

サクサク動くスパコンを作る ～低遅延ネットワーク・トポロジの追究～

藤原 一毅

アーキテクチャ科学研究系 特任准教授

<http://ikki.fujiwa.la>

本日のお題

**スーパーコンピュータの
ネットワーク設計**

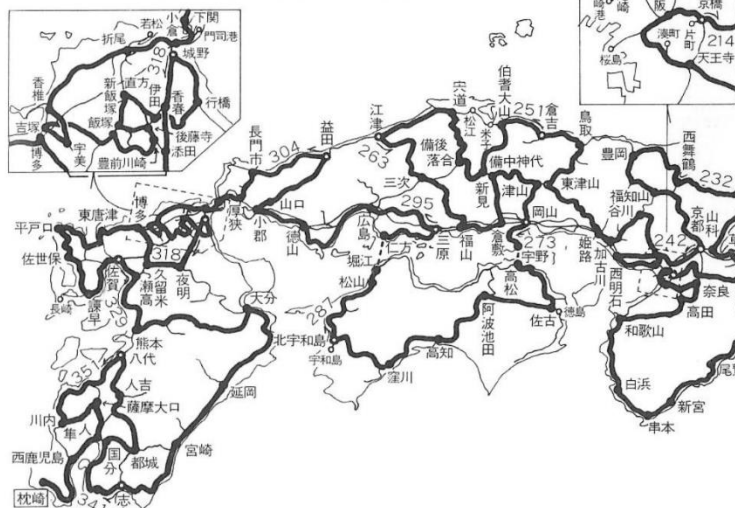
高校生にもわかるように





自動車航送船「第四関門丸」 1956年

<http://www.asahi.com/topics/gallery/2013kitakyushu/CDf20130404182333590GMC.html>



乗車キロ(国鉄「営業キロ」による)

鉄道	13,118.4キ口
連絡船	201.0キ口
計	13,319.4キ口

*国鉄全旅客営業キロは21,011.7キロ
*運賃計算用キロ(本文P.19参照)は
13,267.2キロ

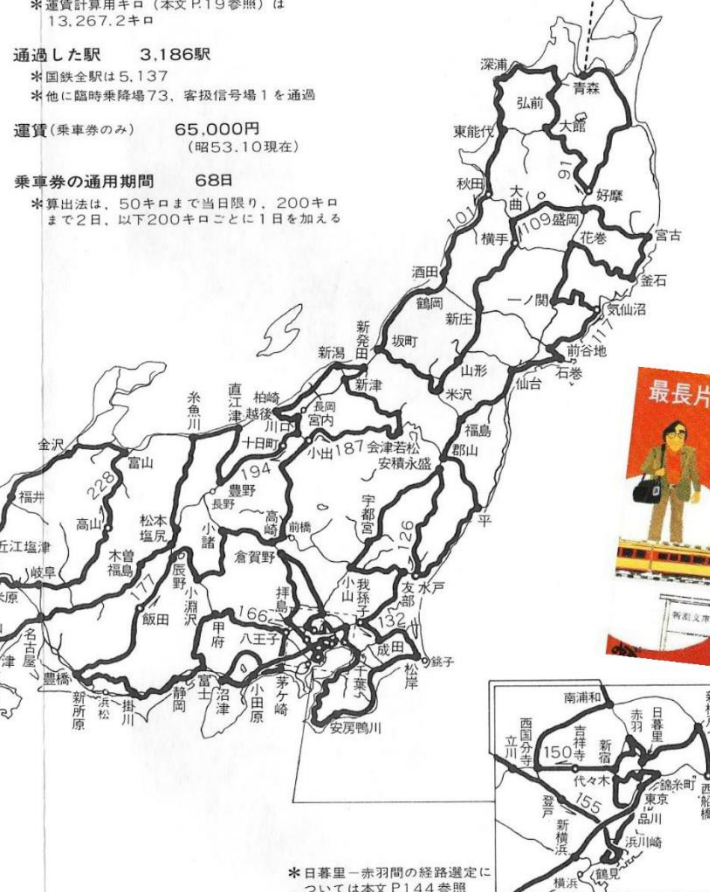
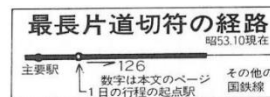
通過した駅 3,186駅

*国鉄全駅は5,137
*他に臨時乗降場73、客扱信号場1を通過

運賃(乗車券のみ) 65,000円
(昭53.10現在)

乗車券の通用期間 68日

*算出法は、50キロまで当日限り、200キロまで2日、以下200キロごとに1日を加える



*日暮里-赤羽間の経路選定については本文P144参照

現在の最長片道切符（2015/05/30～）

7

- 北陸新幹線・仙石東北ライン開通後
- 山田線宮古～釜石間を通らない
※震災運休中。復旧後、三陸鉄道へ移管予定

鉄道	11111.4 キロ
BRT	55.3 キロ
計	11166.7 キロ



東京近郊区間 最多駅数ルート (Ekillion)

8

ekillion - 大都市近郊区間大... x +

nysol.jp:8080/eki

go! tokyo 1130101 1130221 weight=stations order=dsc topk=10 inc= exc= outmode=1 access **724**

近郊区間

大阪 東京 福岡 新潟

始点駅 東京: JR東海道本線(東京～熱海)

終点駅 御徒町: JR京浜東北線

順位付け 降順 昇順

駅数

表示件数 10

ルートに含む駅追加

ルートに含めない駅追加

地図 航空写真

地図データ ©2015 Google, ZENRIN 利用規約

東京 [JR山手線] [〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目9-1] [緯度35.681391] [経度139.766103] [海拔0]

トップ10ノルート総件数6081352

[ルート0000001] 駅数: 344 駅間数: 343
[ルート0000002] 駅数: 343 駅間数: 342
[ルート0000003] 駅数: 343 駅間数: 342
[ルート0000004] 駅数: 342 駅間数: 341
[ルート0000005] 駅数: 342 駅間数: 341
[ルート0000006] 駅数: 341 駅間数: 340
[ルート0000007] 駅数: 341 駅間数: 340
[ルート0000008] 駅数: 341 駅間数: 340
[ルート0000009] 駅数: 340 駅間数: 339
[ルート0000010] 駅数: 340 駅間数: 339

[ルート0000001] 駅数: 344 駅間数: 343
東京 → 有楽町 → 新橋 → 浜松町 → 田町 → 品川 → 大崎 → 五反田 → 目黒 → 恵比寿 → 渋谷 → 原宿 → 代々木 → 千駄ヶ谷 → 信濃町 → 四ツ谷 → 市ヶ谷 → 飯田橋 → 水道橋 → 御茶ノ水 → 神田 → 秋葉原 → 浅草橋 → 両国 → 錦糸町 → 亀戸 → 平井 → 新小岩 → 小岩 → 市川 → 本八幡 → 下総中山 → 西船橋 → 船橋 → 東船橋 → 津田沼 → 幕張本郷 → 幕張 → 新検見川 → 稲毛 → 西千葉 → 千葉 → 本千葉 → 蘇我 → 浜野 → 八幡宿 → 五井 → 姉ヶ崎 → 長浦 → 袖ヶ浦 → 蕨根 → 木更津 → 君津 → 青堀 → 大貫 → 佐貫町 → 上総湊 → 竹岡 → 浜金谷 → 保田 → 安房勝山 → 岩井 → 富浦 → 那古船形 → 館山 → 九重 → 千倉 → 千歳 → 南三原 → 和田浦 → 江見 → 太海 → 安房鴨川 → 安房天津 → 安房小湊 → 行川アイランド → 上総興津 → 鶴原 → 勝浦 → 御宿 → 浪花 → 大原 → 三門 → 長者町 → 太東 → 東浪見 → 上総一ノ宮 → 八積 → 茂原 → 新茂原 → 本納 → 永田 → 大網 → 福俣 → 東金 → 求名 → 成東 → 松尾 → 横芝 → 飯倉 → 八日市場 → 玉湯 → 旭 → 飯岡 → 倉橋 → 猿田 → 松岸 → 椎柴 → 下総豊里 → 下総橋 → 笹川 → 小見川 → 水郷 → 香取 → 佐原 → 大戸 → 下総神崎 → 滑河 → 久住 → 成田 → 下総松崎 → 安食 → 小林 → 木下 → 布佐 → 新木 → 湖北 → 東我孫子 → 我孫子 → 天王台 → 取手 → 藤代 → 佐貫 → 牛久 → ひたち野うしく → 荒川沖 → 土浦 → 神立 → 高浜 → 石岡 → 羽鳥 → 岩間 → 友部 → 穴戸 → 笠間 → 稲田 → 福原 → 羽黒 → 岩瀬 → 大和 → 新治 → 下館 → 玉戸 → 川島 → 東結城 → 結城 → 小田林 → 小山 → 思川 → 栃木 → 大平下 → 岩舟 → 佐野 → 富田 → 足利 → 山前 → 小俣 → 桐生 → 岩沼 → 国定 → 伊勢崎 → 駒形 → 前橋大島 → 前橋 → 新前橋 → 井野 → 高崎問屋町 → 高崎 → 倉賀野 → 新町 → 神保原 → 本庄 → 岡部 → 深谷 → 龍原 → 熊谷 → 行田 → 吹上 → 北鴻巣 → 鴻巣 → 北本 → 桶川 → 北上尾 → 上尾 → 宮原 → 大宮 → 日進 → 西大宮 → 指扇 → 南古谷 → 川越 → 西川越 → 的場 → 笠桶 → 武蔵高萩 → 高麗川 → 東飯能 → 金子 → 箱根ヶ崎 → 東福生 → 拝島 → 小宮 → 北八王子 → 八王子 → 片倉 → 八王子みなみ野 → 相原 → 橋本 → 南橋本 → 上溝 → 番田 → 原町 → 下溝 → 相武台下 → 入谷 → 海老名 → 厚木 → 辻 → 門沢橋 → 倉見 → 宮山 → 寒川 → 舊川 → 北茅ヶ崎 → 茅ヶ崎 → 辻堂 → 藤沢 → 大船 → 本郷台

