

研究ノート

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

— 3 kW屋上太陽光発電10年間の運転実績から —

Expectation to photovoltaic generation system for the houses in the snow cold area

- The results to generate electric power for the 10 years using
the 3kW rooftop type -

張 興 和

Xinghe Zhang

要 旨

北海道は再生可能エネルギーの宝庫と称されるが、再生可能エネルギー自給率はわずか10.9%であり全国平均を下回る。しかし、家庭におけるエネルギー消費量は全国平均より45%多い。

積雪寒冷地域における屋上太陽光発電システムの10年間の発電量等のデータに基づき、発電量と日射量の関係、投資回収年数、二酸化炭素排出削減効果を明らかにした。更に、積雪による発電ロスを推定し、積雪の解決策を示した。

太陽光発電の投資回収年数が非常に長く、投資回収年数だけで評価するなら、決して良い投資ではない。しかし、二酸化炭素排出削減効果、停電時の非常用電源としての活用等を含めて考えると、投資効果が高く評価されるだろう。

近年、太陽光発電システム単価が低下すると共に、耐久性や発電効率が高くなり、投資対効果が改善されつつある。再生可能エネルギーを有効に活用し、電気の自給自足を期待している。

Abstract

Hokkaido is a rich repository of the renewable energy source, but its renewable energy self-sufficiency ratio is only 10.9% and is less than national average. However, the energy consumption in the home has more 45% than national average.

Based on data such as the quantity of generation the rooftop type PV system in the snow cold area for ten years, I clarified the relations between the quantity of generation and the quantity of solar radiation, payback period and the reduction of carbon dioxide discharge. Furthermore, I estimated generation loss by the snow accumulation and showed solution of the snow accumulation.

The payback period of the photovoltaic power generation is very long. It is not good investment if evaluated only at return on investment. However, the investment effect is appreciated, when the reduction of car-

bon dioxide discharge and using as an emergency power supply if necessary in case of a disaster.

In late years, PV system unit price falls, and the durability and generation efficiency become higher, and return on investment is improved. I expect self-sufficiency of electricity by utilization of the renewable energy.

キーワード：太陽光発電、自立運転、日射量、省エネルギー、積雪、発電ロス、固定価格買取制度、投資回収年数

Key words: photovoltaic power generation system; solar power generation; self-sustaining operation; quantity of solar radiation; energy saving; snow accumulation; generation loss; Feed-in Tariff (FIT); payback period

目次

はじめに

- 1 屋上太陽光発電システムの概要
 - 1.1 太陽光発電システムの構成
 - 1.2 主要設備の主要仕様
 - 1.3 太陽電池モジュールの設置
- 2 10年間（2010～2019年）の発電実績
 - 2.1 年別発電量と設備利用率
 - 2.2 月別発電量と全日日射量
 - 2.3 時間別発電量と全日日射量
 - 2.4 月別発電量と電力消費量
- 3 費用便益分析及びお金に代えられない価値
 - 3.1 収益と投資回収年数の試算
 - 3.2 CO₂排出削減効果と原油代替効果
 - 3.3 胆振東部地震停電時の自立運転
 - 3.4 実践し続けてこそ分かるもの
- 4 積雪寒冷地域の積雪課題と克服方策
 - 4.1 積雪による発電ロス
 - 4.2 壁面設置型太陽電池モジュール
 - 4.3 両面受光型太陽電池モジュール
 - 4.4 傾斜角度可変架台

おわりに

参考文献

はじめに

北海道は日本の国土の約1/5を占める広大な大地を有する上に、その人口密度は全国のその約1/5にしかすぎない¹。豊富な農林水産資源を活用し、カロリーベース食料自給率を約200%と誇り、日本有数の食料生産供給地となっている。しかし、北海道は太陽光や風力等再生可能エネルギーの宝庫と称されながら、再生可能エネルギー自給率はわずか10.9%であり、全国平均を下回っている²。

北海道の家庭エネルギー消費量は、全国平均を45%上回る。特に、用途別で見ると冷暖房のエネルギー消費量は、何と全国平均の3倍にも達している。北海道の家庭におけるエネルギー消費のうち、灯油が55%を占めている³。

石油のほとんどすべてが外国からの輸入に依存し、約9割⁴は中東地域に頼っている。石油は温室効果ガスを排出する枯渇性資源である上に、国際情勢の影響などを受けて安定して確保することが難しくなる懸念もある。できるだけ早く石油依存から脱出することが望まれる。

環境省の調査によれば、北海道には、太陽光や風力、地熱といった多様な再生可能エネルギー源が豊富に賦存し、かつ、導入ポテンシャルは非常に大きい⁵ことが分かる。これらの再生可能エネルギー源の活用は、北海道の深刻なエネルギー問題の有力な解決策と考えられる。

一方、筆者が大学に入学後初めて製鉄会社を見学した折、まず目にしたのは、林立する煙突から吐き出される黒煙・黄煙であり、異様なおもい強く感じたものだ。しかし、急速に躍進している鉄鋼業が与えてくれた感動、喜びと誇りに満ちた感情でいっぱいになり、何の疑問も抱かなかった。

やがて、自分の大気汚染への知識の習得が進むにつれて、環境意識が変化してきた。特に環境研究に従事して以来、会議・講義や論文で環境の大切さ・問題の深刻さ・必要な対策等を率直に語ってきた。だんだんと、口で言うだけでなく、個人レベルで可能な取組の一つでも挑戦してみようと思うようになってきた。

確かに北海道に風力や地熱、バイオマス等の再生可能なエネルギー源が多く存在するが、個人レベルになると、選択肢が限定されてくるであろう。天候に恵まれない積雪寒冷地域ではあるが、選択肢には太陽光発電しかないのではないかと考えるようになった。利益が得られれば良いが、利益

