



# 通信の品質保証

## — 快適な情報通信はいかに実現されるか



国立情報学研究所  
計 宇生



# 概要

- 通信システムの構成
  - 情報通信の品質
  - 品質制御の方法
  - 品質保証モデル
  - まとめ
- 

# 通信の目的

- 目的: 情報を物理的に離れたところに届けること
  - 速さ、正確さ: あらゆる場合で必要
  - 機密の保全、確実性: 多くの場合で必要
- 手段: ネットワーク
  - (昔から)のろし、手紙、電話、インターネット
  - より速く、多量な情報の伝達が可能になってきた

# 通信システムの構成

- ネットワーク
  - 一般的に情報を伝達するための機器、回線等からなるものをいう
  - 関連用語：クラウドコンピューティング：ネットワーク自体が情報や計算能力をもっている
- プロトコル：通信規約
  - ネットワーク上で情報のやり取りの手順を決めるもの
  - 例：TCP/IP、HTTP、SMTP、FTP

# 通信プロトコル

- 新しい機能の実現には新しいプロトコルが必要
- 標準として規定しているため、頻繁に変わることはない
- 標準を制定する機関: IETF、IEEE、ITU、3GPP など
- RFC: インターネット上で使用するさまざまなプロトコルの集合

# ■ ネットワークの要素

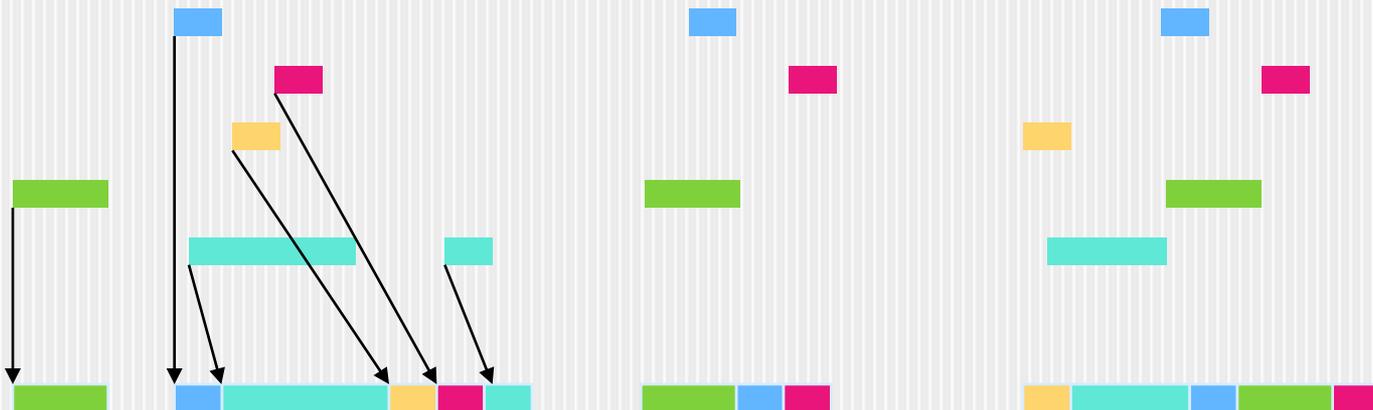
- ノード: 通信の端点および中間の装置
  - コンピュータ、携帯端末、電話機、FAXマシン
  - ルータ、交換機、ブリッジ、ハブなど
- リンク: ノードとノードを結ぶもの。
  - 銅線、光ケーブル、電話線、LANケーブル
  - 無線電波
- インターネット: ネットワークのネットワーク

