第４９５回電波研連Ｆ分科会　資料
平成１７年６月２４日

Ku 帯および Ka 帯衛星回線降雨減衰の前線種類別周波数スケーリングについて

前川　泰之

大阪電気通信大学・情報通信工学部・通信工学科
〒572-8530　大阪府寝屋川市初町 18-8
Tel: 072-820-9047, Email: maekawa@maelab.osakac.ac.jp

１．はじめに

近年衛星通信や衛星放送に対して新たに開拓すべき周波数帯として Ka 帯（30／20GHz）の利用が見込まれているが、その有効な利用を実現するためにはこの周波数帯でますます大きくなる降雨減衰に対して、その発生時間率等を的確に予測することが不可欠である[1].[2]。降雨減衰予測に対しては、気候区や降雨強度累積時間率等から求める方法が元来用いられるが[3]、現在既に Ku 帯（14／12GHz）衛星回線の運用を行い Ku 帯での降雨減衰統計をある程度取得して把握している場合には、それらのデータからさらに周波数が高い Ka 帯に対していわゆる周波数スケーリングを行い、直接降雨減衰累積時間率を推定する方がより的確で現実的であるといえる。

本研究では、前回の発表に引き続き[4]、CS-2 等の Ka 帯ビーコン波（19.45GHz、右旋偏波、仰角 49.5°）と Ku 帯 BS 放送波（11.84GHz、右旋偏波、仰角 41.4°）の降雨減衰を過去 17 年間（1988－2004）大阪電気通信大学寝屋川実験局で連続的に測定したデータを用い、両周波数帯の降雨減衰比の年変化と季節変化についてさらに分析を行なった。そして各降雨事象の雨滴粒径分布や前線種類別、あるいは梅雨期、秋雨期等の季節別に周波数スケーリングを試み、従来法と比較した場合の予測精度改善効果の観点から Ka 帯降雨減衰量の発生時間率についてさらに詳しく検討を行なった。

２．測定結果

２－１．Ka 帯と Ku 帯の降雨減衰比

本研究では、まず Ka 帯と Ku 帯の降雨減衰について年間累積時間率分布を計算し、それらの等時間率同士の関係を年別に求めた。図１に最近の例として、2000 年から 2004 年に得られた結果について示す。図中の細線は代表的な３種類の雨滴粒径分布(Drip size distribution: DSD)、即ち霧雨型（Joss-drizzle: Jd）、標準型（Marshall-Palmer: MP）、および雷雨型（Joss-thunderstorm: Jt）による理論値を示す[5]。計算に必要な等価通路長は５km と仮定してある。また、点線は ITU-R 法による予測値である[3]。同図より、両周波数帯の降雨減衰比は前回報告した 1988 年から 1999 年まで同様に、年毎にかなり大きな変動を示すものの、全般的にはおおよそ上記の３種類の雨滴粒径分布(DSD)による理論値の範囲にあることが分る。

図１に示した降雨減衰周波数比の年変化については、前回も指摘したように次の三つの特徴が Ka 帯の減衰量の範囲別に今回も同様に指摘できる。

１）10dB 程度以下の“低減衰域”では年変化が少なく、減衰比は Jt 型よりである。
２）10～25dB 程度の“中減衰域”では年変化が大きくなるが、年毎に特徴的な減衰比をこの領域では示す傾向がある。
３）25dB 程度以上の“高減衰域”では年変化、年内の変化とも大きくなるが、全般的には再び Jt

型に近づく様子を示す。

即ち、前回も指摘した通り、年毎に周波数による減衰比の差が統計的に多く現れ、降雨タイプの差異による DSD の影響が大きいのは、２）10～25dB 程度の“中減衰域”であるといえる。

２－２．前線種類別降雨タイプによる降雨減衰累積分布

図２に 1986 年から 2004 年の 19 年の間に得られら Ka 帯通信衛星ビーコン波（19.45　GHz）の減衰量の累積時間率分布を示す。また、温暖・寒冷・閉塞前線(△)、停滞前線(□)、夕立・台風(×)の降雨タイプ別の累積時間率統計も同様に示した[6]。図２より、図１において年別に降雨減衰比の年変化が大きく見られた２）10～25dB 程度の“中減衰域”では、主として停滞前線(□)によって発生する降雨減衰の発生時間率が大きな割合を占め、ほぼ降雨事象全体の半分程度の時間率を有することが分る。従って、この梅雨(Baiu)期や秋雨期(Akisame or Shuu)に多くの降雨をもたらす停滞前線が、Jd、MP、あるいは Jt 型のいずれの雨滴粒径分布(DSD)多く含む降雨タイプであるかが、降雨減衰比の年間統計に少なからぬ影響を及ぼすと考えられる。

