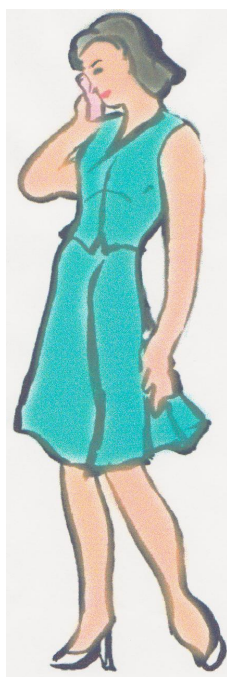


# LTE・LTE-Aの基礎

OFDMとMIMOを中心に



2014年7月  
株式会社 A2A研究所

# 目次

## 1 概要

- (1) 急増するモバイルデータ通信
- (2) 世界の携帯加入契約数
- (3) M2M
- (4) LTEとは
- (5) 3GPPでの標準化
- (6) LTEの無線周波数
- (7) LTEの主要技術
- (8) 無線リンクの主要パラメータ
- (9) OFDM
- (10) サブキャリア変調方式
- (11) ユーザ端末のカテゴリ
- (12) MIMOアンテナ
- (13) 無線アクセスネットワークの構成
- (14) LTE-Aの主要技術
- (15) キャリア・アグリゲーション
- (16) LTE-AでのUEカテゴリー
- (17) ヘテロジニアス・ネットワーク
- (18) 基地局間協調
- (19) 第5世代

## 参考

- (1) 変調波の複素表現
- (2) OFDM信号の複素表現
- (3) 高速フーリエ変換

## 2 無線方式

- (1) OFDM
- (2) FDDフレーム構造

- (3) リソースブロック
- (4) ガードインターバル
- (5) OFDMの処理
- (6) PARR
- (7) SC-OFDMの処理
- (8) スケジューリングとリンクアダプテーション
- (9) 物理レイヤー信号
- (10) 下りリファレンス信号の構成
- (11) LTEの物理チャネル
- (12) 下り回線のフレーム構成
- (13) 非同期ランダムアクセスチャネル
- (14) TDDフレーム構造

## 3 アンテナ方式

- (1) 複数アンテナの方式
- (2) ビームフォーミング
- (3) シャノンの定理
- (4) 伝送路の複数化
- (5) チャネル行列
- (6) チャネル行列の分解
- (7) 閉ループMIMO制御
- (8) LTEでのプリコーディング
- (9) コードワード
- (10) UE Specific RS
- (11) アンテナ伝送モード
- (12) UEからの返送パラメータ
- (13) マルチユーザMIMO



## 1. 概要

### (1) 急増するモバイルデータ通信

#### データ通信量は年2倍、10年で千倍に増加見込み

2000年代に入ってから、携帯電話はもはや、単なる「電話」でなく、電子メールやチャット、WEBアクセスなどのデータ通信中心のガジェット端末に。

通信量では、情報量の多い映像のストリーミングやダウンロードの増加が著しい。標準品質(SD)だけでなく、ハイビジョン品質(HD)が多くなったが、近年、更に高精細な4Kビデオも登場している。

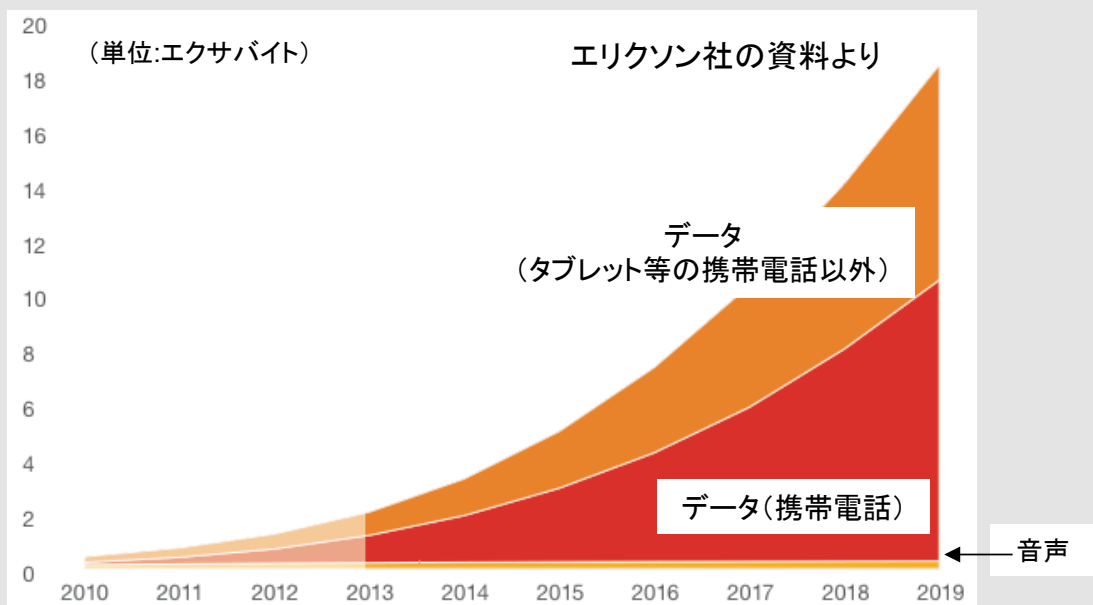
スマートフォンに加えて、タブレットやPCなど携帯電話以外のモバイル端末の普及がデータトラフィックの増加に拍車をかけている。

データトラフィックの爆発は、一歩先を行く米国、日韓の後を追った世界の潮流になっている。

世界全体のトラフィックの年平均増加率は約2倍と見込まれており、月間では、エクサ(10の18乗)バイトの時代に突入している。

【参考】 ギガ(10の9乗)、テラ(10の12乗)、ペタ(10の15乗)

#### 世界全体の月間モバイルトラフィック



タブレット等の携帯電話以外からのデータ通信が急増している。



## 1. 概要

### (2) 世界の携帯加入契約数

#### 2019年にはLTEが3割近くに

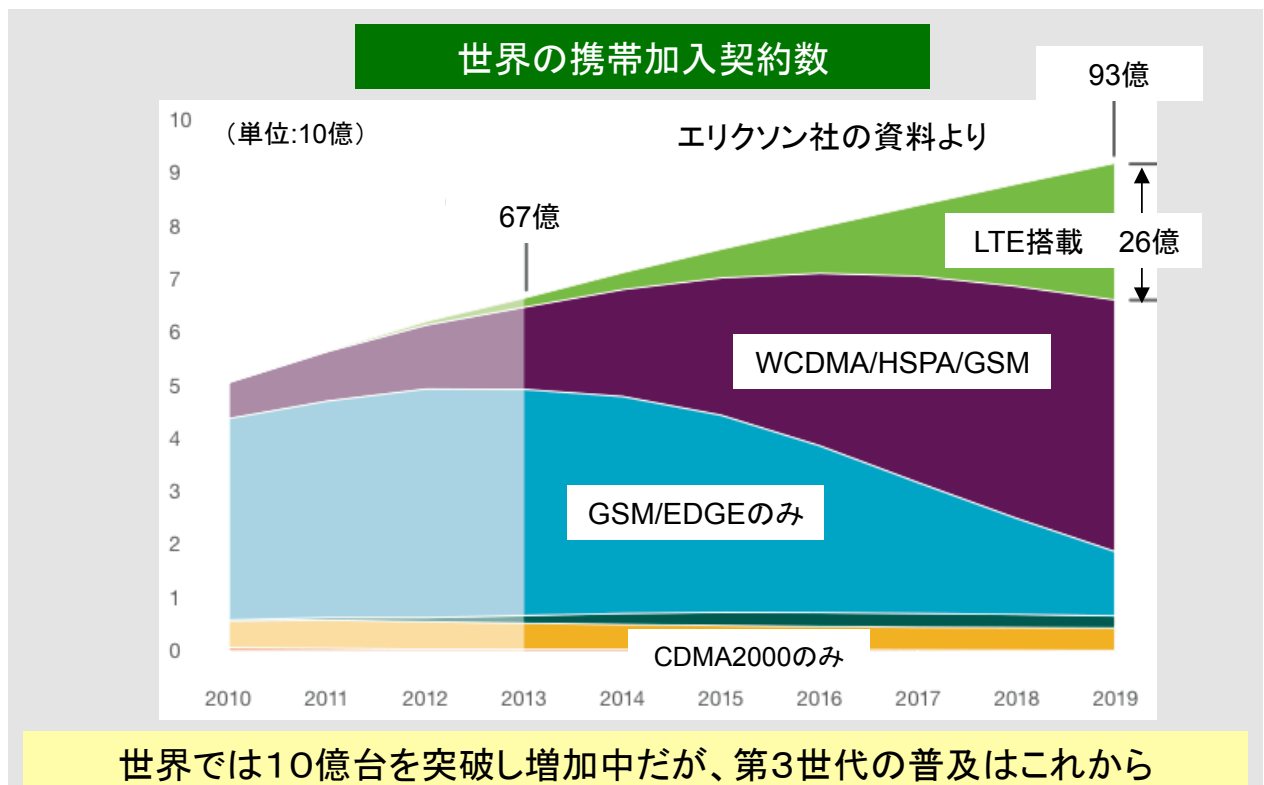
エリクソン社による調査によれば、世界の携帯電話の加入契約数は2013年の67億から、2019年には93億に増加する見込みである。

一人で複数端末を契約する場合を含めた数値であるものの、数のうえでは、世界の総人口とほぼ同じになる。この増加には人口の多いアジア・アフリカ諸国での普及拡大が大きい。

端末方式別に見ると、第2世代のGSMが依然として多数を占めており、2013年時点でも3台のうち2台はGSM端末であるが、最近、減少に転じており、今後は第3世代やLTE端末の普及が急速に進むとみられている。

2019年には、日米等の先進国ではLTEが大半となり、世界全体のLTE契約数は26億件と全体の3割近くに達する見込みである。

以下では、端末をUE (User Equipment) と称している。



### 数では、人間以外の利用が急増する見込み

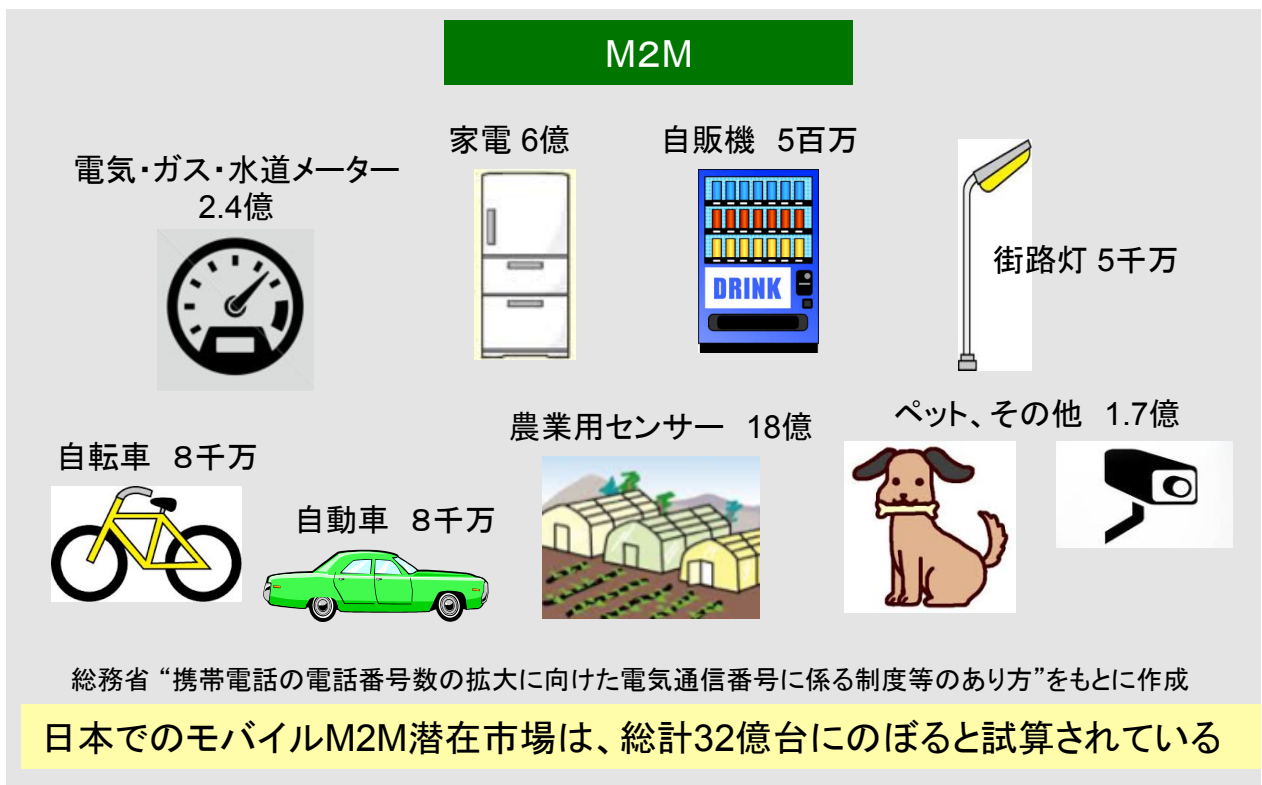
人間でなくモノや機械がネットにつながるのがM2M(Machine to Machine)であり、世界全体では数百億台の潜在需要がある。

各種センサーが収集した各種機械の稼働状況、気象などの環境の測定データを無線送信し、受信側も自動で情報処理、あるいは遠方からの指令により自動的な制御を行う。

自動車では、地図や渋滞情報、エンジン等の稼働状況レポートなど。スマートメーターでは、電力量などの自動計測結果を、需要に応じた柔軟な料金設定や、利用ピーク時の電力節約制御に使うことで、エネルギー消費の削減に。

農業では作物の生育状況や水や肥料の監視制御による効率化や生産量の増加により、人類の最大課題の一つである食料増産に。

M2M装置ではコストや消費電力の低減や、標準化・共通化が鍵である。M2Mの類義語にはIoT(Internet of Things)がある。





## 1. 概要

### (4) LTEとは

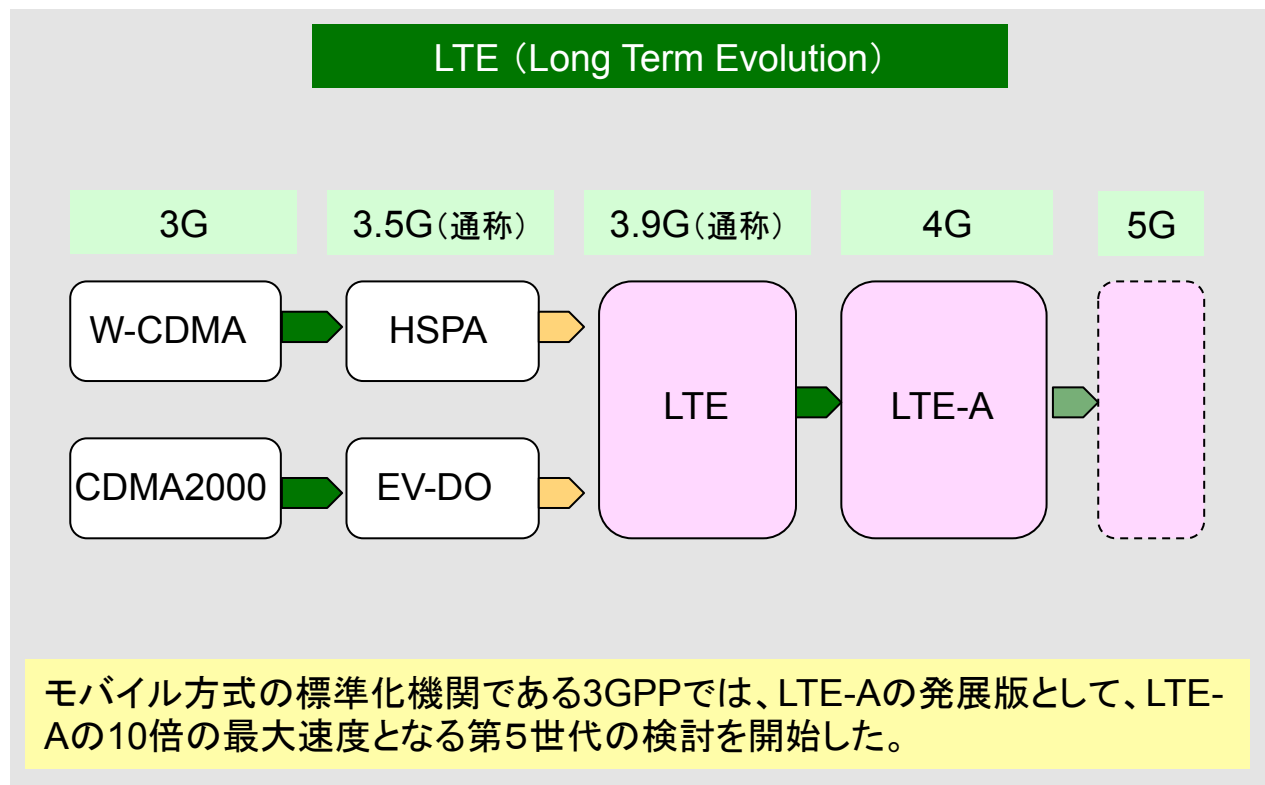
#### 次世代携帯電話の統一世界標準に

LTE (Long Term Evolution)はW-CDMAの後継方式として、下り100Mbps, 上り50Mbpsの高速化を図る方式として3GPPが定めた規格である。無線区間では、下りにOFDMが採用されるなどにより、3G(W-CDMA)や3.5G(HSPA)方式とは互換性がない。

第3世代ではCDMA2000方式を採用した事業者もLTEを導入しているため、世界統一規格になっている。

LTEと互換性をもち、高速化させたものがLTE-Advancedであり、ITUが第4世代と定義した、低速移動時(歩行中)に最大で下り1Gbps, 上り500Mbpsの通信が可能になる。

LTEのネットワークは、無線とコアネットワークを含め全てIPパケット伝送するオールIP方式である。網構成をシンプルにすることで、パケットの遅延時間の大幅な短縮を図っている。





