

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02164

研究課題名(和文)光ネットワークの物理モデル・論理モデルの統合による汎用化システム管理技術

研究課題名(英文) Network control and management system based on unified physical and logical models

研究代表者

石井 紀代 (Ishii, Kiyo)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：90612177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,660,000円

研究成果の概要(和文)：あらゆる通信網領域へ高性能・大容量・低遅延な光ネットワークを導入可能とする、光ネットワークの汎用モデルおよび自動抽象化手法の開発を行った。物理モデルとして、任意の機器構成からなる光ネットワークを自動処理により管理制御可能とするモデル、および、抽象度の高い論理モデルとの変換アルゴリズムを開発した。様々な機器から構成され、異種の制御インターフェイス、ネットワークドメインを模擬した光ネットワークテストベッドを構築し、開発技術を実装した。テストベッド上で故障復旧を模擬した動的制御シナリオを試験し、開発技術により、機器構成を含む光ネットワークの動的再構成が迅速・簡便に実施可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発技術は、光ネットワークを装置単位ではなくその最小構成要素単位で詳細にモデル化を行うことで、あらゆる装置構成を一律かつ自動処理可能な方式でサポート可能としている。装置構成を事前に限定する必要がなくなるため、従来必要であった適用領域毎の個別開発が不要となり、広範な用途の多様なニーズを一律にサポート可能とする。管理制御の自動化は、作業コストや人為的なミスリスクの回避にもつながる。本技術は、今後広範な用途で必要とされる光ネットワークを、特別な専門知識がなくても容易に使用可能とする管理制御システムの基盤となる技術である。

研究成果の概要(英文)：We have developed an optical network modeling method which can handle optical functional blocks composing optical nodes and can be processed in an automated manner. We have also developed a transformation algorithm between the developed physical model and an abstracted logical model (e.g. OpenROADM model). The automation realized by the FBD model will be a key to resolve the complexity required for SDN controllers or NRMs due to the disaggregation approach. We have demonstrated control and resource management system based on the developed model implemented on a real hardware testbed including swift optical physical layer topology update enabled by the automated processing.

研究分野：光通信

キーワード：光通信ネットワーク モデル化 ネットワーク管理制御システム

1. 研究開始当初の背景

通信需要は増加の一途をたどっており、広域網のみならずデータセンタ内/間などあらゆる領域で広帯域な光ネットワーク技術の導入が強く要請されている。広域網通信ではこれまで、必要な機能を全て備えた大規模な通信装置を構成単位とする「オールインワン方式」という構成手法が採られてきた。一方、様々なネットワーク構成ニーズに柔軟・迅速・効率的に対応するため、新たな構成手法である「ディスアグリゲーション方式」の議論が活発化している。ディスアグリゲーション方式は通信装置を機能ごとに分割し必要に応じて組み合わせる構成手法で、多様な装置構成が可能となる（図1）。ディスアグリゲーション方式を真に実現するためには、ネットワーク全体での不均質な装置構成・装置性能を詳細に管理し、さらに、装置構成の変更に対応する必要がある。このため、従来とは抜本的に異なるシステム管理技術が必須となる。

