

# 無線全二重通信ネットワークのための MACプロトコルとその性能解析

MAC Protocol for Wireless Full Duplex Communication  
Networks and its Performance Analysis

眞田 耕輔

三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 助教

2020年 2月24日 電気学会若手セミナー 基調講演

mail: [k.sanada@elec.mie-u.ac.jp](mailto:k.sanada@elec.mie-u.ac.jp)

研究室URL: <http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/>

本日の発表資料: <http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/index.php/sampleprogram/>



# 本日の講演内容と趣旨

## ■ 内容

- 無線全二重通信とそのMACプロトコル
- 無線全二重通信ネットワークの理論解析手法

## ■ 趣旨, ねらい

- 数理モデルを用いたシステムの解析研究の紹介
  - ✓ 利点, 欠点, 研究の面白さ, 難しさ, 意義



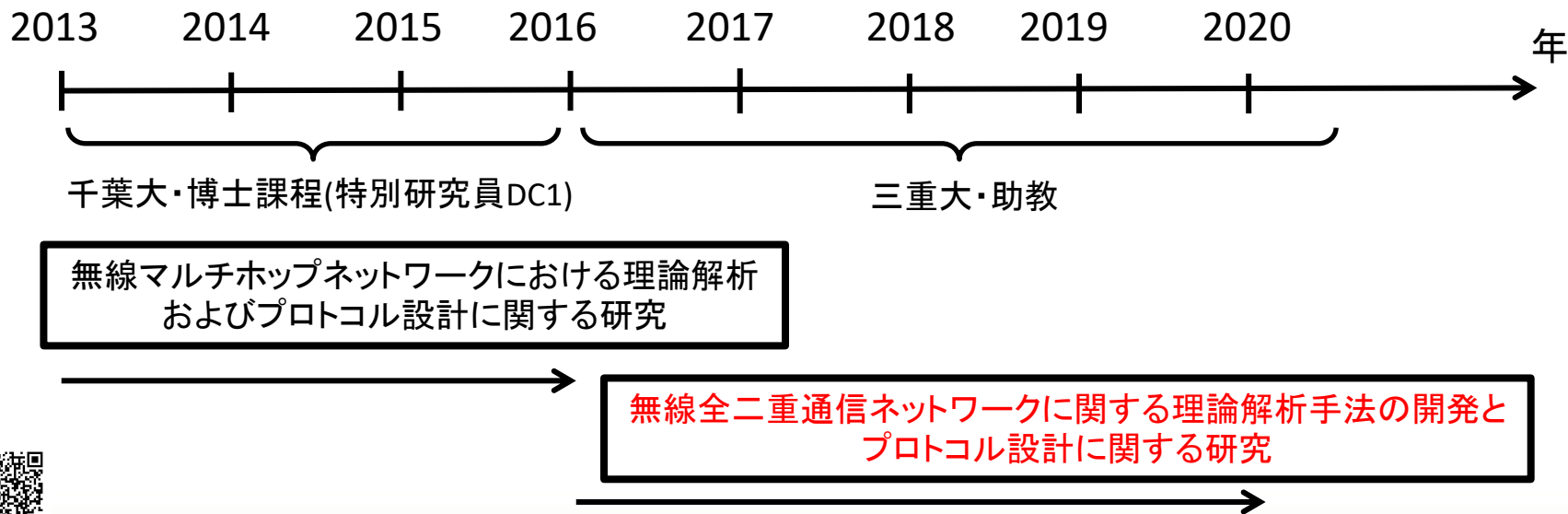
# 自己紹介とこれまでの経歴

- 眞田 耕輔 Kosuke Sanada
- 三重大学大学院工学研究科・助教
- 略歴
  - 1987年 北海道 生まれ
  - 2015年 千葉大学大学院 博士後期課程 修了
  - 2013～2015年 日本学術振興会 特別研究員 (DC1)
  - 2016年～ 三重大学
- 趣味: ギター, バンド



# これまでの研究内容(2013年～現在)

- 数理モデルの構築, 理論解析
  - 待ち行列理論, マルコフ連鎖モデル
- 研究対象
  - 無線通信ネットワーク
    - ✓ 無線マルチホップネットワーク



# 本日の講演の流れ

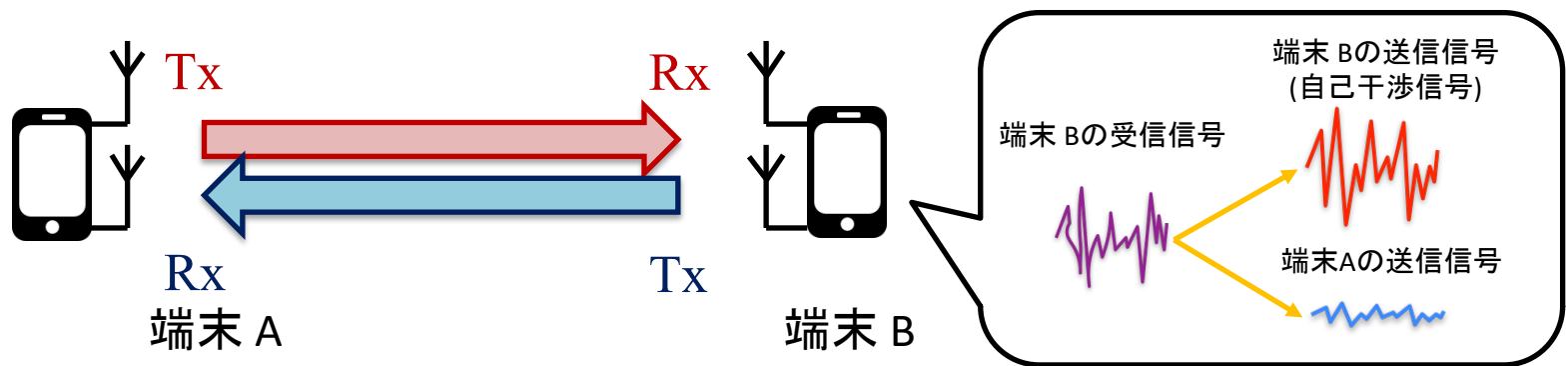
「無線全二重通信ネットワークのためのMACプロトコルとその性能解析」

1. 自己紹介
2. 無線全二重通信とそのMACプロトコル
3. 数理モデルを用いた理論解析
  - a. IEEE 802.11 DCF のマルコフ連鎖モデルを用いた解析
  - b. 全二重通信ネットワークの解析への拡張
4. 無線全二重通信シングルホップネットワークの解析
5. 無線全二重通信マルチホップネットワークの解析
6. 結論



# 無線全二重通信技術

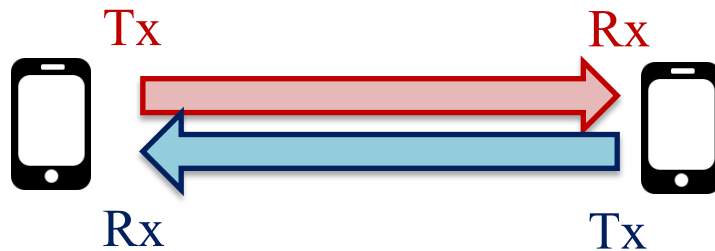
- 同一周波数上で同時に信号の送信と受信
  - 半二重通信(従来方式)では, 同一周波数上では同時送受信不可
  - 理論上2倍の情報通信(スループット)
- 主要技術技術 (物理層)
  - 自己干渉除去(Self-Interference Canceller: SCI)
    - ✓ 受信信号から自身の送信信号を除去
    - ✓ アナログ回路, デジタル信号処理
    - ✓ 110dBの自己干渉除去[1], 2.4GHz帯



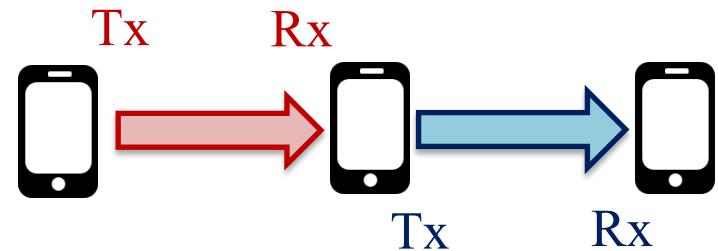
[1] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in Proc. ACM SIGCOMM, 2013, pp. 375–386.

# 全二重通信モード

- 双方向全二重通信 (Bidirectional Full Duplex : BFD)
  - 2台の端末が同時に送信と受信
- 片方向全二重通信 (Unidirectional Full Duplex: UFD)
  - 1台の端末が同時に送信と受信
  - 中継通信
    - ✓ Amplify-and-forward (AF): 復調せずそのまま中継
    - ✓ decode-and-forward (DF): 復調して中継



双方向全二重通信  
(BFD: Bidirectional Full Duplex)



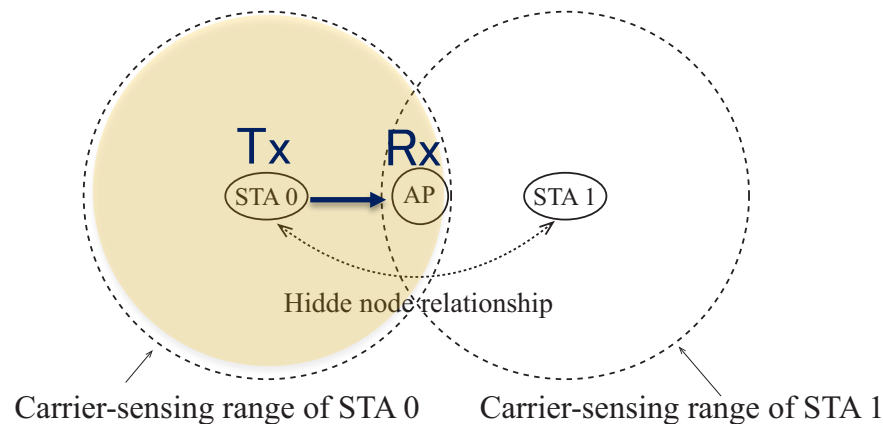
片方向(中継)全二重通信  
Unidirectional Full Duplex



- [2] K. M. Thilina, H. Tabassum, E. Hossain and D. I. Kim, "Medium access control design for full-duplex wireless system: Challenges and approaches," IEEE Communication Magazine, vol. 53, no. 5, pp. 112-120, May 2015.

