

# リンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクの電力見積手法の初期検討

西郷 雄斗<sup>1,a)</sup> 三輪 忍<sup>1</sup> 八巻 隼人<sup>1</sup> 本多 弘樹<sup>1</sup>

**概要:** 現在の世界トップクラスの HPC システムは膨大な電力を消費しており、電力効率に優れたハードウェアを必要としている。本論文は、HPC システムのインターコネクต์における省電力技術として最近注目を集めている、ON/OFF リンクの電力見積手法について述べる。ON/OFF リンクは、データ通信を行っていないリンクを省電力モードに遷移させることで、リンクの消費電力を削減する技術である。モード遷移が発生すると通信レイテンシが悪化することから、頻繁なモード遷移を避けるために、ON/OFF リンクではリンクオフスレッシュホールド (Link Off Threshold) が有効とされている。本論文ではリンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクの電力見積手法を検討する。

## 1. はじめに

近年の HPC システムは消費電力の削減が強く求められている。アメリカ合衆国エネルギー省 (DoE) や国防高等研究計画局 (DARPA) は、次世代のフラッグシップモデルとしてエクサフlops級システムを 20MW で動作させることを目標に掲げている [2][7][13]。この目標値は現在の TOP500[5] における最も電力効率の良いシステム [6] (2015 年 11 月において 7GFlops/W) をスケールしても到達し得ない値であり、目標を達成するためには、CPU、アクセラレータを始め、メモリ、インターコネクต์などさまざまなハードウェアの電力効率の改善が必須である。

我々は、インターコネクットの省電力技術として最近注目を集めている ON/OFF リンクに着目する。インターコネクットの消費電力はシステム全体の 12% [8] といわれており、その削減は重要な課題となっている。インターコネクต์においては、リンクの両端に位置する PHY が多くの電力を浪費していることが知られている [3]。ON/OFF リンクは、データ通信を行っていないリンクに対し、その両端の PHY を省電力モードに遷移させることによって消費電力を削減する。ON/OFF リンクは Ethernet において EEE (Energy Efficient Ethernet)[1][9] として既に実用化されており、将来的には InfiniBand などの他の通信規格においても実用化が期待されている。

ON/OFF リンクでは、後述するようにモード遷移によって通信レイテンシが悪化することから、頻繁なモード遷移

を避けるためにリンクオフスレッシュホールドを用いるのがよいとされている。リンクオフスレッシュホールドはモード遷移決定までの必要待機時間に相当し、リンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクでは、データ通信を終えてすぐに省電力モードに遷移するのではなく、リンクオフスレッシュホールド時間が経過するまでの間は通常モードを維持する。これにより、リンクオフスレッシュホールド以内に到着したフレームは、モード遷移の影響を受けることなく通常のレイテンシで通信できる。いくつかの EEE 対応のスイッチでは同様の制御が行われている。

リンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクはインターコネクットの省電力技術として有望視されているものの、実際にこの技術を採用した HPC システムは、実用されていない。実際の HPC システムでこの技術を採用した場合のシステム性能や消費電力削減効果が未知数なためである。ON/OFF リンクに対するこれまでの評価は、そのほとんどがシミュレーションによるものであった。また、システム規模が最大でも 64 ノードと小さく、評価はシングルジョブを実行する状況に限られていた。

我々は、より実 HPC システムに近い環境で ON/OFF リンクを評価する手法として、ON/OFF リンクを採用していない実 HPC システム上で得た通信トレースを用いて、このシステムが ON/OFF リンクを採用した場合の性能と消費電力を見積もることを考えている。ON/OFF リンクを採用していない実 HPC システムは世の中に多数存在する上、中には数千ノードを利用可能なシステムもある。また、シミュレーションとは異なり、実 HPC システムならばマルチジョブ実行の評価も容易である。

<sup>1</sup> 電気通信大学

<sup>a)</sup> saigo@hpc.is.uec.ac.jp

今回、上記の手法の初期検討として、リンクオフスレッシュォルドを有する ON/OFF リンクの電力見積手法について検討を行った。リンクオフスレッシュォルドを有しない ON/OFF リンクに対しては通信量から消費電力を見積もる手法が既に提案されているが [4]、リンクオフスレッシュォルドを有する ON/OFF リンクに対する同様の手法は我々の知る限りまだない、

