Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

複数の傾斜地を考慮した携帯電話の電波伝搬損失特性の検討

林 和貴[†1] 平井 尊教[†2] 新 浩一[†1] 西 正博[†1]
秦 正治[†2] 市坪 信一[†3] 冨里 繁[†2] 吉田 彰顕[†1]

スマートフォンの普及が進んでいる移動通信では小セルによるサービスエリアの展開が図られており，山地が多い我が国では傾斜地を考慮することが重要である．しかし，傾斜環境における伝搬損失特性は明らかにされていない．本研究では，基地局と移動局の距離が 1km と短い傾斜地における市街地伝搬損失推定式の補正を目的として，広島市・岡山市・北九州市の異なる傾斜環境下で電波測定を行った．その結果，伝搬損失の推定には各傾斜地の傾斜環境を考慮する必要があることがわかった．この傾斜環境と伝搬損失との特性を明らかにするとともに，市街地伝搬損失推定式への補正を検討した．

A Study on Mobile Radio Propagation Path Loss Characteristics in Consideration of Several Slope Areas

KAZUKI HAYASHI[†1] TAKANORI HIRAI[†2] KOICHI SHIN[†1]
MASAHIRO NISHI[†1] MASAHARU HATA[†2] SHINICHI ICHITSUBO[†3]
SHIGERU TOMISATO[†2] TERUAKI YOSHIDA[†1]

The service area of mobile communication by using small cell such as microcell or femtocell is widespread with the rapid growth of smartphones. It is important to consider slope areas in the radio link design since there are many mountains in Japan. However, radio propagation characteristics of the mobile systems in slope areas are not clear.　In this study, we tried to correct the propagation loss formula in urban area to fit into slope area within the distance of 1km from the base station. We measured mobile radio waves under different slope environments in Hiroshima, Okayama and Kitakyusyu. As a result, it was clarified that it was necessary to consider the difference of characteristic of each slope area in order to estimate the propagation path loss. We clarified the relationship of the characteristic of slope area to the propagation path loss. And, we studied applicability of this relationship to correct the formula for slope areas.

1. はじめに

今日，スマートフォンの普及に加えて，ソーシャルメディア，ビデオストリーミングなどのサービス拡大により，データトラフィックが急増している．トラフィックの増大に対応するため，高速かつ大容量な移動通信システムである LTE(Long Term Evolution)が 2010 年より導入された[1]．また，マイクロセルやピコセル，フェムトセルといった小さなセルの基地局によりサービスエリアを構成することで屋内外の通信品質の改善も図られている[2]．このような小セルで構成される無線回線設計には，基地局からの距離が 0.1~3km 程度における伝搬損失の推定が必要となる[3][4]．

さらに，我が国の国土は約 7 割を山地と丘陵地が占めているため，住宅地が傾斜地にある場合が多い．よって携帯電話のサービスエリアの展開には，傾斜地における電波伝搬特性の考慮が必要となる．しかし，傾斜環境における伝搬損失特性は明らかにされていない．

伝搬損失の推定にはCOST231-WIモデル[5]やLeeモデル[6]があるが，本研究では一般に無線回線設計に用いられている市街地伝搬損失推定式[7]に着目した．本推定式は 1~20km という範囲の平地での伝搬損失を推定するものである．そこで新たに，基地局からの距離が 1km 以内と短い傾斜地に本推定式を適用できるよう，その補正項を導出するため，広島市・岡山市・北九州市にあるそれぞれの傾斜団地にて携帯電話の電波測定を行い，それぞれの環境を考慮した伝搬損失特性を検討した．

図 1　測定エリア(あさおか台)の概観

†1 広島市立大学　大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University
†2 岡山大学　大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology Okayama University
†3 九州工業大学　大学院工学府
Kyushu Institute of Technology

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

2. 測定エリアと測定方法

2.1 あさおか台

広島の測定エリアであるあさおか台の概観を図 1 に示す．ここで，あさおか台は基地局からみて南方向が上りの傾斜団地となっているが，団地の東側と西側で傾斜環境が大きく異なっていたため，便宜上，緩やかな傾斜であった東側をあさおか台(緩), 急な傾斜であった西側をあさおか台(急)と表記する．

あさおか台(緩)は基地局から約 200m までが平坦地であり，それ以遠が平均斜度 4.9 度の傾斜地である．住宅地は傾斜地上の約 570m の範囲に形成されている．

あさおか台(急)は基地局から約 250m までが平坦地であり，それ以遠が平均斜度 8.3 度の傾斜地である．住宅地は傾斜地上の約 400m の範囲に形成されている．

2.2 半田山

岡山の測定エリアである半田山の概観を図 2 に示す．半田山は基地局から約 250m までが平坦地であり，それ以遠が平均斜度 4.8 度の傾斜地である．住宅地は傾斜地上の約 530m の範囲に形成されている．

2.3 志井鷹羽台

北九州の測定エリアである志井鷹羽台の概観を図 3 に示す．志井鷹羽台は基地局から約 240m までが平坦地であり，それ以遠が平均斜度 4.9 度の傾斜地である．住宅地は傾斜地上の約 550m の範囲に形成されている．

