

車上主体列車制御システムにおける高信頼なネットワーク構成検討

○松原康博 棟田恭弘 大木啓司

[電] 森 崇 [電] 延原 隆良 (西日本旅客鉄道株式会社)

A study on network of high reliability
for the on-board oriented train control system (JRTC-W)○Yasuhiro Matsubara, Yasuhiro Muneda, Hiroshi Oki,
Takashi Mori, Takayoshi Nobuhara (West Japan Railway Company)

Abstract

Recently, railway operators focus on various Communication Based Train Control Systems. And it is very important to clear up the Point of Interface to keep the interoperability between system components. To realize this, we use the Ethernet and IP network for backbone to clarify the interface points.

Therefore, in this paper, we consider the redundancy which is most suitable for this network from the viewpoint of physical and logic constitution and study the network that work stably at the time of the failure.

キーワード：安全性の向上、無線式列車制御、IP ネットワーク、最適なネットワーク、安定性の向上

Key Words :Improvement of safety, simplification of equipment, Communication Based Train Control System, IP network, Optimized Network、Improvement of stability

1. はじめに

近年、移動体通信やコンピュータなどの情報通信技術の発展は目覚ましいものがある。この情報通信技術を鉄道に取り入れ、保安度の向上と地上設備のシンプル化を目指し、車上主体で位置検知や速度制御を行い、地上と車上は常時無線で交信を行う「無線式列車制御システム」の開発を行うこととした。このような無線による列車制御システムは、既にJR東日本において「ATACS」として開発が進んでいるため、当社はJR東日本の技術協力を頂きつつ今回の開発を進めている。

今回開発している「無線式列車制御システム」は、JRTC (Japan Radio Train Communication) として、JIS E 3801-1 に一般要求事項及び機能要求事項が定められている。当社はこのJISに沿って開発を行っており、IPネットワークを用いた際のJISの一般要求事項に定められた相互運用性および互換性を実現するための検討を行っている。本論文では、当システムのような保安システムにIPネットワークを適用する場合に、どのようなことが要件となるかについて考察する。

課題としては、IPネットワークは非同期システムであるため、定時間内の応答が保証されず、システムの挙動が不安定になることである(本システムでは約3秒以上の遅延が発生すると列車を停止制御してしまう)。そこでネットワーク挙動の把握の方法およびこのようなシステムに適用する際のネットワークの特性について検討しているところ

である。まだ、検討中の事柄もあるがこれらについて本論文で報告したい。

2. 無線式列車制御システムの概要

2.1 システムの特徴

- ①車上と地上は常時無線により相互に交信を行い、列車制御を行う。
- ②車上にはあらかじめ走行する線路の曲線、踏切等の位置がデータベース(以下、車上DB)として登録されている。
- ③列車は速度発電機及び地上子から自列車の走行位置を認識している。

2.2 システムの機能概要

本システムの主な機能概要を、図1に示す。

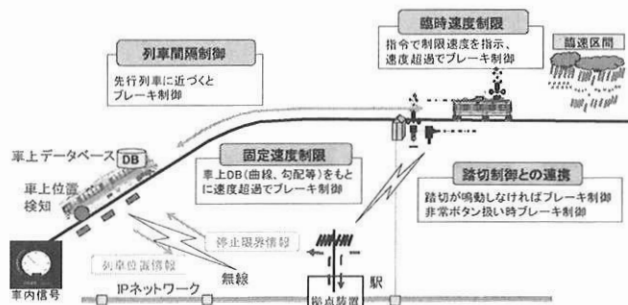


図1 無線式列車制御システムの概要

3. 本システムにおけるIPネットワークの安全基準

IPネットワークを安全に関わる本システムに適用するには安全基準に従う必要がある。そこで、

Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Part1 : Safety-related communication in closed transmission systems (IEC62280-1)の要求事項に沿って本システムの設計を進めた。

