

ネットワークアーキテクチャと 今後の研究の方向性



大阪大学
大学院情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻

村田正幸

murata@ist.osaka-u.ac.jp

<http://www.anarg.jp/>

M. Murata

1



これまでの基礎研究の役割

- コンピュータネットワークはまだ40年
 - ◆ 第1フェーズは終わった
- 主として応用数学に基づいて発展してきた
 - ◆ トラヒック理論、待ち行列理論⇒ネットワーク設計、プロトコル性能、QoS保証
 - ただし、理論の発展がネットワークの発展を促したとは言えない（インターネットの場合は特に後付が多い）
 - 結局使えるのはアーラン呼損式とM/G/1待ち行列システム
 - 「負荷が容量に近づくと急に立ち上がる」
 - 「ばらつきが大きいと遅延が大きくなる」
 - ◆ 制御システム⇒ネットワークの安定性
 - ◆ 非線形システムの最適化⇒資源配置問題
 - ◆ グラフ理論⇒ルーティング、分散制御

M. Murata

2



過去における基礎研究の貢献

- ランダムアクセス方式における確率モデルと解析手法
 - ◆ ALOHA、CSMA/CD、CSMA/CA、トークンリング
- 流体近似モデルによるAIMDの考え方の妥当性検証
 - ◆ TCPの輻輳制御
- 確率モデル、流体近似モデル、大偏差理論
 - ◆ リーキーバケット、スケジューリングアルゴリズム、実効帯域
- 協力、非協力ゲーム理論の応用
 - ◆ 資源割当問題、輻輳制御
- 制御理論の応用
 - ◆ AQMによるTCPの性能向上の解析、安定性
- 最適化問題の応用
 - ◆ 経路制御(BGP、OSPF)



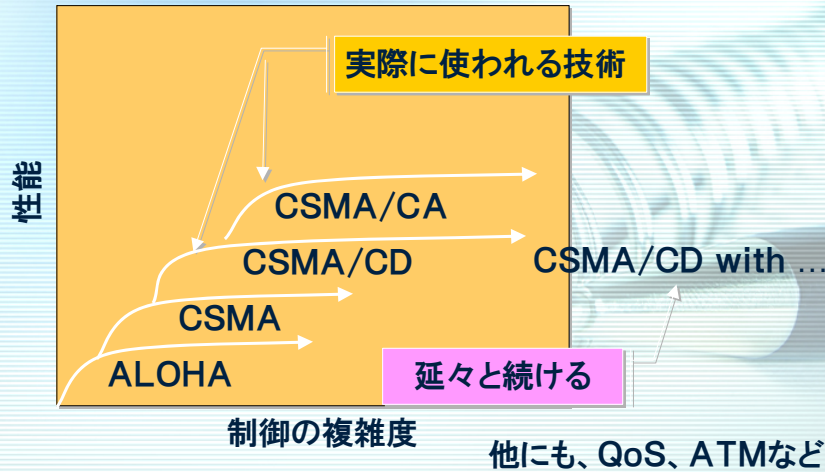
しかし従来基礎研究とされていたものは、

- インターネットプロトコルは基礎研究に基づくものか
 - ◆ TCPはもともと科学的な発見に基づくものとは言えない
 - 理論的にも優れたものであることの証明は後付け
 - CSMA/CDも同様
 - ◆ IPルーティングは最適性の議論が止まったまま
- システムのモデル化と性能評価
 - ◆ トラヒックのモデル化、トポロジーのモデル化、プロトコル設計、計測など
 - ◆ グラフを書くことになっていないか
 - ◆ 計測でも、分析とそれに基づいた方式はあっても、なぜそのようなデータが得られるのかは十分には解明されていない
 - ◆ モデル化後の問題には最適解はあるが、最適なアーキテクチャまでは至っていない
- アーキテクチャデザイン
 - ◆ 経済学と同じで、ルールを決めて、だめなら別の方法(規制強化、規制緩和)を探しているだけ



ネットワーク研究者の悪い癖（１）

Complexity-Performance Curve



M. Murata

5



ネットワーク研究者の悪い癖（２）

■研究者・技術者の習性

- ◆ その時々々のボトルネックにチューンした制御を考える、しかし、...

