

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12290

研究課題名(和文)分散型エネルギーシステム構築に向けたシステムデザイン方法論とその実践研究

研究課題名(英文) Systems Design Methodology toward Building a Distributed Energy System and its Practical Study

研究代表者

野間口 大 (Nomaguchi, Yutaka)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：90362657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：社会全体の費用対効果を最大化する分散型エネルギー(DE)システムの構築を究極的な目標として掲げ、それにあたっては新しいシステム・オブ・システムズデザイン方法論が必要との認識を持ち、実践的研究のもとでその構築を試みた。具体的には、リスク評価のための目的関数の非連続特性に着目した数理モデルとそれをもとでの最適デザイン方法を新たに開発し、シナリオデザイン手法、マルチエージェントシミュレーションと統合的に利用するデザインフレームワークを提案した。大阪府三島地域におけるDE計画を題材とするケーススタディを実施し、政策担当者と一般市民を交えたワークショップを通じて自治体の環境政策に向けたシナリオを構築した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to build a distributed energy (DE) system which maximizes the cost-effectiveness of society. This research aims at building a new system-of-systems (SoS) design methodology with its practical study toward our final goal. The research group has developed a mathematical model of risk assessment focusing on discontinuity of system performance, and a new optimal system design method based on it. A new SoS design framework was proposed by the integration of scenario design method, multi-agent simulation and the developed risk assessment method. This research performed a case study of DE planning in Mishima area, which is a dormitory area in Osaka Prefecture, Japan to verify the proposed framework. It is followed by successive workshops, which citizens and decision makers in Suita city of Mishima area join, to design a scenario of energy policy of the city.

研究分野：設計工学

キーワード：システムデザイン System of Systems 分散エネルギーシステム リスクマネジメント

## 1. 研究開始当初の背景

近年、設備費用の低下や再生可能エネルギーに対する補助金、余剰電力買取制度(FIT)などの効果で、分散型エネルギー(DE)の普及が進みつつある。一方で、コスト上昇、電力供給の不安定化などのリスクも指摘される。リスクを克服して合理的にDEシステムを構築するためには、適切なFITの導入など政策手法の充実化と同時にDEに適した送電網の整備を進めるなど、社会全体を俯瞰的に捉えるシステムズアプローチが求められる。システム工学分野では従来、システムモデリング手法やリスク分析・評価手法、不確実性に対応するためのロバスト最適設計法などが開発されているが、これらはシステムとその外部の環境との区別が明確で、システムの挙動のモデルが明示的に構築できることが前提となっている。

しかしシステム設計は、元来、高度に開放系の問題であり、その合理性は、社会に存在する他のシステム群との共創的な相互作用とそこに含まれる不確実な要因に大きく依存する。DEはSystem of Systems (SoS) [1]、すなわち、個別に導入される発電設備、電力網、各種の社会制度など、それ自体がシステムとなっている複数の構成要素が複合的に影響しあう「超システム」である。SoSは構成要素相互の関連性の把握が困難であることに加え、長期スパンの視点が不可欠であることから不確実性がきわめて大きく、従来のシステム工学的アプローチでは限界がある。それに代わる体系的な手法ははまだ確立されていない。そのことがDEシステム構築における本質的な障害なのである。

## 2. 研究の目的

本研究では、社会全体の費用対効果を最大化するDEシステムの構築を究極的な目標として掲げる。それに当たっては、SoSの課題に正面から取り組み、新しいシステムデザイン方法論が必要との認識を持ち、実践的研究のもとでその構築を試みる。

## 3. 研究の方法

本研究では前項で掲げた目的を達成するため、具体的に以下の3つの研究課題を設定し、多角的な観点から融合しながら研究を遂行した。

1. SoSに関連するリスク要因の把握とそのマネジメント手法の確立
2. SoSに関連するステークホルダーの共創的な挙動のモデリングと最適計画手法の確立
3. 社会との協働と方法論へのフィードバックの

1については、不確実性が大きいシステム的设计に対する有効な手段であるシナリオと

ロバストデザインの考え方に基づくリスクマネジメント手法を開発する。2については共創を取り扱う有望な手段であるマルチエージェントシミュレーション(MAS)を活用し、DEシステムのデザインが、社会全体の費用、エネルギー供給量、各種リスクの大きさなどの多目的問題であることを踏まえ、その最適計画法を開発する。3については、研究代表者のグループが従来から連携を行っている大阪府吹田市の政策担当者や市民との協働を通じ、提案した方法論の実践を行い、方法論の精錬化を目指す。

