

IP 網品質条件に応じた高品質 MPEG2 映像配信システムの最適化設計

北村 和夫[†] 森西 優次[†] 大西 隆之[‡] 小合健太[‡]

[†]NTT サイバーソリューション研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

[‡]NTT サイバースペース研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: [†]{kitamura.kazuo, morinishi.yuji}@lab.ntt.co.jp, [‡]{onishi.takayuki, ogou.kenta}@lab.ntt.co.jp

あらまし 本資料では、TV 放送品質の保証に必要な End-End の品質保証技術として、TCP を適用した際の所要 QoS 条件、パケット損失補償値およびジッタ補償量等のシステム条件を検証することを目的としている。ITU-T 勧告草案 Y.1541 のクラス 0 の QoS 条件を例として、MPEG2 放送品質を保証するためのシステムパラメタ値、パケット損失補償値およびジッタ補償量を定量的に評価するとともに、複数の TCP セッションによる多重化転送方式の有効性および適用条件を提示する。

キーワード QoS, パケット損失率, TCP, 転送速度, MPEG2, ジッタ

A QoS-Optimal design of a high quality MPEG2 Video Delivery system over IP network

Kazuo KITAMURA[†] Yuji MORINISHI[†] Takayuki ONISHI[‡] and Kenta OGOH[‡]

[†]NTT Cyber Solutions Laboratories 1-1 Hikarinooka, Yokosuka-Shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

[‡]NTT Cyber Space Laboratories 1-1 Hikarinooka, Yokosuka-Shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

E-mail: {kitamura.kazuo, morinishi.yuji}@lab.ntt.co.jp, {onishi.takayuki, ogou.kenta}@lab.ntt.co.jp

Abstract In this paper, we have described the system configurations for the guaranteed MPEG2 TV Quality used TCP on IP networks. We have designed the system configurations, and discussed a transmission method using multi-TCP sessions to be applied to ITU-T Y.1541 QoS class 0.

Keyword QoS, Packet loss rate, TCP, Throughput, MPEG2, Jitter

1. はじめに

MPEG2 映像配信システムにおいて、サービス品質として放送品質レベル（転送速度：6Mbit/s、1 時間以上パケット損失がないこと）を保証するためには、MPEG2 下位において、遅延変動量を吸収するためのジッタ補償に加えて、 10^{-7} 以下のパケット損失補償も必要となる。

一方、IEEE802.3u (100Base-TX) 物理レイヤにおけるビットエラー条件は 10^{-9} 以下と規定されている [1]。ここで、トランスポートレイヤのパケット（セグメント）をフラグメントすることなく、1Ether フレームで伝送するものとする、 10^{-5} のパケット損失率が限界品質となる。

つまり、IP 網に適用する MPEG2 映像配信システムにおいて、 10^{-7} 以下のパケット損失率を保証するためには、ネットワークの QoS 保証だけでなく、Feedback 型（ARQ 制御の再送による）、もしくは OpenLoop 型

（冗長パケットの送信による）のパケット損失補償技術による End-End の品質保証も必要となる

上記背景により、システム設計時には、アプリケーションレベルでの品質要求条件および適用するネットワークの QoS 条件に応じて、End-End の品質保証を実現する最適なプロトコル構成を選択する必要があるとともに、所要となるマージンを見込んだ上で、ジッタ補償量やシステムパラメタ値の設計が必要となる。

しかし、End-End の品質保証を実現するためのパケット損失補償技術と QoS 条件、その時のパケット損失補償値およびジッタ補償量等のシステム条件を定量的に評価、比較した報告の例はない。

本資料では、TV 放送品質を実現するとともに、パケット損失補償技術として、Feedback 型の代表的なプロトコルである TCP Reno[2] を適用した際の所要 QoS 条件、パケット損失補償値およびジッタ補償量等のシステム条件を定量的に評価することを目的とする。

2. TCP を適用する際のシステム設計上の課題

TCP を適用する際には、システム設計上、特に以下の点が課題となると考えられる。

1. 所要とする転送速度の実現条件：適用するネットワークの QoS 条件（パケット損失率、遅延時間、遅延変動量）において、所要とされる転送速度（6Mbit/s）が実現できることが条件となる。ここでは、文献[3]により報告されている(1)式の転送速度近似式を適用して検証する。なお、(1)において、 $rwnd$ は受信側ウィンドサイズ、 $srtt$ 平均遅延量、 p はパケット損失率、 $smss$ 送信セグメントサイズである。

$$B(p) = \left(\frac{rwnd \times 8}{srtt}, \frac{smss \times 8}{srtt \sqrt{\frac{2p}{3}} + 3p(1+32p^2) \sqrt{\frac{3p}{8}}} \right) \quad (1)$$