また，これら 4 カ所どの傾斜地においても，多くの建造物は 2 階建ての住宅であるため，典型的な傾斜地上の住宅地といえる．

2.4 測定方法

表 1 に示すように基地局の地上高はそれぞれあさおか台が 50.5m，半田山が 37.9m，志井鷹羽台が 38.0m である．受信レベルの測定には市販のエリアテスタを用いて，基地局から常時送信される共通パイロットチャネルを対象として測定を行った．ここで携帯機の使用状況や市街地伝搬損失推定式への適応を考慮し，各測定点における測定器のアンテナの高さは地面から約 1.5m とした．さらに，斜面の起伏による高さの変化や，家屋などの遮蔽物および道路の間隔による受信レベルの変動を考慮し，測定間隔はあさおか台・半田山を 5m，志井鷹羽台を 10m とした．各測定点において 3 秒間隔で 10 回測定を行い, 受信レベルの平均値をその地点の測定値とした．

表 1 測定の主な諸元

Area	Asaoka-dai	Handayama	Shiitakaba-dai
Measurement frequency	2,100MHz		
Base station height	50.5m	37.9m	38.0m
Receiving antenna height	1.5m		
Receiving antenna	Monopole antenna		

図 2 測定エリア(半田山)の概観

図 3 測定エリア(志井鷹羽台)の概観

3. 移動伝搬特性の評価

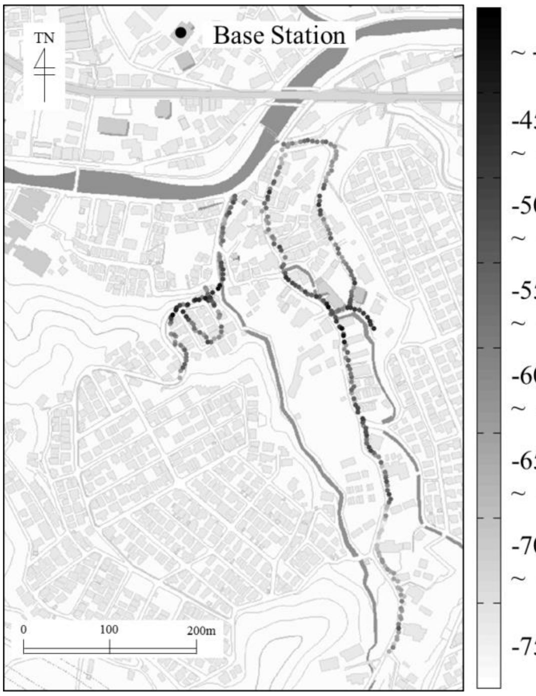

図 4 受信レベルマップ(あさおか台)

3.1 あさおか台

あさおか台の測定エリアの受信レベル分布を図 4 に示す．図 4 より，基地局からの距離による受信レベルの減衰が確認できた．また，他の測定エリアと比較し全体的に受信レ

Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

ベルが高い要因として，あさおか台の測定エリアは建物の密集度が低く，基地局からの見通しがある地点が多かったことが考えられる．

図 5，図 6 に測定結果として，基地局からの距離と伝搬損失の散布図を示す．また，これらの関係を最小二乗法により次式のように導出した．あさおか台(緩)では

$$Ls_{mag} = 24.81\log(d) + 107.13 \qquad (1)$$

となり，距離の約 2.5 乗で減衰していることが確認できた．また，あさおか台(急)では

$$Ls_{mas} = 68.85\log(d) + 130.48 \qquad (2)$$

となり，距離の約 6.9 乗で減衰していることが確認できた．

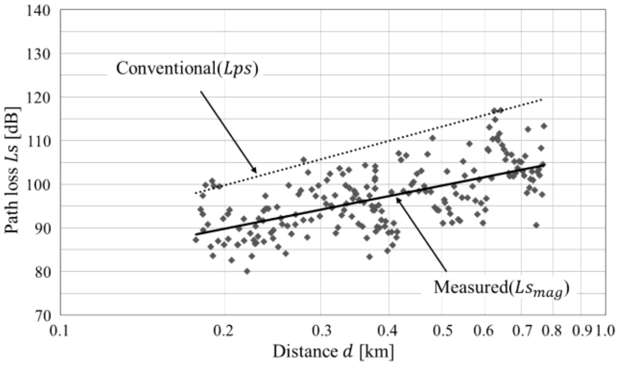

図 5　伝搬損失の距離特性と市街地伝搬損失推定式 (あさおか台(緩))

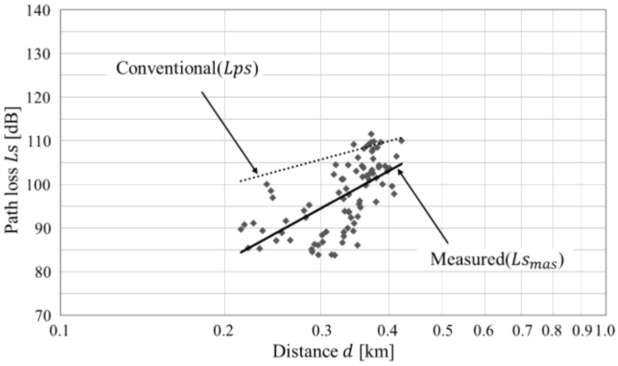

図 6　伝搬損失の距離特性と市街地伝搬損失推定式 (あさおか台(急))

