

ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討

報 告 書

平成22年3月

ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会

巻 頭 言

ヘルツにより電波の存在が確認されて以来、約 120 年の無線通信技術の発達で、使える周波数帯はほぼ使い尽くし、ミリ波は最後に残ったフロンティアの感がある。1Gbps を超える高速無線伝送を行うには、少なくとも準ミリ波帯以上を使う必要があるが、克服しなければならない課題も多い。

70/80GHz 帯のミリ波は、その性質から降雨減衰等による回線断など、信頼性に対する懸念等から、国内では高速無線データ通信用としては、実用に至っていない。

一方、山間地域や河川横断等の光ファイバ伝送路の敷設が困難な地域におけるブロードバンド整備にあたって、地域環境に応じた柔軟かつ設置が比較的容易な大容量伝送回線の構築が求められており、ミリ波帯（70/80GHz 帯）高速無線伝送システムは、このような需要や、光ファイバ伝送路代替回線、WiMAX 等へのアプローチ回線等に活用できるシステムとして期待される。また、ハイビジョン映像の中継回線として、非圧縮で映像を無線伝送することも可能であり、本システムに対する潜在的需要は十分にあると考えられる。

本調査検討会では、日本のように多彩な気候条件を持つ国において、ミリ波帯高速無線伝送システムが実用化できるか、またどのような利用分野があるかを検討し、さらに当該システムの課題や技術的条件についても言及した。

検証試験では、70/80GHz のミリ波帯を用い、秋から冬にかけての約 3 か月間、伝送距離や回線の安定性、降雨・降雪減衰等による回線瞬断率等について、技術的データの収集・分析を行った。調査期間中は、雨、みぞれ、雪などの多彩な気象条件の中で、その影響を調べることが出来た。中でも、みぞれから雪に変わった場合など湿気を多く含む雪と乾いた雪では大きな違いがあり、十数年ぶりという大雪の時間帯に回線断がないにもかかわらず、みぞれ交じりの雪がアンテナに付着した例では大きな影響があったことは興味深い。これまで、ミリ波帯の高速無線伝送で雪の影響について報告された文献等は皆無であり、有益な資料となり得るものと考えられる。

本調査検討会で得られた成果が、ミリ波帯高速伝送システムの実用化に向けて有効活用されることを期待するものである。

平成22年3月

「ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会」

座長 半田 志郎（信州大学工学部・教授）

目 次

第1章 調査検討会の概要	1
1.1 調査検討の目的	1
1.2 調査検討項目	1
1.3 調査検討会の組織及び開催期間	1
1.4 調査検討会の開催状況等	1
第2章 ミリ波帯周波数の特性と利用状況	2
2.1 ミリ波帯周波数の特徴	2
2.2 国内における利用状況等	3
2.2.1 ミリ波帯周波数の割り当て状況	3
2.2.2 国内における利用状況	4
2.3 国内における技術開発動向	5
第3章 ミリ波帯高速無線伝送システムの検証試験概要	6
3.1 受信電力等の測定による検証試験の概要	6
3.1.1 試験場所及び試験回線	6
3.1.2 測定期間	7
3.1.3 測定項目	7
3.1.4 測定方法	7
3.1.5 測定装置	10
3.1.6 主な解析項目	13
3.1.7 データ処理法	14
3.1.8 データ取得例	16
3.2 試験回線の基本特性等	18
3.2.1 定常時受信電力と測定マージン	18
3.2.2 回線周辺の気象状況	18
3.3 Ping 伝送試験の概要	19
第4章 ミリ波帯高速無線伝送システムの電波伝搬試験結果と考察	21
4.1 データ処理結果に関する考え方	21
4.1.1 電波伝搬特性試験について	21
4.1.2 Ping 伝送試験について	21
4.2 測定記録例について	21
4.2.1 代表的なイベントの時間変化記録例	21
4.2.2 アンテナ表面変化例	26
4.3 気象データと他のデータとの比較	29
4.3.1 気象現象の発生割合	29
4.3.2 月間降水量	30

4. 3. 3	自治体データとの総降水量比較	30
4. 3. 4	降水減衰発生リスト	30
4. 4	電波伝搬試験結果に基づく降水減衰係数の考察	34
4. 4. 1	降雨減衰係数の考察	34
4. 4. 2	降雨減衰係数の補正	36
4. 4. 3	降雪減衰係数の考察	38
4. 4. 4	降雪減衰係数の補正	39
4. 5	Ping 伝送試験結果と考察	41
4. 6	イベントから見る降雨・降雪減衰による回線状況の特徴と考察	46
4. 7	HDTV 伝送試験結果（参考）	50
第5章	試験結果を踏まえたミリ波帯高速無線伝送システムの評価等	53
5. 1	電波伝搬特性試験結果に対する評価	53
5. 1. 1	降水強度等に関する試験結果の評価	53
5. 1. 2	検証システムに関する評価	55
5. 1. 3	周波数の共用検討	58
5. 2	今後の検討課題	61
5. 2. 1	降雨減衰評価に関する課題	61
5. 2. 2	降雪減衰評価に関する課題	61
5. 2. 3	ミリ波帯高速無線伝送システムの課題	62
5. 3	ミリ波帯高速無線伝送システムの技術的条件の提案	64
第6章	ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策及び普及への課題	66
6. 1	ミリ波帯高速無線伝送システムの利点と利用方策	66
6. 1. 1	ミリ波帯高速無線伝送システムの利点	66
6. 1. 2	利用方策の提案	66
6. 2	普及への課題	69
あとがき		70

第1章 調査検討会の概要

1. 1 調査検討の目的

昨今、光ファイバの代替として、柔軟かつ比較的容易に大容量伝送の回線構築ができる無線伝送システムの実現が求められ、様々な高速無線伝送システムの検討が進められているが、降雨減衰等による回線瞬断など信頼性の問題等から国内で普及している大容量伝送システムは存在していない。

本調査検討は、未利用周波数帯である70/80GHz帯を使用するミリ波帯高速無線伝送システム(以下、本章において「本システム」という。)の、降雨減衰等電波伝搬特性に関する技術的調査検討を行うことにより、本システムの早期実用化に係る技術基準の策定に反映させ、もって、周波数の有効利用に資することを目的とした。

1. 2 調査検討項目

- (1) 電波の伝搬特性(雨・雪等による減衰の影響)に関する調査検討
- (2) 実用化に向けた利活用分野の検討及び課題等の整理
- (3) その他、調査検討の目的達成のために必要な事項

1. 3 調査検討会の組織及び開催期間

本システムの技術的検討と実用化に向けた技術的検討を行うため、「ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会」(以下、「調査検討会」という。)を設置し、併せて、実用化に向けた本システムの利用方策の提案及び利用方策に関する課題の整理を行うための「実用化検討部会」を調査検討会内に組織した。

調査検討会及び実用化検討部会の構成委員には、学識経験者の他、無線機器製造メーカー、通信事業者、放送事業者、ケーブルテレビ事業者、国、自治体及び利用が想定される企業等、幅広い分野の専門家に参画いただいた。

調査検討会の開催期間は、平成21年6月から平成22年3月とした。

1. 4 調査検討会の開催状況等

調査検討会の開催要綱、構成員及び開催状況は、資料編6に示す。

第2章 ミリ波帯周波数の特性と利用状況

2.1 ミリ波帯周波数の特徴

ミリ波とは電磁波の広い周波数範囲の中で文字通り波長が1mm～10mmの、周波数30GHz～300GHzの電波の総称である。この周波数帯の電波は大気中を伝搬する時降雨等の降水粒子により散乱、吸収され、特定周波数において水蒸気や酸素等の気体分子により吸収され減衰する。

このうち最も顕著な影響を与えるのは降雨による減衰であり、これらの大気中伝搬時の特徴が類似する10GHz～30GHz帯の周波数は準ミリ波帯と呼ばれ、伝搬特性上同じ扱いを受ける場合もある。

ミリ波帯周波数の一般的な特徴とそれに起因する実用化時の利点と問題点をそれぞれ示す。

利点と考えられる点は以下のとおりである。

- (1) ミリ波帯は未使用の広い周波数帯域を有しており、他システムとの干渉を考慮することなくミリ波帯の特徴を生かした新方式に用いる周波数として任意に選択できる。
- (2) ミリ波帯は広い周波数帯域を有しているため信号伝送帯域を広くとることができ、高速で大容量の伝送回線を構築できる。
- (3) ミリ波帯では信号帯域幅を広くとれることにより、多値変調等に頼ることなく簡単な回路構成で高速の変復調回路を構成できる。
- (4) ミリ波帯は波長が短いため小形・軽量で指向性の鋭い高利得のアンテナを実現でき、その場合は他回線との与被干渉を軽減できる。
- (5) ミリ波帯は波長が短いので装置構成を小形・軽量にすることができ、装置設置場所の選択の自由度を大きくできる。
- (6) ミリ波帯装置は小型、軽量で簡易に設置できるので利用開始までの時間を短縮できる。

実用化時に問題となる点は以下のとおりである。

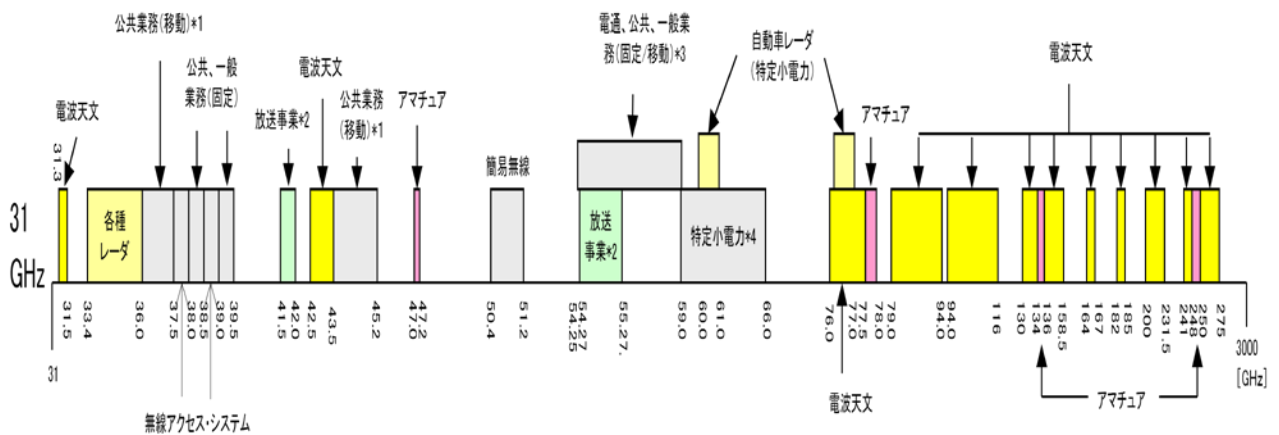
- (1) ミリ波帯は10GHz帯以下の周波数に比べて伝送時の損失（自由空間損失）が大きい。
- (2) ミリ波帯は降雨等降水粒子による減衰が大きいため伝送距離が制限される。
- (3) ミリ波帯の特定周波数では酸素や水蒸気等の気体分子による吸収により減衰する。
- (4) ミリ波帯は波長が短く直進性が強いので伝搬途中の障害物による遮蔽損失が大きい。
- (5) ミリ波帯は波長が短いので伝搬路でラジオダクトにより多重波が発生した場合には干渉性フェージングを生じ易い。
- (6) ミリ波帯で可能となる信号帯域の広帯域化により室内等の壁面反射により遅延分散の大きい環境では波形歪が大きくなる。
- (7) ミリ波帯周波数は開発途上であるため、周波数帯によっては任意周波数での回路部品の調達が困難である。
- (8) ミリ波帯の長所である広帯域性や高速性を生かす広帯域で低損失の発振回路やスイッチング回路等の開発が必要である。

2. 2 国内における利用状況等

2. 2. 1 ミリ波帯周波数の割り当て状況

総務省の電波利用ホームページから抜粋したミリ波帯周波数の電波割り当て状況は、以下のとおりである。

ミリ波帯周波数では、ミリ波の利点を活用したシステムが認められているが、一方、多くの未使用周波数も存在している。一般的にこれらは「未利用周波数帯」と呼ばれており、新たなシステムによる周波数利用が期待されている。



出典：総務省電波利用ホームページ

1	36.0～37.5、 43.5～45.2	公共機関の画像伝送用
2	41.5～42.0、 54.27～55.27	放送事業者の番組素材中継用
3	54.25～59.0	高速無線回線システム等
4	59.0～66.0	ミリ波画像伝送用システム及びミリ波データ伝送用システム等

2. 2. 2 国内における利用状況

ミリ波帯の国内における利用状況については、電気通信業務用の無線アクセスシステム、公共・一般業務用の中継・エントランス回線、公共業務用の画像伝送システム、放送事業用FPU、簡易無線、アマチュア業務等の分野で利用されている。

また、免許不要局として不特定多数の利用を想定した、ミリ波データ伝送（高速無線 LAN）、ミリ波画像伝送（家庭内再送信）及びミリ波レーダ（自動車衝突防止・車間計測）が実用化されている。

なお、ミリ波帯（60GHz 帯）を使用した画像伝送システムは、地上テレビジョン放送のデジタル化により、家庭内へのデジタル放送伝送システムとして期待が高まっている。

無線局の目的等、電波利用システムの形態、周波数帯及び免許の要否については、表 2-1 に示すとおりである。

表 2-1

無線局の目的等	電波利用システムの形態	周波数帯	免許
電気通信業務用	無線アクセスシステム	60GHz	必要
公共・一般業務用	中継・エントランス回線	40GHz	
公共業務用	画像伝送システム		
放送業務用	放送事業用システム（FPU）	42/55GHz	
鉄道業務用	駅ホーム画像伝送	40GHz	
簡易な業務	画像・データ伝送用簡易無線	50GHz	
アマチュア業務用	アマチュア無線	47/78/135 /249GHz	
特定小電力無線局	ミリ波データ伝送 （高速無線 LAN）	60GHz	不要
	ミリ波画像伝送 （家庭内再送信）		
	ミリ波レーダ （自動車衝突防止・車間計測）	60/76GHz	

2. 3 国内における技術開発動向

ミリ波帯については、大容量の高速伝送ニーズの高まりと電波利用技術の発展に伴い、今までは技術的に利用できなかった高い周波数帯としてシステム開発が促進され、新規の電波利用が可能な周波数帯となっている。

近年、ミリ波帯では、デバイスの小型化、省電力化、低コスト化が進み、移動体システムとして利用することが可能となってきたところである。広帯域の電波利用に適しており、超高速無線 LAN や素材伝送システム等の大容量伝送システム及び高分解能レーダシステム等の新システムの導入に向けた検討が進められている。

総務省では、ミリ波無線システムの実現に向けて、以下の技術的検討や研究開発を実施しているところである。

- (1) 列車、船舶、航空用無線の高度化及びブロードバンド化のため、40GHz 帯における無線システムの研究開発
- (2) ホームエレクトロニクスに資する短距離大容量通信の実現に向けた、60GHz 帯における近接エリアネットワークの研究開発
- (3) 79GHz 帯における自動車等の安全運転支援・衝突防止のための高分解能レーダシステムの技術的検討
- (4) 120GHz 帯における非圧縮ハイビジョン信号を用いた低遅延・多重伝送（10Gbps）可能な無線システムの研究開発

その中でも、特徴的なものとして、現在、79GHz 帯を使用するミリ波レーダシステムについて、以下のとおり技術検討が進められている。

背景としては、現在、自動車同士の衝突事故を回避する車載レーダシステムとして、60/76GHz 帯レーダの利用が進んでいるが、このレーダは、200m 程度先までの自動車等の大きな対象物の検知は可能だが、占有周波数帯域幅が 500MHz 以下のため、数 10m 以内の人や自転車等の小さな対象物の検知については困難な状況にある。

このような状況を踏まえ、数 10 cm から数 100m 離れた状態でも物体を高精度に検知・分離することが可能な高分解能レーダシステムを実現するため、情報通信審議会情報通信技術分科会 ITS 無線システム委員会において、「79GHz 帯高分解能レーダの技術的条件」の審議を平成 21 年 11 月より開始し、平成 23 年頃の実用化を目指した検討が行われている。

なお、欧州では平成 16 年に制度化され、今後、米国、アジア諸国等でも導入に向けた検討が開始されると想定される。

第3章 ミリ波帯高速無線伝送システムの検証試験概要

3.1 受信電力等の測定による検証試験の概要

3.1.1 試験場所及び試験回線

- ・試験については、以下の場所を実施した。

新潟県上越市西本町 4-3-3 NTT 東日本 新潟上越ビル

新潟県上越市港町 1-9-1 佐渡汽船直江津ターミナルビル

(以下3.1の項において、NTT 東日本 新潟上越ビルに置く無線局を「送信局」、佐渡汽船直江津ターミナルビルに置く無線局を「受信局」という。)

- ・試験回線

測定回線付近の地図と伝搬路プロフィールとを図3-1、図3-2に示す。

送信局

北緯 37 度 10 分 21 秒

東経 138 度 14 分 26 秒

アンテナ標高 37m

受信局

北緯 37 度 10 分 58 秒

東経 138 度 15 分 00 秒

アンテナ標高 29m 距離 1.39km



図3-1 測定場所

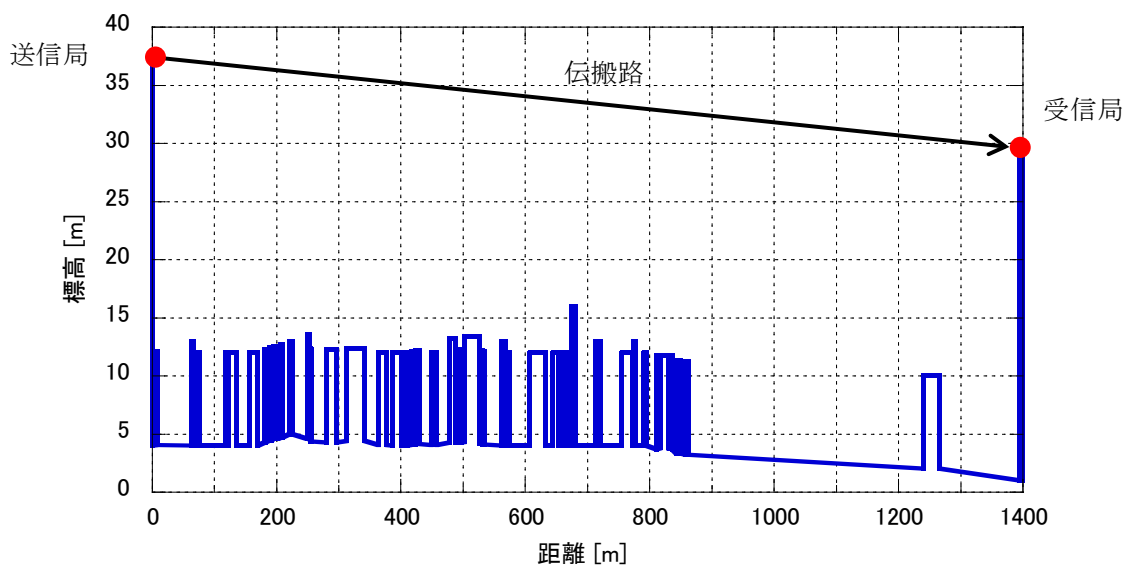


図3-2 伝搬路プロフィール

3. 1. 2 測定期間

- (1) 測定開始 平成 21 年 10 月 28 日 17 時
※なお、降雨データが取得されたのは、11 月 1 日からである。
- (2) 測定終了 平成 22 年 1 月 19 日 17 時
- (3) 測定日数 約 3 か月間 (83 日間)

3. 1. 3 測定項目

試験における主な測定項目は以下の通りである。

- (1) 受信電力 : 80GHz 帯無線設備の受信機からの出力電圧を 1 秒間隔で測定
- (2) 符号誤り率 : 受信入力電圧値より送受信機付属の較正表より推計
- (3) 降雨強度 : ヒーター付雨滴計数型雨量計により高精度 (1/ 120mm) 測定
- (4) 気温と湿度 : デジタル温湿度計を用いて 1 秒間隔で測定
- (5) 映像撮影 : 伝送路と送受信アンテナを 10 分間隔で撮影
- (6) 周辺降雨強度 : 回線近傍の AMeDAS 等の観測点の降雨データを参照

3. 1. 4 測定方法

NTT 東日本新潟上越ビルの屋上に無線設備を置き、80GHz 帯の電波を受信局に向けて送信するとともに、ネットワークカメラにより送信アンテナの状況を 10 分間隔で撮影して画像データをパソコンに保存する。送信局設置状況と送信局から見た受信局方向の状況を図 3 - 3 に示す。



(a) 送信局設置状況



(b) 測定装置設置状況



(c) 送信局から見た受信局方向の風景

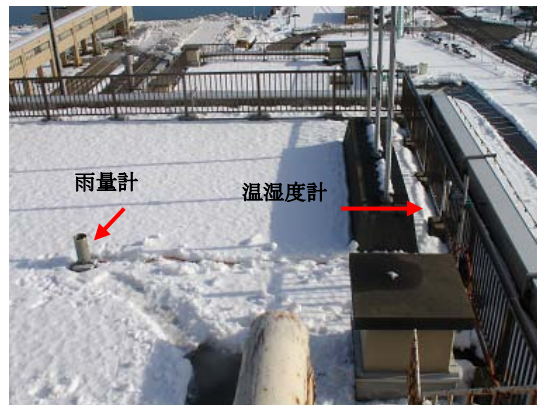
図 3 - 3 送信局設置状況

一方、佐渡汽船直江津ターミナルビル屋上に無線設備を置き、ミリ波帯試験装置により送信局からの 80GHz 帯の電波を受信する。ここで得られた RSSI 電圧の数値は、別途屋上に設置された温湿度計で観測された温度／湿度データと共にデータ記録用レコーダに記録する。また、屋上には降雨強度計も設置し、観測された降雨データも AD 変換後降雨データ用パソコンに記録する。ここでもネットワークカメラにより受信アンテナの状況を 10 分間隔で撮影すると共に、画像データをパソコンに保存する。

受信局設置状況と、受信局から見た送信局方向の状況を図 3 - 4 に示す。



(a) 受信局設置状況



(b) 気象観測装置設置状況



(c) 測定装置設置状況



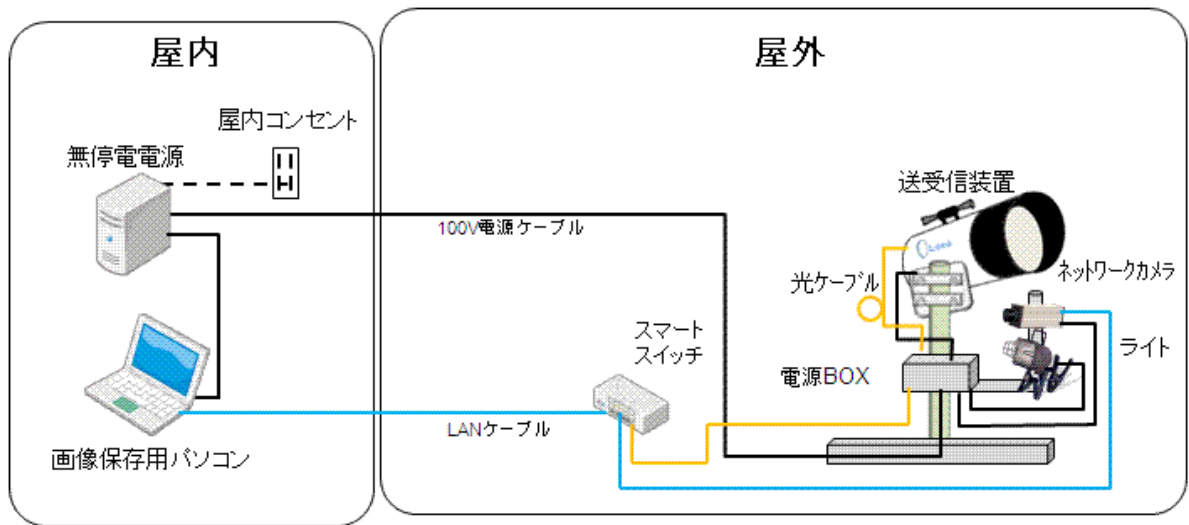
(d) 受信局の設置場所



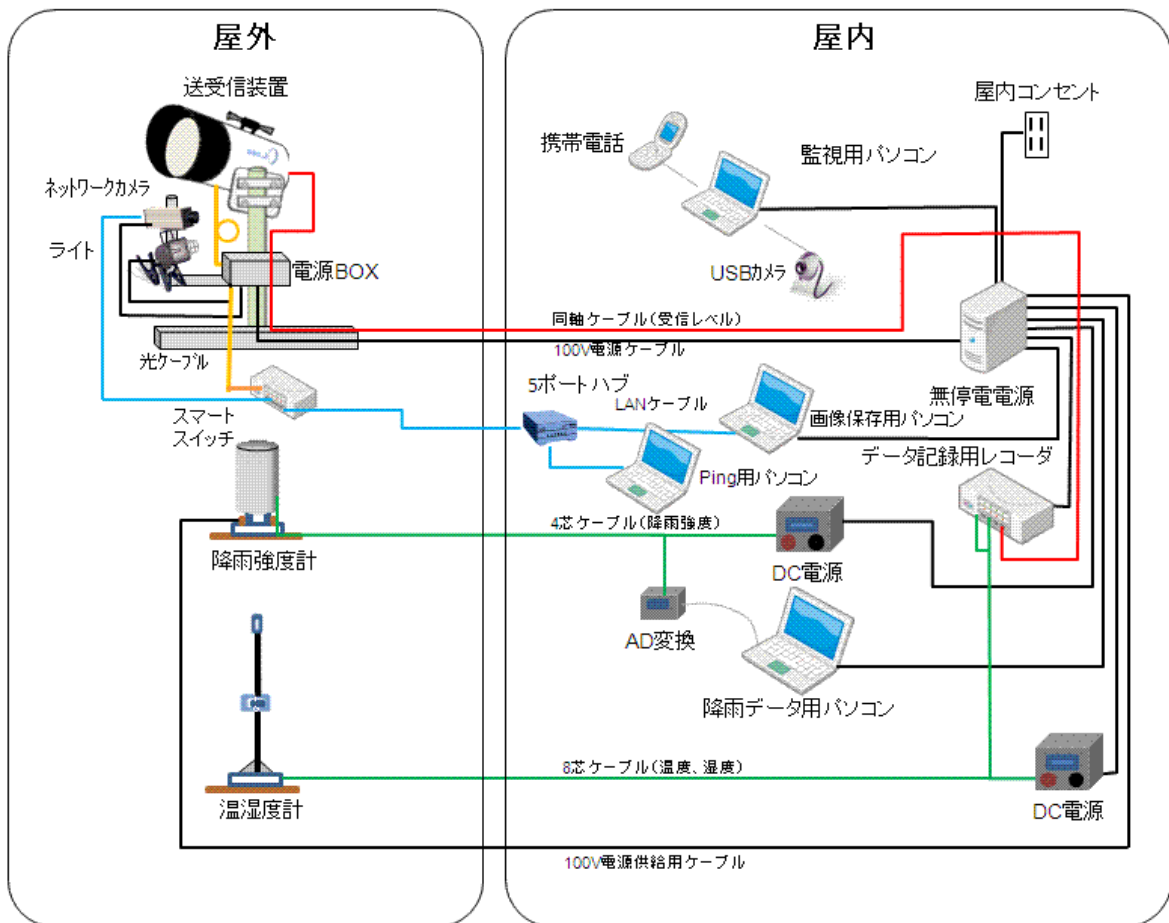
(e) 受信局から見た送信局方向の風景

図 3 - 4 受信局設置状況

図 3-5 には送受信局別の測定系統図を示す。受信局の画像情報は携帯電話を用いて遠隔監視できる構成となっている。



(a) 送信局



(b) 受信局

※11月19日 Ping 伝送試験開始以降の構成
図 3-5 測定系統図

3. 1. 5 測定装置

試験で使用した無線設備と各種気象観測用装置及び主な仕様を以下に示す。

(1) 無線設備

受信電力を測定した 70/80GHz 帯の無線設備は、米国 Loea 社製の L-1000 を用いることとした。その外観図を図 3-6 に主な仕様を表 3-1 に示す。

測定項目は受信電力に対応した RSSI 電圧であり、同軸ケーブルを介してデータ記録レコーダに 1 秒間隔で記録される。

なお、測定周波数帯については、自由空間伝搬損失が大きい等、より条件が厳しい 80GHz 帯とした。



図 3-6 無線設備外観図

表 3-1 L-1000 無線設備の基本仕様

項目	仕様	備考
周波数	73.5GHz 83.5GHz	測定では 83.5GHz を使用
送信出力	最大 100mW	最大 20dBm
変調方式	ASK (OOK 変調)	
占有周波数帯幅	4.95GHz (70GHz 帯) 3.66GHz (80GHz 帯)	
最大伝送量	1.5Gbps	
アンテナサイズ	10inchLens	25cm
アンテナ利得	43.6dBi (70GHz 帯) 44.5dBi (80GHz 帯)	ビーム幅 1.1° (70GHz 帯) ビーム幅 0.9° (80GHz 帯)
スレッショルド	-54dBm@10 ⁻⁶ BER	

(2) 雨量観測装置

雨量観測には横河電子機器社製の雨滴計数型雨量計を使用し、その構成図を図3-7に主な仕様を表3-2に示す。本雨量計は開口径20cmの受水口で捕捉した降水を一定量(1/120～0.0083mmに対応)の大きさの水滴として、ランプとフォトセル間の空間に落下させ、その個数を計測して降雨強度を求める装置である。最小感度は1分間に計測された水滴の個数が1個の場合であり、1時間当りの降雨強度として0.5mm/hとなる。出力は0～1Vの直流電圧であり、ノートパソコンに搭載したアナログ・デジタル変換ボードを介して雨滴パルスを記録している。

なお、今回本観測装置を設置した場所は寒冷地であるため、降雨以外に降雪の場合もあり、さらに、受口面での凍結の恐れもあることから、ヒーターを受水部の下部に配置する構造とした。これにより降雪も降水強度として測定されることになる。



(a) 降雨強度観測部

(b) データ取得部

図3-7 雨量観測装置外観

表3-2 雨量観測装置の仕様

項目	仕様
検出方法	雨滴計数型
口径	200mm φ
分解能	1/120 (≒0.0083) mm/pulse
最小1分降雨強度	0.5mm/h
測定精度	±10%
出力	0～1V
データ記録部	ノートパソコン
インターフェース	アナログ・デジタル変換カード(12bit)
電源	DC +14.8V
その他	ヒーター付

(3) 温湿度観測装置

温湿度観測にはヴァイサラ社製温湿度プローブを用いた。その概観図を図3-8、主な仕様を表3-3に示す。本温湿度計は強制通風筒を使用し、風を筒内の温湿度プローブに当てて温度及び湿度を計測する装置である。温度測定には白金抵抗センサ (Pt100) を使用し、温度変換器を介して温度に対応した0~1Vの電圧を出力する。また、湿度測定では静電容量式センサを用いて湿度に対応した0~1Vの電圧を出力する。本装置の測定可能温度は-40~50℃であり、同湿度は0.8~100%RHである。温湿度観測部から出力された電圧はデータ記録用レコーダに入力され、1秒間隔でデータを記録する。



(a) 温湿度観測部



(b) データ取得部

図3-8 温湿度観測装置外観

表3-3 温湿度観測装置の仕様

項目	仕様	
検出方法	温度	白金抵抗センサ (Pt100)
	湿度	静電容量式センサ
測定可能範囲	温度	-40~50℃
	湿度	0.8~100%RH
出力	温度	0~1VDC (-50~50℃)
	湿度	0~1VDC (0~100%RH)
測定精度 (+20℃)	温度	±0.2℃
	湿度	±2%RH (0~90%RH) ±3%RH (90~100%RH)
電源	DC+12V	
ケーブル長	50m	
データ記録部	データ記録用レコーダ	
その他	強制通風筒、温度変換器付	

3. 1. 6 主な解析項目

取得された測定データにより主に解析した項目は以下の通りである。

(1) 降水量関係

- 1) 降雨と降雪との分類法 (降雪の閾値 : 気温 0°C <映像情報も考慮>)
- 2) 総降水量 (月毎/種類別)
- 3) 降水強度確率分布 (月毎/測定全期間/降水イベント <降雨、降雪総合>)
- 4) 降雨強度確率分布 (降雨強度分類時間 : 測定全期間/降雨イベント)
- 5) 降雪強度確率分布 (降雪強度分類時間 : 測定全期間/降雪イベント)
- 6) 降雨強度自己相関関数 (イベント 積分時間の影響)
- 7) 降雪強度自己相関関数 (イベント 積分時間の影響)
- 8) 近隣降雨観測データとの比較 (直江津・高田・安塚・大潟/月間降水量・降雨時間帯)
- 9) 降水強度継続時間分布 (降雨・降雪/イベント)
- 10) 降雨強度変化速度確率分布 (降雨・降雪/イベント)

(2) 降水減衰関係

- 1) 降水減衰確率分布 (各月/測定全期間/降水イベント)
- 2) 降雨減衰確率分布 (降雨強度分類時間 : 測定全期間/降雨イベント)
- 3) 降雪減衰確率分布 (降雪強度分類時間 : 測定全期間/降雪イベント)
- 4) 降雨減衰係数 (降雨強度との相関関係/イベント 雨滴粒度分布の影響)
- 5) 降雪減衰係数 (降雪強度との相関関係/イベント 雪の種類/気温・湿度の影響)
- 6) 降雨減衰継続時間確率分布 (イベント)
- 7) 降雪減衰継続時間確率分布 (イベント)
- 8) 降雨減衰変化速度確率分布 (イベント)
- 9) 降雪減衰変化速度確率分布 (イベント)

(3) 符号誤り率関係

- 1) 符号誤り率確率分布 (各月/測定全期間/降水イベント)
- 2) 降水減衰量との相関関係 (イベント)

(4) その他検討項目

- 1) その他降水粒子 (主に霧) による減衰特性 (イベント)
- 2) 気温と湿度の確率分布 (全期間/月間)
- 3) 水蒸気含有量確率分布 (全期間/月間)

3. 1. 7 データ処理法

(1) 受信電力

受信装置より出力された受信電力に相当した RSSI 電圧は同軸ケーブルを介してデータ記録用レコーダに 1 秒間隔で記録される。取得した RSSI 電圧値は無線設備付属の較正データを用いて受信電力に変換する。この変換に際して無線設備の出力端子電圧とレコーダ入力電圧を測定し、その差分の電圧を用いてケーブルにおける電圧降下を考慮した較正カーブを作成した。RSSI 電圧対受信電力特性を図 3-9 に示す。グラフ上部の数値は多項式近似を行った結果である。データ変換ではこの近似式を用いて RSSI 電圧を受信電力に変換した。

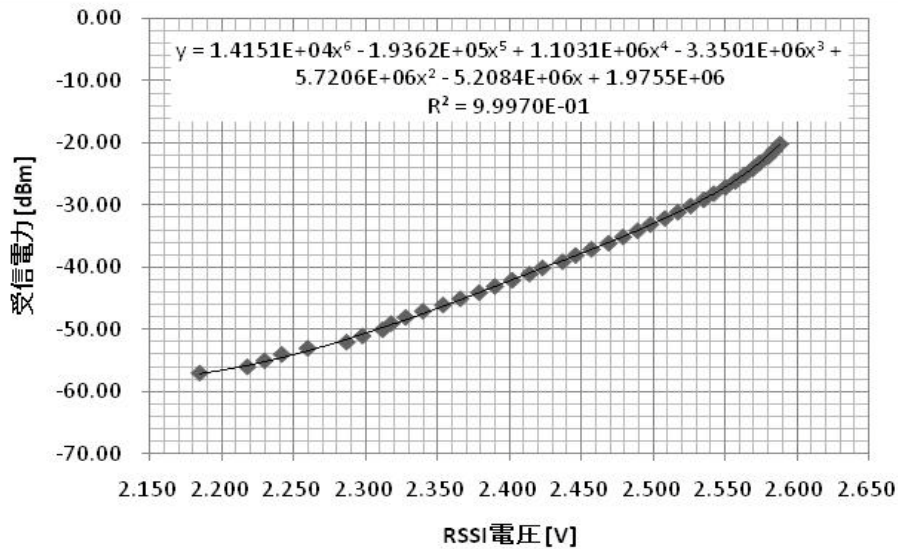


図 3-9 RSSI 電圧対受信電力特性

(2) 符号誤り率

図 3-10 では、符号誤り率 (BER) は取得した受信電力から無線設備付属の較正カーブを用いて変換した。ここでの BER の 1E-11 はエラーフリーを示している。データ処理においては受信電力-57dBm 以下をオーバーフローとし、1E-2 と規定した。

なお、-14~-10dBm の符号誤り率は無線設備が飽和状態となる特性によるものである。

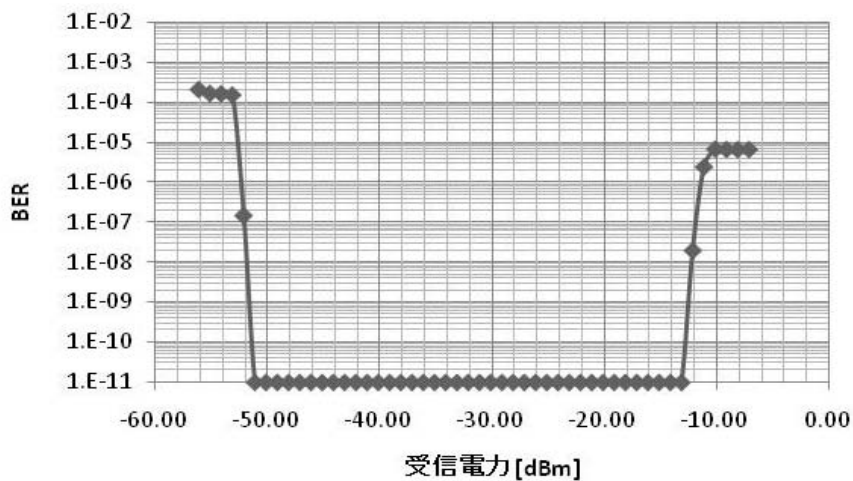


図 3-10 受信電力対 BER 特性

(3) 降水強度

降雨強度計より出力されたパルス信号はパソコンに搭載した A/D 変換ボードを介してパルス数をカウントし、6 秒間隔で記録される。データ処理では 6 秒間隔で記録されたパルス数をもとに 6 秒降雨強度 (mm/h) 及び 1 分降雨強度 (mm/h) に変換した。

(4) 温湿度

温湿度観測装置より出力された温度、湿度に相当した電圧はケーブルを介してデータ記録用レコーダに 1 秒間隔で記録される。温湿度観測装置より出力される電圧の範囲は 0~1V である。これらの取得した電圧は温湿度観測装置付属の校正データを用いて温度及び湿度に変換する。出力電圧対温度、湿度特性を図 3-11 に示す。

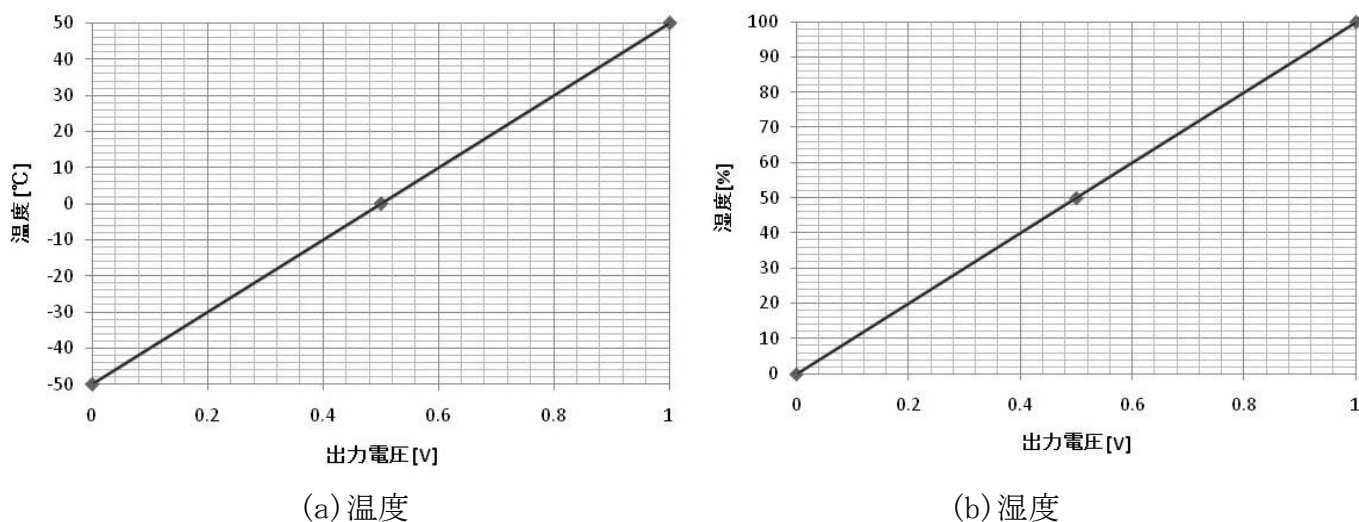


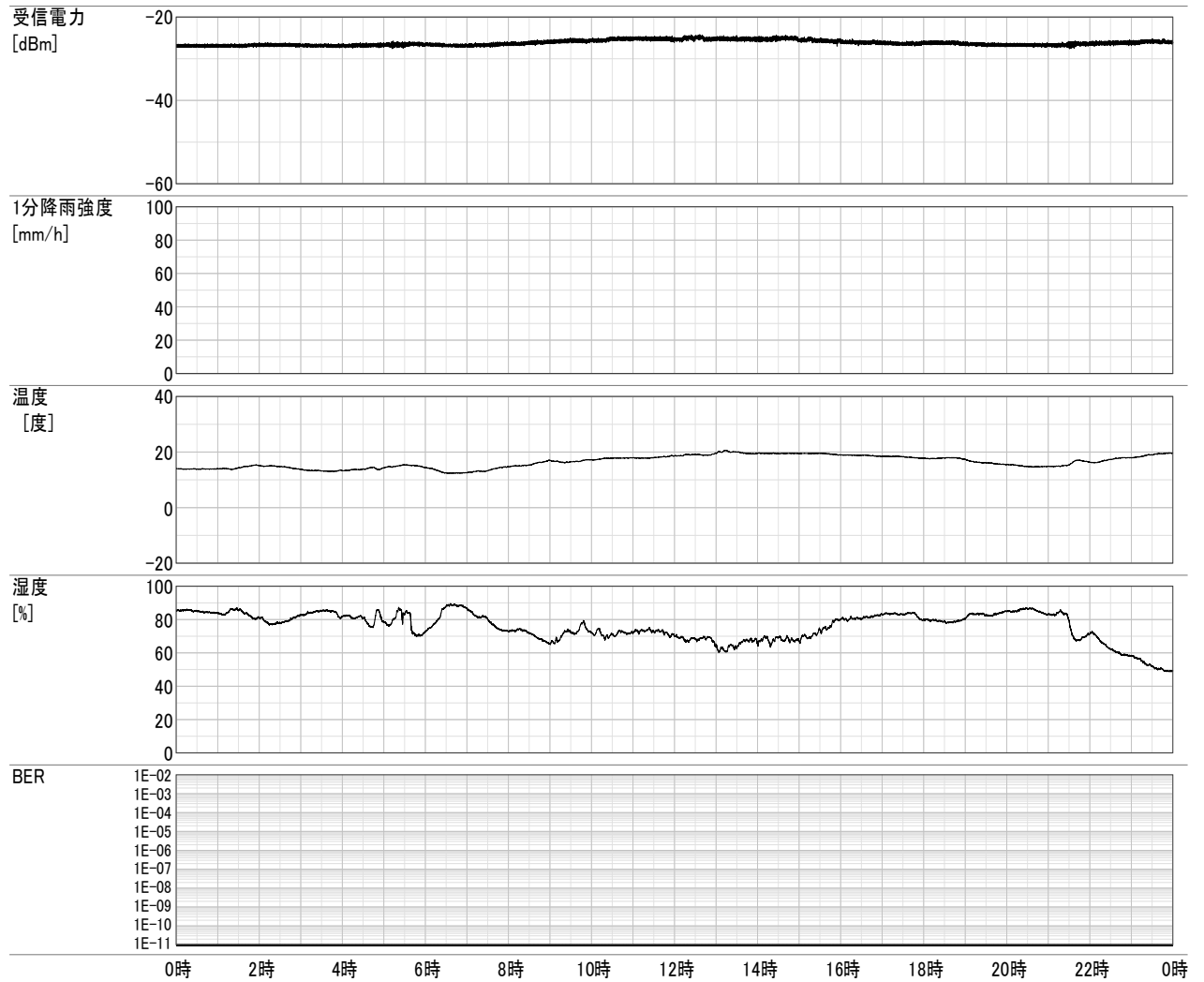
図 3-11 出力電圧対温度、湿度特性

(5) 映像撮影

送受信場所においてネットワークカメラを用いて送受信装置等を撮影し、10 分間隔でパソコンに画像を記録している。画像サイズは 640×400 ピクセルであり、ファイル形式は JPEG 形式を使用している。夜間においてカメラ画像を撮影するため、LED ライトを夜間のみ点灯させ、光を無線設備に当てて撮影可能とした。

3. 1. 8 データ取得例

前項で説明したデータ処理法を用いてデータ処理した結果を図 3-12、3-13 に示す。図 3-12 は定常時のデータ取得例、図 3-13 は降雪時のデータ取得例を示している。



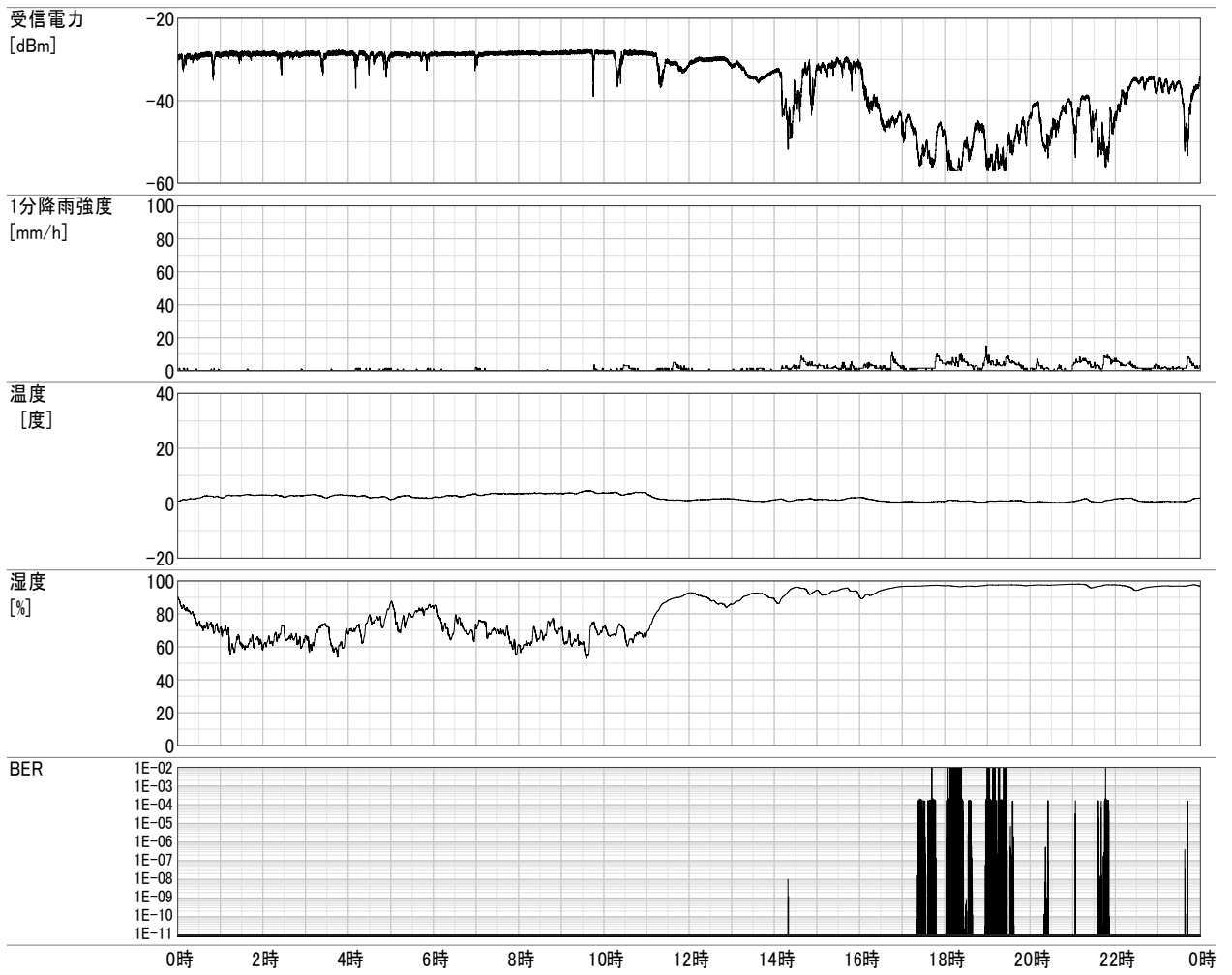
送信局



受信局



図 3-1 2 定常時の時間変化例 (2009 年 10 月 31 日)



送信局



受信局

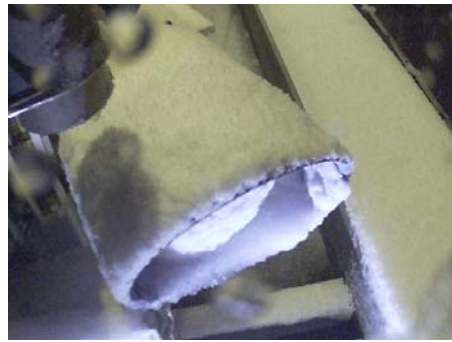


図 3 - 1 3 降雪時の時間変化例 (2009 年 12 月 19 日)

3. 2 試験回線の基本特性等

3. 2. 1 定常時受信電力と測定マージン

本試験においては、定常時の受信入力電力は約-27dBmと実測された。また、限界値である最小受信電力は、降雨時のデータ取得状況から実績値は-57dBmであり、測定マージンは約30dB(-27~-57dBm)である。

表3-4 定常時受信入力と測定マージン

項番	項目	数値
1	中心周波数	83.5GHz
2	定常時受信電力	-27.0dBm
3	最小受信電力	-57.0dBm
4	測定マージン	30.0dB

3. 2. 2 回線周辺の気象状況

試験では1.39kmの伝搬路に対して雨量測定地点は受信点のみである。そのためここで得られた降雨データの信頼性の確認及び伝搬路周辺の降雨状況の把握さらには試験期間の降雨状況の平年値との比較等のため試験回線付近の気象庁 AMeDAS 観測点等における降雨データを参考にした。伝搬路周辺の新潟地方気象台管理の AMeDAS 観測地点と、伝搬路に最も近い AMeDAS 観測点以外の観測点とを図3-14に示す。この図において試験で降雨観測を実施した場所は直江津港観測点の近くである。また、これらの降雨観測地点の場所と観測実施主体等を表3-5に示す。この表に試験で降雨を観測した受信点の場所も併記した。



図3-14 伝搬路周辺の気象観測地点

表 3 - 5 比較に用いた降雨観測点

地点名	観測主体	住所	緯度経度
高田	気象庁 (AMeDAS)	上越市大手町 高田特別地域観測所	北緯 37 度 06 分 24 秒 東経 138 度 14 分 48 秒
大潟	気象庁 (AMeDAS)	上越市大潟区潟町 大潟観測所	北緯 37 度 13 分 54 秒 東経 138 度 20 分 00 秒
安塚	気象庁 (AMeDAS)	上越市安塚区 安塚観測所	北緯 37 度 06 分 24 秒 東経 138 度 27 分 24 秒
直江津港	地方自治体※	上越市港町 1-11-2 上越地域振興局	北緯 37 度 10 分 56 秒 東経 138 度 15 分 09 秒
直江津 (試験)	NTT-AT	上越市港町 1-9-1 佐渡汽船直江津ビル	北緯 37 度 10 分 58 秒 東経 138 度 15 分 00 秒

※上越地域振興局の雨量データについては、国土交通省防災情報提供センターから提供されているデータを引用した。

3. 3 Ping 伝送試験の概要

(1) 試験期間

平成 21 年 11 月 19 日から平成 22 年 1 月 19 日までの 2 か月間

(2) 試験装置の仕様

試験装置の仕様を以下に示す。

表 3 - 6 試験装置の仕様

項目	仕様
接続認証部	スマートスイッチ (BUFFALO 製)
インターフェース	SFP トランシーバ (BUFFALO 製)
データ記録部	ノートパソコン
その他	光ファイバケーブル (LC-LC) LAN ケーブル (カテゴリ 5)

(3) 測定系統

Ping 伝送試験の構成図(Ping 伝送に関する部分のみ再掲)は、図 3-15 のとおりである。

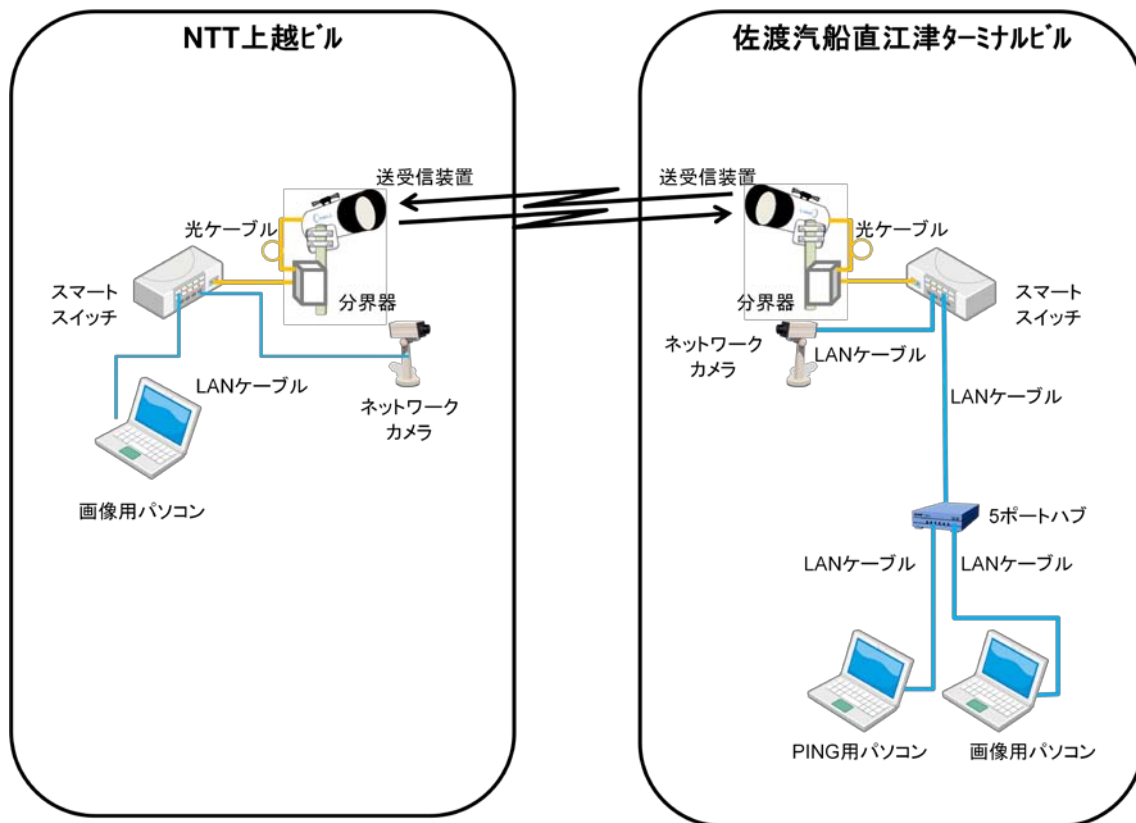


図3-15 Ping 伝送試験の構成図

なお、接続の概要については、以下のとおりである。

- 1) 無線設備～分界器間は光ケーブルで接続されている
- 2) 分界器～スマートスイッチ間は光ケーブルを使用
- 3) スマートスイッチに SFP トランシーバを組み込み、光ケーブルを接続
- 4) その他の機器間は、カテゴリ 5 の LAN ケーブルを使用

(4) データ取得方法

Ping 伝送試験は、佐渡汽船側から設置した装置から Ping (32 bytes データ) を送信し、NTT 上越側から戻ってきた情報の記録を繰り返す。

※1 秒間×60 回×60 分×24 時間×日数分

(5) 測定項目

Ping データ (1 秒間×60 回×60 分×24 時間×日数分のデータ)

(6) 解析項目

Ping のタイムアウトと受信入力レベル及び天候等を対比して解析

第4章 ミリ波帯高速無線伝送システムの電波伝搬試験結果と考察

4. 1 データ処理結果に関する考え方

4. 1. 1 電波伝搬特性試験について

本試験において降雨等の雨量観測データが取得された期間は、平成21年11月1日から平成22年1月19日までの約3か月間であり、その間の受信電力低下の原因は降雨だけでなく、季節的降雪や降雨と降雪が複合した場合もあり、また、降雪が原因である場合も、雪には水分を多く含むみぞれや湿雪と水分の少ない乾雪とがあり、それぞれの減衰係数は大きく異なると言われている。

