

画像情報特論 (7)

- アダプテーション (2)

パケット廃棄対策、TCPフレンドリ

2004.05.28

情報ネットワーク専攻 甲藤二郎

E-Mail: katto@waseda.jp

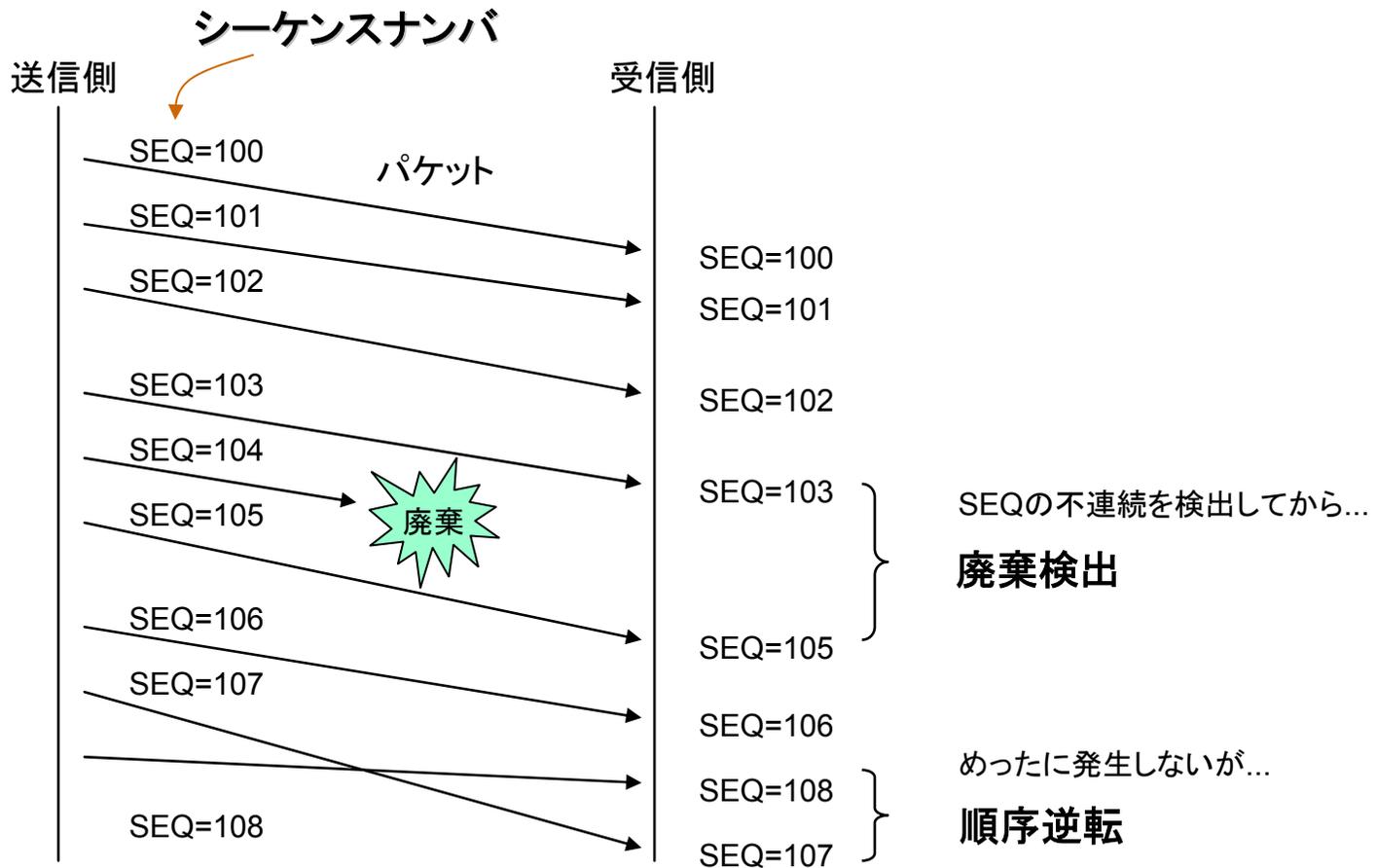
パケット廃棄対策

誤り対策一覧

	電話	移動体	デジタル放送	インターネット	程度
誤り検出符号	○	○	○	○ (TCP/UDP)	検出 (ビット誤り)
シーケンス ナンバ		○	○	○ (RTP)	検出 (パケット廃棄)
再同期	△	○	○	○ (RTP)	局所化
インタリーブ	△	○	○		訂正
FEC				○ (RFC2733)	訂正
再送				△ (検討中)	訂正
NewPred	△	△	△	△ (検討中)	局所化

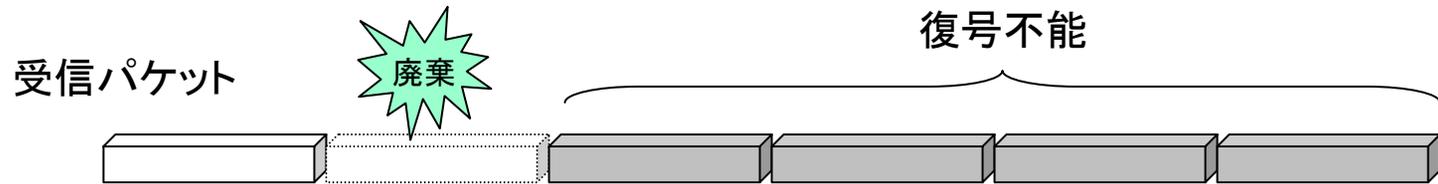
シーケンスナンバ

- パケット廃棄の「検出」

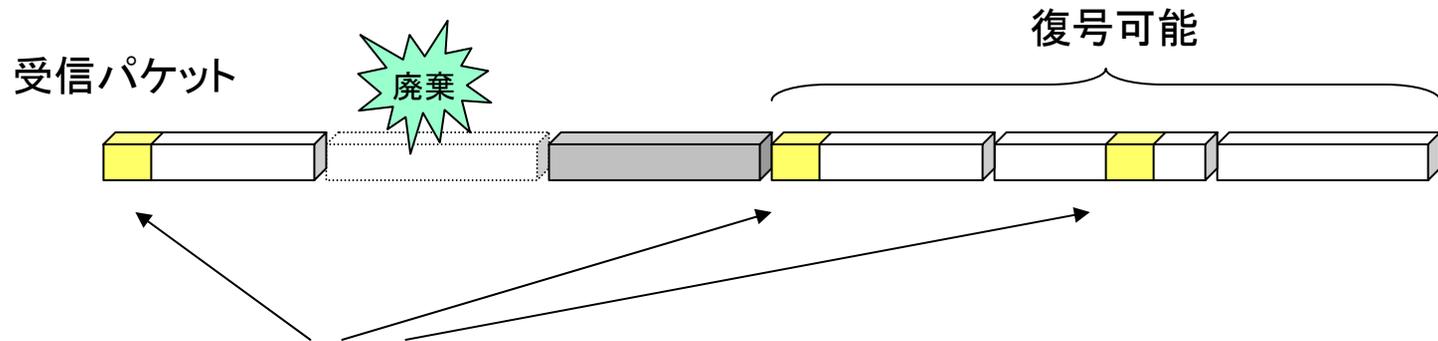


再同期

- パケット廃棄の影響の「局所化」



(a) 再同期情報がない場合



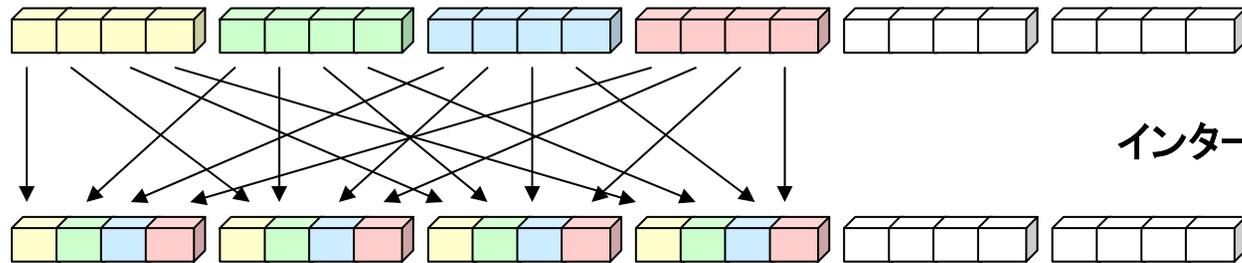
ユニークワード + 再同期情報

(b) 再同期情報がある場合

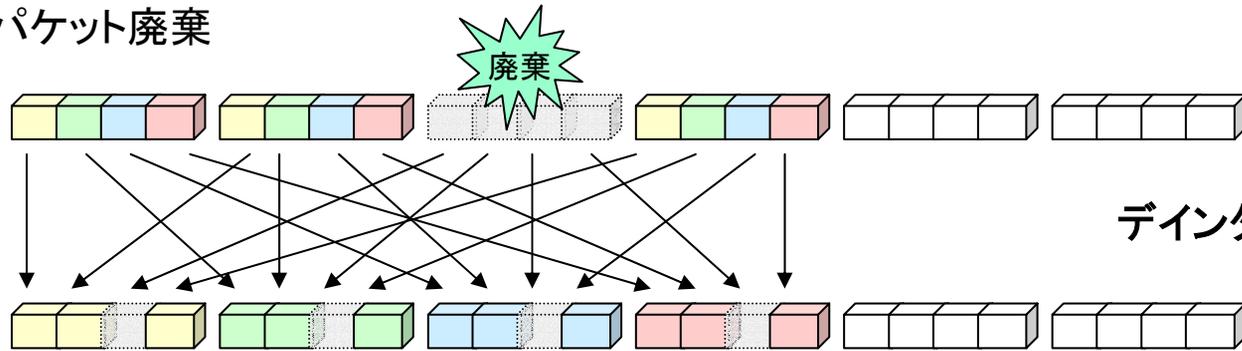
インタリーブ

- パケット廃棄の「訂正」... 誤り訂正符号の応用 1

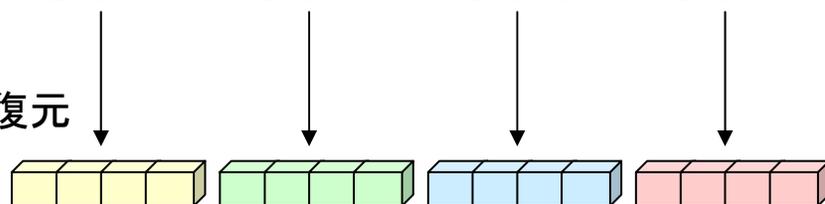
パケット (データ+誤り訂正符号)



パケット廃棄



復元



インタリーブ (送信)

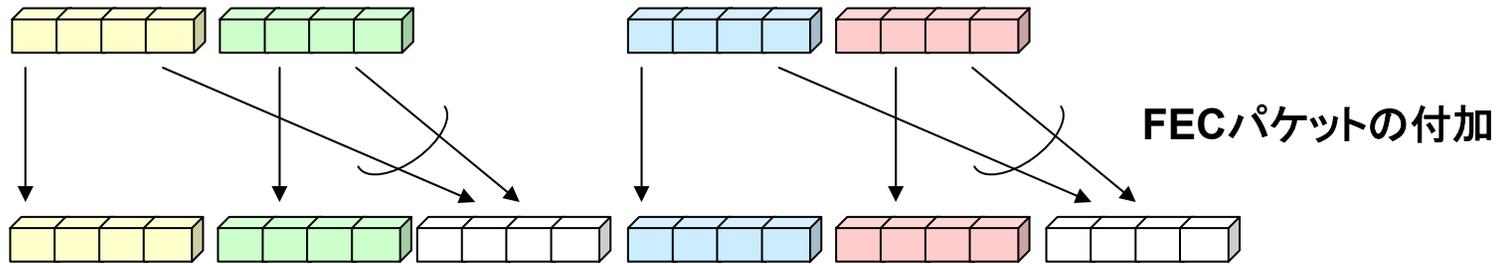
デインタリーブ (受信)

