

# アドホックネットワークにおけるストロング ビジートーンの導入とバックオフアルゴリズム 修正の検討と評価

伊藤智洋<sup>a†</sup> 旭健作<sup>††</sup> 渡邊晃<sup>††</sup>

アドホックネットワークの隠れ端末問題を解決するために、IEEE802.11 では RTS/CTS 方式が採用されている。しかし、トラフィック負荷が増加するにつれパケットの衝突が発生しやすい。本稿では、単一周波数の信号からなるビジートーンの電波到達範囲を拡大させたストロングビジートーン(Strong Busy Tone)と呼ぶ特殊な制御信号を用い、さらに CSMA/CA のバックオフアルゴリズムを修正することによりアドホックネットワークのスループットを向上させる方法について提案する。

## Studies on the Introduction of Strong Busy Tone in the Ad Hoc Network and the Modification of Back-off Algorithm

TOMOHIRO ITO<sup>†</sup> KENSAKU ASAHI<sup>††</sup> AKIRA  
WATANABE<sup>††</sup>

In order to solve the problem of a hidden terminal problem in the ad hoc network, RTS/CTS method is adopted in IEEE802.11. However, when traffic load increases, packet collisions tend to occur. In this paper, we propose a method whereby the throughput of the ad hoc network is improved, by using a special signal called “Strong Busy Tone” where the reachable range of the busy tone based on a single frequency is expanded, and by modifying the back-off algorithm of CSMA/CA.

### 1. はじめに

ユビキタス社会に向け無線 LAN 技術の普及が急速に進んでいる。無線 LAN の利点

は配線工事が不要、ノードの移動や設置が容易、また端末設置の自由度が高く容易に LAN の構築が可能である点があげられる。

無線 LAN のネットワーク形態にはインフラストラクチャモードとアドホックモードがある。インフラストラクチャモードは有線で接続されたアクセスポイントを介して通信を行う形態で一般的に利用されている。一方、アドホックモードは無線 LAN ノードどうしが直接通信を行う形態で、インフラを必要としない方式である。直接電波が届かない端末との通信は他の端末を経由することで、マルチホップ通信をするアドホックネットワークを実現することが可能である。アドホックネットワークは一時的なネットワーク構築が容易であり、災害時にインフラが破壊されたような場所で、通信環境を迅速に回復することができる。

アドホックネットワークは隠れ端末問題により大幅にスループットが低下することが知られている。隠れ端末問題とは、互いに電波の到達範囲外にいる送信ノードが、同時に通信を開始すると、中間地点においてデータの衝突が発生する問題である。IEEE802.11 では、隠れ端末問題の対策として RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send)方式が標準規格として採用されている。RTS/CTS 方式では、近隣の端末に対し RTS や CTS を受信させることで仮想的なキャリア検出状態に移行させ、一定期間送信を控えさせることにより衝突を防止する。しかし、RTS/CTS 方式ではトラフィック負荷が増加するにつれ RTS どうしや CTS とデータの衝突が発生することが避けられない。その理由として、RTS/CTS 自体がパケットであるため、一連のシーケンスの実行に所定の時間が必要となるためである。そのため、無駄な送信や、送信待機時間の増加が発生する。従って、RTS/CTS 方式だけでは隠れ端末問題を完全に解決したとは言えない。RTS/CTS 方式の課題を解決する方法としてビジートーンを用いた技術 1)~6)が提案されているが課題を完全に解決するには至っていない。

次に、無線 LAN の効率を落とす別の要因として、CSMA/CA の待機時間が必要以上に大きいことがあげられる。IEEE802.11 で規格されている待機時間には無駄が多く、衝突した後の待機時間が長いために、スループットの低下を招いている。待機時間を見直す技術 9)~12)が提案されているがバックオフアルゴリズムの計算方法を工夫する方法が多く、スロットタイムの大きさを見直すというアプローチは少ない。

そこで、本論文ではストロングビジートーン(SBT: Strong Busy Tone)7)8)と呼ぶビジートーンの電波到達範囲を拡大した特殊な制御信号を用い、周辺端末を制御することで隠れ端末同士の同時送信を防止する。また、スロットタイムの値の無駄な部分を省き CW の値を調整することにより、スループットを大幅に改善する方法を提案する。

以下、2 章では既存技術とその課題について、3 章では提案方式についてそれぞれ説明を行う。4 章では各提案方式について検討を行った結果の説明を行う。最後に 5 章でまとめを行う。

<sup>†</sup>名城大学大学院理工学研究科  
Graduate School Science and Technology, Meijo University

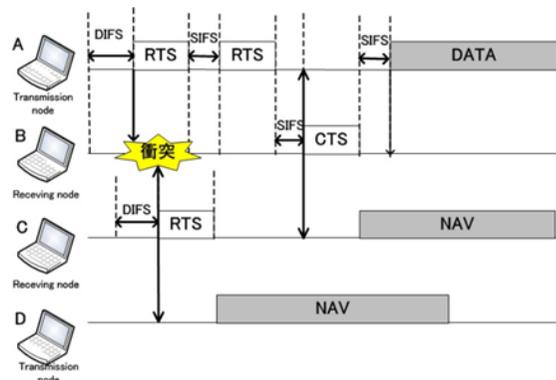


図1 RTS/CTS方式の課題(1)

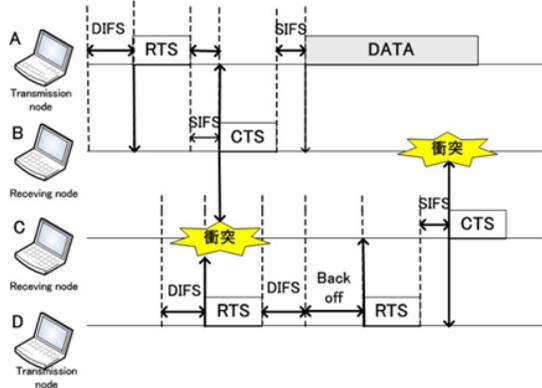


図2 RTS/CTS方式の課題(2)

## 2. 既存技術とその課題

### 2.1 RTS/CTS方式の課題

RTS/CTS方式の課題の例を図1に示す。ノードAとノードCは隠れ端末の関係にあり、ノードAからノードBに送信が行われる例を示す。図1では、ノードAとノードCがほぼ同時にノードBに対して通信を開始しており、衝突が発生する。RTSの再送が必要になることによりスループットが低下する。また、ノードDはRTSを受信するため無駄な待機時間が発生し、スループットが低下する原因となる(さらし端末問題)。

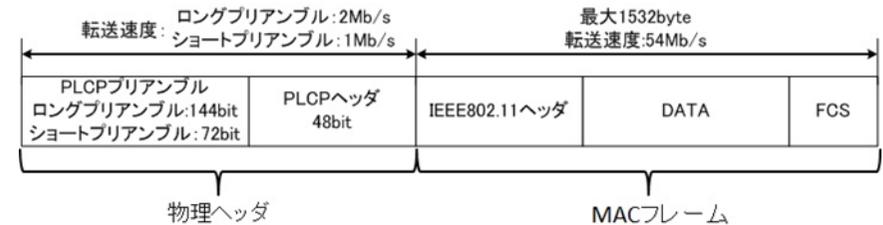


図3 PLCPのフォーマット

RTS/CTS方式の課題の別の例を図2に示す。ノードAが送信したRTSに対して、ノードBはCTSを返信して送信を許可する。ここで、RTS/CTSのやりとりの間にさらに遠隔にあるノードDがRTSを送信すると、ノードBが送信したCTSとノードCの部分で衝突する。ノードDはCTSの応答がないため、RTSを再送信する。一方、ノードAはノードBからのCTSを受信すると、ノードCで衝突が発生していることに気付かずノードBに対してデータ送信を始める。ノードCはノードDからのRTSに回答してCTSを送信するため、ノードAのデータと衝突する。これにより、ノードAは再送信が必要となり、スループット低下の原因となる。

これらの課題はRTS/CTSがパケット交換であるために送信にある程度の時間を必要とし、衝突が発生しやすいことに起因している。そのため、通信が混雑するほどスループットが大幅に低下する。

### 2.2 PLCPに起因する問題

PLCP(Physical Layer Convergence Protocol)とは、無線でパケットを送信する際に必ず必要となるヘッダ情報である。PLCPは、PLCPプリアンブルとPLCPヘッダで構成されている。PLCPプリアンブル部分には受信装置が同期を確立するために必要な情報が記載されており、PLCPヘッダ部分にはMACフレームの速度に係る情報が定義されている。PLCPのパケットフォーマットを図3に示す。

IEEE802.11gではMACフレーム部分の通信最大速度は54Mbpsであるが、PLCPは全ての端末が受信できるよう2Mbpsと定義されている。このため、MACフレームよりPLCP部分の方がはるかに長い時間を要する場合がある。PLCPはデータだけでなくRTS、CTS、ACKなどにも付加される。表1にIEEE802.11gにおけるシーケンスの所要時間を示す。表1に示すようにRTS、CTS、ACKはいずれもMACフレーム本体部分が $3\mu s$ 程度で送信されるのに対し、PLCP部分に $26\mu s$ という時間を要す。

RTS/CTSのMACフレームは短く定義されているもののPLCPを含むパケット全体の送信に要する時間は大きく衝突の可能性を高くする大きな要因となっている。

表 1 802.11g におけるシーケンスの所要時間( $\mu$ s)

DIFS		34
Backoff		135~9207
RTS	PLCP	26
	本体	3
SIFS		10
CTS	PLCP	26
	本体	3
DATA	PLCP	26
	本体(MAX)	227
ACK	PLCP	26
	本体	3

### 2.3 ビジートーンを用いた解決策

RTS/CTS 方式の課題の一部を解決できる技術として、ビジートーンを用いた技術が提案されている。ビジートーンとは、単一の周波数の電波で、送信ノードが通信中であることを周囲に伝える制御信号である。ビジートーンは、小さな電力で広範囲において受信可能であるため、それによる電力消費の増加は小さい。また、複数の装置が同時にビジートーンを発生させたとしても、周辺の装置はこれを検知することができる。DBTMA (Dual Busy Tone Multiple Access)1)2)では RTS/CTS の送信時と DATA 送信時にビジートーンを送信し周辺端末を制御する。図 1、図 2 と同様の状況で DBTMA を適用した場合の例を図 4、図 5 に示す。図 4 では RTS と同時にビジートーンを送信するが、ノード C までは制御できたため C は送信を開始する。そのため、ノード B で衝突が発生し、図 1 の状況は改善できない。図 5 ではノード B は CTS と同時にビジートーンを送信するが、ノード D までは制御できたため D は送信を開始する。そのため、ノード C で衝突が発生する。しかし、ノード C はノード B からのビジートーンを受け続けているため、D からの RTS 再送に対し CTS を返すことはなく、図 2 の状況を改善できる。以上に示すように RTS/CTS 方式の課題はビジートーンの制御だけでは防ぐことができないことがわかる。

DBTMA の応用技術として、FPDBT(Fixed Power Dual Busy Tone)3)と VPDBT(Variable Power Dual Busy Tone)3)が提案されている。しかし、この方式は RTS/CTS 方式の課題の解決ではなくさらし端末問題の解決に焦点を当てている。FPDBT では送信時に干渉が発生する範囲が伝達範囲よりも広範囲になった場合、干渉の発生する最大範囲に対してビジートーンを送信し周辺端末を制御する。

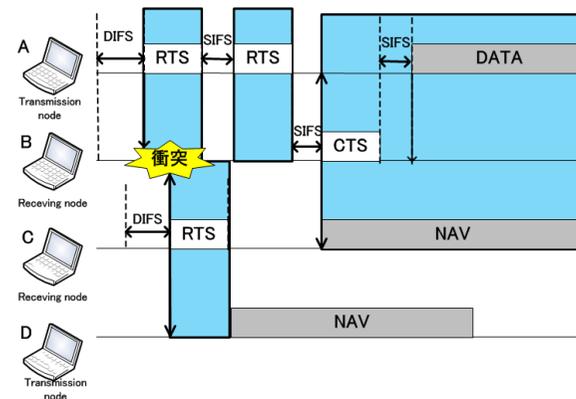


図 4 DBTMA の動作(1)

