

---

# 将来の無線アクセスネットワーク ～今のままでは周波数が足りない！～

金子 めぐみ

国立情報学研究所  
アーキテクチャ科学研究系  
2018年10月24日

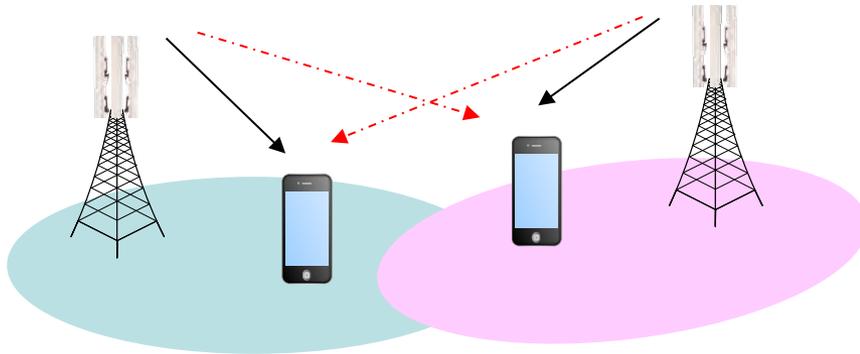
- 無線通信の背景
  - 既存システムの問題
  - 次世代無線通信システムへの要求
- 無線通信路の概要
- 無線資源割当て・無線アクセス法の基礎
- 無線資源利用効率向上を目指した最新の研究動向
  - 非直交無線資源割り当て(NOMA)
  - クラウド・Fog無線アクセスネットワーク
- まとめ

---

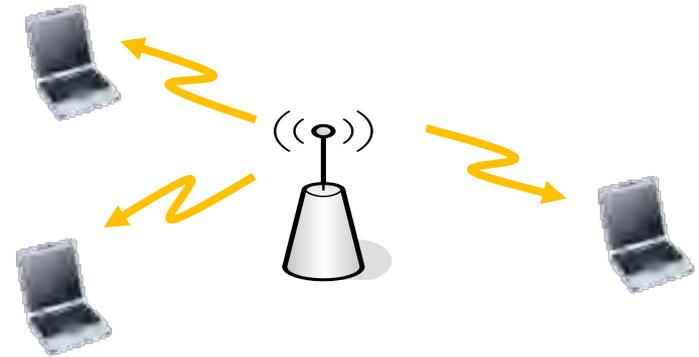
# 無線通信の背景

# 様々な無線通信システム

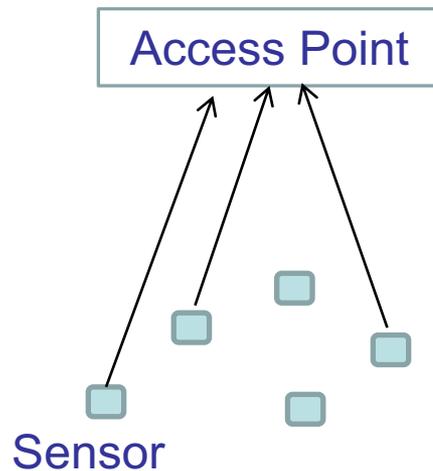
携帯電話の移動体通信システム:  
4G, 5G



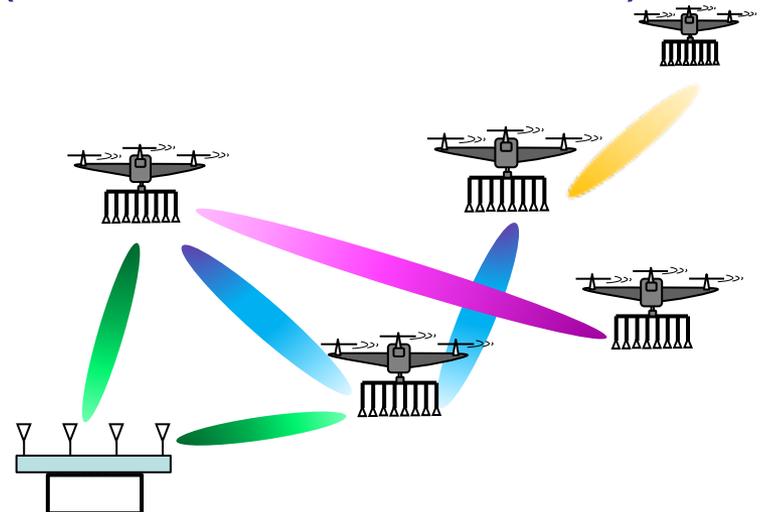
無線LANシステム



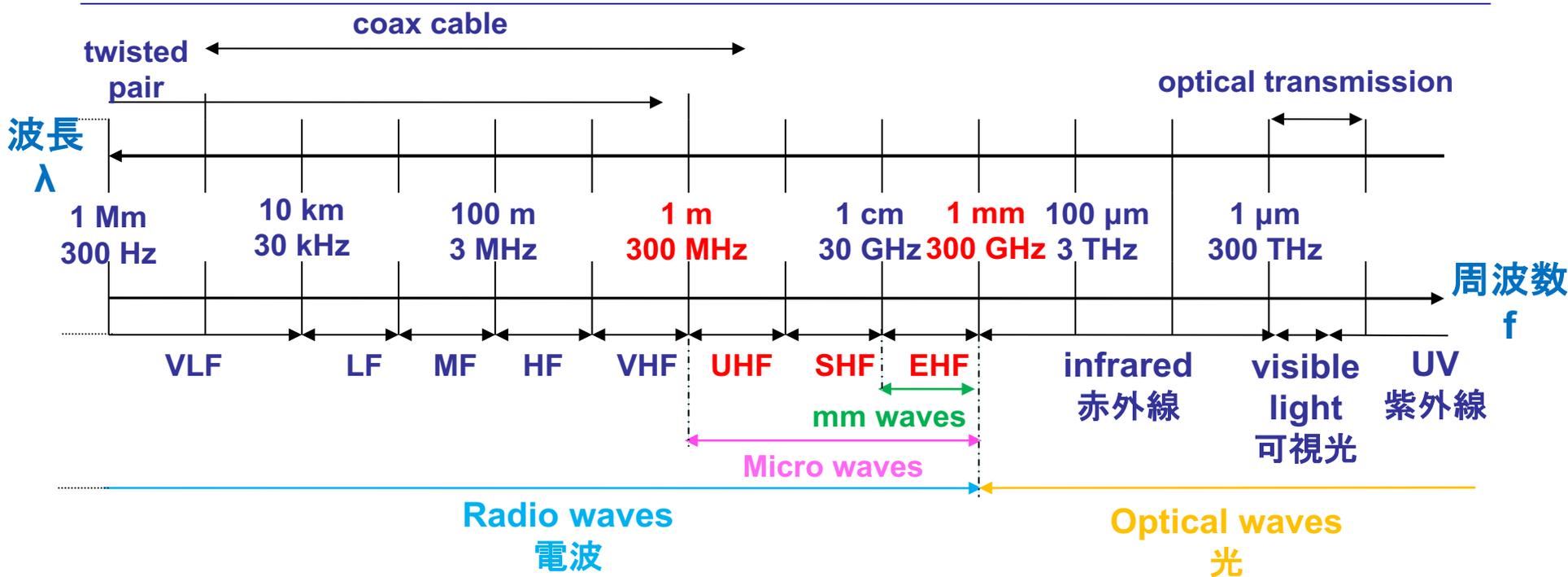
M2M・IoT無線センサーネット  
ワーク



新しいシステム  
(ドローンネットワーク等)



# 周波数スペクトル



Radio waves  
電波

Optical waves  
光

VLF = Very Low Freq.

LF = Low Freq.

MF = Medium Freq.

HF = High Freq.

VHF = Very High Freq.

UHF = Ultra High Freq.

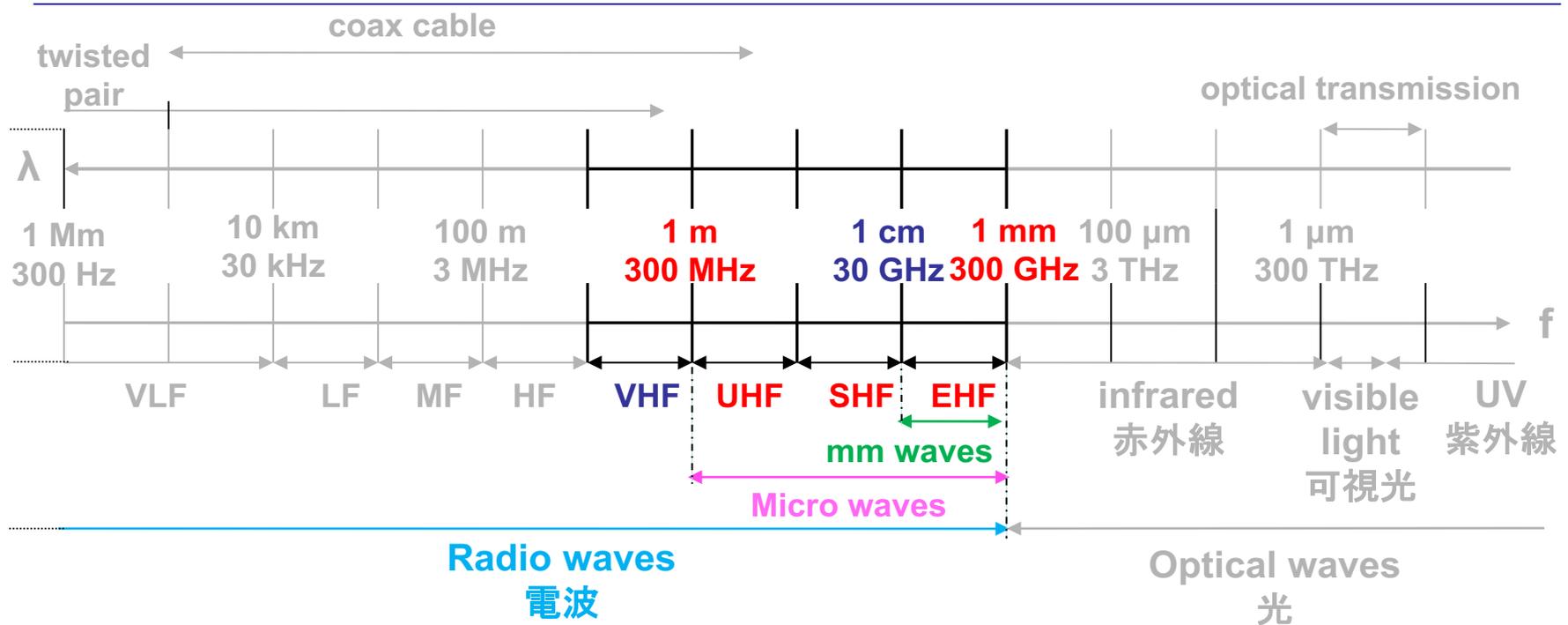
SHF = Super High Freq.

EHF = Extra High Freq.

