

# メタル通信回線による鉄道用長距離高速データ伝送方式の導入評価手法

竹内 恵一\* 中村 一城\*  
川崎 邦弘\* 山口 大介\*

A Method to Evaluate the Appropriateness of Introduction of High Speed Data Transmission System Using Metallic Telecommunication Lines into Railways

Keiichi TAKEUCHI Kazuki NAKAMURA  
Kunihiro KAWASAKI Daisuke YAMAGUCHI

The high speed data transmission systems using metallic telecommunication lines such as xDSL(Digital Subscriber Line) systems are being introduced in railway systems to substitute for analog carrier and to supplement optical carrier. Before this study, the evaluation method was devised, by which appropriateness of introduction of high speed data transmission systems using normal state telecommunication lines into railways can be judged. In this study, we propose an improved evaluation method, which takes into consideration the influence of the line outage on electrical characteristic of telecommunication lines, and delay time and jitter when the transmission systems are connected in tandem.

キーワード：メタル通信回線，高速データ伝送，xDSL，回線障害，遅延，S/N

## 1. はじめに

アナログ搬送通信の代替や光搬送通信の補完として、xDSL 技術を活用し、メタル通信回線を用いた高速データ伝送システムの導入が進んでいる。高速データ伝送システムを導入する際には、同一ケーブル内に収容されている既存の伝送システムとの間で相互に生じる漏話の影響や、鉄道沿線環境においてメタル通信回線に混入する雑音の影響も考慮する必要がある<sup>1), 2)</sup>。これまでに、鉄道環境において、導入予定回線における受信 S/N が、所要の伝送品質を満たす S/N より大きいかな否かで導入可否を判断する手法を提案<sup>3)</sup>した。ただし、既提案手法は正常な状態の回線における導入可否の評価を前提としたものであった。

また、高速データ伝送システムは複数段接続で用いられる場合が多く、一部区間での障害が伝送システム全体に影響する可能性がある。しかし、導入計画時に回線障害の影響を実測により把握するのは困難であり、回線障害時の影響を予測可能な手法が求められる。

そこで、回線障害時の S/N と、複数段接続時の伝送遅延を予測し、高速データ伝送方式の導入可否を評価する手法を提案した。本報告では、提案した評価手法の概要と、提案手法に基づいて開発した導入評価支援ツールの概要について述べる。

## 2. 回線障害時における電気的特性への影響

ここでは、回線障害の発生によりメタル通信回線の電気的特性に与える影響を検討した結果について述べる。

### 2.1 回線障害を示す指標

メタル通信回線における主な回線障害として、接触不良や断線などが挙げられる。これらの回線障害は、表 1 に示す、鉄道用メタル通信ケーブルの敷設時やメンテナンス時に行う各種電気的特性試験の項目において、標準値<sup>4)</sup>を下回った場合に回線障害と認識される。

表 1 に示した項目のうち、既に提案した手法では、導体抵抗の増加と特性インピーダンスの変化、減衰量の増加、雑音の増加につながる障害事象に対応できる入力パラメータがあるが、絶縁抵抗不良、導体抵抗不平衡に対応できる入力パラメータの設定がされていないため、影

表 1 回線障害を示す指標

項目	標準値	既提案手法での対応の可否
絶縁抵抗	5000M Ω・km 以上 (測定距離が 5km 以下では 1000M Ω 以上)	×
導体抵抗	0.9mm 心線 29.0 Ω /km 以下	○
導体抵抗不平衡	2% 以下	×
特性インピーダンス	0.9mm 心線 420 Ω (装荷 1380 Ω)	○
減衰量	0.9mm 心線 0.8dB/km	○
近端漏話減衰量	65dB 以上	○
雑音電圧	1 交換所区間 1.0mV 以下	○

\* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：信号通信技術

響を評価することができない。そこで、本研究では、絶縁抵抗不良、導体抵抗不平衡による影響を検討の対象とすることとした。

2.2 障害発生時の自回線への影響

ここでは、高速データ伝送方式を導入予定の回線に絶縁抵抗不良と導体抵抗不平衡が発生した際に、導入する回線の電気的特性に与える影響の検討について述べる。

絶縁抵抗不良は、図1に示すように、メタル通信回線の心線  $L_1$  と心線  $L_2$  の間の絶縁抵抗値  $R_{L1-L2}$  が低下する事象である。この絶縁抵抗値の低下は、回線の電気的特性上は回線減衰量の増加として現れると想定される。そこで、絶縁抵抗が低下した時の回線減衰量の増加分を計算する回路モデルを作成し、モデルをもとに電気回路シミュレータ (EMTP) により、絶縁抵抗値毎の回線減衰量増加分を計算した。絶縁抵抗不良による回線減衰量増加分の計算例を図2に示す。

