

平成22年5月10日現在

研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2008～2009  
課題番号：20760409  
研究課題名（和文） 都市スケール建築エネルギー需要モデルの精度保障に関する研究  
研究課題名（英文） Energy Demand Model Development Procedure for Commercial and Residential Sector Considering Accuracy Assurance  
研究代表者  
山口 容平（YAMAGUCHI YOHEI）  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号：40448098

## 研究成果の概要（和文）：

民生部門を対象とするエネルギーマネジメントは重要な課題である。近年エネルギーマネジメントの中長期的な効果を推計するエネルギー需要モデルの開発が盛んに行われている。本研究はエネルギー需要モデルの数値計算結果の精度を保障するモデル開発手法を開発した。また、開発した手法を地域、都市、国家と異なる空間スケールの家庭・業務ストックに適用し、中長期の温室効果ガス削減シナリオの評価などに用い、開発手法の有用性を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

This research proposes a procedure to develop an energy demand model of a residential or commercial building stock. In this procedure, first, a parameter screening is carried out to select building properties that have a significant influence on the energy use of buildings. Then the building stock is classified into building stock categories according to the parameters specified in the screening. Then, a building model each representing a building stock category is designed. This model is used as input dataset to perform simulations for quantifying the energy consumption per unit floor area or household in each building stock category. Finally, the total energy consumption is aggregated by summing up the predicted energy consumption of all the building stock categories. In this research, it is evaluated how this procedure assures the accuracy of the simulation result through several case studies in which this procedure was applied to residential or commercial building stock at several spatial scale from district, city to nation.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 都市計画・建築計画

キーワード：エネルギー効率化，都市・地域計画，シミュレーション工学，精度保証

## 1. 研究開始当初の背景

日本や先進国においては中長期に実施すべき温暖化対策の策定、アジア諸国の多くの都市においては増大する建築関連エネルギー消費の管理方策の検討において、エネルギー需要を推計、予測する数値モデル（エネルギー需要モデルとする）が開発されている。一方で、それらのモデルの精度について必ずしも十分な検証がなされておらず、数値計算結果の精度の保障が行われることはまれである。この理由は次のようなジレンマの存在にある。モデルの開発過程において、対象とする空間領域が大きくなるほど数値モデルが扱わなければならないパラメータの数が増加し、モデルの簡略化が必要になる。一方で、建築におけるエネルギー需要は居住者の行動、照明などのエネルギー消費機器、建築・設備の性能、気象条件により影響を受けるため、エネルギー需要を正確に予測・推計するためには、数値モデルにおいて「エネルギー需要が形成される構造」を可能な限り模擬する必要がある。また、現在提案されている多様なエネルギーマネジメント手法を取り扱う能力を備えるためには、数値モデルにおいてより多くのパラメータを扱う必要が生じる。これらの数値モデルの設計仕様はモデルの詳細化を要求する。ここで述べた関係は相反する関係にあり、この相反関係は数値モデルによって得られる結果の精度の低下をもたらす。以上の背景から、建築ストックエネルギー需要モデルの計算精度を保障することができるモデル開発手法を確立することは重要な課題と考えられる。

## 2. 研究の目的

都市スケールの建築ストックエネルギー需要モデルの開発手法を確立することを研究の目的とする。

数値モデルの精度は次の3つの要素から決定される：

- ① 計算アルゴリズム（主計算部分）の精度
- ② 計算の入力条件（パラメータ）の精度
- ③ 計算結果に基づく最終出力の算出部分の精度（エネルギー需要モデルであれば個々のエネルギー消費の積み上げ方法）

計算アルゴリズムにおける精度の確保（上記①）はシミュレーション研究における主要テーマの一つである。計算の目的に応じてどこまで詳細なモデルを構築するか適切に判断することが重要である。Prof. Jan Hensenの研究グループによってこの判断基準、手順

が提案されている<sup>1</sup>。計算の入力条件の不確実性（上記②）は計算出力に大きな影響を及ぼす。その影響を定量的した分析にはWit<sup>2</sup>の研究などがある。最終出力の算出部分の精度（上記③）については、エネルギー消費特性から建築ストックを分類し、分類別にエネルギー需要を定量化する方法が提案されている<sup>3</sup>。