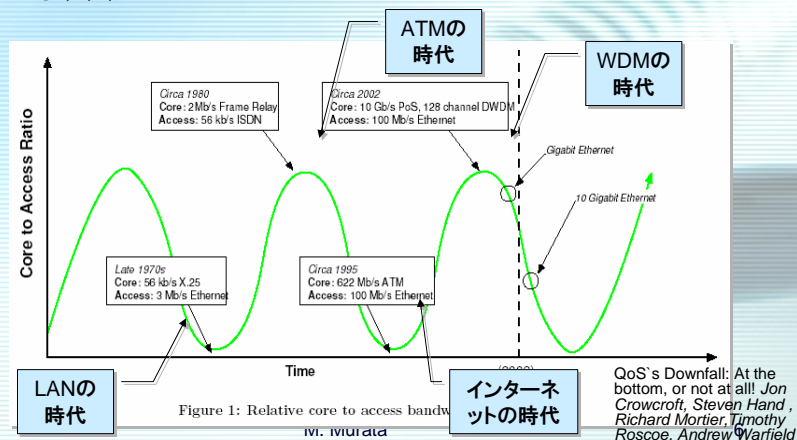


Figure 1: Relative core to access bandwidth

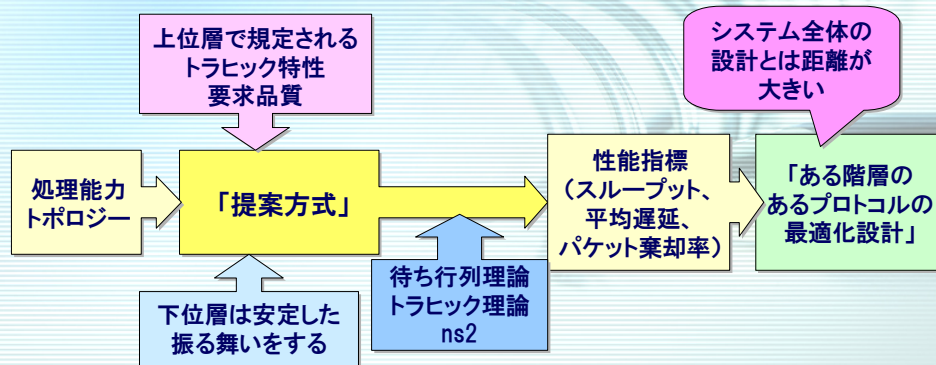
M. Murata



システム性能評価とは

■従来のネットワーク設計

- ◆現状および近未来の技術水準に基づくサービス品質の最適化



M. Murata

7



今何が性能評価を難しくしているか (1)

■どんな評価モデルを使ったらいいかわからない

- ◆ネットワークは大規模化している
- ◆ネットワークは多様化している
 - RTT、パケット棄却率、回線容量
 - ISPによる階層化やクラスタリング
 - 経路は変化する
 - これを使っておいたらひとまず安心というトポロジーがない (dump bell, parking-lot)
- ◆トラフィック(アプリケーション)は多様化している
 - エンドホストの動作がトラフィック生成過程に影響を与える
 - プロトコルは実装レベルになるといろいろ (TCP、アプリケーションプロトコル)
 - ポアソン到着でも十分なのに、査読者がいろいろ言う

M. Murata

8

今何が性能評価を難しくしているか (2)



■ 実用性を問われる

- ◆ インターネットでは当然ではあるが、、、
- ◆ 実装まで要求される
 - OSを知っていないとつらい
 - マルチスレッドプログラミング
 - ただし、HWまで要求されないのは僥倖
- ◆ 現実ネットワークにおける測定
 - モデル抽出ができないので、さまざまな要因が入り込み、抽象化されたシミュレーション、解析とあわない
 - 例えば
 - タイマ粒度
 - TCPの研究なのにルーティングも考慮しないとけない
 - ISPが(余計な)帯域制限をかけている
 - OSによってプロトコル実装はいろいろ

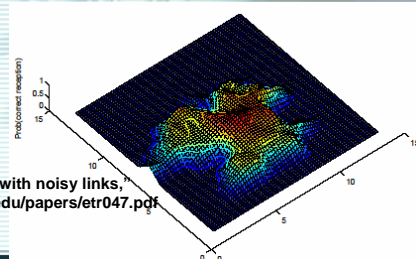
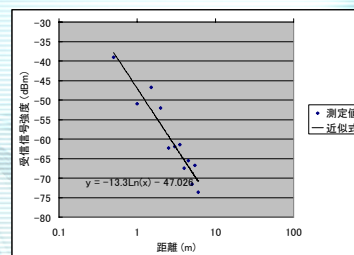
今何が性能評価を難しくしているか (3)



■ 不安定な無線ネットワーク(含 アドホック、センサーネットワーク)

- ◆ 環境変動が激しく、数学モデルによる予測が不可能
- ◆ 受信強度は距離の2乗に反比例?
- ◆ フェージング、マルチパスの数学モデルは意味があるか?
- ◆ ビット誤りはギルバートモデルか?