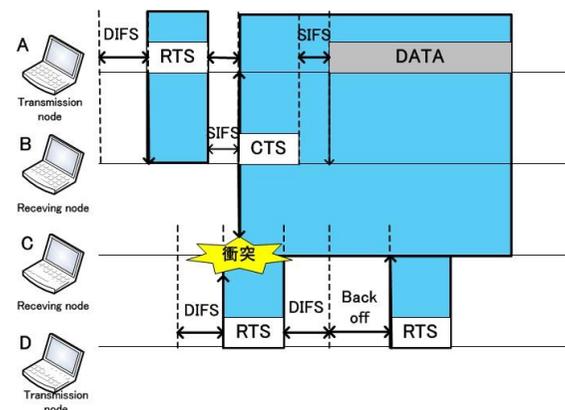


図 5 DBTMA の動作(2)

VPDBT では干渉が発生する範囲をビジートーンで調査する。ビジートーンを送信している間に、衝突が発生するとビジートーンの送信範囲を拡大し、衝突が発生しないとビジートーンの送信範囲を縮小することで帯域の占有を防いでいる。ADBT(A Novel Dual Busy Tone)4)では、2つのチャネルを使用し送信時と受信時にビジートーンを個別に設定することで干渉範囲の変化にも対応できる。

このように、既存のビジートーン技術は隣接端末を制御するだけであるため RTS/CTS 方式の課題を完全には解決することはできない。

## 2.4 バックオフアルゴリズムに係る既存技術

バックオフ時間はスロットタイム(以下  $\Delta t$ )と CW の範囲内で発生した乱数の値を以下の式で演算したものである。

$$\text{Back off} = \Delta t \times \text{randam}(0.CW)$$

Random(0.CW)は、0~CW の範囲の一様な分布から生成されたランダムな整数値である。CW は、最小値が CWmin と最大値が CWmax の値の範囲内の整数で以下の式で求められる。n は再送回数で所定の回数に達すると送信に失敗したとみなしフレームを破棄する。

$$CW = (CW_{\min} + 1) \times 2^{(n-1)}$$

CW の範囲は指数関数的に増加するため、トラフィックが増加したときは送信を控え、さらにトラフィックが増加することを防止できる。しかし、乱数の演算において複数のノードが同一乱数を生成した場合がありますので、衝突を完全に回避することはできない。

バックオフ時間を改善するための関連研究として 9)では、 $\Delta t$  の値を素数に設定することにより乱数の演算において 2 の倍数になった場合に衝突が発生するのを防いでいる。10)では、CW サイズを小さくすることで優先的に動作させる AP を設けることによりスループットの向上をはかる。これらの方式では CW を変更することにより衝突を軽減しスループットを向上させる効果が認められるが、 $\Delta t$  の値については現状の値を前提としている。そのため、 $\Delta t$  の最適値を考慮することにより、さらに改善の余地があるものと考えられる。

## 3. 提案方式

本論文では、RTS/CTS の課題を解決するためにストロングビジートーン(SBT)とバックオフアルゴリズム修正を提案する。

### 3.1 SBT の導入

SBT は、ビジートーンの電波到達範囲を拡大することにより遠隔のノードを制御することを可能とした制御信号である。各ノードは、RTS および CTS を送信する際に、電波強度を拡大した SBT を同時に送信することにより、遠隔ノードが送信することを防止する。SBT の到達範囲は、RTS 送信時には通常の通信範囲の 3 倍、CTS 送信時には 2 倍の距離に拡大して送信する。各ノードは SBT を検出した場合、キャリアを検出し

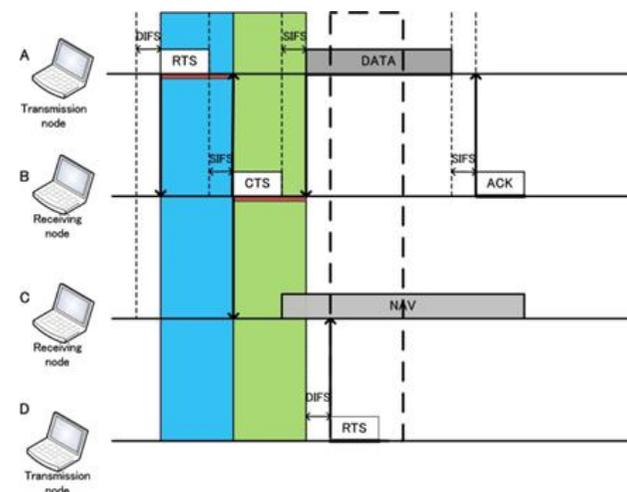


図 6 SBT の動作

た状態となり新たな通信を行うことができない。ただし、通信を既に行っている際は、SBT を検出してもそれを無視する。

図 6 に SBT を導入した場合の動作を示す。ノード A は RTS 送信と同時に端末 D まで到達するよう SBT の電波到達範囲を 3 倍に拡大し送信する。次にノード B は CTS 送信と同時に端末 D に到達するよう SBT の電波到達範囲を 2 倍に拡大し送信する。これにより、図 1、図 2 に示すような衝突を防ぐことができる。SBT による送信抑制が終了後にノード D が RTS 送信を行った場合、ノード C は既に NAV 状態に入っているため CTS を応答しない。このとき、ノード D の送信する SBT がノード A、ノード B に到達するが通信中のため SBT は無視される。

SBT は情報を持たない単一電波であるため、瞬時に制御がかけられる。そのため、RTS/CTS の交換に時間がかかるという課題を解決することができる。

### 3.2 バックオフアルゴリズムの修正

SBT によりパケットの衝突は大幅に軽減するものの完全になくすことはできない。その理由はバックオフ時間の演算において複数のノードが同一乱数を生成すると再送開始タイミングが全く同時になる場合があるためである。そこで、バックオフ時間におけるアルゴリズムを修正することにより再送時におけるパケット衝突をさらに軽減する。本方式ではバックオフ時間の演算に用いられる  $\Delta t$  の値を最適化することで性能を向上させる。

IEEE802.11 では  $\Delta t$  の値は以下の式 13)によって定義されている。

$$\Delta t = \text{CCATime} + \text{Air PropagationTime} + \text{RxTxTurnaroundTime} + \text{MacProcessingDelay}$$
$$\text{CCATime} = \text{RxTxDelay} + \text{PLCPDelay}$$

- RxTxDelay : 送受信間の遅延(2  $\mu$  s)
- PLCPDelay : PLCP による遅延(2  $\mu$  s)
- Air PropagationTime : 伝搬時間(1  $\mu$  s)
- RxTxTurnaroundTime : 送受信間往復時間(2  $\mu$  s)
- MacProcessingDelay : MAC の処理時間(2  $\mu$  s)

IEEE802.11g では、上記の要素の合計から  $\Delta t$  が 9  $\mu$  s と定義されている。この式は無駄な時間が含まれており、 $\Delta t$  を小さく設定することが可能である。無線通信においては衝突を検知することができないため RxTxTurnaroundTime は不必要な時間である。SBT はパケットではないため PLCP は不要である。そのため、PLCPDelay を考慮する必要はない。また、SBT は情報を含まないため送受信間での遅延や、復号等の時間を必要としない。そのため RxTxDelay や MacProcessingDelay を考慮する必要はない。上記のことから、SBT を用いた場合、 $\Delta t$  の値は Air PropagationTime のみ考慮すればよい。

SBT の伝搬時間は、電波到達距離を 100m とすると約 0.3  $\mu$  s で到達する。提案方式では SBT で 3 ホップ先の端末を制御するため、 $\Delta t$  は 3 ホップ先のノード(300m)に SBT が届く時間、すなわち約 0.9  $\mu$  s でよい。 $\Delta t$  をここでは余裕をもって 1.0  $\mu$  s と設定する。

$\Delta t$  を小さくすることで無駄な待ち時間を減少し、スループットの向上させることが可能である。 $\Delta t$  を小さくしたことに伴い、CW のサイズを調整することにより同一乱数が発生する確率を減少させ衝突を防ぐことができる。 $\Delta t$  の値と CW のサイズについてはトレードオフがあり、提案方式を用いる環境に応じて適用する必要がある。トレードオフの関係については 4 章で説明する。

## 4. シミュレーション

### 4.1 シミュレーション環境

SBT およびバックオフアルゴリズム修正による効果を ns-2 によるシミュレーションを行い測定した。 $\Delta t$  の値は 802.11g の定義値 9.0  $\mu$  s と提案値 1.0  $\mu$  s の 2 通りを実行した。また CW のサイズについては  $\Delta t$  を 1/9 にしたことから従来の 15~1023 と 135

~9207(従来値の 9 倍)の 2 通りを実行した。

表 2 にシミュレーションパラメータを、表 3 に測定端末と背景負荷端末の条件を、図 7 にシミュレーションのネットワーク構成を示す。各端末は 1 ホップ先の端末までの電波が届くように 90m 間隔で設置した。電波到達範囲は 100m とし、SBT の到達範囲は RTS 送信時は 300m、CTS 送信時は 200m とした。

表 3 に示すように、測定用の TCP 通信は通信タイプは FTP 通信を想定し、送信するパケットのサイズは 1000Byte とした。背景負荷の UDP 通信は VoIP (Voice over Internet Protocol) を想定し、パケットサイズ 200Byte、パケット発生率は 0.064Mbps の CBR(Constant Bit Rate)とした。

図 7 に示すように測定用 TCP 通信を行う端末として、送信端末を 12、宛先端末を 32 とする。背景負荷は、端末 12 と端末 32 を除く 35 台の端末からランダムに送信端末と宛先端末を選択し UDP 通信を行わせた。

シミュレーション開始から 20 秒後に TCP 通信を開始する。この時は TCP セッションが 1 本確立されているだけである。その後 10 秒毎にランダムに選択された 2 台の端末間で UDP セッションを確立し、背景負荷を徐々に増やしていく。このときに対象の TCP スループットがどのように変化するかを測定した。

表 2 共通のシミュレーションパラメータ

アドホックネットワーク	
ノード数	37 台
電波到達範囲	100 (m)
SBT3 電波到達範囲	300 (m)
SBT2 電波到達範囲	200 (m)
端末間距離	90 (m)
フィールド	1000×1000 (m)
伝搬方式	Two Ray Ground
アンテナタイプ	OmniAntenna
ルーティングプロトコル	AODV
計測時間	330 (s)
アクセス方式	802.11g
無線帯域	54 (Mbps)

表3 測定端末と背景負荷の条件

測定用 通信端末	ノード数	2台
	通信タイプ	FTP
	トランスポートプロトコル	TCP
	パケットサイズ	1000(Byte)
背景負荷	ノード数	2~60台
	通信タイプ	CBR
	トランスポートプロトコル	UDP
	パケットサイズ	200(Byte)
	パケット発生率	0.064(Mbps)

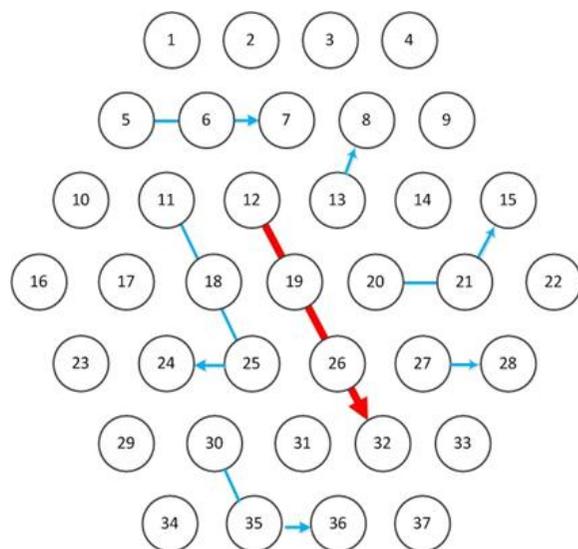


図7 ネットワーク構成

測定時は SBT の使用状態、 $\Delta t$  の値、CW の値により以下の 4 つのケースにおいてシミュレーションを行った。各ケースのパラメータを表 4 に示す。各ケースの状態は以下のようにした。

