

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目： 基盤研究（B）  
 研究期間： 2007 ～ 2008  
 課題番号： 19300020  
 研究課題名（和文） 生体内制御機構を模倣したトラフィックエンジニアリング：  
 情報通信への適用  
 研究課題名（英文） Bio-inspired Algorithm of Traffic Engineering：  
 Application to Adaptive Routing of Packets  
 研究代表者  
 岡本 正宏（OKAMOTO MASAHIRO）  
 九州大学・大学院農学研究院・教授  
 研究者番号： 40211122

## 研究成果の概要：

コンピュータネットワークは我々を取り巻く情報の相互伝達のバックボーンとして重大な機能を果たしている。インターネットをはじめとする爆発的に増大化した物理層（IP 層）のふくそう（トラフィック）制御問題を解消するためには、1）多重保障性（耐障害性）、2）ネットワーク全体の load バランシング、3）分散化および階層化制御の確立は最重要課題であり、社会的ニーズである。従来より、3）の具体的機構として様々な QoS オーバーレイ経路選択アルゴリズムが提案されてきたが、本研究で提案した生体内制御機構（細胞内酵素反応フィードバック制御機構）に基づくルーティングアルゴリズムを QoS オーバーレイ経路選択アルゴリズムに部分的にカプセル化することにより、上記の、1）および 2）の要件を確立できる可能性が極めて高いことが明らかになった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2008 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野： 生物情報科学

科研費の分科・細目： 情報学・ 計算機システム・ネットワーク

キーワード： 情報通信システム、適応型ルーティング、生物模倣

## 1. 研究開始当初の背景

生物の進化、行動、および生命の動作原理にヒントを得て、それらを情報通信をはじめとする工学システムに活用しようとする研究(biologically inspired research)が最近、盛んになっている。たとえば、蟻のエサ獲得のためのルート形成のしくみを情報通信のデフォルトルートに取り入れた、Ant Path

Algorithm、疫学の感染伝播のしくみを、情報通信のウイルス感染およびその防御法に取り入れた、Epidemic Communication Algorithm などが有名である。本研究の原点となったものは、本研究代表者の研究グループが提出した特許（「ネットワークにおけるルート選定方法、通信ネットワークにおける送信ルート選定方法及びそれらの装置、並び

にコンピュータプログラム」(特開2004-172698))である。我々は、細胞内の生命化学情報通信網(代謝マップ)が、現在の情報通信網のトポロジカルな基本構造(ハブ、リング、スター)をすべて含んでいることに着目し、代謝系が常に外界からの予期せぬ摂動を受ける開放系であるにもかかわらず、ネットワーク全体の恒常性を保っている機構(酵素反応フィードバック制御による負荷分散機構)を情報通信のルート選択のアルゴリズムに導入し、世界で初めて、細胞内代謝制御機構をモデルにした分散平均化ふくそう回避システムを提案した。細胞内代謝系の化学物質濃度の恒常性の維持は、酵素フィードバック制御によって成り立っている。様々なフィードバック関数がこれまでの生化学の研究によって明らかにされているが、共通して、酵素反応フィードバック制御は、帯域制御(band width control)による分岐経路選択である。酵素反応フィードバック制御のルーティングアルゴリズムへの適用法を図1に示す。図1において、[a]は送信ノードの送信待ちパケット量、[b]は隣接ノードの送信待ちパケット量、Vをノード間の通信速度(最大のものをVmaxとする)とすると、酵素拮抗阻害フィードバック関数pはそのまま、混雑状況の指標となる。混雑するほどpの値は小さくなる。分岐において、評価関数f(混雑状況指標と最短距離指標(hは送信目的ノードまでのホップ数)の重み付関数)の値が最大の経路が選択される。

