

2-3 Beyond 5G に向けたレジリエントネットワークの研究開発

2-3 Research and Development of Highly Resilient Network toward Beyond 5G

井上 真杉 滝沢 賢一 大和田 泰伯 淡路 祥成

INOUE Masugi, TAKIZAWA Kenichi, OWADA Yasunori, and AWAJI Yoshinari

国内外でレジリエンスの必要性と期待は高まる一方であり、当然ながら Beyond 5G で実現されるべき重要な特徴にも挙げられている。本稿ではまず、情報通信ネットワークの脆弱性とレジリエンスの研究を考察し、レジリエントな情報通信ネットワークシステムの実現に向けて必要となる技術や研究開発の方向性を述べる。そして、レジリエント ICT 研究センターで取り組んできているレジリエントな無線通信技術、光ネットワーク技術、エッジクラウド技術の研究開発と成果を報告する。

The need for and expectations of resilience are growing both domestically and internationally, and surely resilience is also listed as an important feature to be realized in Beyond 5G. This paper first discusses the vulnerability of information and telecommunications networks and research cases for improving their resilience, and then describes the technologies and R&D directions required to realize resilient information and telecommunications network systems. Then, the research and development of resilient wireless communication technology, optical network technology, and edge cloud technology, which Resilient ICT Research Center has been working on, and the results are reported.

1 まえがき

国内外でレジリエンスの必要性と期待は高まる一方であり、Beyond 5G の重要な特徴にも挙げられている。本稿ではまず、情報通信ネットワークにおけるレジリエンス研究の経過を考察し、レジリエントな情報通信ネットワークシステムの実現に向けて必要となる技術や研究開発の方向性を述べる。そして、レジリエント ICT 研究センターで取り組んできたレジリエントな無線通信技術、光ネットワーク技術、エッジクラウド技術の研究開発と成果を報告する。なお、本報告の **2** は主に [1] を加筆修正して作成した。

2 情報通信ネットワークとレジリエンス

2.1 世界が求めるレジリエンス

世界各地で地震や津波、台風や豪雨に伴う地滑りや洪水、豪雪に猛暑、火山噴火などの自然災害が毎年発生し、人命や社会インフラが失われている。パンデミック、食糧危機やエネルギー危機、国際紛争などの脅威にさらされる機会も増す一方である。「レジリエンス」は心理学分野では 1950 年代に心の資質や能力を指

す用語であった [2]。それが今ではコミュニティやインフラ、都市や国家、経済や政治、文明や人類、そして地球のレジリエンスまでも論じられるようになってきている [3]。国連の持続可能な開発目標 SDGs (2016 ~ 2030 年で達成すべき 17 の目標) の 9 番でレジリエントなインフラ構築、11 番でレジリエントな都市と人間の居住地が謳われている。前身のミレニアム開発目標 MDGs (2001 ~ 2015 年) では謳われていなかったことから、近年レジリエンスの重要性が強く認識されていることが見て取れる。

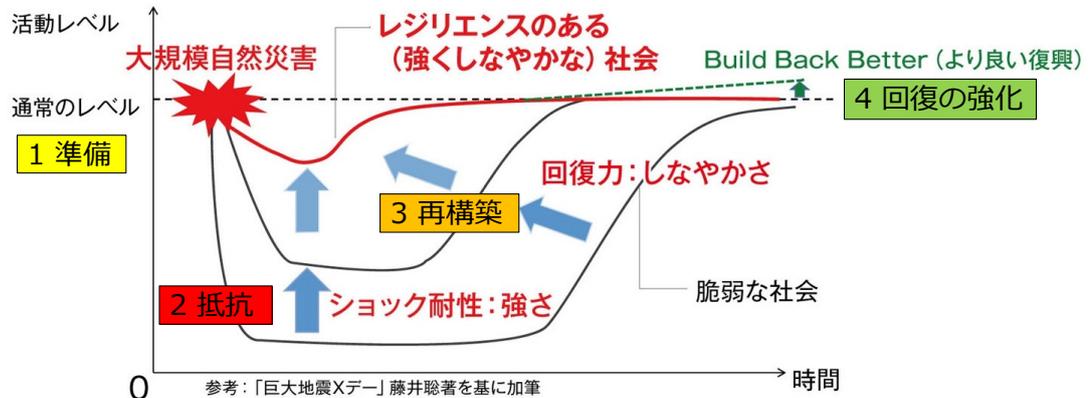
様々な分野に登場するレジリエンスという用語は、ある分野に限定しても多様な定義や解釈が可能で、この多様性が特徴である。情報通信に携わる人たちは、特に東日本大震災以降に図 1 と類似の図を見る機会が増えたのではないだろうか。これは内閣官房が国土強靱化の文脈で示している図であり、大規模災害発生時の経済社会システムの活動レベル(縦軸)のショック耐性を高め、回復力も高めて早期に復旧し、さらに以前よりも良い状態にまで高めることも目指す様子を定性的に描いている。この原型のひとつと考えられるものが、構造信頼性工学の第一人者である篠塚正宣(カリフォルニア大学アーバイン校(当時))らが地震に対す

レジリエンスとは

内閣官房 国土強靭化

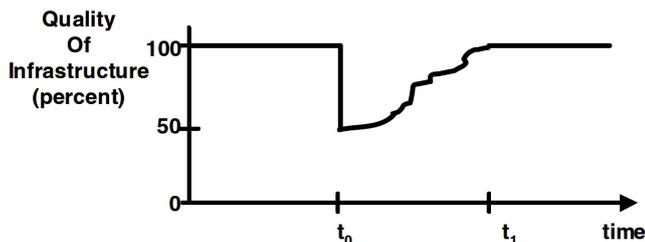
大規模自然災害時に、人命を守り、経済社会への被害が致命的にならず、迅速に回復する「強さとしなやかさ」を備えた国土、経済社会システムを平時から構築していくことです。

強靭な社会のイメージ



参考: 「巨大地震Xデー」藤井聡著を基に加筆
内閣官房国土強靭化推進室作成図面に筆者が1~4を追記

図1 レジリエンスの定性的な定義の例



地震に対するレジリエンスの概念的定義

図2 地震に対するレジリエンスの概念的定義 [4]

るレジリエンスの定量化を論じた 2003 年の研究報告 [4] にある (図2)。この報告で、レジリエンスとは、ショックの可能性を低減し、吸収し、そして早期に回復していくことだと提示されている。

2.2 情報通信ネットワークの脆弱性

電力、交通、物流、金融、教育、気象観測、消防警察等の様々な社会サービスや社会インフラが情報通信ネットワークを頼りにしている。それゆえ近年頻発する機器障害や自然災害による大規模な通信障害によりこれらのサービス停止が余儀なくされている。

肝心要の情報通信ネットワークは実のところ本質的に4つの脆弱性を抱えている。情報通信ネットワークを簡略化したものを図3に示す。第1は「通信の脆弱性」である。LANを含むこれらのネットワークは上から下へ枝分かれる形状であり、各通信装置の障害がそれより下部の通信途絶をもたらす。近傍のユーザ側装置同士が通信するにもネットワークの上流で折り返す必要もある。第2は「情報処理の脆弱性」である。従

来クラウド上に存在していた情報やその処理機能がインフラのユーザ寄り(エッジ)に移動するトレンドがあるが、現時点ではまだクラウドが主である。基本的にユーザ側装置はクラウドと通信する必要があり、途中の通信不全やクラウド側のサーバ不全により所望のサービスが実行できなくなる。第3は「制御の脆弱性」である。現在の制御は全体を制御する装置群が存在する中央制御型であり、ユーザ側装置や通信装置がそれら制御装置との間で制御通信が行えないと、部分的あるいは全体的に情報通信が停止するリスクがある。災害時に通信需要が増して制御系が破綻するのを事前に防ぐために通信規制が行われるのはそのためである。そして最後は、東日本大震災や能登半島地震などでも認識された「電力源の脆弱性」である。東日本大震災を契機に、総務省が制定する基本的な指針(ガイドライン)である「情報通信ネットワーク安全・信頼性基準」において、役場や災害病院など重要箇所の携帯電話基地局のバッテリー運用が推進されてきているが、その数は国内携帯電話基地局のせいぜい数%程度と推測される(筆者試算)。

