

# 赤道域および温帯対流圏での Ku 帯衛星回線の降雨減衰の年変動特性

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、従来からの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、10GHz以上の周波数がより高い電波は降雨による影響を受けやすいという問題点が存在する<sup>(1)</sup>。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利用が増加しており、その回線品質を調査して信頼性の高い運用方法を確立することが急務である。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<sup>(2)</sup>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前回の報告<sup>(3)</sup>に引き続いてさらに詳しく調査を行った。

特に今回は両局上下回線の降雨減衰統計の年変化において、降雨時の年平均地上気温との関連について温帯と赤道域に共通して見られる特徴に着目して解析した。そして、大阪電気通信大学(OECU、大阪府寝屋川市)で過去20年以上にわたって行われたKa帯通信衛星電波(CS、19.45GHz)とKu帯放送衛星電波(BS、11.84GHz)の降雨減衰長期観測で明らかにされた年変動特性<sup>(4),(5)</sup>を参照し、エルニーニョやラニーニャ等の赤道域気候変動が温帯での降雨減衰統計にも影響を及ぼしている可能性について報告する。

## 2. 降雨減衰統計の年変動と地上気温との関係

前回の報告<sup>(3)</sup>でも述べたように、衛星回線の降雨減衰統計の予測は通常地上降雨強度の年間時間率分布を用いてITU-R(世界電気通信連合無線通信部門)が勧告する推定法<sup>(6)</sup>に基づいて行われ、降雨強度の年間0.01%値に一定のファクターをかける形で降雨減衰値の各時間率値が算出される。この方法では使用する電波の周波数や衛星仰角等のパラメータの他に、世界各地の0°C高度を基準として算出される降雨高度から与えられる雨域等価通路長が推定精度を決める上で特に重要となる。このため世界各地で降雨減衰統計が新たに実測された場合には、地上降雨強度との等確率の関係から与えられるこの雨域等価通路長を算出して確認しておくことが強く望まれる。

図1は、EARとRISHで2003年から2006年の各年に測定された降雨強度と降雨減衰の等確率値<sup>(3)</sup>を用いて、降雨強度20mm/h以上の場合について求めた(a)雨域等価通路長の年変化と、降雨時の(b)地上気温の年平均値を比較したものである。降雨強度20mm/h以下では大気や雲によると思われる減衰のため両局とも雨域等価通路長が非常に長く算出される場合があるのでそれらの値は除いた。また各年の雨域等価通路長は両局とも上下回線の平均値である。RISHの地上気温については大阪電気通信大学(OECU、南西約20km)で測定された値を用いてある。ここで地上気温を求める期間はEARでは1年の全期間であるが、RISH(OECU)では降雨減衰が集中して観

測される 5 月から 10 月に限定してある。また各降雨強度に対する 14/12GHz 帯での単位距離当たりの減衰量（減衰係数： $\alpha = aR^b$  [dB/km]）は ITU-R 勧告による値を用いてある<sup>(6)</sup>。一方、図 2 はこのようにして 4 年間にわたって求めた(a)RISH と(b)EAR における雨域等価通路長と地上気温の関係をさらに相関図で示したものである。

図 1 と図 2 から RISH と EAR いずれも雨域等価通路長と地上気温の年平均値の間にはそれぞれ相関関係があり、期間は 4 年間程度ではあるがそれらの相関係数は 0.8 前後に上る。しかしこれらの間に厳密な比例関係は存在せず、図 5 より地上気温が上昇する割合（たとえば 20~25℃では 1.25 倍）以上に雨域等価通路長が増大する傾向にあることが分る。従って各年とも気温の上昇と伴って 0℃高度による降雨高度のみならず、降水雲自体の水平・垂直スケール等も増大する傾向にあることが示唆される<sup>(4)</sup>。また、年変動の期間に関しては、2003 以前は“エルニーニョ”期間、2006 以降は“ラニーニャ”期間に対応し、それぞれ地上気温と雨域等価通路長が RISH と EAR いずれにおいても減少と増加の傾向を概して示すことは注目される。

