

2019年3月10日@数学パワーが世界を変える2019

# 「イジング型計算機、日立製作所 と北海道大学の取り組み」

寺本 央

北海道大学電子科学研究所 准教授

JSTさきがけ

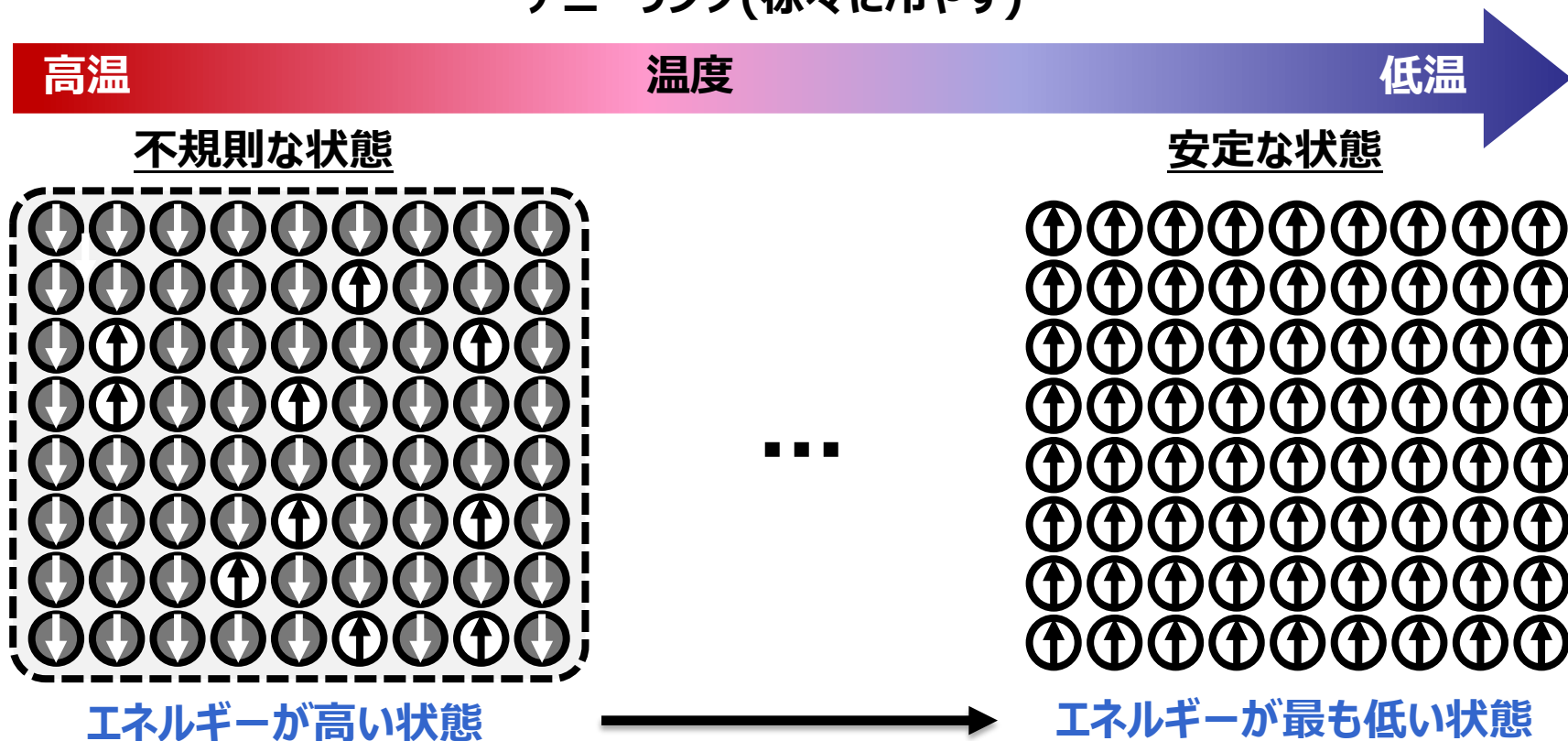
本研究は北海道大学および日立製作所との共同研究の成果の一部である。

イジング計算機とは

# イジング計算機の動作原理

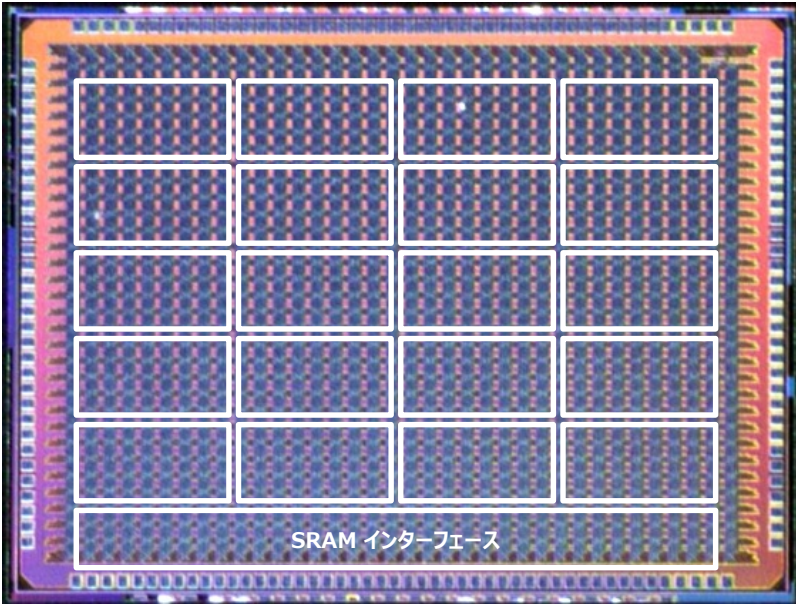
