

災害拠点病院を対象とした 災害時事業継続性向上のための 分散型電源導入量の最適化

上道 茜, 山崎 由大, 金子 成彦

災害時の事業継続性を向上させるため、エネルギー源の確保や多重化は不可欠である。なかでも、災害拠点病院は災害医療の中核となる機関となるため電源多重化をすることが望ましい。しかしながら、災害時のエネルギーレジリエンス性を考慮した分散型電源導入の指針は十分には確立されていない。そこで、われわれが進めている研究開発プロジェクトではコージェネレーションシステム機器容量、太陽光発電パネル面積、蓄電池容量、電気およびガスの契約プランを設計変数として、エネルギーレジリエンス性を指標とした目的関数を取り入れて最適化ツールの構築を行った。本稿では、現在進行中の研究開発プロジェクトについて、背景やツール構築の考え方について説明し、これまでの研究成果について簡単に紹介する。

キーワード：エネルギーレジリエンス、分散型電源、自家発電機、災害、事業継続性

1. はじめに

1.1 研究背景

我が国は、自然災害による事業停止リスクと常にともなりあわせにある。2018年9月に発生した北海道胆振東部地震をきっかけに、広域にわたるブラックアウトに陥ったことも記憶に新しい。こうした自然災害による事業停止を避けるため、事業継続計画 (Business Continuity Plan, BCP) を策定することに加え、事業継続に資する設備導入などが重要である。特に、電力を必要とする機器を多用する現代においては、停電によってエネルギー供給が絶たれた場合には、事業継続は極めて困難である。

したがって、集中型電源¹からのエネルギー供給が途絶した場合に備えて、エネルギー源の多重化をしておくことが肝要である。最近では、非常用発電機だけでなく、平常時にも使用可能な分散型電源²も利用することを想定した設備導入が行われている。平常時にはピークカットを、災害時にはエネルギー供給を目的として、避難所として利用される施設に対して再生可能エネルギーである太陽光発電パネルと蓄電池を組み合わせた

自家発電機³を導入した例も報告されている [1]。

われわれが進めている研究開発プロジェクトでは、実際に事業所が災害時の事業継続に資するエネルギー機器の導入を検討する際に使用することを想定し、データに基づいて、自家発電機の導入構成の提案を行うことを目的として研究を進めている。本稿では、研究の経緯および方向性について示し、これまでの研究成果の概略を述べる。なお、本研究では最適化に関して革新的な手法を適用したわけではなく、災害時のエネルギーレジリエンス性という新たな視点を加えた目的関数を設定した点に独自性があると考えられる。その点について紙面を割いて説明したい。

1.2 研究の経緯

まず、本研究の経緯について触れておきたい。

2005年、東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻に、東京ガスのご支援によりホロニック・エネルギーシステム学寄附講座が開設された。ここでは、分散型エネルギーシステムに関するさまざまな研究が行われた。寄附講座設置期間終了後も研究室では、寄附講座で行われていた研究テーマの一部を引き継ぎ、再生可能エネルギーの変動補償をガスエンジンによって行う

うえみち あかね
東京農工大学工学府
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16
uemichi@go.tuat.ac.jp
やまさき ゆうだい
東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻
かねこ しげひこ
早稲田大学理工学術院国際理工学センター

¹ 大規模発電所で大量の発電を行い、消費地に配電する電力供給形態。

² 消費地の近くに分散配置された小規模発電装置によって、電力供給を行う形態。

³ なお、本稿では、停電などの非常時のみに使用する発電機器を「非常用発電機」、平常時にも使用可能な太陽光発電パネルや蓄電池、コージェネレーションシステムを「分散型電源」、単一とみなせる事業所の建物内に有するこれらの発電機器を総称して「自家発電機」と呼ぶことにする。

際の運用指針に関する研究が行われた。この研究では、機器運用シミュレーションの作成にあたり、実際のガスエンジンの寸法、形状、機構や動特性、そして、内燃機関の燃焼特性を反映させた数理モデルを提案し、シミュレーションプログラムに組み込んだ [2]。

こうした中、2014年、災害時の事業継続を目的として分散型電源を導入するというアイデアに基づいた研究に着手した。対象とした建物は、病院、ホテル、事業所、集合住宅である。対象とした分散型電源としては、熱電併給可能なコージェネレーションシステムとし、ガスエンジンおよび排熱投入型冷温水機⁴の容量を最適化対象とした [3]。

