

平成 2 1 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：1 8 3 6 0 0 6 6

研究課題名 (和文) 環境に配慮した生産システム構築手法の統合化

研究課題名 (英文) Integrated Method for Constructing Environmentally Conscious Manufacturing Systems

研究代表者

木村 文彦 (KIMURA FUMIHIKO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 6 0 1 3 3 1 0 4

研究成果の概要：環境に配慮した生産システム構築手法について、既存手法の整理・体系化を進めるとともに、システム構築・評価のための手法の統合化を検討した。技術の現状と問題点を把握するために機械加工システムについてエネルギーや資源の消費についての実測を行い、省エネルギーや資源リサイクルに配慮した実生産システムの分析を進めて、システム構築・評価手法を改良すると共に、標準化や実用化への問題点を検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2 0 0 6 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2 0 0 7 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2 0 0 8 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：生産システム工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学 加工学

キーワード：生産システム、ライフサイクル工学、環境配慮生産、環境効率

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題に対する拡大製造者責任が論じられ、製造企業は競って環境対応技術に力を入れるようになった。製品やその生産システムに対する環境配慮技術は急速に進歩し、省エネルギー性能やリサイクル性の向上を謳う製品が市場にあふれ、省エネルギーに配慮したクリーンな工場もあたりまえの存在となってきた。

これは重要な成果であるが、これだけでは環境問題に対する十分な解答にはならない。大量生産されるものを後処理するに止まらず、利用された資源を回収して効率よく再利用し、新規資源の投入を最小化するような循環型の

生産体系へ転換する必要がある。

循環する資源から提供される製品利用者への効用を増大させることにより、循環する資源量そのものを削減していくことが重要である。このように資源生産性を向上させて、投入された資源の効用を使い尽くすような生産形態を実現する生産システムを、環境に配慮した生産システムと呼ぶ。本研究においては、品種や生産量変動の大きい量産機械製品に対する生産システムを対象として考える。

環境に配慮した生産システムの実現に向けて、生産システムの観点から循環型生産やインバースマニュファクチャリング、製品の観点からエコデザインなどの研究が強力に推進

されている。一方、グローバル化する状況の中で製造業の競争力強化を目指し、製品や技術の変動に対応できる柔軟で効率の良い再構築可能な生産システムの研究も進展している。従来は、往々にして、環境配慮の観点と競争力強化の観点とは矛盾するとみなされ、特に産業界からは環境配慮の観点を前面に押し出すことへの抵抗があった。近年は、環境配慮の重要性が社会的に認知され、企業イメージの向上から環境配慮が強く主張されるようになってきた。しかし、環境配慮と企業競争力強化とが両立する、ということを確認することは容易ではなく、その理論的根拠はいまだに脆弱である、といわざるをえない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、資源生産性向上を評価の基準とすることにより、環境に配慮した生産システムと企業競争力強化を目指す生産システムを統合的に評価して、その相互関係を明確にし、両者の要求を考慮した合理的なシステム構築手法を確立することである。具体的な研究の目的は次のようである。

### (1) 生産システム構築手法の体系化と統合

環境配慮の観点と生産性の観点との双方から、様々な生産システム構築手法を分析し、その前提条件やモデリング、評価基準などにより体系化を試みる。これに基づき、両者の観点を整合性を考え、統合化の方策を検討する。

### (2) 資源生産性を基本とする生産システム評価法の確立

生産により消費される資源と生み出される効用との比に着目する資源生産性を考察し、環境に配慮した生産システム構築の基準として適切な評価指標を提案する。

### (3) 環境に配慮した生産システムの提案

生産加工のプロセスや対応する資源消費などの生産システムを特徴つけるパラメータを明示的に含むような生産システムのモデリングを可能とし、環境配慮生産システムのフレームワークを提案する。パラメータ変化により様々なシステム形態の表現を可能とする。

### (4) 生産システムの環境配慮性の実験と評価

機械加工システムを対象として、加工精度や製品多様性と対応する資源消費を事例実験により計測し、環境配慮性の評価手法とシステム改善への方策を検討する。

## 3. 研究の方法

環境に配慮した生産システム構築手法について、既存手法の整理・体系化を進めるとともに、システム構築・評価のための手法の統合化を検討した。技術の現状と問題点を把握するために、機械加工システムについてエネルギーや資源の消費についての実測を行った。省エネルギーや資源リサイクルに配慮

