

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国土の有効利用を考慮した太陽光発電の ポテンシャルと分布

令和 4 年 3 月

Potential and Distribution of Photovoltaic Power Generation Considering
the Efficient Land Use

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2021-PP-03

概要

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの導入を加速すべきである。太陽光発電は将来の主力電源の一つと考えられる一方で、平坦地の少ない日本の国土で、今後開発できるポテンシャルは低いとみなされている。本提案書では、太陽光発電施設の設置場所と設置方法を検討し、2050年のポテンシャルを計算した。

計算上の仮定として、農地のうち畑の40%で営農型太陽光発電を行うこととし、荒廃農地は太陽光発電用地とした。住宅をはじめとする建造物の屋根を全て発電に利用することとし、現在、増加している空き家は処分して、空き家整備地には野立ての太陽光発電施設を設置することとした。以上を2050年の太陽光発電設備と考え、そのポテンシャルを計算したところ、2050年の設備容量は700 GW、年間発電量は1,040 TWh/年となった。この年間発電量は現在の年間電力需給量に匹敵し、太陽光発電が将来の主要な電源になることが分かった。

太陽光発電は変動する電源（VRE）であり、電力安定供給のためには、揚水発電等の電力貯蔵設備と組み合わせた電力システムを構築する必要がある。本提案書で計算した太陽光発電の発電量の国内分布と、LCSがこれまで提案してきた新揚水発電の分布を重ねてみると、いずれも広く広く分布しており、地域ごとに安定電力供給をする電力システムを構築できることが明らかとなった。

Summary

The introduction of renewable energy should be accelerated toward the realization of carbon neutrality in 2050. While photovoltaic power generation is considered to be one of the main power sources for the future, it is considered that the potential for future development is low in Japan, where there is little flat land. In this proposal, we studied the installation location and installation method of photovoltaic power generation facilities and calculated the potential for 2050.

As an assumption for the calculation, 40% of the farmland will be used for farm-based photovoltaic power generation, and the abandoned farmland will be used as photovoltaic-power-generation land. We assumed the use of all the roofs of buildings, including residential houses, for power generation, disposal of the currently increasing vacant houses, and installation of open-air photovoltaic power generation facilities in the vacant lot. Considering the above as the photovoltaic power generation infrastructure for 2050, its potential is calculated to be 700 GW of generation capacity and 1,040 TWh/year of annual power generation in 2050. This annual power generation is comparable to the current annual power supply and demand, and photovoltaic power generation will be the main power source in the future.

Photovoltaic power generation is a variable renewable energy (VRE), and it is necessary to develop a power system combined with power storage facilities such as pumped storage power generation for stable power supply. When the domestic distribution of photovoltaic power generation calculated in this proposal and the distribution of new pumped storage power generation, which has been proposed by LCS, are superimposed, it is clear that they are both widely and evenly distributed, and it is possible to develop a power system that provides stable power supply for each region.

目次

概要

1. 緒言 1

2. 方法 1

 2.1 太陽光発電施設設置場所の検討 1

 2.2 2050 年の太陽光発電のポテンシャル計算 2

 2.3 現在から 2050 年までの普及のパターン 3

 2.4 変動電源と新揚水発電所の分布パターン 3

3. 結果と考察 3

 3.1 国土利用の現状と太陽光発電施設のための土地区分 3

 3.2 2050 年の全国の太陽光発電の設備容量と発電量 7

 3.3 全国の分布 8

 3.4 現在から 2050 年ポテンシャルまでの太陽光発電の普及の道筋 11

 3.5 VRE のポテンシャルと新揚水発電の組み合わせ 12

4. まとめ 15

5. 課題 15

6. 政策立案のための提案 15

参考文献 16

1. 緒言

近年の日本の年間電力需要量は 1,000 TWh/年 前後 [1] であり、再生可能エネルギー電力の占める割合は 2020 年に 20.8% となった [2]。今後、人口減少や省エネによって電力需要が減少するという予測もあるが [3, 4]、運輸や鉄鋼業などで化石起源のエネルギーから再生可能エネルギーへシフトすることや、情報化社会の進展に伴って電力需要が増加することから [5]、2050 年の日本全体の年間電力需要は現在より大きくなると推定される。2050 年のゼロカーボンに向けて電力供給を増強するためには、再生可能エネルギーの導入を直ちに増強することは喫緊の課題である。

第 6 次エネルギー基本計画 [6] では、2050 年のカーボンニュートラルの実現を目標に掲げているが、2050 年時点の具体的な年間電力需要推計値や電力構成を示していない。2030 年時点の見通しとして再生可能エネルギーが電源構成の 36 ~ 38% となり、太陽光発電は全体の 14 ~ 16%、設備容量 103.5 ~ 117.6 GW となることを示しているが根拠は不明である。

太陽光発電は設置場所に合わせて規模を柔軟に変更でき、再生可能エネルギーのなかでは最も低コストかつ短時間で容易に導入することができる。そのため、カーボンニュートラル実現に向け、他の再生可能エネルギー電源に先んじて大量に導入して運用を始めることが重要である。2030 年までの 10 年弱の期間に太陽光発電の導入を急ぐことが肝要であり、第 6 次エネルギー計画の 2030 年見通しを上回る実現可能な導入プランが必要である。一方、太陽光発電は広域の設置場所を要するために、山地の多い日本の国土において、平野部や宅地の建物屋根を有効に利用することが不可欠である。そこで、農地でのソーラー・シェアリング¹⁾や荒廃農地の利用、さらに、屋根の利用で得られるポテンシャルを把握することが重要である。

太陽光発電は風力発電とともに今後の主力電源となり得るが、これらは変動電源 (VRE) である。電力の安定供給のためには蓄電池や揚水発電と組み合わせた電力システムを構築することが必須である。これまで LCS では、VRE と組み合わせて利用することを想定した新揚水発電所を提案して [7-10]、新揚水発電所の全国のポテンシャル分布を調査した [9]。太陽光発電ポテンシャルも同様に全国の分布を明らかにし、両者の分布を重ねて、両者を組み合わせた地域ごとの利用の検討が求められる。

本提案書は以下の内容を示す。(1) 建物屋根を含む平坦地における太陽光発電の設置可能場所を検討し、2050 年の発電ポテンシャルの計算結果を示す。(2) これまでの導入実績と 2050 年の発電ポテンシャルから、今後 2030 年から 2050 年までの導入の道のりを示す。(3) 太陽光発電および風力発電の VRE のポテンシャル分布と新揚水発電所のポテンシャル分布を重ね合わせることで、両者の組み合わせ利用を検討し、各地域における電力の安定供給の可能性を示す。

2. 方法

2.1 太陽光発電施設設置場所の検討

(1) 国土利用の現状調査と太陽光発電導入量の推移

太陽光発電は広域の設置場所を必要とするために、国土の利用状況の把握と将来の持続的かつ有効な利用の方針が必要である。太陽光発電の設置の適地は平坦地および建物の屋根上であるため、主要な設置場所の候補である宅地と農地について、現状および将来の利用と管理や法整備に関する資料を調査した。あわせて、これまでの太陽光発電導入推移についても調査した。

¹⁾ ソーラー・シェアリング：太陽光発電施設建設時の投資者らがその後の経済的利益を共有することを意味するが、国内では農地の上部に発電施設を設置し、農業生産と発電を同時に行って双方からの収入を得る営農型太陽光発電のことを指すことが多い。本提案書では営農型太陽光発電を意味する。

(2) 太陽光発電施設設置場所の土地区分の決定

前項(1)の結果に基づいて、太陽光発電設置用の土地区分を決定した。その際、環境省報告書[11]を参考とした。環境省報告書は土地区分図と地形図、航空写真を調査し土地利用区分ごとの太陽光発電ポテンシャル推計を行ったものである。

2.2 2050年の太陽光発電のポテンシャル計算

「農地」・「住宅地」・「その他」の土地区分ごとの設備容量と年間発電量のポテンシャル計算を行った(これらの区分については、3.1(2)「太陽光発電施設設置場所の土地区分」で後述する)。計算にあたって、環境省報告書[11]を参考にした。環境省報告書[11]では、土地区分ごとに設備容量を計算するための係数を導いている。例えば、宅地では戸建て住宅、集合住宅、商業系施設、公共施設、工場施設などに細区分し、細区分ごとに屋根の大きさと形状、向き、土地区分当たりの屋根の密度、および太陽光パネルの設置の容易さなどを綿密に調べ、土地区分の面積にこの係数を乗じることで設備容量が計算できる。「住宅屋根」と「その他」については、環境省報告書[11]の計算に従った。野立て式を用いる土地区分についても環境省報告書[11]を参考にして、表1に示すような必要な条件を加えた。変換効率は2002年に対して、2020年から2030年の間は20%上昇、2040年は23%、2050年は25%上昇するとした[12]。以上に基づいて設備容量は(1)式で計算した。

$$\text{設備容量 (kW)} = \text{土地区分面積 (m}^2\text{)} \times \text{土地利用効率} \times \text{パネル設置率} \times \text{システム出力係数} \times \text{設置密度 (kW/m}^2\text{)} \times (1 + 0.25) / (1 + 0.2) \quad (1)$$

