

情報通信審議会 情報通信技術分科会

移動通信システム委員会

報 告（案）

参考資料

目次（案）

参考資料 1	アマチュア無線業務との干渉検討	2
参考資料 2	電波天文業務との干渉検討	6
参考資料 3	空中線電力の偏差に関する検討	44

参考資料 1 アマチュア無線業務との干渉検討

77.5GHz 帯アマチュア局においては無線電信、FMテレビジョン方式の利用がなされている。79GHz 帯高分解能レーダシステムからアマチュア局への干渉については許容干渉レベルを満たす離隔距離をメインビーム対向の条件で求め、同様にアマチュア局から 79GHz 帯高分解能レーダシステムへの干渉については LNA 入力値 $P_{1dB} = -10\text{dB}$ を満たす離隔距離をメインビーム対向の条件で求めた。それらの値と実運用の形態からメインビームによる干渉確率を考慮し、共用について検討した。

1 前提条件

干渉検討に用いたアマチュア局、79GHz 帯高分解能レーダの送信パラメータ、許容干渉レベル等の前提条件は表 1-1、表 1-2 に示すとおりである。ここではメインビームが対向した場合について評価を行う。

表 1-1 アマチュア局の前提条件（メインビーム方向にて検討を行う）

周波数	77.75GHz
出力	200mW (23dBm)
アマチュア局アンテナ利得	35dBi (メインビーム)
許容干渉レベル	(1) -126dBm (帯域 2.4kHz) 無線電信 (2) -78dBm (帯域 20MHz) FM テレビジョン
与干渉アマチュア局	1局

表 1-2 79GHz 帯高分解能レーダの前提条件（メインビーム方向にて検討を行う）

周波数	77.75GHz
レーダ出力 (e. i. r. p.)	9dBm/MHz (10dBm/4GHz、アンテナ利得 35dBi)
アマチュア局アンテナ利得	35dBi (メインビーム)
IP1dB	-10dBm (LNA 入力値)
与干渉レーダ台数	1台

2 79GHz 帯高分解能レーダ与干渉の場合

79GHz 帯高分解能レーダ側与干渉、アマチュア局側被干渉とした場合の計算条件を表 2-1 に示す。

表 2-2 計算条件

閾値	(1) -126dBm (帯域 2.4kHz) 無線電信 (2) -78dBm (帯域 20MHz) FM テレビジョン
伝搬モデル	自由空間伝搬
干渉緩和要素	<p>a) FMCW レーダにおいてはレーダ掃引周波数 4GHz、アマチュア局帯域 2.4kHz の場合、干渉時間率は 6.0e-5%となり干渉電力に 62.2dB の損失が加わった場合に相当する。同様にアマチュア局帯域 20MHz の場合 23.0dB の損失に相当し、それぞれの干渉緩和要素とする。</p> <p>b) 周波数コード変調についてもステップ周波数レーダを例に考えると同様である。</p> <p>以上から FMCW・周波数コードについてもそれぞれの利用形態(帯域)毎に 62.2dB, 23.0dB を干渉緩和要素とする。</p> <p>パルスレーダの場合、ピーク出力時の電力の上限(10dBm)により平均電力が低下する。パルス幅 1ns、duty 比 300 を仮定し、簡単のため 1ns 幅のパルスの占有帯域は 1GHz であるとする、18.77dB 平均電力が低下することになる。また、1GHz の帯域がアマチュア局の使用帯域と重なる確率は 1GHz/4GHz=1/4 であり、6dB の損失とみなせる。</p> <p>合計 24.77dB を干渉緩和要素とする。</p>

アンテナ対向時の干渉電力 P_i [dBm]は、与干渉側電力(ここではレーダ出力)を P_t [dBm]、レーダアンテナ利得(メインビーム)を G_r [dBi]、アマチュア局アンテナ利得(メインビーム)を G_a [dBi]、アンテナ間距離 d [m]、波長 λ [m]、干渉緩和要素 L [dB]とすると自由空間伝搬モデルを用いて以下のように表される。

$$P_i = P_t + G_r + G_a + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 - L \quad (*)$$

(*)式に表 1-1、表 1-2 のパラメータを代入し、帯域あたりの干渉電力が閾値を超えない d の最大値が離隔距離となる。この条件により求められたメインビーム対向時の離隔距離を表 2-3 に示す。

表 2-3 計算結果

メインビーム対向時の離隔距離 (FM/CW、周波数コード、パルス レーダにおける最大値)	(1) の場合 0.27km (参考:(2) の場合 0.12km)
--	---------------------------------------

3 アマチュア局与干渉の場合

アマチュア局側与干渉、79GHz 帯高分解能レーダ側被干渉とした場合の計算条件を表 3-1 に示す。

表 3-1 計算条件

閾値	レーダ側入力レベル=P1dB (-10dBm)
伝搬モデル	自由空間伝搬

前節同様(*)式を用い、アマチュア局を与干渉側として表 1-1、表 1-2 のパラメータを代入し、干渉電力 P_i が表 3-1 の閾値を超えない d の最大値が離隔距離となる。ここでは干渉緩和要素は考慮せず 0 とした。この条件により求められたメインビーム対向時の離隔距離を表 3-2 に示す。

表 3-2 計算結果

メインビーム対向時の離隔距離 P1dB=-10dBm (LNA 入力値)	43.6m
---	-------

4 メインビーム対向確率を考慮した共用可能性

アマチュア局・レーダのメインビーム同士が重なる確率を以下のように求める。

アマチュア局・レーダのアンテナビーム幅をそれぞれ 2 度 (35dBi)、2 度 (35dBi) とし、3dB ビーム幅±1 度よりも十分大きな±5 度で計算することとする。

互いに水平面内 360 度、垂直方向±13 度※ 1 を可動範囲とすると、双方がこのビーム幅内に入る確率は 114ppm となる。

上記のメインビーム対向確率に加え、実際には利得の低下や車両へ搭載する際の損失等が考えられることから、共用が可能であると考えられる。

※ 1 : 道路勾配及び自動車の姿勢角による

参照:林道規定細則

http://www.n-nourin.jp/~nousonmenu/rinmusekkeisiryu/rindosekisansiryu/rindokiteisaisoku_.pdf

参照:自動車走行例

<http://www.tokyo-keiki.co.jp/sensor/j/products/pdf/sample-2gm-drive.pdf>

——参考値——

ーレーダ側与干渉、アマチュア側被干渉の場合ー

メインビーム対向確率を考慮した離隔距離 (FMCW、周波数コード、パルスレーダにおける最大値)	2.9m
--	------

ーアマチュア側与干渉、レーダ側被干渉の場合ー

メインビーム対向確率を考慮した離隔距離 P1dB=-10dBm (LNA 入力値)	1m 以下
--	-------

参考資料2 電波天文業務との干渉検討

1 概要

ミリ波帯レーダシステムが利用する周波数である 77-81GHz においては、電波天文 (79.0-81.0GHz) がこの周波数帯を利用している。この周波数帯における観測を行っている国内の天文台は国立天文台野辺山宇宙電波観測所のみであるため、国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺の地形、車両稼働率等を考慮し 79GHz 帯高分解能レーダシステムからの干渉電力を机上検討により評価し共用について検討した。

表 1-1 各種検討条件毎の離隔距離

検討条件		普及率	
		0.3%	1.0%
2,000 秒単位時間の平均受信電力が国立天文台野辺山宇宙電波観測所閾値 (-191.354dBm/MHz) 以下となる確率が 98%となる距離	半径 10.5km まで均一に見通し内レーダ搭載車両が現れると仮定した場合	9.5km	9.5km
	半径 2.5km 以遠に見通し内レーダ搭載車両は現れない場合	2.5km	2.5km
見通し内時間率 2%を満たし見通し外干渉電力が国立天文台野辺山宇宙電波観測所閾値以下となる距離		400m	1.5km

本計算結果によれば、レーダ干渉の影響は否定できない。しかし、実運用上の諸要素を考慮した結果、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を用いた 79GHz 帯観測に限定する限り、実運用上共用可能であるとの結論に至った。

本参考資料において干渉計算の詳細について述べる。

2 干渉検討に用いた手法

本干渉検討においては、干渉モデルを ITU-R 各種勧告、統計データ等をもとに構築し干渉電力を机上検討により評価する方法を用いた。基本的に国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とする同心円のリングからの各干渉電力を計算し積算することで集合干渉電力を求める。離隔距離は干渉率が 2%以下となる条件にて求める。

2.1 リングモデル

電波天文への干渉計算においては非常に遠距離からの影響を含めて考慮する必要がある。また干渉源となる車載レーダは面状に広く分布することから、十分遠方から所望の距離まで同心円のリングに分割しそれぞれのリングに起因する干渉電力を積算するリングモデルを用いた。具体的には国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とする 1km 刻みの同心円を

考え、幅 1km の各リング内に存在するレーダから天文台望遠鏡への干渉電力をレーダ台数密度分布を仮定し計算する（図 2-1）[1]。リング内のレーダ台数密度及び回折損等を含む伝搬損失はリングを 16 方位で分割し各弧毎に計算を行い合計することでリング 1 周分の干渉電力を求める。各リングからの干渉電力を積算することで合計干渉電力を求められる。このとき半径（内径） R km のリングから最外リングまで各リングの干渉電力を積算することで半径 R km から内側にレーダが存在しない場合の干渉電力を求めることができる。干渉率を考慮しない場合、この合計干渉電力が閾値より小さい条件を満たす最小の R が離隔距離となる。これらを計算するため、各計算地点におけるレーダ台数密度、国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺の地形による回折損等のモデルを構築した。

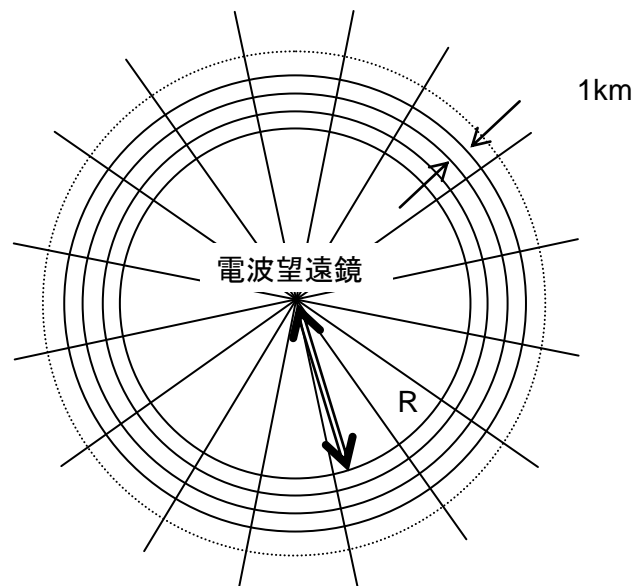


図 2-1 リングモデル概要図。国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とした幅 1km のリングを 16 方位に分割しそれぞれの干渉電力寄与分を計算、最外円から半径 R km まで積算することで離隔距離 R km とした場合の干渉電力を求める。

2.2 干渉率

干渉源である車載レーダは基本的に移動体であり干渉電力は干渉源と天文台アンテナの間が樹木等の遮蔽により見通し内環境であるか見通し外環境であるかによって大きく異なり、樹木等が伝搬路を遮る見通し外領域をレーダ車両が通過中は干渉電力は低下する。本検討ではこの変動を考慮し、干渉により観測が困難となる場合が 2% 生じる状況を受容限界とした[2][3]。ここでは複数の考え方により干渉率を考慮した計算を行った。

3 計算条件

3.1 電波天文（被干渉）側の前提条件

被干渉側の前提条件は表3-1のとおりである。電波天文業務における干渉閾値は参考文献[4]をもとに国立天文台野辺山宇宙電波観測所のパラメータから計算した。なお、80GHz付近を観測予定の天文台は国内では国立天文台野辺山宇宙電波観測所のみである。

表3-1 被干渉側の前提条件

周波数	79GHz
電波天文アンテナ利得	0dBi（全方向平均）
電波天文干渉閾値 （国立天文台野辺山宇宙電波観測所における80GHz帯連続波観測の閾値を用いる）	-191.354dBm/MHz $= 10\log(1.3806503 \times 10^{-23} \times 150 / \sqrt{4 \times 10^9 \times 2000}) - 10 + 90$ $(= 10\log(kT / \sqrt{B\tau}) - 10 + 90)$ k: ボルツマン定数、T: 雑音温度、B: 帯域、 τ : 観測時間
電波天文アンテナ高さ（国立天文台野辺山宇宙電波観測所45m電波望遠鏡）	標高1349m、ディッシュ中央地上24.5m、最大47m

3.2 79GHz帯高分解能レーダ（与干渉）側前提条件

与干渉側の前提条件は表3-2のとおりである。

表3-2 与干渉側の前提条件

周波数	79GHz	
レーダ出力（e. i. r. p.）	-26dBm/MHz （10dBm/4GHz、アンテナ利得0dBi）	
レーダアンテナ利得	0dBi（全方向平均）	
レーダアンテナ高さ	0.5m	
想定レーダ普及率	0.3%を基本とする	
車両あたりレーダ数	4台	
レーダ台数密度	（半径100km以内）回折損計算点が属する市町村のレーダ台数密度をそのまま計算点におけるレーダ台数密度とする（各市町村レーダ台数密度の計算方法は後述） ただし非居住地である山岳地は0台/km ² とする山岳地補正を加える	（半径100km超） 40台/km ² （全国平均値）