本日のお題

**スーパーコンピュータの
ネットワーク設計**

高校生にもわかるように

スパコンってどんなもの？

スーパーコンピュータ「京」の開発
https://youtu.be/_ze51XkKd_I

8万台で8万倍？

12

開始

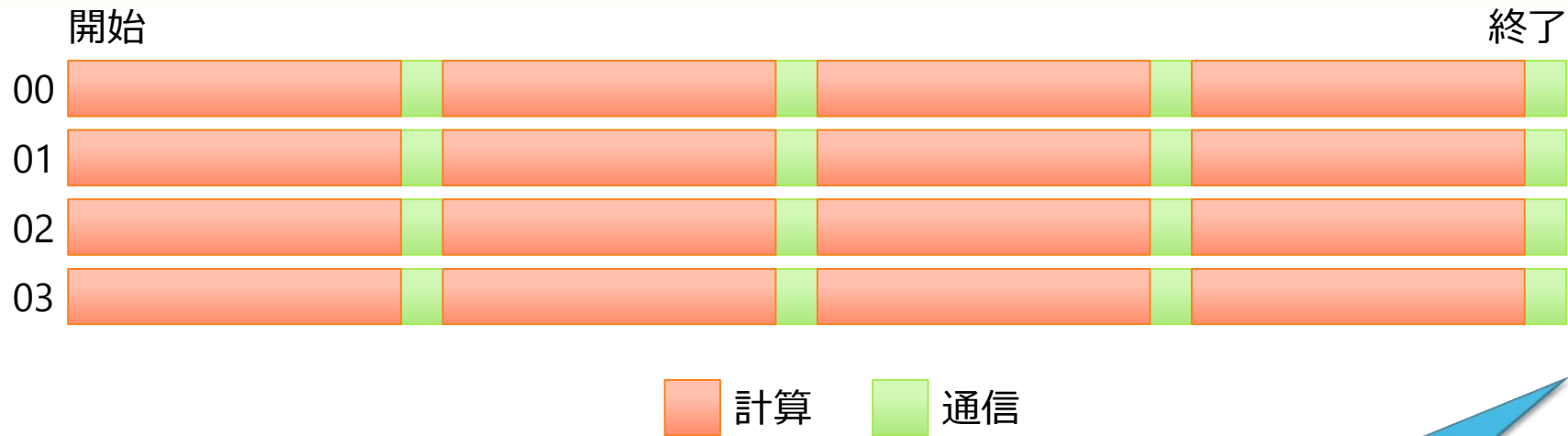
→時間

00

終了

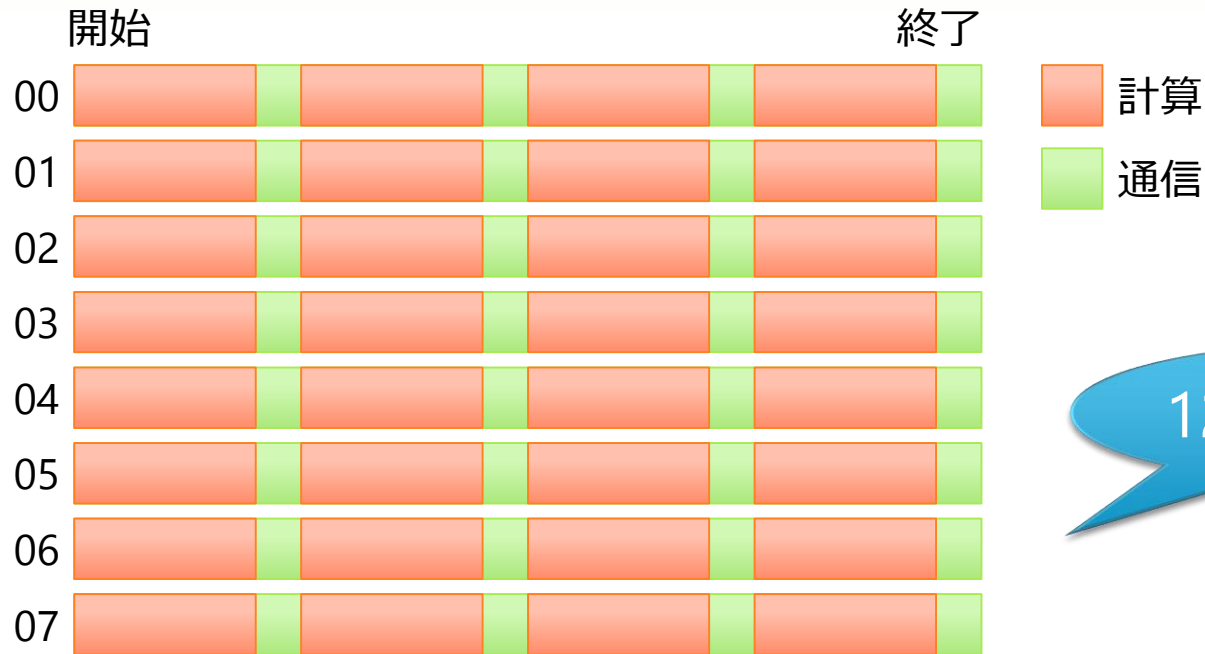
76.8時間／1台

8万台で8万倍？

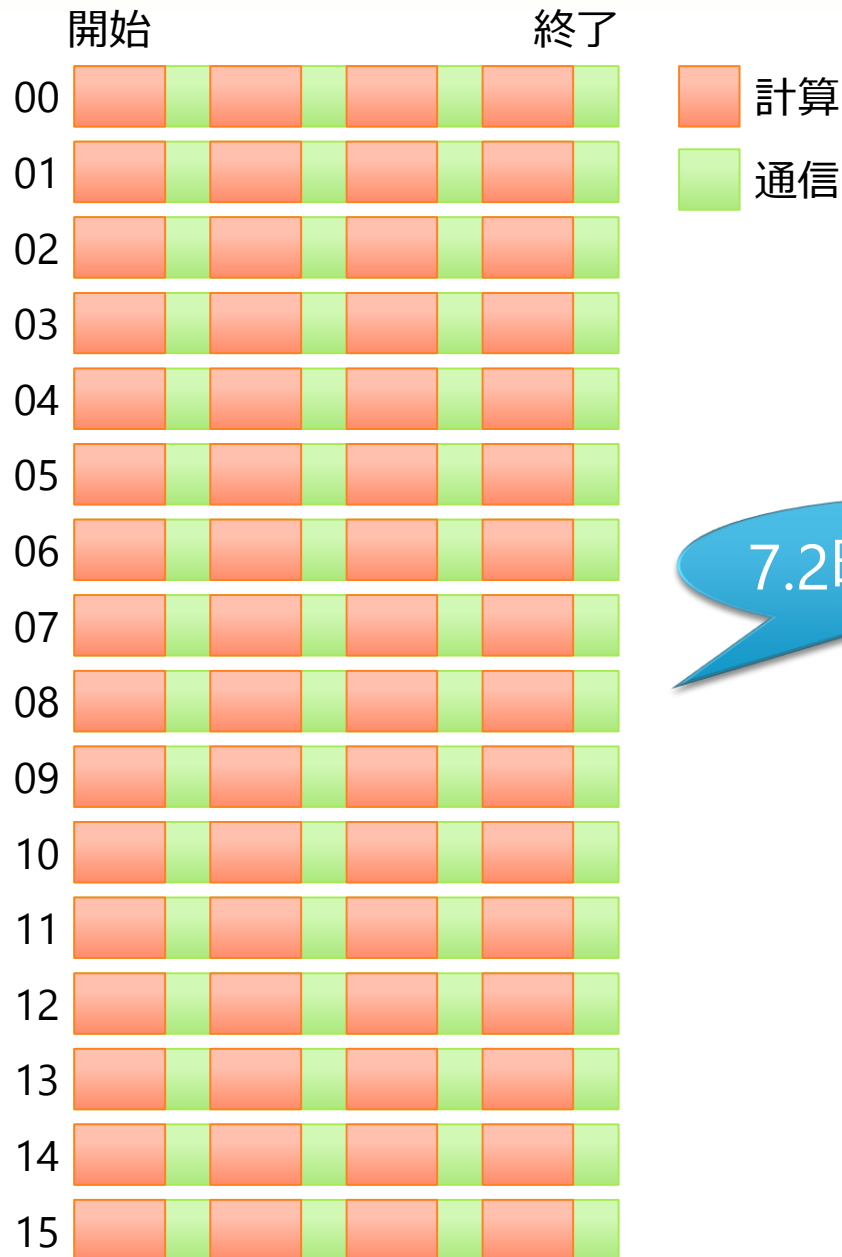


21.6時間／4台

8万台で8万倍？

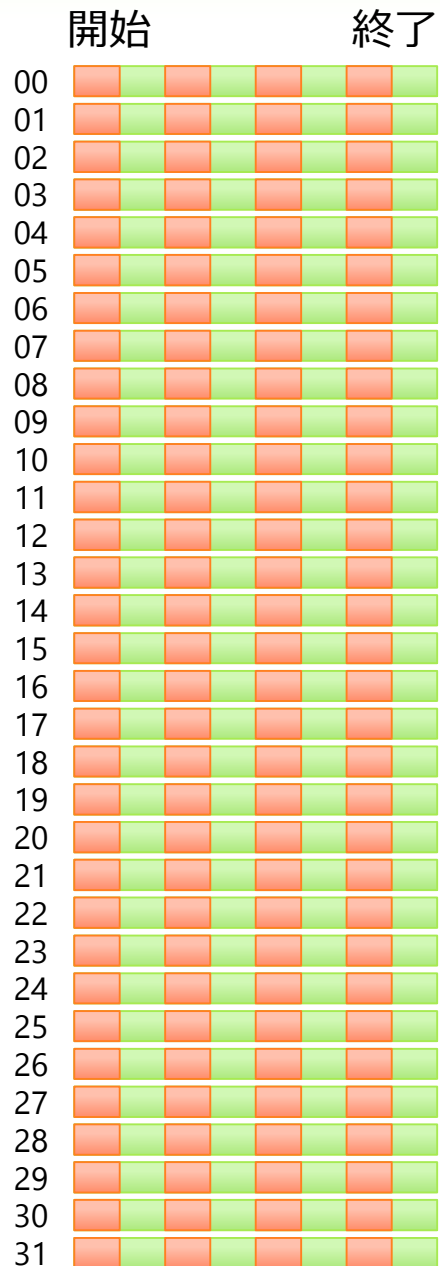


8万台で8万倍？



7.2時間／16台

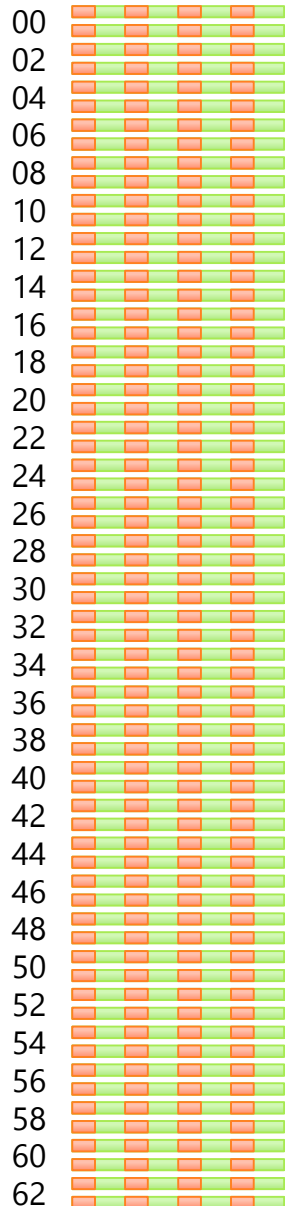
8万台で8万倍？



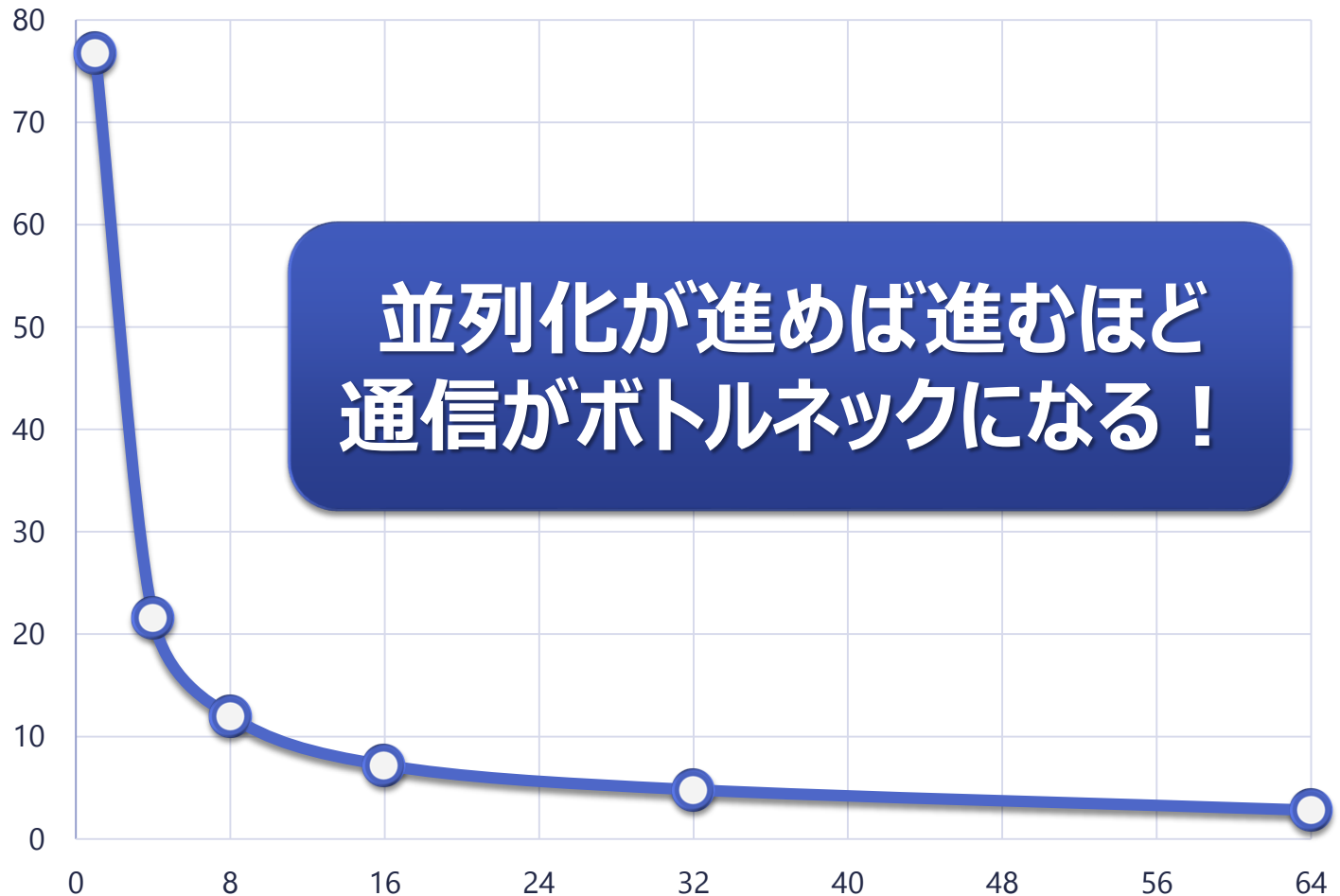
4.8時間／32台

8万台で8万倍？

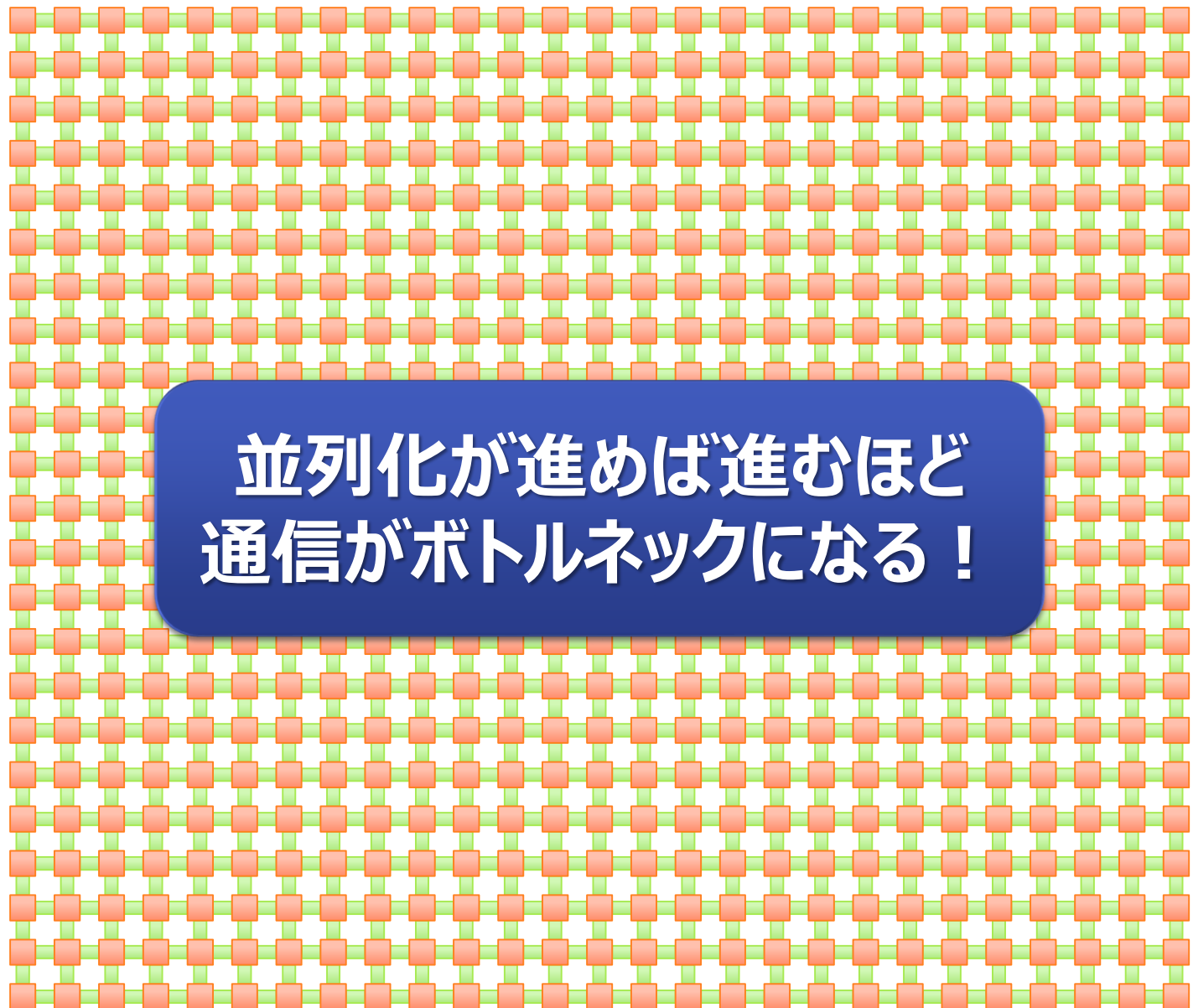
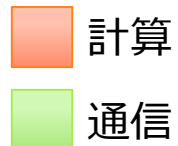