誤り訂正符号で復元

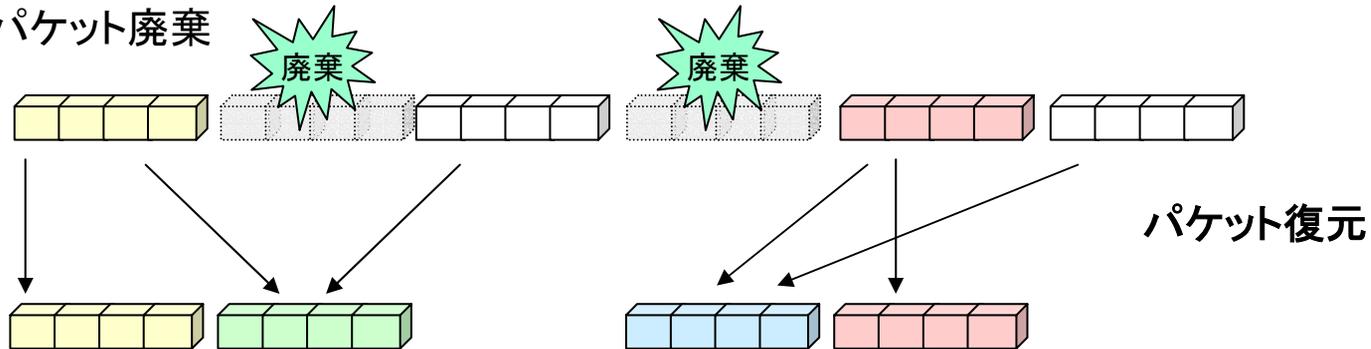
FECパッケージ

- パケット廃棄の「訂正」... 誤り訂正符号の応用 2

パケット



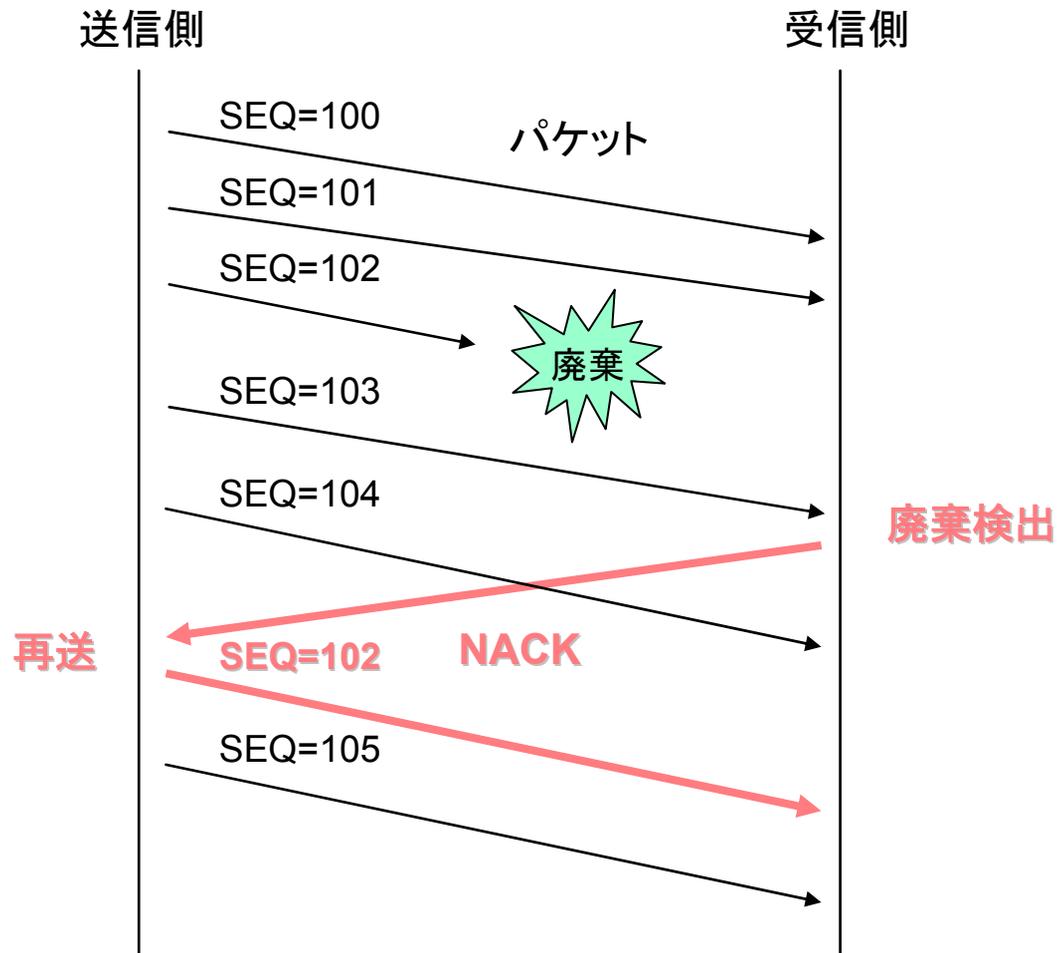
パケット廃棄



- パリティチェック
- Digital Fountain (トルネード符号)

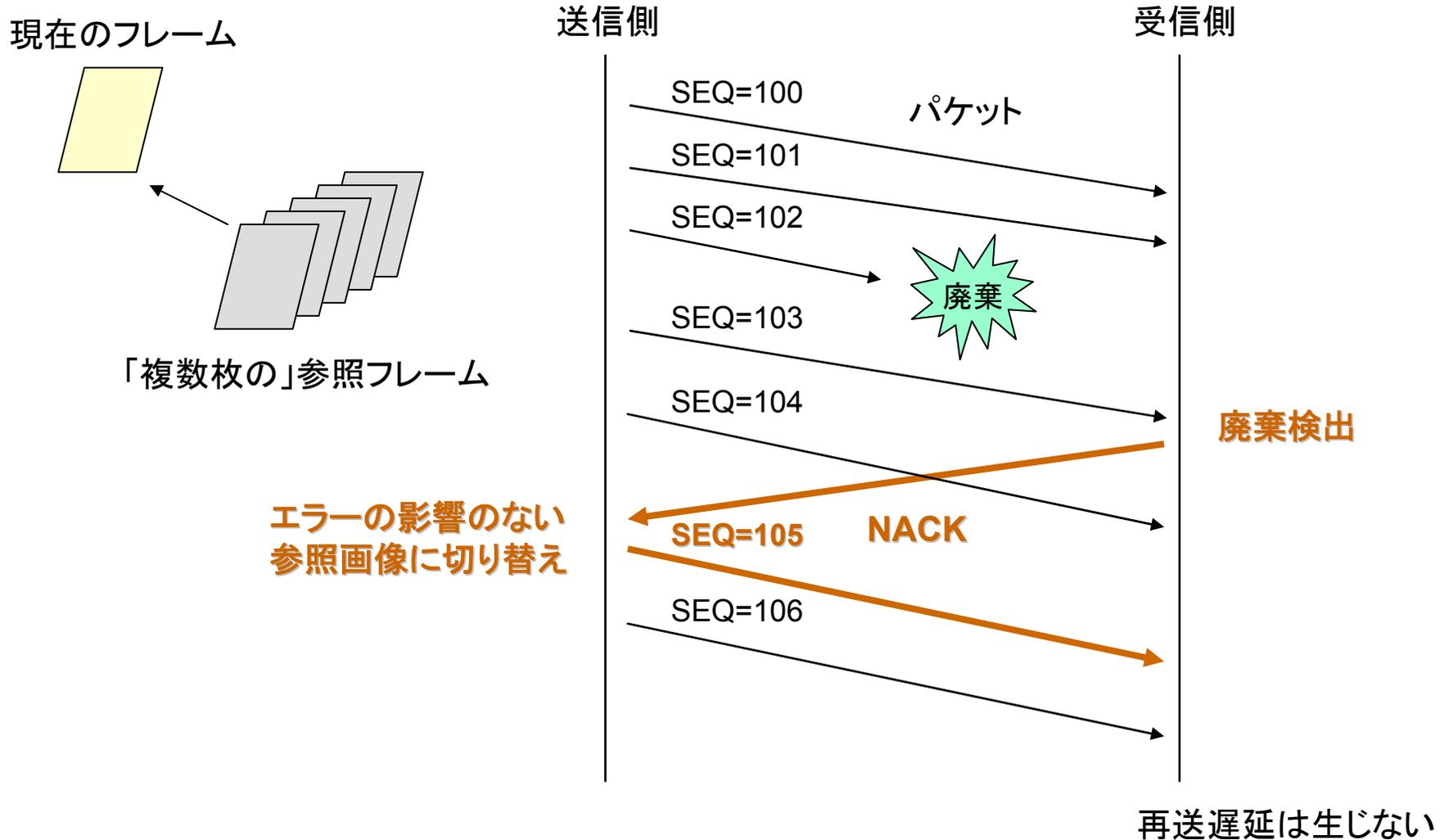
再送

- NACK と廃棄パケットの「再送」



NewPred

- NACK と「参照フレームの切り替え」



RTPペイロードフォーマット (再同期)

RTPヘッダ

v=2	P	X	CSRC カウンタ	M	パケットタイプ	シーケンスナンバ
タイムスタンプ						
SSRC 識別子						
CSRC 識別子 (list)						
(ペイロードフォーマット拡張)						
データ						

パケットタイプ:

転送メディアの符号化アルゴリズム

シーケンスナンバ:

パケット廃棄の検出

タイムスタンプ:

同期再生 (メディア内同期)

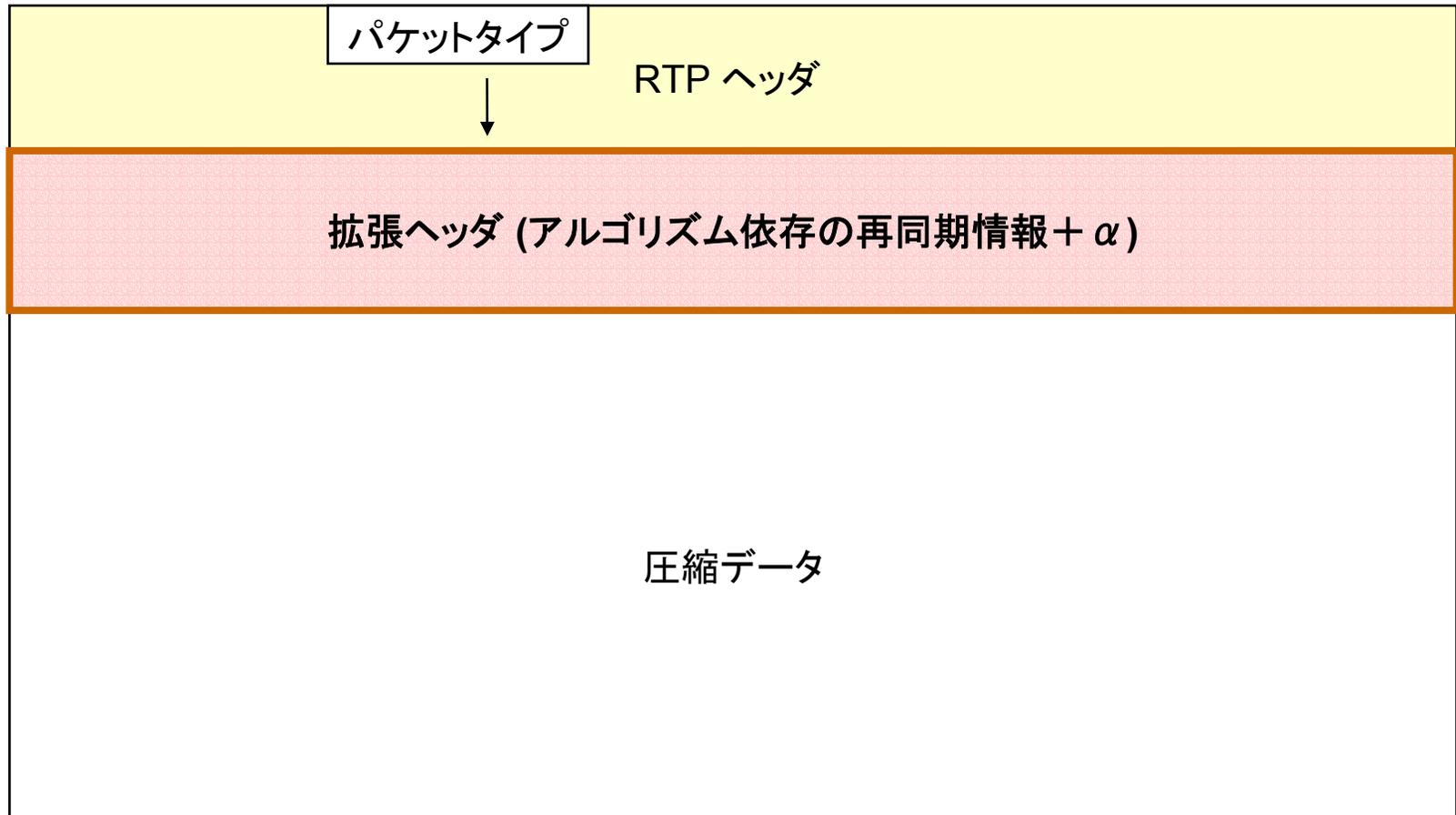
Mビット:

フレーム境界の通知

SSRC:

ストリームの識別

RTPペイロードフォーマット

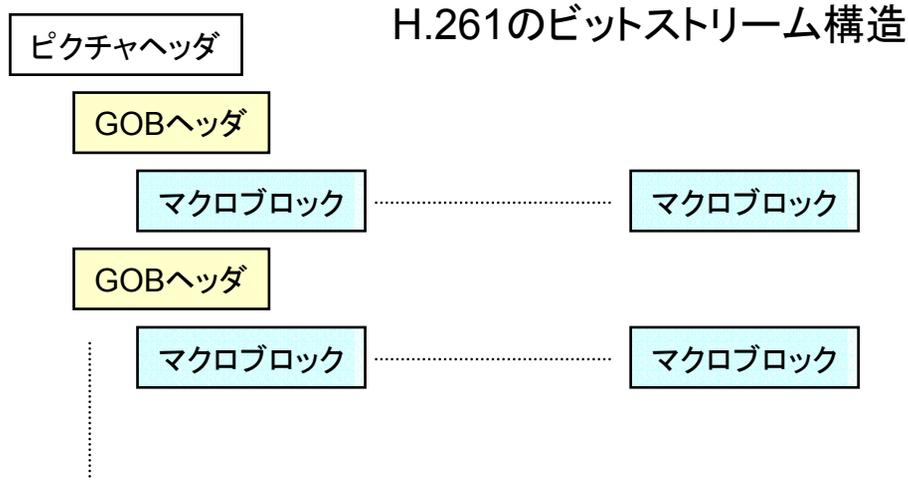
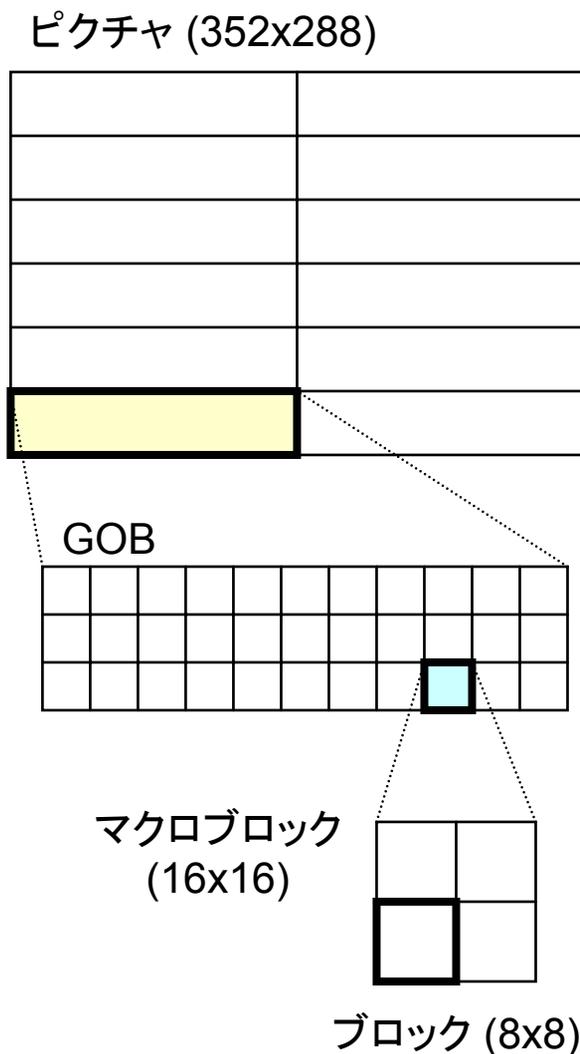


符号化アルゴリズム毎に、さまざまなペイロードフォーマットが決められている (RFC)

パイロードフォーマットのRFC一覧

RFC 番号	符号化アルゴリズム
1890	各種音声符号化 (G721, G722, G728 等)
2032	ITU-T H.261
2190	ITU-T H.263
2250	ISO/IEC MPEG1/MPEG2 Video/Audio
2429	ITU-T H.263+
2435	ISO JPEG
3016	ISO/IEC MPEG4 Audio/Visual
3047	ITU-T G.722.1
3119	ISO/IEC MP3 Audio
I-D	ISO JPEG-2000

RFC2032 (H.261)



再同期位置？
→ GOBヘッダ、あるいはマクロブロック

マクロブロックにまたがって継承される情報？
→ マクロブロックアドレス、動きベクトル、量子化ステップサイズ、等。
→ これらを再同期情報としてコピー

RFC2032 (H.261)

RTP ヘッダ:

フレームの最後で、M ビットを 1 にセット。
タイムスタンプの解像度は 90kHz。

H.261ヘッダ (4バイト):

SBIT	EBIT	I	V	GOBN	MBAP	QUANT	HMVD	VMVD
------	------	---	---	------	------	-------	------	------

SBIT, EBIT: 先頭、最終バイトの有効ビットの位置 (H.261ではバイトアラインが行われなため)。

I: イントラフレーム or インターフレーム。

V: 動きベクトルが使われている or 使われていない。

GOBN: パケットの先頭のマクロブロックのGOB番号。

MBAP: パケットの先頭のマクロブロックのマクロブロックアドレス。

QUANT: パケットの直前で有効だった量子化ステップサイズ。

HMVD, VMVD: パケットの先頭のマクロブロックの動きベクトル。

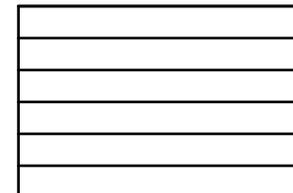
再同期情報

圧縮データのフラグメンテーション:

ピクチャ、GOB、あるいはマクロブロック境界にアライン

RFC2190 (H.263)

H.261の機能拡張 (半画素動き検出、GOBのライン化、ほか) →



H.263 特有の機能 (オプション):

ベクトル探索範囲の拡大 (Annex D):

算術符号化 (Annex E): ハフマン符号化の代替オプション。

アドバンス予測 (Annex F): 8x8ブロック単位の動き補償、オーバーラップ動き補償。

PB フレーム (Annex G): B ピクチャの簡易版。



H.263 用ペイロードフォーマット:

Mode A: ピクチャ、もしくはGOB境界にアライン。

Mode B: PB フレームなし、マクロブロック境界にアライン。

Mode C: PB フレームあり、マクロブロック境界にアライン。



Mode A の利用が推奨。

RFC2190 (H.263)

H.263 ヘッダ Mode A (4バイト): GOB 単位

F	P	SBIT	EBIT	SRC	I	U	S	A	reserved	DBQ	TRB	TR
---	---	------	------	-----	---	---	---	---	----------	-----	-----	----

F: 0 の場合 mode A、1 の場合 mode B/C。

P: 0 の場合 I/P フレーム、1 の場合 PB フレーム。

SRC: ピクチャ解像度。

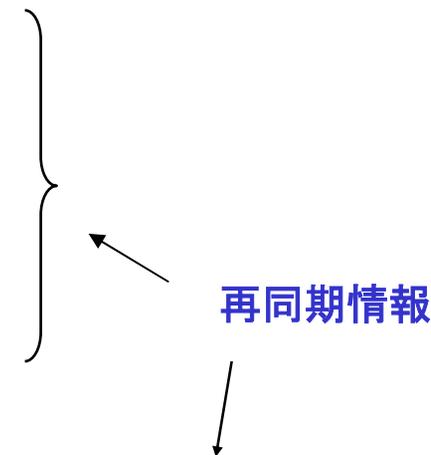
U: Annex D オプション (ベクトル探索範囲拡大) の on/off。

S: Annex E オプション (算術符号化) の on/off。

A: Annex F オプション (アドバンス予測) の on/off。

DBQ: PB フレームオプションの差分量子化パラメータ。

TRB、TR: PBフレームオプションのテンポラルリファレンス。



Mode B (8バイト): マクロブロック単位、PB オプションなし

GOB番号、量子化ステップサイズ、マクロブロックアドレス、動きベクトルの複製。
差分量子化パラメータ、テンポラルリファレンスの削除。

Mode C (12バイト): マクロブロック単位、PB オプションあり

Mode A & B に使用されるすべてのフィールドから構成。

RFC2429 (H.263+)

H.263の機能拡張

インターネット用途に有効な H.263+ の拡張機能:

スライス構造 (Annex K): GOB の代替。固定されたGOBとは異なり、スライス幅を動的に変更可能、スライススタートコードでバイトアラインされる。

独立セグメント復号 (Annex R): セグメント (GOB /スライス) 単位で独立して復号可能。

動きベクトルの探索範囲はセグメント内に限定。

スケーラビリティ (Annex O): Temporal, SNR & spatial scalability。時間解像度と空間解像度の階層化、SNR エンハンスメント。

参照ピクチャ選択モード (Annex N): 参照ピクチャの動的切り替え。エラー通知によるリカバリ。

ペイロードフォーマットの工夫 (H.261/H.263 用とはかなり違う):

ヘッダの簡素化。

ピクチャヘッダの複製の挿入。

スケーラビリティは、個々の階層を独立したストリームとしてパケット化。

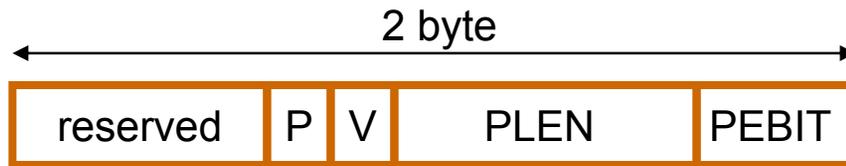
RFC2429 (H.263+)

RTP ヘッダ:

フレームの最後で、M ビットを 1 にセット。

タイムスタンプの解像度は 90kHz。

H.263+ヘッダ



P: スタートコード (ピクチャ、GOB、スライス) から始まる場合、1 にセット。

V: ビデオ冗長符号化が使われる場合、1 にセット。

PLEN: ピクチャヘッダが挿入されている場合、その長さ (バイト単位)。

PEBIT: ピクチャヘッダの最後のバイトで無視されるビット数。

再同期情報

圧縮データのフラグメンテーション:

制約無し (Pビットで識別)。

P=0 で前パケットが廃棄された場合、受信パケット中のスタートコードをサーチし、それを再同期ポイントとする。

RFC3016 (MPEG-4 Video/Audio)

MPEG-4 Video と H.263+ の対比:

再同期マーカ: 17ビットの再同期マーカを先頭に、マクロブロック群の固まりを構成 (ビデオパケット)。

→ H.263+ のスライス構造。

ピクチャヘッダのコピー: フラグに応じて、ビデオパケット単位にピクチャヘッダ (VOPヘッダ) を複製。

→ H.263+ ペイロードフォーマットのピクチャヘッダ複製機能。

データパーティショニング: マクロブロック情報を動きベクトルとテクスチャ情報に分け、モーションマーカ (17ビット) を挿入して分離。

→ H.263++ で採用。

リバーシブルVLC: DCT係数のハフマン符号で、両方向から復号可能な VLC 。

→ インタネットではあまり大きな意味を持たない。

スケーラビリティ: H.263+ と同様。

形状符号化: JBIG 拡張としてのオブジェクト形状の符号化。

→ MPEG-4 独自。廃棄対策は、再同期情報の挿入。

RFC3016 (MPEG-4 Video/Audio)

RTP ヘッダ:

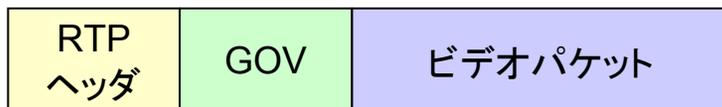
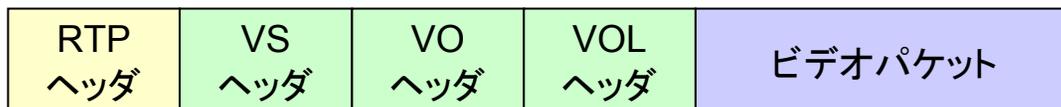
フレーム (VOP) の最後で、M ビットを 1 にセットする。

MPEG-4 Video 用ヘッダ

なし。

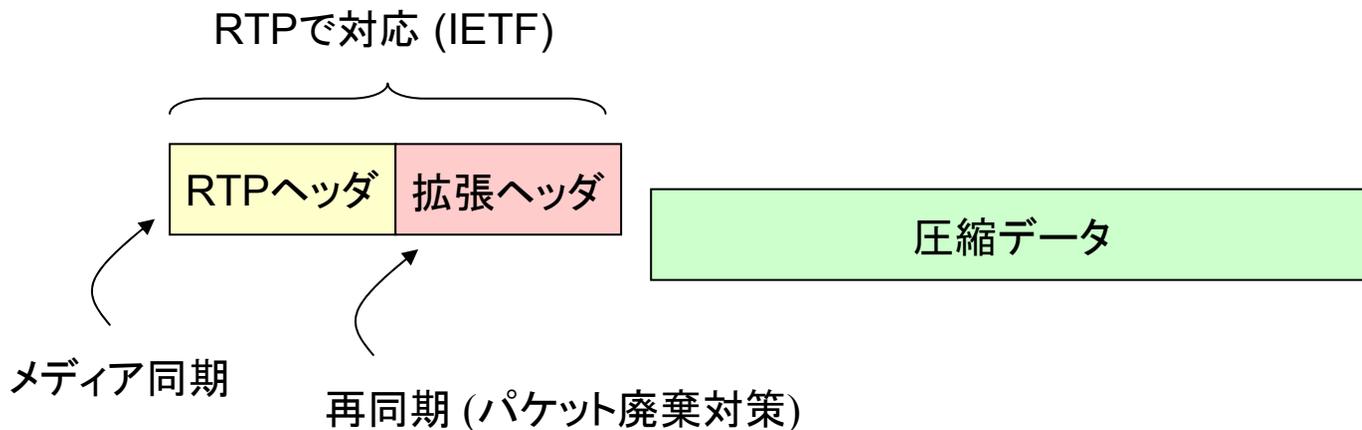
圧縮データのフラグメンテーション:

構成情報と GOV はペイロードの先頭に来なければならない

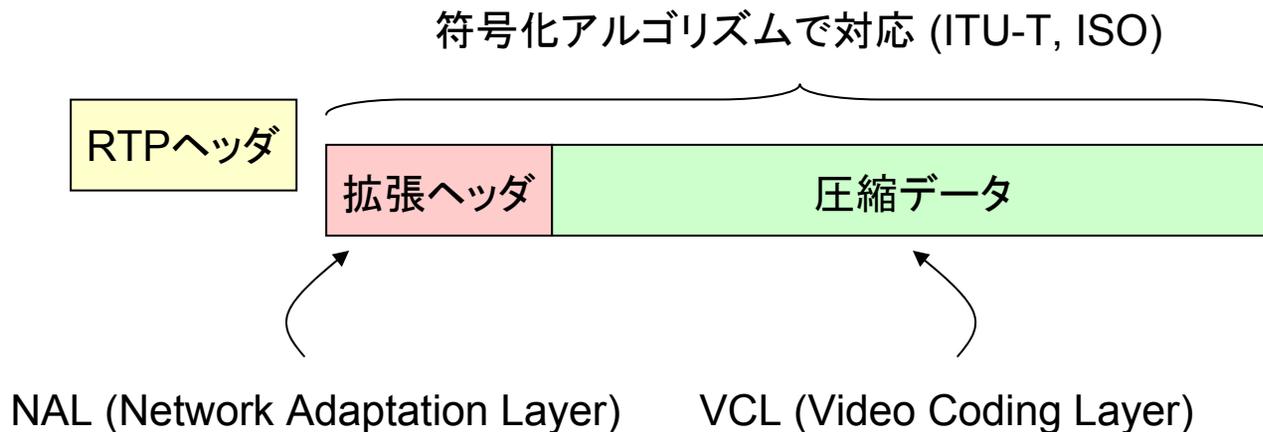


ペイロードフォーマットの歴史

昔: H.261、H.263



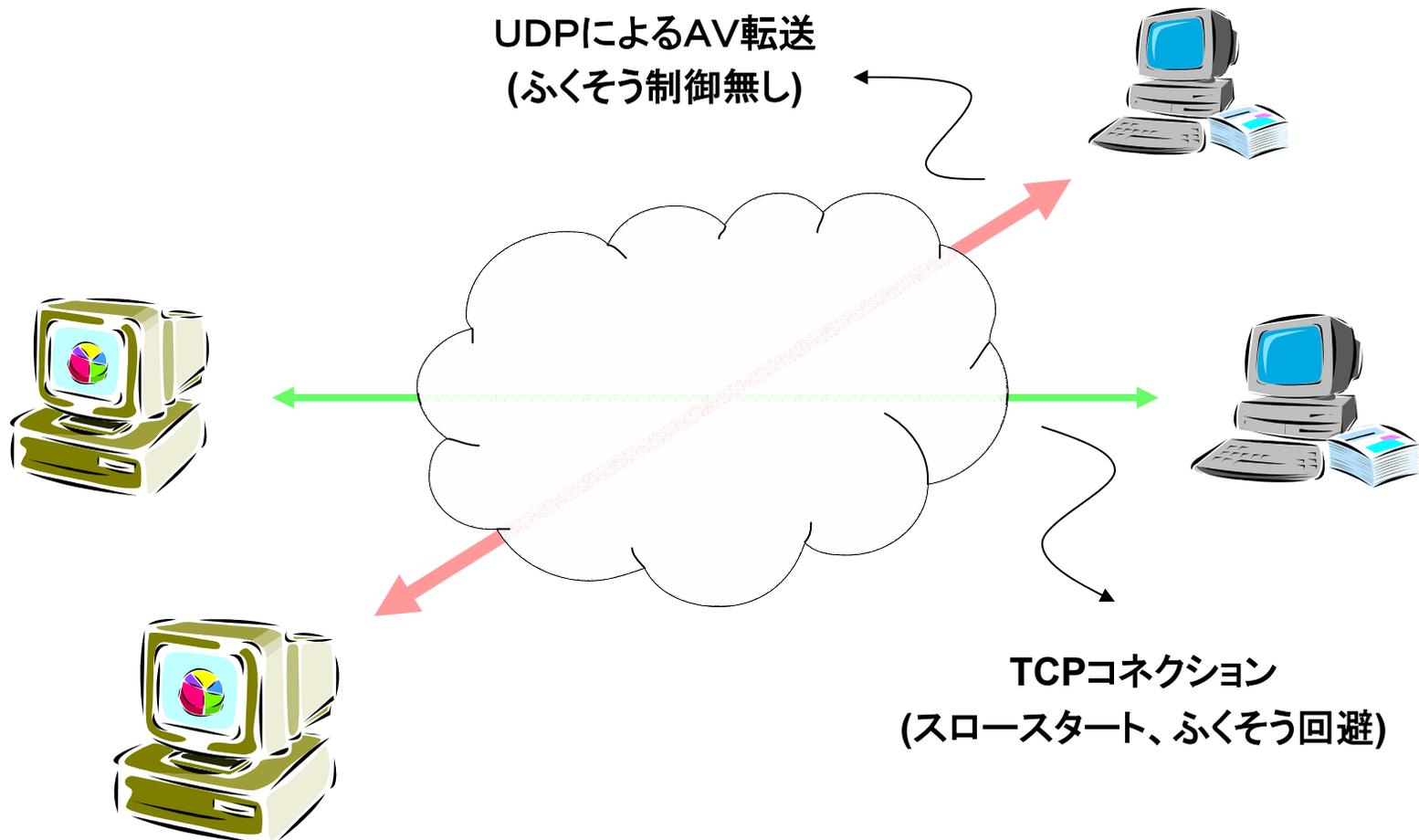
最近: H.263+、MPEG-4、H.26L



TCPフレンドリ (フロー制御)

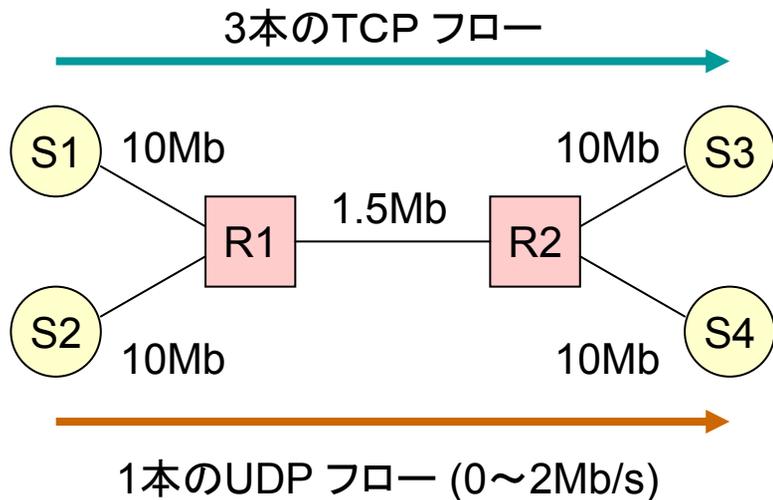
フロー制御の必要性 (1)

- UDP 帯域が増えると TCP 帯域はどうなるか？



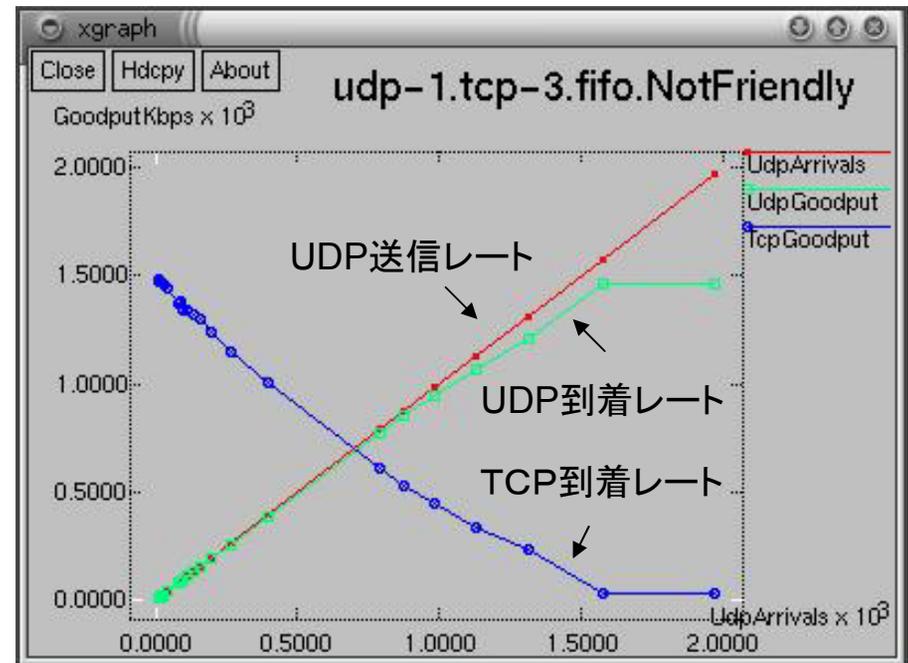
フロー制御の必要性 (2)

- UDP 帯域が増えると TCP 帯域はどうなるか？



UDP の送信レートの増加に伴い、TCP のスループットが低下する。リンク容量を越えた UDP は廃棄。

ネットワークシミュレータ

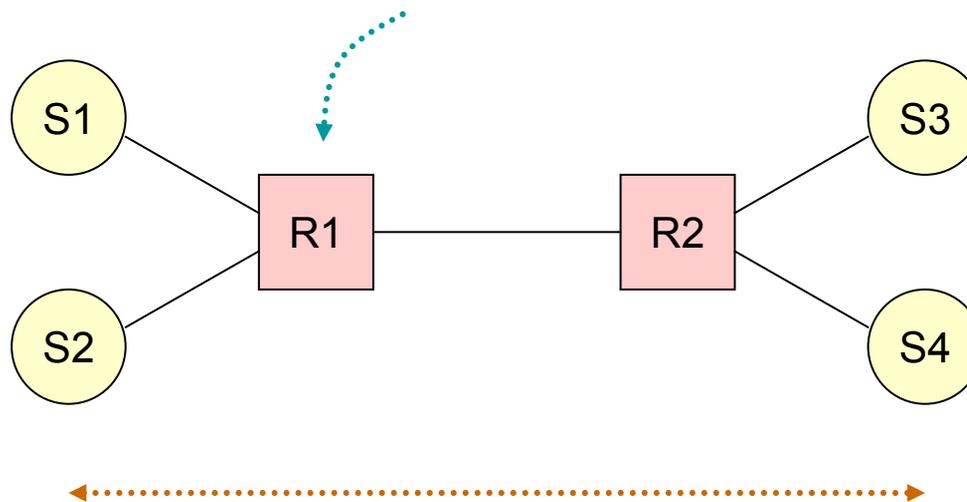


フロー制御の必要性 (3)

- どこで解決するか？

⇒ diffserv、MPLS

① フローの差別化 (at ルータ: ネットワーク層)



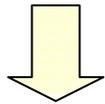
② End-to-End 制御 (at 端末: トランスポート・アプリケーション層)

