HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	無線通信の仕組みについて，不正確だけどわかりやすさを追求したお話…
Author(s)	大鐘，武雄
Citation	科学技術コミュニケーション，21，119-128
Issue Date	2017-06
DOI	https://doi.org/10.14943/79328
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66329
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_ohgane_119-128.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

小特集ノート：寄稿

無線通信の仕組みについて，不正確だけど わかりやすさを追求したお話…

大鐘 武雄[1]

An Inexact but Easily-understandable Talk on Wireless Communications

OHGANE Takeo[1]

キーワード：電波，アンテナ，変調，次世代の無線通信技術，わかりやすさと厳密さ

Keywords: electro-magnetic wave, antenna, modulation, next generation's wireless communication technology, intelligibility and exactness

1. はじめに

ご紹介ありがとうございます．今日は，CoSTEPの修了式公開シンポジウムということで，修了された方々，おめでとうございます．皆様が一所懸命，科学技術コミュニケーションについて勉強した中で自分が発表するというのは，ハードルがすっかり上がってしまったように思いますが，今日は電波について何となく分かったような気になる，そういうお話をさせていただきます．最初に久保田先生，そして最後に原島先生という二人のメインがいらっしゃいますので（久保田 2017; 原島 2017），私の話は箸休め程度に聞いていただければと思います．



図1　講演する著者

みなさんの周りには，意識している，していないにかかわらず，たくさんの無線通信機器が非常に豊富にあります．通信インフラは業者さんが設置するものですが，それに対して，例えば無線LANのように，自分で自宅に設置できるものまであります．ここまで身近な道具になっている無線，あるいは電波というのは，身近でつまらないものと思われるかもしれませんが，少しでもその原理を知ると，何となく興味を持つかもしれません．これは，小さなゴム風船にヘリウムを入れて無線で飛ばす飛行船です．ヘリウムは高いですが，全部で2,000～3,000円あれば作成できます．なぜこういうものを作ったかというと，大学1年生が無線通信の面白さを知るきっ

2017年5月12日受納　2017年6月6日受理
所　属：1. 北海道大学大学院情報科学研究科
連絡先：ohgane@ist.hokudai.ac.jp

かけになってほしいからです.

今日は専門でない方々に少しでも理解してもらえるよう，厳密さを無視して，無線通信の仕組みをお話しします．目次を大きく三つの章に分けています．最初に電波の基礎，次が変調の基礎，最後に無線通信の基礎ということで，それぞれ何となく少しずつ分かってもらえたらと思います.

2. 電波の基礎

2.1 電波を発するアンテナの原理　～電流と磁界，コンデンサ～

まず電波の基礎は，非常に有名なアンペールの法則です．アンペールの法則は，電流が流れると向かって時計回りに磁界が発生するということです．同じように，ファラデーの電磁誘導の法則は，コイルの中に磁石を出し入れする，つまり磁界が変化すると，変位電流が流れるということです（図2）. つまり，電界が変化すると磁界が変化し，あるいは磁界が変化すると電流が変化するということで，この二つは関係があるわけです.

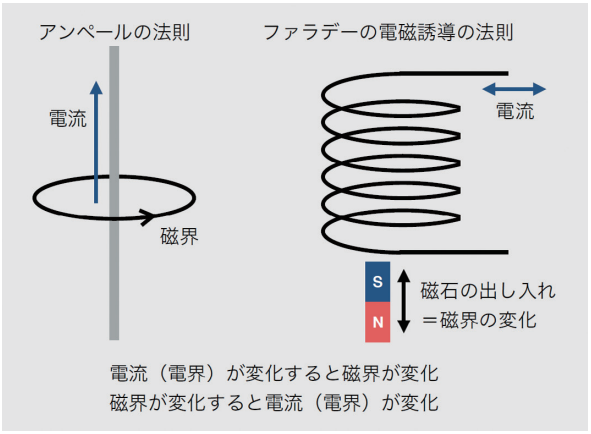
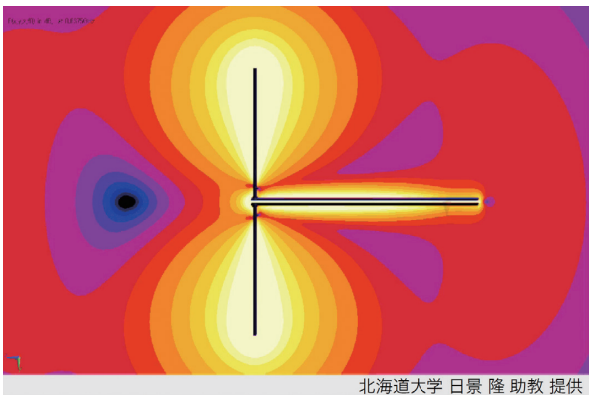


