

衛星伝搬の壺

第1講

伝搬研究は縁の下の力持ち

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

新世代のワイヤレス通信では、地上回線に加え、衛星や飛行船などを組み入れた3次元空間構成ネットワークへの期待が高まっている。本シリーズでは内容を衛星回線の電波伝搬に絞り、降雨減衰をはじめとする種々の伝搬現象のメカニズムやモデリングの本質に迫る。衛星伝搬の研究そのものは実用に足る推定法を得て一段落の状態にあるが、サービス形態の変遷に伴って新たな視点での見直しも必要である。本シリーズは衛星伝搬を不易流行の視点で捉える。初回の本講はその全体像を俯瞰してみたい。



不易流行

筆者は、本誌にて「電波研究の玉手箱」を10回に亘って連載した[1]。そこでは、開けてびっくりの玉手箱をイメージし、電波技術の中に現れる「不思議」に焦点を当て、現象の根底に横たわるからくりを解説した。今回は、技術の内容を衛星通信の電波伝搬に絞り、降雨減衰をはじめとする種々の伝搬現象とそのモデリングの要点(壺)をまとめてみたい。タイトルに付けた「壺」には、財宝の在り処を記す地図が隠されていると伝わる「こけ猿の壺」(あの丹下左膳にでてくる)にあやかりたいという気持ちも込めている。

衛星通信の回線設計に資する電波伝搬モデル(伝搬劣化の推定法)の研究は、1970～1990年代、国内外において精力的に行われ、実用に足る推定手法(無線通信の国際標準化機関ITU-R(1992年以前はCCIR)の勧告手法)もほぼこの時期にその形が出来上がっている。一方、移動通信の第5世代からその未来に続くシステムでは、地上回線に加え、低軌道周回衛星(LEO)や成層圏飛行船(HAPS)、さらには、ドローンやバルーンなどを組み入れた3次元空間ネットワーク構想が打ち出され(図1)、高高度飛行体利用無線通信システムへの期待が高まっている[2、3]。地球上のあらゆるものの(人が携帯する情報端末・無人センサなど)を結び付けて制御するIoT(もののインターネット)や非常災害時の通信遮断に耐性を持つ強靱ネットワークを目指すものである。新しい無線システムがあるところには、電波伝搬問題も必ず付随し、衛星通信についても、従来の伝搬モデルの範疇を超え

て、新たな視点での伝搬検討が必要になっている。

筆者は、1980年代、KDD研究所(当時)において衛星伝搬を研究テーマとしていた。また、並行して無線通信の国際標準化機関であるCCIR/ITU-Rの標準化会合にも日本代表団の一員として参加し、衛星伝搬モデルの勧告化にも注力してきた。本シリーズでは、そのころを振り返って衛星伝搬モデリングの基本的な考え方(不易)を中心に述べると共に、時代の新風(流行)を受けて進化しつつある伝搬研究の姿を紹介したい。第一回の本講は衛星伝搬の概要を、次回以降では、降雨減衰など個別の伝搬現象を取り上げ、伝搬モデリングについて詳しくみてゆきたい。