## 4. 研究成果

(1) そもそもデザインは、何らかの面において新規性を含む、製品や価値を生み出す活動である。従って、デザインの結果であるシステムの性能には、必然的に不確実性に起因するリスクが含まれることになる。システムデザインにおいては、一般に、削減可能な不確実性と削減不可能な不確実性の2種類が存在すると指摘されている。前者は、デザイン対象であるシステムについての知識の欠如やあいまいな定義に起因するものであり、システムの理解を深めることによって削減することが可能である。一方で、後者については、将来、事象が発生してはじめてその存在が明らかになるものである。この種の不確実性を取り扱うためには、システムの運用を通じてリスクを管理し、システムデザインに適宜フィードバックする必要がある。

SoSデザインの課題は、不確実性によりさらに困難なものとなる。SoSの性能についての明確な評価指標があったとしても、そこに含まれる不確実性は大きい。解空間の非線形性・非連続性や創発的挙動により、削減可能な不確実性の領域はさらに狭まることになる。さらに、SoSのデザインは長期間の視点のもとでの評価が必要であり、将来起こりうる事象をフィードバックすることは非常に困難である。

こうした課題認識のもと、本研究では、図1に示すように、シナリオデザイン手法、マルチエージェントシミュレーション(MAS)、

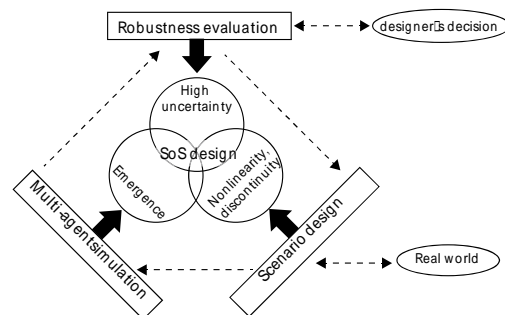


図1. SoS デザインフレームワーク

ロバスト評価手法を取り上げ、統合的に利用するデザインフレームワークを提案した(研究成果: 学術雑誌-3, 学会発表-5)。

(2) SoS デザインでは、上述の通り SoS 自体がもつ複雑性や不確実性のためシステム群全体の挙動が大きく変わるリスクがある。つまりデザイン問題の目的関数の値が大幅に変化する可能性がある。本論文ではこのリスクを非連続特性の用語を用いて議論し、ロバストデザイン手法の考え方に則って、その最適化問題を定式化した(研究業績: 学術雑誌-2, 学会発表-7)。なお、ここでの非連続特性とは、数学的な関数の不連続性とは異なり、目的関数の値の変動が質的に大幅に変化することを示す概念として導入するものである。

ロバスト性とは、一般に、体格や構造の強靭さや頑丈さを表す言葉である。設計工学分野においては、システムを考えるとときに制御不能な外乱によって引き起こされる不確実な変動に対して、システムが安定した特性をもつことを表現するために使用される。ロバストデザイン法には制御因子、誤差因子、目的関数、ロバスト評価関数の4つの基本概念が存在する。制御因子とは、設計者が操作可能な因子である。誤差因子は、設計者が制御することはできず、その値にはばらつきがある因子である。目的関数とは、設計目標となる特性である。上記の3つの要因により表される式がロバスト評価関数である。一般に、最適化問題では、目的関数を最大値、あるいは最小値をとるものを最適解とする。しかしロバストデザインにおいては、ばらつきがある誤差因子に対して目的関数の値の安定性を保つデザイン案を最適解とする。この時の目的関数の値の安定性を表す程度をロバスト性と呼び、ロバスト評価関数により定量的に表す。ロバスト性が高くなるよう最適化することをロバスト最適化という。