3.2 半田山

半田山の測定エリアの受信レベル分布を図 7 に示す．図 7 より，基地局の北方向に受信レベルの高い地点が多いことが確認でき，また，基地局から距離のある北東方向にも受信レベルの高い地点が多くみられる．これは基地局アンテナが北および北東方向に向けてあることに加え，標高が高くなるに従い見通しが良くなる地点があることが要因として考えられる．

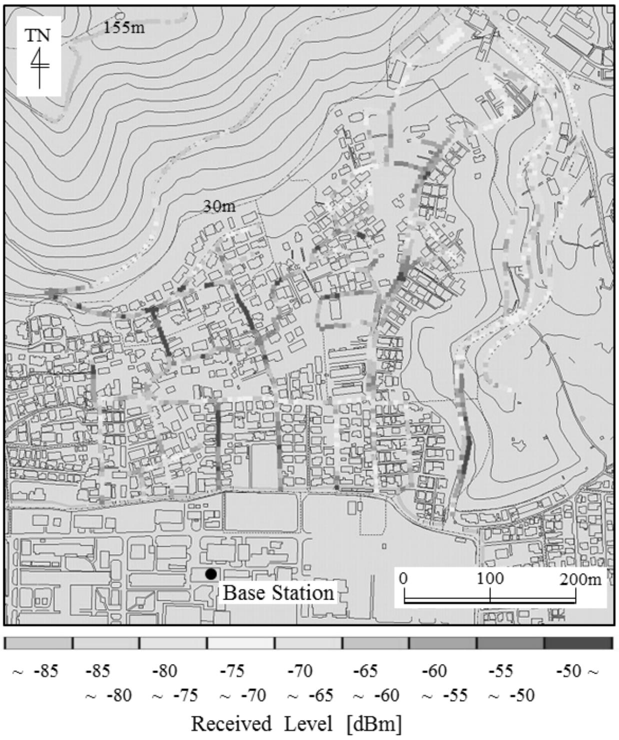

図 7　受信レベルマップ(半田山)

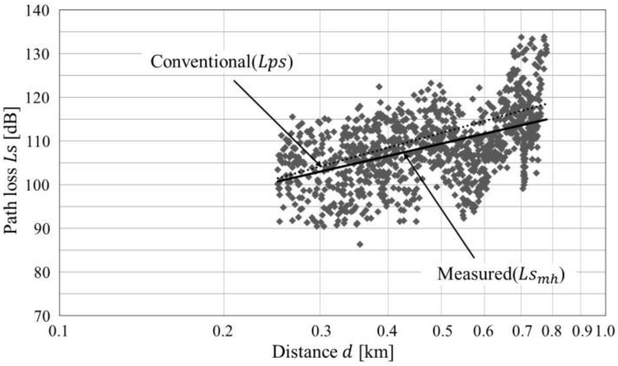

図 8　伝搬損失の距離特性と市街地伝搬損失推定式 (半田山)

図 8 に測定結果として，基地局からの距離と伝搬損失の散布図を示す．また，これらの関係を最小二乗法により次式のように導出すると，

$$Ls_{mh} = 28.83\log(d) + 118.02 \qquad (3)$$

となり，距離の約 2.9 乗で減衰していることが確認できた．

3.3 志井鷹羽台

志井鷹羽台の測定エリアの受信レベル分布を図 9 に示す．図 9 より，南北に走る道路にと比較し東西に走る道路の方が受信レベルの高い地点が多いことが確認できた．これは，南北に走る道路は基地局からの見通しがあるのに対し，東西に走る道路においては家屋等が遮蔽物となるため見通しがなくなることが要因として考えられる．

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

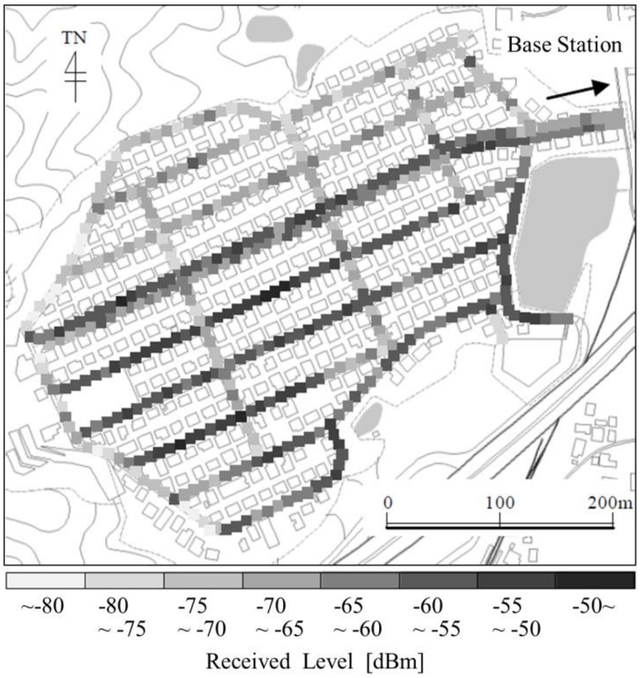

図 9　受信レベルマップ(志井鷹羽台)

