

NB-IoTの基礎



2017年6月
株式会社 A2A研究所



NB-IoTの基礎

(1)IoT向けLTE方式

Cat 1, 0, M1, NB-IoTの4方式

LTE方式などのグローバルなモバイル通信方式の標準化を行っている3GPP(3rd Generation Partnership Project)では、既存LTEとの親和性を考慮したIoT(Internet of Things)向け技術仕様を定めている。

これまでに年を経るにつれて、より低速で簡単な端末(*)構造に対応した4つの規格が制定されている。このうちNB(Narrow Band)-IoTは、LoRaWAN等の他のLPWA方式が急速に台頭することになったため、通常より短期間のうちに制定されることになった。

(*)以下では3GPPでの用語であるUE(User Equipment)を用いる

- ・ Cat 1 2009年 リリース8
- ・ Cat 0 2011年 リリース10
- ・ Cat M1 2016年 リリース13
- ・ NB-IoT 2016年 リリース13 (3GPP仕様書ではCat NB1と呼称)

IoT向けLTE方式の比較

カテゴリー	Cat 1	Cat 0	Cat M1	NB-IoT
帯域幅	20MHz	20MHz	1.08MHz	180kHz
ガードバンド利用	不可	不可	不可	可能
下り最大速度	10M bit/s	1M bit/s	1M bit/s	250k bit/s
上り最大速度	5M bit/s	1M bit/s	1M bit/s	250k bit/s
リンクバジェット	LTE並み	LTE並み	LTE +15dB	LTE +20dB
UE送信電力	23dBm	23dBm	20/23dBm	20/23dBm
複信方式	全2重	全/半2重	全/半2重	半2重

NB-IoTではCat M1より帯域幅を更に狭くすることでガードバンド利用も可能に

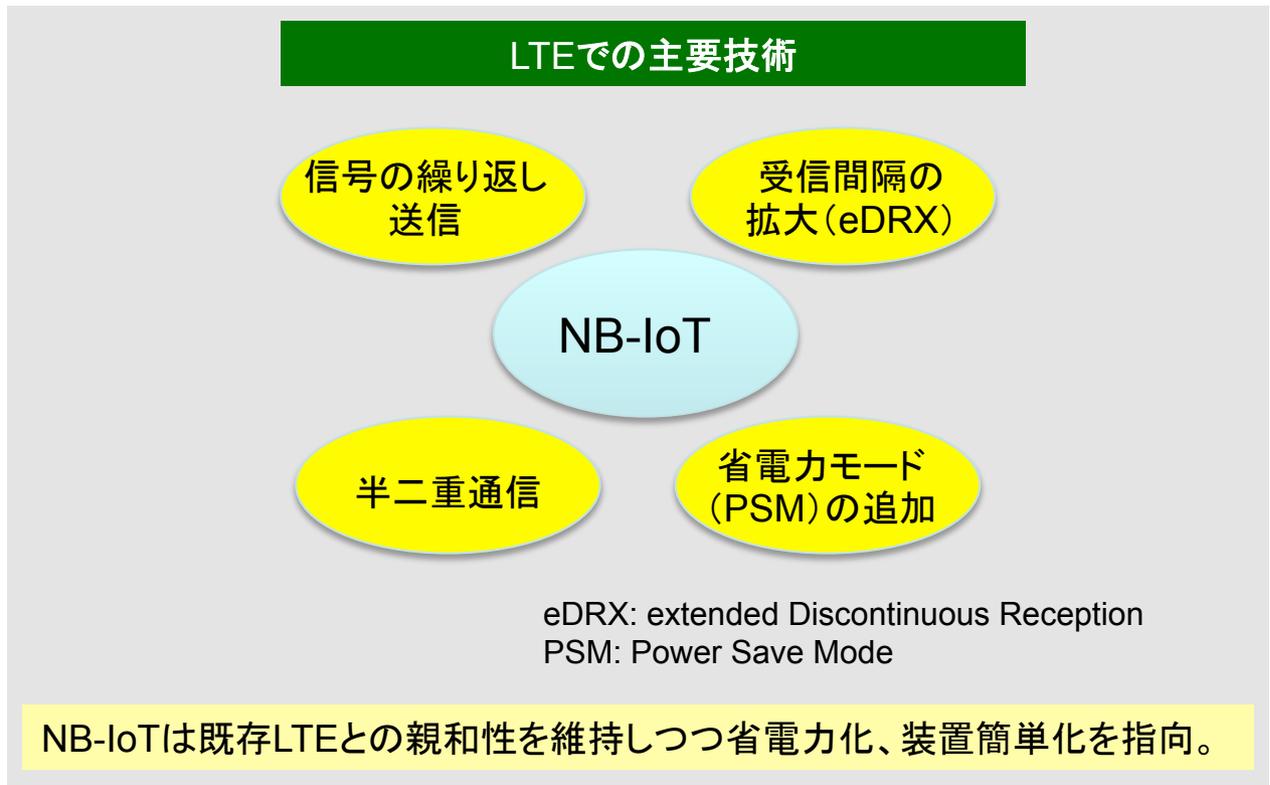
3GPPでは、既存LTEに親和性のあるIoT向け仕様を順次標準化している。

電池駆動で十年以上もつUEも可能に

NB-IoTでは、移動が限定的であるUEが少量のデータ送信を行うこと、電池超寿命化と装置簡単化によるコスト低減が大きいことを考慮して、更なる狭帯域化を図るとともに、以下の技術を採用している。

