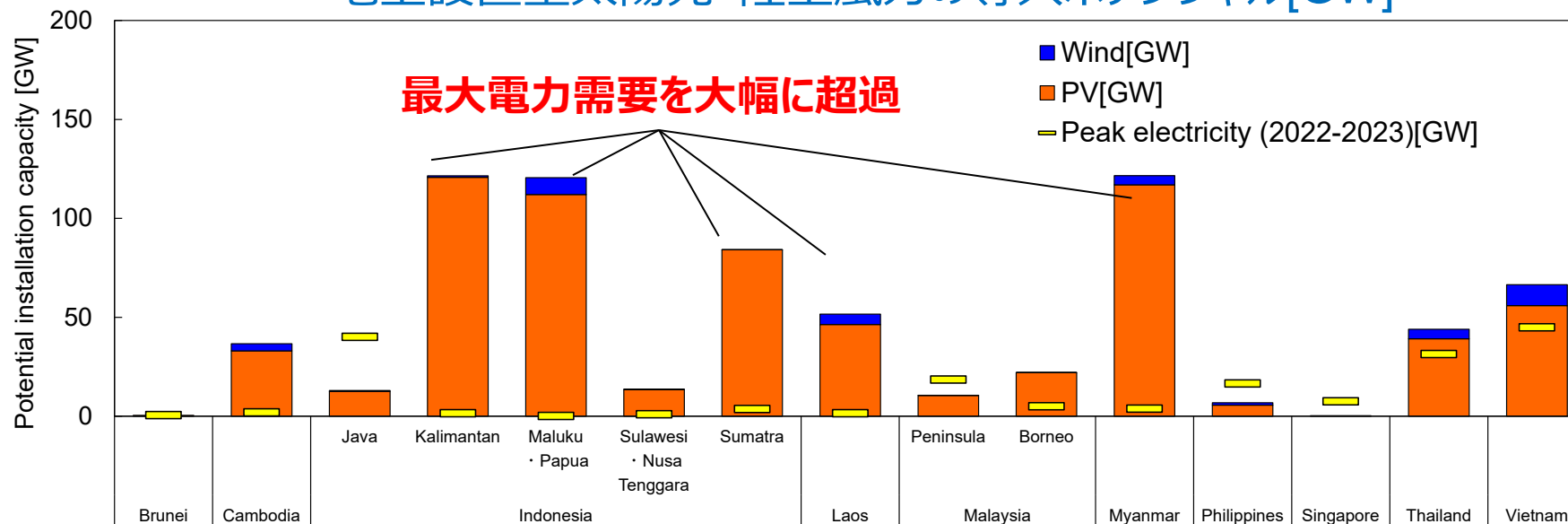


雑草地などの面積から保護区域などを除外した面積は**11,778km²**と推計された。
ただし、**約3割**の場所で太陽光発電と風力発電の**土地利用競合**が発生する。

地上設置型太陽光・陸上風力の導入ポテンシャル

地上設置型太陽光と陸上風力の土地利用競合を考慮し、年間平均風速5.0 m/s未満の場所に太陽光、同5.0m/s以上に陸上風力を設置した場合の導入ポテンシャルを示す。

地上設置型太陽光・陸上風力の導入ポテンシャル[GW]



- * 太陽光発電の面積から設備容量への換算はBolinger and G.Bolinger[29]による実績に基づくベンチマークに基づき0.087GW/km²とした。
- * 陸上風力発電の面積から設備容量への換算はObane et al.[19]と同様に0.010GW/km²（理論値ベース）とした。
- * 最大電力需要は各国の電力会社のレポート等より推計した[30]-[39]。

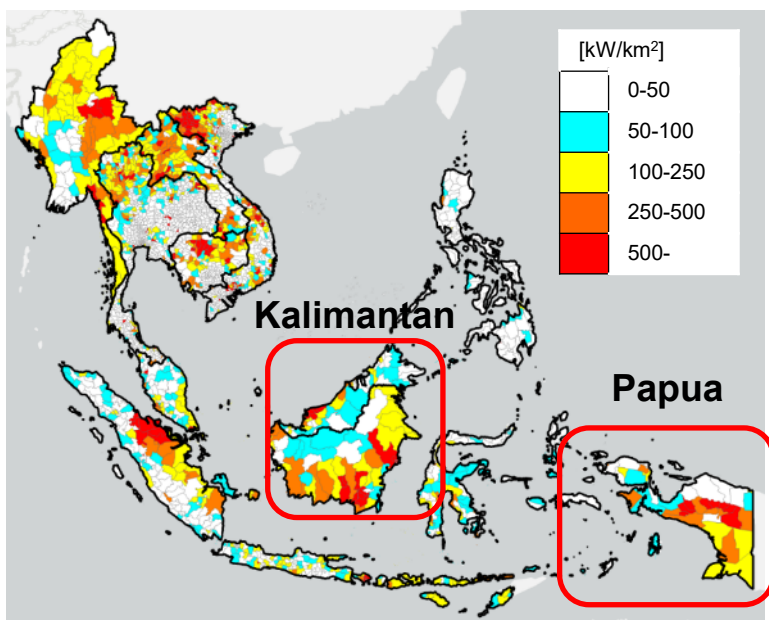
ASEAN全体の未利用地の導入ポテンシャルは太陽光**673GW**、陸上風力**40GW**と推計された。ただし、設置対象場所はマルク・パプアなどの**電力需要の少ない地域**や、**国家情勢が不安定なミャンマー**などに偏在している。

地域別の導入ポテンシャル

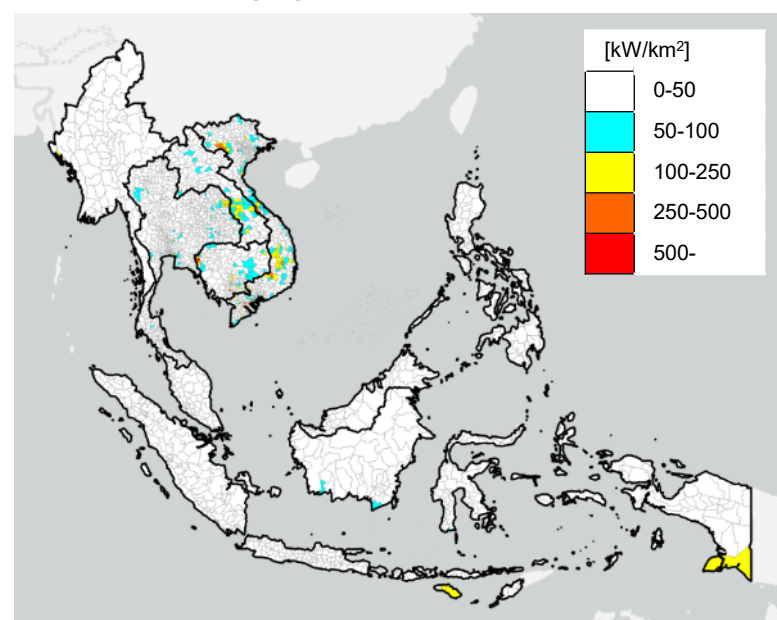
地域別の導入ポテンシャルの密度[kW/km²]を推計した結果を以下に示す。

地域別の導入ポテンシャルの密度[kW/km²]

(A) 地上設置型太陽光



(B) 陸上風力



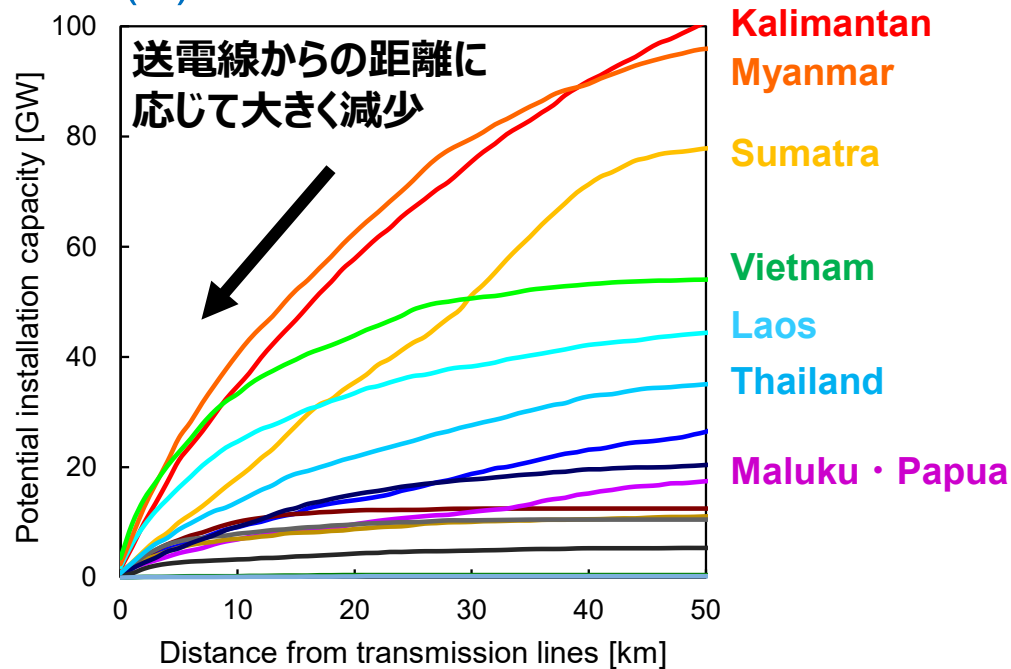
地上設置型太陽光の設置対象場所は、**森林**で囲まれたカリマンタンやパプアの内陸側などにも多く存在し、系統接続に関わる費用の問題だけでなく、森林における**系統整備に伴う環境影響**についても留意が必要である。