3.1 IEC62280-1 の前提条件 IEC62280-1 は、以下の 3 つの前提条件を満たすシステムに適用することができる。
Pr. 1 (この規格においては) 伝送システムは閉じられていること

Pr. 2 安全に関わる場合においても、関わらない場合においても伝送システムにつながる数は把握されており固定であること。安全に関連するシステムの安全性はこの（固定数の）パラメータによること。最大数の装置が通信を一緒に行うことが認められ、Pr. 3にある安全要求規格に合致しなければならないこと。

Pr. 3 伝送装置の物理的特徴（例えば伝送方式、最悪状態での環境など）は不変であること。これはライフサイクルを通して保たれること。もし大きく変わった場合はすべての安全の対象を見直すこと。

本システムでは、上記を満たしつつ安定に稼動するネットワークについて検討する。

4. ネットワーク構成について

対象とするシステムは、図2に示すように拠点装置～拠点装置間ネットワーク(拠点間WAN：IPネットワーク)および拠点装置～現場装置～無線基地局～車上無線局～車上制御装置間の通信を検討範囲とする。データ通信の詳細については割愛するが、拠点間WANと拠点装置から車上制御装置(各装置は非同期かつ個別の周期でデータを送信)までのデータの伝達を解析し、このシステムの振る舞いを明らかにすることとする。

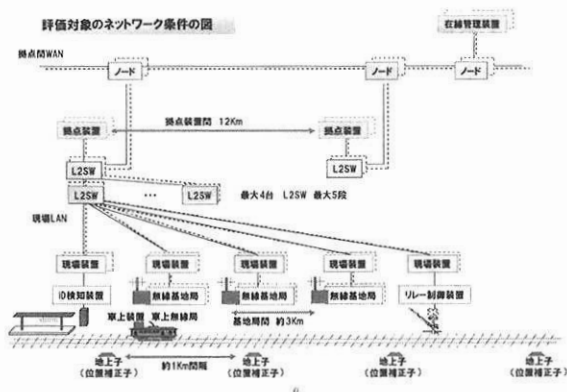


図2 車上主体列車制御システムのネットワーク構成

5. IPネットワーク適用時の課題と対策

先に述べたように、車上主体列車制御システムのような保安システムにIPネットワークを適用する際に、一番問

題となるのはリアルタイム性の確保である。リアルタイム性とはシステムが許容できる範囲の時間の中で、確実にその処理が終了するということである。

従来このような制約がある場合、同期ネットワークシステムを用いることにより、リアルタイム性を確保してきた。(もしくは運行管理システムのように安全に関わるシステムでない場合には、十分高速なネットワークを使用することにより、そのリアルタイム性を確保し安定動作を図った)。ところが、今回適用を試みようとしているIPネットワークは、非同期システムである。加えて車上主体列車制御システムの各機器は非同期に動作する。

このような環境の中で、リアルタイム性を確保することは、安定移動の観点から極めて重要である（安全性については、応答が遅れた場合、停止制御するため問題が無い）。

それでは、リアルタイム性を確保するためにはどうすればよいのか。困難ではあるが、振る舞いを解析すればよい。

5.1 対策としての振る舞いの解析

ネットワークを含めた情報の送受信の振る舞いを解析するため、ネットワークの評価モデルを構築する。今回は、次の4つの方法について考察した。

■評価方法1：数値計算による評価

メッセージシーケンスモデルを作成し、数値計算によりデータ到達時間を求める。

■評価方法2：待ち行列モデルによる評価

装置へのパケット到着間隔、装置内でのパケットの処理時間を確率モデルで表し、データ到達時間を求める。

■評価方法3：動作モデルを模擬するコンピュータ

シミュレーションによる評価

コンピュータシミュレーションにより条件を動的に変化させて、データ到達時間を求める。

■評価方法4：実機による擬似環境を構築し、

実測定データを収集し評価

実機（L2SW等使用する機器）を用い、実験により実測データを収集し、各装置の特性を把握する。

検討の結果、評価方法 1・2 については、今回のようなシステムを解析しようとした場合、その構成や挙動が複雑すぎるため、モデリングが難しかった。また、評価方法 4 については、個々の値としては、良い数値が得られると考えられるが、システムとして解析するとなると実際に全構成を再現することはできないため、適しないと考えられる。評価方法 3 のようにシミュレーションによるエンドーエンドのデータ到達時間の評価を実施することが望ましいと判断し、そのパラメータには評価方法 4 で得た実際の値を用いることにより、シミュレーションの精度を上げることとした。