表4 各ケースのパラメータ

	SBTの有無	$\Delta t$	CW(min/max)
ケース1	無	9.0 $\mu s$	15/1023
ケース2	有	9.0 $\mu s$	15/1023
ケース3	有	1.0 $\mu s$	135/9207
ケース4	有	1.0 $\mu s$	15/1023

- ・ケース1：RTS/CTS方式による既存技術の通信
- ・ケース2：SBTのみを適用した状態の通信
- ・ケース3：SBTを適用した上で $\Delta t$ を小さくしCWを拡大した状態の通信
- ・ケース4：SBTを適用した上で $\Delta t$ を小さくしCWを変更しない状態の通信

## 4.2 実行結果

図8にシミュレーションの結果を示す。図8の横軸は背景負荷端末数、縦軸は測定端末間のTCPスループットである。表5は各ケースにおける衝突回数、TCPスループット、およびパケットロス率を示す。今回の結果は、20回分のシミュレーションで得られた結果の平均値である。

UDPセッション数が増えるごとに段階的にTCPスループットが低下していくことが分かる。これは、UDPの通信量が増加することでネットワークのトラフィックが増大し、TCP通信とUDP通信の衝突が発生するためTCPの通信可能帯域が減少するためである。そのため、既存方式を用いたケース1では背景負荷端末が増加することで図1や図2に表すような衝突が頻繁に発生しスループットが低下している。ケース2は、SBTを適用することで隠れ端末を制御しているため背景負荷端末が増加しても衝突の発生を防ぐことができている。そのため、衝突回数はケース1と比較し約1/11倍に軽減している。ケース1に比べ通信開始時においては大きな差は無いが、背景負荷端末が増加すると衝突防止の効果があらわれ、スループットが最大で4倍に向上している。

ケース3は、 $\Delta t$ を小さくしCWを拡大することで衝突がケース1と比較し1/31倍と大幅に軽減していることが分かる。 $\Delta t$ を小さくすることで通信待機時間が短縮されており、背景負荷端末が存在していない状態においてもケース1よりスループットが向上し、スループットは最大で6倍に向上することができる。しかし、衝突数の減少に見合うだけのスループット向上に結びついていないことがわかる。

ケース4は、 $\Delta t$ のみを変更することで今回の結果の中で最もよいスループットが得られた。衝突回数だけを見るとケース2、ケース3より大きい値を示している。この結果は、衝突回数を減らすより、送信開始時の無駄な待機時間を短縮する方がスル

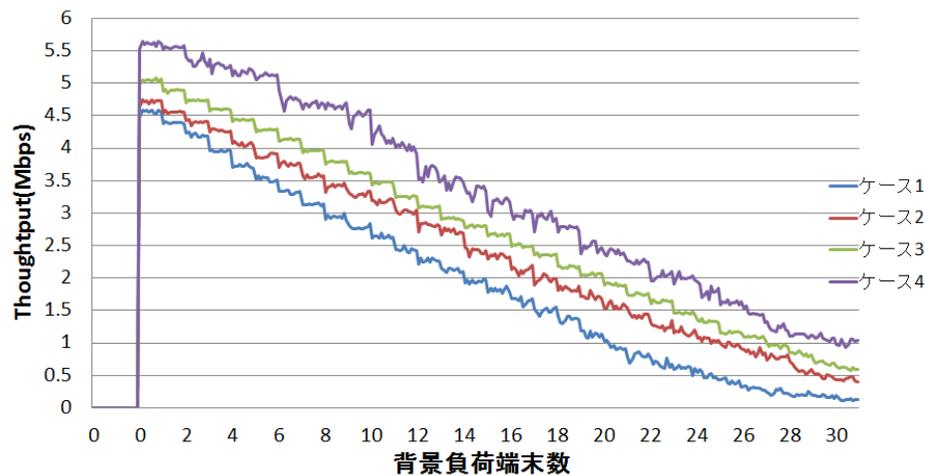


図8 802.11gにおける既存技術と提案技術とのスループットの比較

表5 各ケースの実行結果

	衝突数	TCP スループット (Mbps)		パケットロス率 (%)
		背景負荷無	背景負荷大	
ケース 1	123326	4.5	0.1	$2.6 \times 10^{-4}$
ケース 2	11654	4.6	0.4	$1.8 \times 10^{-5}$
ケース 3	3927	5.0	0.6	$1.5 \times 10^{-5}$
ケース 4	14528	5.5	1.0	$2.0 \times 10^{-5}$

スループット向上に効果があると示している。ケース1と比較しスループットは10倍に向上することができる。

ケース3とケース4を比較すると、ケース3において衝突回数が最も減少しているにも関わらずケース4の方がスループットが向上している。これは SBT を適用することで、図1、図2に示す RTS/CTS の衝突が大幅に減少するためである。バックオフ時間が発生する回数が少なく同一乱数が発生する確率が低い。CW を拡大することで衝突確率を低くしても効果は薄い。そのため、CW を拡大することなく待機時間を短縮した方が効率が良いと考えられる。

上記結果から、衝突数とスループットはトレードオフの関係になっていることが分

かる。今回のシミュレーション条件では、ケース4が最も高いスループットを示したが、条件を変更することでより良い結果が出る可能性が残されている。

## 5. まとめ

RTS/CTS 方式における課題を解決するために、SBT を導入し、かつバックオフ時間の修正により大幅にスループットを向上させる方式を提案した。SBT を用いることで、隠れ端末同士の RTS 送信による衝突や遠隔の端末の通信による衝突を大幅に減少させることができる。バックオフ時間の修正を行うことで、送信開始の無駄な時間を減少させることができる。シミュレーションの結果提案方式の有用性を確認した。提案方式を用いることでスループットは最高で約10倍まで向上することができた。

SBT により周辺端末を制御することができるので RTS/CTS を用いない方法も考えられる。今後は SBT を用いた様々な工夫を検討する予定である。

## 参考文献

- 1) Zygmunt J. Haas, Jing Deng. : Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) : A New Medium Access Control for Packet Radio Networks, IEEE ICUPC' 98, Vol.2, pp.973-977 (1998)
- 2) Zygmunt J. Haas, Jing Deng. : Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) : A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks, IEEE Trans. Communications, Vol.50, No.6, pp.975-985 (2002)
- 3) Supeng leng, Liren Zhang, Yifan Chen: IEEE 802.11 MAC Protocol Enhanced by Busy Tones, Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on
- 4) Ke Liu, Supeng Leng, Huirong Fu, Longjiang Li : A Novel Dual Busy Tone Aided MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks, Dependable, Autonomic and Secure Computing, 2009. DASC '09. Eighth IEEE International Conference on
- 5) 萬代雅希, 笹瀬巖: 無線アドホックネットワークにおけるビジートーン信号を用いたメディアアクセス制御プロトコルの特性解析, 電子情報通信学会技術研究報告. CS, 通信方式 101(54), 7-12, 2001-05-11
- 6) 藤原敏希, 関谷大雄, 萬代雅希, 呂建明, 谷萩隆嗣: 送信範囲の異なる端末で構成される無線アドホックネットワークにおけるビジートーンを使用した MAC プロトコル, 情報処理学会論文誌 47(9), 2815-2829, 2006-09-15
- 7) 後藤秀暢, 渡邊晃: アドホックネットワークのスループットを向上させるストロングビジートーンの提案, IPSJ SIG Technical Report, 情報処理学会研究報

告, 2011-MBL-57, Vol. 2011, No. 26, pp. 1-8, Mar. 2011.

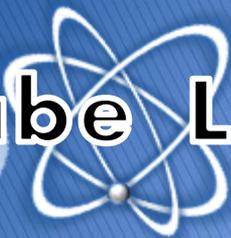
- 8) 森一養, 渡邊晃, 後藤秀暢: ストロングビジートーンを用いたアドホックネットワークにおけるメディアアクセス方式の提案, 全国大会講演論文集, 2011(1), 151-153, 2011-03-02
- 9) 井之丸雄太, 田邊造, 川端信吾, 松江英明: 素数スロット時間とキュー制御を用いた最大遅延保証, 信学技報, IEICE Technical Report, RCS2006-241(2007-3)
- 10) 加藤秀明, 船曳信生, 中西透: 無線メッシュネットワークでのコンテンツウィンドウサイズ操作時のスループット測定結果, 信学技報, IEICE Technical Report, RCS2007-115(2007-12)
- 11) 笠原浩平, 梅林健太, 神谷幸宏, 鈴木康夫: チャンネル占有率情報に着目した最少 CW サイズ制御による周波数共用技術, 信学技報, IEICE Technical Report, SR2008-72(2009-1)
- 12) 吉岡俊博, 大坐島智, 川島幸之助: IEEE802.11における基地局の動的なコンテンツウィンドウ制御による端末ごとの帯域割り当て方式, 信学技報, IEICE Technical Report, NS2009-12(2009-04)
- 13) **IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).**



# アドホックネットワークにおける ストロングビジートーンの導入と バックオフアルゴリズム修正の提案

名城大学大学院 理工学研究科  
伊藤智洋，旭健作，渡邊晃

Watanabe Lab.

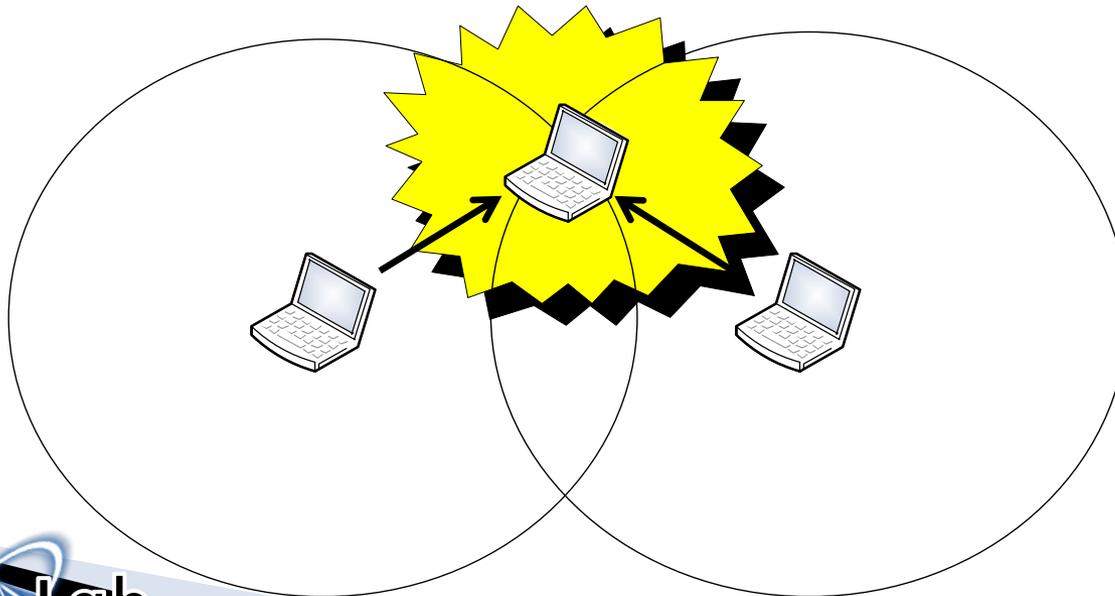


# 研究背景

- ▶ 現在ユビキタス社会に向け無線LAN技術の普及が急速に進んでいる
- ▶ 端末の増加に伴いパケット衝突によるスループットの低下が問題視されている
- ▶ 無線LANの形態
  - インフラストラクチャモード  
⇒ アクセスポイントを介して通信を行う
  - アドホックモード  
⇒ アクセスポイントの介在なしに相互に接続して通信を行う