このように、上記①～③の各要因について精度の低下を抑える方法論が提案されている。一方で、上記の①～③の要因を統合的に扱い、モデルの精度を客観的に保障し、モデル構築の目的への適合性を判断する方法は確立されていない。本研究はこの方法論の確立を目指すものである。モデル構築の方法論を確立することで都市スケールのエネルギー需要のモデル化を実施するハードルを下げ、都市のエネルギーマネジメントに関する多様な試みを促すと考えている。

## 3. 研究の方法

- (1) エネルギー需要モデルの計算精度を保証するモデル開発手法の確立

前述の通り、エネルギー需要モデルにおける誤差は、①計算アルゴリズム、②入力条件、③最終出力の算出部分に含まれる誤差、不確実性によって生じる。本研究では、エネルギー需要モデルによって定量化する出力（二酸化炭素排出量など）について、①～③の各要因によって生じる精度の低下を定量的かつ並列に比較する。ここでは実験計画を立案してシミュレーションを行い、統計的手法によって①～③の各要因に含まれる誤差要因によってシミュレーション出力に生じる変化を解析する。この結果に基づいて①～③により生じる誤差・不確実性を位置づける方法を決定し、シミュレーションの目的に適切な精度を確保する。

- (2) モデル開発手法に基づくエネルギー需要モデルの開発

エネルギー需要モデル開発手順を特定の地域、都市、国家の住宅・建築ストックに適用し、エネルギー需要モデルを開発する。こ

<sup>1</sup> Djunaedy ほか 2003. Proceedings of 8th International IBPSA conference 2003, pp. 267-274

<sup>2</sup> Wit. 1997. Journal of statistical computation and simulation, Vol. 57, pp. 305-320

<sup>3</sup> Huang ほか 1991. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-29798, Clarke ほか 2004. Energy and Buildings, Vol. 36, pp. 759-770, Shimoda ほか 2004. Building and Environment, Vol. 39, pp. 959-967.

これらのケーススタディを通してモデル構築手順の課題を抽出し、手順を再考察する。

研究期間に開発したエネルギー需要モデルは以下のとおりである。

- ・ 大阪御堂筋地区、心斎橋地区、中之島地区、南千里丘地区を対象とするエネルギー需要モデル
- ・ 日本全国の家庭部門エネルギー需要モデル
- ・ 近畿圏（2府4県）家庭、業務部門エネルギー需要モデル
- ・ 大阪市業務部門エネルギー需要モデル
- ・ 上海市家庭部門エネルギー需要モデル

上海を取り上げた理由は以下のとおりである。アジアの成長する都市では建築ストックの量的な充足が優先されており、このまま性能の低い建築や設備が集積し、使用されるならば、長期的には非常に非効率なエネルギーシステムが形成されることが懸念される。本研究によって都市スケールのエネルギー需要モデルの構築手法が確立されたならば、その手法を複数のアジアの都市に適用することで、持続的な都市管理・エネルギーマネジメントを実施するために有用な知見を生み出すことができる。特に、都市計画、地域計画、建築計画、インフラ整備等の各領域の設計支援ツールとして活用可能であり、各計画領域の統合的施策の支援も可能となる。以上の背景から、中国同済大学の譚教授の協力を得て上海の家庭部門のエネルギー需要モデルを開発した。

#### 4. 研究成果

##### (1) エネルギー需要モデルの計算精度を保証するモデル開発手法の確立

開発したモデル開発手順を図1に示す。開発したモデルは、家庭部門では世帯、業務部門では建物を最小単位とする。まず、①モデルの最小単位（世帯、建物）のエネルギー需要に大きな影響を及ぼす世帯・建物属性をスクリーニング手法により特定する。次に、②エネルギー需要に大きな影響を及ぼす属性により住宅・建築ストックを類型化し、③類型別に類型に含まれるストックを代表する建物モデル（代表建物モデルとする）を作成する。次に、④代表建物モデルを入力条件としてシミュレーションを行い、エネルギー需要原単位（業務部門であれば延床面積当たり、住宅部門では世帯当たり）を定量化する。最後に、⑤各建物類型の建築ストックに対して推計されたエネルギー需要原単位をかけあわせ、積算し、対象とする住宅・建築ストック全体のエネルギー需要として定量化する。