図2　アンペールの法則とファラデーの電磁誘導の法則

次にコンデンサについて考えてみます．コンデンサというのは，平行平板の中にいろいろな誘電体（例えば一番簡単なものは空気）が入っています．これに電圧をかけると，最初は充電される分だけ電流が流れます．その時に電界が発生して，さきほどのアンペールの法則に従って磁界が出てきます．逆に，磁界に電流が流れると，逆方向に磁界ができます．交流電源をつなぐと，電界が交互に向きを変えますから，磁界がこっち回り，こっち回りというふうに繰り返されるわけです．このようなコンデンサの平板を徐々にハの字に広げていったものが，いわゆるアンテナです.

2.2 電波の性質　～波長と周波数～

北海道大学の日景先生から提供された，こちらの映像（図3）は，半波長ダイポールと言われるアンテナから，電波が放射される様子です．電界ができていって，それに対する磁界ができるという相互作用で，それが波となってどんどん伝わっていきます．このように，電波というのはいわゆる波だということが分かっていただけると思います.



北海道大学 日景 隆 助教 提供

図3　ダイポールアンテナから電磁波が放射される様子
https://youtu.be/Y-NL93PWBd4

cos波形を思い浮かべてみて下さい．波形の山から山の間隔を横軸で周期といいます（図4）. 周期の逆数が周波数です．ですから，周波数の高い信号は，非常に周期が短い信号であるということになります．横軸にアンテナからの距離をとると，波が遠方に伝わっていきま

す．時間によって波が移動するともいえます．たとえば，1周期をT秒とすると，T秒で，山が次の山の位置にまで移動するわけです（図5）．

T秒間の移動距離は，電波の速さがわかると求められます．電波の速さは実は光の速さと同じで，3×10^8m/sです．その間隔でいうと，T秒間に進む距離は，光速と周期をかけた値になるので，このT秒間に進む距離，山がT秒後に次の山まで来る距離が波長と呼ばれます．ですから波長は，光の速さを周波数で割った値で表わされます．周波数が1GHzの波であれば，波長は約30cmということです．この関係が非常に大事です．

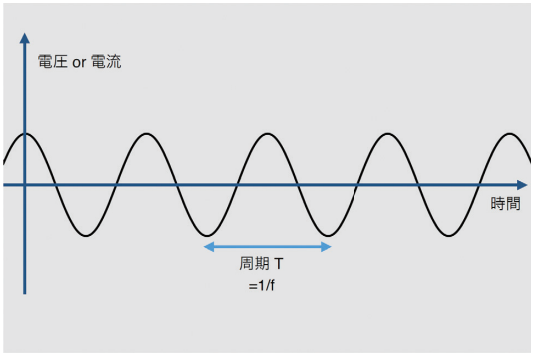


図4　周波数（f）と周期（T）

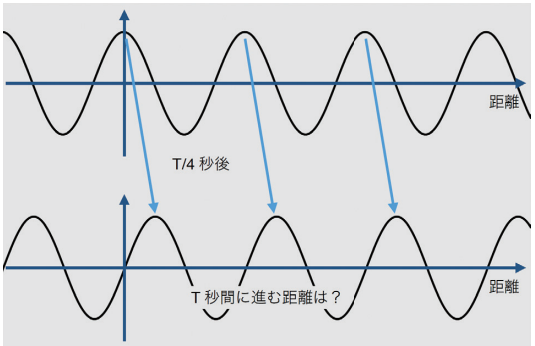


図5　電波の移動

2.3 波長とアンテナサイズ　～巨人と小人の例え～

電波を人に例えると，波長は身長みたいなもので，アンテナはその人が出入りするドアです．ですから，それぞれの身長に合ったサイズのドアがあるわけです．巨大なドアだと開けづらいし，小さいドアだと体が入りません．ちょうど良いドアのサイズは，身長の半分ぐらいだと言われています（図6）．

これはNTTドコモさんからいただいた写真です．いわゆる基地局アンテナと呼ばれている携帯電話のアンテナです　（図7）．少し斜めで見にくいですが，高さは約3mです．ただし，1段当たり15cmのアンテナが18段重ねられています．実は，五つの周波数を一度に送受信できる共用アンテナで，一番短い波長で15cm，一番長い波長で43cmですので，だいたい同じぐらいのサイズのアンテナが必要であることが分かります．