1. 半二重通信：送信と受信を切替運用することでUE構造を簡素化
2. 信号の繰り返し送信：同じ信号を繰り返し送信することでS/Nを改善し、カバレージを拡張
3. 省電力モードの追加：UEでの待受時間が一定値を超えた時、ネットワークへの登録状態を維持のまま電源オフに近い状態に遷移
4. 受信間隔の拡大：UEでの信号受信を間欠的(最長2.9時間まで)とし、それ以外の時間では多くの機能を停止

また、接続中のセル間ハンドオーバー機能は搭載せず、セルの再選択はアイドル状態で行うなどの制御簡単化を図っている。



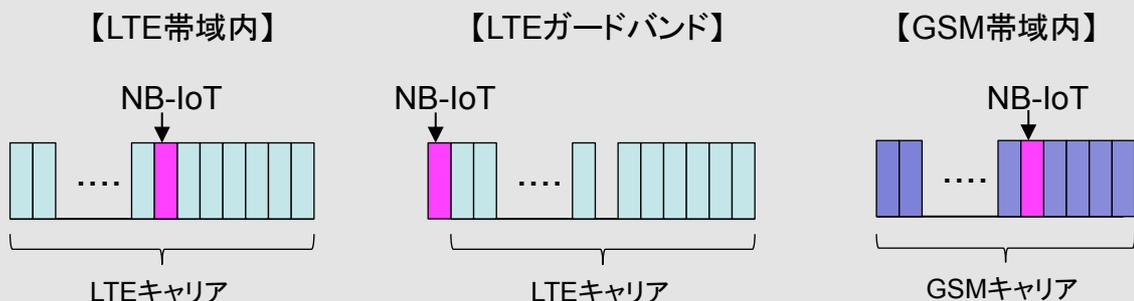
既存LTE帯域のすき間を有効利用

NB-IoTでは、既存LTEでの最小のリソース割り当て単位である180kHz幅(占有帯域幅200kHz)の一つのリソースブロック(RB)内にUEの送受信信号が収まるようにしている。

そこでNB-IoTでは、次の3つの周波数運用モードが可能なため、通信事業者は既存無線システムを有効活用できる。

- (1) 既存LTEの帯域内の一部を1RB単位で使用するインバンドモード
- (2) 5MHz以上の帯域幅を持つ既存LTEのガードバンドに收容するモード (1.4MHz,3MHz幅のLTEではガードバンドが狭いため不可)
- (3) GSM等の帯域内に独立して收容するスタンドアロンモード

NB-IoTの運用例



既存LTEの周波数使用最小単位の12サブキャリア(180kHz幅)と狭いことから、LTE帯域内やガードバンドなどに配置できるので無駄が少ない。



NB-IoTの一次変調方式はQPSKまで

NB-IoTではLTEでの技術やパラメータの多くを踏襲している。多重方式には既存LTE同様、下り回線にOFDM、上り回線にはUEピーク電力低減のためにシングルキャリア(SC)FDMAを採用している。

サブキャリア間隔はLTE同様の15kHzに加え、その1/4の3.75kHzも規定しており、シンボル長が4倍に長くなるのでマルチパスによる干渉に強くなる。上り回線では電力を狭帯域に集中させてS/Nを稼ぐことができるようにサブキャリア1波でも利用可能としている。

LTEでは64QAMまでの位相変調方式を使用するが、低速で広いカバレッジのNB-IoTでは、QPSK以下を使用する。特に上り回線では、瞬時電力変化を少なくするため、データシンボル遷移時に零点通過が生じない $\pi/2$ シフトBPSK, $\pi/4$ シフトQPSKも使用している。

LTE, NB-IoTの無線方式と主要パラメータ

	LTE	NB-IoT		
		下り	上り	
多重方式	下り:OFDM 上り:SC-FDMA	OFDM	SC-FDMA	
一次変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK	QPSK, $\pi/4$ シフトQPSK $\pi/2$ シフトBPSK	
サブキャリア帯域幅	15kHz	15kHz	15kHz	3.75kHz
フレーム時間	10 ms			
スロット数/フレーム	20	20	20	5
スロット時間	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	2 ms
シンボル数/スロット	7または6	7または6	7	7

