

赤道域および温帯対流圏における Ku 帯衛星通信電波の降雨減衰特性

前川 泰之、柴垣 佳明(大阪電通大)、佐藤 亨(京大情報学)
山本 衛、橋口 浩之(京大生存圏研)、深尾 昌一郎(福井工大)

1 . はじめに

近年衛星通信回線は、従来から用いられている C 帯 (6/4GHz) に加えて 10GHz 以上の周波数を盛んに用いる傾向にあるが、周波数が 10GHz 以上の電波は降雨による影響を受けやすいので、その効率的な回線設計や運用を行うためには、降雨の影響を詳細に把握する必要がある⁽¹⁾。特に最近では東南アジア等の多雨地域においても、大容量伝送が可能な Ku 帯等 10GHz 以上の周波数を用いた衛星通信回線の急速な利用の拡大が見込まれており、その回線品質の調査が急務である。

本研究では、京都大学生存圏研究所 (RISH、京都府宇治市) と赤道大気レーダー (EAR、インドネシア西スマトラ州) で 2002 年 9 月から 2006 年 9 月までの 4 年間にわたって取得したスーパーバード C 号機 (軌道位置 144 ° E) の Ku 帯上下回線 (14/12GHz) における降雨減衰測定値⁽²⁾を用い、温帯および赤道域におけるこれらの降雨減衰統計について詳しく検討を行った。本報告では、4 年間の両局上下回線の降雨減衰長期測定結果について、特にそれらの年平均統計の変動に注目して詳しく解析を行った。具体的には最悪月累積分布、雨域等価通路長、および上下回線減衰比等の年変化を重点的に調査し、これらの諸特性の温帯と熱帯における特性の差異について述べる。さらに両局で時刻毎に算出した降雨減衰統計値に基づいて赤道域の特徴的な降水量の日周変動の影響を示し、これらが日本とインドネシア間の双方向における衛星通信回線に対して及ぼす効果を明らかにする。

2 . 測定システム

本研究の測定では、京都大学宇治構内の生存圏研究所 (RISH) とインドネシア西スマトラ州の赤道大気レーダー (EAR) とをスーパーバード C を介して結ぶ Ku 帯 VSAT 局によるデータ伝送専用回線の上下回線の電波を使用した。RISH での上り回線の送信周波数は 14.1292GHz、下り回線の受信周波数は 12.7351GHz であり、EAR での上り回線の送信周波数は 14.4651GHz、下り回線の受信周波数は 12.3992GHz である。偏波面はいずれの局も上り回線は垂直偏波、下り回線は水平偏波をそれぞれ用いている。EAR における仰角は約 39 °、RISH における仰角は約 49 ° である。また各局の海拔高度は RISH が約 50m、EAR は約 865m である⁽²⁾。

日本とインドネシアにおける両局の受信レベルを同時に連続的に記録するために、VSAT 局の IDU (In Door Unit) の受信機の AGC 電圧を 1 秒毎にサンプルした。この AGC 電圧は IDU のパネルに表示される受信レベル (dBm 値) により校正を行った。これらのデータは常時計測用 PC のハードディスクに記録され、毎月定期的に同衛星の専用回線を通して RISH に転送された。さらに両局のデータはインターネット接続によって大阪電気通信大学に送られ詳しく解析された。

本測定で利用した衛星回線では、一方の局における 14GHz 帯の上り回線での送信電力変動が他方の局の 12GHz 帯の下り回線の受信電力にそのまま現れるので、降雨時の各局の上り回線減衰

量は、相手方の局の受信レベルを同時にモニターすれば推定可能になる⁽²⁾。ここで、日本とインドネシアのどちらで発生した減衰量であるかは、両局で同時に測定した 1 分雨量と比較した。RISH には転倒枴 0.1mm 雨量計を我々が設置し 2004 年からデータを取得した。一方 EAR では島根大学が設置した光学式雨量計 (ORG) の測定データを使用した。この降雨減衰推定法では、あくまでも両局で大きな降雨減衰が同時に発生しないことが前提となるが、幸い日本とインドネシアは約 6000km 離れており、Ku 帯で今問題とする数 dB 程度以上の減衰を引き起こすような 20mm/h 以上の降雨強度が同時に発生する時間率は 0.001% 以下であり、実用上無視できる。

3. 4 年間にわたる統計結果

図 1 に 2002 年 9 月から 2006 年 9 月までの間に、(a)RISH (京都府宇治市) と (b)EAR (インドネシア西スマトラ州) で測定されたスーパーバード C の Ku 帯上下回線の減衰量の累積時間率分布を示す。2002 年は RISH でのみ測定が行われ、EAR での測定は 2003 年 1 月より開始されたので、2002 年は RISH では下り回線、EAR では上り回線の減衰量のみ得られている。また、×印は降雨強度の累積時間率分布であり、RISH での 1 分降雨測定は 2004 年より始まったので、2002 年と 2003 年は大阪電気通信大学 (OECU、寝屋川市) で測定された 1 分雨量を用いている。点線はそれぞれ ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunications Sector, 世界電気通信連合無線通信部門) 勧告により降雨強度の 0.01% 値から求めた降雨減衰の予測値⁽³⁾であり、その 0.01% 値は日本では 60mm/h、インドネシアでは 85mm/h である。図 1 より温帯の日本、熱帯のインドネシアいずれも降雨減衰の 4 年間にわたる長期統計値は ITU-R 勧告による予測値とかなりよい一致を示し、インドネシアの十数 dB 以上の高減衰域を除き、各時間率とも 1 ~ 2 dB 程度以下の精度で予測可能であることが分かる。インドネシアの高減衰域で減衰量が急激に減少するのは、赤道域特有の比較的水平スケールの小さい対流性降水雲の影響であり、このことは X 帯気象レーダによる同衛星電波伝搬路上の降水雲分布同時測定により既に確認されている⁽²⁾。

