

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01307

研究課題名(和文) 学習的探索手法を応用した建築・都市エネルギーシステム最適化手法の開発

研究課題名(英文) Development of building/city scale energy system optimization method applying learning search method

研究代表者

大岡 龍三(Ooka, Ryoza)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,100,000円

研究成果の概要(和文)：建物・都市のエネルギーシステムに蓄電池・蓄熱槽及び再生可能エネルギー発電の導入が増加している。本研究では、エネルギーシステムの将来的な変化に先んじて対応するために、エネルギーの需給バランス制御と省エネルギー・コスト削減の達成を目的とする最適建築・都市エネルギーマネジメントシステムの方法論を開発した。主たる研究項目は、1) 学習型需要・PV発電量計算、2) 単体建物エネルギーシステムの最適化、3) 複数建物運用最適化への拡張、4) 不確実性下でのリアルタイム需給制御であった。また、実際のエネルギーシステムにおける制約条件等を整理し、最適運用アルゴリズムの標準設計ガイドラインに関する基礎的検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単体建物ひいては都市全体のエネルギー最適化は現代において重要な課題であるが、個別の要素を統合し、実務の観点まで含めた総合的な研究は行なわれていない。一方で、学術研究では理論的な知見は蓄積されているが、実機の不確実性などを考慮した現実的な手法の提案はまだなされていない。本研究は、このような学術研究と実務の乖離を解決するために、要素技術を集結させたシミュレーションモデルの開発から、実事例の調査による実機特性の把握及びそのモデル化、ひいてはそれらを利用した最適化シミュレーションの実装を行った。開発した方法論は多様なケースに対応しており、今後の最適制御のガイドラインとしての活用できるものである。

研究成果の概要(英文)：The introduction of energy storage batteries, heat storage tanks, and renewable energy power generation in buildings and cities has been gradually increasing. Assuming a situation where such changes have progressed in earnest, this study has developed an optimization methodology for a building/urban energy management system that aims to achieve both energy supply-demand balance control, and energy and cost reduction simultaneously. The main research items were 1) self learning-type energy demand and photovoltaic power generation calculation method, 2) optimization of a single-building energy system, 3) optimization of to multiple-building operation, and 4) real-time supply and demand control under uncertainty. Furthermore, based on a feasibility analysis and case studies, we have created guidelines for standard building energy system design that support a stable energy supply with high efficiency.

研究分野：建築環境工学

キーワード：建築環境・設備 最適化 エネルギー受給 エネルギー効率化

1. 研究開始当初の背景

申請者は本研究の前段階として、建物 1 棟での熱源システムの容量設計から運用方針に至るまでの最適化及び建物 2 棟での複雑な最適熱融通方法を明らかにした。従来の研究では複雑なシステムを単純化し行なっていたのに対して、申請者の研究では物理現象をより現実に即したモデルで計算することが可能になっており、その後の最適化研究の基盤を築いた。近年では蓄電池や蓄熱槽などの普及を見越して、それらシステムの統合的な最適化に関する研究を行なった。蓄電池などは現時刻の運用が次時刻以降の運用に影響する「時間依存性」を有し最適化計算の難度が高いものの、当該論文では従来手法より格段に高速な手法の提案を行なっている。しかし、このように学術研究としての知見は蓄積されているものの、実際の建物 1 棟もしくは地域冷暖房システムを見渡すと、実務的な運用状況は相当簡略化されている。従って、最適化の余地は十分残されていると考える。実務で簡略化されている背景として、翌日の最適運用計画策定には、需要家情報や気象予測、電力取引など考慮しなければならない項目が多岐にわたることが挙げられる。一方、学術研究ではこれまでも個別の技術開発がなされており、気象予測及び需要・発電予測に関する研究や電力取引におけるモデル化に関する研究、冷暖房を行なう建物における熱的・空氣的な物理現象に関する研究などが挙げられる。しかし、これらを統合して検証しなければ実務への応用は難しく、そのような研究はなされていない。更に、各機器の発停にかかる時間のモデル化や性能変化については個別研究開発もほとんどされておらず、要素技術の開発から行う必要がある。また、実際の建物では予測値と現実値が乖離することは頻繁に起こり得る現象であり、そのような変化が起きた際に実際にどのように運用を変更するのかといった対策も必要となり、単純なシミュレーションのみでは実社会への適用は難しい状態であった。