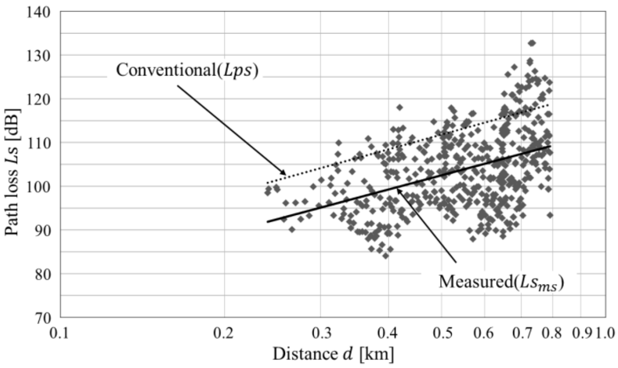

図 10　伝搬損失の距離特性と市街地伝搬損失推定式
(志井鷹羽台)

図 10 に測定結果として，基地局からの距離と伝搬損失の散布図を示す．また，これらの関係を最小二乗法により次式のように導出すると，

$$Ls_{ms} = 33.32\log(d) + 112.52 \qquad (4)$$

となり，距離の約 3.3 乗で減衰していることが確認できた．

4. 伝搬損失特性の導出

市街地伝搬損失推定式Lp[dB]は，周波数をf[MHz]，基地局のアンテナ高をhb[m]，基地局と移動局の距離をd[km]とすると次式で示すことができる[7].

$$Lp[\mathrm{dB}] = 69.55 + 26.16\log(f) - 13.82\log(hb) - k(hm) + (44.9 - 6.55\log(hb))\log(d) \qquad (5)$$

なお，移動局のアンテナ高hm[m]については，$hm = 1.5$[m]のとき，$k(hm) = 0$[dB]となる．ここで，本測定エリアは純粋な市街地ではなく，環境は郊外地に近い特性を持っていると考えられるため，市街地伝搬損失推定式の郊外地補正を適用する（郊外地補正を適用した市街地伝搬損失推定式を以下では郊外地伝搬損失推定式とする）. 郊外地伝搬損失推定式Lps[dB]は，市街地伝搬損失推定式Lp[dB]と周波数f[MHz]を用いて次式で示すことができる[7].

$$Lps[\mathrm{dB}] = Lp - 2\{\log(f/28)\}^2 - 5.4 \qquad (6)$$

本研究では表 1 に示すパラメータを上記の郊外地伝搬損失推定式に適用し，実測値との差を検討した．

4.1 あさおか台

あさおか台における郊外地伝搬損失推定式は

$$Lps[\mathrm{dB}] = 33.74\log(d) + 120.49 \qquad (7)$$

となり，図 5，図 6 の点線で示す．ここで式(7)を式(1)と比較すると式(7)が約 3.3 乗に比例して減衰するのに対し，式(1)は約 2.5 乗に比例して減衰しており，定数項の差も約 13dB あることが確認できた．同様に，式(7)と式(2)を比較すると式(7)が約 3.3 乗に比例して減衰するのに対し，式(1)は約 6.9 乗に比例して減衰しており，定数項の差も約 10dB あることが確認できた．

4.2 半田山

半田山における郊外地伝搬損失推定式は

$$Lps[\mathrm{dB}] = 34.56\log(d) + 122.21 \qquad (8)$$

となり，図 8 の点線で示す．ここで式(8)と式(3)を比較すると式(8)が約 3.5 乗に比例して減衰するのに対し, 式(3)は 2.9 乗に比例して減衰していることが確認できた．

4.3 志井鷹羽台

志井鷹羽台における郊外地伝搬損失推定式は

$$Lps[\mathrm{dB}] = 34.55\log(d) + 122.19 \qquad (9)$$

となり，図 10 の点線で示す．ここで式(9)を式(4)と比較すると定数項の差が約 10dB あることが確認できた．

4.1 節，4.2 節，4.3 節のように，測定による式と市街地伝搬損失推定式の郊外地補正に差が生じた要因は，傾斜地という環境が影響しているためと考えられる．よって，傾斜地に市街地伝搬損失推定式を適用するには，郊外地補正に加え，傾斜地を考慮した補正を行う必要がある．

そこで，上記の伝搬損失推定式の補正を行うにあたり，基地局のアンテナの先端と測定点のなす垂直面角度θ_m(傾斜地)[8][9][10]とθ_{mf}(平坦地)を用いる補正法について検討した．

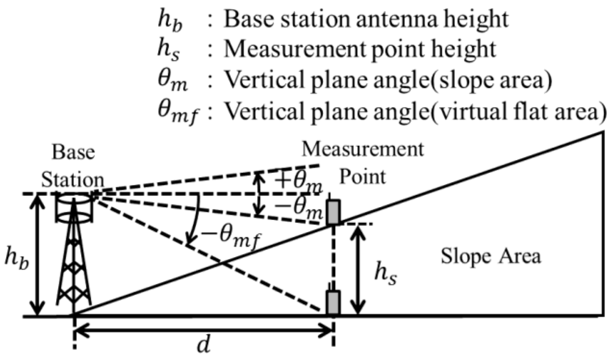

図 11　基地局アンテナと測定点のなす垂直面角度

5. 垂直面角度差分補正法の適用

本研究では郊外地伝搬損失推定式に傾斜地補正項K_s[dB]を加える補正法の検討を行った．この場合，傾斜地における伝搬損失Ls[dB]は郊外地伝搬損失推定式Lps[dB]を用いて次式で示すことができる．

$$Ls[\mathrm{dB}] = Lps - K_s \tag{10}$$

ここで図 11 に示すように基地局のアンテナの先端と傾斜地における各測定点のなす垂直面角度をθ_m，同じ距離で平坦地を仮定したときの基地局からの垂直面角度をθ_{mf}とし，これらの差分をパラメータに用いたときの補正項について考察した．