- 1 2020年10月現在の人口・面積・人口密度：北海道521万人・8.3万km²・66.5人/km²、全国12,578万人・37.8万km²・337.2人/km² (<https://uub.jp/pjn/pb.html>)
- 2 千葉大学倉阪研究室・認定NPO法人環境エネルギー政策研究所「永続地帯2019年度版報告書」(2020.4)、p.13、別冊の「都道府県分析表」によれば、北海道の食料自給率196.2%で全国1位。再生可能エネルギー自給率は10.9% (全国平均13.55%) で、47都道府県中で37位 (北海道の再生可能エネルギーのうち太陽光発電の供給比率は33.8%と最高であり、風力発電は21%である)。2018年度のデータ
- 3 経済産業省北海道経済産業局「グラフで見る北海道のエネルギー消費 (2010年度)」、平成25年1月、P9によれば、エネルギー消費量：北海道64、全国44GJ/世帯、うち冷暖房：北海道32、全国11GJ/世帯
- 4 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部『資源・エネルギー統計年報 (石油)』、2019年、pp.5-6
- 5 環境エネルギー政策研究所「自然エネルギー白書 2017」(2018年1月16日)、<https://www.isep.or.jp/jsr/2017report/chapter5/5-3>

獲得自体が目的ではないため、屋上に太陽光発電を設置することにためらいはなかった。

結局、2009年に屋上太陽光発電システムを設置し、12月に試運転を行い、システムに問題がないことが確認された。翌年の2010年からは正式に発電を開始し、2020年になって、無事10年が経過した。この10年間には多くの実践経験と運転データを蓄積し、単なる文献調査や現場見学だけでは理解できないことを確実に把握することができた。

太陽光発電への関心が高まるにつれて、その関連研究が多くなされてきた。例えば、山口ら⁶は住宅用太陽光発電・蓄電池組合せを提案し、宮崎ら⁷は太陽光発電のkW価値を評価し、大橋弘ら⁸は太陽光発電買取制度を定量分析し、竹濱⁹は太陽光発電の普及を検討し、田中ら¹⁰は太陽光発電の省エネルギー効果を推定し、更に辰巳ら¹¹は日本の日照分析を行った。

これらの研究は、住宅用太陽光発電の促進に資するところが大きいと判断される。しかし、これらのすべてはマクロ的な研究に限定されている。調査した限り、旭川のような積雪寒冷地域において、10年間にわたる実績データを持つ住宅用発電システムに関する詳細な研究報告はないように思われる。

本稿では、10年間に蓄積した発電量等データを集計し、年別・月別・時間別の発電量と日射量の関係を示すことにする。その上に、費用便益分析と投資回収年数予測を行い、二酸化炭素排出削減効果と原油代替効果を試算する。また、定量的に分析できないが、10年間の実践で得た気づきを紹介する。最後に、積雪による発電ロスを推定し、厄介な積雪の解決策を考えることとする。

本稿は、住宅用太陽光発電に興味を持つ方、特に積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電の特徴を知りたい方、住宅用太陽光発電の設置を考えている方、また、発電しているが他者の発電状況と比較したい人々に、少しでも役に立つことを期待している。

1 屋上太陽光発電システムの概要

1.1 太陽光発電システムの構成

屋上太陽光発電システムは、図1に示すように太陽電池モジュール（ソーラーパネルとも称される）、パワーコンディショナのほかに、接続箱、分電盤、電力量計、リモートコントローラ、自立運転専用コンセントから構成されている。

6 山口雅英ら「住宅用対抗発電・蓄電池組合せシステムのメリットに関する研究」『電学論B』123巻3号pp.402-411 (2003年)

7 宮崎聡ら「住宅設置太陽光発電データ分析によるkW価値の評価」『電学論B』124巻11号pp.1293-1299 (2004年)

8 大橋弘ら「太陽光発電買取制度の定量分析」『住宅土地経済』2010年秋号No.78, pp.29-35 (2010年)

9 竹濱朝美「低炭素社会実現に向けた住宅用太陽光発電に対するFreed-in Tariff導入シナリオ」『政策科学』17巻特別号pp.93-123 (2010年)

10 田中昭雄ら「住宅用太陽エネルギー利用設備の省エネルギー効果に関する研究」『太陽エネルギー』Vol.41, No.6, pp.41-47 (2015年)

11 辰巳憲一「日本の年間日照時間の分析」『学習院大学経済論集』第51巻第1号pp.23-47 (2014年)

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

太陽電池モジュールは、太陽の光エネルギーを直接に電気エネルギーに変換する発電装置であり、太陽光発電システムの中心になっている。太陽電池モジュールを屋上に取り付けた架台に載せ、行列に並べて固定する。

太陽電池モジュールから引き出された送電ケーブルを「接続箱」（図中省略）にまとめて、パワーコンディショナに接続する。パワーコンディショナは、インバーター機能を備えた機器であり、太陽電池で発電した直流の電気を交流に変換する。また、停電時に太陽光発電システムを自立運転させる機能も備えている。

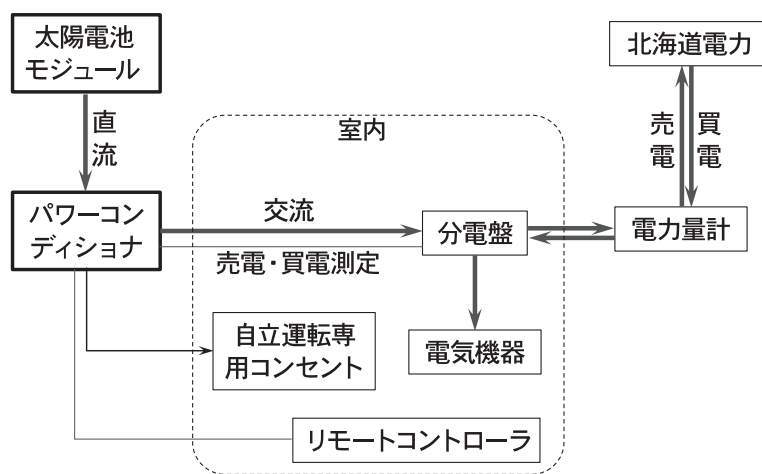


図1 屋上太陽光発電システムの構成

パワーコンディショナで交流に変換された電気は分電盤を経由して各電気機器に供給される。分電盤は同時に、余った電気を北電に売電するように仕分けする。

電力量計は売電メーターと買電メーターがあり、売電量（北電に売った電力量）と買電量（北電から買った電力量）を計測する。

リモートコントローラは、パワーコンディショナの運転操作を行うことができるが、良く利用する機能は、現在の発電量、消費電力、売電量、買電量、及びそれらの過去のデータの表示である。これは節電に活かせる便利な装置である。