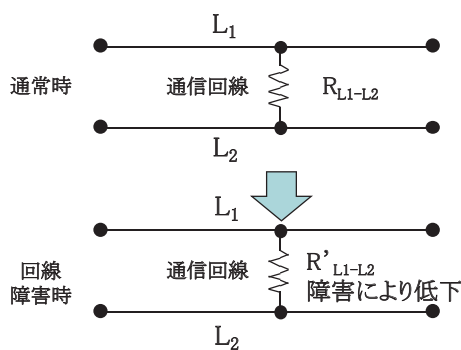


図1 絶縁抵抗不良

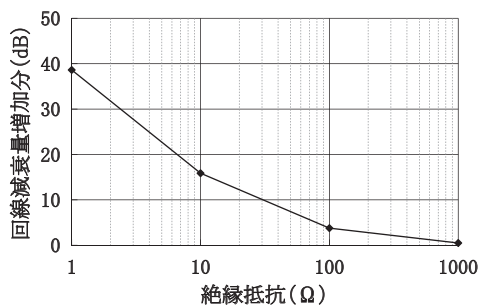


図2 絶縁抵抗不良時の回線減衰量増加 (EMTP による計算例)

一方、導体抵抗不平衡は、図3に示すように、メタル通信回線を構成する心線  $L_1$  の導体抵抗  $R_1$  と心線  $L_2$  の導体抵抗  $R_2$  に差が生じる事象であり、その程度を表わす導体抵抗不平衡率は式 (1) で算出される。

$$\text{導体抵抗不平衡率(\%)} = \frac{|R_1 - R_2|}{R_1 + R_2} \times 2 \times 100 \quad (1)$$

導体抵抗不平衡によりメタル通信回線の1心線のみ導体抵抗が増加した場合においても、回線の電気的特性上は回線減衰量の増加として現れると想定される。そこで、

1心線のみ抵抗値の増分と回線減衰量増加分との関係を実測により把握した。実測結果の例を図4に示す。

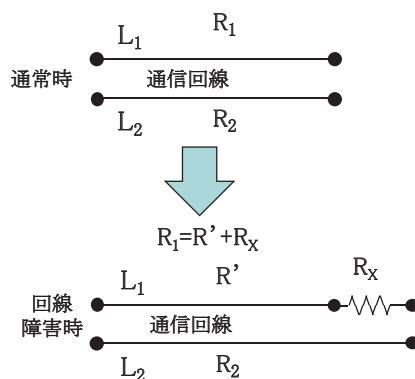


図3 導体抵抗不平衡

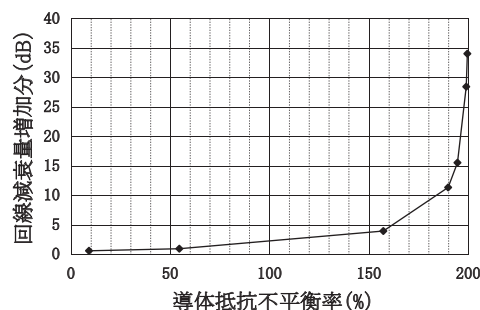


図4 導体抵抗不平衡時の回線減衰量増加 (回線長 500m の場合の実測例)

