

4 フェーズ3 災害復旧活動等

4 Phase 3 Recovering from Natural Disasters

4-1 光ネットワーク間の連携によるレジリエンス戦略

4-1 Resilience Enhancement Strategies of Optical Networks via Cooperation

淡路 祥成 徐 蘇鋼 廣田 悠介

AWAJI Yoshinari, XU Sugang, and HIROTA Yusuke

ネットワーク・クラウドが不可欠な生命線である現代社会では、大規模^{ふくそう}輻輳や障害への迅速な対応、災害後の早期復旧が必須である。特に、膨大なトラフィックを支える光ネットワークの早期復旧は、通信サービスの継続性を確保する上で不可欠である。しかし、現行の復旧手順とそれを支えるICT技術だけではその需要を十分に満たせず、大きなギャップが存在している。このような問題意識により、光ネットワークのレジリエンシー強化を目指し、従来の単一ドメインネットワーク内に限定された復旧手順を超えて、ネットワーク間・事業者間という異なる領域を横断・連携する方策に基づいた研究開発を進めている。

In modern society, where network and cloud infrastructures serve as critical lifelines, rapid responses to large-scale congestion and failures, as well as timely recovery from disasters, are of paramount importance. In particular, the early recovery of optical networks that carry massive volumes of traffic is indispensable for maintaining the continuity of communication services. Nevertheless, current recovery procedures and the ICT technologies that support them are insufficient to fully meet these requirements, resulting in a significant gap between operational needs and recovery capabilities. To address this challenge, we have been pursuing research and development toward enhancing the resilience of optical networks. Specifically, our work extends beyond conventional recovery mechanisms confined to a single network domain and explores cross-boundary collaboration strategies that span multiple networks and service providers, thereby enabling more effective and resilient recovery of communication services.

1 まえがき

光ファイバネットワークは、基盤通信技術としてユーザ間通信のみならず医療・行政など社会のあらゆる機能を支えるライフラインとなっており、その障害の影響は広範囲に波及する。とりわけ災害の多い我が国では、通信インフラを災害や障害に強いものとすることが重要な社会的課題である。現在普及している光ファイバネットワークは、様々な通信機器を調整して光信号を伝送し、大容量の通信環境を実現している。一方で、災害や障害などにより光信号の伝送品質が変化すると、瞬断やリンク途絶などの様々なネットワーク障害へとつながる。そのため、様々なレベルの障害を多面的・多層的に防ぐ仕組みが重要になる。特に広範囲な災害や大規模障害は、単一のネットワーク内の

対策だけでは防ぎきれず、1つの事業者だけで迅速な復旧をまかなうことも難しい。そこで、単一光ネットワークにおける障害検知・予測と障害の影響を低減する対処技術に加えて、異種トランスポートネットワーク間生残資源の相互接続・統合利用を進めネットワークのレジリエンシー向上に寄与するとともに、事業者の枠を超えて通信・計算基盤間の連携を促進し、平常時の大規模輻輳と障害および災害後において、迅速な復旧を促進する取組を進めている。

2 ネットワークオープン化基盤技術の研究開発

2.1 光レイヤにおけるマルチベンダマルチドメイン光ネットワーク間の相互接続

大規模障害・災害発生時に、マルチレイヤから構成

される異種光トランスポートネットワークを横断的に連携させ、生き残った通信資源を相互接続・統合利用できれば、それぞれのネットワークの復旧を待つことなく、通信の早期復旧が期待できる。この実現に向けて、ネットワークオープン化基盤技術の研究開発を進めている。

取組の一環として、光レイヤにおいては、多様化が進む光通信機器の相互接続、統合利用および復旧を実現するためのモデリングおよび制御管理方式を設計した。図1に示すように、産業技術総合研究所（産総研）およびKDDI総合研究所と連携し、光通信機器の多様性に柔軟に対応するFunctional Block-based Disaggregation (FBD、光通信機器の機能を部品単位に分けて柔軟に組み合わせられるようにする技術)（産総研開発）に基づくモデリング技術と、光通信機器を制御するためのBlade Abstraction Interface (BAI、多様な機器を共通の手順で制御できるようにするインタフェース)技術の研究開発を行った[1]。さらに、異なるシステムインテグレータ (SIer) が採用するネットワークモデルの多様性に対して、Open Network Foundation (ONF) のTransport API (TAPI、異なるネットワーク情報を共通の形式でやり取りするための標準インタフェース) およびモデル翻訳ミドルウェアを用いて対応するアプローチを提案した。本提案に基づき、異なる通信機器ベンダ、異なるSIer、マルチドメイン環境、さらにはテレコムおよびデータコム領域を含むヘテロジニアスな光通信環境の統合を実現した。また、ネットワークオープン化による通信機器の迅速な復旧に関する実証実験に成功した(図2) [2]。