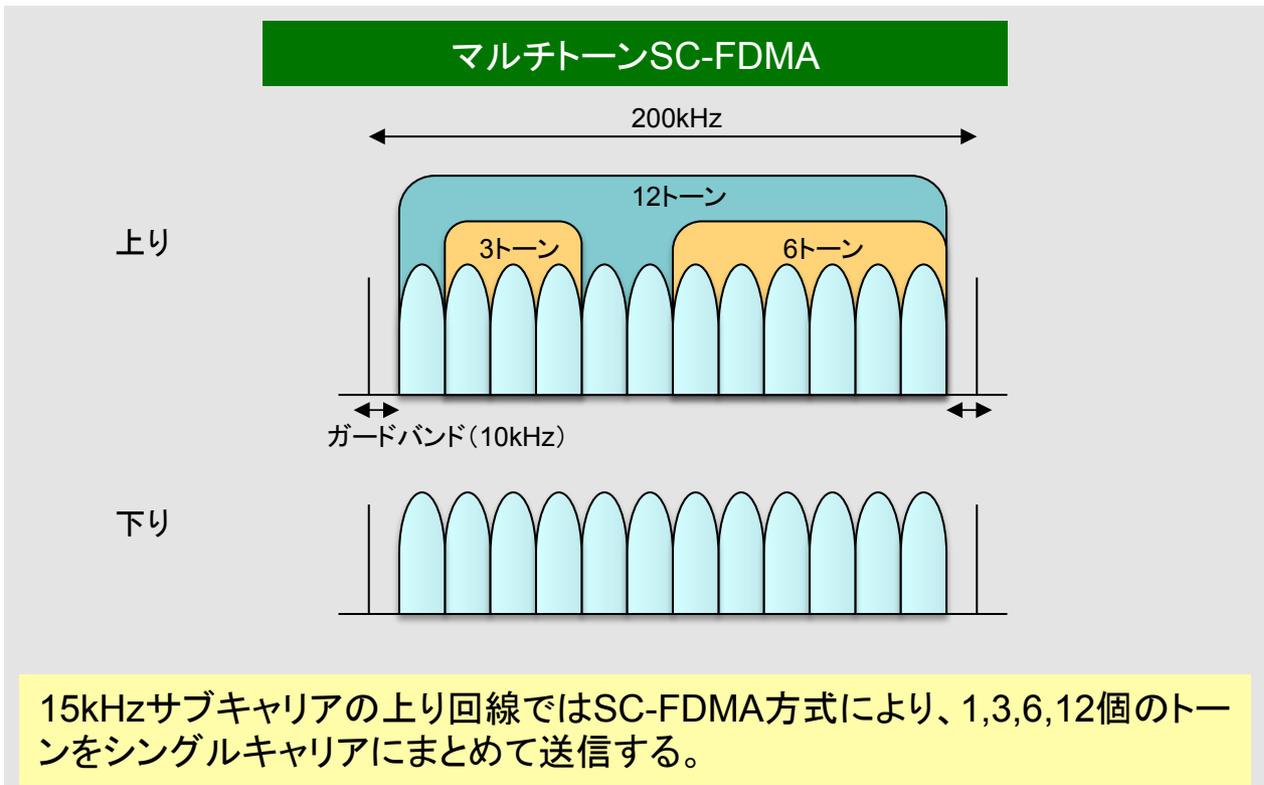
NB-IoTではLTEの無線方式, 主要パラメータを踏襲している。

上り回線では単一サブキャリアや複数サブキャリアの組合せが可能

既存LTEでは、無線リソース割当て単位は15kHzサブキャリア12波の組で構成されるPRB(Physical Resource Block)であるが、NB-IoTの上り通信では、伝送速度を犠牲にすることで、より狭い帯域に電力を集中できるように、1,3,6個のサブキャリア(トーン)の単位でも使用できるようにしている。

なお、ランダムアクセスやACK等の制御信号送信に用いる3.75kHzサブキャリア使用の場合、キャリア数は1個に限っている。

一方、NB-IoTの下り通信では、15kHzサブキャリアを12波まとめて使用し、当該チャンネルにアクセスする全てのUEが同時受信するモードに限られるので、リソース割り当ては時間単位のみで行われる。