年間発電量は(1)式で計算した設備容量から以下の(2)式を用いて計算した。ここで、年間を通しての設備利用率を17%とした[13]。

$$\text{年間発電量 (kWh/年)} = \text{設備容量 (kW)} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ day} \times 0.17 \quad (2)$$

年平均日射量は「農地」と「住宅地」については全国平均値を用いた。「その他」については、都道府県庁所在地の値を都道府県の代表値として用いている。

表1 係数表

農地および空き家整備地の設備容量を計算するための係数
(土地区分については3.1(2)「太陽光発電施設設置場所の土地区分」を参照のこと)

土地区分			土地利用 率	パネル設 置率	システム 出力係数 (損失係数)	設備容量 (kW/m ²)
農地	営農地	耕地	0.4	0.5	0.9	0.06
		再生農地	0.8	0.5	0.9	0.06
	荒廃農地		0.8	1	0.9	0.08
住宅地	空き家整備地		0.5	1	0.9	0.08

空き家率	17%
設備利用率	17%

2.3 現在から 2050 年までの普及のパターン

太陽光発電のこれまでの設置容量ベースの導入実績（参照：図 2）と前項で計算した 2050 年の導入ポテンシャルを S 字カーブでつないだものを普及曲線とし、現在から 2050 年までの普及パターンを示す。

普及 S 字カーブを描くにあたり、2012 年から 2020 年の直近過去 9 年分の設備容量の年次ごとの年間増加率を計算した。それら 8 回分の増加率の最小値と最大値の間におさまるような年間増加率で S 字カーブを描いた。

設備容量のパターンから、(2) 式を用いて年間発電量のパターンを計算した。

2.4 変動電源と新揚水発電所の分布パターン

太陽光発電は VRE であるため、蓄電と電力安定化の機能を持つ揚水発電と組み合わせることで、安定的な電力供給が可能である。これまでに LCS は、既存の多目的ダムを利用した小規模揚水発電所を提案してきており、これを新揚水発電所と名付けている [7-10]。新揚水発電所は下池としての既存ダムとダム周辺の山地に建設した上池、ダム湖岸の発電所と管路によって構成されている [9]、図 1 を参照のこと。小規模で各地に分散して建設できるため、地域内の VRE と組み合わせが容易である。我々は、地理情報の調査から、全国の新揚水発電のポテンシャル分布を示している [9]。

本提案書で計算した太陽光発電ポテンシャルの地域分布と、これまで LCS で提案してきた新揚水発電所の分布の関係を図示して、将来の再生可能エネルギー電力システム構築の可能性を評価する。参考までに風力発電ポテンシャルについても合わせて示す。風力発電のポテンシャル・データは環境省報告書 [11] のデータを用いた。

3. 結果と考察

3.1 国土利用の現状と太陽光発電施設のための土地区分

（1）国土利用の現状調査と太陽光発電導入推移

太陽光発電は平坦地や建物屋上への設置が適しており、国内では主に農地と宅地が該当する。表 2 に示すように農地と宅地合わせて国土全体の 17% に当たった。国土の利用は、図 1 (1), (2) に示すように農地は減少し、宅地が増加した。また、図 1 (3) に示すように耕作放棄地が増加している。また、宅地の増加に伴って、図 1 (4) のように住宅数は増加し、空き家も増えている。

一方、太陽光発電の導入は図 2 に示すように 1990 年代に始まり、一貫して増加している。特に 2012 年に固定価格買取制度が開始されて以降、急激に増加した。

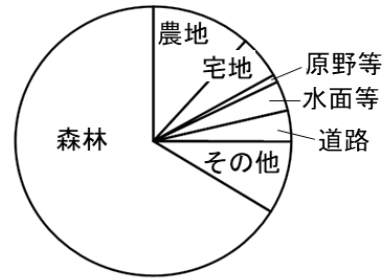
（2）太陽光発電施設設置場所の土地区分

太陽光発電施設を設置する土地区分を表 3 に示すように、「農地」・「住宅地」・「その他」の三大別とした。「農地」はさらに、「営農地」と「荒廃農地」の 2 区分とした。営農地ではソーラー・シェアリングをするものとした。「住宅地」は宅地のうち 6 割と大きな割合を占めるが、空き家も含む。利用されている住宅の屋根に太陽光発電を設置するものを「住宅屋根」とし、空き家を取り壊して整備し、その整備地には野立てで太陽光発電を設置するものを「空き家整備地」とした。「その他」は、住宅以外の宅地と低・未利用地を含み、これらは環境省報告書に従った。建造物には屋根置きものを、それ以外には野立てのものを設置するものとした。

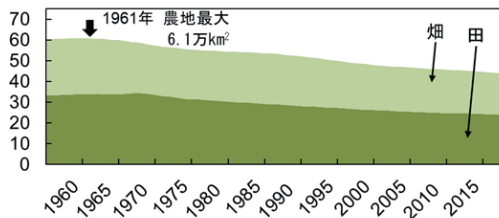
上記の土地利用区分の検討の参考とした農地と宅地、森林について、これまでの利用方法や今後の利用と管理の方針などを表 4 に挙げた。以降、この利用区分ごとに計算を行った。

表2 2019年の国土利用区分別面積。国土交通省データから作成 [14]

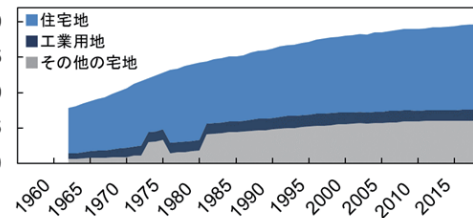
	面積 ($10^3 \times \text{km}^2$)	%	
農地	44.0	12	耕作を行っている田畑等
宅地	19.6	5	住宅地、工業用地、その他の3つからなる
原野等	3.5	1	森林以外の草生地と採草放牧地。耕作が放棄された荒廃農地も含む
水面等	13.5	4	水面、河川、水路
道路	14.1	4	一般道路、農道、林道
森林	250.3	66	国有林と民有林の合計
その他	33.0	9	上記に該当しない土地
合計	378.0		



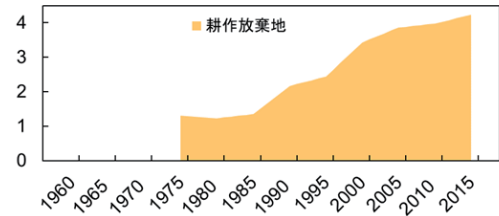
(1) ($10^3 \times \text{km}^2$)



(2) ($10^3 \times \text{km}^2$)



(3) ($10^3 \times \text{km}^2$)



(4) ($10^3 \times \text{万戸} / 10^3 \times \text{万世帯}$)

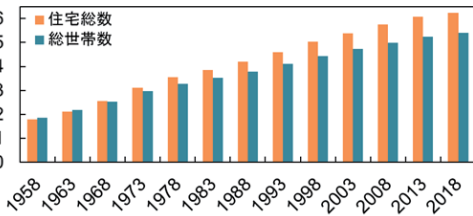
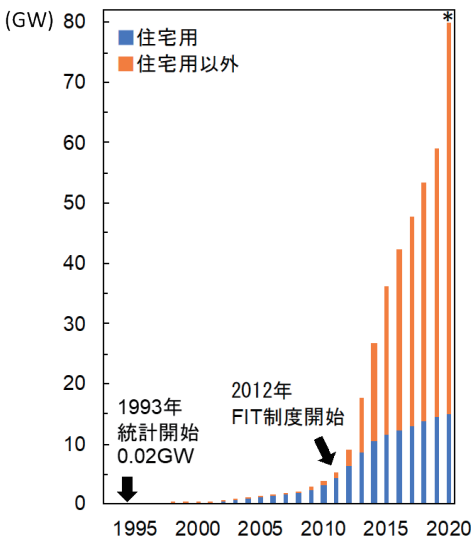