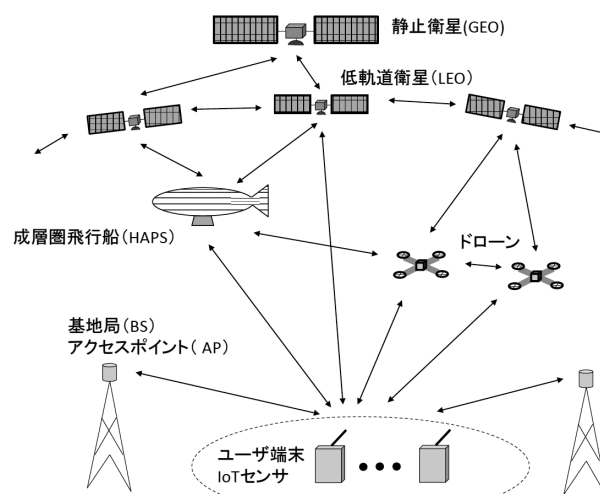


図1 次世代ワイヤレスシステムで構想されている強靱かつ柔軟な三次元空間ネットワークのイメージ

電波伝搬問題

無線通信を対象とする電波伝搬研究者の役目はお医者さんの仕事に似ている（図2）。医者は患者に対して i) 病気の診断、ii) 治療、そして、iii) 病気を防ぐための予防という三つの役割を担う。これに対して、電波伝搬研究では、伝送路上の媒質と電波の作用による通信品質の劣化現象に対して、i) 原因の解明（診断）、ii) 対処（治療）、そして、iii) 伝搬劣化に強いシステムの発案（予防）がミッションになる。多くの人は日常を健康な状態で過ごし、稀に起きる不調に対して医者に頼るのと同様、特に見通し内通信を主とする衛星回線では大部分の時間において通信状態は良好であり、伝搬問題が意識されることは少ない。それでも、次々と訪れる患者さんに対して忙しく働くお医者さんと同様に、電波伝搬研究者にも出番は結構あるのである。医者いらずの理想の生活には、医学の力が欠かせないのと同様、快適な無線通信にも縁の下で支える力が必要なのである。



- i) 診断＝通信障害（伝搬劣化現象）の原因究明
- ii) 治療＝伝搬劣化対策
- iii) 予防＝伝搬劣化に強いシステム提案
伝搬劣化推定法

図2 電波伝搬研究とお医者さんの仕事のアナロジー
（イラストは「いらすとや」フリー画像より）

無線通信の進化は伝搬問題との戦いである。その通信回線に立ちあがる伝搬劣化の壁を乗り越えるところからシステム構築は始まる。乗り越えた先には新たな壁が見えてくる。そしてそこを又乗り越える、この繰り返しである。簡単に乗り越えられる壁もあるしそうでない壁もある。越えられない壁とは何であろうか。代表的なものは以下の4つであろう。

- ①情報の到達速度
- ②電波の伝搬に伴う減衰
- ③受信系の雑音
- ④シャノン（C. Shannon）の通信路容量

図3はこれをまとめている。①に関して、情報伝送を担う電波の速度が光速とはいえ有限であることはマクスウェルやアインシュタインが教えてくれている。3万6千kmの高さにある静止衛星を介した電話では、会話の遅れに戸惑うし、より遠方にいる宇宙人との対

話ではさらに大きな問題になる。②は電波伝搬の問題である。自由空間を伝搬する波であっても、球面状に広がりながら伝搬するため電力密度は送信点からの距離の2乗に逆比例して弱くなる。吸収性の媒質内を伝搬する場合には、さらに大きな減衰になる。③は温度を持つものには熱による雑音が必ず発生する。その雑音の強さは温度（絶対温度 [K]）と帯域幅に比例する。値そのものはきわめて小さいが、信号電力が弱くなれば、そして帯域幅が広くなればそれが問題になる。④はシャノンが打ち立てた情報理論からの帰結である。雑音がある通信路（チャネル）では、どんなに通信方式を工夫しても情報ビットを誤り無く伝送できる量に限界があると言うものであり、その上限速度（通信路容量）は信号のSN比と帯域幅によって決まる。

②によって弱くなる信号電力は、③による雑音の働きを受け、④のSN比で定まる限界を超えることができない。無線通信では、この壁を知り、これらを受け入れた上でのシステム設計がなされる。

