

異なる CPU 処理能力を持つリアルタイム通信システムの平均応答時間と入力トラヒック

陳 紅 兵[†] 木 村 成 伴^{††} 海老原 義彦^{††}

異なる CPU 処理能力を持つヘテロジニアスな通信システム環境で、階層型プロトコル構成の多対多通信システムにおける平均応答時間と入力トラヒックの関係を解析的に求めた。具体的には、リアルタイム通信処理を満たす平均応答時間の上限値が与えられたとき、通信システムの最大トラヒック量と各ノードの入力トラヒック量の関係式を求めている。さらに、平均応答時間の上限値と入力トラヒック量の関係を述べている。

Mean Response Time and Traffic in Real-time Communication System with Different CPU Processing Time

HONGBING CHEN,[†] SHIGETOMO KIMURA^{††} and YOSHIHIKO EBIHARA^{††}

The maximum traffic capacity of multi-point communication has been studied in the condition of a heterogeneous environment of the real-time communication system with different CPU processing time. The communication system has a hierarchical protocol structure. When the upper limit of a mean response time is given, the relationship between the maximum input traffic and the input traffic of each node has been derived theoretically. Furthermore, the relationship between the maximum input traffic and the constrained response time has also been discussed in this paper.

1. ま え が き

マルチメディアを取り扱うリアルタイム通信環境では、応答時間が重要となる^{1)~5)}。特に、通信システムに流入するトラヒックが増加すると、応答時間が劣化してリアルタイム通信が困難になる場合がある^{6),7)}。これに対処する1つの方法は、リアルタイム通信システムに流入するトラヒック量を抑えて、応答時間の上限値を保証することである。

リアルタイム通信処理の環境で、上限平均応答時間以下に保つには、どの程度まで流入トラヒックを許したらよいかシステム設計パラメータの重要な一要因となる。ただし、平均応答時間の上限値をここでは、上限平均応答時間と呼ぶ。すなわち、ユーザーから要求された上限平均応答時間以下に保つという制約条件がある場合、この制約条件を満たす最大流入トラヒック

量を求める問題となる。

先の論文⁸⁾では、同機種からなるホモジニアスな環境での上限平均応答時間と入力トラヒック量の関係を求めた。本論文では、CPU 処理能力の異なるヘテロジニアスな通信ノードからなり、階層型プロトコル構成の多対多通信システムを対象とする。先の論文で得られた平均応答時間算出式をもとにして、平均応答時間の上限値が与えられたときの通信システムの最大容量を求めた。また、通信システムの最大流入トラヒック量と各ノードの入力トラヒック量の関係式を解析的に求めている。

以下、2章では通信システムのモデル化と諸定義を述べる。3章では最大通信システム容量について具体的に算出を行っている。4章では、上限平均応答時間の数値例を示している。5章では、得られた結果について考察および評価を行う。

2. 通信システムのモデル化と諸定義

対象とする通信システムは CPU 処理能力の異なる M 個の異種ノードからなるヘテロジニアスな階層型システム構成をとるものとする。また、各階層のプロトコル機能を処理する単位をモジュールと呼ぶことに

[†] 筑波大学大学院理工学研究科

Master's program in Sciences and Engineering,
Tsukuba University

^{††} 筑波大学電子・情報工学系

Institute of Information Sciences and Electronics,
Tsukuba University

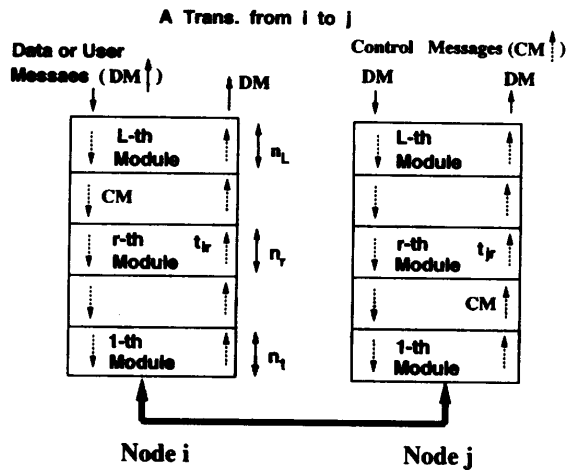


図1 トランザクションの例
Fig. 1 An example of a transaction.

