

アクセスネットワークの省電力化に関する研究

高橋 佑輔

電気通信大学

2013年9月

アクセスネットワークの省電力化に関する研究

高橋 佑輔

電気通信大学大学院情報システム学研究科

博士（工学）の学位申請論文

アクセスネットワークの省電力化に関する研究

博士論文審査委員会

主査 加藤 聰彦 教授

委員 森田 啓義 教授

委員 大木 英司 教授

委員 近藤 正章 准教授

委員 原井 洋明 情報通信研究機構室長

Study on energy-efficient access networks

Yusuke Takahashi

Abstract

We design energy-efficient access networks and show its effectiveness through simulation experiments.

In optical access, we focus passive optical network (PON) with adaptive link rate (ALR) for power saving. An optical line terminal (OLT) and optical network units (ONUs) have a 1 Gbps (low speed) device, 10 Gbps (high speed) device and switching device. ALR in current method changes the whole of link rate to 1 Gbps or 10 Gbps with current communication demand. We propose independent and adaptive link rate (IALR) control method in ONUs. OLT adaptively selects transmission rate from 1 Gbps or 10 Gbps for each ONU. IALR changes each ONU's link rate independently. In other words, ONU's link rate is not decided only by a factor of the threshold in every ONU. The link rate is decided also by calculating whether a communication demand surpasses the threshold in the whole PON. We conclude that IALR is more energy saving method through simulation that IALR uses much 1 Gbps link rate.

In wireless access, we focus wireless-mesh network (WMN), where a number of fixed mesh points (MP) are wirelessly connected to each other. Station connects with nearest MP. Some papers show speed up WMN studies, which uses a multiple access directional antenna for communication between the MPs. On the other hand, the electricity consumption increases because the number of the antennas also increases. To solve this problem, we calculate the link topology that the number of the links is minimized by mixed integer linear programming. But, number of link switching becomes large and makes MPs isolate when applications' demand is changed. Frequent switching of the link topology is likely to degrade the performance of the upper layer. In this study, we proposed a switching method with a little switching number of times without isolated MPs of the link topology and confirm the effectiveness by simulation.

アクセスネットワークの省電力化に関する研究

高橋 佑輔

概要

世界的に省電力化技術に対する関心が高まっている中、装置数の多さからアクセスネットワークの消費電力が通信ネットワークの約7割を示すという調査結果もあり、アクセスネットワークの消費電力の増大が懸念される。本論文ではアクセスネットワークにおいて光アクセスネットワークと無線メッシュネットワークそれぞれの消費電力削減手法を提案し、計算機シミュレーションを通じて本研究の提案方式が消費電力の低減につながることを述べる。

光アクセスネットワークの省電力化

光アクセスネットワークにおいては、広く PON (Passive Optical Network) が利用されている。PON は通信事業者事業者構内に設置される OLT (Optical Line Terminal), 光スプリッタ, それぞれの加入者宅に設置される N 台 (最大 32 台) の ONU (Optical Network Unit) とそれらを繋ぐ光ファイバから成る通信システムである。 N 台の ONU は同一 PON の配下となる。国内で広く普及している 1Gbps 級の GE-PON (Gigabit Ethernet PON) に対し、近い将来に予想される 10Gbps 級の 10GE-PON への移行に際し ONU および OLT の 1Gbps 装置をそれぞれ 10Gbps 装置へと入れ替えるのではなく、1Gbps 装置, 10Gbps 装置とこれらを切替える装置からなる通信装置へとそれぞれ入れ替え, リンク速度を切替える機能である ALR (Adaptive Link Rate) を PON に適用する事を想定する。

全ての ONU のリンク速度を一斉に変更する一斉切替方式は, PON 配下の ONU 全体の通信要求量が 1Gbps を若干上回るような通信量においても, すべての ONU をリンク速度 10Gbps で用いる事となるので, 帯域利用率が小さくなる問題点があることから, 独立切替方式を提案した。独立切替方式は ONU 個別にリンク速度を変更することで PON 全体の通信要求が 1Gbps 以上の場合でも多くの 1Gbps リンクを用いる事が可能であることをシミュレーションにより示した。一方で, 独立切替方式では 1Gbps リンクを用いることによる遅延の発生も見られた。更に, ONU 間の公平性を検討したところ, 一斉切替方式は ONU 毎の通信要求が異なっても全ての ONU がほぼ同一のリンクを用いるのに対し, 独立切替方式は通信要求の小さな ONU が通信要求の大きい ONU よりも 1Gbps リンクを用いる事により ONU 間の公平性のある方式であることを示し

た. 更に, 消費電力の検証を行った. 想定したモデルにおいては, 国内全ての ONU が提案方式に移行した場合に最大で原子力発電所1基のうち 7.7%の消費電力削減効果, 太陽光発電で約 8.58km² (東京ドーム 183 個) 分の設置削減効果を得られることを示した.

無線メッシュネットワークの省電力化

近年, 低コストで自由度の高いアクセスネットワークとして, 無線メッシュネットワーク(WMN: Wireless Mesh Network) の利用が高まっている. WMN は複数の MP (Mesh Point) と複数の無線端末からなる通信システムである. それぞれの無線端末は MP と無線接続し, それぞれの MP 間 (メッシュリンク) は無線接続されマルチホップ通信を行う. 本論文では WMN にネットワークの省電力化の手法として通信経路を特定のリンクへと集約し, 他のリンクの電源を一時的に落とすリンク切断方式を適用する. 無線端末-MP 間とメッシュリンクは異なる通信周波数を用い, メッシュリンク内の MP は指向性アンテナを用い, 隣接する MP 間の信号は他の信号と干渉しない無線メッシュネットワークを想定した.

想定システムにおいて, ネットワークポロジを切替える事でその時々消費電力最適となる手法はあるが, リンク切替回数の増大や切替時にネットワークが切断される可能性がある. 本論文ではネットワーク切断を最小限としつつ消費電力の増加を防ぐ物理ネットワーク構築と経路制御方式を提案した.

提案方式はリンク切替を行う際に, 通信の集中する MP をルート MP とするツリートポロジを保持し, 通信要求の増加に応じてメッシュポロジに段階的に移行する. ツリートポロジは全ての MP との到達性があり, リンク接続数が最小となるリンクポロジであるのでネットワークが切断されない. 通信要求が少なくツリートポロジで十分に通信要求を満たす場合, 徐々に接続リンク数の削減を行いツリートポロジへと変化させることで, 消費電力を削減する. 通信要求が大きく, ツリートポロジでは十分な通信速度が得られない場合に徐々に接続リンク数を増加させることで消費電力が大きくなるが通信要求を満たすメッシュポロジへと移行させる. リンク切替の判断はそれぞれの MP がその時点で割り当てているリンクにリンクを追加・削除する形でおこなわれる. リンク切替に切替前のリンク割当状況を加味する事でリンク切替回数が削減される.

消費電力最適となる方式を数理計画法で示し, 提案方式と数値シミュレーションで比較を行った. 提案方式は消費電力最適となる方式と比べて通信要求が大きい場合にメッシュポロジへと移行する事で消費電力が増大するものの, リンク切替回数は通信要求に関わらず削減され, またネットワーク切断が行われない事を示した.

目次

■ 第1章 はじめに	1
1.1 研究概要	1
1.2 研究背景	2
1.2.1 アクセスネットワーク	10
1.2.1.1 有線アクセスネットワーク	12
1.2.1.2 無線アクセスネットワーク	14
1.3 研究目的	17
1.4 論文の構成	18
■ 第2章 有線アクセスネットワークの省電力化	19
2.1 既存システム	19
2.1.1 PON の通信方式	21
2.1.2 MPCP によるタイムスロット割当手順	24
2.2 関連研究と問題点	25
2.2.1 リンク速度適応切替 (ALR) 方式	26
2.2.2 一斉リンク速度適応切替方式	28
2.3 提案方式	30
2.3.1 独立リンク速度適応切替方式	30
2.3.2 MPCP での ALR 制御	32
2.3.3 独立切替方式のアルゴリズム	33
2.4 検証結果	35
2.4.1 独立切替方式のしきい値の検証	35
2.4.2 PON 全体における高速リンク利用頻度の検証	38
2.4.3 各 ONU の通信要求量が異なる場合の検証	40
2.4.4 消費電力の検証	43
2.5 まとめ	47

第3章 無線アクセスネットワークの省電力化	48
3.1 WMN 関連技術	48
3.1.1 WMN のトポロジー	48
3.1.2 空間分割多重伝送技術.....	51
3.1.3 システムモデル.....	54
3.2 関連研究と問題点	55
3.2.1 数理計画法による導出.....	56
3.3 提案方式	64
3.3.1 提案方式の概要	64
3.3.2 提案方式のアルゴリズム.....	65
3.3.2.1 リンク切替.....	67
3.3.2.1.1 初期手順.....	67
3.3.2.1.2 上流リンクテーブル更新手順	69
3.3.2.1.3 リンク切替手順.....	71
3.3.2.2 フレーム送信手順.....	74
3.3.2.3 ルートMP 変更手順.....	76
3.3.3 リンク速度が異なる WMN の検討	76
3.4 検証結果	77
3.5 まとめ	83
第4章 結論	84
参考文献	87

図表目次

図 1.1 我が国の 2010 年度における温室効果ガス排出量の比率 (CO ₂ 換算) ([2]を基に作成)	2
図 1.2 GLOBAL ICT DEVELOPMENTS, 2001-2011([8]を基に作成)	4
図 1.3 我が国の世代別ブロードバンド利用状況 [7]	4
図 1.4 全世界のコンシューマ インターネット トラフィックの予測 [11]	5
図 1.5 我が国の IT 機器の消費電力量予測([12]を基に作成).....	6
図 1.6 ネットワークの分類	7
図 1.7 通信ネットワークにおける消費電力の推移の予測 [16]	8
図 1.8 アクセスネットワークとコアネットワークの機能別消費電力の内訳([17], [18]を基に作成).....	9
図 1.9 主なアクセスネットワークの接続例	11
図 1.10 我が国の主な有線アクセスネットワークの加入者数の推移([22]を基に作成)	12
図 1.11 PON と専用線接続のネットワークポロジの比較	13
図 1.12 我が国の主な無線アクセスネットワークの加入者数の推移([22]を基に作成)	14
図 1.13 公衆無線 LAN と WMN の比較.....	15
図 1.14 WMN とアドホックネットワークの比較	16
図 1.15 WMN の概要.....	16
図 1.16 WMN の利用例.....	17
図 2.1 PON の多重接続法(GE-PON の例)	21
図 2.2 PON における TDMA 制御の例	22
図 2.3 FBA と DBA のタイムスロット割当	23
図 2.4 MPCP シーケンス.....	25
図 2.5 ALR を適用した PON のシステムの構成図.....	27
図 2.6 一斉切替方式のリンク速度切替イメージ.....	29
図 2.7 独立切替方式のリンク速度切替イメージ.....	31
図 2.8 10GBPS リンク利用割合と平均スループットの関係	31
図 2.9 ALR 適用 MPCP シーケンス図	33
図 2.10 独立切替方式の切替アルゴリズム.....	34
図 2.11 独立切替方式におけるしきい値の比較.....	36
図 2.12 MPCP シーケンス図.....	37
図 2.13 一斉切替方式と独立切替方式の比較.....	39
図 2.14 それぞれの ONU に発生させるデータ量の比率	40
図 2.15 一斉切替方式におけるそれぞれの ONU 間の 10GBPS リンク利用割合と平均遅延時間の比較	41
図 2.16 独立切替方式におけるそれぞれの ONU 間の 10GBPS リンク利用割合と平均遅延時間の比較	42

図 2.17 一斉切替方式と独立切替方式の ONU 消費電力の比較	44
図 2.18 一斉切替方式から独立切替方式へ移行させた場合に削減される ONU 消費電力の比較	45
図 2.19 一斉切替方式と独立切替方式の ONU 消費電力の比較	46
図 2.20 一斉切替方式から独立切替方式へ移行させた場合に削減される ONU 消費電力の比較	46
図 3.1 ボトルネックリンクの例.....	50
図 3.2 無指向性アンテナと指向性アンテナの比較.....	52
図 3.3 無指向性アンテナと指向性アンテナのボトルネックの比較	53
図 3.4 想定するシステムモデル.....	54
図 3.5 接続リンク数の削減によるリンク消費電力の削減.....	55
図 3.6 有向グラフ $G(V,E)$ における MP, リンク, 伝送容量の関係.....	58
図 3.7 トラヒック発生時における変数の例	58
図 3.8 リンク接続状態の決定例	59
図 3.9 制約条件と目的関数の機能イメージ	60
図 3.10 トラヒック流量の制約条件.....	61
図 3.11 リンク切替回数の増大例.....	62
図 3.12 リンク切替順序による孤立 MP の発生例.....	62
図 3.13 リンク切替方針	64
図 3.14 ルート MP と上流・下流 MP の設定	65
図 3.15 上流リンクテーブルの例	67
図 3.16 リンク切替の初期手順	69
図 3.17 ルート MP による残余帯域メッセージの送信	70
図 3.18 残余帯域の更新	70
図 3.19 MP による残余帯域メッセージの送信.....	71
図 3.20 ルーティング割合メッセージの値.....	75
図 3.21 下流ルーティングテーブルの例	76
図 3.22 シミュレーションに用いたネットワークポロジ	77
図 3.22 シミュレーション手順.....	78
図 3.23 平均リンク切替回数の比較	79
図 3.24 平均接続リンク数の比較.....	79
図 3.25 孤立 MP 発生危険度の比較.....	82
図 3.25 消費電力の比較	81
表 1.1 代表的な発電方法における出力量.....	3
表 1.2 ブロードバンドの年平均成長率(上段)と普及率(下段)の比較([8]を基に作成)	5
表 1.3 有線アクセスと無線アクセスとの比較.....	11

表 2.1 GE-PON と G-PON の比較	20
表 2.2 MPCP の主な機能	23
表 2.3 シミュレーションで用いた主なパラメータ	35
表 3.1 WMN のリンク接続形態の比較	49
表 3.2 数理計画法で用いる変数	57
表 3.3 それぞれの MP が保持するテーブル	66

第1章 はじめに

1.1 研究概要

世界的に省電力化技術に対する関心が高まっている中、装置数の多さからアクセスネットワークの消費電力が通信ネットワークの約7割を示すという調査結果もあり、アクセスネットワークの消費電力の増大が懸念される。本論文ではアクセスネットワークにおいて光アクセスネットワークと無線メッシュネットワークそれぞれの消費電力削減手法を提案し、計算機シミュレーションを通じて本研究の提案方式が消費電力の低減につながることを述べる。

光アクセスネットワークにおいては、リンク速度を切替える機能であるリンク速度適応切替 (ALR : Adaptive Link Rate) 方式を PON (Passive Optical Network) に適用することを想定し、データ量に応じての全ての送受信機のリンク速度を切替えるのではなく、回線利用率が定める範囲内におさまるよう独立にリンク速度を切替えていき、より多くの低速 (1Gbps) 装置を用いて通信可能なリンク速度独立適応切替方式を提案した。提案方式は既存方式に比べ、同じ通信要求でも消費電力の小さな低速装置を用いることで低消費電力システムとなることを示した。また、通信装置が独立にリンク速度を切替えることにより、異なる通信要求を持つ加入者間の消費電力量の公平性があることを示した。

無線メッシュネットワークにおいては、空間多重技術の1要素である指向性アンテナを用いるネットワークを想定し、ネットワークを流れる通信量に適応したリンク割当により省電力となる無線メッシュネットワークを提案した。各端末における通信要求の変動に応じ動的にリンク接続、切断を行うことにより、通信要求が変動した際でも端末が孤立することなく、少ないリンク切断、接続回数で省電力効果を示す物理ネットワーク構築手法と経路制御方式を提案した。

1.2 研究背景

近年、世界的に消費電力削減への動きが広まっている。1997年12月に開催されたCOP3 (Conferences of the Parties 3: 気候変動枠組条約第3回締約国会議) において地球温暖化の起因となる温室効果ガス排出量の排出削減の数値目標を定めた京都議定書 (気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書) が採択され、2011年3月現在で我が国を含め192の国が締約した [1]。世界的に地球温暖化対策が注目される中、**図 1.1** に示すとおり、我が国における温室効果ガスの約3割は電力消費を起源としており [2]、温室効果ガス削減の目標を達成するために消費電力の削減が求められる。我が国では2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う国内の電力供給量が需要量を下回った事象、原子力発電所の事故から原子力発電所削減の議論が広がりなど、消費電力削減は地球温暖化に対する付随的なものから主たる目的となっている。

消費電力削減への関心は、政治的な取り組みから一個人のもとへと着実に移行している。多くの家電量販店においては、製品の価格や性能を示すタグの中に消費電力量の表示を加えたり、大きなポスターにより低消費電力製品のメリットを示したりと、消費者の関心が高い省電力製品の販売に力を入れている。また、スマートグリッドに代表される電力の見える化が進んでいる。大規模なシステムを用いなくても低価格で電気製品の消費電力をリアルタイムで確認でき、電気製品の評価の1つとなっている。このように、消費者は石油価格の高騰に伴う電気料金の値上げも伴って、積極的に消費電力の小さな製品の選択を行い、省電力化への取組を行っている。これらのことより、今後も消費電力の少ない製品は広く消費者に普及されるものと考えられる。

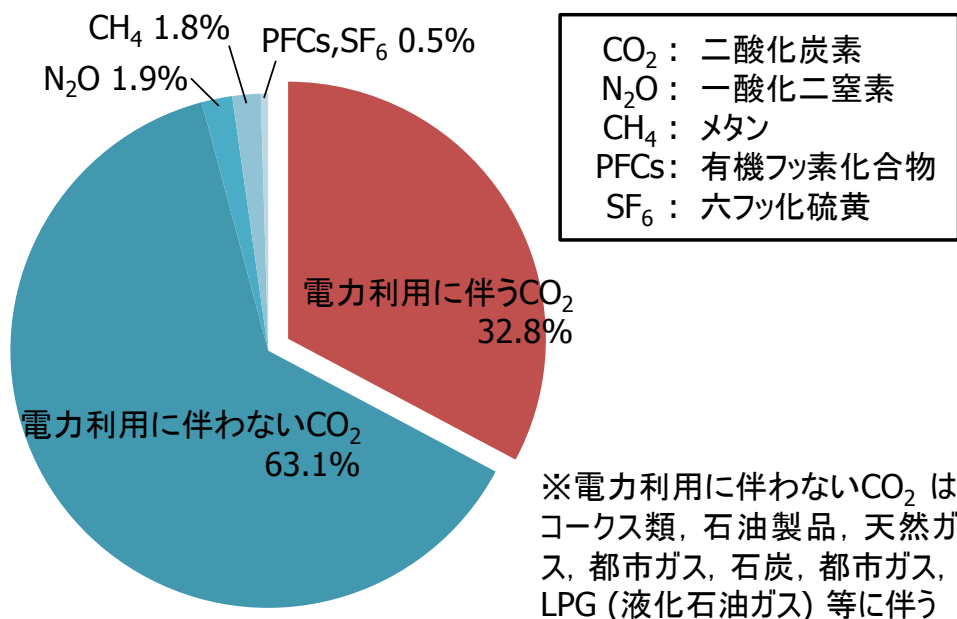


図 1.1 我が国の 2010 年度における温室効果ガス排出量の比率 (CO₂ 換算) ([2]を基に作成)

代表的な発電方法における電力の出力量を表 1.1 にまとめる。原子力発電は1基あたりおよそ 100 万 kW の出力を持つ (例えば [3])。[4]による代表的な原子力発電所の最大出力量と平均稼働率 (設備点検などで稼働していない時間を考慮した率) を掛け合わせると 100 万 kW を下回るが、本論文では 100 万 kW を代表的な値として用いる。太陽光発電においては、現在建設予定中のメガソーラーの最大出力量は 1m² 当たり 74.6W である [5]。太陽光発電は夜間や天気の悪い日には発電が行えないため、平均稼働率は 12%と小さく、出力量は 8.9W/m²となる。風力発電は岩手県一戸町の例で 1 基当たり 2300kW の出力 [6]である。平均稼働率に [4]の平均値である 25%を用いると出力量は 1 基当たり 575kW となる。

表 1.1 代表的な発電方法における出力量

発電方法	原子力発電所	太陽光発電	風力発電
最大出力量	120 万 kW/基 [4]	74.6W/m ² [5]	2300kW/基 [6]
平均稼働率	10-80% [4]	12% [4]	20-30% [4]
出力量	100 万 kW/基 [3]	8.9W/m ²	575kW/基

近年、世界的な ICT (Information and Communication Technology : 情報通信技術) への期待の高まりにより、普及率が增大している。情報通信白書 [7]によると ICT は「先進国, 新興国, 開発途上国などあらゆる国で成長のエンジンとして期待されている」とし、多くの国が国家レベルで ICT の普及に力を入れている。図 1.2 は ITU (International Telecommunication Union : 国際電気通信連合) が公開した世界における近年の通信普及率をそれぞれの媒体別に示したものである [8]。固定電話線の普及率は他の媒体への移行により減少しているものの、携帯電話の年平均成長率^{脚注)} が 19%、有線ブロードバンドの年平均成長率が 30%と、普及率の増大が見て取れる。

ICT 先進国である我が国ではかねてより国内のすべての世帯がブロードバンドサービスを利用できるよう目標をかかげている [9]。ブロードバンド利用率は利用状況が高い 13~19 歳においても 74.6%と、国民全体の利用には届いていないが (図 1.3)、年々増加傾向にある [10]。

開発途上国においては、先進国を上回る速度で ICT が普及している。例えば [8]によると 2007 年から 2011 年における年平均成長率は開発途上国が有線・無線ブロードバンド双方において先進国を上回っており (表 1.2)、将来は開発途上国を中心とした ICT の普及が予想される。

脚注) 年平均成長率 (CAGR: Compound Average Growth Rate) : 複数年にわたる成長率から、1 年あたりの幾何平均を求めたもの。 $\left(\frac{n\text{年の値}}{\text{初年の値}}\right)^{\frac{1}{n-1}} - 1$ で算出。

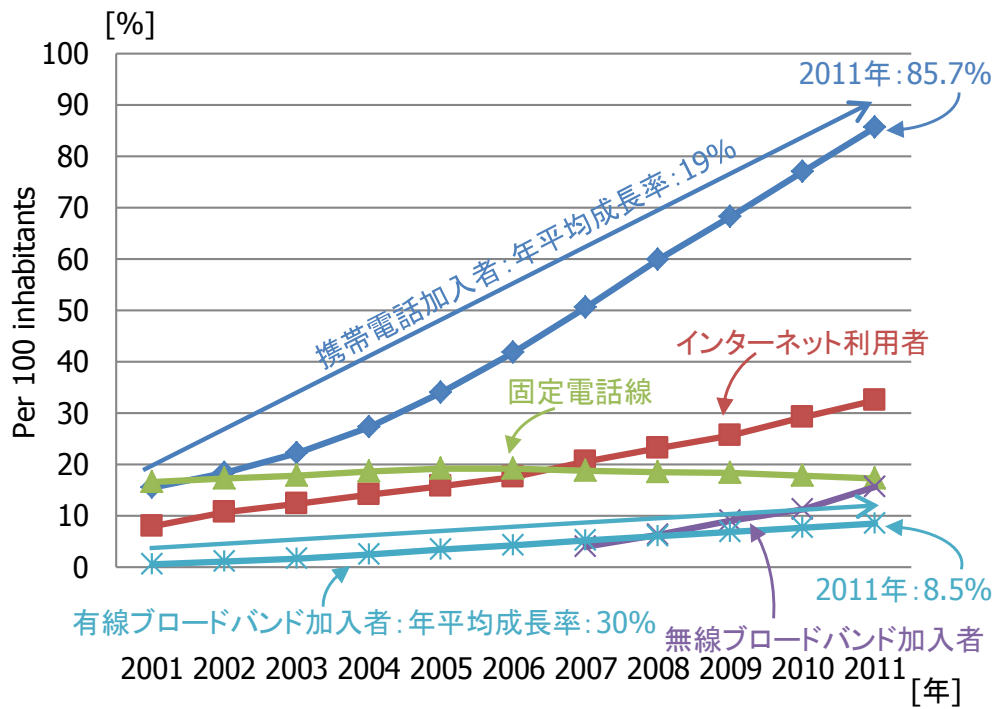


図 1.2 Global ICT developments, 2001-2011([8]を基に作成)

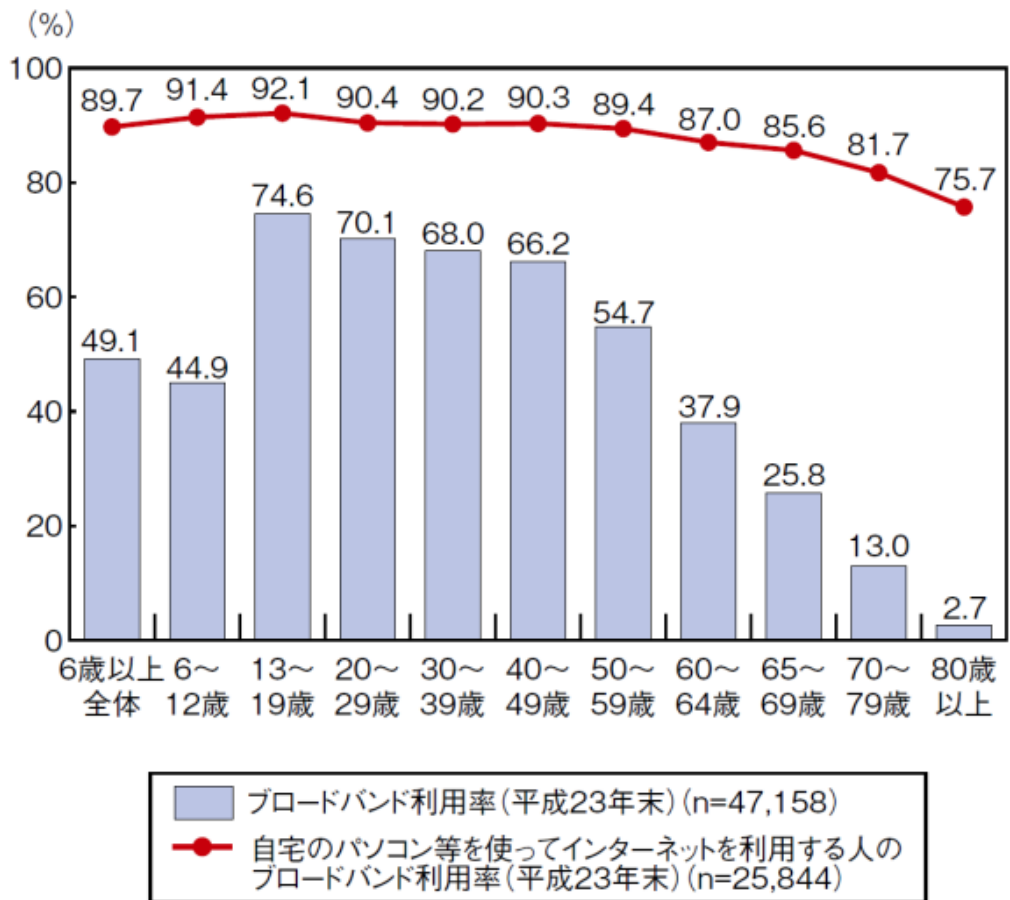


図 1.3 我が国の世代別ブロードバンド利用状況 [7]

表 1.2 ブロードバンドの年平均成長率(上段)と普及率(下段)の比較([8]を基に作成)

	有線	無線
開発途上国	20% (5%)	78% (8%)
先進国	9% (25%)	29% (51%)

普及率の増大に合わせて、世界的な人口増大もあることから将来の通信装置数は増大が予測される。

ICT の普及に加え、1ユーザ当たりの通信量も増加傾向にある。通信量増大の要因は多くの通信を利用するアプリケーションに起因している。例えば、Youtube に代表される動画配信サイトの利用の増加や映像の高微細化、P2P (peer to peer) 等による大容量ファイルの伝送、クラウドコンピューティングによるインターネットを経由したストレージへのアクセスなどが挙げられる。

図 1.4 はシスコシステムズ社が公開した将来のインターネットトラフィックの予測である [11]。ビデオストリーミング (internet video) , ファイル共有 (file sharing) を筆頭に全体のインターネットトラフィックの年平均成長率を 29%と予測している。

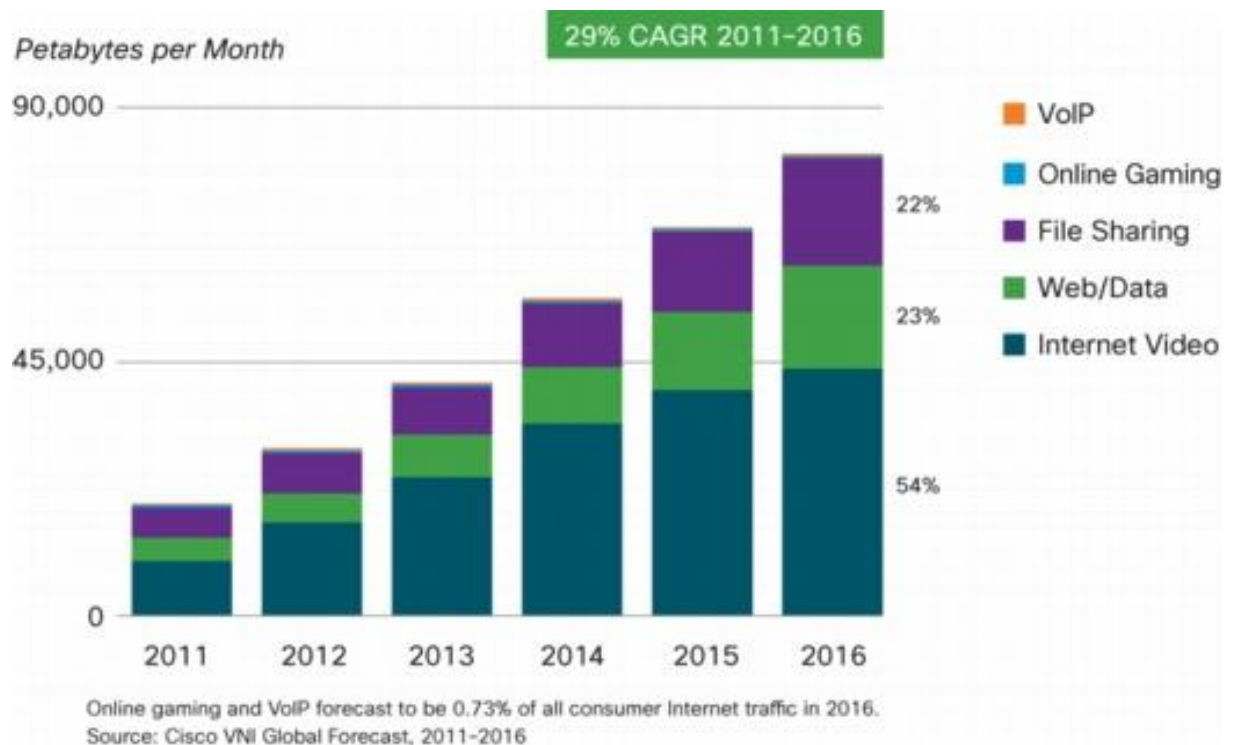


図 1.4 全世界のコンシューマ インターネット トラフィックの予測 [11]

一方で、将来の IT 機器の消費電力は増大が予想される。図 1.5 は我が国の将来の IT 機器の消費電力量の予測である [12]。2006 年と比較し 2025 年の IT 機器の消費電力量は 5.1 倍増加すると予測されており、ネットワーク (図中 NW と表示) 機器においても 5.2 倍の増加が予測されている。

ネットワーク機器の消費電力の増加は主に通信装置数の増加・通信量の増大による。通信装置全体の消費電力量はそれぞれの装置の消費電力量に変化がない場合、装置数に比例して増大する。また装置の通信速度を速くすると一般に消費電力量は増大する。例えば [13] は 2012 年度末までに達成するエコロジーガイドラインの基準を示しているが、同じ種類の装置においても通信速度の大きい装置の基準が通信速度の小さな装置よりも大きい (より大きな消費電力においても基準を満たす)。先に ICT 普及率と 1 ユーザ当たりの通信量の増大を示したが、これらのことから将来のネットワーク機器の消費電力の増大が予測される。

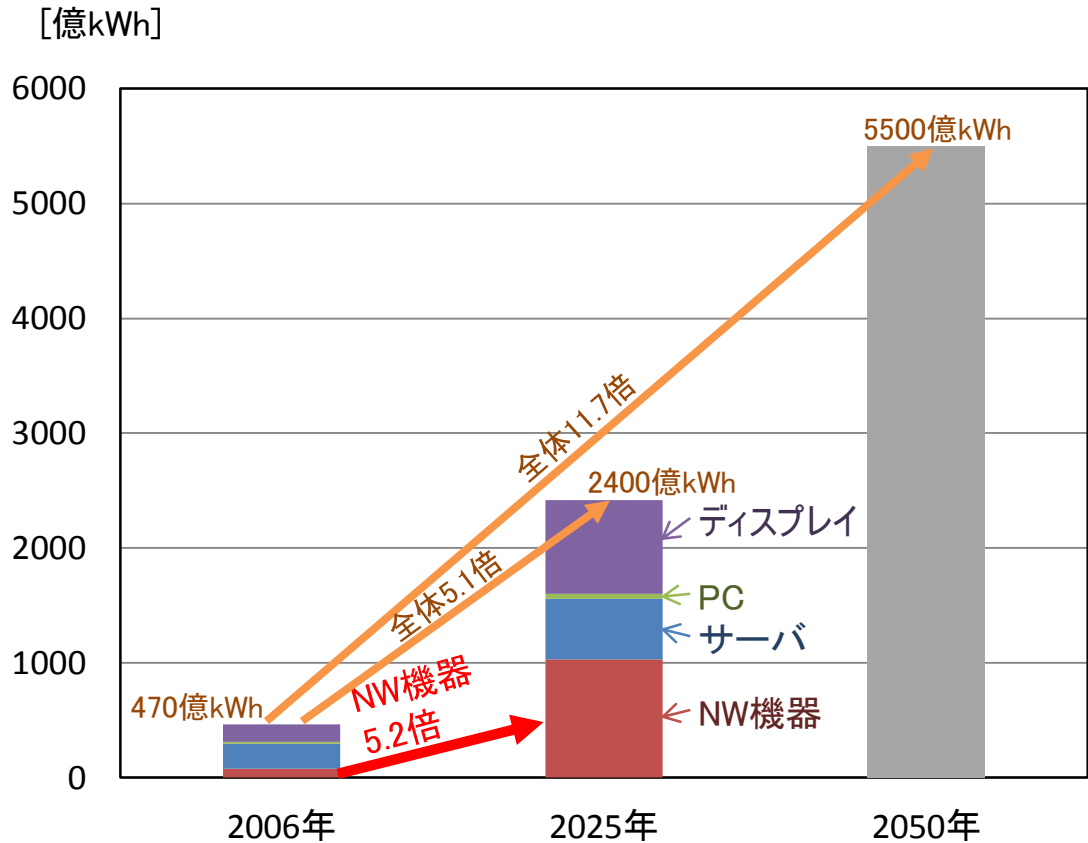


図 1.5 我が国の IT 機器の消費電力量予測 ([12] を基に作成)

ネットワークを図 1.6 に示す様にコアネットワーク、メトロネットワーク、アクセスネットワークと分類する。

コアネットワークは通信事業者の大きな拠点間を結ぶネットワークである (図中、上部に赤色で示す)。我が国の例で示すと東京-大阪間のような大都市間が接続される。コアネットワークは多くのデータが伝送され、ネットワーク切断に伴う障害規模が大きい為、高性能な通信装置が大容量伝送可能である光ファイバで接続される。

メトロネットワークは地域の通信事業者の局舎を結ぶネットワークである (図中、中ほどに緑色で示す)。NTTなどの通信事業者が全国に設置する局舎間が都道府県などの地域単位で接続される。

アクセスネットワークは通信事業者局舎と加入者端末を結ぶネットワークである (図中、下に青色で示す)。それぞれの通信事業者局舎 (携帯電話の場合は基地局) から光ファイバやメタルケーブル (銅線)、無線などで加入者の自宅や端末と接続される。