図1 国土利用の変化

(1) 農地面積の変化 [15] 農地は圃場整備が進んだ1961年に最大となるが、その後は宅地への転用や耕作の放棄による減少が続く。2020年に畑20,000 km^2 、田24,000 km^2 、合計44,000 km^2 となった。

(2) 宅地面積の変化 [14] 宅地面積は増加し続けているが、2000年以降、増加量は小さくなっている。(参照資料の変更があり、変動が大きい箇所がある。)(3) 耕作放棄地面積の変化 [16] 5年おきの調査によると耕作放棄地は増加している。「耕作放棄地」は農地所有者の耕作継続の意思の有無によって定義されるものである。(4) 住宅総数と総世帯数の変化 [17] 住宅地面積の増加につれて住宅総数は増加している。住宅総数と総世帯数はいずれも増加し続けているが、その差は開いている。2018年の差は約840万戸で、これらは空き家である。



1990 年代から太陽光発電は導入され、当初は住宅用が大半を占めた。2012 年以降、住宅用以外の野立てタイプの導入量が急激に増加し、いわゆる「メガ・ソーラー」（大規模太陽光発電施設）が各地に建設された。メガ・ソーラー建設のために山林の開発が行われ、本来、人工物の設置が許可されない自然公園内に太陽光発電が設置された例[19]や、大規模な山林伐採が土砂崩れを誘引した例[20][21]もある。

図 2 太陽光発電設備容量の導入量の推移（[1][18]、および、* 2020 年のみ [13]。2020 年は認定量も含む）

表 3 太陽光発電設置検討のための土地区分と利用可能面積の仮定

農地・住宅地・その他の 3 区分について、太陽光発電施設の設置方法と面積を検討した。3 区分はさらに細分され、それぞれについて表中で説明する。この区分は表 4 に示す農地や宅地などのこれまでの利用と今後の方針に基づいて作成した。*：環境省報告書[11]のポテンシャルを用いた。

土地区分	内訳	説明	設置方法	利用可能な面積(km ²)	環境省報告書[11]の土地区分	国土省の土地区分[14]
農地	営農地（ソーラー・シェアリング）	営農地は耕地と再生農地でソーラーシェアリングを行う区分を合わせたものとした。やや被陰の環境で生育のよい作物を選択する必要がある。耕地のうち畑面積[22]の40%を発電用とした。畑は田よりも太陽光発電設備の設置や管理が容易と考えた。全国では耕地のうち畑は46%、田は54%である。地域別にみると、北海道・沖縄県・鹿児島県などは畑の割合が大きく、東北・新潟県は田の割合が大きいなどの地域差がある[23]。再生農地は、荒廃農地に手を加え再生された農地である[24]。大半が優良農地ではないため、農業生産よりも発電に重点を置くと考え、80%を発電用とする[23]。	野立て	20,900	農地	農地
	荒廃農地	25%は山あいや谷地田で[24]、太陽光発電には適さないと考えられるため、75%を発電用とする[23]。	野立て	1,900		原野等
住宅地	空き家整備地	空き家を解体して整備した土地。現在、住宅ストックが過剰であり、高性能住宅に改修ないし建て換えていく過程で、住宅数を適正数に導くこととした。適正な住宅数は2050年の予測世帯数5000万戸と同等とし、空き家率を17%とした[25]。	野立て	2,000	住宅系建築物（商業系建築物も住宅系とされているが、それは除く）	宅地のうち住宅地
	住宅屋根	住宅等の建物の屋根。戸建住宅、大規模共同住宅、中規模共同住宅の他にオフィスビル、大中小規模の商業施設、宿泊施設を含む。環境省報告書[11]によるポテンシャルは戸建住宅が最も大きく（71%）、ついで中規模共同住宅である（26%）。同報告書ポテンシャル計算値のうちL3レベルを使用するとし、ここから、空き家住宅を除き（上段参照）、それら以外の屋根への設置を想定した。	屋根置き	9,900		
その他	宅地*（住宅以外）	工場系建築物（発電所、工場、倉庫、工業団地）、公共系建築物（発電所、工場、倉庫、工業団地）、商業系建築物（大中小規模の商業施設と宿泊施設）の屋根。設置可能面積は、工場系が最も大きく全体の2/3程度、ついで商業系1/3、もっとも小さいのは商業系で数%である。	屋根置き	7,600	・住宅系建築物の商業系建築物・公共系の発電施設のうち農地以外に設置したもの	宅地のうち工業用地とその他の宅地
	低・未利用地*	最終処分場、河川、港湾施設、空港、鉄道、道路、都市公園、自然公園、ダム、海岸、観光施設	野立て、屋根置き	400	低・未利用地	水面・河川・水路、道路、原野、その他

表4 農地等のこれまでの利用と今後の管理の方針

国土利用は図1に示すように大きく変化している。2010年代に所有者不明土地の問題が顕在化した。所有者不明土地は国土の2割にのぼると推計され[25, 26]、国土の有効な利用を妨げられている。この問題を解消して国土を有効に利用するための法整備が進められている。その方針に則った太陽光発電施設の設置方法を提案するために、農地と宅地について、(1)現状、(2)問題点やその解決方法、(3)今後の土地利用の方針について一覧とした。森林についても、2012年以降に太陽光発電施設のために利用されてきたので以下にまとめた。

農地	(1) 宅地への転用と耕作放棄地の増加につれ、耕地面積は減少を続けている（図1(1)(3)参照）（耕作放棄地は耕地所有者の耕作意欲を反映した主観的な判定によるものである）。また、農地には所有者不明土地が16.9%ある[25]。 (2) 耕作放棄地と所有者不明土地の散在は、農業の合理化や集約化を妨げている。農地の有効利用を推進するために、農地区分に「荒廃農地」を設けた。第三者（市町村農業委員会）の客観的な調査により、耕作をしなくなってから時間が経ち、農地への復元が困難なものや農地としての継続利用が見込めないものをいう。「再生農地」は、荒廃農地のうち、抜根や客土などにより農地として再生の見込まれるものである。農地調査が全国で進み、これらの区分によって農地としての利用可能性が把握できるようになってきた。これに基づいて、農地集積が進められている[27]。 (3) 農業の労働力減少にあっても、食料自給・補償の観点から農地面積をこれ以上減少させないようにし、土地の有効利用を進めながら、農山村での再生可能エネルギーの導入を図り、地域の農林漁業の発展に資する方針である。その一環として、営農型太陽光発電の設置条件を緩和し、促進策を講じている[28][29]。
宅地	(1) 宅地面積は増加し続け、同時に住宅数も増えている（図1(2)）。宅地での所有者不明土地は17.4%で（H28年度のサンプル調査[25]）、それらは空き家を含み、空き家数は増加している（図1(4)参照）。 (2) 空き家の有効利用の取り組みは各地でなされているが、所有者不明土地は都市計画の進行を妨げる。空き家の多くは老朽化が進むと同時に耐震基準を満たしていないものが多く、安全性に問題がある。住宅ストックは約6000万戸に対し、耐震基準を満たしていない住宅は約1850万戸にのぼる（2015年時点、[30]）。適切に管理されず、周囲住民の生活に深刻な影響を及ぼす場合には、行政が空き家の除去を命令するなどの介入することができるようになった[31]。 (3) 新築戸建て住宅への太陽光発電設置（の義務化）を自治体や政府の検討が始まっている[32]。また、家庭部門からのCO₂排出は国内排出量の15%を占めるため、これを抑制するために省エネ住宅の普及も検討されている[33]。
森林	(1) 森林面積は過去60年間ほとんど変化せず約250万km²である[14]。林業の低迷により管理の行き届かない森林が増え、所有者不明土地は25.6%にのぼる[25]。 (2) 管理できない所有者が林地を手放すことで、メガ・ソーラーが建設された（図2参照）。メガ・ソーラーの建設は景観・環境保全・安全の観点から地域住民と事業者の間で対立となる例や事故発生につながる例が各地で生じた[34]。また、メガ・ソーラー開発に関する情報が公開されず、事故への対応がとりづらかった[35]。 (3) 森林の保全と適正な利用を図るために許可基準の見直しを行い、違反行為に適切な対応をし、小規模な開発についても実態把握を行う体制を敷く[36]。本来の森林の公益的な機能、すなわち、林業の推進や森林の吸収源の機能を発揮することに重きを置くこととなり、今後の林地での無秩序な太陽光発電開発は制限されるようになった。