この研究の中で、分散型電源の導入をすべきかどうかを経済性および災害へのレジリエンス性に基づく検討を行ったところ、病院と事業所に対してはコージェネレーションシステムの導入効果が高いことが示された [4]。しかしながら、実際には、災害後に企業の大規模事業所は生産拠点を被災していない工場に移すといった対処がとられることも少なくなかった。

そこで、災害時であっても拠点を移すことが難しく、また、医療を絶えず提供する必要がある病院にフォーカスした研究を行うことにした。

2. 病院におけるBCP策定指針と電力需要の特徴

2.1 災害拠点病院への自家発電機導入指針の例

災害拠点病院は、「災害時における初期救急医療体制の充実強化を図るための医療機関 [5]」であり、各都道府県から指定される病院である。2015年4月1日時点では、全国694病院が指定されている [6]。

災害拠点病院における事業停止は最も避けるべきことのひとつである。2017年には、厚生労働省からの災害拠点病院におけるBCP策定が指定要件として義務づけられた [7]。また、通達に関連して、設備については「通常時の6割程度の容量を有す自家発電機を保有すること」という記述もみられる。

病院におけるBCP策定指針に関しては、ほかには、一般社団法人医療福祉設備協会によるBCP策定に携わる病院経営者や医療従事者に向けたガイドライン [8] や一般社団法人建築環境・省エネルギー機構 IBEC による「スマートエネルギータウン調査報告書」 [9] が挙げられる。後者では、風水害・人為的事故、計画停

電などによる一時的な供給途絶時（数時間～1日程度）を想定した場合、機能維持すべき項目ごとに、供給できる最大電力量の割合に対する電力負荷割合は5段階に分類されている。

状況を調査するうちに、現状、各病院では十分な検討の後に自家発電機の容量を決定しているものの、上述の総量的な基準では、災害医療活動をどの程度カバーできるものなのかという点がはっきりしていないのではないかと思えてくるようになった。たとえば、先述した厚生労働省のガイドラインで「通常時の6割程度」というのは、空調需要の大きな夏季および冬季における1日の需要ピーク値を基準とした場合と、中間季における1日の需要平均値を基準とした場合とでは、その差は大きい。

従来であれば、災害時においては空調需要をバッファードとする対応が一般的であると考えられるが、酷暑の夏の日に空調を停止させることは、入院患者や医療従事者の健康を守るという観点で適切ではない可能性がある。2019年9月、千葉県に甚大な被害をもたらした台風15号による停電下 [10] では、冷房を使うことができず熱中症とみられる症状の死者も複数あった。これは、災害によって悪化した環境によって引き起こされる災害関連死であるといえる。

2.2 病院建物におけるエネルギー需要の特徴 [11, 12]

平常時の病院業務は、外来患者および入院患者に対する診察および治療が基本的な業務である。診療時間である昼間に、外来患者が多数滞在し、診察や治療を受ける。一方、入院患者は一定期間病院に滞在しながら診察や治療を受ける。つまり、病院は患者らに対して、一日中、医療サービスの提供をするだけでなく、入院患者に対しては居住空間をも提供しているといえる。このことから、病院のエネルギー需要は、オフィスのように昼間に限ったものではないことが特徴である。また、治療にあたっての殺菌・滅菌のためにオートクレーブをはじめとする熱や蒸気を利用する機器が多く使われていること、入院患者への温浴や食事の提供が必要であるという点から温水生成や調理にあたってガスなど燃料消費が大きいことも特徴である。総じて、病院のエネルギー消費原単位⁵は高い。

病院で用いられる医療機器は電力消費を伴うものも多くあり、近年の医療サービスはこのような機器への依存度が高くなっている [13]。医療機器に分類される

⁴ コージェネレーションシステムでは、ガスエンジンやガスタービンを用いて発電を行い、発電の際に排出される熱を冷温水機や冷凍機といった主に空調機器で回収して利用する。

