

戦略的創造研究推進事業
(社会技術研究開発)
平成30年度研究開発実施報告書

「科学技術イノベーション政策のための科学
研究開発プログラム」
「レジリエンス強化のための
エネルギー機器導入制度設計」

上道 茜
(東京農工大学、特任助教)

目次

1. 研究開発プロジェクト名	2
2. 研究開発実施の具体的内容	2
2-1. 研究開発目標	2
2-2. 実施内容・結果	3
2-3. 会議等の活動	25
3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況	26
4. 研究開発実施体制	26
5. 研究開発実施者	27
6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など	28
6-1. シンポジウム等	28
6-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など	28
6-3. 論文発表	28
6-4. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）	29
6-5. 新聞／TV報道・投稿、受賞等	29
6-6. 知財出願（出願件数のみ公開）	30

1. 研究開発プロジェクト名

レジリエンス強化のためのエネルギー機器導入制度設計

2. 研究開発実施の具体的内容

2-1. 研究開発目標

本研究プロジェクトでは、「経済性と環境性の両立」、「地域レジリエンス強化」の異なる目的を達成することのできる「エネルギーBCP策定サポートツール」の完成を目指して、2種類のシミュレーションツールを構築し、これらのツールを活用したきめ細やかなエネルギー機器導入補助金制度設計を目指す。

本研究プロジェクトの最終的な成果物として期待される事柄を以下に示す。

1. 最適化計算による分散型エネルギー機器導入計画策定支援ツール（最適化ツール）を開発すること。
2. 上記によって得られた最適機器構成の有効性検証のためのエネルギーシステム詳細シミュレータ（詳細シミュレータ）を開発すること。
3. 本研究プロジェクトで開発するエネルギーBCP策定サポートツールをベースに新しい補助金施策を提案すること。

また、本プロジェクトの完成によってもたらされる社会への影響・効果を以下に挙げる。

- 災害拠点病院をはじめとする公共性の高い事業所への自家発電機の導入の有効性が認知されること。
- 自家発電機の導入による災害時のレジリエンス強化に関する定量的な議論が可能となること。
- 医療機関向け補助金施策についての現状を整理し、将来の補助金施策構想についての議論のベースを創出すること。

2-2. 実施内容・結果

(1) スケジュール

実施項目	17FY	18FY	19FY	20FY
	10～12月 1～3月	4～6月 7～9月 10～12月 1～3月	4～6月 7～9月 10～12月 1～3月	4～6月 7～9月
定期研究会の実施	●		●	●
(1) 従来の補助金制度に関する調査				
(1)-1 過去の補助金制度に関する網羅的調査		延長		
(1)-2 補助金に関わる実務者への聞き取り調査		延長		
(2) 災害拠点病院へのエネルギー需要調査				
(2)-1 アンケート調査票作成				
(2)-2 アンケート調査実施				
(2)-3 災害拠点病院を対象とした聞き取り調査				
(3) 最適化ツールの精緻化				
(3)-1 新しい「災害リスクモデル」の構築				
(3)-2 多目的最適化への変更				
(3)-3 機器故障確率の調査				
(3)-4 ガス・配管故障確率の調査				
(3)-5 既存ツールとカップリング				
(4) 詳細シミュレータの構築				
(4)-1 エネルギー機器データ収集				
(4)-2 各エネルギー機器モデル化				
(4)-3 集中型電源・分散型機器のカップリング				
(5) ケーススタディの実施				
(5)-1 エネルギー需要データの作成				
(5)-2 ケーススタディ計算				
(6) 補助金制度の提案				
(6)-1 本開発ツールを活用した補助金制度の検討				
(6)-2 ケーススタディに対する補助金施策提案				
(7) 評価と分析				
(7)-1 便益計測				
(7)-2 災害拠点病院を対象とした聞き取り調査				
(7)-3 補助金に関わる実務者への聞き取り調査				
(8) まとめ				

(2) 各実施内容

(目標1) 災害のエネルギーレジリエンス性の定量的評価のための需給シミュレーションツールの開発

実施項目 1-①: 最適構成の有効性検証のためシステムシミュレータの構築

実施内容: 各エネルギー機器をモデル化し、これらを組み合わせて病院エネルギーシステムシミュレーションツールを構築した。

実施項目 1-②: 災害拠点病院へのエネルギー需要に関する調査および需要モデル構築

実施内容: 実際に地震による停電被害を経験した災害拠点病院へのインタビュー調

査をもとに災害時のエネルギー需要モデルを構築した。

(目標2) 災害医療および省エネルギー機器導入政策に関する調査

実施項目 2-①：過去の省エネ機器導入補助金制度に関する網羅的調査

実施内容：補助金制度に関するインターネット上の公開資料をもとに過去の補助金制度に関して調査を行った。

実施項目 2-②：災害医療や自家発電機に関する実務者インタビュー調査

実施内容：災害医療や自家発電機に関して行政実務者やメーカー担当者にインタビュー調査を行った。

(3) 成果

(目標1) 災害のエネルギーレジリエンス性の定量的評価のための需給シミュレーションツールの開発

実施項目 1-①：最適構成の有効性検証のためのシステムシミュレータの構築

● 各分散型電源機器のモデル化

まず、各分散型電源機器のモデル化について概要を述べる。

1) ガスエンジン (GG) モデル

コージェネレーションシステムの構成機器のひとつである、ガスエンジンのモデルとして、山崎ら¹⁾が構築したエンジン平均値モデル (MVM: Mean Value engine Model) を用いる。MVMの構成要素を図1に示す。

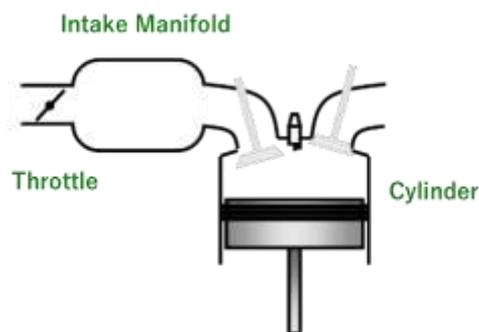


図1 MVMモデルで考慮するガスエンジン概略図。

MVMはスロットル、吸気マニフォールド、シリンダから構成され、ガスの流れをオリフィスモデルとタンクモデルを用いて再現し、各構成要素における温度と圧力を求める。ただし、吸排気バルブは考慮しておらず、連続的に吸排気が行われていると仮定している。また、シリンダでは連続的に燃焼が行われていると仮定しており、シリンダに投入される熱量から図示熱効率を求め、出力を求めている。

もともとのMVMは出力が数十キロワット級の小型のガスエンジンを想定し予混合気の

流量をスロットルで調整することで出力を制御するモデルであり、本研究で対象とした出力数百キロワット級の大型のガスエンジンは燃料噴射量を調整する点でそのメカニズムが異なる。しかしながら、発電効率をカタログ値に、負荷追従性を計測結果とフィッティングさせることで大型のガスエンジンモデルを構築した。

2) ディーゼルエンジンモデル

非常用ディーゼル発電機のエンジンモデルは、先述した MVM を参考にして構築した。ディーゼルエンジンにはスロットルバルブがなく、燃料噴射量のみで出力を制御している。そこで、DG モデルではガスの流れを省略し、MVM で考慮しているスロットルと吸気マニフォールドは構成要素として考慮しないものとした。そのためシリンダでの燃焼のみモデル化を行っている。また、DG の制御パラメータは噴射量であり、計測結果とのフィッティングを行うことで出力の応答を再現している。

3) 蓄電池 (ST) モデル

ST は西崎らのモデル²⁾を参考に構築した。蓄電池は太陽光発電システムの出力変動抑制のために用いられ、出力目標値と PV 出力を入力として、ST 出力と充電量を出力する。インバータの容量に上下限を設けており、通信システムと蓄電池動作の遅れと充放電効率も模擬したモデルとなっている。また、蓄電池の容量には上限を設けていないが、シミュレーションを行った際の最大充電量から必要な蓄電池容量を求めることができる。

4) 太陽光発電システム (PV) モデル

太陽光発電システムの出力は、太陽光パネルの発電効率と面積および日射量の積で表される。本研究では、日射量は東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館屋上に設置した日射計を用いて計測したデータを用いた。図 2 に実測した日射量の例を示す。なお、日射データのサンプリング間隔は 1 s である。

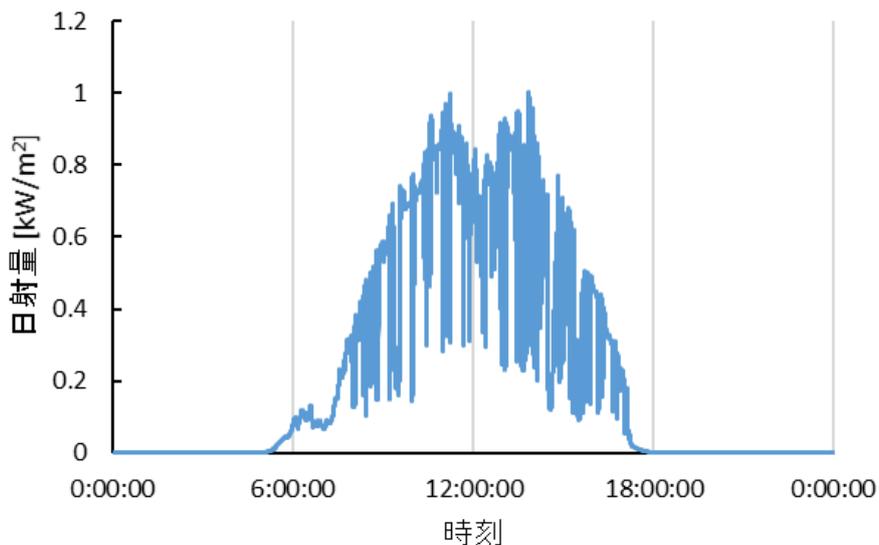


図 2 日射量の計測データ (2018年9月8日, 晴天)