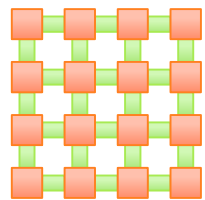
開始 終了



2.8時間／64台



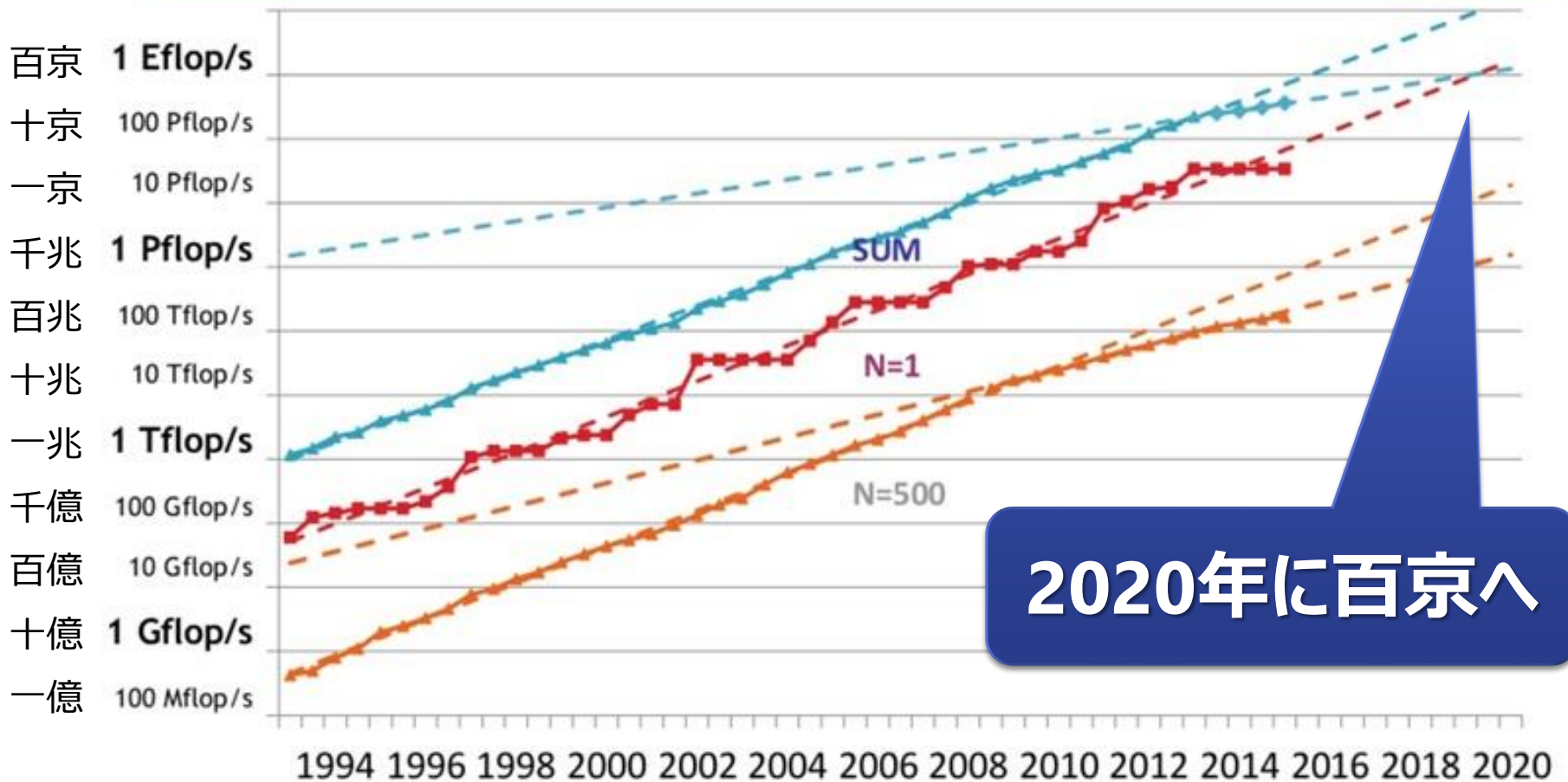
8万台で8万倍？



並列化が進めば進むほど
通信がボトルネックになる！

未来のスパコンはどのくらい速くなる？

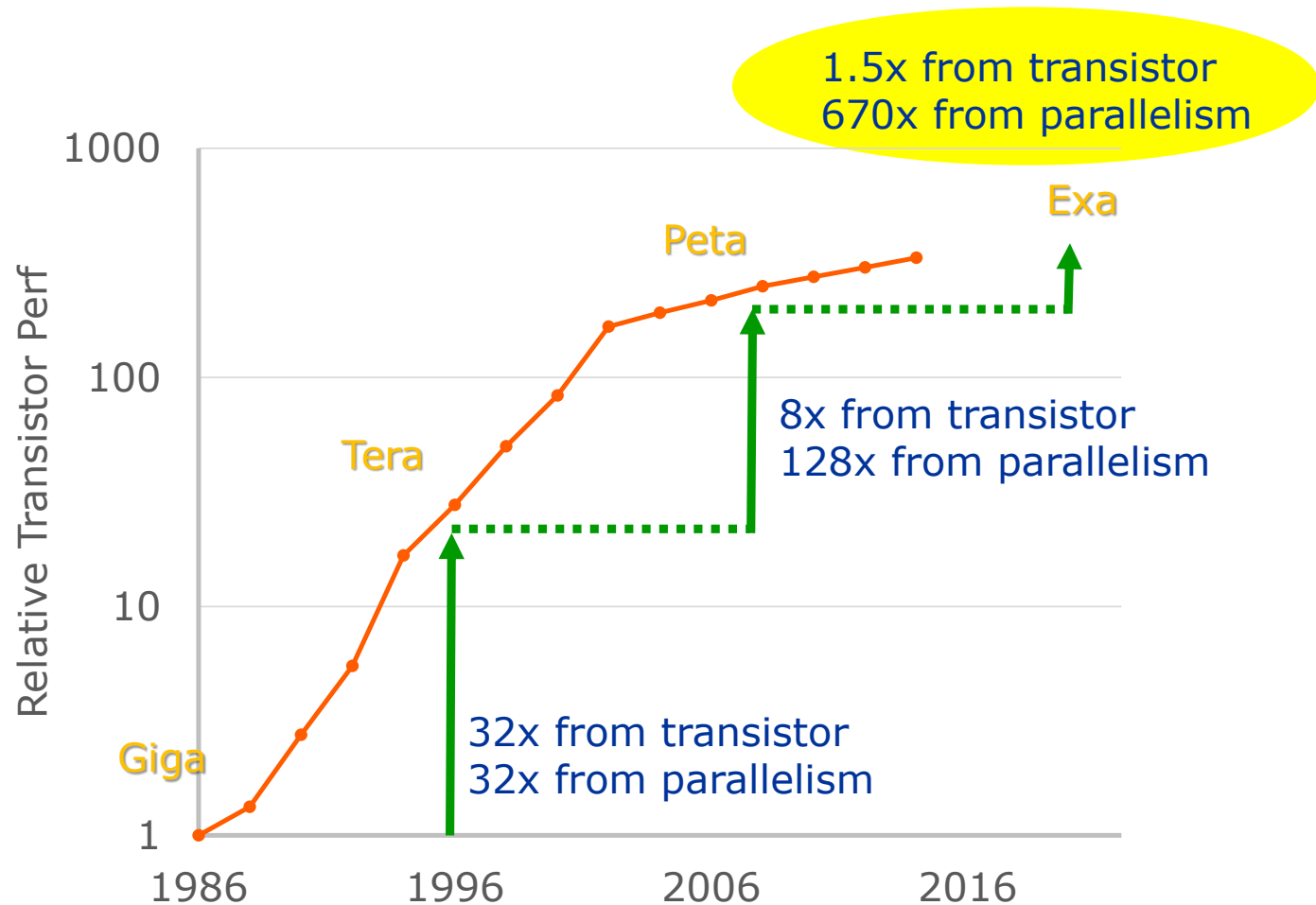
PROJECTED PERFORMANCE DEVELOPMENT



2020年に百京へ

未来のスパコンはどうやって速くなる？

From Giga to Exa, via Tera & Peta



System performance from parallelism

じゃあネットワークを速くしようぜ



©Visitor7

広帯域 = ドバドバ流れる



©Mark Schellhase

低遅延 = ビュンビュン飛んでく

並列化が進めば進むほど
小さなデータを頻繁にやりとりするため
低遅延なネットワークが必要

ネットワークの遅延の内訳

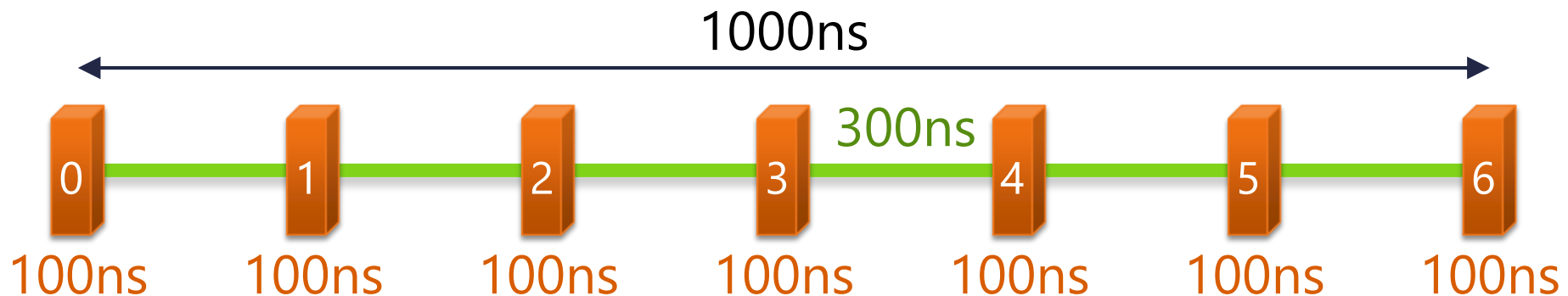
信号がケーブルを伝わる時間

= 0.2m/ns (石英中の光速)

