

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20246130

研究課題名（和文）

循環型製造業の将来像を設計するための持続可能社会シナリオシミュレータの開発

研究課題名（英文）

Development of Sustainable Society Scenario Simulator for Designing Future Images of Circular Manufacturing Industry

研究代表者

梅田 靖 (UMEDA YASUSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40242086

研究成果の概要（和文）：持続可能社会像の議論のため、「持続可能社会シナリオ」が盛んに描かれているが、文章の合理的理解が困難であり、また、シナリオ作成の計算機支援も十分ではない。以上の問題を解決するため、本研究は、論理構造に注目したシナリオ表現方法論、シナリオ作成の計算機支援方法論を提案し、これらを実装したシナリオ作成・分析支援システム「Sustainable Society Scenario (3S) Simulator」を開発した。さらに実行例として、持続可能社会における製造業のシナリオを作成した。

研究成果の概要（英文）：For discussing the image of sustainable society, various “sustainable society scenarios” have been described. However, it is difficult to understand them rationally and computational support for composing those scenarios is not adequate. For solving these problems, this study proposed a scenario representation methodology focusing on the logical structure of a scenario and a computational support methodology for designing a scenario. Then, based on these methodologies, “Sustainable Society Scenario (3S) Simulator,” which supports users to design and analyze a scenario, is developed. Finally, as a case study, a sustainable manufacturing scenario is described by using the proposed methodologies and the simulator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
総計	35,000,000	10,500,000	45,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：持続可能社会、持続可能社会シナリオ、シミュレーション、持続可能な製造業、環境配慮設計、シナリオ構造化、シナリオ設計、シナリオ分析

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題、資源枯渇問題に代表される地球環境問題に対する認識の高まりの中で、「持続可能性」が重要な概念となっ

たが、その具体像はいまだ明確でない。これに対して、近年、温暖化問題、エネルギー問題を主課題として、持続可能社会へ向けたシナリオを描くことが盛んに行われるよう

なってきた。しかし、これら現状の「持続可能社会シナリオ」の記述は、例えば、どこまでが事実に基づいているのか、逆にどのような前提や仮定に基づいているのか、どの部分が論理的に展開されていてどの部分に論理的飛躍が含まれているのかなどが明確でなく、シナリオの合理的な理解が困難な状況にある。また、シナリオ作成の計算機支援も十分ではない。

2. 研究の目的

以上の問題を解決するため、本研究は、持続可能社会シナリオ作成の新たな方法論を提案し、成果物として、シナリオ作成・分析支援システム「Sustainable Society Scenario (3S) Simulator」を開発すると同時に、実行例として、持続可能社会における製造業のシナリオを描き出すことを目的とした。具体的には、以下の五点の課題を研究した。

- (1) 形式化、計算可能化のためのシナリオ表現方法論
- (2) シナリオ作成方法論の計算機化
- (3) シナリオに接続させたシミュレータなどを再利用し what-if 分析を可能とする動くシナリオ化
- (4) 3S シミュレータの実装
- (5) 持続可能製造業シナリオの作成

3. 研究の方法

(1) シナリオ表現方法論

シナリオを、内容を表す「シナリオ文章」と、根拠を与える「シミュレータ」（データベースの参照などを含む。シミュレータがない場合もある）から構成されるものとしてモデル化する。シナリオ文章の論理関係に注目してノードとリンクからなるグラフを用いて表現する方法論を提案する。

(2) シナリオ作成方法論の計算機化

シナリオ作成者が、シナリオを作成するプロセスを計算機により支援する方法論を提案する。従来、現在からの時間的な延長線上に将来を予測する「フォアキャスティング」、逆に、望ましい将来をあらかじめ設定し、そこを始点に現在までの道筋を描く「バックキャスティング」といったシナリオ作成手法が提案されているが、計算機支援は検討されてこなかった。本研究では、これら従来手法を参考にしながら、計算機支援手法を提案する。特に、持続可能社会の形成のように大きな変化が必要な問題に対して有効と考えられるバックキャスティング型を中心にシナリオ作成支援手法を提案する。