下向き  $\downarrow$  上向き  $\uparrow$  の2状態をとるスピンの間に解きたい組み合わせ最適化問題から決まる相互作用、磁場を加え、そのエネルギーが最小となるスピンの配置をアニーリングにより計算する。

アニーリング(徐々に冷やす)



スピンの状態（上向き/下向き）から、最もよい組み合わせが求まる

# イジング計算機のハードウェア



【第1世代 : ASIC】

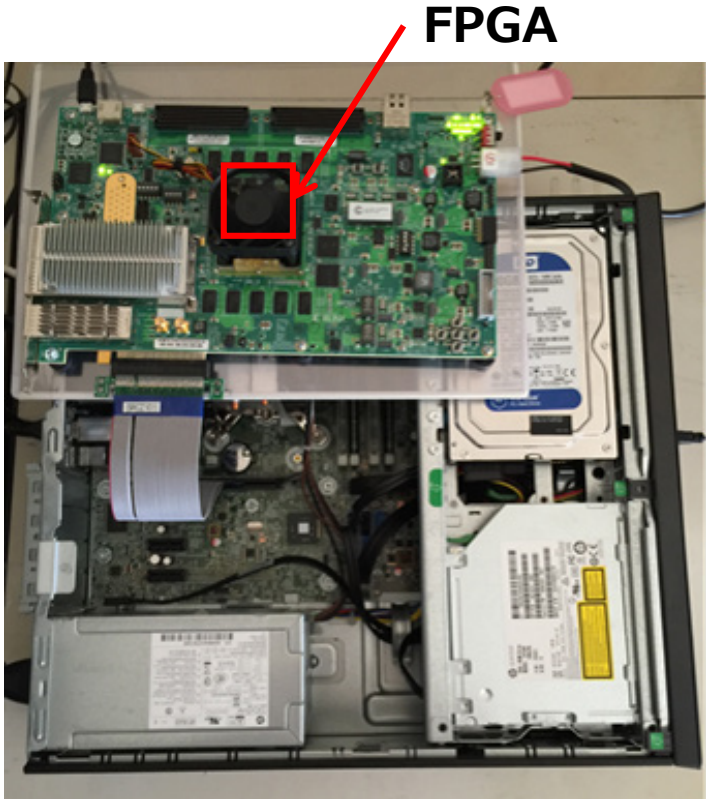
- 65nm CMOS
- 20kスピン
- 12mm角



【第2世代 :  
FPGAプロト環境】

- スピンのトポロジ  
を変更可能

...