2.3 情報通信ネットワークのレジリエンス

2010年前後は、米国を皮切りに欧州や日本でもFuture Internetの研究プロジェクトが推進された時期であった。その頃、インターネットのレジリエンスや信頼性が不十分であることに着目した研究グループが欧州にあった。彼らは2010年の文献 [5] で、レジリエンスの構成要素やリスク(災害に加え人為ミスやサ

本質的に脆弱な情報通信ネットワークの構造

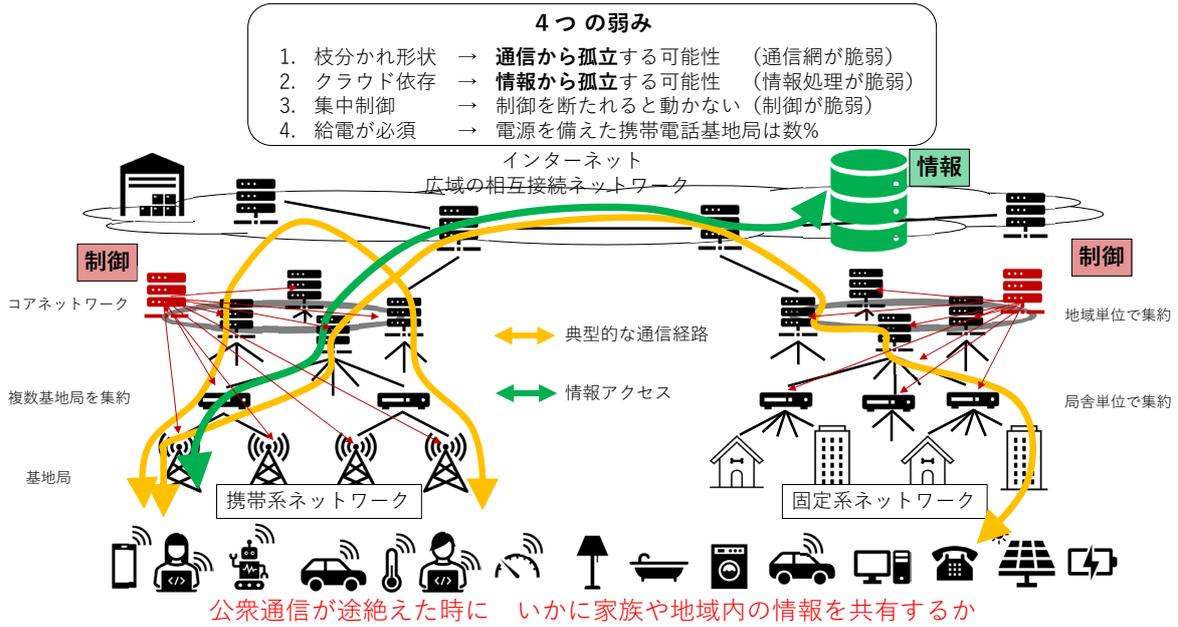


図3 情報通信ネットワークの脆弱性

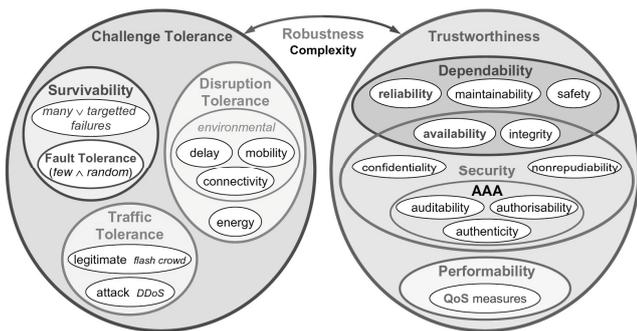


図4 レジリエンスの構成要素の例 [5]

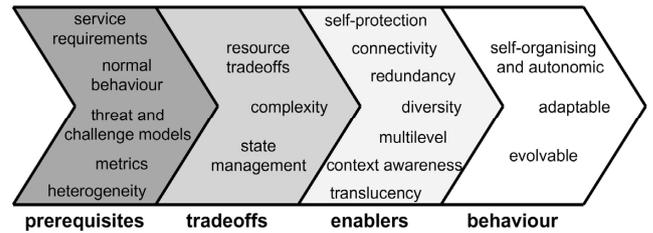


図5 レジリエンス原則 [5]

イバー攻撃までを対象としている)を整理し(図4)、レジリエントなデザイン原則も示している(図5)。欧州の研究用ネットワーク等を対象に評価も行うなど精力的に研究を行った同グループは、2016年の文献[6]において、社会実装に至るにはレジリエンスの定義評価方法、リスク分析、アーキテクチャや構造に関する体系的で工学的なアプローチ、そして何よりもレジリエンスの費用対効果を含む社会経済面の検討が必要だと説いている。

2.4 レジリエントな情報通信ネットワークシステムの実現に向けて

筆者が2022年2月に示した考え[7]をここに再掲する。図1で示した考え方に基づく、レジリエントな情報通信ネットワークシステムとは、大規模自然災害や障害などの「インシデント」が発生しても、「情報通信能力」の「低下を最大限に抑制し」、かつ発生前の能力

への「回復が最大限に早く」、さらに発生前に比べてむしろ能力向上も可能な性能や機能を備えていることと定性的に定義できる(図6)。その上で、同図に示すように、システムチェックかつ定量的なアプローチにより、システムを定義し、システムとインシデントの関係性等を明らかにしていくことで、レジリエンス向上の個別技術だけでなくネットワークシステム全体のアーキテクチャの研究開発も進むことが望まれる。

2.5 NICTの取組

レジリエントICT研究センターは、東日本大震災の教訓を活かして災害に強いICTの研究開発を行うために、平成24年度に発足した耐災害ICT研究センターを継承し、令和3年度に活動を開始した組織である。「ICTで世界をレジリエントに」をキャッチフレーズに、研究開発とその成果の社会利用推進に取り組んできている(図7)[7][8]。

研究開発のテーマは、大別するとレジリエントな性質を備えたICTと世界をレジリエントにするための

レジリエントICT と 研究開発の方向性

大規模自然災害や障害などの「インシデント」が発生しても、

1. 「情報通信能力」の「低下を最大限に抑制し」、かつ
2. 発生前の能力への「回復が最大限に早く」、さらに
3. 発生前に比べてむしろ能力向上も可能な性能や機能を備えていること

各構成要素のレジリエンスはもちろん、全体システム（アーキテクチャ）のレジリエンスも大切

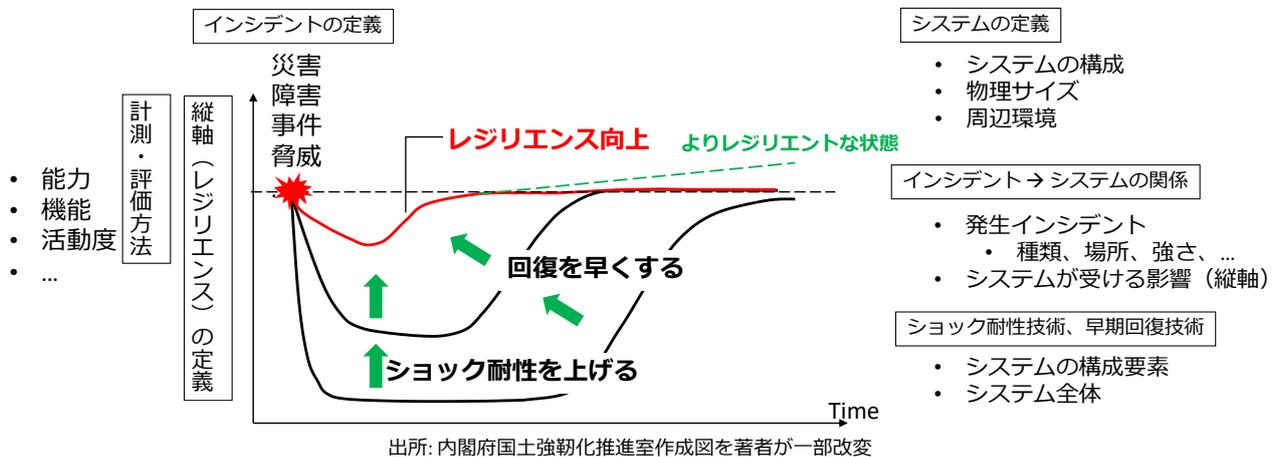


図6 レジリエントICTの定義例とシステムチックな研究開発

ICT で世界をレジリエントに

1. 研究開発：レジリエントな性質を備えたICT、世界をレジリエントにするためのICT
2. 国土強靱化：産学官・地域連携等による成果の社会利用の推進



図7 レジリエントICT研究センターの研究開発と国土強靱化に向けた取組

ICTになる。本稿では本特集号の趣旨を踏まえて後者は割愛する。

レジリエントな性質を備えたICTの1つ目は、従来の無線通信技術では通信が困難な「タフ」な電波環境でも低遅延・高信頼な通信を提供することを目指したタ

フ環境適応無線アクセス技術 [9]である。タフな電波環境とは、5G (3 GPP Release17) が規定する許容損失150 dBを超える伝搬損失が発生する環境のほか、電波が過密な環境や電波伝搬が複雑な環境を想定している。鉛で囲われている上に複雑な内部構造を持つ原子