(3) 動くシナリオ化

一般にシナリオにはその裏付けとしてシミュレーション結果が付随していることが多い。しかし、従来のシナリオでは文章と計算結果のデータが記述されているだけであ

るので、シナリオで想定している前提条件や仮定を変更した場合、シミュレーション結果がどう変化し、それに応じてシナリオのストーリーがどのように変化するか確かめることができない。そこで本研究では、シナリオとシミュレーションを実行するシミュレータを接続し、シナリオ文章中でシミュレーションの条件を変えて、シミュレーションを再実行すれば、シミュレーション結果がシナリオ文章中に反映されるようなシナリオの動態化を実現する。

(4) 3S シミュレータの実装

(1)~(3)で提案する各手法の論理的正当性と計算機支援可能性を検証するために、(1)~(4)の成果に基づき、計算機上に 3S シミュレータを実装する。

(5) 持続可能製造業シナリオの作成

(5)で実装した 3S シミュレータを用いて実行例としてシナリオを作成する。例題として、我が国の持続可能な製造業の 2050 年の将来シナリオを設定した。作成方法として、メンバー全員で合宿を行い、集中的にブレインストーミングを実施し、シナリオのアイデア作成、基本設計を行い、後日、3S シミュレータを用いて、シナリオの具体化、詳細化を行い、その結果をメンバー全員でレビューするというプロセスを繰り返すことにより、シナリオを作成する。

4. 研究成果

(1) シナリオ表現方法論

シナリオ文章の論理関係に注目してノードとリンクからなるグラフを用いて表現する「シナリオ構造的記述法」を提案した。本手法において、シナリオを以下の三つのレベルのグラフで表現する。

- **Scenario Level:** シナリオに含まれるストーリーのかたまり(サブシナリオ)を表す。このレベルのノードは、シナリオ、シナリオ要素であり、リンクは、全体部分関係などである。
- **Expression Level:** サブシナリオにおける文章の「節 (clause)」間の論理構造を表す。本表現法における論理表現の中心レイヤであり、ノードは、問題設定、結論、引用文献、事実、仮定、導出された事実を定義し、リンクは、因果関係、論理的飛躍、参照、比較、詳細化、矛盾などを設定している。
- **Data Level:** シナリオの記述に利用されるシミュレータの入出力データの関係を表す。ノードは、シミュレータ本体、入出力データの集合など、リンクはデータの入出力関係を表す。

以上の表現方法で様々なシナリオを記述し、論理構造を表現するに必要十分であることを確認した。特に、Expression Level で、

ノードが事実か仮定であるかの違い、リンクが因果関係か論理的飛躍かの違いを明示することが論理関係を理解する上で極めて有効であることが明らかになった。また、本表現は XML (Extensible Markup Language) を用いて計算機処理可能な形式で表現しているため、サブシナリオを論理的に成立させている最低限の仮定の集合を抽出するなどの論理構造分析を行うことができ、また、文章表示、グラフ表示、リスト表示など多様な表示形式に変換することが可能になった。

(2) シナリオ作成方法論の計算機化

シナリオ作成過程を、情報収集、分析、アイデアを生み出す「構想」、構想の結果を整理し、文章化する「記述」、記述されたシナリオの「評価」の3ステップの繰り返しにより、問題設定から始めて徐々にシナリオ文章に詳細化する過程と捉えて、作成方法論を提案した。特に構想段階が重要であり、フォアキャストリングにおいては、対象世界を因果ネットワークで記述し、そこからキーワードを抽出して、ストーリーラインを構成する。また、バックキャストリングでは、目標状態を得る可能性のある要因をロジックツリーを用いて因果関係を逆追いすることにより、重要なイベントを抽出し、ストーリーラインを構成する。この2点を主な特徴とするシナリオ作成支援方法論を提案した。

