Vol.2013-SLDM-163 No.36
2013/11/28

沼島直流マイクログリッドの電源管理モデル化と最適化評価の一考察

池田岳穂[†1]　宮原良輔[†2]　福井正博[†3]

環境省・地球温暖化対策技術開発・実証研究事業「離島・漁村における直流技術による自立分散エネルギーシステム技術の実証研究」において、沼島直流マイクログリッドの電源管理モデル化を実施し、運用コスト、CO2 削減量、災害時の最低電力保障量などを最適化目的とした場合の構成法についての検討と評価を実施したので報告する.

Study for Modeling and Optimization of Power Management in Nushima DC Micro Grid

TAKEHO IKEDA[†1]　RYOSUKE MIYAHARA[†2]
MASAHIRO FUKUI[†3]

DC technique of the "Ministry of the Environment remote island fishing village Ministry of the Environment and global warming countermeasure technology development and demonstration research project In empirical studies "of independence distributed energy system technology by surgery, Nushima DC micro Conducted a power management model of the grid, the lowest power operating costs, CO2 reduction, in the event of a disaster The evaluation was carried out with consideration of a construction method of the case of the optimization purpose and security amount.

1. はじめに

近年，温室効果ガスによる地球温暖化が懸念される中，低炭素社会実現のための様々な取り組みが進められている．それらの中で，マイクログリッドは既存の大規模な発電所への依存率を減らし，小規模な分散型電源(太陽光発電，風力発電，バイオマス発電など)を有効活用することで，CO2 排出量を抑えることが期待されている．同システムでは，分散型電源の間欠的なエネルギー供給特性を補い，住宅，オフィス, 学校, などのエネルギー需要と適合させるよう，情報通信技術を利用してネットワーク全体を管理運転する必要がある．本研究では沼島で用いられるマイクログリッドにおいて，電力管理の目的（システム運用コスト、CO2 削減、災害時安全性など）のモデル化を行い，それらを最適化するための方法を提案すると共に，異なる目的間のトレードオフ関係を解明する．

2. 沼島マイクログリッドモデル

2.1 電源管理の目的

マイクログリッドの最適化を行う際に焦点を当てる指標を①CO2 排出量の削減，②マイクログリッド運用の総コスト削減，③災害時の電力供給確保の 3 つとする．

沼島マイクログリッドで用いられる発電方法は主に太陽光発電，風力発電の 2 つである．これらの再生可能エネルギーを用いることで CO2 排出量を抑えることができる. しかし, これらは出力が不安定という問題点がある. そこで, 蓄電池(本研究では全てリチウムイオン蓄電池)と併せて使用することで，余剰電力を貯め，電力不足時に使用する．しかし, 蓄電池の SOC が大きな領域での使用は蓄電池の寿命を早めてしまい運用コストを増大させる．そのため，蓄電池に充電上限を設けることで長期的なコストを削減する [1]．また，本研究では災害時における予備電力の確保ため常に蓄電池に一定量を充電しておくことも目的とする．これら 3 つの目的はトレードオフ関係が成り立ため、総合的に，より最適な運用方法を求める．

2.2 沼島マイクログリッドモデル

図 1 に沼島マイクログリッドの構成を示す.

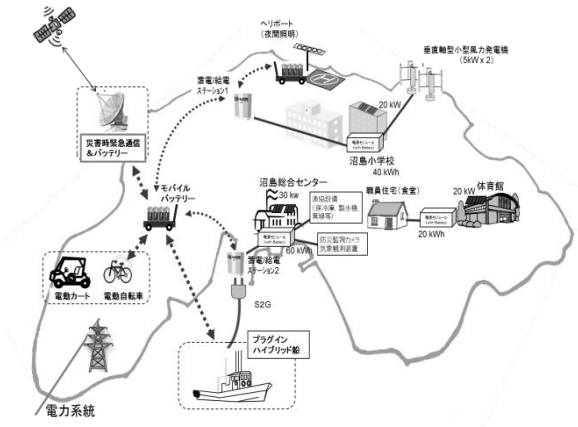

図 1：沼島マイクログリッド概略図

†1 立命館大学 理工学部 電子情報デザイン学科
Department of VLSI System Design, Ritsumeikan University
†2 立命館大学大学院 理工学研究科 電子システム専攻
Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University,
†3 立命館大学 理工学部 電子情報工学科
Department of VLSI System Design, Ritsumeikan University