した実生産システムの分析を進めて、システム構築・評価手法を改良すると共に、標準化や実用化への問題点を明らかにした。具体的な研究の方法は以下のようである。

### (1) 環境配慮による生産システム構築手法の体系化と統合

省エネルギー、省資源、廃棄物抑制、汚染防止など、環境配慮を評価項目として重視して生産システムの機能構成を基本的に考え直すと、従来とは異なったシステムが最適なものとして導出される可能性がある。これまでの基礎研究を概観し、環境配慮のシステム構築手法として整理した。

生産システムを構成するプロセス要素について、低コストや高品質を目指せば、必要資源量は減少し、歩留まりも向上して、資源生産性は向上する。しかし、環境配慮は、これらに新たな制約条件を課する。これまでの基礎研究を展望し、環境配慮の観点から体系的整理を試みた。

生産システムのライフサイクル設計手法についても検討を行った。市場や製品の変動、生産量や技術の変化、設備の劣化や運用の変化など、様々な要因によって、当初は最適に構成された生産システムも、時を経るにつれて生産性が低下する。同一の生産量に対してより多くの資源を消費することになり、環境性能も低下する。これに対応するシステムの再構築(Reconfiguration)、設備のアップグレードや再利用などの設計手法を整理し、体系化を試みた。

### (2) 環境配慮生産システムの環境負荷評価法の確立

LCA(Life Cycle Assessment)による環境負荷評価法は確立している。本研究では、製品ではなく生産システムを対象として、LCAの基本手法に適合するように評価手法を具体化した。生産システムの構築と再利用・廃棄などについては製品のLCAの考え方が流用できる。生産システムの運用時の評価については、評価の基準となる生産システムの効用を検討すること、物質・資源入出力を網羅的に捉えること、製造の対象となる製品に固有の資源は評価から除外すること、システムメンテナンスなどの長期にわたる資源利用も考慮することなどに留意した。

### (3) 環境配慮生産システムのモデリングとシステム構築法

環境配慮生産システムのフレームワーク、生産システム要素のモデリングとその標準化、ライフサイクルオプションの網羅的な生成法、資源生産性評価法などを体系化してとりまとめ、環境配慮生産システム構築法の統合化の基礎となる知識を整理した。国際的な学会や産業界の専門家とも議論して内容の妥当性を検証した。

### (4) 機械加工を主とした環境配慮生産システム

## ムの実験と評価

機械加工システムを対象として環境負荷の実測と評価を行い、今後の統合的な実用化ソフトウェアへの要件を整理した。特に、生産プロセスに関連して必要となる環境負荷原単位等の整備や標準化について検討した。

基本的に大量生産されるが、品種や生産量変動が激しく、生産上の無駄が生じやすい機械加工部品を主な対象として、代表的な機械加工プロセスについて加工実験を行い、環境負荷の発生状況について詳細に検討した。これらの結果と、(1)の知識に基づいて環境配慮生産システムについて一般的な要件を整理し、システム構築手法としてまとめた。

## 4. 研究成果

### (1) 環境に配慮した生産システムの構築

#### 環境配慮の考え方

生産性向上活動は製造業の基幹であり、生産現場ではこれ以上の無駄の削減の余地が無いほどに、生産システムの効率化は徹底して実践されている。それにも係わらず、資源の有効利用の視点で見ると、様々な変動要因のために生産システムにはまだ多くの無駄が潜在している。また環境配慮の視点を導入して、地球環境に対する負荷という観点で見直してみると、さらに多くの問題点が見出される。生産システムの非効率さや環境負荷に関する基本的な問題を検討するために、生産活動に関わる資源の流れをモデル化して資源の無駄や環境負荷を可視化し、生産システムの環境配慮性を評価することは重要である。

#### 生産システムの問題点

生産システムには、技術革新、製品進化、生産量変動などのさまざまな変動要因があり、その結果、生産システムと対応する製品や稼動する環境との不適合を引き起こし、多くの資源・エネルギーの無駄が発生する。環境に配慮し、環境負荷を低減できる生産システムを構築するためには、体系的な思考を徹底し、考えられるあらゆる無駄の要因を明らかにすることが重要である。

