

令和元年6月27日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26282082

研究課題名(和文)環境経営情報志向の循環型・低炭素型サプライチェーンの統合と満足化に関する研究

研究課題名(英文) Environmental Management Information Oriented Integration and Satisficing of Closed-Loop and Low Carbon Supply Chains

研究代表者

山田 哲男 (Yamada, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：90334581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パソコン、掃除機や携帯電話といった組立製品のリサイクルとCO2削減を経済的に促進するために、循環型・低炭素型サプライチェーンと製品ライフサイクルを統合し、環境負荷や経済性のある化と満足化を行った。具体的には、陳腐化した部品交換のアップグレード、製品使用済み時の分解部品選択、グローバル/リバースサプライチェーンネットワーク、製造・再製造システムやマネジメントコントロールシステムなどについて、設計・運用・経営の方法論を提案した。その結果、リサイクル率向上、CO2削減とコスト削減を同時に達成できるケースの存在を示した。また、米・独・英の大学と国際共同研究や国際ワークショップを実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、製品設計から生産・物流、企業経営までのプロセスを結合してモデル化することで、環境に調和しかつ経済的な循環型・低炭素型サプライチェーンの成立要件を示したことである。さらに、目標計画法や線形物理的計画法により、環境負荷と経済性を多目的に満足化する設計・運用・経営の方法論を提案したことである。社会的意義は、新興国と先進国双方からの部品調達、製造数と再製造数の決定、アップグレードによる多目的満足解導出、ボトムアップ型マネジメントコントロールシステムの運用プロセスなど、リサイクル率・CO2排出量・経済性を同時に満足する代替案を、各プロセスの意思決定者が選択できるようにしたことである。

研究成果の概要(英文)：To promote recycling and CO2 reduction for assembly products such as computers, vacuum cleaners and cell phones, modeling and satisficing for environmental and economical loads were conducted by integrating closed-loop/low-carbon supply chain and product lifecycle. Design and management methodologies were proposed for upgrading, disassembly part selection, global and reverse supply chain networks, manufacturing-remanufacturing system and management control system. It demonstrated that there was a case which accomplished improvement of recycling rate and reduction of CO2/cost simultaneously. Moreover, international joint researches with American, German and British universities were conducted, and an international workshop for green supply chain was held in Tokyo, Japan.

研究分野：経営工学

キーワード：廃棄物再資源化 地球温室効果ガス排出削減 サプライチェーン モデル化 経営工学 コスト削減  
製品設計 環境会計

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2011年ダーバンの気候変動枠組条約（UNFCCC）では、温室効果ガス削減のために世界194ヶ国が集結した。持続可能な社会を目指す人類は、地球温暖化のみならず資源・エネルギー枯渇など、なお深刻化する環境問題に対し、生活を支える冷蔵庫・洗濯機、パソコン・携帯電話、自動車など、製品のモノづくりを環境へ調和させねばならなくなった（Seliger, 2013; Bo and Wen-Jing, 2013）。こうした製品は、もともとは地球に眠っていた天然資源から素材が生成され、モノづくりの場である生産システムで日夜生み出され、世界中のあらゆる場所から陸海空運の物流システムを通じ配送されるというサプライチェーン（供給連鎖）を通じて私たちのもとに届けられている。しかし、この豊かさ引き換えに、素材の調達・生産・物流（サプライチェーン）による資源消費とCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）排出を、製品ライフサイクルの全般に渡って避けることができない。

金属やプラスチックなど素材資源の循環を促進させるには、循環型サプライチェーン（曹ら, 2008）が必要である。他方、製品の調達・生産・物流・回収時には、素材（マテリアル）の利用や化石燃料を燃やして得るエネルギー消費によってCO<sub>2</sub>を必ず排出しており、低炭素型サプライチェーンが必要である。しかし、循環型や低炭素型のサプライチェーンを積極的に導入すべきモノづくり企業は、環境負荷の削減と利益との関係が経営情報として定量的に見えないために、コスト増加を恐れて環境に調和したモノづくりを躊躇している現状がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、組立企業のサプライチェーン（生産物流の供給連鎖）と製品ライフサイクル・経営情報システムにおけるモノと情報の流れに着目し、組立・分解作業に伴う製品/素材と企業価値・利益の創出とともに、循環型サプライチェーンのリサイクル率向上と低炭素型サプライチェーンのCO<sub>2</sub>削減を同時に目指す。そのため、環境経営情報を志向して循環型と低炭素型の両サプライチェーンを統合し、経済性と環境負荷についての見える化（Modeling）と満足化（Satisficing）を行う。

