

更なる耐災害性及び耐障害性の向上を目的とした

信頼性の高い画像系ネットワークの整備

阪神高速道路(株)管理本部神戸管理・保全部システム工事課 相田 晋吾
阪神高速道路(株)管理本部管理企画部システム保全課 川井 諒一
阪神高速道路(株)管理本部神戸管理・保全部システム工事課 河野 弘明

要 旨

阪神高速道路では、道路附属設備の通信を行うためのネットワークを整備しているが、交通流監視カメラの増設等に伴い、特に画像データの伝送速度が大幅に増加しているため、新たに「画像系ネットワーク」を構築した。本論文では、今回構築した「画像系ネットワーク」の概要・特長について報告するとともに、従来のネットワークと比較して向上した耐災害性及び耐障害性について述べる。

キーワード: 画像系ネットワーク, 冗長, メッシュ, 耐災害性, 耐障害性

はじめに

阪神高速道路では、安全・安心・快適な道路サービスを実現するため、高速道路上の電気通信設備にかかるデータの伝送に必要な通信ネットワークを整備している。通信ネットワークが機能不全に陥ると、お客さまサービスの低下を含め、社会インフラとしての高速道路の責務を果たすことができなくなる。

従来より構築していたネットワークにおいては、各電気通信設備にかかる様々な種類のデータを同一のネットワークで伝送してきた。しかし、昨今では、従来よりも高画質な交通流監視カメラ（フルハイビジョンカメラ）の増設や、他機関との画像共有の実施に伴い、ネットワークに求められる伝送速度が増加しており、既存のネットワークのみでは伝送速度の増加に対応できなくなることが想定されていたため、ネッ

トワークの増強が課題となっていた。そこで、既存のネットワークから画像伝送の用途を分離すると共に、既存のネットワークにはない接続形態を採用した新たな「画像系ネットワーク」を整備した。また、他道路事業者管理道路にも通信経路を構築することで、耐災害性及び耐障害性が既存のネットワークよりも向上した。なお、既存のネットワークは、画像以外のデータを伝送するための「データ系ネットワーク」として運用を継続する。本論文では、画像系ネットワークの概要・特長を述べるとともに、耐災害性及び耐障害性を向上させるために実施した取り組みについて報告する。

1. 画像系ネットワークの概要・特長

1-1 画像系ネットワークとデータ系ネットワークの分離について

阪神高速道路では、安全・安心・快適な道路

サービスの実現を目的として、様々な道路付属設備を設置・運用している。各設備間で送受信されるデータの中には、機密性の高いデータも含まれるため、従来より阪神高速道路独自のネットワークを構築していた。しかしながら、従来よりも高画質な交通流監視カメラの増設等に伴い、ネットワークに求められる伝送速度の増加が想定されていたため、既存のネットワークである「データ系ネットワーク」の拡張ではなく、新たに別のネットワークである「画像系ネットワーク」を整備し、電気通信設備の増加に対応することとした。画像系ネットワークをデータ系ネットワークとは別に整備することの利点としては、次の点が挙げられる。

1 点目は、障害発生時やネットワーク装置の保守作業時における影響範囲が縮小するという点である。いずれかのネットワークでケーブル破断等による障害が発生した場合も、他方のネットワークの通信には影響が及ばない。また、ネットワーク装置の配下に接続される設備数が減少するため、ネットワーク装置の障害・更新作業等により機器停止が発生した場合の影響範囲が縮小する。

2 点目は、データ系ネットワーク上の情報漏洩のリスク低減につながるという点である。前述のとおり、画像データは他機関との共有を実施しているが、画像データをデータ系ネットワークから分離することにより、例えば ETC 設備に関する機密性の高いデータへの外部からのアクセスを物理的に遮断することができるため、データ系ネットワーク上の情報漏洩のリスク低減に寄与している。

次に、それぞれのネットワークで伝送するデータの種別、通信方式について述べる。データ系ネットワークでは、ETC データ等の高い機密性が求められるデータを伝送しているため、送信元・受信先が 1:1 で通信する方式であるユニキャスト通信を主として利用している。一方で、新たに整備した画像系ネットワークでは、画像データを効率良く複数のユーザーに共有す