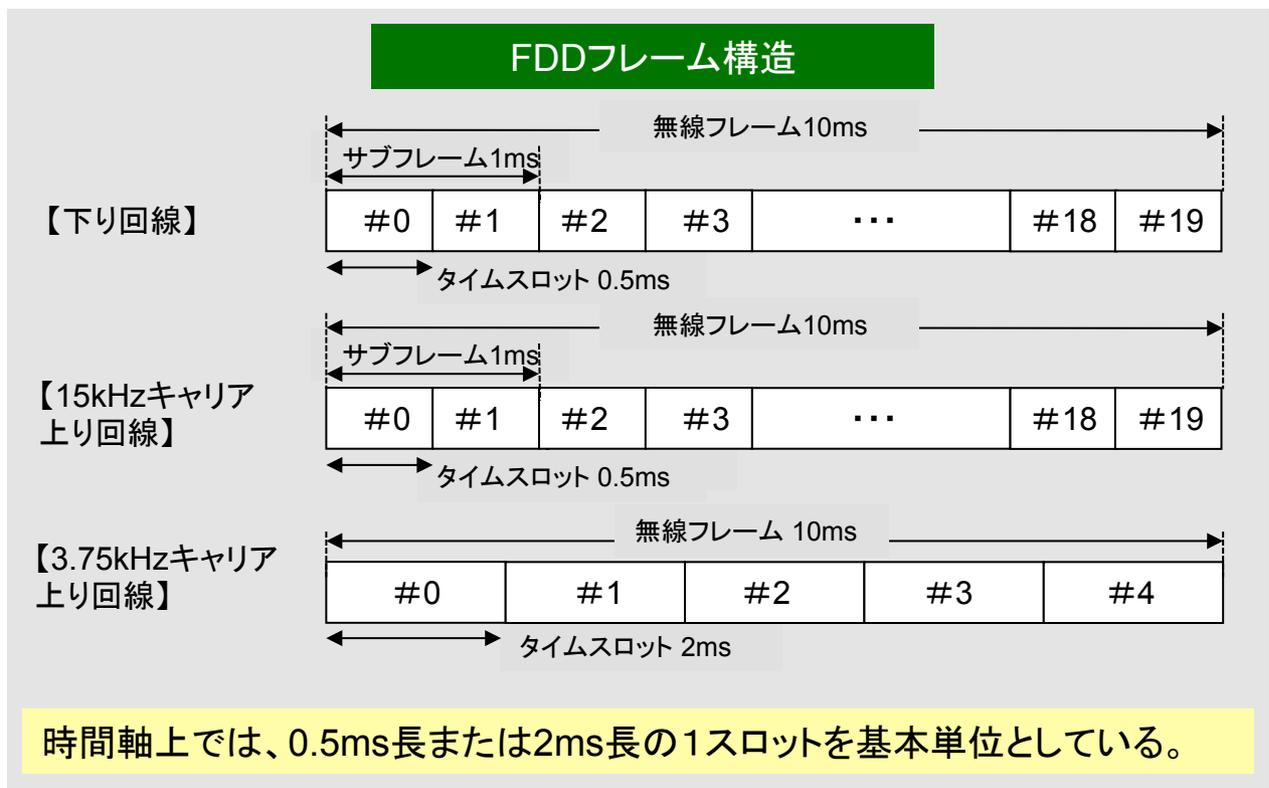
10フレームが10msのFDD

NB-IoTは上下回線に別の周波数を用いるFDD(Frequency Division Duplex)である。

時間軸上では既存LTE同様、上下回線の無線フレーム(RF)が同じ10msのフレーム長を有する構造となっている。

15kHzサブキャリアの場合、1無線フレームは1ms長のサブフレーム10個で構成され、1サブフレームは0.5ms長のタイムスロット2個を有する。

一方、3.75kHzサブキャリア上り回線での1タイムスロット長は2msである。





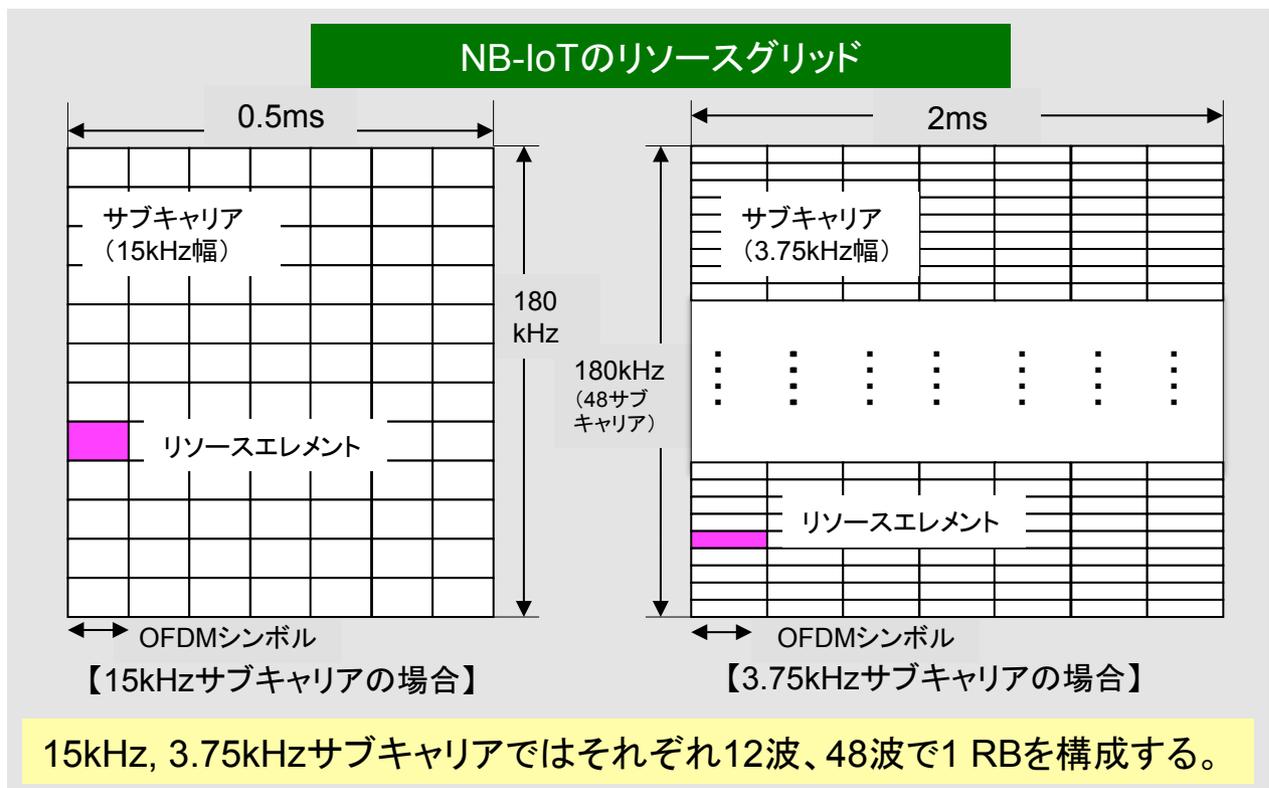
時間と周波数を作る2次元空間がリソースグリッド

LTEやNB-IoTでは、周波数軸と時間軸での無線リソース瞬時位置を2次元的に表示する格子をリソースグリッドと呼んでいる。

NB-IoTリソースグリッドの周波数帯域幅はサブキャリアが15kHz, 3.75kHzのいずれの場合も180kHzである。一方、合計7個のOFDMシンボルをもつ1タイムスロット長は15kHzサブキャリアでは0.5ms, 3.75kHzサブキャリアでは2msである。