### 3. 研究の方法

#### ①製品設計とサプライチェーンの結合

製品の使用時に一部の構成部品のみを交換、追加することで製品の寿命を拡張させるアップグレード可能な製品ビジネスモデルを展開するためには、構成部品が容易に交換可能であるように、設計の初期段階でモジュール化する必要がある。本テーマでは、部品サプライヤーに焦点を当て、部品毎に複数のサプライヤーが存在する際に、サプライヤーとモジュール部品の決め方によって、そのモジュール戦略の効率を環境性と経済性に加え、製品品質とリードタイムの4つの視点から総合的に評価する指標の提案を行った。

また、3次元CAD、組立信頼性評価法、リサイクル性評価法やライフサイクルインベントリデータベースにもとづき、組立・分解時間からコストや環境負荷を算出するモデルを構築し、素材や部品の変更による重量や組立・分解時間、生産ラインの作業編成の変更が、量産の組立・分解システム設計に与える影響を定量的に評価した。

#### ②静脈（リバース）と動脈（レギュラー）サプライチェーンの結合

テーマ①で開発される組立・分解のケースを利用して、静脈と動脈のサプライチェーンの統合と満足化を行った。ここでは、調達・輸送コストや利益に加えてリサイクル率と生産・回収CO<sub>2</sub>量の評価関数も設け、サプライヤー・調達国選択、調達と輸送のグローバル・サプライチェーンネットワーク設計とリバースサプライチェーン設計し、多目的なモデル化と満足化を行った。

また、需要に依存した回収分布を設計し、時系列モデルに組み込むことでサプライチェーンにおける資源の循環を動的に再現するモデルを設計した。さらに、製造品と再製造品の価値に依存した価格設定と、これに対するカニバリゼーション効果を考慮した需要量モデルを開発し、サプライチェーンモデルに組み込むことで最適化を行った。

#### ③経営情報とエンジニアリング情報の結合

マテリアルフローコスト会計（MFCA）の導入企業へのインタビュー調査をベースに、環境マネジメントシステムにおけるエンジニアリング情報の利用可能性を調査した。また、市販の経営情報システムを用い、実際に操作をしながら学習ができるeラーニング授業を開発した。