そのため、この章ではまず降雨や降雪の種類が比較的一定と考えられるイベント毎のデータを処理することにより、典型的な降雨や降雪イベントにおける減衰特性を検討し、ミリ波帯回線設計法構築の基本となる降雨・降雪による減衰に関するデータの処理結果を中心にまとめている。

4. 1. 2 Ping 伝送試験について

本試験においてデータ取得された期間は、平成21年11月19日から平成22年1月19日までの約2か月間であり、期間中タイムアウトがあった日等、特徴のある日時をピックアップし、降雨強度・受信電力とタイムアウト回数の相関関係を示す。

併せて、画像データを参考にして、湿雪と乾雪によるアンテナ面への着雪とタイムアウト回数についても取りまとめている。

なお、タイムアウトした日の各日0:00~24:00の24時間データ等、詳細については資料編3に示す。

4. 2 測定記録例について

4. 2. 1 代表的なイベントの時間変化記録例

平成21年10月28日から平成22年1月19日までに取得されたデータのうち特徴的なイベントとして、降雨、降雪に変わる前の降雨、みぞれを含む降雪、降雪に伴いアンテナ表面に着雪した場合、降雪に伴いアンテナ表面上に大量の積雪があった場合について取り上げる。取り上げたイベントの発生状況を表4-1に示し、代表的なイベントにおける逐時変化を図4-1に示す。

この表にはデータ処理全期間、最大降水減衰量、最大1分降水強度、総降水量等を併記する。

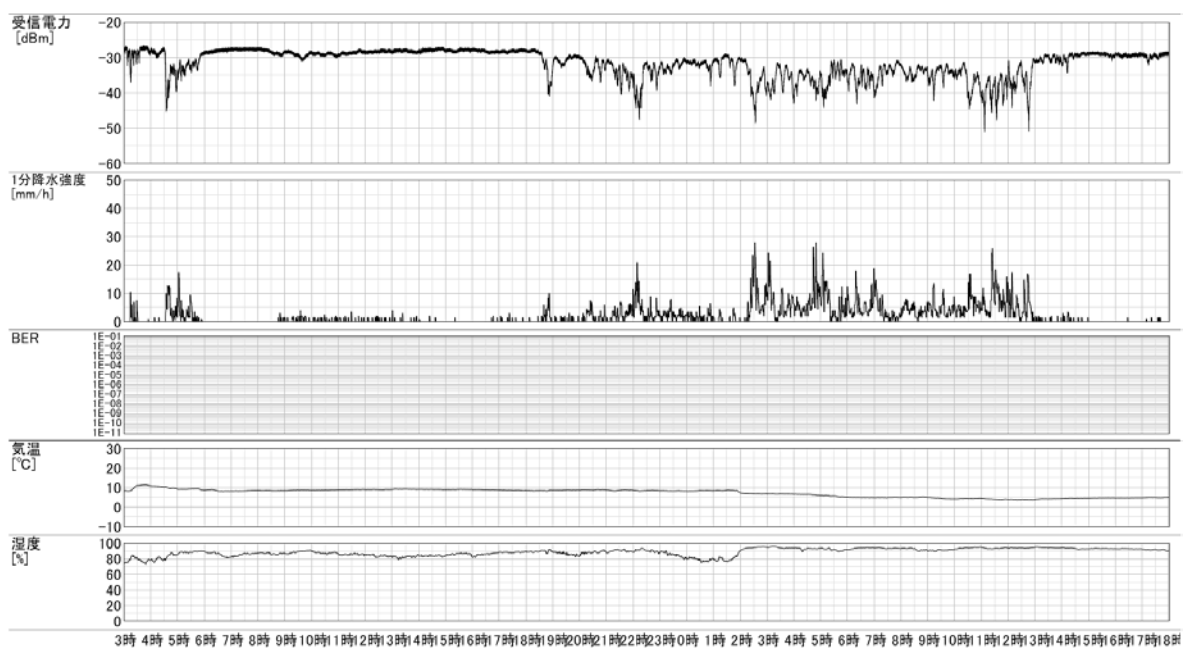
取り上げたイベントデータは測定時期が11月~1月と1年間のうち冬季にあたるため、降雨タイプには台風、夕立、梅雨といった多様性は見られていない。また、送受信アンテナを映す画像データによると、アンテナ設置方向と風向きの関係によりNTT新潟上越ビル側のアンテナには着雪が殆ど見られなかったため、アンテナ着雪及び積雪とは佐渡汽船直江津ターミナル

ビル側のアンテナについて述べている。逐時変化には受信電力、降水強度以外に温度と湿度の変化も併記した。

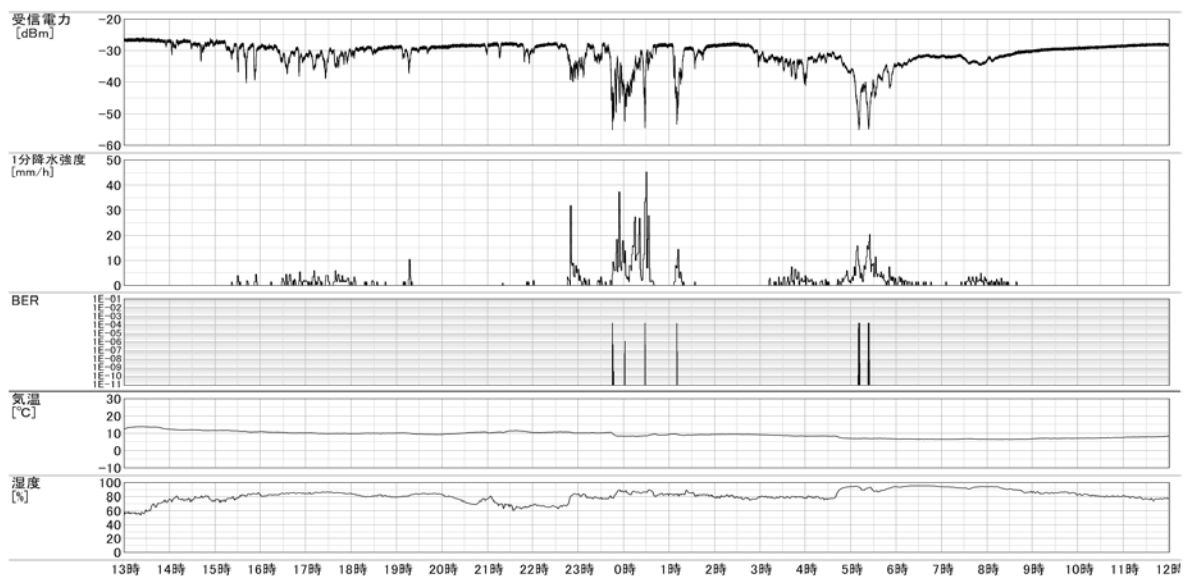
イベントデータのうち、①と②とは受信電力変化の原因が降雨の場合のイベントであるが、季節的に強雨期ではないのでそれほど強い雨ではなく②の最大1分降水強度約45mm/hが試験期間で最大の降雨強度である。イベント③は降雪となる直前の降雨イベントであり、これら3例の降雨時の変化は降雨強度の変化と降雨減衰量の変化とが比較的良好に対応している。次にイベント④からは降雪時の時間変化例であり、イベント④はここに示したデータの直前まで降雨が観測されており、みぞれから降雪へと変化したイベントである。また、イベント⑤では12月18日5時頃にアンテナフード内に雪がたまり始め、同月18日8時20分からアンテナ表面への明らかな着雪が見られている。これに伴い降水強度の変化に対応しない約10dBの減衰が続いている。次にイベント⑥では12月19日11時20分から15時30分までアンテナフード内への着雪があり、16時40分から22時頃までアンテナ表面への大量の積雪が見られており、これに伴い測定限界を超える減衰が表れている。最後にイベント⑦では1月13日6時20分からアンテナ内への着雪が始まり、アンテナ全体を覆う積雪が同月14日昼頃まで継続して観測されている。

表4-1 代表的なイベントにおける統計量

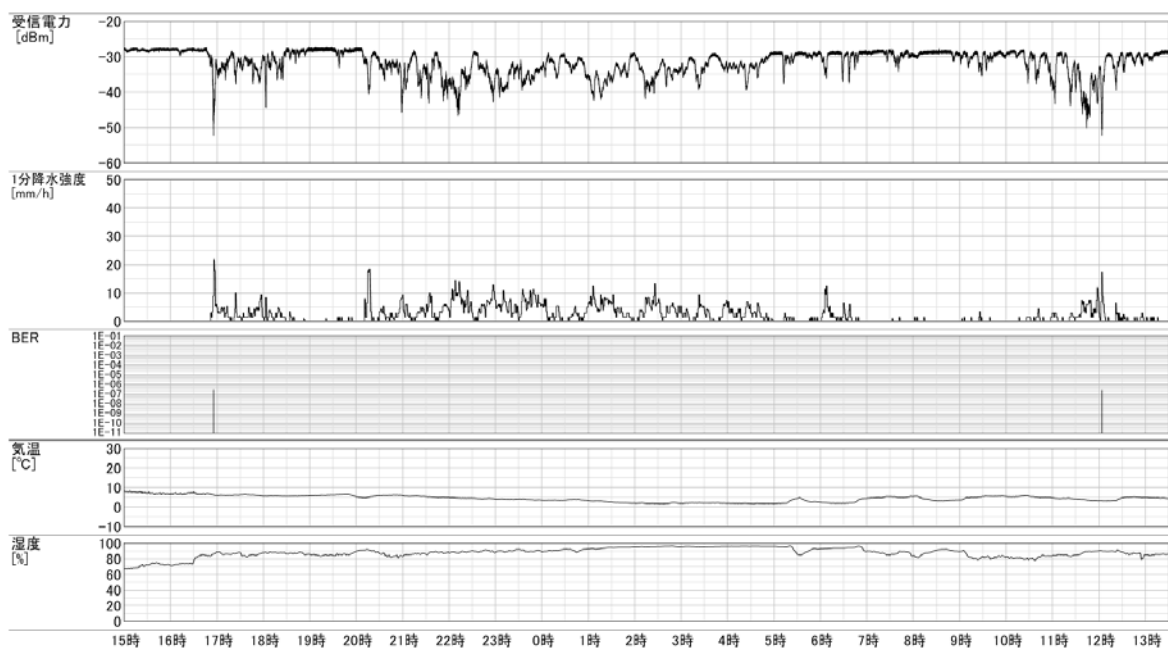
項番	イベントタイプ	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大減衰量 [dB]	最大1分降水強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大BER	最高気温 [°C]	最低気温 [°C]
①	降雨	2009/11/17 03:00	2009/11/18 18:00	39	23.38	27.888	86.5	0	11.5	3.6
②	降雨	2009/11/19 13:00	2009/11/20 12:00	23	27.49	45.318	28.5	1.70E-04	14	6.5
③	降雪直前の降雨	2009/12/15 15:00	2009/12/16 13:30	22	24.34	21.912	48.2	2.98E-07	8.4	1.7
④	みぞれ+湿雪	2009/12/16 13:30	2009/12/17 08:00	18	28.06	12.45	19.5	1.00E-02	4.5	0.3
⑤	湿雪+アンテナ着雪	2009/12/17 23:00	2009/12/18 16:00	17	28.65	12.45	13.9	1.00E-02	3.7	0.5
⑥	湿雪+アンテナ積雪	2009/12/19 09:00	2009/12/20 08:00	23	28.65	14.94	35.4	1.00E-02	4.6	0.2
⑦	乾雪+アンテナ積雪	2010/01/13 05:00	2010/01/14 15:00	34	23.64	9.0	24.7	4.70E-08	3.3	-0.9



(a) イベント① 降雨 (2009/11/17 03:00~2009/11/18 18:00)



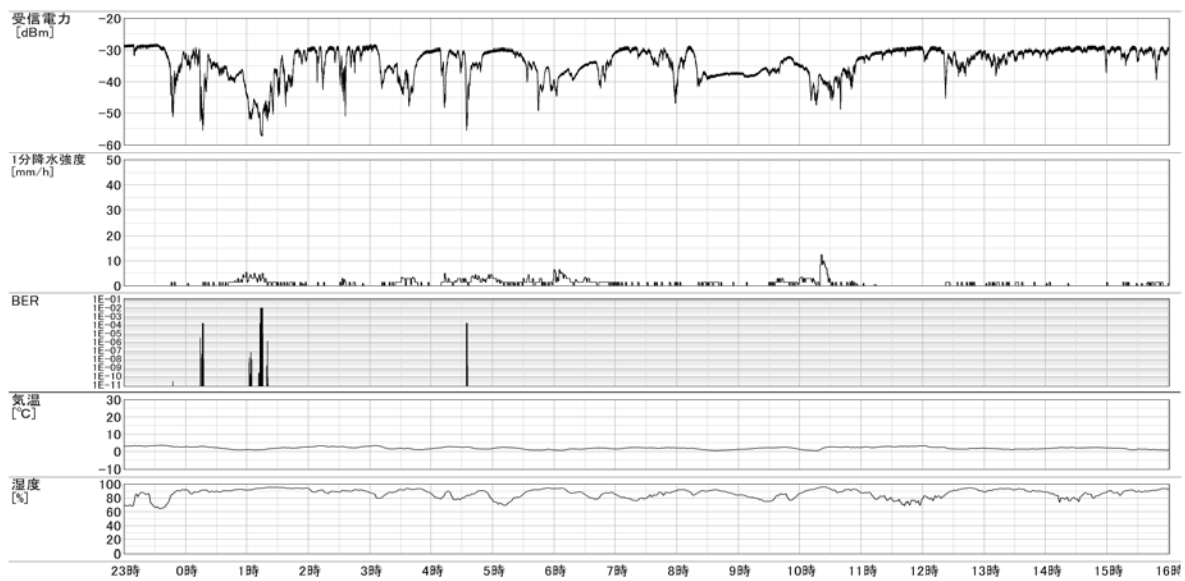
(b) イベント② 降雨 (2009/11/19 13:00~2009/11/20 12:00)



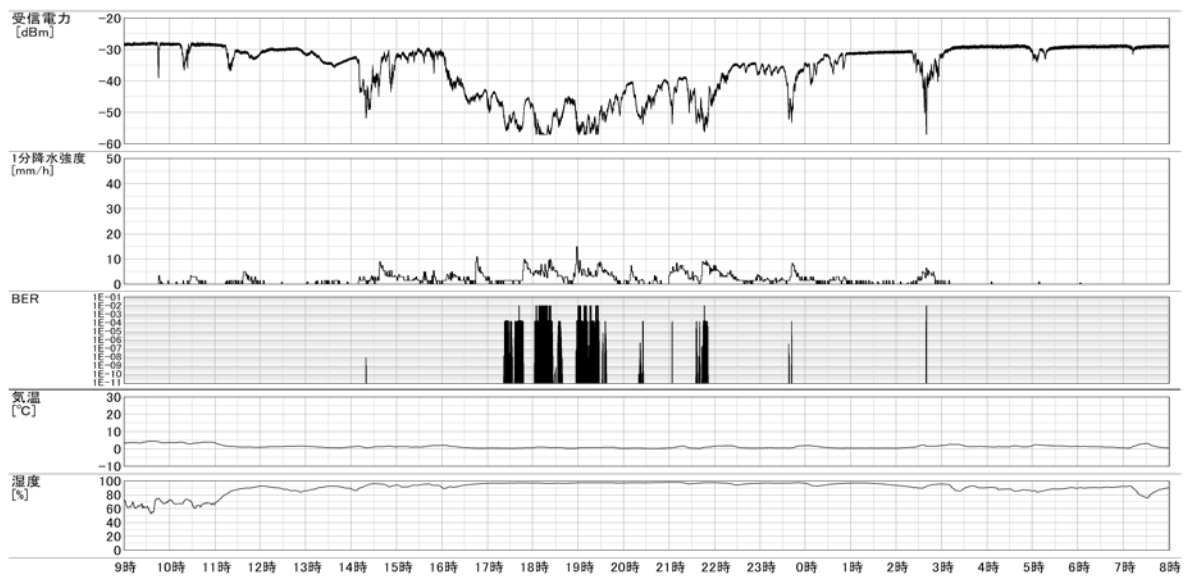
(c) イベント③ 降雪直前の降雨 (2009/12/15 15:00~2009/12/16 13:30)



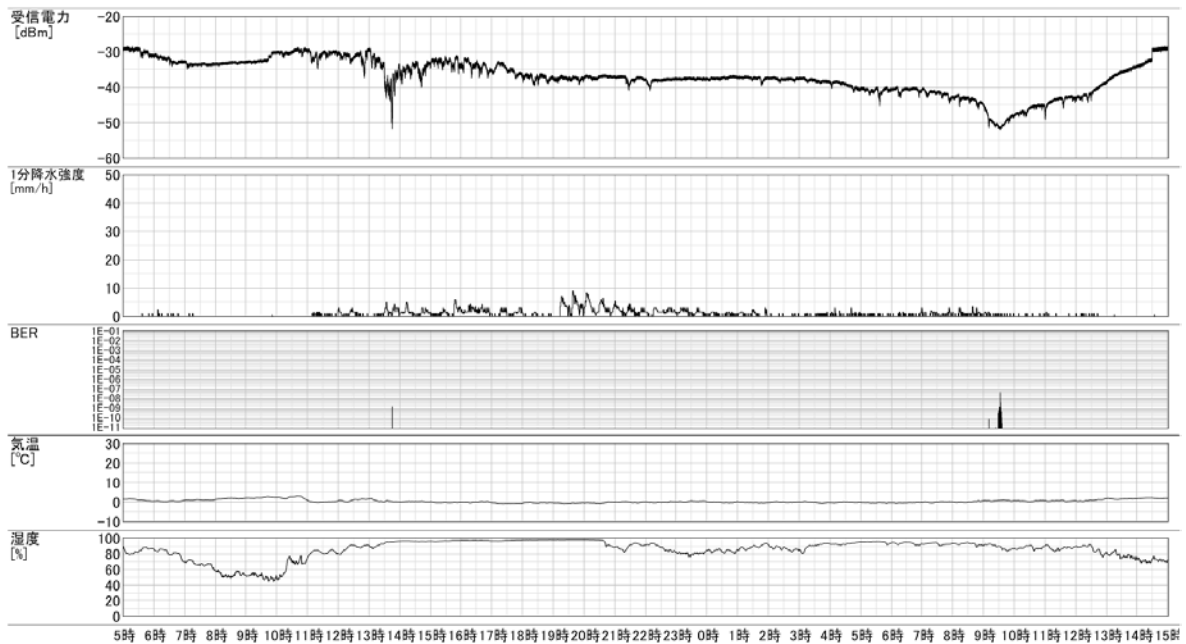
(d) イベント④ みぞれ+湿雪 (2009/12/16 13:30~2009/12/17 08:00)



(e) イベント⑤ 湿雪+アンテナ着雪 (2009/12/17 23:00~2009/12/18 16:00)



(f) イベント⑥ 湿雪+アンテナ積雪 (2009/12/19 09:00~2009/12/20 08:00)



(g) イベント⑦ 乾雪+アンテナ積雪 (2010/01/13 05:00~2010/01/14 15:00)

図 4-1 イベント発生時の逐時変化

4. 2. 2 アンテナ表面変化例

表 4-1 に表示したイベント内におけるアンテナ表面の変化例を表 4-2 に示す。この表では送信局と受信局の同一時間におけるアンテナ表面の様子を示している。ここで (a) は降雨時の時間変化例であり、イベント②内で最大降雨強度を観測した時間を含む平成 21 年 11 月 19 日 20 時から降雨が止む平成 21 年 11 月 20 日 1 時までの変化を示している。ここに示した時間帯は夜間であるためやや鮮明さを欠く点もあるが、写真に現れるいくつかの白点は写真撮影系に水滴が付着したものと予測される。(b) は降雪時の時間変化例であり、イベント⑥内の平成 21 年 12 月 19 日 16 時頃より受信側アンテナフード上面から次第に表面への明らかな着雪が見られ、その後、着雪した雪が消える平成 21 年 12 月 20 日 4 時までの変化を示している。

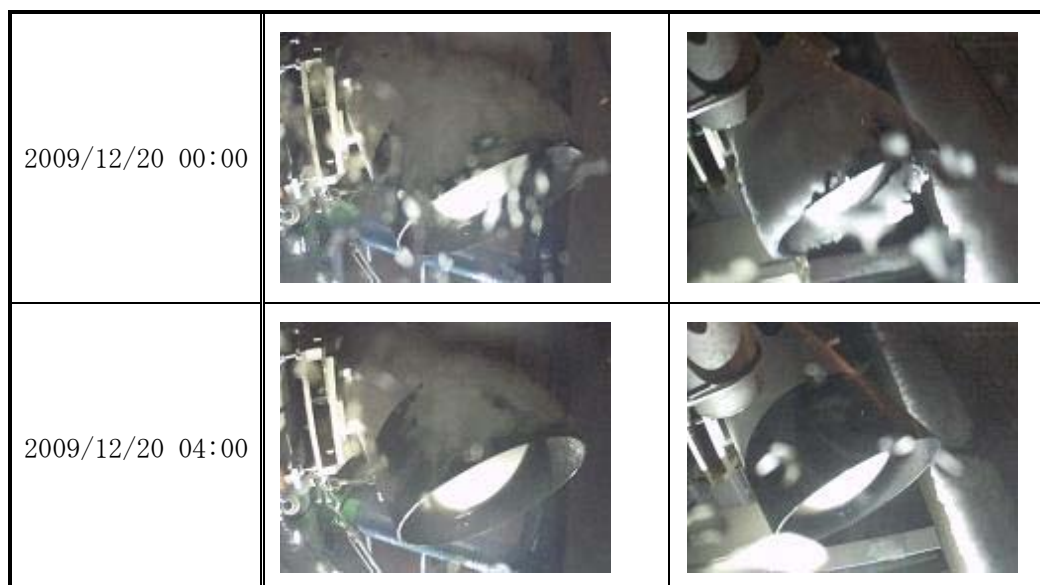
表 4-2 アンテナ表面変化例
 降雨時 (イベント②)

撮影時刻	NTT 新潟上越ビル	佐渡汽船直江津ターミナルビル
2009/11/19 20:00		
2009/11/19 22:00		
2009/11/20 00:00		
2009/11/20 00:30		
2009/11/20 01:00		

2009/11/20 03:00		
------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

(b) アンテナ表面に積雪時 (イベント⑥)

撮影時刻	NTT 新潟上越ビル	佐渡汽船直江津ターミナルビル
2009/12/19 16:00		
2009/12/19 16:30		
2009/12/19 18:00		
2009/12/19 20:00		



4. 3 気象データと他のデータとの比較

4. 3. 1 気象現象の発生割合

表 4-3 に試験期間における気象現象の発生割合を示す。ここで降水イベント中の降水強度 0 の時間は各気象現象発生時間に含み、無降水時間には含めていない。また、降雪タイプの判定は画像データ、気温データ及び国土交通省防災情報提供センターが情報提供している上越市港町の上越地域振興局直江津港湾事務所の 3 時間毎の天気予報データ（以下、「自治体データ」という。）により行った。そのほか試験地点において霧を判断できる観測は行われていないため、AMeDAS 測定地点の高田における視程データ及び月間霧観測日数に基づいて判定した。

なお、1 月については 19 日 13 時までデータが取得されており、この測定期間内の発生割合として求めている。この表によれば、11 月までは降雪は観測されず、12 月から降雪の割合が大きくなるが、乾雪は 1 月に入ってようやく観測されている。また、12 月以降は約 50% を超える時間で降水が観測されている。

表 4-3 気象現象の発生割合[%]

	雨	雪				霧	無降水
		みぞれ	湿雪	乾雪	総合		
2009 年 11 月	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.2
2009 年 12 月	28.0	14.9	6.6	0.0	21.5	0.0	50.5
2010 年 1 月	11.0	34.8	12.6	18.2	65.5	0.0	23.5
試験期間総合	25.8	10.1	9.4	4.2	23.7	0.0	50.5

4. 3. 2 月間降水量

表 4-4 に試験地点における月間降水量を示す。平成 22 年 1 月は 19 日 13 時に測定が終了している。以降の各月の処理結果において 1 月と示すデータは全て 1 月 1 日から 1 月 19 日までを処理した結果とする。この表によれば降水時間は 11 月から 1 月にかけて増加しているが月間降水量はほぼ同じであり、この原因としては降雪の場合は降雨に比べて降水量が少ないことによると思われる。

表 4-4 月間降水量

	月間降水量[mm]
2009 年 11 月	269.8
2009 年 12 月	232.6
2010 年 1 月*	236.2

※2010/1/1~2010/1/19

4. 3. 3 自治体データとの総降水量比較

試験を行った佐渡汽船直江津ターミナルビル屋上の降雨観測データ及び自治体データの平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの月間降水量を表 4-5 に示す。ここで平成 22 年 1 月について 1 月 19 日で終了した試験データに対応させるため、自治体データについては、測定が終了した時間までを総降水量とした。この表より、自治体データと比較すると試験データの降水量は平成 21 年 11 月に 8 割、平成 21 年 12 月に 6 割、平成 22 年 1 月に 7 割と少ない結果となっている。この理由としては、建物屋上のふきさらしの部分に雨量計を設置したため、高度と風による影響ではないかと考えられる。

表 4-5 月間総降水量における比較 (mm)

	試験データ	自治体データ
	直江津	直江津
2009 年 11 月	269.8	319
2009 年 12 月	232.6	367
2010 年 01 月*	236.2	344

※2010/1/1~2010/1/19

4. 3. 4 降水減衰発生リスト

表 4-6 に 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 1 月 19 日までの降雨及び降雪による減衰発生状況を示す。この表において、(a)は降雨、(b)はみぞれ、(c)は湿雪、(d)は乾雪による減衰の発生状況を表している。降雪タイプの判定は佐渡汽船直江津ターミナルビルに設置された画像データ及び自治体データ等に基づいている。表には各発生時間内における最大降雨(降水)減衰

量、最大1分降雨（降水）強度、総降水量、最高気温、最低気温等を併記している。この表によれば降雨と分類された総時間数は約500時間、降雪と分類された総時間は約450時間であり、降雪の場合はみぞれが多くなっている。これは測定期間が季節的に降雨から降雪の観測が始まる晩秋から初冬を含むためと考えられる。水分の少ない乾雪については1月になると共に増加してくる。また、降雨と分類されたデータは最低気温が2°C程度から15°C程度まで広く分布しているが、降雪と分類されているデータはみぞれの場合2~3°C以下、湿雪1°C以下、乾雪0°C以下となっている。

表4-6 減衰発生状況

(a) 降雨

項番	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大降雨 減衰量 [dB]	最大1分 降雨強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大 BER	最高 気温 [°C]	最低 気温 [°C]
1	2009/11/01 14:00	2009/11/02 09:00	19	20.77	26.4	27.4	0	17.1	10.3
2	2009/11/02 12:00	2009/11/03 16:00	28	19.57	28.9	43.1	0	11.6	2.5
3	2009/11/10 21:00	2009/11/12 10:00	37	27.19	32.4	47.2	1.66E-04	17.6	9
4	2009/11/14 06:00	2009/11/14 12:00	6	8.68	7.0	3.8	0	17.3	15.2
5	2009/11/14 12:00	2009/11/14 20:00	8	31.04	44.8	4.9	1.00E-02	17.4	14.7
6	2009/11/17 03:00	2009/11/18 18:00	39	23.38	27.9	86.5	0	11.5	3.6
7	2009/11/19 13:00	2009/11/20 12:00	23	27.49	45.3	28.5	1.70E-04	14	6.5
8	2009/11/21 06:00	2009/11/21 23:00	17	21.26	14.4	3.3	0	11.8	5.1
9	2009/11/22 21:00	2009/11/23 00:00	3	1.9	1.5	0.1	0	8.9	7.6
10	2009/11/25 00:00	2009/11/25 09:00	9	2.53	2.0	0.5	0	12.6	10.1
11	2009/11/26 00:00	2009/11/26 10:00	10	17.24	24.9	9.5	0	14.4	10.3
12	2009/11/27 22:00	2009/11/28 13:00	15	16.33	7.0	6.8	0	16.3	8.4
13	2009/11/28 19:00	2009/11/29 05:00	10	6.99	3.0	1.2	0	10.5	6.5
14	2009/11/29 18:00	2009/11/30 02:00	8	2.99	1.5	2.2	0	10.1	6.8
15	2009/11/30 20:00	2009/12/01 01:00	5	17.43	16.4	4.3	0	10.5	7.6
16	2009/12/03 12:00	2009/12/04 20:00	32	22.3	25.9	9.2	0	12.9	7.8
17	2009/12/05 21:00	2009/12/06 07:00	10	9.95	4.0	0.3	0	13.8	10.9
18	2009/12/06 17:00	2009/12/07 10:00	17	26.9	19.9	12.3	1.68E-04	9.9	4.7
19	2009/12/11 04:00	2009/12/12 03:00	23	4.29	3.0	2.6	0	12.5	8.7
20	2009/12/12 05:00	2009/12/12 17:00	12	26.43	35.4	6.4	1.62E-04	15.9	11.2
21	2009/12/13 14:00	2009/12/14 00:00	10	12.89	3.0	0.8	0	8.5	5.2
22	2009/12/14 11:00	2009/12/15 03:00	16	26.54	21.4	15.6	1.64E-04	8.1	1.7
23	2009/12/15 05:00	2009/12/15 10:00	5	3.18	0.5	0	0	5.7	1.9

24	2009/12/15 15:00	2009/12/16 13:30	22	24.34	21.9	48.2	2.98E-07	8.4	1.7
25	2009/12/23 17:00	2009/12/24 05:00	12	20.55	29.4	6.9	0	10.8	6.1
26	2009/12/26 03:00	2009/12/26 13:00	10	3.47	0.0	0	0	11.7	7.1
27	2009/12/26 16:00	2009/12/27 02:00	10	19.77	8.0	1.5	0	10	6.4
28	2009/12/27 04:00	2009/12/27 12:00	8	1.61	0.5	0	0	6.8	3.5
29	2009/12/28 09:00	2009/12/28 15:00	6	18.42	5.0	2.3	0	8.5	5.5
30	2009/12/30 17:00	2009/12/31 07:00	14	25.99	3.0	2.1	1.65E-04	12.2	2.8
31	2010/01/04 21:00	2010/01/05 12:00	15	21.43	7.0	4.3	0	9	2.5
32	2010/01/05 14:00	2010/01/05 20:00	6	7.78	0.5	0	0	6.8	4.8
33	2010/01/10 10:00	2010/01/10 14:00	4	5.74	1.5	0.2	0	5.4	3.4
34	2010/01/12 11:00	2010/01/12 22:00	11	10.81	8.5	5.5	0	8.1	3.4
35	2010/01/18 18:00	2010/01/19 07:00	13	12.21	9.5	3.5	0	7.9	2.1

(b) みぞれ

項番	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大降雪 減衰量 [dB]	最大1分 降水強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大 BER	最高 気温 [°C]	最低 気温 [°C]
36	2009/12/16 13:30	2009/12/16 17:30	4	28.06	12.5	12.3	1.00E-02	4.5	0.9
37	2009/12/17 13:00	2009/12/17 23:00	10	22.52	4.0	2.9	0	3.9	1.8
38	2009/12/17 23:00	2009/12/18 03:00	4	28.65	5.5	2.7	1.00E-02	3.7	0.9
39	2009/12/18 07:00	2009/12/18 16:00	9	20.5	12.5	4.7	0	3.4	0.5
40	2009/12/18 23:00	2009/12/19 13:00	14	10.63	5.0	3	0	4.6	0.8
41	2009/12/20 18:00	2009/12/21 07:00	13	28.65	7.5	5.1	1.00E-02	5.8	1.8
42	2009/12/21 10:00	2009/12/22 06:00	20	6.47	5.0	2	0	3.9	-0.9
43	2009/12/28 15:00	2009/12/29 11:00	20	28.1	16.4	13	2.08E-04	6.9	1.1
44	2009/12/31 07:00	2009/12/31 16:00	9	28.39	16.9	13.1	1.00E-02	4.5	0.6
45	2009/12/31 16:00	2010/01/01 00:00	8	10.68	1.5	0.2	0	2.4	0.7
46	2010/01/01 00:00	2010/01/02 11:00	35	7.62	1.0	0.4	0	5.3	0.5
47	2010/01/02 11:00	2010/01/02 20:00	9	28.79	12.9	3.4	1.00E-02	6.1	2.6
48	2010/01/04 00:00	2010/01/04 08:00	8	9.25	1.0	0.1	0	4.3	0
49	2010/01/05 12:00	2010/01/05 14:00	2	23.6	9.5	3.6	7.58E-09	5.8	3.3
50	2010/01/06 06:00	2010/01/06 21:00	15	6.68	1.0	0	0	5.5	2.5
51	2010/01/06 21:00	2010/01/08 07:00	34	28.79	13.4	32.7	1.00E-02	7	1.4
52	2010/01/08 07:00	2010/01/09 02:00	19	28.79	9.5	8.8	1.00E-02	6.3	1
53	2010/01/09 02:00	2010/01/10 00:00	22	28.79	9.0	18.3	1.00E-02	5.2	1
54	2010/01/10 22:00	2010/01/11 02:00	4	5.69	3.5	1.5	0	4.9	0.9

55	2010/01/12 22:00	2010/01/13 05:00	7	24.85	3.0	0.7	1.56E-04	4.9	1.3
----	------------------	------------------	---	-------	-----	-----	----------	-----	-----

(c) 湿雪

項番	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大降雪 減衰量 [dB]	最大1分 降水強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大 BER	最高 気温 [°C]	最低 気温 [°C]
56	2009/12/16 17:30	2009/12/17 08:00	14	13.81	8.0	7.2	0	1.5	0.3
57	2009/12/17 08:00	2009/12/17 13:00	5	11.51	9.0	9	0	2.2	0.2
58	2009/12/18 03:00	2009/12/18 07:00	4	27.17	6.5	6.5	1.86E-04	3.6	0.7
59	2009/12/18 16:00	2009/12/18 23:00	7	24.98	8.0	8.2	1.57E-04	2.3	0.2
60	2009/12/19 13:00	2009/12/20 08:00	19	28.65	14.9	33.5	1.00E-02	3.2	0.2
61	2010/01/02 20:00	2010/01/03 18:00	22	20.82	11.0	35.9	0	4.1	0.1
62	2010/01/10 00:00	2010/01/10 10:00	10	19.24	13.4	13.1	0	4.8	0.2
63	2010/01/14 17:00	2010/01/14 22:00	5	2.25	0.5	0	0	2.4	0.2
64	2010/01/15 17:20	2010/01/16 03:00	9	9.71	12.0	12.5	0	2.4	0.1
65	2010/01/16 14:00	2010/01/16 19:00	5	1.95	0.5	0	0	2.4	1
66	2010/01/17 16:00	2010/01/17 21:00	5	7.3	2.5	0.4	0	4.2	0.9

(d) 乾雪

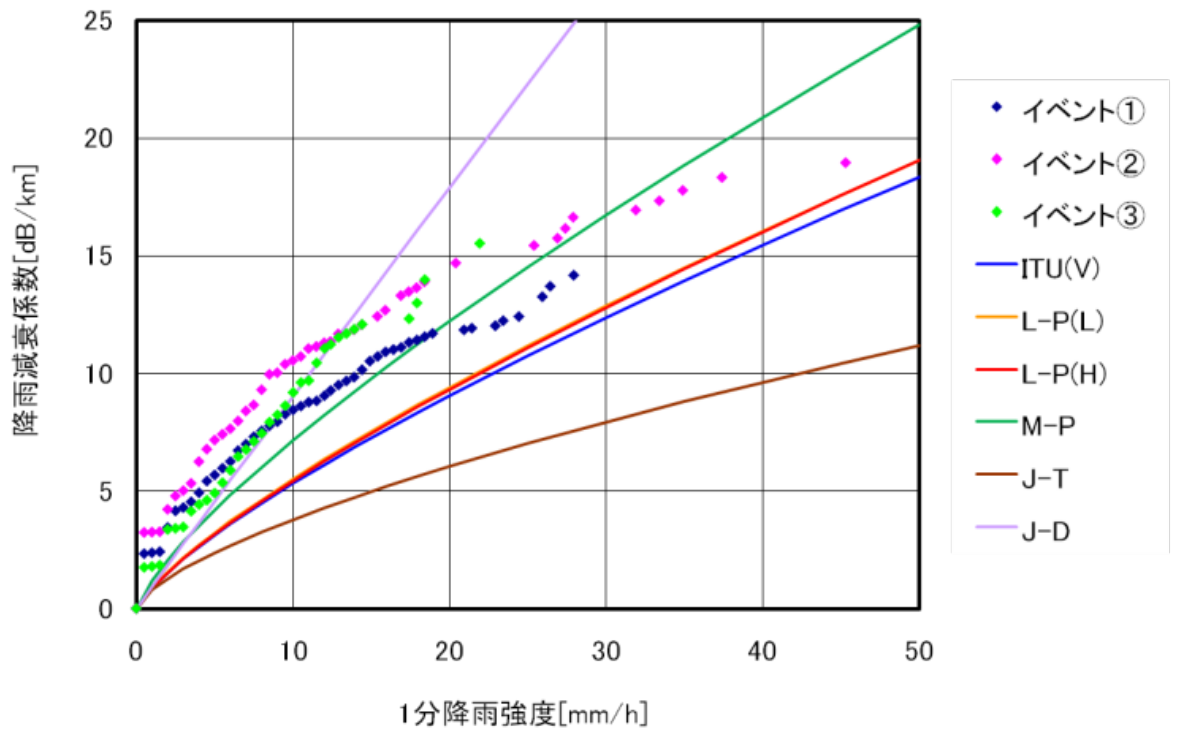
項番	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大降雪 減衰量 [dB]	最大1分 降水強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大 BER	最高 気温 [°C]	最低 気温 [°C]
67	2010/01/13 05:00	2010/01/14 15:00	34	23.64	9.0	24.7	4.70E-08	3.3	-0.9
68	2010/01/14 22:00	2010/01/15 17:20	19	24.91	10.5	47.6	1.57E-04	1.1	-1.3
69	2010/01/16 19:00	2010/01/17 15:00	20	21.38	8.0	17.9	0	4	-2.7
70	2010/01/17 22:00	2010/01/18 06:00	8	2.5	1.5	0.4	0	1.5	-1.6

4. 4 電波伝搬試験結果に基づく降水減衰係数の考察

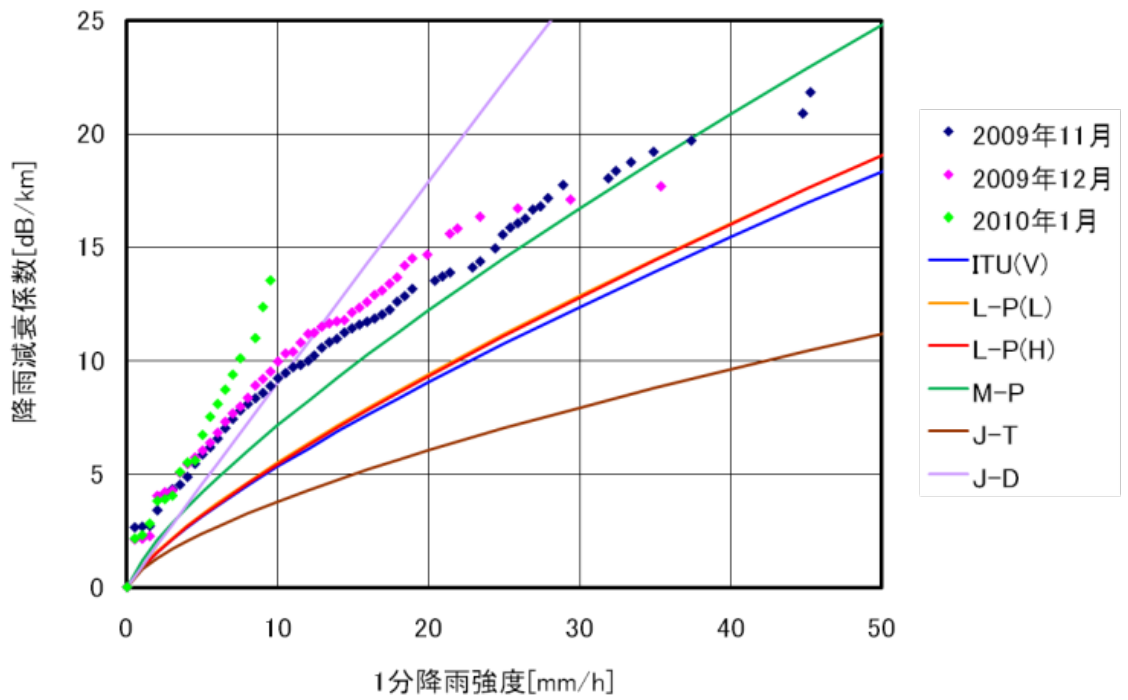
4. 4. 1 降雨減衰係数の考察

単位距離あたりの減衰量を表す降雨減衰係数は回線設計法構築の基本となる。一般的に降雨減衰は、単位距離あたりの減衰量と伝搬距離及び降雨が一樣でないことによる補正係数等によって計算される。ここでは伝搬距離が短いので、さしあたり降雨が一樣でないことによる影響は小さいと考えて、一樣降雨補正は考慮しない。したがって、地点降雨強度と降雨減衰量とから直接降雨減衰係数が求められることとなる。観測地点での地点降雨強度分布と降雨減衰分布との等確率値を用いた関係から単位距離あたりの減衰量を求めた結果を図 4-2 に示す。この図には資料編の表 1-5 に示した各粒度分布モデルによる推定値を併記しており、ITU(V)は ITU に掲示の 80GHz の垂直偏波、L-P(L)と L-P(H)はそれぞれ実測データに基づく Laws & Parsons 分布のうちそれぞれ雨滴の小さな領域及び大きな領域の分布を近似した分布、M-P 分布は Marshall-Palmer 分布、さらに J-T、J-D 分布はそれぞれ Joss の Thunderstorm(雷雨)及び Drizzle rain(霧雨)を対象とした時の減衰係数を示している。これらの粒度分布のモデルは一般的に指数分布で与えられており、モデルによってその常数項の値が異なっている。これらの図において (a) が先に示した降雨イベントでの、(b) が 11 月～1 月の各月での、(c) が試験期間総合での降雨減衰係数の結果である。

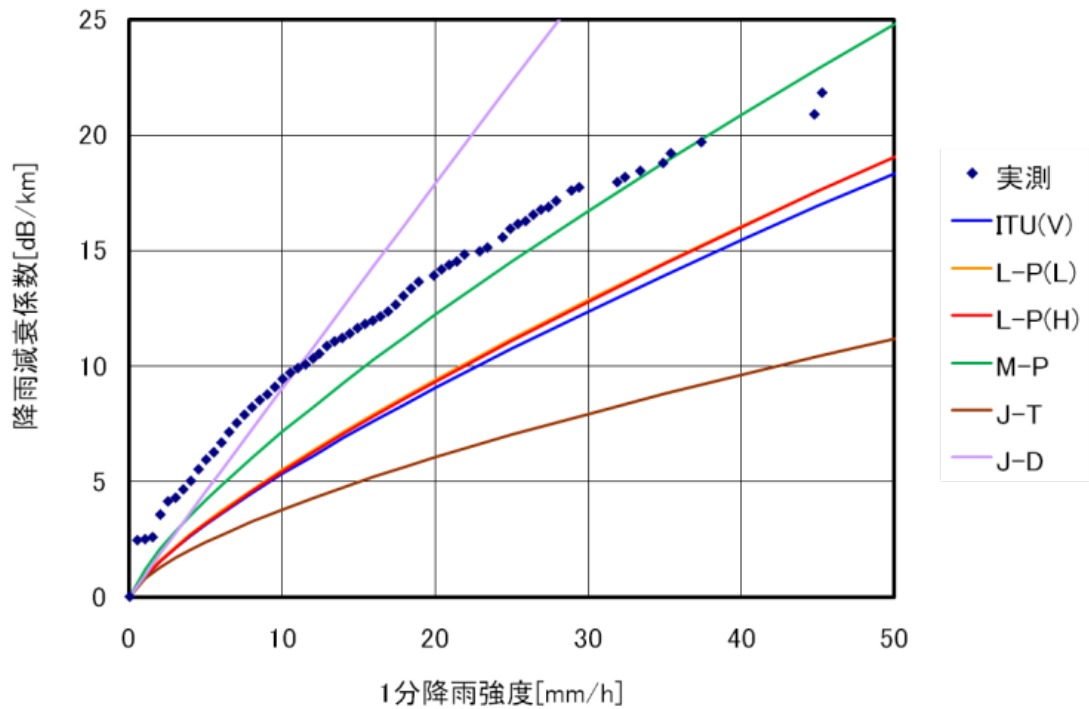
これらの図によれば、まずイベントデータについてはそれぞれ近似度の高い確率分布形は異なっており、イベント①では実測値は降雨強度が 15mm/h より小さい領域で J-D モデルに近く、それより降雨強度が大きい領域では M-P モデルに近づく傾向にある。次にイベント②では同じく降雨強度が 15mm/h 程度までは J-D 分布に近く、それ以後 M-P 分布から ITU 分布へと近づく傾向にある。さらにイベント③は 10mm/h 程度までは J-D 分布に近くそれ以上の降雨強度では平均的に M-P 分布に近似される。次に各月の分布では 11 月と 12 月については上記イベントと同じく 10～15mm/h までは J-D 分布それ以上の降雨強度では M-P 分布に近い傾向となり、1 月についてはこの月は降雨に比べて降雪が多いため降雨強度の強い領域のデータは少ないが、弱雨領域では J-D 分布に近いが降雨強度が 10mm/h に近づくと共に J-D よりも減衰係数が大きくなる傾向となる。この原因としては降雪が主要な月であるので降雨データの前後にみぞれ等の水分の大きな降雪データが混入した可能性と、降雨前後に降雪による着雪が減衰データに混入した可能性がある。最後に試験期間総合の結果でも他の期間と同様に降雨強度約 15mm/h までは J-D 分布にそれ以上の降雨強度では M-P 分布に近づく傾向は同じである。



(a) イベント



(b) 各月



(c) 試験期間総合

図 4-2 降雨減衰係数

4. 4. 2 降雨減衰係数の補正

試験で得られた降水量は自治体データと比べ少ない結果となっている。そのためここでは降雨強度データを周辺の降雨観測データに基づき補正した場合の降雨減衰係数につき検討した。

補正係数としては各対象期間の両者の総降水量の比(自治体データ/試験データ)を用いた。

これには降雪時の降水量は含んでいない。用いた補正係数を表 4-7 に、降雨強度補正後の降雨減衰係数を図 4-3 に示す。

この図は、試験期間総合の観測地点降雨強度分布と降雨減衰分布の等確率値を用いた関係である。表より、月の経過と共に補正係数が大きくなっていることがわかる。また、補正によりイベント間や観測月間で見られた差が小さく変化していること、降雨強度が約 20mm/h より小さい領域で M-P モデルに近く、それより大きくなるに伴って ITU モデルに近づいていることが分かる。

表 4 - 7 補正係数 (降雨時)

		補正係数
イベント	①	1.06
	②	1.33
	③	1.19
各月	2009年11月	1.18
	2009年12月	1.57
	2010年1月	2.07
試験期間総合		1.32

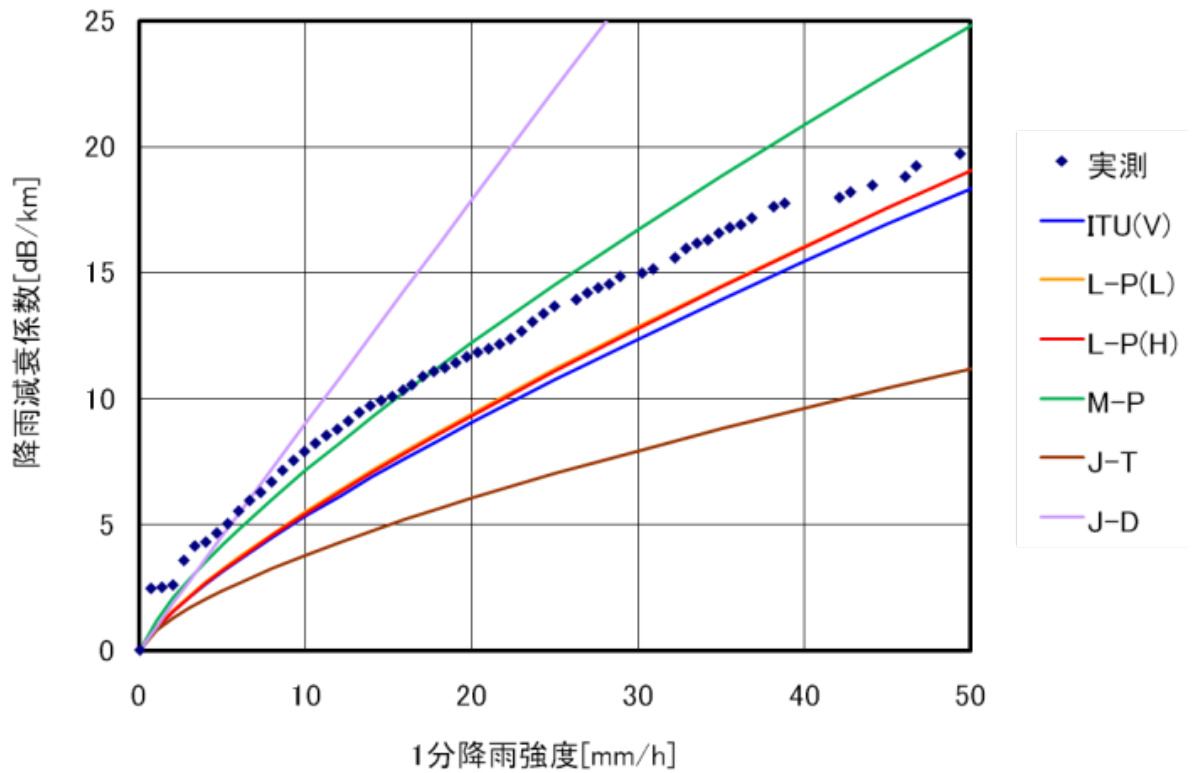


図 4 - 3 補正後の降雨減衰係数 (試験期間総合)

4. 4. 3 降雪減衰係数の考察

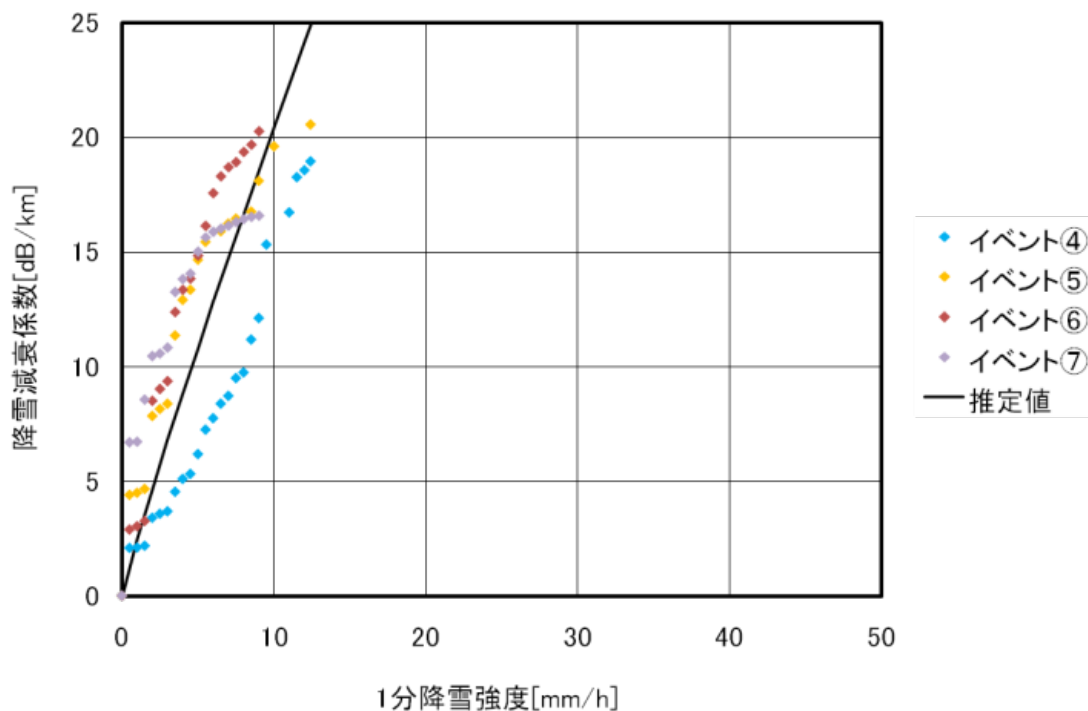
3か月の測定期間のうち12月と1月には降雨以外に降雪による減衰が観測された。実測データのうち降雪と分類した時間帯における降雪強度分布と降雪減衰分布とから等確率値を用いた降雪強度と単位距離当りの減衰量（降雪減衰係数）との関係を求め図4-4に示す。この図には資料編の表1-7に示した新潟県長岡市の距離8.9kmで4か月にわたり実施された11GHz～48GHzの4周波数による実測結果に基づき、外挿により今回新たに求めた80GHz帯の以下の計算式による推定値を併記した。

$$\Gamma = 2.475R^{0.916} \quad (\text{dB/km})$$

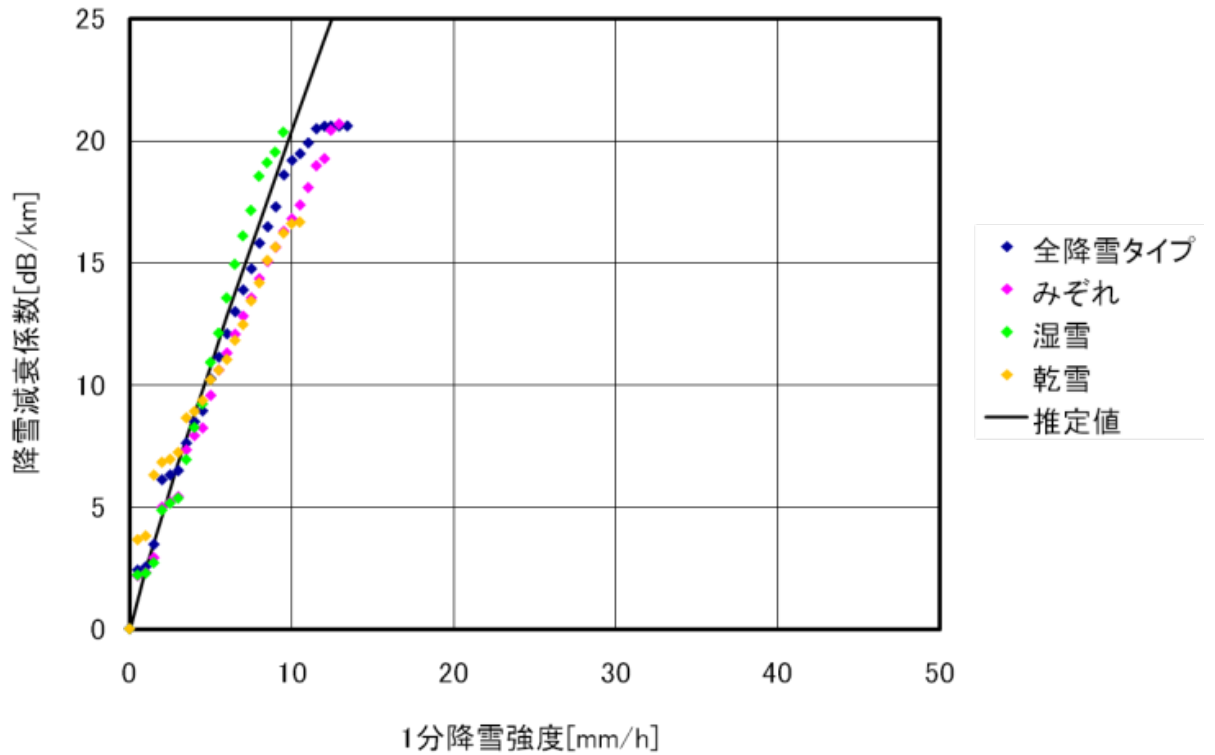
この図において (a) が降雪イベント、(b) が試験期間総合の結果である。

図(a)によれば、イベント④では推定曲線が降雪減衰係数を過大評価し、イベント⑤及びイベント⑥では過小評価している。この理由としてはまずイベント④では降雨から降雪に変わる段階のイベントであるため降雪減衰係数よりも小さい降雨減衰係数に近い結果になったと考えられる。次に、イベント⑤からイベント⑦まではアンテナ表面への着雪があり、それによる減衰と指向性劣化による減衰が空間における降雪減衰に加わっているためと考えられ、伝搬路での降雪減衰を求めるには別途着雪による減衰を評価する必要がある。図(b)より、試験期間総合における全降雪タイプの実測値が推定曲線に近い値を示している。