# NWにおける全二重通信適用効果

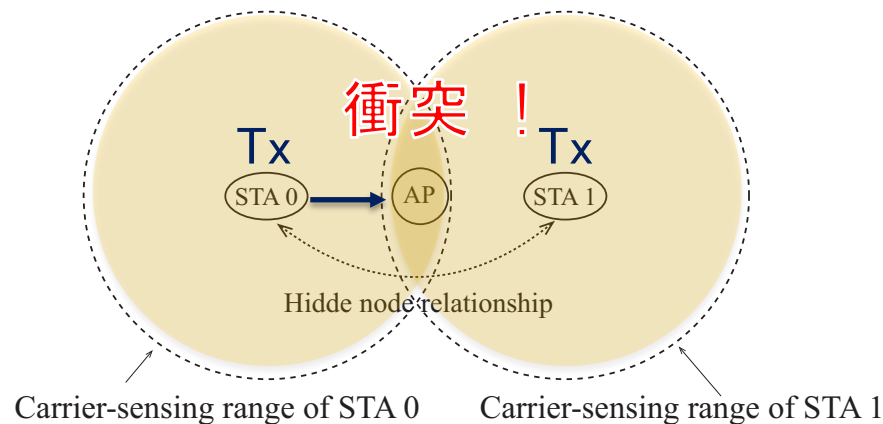
- CSMA(Carrier Sense Multiple Access)方式
  - 周囲の通信状況を確認して通信を開始
- 隠れ端末
  - 通信を検知できない位置関係の端末
- 全二重通信により隠れ端末の送信を抑制





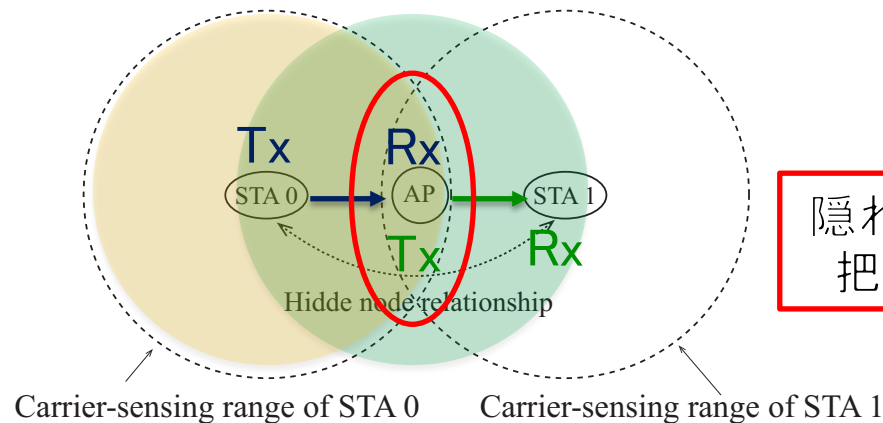
# NWにおける全二重通信適用効果

- CSMA(Carrier Sense Multiple Access)方式
  - 周囲の通信状況を確認して通信を開始
- 隠れ端末
  - 通信を検知できない位置関係の端末
- 全二重通信により隠れ端末の送信を抑制



# NWにおける全二重通信適用効果

- CSMA(Carrier Sense Multiple Access)方式
  - 周囲の通信状況を確認して通信を開始
- 隠れ端末
  - 通信を検知できない位置関係の端末
- 全二重通信により隠れ端末の送信を抑制



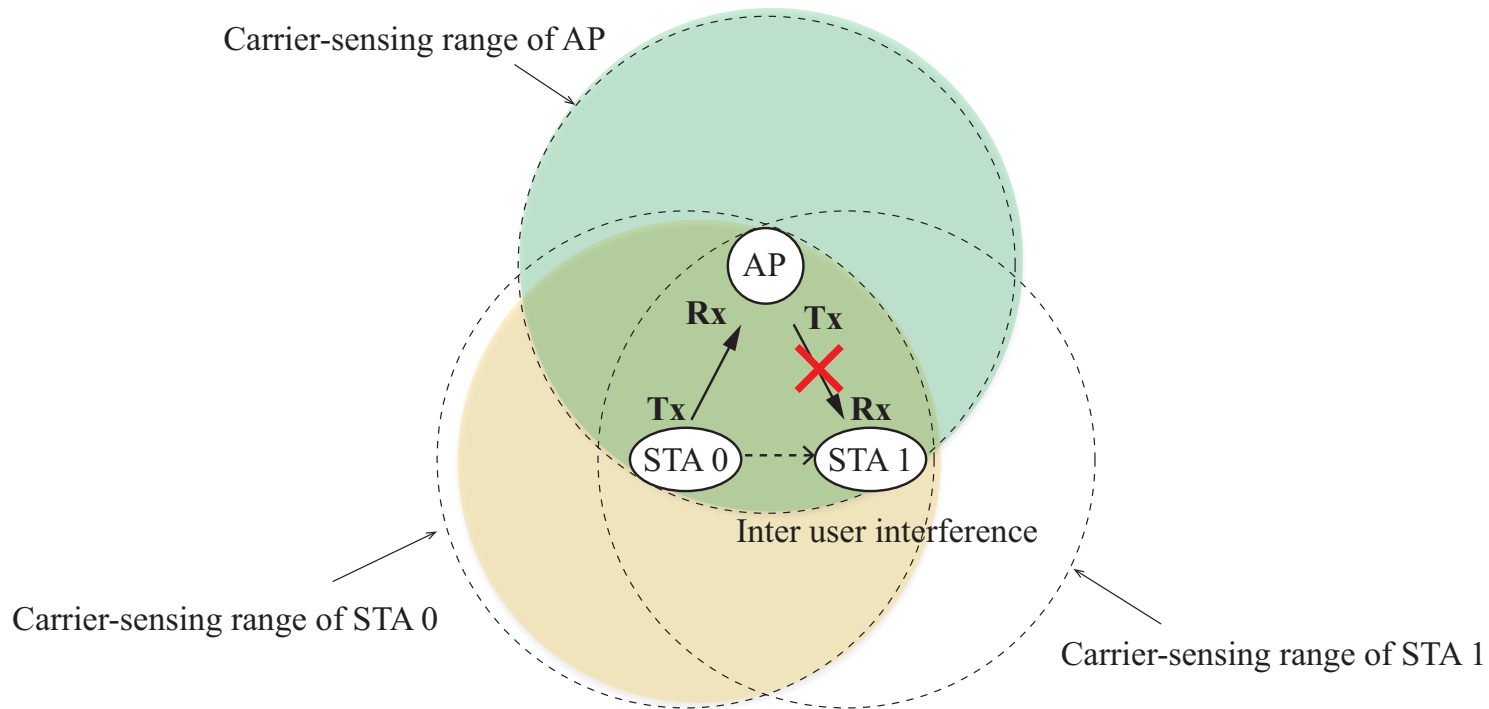
隠れ端末の送信状況を  
把握可能→衝突抑制



# 全二重通信適用で生じる諸問題

## ■ ユーザー間干渉

- 端末の位置関係によっては, 全二重通信失敗



# 全二重通信 NWのためのMACプロトコル開発

## ■ Full Duplex MAC (FD MAC)

## ■ モチベーション

- 周波数利用効率の向上
- 隠れ端末による衝突を抑制
- オーバーヘッドの削減

## ■ 要求

- 送受信端末を適切に決定
- ユーザー間干渉を回避
- 従来規格と互換可能
- 低消費電力



# FD MAC提案に関する研究

## ■ 分類

### ➤ 自律分散型 (CSMA/CA)

- ✓ WLAN, マルチホップネットワーク, インフラレスなシステム
- ✓ 端末が自律的に全二重通信を予約

### ➤ 集中制御型 (TDMA)

- ✓ 対象NW: セルラーネットワーク
- ✓ 基地局が送信スケジューリングを決定

## ■ 評価方法

- 実機実験
- 計算機シミュレーション
- 理論解析

私の研究スタイル  
(本講演で一番紹介したいこと!)



# 数理モデルの構築

## ■ メリット

- 本質的な動作と特性を定式化
  - ✓ 動作の直感的な理解
- (大規模な) システムの性能を高速に把握
- 最適化計算が容易

## ■ デメリット

- 様々な仮定, 簡素化が必要
- 構築が困難



# 本発表(後半)-理論解析手法の紹介-

1. IEEE 802.11 無線LANの理論解析手法
  - ① Bianchi[3]のマルコフ連鎖モデルを用いた解析
2. 全二重通信NWの理論解析への拡張
  - ① WLAN (シングルホップネットワーク)
    - ✓ 2つのマルコフ連鎖モデルを用いた解析[4]
    - ✓ FD MACの性能評価
  - ② マルチホップネットワーク
    - ✓ エアタイムの解析表現とFDネットワークへの拡張
    - ✓ マルチホップNWでのFD MACの性能評価[5]

---

[3] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Sel. Areas Commun, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.

[4] **K. Sanada** and K. Mori, "Performance Analysis of Full Duplex MAC protocols for Wireless Local Area Networks with Hidden Node Collisions," IEICE Trans. Communications, vol. E103-B, No. 7, Jul. 2020 (to be published).

[5] C. Fujimura, **K. Sanada**, and K. Mori, "Analytical expressions for end-to-end throughput of string-topology wireless full-duplex multi-hop networks," IEICE Trans. Communications, vol. E102-B, No. 6, Jun. 2019.