SoS はその複雑性から非常に大きな不確実性を含み、それらがシステムに及ぼすリスクを完全に排除することは不可能である。そこで、システムにはこれらの不確実性が存在するという前提のもと、システムを取りまく環境が計画に与える影響の程度を評価するために、非連続特性の観点から SoS のロバスト最適性を「不確実要因に対して SoS の特性が不連続な変化をしないこと」と定義する。

この定義に基づいてロバスト評価関数を定義し、そのもとでのデザイン手法を提案する。まずデザイン問題として以下の最適化問題を考える。

$$\begin{aligned} \text{find} \quad & x = \{x_1, \dots, x_N\} \\ \text{for given} \quad & z = \{z_1, \dots, z_M\} \\ & z_m \in \{a_1, \dots, a_{L_m}\} \\ \text{optimize} \quad & f(x, z) = \{f_1(x, z), \dots, f_l(x, z)\} \end{aligned}$$

ここで、 $x$  は SoS のデザイン問題における制御因子であり、 $N$  はその数を表す。 $z$  は、SoS の設計者が制御不能な不確実因子である。 $M$  は不確実因子の数であり、それぞれの不確実

因子  $z_m$  は  $L_m$  個の離散値をとりうるとする。 $f$  は目的関数であり、 $x$  と  $z$  の関数として与えられる。 $l$  は目的関数の数である。SoS デザインの代替案  $x^*$  に対して、不確実因子  $z$  の取り得る値の組み合わせを考え、そのそれぞれを不確実因子シナリオと呼ぶ。 $x^*$  の非連続特性を評価する指標  $D_i$  を以下の式で定義する。

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & D_i(x^*, z) = \sum_{s=1}^S d_{i,s}(x^*, z_s) \\ & d_{i,s}(x^*, z_s) = \\ & \sqrt{\sum_{m=1}^M \left\{ \frac{f_i(x^*, z_{s,m}) - f_i(x^*, z_s)}{\Delta z_m} \right\}^2} \\ & z_s = \{z_{1s}, z_{2s}, \dots, z_{Ms}\} \\ & z_{s,m} = \{z_{1s}, z_{2s}, \dots, z_{ms} + \Delta z_m, \dots, z_{Ms}\} \end{aligned}$$

ここで与えられる  $d_{i,s}$  は、目的関数  $f_i$  についての、ある不確実因子シナリオ  $z_s$  に対する  $x^*$  の非連続性である。 $z_s$  から近傍のシナリオに変化した際の  $f_i$  の変化量の  $z_m$  の差分商の二乗和平方根として定義する。 $d_{i,s}$  を全ての不確実因子シナリオに対して求め、 $D_i$  をその総和により求める。 $D_i$  は小さいほど、 $x^*$  のもつ非連続特性は小さいということになる。

(3) 前項で提案したリスク評価指標を、大阪府三島地域を対象とする分散型エネルギーシステム導入計画のケーススタディに適用し、検証を行った(研究業績: 学会発表-7)。DE の代表例である太陽光や風力などによる発電は、出力が気象条件に大きく影響を受けるため配電システム全体の電圧分布を制御しにくいという問題がある。システムのどこかで電圧が定格電圧(例えば、低圧線については  $101 \pm 6[V]$ )を逸脱し、システムに損害を与えることが懸念されている。したがって、この定格電圧を逸脱しないように、システムには連系可能容量と呼ばれる分散型電源の連系量の上限が存在する。系統保護の観点から、この連系可能容量を超える連系には、分散型電源の発電に制限がかけられ、本来の発電能力を発揮できなくなる。このことから、電力システムを分散型電源との連系に対応したものに整備することにより、連系可能容量を向上させる対策が必要である。個別電源の普及計画と併せて検討し、効率の良い普及計画にする必要がある。

このように分散型エネルギーシステム導入計画は、個別電源や電力システムの整備を統合的に考える必要があり、電力会社や地方自治体や家庭などの社会システムが相互に作用しあうため大規模なシステム群となり SoS としての特徴をもつ。