２－３．雨滴粒径分布(DSD)との対応

本研究では、当初ろ紙等を用いた初歩的な方法を経たのち、1995 年以降は光学センサ（水平方向のイメージスキャナ）を用いた降雨時の雨滴粒径の自動測定を 1 分間隔（2002 年以降は 10 秒間隔）でほぼ連続的に行なっている。その実測値を用いて降雨事象毎の雨滴粒径分布(DSD)の種類を上記の３種類の中から、その事象内の平均分布が一番近い形を選んで決定している。1995 年以前等の実測値がない場合は、降雨事象毎の Ka 帯・Ku 帯衛星電波の減衰比の平均値を直接求めて 3 種類の DSD に基づく理論値から最も近いものを選んだ[4]。

以前報告したように、DSD の年間統計を左右すると考えられる停滞前線に関しては、前線の北側(North)、前線通過時(Cross)、あるいは前線の南側(South)で発生する場合の降雨にはっきりとした特性の違いがあり、次のような特徴が 1988 年から 2000 年に到る 13 年間の統計で明確に示された。

１）北側(North)：　DSD は MP 型が多く、梅雨(Baiu)期の秋雨(Shuu)期両方で発生。

２）通過時(Cross)：　DSD は Jd 型が多く、梅雨(Baiu)期に多く発生。

３）南側(South)：　DSD は Jt 型が多く、秋雨(Shuu)期に多く発生。

これらの特徴は 2001 年から 2004 年のかけても同様に確かめられている。

また、7 月中旬から８月末にかけて、梅雨期から秋雨期の間の夏季に、前線を伴わない夕立等のにわか雨により大きな減衰が発生することがあるが、これらの夕立等の降雨(Shower)も主に Jt 型の DSD を有することが 17 年間と統計により同様に示された。

２－４．降雨タイプと降雨減衰比の年変化

前節では、DSD の年間分布を左右し、降雨減衰比の年変化を引き起こす原因として、梅雨(Baiu)期と秋雨(Shuu)期の停滞前線がそれぞれ通過時(Cross)あるいはその南側(South)で発生する降雨、およびその間の時期の下記に発生する夕立(Shower)による降雨の影響を挙げた。本節では降雨減衰比の年変化とより定量的な対応関係を調べるため、図１で年変化が大きく見られた“中減衰域”、即ち Ka 帯で 10dB 以上の減衰量が発生する時間について、各降雨事象別あるいは降雨タイプ別に検討した。

図３に各年の降雨減衰が顕著になる 5 月から 10 月の間に 10dB 以上の Ka 帯衛星ビーコン波減衰量が観測された時間(min)を降雨事象日毎に示す。図中の太い点線は、天気図上で停滞前線の有無により各年の梅雨期の終わり、細い点線は秋雨期の始まりを示す。また、図４はこの様に区別して求めた各年の梅雨期、夏季、および秋雨期での 10dB 以上の減衰発生時間(min)、図５は上記の Cross、Shower、および South の各降雨タイプについて、それぞれ各年の 10dB 以上の減衰発生時間を示す。最近の例で見ると、図１の減衰比では 2003 年(□印)と 2004 年(＋印)はそれぞれ“中減衰域”で Jd 型あるいは Jt 型に寄った分布を示すが、図３と４ではそれぞれの年には梅雨期あるいは秋雨期に 10dB 以上の降雨減衰が多く発生したことが分り、図５ではそれぞれの年に Cross および South による降雨減衰発生が多いことが分る。

図６と図７にこれらの年変化の傾向をまとめて示す。図６の△印は Cross の 10dB 以上の減衰発生

時間が各年に上記３種類の間で占める割合、○印は梅雨期の 10dB 以上の減衰発生時間が各年全体に占める割合をそれぞれ示す。また図７は、各年の年間時間率約 0.02%(概略各年の“中減衰域”に相当)における Ka 帯と Ku 帯衛星電波の降雨減衰の等時間率値同士の比を示したものである。図６と７よりこれらの年変化の間には大きな相関があることが認められる。