### ルーティングアルゴリズム

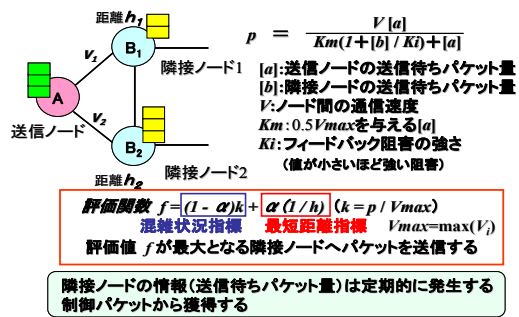


図1 酵素反応フィードバック制御のルーティングアルゴリズムへの適用法

このアルゴリズムの有用性を検証するために、25ノード(リンク数47)からなるランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークを用いて、5つのデータパケット生成ノードを設定し、パケットサイズが同じ500パケットを順次、データパケット生成ノード間で転送させた。比較として、20本のSPF(Shortest Path First)デフォルト経路を設定し、提案アルゴリズムを用いた場合とSPFアルゴリズムを用いた場合で、500個のデータパケットの遅延時間(latency)を調べ

た。その結果、提案アルゴリズムはlatencyの増加がほとんど見られず、ふくそう回避が実現された。

### 2. 研究の目的

(1) 大規模分散型IPルーティングの設計・構築: ①大規模IPネットワークに生体内制御機構に基づく適応型ルーティング制御アルゴリズムを適応させるための手法の開発: 大規模なIPネットワークに如何に適用するのか(階層型適応オーバーレイルーティングをIPネットワーク)の構築について検討する。

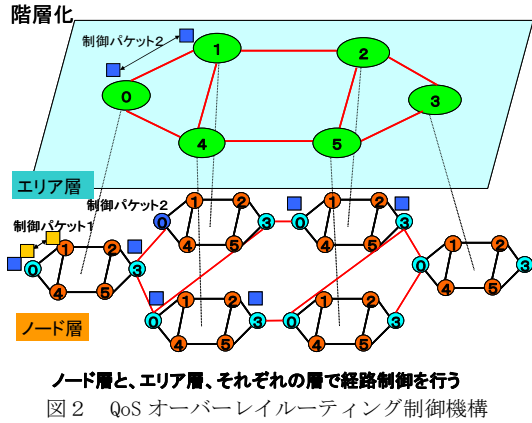
②上記①で構築する階層型適応ルーティングで、ふくそう状況を測定する有効な手法の検討と測定ノードの選択方法: IPレイヤすべてのノードでふくそう状況を測定することは測定コスト・スケーラビリティの観点から非現実的である。ネットワークトポロジーに照らし合わせた測定ノードの選択をどのように行うか、また、その測定法は何が有効なのかを検討する。

(2) 神経系の制御を模倣したP2Pレプリカ配置法の構築: P2Pネットワークはスケールフリーであり、目的ファイルを保持するサーバントへトラフィックが集中することが容易に想定される。一方、神経ネットワーク系は、刺激頻度に応じて、ネットワーク構造が自己組織的に変化するという可塑性を有しており、その機構は神経細胞間を直結する軸索と神経細胞の接続部位であるシナプスの電気信号伝達効率が、刺激頻度に応じて変化するという、“シナプス可塑性”によって実現されている。この機構を、レプリカ存続時間の設定に適用する。すなわち、レプリカへのquery hit数を神経系の刺激頻度として捉え、レプリカ配置数を要求に応じて自己組織的に変化させる。

### 3. 研究の方法

(1) 大規模分散型IPルーティングの設計・構築: 大規模IPネットワークに生体内制御機構に基づく適応型ルーティング制御アルゴリズムを適応させるための手法の開発: ネットワークを階層化することで、QoSオーバーレイへ拡張し、そこに生体内フィードバック制御機構を導入することを考える。すなわち、図2のように、ノード層のいくつかのノードを上位のエリア層の1つのノードと見立て、エリア層とノード層のそれぞれの層で代謝制御フィードバックを導入した経路制御を行う。まず、上位のエリア層で、エリア内制御パケットのデータを基にどのエリアノードに送るかを計算し、それを基に、下位のノード層の各パケットが経路制御される。これにより、ふくそう状態によって経路を大きく変更することが可能になり、大規模系へ