## 1. 概要

### (5) 3GPPでの標準化

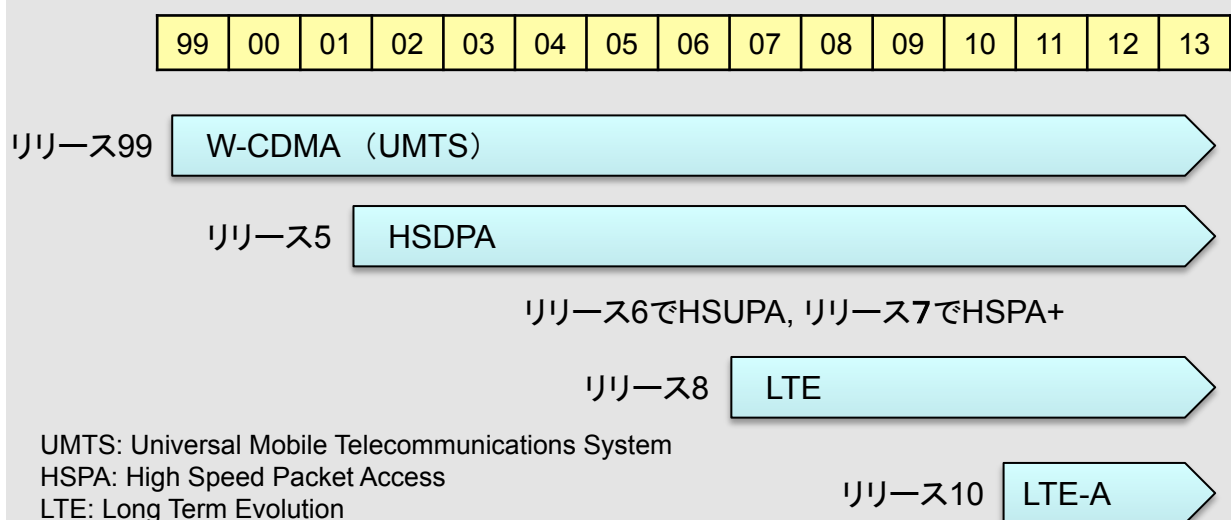
#### LTEはリリース8, LTE-Aはリリース10で確定

LTE, LTE-Aは、第3世代用にWCDMA方式を標準化したグループ3GPP (3rd Generation Partnership Project) が、その後継方式として定めたものであり、このうち、LTEは2007年に規格文書がリリース8として確定した。リリース9ではリリース8の一部機能についての拡張が行われた。

その後、キャリア・アグリゲーションやMIMO等について大幅な拡張が行われたリリース10は、LTE-Advancedとして2010年に確定した。

なお、第3世代用に、1999年に発表されたWCDMA (別名:UMTS) 規格は、1999年に凍結されたため、リリース99と呼ばれている。その後、WCDMA互換のデータ高速化方式(HSPA)が、リリース5～7にて標準化されている。

#### 3GPPでの規格策定の歴史



3GPPによる公開文書シリーズ番号を用いて、LTE規格はリリース8, LTE-Aはリリース10と呼ばれる。



# 1. 概要

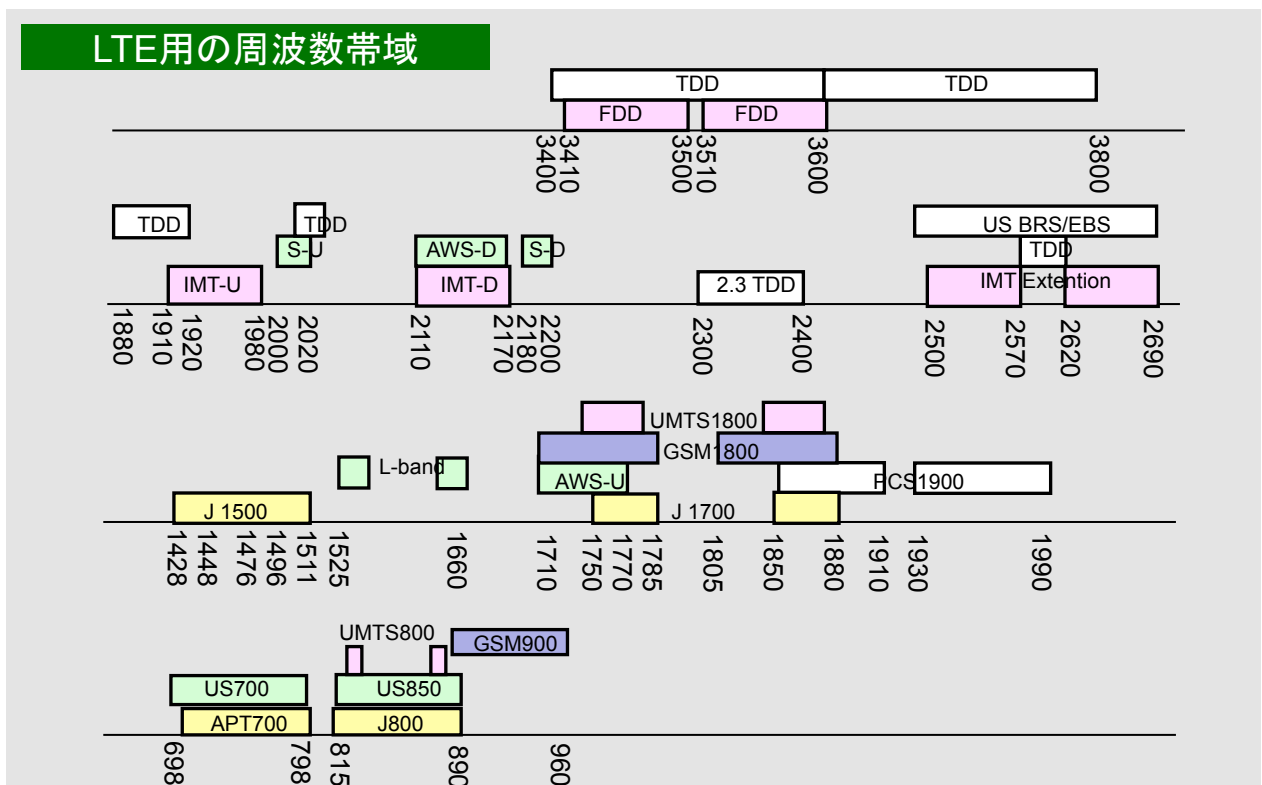
## (6) LTE用の無線周波数

### 高い周波数で、より広い帯域が利用可能に

LTE, LTE-Aに使用できる周波数帯は、3GPPにて指定されている。LTEでは、従来方式からの置換が円滑に進められるように、第2、第3世代が使用している帯域をLTEでも使用できるよう配慮されている。

また、新たな周波数帯として、地上TV放送のデジタル化完了後の空き地や、2.3GHzや2.5GHz帯などを利用できるようにしている。加えて、更なる高速通信需要に応えるため、より高い周波数である3.4~3.8GHzの合計400MHzもの広い帯域が使用できるようになる見込みである。

なお、大半の周波数帯は上下方向をペアで割り当てるFDDであるが、一部の帯域において、1つの連続する帯域を時間で区切って上下方向に使用するTDD用の帯域も指定されている。



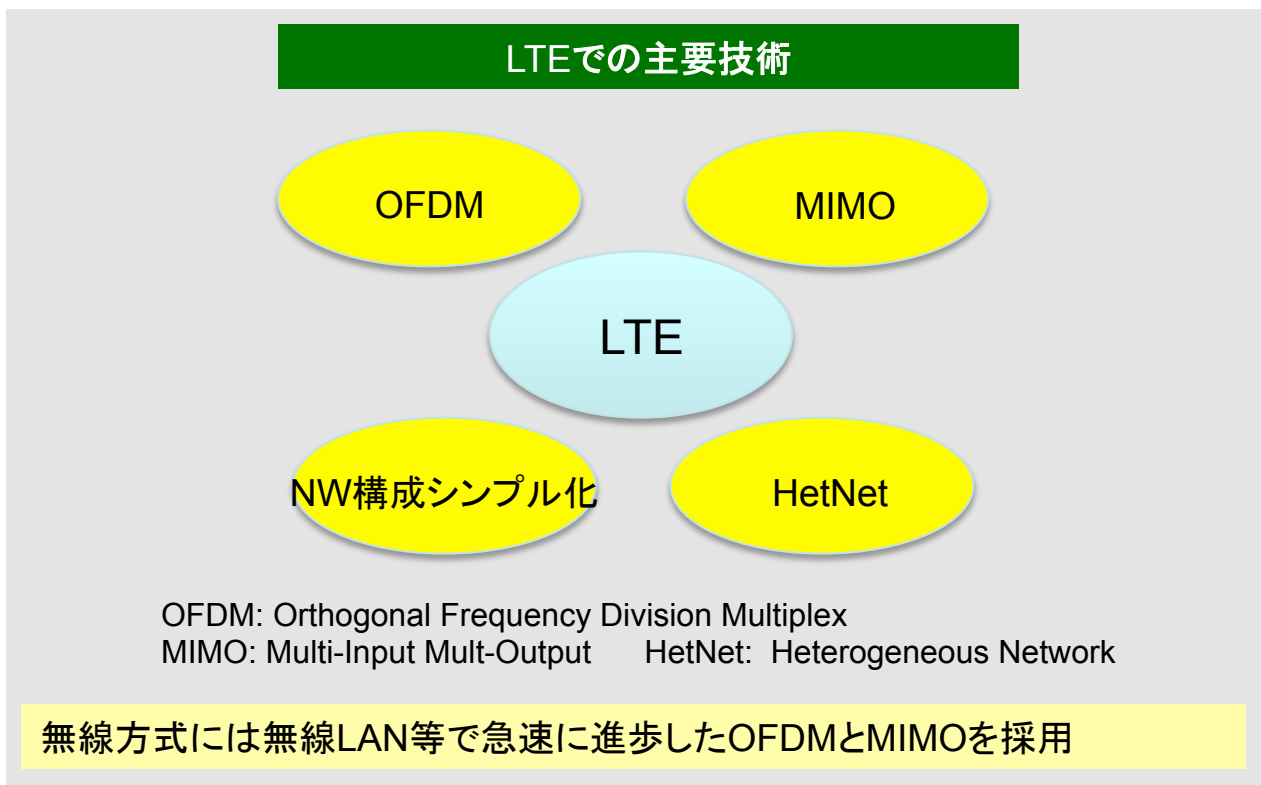


### データ通信の高速化に対応

第3世代では、データ通信の高速化のため、互換性を考慮してHSPAやEV-DOが導入され広く使用されているが、データトラフィックの急増に対処するため、LTEでは、第3世代とは互換性のない新方式が導入された。

LTEの無線方式では、デジタル信号処理の進歩をベースに無線LANや地上デジタルTV等で普及が進んだOFDMを採用するとともに、MIMOアンテナを組み合わせることで、周波数利用効率(1Hzあたりの伝送速度)を高めつつ、10MHzを超える広い帯域に順次拡張できるスケーラビリティを確保している。

また、基地局側設備をオールIP型のシンプルなネットワーク構成とすることで、網内遅延時間を大幅短縮するとともに、セルサイズや方式の異なる基地局を並行運用することで、ネットワーク全体の容量増加とユーザ使い勝手の向上を図っている。





## 1. 概要

### (8) 無線リンクの主要パラメータ

#### OFDMサブキャリア間隔は15kHz

LTEでのOFDMでは、サブキャリア間隔を15kHzとしている。一方、同じOFDMを使用する地デジ放送ではサブキャリア間隔は約1kHzである。

サブキャリア間隔を狭くすると、シンボル長が長くなるため、マルチパスによる干渉に強くなるが、送信周波数の安定度や、サブキャリア数増加に伴う信号処理遅延などが問題になる。

そこで、端末送信のない地デジ放送では、サブキャリア間隔を極力狭くすることで、サービスエリアが広いことによる遅延時間の長い干渉雑音に対処できるようにしている。

一方、双方向伝送であり、高速移動もあるLTEでは、UE送信周波数の安定度やドップラーシフト等も考慮して、これを15kHzとしている。また、UEのピーク送信電力低減のため、シングルキャリア(SC)方式のOFDMAを採用している。

#### LTEの無線方式と主要パラメータ

変調・アクセス方式	上り SC-OFDMA 下り OFDM
帯域幅	1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz
最小TTI	1ms
サブキャリア周波数間隔	15kHz
サイクリック・プレフィクス長	4.7 $\mu$ s(第1シンボルのみ5.2 $\mu$ s), 又は 16.7 $\mu$ s (注)
サブキャリア変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM

TTI: Transmission Time Interval      注) 16.7 $\mu$ sは広いセルエリアを用いるMBMS用

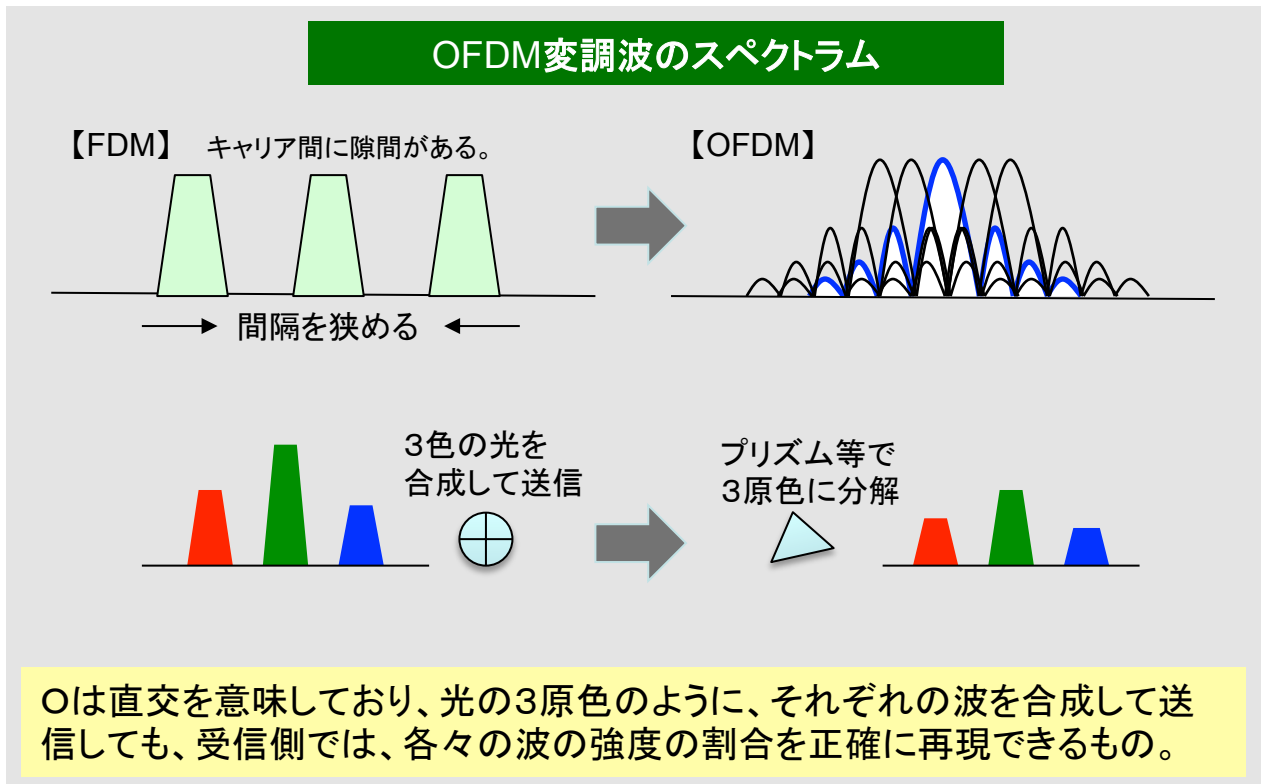
LTE(リリース8)では、1キャリア帯域幅を最大20MHzとしている。

サブキャリア同士が直交するとは？

OFDMのうち、FDMはFrequency Division Multiplex, 周波数多重であり、周波数が異なる電波(キャリア)に別々の信号を乗せて(変調して)同時送信しても、受信側では帯域フィルタ等により個々のキャリアを分離できるので、元の信号を復元(復調)できるという方式である。しかし、隣接キャリアから雑音が漏れこまないように、一定の隙間(ガードバンド)が必要があり、また、装置が複雑となる欠点があった。

これをFFTというデジタル信号処理技術により一挙解決したのが、OFDMであり、キャリア相互を互いに重複するまで狭めている。ここで、OはOrthogonal、「直交」であり、互いに独立しているので、合成しても混じり合うことなく、正確に元の信号を復元できることを言う。

この直交性は、例えば、光の3原色でとらえることができる。赤、緑、青の3原色のそれぞれの強さを変えた光を混合して遠方に送信した時、受信側では、この光をプリズムなどにより分解すると、赤、緑、青の光の強さ(の割合)を完全に再現できるだろう。



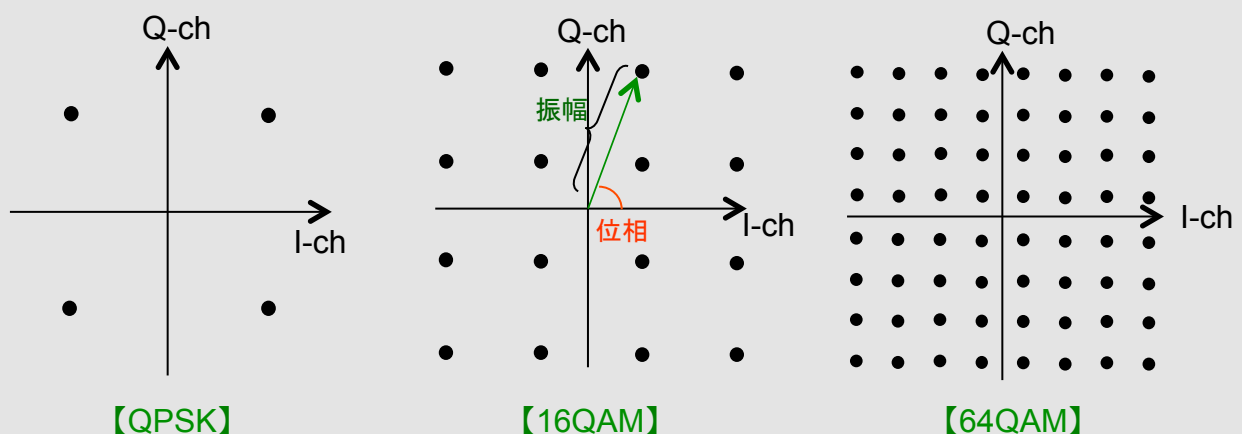
**QPSK, 16QAM, 64QAM**

LTEの各サブキャリアに情報を乗せるための変調方式として、下り回線(基地局→UE)では、QPSK, 16QAM, 64QAMのいずれかが、送信機出力の点で下り回線より条件が厳しい上り回線(UE→基地局)では、QPSK, 16QAMのいずれかが回線品質に応じて選択される。