次に図 3 は、大阪電気通信大学（OECU）において 1986 年から 2006 年の間の各年において、同様に 20mm/h 以上の降雨強度に対して得られた平均雨域等価通路長の年変動を、(a)Ka 帯減衰量と(b)Ku 帯減衰量について示す。また同図(c)に各年の 5 月から 10 月の降雨減衰が集中して発生する期間に得られた降雨時の地上気温の平均値を示す。さらに図 4 にはこれらの各周波数帯の雨域等価通路長と地上気温との間の相関図を示す。ここで(a)が Ka 帯、(b)が Ku 帯の場合である。図 4 より、20 年間以上の長期にわたる各年の雨域等価通路長と降雨時地上気温の間には明らかに正の相関があり、その相関係数は 0.6 程度となることから、両者の間にかかなり深い関連性があることが示される。

一般に地上気温の増加とともに降雨高度がそれにほぼ比例して上昇することは、レーダによるブライツバンド高度の測定等によってよく知られており、本測定による 20 年間の統計結果においても、地上気温に伴う降雨高度の変化の影響がまず考えられる。ここで、年間の雨域等価通路長の平均値が地上気温に伴う降雨高度のみで決まり地上気温にほぼ比例するならば、図 4 においての地上気温が 20℃から 25℃まで上昇したときに雨域等価通路長はちょうど  $5/4 = 1.25$  倍に増加するはずである。ところが図 6 (a)と(b)の回帰直線から Ka 帯と Ku 帯の減衰量いずれの場合も雨域等価通路長はこの間約 1.5 倍前後の増加傾向を示すことが分り、降雨高度の上昇効果だけではこれの半分程度しか説明できない。

### 3. 降雨タイプと雨域等価通路長の関係

地上気温が高くなる夏季に多く発生する降雨タイプといえは、まず夕立等による雷雨が挙げられる。特に最近都市部ではいわゆるヒートアイランド現象による突発的な対流性降雨の発生が注目されている。また夏季に特徴的なもうひとつの降雨タイプとしては、台風の襲来も夏季を中心に増加することが挙げられる。

図 5 は OECU での(a)Ka 帯減衰量と(b)Ku 帯減衰量について、各降雨強度に対する雨域等価通路長をそれぞれ夕立や台風による降雨事象(○印)とそれ以外の温暖、寒冷、および停滞前線による降雨事象(△印)に分けて示したものである。ここで夕立による降雨については、主として夏季において天気図では低気圧や前線が大阪府を含む近畿地方に存在しないときに 1 時間程度の短時間の間に発生した大量の降水と減衰を伴う降雨事象を対象としている。また台風については、台風が

近畿地方に襲来したときの他に、まだ南海上にあるときに近畿地方の停滞前線等に接近してこれらを刺激することにより同様の降雨減衰を発生させたときも、台風の影響に該当する降雨事象としてそれらに含めている。

図5より、時間率が0.01%以上の60mm/h程度までの降雨強度については、Ka帯とKu帯いずれも夕立や台風による降雨に対しては5km以上の雨域等価通路長を示すのに対し、それ以外の場合の雨域等価通路長は4km程度に留まることが分かる。ただし、20mm/h以下の降雨強度については前述のよう大気や雲あるいはアンテナ面等による減衰の効果で、雨域等価通路長が見かけ上さらに長くなる傾向があるので、この範囲の値は除去する必要がある。またKu帯のBSの方の仰角が幾分低いため、その分雨域等価通路長が少し長くなる傾向がある。

以上のように、Ka帯とKu帯の両周波数とも夕立と台風以外の温暖、寒冷、および停滞前線による降雨事象について過去約20年間の平均雨域等価通路長を降雨強度20mm/h以上で計算すると約4kmに過ぎないのに対し、これを逆に夕立と台風のみ降雨に対して同様に計算すると約5km程度まで増大することから、各年の雨域等価通路長の変動をこれらの降雨タイプの発生する割合で説明できる可能性がある。そこで図6に、これらのいわば夏季特有の熱帯性降雨によって各年に発生した降雨減衰の時間的割合をKa帯で10dBの減衰量をしきい値としてカウントした場合に、この時間的割合と各周波数帯の雨域等価通路長との間の相関図を示す。(a)がKa帯、(b)がKu帯の場合である。