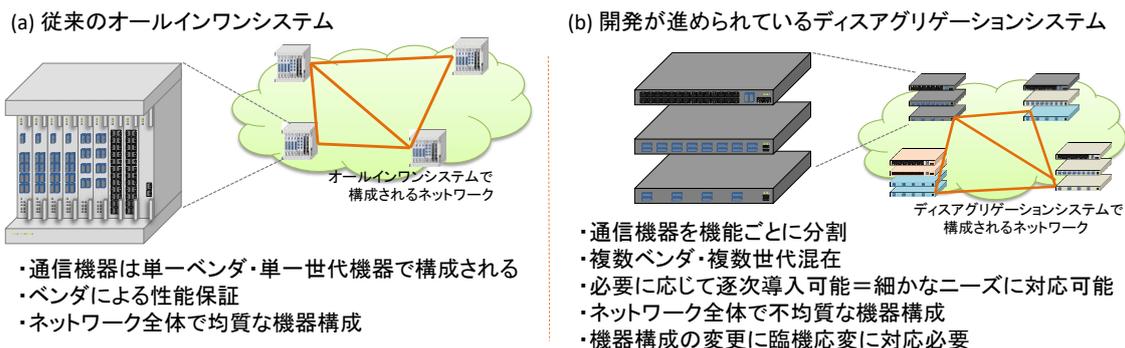


図1：オールインワンシステム方式とディスアグリゲーションシステム方式の比較

2. 研究の目的

本研究の目的は、あらゆる通信網領域へ高性能・大容量・低遅延な光ネットワークを導入可能とする、光ネットワークの汎用・自動管理制御システム技術の研究開発である。自動処理の適用範囲の拡張は、人為的エラーのリスク低減にもつながる。今後広範な用途で必要とされる光ネットワークを、特別な専門知識がなくても迅速かつ簡便に使用可能とする管理制御システムの確立にむけ必須の技術である。

具体的な開発課題としては第一に、ディスアグリゲーション方式に適用可能な、すなわち、任意の機器構成からなる一般化された光ネットワークを首尾一貫したシステムとして管理制御可能とする普遍的なモデルの開発である。第二に、光ネットワークの管理制御システムから参照可能な不要な詳細を隠蔽し、スケーラビリティを確保した抽象化モデルへの自動変換技術の開発である。

3. 研究の方法

従来の光ネットワーク管理制御におけるネットワークモデル（以降、論理モデルと呼ぶ）は、均質な機器構成を前提とし、高度に抽象化された論理モデルを使用する一方、物理的実体である光ネットワークと論理モデルとの整合は、個別のエンジニアリングにより解決されてきた。しかしながら、多様な機器構成・頻繁な構成変更を内包するディスアグリゲーション方式では、このような個別対応は不可能である。すなわち、論理モデルと物理的実体とが常に自動で整合される、全く新しいモデル化手法が必要となる。これを実現するため、1. 装置の構成要素単位で詳細な、すなわち、抽象度の低いモデル化を初めに行い、2. 低抽象度のモデルを実際の装置構成に沿って組み合わせて全体の光ネットワークモデルを構成し、3. 必要な抽象度まで変換するという、リソースをベースとした新たなモデル化手法を提案する。提案手法では最初に現実世界をそのままモデル化（以降、物理モデルと呼ぶ）するため、機器の構成変更などをそのまま反映可能である。さらに、物理モデルから不要な情報を隠蔽し抽象度の高いモデルへ自動変換することで、現実世界の構成変更を自動的に適切に上位層へ伝搬することが可能となる。モデルの抽象化は、ネットワーク全体のスケーラビリティ強化や、現在のネットワーク管理システムとの親和性の観点で重要な課題である。

4. 研究成果

ディスアグリゲーション方式を実現するうえでの課題として、ネットワークを構成する光コンポーネントなどの要素数が増加する、さらにはそれらの組み合わせの増加により管理制御が複雑化することがある。これを解決する技術として、詳細な光コンポーネント単位のモデル化及びその自動処理手法を開発した。図2に開発した Functional Block-based Disaggregation モデル (FBD モデル) の概略を示す。従来手法では、ノードを一つの箱 (ブラックボックス) として抽象化するようなモデル化がなされていた (図中ネットワークレベルモデル相当)。開発した FBD モデルでは、光スイッチなどの光コンポーネントをモデル化し、それらの接続トポロジを記述したノードレベルモデル、ノード間の接続トポロジを記述したネットワークレベルモデルというような階層構造をとるように設計している。さらに、光コンポーネント内の経路設定機能を、整数線形計画法という数理的な手法で定式化し、それを機械可読なモデル言語で FBD モデル内に埋め込んでいる。その結果、光通信ノードの経路設定機能解析や光ネットワーク全体にわたる経路計算を自動で処理することが可能となり、ディスアグリゲーション方式の課題となる管理制御の複雑さを、自動処理により解決可能なモデル化手法となっている。