自立運転専用コンセントはパワーコンディショナから配線を通して室内に設置される。「連系運転」を「自立運転」に切り替えれば、太陽光発電と分電盤を切り離す状態になる。自立運転専用コンセントの電気は、太陽光発電からの電気だけで供給する。自立運転機能を使えば、停電時にも太陽光発電の電気を使うことが可能である。

1. 2 主要設備の主要仕様

（1）太陽電池モジュールの主要仕様

太陽電池モジュールは、SHARP製の寒冷積雪地仕様の、比較的安価な多結晶タイプを採用した。それは50枚の太陽電池セル（150mm×150mm）を横10×縦5に配列し、外枠を嵌めたものであり、主な仕様は表1に示す通りである（基準状態：放射照度1,000W／㎡、分光分布AM1.5、モジュール温度25℃）。

表1 太陽電池モジュールの主要仕様

形名	ND-R7V1C
公称最大出力	177.00W
セル実効変換効率	14.5%
公称質量	18.5kg
外形寸法	1630×848×46mm

（2）パワーコンディショナの主要仕様

パワーコンディショナは、SHARP製の屋外型を採用し、主な仕様は表2に示す。定格電力変換効率が94.5%であることは、直流を交流に変換すると5.5%損失することを意味する。直流で使用するればこの損失を避けるため、将来、直流給電を期待する。

表2 パワーコンディショナの主要仕様

形名	JH-S6A2
最大出力	3.0kW
定格入力電圧	DC240V
定格出力電圧	DC202V
定格電力変換効率	94.5%

1. 3 太陽電池モジュールの設置

太陽電池モジュールを17枚設置し、合計最大出力は約3kW（177W×17=3,009W）となる。一枚の面積が $1.63 \times 0.848 = 1.38\text{m}^2$ で、合計 24m^2 （切り上げで）となる¹²。

太陽電池モジュールを水平の屋上に4行に並べて固定した。左右は5cmの間隔であるが、前後は前のモジュールの太陽の影の長さの考慮で415cmを空けた。設置面積は約 40m^2 である。

12 太陽電池モジュール17枚の面積の合計が24平方メートルあり、これが屋上を覆っているので、一定の遮熱効果が期待できる。一方、一枚の重さが18.5kgなので合計314.5kgであるが、架台を含めると、400kgを超える。これは屋上にかかる負荷となる。

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

図2に示すように、太陽電池モジュールと水平からなる傾斜角度は 10° であり、真南から東へ 41° ずれる方位に向くように設置した。設置方位は建物の制限であるが、傾斜角度は最適角度 34.8° より遥かに小さいのは見た目と防風の配慮によるものである。

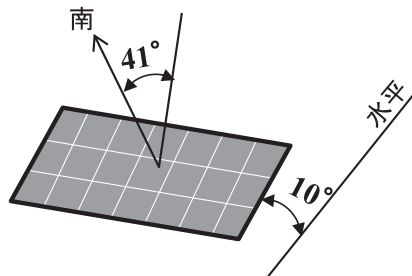


図2 太陽電池モジュールの傾斜と方位

2 10年間（2010～2019年）の発電実績

2.1 年別発電量と設備利用率

2010～2019年の10年間における年別の発電量と売電量、自家消費量及び全天日射量¹³の推移を図3に示す。年間発電量は、2,366～2,760kWhの範囲で変動するが、平均で2,611kWhとなる。発電量のうち、約25%が自家消費し、余剰分を北電に販売するが、平均年間売電量は1,962kWhである。

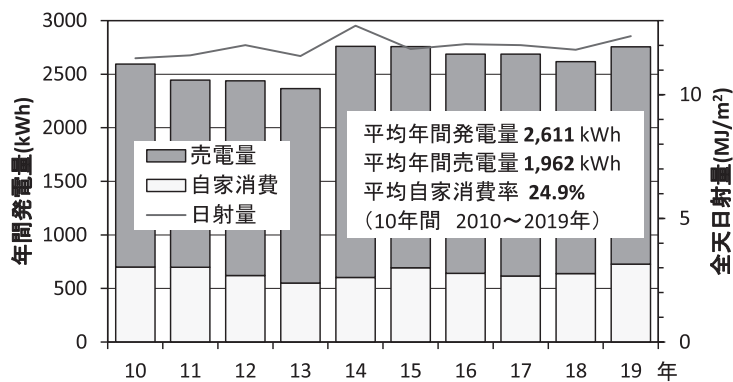


図3 2010～2019年における年別の発電量と売電量・自家消費量

年間設備利用率は「年間発電量÷（最大出力×365×24）」で算出され、これは設備がどのくらい

13 太陽電池の発電量は日照時間とも関係があるが、より関係深いのが日射量と考えられる。そのため、本稿では紙面の関係で日照時間に触れないことにした。本稿に使用した全天日射量等の気象データは、気象庁ホームページに公表された旭川の過去の気象データである。<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

有効に使われているかを表現する指標である。この指標を利用すれば、出力既知設備の発電量を見積もることができ、逆に、予定の発電量を達成するために必要な出力を見積もることができる。

10年間の平均年間設備利用率は、 $2,611\text{kWh}/\text{年} \div (3\text{kW} \times 24\text{h}/\text{日} \times 365\text{日}/\text{年}) = 9.94\%$ と、約10%である。1,203件10kW未満の太陽光発電の年間設備利用率の平均13.4%¹⁴より、約3ポイント低い。