# IEEE 802.11 における自律分散アクセス-DCF-

## ■ Distributed Coordination Function (DCF)

➤ 周囲の通信状況を確認して通信を開始 (CSMA)



➤ 通信の衝突回避

✓ 送信開始前の待機時間をランダムに設定



✓ 通信が失敗すると、送信への積極性を下げる

送信前の待機時間

0から $W_s$ の値の範囲の乱数

$$BackoffTimer_s = \text{RandomValue}(0, W_s)$$

$$W_s = \min(2^s CW_{min}, CW_{max})$$

$i$ 回目の再送信でのCW

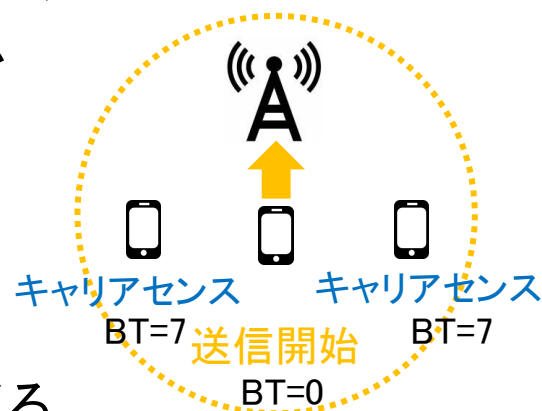




# IEEE 802.11 における自律分散アクセス-DCF-

## ■ Distributed Coordination Function (DCF)

- 周囲の通信状況を確認して通信を開始 (CSMA)
- 通信の衝突回避
  - ✓ 送信開始前の待機時間をランダムに設定
  - ✓ 通信が失敗すると、送信への積極性を下げる



送信前の待機時間

0から $W_s$ の値の範囲の乱数

$$BackoffTimer_s = \text{RandomValue}(0, W_s)$$

$$W_s = \min(2^s CW_{min}, CW_{max})$$

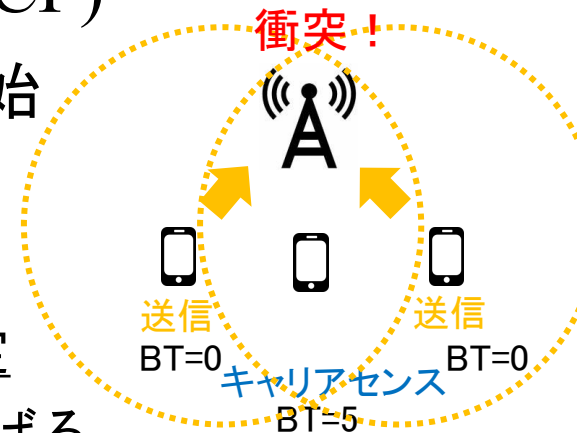
$i$ 回目の再送信でのCW



# IEEE 802.11 における自律分散アクセス-DCF-

## ■ Distributed Coordination Function (DCF)

- 周囲の通信状況を確認して通信を開始 (CSMA)
- 通信の衝突回避
  - ✓ 送信開始前の待機時間をランダムに設定
  - ✓ 通信が失敗すると、送信への積極性を下げる



送信前の待機時間

0から $W_s$ の値の範囲の乱数

$$BackoffTimer_s = \text{RandomValue}(0, W_s)$$

$$W_s = \min(2^s CW_{min}, CW_{max})$$

$i$ 回目の再送信でのCW



# IEEE 802.11 における自律分散アクセス-DCF-

## ■ Distributed Coordination Function (DCF)

➤ 周囲の通信状況を確認して通信を開始 (CSMA)

➤ 通信の衝突回避

✓ 送信開始前の待機時間をランダムに設定

✓ 通信が失敗すると、送信への積極性を下げる



待機  
BT=20



待機  
BT=5



待機  
BT=32

送信前の待機時間

0から $W_s$ の値の範囲の乱数

$$BackoffTimer_s = \text{RandomValue}(0, W_s)$$

$$W_s = \min(2^s CW_{min}, CW_{max})$$

$i$ 回目の再送信でのCW



# IEEE 802.11 DCFの理論解析[3]

## ■ Bianchiによる2次元離散マルコフ連鎖モデル

- 通信の失敗による再送を考慮したデータ送信確率を定式化
- IEEE 802.11 ネットワークのスループット理論値を導出

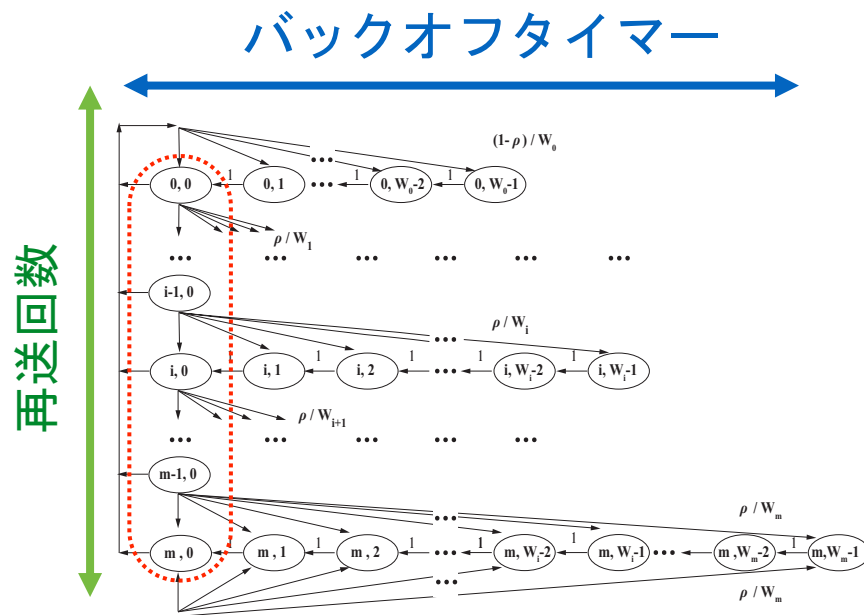
$$\text{送信確率} = \frac{\text{再送含む送信回数}}{\text{バックオフカウント回数}}$$

$$\tau = \frac{2(1 - 2\gamma)}{(1 - 2\gamma)(W + 1) + \gamma W(1 - (2\gamma))}$$

$\gamma$ : 送信失敗率(衝突率)

$W$ : 最小 Contention Window 値

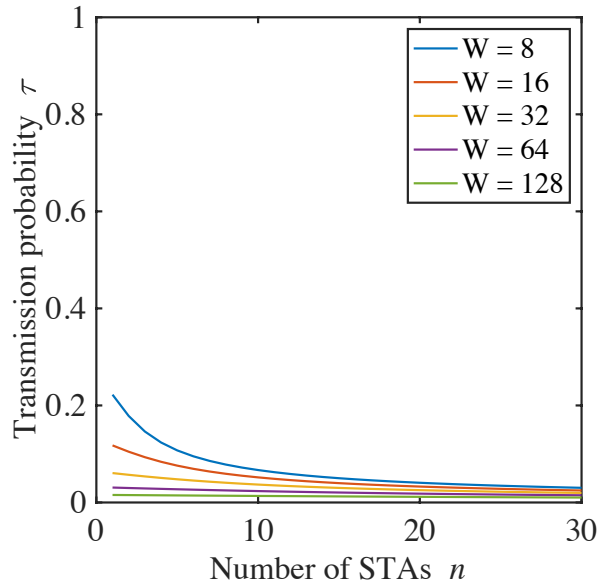
$$\text{衝突率: } \gamma = 1 - (1 - \tau)^n$$



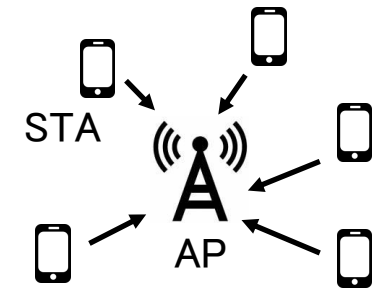
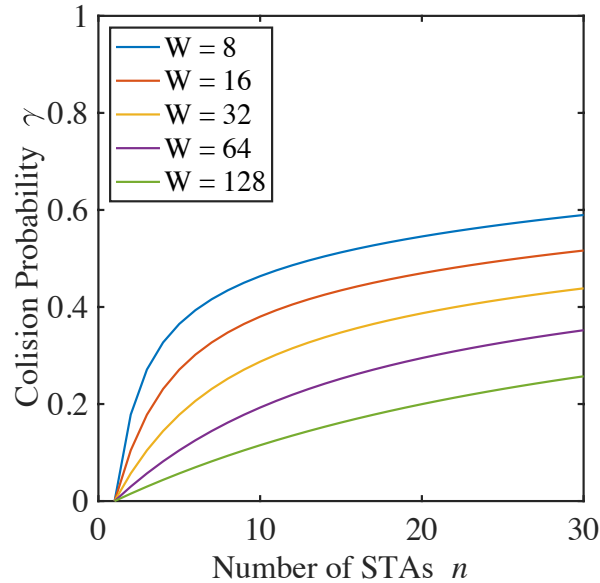
G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.

# 衝突率, 送信確率特性

送信確率



衝突率



スター型シングルホップネットワーク  
(端末台数  $n$  台, 隠れ端末なし)

$$\gamma = 1 - (1 - \tau)^n \quad \tau = \frac{2(1 - 2\gamma)}{(1 - 2\gamma)(W + 1) + \gamma W(1 - (2\gamma))}$$

サンプルプログラムはこちら

<http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/index.php/sampleprogram/>



# 自律分散型FD MAC

- CSMA/CAに基づくチャネルアクセス

- IEEE 802.11 DCF

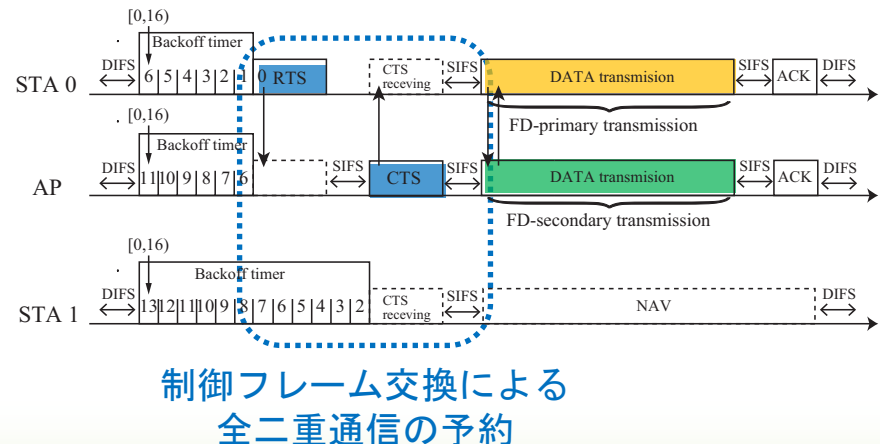
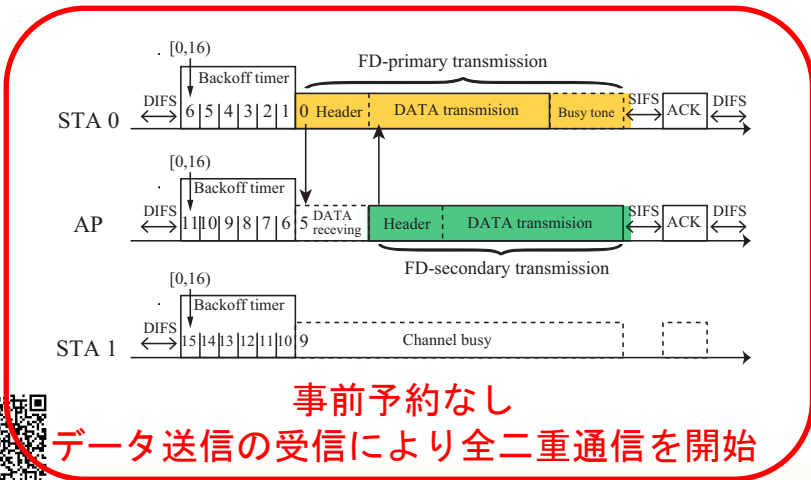
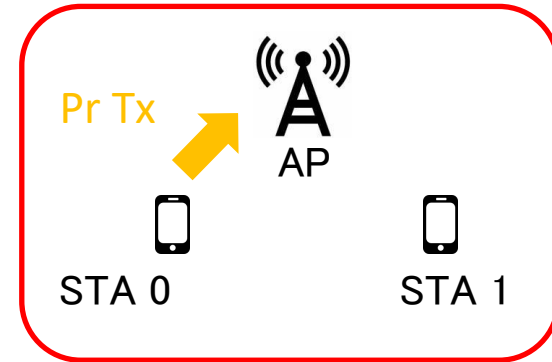
- 全二重通信の事前予約

