

大規模インターコネクトを対象とした消費電力解析環境 NsimPower の構築

阿部 祐希^{1,a)} 稗田 拓路^{1,2} 稲富 雄一^{1,2} 柴村 英智³ 眞木 淳³ 小林 泰三⁴ 深沢 圭一郎^{5,2}
井上 弘士^{6,2}

概要：本稿では、数万から数十万規模のインターコネクトの性能と消費電力見積りを可能とする環境として NsimPower を提案する。すでに開発されたインターコネクト・シミュレータ NSIM に対し、1) 消費電力モデルの構築とその組み込み、2) リンクシャットダウンに基づく低消費電力化方式のサポート、3) 3次元表示グラフを用いた可視化サポートを行った。ケーススタディとして 512 ノードからなる 3次元トラス網を前提とし、アルゴリズムの異なる全体全通信のシミュレーション実験を実施した。その結果、全体全通信という比較的通信トラフィックの多い状況においても、最大で 15.3%の消費電力削減が可能であることが分かった。

1. はじめに

現在、1秒間に 1.0×10^{18} 回の浮動小数点演算を行うエクサスケール・スーパーコンピュータの実現に向けた研究開発が世界各国で活発に行われている。エクサスケールコンピュータを達成するために解決すべき重要課題の1つに、電力当たり性能の大幅な改善が挙げられる。電気代などのシステム運用コストや発電施設の関係から、供給できる消費電力は 20MW 程度が限界であると言われている [3]。例えば、京コンピュータ [10] の実効性能は 10 ペタフロップス、その際の消費電力は 12.6MW である。すなわち、エクサフロップスを達成するには、約 2 倍の消費電力で 100 倍の性能向上 (50 倍の電力効率の改善) が必要となる。そのため、電力効率の改善は急務であり、消費電力の増大を回避しつつ、大幅な性能向上を達成しなければならない。

スーパーコンピュータでは、主に、計算ノードとそれらを相互接続するインターコネクト、ならびに、空調などの設備による消費電力が支配的となるが、本稿では特にインターコネクトに着目する。例えば、京コンピュータに実装されたインターコネクトコントローラ ICC の消費電力は 28W であり、これはプロセッサチップ SPARC64VIIIfx の

約半分の電力に相当する [12]。また、エクサフロップス級の計算ではストロングスケーリングがより重要になるため、通信レイテンシの削減は必要不可欠であり、その結果としてインターコネクトがシステム全体の消費電力に与える影響がより大きくなる。したがって、今後は数十万ノードを相互接続する大規模インターコネクトを対象とした通信性能・消費電力最適化が極めて重要となる。実際、通信頻度に基づくリンクシャットダウン [6] や低消費電力モードの適用 [13] など、すでに様々な取り組みが報告されている。しかしながら、未だ積極的な低消費電力化機構を備えた大規模スーパーコンピュータはほとんど存在しないため、数十計算ノードといった小中規模の実機システムを対象とした評価に留まっているのが実状である。

これまでに、大規模インターコネクトの性能評価を目的にした様々なソフトウェア・シミュレータが開発されてきた [1], [4], [7]。しかしながら、著者らが知る限り、消費電力の見積もりが可能なツールは未だ開発されていない。そこで本研究では、数万から数十万ノード規模のインターコネクト消費電力を推定可能な環境として NsimPower を提案する。Energy Efficient Ethernet [8] がサポートする低電力アイドル (LPI: Low Power Idle) モードのサポートを前提とし、ルータやスイッチに関する消費電力モデルを開発する。そして、インターコネクト・シミュレータ NSIM [11] に本モデルを組み込むと同時に各種遅延オーバーヘッドを反映させることで、電力削減効果とそれに伴う通信性能オーバーヘッドを同時に測定することができる。また、シミュレーション結果の解析を容易にするための可視化環境

