

アニーリングマシンを用いたエネルギー利用最適化

照井雪乃 (指導教員：工藤和恵)

1 はじめに

一昨年政府は、2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにするという目標を掲げた。現在、様々な分野で脱炭素化へ向けた取り組みが行われ始めている。特に再生可能エネルギーは導入が急がれる一方、天候により発電量が変動して供給が不安定化する課題があり、火力発電などのエネルギーや蓄電池を併用して供給を安定化させる技術が今後必要とされる。

本研究では特に住宅のエネルギー利用に注目し、太陽光発電・蓄電池・商用電源を低コスト、かつ環境負荷を低減するように運用するスケジューリング最適化を行った。どの時間帯にどれだけの電力を貯めるのか、使うのか、売るのかなど、エネルギー運用には無数の選択肢が存在する。その中からアニーリングマシンを用いて最適な運用計画を導出することで、住宅のエネルギー利用の最適化を図る。

2 問題設定

太陽光発電と蓄電池を備えた住宅を想定したエネルギー利用のモデルを図1に示す。太陽光発電で発電した電力は充電・売電でき、商用電源も充電できる。需要は太陽光発電・蓄電池・商用電源のいずれかまたは複数から賄われる。

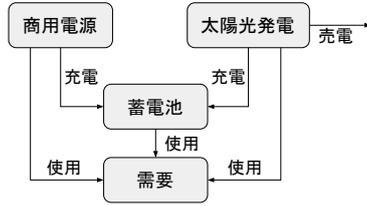


図1: エネルギー利用のモデル

スケジュールの時間解像度は1時間とする。1時間単位の電力需要量と太陽光発電量、電気代、売電価格を入力データとして受け取り、コストと環境負荷を小さくする運用計画をアニーリングマシンで求める。

3 定式化

図1で示したように、エネルギーの運用は“太陽光使用・太陽光充電・太陽光売電・蓄電池使用・商用電源使用・商用電源充電”の計6種を考える。各時間帯に各種の電力量を決定することでスケジュールを作成する。そのため、10W単位など単位電力量をもつ「項目」を以下のように用意する。

- 太陽光使用：光使 i ($i = 1, \dots, n_1$)
- 太陽光充電：光充 i ($i = 1, \dots, n_2$)
- 太陽光売電：光売 i ($i = 1, \dots, n_3$)
- 蓄電池使用：蓄使 i ($i = 1, \dots, n_4$)
- 商用電源使用：電使 i ($i = 1, \dots, n_5$)
- 商用電源充電：電充 i ($i = 1, \dots, n_6$)

項目 i を時間帯 t ($t = 1, 2, \dots, T$) に割り当てるとしたときに1、そうでない時に0をとる決定変数 $x_{i,t}$ を用いてハミルトニアンを以下のように設定する。ハミ

ルトニアンはコスト項である H_{expc} , H_{envc} と制約項である H_{alloc} , H_{inout} , H_{demand} , H_{sun} , H_{bat} の計7項で構成した。アニーリングマシンはハミルトニアンを最小化するような変数の値の組合せを返す。以下 $\gamma_c, \gamma_a, \gamma_{io}, \gamma_d, \gamma_s, \gamma_b$ はハイパーパラメタである。

$$H_{\text{expc}} = \gamma_c a \sum_{t=1}^T \left[C_{\text{ele}}(t) \sum_{i \in \text{Ele}} x_{i,t} - C_{\text{sun}}(t) \sum_{i \in \text{Sun}} x_{i,t} \right] \quad (1)$$

$$H_{\text{envc}} = \gamma_c (1-a) C_{\text{env}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \text{Ele}} x_{i,t} \quad (2)$$

$$H_{\text{alloc}} = \gamma_a \sum_{i \in \text{All}} \left(\sum_{t=1}^T x_{i,t} \right) \left(\sum_{t=1}^T x_{i,t} - 1 \right) \quad (3)$$

$$H_{\text{inout}} = \gamma_{io} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in \text{In}} x_{i,t} \right) \left(\sum_{i \in \text{Out}} x_{i,t} \right) \quad (4)$$

$$H_{\text{demand}} = \gamma_d \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i \in \text{Use}} x_{i,t} - D(t) \right]^2 \quad (5)$$

$$H_{\text{sun}} = \gamma_s \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i \in \text{Sun}} x_{i,t} - S(t) \right]^2 \quad (6)$$

$$H_{\text{bat}} = \gamma_b \sum_{t=1}^T \left[B_{\text{cap}} - B(t) - \sum_{n=0}^{\lfloor \log_2(B_{\text{cap}}-1) \rfloor} 2^n y_{i,t} \right]^2 \quad (7)$$

