信州大学工学部

学士論文

不規則に到着するパケットに対する伝送システムの設計

指導教員　西新 幹彦 准教授

学科　電気電子工学科
学籍番号　04T2096D
氏名　森田 圭一

平成 20 年 3 月

目次

1　序論

1.1　研究の背景

従来情報理論ではランダムな間隔でシンボルを発生する情報源を考えてこなかった. システムへの到着時刻がランダムな場合は情報源を符号化することで円滑にパケットが流れると仮定してきた. しかし, この場合遅延の分析を行うことは不可能である. 一方で, ネットワーク理論ではこれらの問題を処理することが可能であるが, 通信路のモデルが複雑になり, またノイズを無視することになる. よってこれらの問題に対処するために, 情報理論とネットワーク理論を組み合わせるという考え方が必要である.

2006 年に Stephane Musy 氏と Emre Telatar 氏がランダムな間隔でシンボルを発生する情報源に対し最適な送信方法を示した [1]. ここで, 最適とはパケットの遅延が最も小さくなる送信方法のことを指す. また, その方法を用いて理論的なパケットの平均遅延の下界を示した. しかし彼らは十分にバッファが大きいということを前提条件としていて, 具体的に必要となるバッファの大きさを明らかにはしなかった. そこで, 本研究では伝送システムの設計に関してバッファの大きさの設計という観点からアプローチを行う. つまり, ランダムな間隔でシンボルを発生する情報源に対し, 到着レートと送信レートが与えられている下でそれらとバッファとの関係を明らかにする.

1.2　研究の目的

本論文では, 彼らが示した送信方法を用いてバッファ溢れが起こらないようなバッファの大きさの設計を行う. また, 理論的なパケットの遅延の下界が明らかになっているので, 実際にシミュレーションを行ってその下界を検証する.

1.3　本論文の構成

本論文では次のような構成をとる. 第 2 章では, 本論文で使用する諸概念について述べる. 第 3 章では, 本研究におけるシステムのフレームワークを紹介し, 第 4 章では, 不規則に到着するパケットの最適な送信ポリシーを紹介する. 第 5 章では, そのポリシーを用いて伝送システムの設計方法

の提案を行う. 第 6 章では, パケットの遅延に関する考察を行う. そして, 第 7 章で結論を述べる.

2 実験原理

2.1 ポアソン分布

一般的に $\lambda > 0$ として, 非負整数上の分布

$$P(X = x) = e^{-\lambda}\frac{\lambda^x}{x!} \tag{1}$$

をパラメータ λ のポアソン分布という [2].

2.2 ポアソン到着

不規則に到着するパケットのモデルとして本研究では, ポアソン到着に従って到着するパケットを考える. ここで, ポアソン到着とはポアソン過程に従う到着のことである. 各々が自然数をとる確率変数 $\{A(t)|t \geq 0\}$ は, 以下の条件を満たすとき, パラメータ λ のポアソン過程と呼ばれる.

1. $A(t)$ は $[0, t]$ までに到着したパケットの合計を示すもので, $s < t$ のとき,$A(t) - A(s)$ は時間 $(s, t]$ で到着したパケット数を示す. また,$A(0) = 0$ である.

2. 与えられた区間で起こる到着数は, それと重複しない他の区間で起こる到着数に対して独立である.

3. 任意の時刻 t から, 長さ τ の区間における到着数の確率は

$$P\{A(t+\tau) - A(t) = n\} = e^{\lambda\tau}\frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2... \tag{2}$$

で表され, これはパラメータ $\lambda\tau$ のポアソン分布である.

図 1 はパラメータ P を変化させたときのポアソン分布をグラフに表した図である.

2.3 指数分布

一般的に $\lambda > 0$ として, 非負実数上の密度分布

$$P(X = x) = \lambda e^{-\lambda x} \tag{3}$$

をパラメータ λ の指数分布という [2].

また, ポアソン到着するパケットの到着間隔は指数分布に従うといえる.

図 2 はパラメータを変化させたときの指数分布を表した図である.

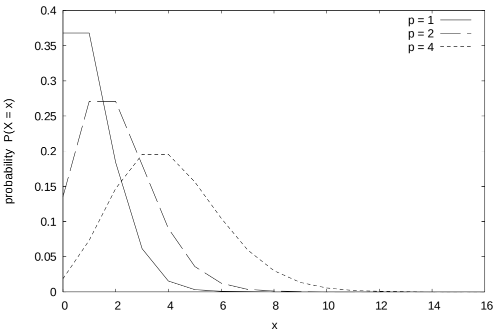

図 1: ポアソン分布

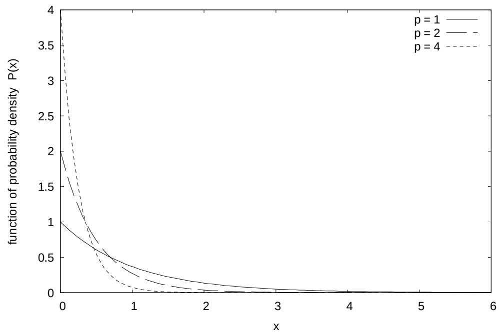

図 2: 指数分布

2.4 リトルの定理

リトルの定理とは, 定常状態におけるシステム内のパケットの個数とシステム内にいる時間との関係を示したものである. ここでは, その二つの値の意味をより明確にし, そこからリトルの定理を導く.

まず時間が $t = [0, \infty)$ におけるシステムを考え, 時間に関するさまざまな量を定義する.

$N(t)$: 時刻 t においてシステム内にいるパケットの個数 [packet]

$\alpha(t)$: $[0, t]$ でシステムに到着したパケットの個数　[packet]

$\beta(t)$: $[0, t]$ でシステムから送信されたパケットの個数　[packet]

T_i : i 番目に到着した客がシステム内にいる時間　[sec]

まず, 時間 $[0, t]$ の平均到着率は

$$\lambda_t = \frac{\alpha(t)}{t} \tag{4}$$

と表される. λ_t を定常状態で表すと

$$\lambda = \lim_{t \to \infty} \lambda_t \tag{5}$$

となる. また, 時刻 t までのパケットがシステム内にいる時間の平均は

$$T_t = \frac{\sum_{i=0}^{\alpha(t)} T_i}{\alpha(t)} \tag{6}$$

で表される. T_t を定常状態で表すと

$$T = \lim_{t \to \infty} T_t \tag{7}$$

となる.

次に, 時刻 t においてシステム内のパケットが $N(t) = 0$ とするとき, 各パケットがシステム内に滞在する時間の総数は, 微小時間を τ として

$$\int_0^t N(\tau) d\tau = \sum_{i=1}^{\alpha(t)} T_i \tag{8}$$

で表される. (8) 式から平均滞在時間は

$$\frac{1}{t} \int_0^t N(\tau) d\tau = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{\alpha(t)} T_i = \frac{\alpha(t)}{t} \frac{\sum_{i=1}^{\alpha(t)} T_i}{\alpha(t)} \tag{9}$$

と表される. ここで, 左辺を時刻 t までのシステム内の平均パケット数 N_t とすると

$$N_t = \lambda_t T_t \tag{10}$$

が得られる.

次に,$N(t) > 0$ ならば

$$\sum_{i=1}^{\beta(t)} T_i \leq \int_0^t N(t) dt \leq \sum_{i=1}^{\alpha(t)} T_i \tag{11}$$

が成り立ち, 上式を変形して

$$\begin{aligned} \frac{\beta(t)}{t} \sum_{i=1}^{\beta(t)} \frac{T_i}{\beta(t)} &\leq N_t \leq \frac{\alpha(t)}{t} \sum_{i=1}^{\alpha(t)} \frac{T_i}{\alpha(t)} \\ \frac{\beta(t)}{t} \sum_{i=1}^{\beta(t)} \frac{T_i}{\beta(t)} &\leq N_t \leq \lambda_t T_t \end{aligned} \tag{12}$$

を得る.

ここで定常状態のとき,$\lim_{t \to \infty} \frac{\beta(t)}{t} = \lambda$ と $\lim_{t \to \infty} \frac{\sum_{i=1}^{\beta(t)} T_i}{\beta(t)} = T$ と仮定すると, はさみうちの原理より

$$\lim_{t \to \infty} N_t = N = \lambda T \tag{13}$$

を得る.

(13) 式を「リトルの定理」と呼ぶ.

3　システムのフレームワーク

システム全体のフレームワークを紹介する. システムはランダムな間隔でパケットを発生する情報源と伝送システム, 通信路, 受信機によって構成される. また, 伝送システムは二つの機能に分けることができる. パケットを蓄えるバッファと, バッファに蓄えられたパケットを通信路へ送信する送信機である. 本研究では, この二つに分かれた伝送システムに注目する. 情報源から, 到着間隔がレート λ の指数分布に従うパケットが伝送システムに到着する. そして, そのパケットはバッファに蓄えられて, 最適な送信方法に基づいて送信機に送られる. 本研究では簡単のため, パケット長は同じで符号化は考えず, パケットの遅延によってシステムの評価を行う. 図 3 は本研究のシステムモデルを表したものである.

ここで, 遅延の定義をする. パケットが送信システムに入ってから出るまでの平均時間を遅延とよび平均遅延は以下の式を満たす.

平均遅延を $\bar{D}$, バッファ内いる時間の平均を $\bar{D}_w$, 送信時間の平均を $\bar{D}_t$ とすると

$$\bar{D} = \bar{D}_w + \bar{D}_t \tag{14}$$

が成り立つ [1].

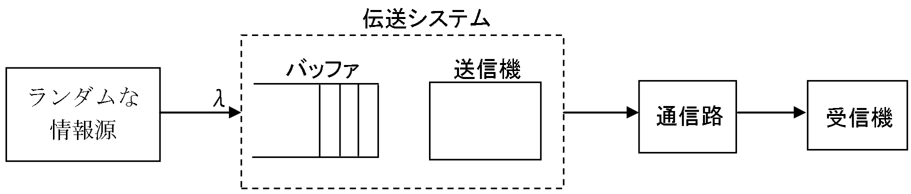

図 3: システムモデル

4　不規則に到着するパケットの対処法

この章では, Stephane Musy 氏と Emre Telatar 氏が示した不規則に到着するパケットに対するバッファや送信機の最適な送信方法を紹介する. 最適な送信方法とは, パケットが送信システムに入ってから出るまで遅延が最も小さくなる方法のことを指す.

まず, n 個のパケットを送信機がまとめて送信するのにかかる時間 $T(n)$ を

$$T(n) = D + nk \qquad [\mathrm{sec}] \tag{15}$$

とする.

この式において $k, D > 0$ である. $1/k$[packet/sec] は通信路の通信路容量である. D は固定遅延とよばれ, 送信機がアイドル状態からパケットを送信するまでのウォーミングアップ時間のことである. 送信機は D が小さいほどウォーミングアップ時間が小さくなるので高性能といえる. 通信路容量が $1/k$ であることから, バッファ溢れを起こさないために到着レート λ は $\lambda < \frac{1}{k}$ を満たす範囲を考える. ここで, 到着レートは指数分布のレートをさす.

一般的に送信時間 $T(n)$ には

$$T(n+m) \leq T(n) + T(m) \tag{16}$$

の関係が成り立つ. つまり, なるべく多くのパケットをまとめて送信するほうが効率はいいということである. しかし, 不規則に到着するパケットに対して Musy 氏と Telatar 氏は, 送信機が現在行っている送信が終わり次第すぐにバッファ内にためられているパケットを送信機に送ることが最適な送信方法であるということを示し, また, この方法におけるパケットの平均遅延の下界が

$$\bar{D} \geq \frac{3}{2}\frac{D}{(1-\lambda k)} \tag{17}$$

で表されることを示した [1].

本研究ではこの送信方法を用いて, 伝送システムの設計を行う.

5 伝送システムの設計方法の提案

前章では不規則に到着するパケットに対する最適な送信方法を紹介した. 本章ではこの送信方法を用いて, 伝送システムの設計方法を提案する. 本研究では, 与えられたパラメータに対してバッファ溢れが起こらないようなバッファの大きさを検討する.

5.1 バッファ内のパケット数のシミュレーション

まず, バッファを十分に大きくとった下でパラメータを $\lambda = 1.0, k = 0.2, D = 100$ に設定する. そして伝送システムにパケットを送り, 最適な

送信方法に基づいてバッファ内に溜められたパケットを送信機へ送り, 伝送システムの外へ送信するというシミュレーションを行う. 伝送システムへ送られるパケット数は 100 万個とし, バッファ内に溜められたパケットの個数をカウントする. ここで, カウントするバッファ内のパケット数は, バッファから送信機に送られる瞬間, つまりバッファ内のパケット数が極大値をとったときの値である.

カウントした結果を図 4 に示す. 図 4 よりパケット数の平均値は 124 で最大値は 169 であった. この例ではバッファ溢れを起こさないためには, バッファの大きさが 169 より大きく設定すればいいということがいえる.

必要なバッファの大きさを求めるために,λ, k, D が与えられたときのバッファ内のパケット数の期待値と標準偏差の関係を明らかにする.

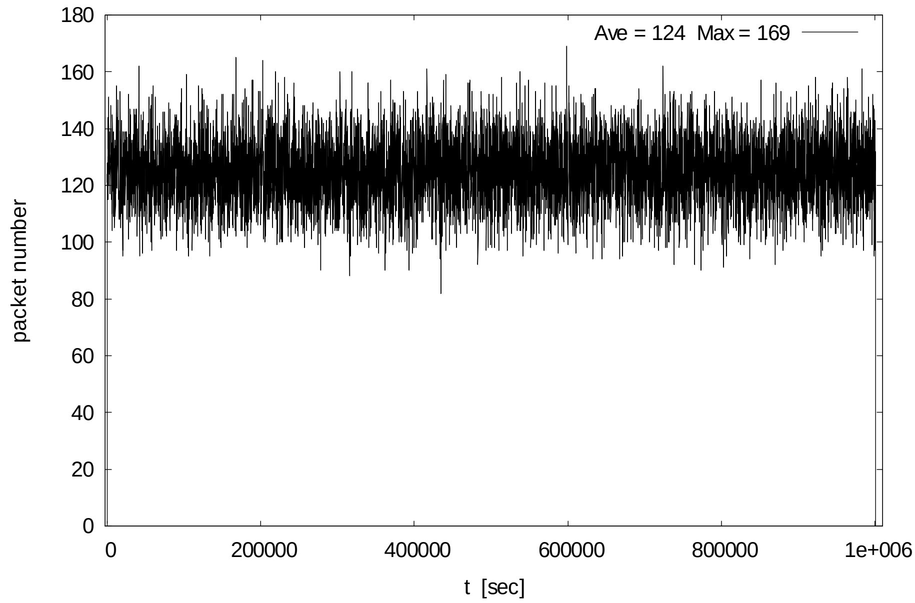

図 4: バッファ内のパケット数の変動 ($\lambda = 1.0, k = 0.2, D = 100$)

5.2 期待値

まず, バッファ内のパケット数の期待値を求める. はじめに, 送信レートを示す. i 番目の送信パケット数が n_i 個あったとすると送信時間は $T(n_i) = D + n_i k$ で表され, 送信レートは $\frac{T(n_i)}{n_i}$ となる. よって, 定常状態における

送信レートは

$$\begin{aligned}\lim_{N\to\infty}\frac{\sum_{i=1}^{N}T(n_i)}{\sum_{i=1}^{N}n_i} &= \lim_{N\to\infty}\frac{\sum_{i=1}^{N}(D+n_ik)}{\sum_{i=1}^{N}n_i}\\ &= \lim_{N\to\infty}\Big(\frac{D}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}n_i}+k\Big) \qquad (18)\end{aligned}$$

となる. バッファ溢れを起こさないためには, 定常状態における送信レートと到着レート λ の間には必ず以下の関係が成り立たなくてはならない.

$$\lim_{N\to\infty}\Big(\frac{D}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}n_i}+k\Big) \leq \frac{1}{\lambda} \qquad (19)$$

ここで, 到着レートと送信レートが平衡状態のときのバッファ内のパケット数の大きさがバッファ内のパケット数の期待値となると考えた. このときのバッファの大きさの期待値 $\bar{B}$ は

$$\bar{B} = \lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}n_i = \frac{\lambda D}{1-\lambda k} \qquad (20)$$

で表されると考えられる.

次に i 番目の送信時間中にバッファ内に溜まるパケット数の期待値を求めて, そこからバッファ内のパケット数の期待値を求める.

まず, 送信機の i 番目の送信について考える. バッファ内にパケットが n_i 個あったとすると, i 番目の送信時間中にバッファ内に溜まるパケット数の期待値 $\bar{n}_{i+1}$ は $\bar{n}_{i+1} = \lambda T(n_i)$ で表される. ここで,$n_{i+1} > n_i$ となる必要十分条件は

$$\bar{n}_{i+1} = \lambda(D+n_ik) \quad > \quad n_i$$

ゆえに

$$n_i < \frac{\lambda D}{1-\lambda k} \qquad (21)$$

で与えられる. このとき $i+1$ 番目に送信するパケット数の期待値 $\bar{n}_{i+1}$ は

$$\begin{aligned}\bar{n}_{i+1} &= \lambda T(n_i)\\ &< \lambda(D+\frac{\lambda D}{1-\lambda k}k)\\ &= \frac{\lambda D}{1-\lambda k} \qquad (22)\end{aligned}$$

となる. 従って

$$n_i < \bar{n}_{i+1} < \frac{\lambda D}{1 - \lambda k} \tag{23}$$

の関係が成り立つ. つまり i 番目の送信パケット数の個数が式 (21) を満たすならば, その次の送信パケット数の期待値は式 (23) を満たす.

次に,$\bar{n}_i$ と $\bar{n}_{i+1}$ の関係を考える.$\bar{n}_{i+1}$ は

$$\begin{aligned}
\bar{n}_{i+1} &= E[n_{i+1}] \\
&= \sum_n E[n_{i+1}|n_i = n] \Pr\{n_i = n\} \\
&= \sum_n \lambda T(n) \Pr\{n_{i+1} = n\} \\
&= \sum_n \lambda(D + nk) \Pr\{n_{i+1} = n\} \\
&= \lambda(D + k\bar{n}_{i+1}) \\
&= \lambda T(\bar{n}_i) \qquad (24)
\end{aligned}$$

の関係が得られる. この式から現在行っている送信パケット数の期待値がわかっていれば次の送信パケット数の期待値も判明するということがわかる.

$\bar{n}_{i+1} > \bar{n}_i$ となる必要十分条件は式 (21) と同様に

$$\bar{n}_i < \frac{\lambda D}{1 - \lambda k} \tag{25}$$

で与えられ, このとき

$$\bar{n}_{i+1} < \frac{\lambda D}{1 - \lambda k} \tag{26}$$

となる. 従って, 常に $n_1 = 1$ が成り立つという事実から, 定常状態における送信パケット数は

$$\lim_{i \to \infty} \bar{n}_i = \frac{\lambda D}{1 - \lambda k} \tag{27}$$

となり送信パケット数の期待値が求まった.

しかし実際のバッファの設計には, 定常状態の期待値だけでなく有限の時間の範囲内でバッファ溢れが起こらないようにバッファの大きさを設計しなければならない. そこでバッファ内のパケット数の標準偏差を求める.

5.3 標準偏差

次にバッファ内のパケット数の標準偏差を求める. しかし, 標準偏差は現段階では期待値を求めたときのように理論的には求まらなかった. よって本論文では, パラメータを変化させてバッファ内のパケット数を求めるシミュレーションを行い, その結果からバッファ内のパケット数の標準偏差を計算する. 図 5,6 のプロット点は $\lambda = 1$ に固定し k, D を変化させたときの標準偏差の計算結果を表したグラフである.

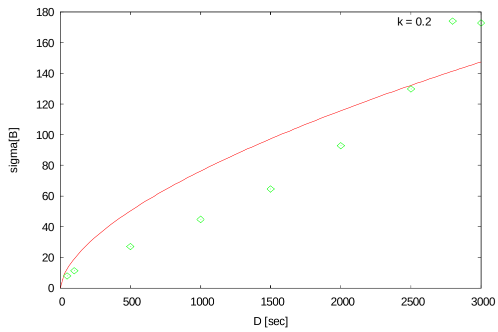

図 5: 標準偏差 (k=0.2)

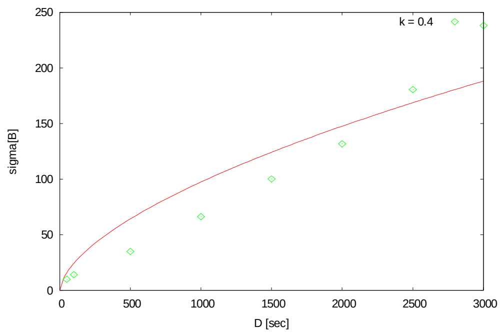

図 6: 標準偏差 (k=0.4)

図 5,6 から λ, k, D に対する標準偏差の関係式を導く. それは変数 λ, k, D から式を作って, その式が図 5,6 の標準偏差の値に近づくように設定する. 本論文ではこの方法によって作成した式を標準偏差の関係式とみなす. その関係式は標準偏差を σ[B] として

$$\sigma[B] = \sqrt{\frac{\lambda D^{1.2}}{(1 - \lambda k)^{1.7}}} \tag{28}$$

で表される. 図 5,6 の実線は式 (28) をプロットした線である.

図 5,6 からもわかるようにこの標準偏差の関係式はシミュレーション結果をうまく近似できなかったので, 次項で用いる標準偏差の値は, シミュレーション結果から計算によって求めた値を用いる.

5.4 バッファの設計

図 7,8 は k, D を設定したときのバッファ内のパケット数の頻度をシミュレーションしたもである. ここで, 到着レートは $\lambda = 1$ でバッファの大き

さは十分に大きく設定した. 上述で求めたバッファの期待値とシミュレーション結果から得た標準偏差を用いて正規分布を描いた実線が, シミュレーション結果を示すプロット点を近似していることから, バッファ内のパケット数の頻度を表す分布は正規分布とみなされる.

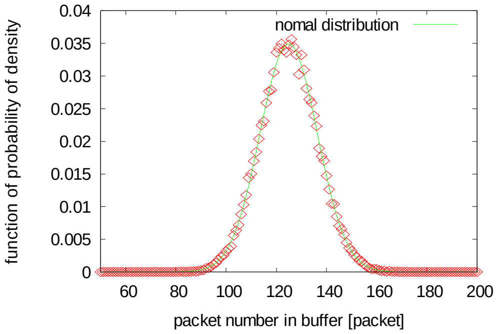

図 7: バッファ内のパケット数の頻度 $(k = 0.2, D = 100)$

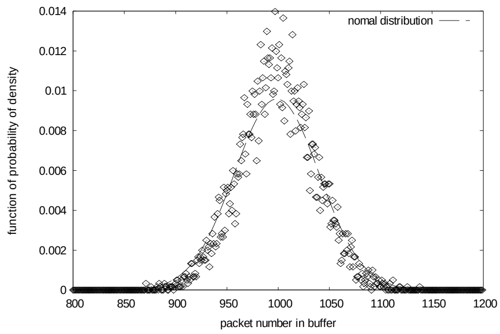

図 8: バッファ内のパケット数の頻度 $(k = 0.5, D = 500)$

よってバッファの大きさは期待値と標準偏差から描かれる正規分布から, 安全性を設けることで設定できる考えた. 安全性とは, バッファの大きさ（グラフの横軸）をある値においたときに, 分布全体の面積に対する $-\infty$ からそのバッファの大きさまでの分布の面積の比率を指す. そこで,90%, 99%, 99.9% の安全性を持つバッファの大きさを設計する. 期待値を μ, 標準偏差を σ とすると正規分布の性質より各安全性に対するバッファの大きさ B は

$$B_{90} = 1.28\sigma + \mu \tag{29}$$

$$B_{99} = 2.33\sigma + \mu \tag{30}$$

$$B_{99.9} = 3.10\sigma + \mu \tag{31}$$

で表される. 上式は期待値と標準偏差から描かれる正規分布を, 定められた安全性に基づいて区間推定を行った式である. 以上より,λ, k, D におけるバッファの設計方法が明らかになった.

図 9 は与えられた $\lambda = 1$ のときの k, D に対する 99% の安全性をもつバッファの大きさを示した例である. 以上より, バッファの大きさ B と λ, k, D の関係が明らかになった.

また, あらかじめバッファの大きさ B が与えられていて,λ, k, D の設計を行うときも提案した式を用いて設計することが可能である.

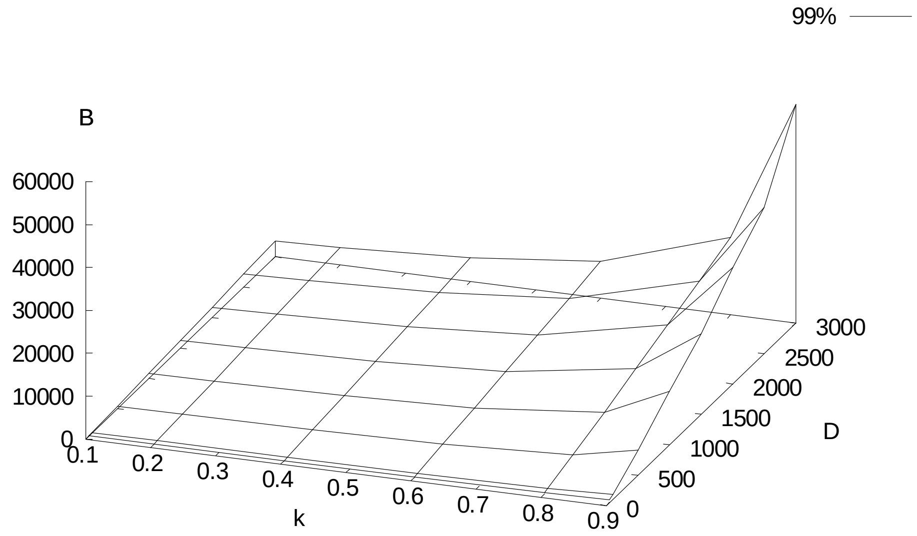

図 9: k-D-B グラフ

6 遅延に関する考察

本章では送信されるパケットの遅延がどのような特性を持つのかをみる. まず, パケットと伝送システムのパラメータ λ, k, D とパケットの遅延の関係を明らかにする. 次に, パケットの遅延の特性を考察する.

6.1 送信システムの性能と時間の関係

まず, 定常状態におけるパケット一個あたりの平均遅延を $\bar{D}[sec/packet]$ で表す. ここで, 平均遅延をシステム内の処理速度 λ, k, D からなる関数とすると, システム内の処理速度と時間は比例関係にあるので以下の関係式が成り立つ.

$$\bar{D}(\frac{\lambda}{\alpha}, \alpha k, \alpha D) = \alpha \bar{D}(\lambda, k, D) \tag{32}$$

ここで,$\lambda = 1$ のときの遅延のときの遅延があらかじめわかっていたとして,$\lambda = \alpha$ のときの遅延を求める. それは $\lambda = \alpha$ のときの遅延を式 (32) から $\lambda = 1$ のときに変換して求める.$\lambda = \alpha$ のときの遅延 $\bar{D}($ α $, k, D)$ は,$\lambda = 1$ のときの遅延を用いて

$$\bar{D}(\alpha, k, D) = \frac{1}{\alpha}\bar{D}(1, \alpha k, \alpha D) \tag{33}$$

と表される. よって遅延の特性をみる場合に $\lambda = 1$ のときだけを調べておけば, 他のレートは上式の変換式から計算可能ということがわかる. よって今後は到着レートを $\lambda = 1$ に固定して, 他のレートの議論は省略する.

6.2 遅延の特性

この節では遅延の特性を示す. パケットの平均遅延の下界は Musy 氏と Telatar 氏によって理論的に示された. そこで, その理論式が正確に特性を表しているのかをシミュレーションによって検証する.

6.2.1 k,D の上界

まずシミュレーションを正確に行うために, バッファ溢れが起きないように送信システムの設計を行う. バッファの大きさを $B = 10000$ としたときに,99% の安全性でバッファ溢れが生じない k, D の上界を示す境界線を式 (30) から求め, 図 10 に示す. 遅延の特性を正確に検証するためにはこの境界線の内側になるように k, D を設定する.

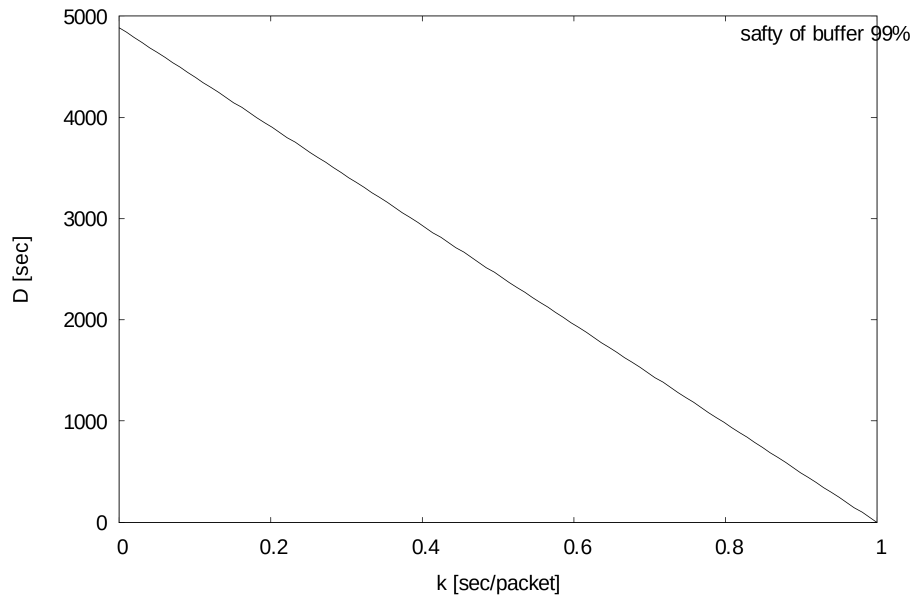

図 10: k-D グラフ

ここで,図10の(k,D)の境界線が必ず$(1,0)$に通ることを証明する.$k>1$のときは,Dのウォーミングアップ時間がどんなに短くても必ず$\lambda k<1$が成り立たなくなる.この場合,送信レートより到着レートのほうが大きくなり,バッファにパケットがたまり続けるので,バッファがいくら大きくてもいずれはバッファ溢れが生じる. $k<1$のとき,Dが大きくてもバッファ溢れは起こらない.なぜなら,パケット一個当たりの送信時間はパケット数を多くすると

$$\lim_{n\to\infty}\frac{D+nk}{n}=\lim_{n\to\infty}\left(\frac{D}{n}+k\right)=k \qquad \text{[sec/packet]} \tag{34}$$

で表され,Dの値に関わらずkの値に近づく.よってバッファが十分に大きければ,$k<1$である限りバッファが溢れることはない. 以上のことから,(k,D)の境界線が必ず$(1,0)$を通る.

6.2.2 遅延の特性

次に遅延の特性を検証する.バッファの大きさは$B=10000$とし,到着レートを$\lambda=1$と設定する.このとき図10で示された境界線の範囲内で(k,D)を設定し,(k,D)におけるパケットの平均遅延$\bar{D}$を計測する.パケット数は1000000であり,平均遅延は算術平均で表す. 図10はシミュレーション結果であり,kをパラメータとしてDを変化したときの平均遅延を表している. 実線は式(17)から求まるパケットの平均遅延の下界である.

シミュレーション結果から平均遅延の値は,理論的に示された平均遅延の下界を示す直線上に乗った.また,数値的にみると平均遅延の下界が平均遅延を上回る点が存在した. よって理論的に式(17)は平均遅延の下界であるが,シミュレーション結果から,平均遅延そのものを表すのではないかと推測できる.

6.2.3 遅延の分布

次に,k,Dを設定したときの,パケットの遅延の分布を図12,13,14,15に示す.図12では,遅延の分布が一箇所に集中した. これは到着レートに対してk,Dの値が小さいので,パケットはバッファ内で待たされずに送信機へ送られるため,遅延は送信時間に依存した結果であると考えられる.図13,14,15はバッファに溜められるので,遅延のばらつきが大きくなった.

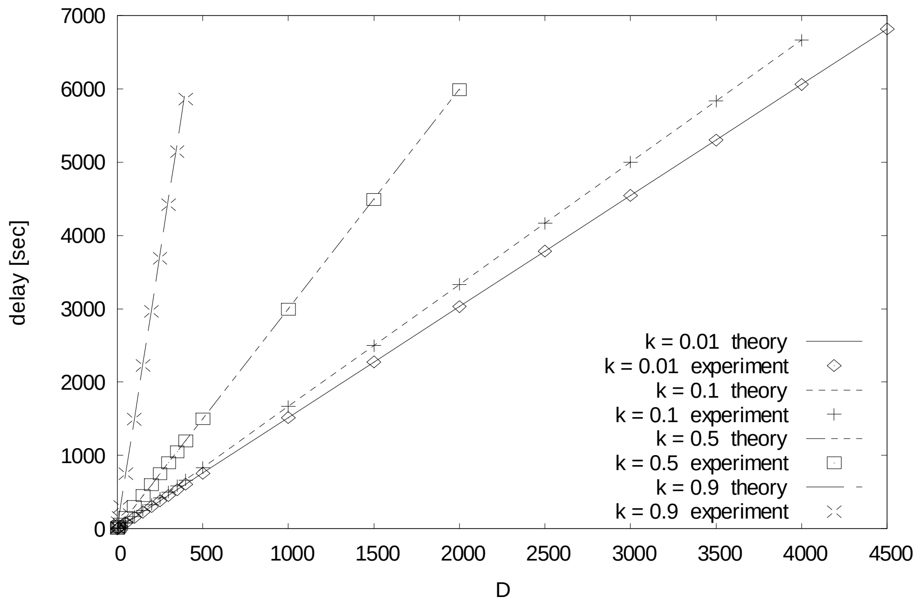

図 11: 遅延特性

7 結論

最適な送信ポリシーに基づいてバッファの設計方法について提案した. 本研究では簡単のためパケット長は同じで, 符号化は考えないので, パケットの到着レートと送信機の性能, 通信路容量の大きさからバッファの大きさを設計した. バッファの設計については, λ, k, D に対するバッファ内のパケット数の期待値と標準偏差の関係式を求め, 正規分布を描くことで, 定められた安全性に対するバッファの大きさを設定した. しかし, 標準偏差はシミュレーション結果を近似することから得ているので, 理論的に求めることが今後の課題として残った. バッファの大きさ B と λ, k, D の関係が明らかになったので, あらかじめバッファの大きさ B が与えられていて,λ, k, D の設計を行うときも提案した式を用いて設計することが可能である.

またパケットの遅延の下界の理論式が明らかになっているので, シミュレーションを行って検証した. 結果として, 平均遅延は理論的に示された平均遅延の下界とほぼ同じ値をとった. また, 数値的にみると平均遅延の下界が平均遅延を上回る点が存在した. よって式 (17) は平均遅延の下界であるが, シミュレーション結果から, 平均遅延そのものを表すのではない

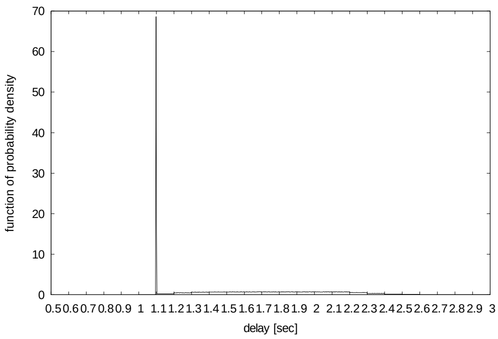

図 12: 遅延の分布 (k=0.1 , D=1)

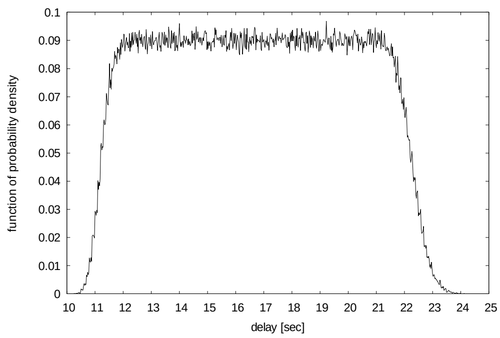

図 13: 遅延の分布 (k=0.1 , D=10)

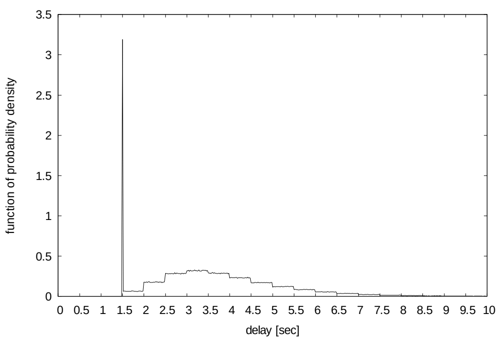

図 14: 遅延の分布 (k=0.5 , D=1)

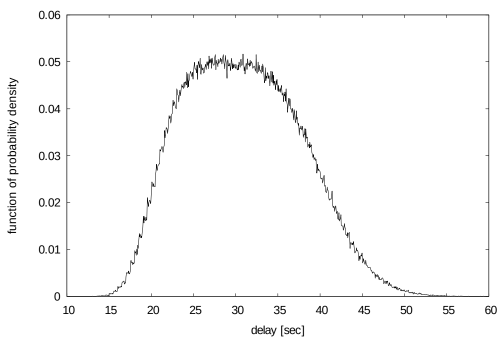

図 15: 遅延の分布 (k=0.5 , D=10)

かと推測できる.

今後の課題としては, 式 (17) が平均遅延そのものであるかどうかを検証すること, またパケットの符号長を変えたり, 符号化を行ったときでも提案したバッファの設計方法どのように活用できるかを考えることが挙げられる.

謝辞

本研究を行うにあたって, 数多くの助言をいただいた西新幹彦先生, 卒論発表の練習の際に助言をいただいた杉村先生に感謝の意を表する.

参考文献

[1] Stephane Musy, Emre Telatar,“On the transmission of bursty sources,” ISIT 2006, pp.2899-2903, 2006.

[2] Dimitri Bertsekas, Robert Galager, *Data Netwarks,* Prentice Hall, 1987.