このリソースグリッドでは、1 OFDMシンボル時間とサブキャリア周波数間隔が作る要素をリソースエレメントと呼んでいる。

OFDMシンボル長は、サブキャリア周波数の逆数で与えられ、15kHz, 3.75kHzサブキャリアでは、それぞれ66.7 μ s, 266.7 μ sとなる。





既存LTE方式を踏襲している

NB-IoTの物理チャンネルは次の目的に使用される。

NPBCH: システム基本情報(MIB: Master Information Block)を常時放送

NPDCCH: UEに上下回線リソース割当やページング等の情報を通知

NPDSCH/NPUSCH: 下り/上りデータトラフィックを伝送

(NPUSCHでは上り制御信号も伝送)

NPRACH: ランダムアクセス用のプリアンブル信号を送信

一方、基準信号(RS)は基地局より全SFの特定スロットに送信される。NPSS, NSSSでは、隣接セル間干渉が少ないCAZAC*1符号が送信されており、UEはWCDMAやLTE同様の階層型セルサーチによって、504通りあるセル固有の物理識別番号(PID*2)を取得する。

DMRSは、基地局にてUE送信信号の復調に用いる基準信号であり、UEデータ送信時のRU内に多重される。

物理層チャンネルと同期用信号

【物理層チャンネル】

先頭のNPはNarrowband Physicalの略

下りリンク(基地局→UE)	上りリンク(UE→基地局)
NPDSCH (DS: Downlink Shared)	NPUSCH (US: Uplink Shared)
NPBCH (B: Broadcast)	NPRACH (RA: Random Access)
NPDCCH (DC: Downlink Control)	

【同期用信号】

下りリンク(基地局→UE)	上りリンク(UE→基地局)
NRS (Reference Signal)	DMRS (Demodulator Reference)
NPSS (Primary Sync Signal)	*1) CAZAC: Constant Amplitude Zero Auto-Correlation waveform *2) PID: Physical layer cell ID
NSSS (Secondary Sync Signal)	

MBMSサービス等がないため既存LTEに比べチャンネルや信号種類が少ない。



2つのフォーマットがある

上り方向のデータと制御信号の送信用チャネル(NPUSCH)の信号には2種類のフォーマットがある。このうち、Format 1はデータの送信、Format 2はACK等の制御信号の送信に用いる。Format 2の一次変調方式はBPSKであり、1トーンのみを使用する。

一方、Format 1を用いたデータ送信では、トーン数によって異なるスロット数をもつリソースユニット(RU)の単位で基地局からの割り当てが行われる。例えば3トーンでは8スロット(4ms長)が1RUである。

基地局ではNPRACHによるUEからのアクセス要求を受信した後、上りデータ送信のためのNPUSCHリソース割当て情報(開始時刻、RU数など)をNPDCCH経由でUEに通知する。

上り回線のリソースユニット

フォーマット	サブキャリア幅	トーン数	一次変調方式	スロット数	時間
Format 1 (データ送信用)	15kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK, $\pi/4$ シフトQPSK	16	8ms
		3	QPSK	8	4ms
		6	QPSK	4	2ms
		12	QPSK	2	1ms
	3.75kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK, $\pi/4$ シフトQPSK	16	32ms
Format 2 (制御信号送信用)	15kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK	4	2ms
	3.75kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK	4	8ms