力発電所はその最たるものである。このような環境でも、回線が切れる前に他の回線を確立させることで通信を提供し続けることができる高信頼な無線技術の実現を目指している。低遅延性に関しては、群ロボットを協調制御することができるサブミリ秒の低遅延無線技術を研究開発している。このような要件を満たすべく鍛え上げた無線技術は Beyond 5G / 6G が備えるべきレジリエンシー [10] に直結するものであり、積極的に Beyond 5G / 6G 向け方式として 3 GPP に提案し、すでに標準仕様に含まれた成果もある。

2つ目は光ネットワークのレジリエンシー向上技術 [11] である。光ネットワークの障害の予兆までも機械学習等も適用して検知しかつ障害を能動的に回避する技術、規格のオープン化に伴って難しくなる相互接続や統合利用を可能にしてレジリエンシーを高める相互接続基盤技術、そして通信ネットワーク資源だけではなく計算(クラウド)資源をも含めて需給マッチングを図り障害復旧を迅速化する通信資源・計算資源連携基盤技術を研究開発してきている。

3つ目はこれらのレジリエントなネットワークの上で機能するエッジクラウドを対象とした技術 [12] である。現在の情報サービスはクラウド方式が主流であり、災害時の情報共有にもクラウドが使われている。しかし、災害の場面では通信が不安定なケースが多くあり、情報共有に支障が生じる。そこで、通信が不安定な環境であっても、あたかもクラウドサービスを使い続けているかのように、各ノードが持つ計算機資源や通信資源をノード間で共有し、仮想的なエッジクラウド機能を提供し続けることができる自己産出型エッジクラウド技術の研究に取り組んできている。

以上3つの技術の研究開発と成果の概要を **3** から **5** で報告する。

3 タフ環境適応無線

3.1 概要

電波環境の急激な変化(減衰等)を伴う電波伝搬環境においても、高度な通信要件(低遅延や多数接続)を必要とするミッションクリティカルな応用を提供するためには、無線通信回線における途絶リスクを事前に検知して、回線が途絶する前に必要な通信資源を適切に割り当て続ける「Make-before-break」[13]を実現することが求められる。従来の無線通信では通信資源の冗長利用によって信頼性を確保していたが、「Make-before-break」では途絶リスクの予測結果に応じて通信資源を適切に割り当てることから、通信資源(無線通信においては周波数資源)の有効利用にも寄与する。NICT では、レジリエントな無線通信技術の実現

に向けて、通信途絶リスクを低減する無線通信技術、機械学習等を利用した通信途絶リスクの予測技術及び予測結果にもとづく通信資源の割り当て技術に関する研究開発に取り組んでいる。本章ではこれらの研究開発の一部について紹介する。

3.2 通信途絶リスクを低減する無線通信技術：非再生中継通信

中継通信は通信範囲の拡大に寄与する技術である。しかしながら、図8に示すように、再生中継では中継器における処理遅延が大きくなることから低遅延性が損なわれることに加えて、時間スロットを複数使用することから多数接続性もまた損なわれてしまう。この課題を解決するため、非再生中継の高度化に関する研究開発を進めている [14]。通常の中継では、閉空間内に中継器を設置した場合、同じ信号を何度も受信することで飽和が生じてシステム全体へ干渉を与えてしまう可能性がある。その対策として考案した非再生中継方式は、通信スロットのタイミングを共有した中継の On-Off 制御や、中継器の送信電力制御などを適用している。これらの制御により、本方式は無線通信の通信方式・標準に依存することなく、様々な通信方式に適用可能であるという特長を持つ。すなわち、通信方式を変更することなく、プラント等に導入済みの無線通信システムの通信範囲を拡張したい場合にも適用可能である。図9に実験結果の一例を示す。この実験は、トンネルの外でのみ通信可能な無線通信システムを、トンネル内(全長約 50 m)へ延伸することを想定して実施したものである。プラント内で利用されている無線通信システムを洞道内等へ延伸したい場合に該当する。トンネル内の受信信号強度のヒストグラムを図中に示している。中継局がなく中継がされない場合にはトンネル内の信号は雑音レベルであったのに対

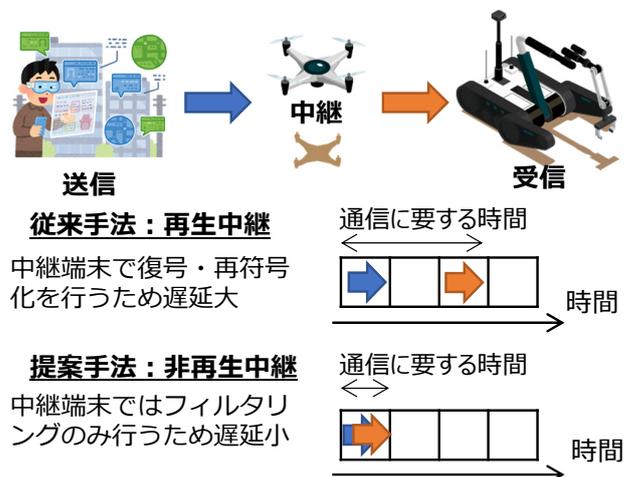


図8 非再生中継を利用した低遅延中継技術

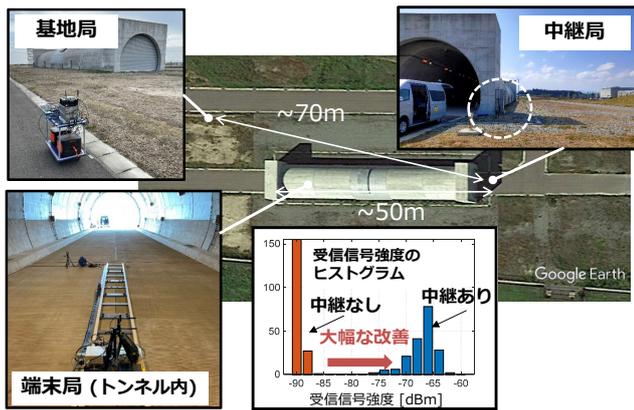


図9 トンネル内への低遅延無線中継実験

して、開発した非再生中継方式を適用した中継局によりトンネル内全域での通信が可能となった。中継局の処理遅延は3.2マイクロ秒と小さく、低遅延性を損なうことなく通信範囲が拡大できることも確認された。本非再生中継方式は、3 GPP Release18 (5G-Advanced) における議題 Network-controlled repeater へ寄与文書として入力し(例えば [15])、Technical Report 38.867 への反映を経て、最終技術仕様である Technical Specification 38.213 等に包含されたため、将来のセルラーシステムに実装されることになる。このような形で Beyond 5G / 6G の国際標準化にも寄与している。

3.3 機械学習等を利用した通信途絶リスクの予測技術：カメラ映像からの電波強度予測

ロボット遠隔制御では、制御回線として利用される無線通信の電波強度がこの先どのように変化するのが予測できれば、通信途絶リスクを低減できる。作業用ロボットの多くは、自らの位置・移動経路を把握するためにカメラやライダー等の周辺環境計測用センサを搭載している。これらのセンサを活用して、無線通信回線の途絶リスク予測を目指した研究開発を進めている。ここではカメラ映像を用いた電波強度予測手法とその評価結果について述べる。予測に向けて、まずカメラ映像 (RGB raw データ、1,200 × 1,500 画素、20 fps) と受信信号強度とを同期して計測し、学習データを構築した。この学習データを用いて、たたみこみニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) と長短期記憶 (Long Short Term Memory: LSTM) を適用したモデルのパラメータを調整し、0.8 秒先の電波強度の予測を試みた。予測誤差 (RMSE: root mean squared error) と予測精度 (電波強度の予測誤差が ±3 dB 以内となる確率) を図 10 に示す。予測に利用する画像フレーム数を増やすことで予測誤差が低減し、予測精度が改善されることが確認できた。また、CNN と LSTM を併用することで、予測精度を 95 % 以

