

屋外光無線回線品質向上に関する研究

横田 知治 朝香 和彦 松本 秀樹 山口 剛 笠井 千春

あらまし 本研究において、光無線装置の回線品質と気象データとの関連について論理的解析と実験的検証を行うとともに、気象依存性低減策（電波との相互補完性）に関する検証を行う。そして、光無線装置が高度情報化社会のアクセス網の構築に有効的であることを実証する。更に、光無線装置を利用し、アクセス網構築するうえでの指針を提言する。

1 はじめに

近年、広帯域でしかも通信網の構築が容易で安価である光無線システムは、LAN間接続やブローバンド・インターネット時代のアクセス系として有効的であるばかりでなく、光ファイバー網や無線通信事業者のバックアップとしてもその有効性が見直されてきた。

しかし、次のような課題が指摘されている。「光無線は雨、霧などの気象現象や、かげろうのような空気の乱れの影響を受けやすいと予想されるが、これらの現象と回線品質との関連性が十分解明されておらず、サービス提供に必要な回線設計が難しい。」

本稿では、光無線および電波無線の回線品質と気象データとの関連及び、気象依存性低減策（電波との相互補完性）に関する論理的解析と実験的検証を行う。そのため、約 1.2km 離れた 2 地点間に光無線装置を設置し、その間の伝送品質を測定するとともに、天気計・視程計を設置して、2 地点の気象状況及び視程距離を測定する。このことにより気象データと回線品質に関する基礎データを取得する。また、気象と光無線装置の伝搬損失をコンピュータシミュレーションで解析し、理論的裏付けを検証する。以上により、屋外光無線装置の回線品質の考え方を示すとともに、回線品質向上のためのシステム設計について報告する。

2 研究システムの概要

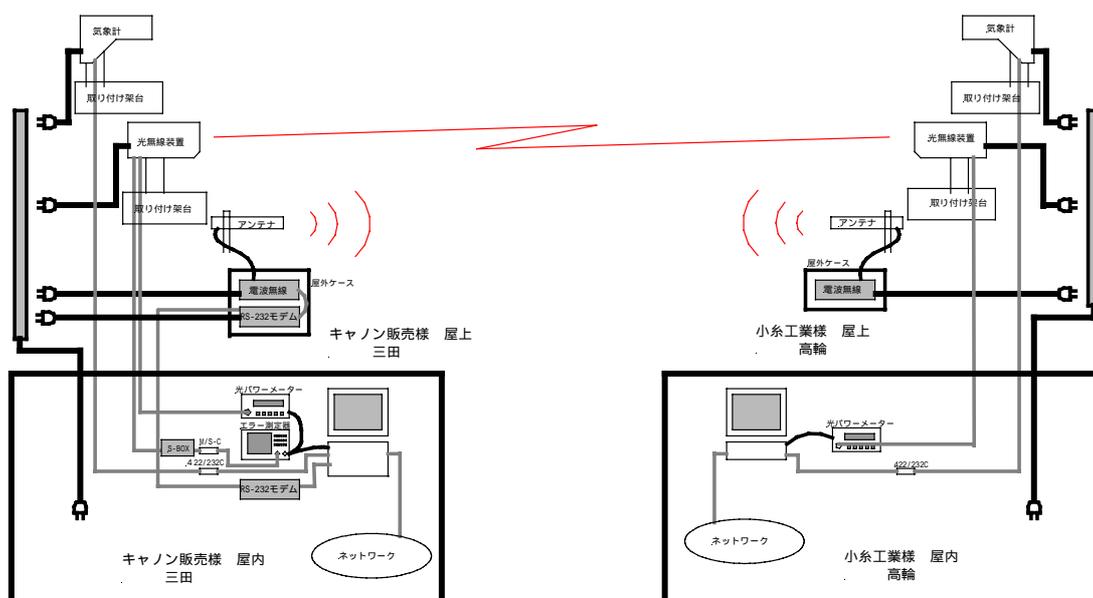


図 2 - 1 光伝搬特性調査システム構成図

光無線装置の回線品質と気象の関係进行调查するため、天気計（視程計）、光無線装置、電波無線装置と計測器類によって以下のデータ収集を行った。気象データ（視程、天気、雨量、その

