

# 光IP連携マルチレイヤネットワークにおける パス検索技術

坂元 宏行 藤井 亮浩  
野崎 正典 川原 正人

現在、情報通信ネットワークは重要な社会インフラの一つであると認識されるようになったが、今後のネットワークの高速大容量化と高機能化の進展により、多様なサービスをストレス無く提供するネットワークが実現することで、その社会的重要性は益々高まると考えられる。情報通信ネットワークの進展には、フォトニックネットワーク技術によるネットワークの高速大容量化が重要な鍵の一つになる。フォトニックネットワークとは、光の特性（波長、高速性、長距離伝送）を活かして構築されたネットワークを指す。近年では、ノード処理の光化による、更なる大容量ネットワークの実現が期待されている<sup>1)</sup>。

フォトニックネットワークは広く国内外で研究されている。総務省は、e-japan, u-japan構想を掲げ、国の重要施策として研究を加速している。また、光レイヤを含めたネットワーク運用の一元化の仕組みとして、光レイヤをIP (Internet Protocol) レイヤから制御するプロトコルであるGMPLS (Generalized Multi Protocol Label Switching) の標準化がIETF (The Internet Engineering Task Force) で進められている。

日本におけるユーザアクセスサービス速度とユーザアクセス端末数の年代別予測の一例を図1に示す。高速固定アクセスのサービス速度が現状の1,000倍（2005年から2020年の間で）になると同時に、ユビキタスアクセスの端末増加とそれに続くコンピュータネットワーク（グリッドNW）の端末数の増加とサービス速度の増加により、ネットワークの総トラヒック量は2020年には1,000～10,000倍になると予想される。

現状の情報通信ネットワークのトラヒックは、総務省の発表（平成17年1月25日「わが国のインターネットにおけるトラヒック総量の把握」<sup>2)</sup>）によれば、おおよそ324Gbit/s（平均）とされている。この現状から予想すると、2015年には日本の情報通信のトラヒック総量として数10Tbit/sが、2020年には数100Tbit/sが必要となる可能性がある。

このような背景の中、光レイヤとIPレイヤで構成され

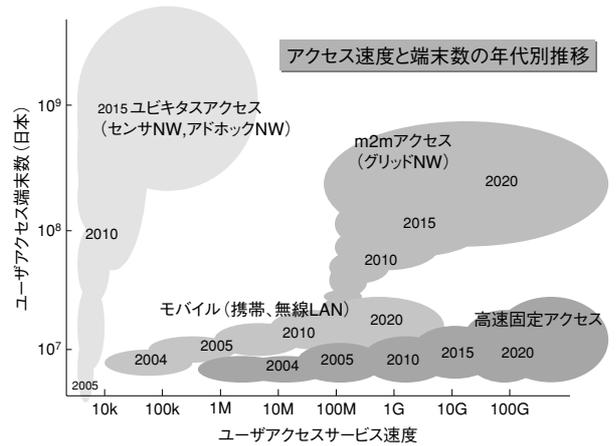


図1 アクセス速度と端末数の年代別推移

る光IP連携マルチレイヤネットワークにおいて、トラヒックを効率的に転送するために、光IPカットスルー技術を用いて、トラヒック変動に応じて光パスを再配置する研究を行っている。トラヒックを効率的に転送する光パス配置は、ネットワークのトポロジ、ネットワークリソースを勘案して検索する。本稿では、大規模メッシュ網を目指したパス検索技術について紹介する。

## 巨大容量ネットワーク

大容量のトラヒックを転送するネットワークを効率的に構築するため、総トラヒック量が数10Tbit/s、数100Tbit/sの容量を持つネットワークに対して、ネットワークの構築方法、必要なネットワーク資源量の算定手法、このときの光パス最適化技術の役割について検討した。

この結果、トラヒックのHOP数とネットワークの構築コストからネットワーク資源の必要量を算定する方法を導き出した。さらに、巨大容量ネットワークの構築方法として、数10Tbit/sにはF<sup>2</sup>（2次元ハイパーフルメッシュ）構造が、数100Tbit/sにはH<sup>m</sup>（m次元ハイパーハブ）構造が有力な候補であることを導き出した（F<sup>2</sup>構造、H<sup>m</sup>構造については別掲記事参照）。このとき必要となるネットワーク資源量を表1に示す。

