

# ネットワークアーキテクチャと 大学における研究



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](mailto:murata@ist.osaka-u.ac.jp)*

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



# 内容

- 現状分析
- これまでのネットワーク分野における基礎研究
- 今後のネットワークアーキテクチャ
- 今後のネットワーク分野における基礎研究

# 現状分析



# インターネットこの10年

## ■ さまざまな技術が収斂してきた

- ◆ インターネット、フォトニク、モバイル、ワイヤレス、オーバーレイ、高性能計算(Grid)
- ◆ FMC、IP Convergence

## ■ ひとつの見方

### ◆ インフラとしてはひとまず完成した

- スイッチング技術(パケット、回線、バースト)はひととおり試された
  - アタック対策、管理の増大などの問題はあるが、技術課題で残されているのはサービス技術やアプリケーション技術だけ
  - 研究であっても社会的な効果が重要
  - 「科学的な好奇心」だけの研究は受け入れられない
- ### ◆ 今後のネットワークの中心は、社会、経済、ビジネス、法律の問題になる



# インフラ(社会資産)が一旦完成すると

- 技術開発課題はもちろんたくさんある
  - ◆ しかし、個別課題に限られる
    - 「重要なのはDeployment」という言葉に縛られる
    - 画期的なものであっても「今のインターネットでは動かない」と言われておしまい
- 開発、管理のための人材は重要
  - ◆ 大学は教育機関になることを求められる
- すでにインフラになっているシステムに対して
  - ◆ 新たな技術に投資するインセンティブ？
    - 「現状でもきちんと(なんとなく)動いている」
    - たいそうな制御方式を導入してスループットを10%向上させる意味？ 2倍にする意味？ 回線容量を2倍にするほうが手っ取り早い
  - ◆ 現状システムに対して投資が進むので、それを回収するまで革命的な発展 (Disruptive Innovation) が望まれなくなる
    - 「研究はもはや不要」



# インフラがいったん完成すると(続き)

- ただし、一方で、企業も常に新しいものを追わなければならない宿命にある
  - ◆ 「いくところまで行って、いよいよだめになるとなったらみんな考え出すだろう(必要は発明の母)」というものもあるが、..
- 誰の発言か？
  - ◆ 企業トップ
    - 将来を見ているが、短期的な業績も必要→場面に応じて言うことがしばしば異なる
  - ◆ 研究、開発の現場トップ
    - 短期的な実績を追い求める
    - 特に研究所はビジネスモデルが変わってきている
  - ◆ 現場
    - 大学での経験の記憶から理想を求めがち
- 画期的な発展を生み出すには
  - ◆ 新しいアーキテクチャを今から準備しておく必要がある
  - ◆ 研究についてもパラダイムシフトを準備する時代に入った
  - ◆ 今こそネットワークの基礎研究が重要



# ネットワーク研究は不要か

- これまでも研究成果に疑問視する向きはある
  - ◆ アカデミアの研究がどれだけ役に立っているのか？
  - ◆ QoSの例
- 反論
  - ◆ さまざまな研究成果に基づいた上で、今のインターネットアーキテクチャに向けたものだけが採用されているだけ
  - ◆ 現状のインターネット技術で実現されているものは、ネットワーク分野に蓄積された知識のごく一部
- 今後
  - ◆ パラダイムシフトを起こし、変革を促して次世代ネットワークを構築するためには、これまでの知識を深化させた上で、よりいっそうの研究の進展が必要