(3) 動くシナリオ化

(1)で述べた Data Level 上で、シナリオとシミュレータ間でデータをやり取りするメカニズムを構築した(図 1 参照)。この図のようにシナリオを動態化することにより、シナリオ文章中で数値を変更すれば、シミュレーション条件が変更されてシミュレータに送られ、結果がシナリオ文章に反映さえる。これにより、一つのシナリオ上で様々な what-if 分析を行うことが可能となった。

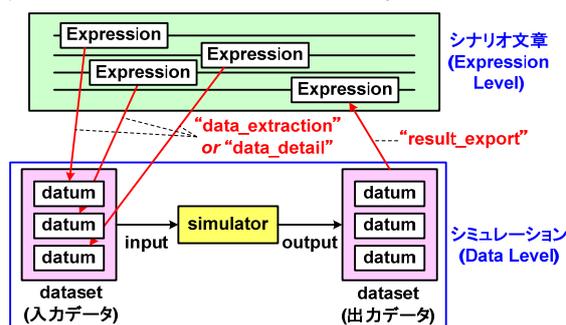


図 1 シナリオとシミュレータの接続

(4) 3S シミュレータの実装

(1)~(3)の成果に基づき、3S シミュレータのプロトタイプシステムを構築することができた。図 2、図 3 に 3S シミュレータのコンセプトと構成を示す。図 3 に示すように、



図 2 3S シミュレータのコンセプト

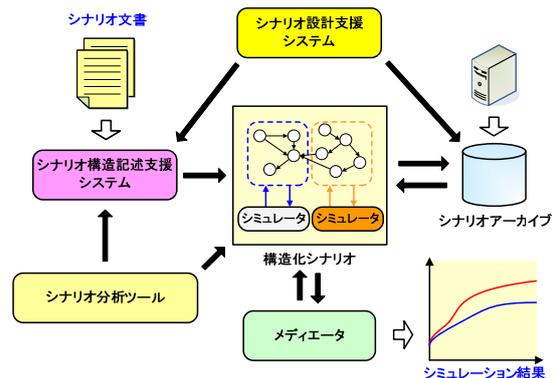


図 3 3S シミュレータの構成

3S シミュレータは、シナリオの構造化を支援する「シナリオ構造記述支援システム」、構造化されたシナリオと、シナリオの記述に利用されるシミュレータを集積する「シナリオアーカイブ」、新たなシナリオの作成を支援する「シナリオ設計支援システム」、および、シナリオの論理構造分析と what-if 分析を支援する「シナリオ分析ツール」から構成される。この 3S シミュレータにより、図 4 に示すように、これまで紙と鉛筆に頼っていたシナリオ作成が計算機化された。



図 4 3S シミュレータの効果

(5) 持続可能製造業シナリオの作成

提案した方法論、および、実装した 3S シミュレータを用いて、様々な持続可能社会シナリオを作成することにより、これらの有効性を検証した。特に、2050 年頃の我が国の持続可能製造業シナリオを作成することを主たるケーススタディとした。

ここでは、持続可能性とものづくりの関係、ものづくりが国内に存在することに意義について様々に検討を行い、産業競争力、国内雇用確保、資源枯渇問題、温暖化問題、エネルギー問題に焦点を当てることとした。資源枯渇問題については、枯渇の危険性の高いベースメタルとして銅を取り上げ、枯渇の予測を行い、2050年頃までに枯渇の危険性は高いが、クリーンエネルギー自動車、太陽電池など我が国が製造するであろうハイテク製品の普及に伴う消費量増大よりも、新興国の経済成長に伴うインフラ整備による消費量増大が主たる要因になることを明らかにした。一方、温暖化問題、エネルギー問題に関しては、購入した「自然エネルギー普及シミュレーションシステム」を用いて試算することにより、再生可能エネルギーの賦存量としては、我が国の電力需要（人口減により2050年に現在の6割の需要であると仮定して）を賄う可能性もあるという結果を得た。

以上より、これら環境制約、資源制約の下で、国内雇用を確保しつつ、産業競争力を維持、向上させることが我が国の持続可能製造業のミッションであることが明確になり、以下の六つのストーリーラインを作成した。