UV = Ultraviolet Light

- 光速度:  $c=3 \times 10^8$  m/s
- 波長  $\lambda$  と周波数  $f$  の関係式:  $\lambda = c/f$
- 無線通信: 電波を使って実現
  - 赤外線以下(300GHz以下)
  - マイクロ波: 300MHz~300GHz (1m~1mm)
  - ミリ波(EHF): 30~300GHz (1cm~1mm)

# 周波数スペクトル



VLF = Very Low Freq.  
LF = Low Freq.  
MF = Medium Freq.  
HF = High Freq.  
VHF = Very High Freq.  
UHF = Ultra High Freq.  
SHF = Super High Freq.  
EHF = Extra High Freq.  
UV = Ultraviolet Light

- 既存の無線通信システム: VHF ~ SHF
  - 高い周波数 → アンテナ小型化
  - 無線通信に適した伝搬環境
- ミリ波(EHF): 5Gで検討
  - 未開拓: 大きな周波数資源
  - 著しい伝搬損失・障害物に弱い・天候に依存

# 周波数割当ての規定

- 周波数は有限な資源
- 国際電気通信連合:ITU
  - 各システムが使用する周波数帯を決定
- 各国の機関が無線通信事業の規制を監督
  - 日本:総務省(MIC)
  - 米:FCC
  - ヨーロッパ:CEPT

**ITU** = International

Telecommunications Union

**MIC** = Ministry of Internal Affairs and  
Communications

**FCC** = Federal Communications  
Commission

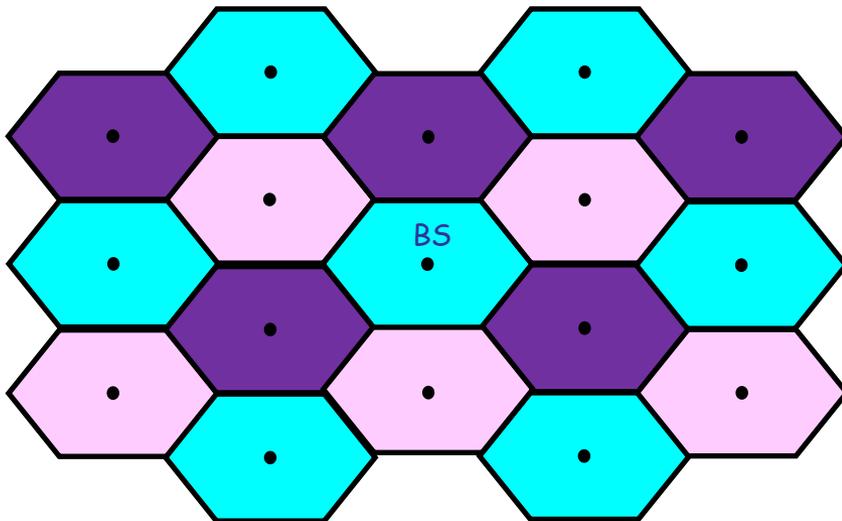
**CEPT** = European Conference for  
Posts and Telecommunications



# 周波数再利用→干渉問題

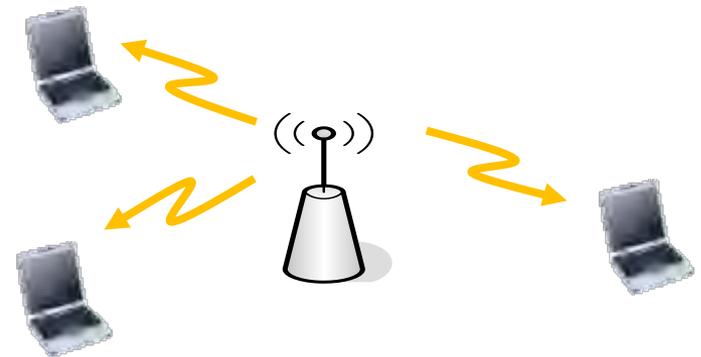
- セル間・システム間で同じ周波数を同時に利用

ライセンスバンド  
(免許必須周波数帯)  
セルラーシステム



アンライセンスバンド  
(免許不要周波数帯)

ISM Industry Science Medical  
WLAN, Bluetooth等



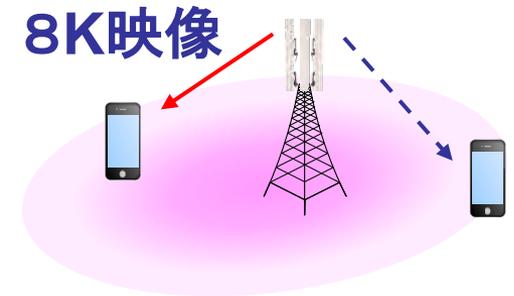
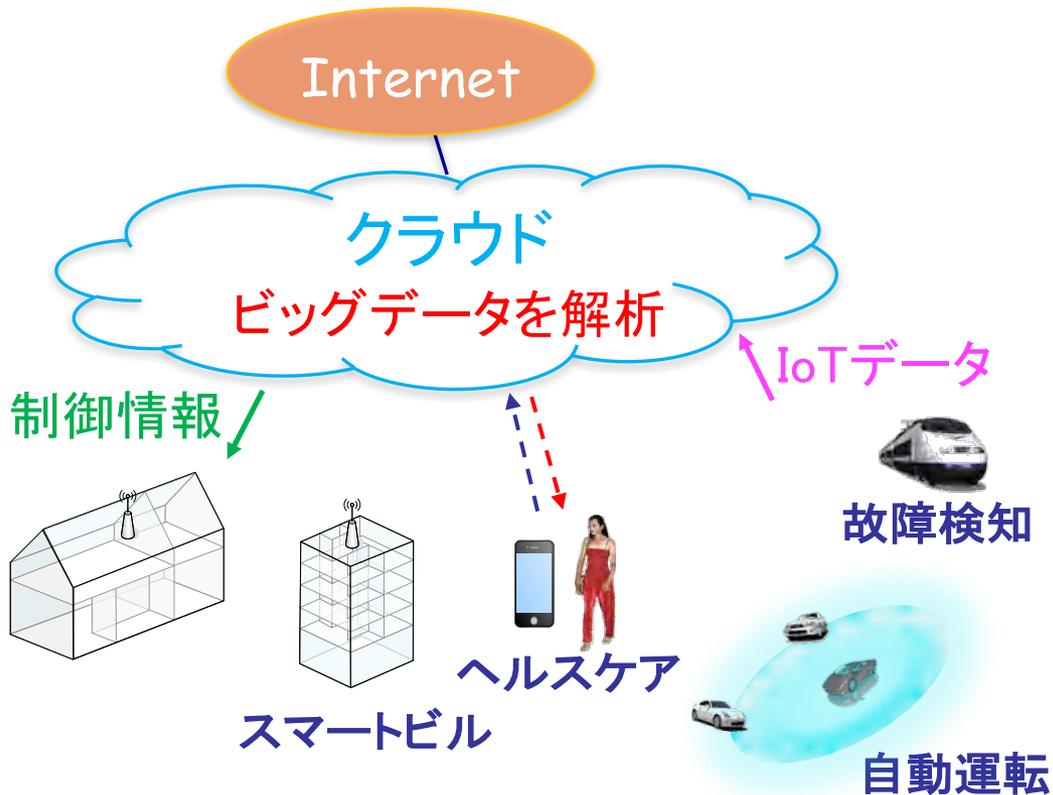
周波数再利用:セル間・システム間の干渉が生じ、  
システム特性(伝送速度等)の劣化を及ぼす

# 将来の様々なサービス

- AIやビッグデータを活用

- 超高速ブロードバンド通信

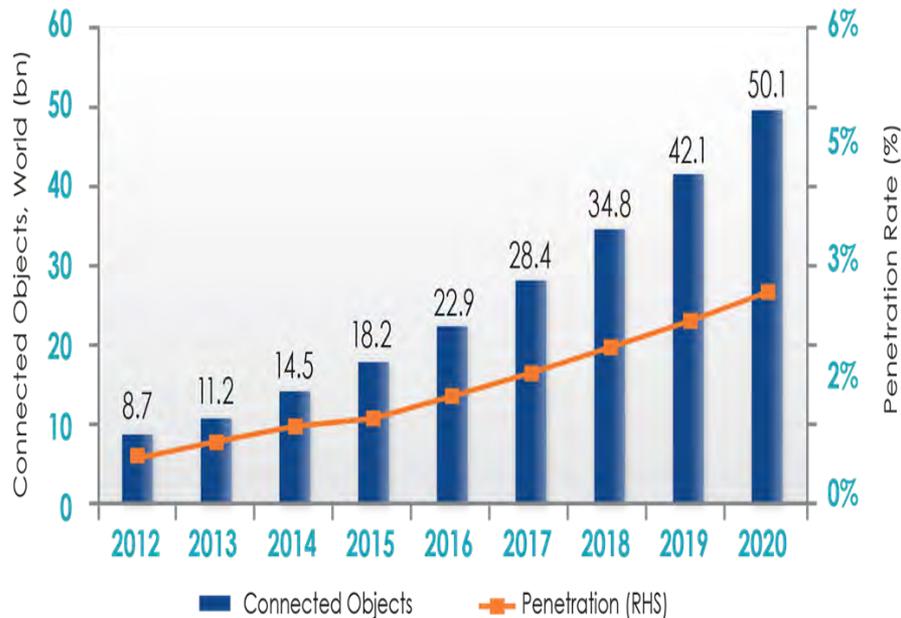
- 広い帯域幅
- 超高速伝送速度



AR (Augmented Reality)  
VR (Virtual Reality)

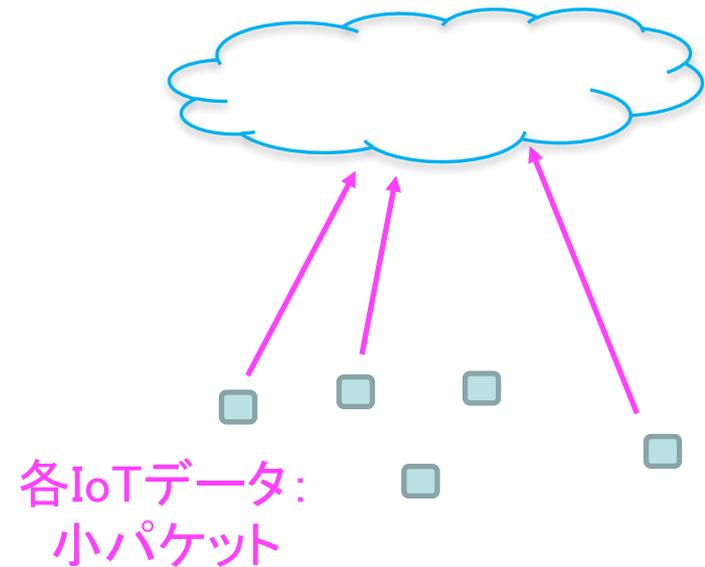
将来の情報ネットワークサービスの実現には  
より進んだ無線通信技術が必須

## 2020年： 500億のIoTデバイスの予測



Source: CCS

<https://web.stanford.edu/class/ee359/lectures.html>



x500億デバイス

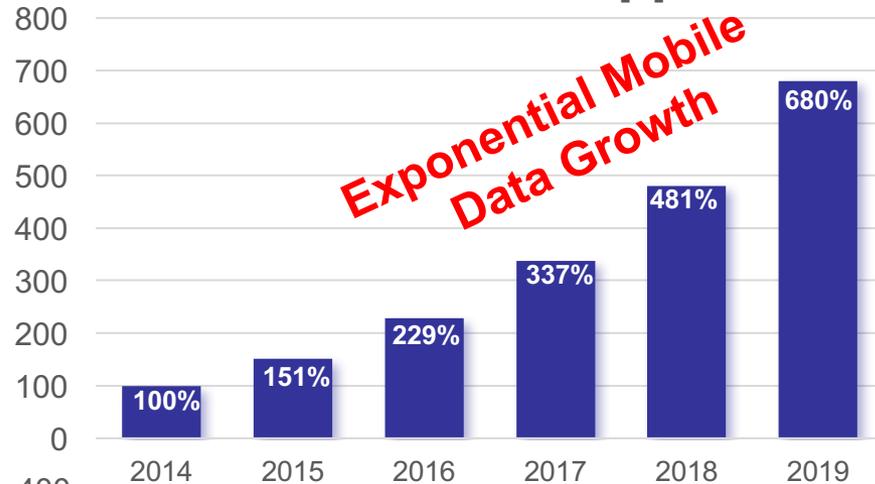
➡ 膨大なデータ量！

# 膨大なデータ通信量の増加

- 膨大な数のIoTデバイス
- 移動体通信システム加入者の増加

→ 指数的に無線データ量増加

Data Growth – Cisco [1]



