

# 装荷回線における伝送損失の 周波数特性推定手法とその応用

竹内 恵一\* 加藤 佳仁\* 関 清隆\*

## Estimation Method of Frequency Characteristics of Transmission Loss in Loading Telecommunication Line and Its Application

Keiichi TAKEUCHI Yoshihito KATO Kiyotaka SEKI

On some telecommunication lines used for voice transmission contained in the existing metallic cables owned by railway operators, loading coils are inserted to suppress transmission loss occurring in the voice frequency band. However, these loading lines cannot be used for the high-speed data transmission, because their transmission loss in the high frequency band is large. On this account, the removal of the loading coils depending on the demand for lines is ideal. In this paper, we report an estimation method of frequency characteristics of transmission loss of the loading lines, to be used for the desk examination whether the extension of the insertion interval of the loading coil is possible or not.

キーワード：装荷回線，装荷線輪，伝送損失，メタルケーブル，音声帯域伝送，周波数特性

### 1. はじめに

鉄道沿線に敷設されたメタルケーブルに収容されている通信回線の中で、音声（電話）伝送に使用される回線の一部には、音声周波数帯域の信号の伝送損失を抑え、長距離電話回線を構成する目的で、装荷線輪が挿入されている。一方、高速データ伝送の需要増加に伴い、鉄道沿線に敷設されたメタルケーブルに収容されている通信回線において、高周波帯域までを使用した伝送方式が導入されるようになってきた。

装荷線輪が挿入された回線は、高周波帯域での伝送損失が大きく、近年需要が増加してきている高速データ回線に利用することができない。また、装荷線輪の挿入間隔は一定であるため、駅間のケーブル接続点に等間隔で挿入箇所が存在している。そこで、装荷回線の空き回線を高速データ回線として利用するためには、駅間に点在する線輪を取り外さなければならず、多大な手間がかかる。装荷線輪のインダクタンス値は可変ではないが、従来と異なるインダクタンス値の装荷線輪を製造すれば、挿入間隔を延伸し、挿入箇所を削減することが可能になるので、回線の需要に応じて線輪の挿抜を簡便に行えることになる。しかし、検討の段階でインダクタンス値を変更した装荷線輪や、挿入間隔を延伸した装荷回線を準備するのは困難であるため、装荷回線の伝送損失の周波

数特性を机上計算で求め、インダクタンス値を変更し、挿入間隔を延伸した場合に、所望の回線品質を満たすかどうか推定できる手法が望まれている。以上のような背景から、装荷線輪挿入回線の伝送損失に関する検討を行ってきた<sup>1)</sup>。

本稿では、まず、装荷回線の伝送損失の周波数特性を推定する手法について説明し、次に実測値との比較による推定手法の精度についての検証結果を報告し、さらに同手法を応用した、装荷線輪挿入間隔延伸の検討方法を紹介する。

### 2. 装荷の原理と装荷線輪の仕様

#### 2.1 装荷の原理

メタル通信回線は、図1のように回路定数であるR（抵抗）、L（インダクタンス）、C（キャパシタンス）、G（漏れコンダクタンス）が回路の長さ方向に分布している、分布定数回路とみなすことができる<sup>2)</sup>。この4つの回路定数の間に式(1)の関係が成立するときに、通信回線の伝送損失は最小となる。

$$LG = RC \quad (1)$$

しかし、メタル通信回線の場合には、RとCは大きく、LとGは小さい。このため、Lを増加させることが回線の伝送損失を低下させる一つの手段となることが式(1)から分かる。このLを増加させるために、回線にLを加えることを装荷といい、装荷された通信回線を装荷回線と

\* 信号通信技術研究部（通信）

特集：信号通信技術

呼ぶ。また、装荷されていない通信回線を無装荷回線と呼ぶ。

一定間隔で装荷線輪と呼ばれる機器を挿入してLを増加させる方法を集中装荷もしくは線輪装荷といい、磁性材料を導体上に平等に巻きつけてLを増加させる方法を平等装荷もしくは連続装荷という。集中装荷方式の場合は使用周波数が高くなると回線の伝送損失が急激に大きくなるという問題があり、平等装荷方式の場合は、周波数が高くなると渦電流損失のためインダクタンスが減少し、伝送特性が劣化するという問題がある。