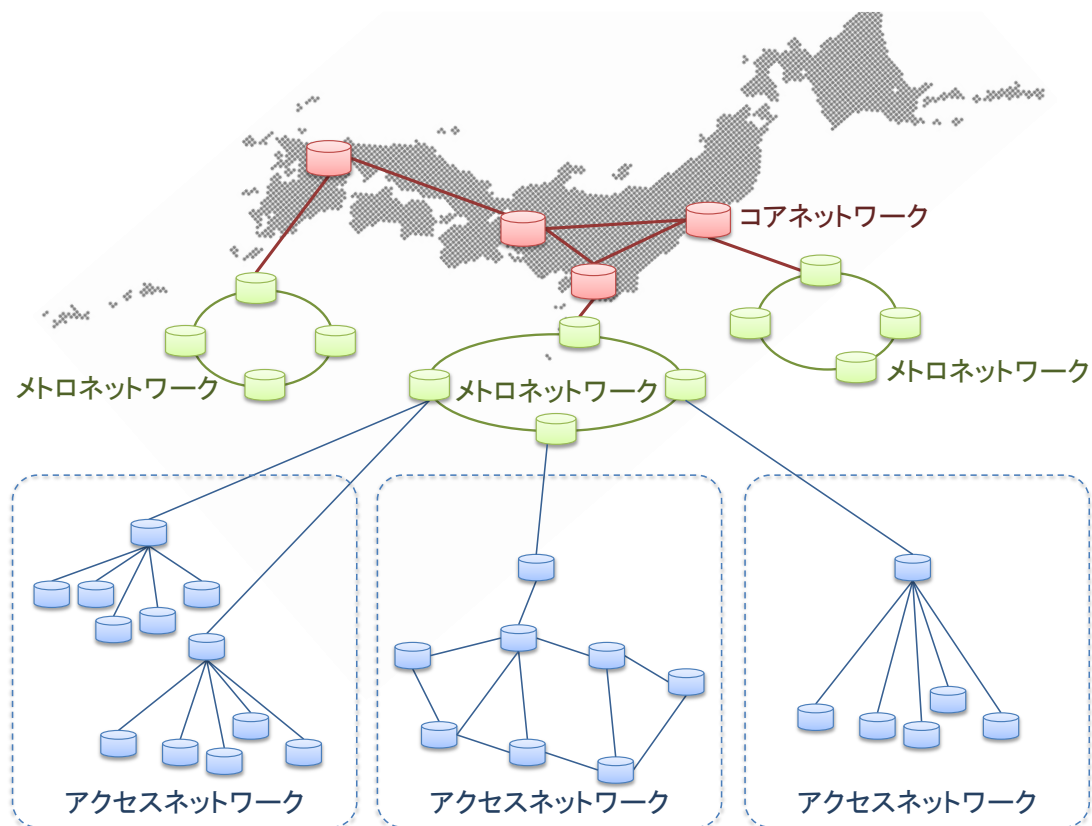


図 1.6 ネットワークの分類

コアネットワーク、メロネットワークを構成する通信装置は多くの加入者の通信を伝送するため大規模になり消費電力が大きい。アクセスネットワークを構成する通信装置は通信装置を用いる加入者の通信を中心に伝送をするため小規模で消費電力が小さい。一方でアクセスネットワークは加入者宅にそれぞれ通信装置を設置するため通信装置の台数が多くなる。例えば2010年のNTTにおけるフレッツ・光電話の例 [14], [15] を基に算出すると構成装置数の比率はコアネットワークの 1 に対しメロネットワークが 4, アクセスネットワークが 1900 と約 99% をアクセスネットワークの通信装置が占める。

図 1.7 はドイツテレコム社におけるアクセス、メロ、コアネットワークそれぞれの消費電力の推移の予測である [16]。図中 backbone はコアネットワークを, aggregation はメロネットワークを示す。2012 年に注目するとアクセスネットワークの消費電力が通信ネットワークの約7割を示しており, アクセスネットワークの消費電力の増大が懸念される。ドイツテレコム社の例では将来アクセスネットワークはメタルケーブル (銅線) から光ファイバを用いた通信に移行することから消費電力の増大は少ないとしているが, 光ファイバが普及した我が国においては加入者や通信量の増大により, 今後も消費電力は増大すると予測する。

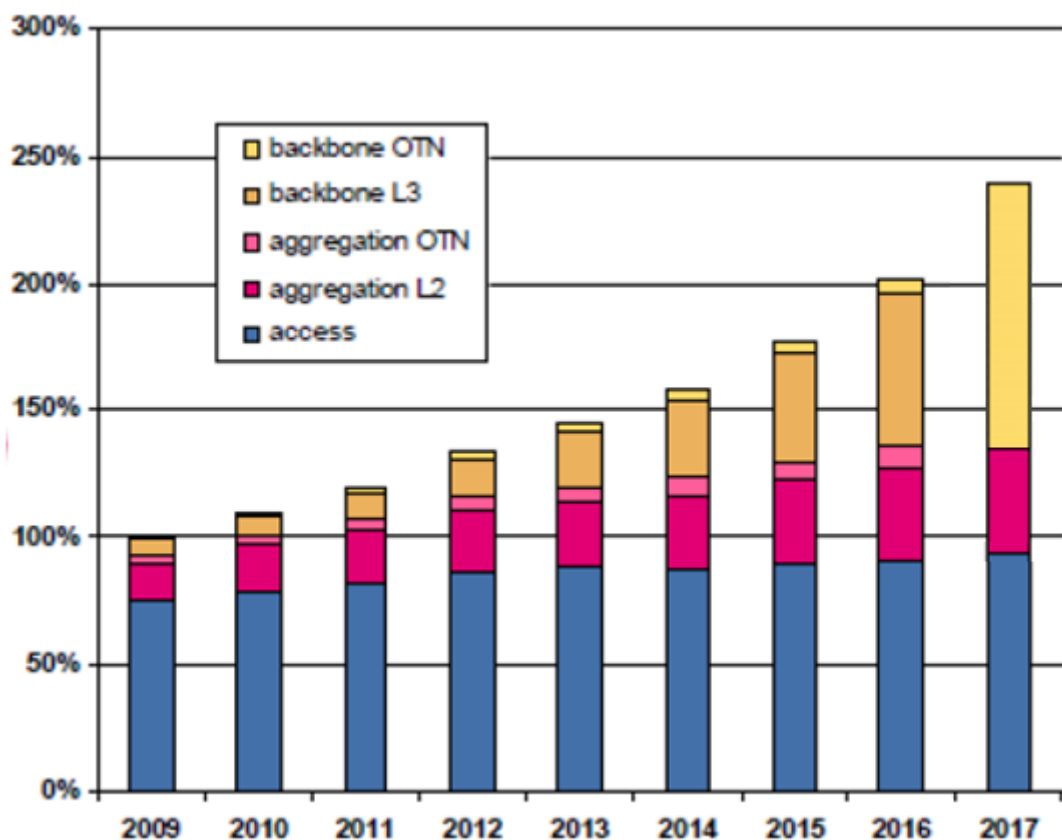


図 1.7 通信ネットワークにおける消費電力の推移の予測 [16]

図 1.8 はアクセスネットワーク装置とコアネットワーク装置においてそれぞれの機能の全体の消費電力に示す割合を示す。アクセスネットワーク装置として 1Gbps 級の加入者宅内に設置する通信装置を [17], コアネットワーク装置として代表的なシスコシステム社の 1Tbps 級高機能ルータを [18] 例にとる。

コアネットワーク装置はデータ処理が消費電力の大部分 (61%) を占める。代表的なルータのデータ処理の機能としてそれぞれ受信したパケットの宛先を識別し、経路表と照らし合わせて適切な経路に割り振る作業が挙げられるが、経路表の大きさが近年大きくなっており、大きな電力を要す。次に、冷却に伴う消費電力の割合が 33%となる。これは主にルータの動作に伴う放熱によるオーバーヒートを防ぐために設置されるエアコン等による。データの送受信が消費電力に示す割合は 7%である。

アクセスネットワーク装置は、各加入者の宅内に設置され取り扱うデータ量が少ないことからデータ処理の占める消費電力の割合はコアネットワークと比べ小さく 45%となる。同様の理由で装置の動作に伴う放熱量も少なく、専用の冷却機能を必要としないことから冷却に伴う電力消費は 0%である。一方、送信の消費電力の割合は 22%, 受信の消費電力の割合は 23%とアクセスネットワーク装置の送受信による消費電力の割合は相対的に大きくなる。

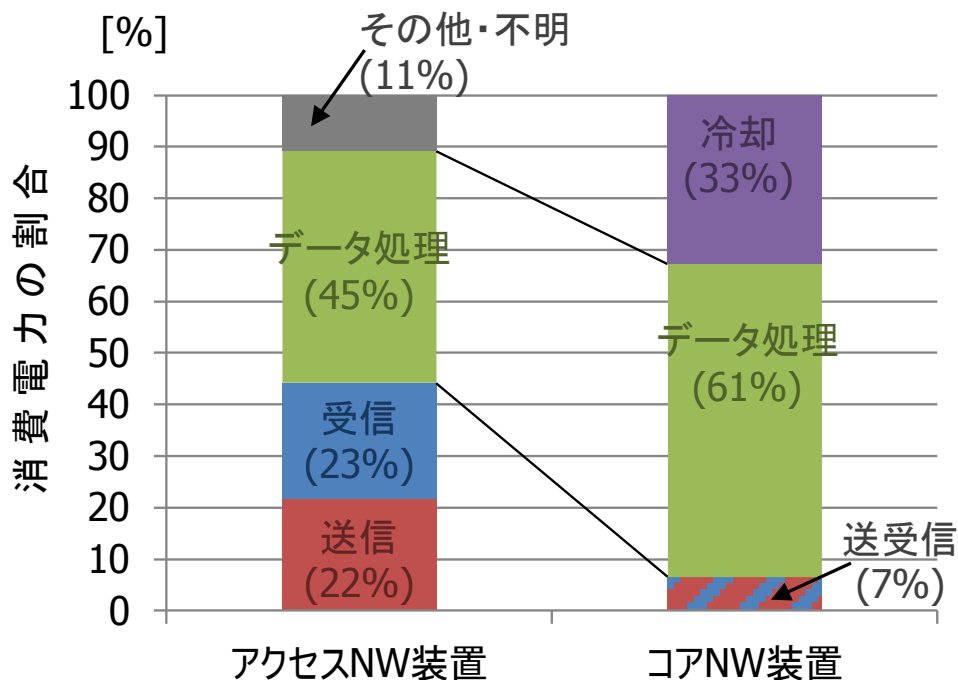


図 1.8 アクセスネットワークとコアネットワークの機能別消費電力の内訳([17], [18]を基に作成)

これらの背景から以降はアクセスネットワークに注目し、1.2.1 項にその概要を示す。

1.2.1 アクセスネットワーク

アクセスネットワークは有線アクセスと無線アクセスとの協調により実現されている。以下にアクセスネットワークの歴史の概要を示す。

我が国では 1995 年 11 月発売の Windows 95 により一般家庭へのコンピュータの導入が進み [19]、その後 1996 年頃から始まるインターネットブーム [20]により一般家庭でのインターネット利用が加速した。初期のインターネット接続は、既存の固定電話回線や、ISDN (Integrated Services Digital Network : サービス総合デジタル網) へのダイヤルアップ接続がおこなわれ、主流は有線アクセスであった。有線アクセスにおいてはその後ブロードバンドサービスとして、既存のメタルケーブルを用いた ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line : 非対称デジタル加入者線) 接続が 2000 年頃から普及し、2008 年には光ファイバを用いた FTTH (Fiber To The Home) が ADSL の加入者数を上回るなど、通信速度の高速化が進んでいる。

初期の無線 LAN の規格である IEEE 802.11a/b の標準化が 1999 年 10 月に完了すると、無線 LAN を用いた接続が進むが、無線接続はコンピュータと無線ルータ間に限られ、無線ルータと通信事業者間の接続には有線が必要であった。一方で、携帯電話網においては 1999 年 2 月にサービス開始された i モードにより、限定的ではあったがインターネットと接続され、加入者端末と通信事業者 (基地局) が直接無線接続された。その後、携帯電話網を用いたデータ通信サービスが開始され、データ通信専用のデータカードによりコンピュータから広域での無線アクセスが可能となった。2010 年にはテザリングサービスが開始され、携帯電話機にルータの機能を持たせることにより、専用のデータカードを必要とせずコンピュータから携帯電話網へのアクセスが可能となった。

携帯電話網の高速化によりコンピュータからのアクセスが容易になったり、iPhone に代表される携帯電話端末の高機能化に伴いコンピュータと携帯電話端末との境界があいまいになったりと、多くの加入者が通信事業者と無線アクセスを行ってインターネットへアクセスしている。一方で、加入者端末-基地局間の伝送量は無線に用いられる周波数が限られていることから制限されている。これらの状況から携帯電話網で有線へのオフロードが進められ、加入者宅内へのフェムトセルアンテナの設置や、公衆無線ネットワークの普及が進んでいる。

このように今日のアクセスネットワークは有線アクセスと無線アクセスとの協調により実現されており、そのアクセス形態も多種多様となっている。図 1.9 にその代表例を示す。これは表 1.3 に示すように、有線アクセス、無線アクセスではそれぞれに利点、欠点があり、様々な加入者の需要に対するアクセスネットワークの提供が行われていることによる。将来の通信量増大の予測による有線アクセスの需要、また無線アクセスで提供されている高モビリティの利便性から、将来においても有線アクセスネットワーク、無線アクセスネットワークによりアクセスネットワークは実現されると予測する。

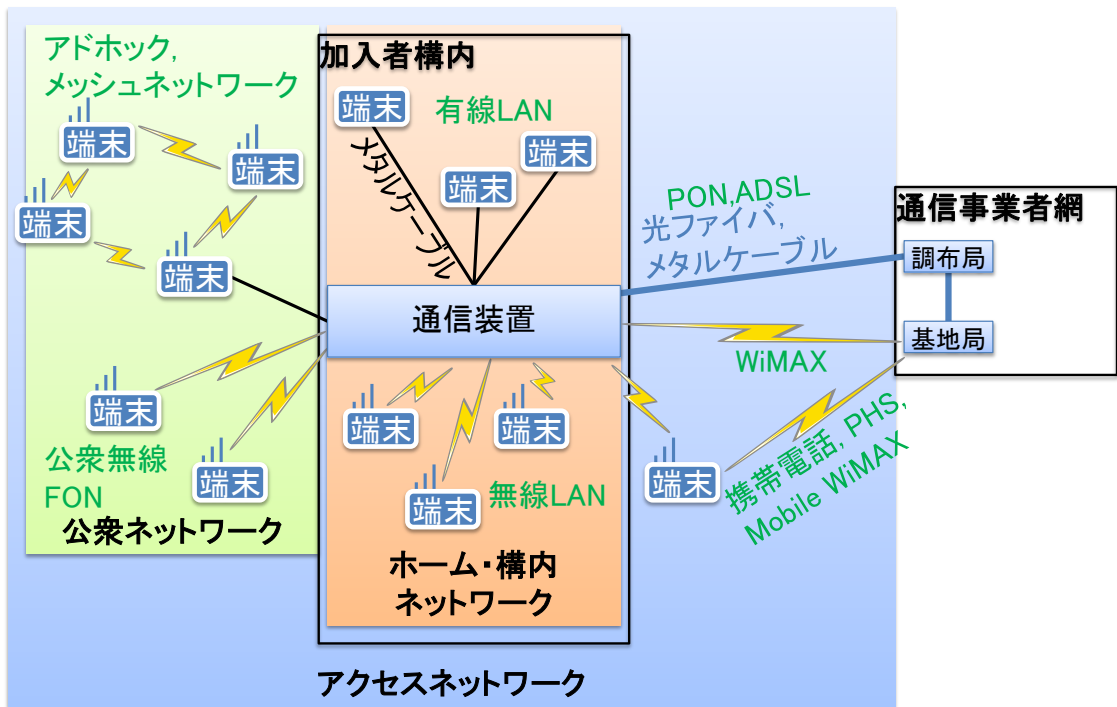


図 1.9 主なアクセスネットワークの接続例

表 1.3 有線アクセスと無線アクセスとの比較

	利点	欠点
有線アクセス	<ul style="list-style-type: none"> 高速通信(多重化が容易) 安定接続(外部ノイズの影響小) 	<ul style="list-style-type: none"> モビリティ小(配線可能範囲のみでの通信) 要配線(要配線スペース, 配線作業)
無線アクセス	<ul style="list-style-type: none"> モビリティ大(ハンドオーバー技術により広域にわたる通信可) 配線不要(電波の届く範囲で通信可) 	<ul style="list-style-type: none"> 低速通信(周波数の制限有・環境依存) 不安定な接続(外部ノイズの影響大) 要セキュリティ対策(電波傍受による情報漏えい)

1.2.1.1 有線アクセスネットワーク

有線によるアクセスネットワークに注目するとメタルケーブルにより敷設される DSL (Digital Subscriber Line: デジタル加入者線) から光ファイバで敷設される FTTH (Fiber To The Home) への移行が進んでいる (図 1.10)。光ファイバはメタルケーブルに対し高速通信が容易であり、通信トラフィック需要の増大へ対応が可能である。総務省の研究会においても光ファイバへの移行が重大とし、またこれに対する政策の必要性を挙げている [21]ことから、更なる光ファイバへの移行が予想される。これらのことから光ファイバを利用した有線アクセスネットワークに注目する。

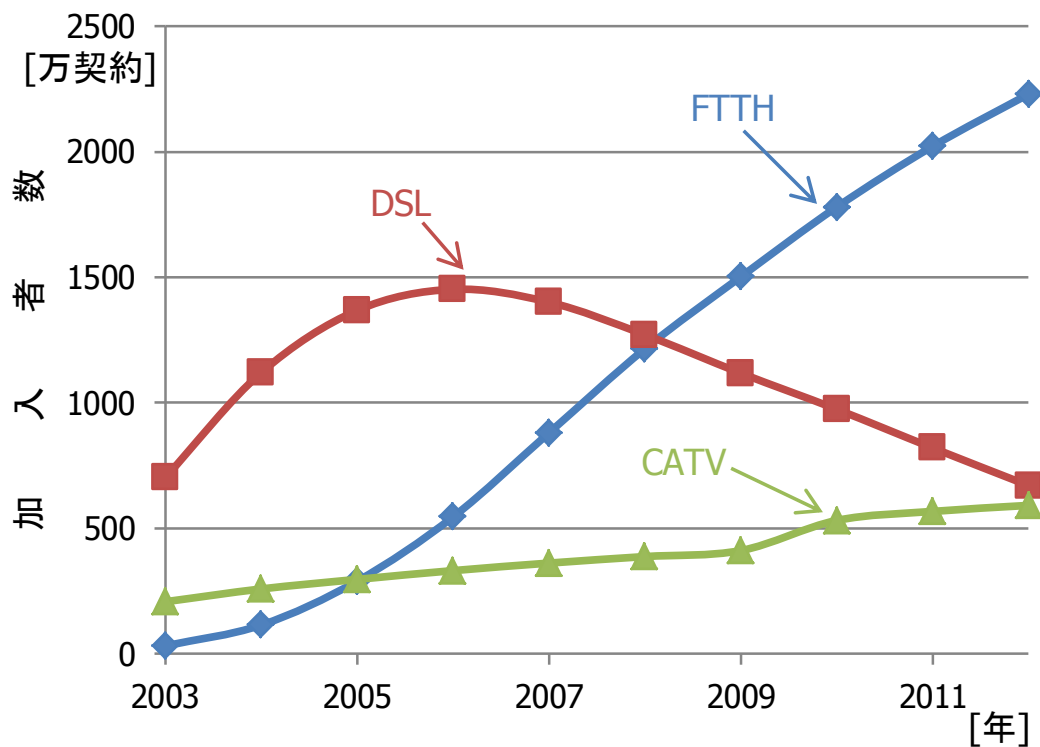
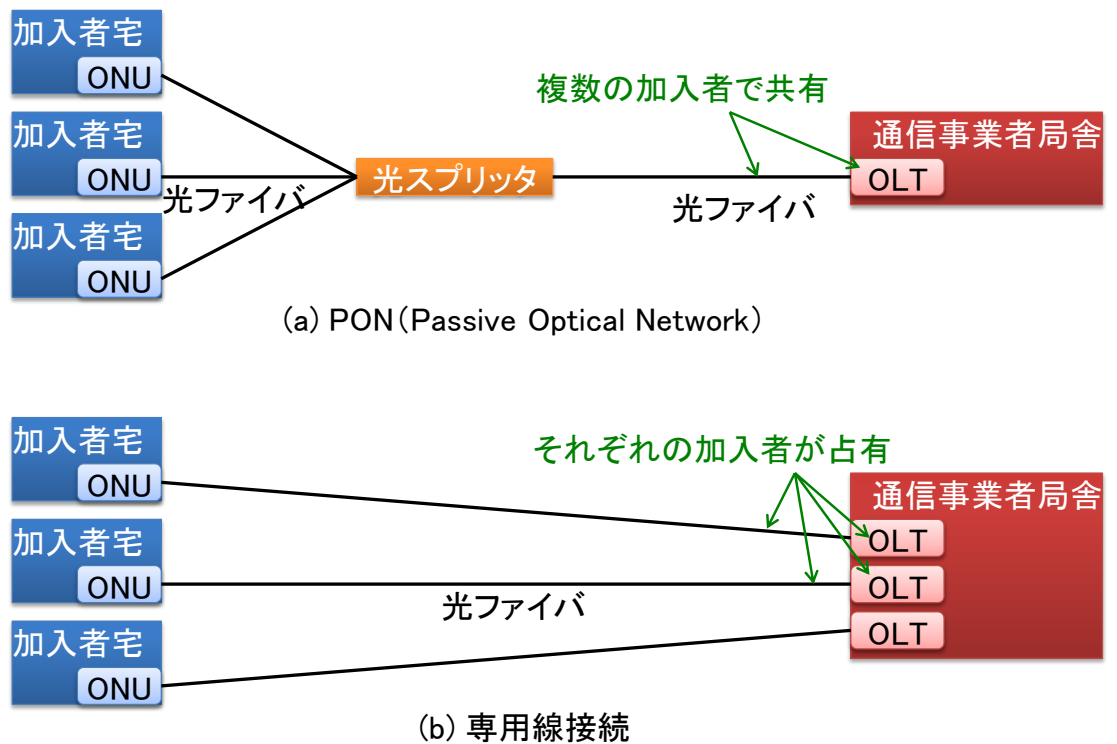


図 1.10 我が国の主な有線アクセスネットワークの加入者数の推移([22]を基に作成)

FTTH の多くは PON (Passive Optical Network) が用いられている。PON は、1 本の光ファイバをユーザと通信事業者の局舎間で占有する光ファイバ通信 (専用線通信) (図 1.11(b)) とは異なり、OLT (Optical Line Terminal: 光加入者線終端装置), 光スプリッタ (光カプラとも呼ばれる), ONU (Optical Network Unit: 光加入者線ネットワーク装置) とそれらの間を繋ぐ光ファイバからなる通信システムである。図 1.11(a)に PON の構成を示す。OLT は、通信事業者の局舎に設置されている通信装置である。光スプリッタは、受動的な動作により、光強度を等分配・結合する光デバイスである。ONU は、加入者の宅内もしくは構内に設置されている。光スプリッタに

より OLT からの信号は複数の ONU に分岐される。複数の ONU からの OLT への信号は結合される。

PON は専用線接続と比較した場合、通信事業者局舎内の通信装置及び局者から光スプリッタに至るまでの光ファイバを複数の加入者で共有できることから、設備費用が安価であり、通信設備の価格の増大が加入者の通信料金の増大につながりやすいアクセスネットワークに有効なネットワークシステムである。



OLT (Optical Line Terminal: 光加入者線終端装置)
 ONU (Optical Network Unit: 光加入者線ネットワーク装置)

図 1.11 PON と専用線接続のネットワークポロジの比較

1.2.1.2 無線アクセスネットワーク

主な無線アクセスネットワークの加入者数を図 1.12 に示す。無線アクセスネットワークにおいてはかねてより携帯電話・PHS の加入者数が多く、我が国の契約数は 1 億台を超えている。携帯電話・PHS からの無線アクセスは通信事業者が提供する携帯電話・PHS 網により行う。

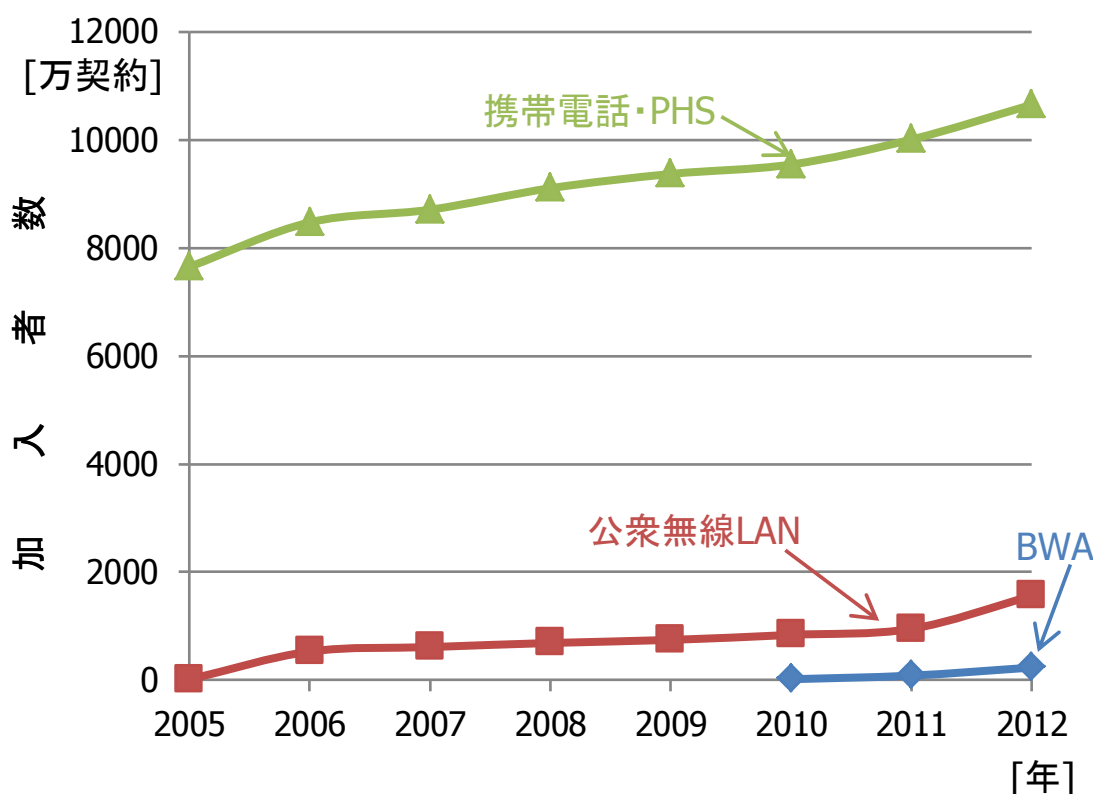


図 1.12 我が国の主な無線アクセスネットワークの加入者数の推移([22]を基に作成)

コンピュータから無線接続を行う場合は、無線 LAN を用いるのが一般的であるが、これは家庭・オフィス内の LAN に無線接続を行うものであり、接続範囲が限定される。コンピュータからの広域無線アクセスネットワークとして、携帯電話によるデータ通信や、近年では Mobile WiMAX をはじめとする BWA (Broadband Wireless Access: 広帯域無線アクセス) への注目も高まってきている。

公衆無線 LAN はアクセスポイント (AP : Access Point) と呼ばれる通信事業者・企業・個人等により設置された無線ルータに無線アクセスすることにより実現される広域な無線アクセスネットワークである。無線 LAN 接続機能を持つ携帯電話機、コンピュータそれぞれがアクセス可能であり、近年急激な加入者の増加を見せている。公衆無線 LAN は携帯電話加入者においては、携帯電話網を用いるより大きな通信速度でのアクセスが可能であり、通信事業者におい

ては携帯電話網を流れる通信を有線アクセスネットワークへとオフロードが可能となり、双方にメリットが存在する。コンピュータからの接続に際しては、携帯電話や BWA の通信装置・加入契約が不要で、比較的安価である公衆無線 LAN への加入契約のみで広域な無線アクセスが可能となる。一方、公衆無線 LAN の AP 数は人口密集地域に限定されている。また、AP は有線アクセスとの接続を前提としているため (図 1.13 (a)), 広域の有線アクセスネットワークを持たない (通信事業者以外の) 企業, 自治体, 大学等での広域公衆無線 LAN の構築は難しい。

広域な有線アクセスネットワークを前提とせず, 広域な無線ネットワークを実現する技術として, 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network) への期待が高まっている。図 1.13 (b)に示すとおり, WMN は複数の AP から構成されるが, 有線アクセスネットワークとの接続ポイントは1台から構成可能で, 有線アクセスネットワークと接続していない AP とは無線接続を行うことにより広域無線アクセスネットワークを構成する。

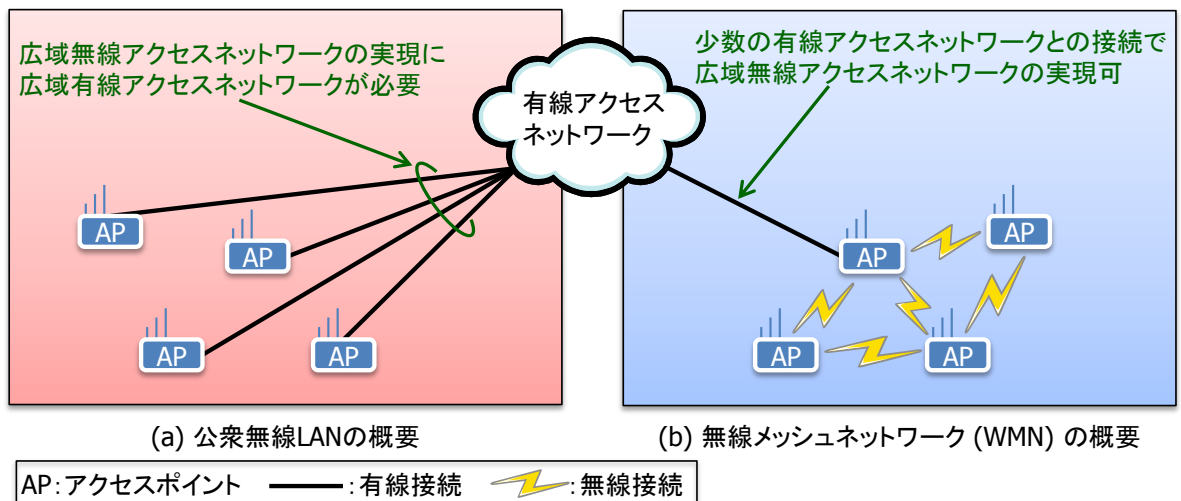


図 1.13 公衆無線 LAN と WMN の比較

WMN と同様のネットワークとしてモバイルアドホックネットワークがある。WMN は複数の AP が無線接続され, 経路制御, 中継は AP のみが行う (図 1.14 (a)). よって, 通信端末は AP との接続のみをおこなえばよい。モバイルアドホックネットワークは, 多くの AP が存在せず, AP に接続された複数の通信端末が順次, 経路制御, 中継を行うことにより広域無線アクセスを実現する (図 1.14 (b)). また, AP は固定配置されるのに対し, 通信端末は移動を考慮する必要がある。モバイルアドホックネットワークは多くの AP を必要としない一方で, 通信端末の負荷, 他人の通信端末を中継のために使用することによりよって起こりえるセキュリティや社会的認知等の問題を考慮すると, 早期普及は難しいとされる [23]. これらの背景から, WMN に注目する。

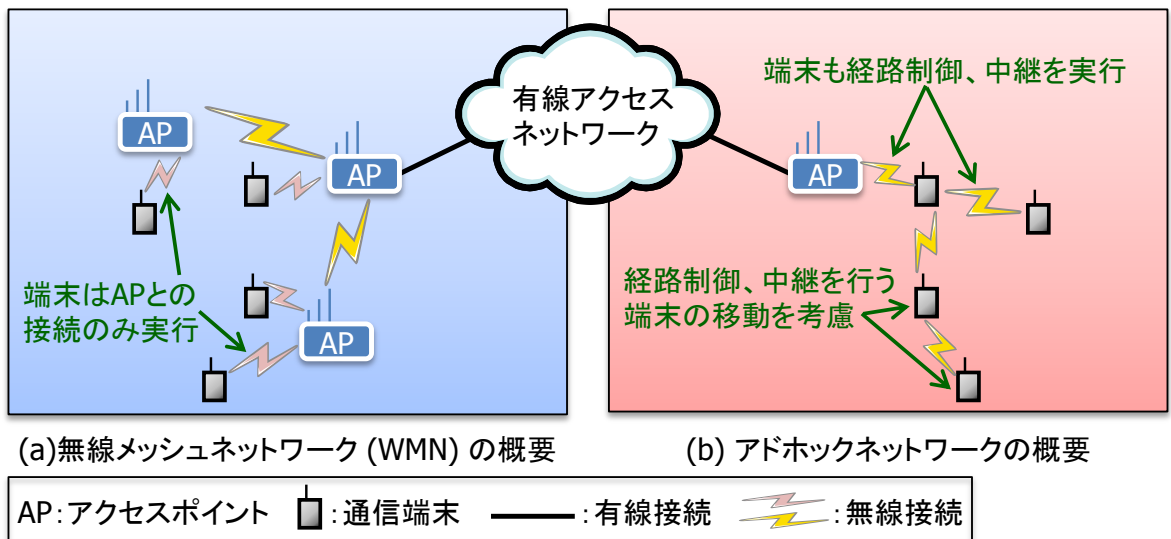


図 1.14 WMN とアドホックネットワークの比較

WMN は固定配置された AP が相互に無線接続をすることで実現される広域な無線アクセスネットワークである. WMN を構成するすべてのノードが通信端末との接続を前提としていないことから, 本論文では図 1.15 に示すとおり, WMNを構成するノードをMP (Mesh Point), 通信端末を STA (STation) とする. STA と接続可能な (AP の機能を持つ) MP を MAP (Mesh Access Point) とし, MP の中で外部ネットワークと接続可能なゲートウェイ機能を持つものを MPP (mesh point collocated with a mesh portal) とする. 本論文では以降, MP としたとき, MAP と MPP を含むものとする.