衛星回線の稼働率の評価法としては、長期にわたる年間時間率統計の他に 1 年間の季節変動を考慮する必要があるため、月別の時間率統計の最悪値を用いた“最悪月累積時間率分布”の方がより重要とされる場合がある⁽²⁾。図 2 は 2005 年の 1 年間を例に取り、(a)RISH と (b)EAR における月別降雨減衰累積時間率分布 (細い点線) とそれらの減衰量別最悪値 (上側の包絡線) から導かれる最悪月累積時間率分布 (太い点線) の関係をそれぞれ示したものである。また一点鎖線は年平均累積時間率分布である。また、図 3 はこれらから導かれた (a)RISH と (b)EAR における最悪月累積時間率分布と年平均累積時間率分布の関係を再度示したものである。さらに図 4 はこれらをそれぞれ 2003 年から 2006 年まで 4 年間平均したものである。図 2 より各月別統計に見られる降雨減衰の季節変動は温帯の RISH の方がむしろ熱帯の EAR よりも大きく、これに伴って図 3 の最悪月累積時間率分布と年平均累積時間率分布の差異も RISH の方が EAR よりも大きくなることが分かる。またこの傾向は図 4 より 4 年間通して平均として存在することが分かる。このことはインドネシアでは雨季の乾季の差はあるものの、地上気温が EAR ではほぼ 21 ~ 22 と年間一定であり降雨高度 (ほぼ 0 高度に相当) が変化しないのに対し、日本では降水量と気温ともより大きな季節変動を有するためと言える⁽²⁾。

次に、図 5 はそれぞれ (a)RISH (京都府宇治市) と (b)EAR (インドネシア西スマトラ州) で測

定された各年の降雨強度累積時間率分布を示したものである。RISH における降雨測定は 2004 年より行われており、2003 年は大阪電気通信大学 (OECU) における測定値を用いている。また図 6 は同様に(a)RISH と(b)EAR 各年の降雨減衰累積時間率分布でここでは上り回線 (14GHz 帯) の値で示してある。なお図 5 と図 6 ではいずれも 2006 年は 1 ~ 9 月の平均値である。図 5 より、降雨量は温帯の日本よりも熱帯のインドネシアの方が概して多く、降雨強度の年間時間率分布自体は日本のある特定の年 (ここでは 2005 年) を除いて比較的よく似た特性を示している。ただし、熱帯では 100mm/h を超える強雨時の年間時間率にばらつきが大きくなり、年間統計に対する降雨の局所性によるばらつきが現れているものいえる。一方図 6 の降雨減衰統計を見ると全般的に温帯の RISH の方が年変動が大きいのに対し、熱帯の EAR では十数 dB 以上の高減衰域を除いて比較的各年の統計値が類似していることが分かる。

これらの特性をより明らかにするため、図 7 に(a)RISH と(b)EAR 各年の年間降水量とともに降雨強度および上下回線減衰量の各時間率値 (0.01, 0.03, および 0.1% 値) をまとめて示す。年間降水量の点線は OECU (大阪府寝屋川市) における測定値で、2003 年の降雨強度累積時間率値も OECU における測定値である⁽⁴⁾。図 7 より全般的な減衰量は赤道域の EAR の方が大きいものの、年変動はむしろ温帯である RISH の方が顕著であることが確認できる。また図 8 はさらに、降雨強度がそれぞれ 30、60、および 90mm/h の時間率に対応する(a)RISH と(b)EAR における Ku 帯上下回線降雨減衰量の当時間率値の年変動を示したものである。図 8 より同様に降雨強度の等時間率値に対する減衰量の変動はやはり温帯である RISH の方が顕著であることが分かる。

4 . 雨域通路長と上下回線減衰比

本章ではまず降雨減衰と降雨強度の等時間率値の関係を求め、減衰係数 α [dB/km] から推定される雨域通路長について温帯と熱帯での違いを考察した。図 9 は(a)RISH と(b)EAR で 2003 年から 2006 年の各年に測定された上下回線減衰量と降雨強度の等時間率値同士の関係をそれぞれ示したものである。また各点線と実線は 2 ~ 6 km の各雨域通路長に対してそれぞれ発生する降雨減衰予測値を ITU-R 勧告⁽³⁾により求めたものある。図 9 より、温帯の RISH の方が等時間率値の分布から推定される雨域通路長はより顕著な年変化を示すが、その通路長は 100mm/h を超える強雨時においても 3 ~ 4 km 程度に保たれていることが分かる。一方、熱帯の EAR では年変動は小さいものの雨域通路長の推定値は 100mm/h を超える強雨時には 2 km 近辺まで減少することが示される。これは前述の赤道域特有の対流性降雨の影響といえるが、特に EAR が赤道直下にありしかも約 865m の高地にあるという地域的な特異性も関与している可能性がある⁽²⁾。

本測定の最大の特長は温帯と熱帯の両局で同時に受信レベルをモニターし、両局の Ku 帯上下回線減衰量を長期にわたり同時に測定したことにある。この様な同一伝搬路における上下回線減衰量の長期にわたる比較は今まで余り例がなく、特に赤道域では皆無といってよい。図 10 は(a)RISH と(b)EAR での 2003 年から 2006 年各年における上下回線減衰量の等時間率同士の関係を示したものであり、3 本の細線は 3 種類の代表的な雨滴粒系分布 (DSD) である Joss-drizzle (Jd: 霧雨型)、Marshall-Palmer (MP: 標準型) および Joss-thunderstorm (Jt: 雷雨型) による理論的關係である⁽¹⁾。また点線は ITU-R 勧告⁽³⁾による予測値である。

図 10 より、温帯の RISH と熱帯の EAR のいずれにおける減衰比も 3 種類の DSD による予測値に近い値を示すものの、それらの間にはかなり顕著な年変動が存在することが分かる。また温

帯の RISH では減衰が増大するにつれて J_t 型に近づく傾向があるのに対し、熱帯の EAR ではむしろ一部 J_d 型に近づく傾向が示される⁽²⁾。一方、今まで累積時間率や雨域通路長では余り大きな年変化のなかった EAR において、減衰比に関しては RISH と同様に大きな変動が存在するのは特徴的であり、同伝搬路におけるレーダ観測との比較により、単一の対流性降水雲が孤立して存在するときよりも複数連なって伝搬路に存在するときに減衰比が小さくなる傾向のあることが知られている⁽²⁾。