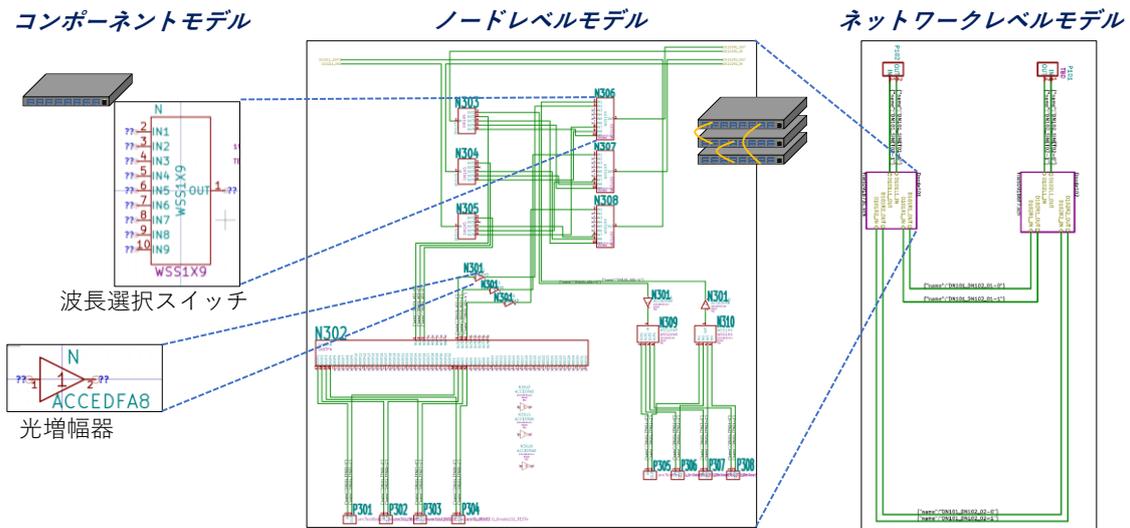


図2 : FBD モデルの概略

FBD モデルおよびネットワーク管理制御システム、抽象モデル、光コンポーネント機器との関係を図3に示す。FBD モデルは実際の機器構成をそのままモデル化するため、光コンポーネント機器の直上に位置する。FBD モデルは、ネットワーク全体をモデル化可能な為、FBD モデルに対応した開発ネットワーク管理制御システムを用いれば、ネットワーク制御として使用可能である (図中最右の階層関係)。一方で、従来の抽象モデルは YANG/Netconf や REST API に準拠しており、オープンコンソーシアムなどで開発が進むオープンソースのネットワーク管理制御システムとも親和性がある。一方で、抽象化モデルは実際の機器構成をそのまま表現するものではないため、個別開発による Hardware Abstraction Layer (HAL、モデルと実機との間のマッピングなどを行うもの) を介して光コンポーネント機器と接することになる (図中最左の階層関係)。

本研究では、FBD モデルと抽象モデルとの間を自動変換するアルゴリズムを開発し、FBD モデルが他の抽象モデルの自動化 HAL として機能することを実証した。具体的には、欧米のテレコムキャリアが主導して議論が進められている OpenROADM という抽象モデルと、FBD モデルとの間の変換アルゴリズムを開発した (図中中央の階層関係)。HW Mapper は、ネットワークの初期導入時に使用するアルゴリズムで、FBD モデルに記載されたネットワーク構成を OpenROADM モデルでの記載へ

