

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561062

研究課題名(和文)次世代エネルギーシステムの最適更新計画

研究課題名(英文)Optimal renewal planning of energy supplying systems in the next generation

研究代表者

天野 嘉春 (AMANO, YOSHIHARU)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60267474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギーの有効利用に資するとされる太陽電池・蓄電池系を含む各種建物用エネルギー供給システムの更新問題に対し、経済性や省エネルギー性の観点からより望ましい合理性に富む計画立案を行うための方法論を検討した。電力・冷暖房・給湯用エネルギー供給システムの更新計画問題に対して、最適化手法を導入することにより、数値分析的計画立案を行った。対象建物の季時ごとに変化するエネルギー需要量を年間に渡り推定し、機器、特に蓄電池の劣化特性や新規導入機器の技術進歩といった不確実性を織り込み、需要量に対するシステム運用計画を考慮しながら評価期間内で望ましいシステム更新解を導出出来た。

研究成果の概要(英文)：A renewal planning problem is studied on energy supply systems including photovoltaic-battery system used for air-conditioning and hot water supply installed into various buildings. In this problem, it becomes necessary to consider many factors such as the structure of initially existing system, the uncertainty including deterioration of each pieces of existing equipment, candidate pieces of newly installed equipment with upgraded efficiency reflecting technology improvement, the system's renewal year, the structure of renewal system, etc. The proposed method is based on the multi-objective optimization approach, and it is applicable for multi-stage renewal planning problems. A numerical study is carried out for an office building or a hospital, and it is certified that many useful and rational results can be derived by applying the proposed method.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：数理工学 再生可能エネルギー コージェネレーション

1. 研究開始当初の背景

我が国におけるオフィスビル・病院・ホテル等の各種建築物の耐用年数は、建築技術の向上に伴い 60 年前後と長寿命化の傾向にある。しかし、これらの建築物に導入されるエネルギー供給システムを構成する各種機器類の耐用年数は 15 ~ 25 年程度と建築物の耐用年数と比較して短い。そのため、エネルギー供給システムは複数回にわたって更新を実施する必要がある。すなわち、エネルギー供給システム関連の工事は新築の建造物に新規導入されるよりも、システムの更新を実施する機会の方が多い。膨大なエネルギーを消費する大型の建築物において、合理的なシステムの更新が収益に与える影響は大きく、また近年の環境問題に対する意識の高まりから、省エネルギー化・環境保全性向上の視点からも適切に更新していくための合理性に富む計画立案手法の確立が求められている。

2. 研究の目的

建築物におけるエネルギー供給システムに対して、経済性・省エネルギー性・環境保全性を向上させるための合理的な更新を実施するためには、システムの導入後における技術進歩による高効率機種の登場や、既設システムの各種構成機器類の劣化の進展およびこれに伴う光熱水費やメンテナンス費の増大、さらにエネルギー需要特性の変化、入力エネルギー価格の変動、金利などを含む経済状況の変化、省エネルギーおよび環境問題に対する情勢変化等、多種多様な要因を総合的に考慮する必要がある。システムの運営者にとって、エネルギー供給システムを適切な時点で、適切なシステムに更新することは重要な課題となる。

しかしながら、エネルギー供給システムが新設導入された後、ある期間を経て更新される場合、すべての機器が撤去されて新しいシステムに置き換えられることはほとんど無く、その寿命に達した一部の機器のみが更新されることが一般的である。また、従来この種の「いつの時点で、どのようなシステムに更新を実施するか」という更新計画問題に対する立案は、設計者の試行錯誤的・経験的勘に頼って実施されてきたのが現状であり、必ずしも合理的にシステム設計がなされてきたわけではない。さらに、エネルギー供給システムが新設導入された建築物に対する更新計画は、前記のように一般的にシステムの更新を複数回にわたって実施していく必要がある。

前記の背景を踏まえ、既設のエネルギー供給システムを 1 回または 2 回更新を行う計画問題に対し、最適化法を導入した手法の確立を目的とする。

また、特に家庭部門では、需要特性の不確実性が本質的に避けられない一方で、再生可能エネルギーの積極的利用促進が社会的要請とされ、太陽光発電出力の不確実性を補償

する要素としての蓄電池導入の効果に、システム設計の観点からも特に注目されている。そこで、実測需要の時系列パターンの情報を保持した新しい統計的解析手法を提案する。また、特に太陽光発電-蓄電池系の長期システム更新計画問題へ適用可能なモデル化手法を明らかにする。

3. 研究の方法

システム更新計画問題の考察において、本研究では、1 回または 2 回更新、目的関数や対象建物の相違等、多種多様な課題を検討した。またこの他に、太陽光発電-蓄電池系を数理モデルに組み込み、試験設備で同定したパラメータを利用して、劣化特性を組み込んだモデルを提案した。以下では、代表的なシステム更新計画問題に対する方法論についてのみ述べる。