3.2 2050年の全国の太陽光発電の設備容量と発電量

2050年の土地区分ごとの太陽光発電の設備容量と年間発電量を「2.2 2050年の太陽光発電のポテンシャル計算」の(1)(2)式、および、表3の利用可能な面積を用いて計算し、その結果を表5と図3に示す。設備容量は700GW、年間発電量は1,040TWh/年となった。この発電量はここ数年の年間電力需要量に相当する。このほかに風力発電やその他の再生可能エネルギーの整備も太陽光発電と同様に行えば、2050年の脱炭素目標に再生可能エネルギーは応え得る。

農地の発電量が520TWh/年で太陽光発電量全体の50%を占めた。内訳はソーラー・シェアリングを行う営農地で360TWh/年、荒廃農地では160TWh/年であった。

ついで住宅地が380TWh/年で全体の37%を占めた。内訳は空き家整備地110TWh/年、住宅屋根270TWh/年であった。

その他の土地区分では140TWh/年の発電量があり、年間発電量全体の13%であった。

設備の総設置面積は29,000km²であった。これは、国土面積の8%に当たる。現在、国土面積の12%が農地、5%が宅地であり(表2)、農地と宅地の有効利用が重要であることが分かった。また、太陽光発電施設設置のために2010年代に森林が利用されたが(図2参照)、表4に示したように今後の必要性は低い。

表5 2050年の太陽光発電のポテンシャル
土地区分ごとの設備容量と年間発電量、および、施設設置面積

土地区分	内訳	設備容量 (GW)	年間発電量 (TWh/年)		設置面積 (km ²)
農地	営農地	240	360		8,700
	荒廃農地	110	160		1,400
	小計	350	520	50%	10,000
住宅地	空き家整備地	80	110		1,000
	住宅屋根	180	270		9,900
	小計	260	380	37%	11,000
その他	宅地(住宅以外)	60	90		7,600
	低・未利用地	30	50		400
	小計	90	140	13%	8,000
合計		700	1040		29,000

* 年間発電量の計算にあたり、「農地」と「住宅地」については、年平均日射量は全国平均値を用いた。「その他」については、都道府県庁所在地の値を都道府県の代表値とした環境省報告書[11]記載値を用いた。設置面積は、住宅とそれ以外の宅地、および、低未利用地については、表3の利用可能な面積を用いた。

(1) 設備容量

(2) 年間発電量

(3) 発電施設面積

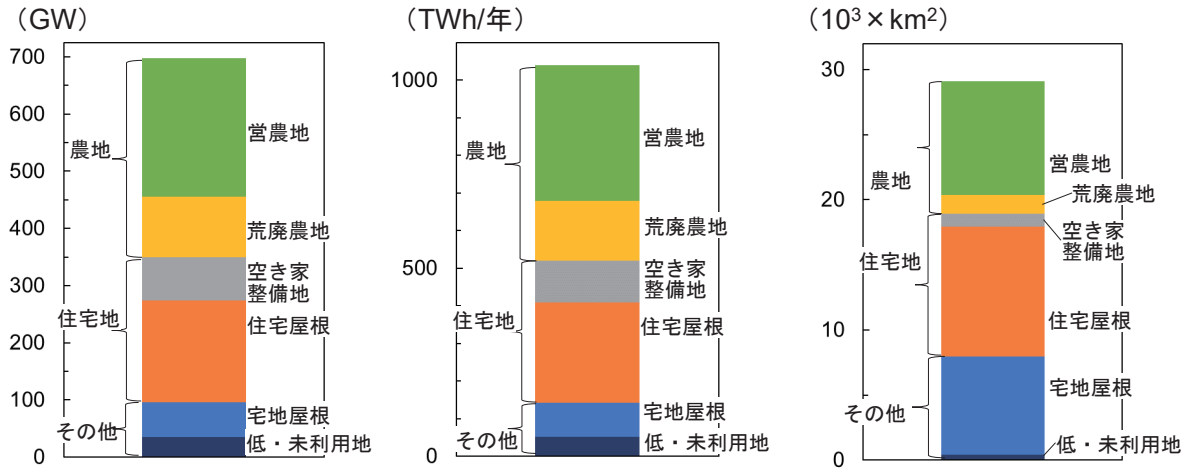


図3 2050年の太陽光発電ポテンシャル

(1) 設備容量、(2) 年間発電量、(3) 発電施設面積を土地区分ごとの積み上げで示している。

3.3 全国の分布

図4(1)に全国の太陽光発電の設備容量と年間発電量の分布と、(2)に設備容量クラスごと、および、年間発電量ポテンシャル・クラスごとの都道府県数頻度分布を示す。

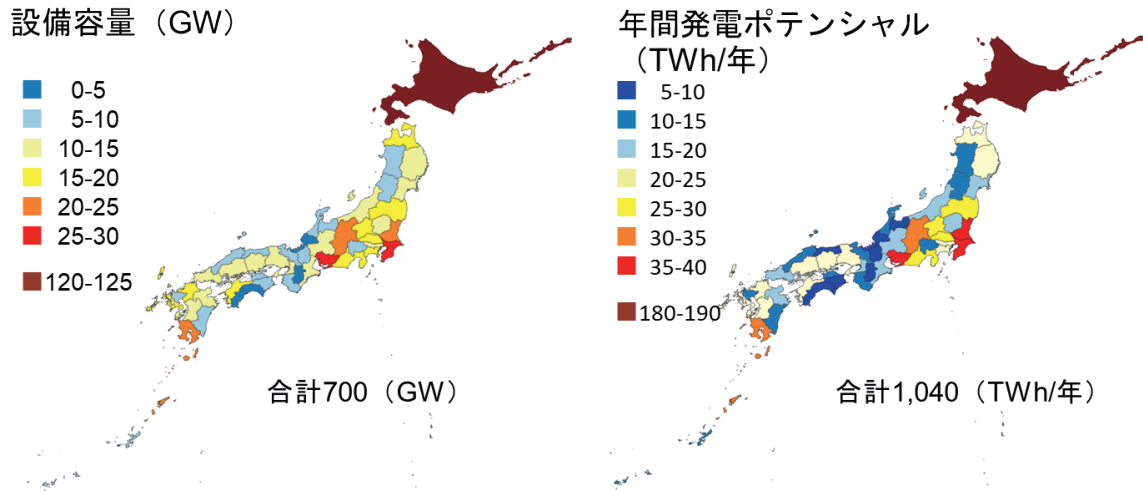
設備容量と発電量は比例の関係なので、発電量に注目する。発電量は北海道が圧倒的に大きく、180 TWh/年であった。それ以外の都府県は5～40 TWh/年の範囲であった。そのなかでは、関東地方、中部地方、および鹿児島県のポテンシャルが大きかった。

図5に各都道府県の設備容量、年間発電量、設置面積とそれらの土地区分内訳を示す。北海道は設備容量、発電量、設置面積ともに全国で抜きんでている。

上記と同様に発電量に注目すると、北海道以外では必ずしも面積の大きな都府県の発電量が多いわけではない。発電量でランク付けした場合、上位にあげられるのは愛知県(2位)、千葉県(3位)、茨城県(4位)、静岡県(7位)、埼玉県(8位)、福岡県(10位)などで、これらの面積のランクは順に26位、28位、23位、13位、29位で中位である。これらの県はソーラー・シェアリングを行える農地の面積が広く、さらに、住宅地を含めた宅地の面積も広い特徴があった。

図6に全国10地域の設備容量、年間発電量、設置面積を示した。10地域は10大電力会社管区を用いた。設備容量と年間発電量、設置面積のいずれも、東京と北海道が首位グループで、九州・中部・東北が比較的大きなポテンシャルを示す第2グループ、その他の地域がそれに続いた。設置面積は東京が最も大きく6,200 km²、ついで北海道4,900 km²であったが、年間発電量は東京200 TWh/y、ついで北海道180 TWh/yであった。北海道は設置用地の大半を農地が占め、太陽光パネルの設置間隔が広いために土地面積当たりの発電量が相対的に低くなることに対して、東京の設置場所は農地よりも、住宅地やその他も大きな割合を占め、宅地では太陽光パネルの間隔をあけずに設置できるため面積当たりの発電量が相対的に大きかった。このことは、それぞれの地域の土地の利用に合わせた太陽光発電が可能であることを示している。