る必要があるため、1 つの送信元から特定の複数の受信先に対して通信する方式であるマルチキャスト通信を主として利用している。

1-2 ネットワークのトポロジーの種類

ネットワークは、主にネットワーク装置とそれらを接続する通信ケーブルで構成されている。図-1 に基本的なネットワーク構成のイメージを示す。

ネットワーク構成にはいくつかの階層があり、ここでは 2 階層の場合で説明する。上位階層のネットワーク装置は、各電気通信設備を管理する中央装置（サーバ）に接続されている。また、下位階層のネットワーク装置は、高速道路に設置されている各電気通信設備、例えば道路情報板や交通流監視カメラ、非常電話等が接続されている。実際には、中央装置と高速道路に設置されている各電気通信設備は、複数の階層のネットワーク装置を経由してデータを送受信しており、このネットワークの接続形態をトポロジーという¹⁾。代表的なものを次に示す。

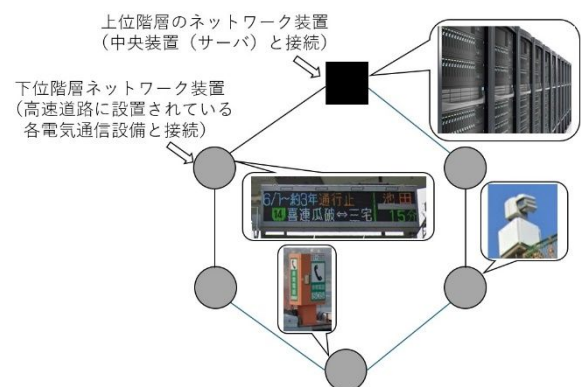


図-1 ネットワーク構成のイメージ

(1) リング型トポロジー

リング型の接続形態は図-2 に示すとおりである。ネットワーク装置がリング状に配置されており、2 方路の冗長構成となっている。ケーブル破断等により 1 方路で通信不可となる箇所が発生した場合でも、図-2 に示すとおり、最上部に記載している上位階層のネットワーク装置とそれ以外の下位階層のネットワーク装置が

通信するための迂回通信経路が確保されている。

一方で、複数箇所通信不可となる箇所が発生すると、図-3 のように、上位階層のネットワーク装置とそれ以外の下位階層のネットワーク装置が通信するための迂回通信経路が確保されないケースがある。

(2) マルチリング型トポロジー

マルチリング型の接続形態は図-4 に示すとおりであり、複数のリングを組み合わせた形態である。図-4 は2つのリングによる構成の場合を示しており、3 方路が 2 箇所、その他の箇所は2方路となる。

マルチリング型トポロジーでは、図-4 に示すとおり、複数箇所ケーブル破断により通信不可となった場合においても、上位階層のネットワーク装置とそれ以外の下位階層のネットワーク装置が通信するための迂回通信経路が確保できるケースがある。このため、孤立するネットワーク装置が生じる確率が単一のリング型と比較すると低減する。

(3) メッシュ型トポロジー

メッシュ型の接続形態は図-5 に示すとおりであり、図-5 の形態の場合にはすべてのネットワーク装置が3方路に対して通信可能である。

メッシュ型トポロジーでは、図-5 に示すとおり、複数箇所ケーブル破断が発生した場合に、上位階層のネットワーク装置とそれ以外の下位階層のネットワーク装置が通信するための迂回通信経路の選択枝数がリング型やマルチリング型と比較すると増加する傾向にある。

1-3 画像系ネットワークの構成

画像系ネットワークは、前節で述べたネットワークとしての信頼性が高いメッシュ型トポロジーを採用し、2 階層のメッシュ構成とした。阪神高速道路が定める事業継続計画（BCP）においては「災害時でも通信可能な通信設備、通信手段を複数配備する」と定められている。画像系ネットワークは、一部の拠点被災した場合でも、メッシュ構成のため迂回通信経路を柔