本研究開発は、今後の光通信技術の多様化を許容するとともに、光ネットワーク技術の革新を促進するものである。さらに、災害発生時には、生き残った異種ベンダの光通信機器や異種光ネットワークを含むヘテロジニアスな光通信資源・環境の統合を促進し、通信の迅速な復旧に大きく貢献することが期待される。

2.2 パケットレイヤにおけるマルチドメイン異種事業者光ネットワーク間の相互接続

また、パケットレイヤにおいては、災害時におけるパケットトランスポートサービスの迅速な復旧に向けて、異種トランスポートネットワークの生残資源間の相互接続を促進するため、主流となるイーサネットおよびMPLS基幹ネットワーク間におけるVLAN-MPLS変換やMPLS-MPLS変換など、異種プロトコル間の変換機能の研究開発を行っている。

図3に示すように、複数の通信事業者ネットワークとクラウド事業者のデータセンタ間接続ネットワーク (Data Center Interconnect : DCI) から構成されるマルチドメイン・異種事業者ネットワーク環境において、生き残った通信資源を相互接続し、異なる事業者間で連携してサービスを復旧する方式を考案し、その有効性を実証した。例えば、緊急時に事業者間を相互接続する拠点となるP1～P3においては、本研究で開発したVLAN-MPLS変換機能またはMPLS-MPLS変換機能を用いることで、異種ネットワーク間のトラフィックを中継することが可能である [3]。