(1) 設備容量と年間発電ポテンシャルの都道府県別分布



(2) 設備容量および年間発電ポテンシャルのクラスごとの都道府県数の頻度分布

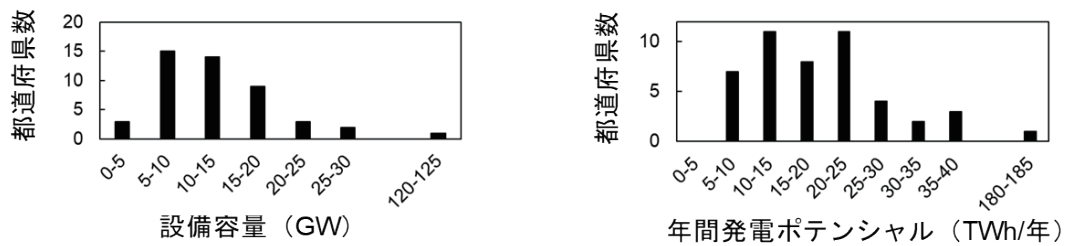
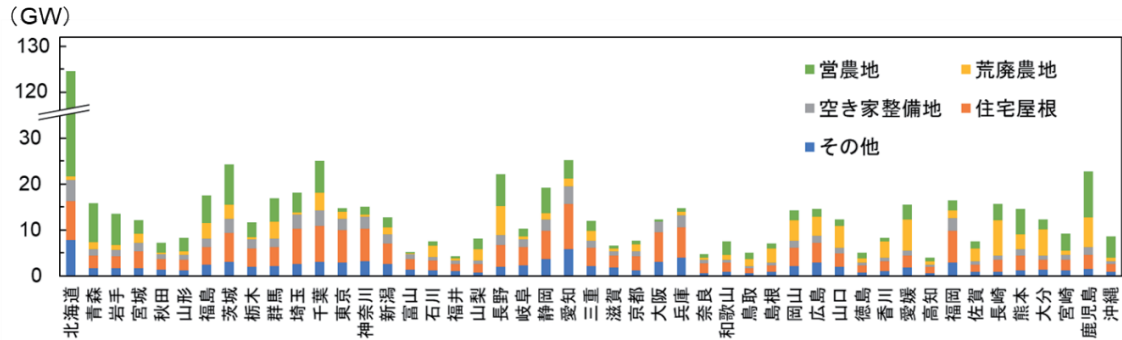


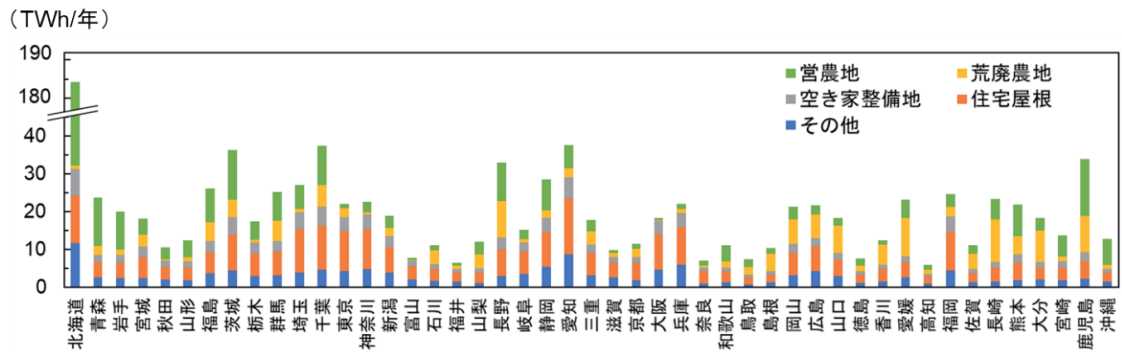
図4 2050年の太陽光発電ポテンシャル

- (1) 設備容量と年間発電ポテンシャルの都道府県別分布 (国土数値情報 [38] と QGIS[39] を用いて作図)
 (2) 設備容量および年間発電ポテンシャルのクラスごとの都道府県数の頻度分布

(1) 設備容量



(2) 年間発電ポテンシャル



(3) 発電施設面積

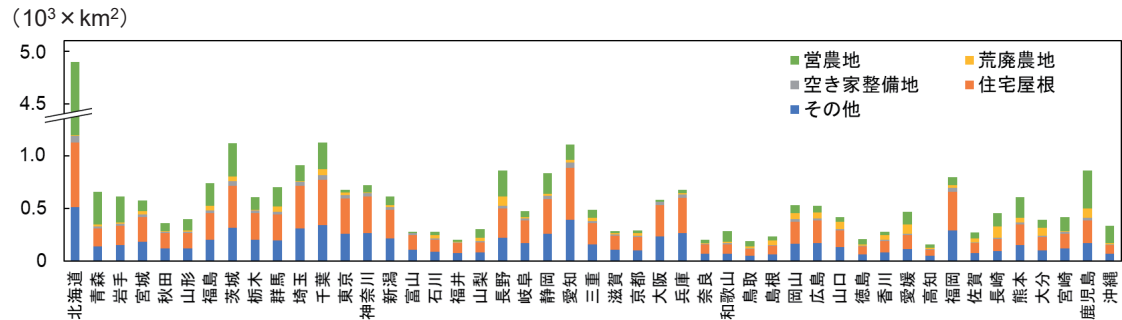


図5 2050年の都道府県別の太陽光発電ポテンシャル

(1) 設備容量、(2) 年間発電量、(3) 発電施設面積、土地区分ごとの積み上げで示している。

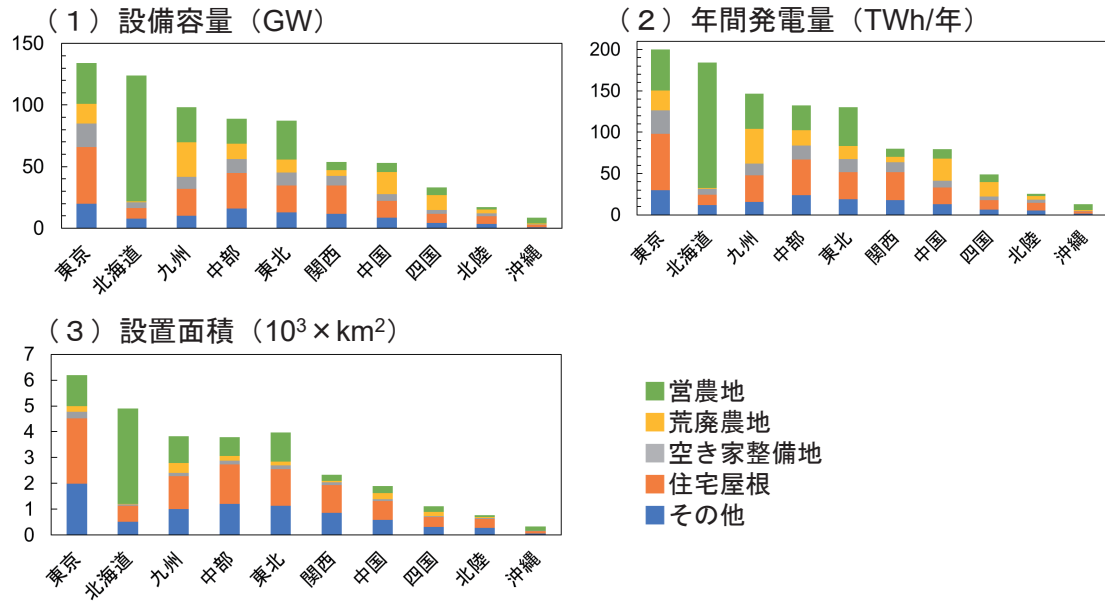


図6 2050年の地域別の太陽光発電ポテンシャル
(1) 設備容量、(2) 年間発電量、(3) 発電施設面積、土地区分ごとの積み上げで示している。
10大電力会社管区で地域分けをした。

3.4 現在から2050年ポテンシャルまでの太陽光発電の普及の道筋

図7に、太陽光発電のこれまでの導入実績から2050年のポテンシャルまでを過去の実績増加率と同等で増加するとみなし、さらに、S字型曲線を想定してつないだ。これを普及の道筋とした。2030年の設備容量は460 GWとなり、第6次エネルギー計画[6]が示す2030年の見通し(103.5～117.6 GW)を大きく上回った。2030年見通しは「上限」ではなく、それ以上のことが可能である。