主な無駄の要因は以下のようなものである。

- ・生産システムの過剰能力
- ・製品の過剰品質
- ・変動による最適状態からのずれ
- ・間接的な設備やエネルギー・資源の浪費
- ・まだ使える設備・資源の廃棄
- ・遊休状態にある資源

上記のような要因を十分に表現できるような生産システムのモデリング手法が重要である。

#### 環境に配慮した生産システム

上で述べたような問題に対する対策は、実務的には Lean Manufacturing などの標語の下に既によく考えられている。これらの対策の

基本的な考え方を以下に示すが、具体的にどの程度、環境負荷低減に効果的であったのかを可視化し評価できるような手段を提供することは重要である。

#### 生産システムの構成適応性

汎用的なシステムとして、変化に対応して長期使用を可能とする。

モジュール性を高めて、変化に応じた再構成(Reconfiguration)を可能とする。

痩せた専用システムとして、変化に応じて迅速全取替えにより対応する。

#### 局所化

資源消費を対象プロセスに限定して、資源の無駄な間接浪費を防ぐ。

#### 最小化

対象製品に適合させ、過大な処理を防ぐ。

#### 高信頼性

故障などによる無駄を徹底して排除する。

#### ゼロ化

生産の目的に直接寄与しない事柄は徹底して排除する。

#### ゼロ(ミニマム)エミッション

資源循環を徹底させ、有害な排出物を削減する。

### (2) 生産システムの環境負荷評価の効用

環境配慮生産システム構築のために、企業や事業所などの上位システムと個別の設備・装置との中間に位置するものとして、生産システムを考える。個別の生産装置や機械の改善、あるいは生産システムの構成や生産計画などが、企業や事業所全体の環境評価にどのように影響するのかを知り、全体として効果的な装置や工程の改善、あるいは生産システムの再構築を支援できることが重要である。

評価の手順はできるかぎり一般化し、個別の装置や工程の情報は対応するモデルとして別途与えるようにして、個別の場合に適用する方式を考える。一般化された手順と個別のモデル記述方式を標準化することが望まれる。

このような生産システムの環境負荷評価について、以下のような効用が期待される。

#### 生産システム自体の評価

新規に生産システムを構築する場合に、装置メーカーから提供される個別の装置のデータを基に、想定される稼動状態における生産システム全体の環境性能を推算できるようになる。現状では、稼動状態に対応する個別の生産機械の性能の変動を十分に表現できないため、個別の機械の積算は生産システム全体の性能を反映できていない。

#### 対象製品の製造時負荷の評価

対象製品やその生産量などを規定して、適切な生産システムを選定する基準とすることができる。また、対象製品の一般的な製造

時環境負荷を得ることができる。

対象製品に固有の生産システム運用モードで評価するとき、次の二つの場合が考えられる。

一般的な評価例：

対象製品の製造時環境負荷

特定システムの評価例：

同一製品を何箇所かの工場生産した場合の環境負荷比較

生産システムの改善効果の評価

工場内では、日々生産システムが改善され、生産効率の向上が図られている。たとえば、運用方式の改善、プロセスの変更、機械の入れ替え、システム形態の変更、などのような活動がある。

これらの活動の効果は、生産量や生産コストなどで評価されるが、環境負荷改善の努力は必ずしも明示的には評価されない。まだ十分に稼働しているが生産効率の悪い設備を効率の良い新鋭設備で置き換えたような場合、一般的には廃却する旧設備の効用や環境負荷を十分に評価していない。これらを考慮に入れれば、旧設備の改修のほうが総合評価が高くなる可能性もある。

### (3) 生産システムのモデリングとシステム構築法

環境負荷評価のために、資源循環を基礎とした生産システムのモデリングを考える。まず、図1に示すように生産システムにおける資源などの入出力を網羅的に数え上げる。評価の対象となる生産システムからその内部に含まれる設備・装置まで、同様のモデルで階層的に記述される。図1の資源などの入出力は次のように大別される。

