

# 鉄道沿線における地上デジタル放送の 受信品質の予測手法

川崎 邦弘\* 中村 一城\*

**A Method to Predict Quality of Digital Terrestrial Television  
Broadcasting Picture Received in the Area along Railway Lines**

Kunihiro KAWASAKI Kazuki NAKAMURA

Digital terrestrial television broadcasting services have been started in 2006 in Japan, and the Ministry of Internal Affairs and Communications is planning to close all analog broadcasting services in 2011. To measure and evaluate quality of digital terrestrial television broadcasting picture received in the area along railway lines, we have to carry out on-site measuring tests at the present time. Especially, to carry out measuring tests for evaluating effects of running trains, we need so much time and cost. Then, to reduce the time and cost, we have developed a calculation program to predict amount of variation of carrier-to-noise ratio (C/N) during train passing by taking into account diffraction of broadcast wave due to the edge of railway structures or a train body, interference by broadcast wave which passes under elevated railway structures, and radio noise radiated from a running train. This paper outlines the prediction method and introduce the feature of the developed calculation program.

キーワード：電気鉄道，電波障害，地上デジタル放送，電波雑音，EMC，シミュレーション

## 1. はじめに

2003年12月に3大都市圏で試験放送が開始された地上デジタル放送は、2006年12月に全国での放送が始まり、2011年7月には完全デジタル化が予定されている。地上テレビ放送のデジタル化により、鉄道沿線における障害現象が大幅に軽減されることが期待される。しかし、アナログ放送では品質が悪くてもかろうじて視聴可能であった地点において、無列車時は正常に受信できるが列車通過時に一時的に影響が現れるなど、デジタル放送特有の現象が起こる可能性が否定できない。このような現象を把握するためには、現時点では実測に拠らざるを得ないが、列車通過に伴う瞬間的な受信レベルの変動や受信品質の変化の測定は測定規模が大きく手間もかかるため、時間と労力がかかっている。そこで、筆者らは、これらの時間の短縮と労力の軽減ができるよう、測定すべき地点の選定や優先順位付けに利用することを目的として、列車通過に伴う受信品質の変化を比較的簡易に予測できる手法の検討を行ってきた。ここでは、基本的な予測計算手法の考え方について述べたのち、開発した予測計算プログラムの概要と計算結果の一例を報告する。

## 2. 地上デジタル放送の概要と鉄道との関係

### 2.1 地上デジタル放送<sup>1)</sup>とアナログ放送の比較

地上デジタル放送とアナログ放送の比較を表1に示す。地上デジタル放送では、映像と音声符号化・圧縮・多重化してMPEG2のトランスポートストリーム（以下TS）を生成し、誤り訂正符号を付加した後、デジタル変調して伝送路へ送出する。このデジタル変調にはOFDM（直交周波数分割多重）方式が採用されている。OFDMは、送る情報を多数の搬送波に分割して載せて伝送するため、干渉や妨害に強いという特徴を持っている。受信機側では、受信信号を復調して誤り訂正を行ったのち、多重化されていた情報を分離、復号化して映像・音声を

表1 地上デジタル放送とアナログ放送の比較

	アナログ放送	地上デジタル放送
伝送方法	映像をAM、音声をFMでアナログ変調して伝送（キャリアは2本）	映像と音声を符号化・多重化してデジタル変調し、複数のキャリア（OFDM）で伝送
周波数帯	VHF帯 (90~108MHz, 170~220MHz) UHF帯 (470MHz~770MHz)	UHF帯のローバンド (470MHz~662MHz)
信号強度の変化	画質の変化として現れる	受信データの誤り率が所定の値まで劣化しなければ影響なし 誤り率が所定の値を超えると、画質が劣化または凍結
雑音の影響	画面に直接現れる	
反射波の影響	ゴーストとして現れる	データ復調のために利用