なお、20dBを超えたところで降雪減衰係数が飽和しているのは、受信電力が測定限界を超えている為と予測される。



(a) イベント



(b) 2009年12月

図4-4 降雪減衰係数

4.4.4 降雪減衰係数の補正

試験で取得された総降水量が自治体データの総降水量と比べて少ないことから、それぞれの総降水量の比（自治体データ／試験データ）による降水強度の補正を実施した。降雪データについても降雪強度の補正を行い降雪強度と降雪減衰係数との関係を求めた。補正に用いた補正係数を表4-8に、補正後の試験期間総合の降雪強度と降雪減衰係数との関係を図4-5に示す。表より、降雨時と比べて全体的に補正係数が大きくなっている事がわかる。特に、みぞれ時の補正係数が大きく、湿雪時の補正係数は小さい。この図によれば降雪タイプによって差異が表れており、湿雪時の降雪減衰係数が推定値に近く、みぞれ及び乾雪時に降雪減衰係数が小さい特性がみられる。

表 4-8 補正係数 (降雪時)

		補正係数	
イベント	④	1.12	
	⑤	2.52	
	⑥	1.24	
	⑦	1.86	
各月	2009年12月	全降雪タイプ	1.59
		みぞれ	1.96
		湿雪	1.27
	2010年1月	全降雪タイプ	1.42
		みぞれ	1.74
		湿雪	1.05
		乾雪	1.43
	試験期間総合	全降雪タイプ	1.48
みぞれ		1.84	
湿雪		1.16	
乾雪		1.43	

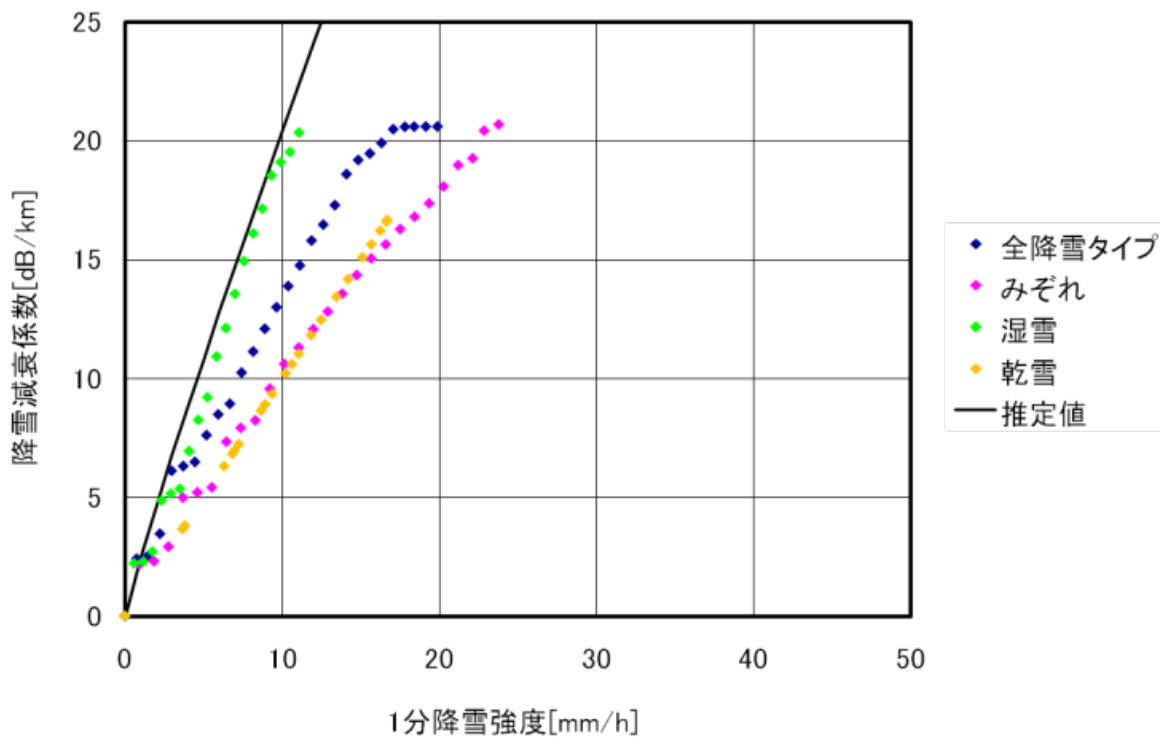


図 4-5 補正後の降雪減衰係数 (試験期間総合)

4. 5 Ping 伝送試験結果と考察

Ping 伝送試験期間（平成 21 年 11 月 19 日から平成 22 年 1 月 20 日）におけるタイムアウトの回数を表 4-9 に示す。12 月 19 日以外はタイムアウトの発生が数回から数十回程度である一方、12 月 19 日は 423 回とタイムアウトが頻発していることが同表よりわかる。図 4-6 と図 4-7 にタイムアウトが発生する具体例を示しているが、前者は図 4-6 のように短時間の間に断続的に発生し、後者は図 4-7 のように長時間にわたって連続的に発生している。

同日の 17 時から 22 時における受信電力、タイムアウト回数及びビット誤り率の関係を図 4-8 に示す。受信電力が概ね -54 dBm 以下（ビット誤り率が 10^{-4} 以上）になるとタイムアウトは発生しやすくなるが、図中の点 a や b のように -54 dBm 付近であってもタイムアウトは発生していないことが同図より確認できる。

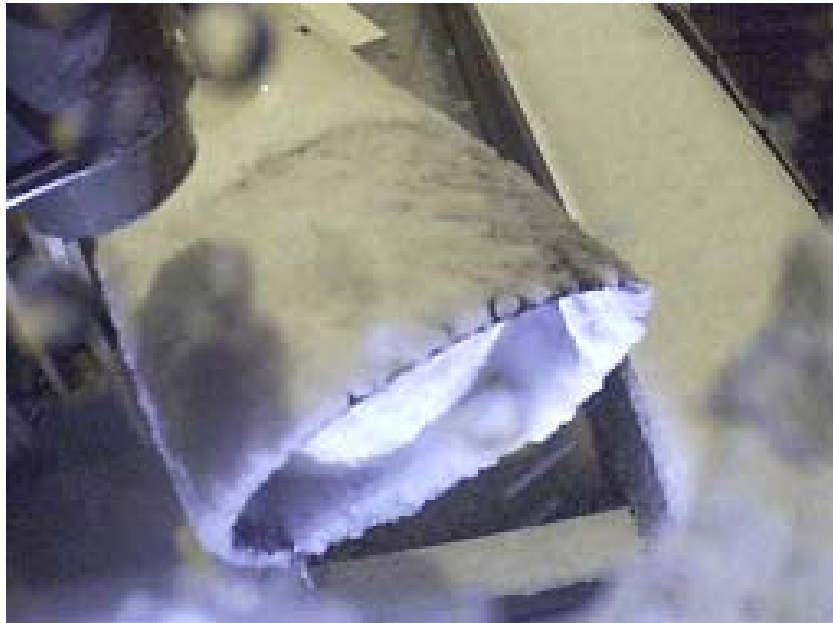
一般に、データサイズが B ビットであるパケットの伝送が成功する確率（パケット成功率）P の理論値は次式を用いて計算できる。

$$P = (1 - \text{BER})^B$$

なお、今回の Ping 伝送試験で用いたパケットのデータサイズは 32 バイト（256 ビット）である。上式を用いて算出したビット誤り率とパケット成功率の関係を図 4-9 に示す。同図より、BER が 10^{-4} 以上になる（回線品質が悪化する）と、急激にパケット成功率が低下し、タイムアウトが発生しやすい環境になることが理論的に裏付けできる。

表 4-9 タイムアウト回数

月日	天候	タイムアウト回数
11 月 20 日	雨	5 回
12 月 16 日	みぞれ及び湿雪	15 回
12 月 18 日	みぞれ及び湿雪	24 回
12 月 19 日	湿雪	423 回
12 月 20 日	みぞれ	32 回
12 月 31 日	みぞれ	39 回
1 月 2 日	みぞれ及び湿雪	20 回
1 月 8 日	みぞれ	41 回
1 月 9 日	みぞれ	16 回
1 月 14 日	乾雪	0 回



湿った雪が、アンテナ表面に着雪

【12/19 無線設備の写真（佐渡汽船直江津ターミナル側）】



乾いた雪がアンテナ表面に着雪

【1/14 無線設備の写真（佐渡汽船直江津ターミナル側）】

Dec16_140737

Pinging 192.168.1.254 with 32 bytes of data:

```
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=33ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=50ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=21ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=61ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=25ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=33ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=33ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=22ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=9ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=45ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=23ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=6ms TTL=64
Request timed out.
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=21ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=25ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=36ms TTL=64
Reply from 192.168.1.254: bytes=32 time=33ms TTL=64
Request timed out.
```

タイムアウトの発生例 (断続的)
(12月16日14:07:37~14:09:07)

```
Ping statistics for 192.168.1.254:
    Packets: Sent = 60, Received = 53, Lost = 7 (11% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 6ms, Maximum = 61ms, Average = 13ms
Dec16_140907
```

図 4 - 6 断続的にタイムアウトが発生する例

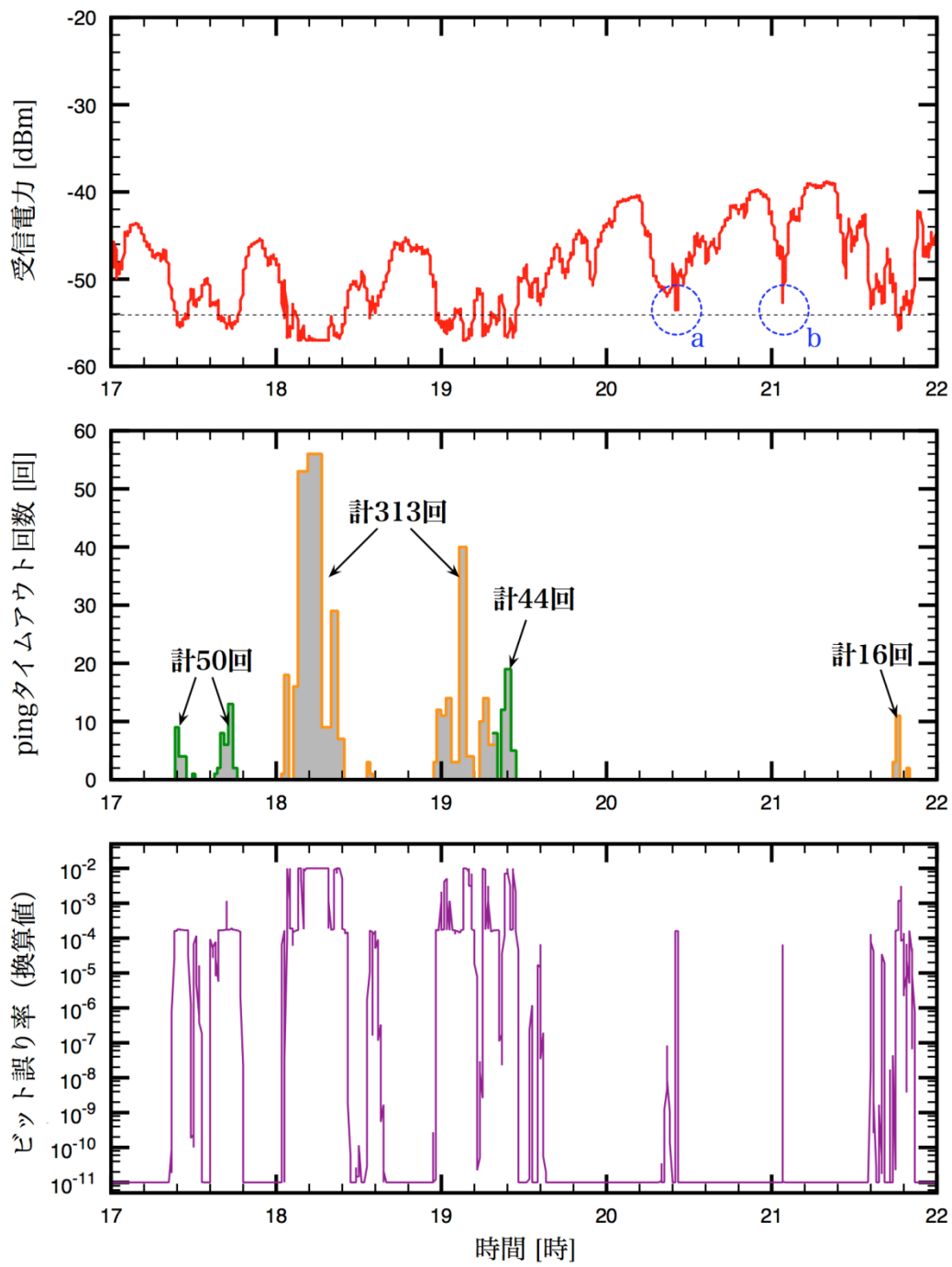


図4-8 受信電力、Ping タイムアウト回数、ビット誤り率の関係
(12月19日17時~22時)

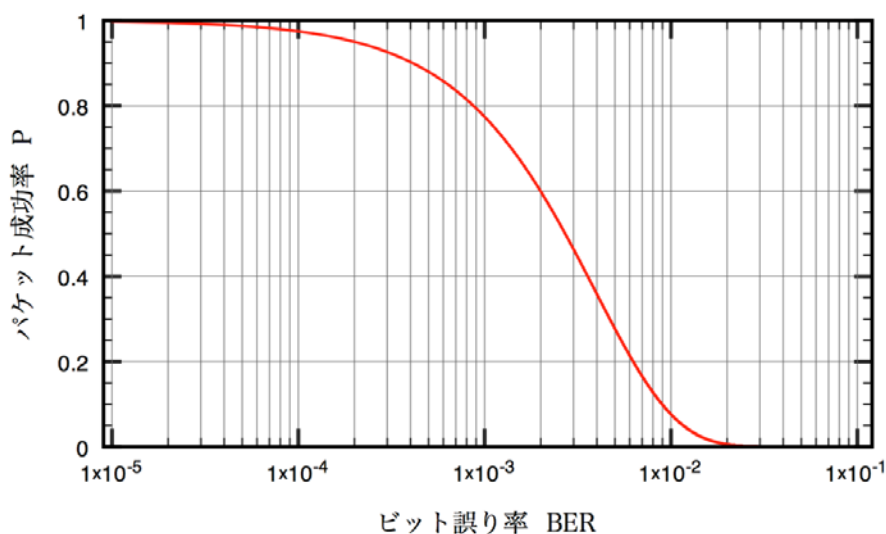
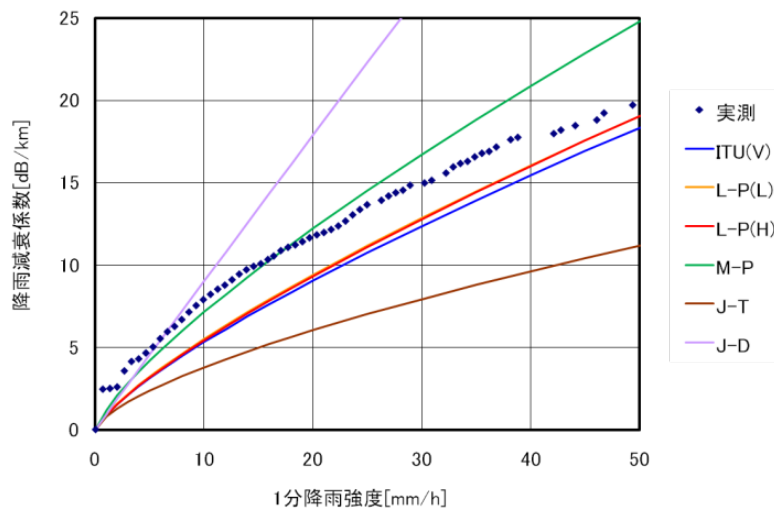


図4-9 ビット誤り率とパケット成功率の関係（理論値）

4.6 イベントから見る降雨・降雪減衰による回線状況の特徴と考察

降雨については、11月19日～20日、最大1分降雨強度45.3mm/h時に最大降雨減衰量27.49dB、最大BER 1.70E-04、5回のPingタイムアウトが生じている。

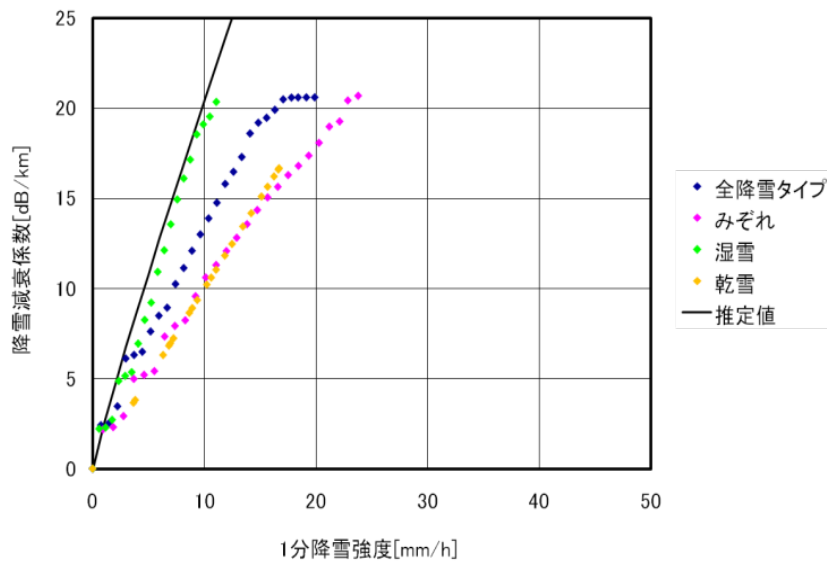
Ping試験を開始してから、このほかに降雨によりPingタイムアウトが生じた例はない。なお、12月12日には、最大1分降雨強度35.4mm/h時に最大降雨減衰量26.43dB、最大BER1.62E-04を記録しているが、Pingタイムアウトは生じていない。



(参考) 図4-3 補正後の降雨減衰係数（試験期間総合）（再掲）

降雪については、アンテナ着雪による減衰も含み、1分降雪強度10mm/h時に、みぞれや乾雪では10dB/km、湿雪では20dB/km程度生じることが分析できた。

また、このことから着雪対策を施さない場合には、距離1.39kmで降雪・着雪により容易に30dB程度の減衰を生じることが明らかとなった。



(参考) 図 4-5 補正後の降雪減衰係数 (再掲)

このアンテナへの着雪の影響については、図 4-12 のイベントごとの比較によると 5~10dB 程度の減衰が推測され、距離 1.39km で着雪対策をしていないこのモデルでは、12 月 19 日~20 日湿雪 (最大 1 分降水強度 14.9mm/h) とアンテナ着雪により最大 BER 1.00E-02 と 400 回を超える Ping タイムアウトが生じている。

しかし、1 月 13 日~15 日乾雪 (最大 1 分降水強度 10.5mm/h) では、アンテナ着雪があるにもかかわらず最大降雪減衰量 24.91dB と、Ping タイムアウトは生じていない。

また、図 4-14 から同日 14 時 29 分にアンテナに着雪していた雪が落下しており、このとき受信電力が階段状に急激に回復している。この事例からは、降雪がほぼなくなったと見られる同日 13 時と回復時である同日 14 時 29 分と比較すると着雪で 10dB 程度の減衰量があったことがわかる。

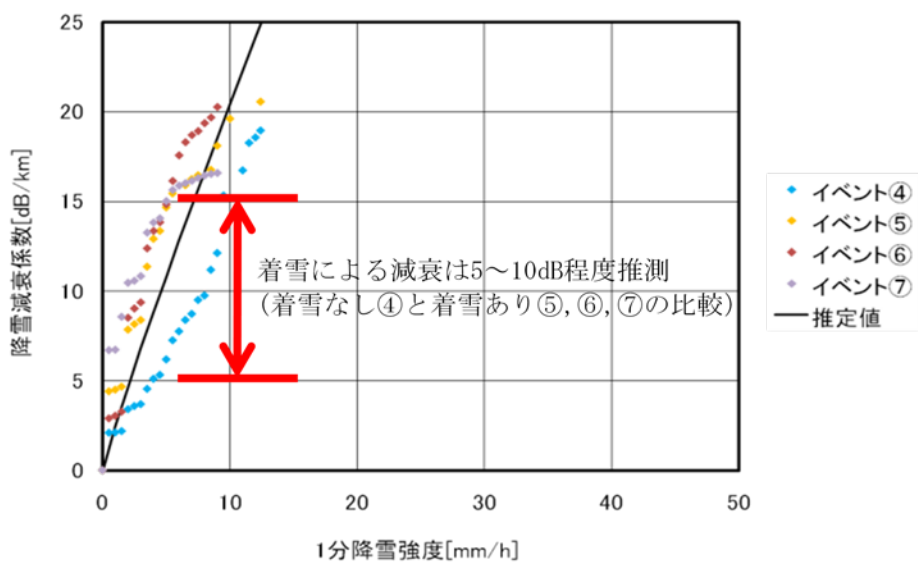


図 4-10 降雪減衰係数 ((a) イベント) から推測

【タイムアウトした日のデータ一覧】

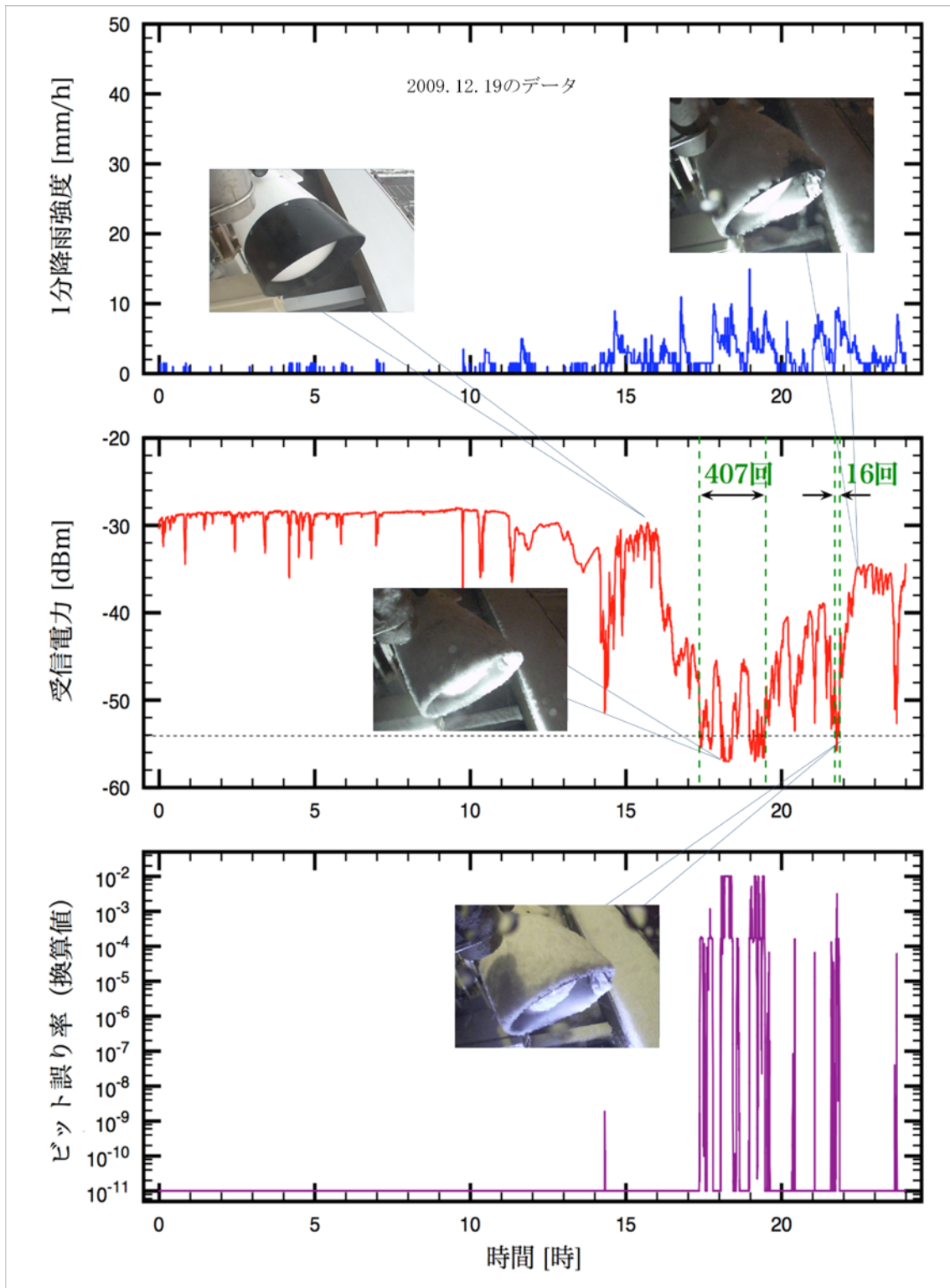


図4-1-1 12/19におけるタイムアウト状況

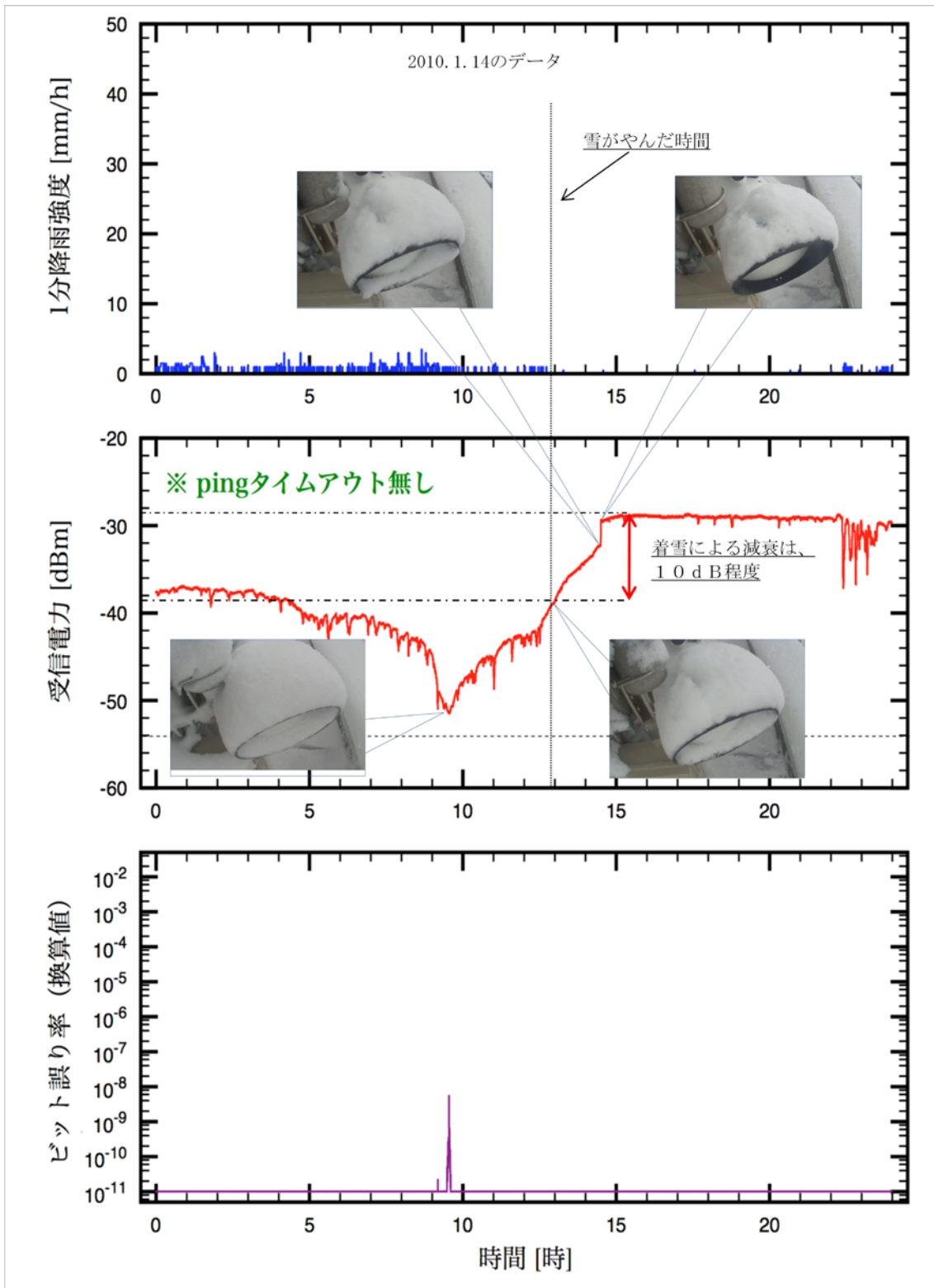


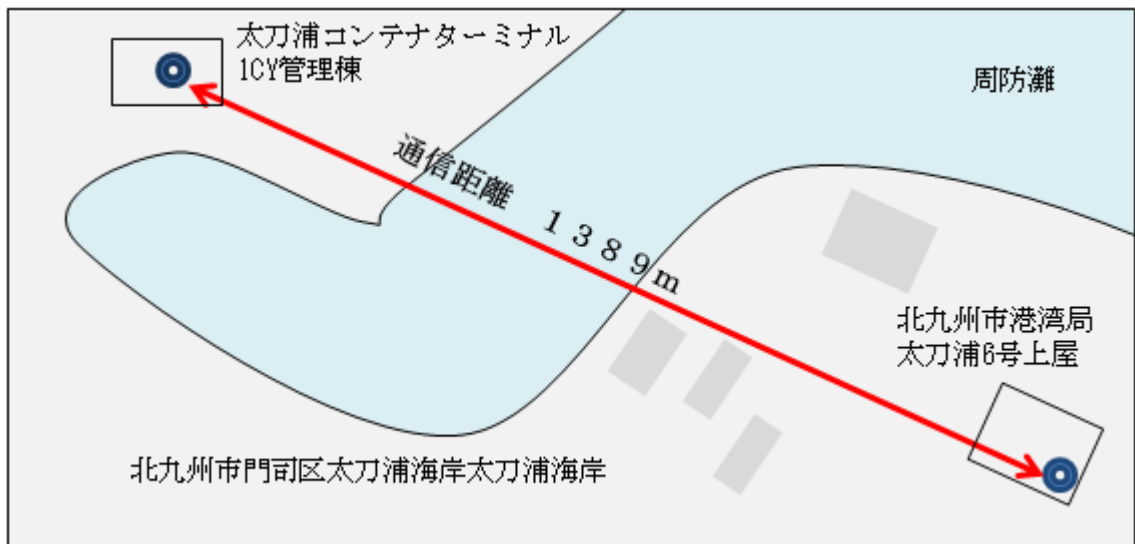
図4-12 1/14における受信電力の変化

4. 7 HDTV 伝送試験結果 (参考)

本ミリ波帯高速無線伝送システムは、ハイビジョンテレビカメラから非圧縮で出力される映像伝送（伝送速度1.485Gbps）に対応できるとしている。

この機能に関して、北九州市において同じ型式の無線設備で運用する無線局により、以下のとおりハイビジョン映像の伝送試験が行われているので、参考として掲載する。

- (1) 試験日：平成22年2月4日（木） 天候：晴れ
- (2) 試験に使用した無線設備：Loea 社製L-1000 2台（株式会社満宏所属実験試験局）
- (3) 試験場所：北九州市門司区太刀浦海岸
太刀浦コンテナターミナル 1CY 管理棟及び北九州市港湾局太刀浦6号上屋



(配置状況の写真)

太刀浦コンテナターミナル 1CY 管理棟側無線設備



北九州市港湾局太刀浦6号上屋側無線設備



(4) 機器構成：

対向して配置した無線設備のうち、片方の無線設備の光出力端子から光入力端子へ光ケーブルをループバック接続し、無線設備により光信号に変換された受信信号を再度無線通信用のデジタル信号に変換し、折り返し送信する。

一方の無線設備については、ハイビジョンカメラから光メディアコンバータを介して光ケーブルを装置分電盤の光入力端子に接続するとともに、装置分電盤の光出力端子から同様に光メディアコンバータを介して同軸ケーブルに接続して受信動画を確認する。

太刀浦コンテナターミナル1CY管理棟

北九州市港湾局太刀浦6号上屋

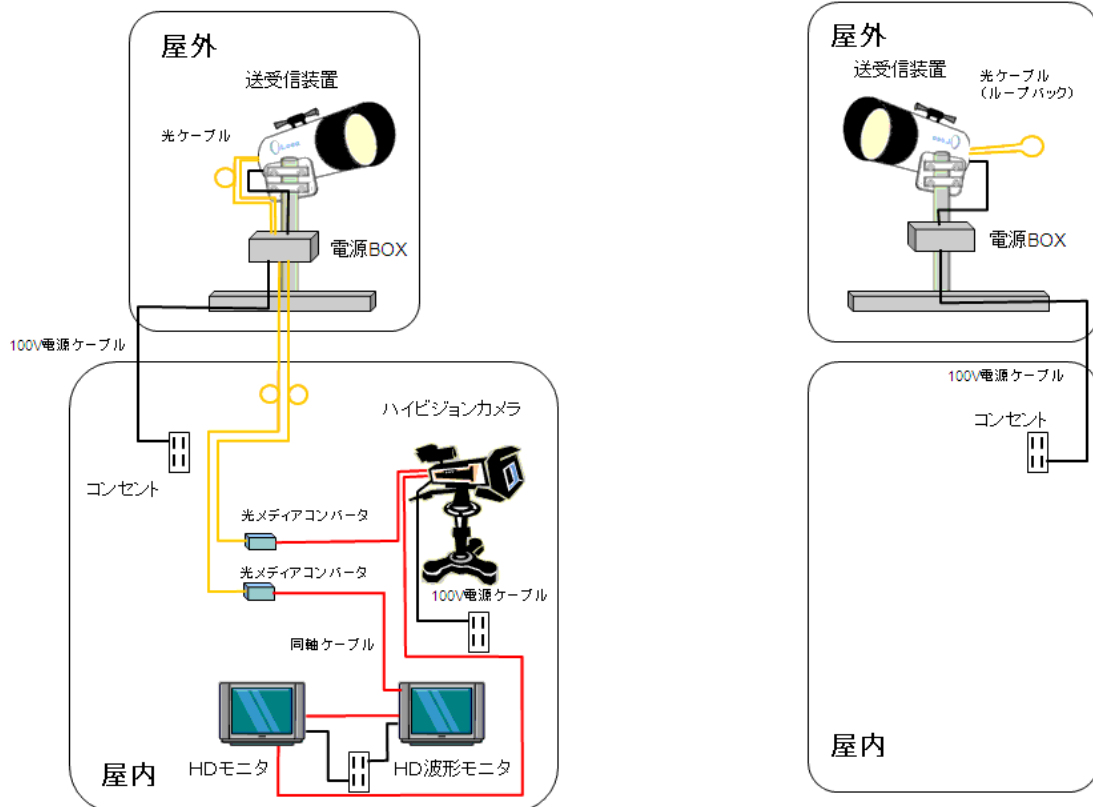


図4-13 HDTV伝送試験系統図

(5) 試験方法：

ハイビジョンカメラの映像を、太刀浦コンテナターミナル管理棟屋上に配置した無線設備から1389mの距離に配置する北九州市港湾局太刀浦6号上屋の無線設備に伝送し、折り返した太刀浦コンテナターミナル管理棟において受信状況を確認する。

(6) 試験結果

ハイビジョン映像は、映像の遅延がない状態でモニタに表示された。



左側の HD モニタはハイビジョンカメラからダイレクトで映像を映し、右側の HD 波形モニタでループバックした映像を表示して画像遅延状況を確認



ループバックした映像において、色信号及び輝度に変動がないことを確認

第5章 試験結果を踏まえたミリ波帯高速無線伝送システムの評価等

ここでは前章までに示した検証試験の結果等を総合的に考察し、ミリ波帯高速無線伝送システムの有効性を評価し、実用化に向けた課題の整理を行うとともに技術的条件を提案する。

5. 1 電波伝搬特性試験結果に対する評価

5. 1. 1 降水強度等に関する試験結果の評価

(1) 降水強度に関する試験結果の評価

降水強度の測定は、雨滴計数型雨量計にて実施し、雨滴受水部の下にヒーターを配置することにより凍結防止と融雪効果による降雪量の測定を可能とした。

測定期間は、実測データに基づき降雨や降雪のイベント及び月間等单位で降水強度確率分布等を導出した。その結果に基づき従来からの実測データの充実している降雨及び実測データの少ない降雪それぞれに関し以下のように評価できる。

- 1) 総降雨量について、自治体データの値と比較し2～3割程度少ない結果が得られた。
これは、建物屋上に降雨量計を設置したため、高度と風による影響を受けて、特に降雪時の降雨量が低くなったと考えられたため、降雨・降水減衰に関するデータを取りまとめる際には、各対象期間の両者の総降水量の比（自治体データ／試験データ）を比較して、補正しデータをまとめた。
- 2) 降雨強度分布については、回線設計で基本とされる強雨期3か月データの半分の最大降雨強度45mm/h以下のデータであったが、測定全期間における降雨強度分布はM分布よりもガンマ分布に比較的よく近似できている。ここでガンマ分布を決定するパラメータの値は平均値及び標準偏差から統計理論的に計算されたものである。
- 3) 降雨と降雪を含む降水強度の確率分布の発表例は見られないが、本試験結果では降雨の場合と同じくM分布よりもガンマ分布に比較的よく近似できている。
- 4) 降水強度の確率分布は降水時を網羅する確率分布であるので、降水に原因する回線品質を直接評価するパラメータとなると思われるので、品質劣化の原因として降雪も考慮する必要のある回線では今後その分布形の検討が重要である。
- 5) 降雪にはみぞれや乾雪等いくつかの種類があるが、どの種類の降雪であってもその確率分布が公表された例を見ない。本試験で得られた全降雪を対象とした降雪強度分布と、降雪の統計量から計算された推定分布とを比較した結果によれば、降雪の場合も確率分布形はM分布よりもガンマ分布に近い傾向にある。

(2) 降水減衰に関する試験結果の評価

ここでは取得された降雨及び降雪減衰の確率分布に関する評価について取りまとめる。

- 1) 測定全期間における降雨減衰確率分布は、降雨強度の場合と同じく M 分布よりもガンマ分布への近似度の方が高い。しかし降雨強度の場合に比べて時間率の小さな領域で過大評価する等近似誤差が大きい。この原因の 1 つは降雨減衰が降雨強度のように確率分布の形状が滑らかに変化しないためと考えられる。すなわち降雨減衰に直接関係する降雨強度は伝搬路に沿って積分された積分雨量であり、これは地点で得られた降雨強度に比べて空間で降雨が一様に降らない効果によって降雨強度が飽和する傾向をもつと言われている。この影響が降雨減衰分布にも表れたものと考えられる。
- 2) 降雪による減衰分布については既述したように空間における降雪減衰以外にアンテナ表面での着雪による減衰が付加されるため、それを切り分けて単独で降雪減衰分布を導出することは不可能である。測定された降雪時の減衰分布によれば着雪を含む減衰が雪のすべての種類に対し 25dB を超えている。したがって、本測定のように着雪対策を施さない場合には容易に 30dB 程度の減衰を生じるということが明らかにできたと言える。

(3) 降水減衰係数に関する試験結果の評価

降水減衰係数の試験結果は、受信点における降水強度と降雨減衰量との相関関係及び両確率分布における等確率値を用いた関係によって評価した。本来降雨減衰に対応する降雨強度としては、伝搬路に沿った積分雨量（区間降雨強度と呼称される場合もある）であるが、今回の試験では降雨強度の測定は 1 地点であるためこの地点降雨強度を用いて評価した。

- 1) 周波数 83.5GHz での降雨減衰係数の実測値を得ることができた。
- 2) 降雨減衰係数は雨滴粒度分布の影響を受けるためイベント毎に異なった粒度分布による推定値に近似されている。しかし回線設計上は長期間の平均的な減衰係数を選ぶ必要があり、その点からは降雨強度が 15mm/h 程度までの弱い領域では J-D（霧雨）分布、それより強い領域では M-P 分布に近い傾向である。しかし今回の最大降雨強度 45mm/h やそれ以上の測定値のない領域では、近隣の測定地点と比較して補正された降雨強度データを用いた場合には、より減衰係数の小さな ITU 分布に近づくことが予測される。
- 3) 降雨強度の捕捉率を考慮して補正された降雨強度データを用いる場合には 15mm/h 以下の領域では補正前と同じ J-D 分布と考えてよいが、それ以上では ITU 分布に近い傾向となる。
- 4) 上記の傾向は弱雨では霧雨を対象とした雨滴粒度分布に基づく減衰係数、それ以上では平均的な降雨の雨滴粒度分布である M-P 分布さらに J-T（雷雨）分布に近づくという点で合理的な結果となっている。
- 5) 回線設計においては、降雨強度により雨滴粒度分布を変えるならば上記 3 種類の粒度分布形による減衰係数を用い弱雨時や強雨時の誤差を許容するならば平均的な M-P 分布または ITU 分布を統一的使用することにより設計できる。
- 6) 降雪減衰に関しては、80GHz 帯においてデータが取得された例は国内初であり、降雨の場合と同じく雪の粒度分布だけでなく雪の形状も一定しないこと及び降雪の種類により含水

率が変わり等価的な雪の誘電率が変わるため雪の種類により減衰係数が異なってくる。そのため物理的に減衰係数を求めることは困難であるので、ここでは実測値を用いて降雪減衰係数を求めることを中心とした。

- 7) この場合降雪減衰は簡易な降雨減衰の計算と同様に単位距離当りの減衰量について降雪強度 R を用いて γR^n の関数形 (γ 、 n は周波数等で決まる定数) で表わされるとし、当該周波数帯での γ 、 n を求めることとした。
- 8) 試験を行った 80GHz 帯での実測データは当然のこととして存在しないので、ここでは今回の試験場所の近郊にある長岡地区での 11~48GHz 帯の 4 周波数の実測データから各周波数における γ 、 n を求め、これを外挿する方法で仮に 80GHz 帯の減衰係数を提示した。結果的には、本試験の実測結果は比較的良好に推定結果と一致しているが、これは着雪減衰も含んだ結果であるので空間での降雪減衰はこれよりも小さいものと推定される。
- 9) しかしながら長岡の測定データに関しても着雪による補正を行った形跡がないので着雪減衰込みの結果と推測される。したがって、回線設計上は着雪込みの推定値としてこの式 ($\Gamma = 2.475R^{0.916}$) を活用する方法も考えられる。

5. 1. 2 検証システムに関する評価

検証システムは、試験結果を踏まえ以下のとおり評価できる。

(1) 無線設備の安定性

検証試験の測定期間は平成 21 年 10 月 28 日から平成 22 年 1 月 19 日までの約 3 か月 (83 日間) であり、この間無線設備の故障等はなく、安定して動作していることが認められた。

(2) 回線の安定性

表 5-1 の利用想定による距離評価について、モデル伝搬路における定常受信電力と許容不稼働時間率における降雨減衰量を求めることにより計算した結果、不稼働率 0.004%/年の回線規格を満足できる距離は 1km 程度 (計算上 1.1~1.2km) であり、不稼働率 0.03%/年の回線規格を満足できる距離は 2km 程度であることが分かる。

計算では、検証システムの無線設備の特性並びに電波法関係審査基準で用いられている 20GHz 帯での降雨減衰推定法及び回線設計法を基本とし、さらに実測された降雨減衰係数を使用している。

なお、本計算上は、降雪は降雨とみなし、アンテナ着雪の影響は考慮していない。

表 5 - 1 利用想定

不稼働率	回線規格	備考
0.004%/年	BER=10 ⁻⁴ 許容時間率 0.004%/年	22GHz 帯電気通信事業用 FWA と同率

0.03%/年※	BER=10 ⁻⁴ 許容時間率 0.03%/年	18GHz 帯公共業務用 FWA が 0.04%/年以下、 23GHz 帯 CATV 放送中継用無線局が 0.05%/年 以下とされている
----------	---------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------

※20GHz 帯での回線設計法で計算可能な上限値

モデル伝搬路における定常時受信電力及び許容不稼働時間率における降雨減衰量の計算過程は、以下のとおりである。

1) モデル伝搬路における定常時受信電力

ここでは周波数 80GHz 帯を用いた距離別のモデル伝搬路において表 5-2 の方式諸元を用いた時の定常時受信電力と測定マージン(最小受信電力に対するマージンをいう。以下同じ。)等の計算値を表 5-3 に示す。計算では、距離により測定マージンは約 25~33dB である。

表 5-2 ミリ波高速無線伝送システムパラメータ

周波数	中心周波数 83.5GHz
空中線電力	100mW (20dBm)
空中線利得	44dB
送受給電損失	3dB (試験距離(1.39km)の時の定常時受信電力 (-27dBm:実測値) から逆算)
最小受信電力*	-57dBm
回線規格	<ul style="list-style-type: none"> • BER=10⁻⁴許容時間率 0.004%/年 • BER=10⁻⁴許容時間率 0.03%/年

※最小受信電力は、試験に基づく数値 (-57.0dBm) とする。

表 5-3 モデル伝搬路における定常時受信電力

項番	項目	計算値			
1	中心周波数	83.5GHz			
2	距離	2.0km	1.5km	1.0km	0.8 km
3	送信出力(最大値)	20dBm			
4	送受アンテナ利得	44dB×2			
5	送受給電損失	3dB (実測値からの逆算値)			
6	自由空間損失	136.9dB	134.4dB	130.9dB	128.9dB
7	定常時受信電力	-31.9dBm	-29.4dBm	-25.9dBm	-23.9dBm
8	最小受信電力	-57.0dBm			
9	測定マージン	25.1dB	27.6dB	31.1dB	33.1dB

2) モデル伝搬路回線品質の評価

上記3つのモデル伝搬路における降雨減衰分布を資料編第2章に示した現状の20GHz帯審査基準における推定法を基準として導出し、許容不稼働時間率における降雨減衰量を求めることにより回線品質を評価した。

各モデル伝搬路について回線不稼働となる時間率における降雨減衰量の計算結果と、測定マージンとの比較結果を表5-4に示す。

表5-4 モデル伝搬路における回線品質

【不稼働時間率0.004%/年の場合】

不稼働時間率	0.004%/年		
距離	1.5 km	1.0 km	0.8 km
降雨設計値(0.0075%値)	90 mm/h		
強雨期等価月数	3ヶ月		
降雨減衰パラメータ： γ	1.21		
降雨減衰パラメータ： n	0.772		
降雨減衰係数 ($\equiv \gamma R^n$)	39.0		
形状関数値($p=0.004\%$)	0.81038		
一様降雨補正係数： K_p	0.874	0.896	0.91
規格確率降雨減衰量	41.4dB	28.3 dB	23.0dB
測定マージン	27.6dB	31.1dB	33.1dB
回線品質判定	×	○	○

【不稼働時間率0.03%/年の場合】

不稼働時間率	0.03%/年		
距離	2.0 km	1.5 km	1.0 km
降雨設計値(0.0075%値)	90 mm/h		
強雨期等価月数	3ヶ月		
降雨減衰パラメータ： γ	1.21		
降雨減衰パラメータ： n	0.772		
降雨減衰係数 ($\equiv \gamma R^n$)	39.0		
形状関数値($p=0.03\%$)	0.319		
一様降雨補正係数： K_p	0.886	0.901	0.918
規格確率降雨減衰量	22.0dB	16.8dB	11.4 dB
測定マージン	25.1dB	27.6dB	31.1dB
回線品質判定	○	○	○

【参考】

計算上、通信可能な最大距離は 2.3km である。

※降雨減衰量は、モデル伝搬路における降雨減衰分布を資料編第 2 章に示した現状の 20GHz 帯審査基準における推定法を基準として導出。

計算に用いた降雨等の条件は以下に示すとおり。

- 1) 降雨強度確率分布の分布形は現状審査基準と同じガンマ分布とする。
- 2) ガンマ分布の形状パラメータは現状の 20GHz 帯審査基準と同じく $\nu = 0.0075$ となる。
- 3) 降雨設計値（強雨期 3 ヶ月の 0.0075% 値）は日本における標準値の 90mm/h とする。
- 4) 年間分布推定に必要な強雨期と等価な月数は 20GHz 帯審査基準と同じく 3 か月とする。
- 5) 降雨空間相関関数は短距離区間に適合する $\rho = \exp(-0.25\sqrt{d})$ とする。〈d: 距離〉
- 6) したがって、一様降雨補正は上記降雨空間相関関数に基づく 20GHz 帯審査基準によるとする。
- 7) 降雨減衰係数は実測結果を平均的に近似できる M-P 法とする。 $\gamma = 1.21$ 、 $n = 0.772$
- 8) 0.004%/年間及び 0.03%/年間の時間率の降雨減衰量を求め降雨マージンと比較

(3) アンテナ着雪対策の有効性の評価

降雪時には、降雪による減衰のほかに、アンテナ面への着雪の減衰が 5~10dB 程度推測されるので、降雪地域ではアンテナへの着雪対策等を行うことが回線品質の向上に寄与でき、有効であると評価できる。

5. 1. 3 周波数の共用検討

(1) 検討条件

干渉局が 1 局の場合を想定し、以下の条件で干渉計算を検討する。

1) 検討周波数

見通し伝搬路の場合の定常時伝搬損失（自由空間伝搬損失）は低い周波数の方が小さいことから、干渉条件が厳しい場合について検討するために検討周波数は 70GHz 帯 (73.5GHz) とする。

2) 干渉雑音配分値

本システムの熱雑音電力は、所要 C/N を 16dB（20GHz 帯の回線設計で用いる所要 C/N と同様）として計算し -73dBm とする。干渉雑音電力に対しても同様の値を許容すると考え、干渉雑音電力の許容値も -73dBm とする。したがって、干渉雑音も含めた総合雑音電力は -70dBm となり、この場合の最小受信電力は所要 C/N が 16dB であることから、-54dBm となる。

3) アンテナ指向特性

本システムの 70GHz 帯アンテナ指向特性を図 5-1 に示す。

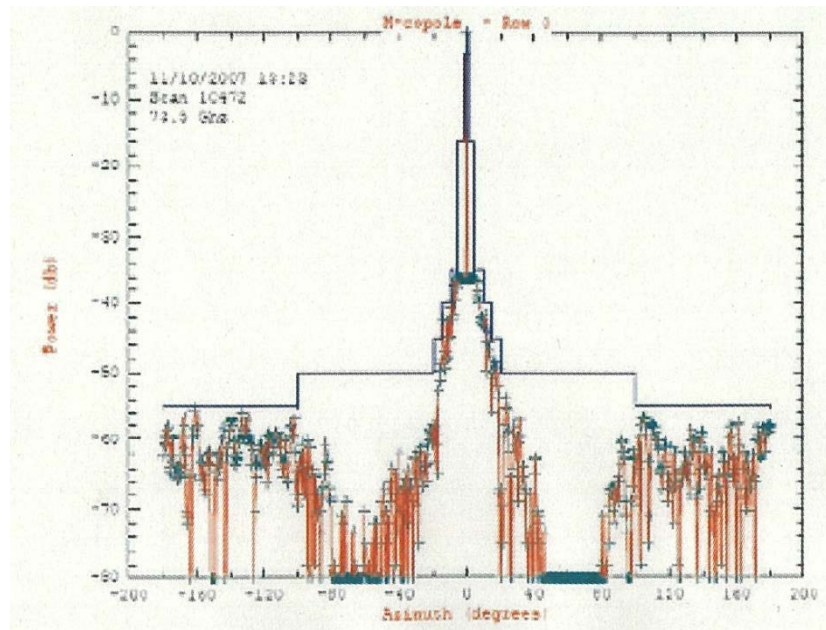


図5-1 アンテナ指向特性

米国における本システムのアンテナ指向特性に対する規格としては3dBビーム幅が1.2°以下であり、広角指向特性については、表5-5のようになっている。実際のアンテナ指向特性は下記の規格値より良い特性になっているが、以下の干渉検討においてはこの規格値を用いる。

表5-5 広角指向特性

角度 (deg.)	相対利得 (dB)
1.2~5	-15.6
5~10	-35
10~15	-40
15~20	-45
20~100	-50
100~180	-55

4) 干渉波伝搬路

干渉局から被干渉局へ到達する干渉波の伝搬路については、実際には干渉局と被干渉局との間に障害物が存在するケースが多いと予想されるが、ここでは干渉波伝搬路として自由空間伝搬路の場合について検討する。また、干渉局アンテナの指向方向については被干渉局に指向している干渉条件が厳しい場合とオフビームしている場合について検討する。

(2) 計算方法

被干渉局において受信される干渉波受信電力と伝搬損失の関係は次式で表される。

$$L = P_{0i} + G_i - G_r - L_f - P_r \quad (5-1)$$

- L : 伝搬損失 (dB)
- P_{0i} : 干渉局送信電力 (20 dBm)
- G_i : 干渉局アンテナ指向利得 (最大 43.6 dBi 被干渉局の方向により変化する)
- G_r : 被干渉局アンテナ指向利得 (最大 43.6 dBi 干渉局の方向により変化する)
- L_f : 送受総合給電損失 (2.3 dB)
- P_r : 被干渉局における許容干渉波受信電力 (-73 dBm)

干渉局～被干渉局間の伝搬距離は次式から求められる。

$$d = \lambda / (4\pi) \times 10^{(L / 20)} \quad (5-2)$$

- d : 干渉局～被干渉局間伝搬距離 (m)
- λ : 波長 (0.0041m)

計算方法としては上記の式(5-1)より許容干渉電力 P_r が-73dBm となる伝搬損失を求め、次に式(5-2)より伝搬距離を求めることになる。

(3) 検討結果と考察

検討結果を、図 5-2 に示す。この図の右欄に記載されている角度は干渉局アンテナ指向方向と被干渉局方向との角度差である。

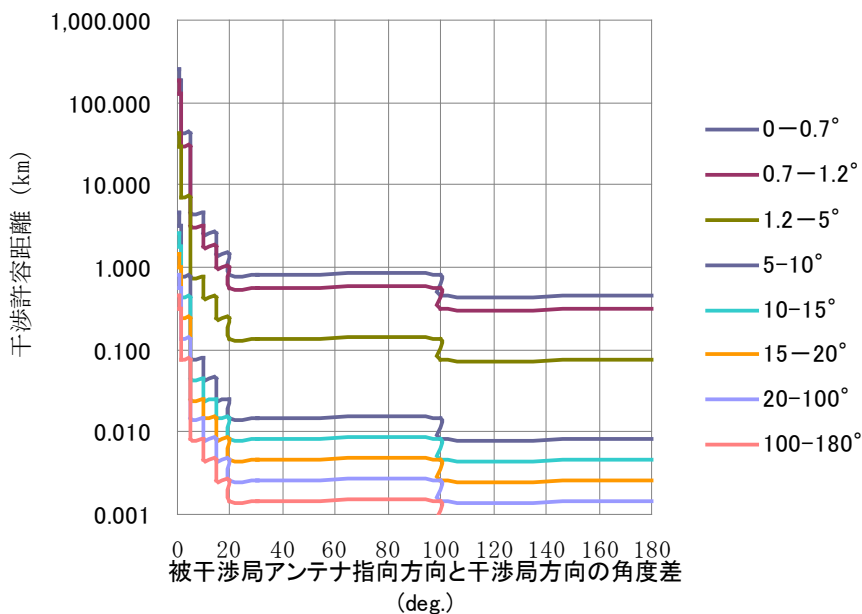


図 5 - 2 干渉許容距離特性

図 5-2 より、干渉局アンテナが被干渉局に対して 10 度以上オフビームして、また被干渉局アンテナの指向方向と干渉局との方向が 20 度以上であれば、干渉許容距離としては 10m 未満となり、この程度離れていれば干渉しないことが分かる。

5. 2 今後の検討課題

5. 2. 1 降雨減衰評価に関する課題

降雨減衰関連の評価に必要となる検討課題には以下の項目が考えられる。

- (1) 降雨強度確率分布形
既存のガンマ分布、M 分布、あるいはその他の分布の適用の妥当性について更なるデータの蓄積が必要
- (2) 確率分布決定パラメータの導出法
解析法として統計量パラメータの導出、回帰法として 2 点近似、あるいは漸近近似とするか等の検討
- (3) 降雨設計値
近年の降雨状況（強雨化）の考慮の妥当性に関する検討
- (4) 降雨設計値の時間率
既存強雨期 3 か月 0.0075% 値 / 年間 0.001% 等の評価法見直しに関する検討
- (5) 一様降雨補正係数
短距離回線の場合の補正の妥当性の検討
- (6) 降雨空間相関関数
既存方法では指数の 1 乗又は 0.5 乗で考慮されているが、特に 1km 以下の場合のデータは稀少であるため、短距離回線のデータの蓄積が必要
- (7) 降雨減衰係数
降雨強度に依存しての雨滴粒度分布使い分け（平均的な M-P 又は ITU 分布使用の妥当性）に関する検討
- (8) 減衰分布の確率の低い領域での飽和現象の定量化
降雨減衰の限界値についてデータの蓄積とそれに基づいた定量化を検討

