



Title	通信ネットワークの構造分析について
Author(s)	井上, 武
Description	ERATO 세미나2010 : No.23. 2010年10月29日
Relation	2010年度科学技術振興機構ERATO湊離散構造処理系プロジェクト講究録. p.158-169.
Issue Date	2011-06
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/48462">https://hdl.handle.net/2115/48462</a>
Type	conference presentation
File Information	23_all.pdf



ERATO セミナ 2010 - No. 23

## 通信ネットワークの構造分析について

井上 武

NTT 未来ねっと研究所

2010/10/29

### 概要

インターネットをはじめとする通信ネットワークは、人工物であるにも関わらずその構造・特性があまり理解されていない。現状、通信ネットワークの設計・運用は、局所的な最適化と経験・勘によって行われている。この問題を顧みて、近年、科学的な視点からネットワーク構造を理解する試みが行われている。その理論基盤となっているのは、複雑ネットワークと呼ばれる新しい学際的な科学領域である。前世紀末以降、多くの自然・人工物ネットワークに共通した特徴(特に、スモールワールドやスケールフリーと呼ばれるようなグラフとしての特徴)が発見され、その構造や振る舞いが熱心に研究されている。理論の明快さを優先した複雑ネットワークの科学と異なり、通信ネットワークには固有の工学的特性があり、それらを考慮した分析が求められる。たとえば、複雑ネットワークの研究者はインターネットのアキレス腱(構造上の弱点)を指摘したが、実際にはそのようなものは存在しない。構成装置の特性を考慮して複雑ネットワークの理論を修正することで、インターネットを生み出すダイナミズムを説明できる。大規模かつ現実的な複雑さを持つネットワークを分析するためには、本質を突く着眼点と、効率的な解析手法・アルゴリズムが求められる。本公演では、通信ネットワークの構造分析に関する研究を、講演者の研究を含めて幅広く紹介する。



2010-10-29 ERATO湊離散構造処理系プロジェクト セミナー

通信ネットワークの構造分析について

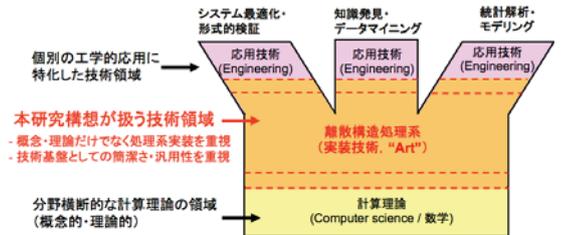
NTT未来ねっと研究所 井上武

1

アウトライン

▶ 通信ネットワークの構造分析について

- ▶ ネットワークの「科学」と通信「工学」
- ▶ Science と Engineering をつなぐ...
- ▶ Art ?



▶ 2

アウトライン

▶ インターネットの課題

- ▶ 複雑ネットワークの科学というアプローチ
- ▶ インターネットの構造・挙動の分析
  - ▶ 大域的・局所的な構造
  - ▶ トラフィックの挙動(井上の研究含む)
- ▶ 今後の展望

▶ 3

インターネットの課題

▶ 現在の通信ネットワークに問題があるのか？

- ▶ 安価な広帯域アクセス
- ▶ ユビキタスな接続環境
- ▶ 安定した通信特性



▶ 4

インターネットの課題

▶ 「問題あるのかわからない」という問題

- ▶ ネットワークが機能している理由を説明できない
- ▶ 今日動いているから、たぶん明日も動いてる
- ▶ でも、今日は偶然動いているだけかもしれない

▶ 5

理論なしの設計・運用

▶ 設計理論なしの場合当たり的な増築

- ▶ 勘と経験に頼った設計
  - ▶ 混雑箇所に増設(局所最適)
- ▶ 例: リンク利用率 25 %



▶ いつも安定、ときに広域障害

- ▶ 1つの設定ミスで、世界規模の経路障害
- ▶ 例: 2009-02-17の世界的な障害



▶ 6

<http://www.renseys.com/blog/2009/02/the-flap-heard-around-the-world.shtml>

## インターネットの構造・挙動

### ▶ インターネット全体の構造・挙動は未解明

- ▶ 接続関係は企業秘密
  - ▶ インターネットの観測は重要な研究トピック
  - ▶ ACM Internet Measurement Conference という会議も
- ▶ トラフィック(情報の流れ)のダイナミクスは極めて複雑
  - ▶ 緻密な設備投資計画は困難
  - ▶ 障害下の挙動は不可知