⁵ 原単位: 1年間、単位面積あたりのエネルギー消費量 [MJ/m²・年]。

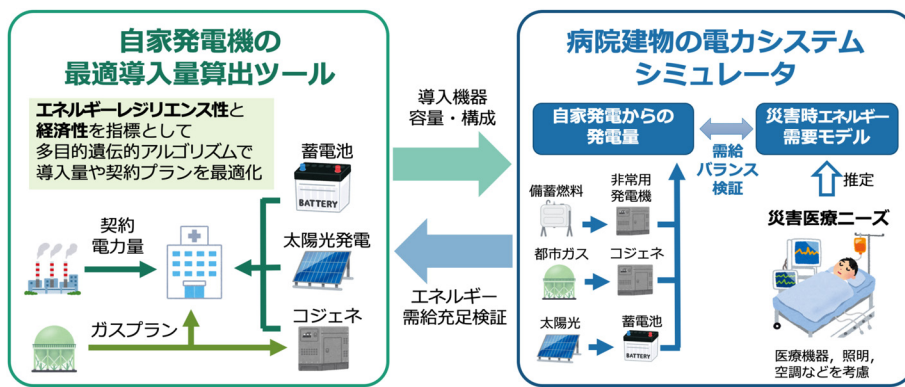


図 1 構築中の自家発電機導入計画立案サポートツールの概要

ものには、人工呼吸器や保育器などの治療を目的とした機器、心電図などのモニタリングを目的とした機器、CT（コンピュータ断層撮影装置）やレントゲンなどの検査を目的とした機器があり、MRI（核磁気共鳴映像法）装置などの大型の検査機器の稼働時の消費電力は極めて高くなる。

こうした熱電需要データは、統計を元にした標準建物データや個別病院に導入された BEMS⁶による計測結果が公開されている [11]。調査によれば、病院の種類によってエネルギー消費原単位や需要の形態も変わってくるのが明らかになっている [12]。また、一般的に需要は地域によっても異なることもよく知られている。

このことから、各病院の種類や所在地を考慮して、導入するエネルギー機器構成や容量を決定することは、災害時のエネルギーレジリエンス性を向上させるだけでなく、省エネルギーひいては病院のコスト削減の観点からも非常に重要である。

3. 研究の全体計画

災害時の事業継続を可能とするエネルギー源を確保するという視点の研究として、二つのツールから構成される「自家発電機導入計画立案サポートツール」を構築することを計画した。図 1 にツールの概略を示す。

サポートツールを構成する要素の一つは、本稿で紹介する「自家発電機の最適導入量算出ツール（最適化ツール）」である。この最適化ツールでは、後に述べるように平常時の熱電需要データに基づいてトータルコストおよびエネルギーレジリエンス性指標を評価し、最適な自家発電機構成を検討することができる。最適化の対象とした自家発電機の種類は、コージェネレー

ションシステム（ガスエンジンおよび排熱投入型冷温水機）に加え、太陽光発電パネル、蓄電池とした。

しかしながら、最適化ツールでは、平常時の熱電需要データを用いているため、災害時の需要を充足できるかどうか十分に示すことができない。そこで、二つめのツールとして「電力システムシミュレータ（詳細シミュレータ）」を構築する。これは、病院建物の電力システムを数理モデルで表したもので、設定した災害時需要に対して、秒刻みのエネルギー需給バランスを検討することができる。

このサポートツールの使用イメージを以下に述べる。

- (1) 最適化ツールで平常時の熱電需要データを元に自家発電機構成の最適解を算出する。
- (2) 選択した自家発電機構成をシミュレータに反映させ、病院建物について秒刻みの電力シミュレーションを実施する。災害時の負荷に対して、停電時に自家発電機のみで電力供給が充足するかを検証する。ここでの災害時の負荷は、利用が想定される医療機器や病院のフロア計画をもとに見積もったデータを用いる。
- (3) このシミュレーションで、自家発電機だけでは、想定した災害時医療活動に対して十分に電力がまかなえないと判明した場合、需要家（病院）は自家発電機の変更し、シミュレータにこれを反映させて、再度シミュレーションを行う。あるいは、災害時の病院フロア計画などの BCP 策定そのものを見直す場合もあると考えられる。

このように、最適化計算とシミュレーションを組み合わせ、需要家の BCP 策定をより実効的なものとするような自家発電機構成を選択することを目指したツールを計画している。

ここに述べた全体計画は現在進行中であるため、本

⁶ Building and Energy Management System.

稿では最適化ツールに限定して、その概要について紹介する。

4. 最適化ツールの構築

4.1 ツール構築の方針

本研究で構築した最適化ツールは、以下の順序での使用を想定した。

- ① ユーザーによるツールへのデータ入力
- ② ツールによる最適化計算
- ③ ユーザーによる結果の把握や確認

特に、①においてユーザーが入力するデータは、できるだけ客観的な数値として入力できるものを検討した。たとえば、地域による災害発生確率、停電・ガス途絶の発生確率、電気料金やガス料金体系、病院規模やエネルギー需要形態が異なることを考慮できるように目的関数などを工夫して作成することにした。

この考えを大元として、本研究では、まず単一目的最適化ツールを構築し、次にそれを拡張した多目的最適化ツールを構築した。これら二つのツールでは、災害によるエネルギー供給停止リスクを異なる考えで設定した。以下では、その概略を述べるが、詳細は既刊の論文をそれぞれ参照されたい [3, 14, 15]。