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

主な建築物は

・沼島小学校(太陽光パネル 20kW, 風力発電機 5kW×2, 蓄電池 40kWh，モバイルバッテリー20kWh)

・沼島総合センター(太陽光パネル 30kW, 蓄電池 60kWh, モバイルバッテリー20kWh，PHV 船 20kWh)

・職員住宅(太陽光パネル 20kW，蓄電池 20kWh)

の 3 つである．モバイルバッテリーは蓄電／給電ステーションに接続することで充電および放電を行うことができ，各所へ持ち運びが可能な小型蓄電池である．図のモジュールと施設を繋ぐ直線は直流送電線である．

本研究のモデルは，より現実的なシミュレーションを行うため，送電ロス，直流・交流変換ロス及び蓄電池の充放電ロスを考慮に入れた上でシミュレーションを行う．各電力ロスは直流送電ロス 10%，DC/DC コンバータ変換ロス 5%，DC/AC コンバータ変換ロス 30%，蓄電池(SANYO 製)有効利用率 99.8%，モバイルバッテリー(中国製)有効利用率 80%，そして，各施設における発電量と消費電力量は現段階で実測値が得られていないので仮の値として全国平均の値を用いてシミュレーションを行う．また気温に関しては 2012 年 7 月の沼島の実測値を用いる. 各施設の発電量及び消費電力は次のように設定した.

・沼島小学校

発電量(太陽光パネルの平均発電量より)

消費電力量(企業の平均(平日，休日))

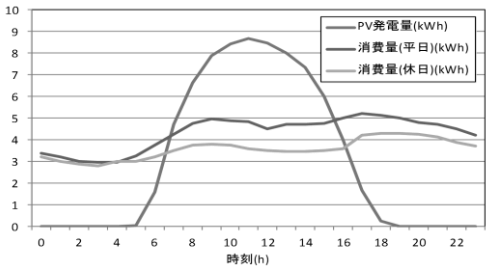

図 2 : 沼島小学校の 1 日の発電及び消費電力の推移(7 月)

風力発電機による発電量は 10kW の風力発電機の 1 日の平均発電量は 36kWh なので実際には発電量は変動しており一定では無いが，本研究では 1 時間に 1.5kW の発電を行うものとする.

・沼島総合センター

発電量(太陽光パネルの平均発電量より)

消費電力量(沼島小学校と同じものを使用)

PHV 船(実測値が無いため EV の充電パターンの実測値を用いる)

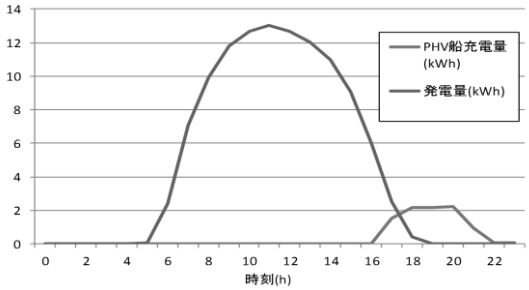

図 3 : 沼島小学校総合センターの 1 日の発電及び PHV 船の充電推移(7 月)

・職員住宅

発電量(太陽光パネルの平均発電量より)

消費電力量(一般家庭の全国平均)