⇒ TCPフレンドリ

TCPフレンドリ

- TCP と UDP をどのように共存させるか？

UDP レートを TCP レートと等しくなるように符号量制御する。



方法1: UDP に対して TCP と同じふくそう制御メカニズムを適用する。

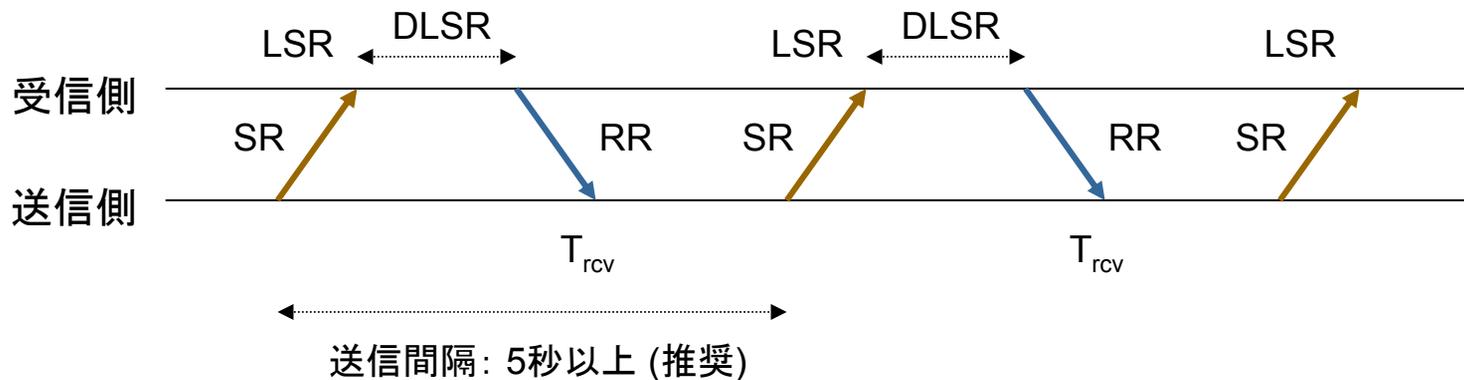
問題: レート変動が激しすぎて、AV アプリケーションには適用できない。

方法2: 測定可能なパラメータから TCP と等価なレートを見積もり、そのレートに適合するように UDP フローを制御する。

問題: TCP と等価なレートをどのように推定するか？

RTCP-RR: Report Block

- 受信側から送信側に返される統計情報量



廃棄率: $p = \text{廃棄パケット数} / \text{送信パケット数}$

ラウンドトリップ遅延: $RTT/2 = T_{rcv} - \text{DLSR} - \text{LSR}$

パケットサイズ: 送信側で測定可能

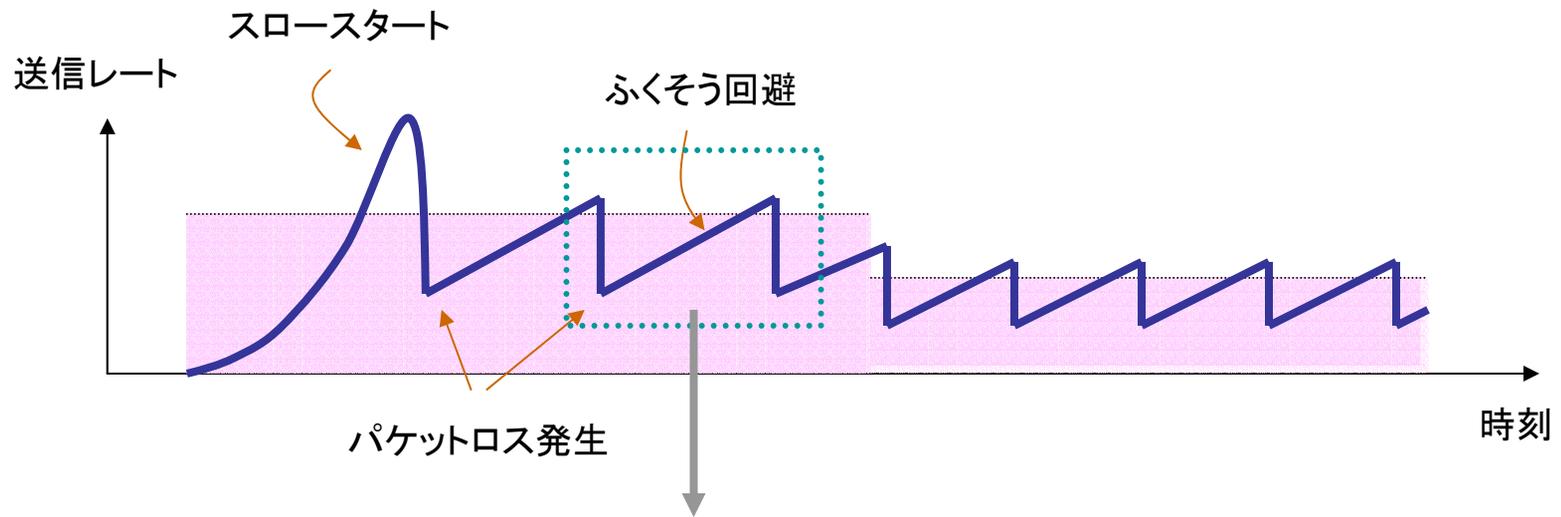
フロー制御
(TCPフレンドリ)

(注) RTCP 自体は、具体的なふくそう制御アルゴリズムは何も決めていない (標準というのはそういうもの)

TCPのモデル

- TCP のモデル化

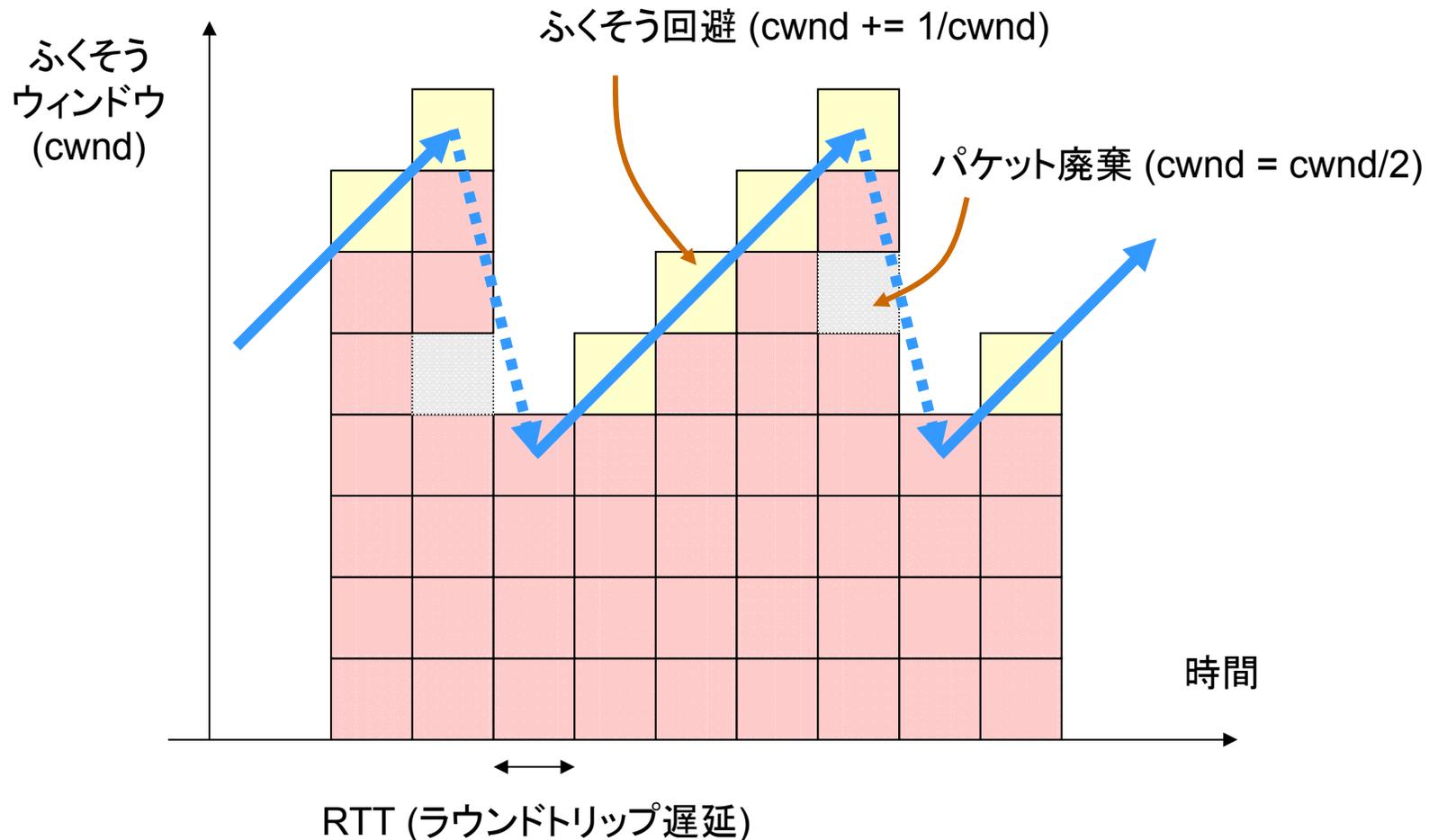
TCP Reno の場合



TCPの定常状態における
ふるまいをモデル化

モデル (1)

- TCP Reno のふくそう回避アルゴリズムのモデル化 (1)



モデル (1)

定常状態:

1個の packets 廃棄



解析:

(1) パケット廃棄の発生間隔 $\frac{W}{2} \cdot RTT$

(2) その期間の送信パケット数 $\frac{W}{2} + \left(\frac{W}{2} + 1\right) + \dots + W = \frac{3}{8}W^2$

(3) パケット廃棄率 $p = \frac{8}{3W^2}$ (総送信パケットのひとつが廃棄)

モデル (1)

TCP フレンドリなパケット送信レート:

(1回のふくそう回避期間に送信されるパケット数の期待値)

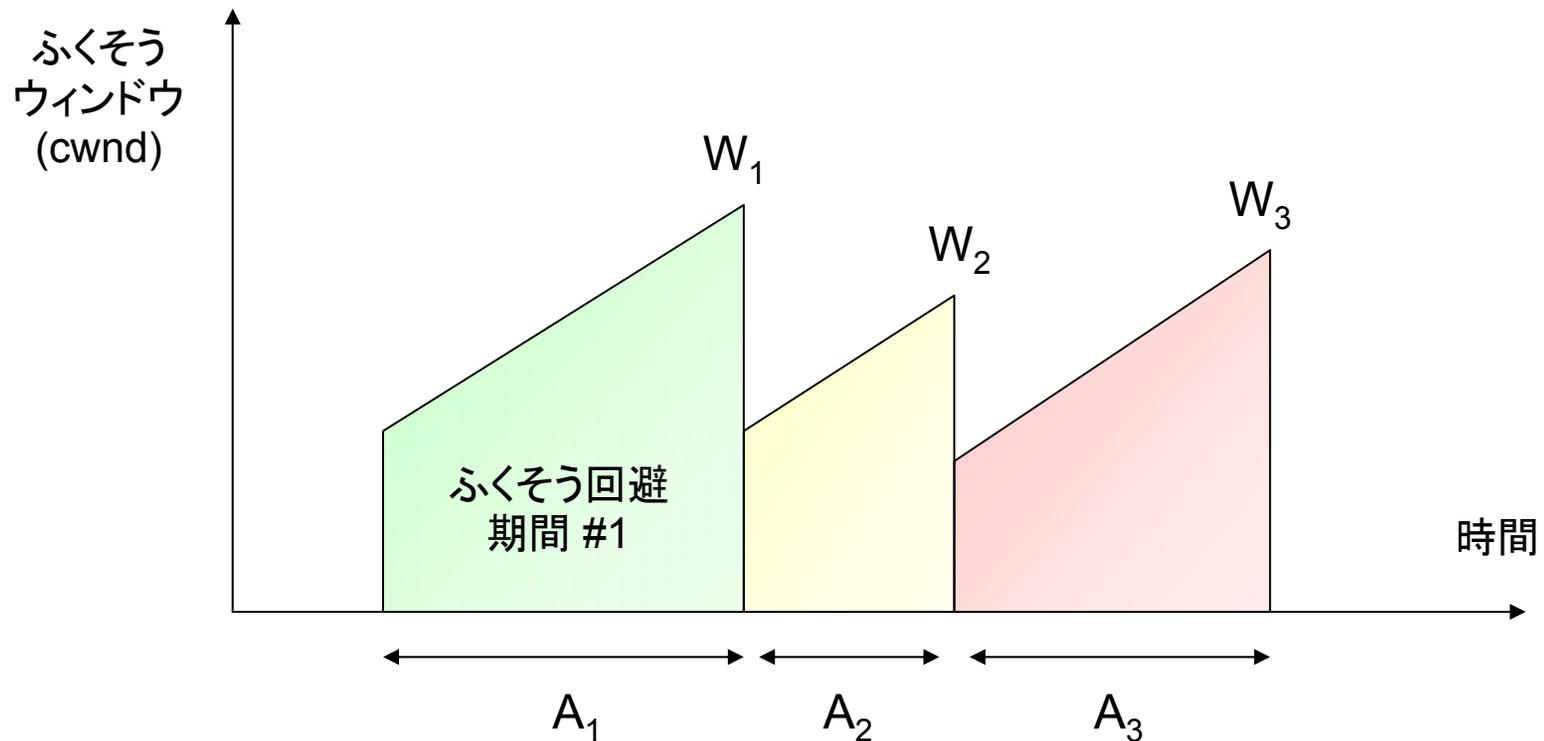
$$\therefore R = \frac{\frac{3}{8}W^2}{\frac{W}{2} \cdot RTT} = \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2p}}$$

ラウンドトリップ遅延

パケット廃棄率

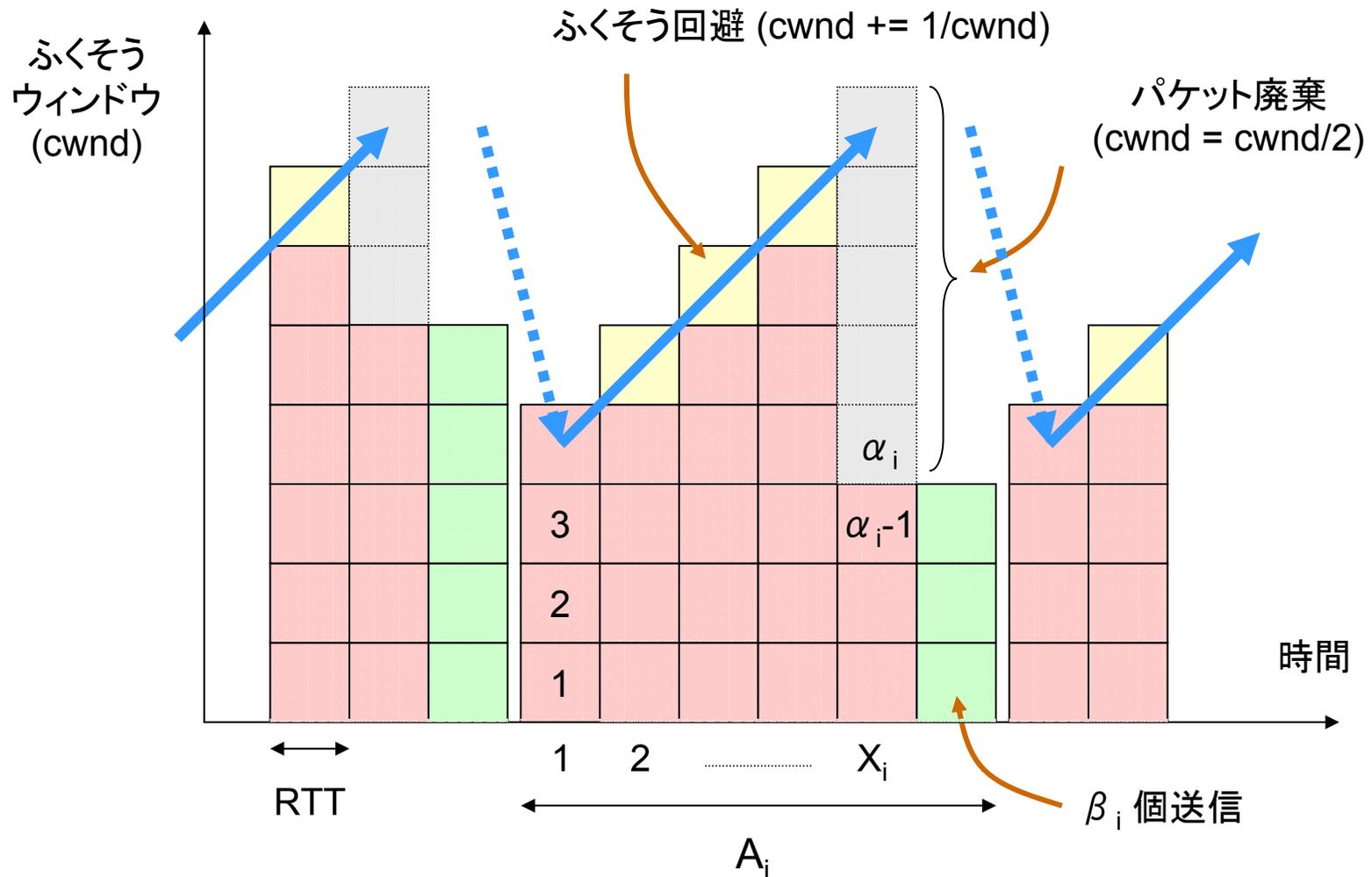
モデル (2)

