

移動無線通信技術の発展と将来展望 そして研究開発の醍醐味

安達文幸
東北大学

E-mail: adachi@ecei.tohoku.ac.jp
<https://adachifumiyuki.jp/>

目次

- はじめに
- 移動通信システムとは
- 進化の歴史(1G~5G)
- 将来展望(6G)
- 無線研究の醍醐味
- おわりに

2021/7/16

FA/Tohoku University

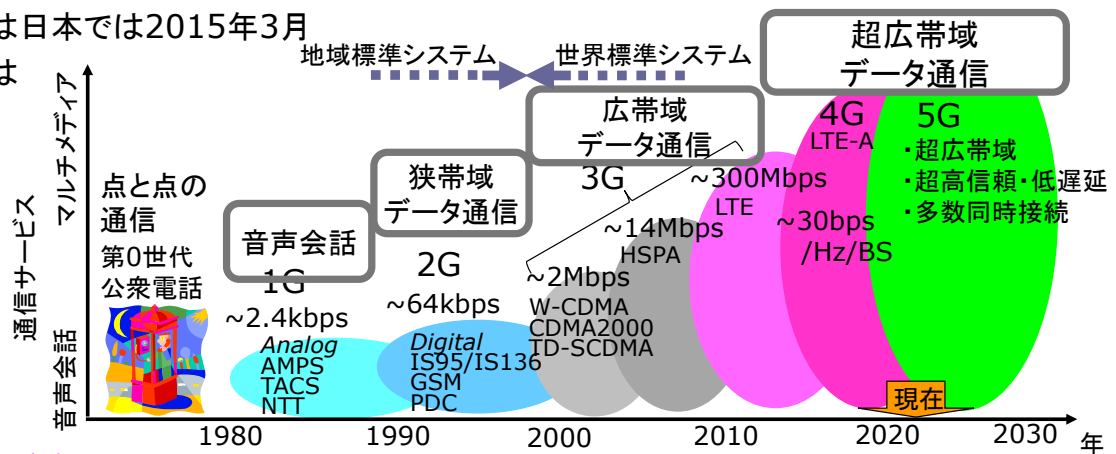
1

はじめに

- 移動通信システムは、およそ40年(1980~2020年)をかけて数kbpsの第1世代(1G:自動車電話)から数10Gbpsの第5世代(5G)へと進化

- 第1世代システムは日本では1979年12月に登場
- そして第2世代(2G), 第3世代(3G), 第4世代(4G)システムへとおよそ10年ごとに進化
- 4Gシステムの登場は日本では2015年3月
- 5Gシステムの登場は2019~2020年

- 超広帯域に加えて
超高信頼・低遅延と
超多数接続



F. Adachi, "Wireless past and future - evolving mobile communications systems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, pp. 55-60, Jan. 2001.
2021/7/16

安達の
研究人生
1973

FA/Tohoku University

2

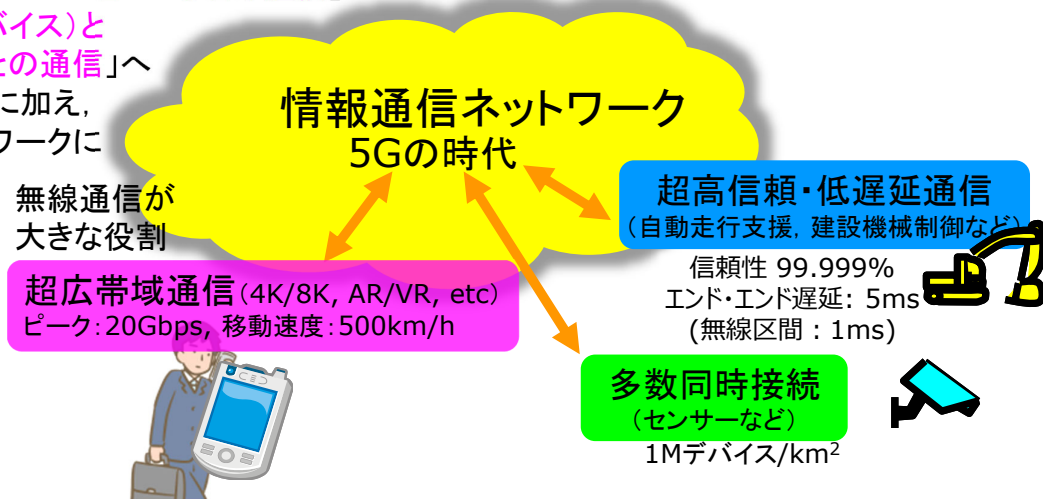
はじめに

□ 移動通信を含む情報通信ネットワークは、今や重要な社会基盤

- 現代社会では、殆ど全ての人がネットワークとつながっている

□ 移動通信システムの進化

- 「人と人との通信」から「人とコンピュータとの通信」へ
- さらに「コンピュータ(デバイス)とコンピュータ(デバイス)との通信」へ
- 5Gシステム以降では人に加え、ほぼ全てのモノがネットワークにつながる



2021/7/16

FA/Tohoku University

3

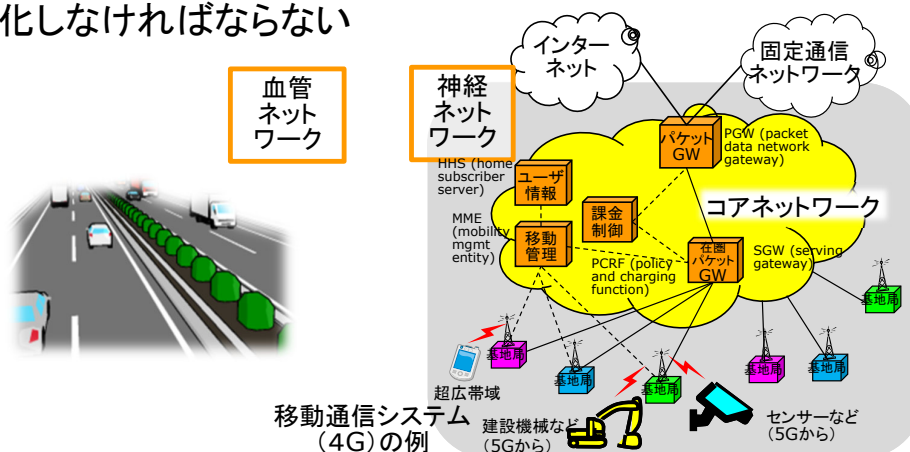
はじめに

□ 移動通信を含む情報通信ネットワークは、今や重要な社会基盤

- 現代社会では、殆ど全ての人がネットワークとつながっている
- 人間に例えれば、情報通信ネットワークは神経ネットワーク、そして輸送ネットワークは血管ネットワーク

□ 社会の進化につれて、「神経」を構成する移動通信システムも進化しなければならない

- 新しい通信サービス
- 安全・安心



2021/7/16

FA/Tohoku University

4

はじめに

- 移動通信システムとは
- 進化の歴史(1G~5G)
- 将来展望(6G)
- 無線研究の醍醐味

2021/7/16

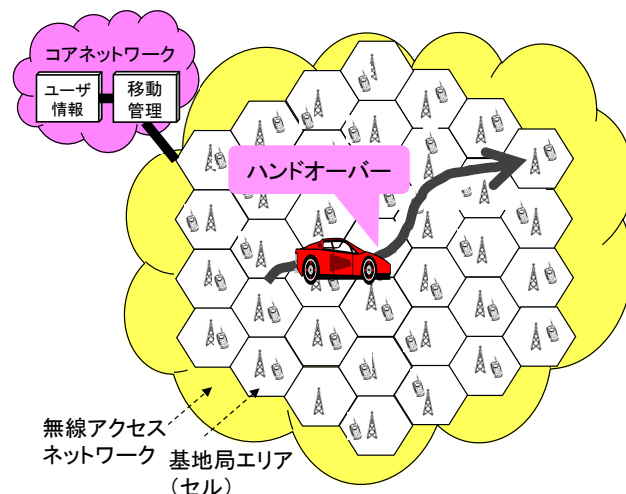
FA/Tohoku University

5

移動通信システムとは

*奥村, 進士監修: 移動通信の基礎, 8章, 信学会, 1986年.
*進士編: 移動通信, 7章, 丸善, 1989年.

- 広いサービスエリアを多数の無線セル(細胞)で覆って, 移動通信サービスを提供
 - このことから, セルラーシステムとも呼ばれる
 - 限られた無線帯域幅と送信電力の効率的利用
- 接続制御
 - 位置登録
 - どこに移動していても接続できるように, 端末位置情報の登録と管理
 - ハンドオーバー
 - 移動中でも通信を継続するために, 通信相手の基地局を無瞬断で切り替え
- 同一周波数の再利用
- 通信距離の縮小



移動通信システムの概念図

1960年代後半, 日本, 米国でそれぞれ研究された
■ 荒木: 全地域移動通信方式の基本的諸問題, 通研実報, 16, No.5, p. 843, 1967.
■ K. Araki, "Fundamental problems of nationwide mobile radio-telephone system", NTT Rev. Elec. Comm. Lab., Vol. 16, pp.357-373, May/June 1968.
■ 森永ほか: 新公衆移動通信方式, 信学会通信方式研究会資料, CS-69-68, 1969.
■ R. H. Frenkiel, "A high-capacity mobile radiotelephone system," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 19, pp. 173-177, May 1970.
■ Bell Laboratories, "High-capacity mobile telephone system technical report," submitted to FCC, Dec. 1971.

2021/7/16

FA/Tohoku University

6

移動通信システムとは

*奥村, 進士監修: 移動通信の基礎, 8章, 信学会, 1986年.
*進士編: 移動通信, 7章, 丸善, 1989年.

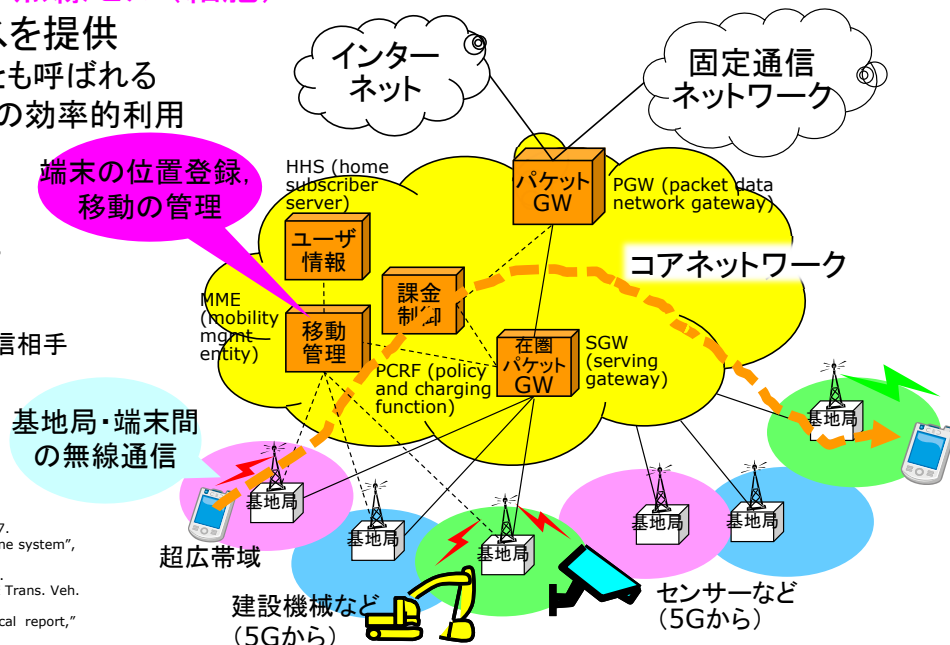
- 広いサービスエリアを多数の無線セル(細胞)で覆って, 移動通信サービスを提供
 - このことから, セルラーシステムとも呼ばれる
 - 限られた無線帯域幅と送信電力の効率的利用
- 接続制御
 - 位置登録
 - どこに移動していても接続できるように, 端末位置情報の登録と管理
 - ハンドオーバー
 - 移動中でも通信を継続するために, 通信相手の基地局を無瞬断で切り替え
- 同一周波数の再利用
- 通信距離の縮小

1960年代後半, 日本, 米国でそれぞれ研究された
 ■ 荒木: 全地域移動通信方式の基本的諸問題, 通研実報, 16, No.5, p. 843, 1967.
 ■ K. Araki, "Fundamental problems of nationwide mobile radio-telephone system", NTT Rev. Elec. Comm. Lab., Vol. 16, pp.357-373, May/June 1968.
 ■ 森永ほか: 新公衆移動通信方式, 信学会通信方式研究会資料, CS-69-68, 1969.
 ■ R. H. Frenkiel, "A high-capacity mobile radiotelephone system," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 19, pp. 173-177, May 1970.
 ■ Bell Laboratories, "High-capacity mobile telephone system technical report," submitted to FCC, Dec. 1971.

2021/7/16

FA/Tohoku University

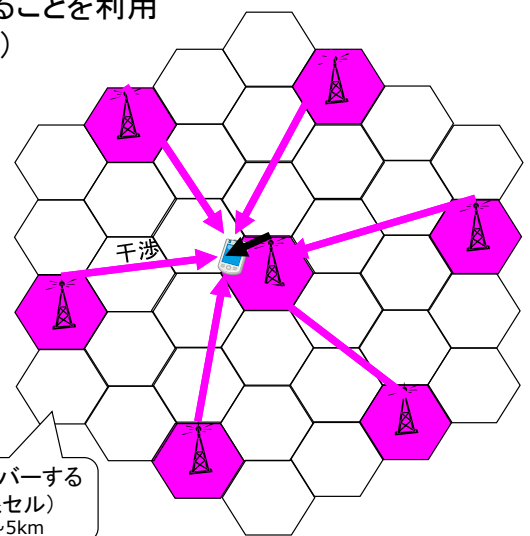
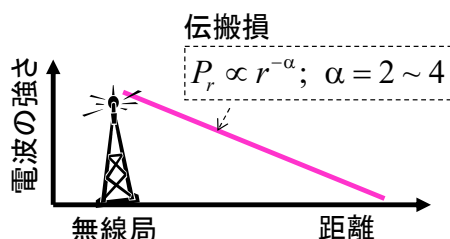
7



移動通信システムとは

*奥村, 進士監修: 移動通信の基礎, 8章, 信学会, 1986年.
*進士編: 移動通信, 7章, 丸善, 1989年.

- 同一周波数の再利用
 - 電波が減衰(およそ距離の2~4乗に反比例)しながら伝搬することを利用
 - 面的スペクトル利用効率の向上(限られた帯域幅の有効利用)
 - 注) 実際には, 伝搬環境のダイナミックな変動があるから
 - 再利用距離の決定は複雑
- 通信距離の縮小
 - エネルギー利用効率の向上
 - (バッテリー駆動の携帯端末にとって重要)



同一周波数の再利用の模式図

2021/7/16

FA/Tohoku University

8

移動通信システムとは 同一周波数の再利用

面的スペクトル利用効率(bps/Hz/km²)

- 限られた帯域幅を如何に有効に利用しているかを表す重要な指標

$$\eta_{\text{ase}} (\text{bps/Hz / km}^2) = \log_2(1 + \Lambda) \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{S}$$

Λ : 許容信号対干渉電力比(SIR)
 F : 周波数再利用係数
 S : 無線セル面積

基地局のスペクトル利用効率
(bps/Hz/BS)

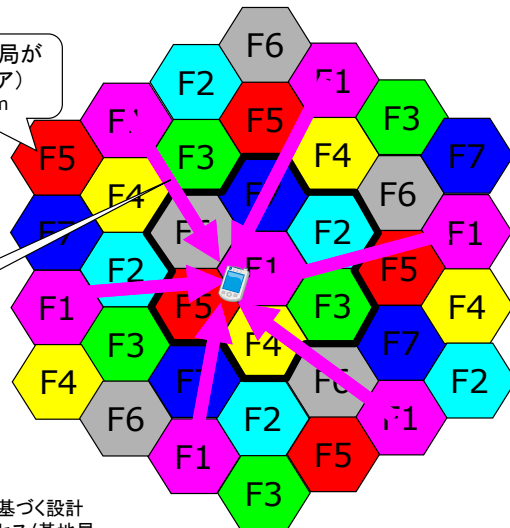
無線セル(基地局が
カバーするエリア)
例: 半径0.75~5km

面的スペクトル利用効率の向上に向けた2つのアプローチ

- その1: 周波数再利用係数 F の低減
(より近距離で同一周波数を再利用)
- その2: 無線セル面積の縮小
(基地局配置の高密度化)

$F=7$ の例

- 重要な仮定:
- セル端品質に基づく設計
 - 単一端末アクセス/基地局



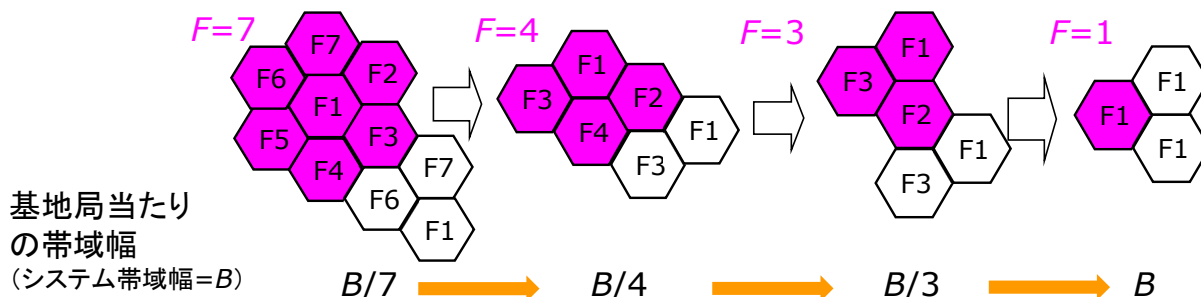
2021/7/16

FA/Tohoku University

9

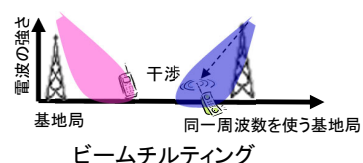
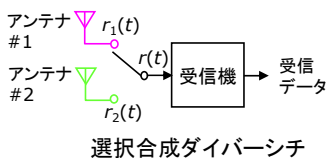
移動通信システムとは 面的スペクトル利用効率向上