３．Ka 帯降雨減衰時間率の予測

３－１．雨滴粒径分布と周波数スケーリング

前章で示した様に、Ku 帯と Ka 帯衛星電波の降雨減衰比は雨滴粒径分布(DSD)の影響を強く受け、その年間統計は梅雨(Baiu)や秋雨(Shuu)等の降雨減衰の発生する季節や、停滞前線の通過時(Cross)、南側(South)等で発生する特定の降雨タイプに大きく依存することが明らかになった。本章では従来の周波数スケーリング法とは異なり、これらの特徴を加味したより精度の高い降雨減衰予測法についてその可能性を検討した。

即ち従来の ITU-R 法等では[3]、降雨強度の累積時間率値やより低い周波数(この場合 Ku 帯)の降雨減衰の累積時間率分布に一定のファクターをかけることにより、降雨減衰予測や周波数スケーリングが簡略的に行なわれる。これに対し今回は各日の降雨事象毎の DSD を前出の代表的間３種類（Jd、MP、Jt）の中から選んで、1 分毎の Ku 帯降雨減衰測定値を累積時間率値ではなく“瞬時値”においてまず Ka 帯へ理論的に変換を行った。そして Ka 帯の“測定値”と同様の処理を行なうことにより、さらに厳密な累積時間率値の推定を行った。最後に Ka 帯の測定値と推定値から得た各年の年間累積時間率の比較を行い、推定値を吟味した。

図８に、以上の様にして Ku 帯降雨減衰量から直接求めた Ka 帯減衰量の年間累積時間率を、1988 年から 2004 年の 17 年間各年の例について示す。減衰量は図１で最も両周波数帯の比が顕著に現れる 15dB(平均年間時間率 0.02%)辺りを選んである。図中の□印は実際の Ka 帯測定値から算出した各年の時間率である。また点線の△印はどの降雨事象も一律標準的な MP 型の DSD を仮定して計算した場合である、一方＋印は降雨事象毎に実際に検出された DSD を 3 種類（Jd、MP、Jt）の中から選んで計算したものである。図８よりかなり変動は大きいものの、ほとんどの年において DSD を一律 MP 型(△印)とするよりも降雨事象毎に３週類の中から選んで決めた(＋印)方が、年間累積時間率の推定値は実測値(□印)より近づく傾向にあることが分る。

３－２．前線種類別予測法と推定精度

実際の衛星通信業務や回線設計を行う際に、降雨事象毎に雨滴粒径分布(DSD)を測定あるいは推定した上で Ku 帯から Ka 帯降雨減衰の年間累積時間率を毎回予測するのは、DSD 測定自体が普通の降雨観測ではほとんど一般的に行われておらず、余り現実的は方法とは言えない。そこで前節で述べた様に、降雨減衰比に著しい偏差を生じさせる Jd や Jt 等の特定の DSD が、ある一定時期の降雨タイプに顕著に発生する傾向があることに着目し、次に挙げる 2 種類の仮定を設けた場合について推定を試みた。

１）各日の降雨事象のうち、停滞前線通過時(Cross)の DSD はすべて Jd、停滞前線南側(South)と夏季夕立(Shower)発生時の DSD はすべて Jt、その他はすべて MP とする。

２）梅雨(Baiu)期の降雨事象での DSD はすべて Jd に対し、夏季(Summer)および秋雨(Shuu)期の降雨事象での DSD はすべて Jt とする。

この様な１）（X/S と略す）と２）（B/S と略す）の条件で各降雨事象与えられる DSD を用いて、同様に 1 分毎に測定された Ku 帯降雨減衰値をそのつど Ka 帯降雨減衰値に変換し、各年の年間累積時間率統計を計算した。そして前節で求めた一律 MP 型を用いた場合と降雨事象毎に DSD を選んだ場合の予測値と推定精度の比較を行った。

図９は、上記の各方法（MP、DSD、X/S、および B/S）を用いて予測した Ka 帯降雨減衰年間累積時間率の推定精度を 10 から 25dB の減衰量の範囲で比較したものである。推定精度はいずれも Ka 帯衛星電波の実測値から得た各減衰量の年間累積時間率との差を百分率で評価しており、各値は 1988 年

から 2004 年の 17 例の平均値で示してある。また参考に ITU-R 法により Ku 帯の累積時間率を直接変換して得た値の推定精度についても同時に示してある。また図 10 はこれらの推定精度を今問題としている 10 から 25dB までの全減衰量で平均して示した結果である。図９より降雨減衰比の年変化が図１の Ku 帯と Ka 帯の等時間率分布同士の関係で顕著見られた 15 から 20dB 辺りの Ka 帯降雨減衰量に対しては、DSD の季節変化や降雨タイプに関する特徴にもとづくこれらの X/S と B/S の推定法においても、降雨事象毎に正確な DSD を用いた場合にほぼ匹敵する年間累積時間率の推定精度が得られることが示される。図 10 においても減衰量全般にわたってこのことは確かめられる。