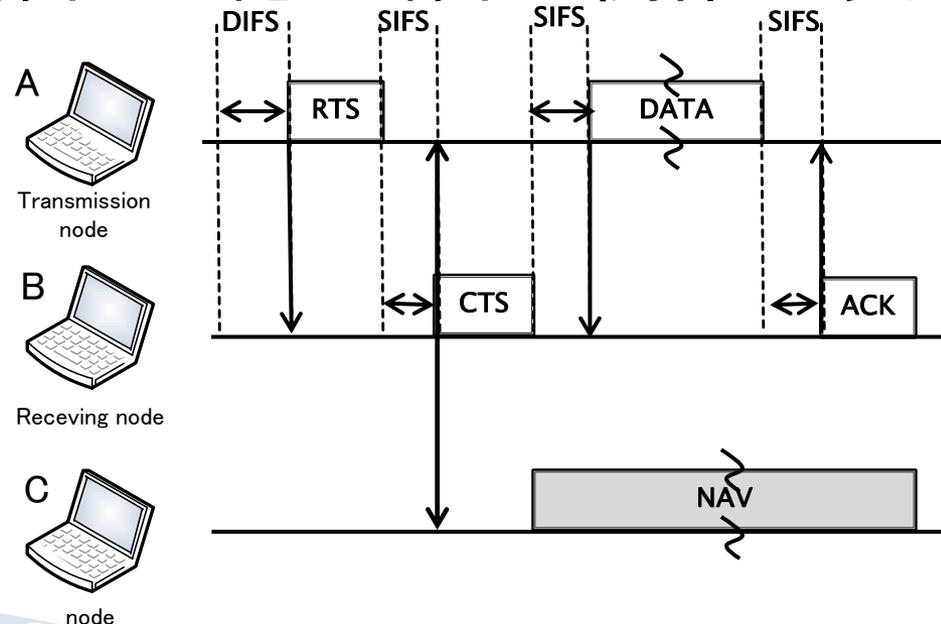
# 隠れ端末問題

- ▶ 隠れ端末問題
  - 無線LAN環境では互いに認識していない端末の行動は分からない
    - ⇒ 同じ対象に同時に通信を行う可能性がある
- ▶ 隠れ端末問題を解決するための2つの方式を提案する

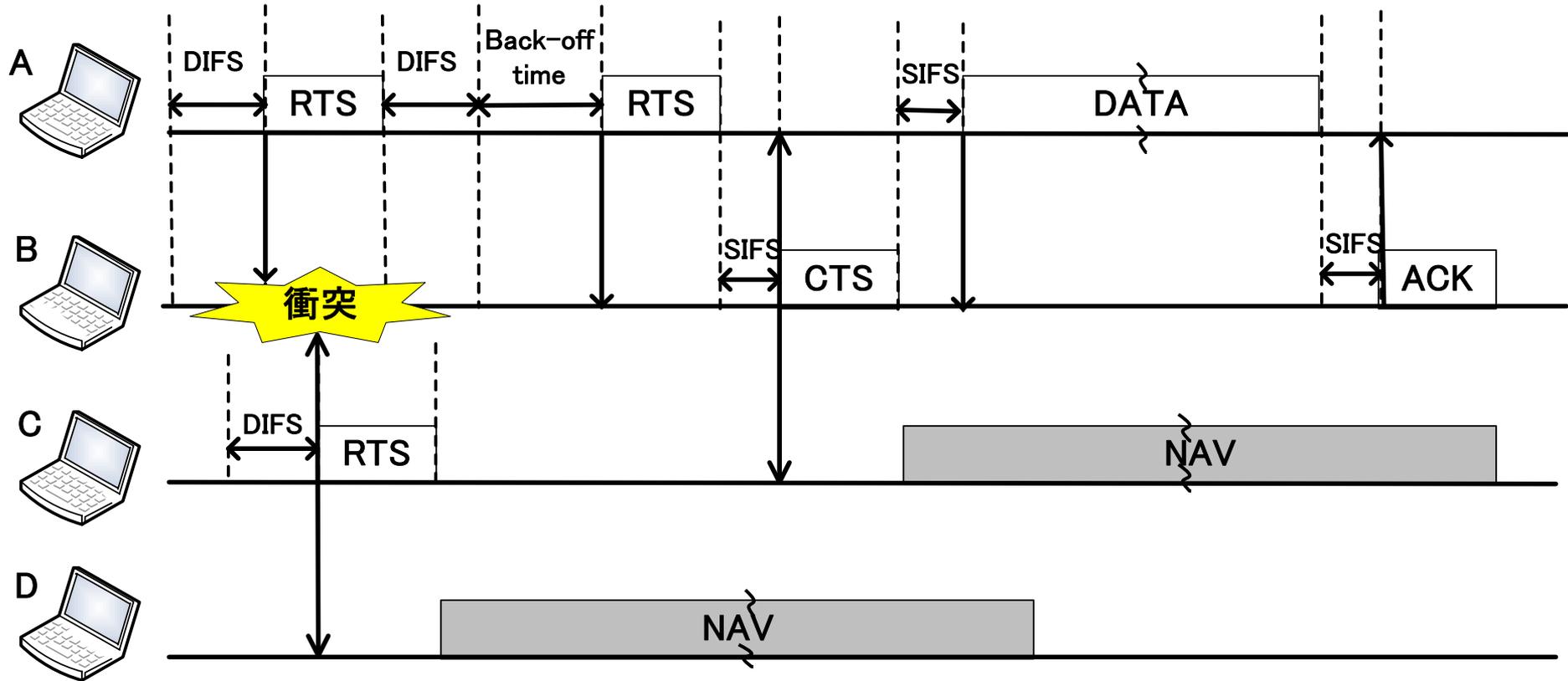


# RTS/CTS方式

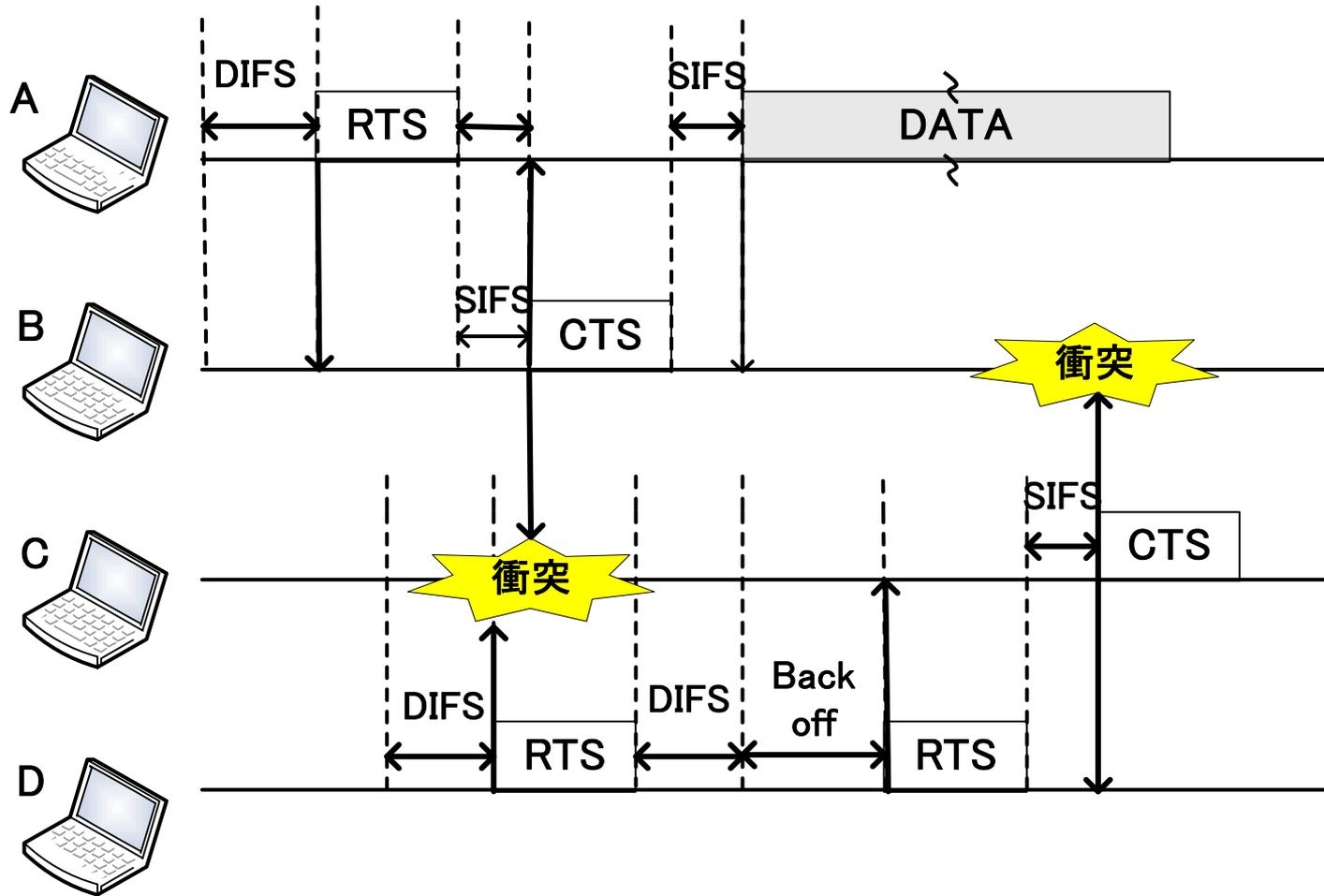
- IEEE802.11ではRTS/CTS方式による送信予約によって隠れ端末問題を解決している
- RTS(Request to Send)は送信予約、CTS(Clear to Send)は予約完了を表す
- 端末Aと端末Cは隠れ端末の関係にある



# RTS/CTSの課題



# RTS/CTS方式の課題



# RTS/CTSの課題

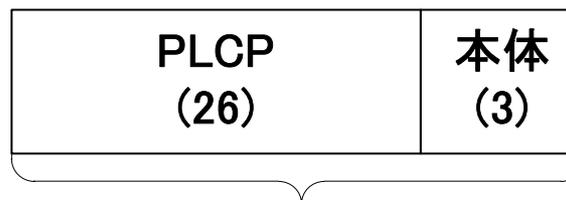
- RTS/CTS自体がパケットであるため制御に時間がかかる
- RTS/CTSでは隣接端末しか制御できない
- RTS,CTS同士で衝突が発生する

# PLCP



## ➤ PLCP

- 受信信号の同期や伝送速度などデータ通信速度識別に用いる情報が記載されている
- 全ての端末が受信できるように最低速度で送信される



RTS 単位( $\mu$ s)

# ビジートーン

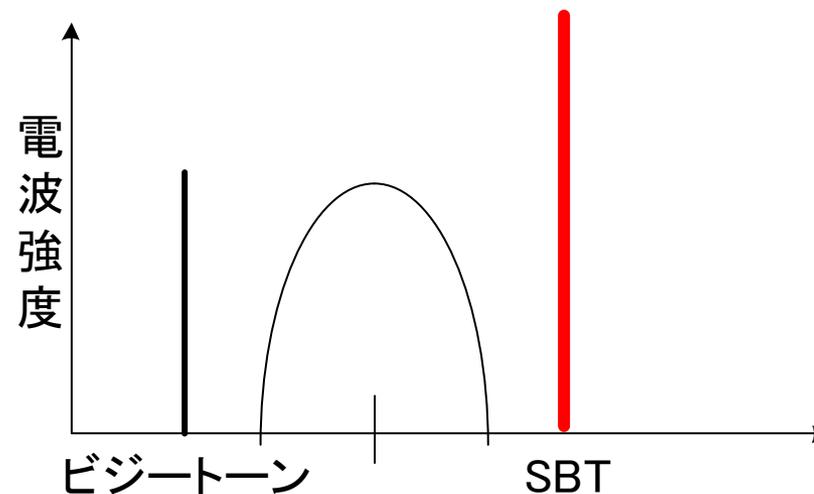
- ▶ ビジートーンとは
    - 単一の周波数の電波
    - 送信ノードが通信中であることを周囲に伝える制御信号
    - 小さな送信電力でも広範囲に受信可能
- ⇒ 電力消費が小さい