制御用  
PC

# イジング計算機で解きたい問題例

分野	物流	金融	交通システム
課題	 <p>物流コスト最小化</p>	 <p>ポートフォリオ最適化</p>	 <p>交通渋滞の解消</p>
最適化対象	総移動コスト	リターン、リスク	交通量、移動コスト
入力パラメータ	拠点間の移動コスト	ポートフォリオの特性	交通状況 各車の目的地
制御パラメータ	移動経路	ポートフォリオ組合せ	信号、各車
最適化問題	巡回セールスマン	ナップザック	最大フロー・最短経路

**お題：イジング計算機でビジネスできるか？**

まずはお題を解決するヒントをうるためにAIMaPワークショップを開催し、有望な応用先であると期待される各分野の有識者に意見を伺う事にした。

## 「非ノイマン型計算、理論と応用」

 AIMaPワークショップ【出会いの場を提供する】

## AIMaPワークショップ「非ノイマン型計算、理論と応用」 (北海道大学)

2018年3月30日 @ 09:45 - 17:00

■場所： 北海道大学電子科学研究所 1階会議室

■プログラム：

9:45 - 10:00 趣旨説明

**北海道大学 寺本 央**

10:00 - 11:00 非ノイマン型CMOSアニーリングマシン

**日立製作所 山岡雅直先生**

11:15 - 12:15 離散最適化とその社会応用

**九州大学 神山直之先生**

13:30 - 14:30 ファイナンスと数値計算

**東京大学 楠岡成雄先生**

14:45 - 15:45 ブースティング:最適化の視点に基づくサーベイ

**九州大学 畑埜晃平先生**

16:00 - 17:00 量子化ニューラルネットワークのためのハードウェアとアルゴリズムの協調設計

**北海道大学 高前田伸也先生**

-意見交換会-

# AIMaPワークショップ「非ノイマン型計算、理論と応用」 (北海道大学)

2019年3月26日 @ 09:45 - 18:45

■場所： 北海道大学電子科学研究所 1階会議室

■プログラム：

9:45 - 10:00 開催趣旨説明

**北海道大学 寺本 央**

10:00 - 11:00 社会システム最適化のためのCMOSアニーリングマシンの開発

**日立製作所 竹本享史主任研究員**

**Norman Mertig研究員**

11:15 - 12:15 線形回帰におけるモンテカルロ法を用いた変数選択

**東京工業大学 樺島祥介先生**

- 昼休み -

14:00 - 15:00 圧縮データ上のブースティング

**九州大学 畑埜晃平先生**

15:15 - 16:15 深層ニューラルネットワークの適応能力と汎化誤差解析

**東京大学 鈴木大慈先生**

16:30 - 17:30 Finding optimal solutions by stochastic cellular automata

**北海道大学 坂井 哲先生**

17:45 - 18:45 二つの確率過程の重ね合わせに対する混合時間

**大阪大学 角田謙吉先生**

- 意見交換会 -

**参加者募集中!**



# 北海道大学と 日立製作所の活動紹介

# 北大・日立連携体制

- 教員・学生含め25名を超える北大関係者と連携した研究体制を構築
- 多分野連携の強みを生かした研究活動を推進



日立北大ラボとの密接連携で問題解決型学習を実践

ができるかという問題に係る基礎理論を確立することです。このような研究では、数学の得意な若手の柔軟な発想が欠かせません。

一方、数学科の学生は、今、自分が勉強している数学が会社に就職した後でどの様に役立つのが見えないことに不安を抱くことが少なくありません。とにかく論理的思考力を鍛え、コミュニケーション能力を身につけておきさえすれば、実際に就職したときに企業から与えられる具体的な問題を解くことに十分対応出来る、と助言を受けても、なかなか実感が湧かないからです。そんな中、