設備利用率が低い理由は2つあると考える。(1) 傾斜角度が最適角度より小さく、方位も真南から東へ41°ずれている。これにより、発電量が約8%¹⁵低下し、設備利用率の1ポイントに相当する。(2) 更に大きな発電ロス、後に示す月別発電量で示したように12～2月の冬季3ヶ月にほぼ発電しないことである(2.2節、4.1節)。

太陽電池モジュールには経年劣化現象があり、多結晶タイプの場合は、発電効率は10年後で94.3%、20年後で88.4%に低下する¹⁶と報告されている。しかし、このシステムの発電量は明確な低下傾向が見られなかった。発電量は日射量、気温等の多くの影響を受けるので、どの程度劣化しているかは断定できない。

2.2 月別発電量と全天日射量

図4は2010～2019年の10年間平均の月別の発電量、売電量、自家消費量及び全天日射量の変化を示すものである。発電量が激しく変動し、12月～2月の3ヶ月はほとんどゼロとなっていることが明らかである。

年間月別の発電量の変化を旭川の年間月別の全天日射量の変化と比較してみると、同じ傾向を示していると言える。しかし、12～2月は積雪で太陽電池モジュールが覆われてしまうため、日射量があるにもかかわらず発電ができない。また、全天日射量のピークが6月にあるのに対して、発電量は5月にピークを迎える。これは気温の影響であろうと推測できる。

発電量は主に日射量に左右されるが、太陽電池モジュールの温度の上昇につれて発電量が低下する特性がある。6月の全天日射量が5月よりやや多いが、6月の気温は5月より高い。その結果、6月の発電量が5月より少なくなると考えられる。

発電中の自家消費量は変動するものの、発電量の変動より小さいため、発電量が高い4～8月には自家消費率(発電量のうちの自家消費分の割合)は24%以下と低い。11月になると発電量と自家

14 資源エネルギー庁「電源種別(太陽光・風力)のコスト動向等について」平成28年11月、p19

15 太陽光発電総合情報(<http://standard-project.net/solar/angle.html>)によれば、最適傾斜角度は年間で総合して一番多く発電できる角度であり、地域ごとに異なり、北海道では34.8°となる。年間最適角度34.5°である仙台では、傾斜10°に設置すると最適傾斜より6%、更に方位が真南から東へ45°ずれると、更に2%、つまり合計8%の発電量の低下となる。

16 株式会社ヒラソルホームページ、<https://www.girasol-solar.jp/magazine/lifespan/>

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

消費量が共に少ないが、自家消費率は37%に上る。

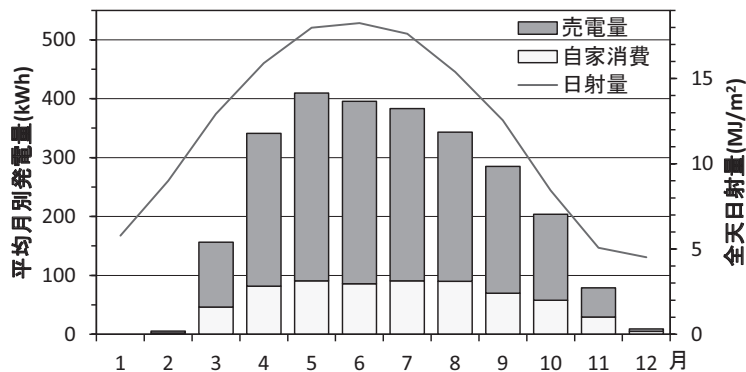


図4 10年間平均の月別発電量と売電量・自家消費量及び日射量

2. 3 時間別発電量と全天日射量

太陽光発電の発電量は、天候によって異なる。晴れの日では発電量が多く、曇りの日は太陽光が散乱して降り注ぐため、晴天時より少ない発電量になり、雨や雪の日は日光が遮られるため、ほとんど発電しない。

2010年5月3日は晴れの日であり、日長14時間14分（日出4：20、日没18：34）、日照時間8.9時間、全天日射量20.15MJ/m²であった。

同日の時間別発電量・売電量・自家消費量、及び消費量¹⁷・買電量を、全天日射量の変化と共に図5に示している。「発電量」は「自家消費量」と「売電量」からなり、「消費量」は「自家消費量」と「買電量」からなる。横軸は0時から23時までとなっている。

同図から分かるように、0時から4時までの夜間は発電せず買電だけに頼った。5時台になると、発電が開始した。発電量は消費量より少ないが、発電量が消費量を超える瞬間では、発電量の一部を自家消費し、余剰分を売電する。自家消費量だけでは消費量を満たさない不足分を買電する。5時台には、売電と買電が共に発生した。

6時台に発電量が多くなり、その一部で自家消費に賄うため、買電せず、余剰分を売電する。

7時台になると、発電量は消費量を遥かに超えるが、料理作り等で消費量が発電量を超える瞬間では買電する。結果として、7時台の発電のほんの一部は自家消費し、その多くは売電するが、不足の瞬間に買電した。7時台にも、売電と買電が共に発生した。

8時から15時までは、電力消費量が少なく、発電量が多く、まったく買電しない、売電のゴール

17 本稿中の電力消費量は太陽光発電システムのリモートコントローラに記録された消費量であり、その中には温水器の夜間電力消費量と暖房の融雪用電力消費量は含まない。

デントタイムである。17時になると発電が停止し、それ以降は買電する。

1日の中で発電量の変動が大きい。5時から発電開始し、10時頃にかけて上昇し、10時頃にピークになり、17時になるまでに発電量が下降する。9時から11時までの3時間の発電量は全体の約4割(42%)を占め、8時から11時までの4時間の発電量は全体の約半分(54%)を占める。

