

TWDM-PONに基づくフロントホールネットワークの 機能配置の最適化に関する一検討

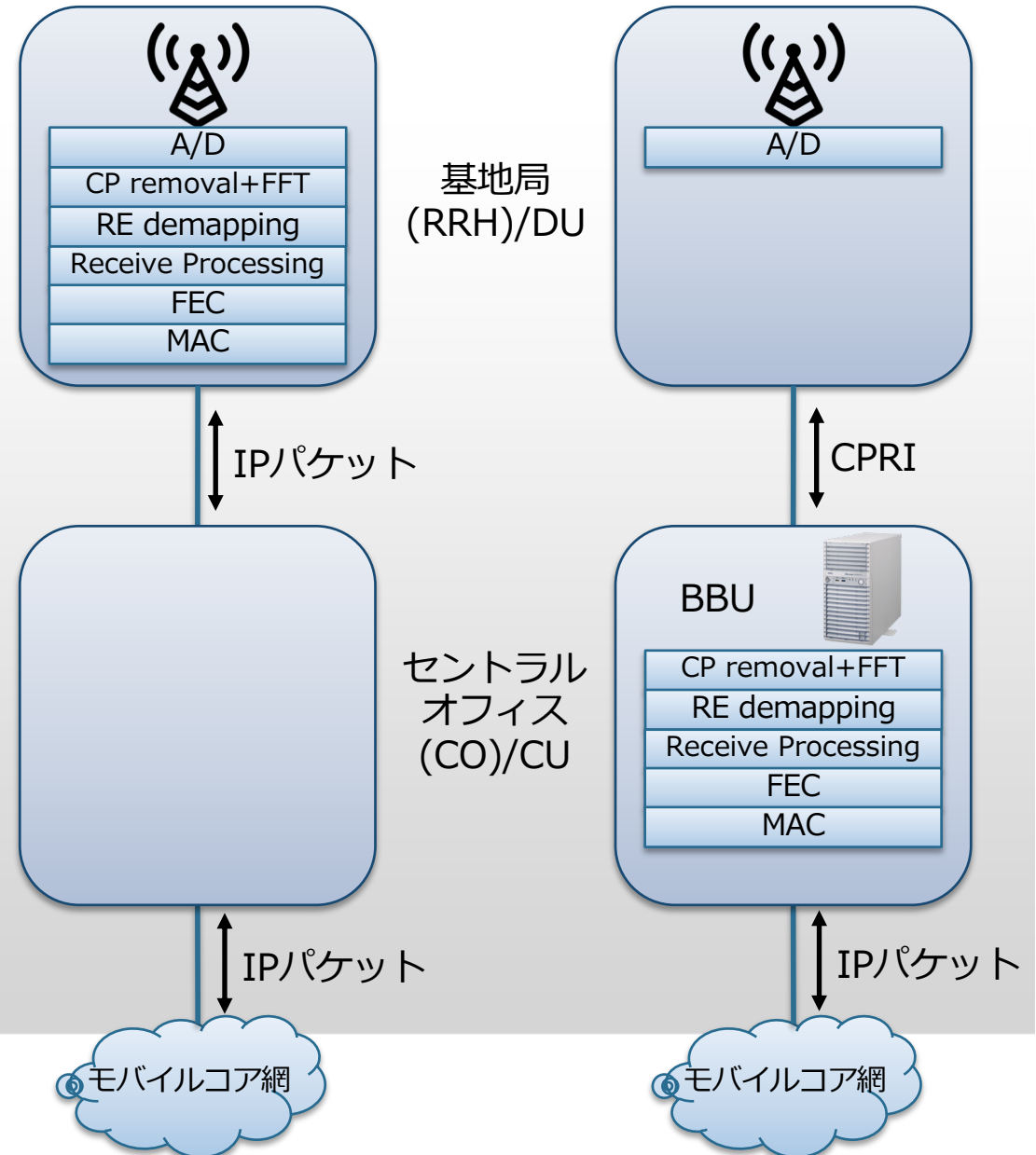
長谷川 剛 (東北大)
村田 正幸 (大阪大)
中平 佳裕・鹿嶋 正幸 (沖電気)
阿多 信吾 (阪市大)

C-RAN (Centralized Radio Access Network)

- ベースバンド処理
 - アナログ無線信号 <-> IPパケット
- D-RAN: RRH側でベースバンド処理を行う
- C-RAN: ベースバンド処理をセントラルオフィスにあるBBU (BaseBand Unit) で行う
 - RRH-BBU間は CPRI (Common Public Radio Interface) 等で接続

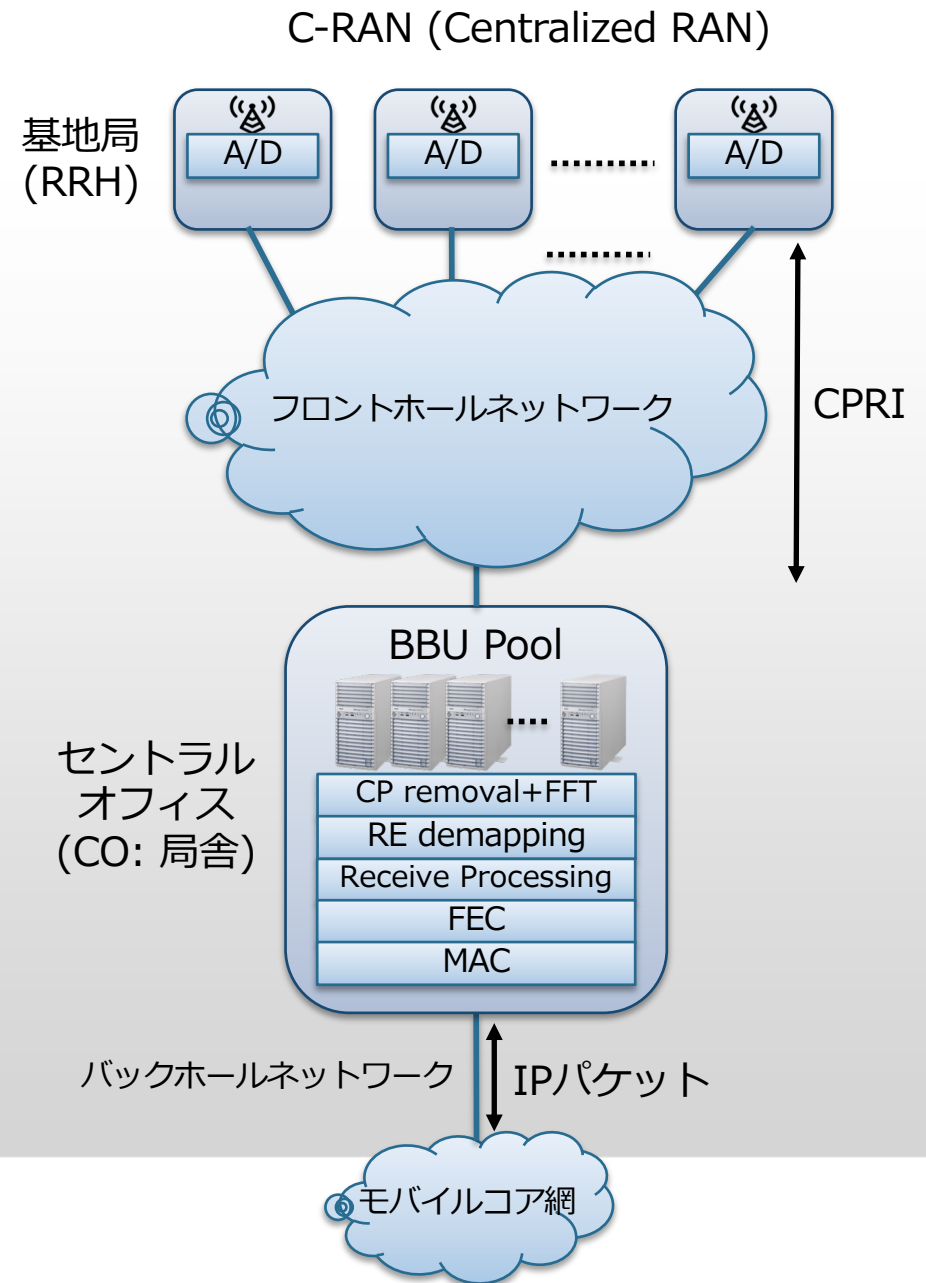
D-RAN (Distributed RAN)