図 1 1 は本章で示した(a)上下回線減衰比と前章で述べた(b)雨域通路長の RISH と EAR における年変化の傾向をまとめて示したものである。これらの年平均値は図 9 と図 1 0 で示した等時間率値を減衰量が下り回線で約 5 dB 以上の場合について平均して求めたものである。また雨域通路長はそれぞれ上下回線の平均値である。図 1 1 より熱帯の EAR では、概して雨域通路長が短いほど上下回線の降雨減衰比が大きくなる傾向があり、これは単一の降水雲による降雨の場合に減衰比が大きくなるという気象レーダ同時観測結果⁽²⁾と一致する特性である。一方、温帯の RISH では両者の間にむしろこれとは逆の関係が見られ、EAR との間に統一した関連性が見当たらない。これは RISH における周波数減衰比には雨域通路長よりも DSD の種類やそれらを伴う特定の降雨タイプの年間割合が OECU と同様に関係しているためと想定され⁽⁵⁾、今後さらに検討を要するものと考えられる。

5 . 降雨減衰の時刻依存性

熱帯における EAR での降雨の大きな特徴として毎日主として午後に激しい降水、いわゆるスコールが周期的に発生するという日周変動がある。この特徴は雨季と乾季の差があるものの基本的に年間通して見られる。また RISH においても夏季の最盛期である 7 月末から 8 月中旬にかけてそれに近い傾向が見られる。そこで、図 1 2 に(a)RISH と(b)EAR における上下回線の降雨減衰発生時間率の日周変動を、一例として 7 dB の減衰量について、それぞれ日本時間とインドネシア時間に対して 4 年間の平均値で示す。ここではデータの連続性を保つため便宜上 3 時間間隔で示してある。両局とも午後の時間帯に減衰発生時間率が増大するが、インドネシアの EAR では特にその傾向が著しく、発生時間率は午前時間帯に対して二桁程度増大することが分かる。これは EAR ではほとんどの降水量が午後に集中するためである⁽⁶⁾。

本測定は前述のように、温帯と熱帯に位置する両局の間で Ku 帯衛星を用いて双方向通信を行う際に発生する両地点での降雨減衰の影響を総合的に評価可能である。ここでは最後に熱帯地方で特に顕著な降雨の日周変化が両方向の衛星通信路に与える効果を示す。図 1 3 は RISH と EAR の間で双方向通信を行った場合に、両方の上下回線で発生する降雨減衰発生時間率の日周変動を一例として減衰量 7dB 対して 4 年間平均して示したものである。図 1 3 (a)は RISH から EAR と EAR から RISH 方向の場合についてであり、(b)は EAR から RISH 方向の場合をさらに EAR が雨季(2 ~ 4 月と 9 ~ 11 月)と乾季(それ以外)に分けてある。時刻はいずれも日本時間で示してある。図 1 3 より EAR における降雨の日周変動の影響は RISH と EAR 間の双方向通信路にも大きな影響を与え、EAR が上り回線となる EAR から RISH 方向でより顕著である。この傾向は EAR の雨季にさらに重大で、毎日平均して時間率が二桁以上の変動となることが図 1 2 (b)で既に示した EAR の上下回線降雨減衰統計の場合と同様に示される。

6 . おわりに

本研究では、京都大学生存圏研究所（RISH、京都府宇治市）と赤道大気レーダー（EAR、インドネシア西スマトラ州）で 2002～2006 年の 4 年間に取得したスーパーバード C 号機の Ku 帯上下回線（14/12GHz）における降雨減衰統計を、温帯と熱帯におけるそれらの差異に注目して詳しく解析を行なった。長期統計に関しては EAR の高減衰域を除きそれぞれの降雨強度 0.01% 値に基づく ITU-R 勧告値とよく一致することが示された。EAR における高減衰域（> 10dB）の時間率の著しい減少は、熱帯の局所的な対流性降雨の影響と考えられ、各年とも雨域通路長の推定値が 2 km 近くまで短くなることが示された。

両局における各年の平均累積時間率や最悪月累積時間率分布を比較した結果、降雨減衰統計の季節変化や年変動は概して熱帯の EAR よりも温帯の RISH 方が大きいことが示された。ただし上下回線減衰比の年変動は EAR でも RISH と同程度存在した。一方、EAR では対流性降雨による減衰が主として午後の時間に集中して発生し、時刻別に累積時間分布を求めると二桁に及ぶ顕著な日周変動となることが分かった。この日周変動は温帯の RISH との間の双方向通信路にも同様の影響を及ぼすことが示された。

謝 辞 EAR の雨量データと X 帯レーダーデータをご提供頂いた島根大学の研究グループに感謝致します。

参考文献

- (1) 飯田尚志、“ウェーブサミット講座：衛星通信”、オーム社、1997.
- (2) Y. Maekawa, T. Fujiwara, Y. Shibagaki, T. Sato, M. Yamamoto, H. Hasiguchi, S. Fukao, “Effects of tropical rainfall to the Ku-band satellite communications links at the Equatorial Atmosphere Radar Observatory,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol. 84A, pp.211-225, 2006.
- (3) “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005. ITU-R, Recommendation P618-8, 2005.
- (4) 前川泰之、“Ka 帯および Ku 帯衛星回線の降雨減衰特性の長期統計結果について、” 信学技報、A・P2008-75, 2008.
- (5) 前川泰之、“Ka 帯および Ku 帯衛星回線の周波数スケーリング特性の年変動について、” 信学技報、A・P2008-150, 2009.
- (6) 前川泰之、柴垣佳明、佐藤亨、山本衛、橋口浩之、深尾昌一郎、“温帯および赤道域での Ku 帯衛星上下回線における伝搬特性の測定、” 信学技報、A・P2009-4, 2009.