する。通信システムは L 階層のモジュールからなるものとする (図1参照)。図1は TSS 処理に見られるようなインタラクティブ処理の流れを表している。ユーザメッセージまたはデータメッセージがノード i から送信され、ノード j からはその応答メッセージが返される。この一連の流れをここではトランザクションと呼ぶ。トランザクションが発生すると、通信システムはプロトコルに従った制御メッセージが送受しながら、1つのトランザクションを処理する。

本論文で扱う通信システムは図2に示すように各ノード間で多対多のトランザクション通信を行う。トランザクションの到着はポアソン分布に従う。図中の λ_{ij} はノード i からノード j をアクセスしているトランザクションの平均到着率を示している。ノード内は階層型プロトコルからなり、一般に L 階層モジュール構成をとる。図3に r 階層モジュールのモデルを示す。各モジュールは3種類の制御メッセージを取り扱う。その内容は上位層から来る制御メッセージと下位層から上がってくる制御メッセージと r モジュールが生成する制御メッセージである。ただし、最上位の L 階層モジュールでの上位から来る制御メッセージとは、ユーザメッセージまたはデータメッセージを指す。各モジュールでの制御メッセージ処理時間は指数サービスとし、到着は制御メッセージ数を考慮した平均到着率を持ったポアソン到着に従う。

以上のような考えのもとで、先の論文⁹⁾では、直列型 $M/M/1$ 待ち行列をもとに、階層型プロトコルを持つ通信システムにおける多対多通信システムの平均応答時間を求めた。その解析結果を式(1)に示す。また、他の論文¹⁰⁾ではノード数が2個や3個の場合における実システムの測定値との比較により、近似的で

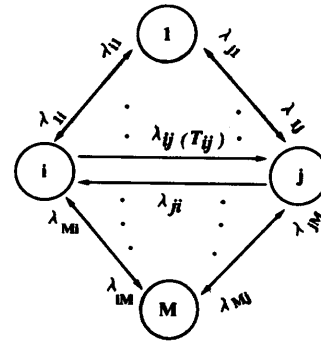


図2 多対多通信システム構成図
Fig. 2 The structure of a communication system.

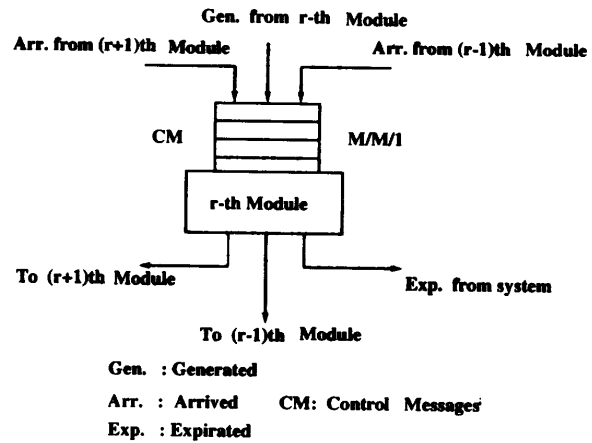


図3 r 階層で取り扱う制御メッセージ
Fig. 3 Control messages in the r -th module.

はあるが解析結果の平均応答時間が実測値と合うことが示された。

式(1)に使用されているパラメータについて説明する。

- T : 1個のトランザクションが通信システムを往復する系全体の平均通過時間、すなわち平均応答時間。
- T_{ij} : ノード i からノード j をアクセスするトランザクションの平均応答時間。
- λ_{ij} : ノード i からノード j をアクセスするトランザクションの平均到着率。
- n_k : 1回のトランザクションに対して、第 k 階層モジュールで生成される送受信制御メッセージ数。
- t_{ir} : ノード i の第 r 階層モジュールの平均メッセージ処理時間。

算出方法の詳細は先の論文に譲ることにする。結論として、 T は次式となる。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} T_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \lambda_{ij}} \quad (1)$$

ただし, T_{ij} は次式で表される.

$$T_{ij} = 2 \sum_{r=1}^L \sum_{k=r}^L n_k \left[\frac{t_{ir}}{1 - \sum_{k=r}^L n_k t_{ir} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} + \frac{t_{jr}}{1 - \sum_{k=r}^L n_k t_{jr} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} \right] \quad (2)$$

また, $M \geq 2, \lambda_{ii} = 0$ とする.