波長が大きいということは，例えるならいわゆる巨大な人間です．場合によっては『進撃の巨人』という漫画にでてくる巨人よりも，もっと大きな巨人です．進撃の巨人は壁を越えられなかったかもしれませんが，高さ数kmの巨人なら高いビルも跨ぐことができます．こういう巨人にとってビ

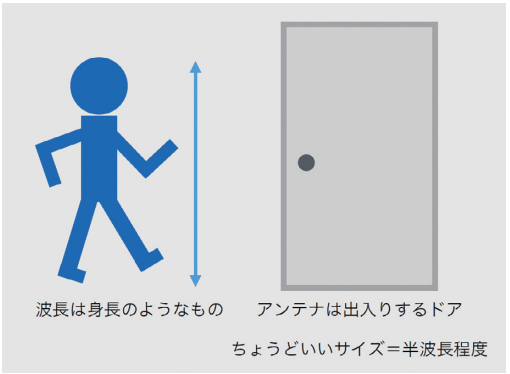


図6　波長とアンテナサイズ



図7　アンテナの具体例 携帯電話基地局

ルは大した障害物ではなく，どんどん遠くまで邪魔されずに歩いていけます．ただし，建物の中には侵入しにくいという弱点があります．

非常に大きな波長の電波の例が標準電波です．皆さんの中に，電波時計を持っている方もいらっしゃると思います．電波時計は，標準電波を受信して時間を合わせています．標準電波はJJYが日本で2ヵ所送信しています．1ヵ所は福島県にあり，なんとアンテナの高さが250mあります．実は，高さ250mでも十分な高さのアンテナではなく，周波数が40kHzなので，波長が7500m，つまり7.5kmという非常に巨大な波長を持っています．ですから，どんなものも跨いで，遠くまで地表を伝わっていけるのです．でも家の中の場合，窓際だと電波が入っても部屋の奥に行くと入らない場合があります．先ほど言ったように，長い波だとペネトレーション（侵入）があまり良くないのです．

一方，波長が短いと，つまり小さい人だと「止まれ」の標識でも大きな障害物になってしまって，進むことができなくなるわけです．ですから，波長が短いと障害物に弱くて，遠くまで行くことができないということが起きます．しかし逆に，窓くらいの大きさでも十分大きく，スイスイ入っていくことができます．ですから，波長の短い携帯電話の電波は，家の中でもちゃんと受信できるわけです．

2.4 電波の減衰と受信

先ほど電波の波長によって障害物に強い弱いという話をしましたが，次に障害物がなかったら電波はどこまで飛ぶのかという話をします．電波の波源に対して，距離の違う場所にいる二人が，どの程度強い信号を受信するかを考えましょう．電波は球面状に広がっていきます．球の面積は$4\pi r^2$ですから，距離の2乗に比例して表面積が大きくなります（図8）．最初のエネルギーが広がるわけですから，単位面積当たりのエネルギーはどんどん薄くなるわけですね．ですから，遠くにいる人は，受信できる電力が距離の2乗に比例して低くなってしまうのです．

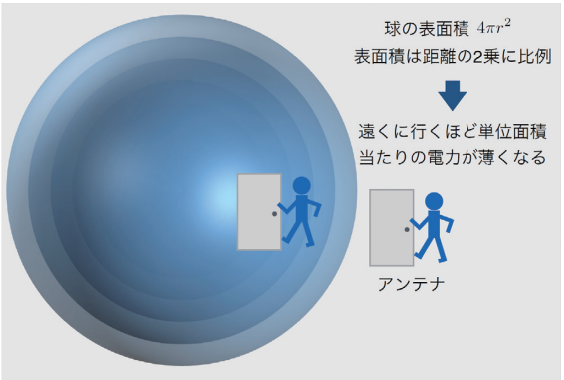


図8　球面波と距離減衰

次に，周波数の依存性を考えましょう．アンテナのサイズは身長と同じぐらいか，半分ぐらいだという話をしました．ですから，低い周波数は大きなドアで待ち構えるし，高い周波数は小さなドアで待ち構えます．そうすると周波数の低いほうがよりたくさん受け取れるわけです．ですから，周波数が高いと減衰する量が多いので，周波数が高いと電波を遠くまで飛ばすためにいろんな工夫が必要です．どうするかというと，ドアをたくさん並べます（図9）．1枚のドアを大きくすると，かえって弱くなってしまいますので，ドアの大きさをちょうど良いサイズにしたままたくさん並べることで，たくさんの信号を送受信することが可能になります．