鉄道沿線に敷設された、鉄道事業者所有のメタル通信回線では、長距離音声電話用回線の一部に集中装荷方式が用いられている。

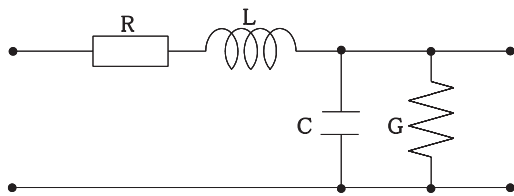


図1 単位長あたりの通信回線モデル

2.2 鉄道通信回線用装荷線輪の仕様

鉄道事業者所有のメタル通信回線で使用されている装荷線輪の仕様を定めた規格としては、日本国有鉄道規格(JRS規格)「装荷線輪」<sup>3)</sup>があり、現在もこの規格に準じた装荷線輪が使用されている。表1にJRS規格で定められた装荷線輪の主な仕様を、図2に装荷線輪の外形を示す。装荷線輪には在来線用と新幹線用があり、インダクタンス値と挿入間隔が異なっている。また、装荷線輪の挿入箇所はケーブル接続点となる場合が多く、図2に例示したような装荷線輪がケーブル接続点に存在し、長距離音声電話用回線の一部に接続されている。

表1 JRS規格に定められた装荷線輪の主な仕様

	インダクタンス (mH)	実効抵抗 (Ω)	挿入間隔 (km)
在来線用	130	20以下	2.0
新幹線用	100	18以下	1.0

3. 装荷回線の伝送損失の周波数特性<sup>1)</sup>

無装荷回線は、周波数が増加すると伝送損失が徐々に増加する傾向にある<sup>4)</sup>。しかし、装荷線輪を挿入する目的は音声周波数帯域の信号の伝送損失を抑えることであるため、装荷回線の伝送損失の周波数特性は無装荷回線の伝送損失の周波数特性とは異なる。そこで、装荷回線の伝送損失の周波数特性を把握するための現地試験を実施した。



図2 装荷線輪の外形例(130mH, 4回線用)

3.1 試験回線

現地試験は、駅間距離6617mのA駅～B駅の既存の装荷回線の空き回線を実施した。試験回線構成を図3に示す。また、伝送損失の周波数特性の比較のため、同一区間の無装荷回線の空き回線での測定も実施した。

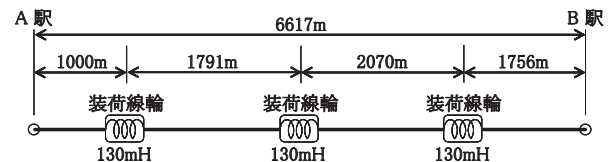


図3 試験回線構成

3.2 伝送損失の測定結果

図4に伝送損失の測定結果を示す。測定結果より、装荷回線の場合は周波数2.8kHz付近までは伝送損失が抑制され、無装荷回線に比べて伝送損失が小さくなるが、周波数がそれよりも高くなると急激に伝送損失が増加する傾向であった。一方、無装荷回線の伝送損失はこれまでに得られたメタル通信回線の実測データ<sup>4)</sup>と同様の傾向であった。

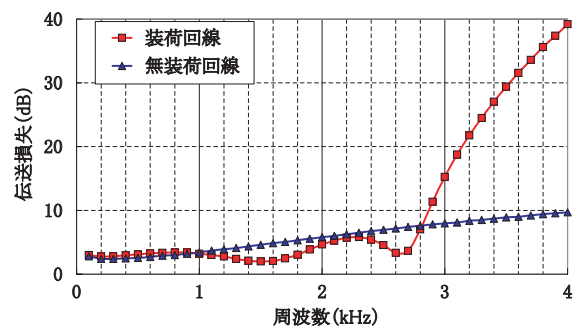


図4 伝送損失の実測結果

3.3 装荷回線の伝送損失の周波数特性

3.1で示した回線構成以外にも既存の装荷回線や、装荷線輪を仮設した回線での測定を実施した。音声信号の中心周波数が800Hzであることを考慮すると、装荷回線の伝送損失の周波数特性に関して測定結果から次のことが言える。