基地局のアンテナ高をh_b[m]，基地局からの距離をd[m]とするとき，測定点の高さh_s[m]はθ_mを用いて次式で示すことができる．

$$h_s[\mathrm{m}] = h_b + d\tan(\theta_m) \tag{11}$$

また，傾斜地のときの垂直面角度θ_m[mrad]はh_s，h_bおよびdを用いて次式で示すことができる．

$$\theta_m[\mathrm{mrad}] = -(10^3\pi/180)\tan^{-1}\bigl((h_b - h_s)/d\bigr) \tag{12}$$

さらに，平坦地のときの垂直面角度θ_{mf}[mrad]はh_s，h_b，およびdを用いて次式で示すことができる．

$$\theta_{mf}[\mathrm{mrad}] = -(10^3\pi/180)\tan^{-1}(h_b/d) \tag{13}$$

ここで，垂直面角度の差分θ_{md}[mrad]は次式で示すことができる．

$$\theta_{md}[\mathrm{mrad}] = \theta_m - \theta_{mf} \tag{14}$$

$$= -(10^3\pi/180)\{\tan^{-1}\bigl((h_b - h_s)/d\bigr) - \tan^{-1}(h_b/d)\} \tag{15}$$

θ_{md}は基地局と各測定点との相対的な位置関係を補正に反映するパラメータである．測定により求めた各測定点における伝搬損失と郊外地伝搬損失推定式による伝搬損失の差分

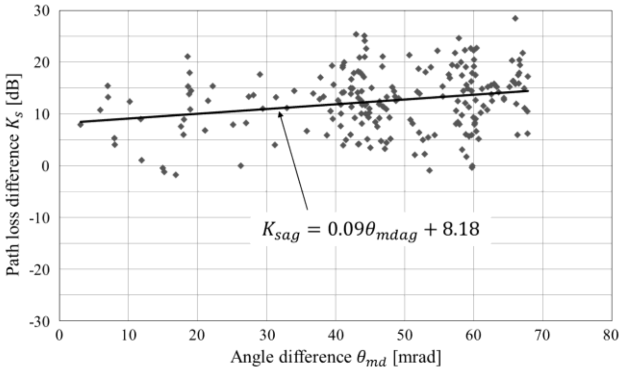

図 12　伝搬損失差分と垂直面角度の関係(あさおか台(緩))

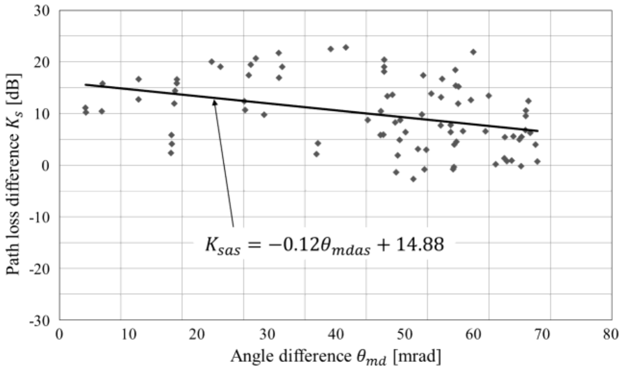

図 13　伝搬損失差分と垂直面角度の関係(あさおか台(急))

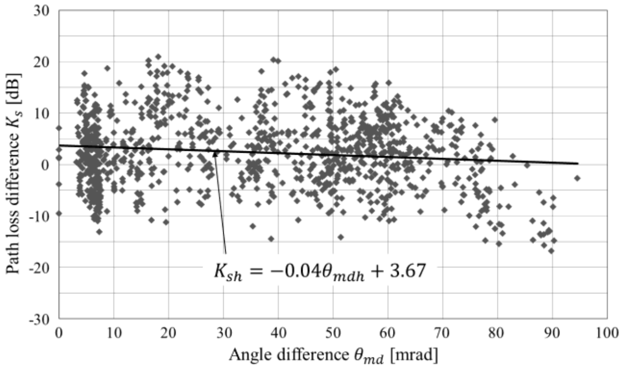

図 14　伝搬損失差分と垂直面角度の関係(半田山)