本論文の構成は以下の通りである。まず 2 章で ON/OFF リンクについて詳しく述べる。3 章では今回検討を行った電力見積手法を述べる。4 章で評価を行い、5 章で考察する。6 章で関連研究について述べ、最後 7 章で本論文をまとめる。

## 2. ON/OFF リンク

従来のリンクは、データ通信を行っていない状態（アイドル状態）でも通信中と同等の電力を浪費する。この電力の浪費を抑える目的で ON/OFF リンクが提案されており、一部の Ethernet では既に実用化されている。本章では、まず ON/OFF リンクの概要を述べ、次いでその性能オーバーヘッドを抑える技術であるリンクオフスレッシュォルドについて述べる。

### 2.1 概要

ON/OFF リンクは、大きく分けて、通常モード（ON 状態）と省電力モード（OFF 状態）の 2 つのモードを有する。通常モードはデータ通信が可能で、かつ、消費電力が大きいモードである。一方、省電力モードはデータ通信を不可能にすることで、電力消費を抑えるモードである。省電力モード中のリンクの消費電力は、通常モードの 10% 程度と言われている [10]。

ON/OFF リンクの基本的な動作を図 1 に示す。データ通信を行っている状態（アクティブ状態）では、リンクは通常モードで動作するため、大きな電力を消費する。データ通信を終えると、リンクは省電力モードへの遷移（スリープ）を開始する。省電力モードへの遷移には数  $\mu s$  程度の時間 ( $T_s$ ) を要する。省電力モード中はリンクの接続状態を確認する作業（リフレッシュ）が定期的に行われる。省電力モードのリンクにフレームが到着すると、リンクは通常モードに復帰（ウェイクアップ）してから通信を開始する。この復帰処理には数十  $\mu s$  程度の時間 ( $T_w$ ) が必要なことから、省電力モード時に到着したフレームの通信レイテンシは通常モード時に到着したフレームよりも大きくなってしまう。

### 2.2 リンクオフスレッシュォルド

ON/OFF リンクのウェイクアップ遅延がインターコネクティブ性能に与える影響を抑制するため、リンクオフスレッシュォルドが提案されている。リンクオフスレッシュォルドは

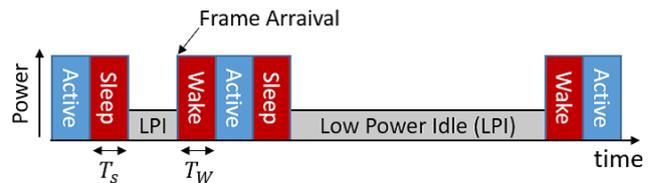


図 1 リンクオフスレッシュォルドを有しない ON/OFF リンクの動作

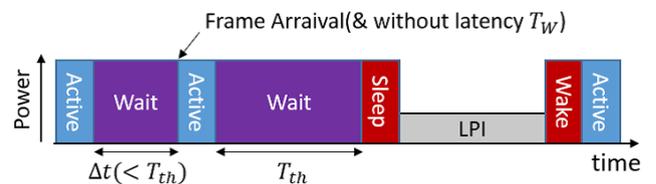


図 2 リンクオフスレッシュォルドを有する ON/OFF リンクの動作

モード遷移決定までの必要待機時間に相当する。すなわち、リンクオフスレッシュォルドを用いた ON/OFF リンクでは、アクティブ状態の終了後ただちにスリープを開始するのではなく、リンクオフスレッシュォルド時間 ( $T_{th}$ ) が経過するのを待ってからスリープを開始する（図 2）。アクティブ状態終了後から  $T_{th}$  以内は通常モードであるため、この間に到着したフレームはリンクをウェイクアップする必要がなく、通常のレイテンシで通信できる。このようにしてリンクオフスレッシュォルドはウェイクアップ回数を抑制する。

多くの HPC アプリケーションは、短期間で集中的に通信を行う通信フェーズと、通信をまったく行わずに計算のみを行う計算フェーズからなることが知られている [11]。そのため、HPC システムで ON/OFF リンクを使用する場合は、通信フェーズではなるべく通常モードを、計算フェーズではなるべく省電力モードを維持することが求められる。リンクオフスレッシュォルドを通信フェーズのアイドル状態の時間間隔よりも長く、かつ、計算フェーズのアイドル状態の時間間隔よりも短く設定することによって、上記の要求に対応することが可能になる。