# 情報の流れとしてのフロー

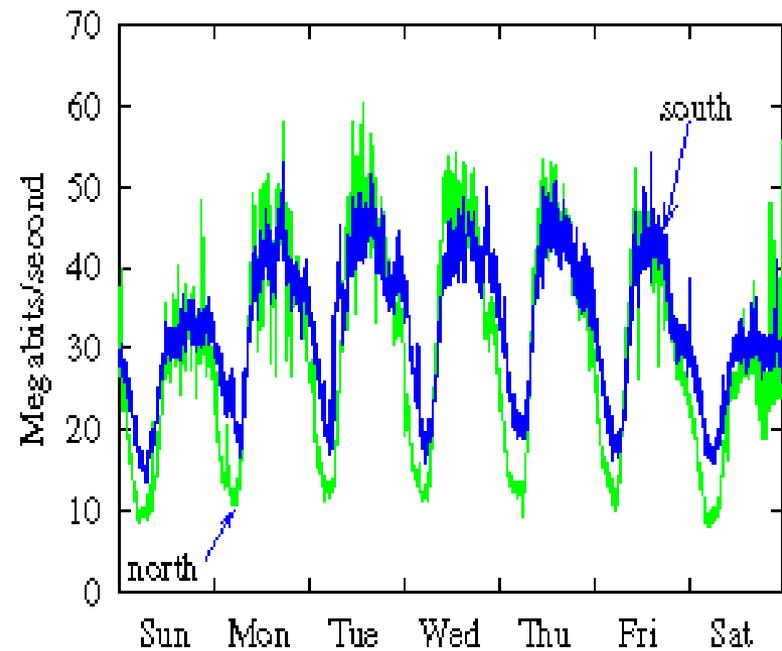
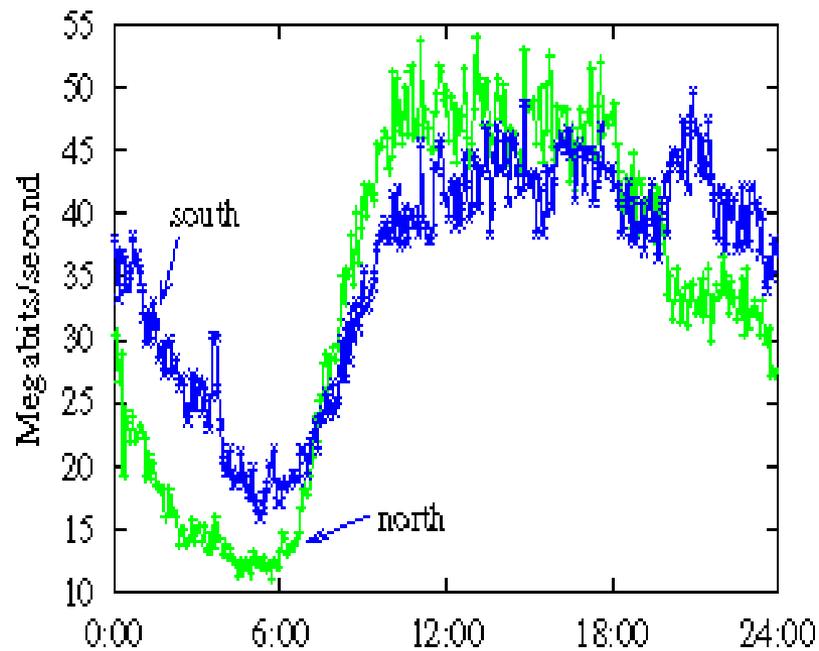
- フロー
  - 送信元(ソース)と宛先(目的地)の対を有する、ネットワーク上の情報の流れ
- 回線交換: フローが回線を独占する
  - 電話
- パケット交換: フローが一連のパケットからなる
  - インターネット

# トラヒック

- **トラヒック(交通量): ネットワーク上に流れる情報の量**
  - **トラヒックの単位: ビット/秒 (bps)**
  - **例: 64kbps, 100Mbps, 1Gbps**
  - **送信レート = パケットサイズ / パケット間隔**