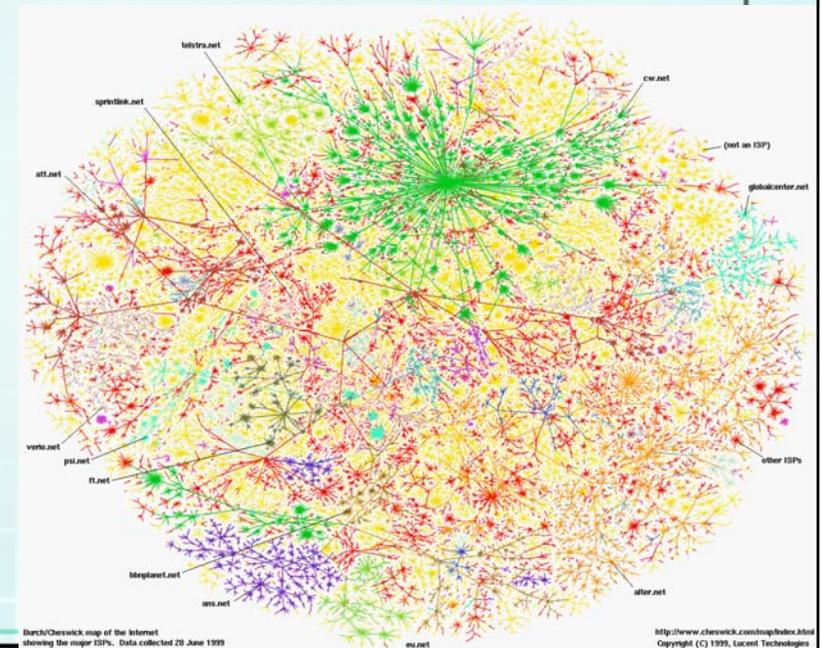
# 科学的見地からはおもしろくなってきた

## ■ 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

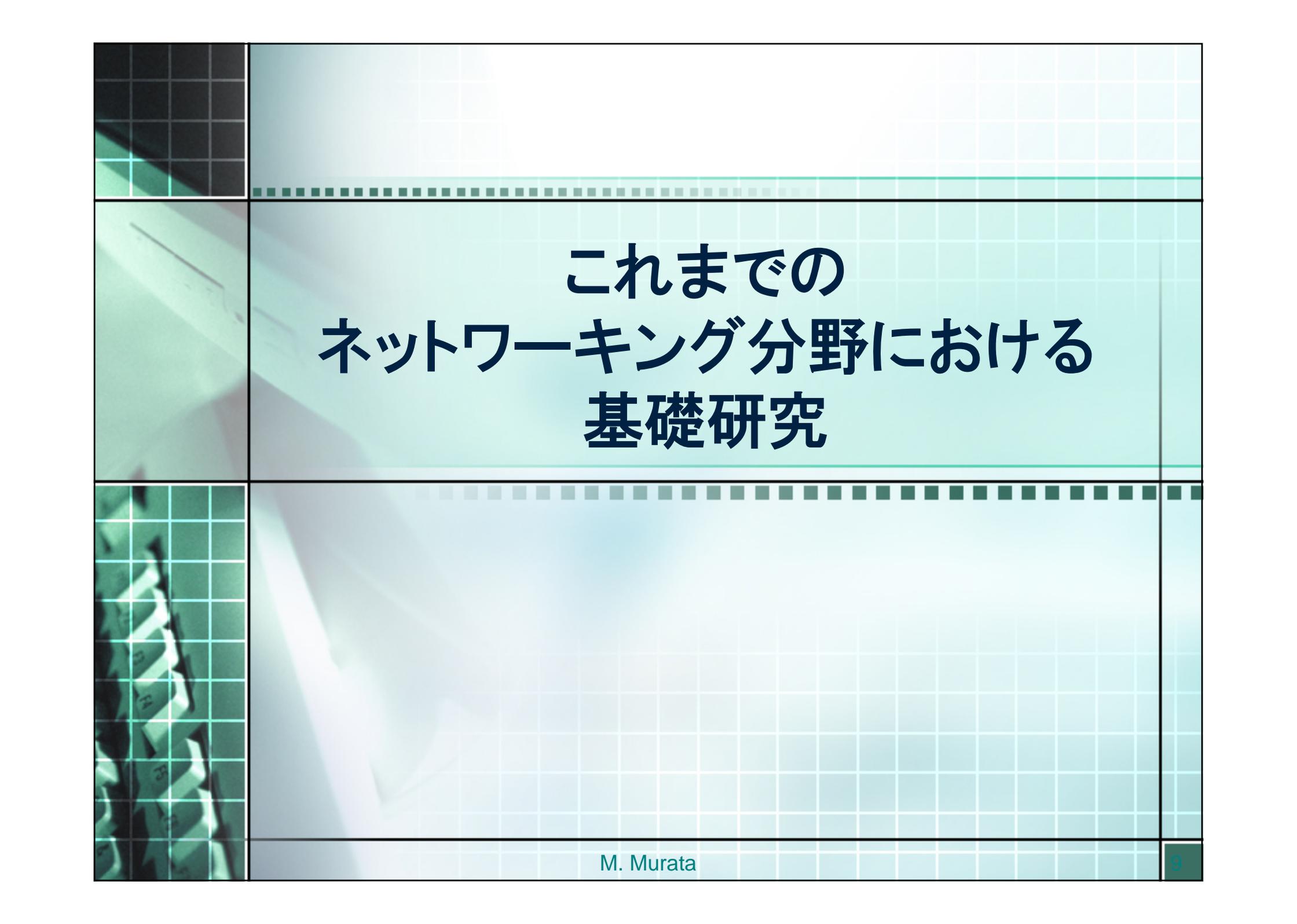
## ■ 新しい「ネットワーク科学」のキーワード

- ◆ パワー則
- ◆ 自己組織化
- ◆ 自己成長
- ◆ 複雑適応系
- ◆ 創発性
- ◆ 非平衡系



Dunck/Cherwick map of the Internet  
showing the major ISPs. Data collected 20 June 1999

<http://www.cherwick.com/map/index.html>  
Copyright (C) 1999, Lucent Technologies

The background features a light blue grid pattern. On the left side, there are three vertical panels: the top one is dark with a grid, the middle one shows a close-up of a computer keyboard, and the bottom one shows a close-up of a computer keyboard with a grid overlay. A horizontal dashed line is positioned above the main text area.

# これまでの ネットワーク分野における 基礎研究



# これまでのネットワーク分野の 基礎研究

- まだ40年
  - ◆ 第1フェーズは終わった(かも)
- 特に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



# 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
- 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
- 協力、非協力ゲーム理論の応用
  - ◆ 資源割当問題、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
- 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)



# しかし従来科学とされていたものは

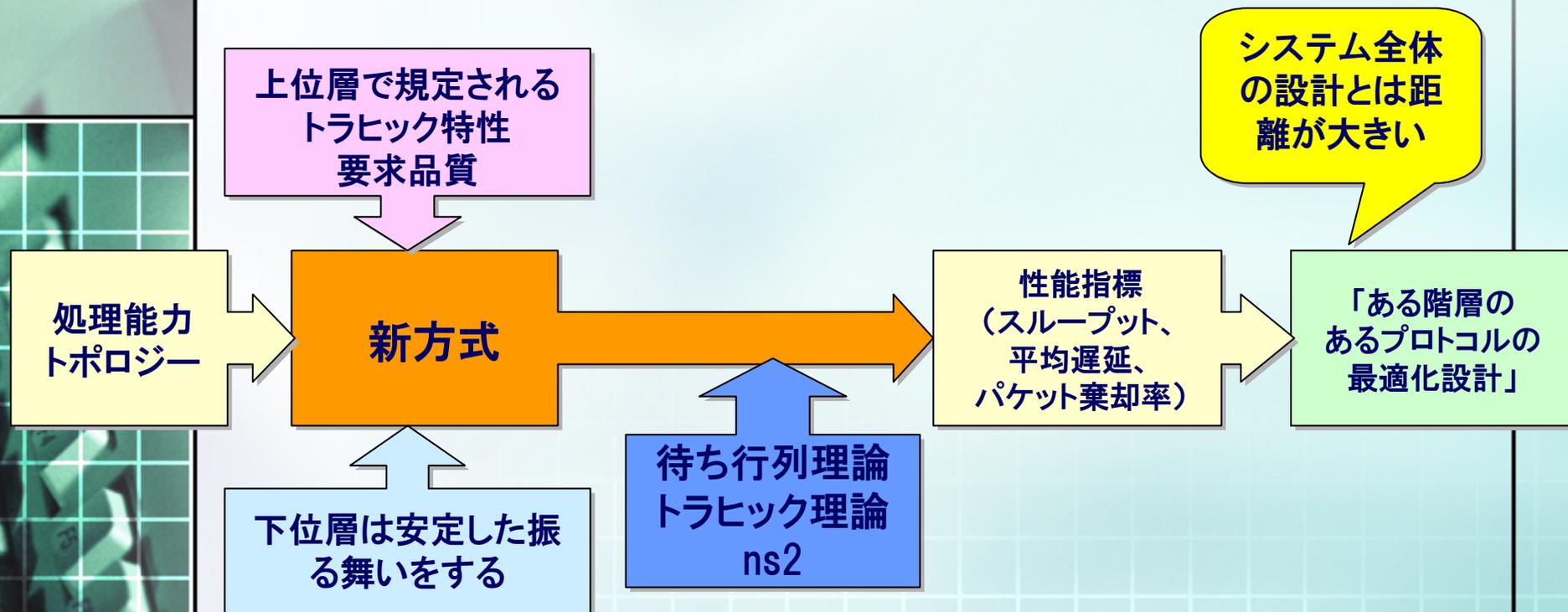
- インターネットプロトコルは科学に基づくものか
  - ◆ TCPはもともと科学的な発見に基づくものとは言えない
    - 理論的にもそれなりに優れたものであることの証明は後付け
    - CSMA/CDも同様
  - ◆ IPは最適性の議論そのものがない
- システムのモデル化と性能評価
  - ◆ トラヒックのモデル化、トポロジーのモデル化、プロトコル設計、計測など
  - ◆ グラフを書くことではないか
  - ◆ 計測でも、分析とそれに基づいた方式はあっても、なぜそのようなデータが得られるのかは十分には解明されていない
  - ◆ モデル化後の問題には最適解はあるが、最適なアーキ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、だめなら別の方法を探しているだけ