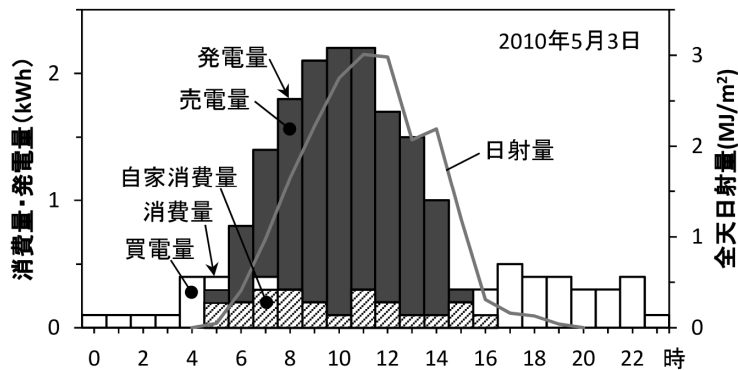


図5 2010年5月3日時間別の発電量・売電量・買電量の変化

「発電量」折線以下の面積はこの日の発電量(自家消費量+売電量)を、「消費量」折線以下の面積はこの日の電力消費量(自家消費量+買電量)を表す。発電量は消費量を遙かに超えることが分かる。発電量と消費量の比で自給率を表せば、この日の自給率は250%となる。

発電量グラフと旭川の全天日射量変化曲線を比較してみると、発電量グラフは全天日射量変化曲線の左に位置し、1時間程度早いことが分かる。これは、太陽電池モジュールが真南から南東へ41°の方位に向いていることに起因すると考えられる。

2. 4 月別発電量と電力消費量

図6は2010~2019年の10年間平均の月別発電量と消費量の比較を示す。消費量は一年中ほぼ一定であるが、夏頃には日照時間が長い分、点灯時間が短く、消費量は減少する。それに対して、発電量の変動が大きい。冬季の12~2月にはほとんど発電せず、初夏頃にピークを迎え、その前後の発電量は多い。10~3月の6ヶ月間には発電量が消費量より少なく、4~9月の6ヶ月間には逆転し、発電量が消費量を超える。

図中の「発電量」曲線以下の面積は10年間平均の年間発電量を、「消費量」曲線以下の面積は10年間平均の年間電力消費量を表す。10年間平均の年間発電量が2,611kWh、10年間平均の年間消費量が2,882kWhであるので、電力の自給率(発電量と消費量の比)は90.6%となる。

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

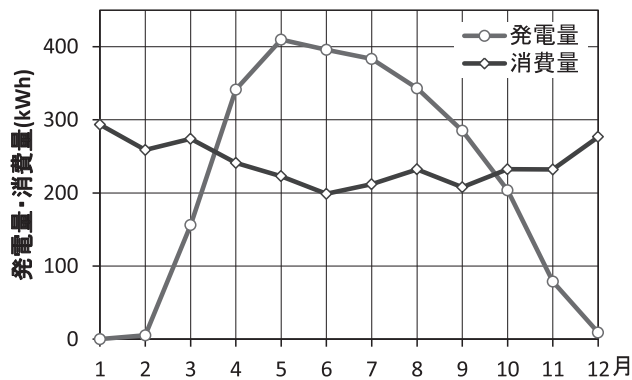


図6 10年間平均の月別発電量と電力消費量の比較

3 費用便益分析及びお金に代えられない価値

3.1 収益と投資回収年数の試算

2009年12月22日に、「余剰電力買取制度」¹⁸を利用し、北海道電力株式会社と「電力需給契約書」を結んだ。契約書によれば、2020年1月7日までの10年間の固定価格買取期間では、売電単価（買取単価）を48円/kWhとし¹⁹、その期間終了後は、売電単価を別に定めるとする。

表3は2010～2019年の10年間の年次別発電量、売電量、自家消費量と共に、売電収入、買電減額及び発電収益を示す。発電量は売電量と自家消費量に分けられ、売電収入と買電減額の合計は発電収益となる。

売電単価が48円/kWhであるため、売電収入は売電単価と売電量の積で算出する。自家消費電力の単価は、2013年9月と2015年4月の2回の値上がりがある上に電力消費量段階別に単価が異なるので、平均して32円/kWhとする。自家消費電力の単価と自家消費量の積が買電減額となる。発電収益は年間約11.5万円、10年間合計約115万円である。

太陽光発電システムの設置費用は、土地代を要しないため、設備費と工事費だけで、合計180万円である。国と市からの補助金42万円を差し引いて、自己投資額は138万円である。また、この10年間には維持費が発生しなかった。自己投資額の138万円から、10年間の売電収益の115万円を引くと、23万円の差額が出る。

18 太陽光発電の「余剰電力買取制度」は2009年11月1日から2012年7月1日まで実施されていた制度であり、家庭や事業所などの太陽光発電からの余剰電力を一定の価格で買い取ることを電気事業者に義務づけるものである。2012年7月1日に再生可能エネルギーの「固定価格買取制度（FIT）」に移行した。FITは、2012年7月1日にスタートし、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスの再生可能エネルギー源を用いて発電された電気を、国が定める価格で一定期間電気事業者が買い取ることを義務付ける制度である

19 固定価格の売電単価は経済産業省により決定される。この制度が開始した2009年に48円/kWhだったが、その後頻繁に見直された。11年に42、13年に38、14年に37、15年に35、16年に33、17年に30、18年に28、19年26、20年に21円/kWhである。その背景には太陽光発電システム単価の低下がある。2009年当時、60万円/kWだったが、2020年現在はその半分の切り、29万円/kW (<https://www.solar-partners.jp/category/price>) である。

表3 2010～2019年の年次別発電量と発電収益

年	発電量 (kWh)	売電量 (kWh)	自家消費 (kWh)	売電収入 (円)	買電減額 (円)	発電収益 (円)
10	2,595	1,895	700	90,960	22,400	113,360
11	2,444	1,746	698	83,808	22,336	106,144
12	2,438	1,817	621	87,216	19,872	107,088
13	2,366	1,815	551	87,120	17,632	104,752
14	2,760	2,157	603	103,536	19,296	122,832
15	2,758	2,065	693	99,120	22,176	121,296
16	2,688	2,047	641	98,256	20,512	118,768
17	2,688	2,071	617	99,408	19,744	119,152
18	2,616	1,978	638	94,944	20,416	115,360
19	2,755	2,027	728	97,296	23,296	120,592
平均	2,611	1,962	649	94,166	20,768	114,934
合計	26,108	19,618	6,490	941,664	207,680	1,149,344