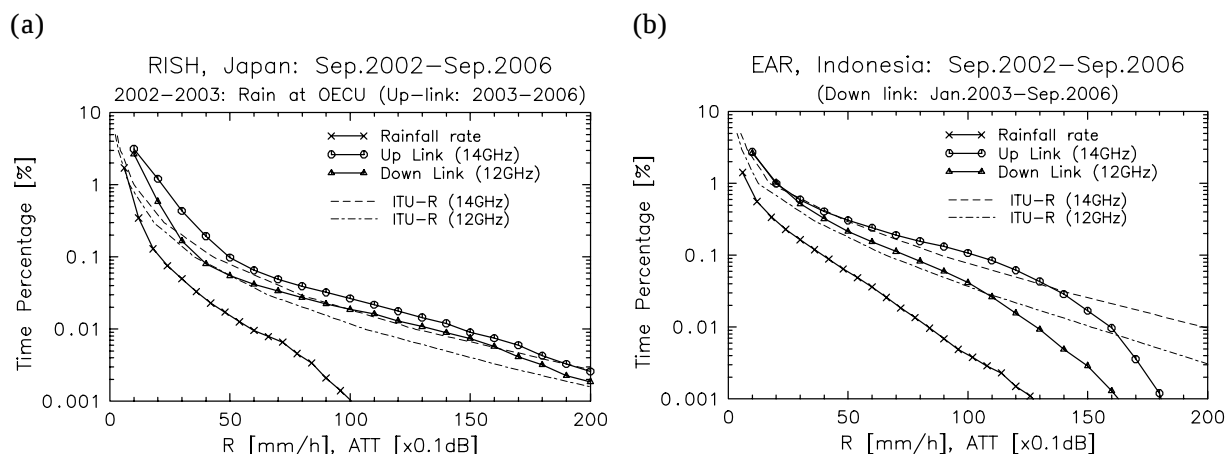


図 1 . (a)RISH (京都府宇治市) と(b)EAR (インドネシア西スマトラ州) で 4 年間測定されたスーパーバード C の Ku 帯上下回線の減衰量の累積時間率分布と ITU-R 勧告との比較。

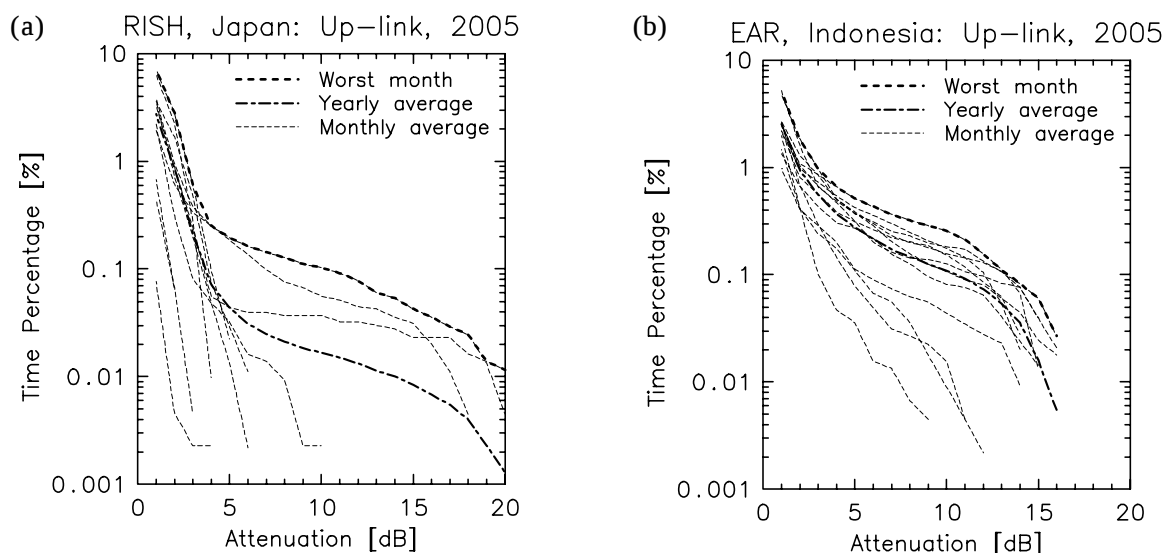


図 2 . (a)RISH と(b)EAR で 2005 年に測定された上り回線減衰量の月別累積席時間率分布 (細い点線) と最悪月累積時間率分布 (太い点線) および年間累積時間率分布 (一点鎖線)。