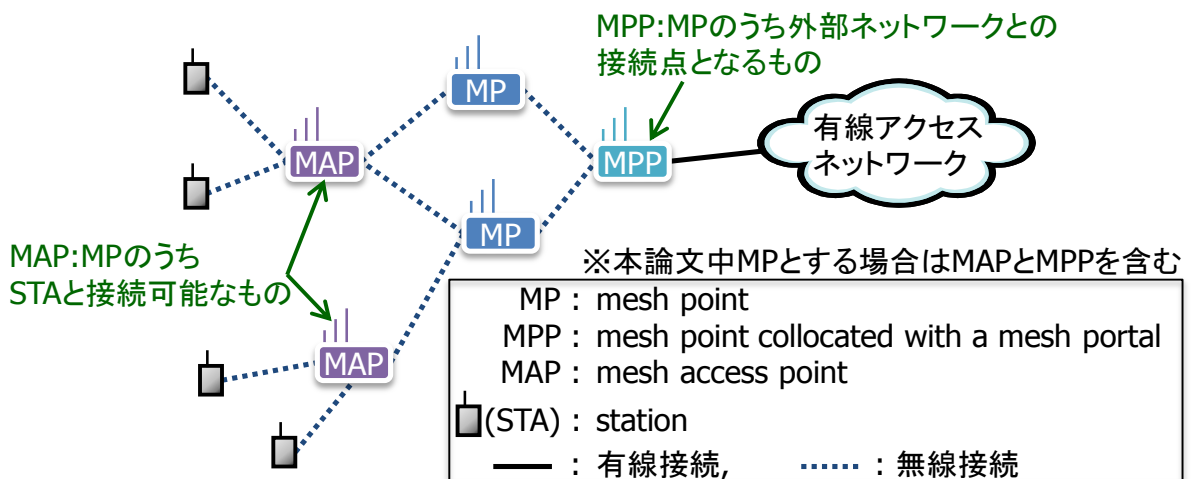


図 1.15 WMN の概要

WMN は広域な有線アクセスネットワークを必要としないことから一時的な広域アクセスの構築に有効である。図 1.16 は WMN の利用例を示す。例えば図中左のホテルと公道を渡り右の会議室を利用して行われる学会を開催する際に、広域な無線アクセスを提供する場合を考える。ここで予めホテルと会議室が有線接続されていれば公衆無線 LAN による構築が可能であるが、有線接続されていない場合は公道上を有線で結ぶか、複数の有線アクセスとの契約が必要である。我が国では公道上を有線で接続するには様々な制約があり、主に通信事業者に限られる。その為、複数の有線アクセスとの契約による公衆無線 LAN の構築が必要となるが、複数の有線アクセスとの契約には大きな費用を必要とする。一方 WMN は無線（例えば 2.4GHz 帯）により公道間を接続可能であり、これらの問題が発生しない。また、災害時の一時的な広域アクセスの構築においても有線ネットワークとの接続点が 1 ヶ所で構築可能であるため有効である。

WMN は地域網の構築にも有効である。例えば市役所が観光スポット情報の発信を目的として市内に広域アクセス網を要する際に多くの有線接続点を要すると大きな費用を要する。WMN を用いることにより、安価で広域な地域網が構築可能となる。

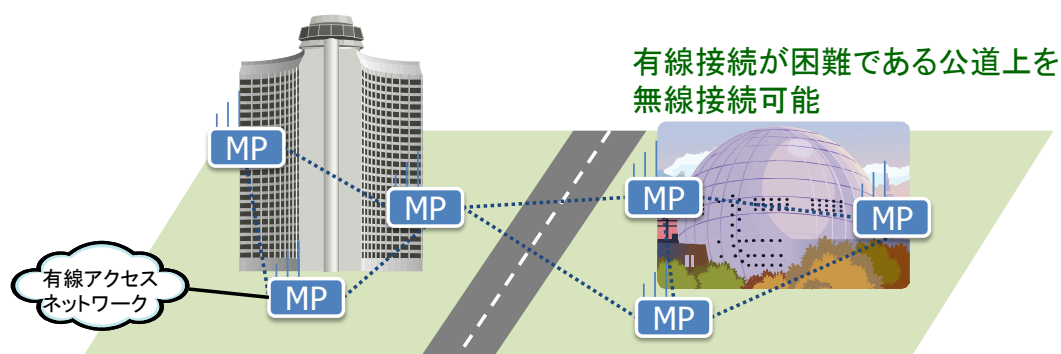


図 1.16 WMN の利用例

1.3 研究目的

これらの背景から本研究ではアクセスネットワークの消費電力に注目する。

有線アクセスネットワークにおいては PON に注目し、本研究による消費電力削減によって得られる原子力発電所の削減効果を示すことを目的とする。

無線アクセスネットワークにおいては WMN に注目し、ネットワークポロジを切替えることでその時々消費電力最適となる手法はあるが、切替時のネットワークが切断される可能性があるため、その切断を最小限としつつ消費電力の増加を防ぐ方式を確立することを目的とする。

1.4 論文の構成

以下、本論文はアクセスネットワークの省電力化に関して示す。2章では有線アクセスネットワーク、とりわけ将来の高速化された光アクセスネットワークにおいて将来想定される高速化に際し、各加入者間に公平性のある省電力化方式を示す。3章では無線アクセスネットワーク、とりわけ無線メッシュネットワークにおいて、空間多重技術の1要素である指向性アンテナを用いるネットワークでリンクの接続・切断を行うことによる省電力化の問題点とその解決手法を示す。4章では、アクセスネットワークの省電力化のまとめを示す。

第2章

有線アクセスネットワークの省電力化

PON の低消費電力化を実現するため、消費電力の大きい高速装置と小さい低速装置を持ち、通信容量に応じてリンク速度を切替可能な機能であるリンク速度適応切替方式を PON に適用したシステムが提案されている。本章では、データ量に応じて PON の全ての送受信機のリンク速度を切替るのではなく、回線利用率が定める範囲内におさまるよう独立にリンク速度を切り替えていき、より多くの低速装置を用いて通信可能なリンク速度独立適応切替方式を提案する。シミュレーションの結果、PON 全体の通信需要が 1Gbps を超える場合においても省電力効果を得ることを示す。更に、独立に切り替えることによる加入者間の消費電力の公平性を検証する。

2.1 既存システム

PON の規格は主に IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers) と ITU-T (ITU-Telecommunication standardization sector) により標準化が行われている。標準化は主に伝送容量 (OLT が送信・受信する伝送容量) の違いにより行われる。主な規格を表 2.1 に示す。IEEE による 1Gbps 級の規格として GE-PON (Gigabit Ethernet-PON) [24]、10Gbps 級の規格として 10G-EPON [25]が、ITU による 1Gbps 級の規格として GPON (Gigabit-capable PON) [26]、10Gbps 級の規格として XG-PON (X は 10 を示す) [27]が存在する。IEEE と ITU-T の規格に相互互換性は無いが、例えば通信に用いる波長を比較すると、1Gbps 級と 10Gbps 級それぞれで同様の帯域を用いるなど、共通する部分も存在する。IEEE と ITU-T の規格の大きな違いとして、通信に用いるフレームが挙げられる。IEEE による規格はその名称に Ethernet が含まれることから分かるように、Ethernet フレームを用いて通信を行う。このため、パソコンなどで広く用いられる Ethernet サービスとの親和性が高い。ITU-T の規格は Ethernet フレームや POTS (Plain Old Telephone Service : 基本電話サービス), ATM (Asynchronous Transfer Mode : 非同期伝送モード) セルなどを最終的に固定長の GTC (G-PON Transmission Convergence) フレームに含めて伝送を行う。そのため、通信事業者網で用いられるサービスとの親和性が高い。

表 2.1 GE-PON と G-PON の比較

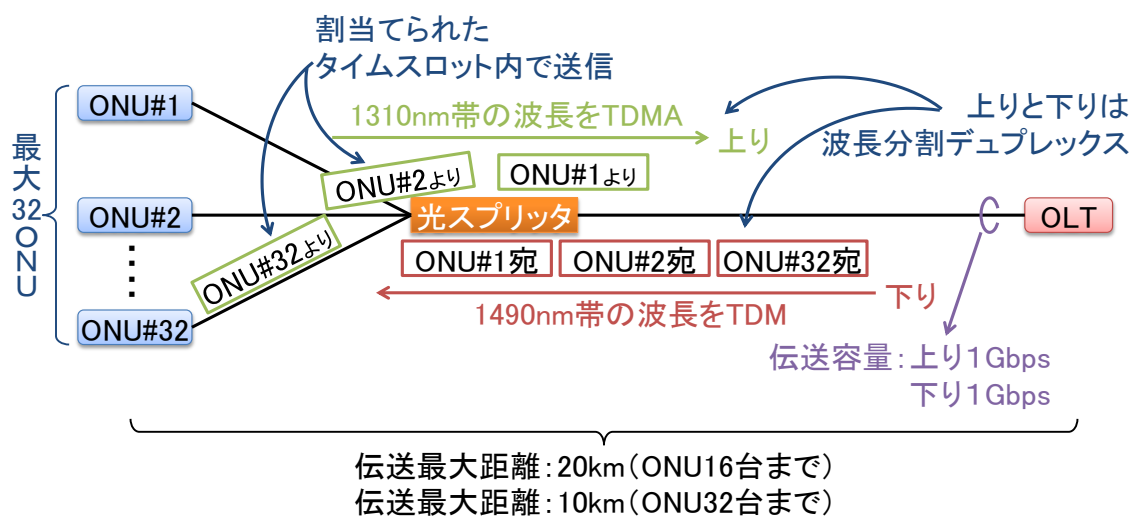
Standardization body		ITU-T SG15 / FSAN		IEEE802.3	
System		GPON	XG-PON	GE-PON	10G-EPON (802.3av)
		(G.984.1~.7)	(G.987, .1~.3)	(802.3ah)	
Standard finish time		2004.6	2010.1 (G.987)	2004.9	2009.9
			2010.10 (.1~.3)		
Transmission speed	Down	1.24416, 2.48832Gbps	2.48832Gbps	1.25Gbps	1.25, 10.3125Gbps
	Up	155.52M, 622.08M, 1.22416G, 2.48832G bps	9.95328Gbps	1.25Gbps	1.25, 10.3125Gbps
Distance		20km (60km:logical)	20, 40, 60km	10, 20km	10, 20km
Wavelength used (nm)	Down	1480-1500	1575-1580	1480-1500	1480-1500(1Gbps) 1575-1580(10Gbps)
	up	1290-1330	1260-1280	1260-1360	1260-1360(1Gbps) 1260-1280(10Gbps)
ONUs accommodated		Max 254	less than 32-64,	less than 16	less than 16 or 32
			64 over(extra split)		
Frame		GEM, GTC	XGEM, XGTC	Ethernet	Ethernet
Upstream DBA		G.984.3	out of scope of the standardization		
Forward error correction (FEC)		Option (RS(255,239))	Option	Option (RS(255,239))	Indispensable (RS(255,223))
			(Up: RS(248,232) Down:RS(248,216))		

2.1.1 PON の通信方式

GE-PON では図 2.1 に示すとおり、1台の OLT に対し、最大 32 の ONU と通信を行い、OLT-ONU 間の伝送最大距離は 20km である (ONU が 16 台までのとき、それを超えると 10km)。

OLT-ONU 間の通信は上り信号 (ONU→OLT) と、下り信号 (OLT→ONU) との多重化を WDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重) 技術により実現している。

OLT は複数の ONU と通信を行うので多重化を行う。上り信号の多重化は TDMA (Time Division Multiple Access : 時分割多元接続) 技術により実現される。上り信号はそれぞれの ONU から出力されるが、光スプリッタにより結合され OLT が受信する。下り信号の多重化は TDM (Time Division Multiplexing : 時分割多重) 技術により実現される。OLT はそれぞれの ONU へとデータを送信するが、OLT が出力した下り信号は同一 PON 系内の全ての ONU が受信する。



OLT (Optical Line Terminal: 光加入者線終端装置)
 ONU (Optical Network Unit: 光加入者線ネットワーク装置)

図 2.1 PON の多重接続法(GE-PON の例)

TDMA では当該 ONU 送出の伝送信号が他の ONU の信号と経路上で衝突しないよう制御が必要である。図 2.2 は PON における TDMA 制御の例である。それぞれの ONU_n の m 番目のタイムスロット (送信可能な時間の範囲) を $TimeSlot_n^m$ と定める。 $TimeSlot_n^m$ は送信開始時

刻と送信終了時刻（所要のデータ量を伝送するのに必要な時間から算出される）から成る。それぞれの ONU_n と OLT との経路長が異なる場合でも伝送信号が衝突することのないよう ONU 毎の $TimeSlot_n^m$ を順次定めることにより、多重化が実現される。この際、各タイムスロットの間に伝送信号の衝突を防ぐためのガードタイムと呼ばれる空白時間を挿入する。また、 $TimeSlot_n^m$ の送信開始時刻と $TimeSlot_{n+1}^m$ の送信開始時刻との差をサイクルタイムと呼び、 $CycleTime_n^m$ で表す。

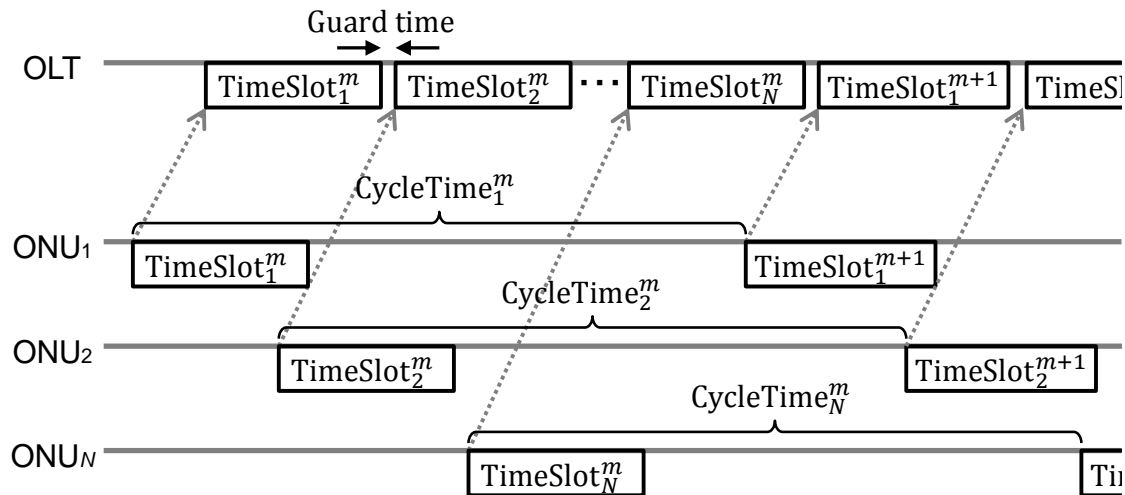


図 2.2 PON における TDMA 制御の例

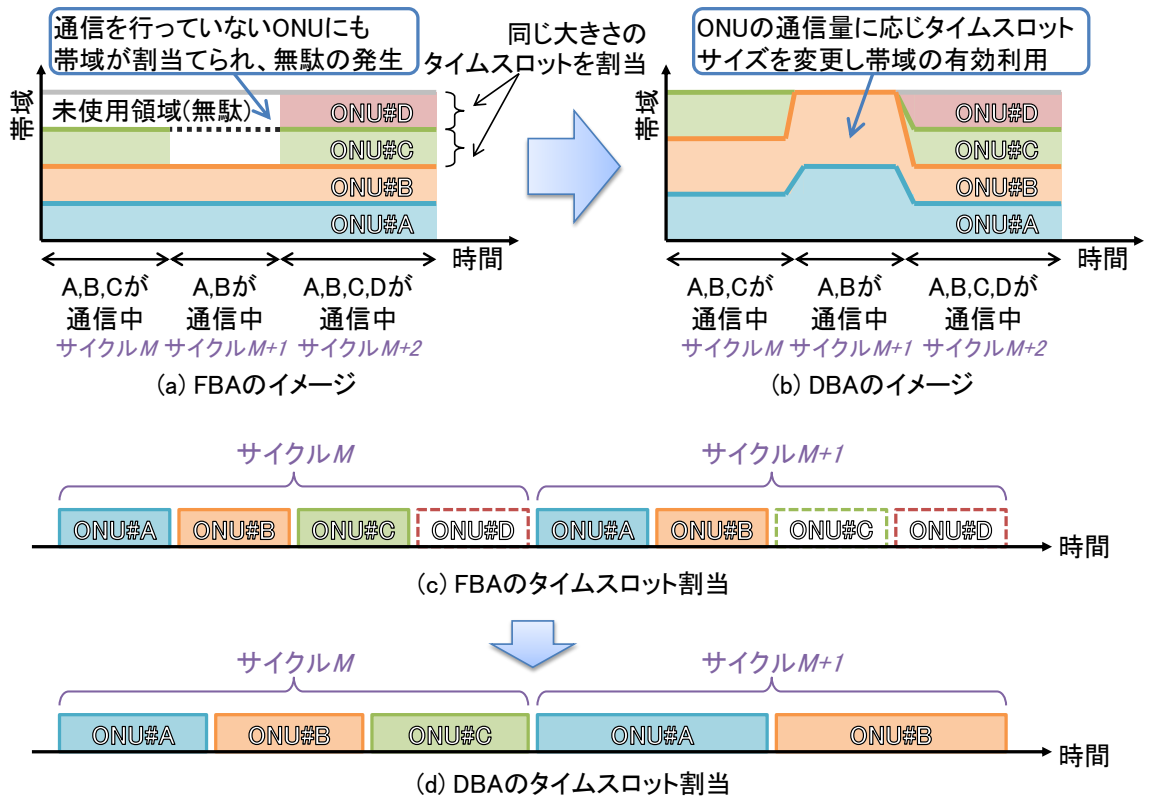
TDMA による最も簡単なタイムスロット割当方式は、それぞれの ONU に均等のタイムスロットを与える方法であり、FBA (Fixed Bandwidth Allocation : 固定帯域割当) と呼ばれる。この方法では、通信を行っていない ONU にも同一の帯域割当が行われるため、無駄が生じる (図 2.3(a)(c))。

この無駄を減らすため、ONU の通信状況に応じてタイムスロットの大きさを動的に変化させる DBA (Dynamic Bandwidth Allocation : 動的帯域割当) が用いられる。DBA は各 ONU の通信要求に応じてタイムスロットを割り当てることにより、FBA に比べて効率のよい通信が可能となる (図 2.3(b)(d))。

図 2.3 (b)(d))。

GE-PON, 10G-EPON では信号制御をする際に MPCP (Multi Point Control Protocol) プロトコルを用いる。MPCP の主な機能としては、表 2.2 に示す3つが挙げられる [28]。

RTT はそれぞれの ONU から OLT への転送時間を基に算出され、TDMA を行う際に重要なパラメータとなる。LLID は ONU が PON に接続した際に OLT により付与され、通信の宛先・送信元を識別するために用いられる。LLID はイーサネットフレームのプリアンブルに埋め込まれるので、付与することで新たなオーバーヘッドは発生しない。機能②は PON の性能と深く結びつくことから、詳細を 2.1.2 項に示す。



FBA(Fixed Bandwidth Allocation: 固定帯域割当)
 DBA(Dynamic Bandwidth Allocation: 動的帯域割当)

図 2.3 FBA と DBA のタイムスロット割当

表 2.2 MPCP の主な機能

①	PON に接続された複数の ONU を OLT が認識し、各 ONU と OLT の間で通信するために必要な RTT (Round Trip Time: OLT から ONU までの往復遅延時間) の測定、それぞれの ONU を識別するために必要な LLID (Logical Link ID) の付与などを行う機能
②	各 ONU にタイムスロットを割り当て、各 ONU からの上り信号を時間軸上に多重する多重制御機能
③	ONU と OLT 間の時刻同期機能

2.1.2 MPCP によるタイムスロット割当手順

TDMA によるタイムスロットの割当を実現するため、MPCP を用いて、それぞれの ONU から OLT への送出信号の発信タイミングを OLT が各 ONU へ通知することにより、他の ONU の送出信号と経路上で衝突しないよう制御が行われる。

MPCP におけるタイムスロット割当の主要な手続きシーケンスを図 2.4 に示す。以下の 5 ステップからなる。

ONU_n は、接続されている端末より送信データが到着すると、ONU_n 内のバッファにデータを保持し待機する。

ONU_n は OLT から受信した Grant_n^{m-2} メッセージに記述される TimeSlot_n^{m-1} の範囲内にバッファに保持しているデータ量 V_n (Byte) を Report_n^{m-1} メッセージに含め OLT に送信する。

OLT は ONU_n から受信した Report_n^{m-1} メッセージに記述される V_n を基にして、TimeSlot_n^m を決定する。

OLT は (3) で決定した TimeSlot_n^m を Grant_n^{m-1} メッセージに含め ONU_n に通知する。

ONU_n は OLT から受信した Grant_n^{m-1} メッセージに記述される TimeSlot_n^m の範囲内にバッファに保持しているデータを OLT に送信する。

ここで (1), (2), (4), (5) の送信手順は [24], [25] にて標準化が行われている。(3) により DBA が実現されるが、標準化の対象外である。(3) の計算手順は多くの研究がなされ、例えば、Limited 方式 [7] は ONU_n からの通信要求量 V_n と、予め与えられている割当可能量 W_{MAX} (Byte) のうち小さい値 r_n を接続時間として割当て方式である。

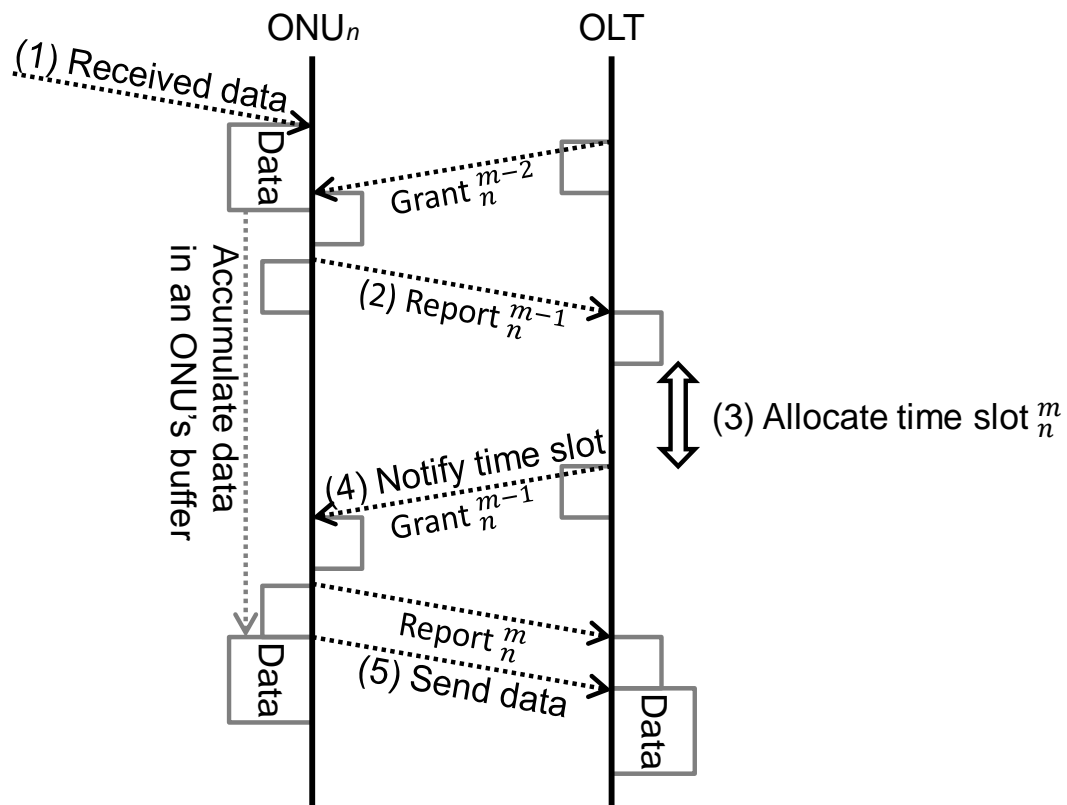


図 2.4 MPCP シーケンス

2.2 関連研究と問題点

PONの省電力化手法として様々な研究が行われている。[29]はOLT上で動作するラインカード数を削減することによる省電力方式の提案である。OLTに複数のラインカードが存在し、1つのラインカードと複数のONUが接続されるシステムを想定する。ここで、それぞれのラインカードは想定しうる最大数のONU(通常16もしくは32)との接続が可能であるが、ラインカードと接続されるONU数は動的に変化する。そこで、ONU数に応じてOLT内でアクティブなラインカード数を変更することによる省電力化を提案している。[30]はPONの長距離化による省電力方式の提案である。複数のラインカードを持ち最大4069のONUと通信可能なOLTを想定する。4ヶ所に配置されている通信事業者局舎すべてにOLTを設置するのではなく、人口密集地域の通信事業者局舎のみにOLTを設置し、他の通信事業者局舎にはスプリッタを設置し、OLTを有する通信事業者局舎と光ファイバ接続をされるネットワーク形態を提案し、OLTの稼働数が削減されることによる低消費電力化を示している。

OLT, ONUをスリープモードとしてデバイスを一定時間停止させることで省電力化させる研究がある[31], [32], [33]。GPONにおいてはスリープモードを適用した規格[34]が定められている。IEEEにおけるPONにおいては標準化が行われていないが、EEE(Energy-Efficient

Ethernet) としてスリープモードを Ethernet に適用した規格が, IEEE 802.3az [35]として標準化された。スリープモードは帯域利用率が小さい場合に大きな省電力効果を示す。

2.2.1 リンク速度適応切替 (ALR) 方式

リンク速度を切り替える機能である ALR (Adaptive Link Rate) を PON に適用する提案がされている [31]。ALR を適用すると, スリープモードを適用した場合と比較して帯域利用率が大きい場合の省電力効果が得られる。

近い将来の 1Gbps PON から 10Gbps PON への移行に際し, ONU および OLT の 1Gbps 装置をそれぞれ 10Gbps 装置へと入れ替えるのではなく, 1Gbps, 10Gbps それぞれの通信が可能な通信装置へとそれぞれ入れ替えることを想定し, PON における 1Gbps リンクと 10Gbps リンクとの ALR を実現させる。図 2.5 は想定する通信装置を用いた PON のシステム構成図である。送信装置 (Transmitter, 図中 Tx と示す), 受信装置 (Receiver, 図中 Rx と示す) はそれぞれ 1Gbps, 10Gbps の通信が可能である装置より構成される 1Gbps 上り, 10Gbps 上り, 1Gbps 下り, 10Gbps 下り通信に用いる光信号の波長はそれぞれ異なる。すなわち 4 種類の異なる波長を用いる。それぞれの信号は WDM カプラにより分配, 結合される。制御装置は既存の ONU, OLT のデータ処理に加え, 送信装置, 受信装置それぞれの 1Gbps 装置, 10Gbps 装置を切り替える機能を持つ。ONU から OLT への上り通信において 1Gbps の通信を行うとき, ONU は制御装置により 1Gbps Tx の電源を入れ, 10Gbps Tx の電源を切る。OLT は制御装置により 1Gbps Rx の電源を入れ, 10Gbps Rx の電源を切る。ONU の 1G Tx から送信された光信号は ONU 中の WDM カプラ, 外部に設置されるスプリッタを通り, OLT の WDM カプラへと向かう。OLT の WDM カプラは波長により経路を分け, この場合は OLT の 1G Rx と向かう。

図 2.5 の構成を実現するためには, 1Gbps 上り, 10Gbps 上り, 1Gbps 下り, 10Gbps 下りに用いる波長が異なることが必要である。GPON と XG-PON を例にすると表 2.1 に示したとおり, 1Gbps 上り, 10Gbps 上り, 1Gbps 下り, 10Gbps 下りに利用される波長が異なることから, 図 2.5 の構成は既存の送信装置, 受信装置により実現可能である。また WDM カプラは光学的性質により受動的に動作を行うので電力を必要とせず, また光信号を分配するのではなく, 経路を選択することから光電力の減少も発生しない。

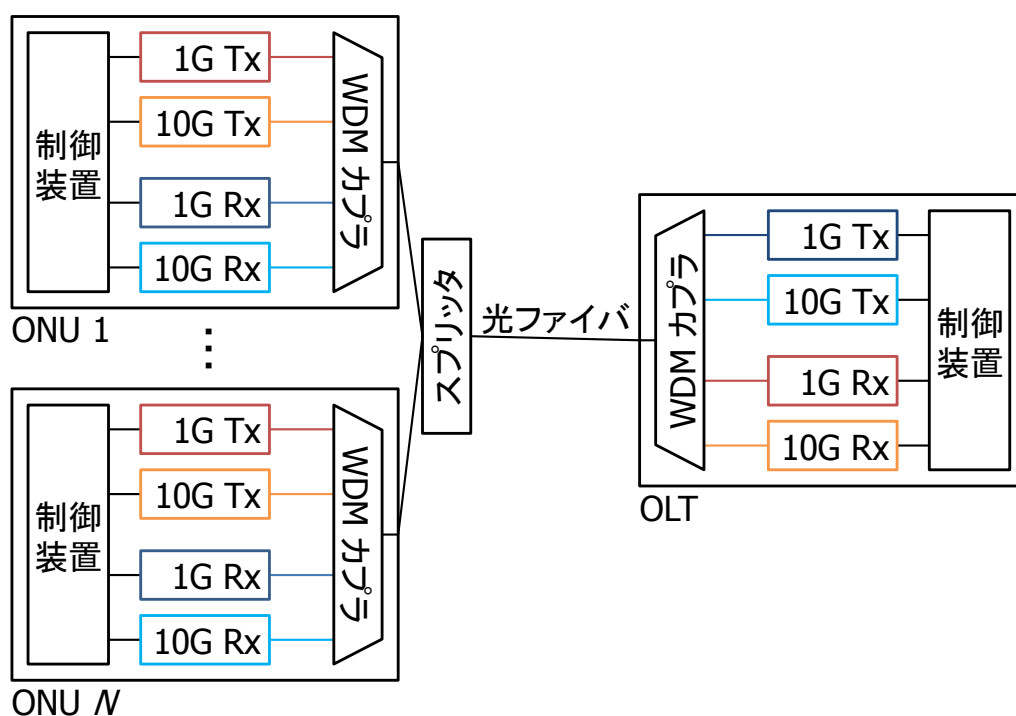


図 2.5 ALRを適用したPONのシステムの構成図

10Gbps 装置は 1Gbps 装置と比べ通信速度が大きくなる一方で、消費電力も大きくなる。ALRの適用により、通信要求の小さい場合に消費電力の小さい1Gbps装置を用い、通信要求が大きい場合は消費電力が大きくなるが通信要求を満たす10Gbps装置を用いると、10Gbps PONへ移行した際の消費電力の増加を抑えられる。

[17]では既存の1Gbps装置を用いた際のONUの消費電力はおおむね6-7W、既存の10Gbps装置を用いた際のONUの消費電力はおおむね13-15Wとしており、消費電力に約2倍の差があることが分かる。[31]では図2.5と同様のシステムにおいて1Gbps通信の消費電力を5W、10Gbps通信の消費電力を10Wと2倍の値で評価を行っている。[13]では2012年度末までに達成するエコロジーガイドラインの基準として既存の1Gbps装置を用いた際のONUの消費電力（複合機能を除いた値）を4.45Wと示している。1Gbps ONUの消費電力は[13]が最も小さい値を示しているが複合機能を含まず、[17]は例えばトリプルプレイ対応時の消費電力を示しており、実際の使用例に即している。これらのことから本論文ではこれらの中間の値をとり[31]と同様に1Gbps通信の消費電力を5W、10Gbps通信の消費電力を10Wとして評価を行う。

[31]ではPONの下り通信において、全てのONUの通信容量の合計をリンク速度切替のトリガとしてしきい値 B_{th} をまたぐときに、1Gbpsと10Gbpsのリンク速度切り替える際の省電力効果

示している。他方、PONの上り通信においてのALRの検討はなされていない。しかし、PONにおける上り通信と下り通信ではその多重化方式が異なる、より具体的には、上りではデータ転送を要求後、OLTにおいて決定された割当量が通知するまでにより多くのデータが保持されることから、上り通信においてはDBAと一体的なALRの適用が必要である。また、上り通信においては最大でONU数の送信器の送出パワーを抑制できるため省エネルギー効果が高い。

2.2.2 一斉リンク速度適応切替方式

[31]ではPONの下り通信において、リンク速度切替のトリガとして全てのONUへの通信量の合計がしきい値 B_{th} をまたぐときに、全てのONUリンク速度を変更する(図2.6(a))。これを上り通信に適用し、以降、一斉切替方式と呼ぶ。一斉切替方式では、 B_{th} を1Gbps以下の値にする必要がある。これはしきい値に1Gbpsを超える値を設定しても1Gbpsリンクでは1Gbpsを上回るデータを通信することができず、通信容量がしきい値を上回らないため、1Gbpsリンクから10Gbpsリンクへの切り替えられないからである。これにより、1Gbpsを若干上回るような通信量においても B_{th} が1Gbps以下であり、すべてのOLT、ONUをリンク速度10Gbpsで用いることとなるので、帯域利用率が小さくなる(図2.6(b))。

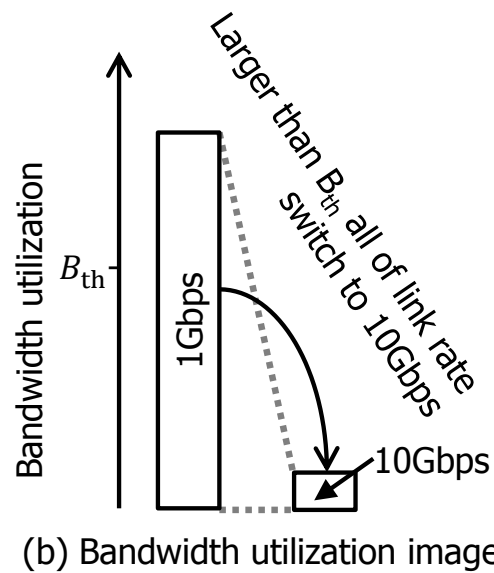
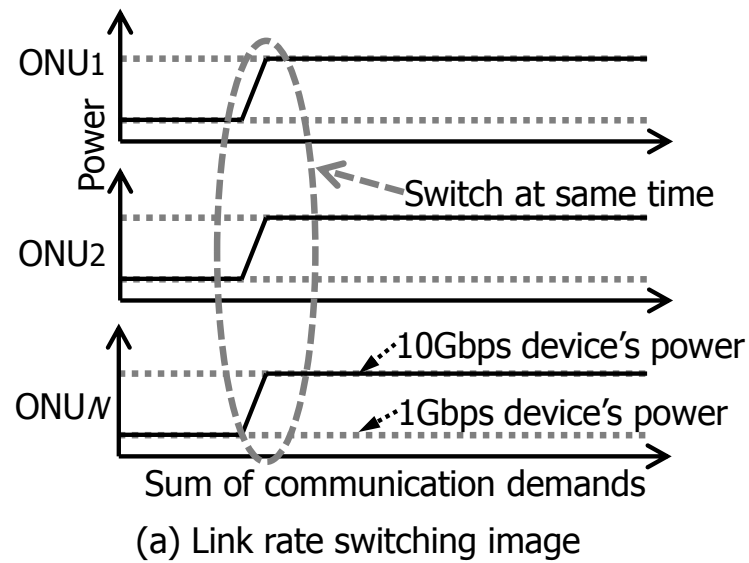


図 2.6 一斉切替方式のリンク速度切替イメージ

ONU は加入者宅内に設置され、電力は各加入者負担であることから、ONU 個別の性能に対する検討が必要である。例えば ONU 毎に発生させるデータ量が異なる場合、より少ない通信を行う ONU がより低消費電力であることが望ましい。しかし、ALR を PON に適用した研究において ONU 個別の性能に対する検討は行われていない。

2.3 提案方式

2.2 節で示した問題点を解決するため、ONU のリンク速度を個別に切替る独立リンク速度切替方式を提案する。以降、本節では ALR を PON に適用する手順と独立リンク速度切替方式の詳細を示す。

2.3.1 独立リンク速度適応切替方式

独立切替方式は各 ONU のリンク速度を個別に切替ることで (図 2.7(a)), 10Gbps 通信のみでは無駄となる通信帯域において消費電力の小さい 1Gbps での通信を行い (図 2.7(b)) 低消費電力化を図る。

図 2.8 に提案方式の平均リンク速度の例を示す。図 2.8 の横軸は当該サイクルタイムの内 10Gbps リンクを用いた時間の割合を示し、棒線の白塗り部分である。棒線の灰色部分は当該サイクルタイムの内 1Gbps リンクを用いた時間の割合を示し、100%から 10Gbps リンク利用割合を差し引いた値である。10Gbps リンク利用割合と 1Gbps リンク利用割合それぞれにリンク速度 (Gbps) を掛け合わせた値の和を平均リンク速度とし、図 2.8 中の縦軸に示す。例えば、10Gbps リンク利用割合が 40% であると、1Gbps リンク利用割合は 60% となり、平均リンク速度は 4.6Gbps と算出される。

一斉切替方式では、全ての ONU が 1Gbps リンクを用いるか 10Gbps 速度を用いるかの二者択一であるのに対し、独立切替方式は ONU 毎に切り替えることで、平均リンク速度は 1Gbps と 10Gbps のみではなく、これらの間の値を得る。このことにより、PON 全体の通信要求の和が 1Gbps と 10Gbps の間にある時に更なる低消費電力化が可能となる。

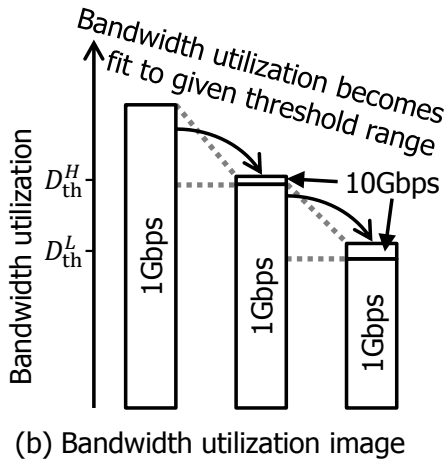
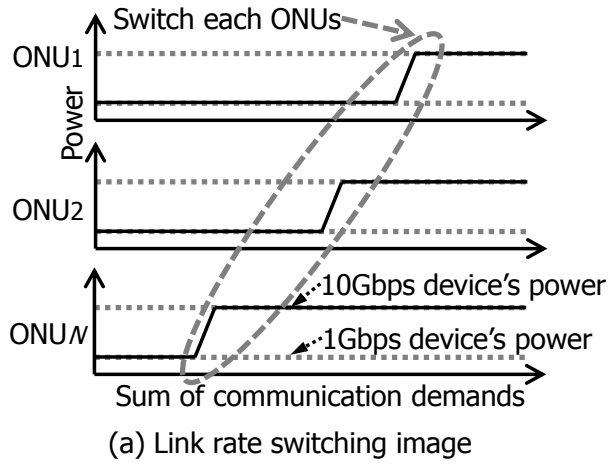