- なし (非同期型 FD MAC)

- あり (同期型 FD MAC)

- 本質的な動作

- プライマリ送信に呼応してセカンダリ送信開始



# 自律分散型FD MAC

- CSMA/CAに基づくチャネルアクセス

- IEEE 802.11 DCF

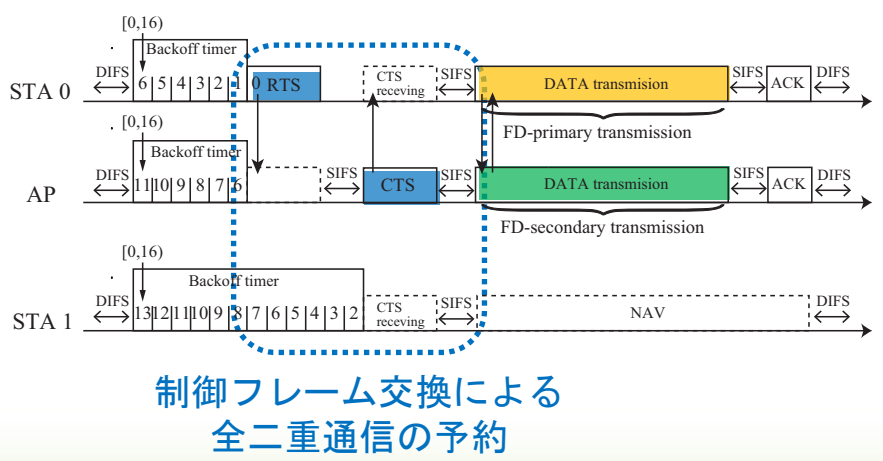
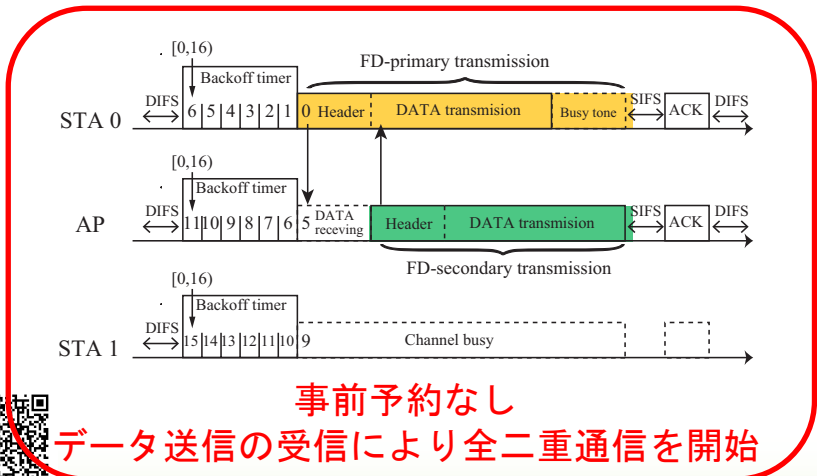
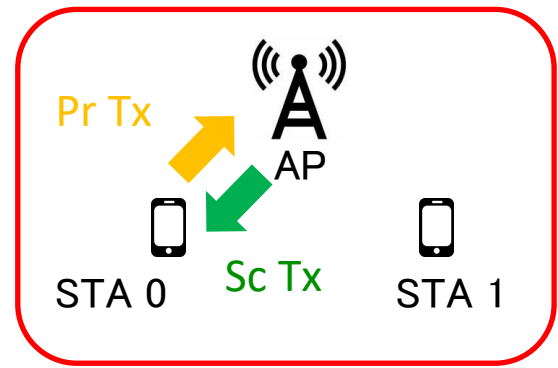
- 全二重通信の事前予約

- なし (非同期型 FD MAC)

- あり (同期型 FD MAC)

- 本質的な動作

- プライマリ送信に呼応してセカンダリ送信開始



# 自律分散型FD MAC

- CSMA/CAに基づくチャネルアクセス

- IEEE 802.11 DCF

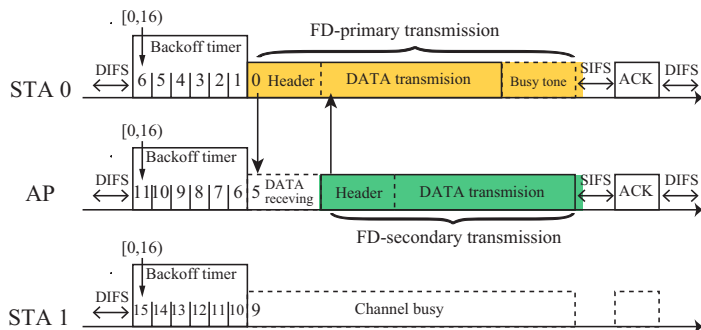
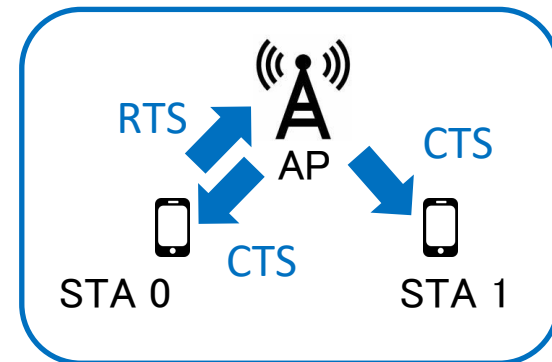
- 全二重通信の事前予約

- なし (非同期型 FD MAC)

- あり (同期型 FD MAC)

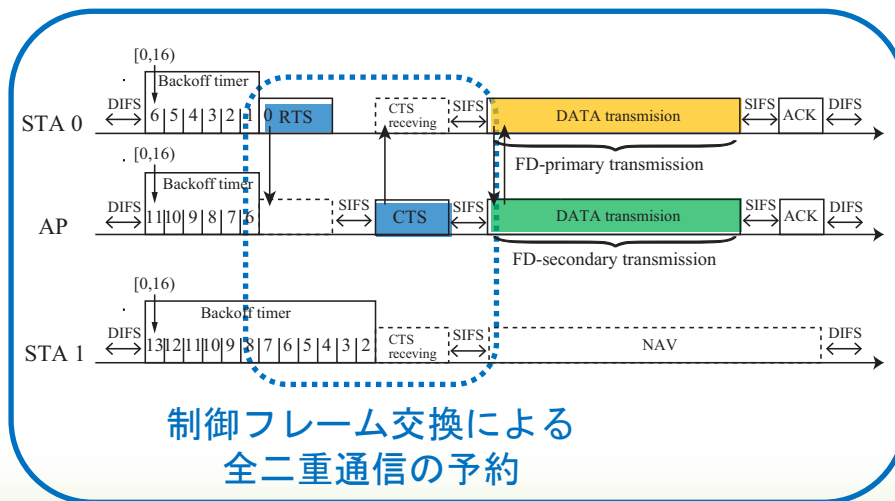
- 本質的な動作

- プライマリ送信に呼応してセカンダリ送信開始



事前予約なし

データ送信の受信により全二重通信を開始



制御フレーム交換による  
全二重通信の予約



# 自律分散型FD MAC

- CSMA/CAに基づくチャネルアクセス

- IEEE 802.11 DCF

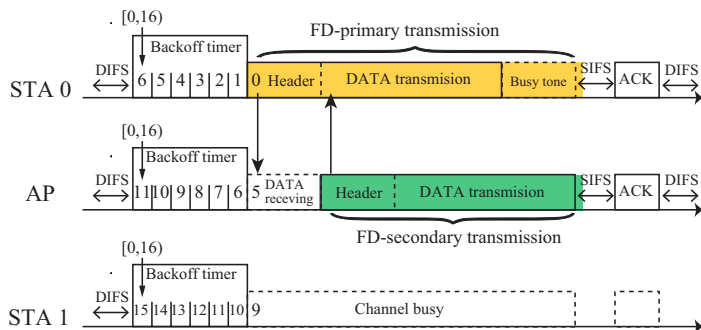
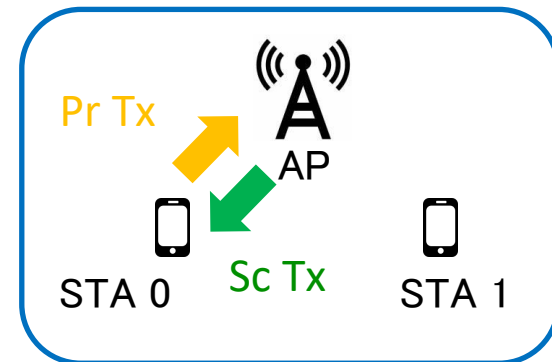
- 全二重通信の事前予約

- なし (非同期型 FD MAC)

- あり (同期型 FD MAC)