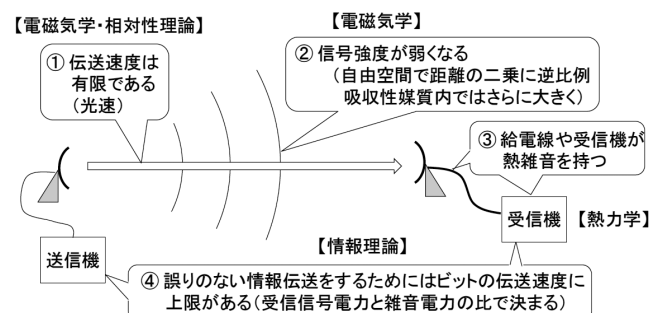


図3 無線伝送における越えられない四つの壁

自然現象を相手にする電波伝搬のモデル構築（モデリング）に際しては、以下の3点が重要である。

【物理現象を知る】

伝搬劣化を引き起こす物理現象（自然現象、地形構造など）の実態を把握する

【電波への作用を知る】

媒質中の電波伝搬（吸収・反射・散乱など）の解析手段（武器）を持ち、媒質の電波への作用を知る

【確率・統計の目で見える】

不規則な伝搬現象を確率・統計問題として捉える

上記を踏まえてモデリングに着手し、実測でのパラメータ同定・検証を経て、回線設計に資する伝搬モデル（伝搬劣化推定法）が出来上がる。伝搬モデルは電波伝搬研究の結晶であり、無線システム構築への橋渡し役を担う。

☞ 衛星通信の電波伝搬

衛星通信の具体的な伝搬劣化現象についてみてゆきたい。図4は衛星回線に現れる電波伝搬現象を示している。伝搬劣化は電波の通路にある電離圏、対流圏、地球表面（地形・植生・構造物）の三つの領域に原因を持つ。衛星回線では地上回線に比べて送受信点間の通信距離が長く、自由空間伝搬損が大きいので、主に衛星見通し内（Line-of-Sight: LOS）での運用になる。目標とする稼働率を例えば99.99%に定めれば、0.01%の不稼働を認めることである。1年間で見ると約52分の時間に相当し、年間の最悪の52分のときの伝搬状態に耐えられるシステムを構築すればよいということになる。人の暮らしにおいて年間の最悪52分と言えば、風邪を引いて寝込んでいるとか、二日酔いで頭ががらがらするとか、そういう特別のときであって、日常生活の大部分においては健康である。衛星通信の伝搬状況もそういうものである。もちろんこの目標稼働率はサービスの目的によって99.9%であったり、99%であったりするので、問題となる伝搬現象も周波数や目標稼働率によって異なる。

また、静止衛星のように、見通しが確保できる位置に端末があれば、その場所において長時間の通信が可能であるが、短時間に衛星方向が変わってしまう低軌道周回衛星では、市街地のような見通し率の悪い環境において通信遮断が頻繁に起き、使い物にならないということになる。このように稼働率も、時間に対する比率（時間率）、場所に対する比率（場所率）、など、利用形態によって異なる見方が必要になる。以下この伝搬現象の概要を個別に見て行きたい。

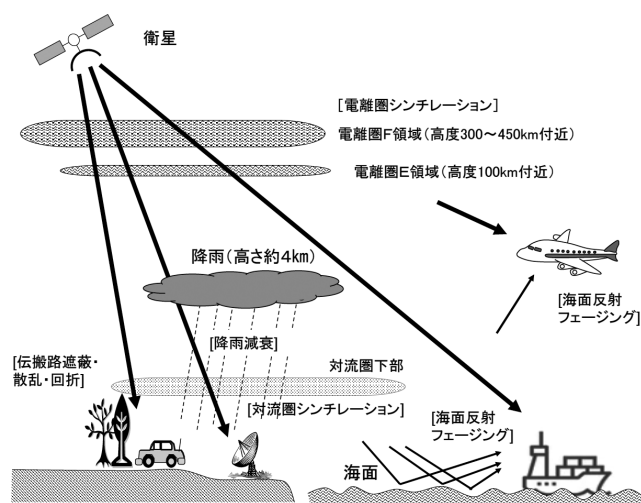


図4 衛星回線に現れる電波伝搬現象

☞ 伝搬劣化現象：その概要

【降雨減衰】

雨の中を電波が通過すると雨滴によって吸収や散乱が起きる。特に、吸収は信号強度の低下をもたらすので、正確な算定が求められる。目に見える雨が対象なので、現象としては分かりやすい。土砂降りのときには、電波も弱くなるだろうと誰でも思う。ゆえに、減衰量推定も簡単だろうと思いがちだがそうではない。1年を統計の基本単位とする降雨現象を不規則確率問題と捉えて、それを正確に把握するには、その何十倍もの時が必要であろうことが理解できるであろう。