3.3 干渉電力計算方法（伝搬モデル）

伝搬モデルを含む干渉電力の計算概要は表3-3のとおりである。

表3-3 伝搬モデルの概要

	0-10km	10-45km	45-100km	100km 超
伝搬損失	（半径 45km 以内）自由空間伝搬損 +酸素・水蒸気による吸収損失を考慮（甲府市の乾燥時期の気圧、気温、蒸気圧データを元に基に ITU-R P. 676 から酸素・水蒸気吸収損を計算し加える。0.094dB/km）		（半径 45km 超）ITU-R P. 620 の調整距離を求める過程で使われる伝搬損失式を使用。	
地形による回折損	（半径 100km 以内） 国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を中心とする 16 方位の地形断面図を元に、地形を考慮した二重（または単一）ナイフエッジによる回折損を計算する（等価地球半径を考慮）。			（半径 100km 超）高さ 30m の二重ナイフエッジによる回折損（1 枚目の遮蔽体は電波天文アンテナからの見通し限界点、2 枚目はレーダから 2km 内側のリングに配置）（等価地球半径を考慮）
干渉緩和要素	この領域では都市構造による遮蔽損は適用していない	都市構造（建築物）による遮蔽損 10.16dB		
	見通し外環境においては樹木による遮蔽損 35dB、見通し内環境では 0dB	この領域では樹木による遮蔽損は適用していない		
	A：見通し率 2% 未満の条件下で見通し外干渉電力により評価 B：2000 秒観測時間単位の平均干渉電力が閾値となる 2000 秒間観測時間単位の割合 2% を許容	山岳遮蔽により車載レーダは見通し外とみなす		

4 伝搬モデル計算式

ここでは3. 3で示された計算方法の詳細を説明する。なおレーダ台数密度モデルについては5節で、干渉率を考慮した計算については8節にて示す。

4.1 空間伝搬損

回折損・遮蔽損を除いた空間伝搬損は以下の計算式により求める。基本的には参考文献[5]の調整距離を求める過程で使われる伝搬損失式を使用するが、有効範囲は45km以遠であるため、45km以内は自由空間伝搬損に酸素水蒸気による吸収損を加えた式を使用した[6]。

$$L = \begin{cases} L_1 & (d < 45\text{km}) \\ L_4 & (d \geq 45\text{km}) \end{cases}$$

$$L_1 = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) + L_{\text{water+oxygen}} d \quad [\text{dB}] \quad f:\text{MHz}, d:\text{km}$$

$$L_{\text{water+oxygen}} = 0.094 \quad [\text{dB/km}] \quad \text{乾燥期の減衰係数} (*)$$

$$L_4 = L_7 + L_9(p_1[\%])$$

$$L_7 = 92.5 + 20\log(f[\text{GHz}]) + A_h$$

A_h : total loss due to terrain shielding ここでは0とし別途距離と方角に応じ計算した回折損等を加える(4.2、4.3、4.4)

$$L_9(p_1) = \gamma_{gm} d + 20\log(d) + 2.6 \left[1 - \exp\left(\frac{-d}{10}\right) \right] \log\left(\frac{p_1}{50}\right) \quad d:\text{km}, P_1:0.01\%$$

$$\gamma_{gm} = \left[2 \times 10^{-4} (1 - 1.2 \times 10^{-5} f^{1.5}) + \frac{4}{(f - 63)^2 + 0.936} + \frac{0.28}{(f - 118.75)^2 + 1.771} \right] f^2 6.24 \times 10^{-4} + (0.039 + 7.7 \times 10^{-4} f^{0.5}) f^2 2.369 \times 10^{-4}$$

$P_1=0.01$ は伝搬損失下位0.01%の値を使用することを意味し、低損失の場合の数値を用いている。

(*) 半径45km以内で使用する大気の減衰係数は野辺山天文台に比較的近く気象データの揃っている甲府市の値とした。気象庁統計情報[7]より甲府市の2005-2009年までの各月1日の時間データから1時間ごとの気圧、気温、水蒸気圧を読み取り水蒸気量(g/m^3)を求めた。これらの値に参考文献[8]を適用し酸素・水蒸気による減衰量(dB/km)に換算、その最小値を半径45km以内の乾燥大気による減衰係数とした。図4-1に計算された水蒸気・酸素による吸収減衰量の累積分布を示す。求められた酸素・水蒸気による吸収損の最小値は0.094 dB/km であった。

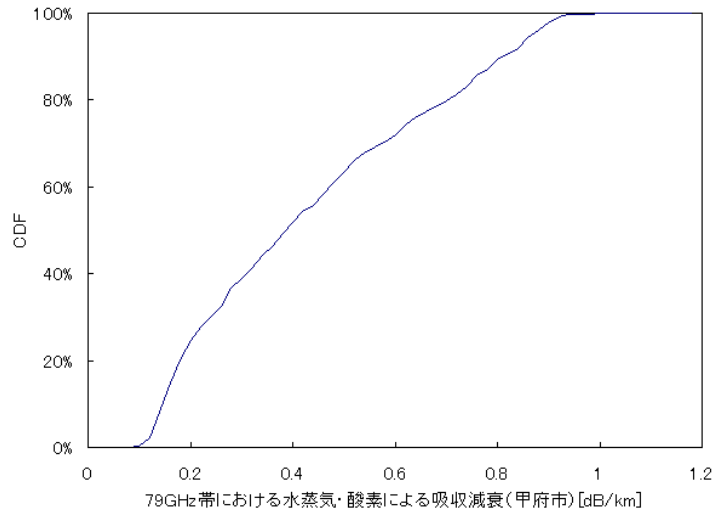


図 4-1 甲府における水蒸気・酸素による吸収減衰の累積確率分布（2005-2009 年）。

4.2 地形による回折損

野辺山天文台から半径 100km 以内については野辺山天文台周辺の地形から、大きなエッジを 5-6 個選び、各計算点ごとにその中で支配的な 1 枚または 2 枚のエッジによる回折損を計算する。回折損の計算に用いる地形情報は国土地理院の 10m メッシュ標高データを用いた[9]。野辺山天文台周辺の地形断面図（16 方位）を、選択されたエッジ頂点及びレーダ台数密度とあわせて図 5-1 ~ 図 5-16 に示す。

半径 100km 以上については、地球の曲率による天文台からの見通し限界距離に 1 枚のエッジ、レーダ前方 2km にもう一枚のエッジをおいた二重エッジ回折によりモデル化した。エッジの高さは 30m とした。このモデルによる回折損は適用の境界となる 100km 付近で約 76dB であり、この距離では計算された 16 方位全てにおいて実際の地形から求めた回折損より小さな値となることを確認している。

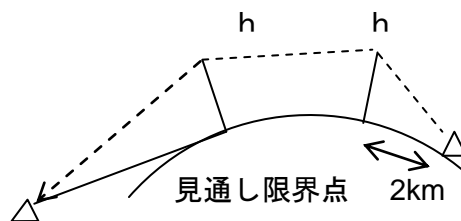


図 4-2 半径 100km 以上での回折損モデル

エッジ 1 枚の場合の回折損は等価地球半径 Ka を考慮し以下のように表される[10]。 $h1$: 天文台アンテナ高、 $d1$: 天文台アンテナとエッジ間距離、 $d2$: エッジとレーダ間距離、 $h2$: レーダ高さである。なお等価地球半径係数 $K=4/3$ 、地球半径を 6370km とした。

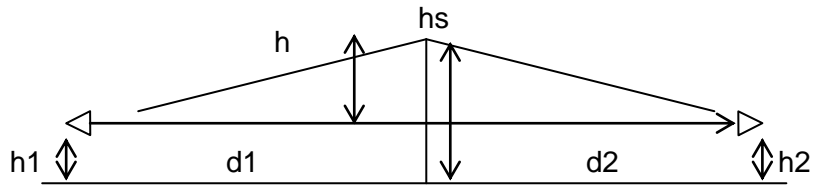


図 4-3 ナイフエッジ回折モデル

$$L_d = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1)$$

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

$$h = -\frac{h_1 d_2 + h_2 d_1}{d_1 + d_2} + \frac{d_1 d_2}{2Ka} + h_s$$

二重ナイフエッジ(図 4-4)の場合は前述のナイフエッジ回折モデルを組み合わせて計算する。

[10]

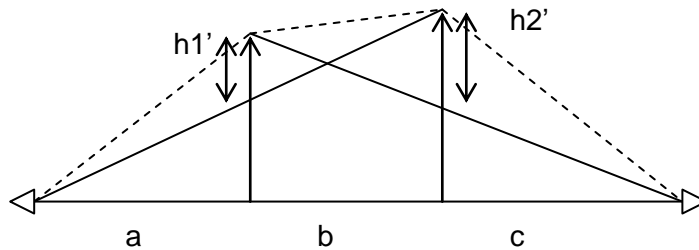


図 4-4 二重ナイフエッジ

図 4-4 において左アンテナと右エッジ頂点の間で左エッジによる回折損 L_{d1} を前述のナイフエッジ回折モデル計算式から求め、左エッジ頂点と右アンテナの間で右エッジによる回折損 L_{d2} を同様に求める。全損失は L_{d1} 、 L_{d2} 、付加損失 L_c の和となる。(付加損失は L_{d1} 、 L_{d2} が 15dB 以上の場合加える)

$$L = L_{d1} + L_{d2} + L_c$$

$$L_c = 10 \log \left\{ \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right\}$$

なお、回折損の計算に用いる天文台アンテナ高さはディッシュ中央と先端の 2 種類としている。これはアンテナ中央では見通し外であっても先端では見通し内となる可能性を考

慮したものである。円周の接線と円の中心から等距離となる直線で2分される領域の面積比により2つの回折損を合成し最終的な回折損とした。ディッシュ中央で計算される回折損を $L_{d-center}$ 、ディッシュ先端で計算される回折損を L_{d-top} とすると合成回折損は以下のように表される。

$$L_d = -10 \log \left(0.1955 \times 10^{-L_{d-top}/10} + 0.8045 \times 10^{-L_{d-center}/10} \right)$$

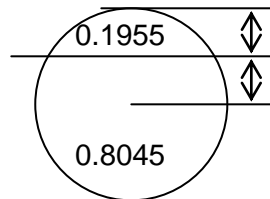


図 4-5 面積比

4.3 市街地構造による干渉緩和要素

車載ミリ波レーダは家屋等の建物より十分低い位置に取り付けられるため、建物は伝搬路を遮蔽する干渉緩和要素となりうる。ここでは市街地建築物による遮蔽効果について考察する。国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺の平均的な面積あたり建物密度・平均的建物の大きさの統計値から建物に起因する見通し確率を求め市街地構造による干渉緩和要素とする。

長野県・山梨県内の約 20 年間 (S63-H20) の建築着工統計調査[11][12]から、建物 1 件あたり延べ床面積は 197m²であった (年代による大きな違い、傾向は見られない)。平均的な構造を 2 階とし、これから建物の幅は約 10m とみなす。野辺山近傍の半径 10-50km に存在する市町村を例として考えると、合計世帯数 461,989、合計事業所数 65,765 から計 527,754 の建物があるとし 93.6 件/km²となる。

ここで建物の位置は一様ランダムに分布すると仮定する。このとき、見通し率 $p(x)$ は建物密度 A 、建物幅 w 、伝搬路の市街地通過距離 x とすると、微小区間 dx だけ見通し距離が伸びたときの見通し率の変化分 $dp(x)$ は以下のように表される

$$dp(x) = -p(x)Awdx$$

$p(0)=1, p(\infty)=0$ であるから見通し率 $p(x)$ は

$$p(x) = \exp(-Awx)$$

と表される。市街地エリアを直径 5km と考え平均的な伝搬路の市街地通過距離は 2.5km とし上記の数値を代入すると $p(x)$ は 0.0963 となり、減衰に換算すると 10.16dB となる（レーダ台数密度が 0.0963 倍に減少した場合と等価である）。この値を地形による見通し外領域となる 10.5km 以遠の計算に用いた。

4.4 植生による遮蔽損

樹木減衰の値としては、参考文献[13] の Fig. 2 Specific attenuation due to woodland に単位深さ（樹木帯幅）当りの減衰量が周波数の関数として示されており、80GHz に外挿した値 15dB/m を減衰の基本とした。実測値の例としては参考文献[14]に 75GHz についての限定された測定結果が示されており、4m の深さで 35dB の減衰、7m の深さでは 60-80dB の減衰である。

国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺の遮蔽環境における樹木の深さは最低でも 2.5-4m、多くの場合は 10m またはそれ以上ある森、林と考えられ、樹木の平均減衰量は 35dB 以上として妥当と判断し干渉計算においては 35dB を使用した。

4.5 集合電力計算

国立天文台野辺山宇宙電波観測所 4.5m 望遠鏡を中心とする間隔 1km の同心円を方位により 16 分割した領域を最小単位とし、各領域からの干渉電力を合計することで全干渉電力を求める。

レーダの送信電力 P_t [dBm/MHz]、 i 番目のリングを等角度で 16 分割した j 方向における領域 C_{ij} 内のレーダ密度を n_{ij} [/km²]、領域 C_{ij} の内径 d_i における全伝搬損（空間伝搬損、回折損、その他緩和要素を含む）を $L_{xj}(d_i, p_1)$ [dB] としたとき（ p_1 は 4.1 参照）、領域 C_{ij} 内のレーダ数 N_{ij} とそれらからの集合干渉電力 P_{rij} [dBm/MHz] は下記のように表される。（ここで内径により伝搬損を見積もるのは安全サイドに立った計算である）

$$N_{ij} = \pi n_{ij} (d_{i+1}^2 - d_i^2) / 16$$

$$P_{rij} = P_t - L_{xj}(d_i, p_1) + 10 \log(N_{ij})$$

外径 d_{i+1} 内径 d_i のリング（ i 番目のリング）による集合干渉電力 P_{ri} は 16 方位分を合計し求める。

$$P_{ri} = 10 \log \left(\sum_{j=1}^{16} 10^{\frac{P_{rij}}{10}} \right)$$

これらを十分遠方から内側の所望の距離まで積算することにより集合電力を計算することができる。本検討では 1km 刻み 500 個のリングにより電力を計算しており、 m 番目のリング及びその外側のリングに起因する集合干渉電力は以下のように表される。

$$P_r(m) = 10 \log \left(\sum_{i=m}^{500} 10^{\frac{P_{ri}}{10}} \right)$$

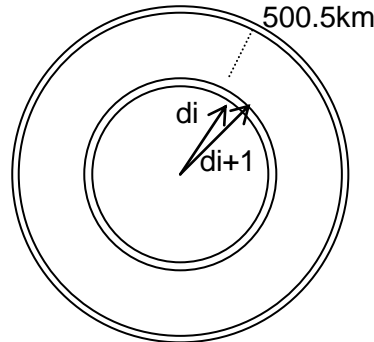


図 4-6 微小リング

5 レーダ台数密度モデル

レーダ台数密度モデルは干渉計算点（16分割されたリングの内径側中心点）の位置が与えられたとき、その場所の（普及率100%における）レーダ台数密度 n_{ij} [台/km²] を与えるものである。なお干渉計算では普及率を乗じた数値を用いる。この節では特に断らない限りレーダ台数密度とは普及率100%の場合の数値である。