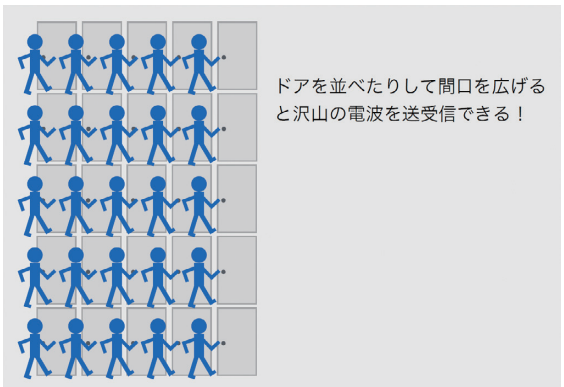


図9　アンテナ開口と利得

これは5G（第5世代携帯電話）のテストベッドとして三菱電機さんが作ったアンテナで，周波数15GHzです（図10）[1]．いま皆さんが使っている携帯電話がだいたい2GHzぐらいですから，その7.5倍です．（今は周波数28GHzを検討しています）．周波数15GHzは波長が2cmに対応します．これを8×8=64個を並べると，面積は64倍に増やすことができます．これによって，より強い信号を送受信できるのです．

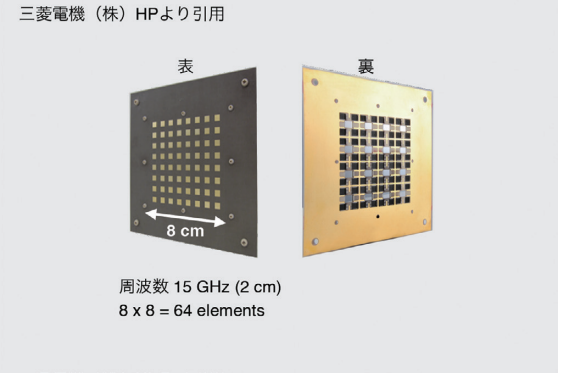


図10　大開口アンテナの例（1）

パラボラというのも同じ原理です．アンテナ本体は，中心のほんの一部分なので，強い信号を受信することができません．そこで，反射鏡を設置してたくさんの面積で集めて，中心のアンテナに入るようにします．なんと，直径64mという日本最大のパラボラが長野県の臼田にあります（図11）．受信する周波数の波長は，一番大きくても21cm，一番小さくて3.6cmですから，3.6cmのアンテナに比べると非常に大きな面積を用意することで，たくさんの信号を受信できるようにしています．

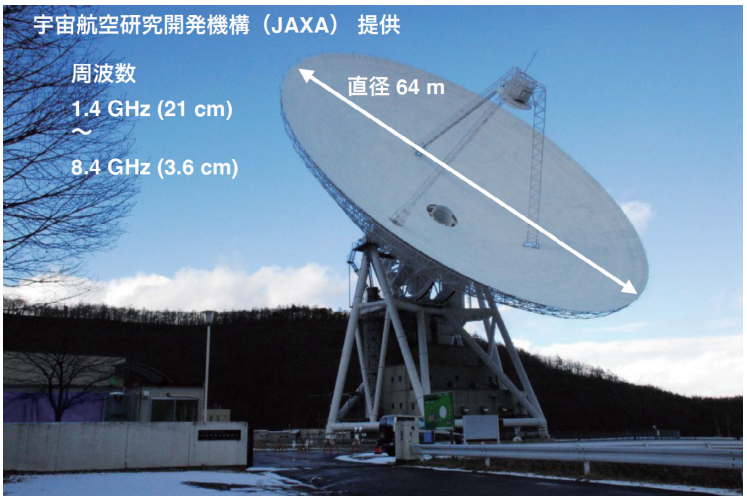


図11　大開口アンテナの例（2）

2.5 電波についてのまとめ

まとめます．電波は電界と磁界の相互作用で伝搬することが，何となく分かったでしょうか．あとは波長です．波長はアンテナのサイズと関係があります．電波は距離の2乗に比例して減衰したり，周波数の2乗に比例して減衰したりします．ただし，アンテナを並べることで，高い周波数でも受けることができるようになります．そのため，第5世代携帯電話では，ミリ波という，1ミリ程度の波長の電波を送受信することが提言されています．

3. 変調の基礎

3.1 電波で情報を送る原理

では，次に変調の基礎に行きましょう．ホイッスルケトルという，お湯が沸くと「ピュー」と鳴るやかんがあります．ホイッスルケトルは，沸くと音を発生させ，沸いたという情報を教えてくれる，1bitの情報発信をしてくれる装置と言えます．