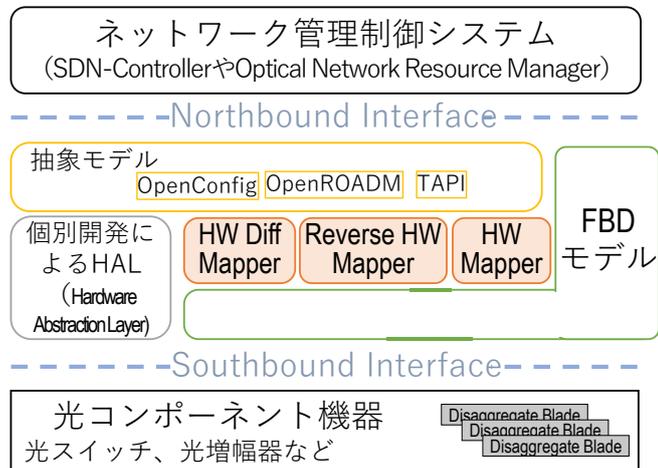


図3 : FBD モデルの位置づけ

と変換する。Reverse HW Mapper は、光パスの動的設定解除の際に使用するアルゴリズムで、OpenROADM の形式で到着したパス設定解除のコマンドを、FBD モデルの形式、すなわち、どのコンポーネントをどのように設定するかに変換するアルゴリズムである。HW Diff Mapper は、ネットワークトポロジの変更時に使用するアルゴリズムで、現在のネットワークトポロジと変更後のネットワークトポロジとを FBD モデルにおいて、すなわち、詳細なネットワーク機器構成レベルで比較し、差分について、OpenROADM モデルのアップデート用コマンドを生成するアルゴリズムである。本開発アルゴリズムにより、故障復旧シナリオにおける新規光コンポーネント導入から光パス復旧までの一連の動作を 5 分以内で完了するという成果を得た（従来、光コンポーネントの変更を伴う作業は数時間から数日かかるものであった）。図 4 に実験の様子の写真を示す。