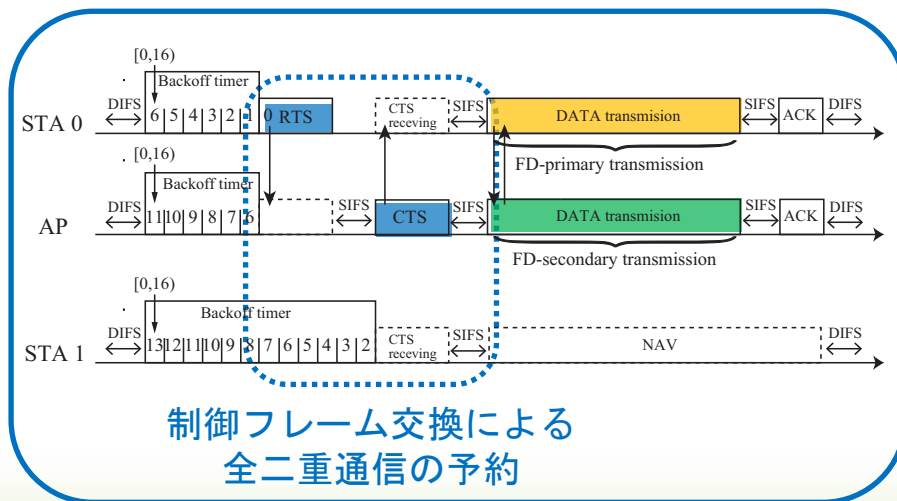
- 本質的な動作

- プライマリ送信に呼応してセカンダリ送信開始



事前予約なし

データ送信の受信により全二重通信を開始



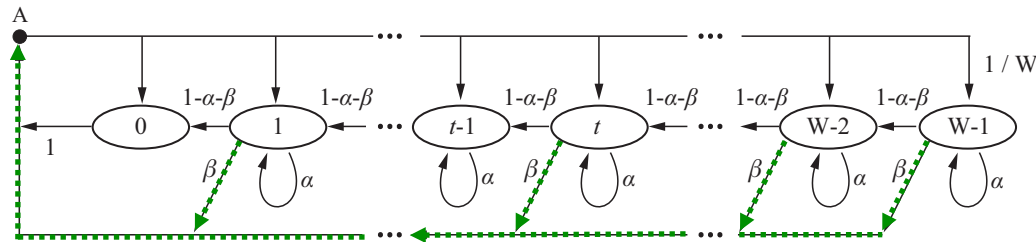
制御フレーム交換による  
全二重通信の予約

# 全二重通信通信NWの解析への拡張[4]

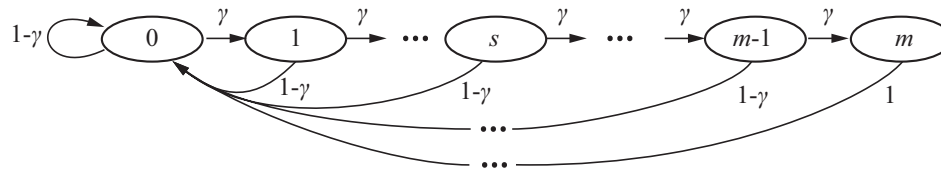
## ■ 要求事項

### ➤ セカンダリ送信の考慮

セカンダリ送信を考慮したマルコフ連鎖モデル



バックオフオフステージ(再送回数)の遷移を表すマルコフモデル



- [4] **K. Sanada** and K. Mori, "Performance Analysis of Full Duplex MAC protocols for Wireless Local Area Networks with Hidden Node Collisions," IEICE Trans. Communications, vol. E103-B, No. 7, Jul. 2020 (to be published).

# プライマリ送信確率 $\tau$ の導出

プライマリ送信確率

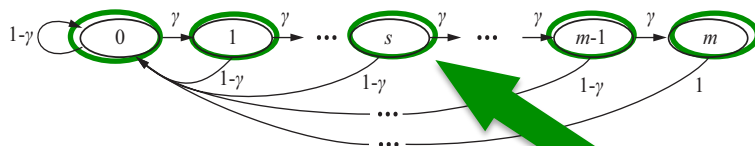
$$\tau = \frac{\sum_S^m \pi_S \times 1}{\sum_S^m \omega_S \pi_S} = \frac{\frac{1 - \gamma^{m+1}}{1 - \gamma}}{\sum_i^m \frac{W_S(\alpha + \beta) - (1 - \alpha - \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^{W_S}]}{(\alpha + \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^{W_S}]}}$$

バックオフカウンtr回数

再送含む送信回数

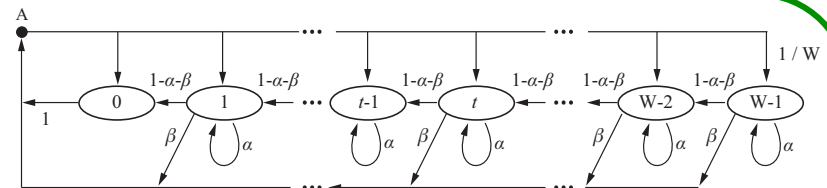
$$\frac{1 - \gamma^{m+1}}{1 - \gamma}$$

$$W \rightarrow W_S = \min(2^S CW_{min}, CW_{max})$$



再送回数  $s$  の確率

$$\pi_s = \frac{\gamma^s (1 - \gamma)}{1 - \gamma^{m+1}}$$



タイマー 0 の確率

$$b_0 = \frac{(\alpha + \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^W]}{W(\alpha + \beta) - (1 - \alpha - \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^W]}$$

平均カウンtr回数

$$\omega = \frac{1}{b_0} = \frac{W(\alpha + \beta) - (1 - \alpha - \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^W]}{(\alpha + \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^W]}$$



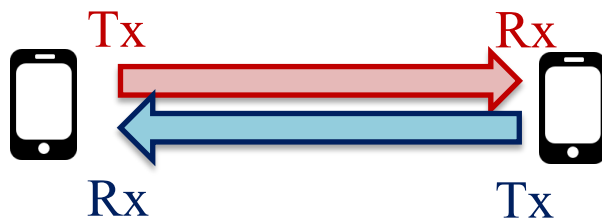
# 解析の仮定とシステムモデル

## ■ 解析の仮定

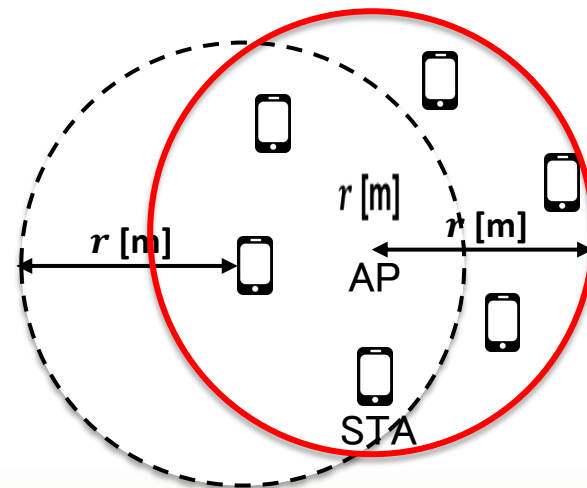
1. 全ての端末は常にキューに送信フレームを持つ(飽和状態)
2. APの先頭フレームの宛先として, 任意の1台が選ばれる確率は $1/n$
3. 双方向全二重通信モードのみを使用.
4. 送信失敗は, 送信フレームの衝突によってのみ生じる.

## ■ スター型シングルホップネットワーク (WLAN)

- APを中心として半径 $r$ [m]以内に  $n$ 台のSTAをランダムに配置)
- 全ての端末のキャリアセンス範囲は $r$  [m]



双方向全二重通信  
(BFD: Bidirectional Full Duplex)



# セカンダリ送信移行確率 $\beta$

- セカンダリ送信(全二重通信)を行う確率
- プライマリ送信確率  $\tau$  の関数として導出

➤ AP

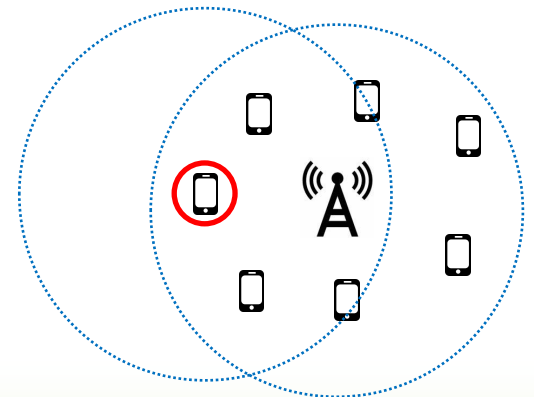
- ✓ STAのプライマリ送信が起点

$$\beta_{ap} = n\tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

➤ STA

- ✓ APのプライマリ送信が起点

$$\beta_{sta} = \tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$



# 衝突率 $\gamma$

- 通信が失敗する確率
- プライマリ送信確率  $\tau$  の関数として導出

➤ AP

- ✓ 隠れ端末なし

$$\gamma_{ap} = 1 - (1 - \tau_{sta})^n$$

➤ STA

- ✓ 競合端末, 隠れ端末の衝突

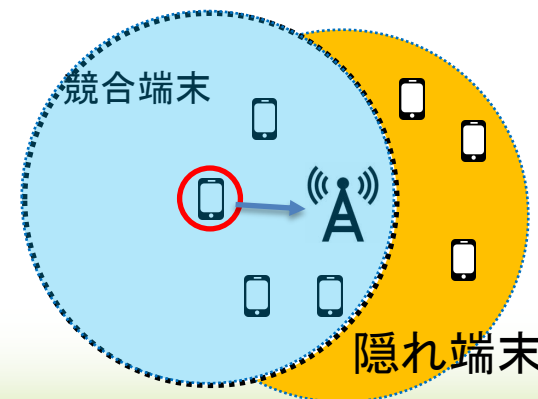
$$\gamma_{sta} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n_c} (1 - \tau_{h_{sta}})^{n_h}$$