送電線からの距離に応じた導入ポテンシャル

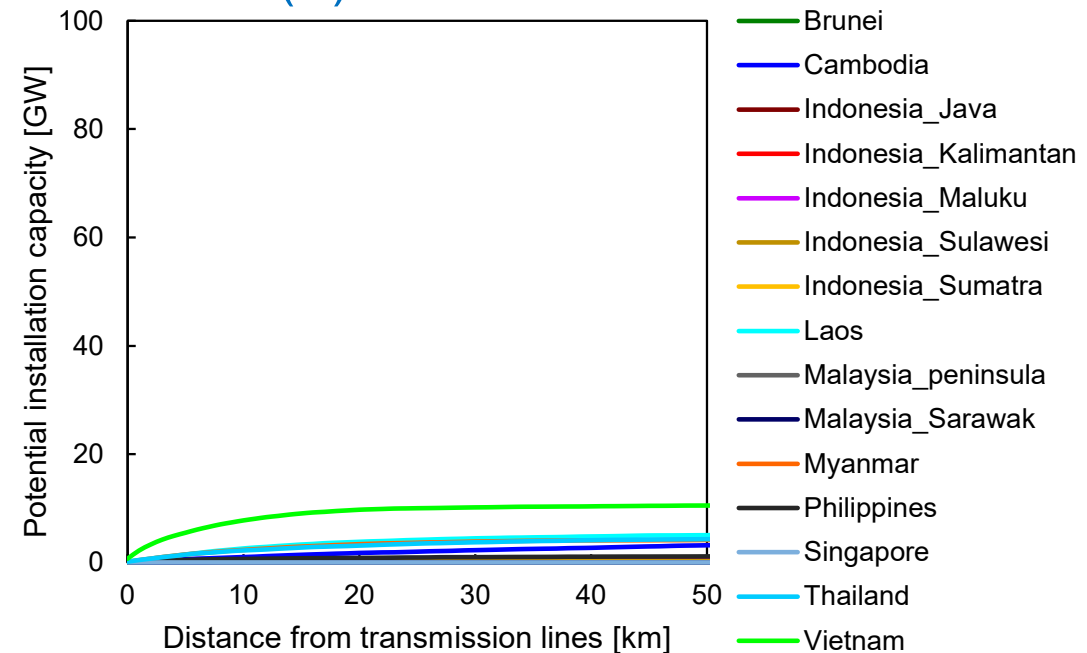
送電線 (> 33kV)からの距離の上限閾値に応じた導入ポテンシャルを以下に示す。

送電線までの距離の上限閾値に応じた導入ポテンシャル[GW]

(A) 地上設置型太陽光発電



(B) 陸上風力



* 各図の横軸(x軸)は送電線からの距離の上限閾値を示しており、同距離がx km未満の場所に各電源を設置するとした場合の導入ポテンシャルを示している。

送電線から近い場所に各電源を設置する場合、導入ポテンシャルは**送電線からの距離に応じて大きく減少**する。

→ 各電源の導入目標を策定する上では、**系統計画と合わせた策定**が必要。

1. 未利用地における地上設置型太陽光・陸上風力の評価

2. 建物屋根における屋根設置型太陽光発電の評価

3. 洋上風力の導入ポテンシャル評価

4. 政策的示唆

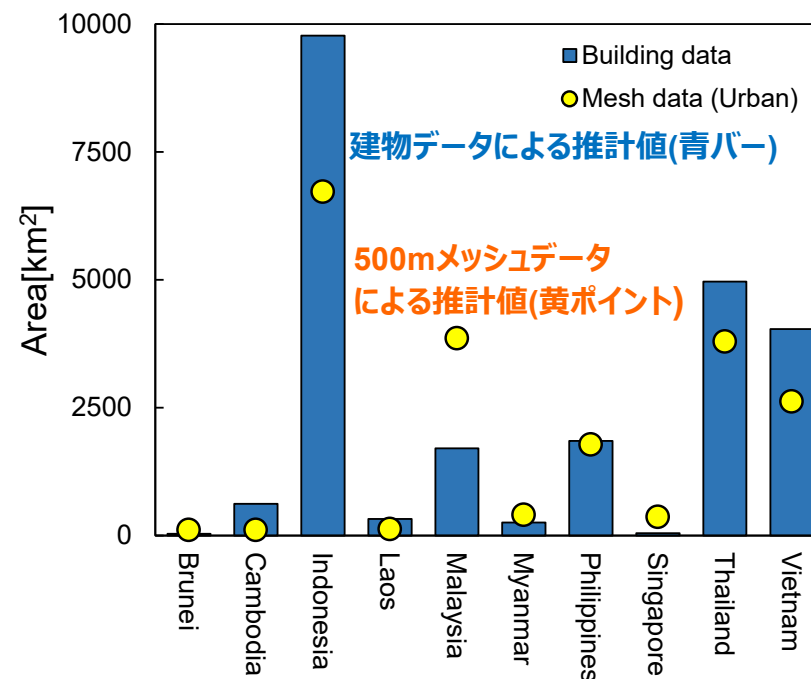
建物データを用いた屋根設置型太陽光の評価方法

Google Open Buildings[40]における約2億9千万棟の建物の緯度経度および形状に関する情報から地理情報データを作成し、各建物の屋根面積を計算した。

建物データ(Java島周辺)



建物データ(棒)とメッシュデータ(点)による
屋根面積の推計値の比較



従来のメッシュデータを用いる方法と比較し、屋根面積の推計値は大きく異なり、屋根設置型太陽光発電の**設置対象場所の評価**に有効であることが示唆される。

設置対象面積の考え方

GISで推計される面積は屋根全体の面積であるため、各文献を参考に屋根面積に対する太陽光発電が設置可能な面積の比率（**設置係数**）を設定した。

本研究にて想定した設置係数

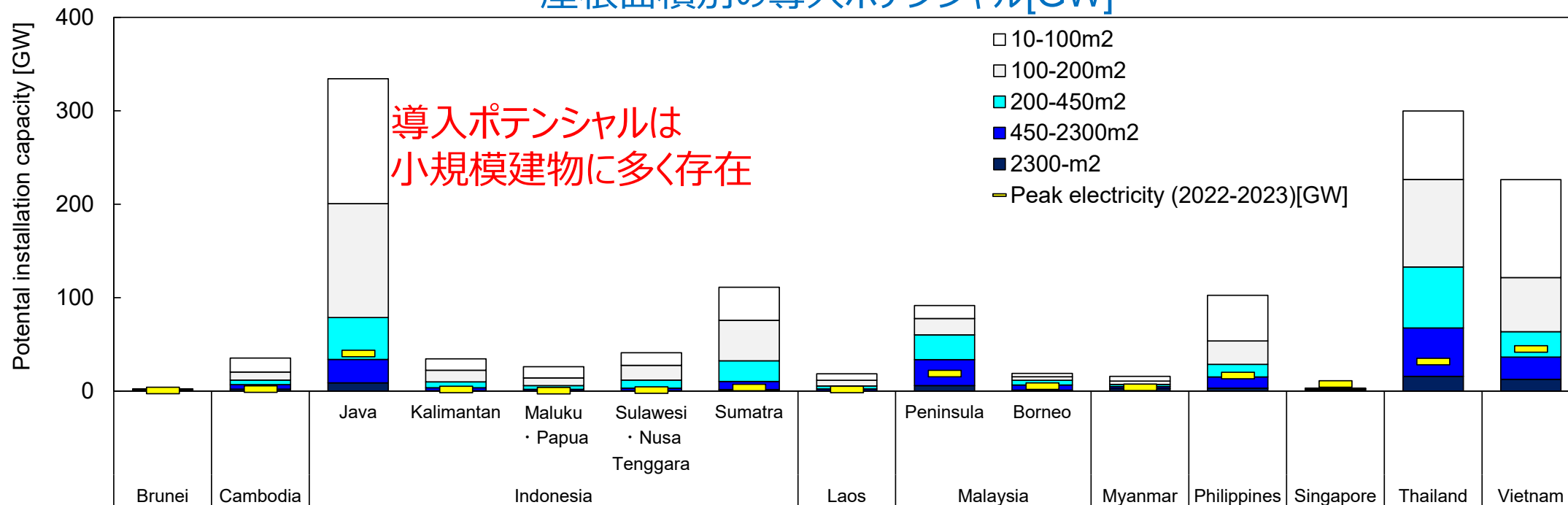
屋根面積[m ²]	設置係数	備考
0 – 10	0	物理的に屋根の全てに太陽光発電を設置したとしても最大で数枚程度であり、設置されない想定とした。
10 – 100	0.30	インドネシアを対象としたサンプル調査(Damayanti et al.[41])を基に設定。ASEANの戸建住宅で最も多い屋根面積。
100 – 200	0.36	インドネシアを対象としたサンプル調査(Damayanti et al.[41])を基に設定。
200 – 450	0.41	屋根面積100-200m ² の設置係数と450-2,300m ² の設置係数の中間値。
450 – 2,300	0.49	米国を対象としたMedium building(5,000 -25,000 ft ²)のサンプル調査(Gagnon et al.[42])を基に設定。
2,300 –	0.66	米国を対象としたLarge building(5,000 -25,000 ft ²)のサンプル調査(Gagnon et al.[42])を基に設定。