表1 ネットワーク構造とネットワーク資源量

	日本の現状NW	2010頃?	2020頃?
NW総トラフィック量(T <sub>max</sub> )	約600G	5~数10T	約0.5P
NW構造	R <sup>1.8~1.9</sup>	F <sup>2</sup>	H <sub>m</sub> (m=2 or 3)
ノード数(N)	約100= 12.42 <sup>1.828</sup>	27=5 <sup>2</sup> ~6 <sup>2</sup>	480=22 <sup>2</sup>
有効ノード数(N <sub>eff</sub> )	15	10	100
NWノード効率(ρ)	0.15	0.37	0.21
最大ノード容量(NT <sub>Nmax</sub> ) ノード方式	約80G 電気ルータ	1~数T 電気、光ルータ	10T 光パケットルータ
平均リンク次数(L <sup>N</sup> )	3.6~3.8	~9	2
リンク総数(L <sup>NW</sup> )	180~190	~120	480
リンク容量(L <sup>Tmax</sup> )	19~18G	~70G	4T
ノード当りリンク容量(L <sup>TNmax</sup> )	68G	~620G	8T
リンク方式	10G、40G(DWDM)	10G、40G(DWDM)	160G(OTDM) +マルチパス技術
全NW ノード処理総量(NT <sup>NWmax</sup> )	4T	14~数10T	2.4P
リンク総容量(L <sup>TNWmax</sup> )	3.4T	9~数10T	1.9P

注：ノード稼働率は50%とする

表1で示した、日本の現状ネットワーク、2010年頃のトラフィック総量が数10Tbit/sのネットワーク（NW構造がF<sup>2</sup>）、2020年頃のトラフィック総量が数100Tbit/s（NW構造がH<sup>m</sup>）の3つのネットワークの遷移と、光パス最適化技術との関係を説明する。

現状のネットワークと2010年頃のF<sup>2</sup>構造のネットワークとでは、ネットワーク構成に対する考え方が根本的に違うため、現状のネットワークは、将来のトラフィックの増加に対応することが難しい。F<sup>2</sup>構造から2020年頃のH<sup>m</sup>構造への進化を前提としたネットワークを構築するためには、バックボーンを作り直す必要がある。現状のネットワークとF<sup>2</sup>構造のネットワークの違いは平均リンク次数が3.7から9程度まで増加することであり、増加したリンクを用いてどのようにノード間を接続し、運用・管理するかがネットワーク構築上重要な課題となる。またF<sup>2</sup>構造からH<sup>m</sup>構造へのマイグレーション方法も加味されなければいけない。これらの条件を満たすバックボーンはノードとリンクが同期して進化するネットワークという意味でシンノードリンクシステム（Synchronizing Nodes-links System）と呼ぶ。

F<sup>2</sup>構造では27台のノードでネットワークを構成するが、各ノードの配下には、このノードをサーバとするクライアントノードが必要数分ネットワーク状に存在すると想定する。どのクライアントノードが、どのサーバノードに接続されるかはネットワークを効率的に構築する上で重要な問題である。各ノードの接続構成を、ファイバーの敷設を行うことなく光パスを用いて実現する技術として、光IPカットスルー技術の利用が可能であり、効率的なネットワークの構築に有効である。

時代の変遷に伴い様々の容量のノードがサーバノード・クライアントノードとして使用されるが、ネットワーク

全体が均一なノードやリンクで構成されることはなく、トラフィックも均一とはならない。また、当初サーバノード数が27から出発して徐々にサーバノード・クライアントノードが増えながら二つのノード数の和が480に近づくにつれて自然にH<sup>m</sup>構造のネットワークに移行することが望まれる。

H<sup>m</sup>構造に進化したネットワークにおいても、どのノードがどのノードと組んでサブネットを組むかが、不均等なトラフィックを効率的に転送するために、重要となる。ここでもネットワーク全体でパス配置の最適化とH<sup>m</sup>構造のネットワークの構成方法の最適化が重要となる。