本検討においては国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とする半径100km内外について以下のように与えた。なお車両1台あたり4台のレーダが利用されるものとする。

$$n_{ij} = \begin{cases} \text{各干渉計算点が属している市町村のレーダ台数密度 (100km以内)} \\ \quad \text{ただし車両の進入できない山岳地は} 1 \times 10^{-7} \text{ [台/km]} \\ 40 \text{ [台/km}^2 \text{]} \text{ (全国平均値)} & (100\text{km以遠}) \end{cases}$$

100km 以内の各市町村のレーダ台数密度は統計データにより以下のように決定する。

(1) 長野県、群馬県、山梨県については各市町村（野辺山天文台近傍の北杜市については合併前の旧市町村単位）の面積あたり車両保有台数×4に稼働率を掛ける（天文台提供データ）。

(2) 栃木、埼玉、東京、静岡、神奈川については各県ごとに定まる係数[稼働レーダ台数/人]（天文台提供データ）を各市町村の人口密度[15]に掛ける。

以上の手続きにより各市町村ごとにレーダ台数密度が一意に定まる。各干渉計算点のレーダ台数密度は干渉計算点がどの市町村に属しているかを逆ジオコーディングにより調べ、その点が属する各市町村のレーダ台数密度をそのまま採用する。ただし車両の侵入できない山岳地については $1e-7$ を割り当てる。（対数計算のエラーを防ぐもので実質0である）

100km 以遠については全ての計算点において（本来であれば海上となる領域も含む）全国平均値 40 台/km² を使用する。

上記の計算で使用する自動車の稼働率（日中 12 時間）は車両の年平均走行距離を用いて以下のように推定する

$$\begin{aligned} \text{稼働率} &= \text{日中 12 時間中の使用時間} / 12 \\ &= (\text{日中 12 時間中の走行距離} / \text{平均速度}) / 12 \\ &= \text{年間平均走行距離} / 365 \times (\text{日中平均交通量} / \text{平均交通量}) / \text{平均速度} / 12 \end{aligned}$$

平均交通量、平均速度は国土交通省道路交通センサス[16][17]のデータを、年間平均走行距離は中古車走行距離データ [18]を用い各県ごとの稼働率が計算できる。計算された県別の自動車稼働率等を表 5-1 に示す。

表 5-1 各県の車両稼働率

	長野県	山梨県	群馬県	東京都	埼玉県	神奈川県	栃木県	静岡県
日中平均交通量/12h	4926	5562	6900	17134	12070	15952	6857	8200
平均交通量/24h	6593	7453	9106	26000	17000	23000	9112	注)
平均速度[km/h]	36.7	33.6	31.1	19.6	26.0	23.9	36.8	32
年平均走行距離[km]	10514	10514	8336	8336	8336	8336	8336	9710
稼働率[%]	4.9	5.3	4.6	6.4	5.2	5.5	3.9	4.4

注) 昼夜率（日中 12 時間平均交通量/平均 24 時間交通量）=1.57

長野県、群馬県、山梨県については下記の各年度市町村別車両保有台数（天文台提供データ）[19]と稼働率の積の 4 倍（車両 1 台あたりレーダ台数）が各市町村レーダ台数密度となる。

- ・平成 21 年長野縣市町村車両保有台数（天文台に近い北杜市は合併前の旧市町村）
- ・平成 18 年群馬縣市町村車両保有台数
- ・平成 16 年山梨縣市町村車両保有台数

栃木県、埼玉県、東京都、静岡県、神奈川県については平成 18 年県別車両保有台数、平成 21 年県別人口及び前述の稼働率から、県別換算係数（稼働レーダ台数/人）を以下のよう求めた。

$$\text{県別換算係数} = \text{県別車両保有台数} \times \text{稼働率} \times 4 (\text{車両一台あたりレーダ台数}) / \text{県別人口}$$

表 5-2 県別換算係数

	東京都	埼玉県	神奈川県	栃木県	静岡県
車両保有台数	4638303	3885610	4001581	1628424	2790870
人口	12988797	7170362	9005176	2010732	3787982
県別換算係数	0.09	0.11	0.10	0.13	0.13

この換算係数と各市町村人口密度の積がレーダ台数密度となる。なお、100km 圏内にはこれら以外の県の市町村も数少ないが存在する。これらの市町村については最大の県別換算係数である 0.13 を各市町村人口密度に乗じてレーダ台数密度とした。

以上の方法により計算された、半径 100km 以内における全干渉計算点のレーダ台数密度を表 5-3 に示す。また、図 5-1 ～図 5-16 に 16 方位毎のレーダ台数密度を示す。各距離の円弧内に市町村役場が存在した場合、その市町村のレーダ台数密度もあわせて示す。

表 5-3 計算に用いた 16 方位のレーダ台数密度[台/km²] (半径 100km 以内、普及率 100% 時)