図6より、各年の夏季に夕立や台風により減衰が発生する時間的な割合と年平均雨域等価通路長の間にはやはり高い相関があり、これらの熱帯性降雨の特性がさらに雨域等価通路長を増大させる原因であるといえる。この様に夕立や台風による降雨により雨域等価通路長がKa帯とKu帯ともちょうど約4kmから5km程度まで増大する特徴が示され

#### 4. エルニーニョ監視域区域の海面水温との関係

第2章では雨域等価通路長と降雨時地上気温の2003～2006年での年変動は赤道域(EAR)および温帯(RISH、OECU)の両方において相関が示され、その前後のエルニーニョやラニーニャ期間との関係がともに示唆された。また第3章ではOECU(大阪府寝屋川市)での20年以上にわたる雨域等価通路長と降雨時地上気温においてこの相関性はその長期統計によって実証され、雨域等価通路長の増大は夏季に夕立や台風によって発生する降雨減衰の年間時間率の増大に起因することが示された。これらの対流性および熱帯性の降雨は熱帯アジア地方をはじめ日本においても一般にエルニーニョよりもラニーニャ期間に増大するとされており<sup>(7)</sup>、例えば先ほどあげた2006年(2005年秋～06春)の他、1988年春～89春、95年夏～95/96年冬、および98年夏～2000年春の様な気象庁発表<sup>(7)</sup>によるラニーニャ期間には図5のKa帯、Ku帯雨域等価通路長および降雨時地上気温の年平均値は確かに増大する傾向にある。ところが1986年秋～87/88年冬、91年春～92年夏、97年春～98年春、および2002年夏～02/03年冬のような同エルニーニョ期間にはこれらは主として減少の傾向にあり、エルニーニョやラニーニャ期間の移り変わりによる赤道域気候変動がこれらの雨域等価通路長等の降雨減衰統計にも影響を与えている可能性がある。

このことを確かめるために、実際に米国NOAAにより公表されているエルニーニョ監視区域Nino3.4 region(5°N-5°S、120-170°W)の海面水温<sup>(8)</sup>が入手できたので、図7と図8において、それぞれKa帯およびKu帯の場合について、図5と同様に各年の(a)夕立や台風による降雨

と(b)それ以外の温暖、寒冷、および停滞前線による降雨の減衰発生時間と同海面水温の偏差の年平均値との相関を調べた結果を示す。図7のKa帯は10dB、図8のKu帯は4dB以上の降雨減衰がそれぞれ発生した年間時間数(分)で縦軸を表してある。図7と図8よりKa帯とKu帯いずれも(a)の夕立や台風で発生する降雨減衰の年間発生時間数の場合はエルニーニョ監視区域の海面水温と0.6前後の相関が認められ、しかも温度偏差が下降するラニーニャ期間ほど顕著に増大するので、前章で述べたようにラニーニャ期間に雨域等価通路長が増大する傾向をよく説明出来ることが分る。

## 5. おわりに

2003年から2006年の4年間に京都大学生存圏研究所(RISH)と赤道大気レーダー(EAR)で測定されたKu帯(14/12GHz)衛星回線の降雨減衰統計の年変動について調査を行ったところ、温帯と赤道域いずれも雨域等価通路長(同じ降雨雨強度対する減衰統計の変化)に著しい年変動が存在し、降雨時(20mm/h以上)の地上気温の年平均値との間に有意な相関関係が認められた。ただし、この年変動は地上気温による0°C高度の変化に伴う降雨高度以上の大きさを示し、“エルニーニョ”や“ラニーニャ”等の気候変動による降水雲の活動等とも関連している可能性が示された。このことはさらに過去20年以上の長期間にわたって大阪電気通信大学(OECU)でKa帯とKu帯の2周波を用いて行われた降雨減衰観測において、各年の夕立や台風による減衰発生時間とエルニーニョ監視区域の海面水温との相関関係を、両者の年平均値から直接求めることによって確かめることが出来た。

謝 辞 EARの雨量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) 前川泰之、柴垣佳明、佐藤亨、山本衛、橋口浩之、深尾昌一郎、“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”、第23回大気圏シンポジウム、1-3、2009.
- (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) Y. Maekawa, “Rain attenuation statistics and yearly variability of Ka and Ku band satellite signals obtained for twenty years in Japan”, 2010 International symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2010), Macau, China, Nov. 23-26, 2010.
- (6) “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.
- (7) [http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/el\\_nino/learning/faq/el\\_nino\\_table.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/el_nino/learning/faq/el_nino_table.html)
- (8) [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