- (1) 装荷線輪のインダクタンス値を大きくすると800Hzの伝送損失は小さくなる。
- (2) 装荷線輪のインダクタンス値を大きくすると800Hz基準の伝送損失のひずみは大きくなる。

#### 4. 装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法

従来から使用されている装荷線輪のインダクタンス値は、表1に示す2種類（100mH, 130mH）のみであり、挿入間隔も均一距離が前提となっている。しかし、回線需要に応じた線輪の取り外しを簡便に行うためには、挿入間隔を延伸したり、さらには挿入箇所を機器室のみにするなど不均一な間隔での挿入が考えられる。

そこで、計算モデルを用いて、装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法を作成した。この手法を用いることで、現在はないインダクタンス値の装荷線輪や、挿入間隔を不均一にした場合の伝送損失の周波数特性を実測することなく推定可能となる。

##### 4.1 計算ツール

装荷線輪の挿入間隔の延伸を検討する際には、装荷線輪のインダクタンス値や挿入間隔を随時変更し、伝送損失の周波数特性を比較する必要がある。そこで、変更箇所のみを修正することで、比較や検討が可能な電子回路シミュレーションツールを使用することとした。

電子回路シミュレーションツールとしては、1970年代にアメリカのカリフォルニア大学バークレー校で開発されたSPICE（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）が一般的に有名である<sup>5)</sup>。現在使用されている電子回路シミュレーションツールのほとんどが、このSPICEを基礎技術としている。本検討においては、回路図作成エディタソフトCapture Lite Editionと、SPICEを基礎技術として作成した回路図の計算を行うPspice Lite Editionが統合されたOrCAD Family Release 9.2 Lite Editionを使用した<sup>6) 7)</sup>。

##### 4.2 伝送損失の周波数特性推定計算モデル

装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法は、メタル通信回線部分の計算モデルと、装荷線輪の計算モデルの組み合わせで構成される計算モデルを用いる。

###### 4.2.1 メタル通信回線の計算モデル

図1で示したように、メタル通信回線は抵抗（R）、インダクタンス（L）、キャパシタンス（C）、漏れコンダクタンス（G）で構成される。しかし、装荷線輪は音声周波数帯域のみに限定して伝送損失を軽減する目的でメタル通信回線に挿入されるものであるため、計算モデルも音声周波数帯域の伝送損失が算出可能かどうかを考慮すればよい。そこで、音声周波数帯域では非常に値が小さ

く、その影響がほとんど無視できるGは省略し、集中定数を与えたR, L, Cで構成される回路とした。例えば、「a km」の通信回線の計算モデルは、a kmを1区間と考え、1kmあたりのR, L, Cをa倍した素子によって構成される回路となる。また、通信線路のパラメータは、表2に示す0.9mm外径の通信ケーブルの周波数1kHzにおける1kmあたり標準的な値をパラメータとして使用した。

表2 メタル通信回線計算モデルのパラメータ<sup>2)</sup>

R 抵抗 (Ω /km)	L インダクタンス (mH/km)	C キャパシタンス (nF/km)
55	0.75	38.5

###### 4.2.2 装荷線輪の計算モデル

装荷線輪は通信回線のインダクタンス値を増加させる目的で挿入されているものである。また、表1に示す内部抵抗も考慮する必要がある。このため、ツール上での装荷線輪は、インダクタンス値Lのインダクタンスのパーツと内部抵抗値rの抵抗パーツを直列に配置した回路で表現することができる。なお、内部抵抗値rは、インダクタンス値Lに比例する項（インダクタンスの巻線部分）と定数の項（接続回線部分）の和で表されると仮定し、表1の仕様で定められている最大値（130mHで20Ω, 100mHで18Ω）を通る直線である式(2)により、既存のインダクタンス値でない装荷線輪の内部抵抗値を求めることとした。