# システム性能評価とは

## ■ 従来のネットワーク設計

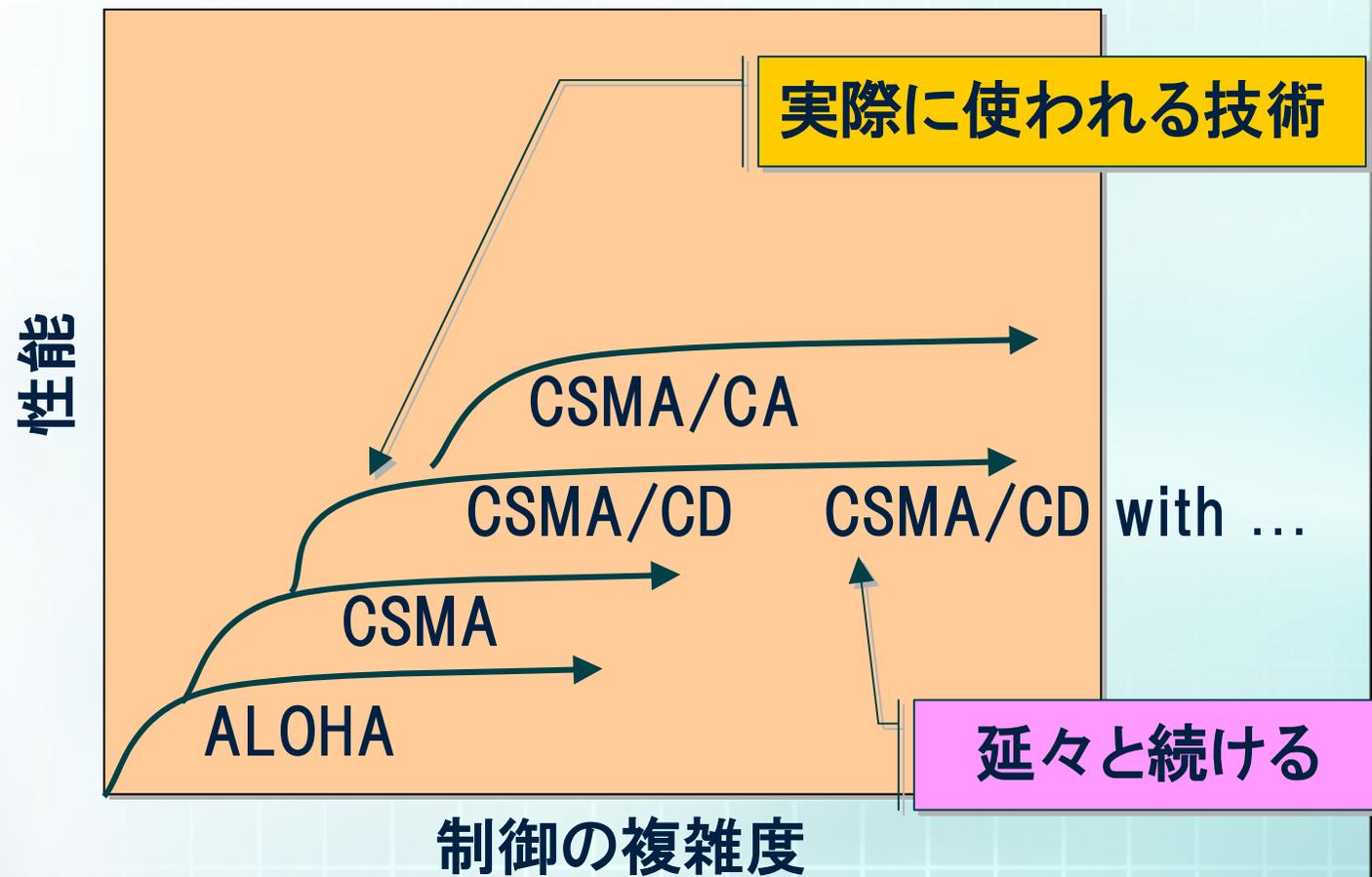
- ◆ 現状および近未来の技術水準に基づくサービス品質の最適化





# ネットワーク研究者の悪い癖

## Complexity-Performance Curve





# 性能評価のべからず集:全般

- 予断を最初からもってはいけない
  - ◆ 自分の欲しい結果を得るためのモデル構築、評価結果を意図的に解釈するのは簡単
- 新しい方式が従来方式と比べて定性的に優れたものであっても定量的に有意な差がないことは多い
  - ◆ 意味のあるパラメータ領域か
  - ◆ 制御コストはどれだけ増えたか
- 定性的な説明がつかないのはどこかに誤りがある
  - ◆ モデル化は正しいか
  - ◆ 解析・シミュレーションプログラムは正しいか
- システムパラメータとデザインパラメータを取り違えてはいけない
- 結果のグラフを一人歩きさせてはいけない
  - ◆ モデル化の過程で導入した仮定に基づいた結果のはず