深刻な無線資源不足：新たな無線通信技術が必須

無線通信システム全体の特性を支配する無線資源割当て・干渉制御を主に研究

[1] R. Pepper, "Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast: Mobile Data Traffic Update, 2014-2019 (Focus on U.S.)," Cisco, Feb. 2015

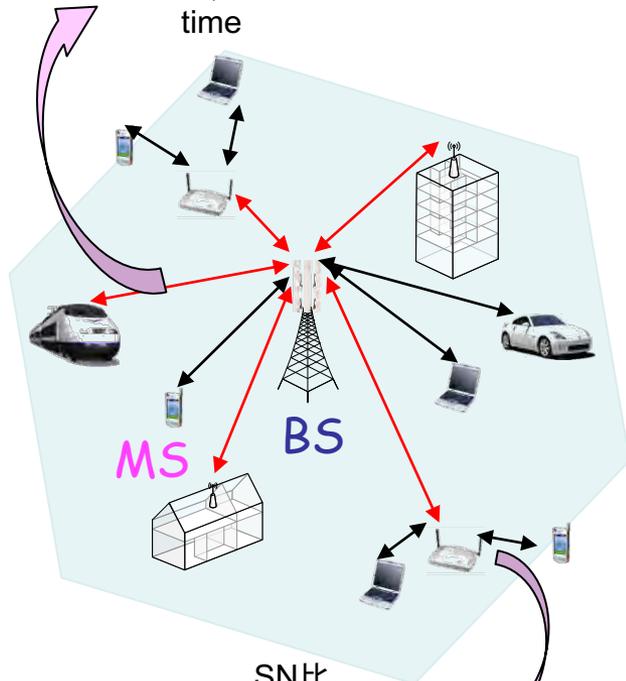
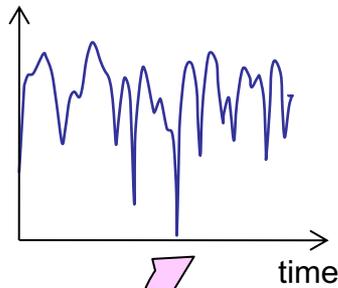
[2] The Brattle Group, "Substantial Licensed Spectrum Deficit (2015-2019): Updating the FCC's Mobile Data Demand Projections", prepared for CTIA The Wireless Association, June 2015

---

# 無線通信路の概要

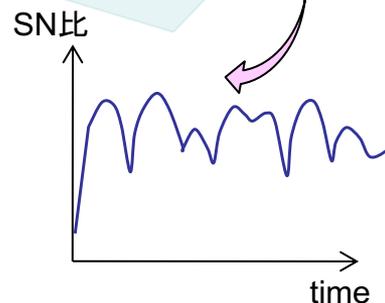
# 無線通信路による劣化

SN比: チャンネル品質



BS: 基地局

MS: 無線端末



- 無線通信路品質: 短時間 (ms 単位) で大幅にランダムに変動
- 不安定で劣化しやすい
  - 周波数選択制フェーディング・パスロス
  - Doppler現象
  - 干渉のランダムな変動
- 一般的に各ユーザチャンネルは独立的に変動する
- チャンネル変動の予測が難しい

# 無線伝搬路のモデル化

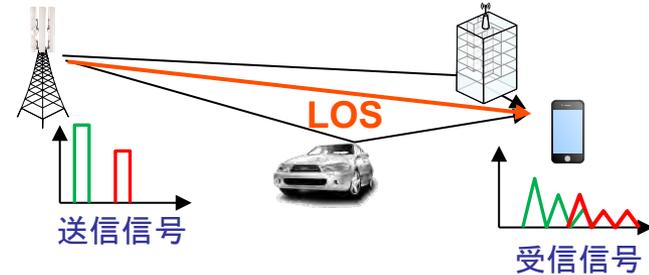
## ■ Large-scaleフェージング～10-100mスケールで変動

### – パスロス:

距離による劣化. ゆっくり変動

### – シャドーイング:

ビル等大きな障害物による遮断



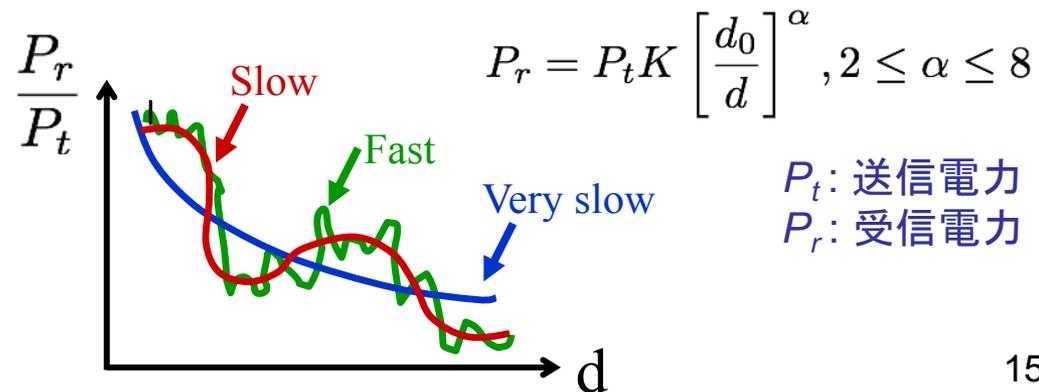
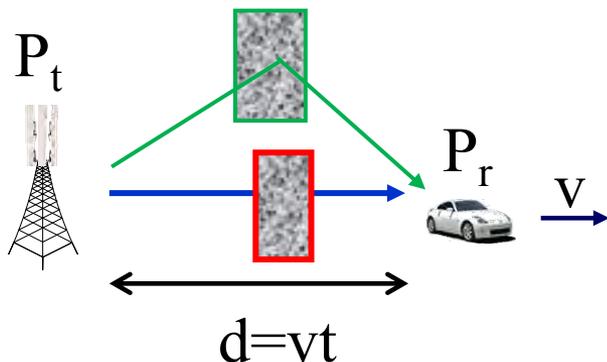
LOS (Line of Sight):  
直接パス

## ■ Small-scaleフェージング～波長 $\lambda$ のスケール

### – マルチパスフェージング:

複数経路からの信号の消極的・建設的な和

### – Dopplerスプレッド: 送受信端末のモビリティ

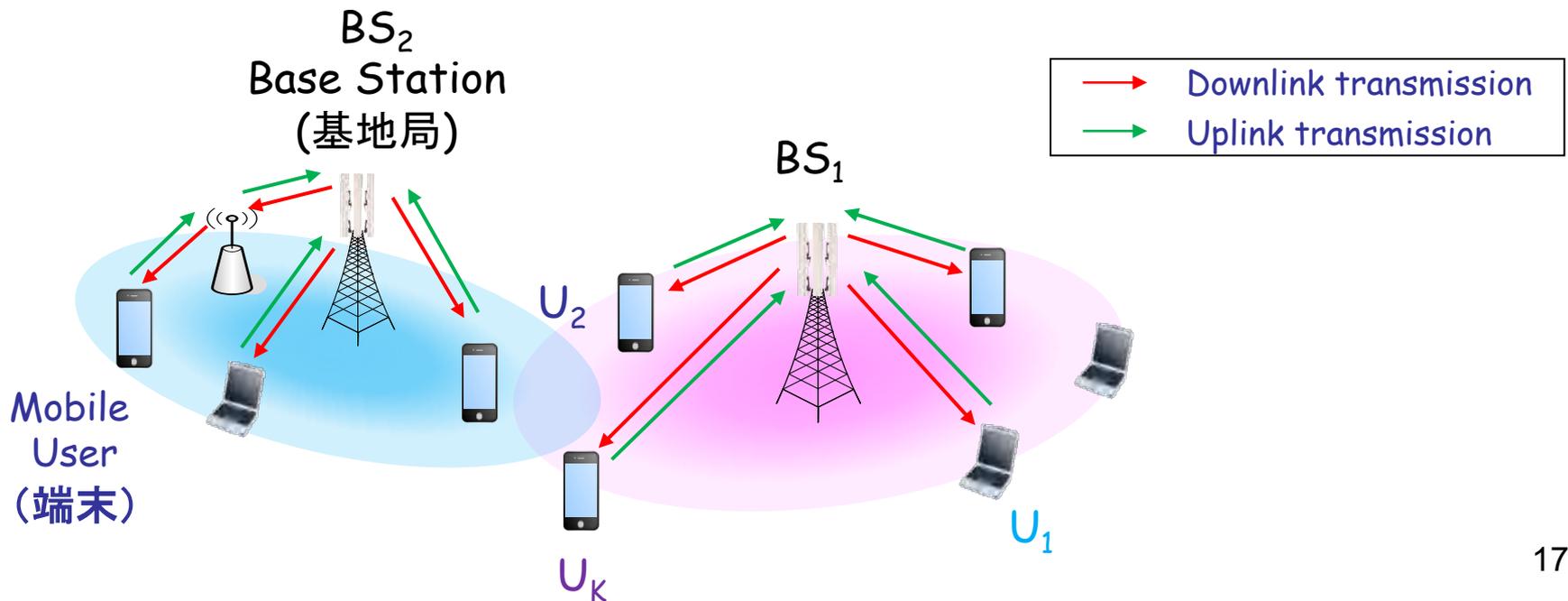


---

# 無線資源割当て・ 無線アクセス法の基礎

# 無線資源割り当て・無線アクセス

- 各システムが使用できる周波数帯は限定
- 各周波数帯の中の複数周波数を効率的に複数のユーザに割り当てる → 無線資源割当て
- ユーザ同士の信号干渉や衝突を回避する