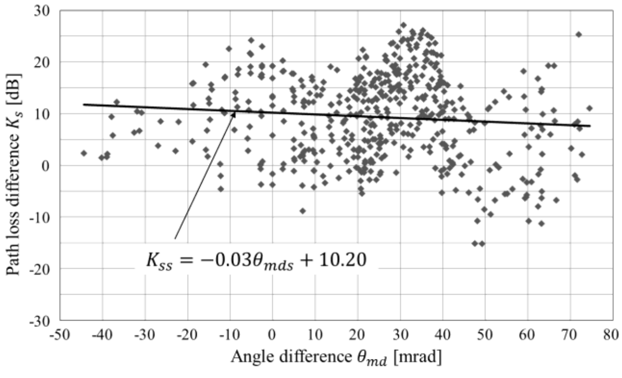

図 15　伝搬損失差分と垂直面角度の関係(志井鷹羽台)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

である補正項K_sと，垂直面角度差分θ_{md}の関係を図 12～図 15 に示す．また，線形近似により次式の通りに導出した．それぞれ，式(16)があさおか台(緩)，式(17)があさおか台(急)，式(18)が半田山，式(19)が志井鷹羽台を示している．

$$K_{sag}[\mathrm{dB}] = 0.09\theta_{mdag} + 8.18 \tag{16}$$

$$K_{sas}[\mathrm{dB}] = -0.12\theta_{mdas} + 14.88 \tag{17}$$

$$K_{sh}[\mathrm{dB}] = -0.04\theta_{mdh} + 3.67 \tag{18}$$

$$K_{ss}[\mathrm{dB}] = -0.03\theta_{mds} + 10.20 \tag{19}$$

ここで，垂直面角度の差分θ_{md}と基地局から測定点までの距離dとの関係を図 16～図 19 に示す．また，それぞれの回帰式を次式の通りに導出した．それぞれ，式(20)があさおか台(緩)，式(21)があさおか台(急)，式(22)が半田山，式(23)が志井鷹羽台を示している．

$$\theta_{mdag}[\mathrm{mrad}] = 66.17\log(d) + 75.10 \tag{20}$$

$$\theta_{mdaa}[\mathrm{mrad}] = 280.22\log(d) + 177.02 \tag{21}$$

$$\theta_{mdh}[\mathrm{mrad}] = 119.75\log(d) + 74.97 \tag{22}$$

$$\theta_{mds}[\mathrm{mrad}] = 180.31\log(d) + 73.07 \tag{23}$$

式(20)～式(23)をそれぞれ式(16)～式(19)に代入すると，それぞれの測定エリアにおける補正項K_sは次式となった．式(24)があさおか台(緩)，式(25)があさおか台(急)，式(26)が半田山，式(27)が志井鷹羽台を示している．

$$K_{sag}[\mathrm{dB}] = 6.11\log(d) + 15.10 \tag{24}$$

$$K_{sas}[\mathrm{dB}] = -34.09\log(d) - 6.65 \tag{25}$$

$$K_{sh}[\mathrm{dB}] = -4.41\log(d) + 0.91 \tag{26}$$

$$K_{ss}[\mathrm{dB}] = -6.29\log(d) + 7.65 \tag{27}$$

よって，式(7)と式(24)，式(7)と式(25)，式(8)と式(26)，式(9)と式(27)をそれぞれ式(10)に代入すると，それぞれの測定エリアにおける伝搬損失推定式Ls_pは次式となった．式(28)があさおか台(緩)，式(29)があさおか台(急)，式(30)が半田山，式(31)が志井鷹羽台を示している．

$$Ls_{pag}[dB] = 27.64\log(d) + 105.38 \tag{28}$$

$$Ls_{pas}[dB] = 67.84\log(d) + 127.14 \tag{29}$$

$$Ls_{ph}[dB] = 38.97\log(d) + 121.30 \tag{30}$$

$$Ls_{ps}[dB] = 40.84\log(d) + 114.54 \tag{31}$$

比較のため，図 20～図 23 にそれぞれの測定エリアにおける，従来法の市街地伝搬損失推定式Lps，測定により求めた傾斜地の伝搬損失推定式Ls_m，垂直面角度差分法により補正した傾斜地の伝搬損失推定式Ls_pをそれぞれ示す．

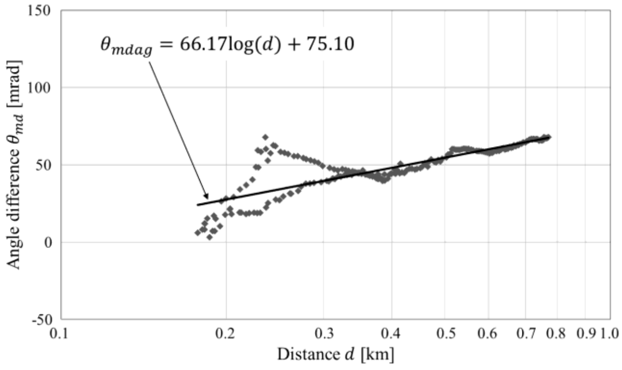

図 16　垂直面角度差分と距離の関係(あさおか台(緩))

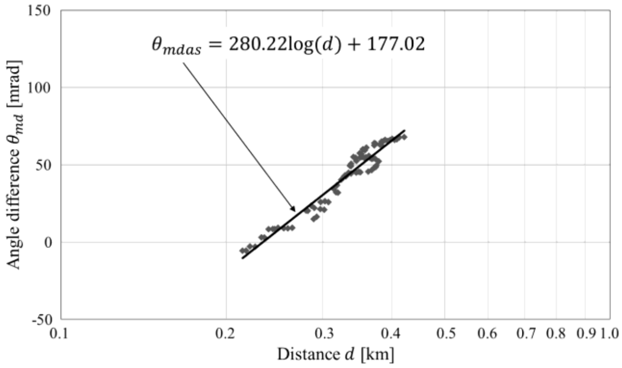

図 17　垂直面角度差分と距離の関係(あさおか台(急))