本研究開発は、災害発生時において、それぞれのネットワークの復旧を待つことなく、生残資源を活用

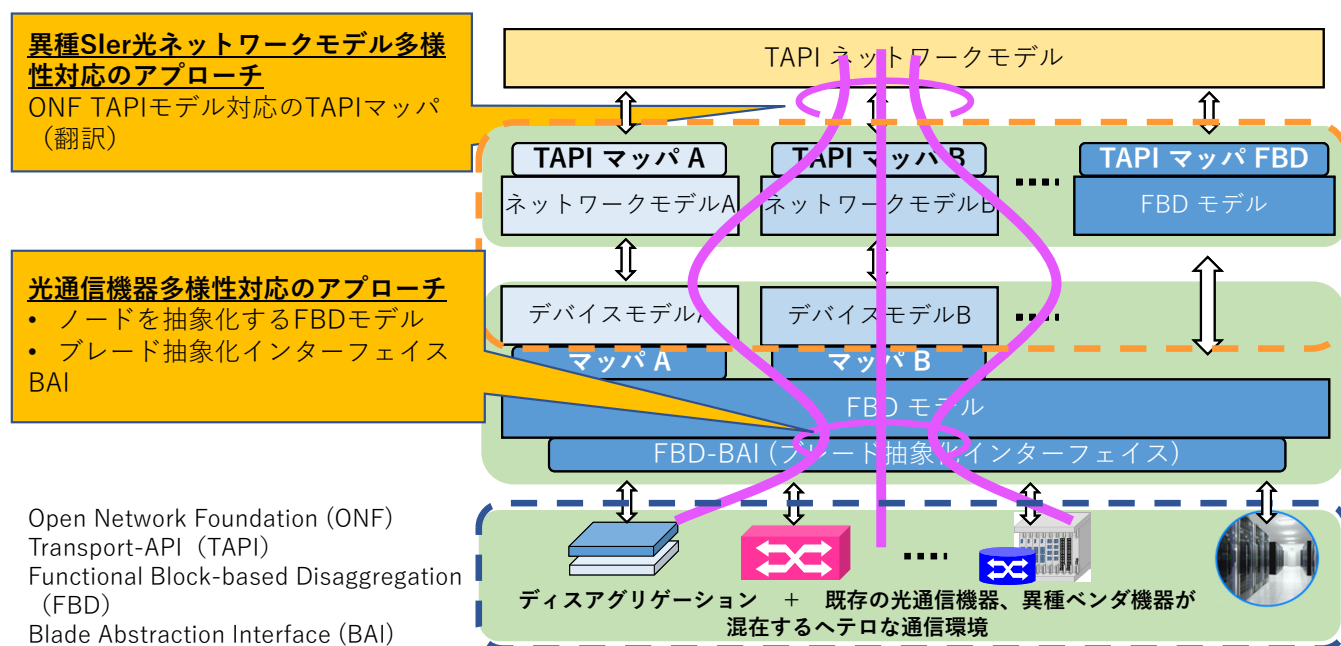


図1 オープン化による多様化した異種ベンダ光ネットワーク統合のアプローチ

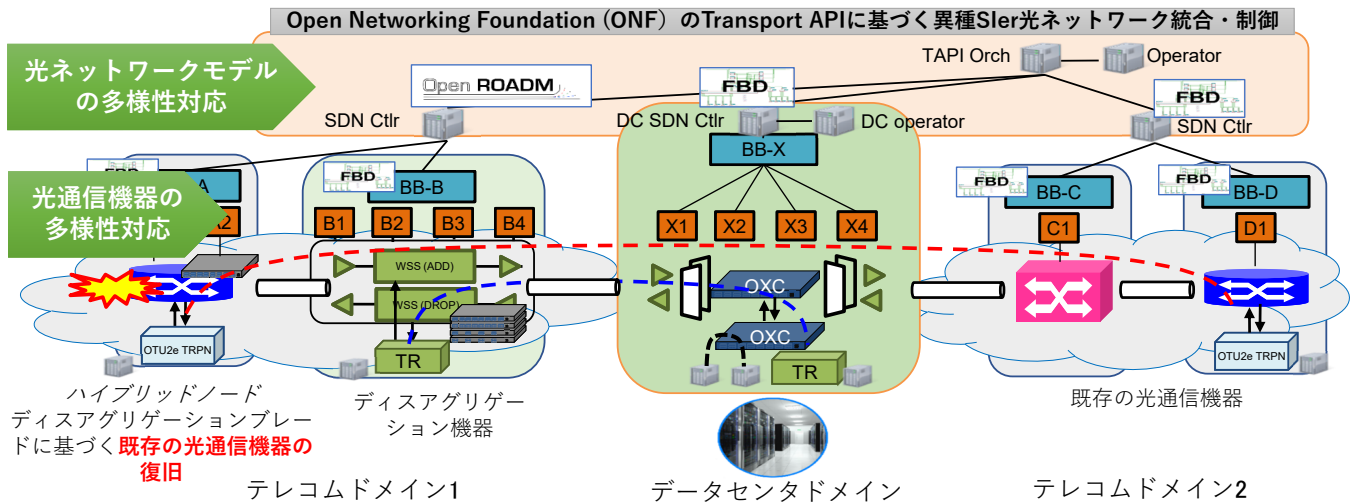


図2 オープン化による異種ベンダ装置・異種光ネットワークの統合・自動制御の実証実験

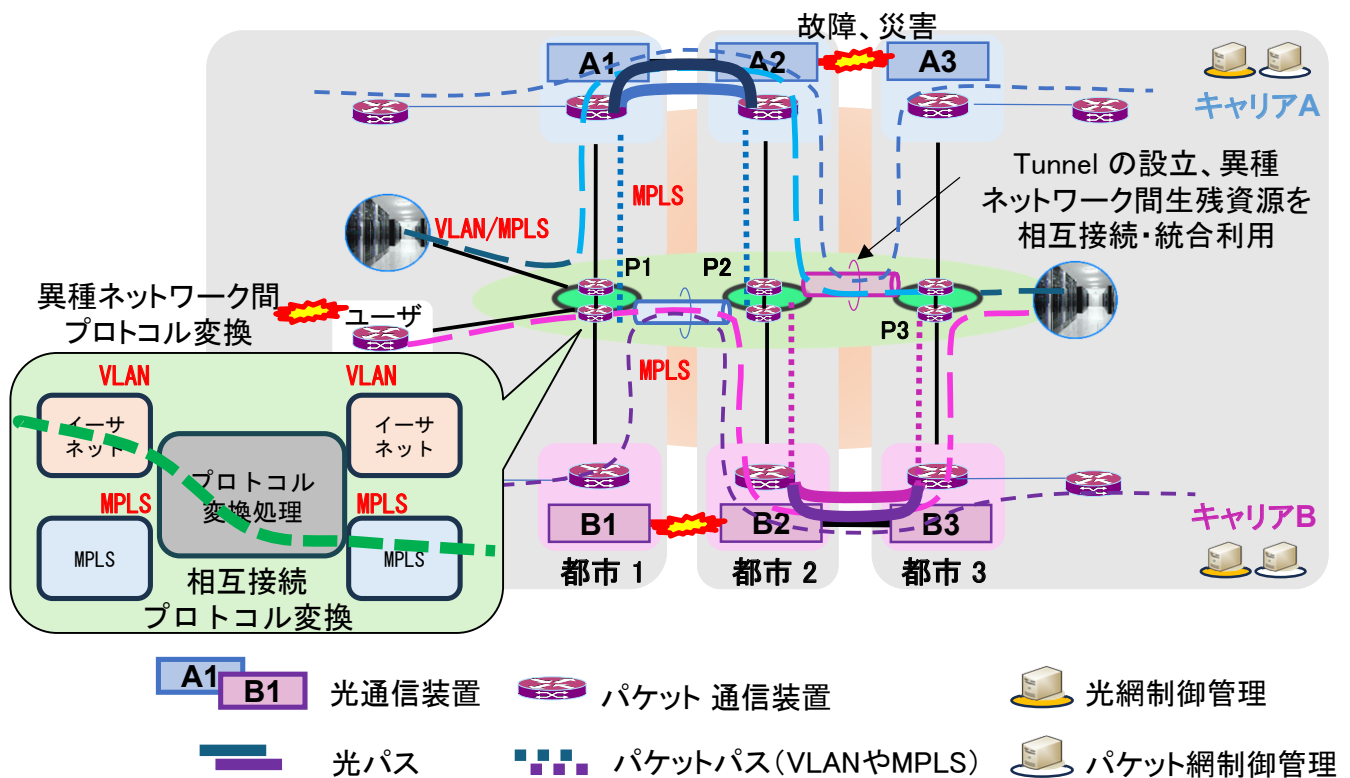


図3 異種事業者、マルチレイヤ異種トランスポートネットワーク間連携復旧の実証実験

した通信サービスおよびクラウドサービスの迅速な復旧を可能とするものであり、通信インフラのレジリエンス向上に大きく寄与することが期待される。

3 通信・計算資源連携基盤技術の研究開発

3.1 異種事業者間の連携復旧戦略

図4に示すように、通信事業者、インターネットサービスプロバイダ (ISP)、データセンタプロバイダ (DCP) は、それぞれ通信資源および計算資源を保有

し、ネットワーク・クラウドエコシステムを形成することで、通信サービスおよびクラウドサービスを利用者に提供している。一方で、輻輳、障害および災害発生時には、ネットワーク・クラウドエコシステム内において通信資源の不足が発生する。2.2で述べたように、迅速なサービス復旧を実現するためには、異種事業者間で連携し、限られた通信資源を効率的に融通・調整することが必要である。そのためには、通信基盤における通信資源の供給状況とインタークラウド環境における通信回線需要との間で、動的かつ効率的な情

報共有、需給マッチングおよび連携復旧戦略の策定を行うことが不可欠である。この中で、異なる事業者間で連携する際には、各事業者が保有する機密情報や営業秘密を保護しながら協調を実現することが重要な課題となる。

そこで、取組の一環として、図4に示すように、事業者間の秘密情報や営業秘密を開示することなく通信資源を共有できるよう、通信資源の抽象化手法を開発するとともに、事業者間連携を促進する第三者エンティティであるプロバイダ・ニュートラル・エクスチェンジ (Provider Neutral Exchange : PNE) の概念

