

修士論文

不均一環境下の IEEE 802.11ah ネットワークにおける端末グループ化 チャンネルアクセス法に関する研究



令和2年度修了

三重大学大学院 工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

通信工学研究室

下川真季

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	論文構成	5
第 2 章	IEEE 802.11ah と端末グルーピング	6
2.1	IEEE 802.11ah	6
2.1.1	物理層	7
2.1.2	MAC 層	8
2.1.2.1	CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式	9
2.1.2.2	省電力化のための新機能	9
2.1.2.3	多数端末対応のための新機能	13
2.1.2.4	RAW (Restricted access window)	14
2.2	RAW 方式のための端末グルーピング	15
2.2.1	端末グルーピングへの要求事項	15
2.2.2	既存端末グルーピング方式	16
2.2.2.1	AID 端末グルーピング方式	16
2.2.2.2	領域等分割グルーピング方式	17
2.2.2.3	RSS (Received Signal Strength) 基準端末グルーピング方式	19

2.3	不均一ネットワーク環境における端末グルーピング	20
2.3.1	IoT ネットワークの多様性	20
2.3.2	既存端末グルーピング方式の課題	22
第3章	不均一ネットワーク環境に対応した端末グルーピング方式	23
3.1	中心角制御型セクタ端末グルーピング方式	23
3.2	フレーム構造	24
3.3	領域分割	26
3.4	領域分割基準	28
3.4.1	端末台数基準	28
3.4.2	トラフィック量基準	29
3.4.3	トラフィックカテゴリ化	29
第4章	特性評価モデル	35
4.1	ネットワークモデル	35
4.2	伝搬路モデル	37
4.3	チャンネルアクセスモデル	38
4.4	トラフィックモデル	39
第5章	特性評価	40
5.1	シミュレーション諸元	40
5.2	評価指標	43
5.3	不均一環境下での性能評価	44
5.4	端末配置不均一度合い変化時の性能評価	53
5.5	端末トラフィック不均一度合い変化時の性能評価	60
第6章	まとめ	71
	参考文献	73

謝辭	76
研究業績	77

目 次

2.1	CSMA/CA 方式	10
2.2	標準 ACK と NDP ACK のフレーム比較	11
2.3	標準ビーコンと S1G ビーコンフレームフォーマット	12
2.4	標準ビーコンと S1G ビーコンの送信間隔例	12
2.5	Association Response Frame のフォーマット [19]	13
2.6	RAW フレーム構造	14
2.7	領域等分割グルーピング方式	18
2.8	RSS 基準端末グルーピング方式	19
2.9	地理的に不均一な端末配置例	21
2.10	様々な端末トラヒック分布例	21
3.1	フレーム構造.	25
3.2	中心角制御型セクタ端末グルーピング ($N_{\text{RAW}} = 3$ の場合)	27
3.3	端末トラヒックに基づく端末のカテゴリ化.	32
3.4	トラヒックカテゴリごとのトラヒック量基準領域分割 ($N_{\text{RAW}} = 3$)	33
3.5	近距離セクタ領域の併合.	34
4.1	端末配置	36
5.1	端末台数 400[台] の端末配置例 ($N_{\text{HS}} = 3, \sigma_{xy} = 300[\text{m}], R = 800[\text{m}]$)	44
5.2	端末トラヒック分布例 (トラヒックモデル 1 : $\lambda^e = 1.0[\text{packets/s}]$)	45
5.3	不均一環境下でのネットワークスループット特性	46

5.4	隠れ端末によるパケット衝突率	47
5.5	不均一環境下でのサブグループ内端末台数標準偏差	48
5.6	不均一環境下でのサブグループ内トラヒック量の標準偏差	48
5.7	端末台数 500[台] での端末レート満足率の累積確率分布	50
5.8	不均一環境下での端末台数に対する端末レート満足率下位 10 % 値	50
5.9	端末台数 500 台での伝送遅延の累積確率分布	51
5.10	不均一環境下での端末台数に対する伝送遅延上位 10 % 値	52
5.11	端末 400[台] での端末配置例	54
5.12	ホットスポット数変化時のスループット性能 ($N_{HS} = 2$)	55
5.13	ホットスポット数変化時のスループット性能 ($N_{HS} = 10$)	55
5.14	ホットスポット数 N_{HS} に対するスループット性能	56
5.15	端末分布の標準偏差 σ_{xy} 変化時のスループット性能 ($\sigma_{xy} = 200[m]$)	58
5.16	端末分布の標準偏差 σ_{xy} 変化時のスループット性能 ($\sigma_{xy} = 800[m]$)	58
5.17	端末分布の標準偏差 σ_{xy} の変化に対するスループット性能	59
5.18	端末トラヒック分布例 (トラヒックモデル 1: $\lambda^e = 0.2[\text{packets/s}]$)	60
5.19	ネットワークスループット特性 ($\lambda^e = 0.2[\text{packets/s}]$)	62
5.20	サブグループ内端末台数標準偏差 ($\lambda^e = 0.2[\text{packets/s}]$)	62
5.21	サブグループ内生起トラヒック量標準偏差 ($\lambda^e = 0.2[\text{packets/s}]$)	63
5.22	端末台数 2000 台での端末レート満足率の累積確率分布	63
5.23	端末トラヒック分布 (トラヒックモデル 2: $\sigma^{n1} = 0, \sigma^{n2} = 0[\text{packets/s}]$)	65
5.24	ネットワークスループット特性 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0[\text{packets/s}], \sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0[\text{packets/s}]$)	66
5.25	1000[台] でのレート満足率の累積確率分布 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0[\text{packets/s}]$)	66
5.26	サブグループ内端末台数標準偏差 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0[\text{packets/s}], \sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0[\text{packets/s}]$)	67
5.27	サブグループ内生起トラヒック量標準偏差 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0[\text{packets/s}], \sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0[\text{packets/s}]$)	67

5.28	端末トラヒック分布 (トラヒックモデル2: $\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s])	68
5.29	ネットワークスループット特性 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s]) . . .	69
5.30	1000[台]でのレート満足率の累積確率分布 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s])	

表 目 次

2.1	MCS と伝送速度 [Mbps]	8
5.1	ネットワーク構成パラメータ	41
5.2	通信関連パラメータ	41
5.3	トラヒック関連パラメータ	42

第1章

序論

1.1 研究背景

平成 28 年，第 5 期科学技術基本計画において，我が国がこれまでの情報社会（Society 4.0）に続く新たな目指すべき未来社会として Society 5.0 が提唱された。Society 5.0 ではモノのネットワークである Internet of Things (IoT) や機械同士の通信である machine to machine (M2M) 通信により全ての人とモノが繋がり，知識や情報が共有され新たな価値を生み出すことで，様々な社会問題を解決して経済発展へと貢献する。このような社会背景に伴い，近年，情報収集のためインターネットに接続される IoT 端末が急増している。膨大な量の IoT 端末を有線によって接続することは，配線やスペースの都合上非現実的である。そこで，無線ネットワークでの超多数の IoT 端末の収容が課題となる。また，IoT 端末の多くはバッテリー駆動であることが一般的であるため，省電力なネットワーク運用も要求事項の一つと言える。これらに対応するためには既存のセルラネットワークや従来の無線ローカルエリアネットワーク WLAN (Wireless Local Area Network) では不適であると考えられる。前者はコストの面で現実的ではなく，後者は小規模なネットワークで高スループットを達成することを目的としており，IoT や M2M ネットワークのような超多数端末環境への対応という点で現実的ではない。一方で，省電力運用の観点では無線パーソナルエリアネットワーク WPAN (Wireless Personal Area Network) がある程度の省電力性を提供できる。WPAN の標準規格である IEEE 802.15.4 では，無線端末の動作状態としてアクティブ期間とスリープ期間（非アクティブ期間）を繰り返

すことにより低消費電力化を実現しているが[1]，狭範囲のネットワークしか構築できない。また，低消費電力広域無線ネットワーク LPWAN (Low Power Wide Area Network) は広範囲の通信を可能としているが低伝送レートであることが課題となる。よって，これらの技術は IoT や M2M 向けのネットワークの要求事項を限定的にしか満たすことができない。

このような背景から，より多くの IoT や M2M シナリオに対応するため，米国電気電子学会 (IEEE) は既存の無線 LAN 規格 IEEE 802.11 を拡張し，新しく標準規格 IEEE 802.11ah を策定した [2]。IEEE 802.11ah では，1 GHz 以下 (Sub-1GHz) の低周波数帯域を利用して最大約 1 km までの伝送距離と，150kbps から 1Mbps までの伝送レートを提供可能である。低消費電力運用を実現するため IEEE 802.11ah では，アクセスポイント (AP) から定期的に発信される管理フレームであるビーコンなどの短縮化や，端末のスリープ機能などが新しく導入されている。また，1つの AP で最大 8192 台までの端末を収容可能である [3]。媒体アクセス制御 MAC (Media Access Control) 層では，この膨大な量の無線端末接続環境において過度のチャンネルアクセス競合を緩和すべく，制限アクセス窓 RAW (Restricted access window) を用いたグループ単位のチャンネルアクセスを採用している。ネットワークに接続している端末を複数の端末グループに分割し，グループごとに専用のチャンネルアクセス期間を設定している。これにより，同時にアクセス競合を行う端末数が制限されるためパケット衝突が大幅に抑制され，ネットワーク性能の向上が確認されている [4]。

RAW におけるグループ単位でのチャンネルアクセスにおいて，どのようなグループ構成でチャンネルアクセス競合を行うか (端末グルーピング) はネットワーク性能に大きく影響すると言える。例えば，後述する「隠れ端末問題」のように互いの性能を劣化させるような端末が同一グループ内に存在する場合，ネットワーク性能の一つである単位時間あたりに送受信されるデータ量を示すスループット特性劣化の要因となる。ゆえに，高いネットワーク性能を発揮するためには，端末グルーピング方式は慎重に設計されるべきである。最も簡易な端末グルーピング手法として，ランダムグルーピングが挙げられる。本手法では端末数が各グループで均等となるよ

うランダムに端末をグループへ分配している [5], [6]. しかし, これらの方式では同一グループ内に互いの信号を検知できないほど遠距離に位置する端末が存在する可能性があり, そのような状況下の端末を隠れ端末と呼び, パケット衝突を頻発させる隠れ端末問題を引き起こす. 隠れ端末問題は IEEE 802.11ah ネットワークにおけるスループット性能劣化の支配的要因の代表例である [7], [8].

端末グルーピングにおいて隠れ端末問題に対処するため, 送信要求/許可信号 RTS / CTS (Request To Send / Clear To Send) 等の制御フレームの利用が提案されている [11], [12]. しかし, IoT ネットワークでは端末が送信するデータは少量であり, 制御フレームの使用は制御オーバーヘッドの増加へとつながる. よって情報伝送に使用されるチャネル資源が低下するため, これらの方式は不適切であると考えられる. また, 端末の位置情報や信号受信強度を利用して隠れ端末問題の発生しない近隣端末同士を同一グループにグループ化する方式 [16], [17] が検討されている. これらの方式は超多数の端末が存在するネットワークにおいて十分に隠れ端末問題を抑制することができるが, 両者ともに端末が AP のカバレッジ内で地理的に均一配置されることや単一の端末トラヒックを前提としている. この前提は実環境での運用を考慮すると不適切であると言わざるを得ない.

実環境ではネットワークの使用環境や用途によってカバレッジ内での端末配置は様々なものが想定される. 均一配置のみならず地理的に偏って配置される不均一配置も考慮する必要がある. また, 端末トラヒックに関しても同様のことが言える. 同一ネットワークにおいて多様な IoT サービスをサポートする場合にはネットワーク内に複数種類の端末トラヒックが存在する可能性が高くなる. このような状況下で文献 [16], [17] の方式を適用すると, グループ内で生起するトラヒック量にグループ間で偏りが生じる恐れがある. グループ内トラヒック量の差はネットワークスループットを劣化させるだけでなく端末のチャネルアクセス機会における公平性を損なうため, 結果としてネットワーク性能を大幅に劣化させる要因となる. そこで, 実環境への高い適用性を実現しつつより高いネットワーク性能を提供するため, 多様なネットワーク環境に対応可能な端末グルーピング方式を検討する必要がある.

1.2 研究目的

本研究ではIoT向け無線LAN規格IEEE 802.11ahで採用されている技術の一つであるRestricted access window (RAW)方式に着眼し、ネットワーク環境の多様性に対応可能な端末グルーピング方式について研究を進める。端末配置や端末トラヒックに偏りがある環境下においてもネットワーク性能が劣化しないRAW方式のための端末グルーピング方式を確立することを研究目的とする。この目的を達成するため本研究では、以下の二点、ネットワークスループット性能の向上と端末間で通信性能差が生じないことを、端末グルーピングへの要求事項として検討する。

まず一つ目の要求事項について、性能劣化の主な要因として、多数端末環境下での過度なアクセス競合や隠れ端末問題によって多発するアクセス衝突が考えられる。前者については、グループごとにアクセス競合を行うRAW方式においてRAWスロット数を調整することによって解決できるため、本研究では後者の隠れ端末問題に焦点を当て、ネットワーク性能劣化の支配的要因となる同一グループ内隠れ端末問題を抑制することを目的とする。よってここでは隠れ端末抑制のため近隣端末同士を同一グループ化することを具体的な目標とする。

次に二つ目の要求事項である通信性能の端末間公平性の向上については、各端末のチャネルアクセス機会をグループ間で均等化することを目的とする。グループ内端末の総トラヒック量をグループ間で均一にすることで、全端末が同程度の端末スループット性能を得て、通信性能の公平性を確保することを目指す。

以上二つの要求事項をいかなる端末配置状況や端末トラヒック条件であっても達成するため、本研究では中心角制御型セクタ端末グルーピング方式を提案する。提案方式の特性評価を計算機シミュレーションによって実施し、提案方式が既存の端末グルーピング方式と比較して優れていることを示す。

1.3 論文構成

本論文は次のように構成される。第2章は本研究の基礎的技術事項としてIEEE802.11ah規格, RAW方式, 端末グルーピングとIoTネットワークの多様性について記述し, 第3章では本研究で提案する中心角制御型セクタ端末グルーピング方式について記述する。第4章では特性評価で仮定したシステムモデルについて記述する。第5章では計算機シミュレーションによる特性評価の結果を示し提案方式の有効性を明らかにする。最後に第6章で本論文のまとめを行う。

第2章

IEEE 802.11ah と端末グルーピング

本章ではまず、IoT ネットワーク向け通信規格 IEEE802.11ah の概要について記述する。2.2 節では Restricted Access Window(RAW) 方式における端末グルーピングについて説明し、その後、2.3 節では本研究での着眼点である IoT ネットワークの多様性と、その端末グルーピングに及ぼす影響と課題について記述する。

2.1 IEEE 802.11ah

免許不要周波数帯域を用いた無線通信として「Wi-Fi」の名称で知られる無線 LAN 規格 IEEE802.11a/b/g/n/ac がこれまで広く利用されている。これらの IEEE 規格はコンピュータネットワークでのデータ伝送を対象としており、データ伝送の高速化に主眼を置き規格策定が進められてきた。しかし IEEE802.11ah は、IoT や M2M などの超多数のセンサ端末が存在する広範囲なネットワークを対象としており、これらのネットワークで求められる低省電力動作や多数端末への対応を、従来の Wi-Fi の利便性を損なわずに実現することを目的としている。2.1.1 節、2.1.2 節で、IEEE 802.11ah の物理層、MAC 層において従来無線 LAN 規格に新たに追加された事項についてそれぞれ記述する。

2.1.1 物理層

IEEE 802.11ah では IEEE 802.11ac の物理層を Sub1GHz 周波数帯域 (S1G) での利用に適応させることで、1MHz 帯域幅で 1km 以上の最大通信距離を実現している。よって IEEE 802.11ac の変調方式や複数アンテナを用いた通信 MIMO (Multiple Input Multiple Output) などの物理層の特徴を受け継いでおり、直交周波数分割多重 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を採用している。変調・符号化方式 MCS (Modulation and Coding Scheme) は MCS 0 から MCS10 に対応しており、802.11ac と比較して長距離伝送が可能であるが、伝送速度は低く抑えられている。MCS と伝送速度の例を表 2.1 に示す。現時点では日本で使用できるチャネル帯域幅は、1 チャネル当たり最大 1MHz 幅のみであるが、最大 4[Mbps] での伝送が可能であり、Sigfox や Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) など既存の LPWA より高速伝送が可能である。

表 2.1: MCS と伝送速度 [Mbps]

MCS	帯域幅			
	1MHz	2MHz	4MHz	8MHz
MCS0	0.3	0.65	1.35	2.925
MCS1	0.6	1.30	2.70	5.850
MCS2	0.9	1.95	4.05	8.775
MCS3	1.2	2.60	5.40	11.700
MCS4	1.8	3.90	8.10	17.550
MCS5	2.4	5.20	10.80	23.400
MCS6	2.7	5.85	12.15	26.325
MCS7	3.0	6.50	13.50	29.250
MCS8	3.6	7.80	16.20	35.100
MCS9	4.0	-	18.00	39.000
MCS10	0.15	-	-	-

2.1.2 MAC 層

IEEE 802.11ah で想定する IoT ネットワークでは超多数のセンサ端末等が存在する環境下において低消費電力な運用が要求される。ここでは IEEE 802.11ah で採用されているチャネルアクセス方式である CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式に加え、省電力化や多数端末への対応という観点から MAC 層について記述する。

2.1.2.1 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式

CSMA/CA 方式は、同一のチャンネルに AP や複数の端末がアクセスする際に、チャンネルが空いていることを確認し、データの同時送信を回避するためにランダムな時間だけ待機してからデータを送信するアクセス方式である。この待ち時間は、DIFS (Distributed Inter Frame Space) と呼ばれるビジー状態のチャンネルがアイドル状態に移行したと判断されるまでの時間にランダムな時間 (バックオフ期間) を加えたものである。データ送信する端末はバックオフタイマを設定し、キャリアセンス後にチャンネルがアイドル状態であればバックオフカウンタを1ずつ減算する。このバックオフ動作後、バックオフ期間が満了した端末は宛先端末にデータパケットを送信する。宛先で正常にデータが受信された場合、受信完了後に宛先端末から SIFS (Short Inter Frame Space) と呼ばれる待ち時間後に確認応答 Ack (Acknowledgement) 信号が送信される。送信端末で Ack 信号が受信されなければデータ送信が失敗したと見なし、データの再送信を行う。図 2.1 に 3 台の端末が受信端末へのデータを保持している際の送受信動作の例を示す。この例では端末 0 が最初にバックオフタイマをカウントし終わり、受信端末へデータを送信している。その間、端末 1 と端末 2 はバックオフカウンタの減算を停止して待機し受信端末からの ACK 送信が終了した後に再開している。以上のように CSMA/CA では複数の端末でチャンネルアクセス競争を行う際の同時送信を回避している。

2.1.2.2 省電力化のための新機能

IEEE 802.11ah では省電力化のため、AP からの制御フレームやビーコンを短縮することで制御オーバーヘッドの縮小が図られている。例えば、本規格では2種類の ACK 信号が用意されている。一つは従来の IEEE 802.11 シリーズ規格から使用されている標準 ACK、もう一つは新規採用された NDP ACK (Null Data Packet Ack) である。この NDP Ack は物理層ヘッダ PLCP (Physical Layer Convergence