\* 信号通信技術研究部（通信）

特集：信号通信技術

再生する。デジタル放送では誤り訂正を行うため、伝送途中で受ける影響の多くを排除することができ、高品質の映像と音声を安定して提供することが可能である。この誤り訂正は、内符号と外符号の2段階となっている。送信側では、MPEG2のTSに対し、まず外符号としてリードソロモン符号による符号化が行われ、階層分離やインターリーブ、遅延補正等を行った後、内符号として畳み込み符号（ビタビ符号）による符号化が行われる。この内符号については、伝送路の状態に応じて、符号化率を1/2～7/8の範囲で選択することにより、訂正能力を変更することが可能である。一方、受信側では、復調された符号に対し、まず内符号によって誤り訂正を行い、階層復元等の処理を行った後に、外符号による誤り訂正を行う。

これに対し、アナログ放送では、映像をAM、音声をFMでアナログ変調し、2つの搬送波を使って伝送する。受信機側では、受信信号を復調してアナログの映像・音声を再生するが、基本的には伝送過程で発生する影響を排除することができない。

また周波数帯としては、アナログ放送はVHF帯とUHF帯の両方を使っているが、地上デジタル放送では比較的電波雑音の少ないUHF帯のみを使用している。

このように、アナログ放送と地上デジタル放送とでは伝送方式が異なるため、受信障害の現れ方も全く異なる。アナログ放送の場合は、受信レベルの変動や電波雑音の混入など伝送途中の影響が、そのまま受信画像の品質に現れる。これに対し、地上デジタル放送の場合は、受信したデータのビット誤り率（以下、BER）が所定のしきい値（内符号による訂正後のBERが $2 \times 10^{-4}$ ）以下であれば、受信画像には伝送途中の影響は全く現れない。しかし、BERがしきい値を超えると、ブロックノイズが現れ、最悪の場合は画像が動かなくなる（画像凍結）可能性がある。なお、アナログ放送では反射波の影響によってゴーストが現れるが、地上デジタル放送では反射波も受信に利用するため、ゴーストは全く現れない。

2.2 鉄道による影響の把握における課題

前節で述べたように、地上デジタル放送では、伝送路上の悪影響を受けにくく、また受信データの誤りが訂正できれば、受信画像に全く影響が現れないという特徴がある。このため、受信レベル（C）と電波雑音強度（N）の比（C/N：搬送波対雑音比）が確保できBERが良好なエリアでは、鉄道による影響は大幅に軽減される可能性が高い。しかし逆に、C/NやBERが許容限度ぎりぎりであるエリアでは、列車通過時に受信品質に影響が現れる可能性が否定できない。

このような鉄道による影響の把握は、現時点では実測調査に頼らざるを得ない。中でも列車通過による影響の測定は手順が煩雑であり、特に時間とコストがかかって

いる。従前より、アナログ方式を前提とした影響範囲の予測法があるが、デジタル放送とアナログ放送とでは影響の現れ方が大きく異なるため、影響範囲の予測結果が過剰となる可能性が高く、そのまま使うことができない。

そこで、ここでは、動的な影響の実測ポイントの絞り込みを主たる目的として、障害範囲のおおまかな傾向を机上で評価できる簡易な計算手法を開発することとした。

3. 予測手法の検討

3.1 基本的な考え方

地上デジタル放送の受信品質はBERで決まり、このBERはC/Nによって決定される。従って、C/Nを求めることができれば、受信品質を予測することができる。

ここで、鉄道による地上デジタル放送への影響を評価するためには、以下の要因を考慮する必要がある。

- ・鉄道構造物等による静的な影響
- ・走行列車による動的な影響

（放送波の受信レベルの変動と電波雑音の混入）

鉄道構造物による静的な影響については、基本的には一般的な建造物と同一の手法<sup>2)</sup>を応用して評価することができるが、高架構造物の下を通過する電波など、鉄道固有の現象を考慮する必要がある。走行列車による動的な影響については、車体による放送波の伝搬路の変化による受信レベルの変化を予測し、また電波雑音強度の距離特性と発生確率からその変化量を求め、最終的にC/Nの劣化幅を計算し、影響の有無を判断する必要がある。

実測結果と厳密に合致する予測結果を得るためには、高度な計算モデルにより受信レベルの計算精度を上げ、なおかつ電波雑音強度の特性（距離特性、発生確率など）を正確に予測に反映する必要がある。しかし、このような厳密な予測計算の方法では、モデルの構築作業や計算作業が複雑化し、実測以上に手間や時間がかかってしまう恐れがある。