を導入した。さらに、PNEを活用した通信・計算基盤連携のモデル化技術に関する研究開発を行い、通信事業者間および通信事業者とデータセンタプロバイダ (DCP) 間における連携復旧戦略を提案した [4] - [6]。図5に例示するように、数値評価の結果、通信事業者間連携により、災害発生直後においてネットワークの復旧を待つことなく提供可能な通信サービス量を78 %向上できることを示した。さらに、通信事業者とクラウド事業者 (DCP) の連携により、提供可能なクラウドサービス量を97 %向上できることを確認した。

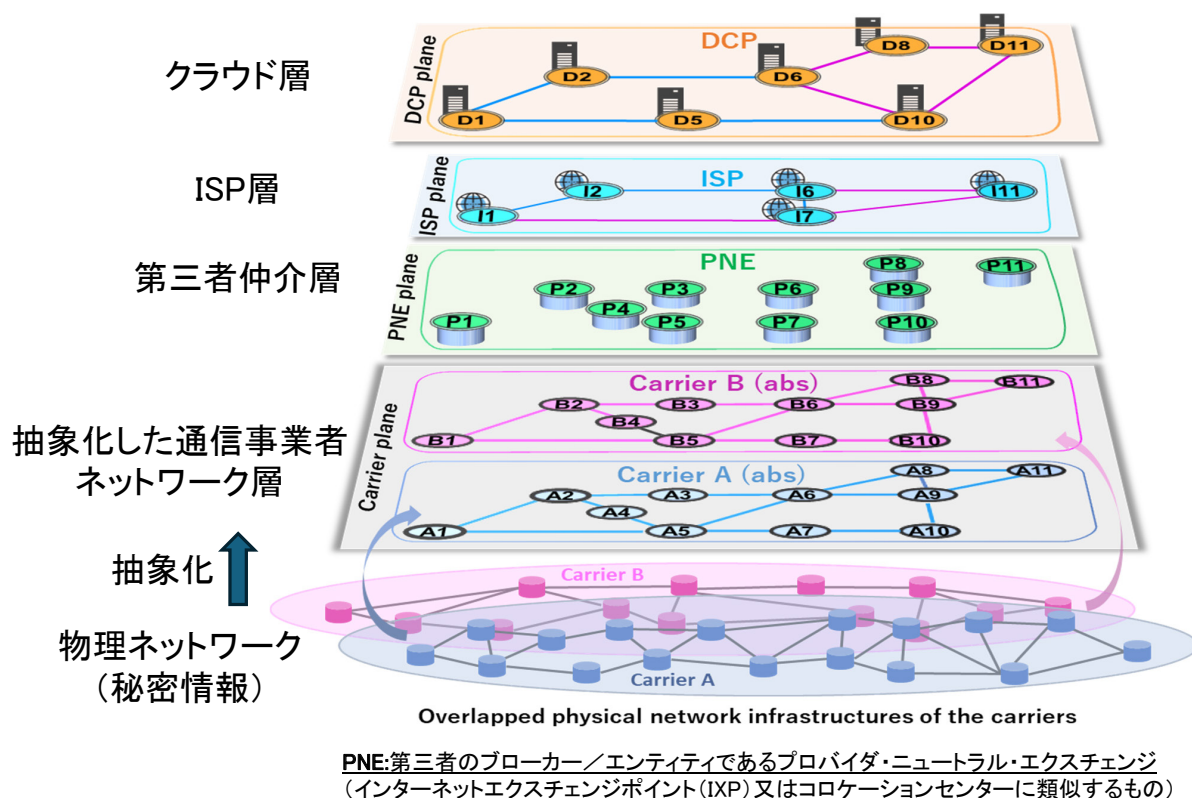


図4 ネットワーク・クラウドエコシステムおよびステークホルダー

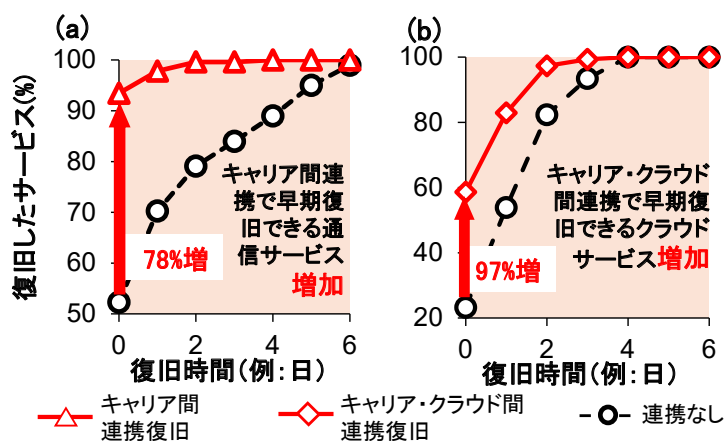


図5 連携復旧の数値評価例

これらの結果は、通信事業者間および通信事業者・クラウド事業者間の連携が、災害時における通信サービスおよびクラウドサービスの迅速な復旧に極めて有効であることを示しており、ネットワーク・クラウドエコシステム全体のレジリエンス向上に大きく寄与するものである。

3.2 異種事業者間連携促進基盤の開発

3.1で述べた連携復旧戦略を通じて、複数の通信事業者が保有する貴重な光ネットワーク資源を効率的に活用するためには、異なる事業者間での情報共有と協調が必要であり、これらを支援するツールとしての連携促進基盤が不可欠である。緊急時には、この連携促進基盤上で事業者間での公平かつ公正な情報共有および資源配分を実現することが重要な課題となる。

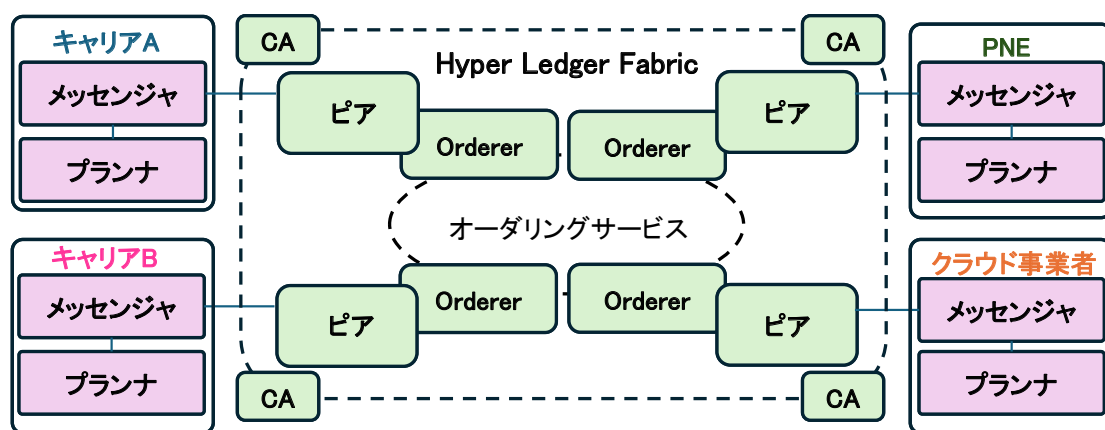