$n$ : ネットワークの端末台数

$n_c$ : 競合端末の台数

$n_h$ : 隠れ端末の台数

$$n_c = 0.59n, n_h = 0.41n$$



# フリーズ確率 $\alpha$

- 送信検知によりタイマーカウントを止める確率
- プライマリ送信確率 $\tau$ の関数として導出

➤ AP

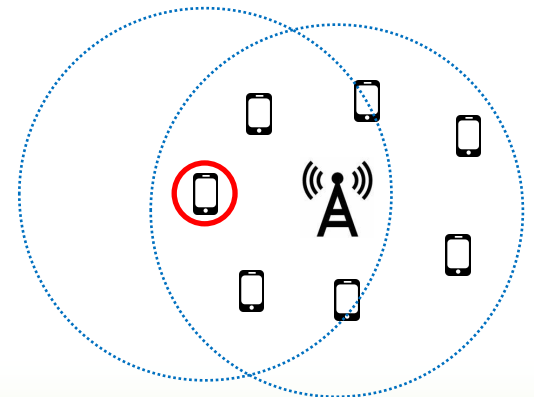
- ✓ STAの送信を検知

$$\alpha_{ap} = 1 - (1 - \tau_{sta})^n$$

➤ STA

- ✓ 検知範囲内STAを検知
- ✓ APのセカンダリ送信を検知

$$\alpha_{sta} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$



# 未知数と代数方程式の整理

$\tau, \beta, \gamma, \alpha$ に関する式

$$\tau_{ap} = f(\alpha_{ap}, \beta_{ap}, \gamma_{ap})$$

$$\tau_{sta} = f(\alpha_{sta}, \beta_{sta}, \gamma_{sta})$$

$$\beta_{ap} = n\tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

$$\beta_{sta} = \tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

$$\gamma_{ap} = 1 - (1 - \tau_{sta})^n$$

$$\gamma_{sta} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n_c}(1 - \tau_{hsta})^{n_n}$$

$$\alpha_{ap} = 1 - (1 - \tau_{sta})^n$$

$$\alpha_{sta} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

$$f(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\frac{1 - \gamma^{m+1}}{1 - \gamma}}{\sum_i^m \frac{W_s(\alpha + \beta) - (1 - \alpha - \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^{W_s}]}{(\alpha + \beta)[1 - (1 - \alpha - \beta)^{W_s}]}}$$

8つの未知数と8つの代数方程式

8つ未知数の値を数値的に導出 (Newton法)





# ネットワークスループットの解析表見

## ■ ネットワークスループット

$$E = \frac{P_{tr} P_{suc} 2L}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_{suc} T_{suc} + P_{tr} (1 - P_{suc}) T_{fail}}$$

- 送信が成功する確率

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau_{ap}) (1 - \tau_{sta})^n$$

送信確率 $\tau$ の関数

- 1台以上の端末が送信を行う確率

$$P_{suc} = \frac{\tau_{ap} (1 - \tau_{sta})^n + \tau_{sta} (1 - \tau_{sta})^{n_c} (1 - \tau_{hsta})^{n_h}}{P_{tr}}$$

同期型と非同期型FD MACの違い

送信成功時のチャネル占有時間:  $T_{suc}$ : 同期型 FD MAC > 非同期型 FD MAC

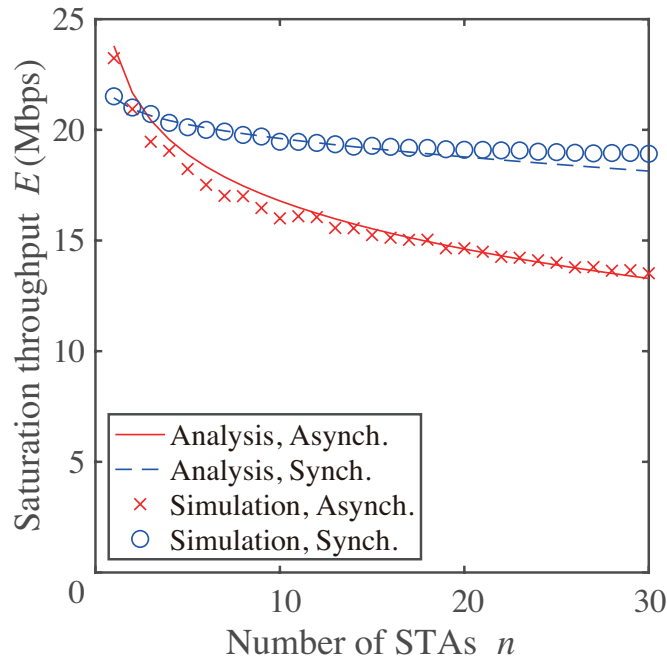
送信失敗時のチャネル占有時間:  $T_{fail}$ : 同期型 FD MAC < 非同期型 FD MAC



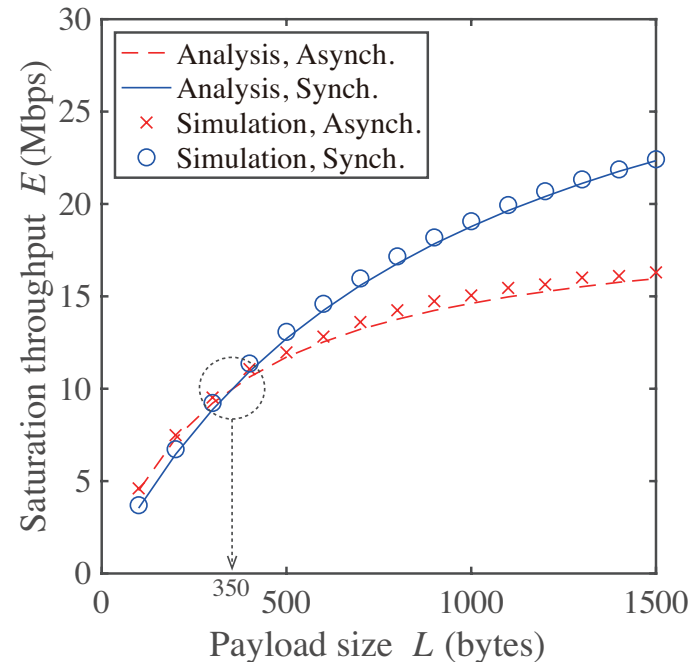
# 解析モデルの妥当性と性能評価

## 同期型と非同期型の比較

ペイロードサイズ  $L = 1000$  bytes



端末台数  $n = 20$



- 解析とシミュレーション結果が一致 → 解析モデルの妥当性
- 同期型が高いスループット
  - 制御フレームの衝突抑制効果 > 全二重通信の衝突抑制効果



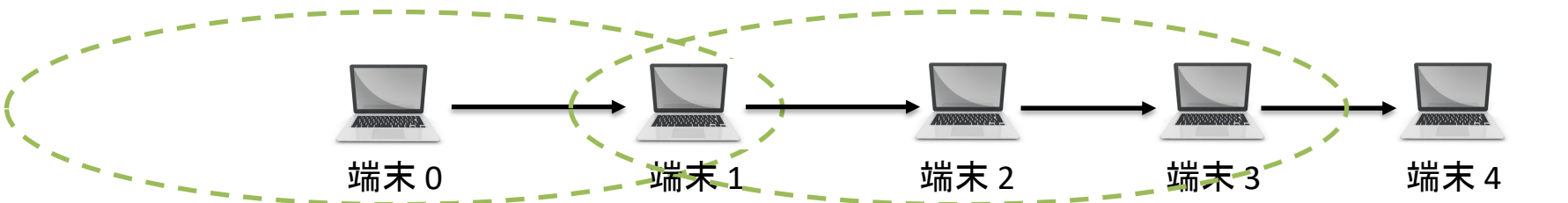
# 無線マルチホップネットワーク

## ■ 特徴

- 端末ごとに衝突, キャリアセンスの影響が異なる
  - ✓ Bianchiの解析手法の適用は困難

## ■ 解析方針

- 端末ごとに異なる動作を考慮
  - ✓ エアタイムを用いた解析手法[6]



[6] P.C. Ng, and S.C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.15, no.2, pp.309-322, Apr. 2007.

# エアタイムを用いた解析手法

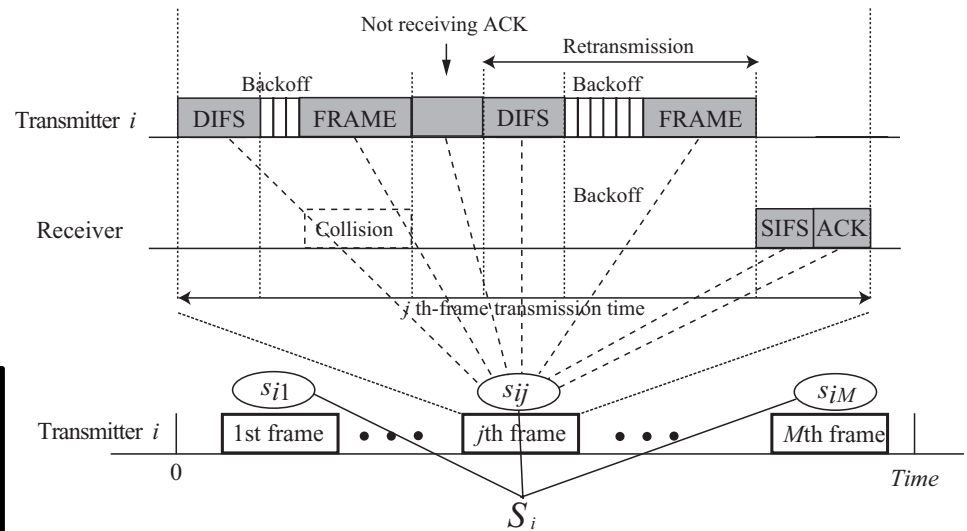
## ■ エアタイムの考え方[6]

➤ 端末*i*がデータ送信中の確率

$$X_i = \lim_{Time \rightarrow \infty} \frac{S_i}{Time}$$

端末*i*のスループット

$$E_i = X_i(1 - \gamma_i) \frac{L}{T_{suc}}$$



$\gamma_i$ : 隠れ端末による衝突率



[6] P.C. Ng, and S.C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.15, no.2, pp.309-322, Apr. 2007.

# エアタイムの解析手法の特徴

- 端末ごとの衝突, キャリアセンスを考慮可能[7]

端末ごとの衝突率

$$r_0 = \frac{X_2}{1 - X_1} \quad r_1 = \frac{X_3}{1 - X_2} \quad r_2 = r_3 = 0$$

端末ごとのキャリアセンスエアタイム

$$Y_0 = X_1 \quad Y_1 = X_0 + X_2 - \frac{X_0 X_2}{1 - X_1} \quad Y_2 = X_1 + X_3 - \frac{X_1 X_3}{1 - X_2}$$
$$Y_3 = X_3$$



端末 0



端末 1



端末 2



端末 3



端末 4



[7] Y. Gao, D. Chiu, and J. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications," Proc. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol.34, no.1, 2006.