# 無線資源割り当て・無線アクセス

- 複数の相反する評価指標を同時に高次元で達成：  
“バランス”・“トレードオフ”が重要
  - システム全体の特性（総伝送速度・資源利用効率等）
  - ユーザ間の公平性
  - 各ユーザが要求するQoS (Quality of Service)
  - 省電力

無線資源割り当て・無線アクセス制御：  
システム全体の特性に直接的に影響を与える  
極めて重要な技術

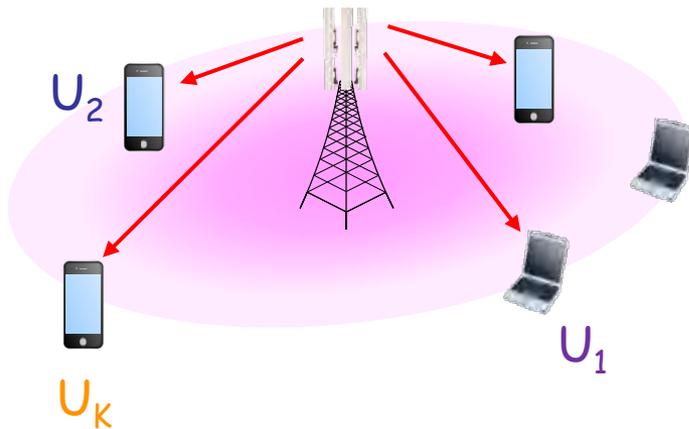
# ダウンリンク・アップリンクの違い

- 下り回線(DL): BSが無線資源割り当てを制御
- 上り回線(UL): 各ユーザを分散的に制御する必要 → 特に難しい

下り回線

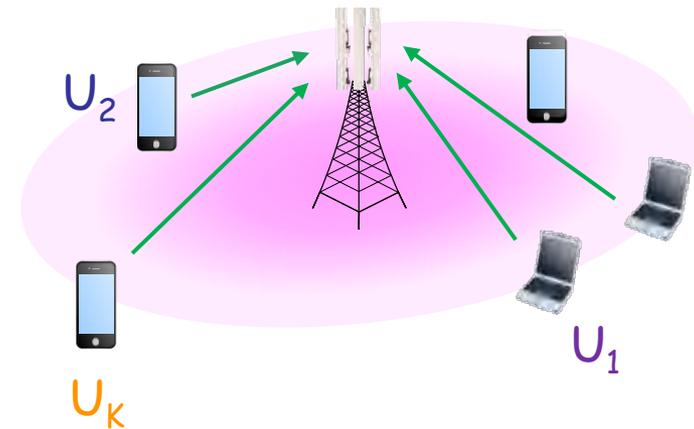
送信ノード数: 1つ

BS: 無線資源割当て

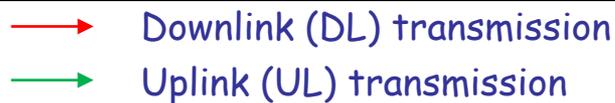


上り回線

送信ノード数: K個



無線アクセス: 各ユーザ



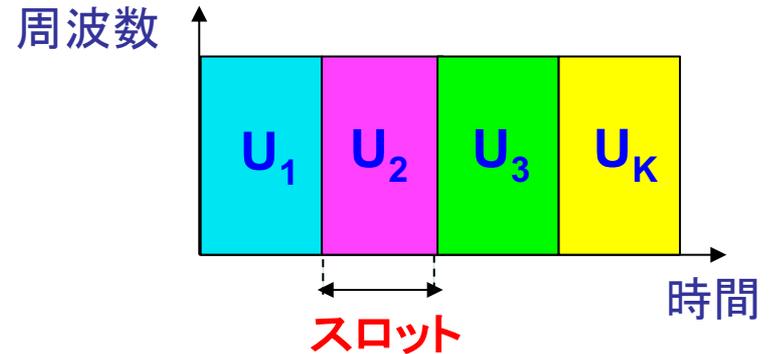
---

# 下り回線での無線資源割当て

## ■ TDM: Time Division

### Multiplexing

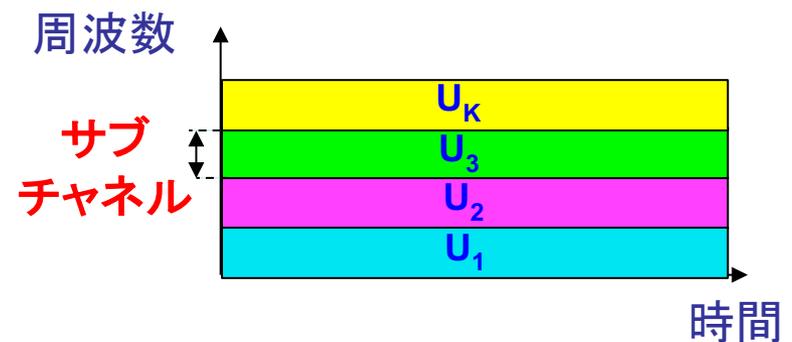
- 時分割多重化
- 各ユーザに異なった時間  
スロットを割当て



## ■ FDM: Frequency Division

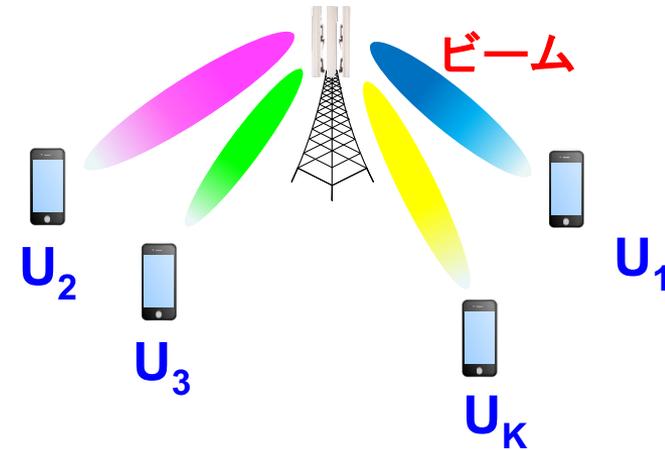
### Multiplexing

- 周波数分割多重化
- 各ユーザに異なった周波  
数(サブチャンネル)を割当て



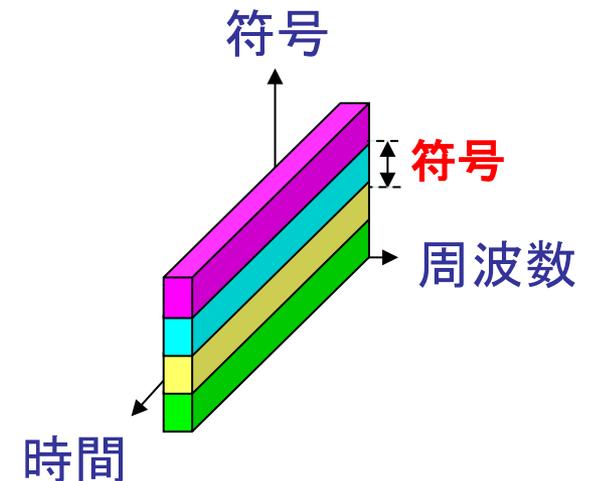
- **SDM**: Space Division Multiplexing

- 空間分割多重化
- 各ユーザに異なった空間 (アンテナ**ビーム**)を割り当て

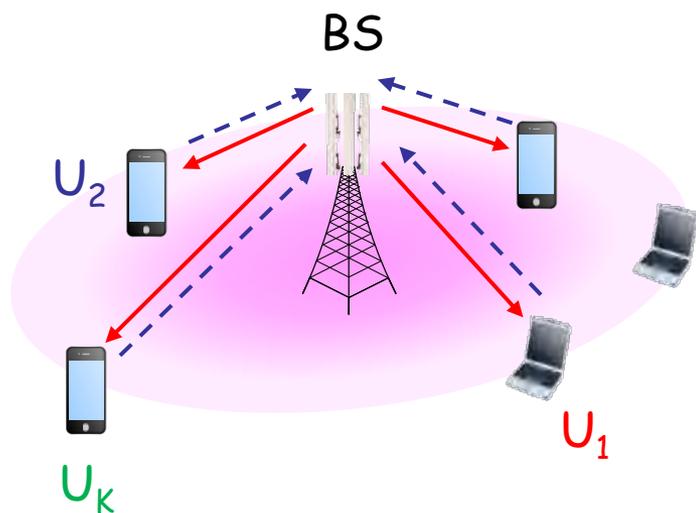
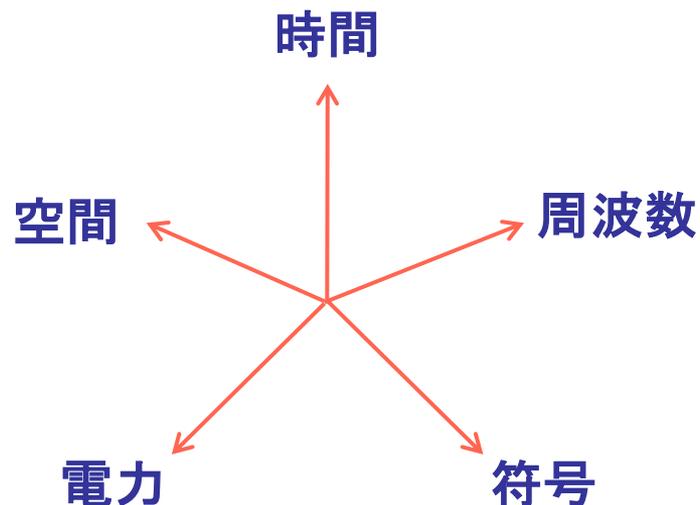


- **CDM**: Code Division Multiplexing (ex: 3G)