● システムシミュレータの概要

図 3に示す，病院の電力システム³⁾を想定してシステムシミュレータを構築する．なお，図中のDGは非常用ディーゼル発電機，GGはガスエンジン（コージェネレーションシステムの一部），STは蓄電池，PVは太陽光発電システムを示す．また，C/D Controllerは充放電コントローラであり，STの充放電とPVの出力先の制御を行う．なお，通常，病院では手術室等の最重要負荷に対しては，DGが始動するまでの電力を供給するためのUPSが設置されているが，本研究では省略した．

なお，前年度に構築した最適化ツールについてSTに関する式を修正した結果，最適化ツールで得られる機器構成に含まれるSTの容量がほぼゼロという結果が得られた．これは，蓄電池の容量あたりの価格が非常に高価であることが理由である．しかしながら，後述するように，災害時の系統電力途絶時にPVの出力変動を抑制するためにはSTは不可欠である．そこで，STの容量については後述する方法でシミュレーションの結果から求めることにする．

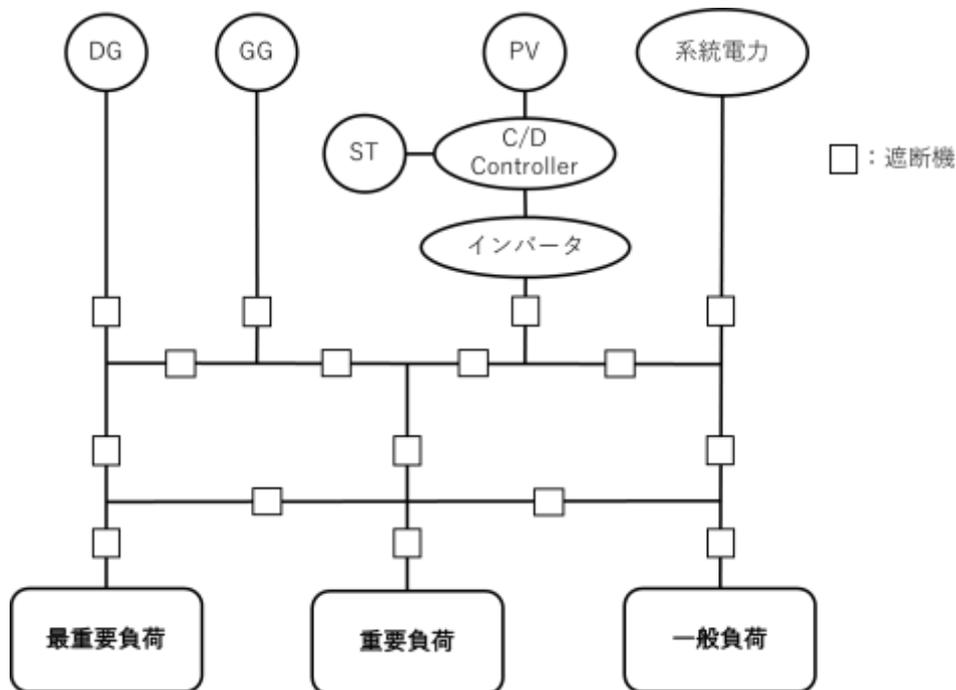


図 3 想定する病院の電力システム。

以降では、「災害時」は「災害によって系統電力が途絶した時」を、「負荷」は「電力需要」を意味するとする。

平常時には，系統電力，GG，PV，STで需要をまかなっている（図 4(a)）が，災害時にはDGが稼働する．負荷は，最重要負荷，重要負荷，一般負荷の3種類に分類することにして，平常時にはすべての負荷が系統電源へと接続されているが，災害時には必要に応じて遮断器を作動させ，重要度の高い負荷へ優先的に電力供給が行われる．

図 4(a)に示すように，平常時にはDGは解列されており，全ての負荷にGG，PV，系統電力から電力が供給されているが，このときの交流周波数は系統の周波数と一致している．また，PVの出力変動も系統電力により抑制することができるため，STを介すことなくイン

バータへ送られる。

一方、災害時には系統電力からの電力供給が途絶した信号を受けて、DG が運転を開始する。DG は単独運転時をする場合と GG との並列運転をする場合(図 4(b)) が考えられる。並列運転の場合は、DG と GG の2 台以上のエンジン発電機が同期させる必要がある。

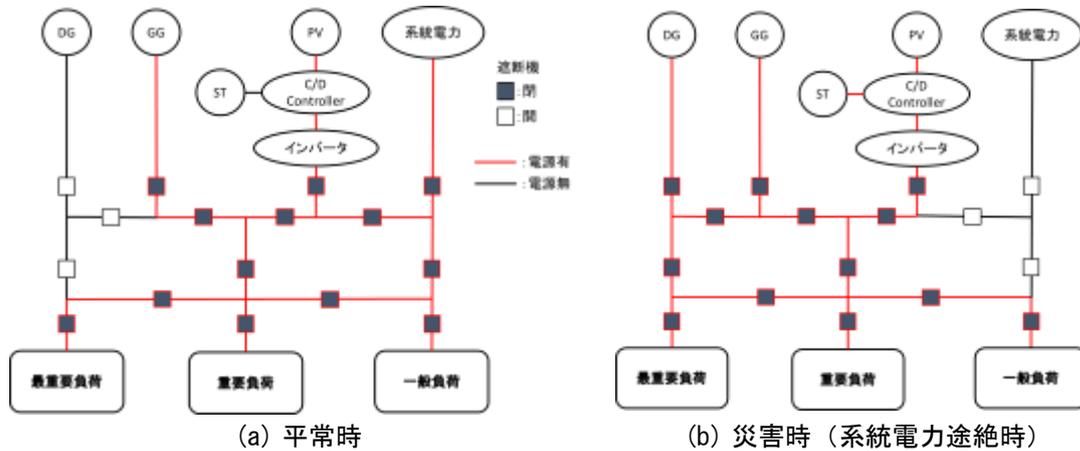


図 4 平常時 (a) および災害時 (系統電力途絶時) (b) の病院電力システム。

図 5 にシステムシミュレータの概要図を示す。このシミュレータによって系統電力途絶時の運用シミュレーションすることができる。各負荷ならびに電源にはスイッチが接続されており、これらは遮断機を模擬している。例えば、ガス供給が途絶した場合、GG の遮断機が開くことで解列される。また、多くの病院では、負荷を重要度で区別し、停電時には重要度の高い負荷へ優先的に電力供給が行われるシステムとなっている。そのため、シミュレータでは負荷を3種類に分けており、電力を供給する負荷の種類を選択することができる。

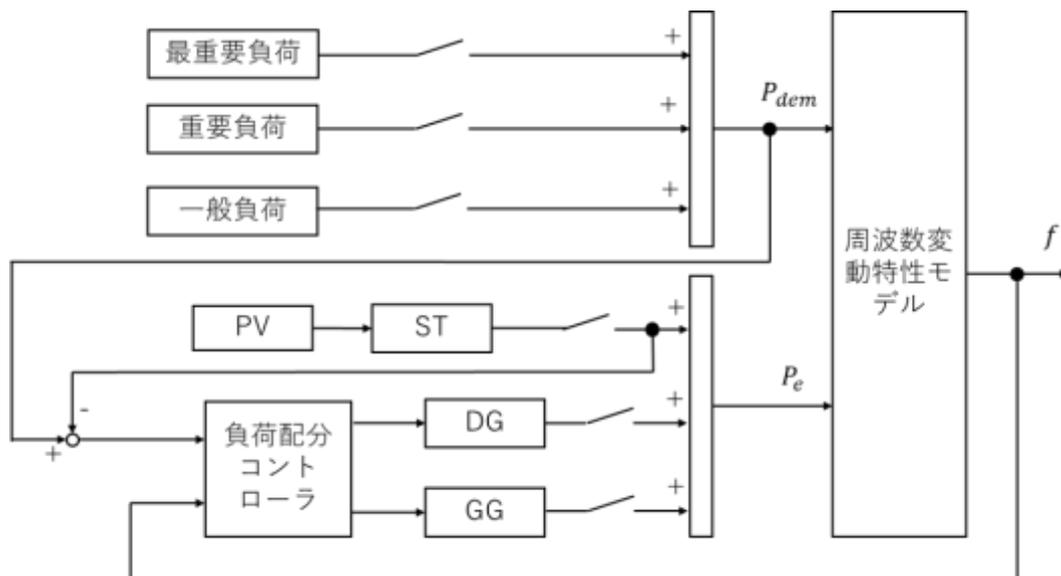


図 5 構築したエネルギーシミュレータの概略図。

● 負荷配分コントローラ

負荷配分コントローラは、周波数が目標値に収束するように DG と GG に出力目標値を出力する。周波数の目標値は、発電機のドループ特性¹⁾によって定められる。また、DG と GG が並列運転している場合は、DG と GG の負荷率が等しくなるように出力の目標値を DG と GG に出力する。

● 蓄電池を用いた太陽光発電出力の変動抑制手法

PV は出力変動が激しく、系統途絶時には PV は ST を介して出力される。したがって、ST の充電量を考慮した PV 出力の変動抑制手法が必要になる。PV の出力変動抑制を行う手法としては、実装が比較的簡単である移動平均法が広く用いられている⁴⁾。移動平均法を用いた際のある時刻 t における移動平均値 \bar{P}_{PV} は次式で表される。

$$\bar{P}_{PV}(t) = \frac{1}{T_m} \int_{t-T_m}^t P_{PV}(t') dt' \quad (3)$$

ただし、 T_m は移動平均時間を表す。 T_m が大きくなると変動抑制効果は大きくなるが、必要な蓄電池容量も大きくなる。

本研究では小熊らの手法⁵⁾を用いて、次式により蓄電池の出力目標値を求める。

$$u_{ST}(t) = \bar{P}_{PV}(t) - K(r_q(t) - q(t)) \quad (4)$$

ただし、 $u_{ST}(t)$ は蓄電池の出力目標値、 $r_q(t)$ は蓄電池充電残量目標値、 $q(t)$ は蓄電池充電残量現在値、 K はフィードバックゲインである。