いわゆる電波のもとになる波というのは，同じ波形の繰り返しなので，何の情報も発信していません．オンとオフになることで，初めてオンの時に「あ，オンになった」という情報が生じるわけです．また，波の大きさを変えることで，情報の種類を増やすこともできます．例えば，いま電波が一番小さいところから2倍，3倍，4倍，5倍になっていくと，何通りもの情報が送れるわけです．こういう仕組みを使って信号を送信しています．

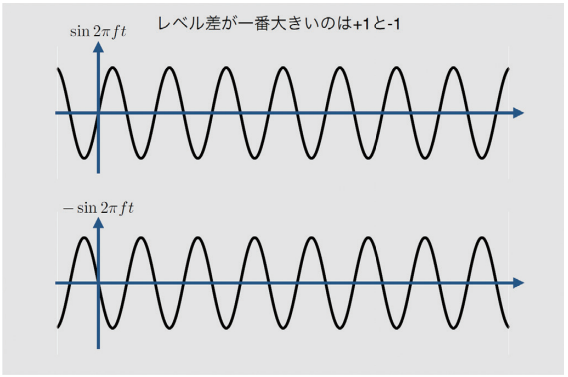


図12　+1と-1の2レベル（1）

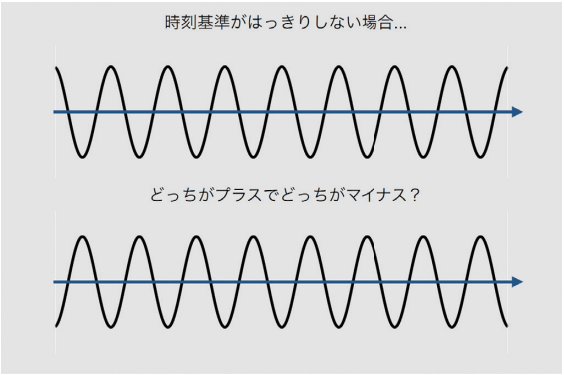


図13　+1と-1の2レベル（2）

レベル差で一番はっきり見分けやすいのが，このプラス1とマイナス1の2レベルです．上にsin2πft，下に－sin2πftの波形を並べてみましょう（図12）．上がプラスの時，下がマイナスで，下がプラスの時，上がマイナスというように反転した形になっていますので，一番違いがはっきりしています．

今度は時間軸の基準点をなくしてみましょう（図13）．どちらがsin2πftでどちらが－sin2πftかを見ただけで分かる人は，さっきの軸の位置を覚えている人だと思います．しかし，時間軸の基準点が曖昧になると，今までsin2πftと思っていた波形が実は－sin2πftなのかもしれなくなります．一般には，時刻の情報が曖昧だと，見ただけでは，どちらがsin2πftでどちらが－sin2πftかは分かりません．

そのために，同期検波というのが使われます．同期検波というのは，受信側で送信側の時に使っ

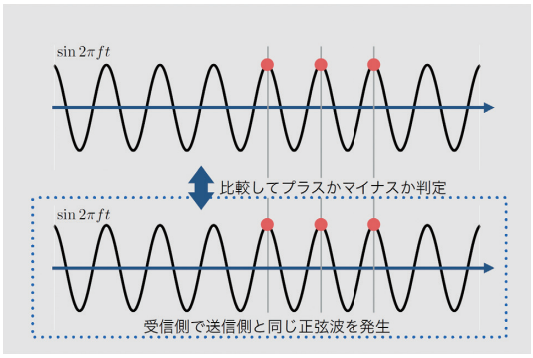


図14　同期検波（+1の例）

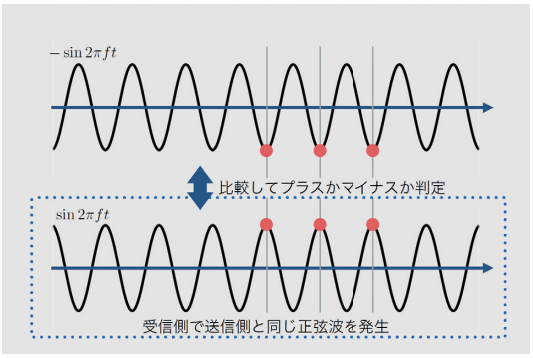


図15　同期検波（-1の例）

たsin2πftと同じものを基準として利用します．そうすると，この正弦波の山と同じ時にプラスの山になっていれば，こっちがsin2πftだということを判定できるわけですね（図14）．逆にマイナスの時は，－sin2πftということが分かるので，信号のプラスかマイナスかが検出できるようになります（図15）．