# 性能評価のべからず集：解析

- 目的をはっきりさせずにやみくもにモデルを単純化する
  - ◆ 現実システムの定量的な評価になっているか
- 数値計算誤差を見過ごす
- 近似解析モデル構築のために、導入した仮定の妥当性の検証を怠る
  - ◆ 近似解析のためのモデルをシミュレーションで検証するのは本末転倒
- 厳密解析を追及するあまり、解析が複雑になり、計算結果が1日で得られない
  - ◆ シミュレーションの方が速い
- 目的を明確にせず、複雑な(一見難しそうな)解析モデルを扱う
- 陽な解析結果は使いでがある



# 性能評価のべからず集:シミュレーション

- シミュレーションモデルにやみくもになんでもかんでも入れ込む
  - ◆ 何を評価したいかまず検討する
- システムパラメータ、デザインパラメータのすべてを組み合わせる結果を集める
  - ◆ 技術動向からシステムパラメータを絞り込む
  - ◆ 何を評価したいか、何と比較したいか
- 得られた結果の妥当性の検証を怠る
  - ◆ 信頼性の検定(本当はあまり意味はない)
  - ◆ 解析結果との比較
  - ◆ 定性的な説明との比較
- ランダムに発生させたネットワークモデルで一回きりの結果を得る



# 今何が性能評価を難しくしているか

## ■ 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)

◆ トラヒック(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ヒ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



# 今何が性能評価を難しくしているか

## ■ 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

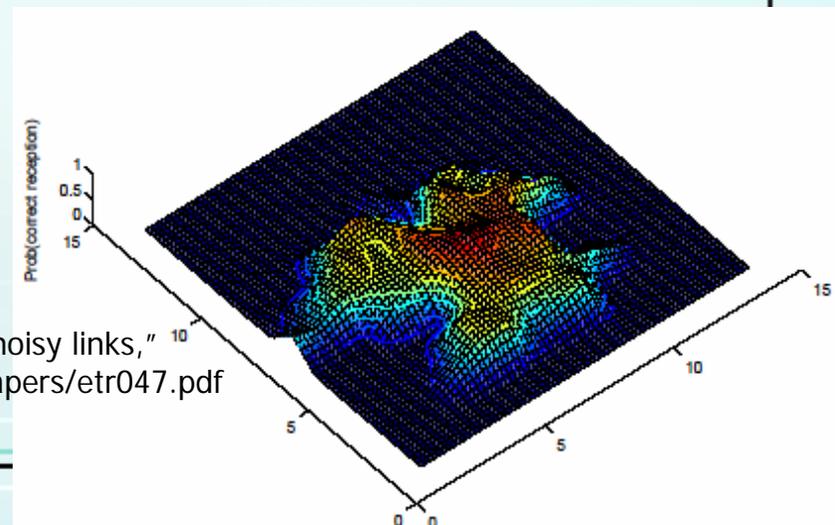
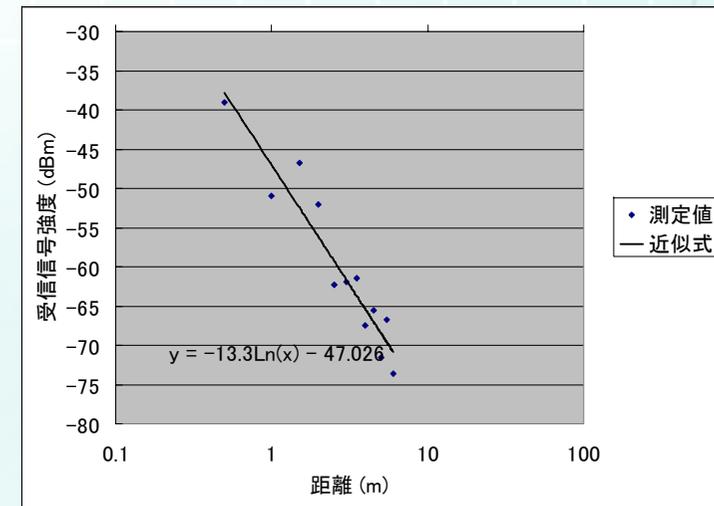
◆ 現実ネットワークにおける測定

- 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いけない
  - 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

- 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？
  - ◆ ビット誤りはギルバートモデル？
  - ◆ 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](http://www.paradise.caltech.edu/papers/etr047.pdf)



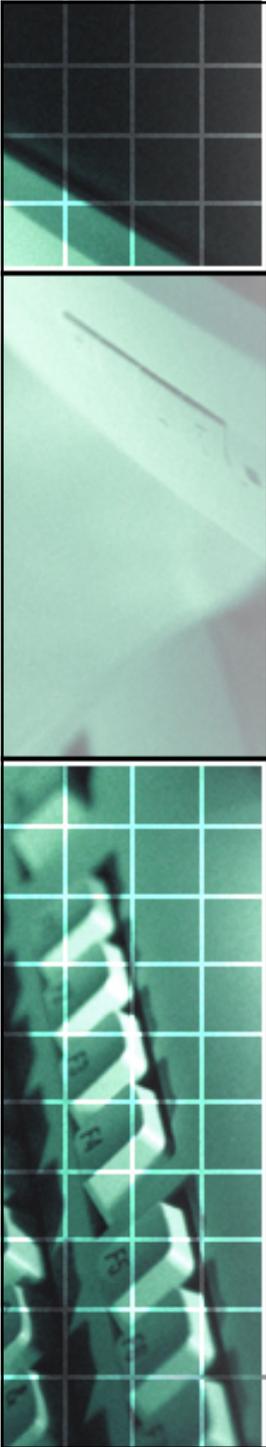
# 妥当な性能評価モデルとは

- 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
  - ◆ 妥当なレベルの入力、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
    - 階層化だけでは問題を単純化できない
      - 上位層(トラフィック量、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
  - ◆ たての関係、横の関係を含んだシステム全体を取り扱う必要がある
- いつまでも効率を追い求める時代でもなくなった



# 今後の ネットワークアーキテクチャ



# 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
  - ◆ トラヒックは標準プロトコルに基づいているが、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)の多様性
  - ◆ 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
    - すべてのアプリケーションにアドレスをつけるという考え方もある
- 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
  - ◆ 現状はベストエフォート転送だが、QoSだけではなく、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



# 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 (Core Programmability) の失敗の要因は？
    - オーバーレイネットワーク(Edge Programmability)
      - そこで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