## 3. リンクオフスレッシュォルドを有する ON/OFF リンクの電力モデリング

我々は、リンクオフスレッシュォルドを有する ON/OFF リンクの評価方法として、ON/OFF リンクを採用していない実 HPC システム上で得た通信トレースを用いて、このシステムが ON/OFF リンクを採用した場合の性能と消費電力を見積もることを考えている。この手法を用いれば、数千ノードの実システム上で得た通信トレースを用いることで、数千 MPI プロセス規模の並列アプリケーションに対する ON/OFF リンクの効果を確認できる。また、マルチジョブを実行した時の通信トレースから、異なるジョブの通信によって共有された ON/OFF リンクの効果を確認できる。

本論文では、通信トレースから、リンクごとの単位時間あたりの通信量と平均フレームサイズが得られると仮定する。これらの情報は、フラットなネットワークではノードとリンクが1対1に対応することから、各ノードにおいてWiresharkなどのフレームキャプチャツールを使用することによって取得できる。マルチホップネットワークのシステム上でこれらの情報を得るためには多少の工夫が必要である。例えば、複数ノードで収集した通信トレースとネットワークトポロジーから、各リンクの通信量と平均フレームサイズを計算によって求めることが考えられる。各リンクにおける単位時間あたりの通信量と平均フレームサイズから、そのリンクが単位時間に消費する平均電力をモデルにより算出する。

リンクオフスレッシュホールドを有するON/OFFリンクの電力モデルは、我々の知る限りまだ存在しない。そこで本論文では、文献[4]で提案されているリンクオフスレッシュホールドを有しないON/OFFリンクの電力モデルを拡張し、新しいモデルを構築する。以下では拡張した電力モデルについて述べる。

まず文献[4]で提案されたON/OFFリンクの電力モデルについて述べる。このモデルでは、ON/OFFリンクを有するネットワークの電力 $P$ は以下の式によって表される。

$$P = P_{base} + P_{Dynamic} \sum_{i=1}^n \min(1, D \cdot \rho_i) \quad (1)$$

ここで $P_{base}$ はリンクの状態によらず常に消費される電力を表しており、 $P_{Dynamic}$ は通信量に応じて消費量が変動する電力の最大値を表している。また $\rho_i$ はリンク $i$ の通信密度を表しており、例えば10ギガビットイーサネットでは10Gb/sで通信が行われている時に $\rho_i = 1$ となる。 $D$ は係数であり、以下の式によって定義される。

$$D = \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left[ p(L) \cdot \frac{1}{SF_e(L)} \right] \quad (2)$$

ここで $L$ はフレームサイズを表しており、 $p(L)$ は $L$ ビットのフレームの出現確率を表している。また、 $SF_e(L)$ は $L$ ビットのフレーム1つの転送において消費される電力のうち、転送そのものによって消費される電力の割合（Single Frame efficiency）を表しており、次式によって定義されている[13]。

$$SF_e(L) = \frac{T_f}{T_s + T_w + T_f} \quad (3)$$

ここで、 $T_s, T_w, T_f$ はそれぞれスリープ時間、ウェイクアップ時間、 $L$ ビットのフレームの転送時間を表している。上記の式は、スリープ時間あるいはウェイクアップ時間が長くなるほどフレーム転送そのものによって消費される電力の割合は増加する、すなわち、ON/OFFリンクによる省電力削減量が減少することを意味している。

式(3)を式(2)へ代入すると、次式となる。

$$D = \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left[ p(L) \cdot \frac{T_s + T_w + T_f}{T_f} \right] \quad (4)$$

このとき、1ギガビット、10ギガビットイーサネットにおいては、フレーム転送時間 $T_f$ が $T_s, T_w$ に比べて限りなく小さいため、分子の $T_s + T_w$ は無視できる[13]。また、フレーム転送時間 $T_f$ はフレームサイズ $L$ を最大転送レート $R$ で割った値であるため、式(4)は次のように表せる。

$$\begin{aligned} D &\simeq \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left[ p(L) \cdot \frac{T_s + T_w}{\frac{L}{R}} \right] \\ &= R \cdot (T_s + T_w) \cdot \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left[ \frac{p(L)}{L} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)は、1フレームあたりの転送時間 $R/L$ に、ウェイクアップ時間 $T_w$ とスリープ時間 $T_s$ の和を乗じた形となっている。これは、ウェイクアップ時間、スリープ時間、フレーム転送時間の3つの時間をすべて1フレームの転送に要する時間としてとらえることを意味している。ここで、通信密度が1になった時の通信量、すなわち $D \rho_i = 1$ となる $\rho_i$ を考える。この時、フレーム転送、ウェイクアップ、スリープの各処理が絶え間なく連続的に発生した結果、ON/OFFリンクは省電力モードでいる時間がゼロとなる。この場合ON/OFFリンクは常に最大電力を消費しており、これ以上通信量を増やしてもリンクの消費電力は増えない。この通信量を飽和通信量と呼ぶ。フレームサイズ $L$ が一定の時 $D$ は定数となるので、 $P$ は飽和通信量未満の領域では $\rho_i$ に対して線形に増加する。