拡張できる。耐障害能力を検証するため、いくつかのノード間の使用可能帯域を小さくし、データパケットのレイテンシーや、伝送経路を詳細に調べる。



また、エリア内のノードはどの程度にすればよいのか、ネットワークのスケラビリティについても検討する。構想としては、上位のエリア層の1つのエリアにまとめられるノード層(図2では、一つ一つの六角形)において、0と3はゲートウェイノードとして、隣接エリアとの制御情報を送受信するように、1, 2, 3, 4はノーマルノードとして、隣接ノードとの制御情報を送受信するように想定する(図3参照)。

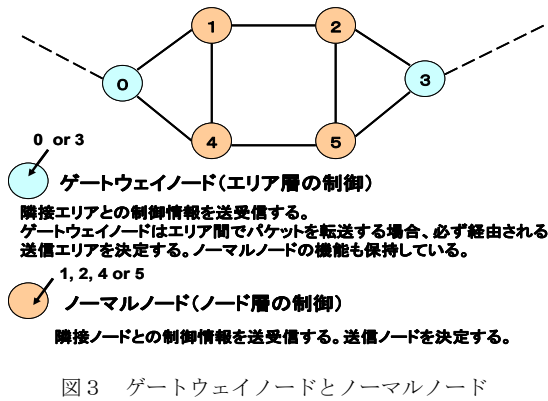
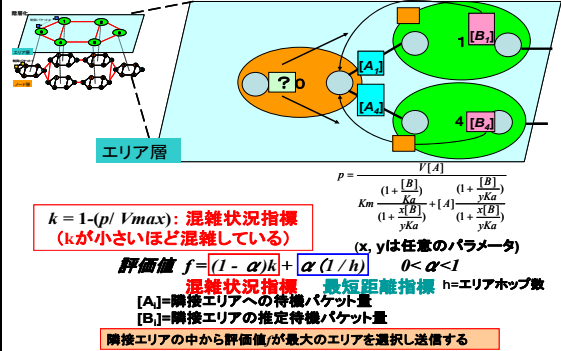
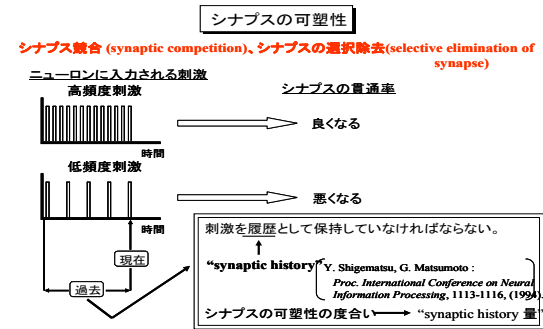


図4のように、いくつかのノードをまとめたエリアでもノード層と同様に経路選択を行う。ここで[A]はゲートウェイノードの隣接エリアへの待機バッファ量、[B]は隣接エリアの推定待機バッファ量を表す。ノード層と同様に、細胞内代謝系の酵素反応フィードバック式(p)を基に、混雑状況の指標(k)を計算し、混雑状況の指標と距離の指標(エリアホップ数の逆数)からなる送信エリアの評価関数(f)を用いて、送信するエリアを隣接エリアから選択する。また、ノード層内は、これまで開発してきたアルゴリズムで、隣接ノードへの待機バッファ量[a]、隣接ノードの推定待機バッファ量[b]、ノード総内での

ゲートウェイノードまでのホップ数h'を基に、同じような評価関数値で評価し、送信するノードを決定させる。これにより、階層型の生体内制御機構に基づく適応型ルーティング制御アルゴリズムが構築でき、大規模ネットワークへの適用が可能になると考えられる。