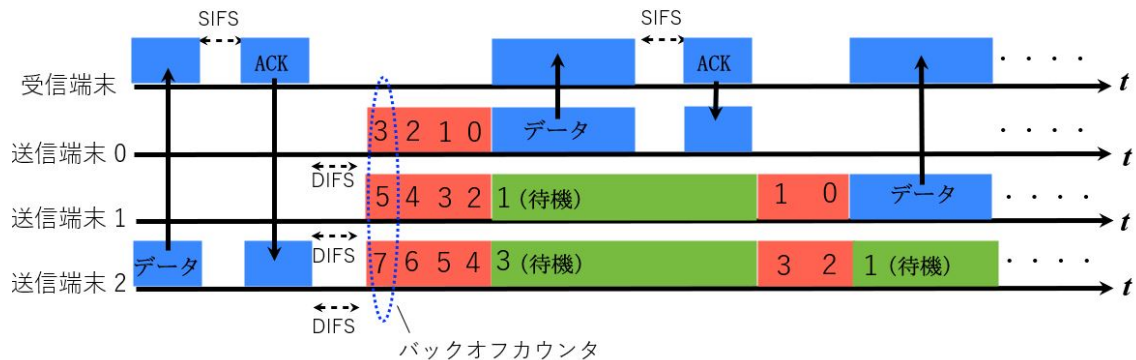


図 2.1: CSMA/CA 方式

Procedure) のみから構成される。図 2.2 に示すように、MAC 層のフレームが格納される PSDU (Physical Service Data Unit) 分だけ標準 ACK よりもフレーム長が短いため送受信動作の時間が短縮され、低消費電力化が期待できる。

また AP から定期的に送信されるビーコンにおいても必要最低限の情報のみを含む S1G ビーコンが新たに採用されている。図 2.3 に標準のビーコンと S1G ビーコンのフレームフォーマットを示す。S1G ビーコンでは宛先アドレス (DA) 等が省略され、送信データの順序番号 (Sequential Control) や時間に関する情報タイムスタンプ (Time Stamp) 等は必要に応じて短縮、オプション化されている [?],[?]。そして、図 2.4 に示すように、より多くの情報を含む従来の標準ビーコンの送信頻度を抑え、S1G ビーコンを代用することにより消費電力を抑制する。図 2.4 において、TBTT 及び TSBTT は標準ビーコンの送信タイミング (Target Beacon Transmit Time) と S1G ビーコンの送信タイミング (Target Short Beacon Transmit Time) をそれぞれ表す。IEEE 802.11ah ではこのように両ビーコンを使い分けることでシステムへの電力負荷を軽減する。

その他にも、消費電力を低減するため、間欠通信方式 TWT (Target Wake Time) などの機能も追加されている。これは AP と端末間であらかじめ通信を行うタイミングを決定する機能である。従来の IEEE 802.11ac 以前の節電メカニズムでは、端末は AP 宛のデータを保持していない場合はスリープ状態へ移行し、AP のビーコン

送信間隔や配信トラフィック情報マップ DTIM (Delivery Traffic Indication Message) 送信間隔などの一定間隔で起動する必要がある。一方, TWT ではそれぞれの端末が AP と同期して起動タイミングを決定するため, 端末ごとにスリープ期間を調整することが可能であり, より電力消費を抑えた運用が可能である。

以上のように, IEEE 802.11ah ではバッテリー駆動の超多数端末が参加する IoT ネットワークにおいて, 消費電力を抑え長期的な運用を可能とする MAC 機能を実装している。

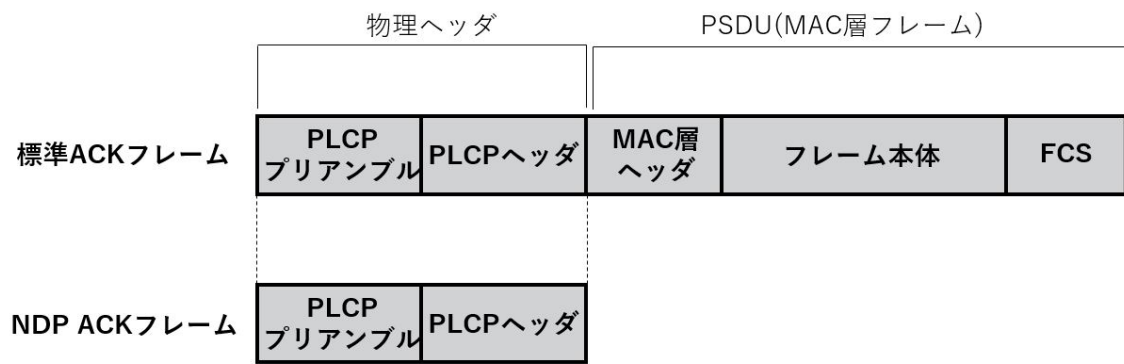


図 2.2: 標準 ACK と NDP ACK のフレーム比較

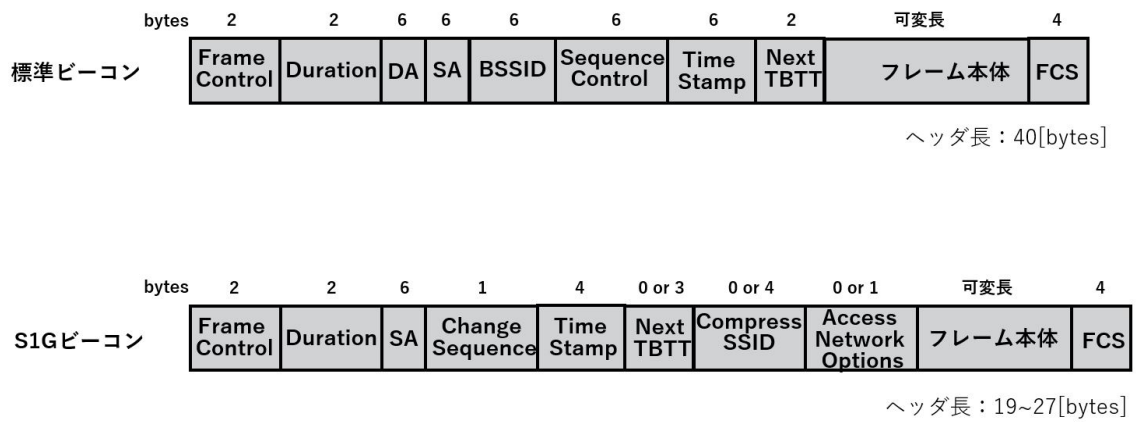


図 2.3: 標準ビーコンと S1G ビーコンフレームフォーマット

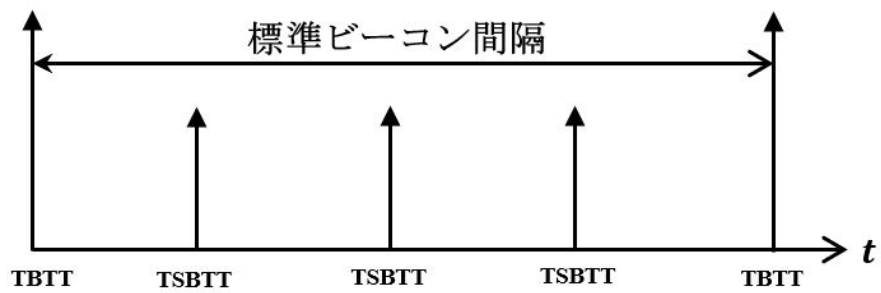


図 2.4: 標準ビーコンと S1G ビーコンの送信間隔例

2.1.2.3 多数端末対応のための新機能

IoT サービスの拡大に伴い、ネットワークへ接続される無線端末の数は急増しているが、従来の無線 LAN 通信規格 IEEE 802.11 では管理フレームの制約上、一つの AP に 2007 台以上の端末を収容することはできない。端末はネットワーク認証時に接続要求 Association Request Frame を AP 宛に送信し、AP から接続許可 Association Response Frame を受信することで初めて接続が完了する。この時、図 2.5 に示すように Association Response Frame 内の識別番号 AID (Association Identifier) フィールドによって端末に固有の AID が割り当てられる。16[bits] の AID フィールドのうち 0 と上位 5[bits] は予約フィールドであり [18]、AID に割かれるのは 1-2007 のみであるため 2007 台までしか端末を収容できない。

これを受けて IEEE 802.11ah では制管理フレーム上の AID を 1-2007 から 0-8191 へと拡張している。また AP にバッファリングされているデータパケットの宛先端末の情報を示す TIM (Traffic Indication Map) も同様に 8191 まで拡張され、IEEE 802.11ah では最大 8192 台の端末を収容可能となっている。

以上のように、IEEE 802.11ah では膨大な数のセンサ端末を収容するためフレーム構造上の制約を打破しているが、実際に数千台の端末が存在する環境下においては過度のチャンネルアクセス衝突が予想される。この問題を解決すべく、IEEE 802.11ah では RAW (Restricted access window) 方式が導入されており、その内容について 2.1.2.4 に記述する。

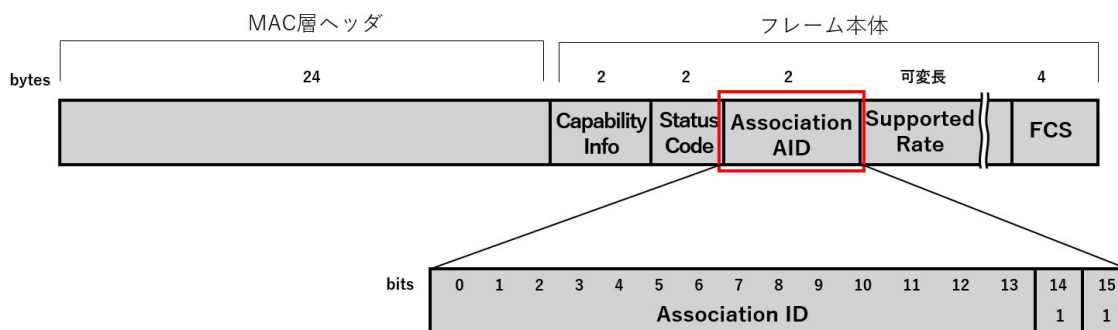


図 2.5: Association Response Frame のフォーマット [19]

2.1.2.4 RAW (Restricted access window)

IEEE 802.11ah では数千台の超多数端末環境下において、過度のチャネルアクセス競合を緩和するため、RAW 方式を導入している。一般に IEEE 802.11 シリーズ規格ではネットワークを管理する目的で一定間隔ごとに AP からビーコンが発信される。IEEE 802.11ah ではビーコンとビーコンの間隔を一つのフレームと考え、各フレーム内で指定された端末のみがチャネルアクセスを行う RAW 期間が設定される。RAW 期間は複数の RAW スロットから構成されており、ネットワーク内の端末は RAW スロット数分の端末グループへと分割され、それぞれ端末グループに固有の RAW スロットが割り当てられる。RAW スロット割り当てや RAW 開始時間など RAW 方式に関する情報は AP からのビーコンで全端末に通知される。RAW 方式において RAW スロット数（端末グループ数）が N_{RAW} の場合のフレーム構造を図 2.6 に示す。

各端末は所属グループに割り当てられた RAW スロット期間内において、同一グループ内の端末同士でのみ CSMA/CA プロトコルに従ってチャネルアクセス競合を行う。よって、同時のアクセス競合数が制限されアクセス衝突を抑制して、超多数端末の接続する IoT シナリオにおいてもネットワーク性能を適切に維持することが可能となる。

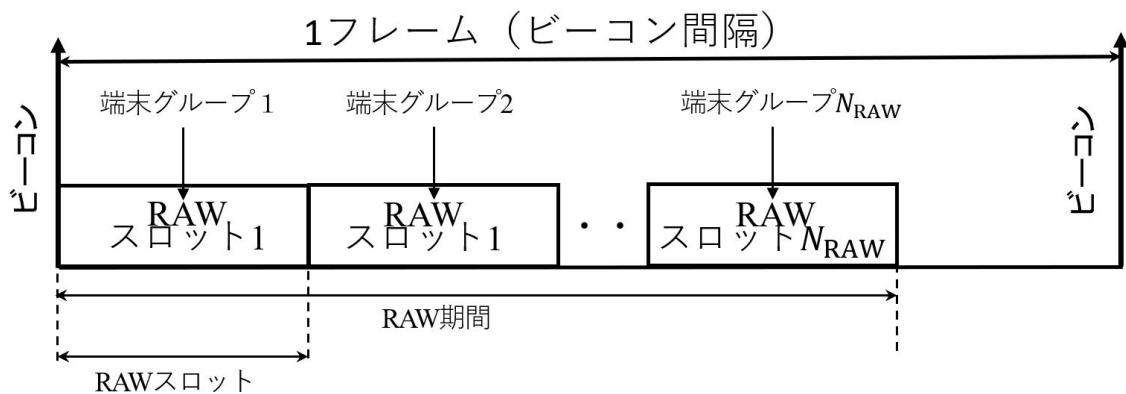


図 2.6: RAW フレーム構造

2.2 RAW 方式のための端末グルーピング

IEEE 802.11ah RAW 方式において、RAW スロットへの端末割当のための端末グルーピングはネットワーク性能に大きく影響する。RAW 方式を採用したシステムにおいて、十分なネットワーク性能を発揮するため、2.2.1 節に記述する端末グルーピングへの要求事項を満たす必要がある。これら要求事項に対し、これまでに検討されている既存端末グルーピング方式を 2.2.2 節に記述する。そして、IoT ネットワークにおいて生じる既存方式の課題について 2.3 節に記述する。

2.2.1 端末グルーピングへの要求事項

端末グルーピングへの一つ目の要求事項として、ネットワークスループットの向上を挙げる。IEEE 802.11ah では端末は割当てられたスロット内において CSMA/CA によってチャネルアクセス競合を行うため、同一グループ内にキャリアセンスできない端末が存在する場合には隠れ端末問題が発生し、スループット性能劣化の支配的要因になる。よって、本要求事項に対する具体的な目標は、同一グループ内における隠れ端末問題の解消とする。

次に二つ目の要求事項には端末間の通信性能公平性の向上を挙げる。端末グルーピングによって生じる端末の通信性能差は、チャネルアクセス機会の差によるものである。各グループに割り当てられる RAW スロット期間長は等しいため、グループ内の端末数や生起トラヒック量にグループ間で差がある場合、端末のチャネルアクセス機会は所属するグループによって異なる。端末数や生起トラヒック量が多いグループではチャネルアクセス機会が減少し、一方で、端末数やトラヒック量が少ないグループではチャネルアクセスが容易になる。よって、本要求事項に対する具体的な目標は、各グループにおける端末数とトラヒック量のグループ間均等化とする。

2.2.2 既存端末グルーピング方式

IEEE 802.11ah RAW 方式の端末グルーピングでは、ネットワーク性能への影響の大きさゆえに、前述の要求事項を考慮して既に多くの方式が検討されている [9]–[15].

一つ目の要求事項に関して隠れ端末問題抑制の観点では、制御フレームの利用により隠れ端末ペアの情報を収集し再グループ化を実施する方式が検討されている。例えば、RTS フレームに送信時刻情報を付随させることにより隠れ端末衝突を検出する方式 [11] や RTS/CTS のやり取りによって端末自身が隠れ端末となる端末を確認する方式 [13] などが提案されている。しかし、制御フレームの使用は少量のデータパケットを多数の端末が送信する IoT ネットワーク環境には不適である。データ量が小さい場合、一度の送信動作の中で情報伝送に使用されるチャネル資源の割合が低下する。よってチャネル利用効率の劣化へとつながる。

一方で、二つ目の要求事項である通信性能の公平化の観点では、文献 [14], [15] では、遺伝アルゴリズムや生物学アルゴリズムなどの数学的アプローチを端末グルーピングに適用している。しかし、これらの研究では隠れ端末による問題が発生しないことを前提としているため、ネットワーク半径が 1km に及ぶ IEEE 802.11ah で想定する環境には不適である。

後述において、IoT シナリオに適した具体例として 3 つの既存端末グルーピング方式を記述する。2.2.2.1 節には隠れ端末を考慮していない端末グルーピング方式の例として、AID 端末グルーピング方式について述べる。次に 2.2.2.2 節, 2.2.2.3 節では隠れ端末問題解決に主眼を置いた領域等分割グルーピング方式 [16] と RSS (Received Signal Strength) 基準端末グルーピング方式 [17] について述べる。

2.2.2.1 AID 端末グルーピング方式

IEEE 802.11ah 標準規格や文献 [3] では、ネットワーク認証時に端末が取得する固有の認証識別子である AID を用いて、マッピング関数により端末をグループ化する AID 端末グルーピングが議論されている。端末は自身の AID により (2.1) 式で与

えられる i 番目の端末グループに所属して i 番目の RAW スロット i_{slot} を使用する.

$$i_{\text{slot}} = (N_{\text{offset}} + \text{AID}) \bmod N_{\text{RAW}} \quad (2.1)$$

ここで N_{offset} と N_{RAW} はそれぞれオフセット値と RAW スロットの数を示す.

この方式は端末を各グループへ均等に分配しており, 端末トラヒックが端末間で均一である場合には, グループ内トラヒック量が均一化されるため端末間のチャネルアクセス機会における公平性, つまり通信性能の公平性を確保することができる. 従って, AID 端末グルーピング方式は前述した端末グルーピングにおける二つ目の要求事項を限定的に満たすことが可能である.

2.2.2.2 領域等分割グルーピング方式

前節の端末位置を考慮しない AID 端末グルーピング方式に対し, 領域等分割グルーピング方式 [16] は端末位置情報を利用して近隣端末同士をグループ化することを目的とした手法である.

本方式ではまず, AP を中心とした円形カバレッジを等しい中心角を持つ等面積の扇形領域に分割する. そして分割された同じ領域内に位置する端末を一つのグループとし, 各グループに固有の RAW スロットを割り当てる. 例えば, 分割数 (端末グループ数が) 6 である場合, 図 2.7 に示すように, 6 つの等面積の扇形領域内の端末をそれぞれグループ 1–グループ 6 として固有の RAW スロット 1–6 を割り当てている.