これにより、蓄電池の充電量残量を目標値付近に保ちつつPV出力の平準化を行うことができる。

● 必要蓄電池容量の導出方法

本研究では、STの充電量 q の初期値に対する変化量から、最低限必要な蓄電池の容量を見積もる。以下ではその方法について述べる。

例として、シミュレーションを行った結果、充電量の初期値に対する変化量が図 6 のようになったとする。ただし、 q_{\max} と q_{\min} はそれぞれ充電量の変化の最大値と最小値を表している。このとき、必要最低限の蓄電池容量 $S_{ST,\min}$ は次式で表される。

$$S_{ST,\min} = q_{\max} - q_{\min} \quad (5)$$

すなわち、本研究では初期値に対する変化量の最大値と最小値の差を必要最低限の蓄電池容量と考えることにする。

¹ 自家発電機で、はエンジンの負荷が増加するにつれてガバナの速度調節の目標値を下げっていく特性をもたせた制御方法(ドループ制御)を採用している場合がある。ドループ制御においてエンジンの定格出力に対する負荷の割合でエンジン回転速度が決まる。このときの回転速度の傾きと周波数幅をドループ特性という。

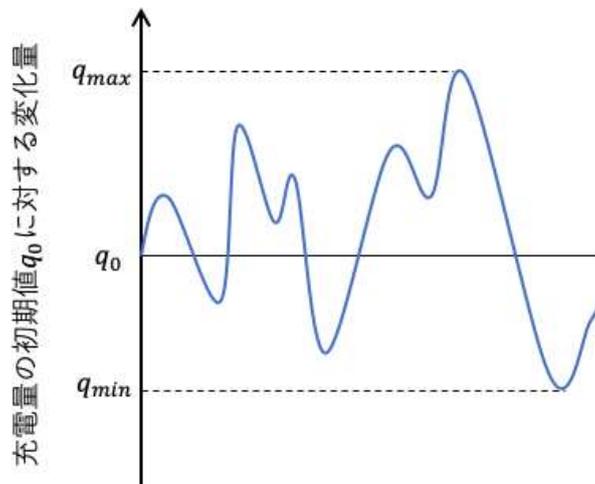


図 6 ST充電量初期値に対する変化量.

実施項目 1-②：災害拠点病院へのエネルギー需要に関する調査および需要モデル構築

以上に述べたシミュレーションツールを用いて災害拠点病院における災害時のエネルギー需給シミュレーションを行うためには、災害時の需要データが必要となる。しかしながら、災害時の事業所別の電力需要データとしてまとめたものは公表されていない。さらに、災害時にある事業所における電力需要データが取得できていたとしても、事業所が有する自家発電機の容量を超えないように節電を行った結果であると考えられることから、望ましい災害医療ニーズが反映されているとは考えにくい。

そこで、本研究では病院の災害医療ニーズにもとづいて電力需要モデルを構築することにした。まず、基本となる病院の電力需要モデルの構築手法を示した後に、平常時の需要モデルを構築し、実測データと比較して検証する。

● 基本とする需要モデルの構築

以下では、基本とする需要モデルの構築について述べる。

○ 需要モデルの変動成分の決定

まず、需要モデルの変動成分の周期を決めた。需要変動成分の周期とは、どのくらいの時間で需要の値を変化させるかを定めたものである。電力系統の需要変動成分は図 7に示すように、サステンド成分、フリンジ成分、サイクリック成分に分けられる⁹⁾。サステンド成分は20分以上の長周期の需要変動成分であり、他の成分よりも変動量大きいのが特徴である。フリンジ成分は数分から20分程度までの変動成分であり、サイクリック成分は数分までの変動成分である。フリンジ成分とサイクリック成分はサステンド成分よりも変動量が小さく、予測することが難しい。一方で、サステンド成分はある程度予測が可能である。

以上より、本研究では需要モデルの変動としてサステンド成分のみを考慮する。また、本研究では1時間ごとの電力需要を設定し、その間を線形補間することで秒オーダーの需要モデルを構築する。

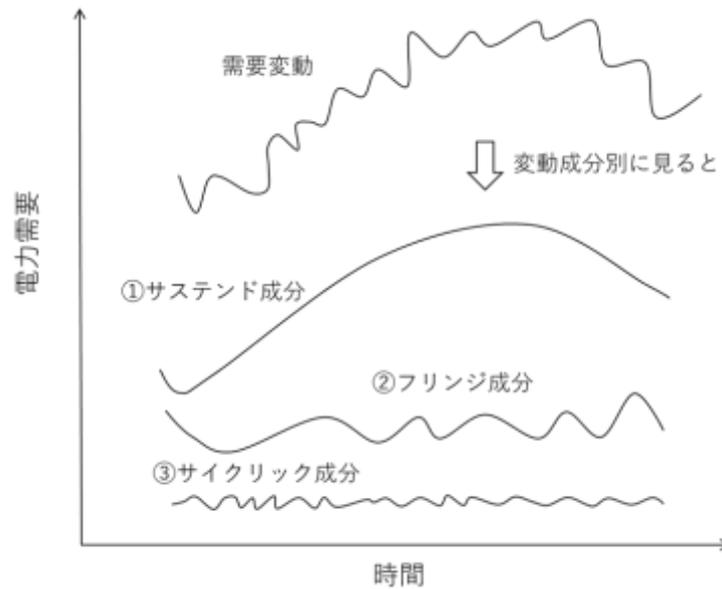


図 7 需要変動特性と変動成分⁶⁾.

○ 用途別需要成分の検討

関連研究として、病院における自家発電機の適切な容量の推定のために、医療機器の消費電力を調査した研究が挙げられるが⁷⁾、照明や空調を含めた病院全体の災害時電力需要モデルを構築した研究は存在しない。そこで負荷を照明や医療機器などの用途に分け、各用途の需要を足し合わせることで、病院全体の需要モデルを構築する。

図 8に平均的な医療機関における用途別消費電力割合⁸⁾を示す。図 8より、照明と空調を合わせると75%以上を占めており、OA機器とエレベータは4%ずつを占めていることがわかる。また、その他は様々な用途が考えられるが、本研究ではその他の用途としては医療機器のみを考慮する。

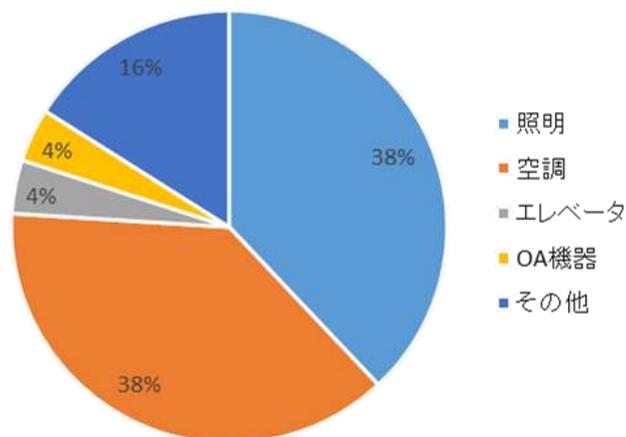


図 8 平均的な医療機関における用途別消費電力割合.

以上より、当該時刻における需要モデル $E(t)$ [kW] は、①照明、②空調、③医療機器、④

エレベータ，⑤OA機器の5つの用途で構成され，次式で表される．

$$E(t) = \sum_{k=1}^5 E_k(t) \quad (6)$$

ただし，添字の k は以下のように各用途を表す．

- $k = 1$ 照明
- $k = 2$ 空調
- $k = 3$ 医療機器
- $k = 4$ エレベータ
- $k = 5$ OA機器

例えば， E_1 は病院全体における照明の電力需要を表す．すなわち，各用途（①照明，②空調，③医療機器，④エレベータ，⑤OA機器）における消費電力の総和が需要モデルとなる．

なお，病院の部門としては以下を想定した．

- $l = 1$ 病棟
- $l = 2$ 外来
- $l = 3$ 中央診療部門
- $l = 4$ その他（廊下や事務室など）

○ 用途別の需要モデル構築の考え方

例として，医療機器の需要モデル $E_3(t)$ [kW] について述べる．リストアップした機器1台あたりの消費電力と稼働している機器数の積であると考え，次式で表される．

$$E_3(t) = \sum_{m=1}^{m_{med}} \alpha_{3,m}(t) W_{3,m} n_{med,m} \quad (5)$$

ただし，添字の m は医療機器の種類を表し， $\alpha_{3,m}(t)$ [-] は機器 m の負荷率， $W_{3,m}$ [kW]は機器 m の1台当たりの消費電力， $n_{med,m}$ [-] は病院が保有している機器 m の台数を表す．

例えば，病院内に機器 m が100台あり，時刻 t において30台が稼働している場合， $\alpha_{3,m}(t) = (30/100) \times 100 = 30\%$ となる．

表 1にリストアップした機器名と1台あたりの消費電力，100床あたりの機器保有台数を示す．消費電力と台数は，各機器のカタログ値⁹⁾と堀らの行ったアンケート調査⁷⁾を参考に決定した．なお，機器の負荷率は，個別に設定せずに，表1に示した用途ごとにまとめて設定する．

表 1 リストアップした医療機器1台あたりの消費電力と100床あたりの保有台数.