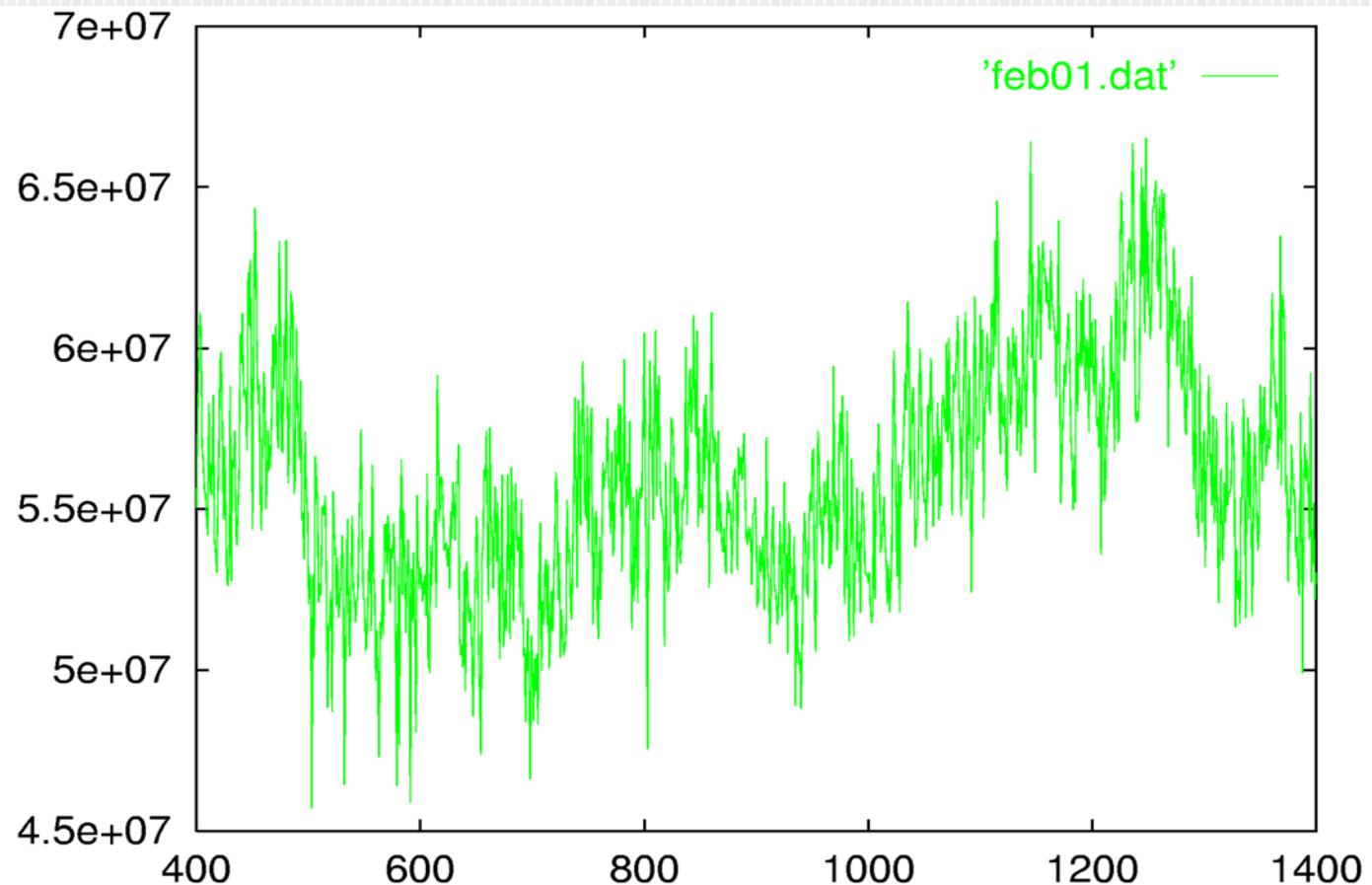


# ネットワークトラフィックの例



出典: K. Thompson et al, Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics, IEEE Networks (1997).

# より細かいスケールで見た場合



# 長期依存性とヘビーテール

- 長期依存性（自己相似性）
  - 長い時間間隔での強い相関
  - 長い時間スケール上での変動
- 長期依存性の原因：
  - ヘビーテールなファイル長分布
  - プロトコルやネットワークの構造による
    - TCP のフィードバックメカニズム
    - 長期依存性は伝送路に沿って伝播されやすい

# インターネットトラヒックの特性

- 変動性、周期性 : daily, weekly, ...
- 非対称性 : 上り、下り
- 突発性、ランダム性
- 増加傾向 :
  - 総務省の2009年8月の調査では、ブロードバンドサービス契約者のトラヒック総量は推定で1.23Tbps。1年で約40.3%増。
- 長期依存性、ロングテール性