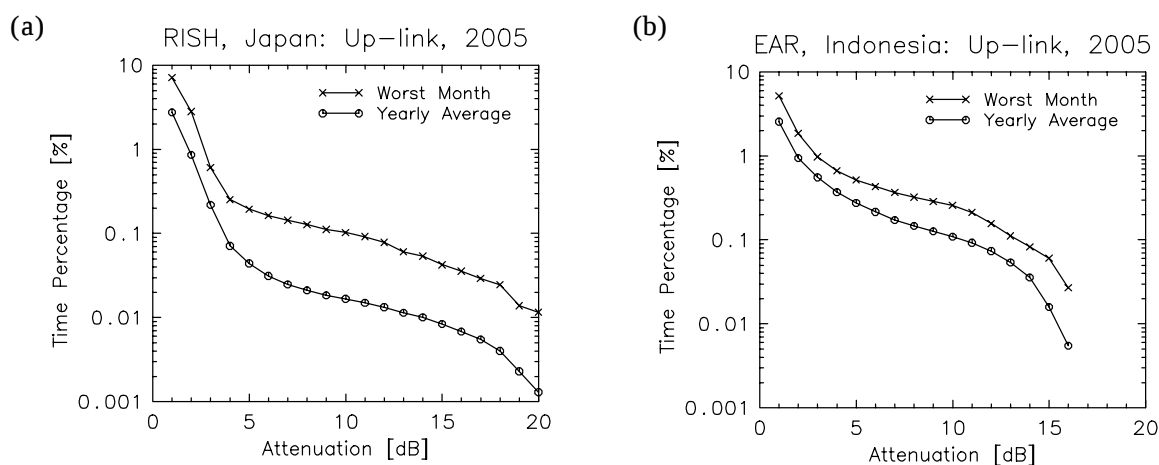


図 3 . (a)RISH と(b)EAR で 2005 年に測定された上り回線減衰量の最悪月累積時間率分布と年間累積時間率分布の関係。

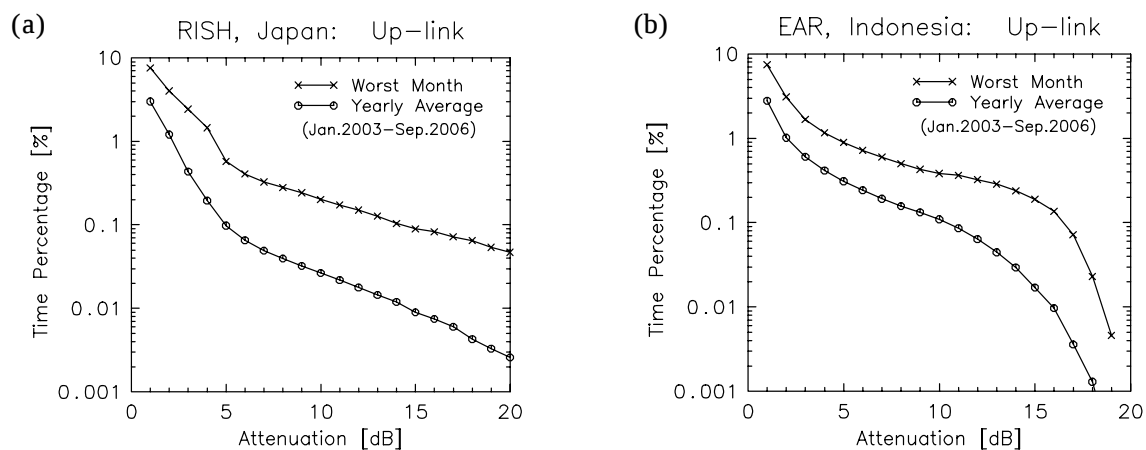


図4. (a)RISH と(b)EAR で4年間測定された上り回線減衰量の最悪月累積時間率分布と年間累積時間率分布の平均値。

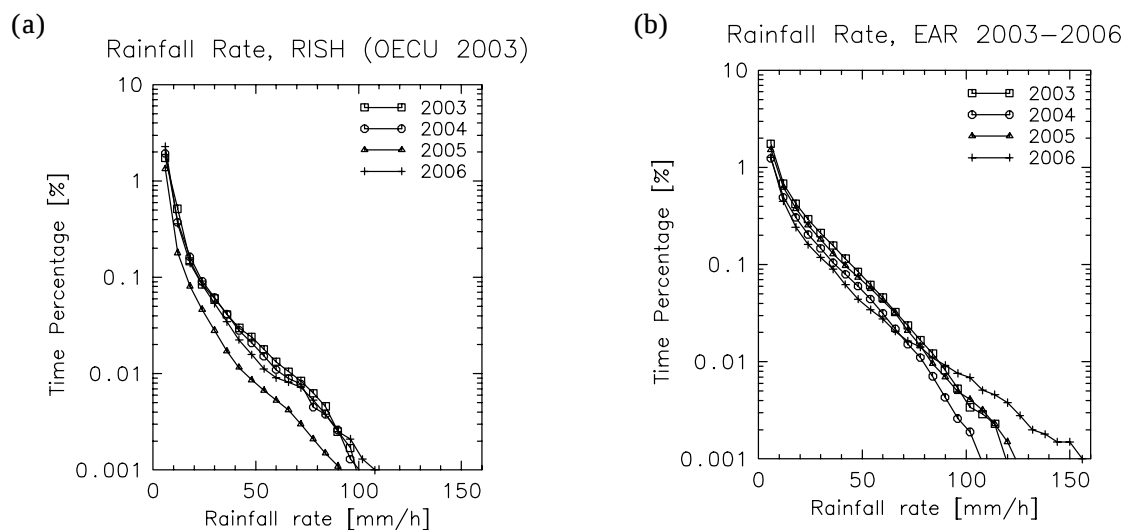


図5. (a)RISH と(b)EAR における降雨強度の年間衰累積時間率分布。