そこで、地上デジタル放送の特性を考慮しつつ、列車通過によって受信品質に影響が現れる可能性を容易に予測するための手法として、図1に示すような流れにより、鉄道の存在によるC/Nの変化幅を予測計算する手法を検討することとした。

3.2 具体的な受信レベルの予測計算モデル

列車通過に伴う受信レベルの変化量（ $\Delta C$ ）を計算するモデルとしては、計算量を軽減するため、図2に示すような単純化したモデルを検討した。この計算モデルを検討する際に仮定した前提条件は次のとおりである。

- ・受信点の周囲に鉄道構造物以外の地物が存在しない
- ・受信アンテナは送信所方向から到来する電波

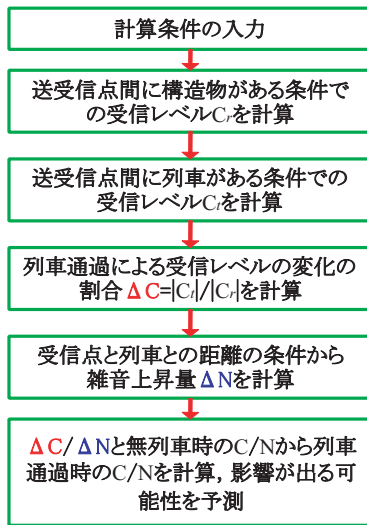


図1 予測計算の流れ

のみ受信する（受信アンテナの指向性を考慮）

- ・ 鉄道の線路方向と、放送波の到来方向とが交わる角度は直角に近い
- ・ 高架の場合、橋脚の影響は有無だけ考慮し、橋脚での回折や反射の影響は無視する
- ・ 盛土の場合、盛土斜面は地面に対して垂直である
- ・ 送信所～受信点間の伝搬経路については、都市減衰のみ考慮する（山や地形等による影響は、単峰として計算）
- ・ 車両の断面形状は方形とする

具体的な受信レベルの計算方法としては、一般的な建築物による障害範囲の予測計算法<sup>2)</sup>を応用し、図3に示すモデルにより鉄道構造物や車体でのナイフエッジ回折効果による受信レベルの回折損 $S_s$ を、(1)式に示すフレネル積分<sup>2) 3)</sup>によって計算する方法を採用した。

$$S_s(x_a) = \sqrt{\frac{j}{2}} \left\{ \frac{1-j}{2} + \int_0^{x_a} e^{-j\frac{\pi}{2}x^2} dx \right\} \quad (1)$$

ここで、 $x_a$ は遮蔽係数であり、以下の式で与えられる。

$$x_a = h_c \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{d_1 d_2 \lambda}}$$

- $h_c$ : 送受信点間を結ぶ線と遮蔽物の頂点とのクリアランス
- $h_c > 0$ : 送受信点間を結ぶ直線より頂点が下
- $h_c < 0$ : 送受信点間を結ぶ直線より頂点が上
- $d_1$ : 送信点～遮蔽物までの距離
- $d_2$ : 遮蔽物～受信点までの距離
- $\lambda$ : 波長
- $j$ : 虚数単位

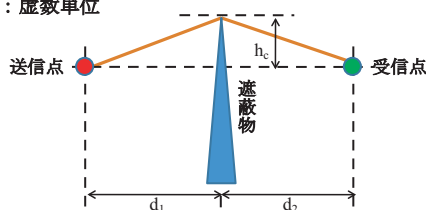


図3 回折損の計算モデル

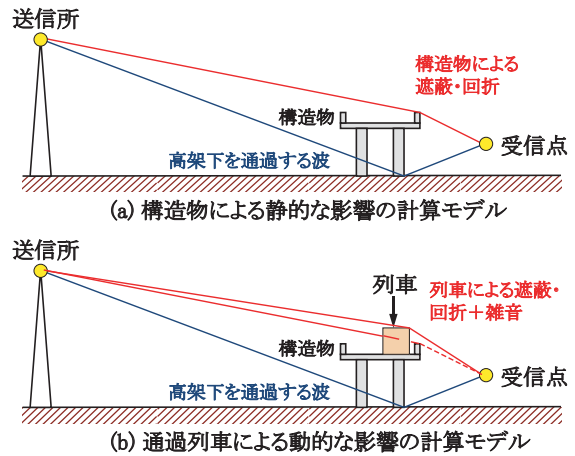


図2 予測計算モデルの基本形

さらに、高架構造物の場合は高架下を通過する大地反射波を考慮して計算することとした。

一方、列車通過時の電波雑音強度の上昇量 ( $\Delta N$ ) については、複数箇所での実測試験の結果から、次のような予測計算式を導出した。

$$\Delta N = -9.8 \times k_1 \times \log_{10}(d) + 20 \times k_2 \text{ (dB)} \quad (2)$$