■ 時間的な変動が激しい



Lorna Booth et al., "Ad hoc wireless networks with noisy links," CALTECH available at www.paradise.caltech.edu/papers/etr047.pdf



妥当な性能評価モデルとは

- 妥当な性能評価モデルはある
 - ◆ 性能評価の対象をはっきりさせる
 - ◆ 妥当なレベルに抽象化された入力、上位層、下位層の振る舞い
- 「経験と勘」
 - ◆ ほんとうは「デザインセンス」
 - ◆ 幅広い知識と深い洞察力、バランス感覚



大規模システムにおける性能評価

- 従来の性能評価手法はもはや使えない
 - ◆ 従来は階層化モデルの恩恵を受けてきたが、階層化だけでは問題を単純化できない
 - 上位層(トラヒック量、特性)はわからない
 - 下位層は変動する
 - 「典型的」なネットワークモデル(トポロジー、処理能力)がわからない
 - ◆ 対象システムが大規模化する現在、モデル化(興味のある部分の抽出)はかえって特徴を見失う
 - ◆ モデル化自体に意味がない
- システム全体の振る舞いに興味がある
 - ◆ 特に自律分散系、自己組織化を含むダイナミックシステム
 - ◆ 縦の関係、横の関係は密接な相互関係を持つ



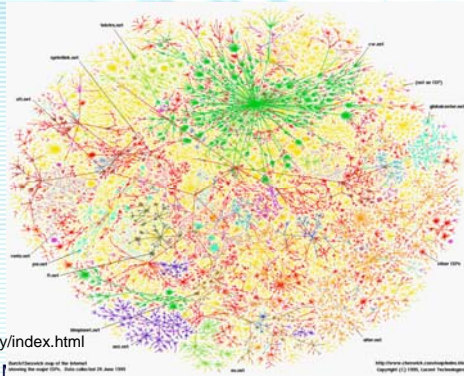
科学的見地からはおもしろくなってきた

■ 大規模ネットワーク

- ◆ グローバルネットワーク自体が研究対象
- ◆ インターネットは分散化志向であり、大規模、かつ、複雑化している
- ◆ それは基礎研究の成果に基づいて得られたものではない
- ◆ 人が設計可能な、制御可能な範囲を超えている

■ 新しい「ネットワーク科学」のキーワード

- ◆ べき乗則
- ◆ 自己組織化
- ◆ 自己成長
- ◆ 複雑適応系
- ◆ 創発性
- ◆ 非平衡系



<http://research.lumeta.com/ches/map/gallery/index.html>

M. Murata

インターネットアーキテクチャの限界を示唆するもの



■ ユーザを信用してきた

- ◆ セキュリティ、アタック
- ◆ エンドホストプロトコル(TCP以上)の改変は可能
 - End-to-End Principleの限界

■ 「エンドホスト」だけではなくなってきた

- ◆ エッジネットワーク(センサ、モバイル)の多様化
- ◆ アドレス問題
 - これまではエンドホストにアドレスがついていた
 - エンドポイントは、アプリケーション、セッション、ユーザ、データとさまざま
 - 場所とエンドポイントアドレスの切り離し

■ ネットワーク管理のための情報の不足

■ アプリケーション要求の多様性

- ◆ QoSではなく、Heterogeneityなども含めた機能の多様性



問題解決のアプローチ

■ 個別問題に対する対処

- ◆ システムが複雑になる
- ◆ 管理が大変になる
- ◆ 故障が発生しやすくなる
- ◆ 新しい要求に対処できない

■ 新しいネットワークアーキテクチャを構築する

- ◆ 将来的に、どうやってよいネットワークをつくれればよいか
 - 使い方に対するビジョンが重要
 - キラーアプリケーションはdriving forceではあるが、それを追うのは無駄
- ◆ 技術的な発見、発明、発展があるか
 - ITの世界では、新しく意味があれば、組み合わせも重要な発見