# 「アーキテクチャを考える」とは

- 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、新しくて意味があれば、組み合わせも重要な発見

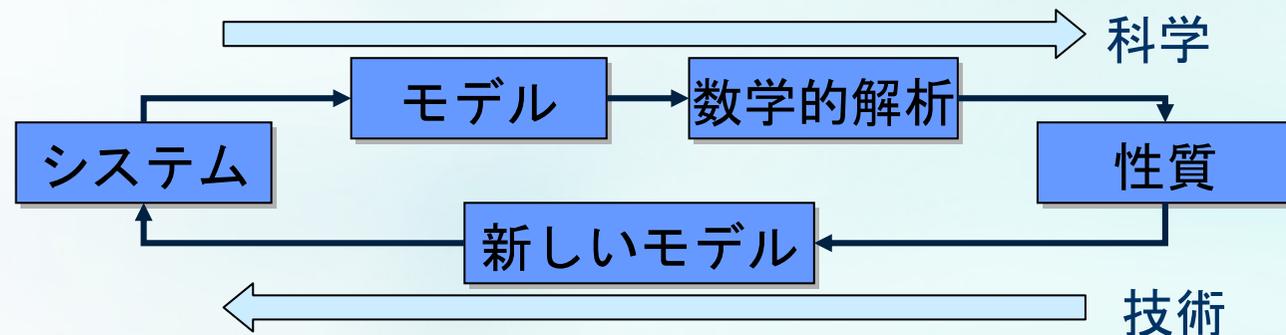


# アーキテクチャ＝科学＋技術

## ■ 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(ここでももののイメージができることが重要)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、現実にはないような良いアーキテクチャを対象にする必要がある





# 意味のあるアーキテクチャ研究とは

- 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



# 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ちばん重要な発見
  - ◆ 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



# アーキテクチャを考える難しさ

## ■ 研究者・技術者の習性

- ◆ その時々ボトルネックにチューンした制御を考える、しかし、...

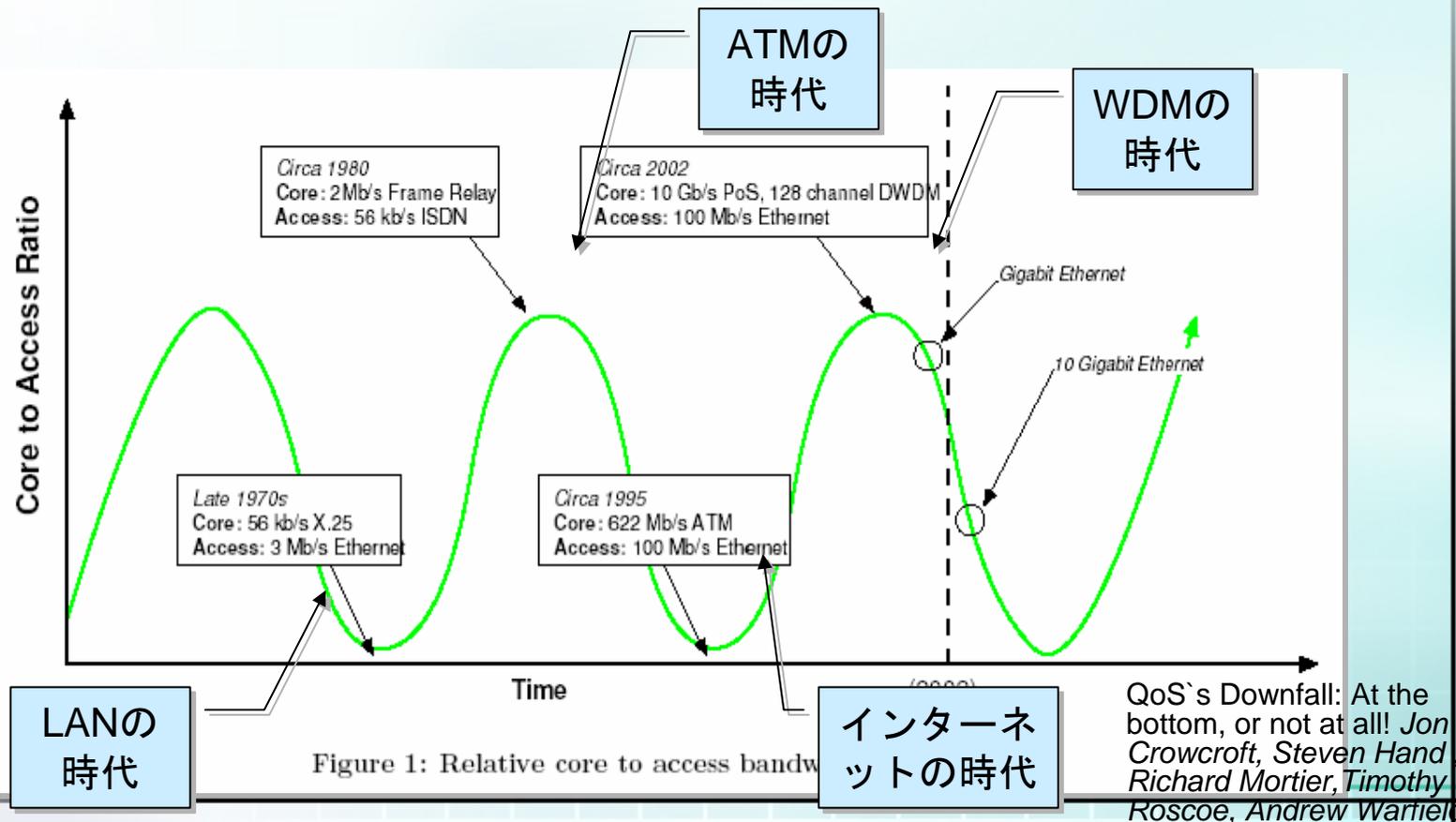


Figure 1: Relative core to access bandwidth over time



## 今後のネットワーク(短期)

- 組込デバイス用ネットワーク
- 位置同定
- アタックに対してセキュアかつロバスト
- サービスやアプリケーションが十分に信頼できるネットワーク環境
- 非常時にも継続されるサービス
- 量子コンピュータ用ネットワークの準備
- ユーザビリティ向上
- 消費エネルギー低減(特に無線)



# 新しいネットワークアーキテクチャの 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？



# 新しいネットワーク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
- 実時間トラヒ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