- 符号分割多重化
- 各ユーザに異なった**符号**を割り当て



# チャネル状態を考慮した 無線資源割当て



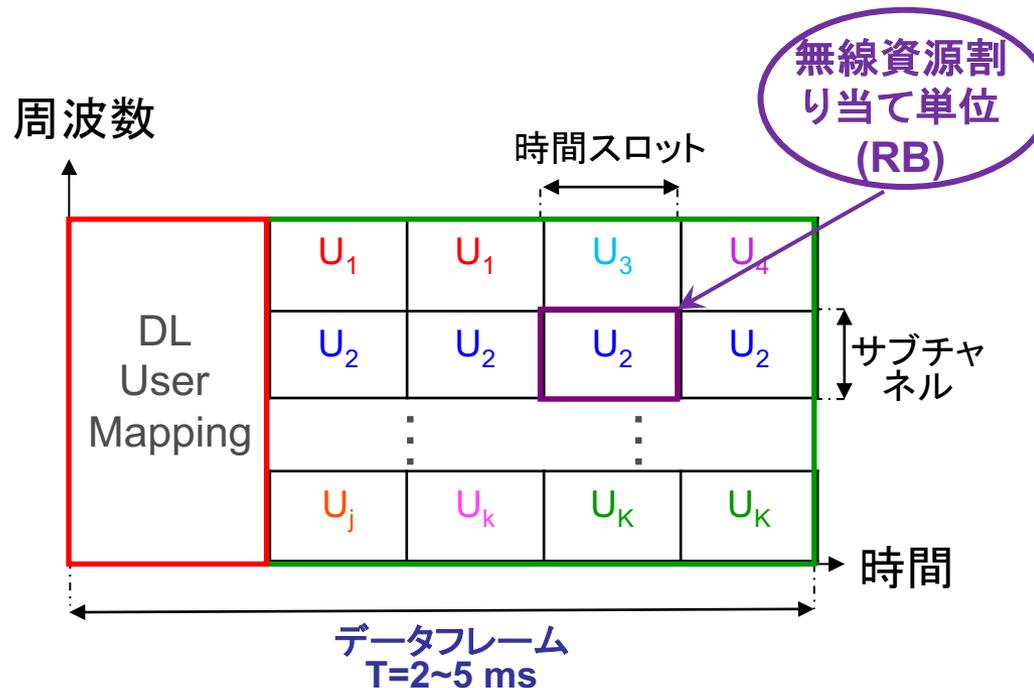
→ 下り回線: データ通信

---> 上り回線: 通信路情報(CSI)フィードバック

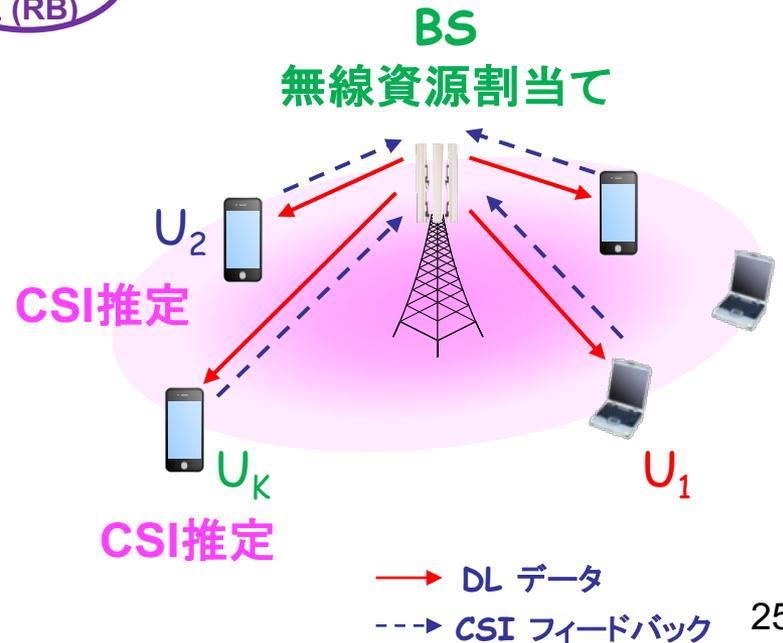
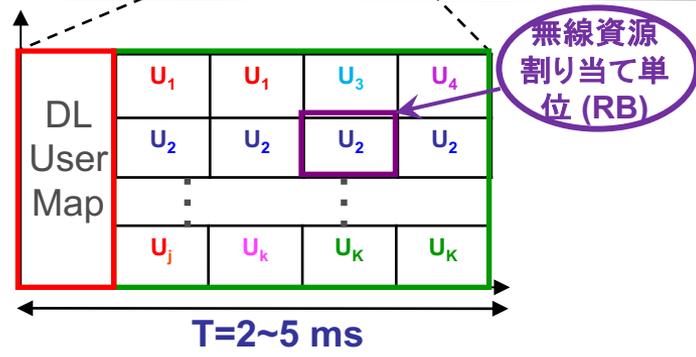
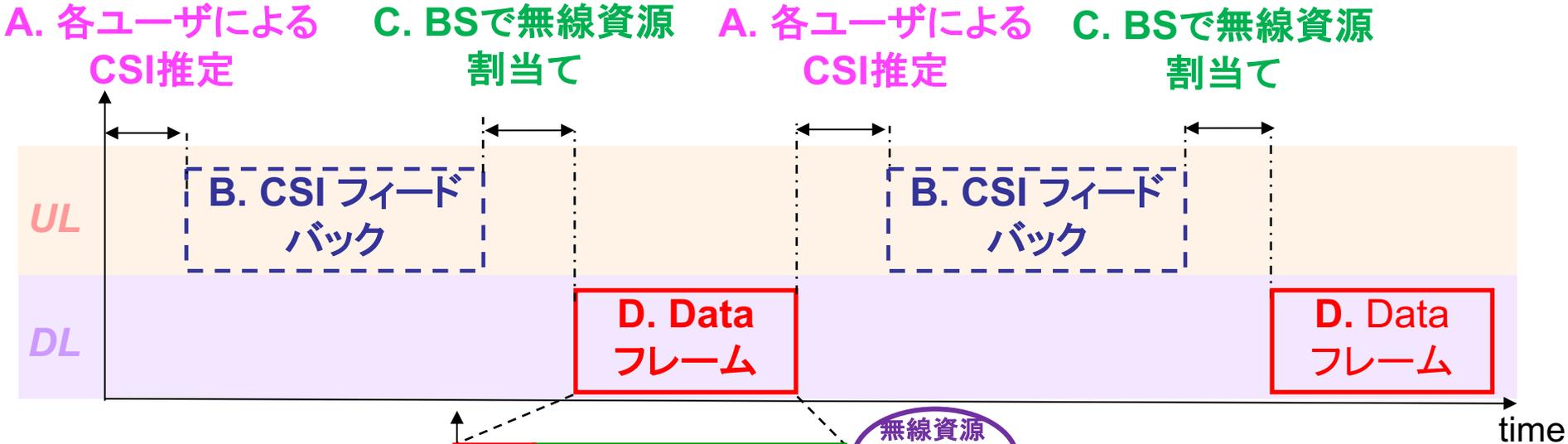
- 無線資源を同時に複数ユーザへ割当て
- 瞬時の通信路状態に応じて、適切に資源を割当て
- 各ユーザの通信品質 (QoS) 要求(音声・ビデオ・データ等)の達成
- 各ユーザのモビリティプロファイルを考慮

# チャンネル状態を考慮した 無線資源割当て

- データフレーム: ex., 4GLTE OFDM方式
- リソースブロック(RB):
  - 時間スロット・サブチャネル(周波数)
  - ユーザ毎に割り当て可能な最も小さい無線資源ユニット
- 通信路情報(CSI):各ユーザのRB毎の通信路状態



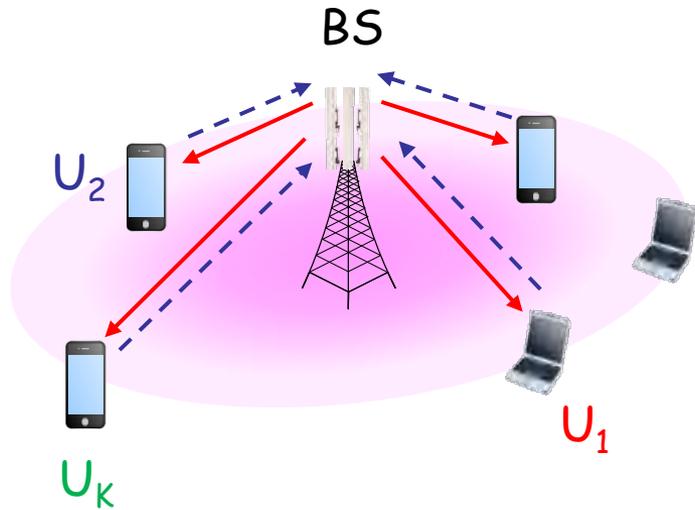
# チャネル状態を考慮した 無線資源割当て



- A. 各ユーザはRB毎のCSIを推定
- B. UL: 各ユーザはCSIをBSへ送信
- C. BSは全ユーザのCSI状態に応じて無線資源を割り当てる
- D. DL: データフレーム送信

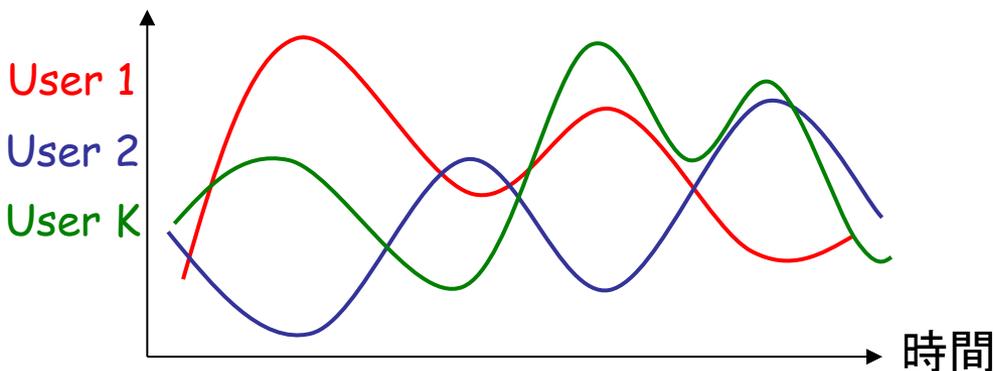
# マルチユーザダイバーシティ

- 下り回線: データ通信
- 上り回線: 通信路情報(CSI)フィードバック



- 各ユーザは独立したランダムなチャンネルを持つ
- ユーザが多い程, 良い (=チャンネル品質が高い) ユーザが存在する確率が高い
- 常にチャンネルの良いユーザへ無線資源を割り当てることでシステム全体の特性を向上