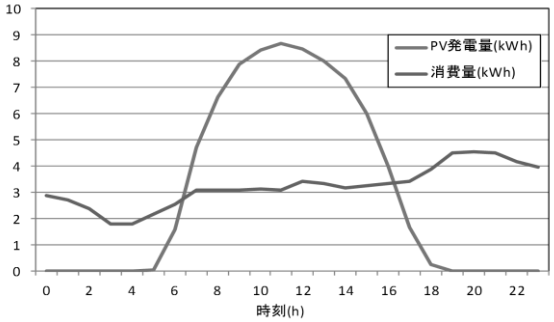

図 4 : 職員住宅の 1 日の消費推移

2.3 蓄電池劣化モデル

蓄電池劣化の主な要因はサイクル劣化及び保存劣化である．本研究では，リチウムイオン蓄電池を対象とする．サイクル劣化は充放電の繰り返しにより内部抵抗の増加，蓄電池の容量低下が生じる．容量劣化量は充放電時の環境温度，DOD(放電深度)，充放電速度による影響を受ける．放電深度は定格容量に対する放電量の比率(%)を表す． 保存劣化は保存時の蓄電池残量及び保存温度に影響される．蓄電池残量は, 一般に SOC(State of Charge)で表現される. SOC は満充電の状態を 100(%)，フル放電の状態を 0[%]，その間を残量(%)で表現する. リチウムイオン電池の定性的な劣化特性[2-5]に基づき，使用する劣化モデルを作成する.

2.4 災害時の予備電力確保

モバイルバッテリーは災害時において持ち運べる非常用電源として使用するため，そして有効利用率が 80%と低く劣化の進行も早いので本研究では使用せず常に満充電しておき，災害時に使用するものとする．定置型蓄電池はモバイルバッテリーと合わせて太陽光発電量が著しく低くなる 18 時から 5 時の間の 11 時間の消費電力を補う電力量を充電しておく必要がある．それぞれの定置型蓄電池に常に充電しておく値を SOC0%，30%，50%の 3 つに設定してシミュレーションを行う.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

3. シミュレーション方法

3.1 フローチャート

本研究で使用したプログラムのフローチャートの概略図を示す(図 5).

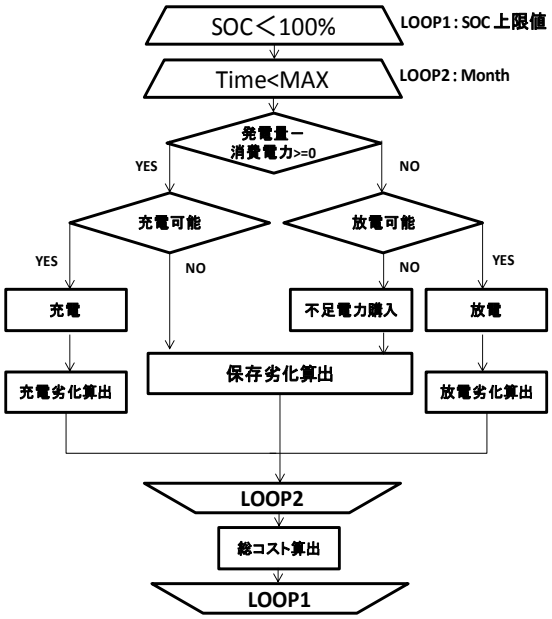

図 5： コスト算出フローチャート

1 ヶ月間の総コスト算出の流れは，一時間毎の発電量及び消費電力量を比較し発電量が多い場合は蓄電池に充電を行い充電による劣化を算出する. 蓄電池の充電量が SOC 上限値に達している場合，充電はせず保存劣化を算出する．逆に消費電力が多い場合は蓄電池から放電を行い放電による劣化を算出する．蓄電池の充電量が不足している，もしくは最低充電量まで充電量が減っている場合は系統から不足分を購入し保存による劣化を算出する．これらの計算を 1 ヶ月分行うことで(LOOP2)総コストを算出する．そして，SOC の上限値を最低充電量から 100%まで変化させてシミュレーションを行う(LOOP1).