機器名称	用途	1台あたりの消費電力 [W]	100床あたりの保有台数
心電図	モニタリング	150	5.6
セントラルモニタ		253	16
ベッドサイドモニタ		119	2.8
パルスオキシメータ		64	24.8
血圧計		43	21.1
人工呼吸器	治療	285	7.5
除細動器		275	2.3
輸液ポンプ		25	43.1
シリンジポンプ		18	30
人工心肺装置		2472	0.2
大動脈バルーンポンプ		429	0.3
無影灯		112	2.5
手術台		470	2
電気メス		724	3.5
麻酔器		795	1.7
電気ドリル		37	1.2
吸引器		210	18.2
酸素供給装置		246	90.6
透析装置		1500	9.9
オートクレーブ		3560	1
X線		検査	45119
CT	33656		2
MRI	44591		2
超音波診断装置	842		13
血液ガス測定装置	164		2
血液凝固分析測定装置	164		1
血液分析装置	577		3

● 平常時のデータを用いた需要モデルの検証

前述の通り、災害時の需要データは存在しないため、構築した需要モデルの妥当性を災害時需要データで検証することはできない。そこで、先に述べた手法で平常時の需要モデルを算出し、BEMSなどを用いて計測された平常時の需要データと比較することで、需要モデルの妥当性を検証する。

○ 計算条件

延床面積20,000 m²、病床数200床の東京都の病院を想定する。表2に設定したOA機器とエレベータの台数を示す。

表 2 想定病院のOA機器とエレベータ台数設定.

機器名	台数
エレベータ	6台
デスクトップパソコン	80台
コピー機	10台
プリンタ	20台

負荷率は以下のように設定した. 負荷率は時間の関数であり, 本研究では1時間ごとに負荷率を設定する. また, 平常時需要モデルの負荷率を設定するにあたり, 以下の仮定をおく.

- 病床利用率は 80%とする¹⁰⁾.
- 外来は 9:00~12:00, 13:00~17:00 とする.
- 日中の手術室稼働率は 80%, 深夜の稼働率は 10%とする¹¹⁾.
- 冷房はセントラル方式ではなく, 全て電気エアコン (EHP) であるとする.
- 冬季は外来部門とその他の部門 (廊下や事務室など) の空調はセントラル方式であるが, 病棟と中央診療部門は EHP であるとする.
- 全ての負荷が系統と接続されているため, 最重要負荷, 重要負荷, 一般負荷の分類は行わない.

以上の仮定をもとに, 設定した病院の平常時の負荷率を設定した.

照明は, 部門ごとに負荷率を設定する. 図 9は平常時における照明の負荷率の設定である. 3.11以後節電意識は高まっており, 病棟部門は照明を間引いていると考えた¹²⁾. そのため, 他部門よりも負荷率を低く設定している. また, 外来部門と中央診療部門は昼休みがあるため12時前後に負荷率を減少させている.

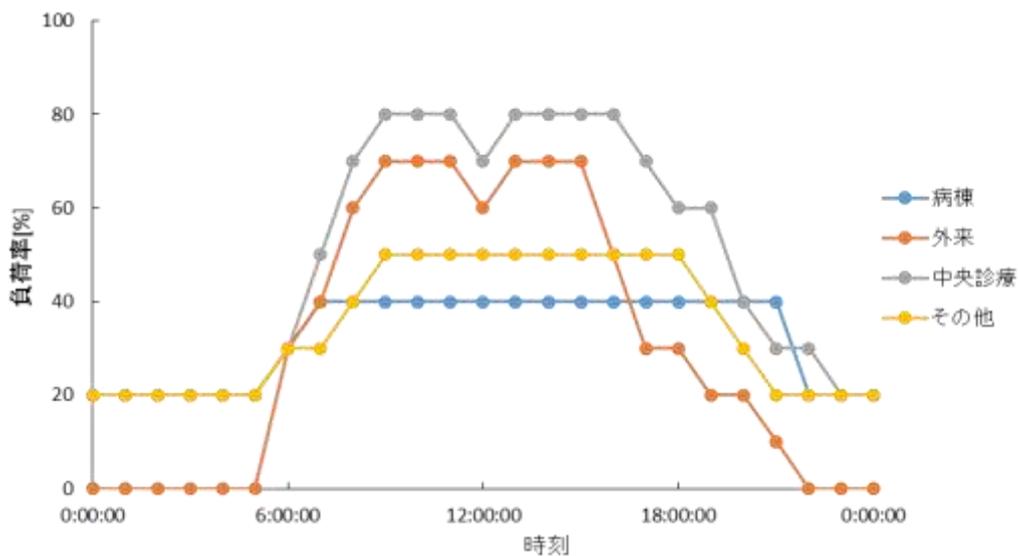


図 9 平常時における照明負荷率の設定.

空調負荷率は季節ごと, 部門ごとに設定した. 図 10に設定した負荷率を示す. 夏は冷房,

冬は暖房を用いているため、空調の負荷率は中間期よりも高く設定している。また、夏季は昼間に最も気温が高くなるため、昼間の負荷率を大きく設定している。さらに、冬季は外来部門とその他の部門はセントラル方式の空調を用いている仮定をしているため、空調による消費電力はない。そのため、負荷率を設定していない。また、中間期は冷房を仮定し負荷率を設定している。

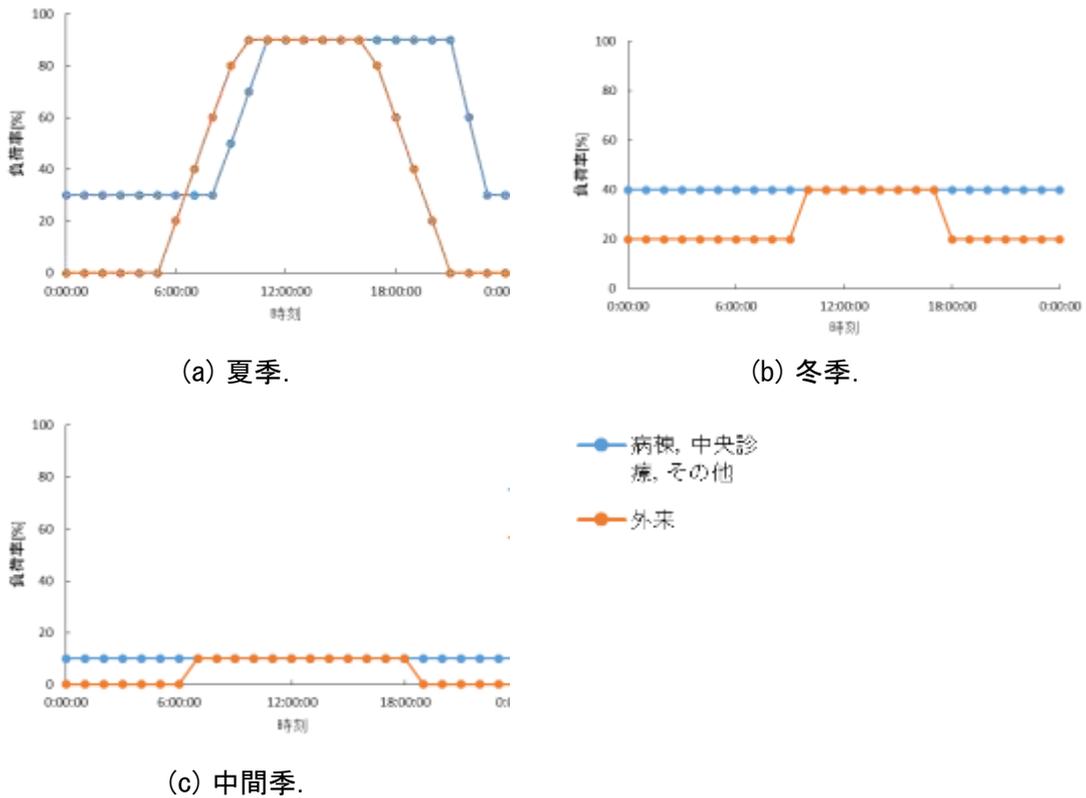


図 10 平常時の空調負荷率の設定.

医療機器は検査、治療、モニタリングの各使用用途ごとに負荷率を設定する。図 11に設定した医療機器の負荷率を示す。モニタリング用の機器は、病床にいる患者がすべてのモニタリング用機器を使用していると仮定し、病床利用率が80%であることから負荷率を80%に設定した。また、時間帯によらず一定の値としている。他方、検査・治療の機器は外来と手術の件数が多くなる昼間にピークを設定した。

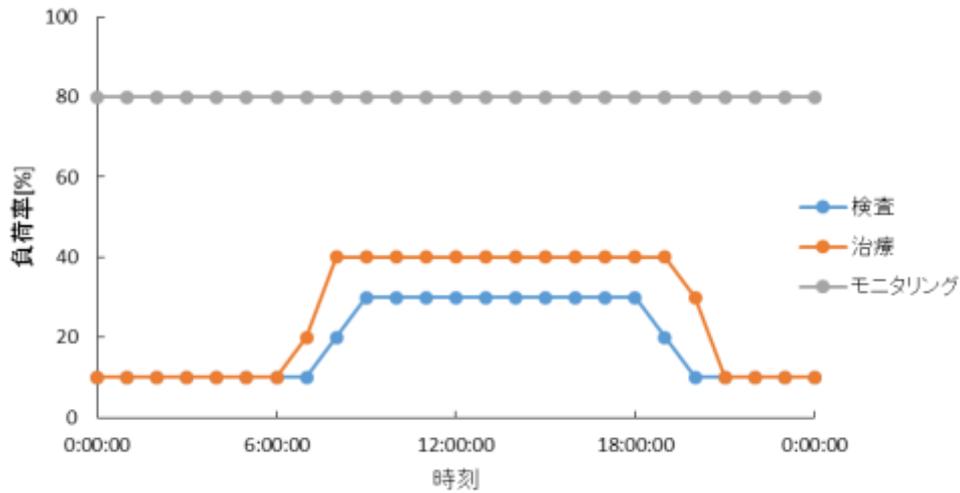


図 11 平常時における医療機器の負荷率の設定.