SN比: チャンネル品質



➡ マルチユーザダイバーシティ現象

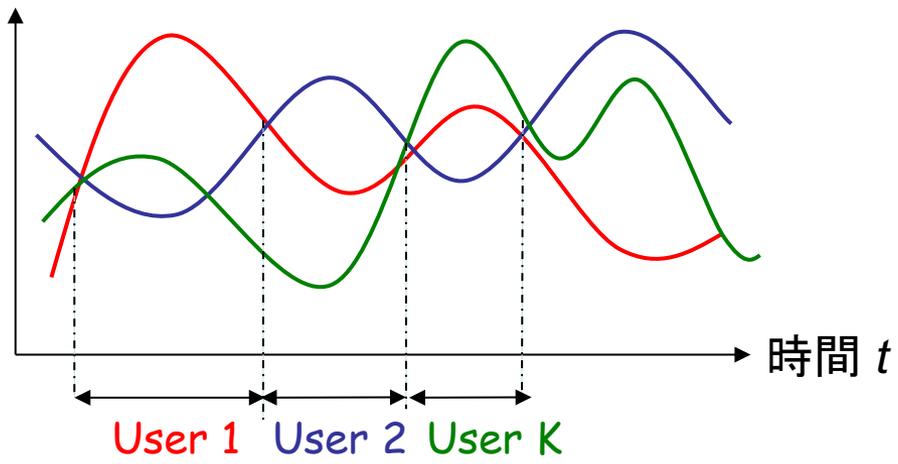
各資源において、達成可能レートが最大なユーザへ割り当てる

- 時間  $t$ , ユーザ  $k$  のチャネル品質 (SN比):  $\gamma_k(t)$
- 時間  $t$ , ユーザ  $k$  の達成可能レート:  $r_k(t) = \log_2(1 + \gamma_k(t))$
- 時間  $t$  を  $r_k(t)$  が最大なユーザに割り当てる
- システム全体の伝送速度 (サムレート) を最大化

$$\max \sum_{k=1}^K r_k(t)$$

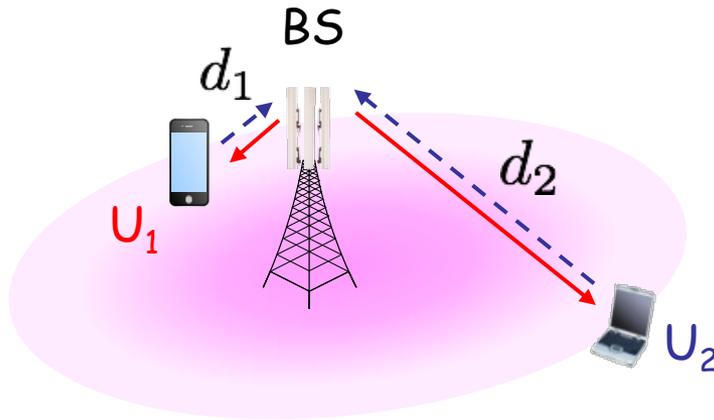
SN比: チャネル品質  $\gamma_k(t)$

User 1  
User 2  
User K



# 基本的な割り当て法1: Max CSI

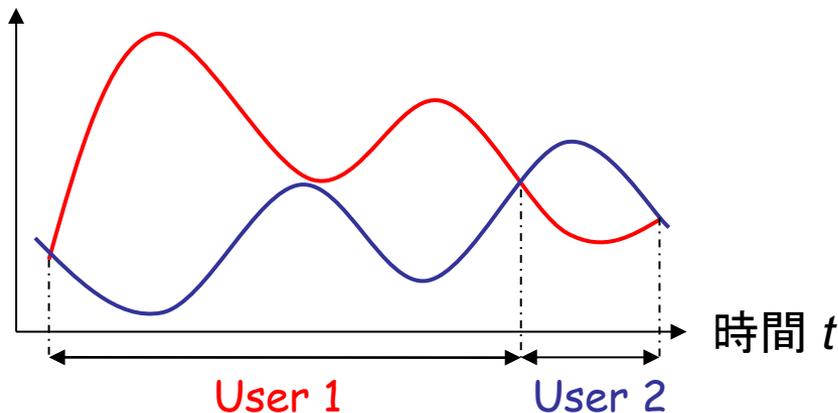
- 一般的に、各ユーザは異なる無線通信路品質を持つ
  - ex: ユーザ1の平均SN比  $\bar{\gamma}_1 \gg$  ユーザ2の平均SN比  $\bar{\gamma}_2$



$$\text{平均SN比 } \bar{\gamma} \propto \frac{1}{d^\alpha} \quad \alpha \geq 2 \quad (\text{パスロス})$$

$$d_1 \ll d_2 \Rightarrow \bar{\gamma}_1 \gg \bar{\gamma}_2$$

SN比: チャンネル品質



通信路品質が高いユーザ  
のみに資源を割り当てる  
**不公平な割り当て法**

# 基本的な割り当て法2: Proportional Fair Scheduler (PFS)

- PFSメトリック:

$$\phi_k(t) = \frac{r_k(t)}{R_k(t)}$$

$$\frac{r_k(t)}{R_k(t)}$$

時間 $t$ でのユーザ $k$ のレート

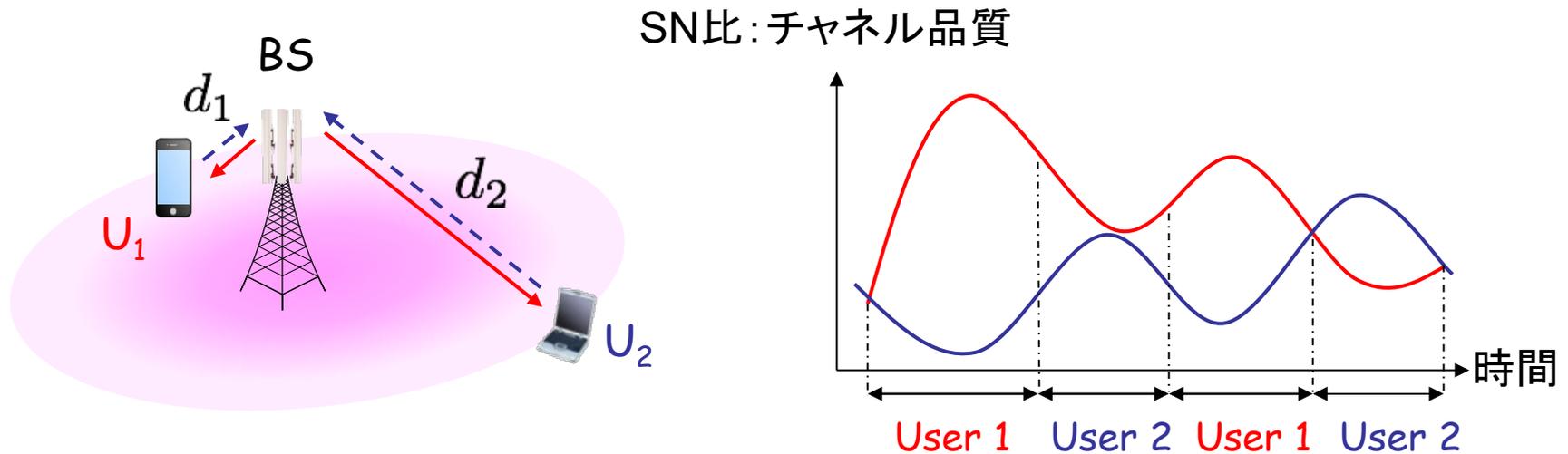
ユーザ $k$ が時間 $t$ まで、過去に割り当てられてきた平均レート

- PFS: 時間 $t$ を $\phi_k(t)$ が最大なユーザに割り当てる
- 瞬時レートも良く, 過去に与えられたレートも低い
- システム全体のlog効用関数を最大化(サムログレート)