- 参考として、ベトナムのDa Nangの148,882棟を対象とした調査[16]（屋根面積別の推計値はなし）の設置係数が0.32であり、特に屋根面積が小さい世帯は概ね0.30-0.40の間に収まると想定される。

屋根面積別の導入ポテンシャル

設定した設置係数を基に屋根面積別の導入ポテンシャルを推計した結果を以下に示す。

屋根面積別の導入ポテンシャル[GW]



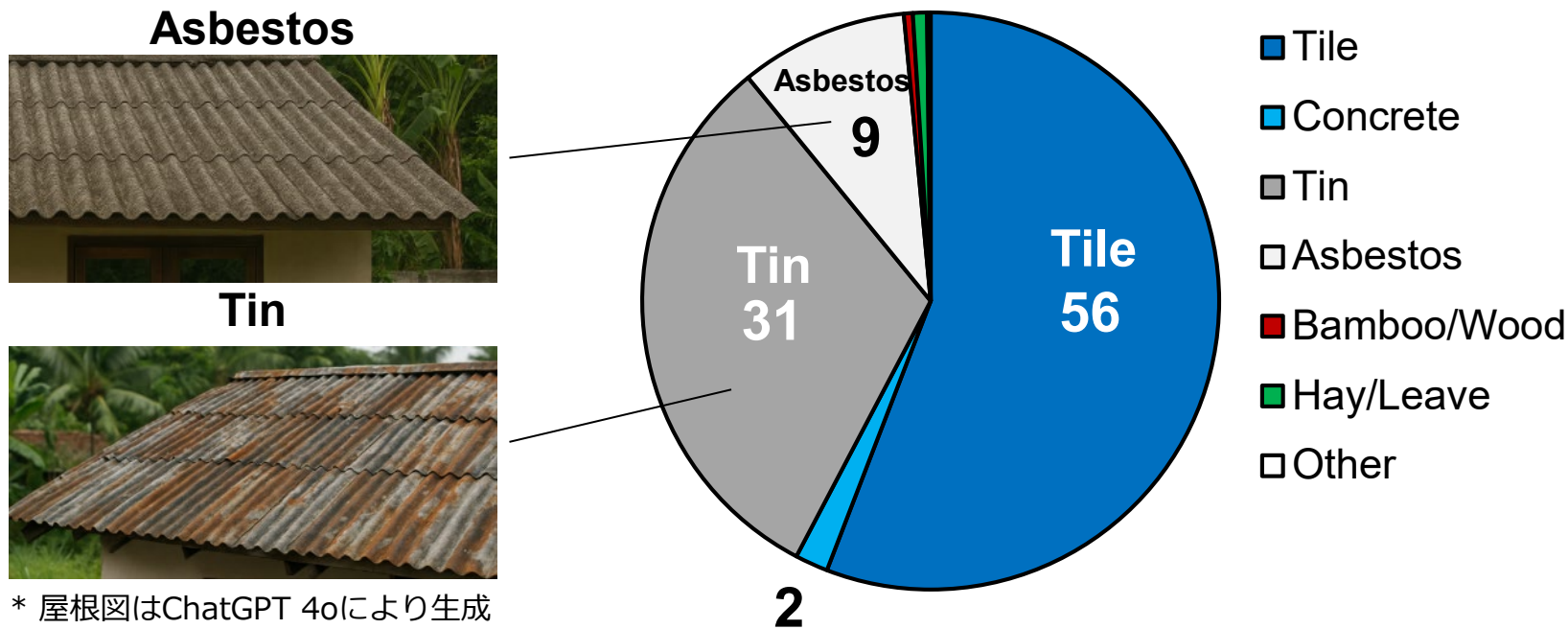
* 面積から設備容量への換算は、主要メーカーの住宅用太陽光発電システムの仕様に基づき $0.167\text{W}/\text{m}^2$ とした[43]。

ASEANにおける屋根設置型太陽光発電の導入ポテンシャルは**1,361GW**と推計されたものの、そのうち約7割(**898GW**)が屋根面積が 200m^2 未満の**小規模建物**に偏在する。
→ 大きな導入ポテンシャルがある反面、**屋根強度などの設置制約**が懸念される。

屋根強度に関する考察

ASEAN全てにおける屋根の統計情報は確認されていないが、導入ポテンシャルが最も大きいインドネシアでは、住宅の約3割が**トタン屋根**、約1割が**アスベスト屋根**であり、これらの屋根においては強度の観点から**必ずしも設置に適しているとは限らない**。

インドネシアにおける住宅屋根の材質別割合[44]

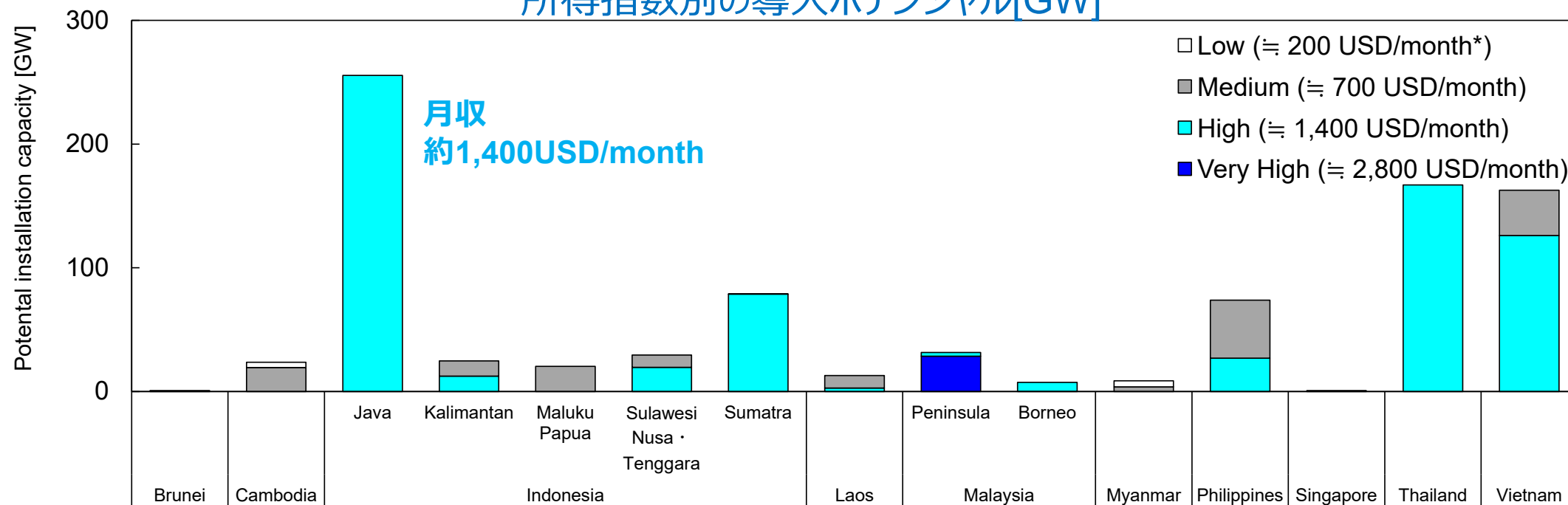


太陽光発電の普及に向けては、**屋根の強度基準策定**と合わせた政策が求められる。

所得指数別の導入ポテンシャル

主に住宅であることが想定される200m²未満の建物を対象に、国連開発計画(UNDP)で
使用される各地域の**所得指数**(Income Index [45])別*の導入ポテンシャルを推計した。

所得指数別の導入ポテンシャル[GW]