②のパラメータスクリーニングにおいては、前述の Wit が提案した手法（Factorial Sampling Method）を用いた。まず、世帯あるいは建物のエネルギー需要モデルにおい

て、不確実性が含まれる入力データについて、最大値、最小値を特定する。次に、初期値としてすべてのパラメータを最大値、最小値のいずれかに設定し、各パラメータをランダムな順番で反転し、それぞれのパラメータの変化による出力（エネルギー消費量などの重要な指標）の変化量を定量化する。すべての属性が反転し終わったら、この手順を多数回繰り返す。各属性が最大値から最小値に変化した出力の変化の平均値を取り、これを当該属性の主効果とする。この主効果の大きさに基づいて、モデル上での各属性の不確実性の取り扱い方を決定する。この手順を図2に示す。図に示すように、属性の主効果が大きく、属性の数値を特定可能なものについては図1に示した2番目の手順においてストックの類型化を行う属性として決定する（図2中の中心の区分）。

ここまでに説明したエネルギー需要モデル開発手順を建築のシミュレーションに関する専門誌 Journal of Building Performance Simulation に投稿しており、掲載が決定している（第5節の雑誌論文1.）。

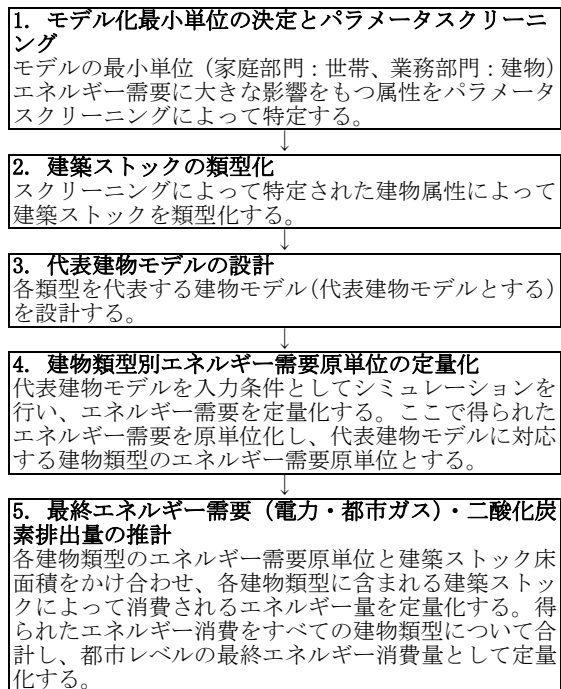


図1 建物類型モデルの概要

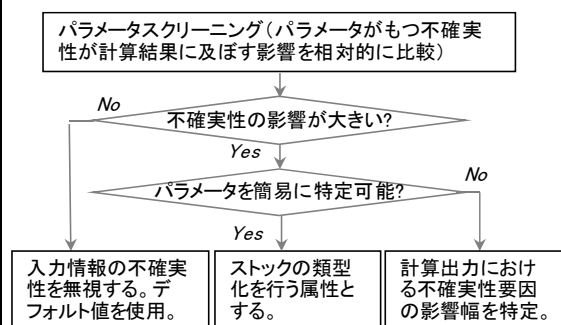


図2 シミュレーションモデルの構築手順

(2) モデル開発手法に基づくエネルギー需要モデルの開発

① 業務部門のエネルギー需要モデルを例とする検討結果

実存するオフィスビル31件を対象として、パラメータスクリーニングより特定された属性情報を特定することによる精度の向上効果を推計した。ここではパラメータスクリーニングの結果、ストックの類型化に用いるべきと分類された建物属性について対象建物の情報を収集し、エネルギー消費量の予測を行った。結果を図3に示す。図からわかるように建物別では最大60%の誤差が生じているが、対象とした31棟全体では電力3%、都市ガス7%、一次エネルギー消費量では2%の誤差となった。この結果は、パラメータスクリーニングの結果が妥当であり、スクリーニングで特定された属性によってストックを類型化し、図1に示した手順に従うことで、計算精度の高いエネルギー需要モデルの開発が可能であることが示唆される。