ブロックチェーンに代表される分散台帳技術(Distributed Ledger Technology : DLT) [7]は、ステークホルダ間における分散型かつ改ざん耐性を有する情報共有を実現する有望な技術である。そこで、取組の一環として、ブロックチェーン技術に基づく異種事業者間連携促進基盤の設計・開発を行った[8]。図6に示すように、Hyperledger Fabric(オープンソースソフトウェア(OSS)のブロックチェーン基盤の一種)を用いて、通信事業者間の連携や通信事業者とクラウド事業者(DCP)との連携など、多様な連携形態を支援し、事業者間の連携復旧戦略の策定機能を実現した。連携促進基盤上における連携復旧戦略策定の実証実験例を図7に示す。図7(a)は、通信事業者とクラウド事

業者との連携復旧戦略を複数のフェーズにて策定する際の情報共有と最適化計算の連鎖的な処理過程を示している。図7(b)は、通信事業者(キャリアA)における前述連携復旧戦略の策定過程を監視・可視化する画面例である。さらに、図7(c)は、図7(a)に示したフェーズP1およびP3を例として、ブロックチェーン上で実施された情報共有の内容を示している。

ブロックチェーン技術を基盤として構築した連携促進基盤は、すべてのステークホルダに対して改ざん耐性を有する情報共有機能および監査・監視機能を提供する。その結果、連携復旧戦略の策定過程における透明性と信頼性を確保するとともに、公平かつ公正な事業者間連携を実現できる。さらに、本研究で提案するPNEおよび連携促進基盤は、機密情報を保護しながら事業者間の協調を促進することを可能とし、災害時におけるネットワーク・クラウドエコシステムのレジリエンス向上に大きく寄与する。

