

低軌道衛星通信を用いた災害時の通信インフラ強化について

太田 憲治¹⁾

1) 東北大学 電気通信研究所

kenji.ota@riec.tohoku.ac.jp

Strengthening Communication Infrastructure During Disasters Using Low Earth Orbit Satellite Communications

Kenji Ota¹⁾

1) Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University.

概要

本論文では、東日本大震災の経験を踏まえ、東北大学電気通信研究所が災害時にも研究活動を継続できる耐災害性の高い情報通信ネットワークインフラの構築を行った取り組みを報告する。2023年度には、災害時に利用する通信インフラとして、SINET 以外に低軌道衛星通信 (Starlink) を導入し、SINET に依存せず通信を維持し、安否確認や情報収集が可能な基盤を整備した。検証試験の結果、通常時のネットワーク安定性は確認されたものの、特定時間帯や通信障害時の応答遅延が課題として浮上した。今後は、さらなる安定性の向上と障害対策の強化が必要である。

1 はじめに

東北大学電気通信研究所 (以下、本所) には約 500 名の教職員と学生が所属し、活発な研究活動を行っている。東日本大震災が発生した際、本所の情報通信ネットワークは停電と通信事業者の大規模な通信制限により、完全に機能を停止した。特に、震災直後に設置された災害対策本部では、安否確認や情報収集に深刻な影響が出た。この経験を踏まえ、本所では研究活動を継続できる耐災害性の高い情報通信ネットワークインフラの構築を目指し、様々な取り組みを進めてきた。

東日本大震災時、大学の基幹ネットワークである東北大学総合情報ネットワークシステム (TAINS) は、建物やネットワーク機器に致命的な損傷がなく、自家発電設備も備えていたため、SINET への通信は維持されていた。しかし、本所の基幹ネットワークシステムであるやわらかいグローバルネットワークシステム (flexible Global information communication NETWORK system: G-Net) は停電のため、通信を継続することができなかった。

2014年に竣工した電気通信研究所本館 (以下、本館) では、ディーゼル防災設備用発電システムを導入した。本所内のサーバや基幹ネットワーク機器を本館に移設したことで、災害時にも電源供給が可能となった。

2024年6月8日7時30分から6月9日18時までと、2024年9月20日20時から9月23日18時までの2回、合計104時間30分間の計画停電が実施された。この間、発電システムのタンクに900リットルのガソリンを入れて電力を供給した結果、停電終了後も410リットルが残っており、数日間の停電にも対応できることが証明された。

また、2022年度には、上流のスイッチであるTAINSの本所用エッジスイッチも本館に移設した。これにより、大規模な停電が発生してもSINETへの通信が可能となった。2023年度には、SINETやTAINSを利用しない通信回線として、低軌道周回衛星 (StarLink) の通信回線を導入し、その有効性を検証する試験を実施した。低軌道周回衛星は従来の地上回線に依存しないため、大規模災害時でも安定した通信環境を提供できると期待されている。そこで、電気通信研究所災害時緊急情報通信ネットワークシステム (Research institute of electrical communication Disaster Emergency information communication NETWORK system: RDE-NET) を構築した。

本論文では、これらの構築および検証試験の結果について報告する。

2 システム概要

2.1 SFARLINK システムの特徴

STARLINK とは、アメリカの宇宙開発企業 SpaceX 社が開発・運用している低軌道衛星を利用したインターネット通信システムである。[1] 地上約 550km 上空を周回する STARLINK の低軌道衛星 (Low Earth Orbit : LEO 衛星) [2] と地上に設置されたアンテナ、ルータ、電源を含む STARLINK システムを利用して、インターネット接続を実現している。

通信は主にフィーダーリンクとサービスリンクを介して行われる。フィーダーリンク (Ka バンド) は、宇宙から地球への 17.8-18.6GHz および 18.8-19.3GHz、地球から宇宙への 27.5-29.1GHz および 29.5-30.0GHz の周波数帯を使用する。サービスリンク (Ku バンド) は、宇宙から地球への 10.7-12.7GHz、地球から宇宙への 14.0-14.5GHz の周波数帯を利用している。[3]