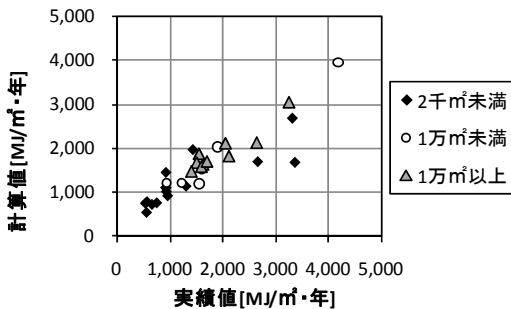


図3 棟別年間一次エネルギー消費量原単位の比較 (凡例は延床面積の区分を示す)

以上の成果に基づいて大阪市の業務建築ストックを対象として図1の手順2以降を実施し、エネルギー需要モデルを開発した。モデルにより推計されたエネルギー需要を実態値と比較した結果を図4に示す<sup>4</sup>。電力、都市ガスの推計値はいずれもほぼ統計値と等しくなり、ある程度の精度が確保されていると考えられる。また、本研究のエネルギー需要モデルの特徴は用途別にエネルギー需要を特定できる点にある。これによってどのような技術の普及によりどの程度エネルギー需要が変化するのか定量化することができる。図5に電力、都市ガス需要の内訳 (最終用途別, 建物用途別) を示す。第5節雑誌論

<sup>4</sup> ただし、高効率照明のシェアについて利用可能なデータがなかったことから、室内の照明器具として普通蛍光灯を仮定した場合 (図4横軸では「高効率照明なし」と表示)、高効率照明を仮定した場合 (図4横軸では「高効率照明」と表示) の両方の結果を示している。現在の高効率照明の普及状況を勘案すると、エネルギー需要の推計値は両データの間付近に位置すると考えられる。

文5. ではここまでの成果を発表するとともに、大阪市の業務部門における二酸化炭素排出量削減可能性を推計した結果を示した。

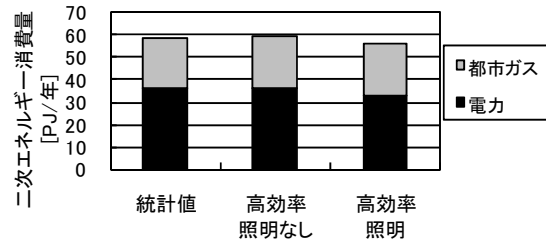


図4 大阪市業務部門エネルギー需要 (電力・都市ガス) 推計結果

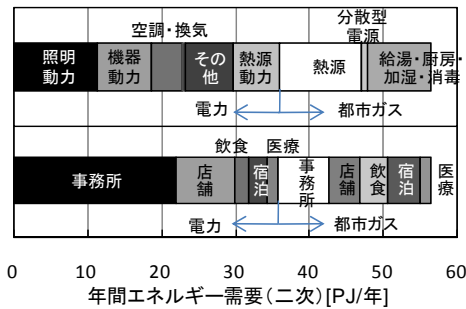


図5 大阪市業務部門年間エネルギー需要 (二次) の内訳 (上: 最終用途別, 下: 建物用途別)

② その他のエネルギー需要モデル

ここに示した検討を家庭部門に対しても実施し、前述のように多様な空間スケールでエネルギー需要モデルを開発した。第5節の雑誌論文4. では大阪府豊中市の住宅街区についてストック更新が地域における二酸化炭素排出量に及ぼす影響を評価した。雑誌論文2. および6. では家庭部門の日本全国のエネルギー需要モデルを開発し、日本全体での二酸化炭素排出量削減可能性について議論した。