次に、エレベータ・OA機器の負荷率に関して説明する。これらは、医療機器と同様に外来と手術の件数が増える昼間にピークを設定している。

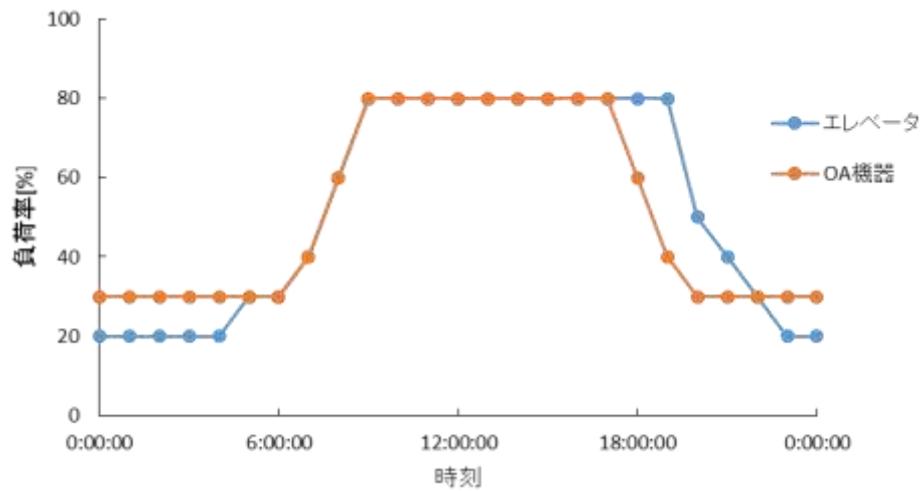


図 12 平常時のエレベータ, OA機器の負荷率の設定.

以上で構築した平常時の需要モデルと病院の電力需要の実測データの比較を行い、需要モデルの妥当性を検証する。比較するデータには、HEAJが調査した、BEMSによる実測データを用いる。比較に用いる病院の詳細を表3に示す。

表 3 比較に用いた病院の情報¹³⁾.

データ	地域	竣工年	種別	規模
A	寒冷地	2004	国公立	中
B	温暖地（関東・中部）	1998	大学	大
C ²	-	-	-	-

また、データCとして、「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル2008」¹⁴⁾に示されている病院の電力需要データを用いた。データCは、建物別に調査された電力負荷標準データであり、昨年度に開発した最適化ツールで分散型電源の最適機器容量を計算する際に用いたものである。

図13に夏季、冬季、中間期の結果を示す。なお、グラフの縦軸は単位延床面積あたりの電力需要である。なお、堀らの研究⁷⁾によって病院の延床面積と電力需要は概ね比例関係にあることが分かっているため、本研究では単位延床面積あたりの電力需要で比較をしている。

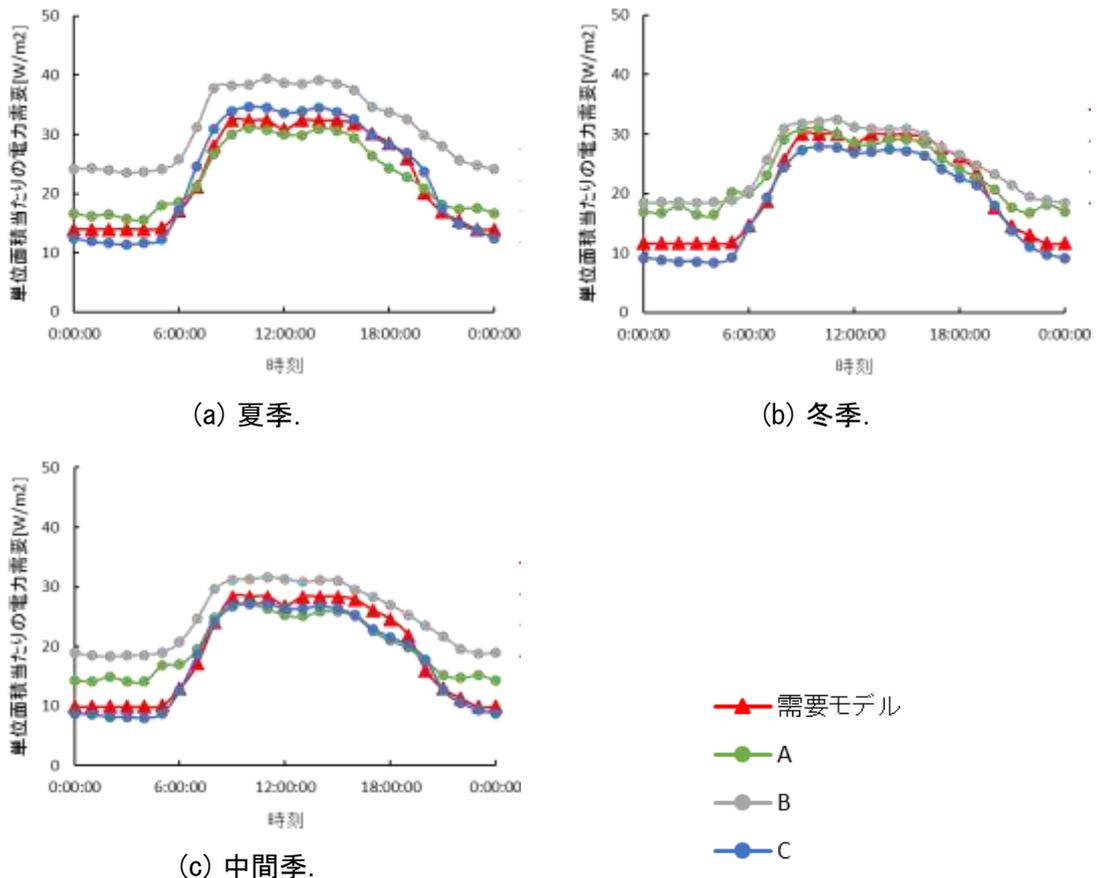


図 13 平常時における季節別病院需要データと構築した需要モデルの結果の比較。

図 13より、需要モデルはいずれの季節においてもデータCとかなり近い結果となった。0時から5時までの時間帯と、夏季と冬季の昼間、中間期の夕方はデータCと若干異なった値

² 建物別に複数の電力負荷を計測し、地域差や規模によらない標準データとして設定されたものである。

となっているものの、いずれもデータAまたはデータBと、データCとの間の値であるため、問題ないと考えた。また、データAからデータCまでの間でも単位延床面積あたりの需要にばらつきがあるが、実測データは昼間に需要のピークを迎え、夜間の需要は昼間よりも少ないことがわかる。需要モデルはその傾向を表現することができている。以上より、需要モデルの妥当性が示されたと考える。

次に、以上に述べた平常時の需要モデルを基準として、北海道胆振東部地震を想定した仮想病院における災害時の電力需要モデルを構築した。なお、時系列データの構築作業に当たり、札幌市内の災害拠点病院でインタビュー調査を行った。

● 災害拠点病院へのインタビュー調査に基づいた需要モデルの構築

北海道胆振東部地震は2018年9月8日に実際に起きた災害である。そこで、被災した病院関係者からヒアリングを行うことで、災害時における病院の機能が平常時とどう異なったかを明らかにできると考えた。ここでは、北海道胆振東部地震によって停電が発生した地域の災害拠点病院を想定した需要モデルについて示す。

北海道胆振東部地震は、2018年9月8日午前3時8分頃に発生した地震である。地震により苫東厚真火力発電所でボイラー管が破損したことから2基の施設が緊急停止し、供給電力と需要電力のバランスが崩れたことにより連鎖的に他の発電所が停止し、北海道全域にわたって系統電力が途絶し、大規模停電が発生した（ブラックアウト）。

本研究グループでは、地震発生後、研究協力者にご紹介いただき、札幌市内基幹災害拠点病院にインタビュー調査を行った。調査対象の災害拠点病院は、約900床の病床を有す大規模病院であり、延床面積は約90,000 m²である。

インタビュー調査により得られた2018年9月8日のタイムラインを整理し、これを受けて、今回構築する需要モデルは、発災当日午前3時から午後4時までを対象とすることにした。また、通常外来は停止した場合であるとする。

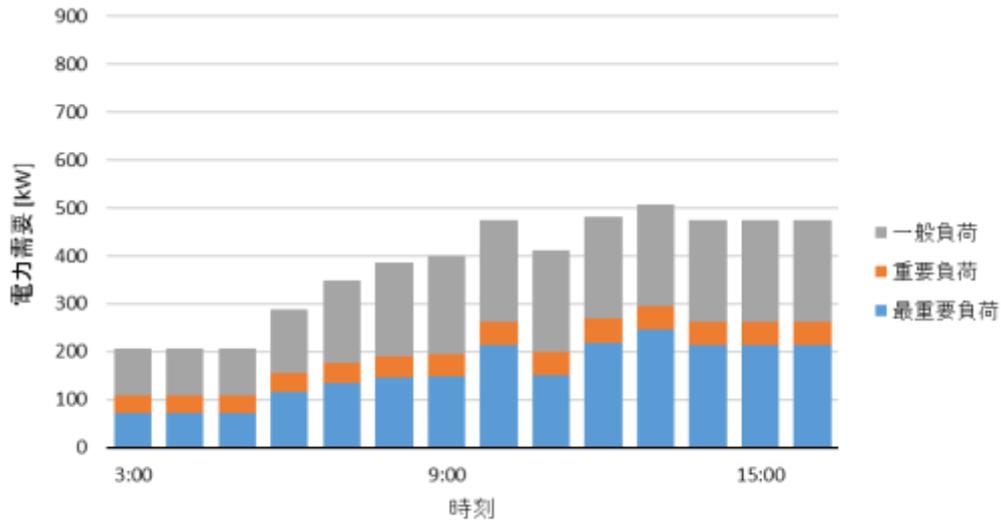
当時、病院の非常用発電機は問題なく作動し、供給は需要を充足されたことがインタビュー調査よりわかった。しかしながら、複数台ある非常用発電機の発電量の実績値は取得できず、今回構築した需要モデルの検証は行うことはできていない。