* Assumed monthly income

導入ポテンシャルが存在する地域は、太陽光発電を設置する上で**必ずしも十分な所得があるとは限らない**ため、初期投資の制約により導入が進まない可能性もある。

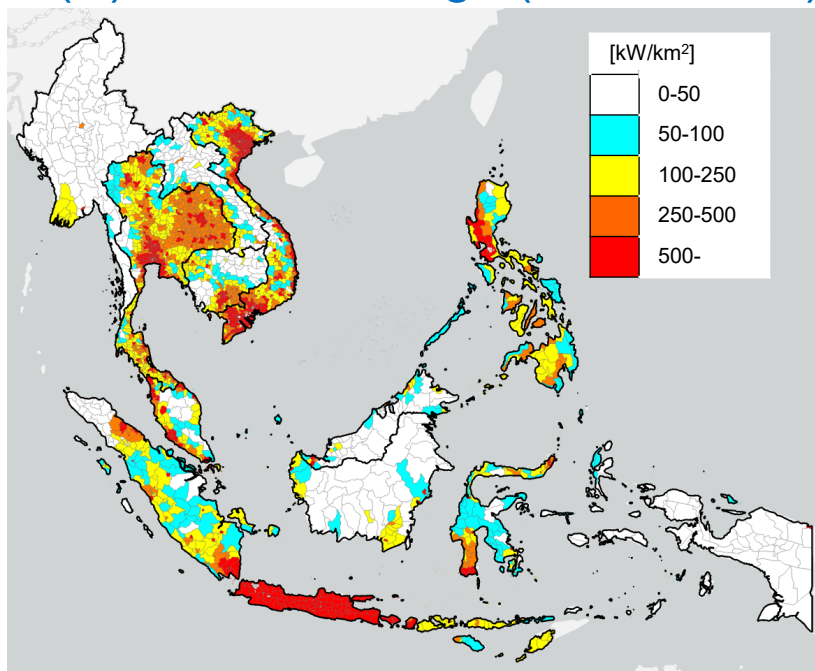
* 所得指数は地域別に集計された指数。

建物設置型太陽光発電の地域別の導入ポテンシャル

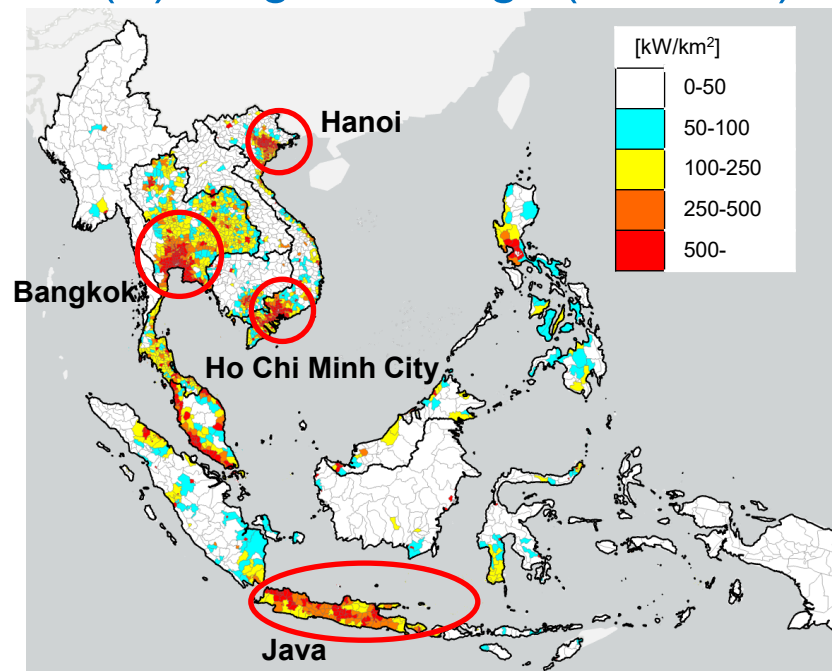
屋根の大きさ別に地域別の導入ポテンシャルの密度を推計した結果を以下に示す。

地域別の導入ポテンシャルの密度[kW/km²]

(A) Small buildings (10 – 200m²)



(B) Large buildings (200m² –)



設置制約が小さいと考えられる大規模建物は都市部に集中しており、局所的に大量導入される場合には、スコールなどによる急な出力変動などへの対応策が求められる。

1. 未利用地における地上設置型太陽光・陸上風力の評価

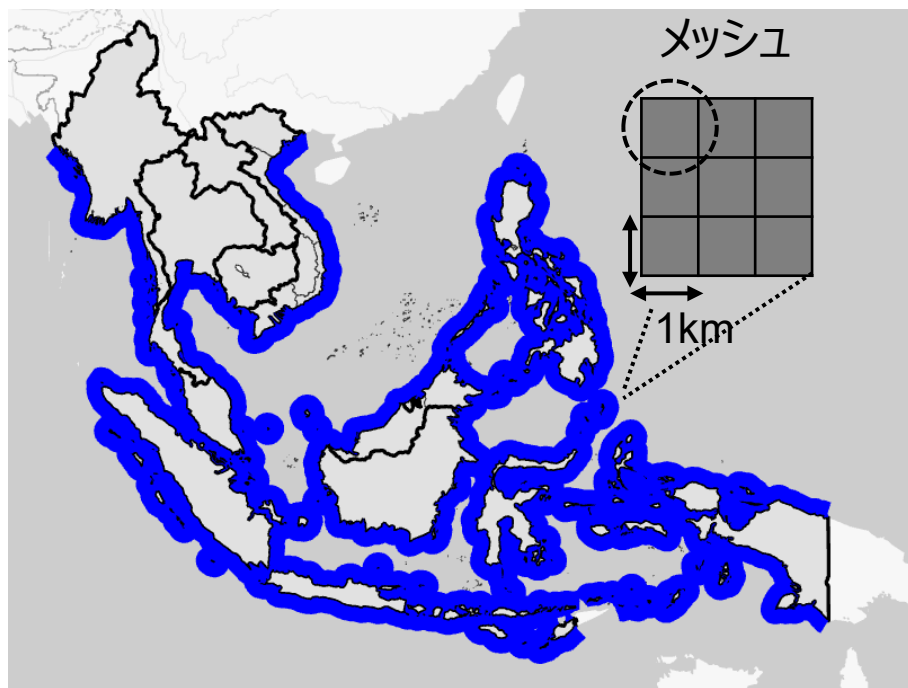
2. 建物屋根における屋根設置型太陽光発電の評価

3. 洋上風力の導入ポテンシャル評価

4. 政策的示唆

離島を除いたASEAN周辺の海域(離岸距離100km未満)を対象に、分割した約1km四方の各メッシュに、風況や水深、船舶通行量などの情報を整備した。

ASEAN周辺における海域利用メッシュ

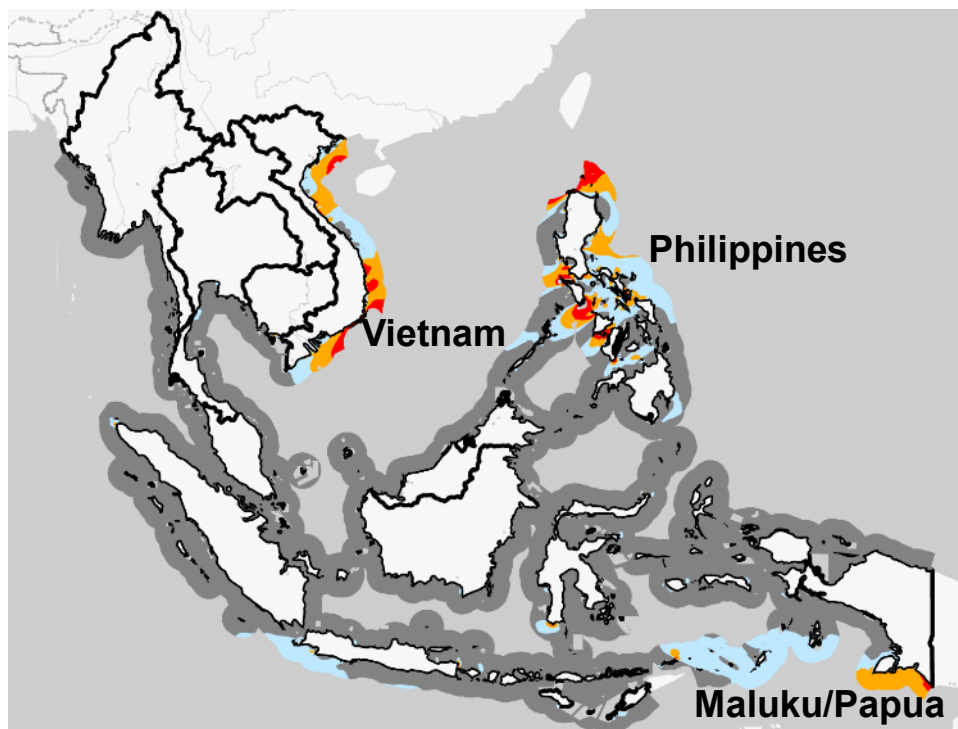


要素	元データ
年間平均風速	Global Wind Atlas [25]
水深	GEBCO[46]
船舶通行量	World Bank[47]の2015年1月から2021年2月までのAISデータより推計
保護区域	WDPA[22]
メッシュ面積	ArcGISの「測地線」で推計

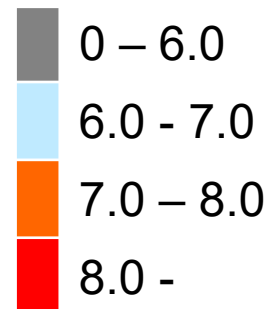
設置対象海域の年間平均風速別分類

ASEAN周辺の海域のうち保護区域を除外し、年間平均風速別の分類を行った。

ASEAN周辺海域の年間平均風速別分類



年間平均風速[m/s]