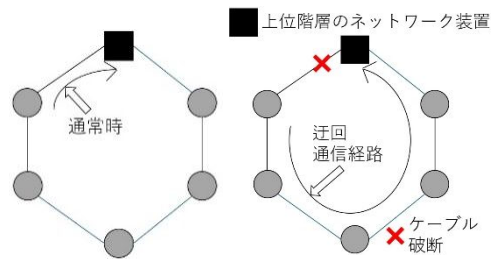


図-2 リング型トポロジー

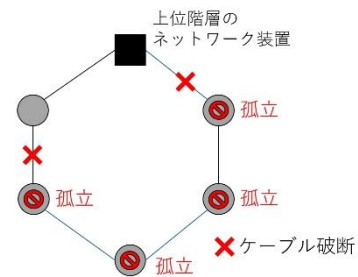


図-3 複数箇所ケーブル破断時の孤立ネットワーク装置

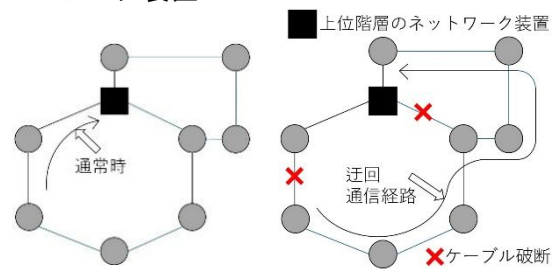


図-4 マルチリング型トポロジー

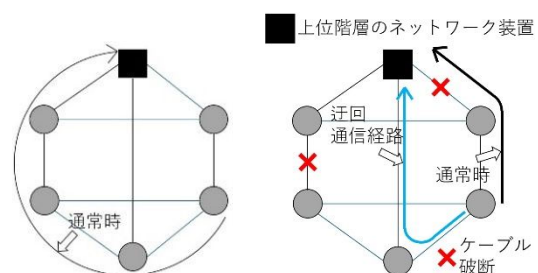


図-5 メッシュ型トポロジー

軟に選択可能であり、事業継続計画に即した構成となっている。今回構築した画像系ネットワークの概念図を図-6 に示す。図-6 における地区間 L3 スイッチ、路線 L3 スイッチ、路側 L2 スイッチは、それぞれネットワーク装置の名称を表している。

1 階層目は、最上位の階層で地区間ネットワークといい、本社、朝潮橋管理所等の各拠点に設置されている地区間 L3 スイッチによるメッ

メッシュ構成となっている。2階層目は、1階層目に次ぐ階層で路線ネットワークといい、各拠点の地区間L3スイッチと、路線L3スイッチによるメッシュ構成となっている。3階層目は、2階層目に次ぐ階層で路側ネットワークといい、路線L3スイッチと路側L2スイッチによるリング構成となっている。路線L3スイッチや路側L2スイッチには、高速道路上の電気通信設備が接続されている。このような3階層の構造で

実際に整備した画像系ネットワークの構成を図-7に示す。

図-7（左）の画像系ネットワークの全体構成において、地区間ネットワークは本社、布施畑受電所、朝潮橋管理所、京橋管理所、四ツ橋管理所、蓮宮受電所の6拠点の地区間L3スイッチによるメッシュ構成となっている（図-7破線内部）。路線ネットワークは本社、布施畑受電所を除く各拠点の地区間L3スイッチ及び各通信塔等に設置された路線L3スイッチによるメッシュ構成となっており、凡例青丸は、路線L3スイッチが収容される通信塔等を示す。路側ネットワークは、路線L3スイッチと路側L2スイッチによるリング構成となっている（凡例灰色部）。路側ネットワークの一例として、図-7（左）における船町通信塔、豊中南通信塔間の構成を図-7（右）に示す。路側L2スイッチに接続される交通流監視カメラの端末からの画像データは、路側L2スイッチを經由した後、路線ネットワークの路線L3スイッチで上位階層のネットワークに伝送される。

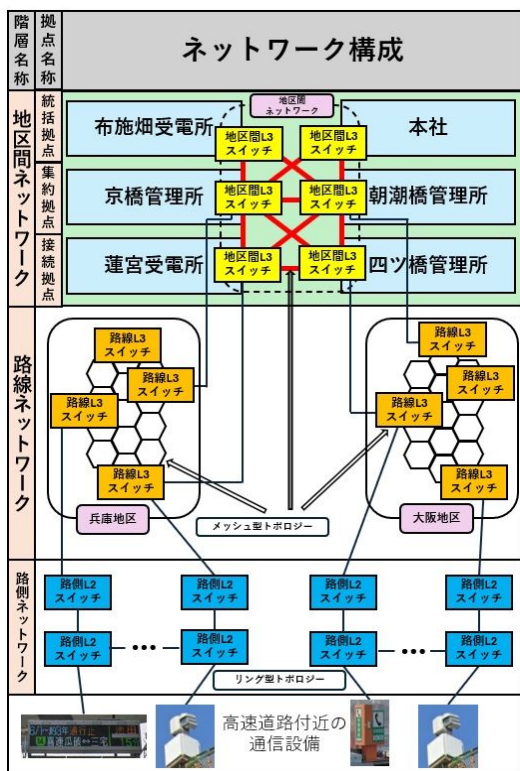


図-6 画像系ネットワークの概念図

1-4 画像系ネットワークの伝送速度

ネットワークの設計検討において、伝送速度の試算は不可欠である。伝送速度とは、単位時間あたりに実際に送信できる情報量を示した値であり、bps（1秒当たりのビット数）単位で