データの受信は、衛星から送信されるダウンリンクを地上に設置したアンテナが受信し、その中にはユーザーがインターネットを使用するために必要なデータが含まれている。逆に、ユーザーのデバイスからのリクエストやデータは、アンテナが衛星に向けて送信し、インターネット上でのデータ送受信が成立する。これにより、高速かつ大容量の通信が実現されている。

アンテナには、衛星との通信を安定化させるための様々な機能が備わっている。まず、自動的な衛星追尾機能を持ち、最も近く最適な衛星を常に自動で追尾することが可能である。これは内部に搭載されたモーターによってアンテナの角度を自動的に調整し、必要な方向に向ける仕組みである。また、アンテナは IP54 の防塵・防水規格で設計されており、雨やほこりの多い環境や過酷な天候条件にも耐えることができる。さらに、雪や氷が積もった場合には自動で表面を加熱し、積雪による通信障害を防ぐ「デフォグ・デアイス機能」が搭載されている。この機能により、本所が所在する東北地方の寒冷地においても常に安定した接続を維持することが期待できる。

アンテナは専用の電源ケーブルを通じて電力供給を受ける。このケーブルはデータ通信も同時に行い、アンテナとルータを一本のケーブルで接続する。同梱されているケーブルは 50 フィート (15.2m) だが、75 フィート (23m) や 150 フィート (46m) のケーブルも用意されているため、使用

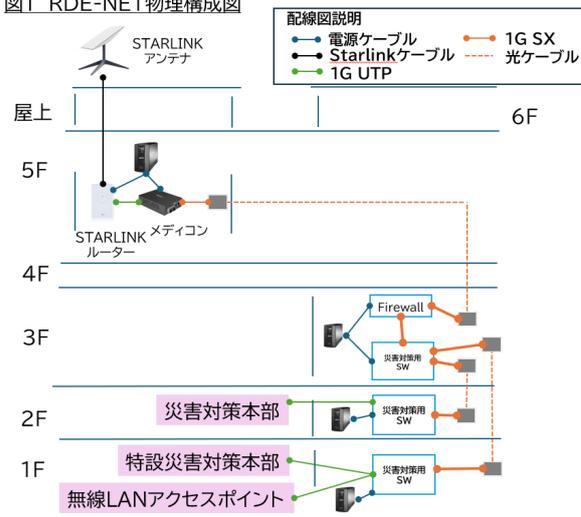
環境や設置方法、設置場所に合わせてケーブルを手配することが可能である。通常運転時の消費電力は 50~100W 程度であり、本所に導入済みのディーゼル防災設備用発電システムでも問題なく利用できる特徴がある。

STARLINK ルータは Wi-Fi 専用のため、他社製ルータや有線 LAN を利用するには、別途「イーサネットアダプター」オプションを手配し、装着する必要がある。本所では、複数の場所で利用するため、Fortinet 社の FortiGate を利用するため、イーサネットアダプターを導入した。

2.2 RDE-NET の概要

RDE-NET システムの物理構成は、図 1 に示した通りである。

図1 RDE-NET物理構成図



LEO 衛星との通信を行うため、本館屋上にアンテナを設置し 5 階 EPS (電源設備室) に STARLINK ルータおよびメディアコンバータ、無停電電源装置を設置している。

災害発生時には、2 階に災害対策本部、1 階に特設災害対策本部を設置する計画である。各階の EPS には災害用フロアスイッチと無停電電源装置を設置し、災害対策本部および避難場所に設置された特設災害対策本部で有線・無線 LAN 通信が利用可能となるよう整備した。また、状況に応じて避難者向けの無線 LAN を提供できるよう、一部の無線 LAN アクセスポイントを災害対策用ネットワークに接続できるように構成した。