5 今後の展望

AI/機械学習は今後更に高度化していくと考えられる。光ネットワーク制御に関わるAI/機械学習も多岐にわたり、複数のAIが連携していく必要がある。一方で、個々のAI/機械学習モデルの開発には学習に用いるデータが重要となる。事業者間に限らず幅広くデータや復旧戦略が共有可能となることにより、レジリエンシーを大幅に向上させ、災害や障害に強い光ネットワークの実現を目指していく。



PNE: プロバイダ中立エクスチェンジ

Hyper Ledger Fabric: オープンソースソフトウェアのブロックチェーンの一種

CA: 分散された認証機構

Orderer: オーダリングノード、トランザクションの順序付けるブロックチェーンの機構

ピア: ピアノード、ブロックチェーンの分散機構

メッセンジャ: ブロックチェーンとのミドルウェア

プランナ: ステークホルダ連携復旧ためのプランニング機構

図6 ブロックチェーンに基づく異種事業者間連携促進基盤

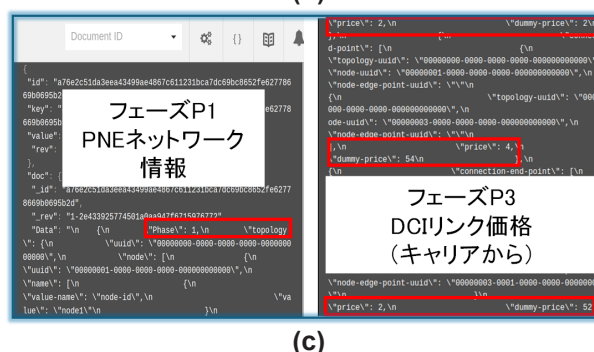
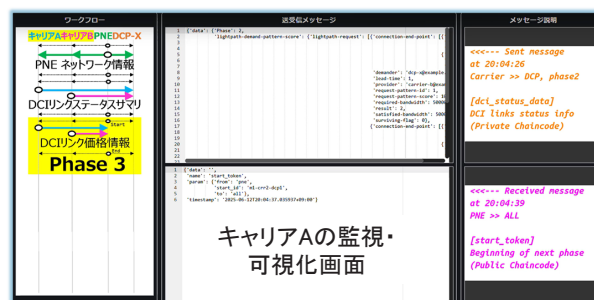
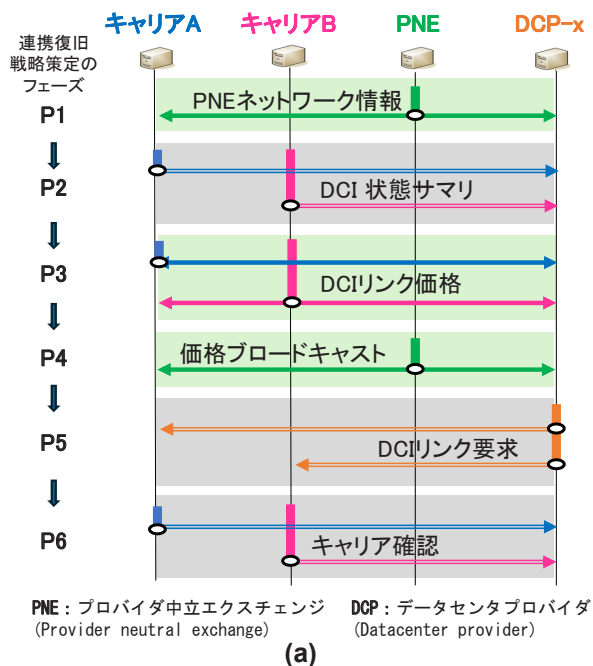


図7 連携促進基盤上での連携復旧戦略策定実験例: (a) 通信事業者とクラウド事業者間連携復旧戦略策定の連鎖、(b) 連携復旧戦略策定過程の監視と可視化 (キャリアA例)、(c) ブロックチェーンによる情報共有例