▶ 7

## インターネットの構造・挙動

### ▶ 現状: インターネットに対する理解を放棄

- ▶ 勘と経験による設計
- ▶ 実験的な動作検証
- ▶ 場当たりの問題対処

### ▶ 電話ネットワークのように理論的に運用したい!

- ▶ 電話: 素朴な階層構造, 単一サービス

▶ 8

## 通信ネットワークの分析と理解を目指して

### ▶ 解明対象

- ▶ ネットワークの構成とその意味
- ▶ ネットワークの挙動とその原因

### ▶ 分析手法

- ▶ 単純なモデルに対する解析的な手法
- ▶ 複雑なモデルに対する数値的な手法

### ▶ 理解するための方法論

- ▶ システマティックなアプローチ(統計物理など)
- ▶ インタラクティブなアプローチ(社会学など)

▶ 9

## アウトライン

### ▶ インターネットの課題

### ▶ 複雑ネットワークの科学というアプローチ

### ▶ インターネットの構造・挙動の分析

- ▶ 大域的・局所的な構造
- ▶ トラフィックの挙動(井上の研究あり)

### ▶ 今後の展望

▶ 10

## 複雑ネットワークの科学

### ▶ ネットワークとは?

- ▶ 複雑なシステムの記述モデル
- ▶ 情報交換, 相互作用の関係を記述
  - ▶ 物理的な接続関係は不問
- ▶ 場のモデル, 波動モデルと同レベルの基盤的なモデル
  - ▶ 統計物理の研究者を中心に発展

### ▶ それってグラフ?

- ▶ 数学の「グラフ」(特にランダムグラフ)をベースにノードやリンクを詳細化



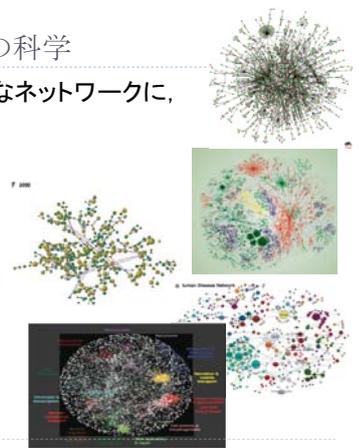
[http://en.wikipedia.org/wiki/Graph\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Graph_theory)

▶ 11

## 複雑ネットワークの科学

### ▶ 1990年代後半, 様々なネットワークに,

- ▶ インターネット
- ▶ World Wide Web
- ▶ 知人, 性的関係
- ▶ 学術論文
- ▶ 生体内相互作用
- ▶ 航空路, ...



### ▶ 共通の特徴を発見

- ▶ スモールワールド性
- ▶ スケールフリー性

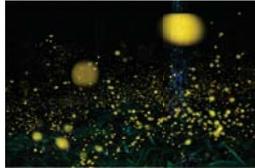
▶ 12

<http://netsci2010.net/Netsci2010Lessons/NesSci10A-finalx.ppt>

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

▶ ホタルの同期

- ▶ ある種のホタルは大群でいっせいに明滅
- ▶ 安定した同期モデルへの要求
  - ▶ 近いホタルの影響は強く
  - ▶ 遠いホタルの影響も少し
- ▶ そのようなネットワーク構造とは？



▶ 13

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

▶ 大きなクラスタ係数

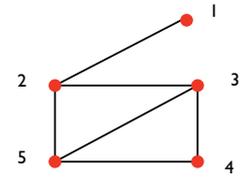
- ▶ 隣接ノード間にリンクがある確率

ノード  $i$  のクラスタ係数

$$C_i = \frac{|\# \text{ of closed triangles} |}{k_i(k_i - 1)/2}$$

$k_i$ : ノード  $i$  の次数 (リンク数)