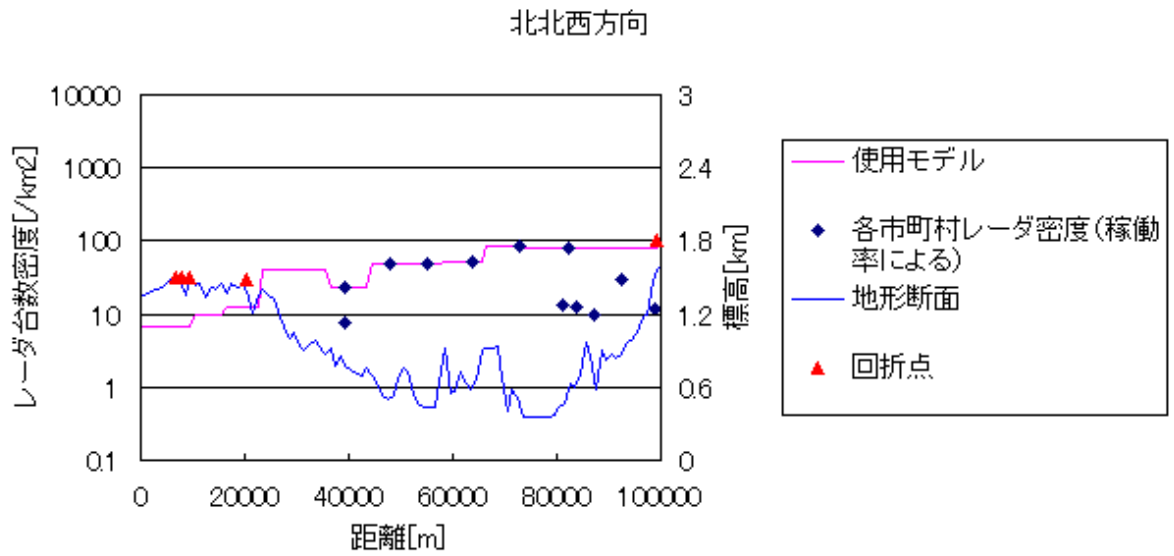


図 5-1 北北西方向の地形とレーダ台数密度

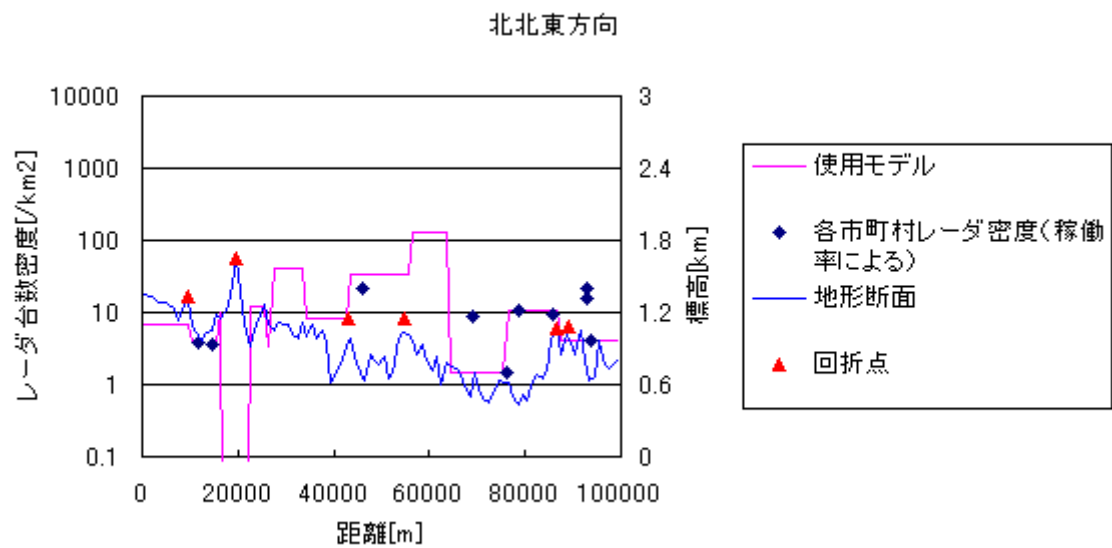


図 5-2 北北東方向の地形とレーダ台数密度

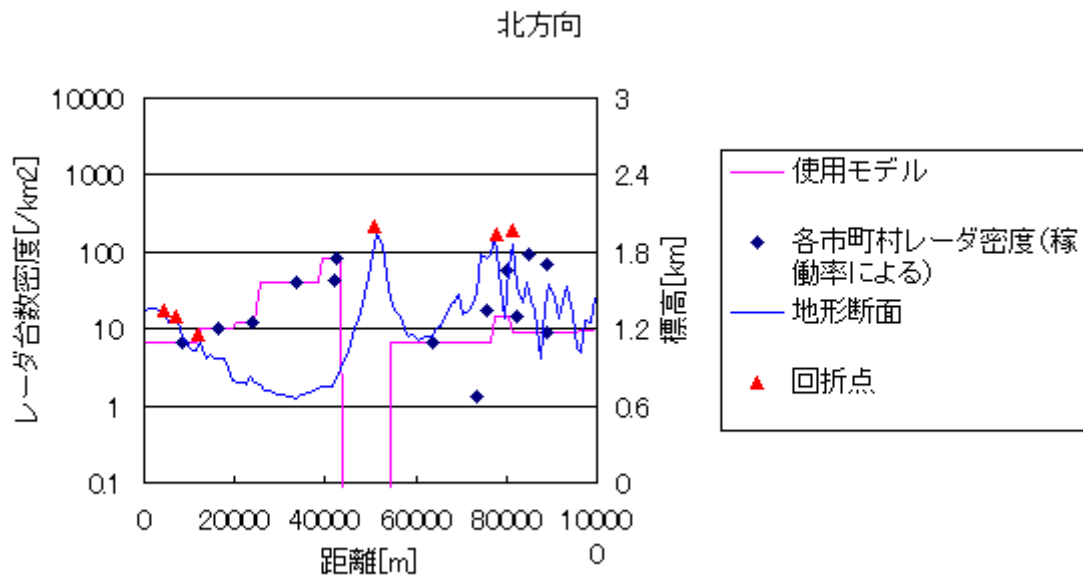


図 5-3 北方向の地形とレーダ台数密度

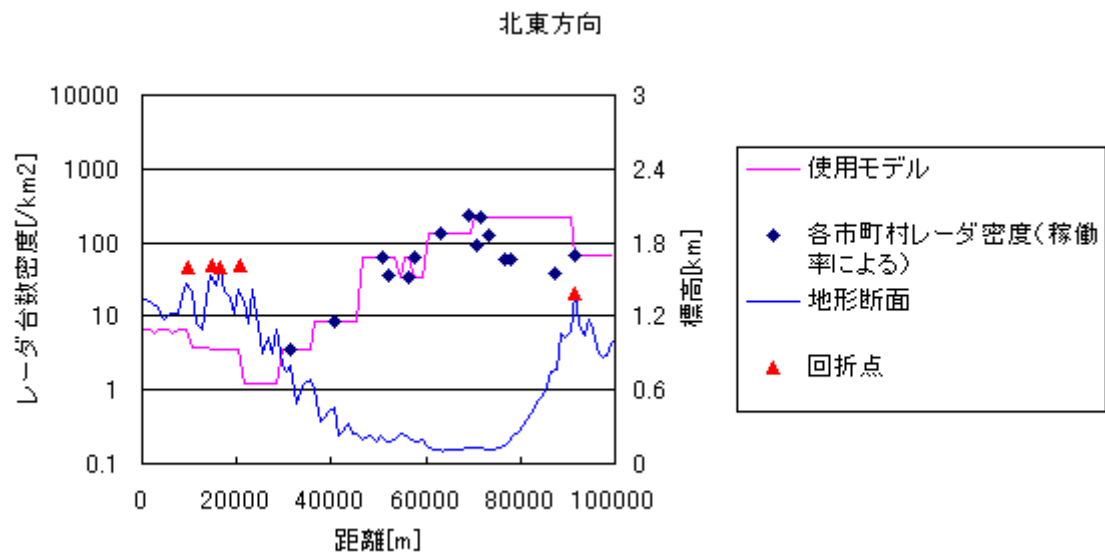


図 5-4 北東方向の地形とレーダ台数密度

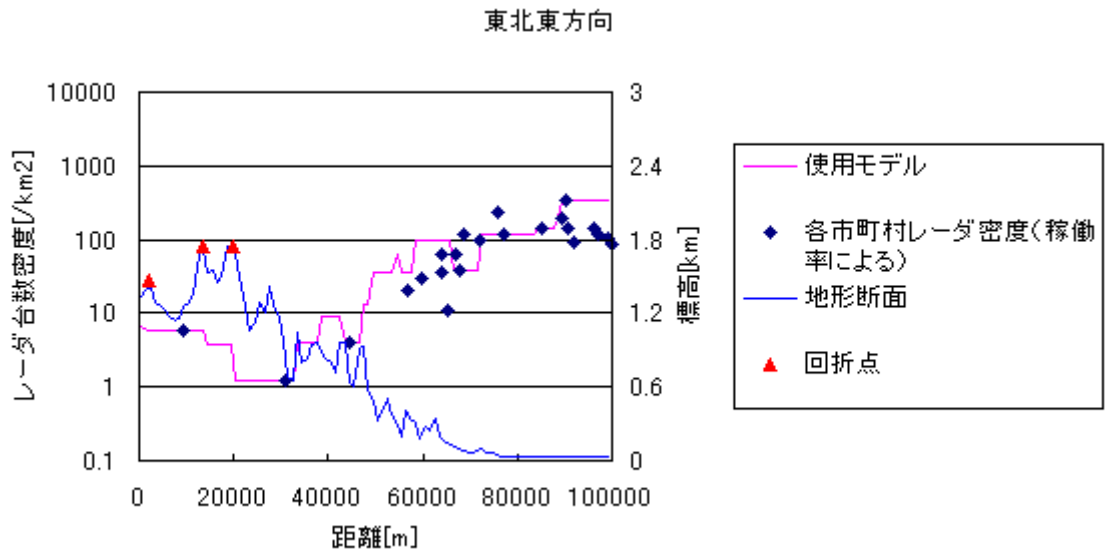


図 5-5 東北東方向の地形とレーダ台数密度

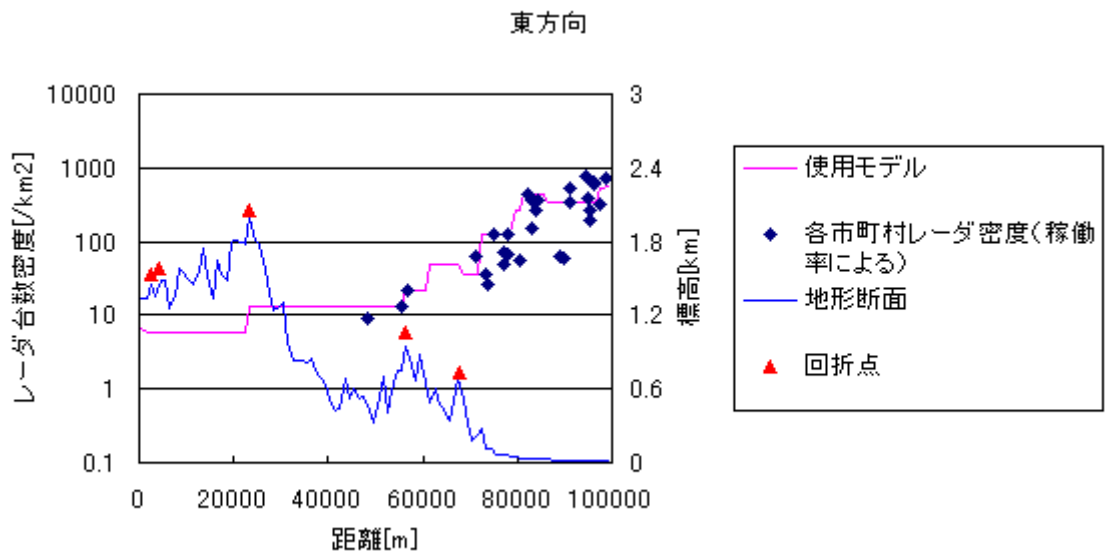


図 5-6 東方向の地形とレーダ台数密度

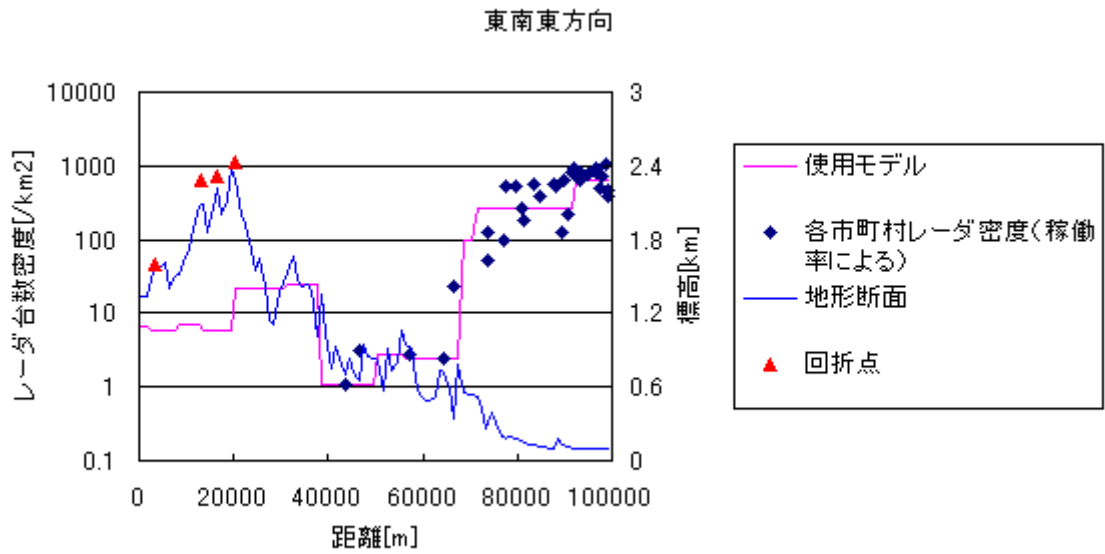


図5-7 東南東方向の地形とレーダ台数密度

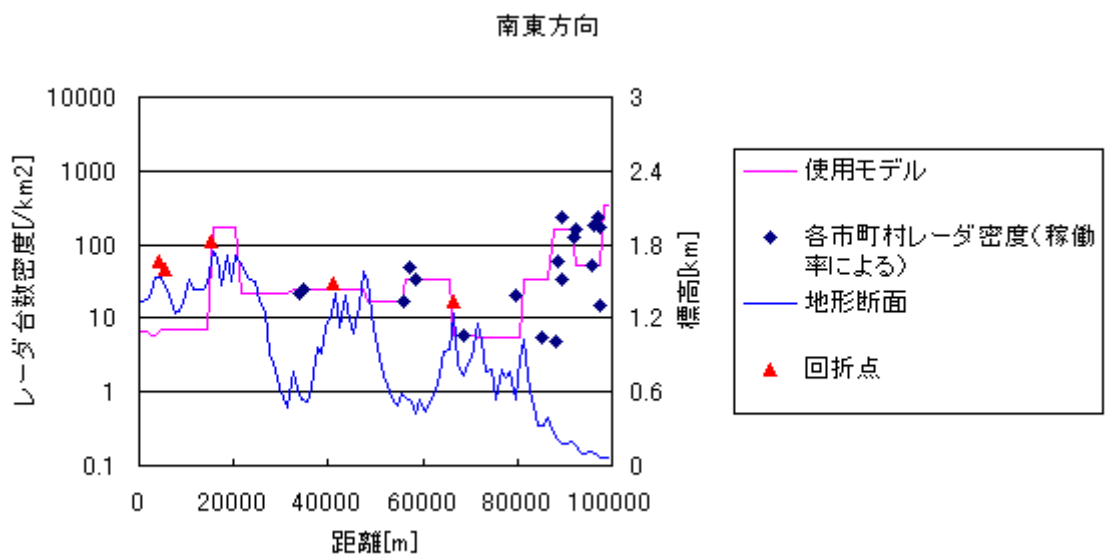


図5-8 東南東方向の地形とレーダ台数密度

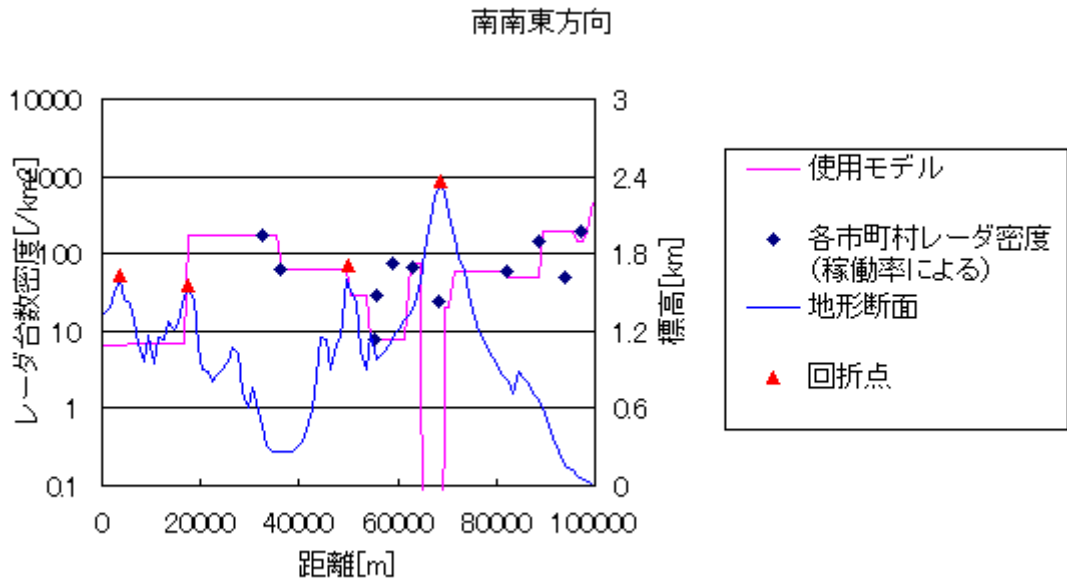


図 5-9 南南東方向の地形とレーダ台数密度

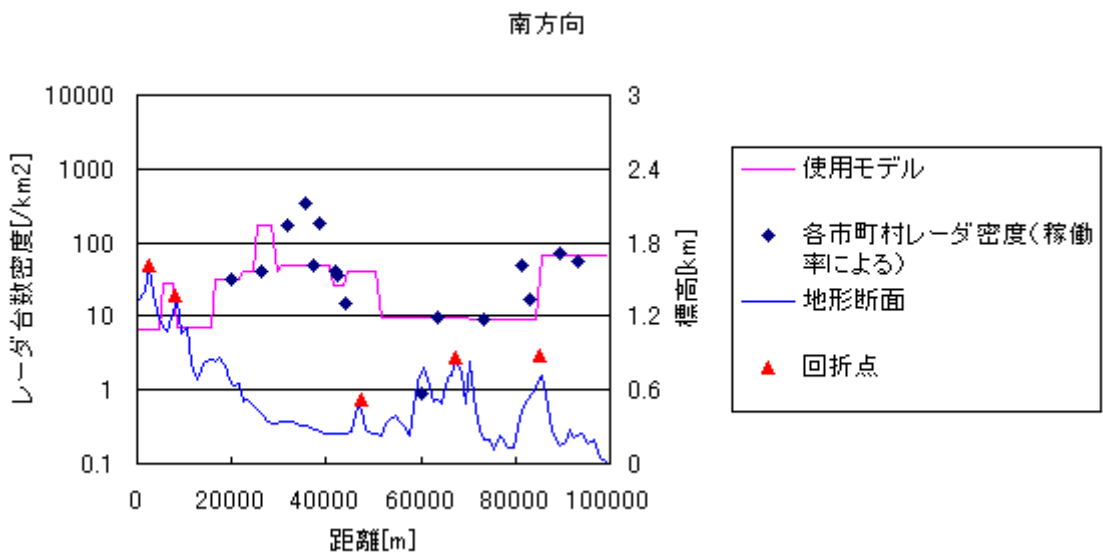


図 5-10 南方向の地形とレーダ台数密度

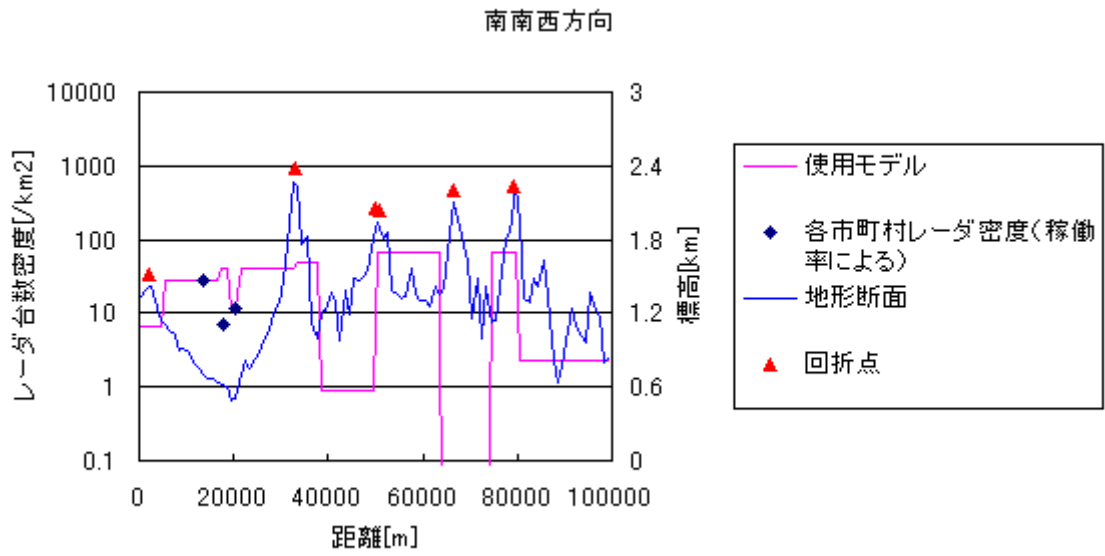


図 5-1 1 南南西方向の地形とレーダ台数密度

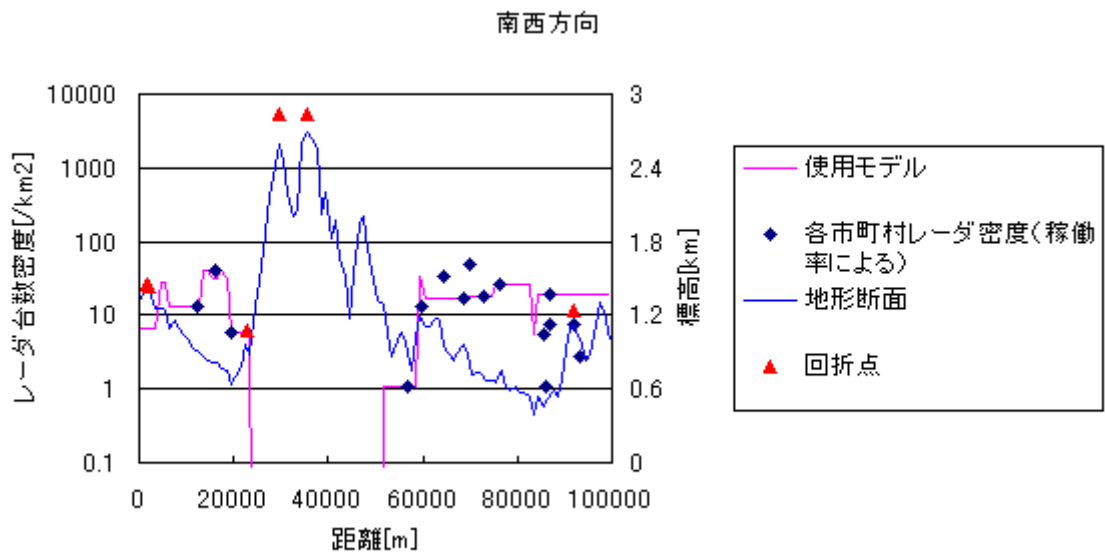


図 5-1 2 南西方向の地形とレーダ台数密度

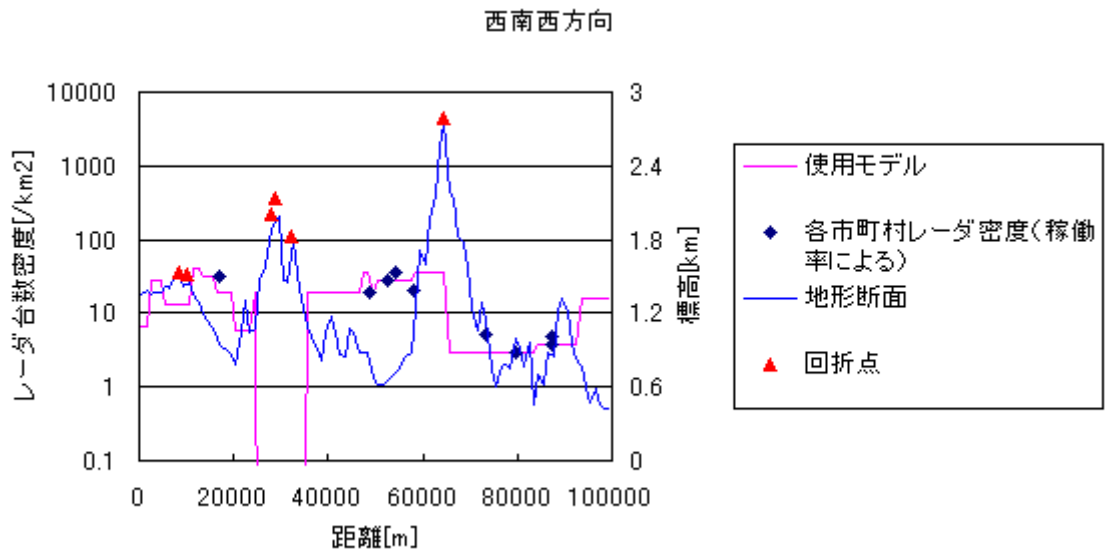


図 5-1 3 西南西方向の地形とレーダ台数密度

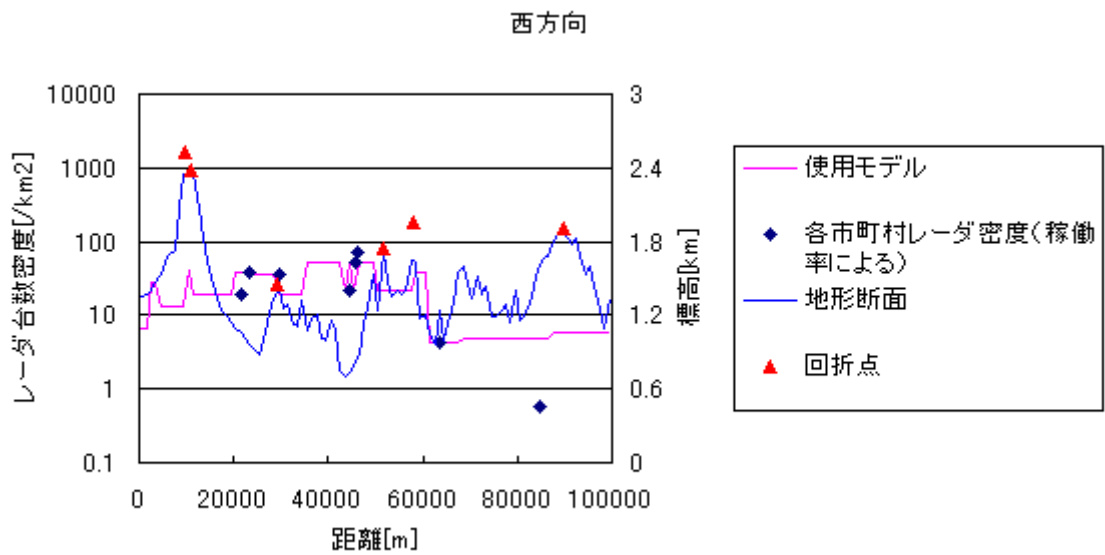


図 5-1 4 西方向の地形とレーダ台数密度

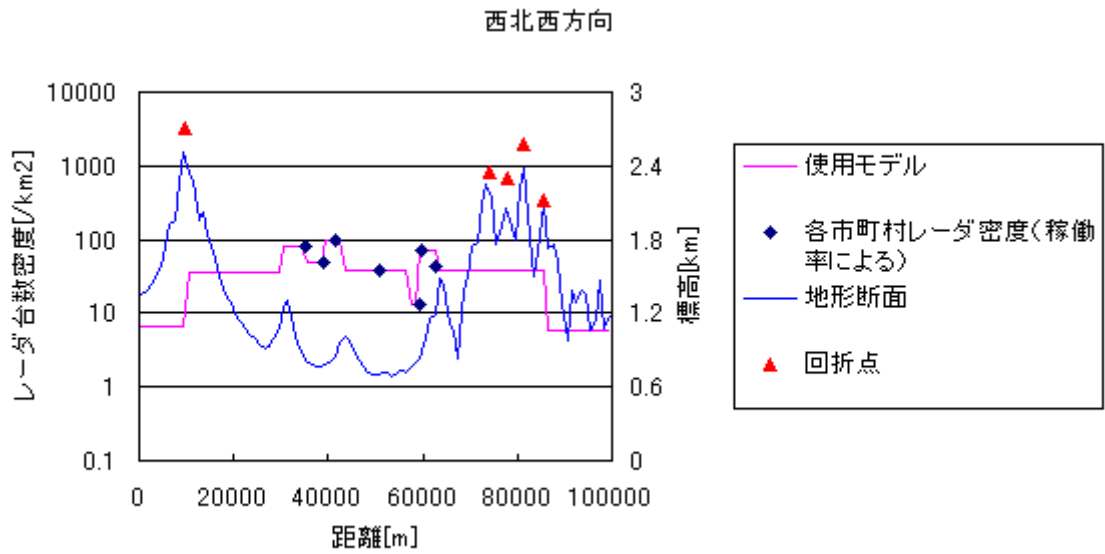


図5-15 西北西方向の地形とレーダ台数密度