ここで  $\Delta N$ : 雑音上昇量 (ただし  $\Delta N \geq 0$ , 上式の右辺が負の場合は  $\Delta N = 0$  とする)

$d$ : 鉄道構造物と受信点との水平距離 (ただし  $d \leq 100 \text{ m}$ )

$k_1, k_2$ : 地域ごとの補正係数 (0.8 ~ 1.2)

予測計算の際に必要な入力パラメータは、送信点の位置 (経緯度・標高)、受信点の位置 (経緯度・標高)、送信出力、送信周波数、鉄道構造物の基準となる位置 (送信点～受信点を結ぶ直線上の緯度・経度と標高)、鉄道構造物の幅および高さ、種類 (高架・盛土)、高架の場合は高架下の空間の高さなどである。なお、列車の高さや幅等の諸元は一定のものと想定した。また、走行列車による影響は常時ではなく通過時のみに起こるが、本予測手法では、一瞬でも受信品質に影響が出る可能性を予測するため、列車長と通過速度に依存する時間的な要因を無視している。

### 3.3 列車通過による受信品質への影響の評価方法

次に、計算で求めた C/N の変動幅から障害が発生する可能性を評価する方法について検討を行った。日本放送協会放送技術研究所のシミュレーション<sup>4)</sup>ならびに実験<sup>5)</sup>によると、一般的な固定受信の場合は 15 ~ 22dB、移動受信の場合は 5 ~ 10dB が最低所要 C/N であるとしている。

この所要 C/N から所要受信電界強度を求める回線設計例 (64QAM, 符号化率 7/8 で、固定受信の場合) を表 2 に示す<sup>6) 7)</sup>。表 2 に示すような標準状態の回線設計とは逆の手順で列車通過時の C/N (表 2 中の①) を求めることができれば、障害の有無を予測することができる。具

特集：信号通信技術

表2 標準的な回線設計例<sup>6) 7)</sup>  
(64QAM, 符号化率 7/8, 13ch)

所要 C/N	C/N	22dB
	装置化マージン	3dB
	干渉マージン	2dB
	マルチパスマージン	1dB
	所要C/N ①	28dB
雑音 N	受信系雑音指数	3.3dB
	受信系雑音電力	-103.3dBm
	外来雑音電力 ②'	-102.7dBm
	全受信雑音電力 ②	-100dBm
所要 強度 C	受信機入力電力 (受信機入力端子電圧 ③)	-72dBm (36.8dBμV)
	受信アンテナ利得	8dB
	アンテナ実効長	-13.8dB
	フィーダー損	2dB
	最低受信電界強度	50.5dBμV/m
	時間率・場所率マージン	9dB
	所要受信電界強度 ④	60dBμV/m

体的には、前節で述べた方法で求めた列車通過に伴う受信レベルの変動(表2中の所要強度Cの変化)と、通過に伴う電波雑音の増分(表2中の外来雑音電力②')を通過条件のときだけ増やす)から列車通過に伴うC/Nの変動幅を求め、無列車時の受信レベルの計算値もしくは実測値(無列車時の実測値は比較的容易に測定可能)から求められるC/Nに加えることにより、通過時のC/Nが得られる。ここで、計算で求めたC/Nが所要C/N(表2中の①)より大きい小さいのみで単純に影響の有無を判断するのではなく、時間率・場所率マージンを考慮して表3に示すような基準で判断を行うことにより、列車通過による影響が発生する可能性を「高い」「あり」「低い」「極めて低い」の4段階で評価することとした。