▶ 既存技術では隣接端末までしか制御できない

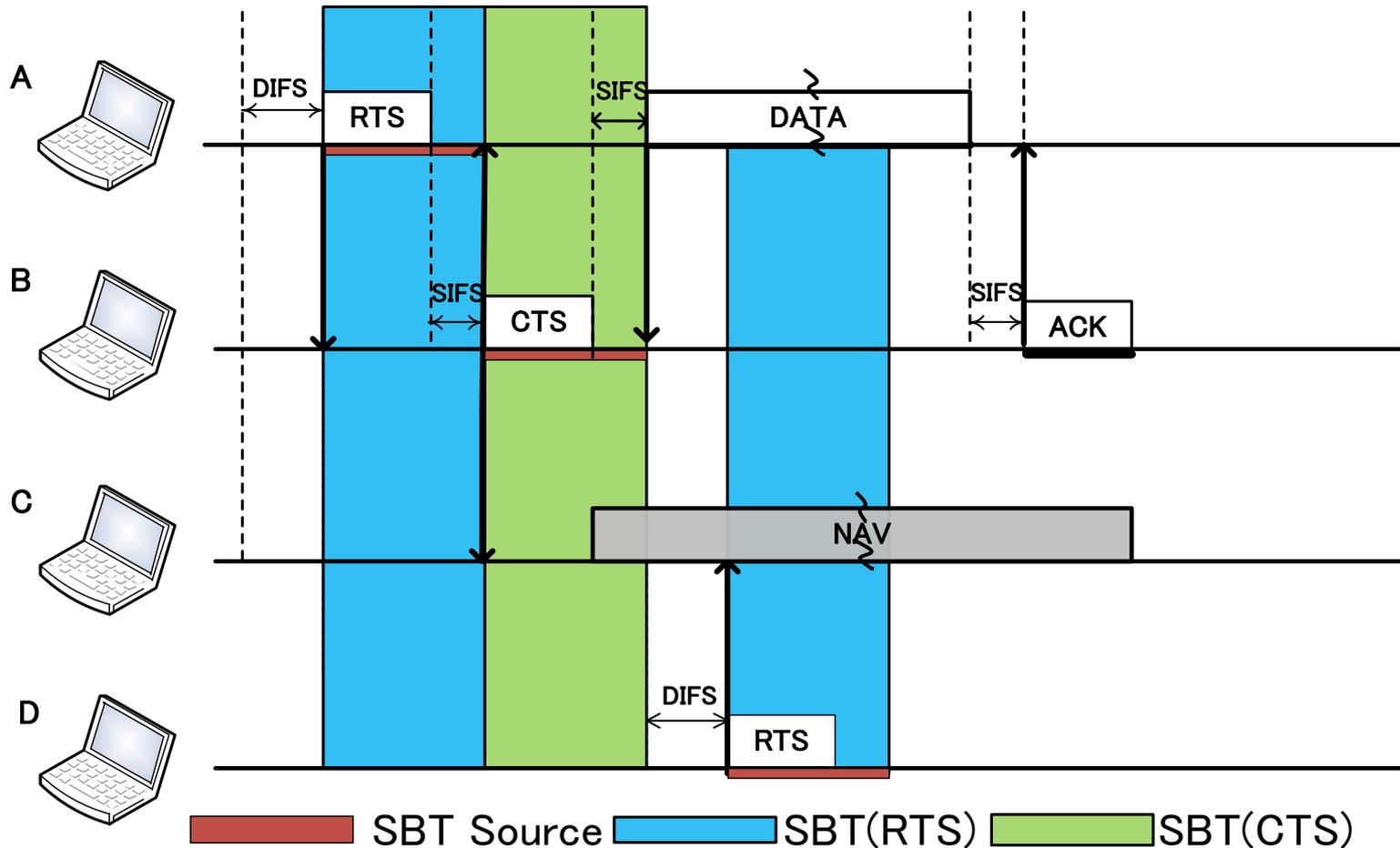
# 提案方式 I (SBT)

## ➤ SBT(Strong Busy Tone)

- ビジートンの電波到達範囲を拡大させ広範囲の端末を制御する
- SBTを受信した端末は通信ができない
- 通信中にSBTを受信しても無視し通信を継続



# SBTの動作



➤ **RTS,CTSと同時にSBTを送信**

# 提案方式Ⅱ (バックオフ修正)

- ▶ バックオフ時間
  - 衝突が発生し再送を行う際に発生
  - 再送のタイミングをずらすための待機時間
- ▶ 既存方式で待機時間に無駄がある
  - 待機時間を最適化することで通信性能を向上できる
- ▶ バックオフ時間が重なり再度衝突する可能性がある
  - 複数の端末で同一の乱数が発生してしまうため

# バックオフ修正

- Backoff =  $\Delta t \times (CWmin + 1) \times 2^n - 1$
- IEEE802.11gの規定
  - $\Delta t$ : 9.0 $\mu$ s
  - CWmin: 15
  - CWmax: 1023
- $\Delta t$ の値を最適化することで通信性能を向上する

# バックオフ修正

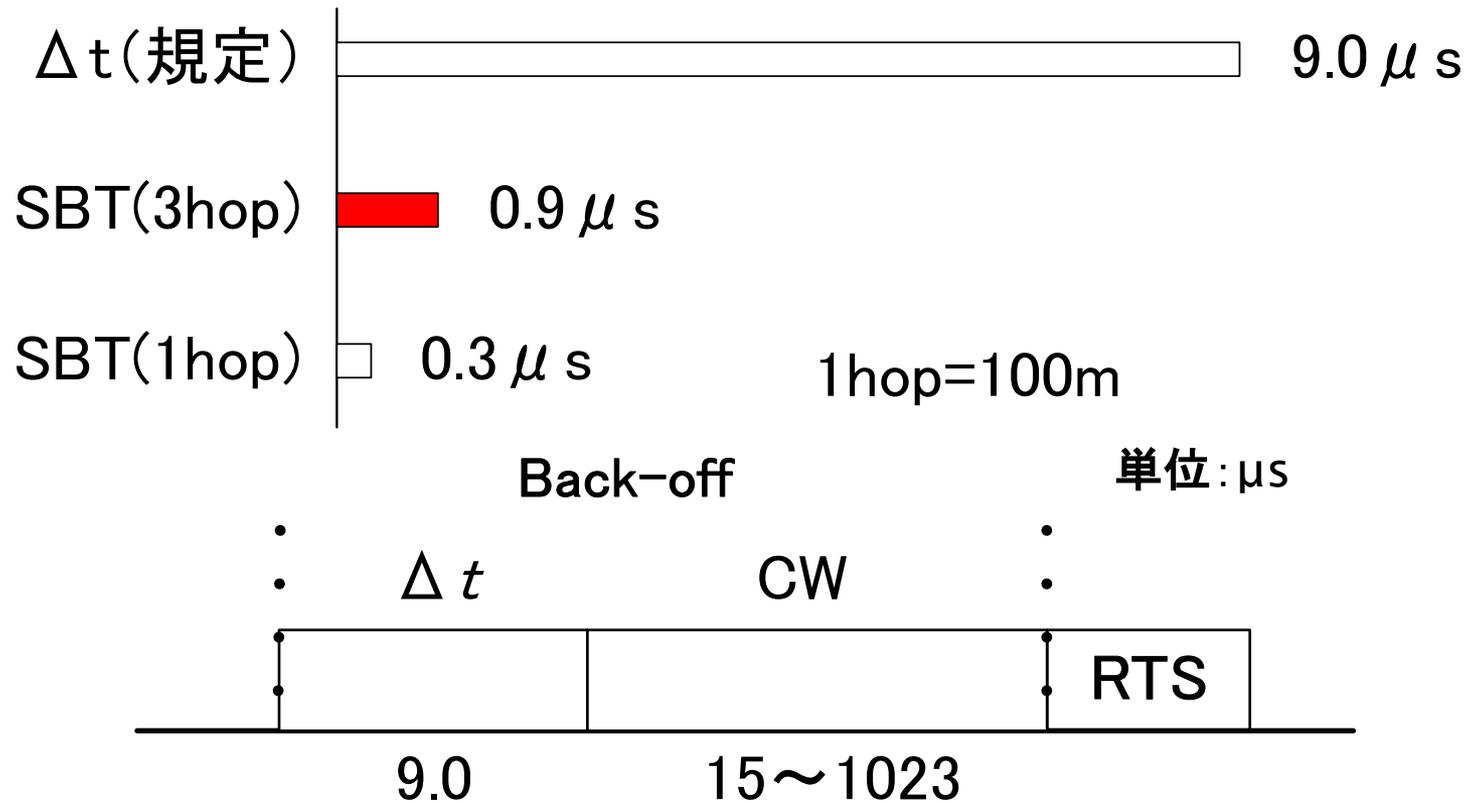
aCCATime (4 $\mu$ s)		AirPropagationTime (1 $\mu$ s)	RxTxTurnAroundTime (2 $\mu$ s)	aMacProcessingDelay (2 $\mu$ s)
RxTxDelay (2 $\mu$ s)	PLCPDelay (2 $\mu$ s)			

- 無線通信には往復時間の待機は不要
  - 衝突の検知が不可能であるため

## ➤ SBTによる短縮

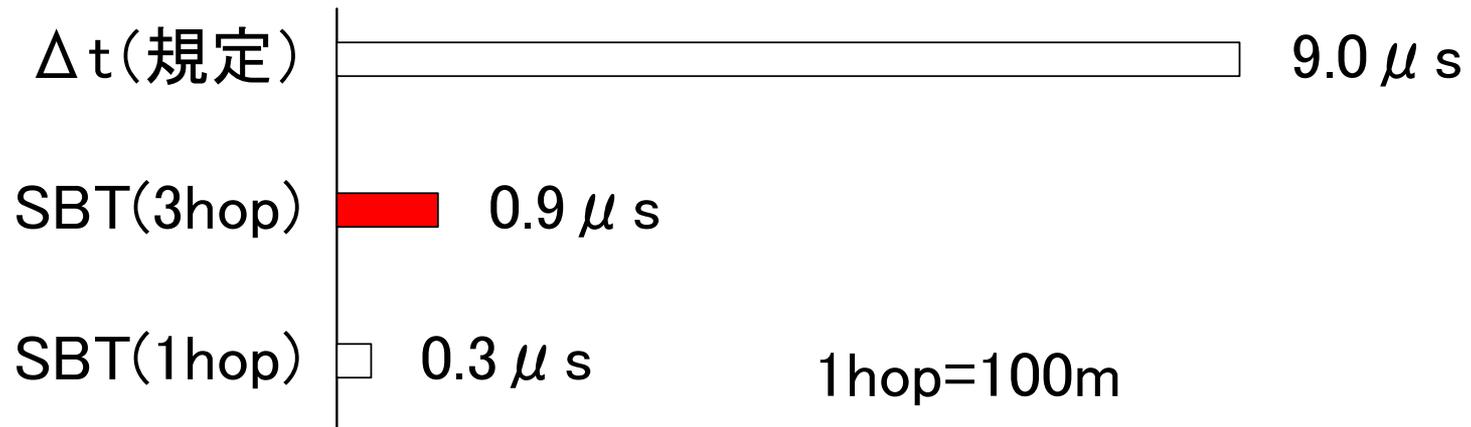
- SBTによる制御では各種遅延を考慮しなくてもよい
- SBTの伝搬時間のみを考慮すればよい