- 周波数再利用係数 F を低減するためには、受信信号レベルを強く、受信干渉レベルを弱くする無線技術が必要



効果的な無線技術

- ダイバーシチ送受信(空間, 時間, 周波数), 符号化, 適応変調
- 基地局のセクタ化やビームチルティング



2021/7/16

FA/Tohoku University

10

移動通信システムとは 面的スペクトル利用効率の向上

□ その2:小セル化(基地局配置の高密度化)

- セルサイズ(半径)を小さくする

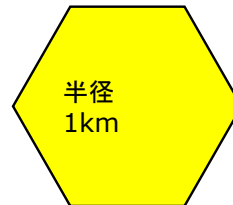
$$\eta_{\text{ase}} (\text{bps/Hz} / \text{km}^2)$$

$$= \log_2(1 + \Lambda) \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{S}$$

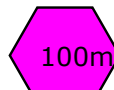
セルサイズの縮小による面的スペクトル利用効率の向上

- 大都市ほど小さなセルサイズ(高密度基地局配置)

マクロセル(半径数km)



マイクロセル(半径数100m)

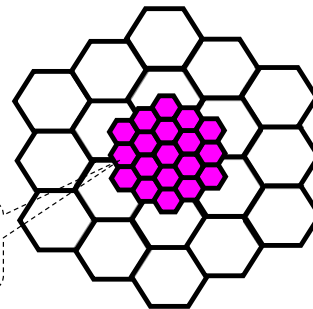


x100倍

ピコセル(半径数10m)



x100倍



都市部(高トラフィックエリア)

移動通信システムとは 伝送速度の向上

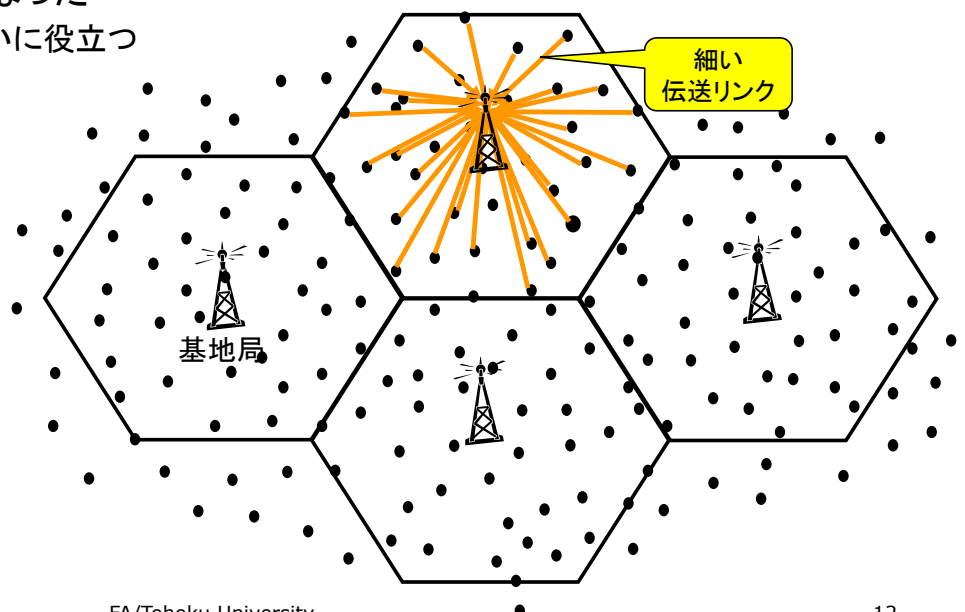
□ 動画などの広帯域通信サービスの登場により 伝送速度の向上が必要となった

- 基地局配置の高密度化が大いに役立つ

基地局当たりの伝送速度

$$B \times \eta_{\text{ase}} (\text{bps} / \text{km}^2)$$

$$= B \times \log_2(1 + \Lambda) \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{S}$$



移動通信システムとは 伝送速度の向上

- 動画などの広帯域通信サービスの登場により
伝送速度の向上が必要となった

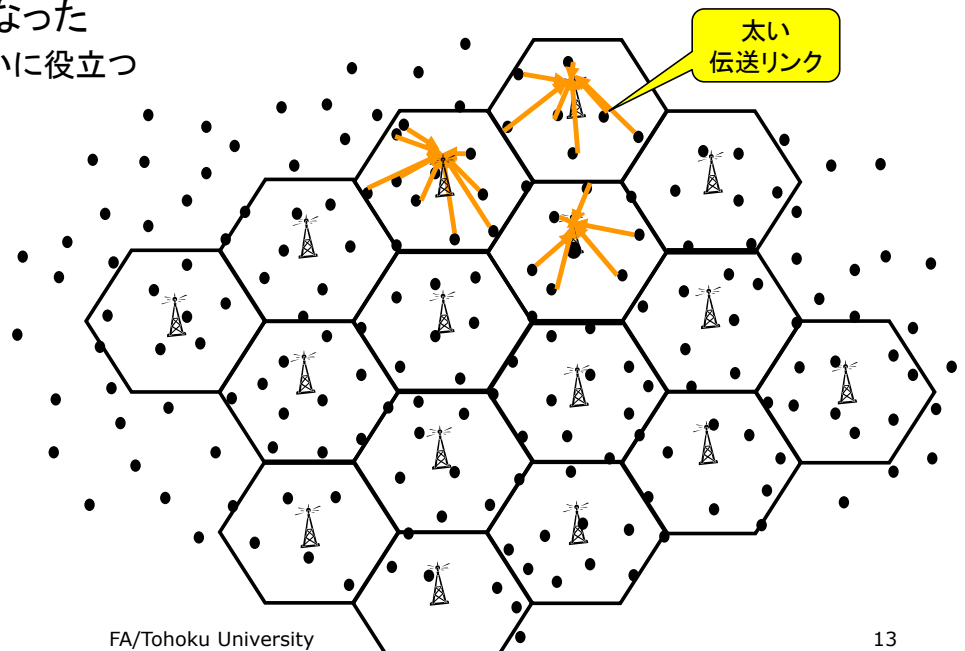
- 基地局配置の高密度化が大いに役立つ

基地局当たりの伝送速度

$$B \times \eta_{\text{ase}} (\text{bps} / \text{km}^2)$$

$$= B \times \log_2 (1 + \Lambda) \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{S}$$

セルサイズの縮小による面的スペクトル利用効率の向上



2021/7/16

FA/Tohoku University

13

移動通信システムとは 伝送速度の向上

- 更なる伝送速度の向上のためには、新周波数帯の開拓によるシステム帯域幅 B の拡大が必須

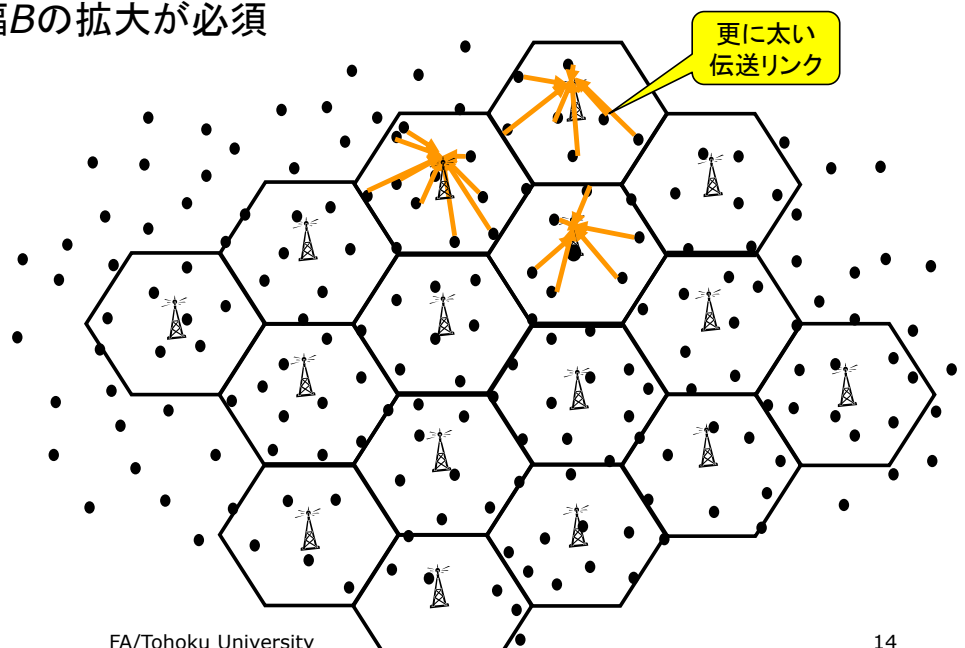
- ミリ波帯(5Gシステム)
- テラヘルツ帯(6Gシステム)

基地局当たりの伝送速度

$$B \times \eta_{\text{ase}} (\text{bps} / \text{km}^2)$$

$$= B \times \log_2 (1 + \Lambda) \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{S}$$

システム帯域幅の拡大による更なる伝送速度の向上



2021/7/16

FA/Tohoku University

14

移動通信システムとは まとめ

- 移動無線通信技術の歴史(1970年代～2020年代)は, 面的スペクトル利用効率向上と伝送速度向上(2Gシステム以降)に向けた挑戦の歴史
 - 基地局配置の高密度化(小セル化)
大セル(半径数km)→小セル(半径数100m)
 - 高効率無線伝送技術の開発
変復調, 符号化, ダイバーシチ, MIMO多重・ビームフォーミングなど
 - 高周波数帯の開拓と広帯域化
 - ・12.5kHz → 25kHz → 5MHz → 20MHz → 100MHz
 - ・極超短波800/900Hz→マイクロ波2GHz→サブミリ波・ミリ波28GHz

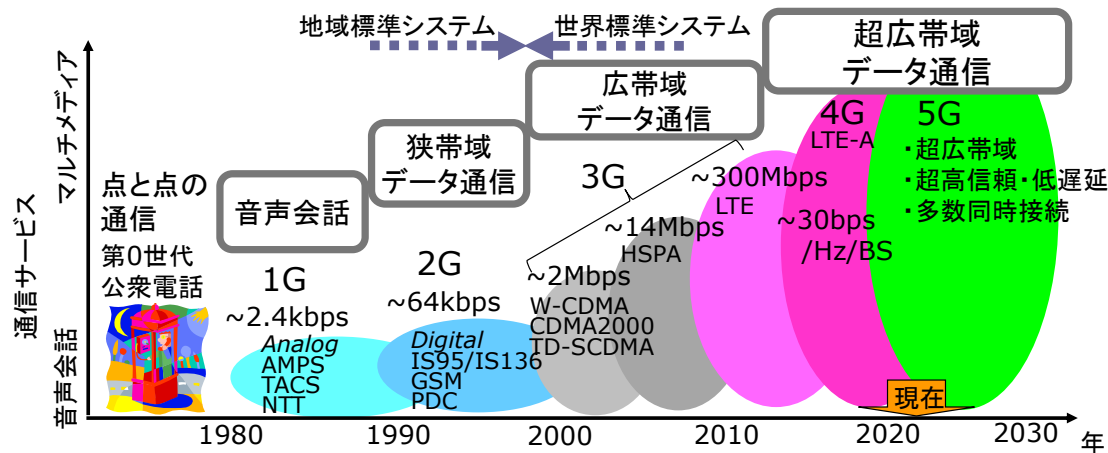
余談: 電波は飛び過ぎないことが望ましい

- 限られた貴重な無線帯域の有効利用には基地局配置の高密度化(小セル化)が威力を発揮
- 電波の飛び過ぎは干渉問題を引き起こす
- ミリ波やテラヘルツ波の利用へ熱い期待
- ただし, 多数の基地局が必要であり, システム展開にコストがかかるのが難点
- これを避ける新しいシステム構成が必要

移動通信システム進化の歴史

(お断り)無線通信技術から見た歴史なので、必ずしもシステム全体を俯瞰したものではない

- 第1世代(1G)システム(自動車電話)の誕生(1979年12月)
- その後、ほぼ10年毎の世代交代を経て4Gシステム(2015年3月)へと進化
 - 数10~100Mbpsクラスの広帯域データ通信サービスの普及
 - 携帯電話は今や社会の重要なインフラになった
- そして5Gシステムの登場(2019~20年導入)
 - 超広帯域に加え、超高信頼・低遅延と超多数接続通信サービス



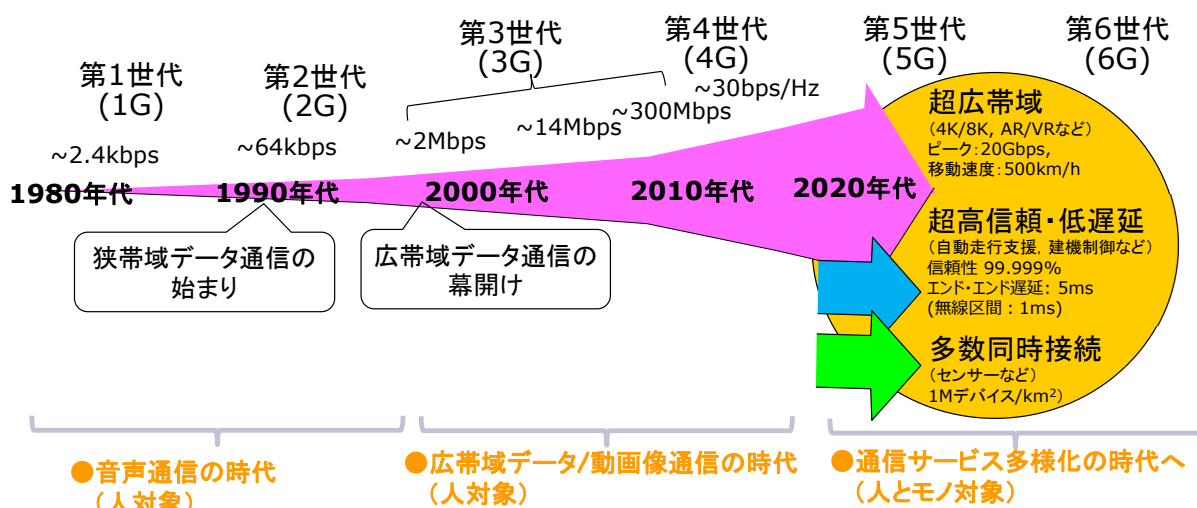
2021/7/16

FA/Tohoku University

17

移動通信システム進化の歴史

- 移動通信サービスの進化を見てみると・・・
 - 4Gまでは人を対象とした通信サービス(音声, データ)の時代
 - 5Gからは全てのモノを対象にした通信サービス多様化の時代



2021/7/16

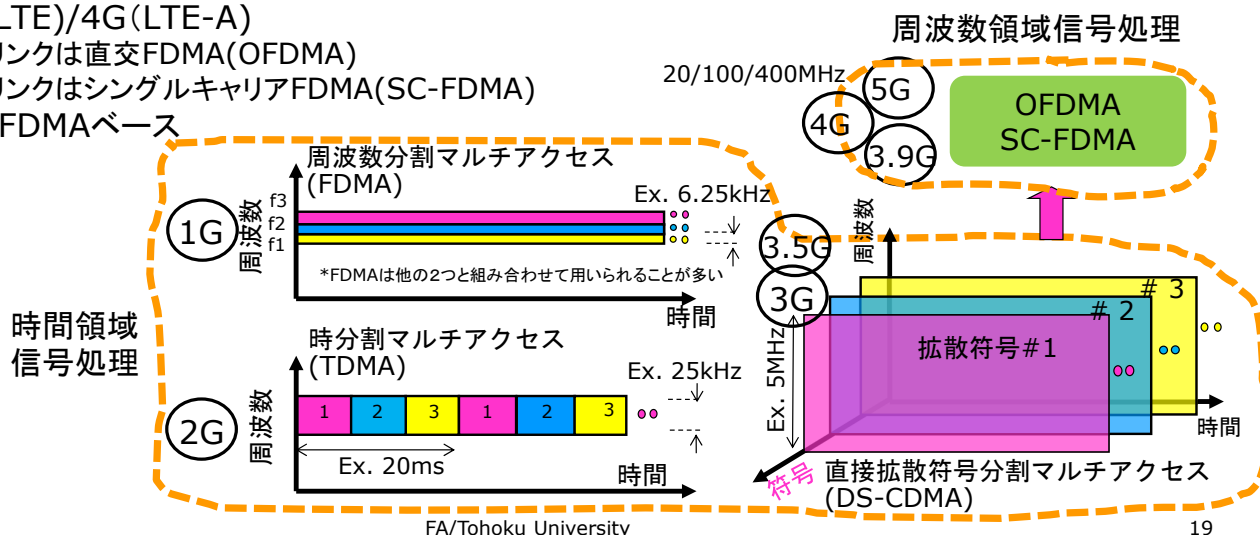
FA/Tohoku University

18

移動通信システム進化の歴史

無線アクセス技術の変遷

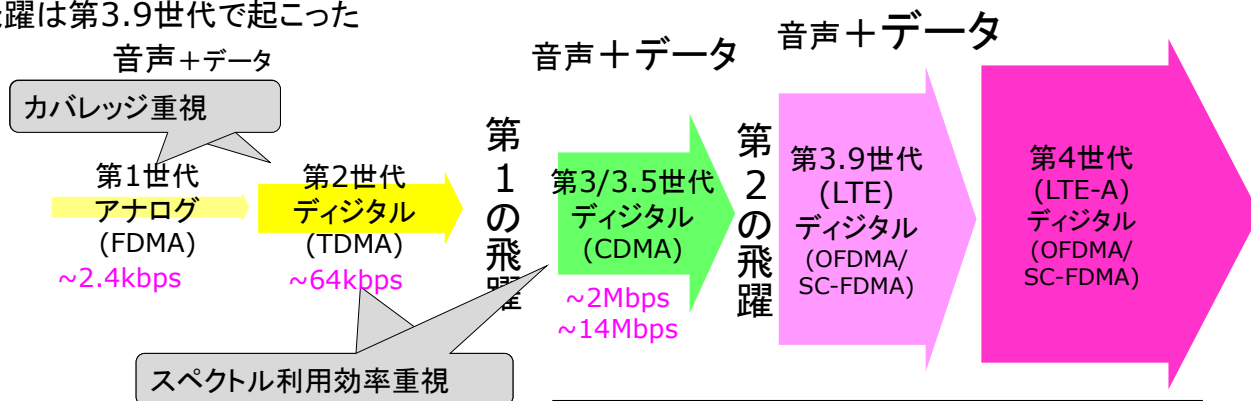
- 1G: 周波数分割マルチアクセス(FDMA)
- 2G: 時間分割マルチアクセス(TDMA)
- 3G: 直接拡散符号分割マルチアクセス(DS-CDMA)
- 3.9G(LTE)/4G(LTE-A)
 - 下りリンクは直交FDMA(OFDMA)
 - 上りリンクはシングルキャリアFDMA(SC-FDMA)
- 5G: OFDMAベース