5. 2. 2 降雪減衰評価に関する課題

限られた地域となるが、降雪減衰関連の評価に必要となる検討課題には以下の項目が考えられる。

- (1) 降雪強度確率分布形
降雨の場合と同様に既存のガンマ分布、M 分布、あるいはその他の分布の適用の妥当性について更なるデータの蓄積が必要

(2) 降雪強度分布の確定法

解析法として統計量パラメータの導出、回帰法として2点近似、あるいは漸近近似とするか等の検討、特に、みぞれ発生確率や形状パラメータの検討

(3) 雪の種類による減衰の評価

最大減衰となるみぞれで評価することの妥当性に関する検討

(4) 降雪減衰係数

既存測定結果からの外挿式を使用することの妥当性に関する検討

(5) 着雪を含まない降雪減衰の評価

アンテナ着雪軽減対策の有無により区別した機器を並列する等の試験による、より精度の高いデータ取得の検討

(6) 有効なアンテナ着雪軽減対策の検討

レドーム、撥水剤塗装、ヒーター設置等によるアンテナ着雪軽減対策の検討

5. 2. 3 ミリ波帯高速無線伝送システムの課題

(1) 回線品質の向上等に関する課題

1) ネットワークを構成する場合は、総合的な回線品質を向上させるため、また、通信の途絶をできる限り避ける工夫として、メッシュ化、ループ化、冗長化が求められる。

2) 通信距離を延長したい場合は、さらに高利得な空中線を使用することや多段中継を行うことが求められる。

高利得の空中線の利用は、同一の通信距離における回線品質の向上にも有効である。

3) 降雪の多い地域では、アンテナ表面への着雪防止や、機器取付け位置の工夫が必要である。

具体的な対策としては、通信に支障の出ない範囲でアンテナへのフードや、屋根の設置又は壁面への取り付け等を行うことや、アンテナ裏面へのヒーター取り付け、アンテナ表面への撥水剤塗布等が有効である。

(2) システムの高度化等の課題

以下のような技術が導入されれば、システムの通信距離の延長、伝送容量の増大など、システムの高度化が図れると考える。

1) 変調方式については、検証システムではASK(00K)変調が用いられているが、一般的にPSK変調等よりも所要C/Nが大きい傾向にあるので、PSK/多値化のような変調方式等の採用が行われれば、安定度や通信速度も向上する。

2) 雑音の影響をさらに小さくできる部品の技術開発等が進めば、雑音指数等を逡減させることにより最小受信電力を低下でき、より不稼働率の小さな高品質回線が構築できる。

3) 直交する偏波を共用するアンテナを用いた偏波ダイバーシチを採用できれば、より高品質な回線が構築できる。

(3) 測定機器等の開発

現在、本周波数帯の周波数及び空中線電力等を直接測定できる測定器の用意は困難であるので、将来的な技術開発動向にもよるが、当面は、以下のような簡便な測定方法で行うことが考えられる。

- 1) 周波数及びスプリアス測定については、ヘテロダイン測定法でダウンコンバートして測定するほか、周波数については、プリスケラ（分周器）で周波数を一定程度低減して測定することにより、10GHz 以下が測定可能なカウンタで対応が可能である。
- 2) 空中線電力については、平均電力から逆算することで求めることが考えられる。
- 3) スプリアス測定については、将来は広帯域なスペクトルアナライザ等の開発が望まれる。現在、79G 帯レーダの開発動向に併せて、80G 帯の測定が可能な測定器の製品化が期待されている。

(4) 制度上(電波監理上)の課題

- 1) ミリ波帯高速無線伝送システムは、検証システムでは 100mW の空中線電力を使用しており、試験結果を踏まえると、特定小電力設備として制度上認められる 10mW 以下の低出力では用途や伝送距離が非常に制限されるので、同システムの制度化にあたっては無線局の免許取得を前提とすることが適当である。

しかし、現在、免許不要となる空中線電力の上限を緩和する電波法改正の動きがあることから、同システムの普及促進を図る観点からは免許不要となることが望まれるので、今後、さらに技術的な検討を進める必要がある。

- 2) ミリ波帯高速無線伝送システムは、指向性の鋭い空中線を使用することによりビーム幅が十分に狭いものとなりシステム相互の干渉が少ないこと、各家庭で一般的に使用するなどの大量流通は見込まれないこと、システムの設置が比較的簡易で、移動も容易な形態であることから、表 5-6 のような固定する無線局としての利点もあり、干渉による混信保護について一定の配慮を要するが、当面は、移動する無線局として運用を行うことが望ましい。

また、上記の内容から、複雑な事前の運用調整等は要しないものとするのが適当である。

表 5-6 固定する無線局と移動する無線局の比較

項目	固定する無線局	移動する無線局
一般的運用形態	想定される	想定される
無線局の目的に照らした混信保護の必要性	電気通信事業用の場合等は、固定する無線局として回線設計のもとで周波数共用に伴う混信に対する保護を受ける選択肢もある	周波数共用に伴う混信に対する保護は得られない
他の類似システムと比較	電気通信業務用のエントランス回線に利用されている形態がある	FWAで利用されている形態がある

手続上考慮すべき事項	移動する無線局と比較して申請に必要な諸元が多い	固定する無線局と比較して申請に必要な諸元は少ない
------------	-------------------------	--------------------------

3) ミリ波帯高速無線伝送システムの利用については、自営通信、電気通信事業、放送事業など幅広い分野で様々な利用形態が想定されることから、無線局の用途については、これらの業務を含む幅広い使用を可とすることが求められる。

4) 電波法第 56 条に定める電波天文業務の用に供する受信設備との関係において、電波天文業務の保護の観点から、電波天文業務の用に供する受信設備として指定を受けている受信設備であって、受信しようとする電波の周波数に 81GHz から 86GHz までの周波数が含まれる電波天文業務を行う観測所の設置場所周辺で運用する場合等は、同受信設備の可視範囲に持ち込まない等、免許に当たっての条件を検討すべきであろう。

なお、現在、受信周波数 80GHz 以上のミリ波帯の指定を受けている電波天文業務の用に供する受信設備の設置場所等は、表 5-7 のとおりである。

表 5-7 電波天文業務の用に供する受信設備の設置場所等 【平成 22 年 3 月現在】

総務省告示番号	設置者	設置場所	受信周波数帯
第 287 号 H15. 4. 4	大学共同利用法人 自然科学研究機構	長野県南佐久郡 南牧村野辺山 462-2	86GHz から 92GHz
第 197 号 H14. 4. 1	大学共同利用法人 自然科学研究機構	鹿児島県鹿児島市 平川町字狐迫 2155	86GHz から 92GHz
第 51 号 H18. 1. 25	大学共同利用法人 自然科学研究機構	① 岩手県水沢市星ヶ丘町 2-12 ② 東京都小笠原村父島字 旭山 ③ 鹿児島県薩摩川内市入 来町裏之名 4018-3 ④ 沖縄県石垣市登野城嵩 田 2389-1	85. 5GHz から 92GHz

5. 3 ミリ波帯高速無線伝送システムの技術的条件の提案

検証試験の結果と評価を踏まえ、ミリ波帯高速無線伝送システムの制度化に向けて以下に技術的条件を提案する。

ただし、提案の技術的条件は、現段階において諸条件を踏まえたものであり、今後の技術開発動向や諸条件等により変更もありうることを申し添える。

(1) 周波数等

1) 周波数

周波数については、ミリ波帯の周波数利用状況を踏まえ、現在未利用周波数帯の中で一定の占有周波数帯幅の確保が可能であり、また、検証試験の結果から、中心周波数 73.5GHz 及び 83.5GHz の周波数が適当である。

周波数の許容偏差については、既に実用化されている 18GHz 帯の周波数の電波を使用する陸上移動業務用の無線局と同様の用途が想定されるので、同無線局と同等である 50×10^{-6} とすることが適当である。

2) 電波型式

電波型式については、検証システムは ASK (OOK) 変調を使用しており、K1D 又は A1D いずれかが考えられるが、制度化に際しては、PSK 変調等の導入等を考慮して、柔軟に対応できることが望まれる。

3) 占有周波数帯幅

占有周波数帯幅については、検証システムは中心周波数 73.5GHz が 4.95GHz、同周波数 83.5GHz が 3.66GHz 必要としているが、制度化に際しては、PSK 変調や多値化を考慮して対応することが望まれる。

4) 空中線電力

空中線電力については、降雨・降雪減衰等の検証試験の結果を踏まえ、屋外で比較的短距離間において光ファイバ相当の高速伝送を行う利用形態や、当該周波数帯における電力増幅器の開発・普及状況、今後のシステムの普及等を併せて考慮し、100mW 以下とすることが適当である。

(2) スプリアス発射の強度の許容値

スプリアス発射の強度又は不要発射の強度は、無線設備規則の一般則を適用することが適当（スプリアス領域の不要発射の強度 $50 \mu\text{W}/\text{MHz}$ 以下、帯域外領域のスプリアス発射の強度 $100 \mu\text{W}/\text{MHz}$ 以下）と考える。

(3) 空中線の特性等

送受信空中線は、システム相互の干渉を少なくするため指向性の鋭いものが求められ、また、利用形態による距離の回線を構成する必要があることから、その絶対利得が 40 デシベル以上を有する指向性空中線であることが望ましい。

第6章 ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策及び普及への課題

6.1 ミリ波帯高速無線伝送システムの利点と利用方策

6.1.1 ミリ波帯高速無線伝送システムの利点

ミリ波帯高速無線伝送システムの利点は、以下のものが考えられる。

- (1) 有線回線を敷設することが困難な河川や山間部などの自然環境的制約を解消する高速通信手段として、また、国立公園等の法令的制約を解消する手段として非常に有効であると考えられる。
- (2) 自然環境や法令的制約により有線回線の設置が困難なエリアにおける解消手段のほか、有線回線の設置では採算が取れない地域ネットワーク末端の代替手段、無電柱エリアへのネットワーク整備手段として有効である。
- (3) 周波数帯が高いことから空中線を含む無線設備の小型化が図れ、低消費電力とすることが可能である。
- (4) 自営LANの張り出しのような場合等は、対応するハードウェア、ソフトウェアが削減され、それによりシステムのコストダウンも可能となる。
- (5) ハイビジョン伝送においては、コーデック不要に伴う全体のコストダウンも期待される。

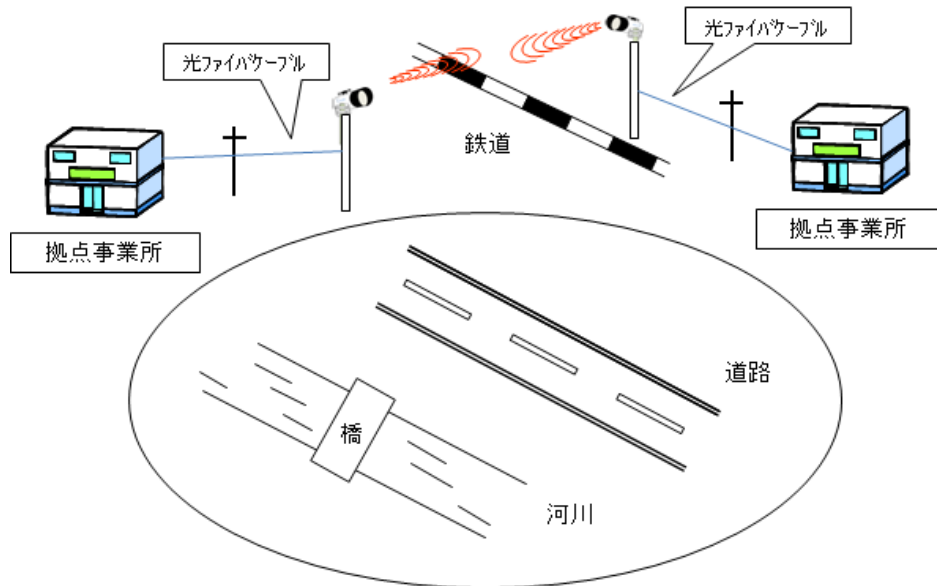
6.1.2 利用方策の提案

ミリ波帯高速無線通信システムについては、以下の利用が考えられる。

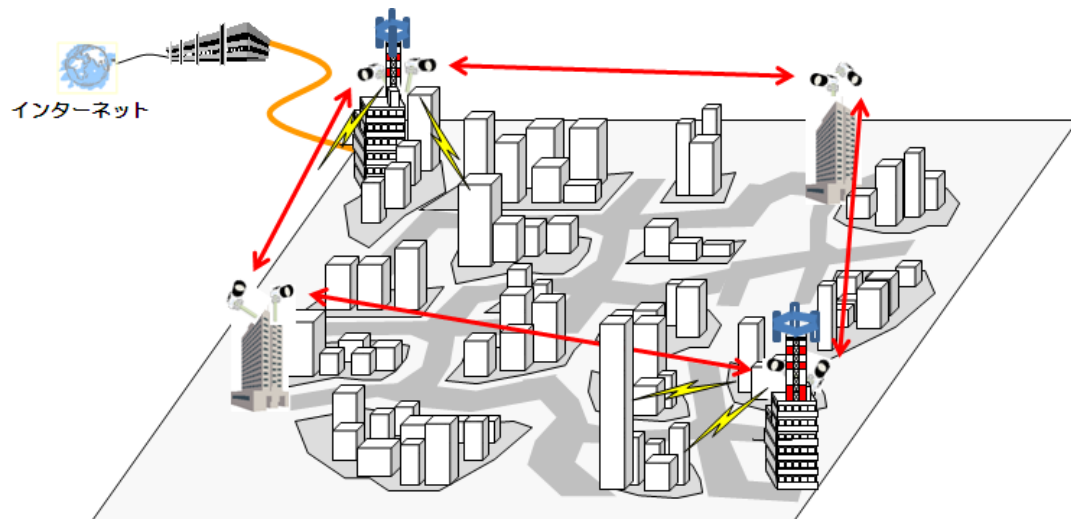
(1) 基幹ネットワークの補完的な利用

光ファイバ幹線の敷設に当たり、自然環境や法的認可取得が困難な地域等における河川・鉄道、入り江等の横断、島しょ地域、国立公園等山間地等における伝送回線（イメージ1）、山間過疎地等に設置された辺地共聴施設の受信点からの集落内有線電気通信設備への引き下ろし幹線代替え等利用や、比較的短距離の携帯電話・WiMAX 基地局・FWA（固定無線アクセス）等へのバックホール回線（基幹ネットへ接続するための回線：イメージ2）が考えられる。

イメージ1 河川・鉄道、入り江等の横断、島しょ地域、国立公園等山間地等における伝送回線



イメージ2 携帯電話・WiMAX 基地局・FWA のバックホール回線

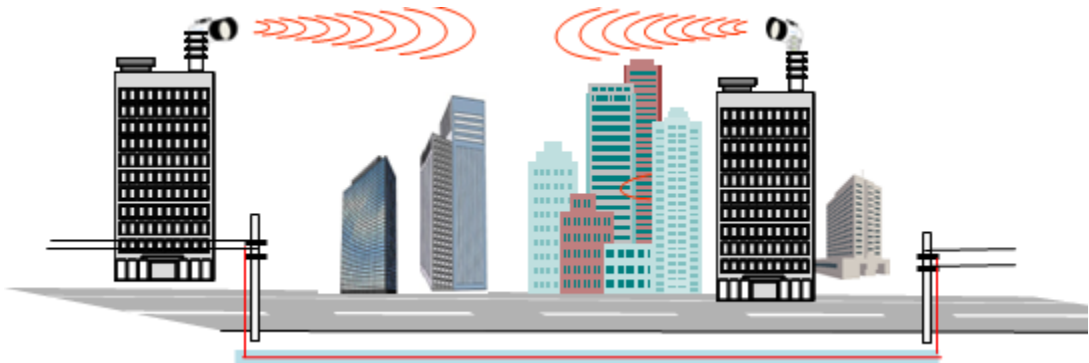


(2) (1) 以外のラストワンマイル等の利用

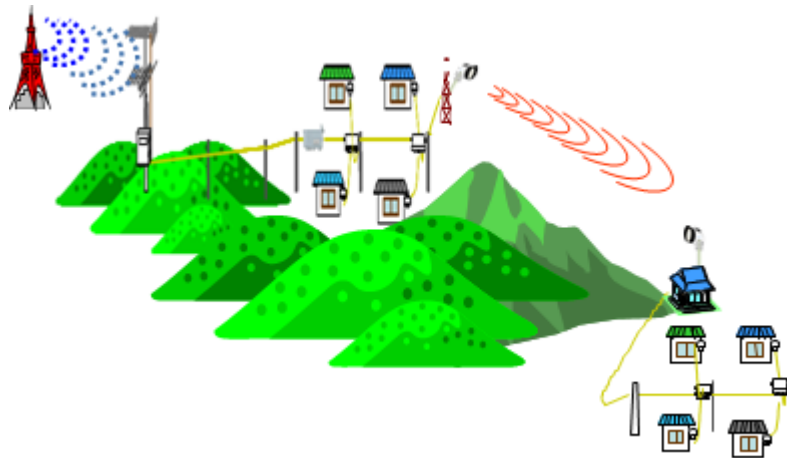
上記(1)以外のネットワークのラストワンマイルにおいて、自然環境等により光ファイバ等の敷設が困難な地域や光ファイバの敷設が高コストとなる地域の対策用に、無電柱化された都市部地域においてネットワークにつながったマンション・ビルなどの建築物か

らネットワークから途絶された建築物に向けた通信回線（イメージ3）や、河川・鉄道等地形的に光ファイバの敷設が困難な LAN の張出部分における通信回線又は辺地共聴施設の受信点設置に代え、隣接共聴施設からの延長幹線利用（イメージ4）が考えられる。

イメージ3 ネットワークにつながったマンション・ビルなどの建築物からネットワークから途絶された建築物に向けた通信回線



イメージ4 辺地共聴施設の受信点設置に代え、隣接共聴施設からの延長幹線利用

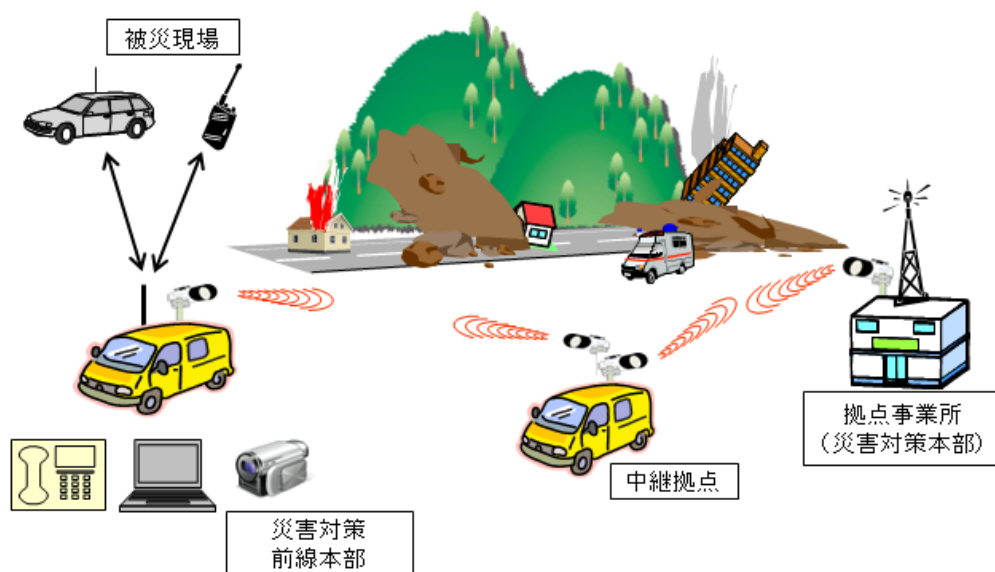


(3) テンポラリー（一時的）利用

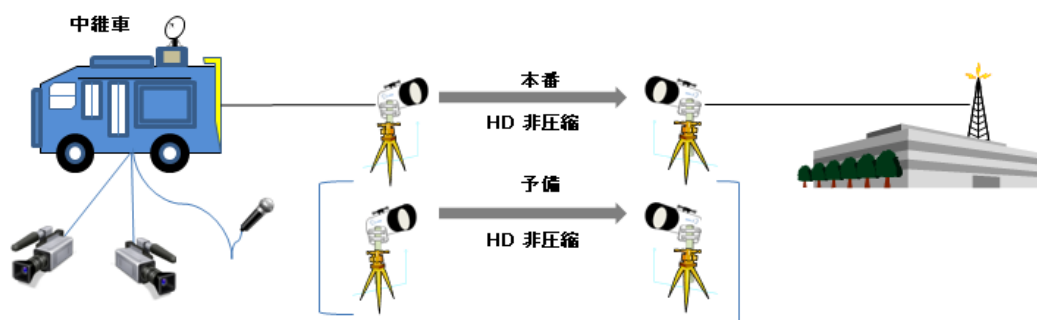
このほか、非常災害時の臨時ルートの確保のための応急回線（イメージ5）、被災現場・孤立集落から災害対策本部等まで又は被災現場等間の映像及びデータ伝送（自営 LAN の張出）回線等、非常災害時における緊急の回線構築に係る利用や、光ファイバ工事に伴う一時的な通信回線、大規模イベントでの主催者又は参加者に必要な通信用回線など非常災害時以外の短期的な利用も考えられる。

また、放送局が行う、光ファイバが敷設されていない屋外イベント会場等からの、リアルタイムの放送中継回線（イメージ6）としての利用も考えられる。

イメージ5 非常災害時における緊急の回線構築



イメージ6 屋外イベント会場等からの遅延ゼロ（リアルタイム）の放送中継回線



6. 2 普及への課題

- (1) 光ファイバと比較して、システム設置等を含めた機器購入費及びランニングコストが安価であることが普及するためには重要である。
- (2) 機器の設置に当たっては、ネットワーク等との中継接続が容易であるとともに、システム全体に係る機器操作が容易であることが求められる。
- (3) インタフェースが汎用であり、比較的安価であることが求められる。
- (4) テンポラリー（一時的）利用にあたっては、上記各項目とともに、迅速なシステム構築が可能であることや、できる限り小型・低消費電力システムで多様な電源システムに対応できることが求められる。

あとがき

本調査検討会は、電波伝搬特性としての減衰率が大きく、比較的限られた分野での利用となっていた 70/80GHz 帯ミリ波帯周波数に着目し、現状、数 GHz 幅の大きな未利用帯域である周波数の活用方策について、管内でも有数の豪・多雪地域である新潟県内での伝搬試験を実施し、その結果により、比較的短距離区間で光ファイバ相当の伝送容量を持つミリ波帯高速無線伝送システムの具体的な利用モデルの提案を行った。

幹線系システムにおける 1Gbps を超える高速無線伝送のニーズは非常に高く、これまでも種々の周波数帯域における伝送システムの検討が実施されてきた。しかしながら、高速大容量を目標にすれば伝送距離が短くなり、伝送距離を長くすれば高速大容量伝送が困難となるなど、幹線系で 1Gbps を超える高速無線伝送システムの実用化には至っていない現状がある。

今回、新潟県上越市で実施した検証試験では、晩秋から冬季にかけた期間の中で、一般的な降雨減衰のデータの他、現地でも十数年ぶり的大雪という巡り合わせにより、アンテナ着雪や雪質（湿雪／乾雪）による減衰率の違いも明らかとなるなど、今後の高速無線伝送システムの実用化に向けた貴重な分析結果が得られた。

この周波数帯における降雪時のデータは国内外で殆ど得られていないので、今後、他の地域で運用する際にも参考となると考えられる。

今後は、得られた検証結果に基づく、システムの実用化を期待するものであり、広範な分野でミリ波帯高速無線伝送システムの導入が進展することを願うものである。

最後に、本報告書の取りまとめにあたり、委員、作業部会員をはじめ、オブザーバ等関係各位に多大なご協力をいただいたことに、あらためて感謝申し上げたい。

資料編

目 次

1	ミリ波帯基本伝搬特性	1
1. 1	気体分子吸収	1
1. 1. 1	酸素による吸収	1
1. 1. 2	水蒸気による吸収	2
1. 2	降雨時伝搬特性	3
1. 2. 1	降雨減衰量と降雨強度の基本計算式	3
1. 2. 2	減衰断面積	4
1. 2. 3	雨滴粒度分布	5
1. 2. 4	降雨減衰係数	6
1. 3	降雪による電波の減衰	9
1. 3. 1	降雪減衰に影響するパラメータ	9
1. 3. 2	降雪の種類	9
1. 3. 3	雪片の形状と大きさ	9
1. 3. 4	雪片粒度分布	10
1. 3. 6	雪片の体積含水率 ¹²⁾	10
1. 3. 7	雪片の誘電率 ¹²⁾	11
1. 3. 9	降雪落下速度 ¹³⁾	11
1. 3. 10	降雪減衰量	12
1. 3. 11	降雪減衰の簡易計算式	12
1. 3. 12	降雨減衰対応簡易計算式	13
1. 3. 13	みぞれの10分降雨強度分布の0.01%値	15
1. 3. 14	アンテナへの着雪の影響	16
1. 4	霧による減衰	16
1. 5	フェージング特性	17
1. 5. 1	ダクト型フェージング ²²⁾	17
1. 5. 2	到来角変動 ²³⁾	17
1. 6	反射・透過・遮蔽特性	18
2	降雨領域回線品質評価法	19
2. 1	降雨領域回線品質評価法の概略	19
2. 1. 1	降雨領域回線品質評価の位置付け	19
2. 1. 2	審査基準 ²⁴⁾ 降雨減衰の評価方法	19
2. 1. 3	審査基準降雨減衰推定法の基本	19
2. 2	ガンマ分布による降雨減衰分布推定法	20
2. 2. 1	ガンマ分布を用いた降雨減衰分布	20

2. 2. 2	任意確率における降雨減衰量	21
2. 3	審査基準降雨減衰推定法	22
2. 3. 1	電気通信用 11/15GHz 帯デジタル方式	22
2. 3. 2	20GHz 帯デジタル方式	24
2. 3. 3	両周波数帯推定法の比較	25
3	ミリ波帯高速無線伝送システム試験結果	26
3. 1	データ処理結果に関する考え方	26
3. 1. 1	電波伝搬特性試験について	26
3. 1. 2	Ping 伝送試験について	26
3. 2	降水強度関係測定結果	27
3. 2. 1	降水強度自己相関	27
3. 2. 2	降雨強度継続時間	29
3. 2. 3	降水強度変化速度確率分布	31
3. 2. 4	降水強度確率分布	33
3. 2. 5	降雨強度確率分布	34
3. 2. 6	降雪強度確率分布	35
3. 3	降水減衰関係測定結果	37
3. 3. 1	降水減衰継続時間累積発生回数	37
3. 3. 2	降水減衰変化速度分布	38
3. 3. 1	降水減衰確率分布	40
3. 3. 2	降雨減衰確率分布	41
3. 3. 3	降雪減衰確率分布	42
3. 4	各データからの相関関係	44
3. 4. 1	降水強度と降水減衰との相関関係	44
3. 4. 2	降雨強度と降雨減衰量との相関関係	45
3. 4. 3	降雪強度と降雪減衰量との相関関係	48
3. 4. 4	降雨強度と受信電力から変換された BER との相関関係	52
3. 4. 5	降雪強度と受信電力から変換された BER との相関関係	53
3. 5	気温・湿度等の観測結果	54
3. 5. 1	気温の観測結果	54
3. 5. 2	湿度の観測結果	55
3. 5. 3	水蒸気吸収累積分布	56
3. 6	Ping 伝送試験結果	57
4	ミリ波帯高速無線伝送システム試験結果の考察	68
4. 1	測定装置の安定性	68

4. 1. 1	各測定装置のデータ取得率	68
4. 1. 2	安定時受信電力の日変化特性	68
4. 2	降水強度関係測定結果の考察	69
4. 2. 1	周辺地域降雨データとの比較	69
4. 2. 2	降水強度確率分布形の考察	72
4. 3	降水減衰関係測定結果の考察	76
4. 3. 1	降水減衰確率分布形の考察	76
4. 3. 2	降水減衰係数に関する考察	77
4. 4	Ping 伝送試験結果の考察	77
5	参考文献	78
6	設置要綱、構成員名簿及び経過報告	80
6. 1	調査検討会設置要綱	80
6. 2	実用化検討部会設置要綱	81
6. 3	調査検討会構成委員名簿	82
6. 4	実用化検討部会構成委員名簿	83
6. 5	経過報告	84
7	用語解説	85

1 ミリ波帯基本伝搬特性

ミリ波帯を屋外環境で使用する場合に問題となる対流圏大気をもたらす気象現象の影響を中心に基本伝搬特性を以下に概括する。ここでは伝搬試験が降雪地帯で冬季に実施されることを考慮して、降雨減衰に比して検討されることの少ない降雪減衰特性についてはやや詳細に取りまとめている。

1. 1 気体分子吸収

電磁波は対流圏に存在する多くの大気ガスによって吸収される。このうちミリ波帯においては図1-1に標準的な大気による電波の吸収特性¹⁾を示すように酸素分子と水蒸気による特定周波数における吸収が顕著であり、その他の気体分子による吸収はこの2つにマスクされてその影響は無視することができる。したがって、ここでは以下に酸素分子と水蒸気による吸収特性に限って取りまとめる。

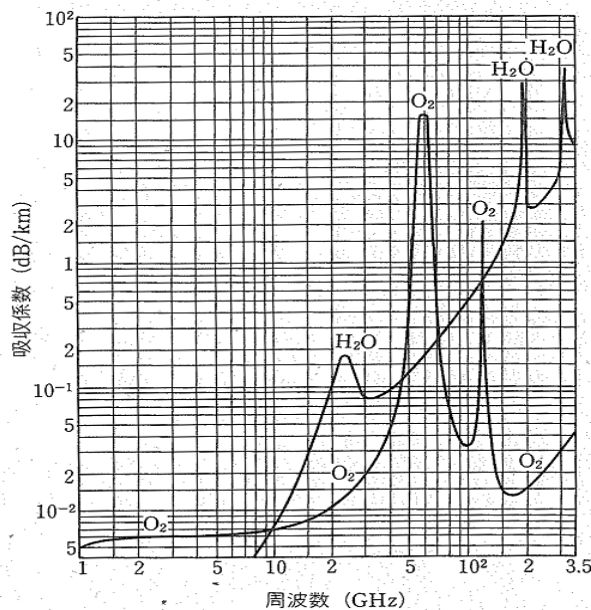


図1-1 大気ガスによる吸収係数

気圧：1、013hPa、気温：15℃、水蒸気量：7.5g/m³

1. 1. 1 酸素による吸収

酸素分子は、図1-1からも明らかなように、60 GHz 近傍に多数の吸収線からなる吸収帯と118.75 GHz に吸収線をもっている。大気中の酸素分子の吸収係数は、これらの吸収線の寄与に非共鳴吸収項からの寄与を加えて計算できる。図に示した酸素吸収係数は気温 15 °C、1 気圧における値であり、吸収係数 γ_o [dB/km] は、周波数が 63GHz を超える場合には近似的に次式によって与えられる¹⁾。この式は酸素吸収の共振周波数が約 60GHz、118GHz にあるこ

とから導出された式である。この式より 60GHz 帯の共振周波数における酸素分子による吸収量は約 15dB/km となる。なお、今回の試験周波数は 70GHz 帯及び 80GHz 帯であり、上記共振周波数とは離れているので酸素分子による吸収は約 0.1~0.2dB 程度であり殆ど考慮しなくてよい。

$$\gamma_o = \left\{ 3.79 \times 10^{-7} f + \frac{0.265}{(f-63)^2 + 1.59} + \frac{0.028}{(f-118)^2 + 1.47} \right\} \times (f+198)^2 \times 10^{-3} \quad (1-1)$$

1. 1. 2 水蒸気による吸収

水蒸気による電波吸収量は単位距離当り単位水蒸気含有量当りの吸収量によって評価される。図 1-1 に示された水蒸気吸収特性はヨーロッパにおける標準的な水蒸気含有量である 7.5g/m³ の時の計算結果であり、日本の場合は後述するように最悪月にはこの値の 3 倍程度となる。

水蒸気含有量は水蒸気の状態方程式を表すグルトンの分圧の法則より蒸気圧を e_w とすると以下の関係にある。

$$\rho = \frac{m_w e_w}{RT} \quad (1-2)$$

ここで m_w は水の分子量、 T は絶対温度、 R は絶対気体常数である。水の分子量は 18g、 $R=8.314\text{joule}^\circ\text{K}$ を用いれば、水蒸気含有量（水蒸気密度）は以下の式で計算できる²⁾。

$$\rho \equiv \frac{217 e_w}{T} \quad (1-3)$$

これに対し水蒸気圧は、気温 T 及び相対湿度 U とした時、 T における飽和水蒸気圧 e_s を用いて以下の式で計算できる。

$$e_w = U \cdot e_s \quad (1-4)$$

ここで飽和水蒸気圧は絶対温度より以下の Goff-Gratch の式から計算できる。

$$\begin{aligned} \log e_s = & -7.90298 \left(\frac{373.16}{T} - 1 \right) + 5.02808 \log \left(\frac{373.16}{T} \right) \\ & - 1.3816 \times 10^{-7} \left\{ 10^{\frac{11.344 \left(1 - \frac{T}{373.16} \right)}{373.16}} - 1 \right\} \\ & + 8.1328 \times 10^{-3} \left\{ 10^{-3.49149 \left(\frac{373.16}{T} - 1 \right)} - 1 \right\} + \log(1013.246) \end{aligned} \quad (1-5)$$

一方、気温 15°C、1 気圧における水蒸気による吸収係数 γ_w [dB/km] は、近似的に次式によって与えられる¹⁾。

$$\gamma_w = \left\{ \begin{array}{l} 0.050 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} \\ + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \end{array} \right\} f^2 \rho \times 10^{-4} \quad (1 < f < 350GHz) \quad (1-6)$$

この式は水蒸気による吸収の大きな共振周波数が約 22.2GHz、183.3GHz、325.4GHz にあることから導出した計算式である。この式によれば、電波の水蒸気による吸収は水蒸気含有量にほぼ比例する傾向にあることが分かる。

日本の代表的な地域における 1m³当りの水蒸気含有量について月間中央値の季節変化特性を表 1-1 に示す²⁾。この表によれば水蒸気含有量は夏季に多く冬季に少ないため、水蒸気による電波の吸収損失は夏季に大きく冬季に小さくなることが分かる。

表 1-1 本邦各地の水蒸気含有量の月間平均値 (単位 g/m³)

地点	新潟	札幌	仙台	東京	名古屋	大阪	福岡	名瀬
1月	4.20	2.50	3.52	3.75	4.32	4.54	4.80	8.86
2月	4.17	2.61	3.54	3.90	4.34	4.67	5.06	9.21
3月	4.84	3.31	4.19	5.08	5.39	5.71	6.23	10.27
4月	6.77	4.92	5.94	7.77	7.92	8.13	8.79	12.63
5月	9.81	7.35	9.00	10.97	11.05	10.96	11.70	15.63
6月	13.60	10.33	12.62	14.58	14.93	14.64	15.29	18.89
7月	17.97	14.19	16.91	18.55	19.43	19.17	20.09	21.65
8月	19.29	15.67	18.32	19.70	20.18	19.94	20.66	21.71
9月	14.84	11.45	14.03	16.08	16.60	16.29	16.69	19.95
10月	8.98	7.43	9.31	11.00	11.11	11.13	11.23	15.70
11月	7.06	4.59	6.21	7.25	7.57	7.96	8.21	12.66
12月	5.14	3.04	4.38	4.76	5.31	5.39	5.69	10.06

1. 2 降雨時伝搬特性

この周波数帯では差当り他方式干渉も少なく片偏波使用となるので基本となる降雨減衰特性に限って明らかにする。

1. 2. 1 降雨減衰量と降雨強度の基本計算式

単位距離(1km)当りの降雨減衰量 Γ (dB)は以下の式で表わされる。

$$\Gamma = 0.4343 \int_0^{\infty} N(a) Q(a, \lambda) da \quad (1-7)$$

ここで $Q(a, \lambda)$ は波長 λ における直径 a (cm)の雨滴の全減衰断面積で、吸収及び散乱断面積の和で表され波長や温度の関数である。 $N(a) da$ は単位体積(1m³)当り直径が a と $a+da$ との間にある雨滴の個数で雨滴粒度分布と呼称する。次に 1 時間当り降水量 V (cm³)は雨滴の形を球とし、直径 a の雨滴の終端落下速度を $v(a)$ とした時以下のように計算できる。

$$V = 3600 \int_0^{\infty} \left(\frac{\pi}{6} \right) a^3 v(a) 10^2 N(a) 10^{-6} da \quad (1-8)$$

したがって、1 時間を基準とした降雨強度 R (mm/h)は以下の式となる。

$$R = 0.6\pi \int_0^{\infty} a^3 v(a) N(a) da \quad (1-9)$$

1. 2. 2 減衰断面積

降水粒子による電波の減衰を規定する全減衰断面積は、波長（周波数）、温度、複素屈折率、雨滴径の関数となる。このうち複素屈折率は波長と温度の関数であり、これが分かれば周波数毎に雨滴径に対する減衰断面積が計算できる。この計算には摂動法やポイントマッチング法が用いられ、いくつかの代表的な周波数については全減衰断面積の計算結果が報告されている。これらの計算では雨滴形状について球形雨滴と扁平雨滴の場合があるが、扁平雨滴の場合は短軸と長軸の比を扁平度として、扁平雨滴の体積と等しくなる等価的な半径 a を用いて表している。ここでは今回の試験周波数帯に近い 50～100GHz 帯を中心として半径に対する減衰断面積の計算結果を表 1-2 に示す。この表には扁平度以外に計算条件として与えられた気温及び水平か垂直かの偏波についても併記した。計算結果はここに示した雨滴直径の範囲を超えてより小さな径や大きな径も計算されている例もあるが、ここでは次項に示す Laws & Parsons の雨滴粒度分布に対応した直径 0.5mm から 7.0mm の範囲に限って統一的に提示した。なお、70～80GHz 帯の降雨減衰は小さな径の雨滴の影響が大きくなるので、計算結果が存在する場合は 0.5mm 以下の径における減衰断面積も利用して理論推定することにより精度が高まるものと期待される。

表 1-2 雨滴直径に対する減衰断面積の計算例

周波数	90.8GHz	82.0GHz	82.0GHz	82.0GHz	50.0GHz	50.0GHz	50.0GHz
文献	(3)	(4)	(5)	(5)	(4)	(5)	(5)
扁平度	球形	球形	1-(a/10)	1-(a/10)	球形	1-(a/10)	1-(a/10)
偏波	両偏波	両偏波	水平	垂直	両偏波	水平	垂直
温度	10℃	20℃	20℃	20℃	20℃	20℃	20℃
0.5mm	0.0017	0.001131	0.00116	0.00109	0.000356	0.00036	0、00034
1.0mm	0.026	0.02329	0.0241	0.0219	0.00803	0.00839	0.00759
1.5mm	0.057	0.05384	0.055	0.050	0.0441	0.045	0.040
2.0mm	0.092	0.09305	0.0957	0.0875	0.0985	0.103	0.0880
2.5mm	0.14	0.14196	0.144	0.134	0.1445	0、149	0.129
3.0mm	0.20	0.19889	0.204	0.180	0.2006	0.211	0.173
3.5mm	0.26	0.26578	0.27	0.247	0.2768	0.292	0.242
4.0mm	0.35	0.34026	0.35	0.31	0.3560	0.369	0.315
4.5mm	0.42	0.42479	0.43	0.38	0.4387	0.46	0.38
5.0mm	0.53	0.51671	0.54	0.47	0.5367	0.57	0.49
5.5mm	0.80	0.61858	0.64	0.56	0.6448	0.68	0.59
6.0mm	0.70	0、72786	0.75	0.70	0.7560	0.81	0.69
6.5mm	0.80	0.84685	0.86	0.81	0.8772	0.95	0.81
7.0mm	0.95	0.97342	1.00	0.89	1.0110	1.1	0.92

1. 2. 3 雨滴粒度分布

雨滴の大きさにより減衰断面積が異なるので、降雨強度が同じでも雨滴粒度分布が変われば降雨減衰量も変わってくる。雨滴粒度分布には実測結果に基づき径毎の体積百分率で与えた Laws and Parsons の分布 (L-P 分布) ⁶⁾を初めとして、この分布を定式化した Marshall-Palmer の分布 (M-P 分布) ⁷⁾さらにはこの分布形を降雨の種類により分類した 3 種の Joss の分布 (J-D 分布、J-W 分布、J-T 分布) ⁸⁾が最もよく用いられている。これらの粒度分布のうち基本となる L-P 分布は、実測データにより 9 つの代表的な降雨強度の場合について、雨滴直径を 0.5mm~7.0 mm の 0.5mm 毎の 14 種類に分けてその大きさ毎の体積百分率によって表している。この結果を雨滴径毎の個数分布で表現した時の分布形が M-P 分布として以下に示す逆指数関数で近似された。

$$N(a) = N_0 \exp(-\lambda a) \quad (1-10)$$

ここで $\lambda = AR^{-B} \quad (1-11)$

これに対しその後 Joss も同じ逆指数関数で雨滴粒度分布を近似しパラメータの値を降雨の種類によって変えた分布形を提示した。これらの逆指数関数形の分布パラメータの常数は表 1-3 に示すように与えられている。ここで Joss 分布において用いられている記号 D は Drizzel Rain (霧雨)、W は Wide Spread Rain (普通の雨)、T は Thunderstorm Rain (夕立) をそれぞれ表している。

この表によれば、M-P 分布は全体の平均的な分布として Joss の普通の雨に近い式表現となっている。なお、各粒度分布ともパラメータ λ が降雨強度の関数となっているが、各粒度分布ともすべての降雨強度に対応すると言うよりも、J-D 分布は降雨強度の弱い領域で、J-T 分布は降雨強度の強い領域で適用可能と考えるべきである。ただし、量的に境界となる降雨強度については明らかになっていない。各雨滴粒度分布の計算結果を図 1-2 に示す。

表 1-3 逆指数関数型粒度分布パラメータの常数表

略称	粒度分布	N_0	A	B
M-P 分布	Marshall-Palmer 分布	8000	4.1	0.21
J-D 分布	Joss (Drizzel Rain) 分布	30000	5.7	0.21
J-W 分布	Joss (Wide Spread Rain) 分布	7000	4.1	0.21
J-T 分布	Joss (Thunderstorm Rain) 分布	1400	3.0	0.21

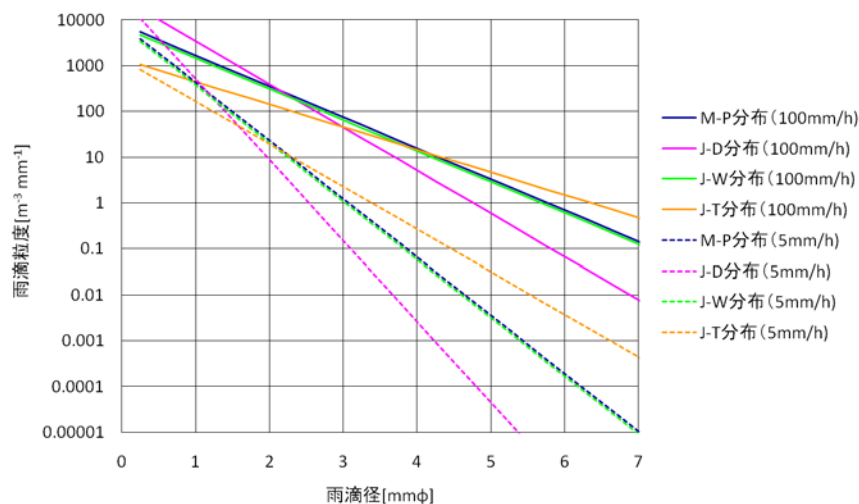


図 1-2 雨滴粒度分布例

1. 2. 4 降雨減衰係数

上記に示した各雨滴径での減衰断面積と粒度分布とから各周波数における降雨減衰係数が計算できる。例えば降雨強度を与えて式(1-10)、式(1-11)により仮定された粒度分布に対応した各雨滴直径の頻度を求め、これに da (直径分割時の変位量 例えば L-P 分布では 0.5mm) を乗

ずることにより各直径の雨滴個数が求められる。減衰断面積が表 3-2 のように計算されていればこれに各直径の雨滴個数を乗じ、すべての直径について和をとれば単位距離当りの減衰量が求められることとなる。しかし、この計算は非常に手がかかるので、現在では準ミリ波帯～ミリ波帯で単位距離当りの降雨減衰量を求める以下の簡易計算式⁹⁾が用いられている。

$$F = \gamma R^n \quad (\text{dB/km}) \quad (1-12)$$

ここで γ と n とは周波数及び偏波によって変わるパラメータであり、試験周波数に近い 70、80GHz 帯ではそれぞれ表 1-4、表 1-5 に示すように表されている。

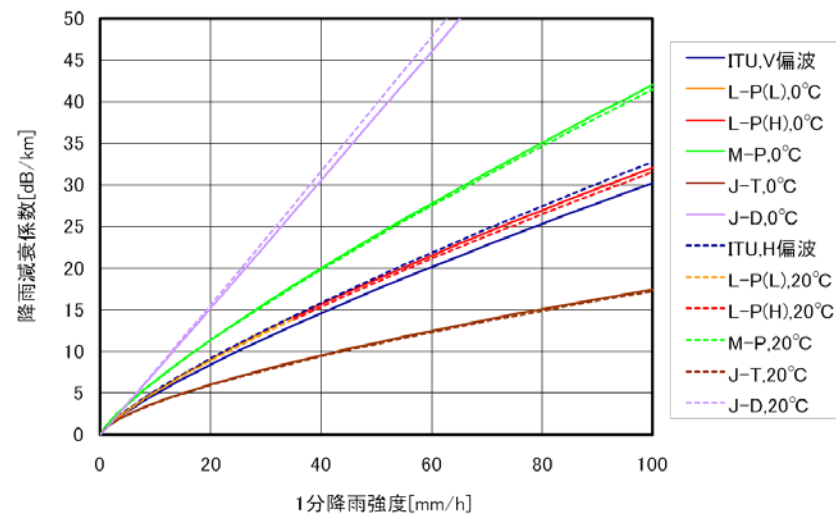
表 1-4 70GHz 帯降雨減衰係数計算例

計算者	粒度分布	水平偏波		垂直偏波	
		γ_H (20°C)	n_H (20°C)	γ_V (0°C)	n_V (0°C)
ITU	不明	0.851	0.793	0.784	0.793
Olsen	L-P (L)	0.802	0.803	0.801	0.809
	L-P (H)	0.850	0.785	0.869	0.784
	M-P	1.01	0.807	1.00	0.812
	J-T	0.814	0.663	0.833	0.661
	J-D	0.735	1.020	0.740	1.009

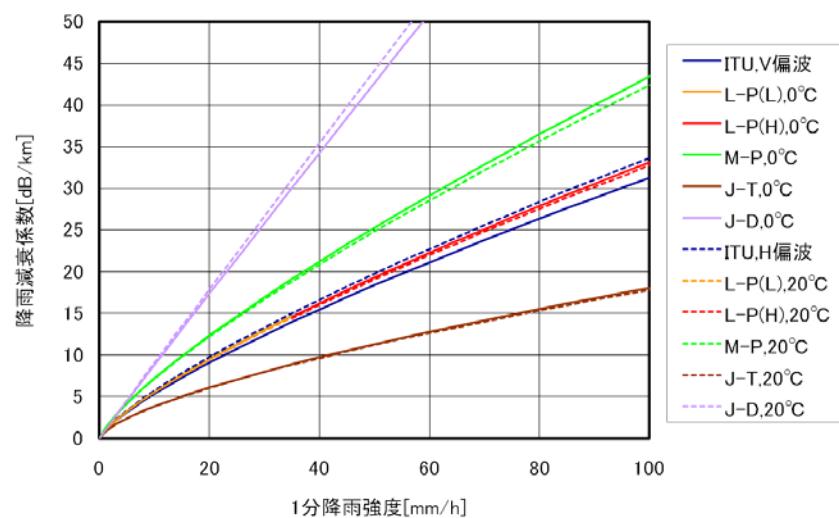
表 1-5 80GHz 帯降雨減衰係数計算例

計算者	粒度分布	水平偏波		垂直偏波	
		γ_H (20°C)	n_H (20°C)	γ_V (0°C)	n_V (0°C)
ITU	不明	0.975	0.769	0.906	0.769
Olsen	L-P (L)	0.934	0.771	0.924	0.778
	L-P (H)	0.902	0.780	0.913	0.780
	M-P	1.21	0.772	1.19	0.781
	J-T	0.810	0.671	0.809	0.674
	J-D	0.936	0.985	0.922	0.980

この表で、ITU の値¹⁰⁾は実測結果も踏まえて導出されており、扁平雨滴を考慮しているため偏波によって若干異なった値が提示されている。一方 Olsen の結果¹¹⁾は球形雨滴を仮定しているため水平と垂直の偏波による差は見られない。ただし、気温は定常時に近い 20°C だけでなく 0°C の結果もあるので、ここでは水平偏波の欄に 20°C の結果を、垂直偏波の欄に 0°C の結果を示している。また、Olsen の結果には粒度分布の異なる 5 つの場合について係数が提示してあり、ここで L-P (L) は Laws and Parsons の体積百分率の測定結果を基に 35mm/h 以下の降雨強度の結果から近似した時のパラメータ値であり、L-P (H) はそれ以上の降雨強度の結果を近似した時の値である。この表から計算される各雨滴粒度分布を取った場合の単位距離当りの減衰量を図 1-3 に示す。



(a) 70GHz 帯



(b) 80GHz 帯

図 1-3 降雨減衰係数の推定値

1. 3 降雪による電波の減衰

1. 3. 1 降雪減衰に影響するパラメータ

降雪による減衰は降雨減衰と比較して、減衰に関係するパラメータの数が多く、また含有する水分量等により分類される降雪の種類によって同一降水強度であっても減衰量が大きく異なる。ここではまず降雪減衰を決定づける各パラメータについて取り上げ、それらが減衰に与える影響を取りまとめておく¹²⁾¹³⁾。

1. 3. 2 降雪の種類

降雪は国際分類に従えば後述する含水率や大きさを基準として表1-6に示すように分類されている¹²⁾。

表1-6 降雪の分類

項番	大分類	種別	時期と気象	大きさ形態	構成	密度 (g/cm ³)
1	乾雪	たま雪 雪あられ	冬の初期終期に多し 比較的高温時 0℃付近	2～5 mm 球又は円錐	微粒の集塊	0.06～ 0.16
2	乾雪	はい雪	風雪時に多し 発生域 -14～-18℃	2～10mm 不定形	結晶・雪霰 不規則粒子	0.01～ 0.03
3	乾雪	こな雪	発生域-5～-6℃ 雪片成長不可	1～2 mm or 1mm 以下	結晶・雪霰 不規則粒子	0、07
4	乾雪	わた雪 ぼたん雪	冬の初期終期に多し 比較的高温時 0℃付近	10mm以上 不定 or 皿状	はい雪大集塊 結合緊密	0.09
5	湿雪	もち雪	冬の初期終期に多し 0℃以上の高温時 乾雪の融けかかり状態	大きさ範囲広し 不定形	氷と水粒水膜 の混合	0.09～ 0.126
6	濡雪	べた雪 みぞれ	もち雪の融けかかり状態	大きさ範囲広し 不定形	水量増加	0.257
7	水雪	みず雪 みぞれ	べた雪が雨に変化する状態	数mm以下 雨滴に近い	雨中に崩れた 氷散見	>0.257

1. 3. 3 雪片の形状と大きさ

雪片は複雑な形をしているが、一般的には降雨と同じく楕円体に近似できるとしている。しかし、降雨と比べて空間において長短軸の方向が変わり易いので減衰係数の計算では球形近似で取扱われている。一方、雪片の大きさについては小さな雪片は大気中で落下する時融け易く雨に近づく場合が多いなど雪の種類によって雪片の大きさの範囲は異なってくる。従来の測定では Water Blue 法等が用いられてきたが、この時露紙表面の大きさから紙の厚さを考慮して雪片を

球形とした時の等価半径を計算している。

1. 3. 4 雪片粒度分布

雪片の粒度分布は降雨の場合と同様に換算降雪半径と個数の対数値の関係が直線にて表される場合と、半径及び個数とも対数値が直線で表わされる場合とがある。このうち前者は降雨の場合に使用される分布形と同じで降雪の場合は乾雪など 1 種類の雪のみの場合の粒度分布と考えてよく、後者は含水率の異なる湿雪と雨など 2 種類以上の降水粒子が同時に降る場合の粒度分布として近似できると言う。実際の降雪の場合は降雪強度や降雪の種類により粒度分布直線の傾斜や全体的な量を示すパラメータが変わってくることになる。また、実際に降雪時の減衰量を計算する場合には積分領域を規定する粒子の最大径を制限しておく必要がある。

降雪による減衰が大きくなる湿雪に近い場合の雪片の粒度分布としては式(1.10)に示した降雨の場合と同じく負の指数関数で表わされると言われる。この場合分布を決定する N_0 、 λ の 2 つのパラメータは次式で表わされる¹⁴⁾。

$$N_0 = 7.6 \times 10^3 R^{-0.87} \quad (\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}), \quad \lambda = 5.1 \times R^{-0.48} \quad (\text{mm}^{-1})$$

1. 3. 5 雪片密度¹²⁾

雪片密度は雪片の体積含水率 P_w と体積含氷率 P_i との関数として実測結果を基にした以下に示す計算式がある。この式からも明らかなように両者が大きいほど雪片密度も大きくなることが分かる。

$$\rho_s = 0.92P_i + P_w \quad (1-13)$$

一般的に雪片における氷の含有率を実測することは困難である。そこで含水率と雪片密度との関係を実測値から求め、これより逆に体積含氷率が求められている。実測結果によれば、含水率と雪片密度との間には以下のような関係がある。

$$P_w = \rho_s^2 \quad (1-14)$$

この式と式(1-13)とから体積含氷率は以下の式で求められることとなる。

$$P_i = \frac{\sqrt{P_w} - P_w}{0.92} \quad (1-15)$$

1. 3. 6 雪片の体積含水率¹²⁾

雪片の体積含水率は雪片密度と関連し雪の種類によって異なった値となるが明確な測定法がないため実測結果に基づき式(1-14)に示した試験式が得られている。この式は体積含水率の大きな水雪や濡雪では近似度が良いと言われており、これは降雪減衰が顕著な雪の種類に対して有効な式であると言える。

1. 3. 7 雪片の誘電率¹²⁾

雪片は空気、氷、水の混合体と考えられるので、各成分の含有量が分かれば（体積比）Wienerの合成誘電率の理論から誘電率を計算できる。Weinerの理論は2種類の組成の場合であるが、これを3成分の場合に拡張すると空気、氷、水に関する量をそれぞれ a 、 i 、 w の添字で表わせれば降雪粒子の合成誘電率 ϵ_s は以下の式を満足することとなる。

$$\frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + u} = p_a \frac{\epsilon_a - 1}{\epsilon_a + u} + p_i \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + u} + p_w \frac{\epsilon_w - 1}{\epsilon_w + u} \quad (1-16)$$

$$p_a + p_i + p_w = 1 \quad (1-17)$$

ここで p は空気、氷、水の体積比であり、 u は形状因子と呼ばれ、氷が柱状をなして電場の方向に並んだ場合には $u = \infty$ 、電場に垂直の方向に並んだ場合は $u = 0$ 、氷が球状になって空気中に分散した場合は $u = 2$ である。形状因子は通常の場合はマイクロ波帯やミリ波帯において $u = 2.5 \sim 10$ と報告されている。波長 3.2cm で測定された結果に基づけば、形状因子は雪の種類に従い乾雪では $u = 2$ 、湿雪では $u = 8$ 、濡雪では $u = 20$ 、水雪では $u = \infty$ が使用されている。

一方、各単体の誘電率のうち水及び氷は基本的に Debye の式を用いて複素誘電率として計算することができる。これに対し空気の誘電率は $\epsilon_a = 1$ に近似できるので、式 (1-16) の第1項は0となり雪片の誘電率は第2、第3項だけで決まると考えてよい。氷及び水の誘電率のうち、雪片温度による変化の大きいのは水の場合である。

1. 3. 8 雪片減衰断面積

他の降水粒子の場合と同じく散乱と吸収の断面積の和として雪の誘電率、大きさ、周波数等から計算される。このうち雪の誘電率は前項に示したように雪質によって異なる含水率の影響を受ける混合誘電率として評価されるために一意的には決定できない。ただし、含水率の大きな湿雪においては減衰断面積が大きくなり、結果として減衰係数が大きくなる。

1. 3. 9 降雪落下速度¹³⁾

降雪粒度分布の導出に必要な量であり、降雨の場合には粒径の大きさだけの関数であった。降雪の場合も落下速度の計算式は試験式が与えられているが、雪片の密度と空気の密度の影響を受ける。新たに導入された雪片の密度は先に示したように雪質（含水率）の影響を受ける。含水率が大きいほど落下速度も大きくなる。ここでは含水率の影響を考慮した雪片の落下速度を以下に示しておく。