3.2 評価方法

評価方法は 7 月の沼島小学校，沼島総合センター，職員住宅それぞれの 1 時間毎の発電電力及び消費電力による蓄電池の劣化を計算し, 1 ヶ月間の総コスト(円)を目的関数として算出する．沼島マイクログリッドモデルで述べた蓄電容量，PV パネル容量でのシミュレーションの他に，蓄電容量及び PV パネル容量をそれぞれ 2 倍にした場合のシミュレーションも行う．それぞれ SOC 上限値を最低充電量(%)から 100%で変化させて最適解を求める．評価式は次のように表す.

$$\mathrm{cost} = \alpha \times PV + \beta \times \left(De_{\mathrm{dis}} + De_{\mathrm{charge}} + De_{\mathrm{keep}}\right) + \gamma \times W\mathrm{b}$$

cost：一ヶ月間の総コスト

PV : PV パネル容量(kW)

De_{dis}：1 ヶ月の放電劣化(%)

De_{charge}：1 ヶ月の充電劣化(%)

De_{keep}：1 ヶ月の保存劣化(%)

$W\mathrm{b}$：1 ヶ月の購入電力(kWh)

α : 1 ヶ月での 1kWh 当たりの PV パネルコスト(本研究では 40 万円/kWh，耐用年数 17 年の PV を想定しており，α = 1960 円),

β ：1%の劣化に対する蓄電池の損失額(本研究では 20 万円/kWh の蓄電池を想定しており，劣化容量が 50%になった時を寿命と考えるので，β = 蓄電容量(kW) × 200000 × 1/50 円),

γ ：1kWh の電気料金(本研究では一律 24 円)

尚，本研究逆におけるマイクログリッドはできるだけ系統に頼らないことを目標としており，逆潮流は系統を不安定化するため考慮しない．また，CO2 排出量は次のように計算する.

CO2 排出量＝購入電力(kWh)×0.338(kg)[関西電力の CO2 排出係数]＋PV 発電量(kWh)×0.053(kg)[太陽光発電 1kWh 当たりの CO2 排出量]＋風力発電量(kWh)×0.029(kg)[風力発電 1kWh 当たりの CO2 排出量]

4. 実験結果

評価実験として蓄電池の SOC の上限値を設定した時の 7 月における各施設の総コストの最小値及び CO2 の排出量を求めた.

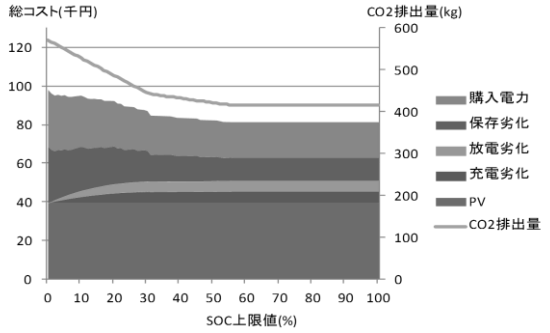

図 6：沼島小学校の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量 (最低充電量設定無し)

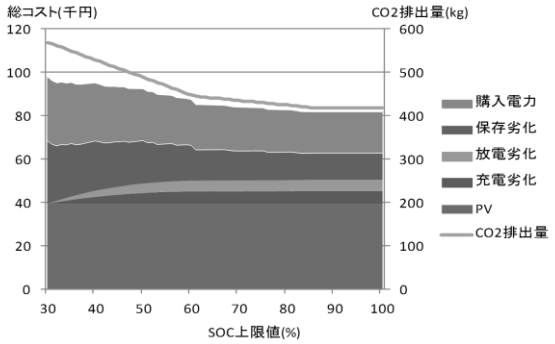

図 7：沼島小学校の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量 (最低充電量 30%)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

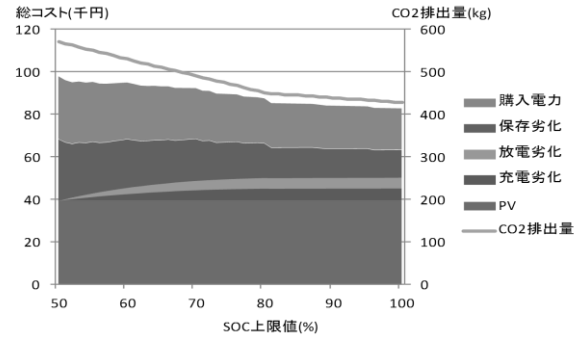

図 8：沼島小学校の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量
(最低充電量 50%)