#### ④製品ライフサイクル・経営情報システムの結合と新興国・先進国のケース検証

テーマ①～④での各プロセスの代替案の変更について、企業の経済性や環境負荷に与える影響を定量的に見える化し、新興国と先進国のケースを作成してモデル検証を行った。

### 4. 研究成果

#### ①製品設計とサプライチェーンの結合

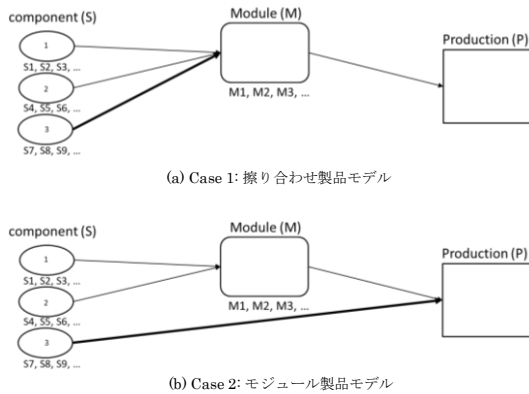


図1 擦り合わせ 対 モジュール製品モデル

つつも、利益を最大化する分解部品選択と、その下でステーション数を最小化する分解システム設計を提案した。

### ② 静脈（リバース）と動脈（レギュラー）サプライチェーンの結合

製品の使用期間を用いることで販売から回収までの製品の流れを仮想的に再現

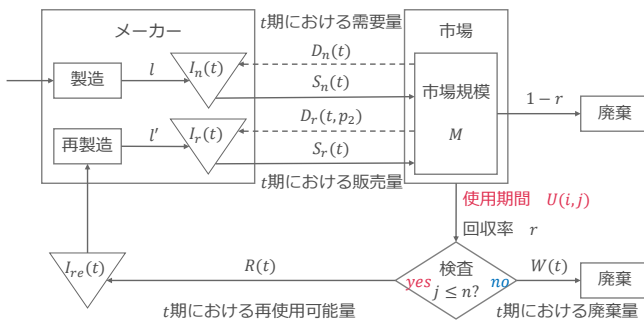


図2 製造・再製造システム

くつかのシナリオが評価され、利益に対して頑健な連動モデルが示された。

### ③ 経営情報とエンジニアリング情報の結合

企業のサステナビリティ経営に関するフィールド調査を通じて、ボトムアップ型のマネジメントコントロールシステムの運用プロセスについて明らかにした。また、実際の経営情報システム Compiere を操作して学習できる e ラーニング教材を用いた授業開発を行い、学習効果を定量的に示した。加えて環境会計におけるアカウンタビリティや、日本における企業サステナビリティのバロメータについて、事例を通じた分析を行った。

### ④ 製品ライフサイクル・経営情報システムの結合と新興国・先進国のケース検証

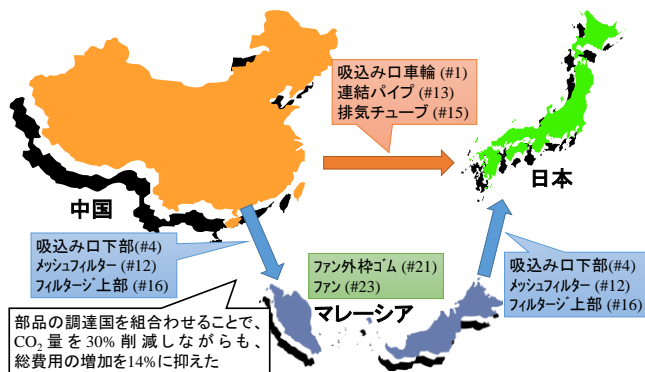


図3 素材CO<sub>2</sub>排出量削減のサプライチェーンネットワーク設計: CO<sub>2</sub>目標削減率30~50%のときの部品調達国の変化

はじめに、部品間の入力関係や機能に焦点を当ててモジュール化を行う DSM (Design Structure Matrix) のクラスタ化手法に対して、より最適なモジュール構成を決定する方法を提案し、リードタイム、製品品質、環境性、経済性の4つの視点から、より評価の高いモジュール戦略を探索した (図1)。

各部品に対して設定したサプライヤーの候補 (S1-S9 等) について、Case 1 は部品 1~3 すべてを一つのモジュールとして擦り合わせする場合を示し、Case 2 は部品 1 と 2 をモジュール地 M でモジュール化し、最終工程地 P にてそのモジュールと部品 3 を組み立てる場合を示す。

また、リサイクル率と回収 CO<sub>2</sub> 量を確保し

素材製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を削減するグローバルサプライチェーンや、リサイクル率を考慮したリバースサプライチェーンについて、それぞれネットワーク設計法を提案した。

さらに、通常の製造品と再製造品の品質による製品価値は価格に反映されると仮定し、それぞれの価格付けによる需要量の変化を考慮するため、カニバリゼーション効果を組み込んだ製造・再製造制御システム (図2) を設計した。また、過去の需要量に影響され変化する回収量モデルが同時に考慮され、これらの時間変化に伴ってサプライチェーンの動脈と静脈が連動し、評価することができるモデルが設計された。これを用いてい

素材 CO<sub>2</sub> 排出量削減のサプライチェーンネットワーク設計法のケース検証を行い、新興国と先進国双方から部品を調達すれば、CO<sub>2</sub> 量とコストを同時に抑制できるケースのあることを示した (図3)。

以上の研究成果の発信のために、国際会議 GBC2016、IJIE2016、LCE2017、ICPR2017 では、日米オーガナイズドセッションを組むなどして研究発表を行った。

さらに、2016 年第 2 回グリーンサプライチェーンに関する国際ワークショップ (東京) の開催、編著による低炭素型サプライチェーンの和書執筆や招待講演等によって、これまでの研究成果の普及に努めた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