条件：売電単価48円／kWh、自家消費電力単価32円／kWh（買電単価の推定値）

発電11年目の2020年に入ると、北海道電力への売電単価が48円／kWhから、8円／kWh（2020年の契約単価）と変わった²⁰。太陽電池モジュールの寿命は20～30年であり、交換はまだ先であるが、パワーコンディショナの寿命は10～15年であり、交換時期に入っている。交換費用は20万円であると言われている。

ここではパワーコンディショナを交換せず、システム全体をそのまま継続使用し、太陽電池モジュールの経年劣化による発電量の低下を無視する前提で、自家消費電力単価を依然として32円／kWhと仮定して、差額の23万円の残金の回収年数を試算した。その結果を表4に示す。

表4 売電型と自家消費型における残金回収年数の試算

自家消費率 (%)	売電量 (kWh)	自家消費 (kWh)	売電収入 (円)	買電減額 (円)	発電収益 (円)	残金 回収年数
25	1,958	653	15,664	20,896	36,560	6.3
100	0	2,611	0	83,552	83,552	2.8

条件：売電単価8円／kWh、自家消費電力単価：32円／kWh（買電単価の推定値）

20 固定価格48円／kWhだったが、10年間の買取期間満了後の2020年は市場価格8円／kWh（2020年の固定価格21円／kWhを大きく下回る）で売電することになった。ほくでん「FIT制度の買取期間満了後の当社買取価格等について」（https://www.hepco.co.jp/info/2019/1241521_1803.html）を参照。北電より高い価格（9～11円／kWh）で買取する会社が多く存在しており、【2020年最新版】卒FIT後の太陽光余剰電力の買取価格、比較一覧まとめ「北海道電力エリア」（<https://enechange.jp/articles/fit-purchase-price-2019#i-3>）を参照。しかし、条件付きや契約変更手続きが必要であるため、契約を変更しなかった。

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

試算結果からわかるように、23万円の残金を回収するには、自家消費率を現状の25%に維持した「余剰電力売電型」の場合は約6年かかる。自家消費率を100%に上げた「全量自家消費型」の場合は約3年に短縮できるが、新たに蓄電池を導入する必要がある。

以上の試算により、土地代・メンテナンス費用がかからず、パワーコンディショナを交換せず、今後の買電・売電価格が変わらない場合、投資回収年数は16年である。補助金なしなら、投資回収年数は28年となる。目の前に迫るパワーコンディショナの交換を考えると、プラスになるのを期待できないだろう。

更に、電力料金が2013年9月と2015年4月の2回合計で20%以上値上がりした。この値上がりにより、自家消費電力の買電減額が大幅に上がった。この電気料金の値上がりがなければ、投資回収年数は更に長くなる。

以上の試算からわかるように、太陽光発電の投資回収年数が補助金があれば最低で28年、あっても16年かかるというように長い。太陽光発電の投資対効果が悪く、得する投資と言えないだろう。

3. 2 CO₂排出削減効果と原油代替効果

2010～2019年の10年間年次別発電量、CO₂排出係数、CO₂排出削減量を表5に示す。発電量とCO₂排出係数の積がCO₂排出削減量となる。

CO₂排出係数は北電の実績値²¹を用いるが、2019年の値は入手できないため2018年と同じであると仮定した。

2010年のCO₂排出係数が0.344kgCO₂/kWhと低かったが、2012年以降はほぼ倍ぐらいの0.6台で推移している。これは2011年3月11日に東日本大震災が発生した後、泊発電所（原子力）が順次停止したことにより、火力発電量が増加したことによる。

同表からわかるように、2010年はCO₂排出係数が低いため、CO₂排出削減量が低かったが、2012年以降はほぼ倍になって推移してきた。10年間平均で年間CO₂排出削減量が1,618kgであり、10年間のCO₂排出削減量は約16トンとなる。

なお、10年間発電量の原油代替量は、「電力原油換算係数0.26L/kWh×発電量」²²で計算すると、0.26L/kWh×26,108kWh=6,788Lとなる。

21 北海道電力株式会社『ほくでんグループレポート2019』2019年8月発行、p.45

22 経済産業省 資源エネルギー庁『エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要』（2017年1月発行）、p.7によれば、原油換算係数=38.2MJ/L、電力換算係数=9.97MJ/kWhとなる。よって、電力の原油換算係数が9.97/38.2=0.26L/kWhである。

表 5 2010～2019年の年次別発電量と二酸化炭素排出削減量

年	発電量 (kWh)	CO ₂ 排出係数 (kgCO ₂ /kWh)	CO ₂ 排出削減量 (kgCO ₂)
10	2, 595	0. 344	893
11	2, 444	0. 485	1, 185
12	2, 438	0. 680	1, 658
13	2, 366	0. 681	1, 611
14	2, 760	0. 688	1, 899
15	2, 758	0. 676	1, 864
16	2, 688	0. 640	1, 720
17	2, 688	0. 678	1, 822
18	2, 616	0. 656	1, 716
19	2, 755	0. 656	1, 807
平均	2, 611	0. 618	1, 618
合計	26, 108	0. 618	16, 177

3. 3 胆振東部地震停電時の自立運転

2018年 9 月 6 日 3 時頃に胆振東部地震が発生した。地震直後に、道内ほぼ全域が停電する「ブラックアウト」が起き、10月 4 日になって漸く全道の停電が解消した。信号機が消え、交通が乱れ、携帯電話の充電できいなど、突然の大停電は市民生活と経済活動を混乱させた。