各サブキャリアの信号点の振幅と位相(基準キャリア位相との相対値)を平面座標にて示すコンステレーション(星状配置)では、QPSK, 16QAM, 64QAMでは、 $4(2^2)$ 個、 $16(2^4)$ 個、 $64(2^6)$ 個の信号点をもつため、1シンボルあたり、2, 4, 6ビットを伝送できることになる。

LTEでは、受信S/Nが絶えず変化するため、基地局は回線品質の測定(下り回線の受信品質はUEからの報告)により、1ミリ秒の時間間隔(1TTI)で変調方式を変更できるようにしている。

**各サブキャリアのコンステレーション**



各サブキャリアは、伝搬路の状況に応じて下り回線は64QAMまで、上り回線は16QPSKまで。(LTE-Aでは上り回線も64QAMまで)



## 1. 概要

### (11) ユーザ端末のカテゴリ

#### 当初のLTE端末の大半はカテゴリ3

LTE (リリース8)では、異なった特性・能力を持つ5種類の端末(UE: User Equipment)カテゴリを定めている。

5つのカテゴリの最大無線帯域幅はいずれも20MHzに対応可能としているが、最大伝送速度はMIMO能力の差などにより異なっている。カテゴリ1はMIMOをサポートしていないが、カテゴリ2~4は2x2MIMO, カテゴリ5は4x4MIMOをサポートする。ただし、LTEでのMIMOは、下り回線のみ適用される。

ここで、最大伝送速度は20MHz帯域を使用した場合の理論上の数値であり、利用できる帯域幅や無線環境・トラフィック負荷により異なる。

当初、市場投入された端末はカテゴリ3が多いが、2014年時点ではカテゴリ4端末も各社から登場している。

#### LTE (リリース8)でのUE能力 (カテゴリ)

カテゴリ		1	2	3	4	5
最大伝送速度 (Mbit/s)	下り	10	50	100	150	300
	上り	5	25	50	50	75
(最大)無線帯域幅		20MHz				
サブキャリア変調方式	下り	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	上り	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
MIMO		なし	2x2		4x4	

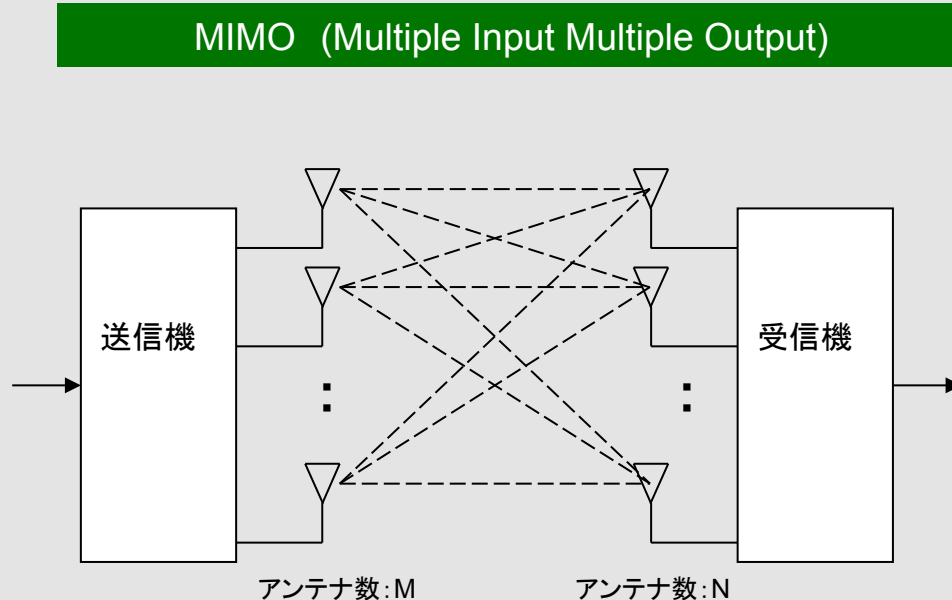
現在、市場で多いUEはカテゴリであるが、カテゴリ4も登場している。

## 送受ともに複数アンテナを用いる

MIMOは送信側と受信側のそれぞれに、複数のアンテナと送受信回路を備えたものであり、各アンテナ間のチャネル状態(利得と相対位相)を知ることによって複数の独立した伝送路を作り、高速化する(空間多重)技術である。

MIMOでは、同時伝送できる最大ストリーム(レイヤー)数は、送受信アンテナの数のうち少ない方に等しい。例えば、MIMOを利用しない場合の通信速度を50Mbpsとすると、送信が3素子、受信2素子のMIMO利用では最大100Mbpsとなる。

ただし、MIMOの各ストリームのS/Nは単一アンテナでのS/Nより悪くなる。そこで、電波状態が悪い場合には、アンテナダイバーシティやビームフォーミングの方が勝るため、MIMOとこれらの技術とを電波状態により切り替えて使うのがいい。



管路を並列あるいは対角線上に並べて水を送るようなもの。独立した伝送路数は送信、受信側アンテナ数の小さい数となる。

### フラットな構成により遅延時間を大幅短縮

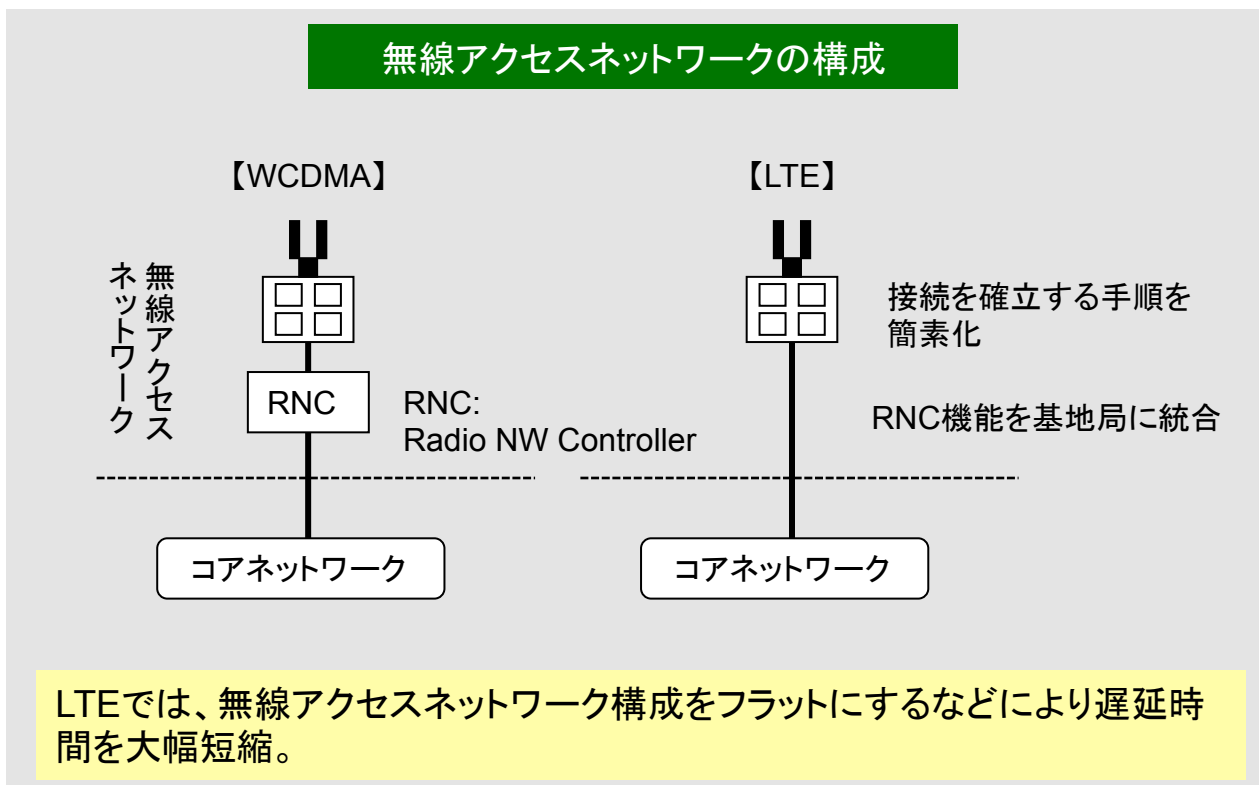
第3世代システムでは、パケット通信方式のデータ回線と回線交換方式の電話回線の両者を扱う必要があったが、LTEでは音声もVoIP方式での伝送を前提とすることでオールIP方式としている。

そこで、LTEでは、データ回線の高速化を達成するために、通信手順(プロトコル)や基地局側の装置構成を簡素化している。

このうち、無線区間では、回線が設定されるまでの通信手順が簡素化されている。

また、ハンドオーバーの制御などのために第3世代では基地局設備と別に置いていたRNC装置の機能を基地局設備に統合することで、経路する装置数を減らしている。

これらによって、基地局UEのIP層間における片方向伝送遅延時間は5ミリ秒、待機状態にあるUEがアクティブ状態に遷移するまでの時間は100ミリ秒未満と第3世代に比べて大幅に短縮されている。

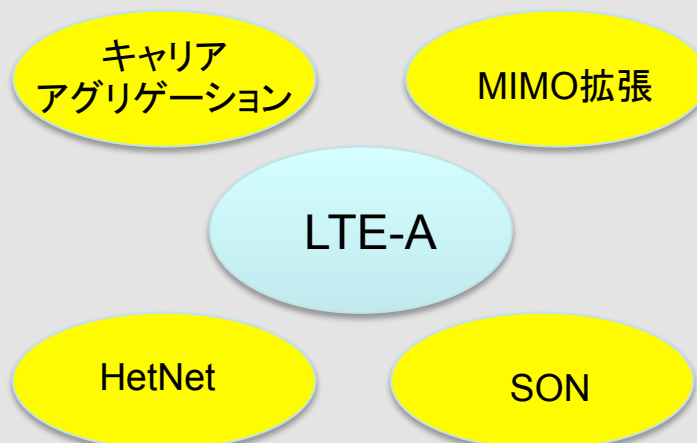


### データ通信の高速化を低コストで

LTE-Aでは、LTEとの互換性を維持しながら、高速化を図るためにキャリアアグリゲーションやMIMO拡張を行うほか、次のようなネットワーク技術を導入することで、ネットワーク全体の容量増加や運用の自動化などによるコスト削減を図っている。

- ・ 設備構成の単純化などによるネットワーク内遅延時間の短縮
- ・ フェムトセル、ピコセル、WiFi等との混在(HetNet)によるトラフィックオフロード
- ・ 隣接セル間での情報交換(協調)による通信品質や容量の最適化
- ・ 上記を含め、種々のパラメータを自律的に調整したり、障害検出して網機能を自動復旧するなど、ネットワークの設置や運用作業の自動化や省力化を行うSON(Self Organized Network)

### LTE-Aでの主要技術



LTE-Advancedでは、LTEとの互換性を維持しながら、個々のUEでの高速化とネットワークの最適化や運用省力化を図っている。



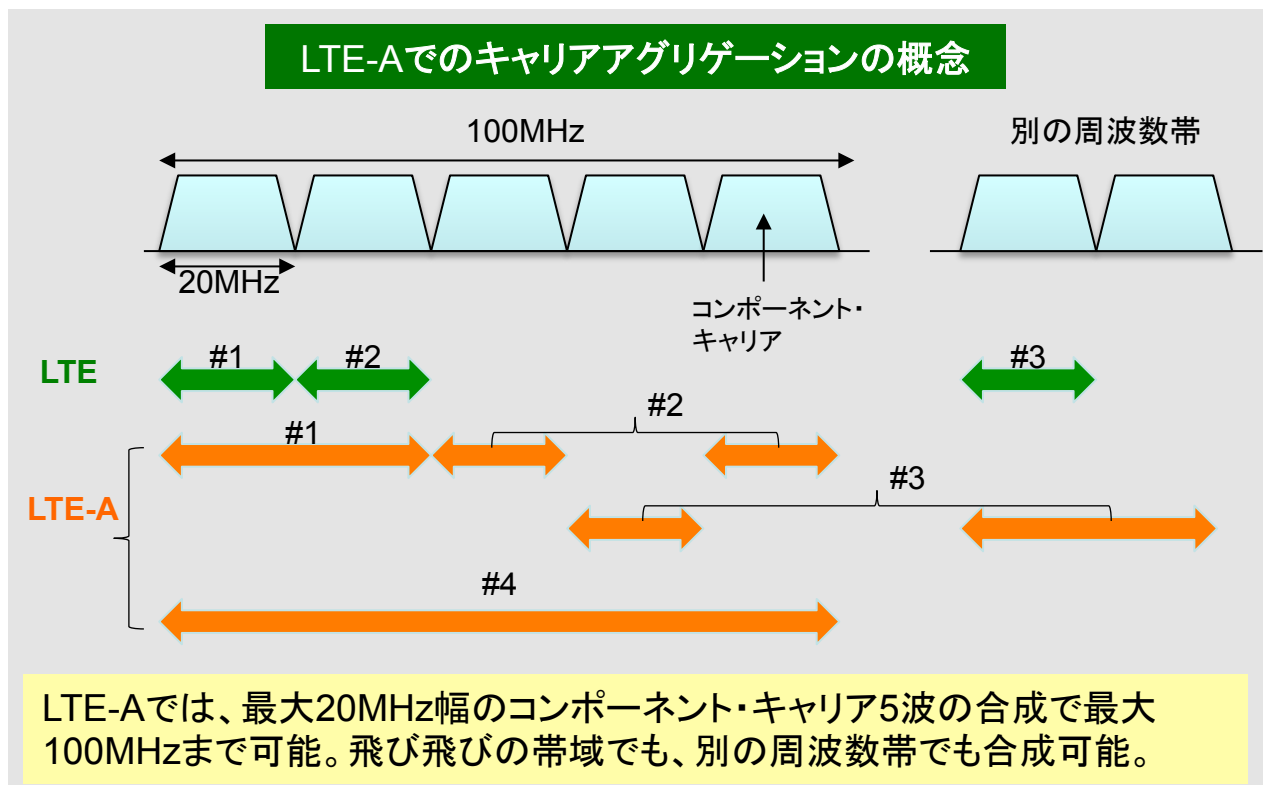
### 異なる周波数帯との組合せも可能に

LTEでは、1つのUEが送受信できるキャリアは、最大帯域幅20MHzの1波のみであったが、LTE-Aでは、キャリアアグリゲーション(CA)により、最大5波までを合成できるようにしている。(ただし、初期は2波まで)

CAは、隣接するキャリア同士だけでなく、隣接しない帯域同士を合成したり、2GHz帯と800MHz帯というように、異なる周波数帯の間での合成も可能としている。

20MHz帯以上を連続して保有する通信事業者は限られる一方で、都市部等では、複数の周波数帯を使用できる場合が多いので、CAを用いることで、高速サービスを提供するとともに、複数周波数帯の利用効率に差がある場合には、これを平準化する効果も期待できる。

UE側では、送受信ユニットが複数台必要になり、異なる周波数帯との組合せパターンが増加するため、装置設計が複雑になる。





## 1. 概要

### (16) LTE-AでのUEカテゴリ

#### カテゴリ8では下りで最大1Gbpsを超える能力に

LTE-Advancedでは、LTE機能の拡張により、更なる高速化が図られており、それに対応したUEカテゴリが定められた。特に、キャリアアグリゲーション(CA)の適用とMIMOの拡張が特徴である。

LTEでは無線帯域幅が最大20MHzとしているが、LTE-Aでは、20MHz幅のキャリアを複数(カテゴリ6,7では2波、カテゴリ8では5波まで)束ねるCAを規定している。

一方、MIMOについては、LTEでは下り回線のみ適用であったが、LTE-Aではカテゴリ7以上にて、上り回線にも適用する。

カテゴリ8の下り回線では、帯域幅100MHzと8x8MIMOの適用によって、ITUが第4世代システムの要求条件としていた、下り1Gbps, 上り500Mbpsの最大伝送速度を達成できる。

#### LTE-A(リリース10)でのUEカテゴリ

カテゴリ		6	7	8
最大伝送速度 (Mbit/s)	下り	300	300	1200
	上り	50	150	600
(最大)無線帯域幅		40MHz	40MHz	100MHz
サブキャリア 変調方式	下り	QPSK, 16QAM, 64QAM		
	上り	QPSK, 16QAM		QPSK, 16QAM, 64QAM
MIMO	下り	2x2(CA)又は4x4		8x8
	上り	なし	2x2	4x4

LTE-AはCAによる帯域幅拡張とMIMOの適用によって高速化している。

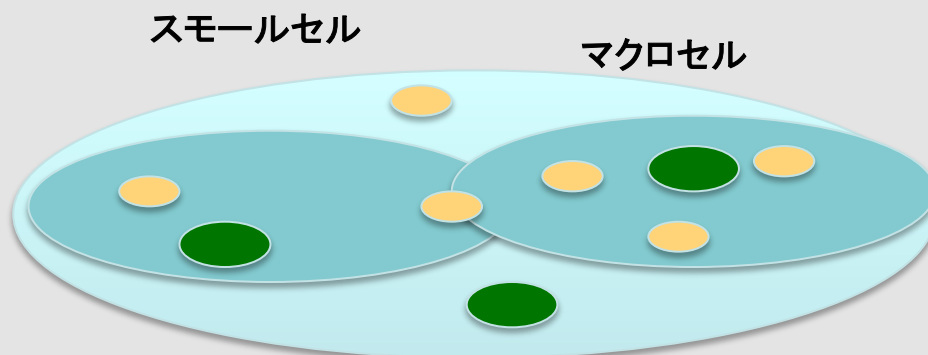
## 大きさを方式が異なるセルを混在

ヘテロジーニヤスは「異種」を意味し、大きさを方式が異なるセルが混在できるようにする技術である。それぞれのセルやシステムを協調動作させることで、全体の通信容量を大幅に増加させることができる。HetNetでは、通信需要の多いエリアに、ピコセルやフェムトセルなどの小型基地局を、マクロセルの上に重ねて設置する。更に、3GとLTEのように異なる世代の方式や、Wi-Fiによるオフロードも行われている。

その際には、セル相互間の干渉が大きな問題となる。

方式が異なるセル間ハンドオーバーがうまくいかないと、通信容量の増加ができないばかりか、ユーザにとって使い勝手が悪くなってしまう。そこで、セル間で情報交換することで干渉を低減させるとともに、スモールセルエリア内では、そちらにトラフィックを誘導できるようにする。LTEでは、このセル間協調によるネットワーク最適化技術が進化を続けている。