本方式において, 各領域内での最大の端末間距離 $r_{\text{max}}[\text{m}]$ はカバレッジ半径を $R[\text{m}]$ とすると, (2.2) 式で表される.

$$r_{\text{max}} = \begin{cases} R & ; \theta \leq 60^\circ \\ 2R \sin(\frac{\theta}{2}) & ; otherwise \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで, θ は分割された扇形領域の中心角とする. フェージング等による信号減

衰の変動を考えない場合（つまり，距離減衰のみを考慮する場合），端末がキャリアセンス可能な距離を仮に r_{CS} ($r_{CS} \geq R$) [m] とすると，中心角が (2.3) 式を満たす場合は隠れ端末問題を完全に回避可能となる。

$$\theta \geq 2\text{Arcsin}\left(\frac{r_{CS}}{2R}\right) \quad (2.3)$$

よって，領域の分割数，つまり RAW スロット数が6以上の場合，グループ内の端末間距離が縮小して r_{CS} [m] 以下となるため隠れ端末問題を抑制することができる。

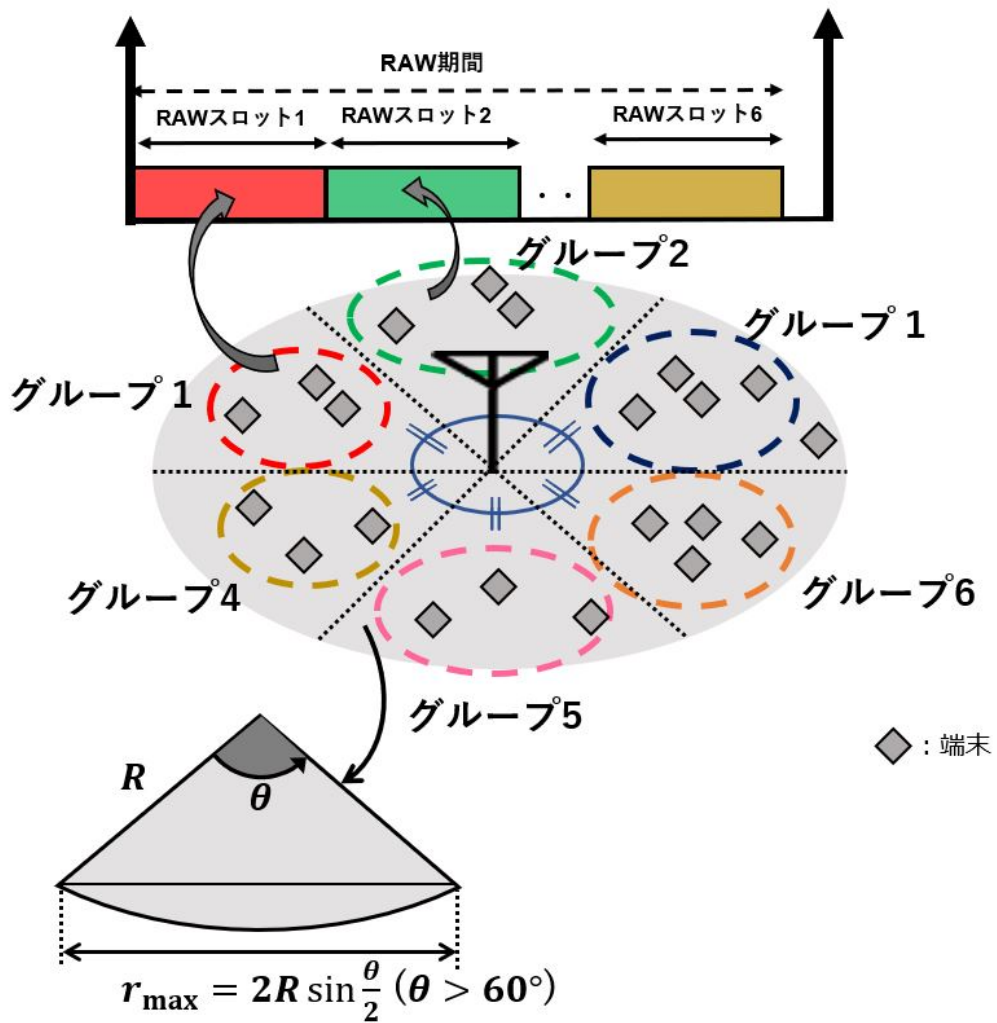


図 2.7: 領域等分割グルーピング方式

2.2.2.3 RSS (Received Signal Strength) 基準端末グルーピング方式

RSS 基準端末グルーピング方式 [17] は、前項の領域等分割端末グルーピング方式と同様に隠れ端末問題抑制のため近隣端末同士を同一グループ化する手法である。本方式ではグループを代表する参照端末が送信する参照信号の受信強度を基に端末をグループ化する。

まず初めに、AP には端末グループ数 (RAW スロット数) と等しい数の参照端末を AP に接続している端末からランダムに選出する。選出された参照端末は一台ずつ順番に参照信号をブロードキャストする。参照端末でない通常の端末は受信した全ての参照信号の受信強度を比較し、最大値を与える参照端末を最も近い参照端末と判断する。そして、通常端末は最も近い参照端末のグループへと参加する。

図 2.8 に 3 つの端末グループに端末をグループ化した例を示す。それぞれの端末が丸印で示した 3 つの参照端末による参照信号の受信強度を基に参加グループを決定することで、最も近距離の参照端末のグループに参加することが可能となっている。よって、近隣端末同士が同一グループ化されるため隠れ端末問題が抑制される。

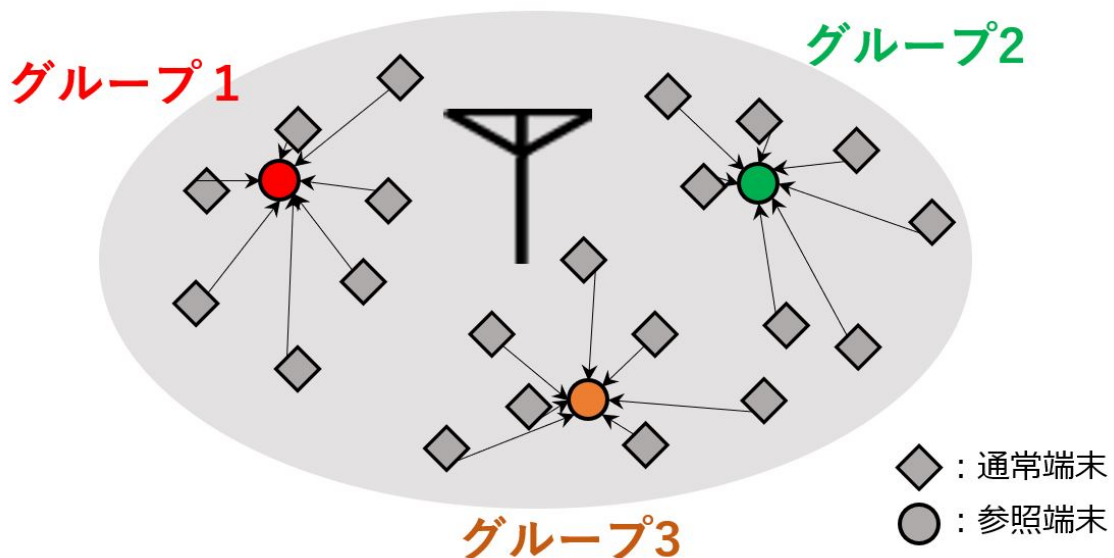


図 2.8: RSS 基準端末グルーピング方式

2.3 不均一ネットワーク環境における端末グルーピング

2.3.1 IoT ネットワークの多様性

IEEE 802.11ah がサポートする IoT シナリオでは多様なネットワーク環境が想定される。ネットワークの用途や使用環境を考慮すると端末の配置状況や端末トラヒックは必ずしも均一なものになるとは限らない。

端末配置であれば、図 2.7 のような均一配置だけでなく図 2.9 に示すような地理的に不均一な端末配置も考慮する必要がある。不均一配置の例として、住宅街で防犯用センサネットワークを設計する場合には、地形により住宅の集中する地点が現れたり、建物の形態（戸建て、集合住宅）によってセンサ端末の配置量が異なる可能性が考えられる。

端末トラヒックに関しても多様な IoT サービスに対応する上で、多種の端末トラヒックが同一ネットワーク内に混在する環境を想定する必要がある。例えば、医療やヘルスケアのネットワークでは採取する生体情報や環境情報の重要性や特性によって、さまざまな端末トラヒック特性が考えられる。心拍数のように高頻度でデータが必要となる高トラヒックのセンサや、体温や室温のように一定間隔で事足りる低トラヒックのセンサが混在し得る。従って、端末ごとのトラヒック量は図 2.10 に示すように多様な分布特性に従う可能性がある。

以上のように、端末配置が地理的に偏る環境や、多種の端末トラヒックが混在するような不均一ネットワーク環境において、端末グルーピングに対する要求事項である隠れ端末抑制と通信性能公平性をともに満たす方式が必要である。しかし、これまでのところ既存の端末グルーピング方式では不均一ネットワーク環境下において両要求事項を同時に満たすことは困難と言える。

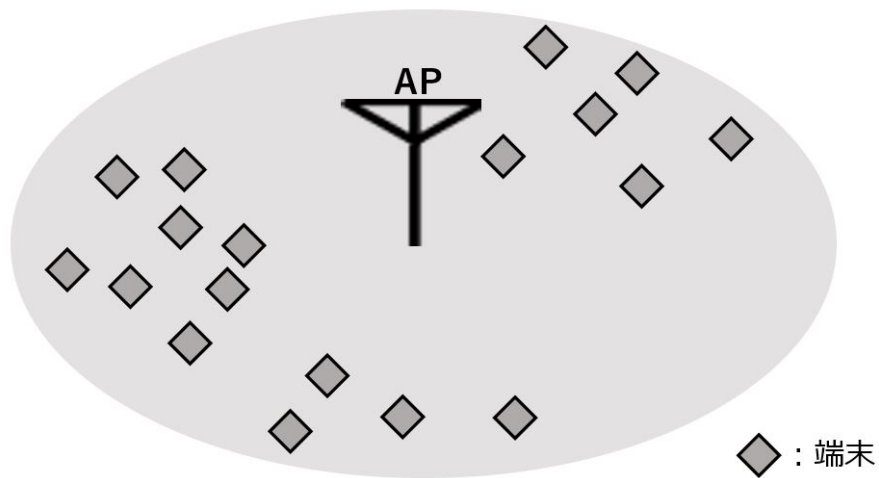


図 2.9: 地理的に不均一な端末配置例

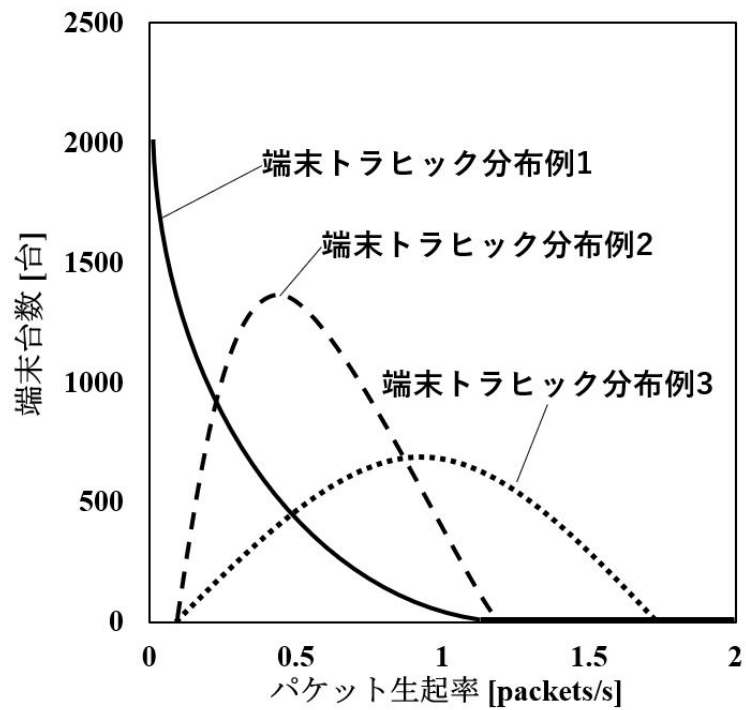


図 2.10: 様々な端末トラヒック分布例

2.3.2 既存端末グルーピング方式の課題

前項の AID 端末グルーピング方式では，端末数をグループ間で均等化することが可能であるため，均一な端末トラヒック環境下においては端末間の公平性を維持でき，端末配置の不均一性には対応可能である．しかし，多種端末トラヒックが混在する環境下においてはグループ内トラヒック量にグループ間で差が生じるため，所属グループによって端末の通信性能に差が生じる．また，隠れ端末に対応していないことから大幅な性能劣化が見込まれる．

同様のことが多種端末トラヒック混在環境下の領域等分割端末グルーピング方式，RSS 基準端末グルーピング方式に関しても言える．また，領域等分割端末グルーピング方式と RSS 基準端末グルーピング方式ではこれに加え端末配置の偏りによっても性能が劣化する．端末配置が地理的に偏っている場合，前者では分割した各領域に所属する端末数の偏りが大きくなり，後者ではそれぞれの参照端末が最も近いと判断する端末数に偏りが生じる．よって，端末配置や端末トラヒックが均一でない場合，端末のチャネルアクセス機会に差が生じ，端末間の通信性能の公平性が劣化する恐れがある．

以上のように，前述した端末グルーピングに対する二つの要求事項，隠れ端末問題の抑制と端末間の通信性能の公平性確保を不均一ネットワーク環境下において既存方式では対応することができない．従って，二つの要求事項をいかなるネットワーク環境においても同時に満足する端末グルーピング方式の開発が望まれる．

第3章

不均一ネットワーク環境に対応した 端末グルーピング方式

3章では、本研究で提案する中心角制御型セクタ端末グルーピング方式について記述する。3.1節では、提案方式の概要とについて記述する。3.3節, 3.2節では、それぞれフレーム構造と端末グループ生成のためのAPカバレッジ領域の分割手順について、3.4節では、領域を分割する際の三つの領域分割基準について記述する。

3.1 中心角制御型セクタ端末グルーピング方式

不均一ネットワーク環境下においても、端末グルーピングに対する二つの要求事項を同時に満足するため、本章では中心角制御型セクタ端末グルーピング方式を提案する。本方式では領域等分割グルーピング方式(2.2.2.2節)と同様に、APのカバレッジをセクタ(扇型)領域分に割して近隣端末同士でグループを生成することにより隠れ端末問題を抑制する。また、領域分割時には、各セクタ領域の中心角を端末配置状況や端末トラヒックで制御することで、均質な端末グループを生成し、端末間の通信性能上の公平性を確保する。

3.2 フレーム構造

本研究では隠れ端末抑制に十分な量の分割数（グループ数）を確保するため，図3.1に示すようなRAW スロットを更にサブスロットに細分化したフレーム構造を採用する．ビーコン間隔 L_{BI} [ms] に期間長 L_{RAW} [ms] の RAW 期間を設置し， N_{RAW} 個の RAW スロットに分割する．それぞれの RAW スロットは更に N_{sub} 個のサブスロットに分割する．全ての RAW スロットおよびサブスロットの期間長はそれぞれにおいて等しく， L_{raw} [ms]， L_{sub} [ms] である．

端末グルーピングは，RAW スロットに対するグルーピングとサブスロットに対するグルーピングの二段階で行う．提案方式では後述するように領域分割によって近隣端末を同一グループ化しているが，まず初めに RAW スロットに対するグルーピングのために領域分割を行う．そして，この段階で生成された各セクタ領域を更に細分化し，サブセクタ領域とする．このサブセクタ領域に存在する端末を一グループとしてサブスロットへと割当てて．RAW スロットとサブスロットの両段階における端末グルーピングの手法は同様のものとし，その内容は3.3節，3.4節に記述する．

IEEE 802.11ah 規格では，AP はスロット期間終了間際において，端末のパケット送信やバックオフカウンタのカウンタがスロットの境界を超えること（越境）を選択的に許可することが可能である．越境を禁止した場合，グループ間でチャネルアクセス競合期間が干渉しあうことがない．よって，隠れ端末を抑制する端末グルーピングの効果を損なうことなく発揮できる．しかし，送信に要する時間が残余スロット期間に満たない場合はスロット期間終了前であっても送信不可となるため，チャネル利用効率が劣化する．一方で，越境を許可した際には，チャネル利用効率は向上するが，端末は割当てられたスロット期間開始時刻付近において，越境通信を隠れ端末問題によって検知できない場合，アクセス衝突の原因になる恐れがある．本提案方式では，RAW スロットの境界を超えた送信は禁止するものとする一方，十分に端末間距離が小さいと予想される RAW スロット内のサブスロット境界においては越境を可能として動作させるものとする．

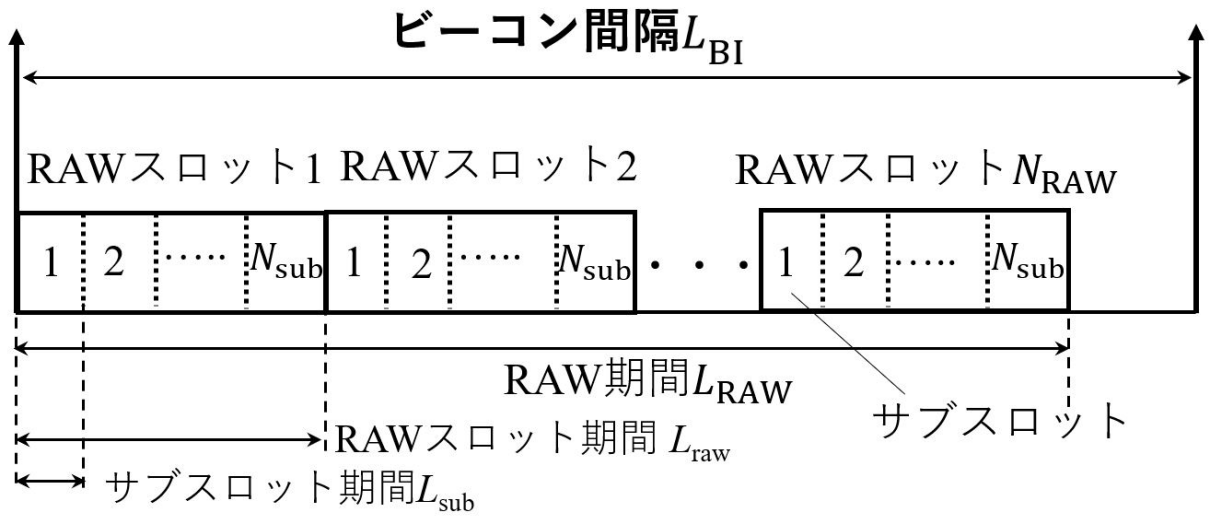


図 3.1: フレーム構造.

3.3 領域分割

提案方式の領域分割では図3.2に示したようにAPカバレッジを円形領域とし、任意の中心角を持ったセクタ（扇形）形状に領域分割する。そして、各領域内に存在する端末を一つのグループとして固有のRAWスロットを割り当てる。各グループ G_i は N_{G_i} 台の端末を収容する。それぞれのセクタ領域の中心角 θ_{G_i} は3.2.1~3.2.3節に示す領域分割基準によって決定される。また、サブスロットに対する領域分割においては、RAWスロット割当時に生成したセクタ領域を同様の手順で任意の中心角を持った小セクタ領域に分割しサブグループを生成する。各サブグループは所属のRAWスロット内のサブスロットへと生成順に割当てられる。よってサブスロット数 N_{sub} の増加に伴い領域面積、つまり同一グループ内の端末間平均距離は縮小するため、隠れ端末抑制効果の向上が更に期待できる。

具体的な分割手順を以下に示す。まず初めにAPカバレッジ内の任意の場所にAPからカバレッジの端に向かって始線を引く。次に全ての端末 i ($i = 0 \sim N_{\text{STA}}$) について始線からの反時計回り方向の角度（これを”端末角”と定義する）を計算する。端末 i の端末角 θ_i は(3.1)式で与えられる。

$$\theta_i = \text{Arccos} \frac{\vec{s}_1 \cdot \vec{x}_i}{\|\vec{s}_1\| \|\vec{x}_i\|} = \text{Arccos} \frac{\vec{s}_1 \cdot \vec{x}_i}{\|\vec{x}_i\|} \quad (3.1)$$

ここで、 \vec{s}_1 、 \vec{x}_i はそれぞれグループ1の始線の単位ベクトルと端末 i の位置ベクトルを示す。最初のグループ G_1 はこの始線からの端末角が小さい順に N_{G_1} 台の端末 ($i = 0 \sim N_{G_1} - 1$) を含む。よって、グループ G_1 を作るセクタ領域の中心角 θ_{G_1} は端末0と端末 $N_{G_1} - 1$ の二端末の端末角差で以下のように与えられる。

$$\theta_{G_1} = \theta_{N_{G_1}-1} - \theta_0 \quad (3.2)$$

この時、グループに所属する端末数 N_{G_1} は後述する領域分割基準値 N_{STAG} 、 V_{TFG} によって決定される（詳細は3.4節）。次に、始線を端末 $N_{G_1} - 1$ の位置まで回転させ（位置ベクトルを \vec{s}_2 とする）、二番目の端末グループ G_2 に対して同様の処理を実施する。この操作を以降のグループに対しても繰り返すと、全ての端末がいずれかのグループに属することになる。

提案方式では領域分割基準値であるグループ内端末台数上限値 N_{STAG} [台], グループ内トラフィック量上限値 V_{TFG} [packets/s] を用いることで, グループ内の端末数やトラフィック量をより均等化して端末性能の公平性を確保する. 各セクタ領域の中心角は端末配置状況や端末トラフィック状況に応じて変動するため, 地理的な不均一端末配置や多種トラフィック環境下においても性能向上が期待できる. 本研究では本セクタ型端末グルーピング方式の具体的手法として, 上記の領域分割基準値のいずれかを用いた三種の方式 (3.4 節参照) を提案してその性能を比較検討する.