C-RAN (Centralized RAN)



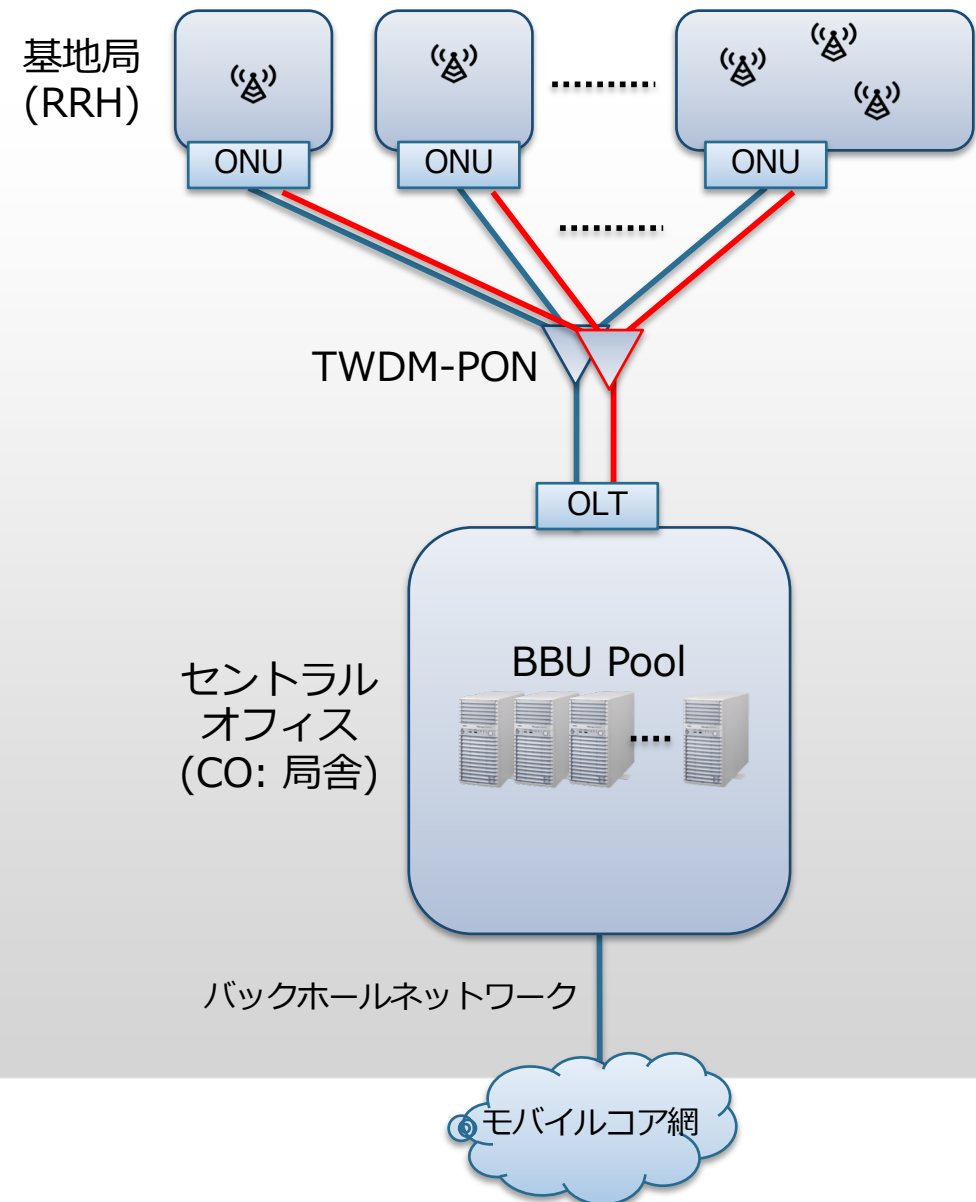
C-RAN (2)

- セントラルオフィスにあるBBU pool が複数RRHのベースバンド処理を行う
- メリット
 - 基地局の簡単化
 - BBU処理の集約による効率化
- デメリット
 - フロントホールネットワークの負荷
 - (例) 1 RRH あたり2.46Gbps (20MHz)
 - ユーザデータ量に依存せずに発生
 - LTE → 5Gによって、より増大する
 - 基地局稠密化