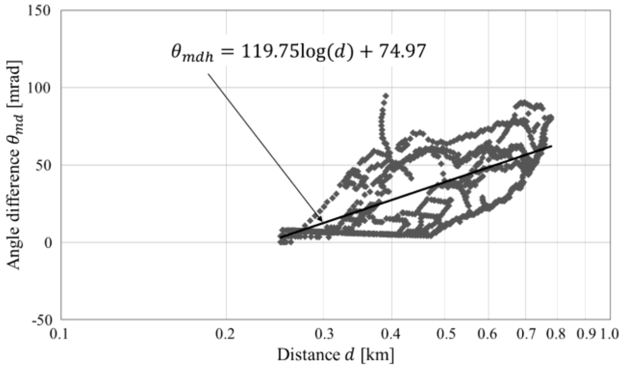

図 18　垂直面角度差分と距離の関係(半田山)

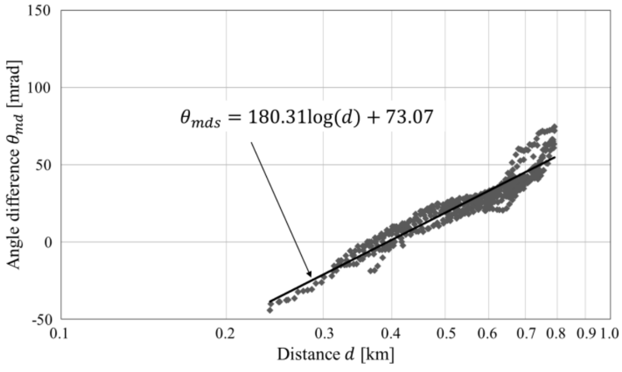

図 19　垂直面角度差分と距離の関係(志井鷹羽台)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

図 20，図 21 よりあさおか台では，Ls_mとLs_pは傾きおよび定数項がLpsと比較してともに近い値を示しており，Ls_pはあさおか台における電波伝搬損失特性をよく近似していることが確認できた．

図 22 より半田山では，Ls_mとLs_pは定数項においてLs_pがLpsと比較して近い値を示している．Ls_mとLs_pの傾きの値が他の環境と比べて異なった要因としては，図 18 に示すように傾斜環境が異なる複数の測定データをまとめて考察しているためと考えられる．しかし，図の範囲(0.25～0.78km)においては，最大約 4dB 程度の差のため，傾きの違いによる影響は小さいことが確認できた．

図 23 より志井鷹羽台では，Ls_mとLs_pは定数項においてLs_pがLpsと比較してより近い値を示していることがわかる．また，傾きは異なっているが，図の範囲(0.24～0.79km)では最大約 3dB 程度の差のため，傾きの違いによる影響は小さいことが確認できた．

以上の結果から，垂直面角度差分θ_{md}を補正式のパラメータとして用いると市街地伝搬損失推定式を補正して傾斜地の伝搬損失を推定する方法の検討に有効であることがわかった．

本考察は測定データをもとに行ったが，実際は測定を行うことなく伝搬損失を推定する必要がある．そこで，補正項の値を決定しているK_sとθ_{md}の関係式に着目して考察した．表 2 に式(16)～式(19)における傾き A および定数項 B をまとめたものを示す. 補正項として導出する際には各傾き A, 定数項 B が同様な特性を持ち，一般性を有する必要があると考える．しかし，現段階では表 2 からわかるように，一般的な特性はみられない．これは，見通しの有無や，道路方向（横コース，縦コース）の割合などを考慮していないことが要因として挙げられる. 今後はこれらの要因も考慮する必要があると考える．

表 2　補正項のパラメータ

	$K_s = A\theta_{md} + B$	
	A	B
あさおか台(緩)	0.092	8.175
あさおか台(急)	-0.122	14.885
半田山	-0.037	3.673
志井鷹羽台	-0.035	10.199

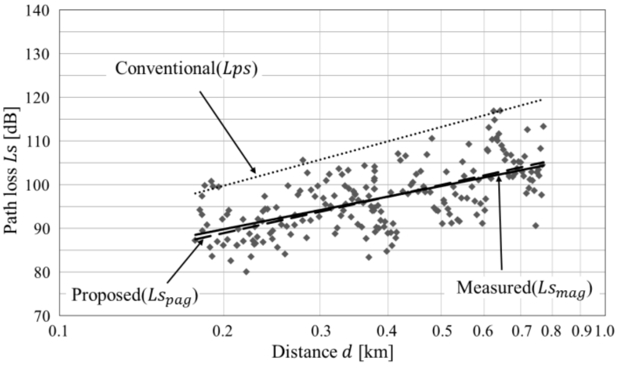

図 20　市街地伝搬損失推定式の補正(あさおか台(緩))

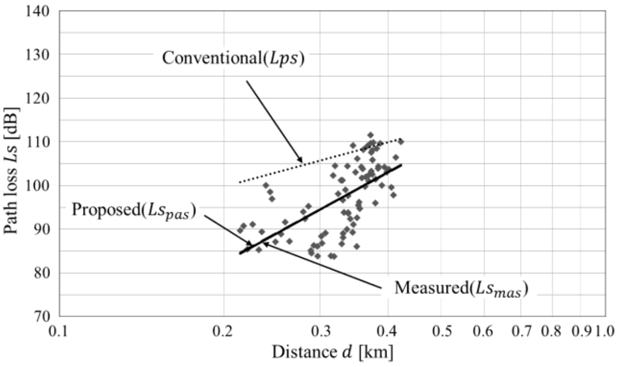

図 21　市街地伝搬損失推定式の補正(あさおか台(急))