3. 1 最適更新計画問題

更新計画問題に際して考慮すべき項目については、非常に多種多様なものがある。表-1 はその一例を挙げたものであるが、これらの項目の選定にはいくつかの代替案がある。また、これらのいくつかの項目間には互いに深い関連性を持っているものもある。例えば項目 1 ~ 4 は 5 に、また 2 は 1 2 に関連性を持っている。また、現段階でこれらの項目が数値的に定量化されているものや、定性的な表

表-1 更新計画問題において考慮すべき項目例

No.	項目	記号[単位]	備考および具体例
1	地域		東京
2	外気温	[]	
3	対象建物用途		事務所ビル
4	建物延床面積	[m^2]	15000 m^2
5	エネルギー需要量	d [kW]	式(3)
6	現時点	t_0 [年]	
7	更新年	t_n [年]	$n=1 \sim N$
8	更新回数	M [回]	
9	評価期間	T [年]	
10	新設システム	X_0	新設年 t_0 時
11	新規導入候補機器群	Y_i	$i=1 \sim I$
12	機器性能特性	a, b	式(1)および(2)
13	機器性能劣化率	[%/年]	
14	新規導入候補機器性能向上率	[%/年]	
15	機器価格	[円/kW]など	機器容量の関数
16	機器メンテナンス費	[円/kW/y]	機器容量の関数
17	既存機器撤去工事費	[円/kW]など	機器容量の関数
18	機器下取り価格	[円/kW]など	機器容量の関数
19	新規導入機器工事費	[円/kW]など	機器容量の関数
20	入力エネルギー価格	[円/kWh]など	基本料金および従量料金
22	設備余裕率	[%]	
23	各種補助金	[円]	ESCO補助金など
24	金利	r [%/年]	
25	目的関数	$J_1 \sim J_3$	経済性・省エネ性・環境性

記に留まっているものも混在している。

図 1 に、本研究で考察した最適更新計画問題の概念を示す。同図において t は年変数であるが、対象ビルに $t=0$ 年で導入されたエネルギー供給システムは、現時点 $t=t_p$ 年で更新

の計画が検討されるものとする。図1に示すように、検討におけるシステムの評価期間を $t=t_p$ から T 年先までとし、この期間に新設システムは1回だけ $t=\tau$ 年で更新するものとする。最適更新計画問題においては、新設システムをいつの時点でどのように更新するのが設定した目的関数に対して最適であるかという形で定式化する。

3.2 目的関数と制約条件

ここでは、システムを経済性の観点から評価し、最小化すべき目的関数を定式化する。

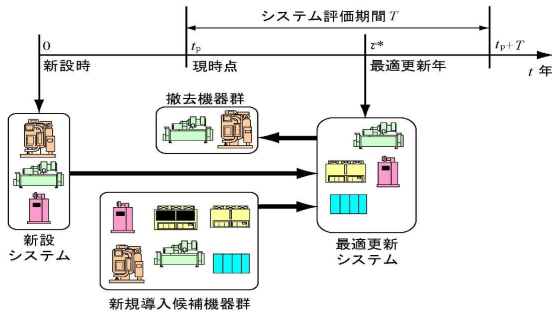


図1 最適更新計画問題の概念図

図1に示すシステム評価期間 T における設備費・運用費・メンテナンス費の総和を年価法に基づいて計算し、 T 内における年間総経費の平均値を目的関数として定義する。また、本最適化問題における制約条件としては、各機器性能特性、エネルギー収支を含めた需給バランス関係である。未知変数は、更新年 τ 、更新時撤去機器および新規導入機器と容量ならびに変動するエネルギー需要量に対するシステム運用方策である。

3.3 解法

以上述べてきた最適更新計画問題を未知変数に0-1整数変数と連続変数が混在する混合整数線形計画問題に定式化し、分枝限定法とシンプレックス法を組み合わせた数値解法を用いて求解する。

4. 研究成果

数値分析で得られた研究成果の内容は、非常に多様であるが、ここでは主要成果のみについて述べる。

4.1 対象建物、需要量および機器性能特性

考察の対象とした建物は、前述したように標準的な延床面積 $15,000\text{m}^2$ の事務所ビルである。このビルに対するエネルギー需要量としては冷暖房および電力のみを考慮し、それぞれ季節別・時刻別データが与えられているものとする。なお、導出される解析結果の分析の複雑化を回避するために、システム評価期間におけるこれらの需要データは変化しないものとする。