## HetNetの概念

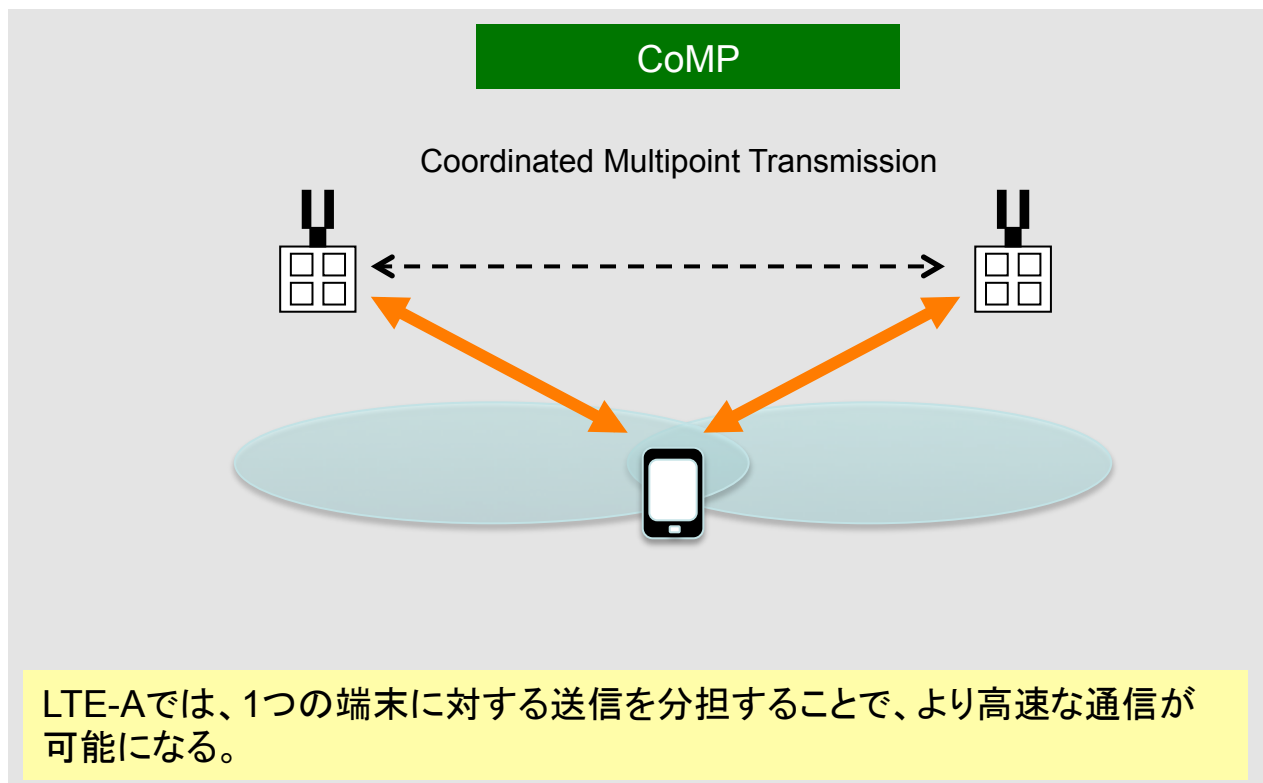


異なるセルの混成は従来から行われているが、システム容量を大幅拡大するために、ますます重要となっている。

## 同時に複数の基地局を経由する通信も可能に

互いに直交するサブキャリアによるOFDM方式であるLTEでは、マルチパスフェージングに強いため、隣接セルにて同一周波数を使うことができる。しかし、セル境界では、隣接セル間の干渉によって、通信速度が大きく低下してしまう。また、セル内でのUE数が大きく異なる時点では、一方のセルは混雑のためつながらないが、隣のセルには大きな空き容量があるというアンバランスが生じてしまう。

LTE-Advancedでは、隣接基地局間にて、UEとの通信品質などの情報をやりとりし、基地局送信電力やリソース割当てを調整することで、干渉回避などを行うCoMP (Coordinated Multipoint Transmission) が規定された。加えて、複数の基地局から同一のUEに同時に電波を送信したり、逆に、一つのUEから複数の基地局へ同時に送信することで高速通信が可能になる。



### 下り速度は最大1Gbit/sが目標

第4世代の10倍にあたる1Gbit/sの高速化を達成する第5世代方式の開発・検討が2020年頃の導入開始を目指して開始されている。そこでは、次のような技術が採用される見込みである。

#### 1. 高い周波数の利用

10GHzを超えるミリ波帯を利用して、LTE-Aの最大帯域幅(100MHz)の10倍にあたる1GHz幅までを確保する。

#### 2. 大容量MIMO

波長が短くなるためアンテナの小型化とMIMO数の増加が可能になる。基地局では、アレイを水平方向だけでなく、垂直方向にも並べた合計百個(10x10)のアンテナなどが検討されている。

#### 3. 小セル化

ピコセルやフェムトセルをオーバーレイしてシステム容量を増加する。

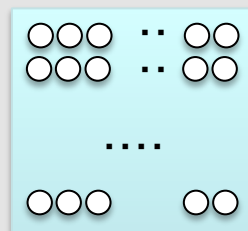
### 第5世代での主な技術

#### 【ミリ波帯の利用】



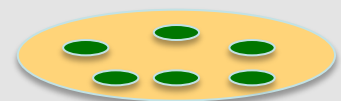
10GHz~20GHz帯の周波数を利用

#### 【大容量MIMO】



約100個のアンテナと無線機をもつ基地局

#### 【小セル・ピコセル】



HetNet, CoMPの高度化

第5世代では、広い帯域が確保できるミリ波を利用したキャリアアグリゲーション、MIMO、基地間協調技術の拡張が予想される。

位相回転は $e^{j\theta}$  で表される

シンボル点の振幅、位相を示すIQ平面にて、直交成分を表すQ軸を虚数軸とすることで、シンボル点の座標は次の複素数で表わされる。

$$Z = I + jQ = A \cos \theta + j A \sin \theta = A e^{j\theta}$$

Aは振幅、 $\theta$ は位相角である。jは $j^2 = -1$ となる虚数であり、これをiとしないのは、電気工学でiは専ら「電流」を表すので紛らわしいため。eは自然対数の底であるネイピア数(=2.718...)である。

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

は、オイラーの公式であり、 $e^{j\theta}$ の乗算は角度 $\theta$ の回転にあたる。

コンステレーションと複素表現

$Z = A \cos \theta + j A \sin \theta$   
 $= A e^{j\theta}$

入力  $A e^{j\theta}$  → 伝達関数  $H e^{j\phi}$  → 出力  $AH e^{j(\theta + \phi)}$

オイラーの公式にて、 $\theta = \pi$ として得られる  $e^{j\pi} + 1 = 0$  はオイラーの等式であり、「博士の愛した数式」(小川洋子著)にも登場する美しい数式。

伝達関数が $H e^{j\phi}$ の回路を通すとシンボル点の振幅はH倍になり、位相は $\phi$ の回転を受ける。

サブキャリアの直交性

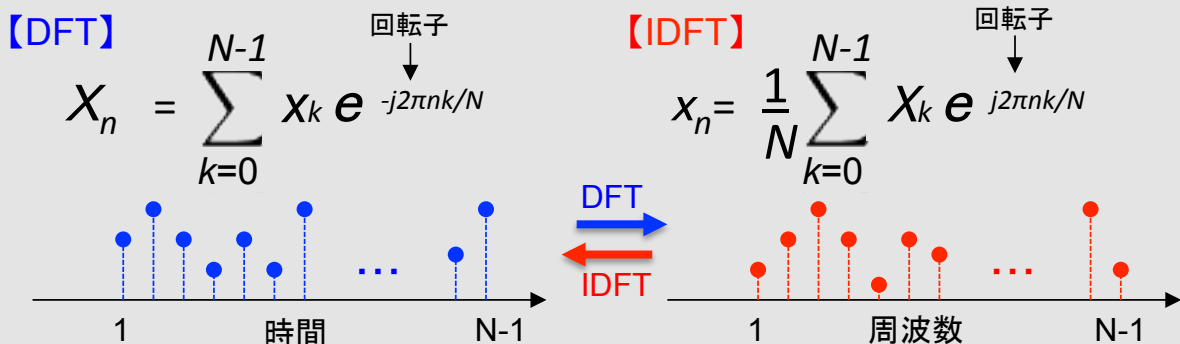
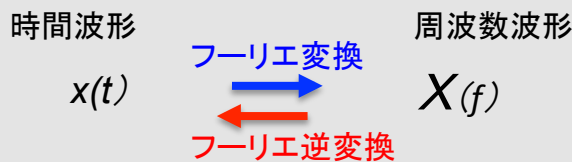
N個のサブキャリアを合成したOFDM信号を複素表現すると次のようになる。ここで、 $X_k$ は第kサブキャリアの変調シンボルである。

$$v(t) = \sum_{K=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k t/T}, \quad 0 \leq t < T$$

各サブキャリアの直交性は次式で示される。 $\delta_{k_1 k_2}$ は $k_1=k_2$ の時のみ1, それ以外は0となるクロネッカーのデルタである。

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T (e^{j2\pi k_1 t/T}) * (e^{j2\pi k_2 t/T}) dt &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi(k_1 - k_2) t/T} dt \\ &= \delta_{k_1 k_2} \end{aligned}$$

離散フーリエ変換(DFT)と逆変換(IDFT)



離散点でのフーリエ変換であるDFT(時間領域⇒周波数領域)とIDFT(周波数領域⇒時間領域)は回転子の符号を逆にすることで同様の計算になる。



## DFTでの掛け算回数を減らす

DFTを $W = e^{-j2\pi/N}$  (回転子)で表すと次式になる。 $W^N = 1$ である。

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi nk/N} = \sum_{k=0}^{N-1} x_k W^{nk} \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

上式を行列表現であらわすと次式になる。

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_n \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0 W^0 & \cdots & W^0 \\ W^0 W^1 & \cdots & W^{N-1} \\ \vdots & & \vdots \\ W^0 W^n & \cdots & W^{n(N-1)} \\ \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ \vdots \end{pmatrix}$$

以下では $N=4$ の場合について  
 $W^4 = W^0$ ,  $W^2 = -W^0$   
 などの規則性を考慮し、計算順序  
 を入れ替えることで簡単化している。

## 高速フーリエ変換 (N=4の場合)

$N=4$ として、 $W^2 = -W^0$ ,  $W^4 = W^0$ ,  $W^6 = W^2 = -W^0$ ,  $W^9 = W^5 = W^1$ を代入すると、

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & -W^0 & -W^1 \\ W^0 & -W^0 & W^0 & -W^0 \\ W^0 & -W^1 & -W^0 & W^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

上式にて行の入れ替え(第2行と第3行)を行い、行列を計算すると、

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_2 \\ X_1 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0(x_0 + x_2) + W^0(x_1 + x_3) \\ W^0(x_0 + x_2) - W^0(x_1 + x_3) \\ W^0(x_0 - x_2) + W^1(x_1 - x_3) \\ W^0(x_0 - x_2) - W^1(x_1 - x_3) \end{pmatrix}$$

合計16回(4x4)の複素数掛け算が、合計8回(2x4)に減少している。

FFTでは、複素数掛け算回数をDFTの $\log_2 N/N$ 程度に減少できる。



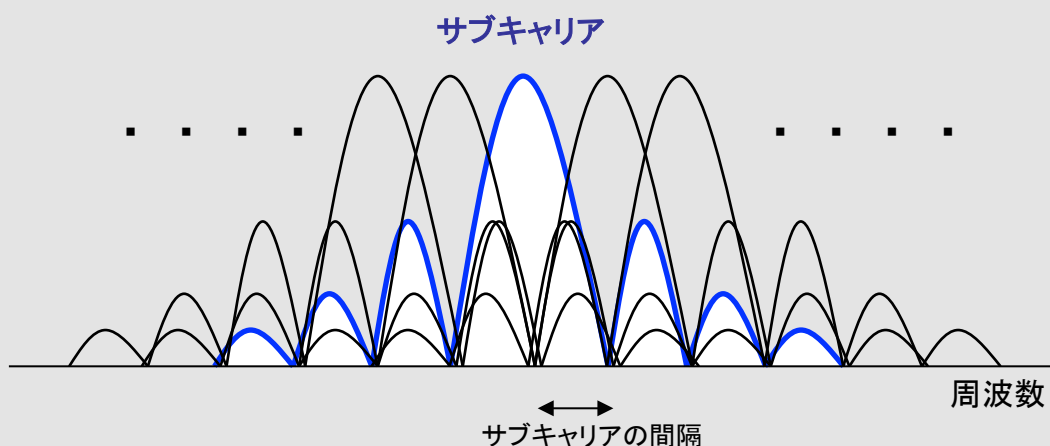
#### FDMA方式の変形に先祖返り

LTEやWiMAXでは、無線チャネルの多重方式にOFDM方式を採用している。OFDMは、チャンネル毎に異なる周波数の電波を使用するFDM方式での周波数間隔を極限まで狭めることで利用効率を改善した方式であり、すでに地上デジタル放送や無線LAN等で広く利用されている。

デジタルデータで変調された波のスペクトラムには山と谷が交互にあり、信号の強さがゼロとなる周波数が等間隔に並んでいる。そこで、谷にあたる周波数に、別のサブキャリアの中心周波数が重なるように配置することで、サブキャリア同士が干渉することなく通信できるようになる。

OFDMには、複雑な時間波形を多数の正弦波の成分に分解するフーリエ変換処理が必要となるが、これを高速で行うFFT(高速フーリエ変換)を集積回路により実現することで可能になった。

#### OFDM変調波のスペクトラム



サブキャリアの谷にあたる周波数に、別のサブキャリアを配置することで、互いに干渉なく通信できる。



## 2. 無線方式

### (2) FDDフレーム構造

#### 0.5ms長タイムスロット2個で1msのサブフレームを構成

LTEでのフレーム構造は、FDDの上下回線で同一であり、下図のように0.5ms長の1タイムスロットを時間軸上での基本単位としている。また、連続する2個のタイムスロットをサブフレームと呼び、基地局によるリソース割当ては1ミリ秒のサブフレーム周期で行われる。10個のサブフレームの集合体は無線フレーム(10ms長)と呼ばれる。

1タイムスロットなどの長さは、システムサンプルレートを意味する $T_s$ の整数倍で規定されており、 $T_s$ とサブキャリア周波数間隔(15kHz)との間には次の関係がある。

$$2048 \times T_s = 1/15k \quad (= 66.7\mu s)$$

右辺は有効シンボル時間であるので、 $T_s$ は、OFDMサブキャリアを2048点でFFT演算する際のサンプリング時間間隔にあたる。

#### FDDフレーム構造



WCDMA、1xEV-DOのチップレート(3.84Mcps, 1.2288Mcps)の逆数はそれぞれ $T_s$ の8、25倍になるため、LTEチップセットをWCDMAと1xEV-DOにも対応可能とする際に都合がよくなっている。

時間軸上では、0.5ms長の1スロットを基本単位としている。

## 2. 無線方式

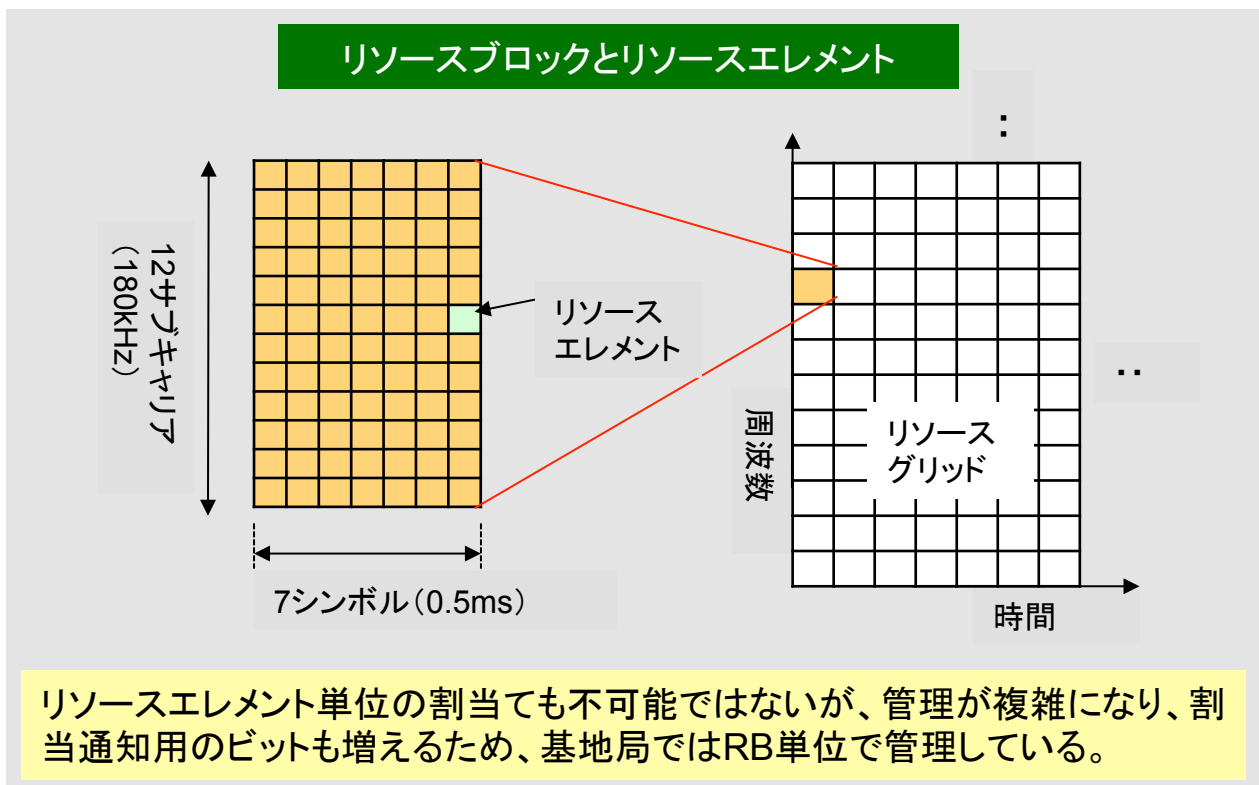
### (3) リソースブロック

#### リソース割当ての単位

一方、周波数軸上でみるとサブキャリア間隔が15kHzのLTEでは、連続する12個のサブキャリアをリソース管理の単位としている。

そこで、この180kHz幅と0.5ms長の1タイムスロットが占める区画をリソースブロック(RB)と呼び、基地局は通信要求に対するリソース割当てをRB単位で行っている。