# バックオフ修正

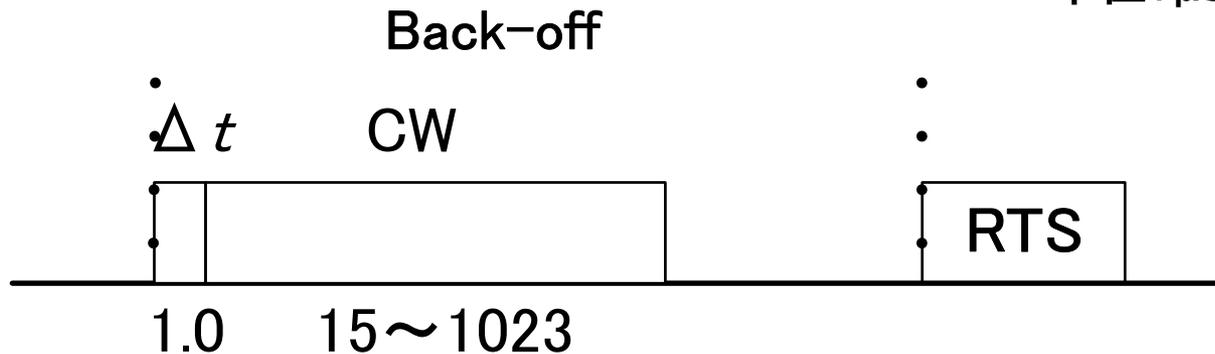


▶  $\Delta t$ を短縮することでCWを相対的に拡大可能

# バックオフ修正

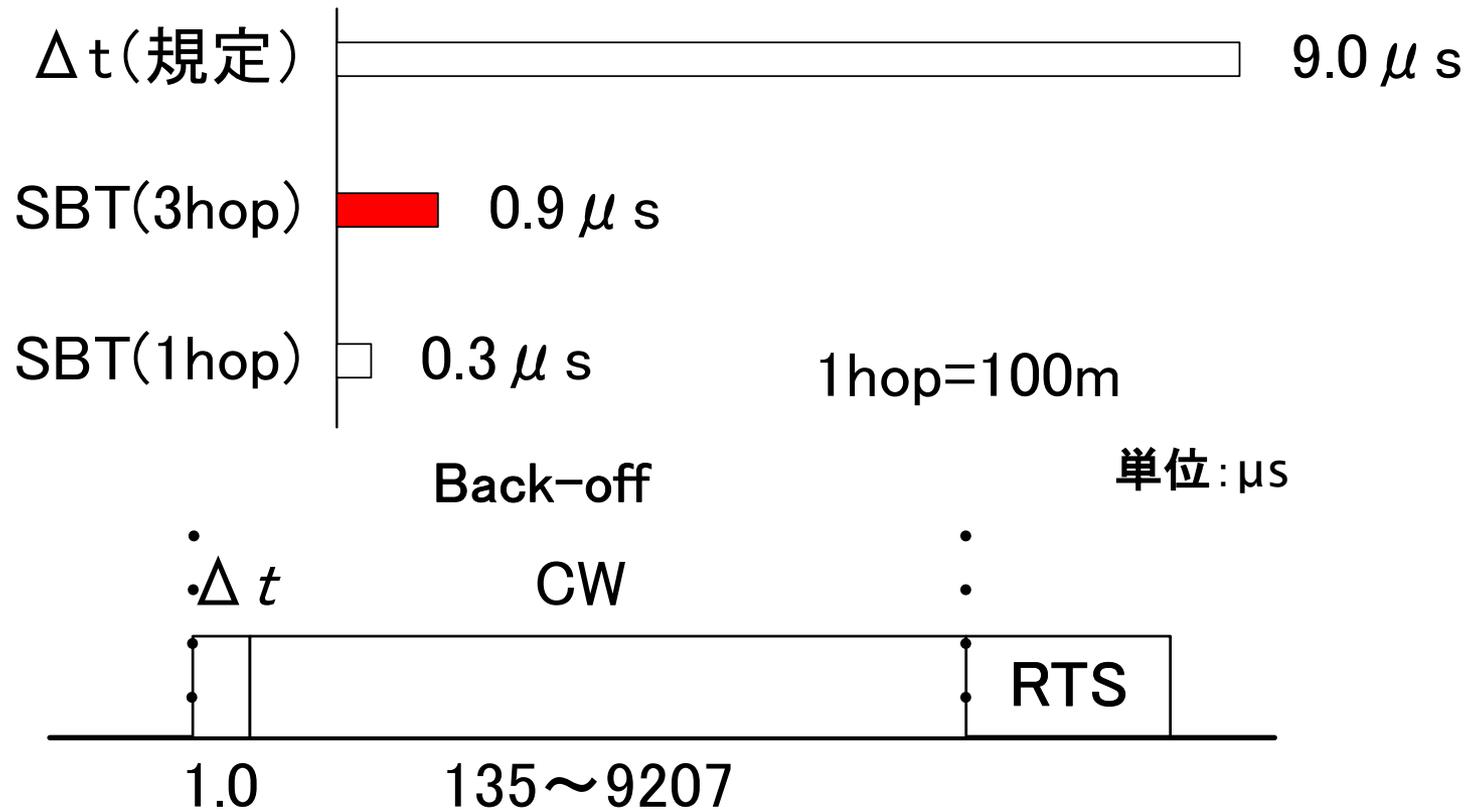


単位:  $\mu s$



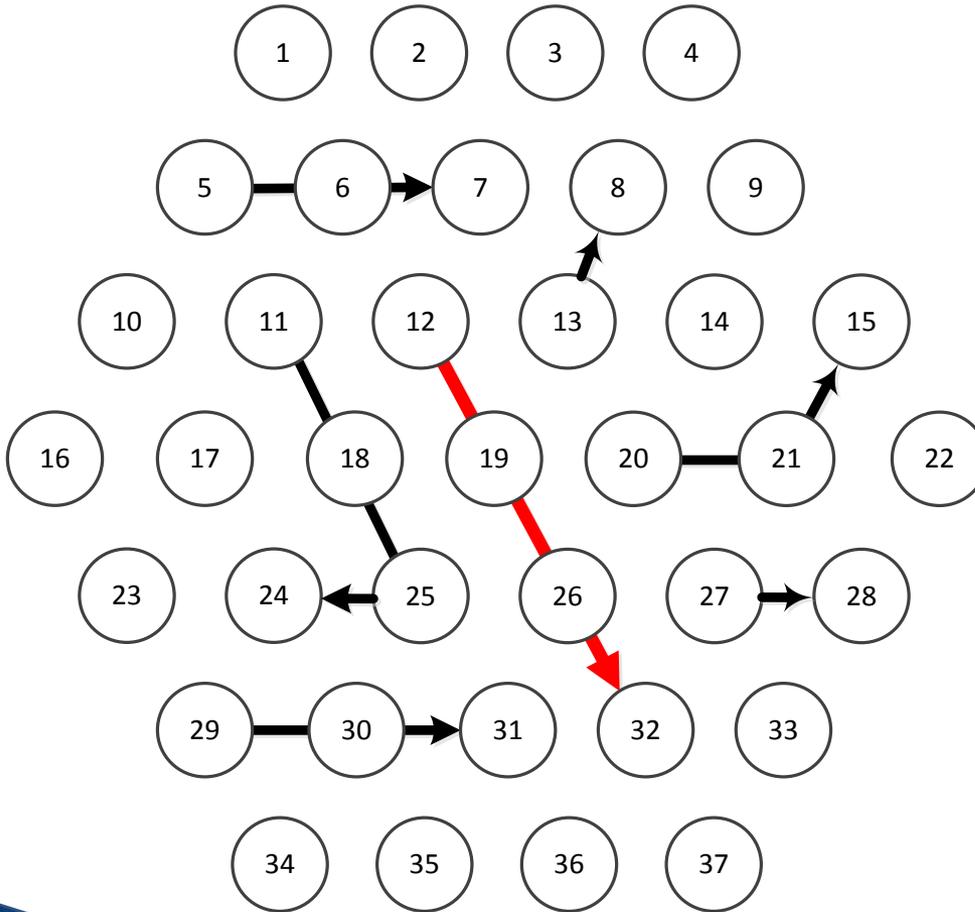
▶  $\Delta t$ を短縮することでCWを相対的に拡大可能

# バックオフ修正



▶  $\Delta t$ を短縮することでCWを相対的に拡大可能

# ns-2によるシミュレーション



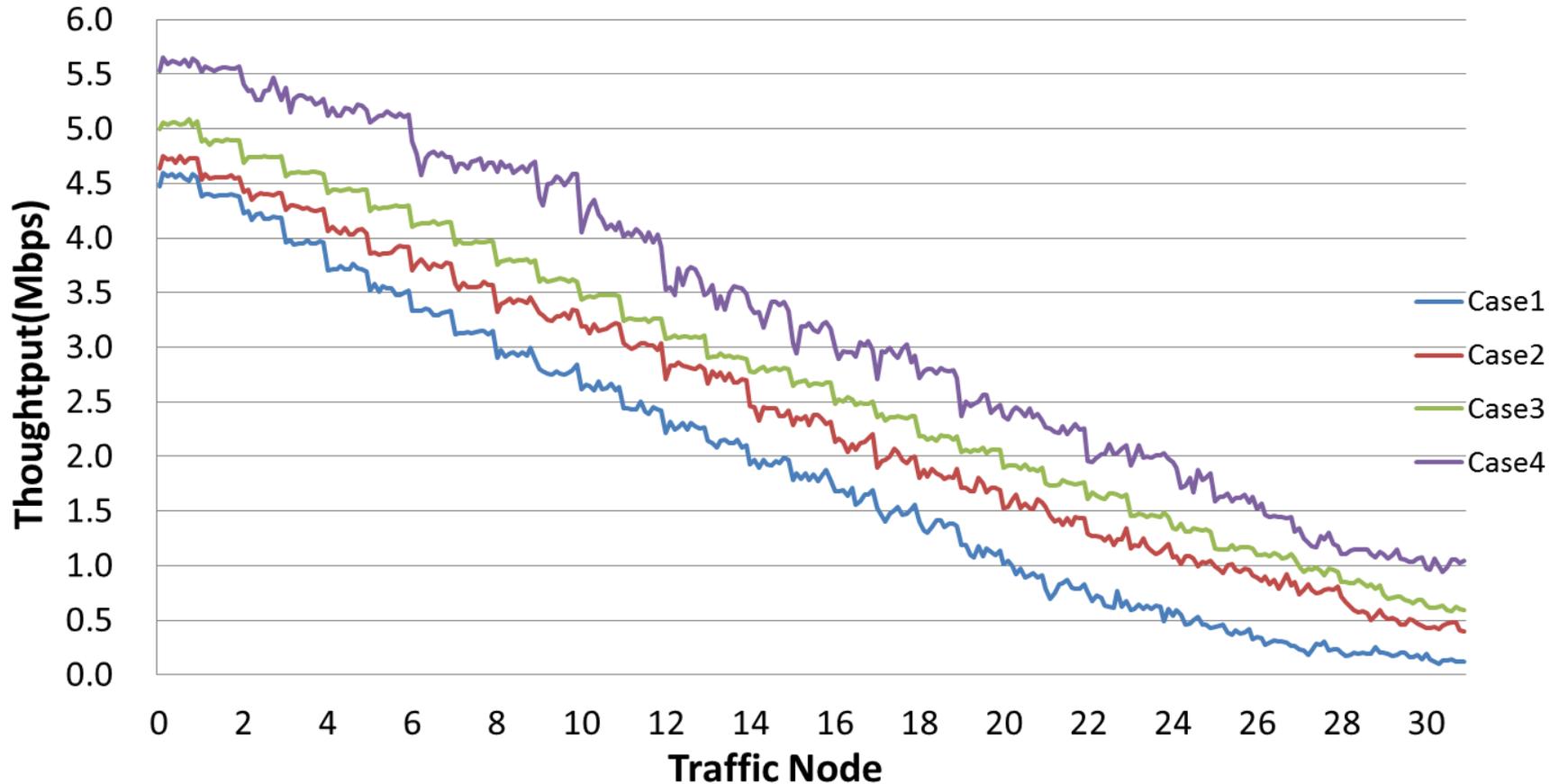
試行回数	20回
アドホックネットワーク	
台数	37台
電波到達範囲	100(m)
SBT3電波到達範囲	300(m)
SBT2電波到達範囲	200(m)
端末間距離	90(m)
計測時間	330(s)
802.11g	
無線帯域	54(Mbps)
スループット測定端末	
台数	2台
トランスポートプロトコル	TCP
パケットサイズ	1000(byte)
背景負荷発生端末	
台数	2~60台
トランスポートプロトコル	UDP
パケットサイズ	200(byte)
パケット発生率	0.064(Mbps)