# 情報通信の品質

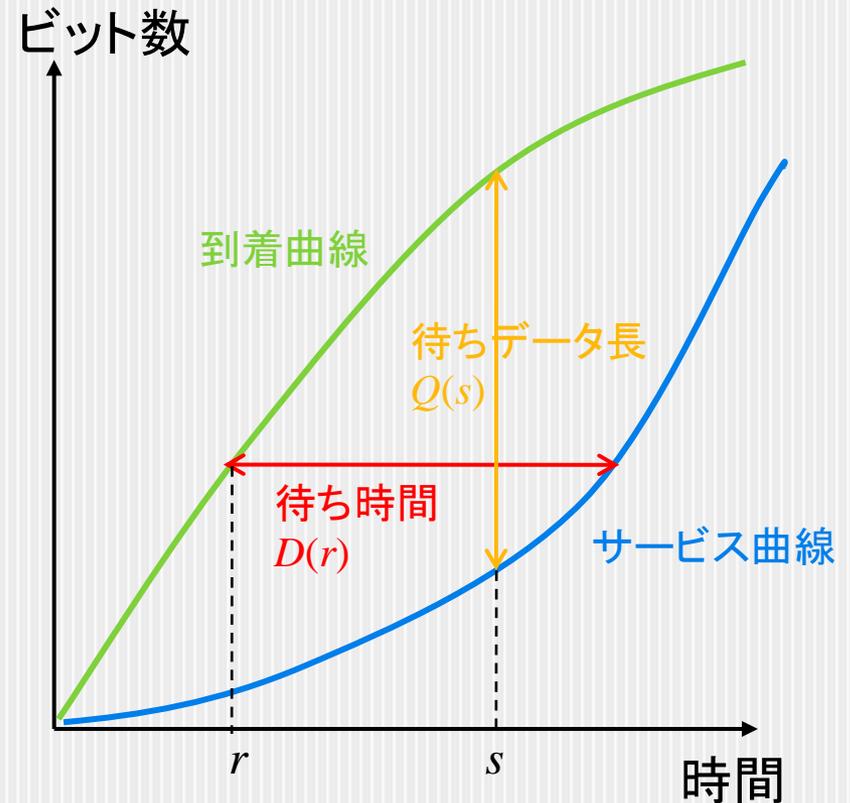
- ネットワーク側からみた通信の品質：QoS（Quality of Service, サービス品質）
  - 遅延、応答時間→「速さ」に関係する
  - 損失率、信頼性→「正確さ」、「確実性」に関係する
- 品質保証の種類
  - 信頼性の保証
  - サービス品質クラス
  - DiffServ: Differentiated Service（品質の差別化）
  - 品質の定量保証

# 品質の保証がなぜ必要か

- ネットワーク資源が限られている
  - リンクの帯域
  - ノード内のバッファ
- 道路の場合：緊急車両の優先、バスレーン、カープール
- アプリケーションからの要求が異なる
  - 電子メール、データ：確実性、機密性
  - IP電話、ストリーミング：実時間性（速さ）

# 品質のグラフ表現

- 到着曲線: ある時刻までのフローの到着ビット数
- サービス曲線: ある時刻までのフローの受けたサービス量
- $D(r)$ : 時刻  $r$  に到着したパケットの遅延
- $Q(s)$ : 時刻  $s$  におけるフローの待ちデータ長





# 品質保証の手段

- ネットワークレベルの制御
  - ネットワーク計画、帯域設計
- フローレベルの制御
  - 受付制御
  - フロー制御
- パケットレベルの制御
  - スケジューリング
  - TCPの輻輳制御