分散型エネルギーシステム導入計画は、人口の増減や技術革新によるエネルギー消費

量の変化，電気料金等の制度の変化など，社会のもつ不確実性にも大きく影響を受ける．これらの不確実性のために，PVの普及が不連続に急激に進んだり，逆に一向に進まなくなったりする可能性がある．急激に進んだ場合発電制限が起り，PVが十分なパフォーマンスを発揮できない．そのため非連続特性が小さくなるようなデザインが求められる．

計画問題の各因子，目的関数を表1，MASに設定した各種の条件を表2に示す．自治体が制御できる因子として，補助金額（PV購入額に対する割合[%]）と輪番区分数を考える．輪番とは，補助金を助成する際に全ての地域に一括に助成するのではなく，特定の期間で対象地域を区切り，順番に助成を行うことで補助金の効果を高めることを狙うものである．この2つの制御因子の組み合わせにより，効率の良い計画を考える．不確実因子として，電気料金単価 [円/kWh] と FIT 単価 [円/kWh] を考える．これらの組み合わせにより，それぞれの計画に対して起こりうる不確実因子シナリオを考える．目的関数としては，PVの普及台数[kW]，購入補助金総額[円]，発電制限割合[%] を考える．これらの目的関数に対して各計画案の不連続特性を評価し，ロバストな計画案を考える．

表 1 計画問題の各因子

Control factors : $x = \{x_1, x_2\}$		
Purchase subsidy amount (%)	$x_1 = \{0.05, 0.01, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5\}$	
Number of district sections	$x_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$	
Uncertain factors : $z = \{z_1, z_2\}$		
Electricity price (JPY/kWh)	$z_1 = \{23, 23.5, 24, 24.5, 25, 25.5, 26, 26.5, 27, 27.5\}$	
FIT purchase price (JPY/kWh)	$z_2 = \{37, 37.5, 38, 38.5, 39, 39.5, 40, 40.5, 41, 41.5\}$	
Objective characteristics : $f = \{f_1, f_2, f_3\}$		
Cumulative diffusion of PV (kW)	$f_1$	
Total cost (JPY)	$f_2$	
Probability that PV power is restricted (%)	$f_3$	

表 2 MAS 設定

Simulation period	20 years
PV price	Gradually decreasing from 350,000 yen/kWh (1st year) to 170,000 yen/kWh (20th years)
Subsidy period	10 years from start of period
FIT period	10 years from time of application
Grid upgrade budget	Less than 4 million yen/year

(4) 提案した手法に基づき，100通りの計画案  $(x_1, x_2)$  に対して，目的関数のもつ不連続特性を評価する  $D_1, D_2, D_3$  を求めた．その結果を図2に示す．図中の  $x_1$  軸，  $x_2$  軸の格子点が各計画案に対応する．なお図に示した  $D_1, D_2, D_3$  はそれぞれの最大値を1として正規化したものを用いている．

$D_1$ については  $(x_1, x_2) = (0.05, 1), (0.1, 1)$ ,

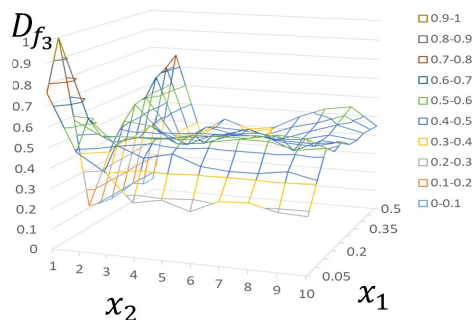
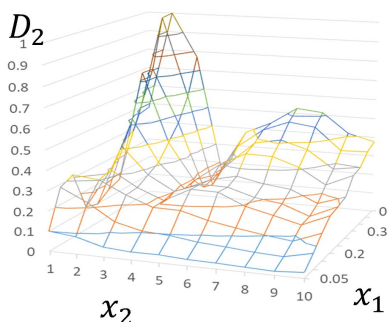
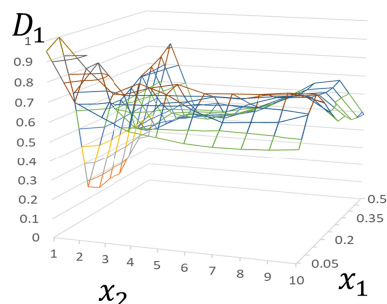