他の気象データ)、光無線装置の BER、光無線装置の受光パワー、電波無線装置の伝送品質状態：ロストパケット数、送受信信号強度、送受信リトライ数。そして、これらのデータを収集するための装置類は、東京都港区高輪 3-5-23 日本生命高輪台ビル 小糸工業株式会社様および東京都港区三田 3-11-28 キヤノン販売株式会社様の 1.2km 離れたビルの屋上および屋内に配置した。実際の研究に使用したシステムの構成を図 2 - 1 に示す。

このシステムで使用した光無線装置の昭和電線電纜製 SIL155M / L1500 は、最大通信速度 155Mbps、通信距離 1500m である。SIL155M/L1500 は、発光角度が 2mrad である 4 個の発光ビームと 4 面の受信部 (レンズおよび受光素子) を有する。実験では、1 面の受光レンズに入射する光を光パワー計測用として光ファイバーにより光パワーメーターに導いている。そのため、ビットエラーレートの計測には、他の 3 面の受光レンズに入射する光が担っている。また、発光波長は 841.4nm から 853.4nm である。また、電波無線装置 CiscoAironet 「AIR-BR1340」は、無線 LAN の標準である IEEE 802.11b に準拠し、11Mbps の伝送速度である。

3 光無線の伝送品質における気象依存性

(1) 気象条件と視程

標準視程は、「均質な霧団気内で、黒い物体が日照の中で、水平線上に区別して見れる距離」と定義されている。視程を直接測定することは困難であるため、本研究で利用した現在天気計のような光学的な装置によって測定した結果を視程値換算して求める。光学的計測器から求められた値、すなわち、光 (色温度 2700K の白色灯の閉口ビーム) がある空間を通過して 5% になったときの距離を MOR (Meteorological Optical Range : 気象光学距離) といい、気象用語の視程と同義に使われている。

ア 気象条件による視程分布

視程が気象条件により受ける影響について、天気計、視程計により調査を行った。

表 3 - 1 に気象条件を、“降水なし”、“もや”、“霧雨”、“雨”の 4 項目に分け、各条件による視程の比率を示す。

今回の観測では視程が 1km 以下になったのは降雨時のみであり、その出現比率は 0.32% とまれであった。尚、今回の測定期間内で最大降雨強度は 42.6mm/hr で、その時の視程は 0.16km であった。

図 3 - 1 に、降雨強度と視程の相関を示す。降雨強度が高いほど視程は悪くなる傾向にはあるが、降雨強度により視程を一意的に求めることはできない。したがって、回線設計を行う場合には、視程から光波の伝搬損失を求める必要がある。

表 3 - 1 気象条件による視程比率

視程計 三田		01/10/24-02/1/24								全体	
視程距離	降水無し		もや		霧雨		雨		観測回数	比率	
	観測回数	比率	観測回数	比率	観測回数	比率	観測回数	比率			
0-1		0.00%		0.00%		0.00%	863	5.89%	863	0.32%	
1-2	3	0.00%	573	4.16%	148	8.02%	2515	17.16%	3239	1.22%	
2-3	3	0.00%	3415	24.78%	216	11.70%	2819	19.23%	6453	2.42%	
3-4	10	0.00%	3808	27.63%	217	11.76%	2111	14.40%	6146	2.31%	
4-5	341	0.14%	5643	40.94%	182	9.86%	1646	11.23%	7812	2.93%	
5-6	6123	2.60%	341	2.47%	101	5.47%	942	6.43%	7507	2.82%	
6-7	6711	2.84%	4	0.03%	130	7.04%	955	6.52%	7800	2.93%	
7-8	6980	2.96%		0.00%	76	4.12%	458	3.12%	7514	2.82%	
8-9	6946	2.94%		0.00%	64	3.47%	307	2.09%	7317	2.75%	
9-10	6218	2.64%		0.00%	38	2.06%	263	1.79%	6519	2.45%	
10-11	6051	2.56%		0.00%	53	2.87%	231	1.58%	6335	2.38%	
11-12	5212	2.21%		0.00%	39	2.11%	140	0.96%	5391	2.03%	
12-13	5404	2.29%		0.00%	38	2.06%	109	0.74%	5551	2.09%	
13-14	4776	2.02%		0.00%	35	1.90%	109	0.74%	4920	1.85%	
14-15	4474	1.90%		0.00%	40	2.17%	111	0.76%	4625	1.74%	
15-16	4775	2.02%		0.00%	39	2.11%	75	0.51%	4889	1.84%	
16-17	4855	2.06%		0.00%	39	2.11%	88	0.60%	4982	1.87%	
17-18	4747	2.01%		0.00%	34	1.84%	71	0.48%	4852	1.82%	
18-19	4677	1.98%		0.00%	34	1.84%	69	0.47%	4780	1.80%	
19-20	157628	66.81%		0.00%	323	17.50%	776	5.29%	158727	59.62%	