論理構成としては、対策本部用、避難者用、管理用のネットワークを Virtual Local Area Network (VLAN) を用いて分割し、データの転送範囲や利用可能なサービス、データ通信帯域を可変的に制限できるように設計した。

3 検証試験

3.1 検証試験用監視システムの構築

各種の検証試験を実施するため、Raspberry Pi 4 Model B 上にオープンソースの監視ソフトウェアである Zabbix を構築した。Zabbix はネットワーク機器やサーバの状態をリアルタイムで監視・記録する機能を有し、本試験ではこれを活用して STARLINK 回線の通信品質を評価した。

長期的なデータ収集およびデータの書き込み・読み込み速度を向上させるため、外付け SSD (サムスン電子製ポータブル SSD T3 1TB) を実装 (図 2) し、起動ディスクおよびデータ保存ディスクとして利用した。これにより、MicroSD カードを用いた場合に比べ、高速な読み書き速度を実現できた。

【性能比較結果】

Team microSDHC の結果

- 書き込み (シーケンシャルアクセス)
10,381 kb/s = 10MB/s | Target:10000=10MB/s
- 書き込み (ランダムアクセス)
114 IOPS(4k) = 0.445MB/s | Target:500=19MB/s
- 読み込み (ランダムアクセス)
663 IOPS(4k) = 2.589MB/s | Target:1500=58MB/s

SSD T3 の結果

- 書き込み (シーケンシャルアクセス)
318,135 kb/s = 318MB/s | Target:10000=10MB/s
- 書き込み (ランダムアクセス)
20,029IOPS(4k)=78.238MB/s | Target:500=1.9MB/s
- 読み込み (ランダムアクセス)
19,162IOPS(4k)=74.851MB/s | Target:1500=5.8MB/s

これらの結果から、SSD T3 を使用することで、MicroSD カードと比較して書き込み・読み込み速度が大幅に向上していることが確認できる。特にランダムアクセス性能の向上により、監視データの記録へのアクセスが効率的に行えるようになった。

検証方法としては、他のキャンパスに設置されているサーバに対して定期的に応答速度やパケットロスの測定を実施し、長期間にわたる通信の安定性と信頼性を評価した。



図 2 検証試験用監視システム

3.2 検証試験の結果

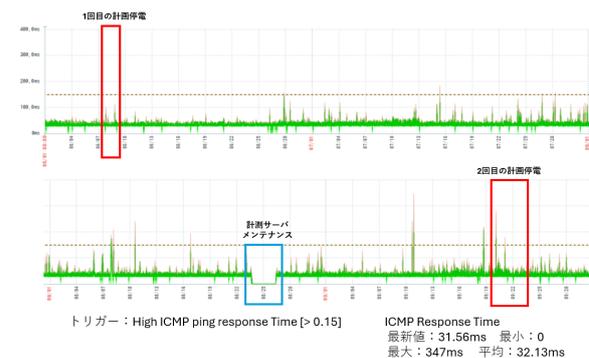


図 3 計測サーバへの PING 実行結果

図 3 は、2024 年 6 月 1 日 00:00 から 9 月 30 日 23:59 までの 4 カ月間における ICMP (Internet Control Message Protocol) 応答時間の変動を時系列で示したものである。この図では、特定の時間帯における応答遅延の異常や、赤枠の計画停電時の通信継続に関する証明、青枠の計測サーバ定例メンテナンスの影響によるデータ欠落など可視化されている。

統計データによると、ICMP 応答時間の最大値は 347ms、平均応答時間は 32.13ms であり、通常の運用中は比較的良好なパフォーマンスが維持されていることが確認できる。しかし、通信障害が発生した時間帯には、応答時間が著しく増大している。