- ① Ayako Okuda, Aya Ishigaki, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, “Inventory Management in a Manufacturing–Remanufacturing System with Cannibalization and Stochastic Returns”, *LogForum*, 14 巻, 113–125 (2018), 査読有, DOI: 10.17270/J.LOG.2018.265
- ② Aya Ishigaki, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, “Design of a Closed-Loop Supply Chain with Stochastic Product Returns”, *International Journal of Automation Technology*, 11 巻, 563–571 (2017), 査読有, DOI: 10.20965/ijat.2017.p0563
- ③ 山田哲男, 加藤美慈, 山際美佳, 石垣綾, “ボストン座談会 Part 2: 米国のサプライチェーンとサービスの実際–ノースイースタン大学機械・経営工学科での滞在研究と米国生活(4)–”, *経営システム*, 27 巻, 178–184 (2017)
- ④ Tomoyuki Urata, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Global Supply Chain Network Design and Asian Analysis with Material-Based Carbon Emissions and Tax”, *Computers and Industrial Engineering*, 113 巻, 779–792 (2017), 査読有, DOI: 10.1016/j.cie.2017.07.032
- ⑤ 柴田知世, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “製品のアップグレード設計への適合性評価(ノートパソコンの設計問題への適用)”, *日本機械学会論文集*, 83 巻, 1–11 (2017), 査読有, DOI: 10.1299/transjsme.17-00082
- ⑥ 伊集院大将, 山田哲男, 木下雄貴, 石垣綾, 井上全人, “リバース・サプライチェーンネットワークの設計と素材再生分析”, *日本設備管理学会誌*, 28 巻, 147–159 (2017), 査読有
- ⑦ Fengjing Xu, Tetsuo Yamada, Munenori Kakehi, “Class Development of Management Information System Using System Operation E-learning by Compiere ERP”, *Innovation and Supply Chain Management*, 11 巻, 1–12 (2017), 査読有, DOI: 10.14327/iscm.11.1
- ⑧ Yuki Kinoshita, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, Aya Ishigaki, Masato Inoue, “Disassembly Parts Selection and Analysis for Recycling Rate and Cost by Goal Programming”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10 巻, 1–15 (2016), 査読有, DOI: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0052
- ⑨ Tomoyuki Urata, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Global Supply Chain Network Design for Lower Material-Based CO<sub>2</sub> Emissions and Costs between Developed and Emerging Countries”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, 67 巻, 156–166 (2016), 査読有, DOI: 10.11221/jima.67.156
- ⑩ 山田哲男, 加藤美慈, 山際美佳, 石垣綾, “ボストン座談会 米国のワークライフバランスとヘルスケアの実際–ノースイースタン大学機械・経営工学科での滞在研究と米国生活(3)–”, *経営システム*, 26 巻, 109–117 (2016)
- ⑪ 中嶋道靖, B. ワグナー, “サステナビリティマネジメント手法としてのマテリアルフローコスト会計(MFCA)の新たな可能性に向けて: ISO14051とISO14052の国際規格化を参考に”, *日本LCA学会誌*, 12 巻, 54–59 (2016)
- ⑫ 國部克彦, “MFCAによる経済と環境の連携を再考する: MFCA-LCA 統合モデルの展開へ”, *日本LCA学会誌*, 12 巻, 60–65 (2016)
- ⑬ Yuta Yoshizaki, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Material Based Low-Carbon and Economic Supplier Selection with Estimation of GHG Emissions and Affordable Cost Increment for Parts Production among Multiple Asian Countries”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, 66 巻, 435–442, (2016), 査読有, DOI: 10.11221/jima.66.435
- ⑭ Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, Masato Inoue, Norihiro Itsubo, “Disassembly System Modeling and Design with Parts Selection for Cost, Recycling, and CO<sub>2</sub> Saving Rates Using Multi Criteria Optimization”, *Journal of Manufacturing Systems*, 38 巻, 151–164, (2016), 査読有, DOI: 10.1016/j.jmsy.2015.11.002
- ⑮ 木下雄貴, 山田哲男, 浦田智幸, 山田周歩, 井上全人, “製品の違いを通じた組立・分解システムの比較考察によるボトルネック作業の特定とその改善方法”, *日本設備管理学会誌*, 27 巻, 131–144 (2016), 査読有
- ⑯ 浦田智幸, 山田哲男, 五十嵐健人, 井上全人, 木下雄貴, “製品・生産設計間における組立および分解の作業とシステムの比較分析に関する事例研究”, *日本設備管理学会誌*, 27 巻, 82–91 (2015), 査読有
- ⑰ 村上隼也, 石垣綾, 山田哲男, “リユース・サプライチェーンにおける回収量の時間変化が経済発注量に及ぼす影響”, *日本設備管理学会誌*, 27 巻, 100–108 (2015), 査読有
- ⑱ Tetsuo Yamada, Yusuke Kume, “Modeling and Analysis of Sorting Traffic and Buffer Capacities for Disassembly Systems with Reverse Blocking”, *Innovation and Supply Chain Management*, 9 巻, 147–155 (2015), 査読有, DOI: 10.14327/iscm.9.147
- ⑲ 田中健一, 古田壮宏, “施設までの距離に着目した線分都市における Quintile Share Ratio の導出”, *都市計画論文集*, 50 巻, 628–635 (2015), 査読有, DOI: 10.11361/journalcpj.50.628