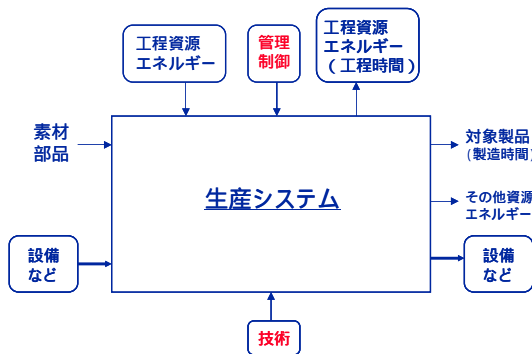


図1 生産システムの資源入出力

- ・ 生産システムの構築に関わるもの：生産システムを構成する設備や治具などが含まれる。比較的長期に渡って生産システムの利用期間中はシステム内に保持される。
- ・ 生産システムの稼働に関わるもの：生産システムの稼働のための電力などのエネルギー、保守部品や消耗品、稼働排出物など

が含まれる。生産システムの稼働期間中に継続的に入出力される。

- ・ 生産システムの廃止に関わるもの：廃棄された設備などで、そのままあるいは部品として他の生産システムに再利用されたり、素材としてリサイクルされる。図2に概要を示したように、一部の資源は、生産システムの利用期間程度の時間で再利用される。その他の資源は、他産業にまたがる大域的な資源循環プロセスに吸収され、素材などとして設備製造などのプロセスに戻されるものもある。

- ・ 生産される製品に関わるもの：製品生産のための素材、部品、生産された製品、あるいは副生成物などが含まれる。

上記の区分は、評価の対象や目的により適切に決定される。また、技術進歩や管理・制御情報の影響も組み込まなければならない。

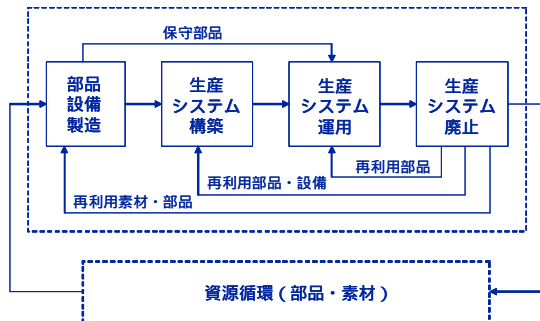


図2 生産システムのライフサイクルと資源循環

環境負荷評価のためには、製品に直接関わる資源・エネルギーの流れと、主に設備・装置やその稼働に関係し製品には間接的に関わる資源・エネルギーの流れをできる限り区別して表現する。製品に直接関係する資源・エネルギーは、製品を構成する基となり、工程内に滞留することなく製品として出力される。その入力と出力の差分が生産における資源・エネルギーの有効な利用として解釈され、生産システムの効用と評価される。このような効用を基に環境効率を考えることができるが、生産対象製品が単純で無い場合には複雑になる。最終的に製品に反映されない資源・エネルギーは負荷として明示的に評価することが重要である。

設備・装置については、その構築・廃棄に関わる資源・エネルギーと日常的な稼働に関する資源・エネルギーを区分して、工程内に滞留する時間を明示的にモデル化する。前者の滞留時間は長く、後者は短い。設備・装置などの資源・エネルギーの排出については、装置の残存機能など排出時の残存価値と、再利用などの回収工程を合理的にモデル化することが重要である。

上記のようなモデル化手法により、現状の

生産システムを As-Is として表現して非効率な要因を可視化する。(1) に述べたような環境配慮の生産システム構築ガイドラインに従って生産システムを To-Be に改変し、その効果を可視化し、環境負荷を評価することにより、生産システム構築手法の体系化を進めることができる。

生産システムの環境負荷はその稼働環境に大きく依存する。環境に配慮した生産システム構築のためには、グローバルな資源・エネルギーの流れを考え、その中での生産システムの影響を評価する必要がある。同じ生産システムでも資源・エネルギーの需給や製品市場が変動すれば、その評価は異なってくる。このような課題に対処するために、生産システムと資源循環の包括的なモデリング手法が望まれる。