４．おわりに

Ka 帯衛星ビーコン波(19.45GHz)と Ku 帯衛星放送電波(11.84GHz)を過去 17 年間測定して取得した降雨減衰データを用いて、両周波数帯の年間時間率統計に顕著に見られる減衰比の年変化について詳しく検討を行った結果、降雨減衰比を大きく左右する Jd(霧雨)型や Jt(雷雨)型の雨滴粒径分布(DSD)は比較的ある特定の降雨タイプに限って発生し、しかも梅雨期あるいは秋雨期等それらの主たる発生時季には著しい偏りが存在することが明らかになった。そしてこれらの特定の降雨タイプによって発生する降雨減衰が年間時間率に占める割合は、Ku 帯と Ka 帯の減衰比の年間時間率統計における差異となって現れるため、時間率に関して一律に補正をおこなう従来の周波数スケーリング法に対して誤差の原因となりうることが指摘された。

この様にして長年にわたる降雨タイプ別の降雨減衰統計により明らかになった特性に基づき、ITU-R 法等の従来の降雨強度や降雨減衰の年間累積時間率をそのまま変換する周波数スケーリングではなく、DSD を降雨事象毎に用いて Ku 帯降雨減衰測定値の瞬時値をそれぞれ Ka 帯降雨減衰推定値に変換してから年間累積時間率を計算して Ka 帯実測値による同時間率と比較することにより、Ku 帯から Ka 帯への周波数スケーリング精度が格段に向上することを示した。そして、DSD は降雨事象毎に実測値を与えるのがベストではあるが、一律に標準型(MP 型)を仮定してもかなりの精度は保たれており、さらに本研究で示したように Jd(霧雨)型や Jt(雷雨)型が卓越する特定の降雨タイプやそれらが頻繁に現れる降雨時季に関する情報を加えることで、減衰比の年変化への追従が改善され、より推定精度の改良に役立つことが分った。

今後さらに DSD 情報を用いた場合の周波数スケーリング精度と降雨事象毎にさらに詳しく吟味するとともに、同一衛星による同一伝搬路における多周波降雨減衰データを取得し、降雨減衰比の瞬時値における推定精度改善度をさらに調査する必要がある。

参考文献

[1] H. Fukuchi, T. Kozu, K. Nakamura. J. Awaka, H. Inomata, and Y. Otsu, “Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellite,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*,vol.AP-31, no.4, pp.603-613, July 1983.

[2] Y. Karasawa and Y. Maekawa, “Ka-band earth-space propagation research in Japan,” *Proc. IEEE*, vol.85, no.6, pp.821-841, June 1987.

[3] “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-7, 2001.

[4] 前川泰之、“Ka 帯および Ku 帯衛星回線の降雨減衰比の年変化と季節変化　－雨滴粒径分布と前線種別との関係－、” 第４５９回電波研連 F 分科会資料、東京工大、Nov., 2001.

[5] 飯田尚志、“ウェーブサミット講座：衛星通信”、オーム社、1997.

[6] 前川泰之、白石新、“準ミリ波衛星回線の前線種類別による降雨減衰継続時間分布特性、” 信学技報、A・P2000-20、大阪電気通信大学、Apr., 2000.