# 最大スループットの導出

## ■ エアタイムを用いたパケット保持確率[8]

$$q_i = \min \left( \frac{\lambda_i \sum_{s=0}^m \frac{W_s}{2} \gamma^s}{1 - X_i - Y_i}, 1 \right)$$

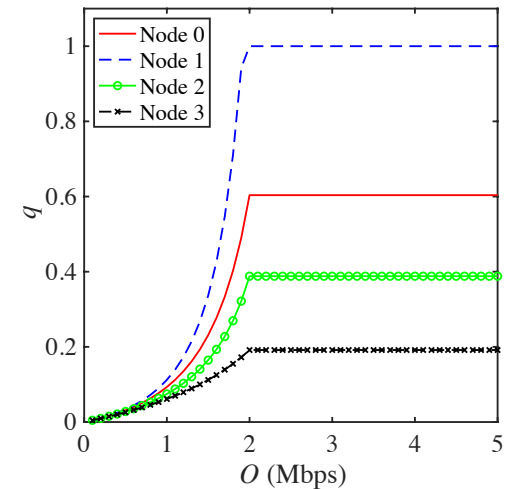
送信待機している時間

送信もキャリアセンスもしていない時間

パケット到着率 = 1ホップ前の端末のスループット

$$\lambda_i = \frac{E_{i-1}}{L} = \frac{X_{i-1}(1 - \gamma_{i-1})}{T_{suc}} \quad \text{データを中継}$$

$$\lambda_0 = \frac{O}{L} \quad \text{データを生起}$$



[8] K. Sanada, N. Komuro, Z. Li, T. Pei, and Y.J. Choi, "Generalized analytical expressions for end-to-end throughput of IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks," Ad Hoc Networks vol.70, pp.135-148, November 2017.

# 全二重通信マルチホップNWの解析への拡張[5]

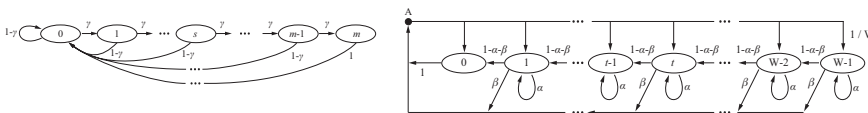
## ■ 方針

- 端末ごとにFD MACの動作を考慮
  - ✓ 端末ごとにセカンダリ送信を考慮

$$\text{プライマリ送信割合} = \frac{\text{プライマリ送信}}{\text{プライマリ送信} + \text{セカンダリ送信}}$$

$$\Delta = \frac{1 - \gamma}{1 - \gamma^{m+1}} \sum_{s=0}^m \frac{1 - (1 - \beta)^{W_s}}{W_s} \cdot \gamma^s$$

2つのマルコフ連鎖モデルから導出



セカンダリ送信エアタイム

$$X_{SCi} = (1 - \Delta_i) X_i$$

セカンダリ送信割合



# 全二重通信を考慮したエアタイムの解析表現

## ■ 3つの送信エアタイム

$$X_i = X_{PR_i} + X_{SC_i} + X_{HD_i}$$

$$X_{PR_i} = \Delta_i X_i$$

$$X_{SC_i} = (1 - \Delta_i) X_i$$

$$X_{HD_i} = X_{PR_i} - X_{SC_{i+1}} = \Delta_i X_i - X_{SC_{i+1}}$$

プライマリ送信

セカンダリ送信

セカンダリ送信が行われなかった場合

## ■ 端末ごとのスループット

$$\begin{aligned} E_i &= [X_{HD_i}(1 - \gamma_i) + (X_{PR_i} - X_{HD_i}) + X_{SC_{i+1}}(1 - \gamma_i)] \frac{L}{T_{suc}} \\ &= [X_i - \gamma_i(X_{HD_i} + X_{SC_i})] \frac{L}{T_{suc}} \end{aligned}$$





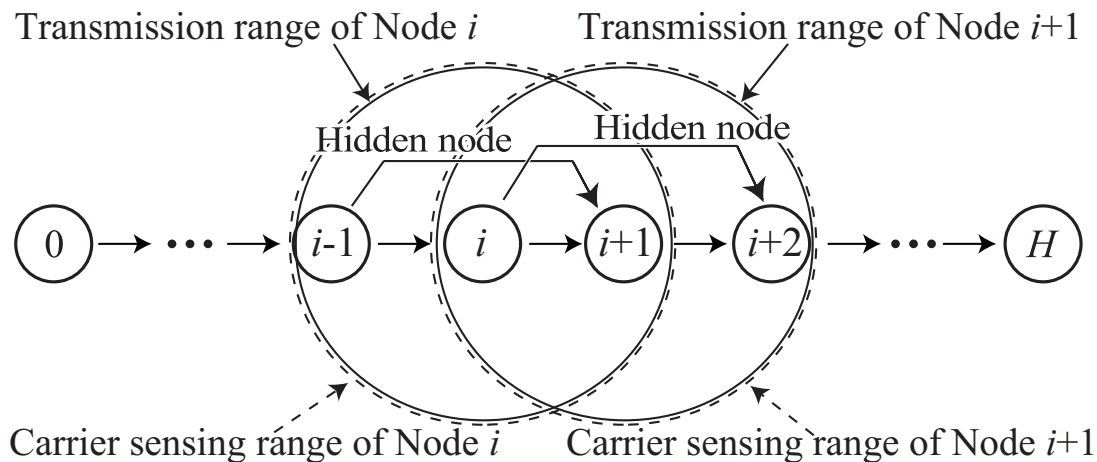
# システムモデル

## ■ 仮定

- 端末0がパケットを生成
- 1ホップ先の端末の送信を検知可能,
- 2ホップ先の端末とは隠れ端末
- 端末 $i$ と端末 $i+1$ とでUFD通信

## ■ ネットワーク

- Hホップネットワーク



# 端末ごとのエアタイムの表現

キャリアセンス

$$Y_i = (X_{i-1} - X_{SCi}) + (X_{i-1} - X_{SCi}) - \frac{(X_{i-1} - X_{SCi})(X_{i-1} - X_{SCi})}{1 - X_i}$$

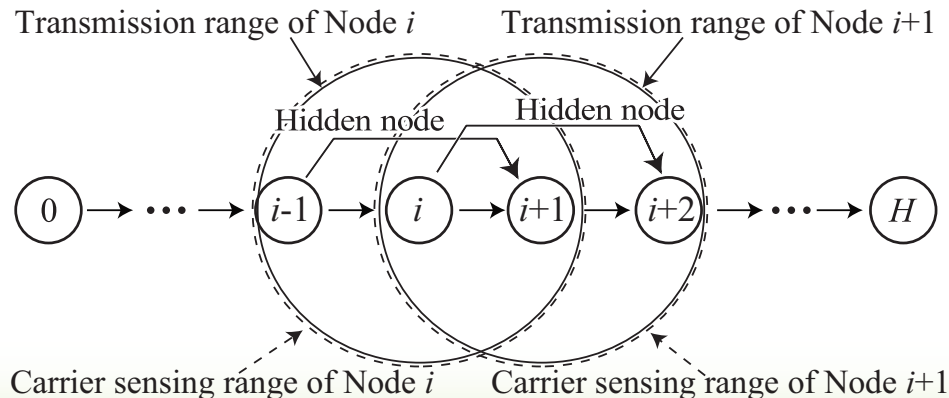
$$= X_{SCi-1} + X_{HDi-1} + X_{PRi+1} - \frac{(X_{SCi-1} - X_{HDi-1})X_{PRi+1}}{1 - X_i}$$

衝突率

$$\gamma_i = \frac{aX_{PRi+2}}{1 - X_{PRi+1}} + \frac{q_{i+2}(1 - X_i - Y_i)\tau_{hi+2}}{1 - X_{PRi+1} - X_{PRi+2}}$$

セカンダリ送信

$$\beta_i = [1 - (1 - q_{i-1})Z_{i-1} - X_{HDi-2} - X_{SCi-2}] \tau_{i-1}$$



# 送信パッケージ保持確率

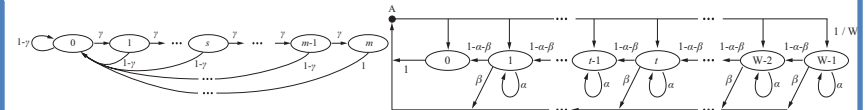
## ■ 送信パッケージ保持確率

$$q_i = \min \left( \frac{\lambda_i \sum_{s=0}^m \gamma^s \frac{W_s \beta_i - (1 - \beta_i)[1 - (1 - \beta_i)^{W_s}]}{\beta_i [1 - (1 - \beta_i)^{W_s}]}}{1 - X_i - Y_i}, 1 \right)$$

送信待機している時間

2つのマルコフモデル

送信もキャリアセンスもしていない時間



$$X_i = X_{PR_i} + X_{SC_i} + X_{HD_i}$$

$$Y_i = (X_{i-1} - X_{SC_i}) + (X_{i-1} - X_{SC_i}) - \frac{(X_{i-1} - X_{SC_i})(X_{i-1} - X_{SC_i})}{1 - X_i}$$

