

回帰分析による太陽光発電の発電量予測の有効性と蓄電池を用いた安定度向上について — 足利市, 前橋市, 新潟市において —

楡居 智也[†]

The Effectiveness of Power Generation Forecasting for Solar Power Using Regression Analysis and Stability Improvement with Battery Storage: A Case Study on Ashikaga, Maebashi, and Niigata Cities

Tomoya Nirei

1. はじめに

地球温暖化防止のため、発電時にCO₂を発生しない再生可能エネルギー利用による方式が増え、今後ますます増加する見込みである。

地域でのエネルギー地産地消は、大都市圏で大企業の参画により進められている。また、発電方式は長期的には再生可能エネルギー100%との目標を掲げた地域もある。

太陽光発電は、発電量が天候に左右されることから、発電量が少ないときは、必然的に火力発電の比率が高まることになる。発電時にCO₂を発生しない、または少ない（アンモニア混焼石炭火力発電など）方式の導入、さらに排出されるCO₂の回収などが望まれているが、コスト、導入期間が長期にわたるなど、これらの方法でCO₂を早急に削減することは難しい。

CO₂の早期削減が難しい中で、本研究の目的は、足利市における太陽光発電の1日の発電量を予測し、さらに、予測誤差の範囲を見極め、予測誤差を補うための蓄電池容量を検討することである。

太陽光発電の発電量が予測でき、誤差の範囲がわかるようになれば、発電量が少ない日は、電力使用量を抑えることによりCO₂を削減することが可能となる。

本研究は、地域単位での取組みであり、一つの地域ではCO₂削減量は少ないが、多くの地域がCO₂削減に取組み、CO₂を大幅に削減することが可能となる。そのため、本研究では、誰でも無料で入手できるデータで、発電量予測を行なった。これは、他の地域でも取組みやすく、CO₂を早期に削減できること、さらにエネルギー地産地消に必須となる発電量予測を、容易に行うことができることである。

足利市における研究を進める中で、発電量を公開している「足利市電力見える化サイト」[1]が2023年3月をもって閉鎖され、研究の継続が出来なくなった。そこで、実際にシミュレーションを行なった期間のデータで、研究成果を確認することにした。また、足利市の研究の方法が、他の地域でも使えれば、足利市以外の地域でCO₂削減に貢献できる。そのため、前橋市と新潟市の太陽光発電において、足利市の研究と同じ方法で、シミュレーションを行なった。

研究の目標は、誰でも無料で入手できるデータで、1日あたりの発電量の予測を精度良く行うこと、さらに予測の変動範囲を見極めることである。予測の変動範囲がわかれば、電力量調整の範囲、蓄電池容量の目安となる。

2. 研究の方法

2.1 研究対象設備

①足利市の設備

表1は、足利市の太陽光発電設備で、各設備の発電容量を合計したものである。

②前橋市の発電設備

二つの発電所の合計である。（発電出力はPCS出力）

（PCS：太陽電池の直流出力を交流に変換する装置）

・まえばし堀越町大規模太陽光発電事業

発電設備（太陽電池）：801(kW) PCS出力：750(kW)

・まえばし荻窪町大規模太陽光発電事業

発電設備（太陽電池）：1032(kW) PCS出力：815(kW)

③新潟市の発電設備

・北新潟太陽光発電所

発電設備（太陽電池）：5414(kW) PCS出力：3980(kW)

[†]2023年度修了（自然環境科学プログラム）

回帰分析による太陽光発電の発電量予測の有効性と蓄電池を用いた安定度向上について

一 足利市、前橋市、新潟市において

表1 足利市における太陽光発電設備と発電容量
足利市公式ホームページ「足利市電力見える化サイト」[1]より

	設備名	発電容量(kW)
1	足利市太陽光発電事業	1044
2	中学校	802
3	小学校	1139
4	公民館	273
5	家庭	9266
6	公共事業	3031
合計		15555

2.2 発電量予測の方法

発電量予測は、過去の発電量と、それに対応する日照時間と日射量の気象条件をデータとし、回帰分析による回帰式(一次式 $y=ax+b$)により行なった。

目的変数 y は、太陽光発電の発電量で、足利市の場合は、足利市公式ホームページ「足利市電力見える化サイト」[1]により、説明変数 x は、日照時間と日射量で、気象庁の「過去のデータ検索サイト」[2]および日本気象協会の「足利市の天気」[3]より入手した。日照時間予測値は、日本気象協会「足利市の天気」[3]の天気予報により予測し、日射量予測値は、気象庁「日射量 ひまわり予報」[4]の予報値を用いた。発電量予測は、日照時間、日射量、データ期間について、表2に示すデータを基に開始した。