# QoS保証の必要性

## 輻輳: ネットワークの混雑

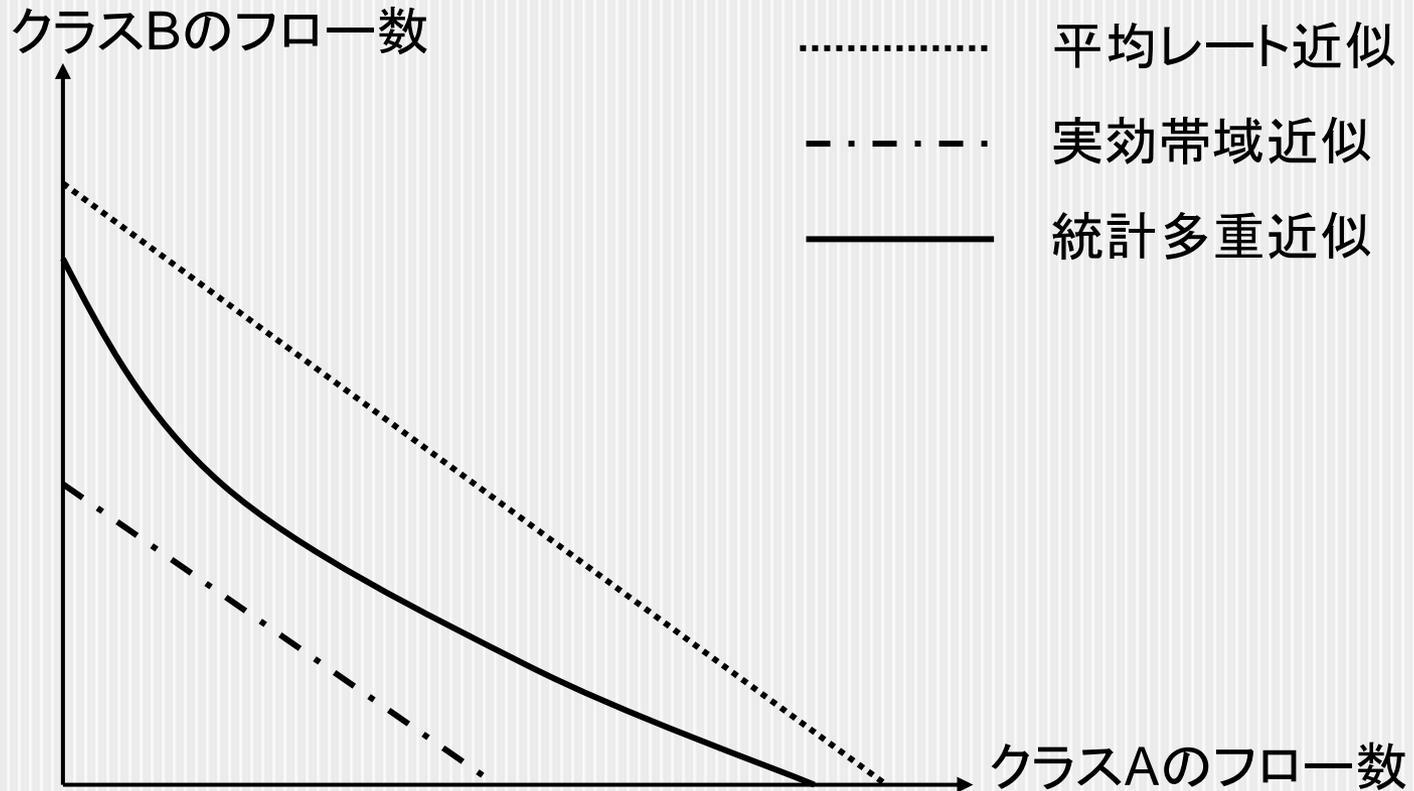
- 原因:
  - ネットワークが処理できる以上のデータを多くのソースから送られてくること
- 現象:
  - パケットの紛失 (ルータにおけるバッファのオーバーフロー)
  - 長い遅延時間 (ルータのバッファの長い行列)
- ネットワーク帯域の公平な配分
  - フロー間の公平性の保証
  - フローの分離

# ネットワークレベルの制御

## ■ 帯域設計

- 無視できる程度の呼損率のための必要帯域
- 長時間平均による近似: 帯域の無駄がないが、危険
- 実効帯域による近似: 保守的であるが、安全
- 統計的多重を考慮した近似: 比較的安全でかつ帯域の無駄が少ない

# 必要帯域の計算



# フローレベルの制御

- 受付制御
  - ネットワーク資源の把握
    - リンクの状態
    - ルーティング
  - サービス品質要求を元に必要な帯域を算出
  - サービス可能なフローの集合を決める
  - 品質の保証ができる場合にのみ新しいフローを受け付ける

# パケットレベルの制御

- パケットスケジューリング
  - サービスを受けようとするパケットの異なるフローが同じ資源を競合するとき、それらのサービス優先度を定めること
  - 同じフローに属するパケットは到着順にサービスされる
- スケジューリングの目的
  - 公平な資源配分
  - フロー間の分離による品質保証

# スケジューリングの例

- FIFO(First-In First-Out)
  - 先着順サービス
- 優先スケジューリング(PQ)
  - 到着順に関係なく、優先度の高いパケットが先にサービスされる
- ラウンドロビン(RR)
  - 順繰りサービス
- プロセッサ共有(PS, GPS, WFQ)
  - 共有の割合に応じてサービスされる
  - フロー間の干渉の解消、資源の確保ができる