6. 拠点間WANへの適用ネットワークの選定

これで振舞いの解析方法は定まったが、シミュレーションを実施するにあたり、どのようなIPネットワーク(拠点間WAN)を実装するか決めなければならない。IPネット

ワーク(拠点間WAN)といっても、そのトポロジーやルーティングプロトコルによって、大きく特徴が変化する。そこでバックボーンとなる拠点間WANにどのようなネットワークが求められるのかということについて検討する。その他の部分は非同期ではあるが周期的に通信しているため、ここでは言及しない。

さて拠点間WANネットワーク方式に求められる要件には大きく4つの条件がある。

1つ目は、「瞬時に復旧できる耐障害性」である。ネットワーク障害が発生した際に、極力通信中断を発生させないことが求められる。

2つ目として、方式の永続性がある。鉄道のシステムでは開発後、設計思想の変更を行うことは難しい。10年から20年に渡り、同じ設計で運用し続けることが求められる。

3つ目は、ネットワークの可用性である。1つ目の耐障害性とも関連するが、ネットワーク全体としてのダウン頻度は10年間で1回程度の性能が求められている。

最後は、相互接続性である。ネットワークは路線に閉じて構成されるが、路線の相互乗り入れや東西路線の連結など、路線の統合への対応も必要となる。そのため、ネットワークを構成する装置がベンダー特有の機能ではなく標準化方式を採用し、他ベンダー装置のネットワークとも相互接続できることが求められる。2つ目の方式の永続性とも関連するが、ネットワークを構築する際、標準的で永続性のある方式でネットワークを構成する必要がある。

6.1 物理構成検討

まず車上主体列車制御システムの物理的なネットワーク構成について、検討した。拠点間WANでは、リンク障害やノード障害が発生しても影響なくデータが伝達されることが望ましい。よって、物理構成としては、図3のような、装置もリンクも物理的に2重化する構成が適切である。このような構成の場合、1箇所の故障(1重障害)が発生しても、どちらかの系で必ずデータは伝達される。また、迂回や切替の影響はまったく受けない。つまり、迂回や切替により、一時的に1系が通信不能となっても2系で通信を継続することが可能となる。

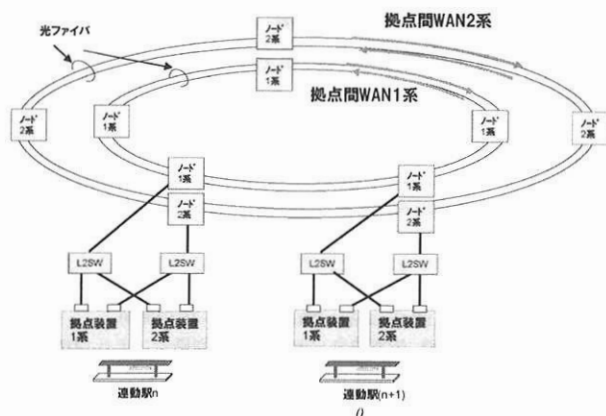


図3 拠点間WANの物理構成案

6.2 論理構成検討

下記を前提として拠点間WANの論理網構成を検討する。

(1) 拠点間WANは物理的に独立した1系/2系のリング網とする。

(2) 拠点装置間のデータ、拠点—在線管理装置間のデータは、各装置1系2系それぞれ4重化で通信する。

(3) 各現場LANと拠点間WANはL3SWのルータ機能を用いてL3レベルで分離する。

まず、WANの片系である一つのリングネットワーク内の通信冗長化方式について整理を行い、上記の前提を考慮して拠点間WANの論理構成案を洗い出し、それぞれについて確認を行う。