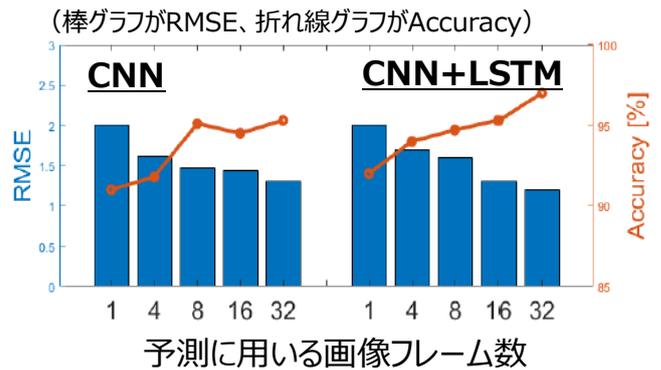


図 10 カメラ映像を利用した電波強度予測結果の例

上にできることも確認した [16]。この予測手法を利用して受信信号強度を予測した結果に基づき、通信回線が途切れる前に接続する基地局を切り替える手法も提案し、原理検証までを行っている。また、電波伝搬シミュレータ等で作成した学習データによって事前学習したモデルを用いることで、現場における学習時間を短縮する手法も提案している [17]。現在、プラントや工場等を模擬した環境における実証を進めている。

4 ロバスト光ネットワーク基盤研究室

光ネットワークは長距離・大容量の情報伝送特性を活かし、都市間を結ぶコア・メトロネットワークから末端のアクセス部分まで幅広く使われており、様々な情報システムサービスを安定的に継続するには光ネットワークのレジリエンシー向上が必須課題であるといえる。災害や機器故障などの様々な障害によって引き起こされる通信断や大幅なスループット低下に対して、光ネットワークのレジリエンシーを向上し、障害の影響を低減するための基盤技術として、光ネットワークに影響をもたらす潜在的な故障源などを検知・予測して性能低下を抑制するための適応制御技術、速やかに機能復旧する耐障害性能向上技術、ネットワーク資源のオープン化による通信事業者間の相互接続技術などに関する研究開発を進めている。具体的には、光ネットワークを模擬したテストベッドから取得した障害情報を活用した機械学習モデル開発、オープンな光ネットワーク相互接続サブシステム開発、光パスレステレーション、プロトコル変換クラスタのアーキテクチャの設計・開発、ブロックチェーン技術を用いた異種事業者間連携プラットフォームの開発に取り組んでいる。また、日米連携 JUNO3 プログラムに基づき、通信事業者・クラウド事業者間相互支援技術の基盤フレームワークを開発している。

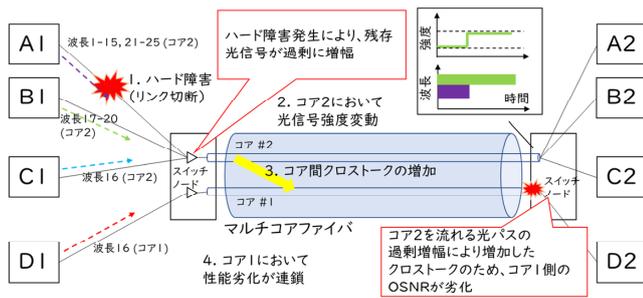


図 11 MCF のコア間クロストークによる伝送品質劣化のモデル

4.1 光ネットワークのテレメトリ・制御高度化技術

光ネットワークのレジリエンシー向上のためには、光ファイバ切断やトランスポンダなどのハードウェア障害による通信の途絶に備えた冗長化・プロテクション技術に加えて、振動などの外乱やデバイスの経年劣化などにより伝送品質が劣化することも考慮する必要がある。通常、前方誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) 技術により受信端でビットエラーを訂正することでエラーフリーな通信を実現することが可能であるが、この伝送品質劣化の度合いが大きくなり FEC による訂正限界を超えると、瞬時的あるいは一時的な通信リンクダウンやスループットの低下、さらには再送による通信遅延の増加などを引き起こす。そこで、光信号の伝送品質をモニタリングし、潜在的な伝送品質劣化を検知することで、通信リンクダウンなどの障害による影響を低減することが期待される。本研究では、具体的な障害事例として、次世代のインフラとして期待されているマルチコアファイバ光ネットワークにおけるコア間クロストークの経時変化による伝送品質劣化問題(図 11)に着目し、光信号の時系列データに基づき論理的な通信リンクダウン障害の発生を予測する機械学習モデルを設計した。図 12 に評価結果を示す。横軸は毎時測定イベント ID を、縦軸はビットエラーが FEC 限界を超えたアラート回数の予測値と実測値を示している。本機械学習モデルにより、障害発生直前で通信リンクダウンの可能性を通知することが可能となることを示した [18]。

また、一般的な機械学習モデル設計と同様に、光ネットワークにおいて障害発生時を含む光信号の時系列データを適切に取得してラベル付けなどを行うことは、上記のように機械学習を適用する上での重要課題の一つである。前年度から開発を進めている物理パラメータ測定システムにおいて、自動的にネットワークトポロジなどの複数の条件を切り替えながら長時間のデータセットをリモートで構築可能な光テレメトリ情報収集システムを開発している(図 13)。さらに、データインテリジェントなネットワーク制御・管理技術の

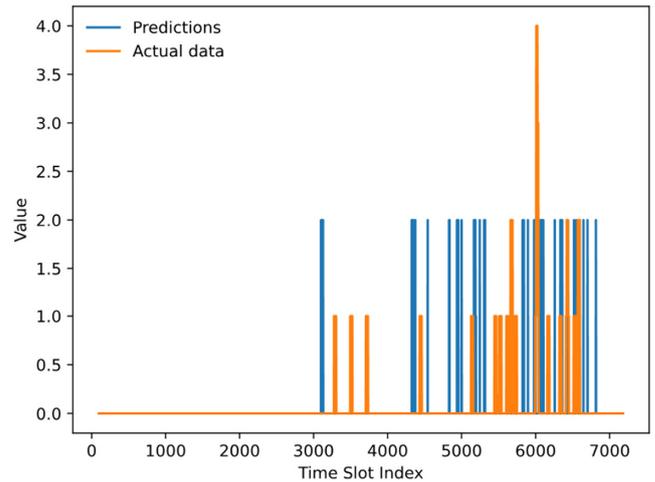


図 12 機械学習によるリンク障害検知の評価結果

研究開発促進に向けて、取得したデータセットの一般公開や Dataspace によるデータ共有プラットフォーム活用を進めている。

4.2 ネットワーク資源のオープン化による相互接続基盤技術

異種ブレードベンダや異種システムインテグレータによって構成された光ネットワーク及び異種トランスポートネットワークの高度な相互接続・統合利用を促進するために、下位層光ネットワーク及び上位層パケットトランスポートネットワーク資源のオープン化基盤技術の確立を目指している。上記の光ネットワークにおいては、オープン化の結果生じた光装置の多様性に対応する必要がある。一方、多様な装置を収容するヘテロ(ヘテロジニアス(異種))なシステムの複雑度が高くなるため、高度なノード及びネットワーク自動化技術が必要になる。そこで、産総研、KDDI 総合研究所と連携し、光装置の多様性に柔軟に対応する Functional Block-based Disaggregation (FBD) (産総研開発) [19] に基づくモデリングの統一적アプローチ及び Blade Abstraction Interface (BAI) 技術についての研究開発を行ってきた。これまでに、ディスアグリゲーション装置とレガシー装置が混在するヘテロな光ネットワーク資源上のオープンな統合制御、ディスアグリゲーションブレードに基づくレガシー装置の応急復旧の実証実験を実施した。また、異種ブレードベンダ、異種システムインテグレータ (SIer)、マルチドメイン、テレコム・データセンターなど異なる領域を含むヘテロな光通信環境において、ハードウェア装置の多様性に FBD + BAI で対応し、異なる SIer のネットワークモデルの多様性を Open Networking Foundation (ONF) の Transport-API (TAPI) 及びモデル翻訳ミドルウェアで収容するという多様性対応の統