電波と雨滴の相互作用は雨滴が波長サイズに近づくとき大きくなる。ゆえに、降雨減衰は周波数が10GHz以上の電波に対して問題になる。地上系でも衛星系でも、近年、ミリ波帯のような高い周波数帯の利用が指向されており、降雨減衰は見通し内電波伝搬における最大の問題である。

降雨減衰量の算定では、均一に分布する雨滴中を伝搬する波の減衰を求める電磁解析問題と、時間および空間上に不均一に分布する降雨現象に対する気象学的確率統計問題の両面から取り組む必要がある。降雨減衰の推定に対しては、図5にまとめるように、以下の点が大事になる。

- ① 降雨減衰推定に関する基本的な考え方（何をどのような形で求めたいか：瞬時値か統計値か、減衰量か持続時間か）
- ② 空間内に均一に分布する雨滴中での電波の減衰（電磁界解析問題）
- ③ 着目地域に対する降雨強度の長期間統計（平年値とそのばらつき。データベースの有無）
- ④ 降雨強度分布の空間構造（水平方向・垂直方向・経路の角度差などに対する不均一性）
- ⑤ 降雨強度統計に対する長期的傾向（地球温暖化問題は雨の降り方に現れているか）

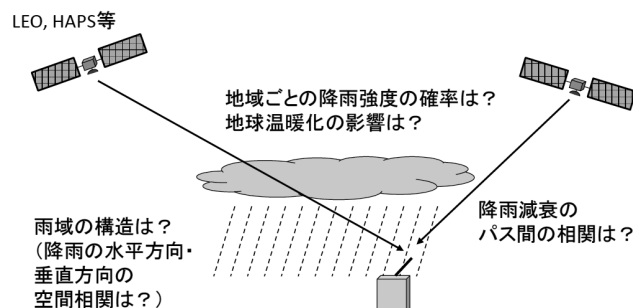


図5 降雨減衰モデリングの要点

【シンチレーション】

シンチレーションは、伝搬媒質の屈折率の乱れによって起きる信号強度の変動現象である。その原因が、電離圏（F 領域、E 領域）のプラズマ密度の擾乱によるものと、対流圏の大気屈折率の揺らぎによるものの2種類があり、前者は電離圏シンチレーション、後者は対流圏シンチレーションと呼ばれる。シンチレーションという言葉は、夜空に浮かぶ星の瞬きとしてお馴染みであるが、これは対流圏シンチレーションである。

大きな電離圏シンチレーションはそれが発生しやすい時期、すなわち、太陽活動が盛んな年（11 年周期の）に、大地震のように突発的に現れるのに対して、対流圏シンチレーションは、特に、夏の暑い季節に継続的に現れる。以下の点が大事になる。

- ①電離圏シンチレーションの発生メカニズムと特徴（発生しやすい地域・時期・時間帯）
- ②電離圏シンチレーションの通信に与える影響度
- ③対流圏シンチレーションの発生メカニズムと特徴
- ④対流圏シンチレーションの影響度

【海面反射フェージング】

海面反射によるフェージングは、海上を移動する船舶や航空機を対象とする衛星通信において、特にその低仰角運用時に問題になる。衛星からの直接波と海面で反射された波との位相干渉により信号強度の変動が起きる。海面反射波は海が穏やかな場合は正規反射点付近からの定常波成分（コヒーレント成分）が、波が高くなって海が荒れてくると不規則反射成分（インコヒーレント成分）が卓越する（図 6）。モデル化に際しては、以下の点が重要である。

- ①地上回線の海面反射フェージングと衛星回線の海面反射フェージングの違い
- ②フェージングが最も厳しい海面状態
- ③船舶と航空機での海面反射フェージングの違い
- ④海面反射フェージングの電波周波数への依存性