日立北大ラボでは、次世代型のイジングコンピュータの開発に関する問題を具体的に提供しており、意欲的な学生にとって自分の力量を試す良いチャンスとなっています。

この様に数学科の学生のニーズと日立北大ラボのニーズがピッタリとマッチしているので、今後、ますます多くの学生が、日立北大ラボで問題解決型学習の醍醐味を体験していくことになるでしょう。(文責:久保英夫 教授)

イジング模型の高温相と低温相でのスピン状態と、温度Tの変化に応じた自発磁化(青線)の振る舞い

# CREST [コンピューティング基盤]平成30年度採択課題

## 学習/数理モデルに基づく時空間展開型アーキテクチャの創出と応用

### 研究代表者

本村 真人                      北海道大学

### 主たる共同研究者

有村 博紀                      北海道大学

湊 真一                         京都大学

坂井 哲                         北海道大学

### 研究概要

組合せ最適化問題を並列に解く「アニーリング計算」と、深層学習を補完する「エッジ分散・オンライン型アンサンブル学習」とをSociety5.0時代の重要情報処理課題として捉え、その背後に存在する「エネルギー最小化」計算原理に基づいて、対象問題構造を空間的に展開した上で時間的に切り替えて処理する「時空間展開型」の智能コンピュータアーキテクチャとそのソフトウェア基盤、及びその応用技術を確立し、実証します。

北海道大学理学部数学教室の学生さんにも協力いただいております、論文2報執筆中。


# プログラミングコンテスト

- 北海道大学と日立製作所で構想段階より共同でプログラミングコンテストを開催した。開催期間が比較的長いマラソン型プログラミングコンテストとしては国内初。
  - 開催期間 2017年11月29日 - 2017年12月12日
  - 登録者数 446 参加者数 126
  - 既存のアルゴリズムを超えるアルゴリズムも提案された。

## Final Standings (Top 3)

Green colored number : Score in this contest

Red colored number : The number of submissions

Rank▼	User name	◆ Problem 2 ◆
1	<u>yosss</u>  (Co-author of our paper)	20090835 (14) 19916:18
2	yowa 	19375872 (16) 19857:05
3	Aquarius 	19341187 (40) 20088:02

# プログラミングコンテストの 研究開発への応用

## 参加者側の視点

- ゲーム的な楽しさ
  - 即採点、即順位更新、リアルタイム
- 情報科学的な楽しさ
  - アルゴリズムを考えるのが楽しい
  - プログラミングが楽しい

秋葉拓哉

勉強か？趣味か？人生か？

ープログラミングコンテストとは

[https://www.slideshare.net/iwiwi/w](https://www.slideshare.net/iwiwi/wakate-web-14323842)

akate-web-14323842

## 開催側の視点

- 実用的なプログラムを開発したい
  - 実用性を加味しつついかに単純でアルゴリズム的にも深い問題にできるか。
- 採点基準は明確である必要があるが、プログラムの良し悪しを定量化するのは難しい
  - 言語化が難しいプログラムへのニーズを如何に定量化し、望む仕様を満たすプログラミング開発をしてもらえるか。