(2) 神経系の制御を模倣したP2Pレプリカ配置法の構築: 神経ネットワークでは、外界からの刺激は五感を通して入力されるが、脳内でインパルスコーディングされ、刺激頻度に応じて、ネットワーク構造が自己組織的に変化するという可塑性を有している。その機構は、下図のように、神経細胞間を直結する軸索と神経細胞の接続部位であるシナプスの電気信号伝達効率が、刺激頻度に応じて変化するという、“シナプス可塑性”によって実現されている(図5参照)。



そして、低頻度のシナプスは選択的に除去され、頻度依存のネットワーク構造が形成される。この機構を、レプリカ存続時間の設定に適用する。

#### 4. 研究成果

(1) 大規模分散型 IP ルーティングの設計・構築:

図2で示す階層型ネットワークを構築する。○印は、ノード層ではノード番号を、エリア層ではエリア番号を表す。ノード層では、

図1であらわすこれまでのルーティングアルゴリズムを適用し、ノード間を移動するパケットを制御する。ノード層のノードをいくつかまとめたエリアを構築する場合、どのノードの情報をそのエリアの情報とするのか問題となる。本研究では、図3のように、ノードをゲートウェイノードとノーマルノードに分け、ゲートウェイノードのみが隣接エリアとの制御情報を送受信するようにした。すなわち、図4で示すように、ノード番号0と3を各エリアのゲートウェイノードとし、たとえば、エリア番号0から、エリア番号1と4のどちらにパケットを送るかを決定する場合、ノード0、3（エリア番号0、ノード番号3）は、ノード1、0、1、3、4、0および4、3から隣接エリアの推定待機パケット量[B]と隣接エリアへの待機パケット量[A]をもとに、混雑状況指標k（図4参照）と評価値fを計算する。そして、評価値の高いほうのエリアにパケットを送るようにする。なお、隣接エリアから送られてくる[B]はあるしきい値を超えたときのみ、送られてくるものとし、[B]が更新されるたびに評価値fが更新される。なお、[B]が送られてこない場合は、経過時間に対して指数関数的に[B]が減少するようにした。このようなアルゴリズムを全エリアに対して適応した。たとえば、エリア層において、エリア番号1にあるパケットを隣接エリア0、2、4のどれに送るか決定する場合、図6に示すように、ノード1、3（エリア番号1、ノード番号3）は、ノード0、0、0、3、ノード2、0、2、3、ノード0、0、0、3から隣接エリア推定待機パケット量[B<sub>j</sub>]（j=0,2,4）を受け取り、隣接エリアへの待機パケット量[A<sub>j</sub>]（j=0,2,4）を基に、評価値fを計算し、高いfを与えるエリアに送るようにする。

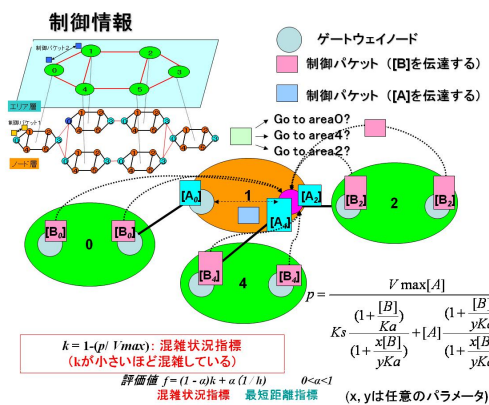
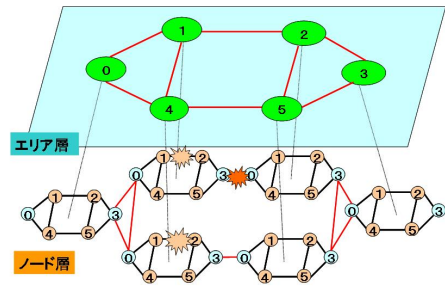


図6 エリア層でのルーティング制御

提案アルゴリズムの有用性を検証するために、図2で示すネットワークにおいて、ノード0、0からノード3、3に2048バイトのパケットを300個、発生間隔200マイクロ秒で送信し、各パケットのレイテンシーを調べ

た。なお、ノード間の送信速度は、100Mbpsとした。また、ルーティングアルゴリズムの比較対象として、従来から広く用いられているSPF(Shortest Path First)+ECMP(Equal Cost Multi Path)と、ノード層のみの適応型ルーティング(図1)を用いた。さらに、DoS攻撃(帯域幅障害)による障害にどれだけ耐えられるかの耐障害性を調べるために、図7で示す障害を想定した。

障害経路



障害	10000μsec 1.3-2.0	100Mbps→10Mbps	障害発生
	20000μsec 1.1-1.2	100Mbps→10Mbps	障害発生
	20000μsec 4.1-4.2	100Mbps→10Mbps	障害発生
障害回復	40000μsec 1.1-1.2	10Mbps→100Mbps	
	40000μsec 4.1-4.2	10Mbps→100Mbps	
	50000μsec 1.3-2.0	10Mbps→100Mbps	

図7 DoS攻撃による障害

SPF+ECMP ルーティングアルゴリズムを用いた場合の結果を図8に示す。図8において、4本の縦の折れ線は、左から順に、ノード1、3と2、0間の障害時刻、ノード1、1と1、2間およびノード4、1と4、2間の障害時刻、ノード1、3と2、0間の障害回復時刻、ノード1、1と1、2間およびノード4、1と4、2間の障害回復時刻(図7参照)を示す。

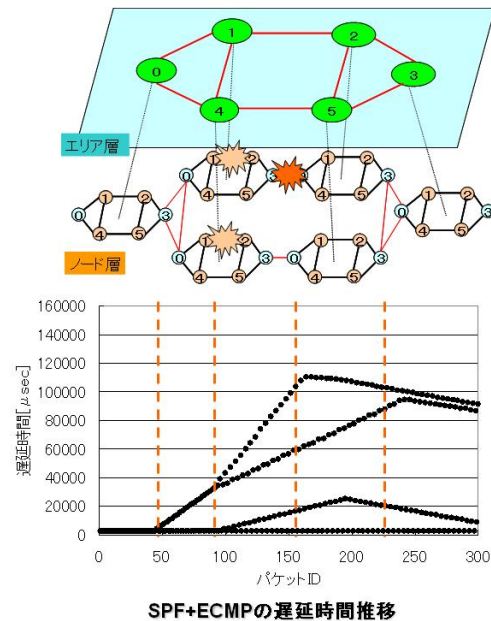


図8 SPF+ECMPの耐DoS攻撃障害回復能力



縦軸は各パケットのレイテンシー（遅延時刻）で、障害に対して、適応的に経路選択ができないため、輻輳が生じ、障害回復後もその影響が残るようになっていく。次に、階層を用いず、ノード層のみで、適応型ルーティング（図1のアルゴリズム）を用いた場合の結果を図9に示す。

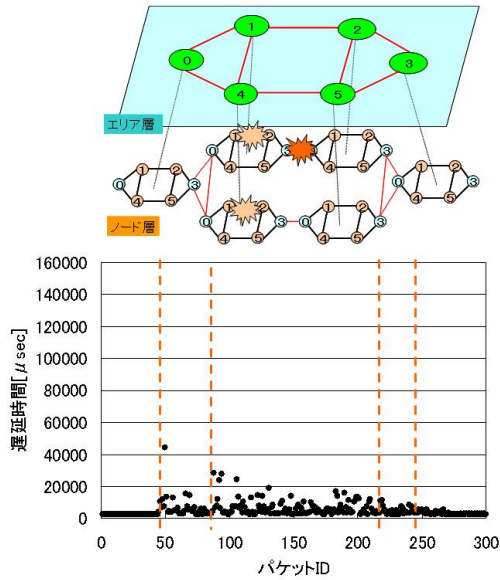


図9 ノード層のみの適応型ルーティングの耐 DoS アタック障害回復能力

図のように、障害による影響は軽減されているが、一部のパケットの遅延時間が増加し、停留するパケットが出ている。次に、本研究で提案した階層適応型ルーティングアルゴリズムを用いた場合の結果を図10に示す。