4.2 単一目的最適化ツール [3, 15]

4.2.1 災害による事業停止損失額の期待値

一般的に、リスクは確率とインパクトを乗じたものとして考えられる。本研究では、災害時のエネルギー供給途絶によって事業停止が引き起こされ、これによる損失が発生するというシナリオに基づき、災害発生とエネルギー供給途絶発生の確率および、災害によるインパクトとして事業停止による損失額の積で表すことにした。後述するように災害およびエネルギー供給途絶は独立事象なので、これらのパターンの組み合わせに対して期待値を算出できる。

事業継続性の観点から経済的損失として、災害による事業停止損失額の期待値 R [JPY] は以下のように求める。

$$R = A \sum_{i,j} P_{out,gas,i,j} T_{out,gas,i,j} L(r_{ind})$$

ここで、ガス供給配管種別 gas の災害パターン i 、エネルギー供給途絶被害パターン j に対して、エネルギー供給途絶確率 $P_{out,gas,i,j}$ 、エネルギー供給途絶時間 $T_{out,gas,i,j}$ [h]、 L は単位面積・単位時間あたり事業停止損失額 [JPY/(m²-h)]、 A は建物延床面積 [m²] である。

災害とエネルギー供給途絶被害の想定は以下のよう

に行った。まず、災害は3パターンを考慮し、震度6弱以上の地震、震度5弱～5強の地震、その他の災害とした。また、エネルギー供給途絶被害を3パターン考慮し、停電、ガス供給途絶、停電とガス供給途絶の併発とした。なお、ガス供給途絶は配管種別によって異なるため、本研究では、低压配管と中圧配管の場合を考えた。中圧配管は一部都市部の大規模事業所への供給を担っており、低压配管よりもガス供給途絶確率が低いとされる。このことから、やや安全側の仮定であるが、中圧配管の場合のガス供給途絶確率はゼロとした。

災害発生確率は、NIED「J-SHIS 地震ハザードステーション」 [16] より調査し、算出した。先述のとおり、建物の所在地によって地震発生確率は異なるため、以降に示す結果は、建物所在地を東京都文京区とした場合である。エネルギー供給途絶時間は、災害およびエネルギー供給途絶のパターンに応じた調査を行った。ここでは、東京都における東日本大震災による供給途絶時間 [17, 18] を参考にして決定した。

事業停止損失額は、需要家が定めた事業停止損失額の許容値 L_{max} をもとにエネルギー自立度 r_{ind} に関する階段関数として表現する。エネルギー自立度は需要量に対する供給量の割合 [%] である。階段関数において $L(r_{ind})$ の値が変化する r_{ind} の値は文献 [9] を参考に、二つ設けた。一つめは機能維持に必須項目を満たすために必要とされる割合を $r_{ind,1}$ 、二つめは機能維持に加えてBCPの観点から機能維持すべき項目に対して供給できる最大電力量に対する割合を $r_{ind,2}$ とした。階段関数は四つの値域で設定した。

なお、ここでは、電力のみを考えるものとし、需要量は需要家が提供するデータに基づく値、供給量はエネルギー供給途絶のパターンに応じて建物に供給される電力の値である。すなわち、停電のみ発生した場合にはガスエンジン発電機、太陽光発電パネル、蓄電池の三つからの電力が供給されるが、停電とガス供給途絶の併発の場合には太陽光発電パネルと蓄電池のみが電力を供給することができる。

4.2.2 単一目的最適化ツールの概要

この最適化ツールにおいては、需要家は、所在地、延床面積、季節別の熱および電力需要データを用意し、自らが決定する事業停止損失の許容額を入力する。この入力に対して、目的関数であるトータルコストを最小化する最適化計算を行う。設計変数は、コージェネレーションシステム容量 (ガスエンジン容量 [kW]、排熱投入型冷温水機 [kW])、太陽光発電パネル面積 [m²]、蓄電池容量 [kWh]、契約電力量 [kW]、ガスプラントイ

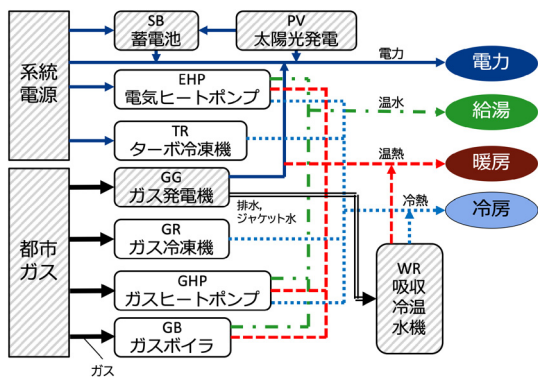


図2 病院内エネルギー機器構成 [15]

