

無線LANのこれまでと今後

2020年10月22日

京都大学 大学院情報学研究科 通信情報システム専攻
守倉正博

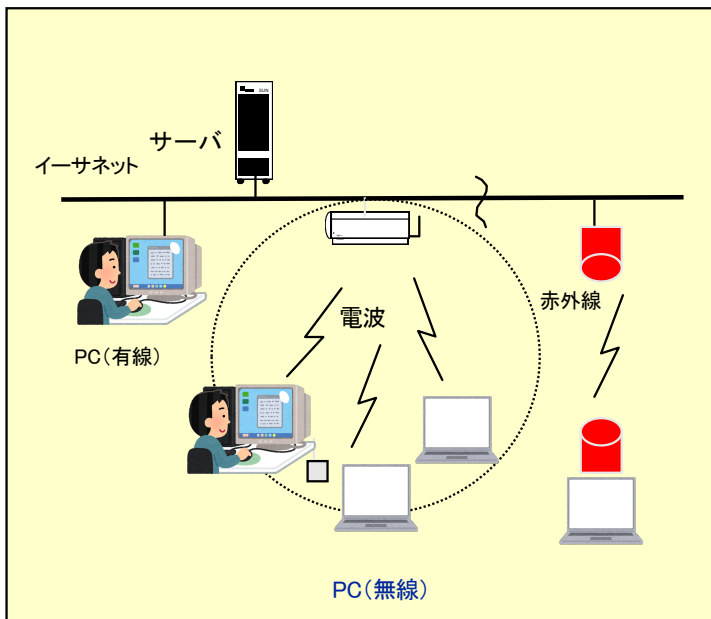


目次

1. 無線LANの位置づけ
ホーム・オフィスの無線アクセスからノマディックへ
2. 通信トラヒックの増加
屋内での端末利用
3. 無線LANの伝送レート増加
4. 無線LANの国際規格(IEEE 802.11 WG)
5. 無線LANに対する企業の貢献
6. 2020年以降の無線LANの世界
7. 無線LANが5G時代に共存するために
8. むすび

1.無線LANの位置づけ

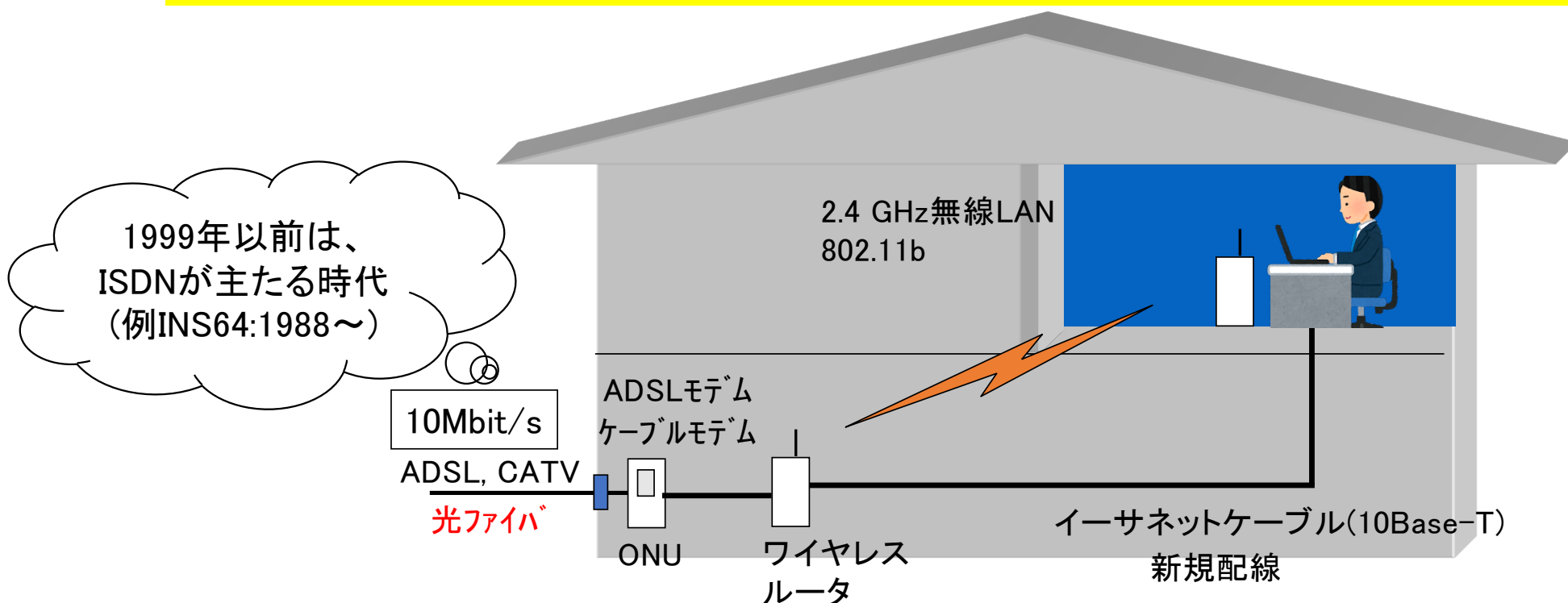
LANの標準的な伝送方式であるイーサネットを、配線なしで伝送する構内通信技術(1990年代の状況)



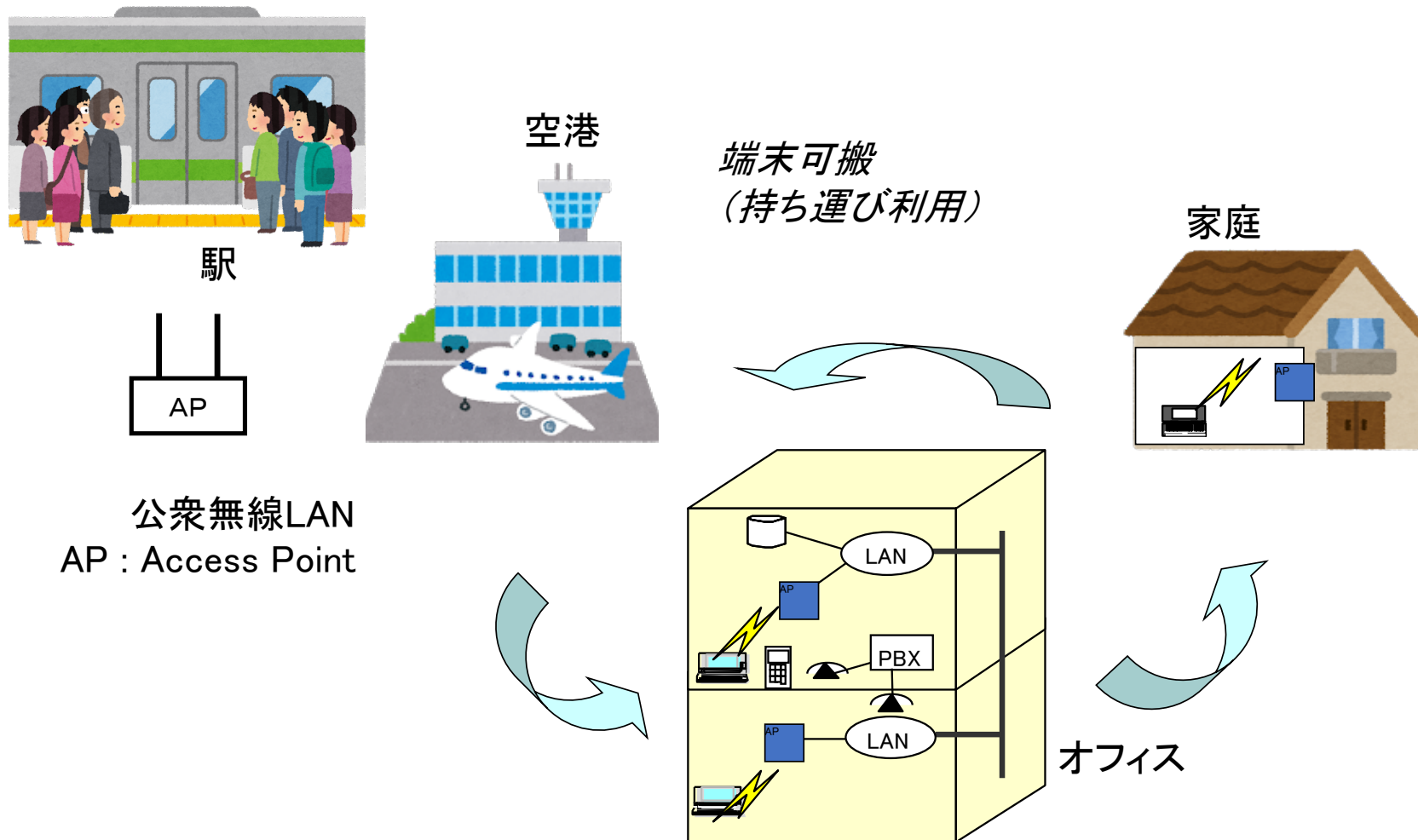
- 通常は左図のようにオフィス内で使う
 - PCとLANを無線接続
 - LANとLANを無線接続(LAN間接続)
- 媒体は電波と赤外線
 - 電波(2.4 GHz): 1, 2 Mbit/s
 - 電波(19 GHz): 25 Mbit/s(ライセンスバンド)
 - 赤外線 : ~10Mbit/s
- ビル間接続にも用いられるものもある

高速アクセスライン(～10 Mbit/s)時代(1999–2001年以降)の ホーム系ネットワーク

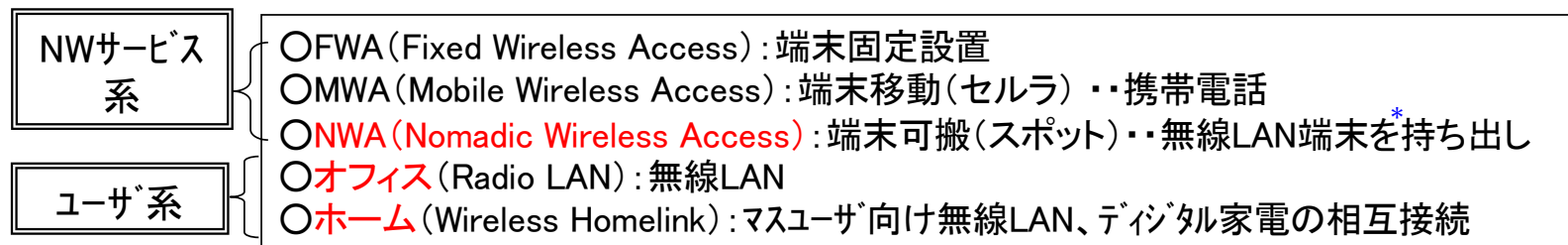
- ・光アクセス、ADSL、CATVに2.4 GHz無線LANで配線を無線化する。
- ・光アクセス、ADSL、CATVにイーサネットケーブルを露出配線で引き回す。