現行のインターネットの発展から学べること

■ 新機能を加えることができるアーキテクチャを準備しておかなければならない

- ◆ KISS (Keep It Simple & Stupid)はやはり重要
- ◆ プログラマビリティ
 - アクティブネットワークの失敗の要因は?: Core Programmability
 - オーバーレイネットワーク: Edge Programmability
 - 開発された有効な機能をネットワーク層にもっていく道筋は必要

■ 「革命のジレンマ」をどうやって乗り越えるか

- ◆ アプリケーション(Web)は重要だが、知識創発、グローバル化、コミュニティ創生など時代の流れのほうが大きい
- ◆ 新たなアーキテクチャに投資するインセンティブ?
 - 電話からインターネットへの変革は参考になるはず

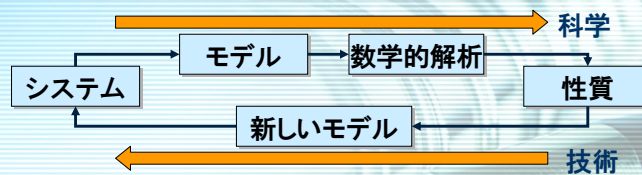


アーキテクチャ = 科学 + 技術

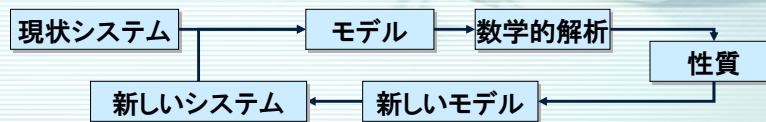
■ 科学と技術の違い

- ◆ 科学(解析): すでに存在しているものにある普遍的な法則を探求すること
- ◆ 工学: 人工物に対して科学的方法論を適用すること
- ◆ 技術(設計): 新しい機能を実現する具体的な方法を案出し、作り上げ、利用すること

■ 今までは、目の前にあるインターネットを対象にしていればよかった



■ 今後は、現実にはないかも知れない良いアーキテクチャを対象にする必要がある



M. Murata

17



「意味のあるアーキテクチャ」の指標

■ 製品やユーザコミュニティに受け入れられたか

- ◆ 研究のアイデアが製品に取り入れられる
- ◆ 製品の付加価値を付ける

■ 現実世界の問題に対する解決策を与えたか

- ◆ 究極とは言えないまでも現実に直面する問題を解決する

■ 新しい設計指針を与えたか

- ◆ QoS
 - 現実に採用されなくとも、QoSアーキテクチャに必要なものは何か、何が問題かは明らかになった

■ 新しい通信方式が実現されたか

- ◆ マルチキャスト、エニーキャスト、位置ベースのサービスなど
- ◆ それに付随する基礎から実用までの諸問題に関する研究の活発化

■ 新しい抽象化、モデル化、ツールが考案されたか

- ◆ ネットワーク内遅延はどのように発生するか;スケジューリング

M. Murata

18



例：QoS

- 理論、アーキテクチャ、プロトコル設計など多岐に渡る研究がなされてきた
 - ◆ 究極的には、End-to-EndのフローごとにQoSを保証するのが目標
 - ◆ アプリケーションに対して性能を保証する、後には予測可能にするトラフィック制御機構
- 成果
 - ◆ 性能や公平性をフローごとに制御するパケットスケジューリングやアドミッション制御などの技術を生み出した
 - ◆ パケット交換ネットワーク上での帯域制御を可能にする通信方式を明らかにした
 - ◆ 今のインターネットでは不可能であることを明らかにした
 - アプリケーションがそのトラフィック特性を予測できないことがいざばん重要な発見
 - ◆ 派生技術はある
 - クラスベースのスケジューリング
 - トラフィックシェーピング
 - VoIP
- QoSをさらに求めるなら
 - ◆ Killer Applicationを待つて機運を盛り上げる
 - ◆ 新しいアーキテクチャ
- 「品質を保証しなければならない」というところにそもそも無理がある



新しいアーキテクチャに必要なもの

- 発展するネットワークにおける制御、設計手法
- それぞれのエンティティが適応的、自律分散的、自己組織的に制御されるネットワーク
 - ◆ 縦の関係、横の関係がよりダイナミックになる
 - ◆ 従来の階層化手法は使えない
- トポロジーが変動するネットワーク
 - ◆ モバイル、P2P
 - ◆ 経路(アドレス)を維持することが本当に重要か？
 - ◆ オンデマンド型資源発見型ルーティング
- 実時間トラフィック計測に基づく制御
- 複雑度をあげない、スケーラブル分散型制御
- 制御プレーンのあるネットワーク