表3 列車通過による影響の評価基準

判定基準	可能性
列車通過時のC/Nの計算結果 ≤ 所要C/N	高い
所要C/N < 列車通過時のC/Nの計算結果 ≤ 所要C/N + 9dB	あり
所要C/N + 9dB < 列車通過時のC/Nの計算結果 > 所要C/N + 20dB	低い
所要C/N + 20dB < 列車通過時のC/Nの計算結果	極めて低い

4. 予測計算プログラムの開発

4.1 プログラムの機能

前章で述べた予測手法を実際に利用できるようにするため、以下のような機能を有するWindowsのアプリケーションプログラムを開発した。

- ① 計算条件の入力  
(送信所, 鉄道構造物, 受信点, 推定方法)
- ② 送信点~受信点間の位置条件による伝搬経路モデ

ルの決定

- ③ 決定した伝搬経路モデルによる受信電界強度の計算
  - ④ 受信電界強度の計算結果に基づく列車通過時における障害の可能性の予測
  - ⑤ 計算条件および予測結果のファイルへの出力
- 開発した予測計算プログラムのスクリーンショットを図4に、また動作環境を表4に示す。

このプログラムでは、計算対象とする地域と送信所を選択して、鉄道構造物と受信地点の位置条件などのパラメータを設定することにより、列車通過に伴うC/Nの変動幅と影響の可能性を予測計算する。鉄道構造物~受信点間の水平距離と、アンテナの高さについては、計算する範囲を設定でき、プログラム上で自動的に受信点の位置を変えながら計算させることができる。なお、送信所については、プログラム起動時に送信所のリストを自動的に読み込んで設定するため、自由に設定の追加・修正等が可能である。

予測計算の結果は、設定したパラメータおよび計算過程で得られた値と併せて一覧表に表示されるが、Excelなど外部のソフトでグラフ化などの処理が行えるよう、テキストファイル(CSV形式)に出力することもできる。本プログラムが出力する計算パラメータおよび計算値の一覧を表5に示す。

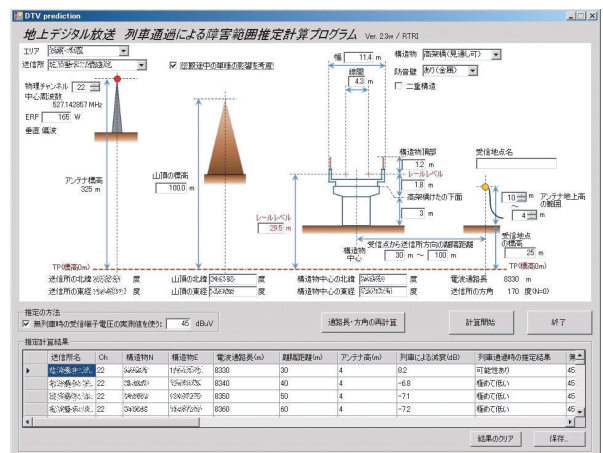


図4 予測計算プログラムのスクリーンショット

表4 予測計算プログラムの動作環境

項目	条件
OS	Microsoft Windows XP (Service Pack 2以降)
CPU	Pentium 1GHz以上を推奨
ビデオ	1024 × 768以上を推奨
実行環境	Microsoft .Net Framework 2.0
メモリ	512MB以上
HDD	2MB以上の空き領域 (プログラムのインストールに必要な領域)