$$r = (1/15) \cdot L + (34/3) \tag{2}$$

###### 4.2.3 伝送損失の周波数特性推定計算モデルの例

上記のメタル通信回線の計算モデルと装荷線輪の計算モデルを組み合わせて装荷線輪の計算モデルを作成する。例えば図5のように、30kmの回線に10km間隔で130mHの装荷線輪が挿入されている場合には、図6のようなモデルとなる。

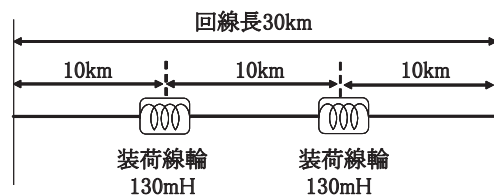


図5 装荷回線の例

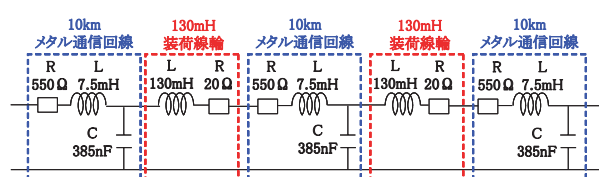


図6 伝送損失の周波数特性推定計算モデルの例  
(図5の計算モデル)

特集：信号通信技術

4.3 実測値による推定計算モデルの検証

上記の周波数特性推定手法により算出した伝送損失の周波数特性の推定計算値が実測値と同様の傾向を示すかどうか検証を行った。

4.3.1 実測値の取得

推定手法の検証を行うために、現状とは挿入間隔やインダクタンス値が異なる装荷回線を構成し、伝送損失の周波数特性測定の実地試験を実施した。

現地試験は、距離1360mの駅間で空き回線15本を折り返して構成した区間で実施した。試験区間において様々な回線構成での実測値の取得を行ったが、代表的な例として、既存の装荷回線の装荷線輪挿入間隔に近い挿入間隔の装荷回線（構成①）と、一箇所に大きなインダクタンス値の装荷線輪が挿入された装荷回線（構成②）を図7に示す。図7中で、既存の装荷線輪のインダクタンス値とは異なるインダクタンス値の装荷線輪が挿入されている場合があるが、これは、既存の装荷線輪を複数個直列に接続して挿入したものである。装荷線輪は通常複数個を直列に接続して使用することはないが、挿入間隔やインダクタンス値が現状とは異なる装荷回線でのデータ取得が目的であるため、このような回線構成とした。

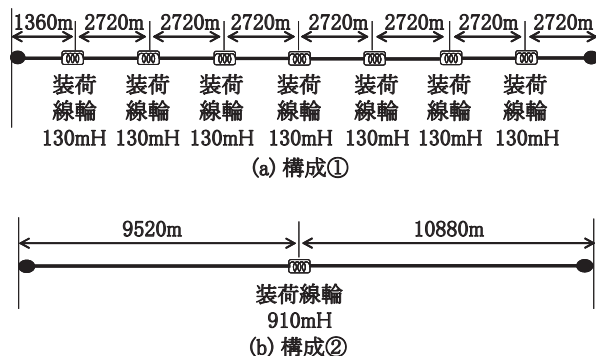


図7 検証データを取得した装荷回線

4.3.2 実測値と手法による推定値の比較

図8に、図7の構成①、構成②の回線構成における伝送損失の周波数特性の実測値と、伝送損失の周波数特性推定手法による推定計算値の比較を示す。構成①、構成②とも音声周波数帯域においては、実測値と推定計算値がほぼ同様の傾向を示すことを確認した。