2. TCP 再送制御に伴うジッタ補償量：ジッタ補償量は平均遅延量の変動量と再送後に所要転送速度まで復旧するまでの再送遅延量との合計量となる。所要 QoS 条件において、アンダーフロー防止のためのジッタ補償を実現することが条件となる。

3. 上記 1,2 を実現するシステムパラメタ値：

4. 上記 1~3 において、所要とされる QoS 条件：

ここでは、上記課題を検討するにあたって、はじめに、ジッタ補償量を 1sec とした際の所要 QoS 条件、システムパラメタ値、パケット損失補償値等のシステム条件値を検証する。次に、ITU-T 勧告草案 Y.1541 のクラス 0 の QoS 条件を例として、MPEG2 放送品質を保証するためのシステムパラメタ値、パケット損失補償値およびジッタ補償量を定量的に評価するとともに、複数の TCP セッションによる多重化転送方式について提示する。

3. ジッタ補償量の検証

TCP では、セグメント数を単位とする送信しきい値、輻輳ウィンドサイズ、受信ウィンドサイズの関係を用いて自律的な転送制御を行う。ここで、輻輳ウィンドサイズは ACK を受信することなく連続して転送できるセグメント数であり、受信ウィンドサイズは受信側の最大ウィンドサイズ（通常、セッション確立時にネゴシエーションする）、送信しきい値は輻輳ウィンドサイズの増加関数を決定するしきい値である。

TCP では、ラウンド（1 ラウンドトリップ時間を単位とする時間）毎に輻輳ウィンド値と送信しきい値との大小関係と比較し、輻輳ウィンド値が送信しきい値以下の場合には輻輳ウィンド値を指数関数的に増加させ、送信しきい値より大きい場合には線形的に増加させる。そして、輻輳ウィンド値のセグメントを連続送信して、ACK の受信を待つ。ACK を受信すると輻輳ウィンド値が受信ウィンド値と等しくなるまで輻輳ウィンド値を増加させ、同様にセグメントの送信を続ける。前者

をスロースタート制御といい、後者を輻輳回避制御という。また、TCP では、重複 ACK を 4 回連続して受信したセグメント、および再送タイム満了前に ACK の受信ができなかったセグメントを損失したものとみなし、前者の場合にはファーストリトランスミッション/ファーストリカバリと呼ばれる再送制御を、後者の場合には再送タイムアウトと呼ばれる再送制御を行う。

ファーストリトランスミッション/ファーストリカバリでは、重複 ACK を 4 回連続して受信した際には直ちにアウトスタンディングセグメント数の 1/2 と 2 とを比較し、大きいほうを送信しきい値とするスロースタート制御で再送制御を行う。そして、重複していない ACK を受信すると、以降は輻輳回避制御を行う。

再送タイムアウト時には、再送タイム満了後にアウトスタンディングセグメント数の 1/2 と 2 とを比較し、大きいほうを送信しきい値とする。そして、輻輳ウィンド値の初期値を 1 としてスロースタート制御で再送を行い、以降は輻輳ウィンド値と送信しきい値との関係に応じて輻輳回避制御を行う。また、再送タイムを、タイムアウトの連続回数: N に応じて、 2^N 倍に設定する。上述した制御において、ラウンド n の時の輻輳ウィンド値を W とし、 W を n の関数として表すと次式の通りとなる。なお、次式において、 ws は送信しきい値を、 wo はアウトスタンディングセグメント数を意味する。

(a) スロースタート/輻輳制御

$$W = \begin{cases} = 2^{n+1} & 0 \leq n \leq \frac{\log ws}{\log 2} \\ = ws + n - \frac{\log ws}{\log 2} & n > \frac{\log ws}{\log 2} \end{cases} \quad (2)$$

(b) ファーストリトランスミッション/ ファーストリカバリ

$$W = \begin{cases} = wo + 2 + 2^n & \text{重複ACK受信時} \\ = ws + n - \frac{\log ws}{\log 2} & \text{その他} \end{cases} \quad (3)$$

(c) 再送タイムアウト

$$W = \begin{cases} = 2^n & 0 \leq n \leq \frac{\log ws}{\log 2} \\ = ws + n - \frac{\log ws}{\log 2} & n > \frac{\log ws}{\log 2} \end{cases} \quad (4)$$