プ⁷である。最適化によってこれらの設計変数の組み合わせが出力される。なお、本研究で想定した病院内エネルギー機器構成を図2に示す。

最適化計算にあたっては、MatlabのOptimization toolboxを用いて最適解周辺の準最適解を求め、列挙法を用いて目的関数をより小さくする解を最適解とした。

このとき、目的関数であるトータルコストは、以下の四つの和として計算した。すなわち、機器導入コスト、ランニングコスト、二酸化炭素排出コスト、先述した災害リスクに基づく事業停止損失額の四つである。

災害リスク以外のコストについては、以下に簡単に述べる。

- ・機器導入コスト：自家発電機単位容量あたりの価格と設計変数である容量の積で表す。
- ・ランニングコスト：最適化ツールに組み込まれている機器運用シミュレーションによって求める。これは、1日の1時間おきの需要に対して電気およびガスの従量料金を最小化するものである⁸。混合整数線形計画問題として定式化し、分枝限定法によって最適解を求めた [19]。夏季、冬季、中間季の三つの代表日の需要パターンに対して、天候パターンを晴れ・曇り・雨と3パターンとした代表日計算を行い、これを15年分に換算した値をランニングコストとする。
- ・二酸化炭素排出コスト：環境性に関わる指標として考慮した。二酸化炭素排出コストは、発電量1kWhあたり排出係数 [tCO₂/kWh] および1tあたりの排出量取引価格 [JPY/tCO₂] との積で表した [20–22]。

⁷ 東京都文京区を対象としたため、電力料金体系は東京電力、ガス料金体系は東京ガスのものを参考にした。

⁸ 「機器運用シミュレーション」は、ランニングコスト最小化を目的としており、3節で述べた「電力システムシミュレータ」とは異なることに注意されたい。

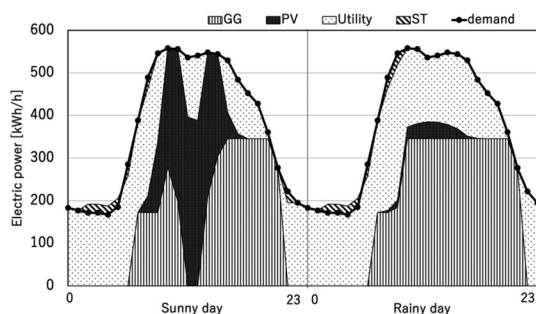


図3 機器運用シミュレーション結果の例。電力需要に対する系統電力および分散型電源からの供給 [15]

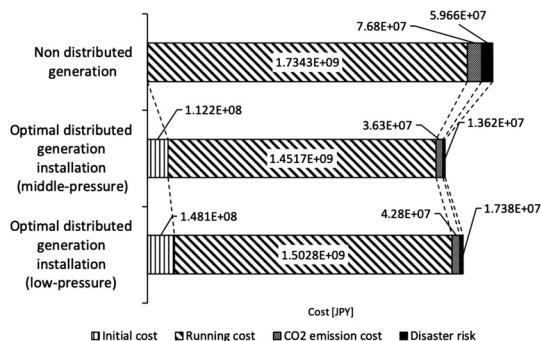


図4 事業停止損失額の許容値 $L_{max} = 500$ JPY/(m²-h) としたときのトータルコスト内訳 [15]

4.2.3 ケーススタディ

延床面積 20,000 m² の仮想病院を対象として最適化を行った。熱電需要データは「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008」 [23] より、冬季、夏季、中間季の代表日のデータを用いた。事業停止損失額の許容値 L_{max} は、0~1,000 JPY まで 500 刻みで変化させ、パラメータスタディを行った。また、病院経営に関する調査 [24] から得られた平常時の病院において、1時間あたり、1m² あたりの利益 (推定値) 25.63 JPY/(m²-h) とした。

ランニングコストを算出するために行った機器運用シミュレーションの結果の例を図3に示す。左図が晴天の場合、右図が雨天の場合である。図より、天候によって太陽光発電からの給電量が差があることがわかるほか、電気料金の低い夜間に蓄電池に充電を行い、昼間のピークにさしかかる放電が行われていることがわかる。このように機器運用シミュレーションではリーズナブルな結果が得られた。

次に、図4に最適化によって得られたトータルコストの内訳を示す。上から、自家発電機を導入しない場合、ガス供給配管種別が中圧の場合、ガス供給配管種別が低圧の場合である。ガス供給配管種別によらず、自