3.2 多量の情報を送るための方法　～直交振幅変調（QAM）～

今度はsinとcos，正弦波と余弦波を考えましょう．並べてみると，sinが+1の時にはcosがゼロ，-1の時にもゼロ，+1の時にまたゼロということで，どちらも，sinが高い時にはcosがゼロで，cosが高い時にはsinがゼロというような関係を持っています（図16）．これが，sinとcosの面白いところです．

この関係を使うとさらに情報の量を増やすことができます．例えばcosを用いて大きさを変えて情報を伝送することを考えましょう．例えばcosのレベルが3，-1，1，3というように山の高さが変化しているとします（図17）．この山の高いところを見ると，全てsin波形のゼロに対応しています．一方，同様にsinを用いて大きさを変えて情報を伝送した場合，sinの1，3，-1，1の山を見てみると，cos波形ではやはり全てゼロとなっています．こういうのを直交関係といい，それぞれの山の高さを調べるときには，他方の波形が邪魔をしないようになっています．したがって，それぞれに情報を乗せて送ることができるのです．これを直交振幅変調（QAM: Quadrature Amplitude Modulation）と言います．

今，皆さんが普通に使っているWi-FiやLTEはこの方法を用いています．cosの軸で，例えば3，1，-1，-3の4通り，－sinの軸も3，1，-1，-3の4通りとすると，4通り×4通り＝16通りの組み合わせを送ることができます．LTEやWi-Fiでは，今のところ16×16の256通りまで信号を送信することができます．

では，これで何bitの情報が送れるでしょうか．例えば16QAMの時はcos側で01，00，10，11の各2bit．sin側でも同様に2bit，合わせて4bitということで，2の4乗はイコール16ですから，ぴったり同じ数の情報が送れます（図18）．皆さんが今使っている携帯，あるいはWi-Fiというのは，このような形でQAMを使っています．

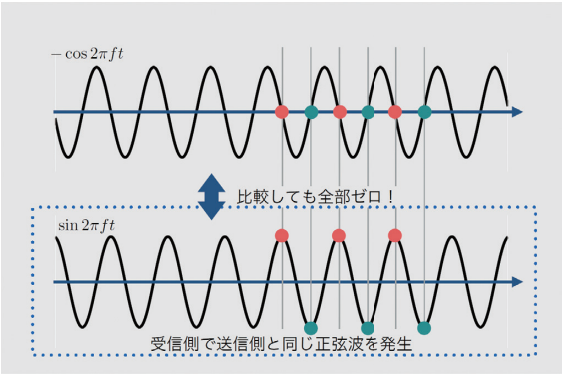


図16　正弦波と余弦波（-cos）

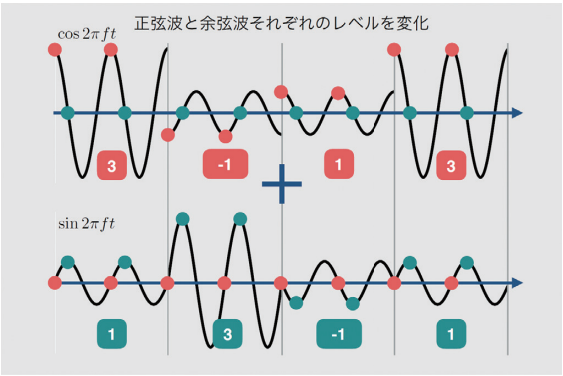


図17　直交振幅変調（QAM）

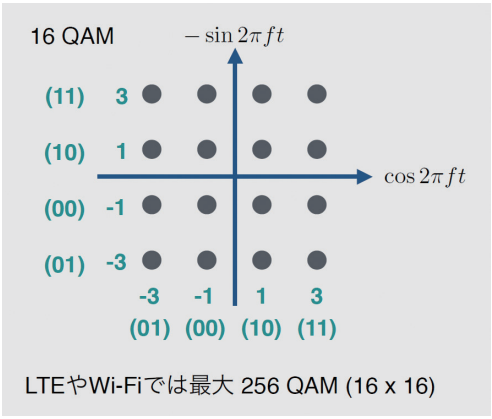


図18　QAMの信号点配置の例

3.3 変調のまとめ

変調の基礎は何となく分かったような気になれたでしょうか．ここではお話ししませんでしたけれども，位相や周波数といったパラメータを動かす場合もあります．一般的には同期検波を使って，その変化を検出して，信号のレベルをいろいろ変えます．そして，sinとcosの両方を使うことによって，たくさんの情報を送れるQAMが，今最も普通に使われています．