基礎研究にとって大事なこと

- さまざまな技術やパラダイムがありえることを考える
 - ◆ 今のインターネットに向けた技術が究極の解決策ではない
 - ◆ RFCを金科玉条とするのは…
- スケーラビリティには要注意
 - ◆ 解決策はあるかも知れないし、心配するほどではないかも知れない
 - オーダーの議論と現実問題は別
 - 「線形ならスケールする」、「指数的ならスケールしない」とは言えない
- 短期的なDeploymentや経済性に重きを置く必要はない
 - ◆ 画期的な発明はそこからは生まれません
- アプリケーションは大事なことはあるが、
 - ◆ 今そこにあるアプリケーションではなく、将来的なアプリケーション動向
 - ◆ 良い例:「電話よりWeb」
 - ◆ 悪い例:「これからは映像配信がはやるので、動画像転送にチューンしたネットワーク制御を考える」



新しいネットワーク科学とは

- ネットワークアーキテクチャのための基礎理論、方法論を与えるもの
 - ◆ ネットワークシステムそのものを理解することが必要
 - ◆ それらによって
 - 新しい発見や原則をもたらす
 - 大規模システムの性能限界を知る
 - 良いプロトコルや制御機構とは何かを明らかにする
- 融合科学の重要性
 - ◆ 科学の細分化⇒狭隘な科学技術分野⇒狭隘な知識
 - ◆ 関連研究分野の発展を促す
 - 「生物に学ぶネットワーク制御」⇒「ネットワーク制御に学ぶ生物の解明」
- 「原理原則から始まって、システムをデザインする」ところまでを含む総合的な科学



新しいネットワーク科学の例： 生物に学ぶネットワーク制御

- 目標は、生物システムの持つ自律性、自己組織性に学ぶ、頑強なネットワークの構築
- 自己組織型制御の重要性
 - ◆ 基本構造は正のフィードバック+負のフィードバックによる安定化
 - もともとネットワーク制御では必須
 - ◆ ランダム性の導入による新しい解の発見、特に時間的変動のあるシステムに対してロバスト性を確保するのに必須要素
 - ネットワーク分野では、経験的に採用されていた
 - ◆ エンティティ間の通信による行動の決定
 - 環境を介した間接的なインタラクションによって、全体の制御を実現する (Stigmergy)
 - 分散制御をつきつめた形
- ただし、生物学者も「生物はうまくいっている」とは言えるが、科学的に証明できているわけではない
 - ◆ 共通の言葉がある
 - 代謝ネットワークとインターネット: べき乗則、fluxとflow
 - ◆ ネットワーク分野からのフィードバックにも意味がある



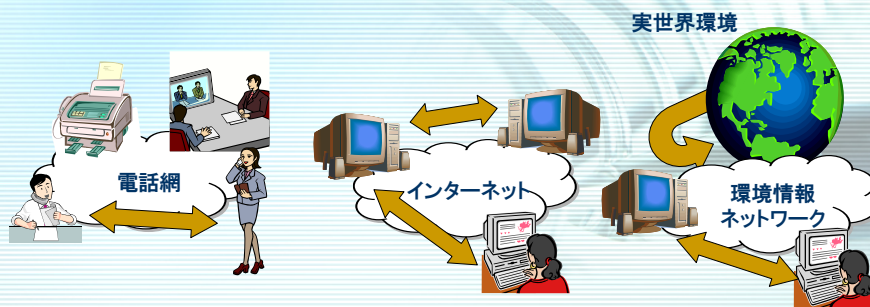
新しいネットワーク科学の指標

- 多様性&移動性&拡張性
- 「性能」以外の指標の重要性
 - ◆ 効率を求める時代でもなくなった
 - ◆ Killer Applicationを追い求める意味(スループット命)のなさを示す傍証
 - ◆ *-ties
 - Reliability (Robustness)
 - Availability
 - Manageability
 - Evolvability
 - Adaptability
 - Complexity
 - Reconfigurability
 - Dependability
 - Sustainability
 - ...
 - ◆ 問題はそれらのメトリックを何で表すか、モデルは？



研究課題例：環境情報ネットワーク

- 環境情報の取得と環境の制御→複雑適応系
- C³ (Communication & Computing & Control)アーキテクチャ



M. Murata

25



研究課題例：ロバスト性

- 従来は物理的な故障に対処するプロトコル設計
- 大規模化、多様化、複雑化するにつれ
 - ◆ 連鎖的な故障の危険性
 - ◆ 例外的な事象ではなく、定常的な事象になっている
- 個別の問題に対する対処策は多く研究されている
 - ◆ 目標によってやるが変わってくる
 - 故障を発生させない
 - 一部の故障が発生しても動作し続ける
 - 自動修復
 - ◆ 障害を予測できたとしても、どんな種類の問題がどの範囲で起こるかは定かではない