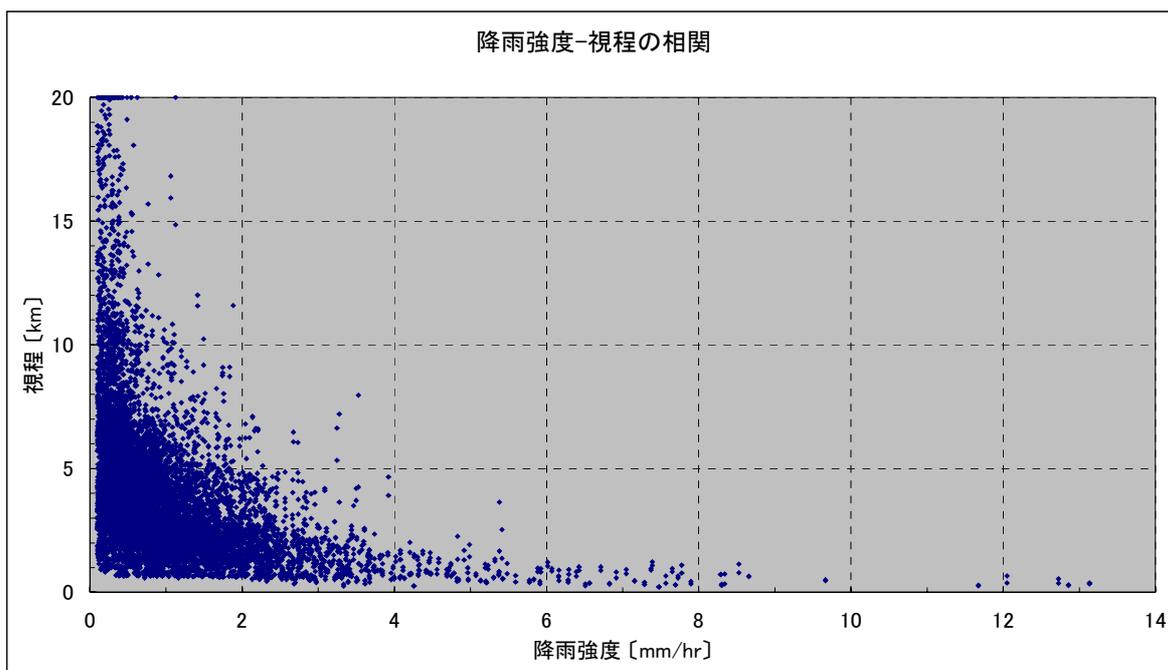


図 3 - 1 降雨強度による視程の相関性

イ 視程、受光パワー、ビットエラー率の観測結果

図 3-2 は平成 13 年 12 月の三田における 1 ヶ月間の降雨時の特性を示したものである。

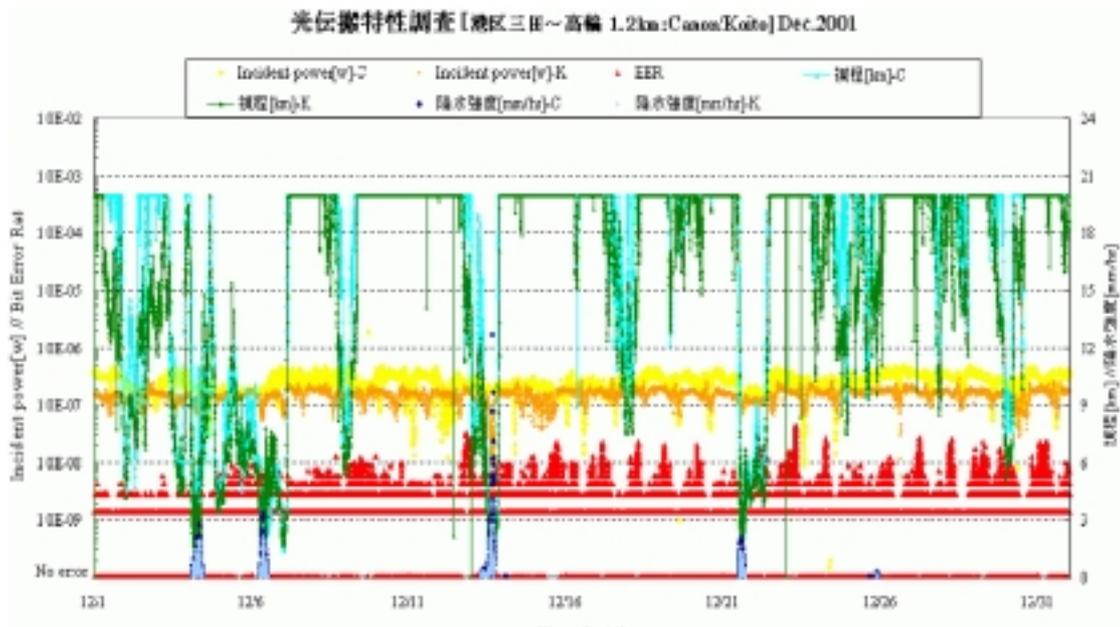


図 3-2 12月1ヶ月間の降雨特性 - 視程、受光パワー、ビットエラー率

視程に関しては、マクロに見れば三田と高輪ともほぼ同じような挙動を示している。両観測点ともに、ある程度の降雨(この図では 3mm/hr 程度)があった時に視程も大きく低下しており、降雨と視程の挙動が一致していることがわかる。ただ、降雨のない時にも視程が低下している現象が見られるが、これは霧やもやの影響であると考えられる。今回の観測データから概ね視程における気象条件の影響に関しては対応関係があることが検証できた。

光無線装置を使う上で、気になるのがエラーの発生である。今回の観測において、天候が比較的良好であった面もあるが、ビットエラーの発生率は $BER=4 \times 10^{-8}$ が最悪値であり、実用回線としての十分な能力有している。ただし、ビットエラーの出方を見ると必ずしも、降雨や視程の変動と対応しておらず、どちらかといえば間欠的に連続して発生している。現状では、この原因を明確にできていない。

(2) 伝搬損失と視程

ア 伝搬損失の評価式