ジッタ補償量は、平均遅延量の変動量とパケット損失に伴う再送後に所要転送速度まで復旧するまでの再送遅延量との合計量となる。ここで、所要転送速度まで復旧する再送遅延量は、輻輳ウィンドサイズが最大値（定常状態で、受信ウィンドサイズと等しい値）に復旧するまでの時間として考えることができる。定常時と再送時の平均遅延量は同じであるものと仮定すると、再送遅延量が最大となるのは、(2)~(4)式より明ら

かに再送タイムアウトが発生した場合である。

再送タイムアウトの連続回数を n とし、再送タイムアウト n 回後に輻輳ウィンドサイズが最大値となるまでのラウンド数を k とすると、再送遅延量 d_n は(5)式の通りとなる。

$$d_n = rto \times (2^n - 1) + srtt \times k \quad (5)$$

ここで、 rto は再送タイムアウト値である。TCP では、 rto を(6)式にしたがって平均遅延量、遅延変動量:dev を測定する毎に更新する。

$$rto = srtt + 4 \times dev \quad (6)$$

この再送遅延量の最悪値は、再送タイムアウト前の輻輳ウィンド値が 2 (再送タイムアウト以外の状態では最小値) の時であり、かつ引続き再送タイムアウトが発生した場合である。

図 1 は、2 回連続して再送タイムアウトとなった場合の再送遅延量とウィンドサイズの時間変化を図示したものである。平均パケット損失率を p とした場合、再送遅延量 d_2 でアンダーフローが発生する確率は p^3 となる。

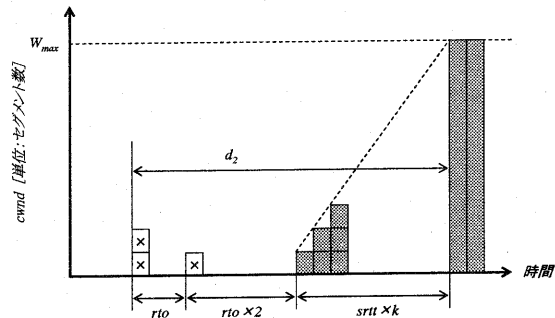


図 1. 再送タイムアウトによる再送遅延量

4.2. システム条件の検証

ジッタ補償量 (再送遅延量) を 1sec とした場合、図 1 の最悪値を保証するために所要となる受信ウィンドサイズを計算する。仮定により最悪値は(5)式において $n=2$ の場合であり、このとき d_2 が 1sec 以下となる受信ウィンドサイズを算出すればよいから、以下の(7)~(9)式を用いて、再送遅延量から所要となる受信ウィンドサイズが計算できる。

$$rate = \frac{rwnd \times 8}{srtt} = \frac{smss \times 8 \times W}{srtt} \quad (7)$$

$$W = ws + k - \frac{\log ws}{\log 2} = 2 + k \quad (8)$$

$$d_2 = rto \times (2^2 - 1) + srtt \times k = srtt \times (9 + k) \quad (9)$$

上記仮定と(7)~(9)式を用いて計算した再送遅延量と受信ウィンドサイズの関係を図 2 に示す。図より、再送遅延量 (ジッタ補償量) を 1sec とした場合の受信ウィンドサイズは 21 セグメントとなることが分かる。

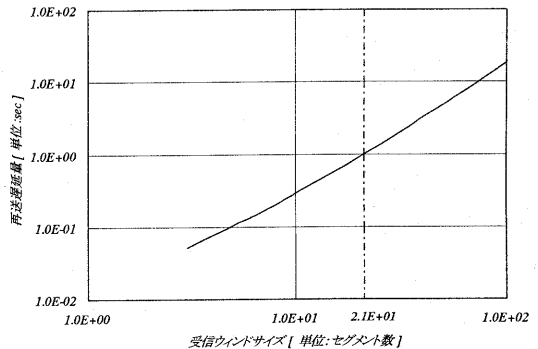


図 2. 再送遅延量と受信ウィンドサイズの関係

4. システム条件の検証

4.1. 検証条件

本資料におけるシステム条件の検討にあたって、以下の通り仮定する。

- 遅延変動量はジッタ補償量に対して十分に小さいものとする。
- 遅延変動量は、平均値遅延量の 1/2 以下であるものとする。
- 2 回連続再送タイムアウト時の再送遅延量を確保する (この再送遅延量でアンダーフローが発生する確率については後で考える。)
- 送信セグメントサイズは 1328bytes (TS パケット $\times 7$ + RTP ヘッダ) とする。
- 転送速度を 6Mbit/s とする。