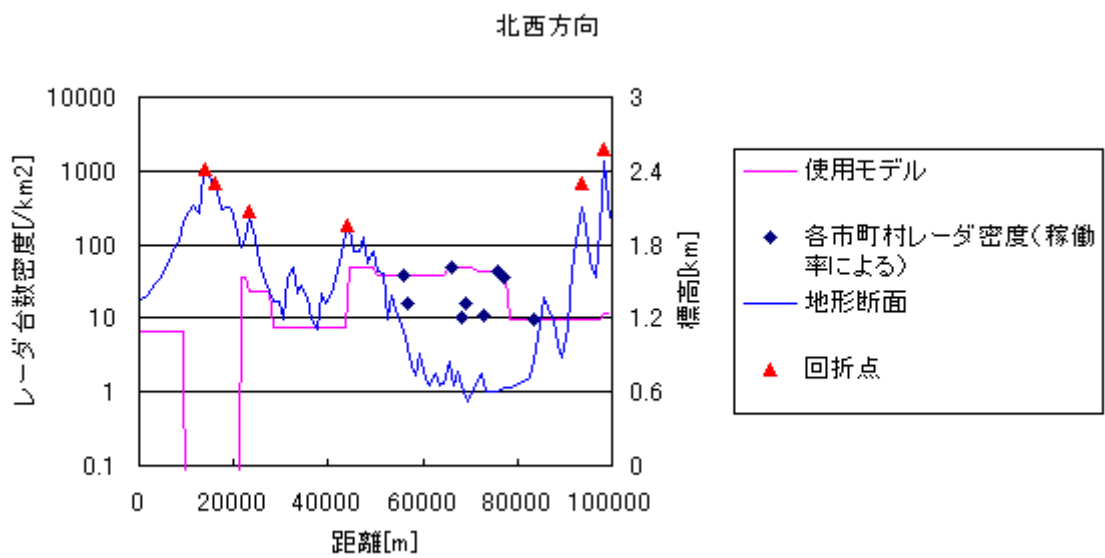


図5-16 北西方向の地形とレーダ台数密度

6 計算結果

以上のモデルを用い普及率0.3%における集合干渉電力の距離特性を計算した結果を図6-1に示す。図の横軸の距離以内にはレーダが存在しない場合の干渉電力を示している。10km付近から内側では地形による遮蔽が存在しなくなる方角が現れ、その影響により地形以外の遮蔽条件を入れない完全見通し内環境では干渉電力は上昇する。すなわち今回の検討における16方位1km間隔で設定した干渉計算点では山岳地帯を除き10km以上に国立天文台野辺山宇宙電波観測所45m電波望遠鏡と見通し内となる場所は存在しない。10km付近でのグラフの分岐は、地形的に国立天文台野辺山宇宙電波観測所への見通し内環境となった場合に植生による遮蔽が存在する場合と存在しない完全見通し内環境の2種類を示しているものである。見通し外環境においては離隔距離0.4kmとなる。

この結果をもとに、8節で干渉率2%未満となる離隔距離を求める。

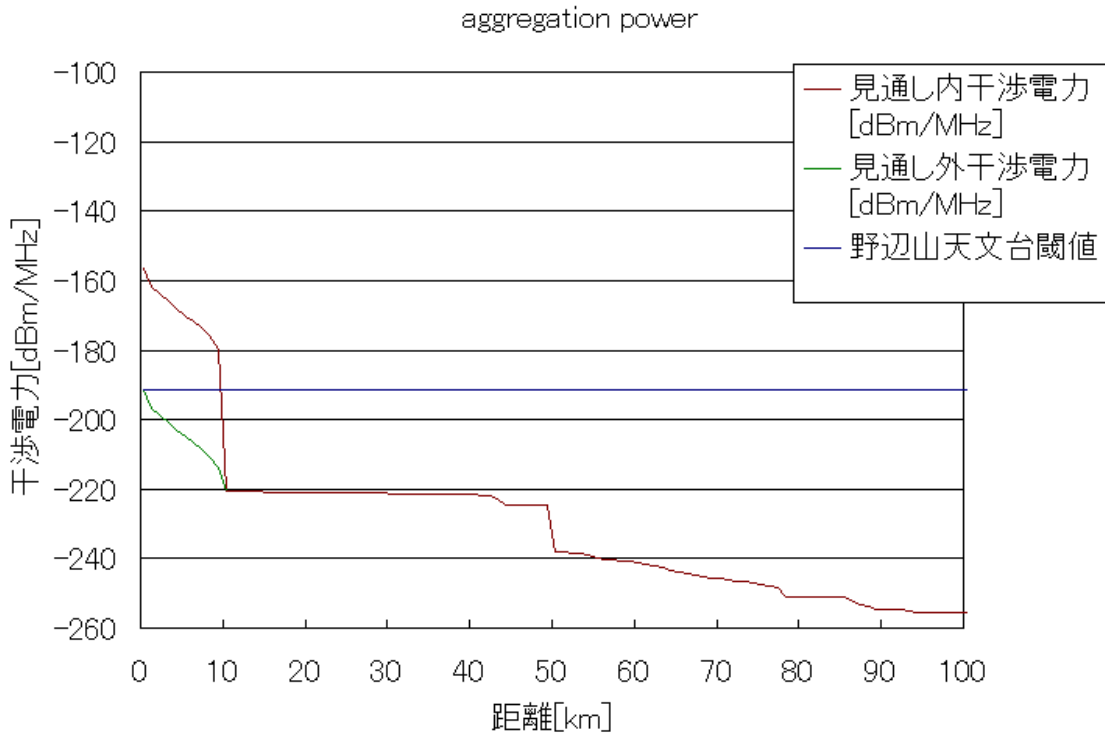


図6-1 干渉電力距離特性（普及率0.3%）

7 モデルの検証

7.1 首都圏からの影響

本干渉モデルにおいては、国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とする半径 100km 以遠については方角に依存しない均一な回折モデルを用いると共にレーダ台数密度は全国平均値を一律に用いている。

これについて人口密度の高い（車両台数の多い）首都圏方向から国立天文台野辺山宇宙電波観測所への干渉について過小評価する可能性があるのではないかとの指摘があり検証を行った。首都圏からの干渉集合電力の寄与分を調べるため、国立天文台野辺山宇宙電波観測所から東京駅方向の地形断面図（図 7-1）を用い首都圏方向の地形による回折損を求めたところ、2000m を超える複数の山岳による遮蔽により、現状の 100km 以遠の均一モデルを 30dB 上回る回折損であった。レーダ台数密度は 16.5dB 増加するが（40→1800=東京区部最大人口密度約 20,000×東京都換算係数 0.09）、この増加分を回折損が十分相殺することが確認できた。よって首都圏の影響は現状のモデルに十分含まれていると考えてよい。