光無線は、大気中のエアロゾルや気象条件によって、その伝送品質に大きな影響を受ける。この影響を評価する方法として、一般的に視程という量を用いている。視程は空を背景とした時、黒い目標物とのコントラストが 5% となった時の観測者から目標物までの距離として定義されており、各地の気象台で観測されている。この視程は可視光における測定データであるが、光無線は約 800nm 近傍の近赤外の波長を使用していることから、可視光における視程データを伝搬損失の算定に利用している。この視程を用いた、大気の伝搬損失 L (dB / Km) の評価式として、一般に次の二つの式が知られている。その一つは、上記の視程の定義から求められた評価式 (1) であり、もう一つは波長による影響を考慮した評価式 (2) である。

- ・波長依存性を考慮しない時

$$L = \frac{13}{V} \quad \text{式(1)}$$

- ・波長依存性を考慮した時

$$L = \frac{17 \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q}{V} \quad \text{式(2)}$$

$$q = 0.585V^{1/3}$$

L : 伝搬損失(dB/km)、 V : 視程(km)、 λ : 波長(nm)

イ 視程と受光パワーの関係

図 3 - 2 は、三田と高輪間の約 1.2Km で約 6 ヶ月間(2001 年 10 月から 2002 年 3 月末迄)視程と受光パワーを測定したデータをプロットしたグラフである。