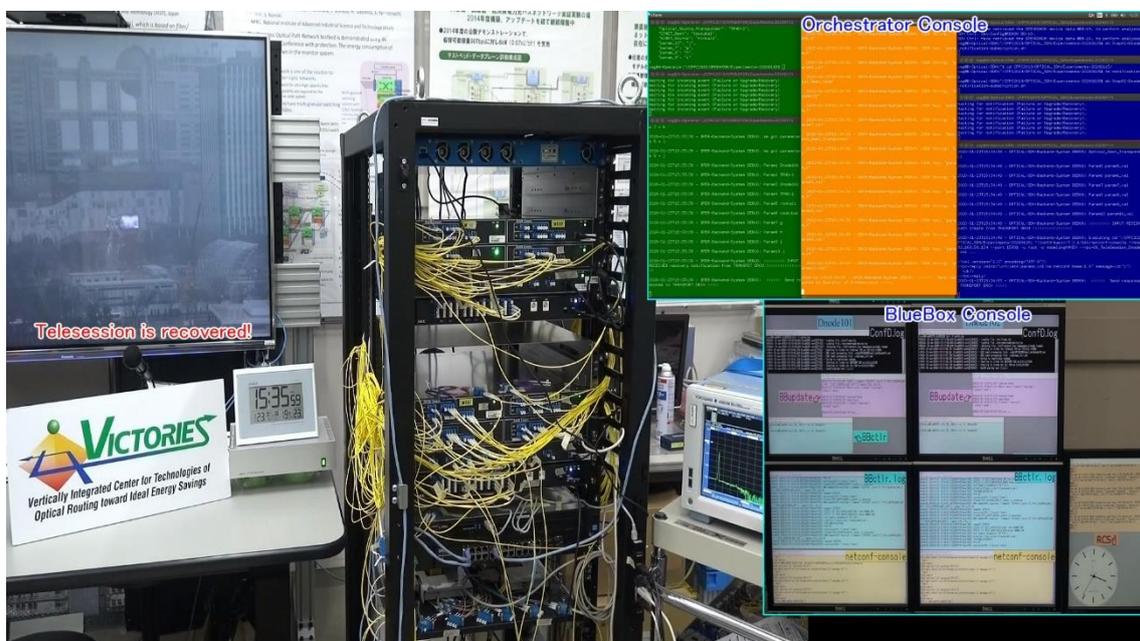


図 4：実証実験の様子：中央のラックがディスアグリゲート方式により構築され、提案手法により制御された光伝送装置。SINET5 と連携し、産総研の二つの拠点の実験室間（つくば-臨海、60km 以上の距離）で 4K 非圧縮リアルタイム映像の伝送を行った。写真右側は管理制御ソフトウェアのコンソール画面で、上側はネットワークレベル、下側はノードレベルの制御をしている。

本研究ではさらに、South Bound Interface として FBD-Blade Abstraction Interface (FBD-BAI) の開発も行った。これは、図 3 の South Bound Interface に該当するもので、多種多様な光コンポーネント機器（図中、Disaggregated Blade）の制御インターフェースを抽象化し、その差異を吸収する物である。異種ネットワークドメイン（キャリア網、データセンタ網）を模倣した光ネットワークテストベッドを構築し、FBD-BAI によるネットワーク制御の実証実験を行った。各ネットワークドメインの制御方式として、Transport API (TAPI) や OpenROADM Network Model などのオープン・インターフェースモデルを採用し、そのアンダーレイとして FBD モデルおよび FBD-BAI が適切に動作することを確認した。実証実験においては、通常の光パスの設定解除に加え、故障復旧シナリオの実証を行った。従来のオールインワン方式の ROADM 装置の一部に故障が発生した状況を模倣し、一部をディスアグリゲート・ブレードで置き換えるシナリオにおいて、コンポーネント単位のモデル化である FBD モデルにより可能となる異種ネットワークエレメントの統合制御により、適切に故障復旧が可能となることを実証した。これにより、異種ネットワークエレメントのみならず異種ネットワークドメインを適切に自動制御するための基盤としての、FBD モデルおよび FBD-BAI の有用性を確認した。

本研究の成果は対外的にも高く評価を受け、光通信において権威ある国際会議の、特に採択率が限られるポストデッドラインペーパーの採択も含め、複数の国際会議で成果発表を行い、さらにその後、国内外で複数の招待講演を受けている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishii Kiyoo, Namiki Shu	4. 巻 14
2. 論文標題 Scalability of integer linear programming path computation for functional block-based disaggregation supporting a flexible grid mechanism [Invited]	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Optical Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 A134 ~ A134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOCN.439820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Kiyoo, Xu Sugang, Yoshikane Noboru, Takefusa Atsuko, Tsuritani Takehiro, Awaji Yoshinari, Namiki Shu	4. 巻 39
2. 論文標題 Automatic Mapping Between Real Hardware Composition and ROADM Model for Agile Node Updates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 821 ~ 832
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2020.3048424	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Kiyoo, Takefusa Atsuko, Namiki Shu, Kudoh Tomohiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Optical Network Resource Management Supporting Physical Layer Reconfiguration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 5442 ~ 5454
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2019.2935789	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 7件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 徐 蘇鋼、石井 紀代、吉兼 昇、Subhadeep Sahoo、Sifat Ferdousi、白岩 雅輝、廣田 悠介、釣谷 剛、Massimo Tornatore、淡路 祥成、並木 周、Biswanath Mukherjee
2. 発表標題 Towards Large-scale Disaster-Resilient Network-Cloud Ecosystem Facilitated by Open Disaggregation and Cooperation Technologies
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報通信マネジメント研究会（ICM研究会）（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shu Namiki, Kiyo Ishii
2. 発表標題 “Digitalizing” Optical Layer for The Green Computing Continuum As The Future Digital Infrastructure
3. 学会等名 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sugang Xu, Kiyo Ishii, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Yoshinari Awaji, Shu Namiki
2. 発表標題 Integration and Control of Heterogeneous Telecom and Data Center Optical Networks Aided by FBD and TAPI for Enhancing Large-scale Optical Path Services and Network Resiliency
3. 学会等名 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyo Ishii, Shu Namiki
2. 発表標題 Mathematical Model of Optical Functional Blocks for Automating Fully Disaggregated Optical Networks
3. 学会等名 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sugang Xu, Kiyo Ishii, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Yoshinari Awaji, Shu Namiki
2. 発表標題 Blade Abstraction Interface for Diverse Blade Integration and Unified Control of Disaggregate/Legacy ROADMs
3. 学会等名 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Kiyo Ishii, Shu Namiki
2 . 発表標題 Functional block-based disaggregation model for optical network automation supporting diverse node structures
3 . 学会等名 Photonics West 2022 On Demand (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Sugang Xu, Kiyo Ishii, et al.,
2 . 発表標題 An Approach to Large-scale Disaster-Resilient Optical Networks with Openness and Disaggregation
3 . 学会等名 電子情報通信学会 CS研究会 (招待講演)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Sugang Xu, Kiyo Ishii, et al.,
2 . 発表標題 Towards Large-scale Disaster-Resilient Open and Integrated Disaggregated/Legacy Optical Networks
3 . 学会等名 ACP2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Ishii, Kiyo; Casellas, Ramon; Vilchez, Fco. Javier; Vilalta, Ricard; Martinez, Ricardo; Fabrega, Josep Maria; Nadal, Laia; Svaluto Moreolo, Michela; Munoz, Raul; Namiki, Shu
2 . 発表標題 Two-Level Abstraction Approach for SDN-based Service Provisioning in Open Line Systems Featuring TAPI Externalized Path Computation
3 . 学会等名 46th European Conference on Optical Communication (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 徐蘇鋼、石井紀代、吉兼昇、釣谷剛宏、淡路祥成、並木周
2. 発表標題 ディスアグリゲート光ネットワーク自動化のためのモデリング ~マルチドメイン・マルチレイヤ光パスネットワークの自動制御・自動更新実験~
3. 学会等名 光ネットワークシステム技術第171委員会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徐蘇鋼、石井紀代、吉兼昇、釣谷剛宏、淡路祥成、並木周
2. 発表標題 ディスアグリゲート光ネットワーク自動化のためのモデリング ~マルチドメイン・マルチレイヤ光パスネットワークの自動制御・自動更新実験~
3. 学会等名 フォトニックネットワーク研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoo Ishii, Sugang Xu, Noboru Yoshikane, Atsuko Takefusa, Shigeyuki Yanagimachi, Takeshi Hoshida, Kohei Shiomoto, Tomohiro Kudoh, Takehiro Tsuritani, Yoshinari Awaji, Shu Namiki
2. 発表標題 Automatic Resource Mapping using Functional Block Based Disaggregation Model for ROADM Networks
3. 学会等名 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoo Ishii, Sugang Xu, Noboru Yoshikane, Atsuko Takefusa, Shigeyuki Yanagimachi, Takeshi Hoshida, Kohei Shiomoto, Tomohiro Kudoh, Takehiro Tsuritani, Yoshinari Awaji, Shu Namiki
2. 発表標題 First Demonstration of Automated Updates of Disaggregate Blades in Multi-Domain/Layer Optical Path Network
3. 学会等名 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Postdeadline (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井紀代、並木周
2. 発表標題 Functional Block based Disaggregation モデルのための開発ツール
3. 学会等名 電子情報通信学会 会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	徐 蘇鋼 (Xu Sugang) (10350448)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所 フォトリックICT研究センター・主任研究員 (82636)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	釣谷 剛宏 (Tsuritani Takehiro)	K D D I 総合研究所	
研究協力者	吉兼 昇 (Yoshikane Noboru)	K D D I 総合研究所	
研究協力者	並木 周 (Namiki Shu) (30415723)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・センター長 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	淡路 祥成 (Awaji Yoshinari) (50358876)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所・研究統括 (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関