M. Murata

26

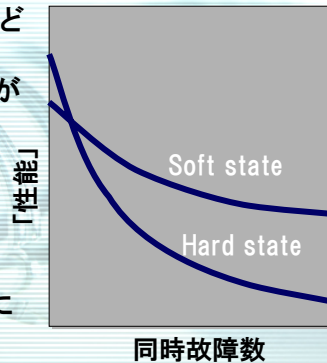


研究課題例：ロバスト性（続き）

■ 全体的なシステムティックなアプローチが必要

- ◆ たとえば、すべてソフトステートを使えばどうなるか
- ◆ ただし、モデルの定義、メトリックの定義が困難
- ◆ システムが大規模、複雑化すれば
 - バグが入り込む余地が大きくなる
 - 人の構成ミスが入り込みやすい
 - 管理がたいへんになる

ということと言えるが、どうやって定量的に言うかは簡単ではない



■ 「予期せぬ事態にも対処できる」⇒証明できること自体矛盾

M. Murata

27



光技術のインターネットに対するインパクト

■ 大容量伝送技術としてはYes

- ◆ QoS技術を不要にしつつある
 - QoS技術は帯域の制約がきつい時に意味がある
- ◆ P2Pから映像配信へ
- ◆ コスト構造とタリフへの影響
- ◆ 信頼性の増大(?)

■ ネットワーキング技術としてはNo

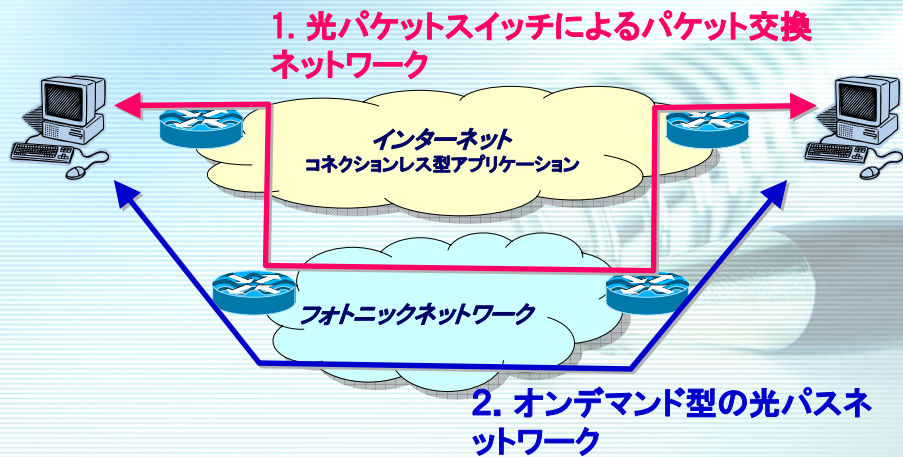
- ◆ 第2層(トランスポート技術)、第2.5層技術(GMPLS):IPの基本理念
- ◆ これまでは、ブロードバンド=ADSL!

M. Murata

28



光ネットワーク：2つの方向性



M. Murata

29



光パケットスイッチ

- 1. の延長上
- IPパケットの直接的な処理
 - ◆ 現状ではGMPLSが必要
 - ◆ 電気ルータとの差別化
- 技術課題
 - ◆ バックボーン用パケットスイッチとして
 - ヘッダ処理→電気処理も可能
 - パケットバッファ容量→そんなにいらぬ [ACM CCR 2005]
 - ◆ エッジにもってこれるか？
 - パケットバッファ容量、インターフェース数が必要

M. Murata

30



オンデマンド型光パス

- 2. の可能性を探りたい
- GMPLS内なら可能だが、エッジホストに接続できることに意味がある
- 追い風
 - ◆ グリッド、SANなどからの需要
 - ◆ 「1ペタバイトのファイルを瞬時に送りたい」
- 技術課題
 - ◆ パケット交換も可能にしたまま、計算機まで光パスを持ってきたい
 - ◆ 分散型光パス設定
 - スケーラビリティ
 - パス設定の高速化
 - グローバル情報ではなく、古い情報、部分情報を用いて実現する