移動通信システム進化の歴史

通信速度の向上

- 第2世代と第3世代の間には伝送能力の大きな飛躍
- 次の飛躍は第3.9世代で起こった



スペクトル利用効率の向上

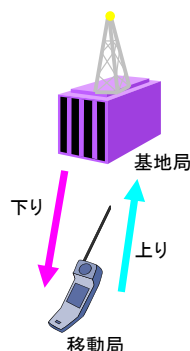
- 狭帯域システム(1G, 2G): チャンネル数増加
- 広帯域システム(3G以降): ピークスループット増大

3.5G (HSPA/5MHz)		3.9G (LTE/~20MHz)		4G (LTE-A/~100MHz)	
上り	下り	上り	下り	上り	下り
5.7 Mbps	14 Mbps	75 Mbps	300 Mbps	15bps/H z	30bps/H z

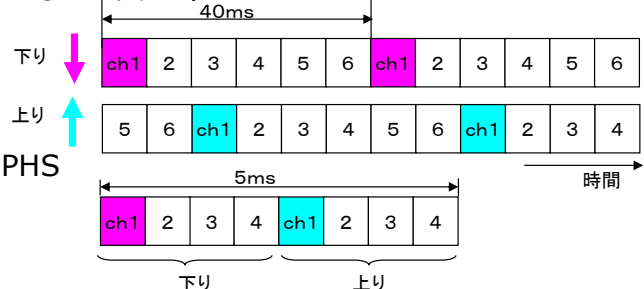
第1世代から第2世代システムへの進化

- 第1世代システムはアナログFMを用いたアナログシステム
- 第2世代システム(PDC)は線形変調 $\pi/4$ シフトQPSKを用いたデジタルシステム

	PDC	PHS
周波数帯	800, 1500MHz	1900MHz
キャリア周波数間隔	25kHzインタリーブ	300kHz
無線伝送速度	42kbps	384kbps
無線アクセス	TDMA-FDD	TDMA-TDD
1キャリア当たりのチャンネル数	6 (ハーフレート)	4
変調方式	$\pi/4$ -QPSK	$\pi/4$ -QPSK
音声符号化	5.6kbpsPSI-CELP	32kbps ADPCM



●PDCハーフレート



2021/7/16

FA/Tohoku University

21

第1世代から第2世代システムへの進化

- 携帯電話機の小型化と移動通信サービスの普及



出典

歌野, "携帯電話の進化とインパクト," 信学誌, vol.90, no.5, pp.350-356, 2005年5月

2021/7/16

22

広帯域化への道 第3世代の目標

- 2Gシステムではデジタルシステムならではの画期的なことが起きた
 - 1993年に登場した**商用インターネットの普及**の影響が非常に大きい
 - 第2世代システムの普及につれ、会話だけでなく、携帯電話間のメッセージ通信からインターネットへのアクセスが急増(1999年2月開始の“iモード”が代表格)
 - 「いつでも、どこでも、誰とでも」、最初は音声会話が中心だったが、ついに「**瞬時にどんな情報をも**」に変わった。これからは**画像のやり取り**が当たり前になると考えたのであった
 - しかし残念ながら、増大する高速データ伝送への要求に応えることができなかった
- そこで、第3世代が提供しようとしたのは**高速ビットパイプ**



第3世代システム W-CDMA無線アクセス

- 第2世代システムより圧倒的に速いデータ伝送を実現した第3世代システム

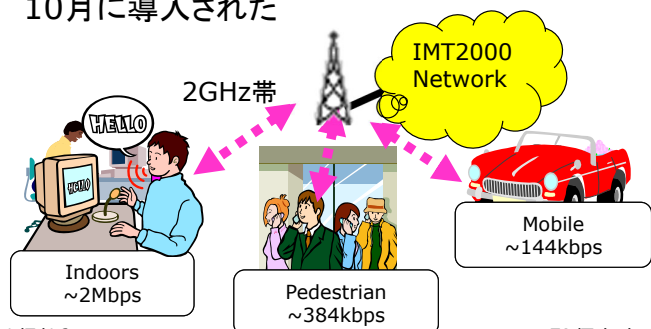
- 屋内2Mbps, 歩行速度384kbps, 高速移動144kbps
- DS-CDMA技術を採用
 - W-CDMAは5MHz帯域幅
 - Cdma2000は1.25MHz帯域幅
- 第3世代システムは日本では2001年10月に導入された

参考文献

□ F. Adachi, M. Sawahashi and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for next generation mobile communications systems," IEEE Commun. Mag., vol. 36, pp. 56-69, Sept. 1998.

□ 立川敬二監修, W-CDMA移動通信方式. 丸善, 2001年.

	W-CDMA	Cdma2000
周波数帯域 (MHz)	800/1500	800/1800 /1900
多重アクセス	DS-CDMA	DS-CDMA
搬送波周波数 間隔(MHz)	5	1.25
チップレート (Mcps)	3.84	1.2288
音声符号器 (kbps)	8 (可変レート)	8 (可変レート)

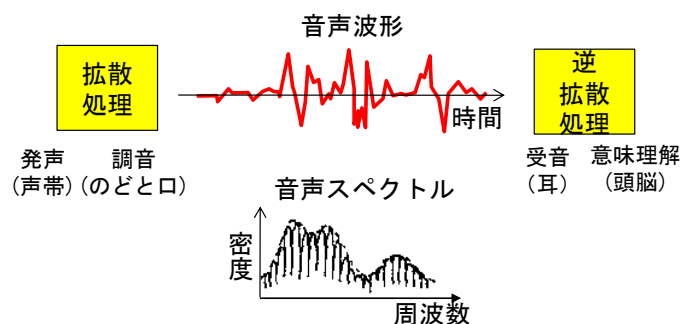


(余談) W-CDMA無線アクセスへの決断

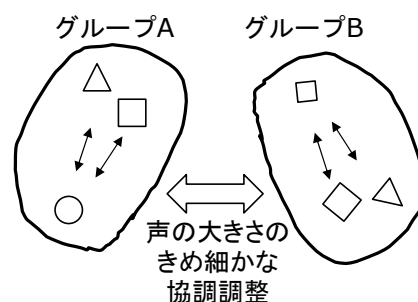
- 広帯域CDMA(W-CDMA)なら, CDMAの利点を積極的に生かしつつ将来の高速マルチメディア(特に画像系)時代を担うことができると確信
- 世界標準を目指し, 産業界への積極的アプローチ
 - 国内ベンダーはもとより, エリクソン, ノキア, モトローラ, クアルコム, ATTなどとの技術交渉, 多くの技術課題, 連帯感
 - ビタビ符号で知られたAndrew Viterbi博士との技術交流できた幸運
- 学術界・大学・研究機関への積極的な情報発信

余談: CDMAと人間の会話との対比

- 直接拡散マルチアクセス(DS-CDMA)と人間の会話との対比
 - 同じ周波数帯域(0.3~3.4kHz)を使って, 私たちはすぐ近くで会話をしている
 - 大勢いる中で会話ができるのは, のどや口の形がそれぞれ異なるので音波波形に特徴が出るから



人間の会話



同じ周波数帯域(0.3~3.4kHz)
の再利用(周波数再利用係数 $F=1$)

第3世代システム W-CDMA無線アクセス

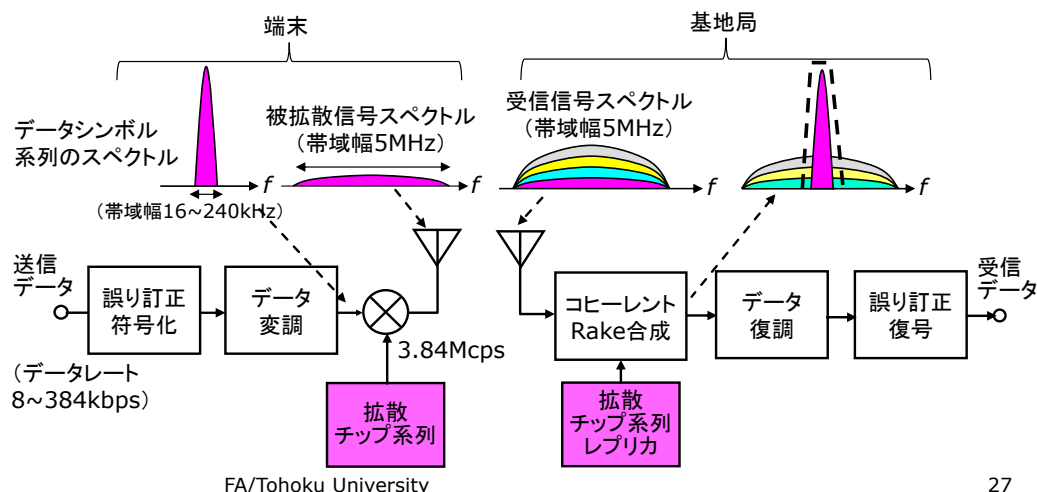
■ 広帯域CDMA(W-CDMA)

- 全基地局で同一無線帯域を利用可能. FDMAやTDMAで必要であった周波数割当問題を回避
- 低速データから高速データまで柔軟な可変伝送レートの実現(直交可変拡散率符号の採用)
- コヒーレントRake合成によりパスダイバーシチ効果を獲得
- 柔軟なシステム展開を可能とするセル間非同期システムの実現

ユーザ固有の拡散符号(チップレート3.84Mcps)を用いて広い帯域幅 $B(=5\text{MHz})$ へデータレート W の送信データを拡散して送信

F. Adachi, M. Sawahashi, and K. Okawa, "Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-SS-CDMA mobile radio," IEE Electron. Lett., vol. 33, pp. 27-28, Jan. 1997.

2021/7/16



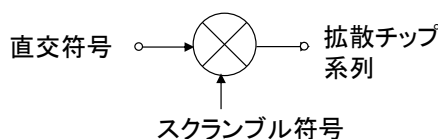
FA/Tohoku University

27

第3世代システム W-CDMA無線アクセス

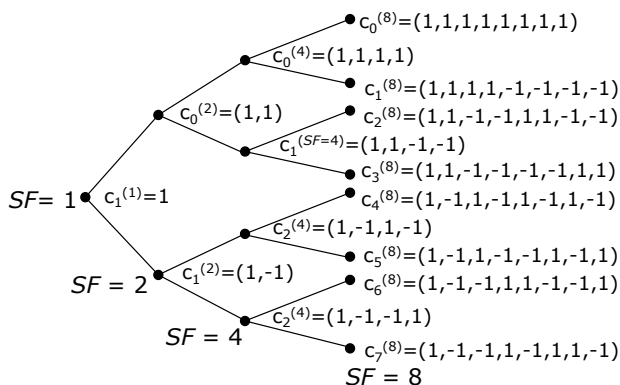
■ 2重拡散符号

- 基地局識別用のスクランブル符号 (38,400チップ長の長周期符号)
- チャネル多重用の直交符号 (4~512チップ長の短周期符号)



■ 直交可変拡散率(OVSF)符号

- Walsh-Hadamard系列からなる木構造を持つ符号
- 伝送レートの異なるマルチメディア信号の直交多重に適する



F. Adachi, M. Sawahashi, and K. Okawa, "Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-SS-CDMA mobile radio," IEE Electron. Lett., vol. 33, pp. 27-28, Jan. 1997.

2021/7/16

FA/Tohoku University

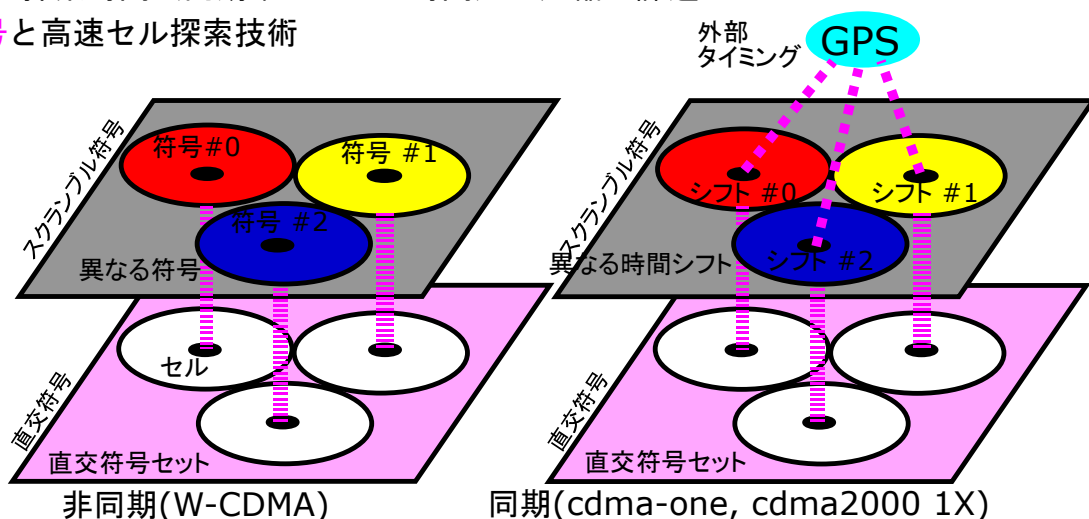
28

第3世代システム W-CDMA無線アクセス

■ 屋内外での柔軟なシステム展開を可能とするセル間非同期システム

- 全地球測位システム（GPS）などの外部時間同期システムが不要
- その代り，セル探索時間（同期確立までの時間）の短縮が課題

→ 2重拡散符号と高速セル探索技術



K. Higuchi, M. Sawahashi and F. Adachi, "Fast cell search algorithm in inter-cell asynchronous DS-CDMA mobile radio," IEICE Trans. Commun., Vol. E81-B, No. 7, pp. 1527-1534, July 1998.

2021/7/16

FA/Tohoku University

29

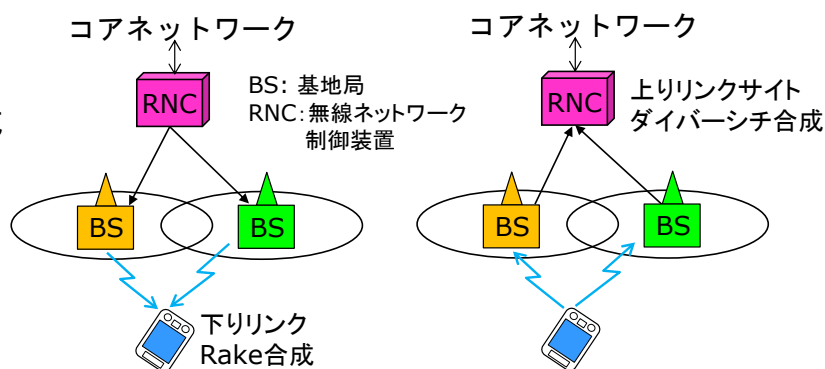
第3世代システム W-CDMA無線アクセス

■ ハードハンドオーバー(1G, 2G)

- FDMA, TDMA
- 各基地局には異なる周波数が割り当てられているため，無瞬断ハンドオーバーを実現できない

■ ソフトハンドオーバー(3G)

- CDMA下りリンク：異なる基地局からの信号をコヒーレントRake合成
- CDMA上りリンク：異なる基地局で受信した信号をRNCでサイトダイバーシチ合成
- これにより無瞬断ハンドオーバーを実現



CDMAソフトハンドオーバー

2021/7/16

FA/Tohoku University

30

第3.5世代システムへの進化

- W-CDMAを基にパケット伝送に焦点を当てた新しい技術を採用したHSPA(High speed packet access)の登場
 - スケジューリング(マルチユーザダイバーシチ)
 - フェージングにより各ユーザの受信レベルが異なること, しかも時間とともに優劣が入れ替わることを利用
 - ハイブリッドARQ(誤り訂正と再送の組み合わせ)
 - 音声などの実時間通信では再送回数を制限し, 遅延時間を許容値内に抑える
 - 基地局選択送信
 - もっともチャネル状態の良い基地局からパケットを送信
 - 14Mbpsを達成



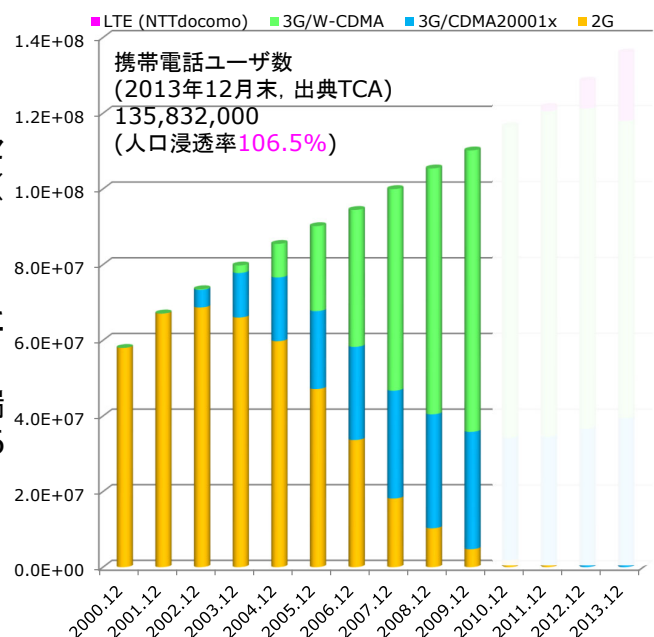
2021/7/16

FA/Tohoku University

31

社会への携帯電話の浸透

- 第3世代システム (~384kbps)が2001年に登場
 - 1993年に登場した**商用インターネットの普及**
 - 第2世代システムの普及につれ, 携帯電話間のメッセージ通信からインターネットへのアクセスが急増(1999年2月開始の“iモード”が代表格)
 - 第2世代システムは2012年ころに消滅
- 広帯域データサービスの普及に合わせた第3.5世代システムへの進化
 - W-CDMAに基づいた高速下りリンク(基地局→端末)パケットアクセス(HSDPA, 第3.5世代)が2006年登場
 - ピークレートは14Mbps/5MHz
 - 第3世代システムは2026年3月に消滅