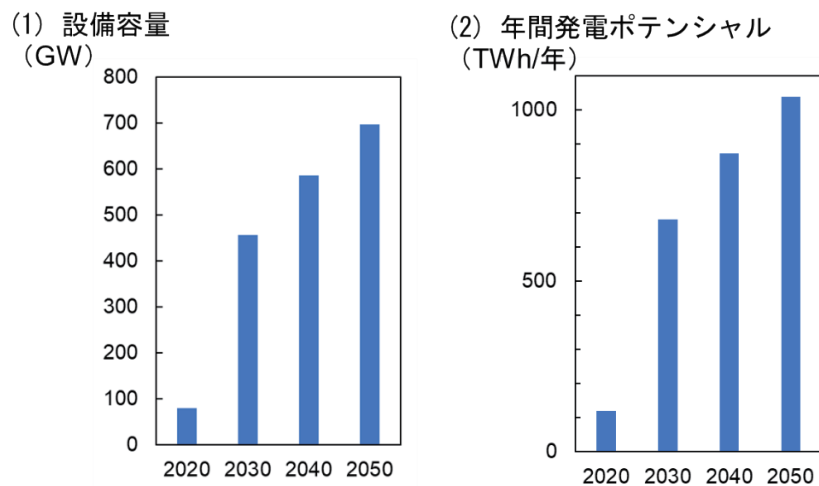


図7 2020年から2050年までの太陽光発電の普及パターン
(1) 設備容量 (GW) (2) 年間発電ポテンシャル (TWh/年)

3.5 VRE のポテンシャルと新揚水発電の組み合わせ

(1) 太陽光発電と新揚水発電の分布

図8に、本提案書で計算した太陽光発電の都道府県別ポテンシャル分布とLCSで提案してきた新揚水発電所の地域分布[9]の組み合わせを示す。VREである太陽光発電は、新揚水発電と組み合わせることで、電力安定供給ができる。また、太陽光発電の余剰の電力を使って、新揚水発電所の揚水を行うことができる。

全国合計の太陽光の年間発電ポテンシャルが1,040 TWh/年に対し、新揚水発電は700 TWh/年[10]であった。太陽光発電ポテンシャルは都道府県ごとに多少はあるが万遍なく分布し、新揚水発電所も各都道府県に分布することから、都道府県ごとに安定的な電力システムが構築できる。愛知県、茨城県、千葉県などは太陽光発電ポテンシャルが高いが、新揚水発電の数は少ない。そのような県では隣接する地域との連携が考えられる。

(2) 太陽光と風力のVREと新揚水発電の分布

太陽光発電とともに風力発電も主力電源として有望である。両者ともVREであるので、新揚水発電との組み合わせを考える必要がある。参考として、風力発電を合わせた地域のポテンシャルを図9に示す。風力発電ポテンシャルについては環境省報告書データ[11]を用い、陸上風力と洋上風力の両方を示した。VREと新揚水発電の年間発電量は5,600 TWh/年と700 TWh/年であった。条件によるが安定化に必要な蓄電池容量は電力需要の10～20%程度と考えられる[37]。現状の年間電力需要1,000 TWh/年に対して、2050年に仮に2倍の電力受需要が達成できたとしても十分に電源を安定化できる新揚水発電の蓄電設備可能容量である。地域別にみると、VREの年間発電量とその構成割合は地域ごとに異なり、新揚水発電による年間発電量も地域によって異なるが、いずれの地域でも両者を組み合わせた電源システムを作ることができる。

洋上風力の導入までにはまだ時間がかかるが、陸上風力は導入が進んでいる。陸上風力と太陽光のVRE電源と新揚水発電の組み合わせによる電力システムは、近い将来に整備を進める必要がある。そこで、以下、図10に陸上風力発電ポテンシャル分布、図11に太陽光と陸上風力の2種のVREと新揚水発電の分布の組み合わせを示す。図10の陸上風力の年間発電ポテンシャルの都道府県別分布から、合計発電量が1,110 TWh/年で太陽光発電と同等のポテンシャルであったが(図9を参照のこと)、分布パターンは異なり、陸上風力ではポテンシャルの高いところと低いところの差が大きいことが読み取れた(図4を比較参照のこと)。図11では、太陽光と風力を合わせたVREの年間発電ポテンシャルの全国分布と新揚水発電所の分布の組み合わせを示す。VREの年間発電ポテンシャルは2,150 TWh/年となり、北海道が最も高く、ついで、東北地方を中心とした東日本で、甲信越地方や西日本は低いという傾向があったが、全国に広くポテンシャルが分布していた。また、新揚水発電所も全国に万遍なく分布しており、それぞれの地域でVREと新揚水発電所を組み合わせた電力システムを設置することができることが分かった。

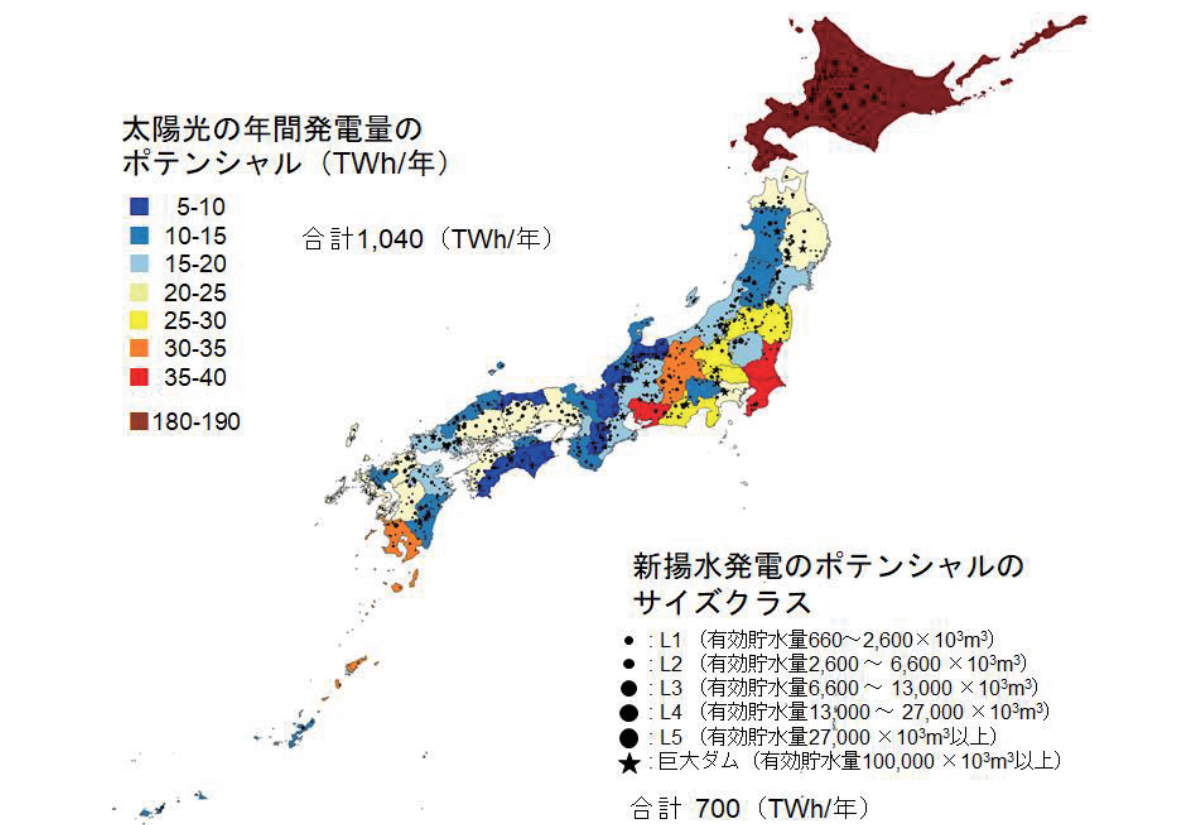


図 8 太陽光発電と新揚水発電のポテンシャルの全国分布 (国土数値情報 [38] と QGIS[39] を用いて作図)
新揚水発電所の分布と発電ポテンシャルは LCS 提案書 [9]、[10] による。