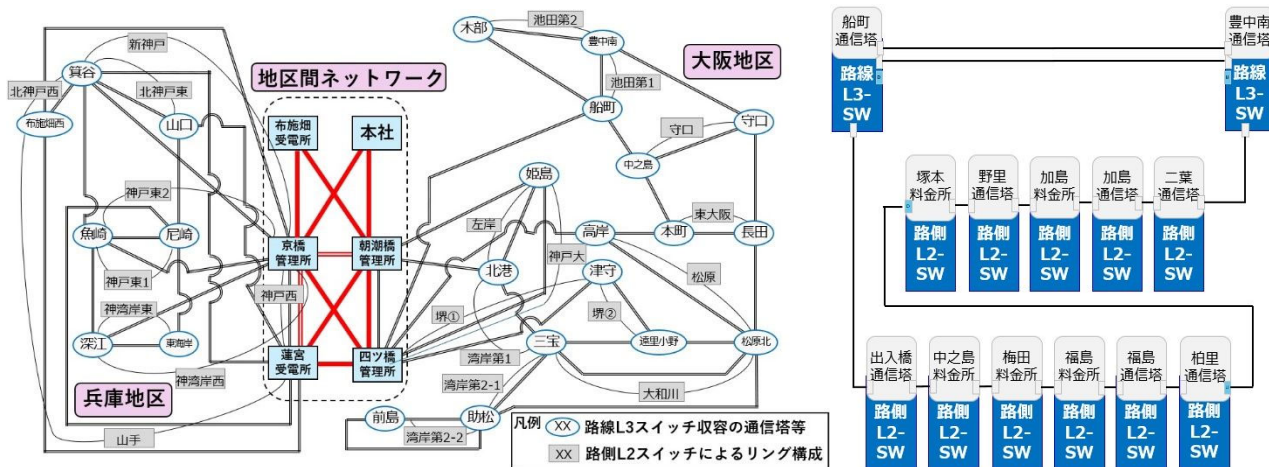


図-7 画像系ネットワークの全体構成図（左）及び路側ネットワークの構成図（右）

表される。画像系ネットワークに求められる伝送速度が確保できない場合、交通流監視カメラの画像データ等が欠損する可能性があるため、ネットワーク装置間に必要となる伝送速度を検討した。

通常時における接続端末から上位階層のネットワークへの通信経路のイメージを図-8に示す。ここでは、地区間 L3 スイッチの配下に 4 つの路線 L3 スイッチが接続されている例を示す。

なお、地区間 L3 スイッチ間、地区間 L3 スイッチ～路線 L3 スイッチ間及び路線 L3 スイッチ間は、複数の物理回線を束ねて 1 つの論理リンクとして扱うことで、高速通信及び冗長性を実現するリンクアグリゲーションを採用しており、より信頼性の高いネットワーク構成としている。

次に、地区間 L3 スイッチ間及び地区間 L3 スイッチ～路線 L3 スイッチ間の伝送速度について、画像系ネットワークの接続対象となる設備を将来増設数も考慮して試算した結果を表-1に示す。

なお、地区間 L3 スイッチ間の伝送速度値は、大阪地区・兵庫地区共に、地区間 L3 スイッチ～路線 L3 スイッチ間の 4 方路分の伝送速度値を合計した値とした。表-1 に示す試算結果及び製作可能な装置の仕様を踏まえ、地区間 L3 スイッチ間は 40 Gbps、地区間 L3 スイッチ～路線 L3 スイッチ間は 10 Gbps の伝送速度をもつネットワークとした。