上り制御信号の送信には低速のFormat 2が使用される。

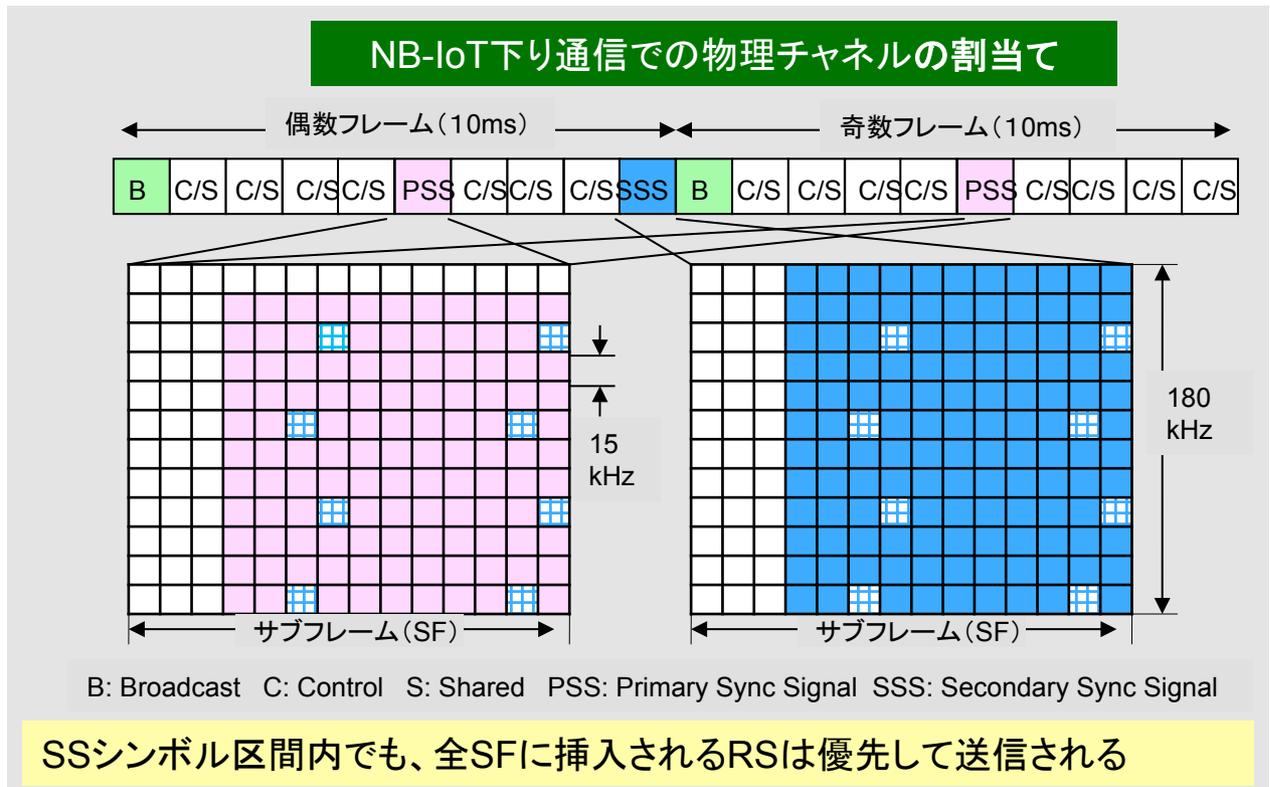
セルサーチ用信号は第5, 第9サブフレームにて常時送信

下り回線の特定サブフレーム(SF)に送信されるセルサーチのための同期信号(SS)では既存LTEでの2段階の同期方式を踏襲している。

NB-IoT用の信号は既存LTEのそれと区別するため、NPSS, NSSSと呼び、NPSSは第5SF、NSSSは偶数フレームの第9SFにて常時送信される。

NB-IoTをLTE帯域内にて運用する場合、SF内の先頭3 OFDMシンボル区間にはLTE向け制御チャンネル(PDCCH)が含まれることがあるので、当該区間にSSシンボルが配置されることはない。