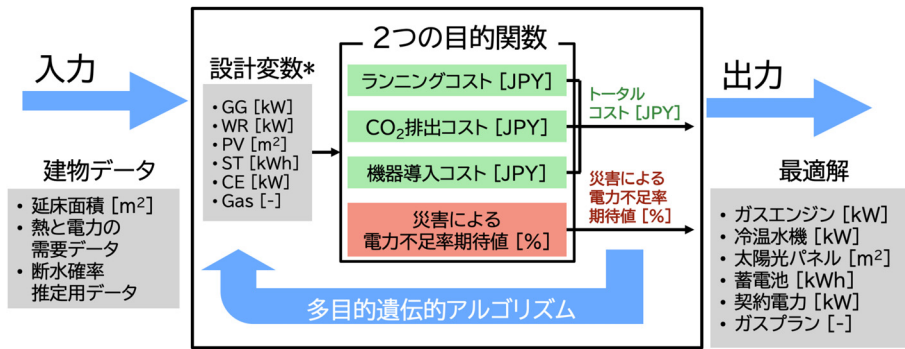


図5 多目的最適化ツールの概略 [14]. 機器運用シミュレーションはランニングコストの算出で用いられるが図では省略

家発電機によるトータルコストの低減効果がある。これは、自家発電機の導入コストより、導入によってランニングコストが低減される金額が大きいためである。また、ガス供給配管種別が低圧の場合よりも中圧の場合のほうがトータルコストの低減効果がある。これは、中圧配管の場合には災害によるガス供給途絶が起きないと仮定されているため、蓄電池が導入されない結果となり機器導入コストが抑えられている結果であると考えられる。

一方で、災害リスクの指標である災害による事業停止損失額の期待値は、自家発電機を導入しない場合、低圧配管の場合、中圧配管の場合の順に小さくなり、研究の意図には即した結果であるといえる。しかしながら、全体に対する災害リスクの割合は小さく、機器導入コストおよびランニングコストがトータルコストの低減に支配的であることから、災害リスクに焦点を当てるためほかの手法が必要であると考えた。

4.3 多目的最適化ツール [14]

4.3.1 停電による電力不足率の期待値

以上の結果を受けて、単一目的最適化ツールを多目的最適化ツールへと拡張した。第一に、先述のとおり、単一目的最適化ツールでは、目的関数であるトータルコストの低減効果は、災害リスクより経済的指標が支配的であったことによる。第二に、災害拠点病院のような公共性の高い施設で損失金額という経済的指標で事業継続性を評価することは不適當ではないかと考えたからである。

図5に、構築した多目的最適化ツールの概略を示す。

一つの目的関数はトータルコストとし、ランニングコスト、機器導入コスト、二酸化炭素排出コストの和とした。もう一つの目的関数は、災害リスクに関するものとして「災害による電力不足率の期待値」とした。

4.3.2 災害による電力不足率の期待値

災害による電力不足率の期待値 P_s を定義する。これは、災害時に必要な電力需要に対して不足すると推定される電力割合であり、 P_s が0%に近いほど災害時にも需要が充足できる可能性が高く、逆に100%に近いほど災害時に需要が充足できない可能性が高いと解釈できるものである。 P_s の導入により、人命を扱う施設において災害リスクを金額換算することなく、エネルギーレジリエンス性を定量的に評価することができるようになった。

$$P_s = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{out,gas,i,j} (1 - r_{ind,i,j})$$

ここで、 $P_{out,gas,i,j}$ はガス配管種別 gas の災害パターン i 、エネルギー供給途絶被害パターン j におけるエネルギー供給途絶確率、 $r_{ind,i,j}$ は被害パターン j におけるエネルギー自立度（エネルギー供給可能率）である。 $r_{ind,i,j}$ は、年間通しての最大電力需要（ピーク値）[kWh/h] に対する供給可能な電力量を割合で表したものであり、 $(1 - r_{ind,i,j})$ はエネルギー非自立度を示す。

なお、災害発生確率やエネルギー供給途絶発生確率は、東京都文京区を対象とした場合について計算した結果である。なお、最適化計算にあたっては Matlab の global optimization toolbox の多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。

4.3.3 多目的最適化ツールから得られる解

二つの目的関数による多目的最適化では、最適解は唯一ではなく優劣のない複数の解、すなわち、パレート最適解集合が得られる。本研究の場合、トータルコストは平常時の経済性と環境性を合わせた指標、災害による電力不足率期待値は災害時のエネルギーレジリエンス性を表す指標としてとらえることができる。