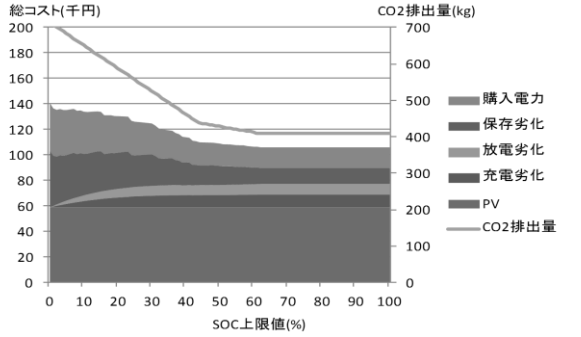

図 9：沼島総合センターの 1 ヶ月総コストと CO2 排出量
(最低充電量設定無し)

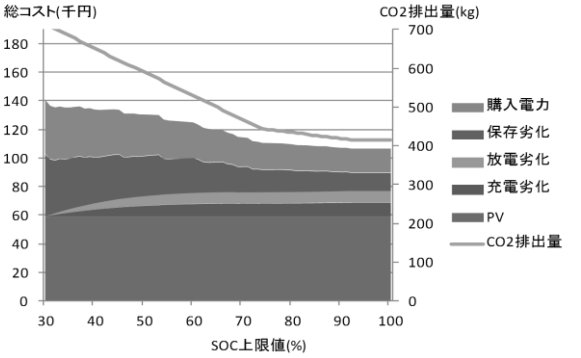

図 10：沼島総合センターの 1 ヶ月総コストと CO2 排出量
(最低充電量 30%)

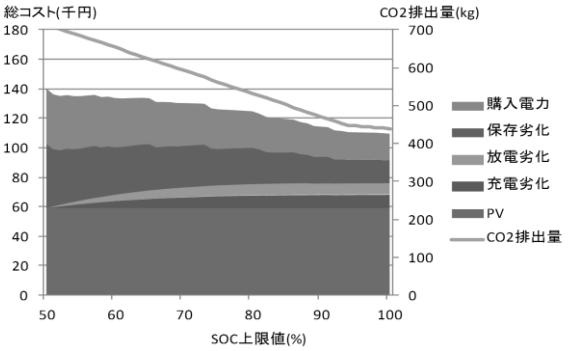

図 11：沼島総合センターの 1 ヶ月総コストと CO2 排出量
(最低充電量 50%)

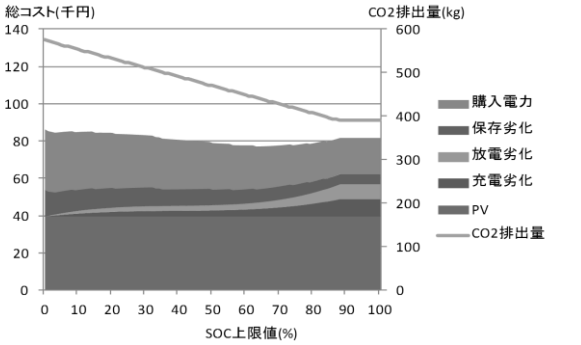

図 12：職員住宅の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量
(最低充電量設定無し)

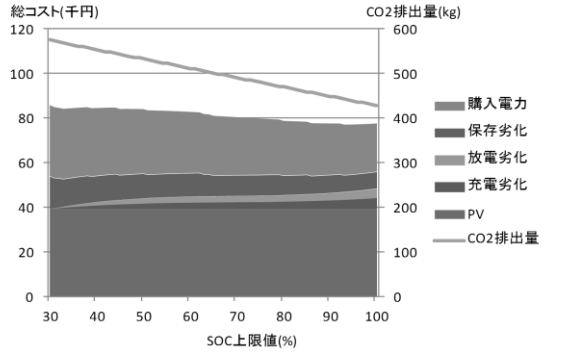

図 13：職員住宅の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量
(最低充電量 30%)