低遅延なネットワークを作るには
乗り換え回数（ホップ数）を減らす！

信号がノードで乗り換える時間

= 1回あたり 100～200ns



グラフとしてモデル化

用語

グラフ

ノードを辺で結んだ構造

トポロジ

ネットワークのグラフ構造

次数

各ノードから出ている辺の数

距離

ふたつのノードを結ぶ最短
ルートのホップ数

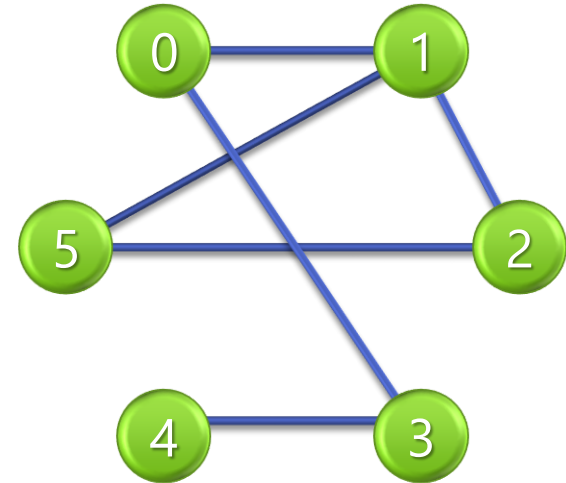
直径

すべての2ノード間の距離の
最大値

平均距離

すべての2ノード間の距離の
平均値

無向グラフ（辺の長さ=1）



距離表

	0	1	2	3	4	5
0		1	2	1	2	2
1			1	2	3	1
2				3	4	1
3					1	3
4						4
5						

グラフ路線図としてモデル化

用語

グラフ 路線図

次数 隣駅数

距離 最短ルート of 駅数

直径 全駅間の距離の
最大値

平均距離
全駅間の距離の
平均値

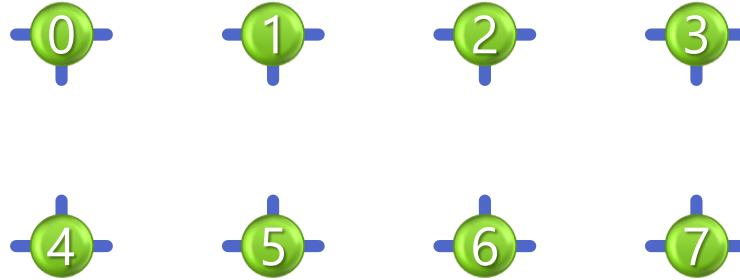


©東京地下鉄

	神保町	四ツ谷	霞ヶ関	茅場町
神保町		4	4	3
四ツ谷			3	7
霞ヶ関				4
茅場町				

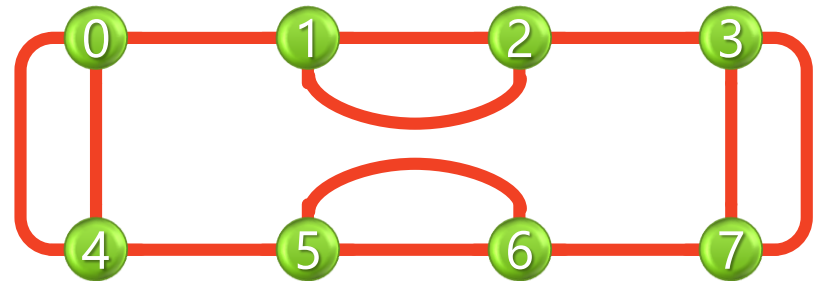
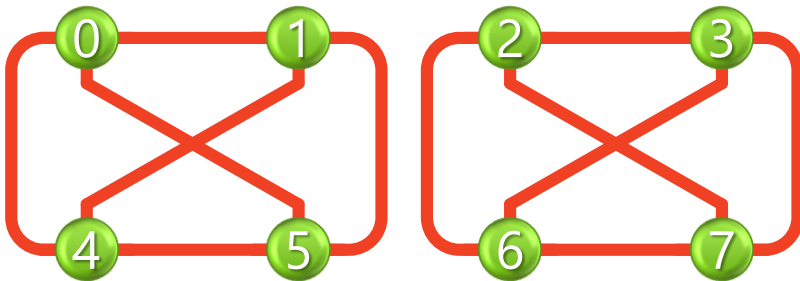
練習問題

- 8ノード・3次で、直径が最小のグラフを作ってください。



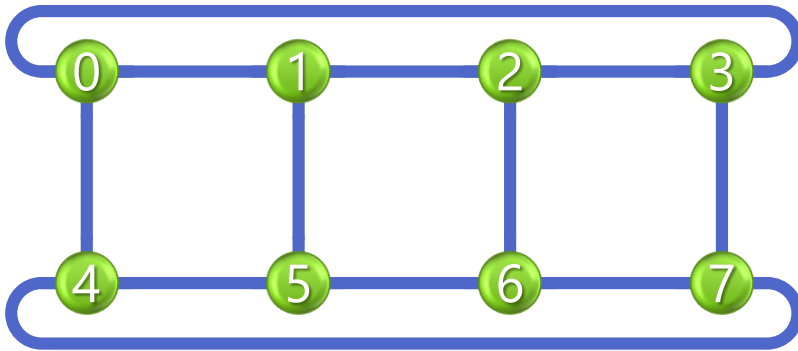
禁止手

- 全ノードがつながっていない
- 同じ場所に2本以上の辺がある



練習問題の解答 (1/2)

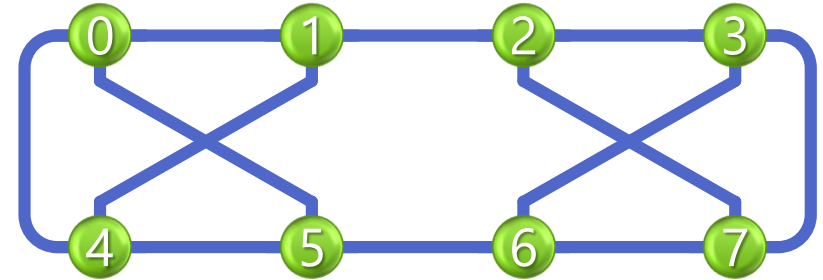
- 8ノード・3次で、直径が最小のグラフを作ってください。



距離表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1	2	1	1	2	3	2
1			1	2	2	1	2	3
2				1	3	2	1	2
3					2	3	2	1
4						1	2	1
5							1	2
6								1
7								

直径 3 平均距離 1.714



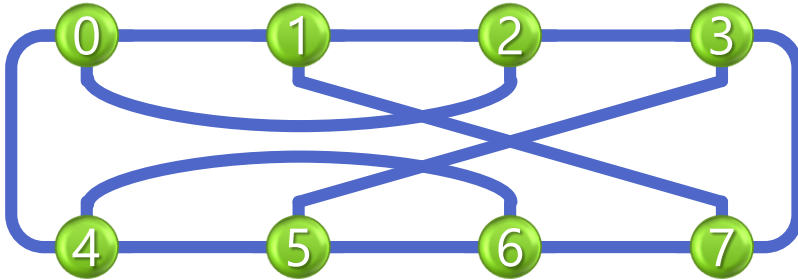
距離表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1	2	3	1	1	2	3
1			1	2	1	2	3	2
2				1	2	3	2	1
3					3	2	1	1
4						1	2	3
5							1	2
6								1
7								

直径 3 平均距離 1.786

練習問題の解答 (2/2)

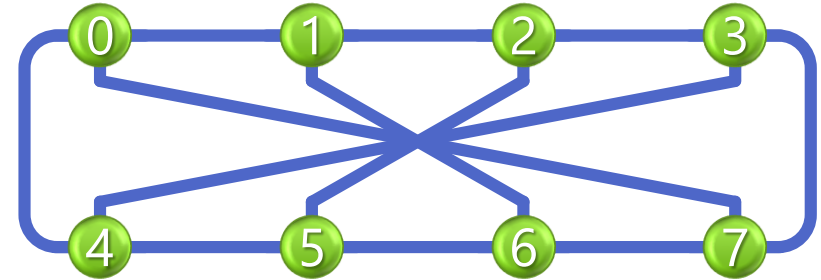
- 8ノード・3次で、直径が最小のグラフを作ってください。



距離表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1	1	2	1	2	2	2
1			1	2	2	3	2	1
2				1	2	2	3	2
3					2	1	2	1
4						1	1	2
5							1	2
6								1
7								

直径 3 平均距離 1.643



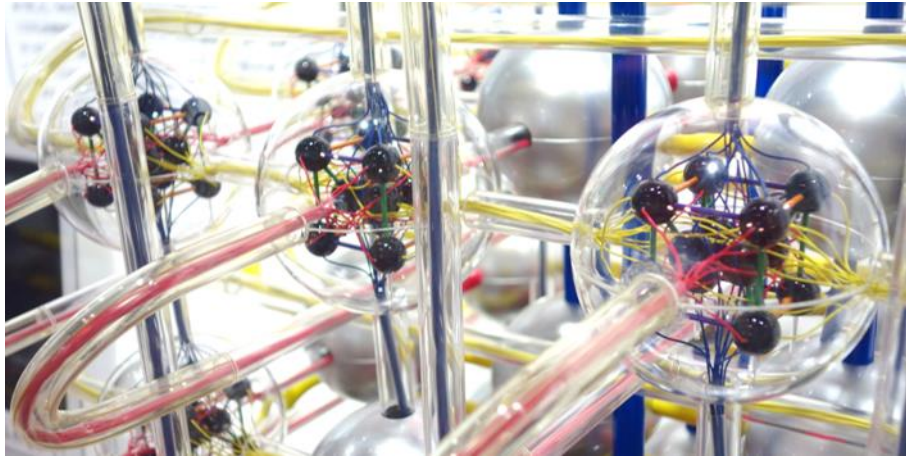
距離表

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1	2	2	1	2	2	1
1			1	2	2	2	1	2
2				1	2	1	2	2
3					1	2	2	1
4						1	2	2
5							1	2
6								1
7								