例: クラスタ係数



- ▶ 近いホタルの影響は強く

ノード2:  $C_2 = \frac{1}{3}$

ノード3:  $C_3 = \frac{2}{3}$

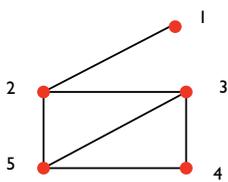
ネットワークのクラスタ係数: 0.54

▶ 14

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

▶ 小さな平均距離

- ▶ 全ノードペアの最短距離の平均値



ノードペア	最短距離
1-2	1
1-3	2
:	:
4-5	1

平均距離:  $L = 1.5$

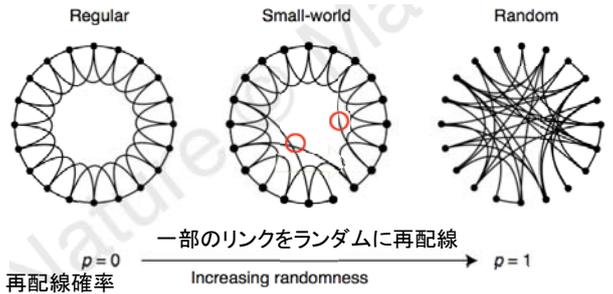
- ▶ 遠いホタルの影響も少し

▶ 15

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

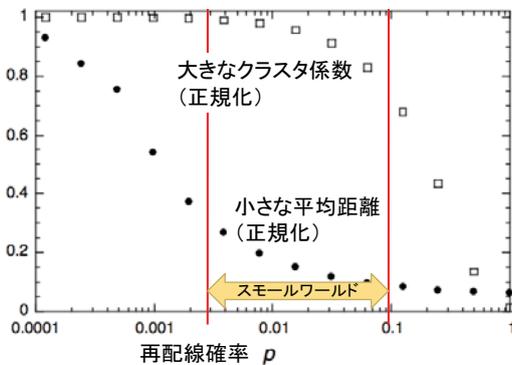
▶ 生成メカニズム

- ▶ 規則的ネットワークのわずかな修正



▶ 16

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)



▶ 17

スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

▶ 様々な自然・人工的ネットワークに普遍的に出現

大きなクラスタ係数      小さな平均距離

Network	C	$C_{rand}$	L	N
WWW	0.1078	0.00023	3.1	153127
Internet	0.18-0.3	0.001	3.7-3.76	3015-6209
Actor	0.79	0.00027	3.65	225226
Coauthorship	0.43	0.00018	5.9	52909
Metabolic	0.32	0.026	2.9	282
Foodweb	0.22	0.06	2.43	134
C. elegance	0.28	0.05	2.65	282

▶ 18

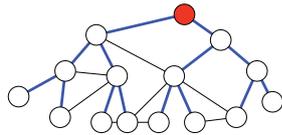
スモールワールド性 (Watts and Strogatz 1998)