以上まとめると、シンノードリンクシステムが構築されてからH<sup>m</sup>構造として稼働し続ける全期間において、ネットワーク資源の最適化（＝トラフィックエンジニアリング技術）の一部として、光パス最適化技術が重要な位置をしめるといえる。

この技術は、変動するトラフィックに対応したパス設定と比較して、対処までの猶予時間が比較的長く、また、応急対処してから最善解へ再度設定することも可能であり、対処時間より最適性が重要な問題である。

また、シンノードリンクシステムにおいても、システム効率の極限での稼働が望まれているとき、変動するトラフィックに対するシステム最適化は重要であり、必要な応答時間も従来どおりと考えられる。

本節の研究で明らかになった動的な光パス配置にかかわる重要な点は、巨大容量のネットワークでの構造とパス資源にかかわるリンク数やリンク容量などの特徴が明確になったことである。この特徴を踏まえることにより、よりヒューリスティックに特徴点を考慮したパス最適化検索が可能になると考えられる。

### 光IPカットスルー技術

我々が提案するマルチレイヤネットワークのアーキテクチャ<sup>3) 4)</sup>を図2に示す。図2でAdministrative domainとして示されているネットワークの部分が、今回開発しているトラフィック変動に応じ、動的に最適光パス変更する「光IPカットスルーネットワーク」である。

ネットワーク構造はマネージメント・プレーン、制御プレーン、転送プレーンの3つのプレーンに分けられ、マネージメント・プレーンには、光IPカットスルーを実現するトラフィック情報収集・集計機能、最適光パス配置検索機能、パス設定機能が与えられている。制御プレーンはIPドメイン制御プレーンと光波長ドメイン制御プレーンがそれぞれ別々に存在する、オーバーレイモデルであることを想定した。

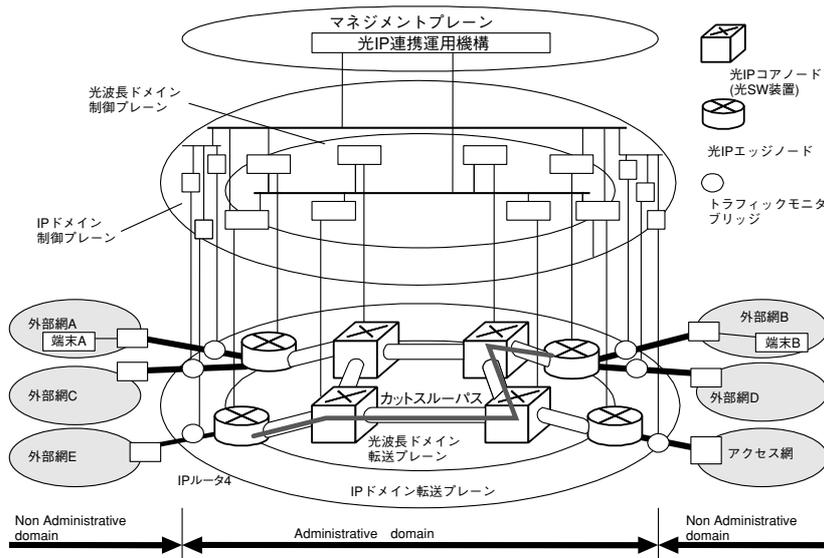


図2 ネットワークアーキテクチャ

光波長ドメイン制御プレーンは、GMPLSにおける、LSC (Lambda Switch Capable) 機能を持ち、光IPエッジノードおよび光IPコアノードは、GMPLSにおけるLSCドメインのLSR (Label Switch Router) である。これらのノード (LSC-LSR) 間に、光IPエッジノードを両終端点とし、光IPコアノードが中継ノードとなる光波長を識別子とする光パス (LSC-LSP : LSC Label Switched Path) が設定される。IPパケットは、光IPエッジノード間に設定されるこの光パスを通して転送される。

転送プレーンでは、IPドメイン転送プレーンは、光IPエッジノード、トラフィックモニタブリッジから構成され、光波長ドメイン転送プレーンは、光IPコアノード、波長多重信号装置と光スイッチから構成される。