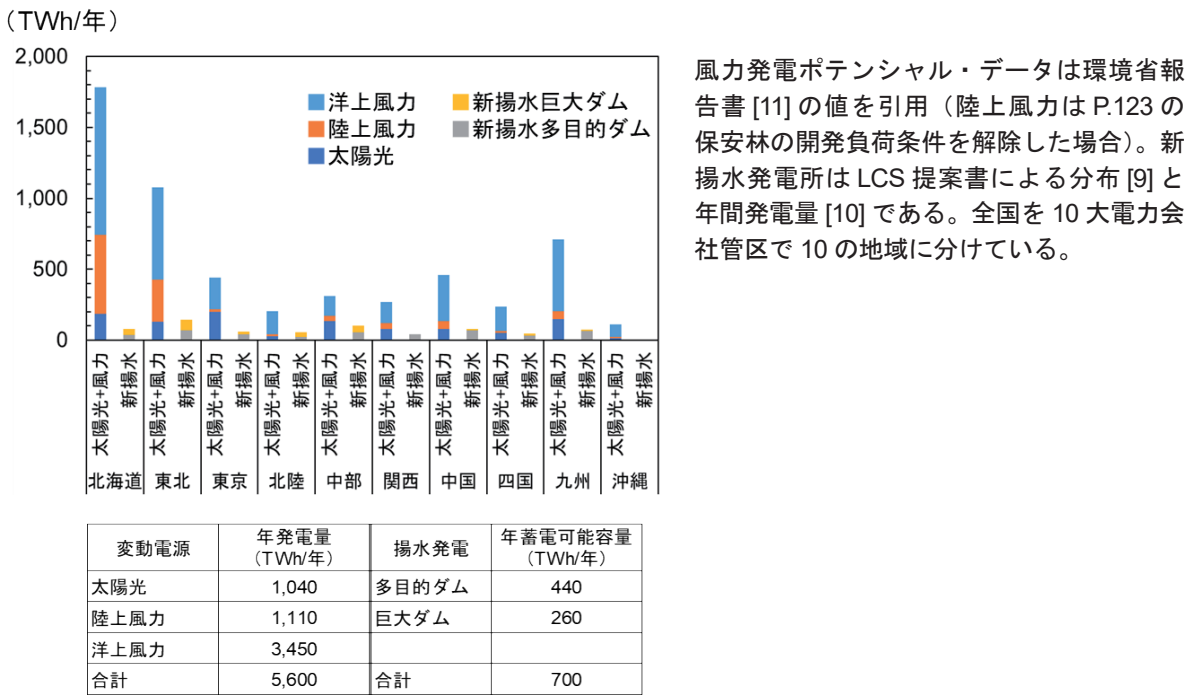
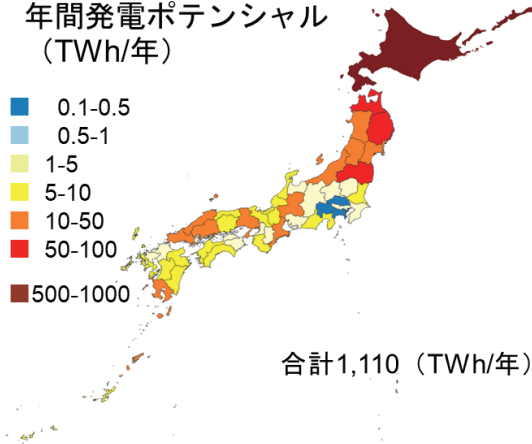
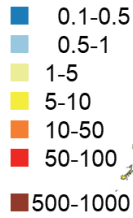


図 9 2050 年の VRE と新揚水発電の地域ポテンシャル分布と年発電量

(1) 全国の発電量分布図
 年間発電ポテンシャル
 (TWh/年)



合計1,110 (TWh/年)

(2) 年間発電ポテンシャルクラスごとの
 都道府県数頻度分布

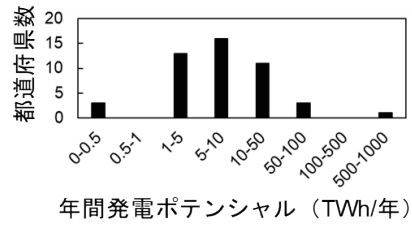
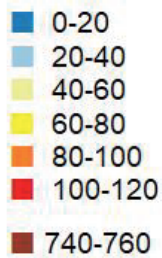
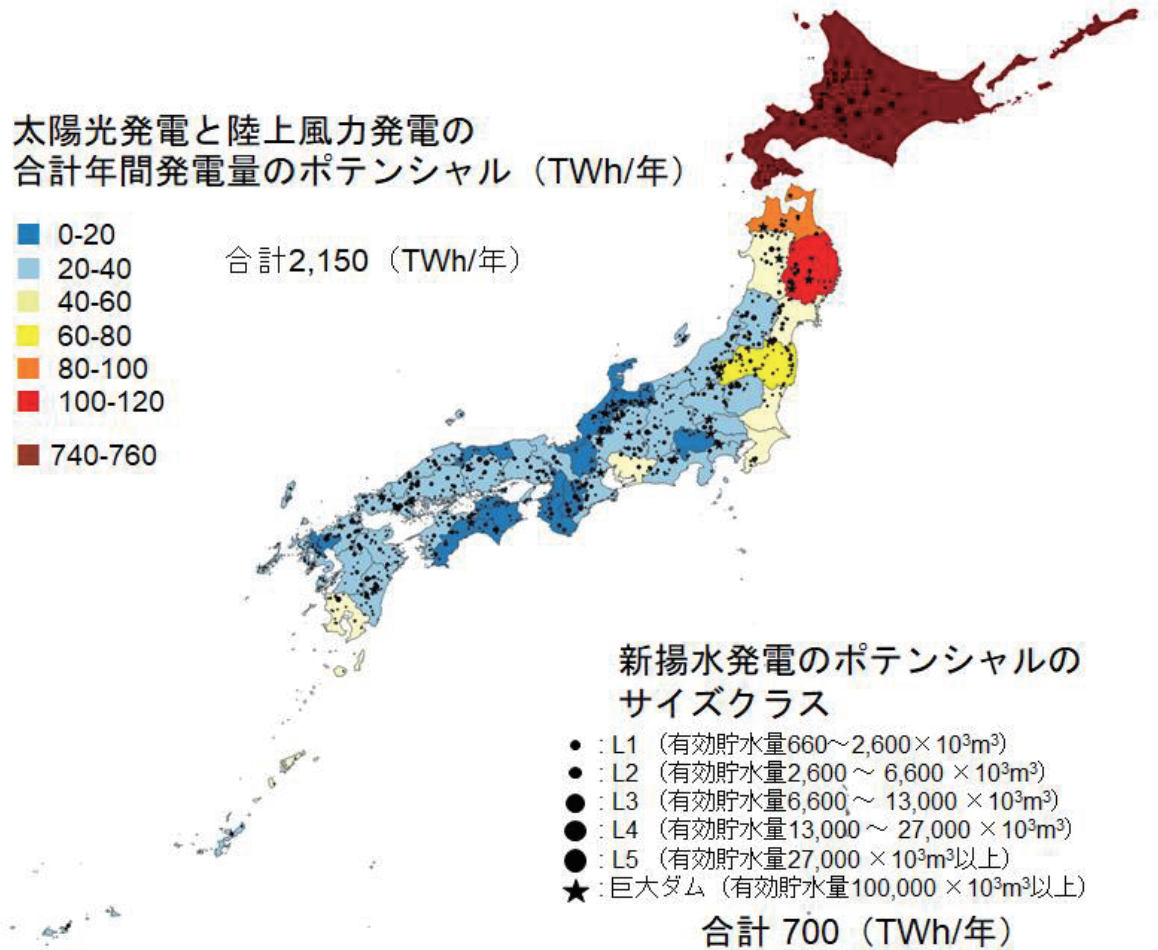


図 10 都道府県別の陸上風力発電の年間発電ポテンシャル
 (データ引用元は図 9 と同じ。国土数値情報 [38] と QGIS[39] を用いて作図)

太陽光発電と陸上風力発電の
 合計年間発電量のポテンシャル (TWh/年)



合計2,150 (TWh/年)



新揚水発電のポテンシャルの
 サイズクラス

- : L1 (有効貯水量660~2,600 × 10³m³)
- : L2 (有効貯水量2,600 ~ 6,600 × 10³m³)
- : L3 (有効貯水量6,600 ~ 13,000 × 10³m³)
- : L4 (有効貯水量13,000 ~ 27,000 × 10³m³)
- : L5 (有効貯水量27,000 × 10³m³以上)
- ★ : 巨大ダム (有効貯水量100,000 × 10³m³以上)

合計 700 (TWh/年)

図 11 太陽光発電と陸上風力発電、および新揚水発電のポテンシャルの全国分布
 (データ引用元は図 9 と同じ。国土数値情報 [38] と QGIS[39] を用いて作図)

4. まとめ

(1) 宅地の屋根と空き家整備地、荒廃農地を含む農地の一部、および、低・未利用地の合計 29,000 km² の用地の利用で設備容量 700 GW、年間発電量 1,040 TWh/年のポテンシャルが計算された。この年間発電量ポテンシャルは現状の年間電力需要に匹敵し、太陽光発電と同時に風力発電等の開発も行えば、今後の電力需要の増加に対応できる可能性がある。

(2) 2050 年の太陽光発電ポテンシャルを実現するための用地面積は国土の 8%にあたり、太陽光発電を設置しやすい平坦地である農地や建物屋根の利用で大半をまかなうことができる。太陽光発電を目的とした森林伐採や山地造成の必要はない。