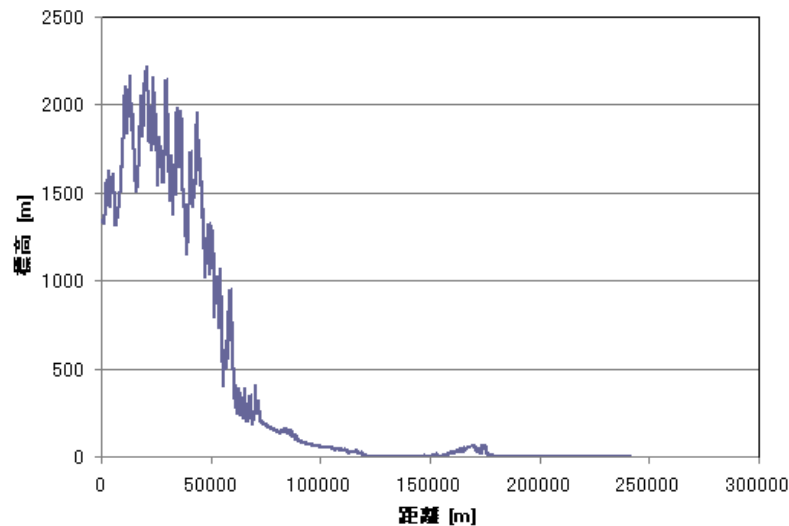


図 7-1 野辺山天文台から東京方向の地形断面図

7.2 主要道路からの影響

本干渉モデルではリングモデルを用いており方角により 16 分割された円弧内のレーダ台数密度はその干渉電力計算点が属する自治体のレーダ台数密度を与えるため領域内は均一である。実際の環境ではレーダ搭載車両は道路上を走行しているため交通量の多い道路に起因する局所的に強い干渉があるのではないかとの指摘があり、主要道路の交通量をもとにした干渉計算をおこなった。

交通量の比較的多い国道 20 号、中央自動車道、上信越自動車道、国道 18 号について干渉の影響を見積もり、伝搬モデル・レーダ台数モデルにより計算された干渉電力と比較を行う。

4つの道路について各干渉計算点と望遠鏡間の地形断面図から回折損を求め、道路長10kmあたりからの干渉電力の計算を行った。交通量は国土交通省道路交通センサスの休日24時間データを使用した[20][21]。普及率0.3%における値は閾値に対し十分に小さいものであった。表7-1に示される数値を図6-1の14-41km付近の集合干渉電力と比較すると十分に小さい。よって、これら交通量の多い主要道路の影響は表5-3のレーダ台数密度モデルを用いたリングモデルによる集合干渉電力に十分含まれている。

表7-1 主要道路による干渉電力

	センサス測定点	干渉計算点	干渉計算点までの距離[km]	回折損 [dB]	センサス (休日24時間)	1kmあたり車両台数	道路10kmあたりの干渉電力 [dBm/MHz]
国道20号	北杜市白州町下教来石683	北緯 35.564 東経 138.2821	19.12	103.9	8540台 52.6km/h	8.46	-297.7
中央自動車道	長坂IC～小淵沢IC	長坂IC	14.11	55.5	29849台 60.7km/h	20.5	-242.4
上信越自動車道	佐久-小諸	佐久平PA	37.08	63.2	20199台 84.3km/h	9.98	-263.8
国道18号	小諸市柏木字四ッ谷原	平原交差点	41.02	56.6	18091台 20.2km/h	37.3	-252.7

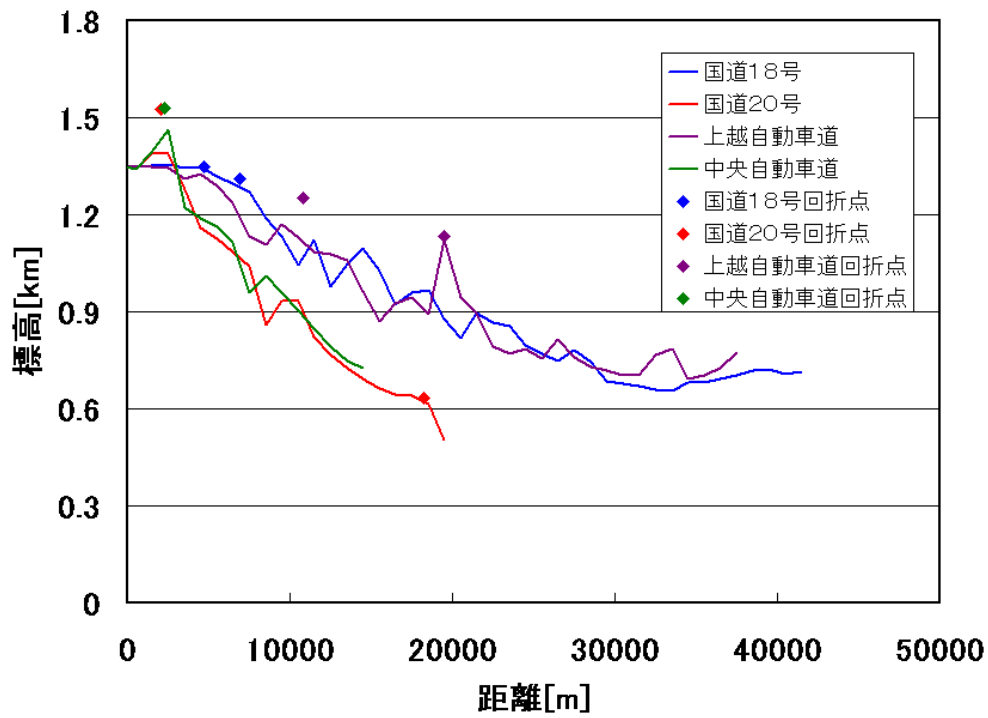


図 7-2 主要道路までの地形断面図 (1km 刻み)。点は回折損計算に使用したエッジを示す。

8 干渉率を考慮した検討

前節までで、見通し内環境である場合と樹木による見通し外環境である場合それぞれの干渉電力距離特性を求めた。次に実際の車両速度、交通量、見通し領域などをもとに干渉率を計算し、干渉率2%未満となる離隔距離を求める。2%は参考文献[2][3]に示される基準値である。ここでは以下の2通りの解釈に基づき検討する。

A：レーダ搭載車両が見通し環境となる時間率を求め、見通し内環境となる時間率が2%未満であれば98%以上を占める見通し外環境の干渉電力距離特性のみから離隔距離を求める。

B：2000秒観測時間単位での平均干渉電力の確率分布を求め、平均干渉電力が閾値を超える2000秒間観測時間単位の割合が2%未満となる離隔距離を求める。

8.1 Aの場合（見通し時間率2%未満）

8.1.1 見通し時間率と離隔距離の推定

干渉時間率を推定するため国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺の交通量の多い道路やレジャー施設について、交通量への寄与をまとめ、また各道路ごとに見通し内環境となる道路距離を求めることで干渉時間率を推定する。なおレーダ普及率は0.3%としている。対象となる道路、レジャー施設は以下のとおりである。

A) 国道141

B) 観測所付近の道路とレジャー施設

(1) 小海線踏切→観測所入り口直線道路

(2) 小海線踏切→シャトレゼリゾート

(3) 小海線踏切→JR最高地点

(4) サンメドウズ清里スキー場に起因する交通量（国道141へ上乗せ）

(5) 清里アーリーバードゴルフクラブに起因する交通量（国道141へ上乗せ）

各道路における交通量は以下のように定めた。国道141号の交通量はセンサス清里3545、休日24時間を使用した[20]。他道路、レジャー施設については国立天文台野辺山宇宙電波観測所調査によるデータを用いた。

A) 国道141（センサス清里3545、休日24時間）

交通量[台/日]	9062
混雑時速度[km/h]	44.8
1kmあたり台数	8.43

国道141（センサス清里3545、休日24時間）B-4 サンメドウズ清里スキー場によ

る 700 台/24h およびアーリーバードゴルフクラブによる 48 台/24h を加えた場合

交通量[台/日]	9810
混雑時速度[km/h]	44.8
1km あたり台数	9.12

B-1) 小海線踏切→観測所入り口直線道路

交通量[台/日]	2160(1.5 台/分) (*)
1km あたり台数	2.01(国道 141 と同じ平均時速 44.8km/h と仮定)

B-2) 小海線踏切→シャトレゼリゾート

最大駐車台数	700 台/日 (*)
交通量[台/日]	700
1km あたり台数	0.651 (平均時速 44.8km/h と仮定)

B-3) 小海線踏切→JR 最高地点

交通量/日	1440(1 台/分) (*)
1km あたり台数	1.34 (平均時速 44.8km/h と仮定)

B-4) サンメドウズ清里スキー場

最大駐車台数	700 台 (*)
交通量/日	700
国道 141 へ加える	

B-5) アーリーバードゴルフクラブ

利用者数	24 組/日 (*)
交通量/日	48 (一組あたり 2 台とする)
国道 141 へ加える	

(*) 国立天文台野辺山宇宙電波観測所調査による。交通量は 2010/9/9 11:45~12:15 (30 分)間の実測値から計算

各道路における見通し内道路長は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡からの写真、航空写真により定めた。各道路の 1km あたり車両台数を N [/km]、見通し内道路長を l [km]、普及率を n [%] とすると干渉時間率は以下のように表される。これから各道路の干渉時間率は表 8 のとおりである。

$$p = 1 - \exp(-nlN/100)$$

表 8-1 各道路の干渉時間率

	見通し内道路長[km] 休日 24h データに対応する干渉時間率内訳
(A) 国道 141 号	0.33 (0.90%)
(B-1) 小海線踏切→観測所入り口直線道路	0.1 (0.06%)
(B-2) 小海線踏切→シャトレゼリゾート	0.46 (0.09%)
(B-3) 小海線踏切→JR 最高地点	0.25 (0.10%)
(B-4) サンメドウズ清里スキー場	0 (0%)
(B-5) アーリーバードゴルフクラブ	0 (0%)

以上の見通し内時間率 0 を越える 4 道路において、見通し内地点に同時にレーダが存在しない時間率はそれぞれを独立事象と考え見通し内時間率を $p_1 \sim p_4$ とすると見通し外時間率の積を取ればよいから

$$(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)$$

よって、これら 4 地点の見通し内地点の少なくとも 1 ヶ所以上にレーダが存在する時間率は

$$p = 1 - (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)$$

となる。表 2 の値を代入すると 1.15% となり 2% を下回る。

表 8-2 全道路による干渉時間率

干渉時間率 (B-4, B-5 の車両台数を国道 141 へ含む)	1.15%
-----------------------------------	-------

よって離隔距離を 98% 以上の時間率を占める見通し外環境の干渉電力距離特性から求めることとすると、離隔距離は 400m となる。普及率 1% とした場合、見通し外環境の干渉電力距離特性から求めた離隔距離は 1.5km である。この場合単純計算される干渉時間率は 2% を越えるが見通し領域のほとんどが半径 1.5km 以内にあるため、1.5km 以遠からの寄与分のみで考えると干渉時間率は 2% 未満である。

8.1.2 主要近傍道路からの干渉電力計算

以上のようにレーダ台数密度を使用した計算モデルから見通し外環境における離隔距離は400mと求められたが、ここでは主要近傍道路からの干渉電力を個別に求めて比較し上記計算結果が妥当であることを確認する。

各道路からの影響を見積もるため、道路を有限長の直線とみなし線路上にそった積分を行うことで干渉電力を求める。ここでは各道路から望遠鏡までの最短距離を、各道路を模した直線と望遠鏡の距離（図の a）とする。直線（道路）上の車両台数密度[/km]はセンサス及び国立天文台野辺山宇宙電波観測所提供データ（8.1.1）を用いる。各道路の見通し内区間を除いた領域で集合干渉電力の線積分を行い、それらを合計することで見通し外環境下の干渉電力を求めた。なおここでは回折損、大気吸収損等は考慮していない。

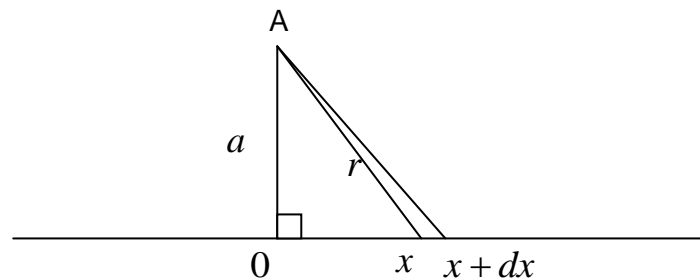


図 8-1 干渉計算の概念図

図 8-1 において道路と望遠鏡の距離を a、直線とみなした道路上 x~x+dx (km) の間から受ける干渉電力を dP、レーダ出力を P_t、レーダ台数密度を N(台/km) とすると（ともにアンテナ利得 0 であるから）

$$dP = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 N dx P_t = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 N \frac{dx}{x^2 + a^2} P_t$$

直線上の点 α から β までの区間からの干渉電力は

$$P = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 N \int_{\alpha}^{\beta} \frac{dx}{x^2 + a^2} P_t = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 N \left[\frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{x}{a} + C \right]_{\alpha}^{\beta} P_t = \left(\frac{\lambda}{4\pi a}\right)^2 N a \left(\tan^{-1} \frac{\beta}{a} - \tan^{-1} \frac{\alpha}{a} \right) P_t$$

この式を用い道路の見通し外区間を積分区間として α、β を定め干渉電力を計算した。

国立天文台野辺山宇宙電波観測所周辺道路について、実際にアンテナから周辺環境を観測した結果をもとに各道路を表 8-3 のような直線とみなし干渉電力の計算を行った。積分範囲が見通し外領域を示す。なお国道 141 号については、半径 10.5km 以内の実際の道路長が約 30km と直線近似の 1.5 倍ほどの長さであるためレーダ台数密度を 1.5 倍とする補正を行った。また、B-4, B-5 の車両台数については国道 141 号の交通量に加算し計算を行っ