このようなネットワークにおいて、IPルータの中継トラフィックを、光パスを利用してカットスルーすることにより光パスの再配置を行い、IPルータの負荷を低減し、ネットワーク全体のリソースを効率的に使用して、ネットワーク全体のスループットの向上を計ることができる。

このときにマネージメント・プレーンに必要となる要素技術が、トラフィック情報収集・集計、最適パス検索技術、パス設定技術である。

#### トラフィック情報収集・集計技術<sup>5)</sup>

光IPカットスルーネットワークに到着するIPパケットのトラフィック量を、入力側光IPエッジノードから出力側光IPエッジノードのペアごとに収集集計する。

当社では、収集機能にネットワークプロセッサを用いて、ワイヤレイトでのIPパケット量の計測と入出力光IP

エッジノード間トラフィック量への高速変換を実現した。その結果、32ノードリング網の規模で、5秒周期でトラフィック情報の収集集計を実現した。

#### 最適パス検索技術<sup>6)</sup>

トラフィックモニタブリッジで収集した入出力光IPエッジノード間のトラフィック量を元に、IPルータの中継量を低減する光パスの配置を検索する。

パスの検索は、遺伝的アルゴリズム<sup>7)</sup>、ヒューリスティックサーチ手法を用いて実現した。詳細は、後述する。

#### パス設定技術<sup>8)</sup>

現時点の光パス配置と、最適パス検索で得られたパス配置との差分を求め、不必要な現用光パスを解除し、新たな光パスを設定する。

現用光パスの解除は、その光パスを使用しているIPトラフィックの転送経路を書き換え、トラフィックを別の光パスに退避させた後に行う。その結果、光パスの解除におけるIPトラフィックの欠落を防ぐことができる。

巨大容量ネットワークを実現するための重要なポイントには、トラフィックの変動に応じたリソースの最適化を如何に実現するかにある。複雑な巨大容量ネットワークにおける光パス検索技術には、リーズナブルな検索時間の実現と、さまざまなリソース条件を勘案した検索アルゴリズムの実現が求められる。

### 最適パス検索技術

大規模化複雑化するネットワークにおいて、変動するトラフィックに応じた最適なカットスルーパスを検索することは、変数が多くさまざまな組み合わせの中から最適解を求める問題に帰着する。

変数が少なければ、全ての組み合わせを計算して最適解を求めることができるが、組み合わせが多いと計算時間が膨大となり、特定時間の中で解を求めることは困難になる。準最適解を求める手法として、ニューラルネットや遺伝的アルゴリズムなどが知られている。

われわれは、大規模ネットワークでの光パス検索技術に、遺伝的アルゴリズムとヒューリスティックサーチ手法を適用し、評価を行った。最適光パスの検索は、ネットワーク内のルータの総中継トラフィック量を最小にする目的で行い、削減した総中継トラフィック量をカットスルー前の総中継トラフィック量で割った値の百分率をカットス

ルー率と定義した。カットスルー率が大きいほど、ルータの中継トラヒック量が減ったことを示す。

(1) 遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm)

遺伝的アルゴリズムは、生物進化（選択淘汰・突然変異）の原理に着想を得た、確率的検索・学習・最適化の一手法である。遺伝的アルゴリズムでは、実際の生物での染色体や遺伝子を、それぞれデータ領域や配列、そのアドレスなどに対応させる。基本的な処理のステップを以下に示す (図3)。