なお、対象とした災害拠点病院の所在地では震度4と大きな震度ではなかったため、今回のインタビュー調査で得られた災害医療の情報は、地震による直接の影響で受けた外傷によって搬送された患者はなく、停電による間接的な外傷（転落事故など）および他病院からの移送、平常時と同様の救急医療（脳卒中）であったことに注意されたい。

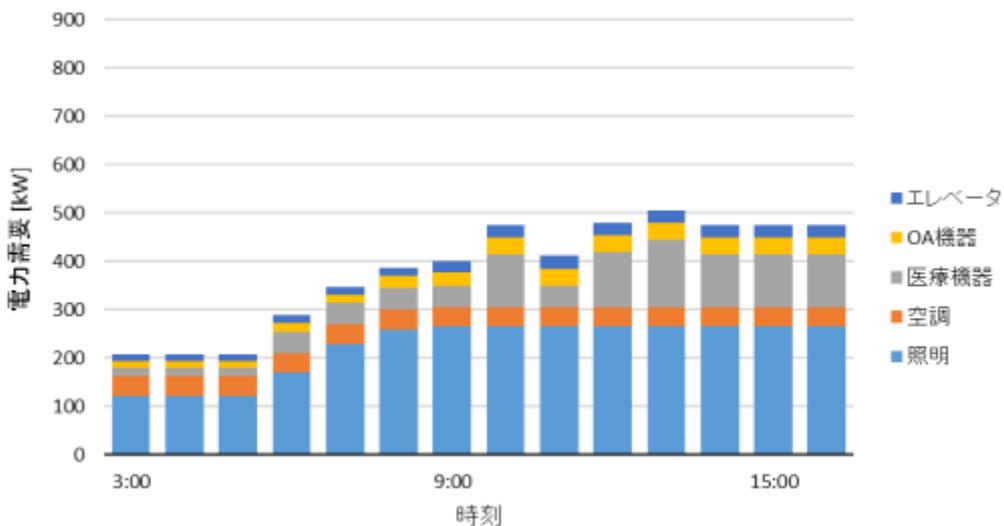
以下に、災害時の電力需要モデルの構築手順を示す。

- ① 病院内の機器の台数を想定し、負荷の種類分け（最重要負荷、重要負荷、一般負荷）を行う。
- ② 想定する災害による被害を見積もり、来院患者数と疾患・外傷の種類を見積もる。
- ③ 負荷を使用する割合（負荷率）を時間ごとに設定する。
- ④ 負荷率から各用途の消費電力を求め、病院全体の電力需要を計算する。

図 14 に、札幌市内における北海道胆振東部地震下で想定される災害時の電力需要を示す。



(a) 負荷別.



(b) 用途別.

図 14 札幌市内における北海道胆振東部地震下で想定される災害時の電力需要.
延床面積10,000 m².

図 14(a)より、重要負荷が最重要負荷・一般負荷と比較すると少ないことがわかる。これは、重要負荷は空調がメインであり、今回は中間期を仮定しているため少なくなったと考えられる。また、重要負荷には外来部門の照明が割り当てられているが、今回は外来を停止していると仮定しているため、外来部門の照明負荷がなかったことも理由として挙げられる。

次に図 14(b)より、昼間は照明が最も大きな割合を占めており、その次に医療機器が大きいことがわかる。また、病院全体の需要モデルは10時・12時と比較して11時に70 kW程度小さくなるが、これは医療機器が影響していることがわかる。

● ケーススタディ

○ ケーススタディのシミュレーション条件

本研究では延床面積が20,000 m²、病床数200床の仮想病院を対象とする。機器容量と変動抑制パラメータを表 4に示す、ケース(A)から(F)までの6通りの条件でケーススタディを行う。ケース(A), (C), (E), (F)はガス供給が途絶した場合を想定しており、GGは考慮していない。また、PVの容量は太陽光パネルの面積で表している。なお、STの容量はシミュレーション結果から必要な容量を求める。また、日射データは図 2に示した2018年の9月8日に東京で測定したデータ（晴れの日）を用いる。

表 4 シミュレーションの設定.

Case	分散型電源機器の容量			変動抑制パラメータ	
	DG [kW]	GG [kW]	PV [m ²]	T_m [s]	K [kW/kWh]
(A)	280	/	300	60	5
(B)	280	350	300	60	5
(C)	500	/	300	60	5
(D)	500	350	300	60	5
(E)	280	/	300	300	5
(F)	280	/	300	300	50

○ 必要蓄電池容量の検討

以下では、蓄電池容量を検討した具体例を示す。さらに、シミュレーション結果から一般的な知見を得る。なお、北海道胆振東部地震を想定した需要モデルの最重要負荷と重要負荷の和を災害時の負荷（需要）として与えた。

・ 移動平均時間とフィードバックゲインが必要な蓄電池容量に及ぼす影響

移動平均時間 T_m とフィードバックゲイン K が必要な蓄電池量へ及ぼす影響を調査するため、ケース(A)、ケース(E)、ケース(F)それぞれの充電量の変化を図 15に示す。なお、図は縦軸は充電量の初期値に対する変化量であり、12時から15時までの結果を重ねて示したものである。なお、充電量の変化はDGとGGの容量に関係なく、PVの容量が一定であれば T_m と K により決定されるため、ケース(B)からケース(D)までの充電量の変化もケース(A)と同じ結果となる。

必要な蓄電池容量を見積もると、以下のようになった。

- ケース(A) : 1.6 kWh
- ケース(E) : 5.5 kWh
- ケース(F) : 4.1 kWh

このことから、ケース(A)とケース(E)の結果を比較すると、移動平均時間 T_m を大きく設定したケース(E)の方が充電量の変化が大きく、必要な蓄電池の容量が大きいことがわかる。また、ケース(E)とケース(F)の結果を比較すると、フィードバックゲイン K を大きく設定したケース(F)の方が充電量の変化が小さく、必要な蓄電池の容量が小さいことがわかる。

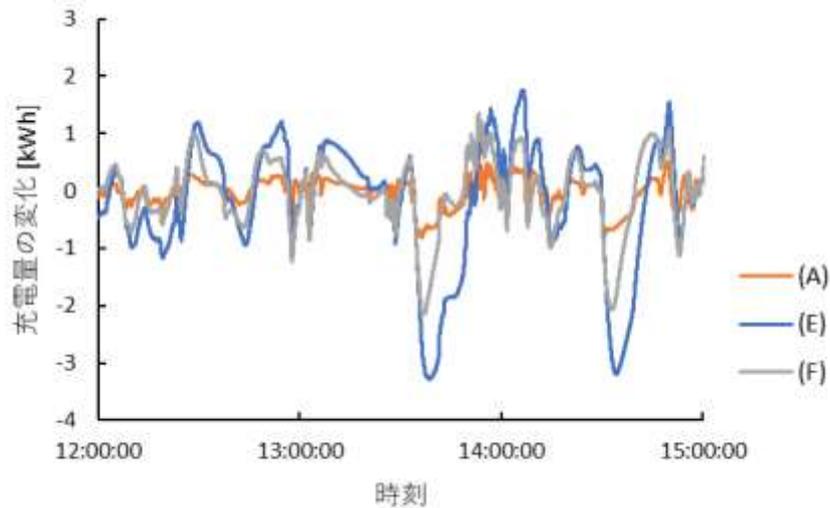


図 15 ケース(A)，ケース(E)，ケース(F)の12時から15時までの充電量の変化。

このように，STに与えるPV変動抑制を目的としたパラメータに依存して，本シミュレータを用いた結果から算出される最低限の蓄電池容量が変化する。

○ 構築したシステムシミュレータを用いたエネルギーレジリエンス性の評価

構築したシステムシミュレータを用いたシミュレーション結果から，ここでは，災害時の電力需要に対する「需要充足性」をレジリエンス性の評価指標として提案する。「需要充足性」とは，設定した機器の容量の範囲内で，災害時の電力需要を充足することができるかどうかを評価する指標である。すなわち，図 16に示すように発電機の時系列出力のシミュレーション結果を用いて，いずれの時刻においても発電機の出力が許容値の範囲内であれば「需要充足性がある」，少しの間でも許容値を超えてしまった場合は「需要充足性がない」と評価する。

災害時需要モデルとシステムシミュレータを用いて発電機の出力をシミュレーションし，この需要充足性評価指標を用いることで，災害時の電力需要に対して電力を供給できないかという判断をすることができる。さらに，複数の天候パターンでのシミュレーションを行うことで，天候ごとの電力供給の可否を評価することができる。

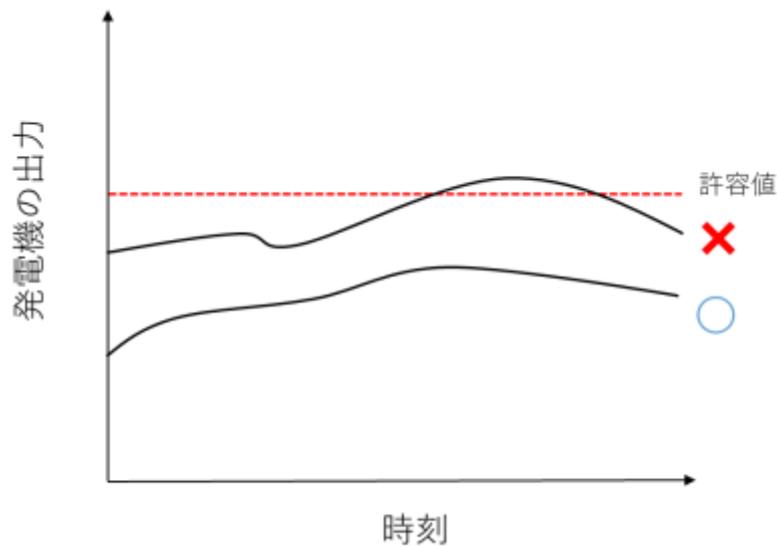


図 16 提案するレジリエンス性の評価指標の概要.

