

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11326

研究課題名（和文）広域仮想計算機基盤のためのNFVテストベッド構築に関する研究

研究課題名（英文）A study on NFV Testbed for Wide-Area Virtual Computer Infrastructure

研究代表者

市川 昊平（Ichikawa, Kohei）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：90511676

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：仮想計算機技術やSDNを基盤とした仮想ネットワーク技術の発達により、地理的に分散する大学や組織が提供する計算機資源をソフトウェア制御技術により動的に多数確保し、仮想計算資源を共有する実験基盤の構築技術は成熟しつつある。しかしながら、仮想計算機と仮想ネットワークを統合した形であるNFV技術を広域環境上で評価可能とするテストベッド構築技術は未確立な状態である。そこで、本研究では、広域に分散する仮想計算機基盤およびそれらをつなぐ仮想ネットワーク上において、NFVに関する実証的研究を可能とするNFVテストベッドの構築に関する研究開発を行った。また、NFVに関連する様々な技術開発や検証を広く実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な大学や研究機関からなる共同研究コミュニティにおいて、研究者らが自由にNFVに関する共同実験のためのネットワークや計算環境を設計可能としたことで、様々な研究アイデアを次々に具現化・実証可能としたことは大きな成果だと考える。また、単なる仮想計算機に関する研究開発ではなく、NFVに特化した様々な関連技術の開発や検証の結果もこの研究分野において有益な情報を提供できたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：With the development of virtual computing technology and virtual network technology based on SDN, the technology for constructing experimental infrastructures that dynamically secure a large number of computing resources provided by geographically distributed organizations using software control technology and share virtual computing resources is maturing. However, a technology for building testbeds that enables evaluation of NFV technology, which integrates virtual computers and virtual networks, in a wide-area environment has not yet been established. Therefore, in this study, we studied on the construction of an NFV testbed that enables empirical research on NFV on a wide-area distributed virtual computer infrastructure and the virtual networks that connect them. In addition, we widely developed and verified various technologies related to NFV.

研究分野：分散システム

キーワード：仮想化技術 仮想ネットワーク SDN NFV

### 1. 研究開始当初の背景

仮想計算機技術の発達により、計算資源の配備はソフトウェアによって動的に制御可能となり、計算資源の共有・利用効率を高め、米国 Amazon 社における Amazon EC2 に代表されるようなスケラブルで柔軟な仮想計算機基盤を提供するクラウドサービスを実現可能としている。学術分野においてもクラウド技術の利用は浸透しており、地理的に分散する複数の研究機関や大学、データセンタの保有する計算資源上に、動的に仮想計算機を配備・集約することによって、複数拠点間にまたがるマルチサイト・クラウド環境の構築が進んでいる。また、これら広域に分散する仮想計算機環境を結合する仮想ネットワーク技術も研究開発が進み、SDN に代表されるようなネットワークをもソフトウェアで制御する環境が整いつつある。このような仮想計算機および仮想ネットワーク環境は、ソフトウェア制御により容易に構築・共有・破棄ができ、ユーザごとに独立したテストベッドを与えることが可能であり、分散システム研究に関連する新しいアイデアの実験の場および教育の場として活発に活用されている。

しかしながら、仮想計算機や仮想ネットワークを動的にソフトウェアで制御し、複数拠点間において仮想計算機資源を共有するテストベッド環境構築技術に関しては成熟しつつある一方で、これら技術を統合して実現される NFV 技術を広域環境上で評価可能とするテストベッド構築技術は未確立な現状がある。広域分散計算環境の構築においては、拠点間のネットワークの高性能化や最適化が性能向上の上では重要であり、従来のネットワーク機器に付加機能を実装する NFV には期待が高まっている。近年では、ESnet の Science DMZ が SDN および NFV 技術を活用し、ファイアウォール処理の効率化に成功するなどの研究事例があるが、一組織内や特定のネットワーク内での適用事例にとどまり、仮想計算機基盤が既の実現しているような地球規模に分散する国際的なネットワーク上での NFV の活用や評価可能な環境の整備に至っていない。したがって、広域分散システムの研究開発のさらなる発展や NFV が本来目指すネットワーク構成・運用の効率化の目的から鑑みても、国際的な広域分散環境上における、NFV 実験基盤の構築は必要不可欠であると考えられる。