4. 無線通信の基礎

4.1 チャネル干渉を避けるためのチャネル割り当て

最後は，無線通信の基礎の話をさせていただきます．今100人以上いるこの会場で皆さんが携帯電話で電話をしようとすると，たぶん，問題なく通話できると思います．ここが携帯電話のすごいところです．皆さんは，聖徳太子（厩戸皇子）が一度に10人の人が話をしても聞き取れたという逸話を聞いたことがあるでしょうか．私は残念ながら，たった二人でも同時に耳元で話されると，絶対に何を言っているのか分からないと思います．実は無線機器も一緒です．

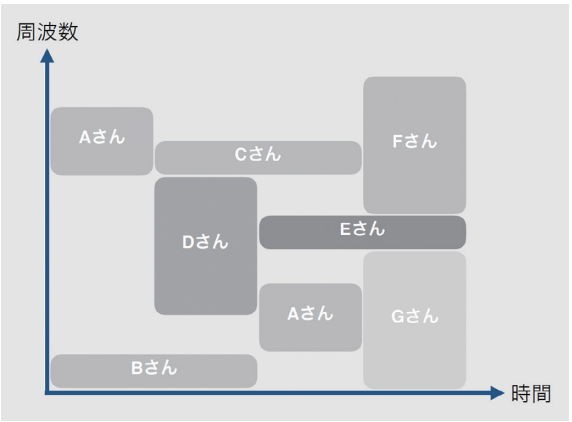


図19　チャネル割り当ての概念

同じ周波数を同時に使っていると，互いに干渉が起きてしまいます．そのため，複数のユーザが使う場合には，異なる周波数や時間を使用する必要があります．これを「チャネル割り当て」と言います．

このスライドで言うと（図19），横軸が時間，縦軸が周波数で，例えばAさんはこの周波数，Bさんはこの周波数，CさんはAさんが使い終わった後に同じ部分の一部を使い，誰も使っていなかった部分にDさんが割り当てられる，またAさんが使おうと思ったら，今度はDさんの後の部分に割り当てられる，というように，同時にいろいろな人が使うために，時間と周波数が重ならないようにきちんと制御しているのが，いわゆるインフラ系の通信システムです．

4.2 広いエリアをカバーするためのセルラ方式

電波の良いところは，遠くまで届くことです．そういう意味では，例えばバスやタクシー，あるいは防災用の業務無線で使われるMCA（Multi-Channel Access: マルチチャネルアクセス）は，一つの基地局でカバーするサービスエリアは数十kmです．それから久保田先生がお話になっていた衛星通信だと（久保田 2017），小さいものでは数100kmぐらいのスポットで，大きいものだと日本全土以上をカバーします．

ただし，この広いエリアを一つの基地局でカバーすると問題が出てきます．基地局が持っているチャネル割り当てのリソースは有限なので，そのエリアにユーザが大勢いると，割り当てるリソースに限界が出てしまうのです．

皆さんが使っている携帯電話はなぜセルラと呼ばれるのでしょう．実は，細胞のようにこのエリア内に隈なく並べているからです．あるセルで使っている周波数を他のセルでも繰り返し使うと，リソースを，すなわち，単位面積当たりのユーザ数を増加させることができます．例えば一つの基

地局で100チャネル使えるとしたら，基地局数が1万局あると全部で100万チャネル存在することになります．このようにしてセルラは同時多数の通話・パケット送受信を可能にしています．

4.3 干渉しないように個々が判断する無線LAN

このように，基地局が神様のようにリソースを制御する方法もあれば，無線LANのように違う方法もあります．皆さんがご家庭で無線LANを使っている時に，隣の家の無線LANのチャネルが見えることがあるように，意外とエリアが重なっています．干渉を起こさないようにするためには，皆さんが自分の努力でチャネルを変えるか，あるいはアクセスポイントが自動的にチャネルを変えるかです．おすすめは，2.4GHzだと1，6，11のように，なるべく離れたものを使うことです．基地局間で周波数を変えて，あとは同じ基地局，アクセスポイントの中で複数のユーザがいると，これが今度は互いに干渉する可能性があります．その場合には，アクセスポイントで干渉しないようにします（図20）．