- TCP Reno のふくそう回避アルゴリズムのモデル化 (2)



モデル (2)

- TCP Reno のふくそう回避アルゴリズムのモデル化 (2)



モデル (2)

パラメータの定義:

i	i 番目のふくそう回避期間
A_i	経過時間
Y_i	総送信パケット数 (廃棄パケットを含む)
X_i	廃棄発生までの RTT ラウンド数
W_i	廃棄発生時の RTT ラウンドのふくそうウィンドウの値
α_i	廃棄発生時までの送信パケット数 + 1
β_i	廃棄発生直後の RTT ラウンドの送信パケット数
p	パケット廃棄率
RTT	ラウンドトリップ遅延
仮定:	同一 RTT ラウンドの廃棄発生後のパケットはすべて廃棄

モデル (2)

解析:

(1) Y_i 、 W_i 、 α_i の関係

期待値

$$Y_i = \alpha_i + W_i - 1 \quad \longrightarrow \quad E[Y] = E[\alpha] + E[W] - 1$$

(2) $E[\alpha]$ (廃棄発生まで連続して送信可能なパケット数の期待値) の算出

$$E[\alpha] = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P[\alpha = k] = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot (1-p)^{k-1} p = \frac{1}{p}$$

(3) W_i と X_i の関係 (ふくそうウィンドウの増加)

$$W_i = \frac{W_{i-1}}{2} + X_i \quad \longrightarrow \quad E[X] = \frac{1}{2} E[W]$$

(4) Y_i 、 W_i 、 X_i 、 β_i の関係 (ふくそうウィンドウの積分)

$$Y_i = \sum_{k=0}^{X_i-1} \left(\frac{W_{i-1}}{2} + k \right) + \beta_i \quad \longrightarrow \quad E[Y] = \frac{E[X]}{2} \left(\frac{3}{2} E[W] - 1 \right) + E[\beta]$$

モデル (2)

解析:

(5) $E[\beta]$ (最終ラウンドの送信パケット数の期待値) の算出

$$E[\beta] = \frac{1}{2} E[W]$$

(6) $E[W]$ とパケット廃棄率 p の関係 ((1) ~ (5) 式より)

$$E[W] = 1 + \sqrt{1 + \frac{8(1-p)}{3p}} \approx \sqrt{\frac{8}{3p}} \quad (p \rightarrow 0) \quad \Rightarrow \quad \text{モデル(1) に一致}$$

(7) $E[A]$ (ふくそう回避時間の期待値) の算出

$$E[A] = RTT \cdot (E[X] + 1) = \dots = RTT \cdot \left(\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{2(1-p)}{3p} + \frac{1}{4}} \right)$$

モデル (2)

TCP フレンドリなパケット送信レート:

(1回のふくそう回避期間に送信されるパケット数の期待値)

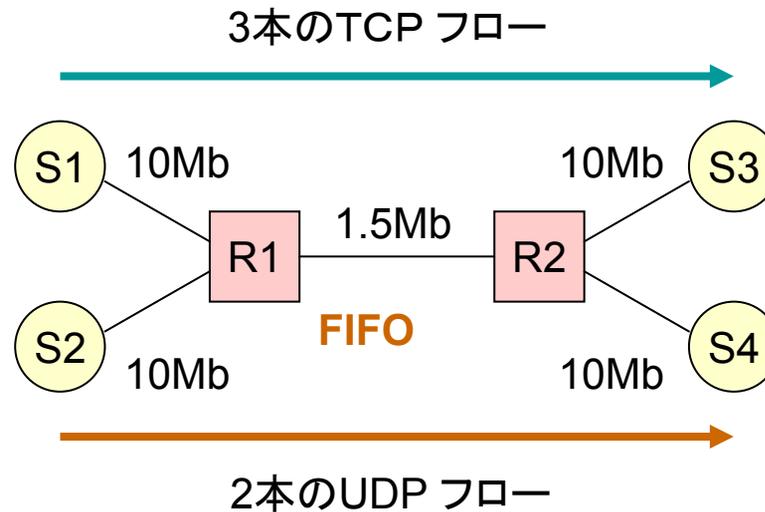
$$R = \frac{E[Y]}{E[A]} = \frac{\frac{1}{p} + \sqrt{1 + \frac{8(1-p)}{3p}}}{RTT \cdot \left(\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{2(1-p)}{3p} + \frac{1}{4}} \right)} \approx \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2p}}$$

モデル(1)に漸近 ($p \rightarrow 0$)

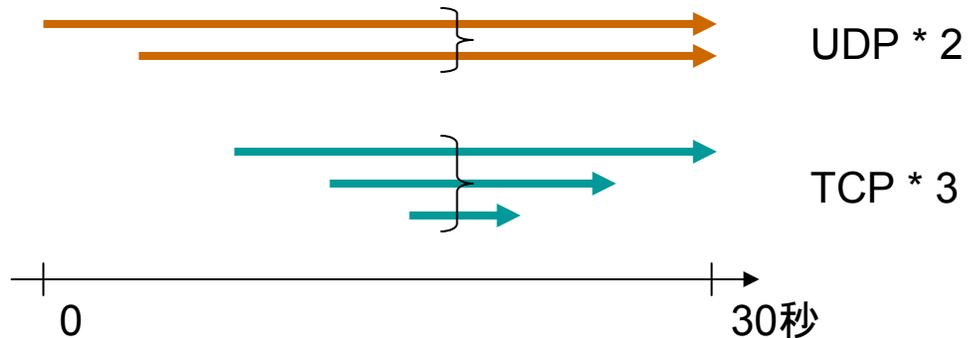
シミュレーション (1)

- TCP フレンドリの効果: シミュレーション条件

トポロジー



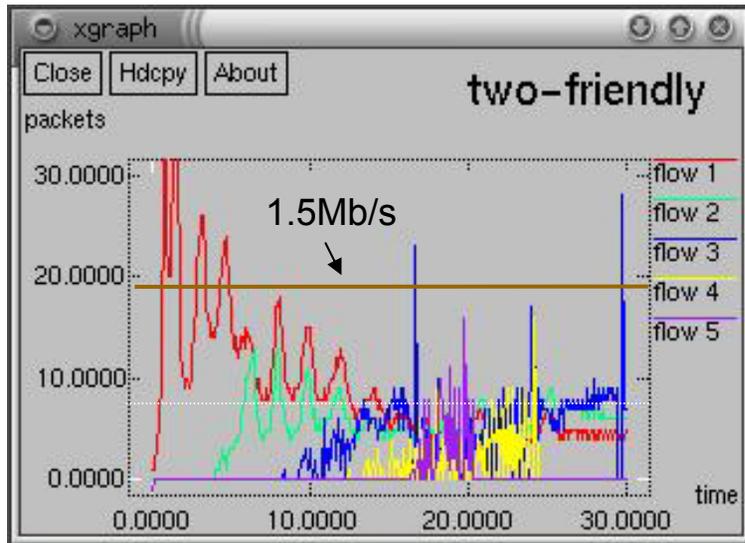
スケジュール



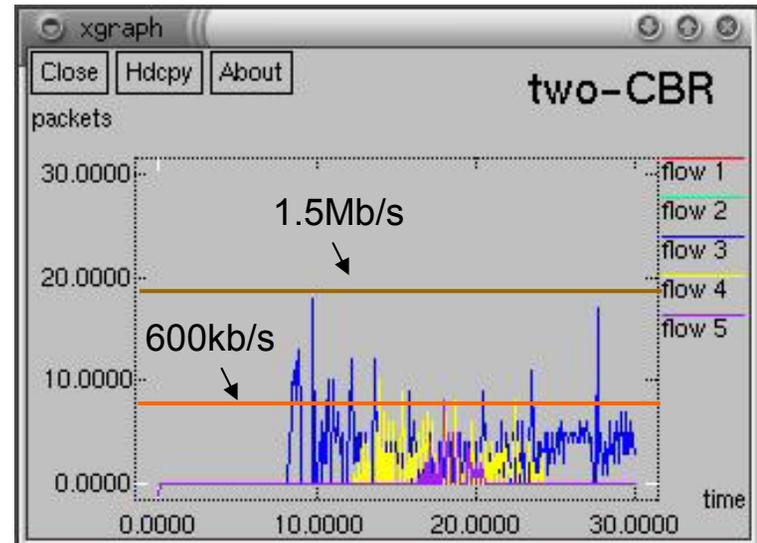
シミュレーション (2)

- TCP フレンドリの効果: シミュレーション結果

TCPフレンドリ対応



TCPフレンドリ未対応 (600kb/s * 2)



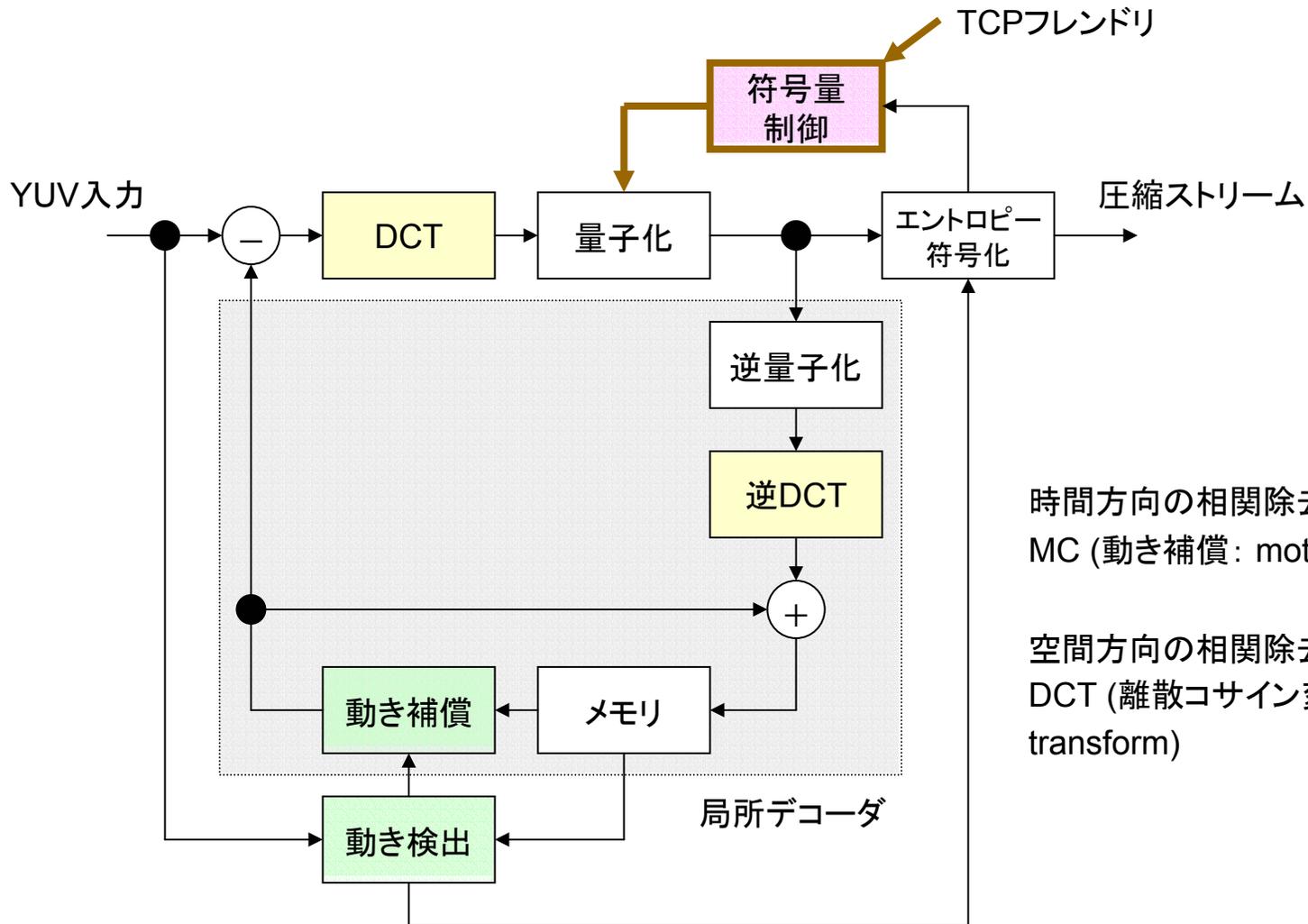
(0.1秒毎の送信パケット数のカウント)

	UDP#1	UDP#2	TCP#1	TCP#2	TCP#3
TCPフレンドリ	698kb/s	459kb/s	352kb/s	159kb/s	292kb/s
未対応	600kb/s	600kb/s	234kb/s	111kb/s	100kb/s

符号量制御 (メディア符号化側)

符号量制御 (1)

- 目標レートに合わせた量子化ステップサイズの制御



時間方向の相関除去:
MC (動き補償: motion compensation)

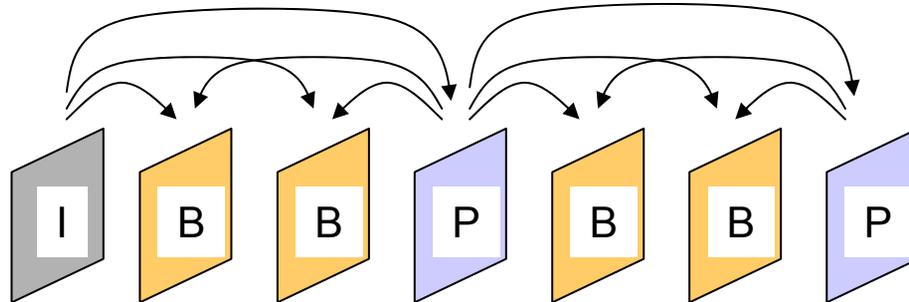
空間方向の相関除去:
DCT (離散コサイン変換: discrete cosine transform)

符号量制御 (2)

- 目標レートと量子化ステップサイズの関係

$$\log R = a \cdot \log Q + b \quad \longleftrightarrow \quad R \cdot Q = \text{const} = X_{\{I,P,B\}}$$

ピクチャタイプ (I, P, B) 毎にほぼ一定



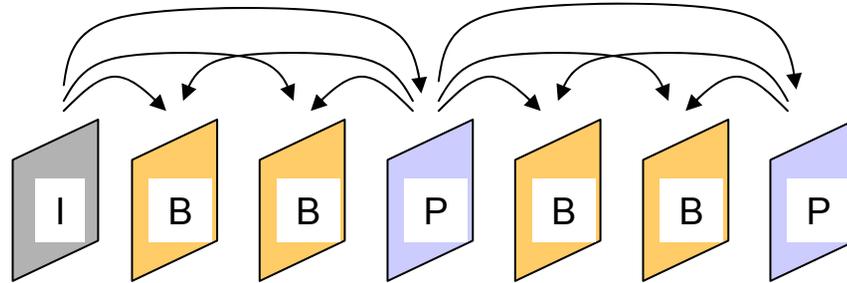
$X_{\{I,P,B\}}$ を事前に測定

目標レート R 確定

量子化ステップサイズ Q 確定

符号量制御 (3)

- TM5 アルゴリズム: ピクチャタイプに応じたレート配分



$$R_I = \frac{R_{remain}}{N_I + \left(\frac{X_P}{X_I}\right) \cdot N_P + \left(\frac{X_B}{X_I}\right) \cdot N_B}$$

$$R_P = \frac{R_{remain}}{N_P + \left(\frac{X_B}{X_P}\right) \cdot N_B}$$

$$R_B = \frac{R_{remain}}{N_B + \left(\frac{X_P}{X_B}\right) \cdot N_P}$$

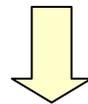
ピクチャ毎の符号量配分を決めるアルゴリズム

R_{remain} : 残余ビットレート (初期値: 目標レート R)

N_I, N_P, N_B : 各ピクチャの残余枚数

X_I, X_P, X_B : 一般的に $X_I > X_P > X_B$

1枚符号化する毎にパラメータを更新

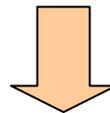


$R_I > R_P > R_B$ となる符号量配分 (準最適性の証明)

符号量制御 (4)

R-D Optimized Mode Selection

$$\text{minimize } J = D + \lambda \cdot R$$



p : パケット廃棄率

p_C : パケット廃棄が伝播していない確率

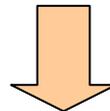
パケットロス率を考慮したひずみの定義:

$$D = \underbrace{(1-p)p_C D_{no-loss}}_{\text{パケット廃棄が発生しない場合のひずみ}} + \underbrace{p D_{concealment}}_{\text{パケット廃棄によるひずみ}} + \underbrace{(1-p)(1-p_C) D_{propagate}}_{\text{パケット廃棄の影響の伝播によるひずみ}}$$

パケット廃棄が発生しない場合のひずみ

パケット廃棄によるひずみ

パケット廃棄の影響の伝播によるひずみ



マクロブロック単位のイントラ・インターモード選択 (イントラ・アップデート)

アダプテーションの まとめ

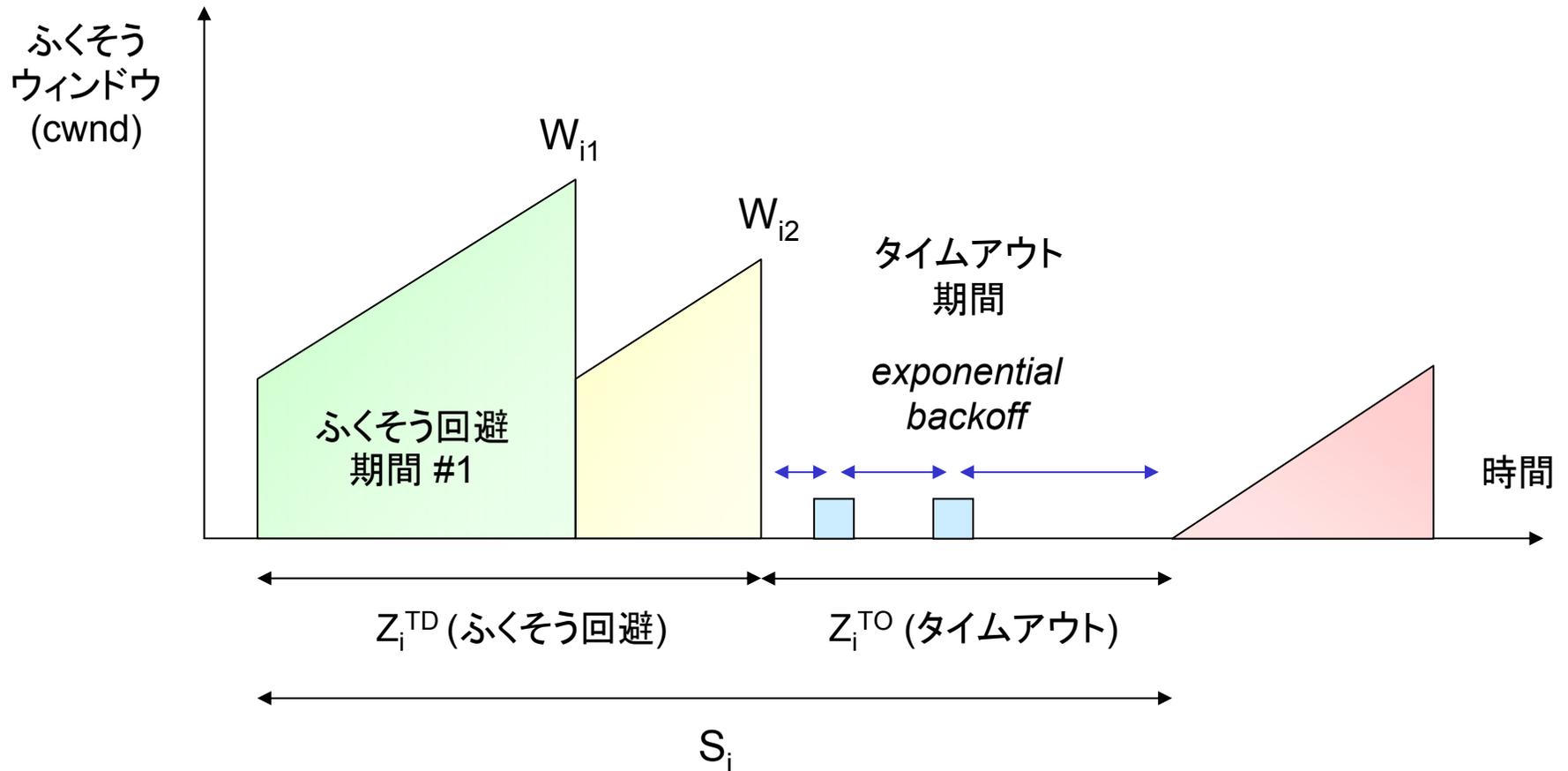
まとめ

アダプテーション	RTP	RTCP	その他
メディア同期	RTP タイムスタンプ ⇒ メディア内同期	NTP タイムスタンプ + RTP タイムスタンプ ⇒ メディア間同期	NTP ⇒ システム間同期
パケット廃棄対策	RTP ペイロードフォー マット ⇒ 再同期		FEC パケット デジタルファウンテン ⇒ 誤り訂正
フロー制御		パケット廃棄率 ラウンドトリップ遅延 ⇒ TCP フレンドリ	(RTP・RTCP 拡張)

TCPフレンドリ (厳密版)

モデル (3)

- TCP Reno のふくそう回避+タイムアウトのモデル化



モデル (3)

パラメータの定義:

i	i 番目の (ふくそう回避+タイムアウト) 期間
S_i	経過時間
M_i	総送信パケット数 (廃棄パケットを含む)
Z_i^{TD}	i 番目のふくそう回避期間の総経過時間
n_i	ふくそう回避期間の数
A_{ij}	j 番目のふくそう回避期間の経過時間
Y_{ij}	j 番目のふくそう回避期間の総送信パケット数
Z_i^{TO}	i 番目のタイムアウト期間の総経過時間
O_i	タイムアウト期間の総送信パケット数
T_0	タイムアウト間隔の初期値

モデル (3)

解析:

(1) M_i 、 Y_{ij} 、 O_i の関係

期待値

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} + O_i \longrightarrow E[M] = E[n]E[Y] + E[O]$$

(2) S_i 、 A_{ij} 、 Z_i^{TO} の関係

$$S_i = \sum_{j=1}^{n_i} A_{ij} + Z_i^{TO} \longrightarrow E[S] = E[n]E[A] + E[Z^{TO}]$$

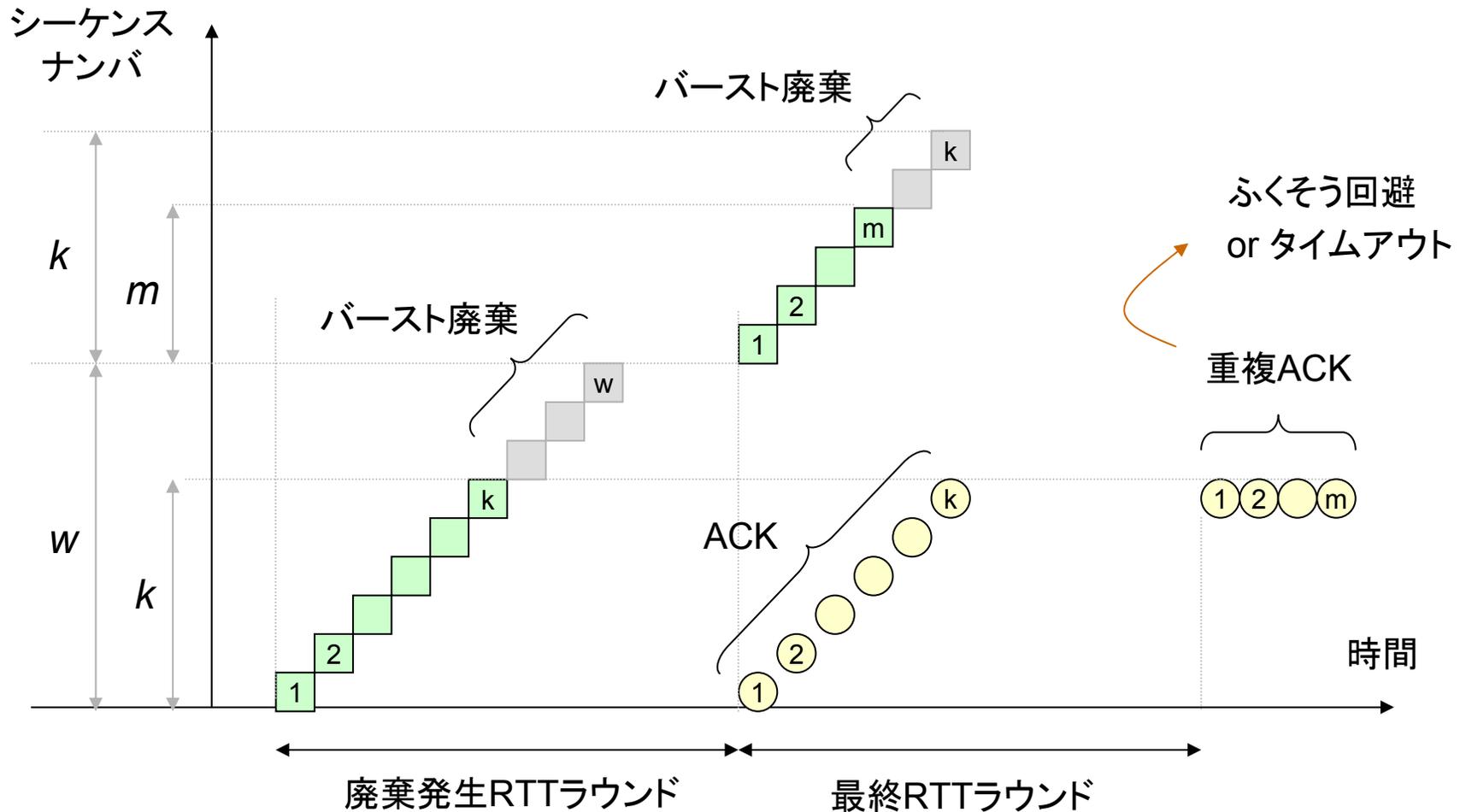
(3) TCPフレンドリなパケット送信レート (パケット送信数)

$$R = \frac{E[M]}{E[S]} = \frac{E[n]E[Y] + E[O]}{E[n]E[A] + E[Z^{TO}]}$$

未知パラメータ: $E[n]$ 、 $E[O]$ 、 $E[Z^{TO}]$... ?