両者のニーズのトレードオフを解決する必要がある。

# プログラミング コンテスト問題例

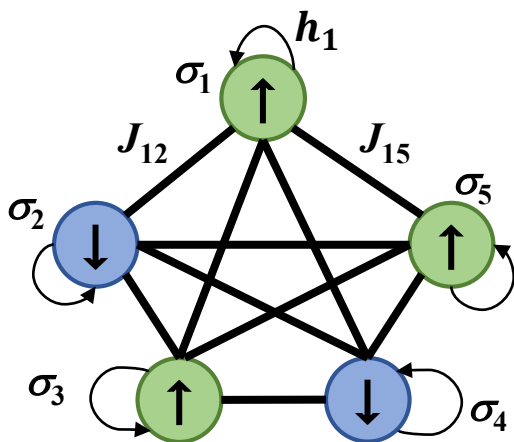
"Hokkaido University & Hitachi 2nd New-Concept Computing Contest 2017."  
<https://hokudai-hitachi2017-2.contest.atcoder.jp/>

謝辞：同問題はプログラミングコンテストの他にも「第1回JST数学領域未解決問題ワークショップ」でも出題検討いただきました。ワークショップを主催してくださった早水桃子先生（統計数理研究所）並びに相談いただいた坪井俊先生（東京大学）に感謝いたします。

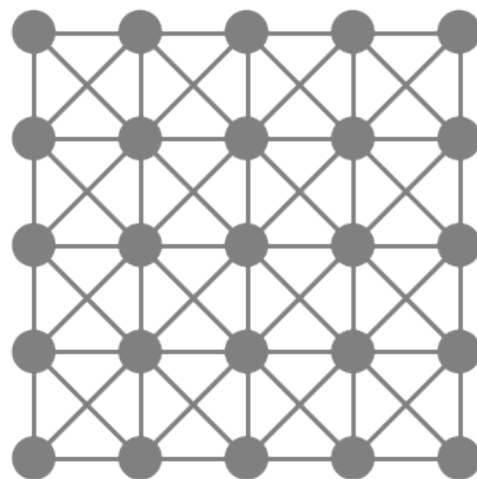
# 動機：

- 色々なグラフ上で定義されるイジングモデルをハードウェアでシミュレートしたいが、ハードウェアのグラフの型は固定されている。

解きたいイジングモデル



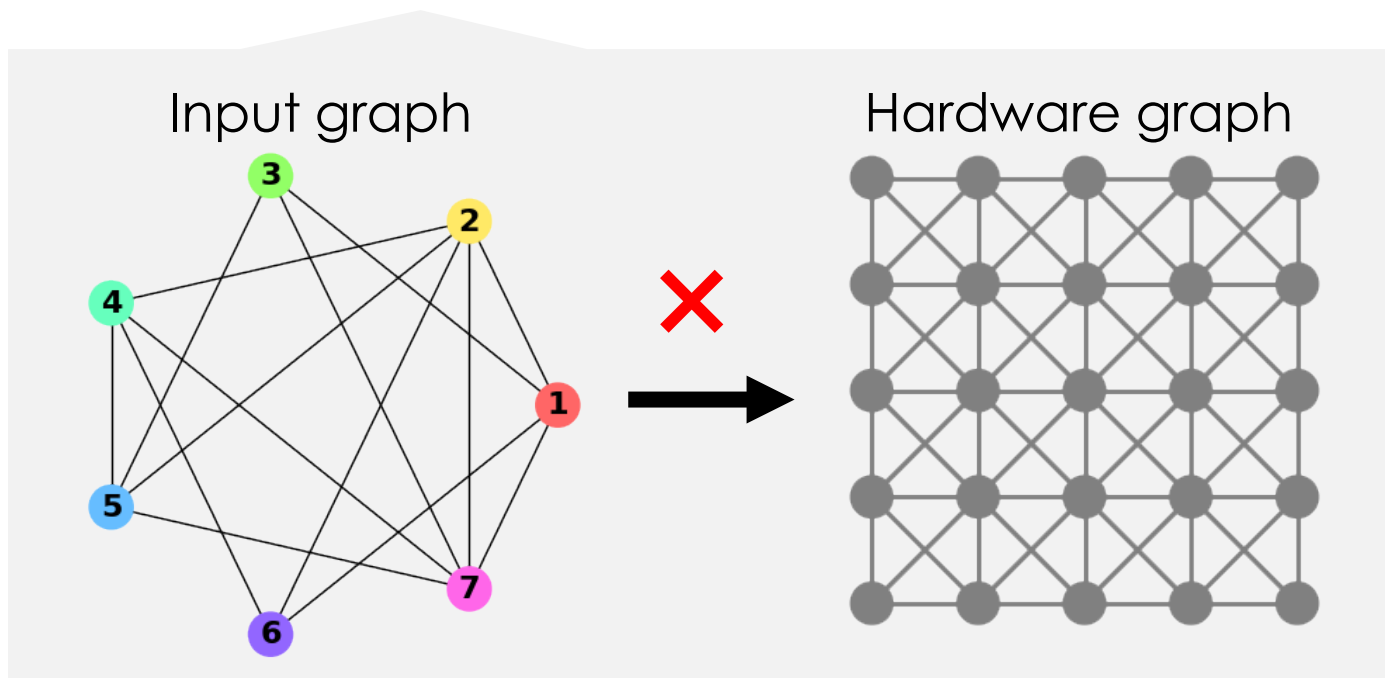
ハードウェアのグラフ  
(以下King's graphと呼ぶ)