2. 研究の目的

本研究で扱う分野は個別要素の集合体であることから、幅広い知見を集約して取り組むべき課題と認識している。そこで効率的に研究を進めるために次の 4 つのステップを明示する。1) 実建物の計測データの収集、需要・発電量予測に関する既存技術の調査・比較及び発展、2) 単体建物におけるエネルギーシステムの詳細な最適化計算の手法確立、3) 2) で確立した手法を街区モデルへ拡張、4) 1) 及び 3) による不確実性を考慮した最適化シミュレーション手法の開発及びデータ解析による定量的な評価、以上の 4 つである。

まず 1) は、従来、継続して研究がなされている分野であるが、特に近年の機械学習に代表される手法の発展もあり、学術研究を俯瞰すると手法の乱立が否めない。そこで調査を通じて手法間比較を行ない、建築分野に効果的に利用できる手法を考察する。そのために実事例の需要データの整備や気象予測が需要に与える影響などを明らかにする。更にこのフェーズで収集するデータはフェーズ 2 以降で使用する機器の回帰モデル等にも利用する。

次に 2) 及び 3) は、システム最適化を対象とする従来研究ではこれまで無視されることが多かった要素(例えば機器の応答性や冷水温度・流量の不確実性、システムの詳細な構成)などについて実際の設計者・プラント運用者など広くヒアリングを行ない、フェーズ 1 で収集したデータと併せることでより詳細なモデルを構築する。ポンプなど各要素の詳細な研究では考慮されてきたものの、そのような研究では計算が煩雑なため数値的な最適化まで発展することが出来ておらず、その 2 つの研究を結合する役割としても本研究の意義がある。ただし、主目的として、日々のシステム運用を如何に効率化できるかに焦点を置いているため、得られた結果の一般性よりも、対象とするシステムがどのような構成であっても適用できる手法そのものの汎用性を重視する。機器モデルでは、従来であれば LCEM など事前に用意された特性式を用いた研究が多かったが、本段階ではその事前特性式を運用中のデータにより修正しつつ計算を行なう Self-adaptive 手法に関する検討も行なう。この手法の確立により、「計測-モデル化-計算による最適化-計測-修正」といったサイクルが自動化できる。

4) では 2) において既知とした需要情報をより現実的なものとし 1) の予測手法と結びつける。予測が実際と異なる多数のケースを計算し、得られた多数のデータ解析から操作基準となる閾値及び最適な対策方法を明らかにする。

更なる発展として、以上により開発したモデル・手法・システム運用方法を更に一体化し、建築・都市エネルギーシステムの効率的かつ安定的な運用が可能なガイドライン策定への基盤とすることを見据える。

3. 研究の方法

本研究では、まず始めに実事例の調査と、収集したデータの解析及び需要予測モデルの研究を行った。これらは単体建物及び複数建物の最適化を行うにあたっての前段階に該当する。次に単体建物において各モデルの連成及び最適化を行なった。その後、段階を経て複数建物、街区と徐々に計算で扱う地域の範囲を拡張した。計算モデルでは蓄電池を含む電力グリッドと、蓄熱槽を含む熱グリッド双方を考慮し、特に熱グリッドについては地域冷暖房にも適用範囲を広げシステムに汎用性を与えた。不測的な需要変動への対応では、需給バランスを保つことを制約条件にした運用計画再計算アルゴリズムの構築を行った。将来的な発展を見据え、開発プログラムは初期段階から外部プログラムとの連系性に富んだ仕様とした。研究において主にコンピューターを用いたシミュレーションを中心としたが、各分野の専門家及び実務家からのヒアリングも含めて他分野の知識を十分に反映し、実用性を確保した。

4. 研究成果

本研究は核の四つのフェーズに分けて行われた。

■フェーズ1. 実測データの収集・分析及び学習型需要計算アルゴリズムの開発

第一段階としては、これまでの研究では扱われていなかった、建物の需要パターンを学習し需要を計算する「学習型需要計算アルゴリズム」の検討及び適用を行った。実事例の各種計測データの収集及び解析を行い、そのデータを利用した新手法の開発を行い、従来手法通りの外気条件等で求める負荷計算の結果と比較することで、利用可能性を評価した。また、仮想需要データを作成し、膨大なデータを用いて学習することで更なる精度検証を行った。加えて、需要の予測モデルの他に、熱源機器の特性曲線のモデル化も検討した。実務ではメーカーから提供される特性曲線もしくはカタログ値を用いているケースが多いが、実態と異なることが多いため、収集した実測データを利用して機器特性の学習モデルを作成した。