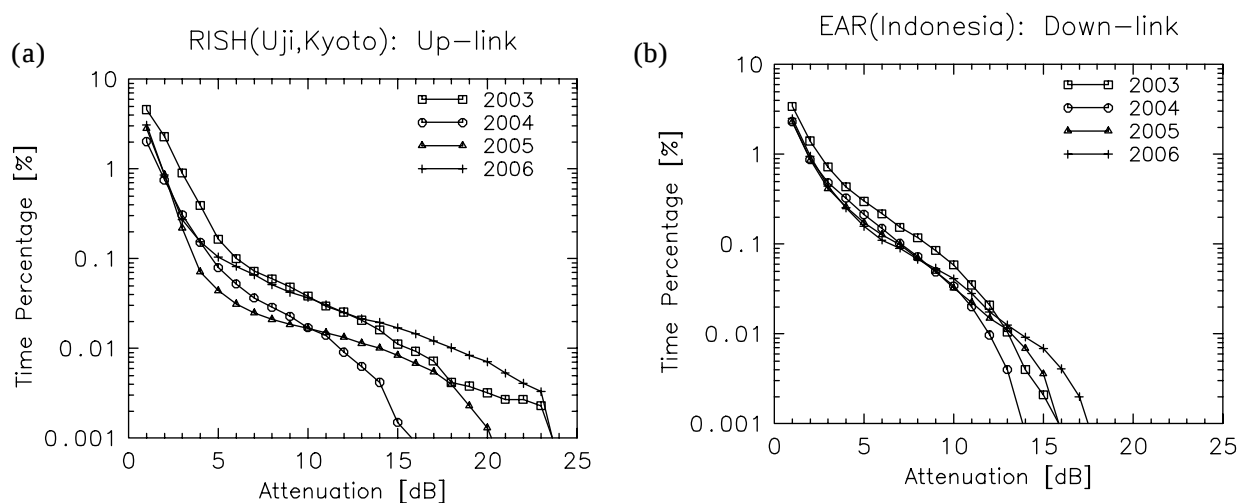


図6. (a)RISH と(b)EAR におけるKu 帯上り回線降雨減衰の年間衰累積時間率分布。

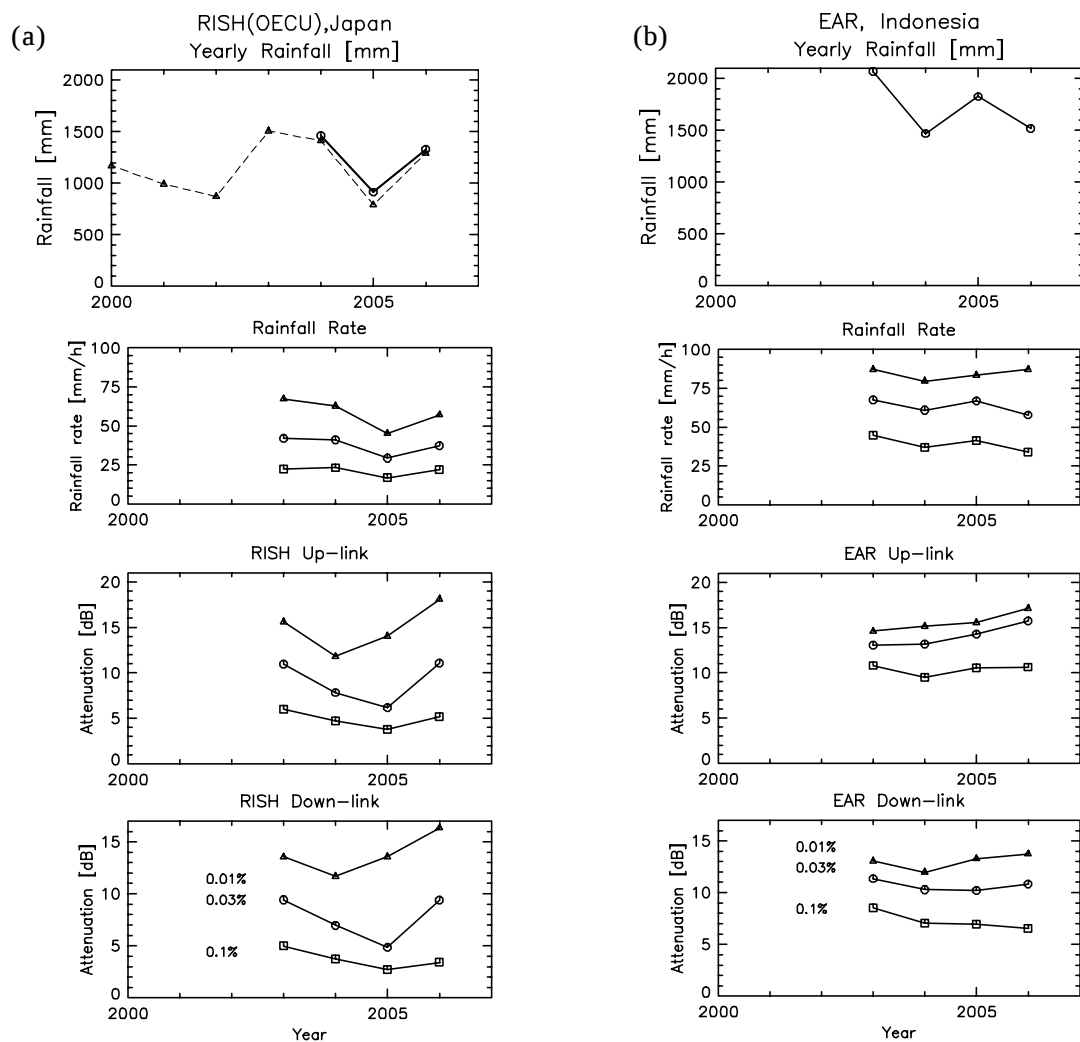


図 7 . (a)RISH と(b)EAR における降雨量、降雨強度と Ku 帯上下回線減衰量の各年間時間率値。

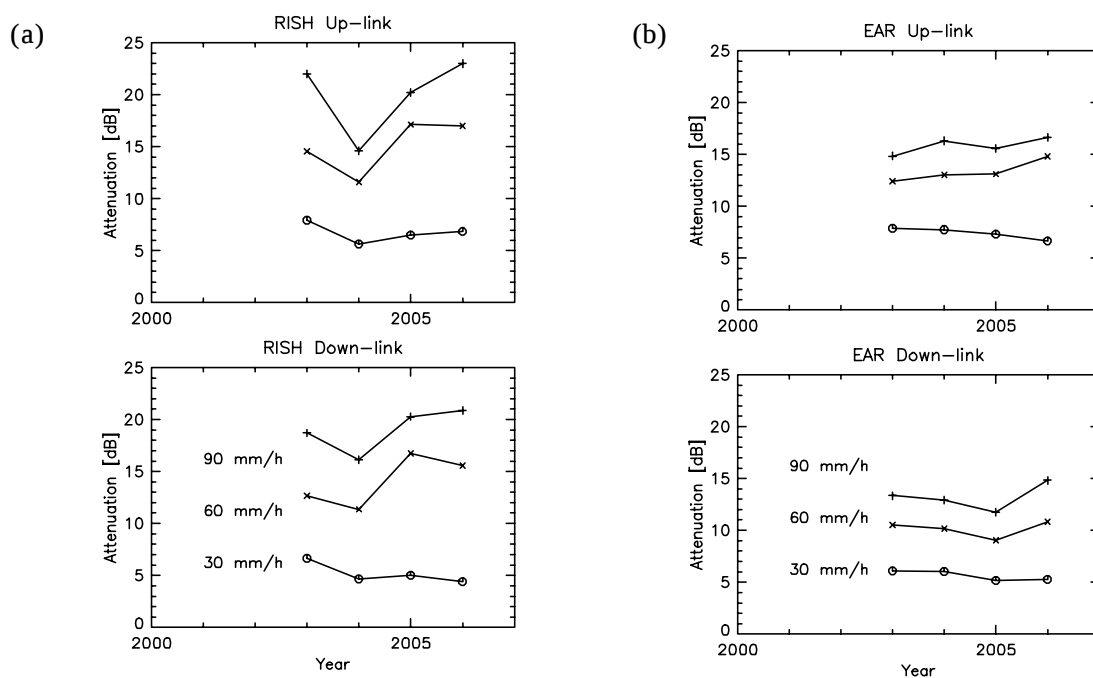