(一社)電気通信事業者協会発表の事業者別契約数データ(2013年12月末)を基に作成
<https://www.tca.or.jp/database/index.html>

* 日本人口@2015年8月1日: 1億2525万9000人

2021/7/16

FA/Tohoku University

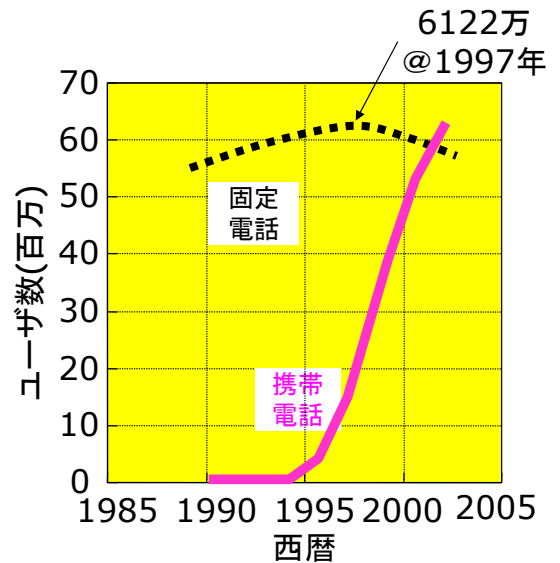
32

社会への携帯電話の浸透

- 携帯電話ユーザ数(PHSを含む)がアナログ電話回線数を超えたのが2000年3月

- 携帯: 51.141M
- PHS: 5.708M
- 固定電話: 55.446M

- これは、人々が通話したい相手は動き回っている人であり、固定した場所ではないことを明らかに示している
- 携帯電話は、これまでの固定電話の役割を担いつつ、さらに通信サービスを動きまわる人に広げたのである



2021/7/16

FA/Tohoku University

33

第3世代システムの進化と限界

- 第3世代システム(~384kbps)が2001年に登場

- そして第2世代システムは、ほぼ10年後に消滅
- 2010年ころ、100%に近いユーザが3Gに移行

- 広帯域データサービスの普及に合わせた第3世代システムの進化

- 第3.5世代システム(W-CDMAに基づく高速パケットアクセス(HSPA))が2006年登場
→下りピークレートは14Mbps/5MHz
- 厳しい周波数選択性チャネルの下では、CDMA Rake受信機の特徴が劣化
- CDMA 周波数領域等化の適用への道があったが、この道へは向かわなかった

CDMA周波数領域等化の参考文献

- F. Adachi, D. Garg, S. Takaoka, and K. Takeda, "Broadband CDMA techniques," IEEE Wireless Commun. Mag., Vol. 12, No. 2, pp. 8-18, April 2005.
- F. Adachi, T. Sao, and T. Itagaki, "Performance of multicode DS-SS using frequency domain equalization in a frequency selective fading channel," Electronics Letters, vol. 39, No.2, pp. 239-241, Jan. 2003.
- F. Adachi and T. Itagaki, "Frequency-domain rake combining for antenna diversity reception of DS-SS signals," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no. 9, pp. 2781-2784, Sept. 2003.
- F. Adachi and K. Takeda, "Bit error rate analysis of DS-SS with joint frequency-domain equalization and antenna diversity combining," IEICE Trans. Commun., Vol.E87-B, No.10, pp.2991-3002, Oct. 2004.

- 高品質動画像通信サービスにはピークレートの大幅な増大が必要

- 帯域幅拡大が限定的な場合(例:5MHz→20MHz)には、ピークレート増大は限定的
- そこで、第3.9世代(LTE)システムではCDMAではなく、無拡散のOFDMAに向かうこととなった
→干渉を避けるように無線リソースを割り当て

2021/7/16

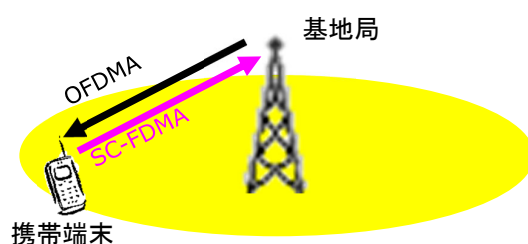
FA/Tohoku University

34

第3.9世代(LTE)システム 無線アクセス

- 第3世代システムまでは時間領域信号処理に基づくシングルキャリア無線アクセスが使われた
 - 第1世代システムではFDMA (12.5kHz), 第2世代システムではTDMA (50kHz), そして第3世代と第3.5世代システムではDS-CDMA (5MHz)
- 広帯域伝送(20MHz)の課題
 - 強い周波数選択性により厳しい符号間干渉(ISI)が発生
 - 強力な等化技術が必要
 - 周波数領域信号処理の導入→直交周波数分割多重(OFDM)やシングルキャリア周波数領域等化(SC-FDE)
- 第3.9世代(LTE)システムでは上り下りの無線アクセス技術が違う
 - 無線アクセス: 下りOFDMA/上りSC-FDMA
 - ピークデータ速度: 下り300Mbps/上り75Mbps

3.5G (HSPA/5MHz)		3.9G (LTE/~20MHz)	
上り	下り	上り	下り
5.7Mbps	14Mbps	75Mbps	300Mbps



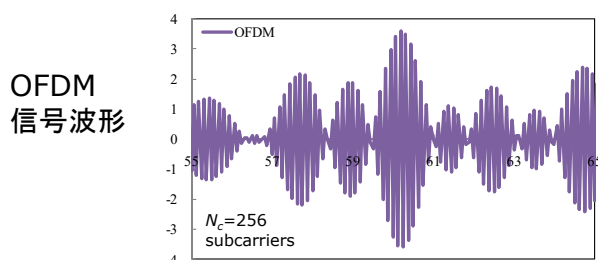
2021/7/16

FA/Tohoku University

35

第3.9世代(LTE)システム OFDMとSCとの比較

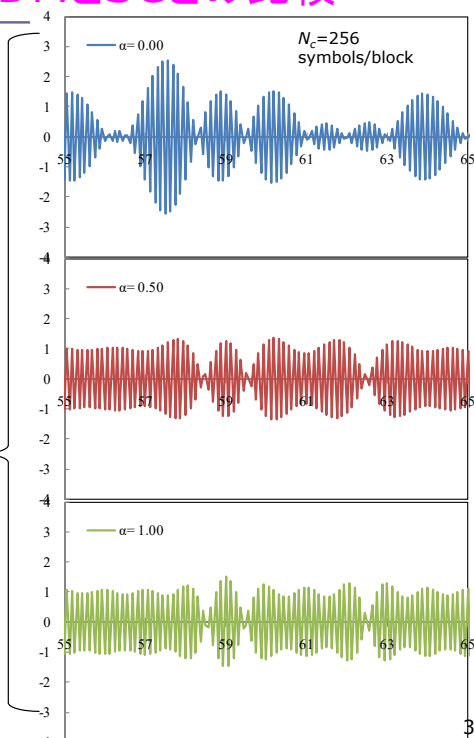
- シングルキャリア(SC)信号はOFDM信号よりPAPRが低い
 - 各シンボル時間点の送信信号波形にはISIが発生しない(ナイキスト伝送)
- SCは上りリンク無線アクセスに適している
 - ピーク電力が少なくてよいので, 比較的安価な送信電力増幅器が使える



Modulated carrier waveform

$$x(t) = \text{Re}[s(t)\exp(2\pi f_c t)] = \text{Re}[s(t)]\cos(2\pi f_c t) - \text{Im}[s(t)]\sin(2\pi f_c t)$$

SC
信号波形



2021/7/16

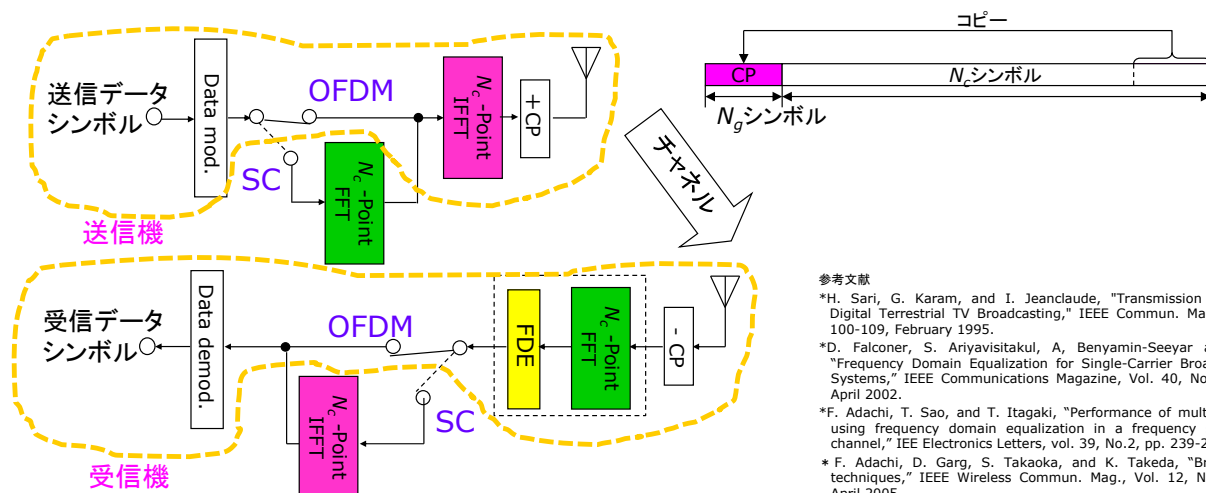
FA/Tohoku University

36

第3.9世代(LTE)システム OFDMとSCとの比較

□ OFDMに基づいた送受信機構成

- シングルキャリア(SC)送受信の場合, FFTおよびIFFTをそれぞれOFDM送信機のプリコードおよびOFDM受信機のポストコードとして追加すればよい
- シングルキャリア(SC)周波数領域等化



参考文献

*H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting," IEEE Commun. Mag., vol. 33, pp. 100-109, February 1995.

*D. Falconer, S. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar and B. Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, pp. 58-66, April 2002.

*F. Adachi, T. Sao, and T. Itagaki, "Performance of multicarrier DS-SS using frequency domain equalization in a frequency selective fading channel," IEE Electronics Letters, vol. 39, No.2, pp. 239-241, Jan. 2003.

*F. Adachi, D. Garg, S. Takaoka, and K. Takeda, "Broadband CDMA techniques," IEEE Wireless Commun. Mag., Vol. 12, No. 2, pp. 8-18, April 2005.

2021/7/16

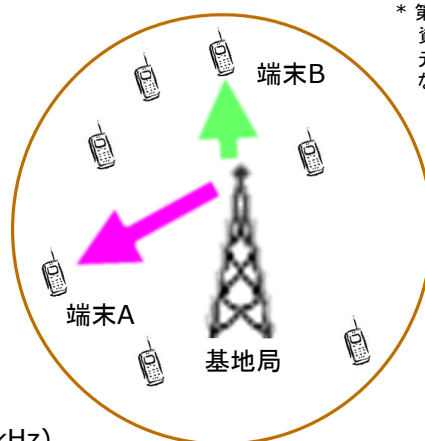
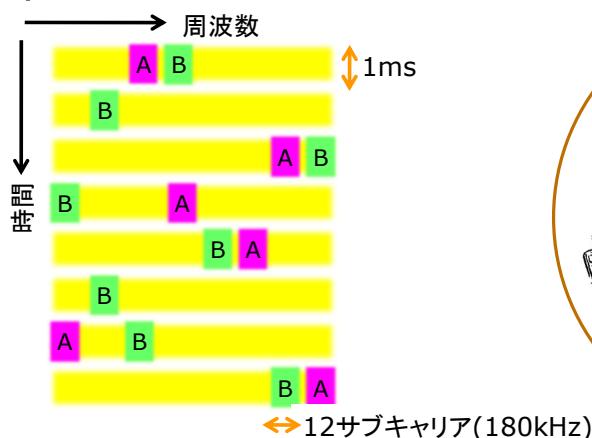
FA/Tohoku University

37

第3.9世代(LTE)システム スケジューリングの導入

□ きめ細かなスケジューリング(リソース割り当て)の導入

- ユーザ数やそれらの伝搬環境の変動に合わせて, 無線リソース(周波数/時間)をダイナミックに割り当て
→ダイナミック2次元マルチアクセス(TD/FDMA)*と言える
- 全ユーザの通信機会の公平性を確保しつつ大きな合計リンク容量が得られるProportional Fair (PF)スケジューリングを採用



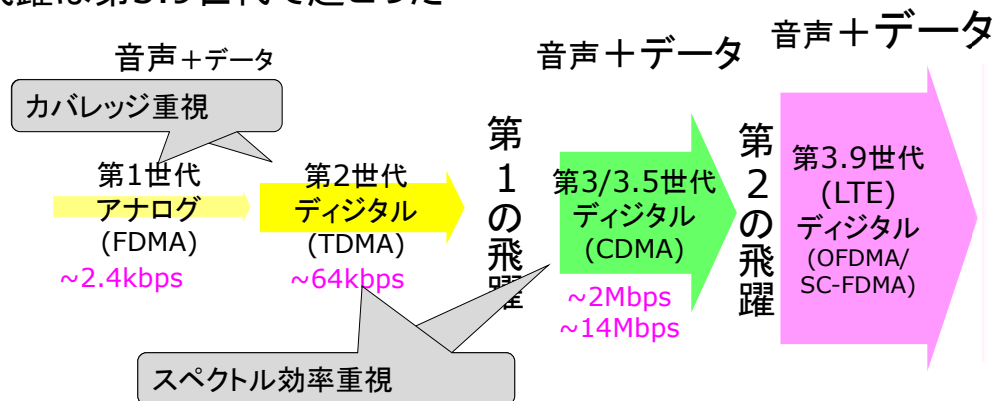
* 第5世代システムではアンテナも無線資源に組み込まれる。ダイナミック3次元マルチアクセスが利用されるようになるだろう

2021/7/16

38

第3.9世代(LTE)システム 伝送速度の飛躍的向上

- 第2世代と第3世代の間には伝送能力の大きな飛躍
- 次の飛躍は第3.9世代で起こった



■ スペクトル利用効率の向上

- 狭帯域システム(1G, 2G): チャンネル数増加
- 広帯域システム(3G以降): ピークスループット増大

3.5G (HSPA/5MHz)		3.9G (LTE/~20MHz)	
上り	下り	上り	下り
5.7 Mbps	14 Mbps	75 Mbps	300 Mbps

2021/7/16

FA/Tohoku University

39

第3.9世代(LTE)システムへの進化

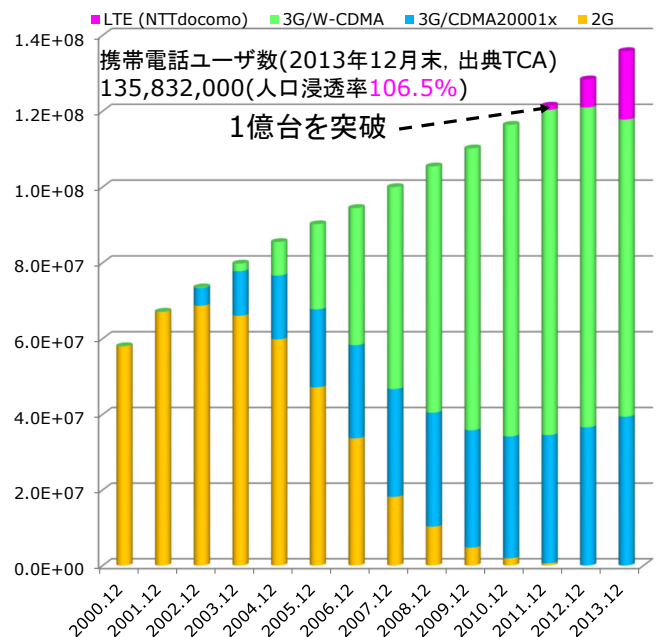
■ 第3.9世代(LTE)システムは2010年に登場

- 第3世代に割り当てられた2GHz周波数帯(20MHz)を利用
- ピークデータ速度: 下り300Mbps, 上り75Mbps
- 第4世代システム(LTE-A)に極めて近い能力

■ 第4世代(LTE-A)システムは2015年3月に登場

- スペクトル効率30bps/Hzを実現
→100MHz帯域幅なら3Gbps

(一社)電気通信事業者協会発表の事業者別契約数データ(2013年12月末)を基に作成
<https://www.tca.or.jp/database/index.html>