# スケジューリングとサービス品質

- PQによる優先制御
  - 緊急データ、制御用データなど
- WFQで品質の定量保証
  - 待ち行列の最大長
  - 待ち時間の上限
- 他の制御との連携が必要
  - 受付制御
  - トラヒックシェーピング

# 品質の定量保証

- Leaky Bucket (漏れバケツ) による  
トラヒックシェーピング

$$(\sigma, \rho) \sim \int_{\tau}^t \lambda(t) dt \leq \rho \cdot (t - \tau) + \sigma$$

- Leaky Bucket での最大待ち時間

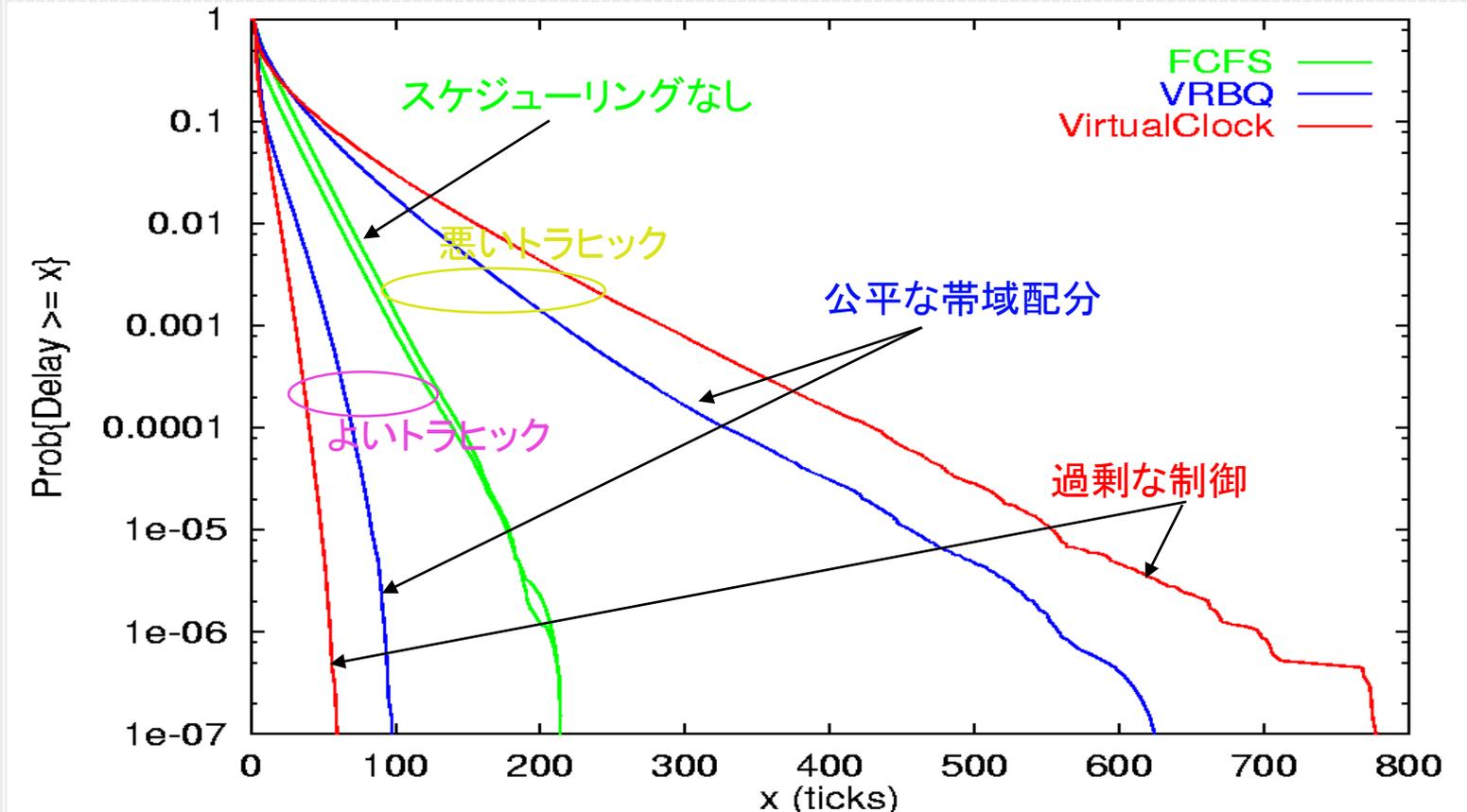
$$D_i \leq \frac{\sigma_i}{\rho_i}$$

- GPSスケジューリングのとき、すべてのフローが同時に最大限にデータを送り込む時の待ち時間は最大



# パケットスケジューリングの効果

遅延のテール分布



単位情報の転送時間

# 無線ネットワークの品質制御

- 無線ネットワークの特徴
  - 限られた帯域
  - パケット損失の確率が高い
  - 連続エラーの発生
  - ユーザの移動
  - その他、パワーの制限、チャネル状態予測の難しさなど
- 資源をどのように配分すればよい？
  - 公平性の基準

# 資源配分の公平性

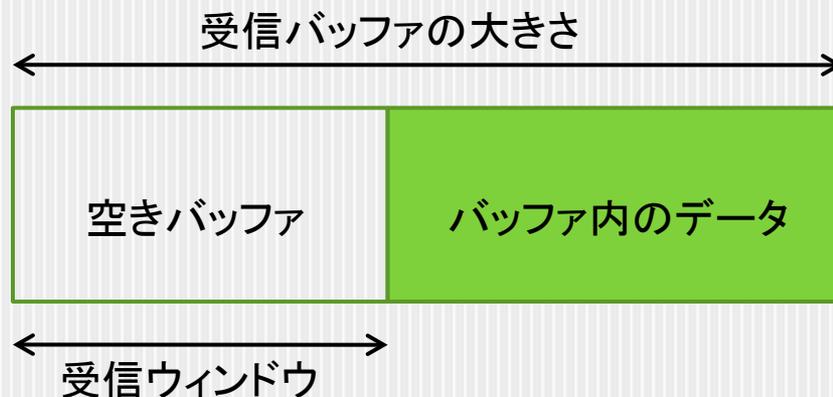
- Greedy (貪欲的) スケジューリング
  - システムの性能を最大限に追求
- MAX-MIN 公平
  - フロー間の公平性を最大限に追求