表2 発電量予測の説明変数

説明変数	データ期間	
	10日間	30日間
足利市日照時間	○	○
宇都宮市日射量	○	○
前橋市日射量	○	○

開始後、日照時間の10日間のデータによる発電量予測が、他のデータによる発電量予測よりも予測誤差が小さいことがわかった。そのため、発電量予測は、日照時間の10日間のデータによるものとした。

日射量は、足利市に観測地点が無い場合、足利市から一番近い観測地点として、ほぼ同じ距離(約40km)である宇都宮市、前橋市の日射量予報値を用いた。

発電量予測において、回帰式で算出した発電量予測値が、過去のシミュレーションの結果から、外れると予測できる日があり、その日は、過去の気象状況が類似した日の実際の発電量から予測を行なった。例を下記に記す。

例) 2022年9月18日

予測日は、台風の影響で日照時間の予測は0時間で、回帰式での予測発電量は16928(kWh/d)となった。過去のシミュレーションの結果から、発電量はさらに少ないと予測できたため、類似した日の9月2日の実測発電量、8354.5(kWh/d)の実績をもとに、8000(kWh/d)と予測した。結果は、実測発電量が8616.1(kWh/d)となり、誤差は-616.1

(kWh/d)、誤差率-7.15(%)であった。

前橋市と新潟市の発電量、日照時間、日射量のデータは、下記のとおりである。

発電量：前橋市「前橋市大規模発電事業の取組み/前橋市」[5]

新潟市「新潟県：企業局：太陽光発電所：発電状況」[6]

日照時間、日射量：気象庁「過去のデータ検索サイト」[2]

日本気象協会「前橋市の天気」[7]「新潟市の天気」[8]

日照時間予測：日本気象協会「前橋市の天気」[7]

「新潟市の天気」[8]

日射量予報値：気象庁「日射量 ひまわり予報」[4]

3. 結果と考察

本研究の発電量予測は、足利市、前橋市、新潟市とも日照時間の10日間のデータにより行なったが、日照時間で問題はなかったのか、確かめるために、日射量予報値での発電量予測値と比較することにした。前橋市と新潟市は、足利市と違い日射量観測地点が市内にあるため、足利市の発電量予測の結果と違いが出るのが予想された。足利市の場合は、日照時間の方が予測誤差が小さい理由として、日射量観測地点および日射量予報値の地点が、約40km離れていることが原因であると考えられた。

足利市は、2022年4月～9月までの期間、前橋市と新潟市は、2023年4月～8月までの期間、シミュレーションを行った。期間中、3市ともそれぞれのサイトの発電量データに欠如などがあり、有効なデータ数は、足利市で177日、前橋市で150日、新潟市で139日であった。

3.1 予測した発電量と実際の発電量の相関

図1の散布図は足利市のものである。横軸に予測発電量、縦軸に実際の発電量を取り相関を示したもので、決定係数は $R^2=0.905$ と相関は強いが、予測を大きく外す日が何日かあった。データ数は、177日であるが、多くは近似曲線付近にあり、発電量予測の方法は有効である。予測発電量に対し、実測発電量が予測を大きく下回る日、また、大きく上回る日もあった(赤丸)。