¹ 九州大学大学院システム情報科学府

² 科学技術振興機構/CREST

³ 九州先端科学技術研究所

⁴ 帝京大学福岡医療技術学部

⁵ 九州大学情報基盤研究開発センター

⁶ 九州大学大学院システム情報科学研究院

a) abe@soc.ait.kyushu-u.ac.jp

も合わせて整備する。ケーススタディとして $8 \times 8 \times 8$ の全体全通信シミュレーションを行った結果、LPI モードを適用することでインターコネクットの消費電力を 15.3%削減できることが分かった。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 節ではインターコネクット・シミュレータ NSIM の概要を説明する。第 3 節では、消費電力モデル、入出力仕様、機能仕様といった NsimPower の詳細を示し、第 4 節で全体全通信を対象とした NsimPower 適用実験を行う。最後に第 5 節にて本論文をまとめる。

2. NSIM

NSIM は、大規模並列システム向けインターコネクットシミュレータである。数万ノードを接続する次世代インターコネクットの性能評価を目的とし、設計・開発現場での実践的な利用を念頭に開発された。以下、NSIM の主な特徴を示す。NSIM の詳細な実装に関しては文献 [7] を参照されたい。

- 様々な構成のサポート：ネットワーク・トポロジとしては、 k -ary n -cube/mesh、ならびに、FBB (full bisectional bandwidth) 構成の FatTree モデルを実装している。k-ary n -cube/mesh の例としては、3 次元トラス/メッシュや京コンピュータで採用された Tofu (6 次元メッシュ) [2] などが挙げられる。また、ルータやスイッチの仕様など各種パラメータを設定することで、様々なインターコネクットの構成を想定したシミュレーションが可能である。
- 高速シミュレーション：NSIM は 離散事象シミュレーションに基づいており、MPI を用いた並列プログラムとして実装されている。また、データ転送はパケットレベルでのモデル化を採用し、バーチャル・カッツスルー方式の動作を考慮することで、フリットレベル・シミュレーションと同等の精度を担保する。このように、シミュレータの並列化と高い抽象度でのモデル化により、10 万ノードクラスの大規模インターコネクットを対象とした場合でも現実的な時間内でのシミュレーションが可能となる。
- 通信パケットの動的生成：シミュレーション対象通信パターンは、NSIM が提供する MPI 互換インタフェース (MGEN API) を利用しメッセージパッシング方式の並列プログラム (MGEN プログラム) として記述する。MGEN プログラムは MPI プログラムと同様の要領で記述できる。MGEN API には MPI に定義されていない拡張関数が含まれており、複数の NIC を同時に利用した通信、ゼロ・コピー通信などを指定したシミュレーションが可能である。MGEN プログラムの実行による通信イベントの生成とインターコネクット・シミュレーションは同期しながら進行するため、

ネットワークの混雑状況に応じて振舞いが動的に変化する通信パターンもその影響を正しく反映することができる。

入力は 3 種類あり、通信パターンを記述した MGEN プログラム、シミュレータ設定ファイル、および、ランクノード割り付けファイルである。シミュレータ設定ファイルでは、MPI 処理時間オーバーヘッド、ルータ仕様、ネットワーク仕様などのパラメータを指定することができる。これらの内容を変更することにより、構成の異なるシステムをシミュレーションが可能となる。また、トポロジを意識したアプリケーションや通信アルゴリズムの評価を行う場合には、ランクノード割り付けファイルを差し替えることで様々なランクとノードとの割り付けを試すことができる。一方、出力としては、性能統計情報 (MGEN プログラム実行時間、平均リンクバンド幅、リンク帯域効率、累積転送データ量など)、時間空間別統計情報 (性能統計情報を時間および空間分割した出力)、および、バッファ利用履歴 (指定ルータの指定期間においてバッファを通過したパケットの情報) がある。