ここで、リンクオフスレッシュホールド $T_{th}$ を任意の値に設定した場合を考える。前述のモデル式における係数 $D$ は、 $T_s + T_w + T_f$ が1つのフレーム転送に要する時間だと考えたが、リンクオフスレッシュホールドを適用した場合は、リンクオフスレッシュホールド分の時間 $T_{th}$ が足されると考える。すると1つのフレーム転送にかかる時間が $T_s + T_w + T_f + T_{th}$ となるため、この場合の式(1)における $\rho_i$ の係数 $D'$ は次式で表すことができる。

$$D' = R \cdot (T_s + T_w + T_{th}) \cdot \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left[ \frac{p(L)}{L} \right] \quad (6)$$

この式が意味することは、リンクオフスレッシュホールド分の時間が足されることにより、飽和するまでの通信密度が減少することを示しており、飽和する通信量はリンクオフスレッシュホールドがない場合よりも少なくなる。ただし、これはフレームの通信間隔が常に一定である場合に限られる。なぜなら、リンクオフスレッシュホールドは本来待ち時間であり、それを含めて1つのフレーム転送時間だと捉えると、フレームの転送間隔のばらつき( $\pm\delta$ )が発生する場合、

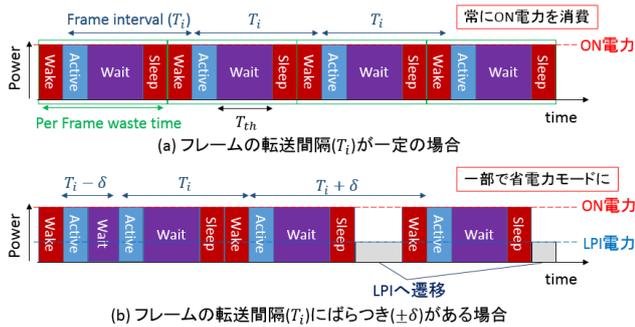


図 3 送信間隔のばらつきによるアイドル間隔の発生

図 3 のように、待ち時間が  $T_{th}$  に達することなく次のフレーム転送を行う、といったことが起こる。これにより、本来のスリープ時間とウェイク時間および、リンクオフスレッシュホールドからこの待ち時間を引いた時間が結果的に省電力モードに費やされる。転送間隔が伸びた場合 ( $T_i + \delta$ ) は  $\delta$  の分の時間だけ省電力モードとなる。つまり、転送間隔がばらけるほど、転送間隔が一定である場合よりも電力の節約ができていくことがわかる。こういった問題は飽和したときに限らず、飽和に近い通信量、つまりフレーム同士の間隔が近くなる程発生しやすいと想定される。そのため、このリンクオフスレッシュホールドを加えたモデルは転送間隔がばらけていると仮定した場合、実際の電力よりも高く見積ってしまうといった、保守的な電力推定のモデルになる可能性がある。このような問題が想定されるものの、次章ではフレームの転送間隔が殆ど一定になると仮定して式 (6) の評価を行った。

#### 4. 評価

本章では、前章で述べたモデル式の精度を評価した結果について述べる。

##### 4.1 環境

今回の評価に用いたシステムを図 4 に示す。図に示すように、実験システムは 2 つのノードと 1 つのスイッチからなる。ノードとスイッチは 10GBASE-T のリンク 1 本を用いて接続されている。スイッチは DELL の Power Connect 8132 を使用した。ノードの CPU には Xeon E5-2630L(2.0GHz, 6core, TDP60W) を用いており、OS には Scientific Linux 6.5 を使用した。

スイッチ側のポートは、管理インターフェース上でポートごとに EEE の有効化/無効化を変更できる。また、各ポートは、ウェイクアップ時間が  $17\mu s$ 、リンクオフスレッシュホールドは  $600\mu s$  以上の任意の値に設定できる。スリープ時間は管理インターフェース上では確認できなかったため、文献 [4] を参考に今回は  $4\mu s$  と仮定した。

電力の測定には、WattsUP?.Net?wattsup という電力計を用いた。これは、接続された機器の 1 秒毎の電力を測定

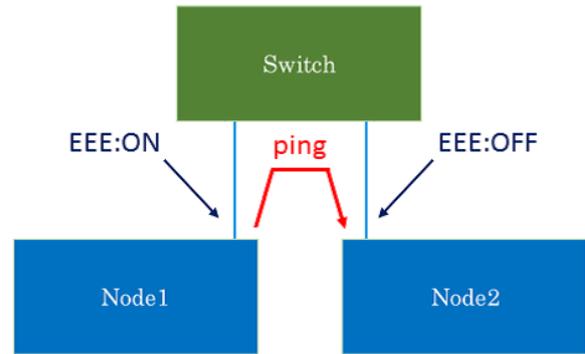


図 4 評価環境

することができる測定器である。これをスイッチの電源プラグとコンセントの間に接続してスイッチ全体の電力の測定を行った。

1 ポートあたりの電力を求めるにあたり、まずスイッチに接続された全てのポートのケーブルを取り外した状態でスイッチの電力を測定した。次いで、EEE が有効になっているポートにのみケーブルを挿した状態でスイッチの電力を測定した。これらの値の差分を求めることで、通信が行われていない状態 (OFF 状態) の 1 ポートあたりの電力 ( $P_{base}$ ) が得られる。一方、 $P_{dynamic}$  は、EEE を無効にしたポートにのみケーブルを挿した状態でスイッチの電力を測定し、測定された値から  $P_{base}$  を引くことで求めた。上記の測定を行った結果、今回の実験環境の  $P_{base}$  は 2.0W、 $P_{Dynamic}$  は 1.3W であった。

##### 4.2 評価方法

本節では、評価の方法を示す。図 4 に示すように、Node1 に接続されたリンクでは EEE を有効にしておき、Node2 に接続されたリンクでは EEE を無効にしておく。この状態で、Node1 から Node2 へ ping アプリケーションを用い、送信間隔を変えることで通信量を変えながら、スイッチの電力の測定を行った (送信間隔は 0.001 秒単位で変更可能)。このとき、Node2 のリンクは EEE が無効であるため、常に一定の電力を消費し続けている。そのため、通信量を変化させることによって変化する電力は、Node1 に繋がるリンクのみになる。ある通信量の場合の 1 ポートあたりの電力は、ある通信量でのスイッチの電力を測定し、その値をアイドル状態の際のスイッチの電力から引いて  $P_{base}$  を加えることで導く。

測定は、フレームサイズ、送信間隔、リンクオフスレッシュホールドを変えて行った。送信間隔は、0.001~0.032 秒の範囲で変更した。フレームサイズは 64byte, 256byte, 1024byte, 1514byte の場合について評価した。リンクオフスレッシュホールドは  $600\mu s$ , 1ms, 2ms, 4ms, 8ms, 16ms に設定して測定を行った。

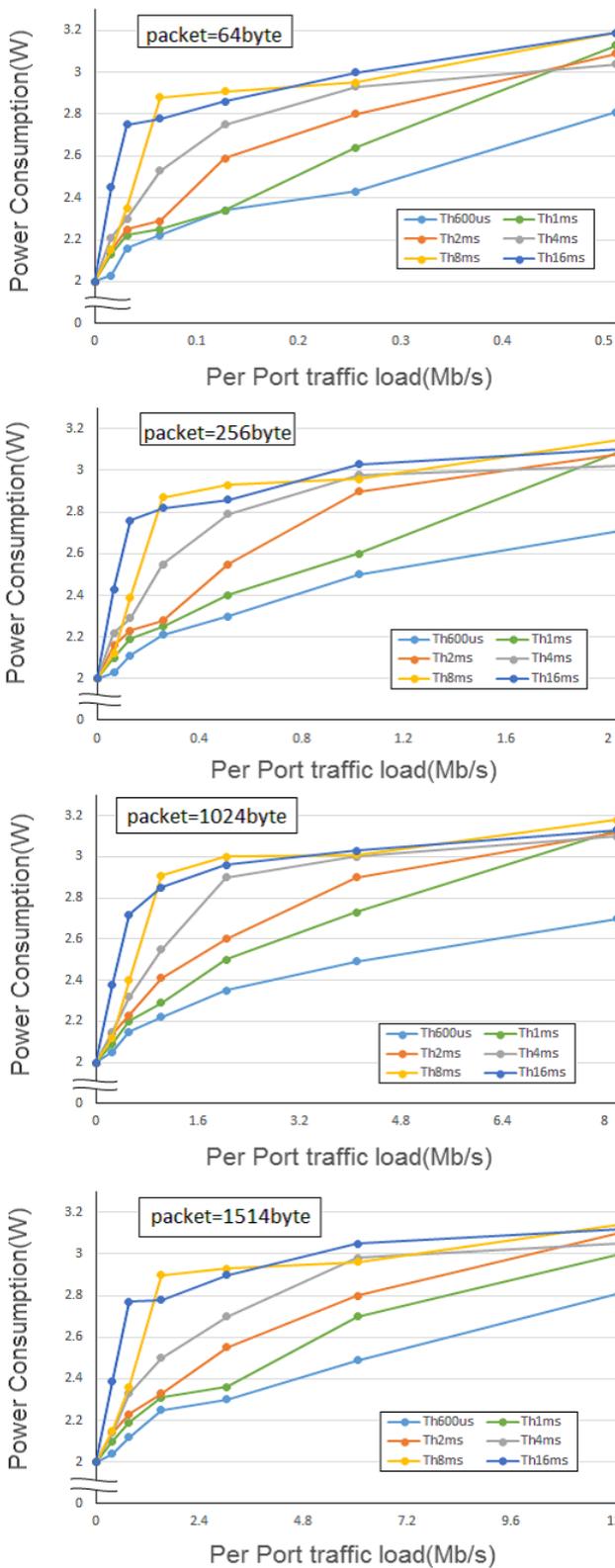


図 5 ON/OFF リンクの消費電力 (実測値)

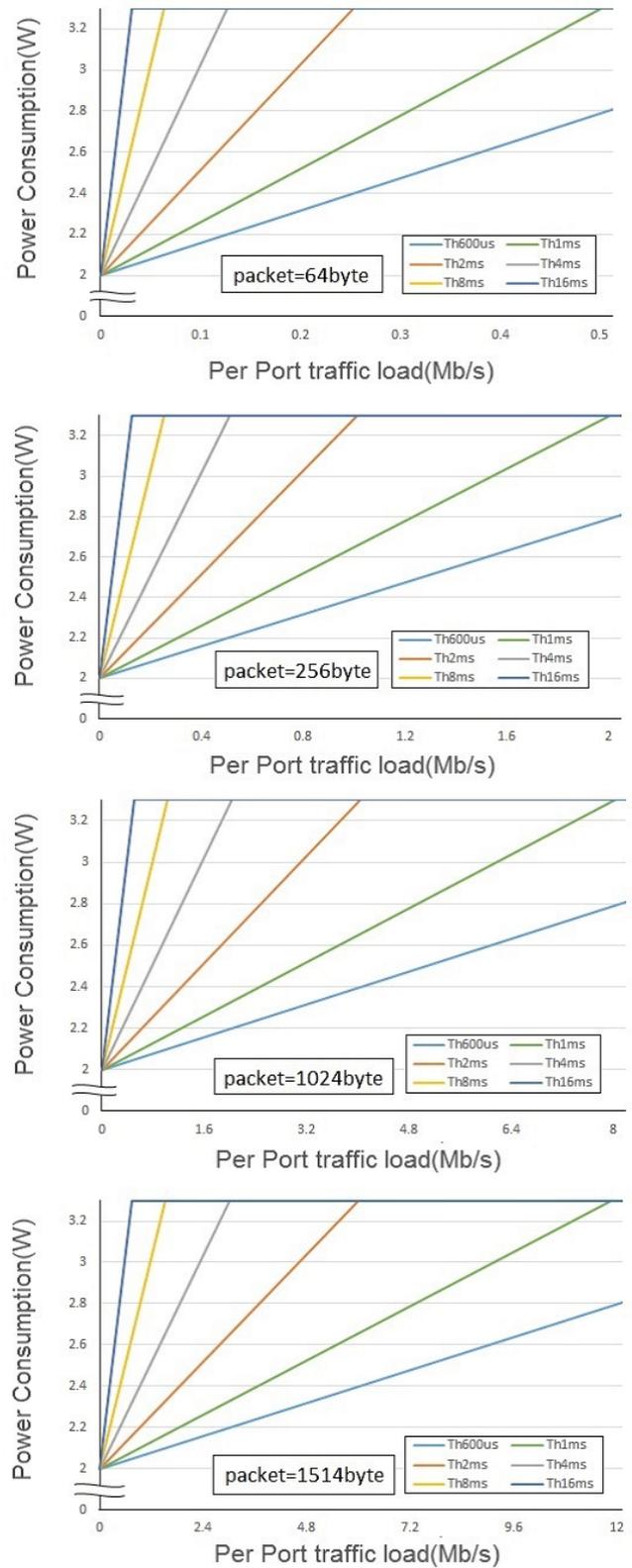


図 6 ON/OFF リンクの消費電力 (モデルによる推定値)

### 4.3 結果

評価結果を図 5 と図 6 に示す。図 5 が ON/OFF リンクの消費電力の実測値，図 6 が前章で述べた電力モデルによる推定値を表している。フレームサイズ別にグラフを分け，各リンクオフスレッシュホールドに対する電力と通信量を

プロットした。縦軸は 1 ポートあたりの消費電力 (W) を，横軸はそのポートを流れる通信量 (Mb/s) を表している。 $T_{th}$  はリンクオフスレッシュホールドの値を表している。どのサイズのフレームにおいても，リンクオフスレッシュホールドを長くするほど通信量を増やしたときの電力の上昇率が増

加した。また、リンクオフスレッシュホールドを 16ms にした場合や、8ms にした場合は、電力が上がりきらず上昇率が途中で減少している。

図 5 の結果と図 6 の結果を比べると、リンクオフスレッシュホールドが  $600\mu s$  や 1ms のように短い場合には、モデルの勾配と近い電力の上昇率であることがわかった。一方、8ms や 16ms といった長いリンクオフスレッシュホールドにおいては、通信量が少ない場合、モデルに近い電力上昇をしているが、前節で述べた飽和通信量に近づいた場合にはモデルよりも電力が大きく下回っている。また、この通信量を超えても電力は最大値に達していない。

## 5. 考察

前章での結果より、リンクオフスレッシュホールドが短いほどモデルによる推定値は実測値に近く、逆に長いほどモデルによる推定値は誤差が大きくなることがわかった。また、モデルによる推定値の誤差が大きい状況では、実測値はモデルによる推定値を常に下回ることがわかった。これは、リンクオフスレッシュホールドを長くするほどフレームの転送間隔のばらつきによる影響が出やすくなり、それによって図 3 のように省電力モードへ遷移している時間が多く発生してしまうためだと考えられる。短いリンクオフスレッシュホールドの場合は、転送間隔の誤差 ( $-\delta$ ) が発生してもリンクオフスレッシュホールドが短いため、待ち時間がそれに達しなくなってスリープ時間とウェイク時間が省電力モードになる、ということが起こりづらく、転送間隔が一定であると仮定したモデルによる推定値に実測値が近くなったと考えられる。

先行研究で導かれている最適なリンクオフスレッシュホールドは数十  $\mu s$  ~ 数百  $\mu s$  といった小さな値であるため、提案したモデル式で誤差を少なく見積もることができると予想される。リンクオフスレッシュホールドを大きく設定した場合の電力推定モデルは、今後実測値に近づくように考慮を加えたモデルへ改良する必要がある。

具体的には、フレーム転送間隔のばらつきにより発生する省電力モードの総時間を精密に見積もることができれば省電力モードの総時間と電力との関係式を作成することで、より精度の高いモデルを作れると考えている。省電力モードの総時間と電力の関係式は、先行研究 [4] で線形的に電力があがっていくということがわかっているので、単位時間あたりの省電力モードが 1 秒の場合、つまり常にリンクが OFF 状態である場合は、電力が  $P_{base}$  に、省電力モードの総時間が 0 秒の場合、つまり常にリンクが ON 電力を消費している場合は、電力が  $P_{base} + P_{Dynamic}$  となるような二元一次方程式で与えられると考えられる。これは次式で表すことができる。

$$P = -P_{Dynamic} \cdot T_{off} + (P_{base} + P_{Dynamic}) \quad (7)$$

ここで、 $T_{off}$  は単位時間あたりの省電力モードの総時間である。この式は、省電力モードの総時間が 1 秒である状態からそれを次第に少なくしていくにつれてポートの電力一定の傾きであがっていくことを示している。省電力モードの総時間が 0 秒になったときに最大電力消費電力になるということになる。式 (7) に対して、単位時間あたりの省電力モードの総時間を入力とすることで、1 秒毎のスイッチの電力を見積もるという方法である。

## 6. 関連研究

HPC システムのインターコネクタに ON/OFF リンクを採用した様々な研究が行われている。Saravanan らは、さまざまなアプリケーションを実行した時のリンクのアイドル時間を分析し、最適なリンクオフスレッシュホールドを求めている [11]。Saravanan らの結果によれば、最適なリンクオフスレッシュホールドは  $50\mu s$  であり、このスレッシュホールドを用いた時のアプリケーション性能の低下は最大でも 2% と小さく、リンクの消費エネルギーの 70% を削減できる。

さらに Saravanan らは、別の論文において、マルチホップネットワークにおいて各リンクのリンクオフスレッシュホールドをどのように決定するかを検討している [12]。複数ホップ通信が被るウェイクアップ遅延は、経由する省電力モードのリンク数に比例する。そのため、マルチホップネットワークにおける最適なリンクオフスレッシュホールドはアプリケーションによって大きく異なる。Saravanan らは、アプリケーションの通信パターンを各スイッチが解析し、各リンクの最適なリンクオフスレッシュホールドを動的に決定する方法を提案している。

Reviriego らは ON/OFF リンクの電力モデルを提案している [4]。彼らの電力モデルでは、リンクに対する負荷と平均フレームサイズを入力変数とし、区分線形関数によって ON/OFF リンクの消費電力を表している。このモデルはリンクオフスレッシュホールドを有しない ON/OFF リンクの消費電力をうまく説明できるが、本論文で述べたように、リンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクの消費電力は説明できない。

## 7. まとめ

本論文では、インターコネクタの消費電力削減手法として最近注目を集めている ON/OFF リンクに着目し、ON/OFF リンクを採用するシステムの電力見積手法について検討した。特に、ON/OFF リンクによる通信レイテンシの悪化を抑えるためにはリンクオフスレッシュホールドが有効であることから、本論文ではリンクオフスレッシュホールドを有する ON/OFF リンクの電力モデリングを行った。評価の結果、今回提案したモデルは、リンクオフスレッシュホールドが大きいかほど誤差が大きくなり、小さいほど誤差が小さくなる傾向が見られた。フレーム転送間隔のばらつきが影響するほ

どのリンクオフスレッシュホールドを設定した場合でのモデルは改良する必要があるとわかった。

#### 参考文献

- [1] IEEE802.32az Task Force : Active/Idle Toggling with Low Power Idle.
- [2] A Sodani : Race to exascale Opportunities and challenges, Keynote Speech, MICRO 44 (2011).
- [3] CISCO: IEEE 802.3az Energy Efficient Ethernet : より環境に配慮したネットワークの構築 (2011).
- [4] P. Reviriego, V. Sivaraman, Z. Zhao, J.A.Maestro, A.Vishwanath, A.Sanchez-Macian and C.Russell : An Energy Consumption Model for Energy Efficient Ethernet Switches, IEEE(p98-104, 2012).
- [5] Top500 list, url: <https://www.top500.org/lists/2015/11/> (2015).
- [6] Green500 List of most energy efficient Supercomputers, url: <http://www.green500.org/> (2015).
- [7] U S DOE : Scientific grand challenges: Crosscutting technologies for computing at the exascale, Report from the Workshop Held (Feb 2010).
- [8] Abts, Dennis and Marty, Michael R. and Wells, Philip M. and Klausler, Peter and Liu, Hong : Energy Proportional Datacenter Networks (p338-347, June 2010)
- [9] K. Christensen and P. Reviriego and B. Nordman and M. Bennett and M. Mostowfi and J. A. Maestro. : IEEE 802.3az: the road to energy efficient ethernet (p50-56, 2010)
- [10] P. Reviriego and J. A. Hernandez and D. Larrabeiti and J. A. Maestro : Performance evaluation of energy efficient ethernet (p697-699, 2009)
- [11] K. P. Saravanan and P. M. Carpenter and A. Ramirez : Power/performance evaluation of energy efficient Ethernet (EEE) for High Performance Computing (p205-214, 2013)
- [12] Saravanan, Karthikeyan P. and Carpenter, Paul M. and Ramirez, Alex : A Performance Perspective on Energy Efficient HPC Links (p313-322, 2014)
- [13] Shalf, John and Dosanjh, Sudip and Morrison, John : Exascale Computing Technology Challenges (p1-25, 2011)