た。

表 8-3 各道路のパラメータ

	望遠鏡からの最短距離 [km]	車両台数密度 [/km]	積分範囲 (km) 望遠鏡から最短距離部分を 0 とする
(A) 国道 141 号	1.277	9.12	-10.5~-0.25 -0.2~-0.07 -0.03~0.065 0.305~10.5
(B-1) 小海線踏切→観測所入り口直線道路	0.278	2.01	-0.75~0.05 0.15~0.9
(B-2) 小海線踏切→シャトレレーザリゾート	0.533	0.651	-0.6~0.7 0.76~1.4 1.8~2.0
(B-3) 小海線踏切→JR 最高地点	0.747	1.34	-0.29~0.41 0.66~1.51

各主要道路毎に干渉電力、干渉時間率を計算し 10.5km 以遠からの干渉電力を含め積算した結果は -193.74dBm/MHz であった。国立天文台野辺山宇宙電波観測所の閾値 -191.354dBm/MHz@79GHz を下回る。即ち、考慮した道路全てを含めて計算される必要離隔距離は道路までの最短距離である 278m 未満となる。これは見通し外環境におけるリングモデルを用いて求められる離隔距離 400m より短く、国立天文台野辺山宇宙電波観測所近傍の主要道路による影響はリングモデルに十分含まれているといえる。

8.2 Bの場合（2000 秒観測時間単位を基準とした計算）

8.2.1 計算手順

2000 秒観測時間単位における干渉率を満たす離隔距離を以下のように求める。

半径 10.5km 以内の領域（C と表す）を 1km 幅のリングに分割し、どれだけ内側に近いリングまで干渉条件を満たすか調べることで離隔距離を求める。リングは内径 0.5km から内径 9.5km まで 10 個であり、内側から $L_1 \dots L_{10}$ とする。

(1) 各リングの平均干渉電力を用い、内径 9.5km より内側方向の複数のリングからの干渉電力を求める。このとき領域 C 内のレーダ搭載車両台数を任意に設定できるようにする。

(2) レーダ搭載車両数の確率分布を交通量の統計値から計算する。

(3) (1), (2) を組み合わせ各リング範囲ごとに 2000 秒観測時間単位で干渉率 2% 未満

を実現しうるか調べ、満足する最小径が離隔距離となる。

計算条件は 8. 1. 1 の交通量データを使用し以下のとおりとする。

- ・ 交通量： 14110 台/日=0.16331 台/秒
- ・ 速度
12.444m/秒（休日）
- ・ 見通し内継続時間（以下の個別道路の見通し区間を連続させた値を交通量で加重平均する）
国道 141 合計見通し区間 330m→26.517 秒(9810 台/日, 休日 24 時間)
小海線踏切→観測所入り口直線道路 合計見通し区間 100m→8.036 秒(2160 台/日, 平日昼)
小海線踏切→シャトレゼリゾート 合計見通し区間 460m→36.964 秒(700 台/日, 休日)
小海線踏切→JR 最高地点 合計見通し区間 250m→20.089 秒(1440 台/日, 平日昼)
以上から加重平均した見通し内継続時間は 23.55 秒である。

また、2000 秒単位時間あたりのレーダ搭載車両数の出現期待値（平均値）は交通量×レーダ普及率×観測時間であらわされる。普及率を 0.3%とすると、観測時間 2000 秒、交通量 0.16331 台/秒であるから 2000 秒単位時間あたりに出現するレーダ搭載車両数は平均で 0.97986 台となる。

8.2.2 平均干渉電力の計算

リング L_i 以遠からの干渉電力の 2000 秒平均値は、リング L_i からリング L_{10} の間にあるレーダ搭載車両からの見通し内干渉電力と見通し外干渉電力の時間平均値に 10.5km 以遠の集合電力を加えたものとなる。

リング L_i からリング L_{10} の間にあるレーダ搭載車両からの干渉電力を求めるには、まず各リング $L_i \cdots L_{10}$ 毎にそのリングの距離を起因とするレーダ搭載車両からの干渉電力を計算する。確率分布に対応した干渉電力計算を行うため、任意の N 台のレーダ搭載車両数について求める。

リング L_i に起因する干渉電力 I_i は、見通し内継続時間が 23.55 秒であるから残りの観測時間は見通し外干渉時間帯であったとして

$$\begin{aligned} I_i(N) &= \frac{N}{2000} \{I_{iLOS}(i) \times 23.55 + I_{iNLOS}(i) \times (2000 - 23.55)\} \\ &= \frac{N}{2000} \{I_{iLOS}(i) \times 23.55 + I_{iLOS}(i) \times 10^{-(35/10)} \times (2000 - 23.55)\} \\ &= N \frac{I_{iLOS}(i)}{2000} \{23.55 + 10^{-(35/10)} \times (2000 - 23.55)\} \end{aligned}$$

ここで見通し外環境における樹木減衰-35dB を用いた。

上式は、10.5km 以内の全ての領域で見通し内区間が存在することを仮定していることを意味する。

なお $I_{iLOS}(i)$ は送信出力-26dBm/MHz, 自由空間伝搬損失+大気吸収 (0.094dB/km) によって決まる電力である。(送受信アンテナ 0dBi)。

この各リングからの干渉電力 I_i から, それぞれのリング内のレーダ搭載車両数 N_i (またはリング L_i の面積 S_i [km²]) で重みをつけ積算したものが任意の N 台のレーダ搭載車両数を設定した場合のリング L_i から L_{10} による干渉電力である。

$$I_{i-10}(N) = \frac{\sum_{k=i}^{10} I_k(N) S_k}{\pi \times 10.5^2} \quad (1)$$

(1) に 10.5km 以遠の集合干渉電力 (-220.372dBm/MHz) を加えて干渉電力とする。

図 8-2 に各離隔距離毎に計算した干渉電力を示す。

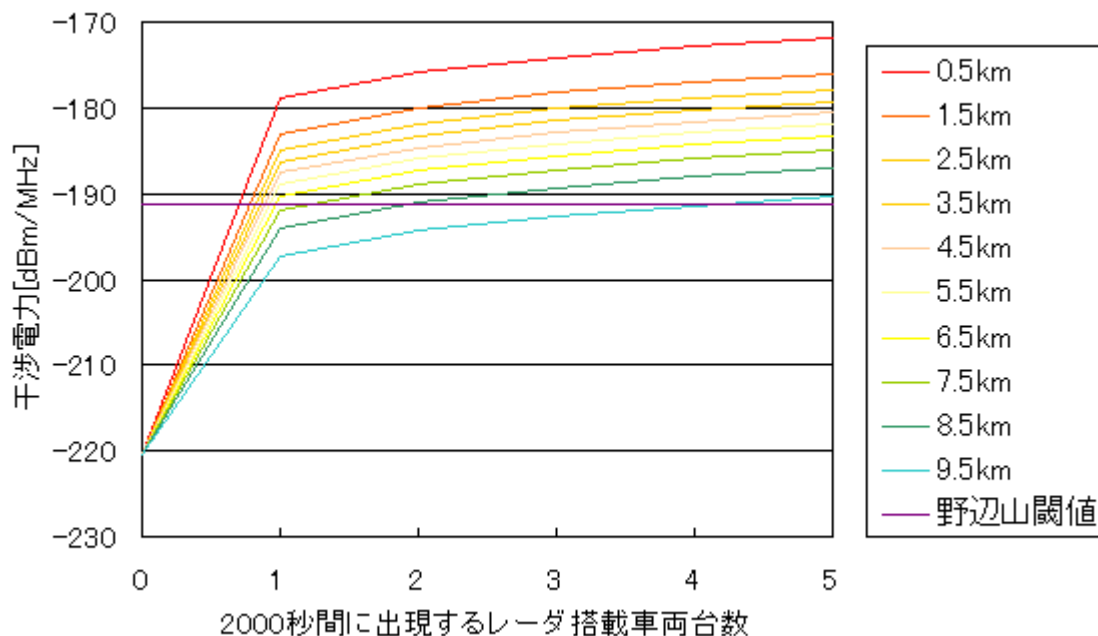


図 8-2 2000 秒単位中に半径 10.5Km 以内に出現するレーダ搭載車両台数を与えた時の平均干渉電力 (仮想離隔距離をパラメータとする)。

8.2.3 レーダ搭載車両数の確率分布

リング L_i からリング L_{10} に存在するレーダ搭載車両数の確率分布を求める。リング L_i からリング L_{10} に 2000 秒観測時間内に出現するレーダ搭載車両数の期待値 N_{i-10} は, 領域 C に均一にレーダ搭載車が存在すると仮定すると, 領域 C 内のレーダ搭載車両数を用いて面積比で表される。

各リング L_i に 2000 秒単位時間内に出現するレーダ搭載車両数の期待値 N_i はリング L_i の面積

を S_i [km²]として

$$N_i = 0.97986 \times \frac{S_i}{\pi \times 10.5^2}$$

となる。また、リング L_{10} からリング L_i までの外側から連続したリング内に出現するレーダ搭載車両数の期待値 N_{i-10} は、該当するリングについて積算し

$$N_{i-10} = 0.97986 \times \frac{\sum_{k=i}^{10} S_k}{\pi \times 10.5^2}$$

と表される。ポアソン分布を用いて、2000 秒観測時間単位中にリング L_{10} からリング L_i にレーダ搭載車両が X 台存在する確率 $P_{i-10}(X)$ は以下ようになる。

$$P_{i-10}(X) = \frac{N_{i-10}^X \exp(-N_{i-10})}{X!} \quad (2)$$

図 8-3 に各リング L_i-L_{10} 間に出現するレーダ搭載車両台数確率分布の計算結果を示す。このように、平均値 (0.97986) よりかなり多めのレーダ搭載車両台数が考慮されていることがわかる。

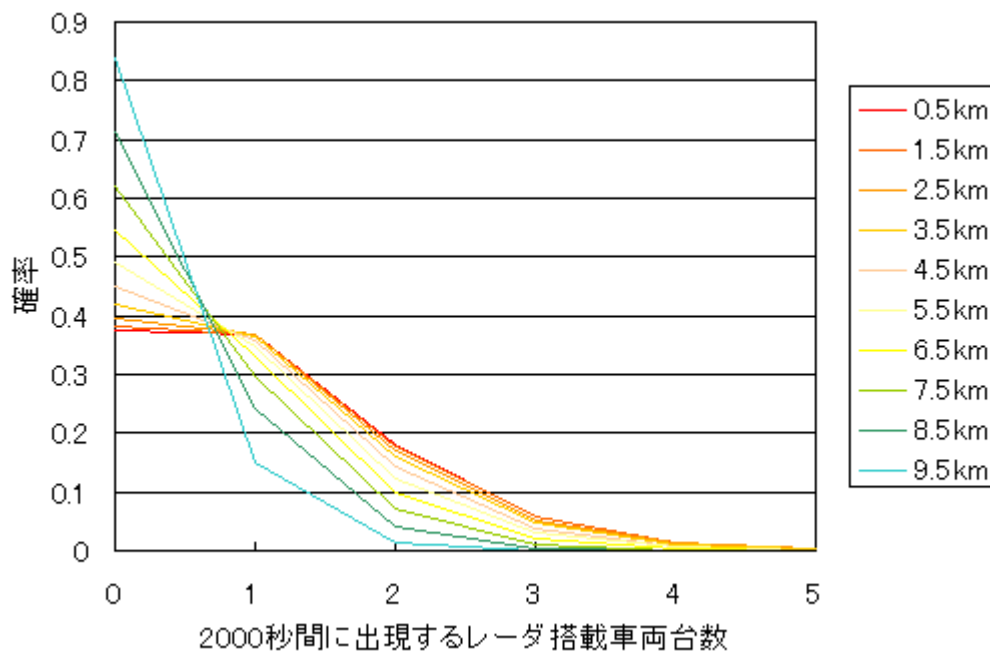


図 8-3 交通量パラメータを基にした半径 10.5km から各離隔距離まで 2000 秒間に出現するレーダ搭載車両台数の確率分布。

8.2.4 2000 秒観測時間における平均干渉電力と干渉率

以上のように、リング L_i-L_{10} からの干渉電力（レーダ搭載車両台数の関数）とリング L_i - リング L_{10} に 2000 秒観測時間内に現れるレーダ搭載車両台数の確率分布が求められた。10.5km

以遠からの干渉電力についてはリングモデルから求められており（図6-1），これらを用いることで2000秒観測時間における平均干渉電力の確率分布 $I_{i-10}(X)$ を求めることができる。この2つを比較することで，各リング範囲 L_i-L_{10} 毎に累積確率98%を超える出現レーダ搭載車両台数が求められる。このレーダ搭載車両台数において平均干渉電力が閾値を下回っていれば，リング L_i の距離においては2000秒観測時間単位での干渉率2%未満を実現できる。

すなわち，図8-4において98%となるレーダ搭載車両台数に対応して図8-2の干渉電力が閾値を下回る仮想離隔距離パラメータ値を探せばよい。98%を満たすパラメータ値は9.5kmであり，9.5kmが普及率0.3%における離隔距離となる。