リングネットワークでは、右回りと左回りの両方のルートがある。リングネットワークにおけるネットワークの通信冗長化方式として、「ルート分散方式」と「切替方式」の2種類がある。

「ルート分散方式」では、同一のデータを常に両方向に送信する。つまり、右回りと左回りの両方を現用ルートとして使用する方式である。また、「切替方式」では、片方向を現用ルートとし、もう一方を予備ルートとする。通常は、現用ルートのみでデータを送信し、障害発生時に予備のルートに切替える方式である。

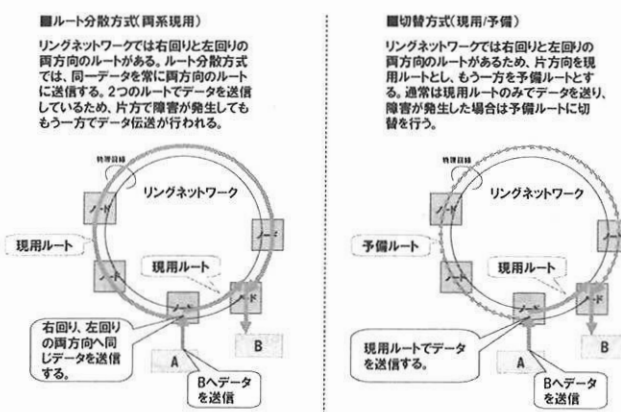


図4 ルート分散方式と切替方式

ルート分散方式および切替方式についてレイヤ1～3のレイヤ毎に方式を整理し、表1にまとめる。

表1 ルーティング方式

	ルート分散方式	切替方式
レイヤ1	SONETリング UPSR (1+1構成)	SONETリング BLSR (1:1構成)
レイヤ2	VLANルート分散	パケットリング切替 (RPR, ERPS, EPSR, EAPS等)
レイヤ3	スタティックルーティングによるルート分散	ダイナミックルーティング (OSPF等)

6.3 適用ネットワークの考察

まず、切替方式に属するものは、先に述べた IEC-62280-1の基準(ネットワークの物理的特徴の把握)に適合させることが難しいことから、検討から除外した。

障害発生時の通信断時間については、ルート分散方式で

は、基本的に通信断が発生しないため、耐障害性には優れていると考えられる。

方式の永続性については、VLAN やスタティックルーティングおよびダイナミックルーティングについては、ルータやスイッチの基本機能であり、今までも長期にわたり、ほとんどの L3SW ベンダー製品がサポートしている。そのため、方式の永続性に問題はない。一方、SONET/SDH については高価であり、大型装置のものが多く、将来性は低い。パケットリング切替プロトコルについては、ベンダー依存であり、標準規格である RPR と ERPS の他に、各ベンダー独自技術の多数のプロトコルが存在する。

相互接続性については、VLAN やスタティックルーティングおよびダイナミックルーティングについては、前述したように、ルータやスイッチの基本機能であり、標準的な方式であるため、他ベンダー装置との相互接続は可能である。SONET/SDH については、高度な技術であるため、同一ベンダーの装置にするほうが好ましいといわれている。パケットリング切替プロトコルは、ベンダー依存であり、ベンダー独自技術の場合には、同じ RFC 等標準化方式をベースにしても相互接続性はかなり低い。

コスト面においては、ルータやスイッチに標準装備されている機能である、VLAN やスタティック、ダイナミックルーティングの構成案が最安価にネットワークを構築できる。

6.4 適用ネットワークのまとめ

このような考察のもと、本システムでのネットワークには、VLAN を用いたルート分散方式が一番望ましいとの結論に至った。

7. 接続機器との装置との協調

6章にて、望ましいネットワークの考察が出来たので、あとは5章で述べたシミュレーションの方法に則って、システムの安定性の検証という流れになるのだが、ここまでの考察はネットワークとしての理想であって、接続する機器（拠点装置）との兼ね合いやコストを考慮していないといっても良い。