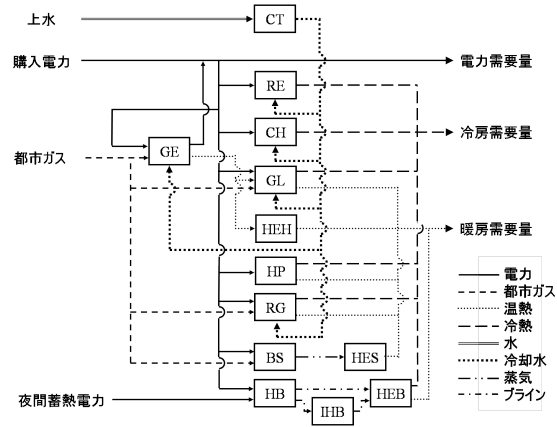


図2 更新システムのスーパー・ストラクチャー

また、現時点を $t_p=7$ 年とし、評価期間は $T=15$ 年とする。すなわち、ビルの新設後7年目に15年先までに1回だけ設備の更新を検討するものとする。また、エネルギー供給システムとしては新設時に単純に容量 $2,708\text{kW}$ のガス吸収式冷温水器 (RG) が導入されていたものとし、これに対し図2に示した多種多様な機器の中から更新候補機器を選択できるものとする。すなわち、ガスエンジン (GE)、水冷ターボ冷凍機 (RE)、水冷スクリー冷却機 (CH)、空冷スクリーヒートポンプ (HP)、空冷ブラインスクリーヒートポンプ (HB)、氷・温水蓄熱槽 (IHB)、前述の RG、排熱投入型ガス吸収式冷温水器 (GL) および蒸気ボイラ (BS) から構成され、事務所ビルに導入可能性の高い多くの機器機種を含んでいる。なお、図2において CT は冷却塔ならびに HEH・HES・HEB は各種熱交換器を表わしているが、これらの機器類の設備費や諸特性に関しては関連する主要機器類にすべて包含して考慮するものとした。

なお、機器の耐用年数は22年とし、金利は全システム評価期間 T で一定で、 $3\%/年$ と仮定した。また、ここでは、主に炭素税導入の影響を分析するために、評価期間を通じて過剰な供給不足が起こらないように、新設システムの設備余裕率をピーク需要比で 30% 確保した。また、炭素税の標準的な値としては、 $R_0=655 \text{円}/\text{t}-\text{CO}_2$ と設定し、炭素税の値を変化させた場合の分析を実施するために r を炭素税倍率と定義し、炭素税を $R=rR_0 [\text{円}/\text{t}-\text{CO}_2]$ で表した。

4.2 数値計算結果

ここでは、炭素税の導入がない場合 ($r=0$) と標準的炭素税が導入された場合 ($r=1$) において、それぞれ最適更新計画問題に対する最適解の結果をまず考察する。

図3にこの更新を全く行わなかったケースを基準とした場合に対しての年間総経費削減率 [%] および総 CO_2 排出量削減率 [%] を示した。これらより、炭素税を導入しなかった場合の最適更新計画年は $\tau^*=8$ 年であり、

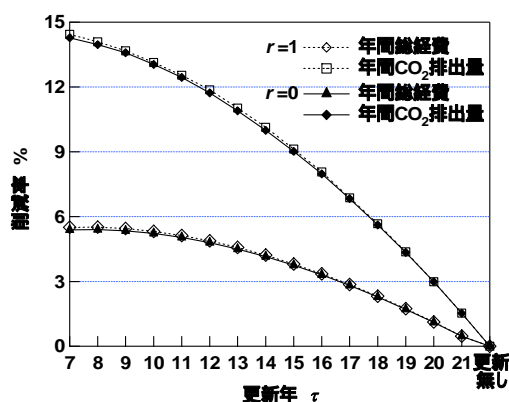


図3 更新年に対する各種削減率

この時の年間総経費削減率は5.4%となる。この場合の機器構成については、新設システムである2,708kWのRGを撤去し、最適更新年 $r^*=8$ 年に新型のRG1(284kW)、およびHB(487kW)を導入する。同様に、標準的炭素税が導入された場合($r=1$)の最適更新計画は機器機種の選択やそれらの運用方策はほぼ同一で、最適更新年は導入を考慮しない場合より1年だけ早くなるのみで、 $r^*=7$ 年となった。これにより、標準的な炭素税を導入しても最適更新計画にはほとんど影響を与えないことが判った。

4.3 結果のまとめ

本研究では、エネルギー供給システムにおける最適更新計画手法の提案とその有効性を示した。また、我が国において注目度の高い問題の一つである炭素税が導入された場合に最適更新計画がいかなる影響を受けるかについて延床面積15,000m²の一般的事務所ビルを対象に感度分析を行い、以下の結論を得た。