公衆無線LANサービス

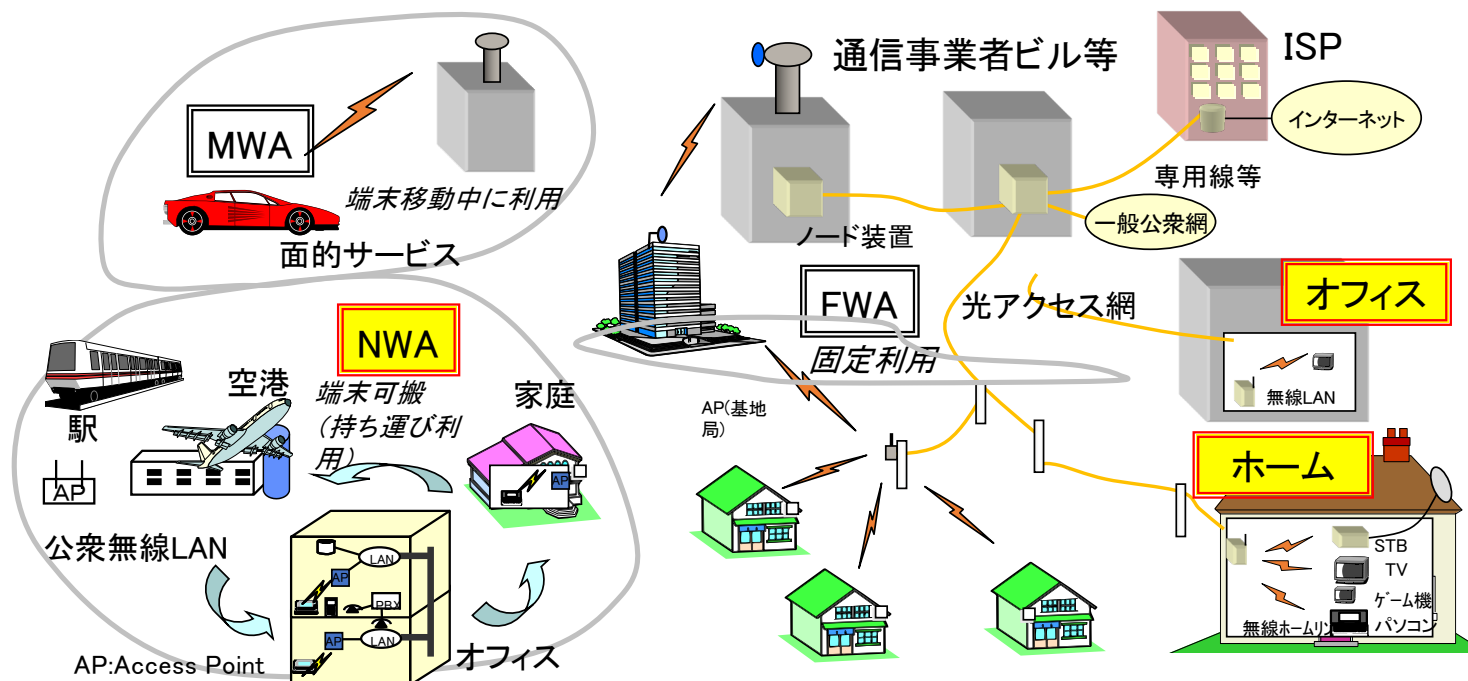


無線アクセスの分類



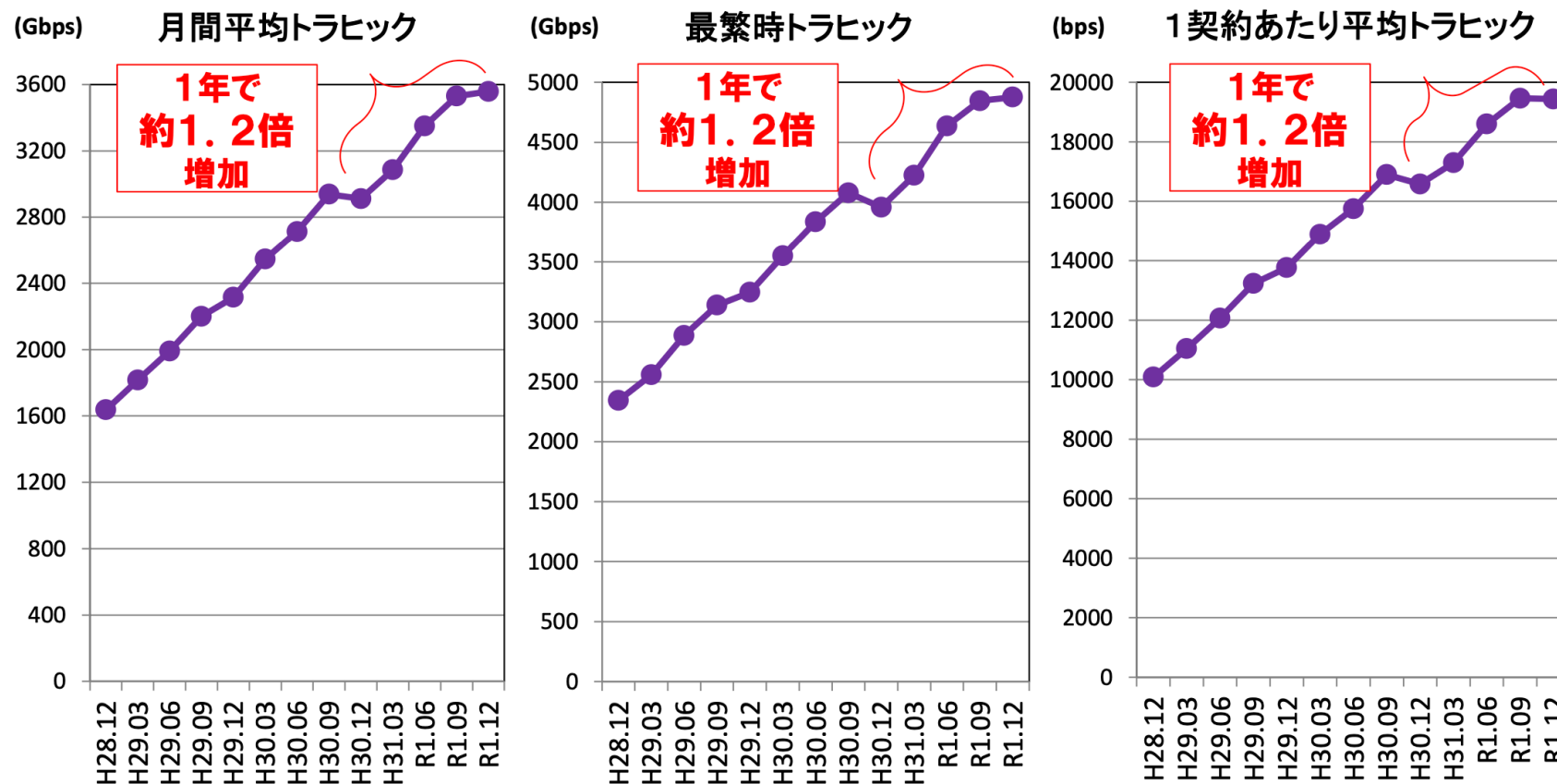
NWAはITU-Rでの
正式用語

(Recommendation
ITU R F.1399)



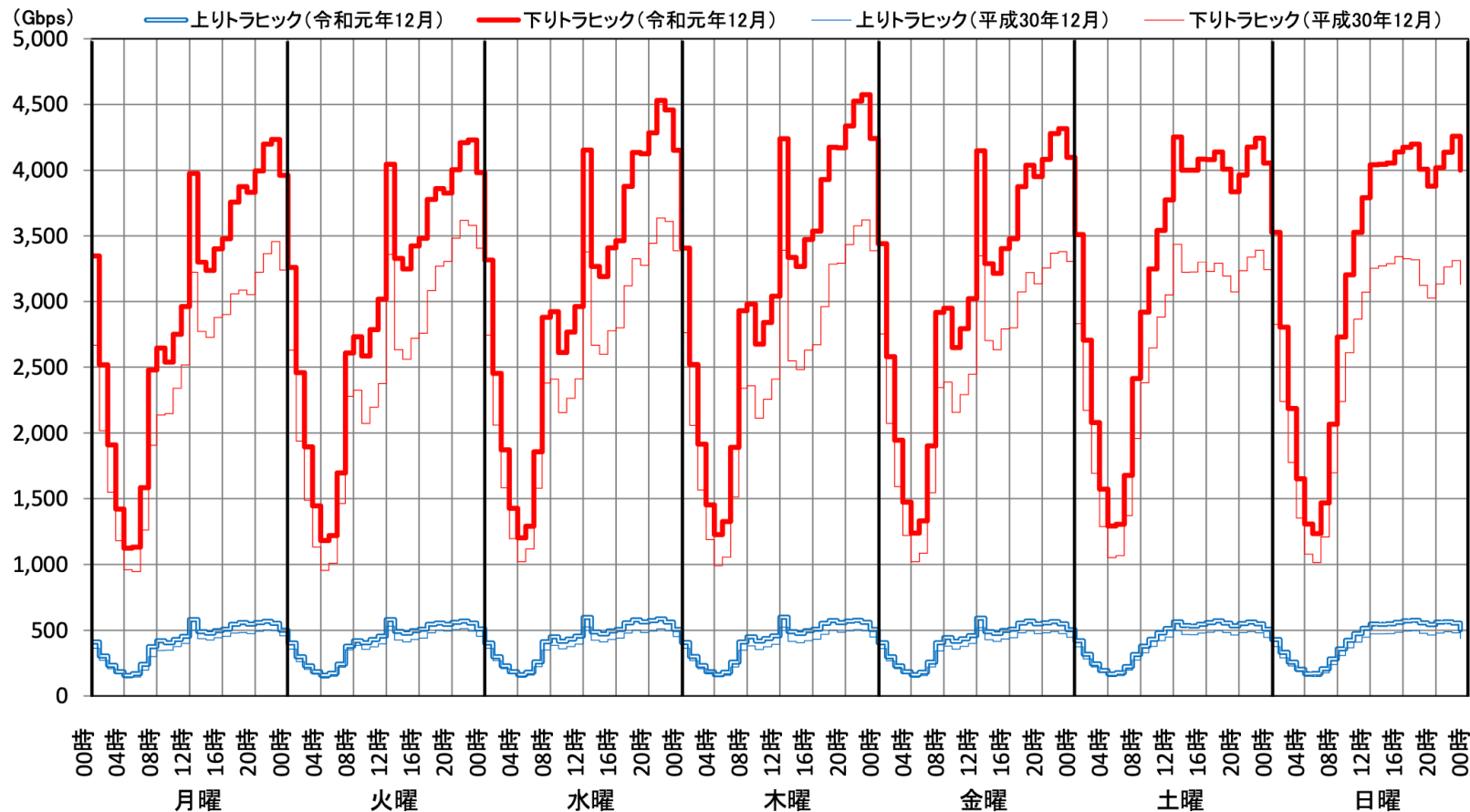
2. 通信トラフィックの増加

移動通信トラフィックの推移(2016/12～2019/12)



総務省資料 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010602.pdf>

移動通信トラフィックの傾向(2018/12, 2019/12)



トラフィックのピークは
昼休みや午後8時~12時



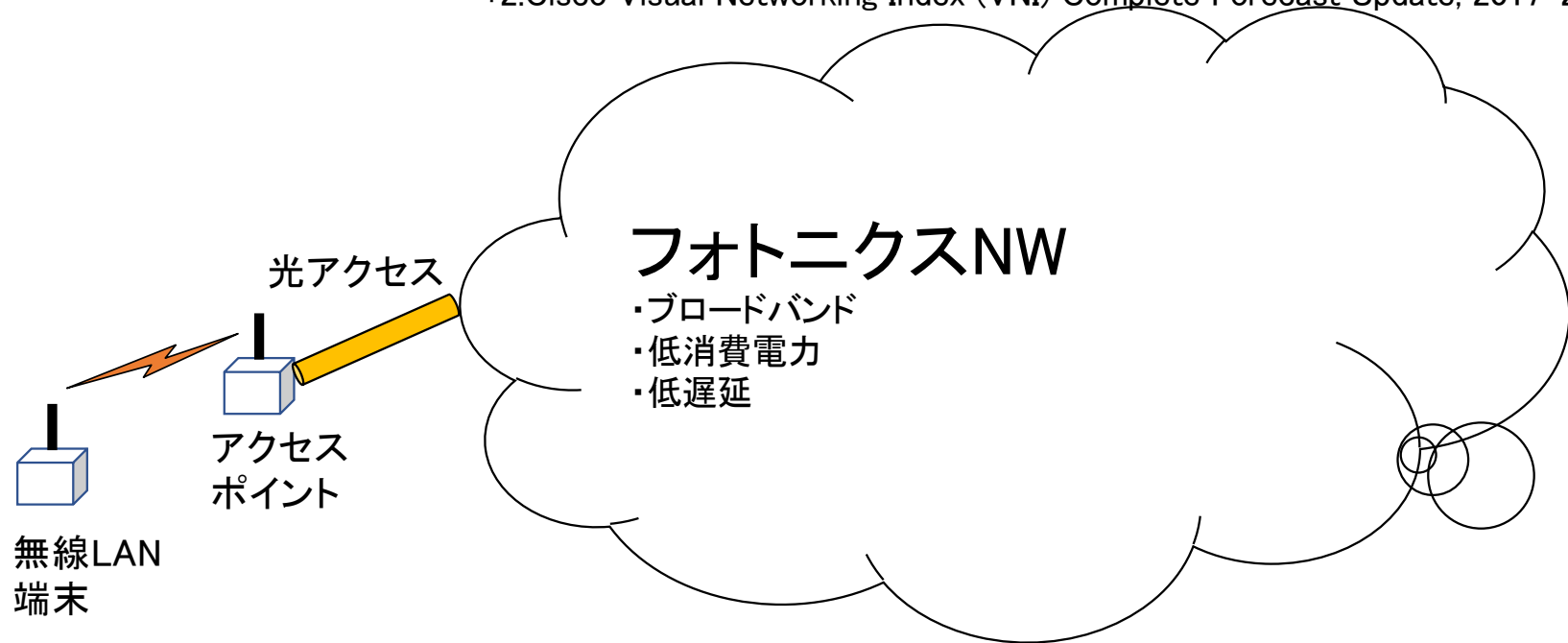
この時間帯で多くの方は
屋内にいると思われる。

無線LANの主な役割

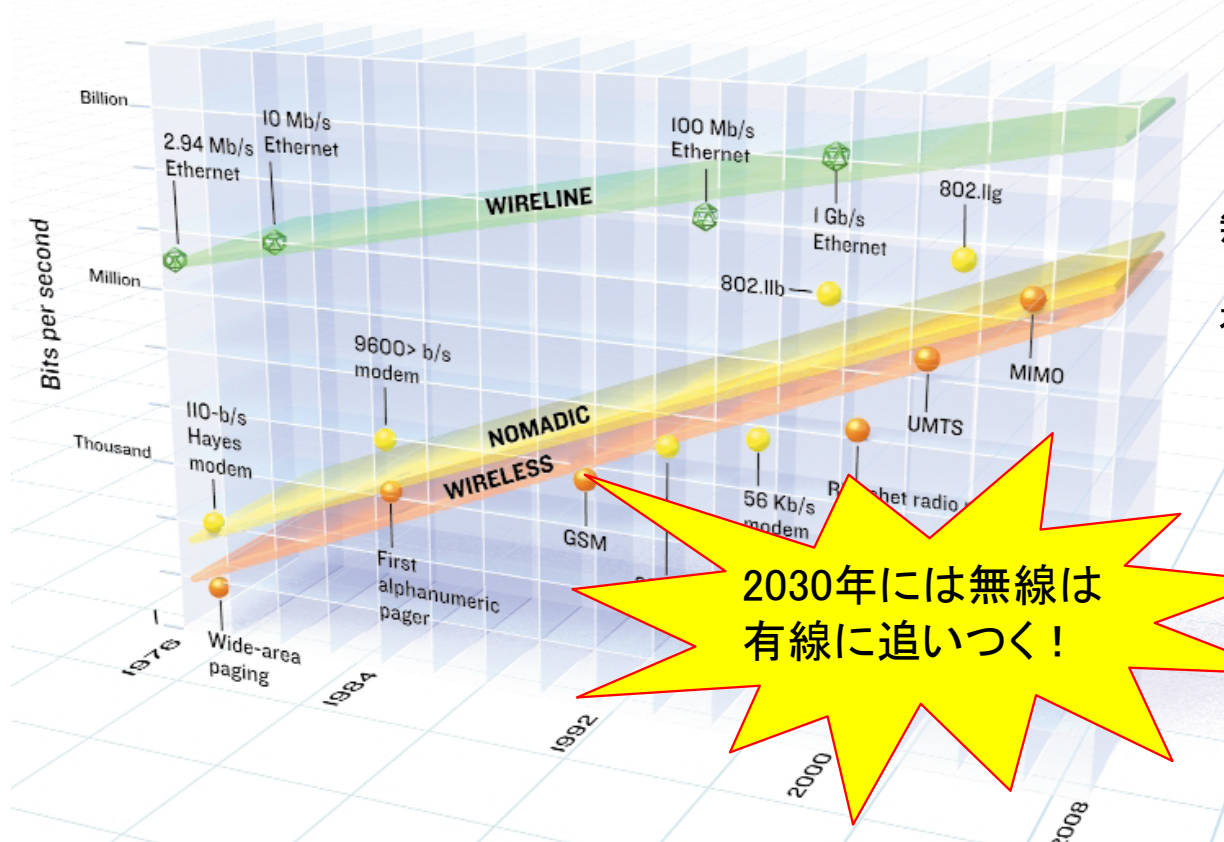
- (1)光アクセス等を介したフォトニクスネットワーク*1との接続
(有線接続の補完)
- (2)スマートフォン・トラヒックのオフロード*2
(2022年にはグローバルなモバイルトラヒックの59%はWi-Fi™へのオフロード)

*1: 澤田純、他、“IWON構想—インターネットの先へ”,NTT出版,2019

*2: Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017-2022



Edholmの法則(有線と無線の関係)



無線:2020年 11ax 9.6 Gbit/s
2025年頃 11be 約30 Gbit/s
有線:2017年 802.3bs 400 Gbit/s

2030年には無線は
有線に追いつく!

無線アクセスの高速化とともに、セル半径が小さくなり、フォトニック・ネットワークの比重が大きくなる。

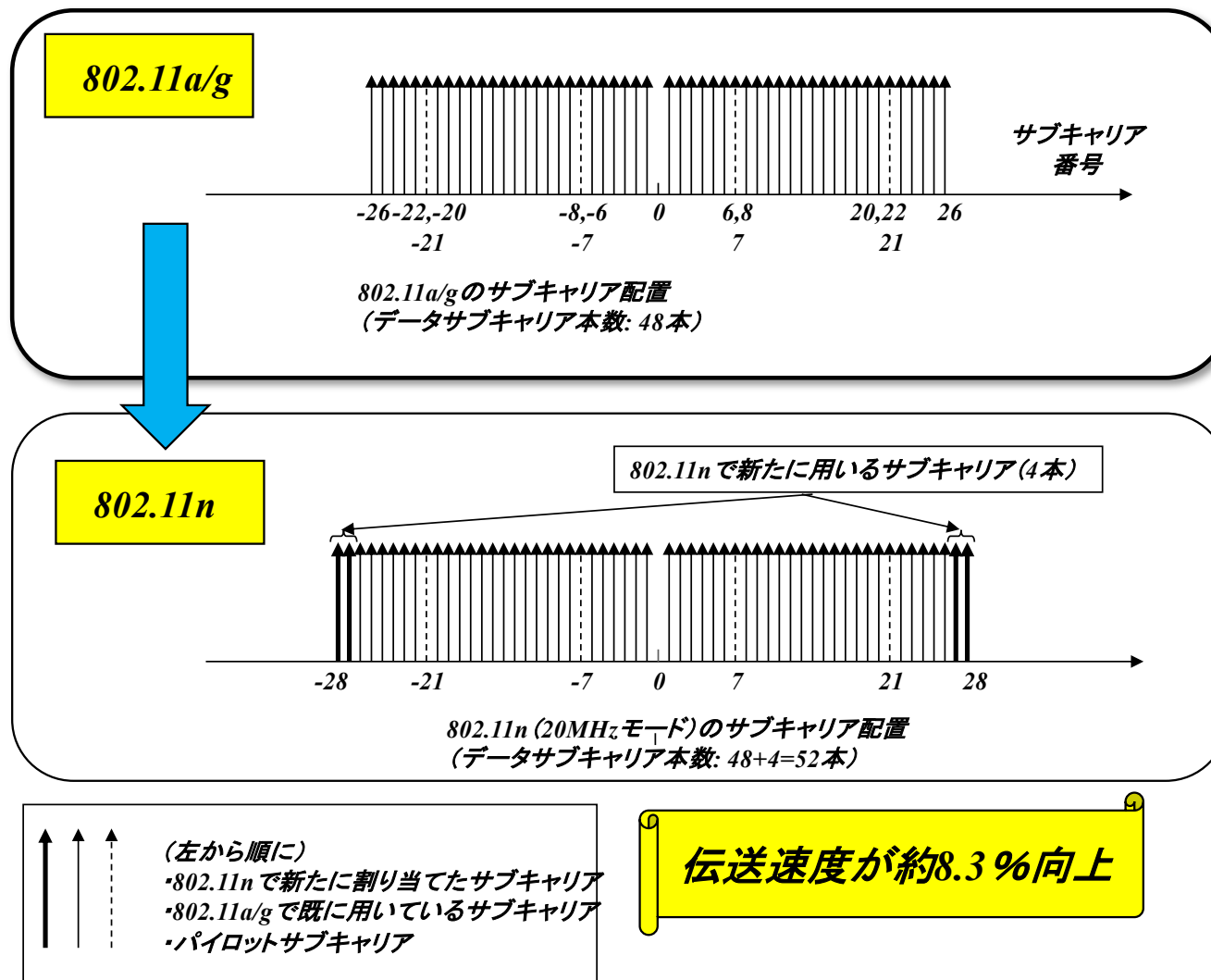
Mooreの法則(半導体の集積度は18か月で倍増)のように情報伝送速度も予測可能というIEEE Spectrum 2004年7月号に開催された記事. Phil. Edholm (Nortel)

3. 無線LANの伝送レート増加

- (1) 無線周波数帯域の増加
- (2) 高能率変調・誤り訂正符号化
- (3) 空間多重数の増加

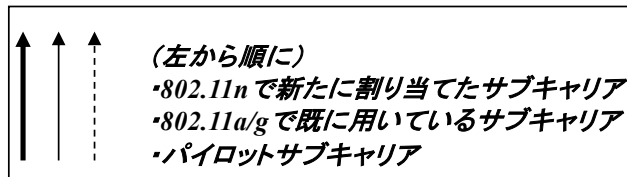
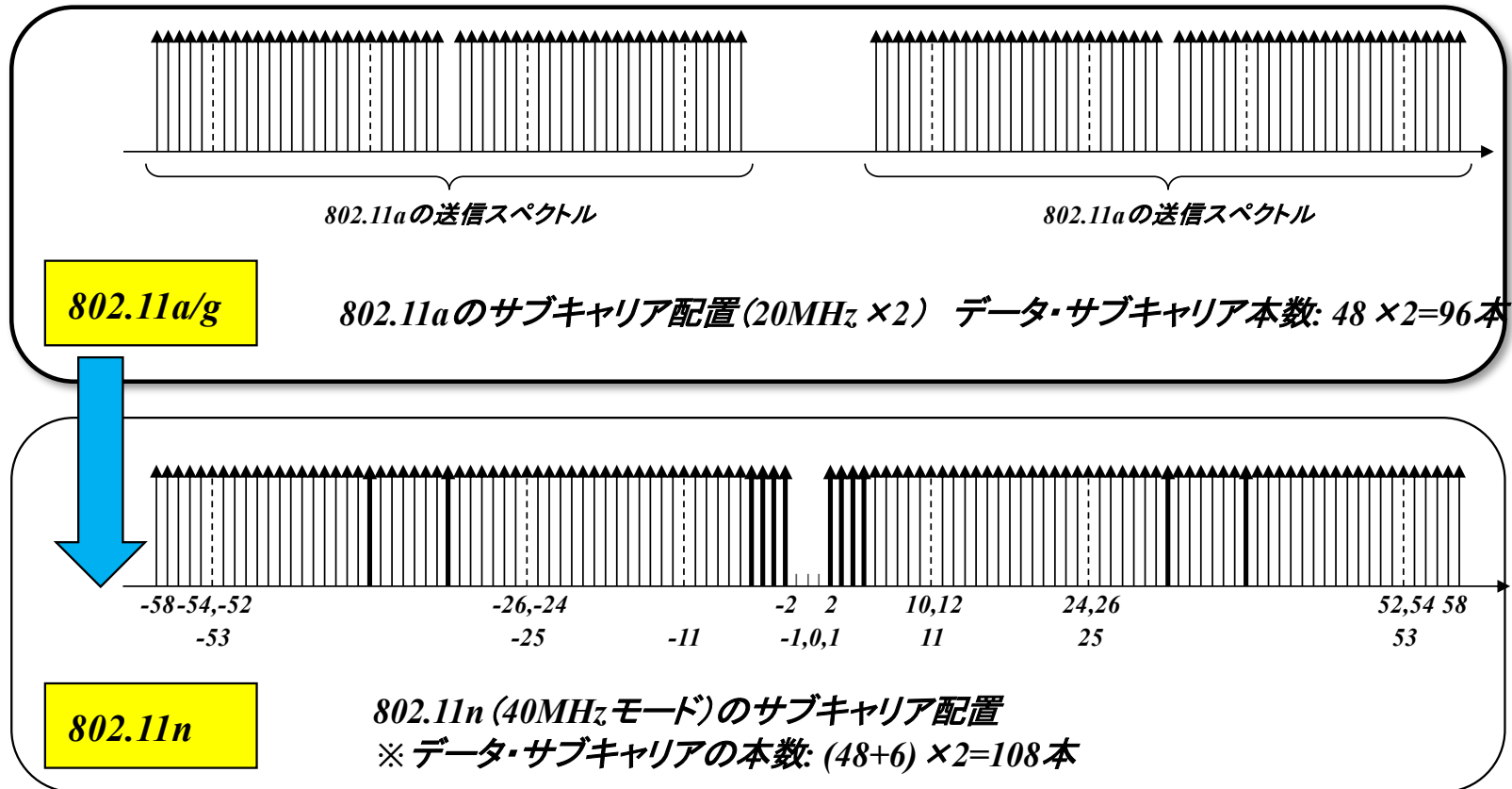
(1) 無線周波数帯域の増加

802.11aと802.11nのサブキャリア割り当ての比較(20MHz帯域)



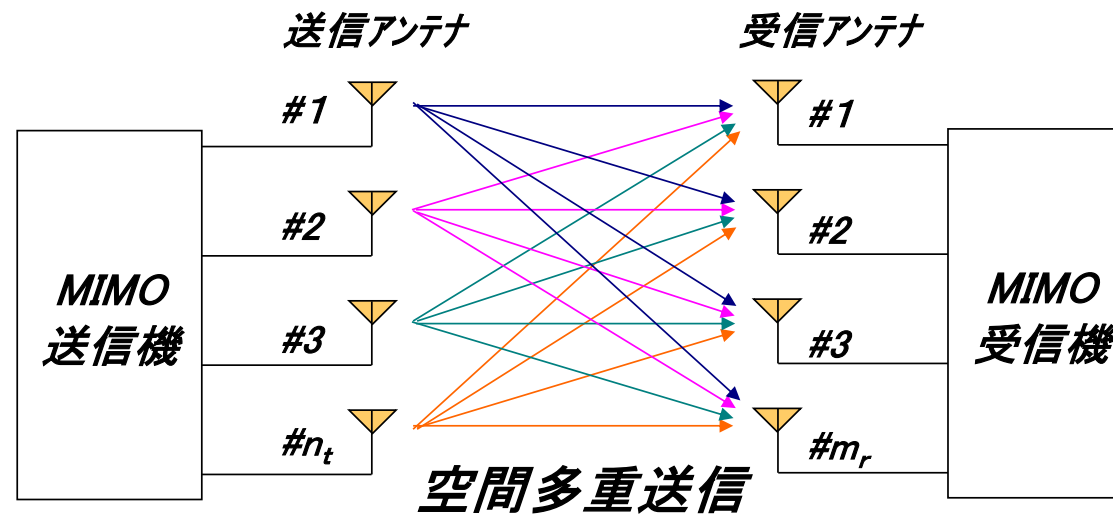
(1) 無線周波数帯域の増加

802.11aと802.11nのサブキャリア割り当ての比較(40MHz帯域)



伝送速度が12.5%向上

(3) 空間多重数の増加 MIMO技術



- 送受信とも複数のアンテナを利用。
- 複数の送信アンテナは異なる信号を同じ周波数で同時に送信。
- 受信機では混ざり合った信号から各送信信号を分離復調。

802.11aから802.11nへの伝送レート増加方法(物理レイヤ)

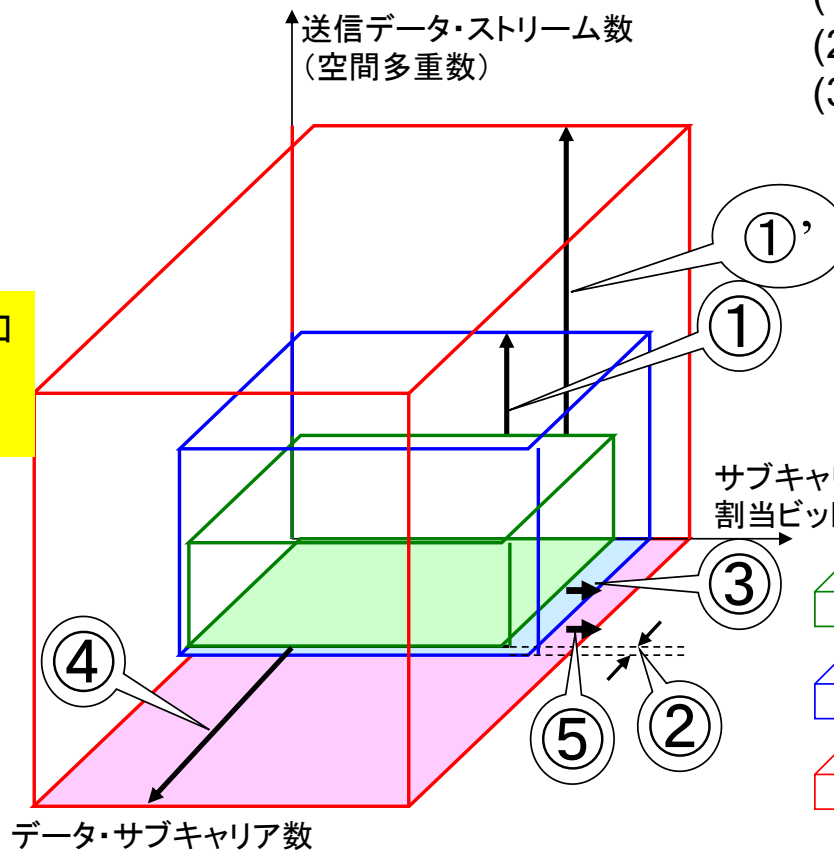
伝送レートは次の3つの積

- (1)サブキャリア毎の割り当てビット数
- (2)データ・サブキャリア数
- (3)送信データ・ストリーム数

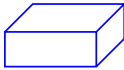
伝送レートの増加



- ・ストリーム数の増加
- ・無線帯域の増加
が大きく貢献



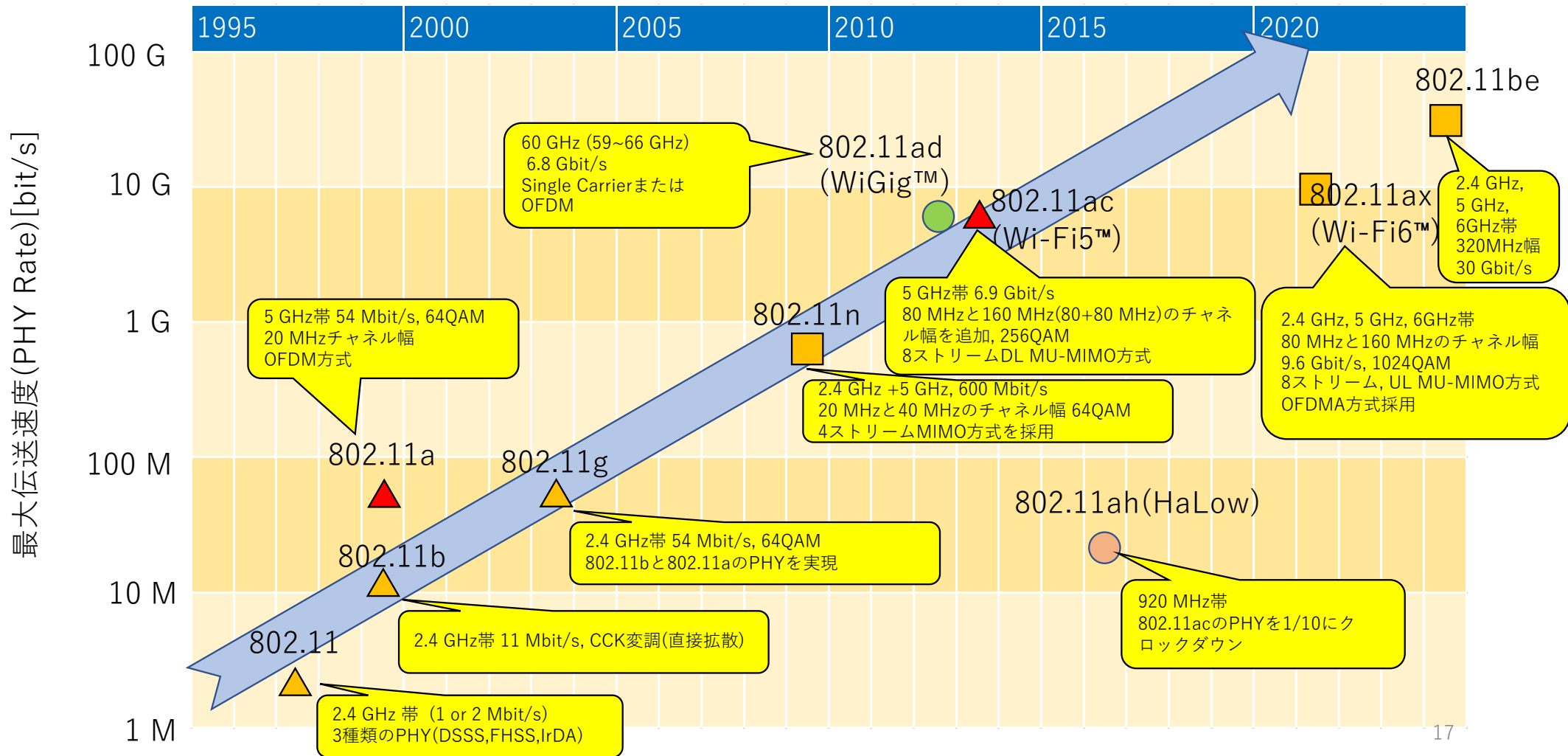
- ①①' SDM技術の導入 ($\times 2/\times 4$)
- ②データ・サブキャリア数の増加 ($\times 52/48$)
- ③高符号化率の導入 ($\times 10/9$)
- ④40MHzモードの適用 ($\times 108/48$)
- ⑤ガード・インターバル長の短縮 ($\times 10/9$)

-  : 802.11aの伝送レート
-  : 802.11n(必須モードのみ)の伝送レート
-  : 802.11n(全てのオプション利用時)の伝送レート

11ac, 11ax, 11beにおける一層の伝送レート増加

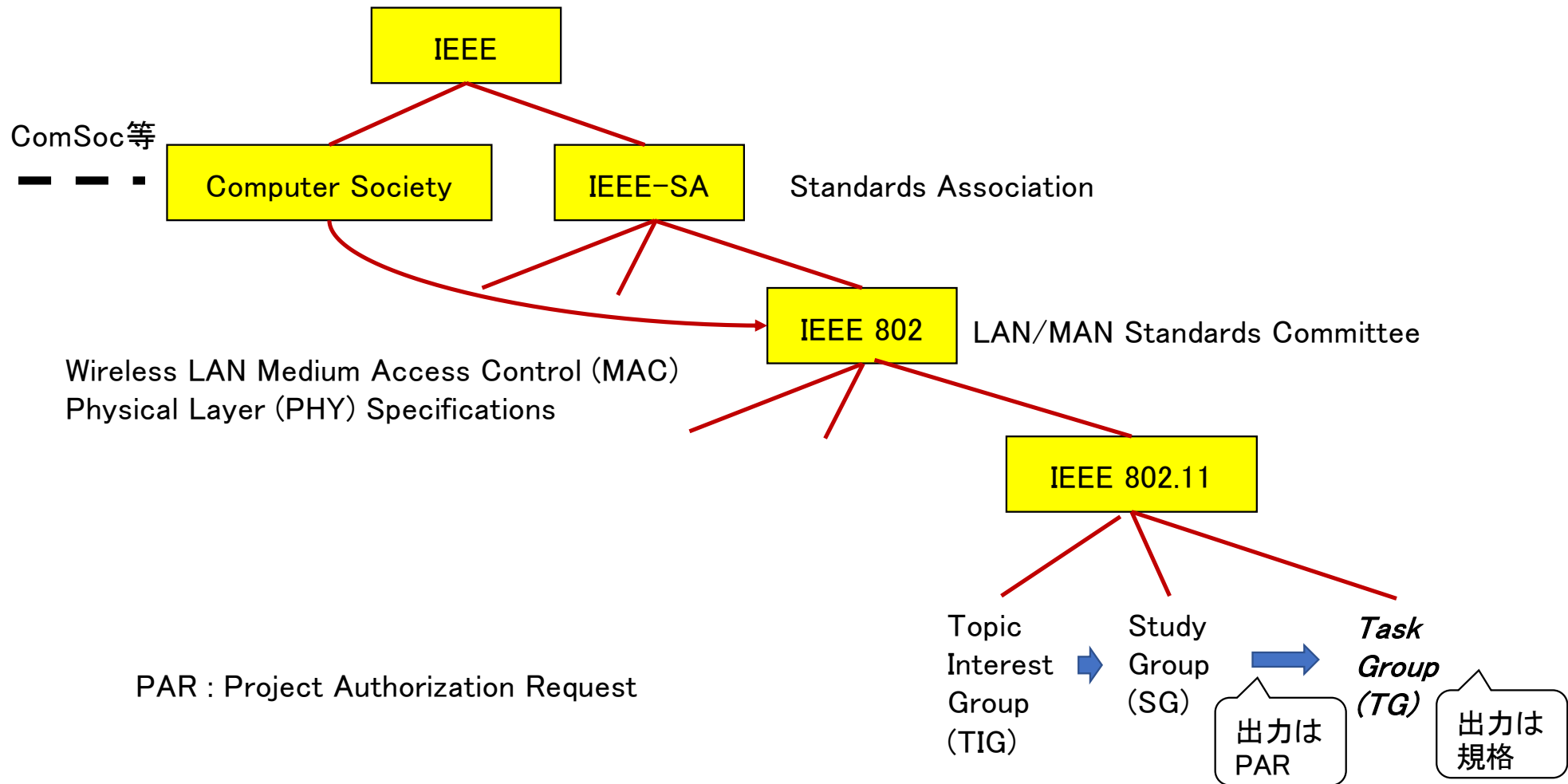
	2.4 GHz帯	5 GHz帯	6 GHz帯	最大チャネル帯域幅	ストリーム数	変調方式	伝送レート
11ac Wi-Fi 5™	X	O	X	160 MHz	8	256QAM	6.9 Gbit/s
11ax (D7.0) Wi-Fi 6E™	O	O	O	160 MHz	8	1024QAM	9.6 Gbit/s
11be (審議中)	O	O	O	320 MHz	16	4096QAM	30 Gbit/s 以上

IEEE 802.11無線LAN規格の進化



4. 無線LANの国際規格

– IEEE 802.11 Working Group –



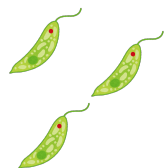
IEEE 802.11のTask Groupの名付け方

無線LANの規格を扱うIEEE 802.11 Working Groupの配下に
種々の無線LAN規格を扱うTask Groupがある。

- IEEE 802.11（小文字のアルファベットが付かない規格：
1997 年成立のLegacy規格）
- IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, … IEEE 802.11z
IEEE 802.11aa, IEEE 802.11ab, IEEE 802.11ac, … IEEE 802.11ax

注) Task Groupで規格を作っても製品として世に出ないものも多い。

参加企業の変遷(食物連鎖)

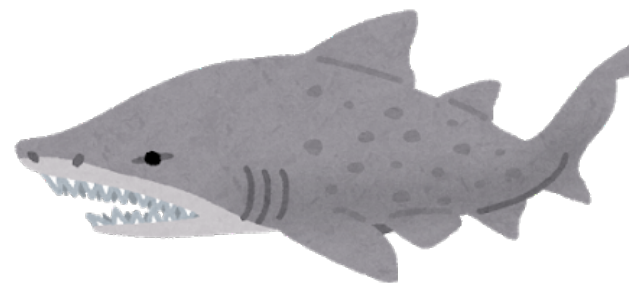


1990年代

ベンチャ企業が活躍
802.11WG参加者: 約60名程度



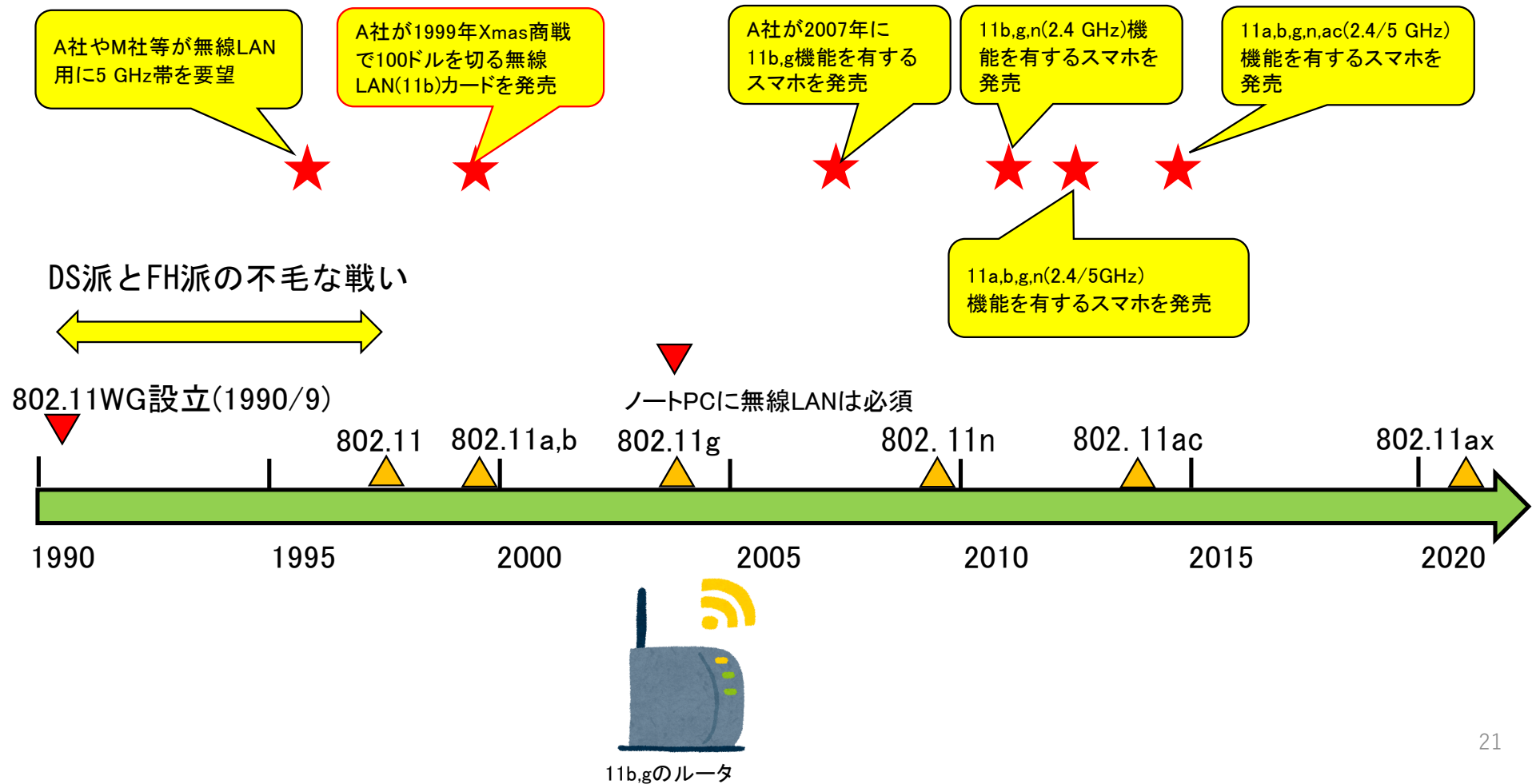
2000年頃



2020年

大企業が活躍
802.11WG参加者: 約480名

5. 無線LANに対する企業の貢献



無線LANに対する企業の貢献

1. 世界統一規格の無線LAN(11b)を低価格で端末機器に実装する。
2. 新たな無線周波数を獲得してブロードバンド化を図り、無線LAN機器開発の参入企業を増やす。
(米国連邦通信委員会:FCCへの請願)
3. Smartphoneに無線LANを実装し、常に最新無線LAN規格の端末を普及させる。

無線LANに対する企業の貢献

1. 世界統一規格の無線LAN(11b)を低価格で端末機器に実装する。

1998/12当時の無線LAN製品例

周波数帯: 2.4GHz
変調方式: 周波数ホッピング(FH)方式
1 Mbit/s
アクセスポイント(198,000円)
無線LAN PCカード(49,800円)

11b規格成立後の無線LAN製品(1999/12～2000/1)

周波数帯: 2.4GHz
変調方式: CCK方式: 11 Mbit/s
アクセスポイント(38,000円)
無線LAN PCカード(12,800円、米国では99ドル)

世界の無線LANの出荷台数

約60万台(1998年)

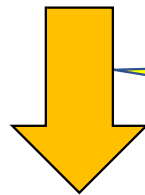
約800万台(2001年)

無線LANに対する企業の貢献

2. 新たな無線周波数を獲得してブロードバンド化を図り、無線LAN機器開発の参入企業を増やす。
(米国連邦通信委員会:FCCへの請願)

無線システムは無線周波数が重要

1990年代後半の無線LANは2.4 GHz帯が主流



2.4GHz帯は他の無線システムと共用が必須

無線LAN用に新たな周波数割り当てが必要

米国は5 GHz帯

欧州はミリ波帯と5 GHz帯

日本では準ミリ波帯(19/25 GHz)で検討

高速無線LAN実現に向けた米国の1990年代の状況

目的

NII(National Information Infrastructure)を早期に実現

ゴア元副大統領
が提唱

無線の積極利用



WINForum(Wireless Information Network Forum)

- SUPERNet (high speed Shared Unlicensed Personal Radio Networks)
- 20 Mbit/s, 5 GHz帯の利用
- マルチメディアコンピュータ通信のための短・中距離伝送手段

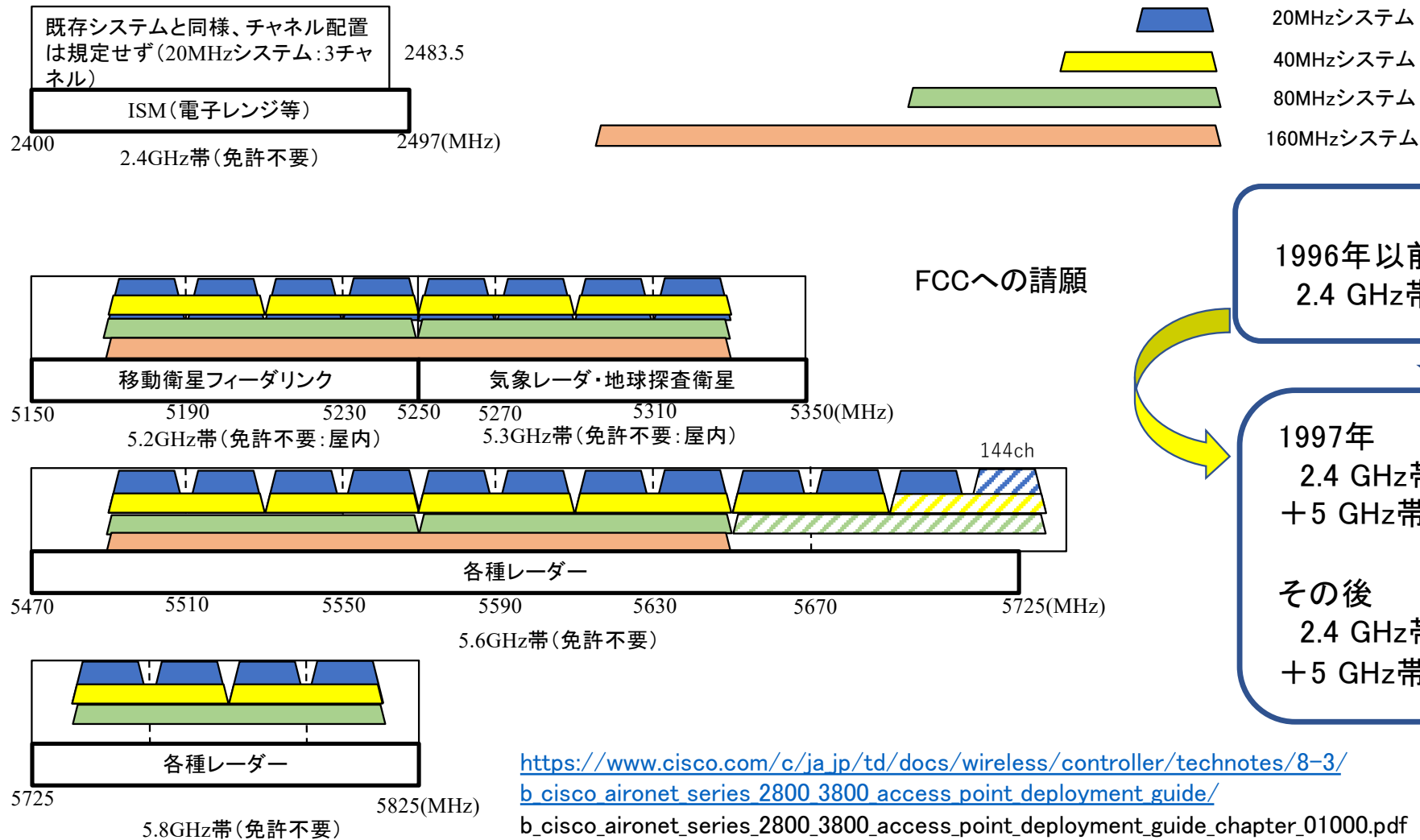
Apple Inc.

- Unlicensed wireless radio network for NII
- 20 Mbit/s, 5GHz帯の利用
- 主要施設(学校、図書館、病院など)からのNIIへのアクセス

FCCの対応: Unlicensed-NII (1997年1月に決定)

- 5.15-5.35 GHz / 5.725-5.825 GHz (計300Hz)をU-NIIに割当

新たな無線周波数を獲得してブロードバンド化を図る(米国)



無線LANに対する企業の貢献

3. Smartphoneに無線LANを実装し、常に最新無線LAN規格の端末を普及させる。

公衆無線LANの利用状況

2002年から始まった公衆無線LANサービスでは、当初ノートPCユーザを対象にしていたため、加入者は伸びず。



2007年のスマホによる無線LAN接続で、公衆無線LANアクセスは増加。

- ・APIは11n規格が多い。ネットワーク提供事業者が設備更改待ち。
- ・端末側はスマホが更新される度に最新の無線LAN規格のインタフェースを持つため、最新規格の自動的に変更。

6. 2020年以降の無線LANの世界

無線LANの周波数は2.4/5 GHz(マイクロ波帯)の次は
ミリ波か？



無線LANでは、ミリ波帯だけでなく、マイクロ波帯の拡大(6
GHz帯)が注目を集めている。

欧州における1990年代プロジェクトの状況

SAMBA

目的：テストベッドの設計と構築

- ・ 広帯域セルラーシステム開発の促進
- ・ 40 GHz帯
- ・ ベアラ伝送速度 34 Mbit/s以下
- ・ トランスペアレントなATM接続の実現
- ・ 物理層、MAC層、ハンドオーバ、無線回線制御等の仕様化

MEDIAN

目的：屋内ミリ波帯ATM-LANの実現

- ・ 60 GHz帯
- ・ ベアラ伝送速度 155 Mbit/s以下

ATMmobil

目的：ドイツ政府研究教育省のサポートを受けたプロジェクト

- ・ 広帯域セルラーシステム開発の促進
- ・ 40 GHz帯
- ・ ベアラ伝送速度 155 Mbit/s以下
- ・ トランスペアレントなATM接続の実現
- ・ 物理層、MAC層、ハンドオーバ、無線回線制御等の仕様化

Magic WAND

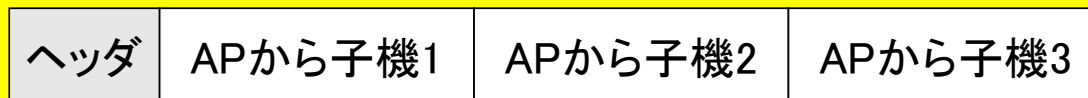
目的：ATM接続の無線 LAN

- ・ 5GHz帯
- ・ ベアラ伝送速度 20 Mbit/s
- ・ 無線ATM伝送

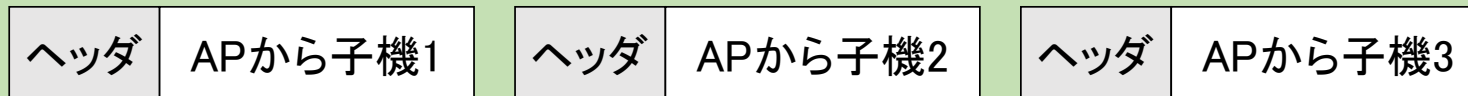
無線LANは自律分散機能に集中制御機能を付加するの
か？

集中制御と自律分散制御のスループット比較

集中制御型: TDMA/TDDの下り回線



自律分散型: CSMA/CAの下り回線



自律分散型: CSMA/CAの上り回線

(簡単のため, Ackパケット省略)

パケット衝突



スループットという観点では集中制御型が自律分散型に勝っている。

IEEE 802.11のスループット特性

—論文からの引用—

(G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function”, IEEE JSAC, vol.18, no. 3, Mar. 2000.)

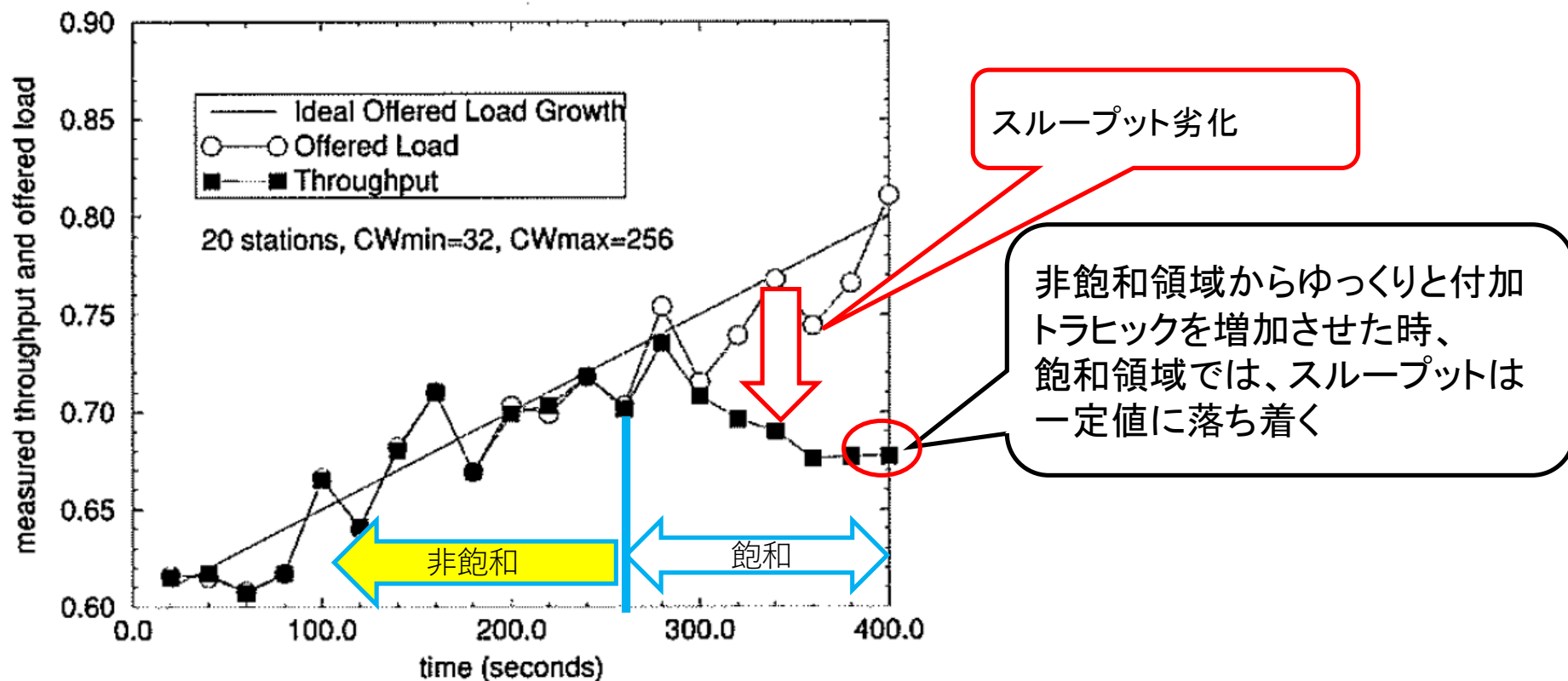


Fig. 3. Measured Throughput with slowly increasing offered load.

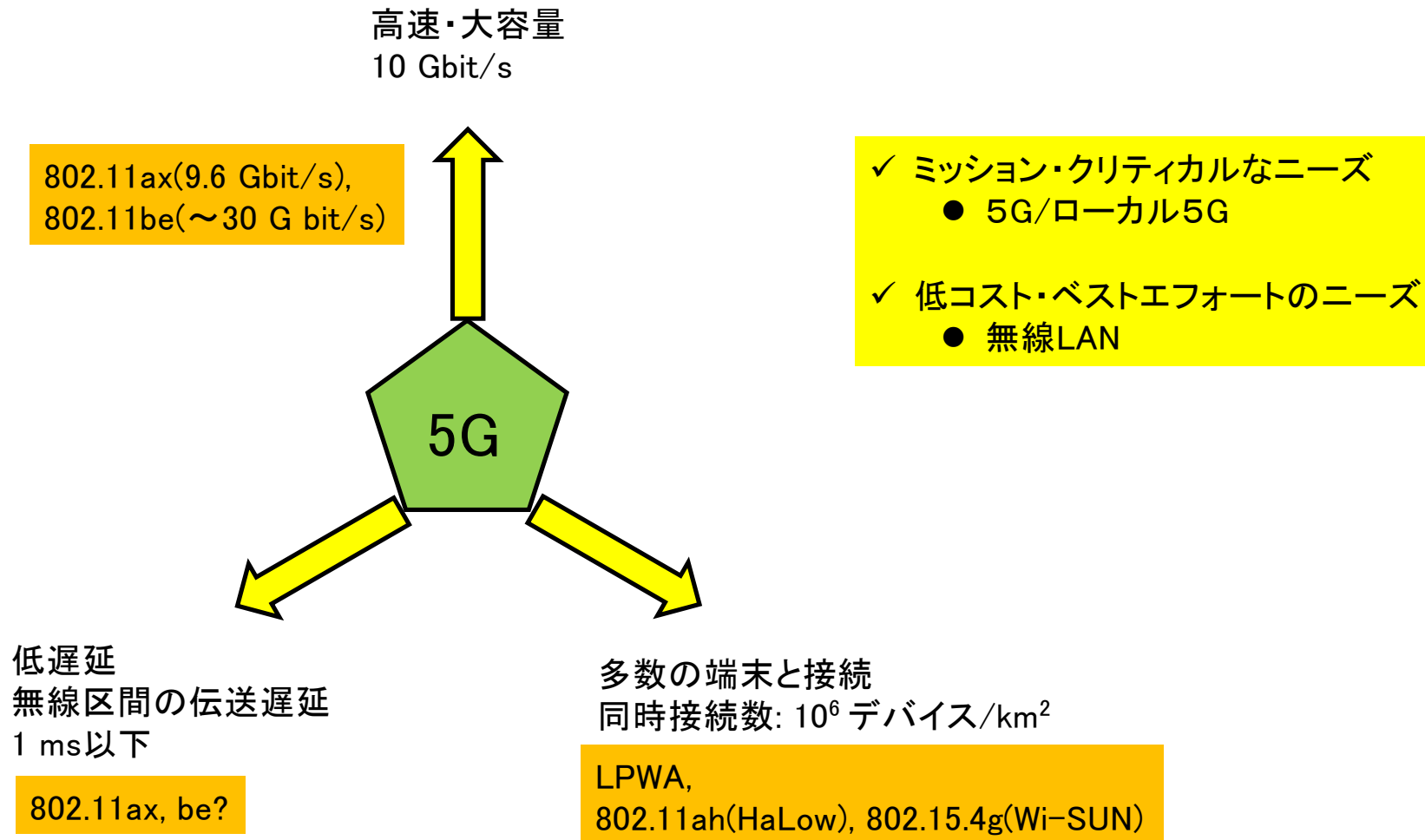
5 GHz帯無線LANが結果的にIEEE 802.11a, n, ac,axになった理由

- 2.4 GHz帯で先にイーサネット系の802.11b規格の無線LANが普及した。
(集合住宅や商店街での利用では、自律分散制御が適している)
- 物理層ではOFDM技術により伝送速度が飛躍的に大きくなったため、
MAC層での自律分散制御による低伝送効率や遅延時間が気にならなくなったため。



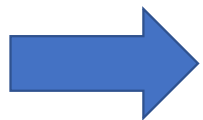
■「色の白いのは七難隠す」のように「高ビットレート化は七難隠す」
1997年当時の論理が2020年以降も通用するのか？

無線LANは5Gと共存し、補完する関係



7. 無線LANが5G時代に共存するために

- ① 無線モジュールを多くの端末機器に実装する。(低コスト化)
- ② 集中制御の機能を部分的に取り入れて、伝送品質保証を改善する
(低遅延等の高品質化)
- ③ 新たな免許不要の無線周波数を獲得してブロードバンド化を図る。
(広帯域化)



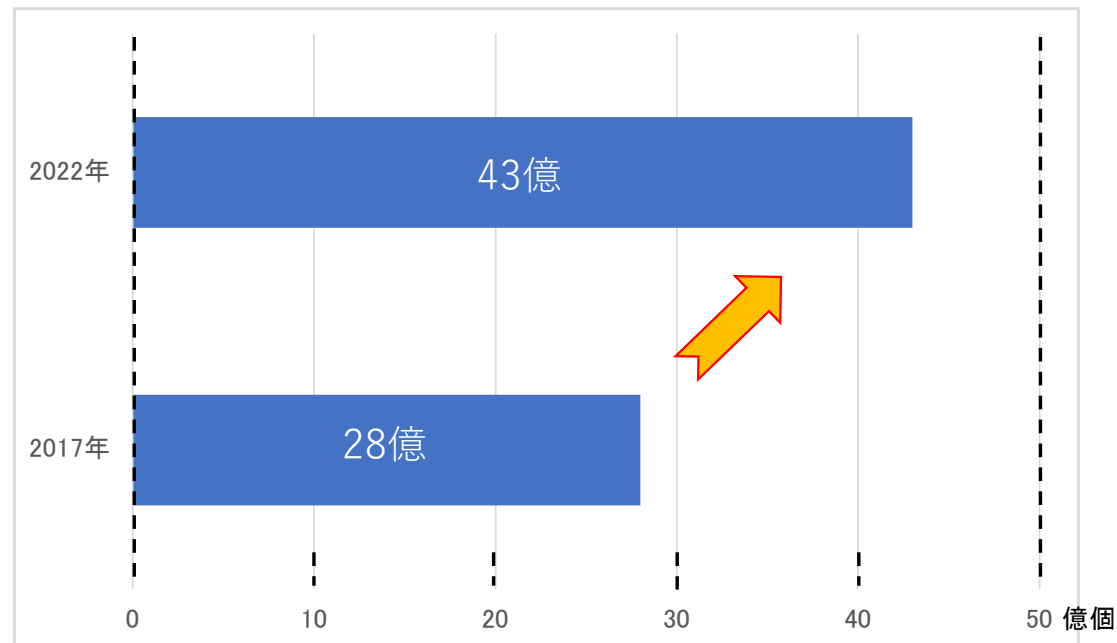
ブロードバンド＋ベストエフォート＋無線通信料無料型サービスで
どこまでユーザのニーズを満たすことができるか？

① 無線モジュールを多くの端末機器に実装する

- Wi-Fi™チップセットは2017年から2022年にかけての予測年間28億個から43億個に

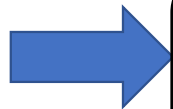
<https://www.gii.co.jp/report/mama484620-wi-fi-chipset-market-by-ieee-standards-80211ay.html>

世界の人口 77億人（2019年）



② 11beの高信頼化・低遅延化

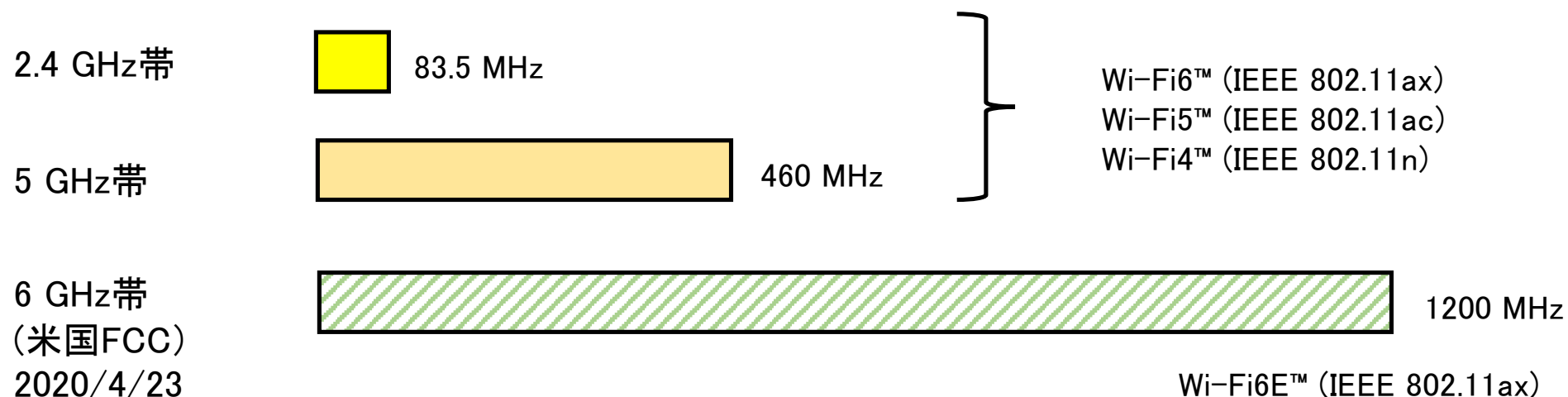
- 11beは**EHT SG**(Extremely High Throughput Study Group)と**RTA SG**(Real Time Application Study Group)を吸収する形で2019年度第一四半期にタスクグループとして昇格
- RTA(Real Time Application)は低遅延と高信頼を狙いとしたSG
- EHT SGと合流するにあたり、低遅延と低ジッタ特性の機能実装を設立趣意書に盛り込んだ



- 11be規格が成立するまで5年前後を要することを考えると5G時代に間に合わない。
- 当面は11axで対処。

③新たな免許不要の無線周波数の獲得

無線LAN用周波数帯(日本)

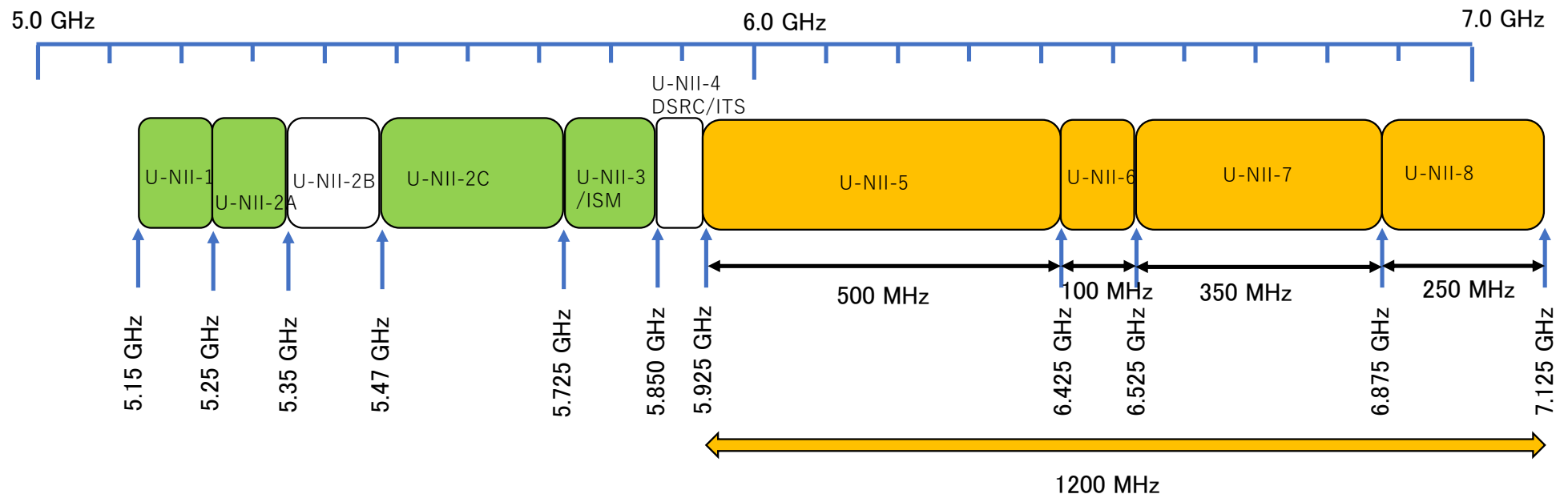


「(総務省資料の抜粋)IEEEや諸外国における検討状況等を踏まえ、無線 LAN の 6GHz帯(5925~7125MHz)への周波数帯域の拡張に係る技術的条件について、令和2年度中に検討を開始する。」(周波数再編アクションプラン(令和2年度第2次改定版)(案))
2020/9/9