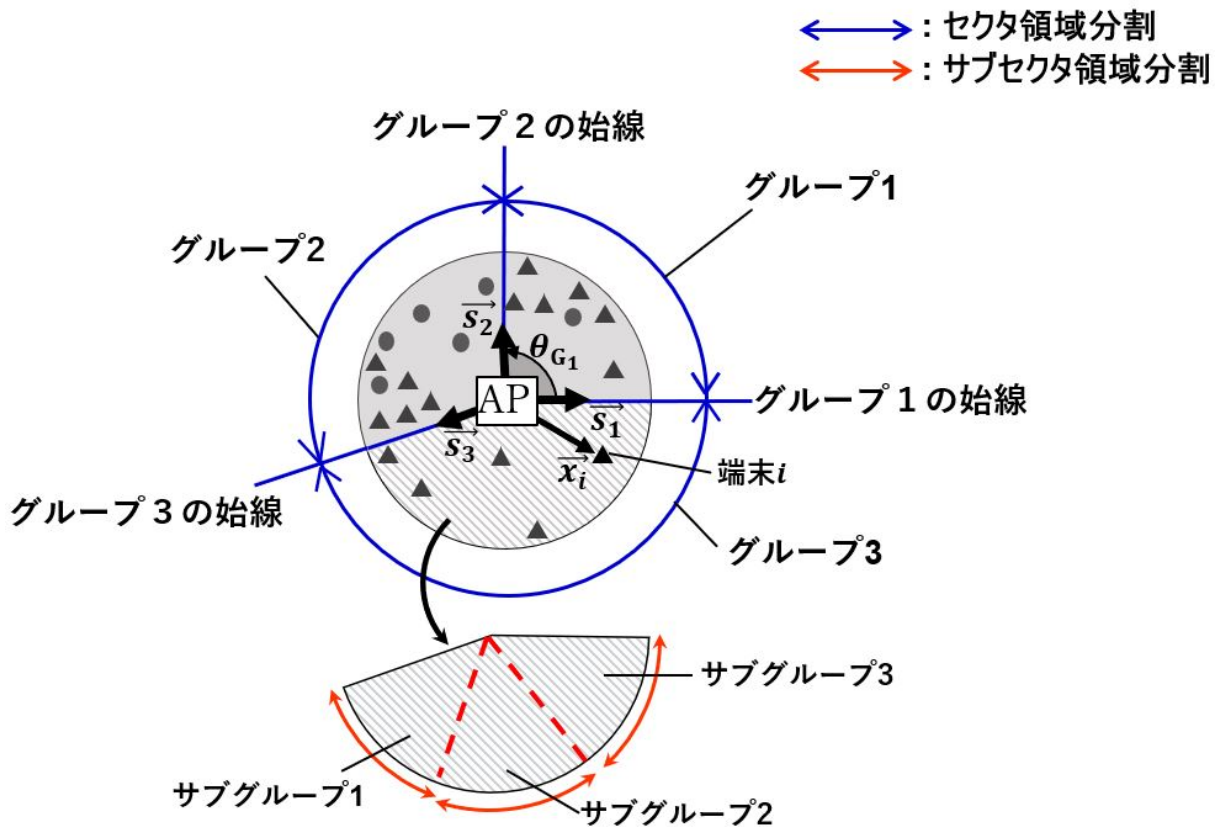


図 3.2: 中心角制御型セクタ端末グルーピング ($N_{\text{RAW}} = 3$ の場合) .

3.4 領域分割基準

中心角制御型セクタ端末グルーピング方式ではネットワーク環境に応じて各セクタ領域の中心角を制御し、均質な端末グルーピングを実施する。本研究では具体的に端末のチャネルアクセス機会に影響を与える端末数や生起トラフィック量、またはその両者を極力均等化することを目的に、以下の三種類の領域分割基準を提案して、それらを比較検討する。

3.4.1 端末台数基準

端末台数基準の中心角制御型セクタ型端末グルーピング方式はセクタ領域分割の中心角を決定する領域分割基準として端末台数を用いる方式である。APはネットワークに接続している全端末台数 N_{STA} とフレーム内のRAWスロット数(グループ数) N_{RAW} により、領域分割基準値を以下の(3.3)式で決定する。

$$N_{STAG} = \text{floor}(N_{STA}/N_{RAW}) \quad (3.3)$$

この領域分割基準値 N_{STAG} を用いて前述したセクタ端末グルーピングの操作に従って端末グループを生成する。本方式では次式のように、各領域内(グループ内)端末数 N_{G_i} が全て基準値 N_{STAG} に等しく設定される。

$$\forall i N_{G_i} = N_{STAG} \quad (3.4)$$

以上より本方式では、端末トラフィックにおける端末間のばらつきが小さい場合には、端末間の通信性能公平性を維持することができる。

また、始線からの端末角順に端末をグループ化していることから、近隣端末同士を同一グループ化することが可能である。よって、もう一方の要求事項である隠れ端末問題の抑制に関しても十分に効果を発揮すると言える。

3.4.2 トラヒック量基準

トラヒック量基準の中心角制御型セクタ型端末グルーピングでは、グループ内のトラヒック量をグループ間で均等化することを第一の目的とする。APは全端末の送信頻度を監視し、全端末の要求レート λ_i [packets/s] とその総和 V_{total} [packets/s] を得る。領域分割基準値は (3.5) 式で表される。

$$V_{\text{TFG}} = V_{\text{total}}/N_{\text{RAW}} \quad (3.5)$$

各グループ内の端末数 N_{G_i} は (3.6) 式に示すように、グループ内端末による総トラヒック量がこの基準値 V_{TFG} を超えない最大端末数として決定され、前述した中心角制御型セクタ型端末グルーピングの操作に従って端末グループを生成する。

$$N_{G_i} = \max_k \sum_{x=j}^k \lambda_x (x \in G_i) \leq V_{\text{TFG}} \quad (3.6)$$

ここで、 j , λ_x はそれぞれグループ G_i に所属する最初の端末番号（端末角が最も小さい端末）と端末 x のパケット生起レートを示す。

本方式は、端末トラヒックを考慮したグルーピング手法であることから、多種の端末トラヒックが混在する環境においても端末間の通信性能公平性が確保される利点がある。さらに、前述した端末台数基準中心角制御型セクタ型端末グルーピングと同様に、隠れ端末問題の抑制においても、近隣端末同士を同一グループとすることが可能であるため、端末グルーピングの両要求事項を満たすと言える。

3.4.3 トラヒックカテゴリ化

3.4.2節で述べたトラヒック量基準の中心角制御型セクタ型端末グルーピング法では、グループ内のトラヒック量が均等化されるため、端末トラヒックのばらつきが大きい場合には端末グループ間で所属端末台数に差が生じて競合端末数に差異が発生し通信性能に端末間で差が生じる恐れがある。この点に着眼してトラヒックカ

カテゴリ化中心角制御型セクタ端末グルーピング法では端末グループ内の端末数とトラフィック量の両者をグループ間で極力均等化することを目指す。これを達成するため、本方式では類似したトラフィック特性を持つ端末同士を一つのトラフィックカテゴリに分類し、各トラフィックカテゴリに前述したトラフィック量基準中心角制御型セクタ端末グルーピング法を適用する。従って、端末トラフィックのばらつきがある程度狭まった端末群（トラフィックカテゴリ）に対して端末グルーピングを行うため、端末グループ内の端末台数をより均等化することが期待できる。

具体的には、まず初めに端末を生起レートに基づいて N_{cat} 個のトラフィックカテゴリに分類する。AP は各端末の生起レート λ_i [packets/s] を把握しているものとし、その平均値を境界として端末を二分するカテゴリ化を実施する。さらに分類された各トラフィックカテゴリにおける生起レートの平均値を求め、同様の方法で各トラフィックカテゴリを更に二分する。端末群が N_{cat} 個のトラフィックカテゴリに分類されるまでこの操作を繰り返す。例えば、トラフィックカテゴリ数 $N_{\text{cat}} = 4$ の場合には図 3.3 に示すように、一度目のカテゴリ化で生成した左右二つのトラフィックカテゴリをそれぞれの平均値で再度 2 分割することで、4 つのトラフィックカテゴリを生成している。

次に、各カテゴリに対して、前述のトラフィック量基準中心角制御型セクタ端末グルーピング法を適用し、これによって生成された $N_{\text{cat}} * N_{\text{RAW}}$ 個の端末グループを N_{RAW} 個の端末グループに併合する。グループ併合においては、各カテゴリから端末グループを一つずつセクタ領域の重複が大きくなるように選択して一つの端末グループとする。そして最終的に構成された N_{RAW} 個の端末グループの一つずつ RAW スロットを割り当てる。

図 3.4 に示すようにトラフィックカテゴリ数 $N_{\text{cat}} = 4$ 、グループ数 $N_{\text{RAW}} = 3$ の場合では、まずカテゴリ 1 に所属する端末にのみ着眼し、3 つのセクタ領域へと分割する。その後、カテゴリ 2 からカテゴリ 4 に所属する端末群それぞれに対しても順番に領域分割を行う。よって、4 度の領域分割が行われ、合計で 12 個のセクタ領域が生成される。そして、図 3.5 に示すように 4 つのトラフィックカテゴリから一セクタ領域ずつを近距離順に（重複領域が大きくなるように）選択して一つのグループ

とすることで、最終的に3つの端末グループが構成される。

以上の手順により、生起レートが近い端末同士でトラヒック量基準のグループを生成することができるため、トラヒック量基準セクタ型端末グルーピング方式に比べてグループ内端末数をより均等化し、端末のチャネルアクセス機会をグループ間で更に公平化することが期待できる。

以上の三種の領域分割基準によって、カバレッジ内の端末配置が不均一な場合や多種の端末トラヒックが混在する環境においても、グループ内の競合端末数やトラヒック量を均等化することが可能となるため、端末の通信性能の公平性を確保できる。同時に、いずれの方式においても端末角を基準に端末をグループ化しており、近隣端末同士が同一グループに属するため隠れ端末問題を低減することが可能である。よって、ネットワークスループットの向上も期待でき、端末グルーピングにおける二つの要求事項を同時に満足することが可能である。

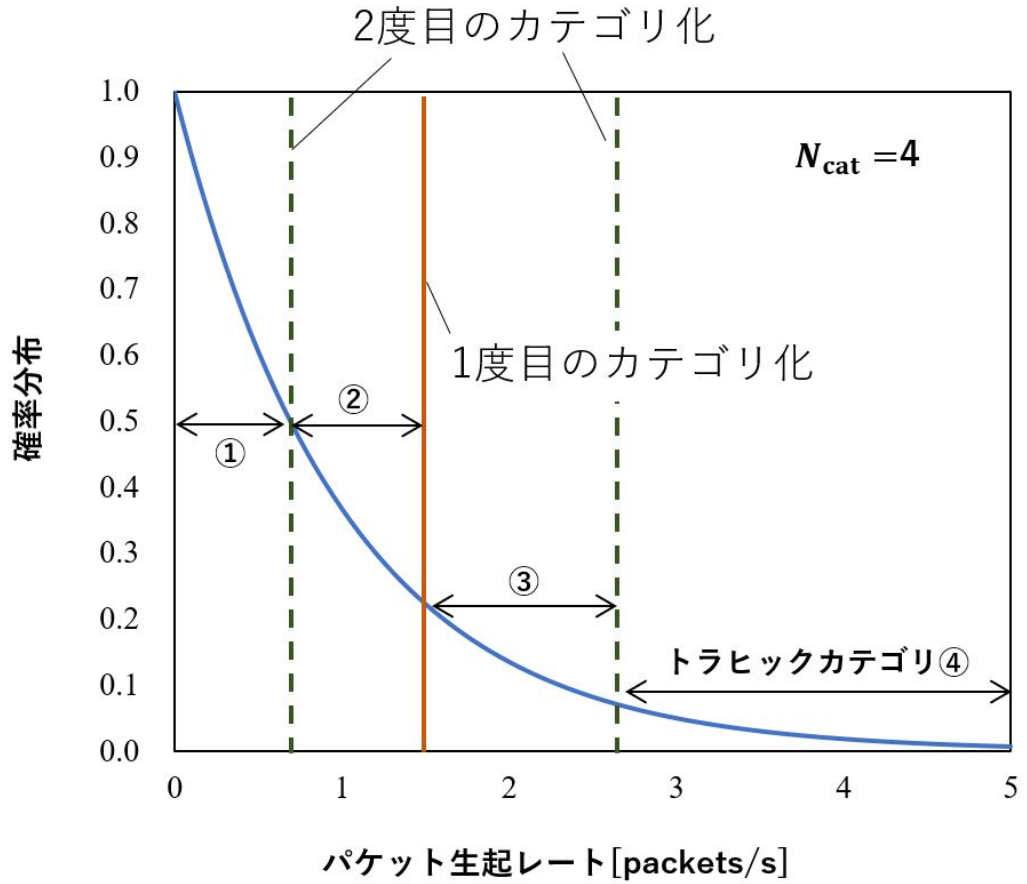


図 3.3: 端末トラヒックに基づく端末のカテゴリ化.

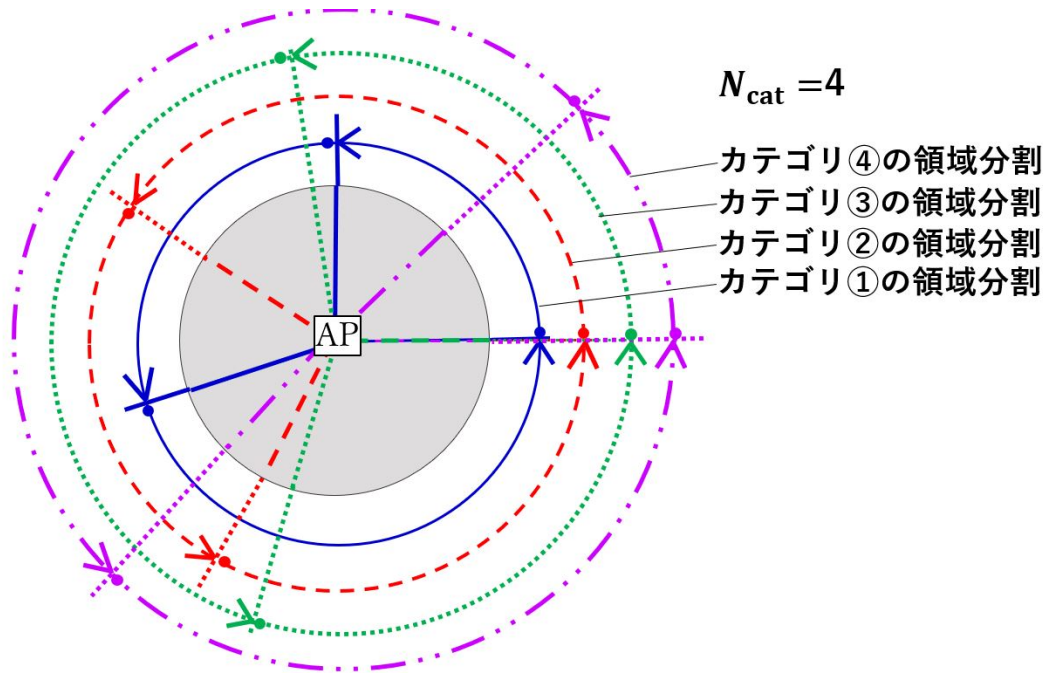


図 3.4: トラヒックカテゴリごとのトラヒック量基準領域分割 ($N_{RAW} = 3$)

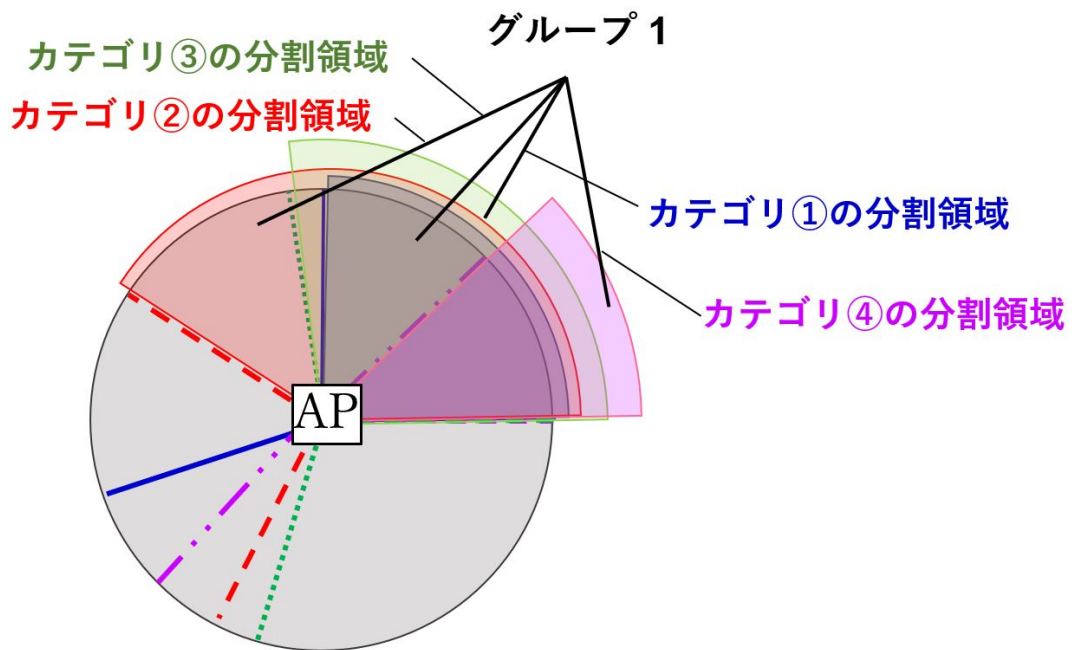


図 3.5: 近距離セクタ領域の併合.