■フェーズ2. 単体建物エネルギーシステムの詳細最適化

右図に示す単体オフィスビルのエネルギーシステムを対象に、水温・流量・ポンプの周波数など実際の運用での制御項目となる箇所を変数として、より実態に即した最適化を行なった。従来の研究では、システム特性を線形近似して線形計画法を利用した研究が多くなされてきたが、実際の運用への適用を考えると、近年のインバータ技術の普及による非線形性や、機器の出力ポイントが離散的(5%刻みなど)であること、水温変化の計算には反復計算による微分方程式の解法が必要になるなど、線形近似では対応しきれない場面が非常に多い。そこで本研究では、

反復計算を用いてより最適な解を探索する人工知能アルゴリズムの一種であるメタヒューリスティクスを利用し、最適化を行った。

従来研究では、上記のいずれの手法を用いた最適化研究においても、計算の煩雑さを避けるために、冷水温度等は一定などと仮定した簡易的な検討が多かったが、本研究では実事例の調査により、下記のように更なる詳細化を行なった。

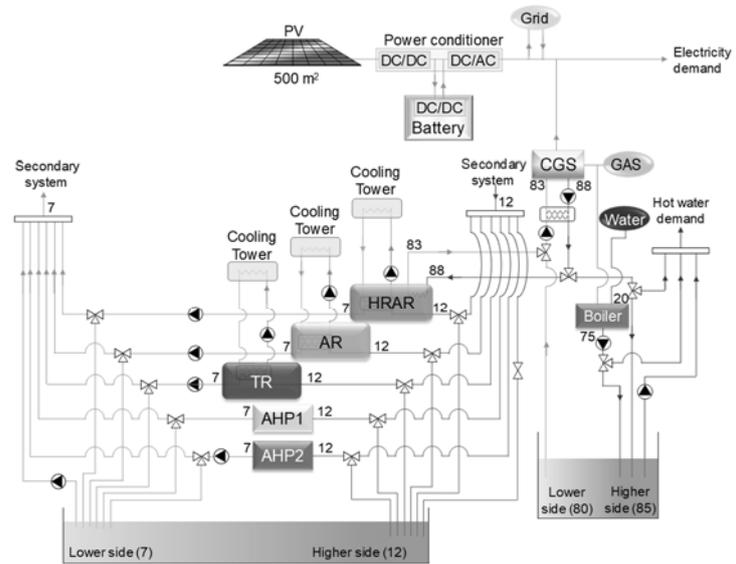
- 1) 実態に即した配管・ヘッダー構成等のモデル化
- 2) 制御ポイント及び成り行きとなっている変数(冷水還温度等)の精査
- 3) 制御応答性の検証及びモデル化
- 4) 実機器の特性把握及び特性変動を動的にモデル化するための Self-adaptive 型学習アルゴリズムの開発
- 5) 各種モデルの連成及び動作検証
- 6) メタヒューリスティクスによる離散・非線形最適化の実装

始めの段階では二次側を除く熱源一次側を対象とした。アルゴリズムのチューニング及びモデル化が終了した後、最適化を施したケースと経験的な運用を想定したケースを比較した。更に、フェーズ1で検討した予測アルゴリズムとの連成を行なった。予測と需要にズレがない所謂「完全予測」と呼ばれるケースにおいて年間を通じた運用最適化を行なった。