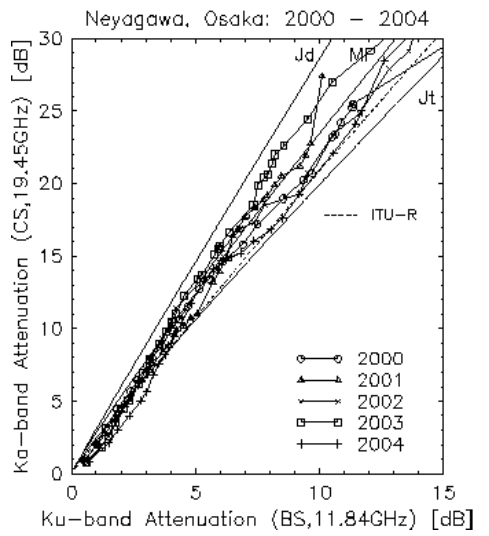

図１．2000-2004年に測定されたKa帯とKu帯降雨減衰の等時間率同士の関係

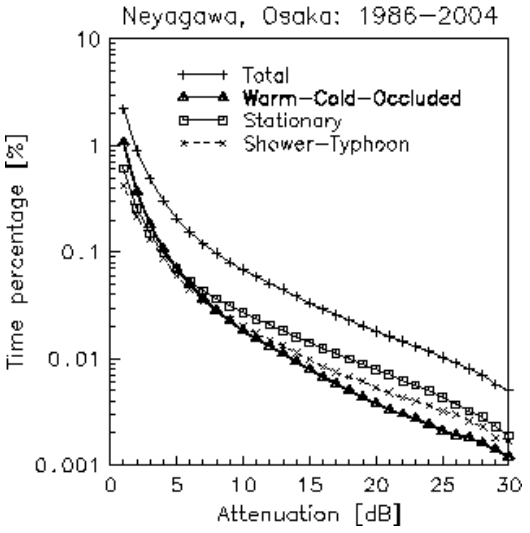

図２．Ka帯降雨減衰の降雨タイプ別累積時間率分布

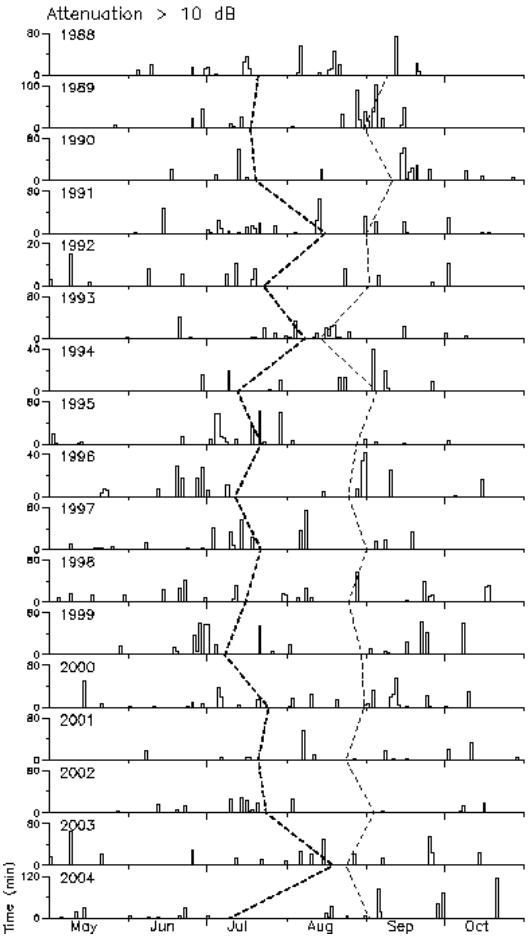

図３．各降雨事象におけるKa帯での10dB以上の減衰発生時間

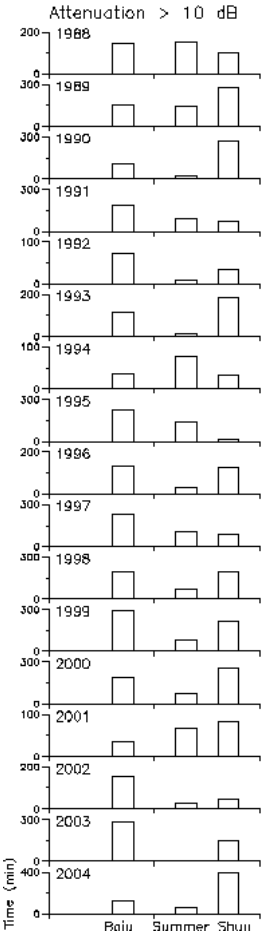

図４．梅雨期、夏季秋雨期での発生時間

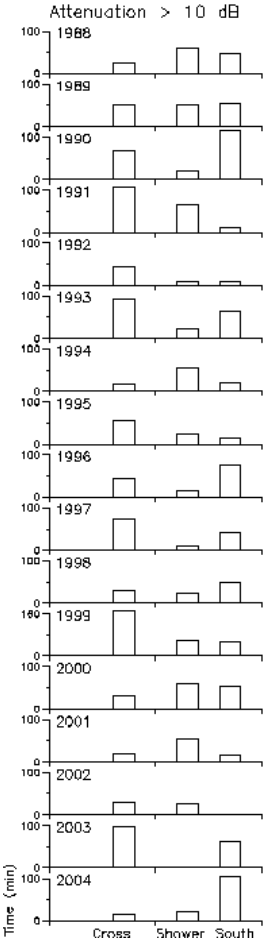

図５．代表的な降雨タイプでの発生時間