(3) 過去の太陽光発電の導入実績と 2050 年のポテンシャルから 2020 年以降 2050 年までの普及カーブを作ったところ、2030 年の設備容量は 460 GW と計算された。これは第 6 次エネルギー計画における太陽光発電の 2030 年見通し (103.5 ~ 117.6 GW) をはるかに上回った。

(4) 太陽光発電ポテンシャル、ないし、風力発電も含む VRE のポテンシャルと新揚水発電の蓄電ポテンシャルの分布はいずれも各都道府県に広く分布しており、将来的に VRE と新揚水発電を組み合わせた地域ごとの電力システムの設立が可能であることが分かった。

5. 課題

(1) 太陽光発電施設の設置を検討するにあたって、土地利用の困難さが露呈した。個人財産の問題が国土管理の問題となっていた。太陽光発電施設の設置だけでなく、風力発電施設の設置や農林業、都市計画などにも影響を与えていた。持続的で有効な土地利用のあり方をよく議論し運用できるように、長期的な展望に立って国土の管理手法を発展させる必要がある。

(2) 本提案書では太陽光発電のポテンシャルを検討し、新揚水発電との地域的分布の状況を示したが、これらをつなぐ電源系統とコントロールシステムについては未検討であり、今後の課題である。

6. 政策立案のための提案

(1) 太陽光発電ポテンシャルは設備容量 700 GW、年間発電量 1,040 TWh/年と高い。第 6 次エネルギー計画 [6] では、2050 年のカーボンニュートラル実現目標が具体的に示されていないが、太陽光発電に関しての目標を示すことができる。また、同計画では 2030 年見通しでは太陽光発電設備容量を 103.5 ~ 117.6 GW としているが、これよりはるかに高い 460 GW が実現可能である。2030 年以降の目標値を再検討し、速やかな太陽光発電の導入を促すことが必要である。

(2) 太陽光発電ポテンシャルは高く、将来の主力電源の一翼を担い得る。そのことを見据えて、太陽光発電パネルの性能向上やコストダウンの技術開発を発展させることが必要である。一方で、古くなった太陽光パネルの回収とリサイクルのシステムを作ることが必要である。太陽光発電産業を製造・設置・管理・リサイクルの循環軌道に乗せて、持続的な産業とするための支援が必要である。

(3) 営農型太陽光発電に関して、農業と太陽光発電の事業者間の競合を避けるような制度設計や運用が必要である。すでに営農型太陽光発電は各地で実施が進められているが、農業生産と太陽光発電がそれぞれ最大になるような最適な組み合わせに関しての知見や事例は乏しい。よって国や都道府県の研究機関等による技術的支援が必要である。併せて、経営を軌道にのせるための経済的な支援も必要である。

(4) 住宅屋根は太陽光発電ポテンシャルの 1/4 を占め、将来の電源構成において重要な役割を果たす。住宅屋根での発電を地域資源と捉え、住宅所有者個人に全ての設備負担を負わせるので

はなく、自治体など適切な事業主体者が運用全般を先導できる体制を整えることが必要である。さらに、持続可能な運営を確立するために住宅所有者や事業主体者に対し、自治体や国からの技術的・経済的支援が必要である。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー白書 2021”.
- [2] 環境エネルギー政策研究所 isep, “2020 年の自然エネルギー電力の割合 (暦年速報)”, <https://www.isep.or.jp/archives/library/13188>, 2021 年 4 月 12 日, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [3] 株式会社システム技術研究所, WWF ジャパン委託研究, “脱炭素社会に向けた 2050 年ゼロシナリオ”, (2020.12.11).
- [4] 未来のためのエネルギー転換研究グループ, “原発ゼロ・エネルギー転換戦略, 日本経済再生のためのエネルギー民主主義の確立へ”, (2019.6.25).
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.3) —ネットワーク関連消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2021 年 2 月.
- [6] 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画” および, “2030 年度におけるエネルギー需給の見通し”, 令和 3 年 10 月.
- [7] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019 年 1 月.
- [8] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.2)”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020 年 2 月.
- [9] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.3)”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2021 年 2 月.
- [10] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.4) —気候変動に対応した提案—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2022 年 3 月.
- [11] 環境省, “令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書”, 株式会社エックス都市研究所, アジア航測株式会社, 令和 2 年 3 月.
- [12] (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部, “太陽光発電ロードマップ (PV2030+)”, 概要版 (2009), “2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030+)”に関する見直し検討委員会”, 報告書.
- [13] 経済産業省, 調達価格等算定委員会, “令和 3 年度以降の調達価格等に関する意見”, R3.1.27.
- [14] 国土交通省 HP, “国土利用区分別面積”, https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_fr3_000033.html, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [15] 農林水産省, “作物統計調査のうち耕地面積調査 (長期累年面積調査)”, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html>, 2019 年, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [16] 農林水産省, 農林業センサス, 2015 年.
- [17] 総務省, “住宅・土地調査”, <https://www.e-stat.go.jp/statistics/00200522>, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [18] 太陽光発電協会, “出荷統計”, 2002 年度から 2021 年度, <https://www.jpca.gr.jp/document/>

figure/, (アクセス日 2021 年 9 月 30 日).

- [19] 国立環境研究所, HP, “太陽光発電施設による土地改変—8725 施設の範囲を地図化, 設置場所の特徴を明らかに—”, <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210329/20210329.html>, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [20] 環境省資料, “太陽光発電の環境配慮ガイドライン”, R02.3.
- [21] 経済産業省資料, “今夏の太陽電池発電設備の事故の特徴について”, 産業保全グループ電力安全課, 平成 30 年 11 月 26 日,
- [22] 総務省統計局, “日本の統計 2021” 第 8 章農林水産業 8-5 都道府県別耕地面積 (令和元年).
- [23] 農林水産省 資料, “令和元年の都道府県別の荒廃農地面積”, 令和 2 年 10 月.
- [24] 農林水産省 資料, “荒廃農地の現状と対策”, 令和 3 年 7 月.
- [25] 国土交通省, 参考資料 2 “所有者不明土地の実態把握の状況について”, 国土審議会土地政策分科会特別部会ワーキンググループ (第 1 回) 配布資料, 2017 年 9 月 12 日.
- [26] 吉原祥子, “人口減少時代の土地問題”, 中央公論新社刊, (2017).
- [27] 農林水産省 資料, “荒廃農地の現状と対策”, 令和 2 年 4 月.
- [28] 農林水産省 資料, “人口構造の変化等が農業政策に与える影響と課題について”, 平成 30 年 10 月 11 日.
- [29] 農林水産省 資料, “再生可能エネルギーを活用した農産漁村の活性化”, 環境省主催 平成 28 年度「地球温暖化対策計画」等説明会 H28 年 9 ~ 11 月.
- [30] 国土交通省, “参考資料 3 空き家の現状と論点”, 社会資本整備審議会住宅宅地分科会, 第 42 回, 2015 年 9 月 30 日.
- [31] 国土交通省資料, “空き家対策について”, 令和元年 5 月.
- [32] 経済産業省, “脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方・進め方”, <https://www.meti.go.jp/press/2021/08/20210823001/20210823001.html>, (アクセス日 2021 年 10 月 1 日).
- [33] 国土交通省 資料, “脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方検討会”.
- [34] 太陽光発電に係る林地開発許可基準の在り方に関する検討会 資料, “太陽光発電に係る林地開発許可基準の在り方に関する検討会報告書”, 令和元年 9 月.
- [35] 山下 英俊, “日本におけるメガ・ソーラー事業の現状と課題”, (2014), 一橋経済学, 第 7 巻, 第 2 号, pp.125-144, 2014.
- [36] 林野庁資料 “太陽光発電施設の設置を目的とした林地開発に対する林野庁の取り組みについて”, 内閣府の第 15 回再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース会議 R03.09.07.
- [37] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, “低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.2) —ゼロエミッション電源システム構築に向けた技術開発課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2018 年 3 月.
- [38] 国土地理院, 国土数値情報, “行政区域データ”, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, (アクセス日 2021 年 10 月 10 日).
- [39] オープンソース地理情報システム, QGIS ver.3.8.3, <https://qgis.org/ja/site/>, (アクセス日 2021 年 10 月 10 日).

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国土の有効利用を考慮した太陽光発電の ポテンシャルと分布

令和4年3月

Potential and Distribution of Photovoltaic Power Generation Considering the Efficient Land Use

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2022.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究員 河原崎 里子 (KAWARASAKI Satoko)
主任研究員 浅田 龍造 (ASADA Ryuzo)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ 8 階

TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273

<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。