なお、リソースブロックを構成する1つのシンボルをリソースエレメントと呼ぶ。また、リソースブロックにて格子状に構成されているリソース全体はリソースグリッドと呼んでいる。



## 2. 無線方式

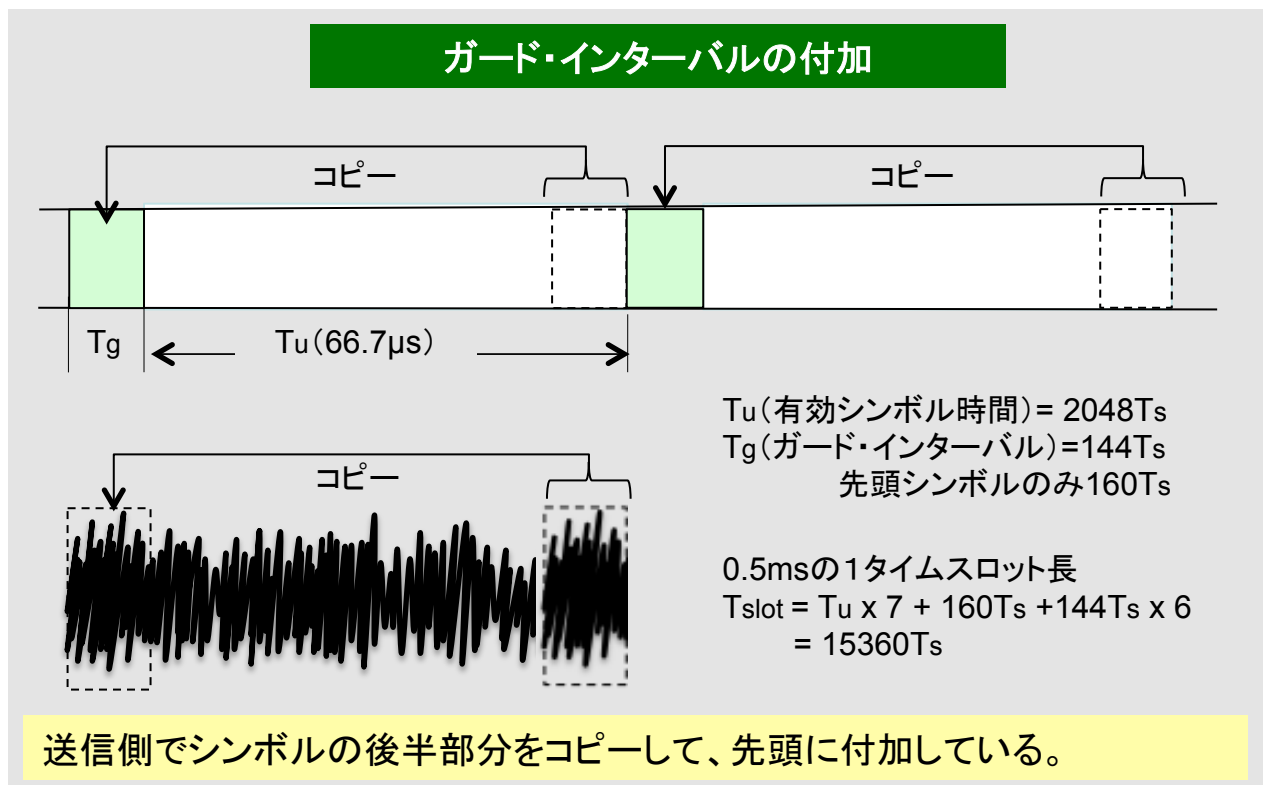
### (4) ガードインターバル

#### シンボルの後半部分をコピーして先頭に付加

OFDMは、シンボル時間の長いサブキャリアを並列伝送して、マルチパスによる干渉を低減しているが、加えて、シンボル区間の一部をガードインターバル(サイクリックプレフィックス)とすることで更なるシンボル間干渉の低減を行っている。

このために送信側では、シンボルの後半部分をコピーして、シンボル先頭に付加する。これによって送信信号が連続するとともに、マルチパスによって、ガードインターバル時間( $T_g$ )以内の遅れた干渉信号が到達しても、隣り合うシンボルの信号が混じりあうことがない。ガードインターバルを使うことで、受信側にて、信号等化が簡単になるというメリットもある。

LTEでは、サブキャリア間隔15kHzの逆数にあたるシンボル区間( $66.7\mu\text{s}$ )のうち、 $4.7\mu\text{s}$ (第1シンボルのみ $5.2\mu\text{s}$ )を $T_g$ としている。なお、サービスエリアが広いMBMSでの $T_g$ は $16.7\mu\text{s}$ である。

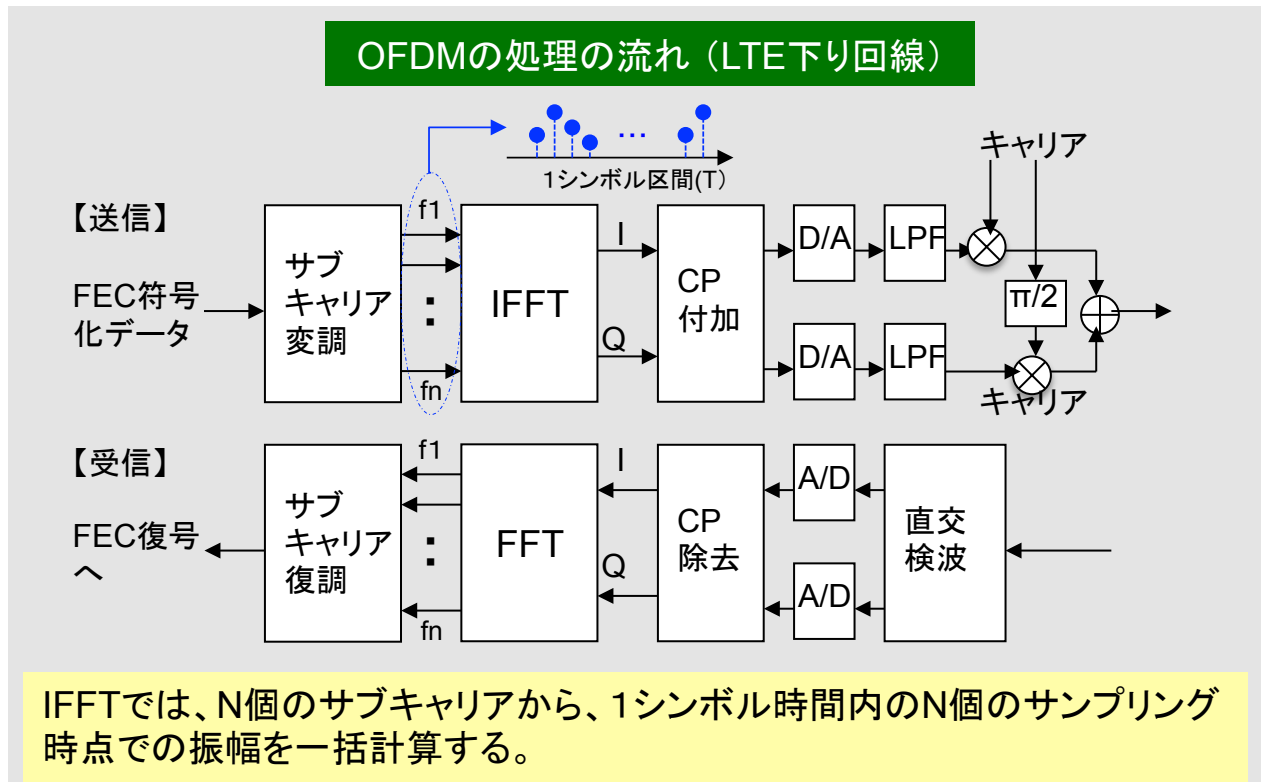


#### 送信側はIFFT, 受信側はFFTで一括変換

下り回線のOFDM変調信号は次の順序で生成される。

- ・ シリアルデータストリームはサブキャリア変調(QPSK/16QAM/64QAM)された後、1シンボル時間にあたるN個の並列な周波数成分に直並列変換される。
- ・ IFFTにて1シンボル時間内のN個の時間領域成分に変換される。
- ・ 並一直列変換された実数部(コサイン成分)と、虚数部(サイン成分)にサイクリック・プレフィクス(CP)が付加される。

一方、この信号の受信側であるUEでは、FFTを用いて送信側と逆の順序で復調される。



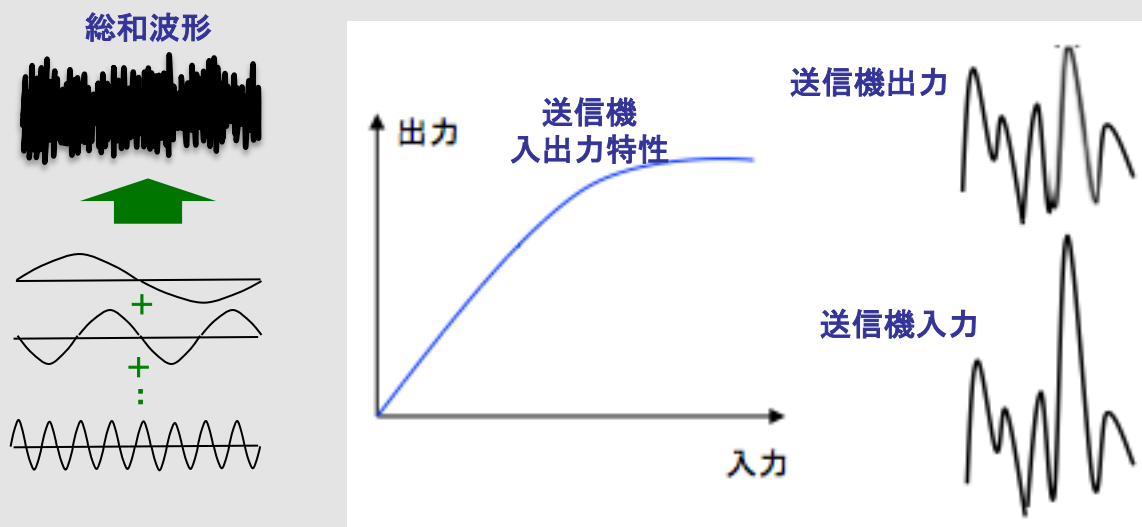
#### 上り回線特有の課題

一方、LTEの上り回線では移動通信を考慮したOFDM信号の変形が行われている。特に、OFDMでは平均電力に比べてピーク電力が増加する、即ちPAPR(Peak to Average Power Ratio)が大きいいため、送信機に余裕がない上り回線では影響が大きい。

なぜなら、OFDMでの各サブキャリアの振幅と位相は、デジタル変調によって独立にランダムな値をとるため、各サブキャリアの時間波形を総和した送信波形を作ると、時には非常に大きな振幅、すなわちピーク電力をもつからである。

そこで、受信側にてサブキャリアを正確に分離して復元するには、この総和波形を送信機にてできるだけ忠実に増幅する必要がある。一方でUE側では、送信機をできるだけ高効率で使用できるように、ピーク電力を抑えたいという要求がある。

#### UE送信機によるOFDM波形のひずみ

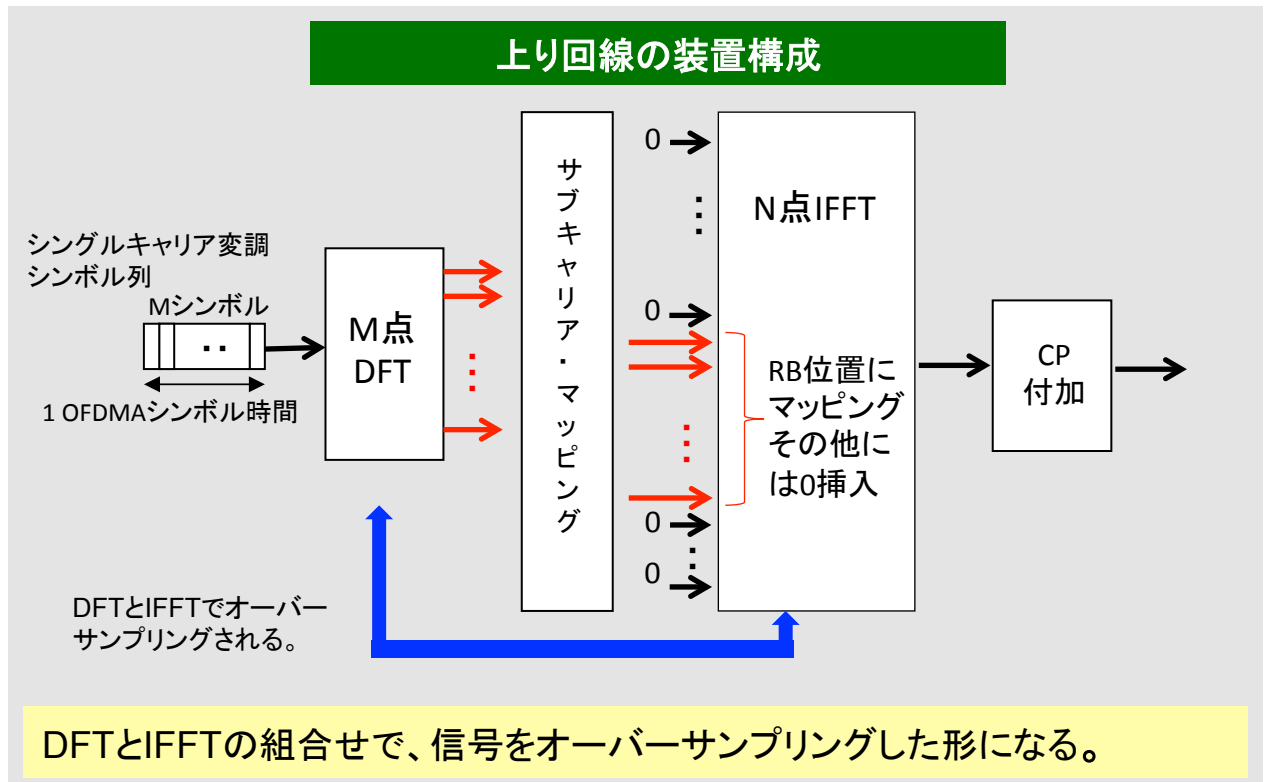


OFDMでは高い先頭値をもつため、送信機の入出力特性に大きな非直線性があると、出力波形が大きく歪んでしまう。

#### DFTでシングルキャリア化

一方、シングルキャリアによるデジタル変調では、帯域制限を行うことでシンボル間でのくびれが多少生じるものの、シンボル区間内では、信号包絡線はほぼ一定であるため、端末には都合がよい。

そこで、LTEのUE送信では、下図のような回路を用いてシングルキャリアの性質をもったOFDM(A)信号を生成している。まず、連続するM個のサブキャリアを割当てられたUEは、シンボル時間(T)のM倍の速度でシングルキャリア変調した時間波形を、M点DFTによって周波数軸での波形に変換する。次に、その周波数位置を割当てられたリソースブロック位置にずらす。(サブキャリアマッピング) その後は通常のOFDM同様にN点IFFT処理を行うことで再度、時間波形に変換する。これによって、個々のサブキャリアの単なる合成波形ではなく、シングルキャリアの性質を引き継いだ波形となる。



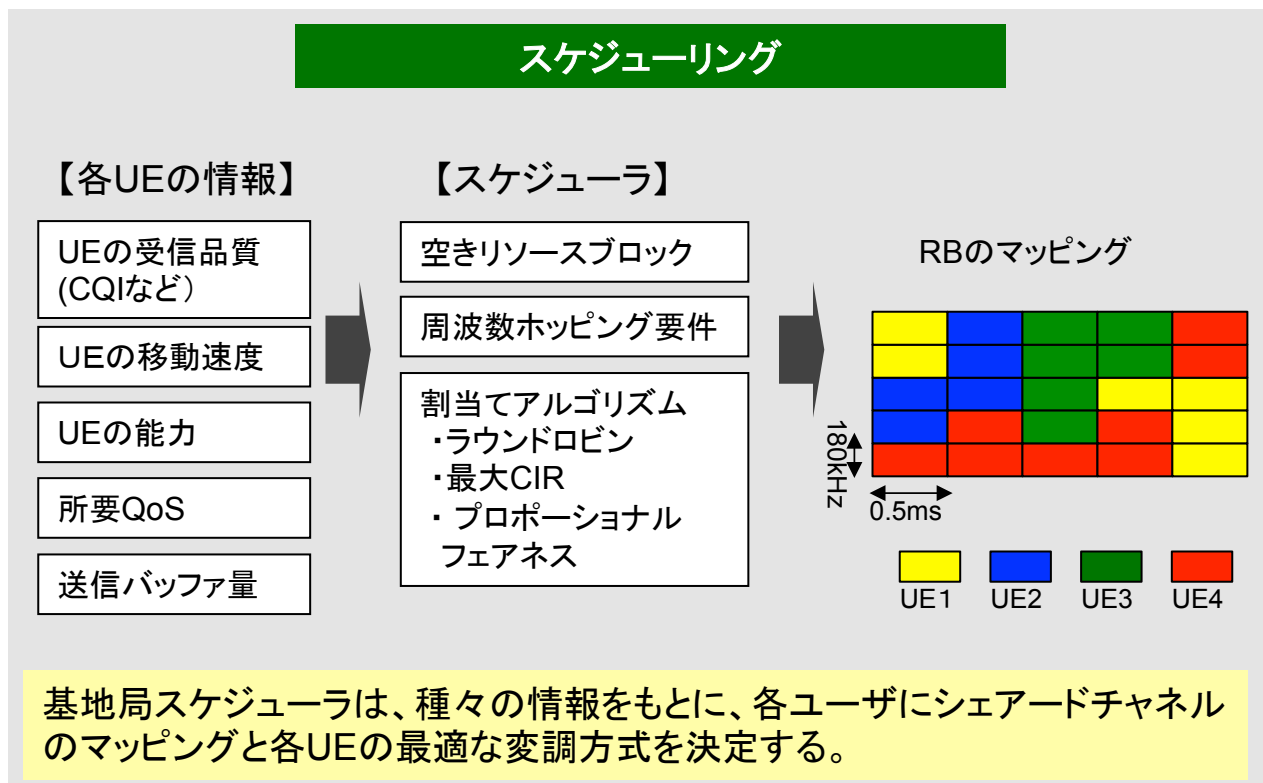
#### 1ms単位に変調方式、符号化率を指定

基地局では、要求するデータ伝送レートにもとづき、リソースグリッドの空き位置に、各UEとの間で使用するRBを割り当てるスケジューリングを行う。フェージング等の影響によってUEでの受信品質が悪いサブキャリアが含まれるRBを割当て対象から除く場合もある。