3. 最大通信システム容量

ここでは, 通信システム全体の平均応答時間の上限値 t が与えられたとき, この上限値を満たす入力トラヒックの関係を求める. すなわち, 通信システムに流入するトラヒック量をトラヒック率で表し, 総トラヒック率が最大になる条件を求める.

まず, 式 (2) の $n_k t_{jr}$ を次式の a_{ir} で置き換える.

$$\sum_{k=r}^L n_k t_{ir} = a_{ir} \quad (3)$$

a_{ir} はノード i の第 r 層の取り扱う総メッセージを処理するモジュール処理時間である.

本論文では各階層のモジュールの処理時間が等しい場合について解析する. このことは, 通信システムが最大処理能力を発揮するシステム構成の場合を取り扱う¹¹⁾. すなわち, この通信システムの最大処理能力下での上限平均応答時間を満たす入力トラヒック量を求める問題であり, 求めた入力トラヒック量はその通信システムの取り扱える上限を示している.

以下の解析ではノードの各階層のモジュール処理時間は等しいものとする. これを a_i で表すと,

$$a_{i1} = a_{i2} = \cdots = a_{iL} = a_i \quad (4)$$

また, ノード j の CPU の処理能力はノード i の CPU の処理能力に比べて m_{ij} 倍あるものとし, ノード j のモジュール処理時間 a_{jr} は m_{ij} に反比例するものとする. ゆえに,

$$a_{jr} = \frac{1}{m_{ij}} a_{ir} \quad (5)$$

である. ただし, m_{ij} は正の実数とする. 式 (2) を a_{ir} で表すと,

$$T_{ij} = 2 \sum_{r=1}^L \left[\frac{a_{ir}}{1 - a_{ir} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} + \frac{a_{jr}}{1 - a_{jr} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} \right] \quad (6)$$

となる.

これを式 (1) に代入して, まとめると次式となる.

$$T = 2 \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left[\frac{a_{ir} \lambda_{ij}}{1 - a_{ir} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} + \frac{a_{jr} \lambda_{ij}}{1 - a_{jr} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} \right] / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \quad (7)$$

[] 内の分母に $\left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)$ を共有する項どうしを求めると, 式 (7) は次式となる.

$$T = 2 \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \left[\frac{a_{ir} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)}{1 - a_{ir} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right)} \right] / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \quad (8)$$

λ_i をノード i に対する流入・流出するトラヒックとすると, 以下のそれぞれは,

$$\begin{aligned} \left(\sum_{j=1}^M \lambda_{ji} + \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \right) &= \lambda_i \\ 2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \lambda_{ij} &= \lambda_i \end{aligned} \quad (9)$$

となるので, 式 (1) は次のように表せる. 以下, λ_i を単に流入トラヒックと呼ぶ.

$$T = \frac{4 \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \frac{a_{ir} \lambda_i}{1 - a_{ir} \lambda_i}}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (10)$$

さらに, 式 (4) の条件を代入して, 整理すると次式と

なる。

$$T = \frac{4L \sum_{i=1}^M \frac{a_i \lambda_i}{1 - a_i \lambda_i}}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (11)$$