この場合、トータルコストのみを最小化しようとす

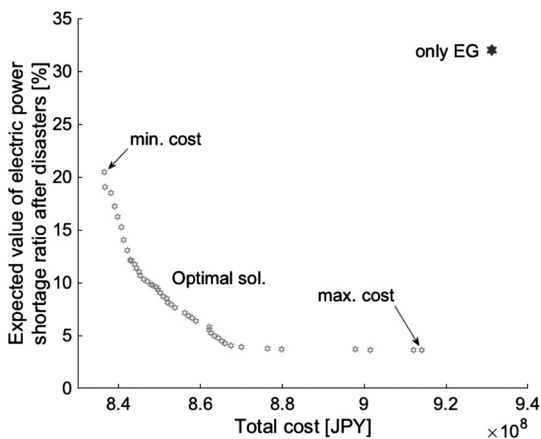


図6 延床面積 10,000 m², 低圧配管の場合に得られた解。only EG は非常用発電機のみ結果 [14]

れば分散型電源導入量は少なくなり、災害による電力不足率期待値は大きくなる。反対に、 P_s のみ最小化しようとすれば、分散型電源導入量が多くなり、総コストが増える。このように、多目的最適化の結果として、トレードオフ関係が得られると考えられる。

4.3.4 ケーススタディ

病院の熱電需要データは単一目的最適化ツールと同様、ガス供給配管種別および延床面積を変化させたケーススタディを行った。

図6に延床面積 10,000 m², ガス配管種別を低圧配管とした場合の結果を示す。横軸は総コスト、縦軸は災害による電力不足率期待値である。双曲線のような形状をした Optimal sol. は最適解集合であり、理想的なパレートフロンティアを形成することが確認できた。

比較のために、非常用発電機のみ導入した場合について結果を示す。非常用発電機の容量は、厚生労働省の通知 [7] を参考に電力需要のピーク値の60%とした。具体的には、夏季の電力需要データのピークより 207.6 kW とした。このとき P_s は 32.0% と求められる。この非常用発電機は、広く用いられているディーゼル発電機として機器導入コストおよびメンテナンスコストを算出すると評価期間での総コストは 9.31×10^8 JPY となる。

これに対して、本ツールにより求められた最適解群は P_s がほぼすべて 20% を下回り、さらに総コストも非常用発電機のみ導入した場合よりも低減できている。つまり、得られた最適解群は、平常時にも利用できる分散型電源を導入することで、総コストを低減しながらも災害によるエネルギー供給途絶によって不

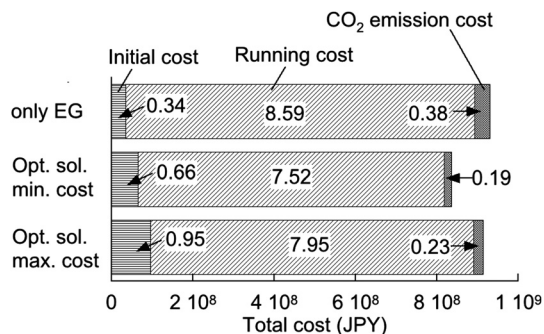


図7 トータルコストの内訳。非常用発電機のみ結果と延床面積 10,000 m², 低圧配管の場合を比較 [14]

足する電力が補われる見込みがあることを示している。

また、図6に示した非常用発電機のみ導入した場合と、得られた最適解のうち総コスト最小となる解および最大となる解の総コストの内訳を図7に示す。非常用発電機のみを導入した解では、機器導入コストは分散型電源を対象とした最適解の結果を下回るが、ランニングコストが他の二つの最適化の結果を上回っているために、総コストの値が大きくなる。

最適化計算の結果、分散型電源の導入量の特徴として太陽光発電パネルの導入量が大きく、上限値付近になることがわかった。この上限値は病院の延床面積から屋上面積を推定した値を用いているため、太陽光発電パネルを設置できる余剰土地のある病院ではさらに最適導入量は大きくなる可能性がある。

このように、多目的最適化を活用して分散型電源導入量を検討するためのフレームワークを示すことができたと考える。

5. おわりに

災害拠点病院を対象として現実的なエネルギー機器導入計画の提案に向けて、「自家発電機導入計画立案サポートツール」の完成を目指している。本稿では、「自家発電機最適導入量算出ツール（最適化ツール）」を取り上げた。最適化ツールについては、災害リスクを目的関数に反映させる方法について述べた。また、ケーススタディの結果を紹介した。