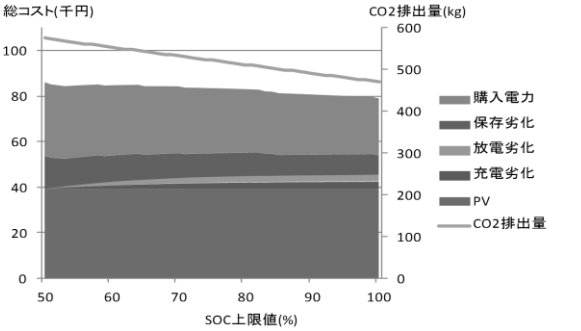

図 14：職員住宅の 1 ヶ月の総コストと CO2 排出量
(最低充電量 50%)

図 7 及び図 10 を見ると沼島小学校と沼島総合センターは余剰電力に対して蓄電池の容量が大きいため余剰電力全てを蓄電しても SOC がある一定の値までしか増加しないため上限値が一定値を超えると購入電力及び劣化による損失は変化しなくなり総コストは一定となる．沼島小学校は SOC 上限値が 56%, 沼島総合センターは 62%以上になると総コストは一定になり最小値になった．また，沼島小学校及び沼島総合センターの蓄電池は容量が大きく一度に行う充放電量が割合的に小さくなるため DOD の値が小さくなる．そのため劣化量も少ない．一方，図 13 より職員住宅は SOC 上限値が 63%のとき総コストは最小となり上限を設定しなかった場合と比べ約 6%コストを削減している．これは，蓄電容量が他の施設と比べ小さく余剰電力が割合的

に多いため SOC 上限値が高くなるにつれ充放電量が増加し，蓄電池に掛かる負荷が大きくなっているためと考えられる．各施設とも CO2 排出量は SOC 上限値が増加し購入電力の減少と伴に少なくなっており，蓄電池を使用しなかった場合と SOC 上限値を設定しなかった場合と比較して沼島小学校は約 150kg，沼島総合センターは約 300kg，職員住宅は約 200kgCO2 排出量を削減している．

最低充電量を設定した場合，各施設とも保存期間が増加するため保存劣化による損失が増加している．沼島小学校と沼島総合センターの最低充電量を設定しなかった場合と最低充電量を 30%，50%と設定した場合の総コストと CO2 排出量を比較すると(図 7-12)，最低充電量が増加すると総コストは全体的に増加しており，CO2 排出量は僅かではあるが増加している．これは，この 2 つの施設の蓄電容量が大きいため最低充電量を 50%に設定しても殆どの余剰電力を蓄電できるためと考えられる．

図 13-15 から職員住宅は最低充電量が増加するにつれ総コスト及び CO2 排出量は沼島小学校及び沼島総合センターと比較して増加の割合が大きい．これは蓄電容量が小さいため最低充電量を設定すると余剰電力を効率よく使用することができず系統から購入する電力が増加するためである．これらの結果を表にまとめたものを次に示す．カッコ内の値は最小値を取る際の SOC 上限値である．

表 1：沼島小学校の CO2 排出量と総コストの最小値

	SOC下限値なし	SOC下限値30%	SOC下限値50%
CO2排出量	415kg(56%以降)	418kg(86%以降)	428kg(100%)
総コスト	81285円(56%以降)	81575円(86%以降)	82783円(100%)

表 2：沼島総合センターの CO2 排出量と総コストの最小値

	SOC下限値なし	SOC下限値30%	SOC下限値50%
CO2排出量	409kg(62%以降)	415kg(92%以降)	438kg(100%)
総コスト	105662円(62%以降)	106256円(92%以降)	109583円(100%)

表 3：職員住宅の CO2 排出量と総コストの最小値

	SOC下限値なし	SOC下限値30%	SOC下限値50%
CO2排出量	390kg(89%以降)	428kg(100%)	470kg(100%)
総コスト	77015円(63%)	77169円(93%)	79015円(100%)

表 1-3 より SOC 下限値が上がるにつれ CO2 排出量及び総コストは増加していく．沼島小学校は SOC 下限値が 0%から 30%になることで CO2 排出量は 3kg，総コストは 290 円増加している．そして，SOC 下限値が 30%から 50%に変化することで CO2 排出量は 10kg，総コストは 1208 円増加しており SOC 下限値が 0%から 30%に変化した時と比べ 2 つの値の増加量は大きくなっている．そのため沼島小学校は SOC の下限値を 30%に，上限値の設定はせず使用することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができると考えられる．