図 2.7 独立切替方式のリンク速度切替イメージ

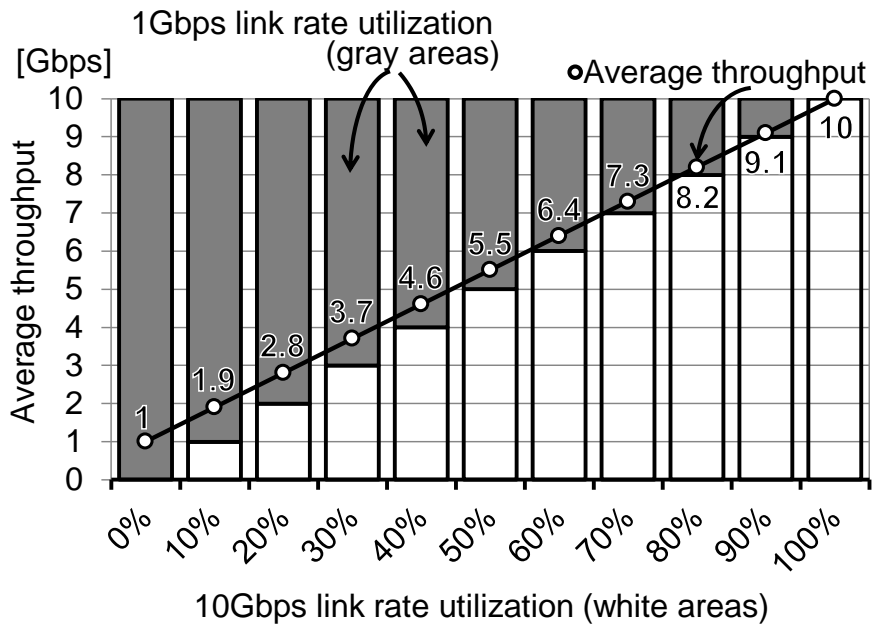


図 2.8 10Gbps リンク利用割合と平均スループットの関係

2.3.2 MPCP での ALR 制御

ALR を PON に適用し、リンク速度を変更する際に、ONU の送信速度と OLT の受信速度とを同期させる必要がある。この実現に MPCP メッセージを利用し、OLT が ONU からの通信要求を元にリンク速度を定め、ONU の送信速度と OLT の受信速度とを切り替える手法を提案する (

図 2.9)。詳細を以下に述べる。

ONU_n は、接続されている端末より送信データが到着すると、ONU_n 内のバッファにデータを保持し待機する。

ONU_n は OLT から受信した Grant_n^{m-2} メッセージに記述される TimeSlot_n^{m-1} の範囲内にバッファに保持しているデータ量 V_n (Byte) を Report_n^{m-1} メッセージに含め OLT に送信する。

OLT は ONU_n から受信した Report_n^{m-1} メッセージに記述される V_n を基にして、TimeSlot_n^m とリンク速度を決定する。

OLT は(3)で決定した TimeSlot_n^m とリンク速度を Grant_n^{m-1} メッセージに含め ONU_n に通知する。

ONU_n は OLT から受信した Grant_n^{m-1} メッセージに記述される TimeSlot_n^m の範囲内に、記述される送信リンク速度でバッファに保持しているデータを OLT に送信する。

これは図 2.4 のシーケンスに OLT によるリンク速度決定プロセスと、OLT が定めたリンク速度を Report メッセージに加えて ONU へ通知するプロセスを加えたものである。これらの手続きにより、PON 上り通信への ALR 適用が実現可能である。

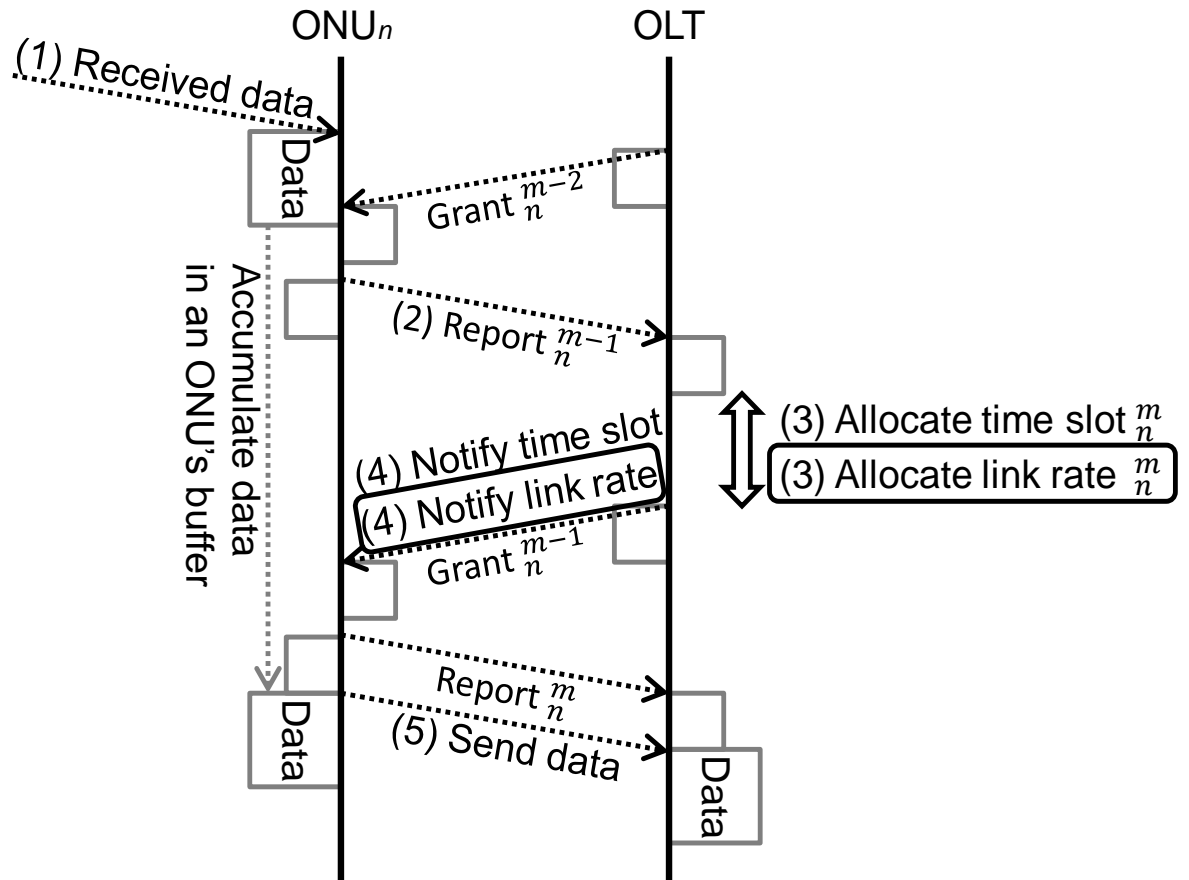


図 2.9 ALR 適用 MPCP シーケンス図

2.3.3 独立切替方式のアルゴリズム

独立切替方式では OLT はそれぞれの ONU_n から Report_n^{m-1} メッセージを受取ると(2.a)式で求める回線利用率 D_{Rate} が、定めるしきい値の上限 D_{th}^H と下限 D_{th}^L の範囲内に収まるよう TimeSlot_n^m のリンク速度を決定する。

$$D_{\text{Rate}} = \frac{(r_1^{m-1} \times c_1^m) + \dots + (r_N^{m-1} \times c_N^m)}{\text{CycleTime}_n^{m-1} - N \times \text{GT}} \quad (2.a)$$

ただし、

r_n^{m-1} : ONU_n が Report_n^{m-1} で要求する通信量 V_n^{m-1} (Byte) と、予め与えられている割当可能量 W_{MAX} (Byte) のうち小さい値 (ただし、OLT に Report_n^{m-1} が到着していない ONU_n は r_n^{m-2} を使用)

c_n^m : $\begin{cases} r_n^{m-1} \text{の通信に 1Gbps リンクを使用} \rightarrow 10 \\ r_n^{m-1} \text{の通信に 10Gbps リンクを使用} \rightarrow 1 \end{cases}$

- N : ONU の数
- CycleTime_n^{m-1} : TimeSlot_n^m に割当てするタイムスロットの割当開始時刻と TimeSlot_n^{m-1} に割当てたタイムスロットの開始時刻との差 (sec)
- GT: ガードタイム (sec)

とする。 D_{Rate} は次サイクルタイムの回線利用率であるため、計算過程において 1 を超えることがあるが、最終的に 1 以下の値になるようリンク速度を変化させる。よって、 D_{th}^H は 1 以下の値に指定する。また、通信速度の変化に伴うアプリケーションレイヤーの影響を抑えるために、 D_{th}^H と D_{th}^L は 0.05 の幅を持たせ、通信量の少ない増減でのそれぞれの ONU リンク速度の頻繁な切り替えを削減する。

図 2.10 に切り替えのフローチャートを示す。 D_{Rate} がしきい値の下限 D_{th}^L よりも小さく 10Gbps リンクを用いる ONU が存在する時、10Gbps リンクを用いる ONU の中から r_n^{m-1} が最小の ONU を 1Gbps リンクに切り替え、 D_{Rate} がしきい値の上限 D_{th}^H より大きく 1Gbps リンクを用いる ONU が存在する時、1Gbps リンクを用いる r_n^{m-1} が最大の ONU を 10Gbps リンクに切り替える。

ONU のリンク速度切り替えをランダムに行うのではなく直近に通知された ONU のバッファに保持されるデータ量から算出した r_n^{m-1} の値に基づいて行うことで、より多くの通信を行う ONU が少ない通信を行う ONU よりも優先して 10Gbps リンクを用いることとなる。

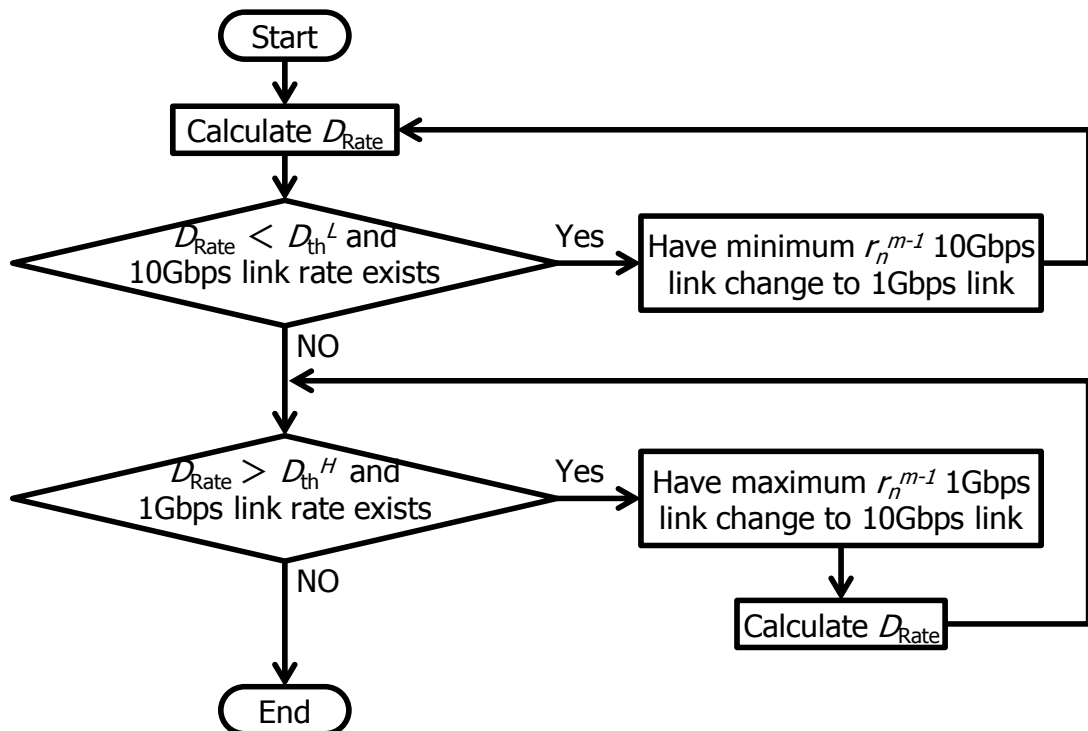


図 2.10 独立切替方式の切替アルゴリズム

2.4 検証結果

2.4.1 独立切替方式のしきい値の検証

ネットワークシミュレータ QualNet により独立切替方式のしきい値に幅を持たせない場合 ($D_{th}^L=D_{th}^H=0.75$ の場合と $D_{th}^L=D_{th}^H=0.95$ の場合) と幅を持たせる場合 ($D_{th}^L=0.7, D_{th}^H=0.75$ の場合と $D_{th}^L=0.9, D_{th}^H=0.95$ の場合) のシミュレーションを行った結果を図 2.11 に示す. 図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である. (a)の縦軸は 10Gbps リンク利用割合であり, 値が小さい程低消費電力となる. (b)の縦軸は OLT が受取ったフレームの平均遅延時間 (μsec) と 95%の信頼区間を示す. (c)の縦軸は PON 配下の ONU の 1sec 当たりのリンク速度切替回数の合計である. フレームはそれぞれの ONU からポアソン分布で発生し, ONU 毎に発生させるデータ量は同量 (すなわち AL/N) である. 2.1.2 項で示した DBA アルゴリズムは [36]の Limited 方式を用いる. 尚, リンクは 1Gbps と 10Gbps の2種類であるので 1Gbps リンクの利用割合は (2.b)式で算出される.

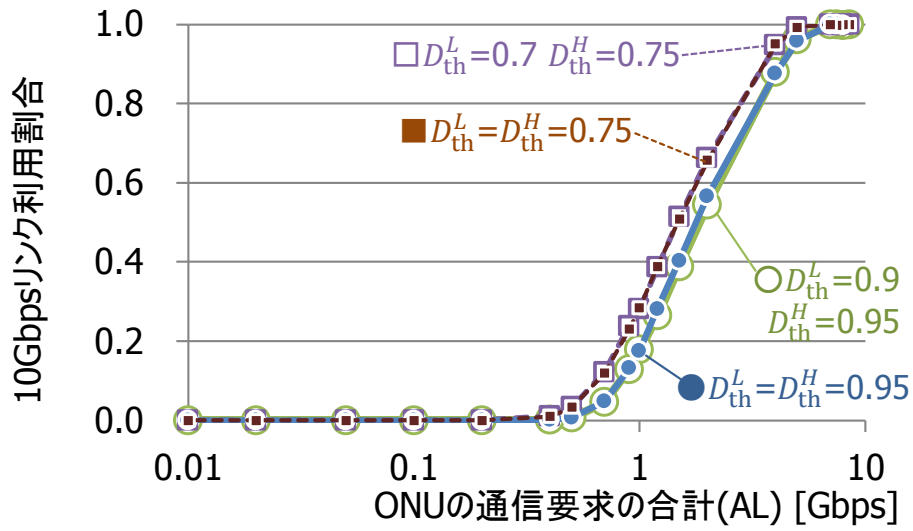
$$1\text{Gbps リンクの利用割合} = 1 - (10\text{Gbps リンク利用割合}) \quad (2.b)$$

シミュレーションで用いた主なパラメータを表 2.3 に示す. 尚, 一般的な省電力効果を示すため 1Gbps リンクと 10Gbps リンクとの切替時間を無視し, ガードタイムに含むものとした. また, CycleTime_m は可変長でありその最小値は ONU と OLT の RTT の最小値である 200 μsec , 最大値は当該サイクルタイムに含まれる全てのタイムスロットとガードタイムの合計となる.

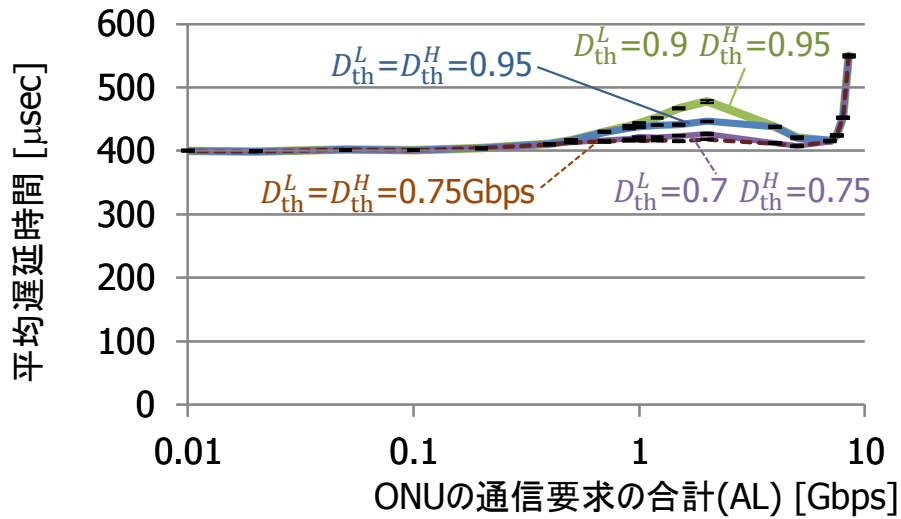
図 2.11(a)よりしきい値に幅を持たせた場合, 幅を持たせない場合, 双方において ONU の消費電力はほぼ同じであることが分かる. また, しきい値 (D_{th}^H) が大きい場合は小さい場合と比べて 10Gbps リンクの使用割合が大きい. これは, より小さな通信要求の発生でもしきい値を上回ることが多いため, 10Gbps リンクに切替わることによる.

表 2.3 シミュレーションで用いた主なパラメータ

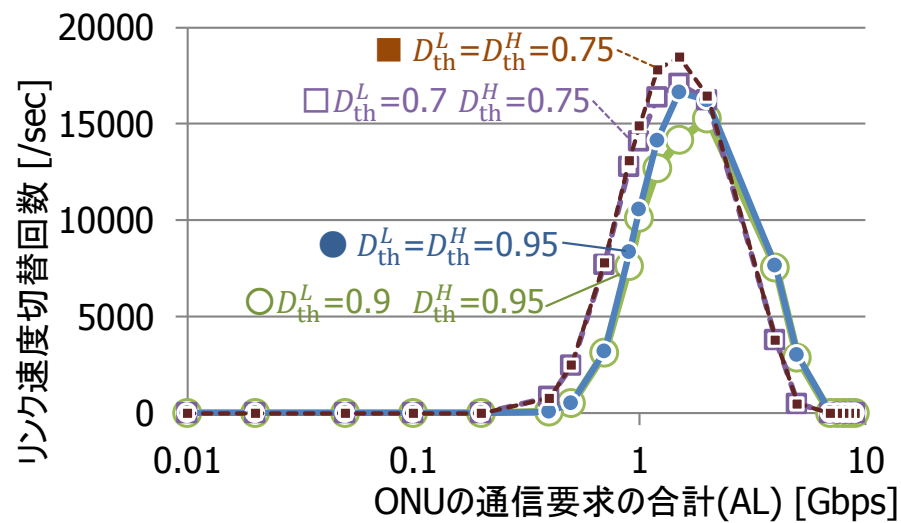
PON 配下の ONU 数(M)	8 台
OLT-ONU 間の距離	20km
ガードタイム(GT)	5 μsec
切替時間	0 (ガードタイムに含む)
フレームサイズ	1500Byte
それぞれの ONU に 1 タイムスロット当たりに割り当てる最大のフレーム数(W_{MAX})	100 フレーム



(a) ALと消費電力の関係



(b) ALと平均遅延時間の関係



(c) ALとリンク速度切替回数の関係

図 2.11 独立切替方式におけるしきい値の比較

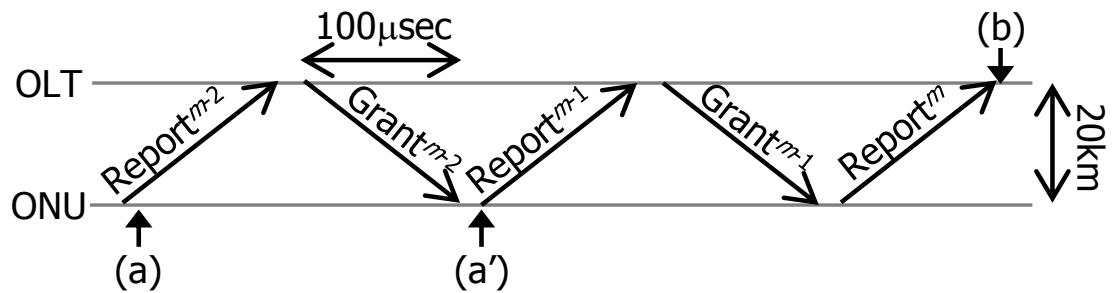


図 2.12 MPCP シーケンス図

図 2.11(b)よりしきい値に幅を持たせた場合、幅を持たせない場合、双方において平均遅延はおおむね $400\mu\text{sec}$ を超えている。これは図 2.12 に示すシーケンスのとおり、ONUにおいて時刻 (a) から (a') の間に発生したデータを OLT が時刻 (b) で受信することによる。手続きの詳細を以下に示す。ONU が Report^{m-1} で送る通信要求は Grant^{m-2} でタイムスロットが割当てられ、 Report^m と同時に送信される。OLT と ONU 間の距離は 20km であり、片方向の通信に $100\mu\text{sec}$ かかる。これを 1 ステップとする。(a) で発生したデータは最短 5 ステップ分の $500\mu\text{sec}$ で (b) へ、(a') で発生したデータは最短 3 ステップ分の $300\mu\text{sec}$ で (b) へ伝送される。データ発生はポアソン分布に従っており、平均遅延の最小値はこれらの平均の $400\mu\text{sec}$ となる。

また、AL が 0.4Gbps から 7Gbps の間で平均遅延が $400\mu\text{sec}$ を上回る値を示す。これは 10Gbps リンク利用率が 0 や 1 を示さない際に多く生じるが、AL が大きくても低速な 1Gbps リンクを用いることにより生じた遅延である。つまりは、ONU_n がタイムスロット TimeSlot_n^m を送信するには、直前のタイムスロット TimeSlot_n^{m-1} を送信した後、 CycleTime_n^{m-1} だけ待つ必要がある。ここで、 CycleTime_n^{m-1} が平均遅延の最小値 $400\mu\text{sec}$ よりも小さければ平均遅延は $400\mu\text{sec}$ となるが、多くの ONU が 1Gbps リンクを用いると CycleTime_n^{m-1} が $400\mu\text{sec}$ を上回ることがあり、その際に $400\mu\text{sec}$ を上回る平均遅延が生じる。このことは、回線利用率が 1 に近づいていることを示す。独立切替方式においては OLT が Report_n^{m-1} メッセージを受取ると CycleTime_n^m の回線利用率 D_{Rate} が定めるしきい値 D_{th}^H , D_{th}^L の範囲に収まるよう TimeSlot_n^m のリンク速度を決定するが、ONU_n を除く Report メッセージは 1 サイクル前のものであるため、全ての ONU のバッファに保持されているデータ量がリンク速度に反映されるのにタイムラグが生じることが分かる。

また、しきい値が小さい場合ほどこの遅延の傾向は小さくなる。これは要求量が少ない場合でも早めに 10Gbps リンクへと切替わることで、低速リンクを用いることにより生じる遅延が低減したことによる。

図 2.11(c)よりしきい値に幅を持たせた場合は幅を持たせない場合に比べて PON 配下の ONU の 1sec 当たりのリンク速度切替回数の合計は小さくなる。これは、しきい値に幅を持たせない場合はそれぞれの ONU の通信要求の少ない増減による回線利用率 D_{Rate} の変化がしきい

値を頻繁にまたぎ多くのリンク速度切替が行われるが、しきい値に幅をもたせることにより D_{Rate} の値がしきい値の範囲内である場合、リンク速度切替が行われないことによる。他方、ONU のリンク速度切替回数の減少はリンク速度が古い Report メッセージにより決定されていることを意味する。これにより図 2.11(b)ではしきい値に幅を持たせた場合は幅を持たせない場合に比べて大きな遅延を示す。

これらのことからしきい値に幅を持たせると大きな遅延を生じるが、高々 1.07 倍でありそれぞれの ONU のリンク速度切替回数は小さくなることから、提案する独立切替方式ではしきい値に幅を持たせる。

2.4.2 PON 全体における高速リンク利用頻度の検証

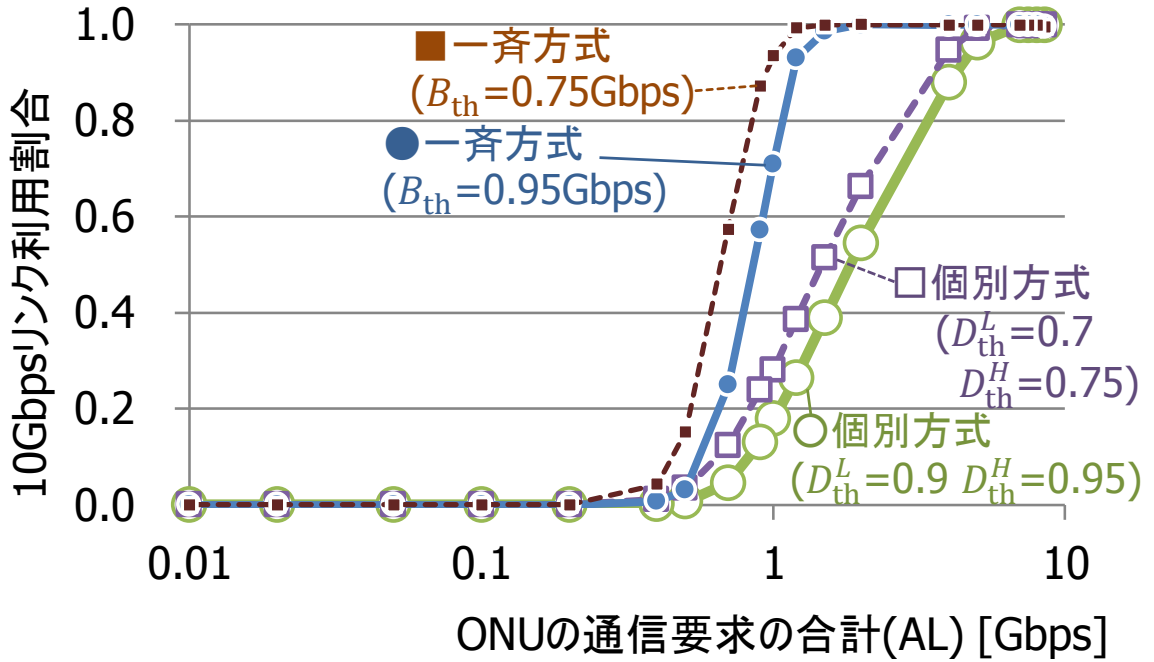
一斉切替方式 ($B_{th}=0.75\text{Gbps}$ の場合と $B_{th}=0.95\text{Gbps}$ の場合) と独立切替方式 ($D_{th}^L=0.7$, $D_{th}^H=0.75$ の場合と $D_{th}^L=0.9$, $D_{th}^H=0.95$ の場合) のシミュレーションを行った結果を図 2.13 に示す。図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である。(a)の縦軸は 10Gbps リンク利用割合であり、値が小さい程低消費電力となる。(b)の縦軸は OLT が受取ったフレームの平均遅延時間 (μsec) と 95%の信頼区間を示す。シミュレーションで用いた主なパラメータは 2.4.1 項と同様で表 2.3 に示す。

図 2.13(a) より一斉切替方式に比べ独立切替方式は ONU の消費電力が小さく、システムをより低消費電力にすることがわかる。とりわけ一斉切替方式は発生したデータ量の合計 AL が 1Gbps を超えるとほぼすべての通信が 10Gbps リンクを用いるのに対し、独立切替方式は AL が 7Gbps を超えるまで 1Gbps リンクを利用した通信を行うことができる。これは、一斉切替方式は 2.2.2 で示したとおり、しきい値に 1Gbps を超える値を用いることができないので、通信要求が 1Gbps を超えると全てのリンク速度が 10Gbps リンクへと切り替わるのに対し、独立切替方式は 2.3.1 項に示したとおり、1Gbps を超えた通信要求に対しても少ない通信を行う ONU に対して 1Gbps リンクの割当を行うからである。

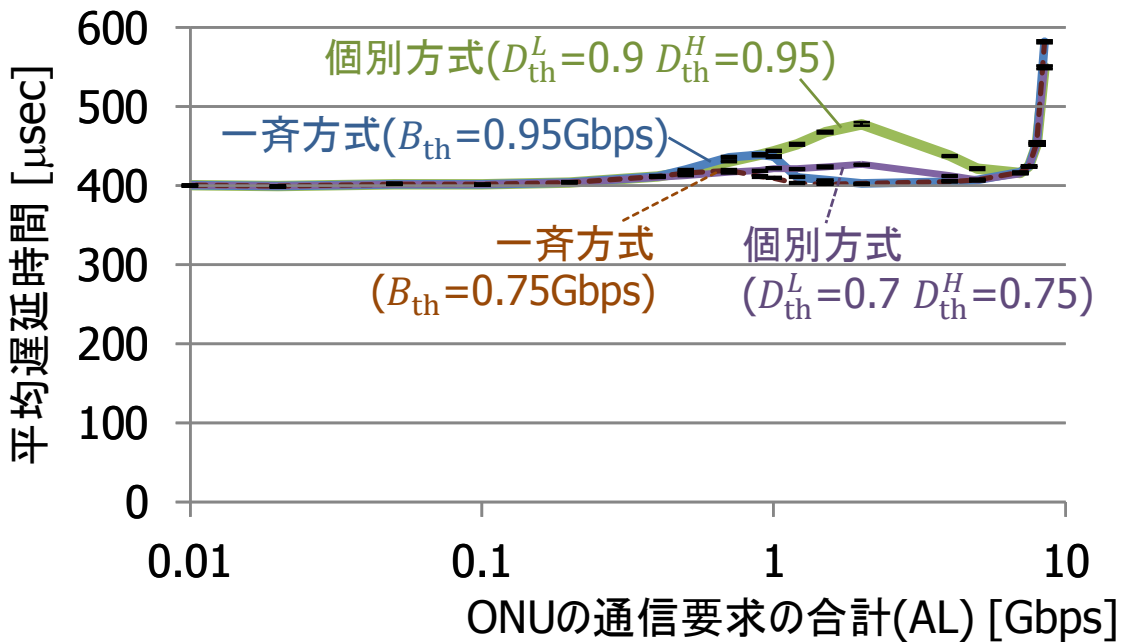
また、一斉切替方式、独立切替方式双方において AL が 0.8Gbps を超えると高速リンクを用いた通信でも通信量が増えることにより遅延が発生する。AL が 1Gbps から 7Gbps の間において、独立切替方式は一斉切替方式と比べ大きな遅延を示す。これは一斉切替方式がすべて 10Gbps リンクを用いているのに対して、独立切替方式は 1Gbps と切り替えることにより遅延が生じる。

以上より、独立切替方式は一斉切替方式と比較して AL が 1Gbps から 7Gbps の範囲において 1Gbps リンクを用いることで、より低消費電力となる。1Gbps リンクを用いることに起因する遅延が大きくなるが、遅延は適切なしきい値設定をすると大して増えない。例えば、 $D_{th}^H=0.75$ のとき

の最大値はALが1Gbpsから7Gbpsの範囲において427 μ secであり、400 μ secの高々1.07倍である。



(a) ALと10Gbpsリンク利用割合の関係



(b) ALと平均遅延時間の関係

図 2.13 一斉切替方式と独立切替方式の比較

2.4.3 各 ONU の通信要求量が異なる場合の検証

ONU 個別の性能に対する検討を行う。ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) に対し、

$$AL_n = \frac{2n \times AL}{(1 + N)N} \quad (2.c)$$

で与えられる、ONU_n に発生させるデータ量 AL_n を 1:2:⋯:N とするよう変化させた場合の評価を行う (図 2.14)。

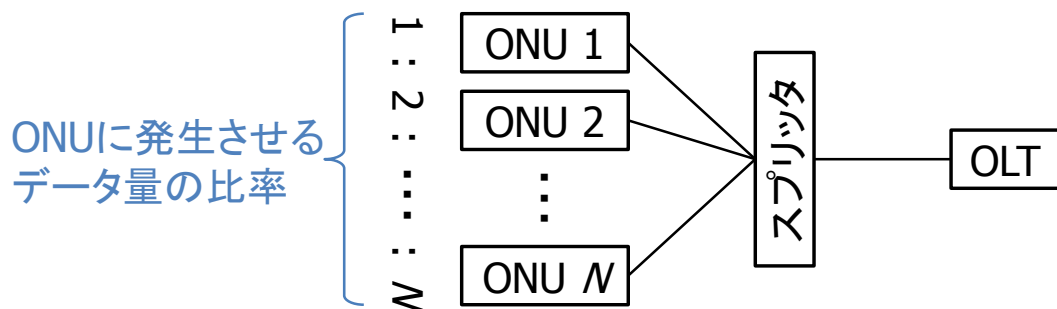


図 2.14 それぞれの ONU に発生させるデータ量の比率

一斉切替方式において $B_{th}=0.95\text{Gbps}$ とした場合の結果を図 2.15 に、独立切替方式において $D_{th}^L=0.9$, $D_{th}^H=0.95$ とした場合の結果を図 2.15 に示す。

図 2.15, 図 2.16 中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である。(a) の縦軸は 10Gbps リンク利用割合であり、小さい程低消費電力となる。(b) の縦軸はそれぞれの ONU 毎のパケットの平均遅延 (μsec) を示す。シミュレーションで用いた主なパラメータは 2.4.1 項と同様で表 2.3 (35 ページ) に示す。

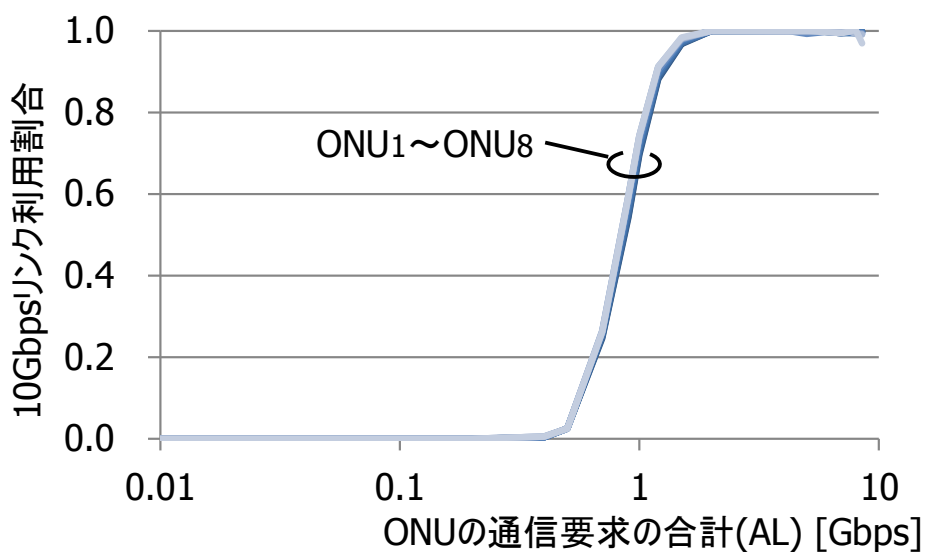
図 2.15(a) より、一斉切替方式においては全ての ONU で一斉にリンク速度を切り替えることから、10Gbps リンク利用割合は全ての ONU でほぼ同じ値を得る。その結果、消費電力もほぼ同じとなる。また、図 2.15(b) より遅延も同様に全ての ONU でほぼ同じ値をとる。これより、一斉切替方式はそれぞれの ONU の通信要求に関わらず、PON に属する全ての ONU の通信要求の合計により遅延と消費電力が決定されることが分かる。

図 2.16(a) より、独立切替方式においては ONU 毎に別々にリンク速度を切り替えるので、ONU が要求するデータ量により 10Gbps リンク利用割合が異なることが分かる。とりわけ、小さな通信要求を行う ONU の 10Gbps リンク利用割合は大きな通信要求を行う ONU に対して小さく、より低消費電力で通信が可能であることが分かる。これは図 2.10 (34 ページ) のフローチャートに示したとおり、1Gbps リンクから 10Gbps リンクへの切り替えは r_n^m の値が大きな ONU_n からが優