また、図7に例示した以外の区間や回線構成においても、実測値と推定計算値がほぼ同様の傾向を示すことを確認した。特に、図7の構成②のように、一箇所に大きなインダクタンス値の装荷線輪を挿入する、挿入間隔を不規則にするなど、現状の装荷回線とは大きく異なる構成の場合においても、概ね実測値と推定計算値が同様の傾向を示すことを確認した。

以上の検証結果から、この周波数特性推定手法により、

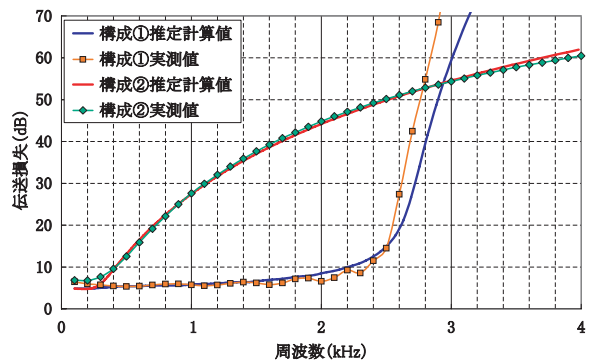


図8 手法による推定計算値と実測値の比較

装荷回線の伝送損失の周波数特性の推定が可能と考えられる。

5. 推定手法を用いた挿入間隔延伸可否の検討方法

装荷線輪の挿入間隔を延伸する場合には、既存の装荷線輪とはインダクタンス値が異なる装荷線輪を用いることで、所望の回線品質を満足することができる可能性がある。この検討に、4章で述べた装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法を応用することができる。一例として、挿入間隔を均一に延伸する際の検討方法を示す。

5.1 前提条件

均一間隔で装荷線輪の挿入間隔の延伸を検討する際に必要な前提条件を以下に示す。

- ①総回線長  
挿入間隔を延伸する区間の総回線長
- ②装荷線輪の挿入間隔  
検討する均一の延伸間隔
- ③通信回線の単位長あたりのパラメータ  
装荷線輪を挿入する通信回線の単位長あたりのパラメータ。通常の0.9mm外径の鉄道通信回線の場合には前述の表2を用いることが可能である。
- ④接続する通信機器の仕様  
装荷回線に接続する通信機器の仕様によって、800Hzにおける許容伝送損失が定まる。
- ⑤比較する伝送損失のひずみ

検討の際に比較対象とする伝送損失のひずみを決めておく。例えば、通信事業者が専用線サービス提供時に参考値として提示している値、現状の挿入間隔での装荷回線の伝送損失のひずみなど。

5.2 延伸可否の検討方法

3章で示した装荷回線の伝送損失の周波数特性から装

荷線輪のインダクタンス値が大きくなると800Hzの伝送損失は小さくなるが、800Hz基準の伝送損失のひずみは大きくなる。逆に、インダクタンス値が小さくなると800Hzの伝送損失は大きくなるが、800Hz基準の伝送損失のひずみは小さくなる。このため、まず800Hzの許容伝送損失を満足する最低のインダクタンス値を決定し、伝送損失のひずみで表される、所望の回線品質を満たすインダクタンス値が存在するかどうかで延伸可否を判断することとなる。具体的なアルゴリズムを以下の手順A、手順Bに示す。また、均一に挿入間隔を延伸する場合の挿入間隔延伸可否の検討方法のフローチャートを図9に示す。

**【手順A】 許容伝送損失を満たす最低のインダクタンス値**

総回線長、挿入間隔、通信回線の単位長あたりのパラメータから計算モデルを作成し、現状のインダクタンス値（130mH）からインダクタンス値を減少させていき、検討している装荷回線の800Hzの伝送損失と装荷回線に接続する通信機器の仕様により定まる800Hzの許容伝送損失を比較する。検討する装荷回線の800Hzの伝送損失が許容伝送損失より大きくなならない最小のインダクタンス値を  $x$  とする。