# 新しいネットワークアーキテクチャを支える科学

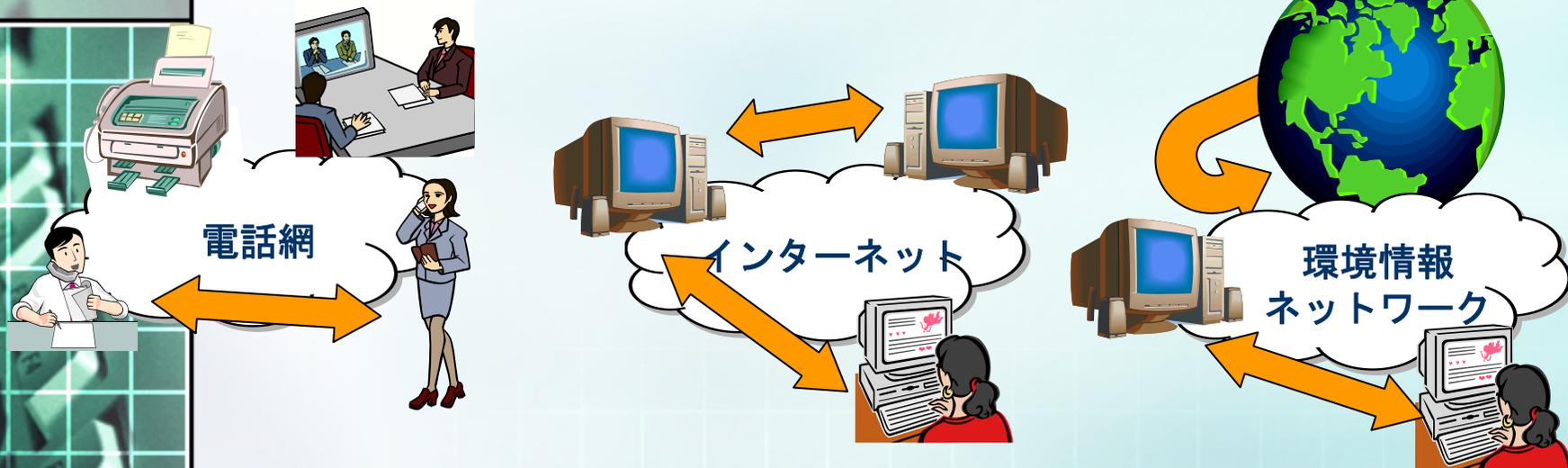
- 従来の性能評価手法はもはや使えない
  - ◆ システム全体の振る舞いに興味がある
    - たての関係、横の関係を含んだシステム全体
  - ◆ ダイナミックシステム
    - 自律分散、自己組織化
  - ◆ それらがわかってはじめて総合的なアーキテクチャデザインの話ができる

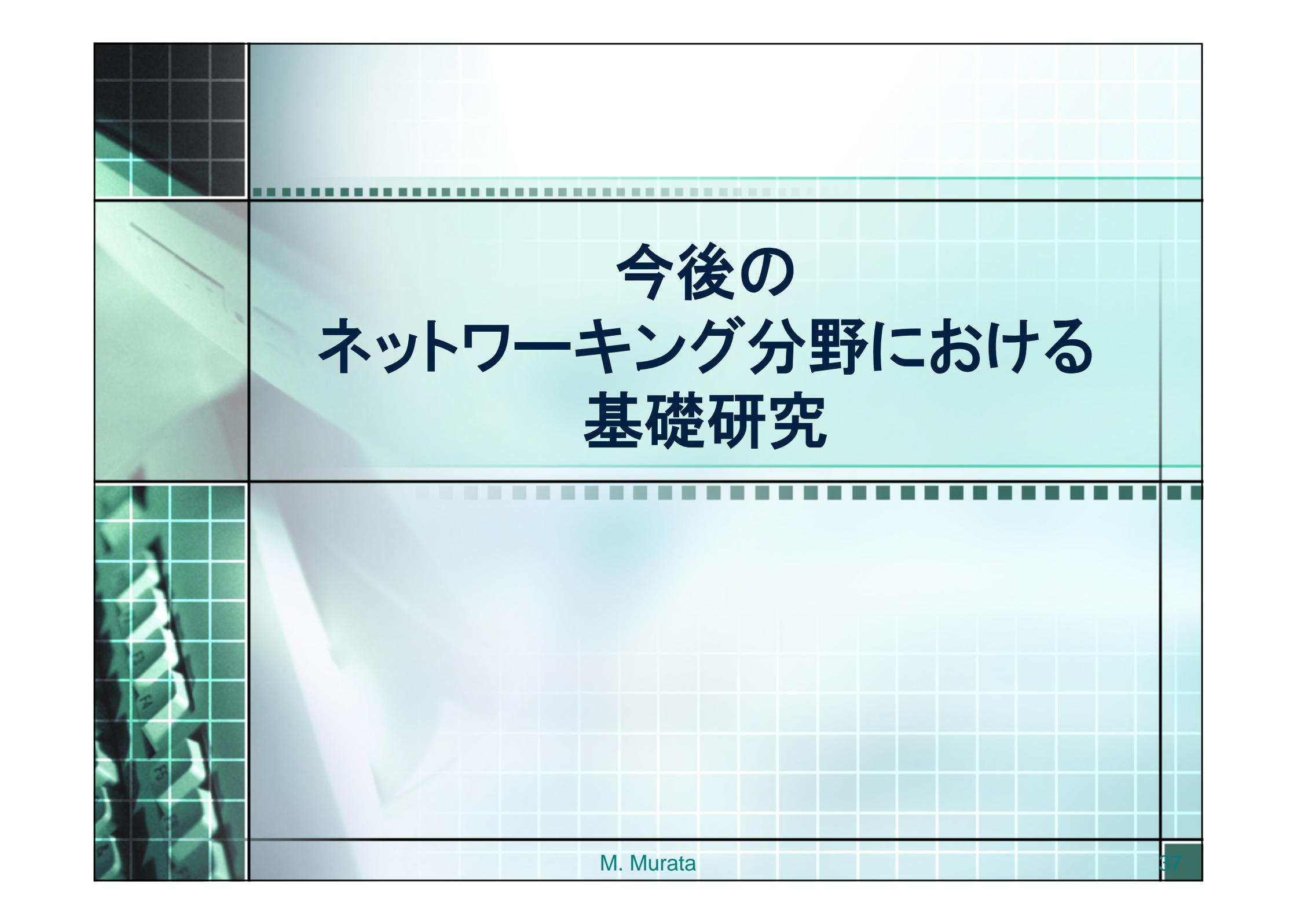


# 環境情報ネットワークの構築

- 環境情報の取得と環境の制御
- C3 (Communication & Computing & Control)