2.3 障害発生時の隣接する回線への影響

本節では、回線障害が発生した際に、同一ケーブル内の隣接回線の電気的特性に与える影響の検討について述べる。

図5に示すように、隣接回線との間の絶縁抵抗値の低下により、隣接回線への影響が漏話雑音として現れる。そこで、近端漏話雑音の増加分を計算する回路モデルを作

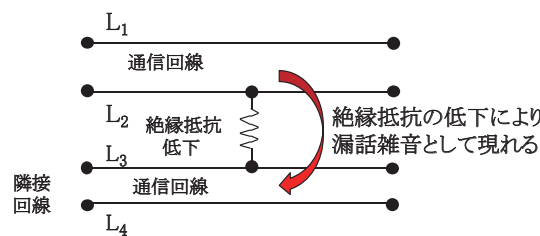


図5 絶縁抵抗不良時の隣接回線への影響

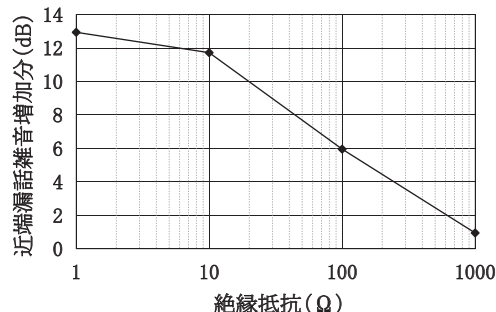


図6 絶縁抵抗不良時の近端漏話雑音増加 (EMTP による計算例)

成し、電気回路シミュレータを用いて絶縁抵抗値の変化による隣接回線の近端漏話雑音強度の増加分を計算した。絶縁抵抗不良による近端漏話増加分の計算例を図6に示す。

図7に示すように、導体抵抗不平衡によって生じる障害発生回線でのパワーの損失分が、隣接回線への漏話雑音として現れる。そこで近端漏話雑音の増加分を計算するモデルを作成し、電気回路シミュレータを用いて、不平衡率が増加したときの近端漏話雑音強度の増加量を計算した。計算結果の例を図8に示す。

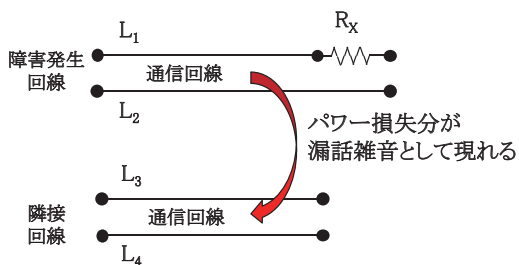


図7 導体抵抗不平衡時の隣接回線への影響

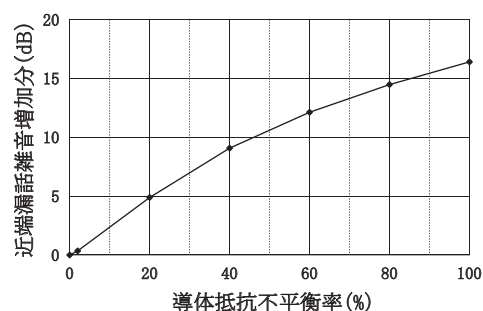


図8 導体抵抗不平衡時の近端漏話雑音増加 (回線長 500m の場合の計算例)

### 3. 回線障害時の遅延時間・ジッタ

#### 3.1 複数段接続時の遅延時間・ジッタの考え方

xDSLを利用して長区間にわたる伝送システムを構成する際には、図9に示すように、複数の区間をシリーズに接続していく(以下、このような回線構成を複数段接続という)。従来の導入評価手法では、1区間毎にS/Nを算出して比較することにより伝送が可能か否か評価していた。しかし、図9のように、区間毎に伝送が可能であっても、端末装置での許容遅延時間Tや許容ジッタJがある場合には、複数段接続によって構成された回線のエンド-エンド間での総遅延時間やジッタが、許容遅延時間や許容ジッタを満たしているかを評価しなければ導

入の可否を判断できない。そのためには、各区間の遅延時間  $T_{ab}, T_{bc}, T_{cd}$  と A 駅～D 駅までの総遅延時間の関係、および各区間のジッタ  $J_{ab}, J_{bc}, J_{cd}$  の関係を明らかにする必要があります。

設定した伝送速度に対する所要 S/N を満たしている場合は、伝送装置は仕様通りの動作をするという前提とし、遅延時間、ジッタは伝送装置の仕様値を用いることとした。一般に、正常動作している伝送装置における遅延時間とジッタは、仕様値よりも小さいため、仕様値による評価は安全側となる。SHDSL 伝送装置を複数段接続したときの全体の遅延時間は、各区間の遅延時間の積み重ねであることを実験的に確認した。実験結果を図10に示す。この実験結果により、同一仕様の伝送装置を複数段接続した場合の正常時の総遅延時間は、(仕様値) × (段数) で表すことができることが分かった。