- グローバル市場で勝ち抜くサブシナリオ
 - 国内雇用確保のための国内生産と海外生産によるグローバル市場対応をバランスさせる「ポートフォリオ」サブシナリオ
 - これまで以上に高品質を追求することにより、他の追従を許さずに生き抜く「ジャパニーズクオリティ」サブシナリオ
 - レコード針のようにニッチな市場の残存者利益を狙う「グローバルニッチ」サブシナリオ
- グローバル市場よりも国内市場に注力するシナリオ
 - 国サブ内市場にのみ注力し、その規模で生き残る「ジャパニーズガラパゴス」サブシナリオ
 - 上記の結果として、ウオシュレットのように、世界市場で売れる「グローバルガラパゴス」サブシナリオ
 - 最終製品よりも、世界中から試作を引き受け、高いQCD (Quality, Cost, Delivery) で対応する「世界の試作工場」サブシナリオ

実際のシナリオ作成ワークショップの現場で3Sシミュレータを使用することは容易ではなかったことが今後の課題としてあげられる。これは、ワークショップが主としてアイデアを生成する思考の発散段階を目的としているのに対して、3Sシミュレータはアイデアをまとめて、種々のデータ、シミ

ュレータと関連づけ、構造化する、思考の収束段階の支援に適している。このため、ワークショップ後に3Sシミュレータを活用してシナリオを作成する手順を踏んだ。また、3Sシミュレータはシナリオ文章の論理構造を明示するために、かなり緻密な文章作成作業、構造化作業を要する。この部分の支援の高度化も今後の課題として挙げられる。

以上、本研究は、持続可能社会シナリオを対象として、新たなシナリオ作成方法論の提案、シナリオ作成・分析支援システムの構築、および、持続可能製造業シナリオを作成するという目的を全て達成することができた。特に、計算機を用いたシナリオ作成方法論という新たな問題設定を行い、それに対して、方法論、プロトタイプシステム、ケーススタディをセットで提案することができたことは大きな成果であり、この分野の研究の発展に大きく貢献している。さらに、本研究のシナリオ作成手法に基づき、シナリオ作成を行う種々のプロジェクト、共同研究を実施しており、本研究の今後の展開が期待出来る。

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23件)

① Hitoshi Komoto, Keijiro Masui, Tetsuo Tomiyama: Quantitative scenario-based simulation of global business models for manufacturers, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 62, 2013, 査読有.

② 和田春菜, 木下裕介, 水野有智, 福重真一, 梅田靖: 持続可能社会に向けたバックキャスト型シナリオ作成手法の提案, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 79, pp. 845-857, 2013, 査読有.

③ 木下裕介, 廣崎真希, 水野有智, 和田春菜, 福重真一, 梅田靖: 持続可能社会に向けた長期戦略立案のためのビジネス戦略シナリオの設計支援, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 78, pp. 3866-3880, 2012, 査読有.

④ 木下裕介, 水野有智, 和田春菜, 福重真一, 梅田靖: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発 (第4報) - what-if 分析による派生シナリオの作成手法 -, *精密工学会誌*, Vol. 78, pp. 985-991, 2012, 査読有.

⑤ 水野有智, 木下裕介, 和田春菜, 福重真一, 梅田靖: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発 (第3報) - フォアキャスト型シナリオ設計支援手法 -, *精密工学会誌*, Vol. 78, pp. 798-804, 2012, 査読有.

⑥ Keishiro Hara, Michinori Uwasu, Hideki Kobayashi, Shinji Kurimoto, Shinsuke Yamanaka,

Yoshiyuki Shimoda, Yasushi Umeda: Enhancing Meso Level Research in Sustainability Science - Challenges and Research Needs, Sustainability, Vol. 4, pp. 1833-1847, 2012, 査読有.

⑦ 細野靖晴, 佐野健二, 小林英樹: 東日本大震災の被災地復興に向けた銅使用量の推計, 日本 LCA 学会誌, Vol. 8, pp. 292-299, 2012, 査読有.