3. NsimPower

3.1 低消費電力化機構

インターコネクットの消費電力見積りを可能とすべく、第 2 節で説明した NSIM をベースとする NsimPower を開発した。MGEN プログラムの実行によって生成される通信パターンに基づき、ルータやスイッチで消費される電力を推定する。代表的な低消費電力化技術としては、無通信期間に着目したリンクシャットダウン [6] が挙げられる。実際、近年では IEEE802.3az 標準 (すなわち EEE[8]) をサポートした商用スイッチが登場しており、今後は直接網を対象としたルータへの適用も進むと考えられる。そこで NsimPower では、今後の低消費電力インターコネクットの普及を見据え、次に説明するリンクシャットダウン機能を実装した。まず、各リンクに対して以下 2 つの動作モードを定義する。

- 活性モード (ACT モード): 接続先への通信路が確立されている状態であり、データの送信が可能である。基本的には、パケット送受信の有無に関係なく何らかの電気信号が常に送られる。そのため、定常的に電力を消費することとなる。
- 低消費電力アイドルモード (LPI モード): 当該リンクに接続されたポートに関連するハードウェアデバイスの大部分がシャットダウンされた状態であり、リンクの確立維持に要する消費電力はほぼゼロとなる。ただし、本モード中でのデータ送受信は不可であり、その場合には活性モードへと遷移しなければならない。動作としては、図 1 に示すように、各リンクにおいて一定期間通信が発生しない場合 (すなわち、無通信期間が T_{lt}

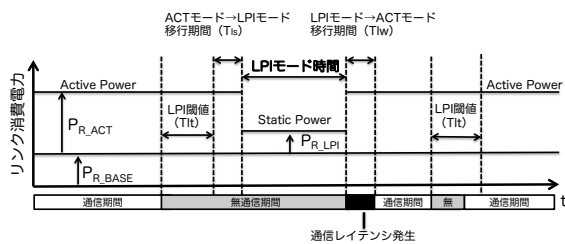


図 1 LPI モード時間と消費電力

時間経過した場合), Tls の時間を要して当該リンクを LPI モードへと遷移させる．その後, 通信要求が発生すると, Tlw の時間を費やして ACT モードへと復帰する．実際, これらモード遷移の期間における消費電力は実装依存であるが, NsimPower では ACT モード動作時と同じ電力を消費すると仮定している．また, 実際の EEE では, LPI モード中にリンクの接続を確立するリフレッシュ・プロセスが定義されている．これは, LPI モードへと遷移した後, 定められた時間が経過した段階で一旦ハードウェアをウェイクアップさせ, パケットを送信し合うことで接続を確認するものである．しかしながら, このリフレッシュ・プロセスが通信性能ならび消費電力に影響は極めて小さいと考え NsimPower では考慮していない．なお, リンクシャットダウンとは異なる低消費電力化技術として DVS(Dynamic Voltage Scaling) の適用 [9] が挙げられるが, 現段階では NsimPower には実装していない．

3.2 電力モデリング

本節では, NsimPower で採用した消費電力モデルを説明をする．ここでは, MGEN プログラムの実行を一定の期間で分割した時間単位であるチャンクを導入する．NsimPower は, 以下のモデルに基づきチャンク毎に消費電力を推定する．なお, ここではルータに着目して説明するが, 間接網などで使用されるスイッチに置き換わった場合も同様である．

$$P_{(i,j)} = \sum_{k=1}^{Nlink} \{ P_{R_ACK} \times (1 - R_{LPI_k}) + P_{R_LPI} \times R_{LPI_k} \} + P_{R_BASE} \quad (1)$$

ここで, $P_{(i,j)}$ はチャンク i におけるルータ j の平均消費電力であり, リンク当り平均消費電力の総和となる．リンク当りの平均消費電力の第 1 項ならびに第 2 項は, 当該リンクにおける動的消費電力の値であり, ACT モード時の動的平均消費電力 P_{R_ACT} , LPI モード時の動的平均消費電力 P_{R_LPI} , ならびに, リンク k でのチャンク i における LPI モード動作率(つまり, チャンクにおいて LPI モードで動作した時間の割合)で求めることができる．一方, 第 3 項