図 2. 非連続特性によるリスク評価

$(0.1, 2), (0.15, 2)$  の非連続特性が大きい．これは補助金割合が低い場合（0.15以下），普及を促進する因子として不確実因子が支配的になるためである．また  $x_2=2$  のときも  $D_1$  の値は大きい．これは輪番区分数が2の場合，PVの大量導入がその助成地域ごとにおきることになり，非連続特変化が起こりやすくなるためであると考えられる．

$D_2$ については， $x_2=2$  の値が大きくなっている．これは  $D_1$  の時と同じ理由であると考えられるが，この場合は補助金割合が高くなるほど値が大きくなっていることがわかる．補助金の割合が大きくなるほど投資額も増えるた



め、PV 普及量の不連続変化が同じであっても購入補助金総額の不連続変化は大きくなる。

$D_3$ の傾向は $D_1$ と同じである。

これら指標を統合的に判断すると、 $(x_1, x_2) = (0.2, 1), (0.25, 1), (0.3, 1)$ の計画が各不連続特性が小さく、安定した計画であると考えられる。このように $D_1, D_2, D_3$ を統合的に判断することにより、非連続特性の大きい普及計画をさけることができ、安定でより良い普及計画を選択することができる。

この結果から得られる知見は、社会が DE 普及のための経費を、例えば補助金という形である程度負担することで、将来の不確実性に対するロバスト性が向上し、結果として DE の普及が加速する可能性がある、ということである。

(5) 前項のケーススタディで得られた知見も踏まえ、大阪府吹田市環境部環境政策室の担当者および吹田市在住の一般市民を交えて、地域のエネルギー政策立案のためのワークショップ (WS) を開催した (研究成果: 学会発表-3, 4, 6)。WS のテーマは、吹田市を対象として、2050 年の持続可能なエネルギー政策のシナリオを作成すること、とした。第 1 回 WS を 2016 年 12 月 10 日に開催し、以降、2017 年 3 月 18 日、同年 9 月 30 日、および 12 月 16 日の計 4 回開催した。各回ともほぼ同じメンバー約 25 名が参加し、4 チームに分かれて討議を行った。各回の WS の冒頭で、前項で述べたシミュレーションの結果を踏まえた情報を提供した。また、本研究グループのメンバーが開発している、将来世代の役割を持つ人々を仮想的に作り出す「フューチャー・デザイン」(研究成果: 図書-1) と呼ぶ手法も取り入れた。

討議によって構築されたシナリオには、参加者自らが名前をつけた。具体的には、太陽光発電シートの普及により太陽光発電普及率 90%以上を目指す「エコやね(屋根), すいた」(A チーム)、環境技術の積極採用や電気代を上げることで電力使用量を強制的に減らす、といった施策を将来への投資として打ち出す「環境エネルギー先進地域すいた: コストではなく投資」(B チーム)、個人単位での再エネ導入を盛んに進めてエネルギー自給率 100%を目指す「市民が作る RE すいた」(C チーム)、最新の技術を活かした省エネと、スローなライフスタイルでの節エネを実施する「星の見えるまち吹田: 個々から始まる地域のエネルギービジョン」(D チーム) の 4 つのシナリオが提案された。いずれのチームもある程度の社会的負担をいとわず、むしろ将来への投資として捉え、積極的に DE を推進していく姿勢が打ち出された。

(6) 本研究の成果を以下にまとめる。

- シナリオデザイン手法, マルチエージェ

ントシミュレーション (MAS), ロバスト評価手法を取り上げ、統合的に利用するデザインフレームワークを提案した。

- リスク評価のためのロバスト性評価手法については、目的関数の非連続特性に着目した数理モデルとそのもとでの最適デザイン方法を新たに開発した。
- 大阪府三島地域における DE 普及計画を題材とするケーススタディを実施した。
- 三島地域に含まれる吹田市において政策担当者と一般市民を交えたワークショップを開催し、ケーススタディで得られた知見を提供しながら、市の環境政策に向けたシナリオを構築した。

DE のシステムに関連しては、消費者選好に基づく各種 DE 機器の普及予測、DE 普及が系統電力網に与える影響の分析、スマートグリッドや将来の電源構成についてのシナリオの構築など、様々な視点のもとで別個に研究が行われている。一方で本研究は、システムズアプローチの必要性とそれに向けた方法論の欠如が本質的な障害となっている点に焦点を当て、その克服を大学と社会との協働のもとで試みる挑戦的取り組みであり、従来にはない画期的な試みであったといえる。

#### 引用文献

[1] Jamshidi, M., *Systems of Systems Engineering: Innovations for the Twenty-First Century*, (2008), Wiley.