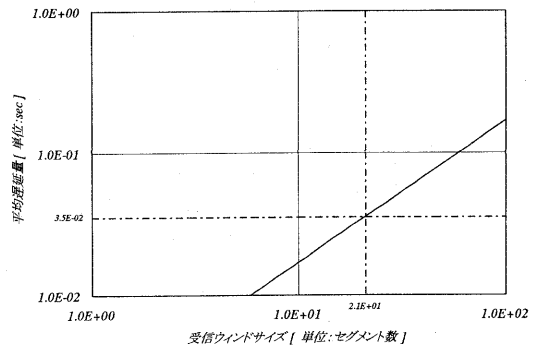


図 3. 平均遅延量と受信ウィンドサイズの関係

次に、(7)式を用いて、転送速度 6Mbit/s のときの平均遅延量と受信ウィンドサイズとの関係を計算した結果を図3に示す。受信ウィンドサイズが21セグメントの時、所要とされる平均遅延量は(7)式を用いて計算すると35msとなる。

平均遅延量と受信ウィンドサイズの計算結果より、(1)式を用いて計算した平均転送速度とパケット損失率の関係を図4に示す。図より、6Mbit/sの平均転送速度を実現するためには、 2×10^{-3} 以下の平均パケット損失率が所要とされることが分かる。このとき、1secのジッタ補償量でアンダーフローが発生する確率は 10^{-8} 以下となり、MPEG2の放送品質を保証できる。

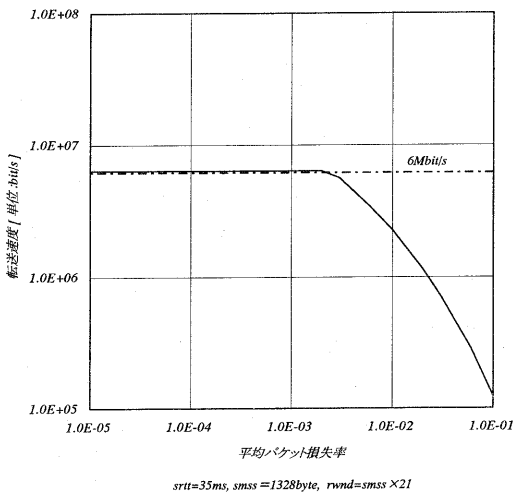


図4. 平均転送速度と平均パケット損失率の関係

表1. 所要 QoS 条件と参考値

諸条件		MPEG2 放送品質	参考値	
			Y.1541クラス0	事業者A
所要QoS条件	平均パケット損失率	$\leq 2 \times 10^{-3}$	$\leq 1 \times 10^{-3}$	$\leq 3 \times 10^{-3}$
	平均遅延量	$\leq 35\text{ms}$	$\leq 100\text{ms}$	$\leq 35\text{ms}$
	遅延変動量	$\leq 17\text{ms}$	$\leq 50\text{ms}$	-
システム条件	転送速度	6Mbit/s	-	-
	パケット損失保証条件	$\leq 1 \times 10^{-8}$	-	-
	セグメントサイズ	1328bytes	-	-
	受信ウィンドサイズ	21セグメント	-	-
	ジッタ補償量	1sec	-	-

表1に、ジッタ補償量を1secとした際の所要 QoS 条件、システムパラメータ値、パケット損失補償値等のシステム条件を示す。また、参考として、ITU-T 勧告

草案 Y.1541 クラス 0 の QoS 条件と、QoS 保証ネットワークサービスにおける保証値の一例を併せて示す。表より明らかな通り、ITU-T 勧告草案 Y.1541 クラス 0 の QoS 条件では、1sec のジッタ補償量を前提とした場合、MPEG2 放送品質を保証できない。

5. QoS 条件に応じた最適化設計

ここでは、ITU-T 勧告草案 Y.1541 クラス 0 の QoS 条件に応じたシステム条件の最適化について考える。

図5の実線は、(1)式の第2項の平均遅延量を100ms、送信セグメントサイズを1328bytesとして計算した結果である。図より明らかに、Y.1541 クラス 0 の QoS 条件では、平均転送速度 6Mbit/s の実現はできない。そこで、Y.1541 クラス 0 の QoS 条件で 6Mbit/s の平均転送速度を実現する方法について考える。