2021/7/16

FA/Tohoku University

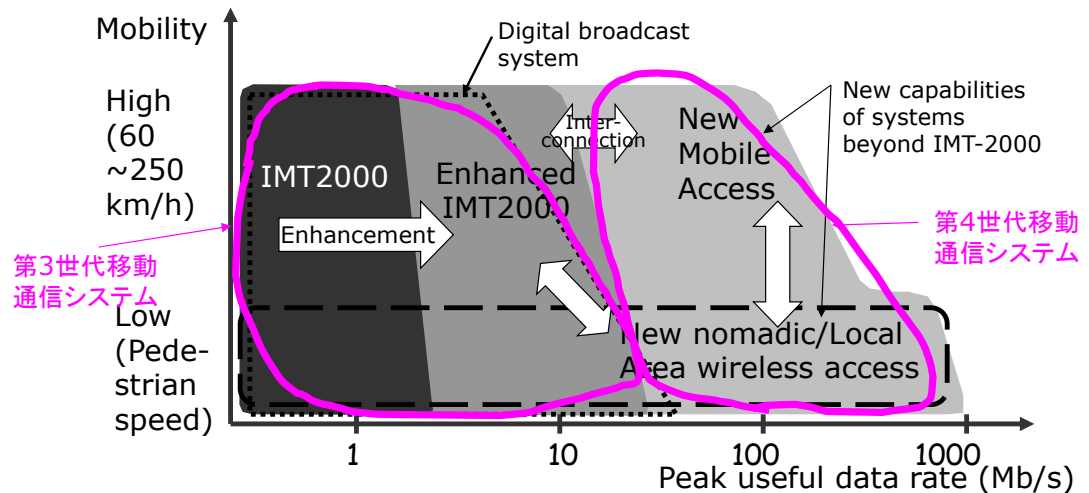
40

第4世代(LTE-A)システムのビジョン

□ ブロードバンドサービスの提供

- 移動ユーザ端末では ~100 Mbps
- 準静止ユーザでは ~1Gbps

下記参考資料を基に作成
 ・将来ビジョン, ITU-R WP8F (Ottawa, June 2002)
 ITU-R WP8F: Illustration of Capabilities of IMT2000 and Systems Beyond
 ・「ITU無線通信総会(RA-07)報告」NTT DoCoMoテクニカル・ジャーナル, Vol. 16, No.1, 2008年4月



2021/7/16

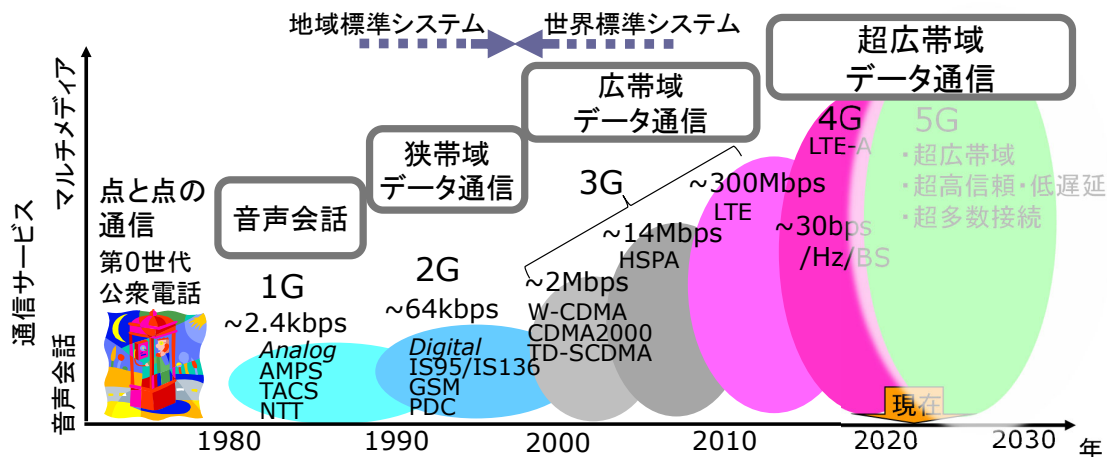
FA/Tohoku University

41

第4世代(LTE-A)システムへの進化

□ 4G(LTE-A)システムは2015年3月に通信サービス開始

- 世界共通バンド(3.4~3.6GHz)は200MHz帯域幅[WARC2007]
 - 1システムで利用可能な帯域幅は2(上り・下り) × 100MHz程度
- 強い干渉環境下でスペクトル効率30bps/Hzを実現



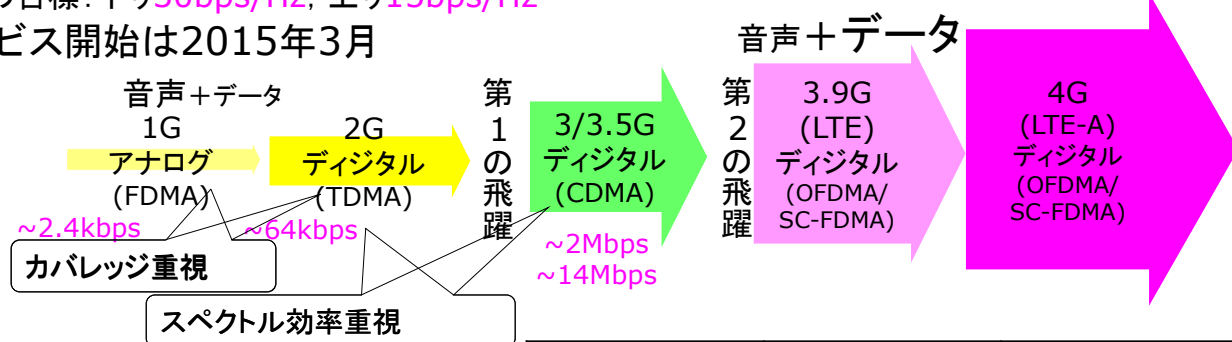
2021/7/16

FA/Tohoku University

42

第4世代(LTE-A)システム 伝送速度の更なる飛躍

- 4G(LTE-A)システムへの割当周波数帯がITUで決着したのが2007年12月
 - 450-470MHz/790-806MHz/2.3-2.4GHz/3.4G-3.6GHz
- 2008年から4Gシステムの研究開発が開始された
 - LTE-Aの目標: 下り30bps/Hz, 上り15bps/Hz
- 4Gサービス開始は2015年3月



- スペクトル利用効率の向上
 - 狭帯域システム(1G, 2G): チャンネル数増加
 - 広帯域システム(3G以降): ピークスループット増大

3.5G (HSPA/5MHz)		3.9G (LTE/~20MHz)		4G (LTE-A/~100MHz)	
上り	下り	上り	下り	上り	下り
5.7 Mbps	14 Mbps	75 Mbps	300 Mbps	15bps/Hz	30bps/Hz

2021/7/16

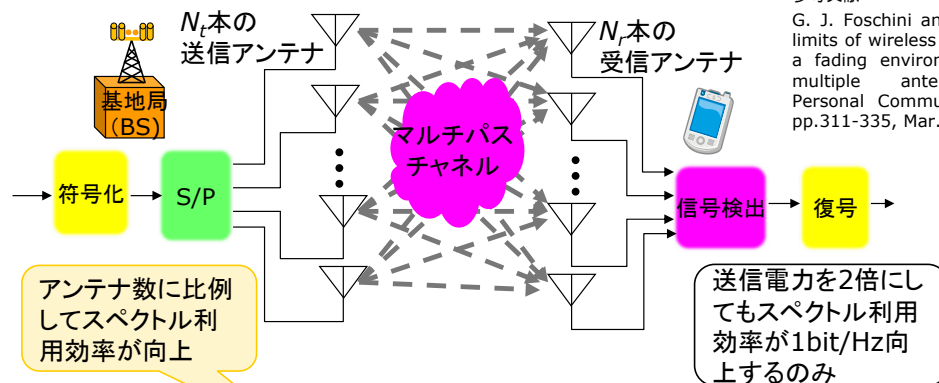
FA/Tohoku University

43

第4世代(LTE-A)システム MIMO(マルチアンテナ)通信技術の導入

- より一層のスペクトル利用効率向上を目指して導入したのが MIMO空間多重(SDM)

- 複数アンテナによる並列データ伝送



- 他セル干渉が無いときのスペクトル効率(W: 利用帯域幅)

$$C/W(\text{bps/Hz}) = N_r \times \log_2(1 + \Gamma) \quad \text{if } N_t = N_r \gg 1$$

アンテナ数 受信SNR

2021/7/16

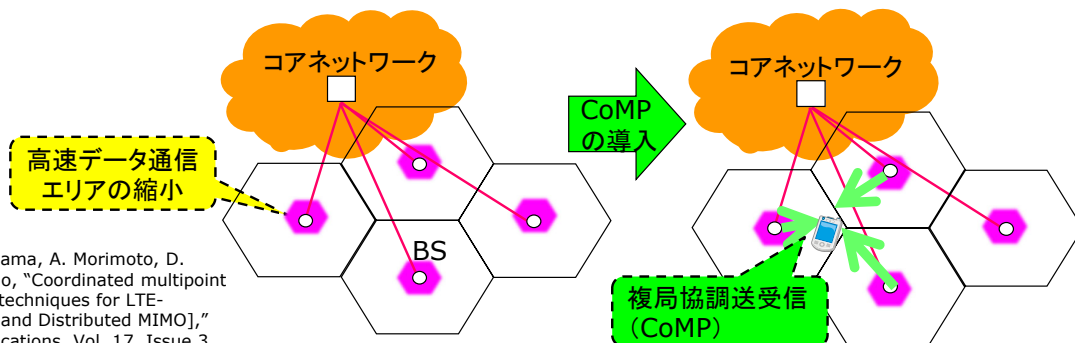
FA/Tohoku University

44

第4世代(LTE-A)システム

複局協調送受信(CoMP)の導入

- 限られた送信電力の下では、高速データ通信エリアの縮小が起こる
 - 信号帯域幅拡大に伴う雑音電力増加による受信SNRの低下に加え、隣接セルからの干渉によりセル端SINRが劣化するから
- そこで4Gで導入登場したのが、複数基地局が協調してセル端領域のユーザをサポートする**複局協調送受信 (CoMP)**
 - アンテナダイバーシチ送受信の拡張と言ってよい



参考文献
M. Sawahashi, Y. Kishiyama, A. Morimoto, D. Nishikawa, and M. Tanno, "Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [Coordinated and Distributed MIMO]," IEEE Wireless Communications, Vol. 17, Issue 3, pp.26 - 34, June 2010.

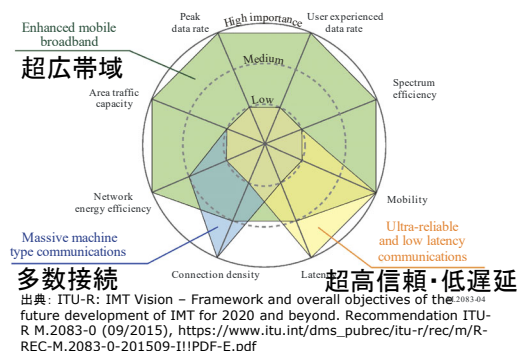
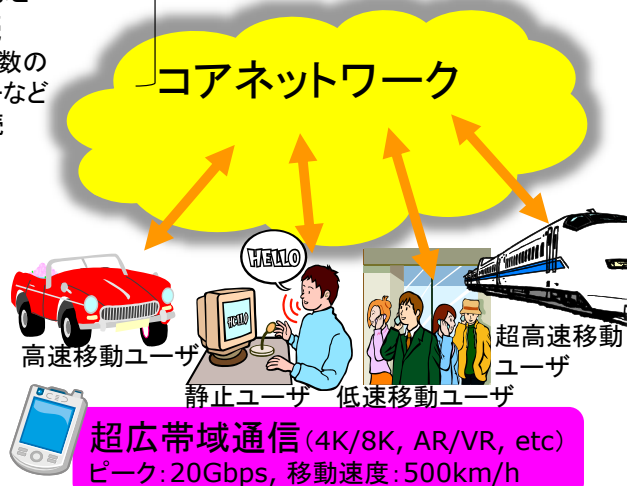
2021/7/16

FA/Tohoku University

45

第5世代システムへの進化

- 新しいモバイル通信サービスの提供
 - 超広帯域通信
 - 超高信頼・低遅延通信
 - 自動運転支援(次世代ITS), 建設機械制御など
 - 多数同時接続
 - 低レートだが多数の様々なセンサーなどデバイスの接続



超高信頼・低遅延通信
(自動走行支援, 建設機械制御など)

信頼性 99.999%
エンド・エンド遅延: 5ms
(無線区間: 1ms)

多数同時接続
(センサーなど)
1Mデバイス/km²

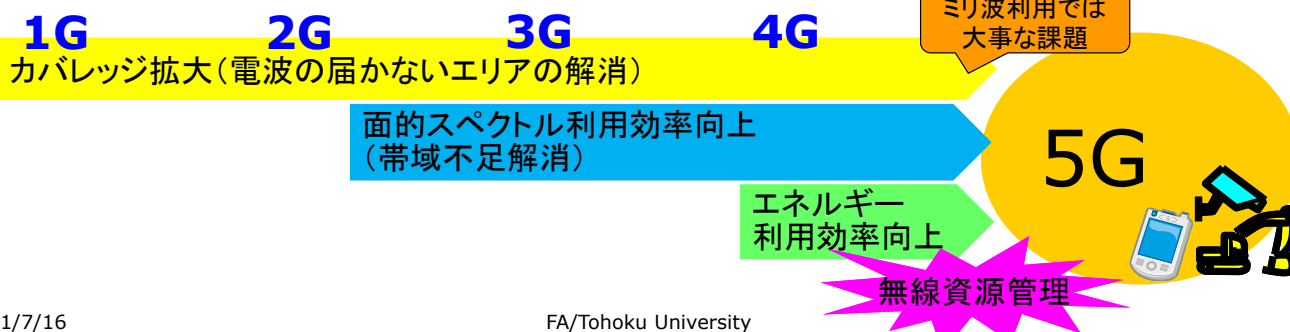
2021/7/16

FA/Tohoku University

46

第5世代システムの技術課題

- 第1～4世代システム
 - 第1～2世代システム: カバレッジ拡大(電波の届かないエリアの解消)
 - 第2～4世代システム: ユーザ数の飛躍的増加と高速通信サービスの広がりにより, 限られた帯域を有効利用するための面的スペクトル利用効率向上に力点
- 第5世代システム
 - 高精細動画や仮想現実(VRやAR)などの高速・低遅延モバイル通信がポピュラーになるにつれ, 帯域(スペクトル)不足問題や電力(エネルギー)消費問題が深刻化, ネットワーク全体のエネルギー利用効率の向上も課題
 - ミリ波利用になり, 再びカバレッジ拡大が浮上
 - 更に超高密度配置された基地局や多数の様々な端末を収容する効率的な無線資源管理も重要課題



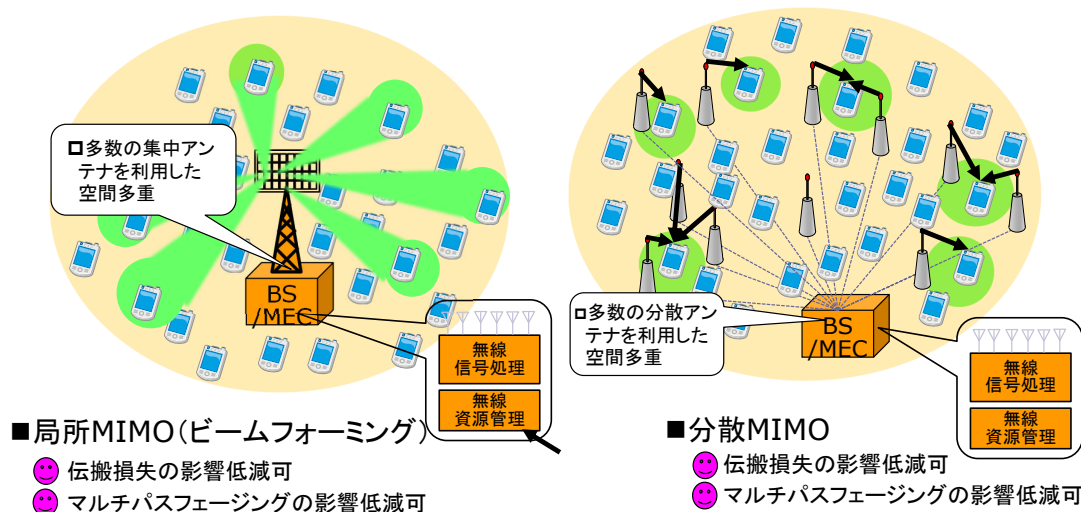
2021/7/16

FA/Tohoku University

47

大規模MIMO

- 基地局側に多数の集中あるいは分散アンテナを用いる空間多重
- 近距離通信(局所MIMOのとき見かけ上)
 - 1～4Gシステムでは利用できなかったミリ波など高周波数帯の利用が可能



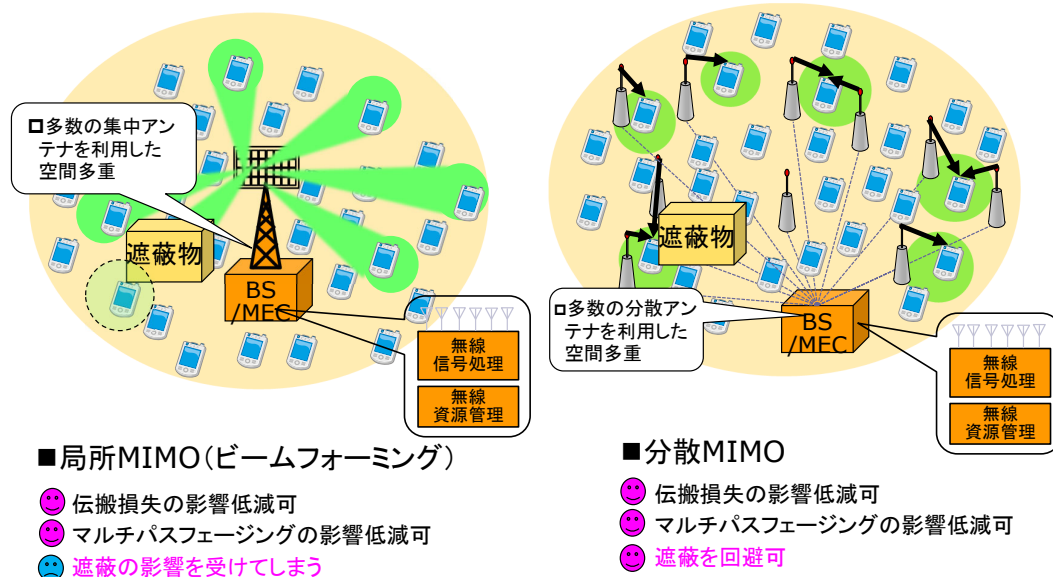
2021/7/16

FA/Tohoku University

48

大規模MIMO

- 直進性が強いミリ波では建物などによる電波遮蔽が発生
 - 分散MIMOでは基地局側アンテナが分散されているので電波遮蔽を回避



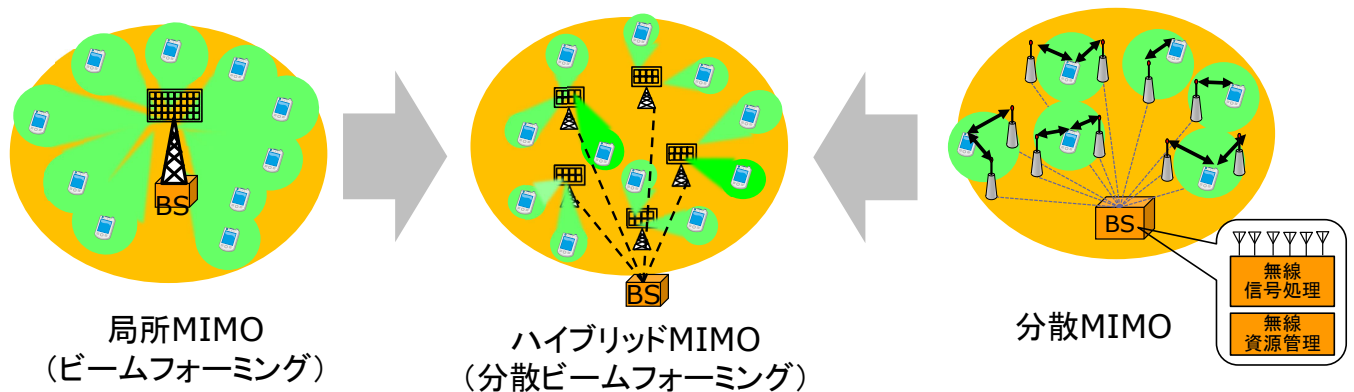
2021/7/16

FA/Tohoku University

49

大規模MIMO

- 実現上の課題
 - 局所MIMO:利点は低いシステム展開コスト, 欠点は建造物などによる伝搬路遮蔽やシャドウイングによる特性劣化の発生
 - 分散MIMO:利点は伝搬路遮蔽やシャドウイングによる特性劣化を救済可能, 欠点は高いシステム展開コスト(特に光モバイルフロントホール)
- 現実的解決は両者の中間になるであろう