▶ スモールワールドという現象

- ▶ 少ないホップ数で全ノードに到達
- ▶ 到達可能なノードがホップ  $r$  ごとに指数的に増加

$$R(r) \sim k^r$$

- ▶ あるノードからの最短経路は指数的に分岐する「木」

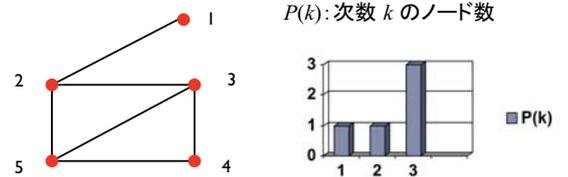


この特徴をあつて利用

▶ 19

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 次数分布

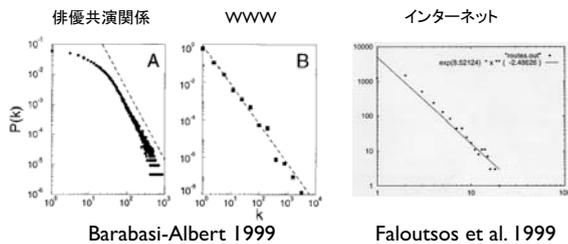


▶ 20

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ ベキ則に従う次数分布

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad \gamma \in (2,3)$$

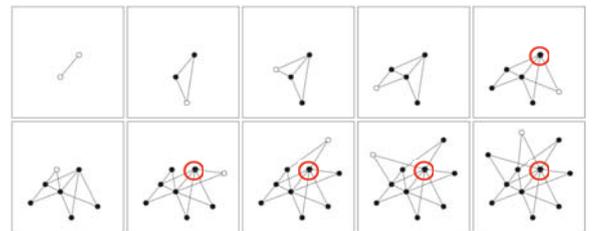


▶ 21

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 生成メカニズム

- ▶ Preferential attachment (the rich gets richer)
- ▶ 次数に比例した確率で接続ノードを選択



少数の「ハブ」ノード(高次数ノード)を生成

▶ 22

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 生成メカニズム

- ▶ Preferential attachment (the rich gets richer)
- ▶ 次数に比例した確率で接続ノードを選択

- ▶ 「解析的」な手法による分析
- ▶ 次数分布

$$P(k) = \frac{2m^2 t}{m+t} k^{-3}$$

$m$ : 各ステップでの追加リンク数

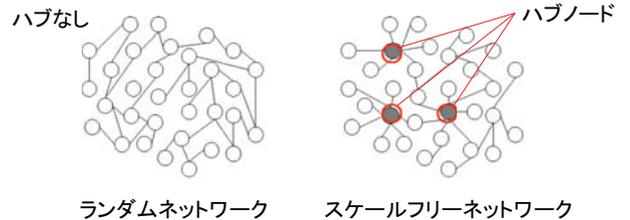
$t$ : 経過時間(ステップ数)

▶ 23

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ スケールフリーネットワークの構造

- ▶ 少数のハブノードが中心, 多数の低次数ノードが周辺

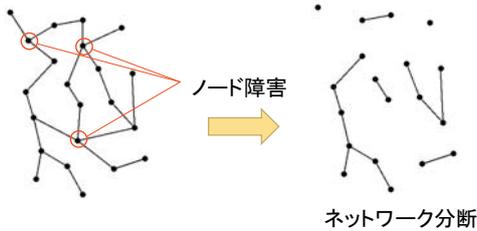


▶ 24

[http://en.wikipedia.org/wiki/Scale-free\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Scale-free_network)

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 障害に対する頑強性と脆弱性



▶ 25

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

- ▶ ベキ則や脆弱性の分析に用いられる「解析的な」手法
  - ▶ どういうときに解けるのか？

▶ 例: Cavity法による脆弱性分析

- ▶ 「木」による近似
  - ▶ クラスタによる相互作用の影響を無視できるときなど
  - ▶ 局所的な条件を漸化式で表現
  - ▶ 連続近似で積分に変換

▶ 複雑な相互作用を無視できるとき解ける

- ▶ 木による近似: ループがない
- ▶ ノードの挙動が(ほぼ)独立

$$C_{i \rightarrow j} = \prod_{l \in \partial(i)} C_{i \rightarrow l}$$

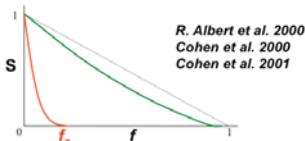
梶島祥介, 白井善史: ランダムネットワークへの情報統計力学的アプローチ  
NICT 第1回複雑システムのネットワーク科学研究会

▶ 26

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 障害に対する頑強性と脆弱性

ランダム故障に強い



ハブ攻撃に弱い



▶ 27

スケールフリー性 (Barabasi and Albert 1999)

▶ 障害に対する頑強性と脆弱性

- ▶ 中心のハブノードを取り除くと、少数でもネットワーク分断
- ▶ スケールフリーなインターネットにも同様の弱点？

インターネットのアキレス腱



▶ 28

複雑ネットワークの科学: まとめ

▶ 構造上の特性

- ▶ スモールワールド性
- ▶ スケールフリー性

スケールフリーなインターネットは脆弱なのか？

インターネットは壊れにくさを目指していたのでは？

▶ 分析手法

- ▶ 「解析的」な手法(「木」などによる近似)
  - ▶ ベキ則の導出
  - ▶ 頑強性と脆弱性の解明
- ▶ 「数値的」な手法(効率的な探索アルゴリズムなど)
  - ▶ 特徴量の抽出(距離, クラスタなど)

▶ 29

アウトライン

▶ インターネットの課題

▶ 複雑ネットワークの科学というアプローチ

▶ インターネットの構造・挙動の分析

- ▶ 大域的・局所的な構造
  - ▶ トラフィックの挙動(井上の研究含む)

▶ 今後の展望

▶ 30

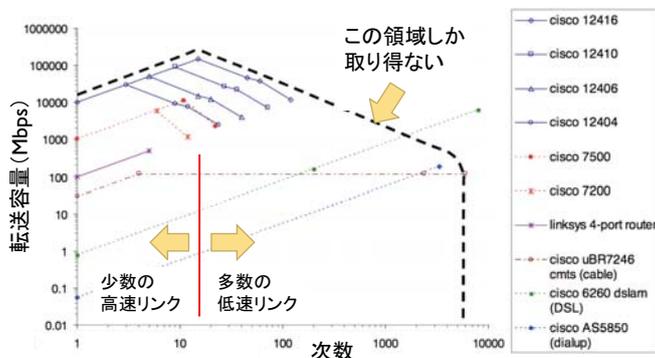
インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