⑧ Shinsuke Kondoh, Kei Kurakawa, Satoru Kato, Yasushi Umeda, Shozo Takata: Analysis of Key Success Factors for Eco-Business through Case Studies in Japan, Int. J. of Automation Technology, Vol. 6, pp. 252-263, 2012, 査読有.

⑨ Mitsutaka Matsumoto Yasushi Umeda: An analysis of remanufacturing practices in Japan, J. of Remanufacturing, Vol. 1, 2011, 査読有.

⑩ 柄井匡, 中野冠, 木村文彦: リサイクルを考慮した国内銅資源供給の持続可能性評価 -自動車、家電4品目、建設部門のリサイクルを中心とした分析-, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, pp. 3744-3751, 2010, 査読有.

⑪ Mitsutaka Matsumoto: Development of a simulation model for reuse businesses and case studies in Japan, J. of Cleaner Production, Vol. 18, pp. 1284-1299, 2010, 査読有.

⑫ 木下裕介, 山崎泰寛, 水野有智, 福重真一, 梅田靖: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第2報) -シナリオとシミュレータの接続による動的シナリオの作成-, 精密工学会誌, Vol. 76, pp. 694-699, 2010, 査読有.

⑬ 木下裕介, 山崎泰寛, 水野有智, 福重真一, 梅田靖: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第1報) -構造的なシナリオ記述に基づく論理構造の分析-, 精密工学会誌, Vol. 75, pp. 1029-1035, 2009, 査読有.

⑭ Yasushi Umeda, Takeshi Nishiyama, Yasuhiro Yamasaki, Yusuke Kishita, Shinichi Fukushima: Proposal of sustainable society scenario simulator, CIRP J. of Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, pp. 272-278, 2009, 査読有.

⑮ 松本光崇, 近藤伸亮, 藤本淳, 梅田靖, 槌屋治紀, 増井慶次郎, 李賢映: クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 29, pp. 49-55, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 76 件)

① Hitoshi Komoto: A simulation method of dynamic systems applied to backcasting scenario design, The 4th CIRP Int. Conf. on Industrial Product Service Systems, 2012.11.8-9, 産総研臨海センター, 東京.

② 梅田靖: 持続可能社会シナリオ作成支援手法の開発 - 持続可能製造業シナリオを例に -, 第 4 回横幹連合総合シンポジウム,

2012.11.10-2, 日本大学.

③ Naoto Kurahashi: Describing Sustainability Scenarios of Regional Electricity Systems: Influences of Introducing Photovoltaic Systems and Electric Vehicles into Electricity Networks, Electronics Goes Green 2012+, 2012.9.9-12, Berlin, Germany.

④ Yusuke Kishita: Estimation of Long-term Copper Demand Based on Sustainability Scenarios: A Challenge to Sustainable Manufacturing Industry, ASME 2012 17th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conf. (DFMLC), 2012.8.12-15, Chicago, USA.

⑤ Mitsutaka Matsumoto: An analysis model for future demands of industrial products - case of automobile, Int. Sym. on Reliability Engineering and Risk Management, 2012.8.6, 神奈川大学.

⑥ Fumihiko Kimura: Sustainable Manufacturing: Evolution and Future, 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2011.11.30-12.2, 京都, Keynote paper.

⑦ Yasushi Umeda: A Methodology for Designing Sustainable Manufacturing Scenarios, 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2011.11.30-12.2, 京都.

⑧ Yuji Mizuno: Designing sustainable manufacturing scenarios using 3S Simulator, 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2011.11.30-12.2, 京都.

⑨ Yusuke Kishita: Describing Scenarios of Introducing Highly-efficient Gas Cogeneration Systems to Next-generation Apartment Buildings, 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2011.11.30-12.2, 京都.

⑩ Jun Fujimoto: Sustainable Car Society Scenarios: A "Game-changing" Approach, EcoDesign 2011: 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2011.11.30-12.2, 京都.