災害が少ないことで知られている旭川でも例外なく停電し、市全域での停電復旧は翌日の17時10分になった。筆者の在住地域は幸いなことに地震当日21時頃に電気が復旧し、約18時間の停電であった。災害時の電気の大切さやありがたさを痛感した。

停電時に、太陽光発電システムの自立運転機能を初めて活用した。本当に役に立ち、太陽光発電には防災の意味でも非常に価値があると感じた。

図 7 は2018年 9 月 6 日10：24に撮影した太陽光発電自立運転中のリモートコントローラの液晶モニター表示である。モニターには日付や時刻、晴れを表すお日様のマーク、「自立運転中」、「発電0.93kW」、「消費0.93kW」などの情報が示されている。

自立運転専用コンセントから給電し、冷蔵庫への給電、携帯電話の充電が無事にできたが、炊飯器でご飯を炊く時、雲が漂ってくる瞬間に、炊飯器が停止してしまった。スイッチを入れ直してご飯を炊くことができたが、安定した非常用電源にするには、蓄電池が必須である。



図7 太陽光発電自立運転中のリモートコントローラのモニター表示

また、停電復旧後の9月13日に、ほくでんエネルギー事務局からは、電力需要の上振れや老朽化した火力発電設備が停止するリスクもあり、電力需要のピークに十分対応可能と言える状況ではなく、平日8:30~20:30において平常時より2割節電するというような要請が入った。発電できる季節であるので、節電と発電の両方で節電要請に応えることができた。

3. 4 実践し続けてこそ分かるもの

太陽光発電を数多く見学してきたが、見学だけで知るものは限定的である。実際に発電してみて初めて学んだことは少なくない。ただ、メモリーの記録をノートに写さないと消えてしまうため、10年間のデータの写しが大変な作業であった。

従来、リアルタイムの電力消費量を知ることができなかった。太陽光発電して以来、そのシステムのモニターを利用して、家全体の電気の流れが「見える化」できた。液晶モニター画面に、消費量、発電量、売電量或いは買電量は、リアルタイムで表示される。

消費量の表示により、電気機器の消し忘れに気づくことができる。ある電気機器の電源を消せば、直にモニターに節電効果が定量的に表示される。太陽光発電して以来、不要な照明を消灯したり、冷房を控えめに設定したりするようになった。「見える化」により、エネルギーの大切さを感じ、省エネ意識が向上した。

一方、売電量の表示により、本来捨てている太陽エネルギーから発生したクリーンな電気エネルギーを電力系統に送電していることを実感できる。従来のように言葉で言うだけでなく、実際に行動でき、充実感を得ることができた。

また、筆者が大学院で担当している「環境経済論研究」の授業では、再生可能エネルギーにも触れる。太陽光発電への理解を深めるため、この太陽光発電システムを受講生の見学場にした。自分が実際発電しているからこそ、太陽光発電の楽しさをリアルに伝えられ、その仕組みや制度を具体

的に説明できたと考えている。

4 積雪寒冷地域の積雪課題と克服方策

4. 1 積雪による発電ロス

図4の月別発電量が示したように、12～2月の冬季3ヶ月間は、日射量があるのに発電量はほぼゼロであった。表6に示した2010～2019年平均の月別日射量・雪日数と発電量の関係から、冬季3ヶ月発電しない原因は、太陽電池モジュールに覆う積雪により、太陽光が太陽電池モジュールに当たらないことが分かる。

表6 2010～2019年平均の月別日射量・雪日数と発電量

月	全天日射量 (MJ/m ²)	雪日数	発電量の実績 (kWh)	発電量の予測 (kWh)
1	5.8	30.2	0	149
2	9.0	26.3	5	214
3	12.9	24.0	156	294
4	15.9	10.6	341	354
5	18.0	1.0	410	396
6	18.3	0	396	402
7	17.6	0	383	389
8	15.4	0	343	344
9	12.6	0	285	286
10	8.4	3.2	204	202
11	5.1	16.1	79	134
12	4.5	28.9	9	123
平均	12.0	11.7	218	274
合計	143	140	2,611	3,287

雪日数10日以上のある11～4月の6ヶ月を除いて、ほとんど雪が降らない5～10月の6ヶ月だけの発電量と全天日射量の相関関係を見たのは図8である。同図からわかるように、発電量と全天日射量は強い正の相関関係を持ち、決定係数が0.982と非常に高い（相関係数0.991）。

図8には回帰式「発電量＝20.34×全天日射量＋30.78」を示している。検定結果により、p値（有意確率）＜0.01（有意水準）となり、この回帰式は有効であると判定された。

この回帰式を用いて、積雪がない場合の発電量を予測した。発電量の予測値を表6に示す。積雪により、年間発電量は676kWh（3,287-2,611）を損失すると推定できる。

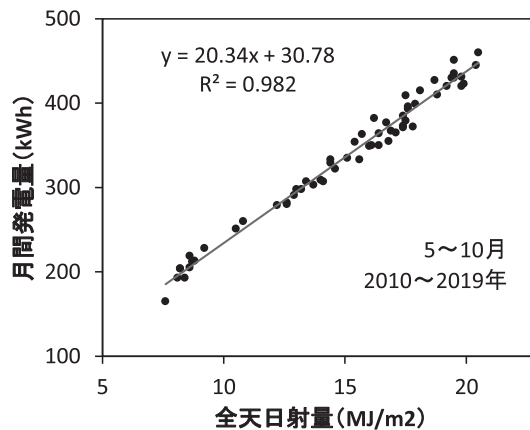


図8 月間発電量と全天日射量の相関関係

この発電ロス、実績発電量の約26%、予測発電量の約21%に相当する。このロスを無くせば、年間設備利用率を、 $3,287\text{kWh}/\text{年} \div (3\text{kW} \times 24\text{h}/\text{日} \times 365\text{日}/\text{年}) = 12.5\%$ （最適方位と傾斜角度の場合は13.6%）に上昇できる。