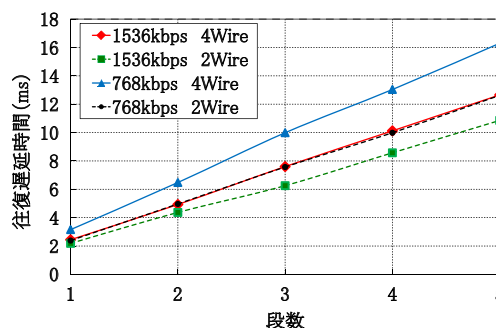


図10 複数段接続時の遅延時間の実測結果 (SHDSL 伝送装置を用いた室内実験での測定例)

次に、ジッタについて検討を行った。1対向の伝送装置間におけるジッタの概略を図11に示す。あるパケットが伝送装置 A から送信された時刻と伝送装置 B に到達した時刻の時間差を遅延時間と考えた場合、伝送装置 B に到達したパケットの遅延時間が  $a=b=c$  であれば、 $t_1=t_2$  でジッタは生じないことになる。しかし、実際には遅延時間に差があり、この差がジッタとなる。仮に遅延時間 a が伝送装置 A～B 間の最小遅延時間で、遅延時間 b が伝送装置 A～B 間の最大遅延時間となった場合に、 $t_1$  は最大となり、これが伝送装置 A～B 間のジッタの最大値となる。伝送装置 A～B 間でジッタが最大値となった2つのパケットが他の伝送装置間でも最大ジッタとなるとは限らず、別の連続する2つのパケット間で、ジッタの最大値が生じる可能性もある。

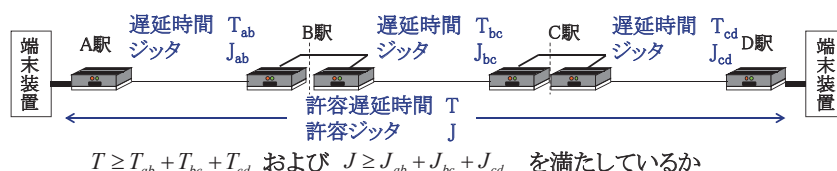


図9 複数段接続による長距離伝送システムの構成例

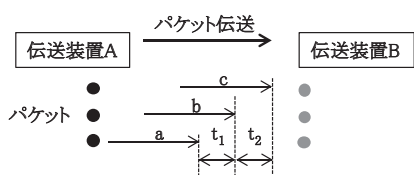


図 11 1 対向の場合のジッタの概略

### 3.2 回線障害時の遅延時間・ジッタ計算モデル

第2章で説明したように、回線障害の発生により回線の電気的特性である信号レベル (S) やノイズレベル (N) に影響が現れる。このため、ある区間で回線障害が発生した場合、当該の区間では S/N が低下して設定伝送速度に対する所要 S/N を満たすことができず、伝送速度が低下する可能性がある。この一部の区間での伝送速度の低下は、伝送システム全体の総遅延時間とジッタに影響を与えることが考えられる。そこで、回線障害時の遅延時間やジッタを計算する方法を検討した。

図 12 に回線障害時の遅延時間・ジッタ計算モデルを示す。伝送システム全体での設定速度に対して、所要 S/N を満たしていない区間では伝送速度が低下、もしくは回線断となる。回線断の場合は遅延時間を無限大として導入不可の判定とする。伝送速度が低下した場合は、送信側伝送装置バッファ内での流入パケット数に対して送出パケット数が少なくなり、バッファ内にパケットが蓄積されていく。よって、バッファ内の最後のパケット (図 12 中の送出順番 Z のパケット) が送信側伝送装置から送信されてから、受信側伝送装置に到達するまでの時間が、障害発生区間での遅延時間の最大値となる。また、ジッタの最大値は、遅延時間の最大値と最小値の差で表すことができる。

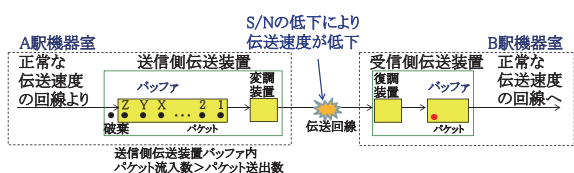


図 12 回線障害時の遅延時間・ジッタ計算モデル

## 4. 長距離高速データ伝送方式の導入評価手法

既に提案した手法をもとに、回線障害発生時の影響も予測でき、長距離データ伝送システム全体の遅延時間やジッタも考慮して高速データ伝送の導入可否を評価する手法を検討した。

### 4.1 評価手法の基本的な考え方

既に提案した手法は、ある伝送速度に対して、所要の伝送品質 (フレーム損失率: FLR) を満足する所要 S/N がわかっているものとし、導入を予定しているデータ伝送回線と隣接回線の受信 S/N を求め、その受信 S/N が