第4章

特性評価モデル

IEEE 802.11ah ネットワークにおいて提案方式の性能を評価するため、以下のシステムモデルを用いて計算機シミュレーションを実施した。

4.1 ネットワークモデル

図 4.1 に示すように、1 台の AP と N_{STA} [台] の無線端末からなるスター型トポロジネットワークを仮定する。AP カバレッジは半径 R [m] の円形領域である。

端末配置は、図 4.1 のように端末が集中する地点として N_{HS} [個] のホットスポットがカバレッジ内にランダムに配置され、AP を原点とした各端末の X, Y 座標がいずれかのホットスポットを中心として標準偏差 σ_{xy} [m] の正規分布に従って与えられるものとする。従って、ホットスポット数 N_{HS} と端末座標の標準偏差 σ が端末配置の偏りを表す指標となる。

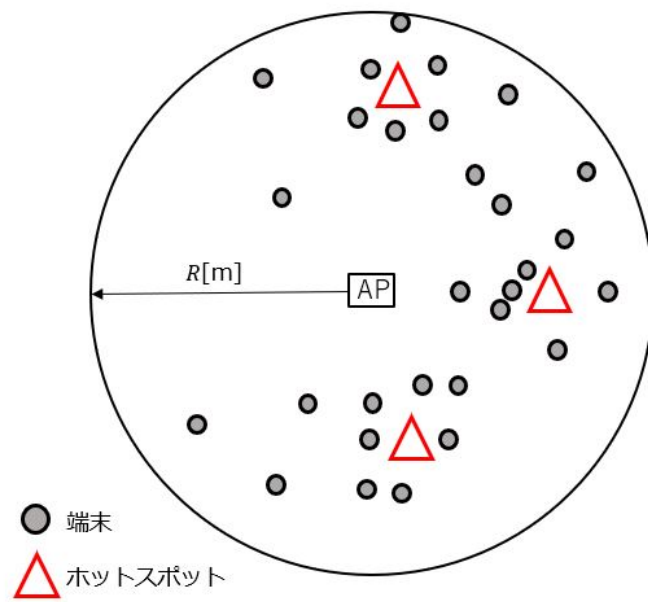


図 4.1: 端末配置

4.2 伝搬路モデル

IEEE802.11ah が採用される屋外ネットワークにおける信号の距離減衰モデルでは、ネットワークが広範囲に広がるマクロ環境と高トラヒックの端末が狭範囲に集中するピコ/ホット環境の二つのシナリオが想定される [11]。本論文では前者のシナリオを仮定し、伝搬距離 d [m] での送信信号の減衰量 $PL(d)$ [dB] は次式で表される。

$$PL(d) = 8 + 37.6 \log_{10}(d) \quad (4.1)$$

さらに伝搬路において、信号はシャドーイング、レイリーフェージングの影響を受けるものとする。シャドーイングによる信号電力の変動量 b_{shad} [dB] は、平均 0 [dB]、標準偏差 8 [dB] の対数正規分布に従う。また、レイリーフェージングによる受信電力の変動分を b_{fade} とすると、端末から送信電力 P_{tx} [dBm] で送信された信号が距離 d [m] 離れた地点で受信される場合の受信電力 $P_{\text{r}}(d)$ [dBm] は次式で与えられる。

$$P_{\text{r}}(d) = P_{\text{tx}} - PL(d) + b_{\text{shad}} + 10 \log_{10}(b_{\text{fade}}) \quad (4.2)$$

ここで、フェージングによる変動分 b_{fade} は、平均 1 の指数分布に従うものとする。

4.3 チャネルアクセスモデル

端末はパケットを保持すると、伝送速度 $r_{\text{data}}[\text{Mbps}]$ で AP 宛にデータを直接伝送する。データ伝送は各端末が所属する端末グループに割り当てられた RAW スロット内のサブスロット期間内において行われ、CSMA/CA 方式によってチャネルアクセス権を得た端末が送信を開始する。

送信前のランダムな待機時間バックオフ期間 $T_{\text{BO}}[\mu\text{s}]$ は、バックオフカウンタ n_{CW} とスロットタイム $t_{\text{slot}}[\mu\text{s}]$ の乗算により (4.3) 式で与えられる。

$$T_{\text{BO}} = n_{\text{CW}} * t_{\text{slot}} \quad (4.3)$$

ここで、バックオフカウンタ n_{CW} は既定の競合範囲 $CW_{i=0}$ の範囲で各端末が各送信時にランダムに選択する。 i はパケット送信の試行回数を表しており、初回送信の場合を $i = 0$ とする。

パケット衝突などにより AP で正常に受信されなかった場合は、再度チャネルアクセス競合を行い、最大 $N_{\text{reTX}}[\text{回}]$ まで再送信を行う。再送時には指数バックオフ制御が用いられる。パケット送信を行う端末はパケット衝突を回避するために、バックオフ期間 T_{BO} を決める競合範囲 CW_i を制御する。再送ごとに2倍に増加した CW_i の範囲からバックオフカウンタを選択し直すことで、パケット再衝突の確率を低減させる。よって、 i 回目の再送時における競合範囲 CW_i は

$$CW_i = \min(2^i CW_{\min}, CW_{\max}) \quad (4.4)$$

と表せる。ここで、 CW_{\min} 、 CW_{\max} はそれぞれ CW の最小値、最大値とする。

チャネルアクセス競合時において、キャリアセンス可能な電力閾値は $P_{\text{sen}} [\text{dBm}]$ とする。また AP が受信したデータパケットを正常に復調するために必要な所要電力は $P_{\text{dem}} [\text{dBm}]$ であり、信号対干渉電力比 SIR 所要値は $\gamma_{\text{req}} [\text{dB}]$ 以上とする。よって、 $P_{\text{dem}} [\text{dBm}]$ 、 $\gamma_{\text{req}} [\text{dB}]$ 未満の受信データパケットは送信失敗となる。

4.4 トラヒックモデル

各端末では長さ L_{pkt} [bits] のデータパケットが、端末ごとに異なる平均生起率 λ_i [packets/s] のポアソン分布に従って生起する。生起したパケットの宛先は全て AP である。端末 x での平均生起率 λ_x は、以下の二つのトラヒックモデル 1, 及びトラヒックモデル 2 によって与えられる。

各端末は、生起したパケットを送信完了までの間一時的に保存するバッファを、長さ L_{BUF} [packets] だけ持つ。バッファ長に達した状態で生起したパケットは破棄されるものとする。

- トラヒックモデル 1

トラヒックモデル 1 では、端末 x での平均パケット生起率 λ_x [packets/s] を指数分布に従ってランダムに与える。また、指数分布の平均は λ^e [packets/s] とする。

- トラヒックモデル 2

トラヒックモデル 2 では、二種の正規分布を想定し、端末 x での平均パケット生起率 λ_x [packets/s] は二種のうちランダムに選択した一つの正規分布に従って与えるものとする。二種の正規分布の平均と標準偏差はそれぞれ、 $\lambda^{n1}, \lambda^{n2}$ [packets/s], σ^{n1}, σ^{n1} [packets/s] とする。

第5章

特性評価

この章では、IEEE 802.11ah RAW 方式向け端末グルーピングにおいて、本研究で提案する中心角制御型セクタ端末グルーピングの有効性を評価するために、計算機シミュレーションによる特性評価結果を示す。初めに、5.1 節に評価条件としてシミュレーション諸元を示し、5.2 節に性能評価のための評価指標を記述する。その後、既存の端末グルーピング方式と比較した提案方式の性能を示し、有効性を評価する。

性能評価では、5.3 節に端末配置と端末トラヒックにある程度の偏りがある環境下での性能評価を示し、5.4 節、5.5 節に両者の偏り具合それぞれ変化させた場合の性能評価を示す。

性能比較対象は2章に記した AID 端末グルーピング方式と領域等分割端末グルーピング方式とした。これらの従来方式ではサブスロットを使用したフレーム構造は採用されていないが、本研究では公平な比較のために、従来方式においてもサブスロット化されたフレーム構造を適用し、RAW スロット割当時の端末グループ化と同様の方法を用いて、端末をサブグループ化してサブスロットに割当ててみる。

5.1 シミュレーション諸元

RAW 方式向け端末グルーピング方式の特性評価において使用したシミュレーション諸元であるネットワーク構成、および通信、トラヒックに関する主要パラメータを表 5.1–表 5.3 に示す。

表 5.1: ネットワーク構成パラメータ

カバレッジ半径	R	800 [m]
端末台数	N_{STA}	100-2200 [台]
端末配置: ホットスポット数	N_{HS}	2, 3, 5, 10 [個]
端末配置: 端末座標の標準偏差	σ_{xy}	200, 300, 500, 800 [m]

表 5.2: 通信関連パラメータ

ビーコン間隔	L_{BI}	1 [s]
RAW 期間長	L_{RAW}	1 [s]
RAW スロット数	N_{RAW}	6
サブスロット数	N_{sub}	4
RAW スロット長	L_{raw}	L_{RAW}/N_{RAW} [s]
サブスロット長	L_{sub}	L_{raw}/N_{sub} [s]
トラヒックカテゴリ数	N_{cate}	2
伝送速度	r_{data}	0.6 [Mbps]
スロットタイム	t_{slot}	52 [μ s]
CW 最小値	CW_{min}	7
CW 最大値	CW_{max}	1023
最大再送回数	N_{reTX}	7
送信電力	P_{tex}	1 [dBm]
キャリアセンス可能電力閾値	P_{sen}	-126 [dBm]
復調可能電力閾値	P_{dem}	-123 [dBm]
所要 SIR 値	γ_{req}	10 [dBm]

表 5.3: トラヒック関連パラメータ

データパケット長	L_{pkt}	800	[bits]
バッファサイズ	L_{BUF}	100	[packets]
平均生起率 (トラヒックモデル1)	λ^e	0.2, 1.0	[packets/s]
平均生起率 (トラヒックモデル2)	$\lambda^{n1}, \lambda^{n2}$	0.2, 1.0	[packets/s]
端末トラヒック標準偏差 (トラヒックモデル2)	σ^{n1}, σ^{n2}	0.0, 0.0 / 0.1, 0.25	[packets/s]

5.2 評価指標

評価指標はネットワークスループット S_N [Mbps] と端末レート満足率 R_s [%], 遅延 D [s] とし, 以下のように定義する.

- ネットワークスループット S_N

ネットワークスループットは AP で受信に成功した単位時間あたりの通信完了情報量 [bps] を示し, 以下の式で算出する.

$$S_N = \frac{N_{\text{suc}} \times L_D}{t_{\text{SIM}}} \quad (5.1)$$

ここで, N_{suc} は受信成功パケット数, L_D [bits] はパケットの長さ, t_{SIM} [s] は観測時間を表す.

- 端末レート満足率 R_s

端末レート満足率は端末におけるデータパケットの生起レート r_{gene} [packets/s] と送信成功レート r_{suc} [packets/s] の比で定義され, 端末毎に算出する.

$$R_s = \frac{r_{\text{suc}}}{r_{\text{gene}}} \times 100[\%] \quad (5.2)$$

端末間の通信性能公平性評価では, 端末レート満足率 R_s の累積確率分布とその下位 10% の端末が示す端末レート満足率 R_s の値として端末レート満足率下位 10% 値 [%] を評価指標とする. この下位 10% 値が大きい場合, レート満足率 R_s の低い端末が減少し, 性能差が縮小されると定量的に言える.

- 伝送遅延 D

パケットが端末で生起してから, AP で正常に受信されるまでの時間として伝送遅延評価を行う. 前項と同様に端末間の通信性能の公平性評価のため, 端末伝送遅延 D [s] の累積確率分布を評価指標とする. また, 伝送遅延 D [s] が長くなる上位 10% の端末が示す値を伝送遅延上位 10% 値 [s] として評価する.

5.3 不均一環境下での性能評価

本節では，不均一環境の一例として，端末配置及び端末トラヒック分布にある程度の偏りがある環境下での性能評価を行う．端末配置については，端末の集中するホットスポット数 $N_{\text{HS}} = 3$ ，ホットスポット周りの端末分布の標準偏差 $\sigma_{xy} = 300[\text{m}]$ で端末を配置した．端末 400[台] とした場合の端末配置例を図 5.1 に示す．端末トラヒックについてはトラヒックモデル 1 を用いるものとし，端末ごとのパケット生起率 $\lambda_x[\text{packets/s}]$ を与える指数分布の平均は $\lambda^e = 1.0[\text{packets/s}]$ とする．この場合の端末トラヒック分布の様子を図 5.18 に示す．

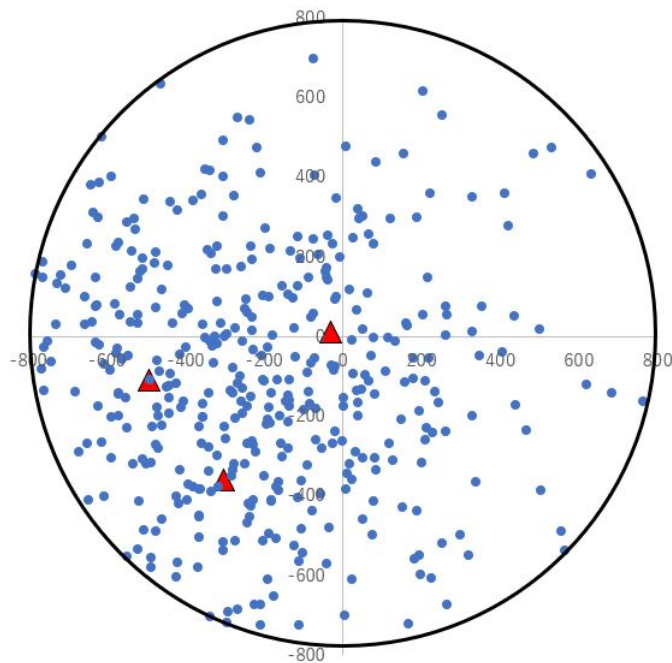


図 5.1: 端末台数 400[台] の端末配置例 ($N_{\text{HS}} = 3, \sigma_{xy} = 300[\text{m}], R = 800[\text{m}]$)

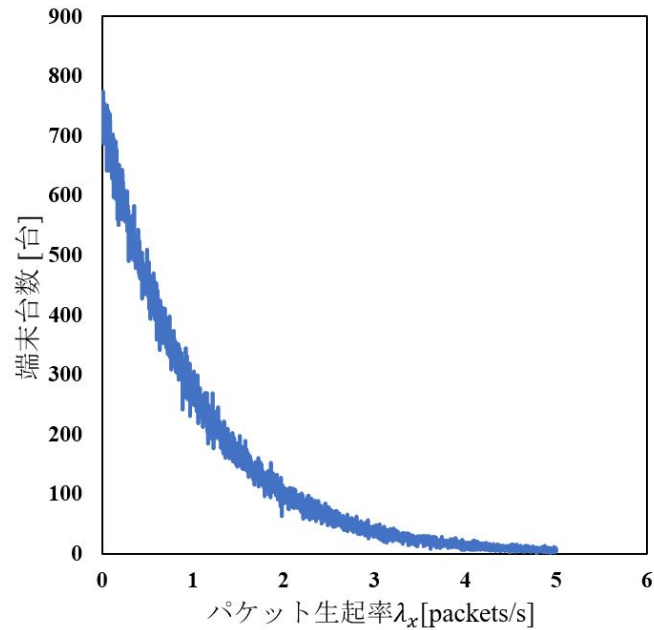


図 5.2: 端末トラヒック分布例 (トラヒックモデル 1 : $\lambda^e = 1.0[\text{packets/s}]$)

図 5.3 に端末台数 N_{STA} を 100-600[台] で変化させた場合のネットワークスループット S_N 特性を示す。図 5.3 より、提案した中心角制御型セクタ端末グルーピング方式の各手法（図中ではそれぞれ，“端末台数基準”，“トラヒック基準”，“トラヒックカテゴリ化”）は，従来方式である AID 端末グルーピング方式（同 “AID 方式”），領域等分割グルーピング方式（同 “領域等分割方式”）と比較すると大幅なネットワークスループットの改善が見られる。これは，提案方式では端末グルーピングへの二つの要求事項を同時に満足することができるためである。

中心角を制御したセクタ領域分割により近隣端末同士をグループ化している提案方式では，図 5.4 に示すように全送信回数中の隠れ端末によるパケット衝突の割合が，AID 端末グルーピング方式に対して大幅に低減していることが分かる。これにより，一つ目の要求事項である隠れ端末問題抑制を達成していると言える。領域等分割端末グルーピング方式でも同様に隠れ端末によるパケット衝突の割合は低減しているが，グループ内端末台数や生起トラヒック量に，グループ間で大きな偏りが

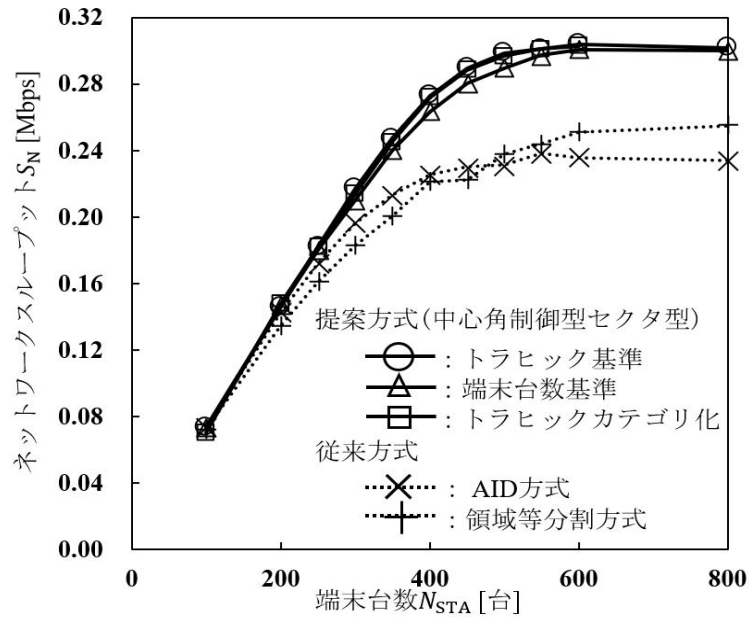


図 5.3: 不均一環境下でのネットワークスループット特性

あるため、提案方式との性能差が生じている。図 5.5, 図 5.6 に示すサブグループ内端末台数, および生起トラヒック量の標準偏差を示している。これらの図から提案方式ではいずれの端末台数においても両者の標準偏差が小さくなっており, サブグループ間で両者の差が小さい均質なグループを構成できていることが分かる。

提案三手法間の比較では, 端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピング方式のネットワークスループット S_N が他の二手法に対してわずかに劣化している。このことから, 端末グループを構成する際はサブグループ内の端末台数の偏りよりも, 生起トラヒック量の偏りを改善する方が, 高い性能を提供できることが分かる。また, トラヒック基準とトラヒックカテゴリ化の二手法では, ほぼ同等の通信性能を示している。図 5.5, 図 5.6 より, サブグループ内の端末台数とトラヒック量の両者の標準偏差において, それぞれ約 1[台], 800[bps] 程度の差が認められるもの, その差は非常に小さいためネットワークスループットにほとんど影響しない。

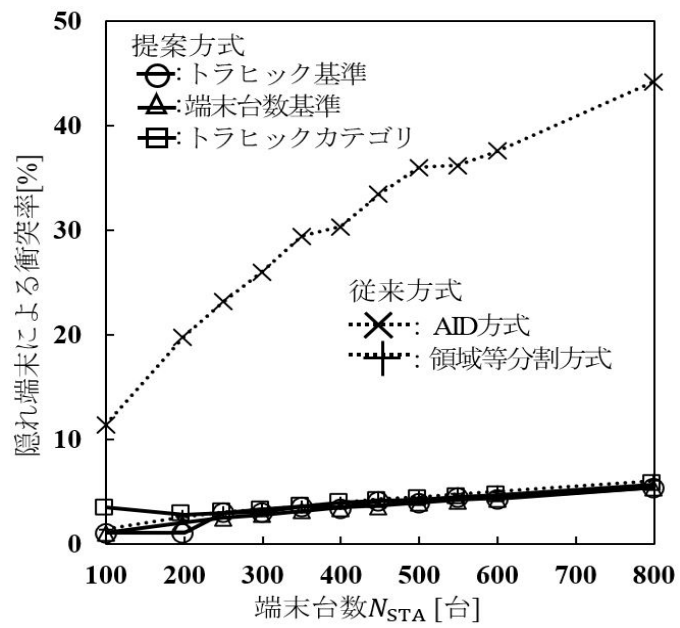


図 5.4: 隠れ端末によるパケット衝突率

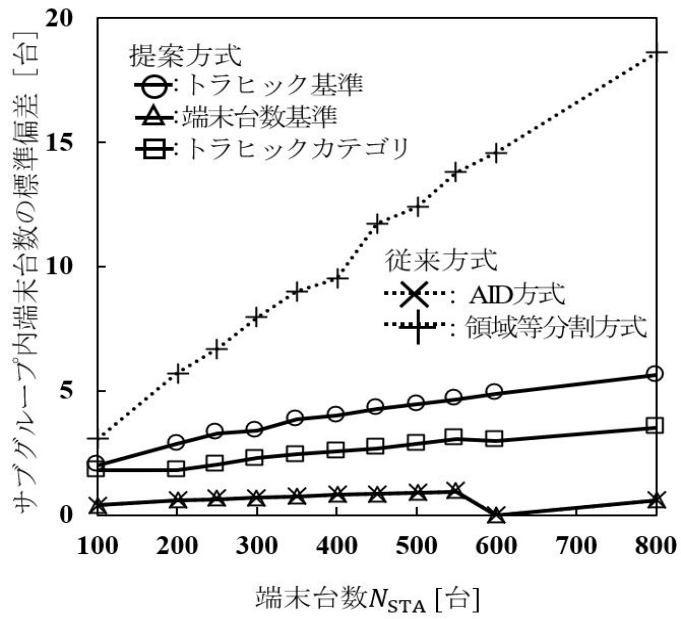


図 5.5: 不均一環境下でのサブグループ内端末台数標準偏差

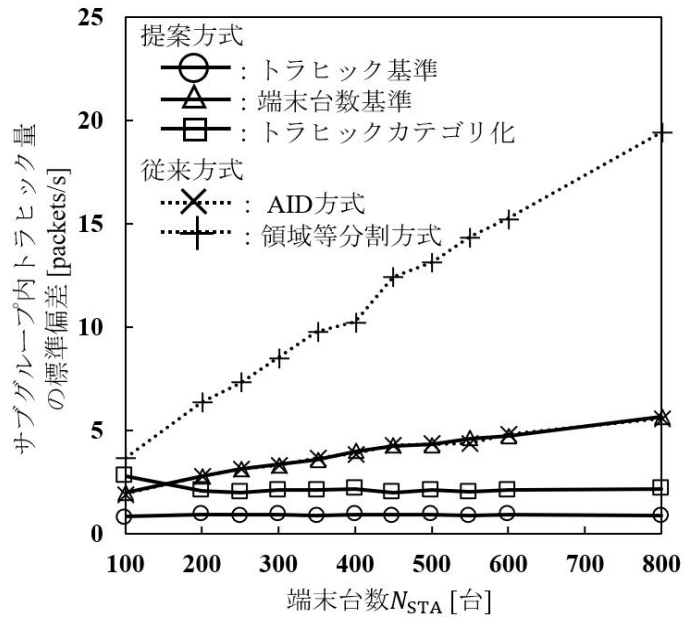


図 5.6: 不均一環境下でのサブグループ内トラヒック量の標準偏差

図 5.7 では端末間通信性能の公平性を評価するため、ネットワークスループット S_N がほぼ最大となる端末台数 $N_{STA} = 500$ [台] における端末レート満足率 R_s の累積確率分布を示す。図 5.7 から、従来方式の累積確率が緩やかに増加しているのに対し、提案方式では 80–100[%] にかけて端末が集中していることが分かる。よって、端末レート満足率 R_s のばらつきが改善し、端末間のレート満足率の公平性が向上していることが確認できる。これは提案方式が端末配置や端末トラフィック環境に依らずにグループ内端末台数または生起トラフィック量を均等化し、チャンネルアクセス機会の公平性が向上したことによるものである。