## FD MACの動作を端末ごとに考慮



# 未知数と代数方程式の整理

$X, Y, \gamma, \beta, q, \Delta$ に関する式

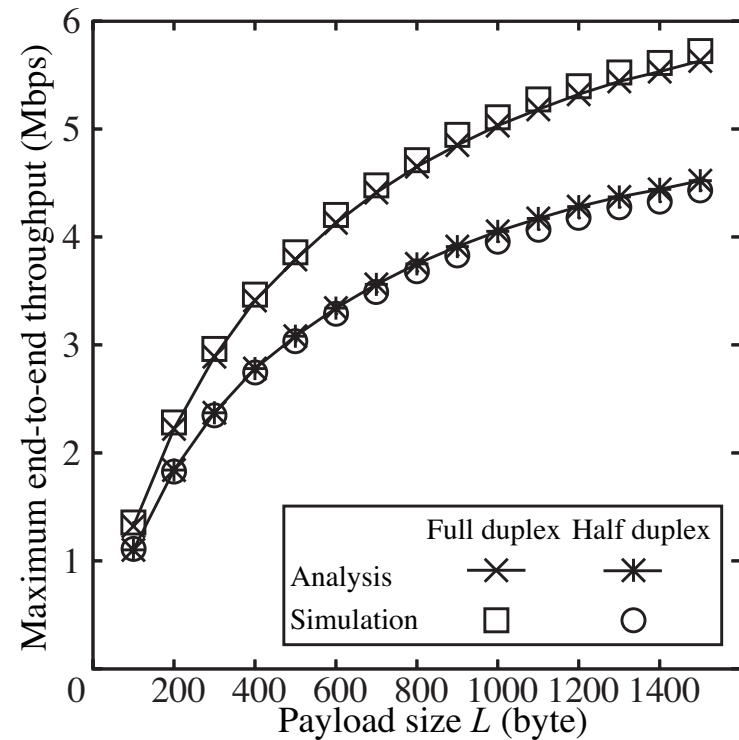
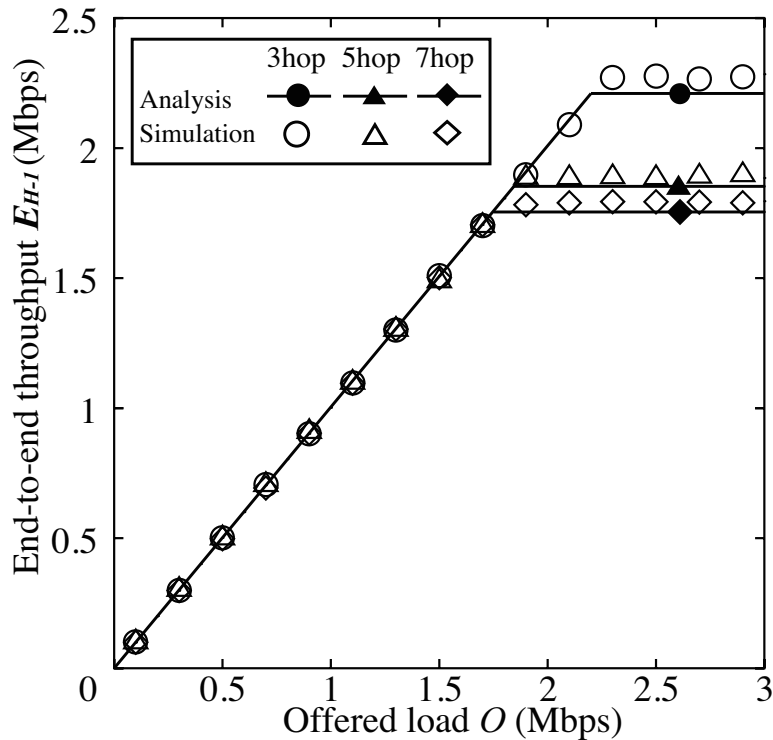
(6つの未知数×ホップ数 $H$ )と(6× $H$ )つの代数方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i = X_{PR_i} + X_{SC_i} + X_{HD_i} \\ Y_i = (X_{i-1} - X_{SC_i}) + (X_{i-1} - X_{SC_i}) - \frac{(X_{i-1} - X_{SC_i})(X_{i-1} - X_{SC_i})}{1 - X_i} \\ \gamma_i = \frac{aX_{PR_{i+2}}}{1 - X_{PR_{i+1}}} + \frac{q_{i+2}(1 - X_i - Y_i)\tau_{h_{i+2}}}{1 - X_{PR_{i+1}} - X_{PR_{i+2}}} \\ \beta_i = [1 - (1 - q_{i-1})Z_{i-1} - X_{HD_{i-2}} - X_{SC_{i-2}}]\tau_{i-1} \\ q_i = \min\left(\frac{\lambda_i \sigma \sum_{s=0}^m \gamma^s \frac{W_s \beta_i - (1 - \beta_i)[1 - (1 - \beta_i)^{W_s}]}{\beta_i [1 - (1 - \beta_i)^{W_s}]}}{1 - X_i - Y_i}, 1\right) \\ \Delta = \frac{1 - \gamma}{1 - \gamma^{m+1}} \sum_{s=0}^m \frac{1 - (1 - \beta)^{W_s}}{W_s} \cdot \gamma^s \end{array} \right.$$



**6× $H$ の未知数の値を数値的に導出 (Newton法)**

# 解析モデルの妥当性の確認



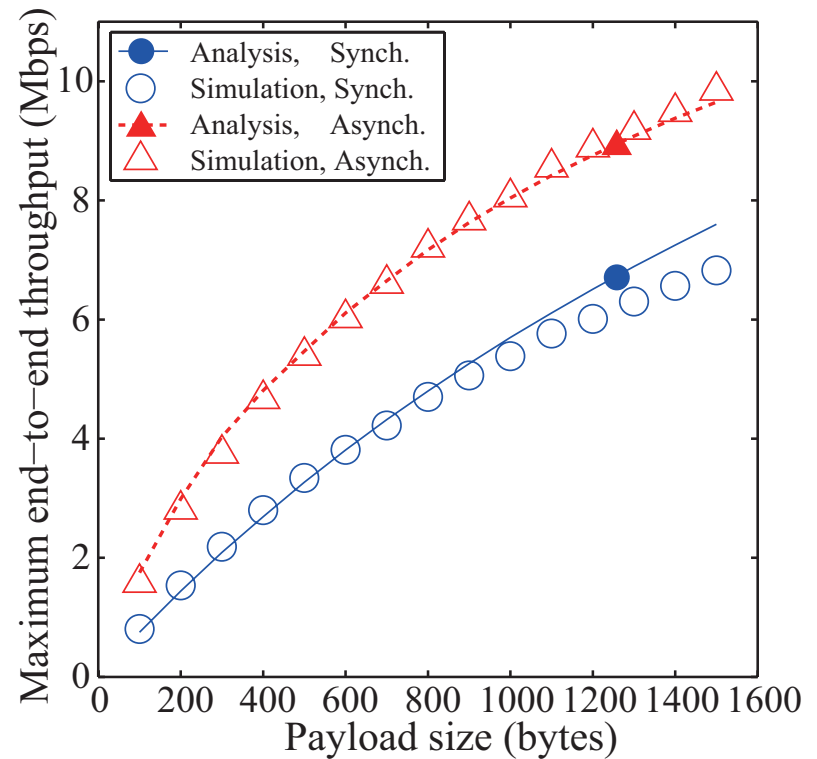
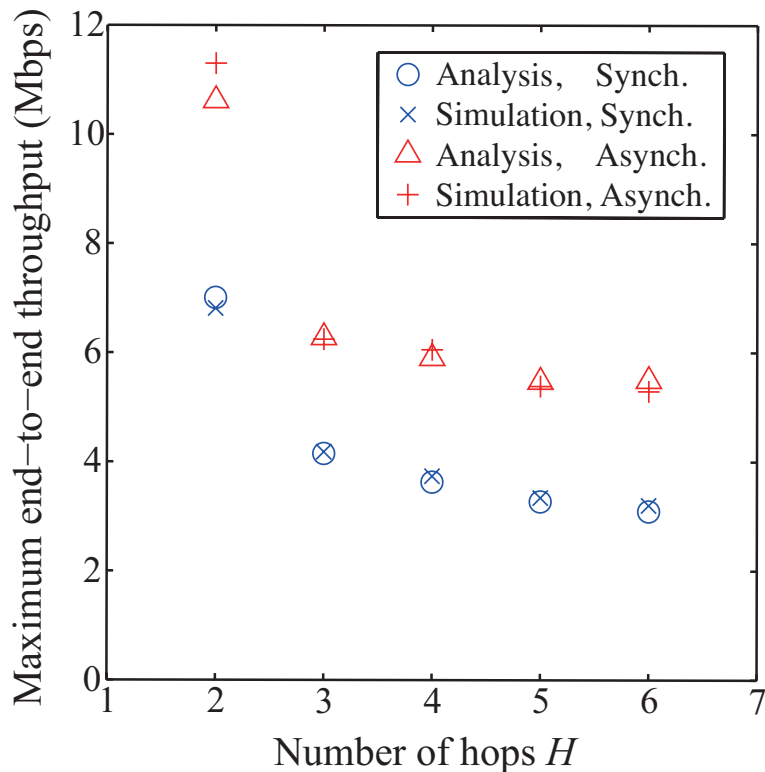
## ■ 全二重通信による利得は2より小さい

### ➤ 要因

- ✓ 通信の失敗
- ✓ 結果的にセカンダリ送信が行われなかったケース



# 同期型[9], 非同期型の性能比較



## ■ 非同期型が高いスループット

➤ 全二重通信で少ないオーバーヘッドで隠れ端末の衝突抑制



[9] Y. Yumen, S. Sakakura, K. Sanada, H. Hatano, K. mori, "Through-put analysis for wireless multi-hop networks with synchronous full- duplex MAC," Proc. IEEE 17th Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, Jan. 2020

# 発表のまとめ

## ■ 内容

- 無線全二重通信とそのMACプロトコル
- 無線全二重通信ネットワークの理論解析手法
  - ✓ BianchiのIEEE 802.11DCFの解析手法
  - ✓ 2つのマルコフ連鎖モデルを用いた解析手法
  - ✓ エアタイムを用いたマルチホップネットワークの解析手法

## ■ 趣旨, ねらい

- 数理モデルを用いたシステムの解析研究の紹介
  - ✓ 利点, 欠点, 研究の面白さ, 難しさ, 意義



# 参考文献まとめ

1. D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in Proc. ACM SIGCOMM, 2013, pp. 375–386
2. K. M. Thilina, H. Tabassum, E. Hossain and D. I. Kim, "Medium access control design for full-duplex wireless system: Challenges and approaches," IEEE Communication Magazine, vol. 53, no. 5, pp. 112-120, May 2015.
3. G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Sel. Areas Commun, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.
4. **K. Sanada** and K. Mori, "Performance Analysis of Full Duplex MAC protocols for Wireless Local Area Networks with Hidden Node Collisions," IEICE Trans. Communications, vol. E103-B, No. 7, Jul. 2020.
5. C. Fujimura, **K. Sanada**, and K. Mori, "Analytical expressions for end-to-end throughput of string-topology wireless full-duplex multi-hop networks," IEICE Trans. Communications, vol. E102-B, No. 6. Jun. 2019.
6. P.C. Ng, and S.C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.15, no.2, pp.309-322, Apr. 2007.
7. Y. Gao, D. Chiu, and J. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications," Proc. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol.34, no.1, 2006.
8. **K. Sanada**, N. Komuro, Z. Li, T. Pei, and Y.J. Choi, "Generalized analytical expressions for end-to-end throughput of IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks," Ad Hoc Networks vol.70, pp.135-148, November 2017.
9. Y. Yumen, S. Sakakura, **K. Sanada**, H. Hatano, K. mori, "Throughput analysis for wireless multi-hop networks with synchronous full-duplex MAC," Proc. IEEE 17th Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, Jan. 2020