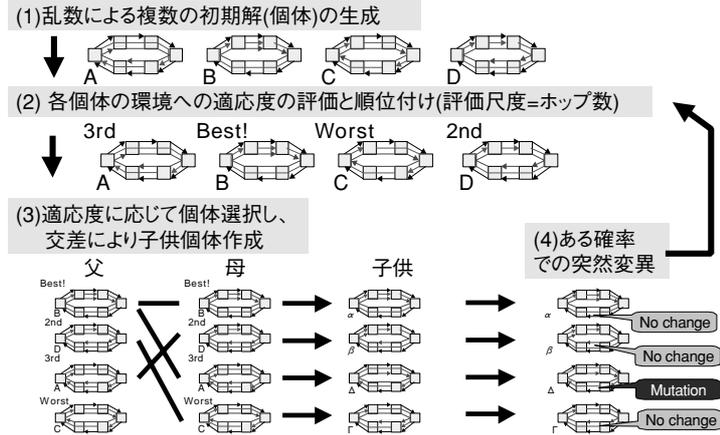


図3 遺伝的アルゴリズム

a) 初期集団の生成

決められた個体数の染色体をランダムに生成する。

b) 適応度の評価

評価関数に従い個々の個体の適応度を評価する。

c) 選択

優れた個体を形成する遺伝子を集団に広げるために交配させる個体を選択する。

d) 交叉

選択された個体の染色体の組替を行う。

e) 突然変異

ある確率で染色体の一部の値を変更する。

b) から e) までの操作をある終了条件が満たされるまで繰り返す。

32ノードリング網において、ルータの中継量を評価関数として導入し、ネットワーク全体のルータ中継量を削減する最適パスを検索した。検索は、現実のネットワークと同等の条件を加味する意味で、光波長数を制約条件<sup>9)</sup>とした。その結果、60秒程度の検索時間でカットスルー率30~90% (利用できるカットスルーパス数により異なる) を満たす解が出現することを確認した。

(2) ヒューリスティックサーチ手法

メッシュ網では、リング網と比べて、カットスルーパスの候補数が飛躍的に増大する。遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子化された情報の操作量が基本的に多くなるのは避けられないため、パス検索の高速性を重視した、ヒューリスティックサーチ手法をメッシュ網に適用し、評価した。

ヒューリスティックサーチ手法は、トラヒック量の多いノード間から順にカットスルーパスを割り当てる手法である (図4)。さらに、光パスの使用効率を高める手法を加えて、最適なパスを検索した。

a) トラヒックマトリックス作成

ノード間のトラヒックマトリックスを、トラヒックの多い順に並べる。

b) カットスルーパスの検索

トラヒックの多いノード間から順に光パスを設定する。その際、ノードが持つ送受信インタフェースの空き塞がり、波長の衝突の回避、使用できる波長数の上限値などの条件を判断して行う。

c) 最適光パスの検索

光パスのリンク使用率の低いパスから解除し、そのパスをランダムに2ノード間に設定して、評価値が向上するかを調べる。この処理を、終了条件を満たすまで繰り返す。

提案(ヒューリスティック)手法

トラヒック量の多いノード間から順にカットスルーパスを割り当てる

[動作例]

Step1:ノード2,5間に光パス(λ1)を割当

Step2:ノード1,2間に光パス(λ2)を割当

Step3:ノード2,3間に光パス(λ3)を割当

.....

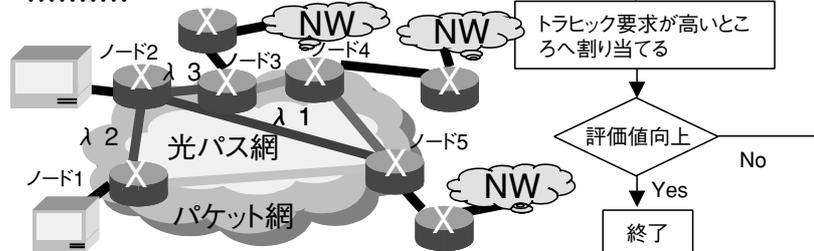


図4 ヒューリスティックサーチ手法

評価は、NSFNet (National Science Foundation Network) (図5) モデルを用いたシミュレーションにより行い、光パスを設定するノードをランダムに選択しながら最適な光パスポロジを検索するランダムサーチ手法と比較した。

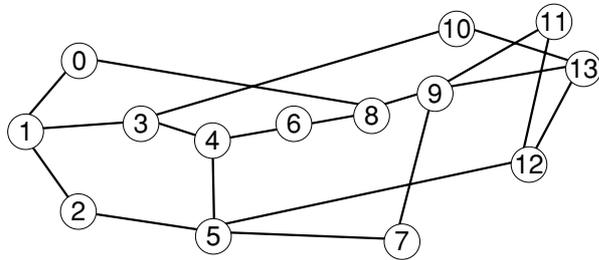


図5 NSFNetモデル

計算時間を10秒間とし、最終的に得られたカットスルー率の大小を比較した(図6)。この結果、相対的にヒューリスティックサーチ手法の方が良好な結果となり、トラフィック条件やインタフェース条件が異なっても、カットスルー率50%を達成した。