まず基本となる雨滴の落下速度については定式化された計算式として A.C.Best による以下の計算式がある。ここで r は雨滴の半径であり、この式による計算誤差は $\pm 2\%$ 程度であるという¹³⁾。

$$v_R = \frac{1.1}{1 + 0.03489r^{-1.313}} \quad (1-18)$$

次に雪片の落下速度 v_s は含水率を p_w とした時雪片の半径と雨滴の半径とが等しいとした時式 (1-18) の計算結果を基に以下の計算式が提示されている。ここで含水率の測定は困難なのではっきりした誤差の評価は困難であるが、最大 10%程度であると言う。

$$v_s = v_R \cdot p_w^{(1+\log v_R)/4} \quad \text{ただし、} 10^{-4} \leq p_w \leq 1 \quad (1-19)$$

一方、いくつかの測定結果から雪片の大きさと落下速度との関係について以下の試験式が良く合致することが確認された¹²⁾。

$$v_s = 8.80 [(\rho_s - \rho_a) 2r]^{0.5} \quad (1-20)$$

ここで ρ_s 、 ρ_a は雪片及び大気の密度(g/cm^3)である。

1. 3. 1 0 降雪減衰量

降雪による減衰は降雨の場合と同様に単位体積あたりの雪片粒子の粒度分布と、各雪片の大きさ毎の雪片誘電率から計算された雪片の減衰断面積とから計算される。すなわち、雪片毎の大きさの数にその大きさでの雪片減衰断面積を乗じ、全雪片について総和を求めることにより単位体積当りの降雪減衰係数が求められるので、それに距離を乗ずることによって降雪減衰量が計算できる。

降雪による減衰は雪の含水率によって雪の誘電率すなわち減衰断面積が大きく変わるため、乾いた雪や湿った雪またはみぞれなど、雪の種類によって様々に変化する。これまでの報告では 30GHz 以下の周波数では乾いた雪による減衰は問題とならないが、周波数が高くなると乾いた雪による減衰も大きくなるといわれている。一方、湿雪においては、水分に換算した降水強度を用いて比較すると、同一降水強度の降雨減衰よりも降雪による減衰が 6~7 倍大きくなる事が報告されている。

1. 3. 1 1 降雪減衰の簡易計算式

降雪による減衰の簡易な推定法には Gunn and East による乾いた雪における減衰係数 A [dB/km] を計算する以下の計算式がある¹⁴⁾。ここで気温は 0 [°C]、 λ は波長 [cm]、 R は降雪を水分として換算した時の降水強度 [mm/h] である。

$$A = 0.00349 \left(\frac{R^{1.6}}{\lambda^4} \right) + 0.00224 \left(\frac{R}{\lambda} \right) \quad (\lambda < 1.5, R < 10) \quad (1-21)$$

この式によれば周波数 80GHz では、例えば換算降水強度 1 mm/h で 0.18 dB/km、5 mm/h で 2.35dB/km と計算できる。この式は減衰係数が最も小さな乾雪に対する計算式であり、回線設

計に用いるためにはより減衰係数の大きな湿雪やみぞれによる減衰量を評価できる必要がある。

1. 3. 1 2 降雨減衰対応簡易計算式

降雨の場合の降雨による減衰の簡易式は降雨強度のべき乗に比例する関数で表されることが明らかにされ、その比例常数及び指数項は減衰断面積の影響を受けるが簡便には周波数の関数で表されることは既に示した。降雪の場合も同じ関数形で表されると考えてよいが、降雪の場合減衰断面積を規定する混合誘電率が雪の種類や含水率により大きく異なるために降雪強度に対してだけでなく雪の種類により減衰断面積は異なり一意的に求められない。雪の性質は地域的にも特徴を有すると言われている。

このように降雪による減衰は雪片の種類により減衰特性が異なるが、回線品質への影響の大きい降雪減衰の大きな領域が計算できるように実測データを基に降雪強度(mm/h)から単位距離当りの降雪減衰量を計算する式を降雨減衰簡易計算式と同じ以下の式表現により導出した。

$$\Gamma = \gamma R^n \quad (\text{dB/km}) \quad (1-22)$$

用いた測定データは新潟県長岡市において4カ月間にわたり距離8.9kmで実施された周波数11、15、24、48GHzの降雪減衰時の記録である¹⁵⁾。この試験で得られた降雪強度と降雪減衰量との確率分布から等確率値をもちいた関係を式(1-22)で近似した時に得られた各降雪減衰係数パラメータの近似値を表1-7に示す。

表1-7 降雪減衰係数パラメータ

周波数(GHz)	パラメータ γ	パラメータ n
11.0	0.1	1.29
15.0	0.2	1.25
24.0	0.33	1.18
48.0	1.1	1.0

この時の降雪はみぞれが多いとの報告もあり、比較的降雪減衰の大きい時の関係であると考えてよい。

周波数毎に求められた2つのパラメータを任意の周波数について計算できるように周波数の関数として導出した結果は以下に示す通りである。これらの式は本来さしあたり測定データの存在する周波数48GHzまでが適用可能である。

$$\gamma = 0.002 f^{1.625} \quad (1-23)$$

$$n = 1.946 f^{-0.172} \quad (1-24)$$

現在のところ本試験で使用する70~80GHz帯では降雪減衰係数の γ 、nパラメータを求める

方法がないので、ここでは式 (1-23)、式 (1-24) がこれらの周波数帯でも適用可能とした時の降雪減衰パラメータの計算結果を表 1-8 に示し、降雪強度に対する周波数 70/80GHz の降雪減衰係数の推定値を図 1-4 に示す。

表 1-8 試験周波数での降雪減衰係数パラメータと減衰量(dB/km)

周波数(GHz)	パラメータ γ	パラメータ n	減衰(1mm)	減衰(5mm)	減衰(10mm)
70.0	1.992	0.937	1.992	9.00	17.23
80.0	2.475	0.916	2.475	10.81	20.40

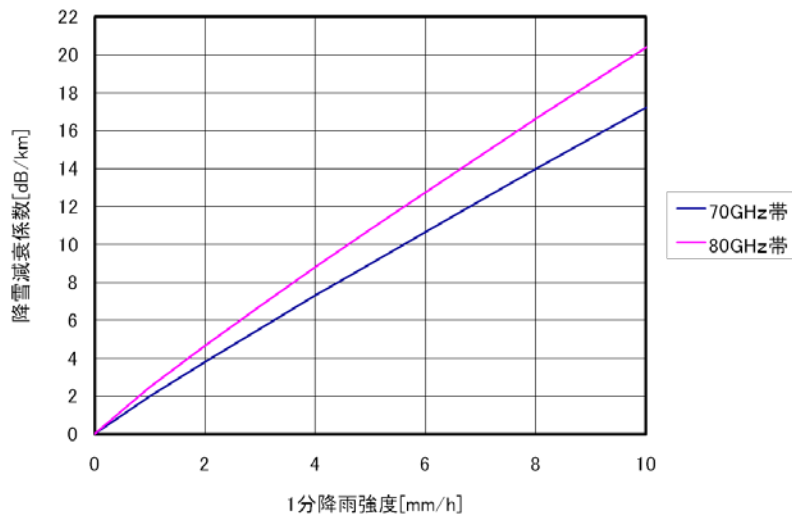


図 1-4 降雪減衰係数の推定値

ここで得られた結果はみぞれに近い雪が主体であるので、比較的降雪減衰係数の大きな場合の推定式と考えてよく、乾雪を対象とした式(1-21)の計算結果よりも数倍大きいことが分かる。

また、表には降雪強度が 1mm/h、5mm/h、10mm/h の場合の単位距離 1km における降雪減衰量を併記する。この表より同じ降水強度ならばこの周波数帯においても降雪減衰が降雨減衰を上回ることが分かる。ただし、降雪強度は強くても 10mm/h 以下と考えられるので、100mm/h 以上の強度となる場合のある降雨の方が回線品質に与える影響は大きい。

1. 3. 13 みぞれの 10 分降雨強度分布の 0.01% 値

降雪減衰で最も問題となるみぞれについて、日本の代表的な降雪地帯における 5 年間の 12 月から 3 月までの 4 ヶ月間の 10 分降雨強度データを基に、この間の総降水量（冬季降水量）、修正気温（冬季平均気温に 5 を加えた温度）及び主にみぞれで規定される 10 分降水強度の 0.01% 値を表 1-9 に示す¹⁶⁾。

表 1-9 冬季降水強度の地域特性

地方	地点名	総雨量(mm)	修正気温 (°C)	みぞれ 0.01%値
北海道	羽幌	380	1.8	6.1
北海道	札幌	398	2.9	5.4
北海道	寿都	408	4.1	6.0
北海道	室蘭	231	4.5	2.1
北海道	函館	285	3.6	4.8
東北	青森	565	4.9	6.6
東北	盛岡	301	4.3	1.2
東北	秋田	484	5.4	2.4
東北	酒田	656	7.9	3.6
東北	山形	412	4.9	3.9
信越	長岡	1230	7.1	10.2
信越	高田	1420	8.8	10.8
信越	長野	239	5.2	0.6
北陸	輪島	864	8.0	9.0
北陸	富山	920	9.8	7.2
北陸	金沢	1115	8.9	10.8
北陸	福井	1140	9.8	8.4
北陸	敦賀	1160	10.5	11.4
山陰	舞鶴	704	10.4	6.3
山陰	鳥取	749	11.1	6.9
山陰	松江	634	10.4	5.4
山陰	浜田	450	11.3	3.6

この表より北海道地方と比較して新潟から北陸にかけての地方では、気温も高く主に降雪が原因となる冬季の降水量が多く、冬季の降水強度も強いことが分る。なお、ここで気温を修正気温なる量で表現した理由は、この文献（森田和夫氏「冬季降水による準ミリ波の減衰推定」信学論）では冬季降水強度の時間率 0.01%における値をこれに影響を与えるパラメータとして選んだ総降水量と気温から推定する方法を提案しており、この場合べき乗の関数形を使用して実施するためにこの変数が負の数となることを避けるためであると考えられる。なお、この表で示した3つ量のデータを回帰分析によりべき乗の関数形で表現するならば、冬季降水量の 0.01%値は以下の式で近似できるという。

$$W = 0.0072 \times E^{1.16} \times T^{-0.417} \quad (1-25)$$

ここでWはみぞれと考えられる降水強度の冬季4ヶ月の0.01%値、Eは冬季4ヶ月総降水量、Tは冬季平均修正気温である。この式に基づく計算値と観測値との相関係数は0.9程度であり比較的高い。すなわち降雪強度の0.01%値は総降水量にほぼ比例し、修正気温のおよそ0.5乗に反比例することとなり、この式を用いれば、降雪強度の確率分布が求められていない場合でも比較的手に入り易い冬季の総降水量と平均気温とを用いてその0.01%値を計算により推定できることとなる。

1. 3. 14 アンテナへの着雪の影響

降雨及び降雪時にアンテナやレドームの表面が水や雪で覆われた場合には伝搬路空間における気象現象以外の原因による電波の減衰が生じる。このうちアンテナ等の表面に漂着した水分は主に熱損失として現れるが¹⁷⁾ 18)、雪が表面に着雪した場合には熱損失以外に着雪状況が不均一である場合にはアンテナ指向特性が乱れビーム方向がずれることによるアンテナ実効利得の低下がもたらされ、非常に大きな受信電力低下の原因となる¹⁹⁾²⁰⁾。これらの水膜による減衰や着雪による指向方向のずれについては、水膜の厚さや表面への着水、着雪状況が多岐にわたるためにモデル計算による理論的な減衰量の推定結果が必ずしも実測結果を説明することができない。ただし、ミリ波帯においては周波数が高く、水膜が厚くなると共に損失が大きくなることは予測される。

アンテナ等における水膜の形成や着雪の影響を避けるための方法としては、アンテナ等の庇を長くして雨や雪が吹き込むことを防止すること、雪の場合はヒーター等の融雪装置により着雪を防止することが考えられる。また撥水剤を塗布することによりアンテナ等の表面に水分が滞留することを防止すること等が考えられる。

1. 4 霧による減衰

霧の粒子直径は小さく、内陸地方での典型的な輻射霧の直径の最頻値は約10 μmである。霧による電波の減衰は降雨の場合と同じく霧水量 M [g/m³] に比例して大きくなる。すなわち単位距離当りの霧による減衰は単位水分量あたりの減衰係数 A [(dB/km)/(g/m³)] を用いて以下の式で表される。

$$\gamma_e = AM \quad (1-26)$$

ここで単位水分量あたりの減衰係数を求める式として、気温をパラメータとした次式が報告されている²¹⁾。

$$A = -1.347 + 0.0372\lambda + \frac{18.0}{\lambda} - 0.022T \quad (1-27)$$

λ : 波長 [mm]

T : 温度 [°C]

たとえば視程が約 300 m（中程度の霧）の水分量は約 0.05 g/m³、視程約 50 m（濃い霧）の水分量は約 0.5 g/m³である。ここで視程とは大気混濁の程度を距離で表したパラメータである。1 km の試験回線全体を同濃度の霧が覆ったと仮定してこれらの値を用いると、減衰の大きな周波数 80 GHz 帯の場合、中程度の霧では約 0.16 dB/km、濃い霧では約 1.6dB/km の減衰が発生すると推定される。なお、霧水量と視程 S (km)との間には経験的に概略以下の関係があると言う。

$$S = 0.024M^{-0.65} \quad (1-28)$$

1. 5 フェージング特性

1. 5. 1 ダクト型フェージング²²⁾

ラジオダクト等の大気屈折率分布の不均一性によるフェージングについては 10GHz 帯以下のマイクロ波帯における回線品質劣化の主要因として検討されてきている。ラジオダクト発生時の多重波による干渉性フェージングについては周波数が高く、距離が長くなると共に増加する。そのため本来ならばミリ波帯はラジオダクトの発生によって回線品質により大きな影響を受けるはずであるが、ミリ波帯ではこれまで示してきたように降雨による減衰が大きいため伝送距離を小さくせざるを得ないので、多重波フェージングは殆ど発生しないと考えてよい。一方、ラジオダクト発生時に伝搬時に電波が次第に発散することによって生ずる減衰性フェージングについても、距離の増加と共に発散による電波エネルギーの低下がもたらされるので、降雨により中継距離が制限されるミリ波帯においては殆ど無視できると考えてよい。

1. 5. 2 到来角変動²³⁾

大気屈折率分布の不均一性が通信回線にもたらすもう 1 つの影響として電波到来角の変化によるアンテナ利得の減少がある。ミリ波帯アンテナは周波数が高いことにより指向性が鋭くなるので到来角変動によるアンテナ利得の低下はより顕著に現れる。しかし、到来角変動の大きさは大気屈折率の時間的変動の大きさだけでなく距離と共に大きくなるので、前述したように降雨減衰により中継距離を短くせざるを得ないミリ波帯においてはアンテナ利得低下による回線品質劣化は殆ど無視できると考えてよい。

1. 6 反射・透過・遮蔽特性

本検討で対象とするシステムは屋外の見通し内回線であるが、ミリ波帯の基本伝搬特性として地物の影響についても簡単に触れておく。ミリ波帯の各種物体による反射、散乱、透過、遮蔽等の特性は、通信に対しては多重波干渉や遮蔽損失として、レーダー等のセンシングシステムにおいてはターゲットの検知感度やクラッタ評価等に重要である。電波は誘電特性の異なる媒質の境界に入射する時エネルギーの一部が反射し、残りは屈折して媒質内に侵入する。境界面が滑らかな平面の場合には反射波は鏡面反射方向のみに観測される。この場合の反射・屈折特性は媒質の複素屈折率、入射角、偏波に依存し、媒質が十分に厚く半無限の場合は Fresnel の反射・屈折の

公式で計算される。

表面が不規則な凹凸のある粗面の場合は鏡面反射成分の他に広い角度範囲にインコヒーレントな拡散成分が生ずる。表面粗さの指標として、表面凹凸の平均面からの標準偏差と入射角に比例し波長に反比例する Rayleigh の規準が用いられる。波長の短いミリ波帯ではこの値が 1 よりも大きくなるので、鏡面反射量に対して拡散成分が主要となっていくことを示している。

コンクリート等によるミリ波帯の遮蔽減衰量は大きいので、ほぼ完全に遮蔽していると考えてよい。一方乾燥木材やガラス等はミリ波帯でも透過減衰量は比較的小さい。屋外通信システムで問題となる樹木等の植生による遮蔽減衰についてはミリ波帯の測定例は少ないが周波数が高くなると大きくなると考えてよい。

2 降雨領域回線品質評価法

2. 1 降雨領域回線品質評価法の概略

2. 1. 1 降雨領域回線品質評価の位置付け

ミリ波帯を用いた屋外の見通し内通信方式における回線品質を規定する伝搬要因はこれまでの検討により降雨及び降雪による減衰と考えられる。このうち降雪による電波の減衰については、降雪の発生する地域と時期が限られること、雪の種類特に雪片の含水量により減衰係数が大きく異なること、減衰係数が降雨よりも大きい場合もあるが降雨よりも強い降雪は発生し難く減衰量としては降雨によるよりも少ない場合が多いこと等からこれまでの30GHz帯以下の周波数帯では特に回線品質評価には用いられてこなかった。したがって、本項では降雨による減衰に限ってこれまでの回線品質評価方法を取りまとめておく。

2. 1. 2 審査基準²⁴⁾降雨減衰の評価方法

現在、電波法審査基準で提示されている降雨減衰分布の計算法には電気通信業務を対象とした11/15GHz帯用と20GHz帯用及び公共業務用18GHz帯の3つがあるが、18GHz帯用は後述する一部を除き基本的に電気通信用20GHz帯と同じである。したがって、本稿では11/15GHz帯用と20GHz帯用に限って降雨減衰分布の計算法を提示する。

審査基準記載の降雨減衰分布の計算は、降雨減衰マージンを計算するのに使用する確率 p %における降雨減衰量を計算する式であり、逆に不稼働率を計算するのに使用する降雨減衰量を与えてその確率を計算する式は公共業務用18GHz帯のみに記載されている。11/15GHz帯と20GHz帯とでは降雨減衰量から不稼働率を計算するには現在計算式がないので、回線設計する際には漸近近似等の手法で実施しているようである。ただし、最近審査基準記載の計算式の導出過程が明らかにされ、積分形式の近似式を用いて降雨減衰量から時間率を計算する方法が提示されている²⁵⁾。

2. 1. 3 審査基準降雨減衰推定法の基本

審査基準記載の降雨減衰分布の計算式は、両周波数帯の場合とも降雨強度分布、降雨強度の n 乗の分布及び降雨減衰分布がすべてガンマ分布で近似できるとし、また、降雨減衰量が式(1-12)に基づき伝搬路に沿った積分雨量の n 乗で求められるとして次節に詳述する計算式⁹⁾の多項式近似として求められている。計算にあたっては両周波数とも降雨状況を示すため全国的に降雨設計値として与えられている強雨期降雨強度分布の0.0075%値⁹⁾のデータベースのうち回線近傍の値を選びそれを基に降雨減衰分布を計算している。降雨設計値として強雨期3か月の0.0075%値が使われた理由としては、当初の降雨が品質劣化要因となる準ミリ波帯のアナログ方式の信頼度が降雨の強い強雨期の時間率で与えられていたこと、強雨期の0.0075%とは強雨期の10分に対応し、気象庁による当時の降雨観測で最も精度の高い10分積分値(10分降雨強度)に対応していたこと等が考えられる。

これに対し近年実測された降雨強度分布がガンマ分布よりも M 分布への近似度が高いとして、M 分布を用いて新たに降雨減衰分布を計算する方法が提示されている²⁶⁾。この方法は降雨強度分布の近似度が向上するだけでなく確率分布関数がガンマ分布のように積分形ではなく直接与えられている等の長所があるが、設計法として用いるには降雨設計値のデータベースがガンマ分布の場合の 1 個に対して 1 地点につき 2 個必要なこと²⁷⁾、降雨強度分布そのものもガンマ分布で近似できる地点も多く全地点で M 分布に近似できるとは言えないこと、既にガンマ分布に基づく計算法で設計された回線の取扱い等の問題点がある。以下にはここではさしあたり現在の審査基準で用いられているガンマ分布による降雨減衰分布の計算式についてその導出過程と両周波数帯計算法の相異点について明らかにする。

2. 2 ガンマ分布による降雨減衰分布推定法

2. 2. 1 ガンマ分布を用いた降雨減衰分布

降雨減衰量 Z は式 (1-12) に示した単位距離当りの降雨減衰量を降雨状況に対応して距離に沿って積分することにより以下の式で計算できる⁹⁾。

$$Z = \gamma \int_0^D R(x)^n dx \equiv \gamma Y \quad (2-1)$$

ここで D は伝搬距離、 $R(x)$ は距離に対する降雨強度の変化、 Y は降雨強度の n 乗の積分雨量である。ガンマ分布に基づく降雨減衰分布の推定法は基本となる降雨強度分布及び積分雨量の確率分布がガンマ分布に近似できるとして計算される。即ち降雨減衰量 Z がガンマ分布で表わされる時 Z の累積確率分布 $F(Z)$ は以下の式で表わされる。

$$F(z) = \frac{\int_0^z \beta_z^{\nu_z} Z^{\nu_z-1} e^{-\beta_z Z} dZ}{\Gamma(\nu_z)} = \frac{\gamma(\nu_z, \beta_z z)}{\Gamma(\nu_z)} \quad (2-2)$$

ここで $\Gamma(\nu)$ はガンマ関数、 $\gamma(\nu, \beta z)$ は第 2 種不完全ガンマ関数、 ν_z 、 β_z はガンマ分布のそれぞれ形状及び量を示すパラメータで、これら 2 つのパラメータが決まれば分布形は決定する。これら 2 パラメータは Z の平均値 μ_z 、標準偏差 σ_z から以下の式で計算できる。

$$\nu_z = \left(\frac{\mu_z}{\sigma_z} \right)^2 = \left(\frac{\mu_Y}{\sigma_Y} \right)^2 = \nu_Y \quad (2-3)$$

$$\beta_z = \frac{\mu_z}{\sigma_z^2} = \frac{\gamma \mu_Y}{\gamma^2 \sigma_Y^2} = \frac{\beta_Y}{\gamma} \quad (2-4)$$

ここで μ_Y 、 σ_Y は式 (2-1) に示す Y の平均値と標準偏差であり、 ν_Y 、 β_Y は Y を同じくガンマ分布で近似された時の分布パラメータである。これより降雨減衰分布を求めるには降雨強度

の n 乗 ($R^n \equiv X$) の空間的な変化を示す降雨空間相関関数が必要であることが分かる。降雨強度 n 乗の空間相関は一般的に降雨強度 R の空間相関と同じく $\rho_R(x) = \exp(-\alpha x^\delta)$ の指数型で表されたと考えられている²⁸⁾。これを用いるならば、 Y の平均値及び標準偏差は細分化された伝搬路各地点での時間的にみた降雨強度の平均値と分散とが等しいならば以下の式で求められる。

$$\text{平均値；} \quad \mu_Y = \mu_X \cdot D \quad (2-5)$$

分散；

$$\sigma_Y^2 = \left\{ 2D \int_0^D \rho_R(x) dx - 2 \int_0^D x \rho_R(x) dx \right\} \sigma_X^2 = G(\alpha, \delta, D) \sigma_X^2 \quad (2-6)$$

ここで μ_X 、 σ_X は X 即ち降雨強度の n 乗の平均値と標準偏差であり、 $G(\alpha, \delta, D)$ は降雨の空間的な変化による降雨減衰変動の大きさを示すパラメータである。

上記を総合すれば、降雨減衰分布は式(4.1)において積分表示されているガンマ関数と第2種不完全ガンマ関数の近似式が与えられるならば2つのパラメータ ν_Z 、 β_Z は式(2-3)～式(2-6)で計算できるので解析的に求めることができる²⁵⁾。

2. 2. 2 任意確率における降雨減衰量

次に審査基準で用いられている任意の時間率における降雨減衰量を求める計算方法を以下に示す。距離 D における降雨減衰量は一般的に式 (2-1) で計算できた。これより降雨減衰量の確率 p % 値はこの式を基に以下の式に変形できる。

$$Z_p = \gamma \int_0^D R(x)^n dx \Big|_p = \gamma R_p^n D \frac{\int_0^D R(x)^n dx}{\gamma R_p^n D} \quad (2-7)$$

$$\equiv \gamma K_p R_p^n D$$

$$K_p = \frac{\int_0^D R(x)^n dx}{\gamma R_p^n D} = \frac{Y_p}{D \cdot X_p} \quad (2-8)$$

ここで K_p は一様降雨補正係数と呼ばれ⁹⁾、降雨の降り方が伝搬路に沿って一様でない効果を表すパラメータであり、伝搬路に沿って変化する降雨強度をそのまま積分して得られる降雨強度 (積分雨量) による減衰量と伝搬路に沿って一様に降雨が降っていたと仮定して計算される降雨減衰量との、確率 p における比として求められる。この値は式(2-6)からも明らかのように、降雨の空間相関関数とガンマ分布に近似された X の分布の形状パラメータ ν_X に依存する。

さらに降雨減衰分布の p % 値を求める式 (2-7) は基準となる特定確率における降雨強度 R_0 を用いると以下のように変形できる。

$$Z_p = \gamma R_p^n K_p D = \gamma K_p R_0^n \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^n D \equiv \gamma K_p R_0^n \Gamma_p D \dots\dots\dots (2-9)$$

ここで R_0 は降雨設計値、 Γ_p は降雨設計値の確率値で規格化された相対値であり、ガンマ分布で表される $X (\equiv R^n)$ の確率分布の形状を表す関数²³⁾ となり、ガンマ分布の形状パラメータ ν のみに依存する。この式はガンマ分布を決定する ν 、 β の2つのパラメータのうち量的パラメータ β に変わり降雨設計値を用いて決定している。降雨設計値としては現在強雨期 3 ヶ月の 0.0075% 値が用いられているので、これをそのまま用いて計算する場合には強雨期の形状関数となる。現在の回線設計では年間の不稼働率によって評価されるので、年間分布における確率は一般的に強雨期と等価な月数を年間 M ヶ月とすれば強雨期の確率の $(M/12)$ 倍となり、逆に年間で与えられた確率を強雨期で考える場合には年間確率の $(12/M)$ 倍とする必要がある。これより回線設計で用いる形状関数は次式で表わされる²⁵⁾。

$$\Gamma_p = (R_{12p/M} / R_{0.0075})^n \quad (2-10)$$

2. 3 審査基準降雨減衰推定法

2. 3. 1 電気通信用 11/15GHz 帯デジタル方式

電気通信用 11/15GHz 帯デジタル方式では降雨減衰量 Z の分布における累積確率 $p\%$ 値 Z_p は式 (2-9) に基づき次式で表している⁹⁾。

$$Z_p = \gamma \cdot R_0^n \cdot \Gamma_p \cdot D \cdot C_p \cdot K_p \quad (2-11)$$

ここで、各パラメータの意味と算出方法は以下の通りである²⁴⁾。

R_0 : 1分降雨強度の強雨期 0.0075% 値

降雨設計値として電波法審査基準では日本全国の主要地点の値が図示されている。

γ 、 n : 降雨減衰係数を求めるパラメータ (γ : [dB/km/mm/min])

$$\gamma = -170.3971 + 584.2427t - 742.788t^2 + 412.6263t^3 - 82.0161t^4 \quad (2.12)$$

$$n = 12.47145 - 31.28249t + 32.49227t^2 - 14.97753t^3 + 2.542102t^4 \quad (2.13)$$

$$t = \log f \quad f: \text{中心周波数[GHz]} \quad (9\text{GHz} \leq f \leq 50\text{GHz})$$

これらの降雨減衰係数に関する式は理論計算結果を多項式近似した式である。

Γ_p : ガンマ分布の $p\%$ を 0.0075% 値で正規化した値で以下の多項式で表わされる。

$$\Gamma_p = 7.102406 \cdot 10^{-3} - 3.8465364 \cdot 10^{-1} \cdot s + 4.5883133 \cdot 10^{-2} \cdot s^2 + 3.2882329 \cdot 10^{-3} \cdot s^3$$

$$s = \log p \quad (0.00001\% \leq p \leq 0.1\%) \quad (2.14)$$

ガンマ分布の形状を表わすパラメータであるが、この式は確率 0.0075% を与えた時に 1 となるので Γ_p は 0.0075% 値で規格化した式となっている。したがって、この式は式 (2-10) において等価月数を 12 カ月としたことに対応している。また、この式の形状から X 分布の形状パラメータ $v_x = 0.01$ が確認されている²³⁾。即ち分布の決定に必要な 2 つのパラメータのうち 1 つは固定されることにより、分布形は残り 1 つの降雨設計値が与えられれば決定する。

D : 伝搬距離[km]

K_p : 一様降雨補正係数

$$K_p = \exp(-a \cdot D^b) \quad (0km \leq D \leq 30km, 0.001\% \leq p \leq 0.1\%) \quad (2.15)$$

$$a = 3.54789 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{\left(\frac{0.280409}{\log p}\right)} \quad (0km \leq D < 15km)$$

$$a = 4.92856 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{\left(\frac{0.315439}{\log p}\right)} \quad (15km \leq D \leq 30km)$$

$$b = 0.93974 - 3.1846 \cdot 10^{-2} / \log p \quad (0km \leq D < 15km)$$

$$b = 0.81364 - 6.2562 \cdot 10^{-2} / \log p \quad (15km \leq D \leq 30km)$$

K_p を計算するこの式もガンマ分布に近似された X 分布の形状パラメータ $v_x = 0.01$ 、降雨空間相関関数 $\rho(D) = \exp(-0.1D)$ に基づいて導出されたことが確認されている²³⁾。

C_p : 計算値の分布と実際の分布が一致しないための補正係数

$$C_p = \exp(-\beta \cdot D) \quad (2.16)$$

$$\beta = -4.245 \cdot 10^{-3} - 8.74 \cdot 10^{-4} s + 1.3884 \cdot 10^{-3} s^2 \quad (0.001\% \leq p \leq 0.1\%)$$

$$\beta = -0.0126 - 7.8632 \cdot 10^{-3} s \quad (0.00001\% \leq p \leq 0.001\%)$$

この C_p パラメータは理論的に導かれたものではなく、実用的な観点から導入されたパラメータである。確率の小さな領域で降雨減衰を飽和させる傾向をもたらすが、20GHz 帯では考慮されていない。

2. 3. 2 20GHz 帯デジタル方式

20GHz 帯の場合も年間の降雨減衰分布の p % 値の推定には強雨期における 1 分降雨強度の 0.0075% 値を用いて式 (2-9) に基づき以下の式で表わされる²⁹⁾。

$$Z_p = \gamma \cdot R^n \cdot \Gamma_p \cdot D \cdot K_p \quad (2.17)$$

ここで、各パラメータの意味と算出法は以下の通りである²⁴⁾。

R : 強雨期における 1 分降雨強度の 0.0075% 値 (降雨設計値)

γ 、 n : 降雨減衰係数を求めるパラメータ (γ : [dB/km/mm/min])

$$\gamma = 0.0422 f^{1.676} \cdot 1.1 \quad (2.18)$$

$$n = 1 \quad (2.19)$$

原論文では周波数が $17.7\text{GHz} \leq f \leq 21.2\text{GHz}$ と制限されている。また、 γ パラメータの値は理論計算結果を $n = 1$ と固定して求めた近似式に実測結果に基づき 1.1 倍して補正している。

D : 伝搬距離[km]

Γ_p : ガンマ分布の p % を 0.001875% 値で規格化した値

$$\Gamma_p = -0.489 - 0.5107s + 0.013s^2 \quad (2.20)$$

$$s = \log p \quad (0.00003\% \leq p \leq 0.03\%)$$

ガンマ分布の形状を示す関数であり、0.001875% (=0.0075% × 3/12) で規格化されているので、等価月数を 3 カ月としていることが分かる。またこの式の形状から X 分布の形状パラメータが $\nu_x = 0.0075$ と固定されていることが確認され、分布を決定するパラメータの数を降雨設計値だけにしている²⁵⁾。

K_p : 瞬間的にみた雨量が一樣でないための補正係数

$$K_p = \exp(-fp\sqrt{D}) \quad (2.21)$$

$$f_p = 4.285 \cdot 10^{-2} - 5.689 \cdot 10^{-2} u - 1.258 \cdot 10^{-2} u^2 - 1.018 \cdot 10^{-3} u^3$$

$$u = \log(4p) \quad (0.0003\% \leq p \leq 0.03\%)$$

ここで変数 u を対象とする確率の 4 倍を用いている (確率 = $4p$) 理由は、 K_p として強雨期分布の場合の値を使用するためである。また、ガンマ分布に近似された X 分布の形状パラメータ $\nu_x = 0.0075$ 、降雨空間相関関数 $\rho(D) = \exp(-0.3D^{0.5})$ に基づいて導出されたことが確認されている²⁵⁾。

最後に計算値の分布と実際の分布とが一致しないための補正係数 C_p は本周波数帯では 1 を用

いるので、式(2.17)では省略されている。

2. 3. 3 両周波数帯推定法の比較

電波法関係審査基準に掲載されている2つの周波数帯における降雨減衰推定法を提示したが、共に分布を決定する2つのパラメータのうち分布の形状を示す ν パラメータは固定され、基本的には式(2-9)に基づいて強雨期3か月の0.0075%値を降雨設計値とするガンマ分布を表わす式で構成されている。両推定法の差は分布パラメータ ν と降雨空間相関関数及び年間において強雨期と等価な降雨が発生する月数の差である。これらの差異をとりまとめて表2-1に示す。

表2-1 審査基準で用いられたパラメータ値の比較

パラメータ	11/15GHz帯	20GHz帯
降雨設計値； R_0	強雨期0.0075%値	強雨期0.0075%値
R^n 分布形状パラメータ； νx	0.01	0.0075
ガンマ分布形状関数； Γ	$\nu x=0.01$ で導出	$\nu x=0.0075$ で導出
降雨空間相関関数； $\rho(D)$	$exp(-0.1D)$	$exp(-0.3D^{0.5})$
一様降雨補正係数； Kp	降雨相関、 $\nu x=0.01$ で導出	降雨相関、 $\nu x=0.0075$ で導出
形状関数規格化確率	0.0075%	0.001875%
強雨期と等価な月数	12ヵ月	3ヵ月

3 ミリ波帯高速無線伝送システム試験結果

3. 1 データ処理結果に関する考え方

3. 1. 1 電波伝搬特性試験について

ミリ波帯高速無線伝送システム装置による受信電力測定と雨滴計数型雨量計による降水強度測定を中心として、自動温湿度計による気温と相対湿度の観測等を実施した。具体的に提示する項目は、積分時間の異なる降雨強度の変換に必要となる降雨強度の自己相関関数、適応変調方式やルートダイバーシチ方式等の装置切替時の設計に必要となる降雨及び降雨減衰の継続時間特性、同じく降雨強度及び降雨減衰の変化速度である。また、降雨及び降雪イベントのうち本編では掲載できなかったその他の降水状況及び降雪の種類等の分類等で用いてきた気温及び湿度の変化状況についても取りまとめている。

なお、代表的なイベントの一覧については、以下の表 3-1 のとおりであるが、各イベント毎の説明、受信電力変化やアンテナ表面変化例の一覧表は、本編第 4 章に示しているためここでは省略した。

表 3-1 代表的なイベントにおける統計量

項番	イベントタイプ	開始時刻	終了時刻	継続時間 [h]	最大減衰量 [dB]	最大 1 分降水強度 [mm/h]	総降水量 [mm]	最大 BER	最高気温 [°C]	最低気温 [°C]
①	降雨	2009/11/17 03:00	2009/11/18 18:00	39	23.38	27.888	86.5	0	11.5	3.6
②	降雨	2009/11/19 13:00	2009/11/20 12:00	23	27.49	45.318	28.5	1.70E-04	14	6.5
③	降雪直前の降雨	2009/12/15 15:00	2009/12/16 13:30	22	24.34	21.912	48.2	2.98E-07	8.4	1.7
④	みぞれ＋湿雪	2009/12/16 13:30	2009/12/17 08:00	18	28.06	12.45	19.5	1.00E-02	4.5	0.3
④	湿雪＋アンテナ着雪	2009/12/17 23:00	2009/12/18 16:00	17	28.65	12.45	13.9	1.00E-02	3.7	0.5
⑤	湿雪＋アンテナ積雪	2009/12/19 09:00	2009/12/20 08:00	23	28.65	14.94	35.4	1.00E-02	4.6	0.2
⑥	乾雪＋アンテナ積雪	2010/01/13 05:00	2010/01/14 15:00	34	23.64	9.0	24.7	4.70E-08	3.3	-0.9

3. 1. 2 Ping 伝送試験について

本試験においてデータ取得された期間は、平成 21 年 11 月 19 日から平成 22 年 1 月 19 日までの約 2 か月間であり、本編に特徴のある日時をピックアップし、降雨強度・受信電力とタイムアウト回数の相関関係を示し、資料編においては、タイムアウトしたすべての日時等を示している。

3. 2 降水強度関係測定結果

3. 2. 1 降水強度自己相関

(1) イベント時降水強度自己相関

降水強度の自己相関は積分時間の異なる降雨強度分布の変換に必要なパラメータである。例えば1分降雨強度を測定していないAMeDASの10分雨量や1時間雨量データから1分降雨強度分布を推定する時に用いられる。その他にも降雨強度の時間的な変化に関連するパラメータとしても活用できる。自己相関は t を時間差として、 $\rho = \exp(-\alpha t^{0.5})$ とした関数形でよく近似できるとされ、その時の係数 α は0.193、及び0.247が日本では用いられている²⁶⁾。この α の値は日本の代表的な8都市での実測データから求められた近似値であり、前者は降雨データの実測結果、後者は積分時間1時間と1分との自己相関の変換誤差が最小となった時のそれぞれ近似値である。

図3-1に表3-1に示した代表的な各イベントにおける降水強度自己相関を示す。ここで(a)が降雨イベント、(b)が降雪イベントの結果である。(a)には参考までに前述した推定曲線も併記している。ただし上記推定曲線は無降雨時も含めたある一定期間を対象としておりイベントには適用できない可能性がある。これらの図より、降雨イベントでは比較的上記推定曲線に近い結果となっていることがわかる。一方、降雪イベントに関しては時間差が20分から30分及び50分から60分にかけて相関係数が高くなる特性や相関係数がマイナスとなる傾向などが見られており、降雨自己相関に比べて変化傾向が一定せず多岐にわたっている。

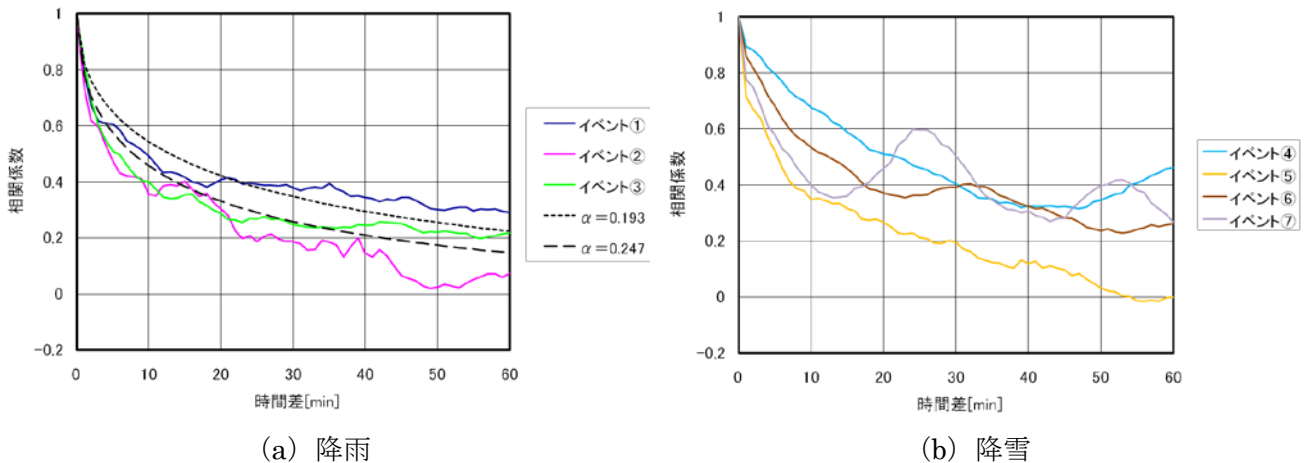


図3-1 降水強度自己相関 (イベント)

(2) 月別及び試験期間総合自己相関

図3-2に平成21年11月から平成22年1月までの各月、図3-3に試験期間総合における降雨強度及び降雪強度の自己相関特性を示す。これらの図は降雨時だけでなく無降雨時も含む全時間の1分降水強度データを基に求めている。これらの図のうちまず図3-2の月毎の自己相関関数について考察する。この図によれば、降雨の場合は試験期間が短くデータ数が少なくまた降雨に分類されるデータの少なかった1月の結果を除き同じ傾向を示すが前述した推定結果

と比べるとやや相関が大きい傾向となった。一方降雪については11月には観測されず12月と1月のみの結果で、全降雪の場合と各降雪の種類毎の結果とを示している。その結果全降雪時については時間差約30分に相関の高くなる傾向がみられる。一方雪の種類毎の結果ではみぞれの場合は12月、1月ともほぼ同じ稽古を示し、降雨自己相関と近い結果を示しているが、湿雪と乾雪については時間差30分程度で相関の高くなる傾向を有し、相関係数そのものも降雨やみぞれの相関係数よりも少し高めである。次に図3-3の測定時間総合に関しては、各月の結果とほぼ同一の傾向を示している。

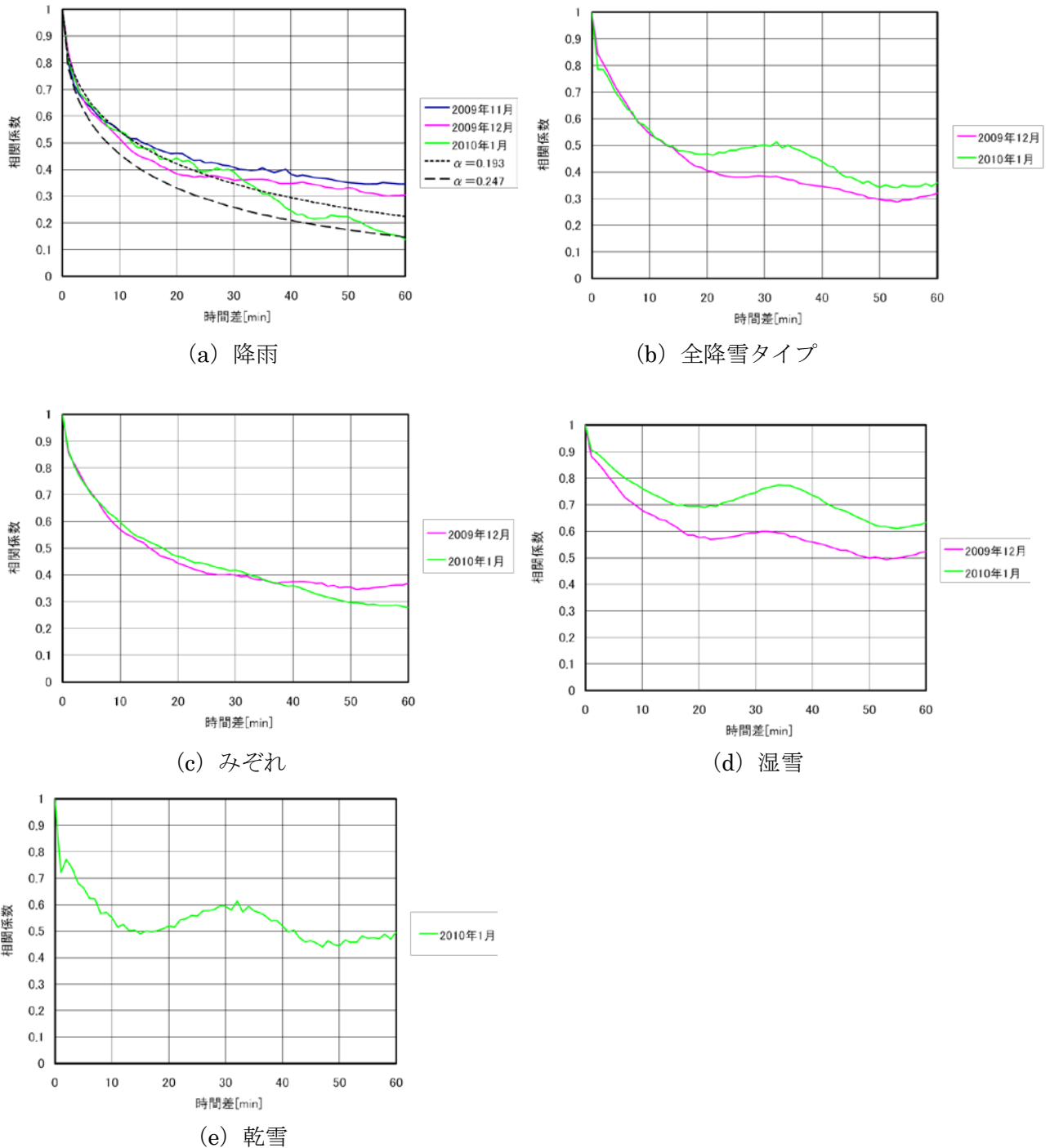


図3-2 降水強度自己相関（各月）

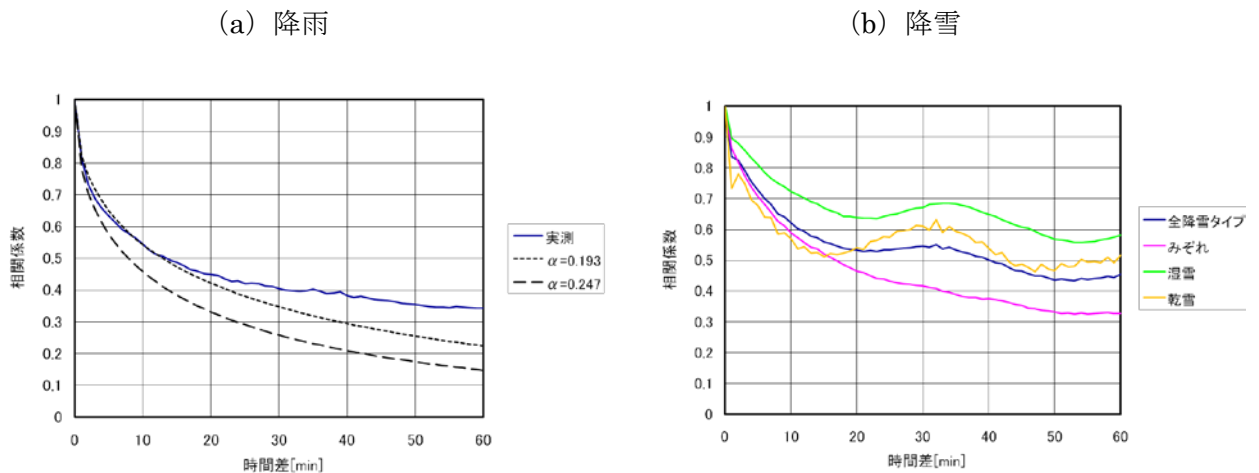


図 3-3 降水強度自己相関 (試験期間総合)

3. 2. 2 降雨強度継続時間

(1) 継続時間特性の表現方法

ある降雨強度以上となる時間が継続して生じ、その閾値となる降雨強度まで回復するまでの時間を降雨強度継続時間という。この量は降雨強度累積確率分布のある降雨強度での確率がその降雨強度以上となるすべての時間と全体の時間に対する比であるのに対して、1つ1つの降雨を継続時間という点で詳細に取り上げたものである。降雨強度継続時間は降雨減衰継続時間の基礎となるデータと考えられる。降雨強度継続時間特性には発生回数及び発生時間に基いた以下のような表現方法がある。降雨減衰継続時間についても以下の降雨強度 R mm/h を降雨減衰量 L dB として同様に考えられる。

- 1) 降雨強度が R mm/h 以上となり、継続時間が D 秒以上継続したイベントの発生回数 $N(D/R)$
- 2) 降雨強度が R mm/h 以上となる継続したイベントの総発生回数 $N(R)$ の中で、継続時間が D 秒以上継続したイベントの発生回数 $N(D/R)$ の割合

$$P_n(D/R) = \frac{N(D/R)}{N(R)} \quad (3-1)$$

- 3) 降雨と判断された総降雨時間 Tr もしくは全観測時間 T の中で、降雨強度 R mm/h 以上となり継続時間が D 以上継続したイベントの総発生時間 $T(D/R)$ の時間率 $P_t(D/R)$

$$P_t(D/R) = \frac{T(D/R)}{[Tr]_{or}[T]} \quad (3-2)$$

(2) 降雨強度継続時間累積発生回数

年間における発生回数に基づく降雨強度継続時間累積発生回数を推定する方法として英国

から RAL (Rutherford Appleton Laboratory) モデルが報告されている³⁰⁾。本モデルによる対数正規分布のパラメータを降雨強度の関数で表した次式で表現できる。ここで R は降雨強度、 D_R は継続時間、 N_0 、 μ 及び σ は対数正規分布のパラメータを示す。

$$N_R(D/R) = N_0 \exp\left\{-\frac{(\ln D_R - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3-3)$$

表 3-2 にヨーロッパ及び日本について報告されている各パラメータを求める計算式を示す。日本における計算式は都内 4 地点における 4 年間にわたる測定データを用いて導出された値である³¹⁾。ここで降雨ゾーンとは ITU において世界における降雨の降り方を収集し、それに基づき導出された地域毎の平均的な降雨強度分布を与えることによって分類した記号である。

表 3-2 N_0 、 μ 、 σ

地域	国	降雨ゾーン	N_0	μ	σ
Chilbolton	U.K	F	$1.7 \cdot 10^4 R^{-1.76}$	2	$(1.93 - 0.02045R)^{0.5}$
Lillehammer	Norway	E	$5.56 \cdot 10^2 R^{-1.47}$	$6.76 R^{-0.12}$	$1.16 R^{-0.19}$
Oslo	Norway	G	$1.02 \cdot 10^3 R^{-1.36}$	$6.72 \cdot R^{-0.12}$	$1.07 R^{-0.12}$
Alesund	Norway	J	$2.46 \cdot 10^3 R^{-2.07}$	$6.63 R^{-0.13}$	$1.28 R^{-0.32}$
Tokyo	Japan	M	$2.32 \cdot 10^4 R^{-1.49}$	$3.17 R^{-0.09}$	$2.42 R^{-0.13}$

本試験では年間のデータは取得されていないので参考までに図 3-4 に試験期間総合における降水強度継続時間累積発生回数を示す。この図では 6 秒毎に移動した 1 分降水強度を用いて、20 mm/h ステップで統計処理した結果を示している。この図で(a)は降雨データによる分布であり、(b)はすべての降雪データによる分布である。これらの図によれば降雨だけでなくこれまで実測データのなかった降雪においても確率分布形は推定分布と同じく対数正規分布で近似できることが分かる。また、降雨の場合に限らず降雪の場合も降水強度が大きくなるにしたがって、発生回数が少なく、継続時間が短くなる傾向が見られる。

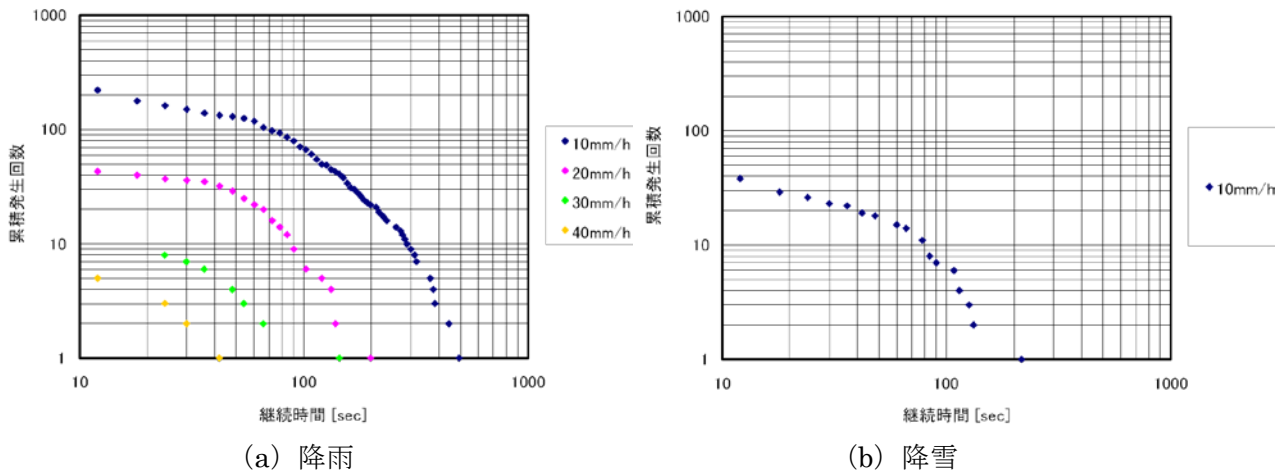
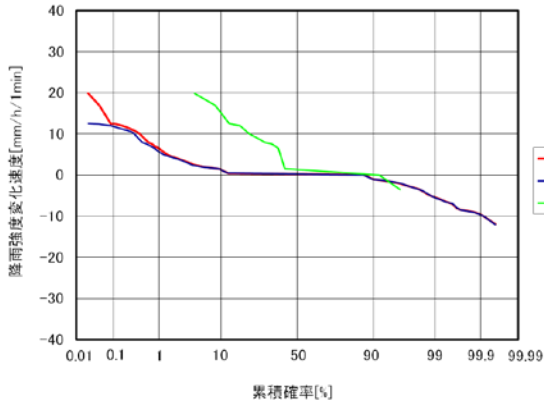


図 3-4 降水強度継続時間累積発生回数（試験期間総合）

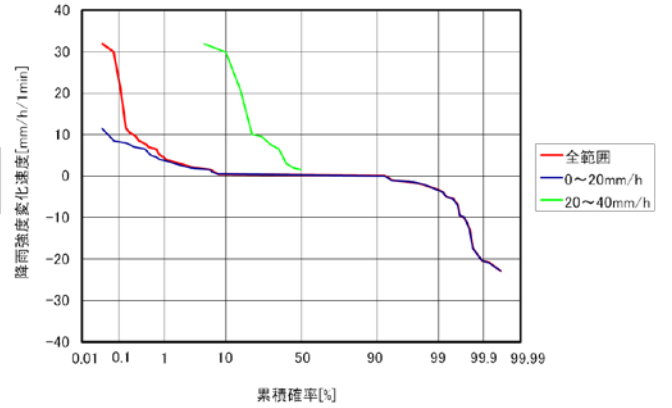
3. 2. 3 降水強度変化速度確率分布

降水強度変化速度は降雨減衰変化速度の基礎となるデータである。降水強度変化速度とはある時間間隔をもった2つの降雨強度の差と考えられるので、理論的にはある確率分布で変動する降雨強度の差の分布として計算される。ただし、ここでは細部にわたるので理論計算式等の提示は省略する。図 3-5 に表 3-1 に示した代表的な各降雨及び降雪イベントにおける、図 3-6 に試験期間総合におけるそれぞれ降水強度変化速度累積確率分布を示す。この図において負となる降水強度変化速度は降水強度が大きい値から小さい値に弱まる時のデータを表している。また、降水強度レベルの依存性を明らかにするため、20 mm/h 毎の降水強度レベルに変化速度を分類した。ここで $R_i - R_{i+1}$ を変化速度としたとき、先の時間における降雨強度 R_i が属するレベルに分類した。

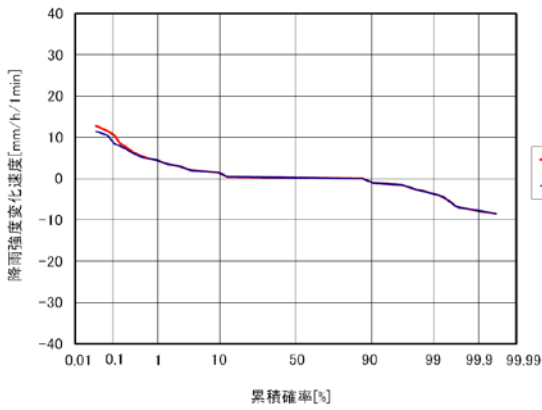
これらの図より、イベント②を除くと確率分布形はおおよそ正負対象になっており、降水が強まる時の速度と弱まる時の速度とが同程度であることがわかる。これらの確率分布の形状は隣接区間の減衰差等の減衰差分布と類似している。また、降水強度のレベル別にみると、降水強度が強くなるにしたがって、降水強度変化速度も大きくなる傾向がみられる。また、降雨強度の強い場合の分布形状が他の分布形状と大きく異なっている場合もあるが、これはデータ数が少ないためである。これらの結果によれば、これまで解析されたことのなかったイベント④以降の降雪の場合の変化速度も降雨の変化速度と同じ分布形状を示していることが確認できる。ただし、量的には降雨に比較して速度は大きくないことが分かる。