- ▶ インターネットの次数分布はスケールフリー
  - ▶ 脆弱なのか？
  - ▶ スケールフリーなネットワークは1種類ではない
  - ▶ Preferential attachment 以外にも存在する
  - ▶ ノード・リンク特性を考慮してモデルを詳細化

▶ 31

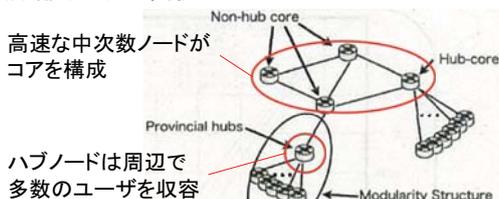
インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

▶ ルータの次数と転送容量の制約



インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

- ▶ ルータの次数と転送容量の制約(前頁)
- ▶ エンドユーザはネットワーク周辺に多数分布
- ▶ 長距離リンクは高価

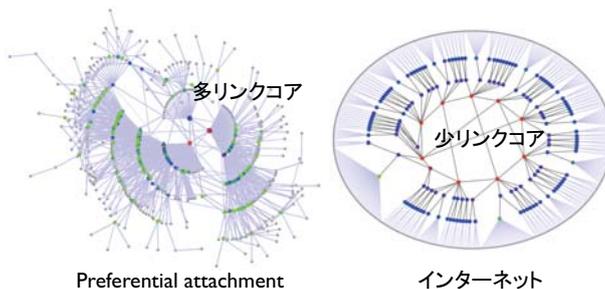


荒川伸一: "情報通信ネットワークのトポロジ構造がもたらすトラフィックダイナミクス" NICT 第2回複雑システムのネットワーク科学研究会.

▶ 33

インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

▶ Preferential attachment とは異なる大域構造

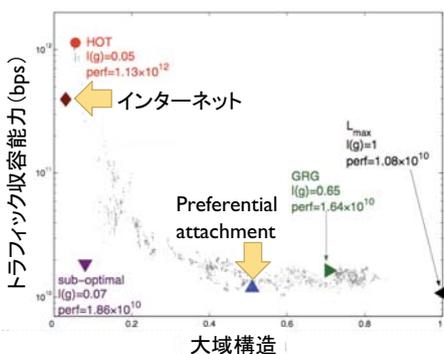


ピンポイント攻撃の影響は限定的？

▶ 34

インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

▶ インターネットの高いトラフィック収容能力



▶ 35

インターネットの大域構造 (Li et al. 2004)

▶ ノード・リンクの特性を考慮してモデルを詳細化

- ▶ ルータの次数と転送容量の制約
- ▶ エンドユーザはネットワーク周辺に分布
- ▶ 長距離リンクは高価

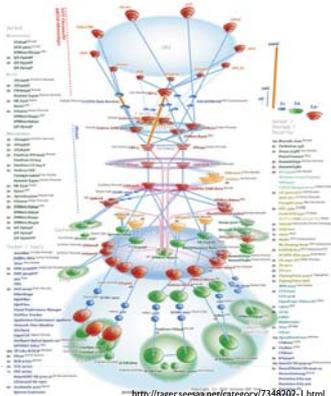
▶ 「数值的」な手法による分析と考察

- ▶ ネットワーク特徴量の抽出(次数相関など)
- ▶ トラフィック収容能力を観測(シミュレーション実験)
- ▶ 要因の寄与度, 相互作用は不明確

▶ 36

インターネットの局所的な構造 (荒川他 2010)

- ▶ 特有の局所構造の分析
  - ▶ インターネットは局所最適
  - ▶ 構造抽出とその意味



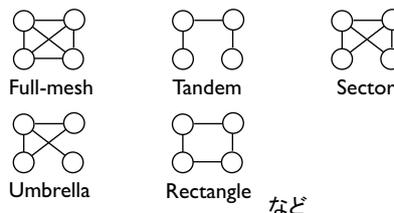
▶ 37

<http://tagers.seesaa.net/category/7348202-1.html>

インターネットの局所的な構造 (荒川他 2010)

- ▶ モチーフ
  - ▶ 確率的モデルとは異なる局所構造(サブグラフ)比率

例: 局所構造(4ノード)