#### (4) 機械加工システムの環境配慮性評価

生産システムに潜む資源浪費の事例として切削加工や放電加工を行う機械加工システムを取り上げた。機械加工システムでは生産性が極限まで追求されているにも関わらず、(1) で述べたように、様々な変動要因によって大きな資源浪費が発生している可能性がある。無加工時の間接的な資源消費、過剰・過大な機械の使用による無駄などである。加工実験に基づいてシステムモデリングや環境負荷評価を行い、無駄を具体的に可視化して、資源生産性向上のためのシステム改善の方策を検討した。環境負荷全般を考察の対象とするが、以下の議論では主に電力消費に着目している。

まず、工作機械を対象として、図1のモデリング方式に従い、加工主軸機構、各種送り機構、潤滑・冷却機構、被加工物・切屑搬送、制御装置、電源など、資源・エネルギーの入出力を網羅的に数え上げ、モデル化した。多くのモデルは理論式に基づくが、実態に適合するように実験的な補正を加えたものとなった。このモデル表現はできうる限り汎用性のあるものとなるようにした。

個別の工作機械に適用する場合には、モデル係数を決めなければならない。そのために、各種の条件で加工実験を行った。モデルの相互比較を可能とするために、テストピースと加工条件設定の標準化についても検討した。十分信頼性のあるモデルが得られれば、現用のシステム改善のみならず、シミュレーションによる新規システム構築の基礎として用いることもできることになる。

切削加工については、マシニングセンター4台(MC1:旧式小型、MC2:小型、MC3:大型、MC4:大型複合機)を用いて実験を行った。図3は、無加工待機時の消費電力を示している。加工安定性に配慮したうえで、不必要時には停止できる機器が多く稼働して無駄な資源

浪費を生じていることがわかる。技術的な困難さではなく、環境負荷に十分な注意を払ってこなかったものと理解される。

図4は、被削物に対する加工機械の適合性を示している。同一加工条件で加工を行うのであれば、加工に直接要する電力は、工作機械の大きさによらずあまり変わらない。しかし、過大な能力の機械を用いると、間接的な電力消費が大きく無駄を生ずることがわかる。

図5は、加工条件の影響を示している。通常は同一加工を行うのであれば加工条件の影響は少なく、間接的な資源消費の影響のほうが大きい。高機能機械を十分な能力を発揮させずに使用すると効率が悪い可能性を示している。

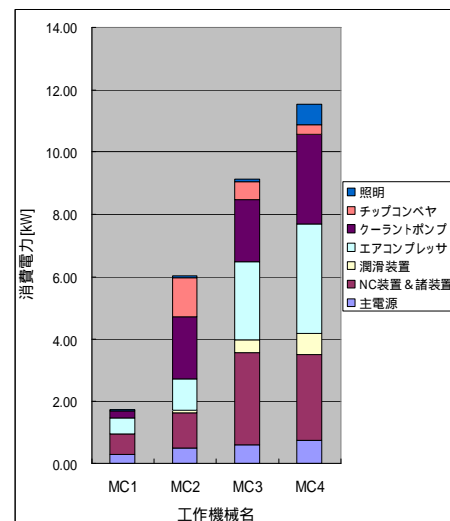


図3 待機時の消費電力の様相

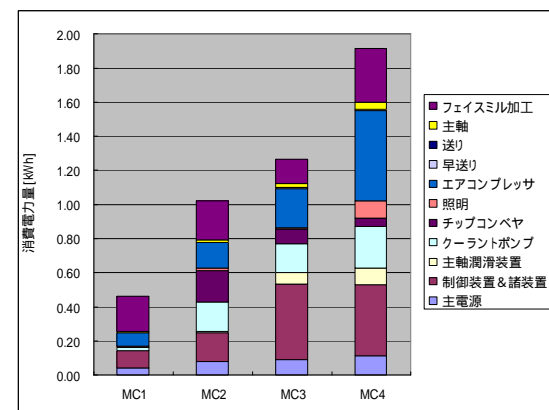


図4 加工時の消費電力の様相

加工実験によりモデルを設定し、シミュレーションより様々な被加工物や加工条件を評価した。一般的な結論を得るためにはさらに徹底した実験と分析が必要であるが、限定した範囲でいくつかの知見が得られた。同一加工要求に対する直接的な資源消費は加工条件や工作機械の選択の影響は少ないが、加