### 2. 研究の目的

このような背景から、本研究では広域に分散する仮想計算機基盤およびそれらをつなぐ仮想ネットワーク上において、動的に NFV に関する実証的研究を可能とする環境の構築が急務であると考え、国際的な NFV テストベッドの構築を研究目的とする。NFV に関する研究開発は現在までに既に活発に行われてきているが、産業界では主に組織内のイントラネットワークやデータセンタ内のネットワーク制御の高性能化や最適化を目的に研究開発が実施されている。一方で、本研究は、国際的な広域分散環境において異なるドメイン間における NFV の評価を対象としている点が特徴であり、産業界が及ばない領域の研究として学術的な意義がある。特に、ネットワーク機器・機能を仮想化することで、ネットワークをより高性能で効率のよいものに進化させるという NFV の本来の利用目的から考えると、インターネットのように異なるドメイン間にまたがるネットワーク上において実証的研究を可能とするテストベッドを構築する意義は大きい。

### 3. 研究の方法

NFV の実証的研究開発においては、NFV の機能自身を実行可能とする仮想計算機基盤とそれら仮想計算機間を結ぶ SDN などの仮想ネットワークが必要となる。本研究は、申請者がこれまでに構築してきた国際的な SDN テストベッドである PRAGMA-ENT (PRAGMA Experimental Network Testbed) を発展する形で実施した。PRAGMA-ENT は、国内外の広域 SDN サービスおよび各拠点における OpenFlow スイッチを相互に接続して構築した国際規模の OpenFlow ネットワークテスト

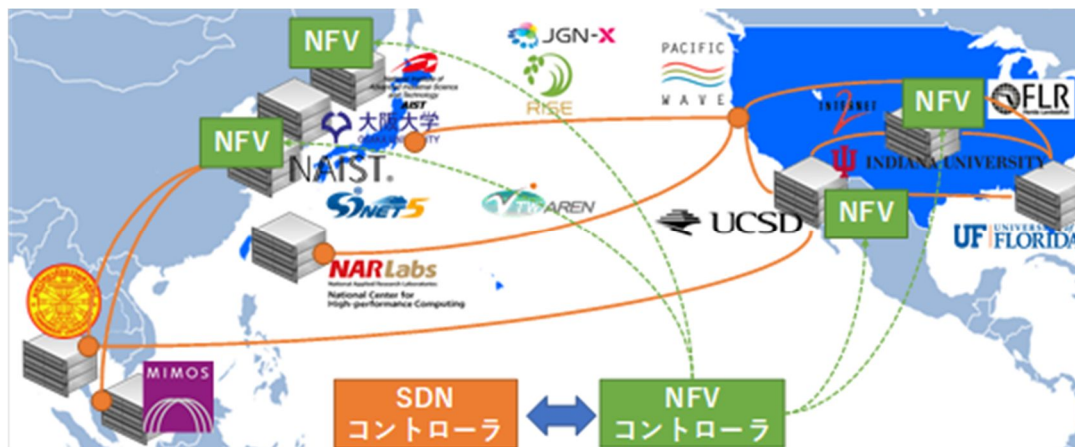


図 1 PRAGMA-ENT 上における NFV のテストベッド環境の概要

ベッドである。この国際 OpenFlow ネットワークに対し、各拠点における計算機上の仮想計算機を動的に接続し、各利用者が NFV の実証実験環境を自由に配備し、実験可能とする分散基盤環境の構築を実施した。図 1 にその概要を示す。

本研究では、これらの目的を達成するため、マイルストーンとなる以下の 3 つの課題を設定し、研究を進めてきた。

#### (1) 国際 OpenFlow ネットワークと仮想計算機基盤の相互接続環境の構築

まず、本研究で用いる仮想ネットワーク基盤として、各国の学術研究ネットワークを用いた国際 OpenFlow ネットワークの拡張を継続して行い、End-to-End 間で相互に OpenFlow スイッチを接続する分散ネットワークを構築する。そして、各参画組織の仮想計算機基盤をこの国際 OpenFlow ネットワークに接続し、仮想計算機および仮想ネットワーク環境双方をソフトウェアから柔軟に制御可能とする環境を構築する。本課題は、構築する NFV テストベッドの物理的な基盤を整備するものである。そのため、本研究期間中は常に継続的に相互接続拠点数の増加や計算機資源の増加に努め、実験基盤の継続的な拡大を狙う。

#### (2) NFV の実証的評価環境のオーケストレーション技術の確立

NFV の実証的評価を行うには、NFV 自身が動作する仮想計算機、さらにその NFV に接続して実際にネットワークを利用するアプリケーションが動作するための仮想計算機、これら仮想計算機間を結ぶ SDN 環境が必要となる。これらの構成は評価しようとする NFV によって、各資源の量や、トポロジなどの構成が変化する。本研究では、クラスタシステム構成ツールである Rocks Cluster 上の仮想計算機に OpenFlow ネットワークを動的に組み込む実装に既に着手しているが、既存のクラウド環境のオーケストレーション技術も調査しつつ、任意の NFV 実証実験環境を構築可能とするオーケストレーション技術の確立を目指す。