- ⑳ 松尾太一朗, 田中健一, 栗田治, “介在機会モデルを導入したフロー捕捉型配置問題”, 都市計画論文集, 50 巻, 622-627 (2015), 査読有, DOI: 10.11361/journalcpj.50.622
- ㉑ 山田哲男, “米国ノースイースタン大学での滞在研究に伴うボストンでの米国家族生活と多様性を持つ社会システム-ノースイースタン大学機械・経営工学科での滞在研究と米国生活(2)-”, 経営システム, 25 巻, 114-122 (2015)
- ㉒ Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Optimal Disassembly System Design with Environmental and Economic Parts Selection for CO<sub>2</sub> Saving Rate and Recycling Cost”, International Journal of Supply Chain Management, 3 巻, 159-171 (2014), 査読有
- ㉓ Yuta Yoshizaki, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Material Based Low-Carbon and Economic Supplier Selection with Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions and Cost Using Life Cycle Inventory Database”, Innovation and Supply Chain Management, 8 巻, 159-170 (2014), 査読有, DOI: 10.14327/iscm.8.159
- ㉔ 中澤優介, 尻無濱芳崇, 北田皓嗣, “アカウンタビリティが開かれるとき: 一関市国保藤沢病院の事例に見るアクターの複数性 (<特集>社会と環境の会計学)”, 国民経済雑誌, 210 巻, 101-119 (2014)

[学会発表] (計 83 件) うち 3 件と招待講演 8 件を掲載

- ① Yuki Kinoshita, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, Aya Ishigaki, Masato Inoue, “Linear Physical Programming Approach for Environmentally Friendly and Economical Material Selection”, Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE) Annual Conference and Expo 2018, 965-970, Orland, USA (May 19-22, 2018)
- ② Yuki Kinoshita, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, Aya Ishigaki, Masato Inoue, “Material Selection for Cost, Disposal Weight and GHG Emissions by Linear Physical Programming”, Northeast Decision Science Institute 2018, 6 pages, Providence, USA (April 12-14, 2018)
- ③ Rena Kondo, Yuki Kinoshita, Tetsuo Yamada, Masato Inoue, “Effects of Different Carbon Tax Among Asian Countries on Low-Carbon and Economic Supplier Selection”, Northeast Decision Science Institute 2018, Providence, USA (April 12-14, 2018)
- ④ 山田哲男, “経済連携協定を考慮したグローバルサプライ・再製造チェーンの統合と研究課題”, 公益社団法人日本経営工学会生産物流部門 移転価格を考慮したグローバル生産システムに関する研究プロジェクト第 5 回研究会, 横浜 (2017), 招待講演
- ⑤ Tetsuo Yamada, “Integration and Challenges of Glocal Supply and Remanufacturing Chain for Sustainability”, アジアにおけるロジスティックスワークショップ, JST さくらサイエンスプラン, 日本・アジア青少年サイエンス交流事業, 横浜 (2017), 招待講演
- ⑥ 山田哲男, “トランプ・Brexit 時代の環境グローバルサプライチェーンの研究と課題”, 未来展, オープンイノベーションカンファレンス, 名古屋 (2017), 招待講演
- ⑦ Tetsuo Yamada, “Challenges of Sustainable but Reliable Global Supply Chain in the Brexit and Trump Era”, 3<sup>rd</sup> Competition Reliability Engineering(CRE) in Product Development and Manufacturing, London, UK (2017), 招待講演
- ⑧ 山田哲男, “環境経営情報による循環型・低炭素型サプライチェーンのモデル化と設計”, 神戸 CSR 研究会東京部会, 法政大学市ヶ谷キャンパス(東京都千代田区), (2016-12-17), 招待講演
- ⑨ 北田皓嗣, “MFCA の利用に対する環境マネジメントに関する組織能力の影響”, 日本会計研究学会, 静岡県コンベンションアーツセンター(静岡県静岡市, 2016-09-13 - 09-14), 招待講演
- ⑩ 山田哲男, “循環型・低炭素型サプライチェーンの統合と経営情報システムによる持続可能なモノづくり” (一社) 日本計量機器工業連合会環境委員会講演会, 日本出版クラブ会館(東京都新宿区 2015-10-28), 招待講演
- ⑪ 山田哲男, “環境経営情報を志向した循環型・低炭素型サプライチェーンの統合と課題”, 東京理科大学大学院, 経営工学専攻, 大学院特別講義, 東京理科大学(千葉県野田市, 2014-07-18), 招待講演