沼島総合センターも同様に SOC 下限値が 0%から 30%に変化した時と 30%から 50%に変化した時を比較すると 30%から 50%に変化した時の増加量が大きく SOC 下限値を 30%，上限値は設定せずに使用することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができる．職員住宅は SOC 下限値が 0%から 30%になることで CO2 排出量は 38kg 増加し，総コストは 154 円と増加はしているが小さな値である．総コストが他の 2 つの施設と比較して増加量が低いのは SOC 下限値を 30%に設定することで購入電力は多少増えるが充放電を行う範囲が狭くなり蓄電池に掛かる負荷が減ったためである．SOC 下限値を 50%に変化すると CO2 排出量は 42kg，総コストは 1846 円増加している．CO2 排出量の増加量は SOC 下限値が 0%から 30%に変化した場合と比較してあまり大きな変化はないが総コストは大きく増加している．これは購入電力が増加したことによる．そのため，職員住宅は SOC 下限値を 30%に設定し，上限値を 93%に設定することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができる．

次に，沼島小学校は蓄電容量が大きく，充電スペースが余っていたので発電量を増やすため PV 容量を 2 倍にした場合のシミュレーションを行ったものを示す．

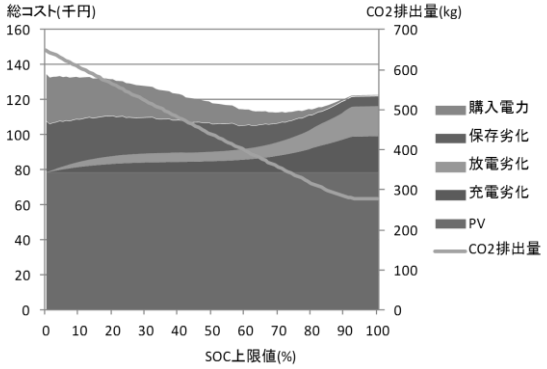

図 15：沼島小学校の 1 ヶ月の総コスト
(PV 容量 2 倍，最低充電量設定無し)

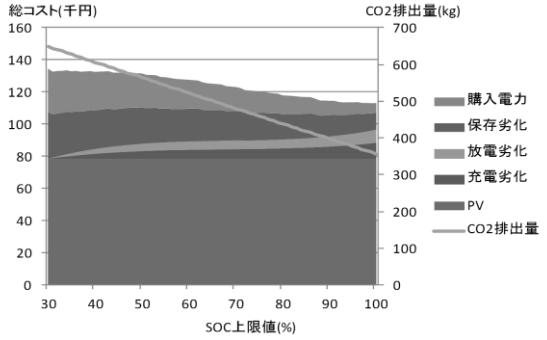

図 16：沼島小学校の 1 ヶ月の総コスト
(PV 容量 2 倍，最低充電量 30%)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

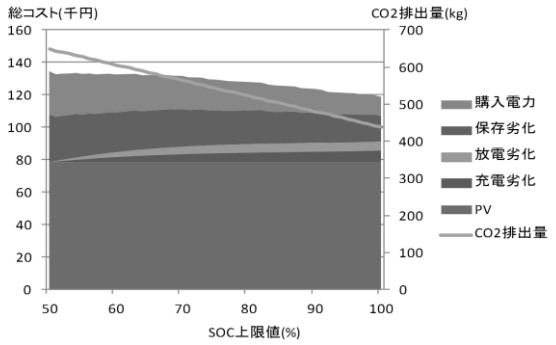

図 17：沼島小学校の 1 ヶ月の総コスト
(PV 容量 2 倍，最低充電量 50%)