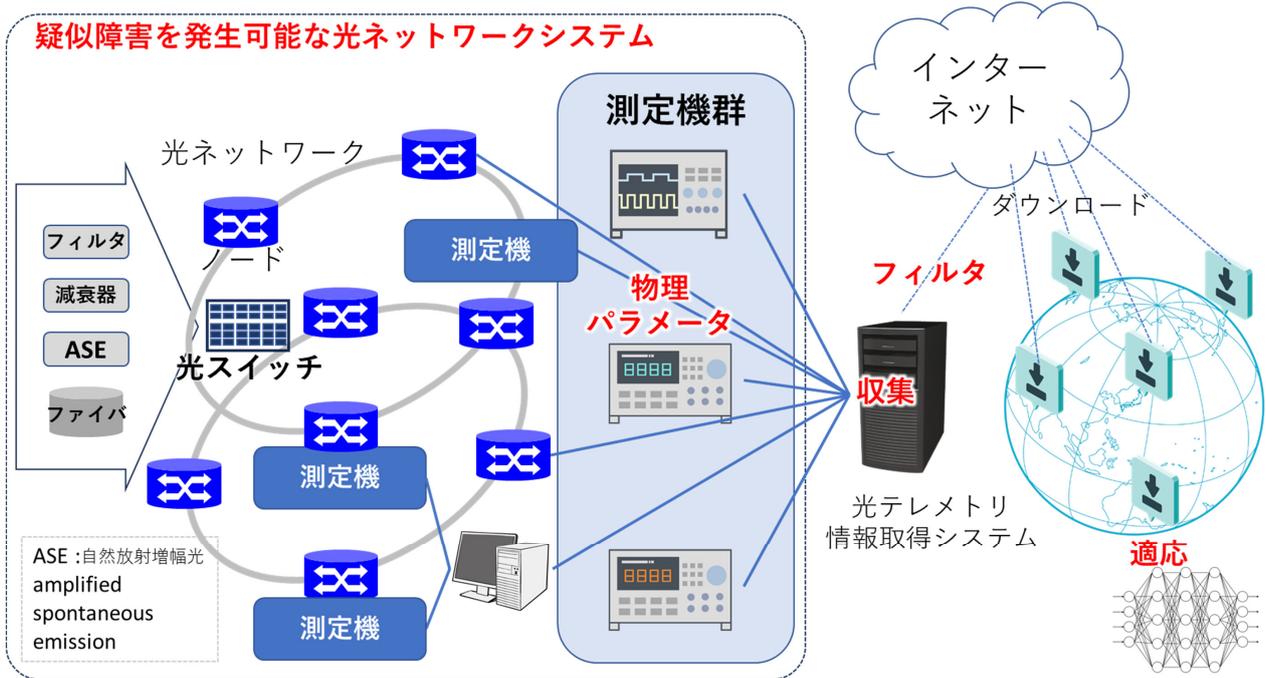


図 13 光テレメトリ情報収集システムの概要

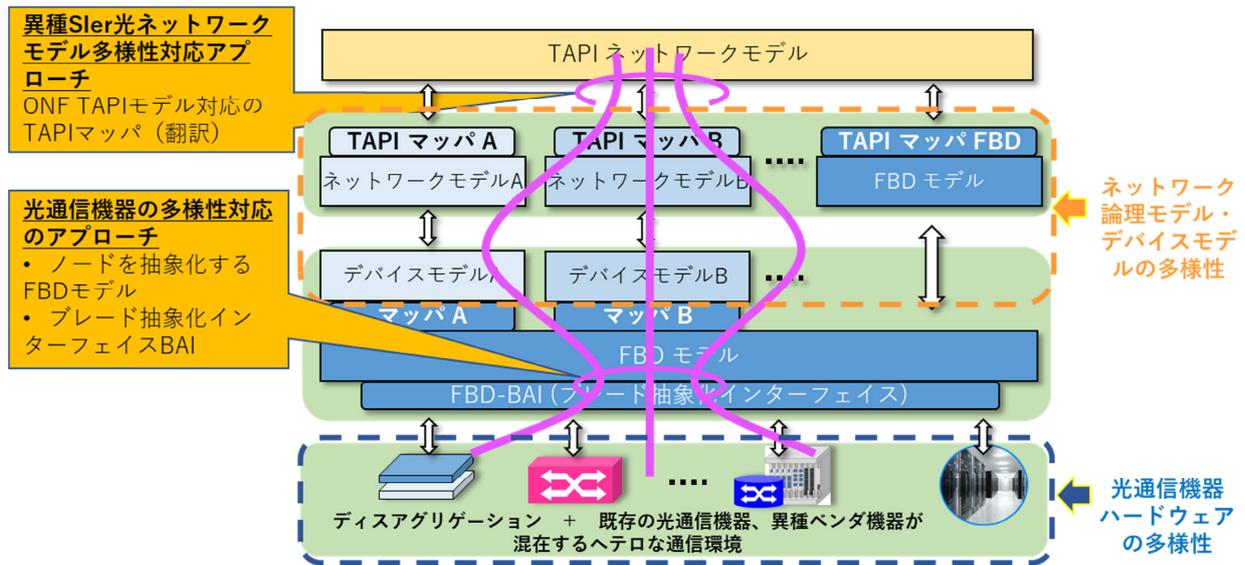


図 14 オープン化によるヘテロな光ネットワーク統合・自動制御アプローチ

一的アプローチを提案し、実証実験に成功した [20] (図 14)。さらに、このアプローチに基づいて、オープン化されたヘテロなマルチドメイン光ネットワークの障害発生事に役立つ高速レストレーションの研究開発を行っている。

上位層トランスポートネットワークにおいて、大規模障害時に異種トランスポートネットワーク間を低コストで素早く相互接続するために、クラウドネイティブ・ネットワーク機能 (CNF) に基づくマイクロサービス化プロトコル変換クラスタを開発した。また、クラ

スタ構造を TAPI で抽象化し、TAPI からコンテナ管理システム Kubernetes の設定管理情報を自動生成するミドルウェアを開発した。クラウドネイティブなコンテナ管理技術を Software Defined Networking (SDN) 自動化に統合し、クラウドネイティブなプロトコル変換クラスタをワンタッチで自動構築及びゼロタッチで自動復旧する機能を開発した (図 15)。さらに現在は、障害からの復旧時に、高速変換能力を求める通信需要に対応するプロトコル変換クラスタの研究開発を行っている。