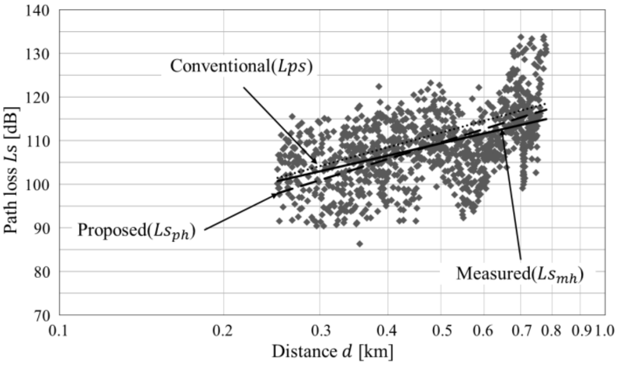

図 22　市街地伝搬損失推定式の補正(半田山)

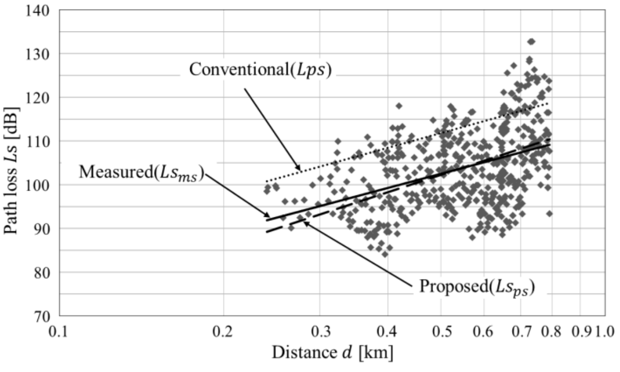

図 23　市街地伝搬損失推定式の補正(志井鷹羽台)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.12
Vol.2013-ITS-55 No.12
Vol.2013-DCC-5 No.12
2013/11/14

6. まとめ

基地局からの距離が 1km 程度の傾斜環境における伝搬特性の解明は，サービスエリアの拡充にとって重要な課題となっている．本研究では市街地伝搬損失推定式に着目し，傾斜地における補正を目的として，広島市，岡山市，北九州市にある傾斜団地において携帯電話の電波測定を行い，異なる傾斜環境を考慮した伝搬損失特性を検討した．結果を以下に示す．

- どの測定エリアにおいても基地局からの主ビーム方向を横切る道路においては，家屋などが障害物となり，受信レベルが低くなることが確認できた．
- 垂直面角度差分θ_{md}を補正式のパラメータとして用いると市街地伝搬損失推定式を補正して傾斜地の伝搬損失を推定することに有効であることがわかった．
- 各環境において，垂直面角度差分による補正項の関係式が異なることがわかった．

今後は見通しの有無や，道路方向の程度を補正に反映させる手法の検討を予定している．

謝辞　本研究は科学研究費補助金(課題番号 24560463)により行われた．ここに謹んで感謝の意を表する．

参考文献

[1] M. Kitagawa, H. Ota, T. Futakata, and K. Anzawa, “LTE System and Services as Social Platform for Enriching People’s Lives,” NTT DOCOMO Technical Journal, vol.13, no.1, pp.4-9, Jun. (2011)
[2] 齊藤忠夫，立川敬二，移動通信ハンドブック, pp.75-95，オーム社 (2000)
[3] K. Kitao and S. Ichitsubo, “Path loss prediction formula in urban area for the fourth-generation mobile communication systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.6, pp.1999-2008 (2008)
[4] H. Okamoto, K. Kitao, and S. Ichitsubo, “Outdoor-to-indoor propagation loss prediction in 800-MHz to 8-GHz band for an urban area,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.VT-58, no.3, pp.1059-1067, (2008)
[5] E. Damosso, Ed. “Digital mobile radio towards future generation systems,” Cost 231 Final Report, European Commission, Bruxelles, Belgium, (1999)
[6] W. C. Y. Lee, “Mobile Communication Engineering,” McGraw-Hill, (1982)
[7] M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.VT-29, no.3, pp.317-325, Aug. (1980)
[8] T. Fujitani, S. Tomisato, and M. Hata, “Experimental study of mobile propagation loss correction formula for a slope terrain area,” Proc. of 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall, VTC2010-Fall, pp.1B.4.1-1B.4.5, Sept. (2010)
[9] 平井尊教，瀬尾高徳，市坪信一，秦正治，冨里繁, “傾斜地を見上げるセルラ基地局に関する伝搬損失特性の検討,” 平成 25 年度電気関係学会九州支部連合大会, no.01-2A-10, Sept. (2013)
[10] 平井尊教，林和貴，新浩一，西正博，秦正治，冨里繁, “異なる傾斜地エリアに対する伝搬損失補正式の適用性の検討,” 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会, no.B-1-7, Sept. (2013)

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan