

**押さえておきたい! 基盤技術(1)**

**Wi-Fiの混雑に向き合う基本的知識とオフィスWi-Fi提供時の課題**

Internet Week ショーケース in Hiroshima



2018-06-01

Akira KUMAGAI

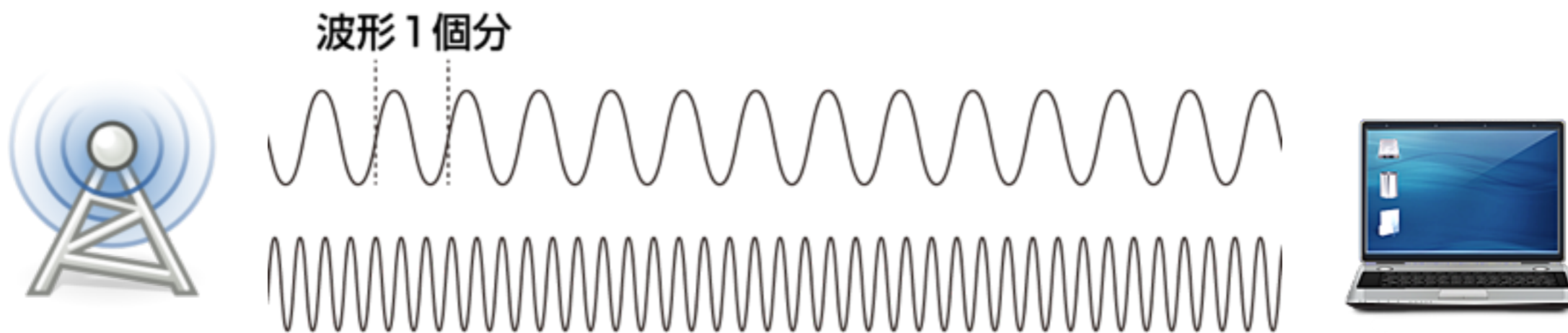
# この資料の目的

- 混雑解消 ～電波とはなんなのか～
- オフィスや公衆 WiFi 設計サンプル
- トラブルシューティングに使える機材と読みかた

**電波とはなんなのか？**

# 電波ってなに

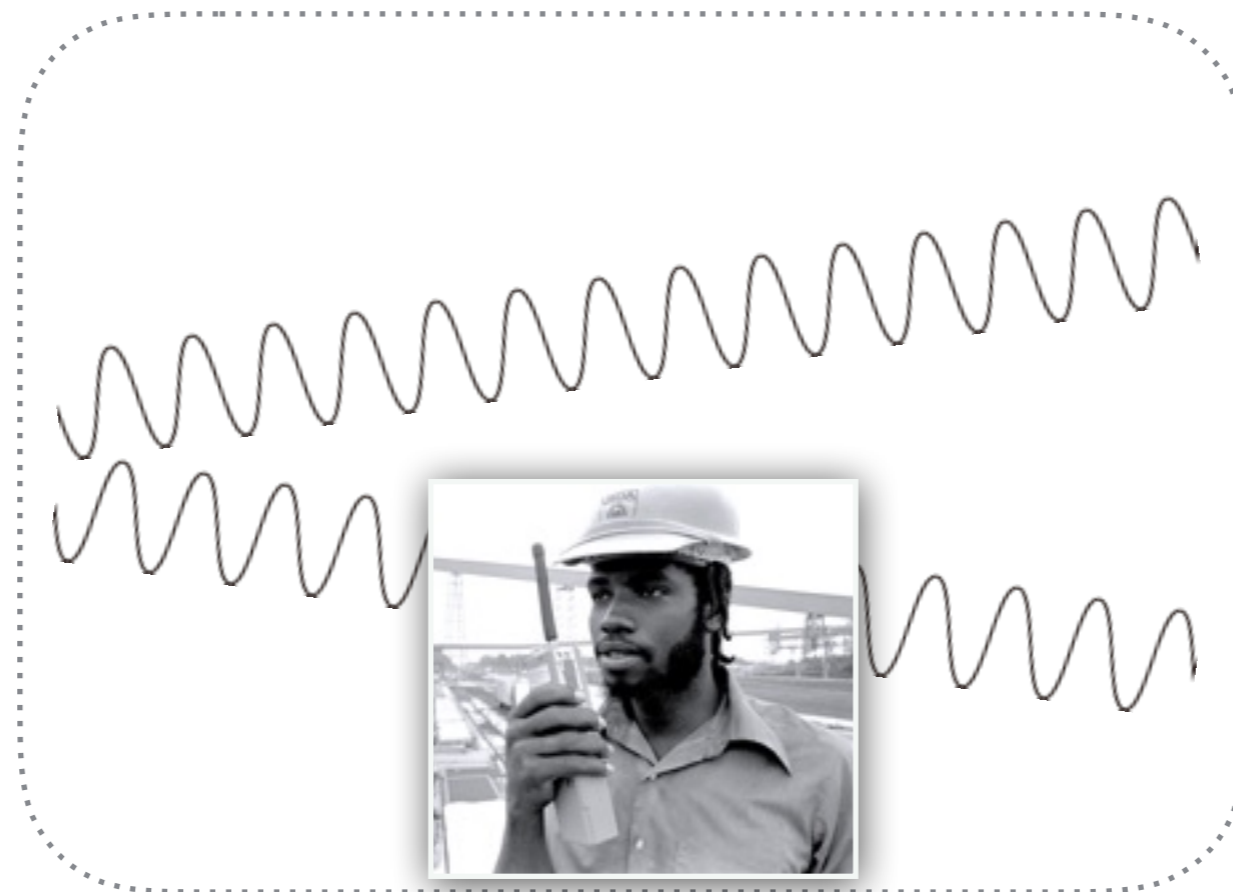
- 電磁波（光などの仲間です）
- 光とのちがいは周波数
  - 周波数(Hz)とは、波が1秒間あたりに繰り返される回数



1秒間に1,000,000,000回繰り返すと 1GHz

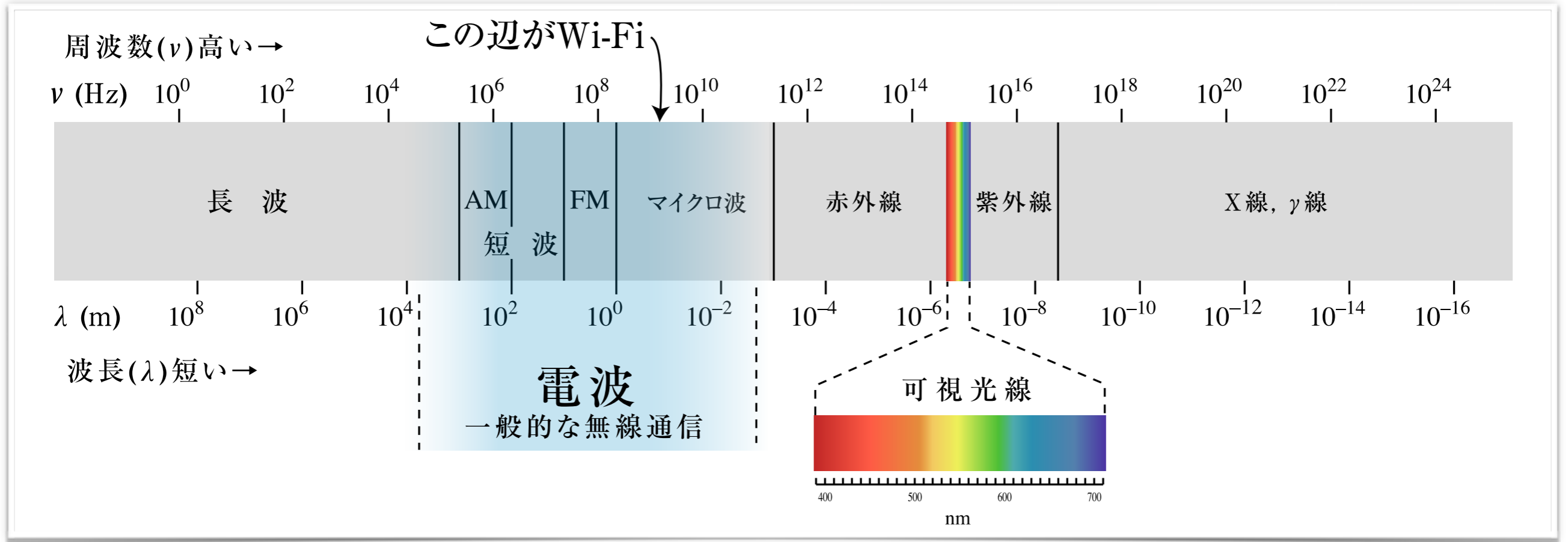
# 伝送媒体としての電波

- 空間を媒体とする共有メディア (空間だから共有せざるを得ない)
- 半二重通信「こちらは～です、どうぞ」が基本



伝送媒体(空間)

# 電波ってなに



## 電磁波と周波数

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM\\_spectrum.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg)

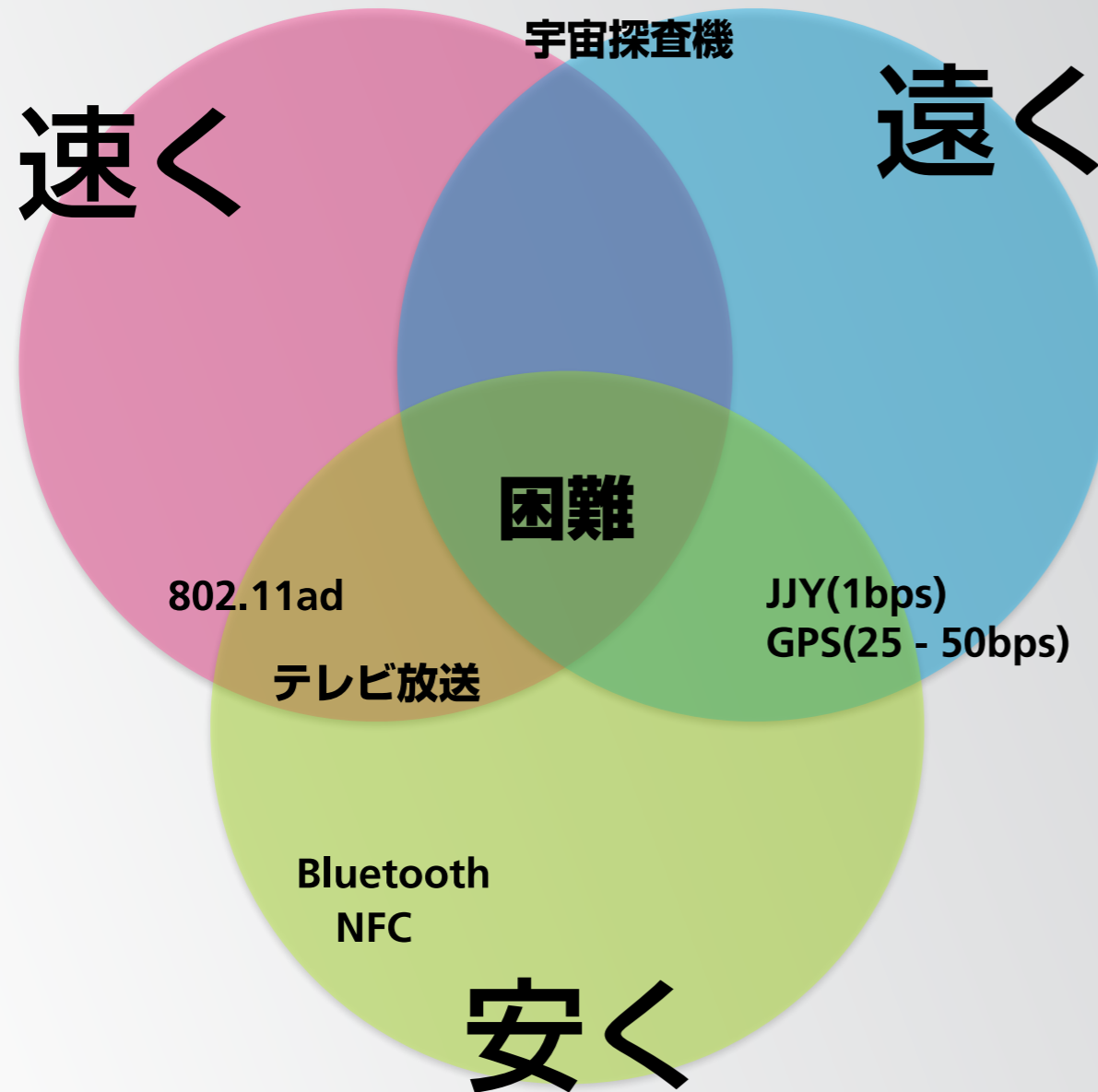
- 電波と呼ばれる範囲はけっこう広い
- 耳では聞こえない・音波は別のもの(音は空気の弾性波)

# 速く・安く・遠くまで



“良い・安い・早い  
これらのうちから 2つを選べます”

# 速く・安く・遠くまで



速く ↔ 遠く は両立できない

シャノンの定理

- 通信路容量の限界は**チャンネル幅**と**信号品質**で決まる

フリスの伝達式

- 同じ周波数なら信号強度は距離自乗に反比例

安くなると

- 誰でも使える小さな設備(低性能)
- 自分と関係ない信号（ノイズ）が増える  
→ 信号品質の低下

物理的に接触しなくても情報が取得できる

受信してみないとそれが何の情報なのか分からない（受信行為自体の法規制が不可能）



# 周波数(Hz)と性質

|       | 周波数    |                               |
|-------|--------|-------------------------------|
|       | 低      | 高                             |
| 波長    | 長い     | 短い                            |
| アンテナ  | 大きい    | 小さい                           |
| 飛び方   | 障害物を貫通 | 障害物に反射/吸収                     |
|       | いろいろある | 導体、水分を貫通しない<br>光っぽい<br>直進性が高い |
| 通信路容量 | 小容量    | 大容量                           |
| 指向性   | 作りにくい  | 作りやすい                         |
| 減衰    | 小      | 大                             |

ワイファイはこのあたり

# 光として考える



アクセスポイントは電球  
電波を光に見立てる

# 光として考える



効率を考えると、カサがあったほうがいい  
上方への光は無駄だし、よそに干渉する

# 光として考える



使いたいところが決まっていれば、  
スポットでビームにするのが一番よい  
強いし、干渉も防げる

# 光として考える

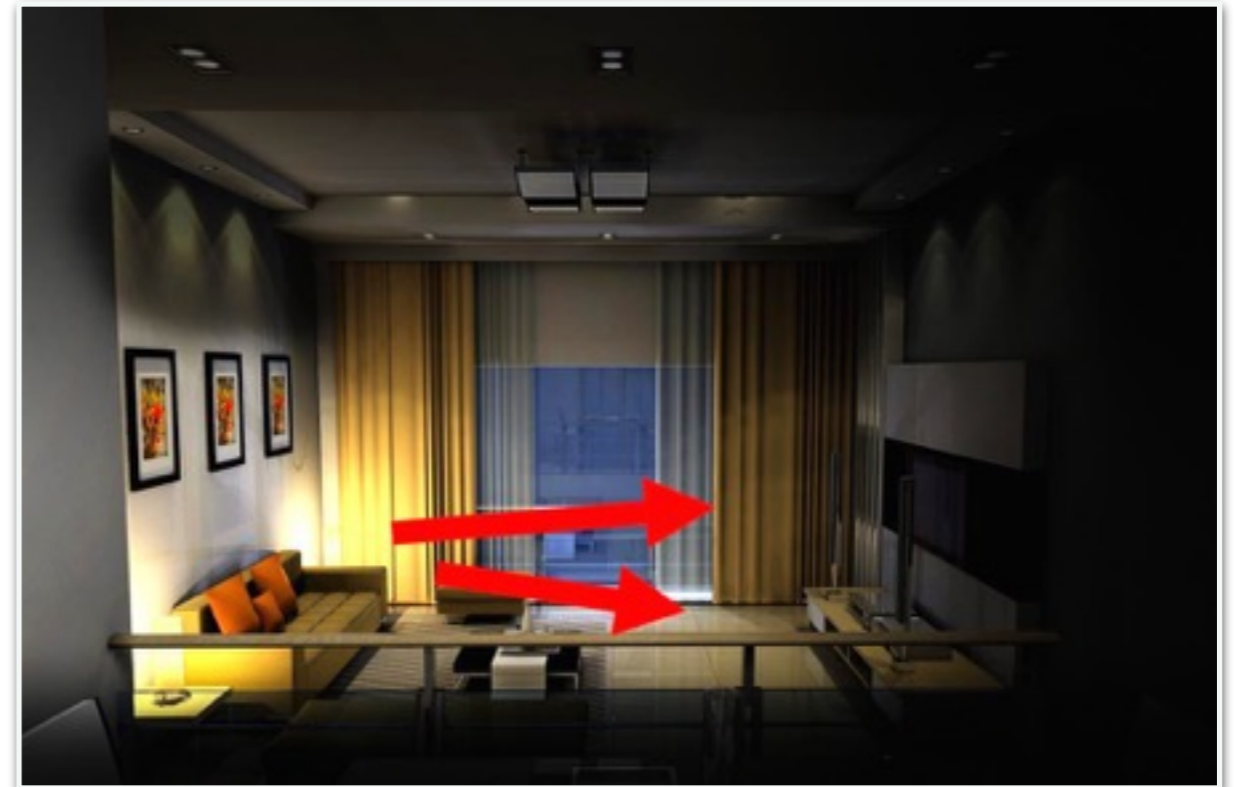


- 電球はすべて同じものだとしても、明るさはかなり変わる
- カサやスポット器具自体に、電球の電力を高める効果はない。四方八方へ散らばっているエネルギーを狭い方向へまとめるだけ
- アンテナも、アンテナの指向性が電力を増幅することはない

# 光として考える



天井の照明



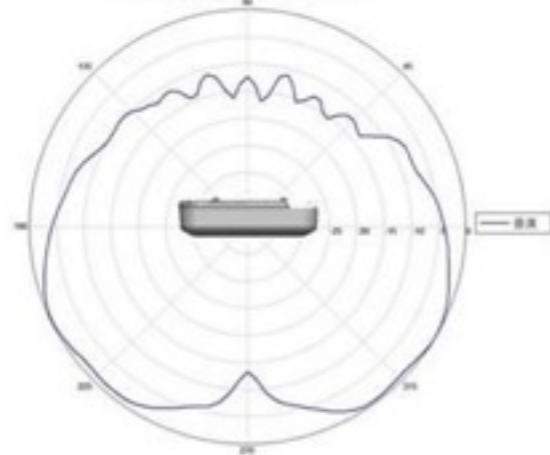
床置き照明

低いところに設置すると陰ができやすい

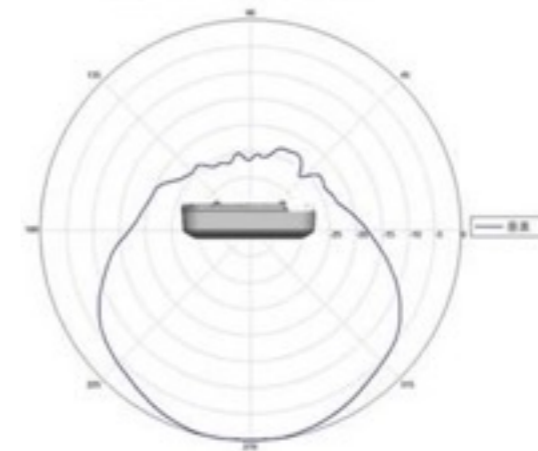
# 実際のアンテナ(1)



5 GHz 垂直マイクロ



5 GHz 垂直マイクロ



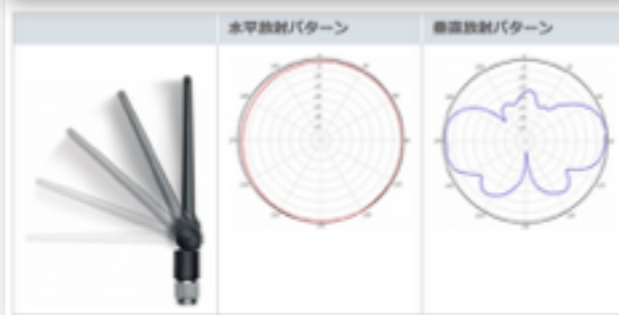
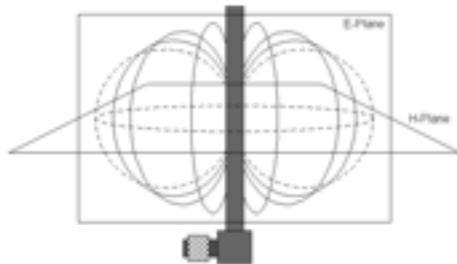
異なるビームパターンのアンテナを2つ内蔵している機種  
右は小さいセル向けアンテナのイメージ

※部屋の絵は正確ではありません

# 実際のアンテナ (2)



完全無指向性のアンテナは作りにくい  
機器内蔵アンテナは緩やかな指向性のもの  
が多い

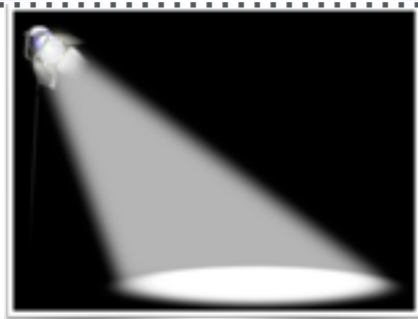


ダイポールアンテナ

似た照明器具はない



パッチアンテナ



八木アンテナ

パラボラアンテナ



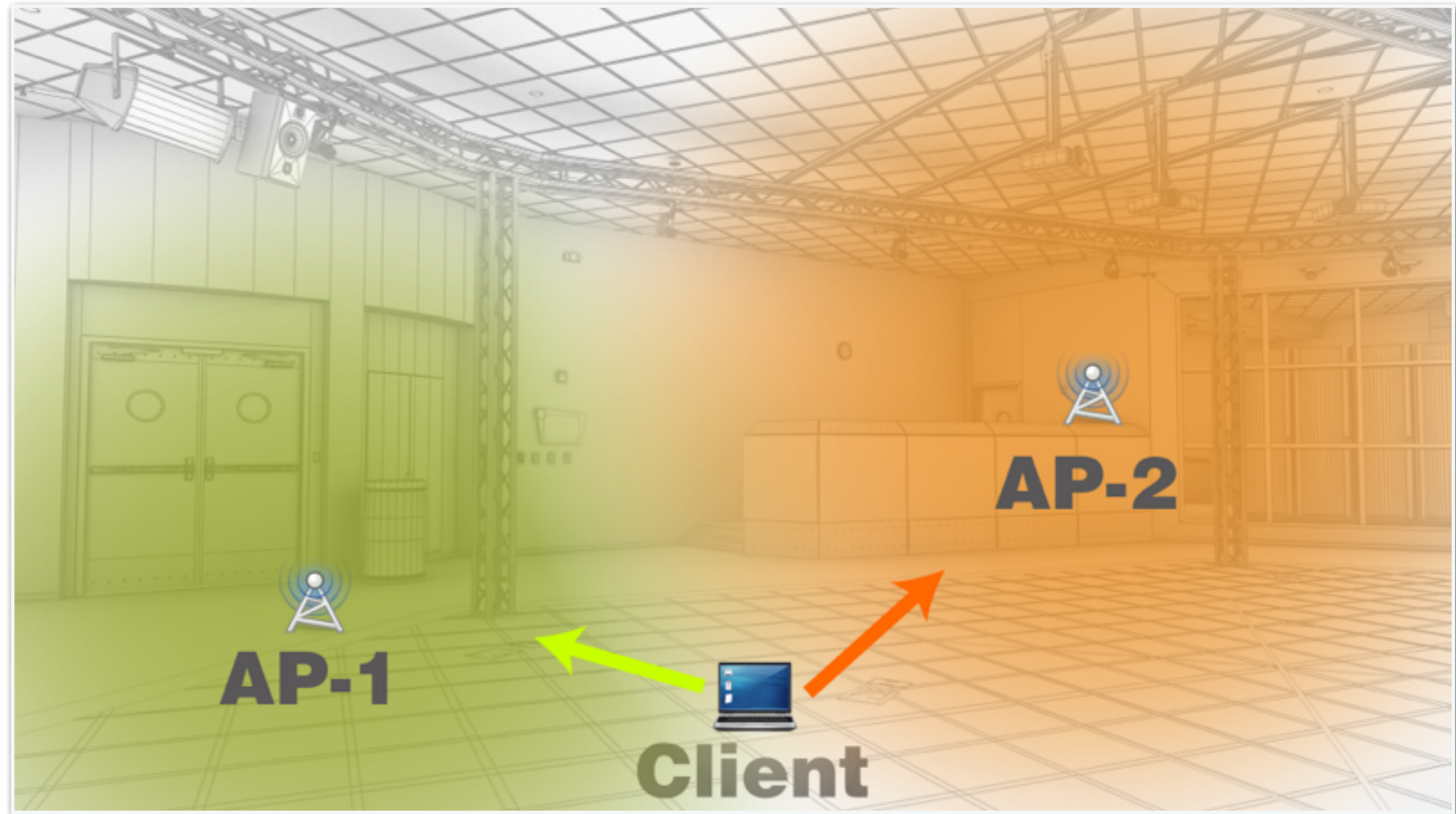
# 光として考える



天井から照らすと影ができにくいのが、遠くまで届きすぎて、たくさん設置すると干渉する可能性がある

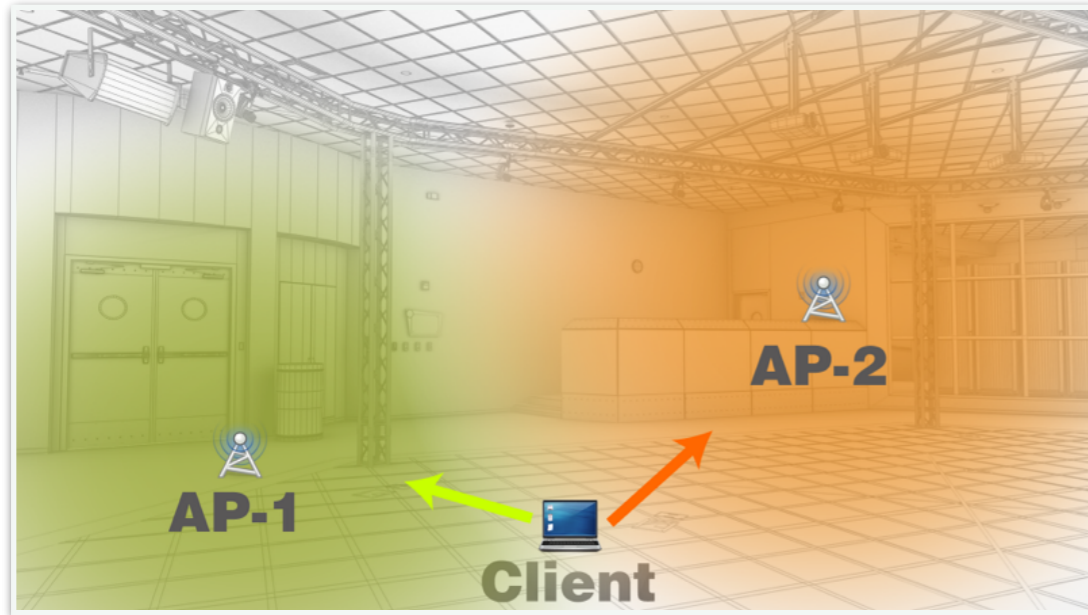
天井の照明器具は全部同じ色のため、それぞれの光を区別できず、混ぜって干渉してしまう

# チャンネルの違い



光の色（周波数）の違い  
電波の場合でもチャンネルの違いのようなもの

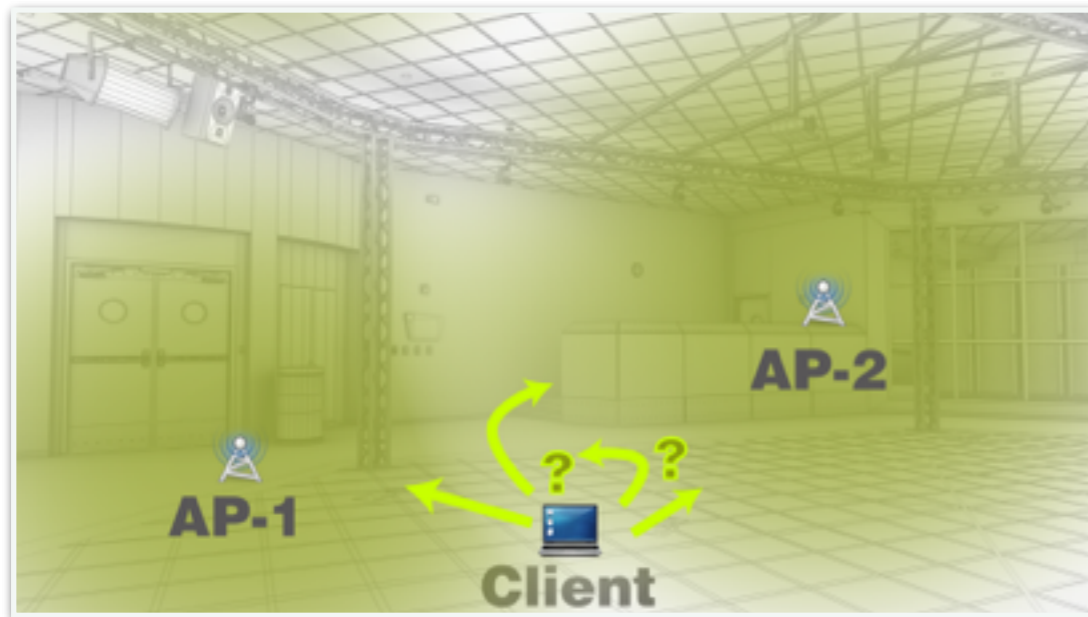
# チャンネルの違い



セル 2個

同じ色×同じ場所  
(チャンネル×電波到達範囲)

端末を収容できる空間の  
最小単位“セル”となる

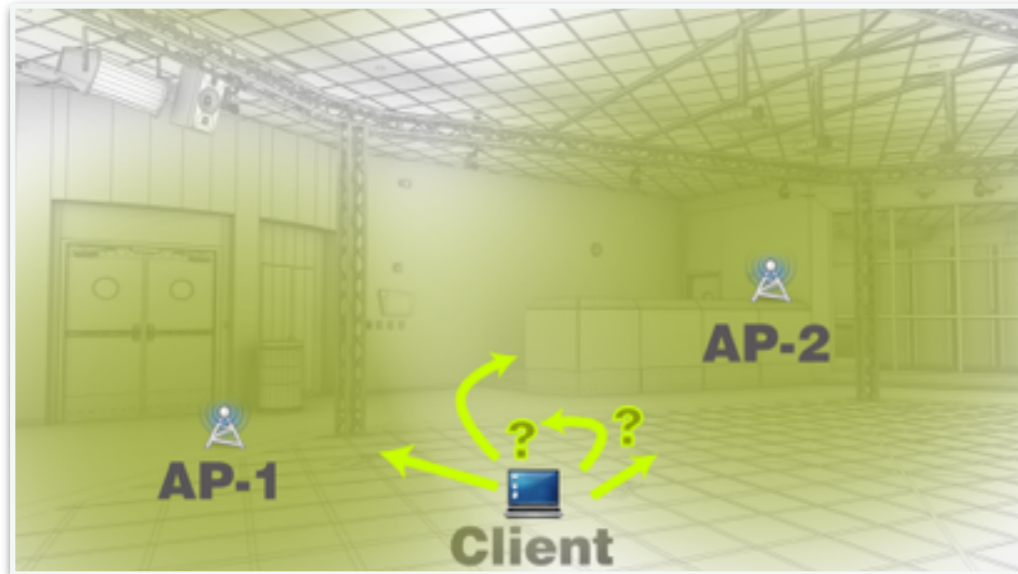


セル 1個

セルあたりの収容能力は  
物理的に上限がある

# チャンネルの違い

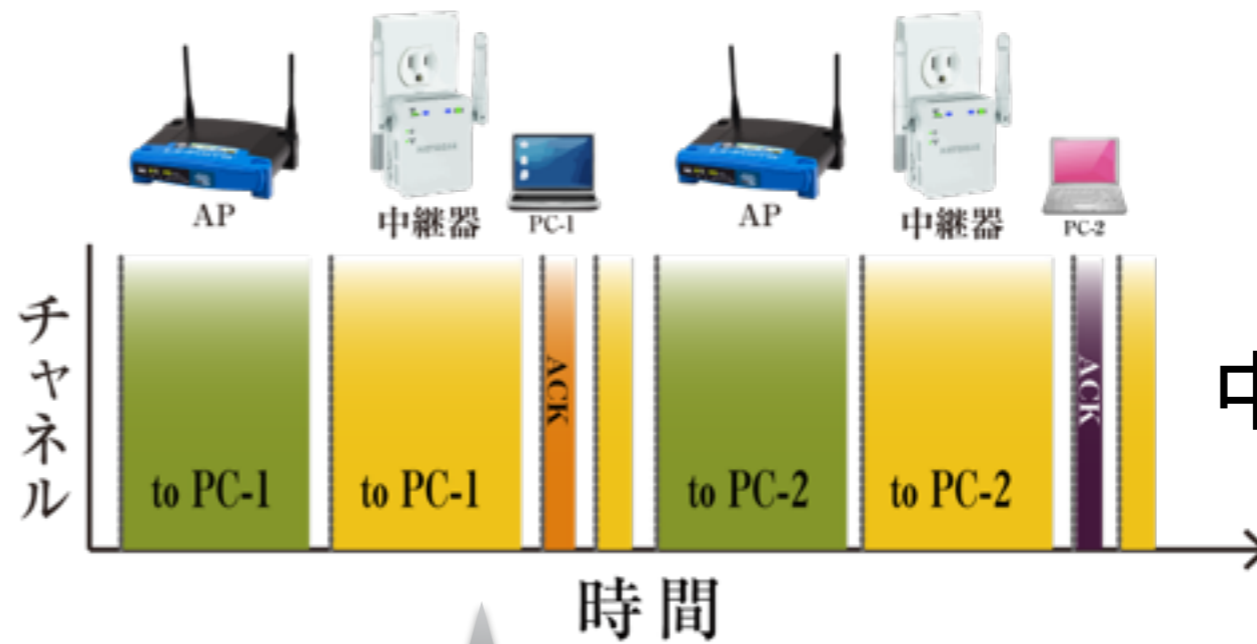
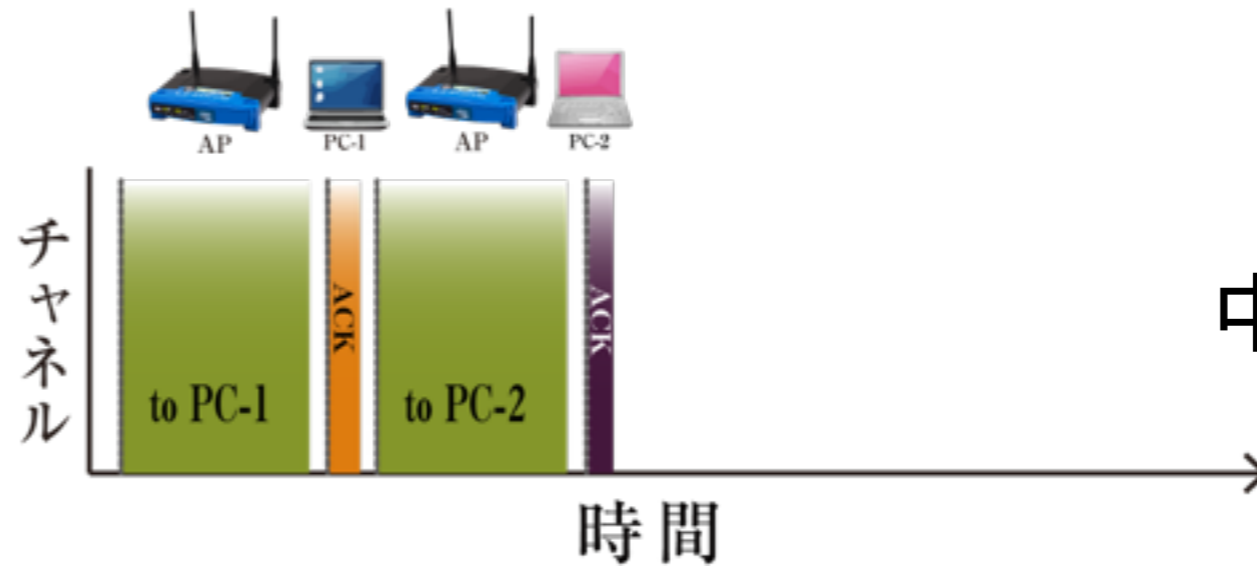
チャンネルを共有している限り、近いところにAPを増設しても改善されない



伝送媒体である空間そのものがボトルネックになっているため

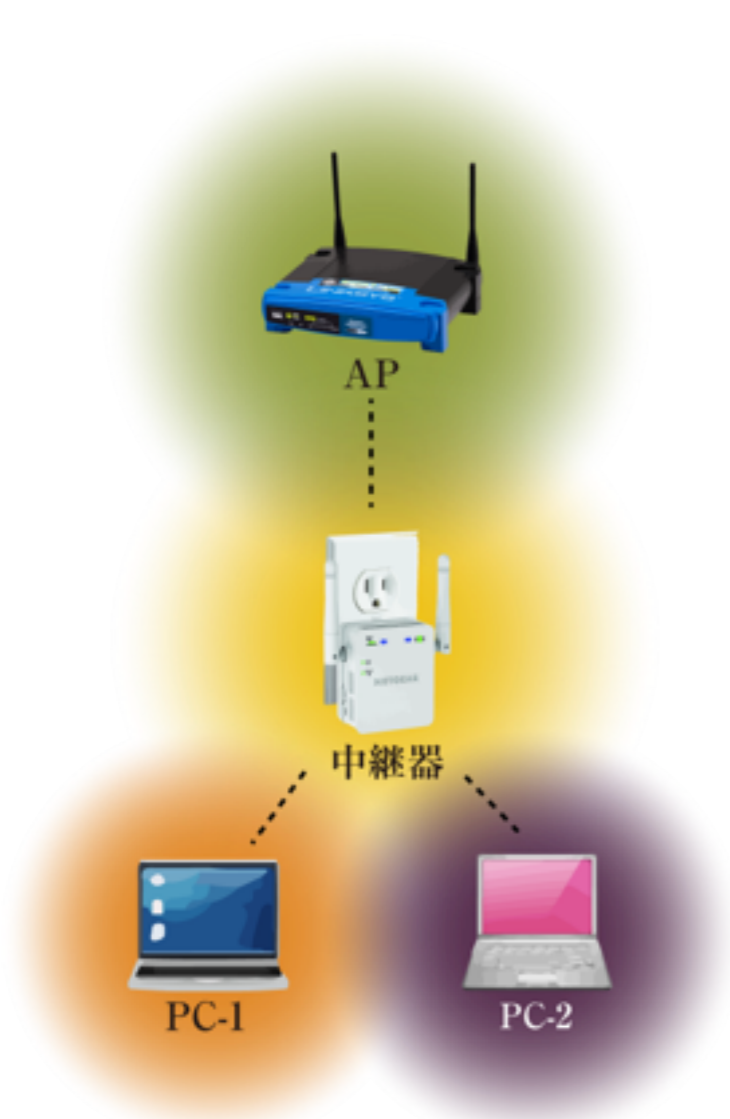
高密度WiFi環境では、これをいかに分割していくかがカギとなる

# 無線中継器の罭

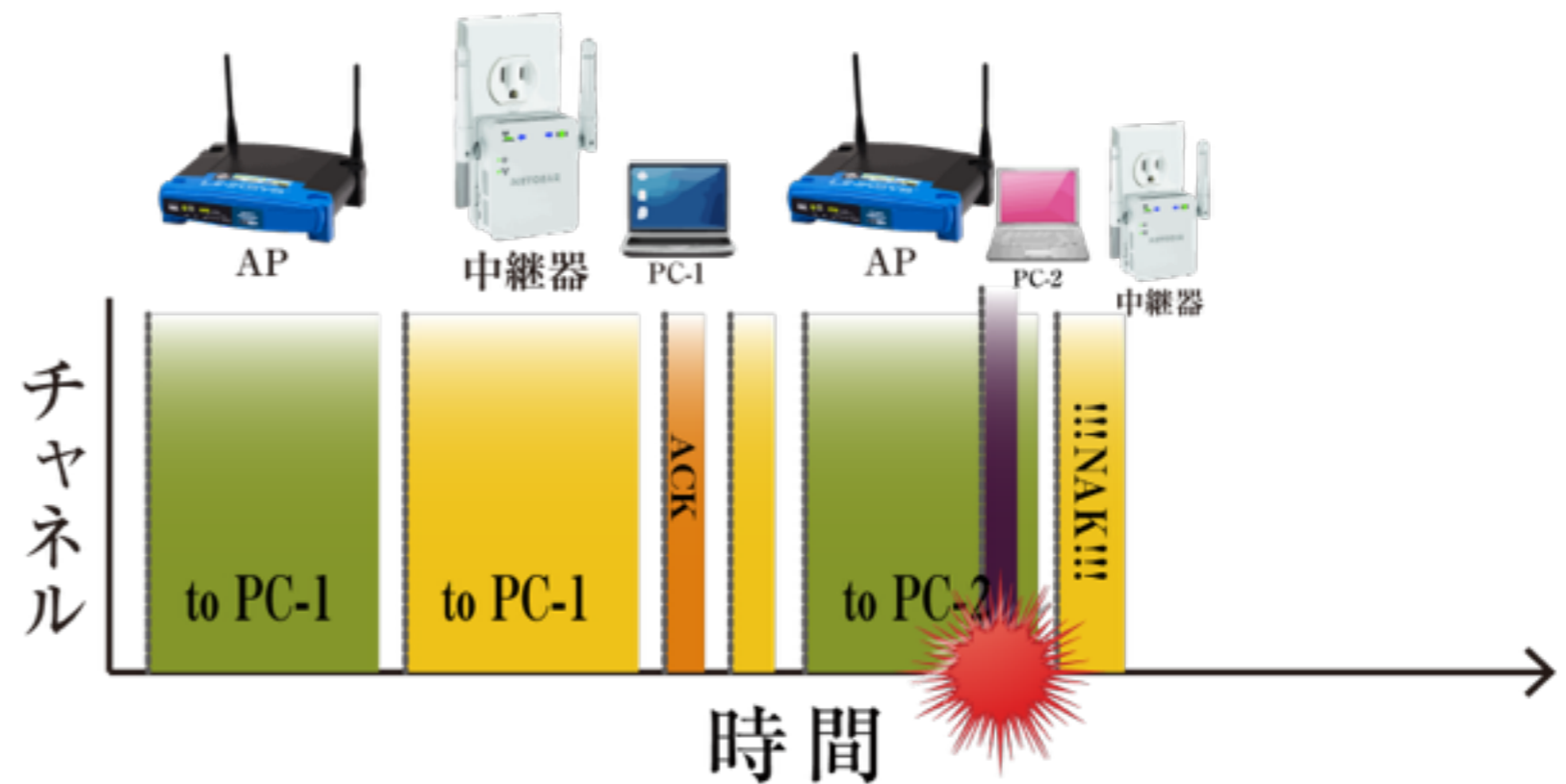


2倍以上の帯域(時間)を占有

# 無線中継器の罠 (さらに・・・)



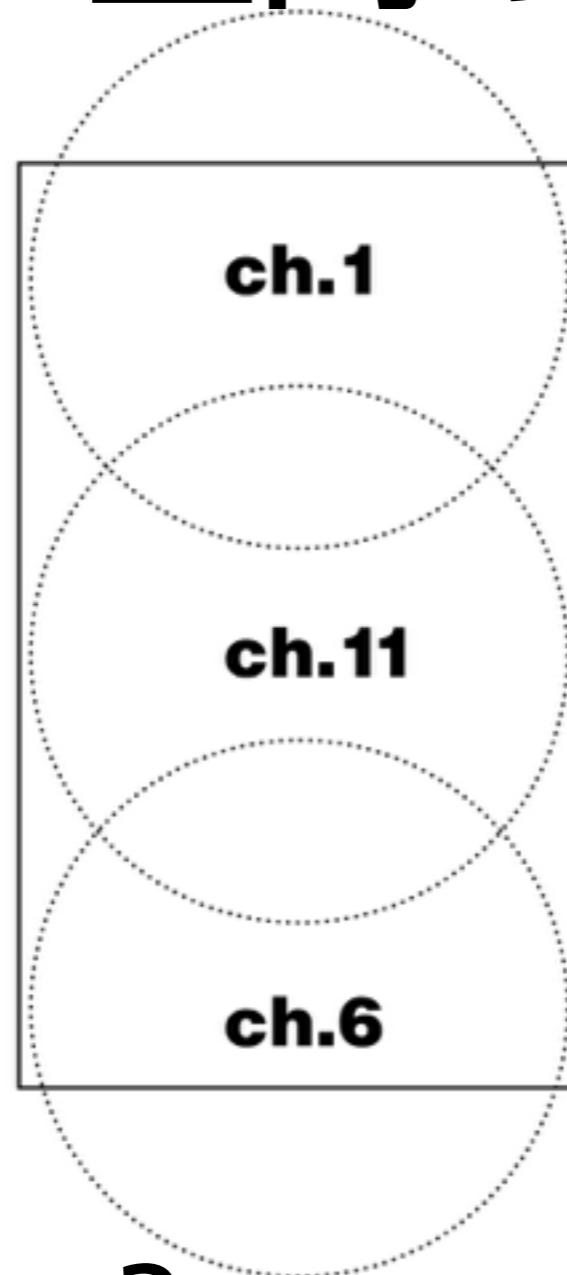
色は電波の到達範囲



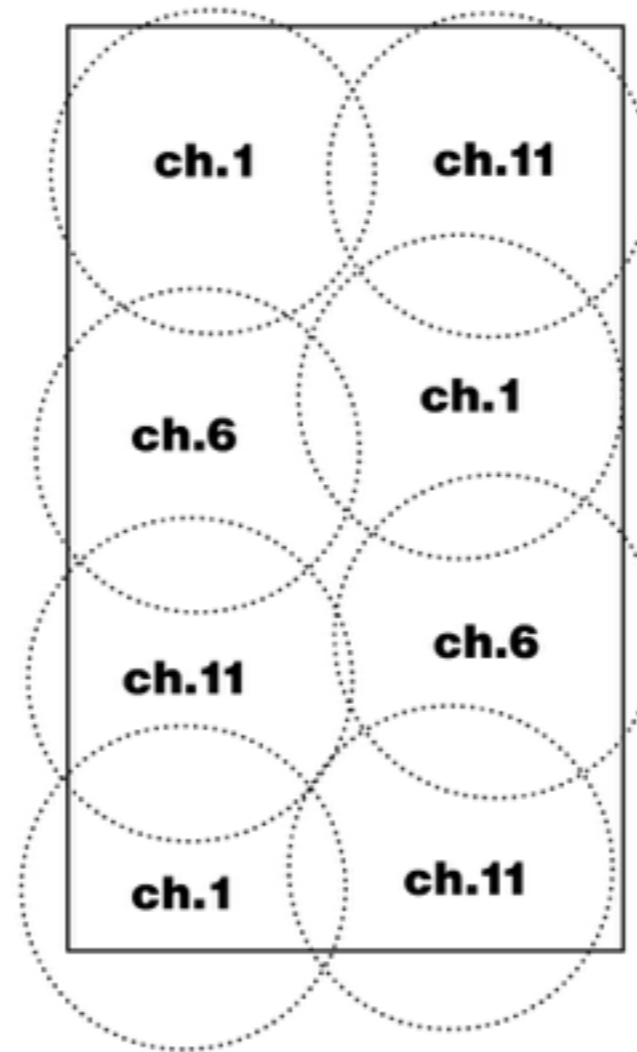
APとPC-1は互いに電波が届かず、見えな  
いため、同時に送信してフレームが壊れて  
しまうかもしれない

ユーザ数の少ない環境では有効な中継器も  
混雑している環境に導入すると破滅すること

# 空間の分割例



**3分割**  
APあたり30端末  
**合計90端末**



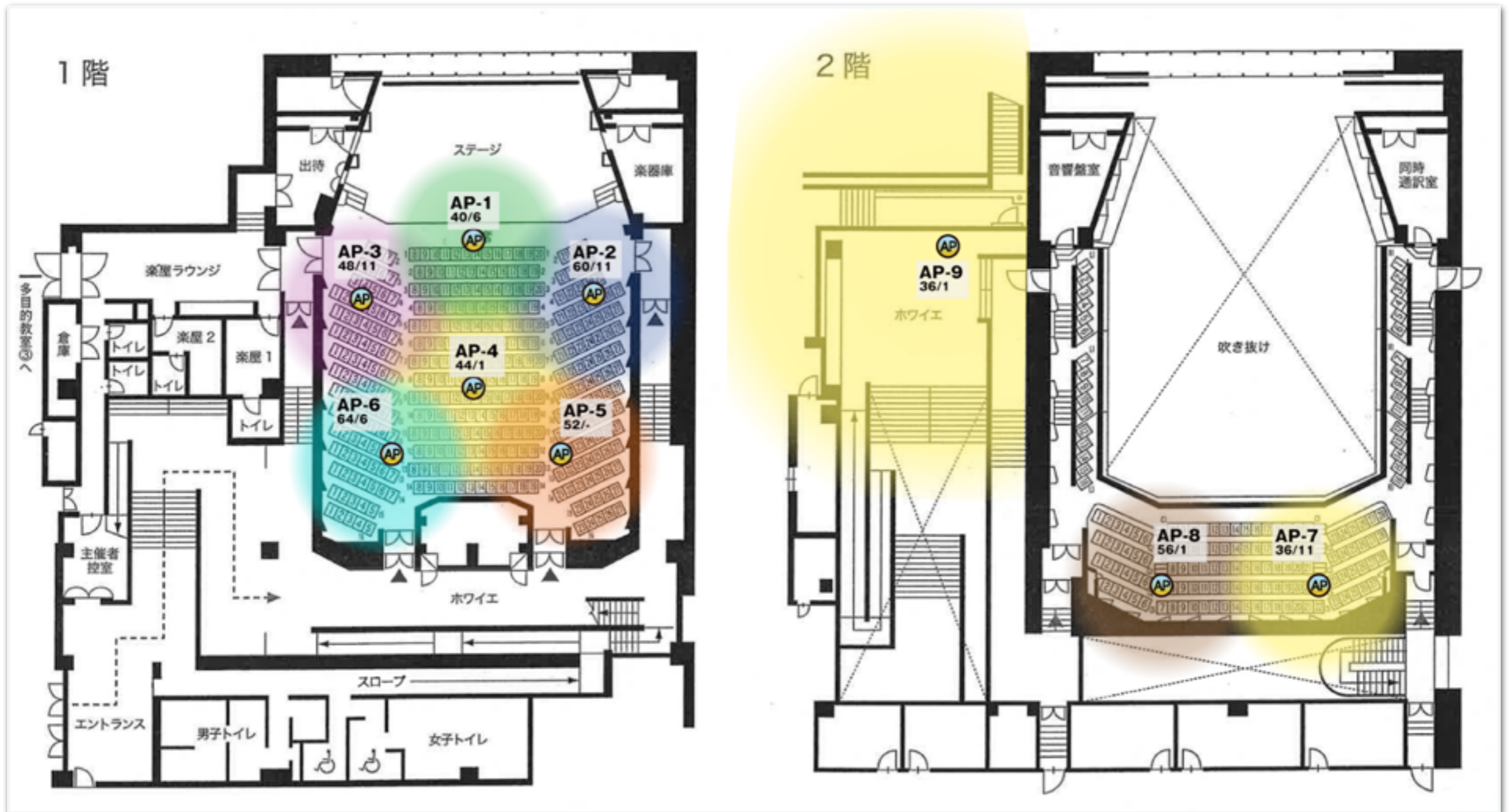
**8分割**  
APあたり30端末  
**合計240端末**

# 空間の分割例

|           | カバー範囲優先(低密度) | 収容端末数優先(高密度) |
|-----------|--------------|--------------|
| 何がネックになるか | 電波の到達範囲      | 電波干渉         |
| APの数      | 少ない          | 多い           |
| アンテナの指向性  | 無指向性         | 指向性          |
| 電波の到達範囲   | できるだけ広く      | 狭い範囲で止める     |
| 障害物       | 少ないほうがよい     | 多いほうがよい      |
| 周波数帯      | 低いほうがよい      | 高いほうがよい      |
| ユースケース    | 家庭           | オフィス、スタジアム等  |



# APを設置してみる



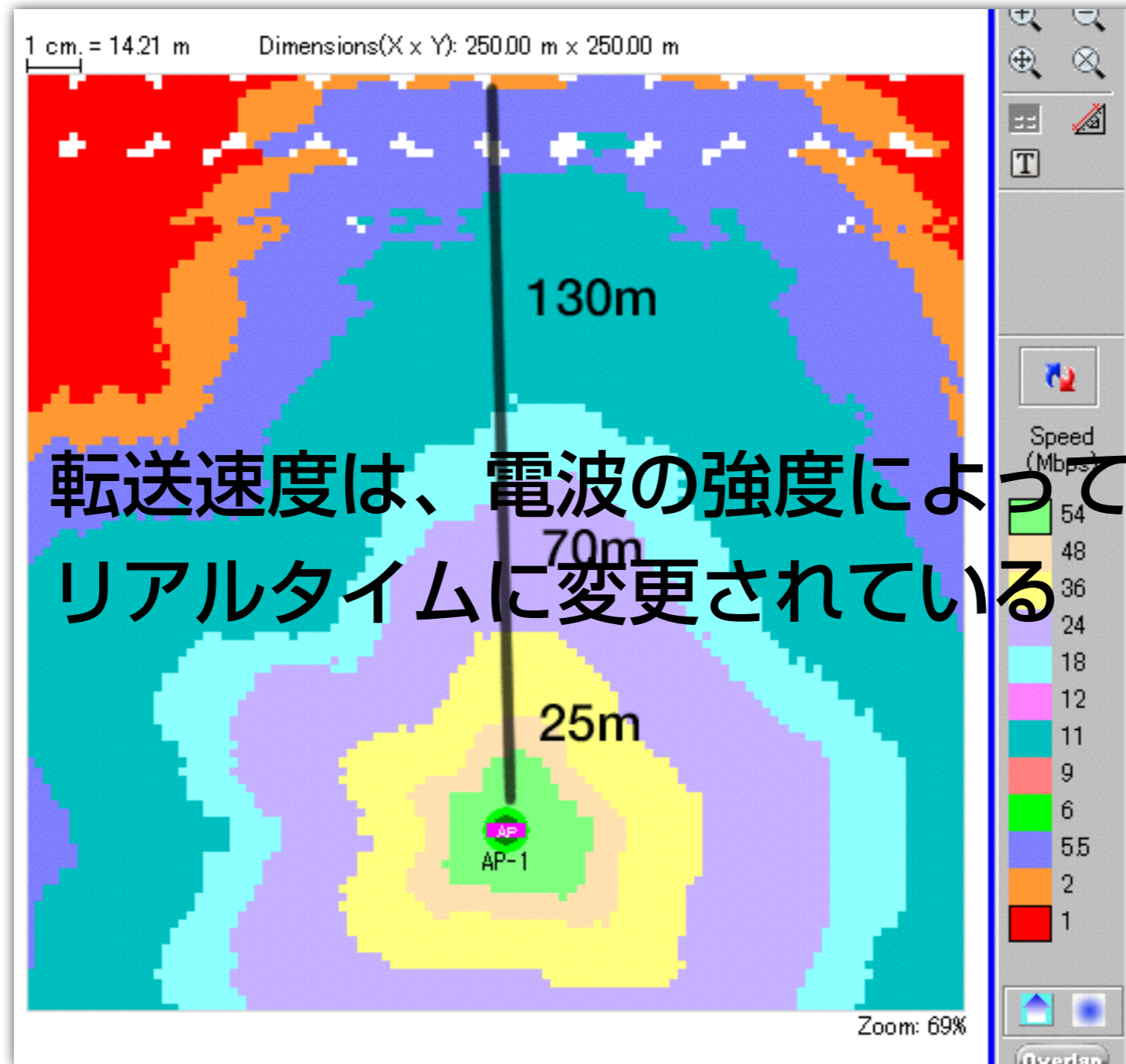
電波の飛びすぎを防ぐ必要がある

# 電波を遠くまで飛ばしすぎない

- 電波が必要以上に飛びすぎると、同じチャネルを使っている他のAPと相互に干渉が起きる
- 遠くまで飛んだとしても、AP一台あたりに収容できる端末数は限られているから、遠くまで飛ばしてもかえってパフォーマンスは悪化する

# 電波の強さとデータレート

# 電波の強さ (距離) と速度 (bps)



だいたい自由空間を想定したシミュレーション

# 電波の強さと速度 (bps)



macOS では option + Wi-Fi アイコン  
で現在の速度を確認できます。リアル  
タイムに変化する様子わかります

# 電波の強さと速度<sub>(bps)</sub>

- 電波の品質が低い場合（信号が弱い、ノイズが多い）、速度(bps)を自動的に下げるようになっている
- 電波の状況は、ほとんどの場合何らかのエラーがあり、無線LANはそれを前提に、がんばってエラー訂正をしながら動いている
- 伝送媒体が空間そのものであるため、品質の予測がしにくい







# ノイズと速度 (bps)

$$\text{信号の品質 (S/N)} = \frac{\text{信号電力}}{\text{ノイズ電力}}$$

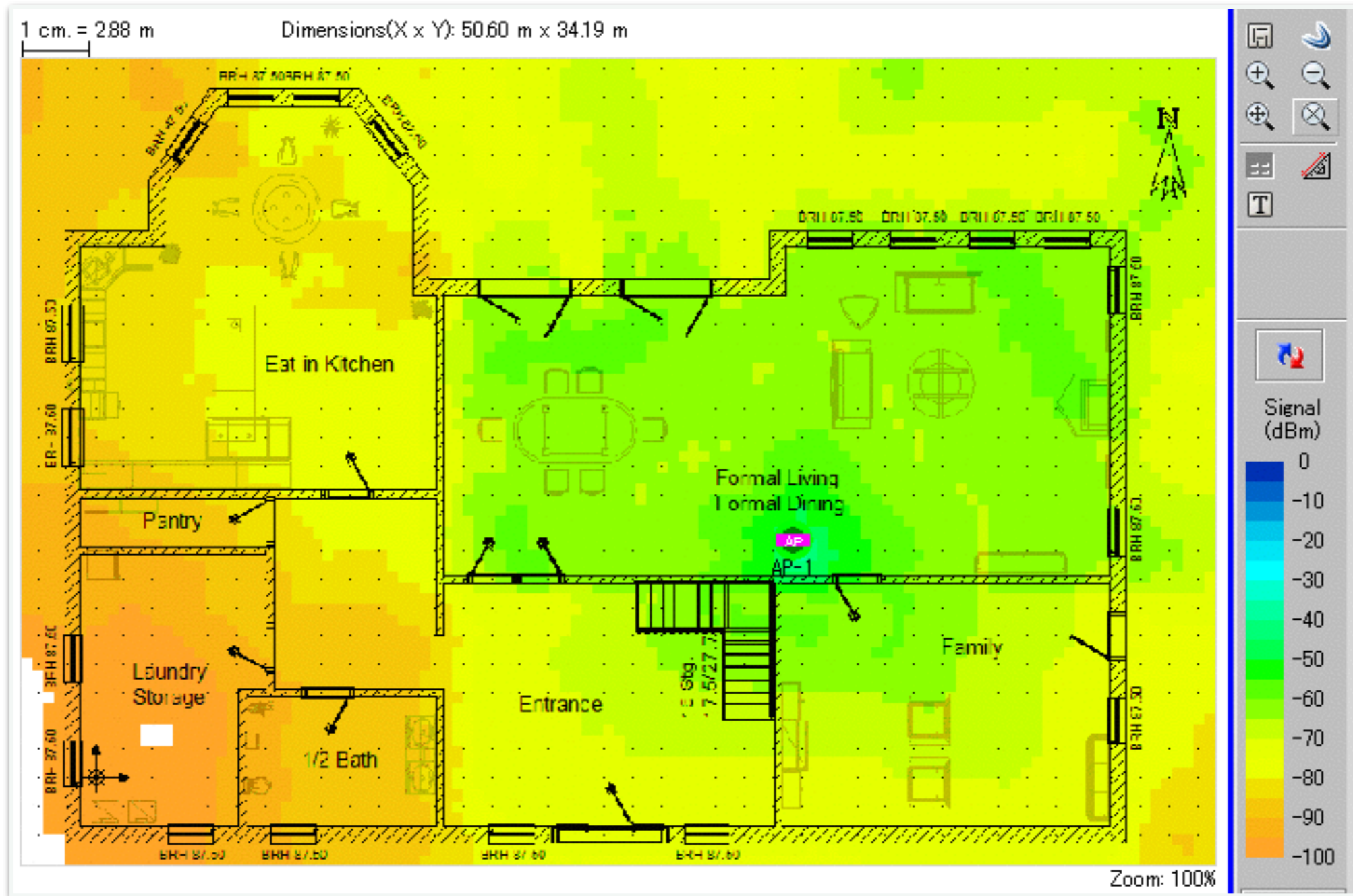
信号電力を高めるには

- 送信機をハイパワーなものにする
- 受信機の感度を高める
- アンテナの指向性を高めて無駄な方向に電波を送らない

ノイズ電力を下げるには

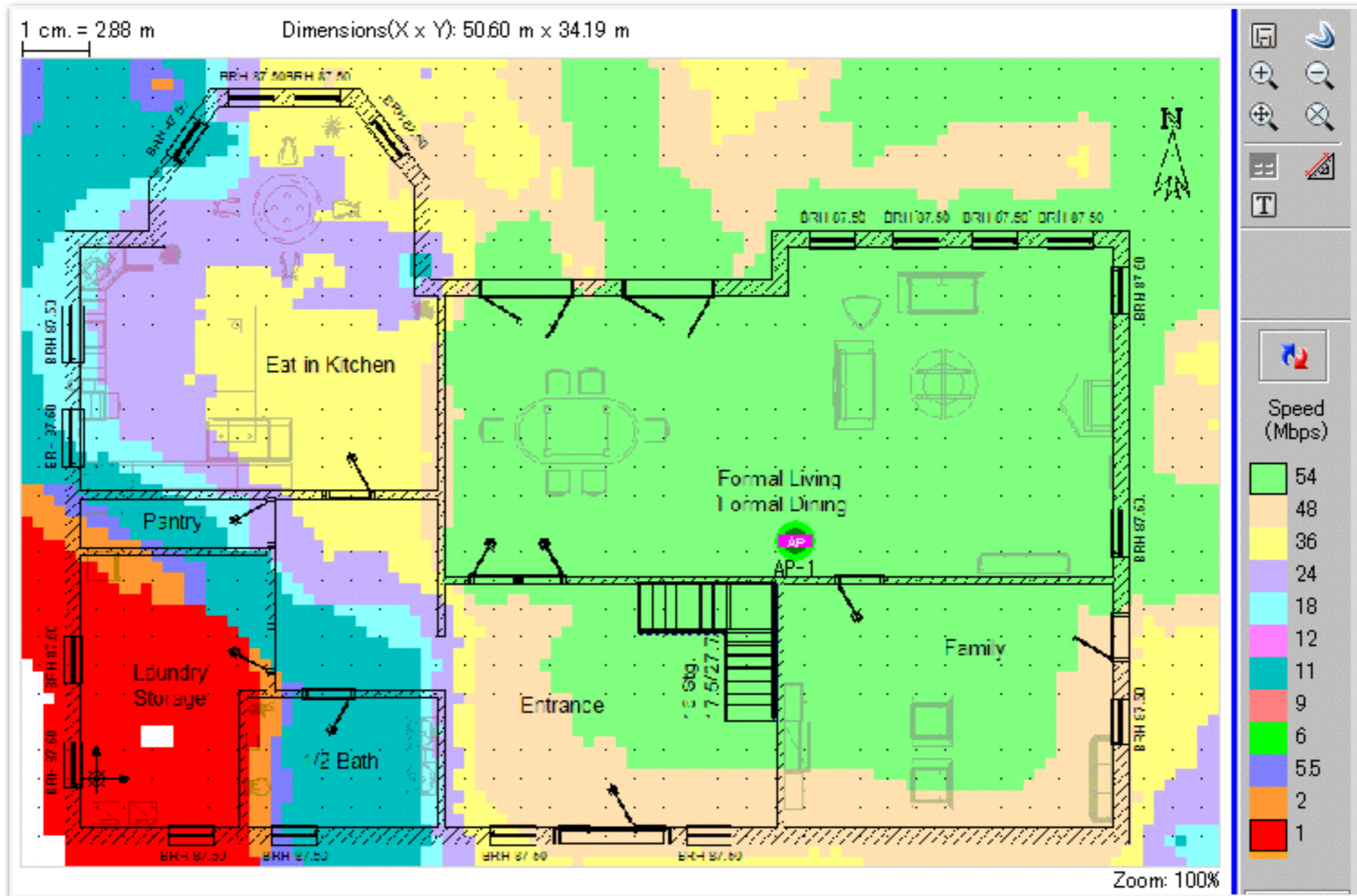
- 無関係な他の無線局をローパワーにしてもらう
- アンテナの指向性を高めて無駄な方向のノイズを拾わない
- 受信機内部や自然界で発生するノイズを低減する

# 電波の強さと速度 (bps)



通常は壁などがあるので、こういう電波強度になり、

# 電波の強さと速度 (bps)



速度はこんな感じ、左下の部屋はちょっとつらい

# まとめ

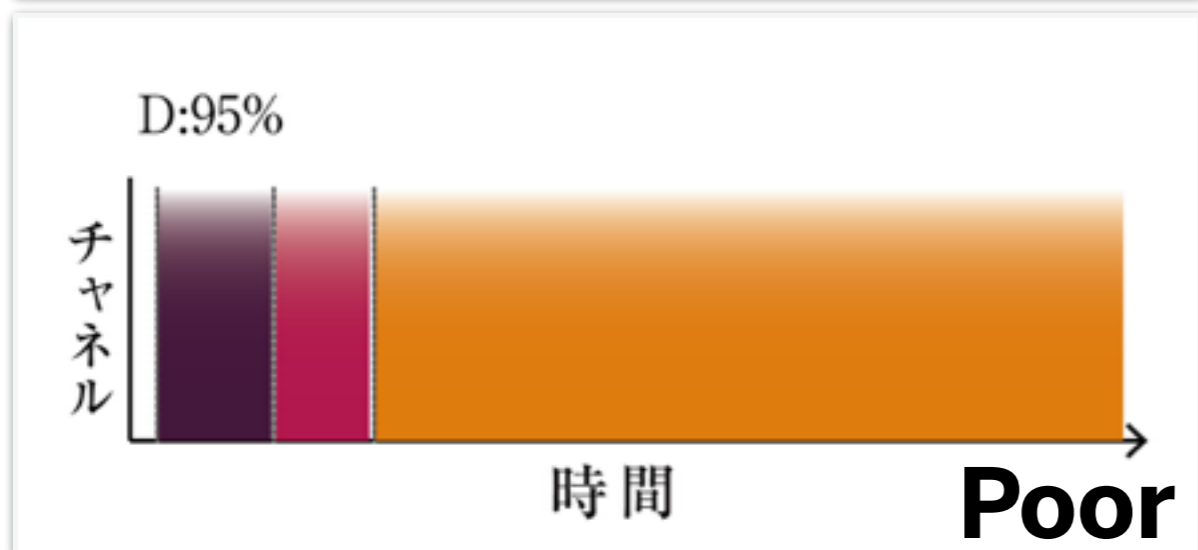
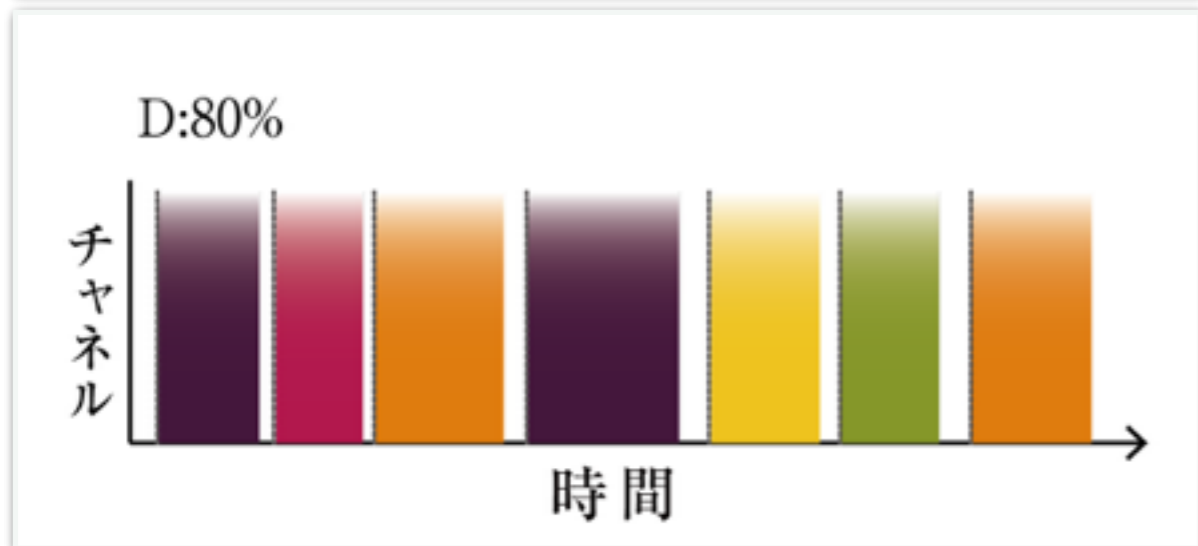
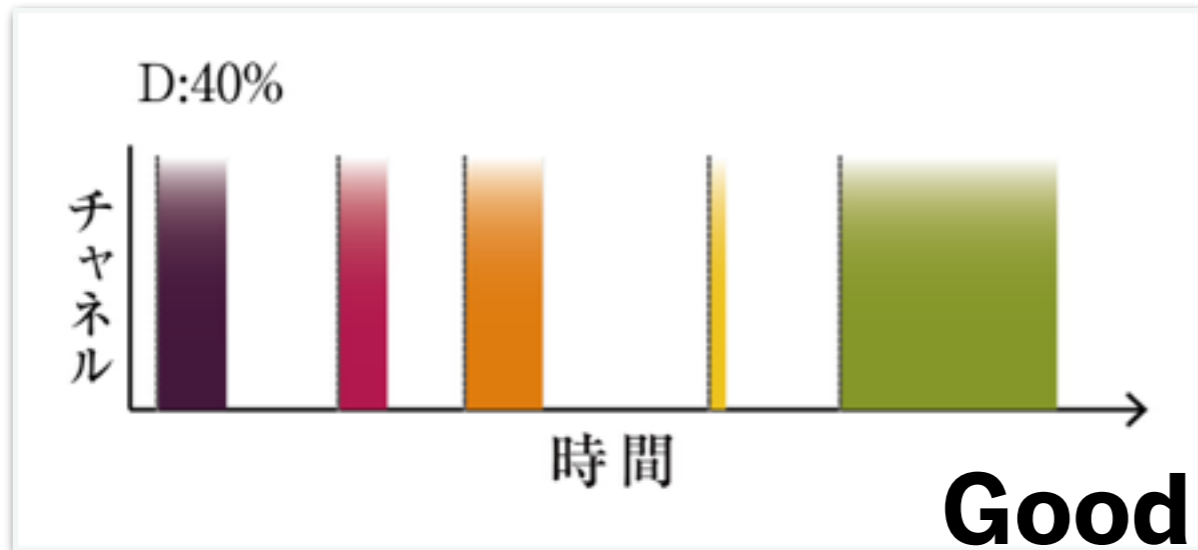
- 電波は半二重メディアで、空間を共有
- 光のような伝搬特性
- 同じ周波数の電波が混ざると干渉を起こす
- チャンネル利用率を低く保つためにはセル設計が重要
- 電波の品質が悪いとデータレートが低下する

# チャンネル利用率

# 混雑とは？

- 無線通信は時空間(エアタイム)を占有して行なう  
スイッチングしない
- 同時に複数の端末が通信できてるように見えるけど  
その瞬間では、通信は必ず1:1で行われていて  
ほかの端末は待機している

# チャンネル利用率

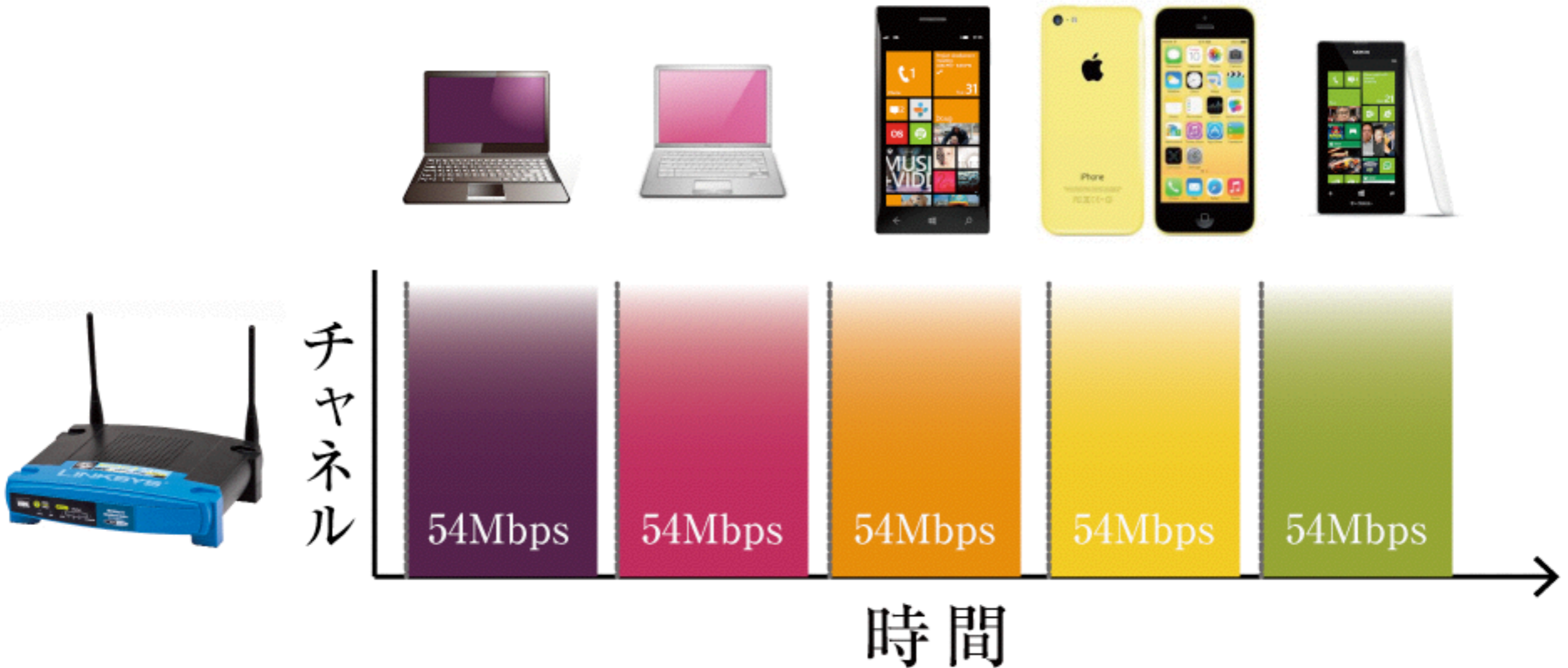


無線は、誰かが送信しているときは他の端末は送信できない

チャンネル利用率が高まると衝突が発生しやすくなるので、低く保つのが理想

衝突が発生しやすくなるとチャンネル利用率が更に高まり、他の誰も送信する隙間がなくなってしまう、制御フレームも送信できず、破滅する

5 台の端末がひとつのチャンネルを時分割して共有

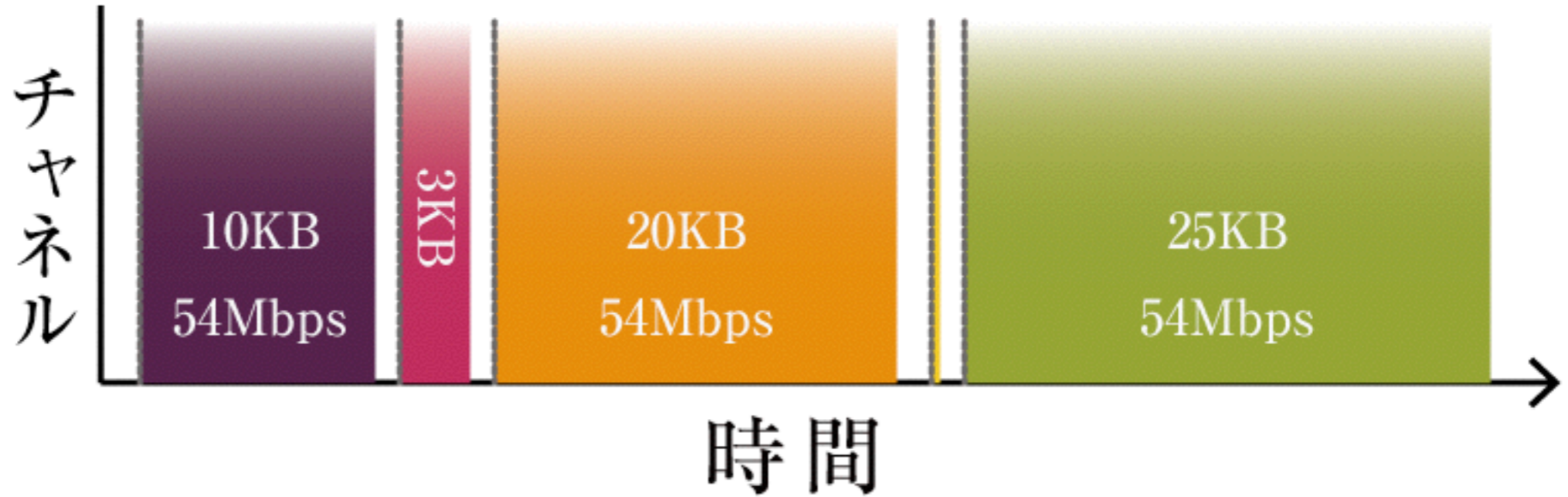


一台のアクセスポイントと複数の端末が  
時間で区切って順番にデータを転送する

ある一瞬では AP と端末はチャンネルを占有している



実際には占有時間はトラフィックによってばらばら



占有時間、順番などもばらばら  
通信内容がないこともある

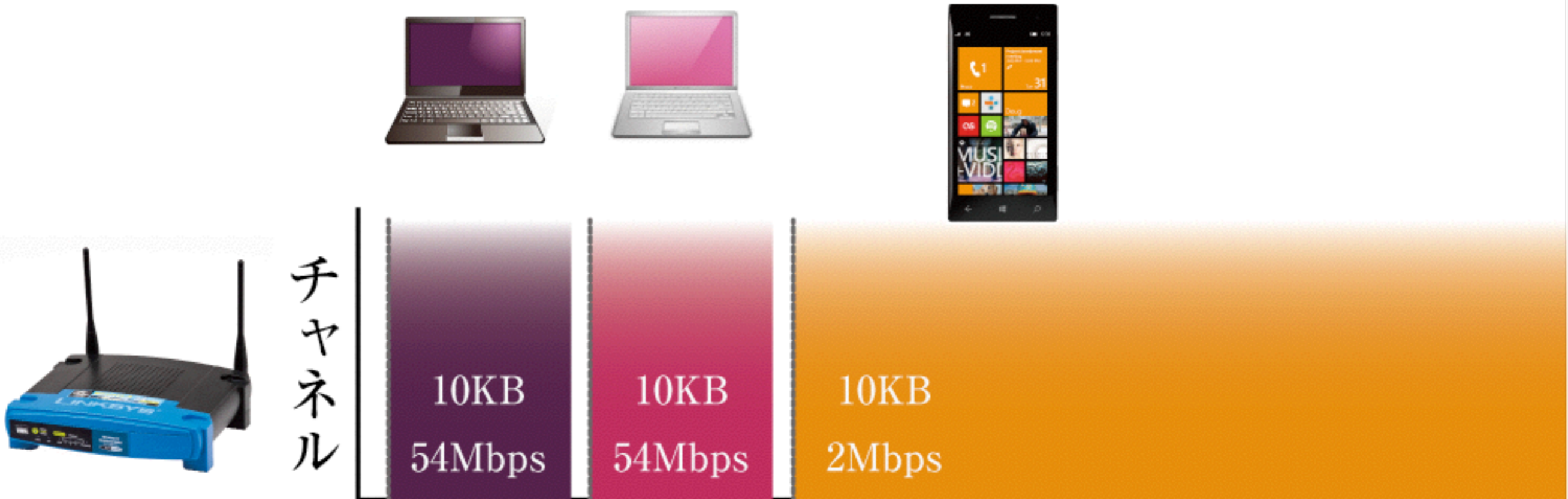


たとえば、

**5台の端末に10KBずつ、計50KB転送することを考える**

**(全部54Mbpsで転送)**

ところが、オレンジの端末が遠くに行ってしまう、  
電波強度が下がり、転送速度が落ちました



**転送レート(bps)は電波強度によって変わる**

**オレンジの端末の転送速度が2Mbpsに下がった場合、**



# 端末が一台遅いと全体が遅くなる



- 同じ50KBを転送するのに、遅い端末が一台いるだけで時間(エアタイム)が5倍くらい無駄になった
- 遅い端末の通信が終わるのを、みんな待っている
- 遅い端末の存在はリソースを食い潰す

# 電波を遠くまで飛ばしすぎない 遅いレートで通信させない

**Data Rates:** Best Range Best Throughput Default

|            |  |   |  |
|------------|--|---|--|
| 1.0Mb/sec  | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 2.0Mb/sec  | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 5.5Mb/sec  | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 11.0Mb/sec | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 6.0Mb/sec  | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 9.0Mb/sec  | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 12.0Mb/sec | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 18.0Mb/sec | <input type="radio"/> Require            | <input type="radio"/> Enable            | <input checked="" type="radio"/> Disable |
| 24.0Mb/sec | <input checked="" type="radio"/> Require | <input type="radio"/> Enable            | <input type="radio"/> Disable            |
| 36.0Mb/sec | <input type="radio"/> Require            | <input checked="" type="radio"/> Enable | <input type="radio"/> Disable            |
| 48.0Mb/sec | <input type="radio"/> Require            | <input checked="" type="radio"/> Enable | <input type="radio"/> Disable            |
| 54.0Mb/sec | <input checked="" type="radio"/> Require | <input type="radio"/> Enable            | <input type="radio"/> Disable            |

MCS Rates:

|         | 0                                | 1                                | 2                                | 3                                | 4                                | 5                                | 6                                | 7                                | 8                                | 9                                | 10                               | 11                               | 12                               | 13                               | 14                               | 15                               |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Enable  | <input type="radio"/>            | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| Disable | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/>            |

**Data Rates\*\***

|          |           |
|----------|-----------|
| 1 Mbps   | Disabled  |
| 2 Mbps   | Disabled  |
| 5.5 Mbps | Disabled  |
| 6 Mbps   | Disabled  |
| 9 Mbps   | Disabled  |
| 11 Mbps  | Disabled  |
| 12 Mbps  | Disabled  |
| 18 Mbps  | Disabled  |
| 24 Mbps  | Mandatory |
| 36 Mbps  | Supported |
| 48 Mbps  | Supported |
| 54 Mbps  | Supported |

遅いレートをDisableにしてみましよう

# 遅いデータレートを制限すると



- 電波が遠くまで飛ばないようになる  
(セルサイズが小さくなる)
- 下のオレンジ色のようなことが起こりにくなる

# まとめ

- 遅いデータレートで接続している端末は、全体の足を引っ張る
- チャンネル利用率が高くて不安定な場合、遅いデータレートを無効にすることで改善できる可能性がある
- ただし遅いデータレートを無効にすると電波の届く範囲は狭くなる



# 実際のAP配置例

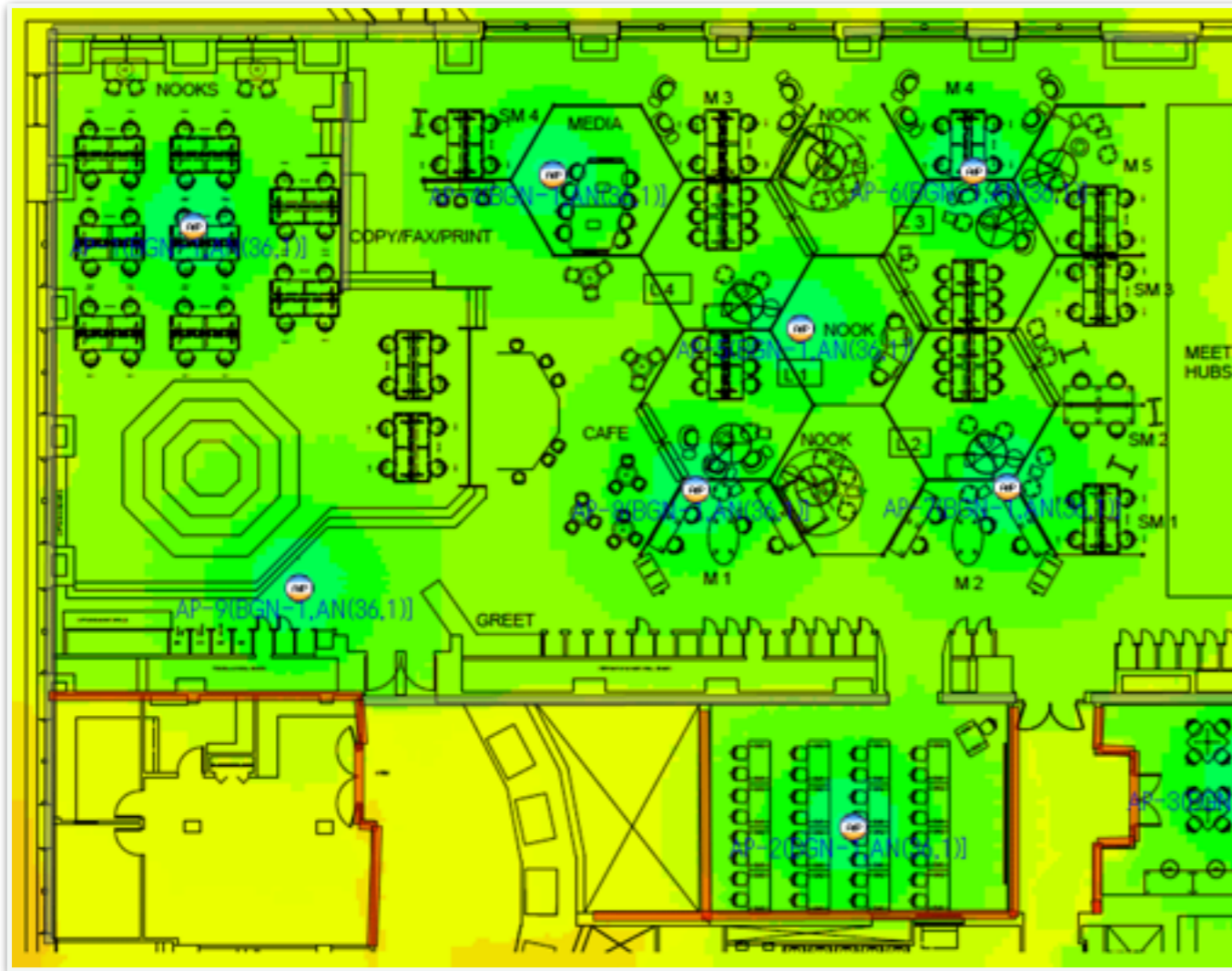
# オフィスの例

- 5GHz帯をメインに
- 席数からAP1台当たりの収容数を決める
- チャンネルが不足するのであれば、チャンネルボンディングをせず20MHz幅にしたほうが良い結果が得られることも
- どうしてもDFSを受けたくない場所があればW52から割り当てる
- DFSをの影響を受けやすい方角とチャンネルがあるので、しばらく運用してみてもそのようなチャンネルの利用を除外する

# APの配置と収容端末数

AP1台あたり最大でも30端末ほどを  
想定

この架空のオフィスの場合、壁など  
が少なくセルのサイズを小さくしに  
くい。同じチャネルを使う可能性が  
あるAP同士が相互に見えるとセルの  
結合が起こる

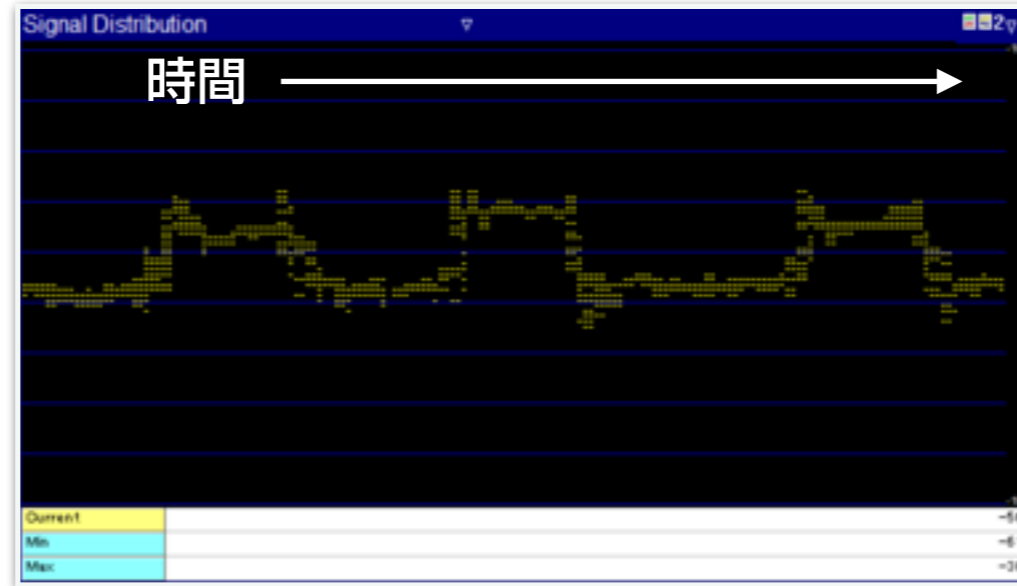


架空の平面図

# 壁でどれくらい減衰するか実験

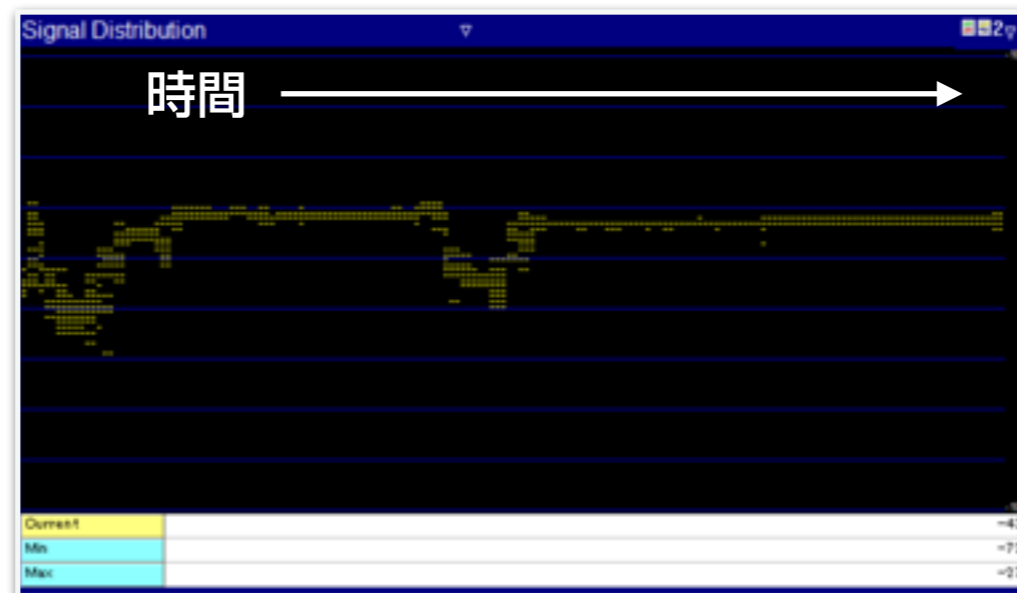
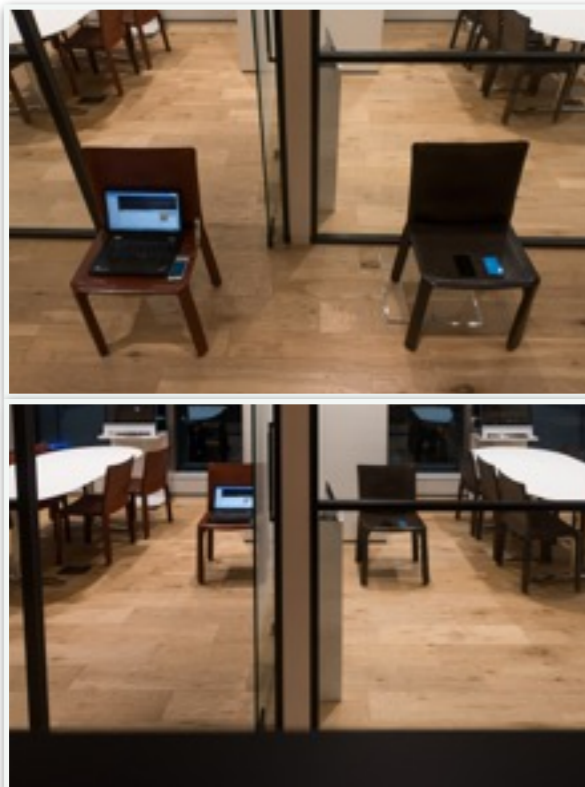


扉



扉を開閉している

かなり重いドア  
12dBくらい?



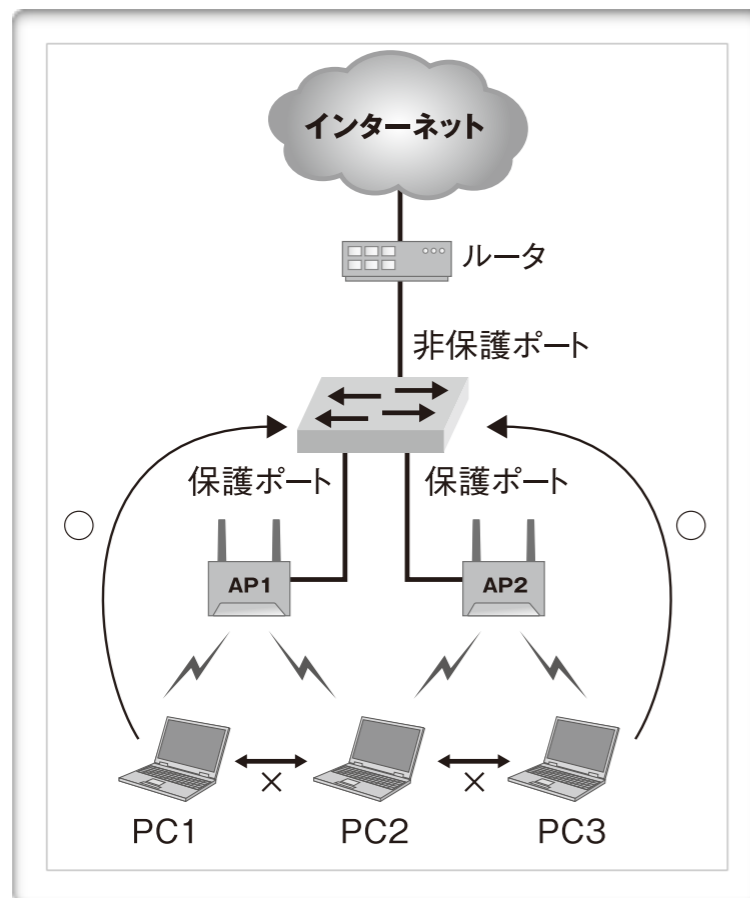
中央の凹みが 中(壁越し)へ運び込んだ瞬間

会議室間の壁  
意外、3dB程度

本当はもうちょっと離して測るべき

# 公衆WiFi シェアオフィスの例

- 電波的にはオフィスと同じと考えてよい



端末同士の通信を防ぐ構成

- シェアオフィスなので端末同士の通信ができないようにするのが望ましい
- AP内での設定(P2P Blocking Actionなど), 収容スイッチの設定(switchport protectedなど)

でも端末同士の通信ができないといけない場合もある(アプリ開発など)

# 公衆WiFi ライブハウス

- 外国人観光客などにニーズがある
- 地下など、携帯電話が入りにくい場所では非常に高密度になる
- 2.4GHz帯を利用する無線LAN以外の機器を考慮すべき
  - ワイヤレスマイクや音響機器と干渉を起こすとインパクトが大きい
  - b/g は提供しないことも考えたい
- 演者用の必須のものと、来場者用のものはセル(AP, チャンネル)ごと分ける



ワイヤレス



iPadで操作する卓



インターネット接続を使うVJ

# 公衆WiFi 喫茶店の例

- 店の目的からして、端末の密度はあまり高くない
- なるべくならAPの台数を少なく済ませたい
  - 遠くまで電波を飛ばしたいのでデータレート制限はゆるめに
- Wi-Fi提供者向けセキュリティ対策の手引き ([http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/security/cmn/wi-fi/Wi-Fi\\_manual\\_for\\_AP.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/security/cmn/wi-fi/Wi-Fi_manual_for_AP.pdf))

# トラブルシューティング 測定器で見てみる



# どんな測定器がある？

## スペクトラムアナライザ



- ✓ 飛んでいる電波そのものを見る
- ✓ WiFi以外の電波も見える
- ⚠ 復号はできない

## WiFi アナライザ



- ✓ 電波そのものではなくIEEE802.11 復号後を見る
- ✓ WiFi の中身を詳しく追うことができる
- ⚠ WiFi 以外の電波が干渉源になっていても見えない

# どんな測定器がある？

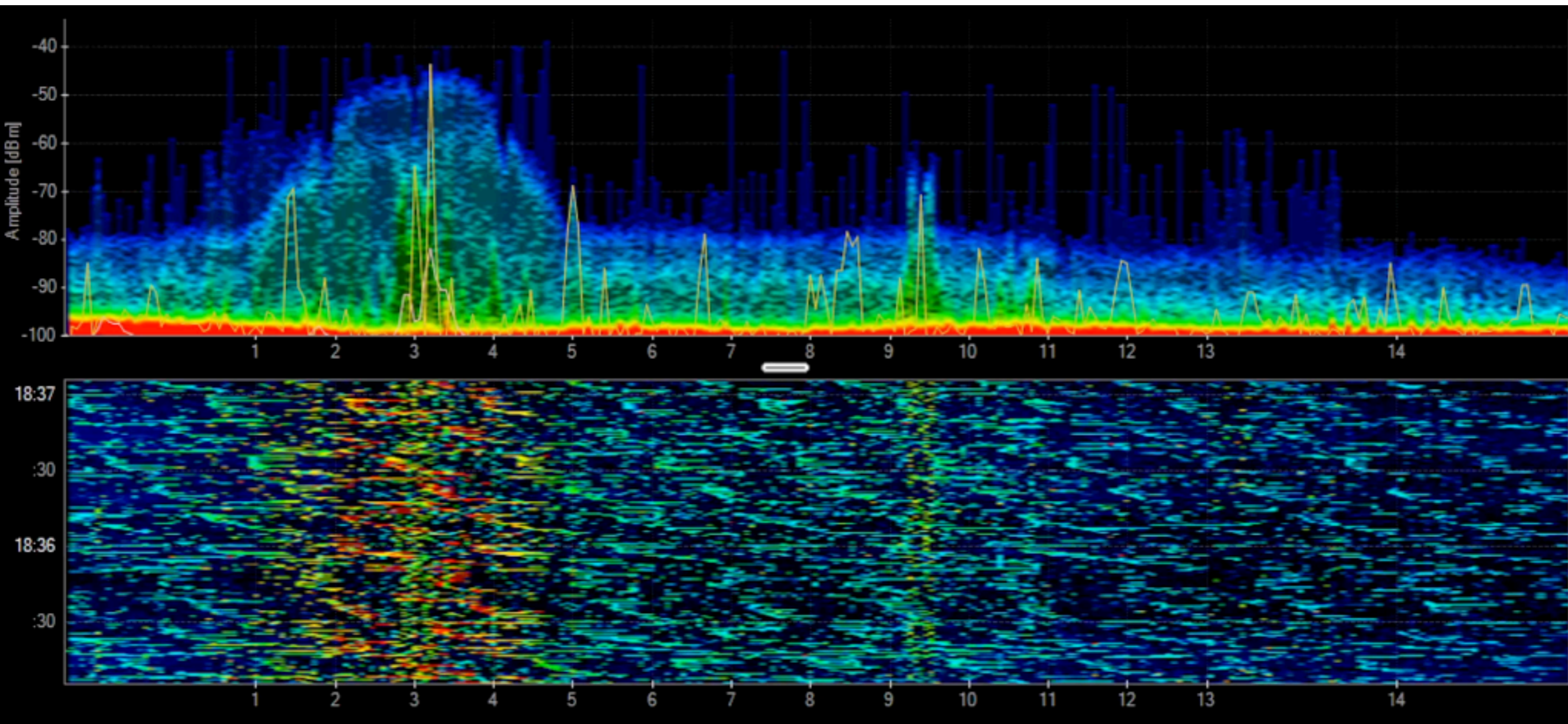
- WiFiアナライザ - WiFiだけを見る
  - ✓ WiFiの中身を詳しく追うことができる
  - ⚠ WiFi以外の電波が干渉源になっていても見えない
- Metageek inSSIDer (Windows, macOS)
- WiFi Analyzer (Android)
  - ✓ 安価 or 無料。アプリをインストールするだけ
  - ⚠ WiFiのビーコンしか見えない 干渉などはわかりにくい
- AirMagnet WiFi Analyzer (Fluke Networks→NetScout Systems)
  - ✓ 中身まで詳しく分析できる
  - ⚠ 高価

# どんな測定器がある？

- スペクトラムアナライザ - 電波そのものを見る
  - ✓ WiFi 以外の電波も見える
  - ✓ 高速
  - ⚠ 電波の形をそのままグラフにするだけなので、読み取るのには慣れが必要
- Metageek Wi-Spy+Chanalyzer (Windows)  
WiFi用に特化したスペクトラムアナライザ
  - ✓ USB接続で小形
  - ✓ 設定項目が少なく扱いやすい
  - ✓ WiFi ビーコンをスペクトラムに重ねて表示ができる
  - ⚠ とても高価ではないが ご家庭向きの価格とはいえない

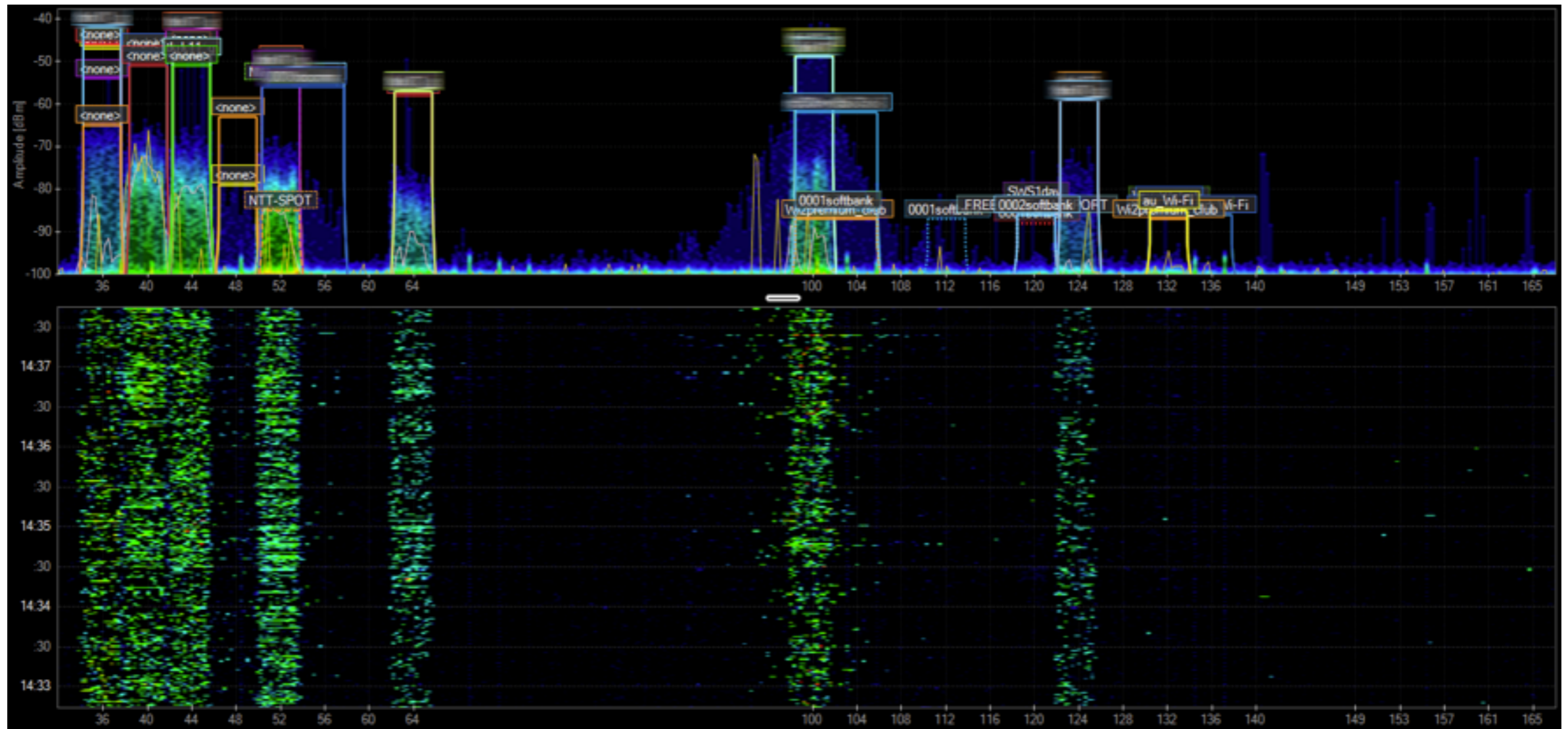


# Wi-Spy + Chanalyzer の例



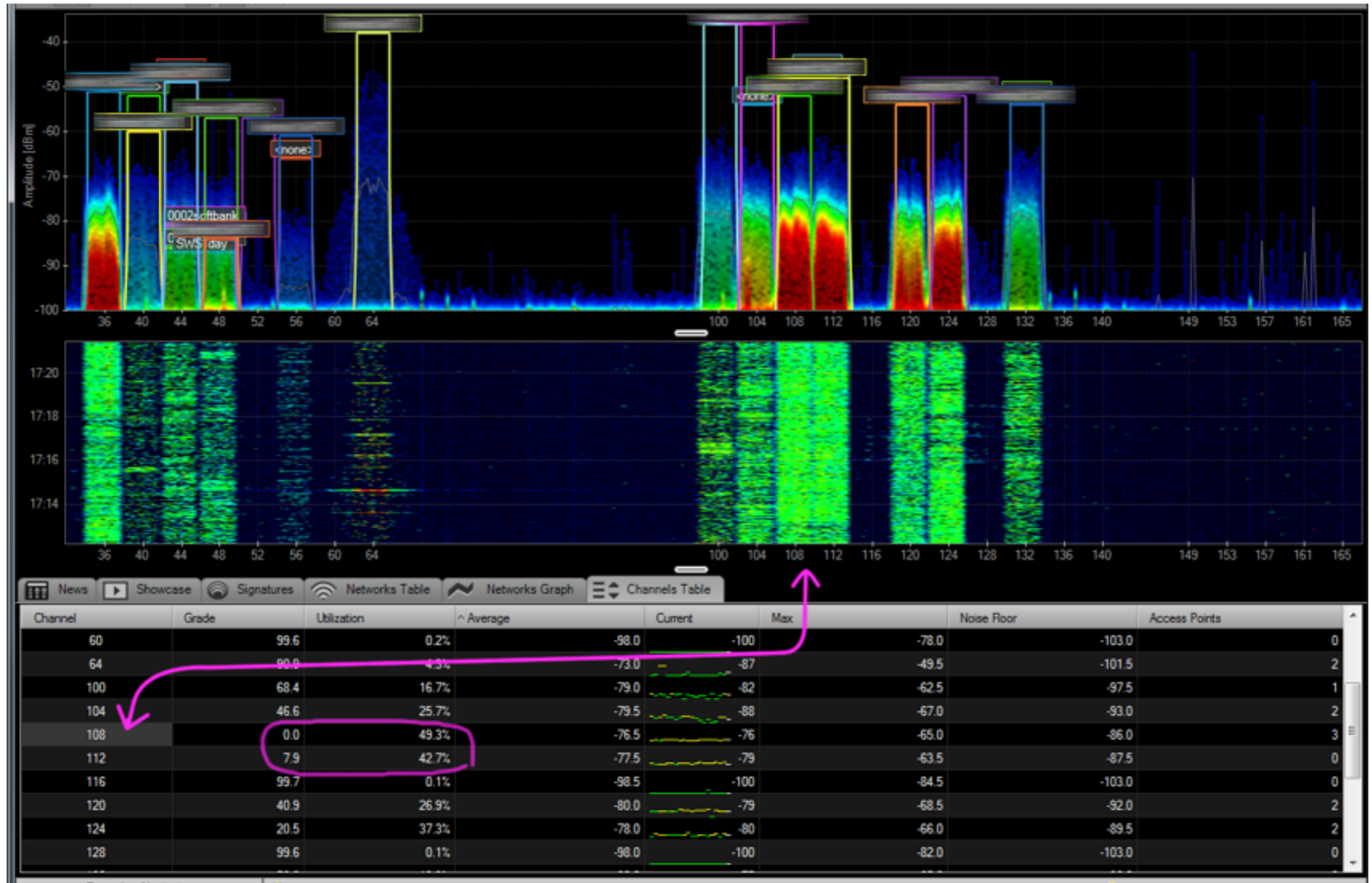
⚠ 電子レンジのノイズを受けている

# Wi-Spy + Chanalyzer の例



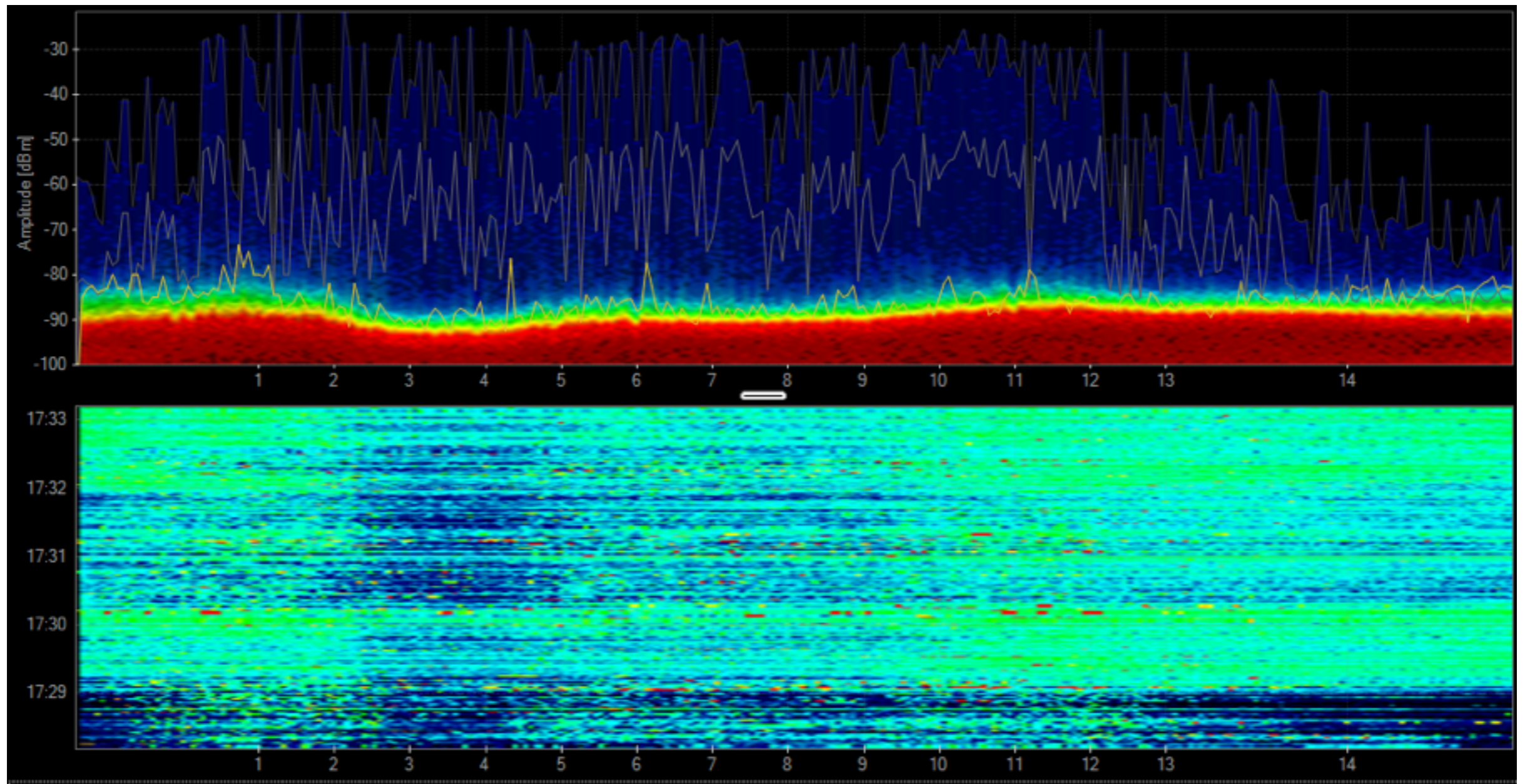
✓ 変なノイズもなく、チャンネル利用率も高くない

# Wi-Spy + Chanalyzer の例



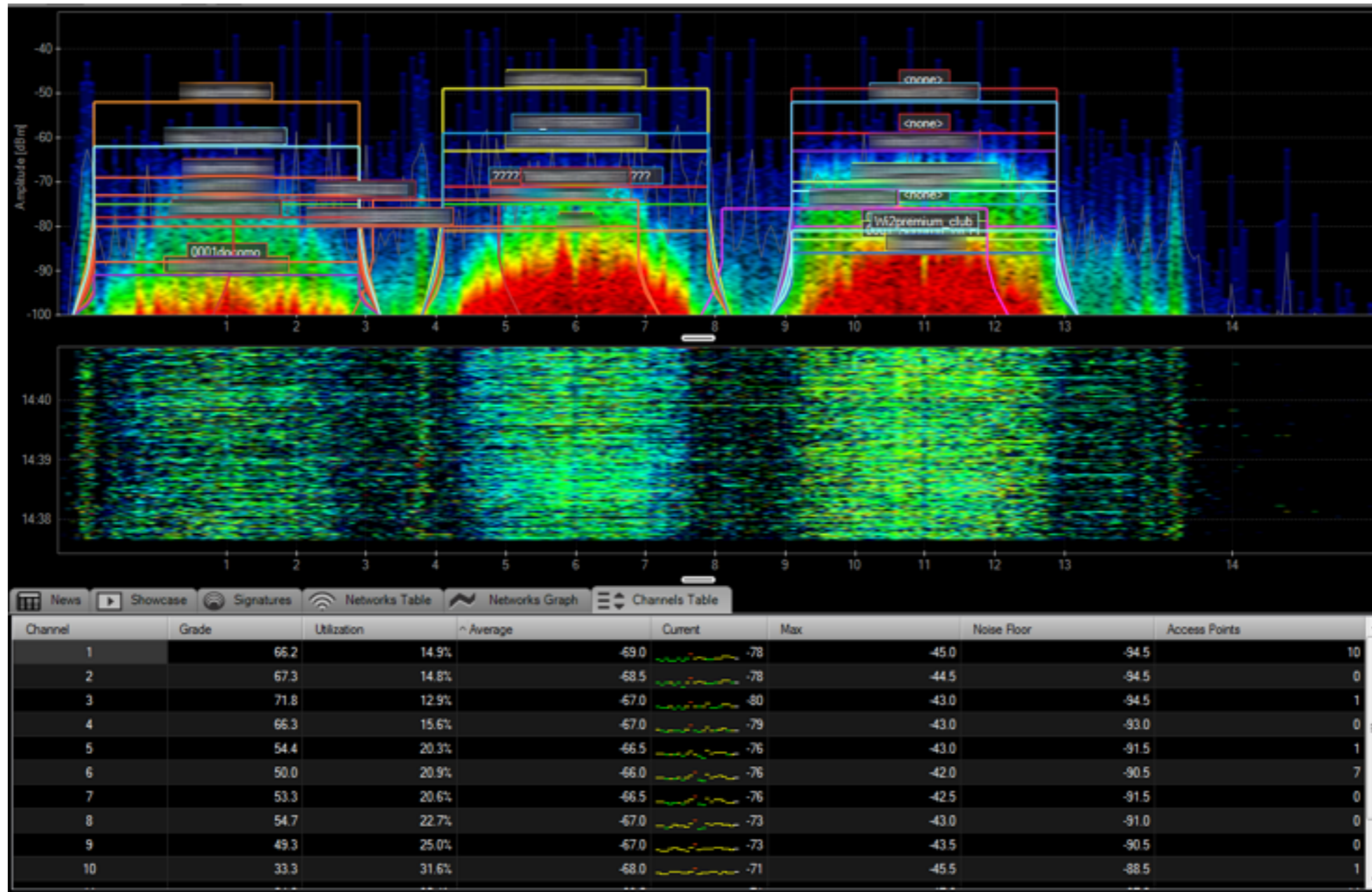
⚠️ 108, 112ch のチャンネル利用率が高すぎる

# Wi-Spy + Chanalyzer の例



⚠ 2.4GHz帯全域に広がる非WiFiによるノイズ

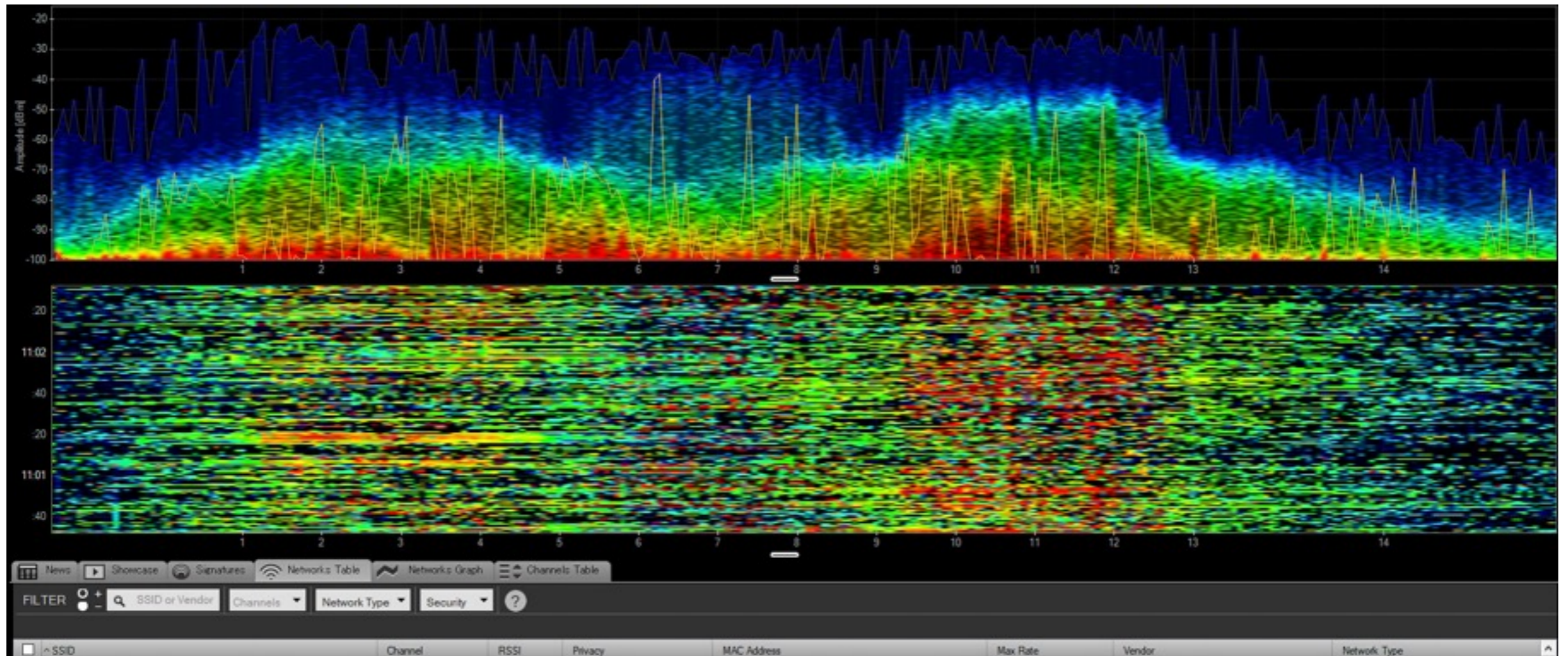
# Wi-Spy + Chanalyzer の例



✅ 同一チャンネルに複数のAPがいるが、まだ大丈夫そう

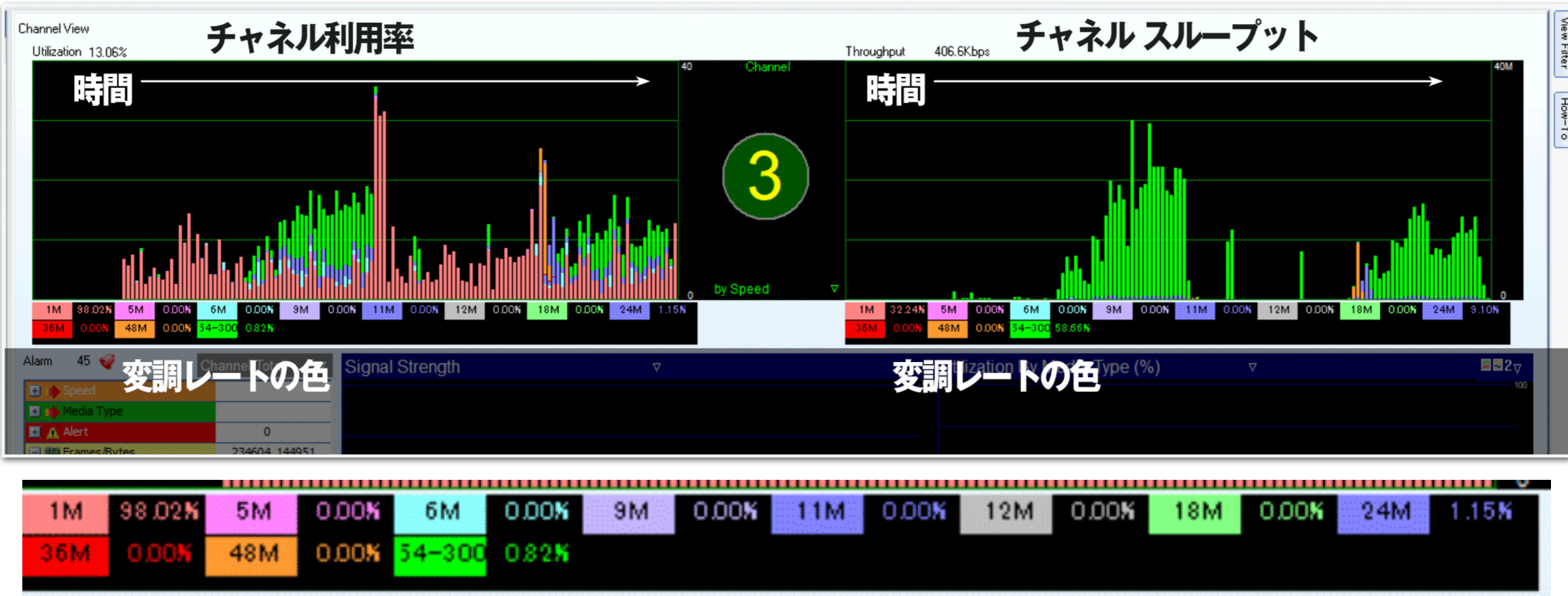


# Wi-Spy + Chanalyzer の例



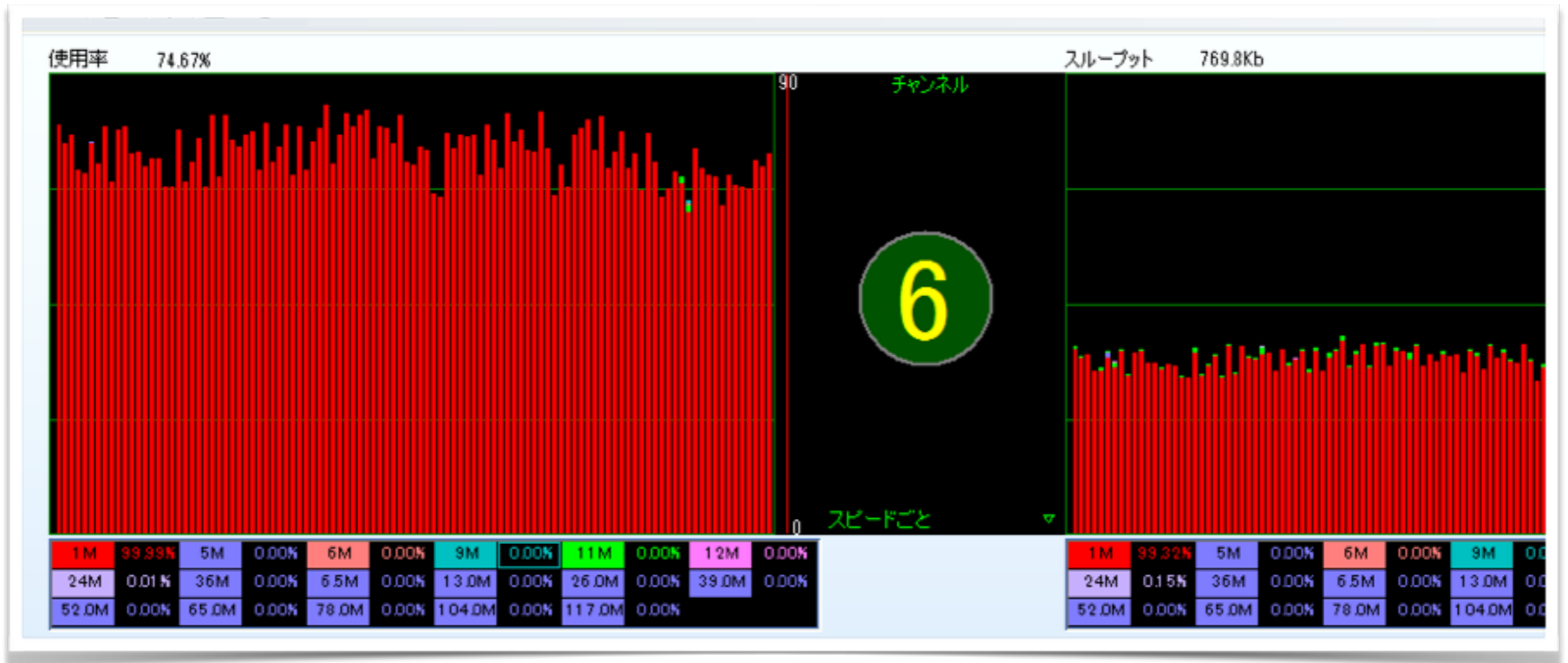
⚠️ 2.4GHz帯では適切な間隔をあけて(ch 1, 6, 11 など)チャンネル割当をすべきだが、そうになっていない状態

# AirMagnet WiFi Analyzer の例



あるチャンネルにおいて、どれくらいの変調レートでどれくらいのアertimeを占有しているか(左)、その結果のスループット

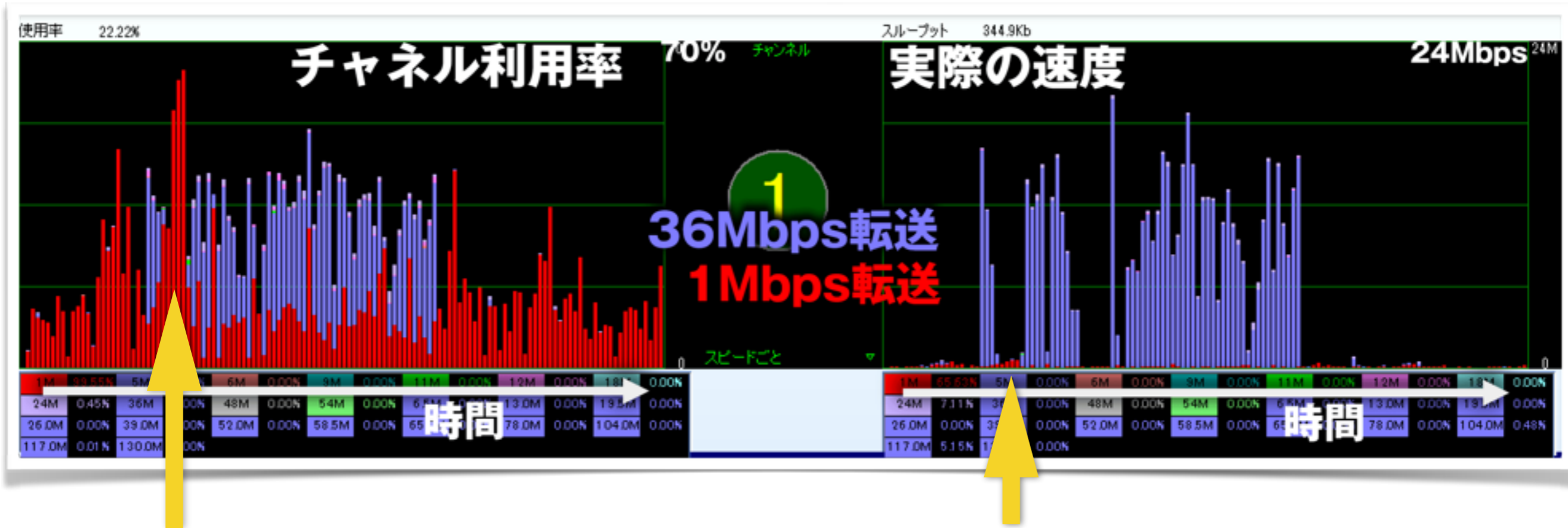
# 遅い端末がいる状態ってどんなの？



某所 改善前

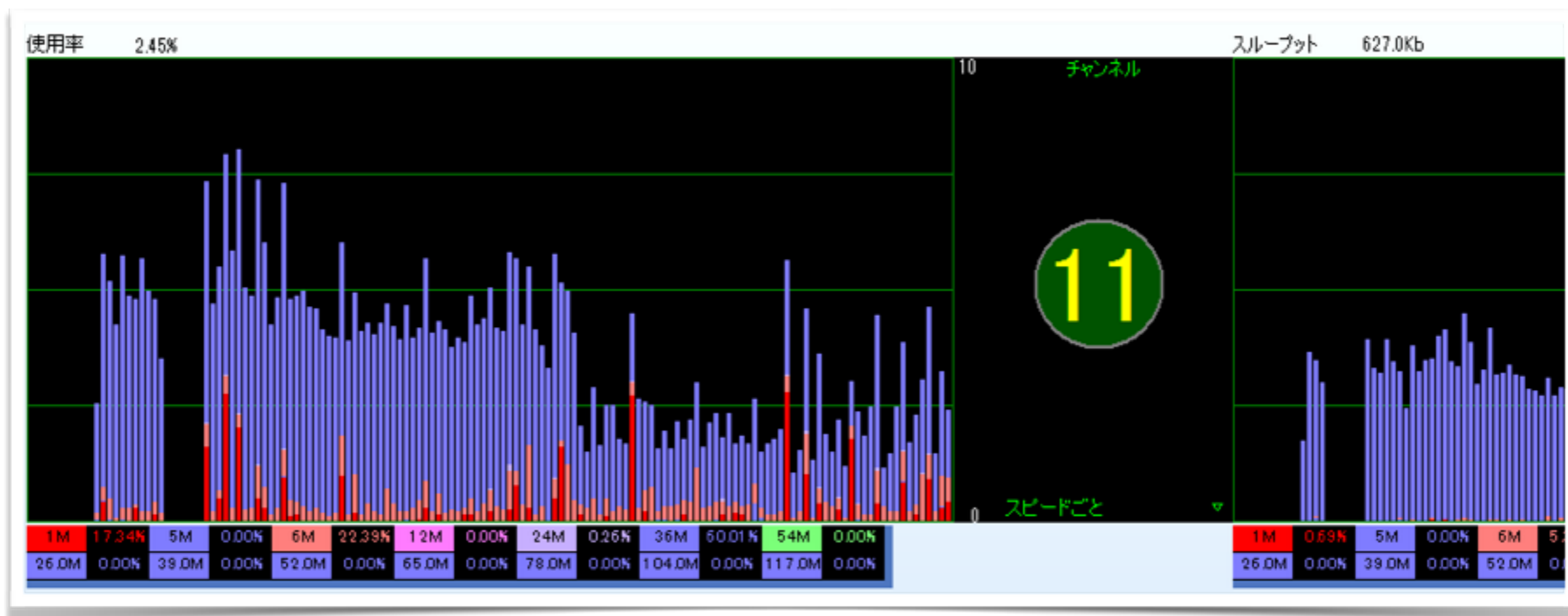
- チャンネルの使用率 74.67% (高すぎる)
- それなのにスループットが769Kbしか出ていない

# 遅い端末ってどれくらい邪魔？



- 横軸は同じ時間
- 矢印のタイミングで、赤(1Mbps)はチャンネル利用率をすごく上昇させているのに、スループットが全然出ていない

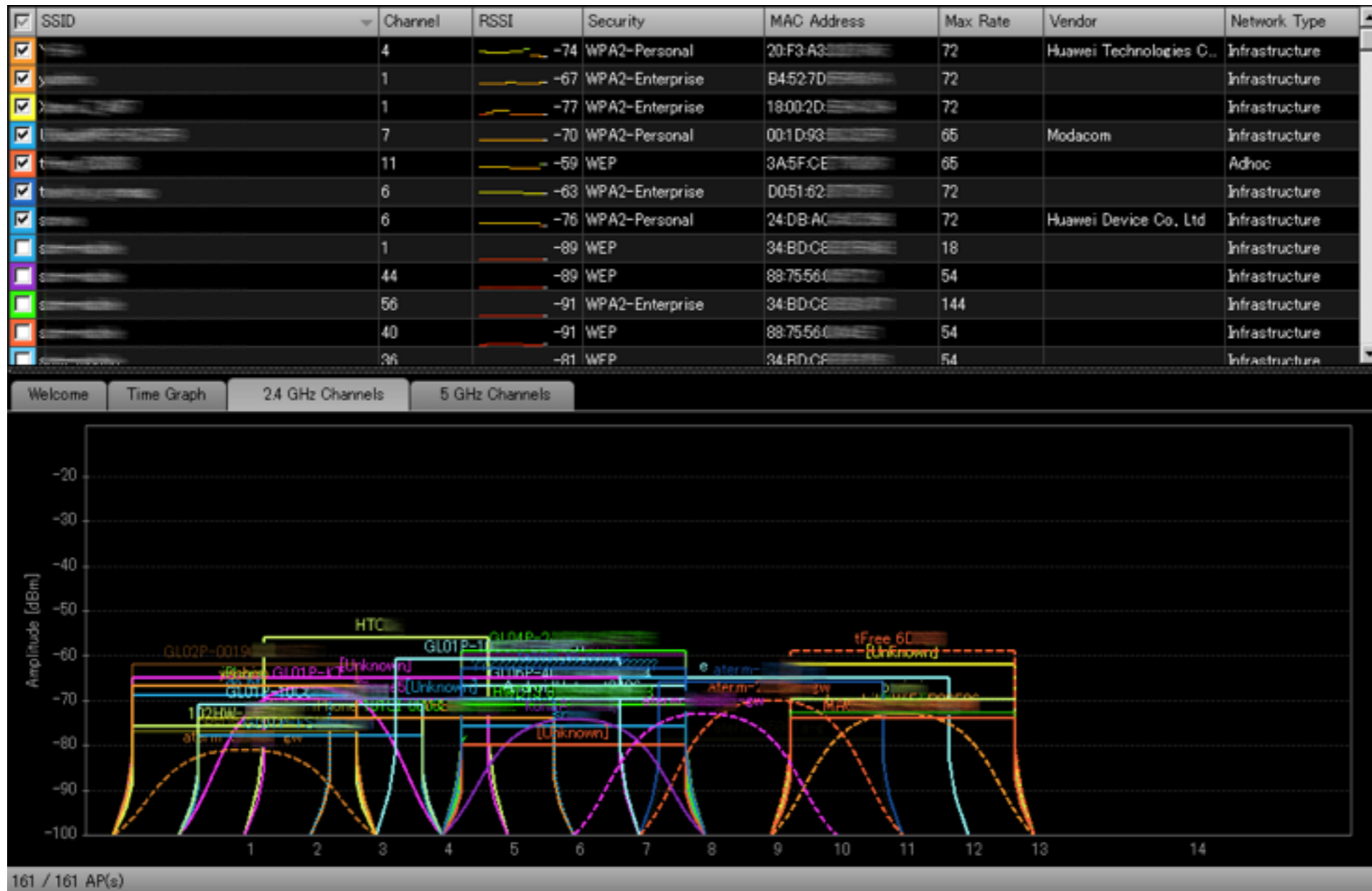
# 遅いデータレートを禁止するとどうなる？



某所 改善後

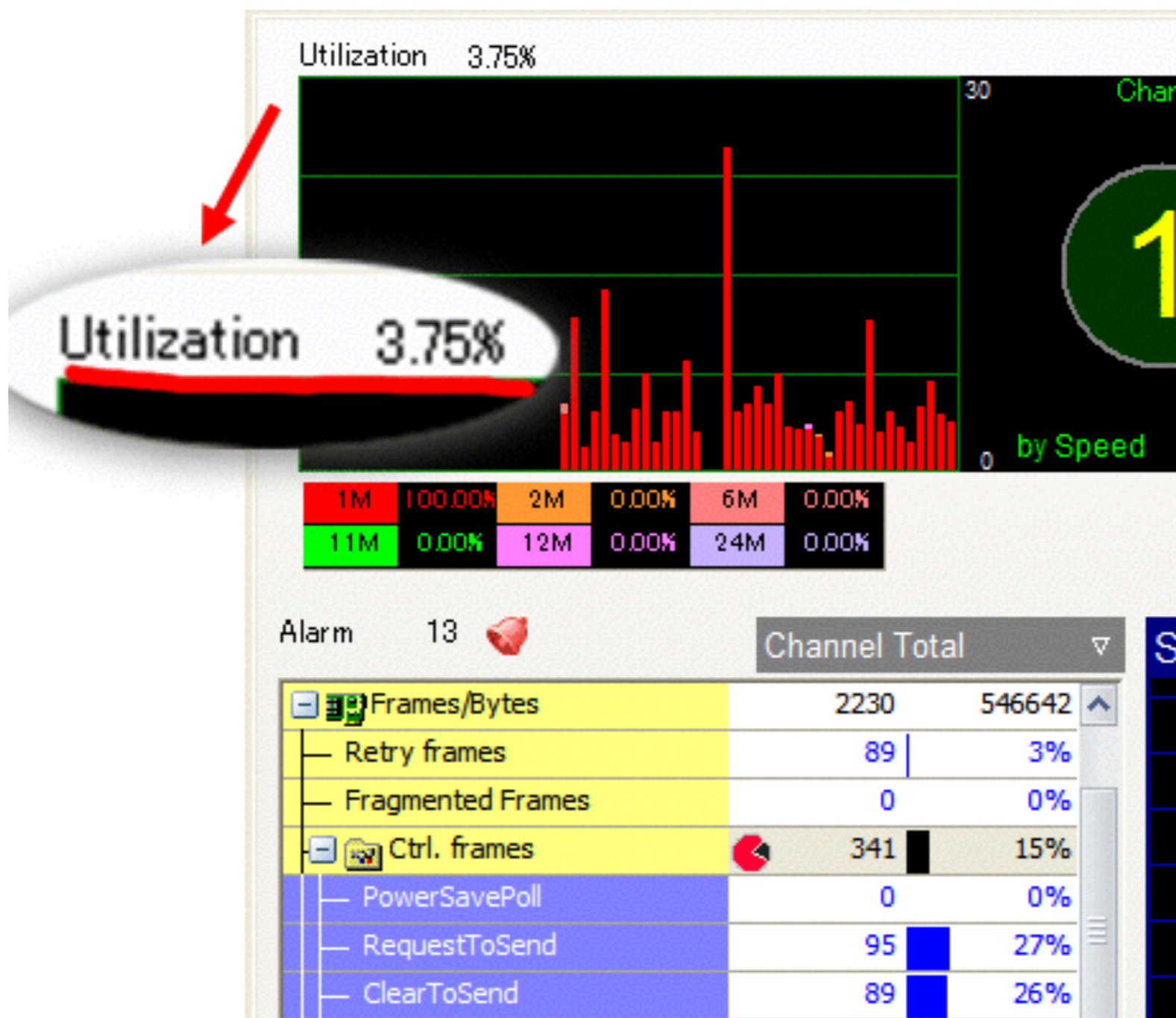
- 最低を36Mbpsに設定、それ未満を禁止
- チャンネル使用率を約75%→2.5%まで改善

# inSSIDer, Wi-Fi Analyzer などの簡易なソフト



結構混んでいるように見えるけど……

# inSSIDer, Wi-Fi Analyzer などの簡易なソフト



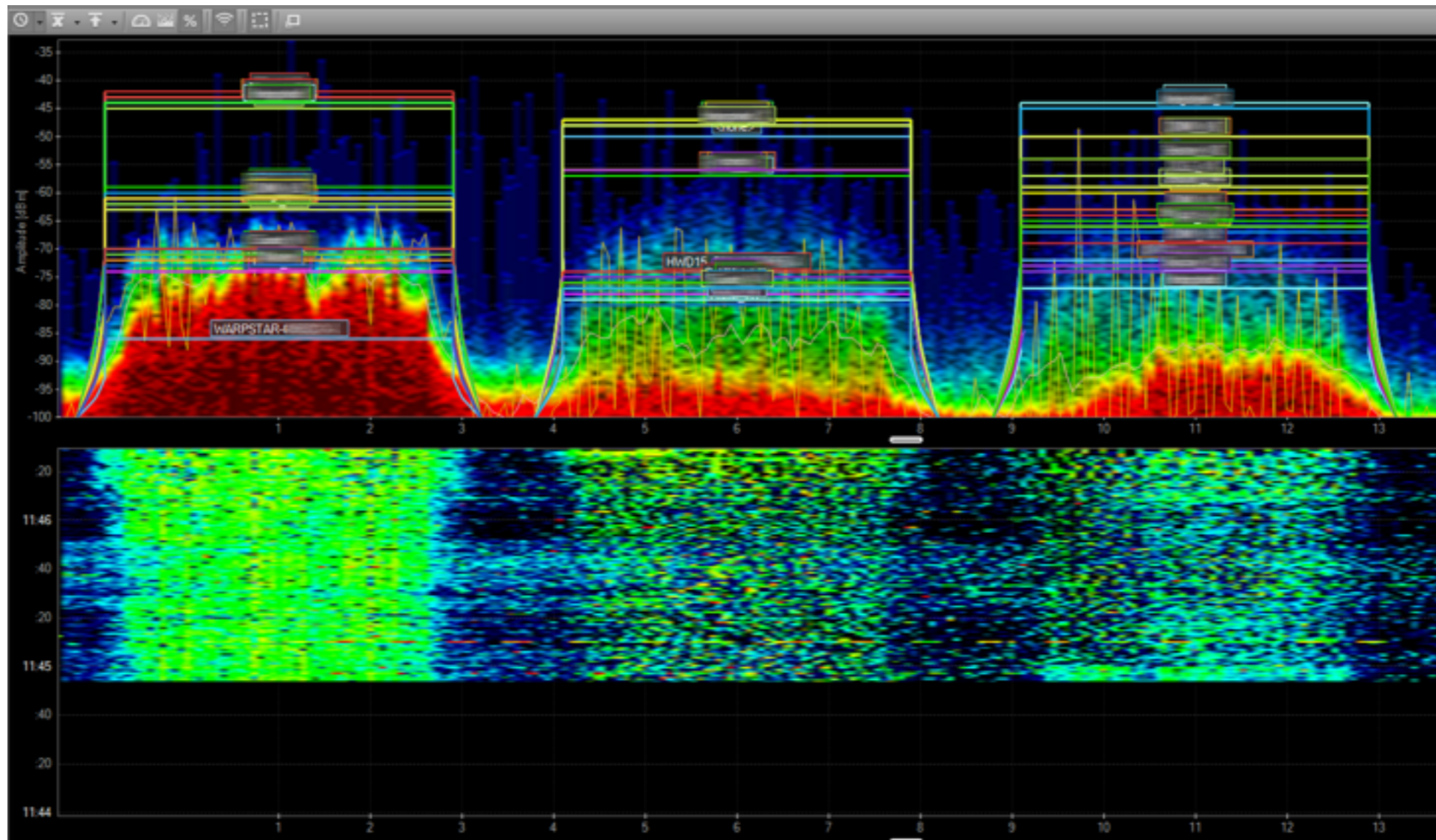
AirMagnetで見ると実はそれほどでもないことも…

# ビーコンとチャンネル利用率

- inSSIDerなどは「ここにAPがありますよ」というAPからのビーコンの電波強度だけを計測している
- 実際にそのAPがどれくらい使われているかは分からない。あまり使われていなければ影響は少ない



# どれくらい使われている？



WiSpy+Chanalyzer

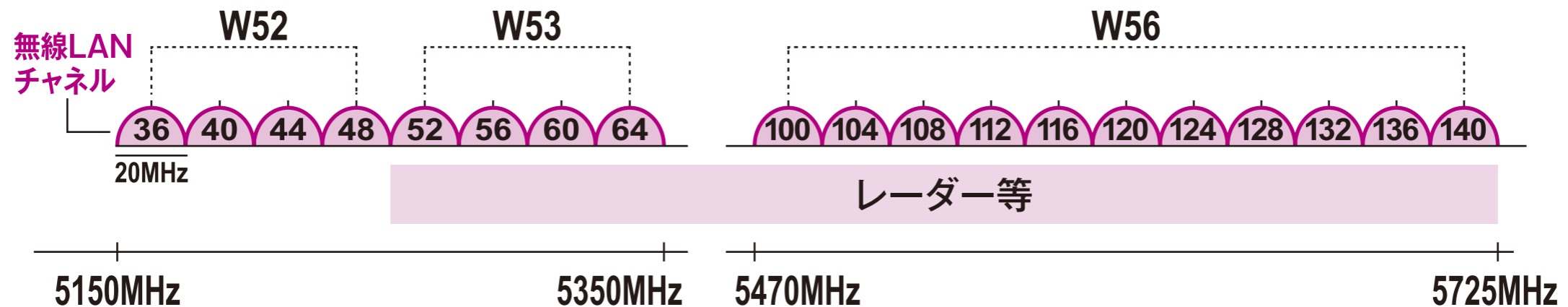
右端のチャンネル(11ch)に大量のAPが見えるが、  
利用率が高いのは左端の1ch

# ビーコンとチャンネル利用率

- PCのソフトだけでは無線LANの状況を正確に把握することは困難
- でも、APがたくさん存在するということは、混雑している可能性もそれなりに高いかもしれない

# DFS

レーダーの電波が存在したら送信してはいけない



- 5GHz帯には先客である気象レーダーがあるため、レーダーがいたら別のレーダーがないチャンネルに変更する義務がある
- レーダーがないことを最低1分間は確認する義務があり、1分以上何も送信できなくなるため、接続が途切れる原因となる
- 802.11a, 20MHz幅で使っていたときはチャンネルに余裕があったが、チャンネルボンディングによってバンド幅を広く使うようになり、DFSの影響を受けやすくなった
- 最近の製品ではレーダー波が検出されたらチャンネルボンディングをフォールバックして縮退しつつ停波は避けるようになっていたり、レーダー波を検出する前から他のチャンネルをスキャンしておき、できるだけ停波しないでチャンネルを変更する技術が用いられている

# DFSの頻度

```
Nov 01 00:03:48 srv1234-vm001-rsyslogd snmptrapd[1347]: 2017-11-01 00:03:48 <UNKNOWN>
[UDP: [10.1.1.1]:56575->[10.1.1.2]:162]:#012DISMAN-EXPRESSION-MIB::sysUpTimeInstance
= Timeticks: (2377551800) 275 days, 4:18:38.00#011SNMPv2-MIB::snmpTrapOID.0 = OID:
SNMPv2-SMI::enterprises.14179.2.6.3.81#011SNMPv2-SMI::enterprises.14179.2.2.1.1.1.0 =
Hex-STRING: A0 E0 AF 00 00 00 #011SNMPv2-SMI::enterprises.14179.2.2.2.1.1.0 =
INTEGER: 1#011SNMPv2-SMI::enterprises.14179.2.2.2.1.4.0 = INTEGER: 52#011SNMPv2-
SMI::enterprises.14179.2.2.1.1.3.0 = STRING: "AP_NAME"
```

AP(WLC)のログからDFSが起きたチャンネルとAP名を拾って、



チャンネルごとに集計

AP(=場所)ごとにも偏りがあり、  
それも役立つ

awk とエクセルなど、道具はなん  
でもいい

# DFSの頻度



[https://twitter.com/n\\_kane/status/935742496524656645](https://twitter.com/n_kane/status/935742496524656645)



DFS対象レーダー局マップ (by @n\_kane)

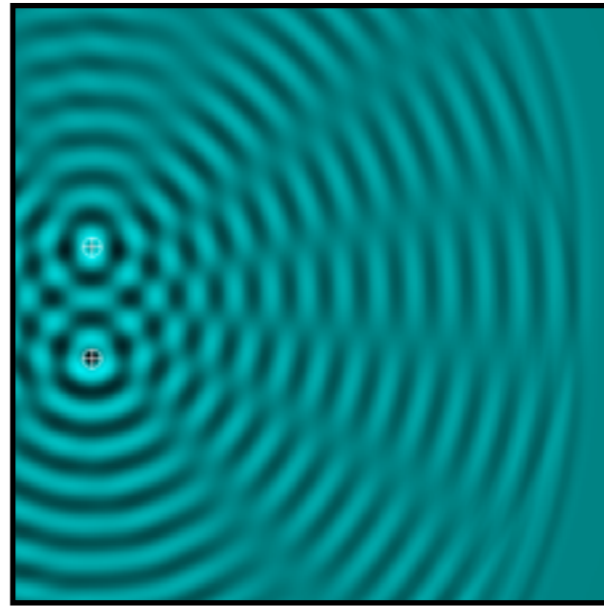
[https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1HN0HXt1HLAMVCib2YfaTzyM\\_hLMOQVjS](https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1HN0HXt1HLAMVCib2YfaTzyM_hLMOQVjS)

# MIMO

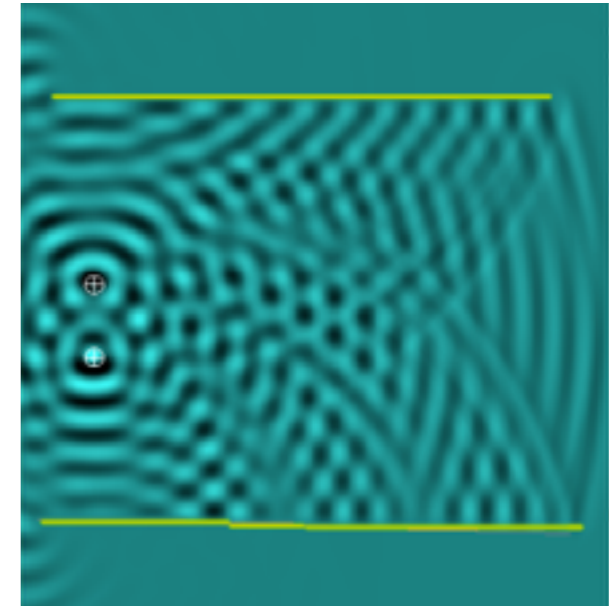
電波を波紋としてイメージしてみる



送信アンテナ1つ



送信アンテナ2つ



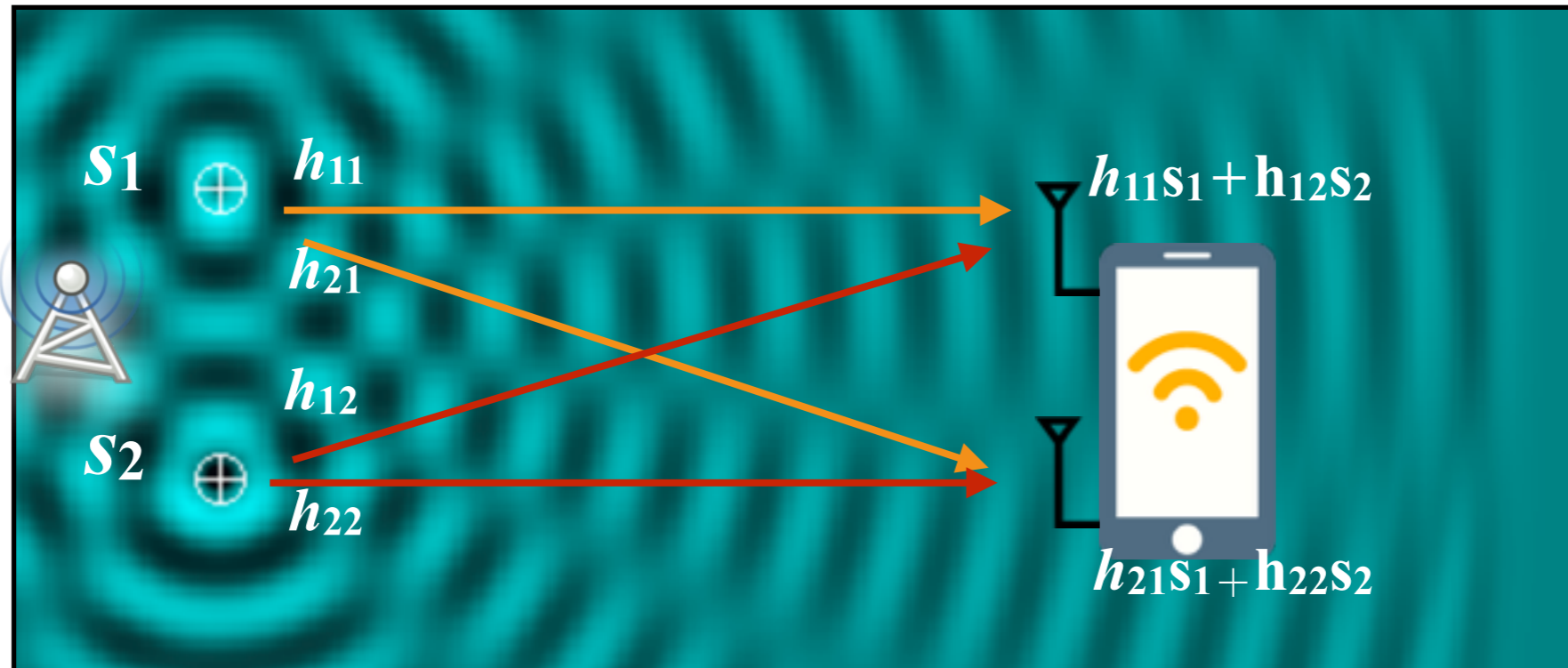
送信アンテナ2つ(壁あり)

ひとつのチャンネルにて、複数のアンテナを使用して  
複数のストリームを同時に送信するのがMIMO

でも同じチャンネルで同時に通信できるのは1:1だったのでは…?  
どうして同じチャンネルで複数送信できるのか?

# MIMO

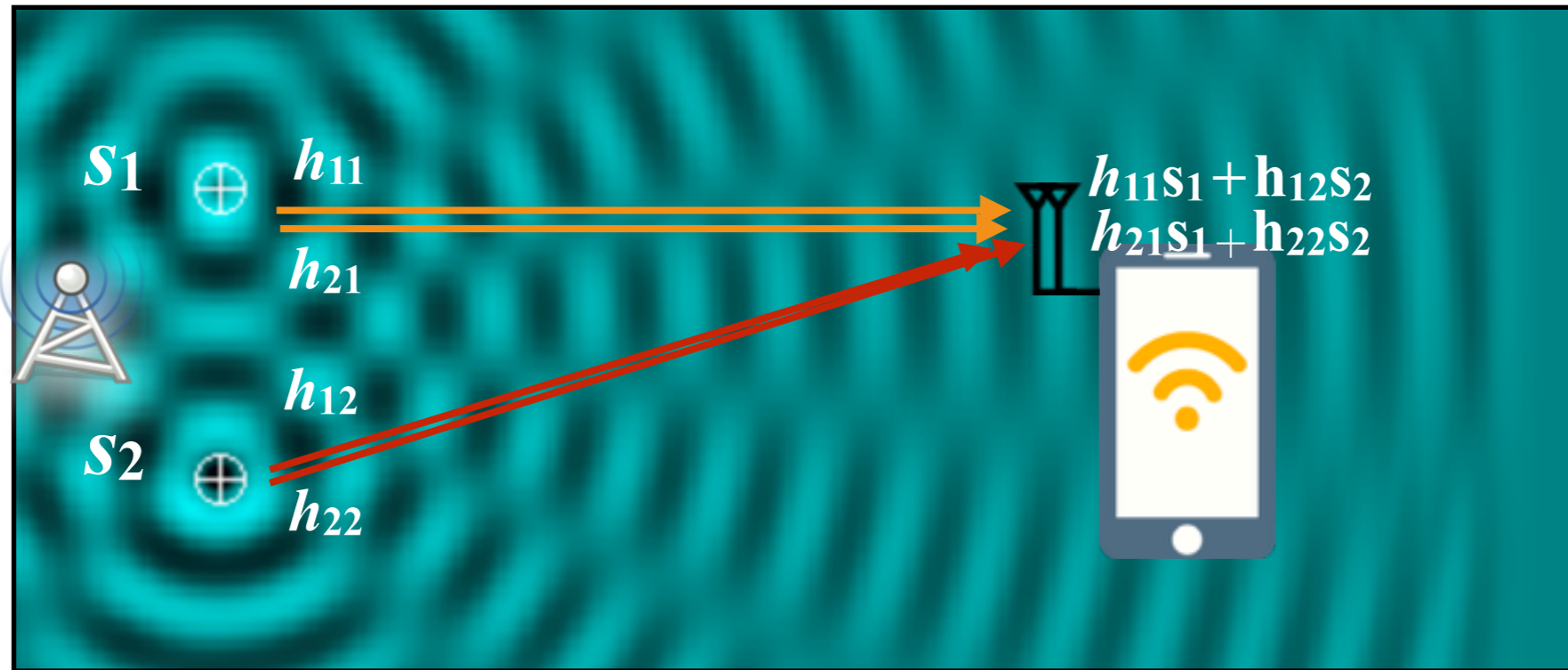
2つの信号( $s_1, s_2$ )を同時に送受信したい



1. 受信側のアンテナでは  $s_1, s_2$  が混ざって受信される
2. 伝送路が4つあり、その応答を調べておく
3. 伝送路が既知なら  $s_1, s_2$  に関する連立方程式を解ける
4. 端末で  $s_1, s_2$  が分離できる
5. 帯域幅が2倍になった、めでたし

# MIMO

もしアンテナが物理的に離れていなかったら？ (伝送路の空間相関高)



## アンテナが近いと

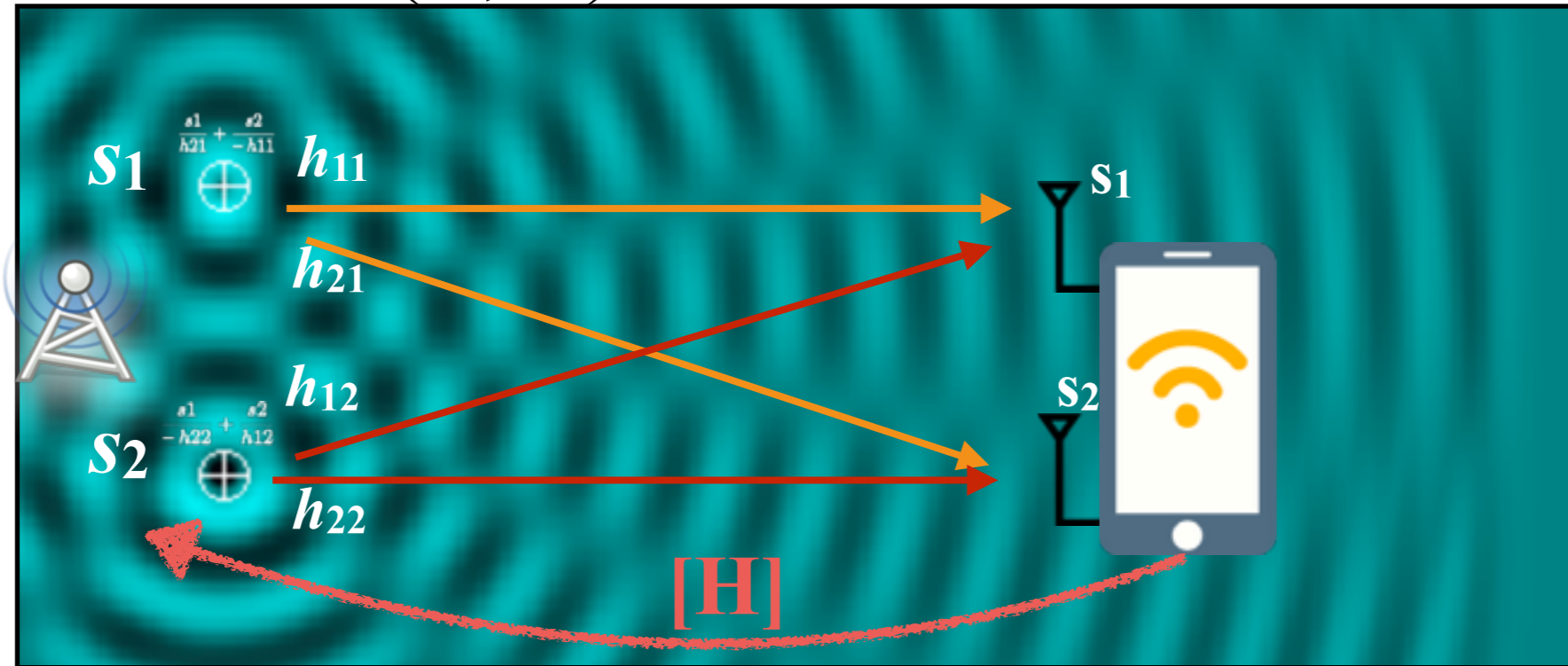
- 相互に回り込みが発生して分離が難しくなり、特性が劣化する
  - $0.5\lambda$  くらいは離したい
- でもアンテナを離すと端末の小型化が難しくなる
  - MIMOストリーム数(アンテナ数)を増やすとさらに小型化が難しい

そもそも分離の計算がけっこう大変なのですよ…それならば…?



# MIMO

2つの信号( $s_1, s_2$ )を同時に送受信したい その2

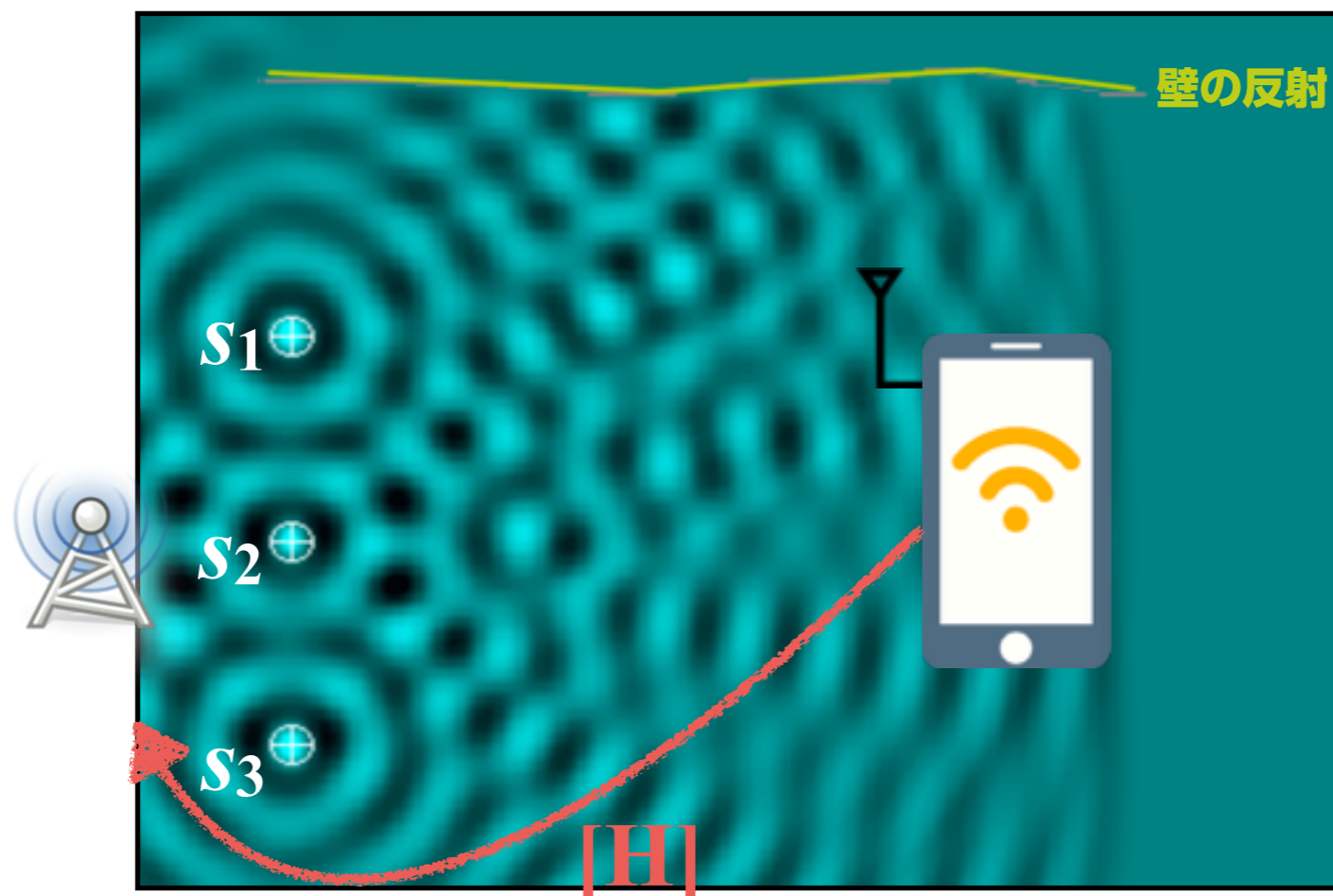


1. 伝送路が4つあり、端末はその応答を調べてAPに送り返す
2. APは伝送路の応答がわかっているので、端末のそれぞれの受信アンテナで  $s_1, s_2$  が分離済みになるように\*、データ送信前に事前加工してから送信する
3. 端末側で分離の計算をしなくてよいので省電力化に有利

\*端末のアンテナのうち、受信対象でないほうのアンテナで電力が最小(null)になるように加工する

# ビームフォーミング

干渉や反射の合成を味方につけて波が強くなるところを作る

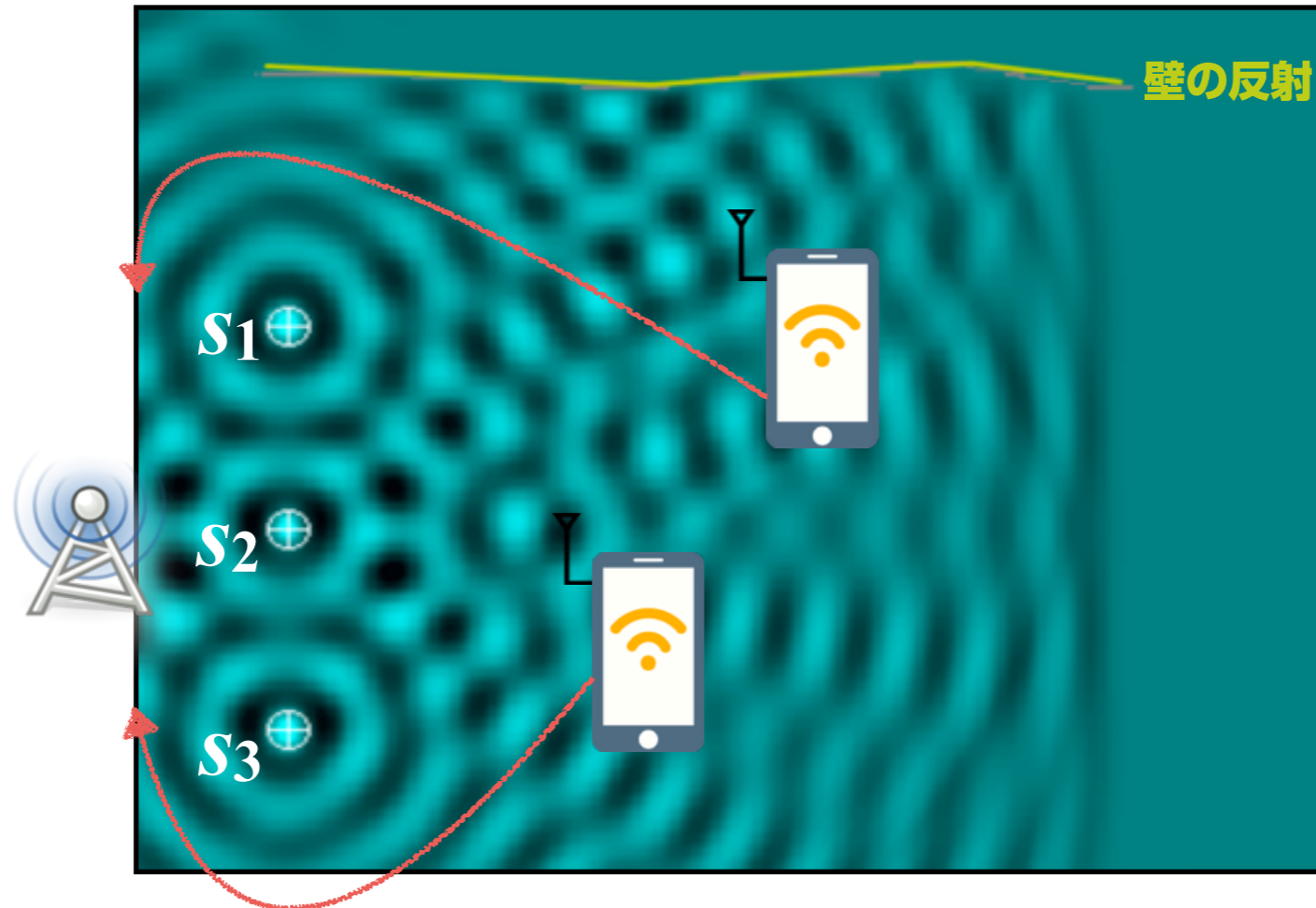


1. 伝送路が多数あり、端末はその応答を調べてAPに送り返す
2. APは伝送路の応答がわかっているので、端末のそれぞれの受信アンテナで  $s$  が最大の電波強度になるように事前加工してから送信する\*  
干渉や壁の反射で波の濃淡をうまく作って、端末の存在する場所の波が強くなるようにする

\*MIMOのように複数の送信機から同時送信するのではなく、アレイアンテナをアナログ的にスイッチングして指向性を作る方法もあります。

# MU-MIMO

ビームフォーミングで空いた地点、空いたなら使ってしまう



1. 複数いる端末はその応答を調べてAPに送り返す
2. APはそれぞれのフレームが、宛先の端末で電波強度最大になり、宛先でない端末では最小になるように事前加工する
3. 事前加工したフレームを同時に複数宛に送信する
4. 端末はひとつずつACKを返す

**実際に見てみましょう**

**demo**

# おまけ

# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた

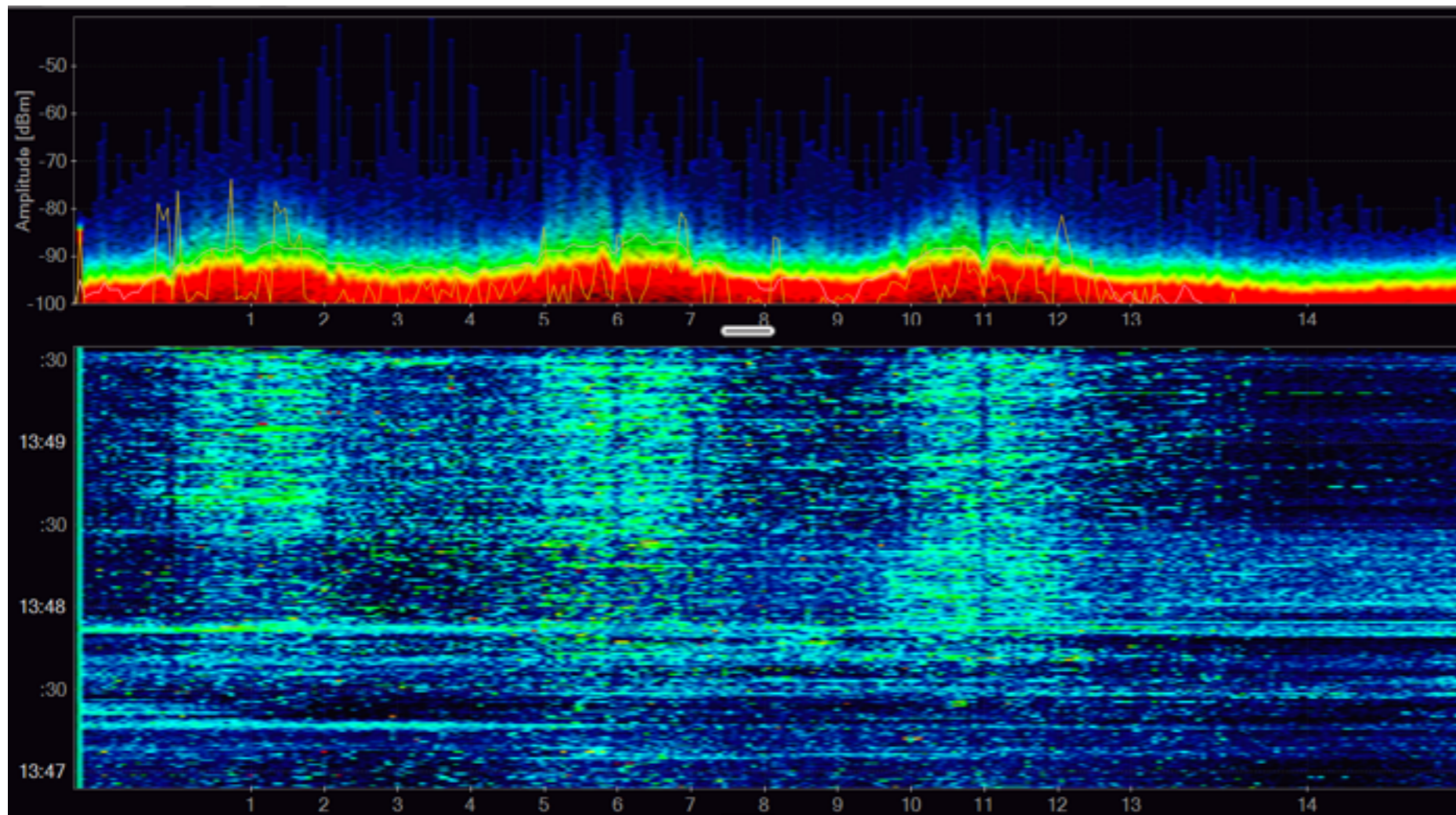


**metageek Wi-Spy**

# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた

<https://www.youtube.com/watch?v=ACEFav1c908>

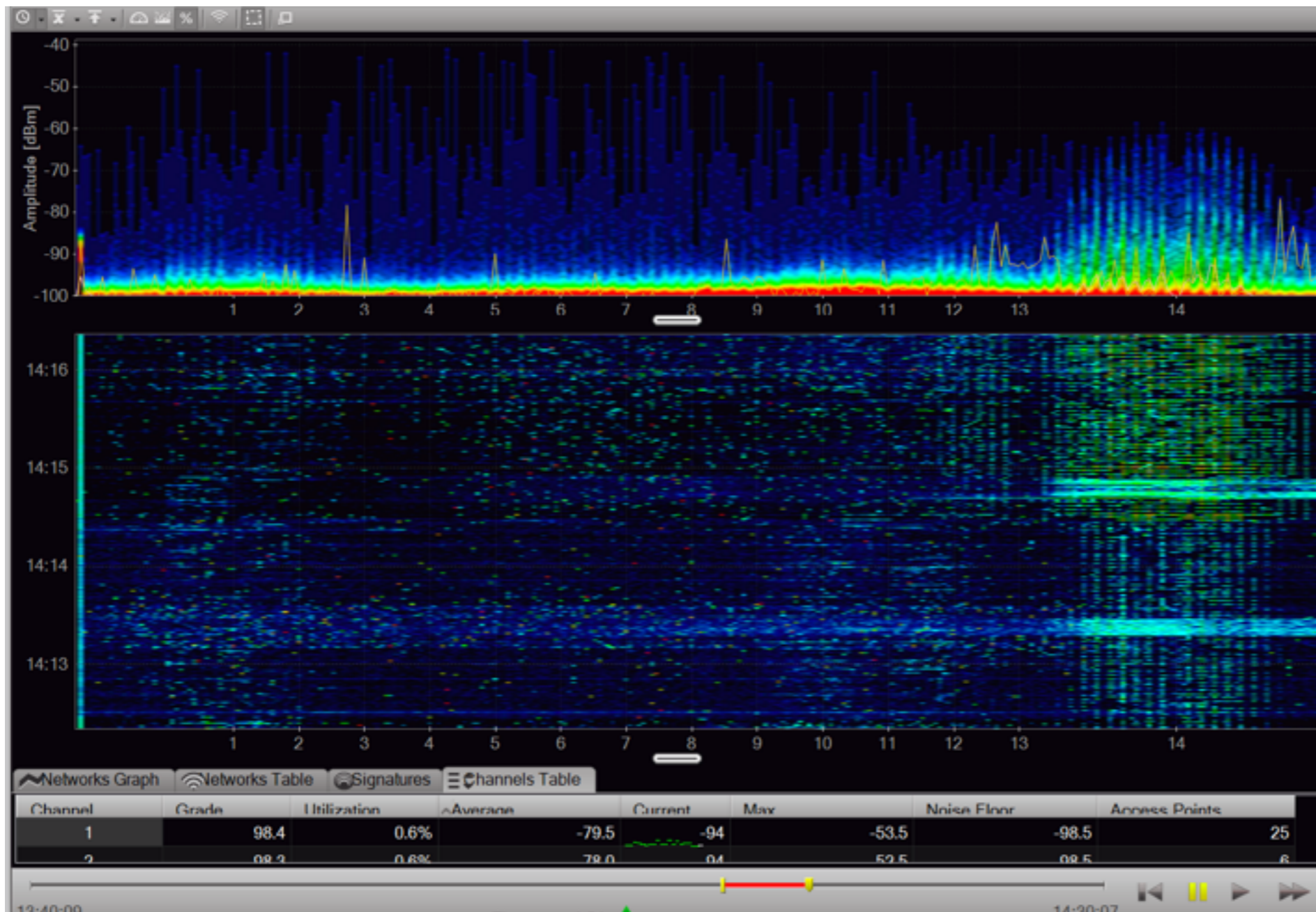
# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた



無線LANの電波の例  
チャンネルの中央に凹み

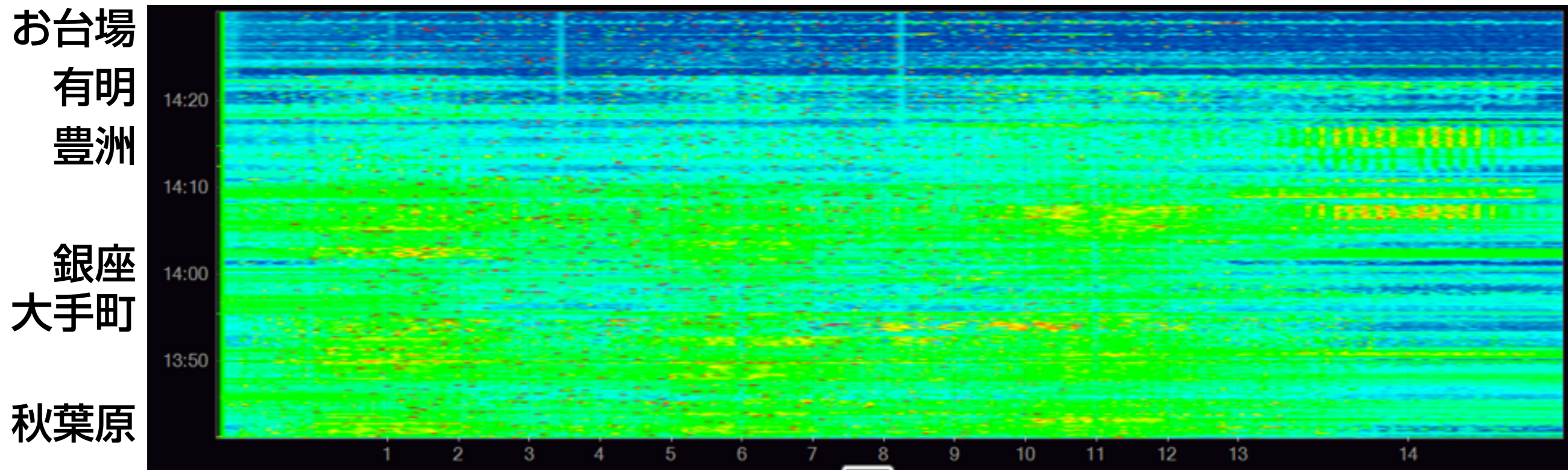


# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた



無線LAN以外の  
データ通信か

# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた



秋葉原～神田～大手町～銀座～豊洲～有明～お台場

繁華街から海へ向かうにつれ電波が減っていく

# オフィス街と郊外を測定しながら走ってみた

- 無線LAN**ではない**と思われる電波がかなり多い
- 繁華街では少し移動しただけで状況が大きく変わる
  - 一般的に「こうなっている」とは言いにくい
- 無線LANの電波だけを拾うツールでは分からない

**\_\_END\_\_**