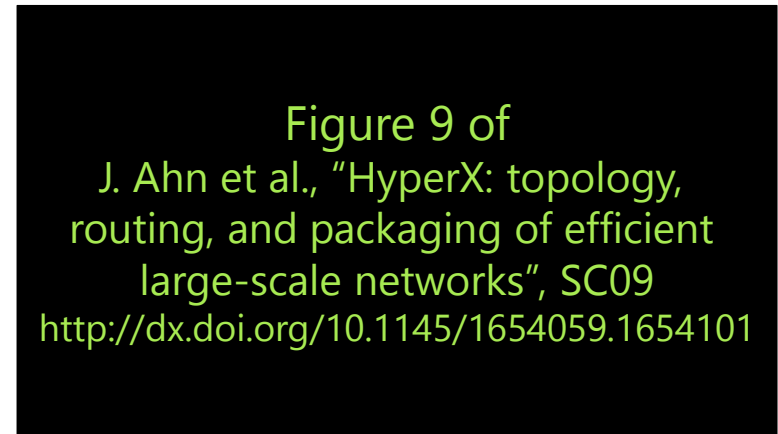
直径 2 平均距離 1.571

一生懸命考えて作った美しいトポロジ

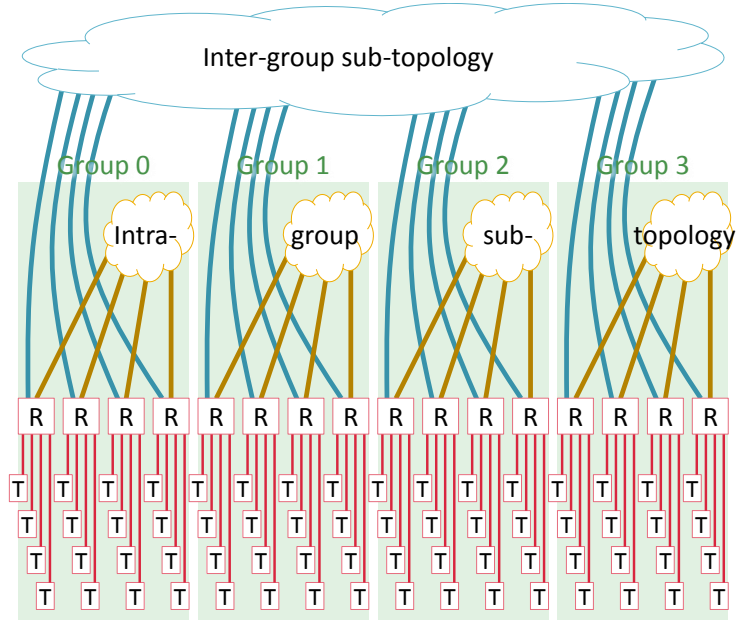
28



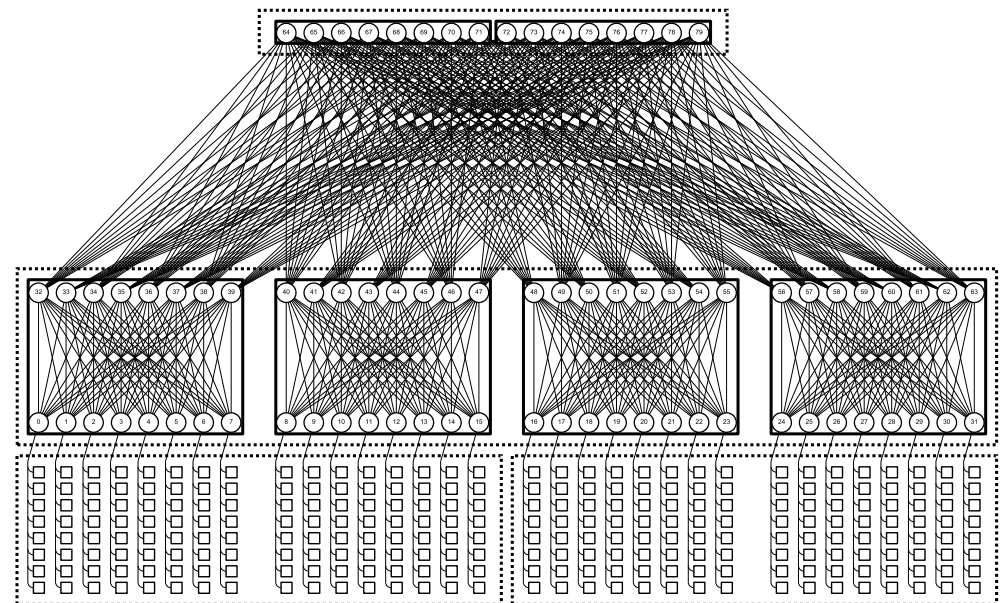
6次元トラス



HyperX



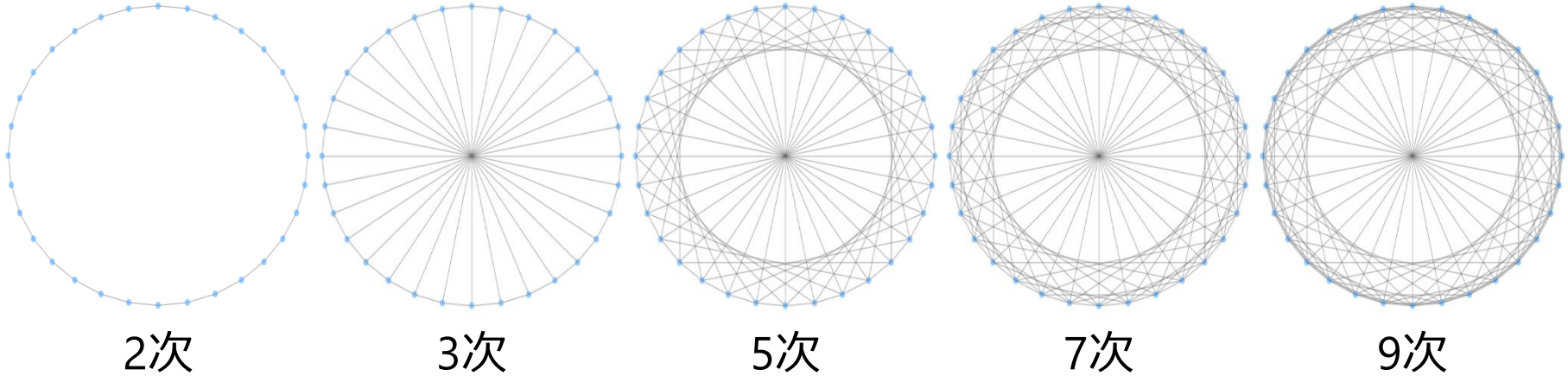
Dragonfly



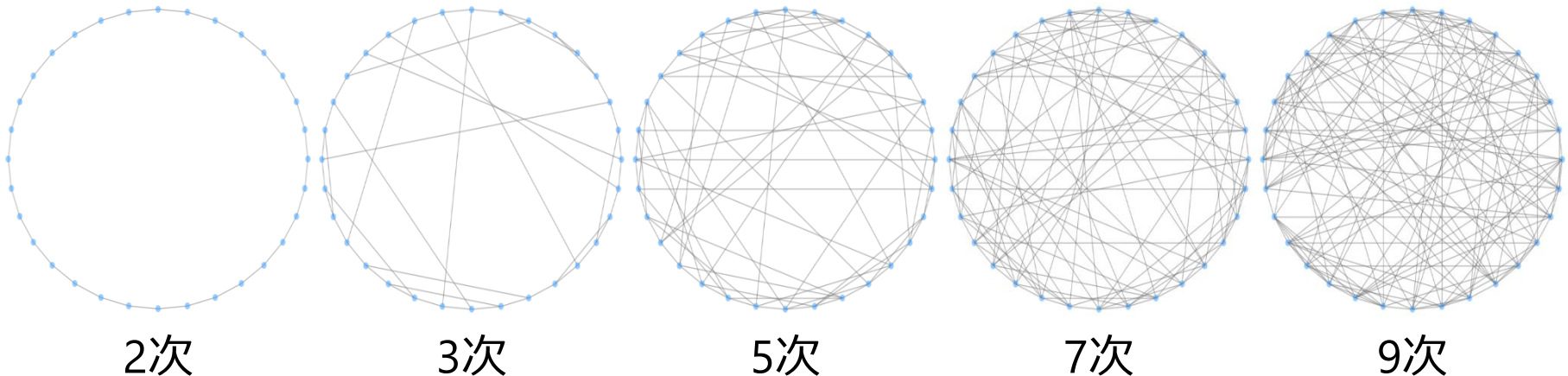
Myrinet Clos

リングに辺を足すとしたら？

■ 規則的なトポロジ：リング + $1/n$ 周ショートカット

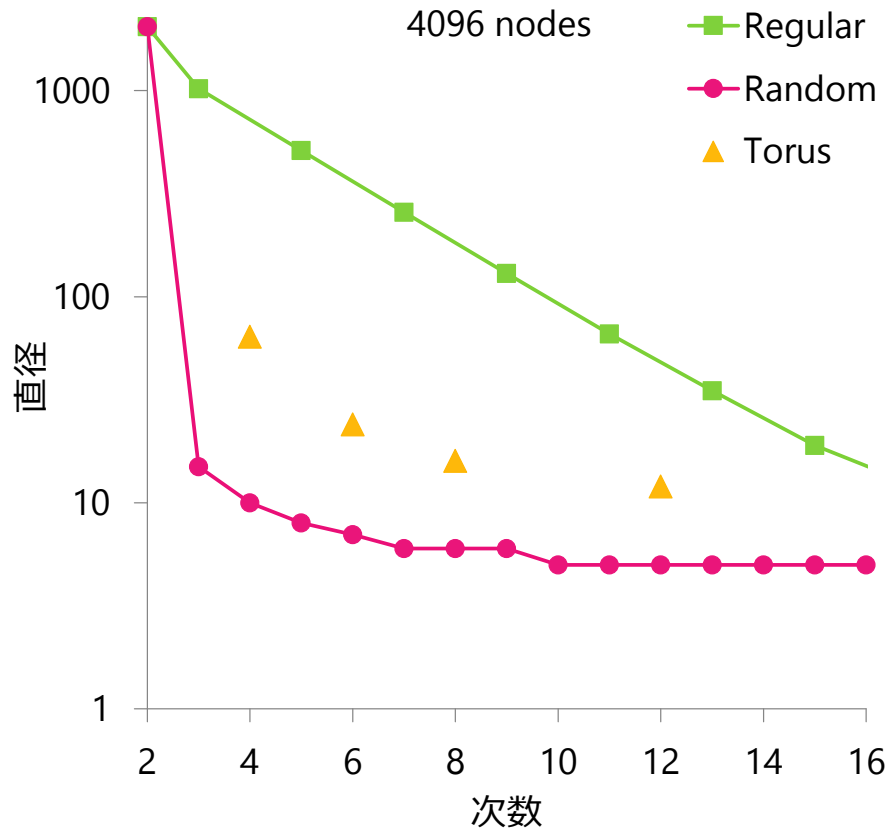


■ 不規則なトポロジ：リング + ランダムショートカット

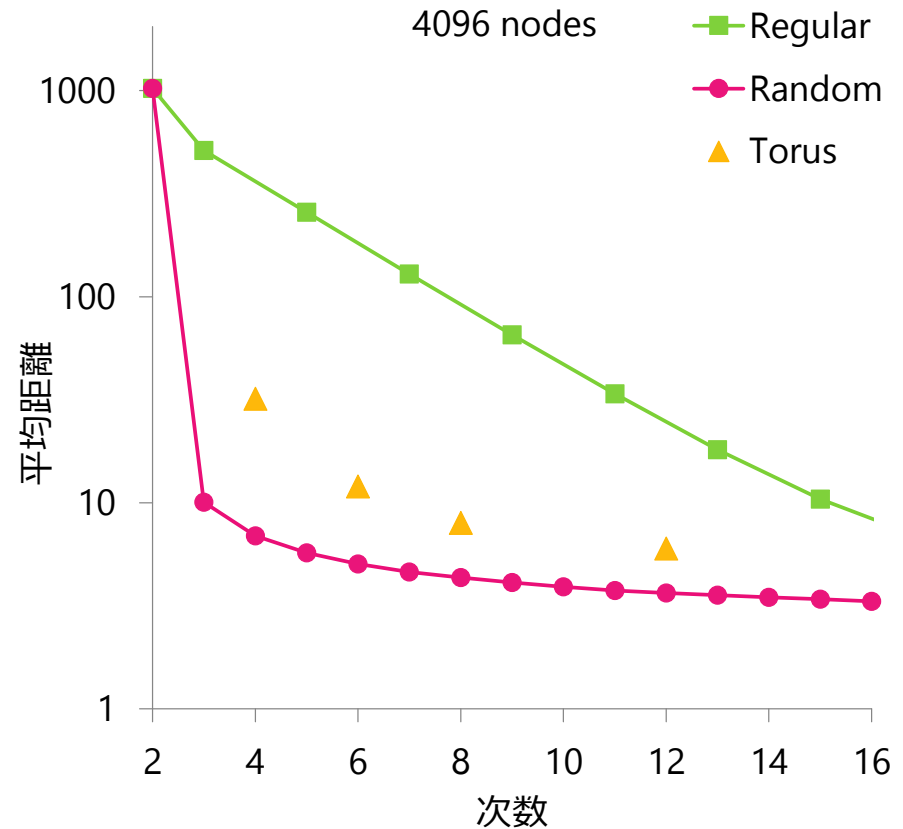


規則的なグラフ vs. ランダムグラフ

直径



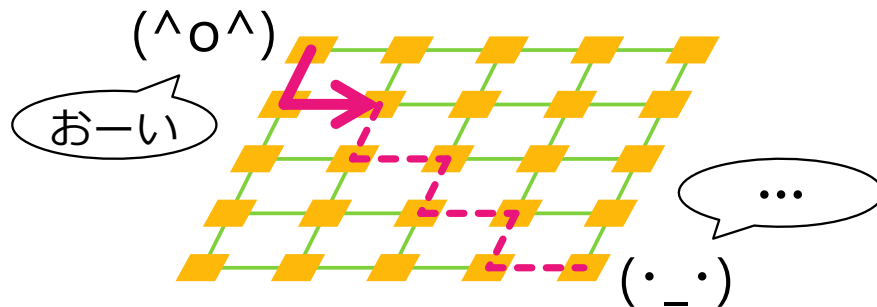
平均距離



ランダムグラフの直径・平均距離は
同じ次数の規則的なグラフより小さい

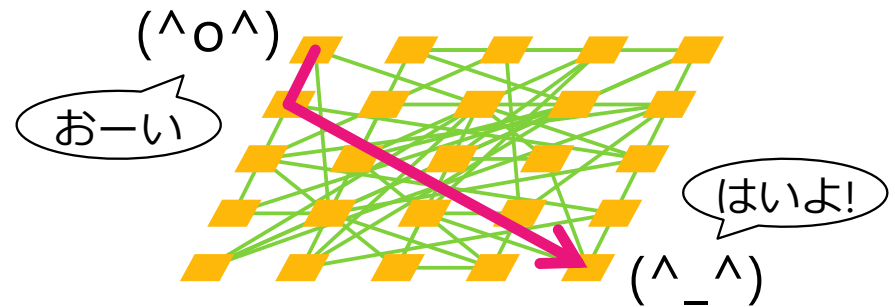
なぜランダムトポロジは直径が小さいの？

- 近道の選択肢が多い



▲ 規則的なトポロジ：

メッセージが届くのに時間がかかる



▲ ランダムトポロジ：

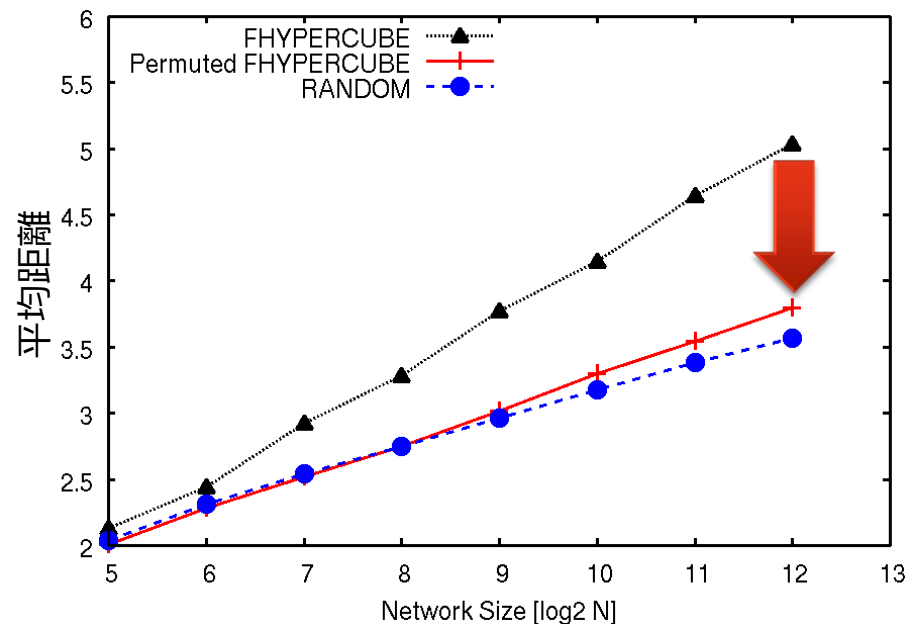
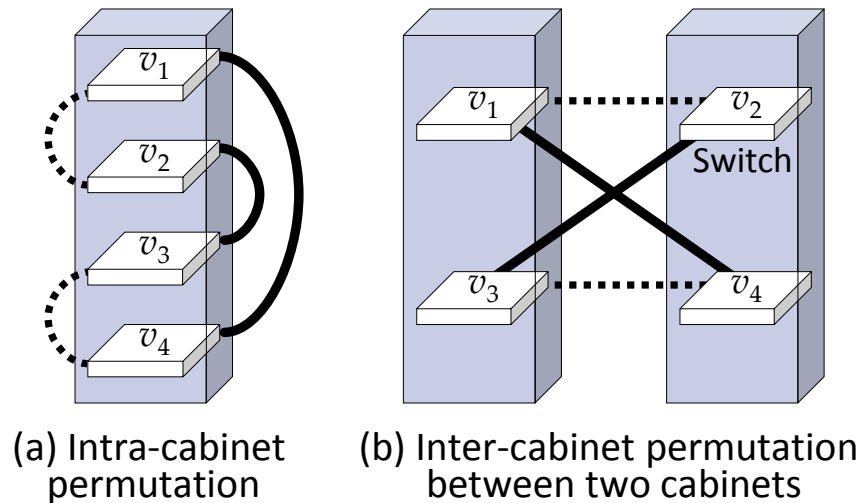
近道があるのでメッセージがすぐ届く

- スモールワールド効果

- ミルグラムの実験 (1967)：「米国中の任意の2人が、平均6人の知り合いを介してつながっている」
- エルデシュ数：数学者ポール・エルデシュとの共著関係（私は3）
- ベーコン数：俳優ケヴィン・ベーコンとの共演関係（最大6）
- ワッツ・ストロガッツの数学モデル

でも配線が大変なんじゃ...

- 隣同士のケーブルを差し替えるだけでもOK!



前半のまとめ

- 2020年に百京スパコン実現へ
- さらなる並列性向上が求められる
- 並列化が進めば進むほど**低遅延なネットワークが必要**
- 信号がケーブルを伝わる時間は光速で一定
⇒ **乗り換え回数を削減**
- 直径・平均距離の小さいトポロジが有利
- **ランダムトポロジ**は直径・平均距離が小さい

本日のお題

**スーパーコンピュータの
ネットワーク設計**

**最新の研究を
疑いの目で見よう**

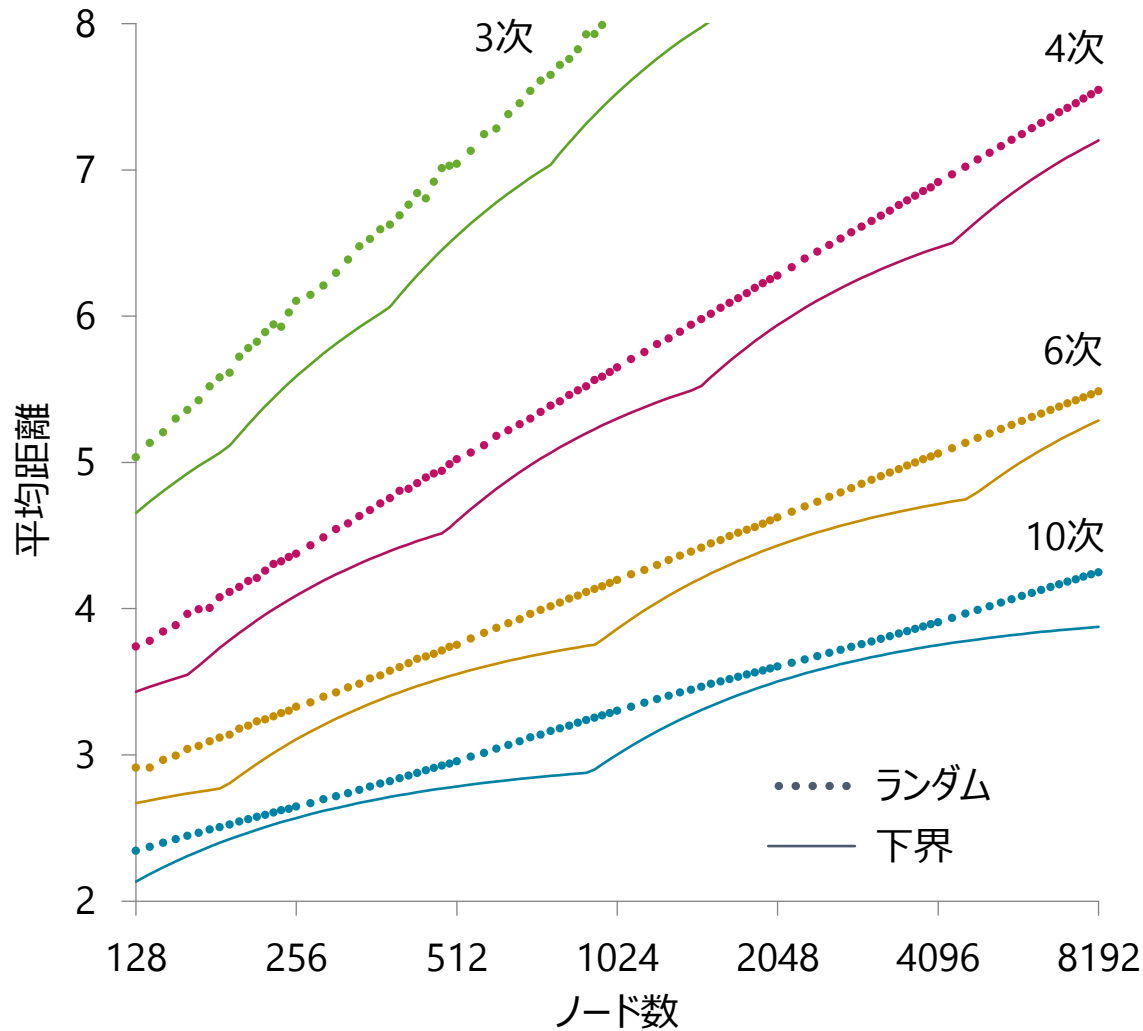
「ランダムトポロジが最善なんですよ」

美しいトポロジを一生懸命
考えた我々の努力がああ!!

「最善」のものは
ひとつに定まるはずだ

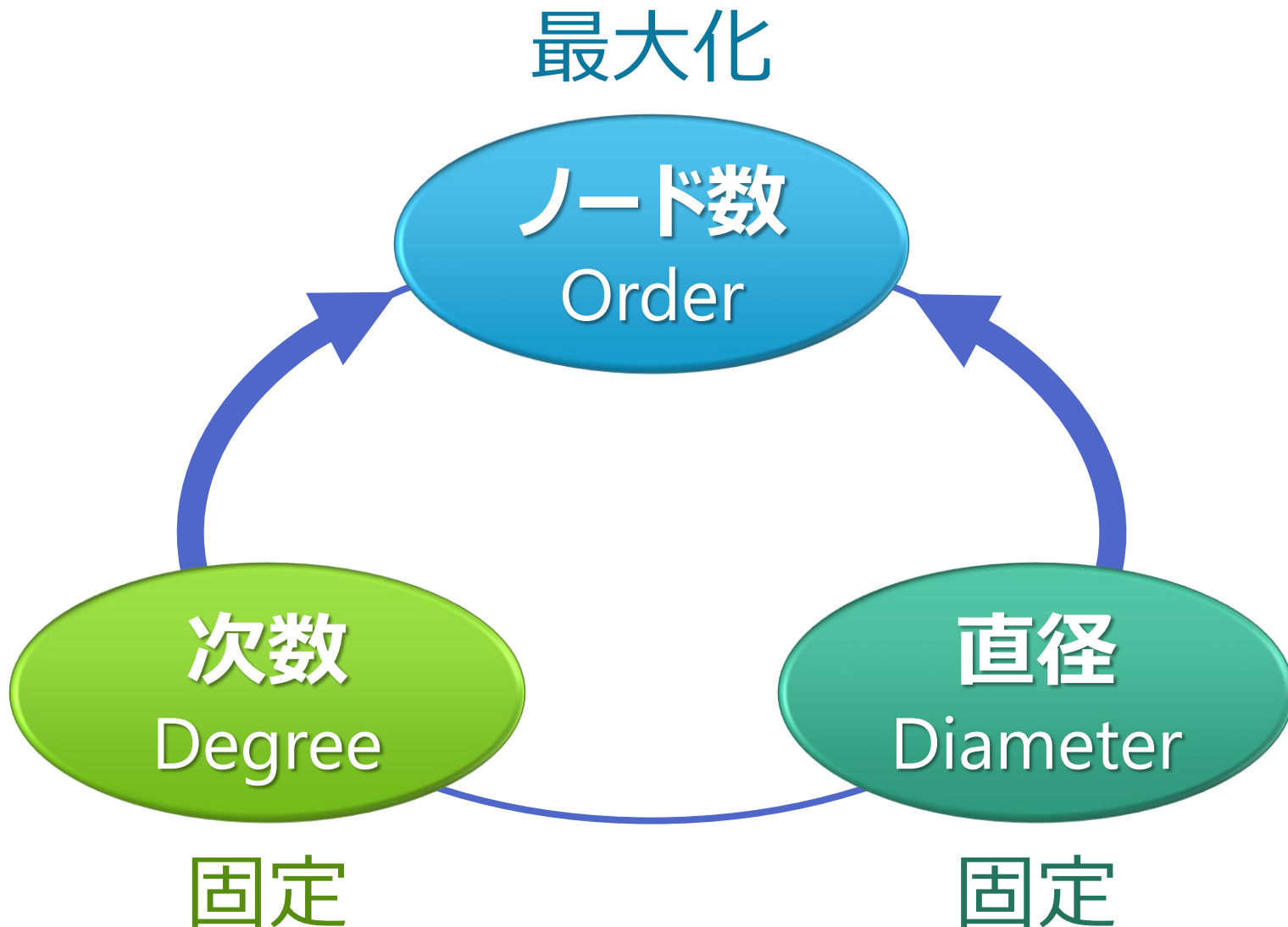
ランダムに作ったものには
「ゆらぎ」があるのでは？

ランダムトポロジは本当に最善なのか？



ランダムより良いトポロジが存在するかもしれない

トポロジの性質を決める3つの数



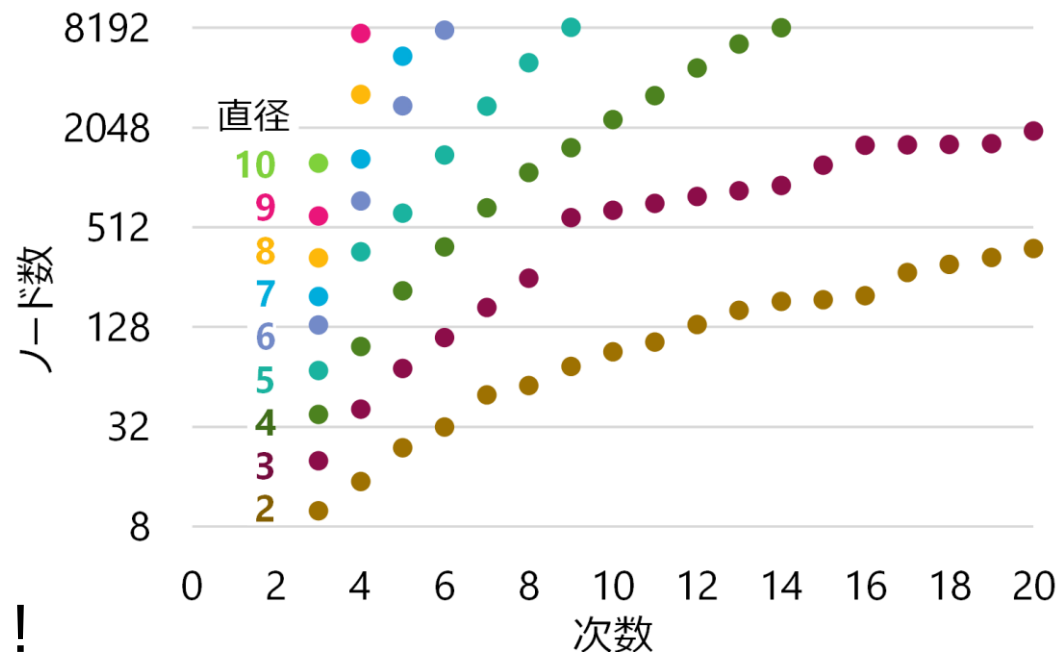
Degree/Diameter 問題 (DDP)

- 与えられた直径 k , 次数 d をもつグラフの中で、**ノード数 n が最大**のグラフを求める問題

- 既知の解が蓄積された Wiki がある

- 得られるノード数は飛び飛び

- 7917ノードの計算機？
 - 計算機のノード数は外部要因によって決まる！



DDPの解はスパコンのネットワークに使えない

※そのまま使ってしまえ！という研究もある [Besta: "Slim Fly", SC14]