現在の案では、ひとつの拠点装置は同じ情報を4つ投げなければならない。拠点装置の1系・2系を考慮すると同じ情報を8つ投げている(図5)。この冗長度は理論的には理想だが、現実問題としてここまでの冗長度を実現することに意味があるのかは、考察が必要であるとともに、拠点装置の処理能力やコストについても考慮が必要である。

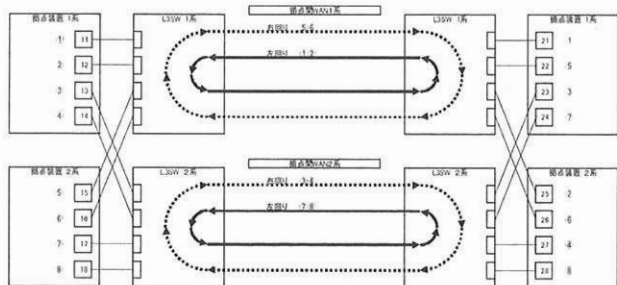


図5 理想的な冗長性を持ったシステム構成

結論としては、(先の議論では、適用が難しいとしたが)系切替を伴うネットワークの場合、同様の冗長度で拠点が投げる情報を半分に出来る(図6)ことから、このネットワークの課題であった、ネットワークの挙動の把握(トポロジーチェンジ)・永続する規格の選定・系切替時間・監視の方法の考察に取り組み、動的なネットワークの導入に向けて、検討を開始したところである。

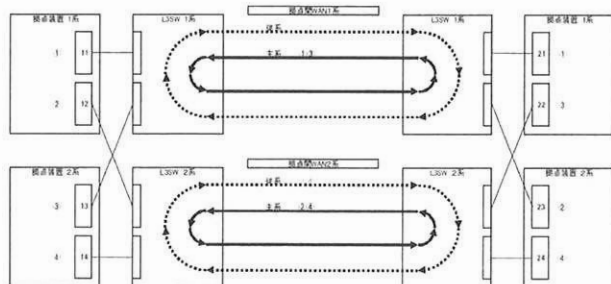


図6 現実的な冗長性を持ったシステム構成

また、更なる冗長性の課題として、図6では2重系×2のループを想定しているが、これを2重系×1とした場合の信頼性について定量的に評価し、ネットワークのより最適な構成を検討する予定である。

8. まとめ

平成21年度、22年度は順調に開発を進めてきたが、ここにきて保安システムにIPネットワークを適用する難しさをあらためて知ることができた。イーサネット+IPという非同期網のリアルタイムシステムへの適用という観点で始めた研究であったが、理論だけではなく、現実との兼ね合いを考えると別の問題が存在することも分かってきた。今後は、規格の選定、それに対するシミュレーションを経て、適切なネットワークを構築したい。

今回の課題を解決することはもちろん、当システムの実用化と更なる発展を目指して今後とも精進したいと考えている。

最後に、本開発を行うにあたり、東日本旅客鉄道株式会社、公益財団法人鉄道総合技術研究所、三菱電機株式会社、西日本電信電話株式会社、日本信号株式会社をはじめ、各協会・会社や行政機関に多大なご協力を頂いている。ここに深甚なる感謝の意を表したい。

文 献

- (1) 西日本電信電話株式会社：「推奨ネットワークに関する評価報告書」, March 2010
- (2) 黒岩篤、梅津知史、伊藤徹理、森井明、馬場裕一、中山恒、今野信三：「仙石線における ATACS の実用化」, JR EAST Technical Review, No.28 Summer 2009, pp.41~46 (2009)
- (3) 森崇、松井則博、延原隆良：「無線式列車制御システム (JR TC-W) における汎用規格通信手順の活用について」, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, Vol.TER-09 No.63-70, pp.17~22 (2009)
- (4) 川崎邦弘、菅原宏之、立石幸也、鈴木祐輔、森崇：「無線式列車制御用通信ネットワークの評価手法」, 第 47 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, November 2010, No.801(2010)