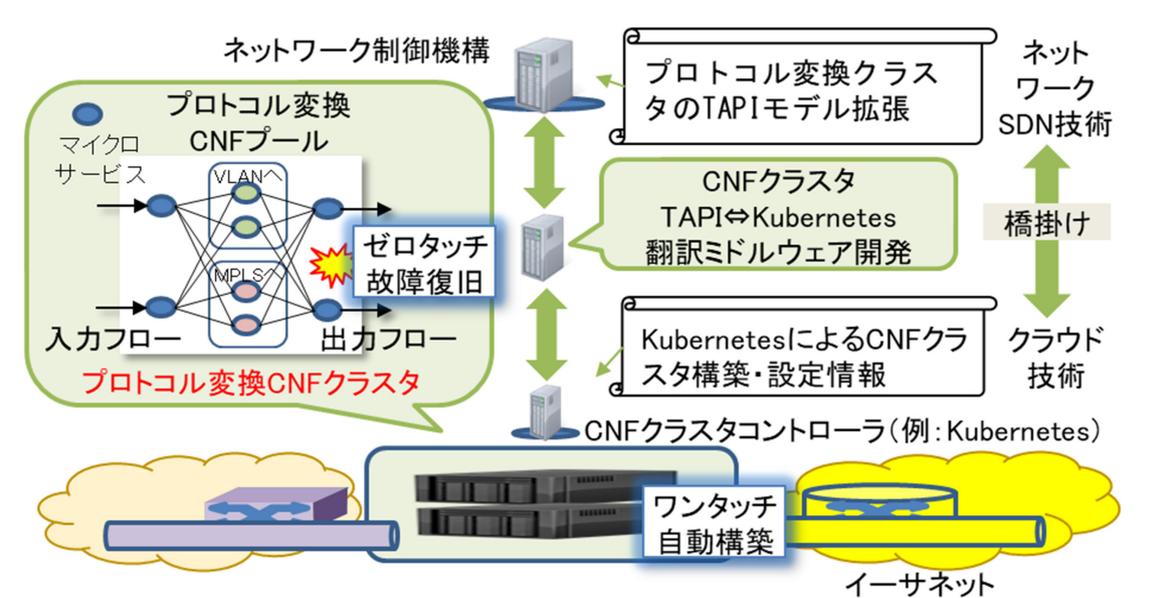


図 15 CNF による異種トランスポートプロトコル変換

4.3 通信・計算資源連携基盤技術

クラウドサービスの普及に応じて光ネットワークとクラウドの自動化技術は進化した。今後光ネットワークサービスに基づいたインタークラウド環境を含むネットワーク・クラウドエコシステムでは、クラウドサービスの新設や既存サービスの変化に応じてインタークラウドの光通信環境をフレキシブルに調整することが望ましい。インタークラウドの光通信環境を新設・調整する機能のほか、大規模故障や災害時には異なる通信事業者とクラウド事業者との間で光ネットワークの通信資源の供給状況や通信需要の状況を動的かつ効率的に共有して需給マッチングを図る機能が必要である。これらの機能を実現するためには、異種事業者間連携を促進するプラットフォームが有効である。通信・計算基盤異種事業者の間において、公開・公平・公正な連携を支援する、ブロックチェーン技術に基づく連携プラットフォームの設計・開発を行い、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)を用いて、ステークホルダ間のマルチラテラルなパブリック情報交換及びバイラテラルなプライベート情報交換機能を実現した。また、本システムを研究者や利用者が容易に理解・利用し、異種事業者間の多様な連携方式に柔軟に対応できるように、Open Networking Foundation (ONF) の Transport-API (TAPI) データモデルを拡張し、連携プラットフォームで交換される情報をデータモデルにて定義・プレゼンスする機能を設計・開発した。さらに、異種事業者間連携プラットフォームに基づいた実証実験を実施している [21] (図 16)。

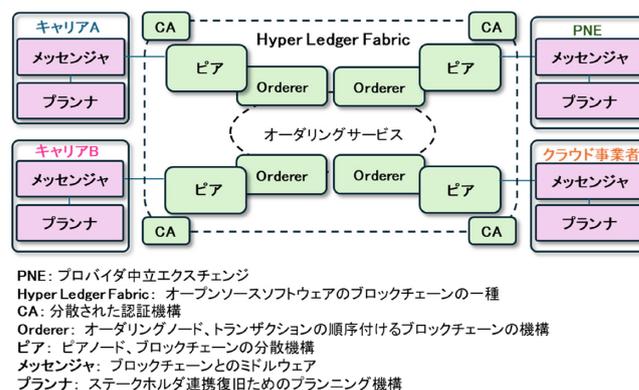


図 16 ブロックチェーンに基づく異種事業者間連携プラットフォームの実証実験

4.4 クラウドー通信キャリア連携に基づく超信頼・高効率なプログラマブル基幹ネットワーク [日米連携プログラム JUNO3]

クラウドサービスに強く依存する現代社会では、ネットワーク・クラウドエコシステムのレジリエンシー向上が重要である。NICT と NSF(米国科学財団) とが共同で運用する日米共同研究プログラム Japan-US Networking Opportunity 3 (JUNO3: 2022年9月～2025年8月)で研究提案が採択され、米国 UC-Davis (カリフォルニア大学デービス校) と共同でクラウドサービス機能維持のための通信事業者・クラウド事業者間連携戦略モデル化の研究開発を実施している。

大規模障害発生時の通信事業者間の連携について、(a) 生残資源の共用手法、(b) 復旧タスクの分担を含む連携復旧時に復旧時間を考慮する復旧タスクの割当手法、そして(c) 第三者仲介 (PNE: プロバイダ中立エクスチェンジ) に基づく連携復旧戦略を最適化するフ

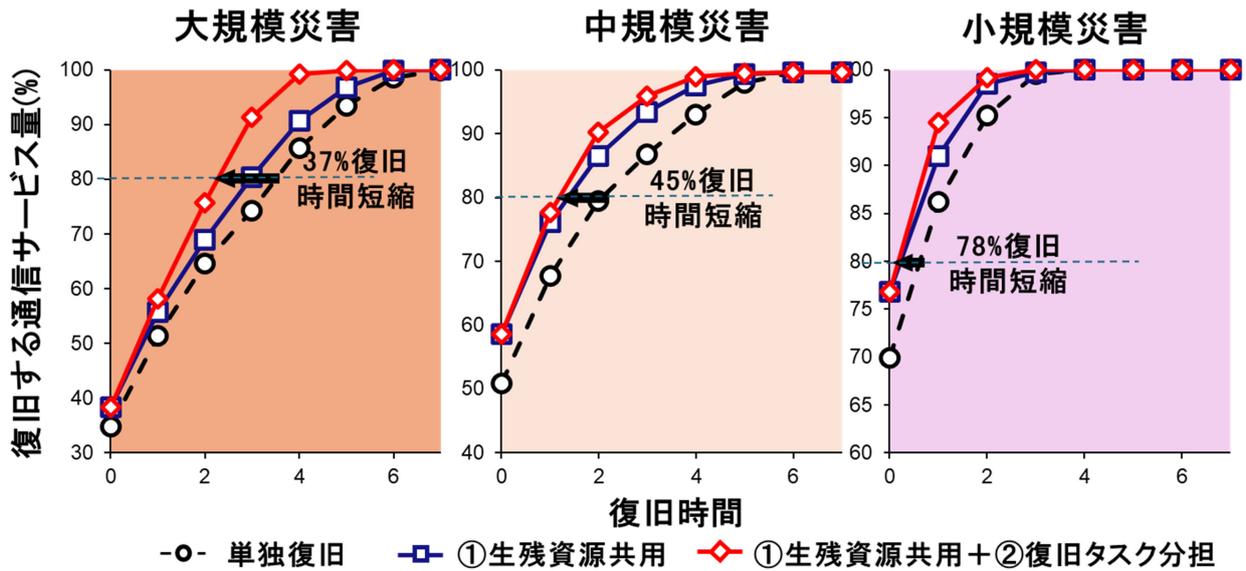
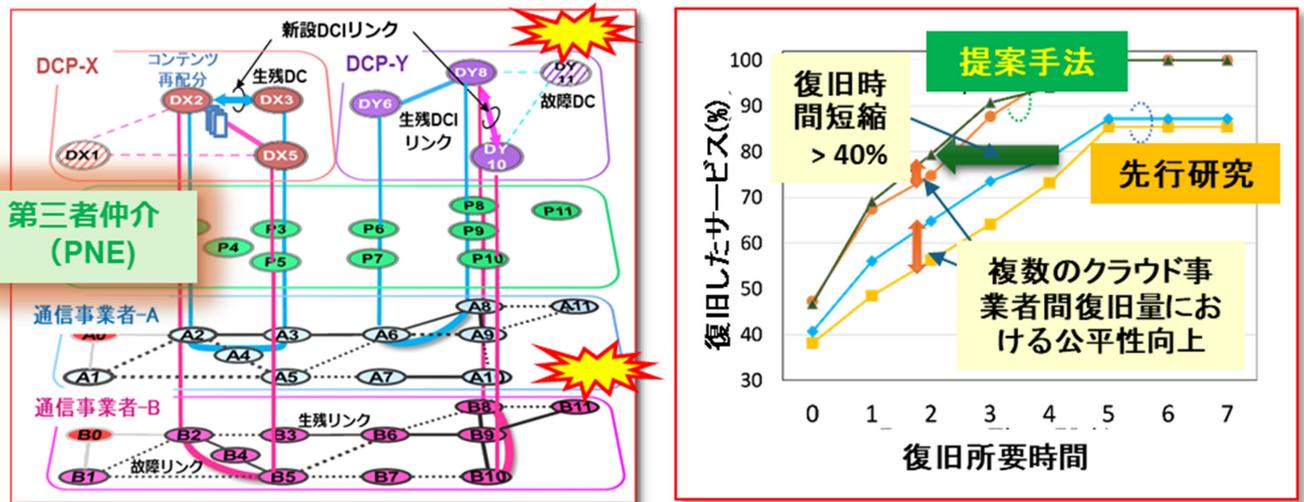


図 17 大規模故障や災害時における通信事業者間の連携による復旧時間の短縮効果



通信・計算基盤異種事業者間連携シナリオ

数値評価

図 18 大規模故障や災害時における通信事業者とクラウド事業者間連携による復旧時間の短縮効果

レームワークを提案した。提案手法に基づく連携は、連携なしの場合と比べ、80%の通信サービスを復旧する所要時間が大規模災害で30%以上、中規模災害で40%以上、小規模災害で70%以上短縮できることを明らかにした [22] (図 17)。