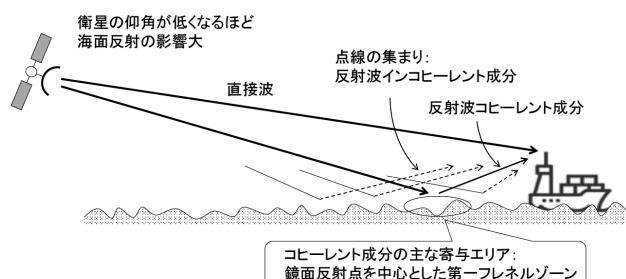


図 6 海面反射フェージングの三つの成分：直接波成分・反射波コヒーレント成分・反射波インコヒーレント成分

【陸上移動体衛星伝搬】

陸上移動体衛星伝搬では、建物・樹木等による遮蔽減衰、建物や地面等からの散乱や反射等によるマルチパスフェージングなど複合的な要因での伝搬劣化を受け、かつその状態が移動体の場所とともに変化する。ゆえに、純粋な自然現象を相手にする電波伝搬（降雨減衰や海面反射フェージングなど）とは違って、運用される環境（複雑な地形や人口構造物など）やサービス形態への依存度が高く、モデル化そのものに考えるべきことが多い。要点は以下である。

- ①陸上移動体通信における地上回線と衛星回線の伝搬現象やモデル構造の違い
- ②静止衛星回線と低軌道周回衛星回線での伝搬モデルの考え方
- ③複数衛星（その他の高高度飛行体を含む）や複数地上局を利用するダイバーシチ・MIMO

次回以降では、それぞれの現象に焦点を絞り、上記ポイントを主体に見てゆきたい。今回は降雨減衰を取り上げる。

ティータイム 

October Sky

アメリカの映画に October Sky（邦題：遠い空の向こうに）がある。1957 年 10 月 4 日、ソ連から打ち上げられた衛星：スプートニクは、アメリカ国民にとって衝撃的であった。翌日 5 日の夜、アメリカの片田舎にある炭坑町の住民も総出で夜空を横切るスプートニクを眺めていた。この映画の主人公、高校生のホーマーもその一人であった。時代の流れに取り残されつつあった炭坑町、その中で、炭鉱の責任者として懸命に働く父、アメフトで将来を期待される兄、そのような環境で育ったホーマーは、「ロケットを作ろう」と決断する。高校生仲間 4 人でグループ「ロケットボーイズ」を名乗り、ロケットづくりに挑戦する。全く知識のない素人ゆえに失敗を繰り返し、父からも周囲からも理解が得られないまま、…、でもやがて…、という映画である。NASA の技術者だったホーマー・H・ヒッカムの実話に基づいているという。

困難な夢に挑戦することのすばらしさ、それを見守る人たちの熱さを感じ取ることができる映画である。このチャレンジする大切さや感動を学生たちにも伝えたいと思って 3 年ごと（修士課程の学生が入れ替わる 1 サイクル）に研究室ゼミでこの映画鑑賞を行ってきた。このコラムに目をとめてくれた人、是非一度、観てほしい。

なお、この映画には原作があり「Rocket Boys」である。映画化に際して、この地味なタイトルを意味深な「October Sky」に変えたという。アナグラム（文字の並び替え）になっている。（[4] のコラムより転載）

<参考文献>

- [1] 唐沢好男, “電波研究の玉手箱：第 1～10 講,” 電波技術協会報 FORN, No. 335-344, 2020.07-2022.01. 以下の URL 参照
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_069_FORN_Lectures.pdf
- [2] 伊達木隆他, “6G に向けた無線通信技術への取り組み,” 信学誌, vol. 104, no.5, pp. 420-424, 2021.05.
- [3] 豊嶋守生他, “超スマート社会における ICT×宇宙通信,” 信学誌, vol. 104, no.5, pp. 453-462, 2021.05.
- [4] 唐沢好男, 藤井威生, 電波システム工学, コロナ社, 2020.