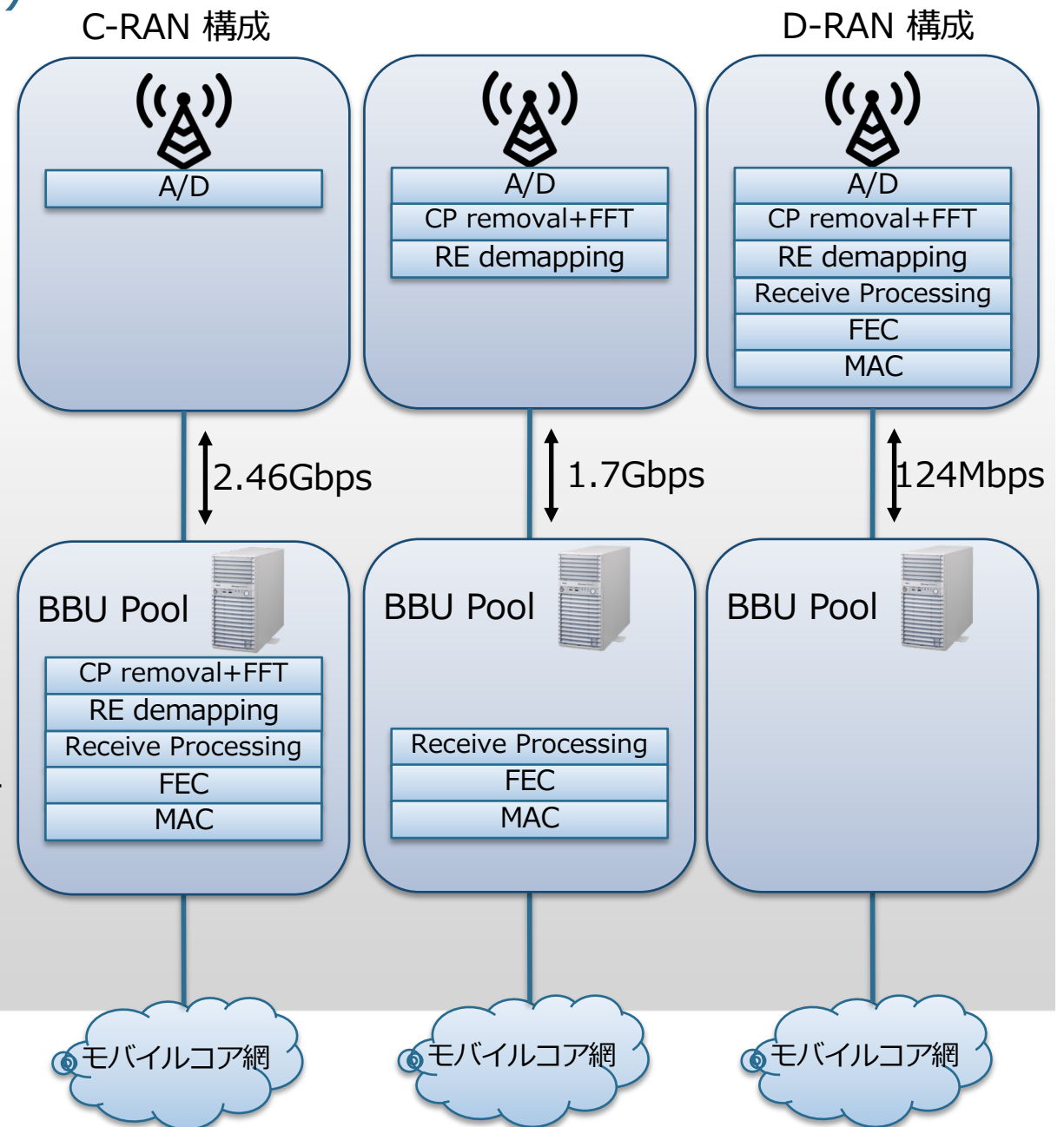
TWDM-PONに基づくC-RANフロントホールネットワーク

- フロントホールネットワークにTWDM-PONを適用
 - フロントホールネットワークの低コスト化
 - 各ONUの使用波長、タイムスロット割り当てによる柔軟な資源配分
 - Ethernet等と異なり、遅延時間の抑制が比較的容易
 - トラフィックが少ない場合は使用波長数を抑え、消費電力低減
- RRHからのトラフィックを適応的にTWDM-PONに收容することで、收容効率の高いフロントホールネットワークを実現可能



機能分割 (function split)

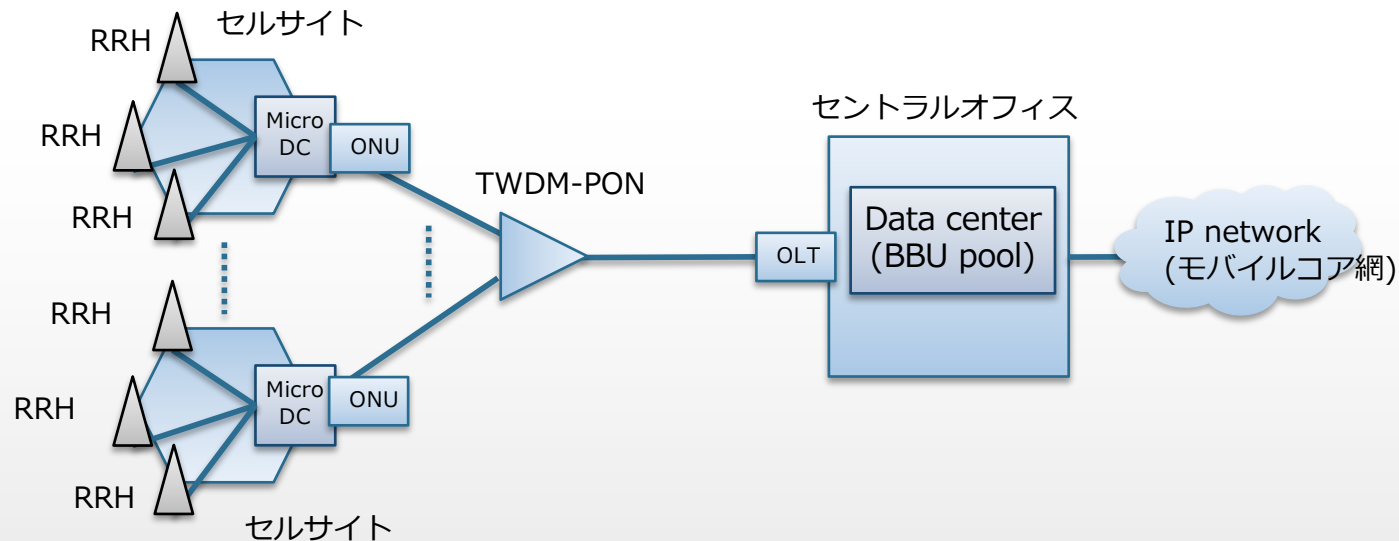
- BBU処理の一部の機能をRRHへオフロード
 - (+) フロントホールネットワークの負荷低減
 - (+) 各機能に適した実装が可能
 - (-) 基地局間協調制御の難化
- 適切なオフロード割合は様々な要素によって変動
 - フロントホールネットワーク容量と消費電力特性
 - ユーザトラフィック量
 - 基地局サイト、COそれぞれのサーバの処理能力、消費電力特性
 - 基地局-CO間の距離
 - ...