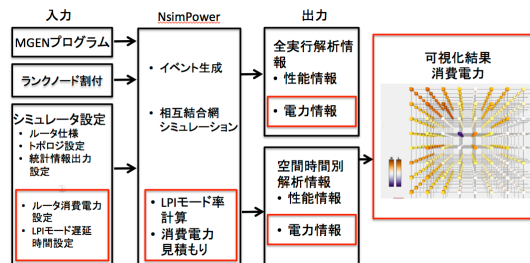


図 2 NsimPower 入出力仕様

である P_{R_BASE} は, パケット送受信の有無に関係なく常に消費されるリンク当たりの静的平均消費電力を表す．これに対し, P_{R_LPI} はインターコネクト・シミュレーションにより求まるパラメータであり, 通信衝突などの影響も考慮される．

3.3 機能ならびに入出力仕様

NsimPower は, 消費電力見積りに関して以下 2 つの解析方法をサポートしており, 消費電力の見積り機能を使用するか否かに関してはコマンドライン中でオプション指定 (--power) する．また, リンクシャットダウン機能の ON/OFF もコマンドライン中のオプション指定で設定可能である．

- 全実行解析: MGEN プログラムの実行終了時に, 消費電力などの統計情報を出力する．シミュレーション中にログファイル等は出力されない．集団通信全体といった粗粒度解析を高速に行う場合に適している．
- 過渡解析: チャンク毎に各ルータの消費電力情報をログに出力する．時間経過に伴う電力消費状況の変動を解析する場合に適している．

NsimPower の入出力を図 2 に示す．ここで, 赤枠は消費電力見積りに関係する部分である．NsimPower では, 従来の NSIM と同様に通信パターンを模擬する MGEN プログラム, ならびに, プロセスの配置に関する情報を入力とする．また, シミュレーション設定ファイルにおいては, 新たに以下のパラメータ設定をサポートする．

- Tls : ACT モードから LPI モードへの遷移に要する時間 [ps]
- Tlw : LPI モードから ACT モードへの遷移に要する時間 [ps]
- Tlt : ACT モードから LPI モードへ遷移する際の無通信期間の閾値 [ps]
- P_{R_BASE} : ルータ静的平均消費電力 [mW]
- P_{R_LPI} : LPI モードでのリンク当りルータ動的平均消費電力 [mW]
- P_{R_ACT} : ACT モードでのリンク当りルータ動的平均消費電力 [mW]

一方, 出力に関して, 全実行解析ではインターコネクト

```

MaxSimTime      295649616000 [Ticks]
SumArrivedPackets 261632
SumArrivedPacketSize 12558336 [Bytes]
SumSizeTransfer 75497472 [Bytes]
SumNumLinks     3072
LinkBusyRate    7.117019 [%] (CumulLinkBusyTime/SumNumLinks/MaxSimTime*100)
.....

SumAveragePowerConsumption 24149221 [pW]
PeakPowerConsumption      4715600009745906620 [pW]
SumEnergyConsumption      7139708108565092352 [pJ]
.....
    
```

図 3 NsimPower 全実行解析情報

```

# router 0,0,0 1,0,0 0,1,0 1,1,0 0,1,1 0,1,1 1,1,1 // 電力情報を出力するルータのネットワーク内番地
t 0 - 1000000 // チャンク開始時間 - チャンク終了時間 tは時間を示す識別子
r 0.12 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(0,0,0)のLPI率 rはルータを示す識別子
r 0.24 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(0,1,0)のLPI率
r 0.24 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(1,0,0)のLPI率
r 0.24 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(1,1,0)のLPI率
r 0.12 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(0,0,1)のLPI率
r 0.12 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(1,0,1)のLPI率
r 0.24 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(0,1,1)のLPI率
r 0.12 // チャンク[0-1000000]におけるルータ(1,1,1)のLPI率
t 1000000 - 2000000 // チャンク開始時間 - チャンク終了時間
r 0.06 // チャンク[1000000-2000000]におけるルータ(0,0,0)のLPI率
    
```

図 4 NsimPower 過渡解析情報 ($R_{LPI,k}$)

に関する平均消費電力，ピーク消費電力（チャンク当りの最大消費電力），消費エネルギーを出力する．また，過渡解析では，チャンク i におけるルータ毎の LPI モードの割合と平均消費電力をファイル出力する．図 3 ならびに図 4 に出力例を示す．

3.4 NsimPower の実装

NsimPower の実装においては，第 2 節で説明した NSIM に対し以下の改良を行った．

- LPI 動作率測定機能の追加：チャンク終了時刻において LPI モード動作率 $P_{R,LPI}$ を求める．現在の通信開始時刻と直前の通信終了時刻より，連続する 2 つの通信間隔を求める．この値に基づき，チャンク中の LPI モード動作期間を計算する．
- 消費電力値計算機能の追加：チャンク終了時刻において消費電力モデル 1 に基づきルータ消費電力を求める．
- モード遷移遅延時間の反映：ACT モードと LPI モードの間での状態遷移に伴う通信レイテンシの増加を反映する．具体的には，LPI モードから ACT モードに復帰する際の遅延時間は，パケットの到着を遅延時間分遅らせることで実装している．一方，ACT モードから LPI モードへの遷移に要する時間に関しては，モード遷移が完了する前に後続の通信が到着した場合にのみペナルティとして現れる．これは，完全に ACT モードから LPI モードへの状態遷移が完了した後，改めて ACT モードへの復帰処理が必要になるためである．

3.5 可視化サポート

NsimPower での消費電力解析をサポートすべく，米国ローレンスリバモア国立研究所で開発された可視化ツール Boxfish[5] との連携を可能にした．これにより，インターコネクト全体の消費電力の傾向を時間的または空間的に把握することができる．図 5 に可視化の例を示す．これらは， $8 \times 8 \times 8$ の 3D トーラス構造における全体全通信（Ring アルゴリズム）実行時の消費電力を示している．なお，本データを取得した際の各種パラメータや実験環境については第 4 節で説明する．

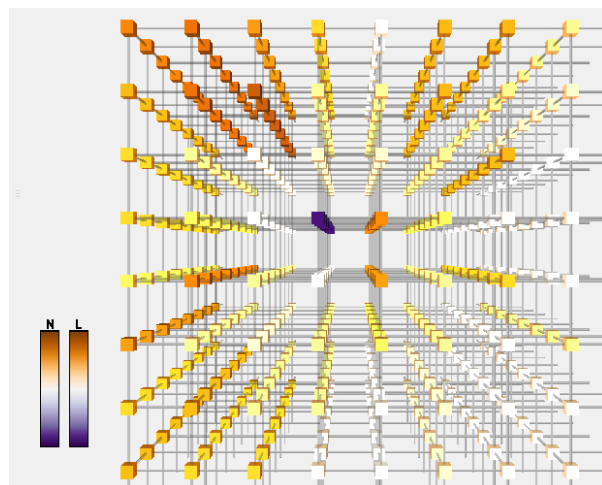


図 5 消費電力の過渡解析（例）

4. 評価

4.1 評価環境

NsimPower 利用に関するケーススタディとして，全対全通信のアルゴリズムを対象とした通信性能とインターコネクト消費電力の評価を実施した．評価対象となる通信アルゴリズムは Pairwise exchange, Ring, Simple spread の 3 種類である．評価するシステムのパラメータ設定を表 1 にまとめる．LPI モードの導入に伴う遅延時間パラメータは文献 [8] で示された 10GBASE-T の値を参照した．また，各消費電力パラメータに関しては，京コンピュータに搭載されたインターコネクト・コントローラの消費電力値を基準とし [12]，文献 [8] の実験データで示されるピーク消費電力，静的平均消費電力，ならびに，リンク当りの動的消費電力の割合から算出した．なお，LPI モードに移行する際の閾値 T_{lt} に関しては，著者が調べた限り文献にて明記されていなかったため， $0\mu s$ から $20\mu s$ の範囲で変化させることとした．

4.2 評価結果

まず，LPI モードに移行する際の閾値が性能と電力に与える影響を議論する．図 6 ならびに図 7 に，Simple Spread, パケット長 2,048 B, $8 \times 8 \times 8$ の 3 次元トーラスにおける MGEN プログラム実行時間（つまり全対全通信時間）と消費電力の結果を示す．それぞれの図において，全ての結果は LPI モードを導入しない状況での実行時間と消費電力

表 1 NsimPower 設定値

パラメータ	設定値
P_{base}	17.80W
P_{act_k}	1.02W
P_{lpi_k}	0.10W
T_{lw}	2,880ns
T_{ls}	4,480ns
T_{lt}	0 20 μ s (1 μ s 毎)
チャンク長	50,000ns
トポロジ	3次元トラス網
ノード間リンクバンド幅	5GB/s (単方向分)
ノード数	4 × 4 × 4, 8 × 8 × 8
パケット長	2,048B

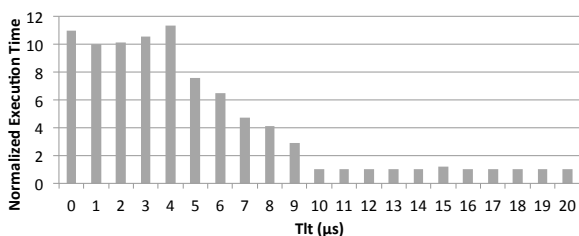


図 6 実行時間と T_{lt} (8 × 8 × 8 トラス)

で正規化している．図 7 より， T_{lt} を 9μ s に設定した際に消費電力を 15%削減できることが分かる．また， T_{lt} の設定値が小さい場合には大幅な性能低下を引き起こすことが図 6 より読み取ることができる．これは，ホップ当りパケット送信時間と比較して， T_{lw} の値が比較的大きいためと考える．また，基本的に全対全通信では多くのパケットがインターコネクト上で送受信されるため，LPI モードから ACT モードへの遷移に要する時間オーバーヘッドが原因となり輻輳が発生した可能性も考えられる．現在，詳細を解析中であるが，いずれにしても LPI モードを導入する際には T_{lt} を適切に設定する必要がある．

次に，Ring アルゴリズム，パケット長 2048B， $4 \times 4 \times 4$ の 3次元トラスにおける時間的な消費電力の変化について考察する．図 8, 9 に実験結果を示す．図 9 は，図 8 のそれぞれのタイミングでのインターコネクト全体の可視化結果である．全消費電力が時々刻々と変化しており，また，インターコネクト内部においても空間局所性を持つホットスポットが様々な箇所で見られていることが分かる．これらの結果より，インターコネクト全体の消費電力を削減するには，何らかの時空間最適化が必要となる可能性がある．

最後に，各全対全通信アルゴリズムに関して， $8 \times 8 \times 8$ の 3次元トラスでの消費電力（ただし，それぞれにおいて消費電力が最小となる閾値 T_{lt} を選択したと仮定）を図 10 に示す．本稿の消費電力モデルでは，LPI モードを on にしていない状況では消費電力は常に一定である（図中の Without LPI mode）．この図から，アルゴリズムによって消費電力に差が出ることが分かる．

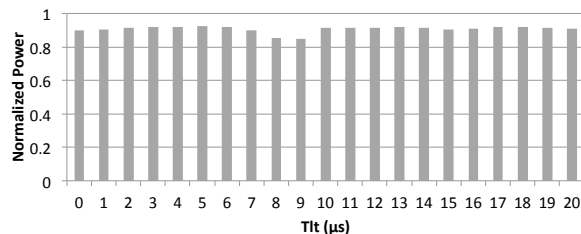


図 7 消費電力と T_{lt} (8 × 8 × 8 トラス)

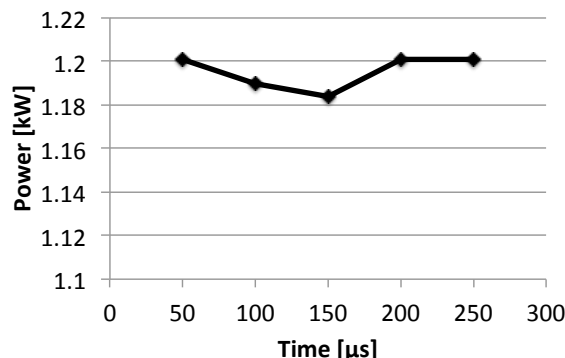


図 8 消費電力の過渡解析結果

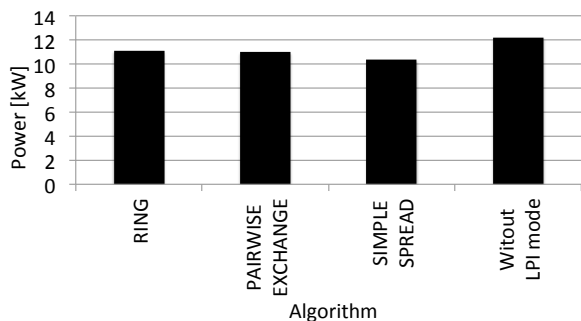


図 10 アルゴリズム別消費電力 (8 × 8 × 8 トラス)

5. おわりに

本稿では，大規模並列システム向けインターコネクトシミュレータである NSIM をベースとして，大規模なインターコネクトの消費電力を見積もる環境である NsimPower を開発した．将来の低消費電力インターコネクトを見据え，EEE でサポートされているリンクシャットダウン機能を実装した．消費電力モデルを構築し，そのモデルに基づき消費電力の見積もりを行った．512 ノードでの全対全通信の消費電力の見積もりを行い，最大で LPI モードを使用した場合，15.3% の消費電力の削減が行えた．ACT モードから LPI モードに遷移する閾値を適切に設定する必要がある．

また，インターコネクト全体の消費電力の傾向を空間的，時間的に把握しやすくするために，Boxfish を用いた 3次元グラフを用いた可視化を行った．その結果，インターコネクト全体の消費電力は空間的，時間的に変化しているこ

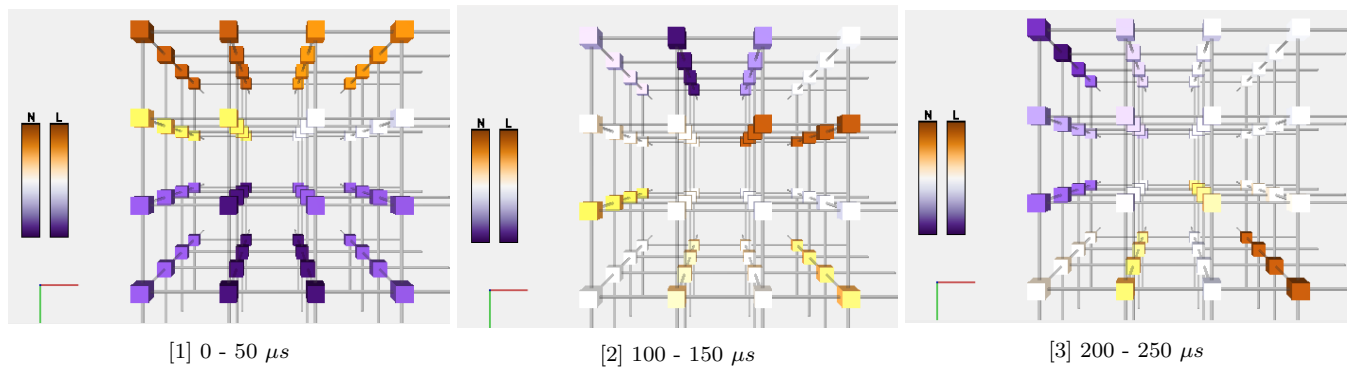


図9 消費電力の過渡解析結果(3次元表示)

とを確認した。今後の課題として、本稿で提案した消費電力モデルの検証が挙げられる。実在するEEEのスイッチの消費電力を測定し、本消費電力モデルの検証を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご協力を頂いた九州大学大学院青柳睦教授、東京大学大学院三輪忍助教に心より感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] ADIGA, N. R., BLUMRICH, M., CHEN, D., COTEUS, P., GARA, A., GIAMPAPA, M., HEIDELBERGER, P., SINGH, S., STEINMACHER-BUROW, B., TAKKEN, T., TSAO, M., AND VRANAS, P. Blue gene/l torus interconnection network. *IBM Journal of Research and Development* 49, 2.3 (2005), 265–276.
- [2] AJIMA, Y., INOUE, T., HIRAMOTO, S., SHIMIZU, T., AND TAKAGI, Y. The tofu interconnect. *IEEE Micro* (2012), 21–31.
- [3] BERGMAN, K., BORKAR, S., CAMPBELL, D., CARLSON, W., DALLY, W., DENNEAU, M., FRANZON, P., HARROD, W., HILL, K., HILLER, J., ET AL. ExaScale Computing Study: Technology Challenges in Achieving Exascale Systems. http://users.ece.gatech.edu/mrichard/ExascaleComputingStudyReports/exascale_final_report_100208.pdf, 2008.
- [4] CHOUDHURY, N., MEHTA, Y., WILMARTH, T. L., BOHM, E. J., AND KALÉ, L. V. Scaling an optimistic parallel simulation of large-scale interconnection networks. In *Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation* (2005), pp. 591–600.
- [5] ISAACS, K. E., LANDGE, A. G., GAMBLIN, T., BREMER, P.-T., PASCUCCI, V., AND HAMANN, B. Abstract: Exploring performance data with boxfish. In *Proceedings of the 2012 SC Companion: High Performance Computing, Networking Storage and Analysis* (2012), pp. 1380–1381.
- [6] KIM, E. J., YUM, K. H., LINK, G. M., VIJAYKRISHNAN, N., KANDEMIR, M., IRWIN, M. J., YOUSIF, M., AND DAS, C. R. Energy optimization techniques in cluster interconnects. In *Proceedings of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design* (2003), pp. 459–464.
- [7] MIWA, H., SUSUKITA, R., SHIBAMURA, H., HIRAO, T., MAKI, J., YOSHIDA, M., KANDO, T., AJIMA, Y., MIYOSHI, I., SHIMIZU, T., OINAGA, Y., ANDO, H., INADOMI, Y., INOUE, K., AOYAGI, M., AND MURAKAMI, K. Nsim: An interconnection network simulator for extreme-scale parallel computers. *IEICE Trans-*
- [8] REVIRIEGO, P., SIVARAMAN, V., ZHAO, Z., MAESTRO, J., VISHWANATH, A., SANCHEZ-MACIAN, A., AND RUSSELL, C. An energy consumption model for energy efficient ethernet switches. In *Proc. of the international conference on high performance computing and simulation* (2012), pp. 98–104.
- [9] SHANG, L., PEH, L.-S., AND JHA, N. K. Dynamic voltage scaling with links for power optimization of interconnection networks. In *Proceedings of the 9th International Symposium on High-Performance Computer Architecture* (2003).
- [10] TOP500. Top 500 supercomputer sites. <http://www.top500.org/system/10810>, 2011.
- [11] 三輪英樹, 薄田竜太郎, 柴村英智, 平尾智也, 眞木淳, 稲富雄一, 井上弘士, 安島雄一郎, 三吉郁夫, 清水俊幸, AND 安藤壽茂. Nsim: 将来の大規模相互結合網を対象とした通信シミュレータの開発. 情報処理学会研究報告 (2010), 1–9.
- [12] 吉田利雄, 池田吉朗, AND 安島雄一郎. スーパーコンピュータ「京」: 3. ハードウェア-ラック, 冷却, プロセッサ, インターコネクト-. 情報処理 53, 8 (2012), 767–773.
- [13] 會田翔, 三輪忍, AND 中村宏. 電力制約下におけるcpuとネットワークの電力制御協調手法. *IPSI SIG Notes* (2013).