⑪ K. Masui: Relevance Analysis of keywords related to Sustainability, CIRP 8th Global Conf. on Sustainable Manufacturing, 2010.11.23, Abu Dhabi.

⑫ Mitsutaka Matsumoto: Consumer preferences for reuse products: a case study on auto-parts reuse in Japan, Going Green CARE INNOVATION 2010, 2010.11.11, Vienna, Austria.

⑬ Shinsuke Kondoh: Proposal of a Cause-effect Pattern Library for realizing Sustainable Development, 6th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2009.12.7-9, 札幌.

⑭ Fumihiko Kimura: Sustainable Resource Reuse and Recycle for Global Product and Production, 6th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2009.12.7-9, 札幌.

⑮ Mitsutaka Matsumoto: Modeling the Social Acceptance of Product Remanufacturing, 6th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2009.12.7-9, 札幌.

⑯ Yasushi Umeda: Sustainable Society Scenario Simulator toward Sustainable Manufacturing (1st Report) – Needs and Approaches to Sustainable Society Scenario Simulation, 6th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2009.12.7-9, 札幌.

⑰ 藤本 淳: 技術と社会イノベーションとの統合的対策のための MESO レベルの概念提案, エコデザイン 2008 ジャパンシンポジウム, 2008.12.11-12, 東京.

⑱ 松本光崇: 企業・消費者・政府をアクターとする循環型社会シミュレーションモデル構築の検討, エコデザイン 2008 ジャパンシンポジウム, 2008.12.11-12, 東京.

[図書] (計 2 件)

① Yasushi Umeda and Yusuke Kishita: 2-1 Framework of future vision, scenario and roadmap, In T. Morioka, K. Hanaki, Y. Moriguchi (eds.), Establishing a Resource-Circulating Society in Asia: Challenges and Opportunities, United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris, 2011, 464 pages (pp. 22-36).

② Mitsutaka Matsumoto, Yasushi Umeda, Keijiro Masui, Shinichi Fukushige (eds.): Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society, Proc. of EcoDesign 2011: 7th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Springer, 2011, 1195 pages.

[その他]

- 3S Simulator Home Page
<http://www-lce.mech.eng.osaka-u.ac.jp/3s/>
3S シミュレータの一部を公開しており、ユーザも獲得している。
- エコデザイン 2008 ジャパンシンポジウム、EcoDesign2009 国際シンポジウム、EcoDesign2011 国際シンポジウムにおいて、本研究プロジェクトの成果公開、3S コンソーシアムの活動を兼ねて、オーガナイズドセッション「Designing Sustainable Society」(2008, 2009)、「Envisioning and Designing Sustainable Manufacturing Industry」(2011)を開催した。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 靖 (UMEDA YASUSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40242086

(2) 研究分担者

松本 光崇 (MATSUMOTO MITSUTAKA)
独立行政法人産業技術総合研究所・サービス工学研究センター・研究員
研究者番号：00443226

福重 真一 (FUKUSHIGE SHINICHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10432527

木村 文彦 (KIMURA FUMIHIKO)
法政大学・理工学部・教授
研究者番号：60133104

増井 慶次郎 (MASUI KEIJIRO)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・グループ長
研究者番号：70357995

(H20→H21: 連携研究者)

藤本 淳 (FUJIMOTO JUN)
千葉工業大学・社会システム科学部・教授
研究者番号：70357995
(H23: 連携研究者)

(3) 連携研究者

近藤 伸亮 (KONDOH SHINSUKE)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・研究員
研究者番号：40336516

高本 仁志 (KOMOTO HITOSHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・研究員
研究者番号：30613244

(H24 のみ)

小林 英樹 (KOBAYASHI HIDEKI)
大阪大学・環境イノベーションデザインセンター・招へい教授
研究者番号：60446903

(H23→H24)

木下 裕介 (KISHITA YUSUKE)
大阪大学・環境イノベーションデザインセンター・特任助教
研究者番号：60617158

(H24 のみ)