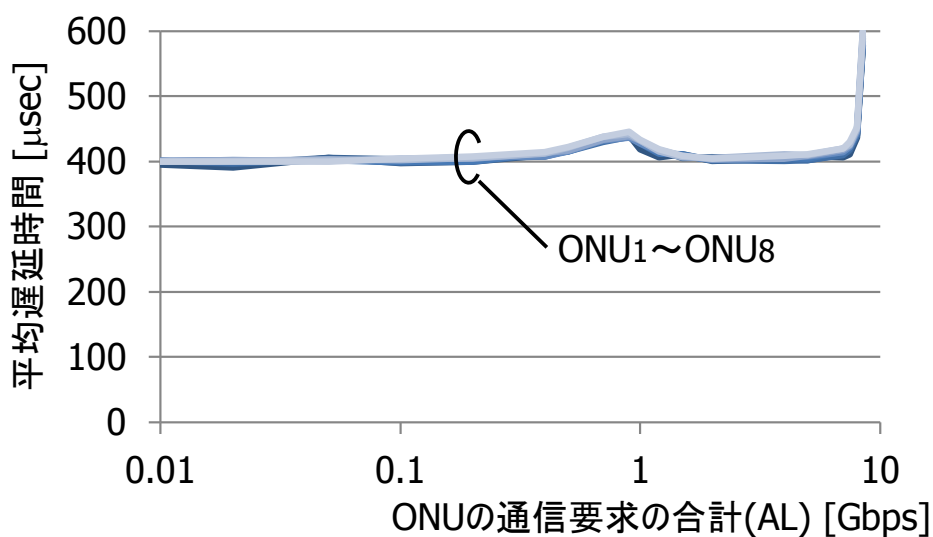
先されて行われることによる。

他方、**図 2.16(b)** より遅延に関しては ONU 毎に発生させたデータ量に関わらずほぼ同様の値を得る。これはそれぞれの ONU へのタイムスロットは周期的に割当てられ、他の ONU へのタイムスロット割当状況により当該 ONU のサイクルタイムが決定されるからである。

以上の結果より、独立切替方式は通信要求の小さな ONU は大きな通信要求を持つ ONU と比べ、より低消費電力となる方式であり、ONU 間の電力に関する公平性のある方式である。一方、平均遅延に関しては ONU 毎の通信要求によらず、PON 全体で同等の値となる。

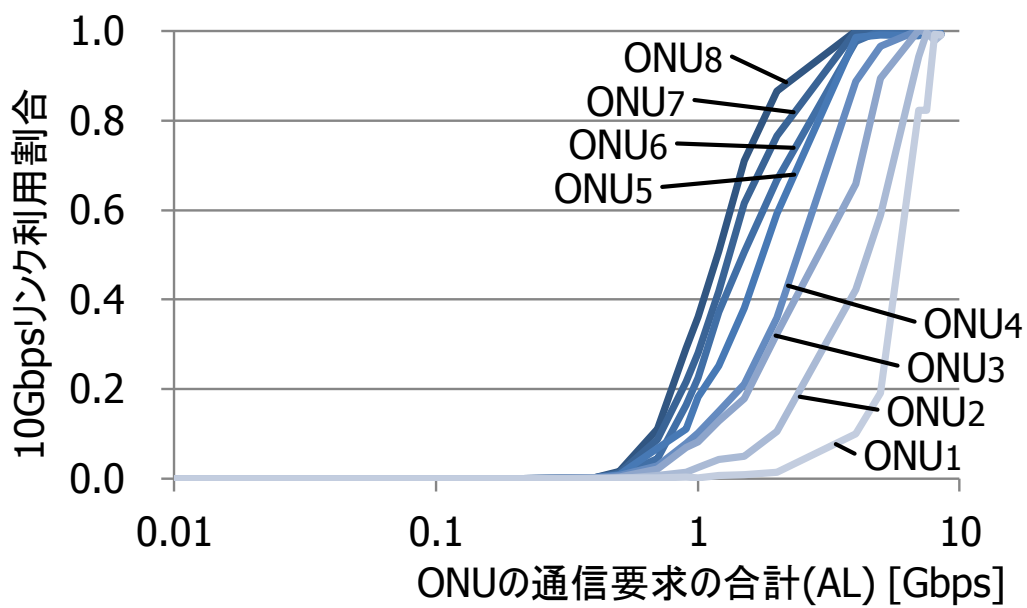


(a) ALと消費電力の関係

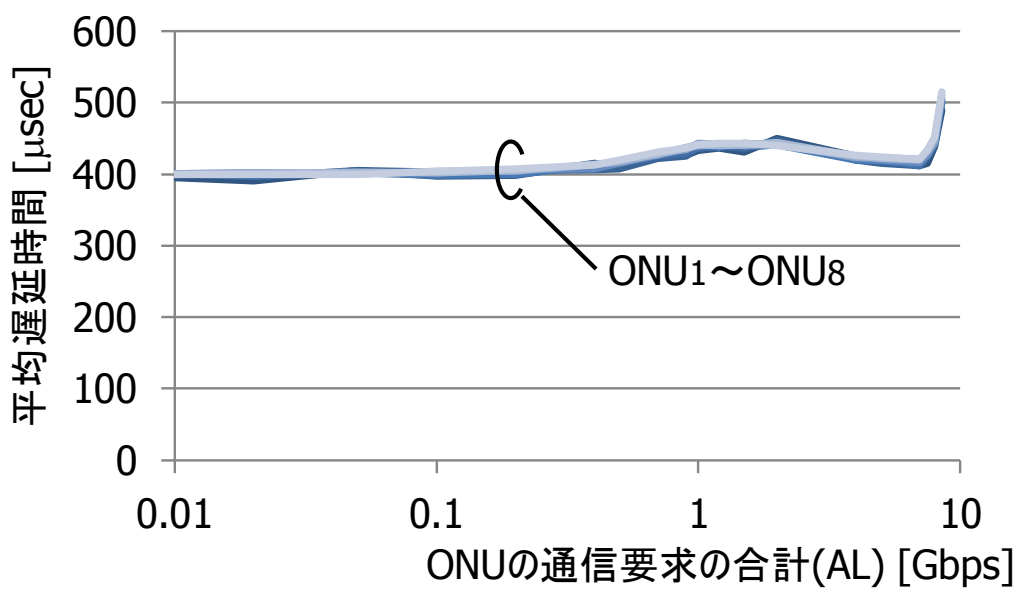


(b) ALと平均遅延時間の関係

図 2.15 一斉切替方式におけるそれぞれの ONU 間の 10Gbps リンク利用割合と平均遅延時間の比較



(a) ALと10Gbpsリンク利用割合の関係



(b) ALと平均遅延時間の関係

図 2.16 独立切替方式におけるそれぞれの ONU 間の 10Gbps リンク利用割合と平均遅延時間の比較

2.4.4 消費電力の検証

本項では独立切替方式と一斉方式の想定される ONU の消費電力の比較を行う。

2.4.2 項では提案する独立切替方式が一斉方式と比べ消費電力の大きな 10Gbps リンクの利用割合が小さいこと、2.4.3 項では独立切替方式では通信要求の少ない ONU が通信要求の多い ONU と比べ 10Gbps リンクの利用割合が小さいことを示した。2.2.1 項では 1Gbps リンクを用いる ONU の消費電力を 5[W], 10Gbps リンクを用いる ONU の消費電力を 10[W]とした。

これらのことより ONU の消費電力[W]を(2.d)式で求める。(2.d)式は 1Gbps リンク, 10Gbps リンクの利用割合にそれぞれのリンクを用いた ONU の消費電力を掛け合わせたものである。1Gbps リンク利用割合は(2.b)式 (35 ページ) より求める。

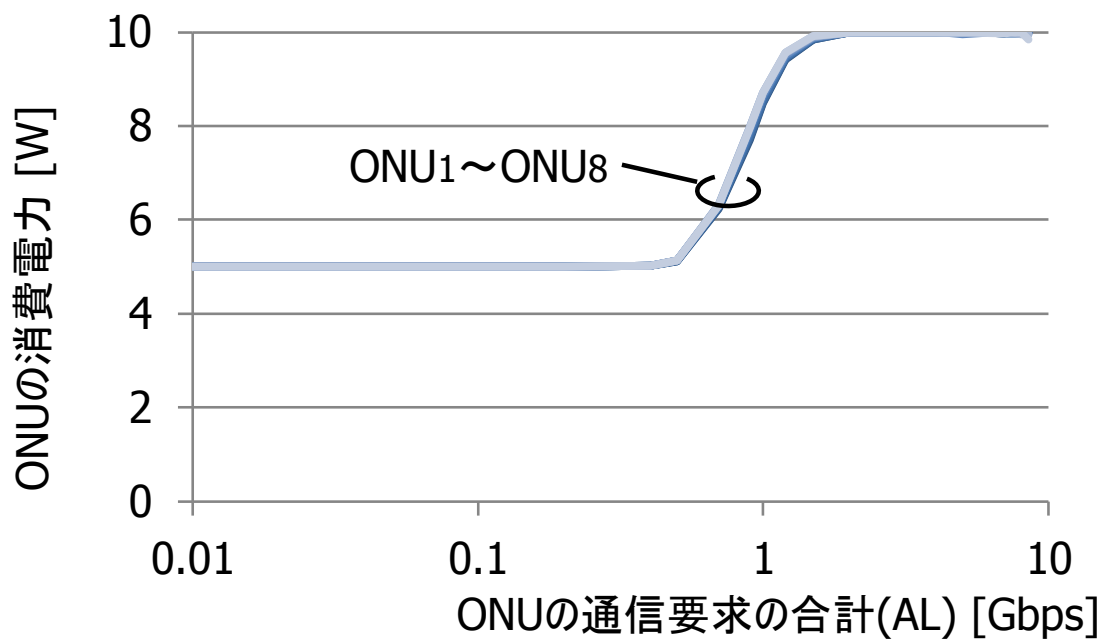
$$\begin{aligned} \text{ONU の消費電力[W]} &= 5[\text{W}] \times \text{1Gbps リンク利用率} \\ &+ 10[\text{W}] \times \text{10Gbps リンク利用率} \end{aligned} \quad (2.d)$$

ONU_n の通信要求 AL_n を 2.4.3 項のとおり変化させた場合の ONU の消費電力の比較を図 2.17 に示す。シミュレーション条件は 2.4.3 項と同様である。すなわち図 2.17 は図 2.15(a), 図 2.16(a) と (2.d)式より算出される。図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である。縦軸はそれぞれの ONU の消費電力[W]である。

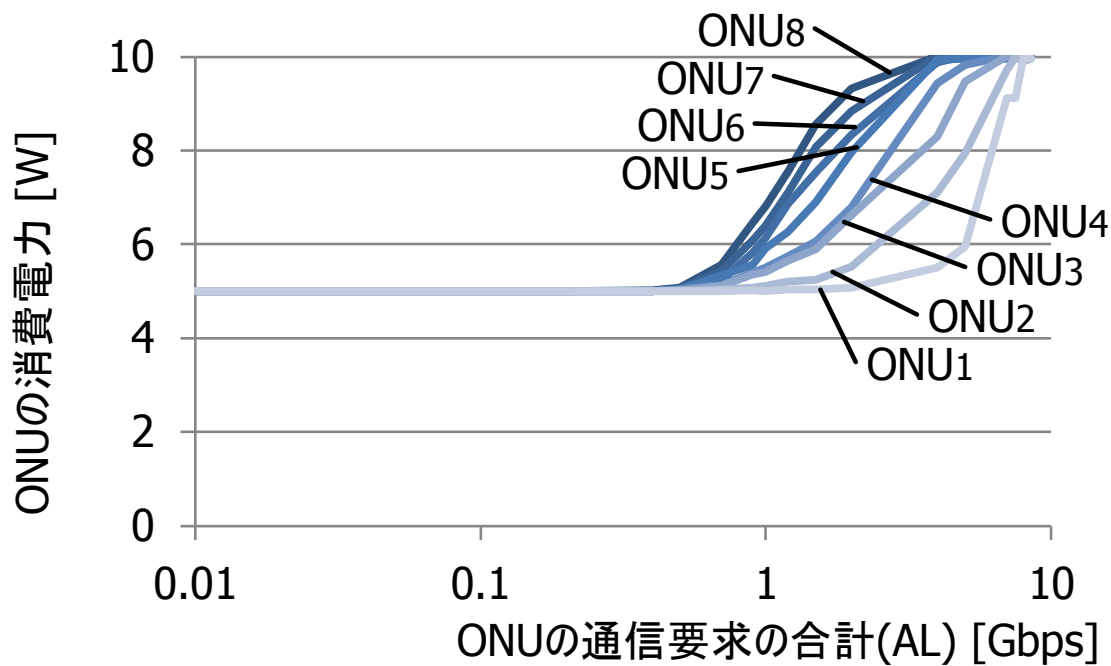
図 2.18 は一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減されるそれぞれの ONU_n の消費電力[W]を示す。図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である。縦軸は一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減される ONU の消費電力[W]である。一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に消費電力が増大する場合は図中縦軸で負の値を示す。

図 2.18 より一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合、消費電力が増大することがあるが、増大量の最大値は AL が 8.5Gbps のとき ONU1 のたかだか 0.12W である。一方で AL が 0.4Gbps から 8Gbps でおおむね全ての ONU の消費電力量は削減され、とりわけ通信要求の小さな ONU 程、消費電力の削減効果が大きいことが分かる。

AL が 1Gbps から 5Gbps であるとき、通信要求の少ない ONU₁ の削減される消費電力は 4W を超える。1 日 4 時間 4W の消費電力が削減されるとすると、1ONU 当たり年間で 5.84kWh の消費電力削減効果が得られる。また、電気料金としては東京電力における家庭契約で最も多く契約されている「従量電灯 B」の料金のうち最も安い「第 1 段階料金」の 18.89[円/kWh] を基に計算を行うと 1ONU 当たり年間で 110 円の電気料金削減効果が得られる。



(a) 全てのONUの通信要求が同じ場合



(b) 各ONUの通信要求を変化させた場合

図 2.17 一斉切替方式と独立切替方式の ONU 消費電力の比較

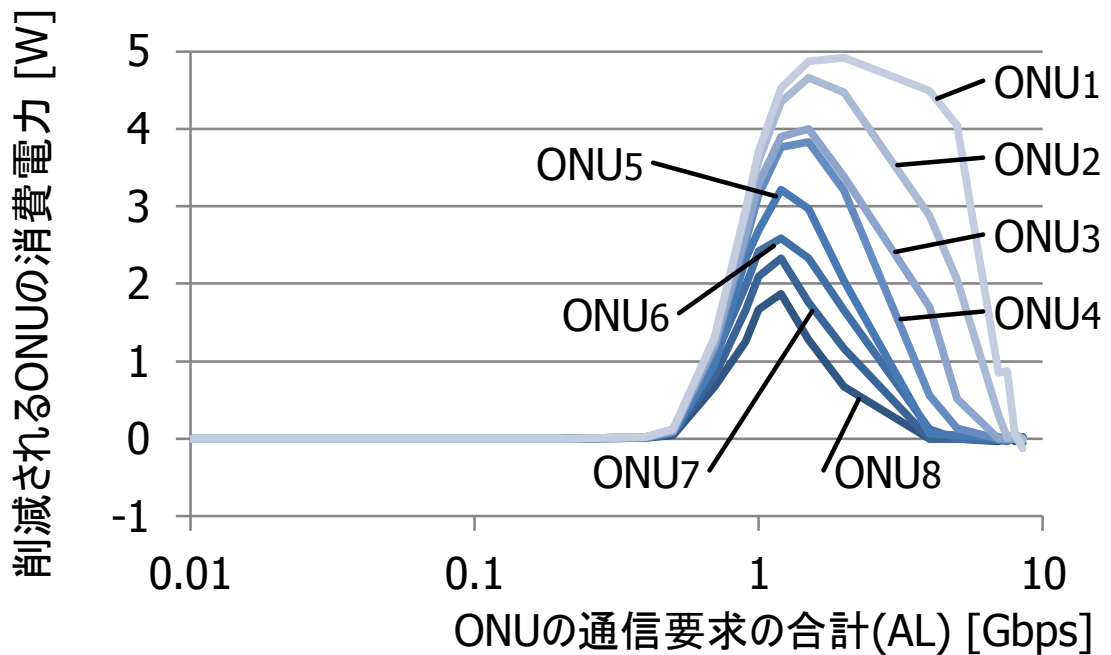


図 2.18 一斉切替方式から独立切替方式へ移行させた場合に削減される ONU 消費電力の比較

全ての ONU の通信要求を同じにした場合の ONU の消費電力の比較を

図 2.19 に示す. シミュレーション条件は 2.4.2 項と同様である. すなわち

図 2.19 は図 2.13(a)と(2.d)式より算出される. 図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である. 縦軸はそれぞれの ONU の消費電力[W]である. これより提案する独立切替方式は一斉切替方式と比べ ONU の消費電力が小さいことが分かる.

図 2.20 は一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減される ONU の消費電力 [W]を示す. 図中の横軸はそれぞれの ONU に発生させるデータ量の合計 AL (Gbps) である. 縦軸は一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減される ONU の消費電力[W]である. $B_{th}=0.75\text{Gbps}$, $D_{th}^L=0.7$, $D_{th}^H=0.75$ の場合と $B_{th}=0.95\text{Gbps}$, $D_{th}^L=0.9$, $D_{th}^H=0.95$ の場合のしきい値が異なる 2 つの結果を示す.

図 2.20 より $B_{th}=0.75\text{Gbps}$, $D_{th}^L=0.7$, $D_{th}^H=0.75$ の場合, 一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減される ONU の消費電力は AL が 1.2Gbps のとき最大の 3.31W を示す. $B_{th}=0.95\text{Gbps}$, $D_{th}^L=0.9$, $D_{th}^H=0.95$ の場合, 一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合に削減される ONU の消費電力は AL が 1Gbps のとき最大の 3.27W を示す. 閾値の設定により削減される消費電力が最大となる AL は変化するものの, おおよそ AL が 1Gbps に近づくほど消費電力が削減され, 提案する独立切替方式は低消費電力な方式と言える.

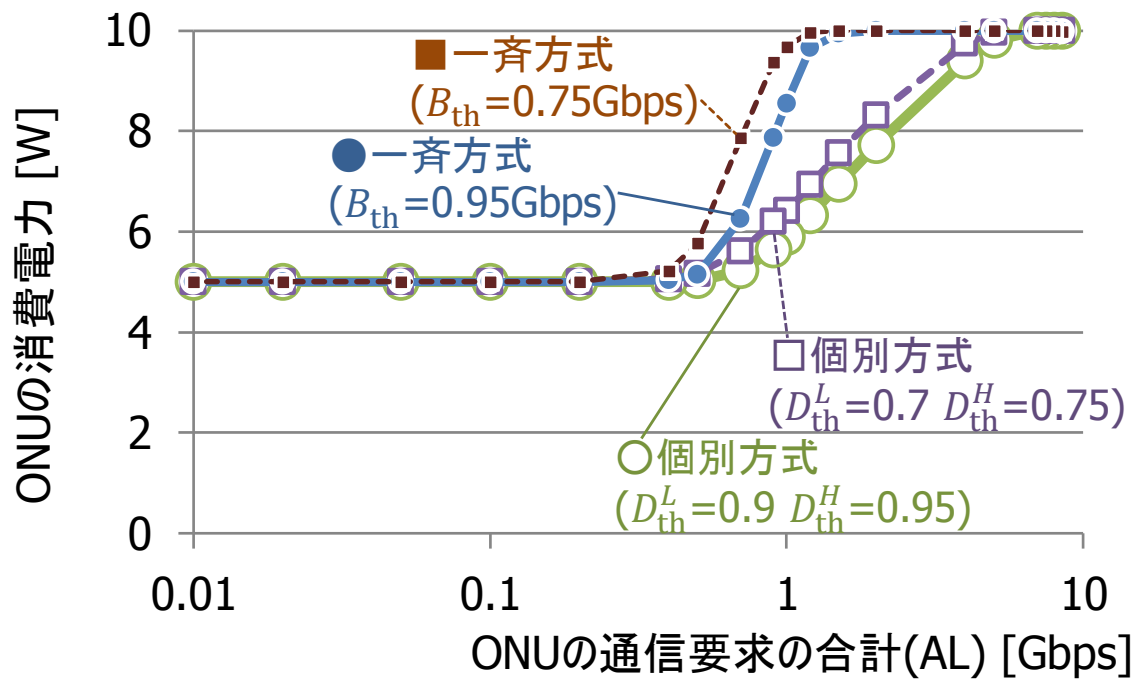


図 2.19 一斉切替方式と独立切替方式の ONU 消費電力の比較

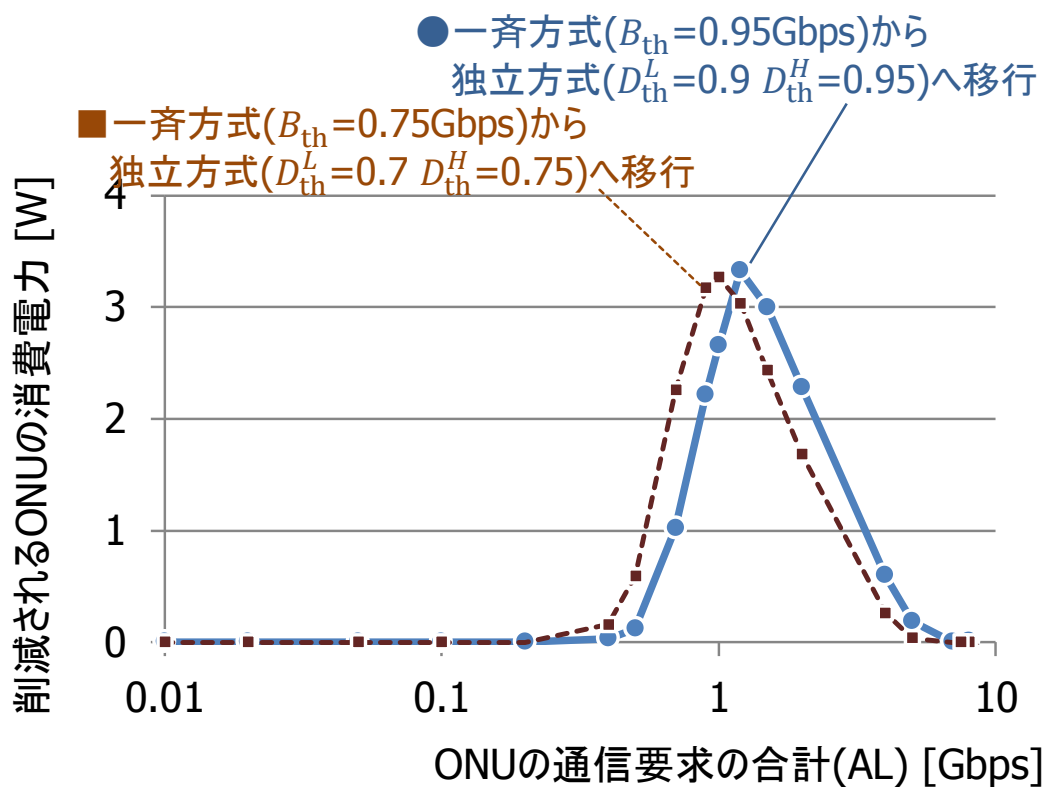


図 2.20 一斉切替方式から独立切替方式へ移行させた場合に削減される ONU 消費電力の比較

削減される消費電力は最大で $B_{th}=0.75\text{Gbps}$, $D_{th}^L=0.7$, $D_{th}^H=0.75$ で AL が 1.2Gbps のとき 3.31W であるが, 国内の FTTH 加入者は 2320 万であり全ての加入者の ONU を一斉切替方式から独立切替方式に移行した場合, 合計で 7 万 6792kW の消費電力削減効果が得られる. **表 1.1 (3 ページ)** に示した出力量を基に算出を行うと, 原子力発電所1基のうち約 7.7% の削減効果が得られる. 同様に太陽光発電の場合, 約 8.58km² 分 (東京ドーム 183 個分) の設置削減効果が, 風力発電の場合, 約 134 基分の設置削減効果が得られることが分かる.

2.5 まとめ

PON の上り通信において 1Gbps (低速) リンクと 10Gbps (高速) リンクを切り替える ALR 方式を適用し, 省電力効果があることを示した. 全ての ONU のリンク速度を一斉に変更する一斉切替方式に比べ, 提案した ONU 個別にリンク速度を変更する独立切替方式の方が PON 全体の上り通信要求が 1Gbps 以上の場合でも多くの 1Gbps リンクを用いることが可能であることを示した. 一方で, 独立切替方式では 1Gbps リンクを用いることによる遅延の発生も見られた. 更に, ONU 間の公平性を検討したところ, 一斉切替方式は ONU 毎の通信要求が異なっても全ての ONU がほぼ一定のリンクを用いるのに対し, 独立切替方式は, 通信要求の小さな ONU が通信要求の大きい ONU よりも 1Gbps リンクを用いることで ONU 間の公平性のある方式であることを示した. 更に, 消費電力の検証を行った. 想定したモデルにおいては通信要求の小さな ONU は年間で 110 円の電気料金削減効果が得られ, 国内全ての ONU が提案方式に移行した場合に最大で原子力発電所の場合1基のうち 7.7% の消費電力削減効果が, 太陽光発電の場合約 8.58km² 分 (東京ドーム 183 個分) の設置削減効果があることを示した.

第3章

無線アクセスネットワークの省電力化

本章では無線アクセスネットワークの省電力化手法を提案する。無線メッシュネットワークにおいて高速通信を実現する為に指向性アンテナを持つシステムでは、それぞれの通信端末における通信要求量の変動に適応して動的にリンク割当を行うことにより、接続リンク数を削減し低消費電力となるが、リンク切替時にそれぞれの通信端末が孤立することなく、少ないリンク切替回数で省電力効果を示す物理ネットワーク構築と経路制御方式を提案する。

3.1 WMN 関連技術

1.2.1.2 (16 ページ) に示したとおり、WMN (Wireless Mesh Network : 無線メッシュネットワーク) は固定配置されたMPが相互に無線接続することにより実現される広域無線アクセスネットワークである。[23]によると、無線 LAN により WMN を実現する最初の製品は 2002 年に Mesh Networks 社から発売された MEA (Mesh Enabled Architecture) が最初とされ、その後 2005 年ごろから米国を中心とする 10 数の企業から製品が発表され、実用化が進展しつつある。一方で、標準化は無線 LAN を軸にした標準規格として IEEE 802.11s タスクグループが発足し、2011 年 9 月に標準化 [37]が完了した。これは既存の無線 LAN を高機能化する標準化であるが、センサネットワーク分野では ZigBee の物理層の標準化が IEEE 802.15.4 [38]として 2003 年 10 月に完了しており、WMN に対応している。

3.1.1 WMN のトポロジー

WMN をリンク接続形態 (トポロジー) に注目し分類すると、表 3.1 に示すとおり、ツリートポロジーとメッシュトポロジーの2種類に分類される。

トポロジーの例を見るとツリートポロジーとメッシュトポロジーとでは接続しているリンクが異なることが分かる。表中の図の例においては MP, STA の配置はツリートポロジー、メッシュトポロジーともに同様である。

ツリートポロジーは木構造を持つ。特定の MP がルートノード (根ノード) となり、ルートノードに近い MP が親ノードとなり子ノードとなる MP が配下に接続される。全ての MP がいずれか1つの親子関係で接続され、メッシュネットワーク全体の接続構造を木構造とする形態である。

メッシュトポロジーはそれぞれの MP がメッシュ状 (網の目状) に接続される接続形態である。

表 3.1 WMN のリンク接続形態の比較

リンク接続形態	ツリートポロジ	メッシュトポロジ
トポロジーの例	<p> ● :MP(Mesh Point) :STA(Station) ↔ :リンク </p>	<p> ● :MP(Mesh Point) :STA(Station) ↔ :リンク </p>
リンク数	小 (最小リンク数による構成)	大 (それぞれの MP が 1 つ以上のリンク接続を持つ構成)
経路情報数	小(O)	大(X)
ボトルネックリンクによる影響	大(O)	小(X)
ネットワークの冗長性	小(X)	大(O)

表 3.1 に示すとおり、リンク接続状態がツリートポロジとメッシュトポロジではその性質が異なり、以下にその詳細を示す。

リンク数に注目する。ツリートポロジはリンク数が最小となる接続形態である。ここで MP の孤立した状態を考える。MP が孤立した状態とは当該 MP が他の MP とリンク接続されていない状態である。WMN を始め、コンピュータネットワークにおいては通信の到達性を確保するため、全ての MP (ノード) が孤立することなく他の MP と接続することが求められる。2 台の MP を孤立することなく接続する最小のリンク数は 1 である。その後、MP が 1 増えるたびに孤立することなく接続を行うために 1 本のリンクを要すことから、 N 台の MP を孤立することなく接続するためには最低 $N-1$ 本のリンクが必要である。ツリートポロジにおいてはリンク数が $N-1$ となることから最小のリンク数による通信が可能となる。一方でメッシュトポロジは隣接する MP 間において複数のリンク接続を行うことから、ツリートポロジと比べ多くのリンク数を要す。

経路情報数に注目する。ツリートポロジは予め木構造のリンクを構築することにより、MP の配置に変化がない場合の経路情報は少ない。メッシュトポロジは隣接する MP 同士がそれぞれ

れリンク接続される。このため、MP の配置に変化がない場合でも多くの経路情報を保持する必要がある。

ボトルネックリンクによる影響に注目する。ボトルネックリンクとは、当該リンクの伝送帯域に残りの帯域が無いことにより、伝送帯域に余裕のある他のリンクにおいて十分な伝送が行えなくなるリンクを示す。ツリートポロジィはボトルネックリンクが発生しやすい。これは木構造の特性上、親ノードに近いリンクである程通信が集約しやすく、また、他の経路により迂回することが不可能であることによる。他方、メッシュトポロジィは複数のリンクにより構成されるので迂回経路による通信が可能となることから、ボトルネックリンクによる影響は小さい。図 3.1 にボトルネックリンクの例を示す。伝送帯域が 100Mbps であるリンクが図のとおり (a) ツリートポロジィ、(b) メッシュトポロジィで接続されている状態で、(1) MP:E から MP:A へと 100Mbps の伝送が行われているとき、(2) MP:D から MP:A へと伝送を行おうとしても、ツリートポロジィの場合は MP:C-A 間の伝送帯域に余裕がないため、MP:C において通信データが破棄される。このことにより、MP:D-C 間の伝送帯域に余裕があるにも関わらず、通信が行えない。メッシュトポロジィの場合は MP:C-A 間のリンクに余裕がない場合でも、経路 D→B→A を選択することにより通信が可能となる。

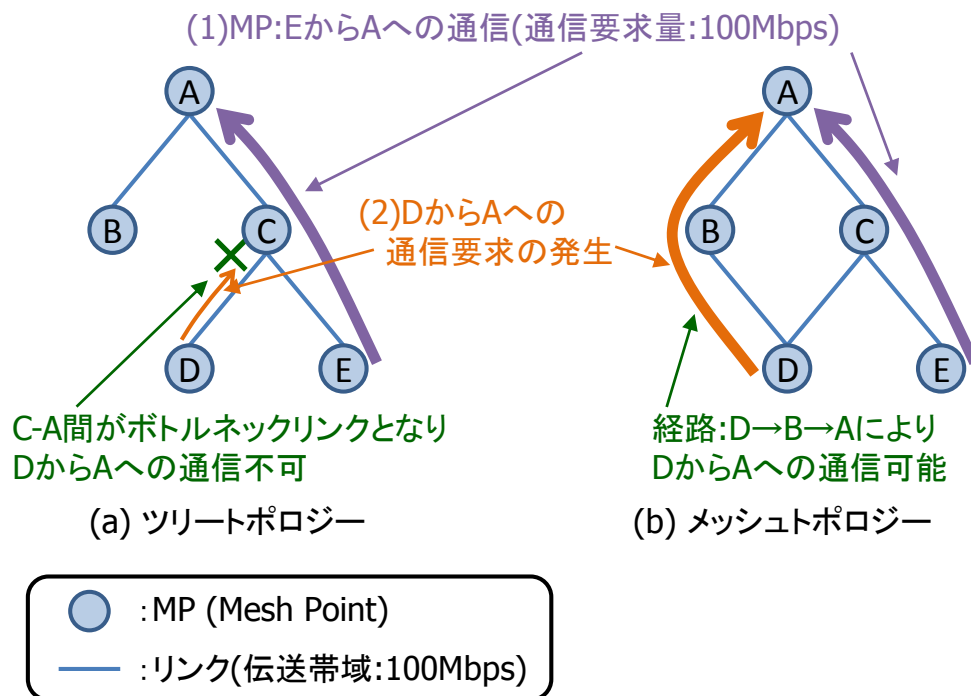


図 3.1 ボトルネックリンクの例

ネットワークの冗長性に注目すると、メッシュトポロジィはツリートポロジィと比較して多くのリンクを所持していることから冗長性が高く、MP の故障等に対する復旧が早い。

3.1.2 空間分割多重伝送技術

無線伝送においては使用できる周波数資源が限られていることから、SDM (Space Division Multiplexing : 空間分割多重) 伝送技術が注目されている。例えば IEEE 802.11n においては MIMO (Multi Input Multi Output) 技術 (送受信に複数のアンテナを配備し、マルチパスによって生じる空間的な伝搬の性質の違いを利用することでアンテナ数に比例して無線リンクの容量を増大させる無線技術 [39]) が用いられ、ビームフォーミング技術 (各アンテナから送信する電力と位相を変動する伝送路の状態に応じて制御することで伝送品質の向上を図る技術 [40]) を用いた製品が普及したりと、端末に複数のアンテナを用いることで高速化を図っている。また、携帯電話や PHS の基地局においては、指向性を持ったアンテナを円周上に等角度間隔で配置し、それぞれのアンテナの送受信範囲を分割することで SDM を実現している。

指向性アンテナを利用は形状やコストの面から主に携帯電話や PHS の基地局使用に限定されてきたが、[41]によると、特定の MAC プロトコルを仮定しない条件において指向性アンテナを用いると、無指向性と比べて約 5 倍の同時接続数を提供可能であると報告されている。

図 3.2 に WMN において利用可能な周波数帯域を F とした際の、(a) 無指向性アンテナを用いた場合と (b) 指向性アンテナを用いた場合の MP:C が送信する電波の到達範囲を比較した図を示す。図中、(楕)円は MP:C が送信する電波の到着範囲を示す。楕円を複数の色で示しているが、同じ周波数帯域を用いるものとする (すなわちそれぞれの電波は互いに干渉する)。無指向性アンテナを用いる場合、MP:C から送信された電波は MP:A, B, D, E へ到着する。これらの伝送は同じ周波数帯域 F を用いることから、MP:C-A, C-B, C-D, C-E 間のリンクは共通で F を使用することとなる。指向性アンテナを用いる場合は MP:C から MP:A へ送信された電波は MP:A のみが受信し、MP:B, D, E は受取らない。MP:C-A, C-B, C-D, C-E 間の伝送はそれぞれ F を用いるが、他のリンクと干渉しないため、それぞれのリンクが独立して F を用いることが可能である。

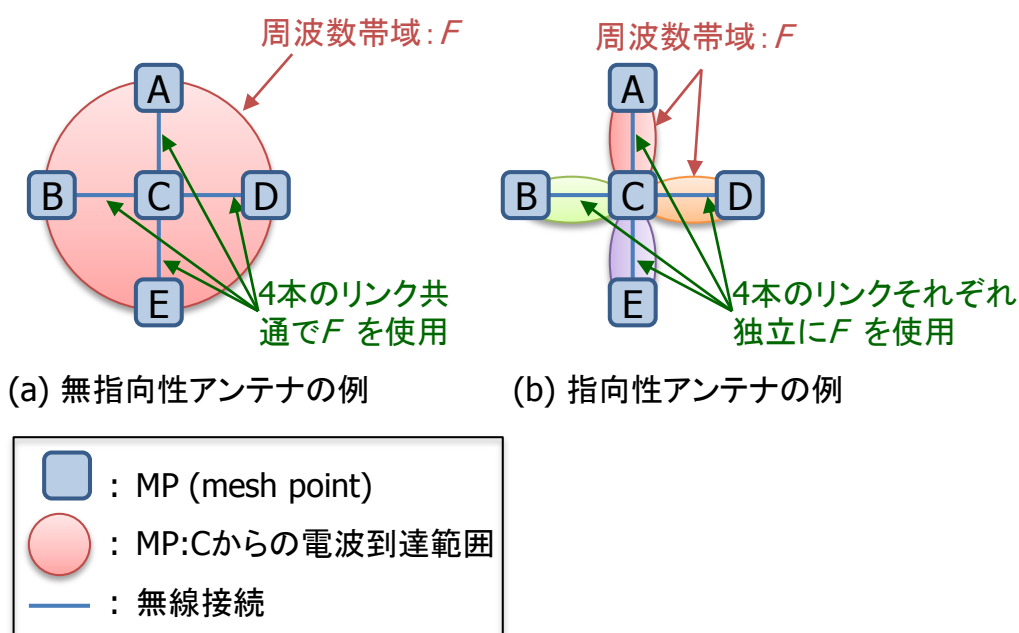


図 3.2 無指向性アンテナと指向性アンテナの比較

図 3.3 は (a) 無指向性アンテナと (b) 指向性アンテナにおいて MP:S (source) から MP:D (destination) へ通信する際のボトルネックリンクを比較した図である。それぞれの周波数帯域を 100Mbps とし、それぞれの MP は図のとおり無線接続されている。MP:S から D への経路は $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$ と $S \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$ の 2 通り存在する。ここで、(1) 経路: $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$ を用いて 100Mbps の通信を行っているときに、(2) 経路: $S \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$ を用いた通信をおこなおうとすると、無指向性アンテナの場合は MP:S-A 間で 100Mbps の伝送を行っていることから MP:S-C 間の周波数帯域に余裕がなく伝送を行うことが出来ない。一方、指向性アンテナを用いた場合は MP:S-C 間の周波数帯域は MP:S-A 間での伝送の有無に依存しない。同様に MP:E-D 間の周波数帯域も MP:B-D 間での伝送の有無に依存しないことから、経路: $S \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$ を用いての通信が可能である。MP:S から D への最大伝送速度は無指向性アンテナを利用した場合に 100Mbps なのに対し、指向性アンテナを用いた場合は 2 通りの径路を用いた 200Mbps となる。このように指向性アンテナを用いることにより周波数帯域に依存する伝送速度のボトルネックが小さくなる。