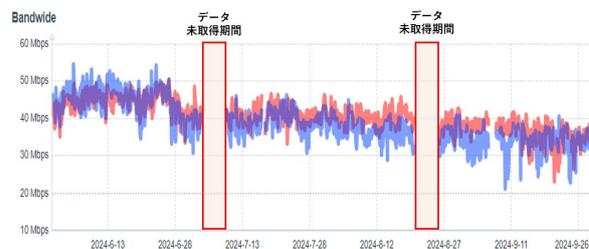


図 4 スピードテスト実行結果

図 4 では、2024 年 6 月から 9 月にかけてのインターネット接続におけるダウンロード帯域幅 (赤線) およびアップロード帯域幅 (青線) の時系列変動を示している。全体として、両帯域幅は期間を通じて一定の変動を見せているが、特に 2024 年 9 月は変動幅が大きいことが確認される。ダウンロード帯域幅は 20Mbps 台に低下する局面も散見され、時期に応じて大きなばらつきが生じている。

また、6 月から 8 月は、ダウンロードおよびアップロード帯域幅が安定する傾向が見られ、両者の差が縮小する様子が確認できる。ダウンロード帯

域幅は概ね 30~50Mbps の範囲で推移している, 特定の期間では差が顕著に現れることがある. これらの結果は, ネットワークの利用状況や負荷の変動, あるいは回線の管理に関する要因が, 時期によって帯域幅に影響を与える可能性を示唆している.

4 おわりに

本研究では, 東日本大震災の教訓を踏まえ, 東北大学電気通信研究所における耐災害性の高い情報通信ネットワークインフラの構築と, その検証試験の結果について報告した. ディーゼル防災設備用発電システムの導入や, 基幹ネットワーク機器の本館への移設, さらには低軌道周回衛星 (StarLink 社) の通信回線を利用した RDE-NET の構築など, 多角的なアプローチを実施した.

2024 年 6 月から 9 月にかけて行ったネットワークパフォーマンスの詳細な分析では, 通常時におけるネットワークの安定性が確認された一方, 特定の時間帯や通信障害時には応答遅延が増大することが明らかになった. また, スピードテストの結果から, 帯域幅が時期によって大きく変動し, ネットワークの利用状況や負荷がパフォーマンスに影響を与えている可能性が示唆された.

計画停電中の発電システムの運用結果では, 900 リットルの燃料で 104 時間 30 分間の電力供給が可能であり, 停電終了後も 410 リットルが残存していたことから, 数日間の停電にも対応できることが実証された. さらに, TAINS の本所用エッジスイッチを本館に移設したことで, 大学全体の停電時にも SINET への通信が維持可能となった. 低軌道周回衛星を利用した通信回線の導入により, 地上回線に依存しない安定した通信手段も確保した.

以上の結果から, 構築した情報通信ネットワークインフラは災害時にも有効に機能することが示された. 特に, 停電や通信インフラの損傷といったリスクに対して高い耐性を持ち, 災害対策本部での安否確認や情報収集に貢献できると考えられる. しかし, ネットワークパフォーマンスが運用状況や時期により変動することから, さらなる安定性の向上や通信障害時の対策が課題として残る.

今後は, 定期的なモニタリングと適切なメンテナンスを継続し, 通信障害時の応答遅延を軽減するための対策や帯域幅の最適化に向けた取り組みを強化する必要がある. これにより, 災害時にも信頼性の高い情報通信ネットワーク環境を維持し, 研究活動の継続と安全確保に寄与できると期待される.

参考文献

- [1] SpaceX の公式ウェブサイト, <https://www.spacex.com/mission/>
- [2] スターリンクアカデミー, Low Earth Orbit (LEO), <https://starlink.academy/glossary/low-earth-orbit-leo/>, 株式会社クラウンクラウン, 2023 年
- [3] 小型衛星コンステレーションによる衛星通信システム (Ku 帯非静止衛星通信システム) の検討状況について, https://www.soumu.go.jp/main_content/000691584.pdf, KDDI, 2020 年.