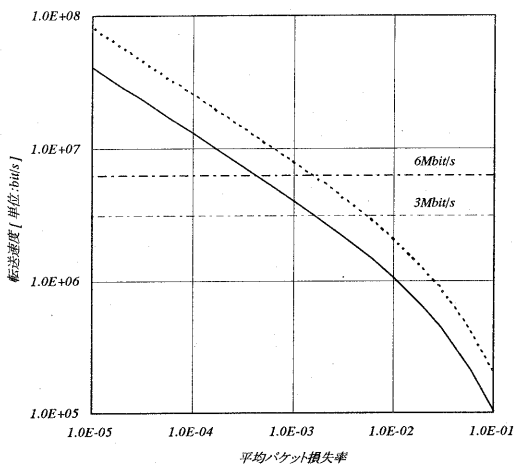
(1)式において、第1項は曲線の飽和速度に、第2項は飽和速度までの曲線の”立上り”に対応する。平均遅延量が同一であれば、飽和速度は受信ウィンドサイズにより律速される。また、曲線の”立上り”の傾きは、平均パケット損失率が同一であれば、送信セグメントサイズにより律速される。ある平均転送速度を実現する時のパケット損失率の限界値は、(1)式の第1項と第2項とが交差する点で決定される。つまり、より大きなパケット損失率下で、同じ平均転送速度を実現するには、(1)送信セグメントサイズを大きくする方法と、(2)1/n の平均転送速度のセッション n 個を多重する方法との2通りが考えられる。

図5の点線は、送信セグメントサイズを2倍として計算した結果である。図より、送信セグメントサイズを2倍以上に設定することにより、Y.1541 クラス 0 の QoS 条件で所要転送速度の実現が可能となることが分かる。また、平均転送速度が 3Mbit/s 以下のセッションを所要数多重することで同様に所要転送速度の実現が可能となることが分かる。

上記2つの方法、および後者の方法の多重度を2,3,6とした場合の所要システム条件について計算した結果を表2に示す。いずれの方法、いずれの多重度数においても、MPEG2 放送品質保証は可能であるが、(1)の送信セグメントサイズを大きくする方法の場合、MTU 値も合わせて大きくする必要がある。このため、利用するネットワークサービスの MTU 値の上限値によっては適用できないことがある。また、(2)の 1/n の平均転送速度のセッション n 個を多重する方法に関しては、多重度が高いがより小さなジッタ補償量で品質保証が可能となる。ただし、この場合には、セッションを多重化する手段を TCP 上位レイヤ (例えば、RTP/RTCP) で実現する必要がある[6]。

文 献

- [1] IEEE Std 802.3, 2000 Edition.
- [2] Allman, M., Paxson, V. and W. Stevens, "TCP Congestion Control", RFC 2581, April 1999.
- [3] Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D. and J. Kurose, "TCP Throughput: A simple model and its empirical validation", SIGCOMM Symposium on Communications Architectures and Protocols, August 1998.
- [4] Mathis, M., Mahdavi, J., Floyd, S. and A. Romanow "TCP Selective Acknowledgment Options", RFC 2018, October 1996.
- [5] Speakman, T., "PGM reliable transport protocol specification", RFC3204 Desember 2001..
- [6] Rosenberg, J., Schulzrinne, H., "An RTP Payload Format for Generic Forward Correction", RFC2733, Desember 1999.
- [7] <http://www.ietf.org/html.charters/rmt-charter.html>



実線: smss = 1328 byte、点線: smss = 2656 byte

図 5. 平均転送速度と送信セグメントサイズの関係

表 2. 所要システム条件の計算結果

諸条件		(1)の方法	(2)の方法			
			2多重	3多重	6多重	6多重
所要QoS条件	平均パケット損失率	$\leq 1 \times 10^{-3}$				
	平均遅延量	$\leq 100\text{ms}$				
	遅延変動量	$\leq 50\text{ms}$				
システム条件	転送速度	6Mbit/s	2×3Mbit/s	3×2Mbit/s	6×1Mbit/s	
	パケット損失保証条件	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 2 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 6 \times 10^{-4}$	
	セグメントサイズ	2656bytes	1328bytes	1328bytes	1328bytes	
	受信ウィンドサイズ	30	30	20	10	
	ジッタ補償量	3.7sec	3.7sec	2.7sec	1.7sec	

6. おわりに

今後は、検証した結果を実機により評価するとともに、複数セッションを多重化する方法を検討する。また、他のパケット損失補償技術[4][5][7]についても同様に検討し、本検討結果に対する諸条件のゲインを評価する予定である。