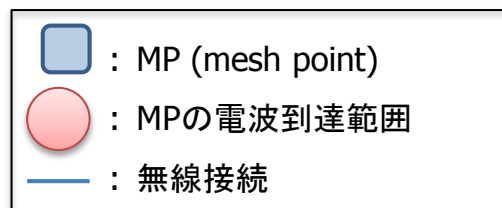
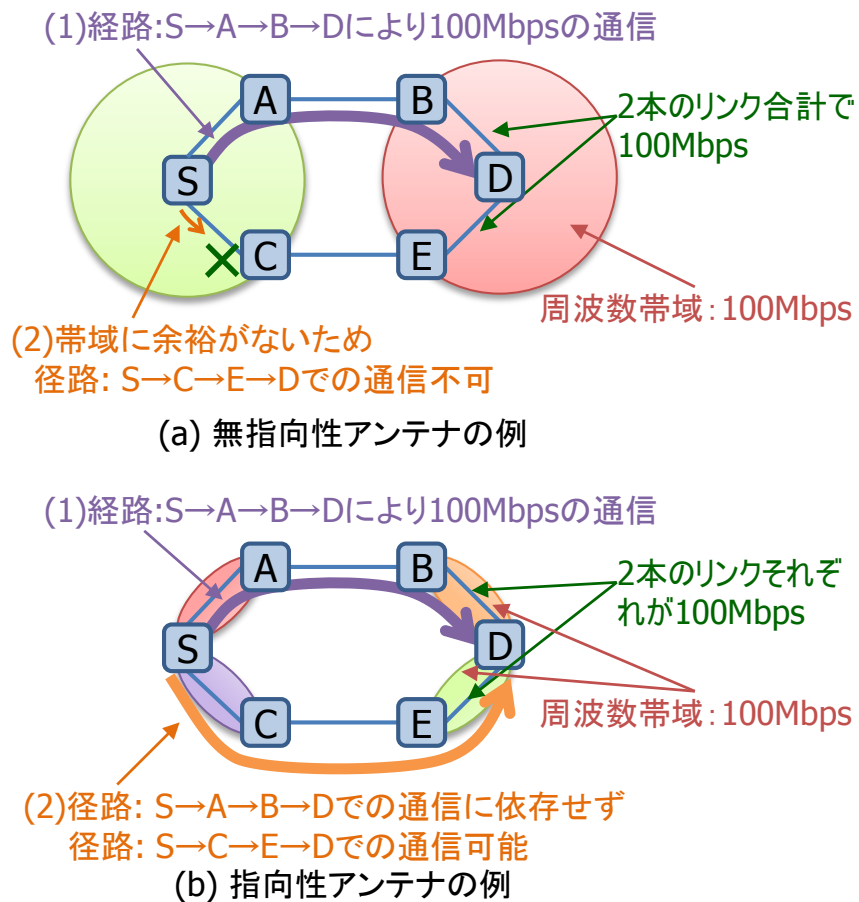


図 3.3 無指向性アンテナと指向性アンテナのボトルネックの比較

また、指向性アンテナを用いた無線 LAN 製品も発売されている (例えばバッファロー製の WLE-2DA)。これらのことから、指向性アンテナを用いて MP 間を接続する無線メッシュネットワークが提案されている [42]。

1.2 節 (2 ページ) に示したとおり、将来の通信要求の増大と低消費電力化の需要があることから、高速通信が可能となる指向性アンテナを用いた WMN における低消費電力化に注目する。

3.1.3 システムモデル

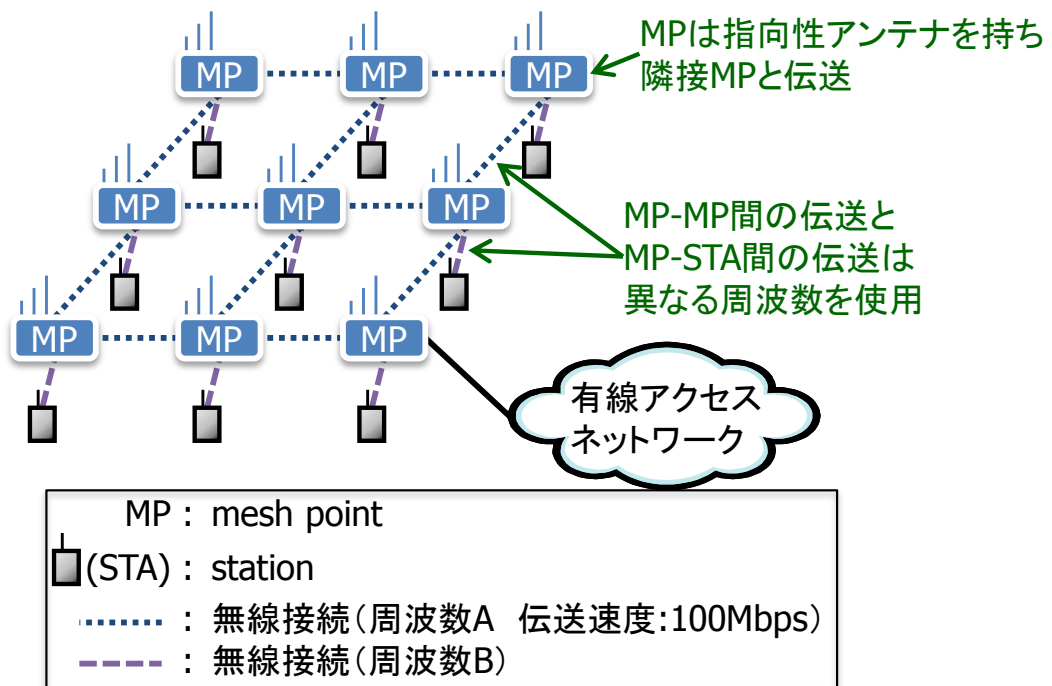


図 3.4 想定するシステムモデル

図 3.4 に示すとおり、指向性アンテナを用いて MP 間を接続する無線メッシュネットワークを想定する。隣接する MP 間は指向性アンテナにより接続され、相互の伝送は TDD (Time Division Duplex : 時分割複信) により複信される。すなわち、MP 間の通信に際し上り、下り伝送を同時に行うと周波数干渉により伝送損失が発生することから、上り、下り伝送の伝送は同時に行わないものとする。MP 間を接続する際に用いる周波数と MP-STA 間を接続する際に用いる周波数は異なり、それぞれの伝送は干渉しないとする。また、各 MP 間の伝送速度は、代表的な無線 LAN の伝送速度範囲内の 100Mbps とする。

3.2 関連研究と問題点

指向性アンテナを用いた WMN の通信方式に関する研究が多くされている [43]。[44]、[45]、[46]は低消費電力化に関する研究である。指向性アンテナは同じ電力で無指向性アンテナより長距離の通信が可能であることから、[44]は無指向性アンテナにおいて複数の MP を経由するところ、指向性アンテナを用い経由する MP 数の削減を提案している。[45]は、複数の指向性アンテナを持つ MP が同時に 1 つの指向性アンテナしか用いない条件で、動的に使用アンテナを変化することで経路を変化させる提案である。[46]は、はブロードキャスト、マルチキャスト通信時にツリートポロジリーにすることを提案している。

また、送受信機の伝送速度に注目し低消費電力化を行う研究もある。[47]では、リンク速度切替可能な送受信機を用いた際にデータ流量と消費電力が線形の関係にないことから、より低消費電力となるリンク速度を導出することによる低消費電力化を提案している。

[48]、[49]は、メッシュトポロジリー状に接続された有線ネットワークにおいて、流量の少ないリンクを切断し、スリープ状態にすることで省電力とする手法を提案している。図 3.5 に示すように通信量に対し伝送速度に余裕のある複数のリンクを少数のリンクに集約することでリンク数を削減することにより低消費電力となる。システムモデルとした指向性アンテナを用いた WMN はメッシュトポロジリー状に接続された有線ネットワークとトポロジリーは同様であるため、WMN においてもリンク数を削減することによる省電力化が期待できる。[48]は特定の制御ノードがネットワーク全体の経路情報と各リンクの流量に基づき経路計算を行い、リンク接続・切断を決定し各ノードに通知することで実現可能である。これらのことから本論文では指向性アンテナを用いた WMN の省電力化として接続リンク数の削減に注目する。

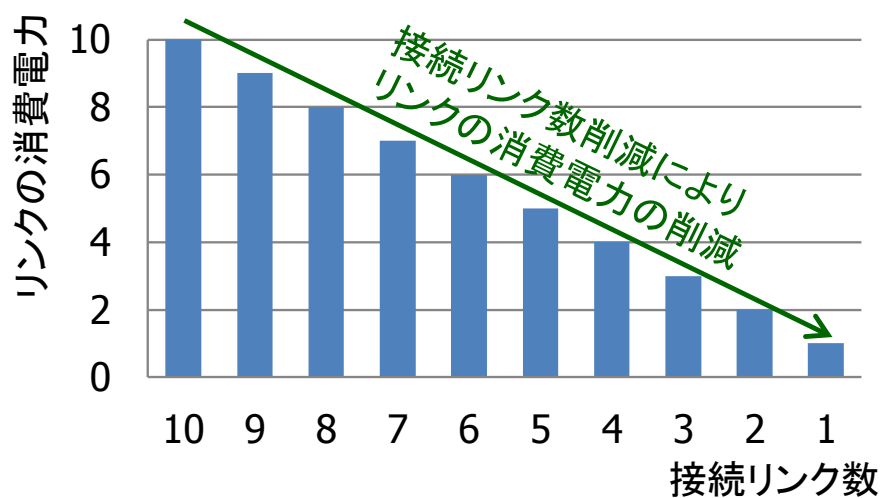


図 3.5 接続リンク数の削減によるリンク消費電力の削減

現在、国内で広く販売されているメッシュネットワークを構成可能な MP (AP) の消費電力量

として、例えばシスコシステム社の Aironet 3600 シリーズの最大消費電力は 12.95 W、バッファロー社の WAPM-APG600H, WAPM-APG300N の最大消費電力はそれぞれ 8.4W, 12.6W である。これらより、本論文では代表的な MP の消費電力量として 12W を用いる。

[50]は、代表的な通信装置の消費電力の比率を (1) electronic, (2) optical, (3) power amplification, (4) AC/DC power conversion の構成要素別に示し、無線システムの代表としては WiMAX と第 3 世代の携帯電話網について示している。[50]中、特段リンク接続にかかる消費電力は示されていないが、(3) power amplification は送受信に関する電力であり、通信装置別の比較においてもリンク接続にかかる消費電力とみなすことができるので、本論文では [50] の power amplification をリンク接続により発生する電力消費量とし議論する。

[50]によると、WiMAX の AP における power amplification の比率は 11%、第 3 世代携帯電話網の基地局における power amplification の比率は 27% となっている。WMN と WiMAX の装置構成は若干異なるが、本論文中では WiMAX の値を参考に、WMN におけるリンク接続に関わる消費電力量を全体の 11%、すなわち $12 \text{ W} \times 0.11 = 1.32 \text{ W}$ とする。

3.2.1 数理計画法による導出

数理計画法を用いて、想定したシステムモデルにおいて接続リンク数が最小となるリンク割当を算出する。

数理計画法とは現実の事象を数理モデルとして定式化し、数学的手法により最適解を求める手法である。例として、10kg の苺と 10ℓ の牛乳があるとする。苺 3kg と牛乳 1ℓ から 1000 円の苺ミルクが、苺 1kg と牛乳 3ℓ から 500 円の牛乳イチゴが作れるとする。このとき最大の利益となるために苺ミルクと牛乳イチゴをそれぞれどのくらい作ればよいかを数理計画法を用いて求める。

ここで、苺ミルクを x とおき、牛乳イチゴを y と置いた時の最大の利益は、

$$\max 1000x + 500y \quad (3.a)$$

と表せ、(3.a)式が成立するような x と y を求めることを目的とする。(3.a)式のように最大化、もしくは最小化することで目的とする最適解を求める関数を目的関数、 x, y のように目的関数が最適となるよう決定したい変数を決定変数と示す。また、苺は 10kg、牛乳は 10ℓ と予め分量に制約があるので、

$$3x + y \leq 10 \quad (3.b)$$

$$x + 3y \leq 10 \quad (3.c)$$

(3.b), (3.c)式が成立する必要がある。このように決定変数を制約する条件として与える関数を制約条件と示す。

数理計画法を用いるにあたり、パラメータの数理モデル化が必要である。表 3.2 は接続リンク数が最小となるリンク割当を算出する際に必要な変数を示す。以下にそれぞれの変数の詳細を示す。

ネットワークを有向グラフ $G(V,E)$ で表す (図 3.6 上)。 V は MP の集合であり、 E はリンクの集合である。 $MP:i (i \in V)$ から $MP:j (j \in V)$ までのリンクを (i,j) (ただし、 $(i,j) \in E$) と表す。

有向グラフで示すので、リンク (i,j) が存在するとき $(i,j) = 1$ 、存在しないとき $(i,j) = 0$ とすると、一般的には $(i,j) \neq (j,i)$ となることがあるが、MP 間の伝送は TDD を用い、片方向リンクみの保持を想定していないので、本章中では常に $(i,j) = (j,i)$ となる。

c_{ij} は $MP:i, MP:j$ 間の伝送容量である (図 3.6 下)。 TDD は半二重通信であり、 $MP: i, MP: j$ 間の伝送容量を c'_{ij} とすると $MP: j \rightarrow MP: i$ の伝送量が 0 であるとき $MP: i \rightarrow MP: j$ では c'_{ij} の伝送が可能であり、 $c_{ij} = c'_{ij}$ となる。同様に $c_{ji} = c'_{ji}$ となるから、 $c_{ij} = c_{ji}$ となる。また、 $c_{ij} + c_{ji}$ は $MP: i, MP: j$ 間の伝送容量とは異なる。

表 3.2 数理計画法で用いる変数

$G(V,E)$	有向グラフ
V	MP の集合
E	リンクの集合
(i,j)	MP: i から MP: j へのリンク ($i,j \in V, (i,j) \in E$)
c_{ij}	MP: $i, MP:j$ 間の伝送容量 (bps)
t	トラヒックの識別番号
N	t の集合 ($t \in N$)
v_t	t の流量 (bps)
M	v_t の集合 ($v_t \in M$)
p_t	t の送信 MP ($p_t \in V$)
q_t	t の目的 MP ($q_t \in V$)
x_{tij}	(i,j) を流れる t の伝送量 (bps)
l_{ij}	(i,j) の接続状態 $\begin{cases} (i,j) \text{が接続} \rightarrow l_{ij} = 1 \\ (i,j) \text{が切断} \rightarrow l_{ij} = 0 \end{cases}$

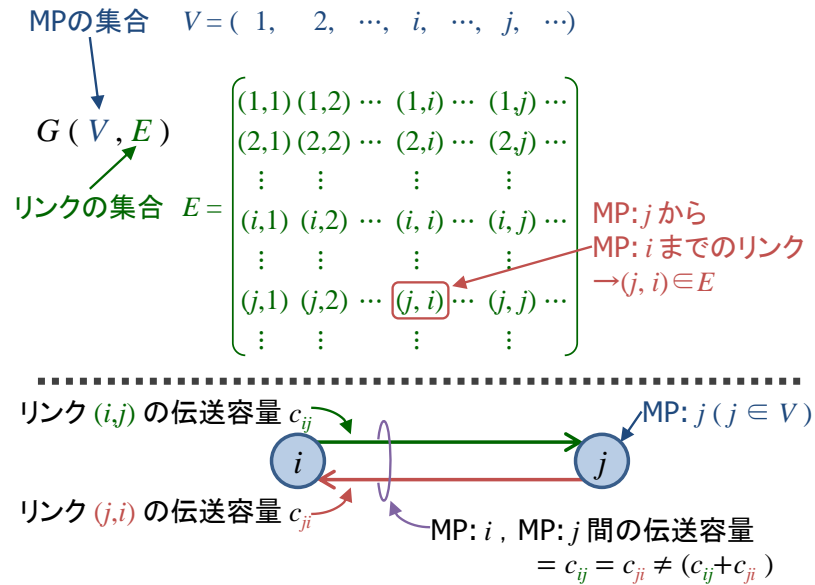


図 3.6 有向グラフ $G(V, E)$ における MP, リンク, 伝送容量の関係

図 3.7 はトラフィックを発生させた際の変数の例を示す。上位層で発生したトラフィックは識別番号を t として ($t=1, 2, \dots, T$) 送信ノード (MP) $p_t \in V$ から目的ノード (MP) $q_t \in V$ まで送られる。 N は t の集合で $t \in N$ である。 v_t はトラフィック t の流量である。 M は v_t の集合で $v_t \in M$ である。

ネットワーク層において、 t は送信ノード (MP) から中継ノード (MP) を経由して目的ノード (MP) へと伝送される。中継 MP を考慮するため、トラフィック t が経路上の (i, j) を通過する伝送量を x_{ij} とする。図 3.7 では送信 MP: $p_t = 2$, 目的 MP: $q_t = 4$ として流量 10Mbps のトラフィック t が発生している。ここで t は MP: $2 \rightarrow$ MP: $3 \rightarrow$ MP: 4 と伝送されることから $(2, 3)$, $(3, 4)$ を流れる t の伝送量 x_{23} , x_{34} はそれぞれ 10Mbps である。 t は $(1, 2)$ を経由せず、 $(3, 2)$, $(4, 3)$ は流れる向きが逆であるので x_{12} , x_{32} , x_{43} はそれぞれ 0Mbps となる。

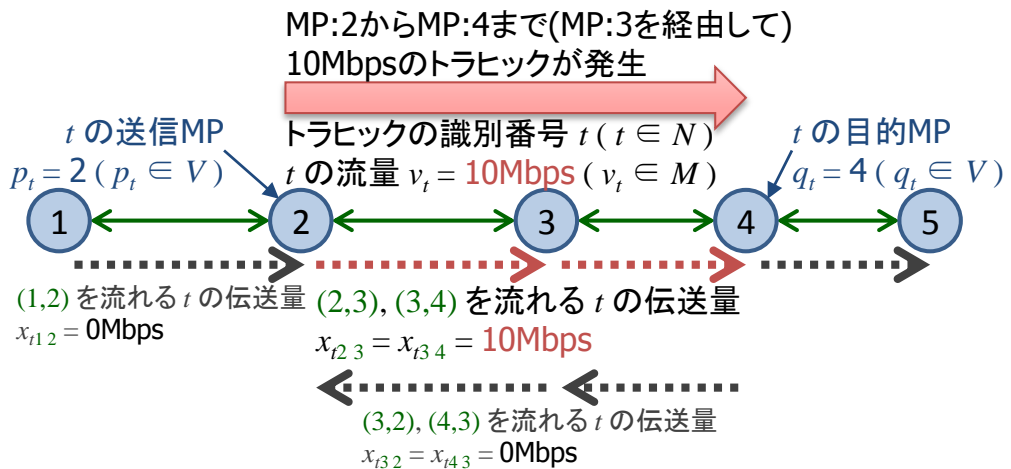


図 3.7 トラフィック発生時における変数の例

l_{ij} はリンク (i,j) の接続状態を示す。リンク (i,j) が接続されているときは $l_{ij} = 1$ を、リンク (i,j) が接続されていないときは $l_{ij} = 0$ を示す。図 3.8 は l_{ij} の決定例を示す。MP: i , MP: j 間、すなわち (i,j) 及び (j,i) を伝送するフレームが存在しない場合、リンク切断と判断し $l_{ij} = 0$ とする。 (i,j) の伝送量はすべての $t \in N$ が (i,j) を流れる伝送量の合計であるから $\sum_{t \in N} x_{tij}$ であり、 (j,i) の伝送量は $\sum_{t \in N} x_{tji}$ となるから、MP: i , MP: j 間の伝送量は $\sum_{t \in N} (x_{tij} + x_{tji})$ である。よって $\sum_{t \in N} (x_{tij} + x_{tji})$ が 0 のとき $l_{ij} = l_{ji} = 0$, 0 以外の時 $l_{ij} = l_{ji} = 1$ とする。接続しているリンク数の合計は $\sum_{i,j} l_{ij}$ で求まる。

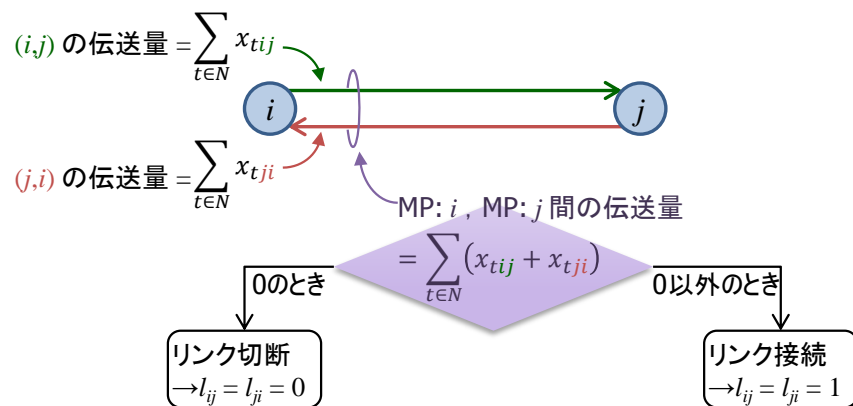


図 3.8 リンク接続状態の決定例

先に示した変数を用い、接続リンク数が最小となるリンク割当を数理計画法により(3.d)~(3.g)式により算出する。

$$\text{目的関数} \quad \min \sum_{i,j} l_{ij} \quad (3.d)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{j \in V} x_{tij} - \sum_{j \in V} x_{tji} = v_t \quad (\forall v_t \in M, i = p_t) \quad (3.e)$$

$$\sum_{j \in V} x_{tij} - \sum_{j \in V} x_{tji} = 0 \quad (\forall v_t \in M, \forall i \neq p_t, q_t \in V) \quad (3.f)$$

$$\sum_{t \in N} (x_{tij} + x_{tji}) \leq c_{ij} \times l_{ij} \quad (\forall (i,j) \in E) \quad (3.g)$$

(3.d)式は目的関数であり、(3.e)~(3.g)式は制約条件である。図 3.9 にこれらの式の主な機能とその関係をイメージ図として示す。図 3.9 はあくまでもイメージ図であり、実際の計算は図のとおりに行われない点に注意いただきたい。

リンクを伝送するフレームが存在するとき、当該リンクは切断されない。よって全ての t の伝送量 x_{ij} ($t \in N, (i,j) \in E$) の組み合わせで計算を行い (図中オレンジ枠), リンクを伝送するフレームが存在しない場合にリンクを切断すると判断し (制約条件(3.g)), 接続リンク数が最小であるリンク割当を解とする (図中赤枠, 目的関数(3.d)). ここで x_{ij} のとり得る範囲には制約があるので制約条件として含める. 伝送は, 送信 MP から中継 MP を経由し目的 MP まで行われるので, 制約条件(3.e),(3.f)としてトラフィック流量, 伝送経路に矛盾が発生する解を除外する. また, リンクには伝送容量があり, これを超える伝送を行うことができないので制約条件(3.g)として伝送容量を超える解を除外する. 以下ではこれらの詳細を示す.

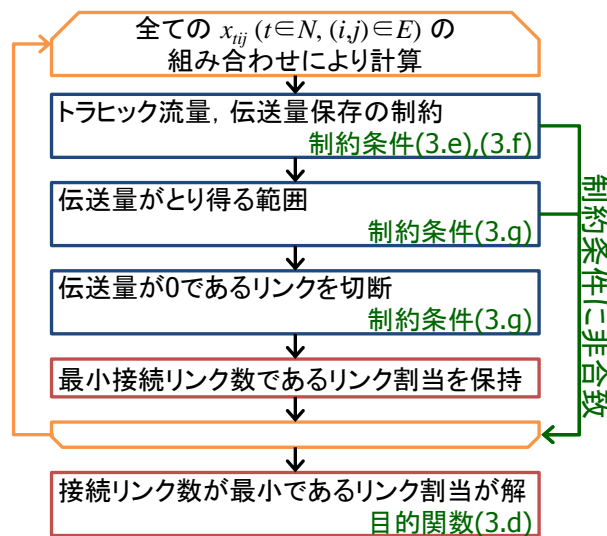


図 3.9 制約条件と目的関数の機能イメージ

ネットワークポロジとそれぞれのトラフィックが決定しているときにリンク数が最小となるリンク割当を求める. よって MP の集合 V , リンクの集合 E , トラフィックの流量の集合 M は定数として与えられる. この際, それぞれのトラフィック $v_t \in M$ がどのリンクを通るかは定めず, 伝送量 x_{ij} は変数である. また, リンク接続状況 l_{ij} は x_{ij} により求まる変数である. よって, 決定変数は x_{ij}, l_{ij} となり, これらの決定変数を変動させることでリンク数が最小となるリンク割当を求める.

(3.e), (3.f) 式はトラフィック流量, 伝送量保存の制約である. p_t から q_t まで流量 v_t のトラフィック t を流すことを考える (図 3.10). トラフィックの送信 MP: p_t では流量 v_t のトラフィックが流出し, トラフィックの目的 MP: q_t では流量 v_t のトラフィックが流入し, p_t, q_t を除く中継 MP においては流入量と流出量は等しい. (3.e)式はそれぞれのトラフィック t の送信 MP である MP: p_t から流出する伝送量 ($\sum_{j \in V} x_{tp_j}$) と MP: p_t に流入する伝送量 ($\sum_{j \in V} x_{tj_p}$) の差が, 流量 v_t に等しくなるよう加える制約条件である. (3.f)式はそれぞれのトラフィック t の中継 MP である MP: $i (i \neq p_t, q_t)$ において, 流出する伝送量 ($\sum_{j \in V} x_{tij}$) と流入する伝送量 ($\sum_{j \in V} x_{tji}$) が等しくなるよう加える制約条件である. ここで目的 MP における制約条件は, (3.e), (3.f) 式が成立する場合つねに成立する

[51]ので加えない。

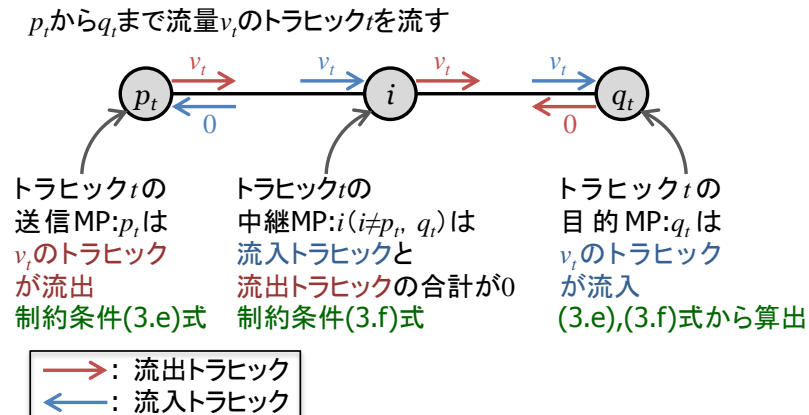


図 3.10 トラヒック流量の制約条件

(3.g)式は $\sum_{t \in N}(x_{tij} + x_{tji})$ が $c_{ij} \times l_{ij}$ を超えないよう加える制約条件である。 l_{ij} は 0 か 1 のいずれかの値をとるが、ここで常に $l_{ij}=1$ とすると、(3.g)式は MP: i , MP: j 間の伝送量 $\sum_{t \in N}(x_{tij} + x_{tji})$ が MP: i , MP: j 間の伝送容量 c_{ij} を超えないよう加える制約条件となる。尚、すべての x_{ij} は 0 以上の値を得る (図 3.7 に示すとおり、 (i,j) の伝送量 x_{ij} と (j,i) の伝送量 x_{ji} は個別に与えられ、例えば、逆方向の伝送が発生すると考え、 $x_{ji} = -(x_{ij})$ とはならない) ので、 $\sum_{t \in N}(x_{tij} + x_{tji})$ は 0 以上、 c_{ij} 以内に制約される。

(3.d)式は目的関数であり、接続リンク数の総和 $\sum_{i,j} l_{ij}$ を最小化するものである。リンク (i,j) が切断しているとき l_{ij} は 0、接続しているとき l_{ij} は 1 となるので接続リンク数は単純に l_{ij} の総和で求まる。

(3.g)式 右辺の l_{ij} は、左辺が 0 のときのみ 0 か 1 のいずれかの値をとり、左辺が 0 でない場合は常に $l_{ij} = 1$ となる。すなわち (i,j) の接続状態 l_{ij} は MP: i , MP: j 間の伝送量 $\sum_{t \in N}(x_{tij} + x_{tji})$ が 0 のときのみ 0 (切断状態) となり得る。ここで(3.d)式の目的関数により $\sum_{i,j} l_{ij}$ が最小であるものを解とするため、(3.g)式の左辺が 0 である場合、常に $l_{ij}=0$ が解となる。

数理計画法を用いた計算はネットワーク全体の経路情報と各リンクの流量を収集し、各 MP の通信要求の変化毎に集中制御により全体の経路を変更するものである。それぞれの MP と集中制御を行う MP 間の通信が必要となることから制御フレームが増大し、また経路の計算量が増大する。また、リンク切替前の (経路変更前の) 経路情報を加味しないことから、通信量の変化に伴う経路変更毎に多くのリンクの接続・切断が行われる。例えば、図 3.11 において、(a)は MP:A から MP:I へ通信要求がある場合に計算されたリンク割当例を示している。A から I の通信は A→B→C→F→I と経由される。(b)は(a)の後、MP:A から MP:I へ通信要求がなくなり、MP:D から MP:I への通信要求が発生した後、リンク割当の計算を数理計画法により行い、リンク切替を行った例である。この場合、通信要求に変化があってもリンク切替を行わずに MP:D か

ら MP:I への通信を D→E→F→I と行うことが可能である。しかし、数理計画法によるリンク割当結果によっては(b)に示すとおりリンク切替を伴う場合がある。図の例では4回のリンク接続、4回のリンク切断と合計8回のリンク切替が行われる。これは、通信要求の変化により新たなリンク接続の計算を行う際に計算前の経路情報を加味していないことにより発生する。このように、数理計画法によるリンク割当はスループット、消費電力において最適解が算出される一方でリンク切替回数が大きくなる。

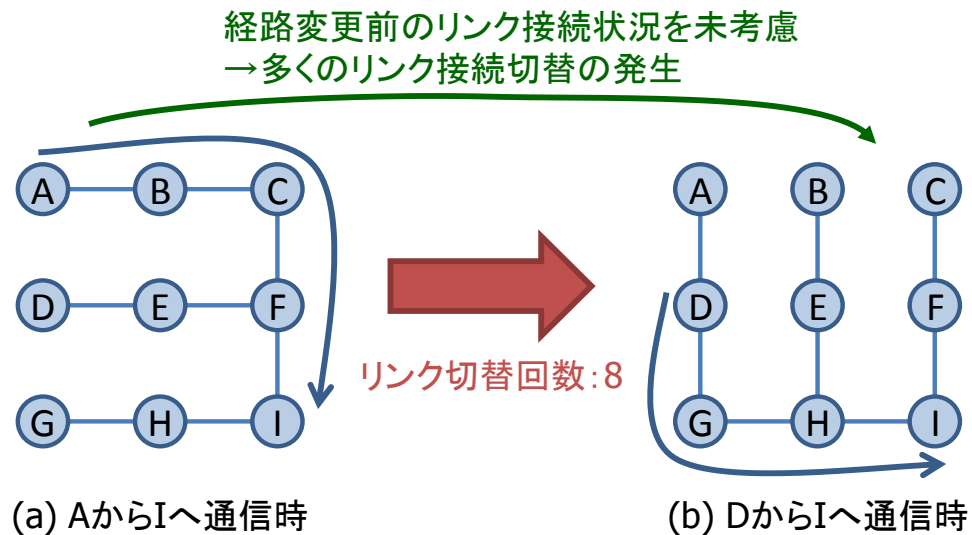


図 3.11 リンク切替回数の増大例

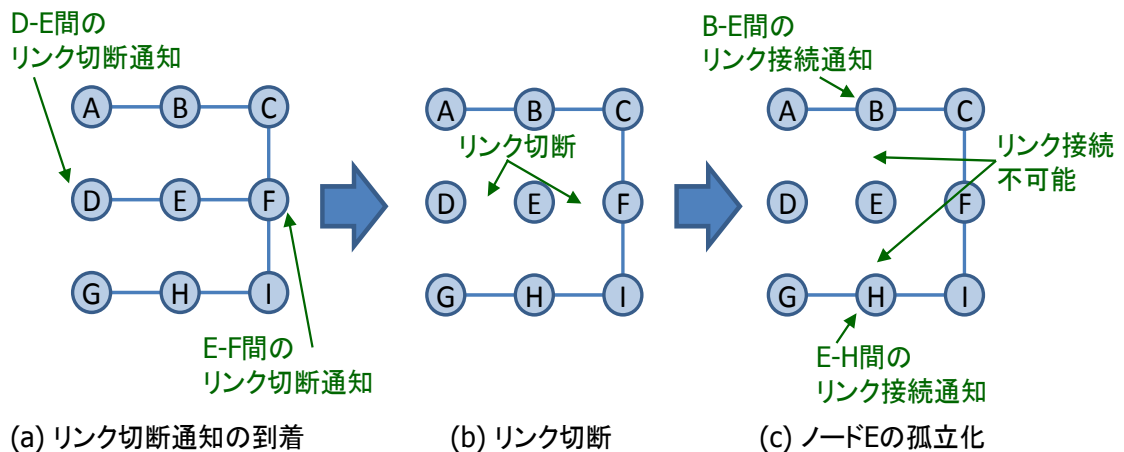


図 3.12 リンク切替順序による孤立 MP の発生例

また、経路変更前、経路変更後ともに全ての MP への到達性がある場合においても、リンクの接続・切断の順序によっては、孤立 MP が発生する。図 3.12 は図 3.11 (a) のリンク接続状態から経路計算が行われ図 3.11 (b) のリンク接続状態へ経路切替を行う場合に発生しうる孤立 MP の例を示す。図 3.11 の(a), (b)はともに全ての MP への到達性がある。ここで MP:E に注目すると、

D-E 間, E-F 間のリンクを切断し, B-E 間, E-H 間のリンクを接続することで MP:E のリンク切替が完了する. ここで, 図 3.12 (a)のとおり, D-E 間, E-F 間のリンク切断通知が先に到着し, (b)リンク切断が行われると, (c)において B-E 間, E-H 間のリンク接続通知が MP:E に届かない. また B-E 間, E-H 間のリンクが切断されていることから, MP:B, H から MP:E とのリンク接続が行えない. この様にリンク切断を伴う経路変更においてはリンク切替順序の考慮が必要である.

これらの問題点を解決するため, 本論文では図 3.4 (54 ページ) に示す指向性アンテナを用いた WMN において, MP の通信量の変化に応じてリンクの切断・接続を行い低消費電力化する際に, 全ての MP への到達性を確保し, またリンク切替回数を低減する方式を提案する. リンク切替回数の評価として 1 回のリンク割当 (通信要求の変化に伴う再計算) 当たりのリンク切断・接続切替回数を比較する. 孤立 MP の発生の評価として 1 回のリンク割当 (通信要求の変化に伴う再計算) 当たりの孤立 MP が発生しうるリンク切断・接続の発生回数 (孤立 MP 発生危険度と呼ぶ) を比較する. 図 3.12 は孤立 MP の発生例を示したが, 切替手順によっては孤立リンクが発生しない. よって, 切替手順によっては孤立 MP が発生するようなリンク切替の平均回数を孤立 MP 発生危険度とした.

3.3 提案方式

指向性アンテナを用いた低消費電力な WMN を実現するために通信要求の変化に応じて動的にリンク割当を変化する際に、少ないリンク切替回数で孤立 MP が発生しない手法を提案する。提案方式は各 MP が他の MP から通知されたルート MP までの空き容量を予測した値である残余帯域メッセージと、接続しているリンクに基づきリンク切替を行う。リンク切替の判断に切替前の接続情報を加味することにより頻繁なリンク切替を削減し、ツリートポロジを基にした切替を実現することで孤立リンクを発生させない方式である。

3.3.1 提案方式の概要

提案方式は通信要求の変化に応じツリートポロジとメッシュトポロジとを段階的に変化させる (図 3.13)。3.1.1 項に示すようにツリートポロジは (全ての MP との到達性を前提に) リンク接続数が最小となるリンクトポロジである。通信要求が少なくツリートポロジで十分に通信要求を満たす場合、徐々に接続リンク数の削減を行いツリートポロジへと変化させることで (図 3.13(a)), 消費電力を削減する。通信要求が大きく、ツリートポロジでは十分な通信速度が得られない場合に (b), (c) のように徐々に接続リンク数を増加させることで消費電力が大きくなるが通信要求を満たすメッシュトポロジへと移行させる。

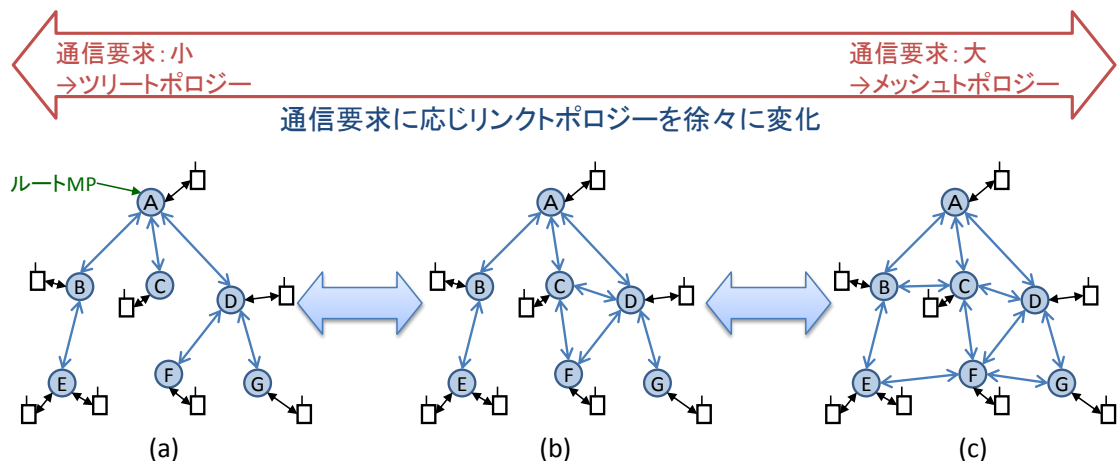


図 3.13 リンク切替方針

提案方式はリンク切替回数が少ない手法である。MP は定期的に他の MP からルート MP までの空き帯域を予測した値である残余帯域メッセージを受け取る。MP は (1)残余帯域メッセージから得られる値によりリンクの接続が必要と判断し、接続可能であるリンクがある場合にリンクの接続を行い、(2)切断可能なリンクがあり、残余帯域メッセージから得られる値によりリンク切断

を行っても十分に通信が可能な場合にリンクの切断を行う。リンク切替の判断はそれぞれの MP がその時点で割り当てているリンクにリンクを追加・削除する形でおこなわれる。3.2.1 項では切替前のリンク割当状況を考慮しないことによるリンク切替回数の増大を問題点としたが、提案方式はリンク切替に切替前のリンク割当状況を加味することでリンク切替回数を削減する。

また、提案方式は孤立 MP を派生させない手法である。リンク切替に際し通信要求が小さく接続リンク数を最小にする場合でもツリートポロジーを保持する。ツリートポロジーは全ての MP との到達性が確保されており、リンク切替時においてもリンクの切断はツリートポロジーを保持する最低 1 つのリンクを保持して行う。ツリートポロジーはそれぞれの MP から 1 つをルート MP として選択し作成される。図 3.14 は MPP をルート MP と選択した例である。相対的にルート MP に近い (ルート MP からのホップ数が少ない) MP を上流 MP とし、ルート MP から遠い (ルート MP からのホップ数が多い) MP を下流 MP とする。リンクの切断はツリートポロジーを保持するために当該リンクの下流 MP のみが少なくとも 1 つの上流 MP とのリンクを保持して行う。図 3.14 を例にすると MP:B,C,D はそれぞれ MP:F の上流 MP であり MP:F は MP:B,C,D の下流 MP である。MP:F は上流 MP と接続する 3 つのリンクを保持しているため 3 つのうち 1 つのみを保持して残りのリンクを切断することが可能である。全ての MP が必ず 1 つ以上の上流 MP とリンク接続を行うことでリンクポロジーを保持する。これらのことにより孤立 MP が発生しない。

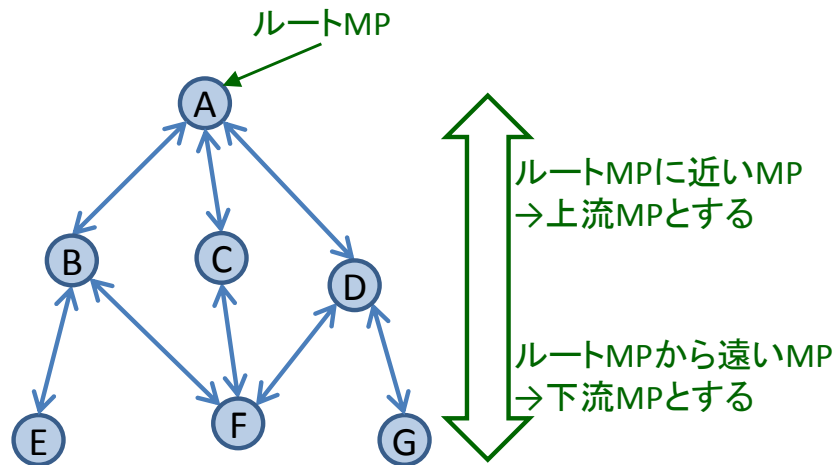


図 3.14 ルート MP と上流・下流 MP の設定

3.3.2 提案方式のアルゴリズム

3.3.1 項で示した基本方針を実現するアルゴリズムを以下に示す。

提案方式はそれぞれの MP において上流リンクテーブルと下流ルーティングテーブルを作成し、データの送受信やメッセージの交換によりそれぞれのテーブルを更新する。表 3.3 に 2 種類

のテーブルをまとめる。

表 3.3 それぞれの MP が保持するテーブル

名 称	上流リンクテーブル	下流ルーティングテーブル
保持する MP	<ul style="list-style-type: none"> ・ ルート MP を除く全ての MP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ルート MP ・ 下流 MP とリンク接続可能な MP
機 能	<ul style="list-style-type: none"> ・ リンク切替の判断要素 ・ 上流 MP 向けフレームの送信割合の判断要素 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下流 MP 向けフレームのルーティングテーブル

先に示したとおり、リンク切替の判断は下流 MP が上流 MP と接続可能なリンクに対してのみ行う。そのため隣接する上流 MP を行にエンタリした上流リンクテーブルを下流 MP が持つ。ルート MP は上流に WMN を構成するノードを持たないので上流リンクテーブルを持たないが、そのほかの全ての MP は上流 MP (上流に存在するルート MP を含む) を持つので上流リンクテーブルを保持する。

フレームのルーティングテーブルは、当該 MP に属する下流 MP に対してのみ保持する。よって MP が受信したフレームの宛先が当該 MP に属する下流 MP あてであった場合、下流ルーティングテーブルを参考に、下流 MP へと送信を行う。それ以外のフレームは上流リンクテーブルを参照し定める送信割合にて上流 MP へと送信を行う。

上流リンクテーブルは上流リンクの存在しないルート MP を除く全ての MP が作成する。図 3.15 のとおり、上流リンクテーブルの列は MP 記号、ホップ番号、リンク流量、残余帯域の 4 項目で構成される。MP 記号は当該 MP と隣接する全てのの上流 MP の MP を識別する記号 (いわゆる MP の名前) がエンタリされる。ホップ番号は当該 MP のホップ番号が代入される。リンク流量は当該 MP と接続するリンクの現在の流量 (Mbps) が代入される。この値は、それぞれの MP の測定により得られる。すなわち 1 秒間に当該リンクを用いて送受信されたデータ量 (Mbit) 残余帯域は当該 MP と接続するリンクを用いてルート MP に到達する経路うち、現在のリンク接続において追加で通信可能な通信量の予測値が代入される。

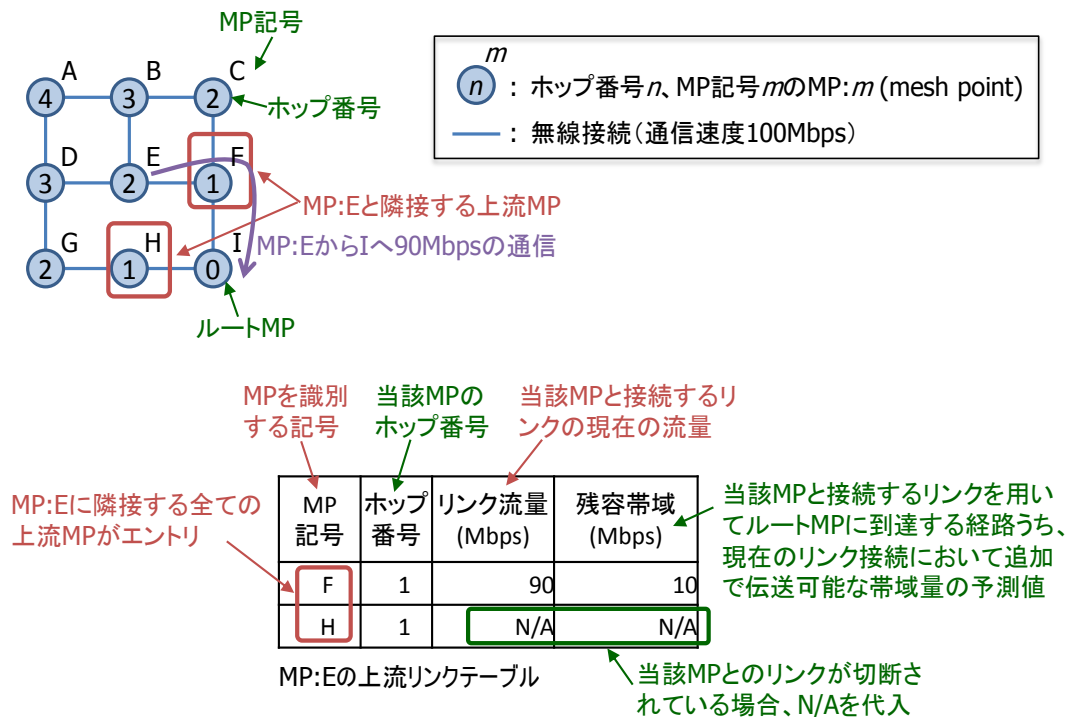


図 3.15 上流リンクテーブルの例

3.3.2.1 リンク切替

通信量の増減に応じてリンク切替を行う。リンク切替は上流リンクテーブルを参照し決定される。上流リンクテーブルは WMN 構成時に作成され (初期手順), 随時 MP 間でメッセージの交換により更新され (上流リンクテーブル更新手順), 上流リンクテーブルを基にリンク切替が行われる (リンク切替手順)。

3.3.2.1.1 初期手順

初期手順では上流リンクテーブルが作成される。図 1.4 (5 ページ) で示した多くのトラヒックは WMN 外部のサーバーとの通信が大部分を占めるので MPP に通信が集中することから MPP をルート MP とするのが望ましい。他方, 1.2.1.2 で示した地域網の構築を WMN で行う場合, WMN 配下の任意の MP がサーバーとなり通信が集中することが想定される。よって任意の MP がルート MP となるのが望ましい。提案方式は通信要求の変化に応じてルート MP となる MP の変更が可能であるが, 初期手順では各 MP 間での通信要求の交換が行われていないことから MPP をルート MP とする木構造となるよう値が設定される。木構造は上流 MP と下流 MP を設定することで作成される。以下に手順の詳細を示す。

Step 1: それぞれの MP のルート MP からの最短ホップ数を求める (図 3.16(a))

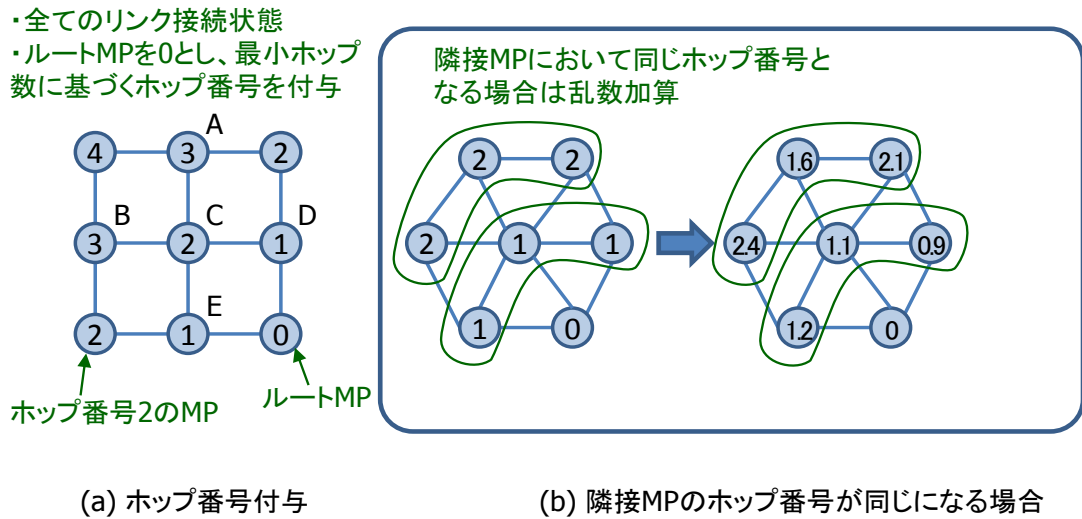
WMN を構成する全ての MP とルート MP の隣接するリンクを全て接続した状態でルート MP からのホップ数を求める。ルート MP のホップ数を 0 とし、それぞれの MP はルート MP からの最短ホップ数を記憶する。

Step 2: それぞれの MP は上流リンクテーブルを作成する (図 3.16(c))

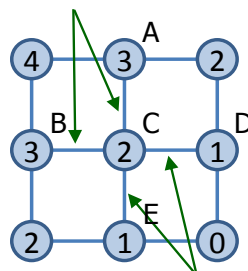
それぞれの MP は隣接する全ての MP, ルート MP と Step 1 で記憶したホップ数をホップ番号として通知しあう。隣接する MP, ルート MP のホップ番号が大きければ上流 MP (ルート MP) とし、小さければ下流 MP とする。隣接する MP のホップ番号が自身のホップ番号と同じである場合、上流と下流との判断がおこなわれないことからホップ番号に -0.5 を超え 0.5 を下回る変数を加算し再度ホップ番号を通知する (図 3.16 (b))。隣接する MP との自身のホップ番号は全て異なるものとなり、全ての隣接する MP と上流, 下流の関係が作成される。

それぞれの MP は隣接する上流 MP を行として上流リンクテーブルを作成する。図 3.16(c)の MP:C に注目すると自身のホップ番号 2 より値の小さなホップ番号を持つ MP:D,E が上流 MP となる。よって MP:C は上流リンクテーブルに MP:D と E の行をエントリさせ上流リンクテーブルを作成する。

Step 1,2 によりツリートポロジを基にしたリンクトポロジが作成される。3.3.1 項で示したとおり全ての下流 MP が 1 のみの上流 MP とのリンクを保持してその他のリンクを切断した例を図 3.16(d)に示す。図の例ではルート MP 木構造のルート (頂点) としたツリートポロジになっていることが分かる。

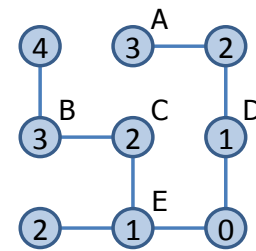


・MP:Cは隣接するMPのうちホップ番号の大きなMP:A、MP:Bのリンク接続・切断を判断しない



・MP:Cは隣接するMPのうちホップ番号の小さなMP:D、MP:Eどちらかとのリンクを常に保持

(c) MP:Cが切断・接続を判断するリンク



(d) 最小リンク接続例

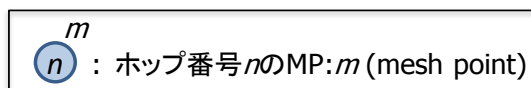


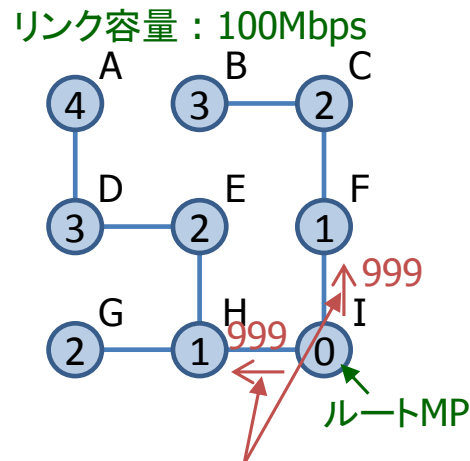
図 3.16 リンク切替の初期手順

3.3.2.1.2 上流リンクテーブル更新手順

リンク切替は上流リンクテーブル中のルート MP までの空き帯域を予測した値である残余帯域を基に行う。残余帯域は残余帯域メッセージを基に更新される。残余帯域メッセージはルート MP から全ての下流 MP へと順次送信される。以下に手順の詳細を示す。

Step 3: ルート MP は隣接する下流 MP に残余帯域メッセージを通知する (図 3.17)

図では例としてルート MP が隣接する下流 MP に 999 と残余帯域メッセージを通知している。ルート MP が通知する残余帯域メッセージはリンク流量に対し十分に大きな値とする。図の例では設定した伝送容量 100Mbps に対し 999 は十分に大きな値である。



MPPは十分に大きな値を残余帯域メッセージとしてMP:F,Hに通知する

図 3.17 ルート MP による残余帯域メッセージの送信

Step 4: 残余帯域メッセージを受取った MP は残余帯域を更新する (図 3.18)

残余帯域メッセージを受取った MP は受取ったメッセージの値と当該リンクの通信速度からリンク流量を差し引いた値とを比較し、小さい値を残余帯域とする. 図の場合は受取ったメッセージの値が 999 で当該リンクの当該リンクの通信速度からリンク流量を差し引いた値が 100 であるから小さな値である 100 を残余帯域として更新する.

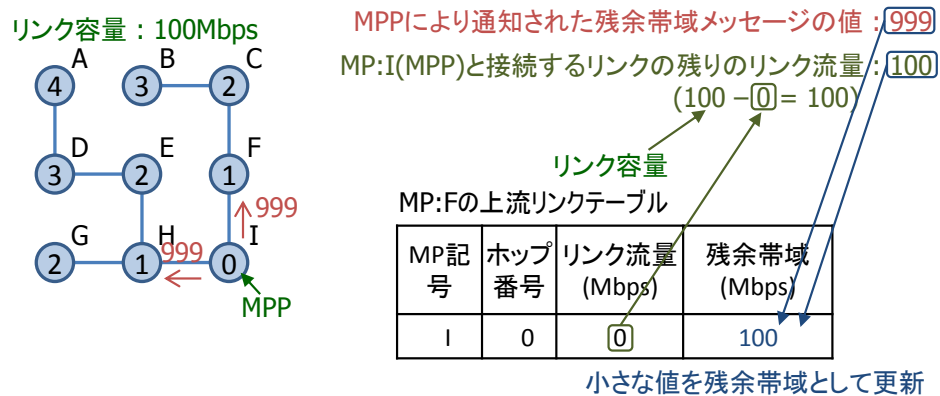


図 3.18 残余帯域の更新

Step 5: 残余帯域を更新した MP は下流 MP に残余帯域メッセージを通知する (図 3.18)

残余帯域が更新された場合, 上流リンクテーブルに含まれる全てのの上流 MP の残余帯域の合計 (N/A の場合は無視する) をリンク接続されている全てのの下流 MP に対し残余帯域メッセージとして通知する.

ルート MP が送信する残余帯域メッセージがトリガとなり, 下流 MP が順次その下流の MP に残余帯域メッセージを送信することで WMN 全体において上流リンクテーブル中の残余帯域の

値が更新される。先に示したとおり、残余帯域は当該 MP と接続するリンクを用いてルート MP に到達する経路うち、現在のリンク接続において追加で送信可能な通信量の予測値である。Step 4 は上流から送られてくる残余帯域メッセージの値（すなわち、上流 MP が送信可能と予測する値）と当該リンクにおいて追加で送信可能である流量を比較している。上流 MP が多くの通信量を送信可能としても、当該リンクにおいて流量に余裕がない場合は通信できないことから、それぞれを比較し、小さな値を残余帯域とする。

Step 5 は自身が保持する上流リンクテーブル中の残余帯域を基に予測した残余帯域を下流に通知するプロセスである。図 3.19 において MP:E に注目すると MP:F から残余帯域 60 とのメッセージを、MP:H から残余帯域 70 とのメッセージを受け取っている。MP:E はルート MP との通信量を追加する場合、MP:F 経由で 60Mbps、MP:H 経由で 70Mbps の追加が可能である。すなわち MP:E とルート MP との通信は 60Mbps と 70Mbps を加算した 130Mbps の追加が可能である。図の例では MP:D に 130 と通知しても伝送速度の 100Mbps を上回るため、Step 1.において 100 以下の値に修正されるが、通知される残余帯域メッセージの値が小さい場合は上流の複数のリンクを用いることで大きな通信速度を得られることから提案方式では残余帯域を加算して通知する。

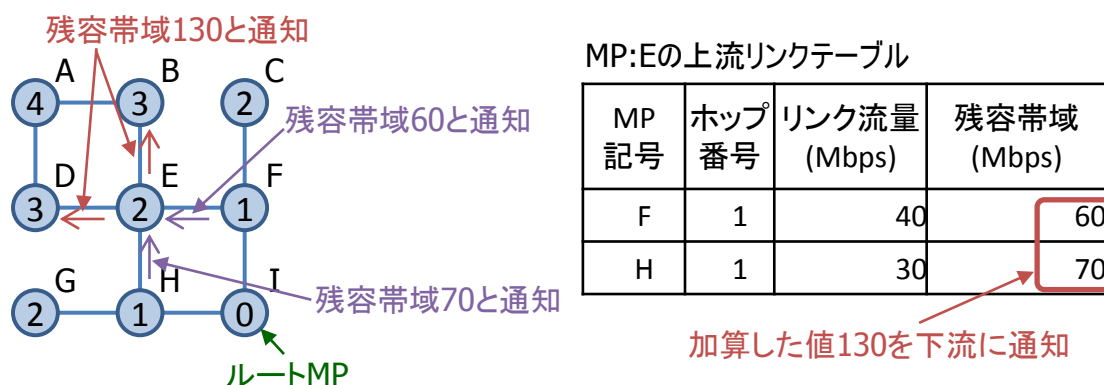


図 3.19 MP による残余帯域メッセージの送信

3.3.2.1.3 リンク切替手順

通信量が多く、既存のリンク数では十分な通信が行えない場合リンクの接続を行い、通信量が少なく余剰なリンクが存在する場合リンクの切断を行う。このリンク増減の判断基準として当該 MP 中の上流リンクテーブルにおける残余帯域の総和を用いる。リンク流量の総和に基づかず、残余帯域の総和を用いる理由としては 3.1.2 項で示したとおり、指向性アンテナを想定したシステムモデルにおいてはボトルネックリンクを迂回することによる通信速度向上が可能であることによる。

リンク数が少ないほど低消費電力であることから、当該通信量においてリンク数を最小とすることが要求されるが、リンク切替には時間を要することから、ある程度の通信量が増加した場合でもリンクの接続プロセスを待つことなく通信が行えることが望ましい。提案方式は、リンク数を増減する判断基準に当該通信量にある程度の余裕を持たせることで、通信量増加時でもリンク接続プロセスを待つことなく通信可能とする。現在、**図 1.4 (5 ページ)** に示したとおり、通信トラヒックの大部分をビデオストリーミングが占めていることから、提案方式では地上デジタル放送(ハイビジョン)の送信速度である 15Mbps をしきい値 T として定め、通信量に余裕を持たせる。また、残余帯域の値は上流から通知された値を基に下流に通知する性質上、上流リンクと下流リンクで同様の値となりやすく一斉にリンク接続・切断が行われることが想定される。また、提案方式はツリートポロジータメッシュトポロジータを動的に変化させる方式であり、ツリートポロジータにおいてはルート MP に通信が集約しやすいことからルート MP に近いリンクを優先して接続することによる通信速度向上が見込まれる。そこで、残余帯域の総和との比較対象を T とせず、 $T + U$ とする。

ただし、

$$U = \begin{cases} U' & (U' > 0) \\ 0 & (U' < 0) \end{cases} \quad (3.h)$$

$$U' = \left(\frac{32 - H'}{32} \right) T \quad (3.i)$$

$$H' = \text{当該 MP のホップ番号を小数第1位で四捨五入した値} \quad (3.j)$$

である。

(3.j)式で四捨五入する理由は**図 3.16 (b)**で示した乱数の影響を除くためである。**(3.i)式**の U はしきい値が大きいほどリンク接続しやすくなることから、ルート MP から近い MP である程大きな値となるよう定めた値である。ここで 32 は [37]で定められた最大の MP 数を用いた。システムモデルにおいて特段 MP の最大数を定めていないので、 H' が 32 を超えることが想定され、その場合 U が負の値となることから、**式(3.h)**において U が負の値となる場合は 0 とする。

Step 6: リンクの接続

それぞれの MP において、上流リンクに切断リンクが存在する場合、以下の手順で接続するリンクを選択する。

$$\text{当該上流リンクテーブル中の残余帯域の合計} < T + U \quad (3.k)$$

であるとき、切断リンクのうちホップ番号が最小である MP とのリンクを選択する。ただし、切断リンクのうちホップ番号が最小である MP が複数存在する場合はランダムに選択する。

ここで、ホップ番号が最小である MP を選択する理由は、ルート MP に通信が集約しやすいことによる。

上記の手順によりリンクが選定された場合、リンク接続を行うが、当該リンクは切断中であるた

め、選定した MP (以降、選定 MP と呼ぶ) から選定されたリンクと接続された MP (以降、被選定 MP と呼ぶ) へ直接メッセージを送信することは不可能である。提案手法においてはルート MP を介してリンク接続メッセージを送信する。以下にその手順を示す。

- ・ 選定 MP は被選定 MP と接続されるリンクの受信アンテナをアクティブにする。
- ・ 選定 MP はルート MP へ自身の MP 記号と被選定 MP の MP 記号をリンク接続メッセージとして送信する。
- ・ ルート MP は被選定 MP へ選定 MP とのリンク接続メッセージを送信する。
- ・ 被選定 MP がルート MP からリンク接続メッセージを受け取ると、選定 MP とのリンクを接続する。

Step 7: リンクの切断

それぞれの MP において上流リンクに2以上のリンクが存在する際に、以下の手順で切断するリンクを選択する。ここで、上流リンクに2以上のリンクが存在する際とするのは 3.3.1 項で示したとおり、すべての MP への到達性を実現するためである。

- ・ それぞれの MP (以降、選定 MP と呼ぶ) において当該上流リンクテーブル中のリンク接続されている MP の中で残余帯域が最も小さい MP (以降、被選定 MP と呼ぶ) を選択する。ただしリンク接続されている MP の中で残余帯域が最も小さい MP が複数存在する場合はランダムに選択する。

$$\begin{aligned} & \text{(当該上流リンクテーブル中の選定 MP を除いた残余帯域の合計)} \\ & \quad - \text{選定 MP とのリンク流量} \geq T + U + V \end{aligned} \quad (3.1)$$

であるとき、選定 MP は被選定 MP とのリンク切断を決定する。

ここで、リンク接続手順とリンク切断手順で同じしきい値を指定すると、通信量が一定の場合に繰り返しリンク接続、リンク切断が行われることを防ぐため、しきい値に V の幅を持たせる。 V の値は、 $T + U$ と比べて小さい値として 5Mbps とする。(3.1)式はリンクを切断した後も、ルート MP までの接続が $T + U + V$ Mbps の余裕をもって行えるかを計算するものである。

上記の手順によりリンクが選定された場合、リンク切断を行う。選定 MP と被選定 MP はリンク切断前に直接のメッセージを送信が可能であることから、以下の手順でリンク切断を行う。

- ・ 選定 MP は被選定 MP へリンク切断メッセージを送る。
- ・ 被選定 MP は選定 MP へリンク切断の確認メッセージを送る。
- ・ 選定 MP と被選定 MP とのリンクを切断する。

接続するリンクの判断は、判断時に切断しているリンクから、切断するリンクの判断は、判断時に接続しているリンクから選択される。すなわち、全てのの上流リンクのリンク配置形態から最適な形態を選択しない。これは経路切替前のリンク情報を加味することで、切替回数を削減するためである。

3.3.2.2 フレーム送信手順

ルーティング割合は下流から上流へ通知されるルーティング割合メッセージにより更新される。ルートMPを除くすべてのMPは上流リンクテーブル（下流ルーティングテーブルではない）を基に自身のルーティング割合をルーティング割合メッセージとして送信する。ルーティング割合メッセージは当該MPの上流リンクテーブル中の残余帯域がそれぞれ同等の値となるよう決定する。

例えば、

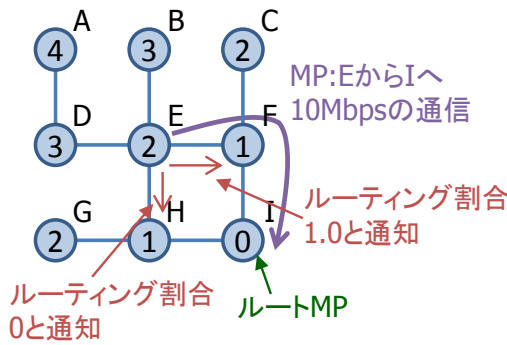
図 3.20 に示すとおり MP:E の上流リンクテーブルが決定されているとする。MP:E がルーティング割合メッセージを送信する際は、図中の残余帯域の値が同等の値となるようルーティング割合を決定する。上流リンクテーブルに変化がなく、(a)のように MP:E から I へ 10Mbps の通信を行う場合、残余帯域の差分は 10 であることから、全ての通信を MP:F 経由で行うこととする。よって MP:E が F へ送信するルーティング割合メッセージの値は 1.0 となり、MP:E が H へ送信するルーティング割合メッセージの値は 0 となる。(b)のように MP:E から I へ 40Mbps の通信を行う場合、残余帯域の差分は 10 であることから、10Mbps の通信は MP:F 経由で行うこととする。残りの 30Mbps は MP:F と H それぞれ半分の 15Mbps ずつ送信を配分する。最終的に MP:F への送信は 25Mbps, MP:H への送信は 15Mbps となることから MP:E が F へ通知するルーティング割合メッセージの値は $(25/40)=0.625$ となり、MP:E が H へ通知するルーティング割合メッセージの値は $(15/40)=0.375$ となる。

MP:Eの上流リンクテーブル

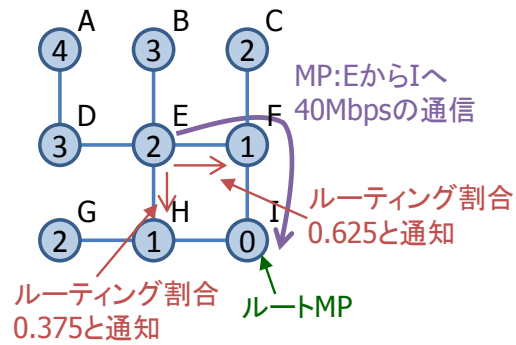
MP 記号	ホップ 番号	リンク流量 (Mbps)	残容帯域 (Mbps)
F	1	70	30
H	1	80	20

m
 n : ホップ番号 n 、MP記号 m のMP: m (mesh point)
 — : 無線接続 (通信速度100Mbps)

残容帯域が同等となるよう
 ルーティング割合メッセージを送信



(a) MP:EからIへ10Mbpsの
 通信を新たに行う場合



(b) MP:EからIへ40Mbpsの
 通信を新たに行う場合

図 3.20 ルーティング割合メッセージの値

下流からのルーティング割合メッセージを受け取ると、下流ルーティングテーブルの値を更新する。さらにその値を上流 MP へと通知するが、この際、上流リンクへの経路が複数ある場合は、下流からのルーティングテーブルも同様に割り振り上流リンクに通知する。

下流ルーティングテーブルは下流からのルーティング情報に基づき作成される。

図 3.21 のとおり、下流ルーティングテーブルの行は当該 MP の下流に属する MP が目的 MP 記号としてエンタリされる。下流ルーティングテーブルの列は当該 MP と隣接するすべての下流 MP がエンタリされる。ルーティング比率は目的 MP へ送信するデータをどのリンクからどの割合で送出するかを定めた値である。図の例では MP:E に属する下流 MP は MP:A,D のみである。ここで MP:B は MP:B-E 間のリンクが切断されていることから属さない。よって MP:E の下流ルーティングテーブルに MP:A と D の行がエンタリされる。MP:E と隣接する下流 MP は MP:B,D である。よって MP:E の下流ルーティングテーブルのルーティング割合中に MP:B と MP:D の列が作成される。MP:B とのリンクは切断されており、当該リンクでの通信が行えないことから MP:B の列中の項目は N/A とされ、下流リンクは MP:B と 1 つのみ接続されているので MP:B の列中の項目に 1.0 が含まれている。MP:E が MP:A を宛先とするフレームを受信した場合、下流ルーティングテーブルを参照し、MP:D とのリンクを用いて 1.0 の割合で (すなわち全て) 送信を行う。

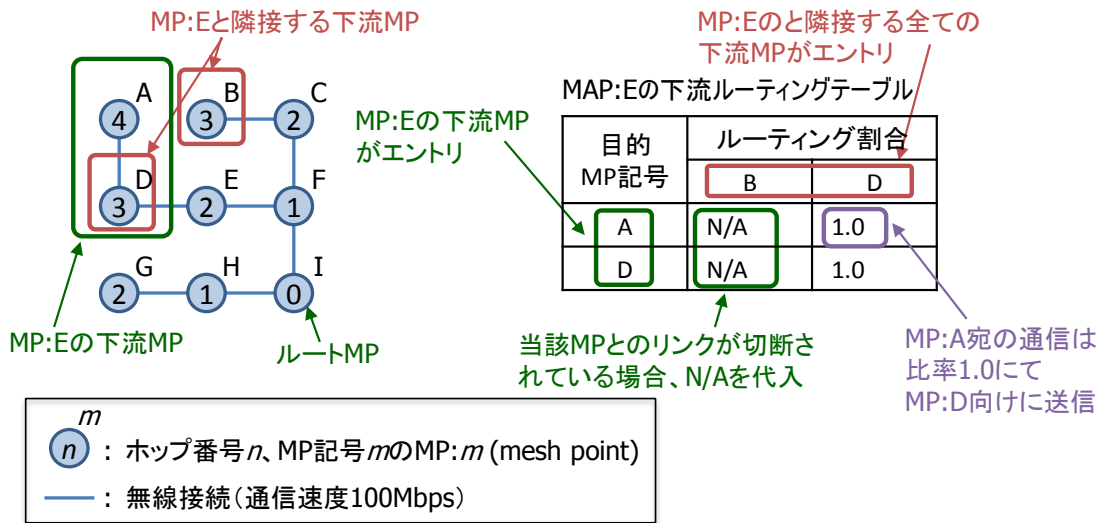


図 3.21 下流ルーティングテーブルの例

上流へのデータ送信手順，下流へのデータ送信手順ともに複数の経路を用いて通信可能な方式であることから，迂回経路を用いることが可能で WMN の高速化が実現される。

3.3.2.3 ルート MP 変更手順

ルート MP を介した下流 MP 間の通信は多くのホップ数を要し，WMN 内の通信量が増大することから，多くの通信が集中する MP をルート MP する必要がある。通信の集中する MP は変化することから定期的なルート MP の変更が必要である。提案方式ではルート MP の変更のため，それぞれの MP は定期的にルート MP に対し当該 MP の通信要求量を通知する。ルート MP は自身の通信要求量を超える WMN 配下の MP が存在する場合，配下の全ての MP に対してルート MP の変更を通知する。

ルート MP の変更は 3.3.2.1.1 に示した初期手順により行う。

3.3.3 リンク速度が異なる WMN の検討

3.3.2.3 では通信の集中する MP をルート MP とし，ルート MP を介した下流 MP 間の通信を削減するとした。他方，ルート MP の最大通信量は図 3.3(b)に示したようにルート MP が接続可能なリンクの伝送容量の総和に制限される。この問題を解決する手段として，予め通信が集中する MP と接続するリンクの伝送速度を他のリンクの伝送速度より大きく設定（設置）することが有効である。下流 MP で集約された通信がルート MP へとさらに集約される際に，伝送速度の大きなリンクを用いることでルート MP がボトルネックとなることを回避する。

提案方式はこうした WMN 配下の MP が接続するリンク速度がそれぞれ異なる場合でも機能する。3.3.2.1.2 の Step 5 に示したとおり、上流 MP はルート MP と追加で通信可能な通信量を残余帯域として予測しその値をそのまま 1 つ以上の下流 MP へと通知する。ルート MP-上流 MP 間のリンク速度が上流 MP-下流 MP 間のリンク速度より大きく、上流 MP の残余帯域が下流 MP と接続するリンク速度より大きい場合、下流 MP は上流 MP との残余帯域を上流 MP-下流 MP 間のリンク速度に制限するが、上流 MP は 1 つ以上の下流 MP へ残余帯域を通知することから複数の下流 MP からの通信は上流 MP において集約される。ルート MP-上流 MP 間のリンク速度が上流 MP-下流 MP 間のリンク速度より小さい場合は通信の集約が行われませんが、通信の集中する MP はに 3.3.2.3 によりルート MP (すなわち上流 MP) となるため上流と下流とが入れ替わることにより集約される。

3.4 検証結果

シミュレーションにより検証を行う。3.2.1 項で示した線形計画法を既存方式として提案方式との比較をする。

図 3.22 はシミュレーションに用いたネットワークポロジである。16 台の MP が 4×4 の格子状に配置される。ルート MP を図中右下の MP 16 とする。伝送容量 (c_{ij}) は 100Mbps, 最大の接続リンク数は 24 である。ルート MP は格子の角に置かれ、2 つのリンクを接続可能であるため、最大 200Mbps での通信が可能である。

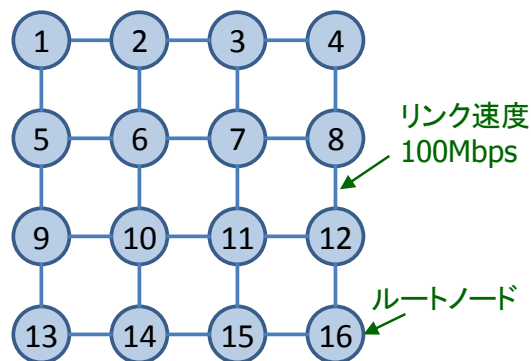


図 3.22 シミュレーションに用いたネットワークポロジ

WMN を構成する N 台の MP のうち n 番目の MP を MP_n とする。ルート MP を MP_{root} とし、 MP_{root} は MP_n のどれか 1 つである (検証では $N=16$, $MP_{root}=MP_{16}$ を用いる)。

図 3.23 はシミュレーション手順を示す。 MP_{root} と MP_{root} を除く MP_n 間はそれぞれの時刻 w において $\sum_n v_{wn} = v_{sum}$ となるよう流量 v_{wn} のトラフィックをランダムに発生させる。これらの計算は独自

の C++プログラムにより 0 から 100 の 101 回行われ (図 3.23 (1)) それぞれ保持される。

それぞれの時刻 w で MP_n に流量 v_{wn} のトラヒックを発生させたときのリンク割当を (2)既存方式, (3)提案方式それぞれについて行う。(2)既存方式は線形計画法の計算ソフトウェアである GLPK (GNU Linear Programming Kit) [52]により行う。既存方式はリンク切替前のリンク割当状況を考慮しないので、この計算はそれぞれの時刻 w において個別に行うことができる。(3)提案方式は独自の C++プログラムにより計算を行う。提案方式はリンク切替前のリンク割当状況を考慮するので、 w におけるリンク割当は $w-1$ におけるリンク割当を参照し、順次行われる。

(2), (3)それぞれのリンク割当の結果を基に独自の Perl プログラムにより (4)平均リンク接続数, (5)平均リンク切替回数, 孤立 MP 発生危険度の算出をそれぞれおこなう。(4)平均リンク接続数は $w=1$ から $w=100$ までの全てのリンク接続数の平均を求めることで算出される。(5)平均リンク切替回数, 孤立 MP 発生危険度は w と $w-1$ ($w=1,2,\dots,100$) それぞれのリンク割当を基に導出される。リンク切替回数は新たに接続されたリンクと切断されたリンクの和である。孤立 MP 発生危険度は 3.2.1 項後半 (62 ページ) 以降に示した方法により計算される。平均リンク切替回数, 孤立 MP 発生危険度ともに $w=1$ から $w=100$ までの平均値となる。

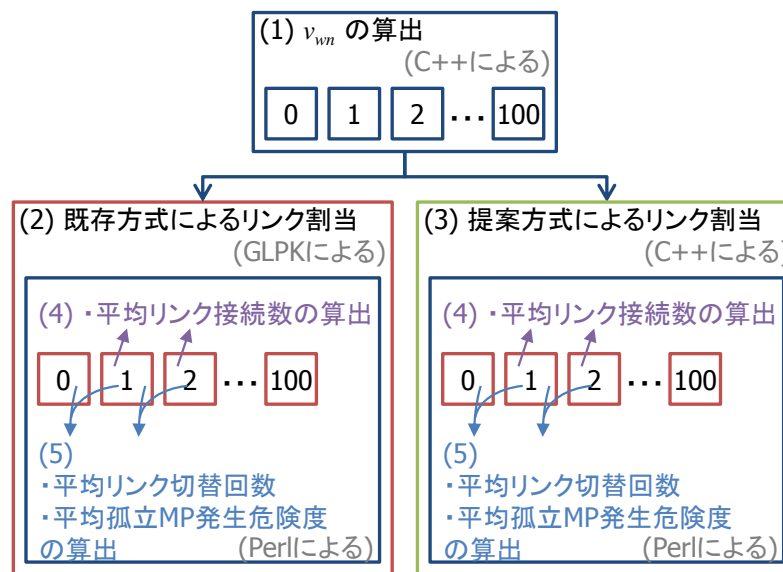


図 3.23 シミュレーション手順

ここで MP_{root} は固定とすることから, 3.3.2.3 で示したルート MP の変更は行われないものとする。また, それぞれのリンク速度は 100Mbps の固定とし 3.3.3 項の評価は行わない。

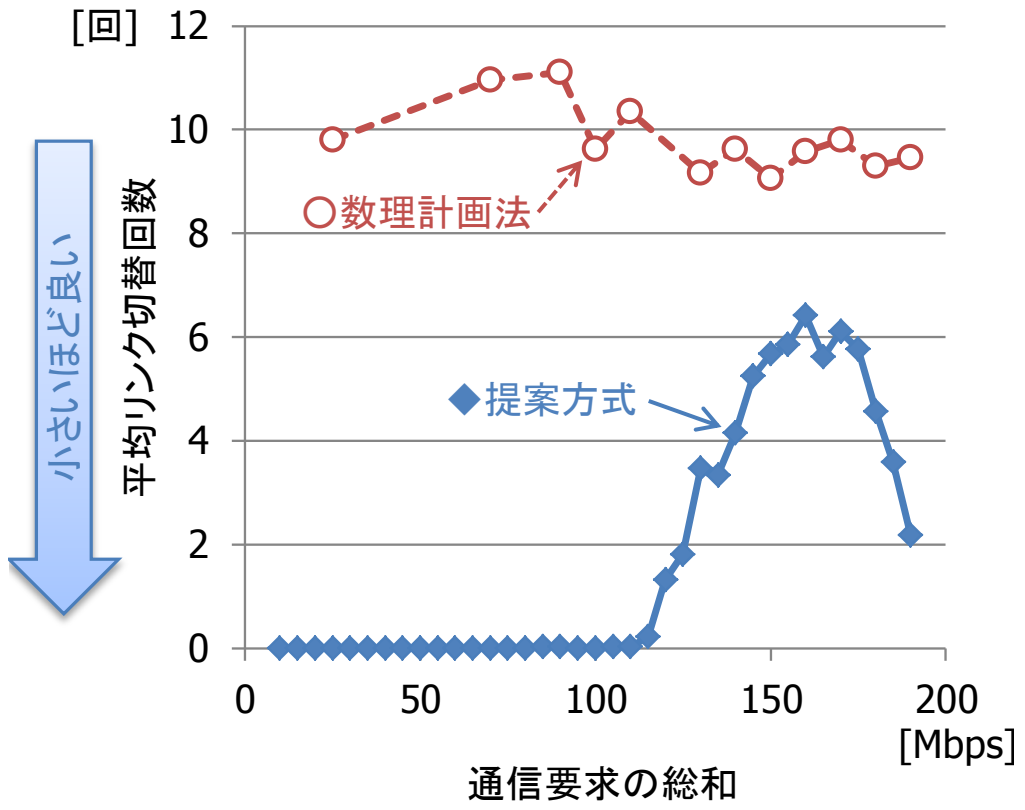


図 3.24 平均リンク切替回数の比較

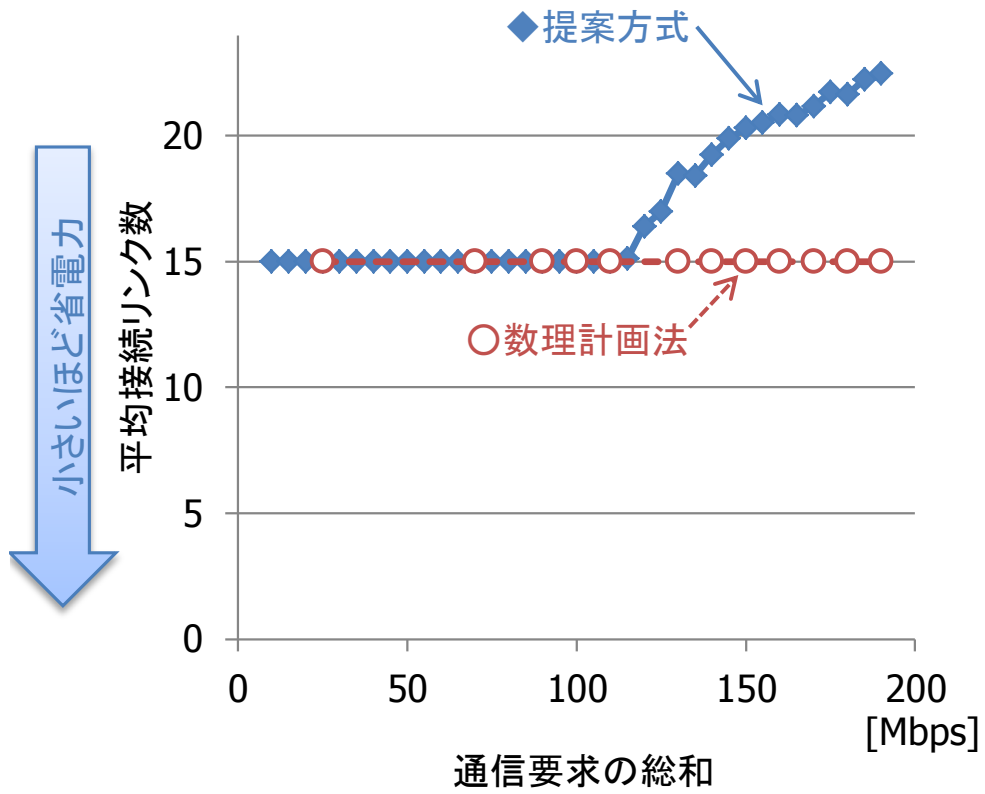


図 3.25 平均接続リンク数の比較

図 3.24 はそれぞれの MP の通信要求の総和を変化したときの平均リンク切替回数の比較である。横軸は通信要求の総和 (v_{sum}) を、縦軸は平均リンク切替回数を示す。すなわちそれぞれの通信要求の総和を定めて、図 3.23 に示すシミュレーションを複数回おこなった。切替回数の増大は上位レイヤーに影響を及ぼすことから平均リンク切替回数は小さいほど良い。

図 3.25 はそれぞれの MP の通信要求の総和を変化したときの平均接続リンク数の比較である。横軸は通信要求の総和 (v_{sum}) を、縦軸は平均接続リンク数を示す。リンク接続により消費電力が増大することから平均接続リンク数が小さいほど省電力である。

シミュレーション結果より、提案方式は数理計画法による導出と比べ通信要求の総和に関わらず平均リンク切替回数が小さいことが分かる。他方、提案方式の平均接続リンク数は通信要求の総和が 100Mbps を超えると大きくなることが分かる。

数理計画法による導出では最小の接続リンク数を解とするので接続リンク数は小さく、低消費電力となる。一方でリンク切替前のリンク割当を考慮しないことから通信要求に関わらずリンク切替回数が大きくなる。

提案方式は通信要求の総和が 1 から 100Mbps のとき、平均切替回数は 0 を示す。これは、図 3.13(a)に示すように通信要求が小さい場合はツリートポロジで全ての通信要求が収容できるのでリンクの切替が起きないことによる。通信要求の総和が 100Mbps を超えると提案方式はツリートポロジにリンクを加えることにより通信要求を満たす (図 3.13(b))。このためリンク切替回数、接続リンク数ともに大きな値を示す。接続リンク数はツリートポロジを想定しない数理計画法による導出に比べて大きくなる。通信要求の総和が 150Mbps を超えると提案方式の平均接続リンク数はリンク数がとりえる最大の値である 24 に近づく。これはリンクトポロジが図 3.13(c)に示すメッシュトポロジに近づいていることを示す。一方で平均リンク切替回数は小さくなる。これは接続リンク数が飽和に近づき、リンクの切断がされにくくなることによる。

図 3.26 はそれぞれの MP の通信要求の総和を変化したときの全ての MP の消費電力の総和の比較である。横軸は通信要求の総和 (v_{sum}) を、縦軸は全ての MP の消費電力の総和を示す。

3.2 節 (55 ページ) 後半に示した通り、リンク接続に関する消費電力量は $12 \text{ W} \times 0.11 = 1.32 \text{ W}$ であり、リンク接続に関わらない消費電力量は $12 \text{ W} \times (1 - 0.11) = 10.68 \text{ W}$ となる。それぞれの MP が複数のリンクを持つ場合はリンク接続に関する消費電力量が増加する事から、それぞれの MP における消費電力 (W) は $10.68 \times 0.11 \times \text{接続リンク数}$ で求められる。また WMN を構成する全ての MP の消費電力の和 (W) は 16 台の MP によるシミュレーションであるから、(3.m)式で求まる。

$$(10.68 + 0.11 \times \text{平均接続リンク数} \times 2) \times 16$$

(3.m)

平均接続リンク数×2 としたのはそれぞれのリンクは 2 台の MP により用いられる事による。
 (3.m)式は平均接続リンク数のみにより求まる関数であるので図 3.26 は図 3.25, (3.m)式により導き出される。

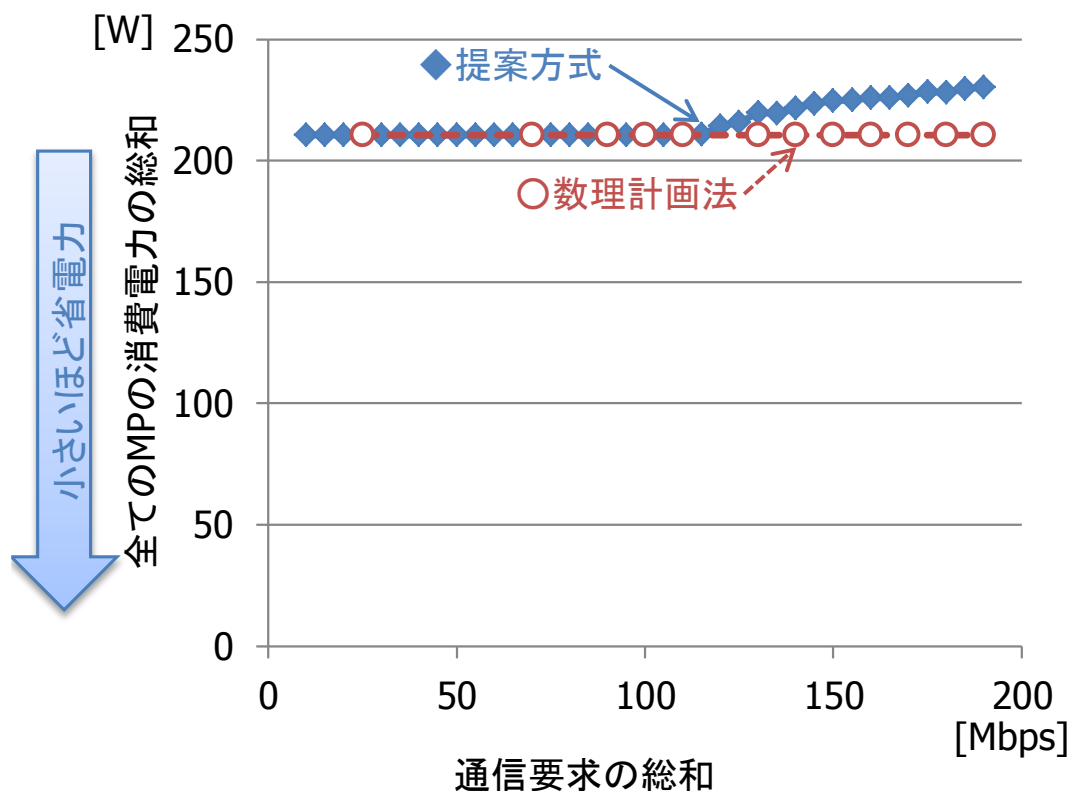


図 3.26 消費電力の比較

図 3.26 より, 提案方式は通信要求が小さい場合は数理計画法によるリンク割当と同様の消費電力を示す. 一方, 通信要求が大きい場合は提案方式の消費電力が大きくなる. 例えば, 通信要求の総和が 190Mbps のとき, リンク切断を考慮せず全てのリンクが接続された場合 (234.2W) と比較すると, WMNを構成するMP全体で4.1Wの省電力効果があるが, 数理計画法と比較するとWMNを構成するMP全体で19.7W消費電力が大きくなる.

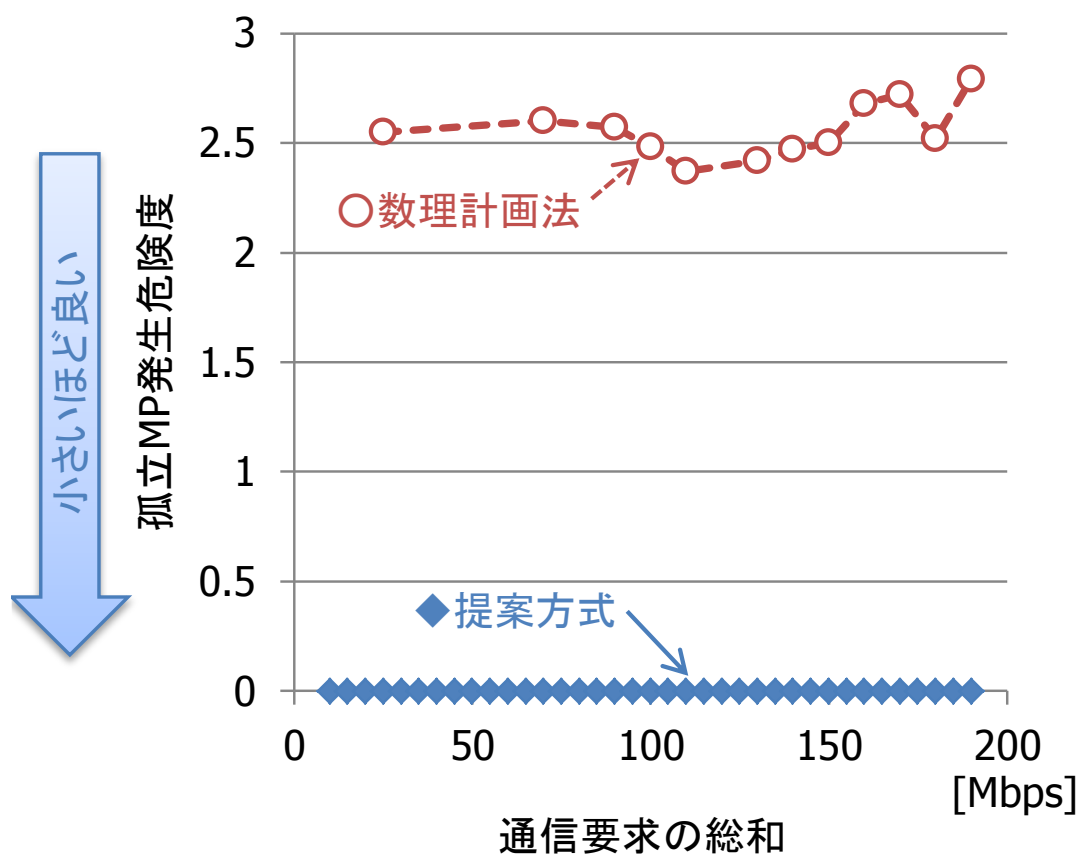


図 3.27 孤立 MP 発生危険度の比較

図 3.27 はそれぞれの MP の通信要求の総和を変化したときの孤立 MP 発生の危険度の比較である。横軸は通信要求の総和 (v_{sum}) を、縦軸は孤立 MP 発生の危険度を示す。

数理計画法による導出では孤立リンクが発生する可能性のあるリンク切替が行われていることが分かる。通信要求の総和と孤立 MP 発生の危険度には相関関係がないが、おおむね 2.5 となっており、リンク切替の際に孤立リンクが発生する可能性のある切替がおおよそ 2 から 3 回発生する事が分かる。一方で提案方式はツリートポロジを保持することで孤立リンクが発生しない。これは理論上明らかであるが、シミュレーションによっても確認した。

3.5 まとめ

本章では指向性アンテナを適用した WMN においてネットワークを流れる通信量に応じてリンク切替を行い少ないリンク数で通信をおこなうことで消費電力を削減するシステムを想定した。数理計画法による導出はリンク切替前のリンク割当を考慮しないためリンク切替回数が増大し、またリンク切替手順によっては到達性が失われ孤立する MP が発生することから、これらの問題を解決する手法を提案した。提案方式はリンクトポロジーとして通信の集中する MP をルート MP とするツリートポロジーを保持し、通信要求の増加に応じてメッシュトポロジーに段階的に移行することによりリンク切替前のリンク割当が考慮されリンク切替回数が削減されるとともに、到達性のあるリンクトポロジーによりリンク切替による孤立ノードの発生がないことをシミュレーションにより確認した。通信要求が小さい場合、提案方式は数理計画法が示す最小の消費電力と同様になる一方で、通信要求が大きい場合、提案方式は全てのリンクを接続する方式に比べ低消費電力であるが、数理計画法による導出に比べ多くのリンク接続を要し、消費電力が大きくなった。

第4章

結論

本論文ではアクセスネットワークにおいて光アクセスネットワークと無線メッシュネットワークそれぞれの消費電力削減手法を提案し、本研究が消費電力の低減につながることを述べた。

第1章では、本研究に至った背景説明を行うとともに、アクセスネットワークの概要を示した。世界的な電力への関心がある中、装置数の多さからアクセスネットワークにおける消費電力への懸念があることを示した。アクセスネットワークは、有線アクセスネットワークと無線アクセスネットワークの協調により実現され、有線アクセスネットワークは高速通信を実現する手段として、無線アクセスネットワークはモビリティを実現する手段として、将来も有効であることを示した。

第2章では、高速化された有線アクセスネットワークにおける消費電力削減手法を提案し、シミュレーションにより、消費電力の低減に有効であることを示した。1節では、現状の PON (Passive Optical Network) システムについて説明した。2節では、関連研究として、1Gbps 級の PON を将来、10Gbps 級の PON へと移行する際に、単に移行するのではなく、1Gbps と 10Gbps の通信速度に対応した PON へと移行し、リンク速度を切替える機能であるリンク速度適応切替 (ALR : Adaptive Link Rate) 方式を PON に適用した研究について示した。関連研究においては ONU 個別による性能の評価がおこなわれておらず、また、全てのリンク速度を一斉に切替えることにより、1Gbps を若干上回る通信においても全てのリンク速度が 10Gbps になる問題点を示した。3節では、リンク速度を個別に切替えるリンク速度独立適応切替方式を提案した。提案方式は、10Gbps (高速) 通信のみでは無駄になる通信要求において ONU (Optical Network Unit) 個別に 1Gbps (低速) 通信に切り替えることで帯域利用率を有効に用いることでより多くの 1Gbps 装置を用いて通信可能であることを示した。4節では、シミュレーションにより提案方式が既存方式と比べ、PON 内の通信要求の総和が 1Gbps である場合を中心に、より低消費電力となることを示し、国内の全ての ONU が提案方式に切り替わった場合、最大で原子力発電所1基のうち約 7.7% の消費電力削減効果があることを示した。また、提案方式は PON 配下の ONU の通信要求がそれぞれ異なる場合に通信要求の小さな ONU は通信要求の大きい ONU と比べ低消費電力になり、既存方式で起こる通信要求の小さな ONU が他の ONU の通信量の増大により消費電力が増大する電力消費量の不公平を改善することを示した。5節では、第2章のまとめを示した。

第3章では、無線アクセスネットワークに着目し、指向性アンテナを持つ WMN において端末における通信要求の変動に適応して動的にリンク接続・切断を行うことにより、通信要求が変動した際に孤立することなく、少ないリンク切断・接続回数で省電力効果を示す物理ネットワーク構築と経路制御方式を提案した。1節では、WMN の関連技術に関して示し、空間分割多重方

式として注目されている指向性アンテナを用いた WMN について示した。2 節では、指向性アンテナを用いた WMN トポロジーにおいて接続するリンク数を増減することで低消費電力となる関連研究を示し、数理計画法をによるリンク割当ではリンク切替時に多くの切替回数が必要であること、切替順序によっては MP が他の MP と孤立する問題点があることを示した。3 節では、ツリートポロジーを基に通信要求の増大に伴い徐々にメッシュトポロジーへと移行する提案方式の詳細を示した。各 MP が (1)他の MP から通知された経路情報と (2)ツリートポロジーのルートとなるルート MP まで追加で通信可能な容量を予測した残余帯域 に基づきリンクの到達性を常に維持しながらリンク数の増減を行う手法を提案した。提案方式はリンク切替の判断に切替前の経路情報を加味することにより、頻繁なリンク切替が削減されることを示した。また、到着性が確保されるツリートポロジーを基にすることで孤立 MP が発生しないことを示した。4 節ではシミュレーションにより提案方式と既存方式の比較・検討を行った。提案方式は WMN 内の通信要求が大きい場合に消費電力が増大するもののリンク切替回数は大きく削減され、孤立 MP は発生しないことを示した。5 節では第3章のまとめを示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

原井洋明情報通信研究機構ネットワークアーキテクチャ研究室室長には 2013 年3月まで指導教員（客員准教授）として研究活動全般にわたりご指導を頂きました。私が曲がりなりにも博士論文をまとめることができたのは、先生が研究者としてのやりがいと面白さを常に私に示してくださいました結果だと深く感謝いたします。

加藤聰彦教授，大坐畠智准教授，策力木格助教，糸川一也元助教を始め，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた電気通信大学ネットワークアーキテクチャ学講座の皆様には感謝します。

情報通信研究機構（NICT）におきましては研修員として研究の場を提供していただき，また，宮澤高也様を始め，ネットワークアーキテクチャ研究室におきましては真剣に議論を交わしてくださいました多数の研究者様，研究しやすい環境を提供していただきました秘書の皆様には感謝いたします。

森田啓義教授，大木英司教授，近藤正章准教授におきましては貴重な時間をさいて博士論文審査委員として御教授いただきました。心より感謝いたします。

また，輪講やポスタ発表におきまして貴重な御教示を賜りました情報システム学研究科の先生方，卒業後もアドバイスを頂きました神奈川大学情報システム創成学科の今井崇雅教授には感謝いたします。

参考文献

- [1] 公益財団法人 地球環境戦略研究機関, “図解京都メカニズム,” 19 版, Jan. 2013.
- [2] 環境省, “2010 年度の温室効果ガス排出量(確定値)”.
- [3] 朝日新聞, “原発1基分、風と太陽で ユーラス、5年で発電所新設へ,” 朝刊, pp.13, 29, Jan, 2010.
- [4] エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会, “コスト等検証委員会報告書,” 参考資料 1, 19, Dec. 2011.
- [5] 河合基伸, “資金調達手法の多様化がメガソーラーの大規模化を後押し,” 日経エレクトロニクス, 2013/03/04 号, pp.86-89, 14, Mar. 2013.
- [6] 朝日新聞, “自然エネルギー発電、県内で計画続々始動 新制度が追い風、「採算見込める」/岩手県,” 朝刊, 岩手県全県版, pp.29, 31, Oct, 2012.
- [7] 総務省, “情報通信白書 平成 24 年版,” <http://www.soumu.go.jp/>, Jul. 2012.
- [8] “ITU World Telecommunication /ICT Indicators database,” <http://www.itu.int/ict/statistics>.
- [9] 総務省, “原口ビジョン,” <http://www.soumu.go.jp/>, Jan. 2010.
- [10] 総務省, “情報通信白書 平成 23 年版,” <http://www.soumu.go.jp/>, Aug. 2011.
- [11] Cisco Systems, “The Zettabyte Era,” White Paper, May. 2012.
- [12] 経済産業省商務情報政策局, “グリーン IT イニシアティブ資料,” May. 2008.
- [13] ICT 分野におけるエコロジーガイドライン協議会, “ICT 分野におけるエコロジーガイドライン,” Feb. 2013.
- [14] 馬場義昌, “コア・メトロ光通信ネットワーク,” <http://www.yamanaka.ics.keio.ac.jp/wp-content/uploads/2008/07/corenw.pdf>, pp.4, Jun. 2008.
- [15] NTT グループ, “株主・投資家情報 > 財務概要 > 契約数,” <http://www.ntt.co.jp/ir/fin/subscriber.html>, May. 2013.
- [16] C. Lange, “Energy consumption of telecommunication networks - a network operator’s view,” OFC/NFOEC’09, San Diego, Mar. 2009.
- [17] L. Valcarenghi, D. P. Van, Raponi, P. G. Giorgio, P. Castoldi, D. R. Campelo, S. Yen, L. G. Kazovsky and G. Leonid, “Energy efficiency in passive optical networks: where, when, and how?,” IEEE Network, Vol.26, Issue.6, pp.61-68, Nov. 2012.
- [18] R. S. Tucker, R. Parthiban, J. Baliga, K. Hinton, R. W. A. Ayre, and W. V. Sorin,

- “Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective,” *J. Lightwave Technol*, Vol.27, Issue.3, pp.243-252, Feb. 2009.
- [19] 佃均, “特集:ITソリューションには「夢」がある,” *日経ソリューションビジネス*, pp.40-45, Jul. 2008.
- [20] 谷口徹也, “急増する ISDN 個人加入者—インターネットが需要牽引,” *日経ビジネス*, pp.50-52, Apr. 1996.
- [21] グローバル時代におけるICT政策に関するタスクフォース, “「光の道」構想実現に向けて,” Dec. 2010.
- [22] 総務省, “ブロードバンド契約者数等の推移”.
- [23] 阪田史郎, 山田暁, 飯塚宏之, 伊藤哲也, “無線 LAN メッシュネットワークの技術動向,” *電子情報通信学会誌*, Vol.92, No.10, pp.841-846, Oct. 2009.
- [24] IEEE, “Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks,” *IEEE Std 802.3ah-2004*, Spt. 2004.
- [25] IEEE, “Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks,” *IEEE Std 802.3av-2009*, Oct. 2009.
- [26] ITU-T, “10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms,” *ITU-T G.987*, Jan. 2010.
- [27] ITU-T, “Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,” *ITU-T G984.1*, Mar. 2003.
- [28] 榊正彦, 川口和穂, “光アクセス GE-PON システム MileStar(TM),” *沖テクニカルレビュー*, 71(1), (197), pp.84-87, Jan. 2004.
- [29] J. Zhang, T. Wang and N. Ansari, “Designing energy-efficient optical line terminal for TDM passive optical networks,” *Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE*, May. 2011.
- [30] F. Saliou, P. Chanclou, N. Genay, and F. Laurent, “Energy efficiency scenarios for long reach PON Central Offices,” *OSA/OFC/NFOEC 2011*, pp.1-3, Mar. 2011.
- [31] R. Kubo, J. Kani, H. Ujikawa, T. Sakamoto, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “Study and Demonstration of Sleep and Adaptive Link Rate Control Mechanisms for Energy Efficient 10G-EPON,” *IEEE JOCN*, Vol.2, Issue.9, pp.716-729, Sep. 2010.
- [32] S. Wong, L. Valcarenghi, S. Yen, D. Campelo, S. Yamashita, and L. Kazovsky, “Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks,” *IEEE GLOBECOM Workshops 2009*, Nov. 2009.
- [33] L. Shi, B. Mukherjee, and A. Lee, “Energy-efficient PON with sleep-mode ONU: progress, challenges, and solutions,” *IEEE Network*, Vol.26, Issue.2, pp.36-41, Mar. 2012.

- [34] ITU-T G.Sup 45, "GPON power conservation," May. 2009.
- [35] IEEE, "Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Energy-Efficient Ethernet," IEEE Std 802.3az-2010, Oct. 2010.
- [36] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "IPACT a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON)," IEEE Commun. Mag., Vol.40, Issue.2, pp.74-80, Feb. 2002.
- [37] IEEE, "Wireless LAN MAC and PHY specifications Amendment 10: Mesh Networking," IEEE Standard 802.15.4-2003, Oct. 2003.
- [38] IEEE, "Wireless MAC and PHY Specifications for LR-WPANs," IEEE Standard 802.15.4-2003, Oct. 2003.
- [39] 大矢智之, 長敬三, 檜橋 祥一, "将来の高速大容量通信に向けた無線要素技術," NTT DOMOMO テクニカルジャーナル, vol.16, No.2, pp.24-30, Jul. 2008.
- [40] 鍋谷 寿久, 江頭 慶真, 竹田 大輔, "高速無線 LAN 用送信ビームフォーミング技術," 東芝レビュー, vol.65, No.4, pp.48-51, Apr. 2010.
- [41] 古樋知重, 大平孝, "無線アドホックネットワークにおける指向性アンテナの効能に関する考察," 電子情報通信学会論文誌, B, J85-B(12), pp.2223-2233, Dec. 2002.
- [42] 長島勝城, 高田昌忠, 渡辺尚, "スマートアンテナを用いた 2 種アクセス併用指向性メディアアクセス制御プロトコル," 電子情報通信学会論文誌, B, J87-B(12), pp.2006-2019, Dec. 2004.
- [43] O. Bazan, "A Survey On MAC Protocols for Wireless Adhoc Networks with Beamforming Antennas," IEEE Transactions on Wireless Communications, VOL.10, NO.10, pp.216-239, Oct. 2011.
- [44] A. K. Saha and D. B. Johnson, "Routing Improvement using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks," GLOBECOM, vol.5, Dallas, Texas, pp.2902-2908, Nov. 2004.
- [45] A. Spyropoulos and C. Raghavendra, "Energy Efficient Communications in Ad Hoc Networks Using Directional Antennas," IEEE INFOCOM '02, New York, NY, pp.220-228, Jun. 2002.
- [46] Jeffrey E. Wieselthier, Gam D. Nguyen, and Anthony Ephremides, "Energy-aware wireless networking with directional antennas: the case of session-based broadcasting and multicasting," IEEE Transactions on Mobile Computing, VOL.1, NO.3, pp.176-191, Jul. 2002.
- [47] M. Xia, Y. Owada, M. Inoue and H. Harai, "Energy-Efficient Dimensioning with Traffic Engineering for Municipal Mesh Access Networks," IEEE GLOBECOM 2011, Dec. 2011.
- [48] 野村啓仁, 矢田健, 川原亮一, 山田博司, "OSPF リンクコスト最適化手法を利用したネッ

- トワーク省電力化手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, IN, Vol.110, No.373, pp.85-90, Jan. 2011.
- [49] 野村啓仁, 矢田健, 山田博司, “OSPF リンク重み値設定による省電力化手法の性能向上の検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2011 年 2011 年_通信(2), _通信(2), B-7-25, pp.189, Feb. 2011.
- [50] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, “Energy consumption in wired and wireless access networks,” IEEE Communications, Vol.49, Issue.6, pp.70-77, Jun. 2011.
- [51] 大木 英司, “通信ネットワークのための数理計画法,” コロナ社, Mar. 2012.
- [52] GLPK (GNU Linear Programming Kit), available at <http://gnu.org/software/glpk/>.