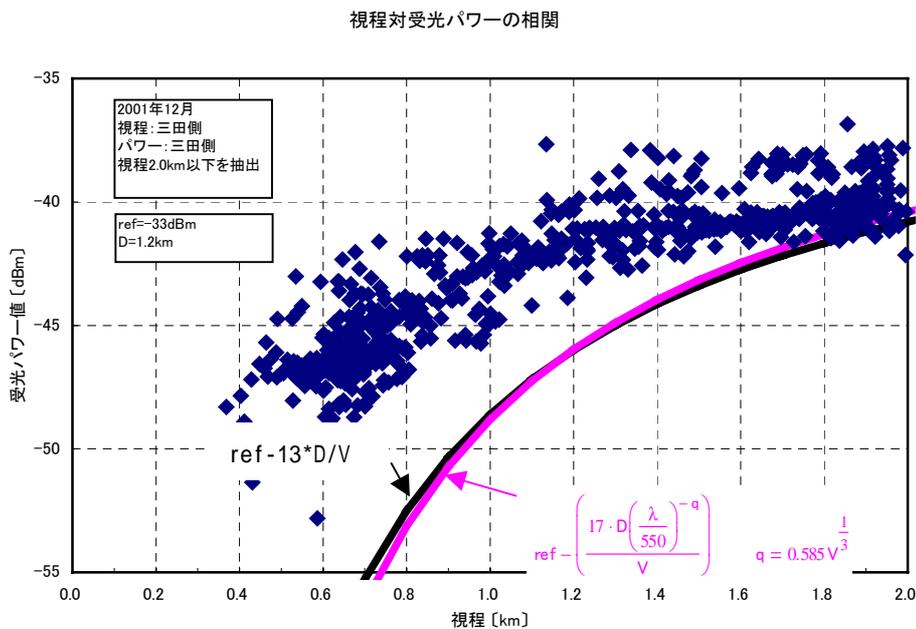


図 3 - 2 視程対受光パワー特性 (三田側)

この図中の黒の実線で表したグラフは式(1)、赤の実線で表したグラフは式(2)の伝搬損失を考慮して求めた受光パワーをプロットしたものである。(送光パワー基準を ref= - 33dBm、伝送距離 D=1.2km として計算した値)

実測データをプロットした視程に対する受光パワーの減衰特性と伝搬損失の評価式(1)(2)より求めた減衰特性を比較すると、評価式より求めた特性曲線は実測データの下限值に沿った特性をもっていることが判る。このことから、伝搬損失の算定には、何れの評価式を用いても問題ない事が検証された。

伝搬損失の評価式について見ると、光無線で想定している伝送距離約 2km、光源の波長約 800nm であれば式(1)と式(2)から得られた結果に大きな差はなく、回線設計の際に、どちらの式を使ってもほぼ同じ結果が得られることが分かる。従って、伝搬損失の評価では、取扱いの容易な式(1)を使う方が便利である。

(3) 伝搬損失と伝送品質

ア 受光強度とエラーレート (BER) の関係

本測定で得られた受光強度と BER の関係を下のグラフに示す。

測定期間 (2001.10.24 ~ 2002.1.27 時点) 2001 年 10 月 24 日の測定開始から 2002 年 1 月 27 日時点までリンクダウンは観測されず、BER も最悪値で 4.3×10^{-8} であり、ワイヤレスシステムとしては非常に回線品質の高いものといえる。