#### 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 3 件)

野間口大, 董春社, 中島寛享, 藤田喜久雄, リスク連鎖基本モデルに基づく設計プロジェクトのリスク特定法, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 842, (2016), 16-00167.

Nomaguchi, Y., Kawakami, K., Fujita, K., Kishita, Y., Hara, K., Uwasu, M., Robust Design of System of Systems Using Uncertainty Assessment Based on Lattice Point Approach: Case Study of Distributed Generation System Design in a Japanese Dormitory Town, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 10, No. 5, (2016), pp. 678-689.

Nomaguchi, Y., Tanaka, H., Sakakibara, A., Fujita, K., Kishita, Y., Hara, K., Uwasu, M., Integrated Planning of Low-voltage Power Grids and Subsidies toward a Distributed Generation System - Case Study of the Diffusion of Photovoltaics in a Japanese Dormitory Town, *Energy*, Vol. 140 Part

1, (2017-12), pp. 779-793.

〔学会発表〕(計8件)

Nomaguchi, Y., Mochizuki, R. and Fujita, K., Management of Modeling and Formulation in Reflective Design Process of Multidisciplinary System, *Proceedings of ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC 2016)*, August 21-24, 2016, Charlotte, North Carolina, USA, (2016), IDETC2016-59469.

Nomaguchi, Y., Kawakami, K., Fujita, K., Kishita, Y., Hara, K. and Uwasu, M., Study on "System of Systems" Design Method with Uncertainty Assessment based on Robust Optimality - Case Study of Distributed Energy System Design in Mishima Area, Osaka -, *Proceedings of 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign2015)*, Tokyo, Japan, December 2-4, (2015), A5-3.

野間口大, 分散型エネルギーシステムにおける出力抑制問題へのシステムズアプローチ, 政治社会学会第7回総会及び研究会大会, (2016). 【招待】

原圭史郎, フューチャーデザイン: エネルギーシステム分野への応用可能性, 政治社会学会第7回総会及び研究会大会, (2016). 【招待】

Nomaguchi, Y. and Fujita, K., A Framework of System of Systems Design with Scenario, Multi-Agent Simulation and Robustness Assessment, *Proceedings of 27th CIRP Design 2017*, May 10-12, 2017, Clanfield, UK, (2017), *Procedia CIRP* Vol. 60, pp. 133-138.

Uwasu, M., Kishita, Y., Nomaguchi, Y. and Hara, K., Role of Future Generations in Deliberation: A Case Study of Suita City's Energy Workshop, *Proceedings of 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2017)*, November 29-December 1, 2017, Tainan, Taiwan, (2017), B1-4.

田代拓夢, 嘉本豊, 野間口大, 藤田喜久雄, 不連続特性を考慮したロバスト最適性評価手法と分散型エネルギーシステム導入計画のケーススタディ, 日本機械学会第27回設計工学・システム部門講演会講演論文集, (2017), 2208.

野間口大, 藤田喜久雄, System of Systems の設計支援フレームワークと分散型エネルギーシステム計画のケー

ススタディ, 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2017), 106.

〔図書〕(計1件)

池道彦, 原圭史郎 (編著), 想創技術社会 - サステナビリティ実現に向けて -, (2016), 大阪大学出版会.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野間口 大 (NOMAGUCHI, Yutaka)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 90362657

(2) 研究分担者

原 圭史郎 (HARA, Keishiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30393036

上須 道德 (UWASU, Michinori)  
大阪大学・COデザインセンター・特任准教授  
研究者番号: 50448099

木下 裕介 (KISHITA, Yusuke)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号: 60617158

藤田 喜久雄 (FUJITA, Kikuo)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10228992