

〈一般研究課題〉 パケット破棄確率の非線形化がTCP/REDに  
与える影響

助成研究者 中京大学 高坂 拓司



## パケット破棄確率の非線形化がTCP/REDに 与える影響

高坂 拓司  
(中京大学)

### Effect of the packet drop probability with a nonlinearity on TCP/RED

Takuji Kousaka  
(Chukyo University)

#### Abstract :

Nonlinear Random Early Detection (RED) is an algorithm applying the nonlinear function to the packet drop probability of TCP/RED and can change the nonlinearity continuously. In addition, the high throughput achieved by the nonlinear RED is confirmed by using Network Simulator-2 (NS-2). This study aims to clarify the effect of the packet drop probability with a nonlinearity on the nonlinear RED. We propose a first-order discrete model for the nonlinear RED. By calculating the bandwidth utilization with various TCP senders using NS-2, we clarify the effect of the number of TCP senders on the traffic loads. Moreover, we compare the average queue size in a router of the NS-2 and that of the model with various TCP senders and nonlinearities of the packet drop probability. Our results show the reproducibility of the model regarding the average queue size.

#### 1. はじめに

ネットワークにおける渋滞 (輻輳) は通信性能を大幅に低下させる要因の1つであり、通信端末からルータへ多数のアクセスが集中した際に生じる。近年、ネットワークの高帯域化およびバッファ容量の増加に伴い多くのパケットを同時に送信可能となり、高スループット化が実現されている。しかし、新たな輻輳の要因として、バッファにおけるパケットの転送待ち時間(キューイング遅延)の増加が広く知られている。このように、輻輳の要因はネットワーク技術の発達に伴い変化するた

め、輻輳制御は通信性能の向上に必要不可欠である。以下、輻輳制御について考える。

Transmission Control Protocol (TCP) は通信の信頼性を保証するための規約であり、輻輳制御機構を持つ。また、現在に至るまで様々な輻輳制御法が提案されており、パケットロスに基づく Loss-based の輻輳制御法が広く普及している。しかし、ルータにおけるバッファ容量が大きいネットワークでは、パケットロスが発生せずキューイング遅延が増加するため、Loss-based の輻輳制御法単体での十分な制御は困難である。この問題に対して、Active Queue Management (AQM) [1] はルータ内のキュー長を積極的に管理するため、キューイング遅延の制御に効果的である。特に、Random Early Detection (RED) [2] は AQM の代表的な手法の1つであり、平均キュー長に基づく乱数的なパケット破棄により過剰なキューイング遅延の増加を抑制する。また、RED は一般的な Loss-based の輻輳制御法 [3] と比べ、迅速な輻輳回避動作が可能であり、スループットの公平性においても高い性能を示すことが報告されている。

RED の制御性能は、パケット破棄確率に関する3つの閾値に強く依存するため、適切な閾値の設定が必要である。しかし、ネットワーク環境やトラフィックの状態により適切な閾値は異なるため、如何なる状況においても高い通信性能を実現することは困難である。また、従来の RED におけるパケット破棄確率は平均キュー長に対して線形特性を示す。一方、高スループット化に最適なパケット破棄確率の特性は明らかになっていない。これらの課題を解決するため、パケット破棄確率に非線形関数を適用した RED (非線形 RED) [4-7] が提案されている。文献 [4-7] はネットワークの研究および開発に広く利用されている Network Simulator-2 (NS-2) [8] を用いて、非線形 RED による高スループット化を示している。しかし、非線形 RED による高スループット化のメカニズムに関する報告は皆無であり、最も高スループットとなる非線形特性の強度を用いた設計は困難である。

先の研究報告[9]では、パケット破棄確率の非線形性が通信性能に及ぼす影響を調査するため、非線形特性の強度を連続的に変化可能なパケット破棄確率を用いた非線形 RED を提案した。また、NS-2 を用いた通信シミュレーションを行い、非線形 RED において非線形性を強めるほど通信性能は向上する一方、過剰な非線形性はスループットを大幅に低下させることを明らかにした。

そこで本研究では、非線形 RED による高スループット化のメカニズムを解明するための第一歩として、ルータ内の平均キュー長に注目した1次元離散非線形 RED モデルを提案する。はじめに、NS-2 を用いて TCP 接続台数に対する帯域利用率を計算し、接続台数がネットワークの負荷に及ぼす影響を明らかにする。次に、NS-2 および提案モデルを用いて、TCP 接続台数と非線形特性の強度を変化させた際の平均キュー長に関する時系列波形を計算する。また、NS-2 と提案モデルの計算結果を比較し、提案モデルの有効性を検証する。最後に、提案モデルを用いて非線形特性の強度に対する固定点解析を行い、非線形 RED の力学的性質を調査する。

## 2. 解析対象

### 2.1 非線形 RED

本研究で取り扱う非線形 RED [9] は、ルータ内の平均キュー長  $\bar{q}$  から決まるパケット破棄確率  $p$  により輻輳を制御する。また、平均キュー長は指数加重移動平均を用いて計算し、式(1)に平均キュー長の更新則、式(2)に非線形特性を伴うパケット破棄確率をそれぞれ示す。

$$\bar{q} \leftarrow (1 - w_q) \cdot \bar{q} + w_q \cdot q \quad (1)$$

$$p = \begin{cases} 0 & \text{for } \bar{q} \leq q_{\min} \\ 1 & \text{for } \bar{q} \geq q_{\max} \\ p_{\max} \cdot \frac{\bar{q} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \cdot \exp\left\{\gamma \cdot \left(\frac{\bar{q} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} - 1\right)\right\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、非線形特性の強度  $\gamma$  は非線形RED特有のパラメータ、重み係数  $w_q$  は指数加重移動平均に関するパラメータ、最大パケット破棄確率  $p_{\max}$ 、最小平均キュー長  $q_{\min}$ 、最大平均キュー長  $q_{\max}$  はパケット破棄確率に関する3つの閾値をそれぞれ意味する。非線形REDでは、まずルータがパケットを受信した際、パケット破棄確率  $p$  および前回のパケット受信時における平均キュー長  $\bar{q}$  を用いて、現在の平均キュー長を更新する。次に、現在の平均キュー長により決定されるパケット破棄確率  $p$  に基づき、乱数的にパケットを破棄することで平均キュー長を一定の長さに保つ。

一度に破棄するパケットの割合は、図1に示す平均キュー長に対するパケット破棄確率に基づき決定される。 $\bar{q} \leq q_{\min}$  の場合はパケットを破棄せず、 $\bar{q} \geq q_{\max}$  の場合はルータ内のパケットを全て破棄する。また、 $q_{\min} < \bar{q} < q_{\max}$  の場合はパケット破棄確率  $p$  に従い乱数的にパケットを破棄する。また、 $p$  は平均キュー長  $\bar{q}$  に対して非線形特性を示す。ただし、 $\gamma = 0$  におけるパケット破棄確率は、従来のREDと同様の線形特性を表し、 $\gamma$  の値が大きいくほど非線形特性の強度を強める。これらの特徴により、非線形REDは非線形特性の強度を連続的に変化可能としている。

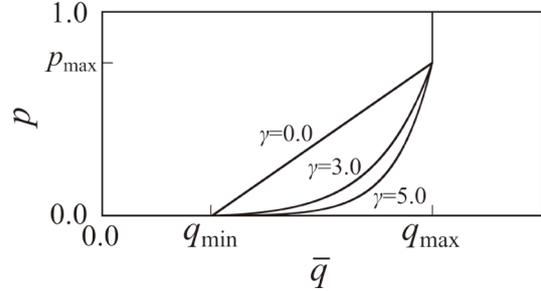


図1 非線形特性を伴うパケット破棄確率

## 2.2 1次元離散非線形REDモデル

1次元離散非線形REDモデルは、ルータ内の平均キュー長  $\bar{q}(k+1)$  を状態変数、非線形特性を伴うパケット破棄確率  $p(k)$  を依存変数とした1次元離散力学系である。平均キュー長は式(3)、パケット破棄確率は式(4)で定義される。

$$\bar{q}(k+1) = \begin{cases} (1 - w_q) \cdot \bar{q}(k) + w_q \cdot \max\left(\frac{R \cdot N}{\sqrt{p(k)}} - \frac{C \cdot d}{M}, 0\right) & \text{for } p(k) \neq 0 \\ (1 - w_q) \cdot \bar{q}(k) + w_q \cdot \left(rwnd - \frac{C \cdot d}{M}\right) & \text{for } p(k) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$p(k) = \begin{cases} 0 & \text{for } \bar{q}(k) \leq q_{\min} \\ 1 & \text{for } \bar{q}(k) \geq q_{\max} \\ p_{\max} \cdot \frac{\bar{q}(k) - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \cdot \exp\left\{\gamma \cdot \left(\frac{\bar{q}(k) - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} - 1\right)\right\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、ボトルネック帯域幅  $C$ 、往復伝搬遅延  $d$ 、接続台数  $N$ 、パケットサイズ  $M$ 、最大ウィンドウ幅  $rwnd$ 、モデル定数  $R = \sqrt{3/2}$  はネットワークパラメータ、重み係数  $w_q$  は指数加重移動平均に関するパラメータ、最大パケット破棄確率  $p_{\max}$ 、最小平均キュー長  $q_{\min}$ 、最大平均キュー長  $q_{\max}$ 、非線形特性の強度  $\gamma$  は非線形REDに関するパラメータをそれぞれ意味する。

### 3. 1次元離散非線形REDモデルの有効性

#### 3.1 仮想ネットワーク環境

Network Simulator-2 (NS-2) [8]は米国DARPAの研究プロジェクトVINT (Visual InterNet Testbed)により開発された、ネットワークに関する研究および開発に広く用いられている通信シミュレータである。

図2は、本研究で使用する仮想ネットワーク環境 [2,10]を表す。図中のR1およびR2はルータを意味し、R1に非線形RED [9]、R2に最も基本的なキューイング方式であるTail-Drop [11]を実装している。また、表1,2にネットワークおよび非線形REDに関するパラメータをそれぞれ示す。以下、接続台数 $N$ および非線形特性の強度 $\gamma$ を変化させ、解析を進める。

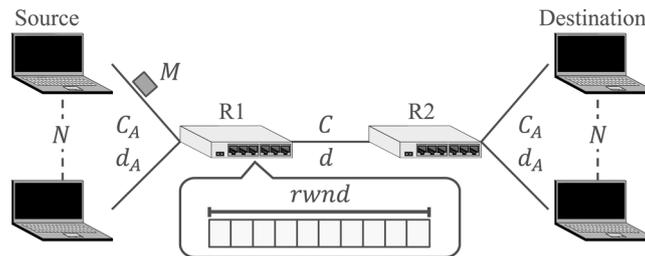


図2 仮想ネットワーク環境

#### 3.2 接続台数に対する帯域利用率

通信シミュレーションを行う。表3は、従来のRED ( $\gamma=0$ )における $N$ に対する帯域利用率を表す。 $N$ に対する帯域利用率は増加傾向を示し、接続台数を増やすほどネットワークの負荷は増加している。また、帯域利用率の変化は $N$ の増加に伴い小さくなり、帯域利用率はおよそ $N \geq 2$ において97%、 $N \geq 4$ において99%を上回る。従って、 $N=1$ は低負荷なネットワーク、 $N=3, 10$ は高負荷なネットワークといえる。

表1 ネットワークに関するパラメータ

パケットサイズ $M$ (MTU) [bit]	8,320
アクセス帯域容量 $C_A$ [Gbps]	1
ボトルネック帯域容量 $C$ [Mbps]	100
往復伝搬遅延 (アクセス帯域) $d_A$ [ms]	20
往復伝搬遅延 (ボトルネック帯域) $d$ [ms]	2
受信側許容ウィンドウ幅 $rwnd$ [packet]	10,000
TCP 接続台数 $N$	1-10

表2 非線形REDに関するパラメータ

ローパスフィルタの重み係数 $w_q$	$8.31e^{-5}$
最大パケット破棄確率 $p_{max}$	0.02
最小平均キュー長 $q_{min}$ [packet]	30
最大平均キュー長 $q_{max}$ [packet]	90
非線形特性の強度 $\gamma$	$0 \leq$

#### 3.3 平均キュー長に関する時系列波形

次に、定常状態における平均キュー長についてNS-2と提案モデルの計算結果を比較し、ネットワークの負荷に対する提案モデルの有効性を検証する。図3,4,5に $N=1, 3, 10$ における平均キュー長の時系列波形を示す。図中の(a)は $\gamma=0$ 、(b)は $\gamma=5$ 、(c)は $\gamma=300$ における平均キュー長をそれぞれ表し、実線はNS-2によるシミュレーション結果、破線は提案モデルによる計算結果を意味する。

TCPは、各送信元における送信パケット量(輻輳ウィンドウ幅)を調節することで輻輳を制御する。

また、輻輳ウィンドウ幅の変動はルータに到着するパケット量に影響を及ぼすため、NS-2の時系列波形は振動する。一方、提案モデルは輻輳ウィンドウ幅を簡素化しているため、定常状態における平均キュー長は常に一定の値を示す。

図3において、NS-2の平均キュー長は多くの時刻で $q_{\min}$ を下回る一方、提案モデルでは常に $q_{\min} \leq \bar{q} \leq q_{\max}$ を満たすため、 $N=1$ における提案モデルの再現性は低い。ただし、非線形REDの動作時間は非常に短いため、低負荷なネットワークに対して非線形REDを実装する必要はない。

表3 従来のREDにおける $N$ に対する帯域利用率 ( $\gamma=0$ )

$N$	帯域利用率 [%]
1	87.3016
2	97.0680
3	98.0448
4	99.1488
5	99.6824
6	99.8160
7	99.8688
8	99.9056
9	99.9504
10	99.9592

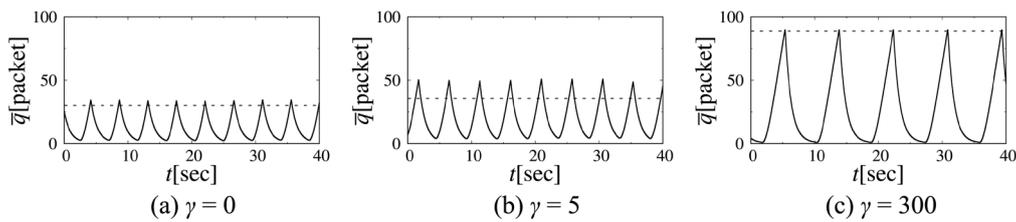


図3 平均キュー長の時系列波形 ( $N=1$ )

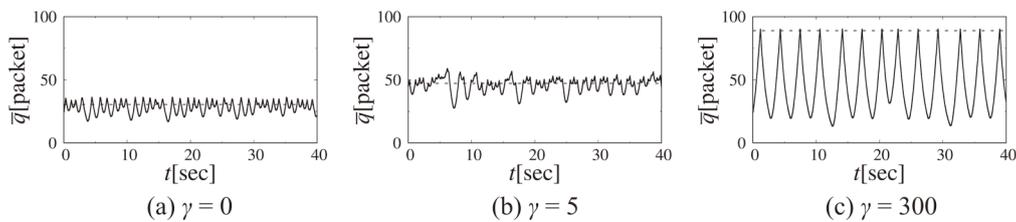


図4 平均キュー長の時系列波形 ( $N=3$ )

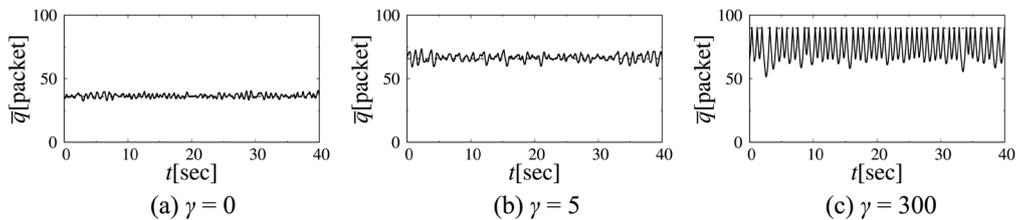


図5 平均キュー長の時系列波形 ( $N=10$ )

図4,5より,  $N=3$ および10のような高負荷なネットワークでは, NS-2と提案モデルの平均キュー長は,  $N$ および $\gamma$ に対してともに増大し, 定性的性質は良く一致している. これらの結果より, 提案モデルはネットワークの負荷に対して高い再現性を示すといえる. ただし, 図5(c)のように平均キュー長が最大平均キュー長 $q_{\max}$ を上回る場合, 提案モデルでは乱数的なパケット破棄が行われる一方, NS-2でのパケット破棄確率は1となり, REDの制御動作が異なるため提案モデルの再現性は僅かに低下する.

#### 4. 非線形特性の強度に対する力学的性質

本研究において, 定常状態における平均キュー長は一定の値を示し, これを固定点 $\bar{q}^*$ と呼ぶ. 本項では, 提案モデルに対して固定点解析を行い, 非線形REDの力学的性質を明らかにする. 式(3),(4)より, 非線形特性の強度 $\gamma$ に対する固定点の導関数を導出する.

$$\frac{\partial \bar{q}^*}{\partial \gamma} = - \frac{\bar{q}^* - q_{\max}}{\gamma + \frac{q_{\max} - q_{\min}}{\bar{q}^* - q_{\min}} + \frac{2}{N \cdot R} \sqrt{p_{\max}(\bar{q}^* - q_{\min})(q_{\max} - q_{\min}) \exp\left\{\frac{\gamma(\bar{q}^* - q_{\max})}{q_{\max} - q_{\min}}\right\}}} \quad (5)$$

式(5)は常に $\partial \bar{q}^* / \partial \gamma > 0$ を満たすため, 非線形特性の強度 $\gamma$ に対する固定点の単調増加を数学的に保証する. 従って, 非線形特性の強度の増加は高スループット化を示唆している.

#### 5. まとめ

非線形REDによる高スループット化のメカニズムを解明するための第一歩として, ルータ内の平均キュー長に注目した1次元離散非線形REDモデルを提案した. まず, NS-2を用いて接続台数に対する帯域利用率を計算し, 接続台数に対してネットワークの負荷が増加することを確認した. 次に, 接続台数および非線形特性の強度に対する平均キュー長の時系列波形について, NS-2および提案モデルの計算結果を比較し, 提案モデルの高い再現性を示した. 最後に, 非線形特性の強度に対する固定点解析を行い, 非線形特性に対して平均キュー長は単調増加することを数学的に保証したことは, 重要な学術的知見である. 今後, ウィンドウ幅を状態変数に加えた2次元離散非線形REDモデルを提案することで, より詳細な解析を進める.

#### 参考文献

- [1] K. Nichols and J. Van, "Controlling queue delay," Communications of the ACM, vol. 55, no. 7, pp. 42-50, 2012.
- [2] S. Floyd and J. Van, "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 1, no. 4, pp. 397-413, 1993.
- [3] S. Ha, R. Injong, and X. Lisong, "Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant," ACM SIGOPS operating systems review, vol. 42, no. 5, pp. 64-74, 2008.
- [4] S. Floyd, G. Ramakrishna, and S. Scott, "Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management," <http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf>, 2001.
- [5] K. Zhou, K. L. Yeung, and V. O. Li, "Nonlinear RED: A simple yet efficient active queue

- management scheme,” *Computer Networks* 50, pp. 3784–3794, 2006.
- [6] A. M. Alkharasani, M. Othman, A. Abdullah, and K. Y. Lun, “An Improved Quality-of-Service Performance Using RED’s Active Queue Management Flow Control in Classifying Networks,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 24467–24478, 2017.
- [7] 西内悠祐, 上田哲史, 太田能, “非線形曲線を導入したネットワークルータにおける輻輳制御,” *電子情報通信学会信学技報*, vol. 104, no. 584, pp. 43–48, 2005.
- [8] S. McCanne and S. Floyd, “NS2 network simulator,” <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [9] 加藤海渡, 加藤秀行, 伊藤大輔, 高坂拓司, “指数特性を持つパケット破棄確率を用いたTCP/RED について,” *電子情報通信学会技術報告*, vol. 120, no. 330, NLP2020-50, pp. 54–57, 2021.
- [10] Z. Hussain, A. Ghulam, and H. Zahid, “A Lightweight Fairness-Driven AQM for Regulating Bandwidth Utilization in Best-Effort Routers,” *Journal of Network and Systems Management*, vol. 26, no. 2, pp. 486–517, 2018.
- [11] N. Sharma, S. S. Rajput, A. K. Dwivedi, and M. Shrimali, “P-RED: probability based random early detection algorithm for queue management in MANET,” *Advances in Computer and Computational Sciences*, Springer, pp. 637–643, 2018.