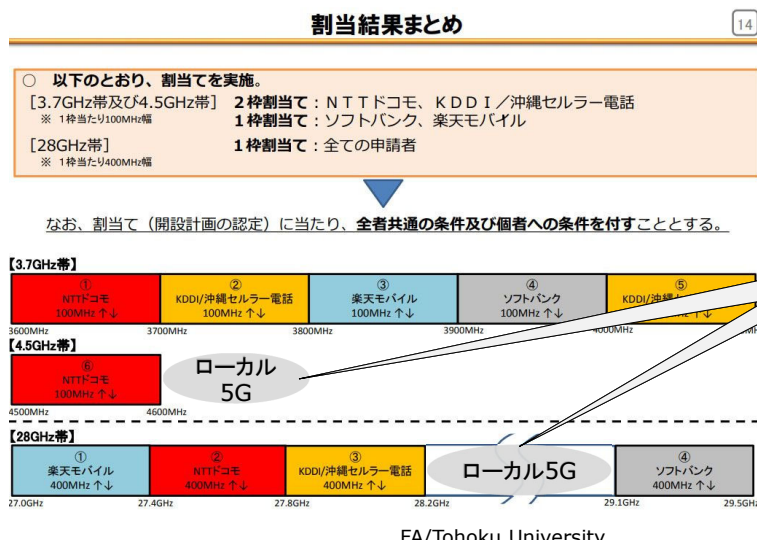
2021/7/16

FA/Tohoku University

50

5G時代の幕開け

- 総務省は5G無線通信サービスに使用する電波の周波数帯割り当て結果を発表（2019年4月10日）
- これから社会が変わる. もっともっと無線通信への期待が高まるはず



出典：ローカル5Gの概要
https://www.soumu.go.jp/main_content/000661550.pdf

出典：第5世代移动通信システムの導入のための特定基地局の開設計画の認定
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000378.html

2021/7/16

FA/Tohoku University

51

5G時代の幕開け

- 5Gや5G以降の時代では人々やあらゆるものがネットワークにつながっている社会
- 5Gは単に4Gの置換えではない、新しいモバイル通信サービスが登場
 - これまで進められてきた高速大容量化の進化の他、多数同時接続や超低遅延を利用した新しい分野（IoT、自動車、産業機器、スマートメータなど）の市場創出が期待されている



出典：電波政策2020懇談会
報告書（平成28年7月15日）

https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/denpa_2020/02kiban09_03000328.html

図2-1-1
新たなモバイルサービスの
実現

2021/7/16

2

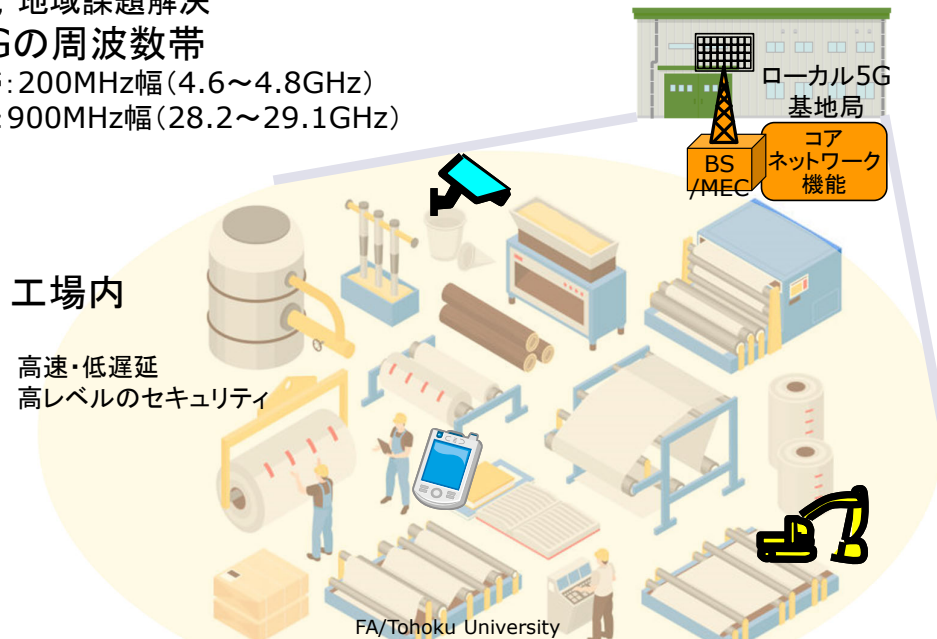
5G時代の幕開け ローカル5G

□ 企業や自治体が個別に利用できる小規模な5G通信環境

- 産業利用, 地域課題解決

□ ローカル5Gの周波数帯

- 4.5GHz帯: 200MHz幅 (4.6~4.8GHz)
- 28GHz帯: 900MHz幅 (28.2~29.1GHz)



2021/7/16

FA/Tohoku University

53

5G時代の幕開け

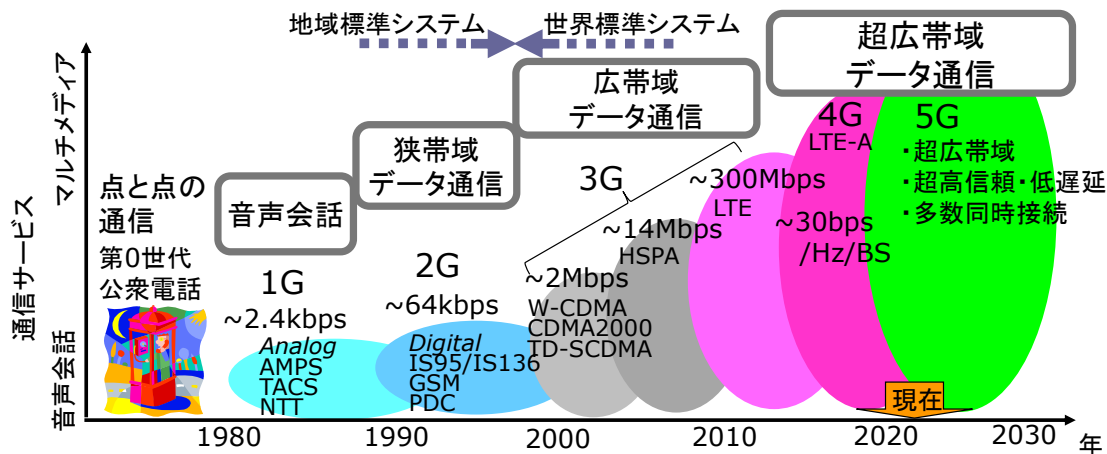
□ 1Gシステム(自動車電話)の誕生(1979年12月)

□ その後, ほぼ10年毎の世代交代を経て第4世代(2015年3月)へと進化

- 数10~100Mbpsクラスの広帯域データ通信サービスの普及
- 携帯電話は2010年頃には社会の重要なインフラになった

□ 5G通信サービス開始は2019~2020年

- 超広帯域通信に加え, 多数同時接続と超高信頼・低遅延通信サービスの提供



2021/7/16

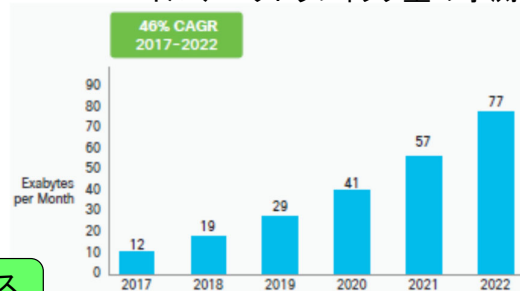
FA/Tohoku University

54

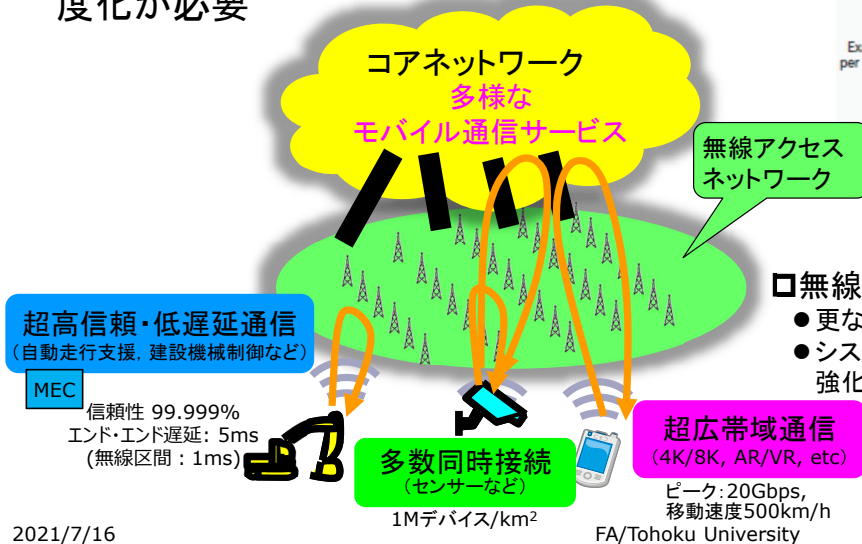
5Gシステムの高度化 今起きていること

- モバイルデータトラフィック量が46%もの年平均成長率(CAGR)で増加している
- 5G以降も引き続き移動通信システムの高度化が必要

モバイルデータトラフィック量の予測



出典: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017-2022
<https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>



□無線アクセスネットワーク

- 更なる大容量化が必要
- システム展開の柔軟性・拡張性向上と耐災害性強化がこれからもっと重要になる

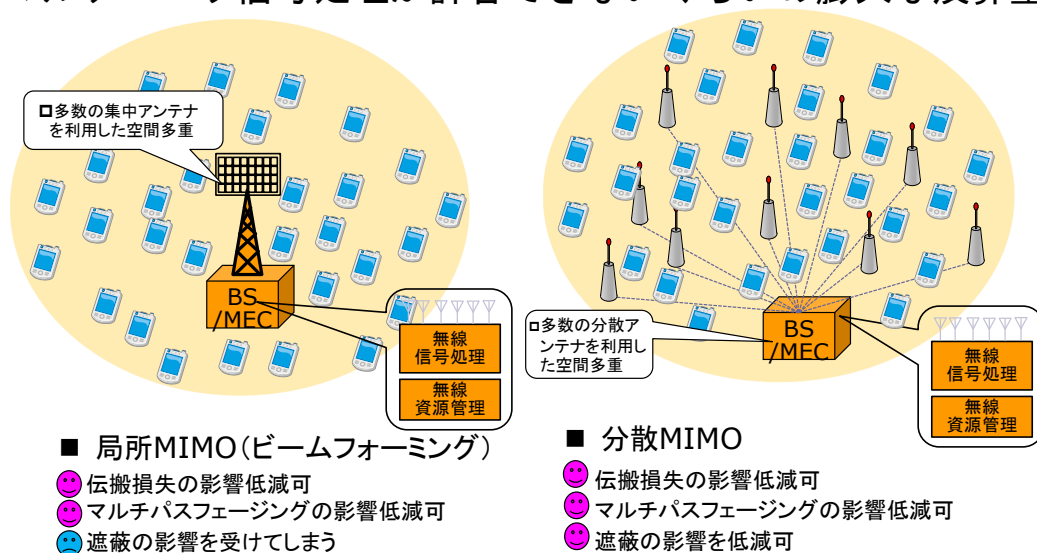
2021/7/16

FA/Tohoku University

55

超高密度無線アクセスネットワークへ

- 無線信号処理と無線資源割り当てを行う基地局の配置密度は従来のままで、スペクトルとエネルギー利用効率を同時向上
- しかし、マルチユーザ信号処理が許容できないくらいの膨大な演算量になってしまう



2021/7/16

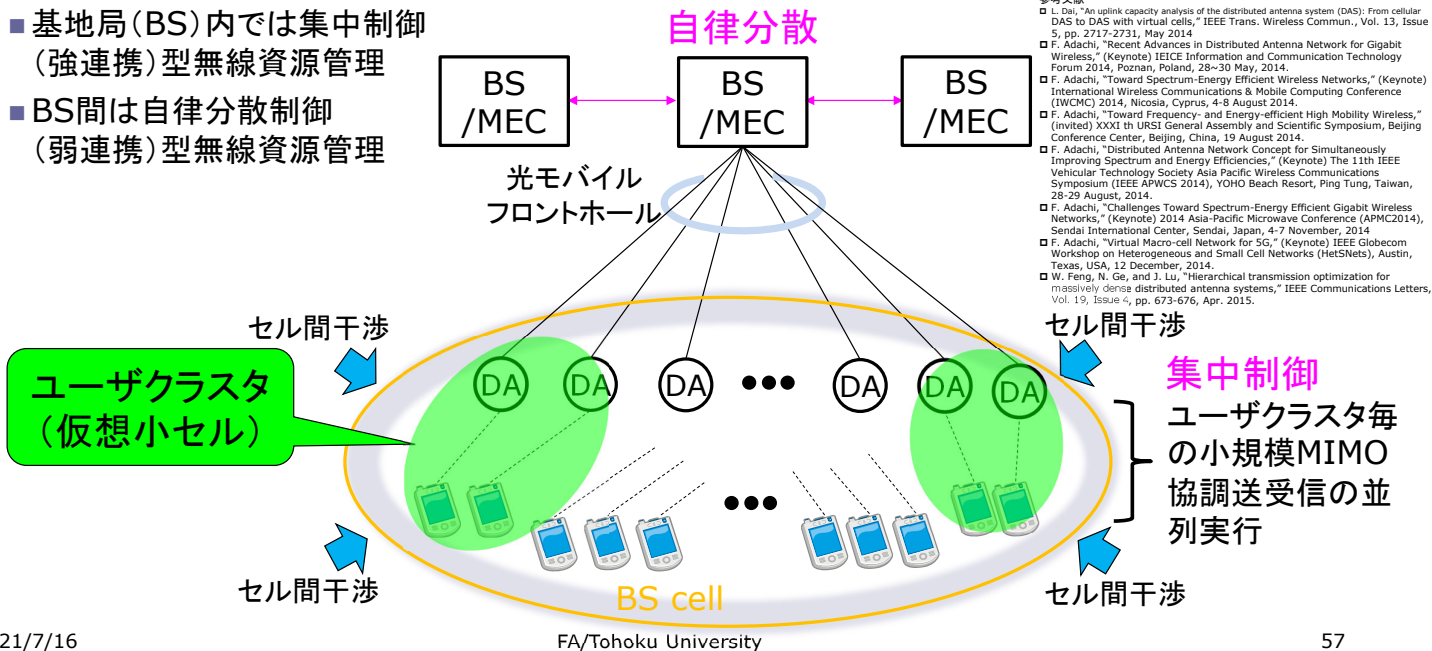
FA/Tohoku University

56

超高密度無線アクセスネットワークへ

□ 高い拡張性と柔軟なシステム展開を可能とする自律分散無線資源管理

- 基地局(BS)内では集中制御
(強連携)型無線資源管理
- BS間は自律分散制御
(弱連携)型無線資源管理



2021/7/16

FA/Tohoku University

57

6Gシステムとは

□ 5G通信サービスの開始(2019~2020年)にともない、研究開発は6Gシステムへ

□ 通信サービスの多様化

- 5Gより更に多様な通信サービス(例えばホログラフィック通信)
- 海で囲まれた日本ならではの通信サービスの掘り起し
 - 海中通信サービス(漁場, 養殖, 資源探査)