$$\max \sum_{k=1}^K \log R_k$$

# 基本的な割り当て法2: Proportional Fair Scheduler (PFS)

- 各ユーザチャネルがピークに近い時に無線資源が割り当てられる

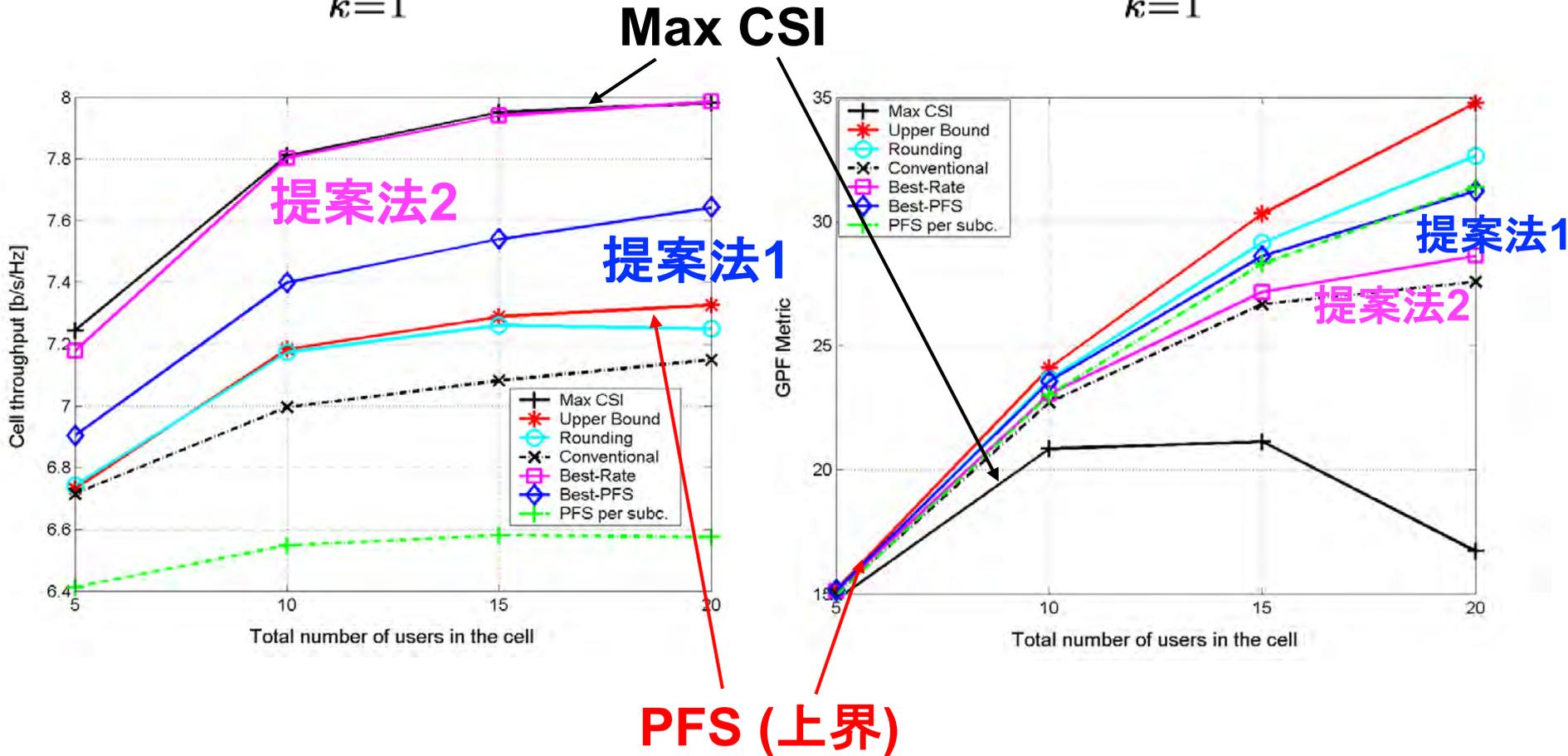


システムサムレート・  
ユーザ間の公平性の  
トレードオフ

# Max CSI vs. PFS

サムレート  $\sum_{k=1}^K r_k$

公平性  $\sum_{k=1}^K \log R_k$



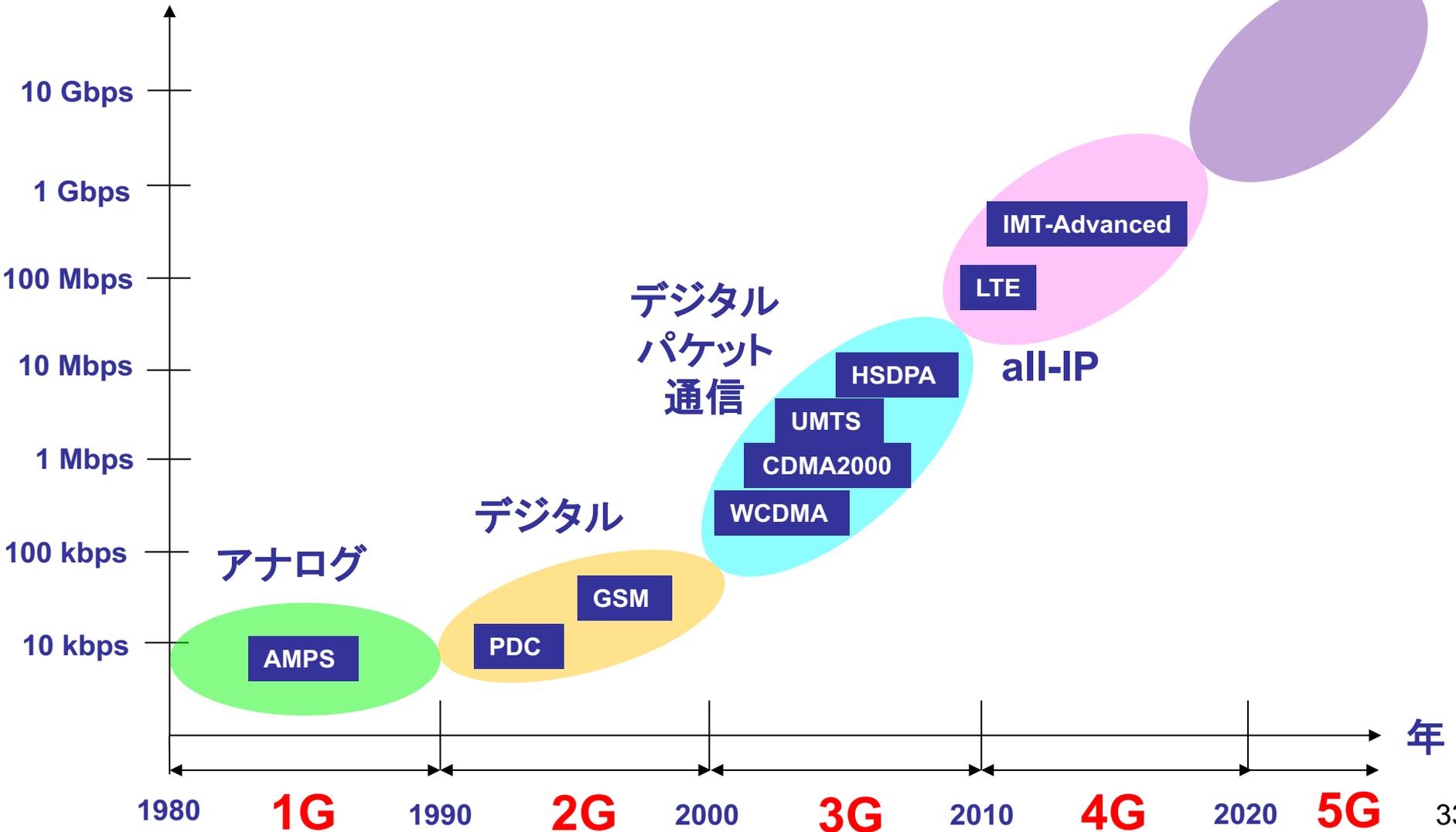
---

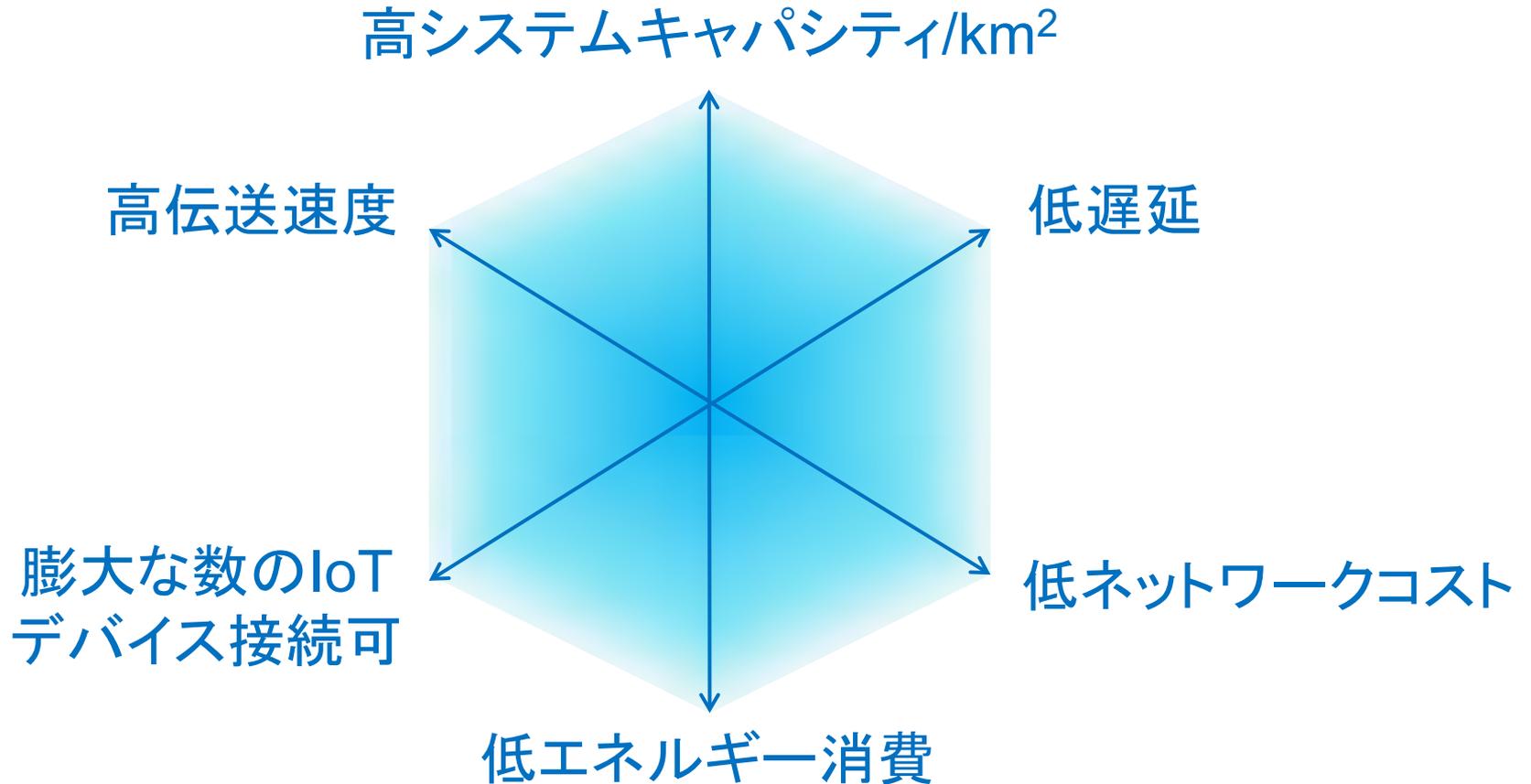
# 無線資源利用効率向上を目指した 最新の研究動向

# 移動体通信システムの進化

**G**: Generation=世代

伝送速度



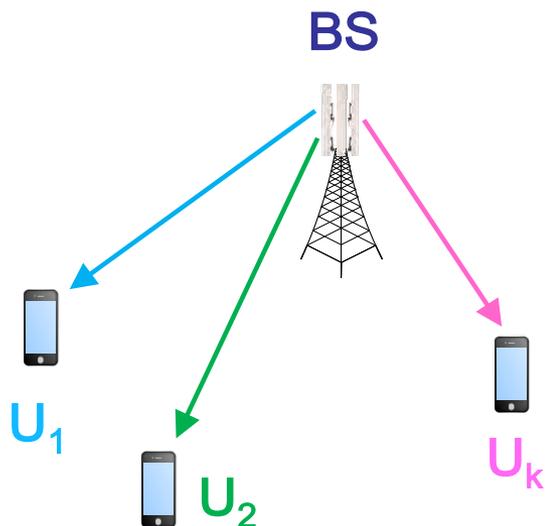


次世代情報通信システムの重大な課題：  
有限で貴重な無線資源の中，膨大なデータ量に対し  
複数の相反する評価指標を同時に高性能で達成する

- 現在世界中で研究・開発・標準化の最中
- 主な新技術
  - **Massive MIMO**: 数100のアンテナ(基地局)
  - **Millimeter waves**: 30~300GHz
  - **Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)**: 非直交多元接続
  - **Full Duplex protocol**: 全二重通信
  - **M2M・IoT**: 物と物の通信 **V2V**: 車車間通信 **D2D**: 端末直接通信
- 新しいネットワークアーキテクチャ
  - 高密度**スモールセル**ネットワーク
  - **CRAN**: クラウド無線アクセスネットワーク
  - **MEC・FogRAN**: モバイルエッジコンピューティング
  - **SDN・NFV**: ネットワーク仮想化

**M2M** = Machine to Machine  
**V2V** = Vehicle to Vehicle  
**D2D** = Device to Device  
**CRAN** = Cloud Radio Access Network  
**MEC** = Mobile Edge Computing  
**SDN** = Software Defined Networking  
**NFV** = Network Function Virtualization

## NOMA (重畳符号化)



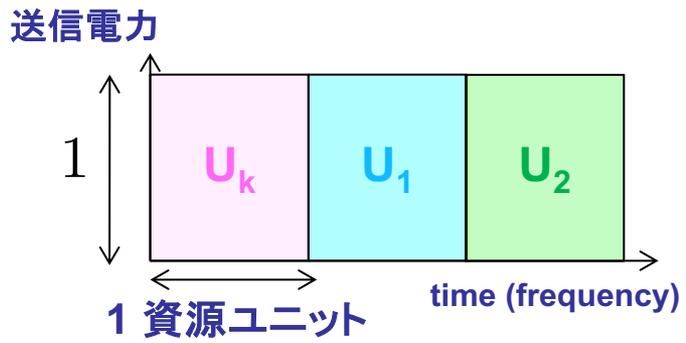
- 1つのBSが複数ユーザと通信:  
**放送通信路**
  - 1対複数の会話. Ex: 講義する教員
  - TV, ラジオ
  - 同時に達成可能な最大レート集合  $(R_1, R_2, \dots, R_k)$  は?