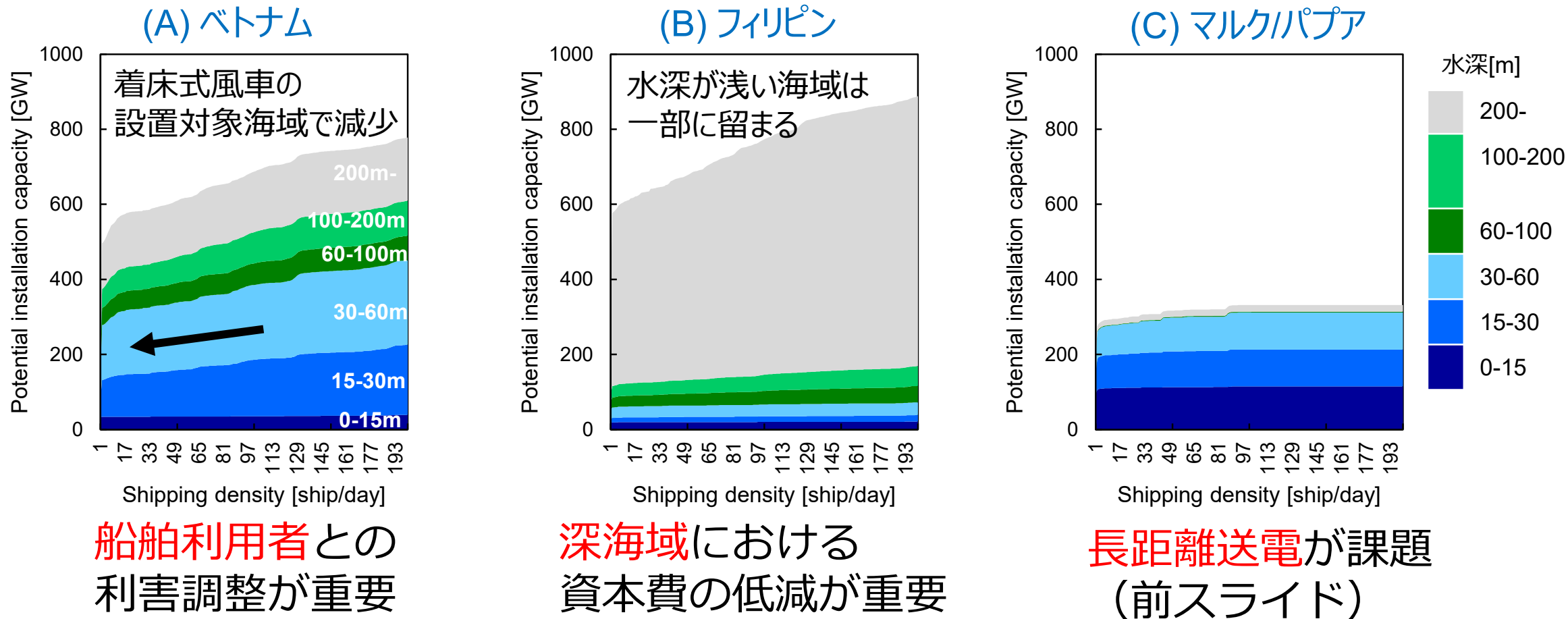


風況条件より設置に適した海域（年間平均風速7.0 m/s以上と定義）はベトナム・フィリピン・マルク/パプアの3海域となる。そのうち・マルク/パプアに風車を設置する場合には、電力を多く消費する地域までの**長距離送電が課題**となる。

船舶通行量の上限閾値に応じた導入ポテンシャル

設置対象の海域のうち、船舶通行量の上限閾値に応じた導入ポテンシャルを示す。

船舶通行量の上限閾値に応じた導入ポテンシャル*1,2



*1 各図の横軸(x軸)は船舶通行量の上限閾値を示しており、同距離がx 隻/日未満の場所に各電源を設置とした場合の導入ポテンシャルを示している。

*2 水深では制約をかけておらず、水深別の分類を行った。

1. 未利用地における地上設置型太陽光・陸上風力の評価

2. 建物屋根における屋根設置型太陽光発電の評価

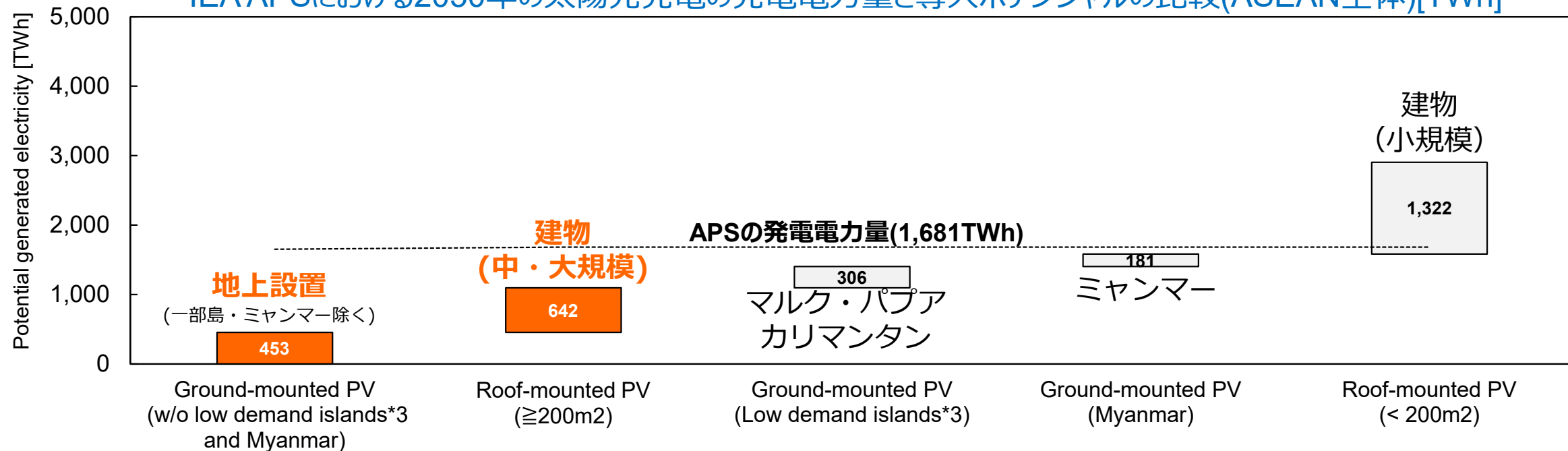
3. 洋上風力の導入ポテンシャル評価

4. 政策的示唆

IEA APSにおける発電電力量との比較(太陽光)

- ASEANのCNに近い想定であるロードマップの一例として、各国のNDC*¹とネットゼロ宣言を反映したIEA APS*²[1]における2050年の太陽光の発電電力量は**1,681TWh**とされている。
- このASEAN全体の発電電力量は、マルク・パプアなどの**需要地までの送電が課題**になる地域や、**国家情勢**が不安定な地域、**屋根の強度や所得の問題**が懸念される小規模建物、および本研究で検討の対象外とした農地等にまで多く導入しないと達成が困難な規模である。

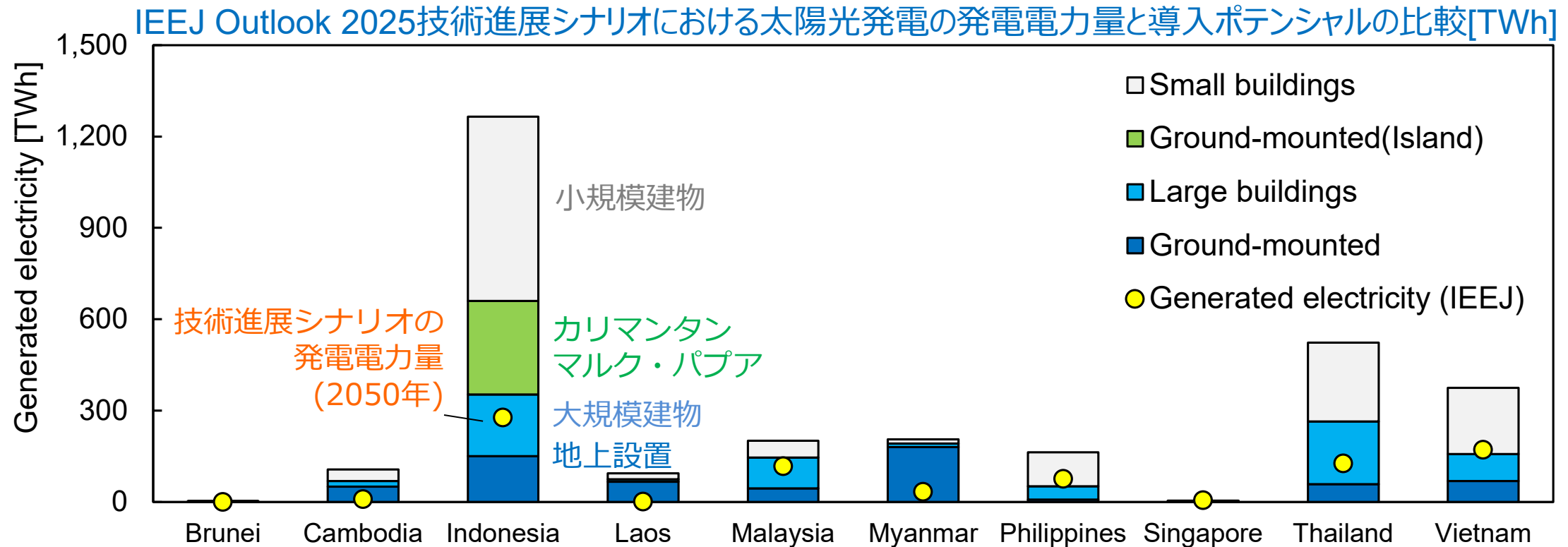
IEA APSにおける2050年の太陽光発電の発電電力量と導入ポテンシャルの比較(ASEAN全体)[TWh]