ただし, $a_{\max} = \max(a_1, a_2, \dots, a_M)$ とすると, 上式が成立する λ_i の範囲は

$$0 \leq \lambda_i < 1/a_{\max} \quad (12)$$

である。次に Lagrange の方法により, 平均応答時間が与えられた上限値 t ($T \leq t$) を満たす条件のもとで, 流入トラヒック量,

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \lambda_i \quad (13)$$

が最大となる $\bar{\lambda}$ と t の関係式を求める。 $\bar{\lambda}$ は λ_i に対して, 単調増加関数である。ここで,

$$\begin{cases} t = T \\ F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \lambda_i + \rho \left[t - 4L \sum_{i=1}^M \frac{a_i \lambda_i}{1 - a_i \lambda_i} / \sum_{i=1}^M \lambda_i \right] \end{cases} \quad (14)$$

とおく。ただし, ρ は未定係数である。 ρ および λ_i に関して偏微分する。 $\partial F / \partial \rho = 0$ から,

$$t = \frac{4L \sum_{i=1}^M \frac{a_i \lambda_i}{1 - a_i \lambda_i}}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (15)$$

が得られる。 $\partial F / \partial \lambda_i = 0$ から,

$$\frac{a_i}{(1 - a_i \lambda_i)^2} = \frac{1}{8L\rho} \sum_{i=1}^M \lambda_i + \frac{t}{4L} \quad (16)$$

であるので, ゆえに, $\forall i, j$ に対して,

$$\frac{a_i}{(1 - a_i \lambda_i)^2} = \frac{a_j}{(1 - a_j \lambda_j)^2} \quad (17)$$

が成り立つ。

$a_i = m_{ij} a_j$ を上式に代入し, 上式の両辺の平方根をとると,

$$\frac{\sqrt{a_i}}{1 - a_i \lambda_i} = \frac{\sqrt{\frac{a_i}{m_{ij}}}}{1 - \frac{a_i}{m_{ij}} \lambda_j}$$

となり, λ_j は,

$$\lambda_j = \frac{1}{a_i} (m_{ij} - m_{ij}^{\frac{1}{2}}) + m_{ij}^{\frac{1}{2}} \lambda_i \quad (18)$$

となる。上式よりすべてのノード j について λ_j の和を求めると,

$$\sum_{j=1}^M \lambda_j = \frac{1}{a_i} \left(\sum_{j=1}^M m_{ij} - \sum_{j=1}^M m_{ij}^{\frac{1}{2}} \right) + \lambda_i \sum_{j=1}^M m_{ij}^{\frac{1}{2}}$$

となる。

$$\sum_{j=1}^M m_{ij} = m_i, \quad \sum_{j=1}^M m_{ij}^{\frac{1}{2}} = s_i \quad (19)$$

とおくと, 上の式は

$$\sum_{j=1}^M \lambda_j = \frac{1}{a_i} (m_i - s_i) + s_i \lambda_i \quad (20)$$

となる。また,

$$\frac{\sqrt{a_j}}{1 - a_j \lambda_j} = \frac{\sqrt{a_i}}{1 - a_i \lambda_i} \quad (21)$$

から,

$$\frac{1}{1 - a_j \lambda_j} = m_{ij}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 - a_i \lambda_i}$$

となるので, 総和をとると,

$$\sum_{j=1}^M \frac{1}{1 - a_j \lambda_j} = \frac{s_i}{1 - a_i \lambda_i}$$

である。また, 次式の右辺は以下のように変形できるので,

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^M \frac{a_j \lambda_j}{1 - a_j \lambda_j} &= \sum_{j=1}^M \left(\frac{1}{1 - a_j \lambda_j} - 1 \right) \\ &= \frac{s_i}{1 - a_i \lambda_i} - M \end{aligned} \quad (22)$$

となる。上式と式 (20) を式 (15) に代入して, 整理すると,

$$t = 4L \frac{a_i}{1 - a_i \lambda_i} \times \frac{s_i - M(1 - a_i \lambda_i)}{m_i - s_i(1 - a_i \lambda_i)} \quad (23)$$

となる。式 (21) から,

$$\frac{\sqrt{a_j}}{1 - a_j \lambda_j} = \frac{\sqrt{a_i}}{1 - a_i \lambda_i} = \frac{1}{K} \quad (24)$$