また、通信事業者とクラウド事業者間の連携について、a) 複数のデータセンタプロバイダ (DCP) における通信資源需要の最適化手法、b) DCP の通信需要評価手法、c) 第三者 PNE における需要と供給のマッチング手法のモデル化を数値評価した。DCP 需要を通信資源供給にマッチングすることで、80%のクラウドサービスを復旧する所要時間を従来手法から40%以上短縮できることを明らかにした [23] (図 18)。

さらに、通信事業者・ISP 間の連携においては、ト

ラヒック変動対応や故障対応などのため、ISP の自律システム自身の再構成最適化やオンデマンドのキャリアとの連携調整手法やロバストな PNE 相互接続技術の研究開発を行っている。

5 エッジクラウド技術

5.1 自己産出型エッジクラウドとは

自己産出 (autopoiesis) とは、生命の有機構成や発現を見定めるために提唱された理論生物学上の概念であり [24]、境界の自己決定を行う閉鎖系システムと定義されている。この概念をエッジクラウドへ適用し、ネットワーク構成が動的に変動する場合であっても、機能となるエッジクラウドサービスの提供を維持する

技術を「自己産出型エッジクラウド」と称している[25]。図19に自己産出型エッジクラウドにおけるサービスの自律再構成のイメージを示す。この例では、アプリケーションA、B、Cによりサービスが構成されていて、通常は各アプリケーションに計算機資源を割り当て、全体として1つのサービスを提供し、単独の制御管理機能が全体を管理する。ネットワークの分断が生じた場合、ネットワーク内の資源変化に適応し、制御管理機能や不足するアプリケーションを新たに生

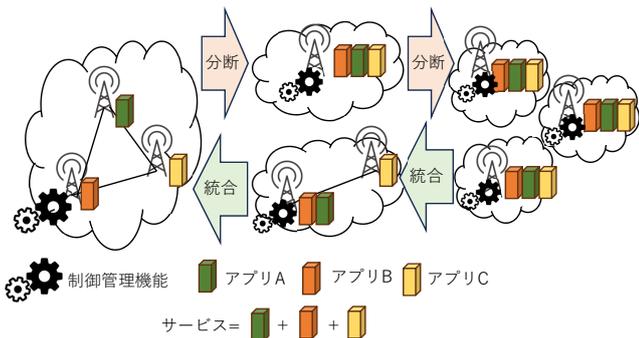


図19 自己産出型エッジクラウドにおけるサービス再構成のイメージ

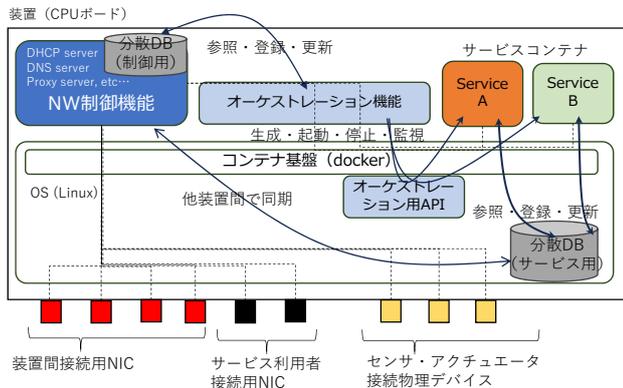


図20 自己産出型エッジクラウドのシステム構成

curlによるウェブ
リクエスト送信プログラム

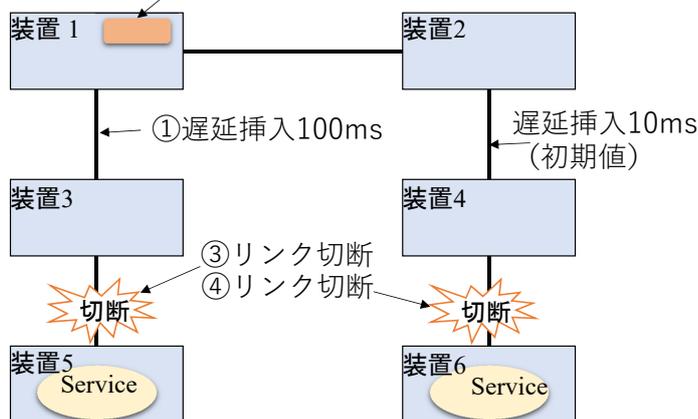


図21 評価用ネットワーク構成

成することで、サービスを再構成する。この技術によって、例えば災害等で通信ネットワークが分断されるような場合であっても、利用者はネットワーク構成の変化に気づくことなく、サービスを継続利用することができる。

5.2 機能要求とその設計

自己産出型エッジクラウドの実装に際して求められる機能を以下に示す。

- ネットワーク内資源に関する情報共有機能と柔軟なネットワーク構成機能
- ネットワーク内資源の仮想化とサービスの自己組織化
- サービスで利用されるデータの複製と同期
- サービス運用における定義とポリシー

これらの機能要求の実現に向けて、クラウドネイティブ技術を活用したシステム設計を行った。概要を図20に示す。①ネットワーク(NW)制御機能: コンテナとして提供されて、ネットワークデバイス(Network Interface Card: NIC)やセンサ・アクチュエータデバイスへの接続性を制御する。②オーケストレーション機能(制御管理機能): コンテナとして提供されるNW制御機能が持つ分散データベース(DB)を用いて、ネットワーク内資源の情報にもとづき、提供するサービスの管理を行う。③名前解決とサービスへの接続方法: 利用者はネットワーク構成によらずサービス名で装置へ接続し、サービス提供が可能な装置のアドレスをリンクメトリック値に基づき自動更新する。