発電量を高めるには太陽電池モジュールに覆う積雪を除去しなければならない。しかし、太陽電池モジュールや屋上防水を損傷する可能性があるため、除雪作業が難航する。電熱ヒーターで雪を溶かす試みがあったが、残念ながら電力消費量が膨大で、結局失敗に終わった。

4.2 壁面設置型太陽電池モジュール

旭川市民文化会館の壁に設置面積が横12.1m×縦6.1m、配列が横12×縦4枚、最大出力が230W×48枚=11.04kWの太陽電池モジュールが、傾斜角度90°で設置され、2011年3月29日から稼働開始した²³。

垂直設置のため太陽光を浴びにくくなるが、積雪による発電しない時期が無くなるだけでなく、雪面からの太陽光の反射により冬季の発電効率が向上する。

2011～2014年度の4年間の月別平均によれば、一年中の発電量がほぼ安定している。月間発電量が平均726kWhであるが、冬季の12～2月の発電量がそれぞれ616、733、905kWhであり、冬季の発電効率の高さが示された²⁴。

23 旭川市役所ホームページ、<https://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/kurashi/271/290/293/p003631.html>

24 市役所ホームページ公表データに基づいた。紙面関係でデータの詳細を省略した。

4. 3 両面受光型太陽電池モジュール

西山坂田電気は、両面受光型太陽電池モジュールを利用している。冬季は雪の反射を利用し、夏季はホタテの貝殻を使って日光を反射させ、太陽電池モジュールの裏面でも発電できる。雪の反射光により裏面の発電が先行し、それによる温度上昇で、表面の積雪が滑り落ちやすいことが実証された。出力は10～30%向上した²⁵という。

4. 4 傾斜角度可変架台

太陽電池モジュール傾斜角度可変架台²⁶の導入が提案されている。季節ごとに太陽光の向きに合うように手動で角度を調整して発電量を増やす。積雪寒冷地域では、冬季になると、傾斜角度を十分に大きくすれば、雪が滑り落ちると考えられる。

おわりに

太陽光は無尽蔵なクリーンなエネルギーである。それを活用した太陽光発電は、屋上の形状や広さに合わせて自由に規模を決めることができ、近隣に迷惑をかけることはない。また、10年間メンテナンスなしに発電し続ける実績が得られた。

発電量は日射量に左右される。夜は発電せず曇りや雨雪の日には発電量が低下し、雲の動きで発電量が不安定になる。安定的に自家消費するには、太陽光発電システムに蓄電池を組み合わせる必要がある。

投資回収年数は補助金がない場合に最低で28年と長く、投資対効果だけでは決して賢明な投資ではない。しかし、二酸化炭素排出削減効果、停電時の非常用電源としての活用、電力可視化による省エネ意識の向上等、お金に代えられない価値を考慮に入れると、魅力があるのではないかな。

積雪寒冷地域で最大の課題が積雪である。積雪により21%の発電ロスが発生する。壁面設置型や両面受光型の太陽電池モジュールが開発され、積雪の反射光の利用で発電能力が高くなってきた。また積雪が滑り落ちやすいように傾斜角度可変架台も提案され、積雪の課題も解決されつつある。

太陽光発電システム単価が年々低下し、既に10年前の半額以下に下がっている。また、耐久性と発電効率が高くなり、投資対効果が改善されている。再生可能エネルギーを有効に活用し、電気の自給自足の時代が早く実現することを願ってやまないものである。

最後に、本稿の作成にあたっては、本学経済学部須川宏之准教授より有益な助言と共に詳細な日本語校正を頂いた。ここに深く感謝申し上げたい。なお、本稿での誤りは全て執筆者の責任に帰す

25 2013年12月10日付日本経済新聞 (https://r.nikkei.com/article/DGXNASFC10007_Q3A211C1L41000?s=6)、スマートジャパン (<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1312/17/news028.html>)

26 太陽光発電総合情報 (<http://standard-project.net/solar/angle.html>)

積雪寒冷地域における住宅用太陽光発電への期待

るものである。

参考文献

- 1) 千葉大学倉阪研究室・認定NPO法人環境エネルギー政策研究所「永続地帯2019年度版報告書」(2020年)
- 2) 経済産業省北海道経済産業局「グラフで見る北海道のエネルギー消費(2010年度)」(2013年)
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部『資源・エネルギー統計年報(石油)』(2019年)
- 4) 環境エネルギー政策研究所「自然エネルギー白書2017」(2018年)
- 5) 山口雅英ら「住宅用対抗発電・蓄電池組合せシステムのメリットに関する研究」『電学論B』123巻3号pp.402-411(2003年)
- 6) 宮崎聡ら「住宅設置太陽光発電データ分析によるkW価値の評価」『電学論B』124巻11号pp.1293-1299(2004年)
- 7) 大橋弘ら「太陽光発電買取制度の定量分析」『住宅土地経済』2010年秋号No.78, pp.29-35(2010年)
- 8) 竹濱朝美「低炭素社会実現に向けた住宅用太陽光発電に対するFreed-in Tariff導入シナリオ」『政策科学』17巻特別号pp.93-123(2010年)
- 9) 田中昭雄ら「住宅用太陽エネルギー利用設備の省エネルギー効果に関する研究」『太陽エネルギー』Vol.41, No.6, pp.41-47(2015年)
- 10) 辰巳憲一ら「日本の年間日照時間の分析」『学習院大学経済論集』第51巻第1号pp.23-47(2014年)
- 11) 資源エネルギー庁「電源種別(太陽光・風力)のコスト動向等について」(2016年)
- 12) 北海道電力株式会社『ほくでんグループレポート2019』(2019年)
- 13) 経済産業省資源エネルギー庁『エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要』(2017年)

参考にしたホームページ

- (1) 国土交通省 気象庁、<http://www.data.jma.go.jp/>
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁、<http://www.enecho.meti.go.jp/>
- (3) 旭川市役所、<https://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/>
- (4) 太陽光発電総合情報、<http://standard-project.net/>
- (5) スマートジャパン、<https://www.itmedia.co.jp/>