とおくと, λ_i の範囲は $0 \leq \lambda_i < 1/a_i$ であるので, $1/K \geq \sqrt{a_i}$ となる。すなわち, $K \leq 1/\sqrt{a_i}$ である。式 (12) を考慮すると, K の許される範囲は次式となる。

$$0 < K \leq \frac{1}{\sqrt{a_{\max}}} \quad (25)$$

$(1 - a_i \lambda_i) = K \sqrt{a_i}$ を式 (23) に代入して, K で展開すると,

$$s_i \sqrt{a_i} t K^2 - (4L M a_i + m_i t) K + 4L \sqrt{a_i} s_i = 0 \quad (26)$$

この 2 次方程式の判別式 Δ_K を計算すると、以下の
ような t の 2 次式 $f(t)$ になる。

$$f(t) = \Delta_K = m_i^2 t^2 + 8La_i(Mm_i - 2s_i^2)t + 16L^2 M^2 a_i^2$$

$f(t)$ に関してもう一度判別式 Δ_t を計算すると、次の
式になる。

$$\Delta_t = 256L^2 s_i^2 a_i^2 (s_i^2 - Mm_i)$$

$s_i^2 \leq Mm_i$ (等号は $\sqrt{m_{ij}} = m_{ij}$ の場合だけ成り
立つ) なので、つねに $f(t) \geq 0$ である。ゆえに、式
(26) は k_1, k_2 の 2 つの実数根を持つ。2 次方程式の
性質から、両根とも正である。式 (26) から、

$$k_1 + k_2 = \frac{4LM\sqrt{a_i}}{s_i t} + \frac{m_i}{s_i \sqrt{a_i}} \quad (27)$$

$$k_1 \times k_2 = \frac{4L}{t} \quad (28)$$

となる。相加平均と相乗平均の大小関係と $s_i^2 \leq Mm_i$
の関係式から、式 (27) は、

$$\begin{aligned} \frac{4LM\sqrt{a_i}}{s_i t} + \frac{m_i}{s_i \sqrt{a_i}} &\geq 2\sqrt{\frac{4L}{t} \frac{Mm_i}{s_i^2}} \\ &\geq 2\sqrt{\frac{4L}{t}} \end{aligned} \quad (29)$$

$0 < k_1 \leq k_2$ とすると、 $k_1 < \sqrt{4L/t}$ 、 $k_2 \geq \sqrt{4L/t}$
でなければならない。式 (25) と式 (28) から、

$$\frac{4L}{t} \leq \frac{1}{a_{\max}}$$

である。ゆえに、

$$k_1 < \frac{1}{\sqrt{a_{\max}}} \quad (30)$$

である。ゆえに k_1 は式 (25) の許される範囲に納まる。

式 (26) は任意の i に関しても成立するので、 $a_k = a_{\max}$
のような k を選ぶと、 $\forall j$ に対して、

$$m_{kj} = \frac{a_k}{a_j} \geq \sqrt{\frac{a_k}{a_j}} \geq 1 \quad (31)$$

が成り立つので、 $m_k = \sum_{j=1}^M m_{kj}$ と $s_k = \sum_{j=1}^M m_{kj}^{\frac{1}{2}}$ から

$$m_k \geq s_k \geq M \quad (32)$$

が成立する。 $K = 1/\sqrt{a_k}$ を式 (26) に代入して、関
数の正負を判定する。

$$\begin{aligned} f\left(\frac{1}{\sqrt{a_k}}\right) &= \frac{1}{\sqrt{a_k}} [t(s_k - m_k) \\ &\quad + 4La_k(s_k - M)] \\ &\leq 4L\sqrt{a_k} [2s_k - (M + m_k)] \\ &\leq 0 \end{aligned}$$

ただし、等号は $t = 4La_k$ かつ $a_1 = a_2 = \dots = a_m$
のとき成り立つ。

$$f(k_1) = f(k_2) = 0$$

また、 $k_1 < 1/\sqrt{a_k}$ と $f(1/\sqrt{a_k}) \leq 0$ から、

$$k_2 > \frac{1}{\sqrt{a_k}} \quad (33)$$

である。式 (25) によって、 k_2 は求める解ではない。
よって、ノード i に流入するトラヒックの最大量 λ_i
は

$$\lambda_i = \frac{1 - k_1 \sqrt{a_i}}{a_i} \quad (34)$$

となる。ただし、 k_1 は式 (26) の解の小さい方で、次
式となる。

$$k_1 = \frac{4LMa_i + m_i t - \sqrt{\Delta_K}}{2s_i \sqrt{a_i} t} \quad (35)$$

4. 上限平均応答時間の数値例

ここでは、上限平均応答時間とノードのトラヒック
量との関係について、具体的数値例を示す。式 (34)
はプロトコル階層数 L 、ノード数 M 、各ノードのモ
ジュール処理時間 a_i からなるシステムでは、平均応答
時間の上限値 t が与えられたとき、ノードに流入でき
るトラヒックの最大値を表している。図 4 は $L = 4$ 、
 $M = 3$ 、 $a_1 = 2$ ms、 $a_2 = 2.5$ ms、 $a_3 = 3$ ms の場
合の上限平均応答時間とノードのトラヒック量の関係
を示している。通信システムの平均応答時間を、たと
えば、150 ms にした場合、1 秒あたりノード 1 は約
380、ノード 2 は約 300、ノード 3 は約 240 トランザ
クションとなり、この値を超えない範囲でトラヒック
の入力を制御する必要がある。一般に、平均応答時間
の上限値が比較的小さい範囲では、各ノードに流入す
るトラヒック量はモジュールの処理時間、ノード数お
よびプロトコル階層数に影響される。一方、平均応答
時間の上限値が大きくなり、ノード自身の処理能力の

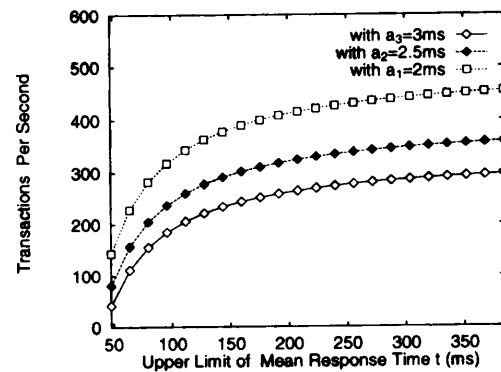


図 4 平均上限応答時間付き各ノードの最大トラヒック

Fig. 4 Maximum traffic input v.s. upper limit of response time.

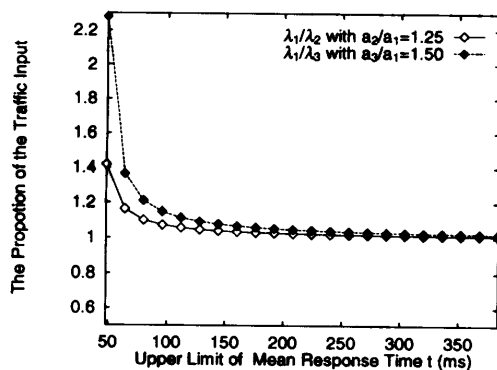


図5 ノード間の最大トラフィック比率と上限平均応答時間
Fig.5 Proportion of the maximum traffic input of nodes and the module processing time v.s. upper limit of mean response time.

限界 $1/a_i$ に近づくに従って、流入するトラフィックは飽和してゆく。このことは、ノードに流入する多少のトラフィック変動に対して、大きく平均応答時間の上限値が変わらないことを意味している。

各ノードに流入する最大トラフィック量とCPUの処理能力との関係について考える。ノード1に対するノード2とノード3に流入するトラフィックの比をそれぞれ $(\lambda_1/\lambda_2, \lambda_1/\lambda_3)$ とする。また、CPUの処理能力の比を $(a_2/a_1, a_3/a_1)$ とする。このとき、 $((\lambda_1/\lambda_2)/(a_2/a_1))$ または $((\lambda_1/\lambda_3)/(a_3/a_1))$ と平均応答時間 t の関係を求めたのが、図5である。一般に、トラフィック比は、つねにCPU処理能力比より大きいことが分かる。 t が比較的小さい場合、流入トラフィック比とCPU処理能力比の割合に差ができるが、 t が大きくなるにつれて、CPU処理能力の比に収束する。すなわち、 t が大きい値をとったときは、各ノードに流入するトラフィックはほぼCPU処理能力に比例することが分かる。

5. ま と め

CPU能力の異なるヘテロジニアスな通信システム環境で、かつ、各階層のモジュール処理時間が同じという条件下で、通信システムの最大流入トラフィック量を求めた。すなわち、モジュール処理時間と各ノードのCPU処理能力、上限平均応答時間 t が与えられたときの最大流入トラフィックを解析的に求めた。一般に、通信システムにおいて相手のトラフィック状況を正確に把握し、システム全体の流入トラフィックを制御するのは困難である。しかし、式(34)は上記の条件が与えられたとき、ノード単位で独立にトラフィックを制御できることを示しており、この式を超えない範囲で入力を制御すれば、所定のリアルタイム処理環境を保てることを示している。

謝辞 本論文を遂行するにあたり、研究室の皆様から適切なアドバイスを受けましたことを深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Stalling, W.: Local Networks, *Computing Surveys*, Vol.16, No.1, pp.3-41 (1984).
- 2) Bertsekas, N. and Gallager, R.: *Data Networks*, pp.429-438, Prentice-Hall (1987).
- 3) Mitchell, L.C.: A Methodology for Predicting End-to-end Responsiveness in a Local Area Network, *Proc. Computer Networking Symposium*, pp.83-91 (1981).
- 4) 稲井, 西田, 宮原: 待ち行列網による階層型通信プロトコルのモデル化, 電子情報通信学会システムのモデリング性能評価研究会資料, pp.79-84 (1988).
- 5) 小柳津, 魚住, 森, 星子: 高速光トークンリングを用いたプロセッサ間結合システムの性能評価, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.128-132 (1986).
- 6) Shneiderman, B.: Response Time and Display Rate in Human Performance with Computers, *Computing Surveys*, Vol.16, No.3, pp.265-285 (1984).
- 7) Gruber, J.G.: Delay Related Issues in Integrated Voice and Data Networks, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.COM-29, No.6, pp.786-800 (1981).
- 8) 海老原, 張: ホモジニアスなリアルタイム通信システムの上限付き平均応答時間とトラフィック, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.8, pp.1820-1828 (1993).
- 9) 海老原, 中村: LAN通信システムのポイント・トゥ・ポイント平均応答時間の近似解析, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.11, pp.1504-1511 (1989).
- 10) 海老原, 中村, 東: 高速LAN通信システムの平均応答時間の近似評価, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.11, pp.1522-1525 (1989).
- 11) Gerla, M. and Kleinrock, L.: Flow Control: A Comparative Survey, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.COM-28, No.4, pp.553-575 (1980).

(平成7年10月19日受付)

(平成8年9月12日採録)



陳 紅兵

平成 2 年中国南開大学情報科学学部卒業。理学学士。平成 7 年筑波大学理工学研究科修士課程入学。現在に至る。興味のある研究分野はプロトコル、ネットワークの性能評価、

ATM-LAN など。



木村 成伴 (正会員)

平成 7 年東北大学大学院情報科学研究科博士課程修了。平成 7 年筑波大学電子・情報工学系講師。並行プロセスの代数的形式化や帰納推論によるプログラム合成の研究に従事、

現在に至る。電子情報通信学会会員。



海老原 義彦 (正会員)

昭和 22 年生。昭和 45 年東北大学工学部電子工学科卒業。昭和 50 年同大学院博士課程単位取得退学。同年同大学応用情報学研究センター助手。昭和 51 年筑波大学電子・情報工学系講師。昭和 60 年同助教授。現在同教授。主たる研究部分野は、計算機網のネットワーク・アーキテクチャ、デジタル通信システムの性能評価および知的通信システムの研究など。工学博士。電子情報通信学会会員。