所要 S/N よりも大きいかな否かで、導入可否を評価していた。今回提案する評価手法も同様の考えに基づき、回線障害の影響を受信 S/N に反映させる方法とし、所要 S/N より大きいかな否かで各区間での導入の可否を評価する。

S/N による評価の結果、導入可能であった場合は、長距離データ伝送システム全体の許容遅延時間と許容ジッタを計算し、許容値との比較により、最終的な導入の可否を評価する。ここで述べた手順をフロー図として整理したものを図 13 に示す。

### 4.2 回線障害時の S/N 評価手法

S/N は受信信号強度 (S) と雑音強度 (N) から求められる。回線減衰量の増加は S を劣化させ、近端漏話雑音の増加は N を増大させる。第2章で述べたように、絶縁抵抗不良、導体抵抗不平衡の際は、障害が発生した回線の回線減衰量が増加し、隣接する回線の近端漏話雑音が増加する。このため、通常時の受信 S/N に回線減衰量の増加分、近端漏話雑音量の増加分を反映させることにより、回線障害時の受信 S/N を予測することが可能となる。

### 4.3 遅延時間・ジッタの評価手法

3.1 節で述べたように、受信 S/N が所要 S/N を満たしている場合、伝送システム全体の遅延時間とジッタは、仕様値の段数による積み重ねで算出され、伝送システムとして要求される許容遅延時間および許容ジッタより小さいかな否かで導入可否を評価する。

一方、回線障害により一部区間で受信 S/N が伝送速度に対する所要 S/N を満たしていない場合は、所望の伝送品質を満足できないが、それでも伝送を考える場合、受信 S/N をもとに、あらかじめ把握している所要 S/N を満たす伝送速度まで速度が低下しているとみなす。しかし、一部区間のみ伝送速度が低下することによって、伝送システム全体の遅延時間、ジッタは増大することとなる。3.2 節に述べたモデルを用いて、所要 S/N を満たしていない区間の遅延時間の最大値とジッタを求め、所要 S/N を満たしていない区間の遅延時間・ジッタの仕様値と置き換えることとする。そして、各区間の積み重ねにより求めた伝送システム全体の遅延時間・ジッタと、要求される許容遅延時間・許容ジッタとを比較する。

## 5. 長距離高速データ伝送方式の導入評価支援ツール

提案した手法による評価作業は、入力パラメータが多く、手計算では作業が複雑で負担が大きい。そこで、計算作業を軽減できるよう、提案した導入評価手法に基づく評価支援ツールを、Windows アプリケーションプログラムとして実装した。開発したアプリケーションプログラム