前橋市と新潟市の決定係数は、前橋市 $R^2=0.8778$ 、新潟

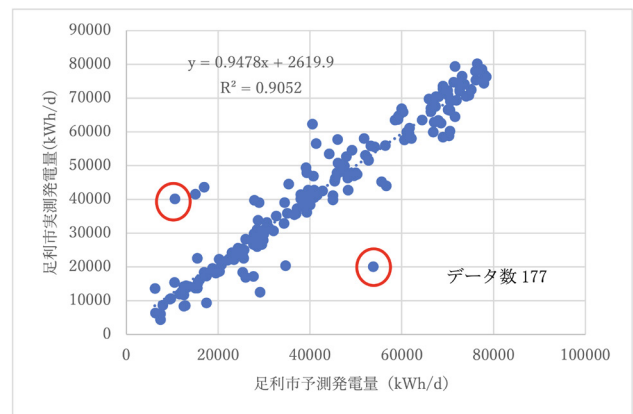


図1 足利市予測発電量と実際の発電量との相関

市は $R^2=0.8283$ であった。前橋市は、相関は強いといえるが、新潟市は、図1の足利市 ($R^2=0.9052$) や前橋市と比較し、相関は強くない結果となった。新潟市は、足利市と同じく、実際の発電量が予測発電量の1/2以下や、2倍以上の日など、近似曲線からのずれが大きい日があったが、近似曲線の右端周辺の発電量の多い日が多かった。足利市は、近似曲線からのバラツキが一番小さかった。

3.2 1日あたりの平均発電量、最大発電量、最小発電量

3市における1日あたりの平均発電量、最大発電量、最小発電量は、表3のとおりであった。

3市とも太陽光発電設備の容量が違うため、値の大きさに違いがあるが、平均発電量と最大発電量の比率に以下のように違いがあった。

表3 平均発電量、最大発電量、最小発電量 単位: kWh/d

	平均発電量	最大発電量	最小発電量
足利市	42948	80162	4368
前橋市	4227	6852	335
新潟市	22542	32728	3170

- ・足利市: $42948(\text{kWh/d}) \div 80162(\text{kWh/d}) \times 100 = 53.6\%$
- ・前橋市: $4227(\text{kWh/d}) \div 6852(\text{kWh/d}) \times 100 = 61.7\%$
- ・新潟市: $22542(\text{kWh/d}) \div 32728(\text{kWh/d}) \times 100 = 68.9\%$

新潟市の平均発電量が、最大発電量に近い値であった。新潟市は最小発電量の10.3倍が最大発電量であるが、前橋市は、最小発電量の20.5倍が最大発電量であり、足利市については、最小発電量の18.4倍が最大発電量であった。シミュレーション期間中、新潟市は、他2市と比較して、悪天候でも発電量の落ち込みが少なかった。これは、新潟市の太陽光発電の特性によるものと考えられる。

太陽光発電設備は、過積載率と呼ばれるものがある。過積載率は、太陽光パネル容量 (kW) と、実際の発電出力 (kW) となるPCS出力 (kW) との比のことである。PCS出力 (kW) が同じで、太陽光パネル (以下パネル) 容量が違う発電所の場合は、悪天候でも、パネル容量が大きい方がパネル出力 (kW) は大きい。そのため、PCS出力 (kW) は同じでも、パネル容量が大きい方が、PCSへの入力 (kW) は大きくなり、発電出力 (kW) は大きくなる。新潟市の太陽光発電設備は、過積載率が1.36、まえばし堀越町大規模太陽光発電事業の発電設備が1.07、まえばし荻窪町大規模太陽光発電事業の発電設備が1.17であった。足利市は、過積載率に関する情報は入手できなかった。

3市の違いの原因は、気象条件 (新潟市は晴れの日が多かった) と太陽光発電設備の違いによるものであった。

3.3 日射量予報値による予測発電量と実際の発電量の相関

発電量の予測において、なぜ日照時間は日射量に比べ予

測誤差が小さかったのか、日射量予報値での予測発電量と、実際の発電量との相関を比較した。図2は足利市のものである。前橋市の日射量予報値を用いたもので、決定係数は $R^2=0.6627$ と日照時間と比較し、強い相関ではなかった。

図1 (日照時間) と比較して、近似曲線とのずれは、日射量予報値の方が多く、予想を大きく外す日も多かった。

前橋市と新潟市の決定係数は、前橋市 $R^2=0.667$ 、新潟市 $R^2=0.6037$ であった。前橋市は足利市とほとんど同じであったが、新潟市は、他の2市より相関は強くなかった。

3市とも日射量予報値を用いた予測発電量では、誤差が大きくなることがわかった。これは、「日射量 ひまわり予報」[4]の予報値が不正確であったといえる。

これらのことから、本研究の日照時間により発電量を予測する方法は、日射量予報値を用いた発電量予測よりも、予測誤差が小さく精度が高いことがわかった。

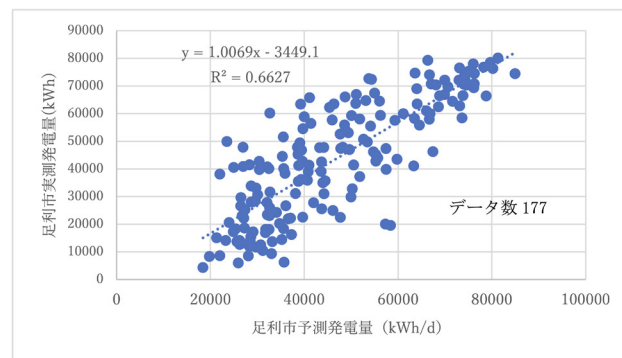


図2 前橋市日射量予報値による予測発電量と実際の発電量との相関

3.4 実測日射量と実際の発電量の相関

足利市は、前橋市の実測日射量との相関となるが、実際の発電量との相関は、決定係数 $R^2=0.8982$ と相関は強いことがわかった。これは、距離が離れている地域 (西へ約40km) の日射量予報値でも、気象庁「日射量 ひまわり予報」[4]が正確であれば、発電量の予測に有効であることがわかった。

前橋市と新潟市は観測地点が2市とも市内にあり、決定係数は、前橋市 $R^2=0.7857$ 、新潟市 $R^2=0.9462$ であった。前橋市は、近似曲線から下方にずれがある日が多くあり、設備のトラブルがあったことが予想された。日射量による発電量予測は、予報値が正確であれば有効であるといえる。

3.5 予測誤差のヒストグラムと平均誤差、分散、標準偏差

足利市は、発電量予測の平均誤差は、 $-400(\text{kWh/d})$ であった。分散と標準偏差は以下となった。

$$\text{分散} = \{(\text{偏差の2乗})\text{の合計}\} \div (\text{データ数}117)$$

$$= 42695761.35 \text{ 偏差} = (\text{データの数値}) - (\text{平均値})$$

$$\text{標準偏差 (S.D.} \pm 1 : \text{約}68\%) = \text{偏差の2乗平均}$$

$$= \sqrt{\text{分散}} = 6534 (\text{kWh/d})$$

回帰分析による太陽光発電の発電量予測の有効性と蓄電池を用いた安定度向上について

一 足利市, 前橋市, 新潟市において

標準偏差(S.D.±2:約95%)=6534×2=13068(kWh/d)

図3は, 足利市の予測誤差のヒストグラムと標準偏差を表わしたグラフである。

緑線は, S.D.±1 -400±6534(kWh/d)(約68%)

赤線は, S.D.±2 -400±13068(kWh/d)(約95%)である。

標準偏差S.D.±1(約68%)では, 誤差平均-400(kWh/d)から±6534(kWh/d)で, 最大発電量80162(kWh/d)の8.2%, 平均発電量42948(kWh/d)の15.2%であった。

S.D.±2(約95%)では, 誤差平均-400(kWh/d)から±13068(kWh/d)で, 最大発電量80162(kWh/d)の16.3%, 平均発電量42948(kWh/d)の30.4%であった。

前橋市のS.D.±1(約68%)は, 誤差平均41(kWh/d)から±548(kWh/d)で, 最大発電量6852(kWh/d)の8.0%, 平均発電量4227(kWh/d)の13.0%であった。

S.D.±2(約95%)では, 誤差平均41(kWh/d)から±1096(kWh/d)で, 最大発電量6852(kWh/d)の16.0%, 平均発電量4227(kWh/d)の25.9%であった。

新潟市のS.D.±1(約68%)は, 誤差平均118(kWh/d)から±3625(kWh/d)で, 最大発電量32728(kWh/d)の11.1%, 平均発電量22542(kWh/d)の16.1%であった。

S.D.±2(約95%)では, 誤差平均118(kWh/d)から±7250(kWh/d)で, 最大発電量32728(kWh/d)の22.2%, 平均発電量22542(kWh/d)の32.2%であった。

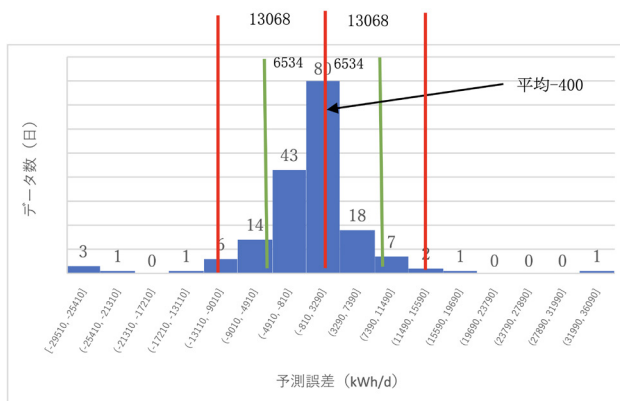


図3 足利市の予測誤差のヒストグラム

この結果は, 本研究での発電量予測の変動範囲といえる。S.D.±2(約95%)の結果は, 電力の使用量調整の範囲, 蓄電池の容量の目安となるものである。

3市ともに, 太陽光発電の発電量予測において, 予測発電量と実測発電量の相関など, 多少の違いはあるにせよ, 本研究の方法は, 足利市以外の地域でも有効であるといえる。正確な発電量予測ではないが, 標準偏差により発電量予測の変動範囲を示せたことは本研究の成果といえる。

4. 結論

4.1 わかったこと

・本研究の日照時間による発電量予測の方法は, 日射量予報値によるものより, 3市とも精度が高く有効であった。

・標準偏差S.D.±2(約95%)の範囲が, 本研究の目的である予測発電量の限界値で誤差の範囲であり, 蓄電池容量の目安となる。それらは, 蓄電池容量の過大なマージンを防ぎ, 蓄電池容量の削減に貢献できる。

・予測発電量と実測発電量の相関は, 3市とも決定係数や近似曲線からのずれの大きさなどで, 特徴や違いがあった。
・足利市と前橋市は, 日射量での発電量予測に前橋市の日射量予報値(説明変数)を用いた。実測発電量との相関は, 前橋市の方が強いと予想したが, 予想どおりではなかった。

・新潟市は, 太陽光発電設備の特性により, 他2市と比べ, 雨天でも発電量の落ち込みが少なく平均発電量が高かった。

4.2 まとめ

誰でも入手できるデータで, 発電量予測を行うとの目的に対し, インターネット上の情報から発電量を予測し, 目標の予測誤差の限界値を示すことができた。さらに, 発電量予測は, 日照時間により行い, 日射量による予測よりも, 精度が高い結果を示せたことは, 本研究の成果と考える。

本研究の方法は, 地域毎に違いや特徴が出るにせよ, 予測誤差の変動範囲を見極め, 電力使用量調整を行うには, どの地域でも有効で, 容易にCO₂削減に貢献できるものである。地域に限らず, 太陽光発電を設置されている事業者単位でも, 発電量を予測し, 電力使用量調整に役立てれば, さらにCO₂削減に貢献できるものである。

謝辞

放送大学大学院に入学し, 修士論文を書き上げることができました。これも研究指導責任者であられる橋本健朗教授のご指導によるものと, 深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 足利市公式ホームページ:「足利市電力見える化サイト」, <https://www.city.ashikaga.tochigi.jp/page/denryokumieruka.html> / (2022年3月~2022年9月 参照)
- [2] 気象庁 | 過去の気象データ検索, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=40&block_no=47646 / (2022年3~2022年9月 2023年3月~2023年8月 参照)
- [3] 日本気象協会:「足利市の天気」, <https://tenki.jp/forecast/3/12/4110/9202/> / (2021年11月~2022年9月 参照)
- [4] 気象庁:日射量 ひまわり予報, <http://www.amecs.co.jp/solar/index.html> / (2022年4月~2022年9月 2023年4月~2023年8月 参照)
- [5] 前橋市大規模発電事業の取り組み/前橋市,

<https://www.city.maebashi.gunma.jp/soshiki/kankyo/kankyoseisaku/gyomu/2/2/4/2727.html> /
(2023年3月～2023年8月 参照)

[6] 新潟県：企業局：太陽光発電所：発電状況,
<http://kigyo.pref.niigata.lg.jp/solar/plant/tohbu2/> /
(2023年3月～2023年8月 参照)

[7] 日本気象協会：「前橋市の天気」,
<https://tenki.jp/forecast/3/13/4210/10201/1hour.html>
/ (2023年4月～2023年8月 参照)

[8] 日本気象協会：「新潟市の天気」,
<https://tenki.jp/forecast/4/18/5410/15100/1hour.html>
/ (2023年4月～2023年8月 参照)