図 8 . (a)RISH と(b)EAR における Ku 帯上下回線減衰量の各降雨強度に対する年間等時間率値。

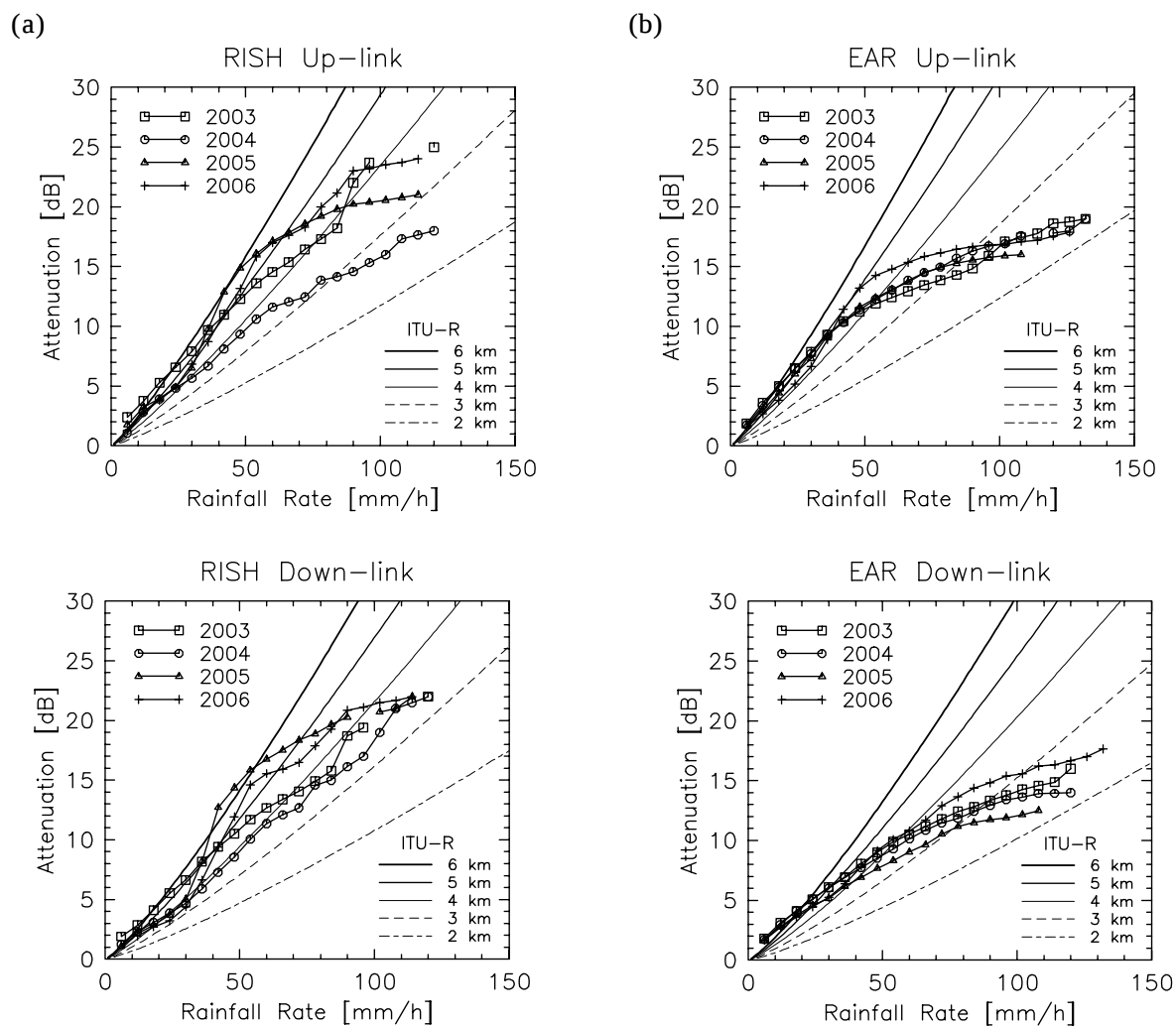


図9 .(a)RISH と(b)EAR の各年における Ku 帯上下回線減衰量と降雨強度の等時間率値同士の関係と、各雨域通路長に対する ITU-R 勧告値。

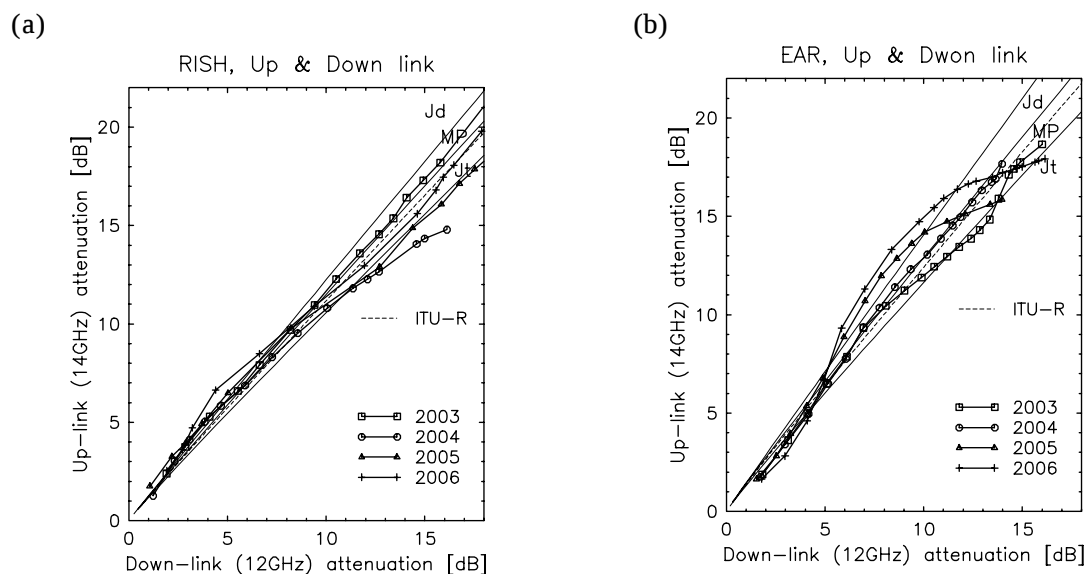


図10 . (a)RISH (宇治市) と(b)EAR (インドネシア) の各年の上下回線減衰量の等時間率値同士の関係と、各種 DSD による理論値と ITU-R 勧告値。