## ■ 可能な通信方式

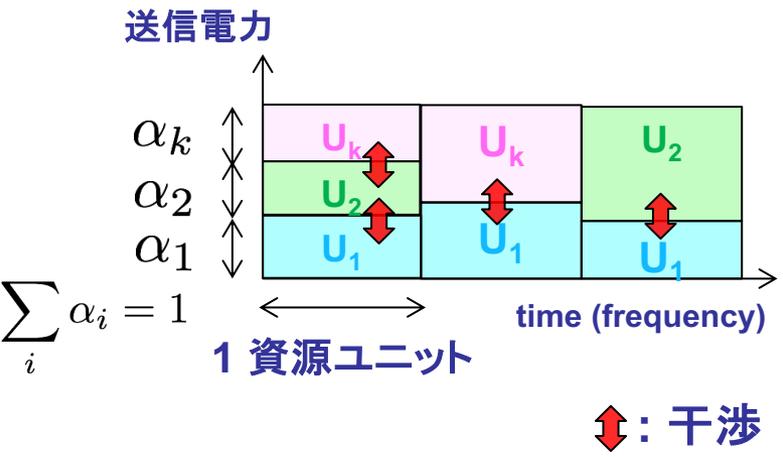
1. 通信路状態が最低なユーザの最小レートで通信: 全ユーザが受信
2. 通信路状態が最高なユーザの最大レートで通信: そのユーザのみが受信
3. 直交割り当て ex: 各 $U_k$  に異なる時間スロットを割り当てる
4. 非直交割り当て: 各ユーザの通信路状態に合わせて, 異なるレートの情報階層を重ねる (重畳符号化)

# NOMA (重畳符号化)

## 直交割り当て(OMA):

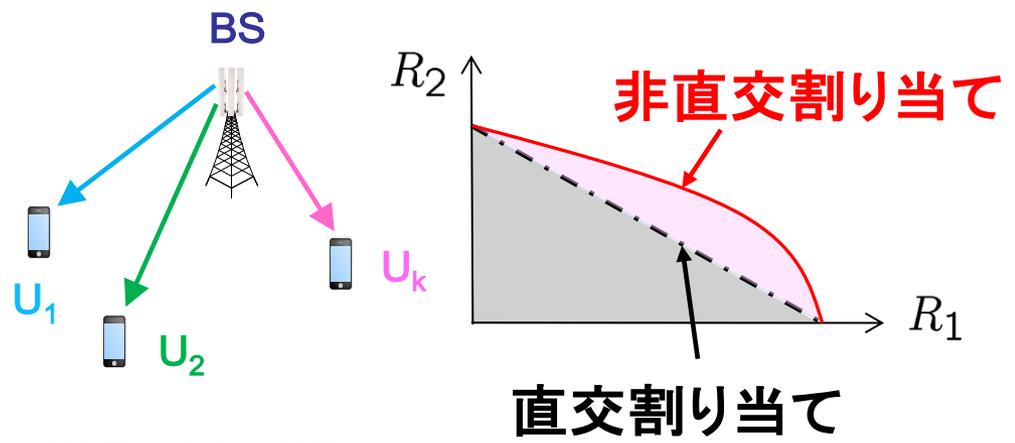


## 非直交割り当て(SC, NOMA):



各無線資源を各ユーザに直交分割して割り当てるよりも、複数のユーザの信号を重ね合わせた非直交分割の方がどのユーザも高いレートを達成

- 1970年代から理論的既知[4]
- 実装困難:5Gでようやく検討[5][6]



[4] T.M. Cover, "Broadcast Channels", *IEEE Trans. on Info.Theory*, vol.18-T, no.1, Jan. 1972  
 [5] M. Kaneko, H. Yamaura, Y. Kajita, K. Hayashi, H. Sakai, "Fairness-Aware Non-Orthogonal Multi-User Access with Discrete Hierarchical Modulation for 5G Cellular Relay Networks", in *IEEE Access*, vol.3, pp. 2922-2938, Dec. 2015  
 [6] I. Randrianantenaina, M. Kaneko, H. Dahrouj, E. ElSawy, M.S. Alouini, "Joint Scheduling and Power Adaptation in NOMA-based Fog-Radio Access Networks", accepted in *IEEE Globecom*, Dec.2018

# 高密度スモールセルネットワーク

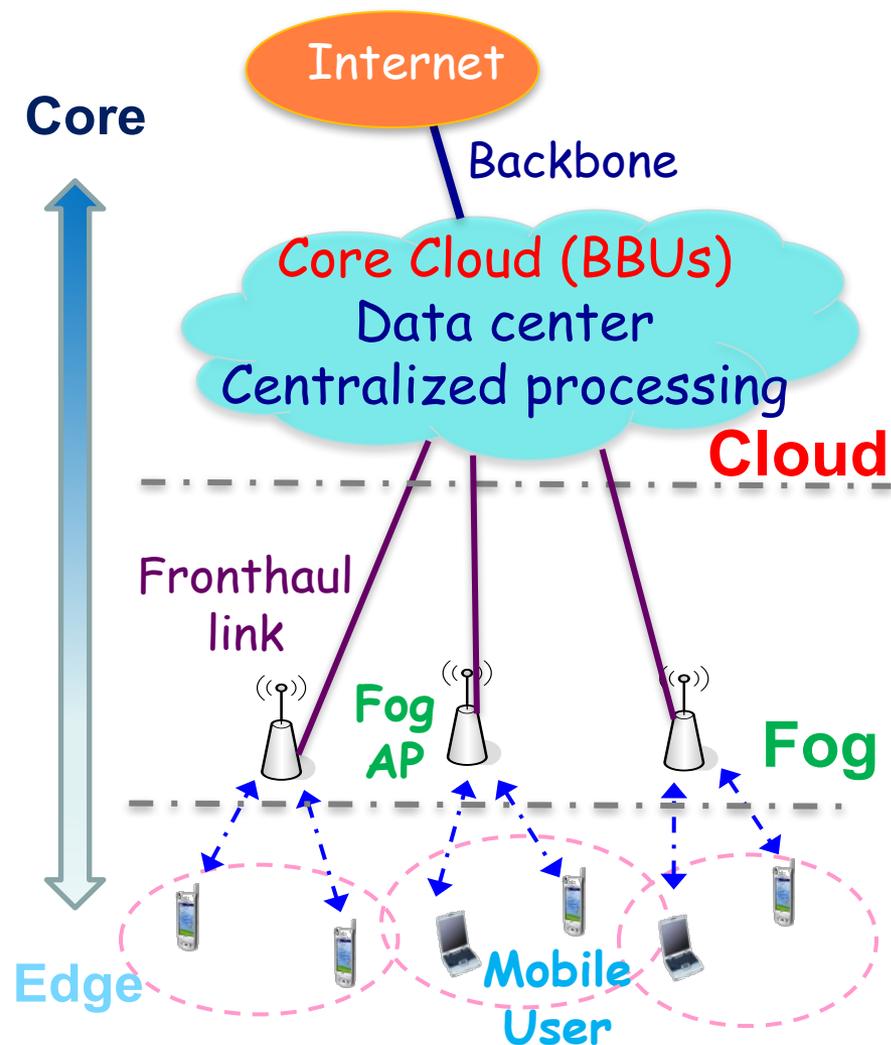
- 異なる種類の基地局が共存: マクロセル (既存セルラー), フェムトセル, ピコセル, 無線中継局...
- 基地局-端末間距離が小さい程高い伝送速度  
→ 小セル化
- 全セルで同じ周波数を利用 → 周波数利用効率向上
- 問題: セル間の干渉でシステム特性が著しく劣化
- 優れた無線資源割当て・干渉制御技術が必要
- 各セル: 半自律分散型制御 [7]





- **無線アクセスポイント(RRH)**
  - 従来の基地局が行っていた信号処理や無線資源割当て → クラウド
  - 単純・低コスト
- **クラウド: 超高速処理機能**
  - 大規模信号処理・無線資源割当て
  - 中央集中的制御
- **フロントホールリンク(fronthaul)**
  - RRH・クラウド間で全ユーザ信号を転送

- **利点: 無線資源割当ての大規模最適化 → 特性の大幅な改善**
- **問題: フロントホールリンクへ大きなデータ量の負担**



- 能力をよりエッジ側へ
- リアルタイム高速処理
- クラウド:
  - 中央集中的制御
- Fogアクセスポイント(FogAPs)
  - ローカル信号処理・割り当て
  - エッジコンピューティング

- **利点**: フロントホールへの負担を削減・遅延の削減
- **問題**: ローカルな干渉制御
- 分散型信号処理・割り当て法必須

- 今後の主なチャレンジ：
  - 有限で貴重な無線資源の中，膨大なデータ量通信に対応
  - アプリケーションの汎用化
  - 複数の相反する通信品質要求を同時に高性能で達成

**近未来の情報通信システムの確立には、  
新たな無線通信技術の開拓が必要**

- CRAN・FogRANのエネルギー利用効率最適化
  - 複雑な非凸最適化問題
- ダイナミックに変動する干渉環境の学習・予測を活用した無線資源割り当て法
  - 機械学習(強化学習)に基づいた提案法
- 他の5G要素技術を含めた無線資源割り当て法 (NOMA, mmWave, etc.)
- IoT: LoRa・LoRaWANの性能解析[10]・信号処理法[11]

[10] A. Waret, M. Kaneko, A. Guitton, N. El Rachkidy, "LoRa Throughput Analysis with Imperfect Spreading Factor Orthogonality", accepted in *IEEE Wireless Communication Letters*, DOI:10.1109/LWC.2018.2873705, Sept. 2018

[11] N. El Rachkidy, A. Guitton, M. Kaneko, "Decoding Superposed LoRa Signals", in the 43rd IEEE Conference on Local Computer Networks (IEEE LCN 2018), Chicago, USA, Oct. 2018

## ■ 金子めぐみホームページ

[https://www.nii.ac.jp/faculty/architecture/kaneko\\_megumi/](https://www.nii.ac.jp/faculty/architecture/kaneko_megumi/)

<http://research.nii.ac.jp/~megkaneko/>

## ■ 参考文献

- N. Pontois, M. Kaneko, T.H.L. Dinh, L. Boukhatem, “User Pre-Scheduling and Beamforming with Outdated CSI in 5G Fog Radio Access Networks”, in *IEEE Globecom*, Dec. 2018, available at: arXiv:1802.01104 [eess.SP]
- I. Randrianantenaina, M. Kaneko, H. Dahrouj, E. ElSawy, M.S. Alouini, “Joint Scheduling and Power Adaptation in NOMA-based Fog-Radio Access Networks”, in *IEEE Globecom*, Dec. 2018
- M. Kaneko, “Throughput Analysis of CSMA With Imperfect Collision Detection in Full Duplex-Enabled WLAN”, in *IEEE Wireless Communication Letters*, vol.6, no.4, pp.490-493, Aug. 2017
- M. Kaneko, T. Nakano, K. Hayashi, T. Kamenosono and H. Sakai, “Distributed Resource Allocation with Local CSI Overhearing and Scheduling Prediction for OFDMA Heterogeneous Networks”, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, no.2, pp.1186-1199, Feb. 2017
- M. Kaneko, H. Yamaura, Y. Kajita, K. Hayashi, H. Sakai, "Fairness-Aware Non-Orthogonal Multi-User Access with Discrete Hierarchical Modulation for 5G Cellular Relay Networks", in *IEEE Access*, vol.3, pp. 2922-2938, Dec. 2015
- M. Kaneko, K. Hayashi, H. Sakai, "Sum Rate Maximizing Superposition Coding Scheme for a Two-User Wireless Relay System", *IEEE Communication Letters*, vol.15, no. 4, pp. 428-430, April 2011
- M. Kaneko, P. Popovski, J. Dahl, “Proportional Fairness in Multi-Carrier System: Upper Bound and Approximation Algorithms”, in *IEEE Comm. Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 462-464, June 2006