工精度向上などは資源消費に大きく影響する可能性がある。また、間接的な資源消費については十分な注意が払われていない可能性があり今後の向上の余地があることなどである。

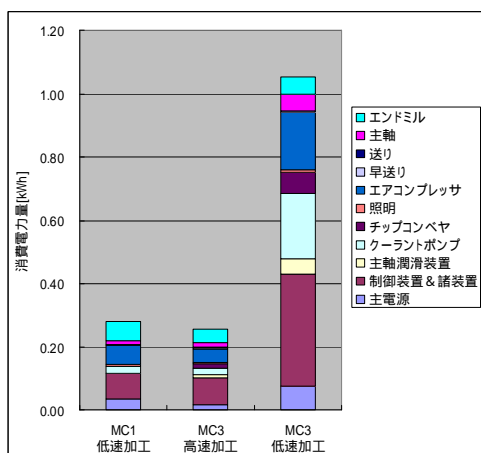


図5 工作機械や加工条件の影響

マシニングセンターや旋盤の機能を統合した複合作業機械、マシニングセル、あるいは機能を絞り込んだ専用工作機械によるトランスファーラインなど、各種のシステム構成の評価も試みた。

また、放電加工についてもいくつかの加工実験を行い、加工にかかわる資源消費の様相を調べた。一般的に放電加工についても間接的な資源消費は大きい。表面粗さなどの加工精度の影響は大きく、加工要求と加工法との適合性の十分な検討が必要である。

以上のようなシステムモデリング手法の標準化を進めることにより、モデルデータが充実し、各種加工法や工作機械、加工システムの相互比較が可能となることが望まれる。

#### (5) まとめ

環境に配慮した生産システムの構築手法について研究し、システム構築のためのモデリングと環境負荷評価手法を検討して、機械加工システムを事例として有用性を評価した。このような手法を広く普及させるためには、生産システム要素のモデルデータを標準化し整備することが重要であり今後の課題である。

#### 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)

木村文彦：ライフサイクルデザイン、精密工学会誌、査読有、第75巻、2009、pp.44-45.

木村文彦：高齢者による生産活動の支援、精密工学会誌、査読有、第73巻、2007、pp.1195-1199.

木村文彦：環境に配慮した製造へ向けて、経営システム誌、査読有、第16巻、2006、pp.183-193.

#### 〔学会発表〕(計10件)

木村文彦：資源循環を基礎とする生産システムの環境負荷評価、精密工学会2009年度春季大会、2009年3月13日、東京。

木村文彦：ライフサイクルエンジニアリングの現状と課題、精密工学会LCE専門委員会総会、2009年3月2日、東京。

Fumihiko Kimura: Standardization for Environmental Evaluation Method of Manufacturing Systems, CIRP Annual Meeting, Jan.29, 2009, Paris.

木村文彦：環境に配慮した生産システム構築のためのモデリング手法、エコデザイン2008、2008年12月11日、東京。

Fumihiko Kimura: Current Trends in Manufacturing and Product Development, Japan-Norway Bilateral Workshop on Manufacturing and Product Development, May 29, 2008, Tokyo.

Fumihiko Kimura: Sustainable Recycling and Reuse of Resources Embedded in Products with Different Product Life Cycle, IMS/MTP Workshop on Sustainable Manufacturing, April 24, 2008, Bern.

横山健二、木村文彦：機械加工システムのモデリングに基づく環境負荷評価手法、精密工学会2008年度春季大会、2008年3月18日、生田。

Fumihiko Kimura: Designing Environmentally Conscious Manufacturing Systems under Disturbances, Int. Seminar on Life Cycle Engineering, June 6, 2007, Haifa.

Fumihiko Kimura: Standardization Method for Environmental Evaluation of Manufacturing Systems, CIRP Annual Meeting, Jan.25, 2007, Paris.

Fumihiko Kimura: Manufacturing System Evolution based on Life Cycle Simulation, CIRP General Assembly/WG, August 25, 2006, Kobe.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

木村文彦 (KIMURA FUMIHIKO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：60133104

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし