Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

物理の近接作用に学ぶ
——拡散現象を指導原理とした自律分散型フロー制御技術——

Autonomous Decentralized Flow Control Mechanism Based on Diffusion Phenomenon as Guiding Principle : Inspired from Local-action Theory

高野知佐　会田雅樹

Abstract

物理システムの中には，システム状態の時間発展が偏微分方程式の形で表現できるものがある．これは，ある場所での時間的な状態変化が近隣の状態のみによって左右されるものであり，遠方の状態から直接的な影響を受けるわけではない，という「近接作用」の考え方を反映したものである．近接作用に基づく物理システムが秩序ある世界を作り出すような状況は，偏微分方程式が大域的に秩序ある解を持つことに対応する．この状況を工学的な自律分散制御の立場で見ると，局所的な情報のみに基づいた部分システムの自律動作によって，結果的にシステム全体の状態に秩序を生み出すように動作していることになり，このような動作特性を持つ自律分散制御の実現が期待できる．本稿では，近接作用である拡散現象から着想を得た自律分散型のフロー制御技術について解説する．

キーワード：自律分散制御，拡散方程式，トラヒック制御，偏微分方程式

1.　近接作用と偏微分方程式

物理的なシステムにおいて異なる位置にある対象同士の間に生じる何らかの作用を考えるときに，作用の及ぼし合いの仕方によって遠隔作用と近接作用の二つの考え方が存在する．遠隔作用とは離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うと考えるモデルである．一方，近接作用では，離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うことはなく，作用が直接伝わるのは近隣のみであって，近隣同士間の作用の影響が徐々に空間を伝わっていくことで，離れた対象に作用が到達すると考える．見方を変えると，遠隔作用では作用が瞬間的に伝わるモデルを考えていて，近接作用では作用が有限な速度を持って伝搬するモデルであると考えることができる．

ニュートン力学は力学的な力が遠隔作用によって伝わるとしているモデルであり，例えば，それぞれ異なる位置 $\mathbf{r}_1$ と $\mathbf{r}_2$ にある質量 m と M の質点の間に働く力の大きさは

$$F(\mathbf{r}_1,\ \mathbf{r}_2)=\frac{GmM}{|\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2|^2} \qquad (1)$$

で与えられる．ここで G は重力定数である．このように，異なる地点間に働く力の大きさ $F(\mathbf{r}_1,\ \mathbf{r}_2)$ が，質点の異なる位置 $\mathbf{r}_1$，$\mathbf{r}_2$ の関数であるということは，力の大きさ F が決まるときに，二つの質点の位置を（神様が）同時に知っていなければならないことを意味する．このことを工学的な立場で見ると，空間的に離れたシステム構成要素の状態を知っていて，力の大きさ F が決められていることから，一種の集中管理または集中制御的な枠組みになっていることが分かる．

現代の物理学では近接作用の立場を支持しており，相互作用は局所的に起こるとしている．このようなモデルでは，空間の各点に何らかの物理量があるとする「場」を考え，近隣の点同士でその物理量の変化が起き，その影響が空間各点の近隣同士の相互作用を介して時間とともに有限の速度で伝わっていく．このような場の時間的な変化を適切に記述する枠組みが偏微分方程式である．

高野知佐　正員　広島市立大学大学院情報科学研究科情報工学専攻
E-mail　takano@hiroshima-cu.ac.jp
会田雅樹　正員　首都大学東京大学院システムデザイン研究科経営システムデザイン専修
E-mail　maida@sd.tmu.ac.jp
Chisa TAKANO, Member (Graduata School of Information Sciences, Hiroshima City University, Hiroshima-shi, 731-3194 Japan) and Masaki AIDA, Member (Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, Hino-shi, 191-0065 Japan).
電子情報通信学会誌　Vol.91 No.10 pp.875-880 2008年10月

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

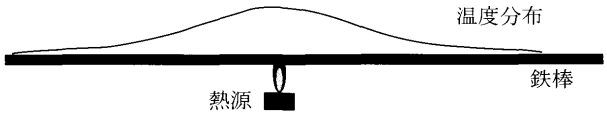

図1　拡散現象の例　鉄棒の一点に熱を加えると，温度分布は正規分布となって拡散していく．

近接作用の例として，最も簡単と思われる一次元の拡散現象（本稿の主題と直接関連する）の例を考えてみよう．図1のような冷えた鉄棒を考え，その一点を一瞬だけ加熱した状況を考えてみる．このとき，熱は時間とともに鉄棒全体に拡散し，温度分布は平滑化していく．時刻 t のときの鉄棒上の微小区間 $[x, x+\mathrm{d}x]$ にある熱量を $n(x, t)\mathrm{d}x$ とする．つまり $n(x, t)$ は熱の空間的な分布に関する密度関数である．拡散現象では，鉄棒内の熱の流れ $J(x, t)$ が

$$J(x, t) = -\kappa \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} \tag{2}$$

となる．ここで κ は正の定数である．この意味は，鉄棒の各点は左右の温度差に比例したレート(注1)で，熱を高い方から低い方に移動させる，という意味である．もちろん，鉄棒の各点は「左右の温度差を知る」ほど「知性」があるわけではない．熱（エネルギー）の流入は点の両側から起きるが，熱の高さに比例して流入量が決まるので，左右からの熱の流入を差し引きすると，ちょうど温度差に比例したレートで熱量が移動しているように見えるということになる．つまり，左右の温度差に比例することは原子のランダムな熱振動の結果である．しかし，後で説明するような工学的応用の観点からは，ランダムな性質がここでの議論の本質ではなく，局所的に温度差に比例した熱の移動が実現できるのであれば，それがどのような理由によって実現したものであるかを問わない．したがって，温度差に比例した熱の移動を前提として，以下の偏微分方程式の議論を考える．

熱が鉄棒の外には散逸しないとすると，鉄棒の各点での温度変化は熱の移動によるものであるので，連続の式

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x, t)}{\partial x} \tag{3}$$

が成立し，式（2）を式（3）に代入することにより，温度分布の時間発展方程式として

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 n(x, t)}{\partial x^2} \tag{4}$$

を得る．これはよく知られた拡散方程式である．この方程式は，初期条件として瞬間的に鉄棒を熱して δ 関数的な温度分布を与えると，その後は時間とともに正規分布に従って，熱が拡散して温度が均一化していくような解を持つことが知られている．また，線形方程式であるので，より複雑な初期条件に対しても，基本解である正規分布の重ね合わせによって一般的な解が得られる．

拡散現象の例で分かるように，偏微分方程式で記述できる近接作用のシステムは，工学的な立場で見ると，以下のように自律分散制御の枠組みに対応付けすることができる．

- 鉄棒の各点は，鉄棒全体（システム全体）に関する情報は持っておらず，あらかじめ決められたルールで近隣の点と相互作用している．
- システム全体の情報を知っている存在はなく，離れた点からの直接的な作用もない．
- このような状況にもかかわらず，システム全体の状態は偏微分方程式の解で与えられるような大域的に秩序ある振舞いを生み出している．

つまり，局所的な状態情報のみに基づいて自律分散的に動作するサブシステムが，全体として秩序ある状態を生み出すことができることを示唆している[1]．一般に，自律分散的なシステムでは，サブシステムの局所的な動作によってシステム全体がデッドロック状態に陥る可能性も考えられるため，サブシステムの自律動作がシステム全体にどのような影響を与えるのかについて慎重に設計する必要があった．この問題を回避する考え方として，近接作用の示唆する自律分散制御は以下のようにまとめることができる．

- システム全体の状態が持つべき大域的な性質を考え，そのような性質を備えた解を持つ偏微分方程式を考える（式（4）に対応）．
- その偏微分方程式が記述している（近接作用としての）局所作用を考え（式（2）に対応），それを動作ルールとするようなサブシステムの設計を行う．
- その結果，サブシステムは局所的な状態情報のみに基づいて自律分散的に動作するにもかかわらず，システム全体の状態を（対応する偏微分方程式の解として）望ましい方向に導く．

このような「ミクロスケールの動作ルールを適切に設計することによって，マクロスケールでの状態を間接的に制御する機構」の実現例として，2. 以降で拡散型フロー制御の解説を行う．

(注1)　正確には，温度こう配に比例したレートと書くべきである．

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

2. 拡散型フロー制御のねらい

本章では，ネットワーク制御技術において「ネットワーク全体に関する情報を知ることができない環境下であっても，サブシステムが部分的な情報のみに基づいて自律動作することにより，ネットワーク全体を適切に制御する技術」をフロー制御の例で解説する．このような技術が必要な理由は，以下の二つの異なる技術的背景に求めることができる．一点目は，ネットワークの高速化によって制御遅延がネットワーク性能に大きな影響を与えるようになる現象に対して，ネットワーク全体の情報を収集することなく部分的な情報のみに基づいて高速動作する制御機構が求められることである．二点目は，ネットワーク全体の情報交換が制限されるモバイルアドホックネットワーク等の自律分散的に構成されるネットワークにおいて，部分的な情報で動作する制御機構が求められることである．ここでは，ネットワークの高速化を例に，本技術の背景を説明する．

近年のインターネットの急速な普及・通信需要の拡大により，将来をにらんだ超高速ネットワークの構築が進められている．ネットワークが高速化すると，光速度で決まる固定伝搬遅延に比べてノードの動作速度が相対的に高くなる．このため，ノードの高速動作を特徴付ける短い時間スケールにおいて，各ノードが収集可能な情報は非常に限られたものになる．図2はこの状況を図示したものである．低速ネットワークでは，あるノードから送出し始めたパケットについて，例えばパケットの最終ビットの送出が終わる前にパケットの先頭ビットが相手のノードに到達し始めると考えても問題がなかった．ノードの混雑状況の状態変化はパケット到着／退去の時間スケールで変化する（つまり，パケットの到着／退去によりノードの状態変化が駆動される）ので，あるノードが送ったノードの状態情報は，ノードの状態がほとんど変化しないうちに相手に到達すると考えてよい．そのため，低速ネットワークではノード間での状態情報の交換において，情報の鮮度が劣化しにくい．これはデータ転送レートによって決まるパケットの到着／退去の時間に比べてパケットがリンクを通過する時間（光の速度で決まる）が十分短いという状況である．一方，ネットワークが高速化すると，データがリンクを通過する物理的な時間は変化しないが，その間に送出されるデータ量は増大し，リンク上に多くのパケットが伝搬中の状態で存在することになる．したがって，あるノードが送ったノードの状態情報が相手ノードに届くまでに，数多くのパケットが到着／退去を繰り返すことになる．ノードの状態変化はパケットの到着／退去ごとに発生するので，ノードの状態情報があて先ノードに届くころには，送出元ノードの状態が大きく変化してしまう可能性がある．そのため，遠くのノードから収集した情報は，ノードの制御動作に適用するには古すぎる情報であり，ネットワーク全体に関する現時点の状態情報を知ることはできない．この意味で，ネットワークの高速化は各ノードが情報的に孤立する状況を招く．

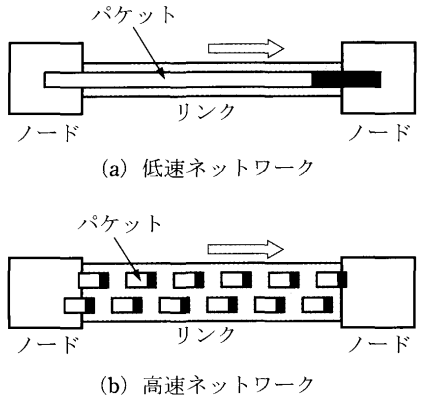

図2 高速ネットワークの特徴 ネットワークが高速化しても光速度は変わらないため，リンク上に多くのパケットが存在するようになる．

また，高速ネットワークでは短時間に大量のパケットが転送されるため，制御遅延がパケット転送品質に与える影響が大きくなる．ネットワークに存在するパケットのうち，ある時点で制御可能なものはその時点でノード内に存在するパケットのみであり，リンク上を伝搬中のパケットを制御することができない．しかしながら高速ネットワークではリンク上を伝搬中のパケット数が増大することになり，制御遅延がネットワークの安定性に与える影響が大きい．

このように，ネットワークの高速化は制御のための情報収集を困難にし，制御遅延によるネットワークの影響も敏感にする．このため，超高速ネットワークで適切に動作する制御を実現するためには，制御技術が以下の要求を満たす必要がある．

- 制御に必要なネットワークの状態情報は収集可能なものでなければならない．
- できる限り短い制御遅延を実現しなければならない．

ネットワークの大域的なトラヒック制御の課題に対する多くの研究は，数理計画問題として定式化され，ネットワークの広範囲にわたる状態情報が収集可能であることを前提にしている．また，数理計画問題の求解には十分な時間が必要なので，高速ネットワークに要求される非常に短い制御遅延を満足することが難しい．

現在のインターネットで広く利用されているTCPは，エンドホストによる自律分散制御であり，ネットワーク全体の状態情報を知ることなく動作が可能である．しかし，エンドホスト主体の制御であるため，制御遅延をエンドホスト間の往復遅延時間（RTT）より短い時間に抑

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

えることはできない．本研究の対象は，RTT よりも短い時間スケールで動作するネットワーク制御機構を実現することである．この高速動作性能は，ユーザからのサービス要求というよりも，むしろ「より長い時間スケールで動作するネットワーク制御に対して，安定したネットワーク品質を提供する」という点で意味がある．

3. 拡散型フロー制御技術の仕組み

拡散型フロー制御（以下，DFC）はノードが局所情報に基づいて自律動作をすることで，ネットワーク全体としてノード内パケット数分布を均一化し，ネットワーク状態を秩序ある方向に導くことを目的としている．ここでは，単一のフローに対する DFC の具体的な動作について簡単にまとめる．

あるフローに沿って一次元的に連結したノード i ($i=1,2,\cdots,N$) を考える（図 3）．ノード i は，時刻 t における下流ノード $i+1$ へのパケット転送レート $J_i(t)$ を自分が知り得る情報のみに基づいて決定し，パケット転送を行う．また，上流ノード $i-1$ に向けてノード i の情報 $\mathbf{F}_i(t)$ をフィードバックする．パケット転送レート $J_i(t)$ の決定は，下流ノード $i+1$ から通知される情報 $\mathbf{F}_{i+1}(t-d_i)$ の到着ごとに実行する．ここで d_i はノード i と $i+1$ 間の伝搬遅延であり，$\mathbf{F}_{i+1}(t-d_i)$ は現在時刻 t より d_i だけ過去に下流ノード $i+1$ で生成された情報であることを意味する．上流ノード $i-1$ に向けたフィードバック情報 $\mathbf{F}_i(t)$ の通知は，ノード $i-1$ と i 間の伝搬遅延 d_{i-1} に比例した時間間隔で行う．パケット転送レート $J_i(t)$ は

$$J_i(t)=\max(0,\min(L_i(t),\tilde{J}_i(t))) \qquad (5)$$

$$\tilde{J}_i(t)=r_i(t-d_i)-D_i(n_{i+1}(t-d_i)-n_i(t)) \qquad (6)$$

と決定する．ここで，$n_i(t)$ は時刻 t でノード i に存在するパケット数，$r_i(t-d_i)$，$n_{i+1}(t-d_i)$ は下流ノード $i+1$ からのフィードバックにより（リンク伝搬遅延 d_i を伴って）通知される情報で，それぞれ下流からの指示レート，下流ノード内のパケット数を表し，$L_i(t)$ はノード i から $i+1$ に向かうリンクの利用可能帯域である．また D_i は $D_i=D/d_i$ のように決める．ここで D (>0) は定数である．一方，ノード i が生成するフィードバック情報 $\mathbf{F}_i(t)$ は $\mathbf{F}_i(t)=(r_{i-1}(t),n_i(t))$ からなり，これを上流ノード $i-1$ に通知する．ここで，$r_{i-1}(t)=J_i(t)$ とする．

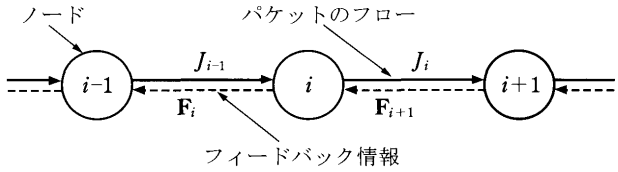

図 3 ノードの動作モデル 下流ノードからのフィードバック情報と自ノードの情報から，パケット転送レートを自律的に決定する．

その他の DFC の仕組みとしては，ネットワーク入口での境界条件や複数フロー混在時の適用方法などが必要で，それらを含む DFC の詳細については文献（2）に詳しい．

DFC の直観的意味を説明する．議論を簡略化するため，ノード番号を連続化し，$i\to x$ で表す．また，連続極限をとってリンクの伝搬遅延を $d_i\to 0$ とする．このとき，式（6）は

$$\tilde{J}(x,t)=r(x,t)-\kappa\frac{\partial n(x,t)}{\partial x} \qquad (7)$$

の形で書ける．ここで，κ は，式（6）の D に対応する正の定数である．連続の式（3）を用いると，パケット密度 $n(x,t)$ の時間発展は

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t}=-\frac{\partial r(x,t)}{\partial x}+\kappa\frac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2} \qquad (8)$$

と書ける．これは拡散タイプの方程式である．したがって，DFC はノードが局所情報に基づいて自律動作をすることで，ネットワーク全体としてノード内パケット数を均一化する効果が期待できる．

4. DFC 技術の動作特性と TCP との相互補完性

DFC による拡散の効果を示すため，各ノードに存在するパケット数の時間変化をシミュレーションにより調べる．シミュレーション評価のシナリオは以下のとおりである．図 4 に示した 30 ノードからなる一次元ネットワークを考え，対象フローと背景フロー（背景トラヒック）の 2 本のフローを流す．対象フローはノード 1 から

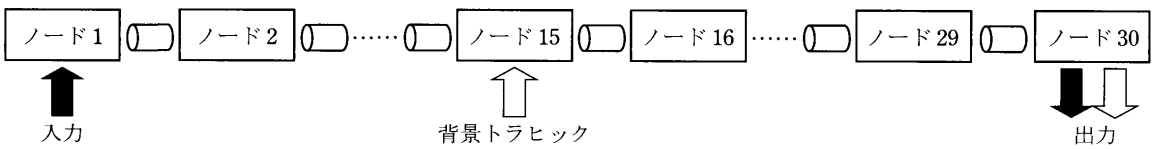

図 4 シミュレーションモデル 2 本のフローが帯域の競合を起こすモデル．DFC は線形な動作をするので，より複雑な状況であってもこの単純なモデルの結果の重ね合わせとして理解できる．

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

ネットワークに入力し，ノード30に向かうものとし，背景フローはノード15から入力してノード30に向かうものとした．リンクの遅延は0.1ms，帯域は12Gbit/s，パケットサイズは1,500Byteである．対象フローは時刻$t=0$ sで開始し，その後$t=0.1$ sで背景フローを開始する．両フローは初期状態ではリンク帯域に合わせたレートでパケットを送信するが，背景フローの入力後，ノード15から16に向かうリンクがボトルネックとなり，DFCの動作によって両フローのトラヒックが制限される．

図5(a)は$D=0.4$のときの評価結果を示している．横軸はノード番号（1～29）で，縦軸はそのノード内に存在する対象フローのパケット数を示す．グラフ内にはシミュレーション時刻を表示している．DFCでは各ノー

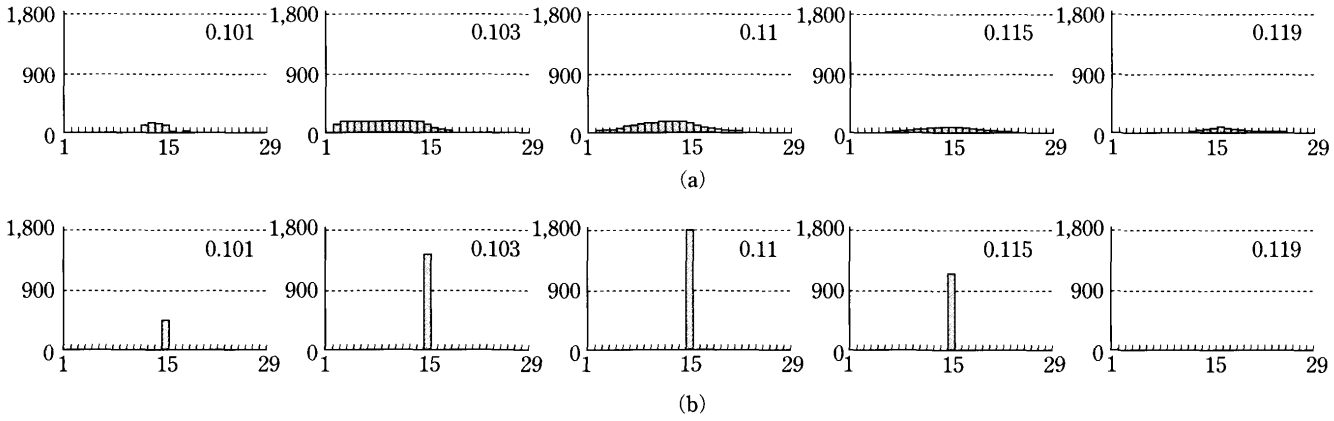

図5　ノード内パケット数分布の時間変化　(a)はDFCを用いたもの．ふくそう発生直後から周囲のノードと協調して1か所にパケットが集中しないように拡散させる効果が現れる．拡散はパケットの個数分布について起きており，パケット自体は左から右に流れているため，決してパケットが逆流しているわけではない．(b)はDFCを用いないTCPフローで，ふくそうノードでのパケット損が発生し，その結果ウィンドウサイズの収縮によりふくそうが回復する．