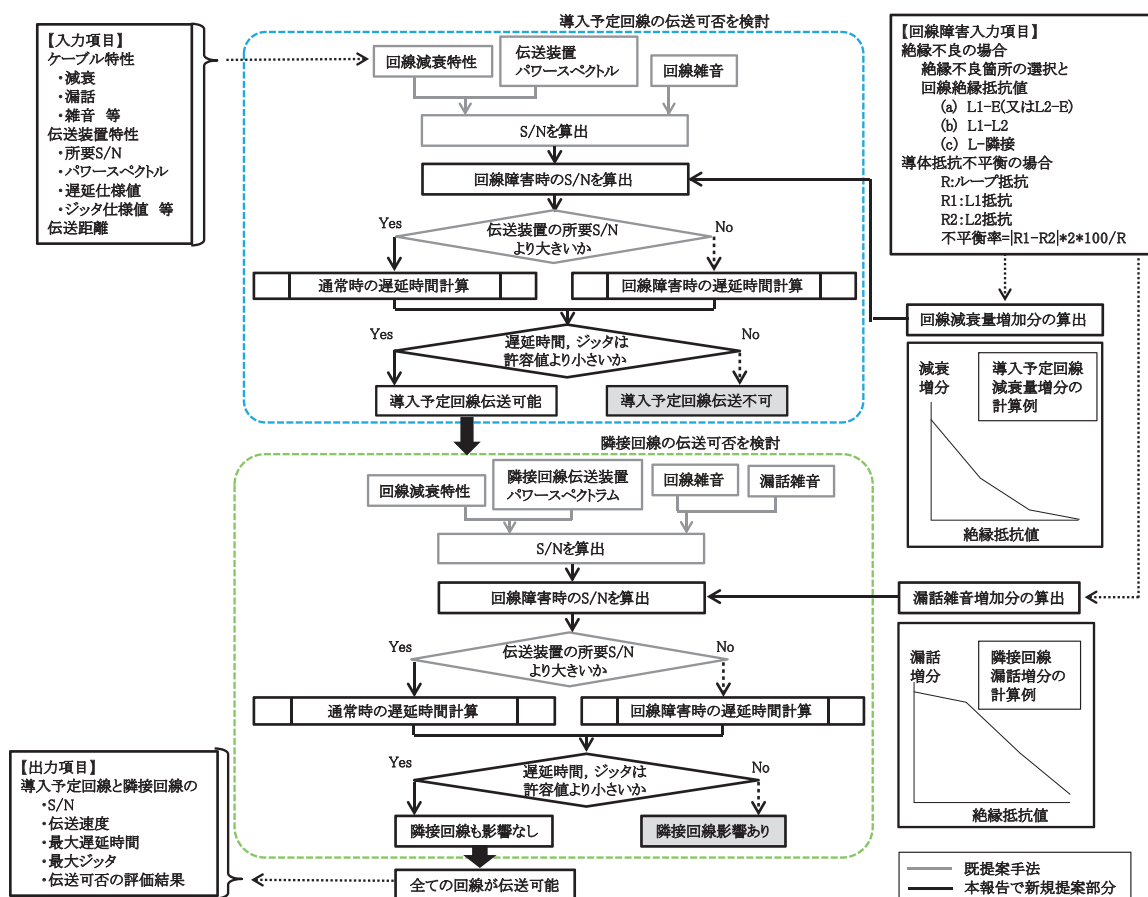


図 13 導入評価手法フロー

ラムのユーザーインターフェースは、導入評価メイン画面と、評価に必要な各種パラメータの入力画面で構成されている。以下では、各画面での入力内容について述べる。

また、伝送システム全体の許容遅延時間、許容ジッタやマージン等もこのメイン画面で入力する。図 14 に導入可否評価メイン画面を示す。

5.1 導入可否評価メイン画面

導入可否評価メイン画面では、導入可否の評価を行う区間や、各区間のメタル通信ケーブル内の各回線に導入されている伝送方式を入力する。また、S/N の計算結果と評価結果を表示する。回線障害の評価を行う際には、所定のチェックボックスをチェックすることにより、回線障害の詳細入力が可能となる。

5.2 入力パラメータ

5.2.1 伝送装置特性入力部

伝送装置特性入力部では、導入予定の伝送方式の特性を入力する。表 2 に伝送装置特性入力部の主な入力項目を示す。

表 2 伝送装置特性の主な入力項目

入力項目	入力内容
遅延	単位：ms 設定した伝送速度における 1 対向遅延時間（仕様値）
ジッタ	単位：ms 設定した伝送速度における 1 対向ジッタ（仕様値）
装置バッファ	伝送装置バッファに蓄積できる パケット数（仕様値）
S/N-伝送速度	単位：dB 伝送速度に対する所要 S/N

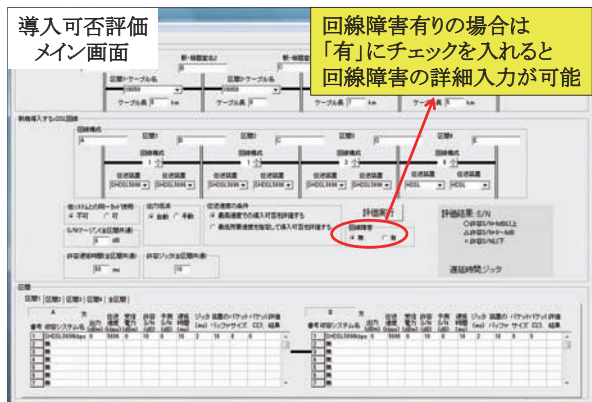


図 14 導入可否評価メイン画面

5.2.2 ケーブル特性入力部

評価を行う回線の回線減衰特性、漏話雑音特性を入力する。なお、いずれもこれまでの測定データをもとにした

特集：信号通信技術

平均値をデフォルト値として設定済みであるが、評価区間の実測データを入力して評価を行うことも可能である。

5.2.3 回線障害入力部

絶縁抵抗不良と導体抵抗不平衡の際の入力項目を、表3、表4に示す。また、図15に回線障害入力画面を示す。

表3 回線障害時の入力項目（絶縁抵抗不良）

入力項目	入力内容
障害回線番号	障害発生を想定する回線番号
絶縁抵抗	単位：Ω 障害箇所の絶縁抵抗値を入力
減衰増分	減衰増分を入力する場合
漏話増分	漏話増分を入力する場合