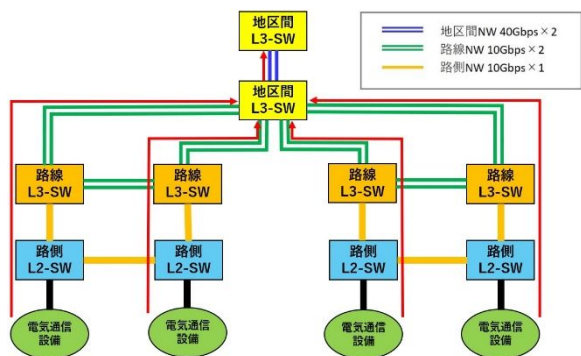


図-8 通常時の通信経路と伝送速度

2. 耐災害性及び耐障害性向上の取り組み

2-1 画像系ネットワークの耐災害性及び耐障害性の向上について

画像系ネットワークでは、前述のとおりメッシュ構成を採用しており、地震による桁ずれ等によりケーブルが破断した場合や障害により一部のネットワーク装置が正常に動作しなくなった場合でも、各電気通信設備から上位階層のネットワーク装置への迂回通信経路が確保されている。

一例として、路線 L3 スイッチで障害が発生した場合の迂回通信経路を図-9に示す。路線ネットワークのメッシュ構成を利用した朱書き線で示す経路により、迂回通信経路が確保されていることを示す。この場合、正常に動作している路線 L3 スイッチと地区間 L3 スイッチ間の経路は、障害が発生した経路も含めた伝送速度が必要となるが、画像系ネットワークにおける各ネットワーク装置は、上記のような障害発生時の伝送速度の増加にも耐えうる仕様とした。

表-1 各ネットワーク装置間の伝送速度の試算結果

	伝送速度 (大阪地区)	伝送速度 (兵庫地区)
地区間L3スイッチ間 (40Gbps)	16.365Gbps	9.480Gbps
地区間L3スイッチ～路線 L3スイッチ間 (10Gbps)	4.091Gbps	2.370Gbps

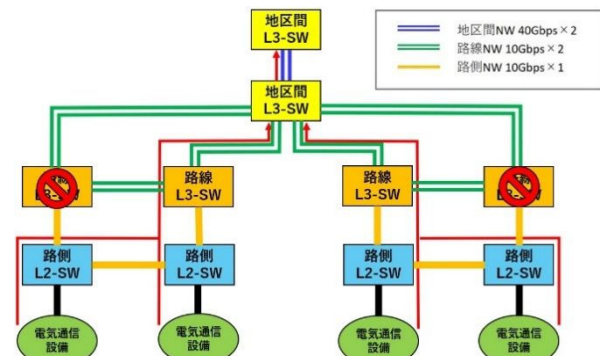


図-9 障害時の迂回通信経路と伝送速度

2-2 路線末端部のネットワークの脆弱性

1. において、画像系ネットワークはメッシュ構成を含むネットワークであることを述べた。しかし、路線末端部においては、阪神高速道路の路線のみでは上位階層のネットワークへの通信経路が1経路しかない場合があり、その経路がケーブル破断等により通信断となった場合の迂回通信経路を構築できないという課題があった。例えば、図-10 に示す4号湾岸線の路線末端部でケーブル破断が発生した場合は、前島通信塔のネットワーク装置は、阪神高速道路の路線のみでは他のネットワーク装置との通信が不可となる。