*1 Nationally Determined Contribution, *2 Announced Pledges Scenario, *3 Maluku/Papua, Kalimantan

IEEJ Outlook 2025 技術進展シナリオとの比較（太陽光）

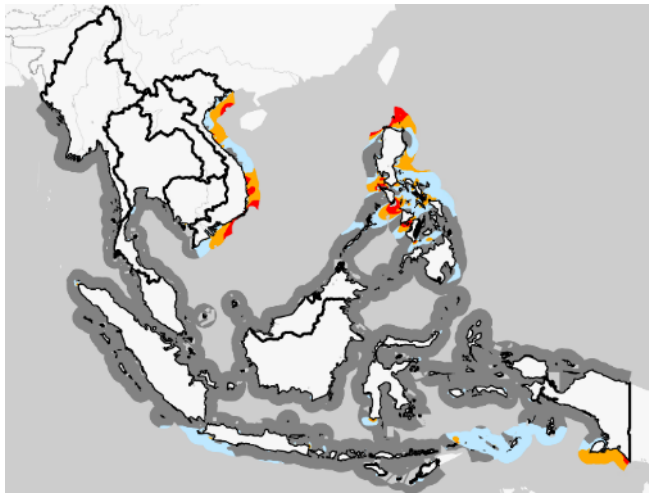
技術開発の強化や国際的な技術協力の推進などを想定したIEEJ Outlook 2025[48]の技術進展シナリオの国別発電電力量(2050年)は、CNまでを想定しない前提のものであっても、**未利用地や大規模建物を多く活用するほどの規模**に相当する。



IEA APSにおける発電電力量との比較(風力発電)

- IEA APS[1]における2050年の風力発電の発電電力量は**1,549TWh**とされている。
- 本分析結果により、設置対象場所の全てに陸上風力を敷き詰めたとしても**95TWh**であり、残りの約1,400TWhを賄うためには**洋上風力**もしくは**陸上風力の農地設置**が必要となる。
- 洋上風力で賄う場合には、パプアなどからの**長距離送電**や**国際連系**が課題となることに加え、ジャワ島の1/3に相当する約50,000km²分における大規模開発(約400GW分*)が必要となり、本研究で不問とした**生態系**や**漁業**などへの影響についての評価が求められる。

本研究による設置対象海域



WWFによるサンゴの生息域[49]



* 設備利用率40%とした場合。

統合費用を考慮したエネルギーシステム分析の必要性

- 現状では火力発電と比べて太陽光・風力発電の均等化発電原価(LCOE*)は低いとされるが、本研究では、太陽光・風力発電の大量導入が進んだ場合、送電線までの**系統接続費用**や、局所集中導入がもたらすスコール等による急な**出力変動への対策費用**が懸念されることが示された。
- そのため、LCOEが低いことのみを根拠に太陽光・風力の比率を極端に高めることは、電力システム全体のコスト最適化の観点からは**必ずしも望ましいとは限らない**可能性がある。
- CN実現に向けた影響評価においては、本研究の地域別の導入ポテンシャルを踏まえた上で、系統接続費用や出力変動対策を組み込んだ**詳細なエネルギーシステムモデルによる評価**が求められる。

* Levelized Cost Of Electricity

土地利用区分データの比較と精査

地上設置型太陽光発電の導入ポテンシャルを既往研究と比較した結果、従来の推計値に比べて大幅に低い値となることが示された。その要因として、電源間の土地利用競合の考慮と、**土地利用区分データの精度**が影響していると推察される（付録3）。

本研究では各電源の設置対象場所とした土地利用区分の精度が高いデータを用いているものの、複数の土地利用データを用いた**推計値の比較**が必要とされる。

時系列評価

本研究では現時点の導入ポテンシャルを評価対象としたものの、将来においては建物の増加や土地利用の大きな変化、船舶通行量の変化などが生じることも予想される。

そのため、本研究で分類した建物の規模や土地利用別の結果などを基に、各設置対象場所における導入ポテンシャルの**時系列変化を踏まえた評価**も課題となる。

未利用地の精緻化

詳細な地理情報を整備し、太陽光・風力発電の導入可能性についての地域偏在や系統接続に関わる物理的な課題を明らかにした。これにより、**将来の系統計画**など地域偏在による影響を緩和する方策の検討に資する基盤情報を示した。

ASEAN全体を対象とした建物屋根の詳細分析

建物屋根の規模・分布をASEAN全体で解析し、屋根の規模や各地域の所得ごとの導入ポテンシャルを明らかにした。これにより、**大規模建物が集中する区域**や、**高所得地域**など、優先的に太陽光発電を普及すべき場所の検討に貢献しうる。

CN達成に向けて必要な発電電力量と障壁の可視化

設置場所別の導入ポテンシャルを詳細にブレイクダウンし、CN達成に必要な発電電力量を達成するための障壁を明示した。太陽光発電の大量導入に向けた物理的課題を整理し、**戦略的対応の方向性を示唆**した。

- [1] Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, Driving up NRE Sources, “Ex-Mines are Turned into Solar Fields”, Press release, 17 January 2020. <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/driving-up-nre-sources-ex-mines-are-turned-into-solar-fieldsr>
- [2] Solar Quarter, Malaysia Explores Solar Farm Expansion on Natural Lakes and Mining Sites, 5 March 2025. <https://solarquarter.com/2025/03/05/malaysia-explores-solar-farm-expansion-on-natural-lakes-and-mining-sites/>
- [3] Housing and Development Board, SolarNova. <https://www.hdb.gov.sg/about-us/our-role/smart-and-sustainable-living/solarnova-page>
- [4] Department of Energy Brunei Darussalam, Solar PV Rooftop and Net-metering Programme. <https://www.energy.gov.bn/Shared%20Documents/Resources/SOLAR%20PV%20GUIDEBOOK%20ENG.pdf>
- [5] International Energy Agency. (2024). Southeast Asia Energy Outlook 2024. Paris: IEA. (Chapter 1: Energy in Southeast Asia – Solar and wind resource potential)
- [6] International Energy Agency. (2022). An energy sector roadmap to net zero emissions in Indonesia. IEA.
- [7] International Renewable Energy Agency. (2022). Renewable Energy Outlook for ASEAN: *Towards a Regional Energy Transition* (2nd ed.). Abu Dhabi: IRENA.
- [8] Lee, N., Flores-Espino, F., Oliveira, R., Roberts, B., Bowen, T., & Katz, J. (2020). Exploring Renewable Energy Opportunities in Select Southeast Asian Countries: A Geospatial Analysis of the Levelized Cost of Energy of Utility-Scale Wind and Solar PV. Golden, CO: NREL/USAID.
- [9] Siala, K., & Stich, J. (2016). Estimation of the PV potential in ASEAN with a high spatial and temporal resolution. *Renewable Energy*, 88, 445–456. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.061>
- [10] Vidinopoulos, A., Whale, J., & Fuentes Hutfilter, U. (2020). Assessing the technical potential of ASEAN countries to achieve 100% renewable energy supply. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100878. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100878>
- [11] Wan Abdullah, W. S., Osman, M., Ab Kadir, M. Z. A., & Verayiah, R. (2019). The potential and status of renewable energy development in Malaysia. *Energies*, 12(12), 2437. <https://doi.org/10.3390/en12122437>
- [12] Sanseverino, E. R., Le Thi Thuy, H., Pham, M.-H., Di Silvestre, M. L., Nguyen Quang, N., & Favuzza, S. (2020). Review of potential and actual penetration of solar power in Vietnam. *Energies*, 13(10), 2529.