- 比例的公平 (Proportional Fairness)
  - 性能と公平性の両方を追求

# TCPにおける制御

- 信頼性の保証
  - コネクション型通信：データ伝送の前にコネクションを確立
  - 再送機構
  - 順序制御
- フロー制御と輻輳制御
  - ウィンドウ制御：受信側の破綻がないように、送信側で送りすぎないように制御する
  - 輻輳制御：パケット損失が起こったら送信を抑制する

# TCPのフロー制御

- 連続(ACKなしで)送信できる最大パケット数は受信ウィンドウと輻輳ウィンドウの小さい方
- 受信側: 空きバッファの大きさ(受信ウィンドウ)を随時に送信側に通知
- 送信側: 送信されたが、ACKされていないデータを保持する



# 品質保証モデル

- 定量保証: 絶対的な性能指標の提供
  - 最小レート
  - 最大遅延
  - 最大損失
- 相対保証: 相対的な品質クラスを提供
  - DiffServ: インターネットのQoSアーキテクチャ
  - その他: WiMAXのQoSクラスなど

# DiffServ: サービス品質の差別化

- Expedited Forwarding(EF)
  - 損失、遅延、遅延変動がともに小さく、帯域が保障されたエンド-エンド間のサービスを提供
- Assured Forwarding(AF)
  - EFより保障のレベルが低い。異なるレベルのサービス保障を提供し、4つのクラスとそれぞれに対応する3つの廃棄優先度が設定されている。
- Class Selector(CS)
  - 逆互換性のためのクラス
- Default(BE)
  - ベストエフォートサービス