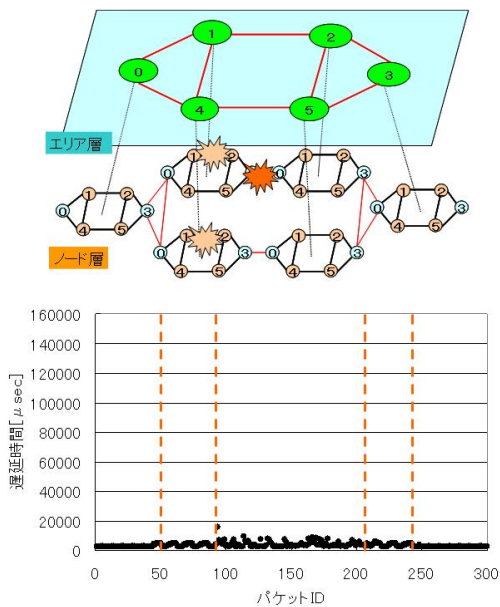


図10 階層適応型ルーティングの耐 DoS アタック障害回復能力

図のように、障害にもかかわらず、トラフィックを平均化しており、障害回復後も平常時に速やかに復帰していることが明らかになった。

(2) 適応型ルーティングを行うノード数の決定：

ネットワークのすべてのノードを適応型ルーティングを行うノード (Adaptive ノード) に置き換えることは、現実的でない。また、代謝系では数少ないフィードバックによって代謝物質濃度の恒常性を保っていることから、ネットワーク上のフィードバックをどこからどこへかけるのかのノード選定 (Adaptive ノードの配置場所) と配置数を検討した。100 ノードから成るスケールフリーネットワーク (Barabasi-Albert model) において、10,000 パケットをランダムに決めたノードで生成し、送信先は生成時にランダムに設定した。各ノード間の通信速度は100Mbps とした。10,000 マイクロ秒において、ランダムに選んだ 10 リンクの通信速度を半分にとり、DoS アタックを、そして 20,000 マイクロ秒でその障害が回復するように設定した。をまず、各ノードを通過するパケット数を、障害前、障害中、障害回復後のそれぞれで調べ、度数分布表を作成した。その結果、障害前の時間では、度数が 300 以上のノードが 5 個、障害中、障害回復後では、度数が 200 以上のノードが、それぞれ 12 個、10 個であった。そこで、これらのノードをパケット通過頻度の高いノードとして、Adaptive ノード (適応型ルーティングを行うノード) とし、その他のノードは、パケットをそのまま通過させるものとした。したがって、100 ノードのうち、およそ 10% のノードを適応型ノードと設定したことになる (Selected ADAPTIVE とよぶ)。これと、全ノードを適応型ルーティングを行うノードと設定したものの (ADAPTIVE) と ECMP において、10,000 パケットのレイテンシーを調べた。その結果を図11に示す。図において、Packet ID が 2500 から 5000 の間が DoS アタックを受けている時間である。図から明らかなように、ECMP は DoS アタックによって Packet ID=4000 ぐらいからレイテンシーが増加し、障害回復後もその影響は残る。それに対し、全ノードが適応型の ADAPTIVE と、パケット通過頻度の高い上位 10% 程度を適応型にした Selected ADAPTIVE は、DoS アタックによってレイテンシーの増加がほとんど見られなかった。つまり、10% 程度を適応型に変更することでパケットトラフィックを平均分散化することが可能となった。なお、Adaptive ノードの配置数と配置場所は、ネットワークトポロジーに依存することも明らかになった。