- [13] Institute for Essential Services Reform. (2019). Residential Rooftop Solar Potential in 34 Provinces in Indonesia (Technical Note). Jakarta: IESR.
- [14] Institute for Essential Services Reform. (2021). Beyond 207 Gigawatts: Unleashing Indonesia's Solar PV Potential. Jakarta: IESR.
- [15] Asian Development Bank. (2015). Renewable Energy Developments and Potential in the Greater Mekong Subregion. Manila: ADB.
- [16] World Bank. (2018). Assessment of technical solar rooftop PV potential in Vietnam (Report No. 1231720).
- [17] Lopez, A., Roberts, B., Heimiller, D., Blair, N., & Porro, G. (2012). U.S. renewable energy technical potentials: A GIS-based analysis (NREL/TP-6A20-51946). National Renewable Energy Laboratory.
- [18] Brown, A., Beiter, P., Heimiller, D., Davidson, C., Denholm, P., Melius, J., Lopez, A., Hettinger, D., Mulcahy, D., & Porro, G. (2016). Estimating renewable energy economic potential in the United States: Methodology and initial results (NREL/TP-6A20-64503). National Renewable Energy Laboratory.
- [19] Obane, H., Nagai, Y., & Asano, K. (2020). Assessing land use and potential conflict in solar and onshore wind energy in Japan. *Renewable Energy*, 160, 842–851.
- [20] Milbrandt, A. R., Heimiller, D. M., Perry, A. D., & Field, C. B. (2014). Renewable energy potential on marginal lands in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 473–481.
- [21] Center for Environmental Remote Sensing Chiba University, Global Land Cover by National Mapping Organizations: GLCNMO ver3.
<https://www.cr.chiba-u.jp/databases/GLP/database-GLP.html>
- [22] Protected planet, Protected Areas.
<https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab=WDPA>
- [23] Key Biodiversity Areas, Web sites.
<https://www.keybiodiversityareas.org/>
- [24] Global Solar Atlas, Web sites.
<https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.173828,3>
- [25] Global Wind Atlas, Web sites.
<https://globalwindatlas.info/en/>
- [26] EarthEnv Web sites.
<https://www.earthenv.org/topography>

- [27] Open Street Map, Web sites.
<https://www.openstreetmap.org/#map=3/18.65/148.54>
- [28] The Humanitarian Data Exchange
<https://data.humdata.org/>
- [29] Bolinger, M., & Bolinger, G. (2022). Land requirements for utility-scale PV: An empirical update on power and energy density. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(2), 368–375.
- [30] Accenture Strategy & Consulting. (2022, June). System value analysis: Brunei Darussalam.
- [31] Intelligent Energy Systems Pty Ltd (IES), CCDE Engineering Consulting Co., Ltd, DlgSILENT Pacific, & Innovation Energie Developpement. (2024, February). Cambodia: Support for a sustainable power sector (Technical Assistance Consultant's Report, Project No. 52096-001). Asian Development Bank.
- [32] Ministry of Energy and Mines, Lao PDR. (2022, July 5–6). Country update – Lao PDR: Greater Mekong Subregion, 29th Regional Power Trade Coordination Committee (RPTCC-29) discussions.
- [33] The Asia Foundation. (2023, September). Adapting to electricity shortages: Learning from Yangon households and small businesses.
- [34] Department of Energy (Philippines). (2023). 2022 power situation report: Peak demand.
- [35] Energy Market Company. (2023). NEMS market report 2023.
- [36] Greenpeace Thailand. (2023). Electricity price crisis and energy transition in Thailand.
- [37] Intelligent Energy Systems (IES), & East West Energy and Climate Link JSC (EWEC). (2023, November 28). Development of Vietnam smart grid roadmap for period up to year 2030, with a vision to 2050: Deliverable 2 – Report on current status of smart grid development in Viet Nam. Energy Transition Partnership.
- [38] Energy Commission of Malaysia. (2022). Malaysia energy statistics handbook 2022.
- [39] Perusahaan Listrik Negara (PLN). (2023, July 31). PLN statistics 2023 (English version).

- [40] Google open research, Open Buildings
<https://sites.research.google/gr/open-buildings/>
- [41] Damayanti, H., Tumiwa, F., & Citraningrum, M. (2019). Residential rooftop solar: Technical and market potential in 34 provinces in Indonesia (Technical Note). Institute for Essential Services Reform (IESR).
- [42] Gagnon, P., Margolis, R., Melius, J., Phillips, C., & Elmore, R. (2016). Rooftop solar photovoltaic technical potential in the United States: A detailed assessment (NREL/TP-6A20-65298). National Renewable Energy Laboratory.
- [43] Ministry of the Environment, Japan. (2022). FY2021 Report on the Study of Information Utilization and Provision Measures for Renewable Energy Deployment Potential.
https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/dat/report/r03/r03_intro.pdf
- [44] Badan Pusat Statistik. (2021). Percentage of households by province and the main material of the widest part of roof (percent), 2021. <https://www.bps.go.id/en/statistics-table/2/MjE2NiMy/percentage-of-households-by-province-and-the-main-material-of-the-widest-part-of-roof--percent-.html>
- [45] Global Data Lab. Subnational Human Development Index (SHDI) v8.1: Metadata. Retrieved May 28, 2025.
<https://globaldatalab.org/shdi/metadata/incindex/>
- [46] GEBCO Compilation Group. (2022). GEBCO_2022 Grid (Version 2022) [Data set]. British Oceanographic Data Centre.
- [47] World Bank Group. Global Shipping Traffic Density. World Bank Data Catalog. Retrieved May 28, 2025,
- [48] Institute of Energy Economics, Japan. (2023). IEEJ outlook 2025.
- [49] World Wide Fund for Nature. Coral Triangle. Retrieved May 28, 2025
- [50] Kobayashi, T., Tateishi, R., Alsaadeh, B., Sharma, R., Wakaizumi, T., Miyamoto, D., Bai, X., Long, B., Gegentana, G., Maitiniyazi, A., Cahyana, D., Haireti, A., Morifuji, Y., Abake, G., Pratama, R., Zhang, N., Alifu, Z., Shirahata, T., Mi, L., ... Yusupujang, A. (2017). Production of global land cover data – GLCNMO2013. *Journal of Geography and Geology*, 9(3), 1–15.
- [51] Zeng, T., Zhang, Z., Zhao, X., Wang, X., & Zuo, L. (2015). Evaluation of the 2010 MODIS Collection 5.1 land cover type product over China. *Remote Sensing*, 7(2), 1981–2006.
- [52] Defourny, P., Schouten, L., Bartalev, S., Bontemps, S., Cacetta, P., De Wit, A., Di Bella, C., Gerard, B., Giri, C., Gond, V., Hazeu, G., Heinimann, A., Herold, M., Knoops, J., Jaffrain, G., Latifovic, R., Lin, H., Mayaux, P., Mùcher, S., Nonguierma, A., ... Arino, O. (2010). Accuracy assessment of a 300 m global land cover map: The GlobCover experience (JRC Technical Report No. JRC54524). International Center for Remote Sensing of Environment.

本レポートに含まれる記述、データ、地図等（以下「本資料」）は、特に明記されていない限り、IEEJおよびその関係者の公式な見解または政策を必ずしも反映するものではありません。

また、本資料は、いかなる国・地域・当局の法的地位に関する意見を表明するものではなく、領土の主権、国際的な国境・境界の画定、あるいは地名の使用等に関して、いかなる立場を取るものでもありません。

付録 1

土地利用区分データの詳細

本研究とGLCNMO ver3 の土地利用区分の対応

区分	本研究	GLCNMO ver3
設置困難 非推奨	Forest	Broadleaf Evergreen Forest
		Broadleaf Deciduous Forest
		Needleleaf Evergreen Forest
		Needleleaf Deciduous Forest
		Mixed Forest
		Mangrove
	Tree Open	Tree Open
	Farmland	Sparse vegetation
		Cropland
		Paddy field
		Cropland / Other Vegetation Mosaic
	Wetland	Wetland
	Water bodies	Water bodies
	Urban	Urban
	Snow/Ice	Snow/Ice
設置対象	Gravel	Bare area, consolidated(gravel, rock)
	Herbaceous	Herbaceous
		Herbaceous with Sparse Tree/Shrub
	Sand	Bare area, consolidated(gravel, sand)
	Shrub	Shrub
	Buildings	(Google Open Buildingsより推計)

GISにおける土地利用区分別面積[km²]

Unit: km²

Country		Forest	Tree open	Farm land	Water bodies	Urban	Snow/Ice	Gravel	Herbaceous	Sand	Shrub	Building	Total
Brunei		4,912	113	364	102	98	0	1	6	0	0	35	5,632
Cambodia		78,252	21,045	73,600	6,184	74	2	7	1,271	8	325	618	181,385
Indonesia	Java	49,639	8,876	67,005	3,596	3,400	0	14	167	1	57	6,001	138,756
	Kalimantan	429,867	23,360	74,153	5,327	288	679	36	1,483	0	268	612	536,072
	Maluku ・Papua	456,503	22,394	60,081	15,123	59	2	33	3,140	1	934	480	558,749
	Sulawesi ・Nusa Tenggara	142,750	6,522	29,426	8,574	171	346	3	252	0	31	728	188,804
	Sumatra	308,222	55,832	97,396	8,415	1,003	2,209	23	952	0	149	1,955	476,156
Laos		177,685	20,517	27,210	944	101	0	2	1,130	0	190	325	228,104
Malaysia	Peninsula	91,287	6,706	28,034	1,920	2,866	0	13	109	0	24	1,409	132,368
	Borneo	173,444	6,186	14,341	2,001	348	0	2	275	0	25	297	196,920
Myanmar		434,893	32,856	188,971	4,510	374	211	98	1,881	1	894	256	664,946
Philippines		155,218	22,823	104,757	13,281	1,406	0	5	208	1	65	1,849	299,613
Singapore		68	18	72	16	320	0	1	2	0	1	44	544
Thailand		188,982	28,339	283,981	4,757	3,022	60	9	950	0	386	4,967	515,451
Vietnam		158,507	34,923	119,825	5,008	2,060	5,923	43	1,339	2	616	4,037	332,282
Total		2,850,230	290,509	1,169,216	79,761	15,591	9,430	289	13,164	12	3,964	23,614	4,455,782