# シミュレーション

- ▶ 測定環境において提案方式ごとに測定
  - SBTの有無, $\Delta t$ の値,乱数の範囲

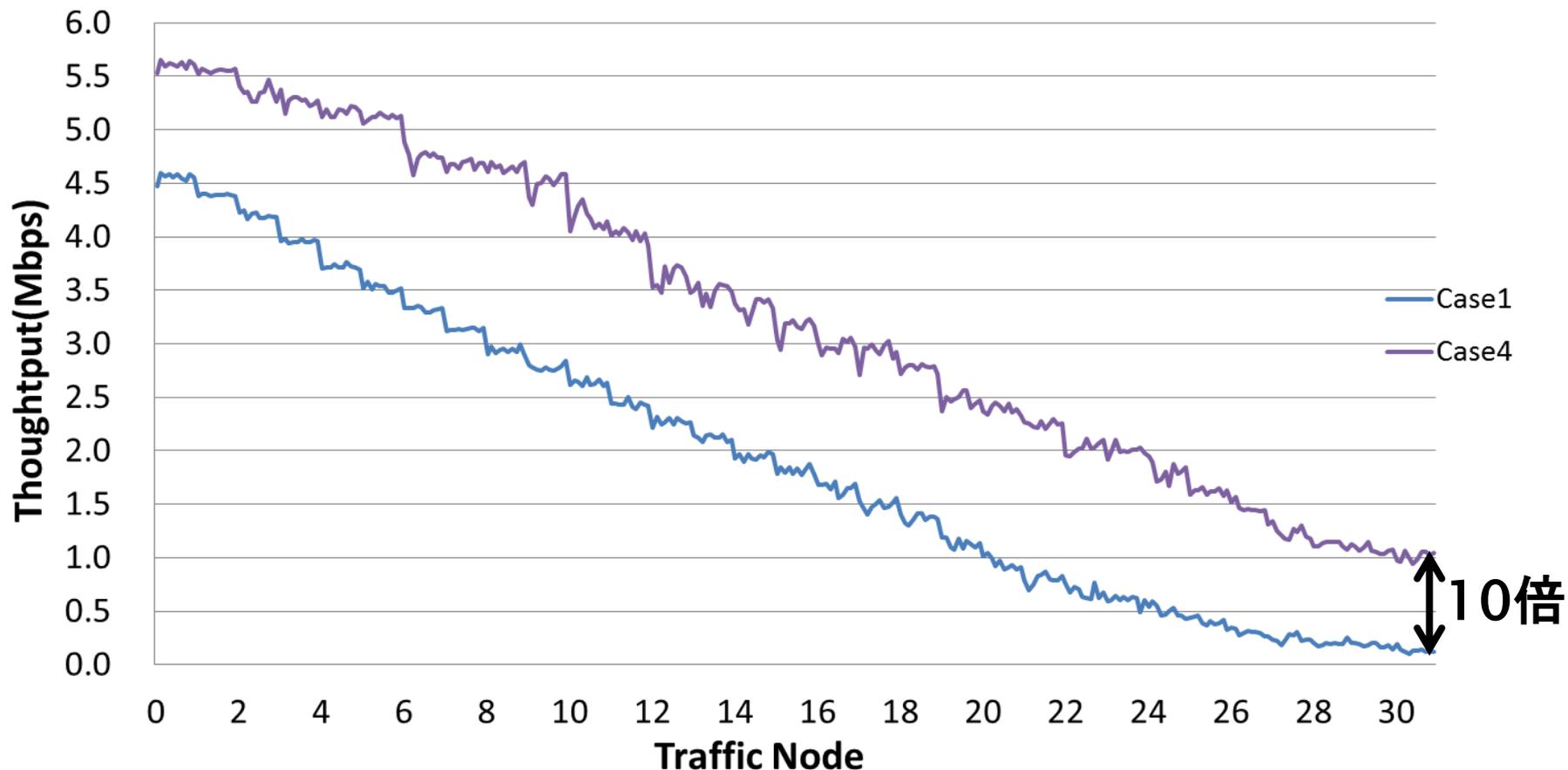
	SBT	$\Delta t(\mu s)$	CWmin~CWmax
Case1(RTS/CTS方式)	無	9.0	15~1023
Case2(提案方式 I)	有	9.0	15~1023
Case3(提案方式 I . II)	有	1.0	135~9207
Case4(提案方式 I . II)	有	1.0	15~1023

# シミュレーション結果



▶ 提案方式を用いることでスループットの向上が可能

# シミュレーション結果



- ▶ 提案方式を用いることでスループットの向上が可能

# シミュレーション結果

	Total Collision	TCP Throughput(Mbps)	
		No Traffic	High Traffic
Case1	123,326	4.5	0.1
Case2	11,654	4.6	0.4
Case3	3,927	5.0	0.6
Case4	14,528	5.5	1.0

- 提案方式を用いることで衝突を大幅に削減可能
- 衝突回数の減少とスループットの向上はトレードオフ
- 待機時間を短縮することが最も効率が良い

# むすび

- SBTの導入とバックオフ時間修正により衝突発生を大幅に削減するアルゴリズムの方式を提案した
  
- 提案方式の有用性の証明
  - 衝突回数の軽減
  - スループットの向上
  
- 今後の課題
  - SBTを用いた様々な方式の検討



# 補足

# キャリアセンス

- 各端末は通信開始時にキャリアセンスを行う  
⇒ 一定以上の電波を検知した場合通信を控える
- キャリアセンスにおいてビジートーンを検知する  
⇒ 受信に関して端末の改造は不要

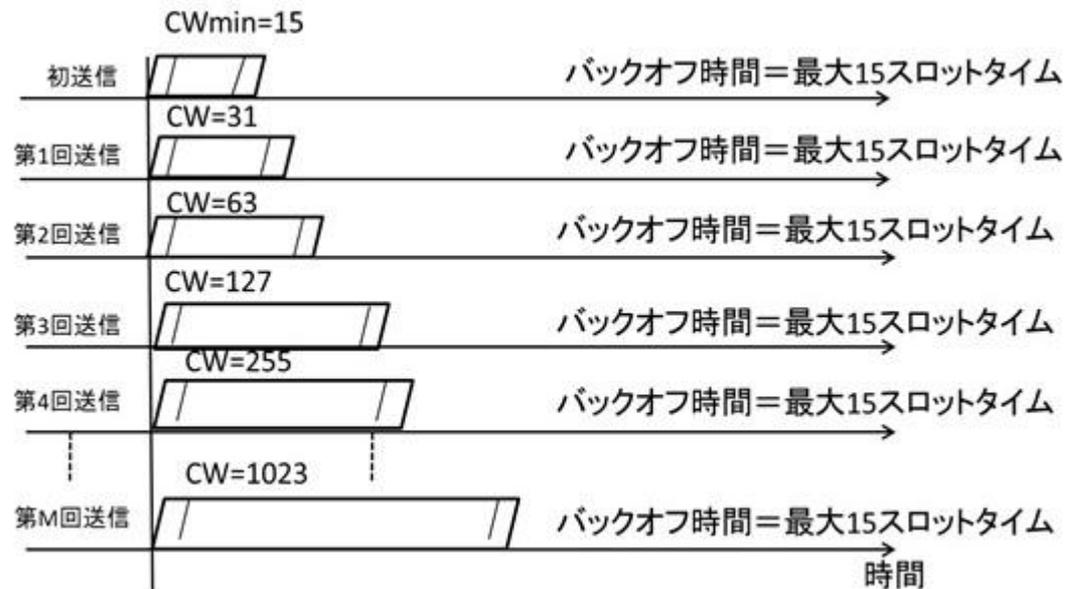


# バックオフアルゴリズム

- ▶ バックオフアルゴリズムにおいて、乱数は以下の様に CWmin から始まり Cwmax になるまで

$$(CWmin + 1) \times 2^n - 1$$

上記の式の指数関数で CW の範囲内からランダムに選択される。



# バックオフアルゴリズム修正

- SBTを導入することにより、大幅に衝突回数を削減することができる。しかし、完全に衝突を防ぐことはできない。
- バックオフ時間の演算において2台のノードが同一乱数を生成すると再度衝突を繰り返してしまう。  
→バックオフ時間におけるアルゴリズムを修正することで再送時のパケット衝突を軽減する

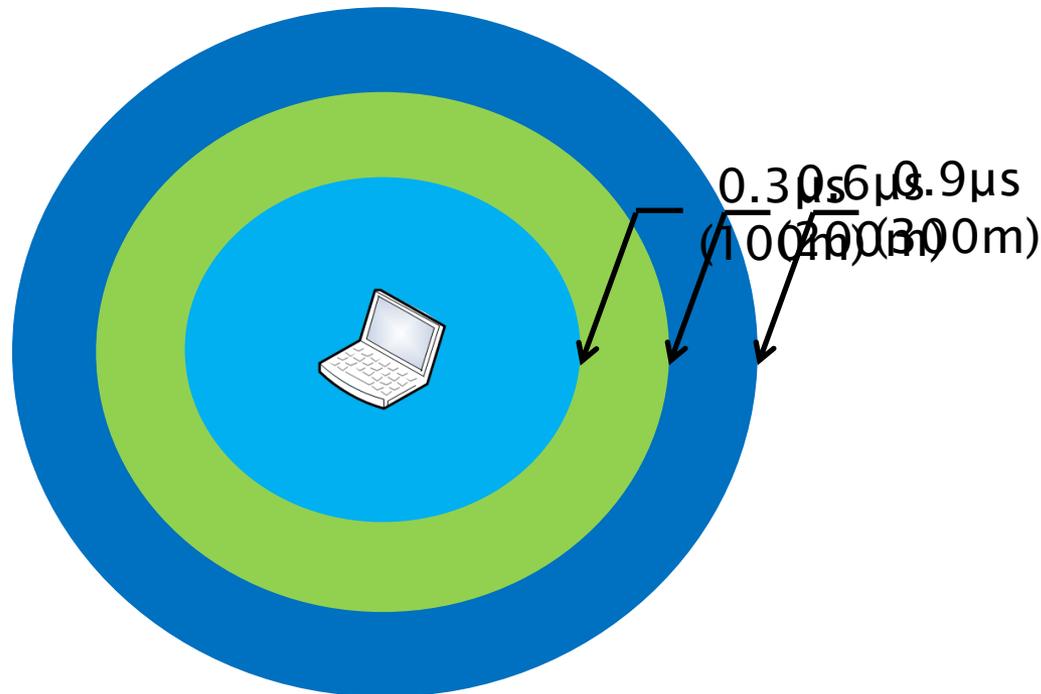
# ガードバンド

- SBTは通常の周波数帯ではなくガードバンドを使用
- ガードバンドとは
  - 2つの通信チャネルの間にある未使用周波数帯
    - ⇒ 11b/gは周波数帯が被っており双方の未使用周波数帯を確認する必要がある
    - ⇒ 11aでは周波数帯が整備されているので問題はない