**【手順B】 伝送損失のひずみを満たす最大のインダクタンス値**

手順Aで決まったインダクタンス値から今度はインダクタンス値を増加させていき、検討している装荷回線の伝送損失から定まる伝送損失のひずみと、前提条件①における無装荷回線の伝送損失のひずみが交差する周波数 ( $f_1$  とする) と、前提条件で設定した比較する伝送損失のひずみと無装荷回線の伝送損失ひずみが交差する周波数 ( $f_2$  とする) を比較し、 $f_1=f_2$  となる時のインダクタンス値を  $y$  とする。インダクタンス値が  $x$  以上、 $y$  以下であれば所望品質を満たして、決定した前提条件のもとで装荷線輪の挿入間隔を延伸可能と判断する。また、インダクタンス値が  $x$  の時点で、 $f_1 < f_2$  となる場合には延伸不可能と判断する。

**5.3 延伸可否の検討方法を用いた検討例**

下記の前提条件における、挿入間隔延伸可否の検討方法を用いた、挿入間隔延伸の検討例を示す。

- ①総回線長：36km
- ②装荷線輪の挿入位置：3kmの等間隔
- ③通信回線の単位長あたりのパラメータ：表2の値
- ④接続する通信機器の仕様：800Hzの許容伝送損失は13dB（NTTの参考値）