本研究の目的

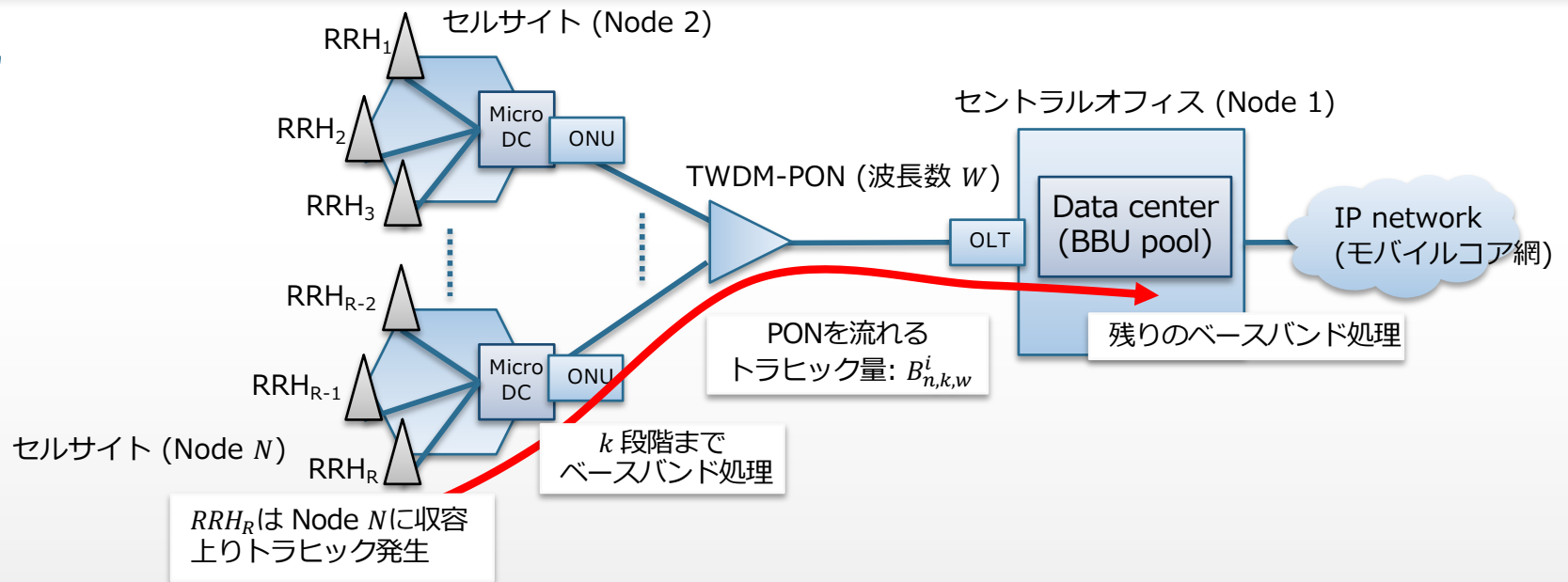
- TWDM-PONに基づくセルラネットワークのベースバンド処理の機能分割の最適化フレームワークの提案
 - システム全体の消費電力を最小化する最適化問題として定式化
 - パラメータ設定
 - 分割されたベースバンド処理負荷、消費電力
 - TWDM-PONのキャパシティ、消費電力
 - 数値例を示し、手法の有効性を検証
 - RRH数、セルサイト/セントラルオフィスのサーバ消費電力プロファイル、TWDM-PONの容量等に応じて、消費電力を最小化する機能分割が存在することを確認

ネットワークモデル



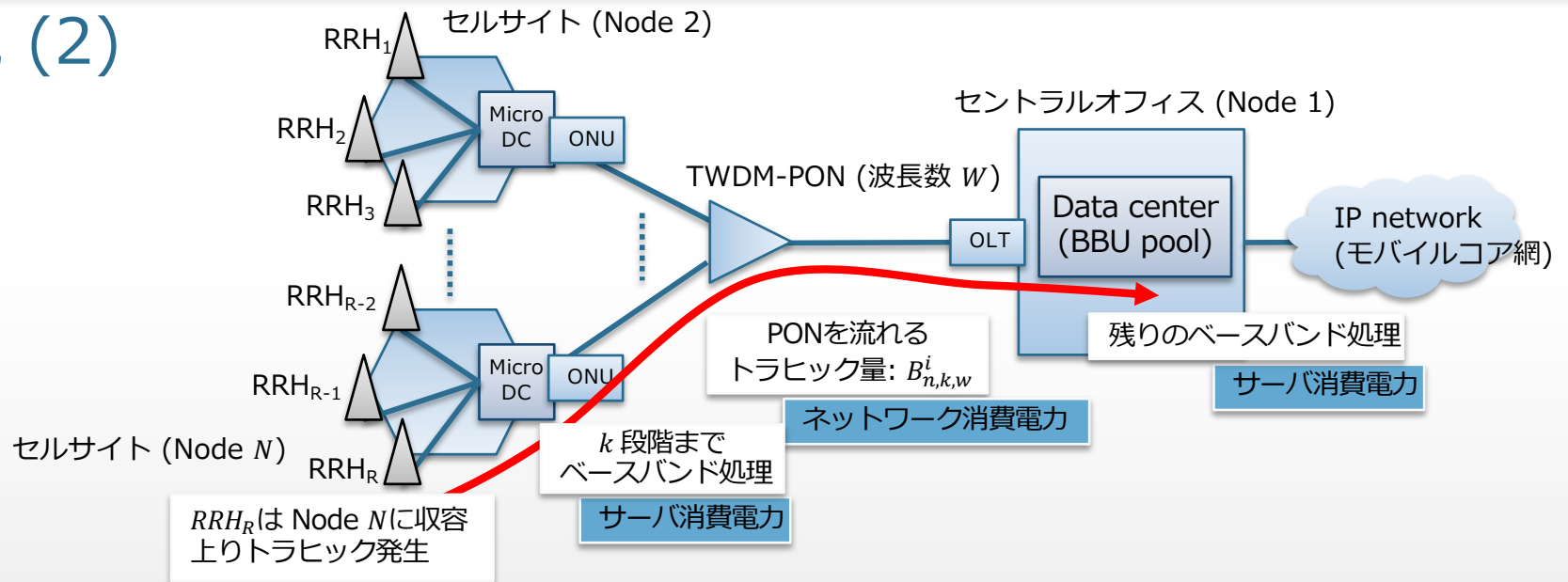
- セルサイト-セントラルオフィス間は TWDM-PON で接続
- セルサイトには1つあるいは複数のRRH (基地局) が存在
- セルサイトにはマイクロデータセンタ (Micro DC)、セントラルオフィスにはデータセンタがある
 - 物理マシン上の仮想マシンがベースバンド処理 (の一部) を行う
- 各セルサイトのONUは複数波長を同時に使用可能
 - RRHごとにONUが存在することに相当

変数定義



- R : RRH数、 N : ノード (セルサイト+BBU pool) 数
- a_n^i : ネットワークトポロジ (RRH_i がNode n に存在すれば1、そうでなければ0)
- W : TWDM-PONの波長数、 B_w : TWDM-PONの波長 w のキャパシティ
- K : RRHトラヒックの総処理段階数
- $y_{n,k,w}^i$: RRH_i のトラヒックをNode n で k 段階までBBU処理をして、COまで波長 w で運ぶなら1,そうでないなら0 (決定変数)
- $B_{n,k,w}^i$: RRH_i のトラヒックをNode n で k 段階までBBU処理をして、COまで波長 w で運ぶ時のビットレート

変数定義 (2)



- $X_{n,k}$: ($n \geq 2, k \geq 1$) Node n (=Micro DC)で1つのRRHトラヒックを k 段階目まで処理する時の仮想マシンの消費電力
- $X_{1,k}$: ($k \geq 1$) MicroDCで k 段階目まで処理されたトラヒックを、Node 1 (=BBU pool)で残りの処理を行う際の仮想マシンの消費電力
- C_n : Node n の物理サーバの消費電力
- L_w : TWDM-PONの波長 w を使う際の消費電力
- x_n : Node n が使われていれば1、そうでないなら0
- l_w : 波長 w が使われていれば1、そうでないなら0

最適化問題としての定式化

Minimize :

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i (X_{1,k} + X_{n,k}) + \sum_{n=1}^N x_n C_n + \sum_{w=1}^W l_w L_w \quad (1)$$

Subject to :

$$y_{k,n,w}^i, x_n, l_w \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$y_{k,n,w}^i \leq a_n^i \quad \forall i, n, k, w \quad (3)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i B_{n,k,w}^i \leq B_w \quad \forall w \quad (5)$$

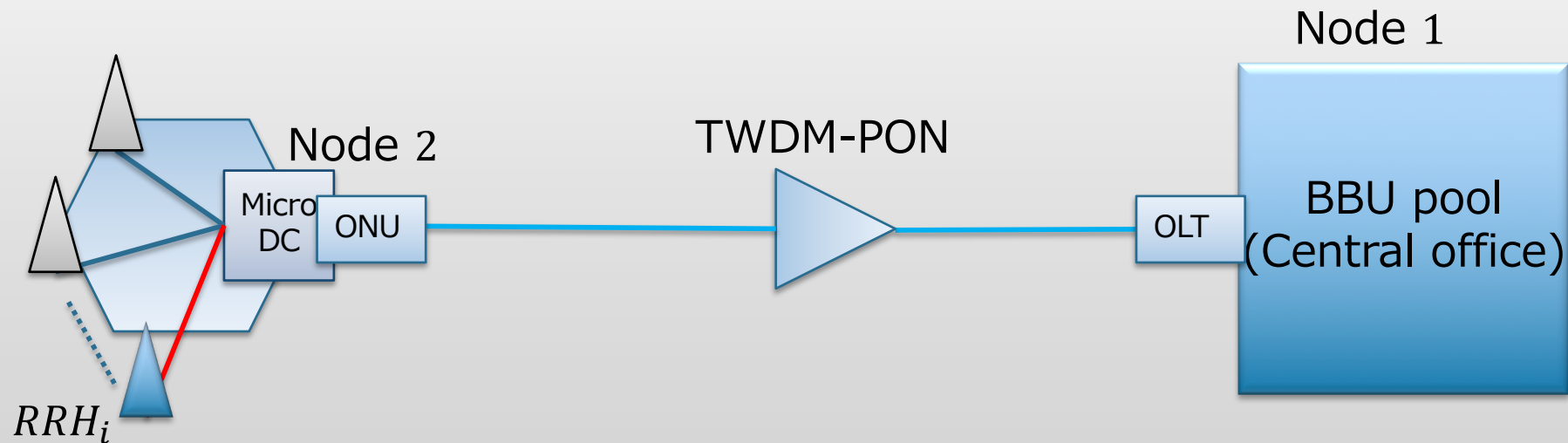
$$x_n = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$l_w = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

- (1) 目的関数: 消費電力の総和の最小化
 - 仮想マシンのベースバンド処理+物理サーバ+TWDM-PONの波長
- 制約条件:
 - (2) y, x, l はバイナリ
 - (3) トポロジ制約
 - (4) RRH_i のトラヒックはどこかのノードでいずれかの段階までBBU処理され、いずれかの波長でCOまで運ばれる
 - (5) 波長 w で運ばれるトラヒック量がキャパシティ以下である
- その他
 - (6)(7) x, l の定義 (y から決まる)

数値例: パラメータ設定 (1)

- セルサイト数: 1
- RRH数: 1~20
- 1 RRHあたりのユーザトラフィック: 124Mbps
- DWDM-PONの波長1つあたり20W
- 物理サーバのベース消費電力: 200W



数値例: パラメータ設定 (2)

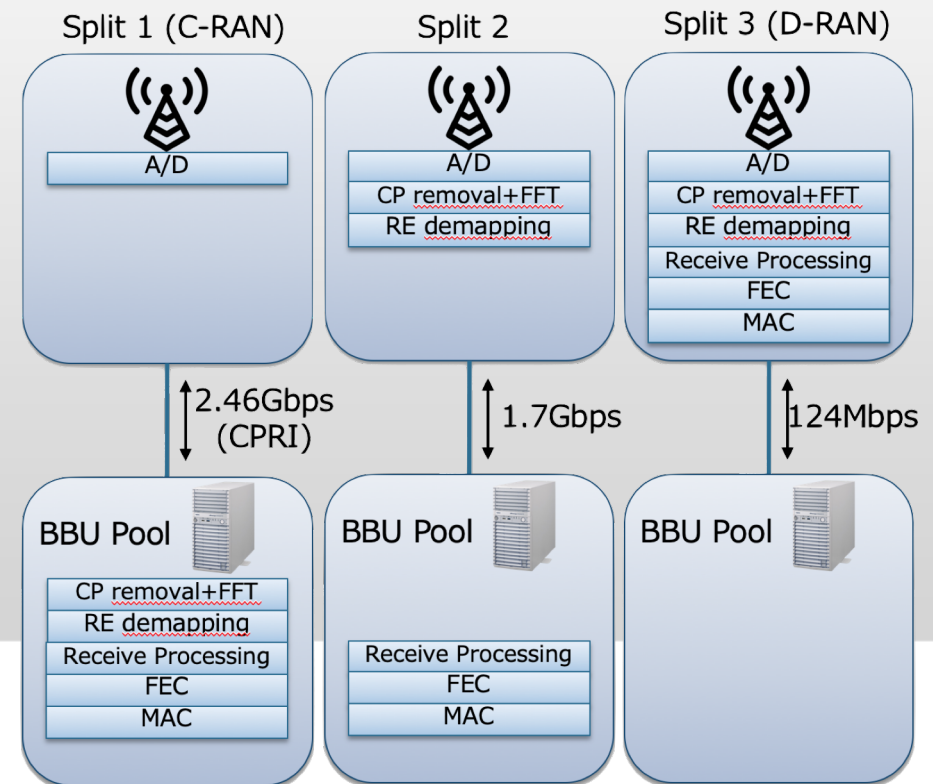
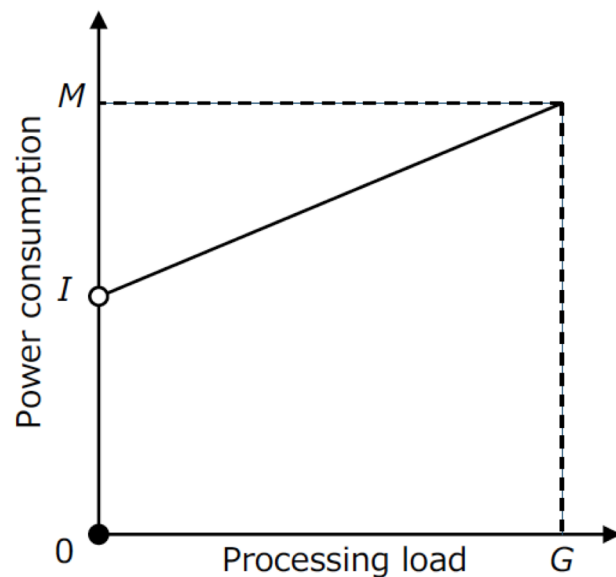
- 3パターンの機能分割を想定

表1 ベースバンド処理の機能分割パターン

	Split 1 (CRAN 相当)	Split 2	Split 3 (DRAN 相当)
RRH での処理量	200	200	200
Micro DC での処理量	360	80	160
Central office DC での処理量	480	400	320
TWDM-PON を流れるトラフィック量	2.4Gbps	2.5 / 1.7 / 0.8 Gbps	300 / 124 / 64 Mbps

CPRI 処理が含まれている

- ベースバンド処理の仮想マシンの消費電力は、線形モデルに基づいて決定



数値例：評価シナリオ

- サーバの消費電力プロファイルと、各Splitにおけるトラフィック処理に必要な総消費電力
 - Scenario 1: 仮想マシンの消費電力特性が均一
 - Scenario 2: マイクロデータセンタの仮想マシンの消費電力特性が悪い
 - Scenario 3: セントラルオフィスの仮想マシンの消費電力特性が悪い
- ILPソルバ: IBM CPLEX

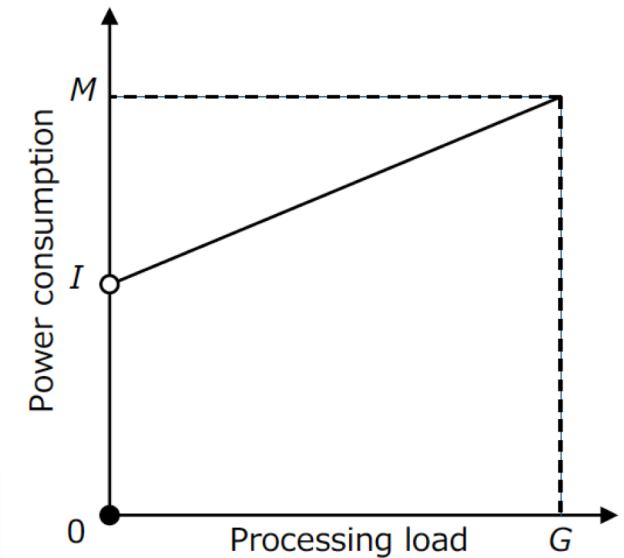


図2 消費電力モデル [13]

表2 消費電力パラメータ設定と機能分割パターン別の総消費電力

	Central office DC			Micro DC				Power consumption per RRH		
	G	M [W]	I [W]	G	M [W]	I [W]	C_2 [W]	Split 1 [W]	Split 2 [W]	Split 3 [W]
Scenario 1	480	20	10	480	20	10	200	37.5	30	30
Scenario 2	480	20	10	480	200	100	200	105	45	60
Scenario 3	480	200	100	480	20	10	200	127.5	105	90

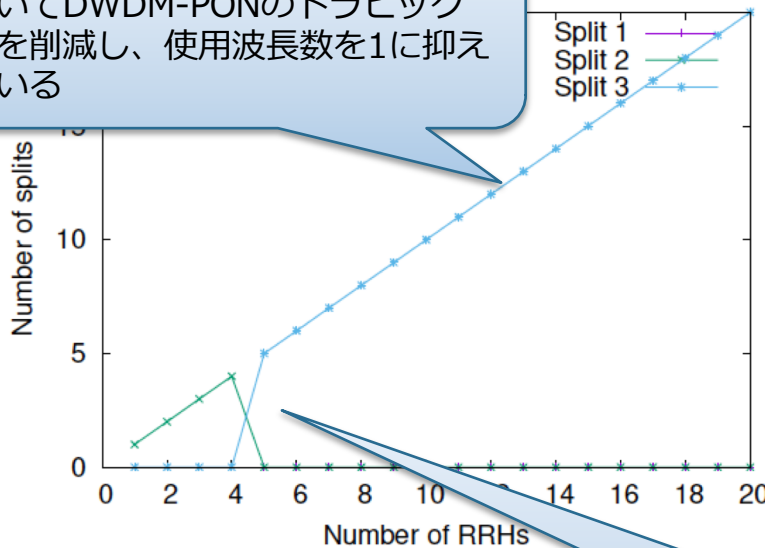
数値例 (Scenario 1)



表2 消費電力パラメータ設定と機能分割パターン別の総消費電力

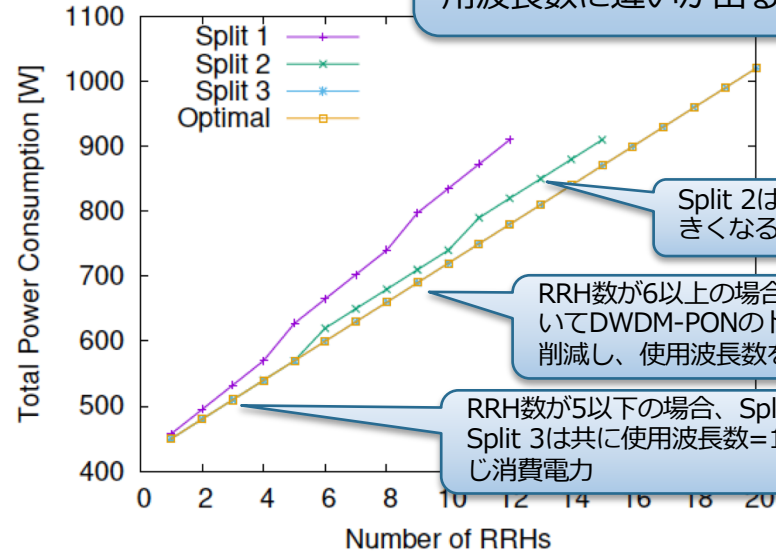
	Central office DC			Micro DC				Power consumption per RRH		
	<i>G</i>	<i>M</i> [W]	<i>I</i> [W]	<i>G</i>	<i>M</i> [W]	<i>I</i> [W]	<i>C</i> ₂ [W]	Split 1 [W]	Split 2 [W]	Split 3 [W]
Scenario 1	480	20	10	480	20	10	200	37.5	30	30
Scenario 2	480	20	10	480	200	100	200	105	45	30
Scenario 3	480	200	100	480	20	10	200	127.5	105	30

RRH数が6以上の場合、Split 3を用いてDWDM-PONのトラフィック量を削減し、使用波長数を1に抑えている



(a) Scenario 1: 選択された機能分割の分布

Split 2とSplit 3は同じ消費電力 → ビットレートが違っているので、使用波長数に違いが出る



Split 2は使用波長数が大きくなる

RRH数が6以上の場合、Split 3を用いてDWDM-PONのトラフィック量を削減し、使用波長数を1に抑えている

RRH数が5以下の場合、Split 2とSplit 3は共に使用波長数=1なので同じ消費電力

RRH数が5以下の場合、使用波長数はともに1なので、Split 2でもSplit 3でも消費電力は最小化される

(b) Scenario 1: 総消費電力

数値例 (Scenario 2)

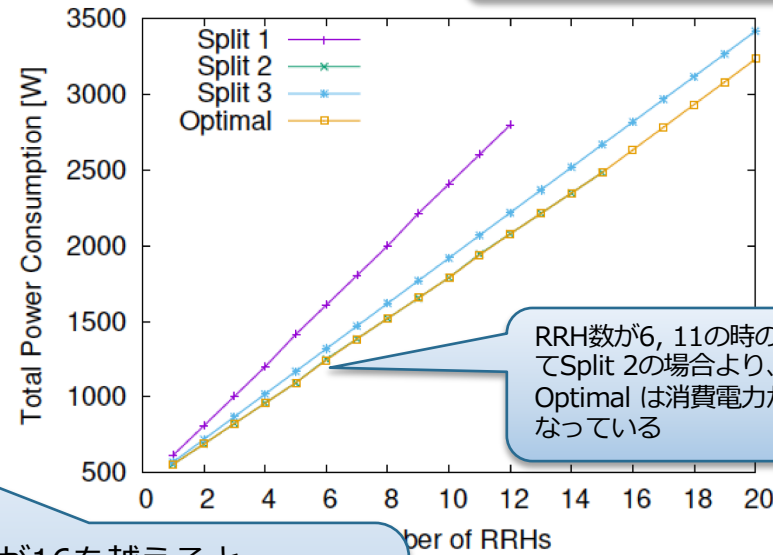
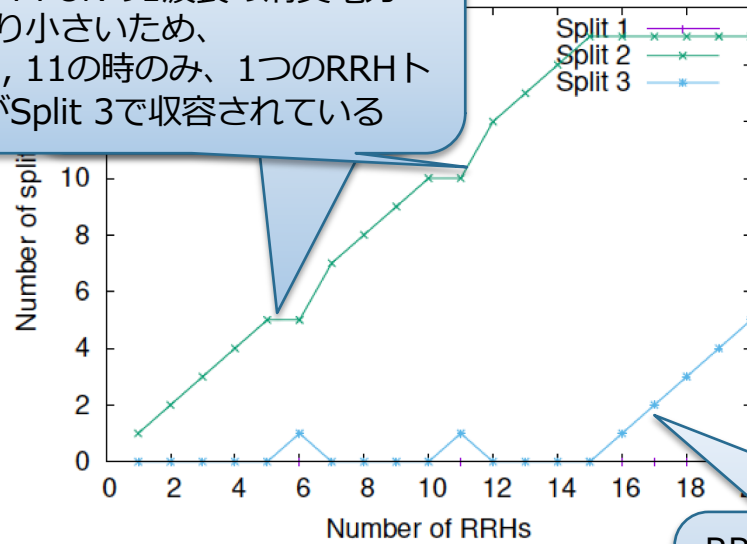


表2 消費電力パラメータ設定と機能分割パターン別の総消費電力

	Central office DC			Micro DC				Power consumption per RRH		
	G	M [W]	I [W]	G	M [W]	I [W]	C_2 [W]	Split 1 [W]	Split 2 [W]	Split 3 [W]
Scenario 1	480	20	10	480	20	10	200	37.5	30	30
Scenario 2	480	20	10	480	200	100	200	105	45	60
Scenario 3	480	200	100	480	20	10	200	127.5	105	0

Split 2 と Split 3の消費電力差 (15W) が、DWDM-PONの1波長の消費電力 (20W) より小さいため、RRH数が6, 11の時のみ、1つのRRHトラヒックがSplit 3で收容されている

Split 2が最小の消費電力



(c) Scenario 2: 選択された機能分割の分布

RRH数が16を越えると、DWDM-PONの容量が不足し、全てをSplit 2で收容できないため、Split 3が使われている

RRH数が6, 11の時のみ、全てSplit 2の場合より、Optimal は消費電力が小さくなっている

総消費電力

数値例 (Scenario 3)

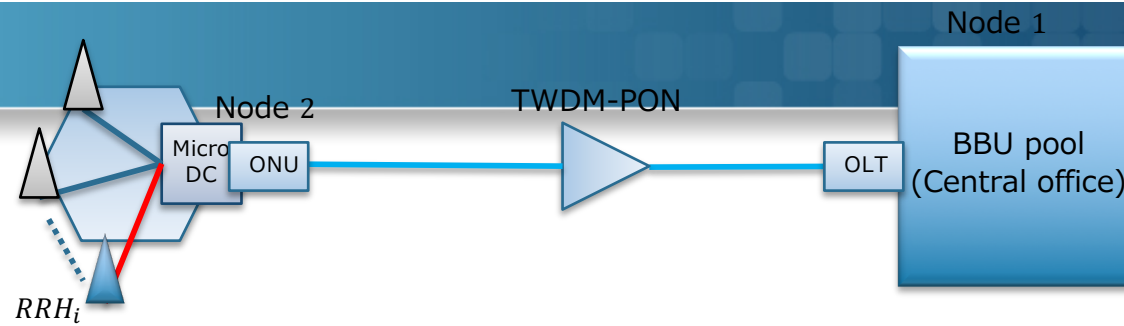
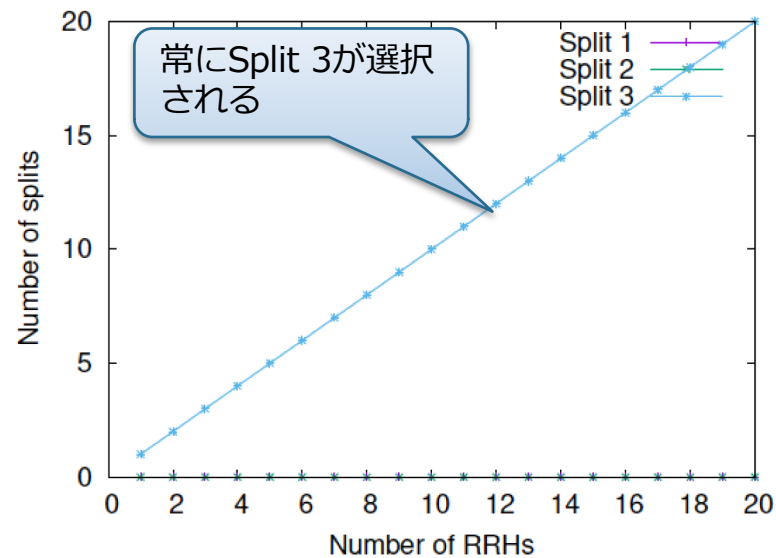


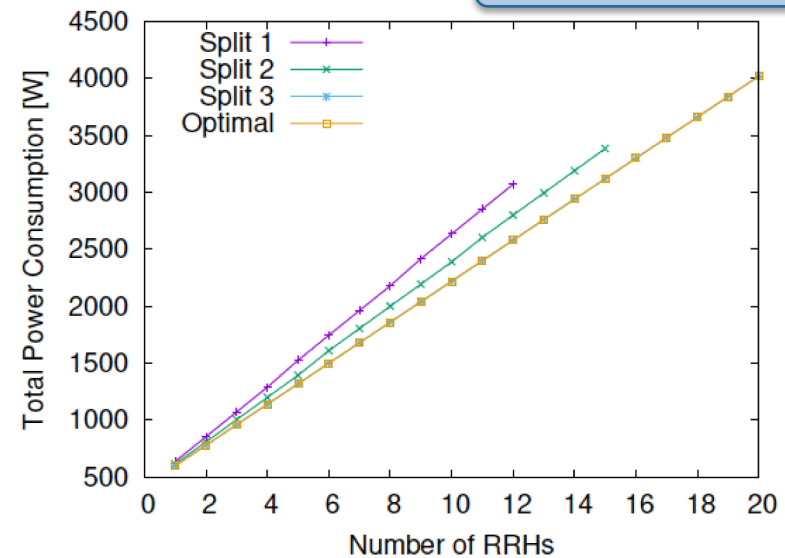
表2 消費電力パラメータ設定と機能分割パターン別の総消費電力

	Central office DC			Micro DC				Power consumption per RRH		
	G	M [W]	I [W]	G	M [W]	I [W]	C_2 [W]	Split 1 [W]	Split 2 [W]	Split 3 [W]
Scenario 1	480	20	10	480	20	10	200	37.5	30	30
Scenario 2	480	20	10	480	200	100	200	105	45	60
Scenario 3	480	200	100	480	20	10	200	127.5	105	90

Split 3が最小の消費電力



(e) Scenario 3: 選択された機能分割の分布



(f) Scenario 3: 総消費電力

考察

- RRHトラヒックに対する機能分割の選択は、パラメータに大きく依存する
 - 消費電力特性、ネットワークキャパシティ、ユーザトラヒック量、...
 - 現実的なパラメータ設定が重要
 - 最適化問題を解く必要性
- 全てのシナリオでSplit 1 (C-RAN構成) が選択されていない
 - Split 1はマイクロデータセンタでのCPRI処理が必要であるため
 - CPRI処理のハードウェア化などによる消費電力低減が必要

表1 ベースバンド処理の機能分割パターン

	Split 1 (CRAN 相当)	Split 2	Split 3 (DRAN 相当)
RRH での処理量	200	200	200
Micro DC での処理量	360	80	160
Central office DC での処理量	480	400	320
TWDM-PON を流れるトラヒック量	2.4Gbps	2.5 / 1.7 / 0.8 Gbps	300 / 124 / 64 Mbps

まとめと今後の課題

■ まとめ

- TWDM-PONに基づくセルラネットワークのベースバンド処理の適切な機能分割の最適化問題の定式化
- 数値例による評価
 - 消費電力を最小化する構成を導出可能
 - C-RAN構成はCPRI処理にかかる消費電力が大きく影響する

■ 今後の課題

- パラメータ設定の精密化
- 遅延時間制約の導入
 - TWDM-PON部分の伝搬遅延時間
 - ベースバンド処理遅延時間
- 大規模ネットワークでの検証
- 計算時間の評価