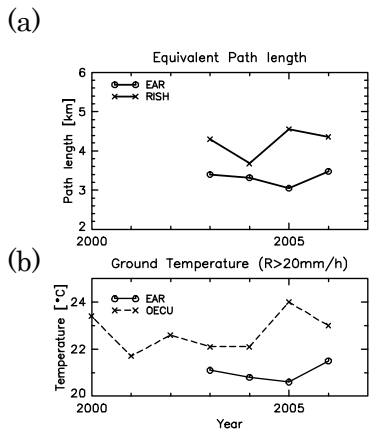


図 1. (a)雨域等価通路長と(b)地上気温の年変化。

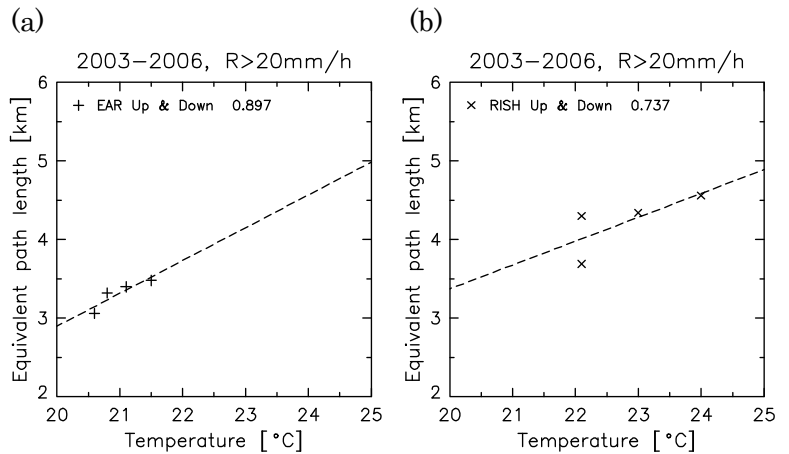


図 2. (a)RISH と(b)EAR における同相関図。

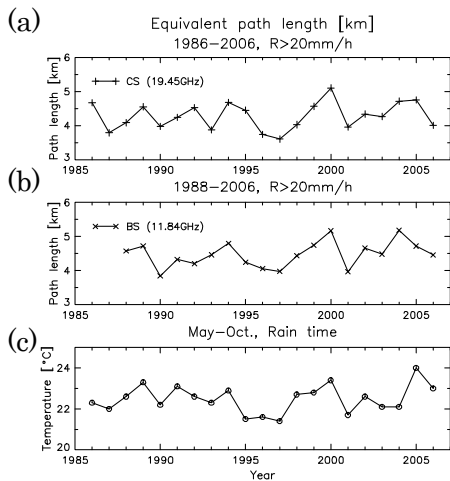


図 3. (a)Ka 帯と(b)Ku 帯雨域等価通路長と(c)地上気温の年変化。

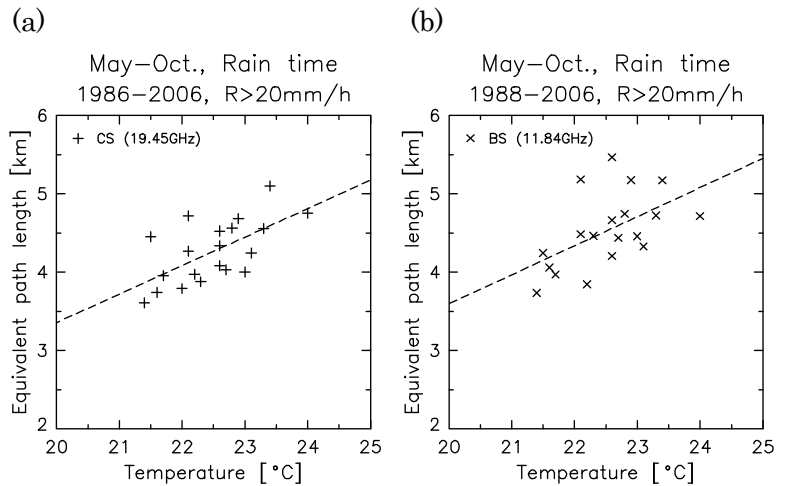


図 4. OECU での(a)Ka 帯と(b)Ku 帯における同相関図。