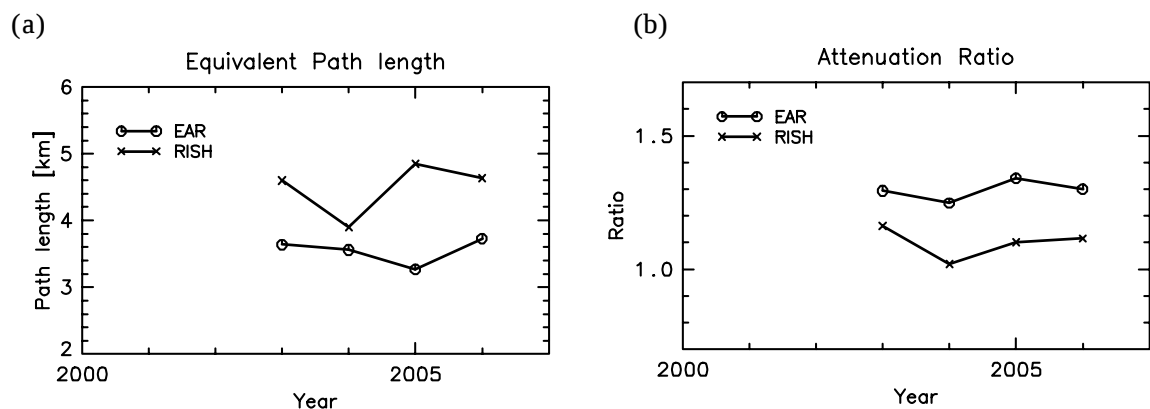


図 1.1 . RISH と EAR で得られた(a)上下回線減衰比と(b)雨域通路長の年変化。雨域通路長は上下回線の平均値で示してある。

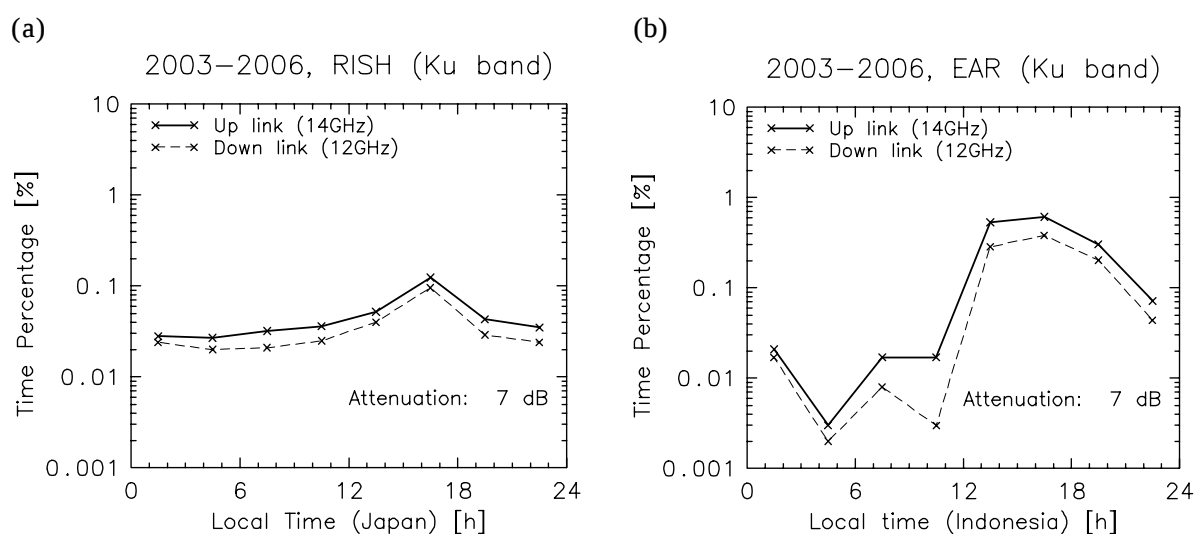


図 1.2 . (a)RISH と(b)EAR における降雨減衰発生時間率の日周変動 (減衰 7 dB)。

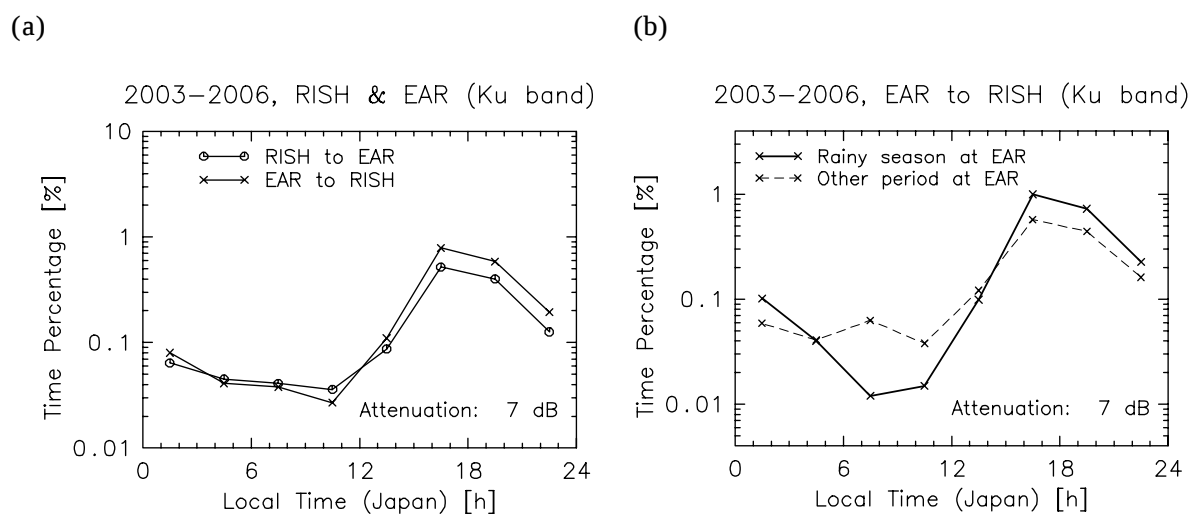


図 1.3 . (a)RISH と EAR 間の双方向通信路における降雨減衰発生時間率の日周変動。(b)EAR から RISH へ通信路で EAR が雨季と乾季の場合。