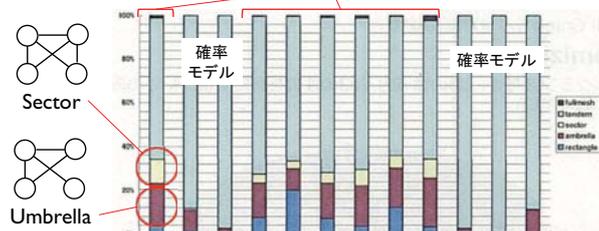


▶ 38

<http://tagers.seesaa.net/category/7348202-1.html>

インターネットの局所的な構造 (荒川他 2010)

- ▶ フルメッシュに近い構造の割合が高い
  - ▶ 迂回路(冗長性)
  - ▶ 経済性(少リンク)
 のためと推測...  
インターネット

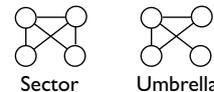


▶ 39

荒川他「情報通信ネットワークのトポロジ構造がもたらすトラフィックダイナミクス」  
NICT 第2回複雑システムのネットワーク科学研究会

インターネットの局所的な構造 (荒川他 2010)

- ▶ 4ノードからなる局所的な構造(モチーフ)の抽出
  - ▶ フルメッシュよりやや簡素な構造(Sector, Umbrella)
  - ▶ 迂回路, 経済性



- ▶ 「数値的」な手法による分析と考察
  - ▶ ネットワーク特徴量の抽出(モチーフ)
  - ▶ 構造の「意味」はエンジニアリングの定石から「推測」
    - ▶ 妥当性が示されたわけではない

▶ 40

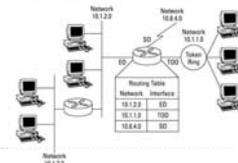
アウトライン

- ▶ インターネットの課題
- ▶ 複雑ネットワークの科学というアプローチ
- ▶ インターネットの構造・挙動の分析
  - ▶ 大域的・局所的な構造
  - ▶ トラフィックの挙動(井上の研究含む)
- ▶ 今後の展望

▶ 41

インターネットのトラフィック

- ▶ トラフィックとは？
  - ▶ ネットワークにおける連鎖的な相互作用(情報の流れなど)
  - ▶ 伝達経路は「ネットワーク構造」によって制限
- ▶ インターネットのトラフィックとは？
  - ▶ パケット(分割されたデータ)の流れ
  - ▶ 宛先アドレス(など)によって各ルーターが次リンクを決定
    - ▶ ルーター: インターネットのノード



▶ 42

## インターネットのトラフィック

### なぜトラフィックが重要なのか？

- ▶ ネットワークの目的はトラフィックの伝達(収容)
- ▶ 多くのトラフィックを収容できるネットワーク → 高品質
- ▶ なるべく少ない設備でのトラフィック収容 → 利益増

### トラフィックの効率的な収容

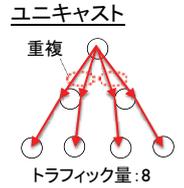
トラフィック種	アプリケーション例	トラフィック削減手法
1:1	メール, 電話	圧縮
1:N	テレビ・会議, 通知(Twitterなど)	マルチキャスト, 圧縮

▶ 43 複製コストの小さいネットワークに特徴的なトラフィック(例:うわさ, 伝染病)

## マルチキャストによるトラフィック削減

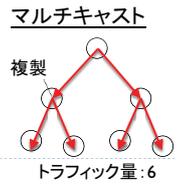
### ▶ 1:Nのトラフィックは大きく削減可能

- ▶ 冗長性が高い(同じ情報を重複して伝達)
- ▶ 削減により設備コストを抑制



### ▶ マルチキャスト

- ▶ 情報を複数の受信者に効率的に伝達
- ▶ ルータで情報を複製しながら配信
- ▶ 「木」には解析的な手法を利用可!
- ▶ Cavity法ではない



▶ 44

## マルチキャストによるトラフィック削減

### ▶ マルチキャストのトラフィック量

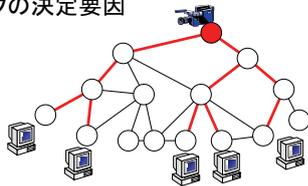
- ▶ 配信経路木の大きさに比例

### ▶ 配信経路木

- ▶ ベースとなるネットワーク(インターネット)上に構築(下図)