最後に上海の家庭部門を対象とするエネルギー需要モデルについて述べる。上海の家庭部門のエネルギー需要について調査したところ、所得階層、都市農村の区分によって世帯におけるエネルギー需要が大きく異なることが明らかとなった。そこで、日本の家庭部門エネルギー需要モデルでストックの区分に用いた世帯区分 (家族構成・世帯人員数の組み合わせ) に加えて、都市・農村の区分、都市については所得区分によりストックを類型化し、エネルギー需要モデルを開発した。

本研究による上海市の家庭部門年間二次エネルギー消費量の推計値を図6に示す。図では統計値および寧ら<sup>5</sup>の推計値を併せて示

<sup>5</sup>寧ら: 中国都市家庭部門におけるエネルギー消費構造に関する研究(Ⅱ)-地域特性-, 日本エネルギー

す。ここで統計値とは、上海統計年鑑<sup>6</sup>に掲載されているエネルギー源別の一人あたり年間エネルギー消費量に総人口を乗じた値である。推計値は2000年、2006年ともに統計値に比べて30%、11%小さい。また、エネルギー源別に見ると、電力消費量を大きく（統計値の1.5倍）、逆に石炭を少なく（統計値の0.2倍）推計している。2006年では電気・ガス消費量は統計値と近い値を示しているが、石炭消費は少ない。

上海市における家庭用エネルギー消費量を推計するためにさまざまなデータベースを構築したが、現段階のモデルは日本の設定を代用している部分があり十分な精度を有していない。特に、都市ガス、石炭消費量の推計値と統計値、他研究の間に差異が大きいことから、暖房や給湯などのモデルに問題があると考えられる。また、2000年から2006年への経年変化を追うことができず、上海における動的な変化をモデル上で表現できていない。しかし、都市部では2006年の電力消費量推計値が統計値と近い値を示しており、家電などの設定はある程度妥当な設定ができていると考えられる。

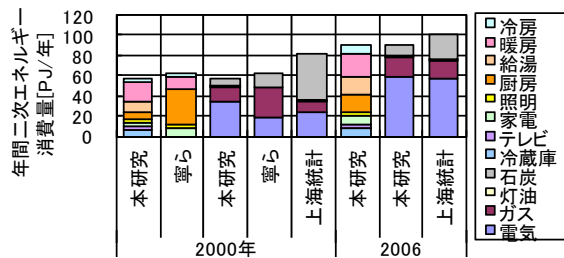


図6 二次エネルギー消費量推計結果

以上の結果から、本研究の成果及び課題をまとめる。

- ・ エネルギー需要モデルで扱う最小単位を住宅あるいは建物とし、住宅、建物のエネルギー需要に大きな影響を持つ建物属性により住宅、建物ストックを類型化し、類型別にエネルギー需要原単位（住宅部門は世帯当たり、業務部門は床面積当たり）を推計し、その結果を類型別ストックの積和を取ってストック全体のエネルギー需要を定量化するモデルを提案した。ストックの類型を行う建物属性はパラメータスクリーニングによって決定される。これによりエネルギー需要モデルの精度を高めることが可能となることを示した。
- ・ エネルギー需要モデル開発手順を地区、都市、国家とスケールの異なる住宅、業務建築ストックに適用し、将来におけるエネルギー需要、二酸化炭素排出量の予測を行う

とともに、技術導入やライフスタイルの変化によるエネルギー需要、二酸化炭素排出量の変化を推計し、モデルの開発手順の有用性を示した。

- ・ 日本の住宅、業務建築ストックを対象としたエネルギー需要モデルでは住宅や建物の規模など物理的な属性でストックを類型化することでエネルギー需要モデルの精度を向上させることができたが、上海のエネルギー需要モデルでは人の行動など物理的な条件の設定では考慮が不可能な要素でストックを類型化する必要性が生じた。アジアの都市を対象とするエネルギー需要モデルの開発には社会的ニーズがあるが、ライフスタイルや人の行動などを取り扱う方法を確立する必要があると考えられる。この点を今後の課題とする。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

1. Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda: “District-scale Simulation for Multi-purpose Evaluation of Urban Energy Systems”, Journal of Building Performance Simulation, Accepted. (査読有)
2. Yoshiyuki Shimoda, Yukio Yamaguchi, Tomo Okamura, Ayako Taniguchi, Yohei Yamaguchi: Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model, Applied Energy, Vol. 87, pp. 1944-1952, 2010. (査読有)
3. 山口容平, 赤井研樹, 瀋俊毅, 藤村尚樹, 下田吉之, 西條辰義: 消費者選好に基づく太陽光発電および太陽熱温水器の技術普及予測と普及推進施策評価, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 31, No. 1, pp. 1-7, 2010年1月 (査読有)
4. 山口容平, 有城丈博, 下田吉之: 住宅ストックのマネジメントによる二酸化炭素排出量の削減効果の推計—大阪府豊中市郊外の戸建住宅地区を対象としたケーススタディ, 都市計画論文集, No. 44, pp. 313-318, 2009年11月 (査読有)
5. 山口容平, 下田吉之, 水野稔: “建築・設備ストックの集積状況を考慮した大阪市の民生業務部門エネルギー需要モデルの開発と温暖化対策の評価”, 日本建築学会環境系論文集, No. 641, pp. 853-862, 2009年7月 (査読有)
6. 下田吉之, 山口幸男, 岡村朋, 谷口綾子, 山口容平: 家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 30, No. 3, pp.

1-9, 2009年5月(査読有)

[学会発表](計37件)

1. 山口容平, 下田吉之: 事務所ビルの建築設備採用実態調査とデータベース開発, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2010年1月), CD-ROM
2. 岡村朋, 下田吉之, 山口容平, 近藤康彦, 荻本和彦: 都市家庭用最終需要モデルを用いた分散型電源・高効率給湯器導入が電力負荷曲線に与える影響の評価(2), 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2010年1月), CD-ROM
3. 藤本卓也, 山口容平, 岡村朋, 下田吉之: 普及促進施策・効率・設置方法・世帯構成が太陽光発電の経済性に及ぼす影響, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2010年1月), CD-ROM
4. 山口容平, 豊田琢磨, 鳴海大典, 下田吉之, 村上周三: “低炭素社会に向けた住宅・非住宅建築におけるエネルギー削減のシナリオと政策提言(その2)事務所ビルの建物属性がエネルギー消費原単位に及ぼす影響”, 2009年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 2183-2186, 2009年9月
5. Yamaguchi Y., Shimoda, Y.: Database and simulation model development for modeling the energy use of non-residential buildings, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Glasgow, Scotland, pp. 1482-1489, 2009年7月
6. Okamura, T., Shimoda, Y., Yamaguchi Y., Yamaguchi Y.: The effectiveness of introducing effective energy saving measures for households in Japanese residential sector, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Glasgow, Scotland, pp. 308-315, 2009年7月
7. Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda: Historical transition of the dominant practice in the Japanese commercial sector, Proceedings of ECEEE Summer Study 2009, pp. 1853-1863, 2009年6月
8. 山口容平, 山口幸男, 下田吉之: “上海家庭部門のエネルギー需要予測と省エネルギー技術評価”, 第28回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集 3-4, pp. 1-4, (2009年6月), CD-ROM
9. 山口容平, 下田吉之: “業務部門用途別標準建物モデルの検討”, IBPSA Japan講演論文集2008年号, pp. 71-77, (2008年11月)
10. Arishiro, T., Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Yamaguchi, Y.: “Evaluation of global warming mitigation measures in the residential and non residential sectors of a suburban city in Japan”, Proceedings of the World Sustainable Building Conference 2008, pp. 1969-1976, 2008年9月
11. 山口容平, 下田吉之: “都市スケールの建築エネルギー需要モデルの精度保障に関する研究”, 2008年度日本建築学会大会学術講演会発表梗概集, D-1分冊, pp. 767-768, 2008年9月

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山口容平 (YAMAGUCHI YOHEI)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 40448098

##### (2) 研究分担者 なし

##### (3) 連携研究者 なし