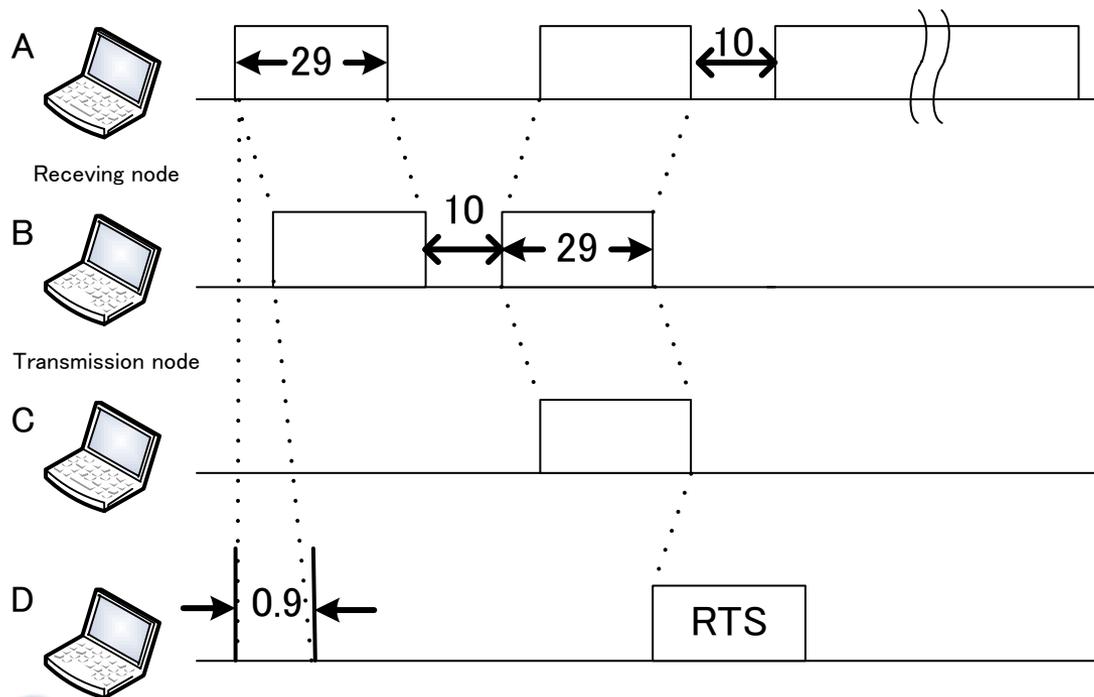
# SBTの到達速度

- SBTは速度は $c$ (光速)なので100m(通常の通信範囲)先の端末への到達速度は約 $0.3\mu\text{s}$   
→ 3ホップ先の端末への到達速度は約 $0.9\mu\text{s}$ である



# SBT使用時における衝突

- SBTを使用しても3ホップ先の端末を制御するためには $0.9\mu\text{s}$ かかる
- $0.9\mu\text{s}$ 以内にRTSが送信された場合衝突する。



# 各シーケンスの時間

- RTS/CTS方式を用いた際の各シーケンスにおける時間

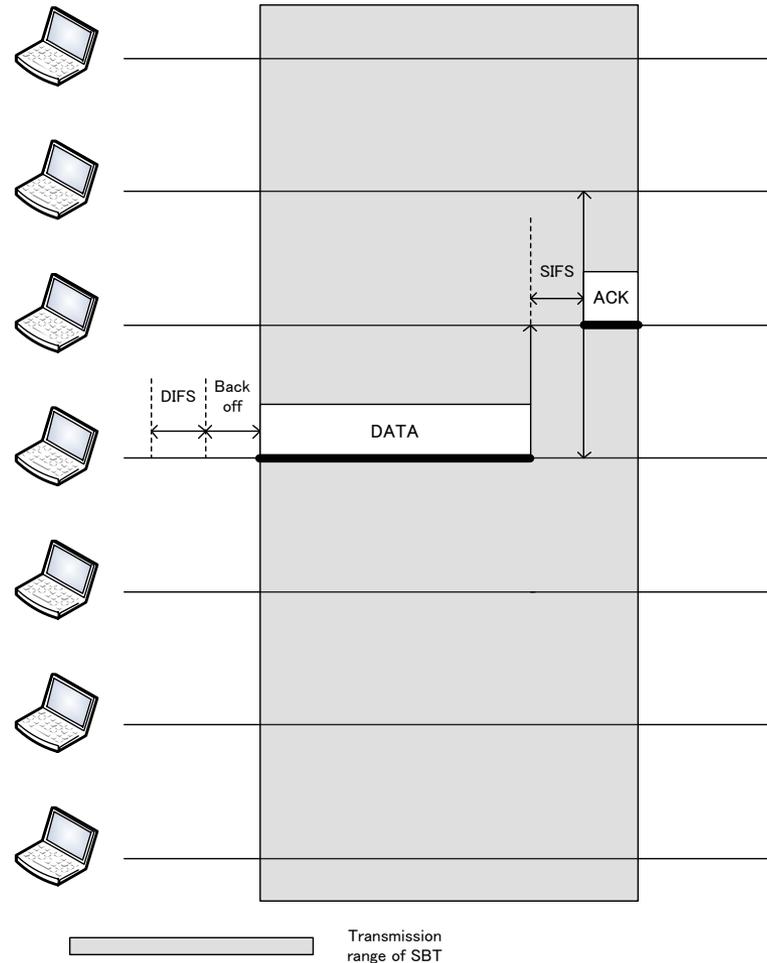
DIFS		34
Back-off		135~9207
RTS	PLCP 本体	26 3
SIFS		16
CTS	PLCP 本体	26 3
DATA	PLCP 本体	26 227
ACK	PLCP 本体	26 3

# SBTについて

- ▶ SBTの受信はキャリアセンス時に電波を受信するものと同様
- ▶ SBTを受信した場合は通常の待機と同様  
⇒ DIFS + バックオフ時間
- ▶ NAVが発生している訳ではない

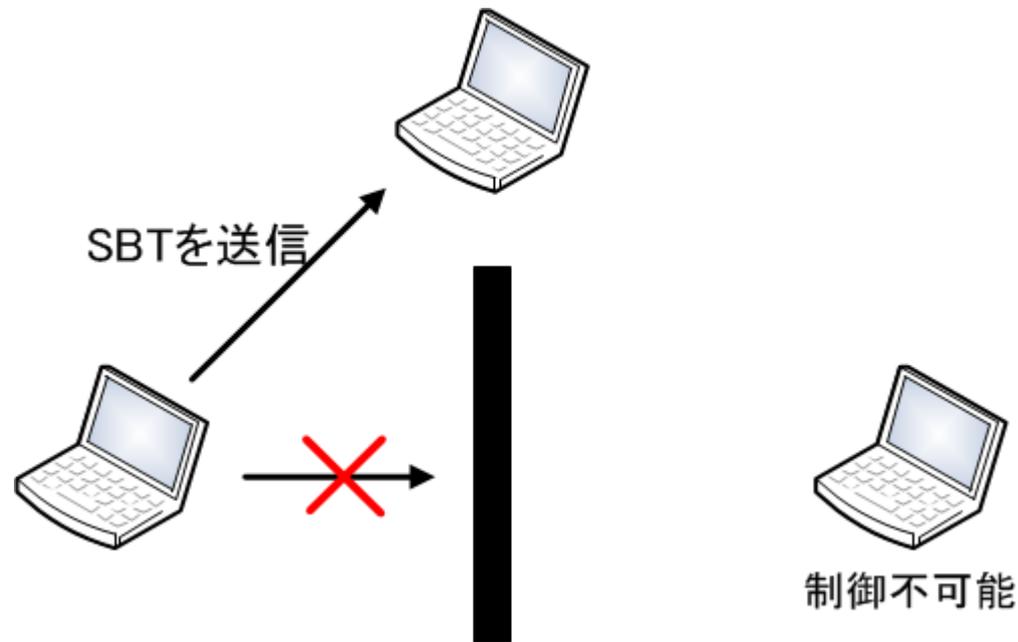
# SBTの拡張性

- RTS/CTSをなくす
- DATA部分にSBTを適用



# SBT拡張時の課題

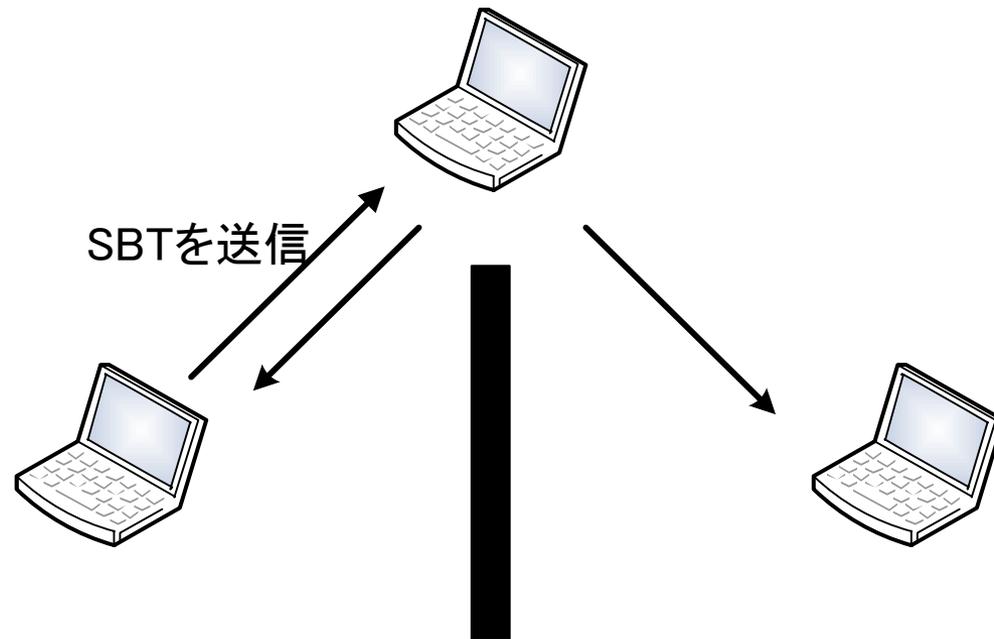
- ▶ 障害物が存在する場合SBTが端末に到達しない
- ▶ RTS/CTSがないため障害物を回避できない



# 課題の解決手法

- ▶ 受信ノード側でもSBTを送信する
- ▶ 障害物を迂回する手法

DATA部分受信と同時に  
SBTを隣接端末に向け送信



# SBTによる通信妨害

- ▶ SBT送信端末がSBTを送信し続ける
  - 通信妨害となる
- ▶ SBTは逆位相の信号を送信すれば消滅する
- ▶ 通信妨害で電波法に抵触する
- ▶ SBTを送信し続けることは電力的にも厳しい

# トレードオフ

- ▶ 衝突回避能力とスループットはトレードオフ
  - 一定以上の向上を目指す場合のみ
- ▶ SBTにより衝突は十分に防止可能
  - 待機時間の増幅はスループット向上の障害
- ▶ スループットの低下はRTS/CTS同士の衝突が要因
  - 再送時の衝突の影響は小さい

# アドホックネットワーク

- ▶ アドホックネットワーク
  - 多数の端末をアクセスポイントの介在なく相互に接続する形態を取っている
  - インフラを必要とせず簡易なネットワーク構築手段として有効である
    - ⇒ 災害地の通信網復旧など