#### (3) 提案 NFV テストベッド基盤上での実証的評価

本研究で提案した NFV テストベッド基盤上で、仮想計算機資源とそれらを結び OpenFlow ネットワークによって構築した国際的に分散する NFV 環境を用いた実証実験を行い、その実用性・有用性について実証的評価を行う。特に、国際的な広域ネットワークを有効活用し、拠点間に存在する複数ネットワーク経路を有効活用した広域分散計算の高性能化を実現する NFV や、ソフトウェア BGP を用いて、アプリケーションの用途に応じて広域のルーティング方式を切り替えるといった広域のネットワークを有効活用する NFV を通じて、提案システムを評価する。

### 4. 研究成果

本研究を通し、広域に分散する仮想計算機基盤およびそれらをつなぐ仮想ネットワーク上において、NFV に関する実証的研究を可能とする NFV テストベッドの構築に関する技術開発が達成できた。また、NFV に関連する様々な技術開発や検証を広く実施した。

#### (1) NFV の実証的評価環境のオーケストレーション技術開発

本研究では、動的に配備したネットワーク環境と各拠点の計算資源上の仮想計算機を動的に接続可能とするオーケストレーションシステムを構築し、NFV アプリケーションを動的に配備可能なシステムを構築した。

本研究で構築したシステムは、PRAGMA コミュニティの計算資源配備で標準的に利用されている Rocks Cluster Toolkit を拡張する形で実装した。具体的には、PRAGMA へ計算機資源を提供する複数研究拠点の計算機資源上で、仮想計算機クラスタを構築する pragma-boot を拡張し、PRAGMA-ENT を組み合わせることで構築した SDN へ仮想計算機クラスタを動的に接続する仕組みを開発することで、NFV アプリケーションの配備に必要なネットワークと仮想計算機資源を同時に動的に配備可能なシステムを構築した。Rocks Cluster Toolkit にはこれまでの研究開発で、Open vSwitch を各物理ノード上に配備し、その Open vSwitch と仮想計算機を接続するインタフェースを作成する Open vSwitch Roll (OVS Roll) と呼ばれるプラグインを構築してきた。今回、研究開発した仕組みは、この OVS Roll で配備した、インタフェースを pragma-boot で構築した仮想計算機クラスタに動的に接続可能とするオーケストレーション機能の拡張を行ったことにある。これにより、動的に構築した SDN 環境に、各拠点の仮想計算機クラスタを動的に接続するところまでを自動化することが可能となり、NFV アプリケーションの配備環境の構築を実現した。

#### (2) 提案 NFV テストベッド基盤上での実証的評価

図 2 は実際にこの環境上で配備した NFV アプリケーションの例である。PRAGMA の異なる拠点に仮想計算機クラスタを構築し、そのノード上にソフトウェア BGP ルータの Quagga を配備した。そして、これら Quagga 間の OpenFlow ネットワークを ONOS で実装された SDN コントローラにより制御し、NFV に関する実証的実験を行った。この実証的実験では、具体的には複数のネットワークパスを BGP ルータと協調して動的に切り替えることで、素早く経路の切り替えを行えるアプリケーションの実装例を評価した。