■フェーズ3. 複数需要家の同時最適化手法の確立

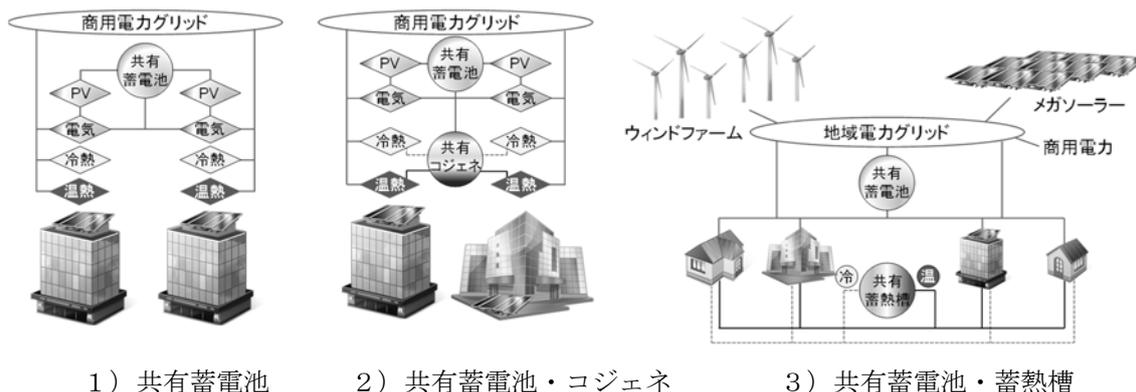
単体建物の最適化を多数の建物に拡張した。今後の社会的なニーズでは、各建物が蓄電池を所有するケースに加えて、とりわけ再開発地区などにおいて共有の蓄電池・蓄熱槽を設けるケースも想定される。そこで本研究では複数建物が持つエネルギーシステム同士の接続を段階的に増やしていくことで研究の発展を試みた。次ページの図は、検討した1)～3)段階の複数需要家のシステム接続を示す。

- 1) PVを備えたオフィス2棟に共有蓄電池を設置し、一般電力需要をその蓄電池及びPV、商用電力から賄うシステムである。
- 2) 2棟で共有するコージェネレーション設備(共有コジェネ)を追加したケースである。更にオフィスビルと病院という需要パターンの異なる建物を連携することで、多様性を持った最適化手法を適用した。
- 3) それぞれ異なる需要パターンを持つ4棟の建物をひとつの模擬的地域とし、「大規模自然エネルギー発電所を組み入れた地域電力グリッド+独立した共有蓄電池」で構成される電力システムと、「冷温熱を独立して扱うことが可能な共有蓄熱槽+冷温熱別熱融通管」で



エネルギーシステムの例

構成される冷熱グリッドを考慮し、最大限の地域内エネルギー融通を行なう最適化を行った。



1)～3)を対象とし、単一目的の他に、全体と個々の最適化に関する多目的最適化も検討した。本研究では地域熱・電力融通に関わるシステム構成を対象として検討を行った。検討の結果、電力融通に関しては熱より問題定義が明確であるため、本研究の成果は実社会に対して即時的な成果を挙げることが期待できる。地域熱融通は地域冷暖房と同じ概念でアプローチした。システムは導管による熱損失や圧力損失、二次側からの冷水・温水還り温度の変動など考慮し、最適化を検討した。より洗練された形にする必要があるが、ベースとなるモデル及びアルゴリズムは地域熱融通の結果を利用できると考える。

■フェーズ4. 需要・発電量変動の不確実性及び最適化の再計算アルゴリズム

最終段階では、需要及び発電量の不確実性に追従する最適化の再計算アルゴリズムの構築に取り組んだ。初期段階として、単体建物に関して需要のみが不測的に変動した場合の対応を考えた。その後、発電量のみが不測的に変動するケースを試行し、更に、実際の計算機による計算負荷の増加量と最適化効果を照らし合わせたときにもっとも効率的に計算が可能になるような手法の方法論を開発した。最後に需要・発電量それぞれが不測的に変動を起こすと仮定したシビアなケースにて本研究のシステムの堅牢性を確認した。次のステップでは街区モデルにも適用した。熱系統に関しては電気系統よりも機器応答性の問題が顕著に表れた。この問題を解決するために、リアルタイムの運用修正を行なう時間幅に関する検討を行った。電気系統は電力の観点で見た場合の需給調整を検討した。本研究のまとめとして、需要の予測手法、気象予測精度が需要に与える影響の定量化、単体建物のエネルギーシステム最適化に関する詳細な検討、複数建物に関する電力融通・熱融通、地域冷暖房の最適運用手法、需要変動への効率的かつ実地的な対処法に関して知見を集積した。本研究の結果を総合することによりエネルギーシステムの運用に関する方法論を更に一般化することができた。