リンクアダプテーションは、UEにて測定され、基地局に報告されるチャンネル品質情報(CQI)などに基づき、1msごとに最適な変調方式と符号化率を決定し、UEに報知する。

なお、LTEでは、無線環境によってUEの送信電力は増減されるが、基地局は常時、最大電力で送信する。

基地局では、UEからの伝搬環境情報(受信品質やドップラー周波数)とUEの能力やQoS、更には通信待ちのデータバッファの状態を総合的に考慮して、UEの伝送パラメータ決定とリソース最適化を行う。







## 2. 無線方式

### (9) 物理レイヤー信号

#### セルサーチは2段階で

RSは受信同期確立用のリファレンス(基準)信号である。基地局は、複数の各アンテナから、周波数時間領域にて予め決まっている位置にRSを常時送信している。P-SS, S-SSはUEが最適セルを探索するセルサーチに用いる信号である。UEはWCDMAと同様、符号系列の異なるこれら2種類の信号を用いた階層型のセルサーチによって、セル固有の物理識別番号(PID\*1)を得ることができる。これらのセルサーチ用信号は使用する帯域幅の大小によらず、帯域中央部にて常時送信されている。

上りリンクのRSのうちDMRSは、基地局にてUE送信信号を復調するために使用する基準信号であり、一定振幅で自己相関ゼロの符号であるCAZAC\*2系列が使用される。また、SRSは上り回線の品質測定や送信タイミングのズレの調整に用いられる。

#### 同期・セルサーチ用の物理レイヤー信号

下りリンク(基地局→端末)	上りリンク(端末→基地局)
RS (Reference Signal)	DMRS (Demodulator Reference)
P-SS (Primary Sync Signal)	SRS (Sounding Reference)
S-SS (Secondary Sync Signal)	

\*1) PID: Physical layer cell ID

\*2) CAZAC: Constant Amplitude Zero Auto-Correlation waveform

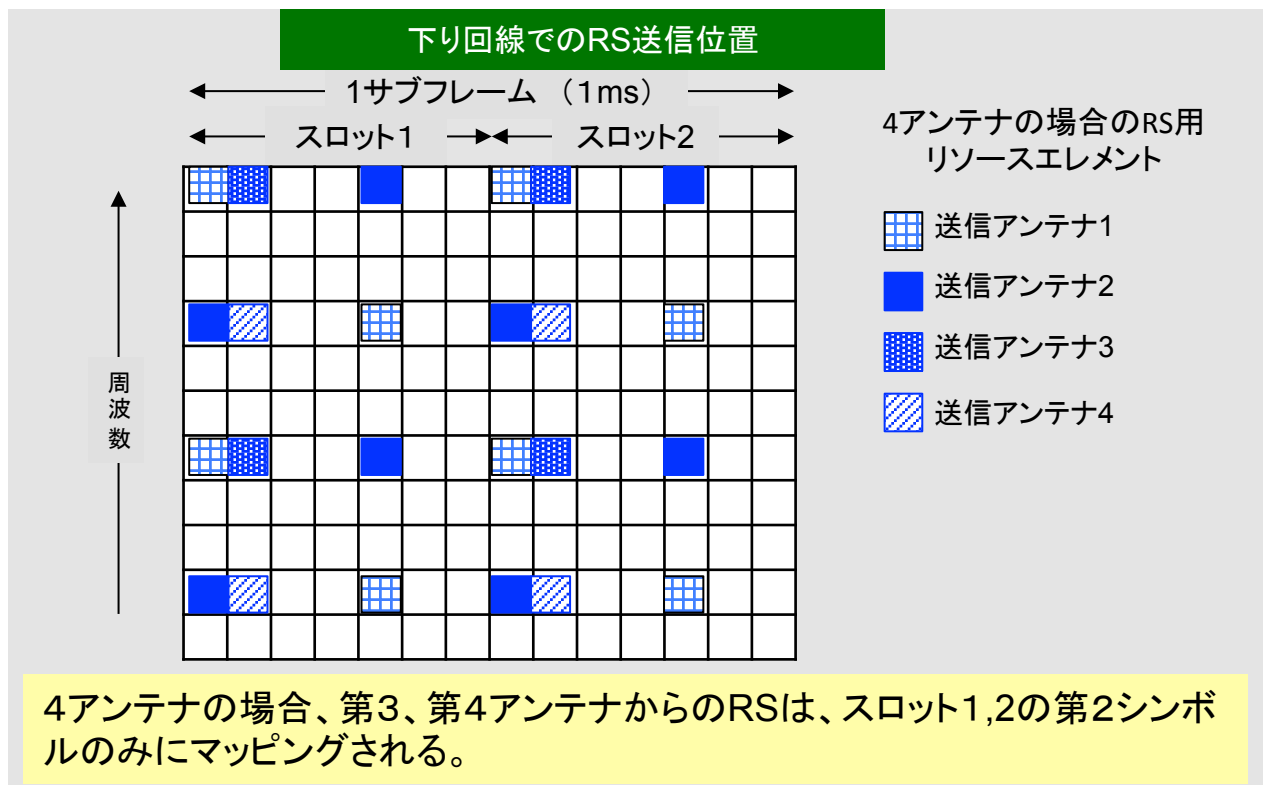
RS信号やSS信号はシステム同期、セルサーチ、無線チャネル品質推定に用いられる。

#### 同期検波やセルサーチなどに

下り回線のリファレンス信号(RS)は、次の目的に使われる。

- (1) スケジューリングや適応制御のため、UEにて測定される下り回線の品質情報(CQI: Channel Quality Indicator)を取得する。
- (2) UEでの同期検波のため、搬送波の基準位相を提供する。
- (3) UEでのセルサーチやハンドオーバーのため、下り回線の平均受信レベル情報を提供する。

同一基地局にある複数のアンテナから送信されるリファレンス信号は互いに干渉しないように、互いに異なった周波数(サブキャリア)あるいは時間(OFDMシンボル)をもつリソースエレメントで送信される。また、隣接セル間で、RS信号が干渉し合わないようするため、サブキャリア位置をずらすこともできる。また、LTE-Aでは、UEでのチャネル推定と推定結果フィードバック簡略化のため、特定UE向けのRS(UE Specific RS)も挿入している。





## 2. 無線方式

### (11) LTEの物理チャネル

第3世代方式より簡略化されている。

多数のUEがデータ伝送用に共通に使用するチャネルがシェアードチャネル(SCH)であり、その伝送用のリソース割当て要求や割当て情報を伝送するのがコントロールチャネル(CCH)である。  
これらのチャネルは次の目的に使用される。

- PBCH UEがセルサーチ後に取得すべき帯域幅等の基本情報を放送
- PMCH MBMS(Multimedia Broadcast Multimedia Multicast Service)用
- PDCCH UEにチャネルのリソース割当て情報などを通知
- PCFICH PDCCHで使用するOFDMシンボル数を通知
- PHICH 上り伝送に対するACK/NACKを通知
- PUSCH 上りデータトラフィックを伝送
- PUCCH 下り伝送へのACK/NACKや受信品質、リソース割当て要求
- PRACH ランダムアクセス用のプリアンブル信号を送信

#### 物理レイヤーチャネル

下りリンク(基地局→端末)	上りリンク(端末→基地局)
PDSCH (DS: Downlink Shared)	PUSCH (US: Uplink Shared)
PBCH (B: Broadcast)	PUCCH (UC: Uplink Control)
PMCH (M: Multicast)	PRACH (RA: Random Access)
PDCCH (DC: Downlink Control)	
PCFICH (CFI: Control Format Indicator)	
PHICH (HI: Hybrid ARQ Indicator)	

第3世代システム(WCDMA)に比べて、チャネル種類が少なくなっている。



## 2. 無線方式

### (12) 下り回線のフレーム構成

#### 中央部に同期信号・報知チャンネルを多重

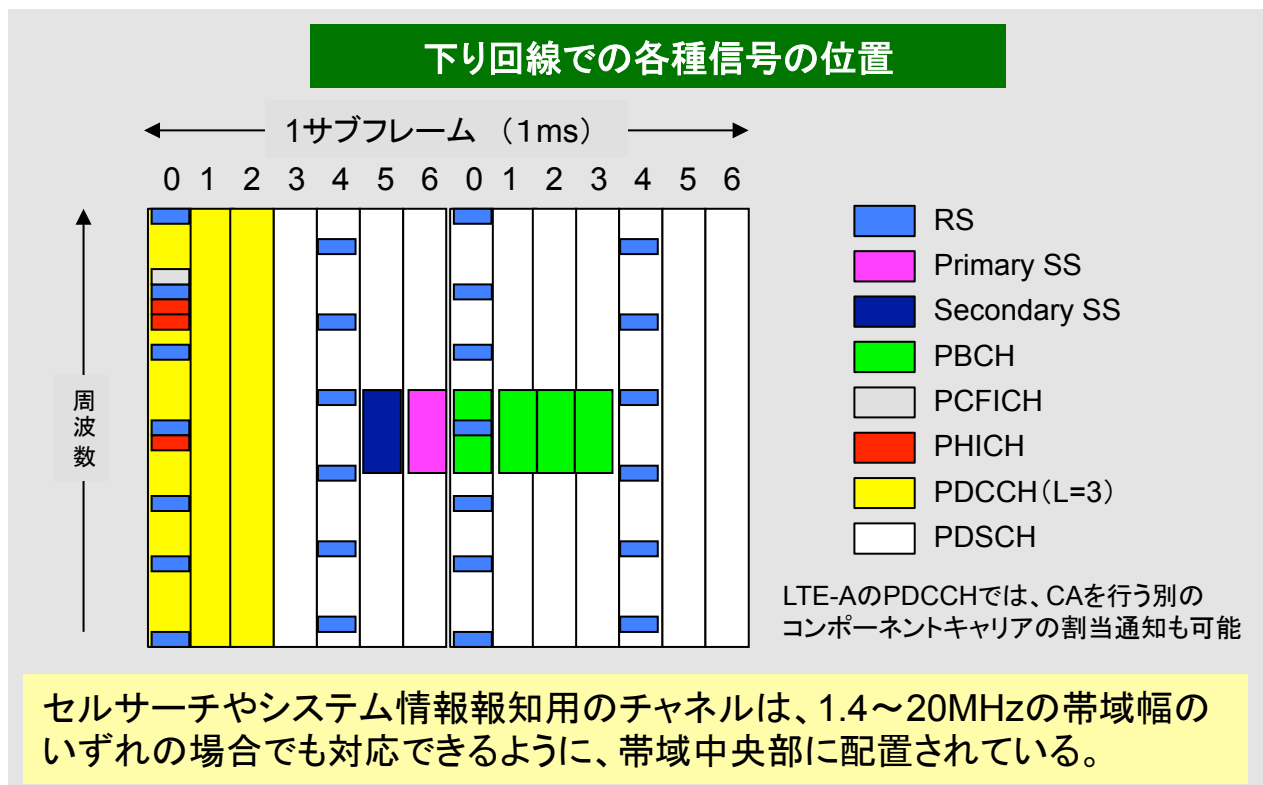
下り回線のサブフレームには、データ伝送用にUEが共通にアクセスするPDSCHのほか、同期や制御用のためのチャンネルが配置されている。

リファレンス信号(RS)はリソースエレメント単位に予め決められた時間、周波数位置に挿入されている。

セルサーチやシステム情報報知用のチャンネルは、帯域中心部に集中配置されている。

リソース割当(スケジューリング)情報等を通知するPDCCHには、割当RBの位置、変調方式、データサイズ、送信電力制御用コマンドなどが含まれている。

受信品質の測定にもとづいて、最適な変調方式とFEC符号化率を選択する適応無線信号処理はサブフレーム単位で行われる。





## 2. 無線方式

### (13) 非同期ランダムアクセス(NSRA)

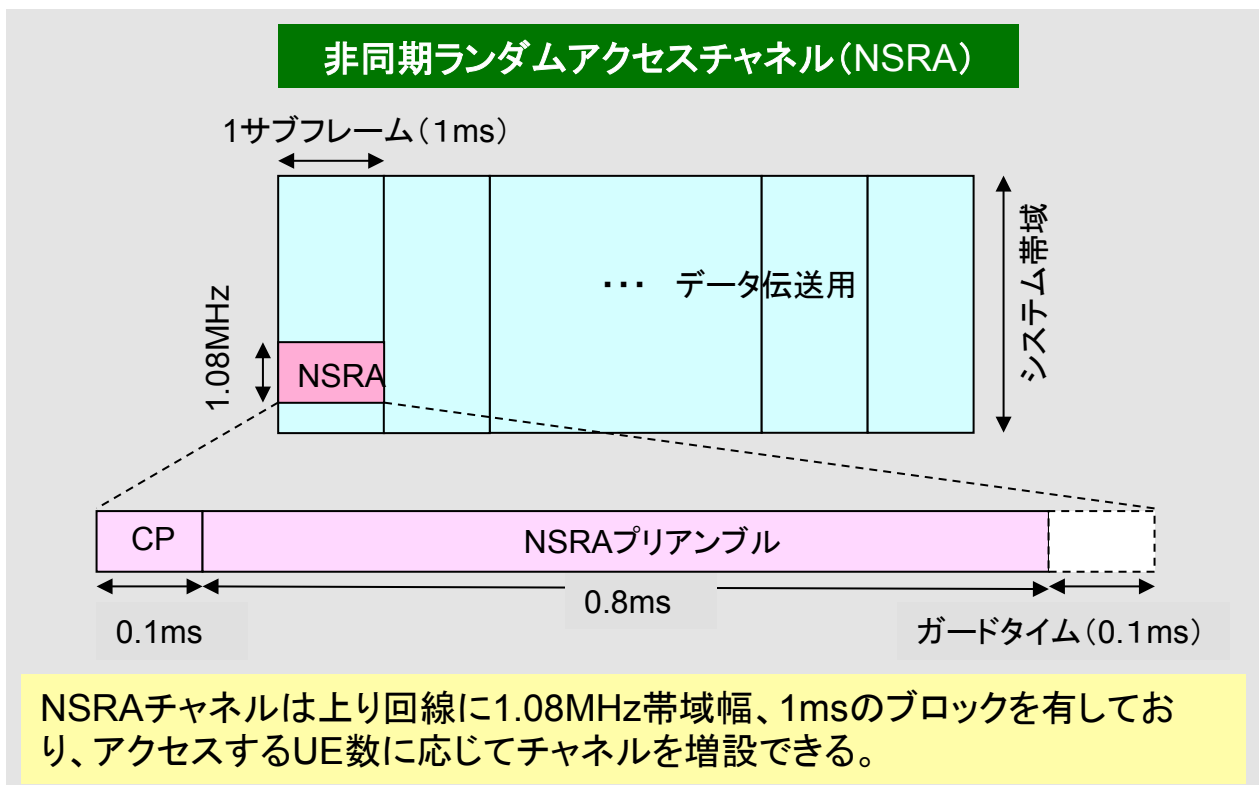
#### UEの初期同期確立などに使われる

NSRAチャンネルは72サブキャリア(1.08MHz幅)と1サブフレーム(1ms長)からなり、アイドル状態にあるUEが通信を開始する場合や、ハンドオーバー後に上り回線の再同期を行う場合に使用される。

長さ0.9msのバースト波のうち、先頭のCP(1ms長)を除いたNSRAプリアンブルには64種類の符号(CAZAC系列符号)があり、UEは、このうちの一つをランダムに選択して符号多重アクセスする。

プリアンブル送信から初期同期確立までは次の手順となる。

1. プリアンブル送信後、一定時間以内に基地局から受信応答が得られない場合、送信電力を増加させて再送信する。一定量増加させても受信応答がない場合、符号を変え、再度ランピングする。
2. 基地局からの応答受信後は、基地局より下り制御チャンネルで報知される送信タイミング補正情報に基づきズレを補正して同期確立する。



## 2. 無線方式

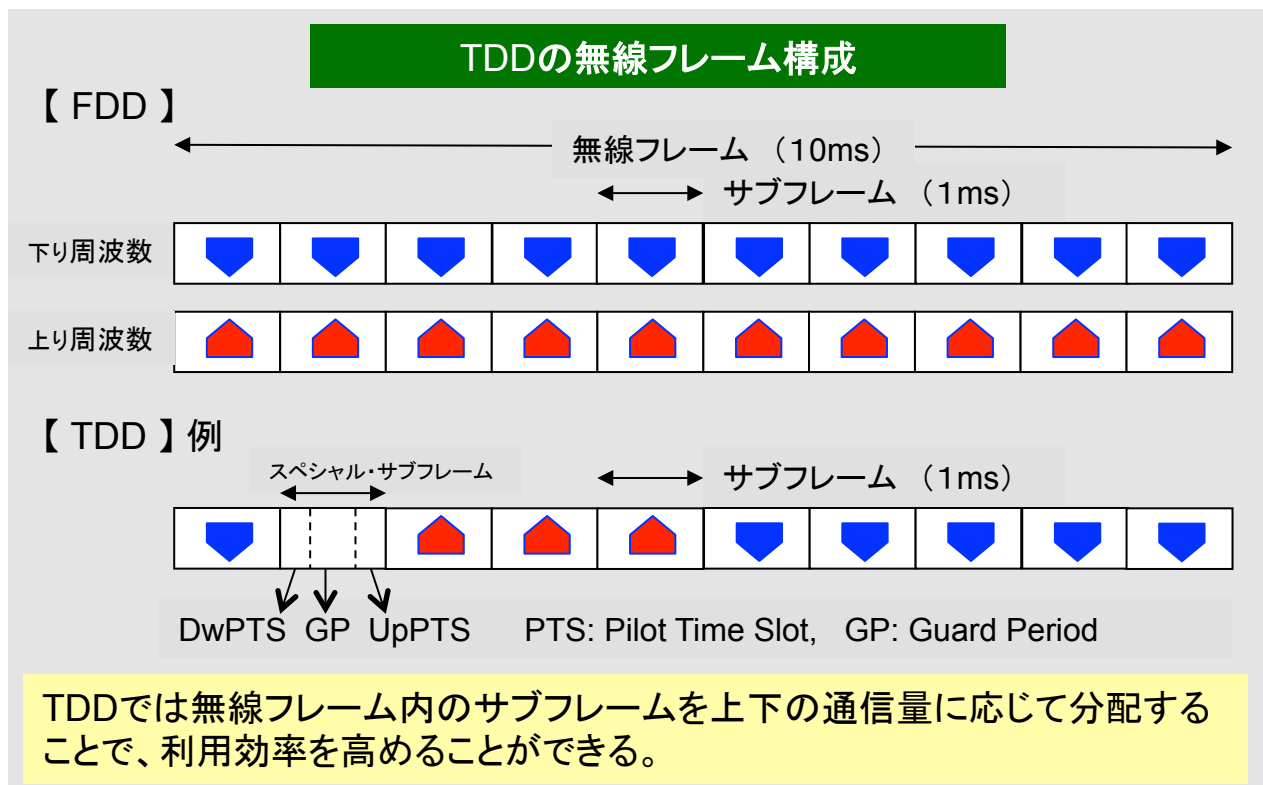
### (14) TDDフレーム構造

#### トラフィック量に応じた柔軟なフレーム構成

現在、携帯電話事業者は、上り(UE→基地局)と下り(基地局→UE)回線に、別々の周波数帯を一对とするFDD(Frequency Division Duplex)で運用しているが、1つの周波数帯のみを用い、上下の伝送方向は時間単位で切り替えるTDD(Time Division Duplex)も一部で使用されている。