このようなケースは1号環状線から放射状に伸びる各路線の末端部や、5号湾岸線等の末端部においても生じうる。

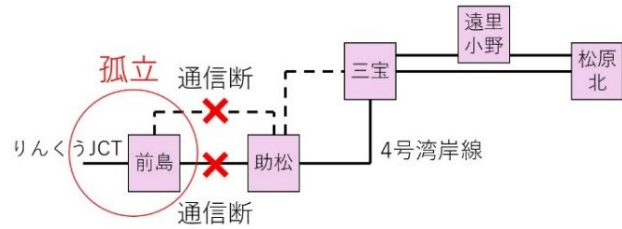


図-10 災害等での通信断による孤立ネットワーク装置の発生例

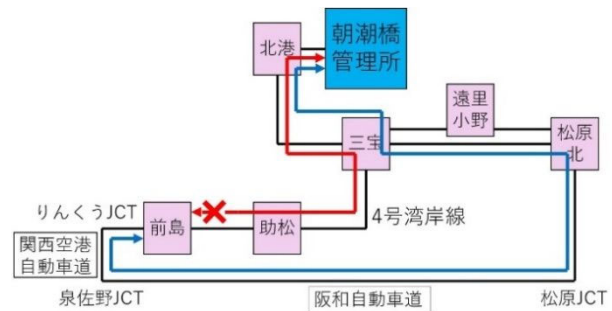


図-11 阪和自動車道迂回による冗長構成

2-3 画像系ネットワークにおける他道路事業者管理道路を利用した迂回通信経路の構築例

今回整備した画像系ネットワークでは、前節で述べたような路線末端部におけるネットワーク装置の孤立という事象を可能な限り減らすために、他道路事業者管理道路を利用した迂回通信経路を構築した。本節では、4号湾岸線の路線末端部について、通信経路の冗長化のために構築した、西日本高速道路株式会社管理の阪和自動車道等を経由した迂回通信経路の構築例について詳述する。

図-11 は、4号湾岸線の路線末端部においてケーブル破断が発生した場合の迂回通信経路を示している。なお、凡例桃色部は、路線 L3 スイッチが収容される通信塔等を示す。

朝潮橋管理所と前島通信塔間の通信経路は、阪神高速道路の路線のみでネットワークを形成した場合は、4号湾岸線経由の経路のみとなる。同一区間において、複数の通信ケーブルが布設されている区間もあるため、いずれかの通信ケーブルが使用可能な状態であれば通信は継続可能な場合もあるが、災害により桁ずれ等が発生した場合は、同一区間の通信ケーブルはすべて

破断してしまうことが想定される。そこで、阪神高速道路の終点であるりんくう JCT と松原 JCT の間は、西日本高速道路株式会社管理の関西空港自動車道及び阪和自動車道を経由する経路で通信ケーブルの光芯線を借用し、4号湾岸線の路線末端部の経路が破断した場合においても前島通信塔～朝潮橋管理所の通信が可能となるような構成とした。

2-4 ネットワークの監視機能に求められる要件

ネットワークの耐障害性向上のためには、ネットワークの状態を常時監視することにより障害発生を速やかに検知すること、また、障害の予兆を検知し、障害が発生する前に早期に対応することが重要である。本節では、ネットワークの安定稼働のために必要とされるネットワーク監視機能の要件について述べる。

まずは、ネットワーク装置の状態を常に監視できることが必要である。ネットワーク装置の障害が検知されれば、速やかな復旧対応が必要となるためである。

次に、ネットワークのリンク状態や伝送速度

等の情報も常に監視できるようにしておく必要がある。阪神高速道路では、通信ネットワークを設計する際に必要な要件を整理した「ネットワーク設計指針」を定めている。この中でネットワークの監視機能について「伝送速度の統計管理機能及び伝送速度の変化を速やかに検知し通知する機能を有すること」、「グラフ等の画面表示による伝送速度の監視が可能であること」等を定めており、これらの要件を満足する必要がある。加えて、ネットワークのあらゆる情報を視覚的かつ直感的に分かりやすく表示できる監視卓を整備することも重要である。前述した機能を把握しやすいユーザーインターフェースにしておくことで障害箇所の特定が容易になり、より迅速な復旧対応が可能となる。

また、前述のとおり、画像系ネットワークはメッシュ構成を組み合わせて構築しており、各ネットワーク装置間の通信経路が複数パターン考えられる。そのような条件下でも、障害が発生した際に原因箇所を特定しやすくするための監視機能を具備する必要がある。

2-5 画像系ネットワークに具備した監視機能

画像系ネットワークでは、図-12 に示すような監視画面により、各ネットワーク装置の状態監視が可能となっている。

メッシュ構成で配置されたネットワーク装置が正常・軽故障・重故障のいずれの状態にあるかが監視画面上で視覚的に把握できるようになっている。また、路側 L2 スイッチで構成されたリング構成の部分においても、図-13 に示す