今後、開発した最適化計算を多様な需要パターン及び多様な機器構成に適用して得られたビッグデータを解析することで、最適運用に関する閾値を見出すことが期待できる。開発した方法論を用いることにより、将来的に実際のエネルギーシステムにおいて毎回最適化計算を行なうことなしに最適な運用計画を策定することが出来ると考える。その成果は、ある特定の大規模事例だけではなく、中小規模のシステムにおける最適化導入の裾野を広げるために非常に重要なものになると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 池田伸太郎、大岡龍三	4. 巻 254
2. 論文標題 地域エネルギーシステムの最適化における学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発 第2報— 建物間熱融通システムの運用最適化における強化学習との比較	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wonjun Choi, Kathrin Menberg, Hideki Kikumoto, Yeonsook Heo, Ruchi Choudhary, Ryoza Ooka	4. 巻 228
2. 論文標題 Bayesian inference of structural error in inverse models of thermal response tests	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 1473-1485
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wonjun Choi, Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka	4. 巻 20
2. 論文標題 Two thermal performance test (TPT) datasets of a single U-tube borehole heat exchanger with inlet setpoint temperatures of 30 °C and 40 °C	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 1769-1774
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dib.2018.08.215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wonjun Choi, Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka	4. 巻 180
2. 論文標題 New perspectives in thermal performance test: Cost-effective apparatus and extended data analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 109-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.enbuid.2018.08.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 千葉理恵, 西脇 修, 棚橋 優, 田中英紀	4. 巻 43巻 258号
2. 論文標題 コージェネレーションシステムの発電機台数制御パラメータの最適化に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 pp.11 -19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wonjun Choi, Ryoza Ooka, Yujin Nam	4. 巻 38
2. 論文標題 Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainable Cities and Society	6. 最初と最後の頁 429-439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016 / j.scs.2017.12.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 文可,大岡龍三,日野俊之,劉明哲,崔元準,李度胤,池田伸太郎
2. 発表標題 再生可能エネルギー利用のための水循環・分散型ヒートポンプシステムの開発 その8 冬期運転試験及び暖房運転性能の実測
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉明哲,大岡龍三,日野俊之,文可,崔元 準,李度胤,池田伸太郎
2. 発表標題 再生可能エネルギー利用のための水循環・分散型ヒートポンプシステムの開発 その9 システム概要及び天空熱源ヒートポンプの冬期集熱運転特性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李度胤, 大岡龍三, 池田伸太郎, 崔元準
2. 発表標題 ANN 及びメタヒューリスティクスを用いたモデル予測制御手法の開発 (その3) 蓄熱槽を含むオフィス建築物の冷房運転へのモデル予測制御の適用
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田伸太郎, 大岡龍三
2. 発表標題 熱源運用最適化におけるメタヒューリスティクスと動的計画法の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日野俊之, 大岡龍三
2. 発表標題 地中熱利用と地中蓄熱を統合するシステムのコンセプト
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 崔元準, 菊本英紀, 大岡龍三
2. 発表標題 熱性能試験データを用いた地中熱交換器設計パラメータのベイズ推論
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李度胤, 大岡龍三, 池田伸太郎, 崔元準
2. 発表標題 ANN 及びメタヒューリスティクスを用いたモデル予測制御手法の開発 (第4報) 蓄熱槽を含むオフィス空調設備の在室者変動を考慮した冷房運転への適用
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉明哲, 大岡龍三, 文可, 日野俊之, 李度胤, 崔元準, 池田伸太郎, Djafar Reza Palasz
2. 発表標題 再生可能エネルギー利用のための水循環・分散型ヒートポンプシステムの開発 (第10報) 冬期運転試験及び実測による暖房運転性能評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 文可, 大岡龍三, 日野俊之, 劉明哲, 李度胤, 崔元準, 池田伸太郎, Djafar Reza Palasz
2. 発表標題 再生可能エネルギー利用のための水循環・分散型ヒートポンプシステムの開発 (第11報) ANNによる天空熱源ヒートポンプの冬期集熱運転性能の予測
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李度胤, 大岡龍三, 池田伸太郎, 崔元準
2. 発表標題 ANN を用いたモデル予測制御の開発 蓄熱槽及び地中熱ヒートポンプの高精度予測のための ANN モデル化
3. 学会等名 第52回空気調和・冷凍連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wonjun Choi, Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka
2. 発表標題 Comparison of thermal response test and thermal performance test
3. 学会等名 EnerSTOCK 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Hino, Ryozo Ooka
2. 発表標題 Water-Loop heat pump system that stores multiple renewable energies in the ground
3. 学会等名 EnerSTOCK 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 英紀 (Tanaka Hideki) (00303660)	名古屋大学・施設環境計画推進室・特任教授 (13901)	
研究分担者	菊本 英紀 (Kikumoto Hideki) (80708082)	東京大学・生産技術研究所・講師 (12601)	