図 5.8 に端末台数に対する端末レート満足率下位 10% 値を示す。端末台数の増加に伴い端末レート満足率 10% 値は劣化していく傾向にあるが、提案方式はいずれの端末台数においても従来方式よりも高い性能を示していることが確認できる。よって、提案方式では低満足率を示す端末を減少できており、より高い性能領域にてレート満足率の公平性を維持することが可能である。

提案三手法間の比較では、 $N_{STA} = 500$ [台] における端末レート満足率 R_s は同等の性能を示している。しかし、端末レート満足率下位 10% 値の評価においては、最大スループット到達前の $N_{STA} = 300, 400$ [台] においてトラフィック量基準がわずかに高い性能を示している。

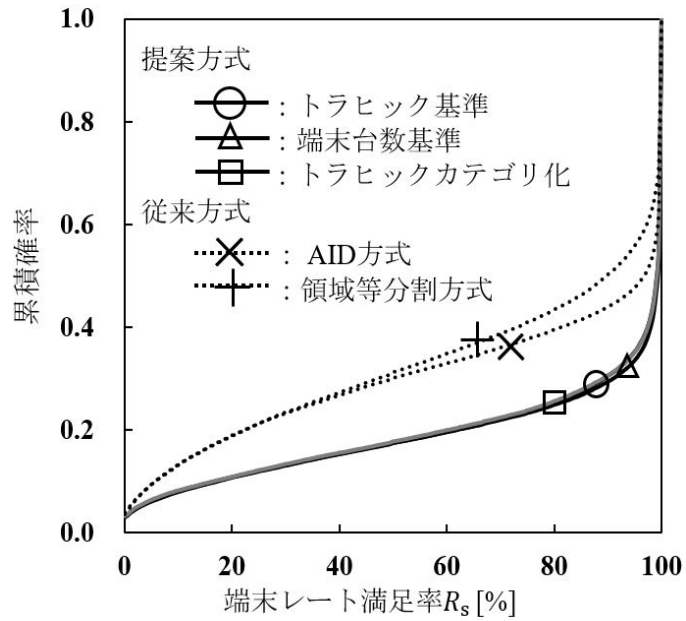


図 5.7: 端末台数 500[台] での端末レート満足率の累積確率分布

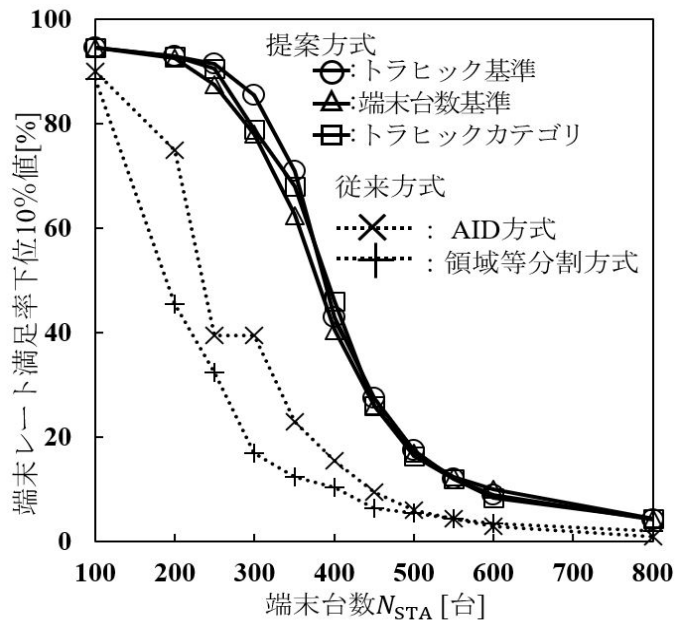


図 5.8: 不均一環境下での端末台数に対する端末レート満足率下位 10% 値

最後に、図 5.9 に端末台数 $N_{\text{STA}} = 500$ [台] における各端末における伝送遅延 D 特性の累積確率分布を示す。図 5.9 から、提案方式では従来方式の累積確率が緩やかに上昇しているのに対し、約 5[s] 以下の領域に集中しており、端末間での遅延性能のばらつきが改善していることが分かる。

図 5.10 には端末台数に対する伝送遅延上位 10% 値 [s] を示す。端末レート満足率 10% 値の評価と同様に、端末台数の増加に伴い、10% 値は劣化していくが、提案方式は従来方式に対して優位な性能を示している。よって、提案方式はより低伝送遅延の領域において、端末間の伝送遅延 D 性能における公平性を維持できることが分かる。また、提案三手法間の比較に関しては、伝送遅延 D の累積確率分布および伝送遅延上位 10% 値 [s] の両者において大きな性能差は見られない。

以上より、提案した中心角制御型セクタ端末グルーピングは、不均一環境下においてネットワークスループット S_N を向上し、端末レート満足率 R_s と伝送遅延 D の観点から端末通信性能の公平性を向上することが確認できる。

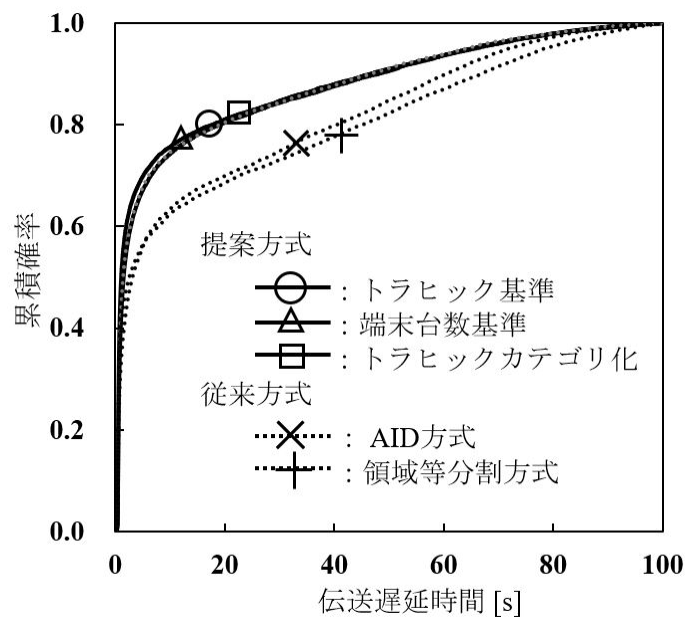


図 5.9: 端末台数 500 台での伝送遅延の累積確率分布

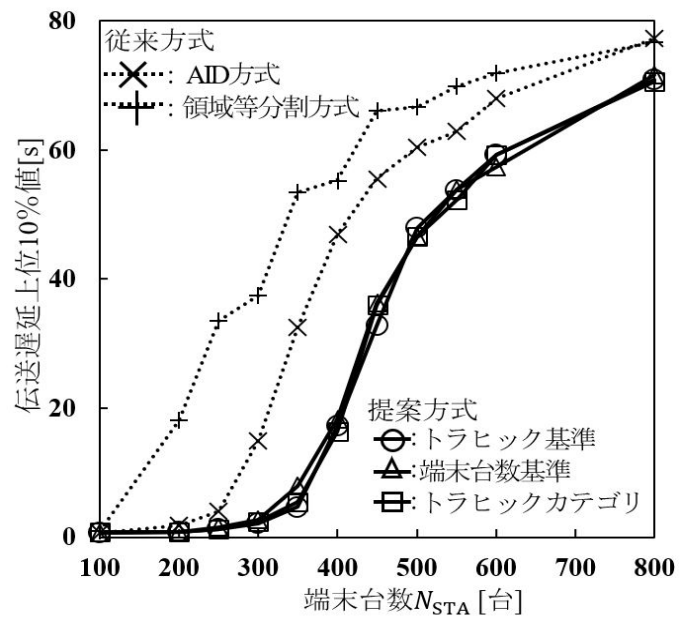


図 5.10: 不均一環境下での端末台数に対する伝送遅延上位 10 % 値

5.4 端末配置不均一度合い変化時の性能評価

本節では、提案方式である中心角制御型セクタ端末グルーピング方式がいかなる端末配置状況においても有効であることを示すため、端末配置の不均一度合いを変化させた場合の性能について評価を実施する。多様な端末配置に対する評価として、端末が集中するホットスポットの配置数 N_{HS} 、ホットスポットを中心とした端末分布の標準偏差 σ_{xy} [m] のそれぞれ変化させた場合の性能について記述する。ホットスポット数 N_{HS} 、標準偏差 σ_{xy} [m] が増加すると端末配置の地理的な偏りは軽減される。

一例として、図 5.11 にホットスポット数 $N_{HS} = 2, 10$ と標準偏差 $\sigma_{xy} = 200, 800$ [m] における 400 台での端末配置例を示す。これらの図から、(b) $N_{HS} = 3$ [個]、 $\sigma_{xy} = 800$ [m] や (d) $N_{HS} = 10$ [個]、 $\sigma_{xy} = 300$ [m] では端末配置は均一配置に近いことが分かる。本節の評価では、端末トラヒックはトラヒックモデル 1 を用い、指数分布のは 5.3 節と同様に $\lambda^e = 0.2$ [packets/s] とする。

図 5.12, 図 5.13 には、ホットスポット数 $N_{HS} = 2, 10$ での端末台数変化時のネットワークスループット特性を示す。ホットスポット周りの端末配置の標準偏差は $\sigma_{xy} = 300$ [m] とした。両グラフにおいて提案方式は従来方式と比較して性能が向上していることが確認できる。従来方式の AID 端末グルーピング方式と領域等分割端末グルーピング方式では端末配置の不均一度合いの変化に起因した性能差が見られるが、提案方式では端末配置状況に依らず同等の性能を示していることが分かる。

提案三手法間の比較では、いずれの手法も端末配置状況の影響を受けにくいことから、5.3 節の評価時と同様の関係性を示しており、端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピング方式のネットワークスループット S_N が他の二手法に対してわずかに劣化している。また、トラヒック量基準とトラヒックカテゴリ化は同等の性能を示す。

図 5.14 には、ホットスポット数 $N_{HS} = 2-10$ で変化させた場合の端末台数 $N_{STA} = 100-600$ [台] での最大ネットワークスループットを示す。端末配置状況に応じた端末グルーピングを行っている提案方式ではホットスポット数に依らず一定の高い性能を提供することができ、提案三手法は同等の最大スループットを示している。

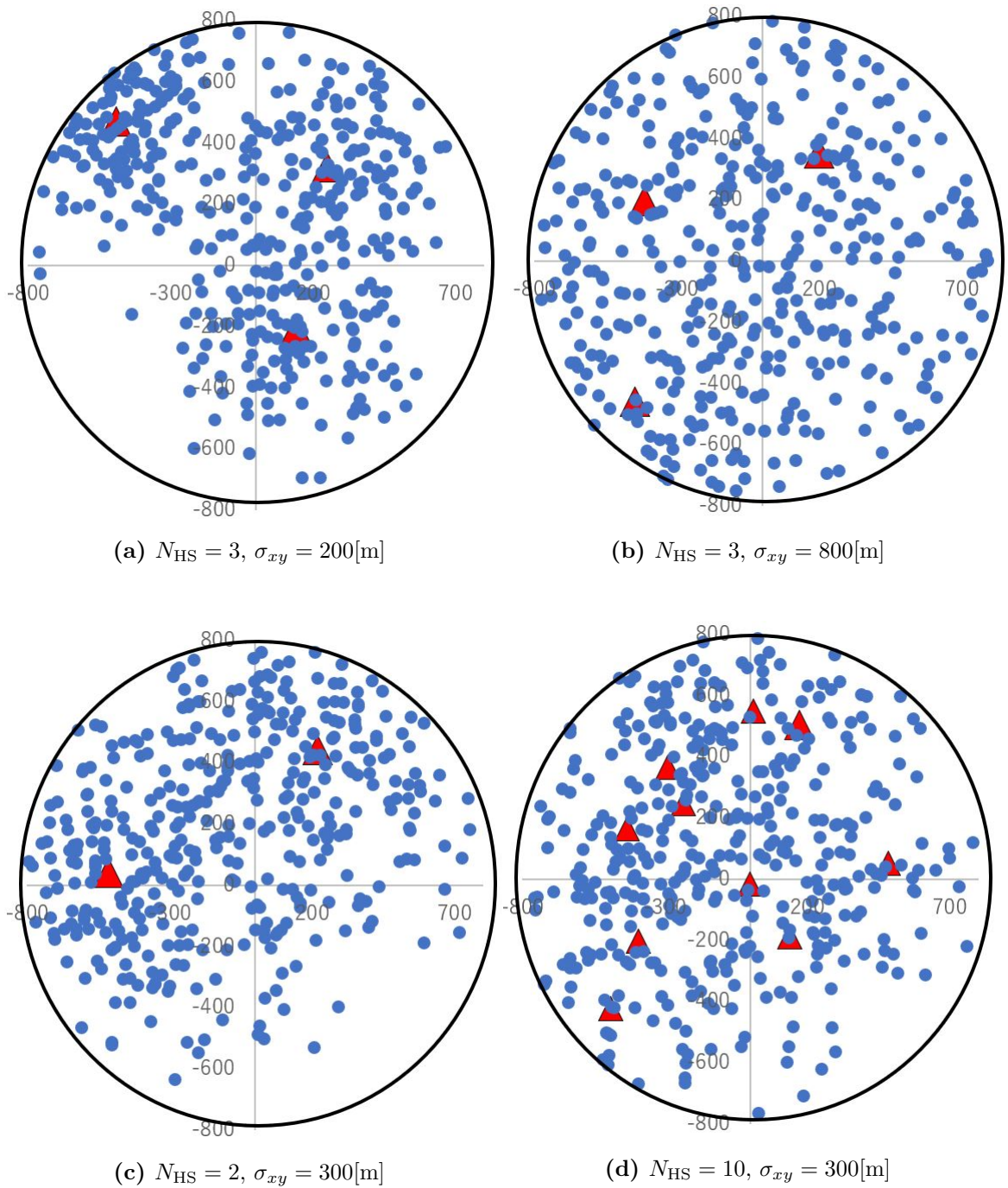


図 5.11: 端末 400[台]での端末配置例

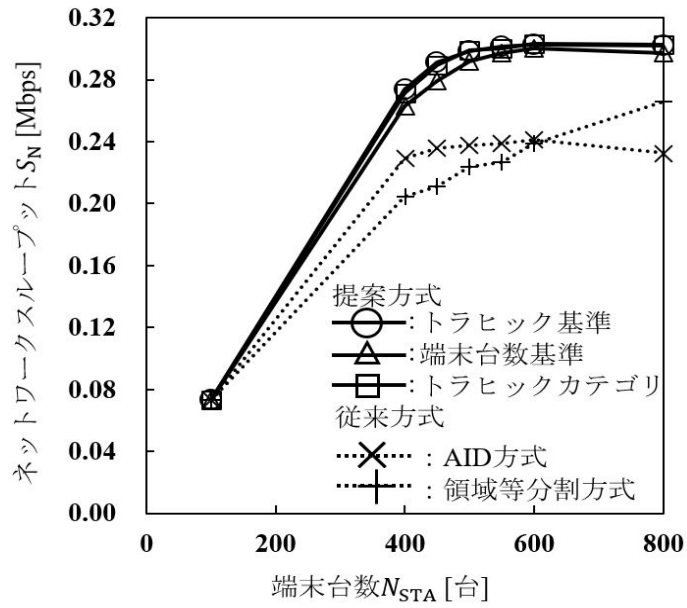


図 5.12: ホットスポット数変化時のスループット性能 ($N_{HS} = 2$)

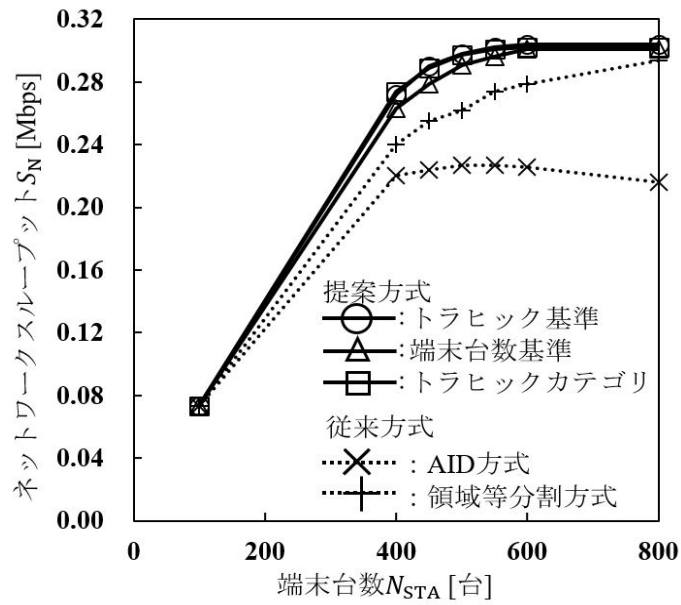


図 5.13: ホットスポット数変化時のスループット性能 ($N_{HS} = 10$)