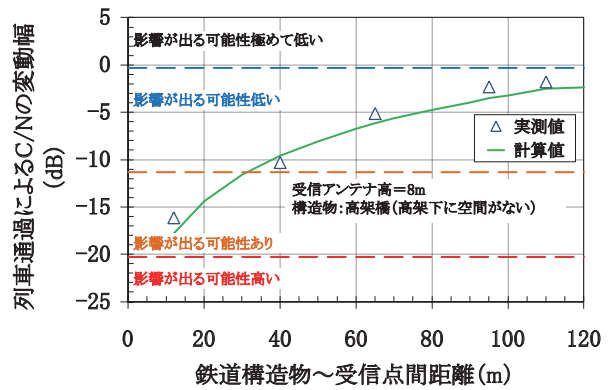
表5 予測計算プログラムの出力

#	項目名	内容
1	送信所名	選択された送信所の名称
2	チャンネル	計算対象とした物理チャンネル
3	構造物中心のN	鉄道構造物の北緯(度)
4	構造物中心のE	鉄道構造物の東経(度)
5	送受信点間距離	送受信点間の電波通路長(m)
6	離隔距離	鉄道構造物と受信点との水平離隔距離(m)
7	アンテナ高	受信アンテナの地上高(m)
8	列車による減衰	列車通過による受信レベルの変動幅の計算結果(dB)
9	列車通過時の影響の予測結果	無列車時に最低限必要となる受信端子電圧(dBμV)または列車通過時に影響が出る可能性を4段階で推定した結果
10	無列車時の受信端子電圧	無列車時の受信端子電圧の計算結果または入力された実測値(dBμV)
11	ERP	設定された実効放射電力(W)
12	高架下通過	高架下を通過して受信点に到来する成分の有無の判定結果
13	構造物による減衰	構造物による放送波の減衰量の計算結果(dB)
14	受信地点名	地名・コメント
15	受信地点の標高	受信地点の地面の海拔高(m)
16	送信点の標高	送信点の地面の海拔高(m)
17	構造物	構造物の種類
18	RL	レールレベルの海拔高(m)
19	高架橋下面～地面	地面～高架橋下面の高さ(m)
20	高架橋桁下面～RL	高架橋下面からRLまでの高さ(m)
21	防音壁の種類	防音壁の種類
22	防音壁の高さ	防音壁の高さ(m)
23	構造物の幅	構造物の幅(m)
24	軌道間隔	上り線と下り線の距離(m)
25	自由空間波	放送波の自由空間電界強度(複素数:V/m)
26	大地反射波	大地反射波の電界強度(複素数:V/m)
27	回折波(無列車)	無列車時の電界強度(複素数:V/m)
28	回折波(列車)	列車通過時の電界強度(複素数:V/m)

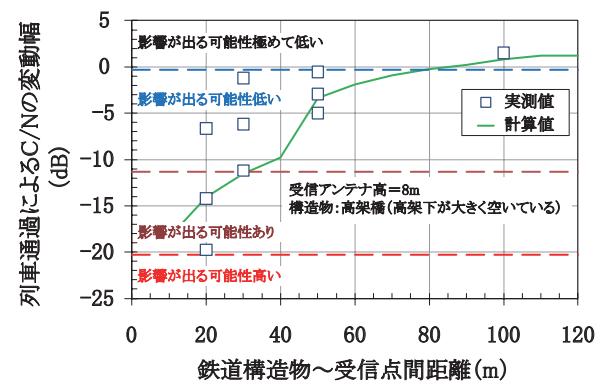
4.2 予測計算結果と実測値との比較検証

開発したプログラムを用いて計算した列車通過に伴うC/Nの変動幅と、実測試験で得られた値とを比較した結果の一例を図5に示す。横軸は鉄道構造物の中心と受信点との水平離隔距離(m)、縦軸は列車通過に伴うC/Nの変動幅(dB)である。図中の実線が計算値、△・□が実測値である。図5(a)は高架下の空間が空いていない場合、図5(b)は高架下の空間が空いている場合である。なお、図中の破線は、列車通過による影響を評価するためのしきい値であり、無列車時のC/Nから決定される値である。

図5より、プログラムの計算結果は実測値と同様の傾向を示しており、簡易的な予測に利用できる誤差で計算



(a) 高架下の空間が空いていない場合



(b) 高架下の空間が空いている場合

図5 開発した予測計算プログラムによる計算値と実測値との比較例

できていることがわかる。これにより、列車の有無による回折損の変化や高架下を通過する電波の有無、ならびに電波雑音強度の上昇量を考慮してC/Nの変動幅を計算する手法が有効であることが確認できた。

なお、放送波の到来方向と鉄道との交差角度が浅くなる地点や、受信点の周囲が山や建造物などに囲まれている地点、送信所～受信点間が極端に近い地点などの条件では、計算値と実測値との差が大きくなることも確認している。

5. 今後の展開

本稿で述べた予測計算プログラムでは、送信所～受信点間の地形による影響を極めて単純なモデルとして扱っており、受信レベルの絶対値の予測計算の誤差が20dBより大きくなる場合がある。列車通過に伴うC/Nの変動幅のみを算出するためであれば、絶対的な受信レベルの計算誤差が大きな問題とはならないことが確認できたものの、最終的に影響が発生するか否かを予測する際には、受信レベルの予測計算誤差が影響する。このため、本プログラムでは、無列車時の受信レベルの実測値、ある