謝辞

本研究の一部は日米連携National Science Foundation US-Japan JUNO3 project (2210384) で実施した。本研究の遂行にあたり、ご指導、有益な議論と貴重な助言をいただいた方々に、特に、国内の研究機関において、産総研の石井 紀代氏、並木 周氏、KDDI総合研究所の吉兼 昇氏および釣谷 剛宏氏、ならびにNTTコミュニケーションズの張 笑誠氏および鈴木 繁成氏、NICTレジリエントICT研究センター企画連携推進室 白岩 雅輝副室長に、また、海外の研究機関において、米国UC Davis大のBiswanath Mukherjee先生、Massimo Tornatore先生、Sifat Ferdousi先生、Subhadeep Sahoo氏に感謝申し上げる。また、実験に関して多大な協力をいただいた任 衛平氏、ネットワーク研究所フォトニックICT研究センターフォトニックネットワーク研究室 鈴木 大雅研究技術員に深く感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1 S. Xu, K. Ishii, N. Yoshikane, T. Tsuritani, Y. Awaji, and S. Namiki, "Blade abstraction interface for diverse blade integration and unified control of disaggregate/legacy ROADMs," Proc. OFC, F1C.2, June 2021.
- 2 S. Xu, K. Ishii, N. Yoshikane, S. Sahoo, S. Ferdousi, M. Shiraiwa, Y. Hirota, T. Tsuritani, M. Tornatore, Y. Awaji, S. Namiki, and B. Mukherjee, "Resilience enhancement in open network-cloud ecosystems through disaggregation and cooperation [invited]," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.16, no.2, pp.A105-A117, Feb. 2024.
- 3 S. Xu, S. Sahoo, S. Ferdousi, M. Shiraiwa, Y. Hirota, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, "Multi-entity cooperation platform facilitating

network-cloud recovery," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.17, no.9, pp.D53-D72, Sept. 2025.

- 4 S. Xu, S. Sahoo, S. Ferdousi, N. Yoshikane, M. Shiraiwa, Y. Hirota, M. Tornatore, T. Tsuritani, Y. Awaji, and B. Mukherjee, "Scheme of carrier cooperation with coordinated scheduling for faster and lower-cost failure/disaster recovery," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.16, no.5, pp.B45-B59, May 2024.
- 5 S. Sahoo, S. Xu, S. Ferdousi, Y. Hirota, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, "Service restoration in multi-entity network-cloud ecosystems: how to cooperate?," IEEE Communications Magazine, vol.63, no.3, pp.129-135, March 2025.
- 6 S. Sahoo, S. Xu, S. Ferdousi, Y. Hirota, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, "Post-disaster cloud-service restoration through datacenter-carrier cooperation," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.17, no.8, pp.700-712, Aug. 2025.
- 7 S. S. Shetty, C. A. Kamhoua, and L. L. Njilla, Blockchain for Distributed Systems Security (Wiley-IEEE Press, 2019).
- 8 S. Xu, N. Yoshikane, X. Zhang, S. Sahoo, S. Ferdousi, M. Shiraiwa, Y. Hirota, T. Tsuritani, S. Suzuki, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, "A novel use case of future multi-carrier interconnection—swift and low-cost disaster recovery via carrier cooperation," Proc. PIERS2025, Chiba, Japan, Nov. 2025.



淡路 祥成 (あわじ よしなり)

ネットワーク研究所
フォトニックICT研究センター
センター長
博士(工学)
光通信ネットワーク
2020年 第65回前島密賞
2016年 フジサンケイ ビジネスアイ 第30回
先端技術大賞特別賞
2012年 第44回市村学術賞貢献賞



徐 蘇鋼 (じょ そこう)

ネットワーク研究所
フォニクニックICT研究センター
フォニクニックネットワーク研究室
研究マネージャー
博士(工学)
光通信ネットワーク
2023年 ONDM2023 最優秀論文賞
2000年 APCC2000及びAPB最優秀論文賞



廣田 悠介 (ひろた ゆうすけ)

ネットワーク研究所
フォニクニックICT研究センター
フォニクニックネットワーク研究室
主任研究員
博士(情報科学)
光通信ネットワーク
2018年 電子情報通信学会PN研究会
JPNデザインコンテスト優秀賞
2013年 電子情報通信学会 ICM研究賞