モデル (3)

- 廃棄発生 RTT ラウンド付近の詳細モデル



モデル (3)

解析:

(4) w 個のパケットを送信して最初の k 個のパケットにACKが返る確率 (廃棄発生ラウンド)

$$P(k | w) = \begin{cases} (1-p)^k p & (k < w) \\ (1-p)^w & (k = w) \end{cases}$$

(5) w 個のパケットを送信してパケット廃棄が発生する確率

$$P(loss | w) = 1 - (1-p)^w$$

(6) w 個のパケットを送信して廃棄が発生した時、最初の k 個のパケットにACKが返る確率

$$P(k | w, loss) = \frac{P(k, loss | w)}{p(loss | w)} = \frac{P(k | w)}{\sum_{k=0}^{w-1} P(k | w)} = \frac{(1-p)^k p}{1 - (1-p)^w}$$

(7) k 個のパケットを送信して最初の m 個のパケットにACKが返る確率 (最終ラウンド)

$$P(m | k) = \begin{cases} (1-p)^m p & (m < k) \\ (1-p)^k & (m = k) \end{cases}$$

モデル (3)

解析:

(8) w 個のパケットを送信してパケット廃棄が発生し、それがタイムアウトになる確率
= w 個のパケットを送信して $thsh$ (通常は3) 個以上の重複ACKが返らない確率

$$P(\text{timeout} | w, \text{loss}) = \begin{cases} 1 & (w < thsh) \\ P(m < thsh | w, \text{loss}) & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$= \min \left(1, \sum_{k=0}^{thsh-1} P(k | w, \text{loss}) + \sum_{k=thsh}^w P(k | w, \text{loss}) \sum_{m=0}^{thsh-1} P(m | k) \right)$$

$k < thsh$ の場合

$k \geq thsh$ & $m < thsh$ の場合

$$= \min \left(1, \frac{(1 - (1 - p)^{thsh})(1 + (1 - p)^{thsh} (1 - (1 - p)^{w - thsh}))}{1 - (1 - p)^w} \right)$$

モデル (3)

解析:

(9) パケット廃棄を検出したときに、それがタイムアウトである確率

$$\begin{aligned} P(\text{timeout} | \text{loss}) &= \sum_{w=1}^{\infty} P(\text{timeout} | w, \text{loss})P(w) \\ &\approx P(\text{timeout} | E[W], \text{loss}) \end{aligned}$$

(10) $E[n]$ (ふくそう回避期間の回数の期待値) = タイムアウト間の廃棄検出回数の期待値

$$E[n] \approx \frac{1}{P(\text{timeout} | \text{loss})}$$


モデル (3)

解析:

(11) タイムアウト期間に k 個のパケットを送出する確率

= タイムアウト期間に連続して $k-1$ 個のパケットが廃棄される確率

$$P(O_i = k) = p^{k-1}(1-p)$$

(12) $E[O]$ (タイムアウト期間中の送信パケット数の期待値)

$$E[O] = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P[O_i = k] = \frac{1}{1-p}$$

モデル (3)

解析:

(13) 連続 k 回のタイムアウトが発生したときのタイムアウト期間の経過時間

$$L_k = \begin{cases} (2^k - 1) \cdot T_0 & (k \leq 6) \\ (63 + 64(k - 6)) \cdot T_0 & (k > 6) \end{cases}$$

 バックオフ回数の最大値

$T_0, 2T_0, 4T_0, 8T_0, 16T_0, 32T_0, 64T_0$

(14) $E[Z^{TO}]$ (タイムアウト期間の継続時間の期待値)

$$\begin{aligned} E[Z^{TO}] &= \sum_{k=1}^{\infty} L_k \cdot P[O_i = k] \\ &= T_0 \frac{1 + p + 2p^2 + 4p^3 + 8p^4 + 16p^5 + 32p^5}{1 - p} \end{aligned}$$

モデル (3)

TCP フレンドリなパケット送信レート:

(1回のふくそう回避+タイムアウト期間に送信されるパケット数の期待値)

$$R = \frac{E[M]}{E[S]} = \frac{E[n]E[Y] + E[O]}{E[n]E[A] + E[Z^{TO}]}$$
$$\approx \frac{1}{RTT \cdot \sqrt{\frac{2p}{3}} + T_0 \cdot \min\left(1, 3\sqrt{\frac{3p}{8}}\right) \cdot p(1 + 32p^2)}$$

ラウンドトリップ遅延、パケット廃棄率+タイムアウト設定時間

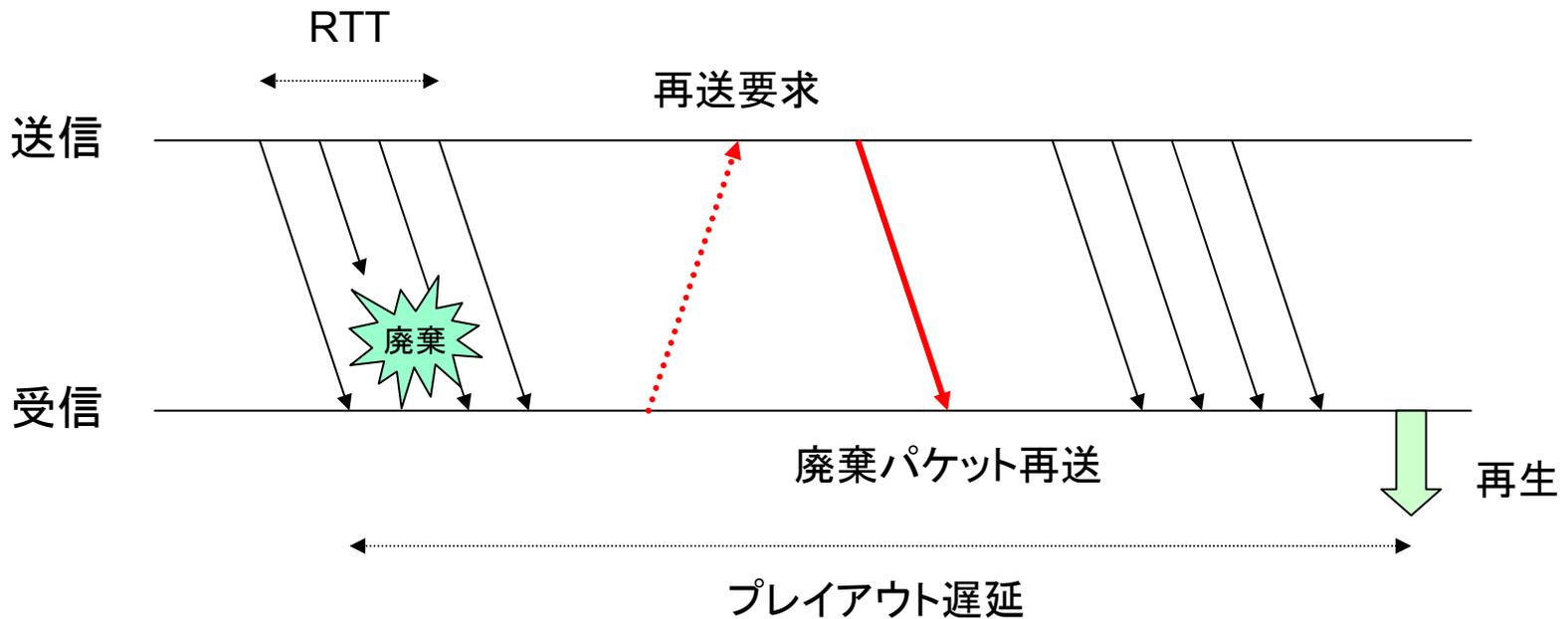
実践編

パケット再送

• 条件付きパケット再送

対象：遅延の小さい (RTTの小さい) 少人数会議・放送

条件：RTT \ll プレイアウト遅延

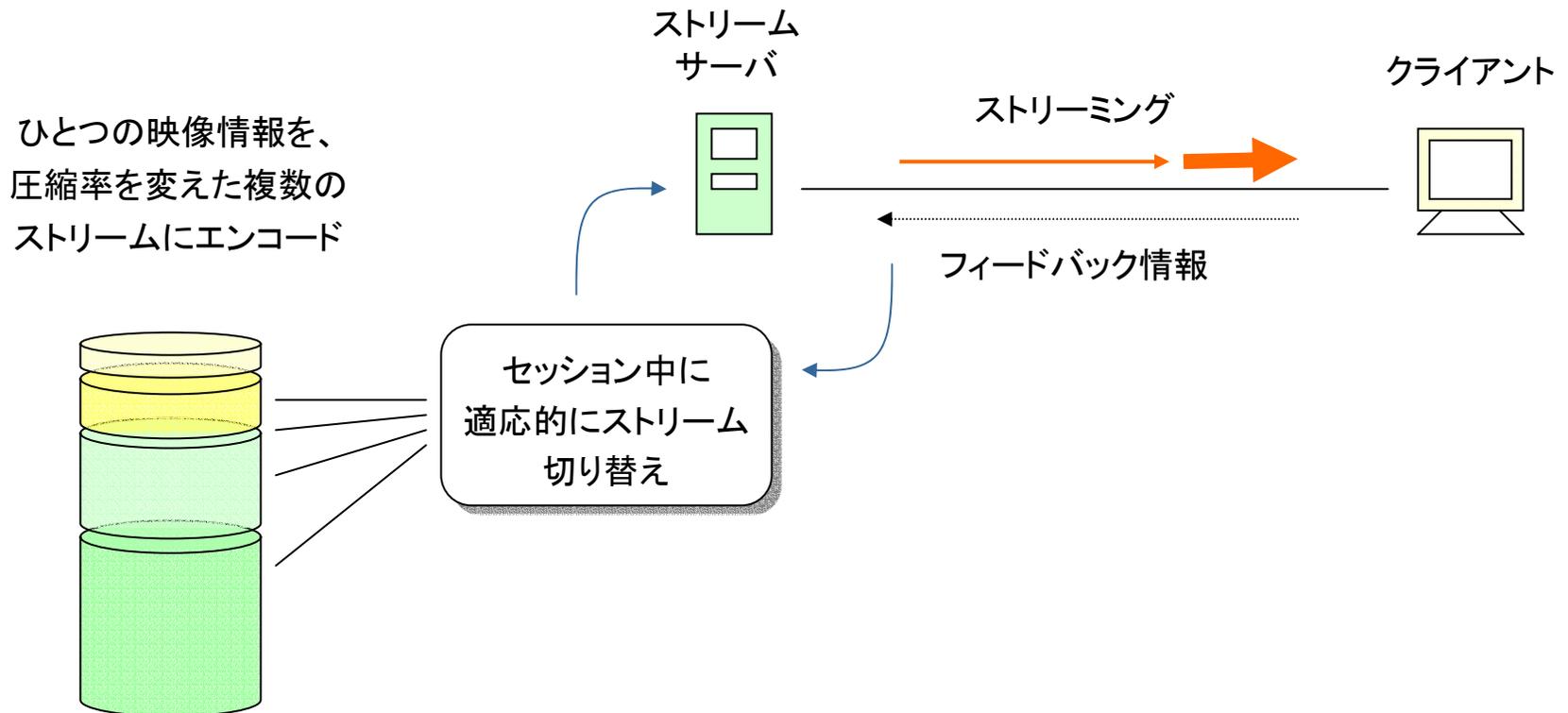


TCPフレンドリの応用 (1)

• 転送レートの切り替え

対象：帯域幅に余裕のない片方向インターネット放送

条件：転送レート > TCPフレンドリ見積もりレート



TCPフレンドリの応用 (2)

• プリフェッチング

対象：帯域幅に余裕のある片方向インターネット放送

条件：転送レート \ll TCPフレンドリ見積もりレート