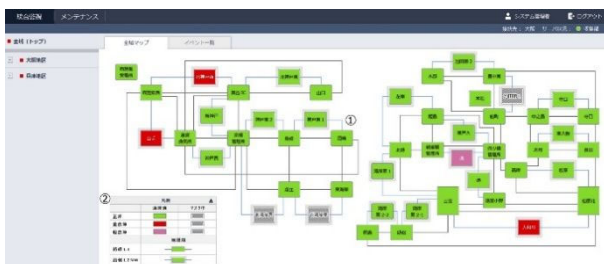


図-12 画像系ネットワークにおけるネットワーク装置の状態監視画面

ような画面で、各通信塔・各料金所ごとの路側 L2 スイッチの状態監視も可能となっている。

次に、図-14 のように、任意の期間・任意のネットワーク装置毎の伝送速度の推移を出力できる機能を具備した。ここでは、2025 年 10 月の 1 ヶ月間において、朝潮橋管理所の地区間 L3 スイッチが京橋管理所の地区間 L3 スイッチから受信したデータの伝送速度、朝潮橋管理所の地区間 L3 スイッチが京橋管理所の地区間 L3 スイッチに対して送信したデータの伝送速度を示す。

加えて、冗長化が図られた画像系ネットワークでは、ケーブル破断等による障害が発生した場合に迂回通信経路の伝送速度の値が上昇することが想定される。それに伴う伝送速度の逼迫を防止するため、安定稼働のために設定している伝送速度の閾値を超過した際にイベント通知する機能を具備している。本機能により、障害を未然に防ぐ可能性が高まる他、万が一障害が発生したとしても迅速な処置を可能にしている。



図-13 路側 L2 スイッチの状態監視画面

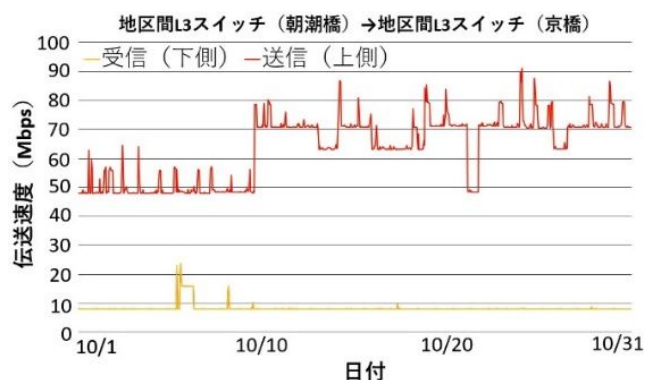


図-14 ネットワーク装置の伝送速度の推移

3. まとめ

交通流監視カメラの増設等に伴い、ネットワークに求められる伝送速度は年々増大している。本論文では、増大するネットワーク需要に対応するために、従来のネットワークから分離して整備した画像系ネットワークの概要・特長について述べるとともに、耐災害性及び耐障害性を従来のネットワークよりも向上させるために実施した取り組みについて報告した。

最大の特長は、2階層のメッシュ構成を採用するとともに、他道路事業者管理道路での迂回通信経路を構築したことにより、ケーブル破断時やネットワーク装置の障害時の迂回通信経路の選択肢が増加し、耐災害性及び耐障害性が向上したことである。

今回の画像系ネットワークの整備は、新たな思想や技術が日々開発されている通信技術において、ますます災害や障害に強い阪神高速道路を実現するための一助となれたと考えている。また、現在、画像系ネットワークの構築で得られた知見を活かした次期データ系ネットワークを構築する工事を実施しており、阪神高速道路の通信ネットワークの更なる強靱化を目指している。

謝辞：本論文の執筆にあたり、ご協力を賜りました関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) マスタリング TCP/IP 入門編 (第6版), 井上直也, 村山公保, 竹下隆史, 荒井透, 荻田幸雄, 技術評論社, 2019.

DEVELOPMENT OF AN IMAGE-TRANSMISSION COMMUNICATION NETWORK FOR ENHANCED DISASTER RESILIENCE AND FAULT TOLERANCE

Shingo AIDA, Ryoichi KAWAI and Hiroaki KONO

Hanshin Expressway Co., Ltd. has been operating a communication network which contains various kinds of roadside telecommunications equipment. With the recent increase in the number of traffic-monitoring cameras used, however, the volume of image data to be transmitted has dramatically increased. As an upgrade to meet the situation, an image-transmission communication network has been developed. This paper reports the outline and features of the image-transmission network and describes how its disaster resilience and fault tolerance have been enhanced relative to the conventional network.

相田 晋吾



阪神高速道路株式会社
管理本部 神戸管理・保全部
システム工事課
Shingo AIDA

川井 諒一



阪神高速道路株式会社
管理本部 管理企画部
システム保全課
Ryoichi KAWAI

河野 弘明



阪神高速道路株式会社
管理本部 神戸管理・保全部
システム工事課
Hiroaki KONO