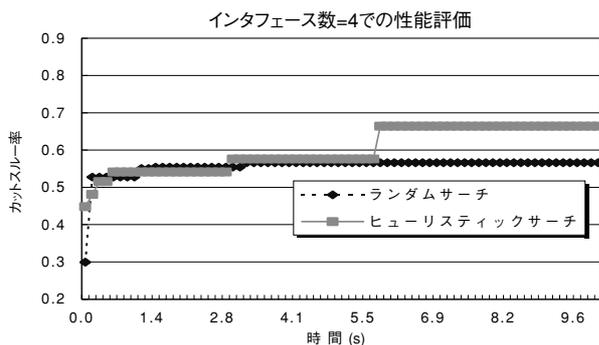


図6 ヒューリスティックとランダムと比較

また、ヒューリスティックサーチ手法と遺伝的アルゴリズムの性能比較を64ノードのリング網をモデルとして行った(図7)。10秒間の計算時間により、最終的に得られたカットスルー率の大小を比較した。

その結果、10秒という限られた時間においては、ヒューリスティックサーチ手法のカットスルー率が良い結果となった。遺伝的アルゴリズムは、初期の遺伝子の状態によって、解の収束度合いが異なるためにカットスルー率が低くなったと考えられる。計算時間を60秒程度まで長く取れば、カットスルー率はヒューリスティックサーチ手法とほぼ同じ値をとるものと予想される。

今回評価した二つの検索手法は、それぞれ特徴はあるものの、ルータの中継トラフィックを削減する目的に対し

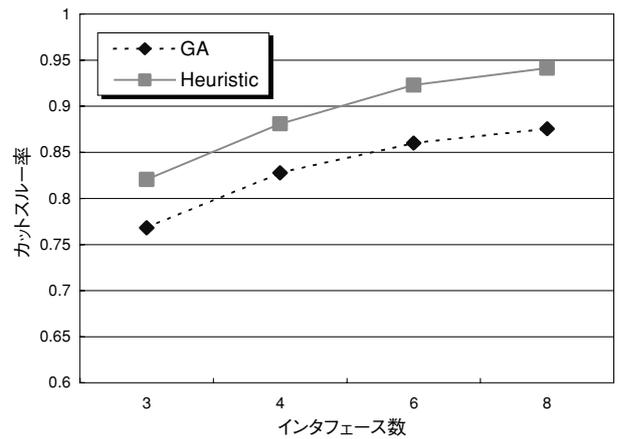


図7 ヒューリスティックと遺伝的アルゴリズムの性能比較

て有効であることを確認した。今後、F<sup>2</sup>構造、H<sup>2</sup>構造のネットワークへの適用について検討を進めていく。

## まとめ

増加するトラフィックに対応したネットワーク構造の変遷について述べ、各時代のネットワークの効率的な構築とネットワーク構造のスムーズな変遷が、光パスを効果的に配置することで可能になるという考えを示した。

光パスを配置する技術として研究を進めている光IPカットスルー技術は、以下のレベルまで達成できている。

適用可能トポロジ：リング、メッシュ

パス検索手法：遺伝的アルゴリズム/ヒューリスティックサーチ手法

パス再配置時間：10秒以下(14ノードメッシュ網)

カットスルー率：50%以上(ノードインタフェース条件による)

今後は、試作したテストベッド(6ノードメッシュ)装置とエミュレーション装置を組み合わせ、大規模メッシュ網への適用を目指した性能改善に取り組んでいくとともに、ネットワーク構造を加味したパス検索技術に取り組んでいく。また、光IPカットスルー技術を次世代の巨大容量ネットワークを実現する重要な技術と位置付け、研究を進めていく。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「フォトリックネットワークに関する光アクセス網高速広帯域通信技術の研究開発」の成果の一部です。関係各位に感謝します。◆◆