[図書] (計 3 件)

- ① Rena Kondo, Yuki Kinoshita, Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Masato Inoue, “Effects of Carbon Tax on Low-Carbon and Economic Supplier Selection for Asian Assembly Product”, In Allen H. Hu, Mitsutaka Matsumoto, Tsai Chi Kuo, Shana Smith (Eds.), “Technologies and Eco-innovation towards Sustainability II Eco Design Assessment and Management”, 377 pages, Chapter 24, pp. 301-313, Springer (2019), DOI: 10.1007/978-981-13-1196-3\_24
- ② 國部克彦, 伊坪徳宏, 中寫道靖, 山田哲男 編著, 北田皓嗣ら分担執筆, 『低炭素型サプライチェーン経営』, 264 pages (pp. 1-13, 149-171, 173-184), 中央経済社 (2015)
- ③ Katsuhiko Kokubu, Hirotsugu Kitada, Badrul M. Haidar, “Corporate Sustainability

Barometer in Japan”, In Schaltegger, S., Windolph, S.E., Harms, D., Hörisch, J. (Eds.), “Corporate Sustainability in International Comparison: State of Practice, Opportunities and Challenges”, 255 pages, Chapter 9, pp. 121-140, Springer International Publishing (2014), DOI: 10.1007/978-3-319-06227-3

[その他]

電気通信大学 山田哲男研究室ホームページ <http://tyamada-lab.inf.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：井上 全人

ローマ字氏名：INOUE, Masato

所属研究機関名：明治大学

部局名：理工学部

職名：専任准教授

研究者番号 (8桁)：60365468

研究分担者氏名：北田 皓嗣

ローマ字氏名：KITADA, Hirotsugu

所属研究機関名：法政大学

部局名：経営学部

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：90633595

研究分担者氏名：石垣 綾

ローマ字氏名：ISHIGAKI, Aya

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：理工学部経営工学科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：50328564

研究分担者氏名：田中 健一

ローマ字氏名：TANAKA, Kenichi

所属研究機関名：慶應義塾大学

部局名：理工学部 (矢上)

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：90408724

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：由良 憲二 (電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授)

ローマ字氏名：YURA, Kenji

研究協力者氏名：國部 克彦 (神戸大学・経営学研究科・教授)

ローマ字氏名：KOKUBU, Katsuhiko

研究協力者氏名：中嶋 道靖 (関西大学・商学部・教授)

ローマ字氏名：NAKAJIMA, Michiyasu

研究協力者氏名：木下 雄貴 (電気通信大学・大学院情報理工学研究科・情報学専攻博士後期課程)

ローマ字氏名：KINOSHITA, Yuki

研究協力者氏名：山田 周歩 (明治大学大学院・理工学研究科・機械工学専攻博士後期課程)

ローマ字氏名：YAMADA, Shuho

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。