構築した北海道胆振東部地震を想定した需要モデルを用いてシミュレーションを行い、発電機の出力量を検証する。

まず、晴れの日の日射データを用いた場合のDGの出力量を図 17に示す。グラフの縦軸は、DGの定格値に対しての出力量の割合を示している。また、図中の赤い点線は許容値（定格値）のラインである。なお、ケース(B)とケース(D)のGGの定格値に対する出力は負荷配分コントローラによってDGと等しくなるように制御され、DGとほぼ同じ出力になるため示していない。

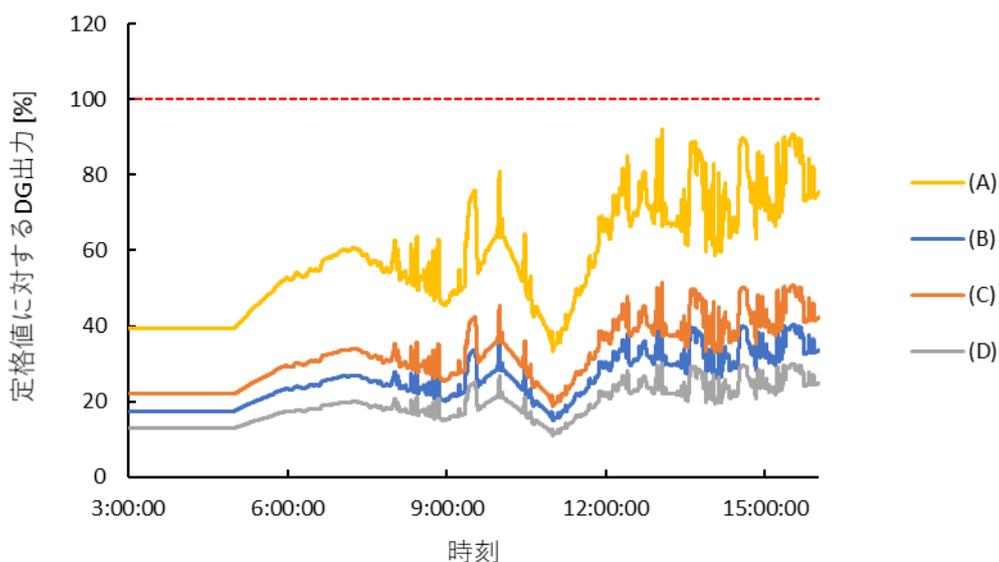


図 17 北海道胆振東部地震を想定した需要モデルに対する晴れの日のDG出力

次に、雨の日の日射データを用いた場合のDGの出力量を図 18に示す。図より、DGの出力量

は定格値の範囲内である。したがって、ケース(A)から(D)までのいずれの機器容量でも需要充足性があると評価する。しかしながら、ケース(A)のDG出力は定格値をオーバーしていないものの、最大値が99.7%と定格値にかなり近い値である。もし雨の日にケース(A)の容量の発電機で電力を供給した場合、需要モデルで考慮していない負荷の変動などの影響で定格値をオーバーしてしまう恐れがある。したがって、機器導入量を検討する際には、ケース(B)よりも若干大きな容量の機器を導入することが望ましいといえる。

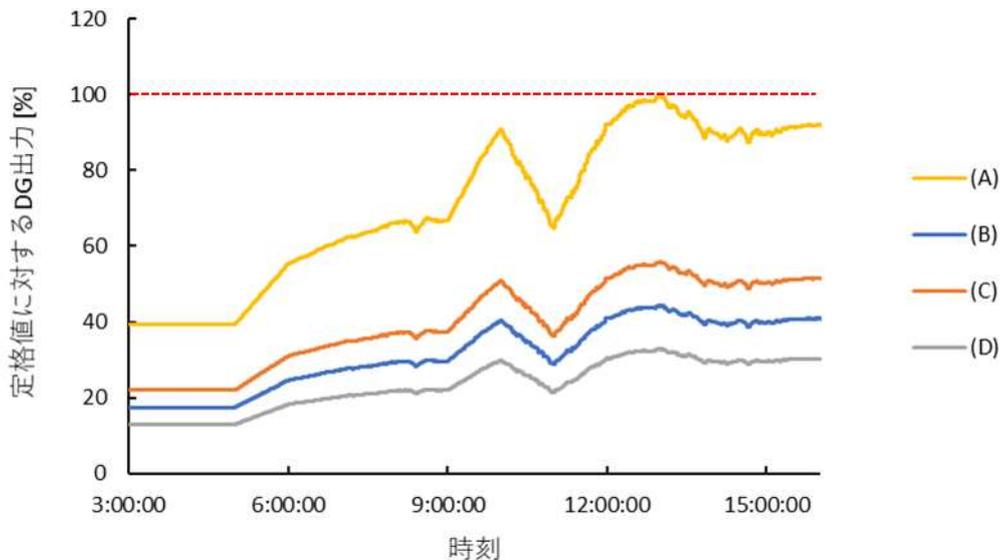


図 18 北海道胆振東部地震を想定した需要モデルに対する雨の日のDG出力

(目標 2) 災害医療および省エネルギー機器導入政策に関する調査

実施項目 2-①：過去の省エネ機器導入補助金制度に関する網羅的調査

前年度に引き続き、省エネルギー機器導入に関する補助金制度について調査を行った。調査対象は、直接補助金（ある活動に要する費用の全額ないし一部を財政から直接提供するもの）のみとし、なかでも、分散型電源機器（コージェネまたは再生可能エネルギー）導入に関する事業者向けの補助金事業とした。

中央省庁（経済産業省、環境省、国土交通省）、地方自治体（都府県単位および基礎自治体単位）が実施する補助金制度についてインターネット上の公開情報に基づき、基本情報をまとめ、対応するレビューシートより政策評価状況について調査した。

省エネルギー性に関しては、省エネルギー機器導入前の二酸化炭素排出量や一次エネルギー消費量を基準に新たに機器導入によってどの程度これらの量が削減できるかというのを申請時に報告する形式であった。

また、省エネルギー性およびレジリエンス性向上の両方の目的で運用されている補助金制度を抽出し、レジリエンス性に関する政策上の評価指標について調査を行ったが、レジリエンス性の定量的な評価方法が明確に記載されているものは、調査を行った中では見当たらなかった。

実施項目 2-②：災害医療や自家発電機に関する実務者インタビュー調査

災害医療政策および自家発電機に関して実務者へのインタビュー調査を行った。表 5 にインタビュー調査実施リストを示す。

表 5 災害医療や自家発電機に関するインタビュー調査実施リスト.

日時	目的	調査対象
2018/5/18	災害医療政策に関する調査	政策実務者（地方行政）
2018/8/16	災害医療政策に関する調査	政策実務者（中央官庁）
2018/8/20	コージェネレーションシステム、非常用発電機に関する調査	自家発電機メーカー
2018/9/12	コージェネレーションシステム、非常用発電機に関する調査	自家発電機メーカー
2018/9/13	コージェネレーションシステム、非常用発電機に関する調査	自家発電機メーカー
2018/10/11	病院の設備設計計画手法に関する調査	設計会社

（４）当該年度の成果の総括・次年度に向けた課題

本年度の実施項目の結果を以下にまとめる。

（目標 1）災害のエネルギーレジリエンス性の定量的評価のための需給シミュレーションツールの開発

実施項目 1-①：最適構成の有効性検証のためシステムシミュレータの構築

- 各種パラメータをカタログ値などから求め、各エネルギー機器のモデル化を行った。ガスエンジンおよび非常用ディーゼル発電機については、計算時間が十分に短くなるように平均値モデルを採用した。
- これらを組み合わせて、病院のエネルギーシステムシミュレーションツールを構築した。
- 次年度は、最適化ツールによって求められた自家発電機構成を病院の電力システムとして災害時の電力需給シミュレーションを行う。

実施項目 1-②：災害拠点病院へのエネルギー需要に関する調査および需要モデル構築

- 実際に北海道胆振東部地震による停電被害を経験した札幌市内災害拠点病院へのインタビュー調査をもとに災害時のエネルギー需要モデルを構築した。
- 構築した需要モデルを用いて、架空の災害拠点病院についてケーススタディを行った。自家発電機の容量や制御パラメータによって、蓄電池の最小導入量が異なることがわかった。
- ケーススタディの例として、晴れの日と雨の日の両方のパターンについて、災害時需給シミュレーションを行い、需要充足性を検討した。想定したケーススタディでは、雨の日には太陽光発電パネルの発電量が小さく、需要が充足できない可能性もあるため、最適化ツールにこの結果をフィードバックして需要充足性の確保ができるように 2つのツールの統合を図る必要がある。

- ・ 今回構築した災害時の電力需要モデルは、札幌市内災害拠点病院の事例をもとに構築したが、次年度は、都内災害拠点病院へのインタビュー調査等を通して病院の電力需要モデルを首都直下型地震に対応したものに改良する。

(目標2) 災害医療および省エネルギー機器導入政策に関する調査

実施項目2-①：過去の省エネ機器導入補助金制度に関する網羅的調査

- ・ 補助金制度に関するインターネット上の公開資料をもとに過去の補助金制度に関して調査を行った。
- ・ 省エネルギー性に関する指標は十分な情報が集まったが、レジリエンス性に関する指標は公開されていなかったため、政策実務者インタビュー調査を実施する必要がある。

実施項目2-②：災害医療や自家発電機に関する実務者インタビュー調査

- ・ 災害医療や自家発電機に関して行政実務者やメーカー担当者にインタビュー調査を行った。
- ・ 災害医療政策について、本研究によって提供できるデータを実装するためにはどういった点を工夫する必要があるのか政策実務者インタビュー調査を引き続き行う必要がある。