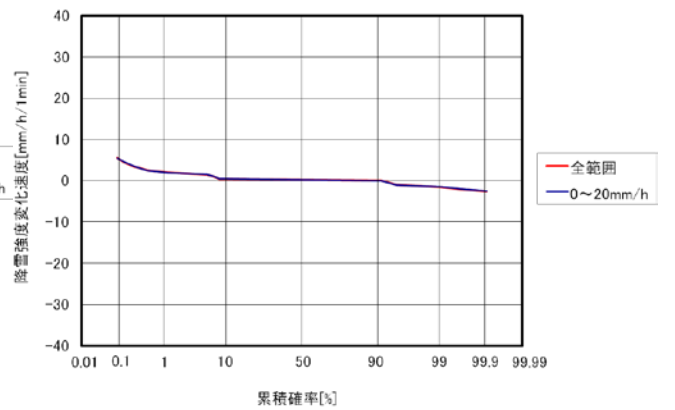
(a) イベント①



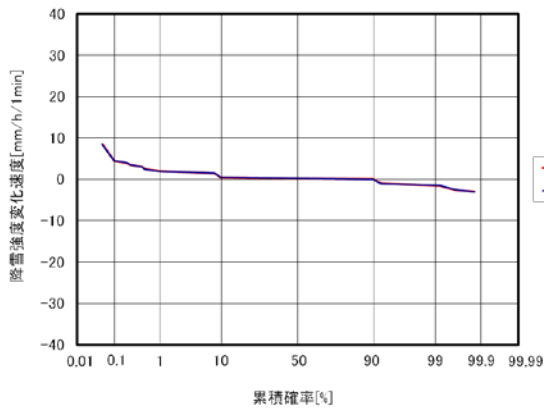
(b) イベント②



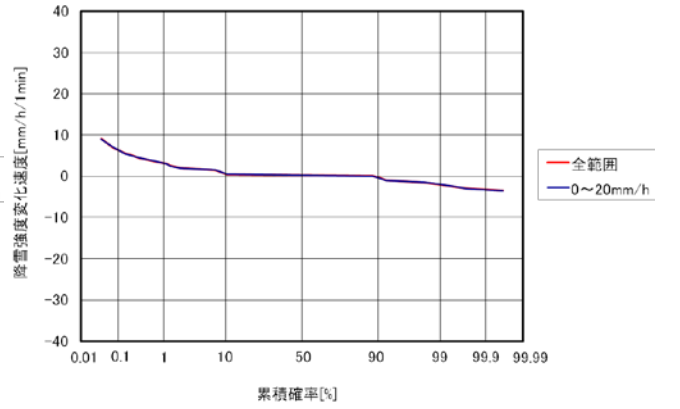
(c) イベント③



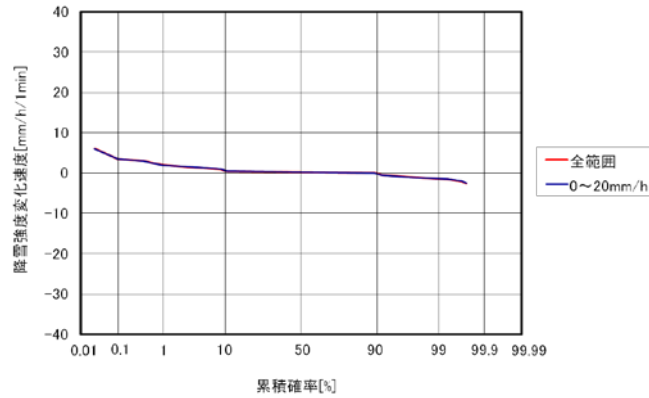
(d) イベント④



(e) イベント⑤

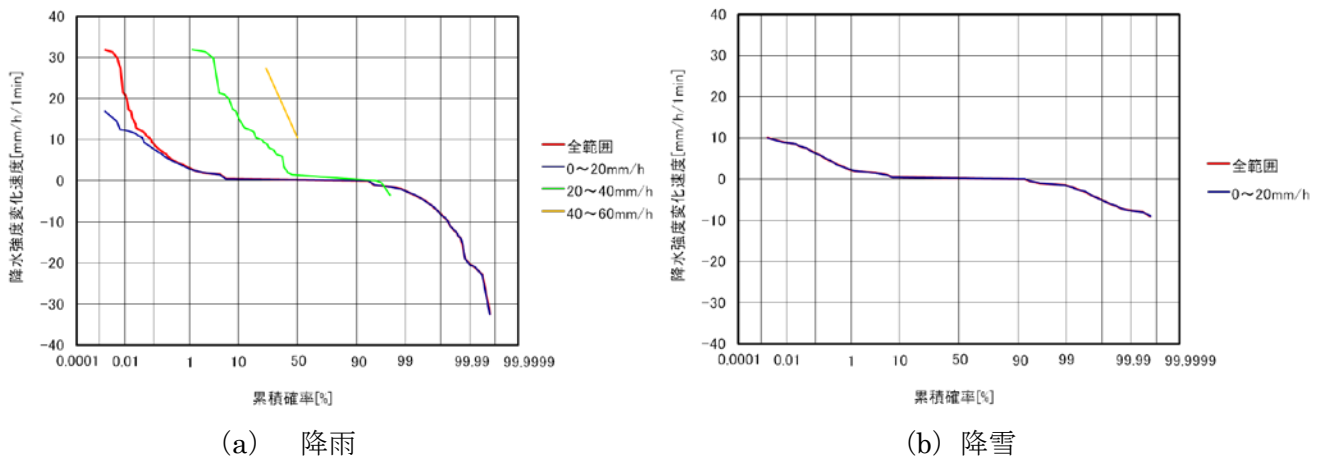


(f) イベント⑥



(g) イベント⑦

図 3-5 降水強度変化速度累積確率分布 (イベント)



(a) 降雨

(b) 降雪

図 3-6 降水強度変化速度累積確率分布 (試験期間総合)

3. 2. 4 降水強度確率分布

回線設計では回線の不稼働率を明らかにするために任意の回線における降雨減衰確率分布を推定することが必要となる。従来回線設計法では強雨期3か月における地点降雨強度確率分布の0.0075%値が降雨設計値として用いられて降雨減衰分布の推定が行われるため、地点降雨強度分布の導出が基本となる。本試験では強雨期のデータは取得されていないため、差当りこの地域の降雨状況を把握するために各月及び試験期間総合について地点降水強度分布を求めた。

図3-7に平成21年11月から平成22年1月までの各月及び試験期間総合における1分降水強度累積確率分布を示す。ここで(a)は各月毎、(b)は測定全期間の結果である。これらの図には降雨及び降雪による全データが含まれている。この図によれば、試験期間が強雨期間ではないために最大降水強度であっても11月における約45mm/hであった。また、降水の中でも降雪が顕著となる1月は最大降水強度が15mm/h以下であり、降雪の場合には降水強度が大きくなることは、まれであることが分かる。

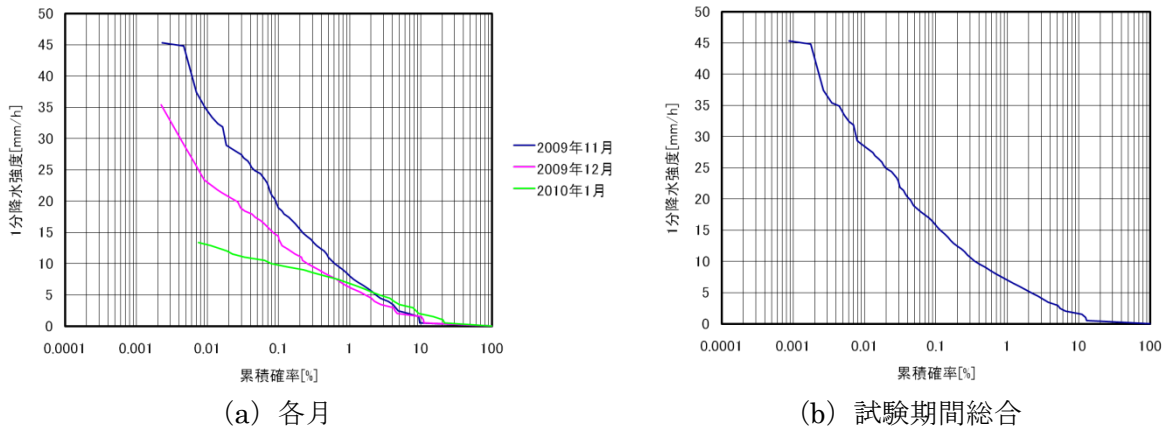
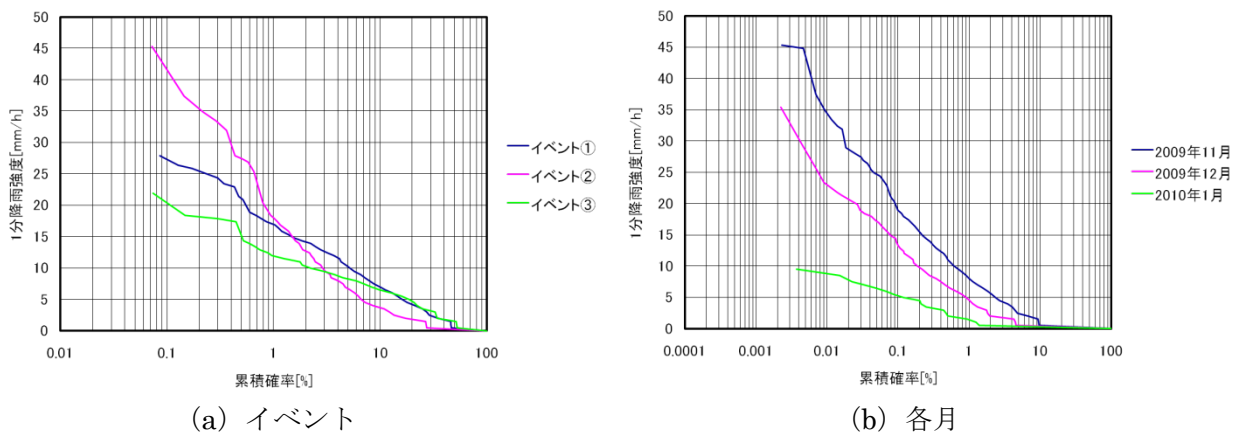
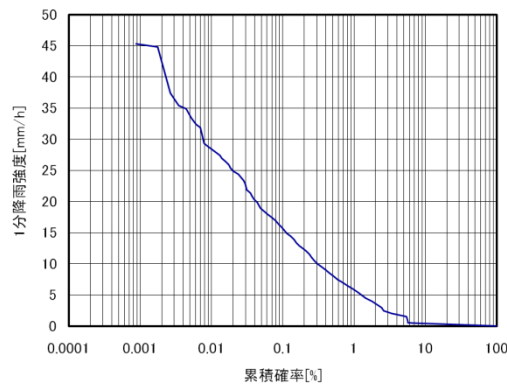


図 3-7 1分降水強度確率分布

3. 2. 5 降雨強度確率分布

ここでは降水のうち降雨のみを取り上げる。図 3-8 に代表的なイベント、平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月及び試験期間総合における 1 分降雨強度確率分布を示す。ここで (a) がイベント、(b) が各月、(c) が試験期間総合の結果である。ここに示した分布は受信電力低下の原因が降雨の場合のデータについて減衰の大きな方から積分し、全時間に対する時間率として求めている。ここに示した確率分布で (b) の月毎の分布によれば 1 月の確率が他の月に比べて小さい。これはこの月の降水には降雪が多く降雨は少ないこと、1 か月を通して降雨の場合も強雨とはならないこと等のためである。ここに示した図のうち (b) 及び (c) の各月及び試験期間総合の降雨強度分布を図 3-7 に示した各月及び試験期間総合の降水強度分布と比較すると、降雪の観測されない 11 月の結果は両者の分布は一致し、大きな降水強度の原因が降雨である 12 月の分布は時間率の小さな領域で両者の分布はほぼ一致するが、降水の主要な原因が降雪である 1 月の分布は両分布の差が大きいことが分かる。また、試験期間総合の分布については大きな降水強度の原因は降雨であるので時間率の小さな領域において降雨強度分布と降水強度分布とはほぼ一致している。





(c) 試験期間総合

図 3-8 1分降雨強度確率分布

3. 2. 6 降雪強度確率分布

ここでは降水による減衰のうち降雪による減衰データだけを対象として統計処理した。図 3-9 に示した降雪の代表的なイベント④～⑦の 4 イベントについて 1 分降雪強度の確率分布を示す。

この図によれば各イベントの総降水量については差が見られる。また、降雪の種類も同じではないが、確率分布についてはほぼ類似の分布形を示している。次に図 3-10 に平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月について雪の種類毎及び全降雪時の 1 分降雪強度の確率分布を示す。最後に図 3-11 に試験期間総合について 1 分降雪強度確率分布を示す。ここで降雪と降水との分類及び降雪の種類の判別には先にも示したようにアンテナ等の映像データ、気温データ及び国土交通省防災情報提供センターが情報提供している上越市港町の上越地域振局直江津港湾事務所の 3 時間毎の天気予報データ（以下「自治体データ」）を利用した。これらの図によれば、どの雪の場合も月による差異は大きくなく、各月及び全測定期間とも雪の種類による差異もそれほど見られなかった。

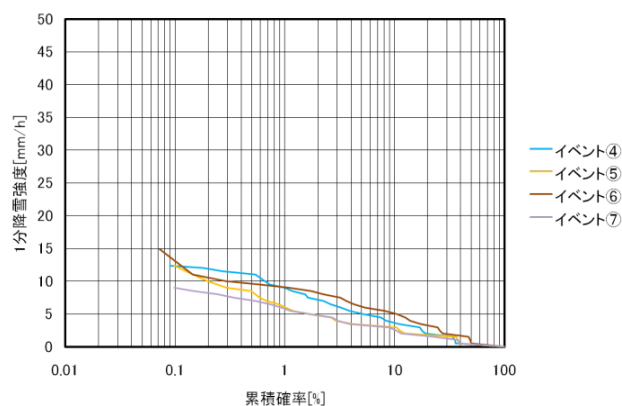


図 3-9 1分降雪強度確率分布（イベント）

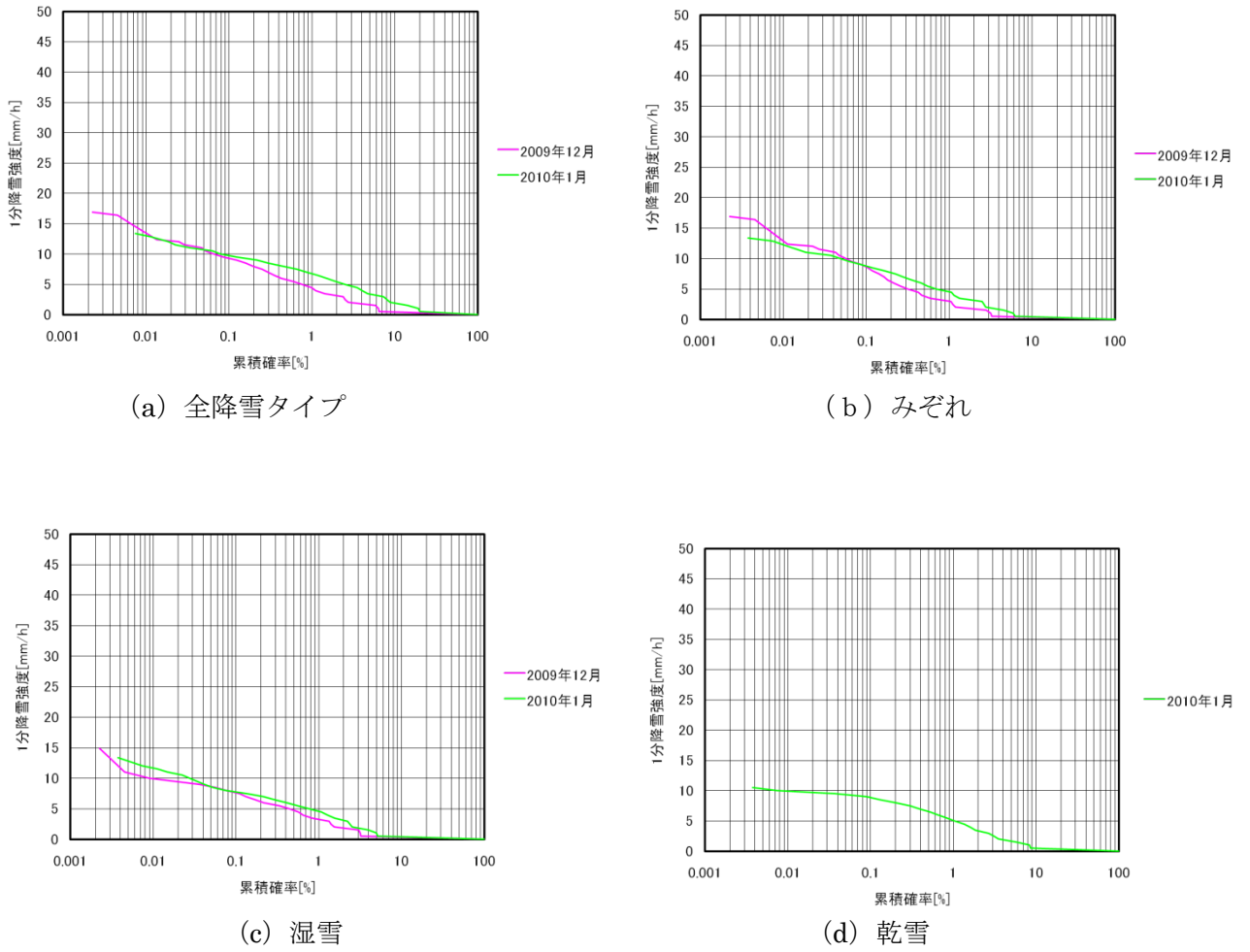


図 3 - 1 0 1分降雪強度確率分布 (各月)

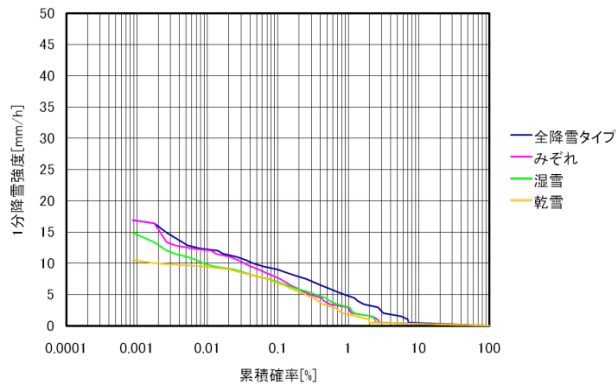


図 3 - 1 1 1分降雪強度確率分布 (試験期間総合)

3. 3 降水減衰関係測定結果

3. 3. 1 降水減衰継続時間累積発生回数

降水減衰がもたらす受信電力変動において、ある降水減衰レベル以上となる減衰が継続して生じ、当初の減衰レベルまで回復するまでの時間を降水減衰継続時間と言う。降水減衰の継続時間分布は、当該回線の降水断継続時間の目安やルートダイバーシチ等の切替方式の設計に必要な特性である。

降雨減衰継続時間発生回数は降雨強度継続時間発生回数を用いて導出できると考えられる。また ITU-RP 530-10³²⁾によると d [km]の回線における降雨減衰 A [dB]は地点降雨強度が R [mm/h]のとき次式により計算できる。

$$A = \gamma \cdot d \cdot r = aR^b \cdot d \cdot r \quad (3-4)$$

ここで γ は降雨減衰係数、 a 及び b は周波数と偏波に依存する係数、 r は伝搬区間において降雨が一様でない為の補正係数を表す。また、降雨強度継続時間累積発生確率と降雨減衰継続時間累積発生確率との関係は、前述した都内 4 地点における 4 年間にわたる測定データを用いて以下の式が報告されている³³⁾。

$$\tau_R = 1.6\tau_A^{0.8} \quad (3-5)$$

前述した降雨強度継続時間特性における RAL モデル、表 3-2 及び式(3-5)を用いて降雨減衰継続時間発生回数を計算する式を導けば以下の対数正規分布を示す式で表される。

$$N_A(D_A/A) = 2.32 \times 10^4 R_A^{-1.49} \exp \left[-\frac{\{\ln(1.6D_A^{0.8}) - 3.17R_A^{-0.09}\}^2}{2(2.42 \times R_A^{-0.13})^2} \right] \quad (3-6)$$

ここで R_A は降雨減衰量が AdB として式 (3-4) から逆算された降雨強度を示す。この式において一様降雨でない為の補正係数 r は日本で報告されている以下の式を用いた²⁸⁾。

$$r = \exp(-0.11\sqrt{d}) \quad (3-7)$$

本試験では年間のデータは取得されていないので参考までに試験期間総合における降水減衰継続時間累積発生回数を図 3-12 に示す。この図では 1 秒毎にサンプルされた降水減衰量を用いて、5 dB ステップで統計処理した結果を示している。この図で(a)は降雨による減衰、(b)は降雪による減衰のそれぞれ継続時間特性を示している。これらの図によれば、これまで報告されたことのない降雪時においても降雨の場合と同じく降雪継続時間累積発生回数は対数正規分布で近似でき、

図より、降雨の場合も降雪の場合も降水減衰量が大きくなるにしたがって発生回数が少なく、継続時間が短くなる傾向が見られる。

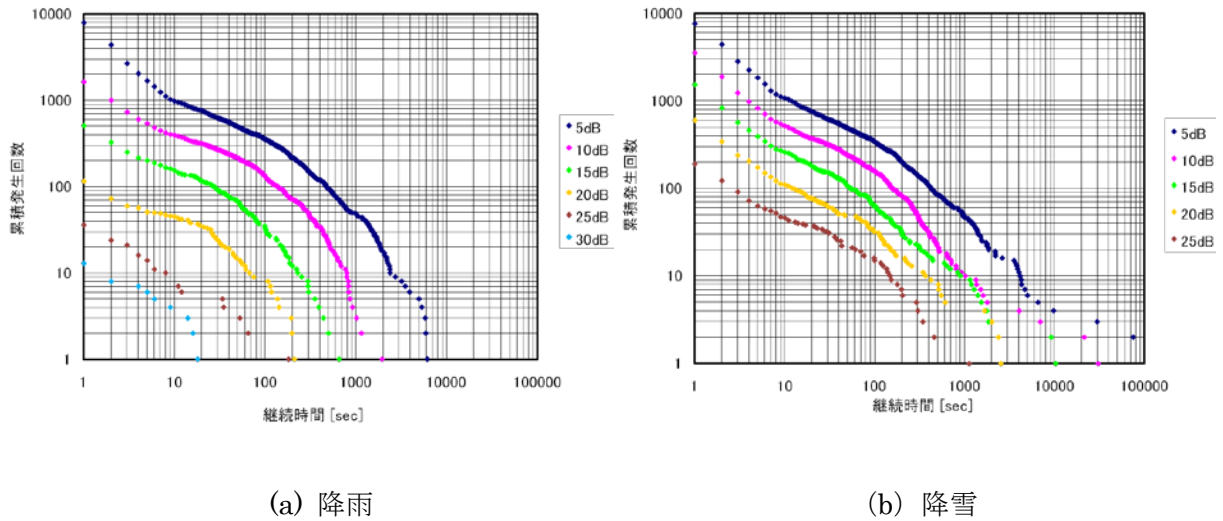
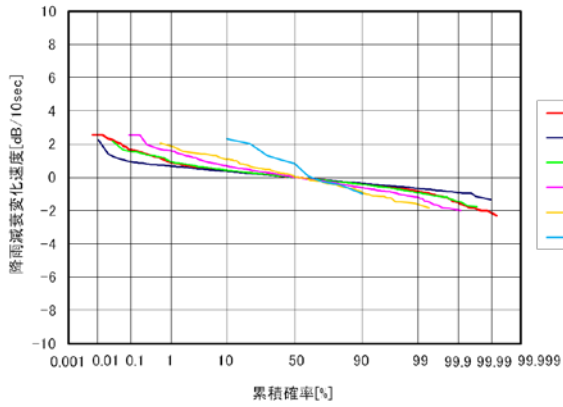


図3-1-2 降水減衰継続時間累積発生回数（試験期間総合）

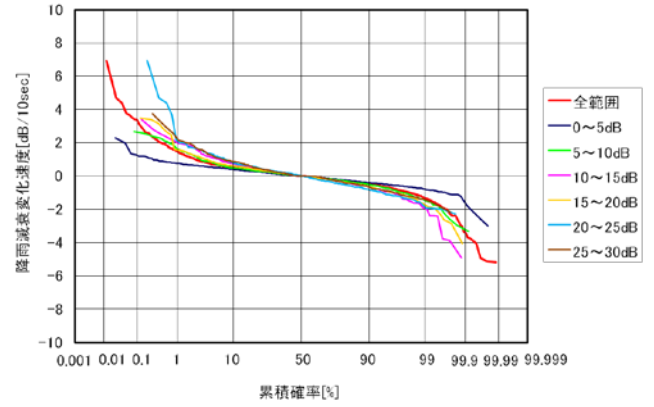
3. 3. 2 降水減衰変化速度分布

降水減衰変化速度は強雨時に無線ネットワークの切替え等を実施する際の設計に重要な特性と考えられている。図3-13に表3-1に示した代表的な降雨及び降雪の各イベント、図3-14に試験期間総合における降水減衰変化速度累積確率分布を示す。ここで受信電力は10秒毎のサンプルデータを基にその変化量を降水減衰変化速度とした。負となる降水減衰変化速度は減衰した状態から定常レベル方向への回復時のデータを表している。また、降雨減衰レベルの依存性を明らかにするため、すべての変化速度データをそのまま統計処理して求めた確率分布以外に、基準となった降水減衰量から ± 2.5 dB以内の減衰データを同一減衰レベルに分類して統計処理して求めた確率分布も併記した。

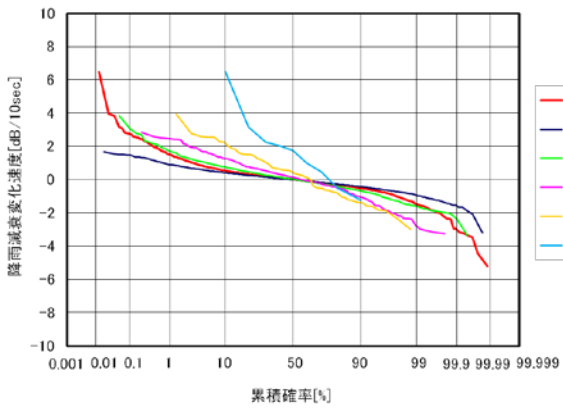
これらの図より、降水減衰変化速度分布は全データを総合した場合も減衰レベル毎に分類した場合もほぼ正負の変化速度が対称となっており、受信電力の落ち込み時の速度と回復時の速度とがほぼ等しいことを表している。これは降水強度の変化速度分布の傾向と同じである。また、これらの図によれば、データ数の少ない減衰量の大きな領域を除き降水減衰速度変化速度分布は降水強度変化速度分布と同じように降雨減衰差分布と同一の分布形状を示し、降雨減衰が大きくなると共に変化速度もおおきくなる傾向を示している。また、降雨イベントと降雪イベントとの比較では共に同じ傾向を示しているため、降雪減衰変化速度が特に降雨減衰変化速度と異なった取扱いをする必要がないことが明らかとなった。



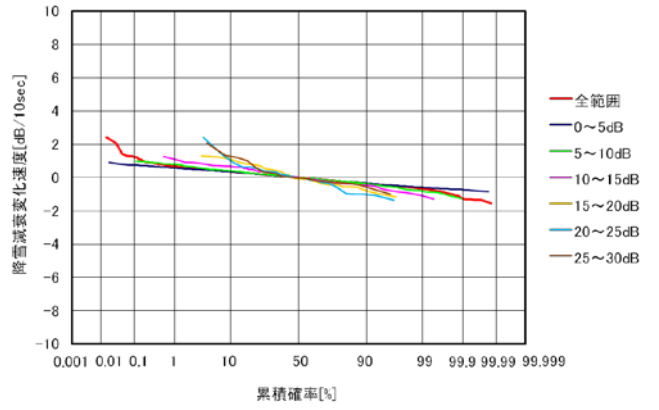
(a) イベント①



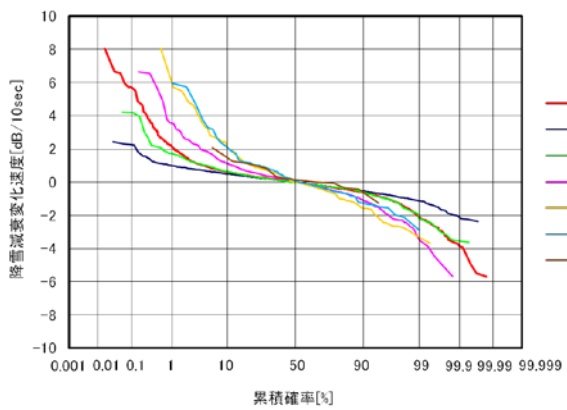
(b) イベント②



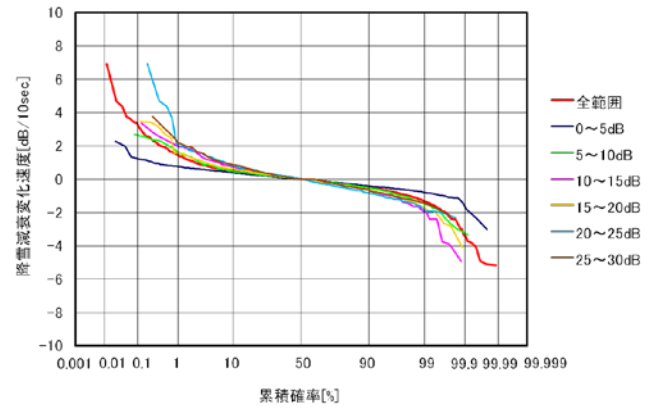
(c) イベント③



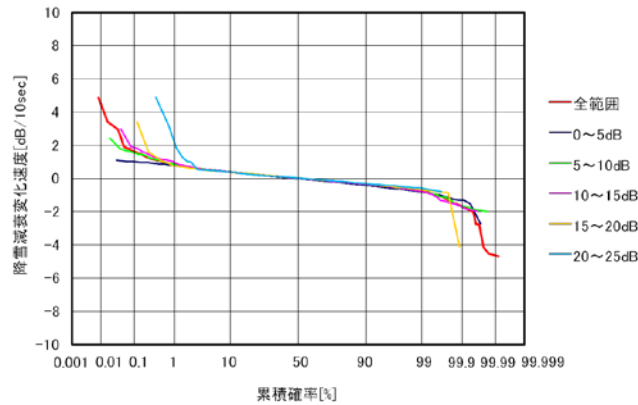
(d) イベント④



(e) イベント⑤

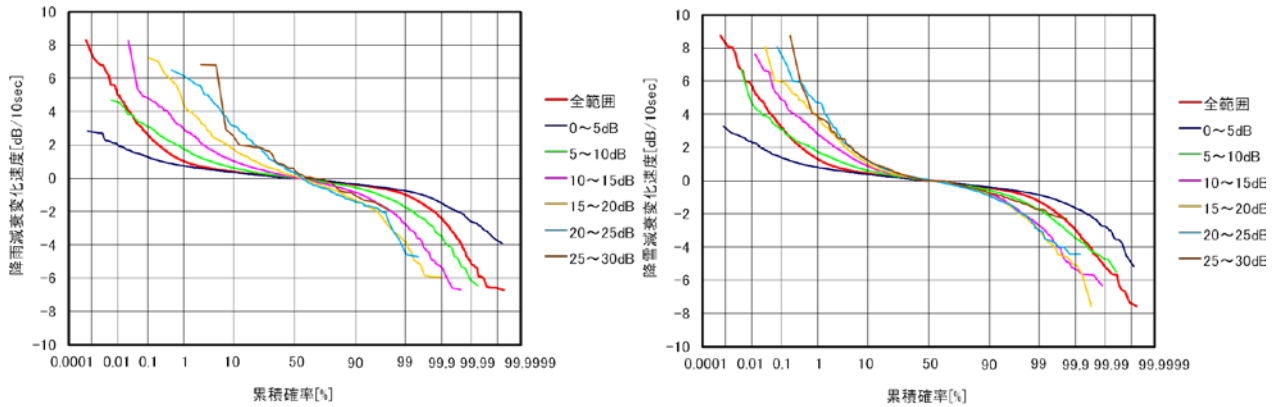


(f) イベント⑥



(g) イベント⑦

図 3-13 降水減衰変化速度分布 (イベント)



(a) 降雨

(b) 降雪

図 3-14 降水減衰変化速度 (試験期間総合)

3. 3. 1 降水減衰確率分布

図 3-15 に平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月及び試験期間総合における降水減衰累積確率分布を示す。これらの図には降雨及び降雪による減衰の全データが含まれている。この図において(a)は各月毎、(b)は試験期間総合の確率分布を示している。(a)の各月の確率分布によれば、各月の降水減衰量の最大値は約 30dB でほぼ同等である。しかし、既に示した各月の降水強度分布の結果によれば降水のうち降雪の割合の大きい 1 月の降水強度分布は他の月に比べて大きな降水強度となる確率は存在しなかった。この原因としては、降雪の観測された 12 月及び 1 月の降水減衰量にはアンテナ表面への着雪による減衰も含まれていることが考えられる。次に試験期間総合の確率分布では減衰量 28dB 程度で分布形が飽和する傾向が見られる。これは(a)の各月の確率分布においても 11 月を除き最大減衰量が同じ 28dB 程度でそれ以上の測定データが得られていないのでここが測定限界であったと考えてよい。11 月に最大減衰量が 30dB 以上であった原因としては定常受信電力が高かったことまたは測定装置の温度特性又は経年特性等

によって最小受信感度が上昇したこと等が考えられる。

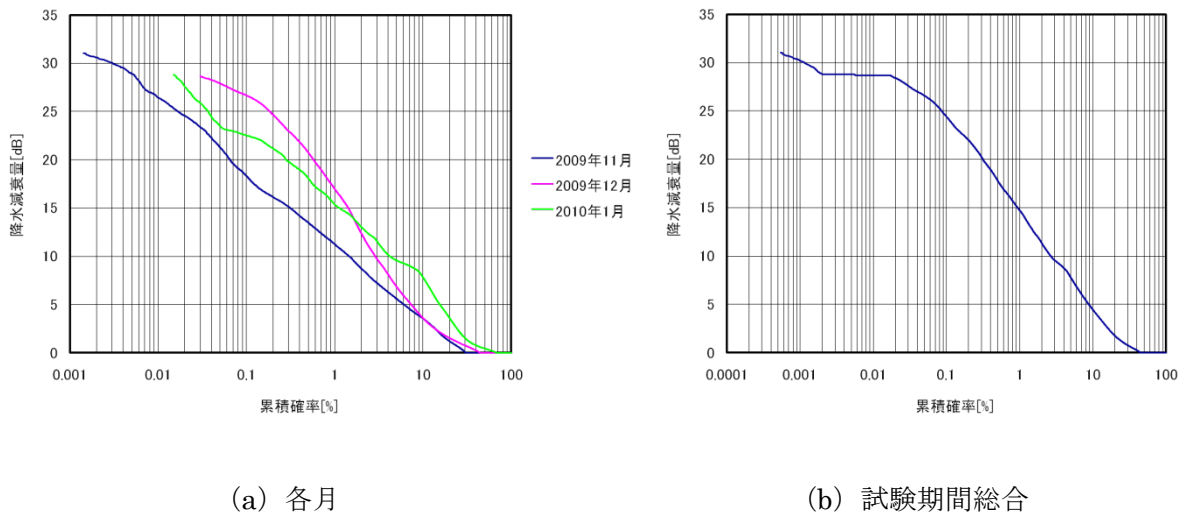


図 3-15 降水減衰確率分布

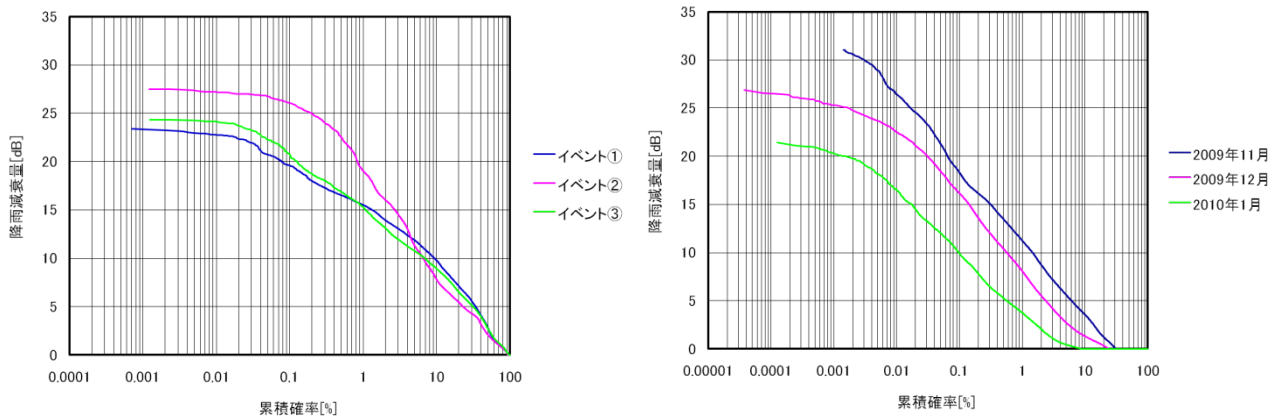
3. 3. 2 降雨減衰確率分布

ここでは降水減衰のうち降雨による減衰のみを取り上げる。図 3-16 に代表的なイベント、各月及び試験期間総合における降雨減衰累積確率分布を示す。ここで (a) が表 3-1 において減衰の原因が降雨であると分類されたイベント①～③の確率分布である。この図によればどのイベントとも飽和する閾値の減衰量はそれぞれ異なるが確率約 0.1% 以下の時間率で分布が飽和する傾向にあることが分かる。同じイベントにおける降雨強度の分布についてはこの傾向は見られないが、その原因の 1 つとしては降雨減衰測定系での測定限界の可能性もある。しかし、降雨強度分布の測定結果では積分時間が 1 分であることから最小時間率が 0.1% 程度であり、それ以下の時間率での結果は測定されていない。即ち降雨強度分布についてもより小さな時間率での測定が実施された場合には降雨減衰分布と同じように時間率の小さな領域で飽和する傾向が生じ得ると考えられる。この場合の飽和する原因としては降雨強度分布それ自体が降雨の強い領域で飽和する傾向があるとの知見に到達する。一方、降雨強度分布がより小さな時間率まで測定された場合も降雨減衰分布のように飽和しない場合も考えられる。その場合は 1 地点での測定データに基づく降雨強度分布に対して降雨減衰分布は送受信点間の距離を積分した量に比例するので、積分雨量が飽和する傾向を有することとなる。これらの原因についてはさらに検討する必要がある。

次に (b) が 11 月～1 月の各月の確率分布である。この図によれば 11 月の結果を除き減衰が飽和する傾向が見られる。また 12 月と 1 月の分布は降水確率分布に比べて降雪時のデータが除去されたので、11 月の分布に比べて減衰の少ない方にシフトされている。これはこれらの月の減衰の大きな原因が降雪時であることを示している。最後に (c) が試験期間総合の結果である。

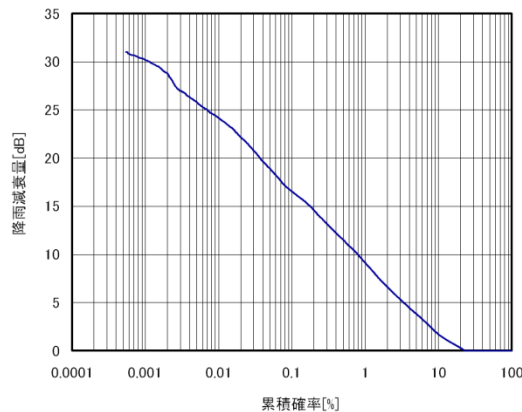
この図によれば降水時の試験期間総合の確率分布が飽和する傾向を有していたにもかかわらず飽和する傾向は現れていない。この原因としては降雨強度分布では降水減衰に含まれていた降雪時の着雪に原因する不自然な減衰が除かれたために一様な変化を有する確率分布の形状を示

したものと考えられる。



(a) イベント

(b) 各月



(c) 試験期間総合

図 3-16 降雨減衰確率分布

3. 3. 3 降雪減衰確率分布

ここでは降水による減衰のうち降雪による減衰のみを取り上げる。図 3-17 に表 3-1 に示した代表的なイベントデータのうち④～⑦の降雪時イベントにおける降雪減衰確率分布を示す。この図によれば各イベントの分布形状は大きく異なっているが最大減衰量はイベント⑦を除いて約 28dB と比較的大きい。先に示した各イベントの降雪強度分布によれば 4 つのイベントの分布形状には大きな差異はなかった。降雪強度分布にイベント毎の差が小さくても減衰分布に差異の生じた原因は、降雪時の減衰分布にはアンテナ表面の着雪による減衰も含まれており、着雪状況が個々のイベントで異なっているためと考えられる。そのため量的にも降雪強度分布から予測される減衰量よりも大きい結果となっている。次に図 3-18 に平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月、図 3-19 に試験期間総合における降雪減衰累積確率分布を示す。これらの図にはみぞれ、湿雪、乾雪といった雪の種類毎及びすべての降雪を含んだ時の確率分布を示している。雪の種類毎の分類方法は既に示した通りである。ここで乾雪の場合は 12 月には観測されなかったので

1月のみの確率分布を示している。これらの図によれば、全降雪とみぞれの場合の減衰確率分布は12月と1月の分布は降雪強度分布の場合と同様に類似の分布形を示しているが、湿雪の減衰分布は1月の分布が飽和する傾向を示している。この原因としては、これまで述べてきたように減衰分布には着雪による減衰の影響が含まれるためと考えられる。

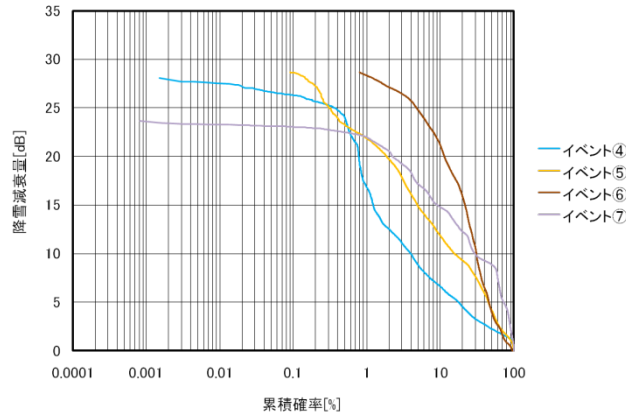


図3-17 降雪減衰確率分布 (イベント)

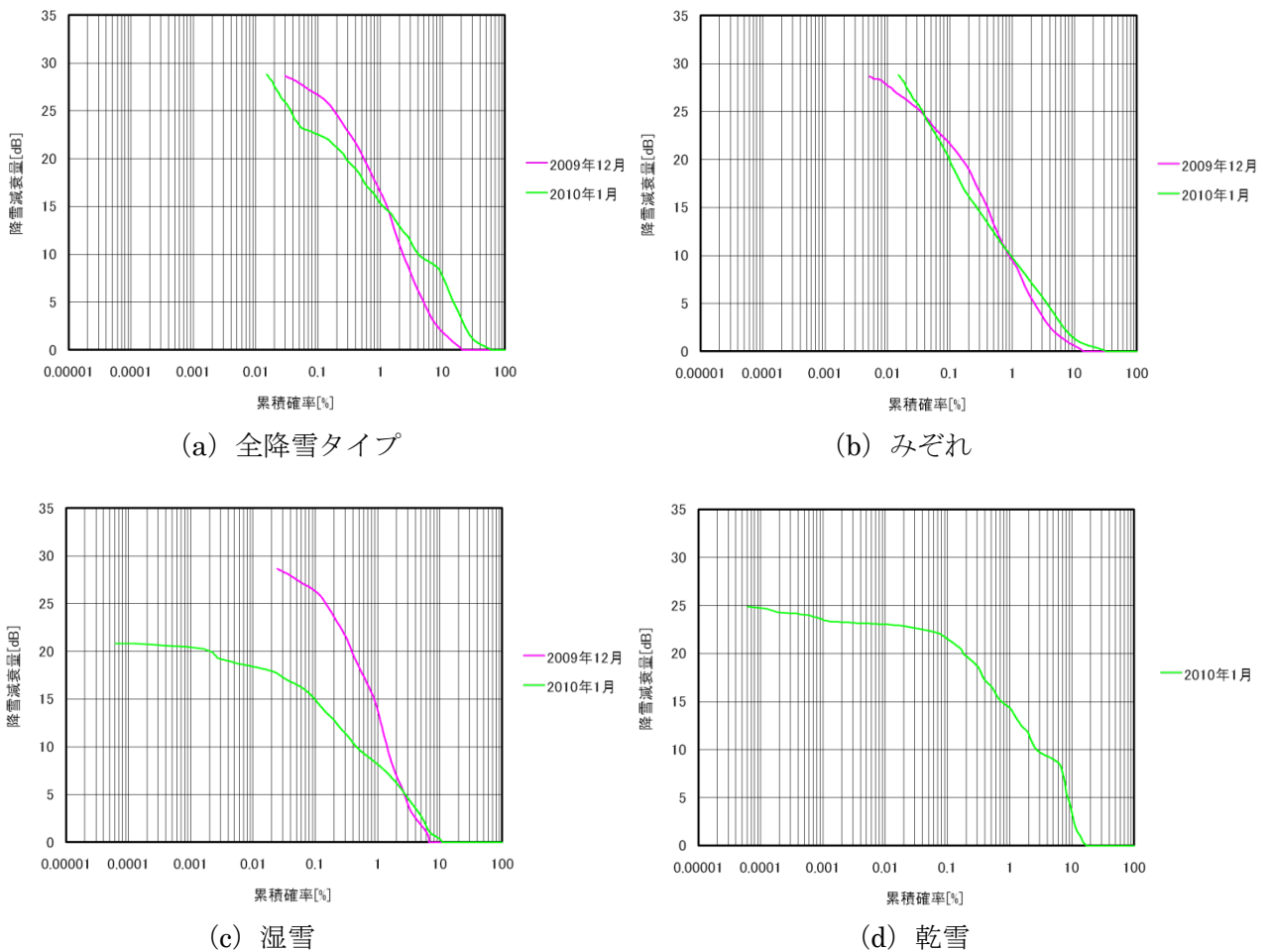


図3-18 降雪減衰確率分布 (各月)

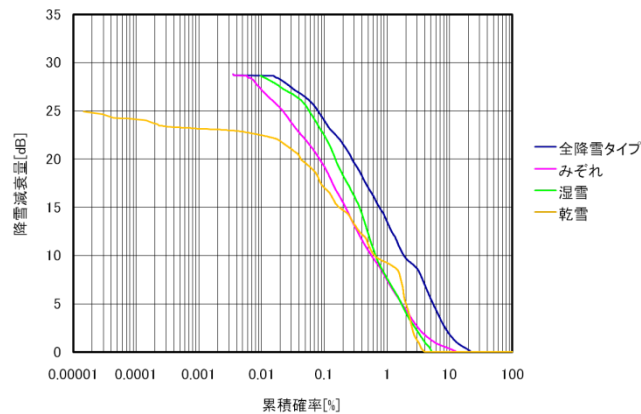


図 3-19 降雪減衰確率分布（試験期間総合）

3.4 各データからの相関関係

3.4.1 降水強度と降水減衰との相関関係

表 3-3 に降水強度と降水減衰量との相関係数、図 3-20 に降水強度と降水減衰量との相関関係を示す。図 3-20 において (a) ~ (c) が平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月、(d) が試験期間総合の結果である。これらの統計処理にあたっては 6 秒毎の受信電力データと 6 秒毎に移動させた 1 分積分降水強度データを用いた。また相関係数は無降水時のデータも含んだ全時間の値である。これらの図表によれば、両者の相関関係は全体として高いと言えない。その原因としては降水強度が受信点の 1 地点での測定であるのに対して、降水減衰は伝搬路を積分した量であること、降水強度は 1 分間の積分値であるのに対して降水減衰量は瞬時値であること等が考えられる。また 11 月よりも 12 月と 1 月の相関関係が小さいのはこの期間は降雪減衰が主要となり、特にアンテナ表面への着雪による減衰の影響であると考えられる。

表 3-3 降水強度と降水減衰量との相関係数

	平成 21 年 11 月	平成 21 年 12 月	平成 22 年 1 月	試験期間総合
相関係数	0.715	0.648	0.507	0.605

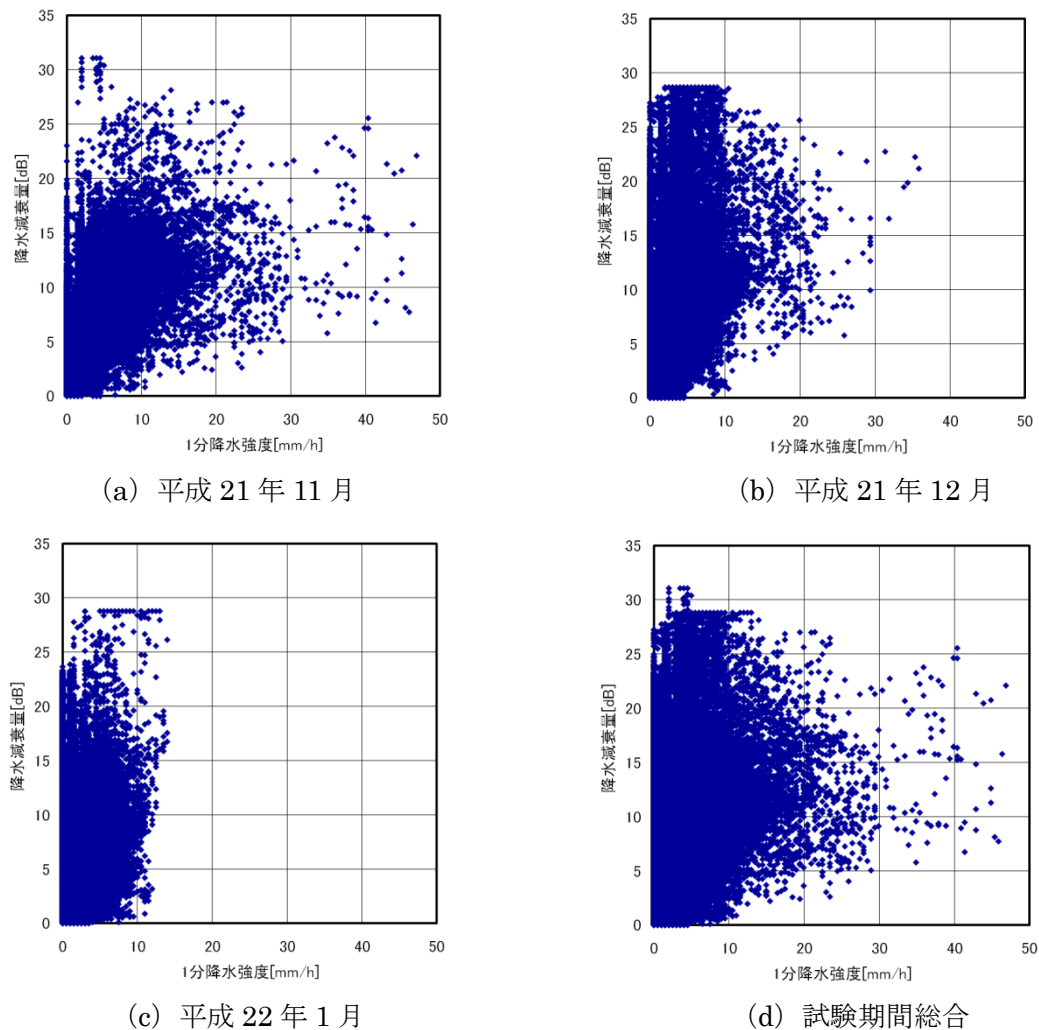


図 3-20 降水強度と降水減衰量との相関関係

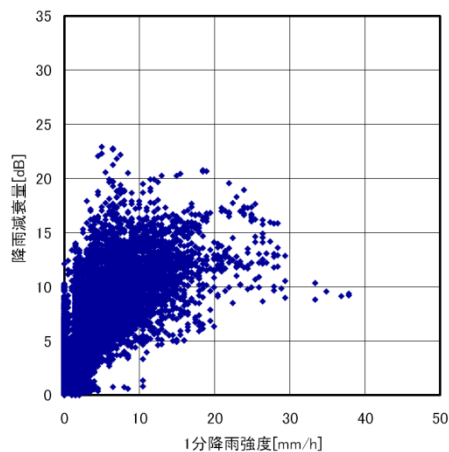
3. 4. 2 降雨強度と降雨減衰量との相関関係

ここでは降水データのうち降雨データのみを取り上げ、降雨強度と降雨減衰量との関係を示す。表 3-4 に各降雨イベントにおける降雨強度と降雨減衰量との相関係数、図 3-21 に各降雨イベントにおける降雨強度と降雨減衰量との相関関係を示す。これらの図表では前述したように 6 秒毎の受信電力データと 6 秒毎に移動させた 1 分積分降雨強度データを用いた。

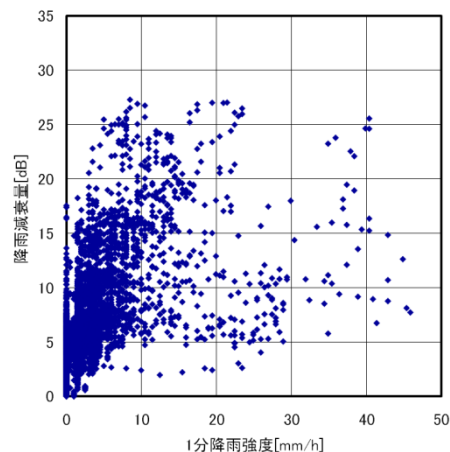
表より、降雨強度と降雨減衰量との相関係数は 0.6~0.8 を示している。従来準ミリ波帯の周波数では両者の相関係数は大まかな値として区間降雨強度と降雨減衰量との値として 0.9 程度であると言われているが本試験結果ではこれより若干低い値となっている。また、図 3-21 によれば、1 分降雨強度が大きくなるに従い、同一降雨強度における降雨減衰量に幅が見られている。これらの原因の 1 つは試験に用いた周波数帯の降雨減衰が降雨強度だけからは一意的には決まらず雨滴粒度分布によっても変化するためと考えられる。

表 3-4 降雨強度と降雨減衰量との相関係数（イベント）

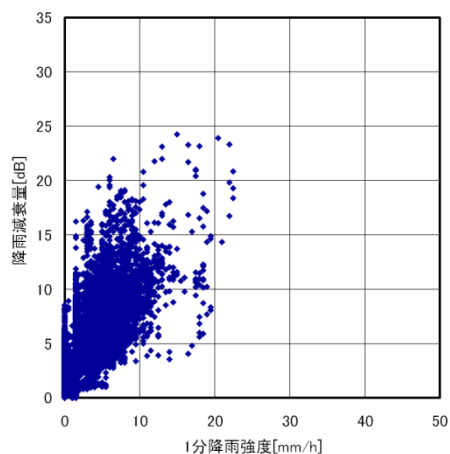
イベント番号	①	②	③
相関係数	0.760	0.632	0.793



(a) イベント①



(b) イベント②



(c) イベント③

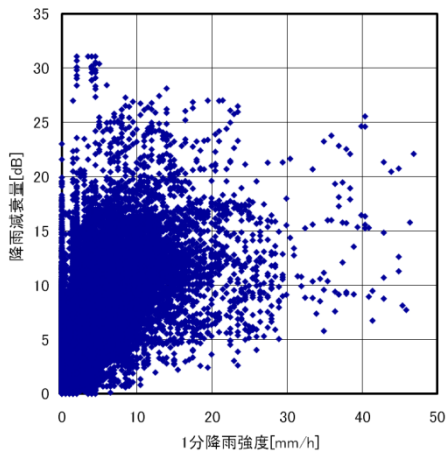
図 3-2 1 降雨強度と降雨減衰量との相関係数（イベント）

次に平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月及び試験期間総合における降雨強度と降雨減衰量との相関係数を表 3-5、降雨強度と降雨減衰量との相関関係を図 3-22 に示す。ここでも相関係数は無降水時のデータも含んだ全時間の値である。これらの図表によれば、長期間の相関関係であるので短時間のイベントにおける相関関係よりも若干小さい傾向にある。また、降水強度と降水減衰との相関関係と比較して降雪時を含む 12 月と 1 月の相関関係は大きくなっている。これは降雪時のアンテナへの着雪に基づく異常な減衰データが除かれるためである。また、降雨強度と降雨減衰のデータ取得と処理に関する時間的、空間的積分の影響は降水データの場合と同