表4 回線障害時の入力項目（導体抵抗不平衡）

入力項目	入力内容
障害回線番号	障害発生を想定する回線番号
回線抵抗 1, 2	単位：Ω 回線のL <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> の導体抵抗値
ループ抵抗	単位：Ω 回線のループ抵抗値 ※評価には使用しない。
導体抵抗不平衡率	算出式は2.2節の式(1)を参照
減衰増分	減衰増分を入力する場合
漏話増分	漏話増分を入力する場合

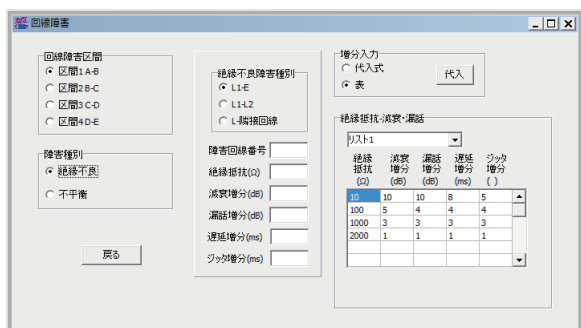


図15 回線障害入力画面

6. 提案手法の検証

提案した導入可否評価手法の検証を行うため、室内実験と、図16に示すSHDSLを複数段接続した区間での実験を行った。いずれの実験においても、回線障害を模擬するための純抵抗を挿入し、伝送品質の測定を行った。導体抵抗不平衡の発生を想定した場合の検証結果の例を図17に示す。図中には試験結果と評価手法を用いた予測結果による伝送可否を「○」、「×」で重ねて表示した。図17に示すように、実測結果と手法による予測結果は概ね一致しており、提案した手法が妥当であることが確認できた。

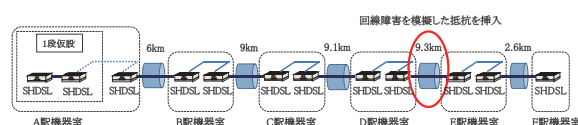


図16 伝送試験構成

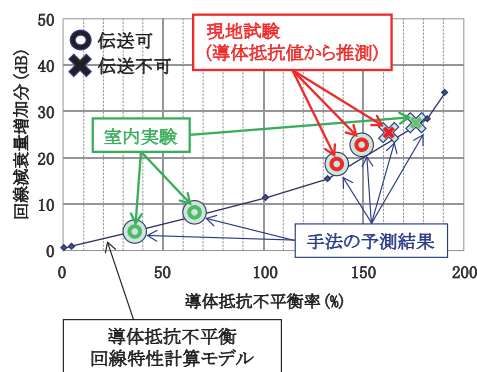


図17 導入評価手法の検証例

7. おわりに

回線障害時における高速データ伝送を導入する予定の回線と、隣接する他回線に対する影響を検討した。その結果、回線障害時のS/Nを予測したうえで、S/Nの劣化による遅延時間やジッタを計算し、高速データ伝送システムの導入可否を評価する手法を提案した。さらに、提案した手法に基づく評価作業を支援する導入評価支援ツールを開発した。開発したツールを高速データ伝送の導入計画時に活用することにより、正常時だけでなく、障害が発生した時の影響も含めて予測でき、導入評価作業の省力化や、既存回線への影響確認のための実測作業の省力化が期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社の関係各位には多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

文献

- 1) 進藤正昭, 中村一城, 関清隆: 鉄道における高速メタリック伝送の検討, 鉄道総研報告, Vol.16, No.7, pp.45-50, 2002
- 2) 進藤正昭, 中村一城, 関清隆: xDSL技術の鉄道への導入評価方法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.6, pp.47-52, 2003
- 3) 竹内恵一, 関清隆: 鉄道沿線のメタルケーブルでの高速データ回線構築評価手法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.10, pp.41-46, 2006
- 4) (社)鉄道電業研究会 事故防止委員会・鉄道通信専門部会: 電気通信工事用ポケットブック (改訂第3版), 鉄道界図書出版株式会社, 2004