TDDは、システム内の全局が上下方向の切り替えを一斉に同期して行うなど制御が複雑になるが、上下方向のトラフィック量に大差がある場合には、利用効率を高めることができるなどの利点がある。

LTEでは上下回線のサブフレーム構成が同じであるので、通常、10ミリ秒の無線フレーム内のサブフレーム数を通信量に応じて設定できる。下図は、その分配の例であり、上下で1対2に分配している。ここでは、下り方向から上り方向の切り替えの間に一定のガード時間を設けることで上下間の干渉を防いでいる。



## SISO, SIMO, MISO

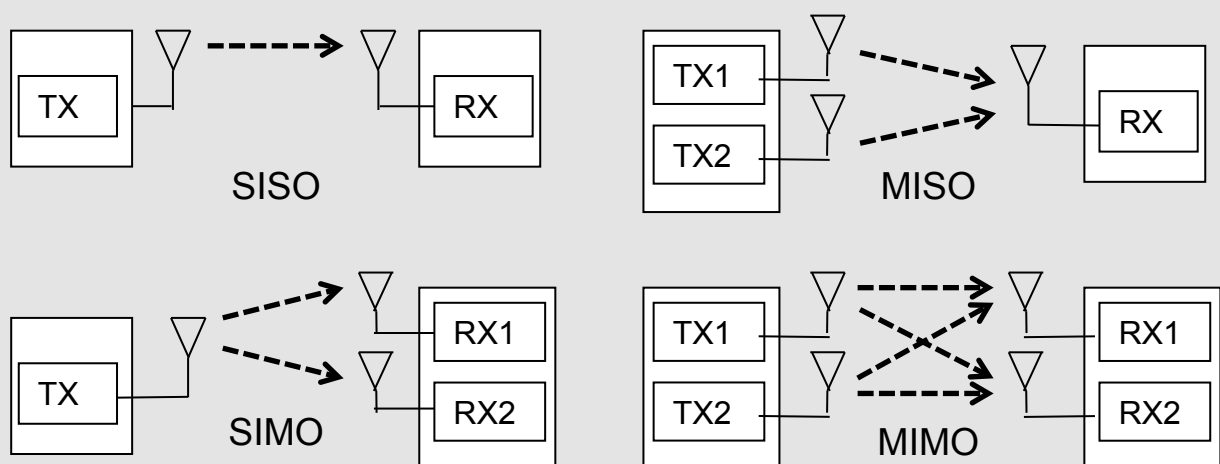
多入力・多出力を意味するMIMOに対して、送信あるいは受信側のアンテナが一つである場合はSISO, SIMO, MISOと称される。

このうちSISO(単一入力・単一出力)は標準的な伝送モードである。

SIMO(単一入力・多出力)は、受信側のみが複数アンテナ(回路)をもつ方式であり、受信ダイバシティに相当する。フェージングにより受信レベルが変動する時、2つのデータストリームを加算あるいは一方を選択することにより、受信S/Nが改善できる。

MISO(多入力・単一出力)は、送信のみ複数アンテナを持つ方式であり、送信ダイバシティに相当する。空間周波数ブロック符号(SFBC)を用いるなどにより、フェージング環境下での受信S/Nが改善できる。しかし、SIMO, MISOとも、送受アンテナ間で同時に複数ストリームを伝送することによる通信容量の増加はできない。

### SISO, SIMO, MISO と MIMO



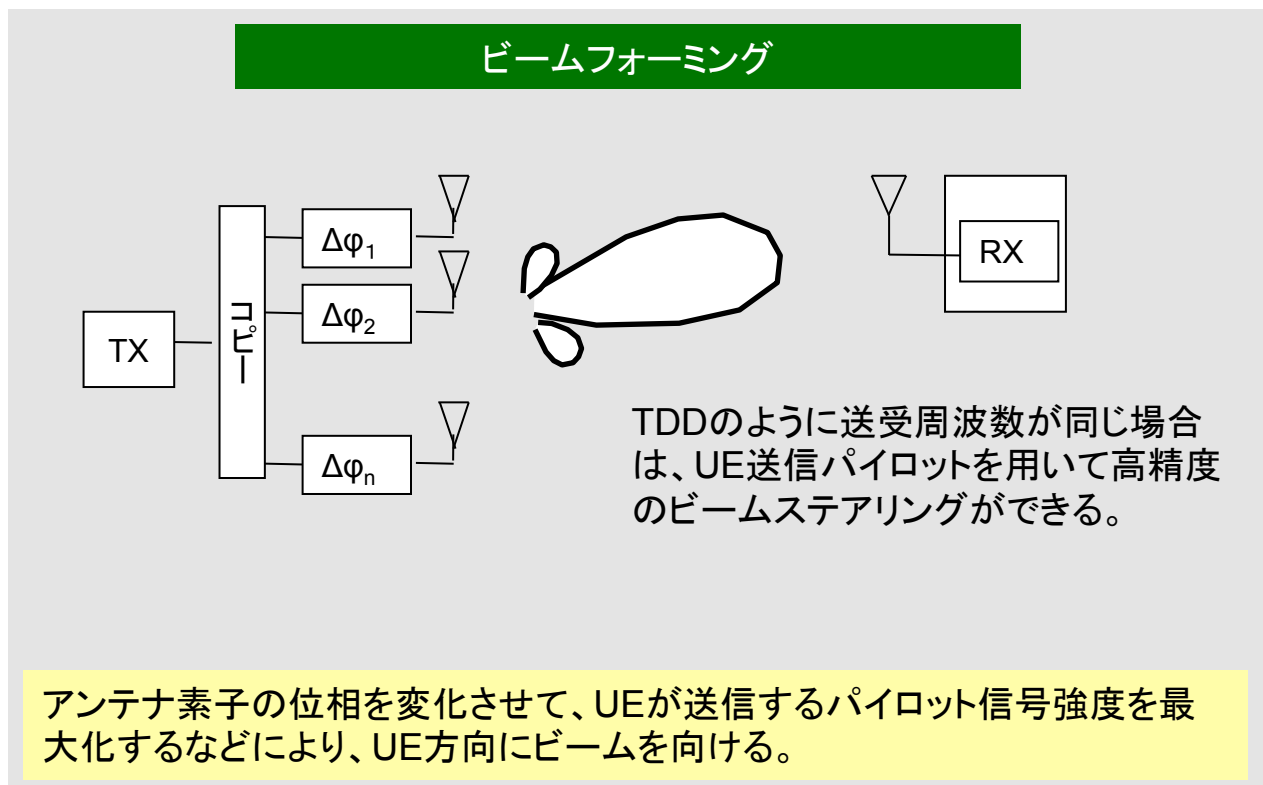
SIMO, MISOは受信ダイバシティ、送信ダイバシティに相当する。

#### 電子制御により通信相手方向にビームを指向

多くのアンテナ素子をもつ無線局が、各アンテナへの送信信号あるいは受信信号の位相や利得(振幅)を変えることで、これらの信号の合成であるビームの方向や形状を変化させ、受信側でのS/N改善を図るもの。

UE方向に向けて電波を集中(最大化)する手法(ビームステアリング)のほかに、複数UE間に干渉がある場合には、干渉を受けるUE方向からの電波を受信しないように制御し、合わせてその方向に送信しないようにするヌルステアリング、更には、両者の組み合わせの手法がある。

ビームフォーミングを行うアンテナはアダプティブアレイ、あるいはスマートアンテナと呼ばれることがある。







### 3. アンテナと電波

#### (3) シヤノンの定理

#### 伝送速度の理論上の上限値

シヤノン・ハートレーの定理ともいう。帯域幅がB(Hz)、信号電力と雑音電力の比S/N(真数)の伝送路にて、誤りなく伝送できるビット数、すなわち通信容量C(bit)の限界値であり、次式で表される。

$$C = B \times \text{Log}_2(1 + S/N)$$

帯域に制限が有る場合でも、信号電力を増やすことで、際限なく通信容量が拡大できることになる。

一方、逆に信号が雑音に埋もれてしまうような条件下、すなわち、S/Nが1以下でも、情報伝達が可能なことも示している。S/Nが悪い場合、例えば、同じ情報を繰り返し送り、受信側で加算することで、伝送速度は落ちるものの情報伝達が可能になる。通信容量は、Bを大きくして、信号を広い帯域に拡散させることでも確保できる。

#### チャンネル容量

S/N (dB)	1Hzあたりの通信容量 上限(ビット)
10 <sup>5</sup> (50dB)	16.6
10 (10dB)	3.46
1 (0dB)	1
10 <sup>-1</sup> (-10dB)	0.14

誤り訂正符号などを用いて、シヤノンの通信容量を上限に伝送できるが、

BとNが決まっている場合、信号電力の増加に対する通信容量の増加は、直線(比例)的でなく、対数的な増加にとどまる。



### 3. アンテナと電波

#### (4) 伝送路の複数化

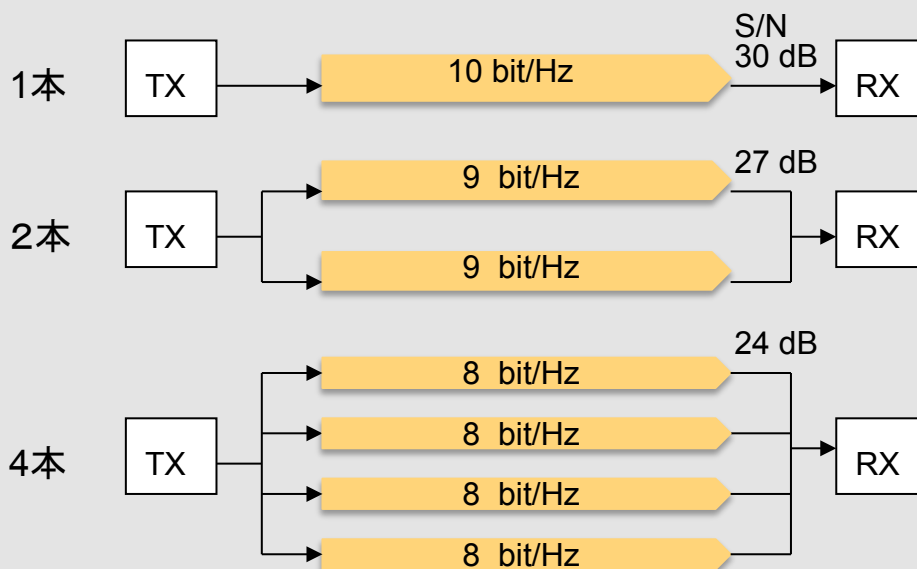
##### 互いに独立な伝送路の場合

先の計算は単一の伝送路の場合だが、複数としたらどうであろうか。有線ケーブルのようにN本では、全体の通信容量はN倍になるだろう。ただし、1本の伝送路での通信容量と正しく比較するには、N本の電力の合計を同じにして比べるべきである。

例えば、1本のチャンネルのみで、 $S/N=30\text{dB}$  ( $2^{10}$ ) にて伝送する時の通信容量は  $C=\text{Log}_2(2^{10}+1)=10$  ビット/Hzとなる。これを、2本、4本の同質なチャンネルにて等分した電力で伝送する時、各S/Nはそれぞれ、 $27\text{dB}$  ( $2^9$ )、 $24\text{dB}$  ( $2^8$ )となるので、通信容量は合計で 18ビット/Hz, 32 ビット/Hzとなる。

このように、互いに独立な複数の伝送路を用いることで、伝送路数にほぼ比例して通信容量を増加できる。

##### 複数伝送路による通信容量の増加



独立な複数伝送路の数にほぼ比例して通信容量が増加できる。

#### MIMO構成の表現

しかし、無線の受信アンテナでは、複数の送信アンテナからの信号が混じり合って受信されるため、有線のように単純ではない。

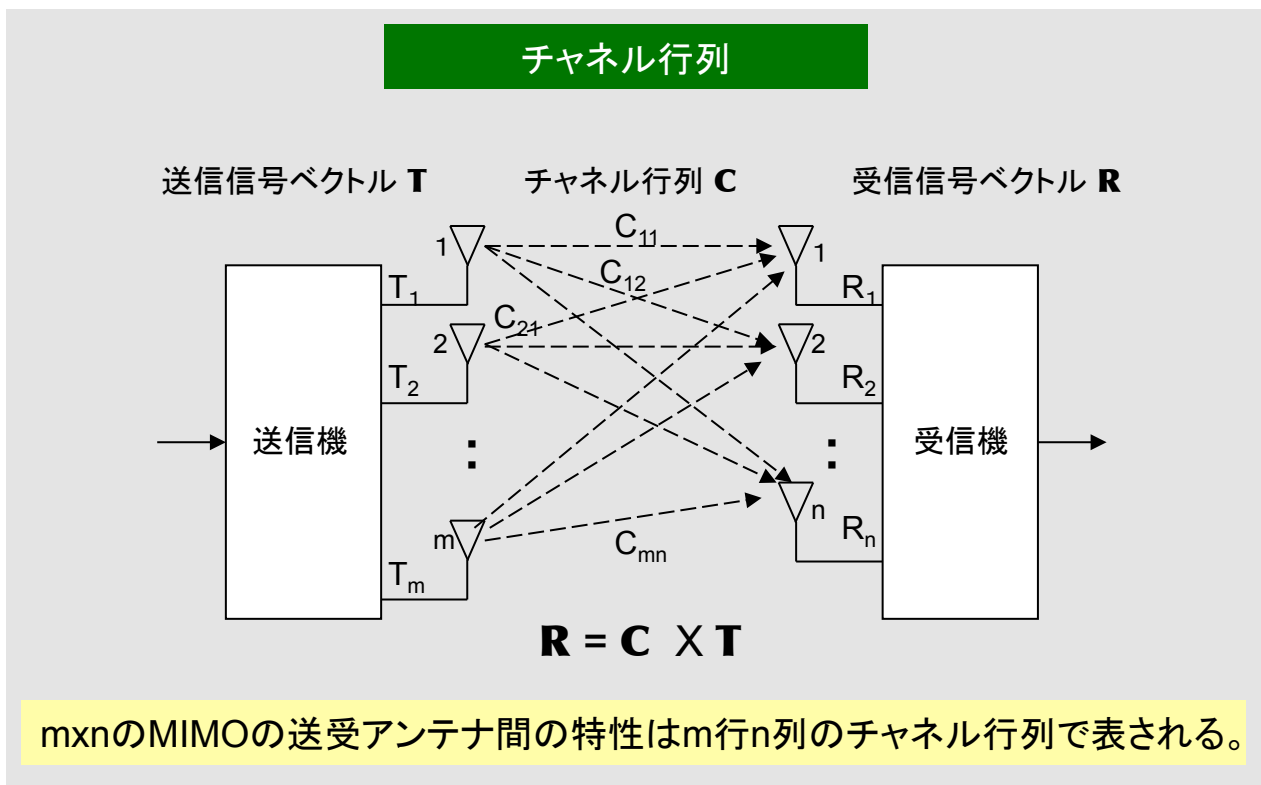
また、伝搬路の状態は絶えず変化しており、干渉雑音もある。

それにも拘わらず、複数アンテナ間の送受信関係を考慮した信号処理を送信、受信側にて行うことで通信容量が増加できる。

例えば、2x2のMIMOで考える。送信信号を $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ , 受信信号を $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ とすると、

$$\begin{aligned} R_1(t) &= C_{11}T_1(t) + C_{12}T_2(t) \\ R_2(t) &= C_{21}T_1(t) + C_{22}T_2(t) \end{aligned}$$

これをベクトル $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{R}$  と行列 $\mathbf{C}$ で表現すると、 $\mathbf{R} = \mathbf{C} \times \mathbf{T}$  となる。  
MIMOでは $\mathbf{C}$ (チャンネル行列)によって、通信容量が決まることになる。