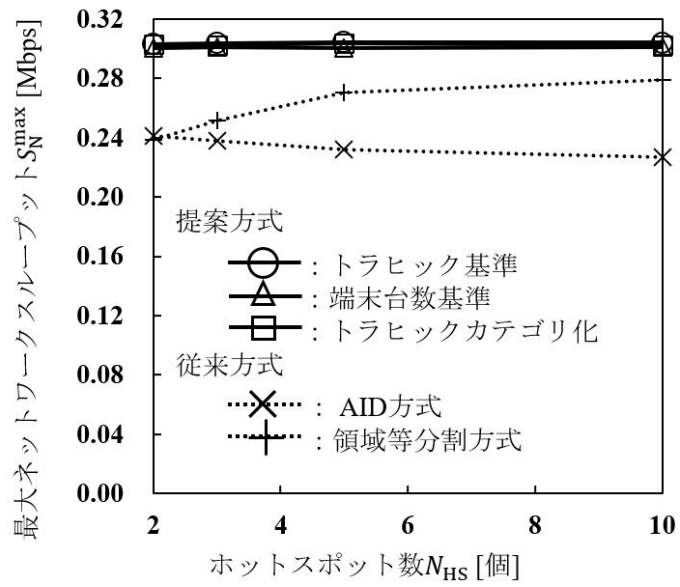


図 5.14: ホットスポット数 N_{HS} に対するスループット性能

次に、図 5.15, 図 5.16 には、端末分布の標準偏差が $\sigma_{xy} = 200, 800[\text{m}]$ での端末数変化時のネットワークスループット特性を示す。ホットスポット数は $N_{\text{HS}} = 3$ とした。提案方式は、不均一度合いが小さい配置 ($\sigma = 800[\text{m}]$)、不均一度合いが大きい配置 ($\sigma_{xy} = 200[\text{m}]$) どちらの端末配置においても従来方式に対し優位な性能を示している。

提案三手法間の比較では、端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピング方式のネットワークスループット S_N が他の二手法に対してわずかに劣化している。また、トラヒック量基準とトラヒックカテゴリ化は同等の性能を示す。

図 5.17 には標準偏差を $\sigma_{xy} = 200 - 800[\text{m}]$ で変化させた場合の、 $N_{\text{STA}} = 100 - 600[\text{台}]$ で端末台数変化時の最大ネットワークスループットを示す。前述した図 5.14 のホットスポット数の変化に対する最大ネットワークスループット性能評価と同様に提案方式では端末分布の標準偏差に依らず一定の高い性能を提供することができ、提案三手法は同等の最大スループットを示している。

以上から、提案方式である中心角制御型セクタ端末グルーピング方式は、不均一端末配置に対応可能であり、多様な端末配置環境において常に高い性能を提供できると言える。提案三手法間の比較においては、最大ネットワークスループット特性ではほぼ同等の性能を示している。しかし、端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピング方式の最大点前のスループット性能は残りの二者と比較してわずかに劣化する。これは端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピング方式が端末トラヒックを考慮していないため、グループ間でチャネルアクセス機会に差が生じ、チャネル資源を十分に使いきれないことが原因と考えられる。

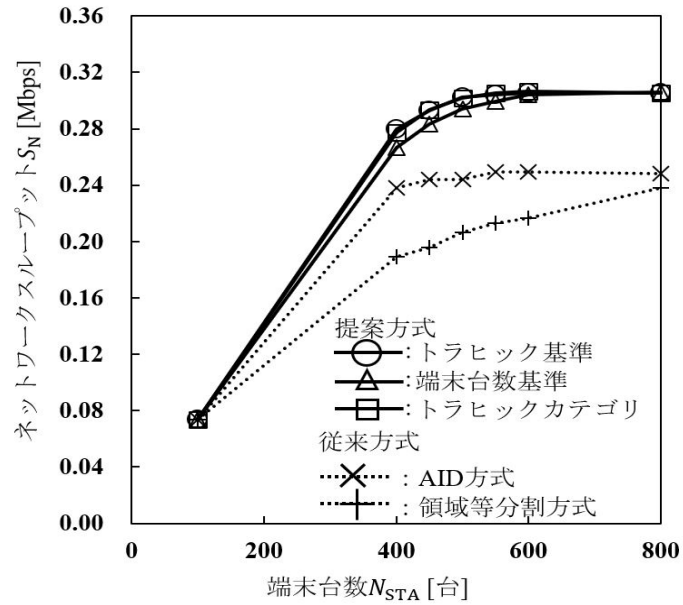


図 5.15: 端末分布の標準偏差 σ_{xy} 変化時のスループット性能 ($\sigma_{xy} = 200\text{[m]}$)

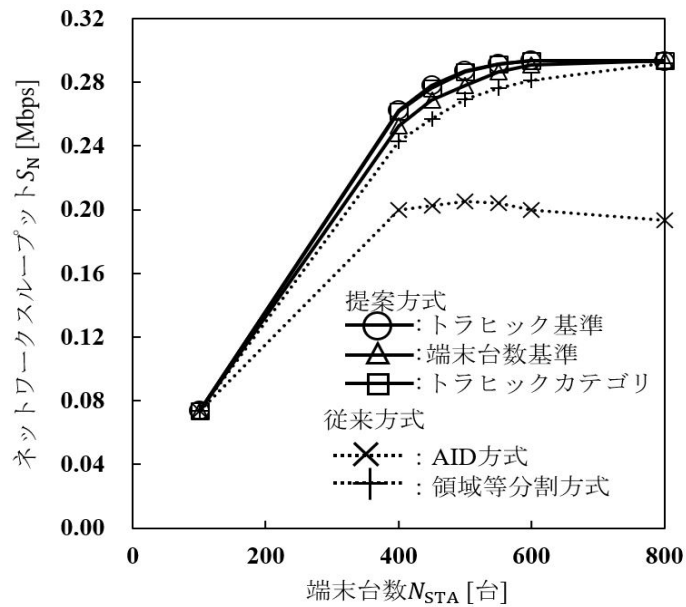


図 5.16: 端末分布の標準偏差 σ_{xy} 変化時のスループット性能 ($\sigma_{xy} = 800\text{[m]}$)

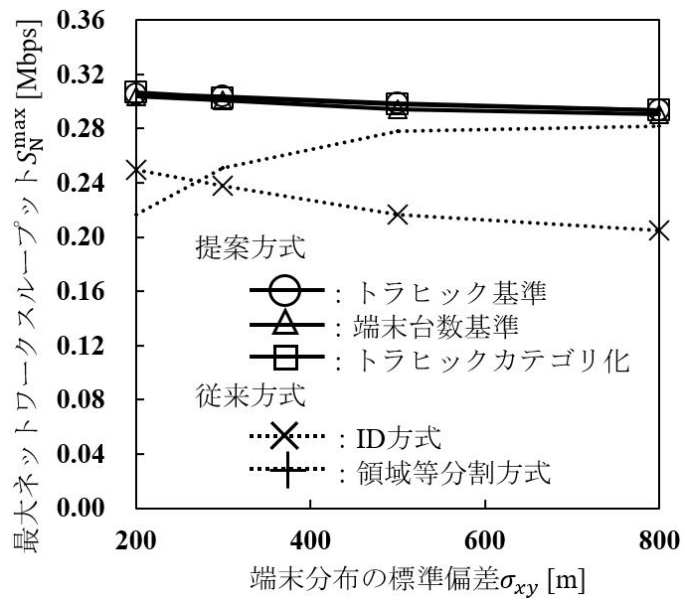


図 5.17: 端末分布の標準偏差 σ_{xy} の変化に対するスループット性能

5.5 端末トラヒック不均一度合い変化時の性能評価

本節では多様な端末トラヒック環境においても提案方式が有効であることを示すため、端末トラヒックの端末間での不均一度合いを変化させた場合の性能評価を行う。具体的には、端末ごとの平均パケット生起率 λ_x を二つのトラヒックモデル（トラヒックモデル1, 2）によって与えた場合のネットワークスループット S_N 特性、レート満足率 R_s [%]特性を評価する。本節での端末配置については5.3節と同様とする。

まず、トラヒックモデル1を用いた場合の評価を行う。端末ごとの平均パケット生起率 λ_x を与える指数分布の平均を $\lambda^e = 0.2$ [packets/s]とする。この場合の端末トラヒックの分布の様子を図5.18に示す。5.3節の端末トラヒック分布と比較すると分布幅が縮小し、低トラヒックの端末が増加した不均一度合いの小さい環境での評価である。

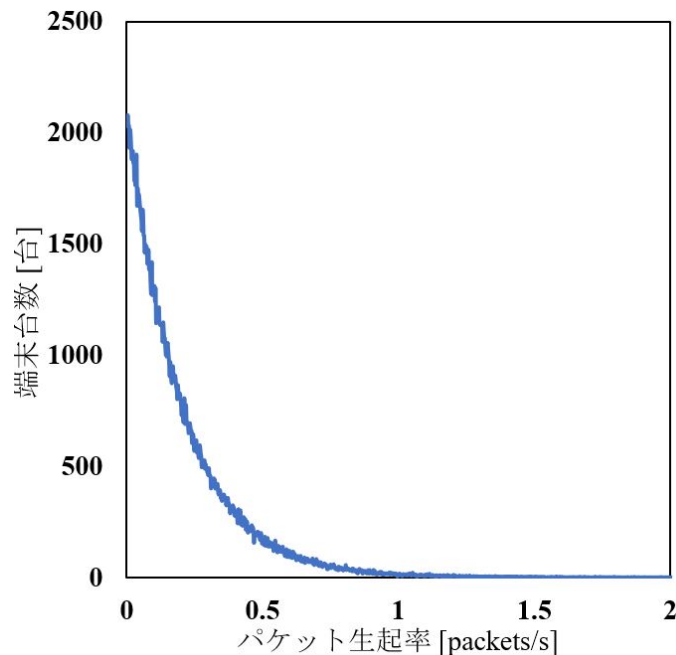


図 5.18: 端末トラヒック分布例（トラヒックモデル1： $\lambda^e = 0.2$ [packets/s]）

図 5.3 には、端末台数 $N_{STA} = 100 - 2200$ [台] で変化させた場合のネットワークスループット特性を示す。5.3 節での評価と比較して多数端末での評価であるため、全ての端末グルーピング方式について、パケット衝突率が上昇しネットワークスループットの最大値が減少する傾向にある。しかし、提案方式は依然として従来方式に対し優位な性能を示している。

提案三手法間の比較においては、5.3 節で示した端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピングの他 2 手法に対する性能劣化は見られず、ほぼ同等の性能を示している。これは、端末トラヒックの分布幅が縮小したことにより、グループ内トラヒック量のグループ間差が減少したことに起因すると考えられる。図 5.20, 図 5.21 にサブグループ内端末台数とトラヒック量の標準偏差を示すが、図 5.21 では 5.3 節の図 5.6 と比較してグループ内トラヒック量の標準偏差が縮小していることが分かる。

図 5.7 には、ネットワークスループット S_N がほぼ最大となる端末台数 $N_{STA} = 2000$ [台] における端末レート満足率 R_s の累積確率分布を示す。提案方式では、従来方式と比較して端末レート満足率の端末間のばらつきが改善され、公平性が向上したことが確認できる。また、提案三手法間の比較では三手法で同等の性能が示されている。

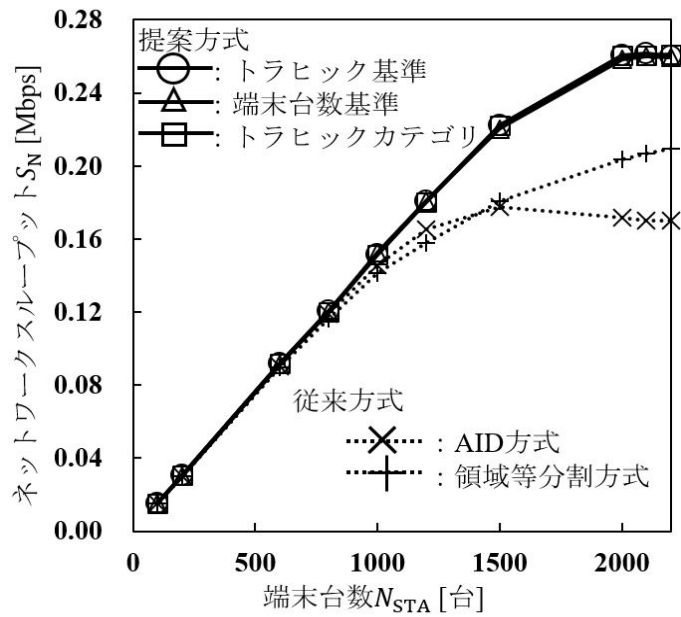


図 5.19: ネットワークスループット特性 ($\lambda^e = 0.2$ [packets/s])

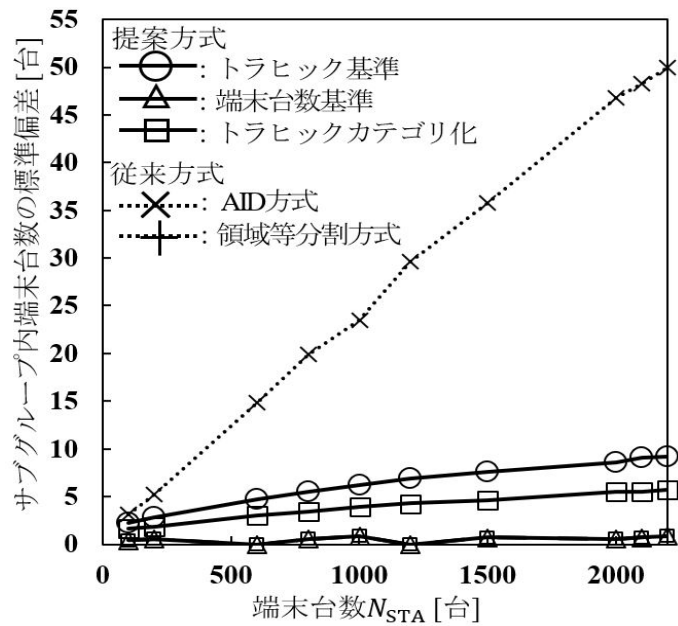


図 5.20: サブグループ内端末台数標準偏差 ($\lambda^e = 0.2$ [packets/s])

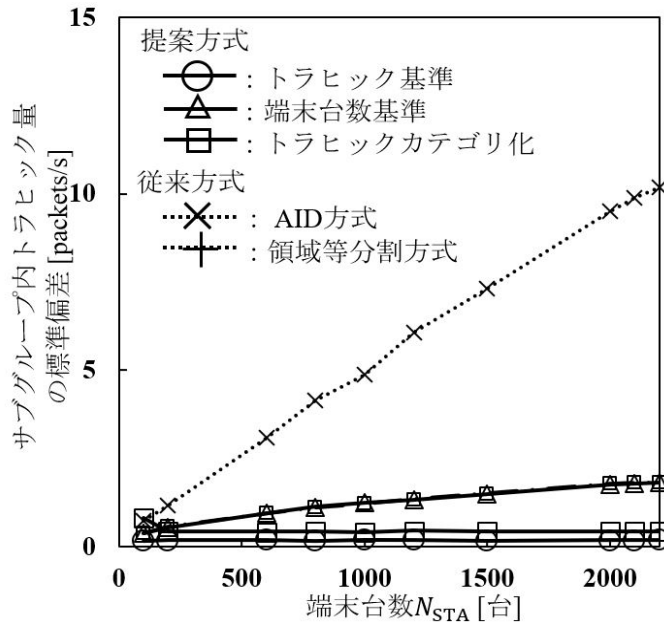


図 5.21: サブグループ内生起トラフィック量標準偏差 ($\lambda^e = 0.2[\text{packets/s}]$)

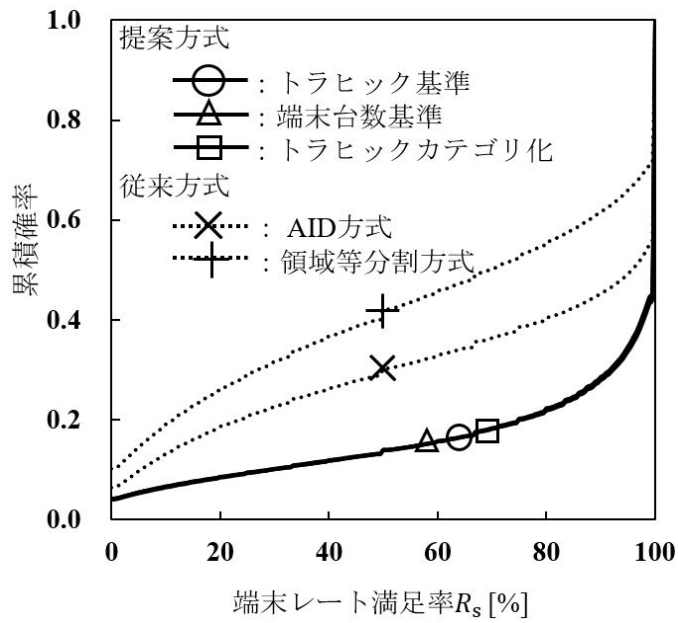


図 5.22: 端末台数 2000 台での端末レート満足率の累積確率分布

次にトラヒックモデル2を用いて端末ごとの平均パケット生起率 λ_x を与えた場合の性能を評価する。二種の正規分布の平均値はそれぞれ $\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], 標準偏差はそれぞれ $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ [packets/s]とした際の性能評価を行う。この場合の端末トラヒック分布の様子を図5.23に示す。図5.23から、各端末の平均パケット生起率が二点のみに集中した不均一度合いが大きい端末トラヒック環境であることが分かる。

図5.24は、端末台数に対するネットワークスループット S_N 特性を示す。この図から、パケット生起率が二点に集中するような端末トラヒック環境下においても提案方式は、従来方式と比較して優位な性能を示すことが確認される。また、図5.25は、 $N_{STA} = 1000$ [台]での端末レート満足率 R_s の累積確率分布を示しており、端末レート満足率 R_s における通信性能の公平性向上も同様に確認できる。

提案三手法間の比較においては、5.3節で示した端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピングの他2手法に対する性能劣化度合いが縮小し、トラヒック基準とトラヒックカテゴリ化はほぼ同等の性能を示している。これは、前述したトラヒックモデル1での評価と同様に、端末トラヒックの分布幅が縮小したことにより、グループ内トラヒック量のグループ間差が減少したことに起因すると考えられる。図5.26と図5.27はサブグループ内の端末台数とトラヒック量の標準偏差を示すが、5.3節の図5.6と比較してグループ内端末数の標準偏差には差がないが、トラヒック量の標準偏差が縮小していることが分かる。

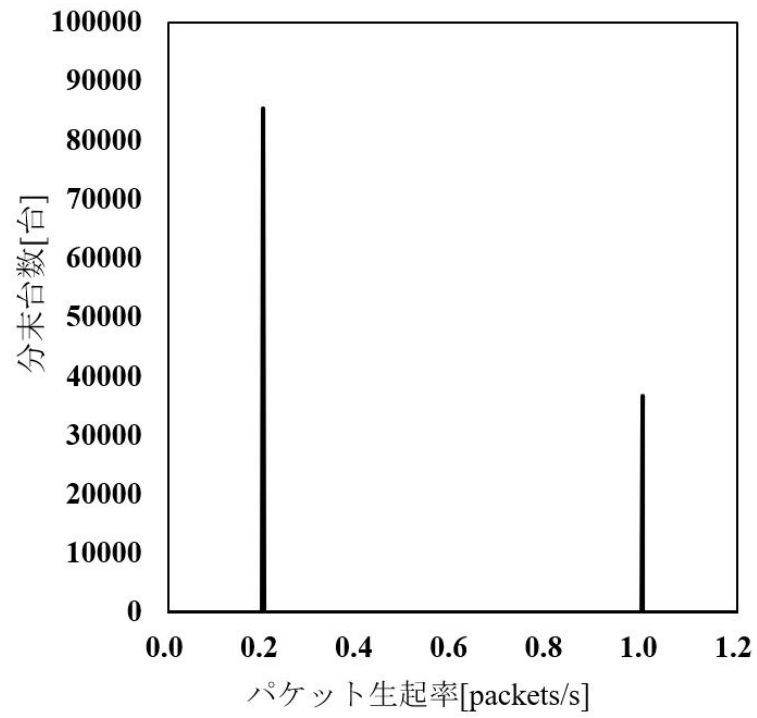


図 5.23: 端末トラヒック分布 (トラヒックモデル 2 : $\sigma^{n1} = 0, \sigma^{n1} = 0$ [packets/s])

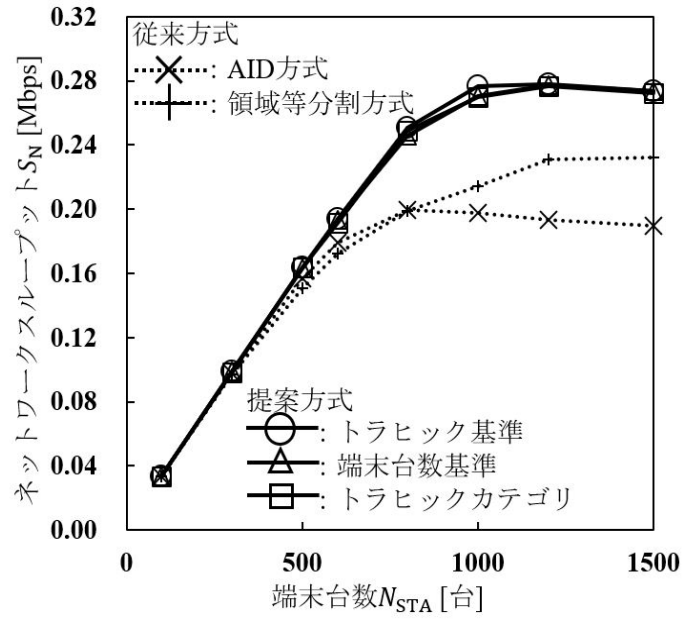


図 5.24: ネットワークスループット特性 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ [packets/s])

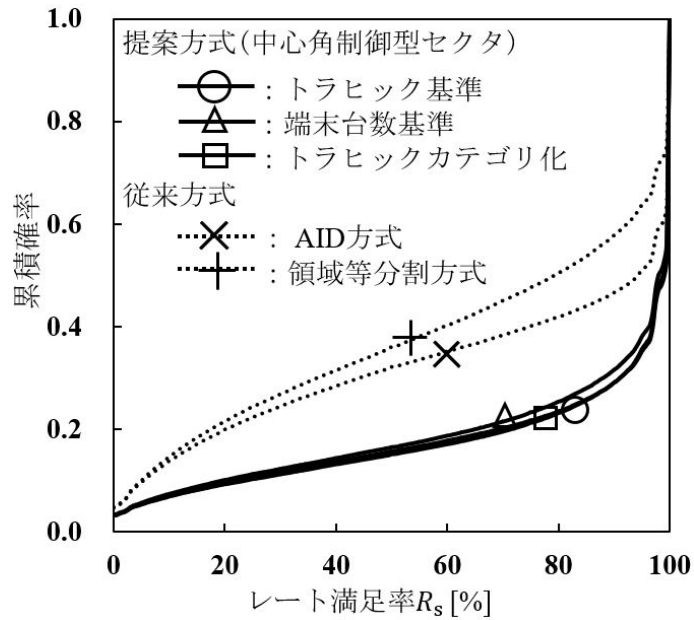


図 5.25: 1000[台]でのレート満足率の累積確率分布 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ [packets/s])

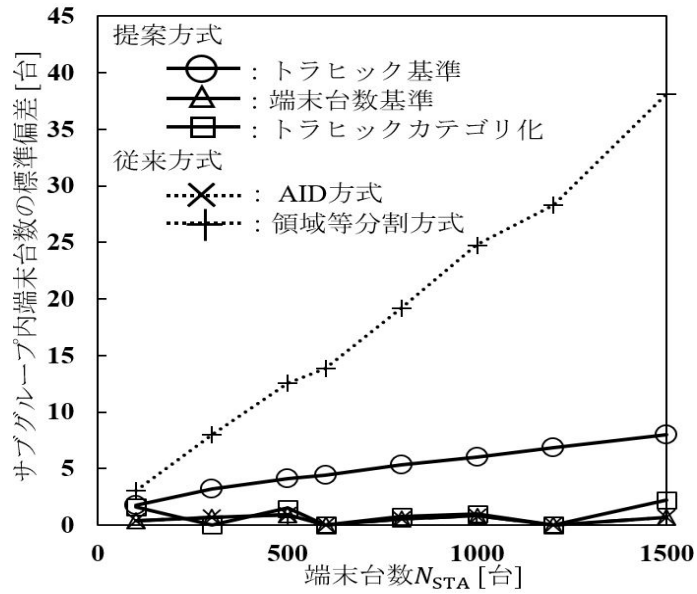


図 5.26: サブグループ内端末台数標準偏差 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ [packets/s])

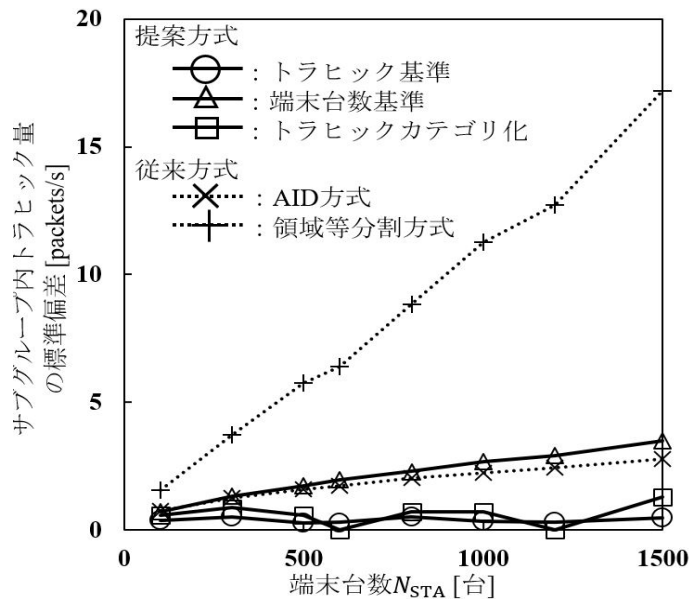


図 5.27: サブグループ内生起トラヒック量標準偏差 ($\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ [packets/s])

最後にトラヒックモデル2において、二種の正規分布の平均値をそれぞれ $\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], 標準偏差をそれぞれ $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s]とし、分布の裾野が重なる程度まで標準偏差を増加させた際の性能評価を行う。この時の実際の端末トラヒックの分布例は図5.28に示す。

図5.29, 図5.30ではネットワークスループットと $N_{STA} = 1000$ [台]での端末レート満足率 R_s を示す。提案手法は両性能において、前述した標準偏差を $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0$ での評価と同様に従来方式と比較して優位な性能を示すことが確認される。

提案三手法間の比較では、端末トラヒックの不均一度合いが軽減したことから、端末台数基準の中心角制御型セクタ端末グルーピングの他2手法に対する性能劣化は見られず、ほぼ同等の性能を示している。

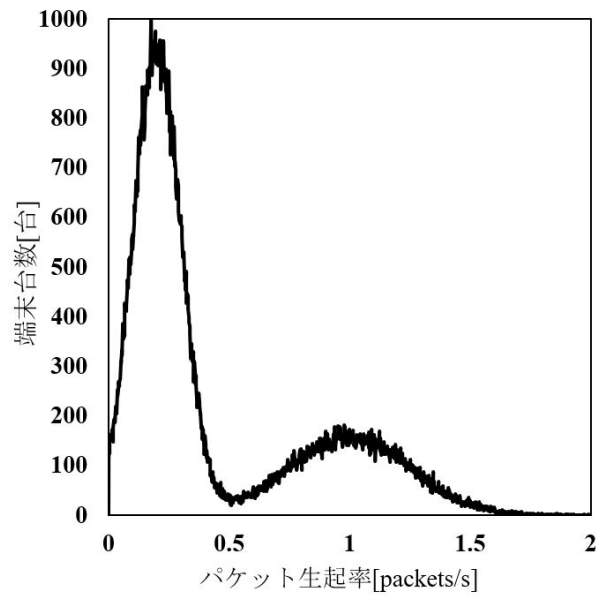


図 5.28: 端末トラヒック分布 (トラヒックモデル2: $\lambda^{n1}, \lambda^{n2} = 0.2, 1.0$ [packets/s], $\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s])

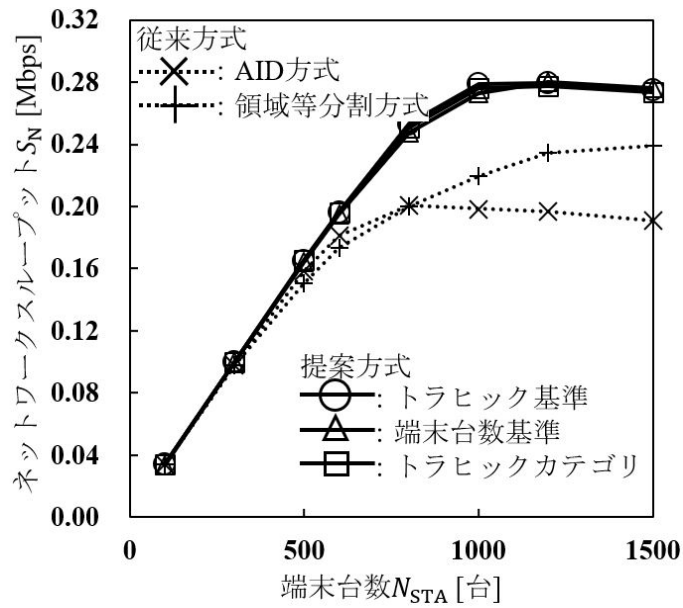


図 5.29: ネットワークスループット特性 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s])

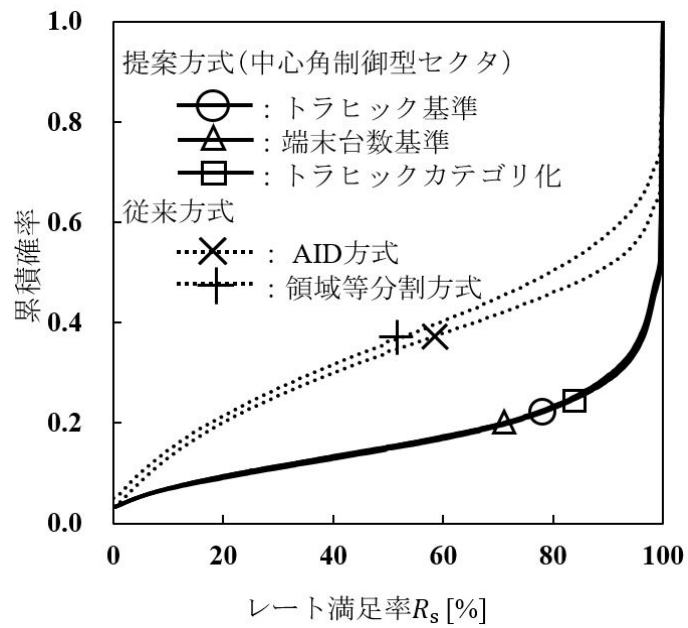


図 5.30: 1000[台]でのレート満足率の累積確率分布 ($\sigma^{n1}, \sigma^{n2} = 0.1, 0.25$ [packets/s])

以上より，提案方式である中心角制御型セクタ端末グルーピング方式は，端末トラヒックの分布状況に依らず従来方式に対し高い性能を提供し，IoT ネットワークで想定される多様な端末トラヒック環境に対応可能であることが確認された。

第6章

まとめ

本論文では、屋外センサネットワークを含むIoTネットワーク向けの通信規格IEEE 802.11ahのRAW方式による端末グループ化チャンネルアクセスに着眼し、当該アクセス方式で必須となる端末グルーピングを研究対象として、端末配置や端末トラヒック等が不均一なネットワーク環境下においても、良好なシステム性能を提供すべく中心角制御型セクタ型端末グルーピング方式を提案し、その性能について調査した。RAW方式では超多数端末環境下でのチャンネルアクセス衝突抑制のため、グループ単位でのアクセス競合を行うが、その場合にどのように端末をグループ化するか（端末グルーピング）がネットワーク性能に大きな影響を及ぼす。端末をグループ化するには、パケット衝突の支配的要因となる隠れ端末問題抑制によりネットワークスループットを向上させること、グループ内端末台数・トラヒック量のグループ間における均等化により端末間の通信性能における公平性を確保することが要求され、本研究ではこれらを端末グルーピングへの要求事項とした。

既存の端末グルーピング方式では、端末配置分布が地理的に均一であることや端末トラヒックが単一であることを前提としているため、IoTネットワークで想定される不均一なネットワーク環境下において両要求事項を同時に満足することは困難である。

そこで本研究では、多様なネットワーク環境において端末グルーピングの二つの要求事項を同時に満足可能な端末グルーピング方式として、中心角制御型セクタ端末グルーピング方式を提案した。提案方式では、APを中心とした円形カバレッジを複数のセクタ（扇形）領域に分割し、同一領域内に存在する端末を一つのグルー

プとすることで近隣端末を同一グループ化し、隠れ端末問題を抑制している。さらに、各セクタ領域の中心角をネットワーク環境に応じて調整し、領域内端末数やトラフィック量が均等となるような領域分割を実施する。これにより不均ネットワーク環境下においても各端末のチャネルアクセス機会を均等化できるため端末間での通信性能における公平性を確保できる。

提案方式の有効性を示すために、ネットワークスループット、端末レート満足率、伝送遅延の各特性を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、多様な端末配置状況や端末トラフィック分布においても提案方式は既存方式と比較して性能の向上が確認された。従って、提案方式は隠れ端末問題を抑制しながら、不均一ネットワーク環境下においても端末間の公平性を確保できることが明らかとなった。以上から、近年のセンサ端末急増により大規模化したネットワークにおいて提案方式は良好なネットワーク性能を提供でき、多様なIoTサービスを実現に向けて有効である。

今後の課題として、本研究では、ネットワーク環境の不均一性として端末配置の偏りや異種端末トラフィックの混在を考慮しているが、端末の無線通信能力や電力資源などは全端末において等しいと仮定している。端末グルーピングにおいて端末台数や生起トラフィック量をグループ間で均等化することが可能であっても、これらの要素が端末ごとに異なる場合はチャネルアクセス機会の不公平性へとつながる恐れがある。そのため、無線通信能力や電力資源などが端末ごとに異なることを考慮して、より実環境に近い環境での評価・改良を行い、提案方式の有効性を示すことが必要であり、実システムでの有用性を示すための今後の課題の一つである。

参考文献

- [1] IEEE 802.15.4 standard, “ Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPAN), September 2006.
- [2] IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, May 2017.
- [3] E. Khorov, A.Lyakhov, A.Krotov, A.Guschin, “ A survey on IEEE 802.11ah: An enabling Networking Technology for Smart Cities,” *Computer Communications*, vol. 58, no. 7, pp. 53-69, March 2015.
- [4] Y. Yang, S. Roy, “Grouping-Based MAC Protocols for EV Charging Data Transmission in Smart Metering Network,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 7, pp. 1328–1343, July 2014.
- [5] L. Zheng, M.Ni, L.Cai, K.Doppler, “Performance analysis of group-synchronized dcf for dense IEEE 802.11 networks,” *IEEE Trans. wireless communications*, vol. 13, no. 11, pp. 6180-6192, November 2014.
- [6] N. Nawaz, M.Hafeez, S.A.R.Zaidi, D.C.McLernon, M.Ghogho, “ Throughput Enhancement of Restricted Access Window for Uniform Grouping Scheme in IEEE 802.11ah,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, May 2017.
- [7] H. Wu, F. Zhu, Q. Zhang, and Z. Niu, “ Analysis of IEEE 802.11 DCF with Hidden Terminals,” in *Proc. IEEE Global Communications Conference*, December 2006.

- [8] A. Tsertou, D. I. Laurenson, “Revisiting the Hidden Terminal Problem in a CSMA/CA Wireless Network,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 7, no. 7, pp. 817–831, May 2008.
- [9] Q. Ngo, D. Ngoc, Q. Le-Trung, D. Lam, “A Novel Directional MAC in Restricted Access Window for IEEE 802.11ah Networks,” in *Proc. IEEE International Conference on Telecommunications*, August 2019.
- [10] L. Lakshmi, B. Sikdar, “Achieving Fairness in IEEE 802.11ah Networks for IoT Applications with Different Requirements,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, May 2019.
- [11] S. Yoon, J. Seo, S. Bahk, “Regrouping Algorithm to Alleviate the Hidden Node Problem in 802.11ah Networks,” *Computer Networks*, vol. 105, no. 11, pp. 22–32, August 2016.
- [12] Z. Zhu, Z. Zhong, Z. Fan, “A Station Regrouping Method for Contention Based IEEE 802.11ah Wireless LAN,” in *Proc. International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, Oct. 2017.
- [13] X. Lei, S. Hyong Rhee, “A Novel Grouping Mechanism for Performance Enhancement of Sub-1 GHz Wireless Networks,” in *Proc. IEEE Global Communications Conference*, December 2019.
- [14] T. Chang, C. Lin, K. Ching-Ju Lin, W. Chen, “Traffic-Aware Sensor Grouping for IEEE 802.11ah Networks: Regression Based Analysis and Design,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 18, no. 3, pp. 674–687, May 2015.
- [15] H. Mosavat-Jahromi, Yue Li, Lin Cai, “A Throughput Fairness-based Grouping Strategy for Dense IEEE 802.11ah Networks,” in *Proc. IEEE International*

Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 2019.

- [16] M. Dong, Z. Wu, X. Gao, H. Zhao, “ An efficient spatial group restricted access window scheme for IEEE802.11ah network, ” in Proc. International Conference on Information Science and Technology, May 2016.
- [17] M. Ghasemahmadi, Y. Li, L. Cai, “ RSS-Based Grouping Strategy for Avoiding Hidden Terminals with GS-DCF MAC Protocol, ” in Proc.IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 2017.
- [18] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, December 2016.
- [19] M. Gast. (2005) *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, 2nd Edition*, United States: O’Reilly Media.
- [20] A. Hazmi, J. Rinne, M. Valkama, “ Feasibility Study of IEEE 802.11ah Radio Technology for IoT and M2M use Cases, ” in Proc. International Workshop on Machine-to-Machine Communications Key to the Future Internet of Things, March 2013.

謝辞

本研究の遂行及び論文作成に当たり、ご多忙の中多大なご指導と助言をしていただいた森 香津夫教授，羽多野 裕之准教授，眞田 耕輔助教に深く感謝申し上げます。

最後に，研究設備の整備や管理などご協力くださいました山本 好弘技術職員，ならびに本研究のため御助力を注いでくださいました大学院生，学部生の皆様方に深く感謝いたします。

令和3年3月 下川真季

研究業績

- 下川真季, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森香津夫, “IEEE802.11ah RAW 方式における端末不均一配置に対応した端末グルーピング方式,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 B-15-16 2019 年 9 月.
- M. Shimokawa, K. Sanada, H. Hatano, and K. Mori, “Two level station grouping considering non-uniform station distribution for RAW mechanism in IEEE 802.11ah,” Proc. of the 9th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2019.
- 下川真季, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森香津夫, “端末不均一配置の IEEE802.11ah ネットワークにおける多種トラフィックを考慮した端末グルーピング方式,” 年電子情報通信学会 総合 大会講演論文集, B-15-40 2020 年 3 月.
- M. Shimokawa, K. Sanada, H. Hatano, and K. Mori, “Station Grouping Method for Non-uniform Station Distribution in IEEE 802.11ah based IoT Networks,” Proc. of the 91st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2020 Spring), May 2020.
- M. Shimokawa, K. Sanada, H. Hatano, and K. Mori, “Station grouping strategy considering heterogeneous traffic for IoT networks with non-uniform station distribution,” Proc. of the 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2020.
- 下川真季 眞田耕輔 羽多野裕之, 森香津夫, “IEEE802.11ah ネットワークにおける端末不均一配置を考慮したトラフィック負荷分散型端末グルーピング方式,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.120, no.261, pp.17-22, 2020 年 11 月 (若手研究奨励賞 受賞).

受賞

- 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究専門委員会 (SeMI) 令和2年度若手研究奨励賞 受賞 (2020年11月)