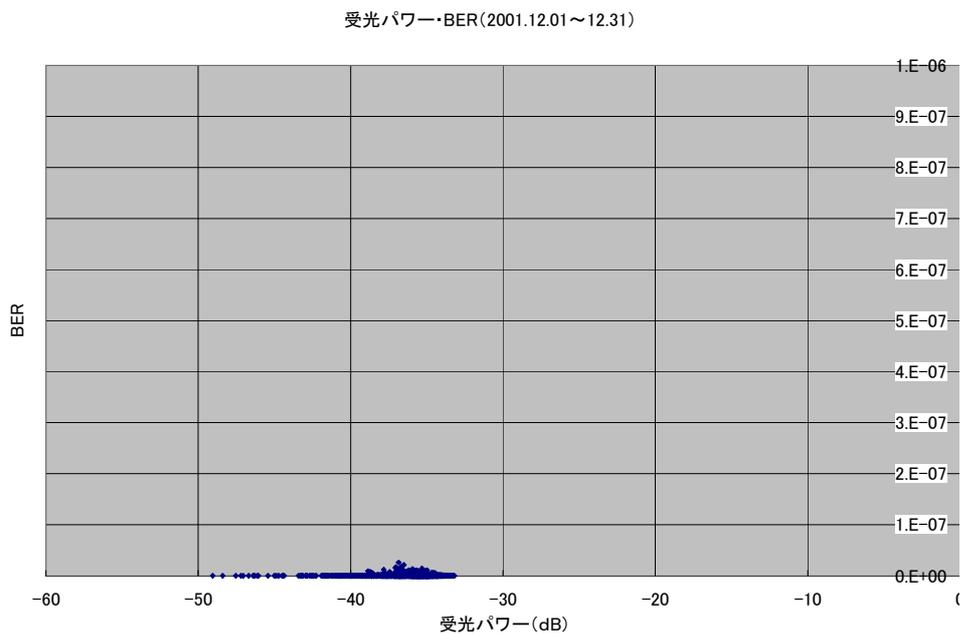


図 3 - 3 受光パワーと BER の関係

イ シンチレーション

空間での揺らぎなどによる受光レベルの変動をシンチレーションという。本測定で得られた、シンチレーション値の一例を表 3 - 2 に示す。

表 3 - 2 シンチレーション測定結果

年月日	視程距離の最低値	天候状況	最高気温	最低気温	BER 最悪値	シンチレーション
2001/12/1	20km (三田) 20km (高輪)	降水なし 100%	12.3	5.9	1.70E-08	4 ~ 8dB
2001/12/9	6.5km (三田) 5.7km (高輪)	降水なし 100%	12.6	5.7	1.00E-08	3 ~ 8dB
2001/12/1	368m (三田) 272m (高輪)	降水なし 55.6% 降雨もや 44.4%	13.1	7	5.80E-09	1 ~ 3dB
2001/12/2	15.1km (三田) 6.25km (高輪)	降水なし 100%	15.2	3.4	4.30E-08	1 ~ 2dB

4 光伝搬特性のシミュレーション検討

本研究で使用したシミュレーションソフトは、基本的な大気構造に FASCODE モデルを用い、大気の組成には標準的大気組成であると認められている HITRAN データベースのパラメータを利用している。

(1) 大気中の光波伝搬の損失に関する理論式とシミュレーション

まず光伝搬シミュレーションソフトと、屋外光無線においてよく使われる、光波減衰を感覚的に捕らえられるパラメータとして視程を用いた評価式との比較を行い、その評価を行った。

評価用式としては良く知られている式(1)、式(2)を用いた。

$$L = \frac{13}{V} \quad (\text{dB/km}) \quad \text{式(1)}$$

$$L = \frac{17}{V} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q \quad (\text{dB/km}) \quad \text{式(2)}$$

L : 伝搬損失(dB/km)、V : 視程(km) λ : 波長(nm)

q = 散乱粒子のサイズ分布 = $0.585V^{1/3}$ (V < 6km)

式(2)も式(1)と同様に散乱粒子による減衰係数を定義したものであるが、この式では波長依存性と粒子のサイズ分布を考慮した式となっている。

図4-1は波長845nmの設定で、評価式(1)および(2)とシミュレーションで得られた値を視程 大気減衰率のグラフとして表したものである。また、シミュレーションソフトの視程環境でのデフォルト設定である Fog (VIS=0.2km, 0.5km)、Rural (VIS=5km)、Urban (VIS=5km) についてもシミュレーションを行った。その結果、評価式に非常に近似した値が得られた。視程以外の散乱に関係する粒子(埃、霧、雨滴)などの影響を考慮することで若干差が出ていると考えられるが、視程をパラメータとしてシミュレーションにより光波伝搬損失を推測することは十分可能であると考えられる。

(2) 気象とシミュレーション結果

出現頻度が多く、光無線通信への影響が大きい降雨時に関するシミュレーションを、降雨強度を主パラメータとして行った。

シミュレーションソフトでは降雨強度(Rain rate)に対する Transmission の評価式として Marshall-Palmer の式を用いて計算している。Marshall-Palmer の式は次のとおりである。

$$t = \exp(-0.365R^{0.63} \times s) \quad \text{式(3)}$$

t = transmission, R = rain rate (mm/hr), s = path length (km)

まず、視程(Visibility)を一定(VIS=23km)とし、降雨強度を変化させたときのシミュレーションを行った場合、その結果は式(3)にほぼ一致しており、降雨強度(rain rate)に対する減衰が正しくシミュレーションされていた。しかし、Visibilityを小さくしていく(10km, 1km)と、式(3)からの乖離が大きくなっていく結果となった。これは単純に降雨による減衰よりも他の要因による散乱・吸収による減衰が大きいことを示している。言い換えれば視程を悪化させる要因は降雨よりも他に存在(霧や霏などの影響)し、その影響の方が強く現れることを示しているといえる。