式(1)の H_{expc} は経費コストを表す。 C_{ele} は商用電源料金、 C_{sun} は太陽光売電価格、 Ele は集合 { 電使1, ..., 電使 n_5 }、 Sun は集合 { 光使1, ..., 光使 n_1 } である。この項ではスケジュール通りに運用した場合の経費を計上する。式(2)の H_{envc} は環境コストを表す。 C_{env} は商用電源を使用する際の CO_2 排出量に基づく係数である。その指標として CO_2 排出係数 [$\text{t-CO}_2/\text{kWh}$] を用いる [1]。この項ではスケジュール通りに運用した場合に排出される CO_2 排出量を計上する。変数 a は H_{envc} に対し H_{expc} を優先する度合いを示し、0以上1以下の値をとる。 a を調節することでスケジューリングにおける経費面と環境面の優先度合を決定する。

式(3)の H_{alloc} は項目 i を割り当てる時間枠を1枠までとする制約項である。 All は項目全体の集合である。式(4)の H_{inout} は蓄電池の入出力を同時に行わないための制約項である。 In は集合 { 光充1, ..., 光充 n_2 , 電充1, ..., 電充 n_6 }、 Out は集合 { 蓄使1, ..., 蓄使 n_4 } である。式(5)の H_{demand} は各時間において需要量を供給量が満たすための制約項である。 D は需要量、 Use は集合 { 光使1, ..., 光使 n_1 , 蓄使1, ..., 蓄使 n_4 , 電使1, ..., 電使 n_5 } である。式(6)の H_{sun} は各時間において太陽光発電量と太陽光使用・充電・売電量の合計値を等しくするための制約項である。 S は太陽光発電量、 Sun は集合 { 光使1, ..., 光使 n_1 , 光充1, ..., 光充 n_2 , 光

売 1, ..., 売電 n_3 } である。式 (7) の H_{bat} は以下の蓄電池容量の不等式制約を表す。

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}, 0 \leq B(t) \leq B_{cap}$$

$$B(0) = B_0, B_{loss}(t) = \eta B(t)$$

$$B(t+1) = B(t) - B_{loss}(t) + b_{in} \sum_{i \in In} x_{i,t} - b_{out} \sum_{i \in Out} x_{i,t}$$

B_{cap} は蓄電池容量、 B_0 は初期蓄電量、 B_{loss} は蓄電池の自然放電量、 η は放電率、 b_{in} , b_{out} はそれぞれ充電・放電における変換効率、In, Out は $H_{in/out}$ で定義した集合と同義である。変数 $y_{i,t}$ は 0 または 1 の値をとる二値変数である。

4 結果

実行結果の評価を行うため用意したデータは以下である。需要量については文献 [2] より電力使用量の多い 2 人家庭のデータを用い、太陽光発電量については文献 [3] より 9 月のデータを用い、快晴日・曇天日・雨天日の 3 つの設定を用意した (図 2 参照)。電気料金は東京電力の電化上手プラン [4] より夜間 (0 時~7 時) 12 円/kWh、夏季昼間 (10 時~17 時) 39 円/kWh、その他の朝夕 26 円/kWh の値を用いた。売電価格は固定価格買取制度 [5] より 19 円/kWh とした。ソルバーは Fixstars Amplify AE を用いた。

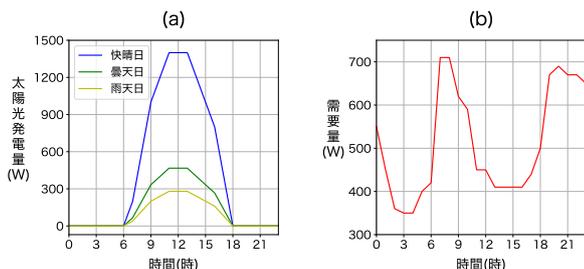


図 2: 用意したデータ (a) 太陽光発電量. (b) 需要量.

計算を行う際、定式化に用いる太陽光発電量 S と需要量 D に関しては項目毎の電力量で表現できるように四捨五入した値を用意した。例として曇天日に初期蓄電率が 50% である日について 5 時間のスケジューリングを行い、その際の入力データとスケジューリング結果を図 3 に示した。項目毎の電力量は 10 W に設定した。

(a)	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00
太陽光発電量 (W)	0	70	200	330	400
需要 (W)	420	710	710	620	590
電気料金 (円)	12	26	26	26	39

(b)	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00
太陽光使用 (W)	0	60	140	170	170
太陽光充電 (W)	0	0	0	70	0
太陽光売電 (W)	0	10	60	90	230
蓄電池使用 (W)	0	130	230	0	260
商用電源使用 (W)	420	520	340	450	160
商用電源充電 (W)	690	0	0	170	0
蓄電池残量 (W)	3065	2781	2412	2532	2145

図 3: (a) 入力データ. (b) スケジューリング結果.

本研究の最適化手法の評価として従来法との比較を

行った。太陽光発電と蓄電池の備わる家庭では一般的に、経済性を考慮し「夜間の安い電力で満蓄状態にし、日中の余剰電力は常に売電する」計画法 1 と、環境面を考慮し「日中の余剰電力は常に蓄電し、満蓄状態になった後売電する」計画法 2 のいずれかの計画法が取られる。提案手法、計画法 1、計画法 2 で 24 時間のスケジュールを作成しコストを比較した。項目毎の電力量は 100 W とした。快晴日・曇天日・雨天日の場合、かつ初期蓄電率が 10%, 50%, 90% である場合の計 9 つのシチュエーションについてコストを計上し、平均値を算出した結果を図 4 に示す。電気料金は計画法 1 と比較して 38% 削減、計画法 2 と比較して 59% 削減していた。二酸化炭素排出量については計画法 1 と比較して 9% の削減、計画法 2 と比較して 12% の増加であった。環境面では計画法 2 に劣るが、経済面ではどちらの計画法に対しても大きくコスト削減がみられたため、経済面を優先して計画する場合に本研究の手法が有効であると言える。

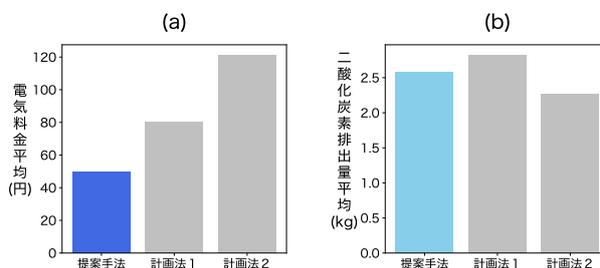


図 4: コスト比較 (a) 電気料金. (b) 二酸化炭素排出量.

5 まとめ

本研究ではアニーリングマシンを用いて、太陽光発電・蓄電池の備わる住宅におけるエネルギー運用計画の最適化を行った。また従来の計画法との比較を行い、本研究の最適化手法が特に経済面において優位な結果を示すことを確認した。

参考文献

- [1] 電気事業者別排出係数, https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r03_coefficient_rev.pdf (2021 年 8 月 15 日アクセス).
- [2] 一般家庭の一日の消費電力, <https://standard-project.net/energy/statistics/energy-consumption-day.html> (2022 年 1 月 10 日アクセス).
- [3] 太陽光発電の 1 日の発電量, https://standard-project.net/solar/hatsudenryo_1day.html (2022 年 1 月 10 日アクセス).
- [4] 東京電力 主な選択約款, https://standard-project.net/solar/hatsudenryo_1day.html (2022 年 1 月 10 日アクセス).
- [5] 資源エネルギー庁 固定価格買取制度, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html (2022 年 1 月 10 日アクセス).