現在は、シミュレータに入力するための災害時電力需要の見積もりを行っており、今後これを負荷側の入力データとして災害時のシミュレーションを行う予定である。

謝辞 本研究は、Siebel Energy Institute Research Grant 2017 および JST 社会技術開発センター「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により助成を受けた研究の一部である。また、本研究の遂行にあたって、電力中央研究所の坂東茂氏をはじめとする研究協力者の皆様には有益なご助言を多数いただいた。最後に、東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻（修士生含む）の長尾浩志君、八木正彰君、及川亮君、海藤直記君が災害発生確率をはじめとするデータの詳細な検討や調査や最適化ツールの構築にあたってのコーディングを行ってくれた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 環境省, 防災拠点等への再生可能エネルギー等導入推進事業, https://www.env.go.jp/policy/policy/local_reproject/renewableenergy_suisin.html (2019年10月9日閲覧)
- [2] 野口雄平, 小林大悟, 山崎由大, 金子成彦, “ガスエンジンダイナミクスモデルによる太陽光発電の出力変動抑制予測,” 第16回動力・エネルギーシンポジウム, pp. 485–492, 2015.
- [3] 長尾浩志, 上道茜, 八木正彰, 山崎由大, 金子成彦, “災害時の事業継続性を考慮したコージェネレーション機器導入計画最適化手法の提案,” エネルギー・資源, **38**, pp. 10–23, 2017.
- [4] H. Nagao, A. Uemichi, Y. Yamasaki and S. Kaneko, “Proposal of a decision scheme for installing a cogeneration system considering disaster risks,” *Applied Thermal Engineering*, **114**, pp. 1414–1423, 2017.
- [5] 災害医療センター, 「災害拠点病院とは」, <http://www.nho-dmc.jp/disaster/saigaiyoten.html> (2019年10月9日閲覧)
- [6] 厚生労働省, 「災害拠点病院一覧」, https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/iryuu/saigai_iryuu/dl/saigai_iryuu07.pdf (2019年10月9日閲覧)
- [7] 厚生労働省, 「災害拠点病院指定要件の一部改正について, 平成29年3月31日, 医政発0331第33号」, https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00tc2601&data Type=1&pageNo=1 (2019年11月25日閲覧)
- [8] 日本医療福祉設備協会, 病院設備設計ガイドライン (BCP編), 2012.
- [9] 一般財団法人建築環境省エネルギー機構, スマートエネルギータウン調査報告書, 持続可能な都市・地域づくりに貢献する分散型エネルギーシステム・スマートエネルギーネットワーク, 2012.
- [10] 千葉県, 「台風15号による停電中の熱中症対策」, <https://www.pref.chiba.lg.jp/kansei/necchuusyou/taihuu15.html> (2019年10月10日閲覧)
- [11] 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実態調査3年間の総括報告書, 2015.
- [12] 日本省エネルギーセンター, 病院の省エネルギー, 2009.
- [13] 日本臨床工学技士会, 計画停電における医療機器の安全使用マニュアル (2012年度版), 2012.
- [14] 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, **39**, pp. 6–18, 2018.
- [15] A. Uemichi, M. Yagi, R. Oikawa, Y. Yamasaki and S. Kaneko, System design to reduce disaster risks by installing distributed power resources, *Journal of Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, **1**, pp. 49–56, 2018.
- [16] 防災科学研究所, J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019年10月9日閲覧)
- [17] 地震情報サイト JIS, 「首都直下地震 ガス供給停止」, <http://j-jis.com/news/shuto/tokyo/gas> (2019年10月18日閲覧)
- [18] 東京電力, 「数表でみる東京電力」, <http://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/electricity-supply/index-j.html> (2019年10月18日閲覧)
- [19] 伊東弘一, 横山良平, 『コージェネレーションの最適計画～インテリジェント・フレキシブル・コージェネレーションを目指して～』, 産業図書株式会社, p. 117–119, 1990.
- [20] 環境省, 「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度, “電気事業者別排出係数一覧 平成28年度提出用”」, https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/h28_coef_t_rev2.pdf, (2019年10月18日閲覧)
- [21] 東京ガスグループ, CSR レポート 2015, 2014年度の取り組み結果, 温暖化対策ガイドライン (2014年度の取り組み結果), https://s3-ap-northeast-1.amazonaws.com/sustainability-cms-tokyogas-s3/pdf/ja/903/02/csr2015_all.pdf (2019年10月18日閲覧)
- [22] 環境省地球温暖化対策課市場メカニズム室, 「国内排出量取引制度について平成25年7月」, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/det/capandtrade/about1003.pdf>, (2019年10月18日閲覧)
- [23] 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.
- [24] 全日本病院協会, 平成25年病院経営調査報告, 2013.