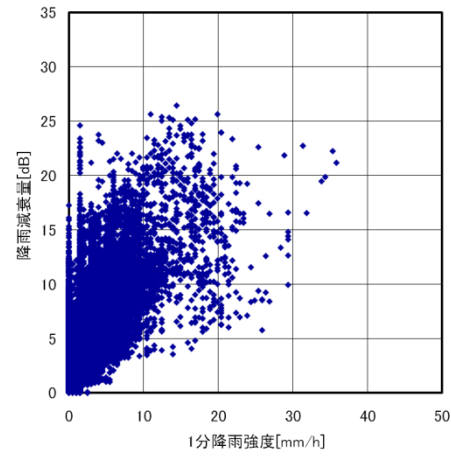
様に相関関係を小さくしてしまう原因となっていると思われる。

表 3-5 降雨強度と降雨減衰量との相関係数（各月/試験期間総合）

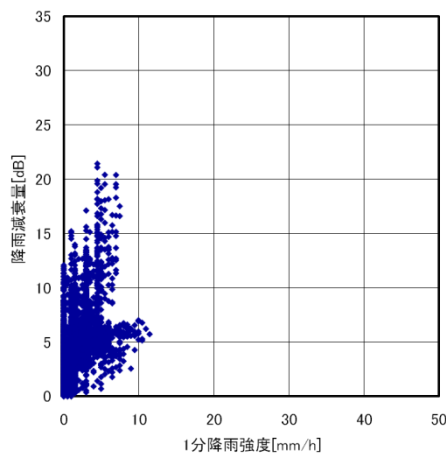
	平成 21 年 11 月	平成 21 年 12 月	平成 22 年 1 月	試験期間総合
相関係数	0.715	0.743	0.697	0.723



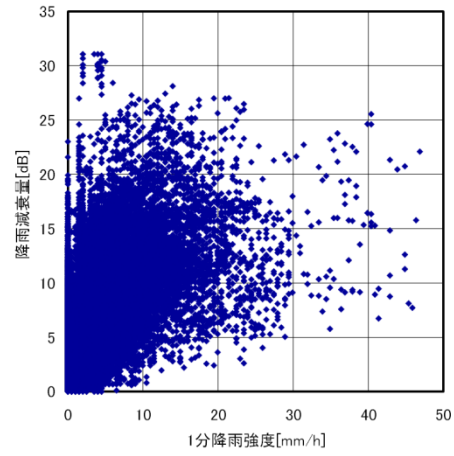
(a) 平成 21 年 11 月



(b) 平成 21 年 12 月



(c) 平成 22 年 1 月



(d) 試験期間総合

図 3-2-2 降雨強度と降雨減衰量との相関関係（各月/試験期間総合）

3. 4. 3 降雪強度と降雪減衰量との相関関係

ここでは降水データのうち降雪データのみを取り上げ、降雪強度と降雪減衰量との相関関係を示す。表 3-6 に各降雪イベントにおける降雪強度と降雪減衰量との相関係数、図 3-23 に各降雪イベントにおける降水強度と降水減衰量との相関関係を示す。これらの図でも 6 秒毎の受信電力データと 6 秒毎に移動させた 1 分積分降雪強度データを用いた。

この表によれば、全体的に降雨イベントと比べて相関が低い傾向が表れている。図 3-23 より、降雪イベントでは降水強度が 0 の場合にも減衰量に幅があり 25dB を超えるデータも多数見られている。これは降雪時には空間における降雪減衰と比べてアンテナ着雪による減衰が支配的となる為である。アンテナ表面への着雪により指向性も劣化するため、特に表面での着雪の偏りがアンテナ指向方向をずらし大きく減衰する結果となる。また、着雪する雪質の水分含有量が多いほど減衰が大きくなると考えられている。さらに降雪強度データの特徴としては降雨強度データと比較して、降雪が強い場合でも 1 分降雪強度が 10mm/h を超えるような雪は、まれであるため降雪強度の範囲が狭いこと、降水測定機器表面の着雪は溶解後にカウントされるための時間遅れ等も相関関係を小さくしている原因であると考えられる。

表 3-6 降雪強度と降雪減衰量との相関係数 (イベント)

イベント番号	④	⑤	⑥	⑦
相関係数	0.750	0.420	0.632	0.017

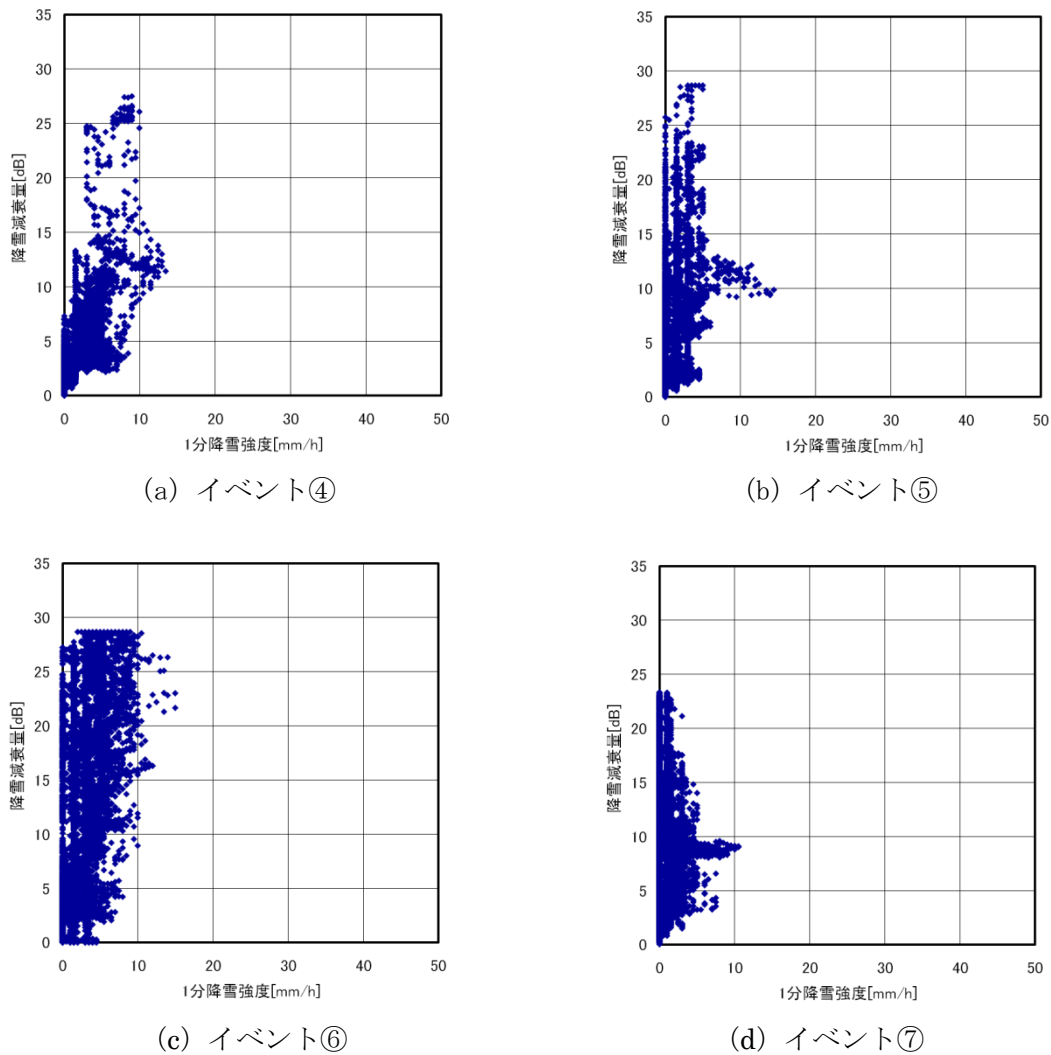


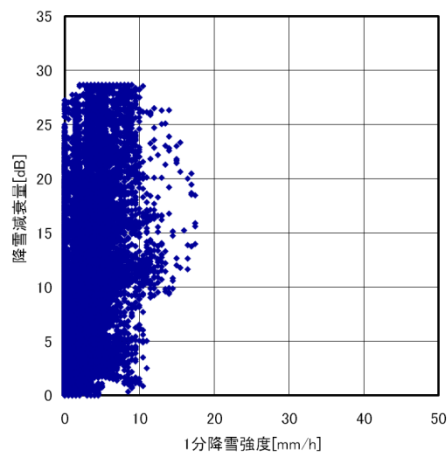
図 3-23 降雪強度と降雪減衰量との相関係数（イベント）

次に平成 21 年 12 月と平成 22 年 1 月との各月及び試験期間総合における降雪強度と降雪減衰量との相関係数を表 3-7 に、降雨強度と降雨減衰量との相関関係を図 3-24～図 3-27 に示す。

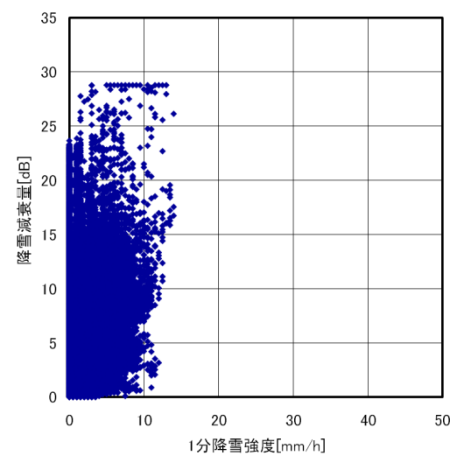
ここで 11 月には降雪は観測されていなかったの除いており、相関係数の計算には無降水時のデータも含んだ全時間の値を用いている。また、それぞれの相関関係の導出においては雪の種類に分けて統計処理した結果を示している。これらの図表によれば降雪強度と降雪減衰量との相関関係は月毎、雪の種類に対して乾雪の場合を除き大きな差異はなく降雨に比べて若干小さくなっている。乾雪の場合の相関関係が低い理由はこれまでも述べてきた着雪の影響が特に顕著であったからと思われる。

表 3-7 降雪強度と降雪減衰量との相関係数 (各月/試験期間総合)

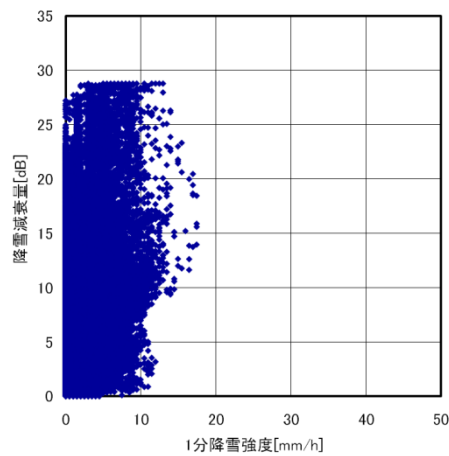
	みぞれ	湿雪	乾雪	全降雪タイプ
平成 21 年 12 月	0.670	0.738	—	0.696
平成 22 年 1 月	0.703	0.743	0.441	0.510
試験期間総合	0.685	0.707	0.471	0.614



(a) 平成 21 年 12 月



(b) 平成 22 年 1 月



(c) 試験期間総合

図 3-2 4 降雪強度と降雪減衰量との相関関係 (全降雪タイプ)

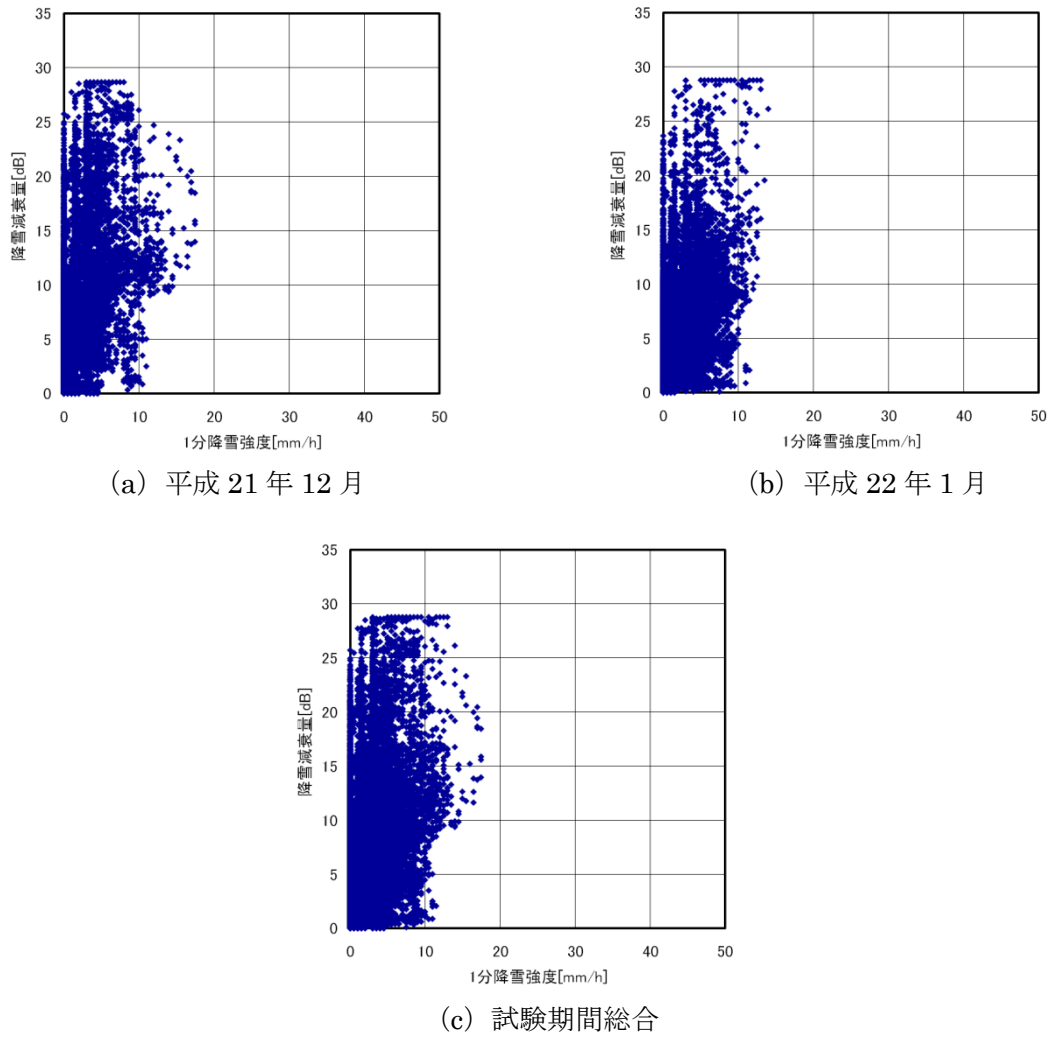
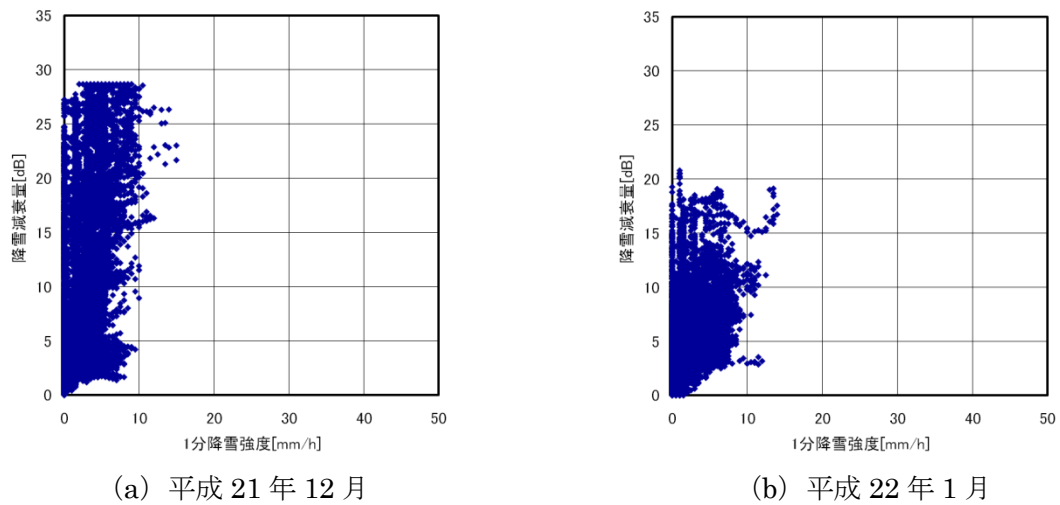
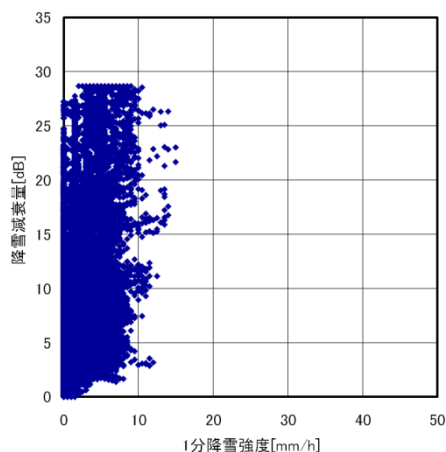


図 3-25 降雪強度と降雪減衰量との相関関係 (みぞれ)





(c) 試験期間総合

図 3-26 降雪強度と降雪減衰量との相関関係 (湿雪)

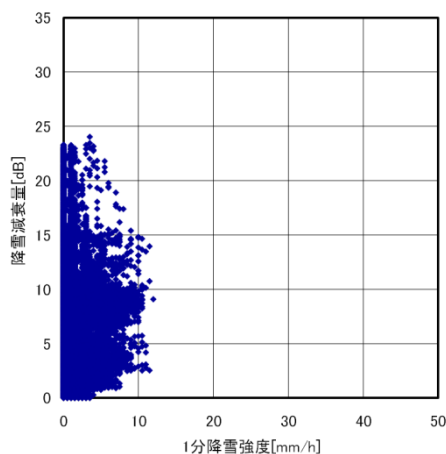


図 3-27 降雪強度と降雪減衰量との相関関係 (乾雪)

3. 4. 4 降雨強度と受信電力から変換された BER との相関関係

図 3-28 に降雨強度と受信電力から変換された BER との相関関係を示す。これらの図において (a) ~ (c) が平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月、(d) が試験期間総合の結果である。これらの図によれば、BER のデータは直接測定されたわけではなく、降雨時の受信電力から較正データにより変換されたもので、5dB 程度のレベル範囲から 10 桁の BER に変換していることもあり、直接降雨強度と降雨減衰量との相関関係を求めた場合よりも相関は低くなっている。また、降雨時で比較的強い降雨強度の場合であっても十分な受信電力が維持されてエラーフリーとなっているデータが多いことも分かる。

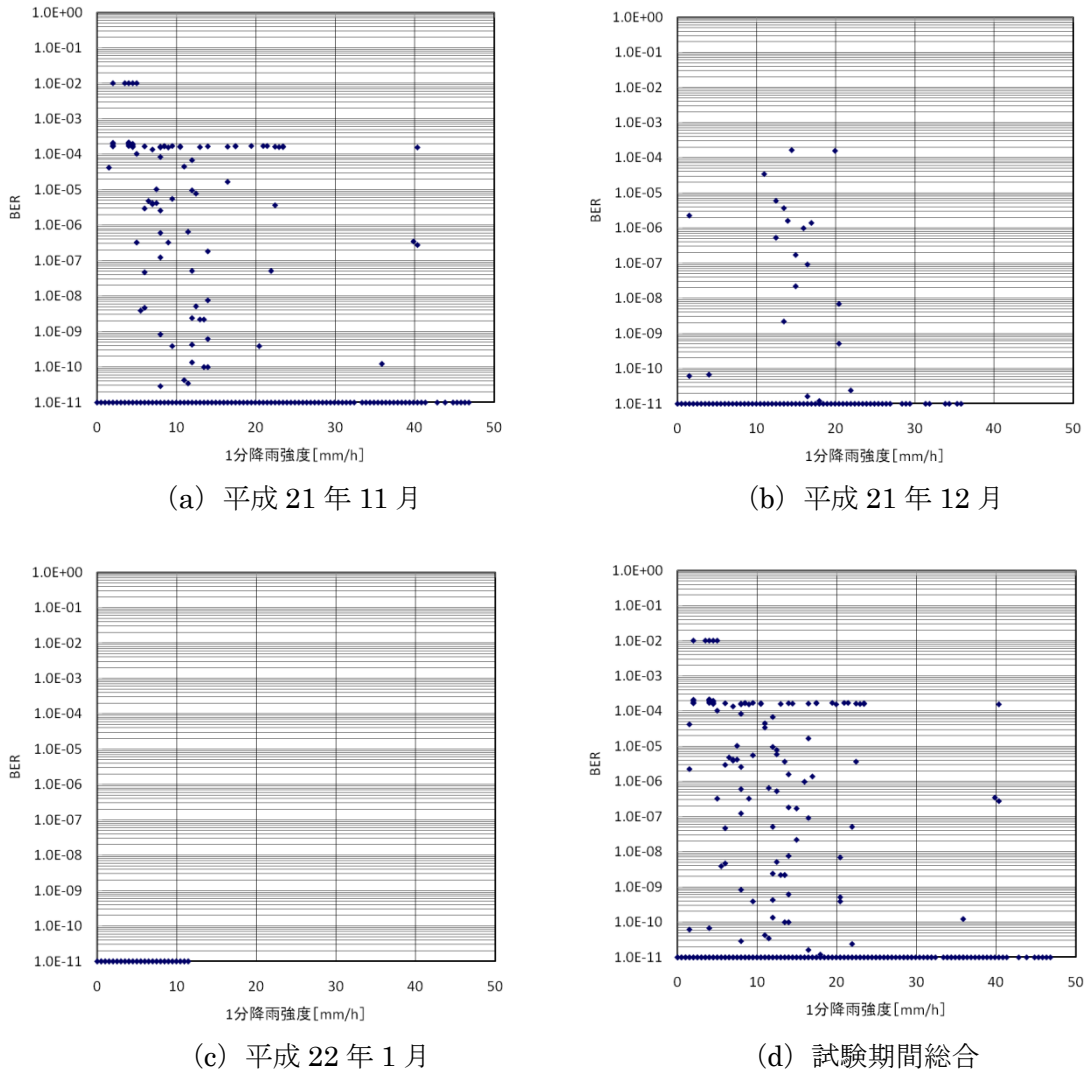


図 3-28 降雨強度と受信電力から変換された BER との相関関係

3. 4. 5 降雪強度と受信電力から変換された BER との相関関係

図 3-29 に降雪強度と受信電力から変換された BER との相関関係を示す。これらの図において (a) ~ (b) が平成 21 年 12 月から平成 22 年 1 月までの各月、(c) が試験期間総合の結果である。ここでは各図とも雪の種類については記号を変えて示してある。これらの図によれば、降雨の場合と同じように降雪強度と BER との相関は雪の種類に関らず大きくない。また、月毎の相関関係の変化はみられない。

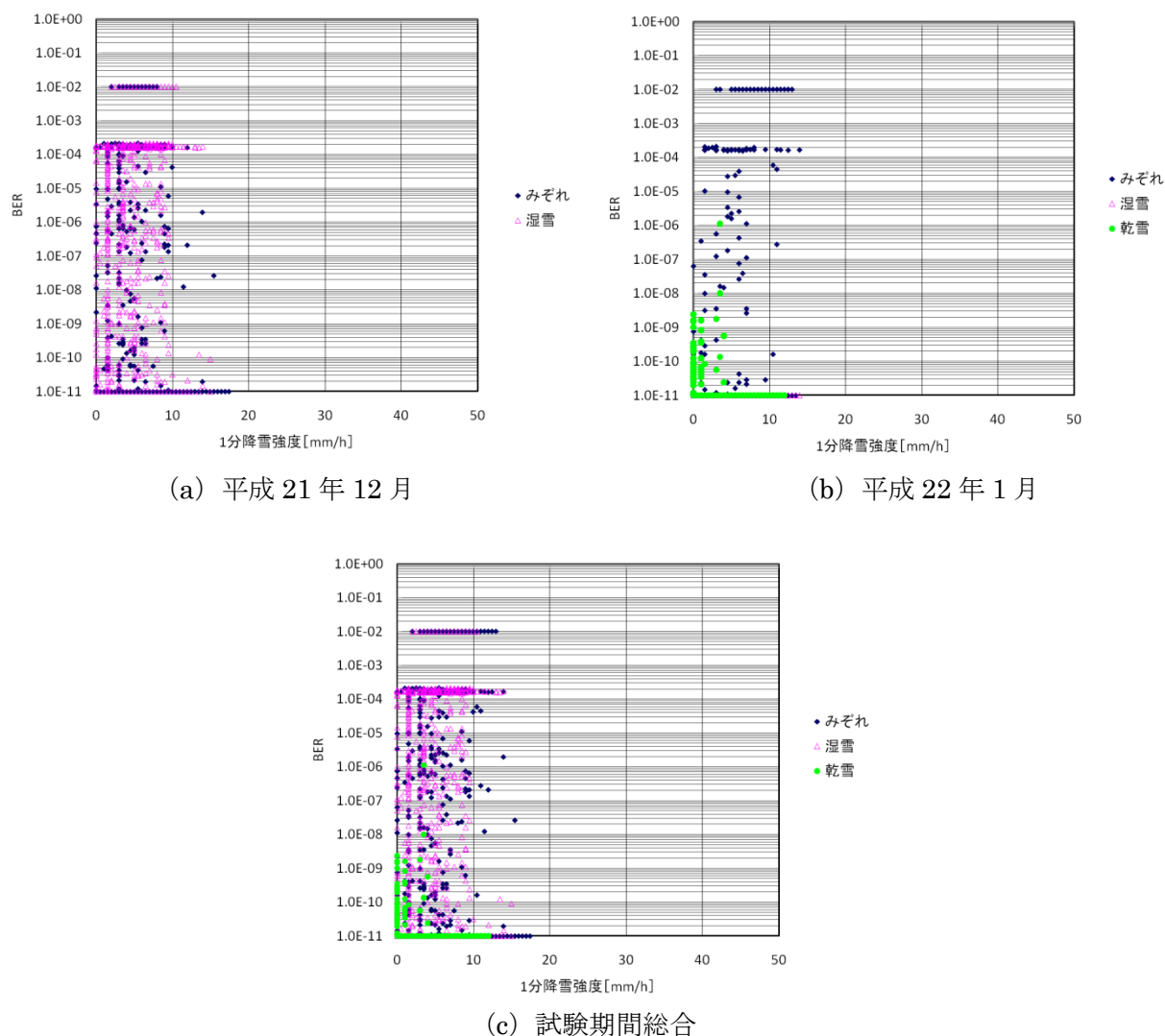


図 3-29 降雪強度と受信電力から変換された BER との相関関係

3.5 気温・湿度等の観測結果

3.5.1 気温の観測結果

試験時の全体的な気象状況を確認し、降雪時には雪の分類に資するため及びミリ波帯で少なからず影響を与える水蒸気吸収量を推定するために受信点において気温及び相対湿度の観測を実施した。その中でここでは気温に関する測定結果を提示する。図 3-30 には平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月における気温の日変化特性及び累積確率分布を示す。日変化特性は 1 分毎にひと月の同時分における気温データを平均した値を示している。この図によれば、各月の平均レベルは冬の深まりと共に約 4° 毎に下がっている。また、日変化特性はほぼ同じ傾向を示し、最高気温は 13:00~14:00 頃に最低気温は明け方の 6:00 頃に生じていることが分かる。

次に 1 か月毎の気温の累積確率分布によれば各月の中央値はそれぞれ 11 月が約 12.5°C 、12

月が約 7.0℃、1 月が約 3.0℃となり、新潟における平年値である 11 月が 10.2℃、12 月が 5.3℃、1 月が 2.6℃よりも若干高くなっている。また確率分布形は各月ともほぼ正規分布に近似できるようである。

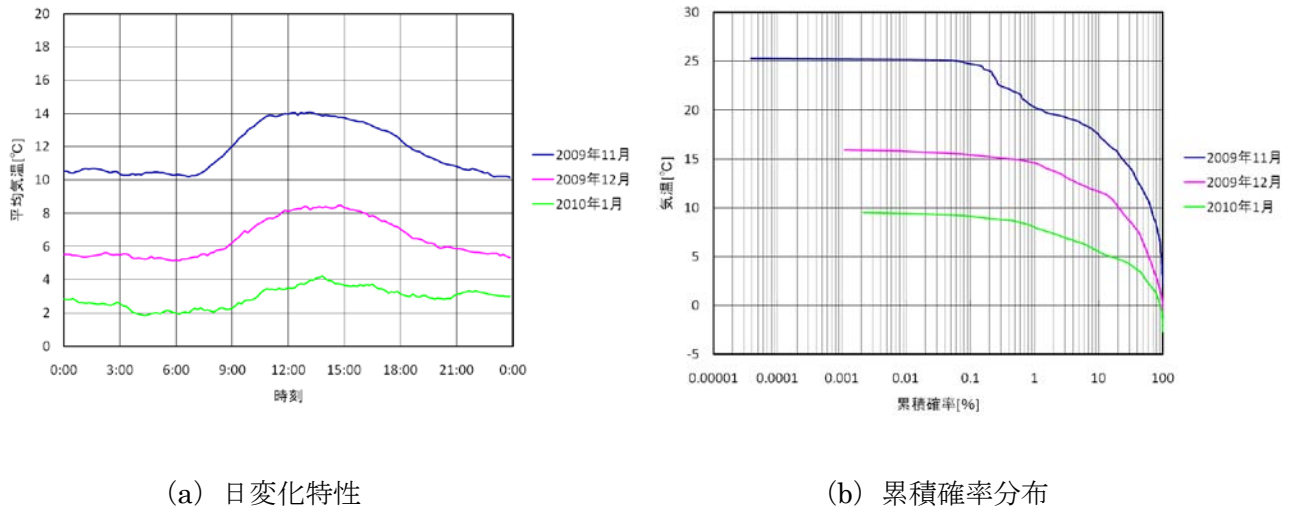


図 3-30 気温の日変化特性及び累積確率分布

3. 5. 2 湿度の観測結果

平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの各月における相対湿度の日変化特性及び累積確率分布を図 3-31 に示す。日変化特性は気温の場合と同じく 1 分毎にひと月の同時刻におけるデータを平均することにより求めている。この図によれば、各月の相対湿度とも夜中から明け方にかけて高く、昼間の 12 時前後に低くなっているが、月毎の差異は気温変化ほど明確ではない。相対湿度の日変化の特徴は気温と逆相関に近い変動を示しているが、その原因は以下のように考えられる。即ち、相対湿度変化に影響を与える大気温度は気温の日変化により昼間は高くなるので、気温に依存する飽和水蒸気圧が増加する。この場合大気に含有する水蒸気に大きな変化がなければ、相対湿度は飽和水蒸気の大きくなった昼間において下がることとなる。実測された日変化がこのような傾向を示しているので逆に大気の水蒸気含有量は 1 日で大きな変化を示さないことが示唆される。

次に月毎の相対湿度の累積確率分布によれば、相対湿度の確率分布は各月ともほぼ同一の分布形を示している。また各月の中央値は約75～80%で、新潟の平年値約72～74%よりも若干大きかった。

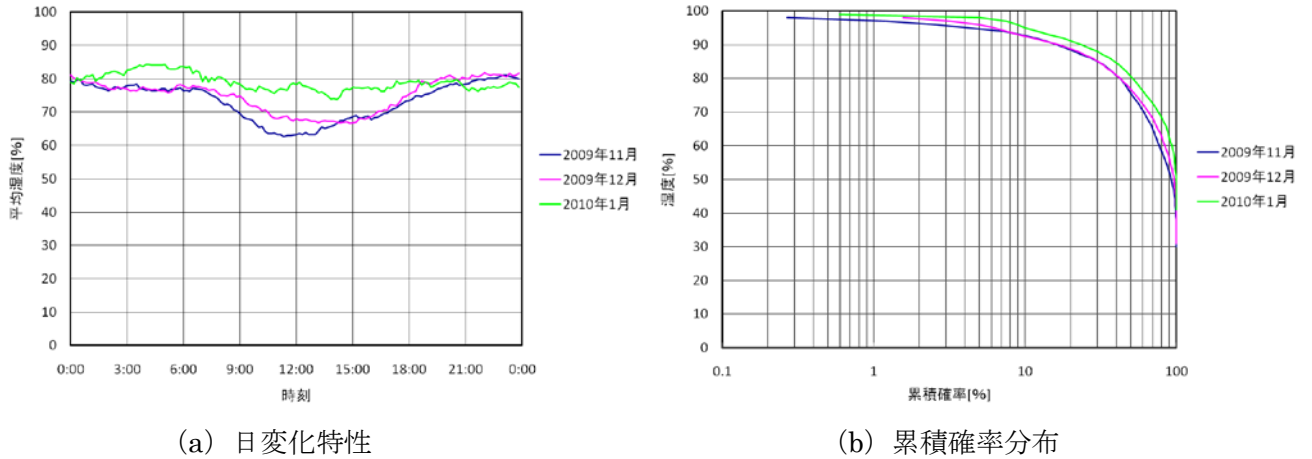


図 3-31 湿度の日変化特性及び累積確率分布

3. 5. 3 水蒸気吸収累積分布

水蒸気吸収量は単位距離当たり単位水蒸気含有量当りの電波吸収量によって評価される。上記に示した実測された温湿度の気象データ及び資料編 1.1.2 項に示した式(1-4)～式(1-6)の計算式を用いて計算した試験回線における各月の水蒸気吸収累積確率分布を図 3-32 に示す。図には資料編の表 1-1 に示した新潟における水蒸気含有量の月間平均値を用いて推定した値を併記する。推定値は月平均値を表すため、ここでは累積確率 50% にプロットした。図より、最大で 0.95dB の水蒸気吸収が発生している事が分かる。ただし、湿度が一定の場合温度が高くなると水蒸気密度が高くなるため、夏にはこれより約 2～3 倍大きな水蒸気吸収が表れると考えられる。

なお、この図より水蒸気吸収量の実測値と推定値は比較的良好に一致していることが分かる。

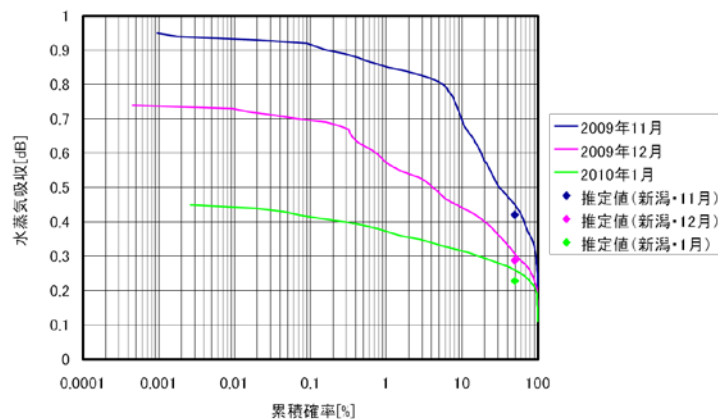


図 3-32 水蒸気吸収累積分布

3. 6 Ping 伝送試験結果

Ping 伝送試験の結果、受信電力 (BER) とタイムアウト回数について、以下のとおり示す。

Ping 伝送試験期間 (平成 21 年 11 月 19 日から平成 22 年 1 月 19 日) におけるタイムアウトの回数を表 3-8 に示し、タイムアウトが生じた全ての日及び比較として 1 月 14 日の各日 0:00 ~24:00 の 24 時間データを示す。(図 3-33 から図 3-42)

各図より、BER が 10^{-4} 以上になる (回線品質が悪化する) と、急激にパケット成功率が低下し、タイムアウトが発生しやすい環境になることが裏付けできる。

表 3-8 タイムアウト回数

月 日	天 候	タイムアウト回数
11 月 20 日	雨	5 回
12 月 16 日	みぞれ及び湿雪	15 回
12 月 18 日	みぞれ及び湿雪	24 回
12 月 19 日	湿雪	423 回
12 月 20 日	みぞれ	32 回
12 月 31 日	みぞれ	39 回
1 月 2 日	みぞれ及び湿雪	20 回
1 月 8 日	みぞれ	41 回
1 月 9 日	みぞれ	16 回
1 月 14 日	乾雪	0 回