## ■参考文献

- 1) 青山友紀他：“フォトリックネットワーク革命-世界先端IT国家実現のキーテクノロジー”，初版，超高速フォトリックネットワーク開発推進協議会，2003年
- 2) 総務省：「わが国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握」  
http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/pdf/050125\_3\_1.pdf
- 3) 藤井亮浩他：光IP連携マルチレイヤネットワーク，沖テクニカルレビュー，Vol.71 No.1，pp.70-75，2004年1月
- 4) Y.Nakahira *et al.*：“Dynamic path switching experiment for maximizing throughput on IP optical GMPLS test-bed network”，OFC2004
- 5) 中平佳裕他：動的光パス配置システムへの適用を目指したトラフィック情報収集・集計機構，電子情報通信学会ソサエティ大会，2003年
- 6) 藤井亮浩他：動的光パス配置システムにおける最適パス検索手法の一提案，電子情報通信学会ソサエティ大会，2003年
- 7) L.Davis (ed.)：“Genetic algorithm and simulated annealing”，Morgan Kaufmann Publishers, 1997
- 8) Y.Nakahira *et al.*：“Traffic driven IP optical path rearrange network system using PSC/LSC multi-layer GMPLS”，ECOC2004

- 9) 藤井亮浩他：ノードが持つ波長数を考慮した光パス配置検索手法の検討，電子情報通信学会総合大会，2004年

## ●筆者紹介

- 坂元宏行：Hiroyuki Sakamoto. 研究開発本部 技術探索チーム  
 藤井亮浩：Akihiro Fujii. 研究開発本部 技術探索チーム  
 野崎正典：Masanori Nozaki. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ  
 川原正人：Masato Kawahara. 研究開発本部 戦略企画チーム

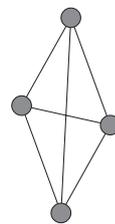
## TIPS 【ハイパー構造とハイパーフルメッシュ,ハイパーハブ】

m次元ハイパー構造は一般に,図Aのように示される。

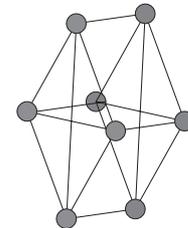
ここでは縦,横,深さ方向の三つの軸で,それぞれ2個,8個,4個のノードの列で全体のネットワークが構成されている。全部のノード数は $N=2 \times 8 \times 4=64$ となる。このとき,縦,横,深さのそれぞれの次元の方向に伸び,複数のノードを刺し通している串を考える。それぞれの串で貫き通されているノードの間のみリンクが張られ,それ以外にはリンクが張られていないときハイパー構造のネットワークという。それぞれの串で貫き通されたノードによるネットワークを(ハイパー)サブネットワークという。(ハイパー)サブネットワークの全ての構造が同一であるとき均質なハイパー構造という。この場合,32本の縦方向の串に対応する2ノードからなるネットワークと,8本の横方向の串に対応する8ノードからなるネットワーク,16本の深さ方向の串に対応する4ノードからなるネットワークの合計56個のサブネットワークが構成されている

サブネットワーク構造は,バス,リング,ハブ,フルメッシュなど基

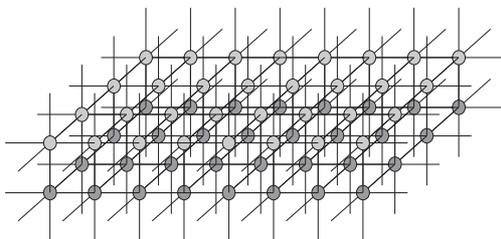
本的ネットワーク構造を取ることが可能である。F<sup>2</sup>構造(2次元ハイパーフルメッシュ)の例を図Bに,H<sup>2</sup>構造(2次元ハイパーハブ)の例を図Cに示す。



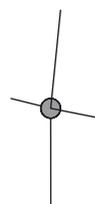
メッシュサブネットワーク



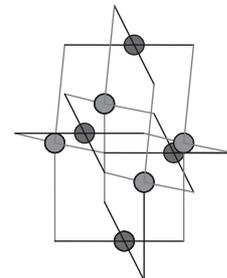
2次元ハイパーフルメッシュ(4×2)

図B F<sup>2</sup>構造：2次元ハイパーフルメッシュ

図A ハイパー構造



ハブサブネットワーク



2次元ハイパーハブ(4×4)

図C H<sup>2</sup>構造：2次元ハイパーハブ