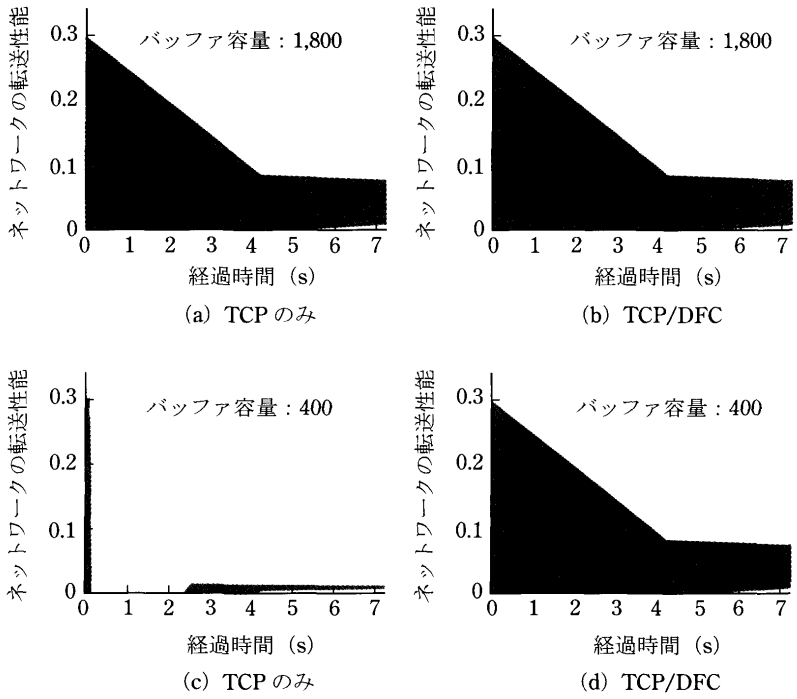

図6　TCP VegasとDFCの組合せによる評価　バッファ容量1,800の結果はDFCの有無にかかわらずパケット損が発生していない．この場合，DFCと組み合わせてもTCP Vegas単独での特性を妨げない．バッファ容量400の結果は，TCP単独の場合でパケット損が起き，性能が急激に劣化する．しかし，DFCと組み合わせるとTCP Vegasの性能を維持する．

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

ドが局所情報に基づいて自律的に動作するが，その結果としてノードが互いに協力してパケットが特定ノードに集中しないように動作し，パケット損を回避している．図5(b) のように，DFCを適用しない場合ではボトルネックとなるノード15のみに大量のパケットがたまり，パケット損の発生要因となる．

DFCによる具体的な効果を見るために，ネットワークの遅延品質に敏感な特性を持つTCP Vegasとの組合せによる効果を確認する．TCP VegasとはTCP制御のバージョンの一つで，ネットワークの遅延を計測しながら動作する方式である．図4のモデルにおいて，ノードのバッファ容量を1,800及び400パケット分とし，TCP Vegas単独の場合とDFCを組み合わせた場合の評価を図6に示す．横軸は時刻を表し，縦軸は対象フローによるリンク全体の使用率を表す．これは，ネットワークのパケット転送効率を示す指標である．バッファ容量1,800では，DFCの有無にかかわらずパケット損が発生していない．また，DFCと組み合わせてもTCP Vegas単独での特性を妨げていないことが分かる．バッファ容量400では，TCP単独の場合でパケット損が起きて性能が急激に劣化する．しかし，DFCと組み合わせるとパケット損が起きず，バッファ容量1,800の結果と同等のTCP Vegasの性能を維持する．この結果は，DFCの効果によって，バッファ容量が小さくても（相対的にはネットワークの速度がより高速化しても）上位のTCPの動作に安定なネットワーク特性を提供していることを示している．

5. まとめと今後の課題

近接作用の一種である拡散現象を指導原理として構成される自律分散制御の考え方について述べ，その具体例として拡散型フロー制御技術の概要と効果について解説した．今後は，拡散型フロー制御技術を実用化するための実装技術に関する課題解決が必要であるとともに，近接作用の考え方に基づいた他のタイプの制御機構の展開が望まれる．

文　献

(1) M. Aida and C. Takano, "Principle of autonomous decentralized flow control and layered structure of network control with respect to timescales," Supplement of the ISADS 2003 Conference Fast Abstracts, pp.3-4, 2003.

(2) 高野知佐，"拡散現象を指導原理とする自律分散フロー制御機構の研究，" 首都大学東京大学院システムデザイン研究科，博士学位論文，p.126, 2008.

(平成20年4月10日受付　平成20年5月20日最終受付)

高野（たかの）　知佐（ちさ）（正員）
平12阪大・工・電子通信卒．平20首都大東京大学院博士課程了．平12 NTTアドバンステクノロジ入社．平20広島市大・情報科学・准教授．博士（工学）．

会田（あいだ）　雅樹（まさき）（正員）
昭62立教大・理・物理卒．平元同大学院博士前期課程了．同年NTT入社．平17首都大東京・システムデザイン・准教授．平19同大学院・教授．博士（工学）．

NII-Electronic Library Service