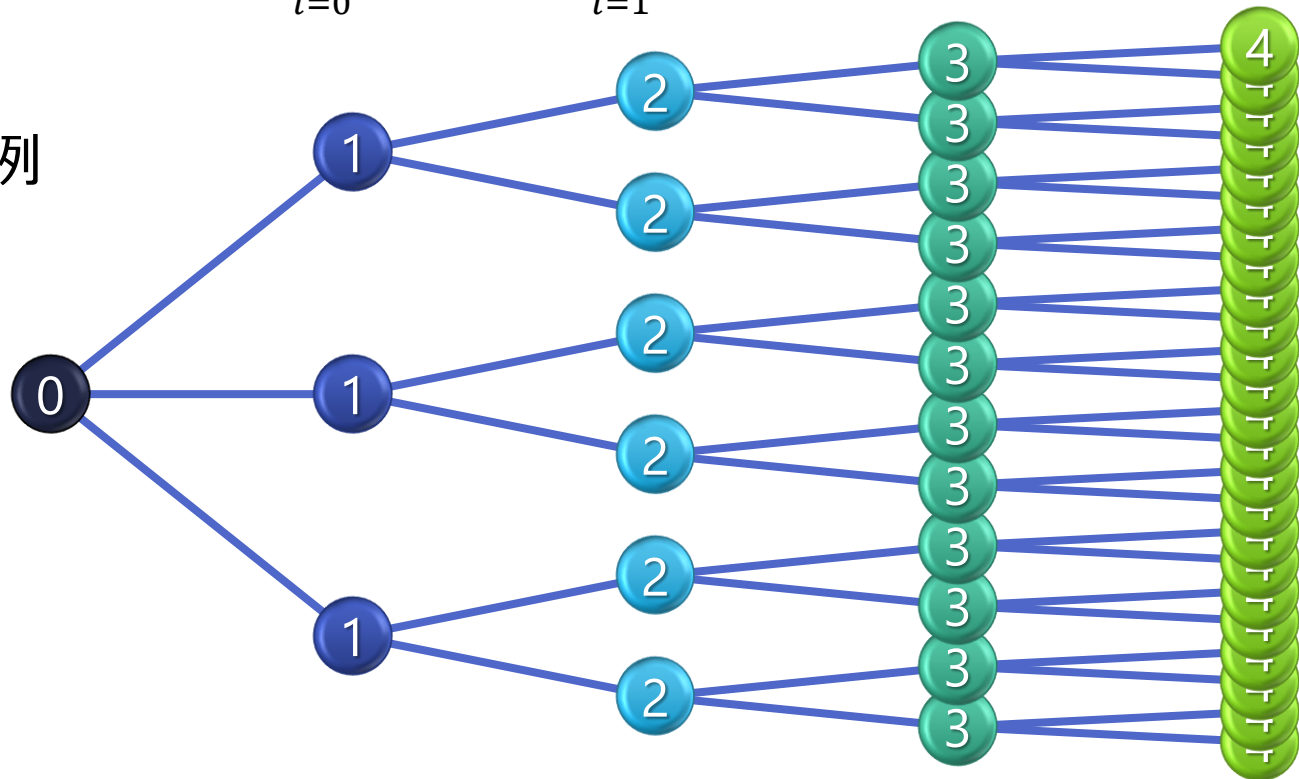
ムーア限界 (Moore Bound)

- 与えられた直径 k , 次数 d に対するノード数 n の上界 $N_{d,k}$

$$N_{d,k} = \sum_{i=0}^k n_i = 1 + d \sum_{i=1}^k (d-1)^{i-1}$$

- 次数 $d = 3$ の例

直径 $k =$



ノード数 $n_k =$	1	3	6	12	24
上界 $N_{d,k} =$	1	4	10	22	46

ムーア限界に基づく下界

- ノード数 n , 次数 d に対する**直径 k の下界** $K_{n,d}$

$$K_{n,d} = \begin{cases} \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil & \text{if } d = 2 \\ \left\lceil \log_{d-1} \left(\frac{(n-1)(d-2)}{d} + 1 \right) \right\rceil & \text{if } d > 2 \end{cases}$$

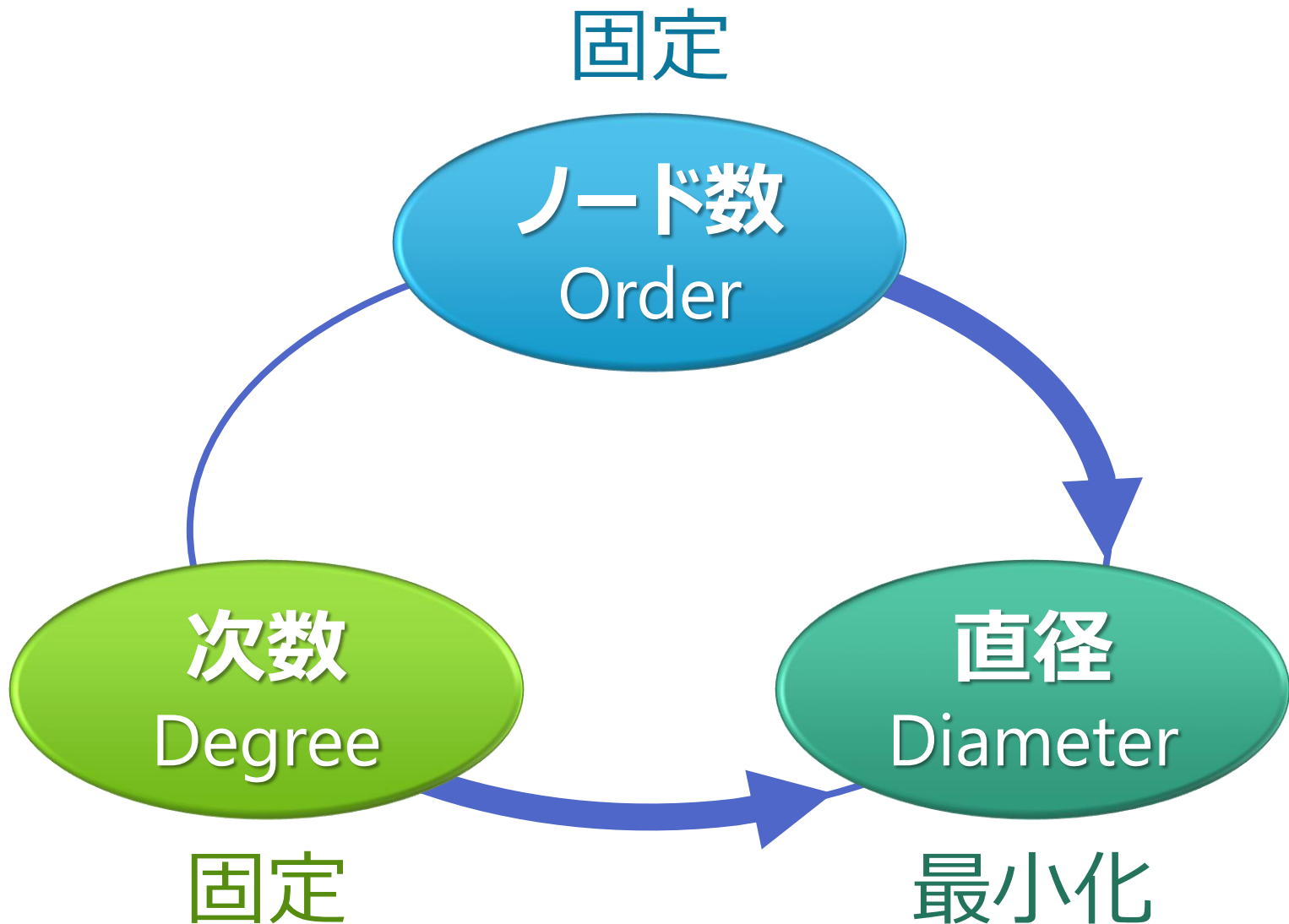
- ノード数 n , 次数 d に対する**平均距離 l の下界** $L_{n,d}$

$$L_{n,d} = \begin{cases} 1 & \text{if } K_{n,d} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^{K_{n,d}-1} id(d-1)^{i-1} + K_{n,d} \left(n-1 - \sum_{i=1}^{K_{n,d}-1} d(d-1)^{i-1} \right)}{n-1} & \text{if } K_{n,d} \geq 2 \end{cases}$$

- 平均距離の**ギャップ** p

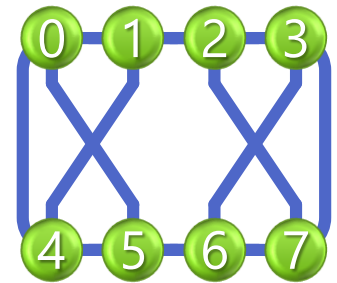
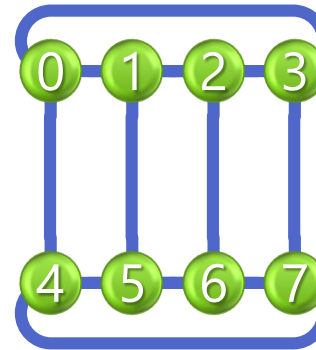
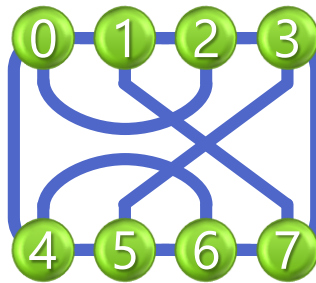
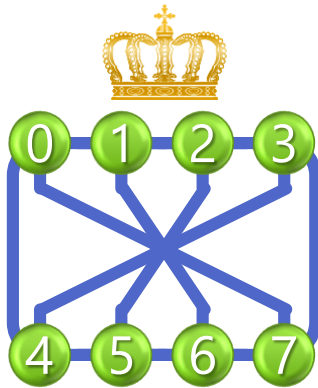
$$p = \frac{l - L_{n,d}}{L_{n,d}}$$

トポロジの性質を決める3つの数



Order/Degree 問題 (ODP)

- 与えられたノード数 n , 次数 d をもつグラフの中で、**直径 k が最小**のグラフを求める問題
 - 直径が同じグラフの中では**平均距離 l が最小**のグラフを求める



直径	2	3	3	3
平均距離	1.571	1.643	1.714	1.786

- スパコンのネットワーク設計順序に沿ったやり方だが...

ODPは今まで誰もまじめに取り組んでいない

すごく、難しいです。。。

- あるノード数 n , 次数 d をもつ
グラフの数は爆発的に増える
 - Graphillion を用いてすら、
すぐに数え上げ困難な数になる
 - メモリが 200GB あっても足りない...

数え上げおねえさん
<https://youtu.be/Q4gTV4r0zRs>

グラフの数（同型グラフを含む）

©日本科学未来館／JST ERATO湊離散構造処理系プロジェクト

	4次	6次
8ノード	1万9355個	105個
9ノード	102万4380個	3万0016個
10ノード	6646万2606個	1118万0820個
11ノード	51億8845万3830個	51億8845万3830個
12ノード	4804億1392万1130個	2兆9776億3513万7862個

目標とアプローチ

究極の目標

あらゆる頂点数・次数の組合せ
に対し、最小の直径・平均距離
をもつグラフの**カタログ**を作る！

攻めのアプローチ

理論家による研究の進展を
座して待つのではなく、
オープンサイエンスの潮流に
乗って追究を加速しよう！

他力本願

小直径グラフ探索コンペ “Graph Golf”

45

- 与えられたノード数 n , 次数 d をもつグラフの中で、直径・平均距離が最小のグラフを見つけてください
- 今年の出題
(全21題)

$d \backslash n$	16	64	256	4096	10000
3					
4					
16					
23		※			
60		※	※		
64			※		

※初期値 (ランダム) が下界に一致したので表彰対象外

- 参加者がグラフを投稿稿
- 主催者が直径・平均距離を計算し、ランキングを毎週発表
- 上位参加者を国際会議 CANDAR'15 で表彰

表彰ルール



Widest Improvement Award

- 最多数の最善解を発見した人
- 最善解とは、各 n, d において直径 k が最小のグラフ
- 直径が同じ場合は平均距離 l で比較



Deepest Improvement Award

- すべての n, d にわたって最小の平均距離ギャップを達成した人
- 事実上、平均距離ギャップ $p = 0$ を達成した人全員

Graph Golf: The Order/de... x

research.nii.ac.jp/graphgolf/

Home Problem Solutions Submit Event Q&A About

Graph Golf

The Order/degree Problem Competition

Find a graph that has smallest diameter & average shortest path length given an order and a degree.

News

- 2015-06-01: Submission period started
- 2015-05-29: [News release \(in Japanese\) \[PDF\]](#)
- 2015-05-22: Uploader launched
- 2015-04-23: Preliminary release

Best solutions

Update 2015-06-01

Degree d	Order n				
	16	64	256	4096	10000
3	5 / 2.45 11.36%	8 / 4.30 14.39%	11 / 6.13 9.61%	15 / 10.10 6.22%	16 / 11.37 5.56%
4	3 / 1.92 10.58% ²	5 / 3.15 10.40%	7 / 4.42 7.98%	10 / 6.92 6.90%	11 / 7.73 5.19%
16	N/A	3 / 1.75 0.45%	3 / 2.28 17.79% ²	5 / 3.32 11.07%	5 / 3.66 1.91%
23	N/A	2 / 1.63 0.00% ¹	3 / 2.01 5.33%	4 / 2.93 2.24%	4 / 3.26 10.57%
60	N/A	2 / 1.05 0.00% ¹	2 / 1.76 0.00% ¹	3 / 2.40 13.72%	3 / 2.69 2.13%
64	N/A	N/A	2 / 1.75 0.00% ¹	3 / 2.35 18.24% ²	3 / 2.66 2.78%

Legend: Diameter / Average shortest path length (ASPL)
Gap from [the lower bound of ASPL](#) (%)

Notes:
1. A random graph is optimal. Submissions with this size will not be awarded.
2. There are no graphs with this size that satisfy the lower bound of diameter and ASPL [\[Erdős 1980\]](#).