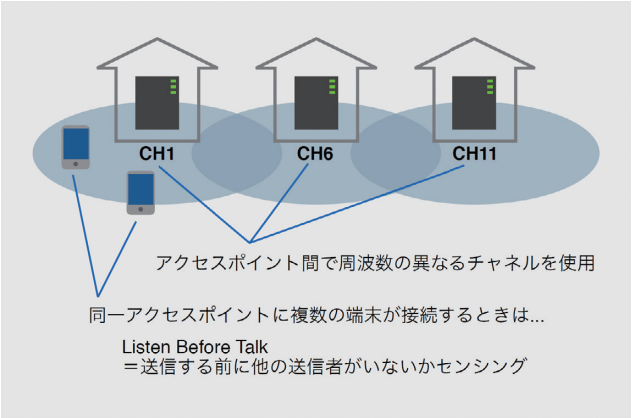


図20　誰でも設置できる無線LANのリソース

アクセスポイントは，送信する前に他の送信者がいないかということをセンシングして，誰もいなかったらパケットを送信するという形でシステムが成り立っています．（Listen Before Talkと呼ばれる．）このように，インフラ系とは異なり，互いに自分の努力で干渉しないようにするというシステムもあるのです．

4.4 これからの無線方式

これからの無線通信はどうなるでしょう．第5世代携帯電話とIoT（Internet of Things：もののインターネット）の二つが，おそらく大きなキーワードになると思います．今みなさんのトラフィック量がひと月に1ギガで済んでいる人はおそらく少なくて，3ギガとか5ギガくらいにどんどん増えていると思います．こういう人たちが将来困らずに利用できるよう，第5世代携帯電話を2020年頃からスタートさせるべく，各国でいろいろなシステムを検討しています．第5世代携帯電話の想定最大レートは10Gbpsと非常に速いものです．これを支えるのが大規模MIMO（multiple-input and multiple-output）といって，さきほども言ったようにアンテナをたくさん用意することで，信号を遠くまで届けるシステムを使います．ここでお話ししたいのは，大規模MIMOでたくさんのユーザを同時に収容する，マルチユーザMIMOという技術です．そのマルチユーザMIMOの中で今注目されている一つが，非線形送信プリコーディング，つまり事前に少し信号を変えて送るもので，中でもTHPという手法がよく知られています．このTHPはTomlinson-Harashima Precodingの略称で，実は次の御講演でお話になる原島先生が45年ほど前に開発，発明された方式なのです（Harashima & Miyahara 1972）．それが45年後の今，世界でも注目されて実用化が検討されています．原島先生は，私たちの分野でも非常に有名な方なのです．

一方，IoTはもの同士が少ない情報（温度などの環境データ，電力・ガスなどの使用量，人の感知など）をやり取りするものです．情報量が少ないため少ない電力で通信でき，電池でも10年も

の寿命があるものも想定されています．別名，D2DやM2M[2]とも呼ばれています．これらの場合には必ず「D2Dコミュニケーション」や「M2Mコミュニケーション」のように，「コミュニケーション」という言葉が後に続きますが，IoTはIoTだけです．ものが通信をするのはわかりますけれども，コミュニケーションという日本語が本当にコミュニケーションと言って良いかどうか，ちょっと私にはよく分かりません．ともかく，このように，人以外のものがデータを発信するIoTは，今流行りのキーワードです．

5. わかりやすさと厳密さは両立するのか

以上，非常に駆け足で無線通信の仕組みを簡単に説明しました．何となく分かったような気になれば幸いです．しかし，注意して欲しいことが一つあります．分かりやすさを追求することと，厳密さを両立せることが，私にはできなかったということです．実は今日のお話の中には，嘘とは言いませんけれども，厳密さに欠けて，「これで本当に説明合っているのか？」という苦言を呈されてもおかしくない部分があるのです．そのような不正確さをはらんだ説明になっていることが，わかりやすさを追求したお話の怖いところです．

わかりやすさを追求するあまり何かを省いてしまい，かえって間違った情報を伝える恐れがあることを，科学技術コミュニケーターの皆さんに考えてもらえたら良いなと思います．下駄を預けてしまって申し訳ありませんが、ぜひ良い方法を考えてくれればと思います．以上，どうもありがとうございました．

注

1) 表面にある金色の部分ひとつひとつがアンテナであり，それを複数ならべることでより強い信号を送受信することができる．三菱電機ホームページ「5G基地局向け超多素子アンテナシステム技術」より引用．http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a31/index.html（2017年5月12日閲覧）．

2) D2Dとは "Device to Device" の略. M2Mは "Machine to Machine" の略. どちらも人間を介さずに機械（もの）同士が通信すること．

●文献：

Harashima, H. and Miyakawa, H. 1972: "Matched-Transmission Technique for Channels with Intersymbol Interference", *IEEE Transactions on Communications,* 20（4）, 774-780.

原島博 2017:「電波と私～それはどう関わってきたのか？　これからどう関わるのか？～」『科学技術コミュニケーション』21, 129-137.

久保田晃弘 2017:「宇宙からの芸術」『科学技術コミュニケーション』21, 111-118.