### ▶ マルチキャスト・トラフィックの決定要因

- ▶ ネットワーク構造
- ▶ スモールワールド性
- ▶ スケールフリー性
- ▶ 経路制御プロトコル
- ▶ ユーザ, アプリケーション

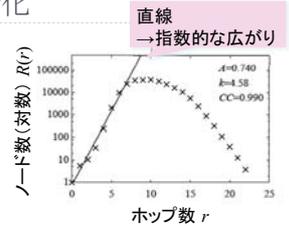


▶ 45

## マルチキャストのトラフィック量 インターネットのモデル化 (Phillips et al. 1999, Inoue et al. 2006)

### ▶ 指数的に広がるネットワーク

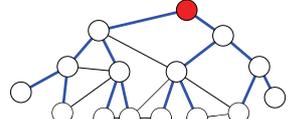
- (スモールワールド性)
- ▶ 観測されたノード数分布(上図)
- ▶ → 指数的な広がりを確認



- ▶ 最短経路から成る全域木を等分木( $k$ 分木)と仮定(下図)
- ▶ 次数のスケールフリー性は無視
- ▶ 平均的な特性を分析

- ▶  $r$  ホップにあるノード数

$$R(r) \approx k^r$$



例:  $k=2$  の等分木モデル

▶ 46

## マルチキャストのトラフィック量 配信木のモデル化 (Phillips et al. 1999, Inoue et al. 2006)

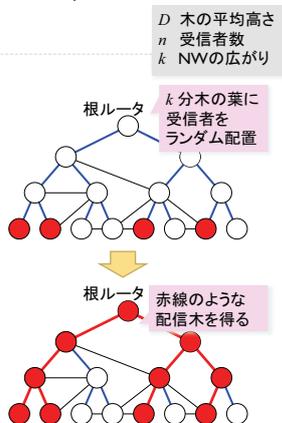
### ▶ $k$ 分木上に配信木を構築

- ▶  $n$  の受信者を  $k$  分木の葉にランダム配置(重複可)
- ▶ 選択される葉数  $m$

$$m = k^D \left\{ 1 - (1 - k^{-D})^n \right\}$$

- ▶ 根ルータから  $r$  ホップ離れたルータ  $k^r$  のうち、配信木上のルータ数  $T(r)$

$$T(r) = k^r \left\{ 1 - (1 - k^{-r})^n \right\}$$



▶ 47

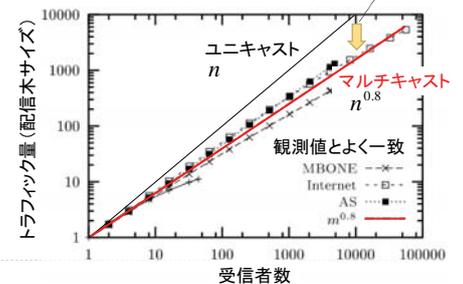
## マルチキャストのトラフィック量 トラフィック量の近似式 (Phillips et al. 1999, Inoue et al. 2006)

### ▶ マルチキャストのトラフィック

- ▶ 「解析的」な手法(連続近似など)

$$\sum_r T(r) \approx \int T(r) dr \approx n^{0.8}$$

マルチキャストのトラフィック削減効果



▶ 48

(Inoue et al. 2006)

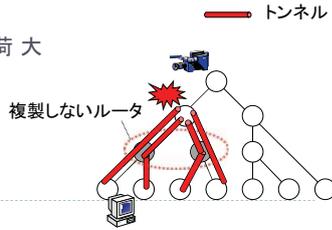
### マルチキャスト導入問題

#### より現実的な問題へ

- 複製機能を持ったルータの導入は限定的
  - 部分的にユニキャストによる配信
  - 「トンネル(仮想リンク)」技術の利用

#### トラフィックへの影響

- トンネル根側ルータの負荷 大
- トラフィック削減効果 小
- 重複トラフィック

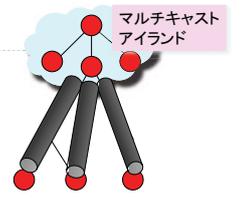


▶ 49

(Inoue et al. 2006)

### トンネルの影響

- 仮定: マルチキャストアイランド
  - 複製できるルータのネットワーク
  - 根ルータから等方的な広がり
  - アイランド外はトンネルによる配信
  - 例: 先進的なISPのみに配備

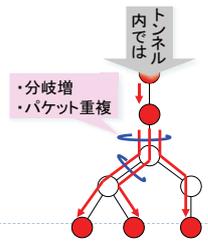


#### トンネルの影響

- トンネル終端ノードの分岐増
- トンネル区間に重複トラフィック

#### 適切なアイランドサイズは?

- 設備投資を決定



▶ 50

(Inoue et al. 2006)