なおSSシンボル区間内でも、全てのSFに挿入される基準信号(RS)は優先して送信される。





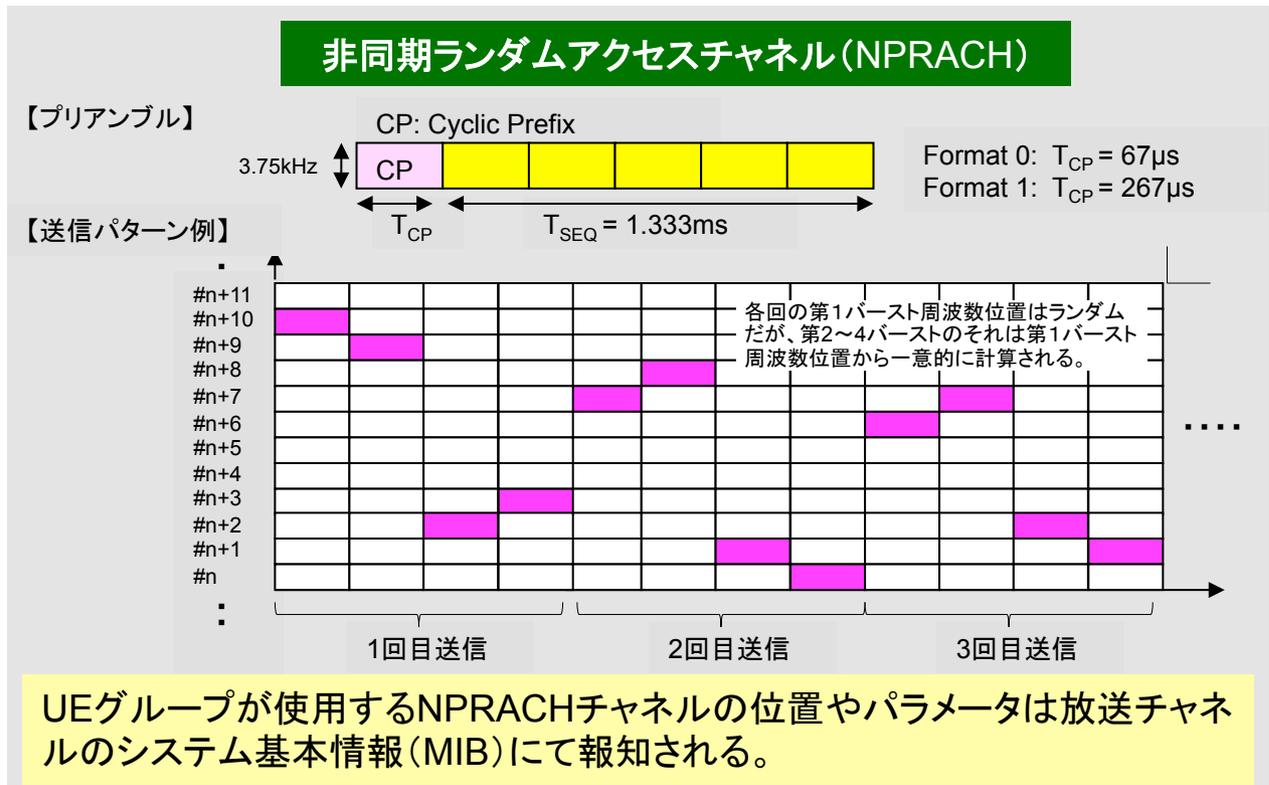
UEのネットワーク登録や送信要求準備のために行われる

UEからのアクセス要求用のNPRACHでは、BPSK変調の3.75kHzサブキャリアによるプリアンプルを用いるが、そのフォーマットには最大接続半径が異なる2種類がある。このうちFormat 0はCP長66.7 μ 秒(接続半径 8km)、Format 1はCP長266.7 μ 秒(接続半径 35km)である。

NPRACHの位置やパラメータはMIBにて報知され、次の値を持つ。

- ・サブキャリア：連続する3.75kHzサブキャリアの先頭周波数位置と数
- ・周期：40ms ~ 2.56s
- ・時間軸上での開始位置と繰り返し数 など

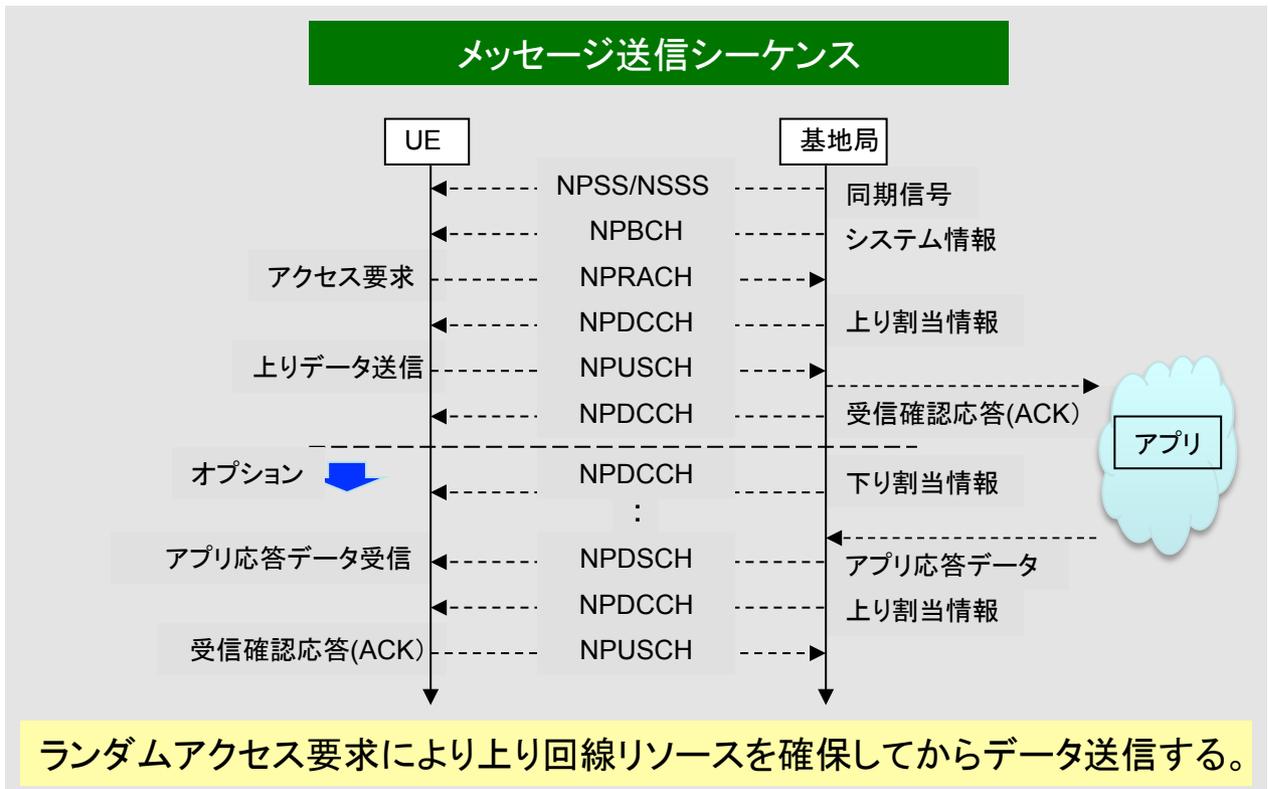
UEは、MIBにて指定された連続する12サブキャリア内にて指定個数(下の例では4個)のプリアンプルをギャップなしで周波数ホッピングして送信し、これを指定回数だけ繰り返す。