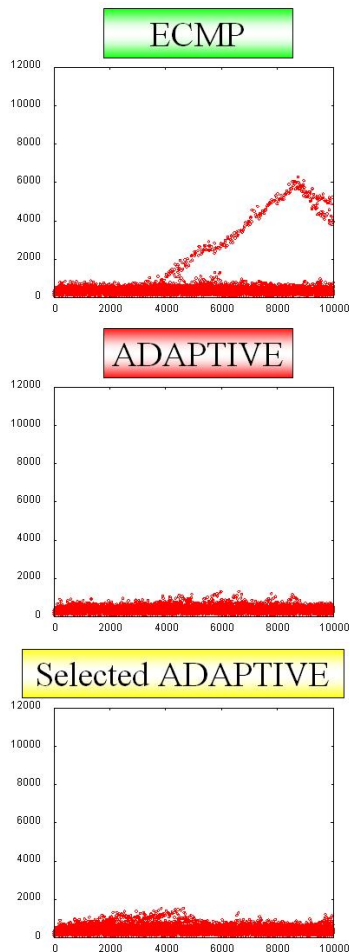
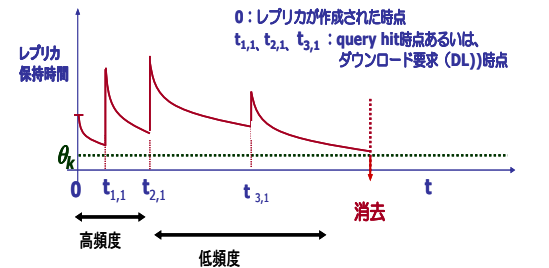


図 11 DoS アタックに対する耐障害能力

(3) 神経系の制御を模倣した P2P レプリカ配置法の構築：

P2P 型通信においては、あるファイルを要求するサーバントは query を発出してその保持者を探索した後、ヒットした (query hit が返ってきた) サーバントの中から物理的に近いものを選出し、そこからそのファイルをダウンロードして目的ファイルを獲得する (オーナーレプリケーション)。その際に、そのダウンロードの通りの道の各サーバントにコピーを残す方法もある (パスレプリケーション)。このように、ネットワーク内においてレプリケーション (ダウンロードによりファイルの複製を配置する) を行うことによりヒット率の向上が可能である。しかし、P2P 型通信において、レプリケーション (ダウンロードによりファイルの複製を配置する) を行うことはコストがかかるため、ヒット率向上を目指してやみくもにレプリカ (複製) を配置し維持することはコストパフォーマンスが良くない。また、不要になったレプリカは、各サーバント内のメモリの効率的利用上速やかに削除するのが良い。そこで、本研究では、必要な数のレプリカをネットワーク内に存在するように制御する方法として、神経

系における“シナプス可塑性”の原理を適用するように考案し、レプリカ存続時間の設定に適用するアルゴリズムを構築した (Modified Long Span 法)。すなわち、レプリカへの query hit 数を神経系の刺激頻度として捉えることで、query hit の少ない不要なレプリカを自己組織的に削除することが可能となった (図 12 参照)。また、ハブの周りにレプリカを配置することで、一部の peer へのトラフィック集中を回避することも可能となった。



高頻度にダウンロード要求(DL)あるいは、query hitがあるほど、レプリカ保持時間を長く、DLの頻度(あるいは、query hit頻度)が低いほど、レプリカ保持時間が短くなる。

シナプスの選択除去の機構の適用

図 12 シナプス可塑性の機構を利用したレプリカ存続時間の設計アルゴリズム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

(1) Nozoe T, Kawauchi, T., Okamoto, M., A Bio-inspired Adaptive Routing Based on Enzymatic Feedback Control Mechanism in Metabolic Networks, Proc. the Intl. MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2007 (IMECS 2007), 1361-1365 (2007).

(2) Iwasaki, A., Nozoe, T., Kawauchi, T., Okamoto, M., Design of Bio-inspired Fault-tolerant Adaptive Routing Based on Enzymatic Feedback Control in the Cell: Towards Averaging Load Balance in the Network, Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies: FBIT 2007, 845-850 (2007)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 正宏 (OKAMOTO MASAHIRO)  
九州大学・大学院農学研究院・教授  
研究者番号：40211122