□ サービスエリアの拡張

- 2次元通信サービスエリアから宇宙, 空中や海中をも含む3次元通信サービスエリアへの拡大
- 多様なシステム間の連携

□ 超高周波数帯の利用

- 極超高速通信(1Tbps)を可能とするテラヘルツ帯の利用
- 極近接通信(テラヘルツ通信)から極長距離通信(衛星)を統合したシステム運用

□ 賢く安全安心なシステム

2021/7/16

FA/Tohoku University

58

6Gシステムとは

- 5G通
- 通信サ
- 5G
- 海で
- 海
- サービ
- 2次
- 多様
- 超高周
- 極超
- 極近
- 賢く安

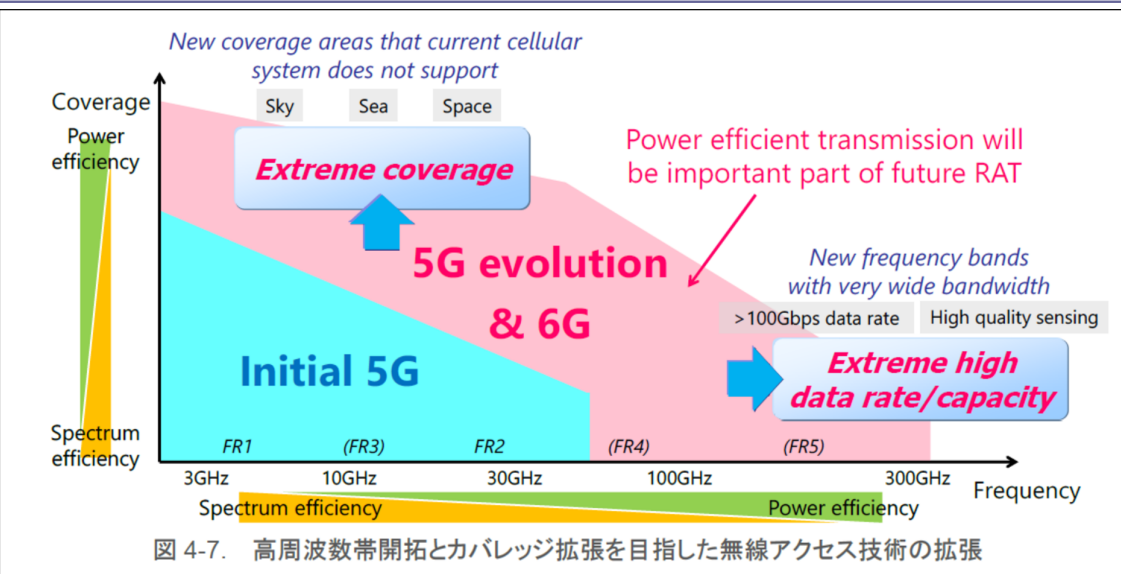


図 4-7. 高周波数帯開拓とカパレッジ拡張を目指した無線アクセス技術の拡張
 出典: ドコモ6Gホワイトペーパー(2.0版)
<http://5ge-and-6g-summit.com/pdf/6gwhitepaper2.pdf>

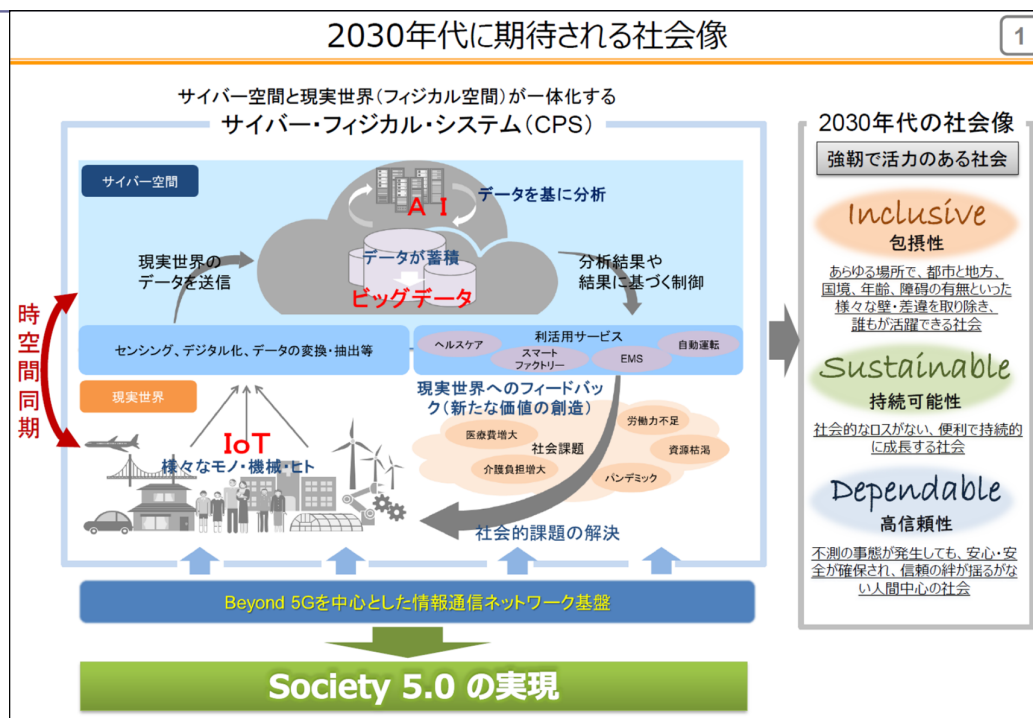
2021/7/16

FA/Tohoku University

59

6Gへの期待

出典: 総務省 Beyond 5G推進戦略(概要)2020年6月
https://www.soumu.go.jp/main_content/000702111.pdf



2021/7/16

60

6Gの主要サービス

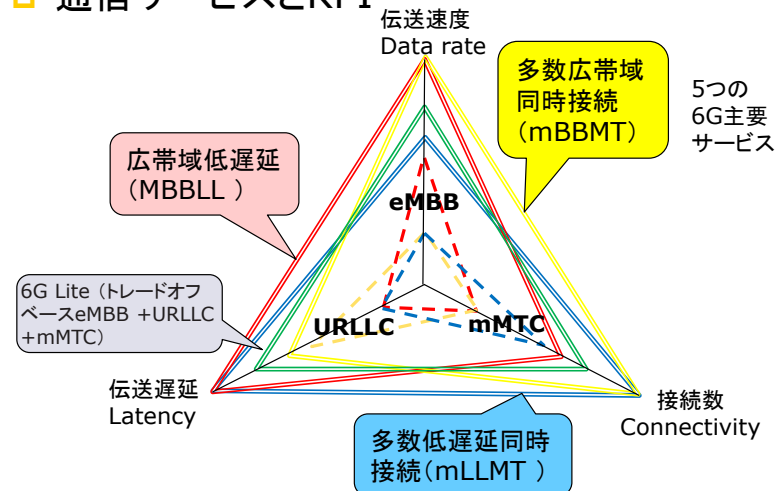
参考文献

G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence," IEEE Wireless Comm., Vol. 27, Issue 5, pp. 126-132, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900516>.

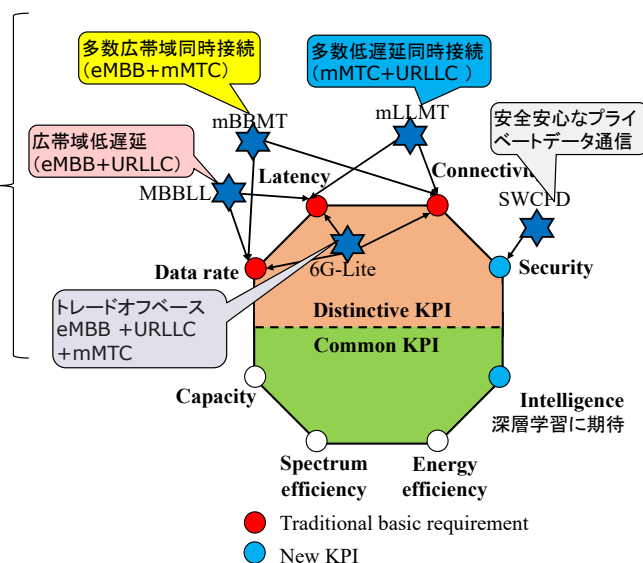
- 6Gでは、人と機械を一体として扱った通信サービスを提供。

体感品質QoEの向上が重要

- 通信サービスとKPI



主要通信サービスの5Gから6Gへの進化



6G通信サービスのKPI

2021/7/16

FA/Tohoku University

61

6Gの主要サービス

参考文献

G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence," IEEE Wireless Comm., Vol. 27, Issue 5, pp. 126-132, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900516>.

- まず、6G初期サービス(6G Lite)

- 伝送速度、遅延、接続数に関する要求条件を同時に満足させることは難しく、それらの間のトレードオフを最適化
- 最もあり得るシナリオは高度運転制御(走行ルート計画、自動運転支援、障害物検出、移動体監視、緊急救助など)

- 広帯域低遅延 (MBBLL: Mobile broadband and low latency)

- eMBB + URLLC
- モバイル拡張現実(AR), 仮想現実(VR), ヘッドセット不要なホログラフィック遠隔会議
- 下りリンクピークレート>1Tbps, ユーザ体感レート>10Gbps, 低遅延<0.1 ms
- 移動速度>1000km/h: 宇宙探査, 飛行機, 磁気浮上鉄道など

2021/7/16

FA/Tohoku University

62

6Gの主要サービス

参考文献

G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence," IEEE Wireless Comm., Vol. 27, Issue 5, pp. 126-132, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900516>.

■ 多数広帯域同時接続 (mBBMT: Massive broadband machine type)

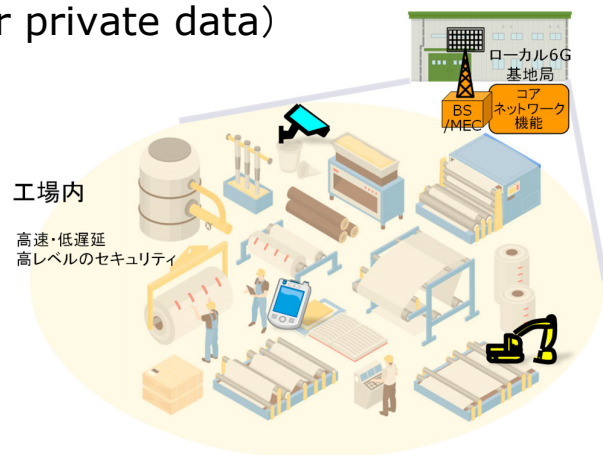
- eMBB + mMTC
- 触感(tactile) IoT → 高速伝送が必要
- 触感センサーの高密度多数同時接続(例えば, 100センサー・デバイス/m³)

■ 安全安心なプライベートデータ通信

(SWCPD: Secure wireless computing for private data)

- 様々なプライベート(企業, 個人)データが無線コンピューティングで処理されるようになる. 安全安心な無線コンピューティングでなければならない
- プライベートデータと無線コンピューティングを狭い物理的エリアに閉じ込めることで安全安心を確保しつつ, 高速・低遅延・高信頼通信サービスを提供する例が, データを地産地消するローカル6G. ローカル5Gの高度化版

ネットワーク側でのネットワーク機能仮想化やスライシングに対応した柔軟な無線システムが要求される. 無線側でも無線機能を自己最適化できる能力が必要になる. それを可能にするのが無線コンピューティング



2021/7/16

FA/Tohoku University

63

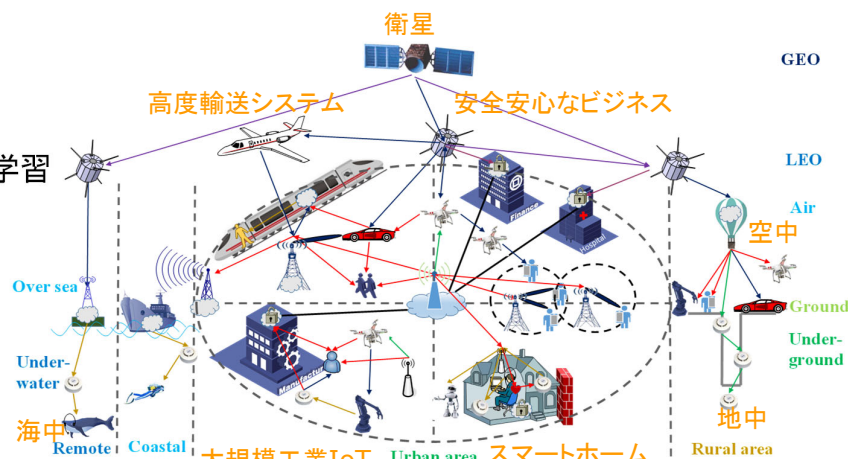
6G通信エリアの拡大

■ 地上から空中, 海中, 宇宙にまでエリア拡大

■ ミリ波からテラヘルツ, そして可視光に至る広範囲な周波数帯の統合利用

■ 超複雑ネットワークの最適運用

- 分散化を可能とする転移学習 (DNNモデルの共有)
- 判断結果を説明できるモデル駆動深層学習 (例えばdeep unfolding NN)



参考文献

G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence," IEEE Wireless Comm., Vol. 27, Issue 5, pp. 126-132, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900516>.

6Gアーキテクチャの例

2021/7/16

FA/Tohoku University

64

6G通信エリアの拡大

□ 水中・海中ローカルエリアネットワーク

- 海で囲まれた我が国の新しいビジネスエリアの開拓
- 水中に地上並みのLocal Area Network (ALAN) を構築することを目指し、水中光無線通信をはじめとした水中光無線技術の検討が開始されている

参考文献

鈴木、高橋、島田、安達, "ALAN
コンソーシアムにおける水中光無線
通信技術の検討," BI-5 自由
空間光伝送技術の最新研究動向,
BI-5-4, 2020年信学会総合大
会, 2020年3月.



図1 ALANコンソーシアムで検討する水中光無線技術

2021/7/16

FA/Tohoku University

65

移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 伝搬環境に強い制約を受ける移動無線通信

- 伝搬環境は時間領域と周波数領域で複雑に変動

□ 無線通信技術の研究開発は、無線チャネルの構造を理解しモデル化することから始まる

- これなくしては実用的な無線通信技術の研究開発は不可能であると言っても過言ではない

□ 過酷な伝搬環境下での高速高品質な通信実現は極めて難しい

□ でも、わくわくする挑戦

2021/7/16

FA/Tohoku University

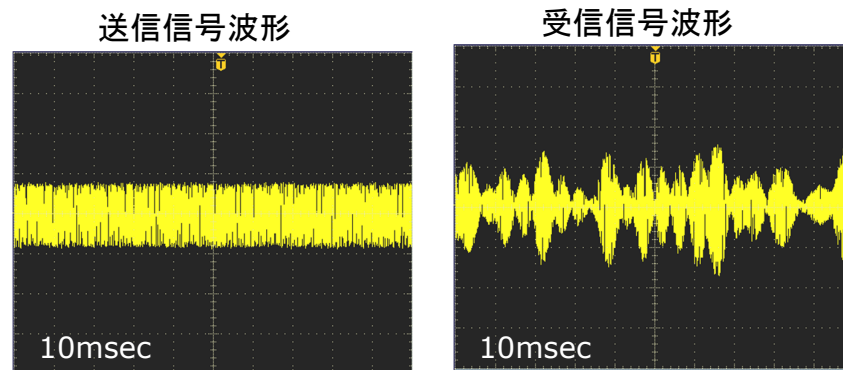
66

移動無線研究(物理層)の醍醐味

無線チャネルのモデル

- マルチパスフェージング
- 遅延広がり(広帯域チャネル)
- シャドウイング, 遮蔽

マルチパス
フェージング

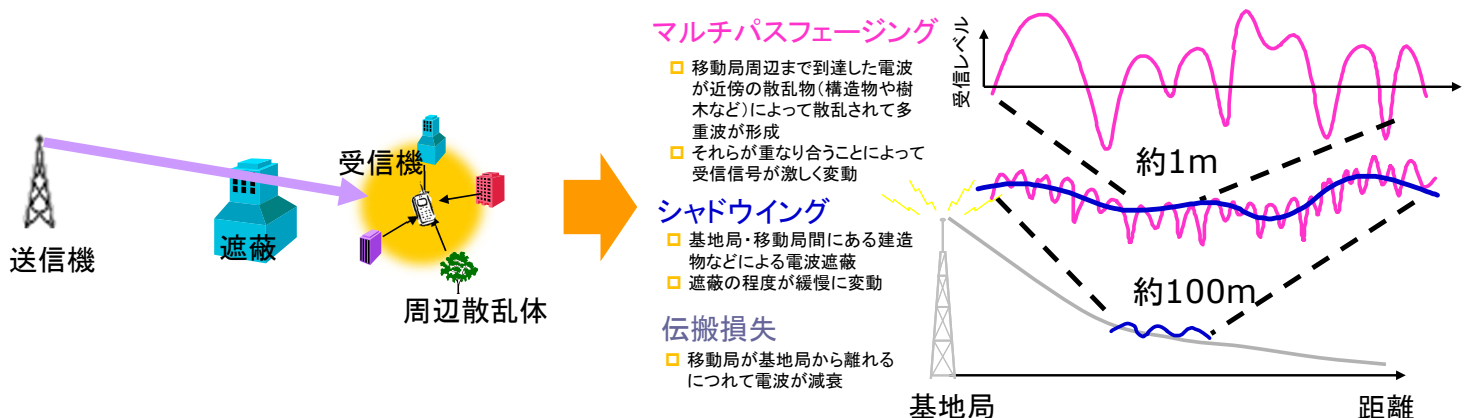


最大ドップラー周波数 $f_D = 120\text{Hz}$
(搬送波周波数 2GHz , 移動速度 64.8km/h)

移動無線研究(物理層)の醍醐味

移動通信伝搬路は以下の3つで特徴付けられる

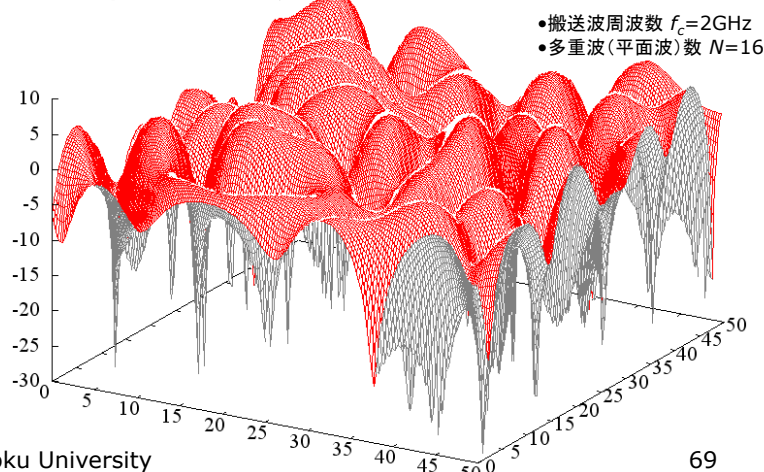
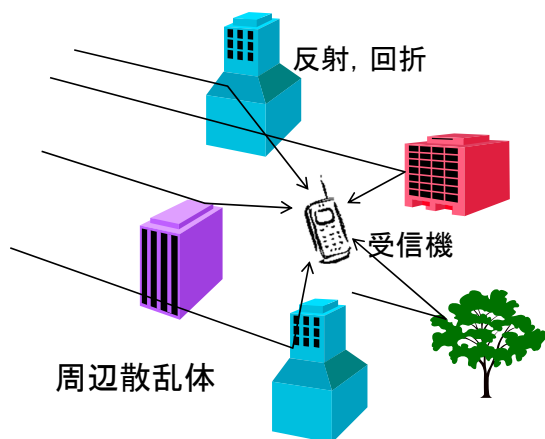
- 伝搬損失: 送信点からの距離に依存
- シャドウイング: 数十から数百メートルの周期で不規則に伝搬損失が変動
- マルチパスフェージング: 搬送波波長の半分程度の周期で不規則に受信電力が変動