Show complete list

ニュースリリース



平成 27 年（2015 年）5 月 28 日

効率的なスパコン設計につながるグラフ発見を競うコンペ開催 ～専門家以外でも「理想のスパコン」実現に貢献可能～

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所（以下 NII、所長：喜連川 優、東京都千代田区）は 6 月 1 日より、スーパーコンピュータ（スパコン）などで使われている複雑なネットワーク構成を簡単なグラフにおきかえ、CPU チップ内および CPU チップ間のネットワークの効率的な設計につながる、より単純な構成のグラフの発見を競うコンペティション「グラフ ゴルフ」を開催します。応募は同コンペの専用ウェブサイト（<http://research.nii.ac.jp/graphgolf/>）で受け付け、締め切りは本年 10 月 15 日。優れたグラフの発見者は 12 月に札幌市で開催されるコンピュータシステムとネットワーク技術に関する国際シンポジウム「CANDAR2015」（<http://is-candar.org/>）で表彰します。

最近のコンピュータは大規模で複雑になってきており、スパコンでは数百万のプロセッサコアが相互に接続されています。膨大な数のコアをいかに効率的に相互接続するかというネットワーク構成（ネットワークトポロジ）の設計は、スパコンの処理能力に大きく影響します。今回のコンペでは、このネットワークトポロジについて、コアを「頂点」、コアとコアをつなぐ配線を「辺」とみなしたグラフとしてモデル化。一つの頂点から最も離れた頂点までの「ホップ数」（経由した頂点＋終点の頂点の合計数）、および、各頂点間のホップ数の平均値が最も小さいグラフの発見を競います。

グラフの条件設定は複数あり、プログラミング不要で手描きで挑戦できるものもあります。このため、本来は専門家の領域であるネットワークトポロジの研究分野ではありますが、中高生などの若年層から気軽に参加でき、一般の方が理想的なスパコンの実現に直接貢献可能です。専門家以外にも本コンペを身近に感じていただき、より多くの方の参加につなげようと、本コンペを「グラフ ゴルフ」と名付けました。これは、番号がコアを一つひとつ経由して流れていく様を、ショットを一打ずつ積み重ねて最少打数を競うゴルフになぞらえた命名です。専用サイトでは、応募案の中で最も優れたグラフや自分が応募したグラフの順位を随時確認でき、ゲーム感覚でコンペを楽しむことができます。

本コンペは来年度以降も問題の条件設定を変えて継続し、グラフ（ネットワークトポロジ）のカタログを更新していくことで、学术界や産業界に貢献する予定です。

National Institute of Informatics

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構
国立情報学研究所
総務部企画課 広報チーム
〒101-8430 千代田区一ツ橋 2-1-2
直通：03-4212-2164 FAX：03-4212-2150
E-Mail: media@nii.ac.jp

Web: <http://www.nii.ac.jp>
Twitter: @jouhouken
facebook: <https://www.facebook.com/jouhouken>

日刊工業新聞
2015年6月9日
朝刊19面

後半のまとめ

- ランダムより直径・平均距離の小さいトポロジがあるかも？
- 直径・平均距離が**最小のトポロジを知りたい**
- Order/Degree 問題を解く
⇒ 今まで誰も挑戦していない
- **一般参加のコンペを実施中！**

本日のお題

**スーパーコンピュータの
ネットワーク設計**

**最新の研究を
疑いの目で見よう**

前半のまとめ（再）

- 2020年に百京スパコン実現へ
- さらなる並列性向上が求められる
- 並列化が進めば進むほど**低遅延なネットワークが必要**
- 信号がケーブルを伝わる時間は光速で一定
⇒ **乗り換え回数を削減**
- 直径・平均距離の小さいトポロジが有利
- **ランダムトポロジ**は直径・平均距離が小さい

乗り換え回数の削減が重要？

- ノードでの乗り換え時間はどんどん短くなっていく
- 近い将来、ケーブル遅延が無視できなくなる
- 乗り換え回数を減らすだけではダメな時代が来る



近い将来の製品



©QLogic

QLogic 12300



©Cisco

Cisco SFS7000D

乗り換え時間

60 ns

140 ns

200 ns

相当ケーブル長

12 m

28 m

40 m



©Mellanox



©eBay



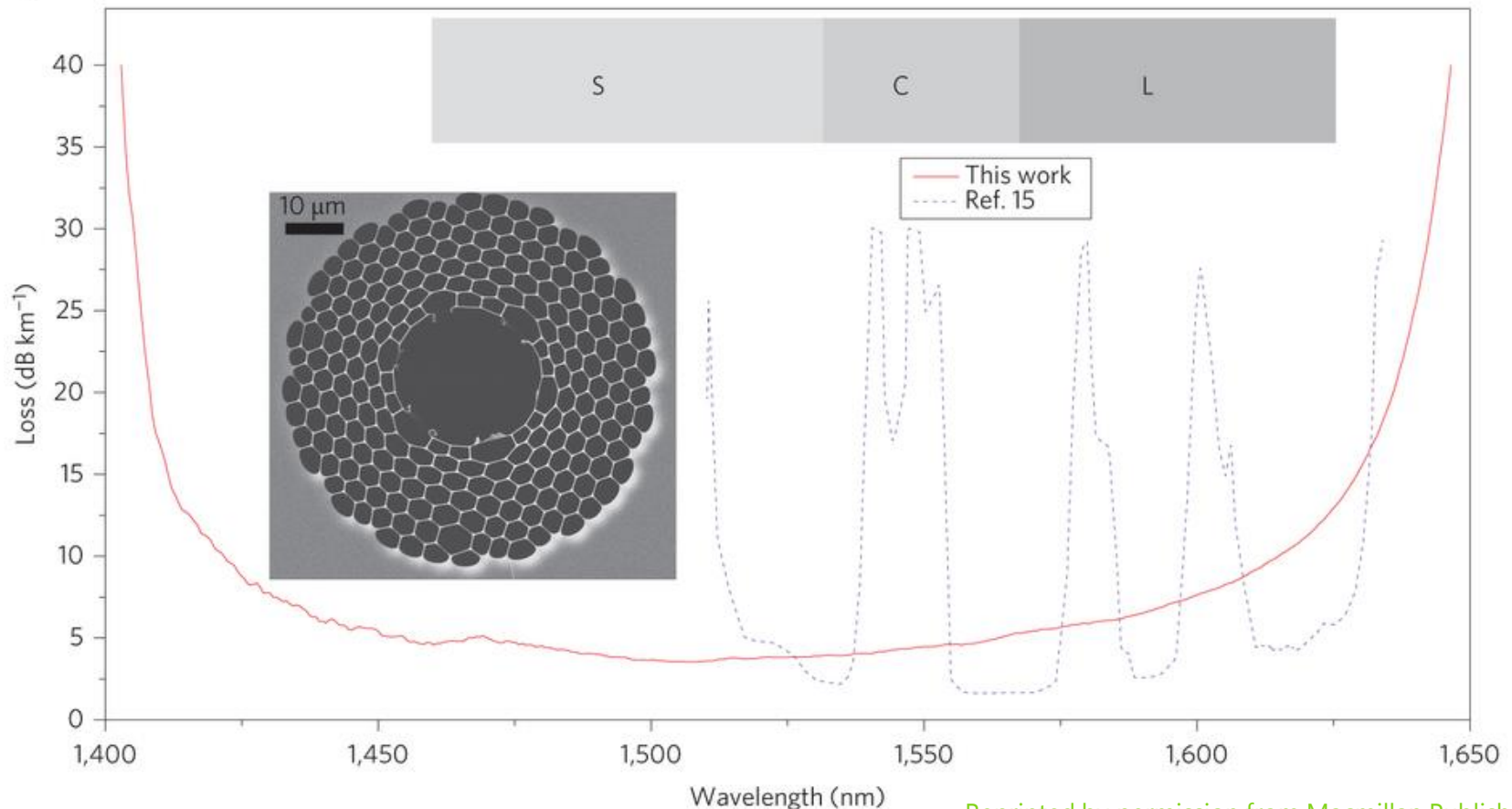
©UNIXSurplus

前半のまとめ（再）

- 2020年に百京スパコン実現へ
- さらなる並列性向上が求められる
- 並列化が進めば進むほど**低遅延なネットワークが必要**
- 信号がケーブルを伝わる時間は光速で一定
⇒ **乗り換え回数を削減**
- 直径・平均距離の小さいトポロジが有利
- **ランダムトポロジ**は直径・平均距離が小さい

光ファイバー中の光速は一定？

- ちくわファイバー登場
- 真空中の $2/3$ (0.2m/ns) だったのが 99.7% (0.3m/ns) まで加速する



前半のまとめ（再）

- 2020年に百京スパコン実現へ
- さらなる並列性向上が求められる
- 並列化が進めば進むほど**低遅延なネットワークが必要**
- 信号がケーブルを伝わる時間は光速で一定
⇒ **乗り換え回数を削減**
- 直径・平均距離の小さいトポロジが有利
- **ランダムトポロジ**は直径・平均距離が小さい

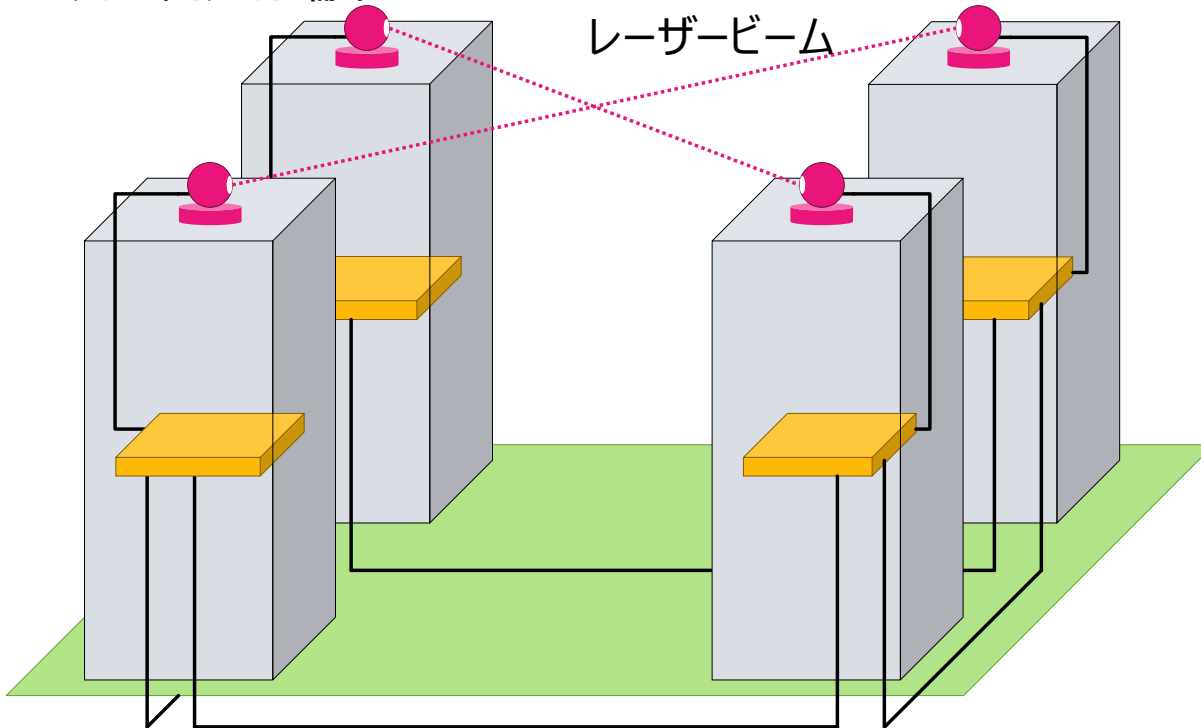
信号はケーブルを伝わる？

- レーザービームを飛ばしてもいいのよ

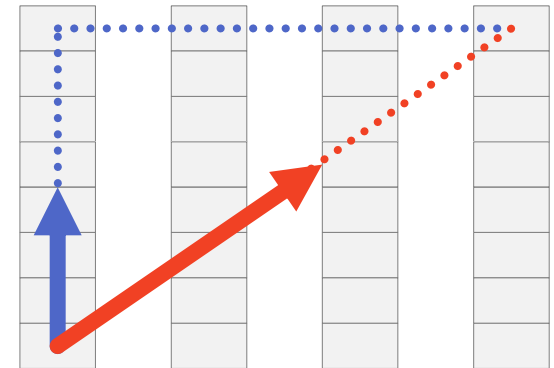


光空間無線端末

レーザービーム



有線: **0.2 m/ns**
直角に進む



無線: **0.3 m/ns**
斜めに進む

前半のまとめ（再）

- 2020年に百京スパコン実現へ
- さらなる並列性向上が求められる
- 並列化が進めば進むほど**低遅延なネットワークが必要**
- 信号がケーブルを伝わる時間は光速で一定
⇒ **乗り換え回数を削減**
- 直径・平均距離の小さいトポロジが有利
- **ランダムトポロジは直径・平均距離が小さい**

ランダムトポロジは本当に最善なのか？

サクサク動くスパコンを作るために
みなさまの**挑戦**をお待ちしています

Graph Golf

検 索