以上より、プロジェクトの目標達成に対して、現在の進捗状況は概ね順調である。

2-3. 会議等の活動

年月日	名称	場所	概要
2018/4/24	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/5/7	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/5/14	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	インタビュー調査事前打ち合わせ
2018/7/6	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/7/17	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/8/31	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/9/5	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/10/3	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/10/30	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/11/6	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2018/11/20	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	インタビュー調査事前打ち合わせ
2018/12/18	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等
2019/1/7	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究に関するディスカッション, 打ち合わせ等

3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況

該当なし。

4. 研究開発実施体制

(1) 研究コアグループ (上道茜)

東京農工大学工学府，東京大学工学系研究科機械工学専攻

実施項目①：

都内災害拠点病院へのエネルギー需要に関する調査，被災シナリオおよび熱電需要データ作成

概 要：本研究で構築している最適化ツールおよび詳細シミュレータの2つのツールに入力するための熱電需要データを作成する。平常時の熱電需要データは，都内災害拠点病院に対するアンケートおよびヒアリング調査をもとに病院の保有する機器の種類，数量，消費電力特性を調査して作成する。災害時の熱電需要データは被災シナリオに基づき，業務の優先度によって数パターンを作成する。

実施項目②：最適化ツールの精緻化および最適構成の有効性検証のため詳細シミュレータの構築

概 要：より実用的な最適化ツールの完成を目標に，構築してきた最適化ツールに分散型エネルギー機器本体の故障確率および，より精度の高いガス供給途絶確率を組み込み，更なる精緻化を図る。一方，最適化ツールより得られた結果の有効性を検証するために，詳細シミュレータを構築する。この目的は，(1) 最適化ツールよりも精緻なランニングコストを算出すること，(2) 災害時にどの程度の熱電需要を満たせるかどうかを検証することである。

5. 研究開発実施者

研究コアグループ

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
上道茜	ウエミチ アカネ	東京大学	工学系研究科 機械工学専攻	助教
上道茜	ウエミチ アカネ	東京農工大学	工学府	特任助教
金子成彦	カネコ シゲヒコ	東京大学	工学系研究科 機械工学専攻	教授
山崎由大	ヤマサキ ユウダイ	東京大学	工学系研究科 機械工学専攻	准教授
及川 亮	オйкаワ リョウ	東京大学	工学系研究科 機械工学専攻	大学院生
海藤直記	カイトウ ナオキ	東京大学	工学系研究科 機械工学専攻	大学院生
秋澤 淳	アキサワ アツシ	東京農工大学	生物システム 応用学府	教授

6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など

6-1. シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2019/3/1	2018年度定期研究会	東京大学本郷キャンパス	12名	本研究グループにおける研究変遷に関する話題提供および2018年度の成果報告.

6-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

(1) 書籍・冊子等出版物、DVD等
なし

(2) ウェブメディアの開設・運営
なし

(3) 学会（6-4. 口頭発表）以外のシンポジウム等への招聘講演実施等

- ・ オペレーションズリサーチ学会エネルギーミックスの諸問題と OR 第8研究部会, 「エネルギーレジリエンス性を考慮した災害拠点病院への省エネルギー機器導入量決定手法の検討」, 2018年6月15日, 構造計画研究所中野イノベーションオフィス.
- ・ NPO 法人日本シミュレーション&ゲーミング学会エネルギー・環境ゲーミング研究部門会第3回研究会, 「エネルギーレジリエンス性を考慮した省エネルギー機器導入量の検討」, 2018年7月26日, 筑波大学大塚キャンパス.

6-3. 論文発表

(1) 査読付き (2 件)

●国内誌 (1 件)

- ・ 上道茜, 八木正彰, 山崎由大, 金子成彦, 経済性・環境性・レジリエンス性を考慮した分散型電源機器導入量決定のための多目的最適化ツールの開発, エネルギー・資源, Vol. 39, No. 6 (2018) pp.6-18, doi: 10.24778/jjser.39.6_6

●国際誌 (1 件)

- ・ Akane Uemichi, Masaaki Yagi, Ryo Oikawa, Yudai Yamasaki, Shigehiko Kaneko, Multi-objective optimization to determine installation capacity of distributed power generation equipment considering energy-resilience against disasters, Energy Procedia, Vol. 158 (2019) pp.6538-6543, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.104

(2) 査読なし (0 件)

6-4. 口頭発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

(1) 招待講演 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

(2) 口頭発表 (国内会議 3 件、国際会議 2 件)

- ・ 及川亮 (東京大学), 上道茜 (東京農工大学), 山崎由大 (東京大学), 金子成彦, 病院を対象とした災害時事業継続性検討のためのエネルギー需給シミュレーション: 分散型電源機器のモデル化とシステムシミュレータの構築, 日本機械学会関東支部講演会, 千葉工業大学, 2019年3月19日.
- ・ 海藤直記 (東京大学), 及川亮, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, 災害拠点病院における分散型電源システム最適導入量の検討, 地震工学シンポジウム, 宮城県仙台市, 2018年12月.
- ・ Akane Uemichi (The University of Tokyo), Masaaki Yagi, Ryo Oikawa, Yudai Yamasaki, Shigehiko Kaneko, Multi-objective optimization to determine installation capacity of distributed power generation equipment considering energy-resilience against disasters, The 10th International Conference on Applied Energy – ICAE2018, Hong Kong, Aug. 22-25, 2018
- ・ Akane Uemichi (The University of Tokyo), Masaaki Yagi, Ryo Oikawa, Yudai Yamasaki, and Shigehiko Kaneko, Multi-objective Optimization to Install Private Power Generation System, MoVIC2018, Daejeon, Korea, Aug. 5-8, 2018.
- ・ 上道茜 (東京大学), 八木正彰, 及川亮, 山崎由大, 金子成彦, 災害時の事業継続性を考慮した省エネルギー機器導入量最適化, 安全工学シンポジウム2018, 東京都港区 (日本学術会議), 2018年7月4-6日.

(3) ポスター発表 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

6-5. 新聞/TV報道・投稿、受賞等

(1) 新聞報道・投稿 (0 件)

(2) 受賞 (1 件)

- ・ 2019年3月20日, エネルギー・資源学会第15回論文賞
対象: 上道茜, 八木正彰, 山崎由大, 金子成彦, 経済性・環境性・レジリエンス性を考慮した分散型電源機器導入量決定のための多目的最適化ツールの開発, エネルギー・資源, Vol. 39, No. 6 (2018) pp.6-18, doi: 10.24778/jjser.39.6_6

(3) その他 (1 件)

- ・ 2018年5月17日, 「災害時の事業継続性を考慮した分散エネルギー機器最適導入計画」に関する論文がSpringer Natureの“Change the World, One Article at a Time” にノミネート.
対象: Akane Uemichi, Masaaki Yagi, Ryo Oikawa, Yudai Yamasaki, and Shigehiko

Kaneko, System design to reduce disaster risks by installing distributed power resources,
Journal of Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, Vol. 1 (1)
(2018) pp.49-56, doi: 10.1007/s41939-017-0005-5.

<https://www.springernature.com/gp/researchers/campaigns/change-the-world/chemistry-physics-astronomy-engineering-materials> (最終閲覧日 : 2019年5月30日)

6－6．知財出願（出願件数のみ公開）

（１）国内出願（ 0 件）

（２）海外出願（ 0 件）

参考文献リスト

- 1) 山崎由大, 小林大悟, 野口雄平, 牛島宏太, “ガスエンジンを利用した自然エネルギー電源の出力変動補償”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79, No.806(2013), pp. 2138-2148.
- 2) 西崎康, 入江寛, 横山明彦, 多田泰之“風力発電連結システムの周波数制御のための風車ピッチ角制御とその蓄電池容量削減効果”, 電気学会論文誌 B 編, Vol.129, No.1(2009), pp. 50-56.
- 3) 一般社団法人日本医療福祉設備学会, “病院設備設計ガイドライン (電気設備編)”, (2011).
- 4) 奥田靖男, 木村操, “太陽光発電システムの出力変動抑制技術”, 東芝レビュー, Vol. 65, No. 4, pp. 10-14(2010).
- 5) 小熊祐司, 前田宗彦, 今久保知史, 平尾俊幸, “大規模太陽光発電所向け蓄電池制御技術の開発”, IHI 技報, Vol. 55, No. 4, pp.72-80(2015).
- 6) 井上俊雄, “電力システムの周波数制御から見た火力機の出力応動特性”, 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No.3, pp. 343-346(2004).
- 7) 堀英祐, 井上友理, 関野正人, 長谷見雄二, “災害時医療に係る医療機器負荷特性に関する調査研究”, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 81, No. 725, pp. 625-632(2016).
- 8) 資源エネルギー庁, “節電行動計画記入説明書”, <https://www.jcci.or.jp/0606guide2.pdf>, 最終アクセス日: 2019.2.6.
- 9) 独立行政法人医薬品医療機器総合機構, 医療機器情報検索 <http://www.pmda.go.jp/PmdaSearch/kikiSearch/> (最終アクセス日: 2018年12月25日)
- 10) 独立行政医療法人福祉医療機構, “病院の病床利用率・平均在院日数 (都道府県別)”, https://www.wam.go.jp/content/wamnet/pcpub/top/toukeidata/statistics02_02.html, 最終アクセス日: 2019.2.6.
- 11) 安田信彦, 西村由美子, 中西悟志, 満武巨裕, “手術室の使用効率に関する実証研究 - 疾患別原価計算および手術室稼働率の測定”, 医療経済研究10, pp. 5-20(2001).
- 12) 高口洋人他, “東日本大震災後の夏季節電実態”, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 79, No. 703, pp. 795-801(2014).
- 13) 一般社団法人日本医療福祉設備協会, “医療福祉施設におけるエネルギー使用調査3年間の総括 報告書”(2015).
- 14) 日本エネルギー学会編, “天然ガスコージェネレーション 計画・設計マニュアル 2008”, 日本工業出版(2008).
- 15) 日本医師会, “地域医療システム(JMAP)” <http://jmap.jp/cities/detail/pref/13>, 最終アクセス日: 2019.2.6