すなわち、実フィールドでの降雨時の光波減衰を推定する場合には、降雨強度よりも視程データの方が有効である。

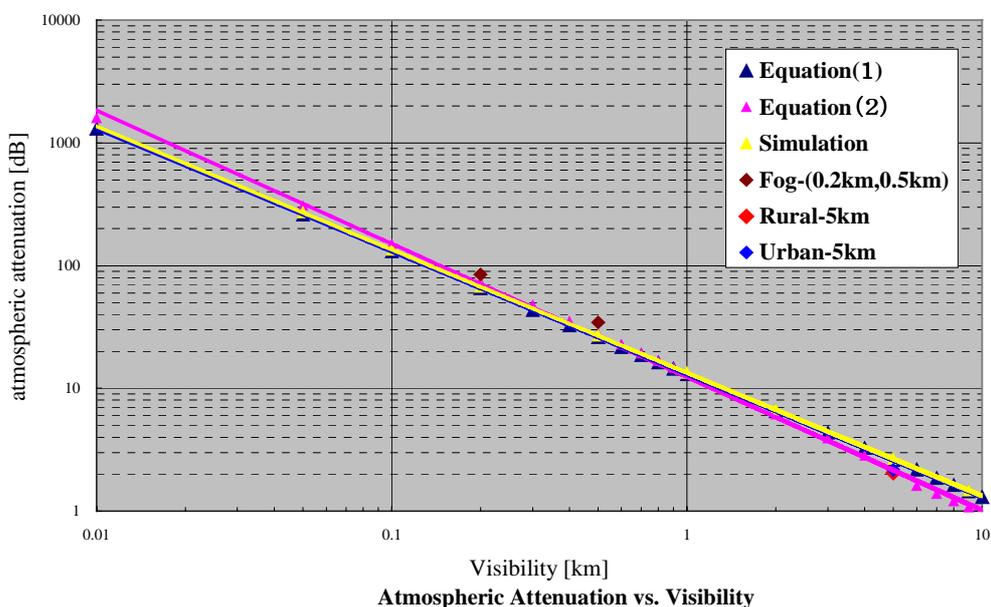


図 4 - 1 視程と大気減衰率

5 まとめ

伝送品質における気象依存性について以下のことが明らかになった。

平成 13 年 10 月から平成 14 年 3 月までの東京都内において視程を観測した結果、光無線装置の通信に影響を及ぼすような視程 1km 以下の気象状態は、降雨時であり、その出現比率は 0.32% と非常にまれである。

光伝搬損失は、最悪値が評価式の値とほぼ等しくなり、おおむね評価式の値に比べ小さな値となった。このことより、評価式より光無線装置の伝搬損失および回線品質を見積もることに問題はない。

実験の間光無線装置の回線断は観測されず、BER の最悪値は 4.3×10^{-8} とワイヤレスシステムとしては非常に良い回線品質を維持した。

次に、光伝搬損失をシミュレーションし、以下のことが示された。

視程をパラメータとしたシミュレーションの値は評価式に合致した。シミュレーションによっても視程から光伝搬損失を見積もることも可能である。

視程に加え降雨強度をパラメータに加えシミュレーションした結果、視程距離が長い場合は評価式に合致するものの、視程が悪化するに従い評価式から大きく乖離する結果となった。降雨強度をもとにシミュレーションすべきではなく気象条件を包含した視程をもってシミュレーションすべきである。

以上のように、屋外光無線装置の回線品質が気象の変化によりどのように影響を受けるか捕らえることができた。すなわち、屋外光無線装置は気象の影響、特に視程との関連が高く、視程により光無線装置の回線品質を推定することが可能であることを示した。視程は、視程計で計測可能なほか、主な気象台よりその観測結果を入手することができる。本研究では、東京大手町の気象庁データを利用して品川付近の回線設計が可能であることを示したが、他の地域でも各地の気象台発表の視程データをもとに同様の推定が可能である。

屋外光無線装置は高速・広帯域でしかも即応性がありシステム構築が容易であるばかりでなく、信頼性の高いシステムであり、ブロードバンド・インターネットのアクセス網構築において極めて有効的である。