PV 容量を 2 倍にすると減価償却額が増加し全体のコストが大きくなっている(図 16-18)．一方，購入電力は減少しており，SOC 下限値を設定しなかった場合(図 16)，SOC 上限値が 93%以降はほぼ 0 になっている．これらにより系統に殆ど依存せず消費電力を賄っていることがわかる．同時に蓄電池の充放電量が増加し充放電劣化による損失が大きくなっている．また，蓄電池の SOC 上限値が高くなるにつれ余剰電力を効率よく使用でき購入電力が小さくなっているため CO2 排出量の値も大きく減少している．削減量は蓄電池を使用しなかった場合と SOC 上限値を設定せずに使用した場合に比較して約 350kg となっており，PV 容量を変化させなかった場合の 2 倍以上も削減に成功している．

SOC 下限値を高く設定していくことで使える蓄電スペースが小さくなり，購入電力が少し増加し，また保存劣化による損失が大きくなっている (図 17，18)．これらの結果をまとめたものを次に示す．カッコ内の値は最小値を取る際の SOC 上限値の値である．

表 4：沼島小学校の CO2 排出量と総コストの最小値
(PV 容量 2 倍)

	SOC下限値なし	SOC下限値30%	SOC下限値50%
CO2排出量	278kg(93%以降)	357kg(100%)	438kg(100%)
総コスト	112410円(72%)	113093円(99%)	118428円(100%)

CO2 排出量は SOC 下限値を 30%, 50%と増加することで約 80kg ずつ増加している．総コストは約 600 円，約 5500 円と増加量が変化している．これは SOC 下限値を 30%に設定したことで充放電量が抑えられ DOD が小さくなっているためと考えられる．SOC 下限値を 50%にすると購入電力及び保存劣化が充放電劣化の減少量と比較して増加するため総コストが増加している．そのため沼島小学校は PV 容量を 2 倍にした場合も SOC の下限値を 30%に，また上限値は 99%に設定して使用することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができる．

5. まとめと今後の課題

本研究では沼島マイクログリッドモデルの詳細を決定し，コスト，CO2 排出量，災害時における充電量の 3 つの値を最適なものにするためシミュレーションを行った．そして，沼島小学校は SOC の下限値を 30%に，上限値の設定はせずに使用し，沼島総合センターも同様に SOC 下限値を 30%，上限値は設定せずに使用し，職員住宅は SOC 下限値を 30%に設定し，上限値を 93%に設定することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができると考えられるという結果が得られた．また，沼島小学校については蓄電池の容量を充分に使うために PV 容量を 2 倍にしてシミュレーションを行った．その場合も SOC の下限値を 30%に，また上限値は 99%に設定して使用することで災害時のライフラインの確保をしつつ CO2 排出量及び総コストを削減することができるという結果が得られた．

今回のシミュレーションに用いた発電量と消費電力量は一定のパターンで行っているので気象条件による発電量や日々の消費電力の変化を取り入れることができていない．そのため，今後は実測値を用いてシミュレーションを行う必要がある．また本研究では電力融通を考えていないが電力融通を用いた場合の効果についてシミュレーションも行っていく．また，発電量や消費電力の予測をしながら最適化を行う手法の開発に取り組む．

謝辞

本研究の一部は，環境省・地球温暖化対策技術開発・実証研究事業「離島・漁村における直流技術による自立分散エネルギーシステム技術の実証研究」の支援を得て実施した．

参考文献

1) M. Fukui, T. Tanaka, R. Miyahara, and S. Gora, "Cost-effective power management for smart house considering degradation of batteries," IEEE POWERCON, 2012.
2) J. Lopez, M. Godlez, J. C. Viera, and C. Blanco, "Fast-charge in lithium-ion batteries for portable applications," INTELEC, pp.19 - 24, 2004.
3)市村雅弘・下村誠・竹野和彦・代田玲美・高野和夫：「小形リチウムイオン電池の寿命特性」，信学技報，Vol.105，No.197，EE2005-16，pp.19-23, 2005.
4)瀬山幸隆・下薗武司・西山浩一・中村秀司・園田輝男：「産業用リチウムイオン電池「LIM シリーズ」の開発」，*GS News Technical Report*，Vol.62, No.2, pp73-78, 2003.
5)堀江利夫：「据置用リチウムイオン二次電池の特性評価」，*NTT Building Technology Institute*，pp.1-6, 2006.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan