

リンクパワーオフによるネットワーク省電力化のための 高速トポロジ計算手法

米津 遥[†] 高山[†] 清水 翔[†] 石井 大介[†] 岡本 聡[†]

大木 英司^{††} 山中 直明[†]

[†] 慶應義塾大学理工学部情報工学科 〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

^{††} 電気通信大学情報理工学部情報・通信工学科 〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: †yonezu@yamanaka.ics.keio.ac.jp

あらまし 近年、インターネットの普及に伴いトラフィック量及びネットワークの消費電力が増加していることにより、ネットワークの省電力化が重要な課題となっている。リンクパワーオフによるネットワーク省電力化手法では、トラフィックを特定のリンク上に集約しネットワーク内の未使用リンクの電源を落とすことによって省電力ネットワークを構築する。従来、リンクのON/OFFの組み合わせを全パターン生成することによって、ネットワーク性能を維持し、リンク数が最小限となる最適なネットワークを導出する手法が研究されているが、リンク数の多いネットワークでは計算量が膨大となるという問題がある。そこで本稿では、ネットワーク内のリンク数を削減するためのヒューリスティックな高速計算手法として、深さ1探索方式及び深さ2探索方式の2つを提案する。提案方式では、ネットワーク内のリンクを1本及び2本ずつ削減した場合のトポロジの中から、最もネットワーク性能が良いトポロジを局所最適解として繰り返し導出するため、計算時間を大幅に削減することが可能となる。計算機シミュレーションにより、各方式の省電力効果・ネットワーク性能・計算時間において有効性を示す。

キーワード 省エネ, PCE

High-Speed Energy Efficient Topology Calculation Method by Link Power Management

Haruka YONEZU[†], Shan GAO[†], Sho SHIMIZU[†], Daisuke ISHII[†], Satoru OKAMOTO[†], Eiji OKI^{††}, and Naoaki YAMANAKA[†]

[†] Dept. of Information and Computer Science, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku, Yokohama, 223-8522 Japan

^{††} Department of Information and Communication Engineering,

The University of Electro-Communications, 1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585, Japan

E-mail: †yonezu@yamanaka.ics.keio.ac.jp

Abstract In order to reduce the energy consumption of the network, we introduce a concept that realizes a low power consumption network by aggregating traffic into specific links and powering off interfaces of routers/switches that do not convey traffic. Conventionally, a calculation method to derive an optimum topology by examining all combinations of link ON/OFF patterns was proposed. However, it is time consuming and is unsuitable for large networks. In this paper, we propose a network topology calculation method that can derive an optimal power consumption network within practical time. By iterating the process of powering off one or two links in a heuristic manner, an optimal power consumption topology can be constructed. By computer simulation, it is shown that the proposed scheme is effective from several perspectives.

Key words Energy Efficient, PCE

1. まえがき

近年、インターネットは急速に普及しており、人々の生活に必要な不可欠なものとなっている。インターネットの利用者数の増加に伴い、ネットワークを流れるトラフィックは年々増加し続けており、それに合わせてルータ、スイッチといったネットワーク関連機器で消費される電力も同時に増加の一途を辿っている。経済産業省の IT 機器の消費電力の試算 [1] によれば、2025 年のネットワーク機器の消費電力量は IT 機器全体の 40 % 強を占める見通しとなっており、中でもルータの消費電力は 2020 年には 100 億ワットを突破すると予想されている。よって、ネットワークにおける省電力化は重要な課題であるといえる。

現在ネットワークの省電力を実現するために、様々な技術が研究されている。例えば、IP ルータやイーサネットスイッチなどのネットワーク機器を、使用していない時間帯にスリープさせることによって、省電力化を実現する技術 [2] [3] や、リンクの送信レートをトラフィック量に応じて調整することにより、リンクの消費電力を削減する ALR (Adaptive Link Rate) の技術 [4]- [6] があげられる。一方、本研究が着目するネットワーク制御による省電力化技術として、PCE (Path Computation Element) [8] を利用したリンクパワーオフ手法がある [7]。本コンセプトでは、トラフィックを特定リンク上に集約し、使用しないリンクの電源を落とすことによって省電力化を実現する。PCE はネットワーク内のトラフィックをモニタリングし、取得したトラフィック情報に基づいて省電力ネットワークを再構成する。このとき PCE は、使用リンク数をできるだけ削減し、ネットワーク全体のトラフィックを集約可能なトポロジを導出する必要がある。これに対し、ネットワーク内のリンクの ON/OFF の組み合わせを全パターン生成することによって、最適なネットワークを導出する手法が提案されている [9]。しかしネットワーク内のリンクの ON/OFF の組み合わせは、ネットワークのリンク数を l とすると $2^l - 1$ 通り存在する。そのため、リンク数の多いネットワークでは計算量が膨大となり、高速なプロセッサを利用しないと最適解を得ることができない。

そこで本稿では、ネットワーク性能を考慮し、リンク数を削減可能なトポロジを導出するためのヒューリスティックな手法を 2 つ提案する。深さ 1 の探索方式では、ネットワーク内のリンクを 1 本削減した場合のトポロジの内、最もネットワーク性能が良いトポロジを局所最適解として繰り返し導出していく。これにより、従来方式と比較して大幅に計算時間を削減でき、リンク数の多い大規模なネットワークにも適用可能となる。また、1 度に削減するリンク数を 2 本に増やし、その組み合わせの中からネットワーク性能が最も良くなるトポロジを選択する深さ 2 の探索方式を提案する。探索の深さを 2 とすることによって局所最適解を導出するための探索の範囲が広がるため、計算量が増加するが、リンク削減率の精度をより最適解に近付けることが可能となる。計算機シミュレーションにより、各方式の省電力効果・ネットワーク性能・計算時間を評価した。

本論文の構成は以下の通りである。2 節では省電力ネットワークの構築方法を概説し、続く 3 節で従来の全探索によるトポロ

ジ計算手法について説明する。4 節では提案方式である深さ 1 および深さ 2 の探索方式について説明し、5 節で特性評価を行う。最後に、6 節で結論を述べる。

2. 省電力ネットワークの構築

ネットワークにおけるリンクの消費電力は、使用率によらず一定である。そのため、ネットワーク内のトラフィック量が多い場合 (リンク使用率が 80 % に達する場合) と、夜間などトラフィック量が少ない場合 (リンク使用率が 20 ~ 30 % 程度) を比較しても、各リンクの消費電力は等しい。またネットワーク内のトラフィック量が少ない場合、少ないリンク数で全トラフィックを転送可能であるため、必ずしも全リンクの電源を ON にする必要はない。そこで、本稿ではトラフィックを特定リンク上に集約し未使用リンクの電源を落とすことにより、ネットワークの省電力化を実現する。

図 1 に、省電力ネットワークの構築方法を示す。リンクの ON/OFF は PCE と呼ばれる集中経路計算サーバによって制御する。PCE は、次に示す手順に基づいて省電力ネットワークを再構成する。

- (1) 一定時間ごとにネットワーク内で転送されているトラフィックをモニタリング。
- (2) 使用リンク数をできるだけ削減し、ネットワーク全体のトラフィックを集約可能なトポロジを導出。
- (3) 計算結果をもとにリンクの ON/OFF を制御。

図 1 では、元のネットワークに対し、リンクを 5 本削減することができたため、計 10 ポート分の電力を削減可能であることがわかる。

一方、省電力ネットワークでは、元のネットワークに対してリンク数が削減されるため、ネットワーク性能が低下するという問題がある。例えば、常に最短経路を利用する場合と比較し、ホップ数が増加し、遅延が通常より増加する。また、特定リンクにトラフィックが集中することによって発生する輻輳の影響で、パケットロス等によりネットワーク性能の低下が生じる。そのため、ネットワーク性能を維持し、リンク数を削減するためのトポロジ計算手法が必要となる。

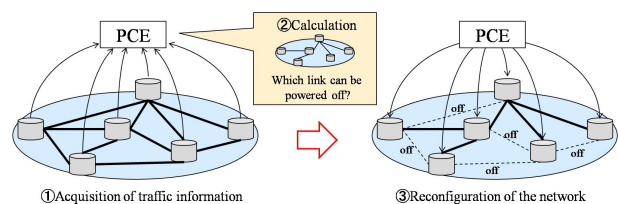


図 1 省電力ネットワークの再構成

3. 従来方式

本節では、従来の全探索による最適トポロジ計算手法 [9] について説明する。本方式では、リンクの ON/OFF を全パターン生成することによって、ネットワーク性能を維持し、使用リンク数を最小限に抑えるようにネットワーク全体のトラフィックを集約可能な最適なネットワークを導出することが可能である。

3.1 省電力化手順

本方式では、ネットワークの休止リンク数を最大にするため、使用リンク数が最小の場合に考えられる全トポロジに対して制約条件の判断を行う。特定の使用リンク数で条件を満たすトポロジを得ることができなかった場合、使用リンク数を増加させる。本方式では、制約条件を満たすトポロジが発見されるまで、特定の使用リンク数で構成されるトポロジを全て生成するため、ネットワーク内のリンク数を l とすると計算量は $O(2^l)$ となる。

従来方式の流れを次に示す。ネットワーク中のノードの数を n 、全リンクの数を l 、電源を OFF にするリンクの数を k とする。

- (1) $k = n - 1$ に設定する。
- (2) リンク数 n から電源を OFF にするリンクを k 本選ぶため、 ${}_nC_k$ 通りのトポロジを候補として生成する。
- (3) トラフィックが発生しているノード間の最短経路を計算する
- (4) ホップ数、遅延、リンクの許容トラフィック等の制約条件を満たしているかを判定する。
- (5) 制約条件を満たすリンクの組み合わせが存在した場合、計算を終了する。制約条件を満たすリンクの組み合わせが得られなかった場合、 k の値を 1 減らし、2)~4) の作業を繰り返す。

図 2 に、5 ノード 7 リンクのトポロジにおいて、「全ノード間の最短経路の最大ホップ数が 3 以下」を制約条件とした場合の例を示す。まず k に 4 を設定する。 k の初期値を $n - 1$ に設定するのは、全ノードの接続性を考慮した為である。図 2 の場合、 $k = 4$ のトポロジは ${}_7C_4 = 35$ 通りのトポロジの候補が生成される。この中で図 2 の $k = 4$ 、左からの 2 番目のトポロジは制約条件である、全ノード間の最短経路の最大ホップ数が 3 以下を満たす。このように条件を満たすトポロジの候補が発見された場合、それを最適解として適用し、計算を終了する。解となるトポロジが複数存在した場合、制約条件の中で優先順位を付け、最も値が小さいものを採用する。制約条件を満たすトポロジが発見されなかった場合、 k をインクリメントし、再度制約条件を満たすトポロジの候補が存在するかを調査する。このようにして、制約条件を満たすトポロジが見つかるまで、もしくは $k = l$ となるまで同様の動作を繰り返す。

3.2 問題点

本方式においてリンク数が l のネットワークを考える場合、各リンクの ON/OFF の組み合わせにより、 $2^l - 1$ 個のネットワークトポロジを生成する必要がある。また最適解を求めるために、生成した全てのトポロジに対して省電力効果および十分なネットワーク性能の両立が可能かを判断する必要がある。このような計算は集合被覆問題として知られており、膨大な組み合わせ数から真の解を現実的な時間で得ることは非常に困難とされている。そのため、ネットワーク内のリンク数が多いネットワークでは、高速なプロセッサを利用しない限り最適解を導出することは不可能である。

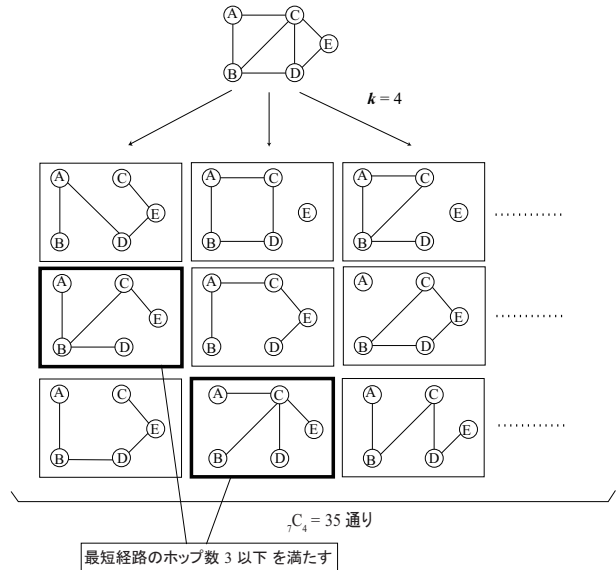


図 2 従来方式におけるアルゴリズム動作例

4. 提案方式

本研究では、省電力ネットワークを再構成するために、ネットワーク内のリンク数を削減するためのヒューリスティックな高速計算手法として、深さ 1 探索方式および深さ 2 探索方式の 2 つを提案する。深さ 1 の探索方式では、ネットワーク内のリンクを 1 つ削減したトポロジのうち、ネットワーク性能を維持し、全トラフィックを転送可能である局所最適なトポロジを繰り返し選択する。本方式では、従来方式と比較して解を導出するための探索範囲が狭いため、大幅に計算時間を削減することが可能である。一方深さ 2 の探索方式では、元のネットワークに対してリンクを 2 本削減した場合の組み合わせの中から局所最適解を繰り返し導出する。そのため深さを 1 とする場合と比較し、探索範囲が広いため計算時間は長くなるが、より最適解に近い精度でリンクを削減することが可能となる。

4.1 最大リンク使用率

本提案では、ネットワーク性能への影響を図るための基準として最大リンク使用率を用いる。最大リンク使用率とは、ネットワーク内の全リンクの中でトラフィック量が最も多いリンクの使用率であり、繰り返しごとに生成される全トポロジに対して算出される。最大リンク使用率が 1.0 より大きいトポロジでは、特定のリンクに負荷が集中し、リンクの許容量以上のトラフィックが流入していると考えられる。またネットワーク内のトラフィック量が同じであっても、最大リンク使用率が小さいトポロジでは、最大リンク使用率が大きいものと比較して、トラフィックが平均的に全リンクに分散し、平均ホップ数が少ないと考えられる。そのため本提案では、繰り返しごとに最大リンク使用率が最小となるトポロジを優先的に選択することによって、ネットワーク性能への影響を抑える。また、生成した全トポロジにおいて最大リンク使用率が 1.0 を超える場合は、削減可能なリンクがないと判断し探索を終了する。

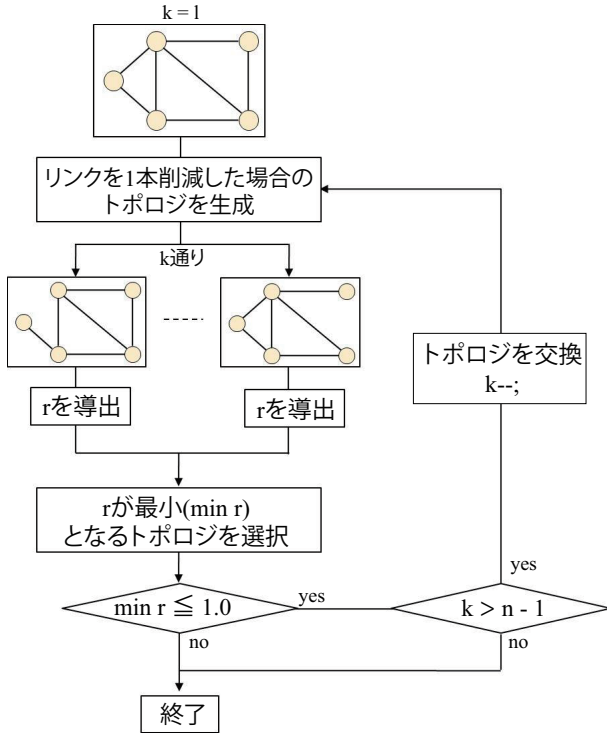


図3 提案方式〈深さ1の探索〉の流れ

4.2 深さ1の探索

深さ1の探索方式は、ネットワーク内のリンクを1本削減したトポロジのうち、最大リンク使用率が最小となるものを繰り返し選択していくヒューリスティックなアプローチである。

図3にアルゴリズムの流れを示す。本方式では、ネットワーク内のリンクを1本削減した場合のトポロジをONリンク数分生成し、最大リンク使用率が最小となるものを局所最適解として導出する。この動作を、生成した全トポロジにおいて最大リンク使用率が1.0より大きくなるか、ネットワークの接続性がなくなるまで繰り返し行う。本方式では、ネットワーク内のリンク数を l とすると計算量は、 $O(l^2)$ となる。

本方式の省電力化手順を次に示す。ネットワーク内のノード数を n 、リンク数を l とし、ネットワーク内のONリンク数を k とする。

- (1) リンクを1本切った場合のトポロジを k 通り生成。
- (2) 生成した各トポロジのうち最大リンク使用率 r が最小($\min r$)となるトポロジを選択。
- (3) $\min r \leq 1.0$ となる場合は、トポロジを入れ替える($k \leftarrow k-1$)。
 $\min r > 1.0$ となる場合は計算を終了する。
- (4) $k = n-1$ となるまで(1)~(3)を繰り返す。

図4に、5ノード7リンクのトポロジにおいて本方式を適用した場合の例を示す。制約条件を「全ノード間の最短経路の最大ホップ数が3以下」に設定した場合を考える。まず $k=7$ であるので、リンクを1本切った場合のトポロジが7通り生成され、全トポロジに対し最大リンク使用率 r が導出される。図4の場合、 $r=0.3$ となるトポロジが最小となり、また $r \leq 1.0$ を満たすので、リンク BC をOFFにする。次に、 $k=6$ と

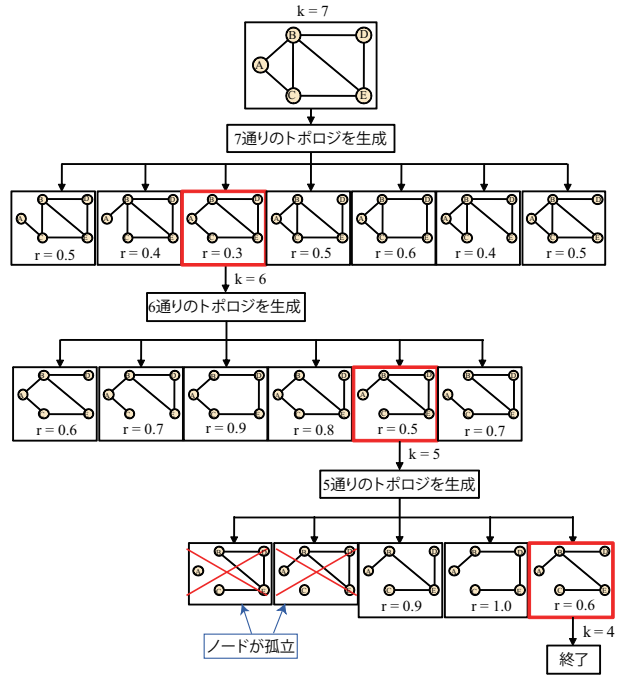


図4 提案方式〈深さ1の探索〉におけるアルゴリズム動作例

なるのでトポロジは6通り生成される。この6通りのトポロジに対して同様に最大リンク使用率を導出し、 r が最小、かつ $r \leq 1.0$ を満たすリンク AC をOFFにする。この動作を $k=4$ となるまで繰り返し、最終的に得られたトポロジを解とする。途中、全トポロジにおいて $r > 1.0$ となる場合は計算を終了し、そのときのトポロジの状態を解とする。

4.3 深さ2の探索

深さ2の探索方式は、最大リンク使用率が最小となるように、2本の削減リンクの組み合わせを繰り返し選択していくヒューリスティックなアプローチである。本方式では、ネットワーク内のリンク数を l とすると計算量は、 $O(l^3)$ となる。

本方式の省電力化手順を次に示す。ネットワーク内のノード数を n 、リンク数を l とし、ネットワーク内のONリンク数を k とする。

- (1) リンクを2本削減した場合のトポロジを ${}_k C_2$ 通り生成。
- (2) 生成した各トポロジのうち最大リンク使用率 r が最小($\min r$)となるトポロジを選択。
- (3) $\min r \leq 1.0$ となる場合は、トポロジを入れ替える($k \leftarrow k-2$)。
 $r > 1.0$ となる場合は深さ1の探索を1回行い計算を終了する。
- (4) $k-1 > n-1$ である間は(1)~(3)を繰り返す。
- (5) 深さ1の探索を1回行い計算を終了する。

本方式では1度に削減するリンク2本とし、その組み合わせの中で最もネットワーク性能が良いトポロジを選択するため、深さ1の場合と比較して探索範囲が広がる。そのため計算時間がより長くかかるが、より最適解に近いリンク削減率を削減することが可能となる。

表 1 シミュレーション諸元

リンク容量	1.0
最大リンク使用率の閾値	0.8
ノード間発生トラフィック	均一
最短経路導出方法	ダイクストラ法

5. 特性評価

本節では、従来方式および2つの提案方式を省電力性・ネットワーク性能・計算時間の3つの点から比較し、評価する。

本シミュレーションは、図5に示すような14ノード、21リンクのNSFnetトポロジおよびノード次数が3となるように生成したランダムトポロジを利用して行った。

シミュレーション諸元を表1に示す。各ノード間に発生すトラフィック量は、元のトポロジにおいて、最大リンク使用率が閾値に達するときのトラフィック量で正規化した値とする。閾値は、最大リンク使用率の上限値として設定する。本シミュレーションでは、実際のネットワークにおけるトラフィック変動を考慮し、リンクの許容トラフィックより低い値を閾値としてする。従来方式では、ネットワーク性能を維持するための基準を提案方式と同じくするため、制約条件を「最大リンク使用率が閾値以下」としてシミュレーションを行った。

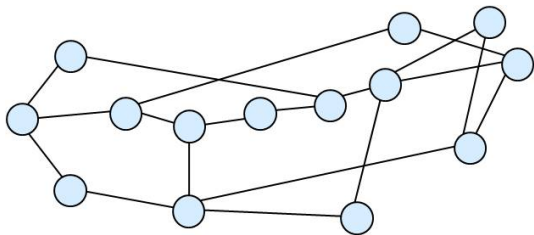


図5 NSFネットワークトポロジ

5.1 省電力性に関する評価

図6に、NSFnetトポロジにおいて正規化トラフィック負荷を0.1~1.0まで変化させた場合の各方式のリンク削減率の変化を示す。図6より、提案方式では低付加時は約40%、中負荷時は約25%電源ONのリンク数を削減可能であることが分かる。最大で40%に留まっているのは、ノード間の接続性を維持するため、電源ONのリンク数を13以下に減らすことが不可能なためである。

提案方式のリンク削減率の精度を最適値である従来方式と比較すると、ノード間負荷が多くなるにつれて精度が落ちることがわかる。これは、低負荷時は最適なリンクを削減していなくても全トラフィックを収容する余裕があるのに対し、高負荷時は最適なリンクを削減しないと全トラフィックを収容することができないためである。しかし探索の深さを2とすることにより、リンク削減率を最適解に近づけることができ、低負荷時においては最適解とほぼ同じリンク削減率を実現することができた。

5.2 ネットワーク性能に関する評価

従来方式および提案方式におけるネットワーク性能を比較するために、リンク削減率に対する平均ホップ数および最大ホッ

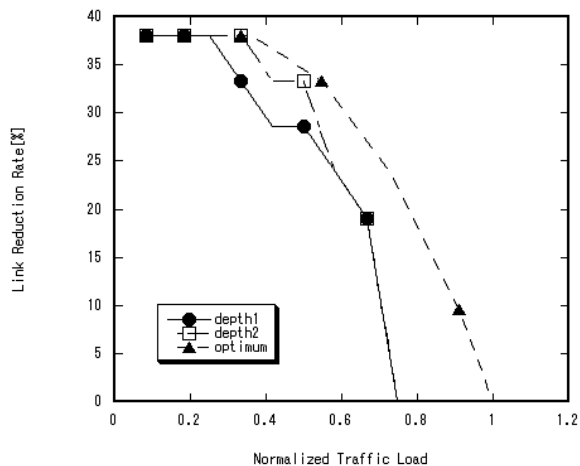


図6 各方式におけるリンク削減率の比較

ブ数の変化を用いる。図7に、NSFnetトポロジにおいてリンク削減率を変化させたときの最短経路の平均ホップ数および最大ホップ数の変化を示す。図7より、提案方式および従来方式の平均ホップ数は最大でも0.8しか変わらないことから、ネットワーク性能を維持可能であると考えられる。また深さ2の探索方式では、より最適解に近い値を導出することができた。

最大ホップ数に関しては、提案方式および従来方式を比較すると最大1.5倍になっている。この値が問題になる場合、最大ホップ数が最小となるようにトポロジを選択することによって、省電力効果はわずかに劣化するがホップ数の増加を防ぎつつ省電力となるネットワークトポロジを求めることが可能となる。

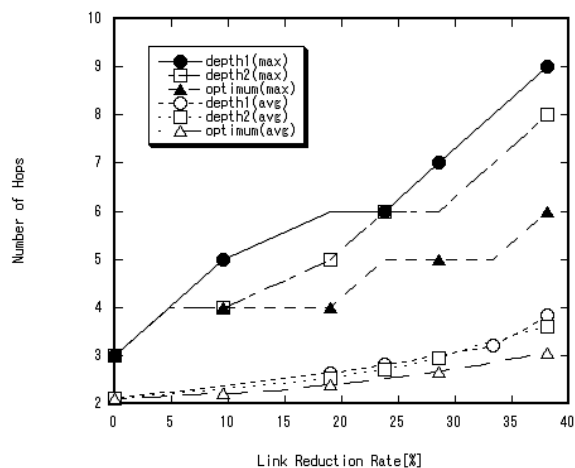


図7 各方式におけるホップ数の比較

5.3 計算時間に関する評価

図8にノード数を10~100と変化させたときの各方式の計算時間を示す。従来方式において、30ノード以上のトポロジ

における計算時間は時間制限により導出することができなかったが、提案方式では 100 ノードの大規模なネットワークにおいても実時間内に解を導出することができた。また、測定可能であった 10 ノードおよび 20 ノードのネットワークでも、提案方式が大幅に計算時間を削減可能であることを確認できた。これは従来方式では、省電力ネットワークを導出するために、計算量が $O(2^l)$ となるのに対し、提案方式では計算量が $O(l^2)$ および $O(l^3)$ となるためである。これにより従来方式では、計算量の問題から大規模ネットワークにおいて省電力ネットワークを導出不可能であったのに対し、提案方式は大規模なネットワークに対しても有効であることが確認できた。

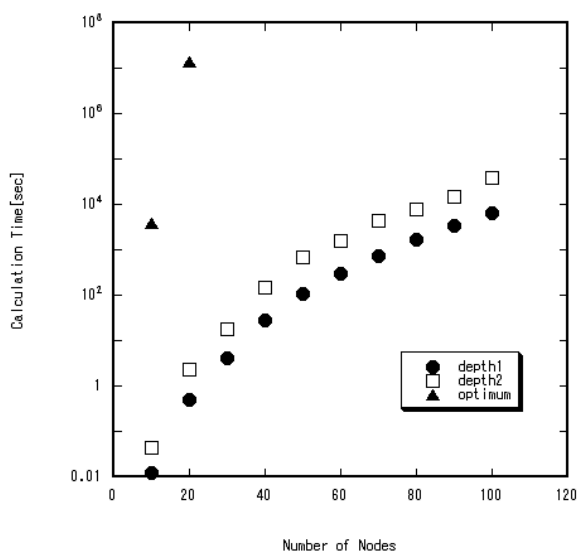


図 8 各方式における計算時間の比較

6. ま と め

本論文では、ネットワーク全体のトラフィックを特定リンクに集約し、不要なインターフェースの電源を落とすことでネットワークの省電力化を行うための高速トポロジ計算手法を提案した。

従来手法では、ネットワーク中のリンクの ON/OFF のパターンを全て生成することによって、ネットワーク性能を維持し使用リンク数を最小限にするネットワークを導出していった。しかし、リンク数の増加に応じて計算量が膨大になるため、高速なプロセッサを利用しない限り大規模なネットワークには適用困難であった。

そこで本研究では、ネットワーク内のリンクを 1 本削減した場合のトポロジの内、最もネットワーク性能が良いトポロジを局所最適解として繰り返し導出していくことによって、大幅に計算時間を削減することが可能な深さ 1 の探索アルゴリズムを提案した。また、削減リンク数の精度をより最適解に近付けるために、1 度に削減するリンク数を 2 本とする深さ 2 の探索ア

ルゴリズムを提案した。

計算機シミュレーションにより、すべてのリンクを ON にした場合と比較し最大 40% 使用リンク数を削減し、ネットワーク全体の消費電力を削減可能であることが確認できた。提案手法におけるリンクの削減率の精度は、深さ 2 の探索方式を用いることによって、最適解に近づけることができた。また従来方式と比較し、計算時間を大幅に削減できたことが確認できた。

謝 辞

本研究の一部は、総務省が進める PREDICT プログラムの成果である。関係者各位に深謝する。

文 献

- [1] 経済産業省, 情報通信機器の革新的省エネ技術への期待, 2007
- [2] Gupta M, Singh S, "Greening of the Internet", Proceedings of the ACM SIGCOMM, pp. 1926, August 2003.
- [3] H. Tamura, et al., "Performance Analysis of Energy Saving scheme with Extra Active Period for LAN Switches", Proc. IEEE Globecom 2007, Nov. 2007.
- [4] H. Anand, "Ethernet Adaptive Link Rate (ALR): Analysis of a MAC Handshake Protocol", Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Volume, Issue, Nov. 2006 Page(s):533 -534
- [5] IEEE Draft P802.3az, "Access Control parameters, Physical Layers and management parameters for Energy-Efficient Ethernet", http://www.ieee802.org/3/eee_study/index.html, May 2010.
- [6] F. Blanquicet and K. Christensen, "An Initial Performance Evaluation of Rapid PHY Selection (RPS) for Energy Efficient Ethernet", IEEE Conf on local computer networks, Oct. 2007, pp.223-225
- [7] N. Yamanaka, S. Shimizu, and G. Shan, "Energy Efficient Network Design Tool for Green IP/Ethernet Networks", Proc. ONDM, 2010 2-1, Feb, 2010.
- [8] A. Farrel J.-P. Vasseur, J. Ash "A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture," RFC4655, AUG. 2006.
- [9] 津留崎 彩, 荒川 豊, 石井 大介, 山中 直明, 石川 浩行, 斯波 康裕, "光ネットワークの省電力化へ向けたリソース最小化アルゴリズム", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. PN2008-108, pp. 1-5, December 2008.