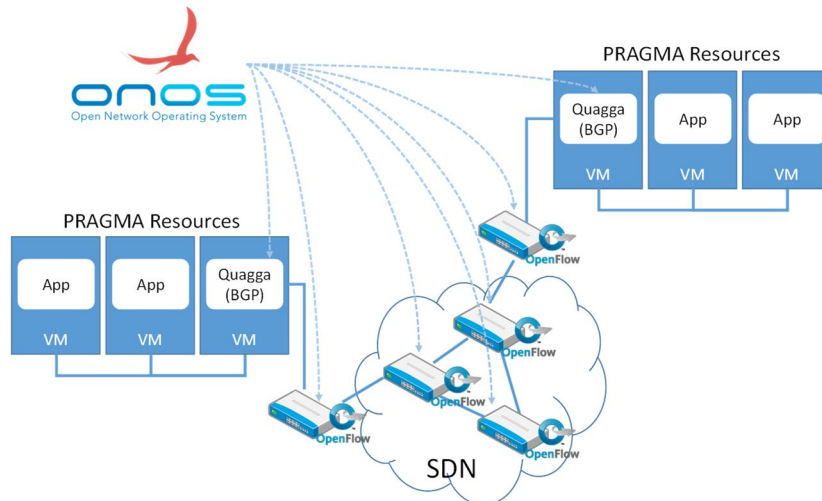


図 2 NFV アプリケーション配備の例

### (3) NFV に関連する技術開発および検証

#### NFV のための軽量仮想化手法の評価

コンテナによる軽量な仮想環境が大きな注目を集める一方で、オーバーヘッドが大きい仮想計算機側でも大手のクラウドベンダーを中心に軽量仮想計算機に関する研究開発が進められている。また、NFV の活用が広まるにつれて、ネットワーク仮想化の共通の課題として述べられている、データプレーン処理がカーネル空間とユーザ空間の間を行き来することによるオーバーヘッドの問題も、カーネル空間処理をバイパスしてユーザ空間でネットワーク処理を高速に行う技術の開発が進められている。本研究では、これら複数の計算機仮想化の軽量化や仮想ネットワークの高速化手法を組み合わせることで評価し、急激な需要変化に対応可能な NFV 配備システムに適切な仮想化技術に関して調査・評価を行った。

#### 仮想ネットワークのモニタリング

分散する NFV システムを配備する上で、広域に展開する SDN ベースの仮想ネットワークの制御・管理は重要な課題である。本研究では、このような SDN ネットワークをモニタリングし、可視化するシステムの開発を進めた。

具体的には、OpenFlow ベースのネットワークに対し、透過的にネットワーク全体の状況をモニタリングするシステムの構築とその高速化に取り組んだ。本モニタリングシステムは、OpenFlow のスイッチとコントローラの間プロキシのように挿入することで、スイッチとコントローラ間で交換される制御メッセージを透過的に全て解析し、かつ定期的に各スイッチに対して状態をクエリするパケットを送信することで、OpenFlow ネットワーク全体の状況をリアルタイムにモニタリングするものである。本システムではプロキシのパフォーマンスを向上させるため、マルチプロセスアプリケーションとして実装し、さらに各処理に最適化を施すことで、本モニタリングシステムを適用した場合の遅延とスループットに対するオーバーヘッドをそれぞれわずか 3%と 8%に抑えることに成功した。

#### エッジコンピューティングノードにおける軽量機械学習

分散する NFV システムの管理の最適化のために機械学習の適用が進められている。ネットワークルーティングの効率化であったり、資源配備の最適化などが主な課題である。しかし、末端となる計算機としては、エッジコンピューティングノードなどが想定され、大きな機械学習モデルを実行するのに十分な計算機資源が確保できないという問題がある。そこで、本研究では、構築した NFV システム上に機械学習アプリを配備する際に、その機械学習モデルを軽量化するモデル圧縮技術の開発を行った。

機械学習モデルの圧縮処理は、機械学習モデルを構成するニューラルネットワーク内の各ノード間の接続パラメータを少ないデータサイズで表現可能なように変換することである。本研究では、パラメータの集合に対し、ベクトル量子化を適用し、データサイズの圧縮を試みた。機械学習モデルの圧縮処理では、圧縮率と精度維持はトレードオフの関係であり、圧縮率上げるとモデル性能は著しく低下する傾向にある。本研究では、この圧縮率の向上とモデル精度の維持を多目的最適化問題として定式化し、遺伝的アルゴリズムをベースとした最適化手法を用いることで、自動的に最適な圧縮パラメータを導出する手法を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wassapon WATANAKEESUNTORN, Keichi TAKAHASHI, Chawanat NAKASAN, Kohei ICHIKAWA, Hajimu IIDA	4. 巻 E105-B
2. 論文標題 Opimon: A Transparent, Low-overhead Monitoring System for OpenFlow Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 485-493
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2021EBP3083	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 該当する
1. 著者名 Kensworth Subratie, Saumitra Aditya, Vahid Daneshmand, Kohei Ichikawa, Renato Figueiredo	4. 巻 E103-B
2. 論文標題 On the Design and Implementation of IP-over-P2P Overlay Virtual Private Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 2-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2019CPI0001	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 該当する
1. 著者名 Thonglek Kundjanasith, Takahashi Keichi, Ichikawa Kohei, Nakasan Chawanat, Nakada Hidemoto, Takano Ryousei, Leelaprute Pattara, Iida Hajimu	4. 巻 10
2. 論文標題 Automated Quantization and Retraining for Neural Network Models Without Labeled Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 73818 ~ 73834
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3190627	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 該当する
1. 著者名 Li Guoqing, Takahashi Keichi, Ichikawa Kohei, Iida Hajimu, Nakasan Chawanat, Leelaprute Pattara, Thiengburanathum Pree, Phannachitta Passakorn	4. 巻 4
2. 論文標題 The Convergence of Container and Traditional Virtualization: Strengths and Limitations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SN Computer Science	6. 最初と最後の頁 387
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42979-023-01827-9	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 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Hideaki Takahashi, Kohei Ichikawa, Keichi Takahashi
2. 発表標題 Difficulty of detecting overstated dataset size in Federated Learning
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理 (DPS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Guoqing Li, Keichi Takahashi, Kohei Ichikawa, Hajimu Iida, Pree Thiengburanathum, Passakorn Phannachitta
2. 発表標題 Comparative Performance Study of Lightweight Hypervisors Used in Container Environment
3. 学会等名 11th International Conference on Cloud Computing and Services Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦智基, 高橋慧智, 市川晃平
2. 発表標題 SRv6を用いたアプリケーションの特性を考慮した通信経路決定手法の提案
3. 学会等名 RICC-PIoT Workshop 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kundjanasith Thonglek, Kohei Ichikawa, Keichi Takahashi, Chawanat Nakasan, Hajimu Iida
2. 発表標題 Improving Resource Utilization in Data Centers using an LSTM-based Prediction Model
3. 学会等名 Workshop on Monitoring and Analysis for High Performance Computing Systems Plus Applications (HPCMASPA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Ichikawa, Atsuko Takefusa, Yasuhiro Watashiba, Yoshiyuki Kido, Susumu Date
2. 発表標題 Deployment of NFV environment on an international SDN testbed
3. 学会等名 RICC-RIEC workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vahid Daneshmand, Renato Figueiredo, Kohei Ichikawa, Keichi Takahashi, Kundjanasith Thonglek and Kensworth Subratie
2. 発表標題 Investigating the Performance and Scalability of Kubernetes on Distributed Cluster of Resource-Constrained Edge Devices
3. 学会等名 The 37th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Juan Sebastian Aguirre, Yoshiyuki Kido, Susumu Date, Shinji Shimojo, Kohei Ichikawa, Atsuko Takefusa
2. 発表標題 Near Real-time Failover Model for Continuous Inter-Domain Communication
3. 学会等名 The 37th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wassapon Watanakesuntorn, Kohei Ichikawa, Keichi Takahashi and Hajimu Iida
2. 発表標題 An Interactive Monitoring Tool for OpenFlow Networks
3. 学会等名 The 37th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kundjanasith Thonglek, Kohei Ichikawa, Keichi Takahashi, Chawanat Nakasan, Hajimu Iida
2. 発表標題 Towards Optimal Resource Utilizations in Data Centers using Long Short-Term Memory
3. 学会等名 The 36th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kundjanasith Thonglek, Kohei Ichikawa, Chatchawal Sangkeettrakarn, Apivadee Piyatumrong
2. 発表標題 Auto-Scaling Apache Spark Cluster using Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 International Conference on Optimization and Learning 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Ichikawa, Atsuko Takefusa, Yoshiyuki Kido, Yasuhiro Watashiba and Susumu Date
2. 発表標題 Integrating PRAGMA-ENT and Inter-Cloudusing Dynamic L2VLAN Service
3. 学会等名 The 35th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wassapon Watanakeesuntorn, Kohei Ichikawa, Jason Haga, Gerald Pao, Erik Saberski
2. 発表標題 rEDM Code Acceleration with ABCI Supercomputer
3. 学会等名 The 35th PRAGMA workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Kohei Ichikawa, Atsuko Takefusa, Yasuhiro Watashiba, Yoshiyuki Kido, Susumu Date
2. 発表標題 An international SDN testbed and NFV applications
3. 学会等名 The 3rd RICC-RIEC workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹房あつ子, 市川昊平, 栗本崇, 合田憲人
2. 発表標題 国際的なオンデマンドネットワークのためのトークンベース認証機構の研究
3. 学会等名 情報処理学会インターネットと運用技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kundjanasith Thonglek, Keichi Takahashi, Kohei Ichikawa, Chawanat Nakasan, Pattara Leelaprute and Hajimu Iida
2. 発表標題 Sparse Communication for Federated Learning
3. 学会等名 IEEE ICPEC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

PRAGMA-ENT <a href="https://github.com/pragmagrid/pragma_ent/wiki">https://github.com/pragmagrid/pragma_ent/wiki</a> Software of Cloud Computing <a href="https://sdlab.naist.jp/project/cloud-computing/">https://sdlab.naist.jp/project/cloud-computing/</a>
---

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	University of California, San Diego	University of Florida	Indiana University	
タイ	Kasetsart University			