上り信号を間欠的に送信し、下り信号の受信はその直後のみ

NB-IoTではセンサーデータ収集のような上り通信が殆どと考えられている。この上り通信の基本的な手順は次のようになる。

1. UEは基地局からのNPSS/NSSSを受信して同期を確立した後、NPBCHにて報知されているシステム情報や制御情報を取得する。
2. UEはランダムアクセス信号をNPRACHに送信し、上り通信のためのリソース割当てを要求する。
3. 基地局は上記の受信後、上り割当情報をNPDCCHにて送信する。
4. UEは上で指示されたNPUSCH上のRUにてデータを送信し、これを受信した基地局はクラウド側アプリに転送する。
5. 基地局はNPDCCHにてACK応答を返す。その後、次も追加できる。
6. NPDCCHでの下り割当情報と、NPDSCHでのアプリデータ送信。
7. NPDCCHでの上り割当情報と、UEからのACK応答の送信。



殆どの時間帯では受信も不可なスリープ状態に

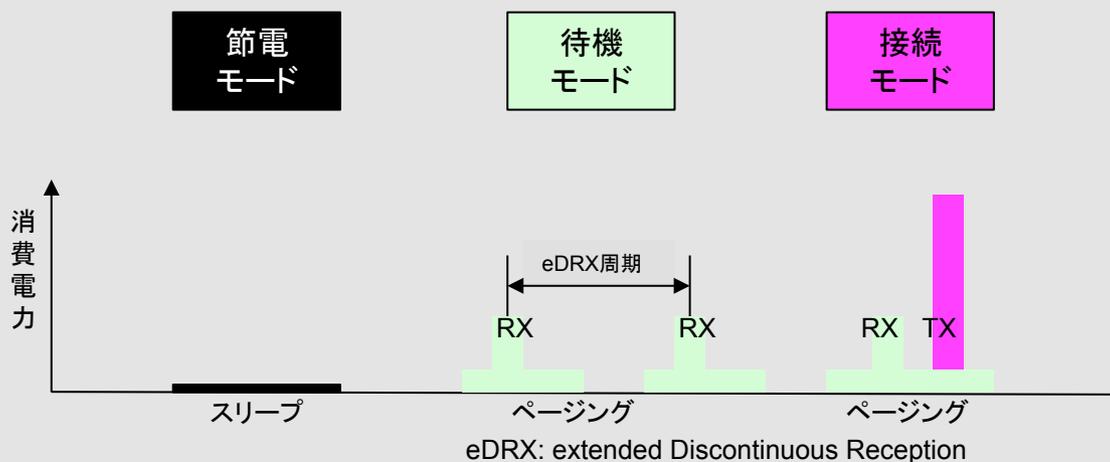
NB-IoTでのUEは、次の3つの動作モードをもたせることで消費電力を抑えている。

- 節電モード(Power Save Mode) 基地局に登録されてはいるが、UE制御ができないため、送信・受信ともに不可の状態
- 待機モード(Idle Mode) UE制御ができる下り受信可能な状態
- 接続モード(Connected Mode) 上りデータを送信できる状態

各状態では固有のタイマーを持ち、一定の時間の経過あるいはトリガーイベント発生時に動作モードが遷移する。

特に、NB-IoTでは基地局からUEを呼び出すページング信号の周期を長くしているのに加え、節電モードに入る際には基地局にその旨を通知し、無駄なページング情報を送らないようにするなど、待機モードと節電モードでの電力低減を図っている。

動作モードの遷移と消費電力



NB-IoTではページング周期を最大175分まで延長できる。更にUE動作の殆どを停止し、 μ Aレベルの電流値にする節電モードを追加している。



それぞれに長所短所がある

NB-IoTはLPWA(Low Power Wireless Access)の一種であり、代表的なLPWAであるLoRaWAN™とは概ね次のように比較できるだろう。

最大の違いは、前者は免許人のみが専用使用するライセンス帯域を用いるのに対して、後者はアンライセンス帯域を使用する点にある。そこで、前者はUE電力や伝送速度の点で有利である。

反面、前者はLTE方式を基本とした同期方式のため、UE送信時のみに一定の電力消費がある非同期方式の後者に比べて、電力消費や装置複雑さの点で多少劣っている。また、既存のLTE基地局に装置を設置することで、MNOのサービスエリアでは有利に展開できると見られるが、それ以外のエリアや特定ユーザのアプリケーションではLoRaWAN等が使用されるだろう。

NB-IoTとLoRaWANの比較

	NB-IoT	LoRaWAN クラスA
周波数帯	ライセンス帯域	アンライセンス帯域
基本帯域幅	180kHz	200kHz
UE出力	20/23dBm	13dBm (日本)
最大伝送速度	百kbps程度	十kbps程度
同期方式	同期	非同期
UE復信方式	半二重	半二重
カバレッジ(セル半径例)	約 5km	約 3km
UE装置複雑さ	小	極めて小

NB-IoTと他のLPWAはそれぞれの特徴を生かして共存してゆくだろう。