1) 炭素税655円/t-CO₂($r=1$)が導入されても、この程度の価格であれば、最適更新計画にほとんど影響を与えないことが判明した。

2) 炭素税を2倍($r=2$)にすると、CO₂排出量を減らすために1年だけ早く更新する解が最適であることが判った。

3) ここでは、数値的な結果の詳細は述べなかったが、初期段階で導入されたシステムの省エネルギー特性が高くない場合、出来るだけ早い時期により高効率な機器に更新するのが、長期的視点から得策である。その一方で、初期システムが高効率の場合、急いで更新を行う必要性は無い。

4) 2段階更新計画問題においては、1回目の更新において基本的により効率の高いシステムに入れ替えが行われているため、2回目の更新においてはあまり大幅な機器機種等の変更は無いことが判明した。

また、太陽電池-蓄電池系の劣化特性については、特にリチウムイオン形2次電池の劣

化特性が、長期間の最適機器運用に与える影響を考慮するための混合整数計画問題を取り上げた。ここでは特にサイクル劣化と放電深度履歴に依存する劣化の特性をモデル化した。非常用バックアップ電源によく見られる、常時満蓄状態に維持するフロート充電は想定せず、日々、省エネ性あるいは経済性を重視した最適運用を行うとした。この場合、家庭用を想定した評価期間10年では、最適運用に対する蓄電池の劣化特性が与える影響は無視できず、運転モード(経済優先か、省エネ優先か)による最適運用の違いが明確になった。

以上のように、エネルギーシステムの最適計画において、機器の運用期間よりも長期となる評価期間を設定することによって、従来行われてきた、1年間だけの需要特性だけでシステムを決定することは合理的ではなく、機器の劣化特性や、技術革新などの性能向上の影響が、システムの最適更新計画、ひいては初期システムの決定にとっても非常に重要であることが判明した。また、ここでは詳しく述べなかったが、需要特性の時系列情報を保持したクラスタリング手法も明らかにしたことで、長期的なシステム運用を考慮した設計・更新計画を可能とする数理的基盤を開発することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

吉田修、吉田彬、伊東弘一、天野嘉春：病院用エネルギー供給システムの更新計画における初期システムの影響分析；日本機械学会論文集(B編)79巻806号、pp.2312~2323(2013)、doi:10.1299/kikaib.79.2312、査読有

A. Yoshida, Y. Amano, N. Murata, K. Ito, and T. Hasizume, A Comparison of Optimal Operation of a Residential Fuel Cell Co-Generation System Using Clustered Demand Patterns Based on Kullback-Leibler Divergence, *Energies* 2013, 6, 374-399; doi:10.3390/en6010374, 査読有

[学会発表](計7件)

S. Yoshida, K. Ito, A. Yoshida, Y. Amano: A multi-stage renewal planning of an energy supply system for a hospital based on the mathematical optimization method; Prof. of ECOS 2015(2015)(in press), 査読有

A. Yoshida, T. Sato, Y. Amano, K. Ito, Impact of electric battery's degradation on economic and energy saving characteristics of residential

photovoltaic system, Proc. ECOS2014, Turku, Finland, (2014/6), 査読有
佐藤富一, 吉田彬, 天野嘉春, 伊東弘一,
家庭用太陽電池システムへの蓄電池の導入効果の分析, エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2014/1/23-24, (2014)
佐藤富一, 吉田彬, 天野嘉春, 伊東弘一,
家庭用 PV システムと併用する蓄電池の劣化特性を考慮した検討, 日本機械学会第18回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2013/6/21-22, 千葉, (2013)
A.Yoshida, Y. Amano, K. Ito, Optimal operation of a residential photovoltaic/fuel-cell energy using scenario-based stochastic programming, Proc. ECOS 2013, Guilin, CHINA, 2013/6/16-19. (2013), 査読有
S. Yoshida, K. Ito, Y. Amano, S. Ishikawa, T. Sushi, T. Hashizume: Effect of initial systems on the renewal planning of energy supply systems for a hospital; Proc. of ECOS 2012, Perugia, Italy, (2012), 査読有
A. Yoshida, Y. Amano, N. Murata, K. Ito, and T. Hashizume, A comparison of optimal operation of residential energy system using clustered demand patterns based on Kullback-Leibler divergence, Proc. ECOS 2012, Perugia, Italy, (2012), 査読有

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.amano.mech.waseda.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天野 嘉春 (AMANO Yoshiharu)

(早稲田大学・理工学術院・教授)

研究者番号: 60267474

(2) 研究分担者

伊東 弘一 (ITO Koichi)

(早稲田大学・理工学研究所・招聘研究員)

研究者番号: 30029293 (*2012)