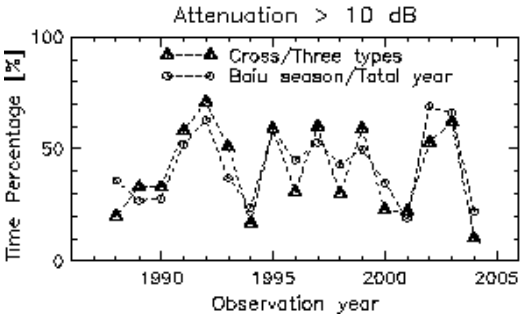

図６．停滞前線通過時と梅雨期に Ka 帯で 10dB 以上の減衰が発生する割合

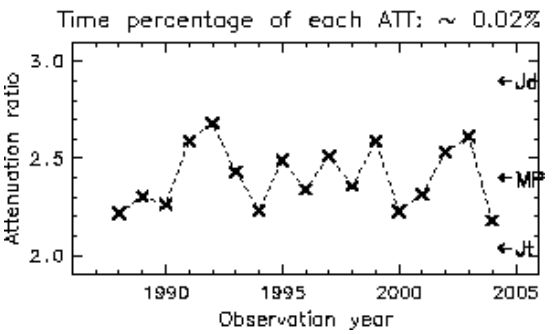

図７．Ka 帯・Ku 帯減衰比(時間率約 0.02%)の年変化

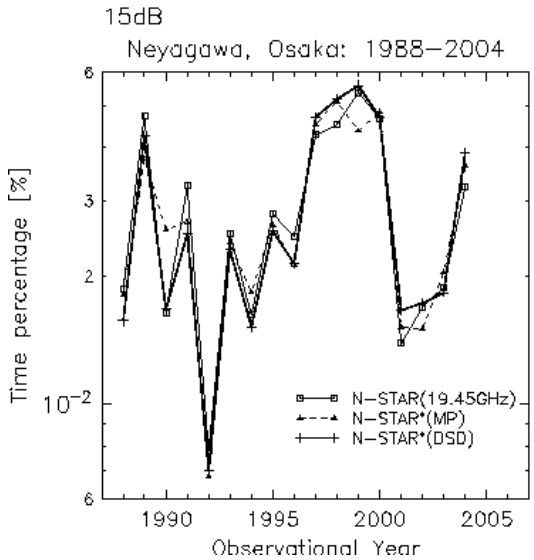

図８．DSD による Ku 帯から Ka 帯減衰量累積時間率の推定例

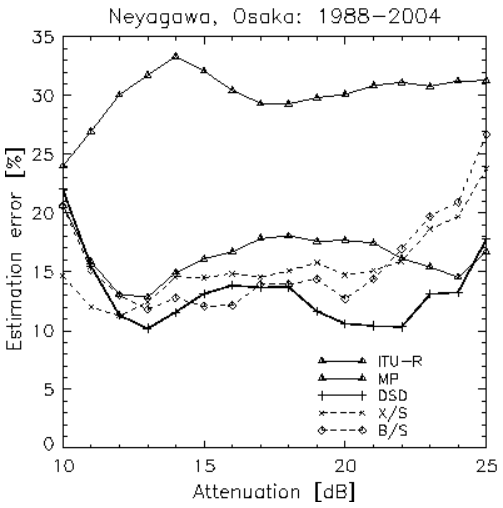

図９．DSD による各種周波数スケーリングの推定精度の Ka 帯減衰量別の比較

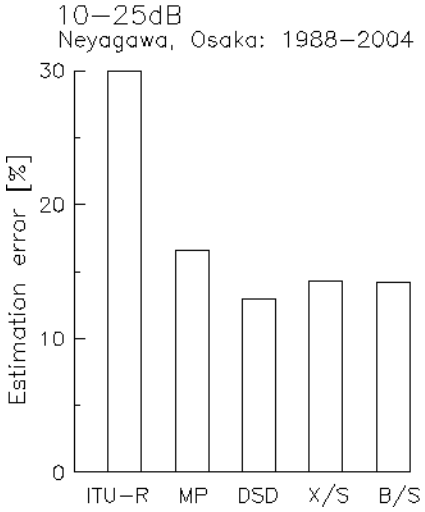

図１０．DSD による各種周波数スケーリングの推定精度