5.3 原理検証

原理検証として、図21に示すように装置6台から構成されるネットワークを構築し、サービスとしてウェ



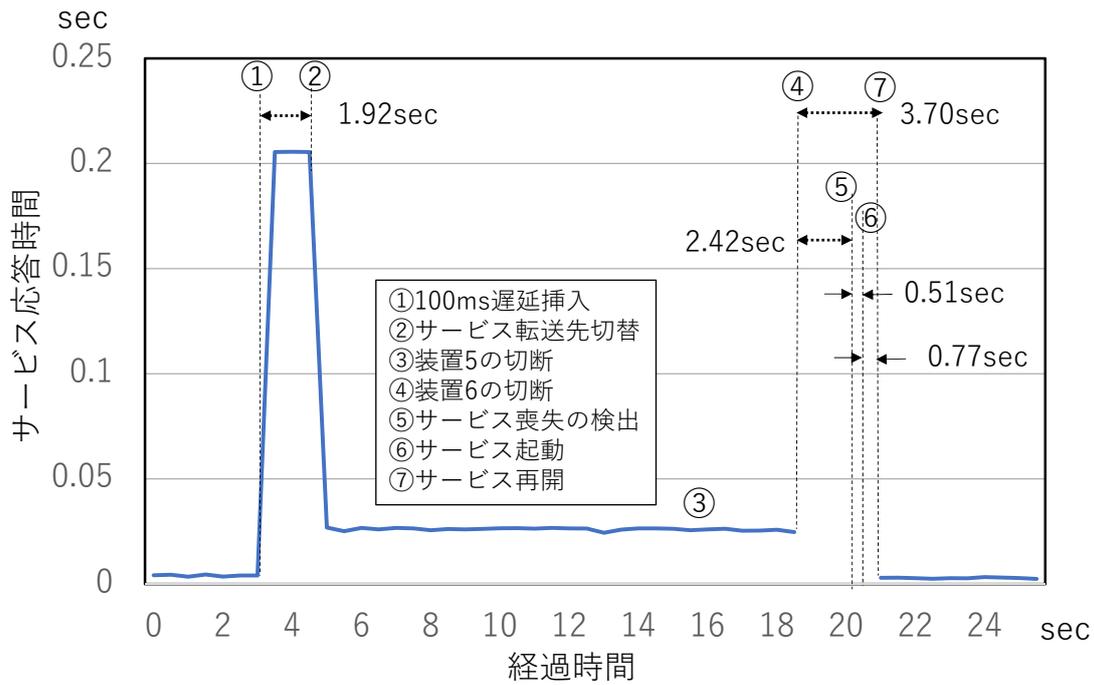


図 22 サービス応答時間の時間変化

ブアプリケーションを動作させた。nginx を用いたウェブサーバコンテナを作成・配布し、ネットワーク内で2つの同一コンテナを動作させる構成とした。機能検証シナリオとしては、図に示すようなリンクの切断によって、ネットワークが分断される場合でも、サービスが再構成されるか確認した。結果を図22に示す。初期状態では、装置1は通信遅延が小さい装置5にリクエストを転送しているため、レスポンス時間は数ミリ秒ほどである。①のタイミングで、装置1・装置3間のリンクに100msの遅延時間が挿入され、装置1から装置5へのレスポンス時間が200ms以上に劣化する。これによって、リンクメトリック値が最小となる装置6へリクエストの転送先が自動更新される(②)。その後、装置3・装置5間のリンクが切断される(③)、④のタイミングで装置4・装置6間のリンクが切断されることで、装置1が接続するネットワーク内にそれまでのサービスが存在しなくなる。1秒以上にわたってリンクセンシングが受信できないと、サービスを構成する装置が切断されたものと判断し、分散DBの同期機能を用いて接続可能な全ての装置に切断を共有する。これを受けて、制御管理機能によって経路やサービスマッピングテーブルの更新が行われる。検証では、サービスが存在しなくなったことを装置1が検出すると、装置1の制御管理機能は装置2に対してサービス構成要素の起動を指示し(⑤)、装置2が受信してサービスを起動させ(⑥)、装置2が装置1へのサービス応答を再開させている(⑦)。

今後はユースケースを絞り込んだ上で、具体的なア

プリケーションを想定し要求機能を定めていくとともに、詳細な設計と機能検証を進めていく予定である。

6 あとがき

レジリエンスは、主に自然災害を相手にした防災減災はもちろんのこと、各種脅威を対象にした安全安心も含む大変広い概念であり、社会的要請である。しかるに公的な研究機関が取り組むにふさわしいテーマであると同時に、いわゆる産官学の連携のみならず、個々人も含むより多くの人々と組織が普段から考え、長期的に取り組んでいくべきテーマでもある。技術研究開発の観点では、各パーツのレジリエンスを研究開発により高めるだけでなく、それらを組み合わせで構成される情報通信ネットワークシステムのレジリエンスを高める必要がある。そして現実世界でその恩恵を受けるためには、標準化やオープン化などによる実用システムへの反映、ネットワークレジリエンスの基準や認証の策定と実施、それに基づく導入補助金施策などファイナンス面を含めて、社会全体が各種手段を講じていく必要もあろう。その一員として我々は基礎的な技術研究を担い、新たな技術を創出し、学術的な成果に加えて、国際標準という形での成果も得られ始めていることを本稿で報告した。6G and Beyond を視野にこれからも研究開発と成果還元に取り組んでいく。

謝辞

本稿に記載にした取組と成果は、本稿筆者のみならず、レジリエント ICT 研究センターを含む NICT と、外部の多くの組織と人々による連携の産物であり、ここに感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 井上真杉, “レジリエント ICT の展望,” 電子情報通信学会総合大会, BK-2-1, March 2023.
- 2 セルジュ・ティスロン著, “レジリエンス: こころの回復とはなにか,” 白水社, 2016.
- 3 稲村哲也他 編, “レジリエンス人類史,” 京都大学学術出版会, 2022.
- 4 Michel Bruneau, et al., “A Framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities,” Earthq. Spectra vol.19, no.4, pp.733–752, 2003.
- 5 James P. G. Sterbenz, et al., “Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines,” Computer Networks, vol.54, issue 8, pp.1245–1265, 2010.
- 6 Andreas Mauthe, et al., “Disaster-resilient communication networks: principles and best practices,” Proc. of 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM), Sept. 2016.
- 7 井上真杉, “レジリエントな世界を目指して,” レジリエント ICT 研究シンポジウム 2022, 2022 年 2 月.
- 8 井上真杉, “10 年の歩みとレジリエント ICT 研究の展望,” レジリエント ICT 研究シンポジウム 2022*, 2022 年 11 月.
- 9 滝沢賢一, “タフ無線環境に適応する無線アクセス技術に関する研究開発,” レジリエント ICT 研究シンポジウム 2022, 2022 年 2 月.
- 10 総務省 “Beyond 5G Promotion Strategy,” 2020 年 6 月.
- 11 淡路祥成, “光ネットワークのレジリエンシー向上に向けて,” レジリエント ICT 研究シンポジウム 2022, 2022 年 2 月.
- 12 大和田泰伯, “レジリエントな分散エッジクラウドの実現に向けてーダイハードネットワークの紹介ー,” レジリエント ICT 研究シンポジウム 2022, 2022 年 2 月.
- 13 ITU-T, “Network 2030 Architecture Framework,” 2020.
- 14 N. W. M. Thet and K. Takizawa, “Low Latency Self-Interference Suppression in In-Band Full-Duplex Relay,” Proc. of IEEE CCNC2024, 2024.
- 15 NICT and Toyota InfoTechnology Center, “Discussion on side control information and NCR behavior,” R1-2301036, 2023.
- 16 N. K. Nguyen and K. Takizawa, “Millimeter-Wave Received Power Prediction from Time-Series Images Using Deep Learning,” Proc. of IEEE ICC2022, 2022.
- 17 N. K. Nguyen and K. Takizawa, “Prediction-based Physical Layer Base Station Switching using Imaging Data,” Proc. of EuCNC/6G summit, 2023.
- 18 廣田悠介, 白岩雅輝, 徐蘇鋼, 淡路祥成, “マルチコアファイバ光ネットワークにおける機械学習を用いた障害予測に関する研究,” 信学技報, vol.123, no.349, pp.34–38, 2024 年 1 月.
- 19 K. Ishii, A. Takefusa, S. Namiki, and T. Kudoh, “Optical network resource management supporting physical layer reconfiguration,” Journal of Lightwave Technology, vol.37, no.21, pp.5442–5454, Nov. 2019.
- 20 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],” Journal of Optical Communications and Networking, vol.16, no.2, pp.A105–A117, Feb. 2024.
- 21 S. Xu, S. Sahoo, N. Yoshikane, S. Ferdousi, M. Shiraiwa, Y. Hirota, T. Tsuritani, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, “A distributed-ledger-based multi-entity cooperation platform for network-cloud recovery,” Proc. 2024 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM2024), Madrid, Spain, p6, May 2024.
- 22 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,” Journal of Optical Communications and

Networking, vol.16, no.5, pp.B45–B59, May 2024.

- 23 S. Sahoo, S. Xu, S. Ferdousi, Y. Hirota, M. Tornatore, Y. Awaji, and B. Mukherjee, “Datacenter-carrier cooperation over optical networks during disaster recovery,” Proc. of OFC2022, San Diego, CA, USA, W2A.23, March 2022.
- 24 H. R. Maturana and F. J. Varela, “Autopoiesis and Cognition: the Realization of the Living,” Boston Studies in the Philosophy and History of Science, D. Reidel Publishing, vol.42, 1980.
- 25 大和田泰伯, バボウ シェック サリユー ンバケ, 佐藤剛至, “自己産出型エッジクラウドシステムのアーキテクチャ及びプラットフォーム機能の検討と試作,” 信学技報, vol.123, no.345, SeMI2023-56, pp.39–44, 2024 年 1 月.



井上 真杉 (いのうえ まさぎ)

ネットワーク研究所
レジリエント ICT 研究センター
研究センター長
博士 (工学)
モバイルネットワーク、無線ネットワーク、
ネットワークアーキテクチャ

【受賞歴】

- 2021 年 前島密賞
- 2021 年 電子情報通信学会フェロー称号
- 2020 年 文部科学大臣表彰科学技術賞、日本 ITU 協会功績賞



滝沢 賢一 (たきざわ けんいち)

ネットワーク研究所
レジリエント ICT 研究センター
サステナブル ICT システム研究室
室長
博士 (工学)

無線通信、通信信号処理

【受賞歴】

- 2022 年 電子情報通信学会論文賞
- 2007 年 電子情報通信学会学術奨励賞



大和田 泰伯 (おおた やすのり)

ネットワーク研究所
レジリエント ICT 研究センター
サステナブル ICT システム研究室
主任研究員
博士 (工学)

モバイルネットワーク、分散システム

【受賞歴】

- 2021 年 前島密賞奨励賞
- 2020 年 文部科学大臣表彰科学技術賞



淡路 祥成 (あわじ よしなり)

レジリエント ICT 研究センター
ロバスト光ネットワーク基盤研究室
室長
博士 (工学)

光ネットワーク

【受賞歴】

- 2020 年 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