特集：信号通信技術

いは定常的な受信レベルを予測計算する市販のソフトウェアの計算結果を入力することにより、より精度のよい予測ができる機能を持たせている。しかし、実測値が得られない場合、あるいは本プログラムのみで影響が発生する可能性を予測する場合には、本プログラムにおける受信レベルの絶対値の予測計算精度が、最終的な予測結果の精度に大きな影響を与えてしまう。

そこで現在、次のステップとして、受信レベルの絶対値の計算精度を向上するため、送信所～受信点間の地形を考慮して多重回折の計算を行う手法の導入を検討している(図6)。これにより、本プログラムのみで無列車時・列車通過時の双方の受信品質の予測評価が可能となる。

さらに、今回開発したプログラムでは、鉄道構造物の位置や受信点の位置を数値で入力する必要があり、また、計算結果についても、数値データとして表示・保存する機能しか有していない。このため、計算条件の入力ミス等が発見しにくく、影響が起こる可能性のある範囲を直感的に把握しにくい欠点がある。そこで、数値地図データを活用し、計算条件の入力や計算結果の表示を地図上で行えるようにするための機能向上も検討している。これにより、使い勝手が向上するばかりでなく、放

送波の到来方向と鉄道構造物との交差角度をプログラム上で容易に算出でき、受信レベルの予測計算に反映できるため、4.2節で述べたような交差角度による予測精度の劣化などの問題点を解決できる見込みである。

6. まとめ

列車通過に伴う地上デジタル放送の受信品質の変化を予測計算する手法について、基本的な考え方を述べ、具体的な予測計算プログラムの概要を紹介した。開発した予測計算プログラムは、列車通過時の影響や受信レベルの変動を測定すべき箇所・の絞り込み、優先順位付けのほか、沿線における受信品質の概況の予測などにも利用できるものと考えている。

今後、受信レベルの予測計算精度の向上と使い勝手の向上を図るほか、実際に現場で得られる実測値に基づく受信品質の評価機能等の追加も行い、鉄道沿線における受信環境を総合的に予測・評価できるシステムへと発展させる予定である。

文献

- 1) 佐々木, 黒田: “地上デジタル放送方式”, NHK 技研 R&D No.56 pp.4-19, 日本放送協会放送技術研究所, 1999
- 2) 日本放送協会営業局受信技術センター: “建造物障害予測の手引き—地上デジタル放送”, 日本 CATV 協会, 2005
- 3) 松本: “電波工学入門”, pp.253-254, 朝倉書店, 1974
- 4) 高田: “OFDM 信号の伝送特性”, NHK 技研 R&D No.56 pp.30-42, 日本放送協会放送技術研究所, 1999
- 5) 岡野: “地上デジタル放送の伝送実験”, NHK 技研 R&D No.56 pp.49-62, 日本放送協会放送技術研究所, 1999
- 6) 電気通信技術審議会答申 諮問第 74 号および第 98 号, 1999
- 7) NHK 受信技術センター編: “知っておきたい地上デジタル放送”, NHK 出版, 2003

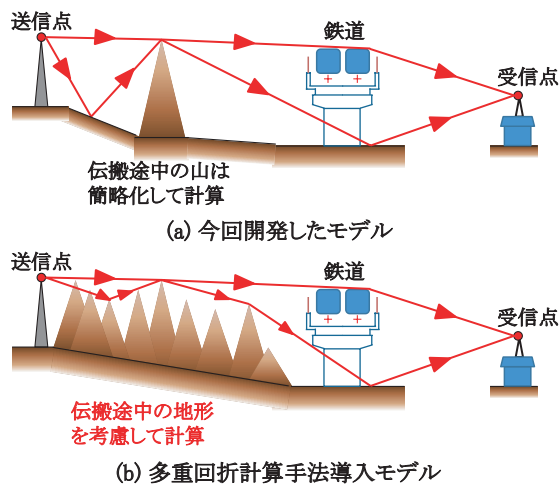


図6 受信レベルの絶対値の予測計算精度の向上