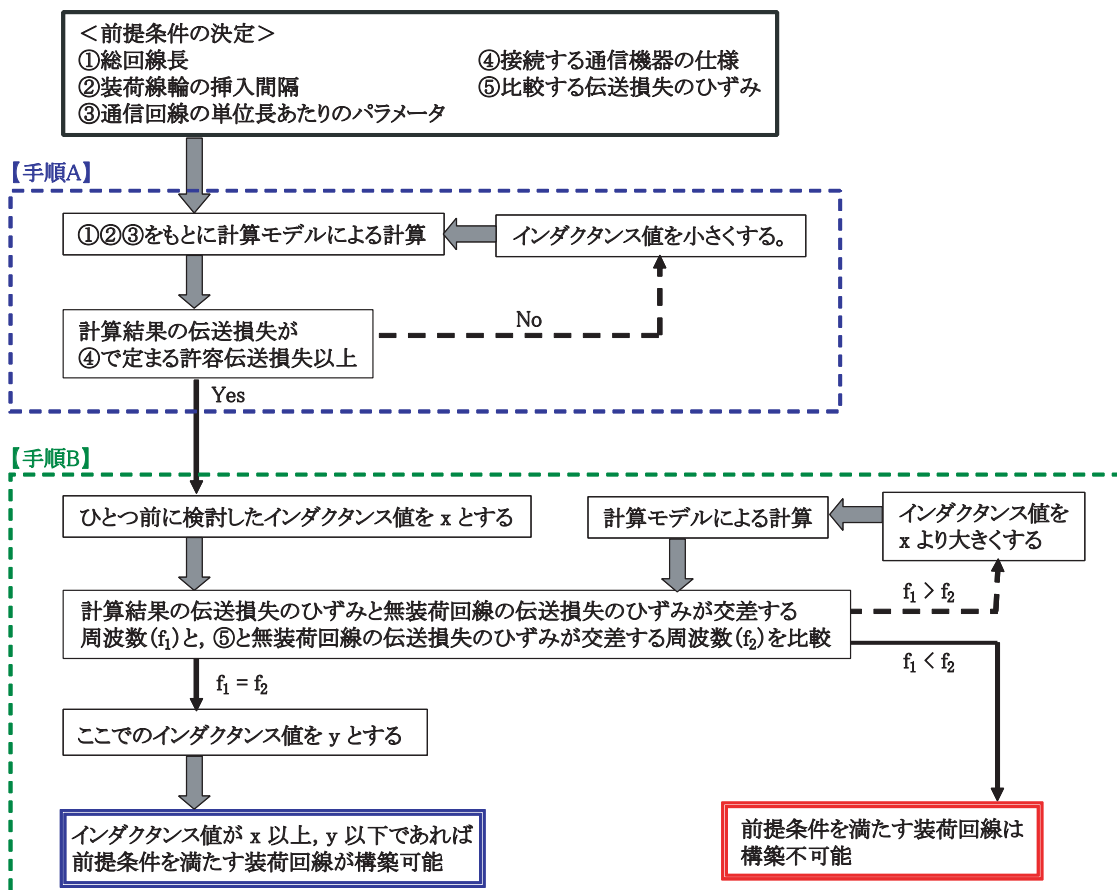


図9 均一間隔での挿入間隔延伸可否の検討方法フローチャート

特集：信号通信技術

⑤比較する伝送損失のひずみ：36kmの現状の装荷回線の伝送損失のひずみ（2km間隔で130mHの装荷線輪が挿入されている）

【手順A】

①～③の前提条件をもとに、伝送損失の周波数特性推定計算モデルを作成する。800Hzの伝送損失が許容伝送損失以下となる最低のインダクタンス値は表3より55mHとなる。このインダクタンス値が、図9に示したフローチャートのxとなる。

表3 許容伝送損失を満たすインダクタンス値の検討例

無装荷	50mH	55mH	60mH
13.2dB	13.39dB	12.96dB	12.57dB

【手順B】

現状の2km間隔、130mHの場合の装荷回線の伝送損失のひずみとの比較を行う。伝送損失のひずみの検討例を図10に示す。周波数 $f_1$ と周波数 $f_2$ がほぼ同じとなるのはインダクタンス値が75mHの時であり、図9に示すyが75mHとなる。つまり、この検討例の場合、インダクタンス値は55mH以上、75mH以下であれば、所望の回線品質を満足して、挿入間隔を3kmに延伸可能と判断する。

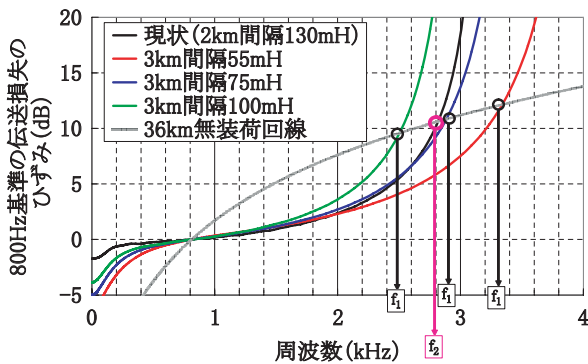


図10 挿入間隔3kmに延伸時の伝送損失のひずみの検討例

6. おわりに

装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法を作成し、実測値との比較を行った結果、両者が音声周波数帯域で同様の傾向を示すことを確認し、この手法による装荷回線の伝送損失の周波数特性の机上推定が可能であることを示した。さらに、推定手法を用いた応用例として、インダクタンス値の変更による装荷線輪挿入間隔を均一に延伸する場合の判断方法をまとめ、判断手法を用いた挿入間隔延伸の検討事例を紹介した。

この装荷回線の伝送損失の周波数特性推定手法を用いることで、装荷線輪の挿入箇所を疎らにしたい場合に、装荷線輪のインダクタンス値を変更することで、所望の回線品質を満たすことができるか検討することが可能となる。

文献

- 1) 竹内恵一, 加藤佳仁, 関清隆, 中村和雄, 日尾泰典: 鉄道装荷回線の回線特性に関する検討, 電気学会通信研究会資料, CMN-08-4, 2008.1
- 2) 電子通信学会: 有線伝送工学, コロナ社, 1979
- 3) JRS規格: 装荷線輪, 日本国有鉄道, JRS 23642-1C-14AR8D, 1978
- 4) 中村一城, 進藤正昭, 関清隆, 五十嵐雅人, 川邊圭吾, 清啓郎: 現地回線におけるxDSL伝送試験, 第39回鉄道サイバネ・シンポジウム, 801, 2002.11
- 5) 加藤肇: 電子回路シミュレーション入門, 講談社, 2005
- 6) 棚木義則: 電子回路シミュレータPSpice入門編, CQ出版社, 2003
- 7) 遠坂俊昭: 電子回路シミュレータSPICE実践編, CQ出版社, 2004