# WiMAXのQoSクラス

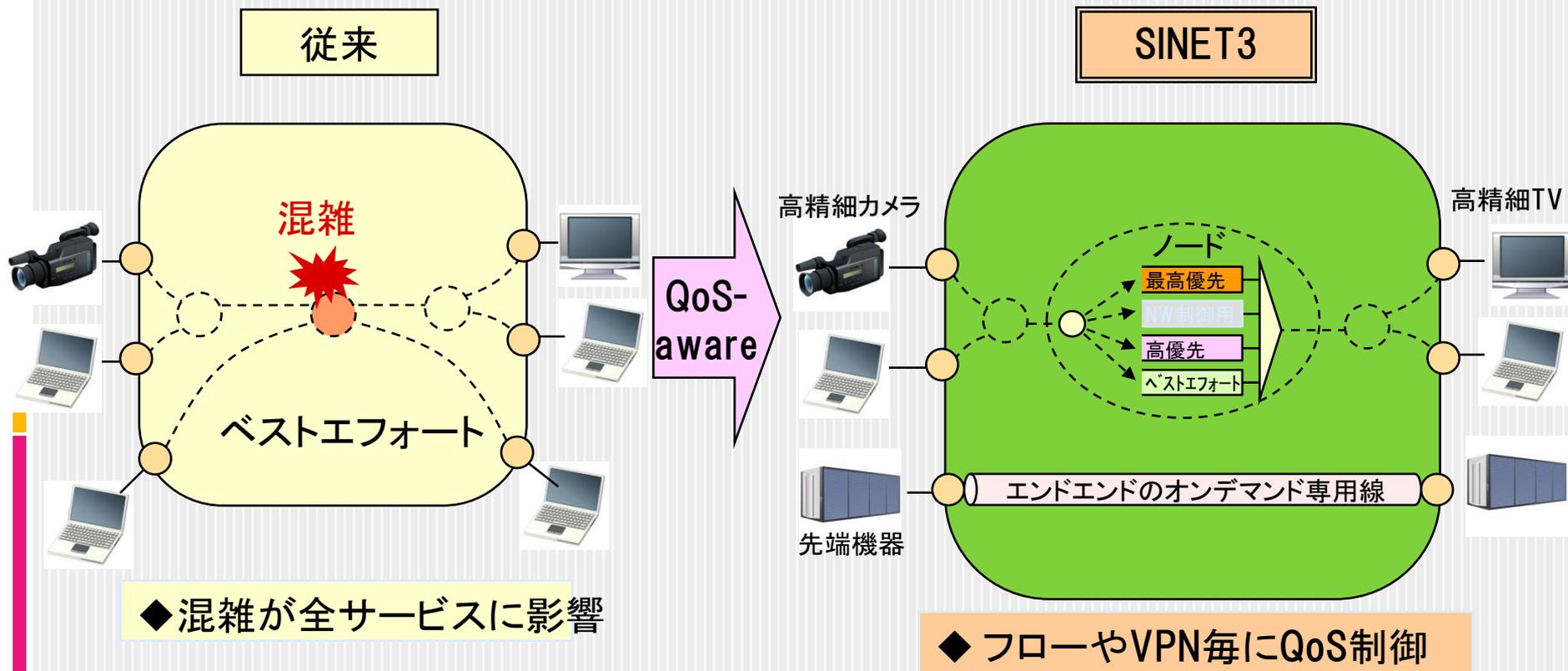
- 帯域授与型サービス(UGS): 圧縮なしの音声データなどのような固定レートのリアルタイムサービス用
  - 最大持続レート、最大遅延、許容ジッターの保証が必要
- 実時間ポーリングサービス(rtPS): MPEGなどの可変レートのリアルタイムアプリケーション用
  - 伝送レートと最大遅延の保証が必要
- 拡張実時間ポーリングサービス(ertPS): 圧縮された音声データのような可変レートのリアルタイムアプリケーション用
- 非実時間ポーリングサービス(nrtPS): 遅延の許容性があるが、伝送レートが保障されたデータ用
- ベストエフォートサービス(BE): 品質要求のないデータ用

# 品質差別化の方法

- PQによる厳密な優先度
  - 品質の高いサービスクラスの packets は必ず低いクラスの packets より先に伝送される
  - 高いクラスのトラフィックが増えた場合、低いクラスの packets はずっとサービスされない可能性がある
  - 受付制御と組合せての使用が必要
- WFQなどによる容量の差別化
  - 品質の高いクラスには、その予想負荷に対し、より大きな帯域を割当てることによって、遅延を少なくする。

# SINET3におけるQoSサービス

ネットワーク性能に敏感なアプリケーション(高精細映像等)をサポート



# まとめ

- 通信システムの定義
- 情報がネットワーク上で流れる様子
- 通信サービスの品質
- 3つのレベルによる品質制御
- インターネットでの品質保証
- NIIで提供している学術研究ネットワーク SINET3のQoSサービス