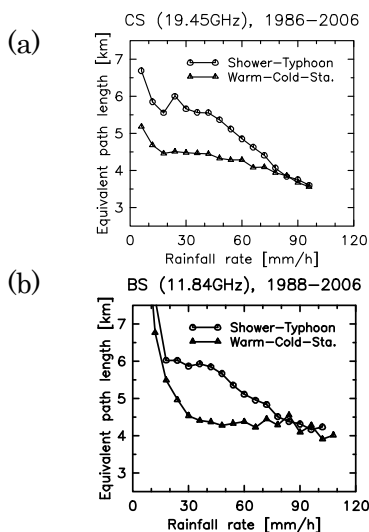


図 5. (a)Ka 帯と(b)Ku 帯の降雨タイプ別での雨域等価通路長分布。

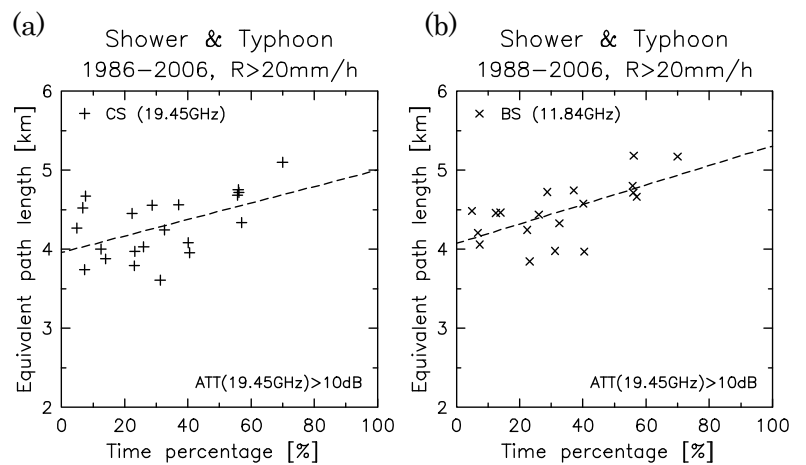


図 6. (a)Ka 帯と(b)Ku 帯での夕立・台風の割合と雨域等価通路長の関係。

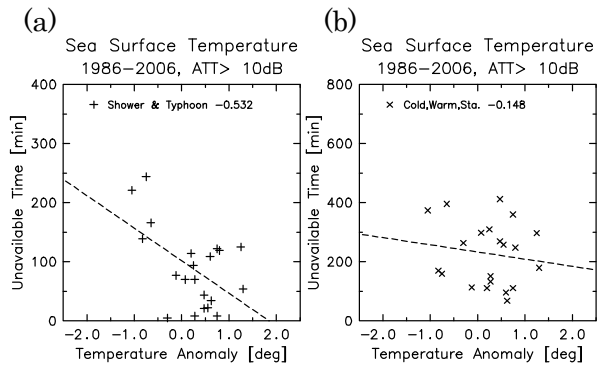


図7. (a)夕立・台風と(b)その他のKa帯降雨減衰年間発生時間とエルニーニョ監視区域海面水温の関係。

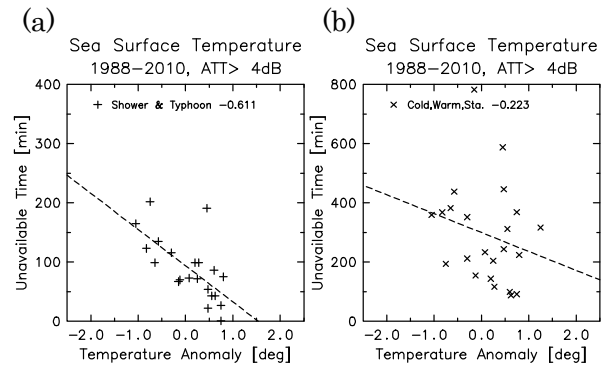


図8. 同Ku帯。