なお，普及率1%としても9.5kmでは98%を満たした。

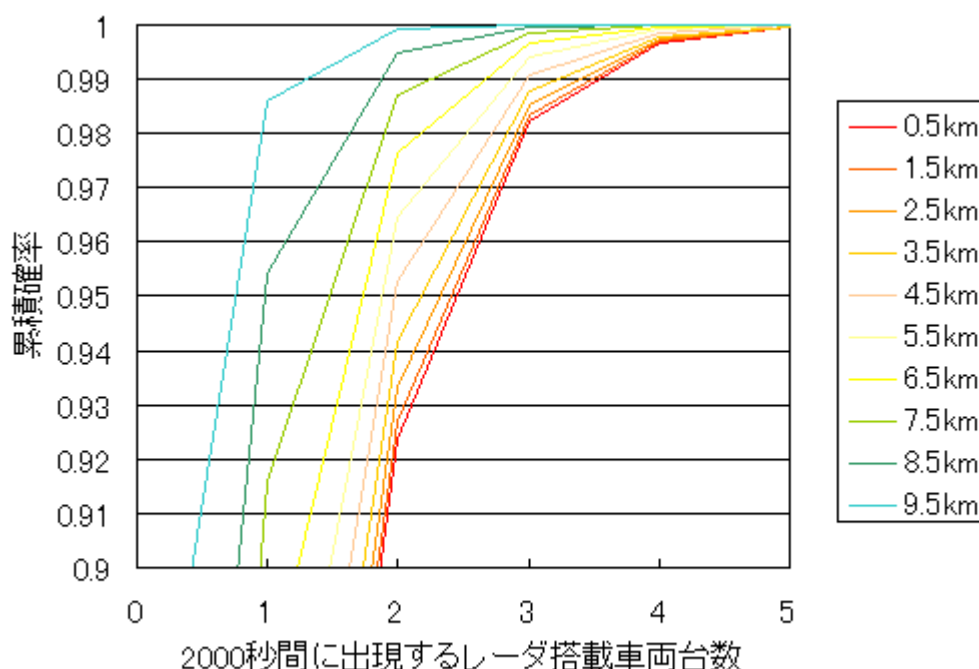


図8-4 半径10.5kmから各離隔距離までのレーダ搭載車両台数の累積確率（横軸の台数以下となる確率）。

8.2.5 2.5km 以遠に見通し内車両が存在しない場合

電波望遠鏡からの目視では見通し環境となる道路は半径2km弱以内に確認された。そのため内径2.5km以上のリングでは見通し内車両が存在しないと仮定することも1つの方法として考えられる。2.5km 以遠に見通し内車両が存在しない場合については，領域Cを半径10.5kmから半径2.5kmに変更することで同様に計算することが可能である。2.5km 以遠からの干渉電力はリングモデルによる見通し外干渉電力2.5kmの値を使用する（図6-1）。

以下に2.5km 以遠に見通し内車両が存在しない場合について計算されたリング毎の干渉電力の見通し内レーダ搭載車両台数依存性，見通し内レーダ搭載車両台数の確率分布，見通し内レーダ搭載車両台数の累積確率の図を示す。2000秒観測時間単位で98%を満たすには見通し内レーダ搭載車両台数3台に耐える必要があるが，見通し内レーダ搭載車両台数1台で閾

値を越えており、離隔距離は見通し外領域とした 2.5km となることがわかる。

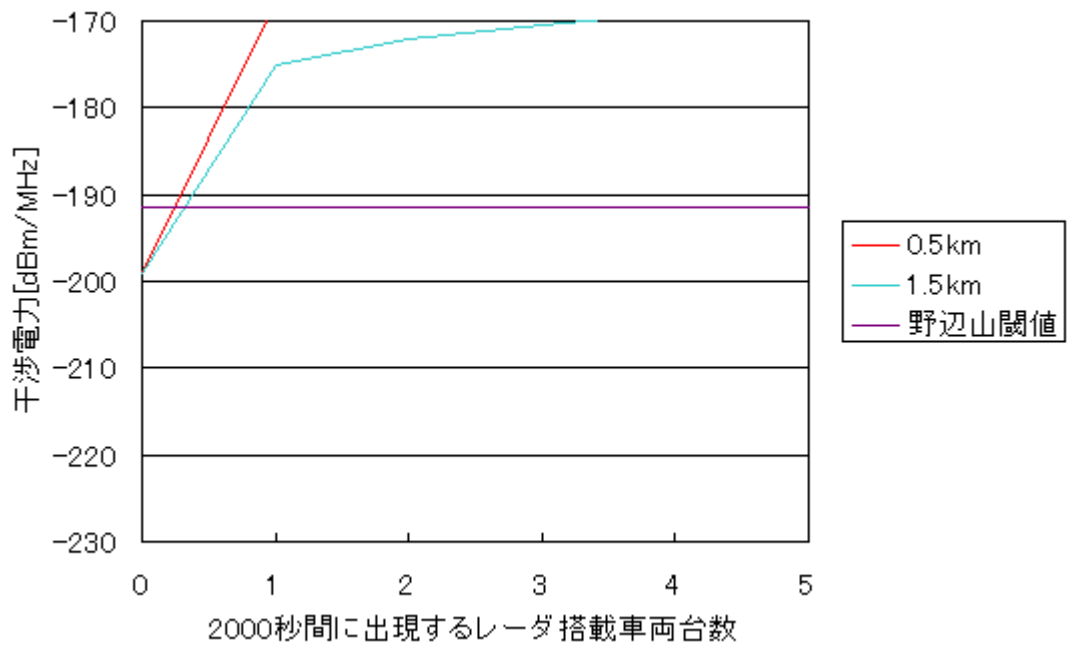


図 8-5 半径 2.5km 内 2000 秒間に出現するレーダ搭載車両台数を与えた場合の各離隔距離における平均干渉電力。

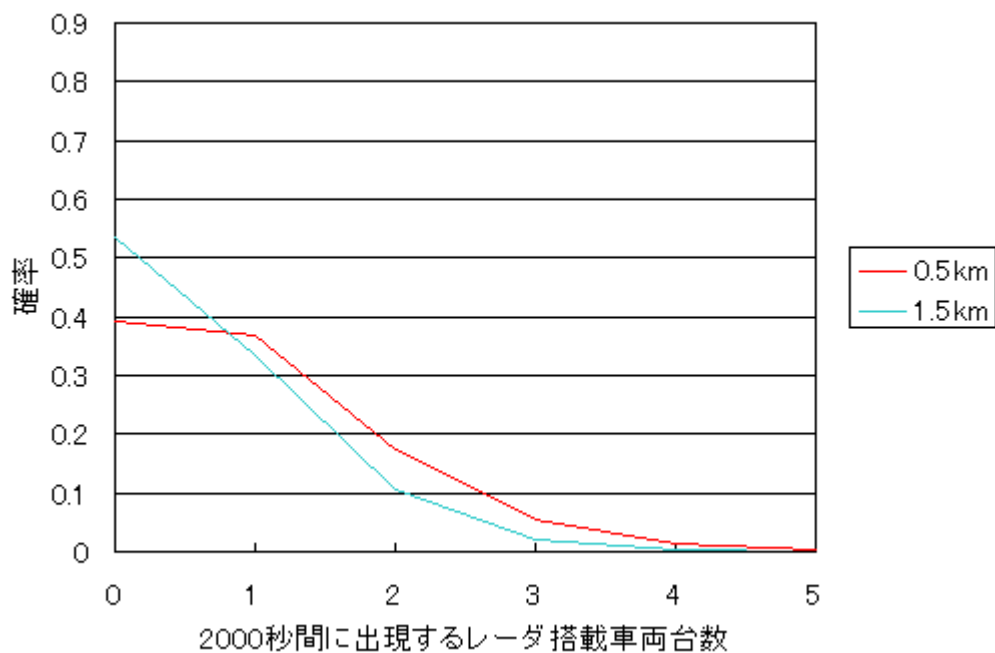


図 8-6 交通量パラメータを基にした半径 10.5km から各離隔距離まで 2000 秒間に出現するレーダ搭載車両台数の確率分布。

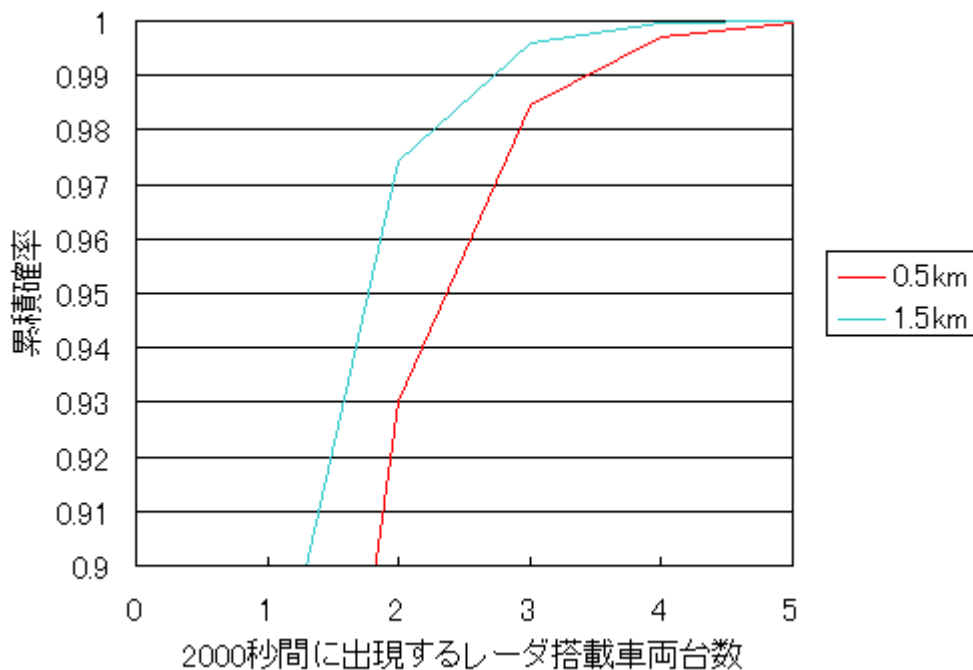


図 8-7 半径 10.5km から各離隔距離までのレーダ搭載車両台数の累積確率（横軸の台数以下となる確率）。

9 結論

以上の検討により求められた国立天文台野辺山宇宙電波観測所に対する 79GHz 帯高分解能レーダの離隔距離を表に示す。（表 1-1 再掲）

表 9-1 各種検討条件毎の離隔距離

検討条件		普及率	
		0.3%	1.0%
2000 秒単位時間の平均受信電力が国立天文台野辺山宇宙電波観測所閾値（-191.354dBm/MHz）以下となる確率が 98%となる距離	半径 10.5km まで均一に見通し内レーダ搭載車両が現れると仮定した場合	9.5km	9.5km
	半径 2.5km 以遠に見通し内レーダ搭載車両は現れない場合	2.5km	2.5km
見通し内時間率 2%を満たし見通し外干渉電力が国立天文台野辺山宇宙電波観測所閾値以下となる距離		400m	1.5km

本計算結果によれば、レーダ干渉の影響は否定できない。しかし、実運用上の諸要素を考慮した結果、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を用いた 79GHz 帯観測に限定する限り、実運用上共用可能であるとの結論に至った。

なお本計算では考慮されていないガードレール等路側構造物による遮蔽損失や野辺山に

おける実観測時間帯が交通量オフピーク時になる可能性などの干渉緩和効果が存在する一方で、同様に計算中に考慮されなかったが遠方にも国立天文台野辺山宇宙電波観測所を見通せる例(例えば本沢温泉)が存在することを併記する。

参考文献

- [1] ECC REPORT 56 COMPATIBILITY OF AUTOMOTIVE COLLISION WARNING SHORT RANGE RADAR OPERATING AT 79GHZ WITH RADIOCOMMUNICATION SERVICES
- [2] Rec. ITU-R RA.1513-1 Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage of time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy on a primary basis.
- [3] Rec. ITU-R RA.1031-2 Protection of the radio astronomy service in frequency bands shared with other services.
- [4] Rec. ITU-R RA.769-2 Protection criteria used for radio astronomical measurements.
- [5] Rec. ITU-R P.620-6 Propagation data required for the evaluation of coordination distances in the frequency range 100 MHz to 105 GHz.
- [6] Rec. ITU-R P.525-2, Calculation of free space attenuation.
- [7] 気象庁統計情報 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- [8] Rec. ITU-R P.676-7 Attenuation by atmosphere gases.
- [9] 国土地理院基盤地図情報 <http://fgd.gsi.go.jp/download/>
- [10] Rec. ITU-R P.526-11, Propagation by diffraction.
- [11] 山梨県統計データバンク
http://www.pref.yamanashi.jp/toukei_2/DB/EDG/dbgb01000.html
http://www.pref.yamanashi.jp/toukei_2/DB/EDC/dbca03000.html
- [12] 長野県平成 18 年度事業所・企業統計調査結果
http://www3.pref.nagano.jp/toukei3/jigyousyo/H18_kakuhou.htm
- [13] Rec. ITU-R P.833-6 Attenuation in vegetation.
- [14] D. Didascalou, M. Younis, W. Wiesbeck, "Millimeter-Wave Scattering and Penetration in Isolated Vegetation Structures," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.38, Sep. 2000
- [15] 平成 17 年国勢調査 <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm>
- [16] 一般交通量からみた関東地域の道路交通の現状、推移(国土交通省関東地方整備局)
http://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road_shihon00000040.html
- [17] 静岡県道路交通センサス
<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-210/sen.html>
- [18] ディーゼル乗用車の経済分析、ガソリン車・ハイブリッド車との比較(三菱総合研究所)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g41116b40j.pdf>
- [19] 市町村別自動車保有車両数 (自動車検査登録協力会編)

[20] 平成 17 年度道路交通センサス（長野県）

http://www.ktr.mlit.go.jp/honkyoku/road/census/h17/PDF/KY_20000.pdf

[21] 平成 17 年度道路交通センサス（山梨県）

http://www.ktr.mlit.go.jp/honkyoku/road/census/h17/PDF/KY_19000.pdf

参考資料3 空中線電力の偏差に関する検討

小電力ミリ波レーダの空中線電力の許容値については、システムの所要性能の確保を考慮しつつ、使用環境条件下における高周波回路の安定度による実現性を考える必要がある。

空中線電力の許容偏差の上限については、現行無線設備規則第14条の規定に準じ、50%とするのが適当である。

下限については、現行の特定小電力無線局に対しては、50%であるが、想定されているレーダ方式は、広い周波数帯域を使用するため、その測定精度、ならびにミリ波帯の高周波回路の安定度を考慮して70%とするのが適当である。本下限でも、アンテナ利得の確保やレーダ信号処理の工夫により、システムの所要性能の確保は可能である。