#### 仮想的な複数伝送路を作る

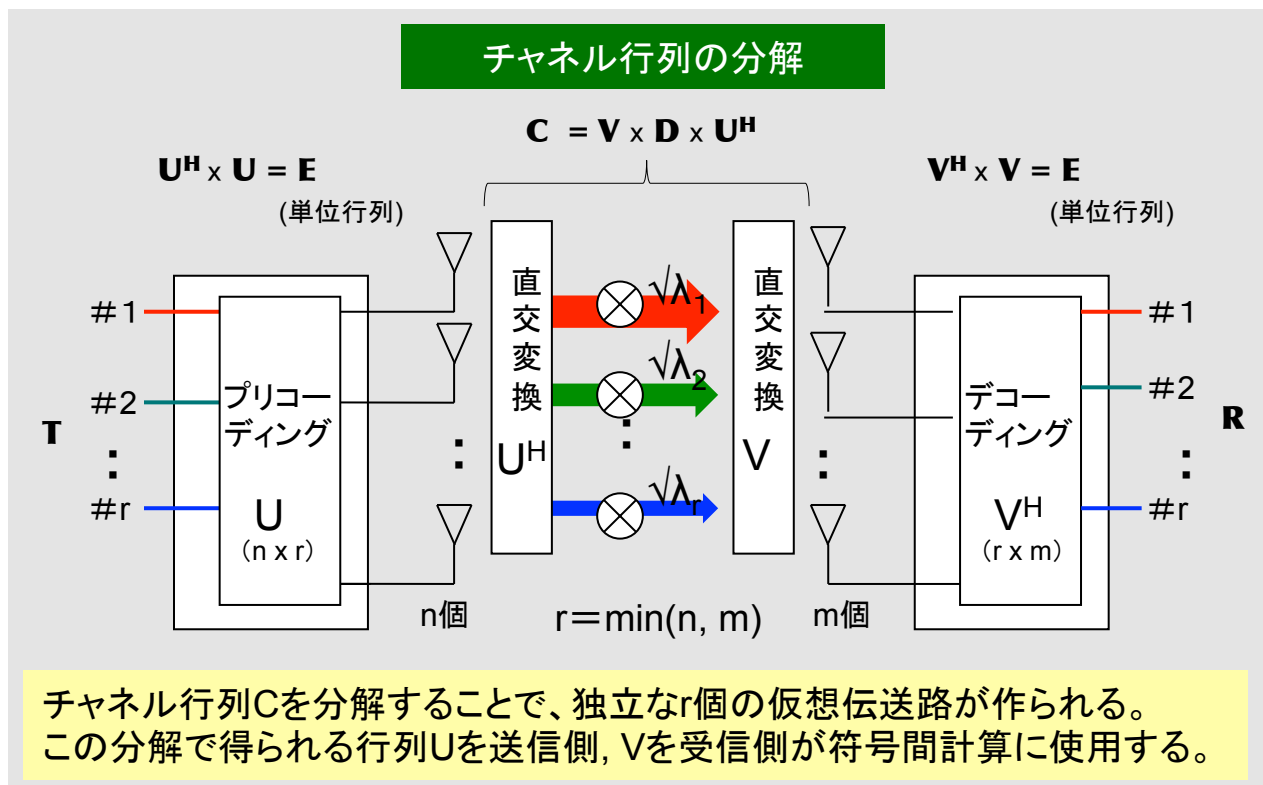
2x2MIMOにて全く独立で同じ太さの場合には、 $C_{11}=C_{22}$ ,  $C_{12}=C_{21}=0$  であるが、他の場合でも、送受側で符号間の計算を行うことで、2本の独立な仮想伝送路(レイヤー)に変えることができる。

これは、チャネル行列  $\mathbf{C}$  は、適当な行列  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  を用いることで、特異値  $\sqrt{\lambda_1}$ ,  $\sqrt{\lambda_2}$ , ...,  $\sqrt{\lambda_r}$  を有する対角行列  $\mathbf{D}$  との次のような積に分解できるからである。ここで、 $r$ (ランク)はレイヤー数、下の括弧は各行列の行と列の数を示す。また、行列の添字  $\mathbf{H}$  は共役転置を意味し、 $\mathbf{U}^H \times \mathbf{U} = \mathbf{V}^H \times \mathbf{V} = \mathbf{E}$  (単位行列)となる。

$$\mathbf{C} = \mathbf{V} \times \mathbf{D} \times \mathbf{U}^H$$

$$(m \times n) \quad (m \times r) \quad (r \times r) \quad (r \times n)$$

送信側は  $r$  個の信号系列  $\mathbf{T}$  を行列  $\mathbf{U}$  によりプリコーディングして、 $n$  個のアンテナに入力する。この時、 $\mathbf{V}^H$  でデコードした受信信号  $\mathbf{R}$  は、 $\mathbf{R} = \mathbf{V}^H \mathbf{C} \mathbf{U} \mathbf{T} = \mathbf{V}^H \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{U}^H \mathbf{U} \mathbf{T} = \mathbf{E} \mathbf{D} \mathbf{E} \mathbf{T} = \mathbf{D} \mathbf{T}$  となる。



#### LTEでのMIMO適用方法

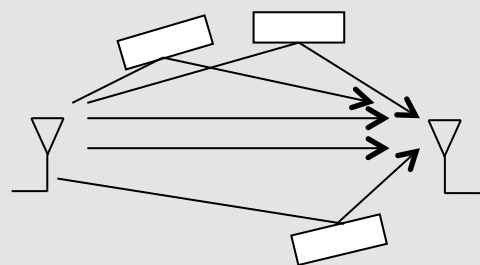
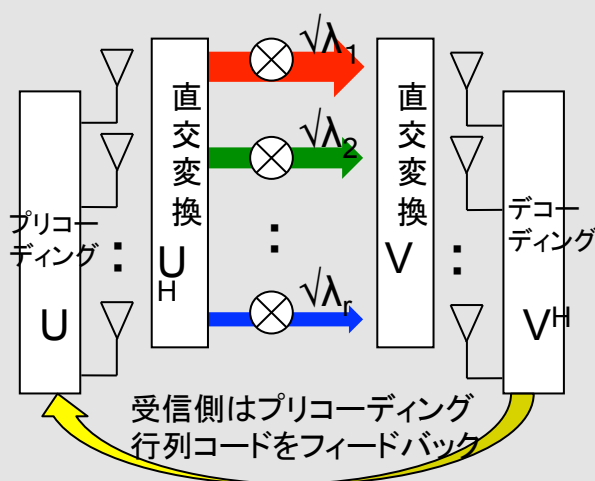
特異値 $\sqrt{\lambda_k}$ は、各レイヤーの利得であり、回線の太さ(通信容量)に対応する。これが大きいレイヤーは、受信S/Nが高く64QAMで送っても雑音に打ち勝って受信できる。他方、特異値が小さいレイヤーは低いS/NになるのでQPSKでも受信できないことになる。

送信側はプリコーディングのため、チャンネル行列を知る必要がある。このためには、基地局の複数アンテナで送信されているRS信号の受信結果をUEは基地局に報告すればいい。

ただし、移動通信では電波環境、すなわちチャンネル行列が常に変動するのでフィードバック伝送量や処理遅延を減らす必要がある。

そこで、LTEでは、予め少数のプリコーディング行列候補を定め、UEは、最も受信品質が高いと予想される行列のコードを返送するようにしている。また、基地局では、受信環境に応じて、レイヤー数を変える、即ちランク数を増減するランクアダプテーションを行っている。

#### チャンネル行列情報の転送



建物等の反射などによって多くの独立のパスがあるとMIMOには有利。

特異値の大きいレイヤーは高いS/Nが得られるが、逆に小さいとS/Nが低いので、このレイヤーをなくす(ランク数を減らす)のがいい。

#### 最適なビームを選択する

MIMOで使用するビームを決定するには、候補となるビームを1つつ送り、どのビームが最も品質がいいかを判断する方法もあるが、LTEでは、リファレンス信号(RS)を用いて一括で、最適なビームを選択している。ただし、選択できるビームの数はランクごとに16種類に限定している。

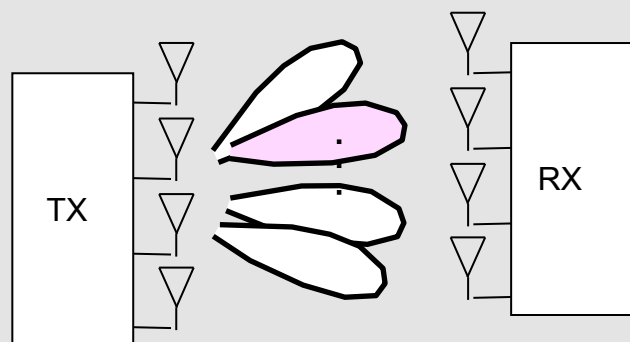
下図左表は、ランク1の場合の送信プリコーディングに対応するウェイトイングである。右図は、これに相当する16個のビームのうち、次のサブフレームではいずれを使用するのが最も良いかをUEは判断し、そのコードを基地局に報告する。

基地局は、UEから推奨されたビームを使用するか、あるいは他を使うかをオーバーライド決定して、UEに通知する。

#### チャンネル行列情報の転送

【4x4MIMO ランク1の場合】

Codebook Index	Weight
0	$[1 \ -1 \ -1 \ -1]^T$
1	$[1 \ -j \ 1 \ j]^T$
2	$[1 \ 1 \ -1 \ 1]^T$
3	$[1 \ j \ 1 \ -j]^T$
⋮	⋮
15	$[1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$



送信プリコーディング行列、ランク、変調・符号化率を推奨

UEでは、リファレンス信号の受信結果から、最も受信品質が良いと推定される送信ビームの候補を基地局に通知する。

#### 同時伝送されるデータブロックの単位

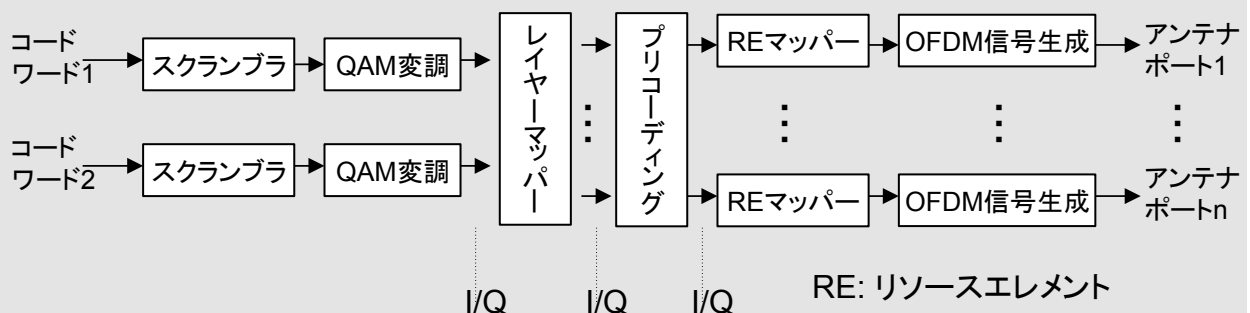
コードワードとは、ターボ符号による誤り訂正符号化を施した伝送データブロックの単位であり、ハイブリッドARQ (HARQ) での再送単位でもある。LTE, LTE-Aでのコンポーネントキャリアでは最大2個のコードワードが使用される。

各コードワードは、スクランブリングに続いて、QAMデータ変調によりI/Qシンボルに変換された後、1つまたは複数のレイヤーにマッピングされる。

続いて、各アンテナポートへの入力のためにプリコーダ行列が乗算された後、スケジューラによって割当てられたリソースエレメントにマッピングされる。

最後に、IFFTによって時間領域のOFDM信号に変換され、CPが付加されて、各アンテナからの送信信号となる。

#### コードワードの処理の流れ



LTEではレイヤー数4まで、LTE-Aではレイヤー数8までであるので、例えば、レイヤー数8では、コードワード1は第1~4レイヤーに、コードワード2は第5~8レイヤーに、(コードワード1の第1,5,9シンボルが第1レイヤーのように)1シンボルずつ順番に分配される。

LTEでは、FECを施したデータブロック(コードワード)の単位で変調、複数レイヤーへのマッピング、プリコーディングが行われる。

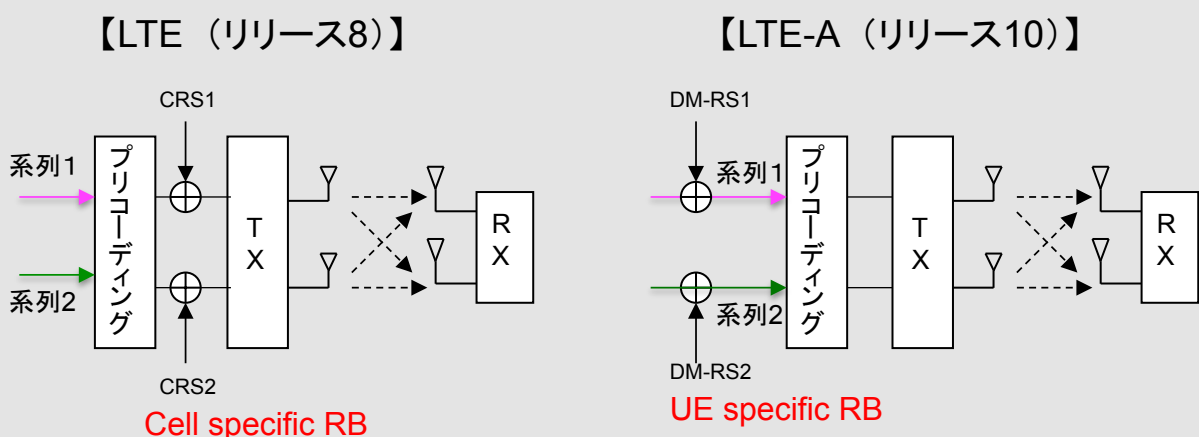
#### 閉ループMIMO動作を簡単化

LTE(リリース8)での閉ループMIMOでは、RS信号の受信結果をもとに、受信側が推奨するプリコーダ行列コード(PMI)とランク情報(RI)をもとに、実際に使用するプリコーダ行列を決定し、その行列コード(TPMI)を制御チャネル(PDCCH)にて通知している。

LTE-Aでは、これとは別に、PDSCHでのUE向けリソースブロック内に、当該UE向けのRS信号(UE Specific RS)を挿入することで、MIMO制御の簡単化と精度の高い信号分離ができるようにしている。

基地局での当該RS信号の挿入はプリコーディングの前段で行われるため、UEは当該RS信号の受信結果を用いることで、上記TPMIを用いずに、基地局が使用するプリコーダ行列を知ることができる。このUE Specific RSと区別するため、セル内の全UE向けのRS信号は、Cell Specific RSと呼ばれる。

#### Cell specific RS と UE specific RS



LTE-Aでは、UEは、コードワードとともに送られる当該UE固有のRSを用いてプリコーディング行列を知ることができる。





### 3. アンテナと電波

#### (11) アンテナ伝送モード

#### 電波環境や装置能力により9種類のいずれかを使用

下り回線では複数アンテナの使用形態によって、合計9種の伝送モード(Transmission Mode)を定めている。

モード2(送信ダイバシティ)は空間多重が利用できない場合に使用される。また、制御信号(PBCHやPDCCH)の伝送に使用する。

モード3(開ループ空間多重)は、チャネル情報が得られない場合や、電波環境が高速に変化する場合に用いる。

モード4は、Cell Specific RSとコードブックを使用する閉ループ空間多重であり、その変形であるモード5は1UEが1レイヤーずつ使用するMU-MIMOである。モード6はモード4にてレイヤー数を1に固定した場合であり、ビームフォーミングと類似の効果をもつ。

モード7,8はUE Specific RSを用いて、特定のUEにビームを向けるビームフォーミングである。これらは制御チャンネルには適用されない。

モード9はモード5のMU-MIMOを8アンテナに拡張したものである。

#### LTE,LTE-Aでの伝送モード

モード	アンテナ方式	備考
1	単一アンテナ	
2	送信ダイバシティ	
3	開ループ空間多重	
4	閉ループ空間多重	2又は4アンテナ
5	マルチユーザMIMO	2又は4アンテナ
6	閉ループ空間多重	レイヤー数1
7	ビームフォーミング	
8	ビームフォーミング	レイヤー数2
9	マルチユーザMIMO	8 アンテナ (LTE-Aで追加)

モード2は空間多重が利用できない場合のフォールバックモードである。



## 2. アンテナと電波

### (12) UEからの返送パラメータ

#### CQI, PMI, RI

基地局は、最適なアンテナ構成、ランク数を決めるとともに、変調方式・符号化レートを選択するため、UEから受信品質などに関する次の3つのパラメータを送ってもらう。

CQI (Channel Quality Indicator) は9つ全ての伝送モードにおいて共通に使用される最も基本的な情報であり、特定のランクとプリコーディング行列を使用した場合のブロック誤り率(BLER)が0.1以下となる送信フォーマット(変調方式、符号化率)を選択し、そのコードを1~15の数値で返送する。

PMI(Precoding Matrix Indicator)、RI(Rank Indicator)は、UEが基地局に推奨するプリコーディング行列のコード、ランクである。

#### CQI

CQI	変調方式	符号化率*	効率
0	—		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

\*) 符号化率 x 1024 を示す。

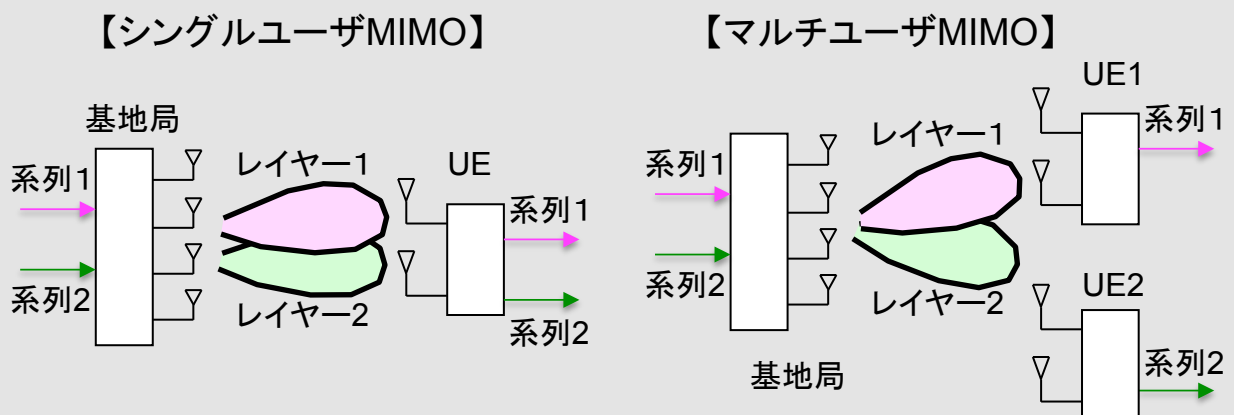
効率は、シンボルあたりのビット数(QPSK:2, 16QAM:4, 64QAM:6)に符号化率(表内の数値/1024)を掛けた数値である。

#### LTE, LTE-Aでは下り回線に適用可能

MU-MIMOは、複数のレイヤーを空間的に分離し、時間と周波数位置が同じであるリソースブロックの各々を別のユーザに割当て、同時に独立して伝送するものであり、空間多重アクセスの一種である。これに対して、送受信局が1対1のMIMO、即ち、1つのUEが複数レイヤーを同時使用するのはシングルユーザMIMO(SU-MIMO)である。

LTE(リリース8)でもMU-MIMOは可能ではあるが、LTE-Aでは下り8x8, 上り4x4のMIMOが可能になっているため、LTE-AにてMU-MIMOが本格利用されるだろう。ただし、組になるUE同士の位置関係や伝送量がMU-MIMOに適している(ほぼ同じ伝送速度の要求がある)など、セル内のUE分布に影響されるだろう。

#### SU-MIMOとMU-MIMO



MU-MIMOは、SU-MIMOにて1つのUEが占有する複数のレイヤーを分離し、複数UEがそれぞれのレイヤーを使用するもの。