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000376.html

韓国では2020/10に6 GHzを割り当て

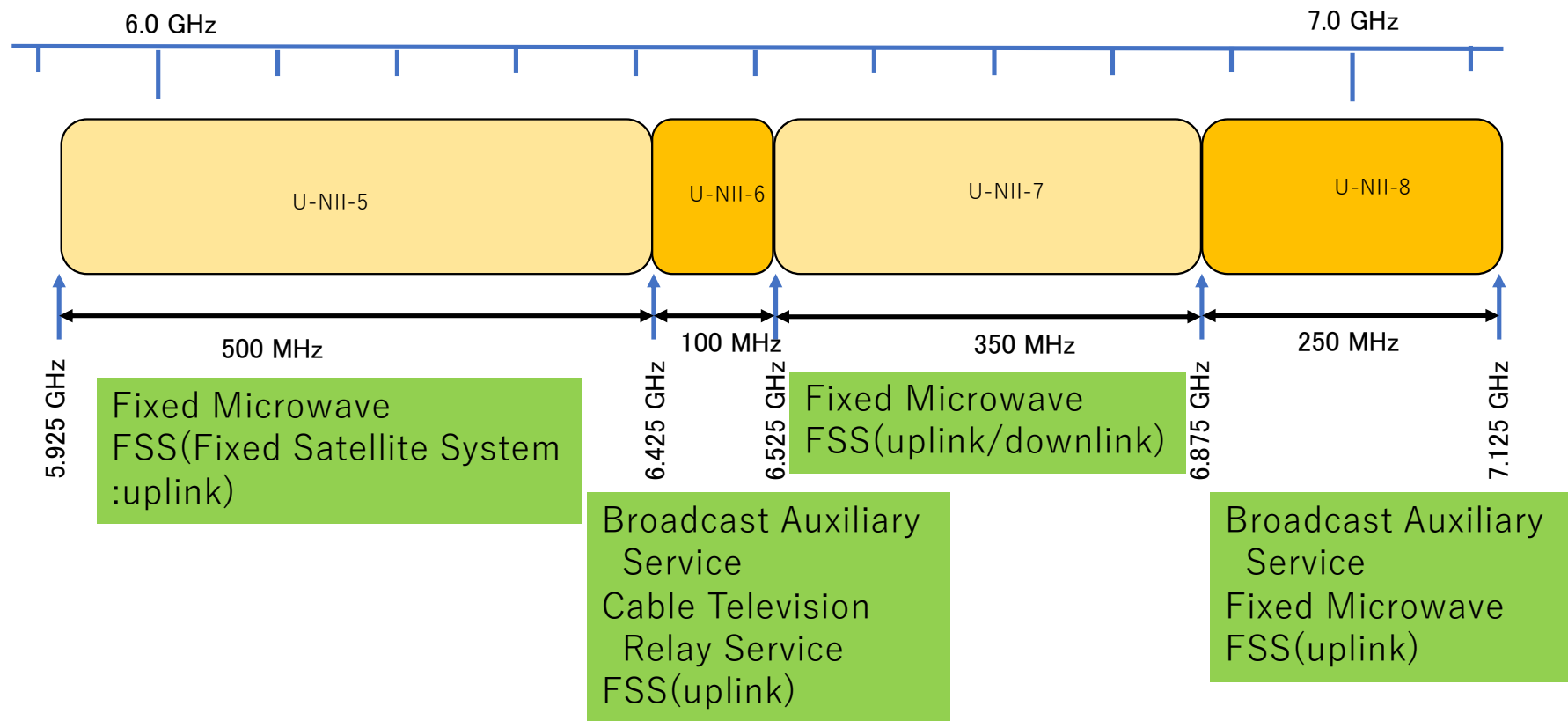
米国FCCが新たに割り当てた6 GHz帯域



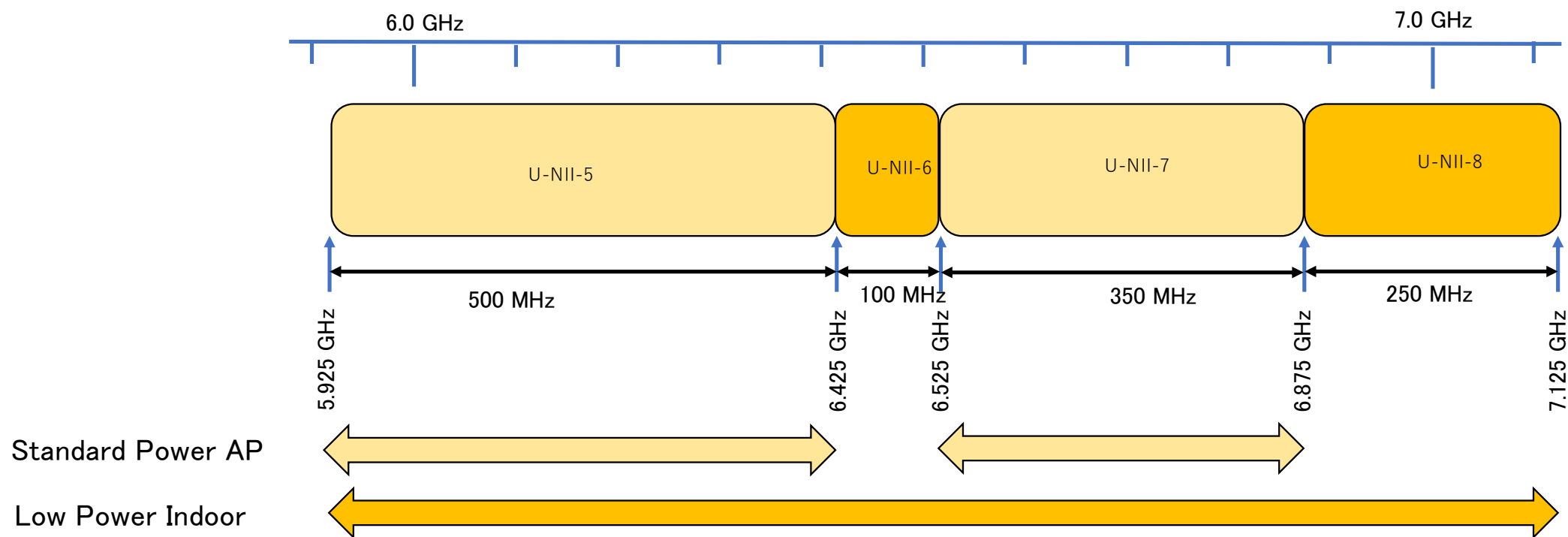
https://www.cisco.com/c/ja/jp/td/docs/wireless/controller/technotes/8-3/b_cisco_ironet_series_2800_3800_access_point_deployment_guide/b_cisco_ironet_series_2800_3800_access_point_deployment_guide_chapter_01000.pdf

<https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses>

米国で6 GHz帯域において共存すべきprimary system



6 GHz帯におけるFCCの新規則



6 GHz帯におけるFCCの新規則

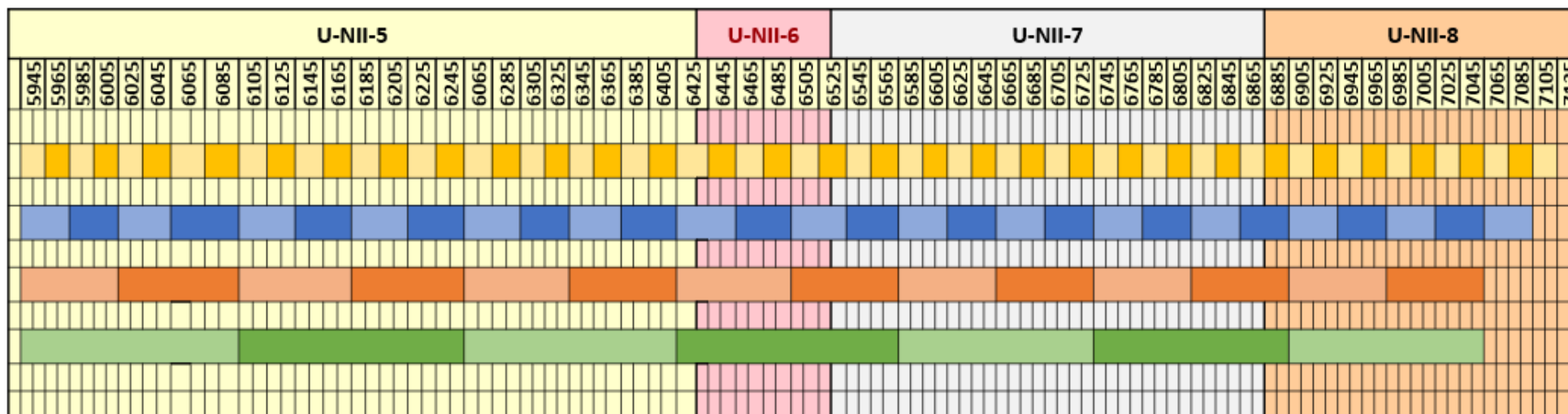
機器のクラス	運用周波数	最大EIRP	最大EIRP電力 スペクトル密度	
Standard-Power AP (AFC制御:屋外)	U-NII-5(5.925-6.425 GHz) U-NII-7(6.525-6.875 GHz)	36 dBm	23 dBm/MHz	帯域幅が 20 MHzの時 $200\text{ mW} \times 20 = 4\text{ W}$
Standard-Power APに 接続された端末		30 dBm	17 dBm/MHz	
Low-Power AP (屋 内のみ)	U-NII-5(5.925-6.425 GHz) U-NII-6(6.425-6.525 GHz) U-NII-7(6.525-6.875 GHz) U-NII-8(6.875-7.125 GHz)	30 dBm	5 dBm/MHz	最大帯域幅は 320 MHz $3\text{ mW} \times 320 = 1\text{ W}$
Low-Power APに接 続された端末		24 dBm	-1 dBm/MHz	

AFC(Automated Frequency Coordination) : APの設置場所に対して使用可能な無線チャネルをDBとアクセスすることにより取得する。

Further Notice of Proposed Rulemaking

Very Low Power Operation(屋内外): U-NII5~8, 最大EIRP(14 dBm=25 mW), 最大EIRP電力スペクトル密度(-8 dBm/MHz), AR/VR用のwearable device用途

11ax における6 GHz帯チャンネル配置案1



- ・10 MHzのガードバンド(5925–5935 MHz)では不足
- ・U-NII帯域の境界を跨いだチャンネル設定
- ・U-NII5と6で異なる規制ルール
- ・U-NII6で80 MHz帯域が確保できない
- ・U-NII6で1個の40 MHz帯確保のみ

Center Frequency [MHz]

20 MHz Channels

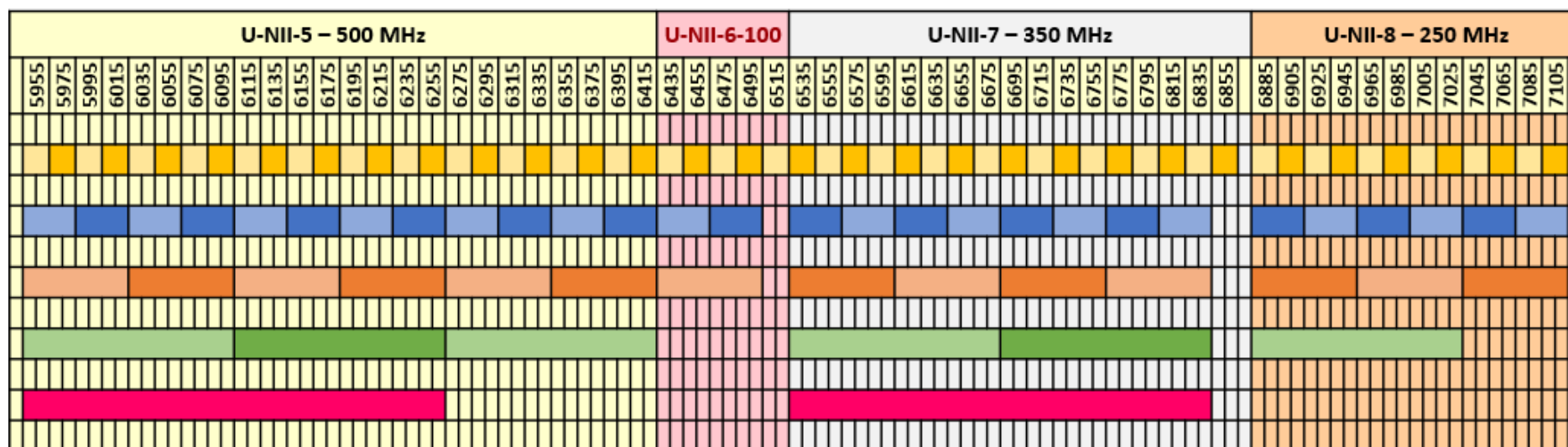
40 MHz Channels

80 MHz Channels

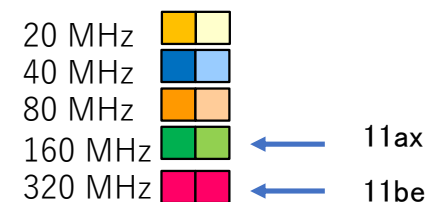
160 MHz Channels



6 GHz帯チャネル配置案2(不採用)



- ・20 MHzのガードバンド(5925-5945 MHz)
- ・U-NII帯域を基本としたチャネル設定
- ・U-NII5で3つの160 MHz帯域確保
- ・U-NII6で1つの80 MHz帯域確保
- ・U-NII5及び7で各々1個の320 MHz帯域確保



8. むすび

無線LANの過去の歴史を振り返り、今後の発展について考察をした。

- ◆ 2000年以降、規格の統一と相互接続性が保証された無線LAN機器が普及した。
 - ✓ ホーム系・オフィス系だけでなくNomadic Wireless Accessシステムとして広く普及
- ◆ 2000～2020年の無線LANの普及は主にブロードバンド化の発展
- ◆ 2020年以降、無線LANがAR/VR機器等の新しいアプリケーションに広く実装されるかどうかが鍵
- ◆ 米国と同様に6 GHz帯で無線LANが日本で近い将来利用できるかどうかは鍵