### トンネルの影響の定式化

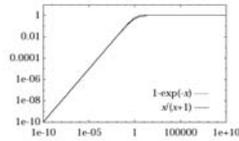
#### T(r) を簡易な形式に近似

$$T(r) = k^r \{1 - (1 - k^{-r})^n\}$$

$$\approx k^r \{1 - \exp(-nk^{-r})\}$$

$$\approx \frac{nk^r}{n + k^r}$$

$(1 - a^{-1})^n \approx \exp(-n/a)$   
 $1 - \exp(-x) \approx \frac{x}{x+1}$



#### 連続近似による和

$$\sum_1^r T(r) \approx [n \log_k(n + k^x)]_{x=1/2}^{x=r+1/2}$$

▶ 51

(Inoue et al. 2006)

### トンネルの影響の定式化

#### トンネル終端ノード分岐数

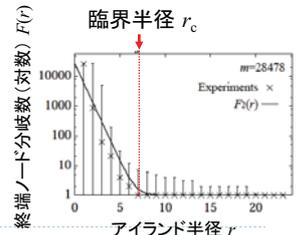
$$F(r) = \frac{(\# \text{ destinations})}{(\# \text{ tunnels})} = \frac{m}{T(r)} \approx 1 + nk^{-r}$$

r はアイランド半径

#### 臨界半径 $r_c = \log_k(n)$

- 配信パラメータ(k, D, n)によらず  $F(r) = 2$
- 任意の配信木で
- トンネル終端ルータの負荷解消

解析的な手法の威力!



▶ 52

(Inoue et al. 2006)

### トンネルの影響の定式化

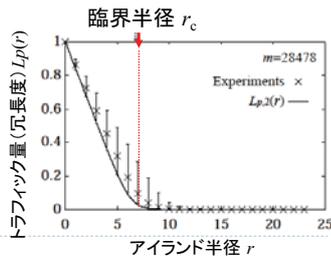
#### トラフィック量

r はアイランド半径

$$L(r) = (\# \text{ inside\_links}) + (\# \text{ outside\_links})$$

$$= \sum_{i=1}^r T(i) + \sum_{i=r+1}^D m$$

#### 臨界半径で十分削減



▶ 53

(Inoue et al. 2006)

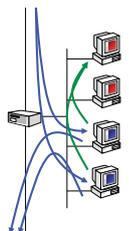
### マルチキャスト導入戦略

#### 「臨界半径」のマルチキャストアイランドを配備

- トンネル終端ノードの負荷削減
- 十分なトラフィック削減効果
- (全域展開に比べれば) 少ない設備投資

#### 負荷の偏りへの対応

- 実際は等分木(k分木)ではなく「スケールフリー」な次数分布
- しかし、スケールフリー性を考慮した解析は困難
- 平均的な負荷は十分に小さいので負荷分散技術で対応(図)



▶ 54

takeru.inoue@ieee.org 11.3.28

## マルチキャストのトラフィック：まとめ

### ▶ マルチキャストのトラフィック量

- ▶ スモールワールドにみられる「木」を利用した解析

$$\sim n_{0.8}$$

### ▶ トンネルの影響の分析

- ▶ マルチキャストアイランドの臨界半径

$$r_c = \log_k(n)$$

- ▶ 設備投資を抑えながら、トラフィックを削減する導入戦略

▶ 55

## アウトライン

### ▶ インターネットの課題

### ▶ 複雑ネットワークの科学というアプローチ

### ▶ インターネットの構造・挙動の分析

- ▶ 大域的・局所的な構造

- ▶ トラフィックの挙動(井上の研究含む)

### ▶ 今後の展望

▶ 56

## 今後の展望

### ▶ 現実的なトラフィック分析への道はまだまだ遠い

- ▶ 「解析的」な手法のみでは重要な問題は対処できない

- ▶ はまれば強力(例: 臨界半径の導出)

- ▶ 限定的な状況での分析が精一杯

- ▶ 「数值的」な手法では問題を「理解」できない

- ▶ 多数の事例から「推測」するのみ

- ▶ 例: インターネットの構造抽出と意味の推測

### ▶ 両者の特長を活かした分析

- ▶ 対象の本質を捉えた解析

- ▶ 効率的なアルゴリズムによる計算

▶ 57