移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ マルチパスフェージング

- 移動局周辺まで到達した電波は、受信点周辺の建造物などによって散乱(回折や反射)され、これらが多重伝搬路(マルチパス)を形成
- 位相の異なる多重波が重なり合うことから、端末の移動に連れて受信信号レベルが激しく変動。これがマルチパスフェージング現象
- アンテナをわずか数センチ移動させるだけで電波の強さが大きく変動



2021/7/16

FA/Tohoku University

69

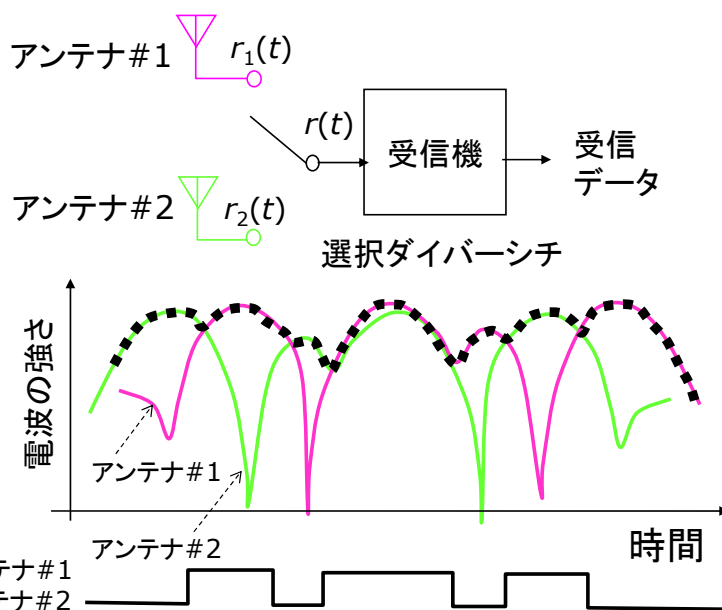
移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 複数アンテナを利用するダイバーシチ受信技術

- 選択, 等利得, 最大比

□ 送信側にも複数アンテナを用いるマルチアンテナ(MIMO)信号伝送へと発展

- シングルユーザMIMO
- マルチユーザMIMO



2021/7/16

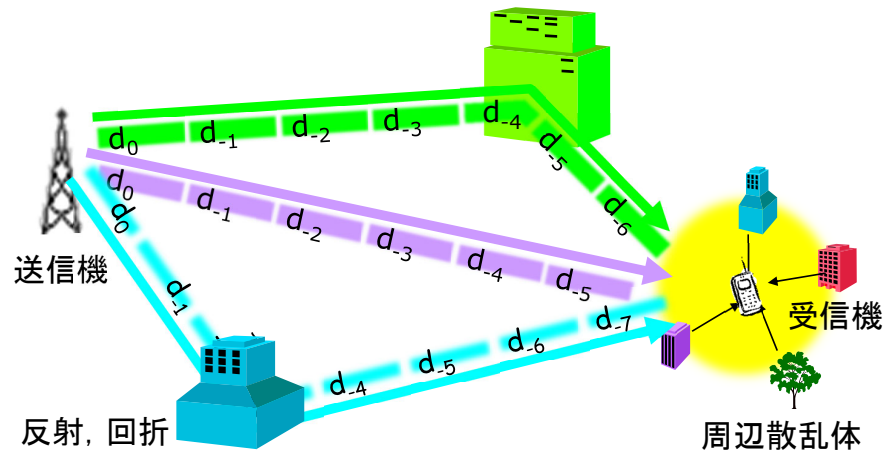
FA/Tohoku University

70

移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 広帯域伝搬路モデル

- 送受信局間に存在する複数の大きな反射物体は、信号帯域幅の逆数以上に離れた時間差を有する複数の伝搬路(パス)を形成
- 100MHz帯域幅のシンボル伝送速度は100Mシンボル/秒. 1シンボル長はたったの3m
- 移動局周辺に存在する多数の散乱物体は分解不可能な多重波を生成



2021/7/16

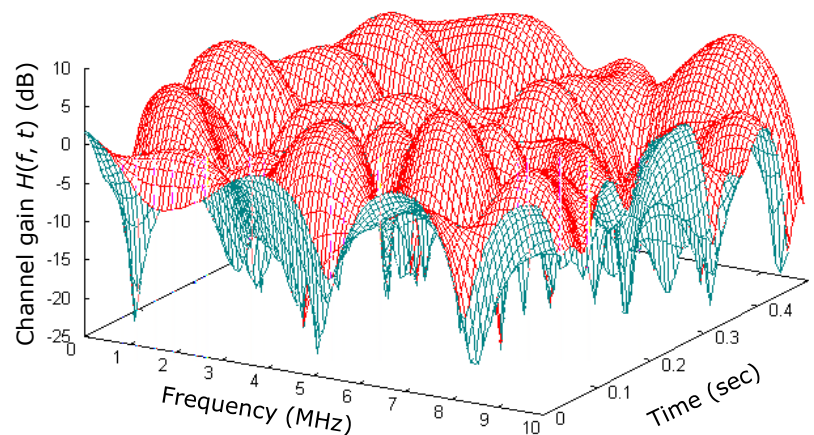
FA/Tohoku University

71

移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 周波数と時間の2重選択性チャネル

- 無線チャネルの伝達関数 $H(f, t)$ は信号帯域幅内でもはや一定ではなく、しかも激しく時間変動
→2重選択性チャネル
- 伝達関数の信号帯域内の変動を低減する技術が不可欠
 - OFDM/OFDMAの採用
 - シングルキャリア周波数領域等化の採用



2GHz, $L=6$, Uniform profile
100nsec, 4km/h

2021/7/16

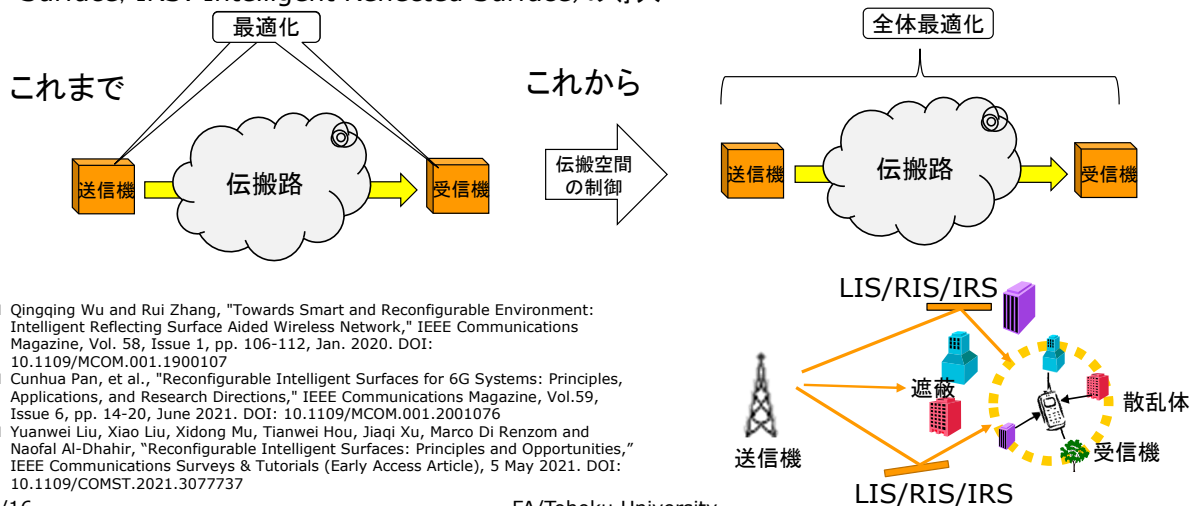
FA/Tohoku University

72

移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 伝搬路も含めた統合無線信号処理への挑戦

- これまでは、無線送信+受信信号処理の最適化
- これからは、無線送信+伝搬路+受信信号処理の全体最適化
 - 例えば、再構成可能な知的反射板(LIS: Large Intelligent Surface, RIS: Reconfigurable Intelligent Surface, IRS: Intelligent Reflected Surface)の導入



- Qingqing Wu and Rui Zhang, "Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network," IEEE Communications Magazine, Vol. 58, Issue 1, pp. 106-112, Jan. 2020. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900107
- Cunhua Pan, et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions," IEEE Communications Magazine, Vol. 59, Issue 6, pp. 14-20, June 2021. DOI: 10.1109/MCOM.001.2001076
- Yuanwei Liu, Xiao Liu, Xidong Mu, Tianwei Hou, Jiaqi Xu, Marco Di Renzom and Naofal Al-Dhahir, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities," IEEE Communications Surveys & Tutorials (Early Access Article), 5 May 2021. DOI: 10.1109/COMST.2021.3077737

2021/7/16

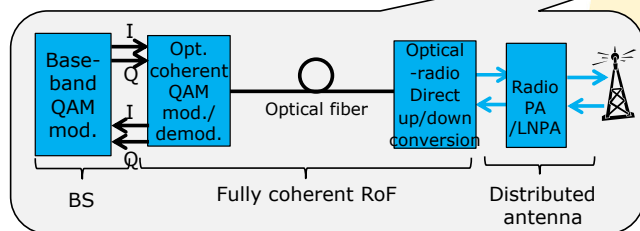
FA/Tohoku University

73

移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 極超高密度化への挑戦

- 過酷な無線伝搬路をできるだけ短く
- 光・無線統合による自在な展開が可能な仮想化基地局
 - A/DおよびD/A変換器を取り除き、無線ベースバンド I/Q波形のフルコヒーレント光伝送
 - 光リンクと無線リンクの違いは搬送波周波数のみ
 - 光 \leftrightarrow 無線直接周波数変換
 - 光帯域幅=無線帯域幅

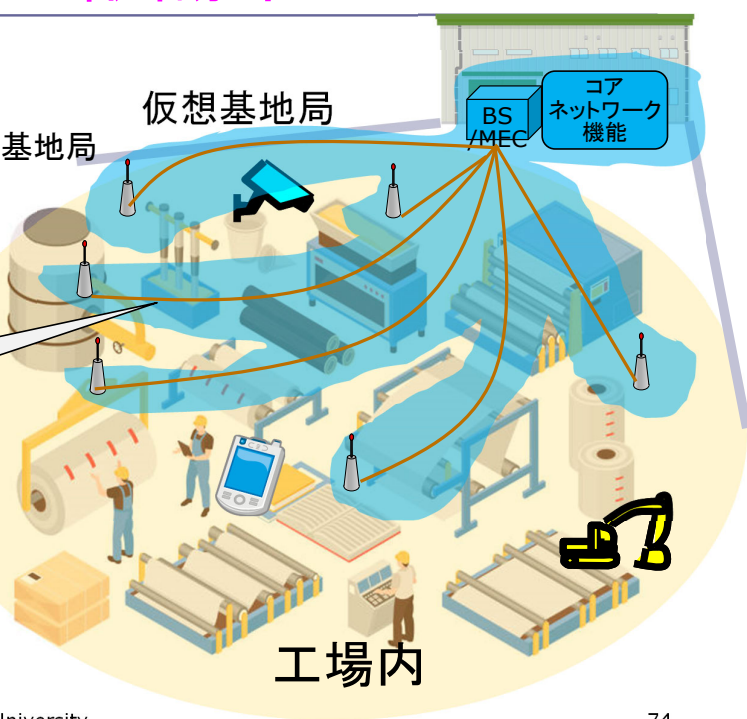


F. Adachi, "Wireless Optical Convergence Enables Spectrum-Energy Efficient Wireless Networks," Proc. 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics/the 9th Asia Pacific Microwave Photonics (MWP/APMP 2014), pp.51-56, Sapporo, Japan, 20-23 Oct. 2014.

2021/7/16

FA/Tohoku University

74

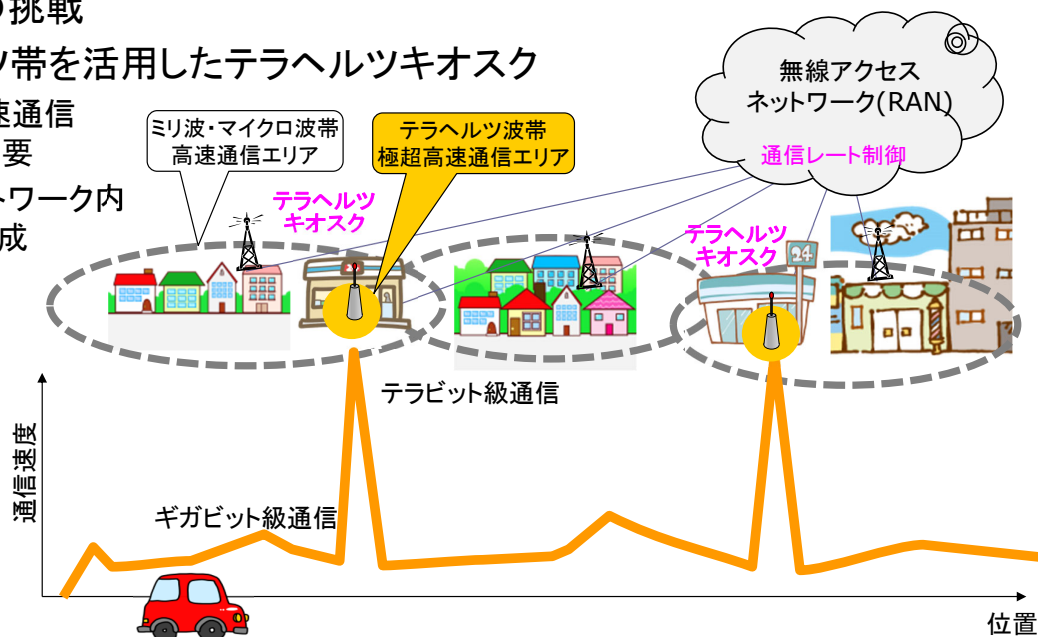


移動無線研究(物理層)の醍醐味

□ 極超高速通信への挑戦

□ 例えば, テラヘルツ帯を活用したテラヘルツキオスク

- 1Tbps級の極超高速通信
ならば連続通信は不要
- 不連続データをネットワーク内
で連続データに再構成



2021/7/16

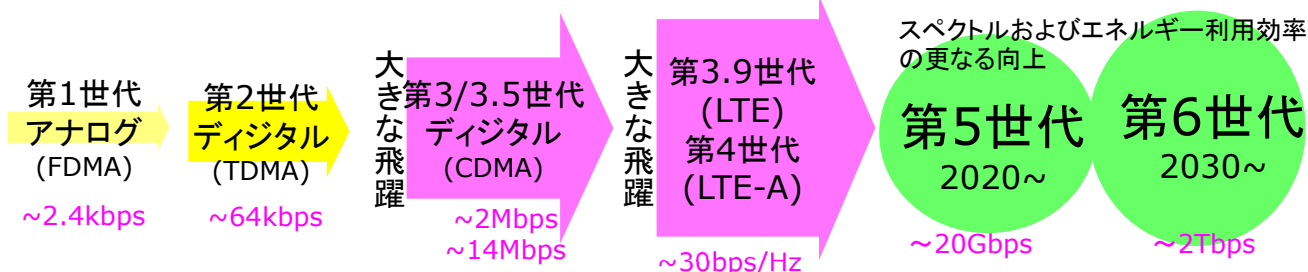
FA/Tohoku University

75

おわりに 移動無線通信技術のさらなる進化への期待

□ 移動無線通信技術は過去40年にわたって第1世代から第5世代へと進化してきた

- アナログからデジタルへ, 単純ブロック符号からターボ・LDPC・ポーラ符号へ
- FDMA, TDMA, CDMAからOFDMAへ
- シングルアンテナ通信(SISO)からマルチアンテナ通信(MIMO), そして大規模MIMOへ
- 直交マルチアクセス(OMA)から非直交マルチアクセス(NOMA)へ



□ 第6世代では空間のより高度な利用

- 超高密度無線アクセスネットワーク(RAN)
- 集中MIMOから分散MIMOへ

□ そして, 広範囲な周波数帯の電波の柔軟な利用

- マイクロ波からテラヘルツ波, 可視光までも

2021/7/16

FA/Tohoku University

76

おわりに 移動無線通信技術のさらなる進化への期待

□ 移動無線通信技術の進化が無ければ、移動通信システムの進化はあり得ない

- 複雑な干渉問題の解決(3次元エリア)
- 伝搬環境制御(large intelligent surface: LISなど)を統合した無線通信全体最適化
- ゼロエネルギー通信(エネルギー収穫)
- テラヘルツ波の利用
 - マイクロ波からテラヘルツ波に至る広範囲な周波数帯の柔軟な利用
- 光無線融合
 - フルコヒーレント光無線伝送
- 新しい通信サービスのための超高速伝送
 - データ量が膨大な3D通信, 例えばホログラフィック通信

移動通信システム

- 無線AI
 - チャンネル情報予測, 適応符号化, 適応ビームフォーミング, 適応信号点配置など
 - 干渉制御
 - 無線資源割当 などなど

移動無線通信技術

おわり
ご清聴ありがとうございました