【タイムアウトした日のデータ一覧】

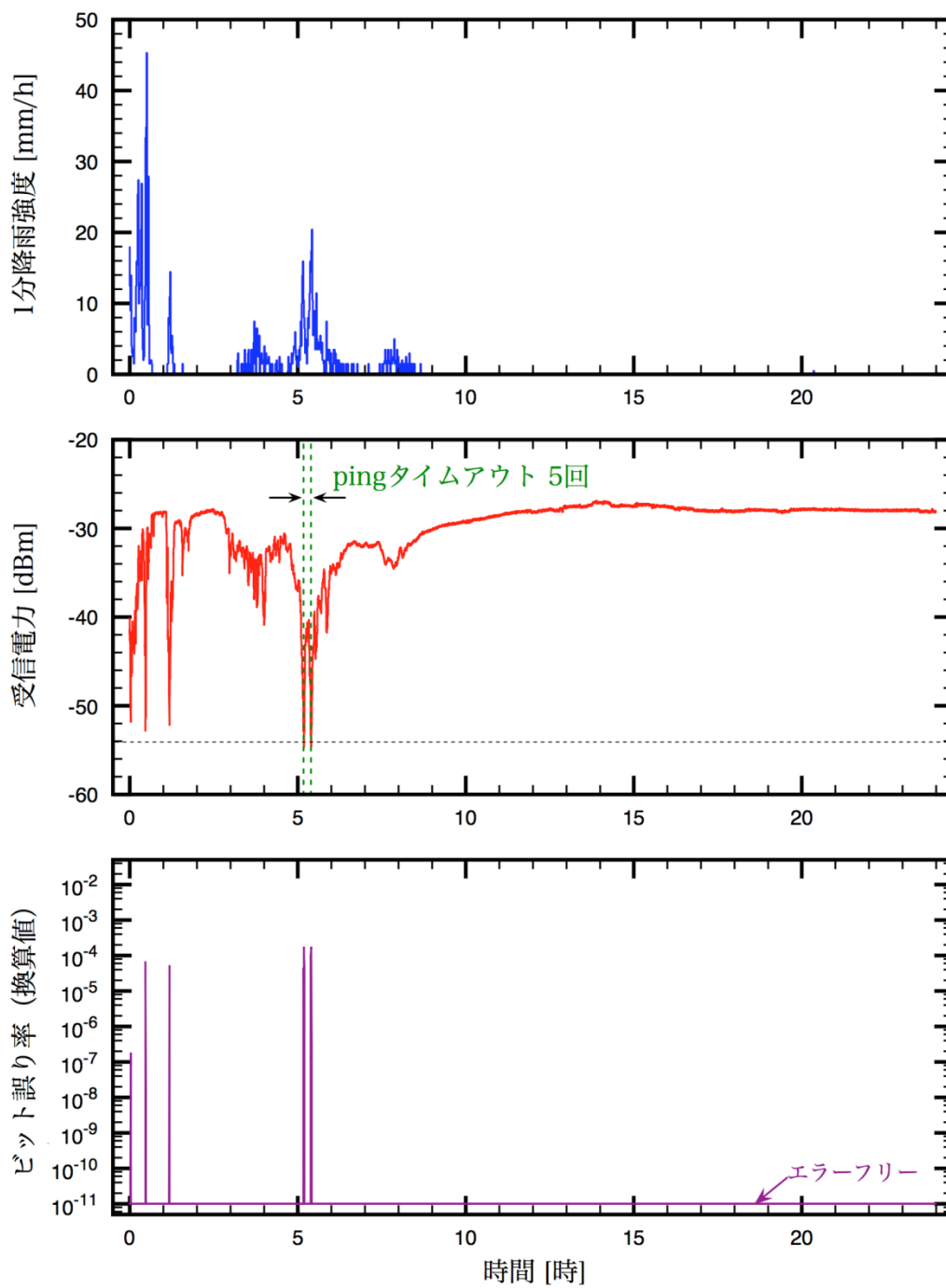


図 3 - 3 3 11/20

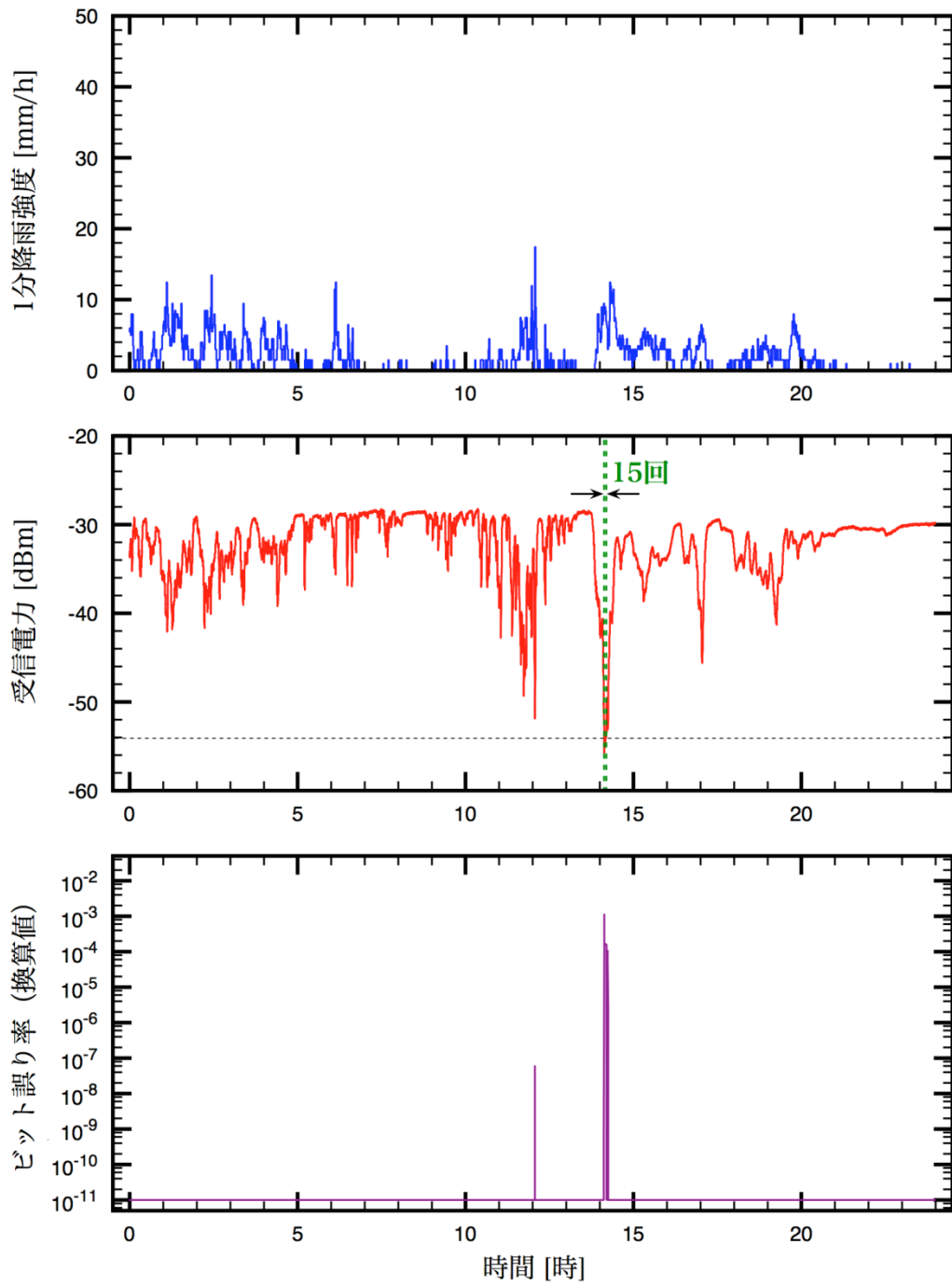


図 3 - 3 4 12/16

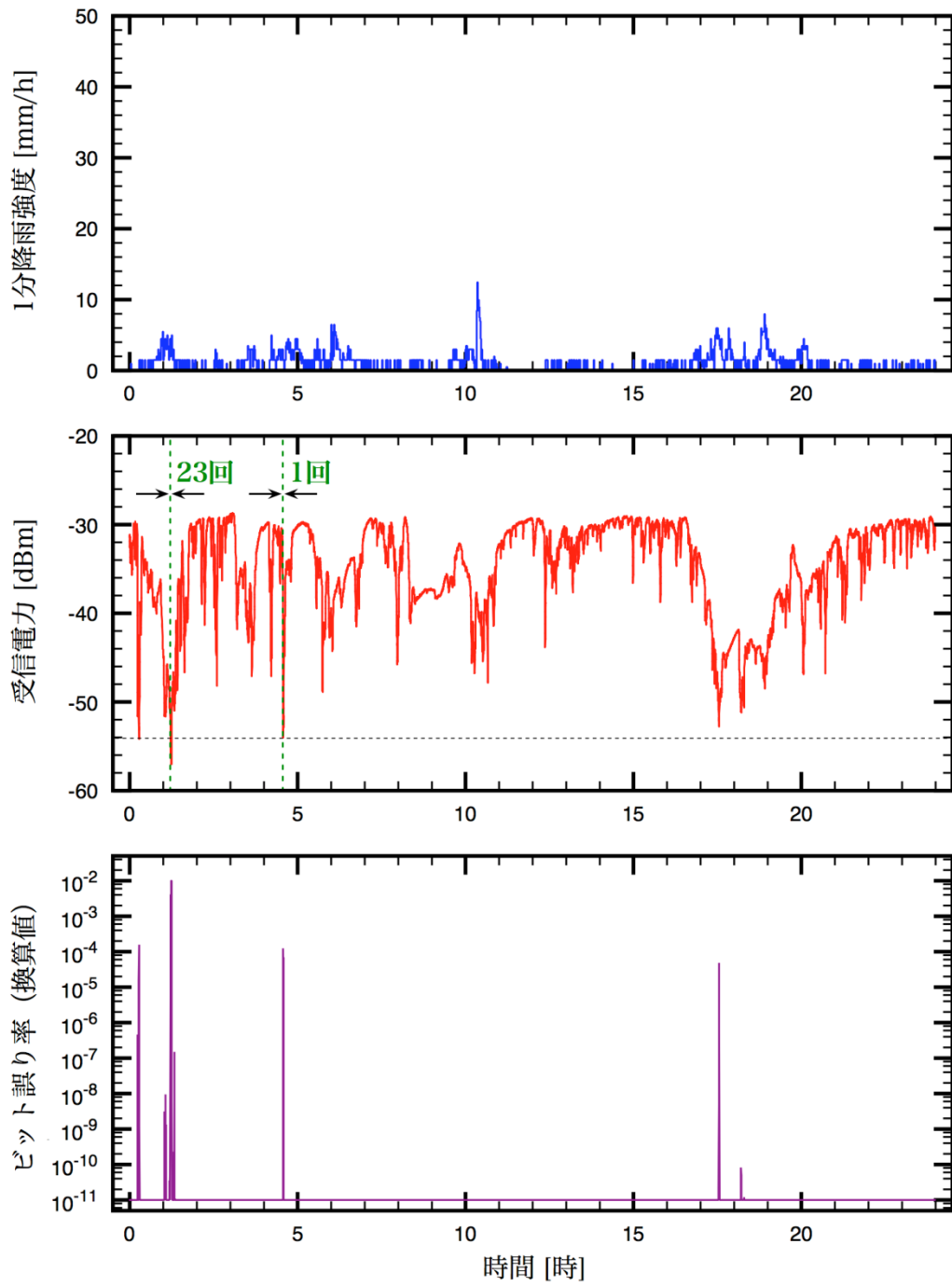


図3-35 12/18

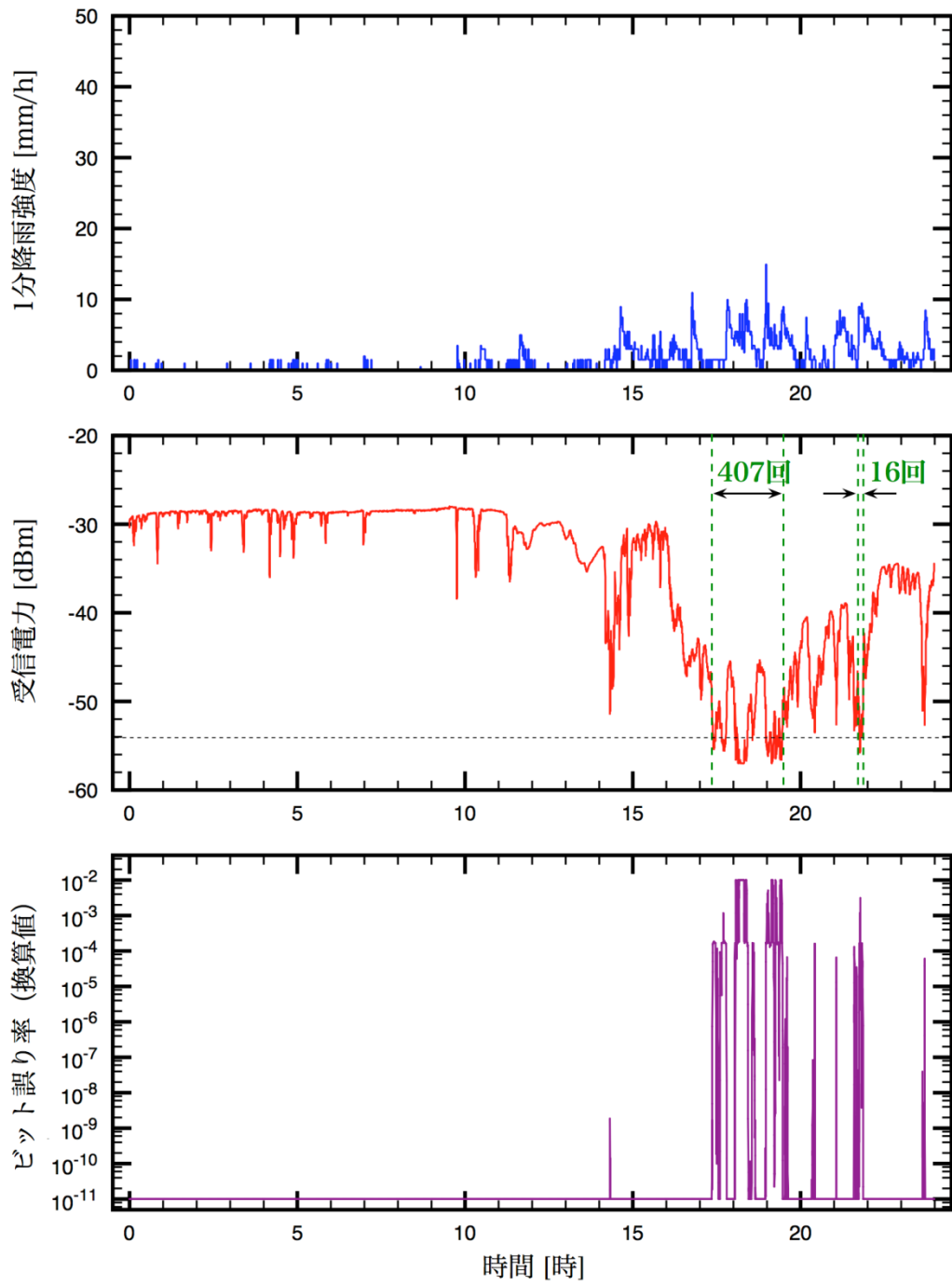


図3-36 12/19

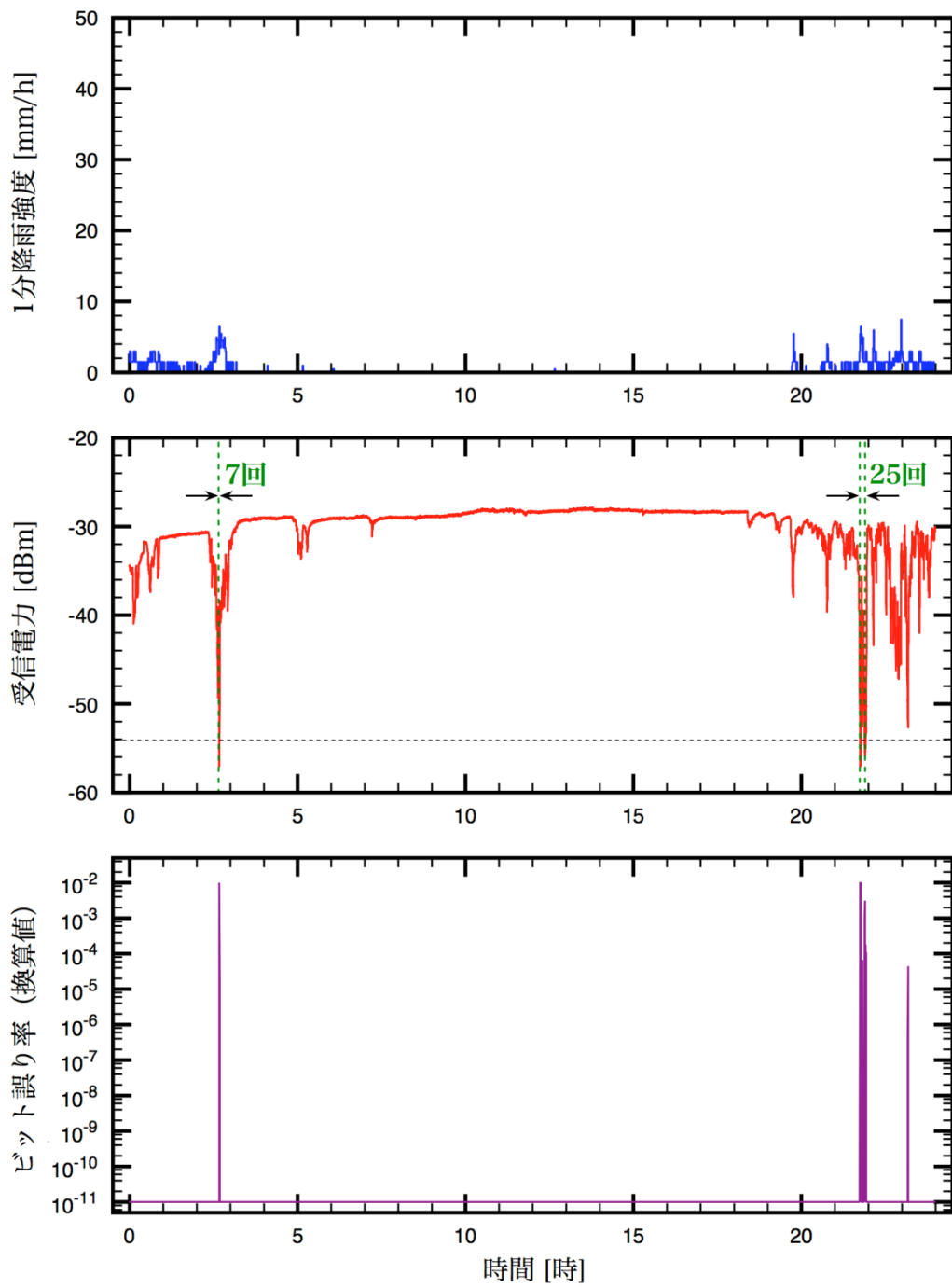


図3-37 12/20

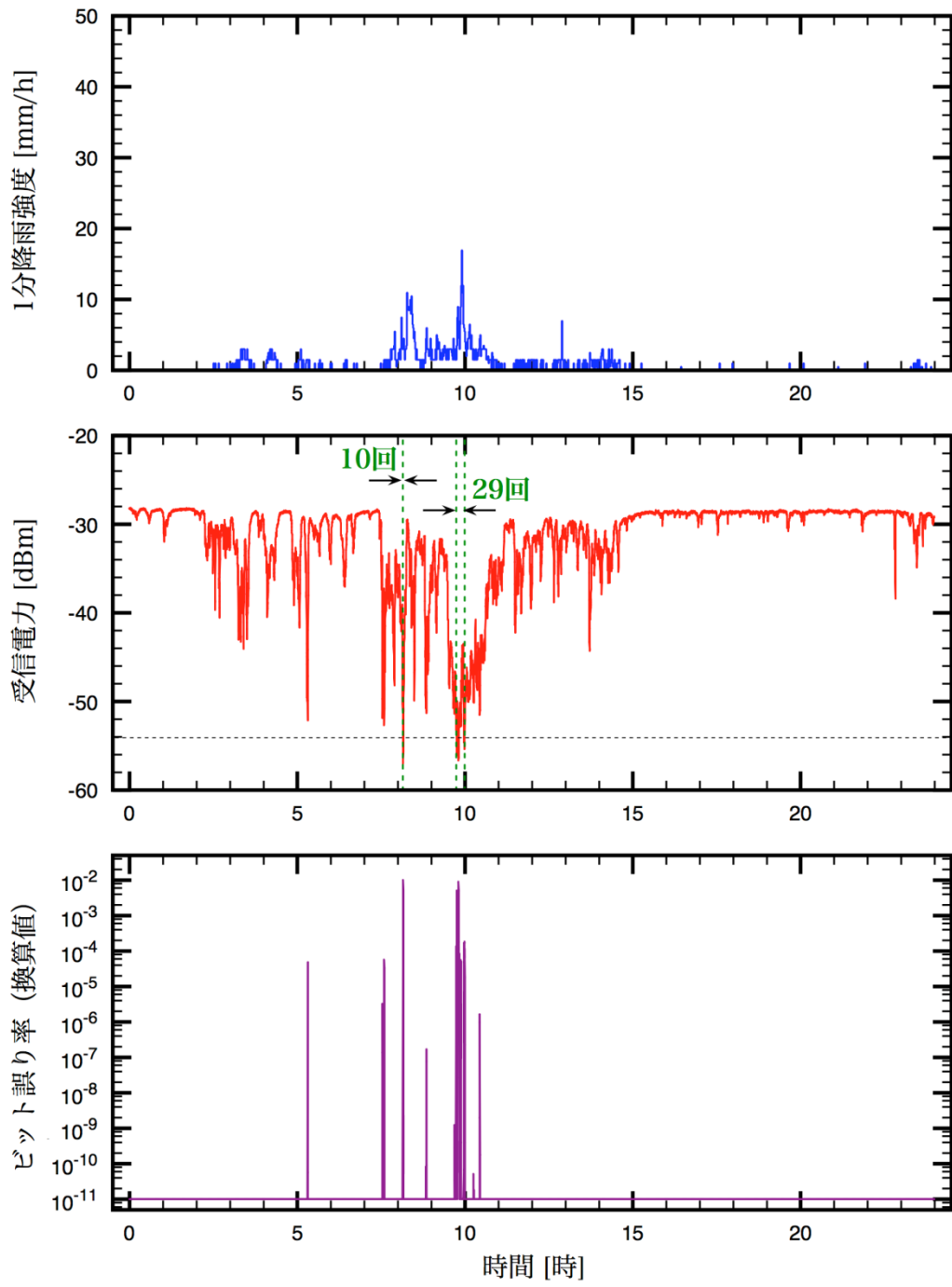


図 3 - 3 8 12/31

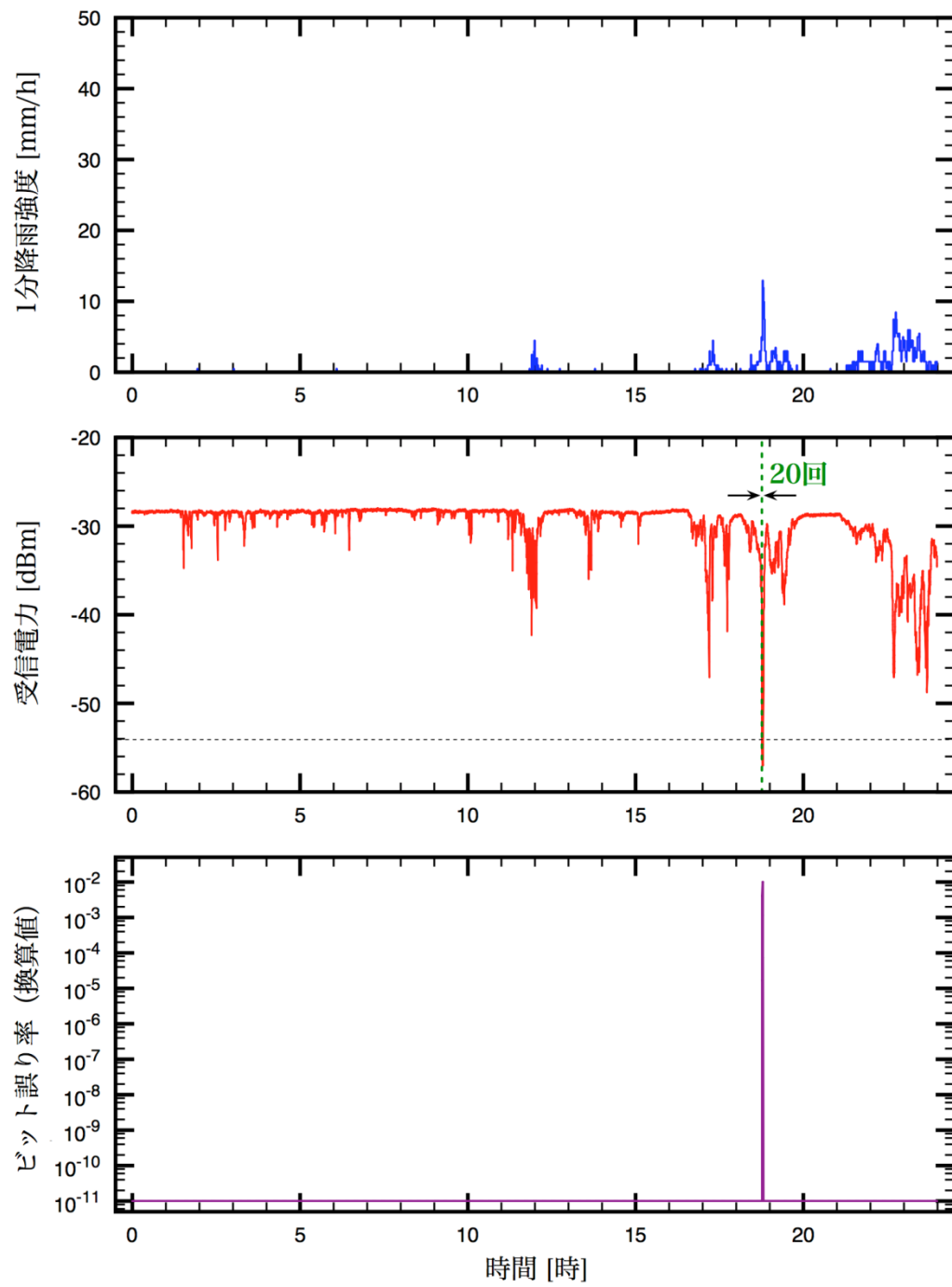


図3-39 1/2

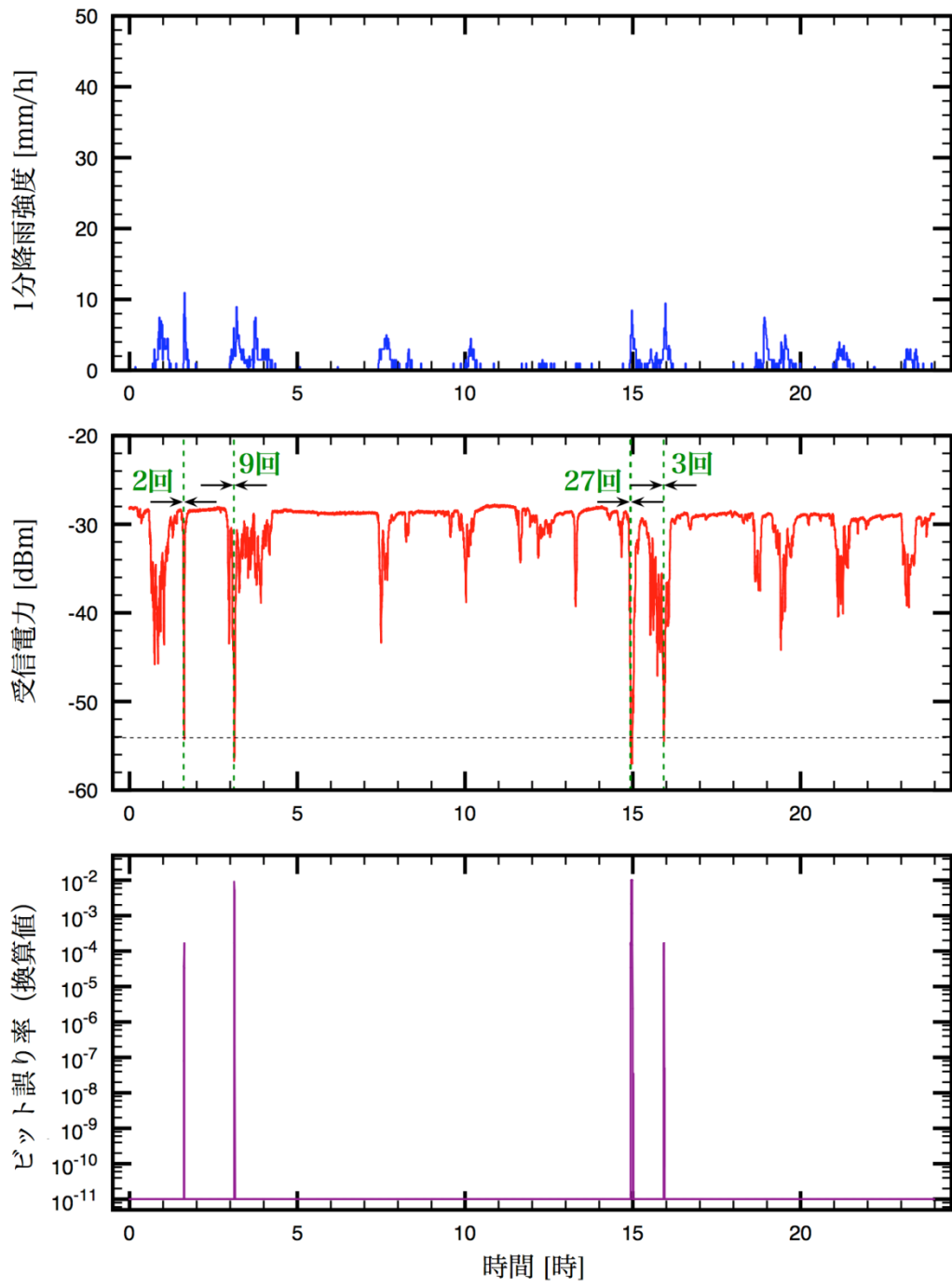


図3-40 1/8

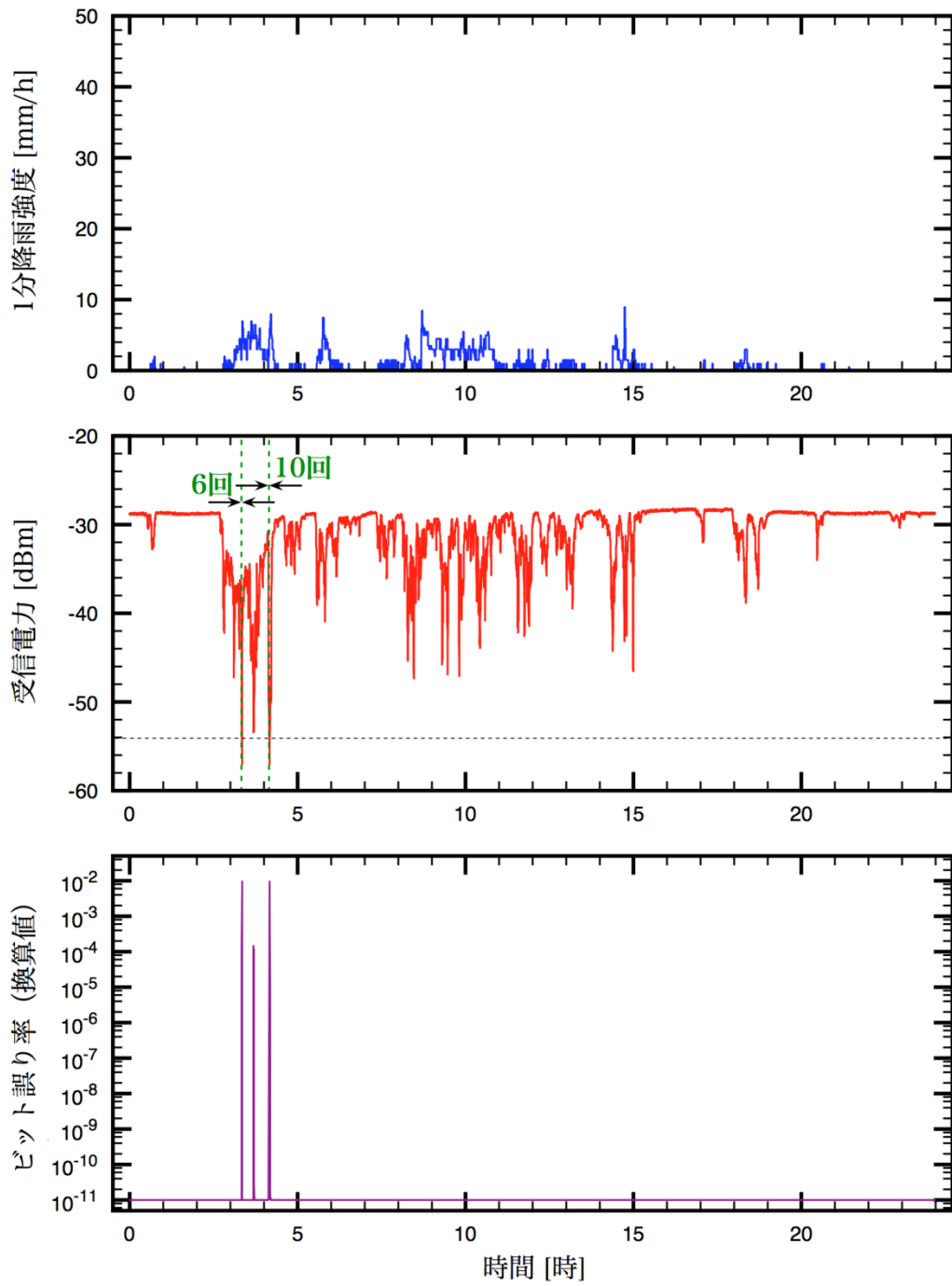


図3-41 1/9

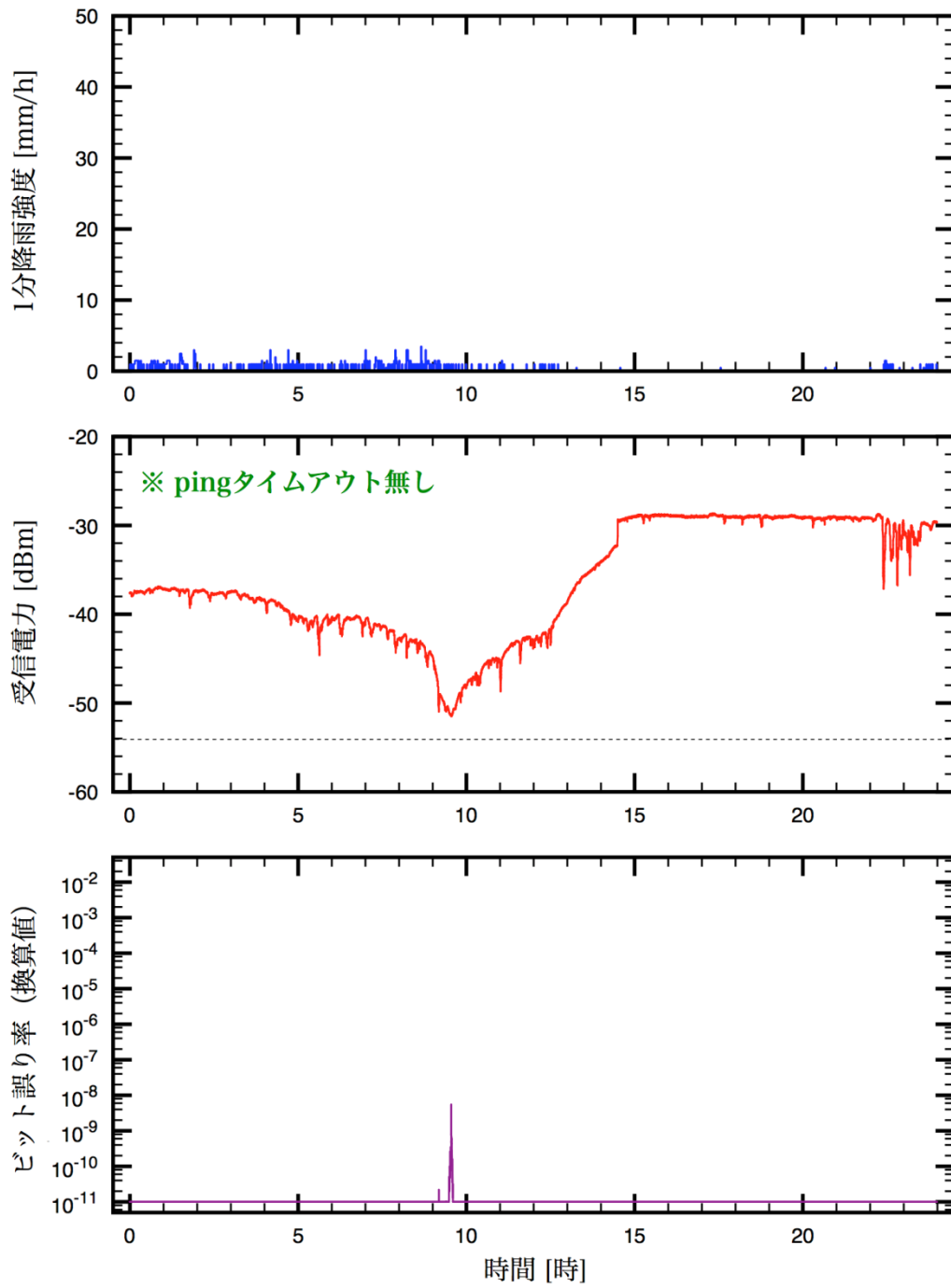


図 3-4-2 1/14

4 ミリ波帯高速無線伝送システム試験結果の考察

4. 1 測定装置の安定性

4. 1. 1 各測定装置のデータ取得率

表 4-1 に平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月における月毎のデータ取得のための欠測時間を除いた測定時間を全時間に対する割合として示す。平成 21 年 12 月の欠測データについては、データ取得のほか停電（約 100 分）によるものである。表より、データ収集率は極めて高く各測定装置とも安定に動作していたことが分かる。また、欠測データが少ないのでこれが処理解析に与える影響はないと考えられる。

表 4-1 月間データ収集率[%]

	受信電力	降雨強度	気温	湿度
平成 21 年 11 月	99.98	100.00	99.98	99.98
平成 21 年 12 月	99.74	99.88	99.74	99.74
平成 22 年 1 月	100.00	100.00	100.00	100.00
試験期間総合	99.89	99.95	99.89	99.89

4. 1. 2 安定時受信電力の日変化特性

図 4-1 に安定時受信電力の日変化特性を示す。ここでは各月において 1 日中降水が観測されていない日を抽出し、1 時間ごとにそれらの同時刻における平均受信電力を示している。なお、平成 22 年 1 月の測定期間内では 1 日中降水が観測されていない日がなかったため、0 時から 1 時までの 1 時間だけ降水が観測された 1 月 11 日のデータによって代表させている。ただし、この日には 8 時から 9 時にかけて原因不明の受信電力変動が観測されている。この図によれば、ひと月経つごとに定常レベルが約 1dB 下がっている事、夜中に比べて日中の受信電力が約 2dB 高い特性であった事が分かる。この原因としては、伝送距離は 1.39km で、到来角の変化等は考えられないので、装置系の温度特性によるものと予測される。

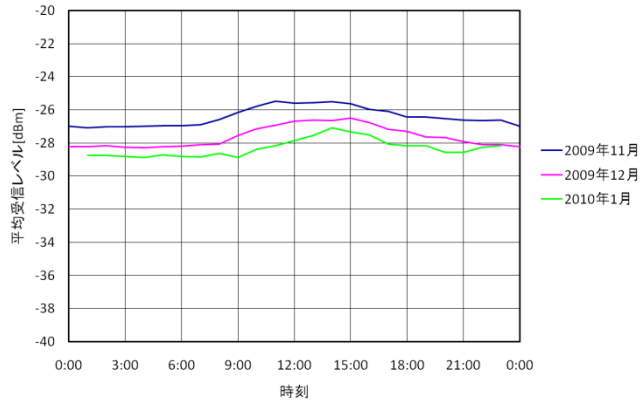


図4-1 安定時受信電力の日変化特性

4. 2 降水強度関係測定結果の考察

4. 2. 1 周辺地域降雨データとの比較

(1) 月間降水量平年値との比較

試験で佐渡汽船直江津ターミナルビルにおいて観測された平成21年11月から平成22年1月までの月間降水量と隣接する AMeDAS 観測3地点における各月の平年値とを比較した結果を表4-2に示す。AMeDAS 観測3地点の平年値データとしては、気象庁から電子閲覧サービスにより公開されている値を用いた。平年値の統計期間は高田で1971年～2000年の30年間、大潟及び安塚で1979年～2000年の22年間である。この表によれば、取得した観測データについて11月の値は大潟及び安塚の平年値と近い値となった。一方、12月及び1月の値は周辺平年値と比べて5割～8割と少ない。ただし、1月の試験結果に関しては19日までの分であるので約2/3の期間である。

表4-2 月間総降水量における比較 (mm)

	試験データ	平年値		
	直江津	高田	大潟	安塚
平成21年11月	269.8	332.5	272.7	271.0
平成21年12月	232.6	420.3	308.5	342.8
平成22年01月	236.2*	413.3	286.4	339.7

*2010/1/1～2010/1/19

(2) 周辺 AMeDAS 降水データとの総降水量比較

試験データ地点及び自治体データ地点さらに AMeDAS 観測データ 3 地点の合計 5 地点の平成 21 年 11 月から平成 22 年 1 月までの月間降水量を図 4-2 及び表 4-3 に示す。ここで平成 22 年 1 月について 1 月 19 日で終了した試験データに対応させるため、自治体データ及び AMeDAS データとも測定が終了した時間までを総降水量とした。これらの図表より、自治体データと比較すると試験データの降水量は平成 21 年 11 月に 8 割、平成 21 年 12 月に 6 割、平成 22 年 1 月に 7 割と少ない結果となっている。この理由としては、これまでの降雨観測において雨量計による差異は大きくなく一方に変位することはないことから、設置場所の影響（高度と風による捕捉率）ではないかと考えられる。

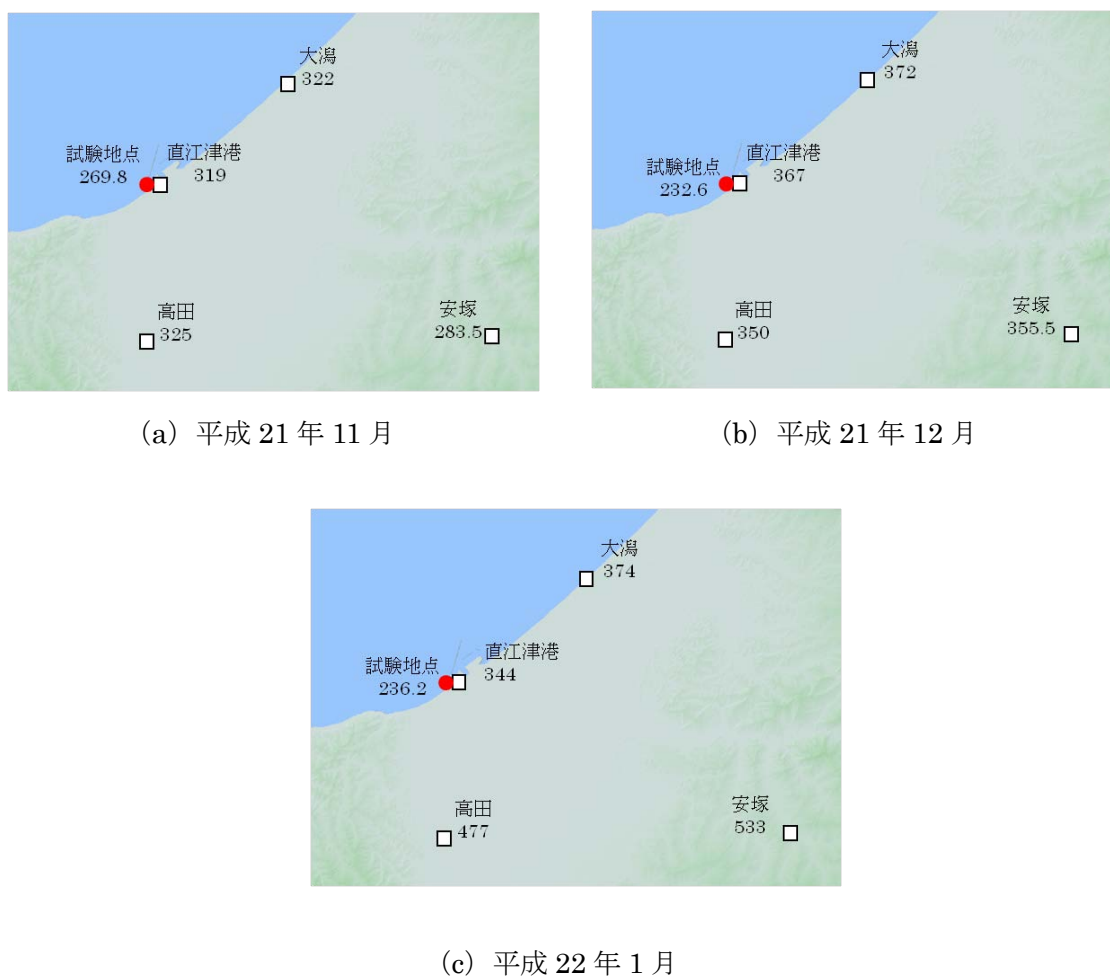


図 4-2 月間降水量

表 4-3 月間総降水量における比較 (mm)

	試験データ	自治体データ	AMeDAS データ		
	直江津	直江津港	高田	大湊	安塚
平成 21 年 11 月	269.8	319	325	322	283.5
平成 21 年 12 月	232.6	367	349.5	372	355.5
平成 22 年 01 月*	236.2	344	477	374	533

※2010/1/1~2010/1/19

(3) 隣接地点 1 時間降水量との相関関係

次に降水状況の地域的な広がりを見るため 1 時間降水量について試験データと周辺 AMeDAS 降水データ及び自治体データとの相関係数を表 4-4、相関関係を図 4-3 に示す。これらの図表より、試験地点と自治体データとの相関に着目すると、平成 21 年 11 月には相関が非常に高いが、平成 21 年 12 月及び平成 22 年 1 月と降雪期間に入ってから相関が低くなっている。これは降雨に比べて降雪の方が地域性を有していることを予測させる。また各地点での相関係数は直江津と同じく海岸に近い大湊で比較的大きくその他の地点は距離と共に相関係数は小さくなっている。また、全体的に試験データと比べて周辺データの方が 1 時間降水量について大きい傾向が表れている。この理由としては 4.2.1.(2)項に述べた通りと考える。

表 4-4 1 時間降水量における試験データと周辺データとの相関係数

	自治体データ	AMeDAS データ		
	直江津港	大湊	高田	安塚
平成 21 年 11 月	0.967	0.728	0.507	0.518
平成 21 年 12 月	0.911	0.691	0.431	0.396
平成 22 年 1 月	0.840	0.518	0.377	0.375

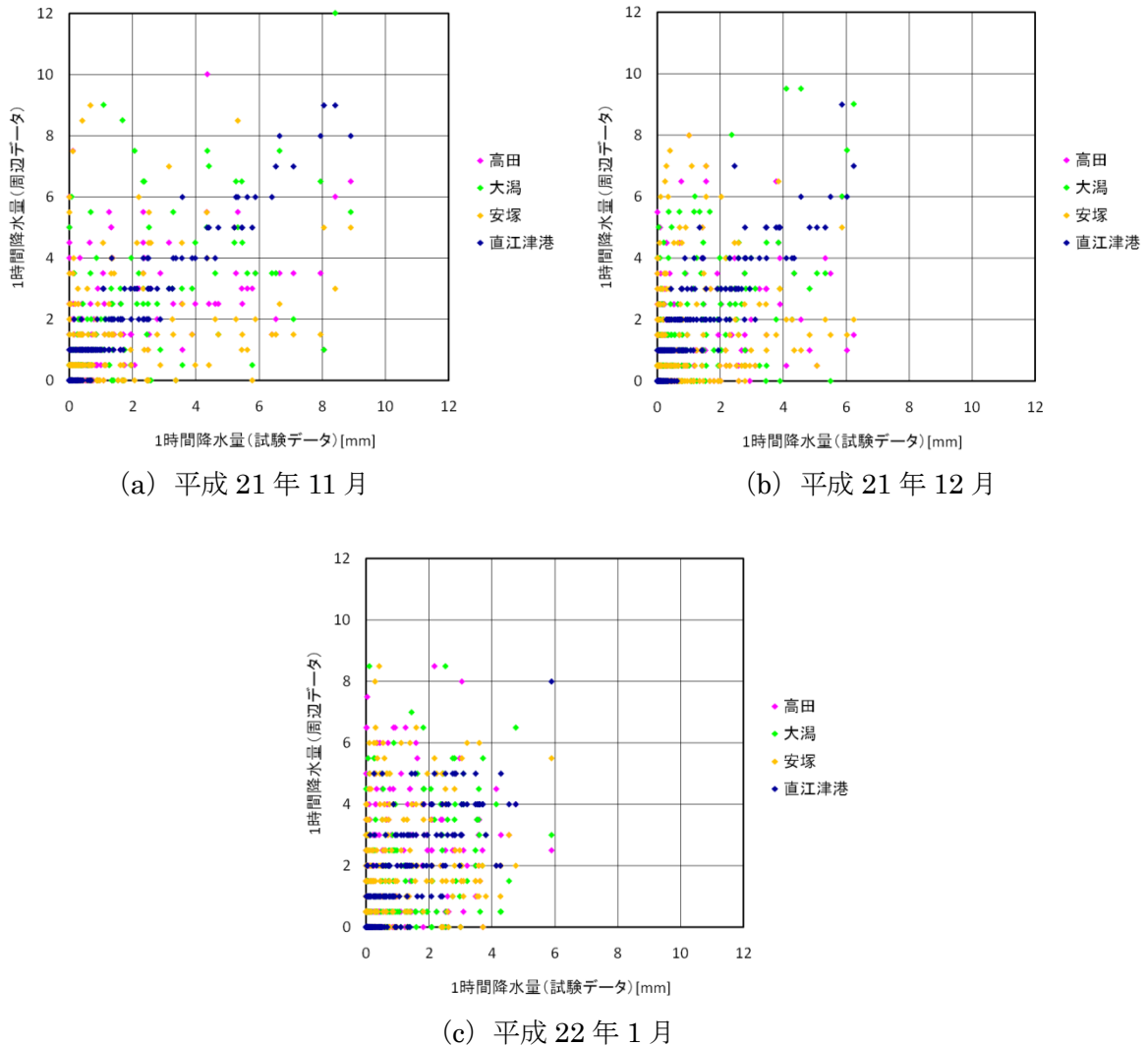


図 4-3 1 時間降水量の相関における比較

4. 2. 2 降水強度確率分布形の考察

(1) 降雨強度確率分布の考察

降雨強度確率分布は、降雨が問題となる周波数領域での回線設計に必要なパラメータであり、その分布形が明らかになれば降雨減衰確率分布を推定できる。現在降雨減衰分布の推定に用いる降雨強度の積分時間として基本的に 1 分積分が用いられる。また観測期間については、強雨期分布と年間分布とが用いられ、前者は準ミリ波帯における回線設計法の基となる分布で降雨設計値も強雨期分布の 0.0075% 値が用いられており、後者は信頼度評価に直接関係する分布である。そのため、これらの期間の確率分布について検討する事が重要となる。降雨強度の分布形としては、従来の回線設計法ではガンマ分布が用いられているが、近年 M 分布による検

討も行われてきているため、これら 2 つの分布形について検討する。これらの分布形の式表現を以下に示す。ここで R が降雨強度、 ν 、 β 、 p 、 u は各分布パラメータであり、降雨強度の平均値 m 及び標準偏差 σ を用いて各式に併記した方法で確率分布を近似する。なお、ガンマ分布については物理的意味も含むより詳細な計算法を資料編の第 2 章に示している。またここでは両分布とも降雨強度の統計量から分布パラメータを決定する方法を示したが、実測分布の 2 点から近似する方法等もある。

[ガンマ分布]

$$f(R) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} \cdot R^{\nu-1} \cdot e^{-\beta R} \quad (4-1)$$

$$\nu = (m/\sigma)^2$$

$$\beta = m/\sigma^2$$

$$\Gamma(\nu) = \int_0^\infty \exp(-t)t^{\nu-1} dt \quad ; \text{ガンマ関数}$$

[M 分布]

$$f(R) = \frac{p \cdot e^{-uR}}{R} \left(\frac{1}{R} + u \right) \quad (R^* \leq R < \infty) \quad (4-2)$$

$$p = R^* \exp(uR^*)$$

$$u = \frac{2R}{\sigma^2 + m^2 - R^{*2}}$$

$$g \equiv \frac{R^*}{\sigma}, \quad g = 10^z$$

$$z \equiv -0.43704973 + 1.724849y + 0.051344y^2 - 0.523097y^3 - 0.543057y^4 - 0.228939y^5 - 0.0358457y^6$$

$$y \equiv \log\left(\frac{m}{\sigma}\right)$$

本試験では強雨期及び年間を通した試験は実施されずそれらの期間のデータはともに取得されていないため、参考までに試験期間総合における 1 分降雨強度の確率分布を図 4-4 に示す。

この図には 1 分降雨強度の平均値、標準偏差といった統計量から各分布形で近似した 1 分降雨強度分布を併記する。この図より全累積確率領域においてガンマ分布が実測分布を比較的よく近似できている事が分かる。一方、M 分布は実測分布よりも確率の小さな領域で 1 分高強度

が大きくかつ分布形状も異なっている。

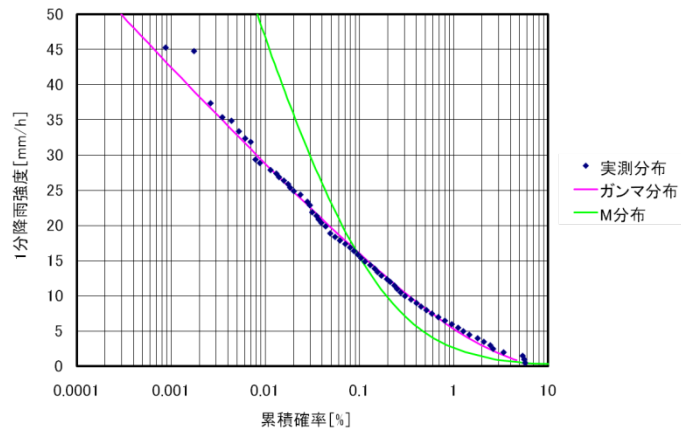


図 4-4 統計量から近似した降雨強度確率分布（試験期間総合）

(2) 降水強度確率分布の考察

既存の準ミリ波帯の回線設計法では回線品質劣化要因としては降雨のみを取り上げ、降雨による不稼働率を計算する方法を提示している。しかし、降雪の多い地域では降雪の影響を含む全降水及び降雪の強度についても時間率分布を明らかにしておく必要がある。本試験では降雪の多い季節いっぱい観測したわけではないので、ここでは測定全期間について降雨も含む全降水の降水強度分布を図 4-5 に示す。この図には降水強度の統計量を基にガンマ分布、M 分布のパラメータを導出して近似した両分布も併記した。この図によれば確率 0.03% 程度以上ではガンマ分布が比較的良好に実測結果と一致しているが、これ以下の確率ではやや実測結果の確率が大きくなっている。この原因の 1 つは以下のように考えられる。即ち降水強度確率の小さな領域は、降雪強度は大きなデータは観測されないため降雨強度の確率で決まりこの降雨確率分布は比較的良好に実測分布と一致していた。これは降雨抛度の場合は統計量からのパラメータの計算が対応していたことを示しており、一方降水強度の場合は降雪データが含まれるため降水強度の統計量は降雨と異なってしまうためパラメータの値も異なりそれに対応した近似分布が導出されたためである。また、M 分布による近似分布は降雨強度の場合と同じように実測結果よりも確率の小さな領域で 1 分降雨強度が大きくなりその差が大きく分布形状も全確率領域にわたり若干異なっていることが分かる。

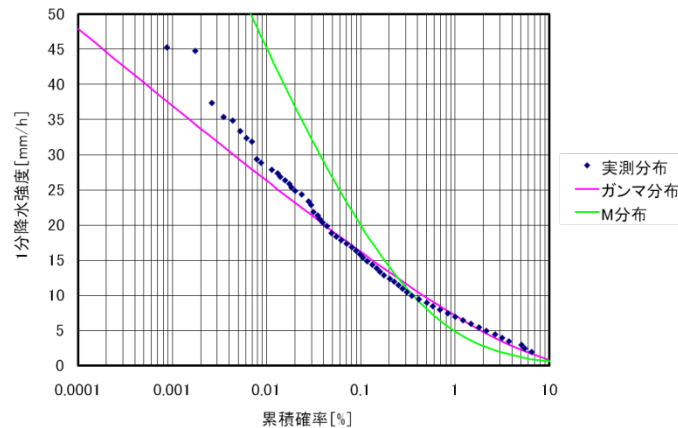


図 4-5 降水強度確率分布（試験期間総合）

(3) 降雪強度分布の考察

降雨に比べて雪は降る季節と地域が限られているため、これまでの回線設計法において降雪減衰の評価はされたことがなく、したがって、降雪強度分布形に関する検討はなされてこなかった。ここではさしあたり測定全期間における降雪強度分布を求め図 4-6 に示す。この図には降雨強度分布と同じように、降雪強度の統計量から計算されたパラメータ値に基づくガンマ分布と M 分布の近似分布を併記する。この図によれば、ガンマ分布による近似分布は確率約 0.1% よりも大きな領域では比較的良好に一致するが、この確率以下では過大評価していることが分かる。一方、M 分布については降雨強度及び降水強度分布の場合と同じく分布形状が異なりかつ確率の小さな領域で過大評価している。これらの原因は明らかでないが、今後必要ならば多くの降雪地点において長期間にわたる観測データを収集し検討していく必要がある。

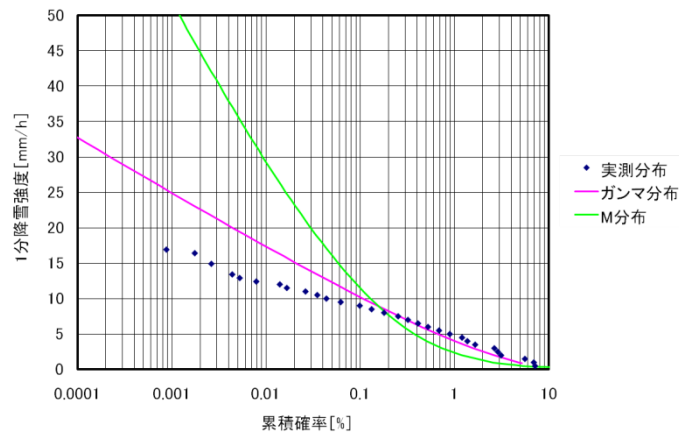


図 4-6 降雪強度確率分布（試験期間総合／全降雪タイプ）

4. 3 降水減衰関係測定結果の考察

4. 3. 1 降水減衰確率分布形の考察

(1) 降雨減衰確率分布の考察

回線設計法では強雨期の降雨減衰分布及び年間不稼動率の計算に用いられる年間の降雨減衰分布が重要となる。ここでは降雨減衰量の統計量から近似した分布形について述べる。推定には降雨強度分布と同じくガンマ分布及びM分布を用い、それぞれ降雨減衰量の統計量から式(4-3)～式(4-4)により求められる。ここでZが降雨減衰量、 ν 、 β 、 p 、 u は各分布パラメータで統計量から降雨強度の場合と同じ式で計算できる。

[ガンマ分布]

$$f(Z) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} \cdot Z^{\nu-1} \cdot e^{-\beta Z} \quad (4-3)$$

[M分布]

$$f(Z) = \frac{p \cdot e^{-uZ}}{Z} \left(\frac{1}{Z} + u \right) \quad (4-4)$$

本試験では強雨期及び年間データともに取得されていないため、参考までに試験期間総合における降雨減衰分布の分布形を図4-7に示す。この図では減衰の原因が降雨であると分類されたデータを基に確率分布を求めている。この図より、累積確率0.4%より小さい領域においてガンマ分布で近似された分布は実測分布よりも過大評価していることがわかる。同じ期間の降雨強度分布によれば実測分布と降雨強度統計量からガンマ分布近似された近似分布とは比較的良好に一致していたが、減衰分布では過大評価されている。この原因の1つは降雨減衰量と直接対応する降雨強度は伝搬路で積分された降雨強度であり、この分布は小さな確率領域では飽和する傾向にあると言われている。このように減衰分布は小さな確率領域では飽和する傾向が表れているものと考えられる。したがって、減衰分布の場合は全確率領域において固定されたパラメータによって近似することが困難な場合があると言える。これに対しM分布は同じく累積確率約0.4%においてそれ以下の確率では過大評価、それ以上の確率では過少評価され、分布形状も異なっている。

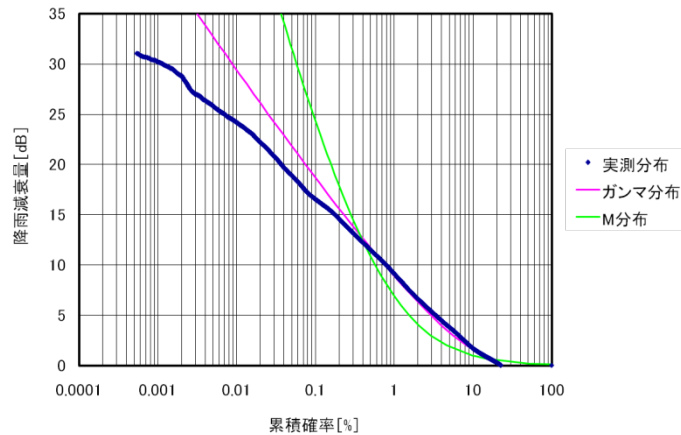


図 4-7 統計量から近似した降雨減衰確率分布（試験期間総合）

(2) 降雪減衰確率分布の考察

降雪による減衰量の確率分布については全試験期間における全降雪の場合及びみぞれと湿雪等の場合の確率分布を図 3-19 に示した。既述したようにこの図の降雪減衰には空間での降雪減衰以外にアンテナ表面への着雪による減衰を含んでおり、純粹の伝搬路空間における減衰分布を求めるにはこのアンテナ着雪による減衰を除外する必要がある。

アンテナ着雪による電波の減衰には表面の雪による熱損失以外に着雪の不均一性によるアンテナ指向方向のずれがあり、これらについては着雪状況のモデル化による計算例はあるが、実際の測定時の着雪状況と降雪強度や減衰量との関係を定式化した検討はない。降雪強度は瞬時での変動であるのに対し、着雪量は基本的に時間と共に蓄積されていくので降雪強度と定量的な関係を持ちうることはない。したがって、ここでは降雪による減衰量を実測データから切り分けることは現段階では困難なので、降雪減衰分布の評価については今後十分にデータが蓄積された段階での検討を期待したい。

4. 3. 2 降水減衰係数に関する考察

降水減衰係数に関する考察については、本編第 4 章に示す。

4. 4 Ping 伝送試験結果の考察

Ping 伝送試験結果の考察については、本編第 4 章に示す。

5 参考文献

- 1) Rep. 719-3 “Attenuation by atmospheric gases” ITU (1991)
- 2) 佐々木収、秋山忠、吉田春彦「水蒸気による電波減衰特性」通研実報 21、6 (1972)
- 3) J. Sader “Rain attenuation of millimeter waves at $\lambda=5.77$ 、 3.3 and 2mm ” IEEE Trans. AP 23、2 (1975)
- 4) O. Sasaki and Y. Hashimoto “Millimeter wave rain attenuation and its simplified frequency scaling “ IEE Third ICAP 2 (1983)
- 5) R. Valentin “Influence of rain drop-size distribution on the rain attenuation” 電電公社通研成果報告 第 16310 号 (1981)
- 6) R. G. Medhurst “Rainfall attenuation of centimeter wave : Comparison of theory and measurement “ IEEE Trans. AP-13、4 (1965)
- 7) J. S. Marshall and W. McK. Palmer “The distribution of raindrops with size” J. Meteor. 115 (1948)
- 8) J. Joss、 J. S. Thams and A. Waldvogel “The variation of raindrop size distributions at Locarno” Proc. Int. Conf. Cloud Physics (1968)
- 9) 森田和夫、樋口伊佐夫「降雨による電波の減衰量の推定に関する統計的研究」通研実報 19、1 (1970)
- 10) Rec. ITU-R.P 838 “Specified attenuation model for rain for use in prediction methods “ ITU Recommendations (1997)
- 11) R. L. Olsen、 D. V. Rogers and D. V. Hodge “ The aR^b relation in the calculation of rain attenuation” IEEE Trans. AP、 AP-26、 2 (1978)
- 12) 西辻昭「降雪時における電波減衰量の計算方法」信学論 54-B、1 (1971)
- 13) 松本正、西辻昭、平山昌宏、羽鳥孝三「降雪時における電波減衰(昭和 42 年度委託研究報告)」電電通研成果報告 第 4098 号 (1968)
- 14) T. Oguchi “Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors “ Proc. of the IEEE 71、9 (1983)
- 15) 大森武夫、青柳正三「降雪による電波減衰の一推定法」信学論 (B) J54-B、8 (1971)
- 16) 森田和夫「冬季降水による準ミリ波の減衰推定」信学論 63-B 11 (1980)
- 17) 近藤学、福田滋、鹿子嶋憲一「10~30GHz におけるレドーム付反射鏡アンテナの降雨時放射特性」信学論 (B) J69-B、3、(1986)
- 18) 佐藤孝平、細矢良雄「降雨時平板レドーム損失の検討」信学論 (B) J66-B、6、(1983)
- 19) 近藤学、福田滋、鹿子嶋憲一「30/20GHz における降雪時アンテナ特性の評価」信学論 (B) 69-B、1 (1986)
- 20) 榛葉実、佐藤和弘、小池浩雄、佐藤孝「レドーム上の着雪によるアンテナパターンの劣化特性」信学論 (B) 70-B、8 (1987)

- 21) E. Altshuler “A simple expression for estimating attenuation by fog at millimeter wavelengths” IEEE Trans. AP AP-32, 7 (1984)
- 22) 池上文夫「大気屈折率の不均一分布によるフェージングの発生機構」通研実報 15、7 (1966)
- 23) 秋山忠、青柳正三、吉田春彦「マイクロ波の入射角変動」信学誌 50、2 (1967)
- 24) 総務省「電波法関係審査基準」電気通信振興会（最新平成 21 年修正版）
- 25) 佐々木収、石田未央、高橋直人、吉川誠「平均値 1 となるガンマ分布を用いた降雨減衰確率分布の統一表現」第 525 回 URSI-F 会合資料 (2008)
- 26) 細矢良雄「日本各地の 1 分雨量分布の一推定法」信学論 (B) J71-B、2 (1988)
- 27) 小野健一、唐沢好男「気象庁の 1 分間降水量データを用いた日本各地における 1 分間降雨強度特性と最適な近似分布モデルに関する考察」信学論 (B) J89-B、3 (2006)
- 28) 森田和夫、樋口伊佐夫「ミリメートル波帯降雨減衰の推定」通研実報 24、9(1975)
- 29) 細矢良雄、佐々木収、白土正、森田和夫「20GHz 帯降雨時伝搬特性の推定」通研実報 33、6 (1984)
- 30) Paulson and Gibbins “Rain model for the prediction of fade duration at millimeter wavelengths” IEE Microwaves Antennas and Propagation 147、6 (2000)
- 31) M. Ishida、O. Sasaki、T. Taga and S. Ichitubo “A study on rain fade duration distribution characteristics on millimeter wave radio link” Clim. Diff. 2003 Clim 52 (2003)
- 32) Rec. ITU-R.P 530-10 “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems” ITU Recommendations (2002)
- 33) M. Ishida、O. Sasaki、M. Yoshikawa and N. Takahashi “A study on the prediction of rain fade duration at millimeter wave” Clim. Diff. 2005 Clim 52 (2005)

6 設置要綱、構成員名簿及び経過報告

6.1 調査検討会設置要綱

(1) 目的

ミリ波帯高速無線伝送システムの電波伝搬特性に関する技術的調査検討を行うことにより、本システムに係る技術基準の策定に反映させ、本システムの早期実用化を図り、もって、周波数の有効利用に資することを目的とする。

(2) 名称

本調査検討会は、「ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会（以下「調査検討会」という。）」と称する。

(3) 調査検討事項

調査検討会では、以下の事項について調査検討する。

- 1) 電波の伝搬特性（雨・雪等による減衰の影響）に関する調査検討
- 2) 実用化に向けた課題等の整理
- 3) その他、調査検討の目的達成のために必要な事項

(4) 構成

調査検討会の構成は以下のとおりとする。

- 1) 調査検討会は、信越総合通信局長の委嘱した委員をもって構成する。
- 2) 調査検討会に座長及び座長代理を置く。
座長は委員の互選によって選出し、座長代理は委員の中から座長が指名する。
- 3) 調査検討会に必要なに応じて、部会を置く。

(5) 運営

- 1) 調査検討会は、座長が召集し主宰する。座長不在時は座長代理がこれを行う。
- 2) 調査検討会は、委員以外の者から意見を徴することが必要であると認めるときは、これを行うことができる。
- 3) その他調査検討会の運営に必要な事項は座長が定める。

(6) 開催期間

平成21年6月から平成22年3月までとする。

(7) 事務局

調査検討会の庶務は、信越総合通信局無線通信部企画調整課が担当する。

6. 2 実用化検討部会設置要綱

(1) 目的

ミリ波帯高速無線伝送システムが実用化された場合における本システムの利用方策の提案及び利用方策に関する課題の整理を行うことを目的とする。

(2) 検討事項

- 1) ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策の提案
- 2) ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策に関する課題の整理
- 3) その他、ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会の実用化検討部会（以下「実用化検討部会」という。）の調査検討事項に必要な事項

(3) 構成

実用化検討部会の構成は以下のとおりとする。

- 1) 実用化検討部会は、信越総合通信局長の委嘱した委員をもって構成する。
- 2) 実用化検討部会に部会長を置く。部会長は委員の中から調査検討会の座長が指名する。

(4) 運営

- 1) 実用化検討部会は、部会長が召集し主宰する。
- 2) 実用化検討部会は、委員以外の者から意見を徴することが必要であると認めるときは、これを行うことができる。
- 3) 実用化検討部会の運営に関して必要な事項は、部会長が実用化検討部会に諮って定める。

(5) 事務局

実用化検討部会の庶務は、信越総合通信局無線通信部企画調整課が担当する。

6. 3 調査検討会構成委員名簿

(敬称略 委員五十音順)

【座長】

半田 志郎 国立大学法人 信州大学 工学部 電気電子工学科 教授

【座長代理】

山田 寛喜 国立大学法人 新潟大学 工学部 情報工学科 教授

【委員】

佐々木 金見 (株)日立国際電気 通信事業部 通信装置設計本部 専門部長

笹森 文仁 国立大学法人 信州大学工学部 電気電子工学科 准教授

末松 英治 シャープ(株) 電子部品事業本部 システムデバイス第2事業部
第1開発部 副参事高橋 和晃 パナソニック(株)東京R&Dセンター 通信コアデバイス開発センター
要素開発グループ 第三開発チーム チームリーダー

高橋 忠生 上田日本無線(株) 無線通信ビジネスユニット 無線通信技術部 部長

服部 監也 日本電気(株) 官公ソリューション事業本部
パブリックサービス推進本部 担当部長堀部 晃二郎 KDDI(株) 技術統括本部 技術渉外室 電波部 管理グループ
グループリーダー

柳 十四男 (株)フジミック新潟 取締役 企画推進室長

吉川 誠 NTTアドバンステクノロジー(株) ネットワークシステム事業本部
ワイヤレスシステムビジネスユニット 主幹担当部長

以上 11名

【事務局】

信越総合通信局 無線通信部 企画調整課

6. 4 実用化検討部会構成委員名簿

(敬称略 委員五十音順)

【実用化検討部会長】

笹森 文仁 国立大学法人 信州大学 工学部 電気電子工学科 准教授

【部会委員】

朝賀 一夫 佐渡汽船(株) 経営改善部 情報システム担当課長

石澤 文博 信越放送(株) 情報センター 番組技術部 部長

岡田 亮 日本放送協会 長野放送局 技術部

神林 正人 東北電力(株)新潟支店 電力流通本部 情報通信センター 通信運営課長

能戸 智也 KDDI(株) ネットワーク技術本部 技術戦略部 課長補佐

逢沢 正文 長野県 企画部 情報統計課 課長補佐

丸田 健一 (社)日本ケーブルテレビ連盟 信越支部 通信委員長
(上越ケーブルビジョン(株)取締役 営業本部長兼通信部長)

宮崎 芳隆 東日本電信電話(株) 長野支店 企画部 経営企画担当課長

宗村 信明 新潟県 総務管理部 情報政策課 課長補佐

柳 十四男 (株)フジミック新潟 取締役 企画推進室長

渡邊 実 国土交通省 北陸地方整備局 企画部 情報通信技術課 課長補佐

以上 12名

【事務局】

信越総合通信局 無線通信部 企画調整課

6. 5 経過報告

月 日		調査検討会及び実用化検討部会の審議内容等
平成 21 年	6 月 8 日	○第 1 回調査検討会（長野市） 調査検討会の設置について 調査検討会の検討内容等について
	9 月 30 日	○第 1 回実用化検討部会（長野市） ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策の検討について 実用化検討部会のスケジュールについて
	9 月 30 日	○第 2 回調査検討会（長野市） 実地試験の実施方法について 今後のスケジュール等について 第 1 回実用化検討部会の報告について
	11 月 20 日	○第 2 回実用化検討部会（長野市） ミリ波帯高速無線伝送システムの利用方策及び課題の検討について 実用化検討部会及び実地試験等スケジュール
平成 22 年	1 月 20 日	○第 3 回実用化検討部会（上越市） ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会への報告（案）について 最終報告書 目次（案）について
	1 月 20 日	○第 3 回調査検討会（上越市） 実地試験の状況について 実用化検討部会報告について 報告書骨子（案）について 最終報告書 目次（案）について
	3 月 25 日	○第 4 回調査検討会（長野市） 調査検討結果の取りまとめについて

7 用語解説

AMeDAS (アメダス : Automated Meteorological Data Acquisition System)

気象庁の「地域気象観測システム」の通称である。日本国内約1、300か所の自動観測所で構成されている。

ASK (OOK) 変調 (Amplitude Shift Keying)

振幅偏移変調。搬送波をデジタル信号によって振幅変調する方式。

2値 (0、1) の場合がOOK(on-off-keying)と呼ばれる。

BER (ビット誤り率 : Bit Error Rate)

対象とする情報のビット総数に対して誤って認識したビットの数の割合。品質を示すものとして使用される。デジタル伝送において、受信側で受信される信号は雑音などによってビットの誤りが生じる。

FWA (Fixed Wireless Access)

加入者系無線アクセスシステム。P-P (対向) 方式、P-MP (1対多) 方式があり、それぞれ最大百数十Mbps、10Mbps の通信が実現可能。

ITU (International Telecommunication Union) 分布

ITUとは、国際電気通信連合の略。電気通信分野における国際連合の専門機関。

ITU 分布とは、ITU-R 勧告にある電波伝搬に関する国際規格である。

Ping (Packet INternet Groper)

ネットワークの接続を確認するプログラム。具体的には、IP アドレスを指定すると、通常 32 バイト程度のデータを送信して相手から返信があるか、返信がある場合はどの程度の時間がかかるかを判断するプログラム。

PSK変調 (Phase shift keying)

位相偏移変調。デジタル信号に応じて搬送波の位相を偏移させる変調方式。

RSSI電圧 (Received Signal Strength Indication)

無線機が受信する電波の強さを表す電圧。

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

2003 年1 月にIEEE (米国電気電子学会) で承認された固定無線通信の標準規格。IEEE802.16 規格の使用周波数帯を変更したもの。無線LAN の広域エリアタイプとして推進団体「WiMAX フォーラム」が2001 年に検討を開始した規格である。

建物内部の通信に使うことを想定した無線LANと異なり、電話回線や光ファイバが担っている加入者系通信網の末端部分での利用を想定している。現在では、ブロードバンド未整備地域へのインターネット接続サービスを提供している。

ラスト・ワンマイル (Last One Mile)

電話局やインターネット・サービス・プロバイダ側から見て、ユーザーにもっとも近い最後の1 マイルということから命名された言葉。

ラジオダクト (radio duct)

対流圏伝搬において、特定の高度に沿って発生する溝(ダクト)状の伝搬路。対流圏伝搬の電波がこのダクト中に入射すると異常な屈折や反射を受け、電波がはるか遠くへ到達したり、ダクト内に電波がトラップされて近くの受信点に到達しなかったりする。

レドーム (Radome)

アンテナを風雨等から守るためのドーム。回転型のアンテナでは全体を覆う形式であるが、固定のパラボラアンテナでは開口面のみを覆う平板又はコーン型が使用されている。

干渉性フェージング (Fading)

フェージングの一種。フェージングとは、受信電界の強さが電波の通路となる媒体の状態の影響を受けて時間的に変化する現象。干渉フェージングとは、複数の受信波相互の干渉によって発生するもの。

雑音指数 (Noise Figure)

受信機の雑音特性を表す検波器までの直線部の総合特性で、有効電力のS/N比の劣化の度合いを示す値のこと。

所要C/N (Required Carrier to Noise ratio)

必要とされる受信限界における信号レベルと雑音レベルの比を表す。

光メディアコンバータ

光ファイバとLAN ケーブルや同軸ケーブルを接続して、信号を相互に変換する装置。

ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討報告書

平成22年3月

ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会

発行 総務省 信越総合通信局
事務局 総務省 信越総合通信局 無線通信部企画調整課
〒380-8795 長野市旭町1108 長野第1合同庁舎
TEL 026-234-9953 FAX 026-234-9947
URL <http://www.soumu.go.jp/soutsu/shinetsu/>