* 表中の面積は500mメッシュに分割した後の面積であり、国境線や海外線周辺で実際の面積と誤差が生じる。そのため統計上の面積とは必ずしも一致しない。

付録 2

導入ポテンシャル推計値の詳細

屋根設置型太陽光発電の導入ポテンシャル[GW]

Unit:GW

		Area of roof [m ²]						
		0-10	10-100	100-200	200-450	450-2300	2300	Total
Brunei		0.0	0.3	0.4	0.9	0.7	0.1	2.3
Cambodia		0.0	14.9	8.8	4.8	4.8	2.1	35.3
Indonesia	Java	0.0	133.8	121.7	45.0	24.9	8.8	334.3
	Kalimantan	0.0	12.2	12.5	6.2	3.1	0.4	34.5
	Maluku •Papua	0.0	12.1	8.2	4.0	1.7	0.1	26.1
	Sulawesi •Nusa Tenggara	0.0	13.7	15.8	8.5	2.7	0.4	41.1
	Sumatra	0.0	35.3	43.4	22.2	8.6	1.6	111.1
Laos		0.0	6.8	6.1	3.2	1.9	0.4	18.4
Malaysia	Peninsula	0.0	14.0	17.5	26.4	27.7	5.9	91.6
	Borneo	0.0	3.5	3.8	5.1	5.5	0.9	18.9
Myanmar		0.0	5.1	3.6	2.2	2.2	2.6	15.7
Philippines		0.0	48.8	25.0	13.4	12.0	3.1	102.4
Singapore		0.0	0.3	0.4	0.7	1.3	0.5	3.1
Thailand		0.0	73.3	93.7	65.3	51.9	15.6	299.8
Vietnam		0.0	104.8	57.8	27.3	23.8	12.5	226.3
Total		0.0	478.9	418.8	235.1	172.8	55.2	1,360.8

地上設置型太陽光発電の導入ポテンシャル[GW]

Unit:GW

		Distance from the nearest transmission lines[km]						
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-	Total
Brunei		0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Cambodia		9.2	4.9	4.8	4.4	3.2	6.6	33.1
Indonesia	Java	10.1	2.1	0.3	0.0	0.0	0.0	12.5
	Kalimantan	34.7	23.1	17.6	14.6	10.7	20.0	120.8
	Maluku ・Papua	6.9	2.8	2.2	3.3	2.2	94.6	112.1
	Sulawesi ・Nusa Tenggara	7.1	1.8	1.3	0.5	0.5	2.3	13.4
	Sumatra	18.1	17.3	15.8	20.1	6.5	6.3	84.1
Laos		24.7	8.8	4.9	3.9	2.2	2.0	46.4
Malaysia	Peninsula	7.9	1.7	0.7	0.1	0.0	0.0	10.5
	Borneo	9.2	5.8	2.7	1.8	0.8	1.7	22.1
Myanmar		40.6	22.0	17.1	9.9	6.4	21.0	116.9
Philippines		3.3	1.1	0.5	0.4	0.1	0.2	5.6
Singapore		0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Thailand		13.7	8.2	5.8	5.2	2.2	4.0	39.1
Vietnam		33.3	10.6	6.7	2.6	0.8	1.9	56.0
Total		219.1	110.3	80.6	67.0	35.6	160.7	673.3

陸上風力発電の導入ポテンシャル[GW]

Unit:GW

		Distance from the nearest transmission lines[km]						Total
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-	
Brunei		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cambodia		1.0	0.8	0.5	0.4	0.5	0.5	3.6
Indonesia	Java	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
	Kalimantan	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.8
	Maluku ・Papua	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	8.2	8.5
	Sulawesi ・Nusa Tenggara	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
	Sumatra	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Laos		2.6	1.2	0.6	0.3	0.2	0.2	5.3
Malaysia	Peninsula	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	Borneo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Myanmar		2.4	1.1	0.5	0.2	0.1	0.5	4.7
Philippines		0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	1.2
Singapore		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Thailand		2.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.5	4.8
Vietnam		7.7	2.0	0.4	0.2	0.2	0.2	10.5
Total		17.4	6.6	3.1	1.8	1.2	10.2	40.4

洋上風力発電の導入ポテンシャル[GW]

		Depth [m]					
		0-15	15-30	30-60	60-100	100-200	200-
Brunei		0	0	0	0	0	0
Cambodia		1	0	0	0	0	0
Indonesia	Java	0	0	0	0	1	3
	Kalimantan	0	0	0	0	0	0
	Maluku ・Papua	115	99	98	2	0	18
	Sulawesi ・Nusa Tenggara	2	1	2	1	1	1
	Sumatra	0	1	0	0	0	0
Laos		0	0	0	0	0	0
Malaysia	Peninsula	0	0	0	0	0	0
	Borneo	0	0	0	0	0	0
Myanmar		0	0	0	0	0	0
Philippines		21	19	36	48	58	759
Singapore		0	0	0	0	0	0
Thailand		0	0	0	0	0	0
Vietnam		40	201	247	72	97	172
Total		179	321	384	123	157	953

Unit:GW

*年間平均風速7.0m/s以上
船舶通行量未制約

付録 3

既往研究との前提条件の比較

既往研究との推計値比較（地上設置型太陽光）

- 地上設置型太陽光発電の導入ポテンシャルを既往研究と比較した結果、従来の推計値に比べて**大幅に低い値**となることが示された。
- 既往研究の前提条件は一部不明な点もあるが、本研究との差異は、電源間の土地利用競合の考慮と、**ベースとなる土地利用区分データの違い**によるものと推察され、今後詳細な検証が必要である（詳細は次スライド）。

既往研究との地上設置型太陽光発電の推計値比較[GW]

	本研究	IEA[5][6]	IRENA[7]	Lee et al. (Relaxed)[8]	Lee et al. (Moderate)[8]	Lee et al. (Restricted)[8]
Brunei	0.4	Unknown	2	104	16	2
Cambodia	33		1,597	4,826	3,198	966
Indonesia	343	1,500	2,898	55,079	12,389	654
Laos	46	Unknown	983	7,961	1,278	547
Malaysia	33		337	9,557	1,965	199
Myanmar	117		5,310	26,312	7,717	1,642
Philippines	6		123	8,001	1,910	342
Singapore	0.3		0.3	4	2	0
Thailand	39		3,509	15,277	10,538	585
Vietnam	56		844	10,315	2,847	729
Total	673	20,000*	15,603	137,436	41,858	5,666

* 陸上風力との合計

既往研究との前提条件の比較

	本研究	IEA [5][6]	IRENA[7]	Lee et al. (Relaxed)[8]	Lee et al. (Moderate)[8]	Lee et al. (Restricted)[8]
Exclusion	<ul style="list-style-type: none"> • Forest • Tree open • Farmland • Water bodies • Urban • Snow ice • Buildings • > 30° Slope 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Protected areas • Forest • Permanent wetlands • Croplands • Urban areas • > 5% Slope 	<ul style="list-style-type: none"> • Protected areas • Water-bodies • Urban areas 	<ul style="list-style-type: none"> • Protected areas • Water-bodies • Forested areas • Urban areas • > 5% Slope 	<ul style="list-style-type: none"> • Protected areas • Water-bodies • Forested areas • Urban areas • Agricultural areas • > 5% Slope
Capacity density [MW/km ²]	87	-	45	36		
Competition w/ wind	Considered	-	-	Not considered		
Land-use data	GLCNMO ver3 15 arcsec (≒ 463.8m grid mesh) Year: 2013	-	MCD12C1 Version 6 0.05 degree (≒ 5,600m grid mesh) Year: 2016	ESA DUE GlobCover (300m grid mesh) Year: 2009		

* “-”は各文献から条件が確認できなかった項目を示す。

土地利用区分データの比較

- 本研究で用いたGLCNMO ver3は、MCD12C1と比較して解像度が高く、また太陽光・風力発電の設置対象場所としたshrublandやgrasslandの精度が大きく低下しない特徴を持つ。
- また、衛星画像に加えて地上調査や各国測量機関の連携により精度向上を実現している。

	GLCNMO ver3	MCD12C1 Version 6	ESA DUE GlobCover
Base year	2013	2016	2009
Grid mesh	15 arcsec (≒ 463.8m grid mesh)	0.05 degree (≒ 5,600m grid mesh)	300m grid mesh
Accuracy	90.8% (Aggregated class) 74.8% (Detailed class)	73.6%(Global average)	73.1%
Note	異なるクラスが混在するモザイク状の地表(Mixed forest, Tree open, Herbaceous with sparse tree/shrub, Cropland/Other vegetation mosaic)の精度が低い [50]	shrublandとwetlandの精度が特に低い（それぞれ3.74%, 7.45%） [51]	衛星に搭載されているセンサー(MERIS)の制約により、wetlands, grasslands, shrublandsの精度が低い [52]
Classification Approach	衛星画像・地上調査・各国測量機関の知見	衛星画像	衛星画像
Land use class	20	17	22