実世界環境





# 今後の ネットワーク分野における 基礎研究



# 他の科学との関係

## ■ 数学との関係

### ◆ いくつかの立場はありえる

- 絶対的な基本か(シャノンの定理)
- 応用できるものを探せばよいのか
- 別に関係ないか

### ◆ すでにある知見を数学的に説明しようとしているだけかも知れない

### ◆ 数学的には意味がなくても工学的な解決策には意味がある

## ■ 物理学、化学と違う点

- ◆ システム構築(アーキテクチャ);デザイン
- ◆ 物理工学、化学工学は参考になるかも知れない

## ■ 理学と違う点

- ◆ 人工物なので、究明するだけでなく(発見)、仮説を実証できる(創造)



# 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

- ◆ 人間・社会・経済との関係性が重要になる

# 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



# 基礎研究で大事なこと

- 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誤り
- 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かもしれない
    - 「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産まれない
- アプリケーションはやはり大事
  - ◆ 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」



# ネットワーク分野の基礎研究

## ■ 考えられる研究課題

- ◆ 数学、確率、最適化理論、統計学などを援用して、ネットワーク分野における方法論と技術を産み出す基本原理に関する研究
- ◆ 実世界のデータに基づいて、抽象化されたトラフィックモデルとネットワークモデルを分析することによって、ネットワークを理解する研究
- ◆ 新たな発見を行い、性能限界を明らかにし、性能予測を行い、プロトコルや制御方式の適正な方向を向いた開発を促す研究
- ◆ 他分野における科学的手法をネットワーク分野の問題に適用する場合であっても、ネットワーク分野独自の科学を確立する研究
- ◆ ネットワーク科学自体は確立されなくとも、少なくとも方法論はネットワーク分野独自のものにする研究
- ◆ 複雑系として捉え、そのダイナミクスを知る研究
- ◆ ロバストなシステムを設計する研究

## ■ 以上を総合して、ネットワーク研究独自の基本原理を確立する

- ◆ Multi-Disciplinaryなフィールド
- ◆ 最後は工学



# 科学としてのキーワード

- スケーラビリティ
  - ◆ 「Unstructured P2Pはスケーラビリティに欠ける」
    - メッセージ数を減らす工夫がなされている
    - 延々巨大化していくわけでもない
    - なぜStructured P2Pがないのか考える必要がある
- 時間スケール
  - ◆ 従来のプロトコル階層とは異なる視点が必要
    - パケットレベル、フローレベル、コネクションレベル
    - 従来の待ち行列理論はパケットレベル、トラヒック理論はコネクションレベル
    - レベル間のインタラクション
  - ◆ 非線形システムとしてのネットワーク
    - フローレベル(アクティブなコネクションのパケット流)
- ネットワーク測定
  - ◆ 特性を知る:トラヒック制御、ネットワーク設計
  - ◆ モニタリングする:ネットワーク管理、トラヒック制御
  - ◆ 決定的な設計が不可能な自律分散型システムでは、エンドホストが独自にネットワーク状況を調べる必要があるため、測定技術は必須
- ロバストシステム



# 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
  - ◆ 目標によってやることが変わってくる
    - 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



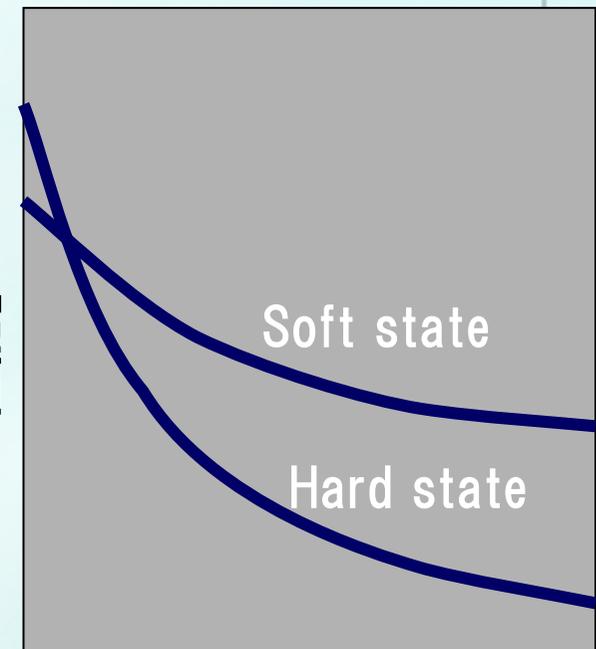
# 研究課題例：ロバスト性（続き）

## ■ 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

ということはあるが、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



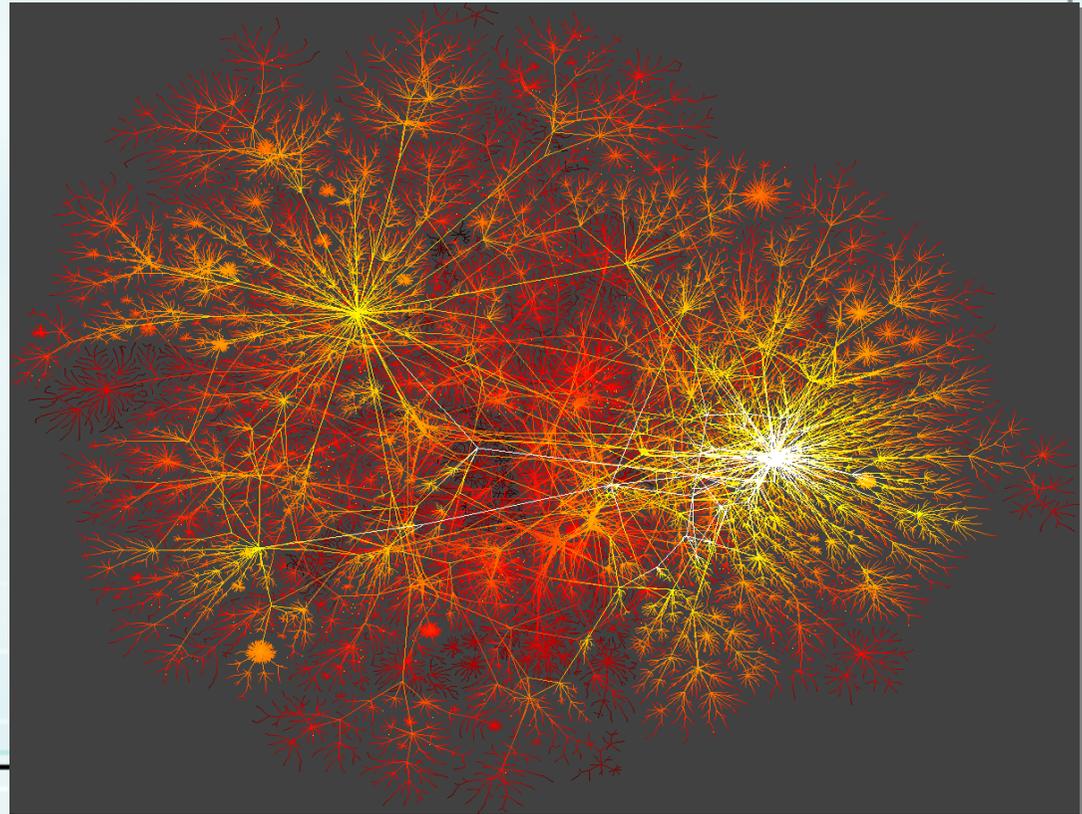
同時故障数



# 大規模適応複雑系としてのネットワーク

## ■ 適応複雑系科学に期待したいこと

- ◆ 大規模システム全体の振る舞い、設計手法
- ◆ 非線形システムの安定性とは
- ◆ 故障の連鎖反応の影響
- ◆ ロバスト性





# 気をつけなければならないこと

## ■「全体は部分の単純な総和ではない」

- ◆システム理論的立場からの、デカルトに始まる要素還元論への批判
- ◆それぞれの要素が複雑に絡み合っているので「個々の要素を(単独に)詳しく調べても全体的な様相が見出せない」だけ
  - 局所的な記述が不十分なだけ
  - もちろん対象システムが巨大化する現在、ミクロ的見方(分析)が行き詰まり間を与えているのは当然
- ◆「創発」ということばから、あたかも知的システムが生まれるような印象を与えるが決してそうではない
  - 例: Ant Routing
    - それぞれのエージェント(あり)は単純な動作をするが、全体として経路制御が実現できる(群知能)。しかし、もちろん新しい知が創造されるわけではない



# 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

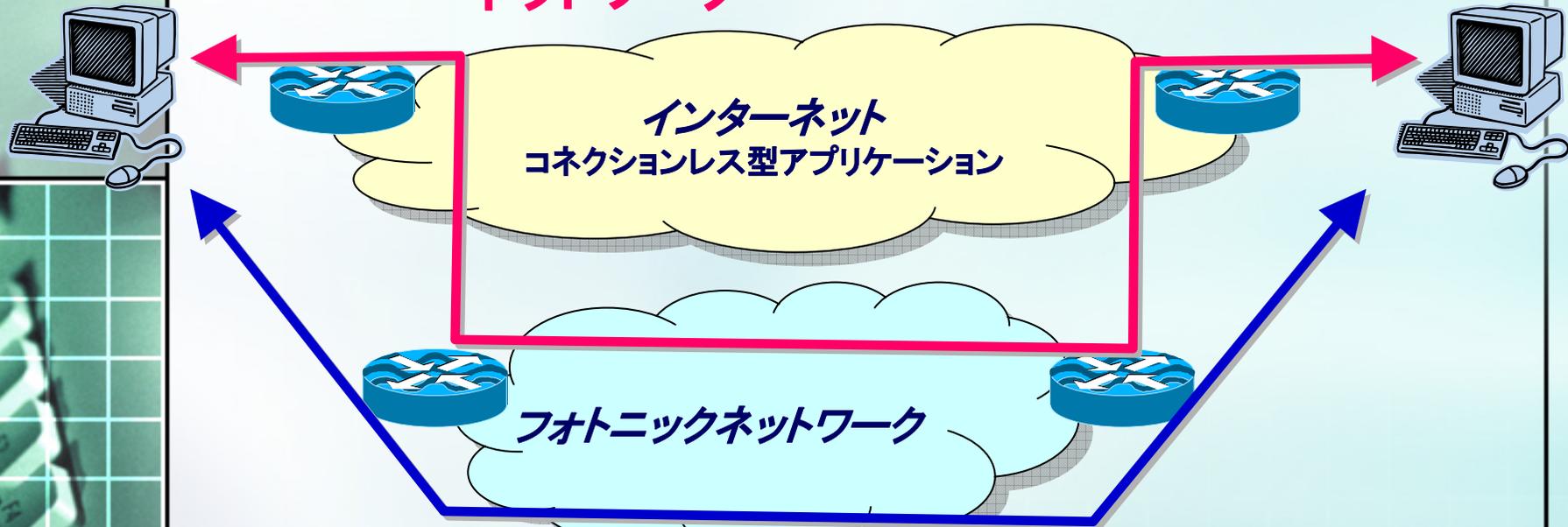
### ◆ 第2層(トランスポート技術)、第2.5層技術(GMPLS):IPの基本理念

### ◆ これまでは、ブロードバンド=ADSL!



# 光ネットワーク:2つの方向性

## 1. 光パケットスイッチによるパケット交換ネットワーク



## 2. オンデマンド型の光パスネットワーク



# 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 [A CM 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



# 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



# Q&A

- **アーキテクチャを考えるアプローチ？**
  - ◆ 中心となるエンド(電話、パソコン)がない
    - さまざまなエンドポイント
    - どれに対してもいい(平均的には)ネットワーク
  - ◆ いい悪いはどう評価するか？
- **制御プレーン？**
- **すべての人の性能(指標?)がわかるしくみ**
  - ◆ エネルギー最小
  - ◆ トポロジー→ルータ処理能力;
    - ネットワーク解剖学
- **階層構造のありかた**
  - ◆ 地域的?、Role-based、Merge?
  - ◆ データリンク層をなくす?
  - ◆ どのようなコンセプトに基づいて考えるか