どうやってハードウェア  
のグラフにのせるか？



直接埋め込もうとしても、一般にはグラフはハードウェアグラフの部分グラフではないので、部分グラフ同型では埋め込めないが、

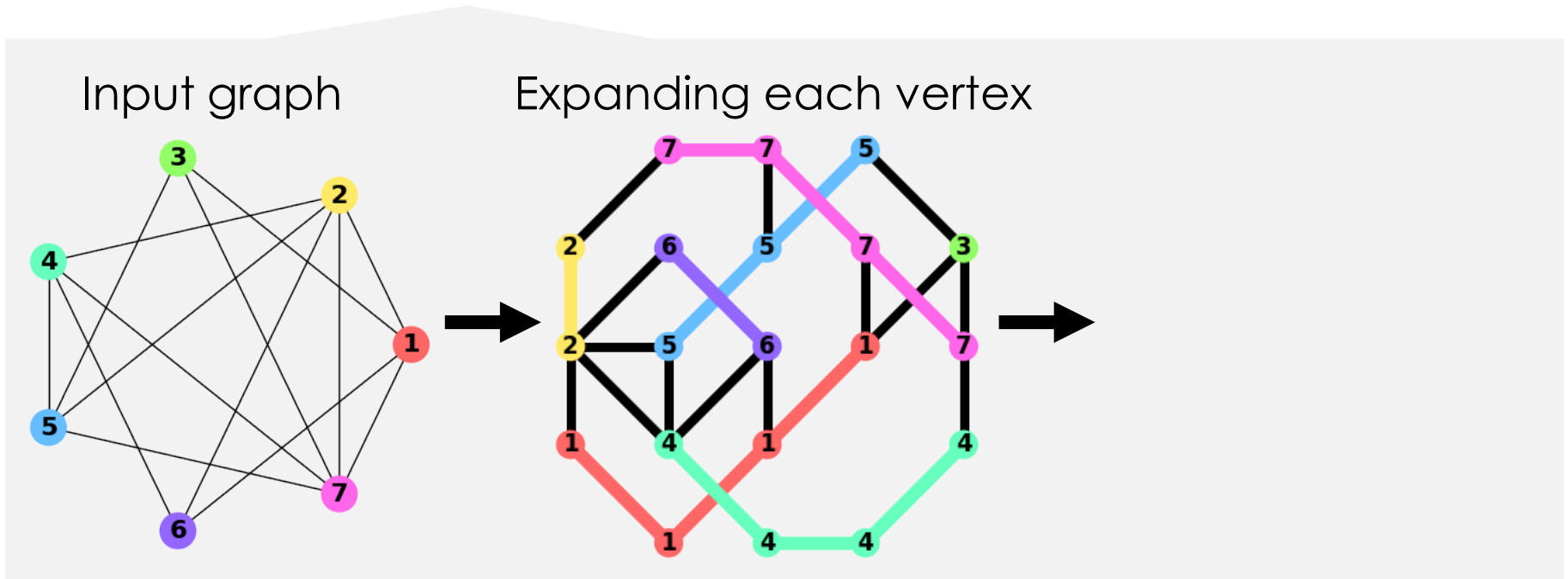


V. Choi, Quantum Information Processing, 7, pp193--209, 2008

V. Choi, Quantum Information Processing: Volume 10, Issue 3 (2011), Page 343



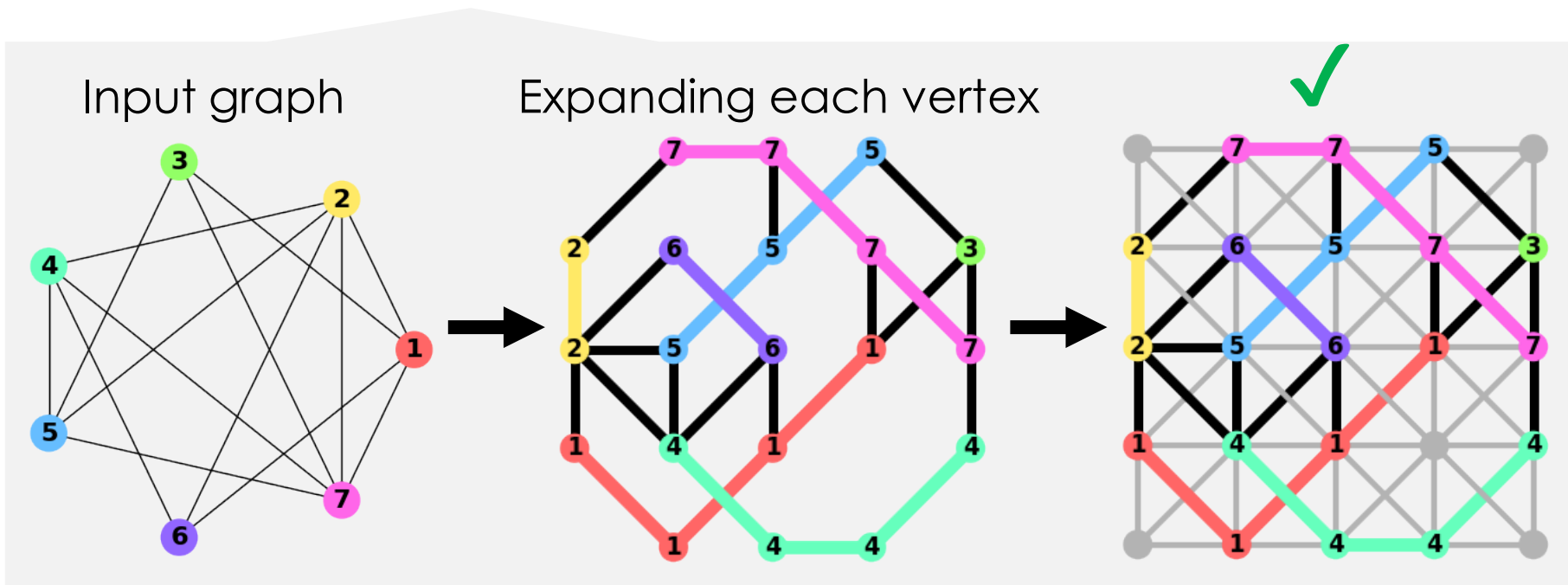
# 各々のスピンを複製してみると



V. Choi, Quantum Information Processing, 7, pp193--209, 2008

V. Choi, Quantum Information Processing: Volume 10, Issue 3 (2011), Page 343

埋め込める！



V. Choi, Quantum Information Processing, 7, pp193--209, 2008

V. Choi, Quantum Information Processing: Volume 10, Issue 3 (2011), Page 343

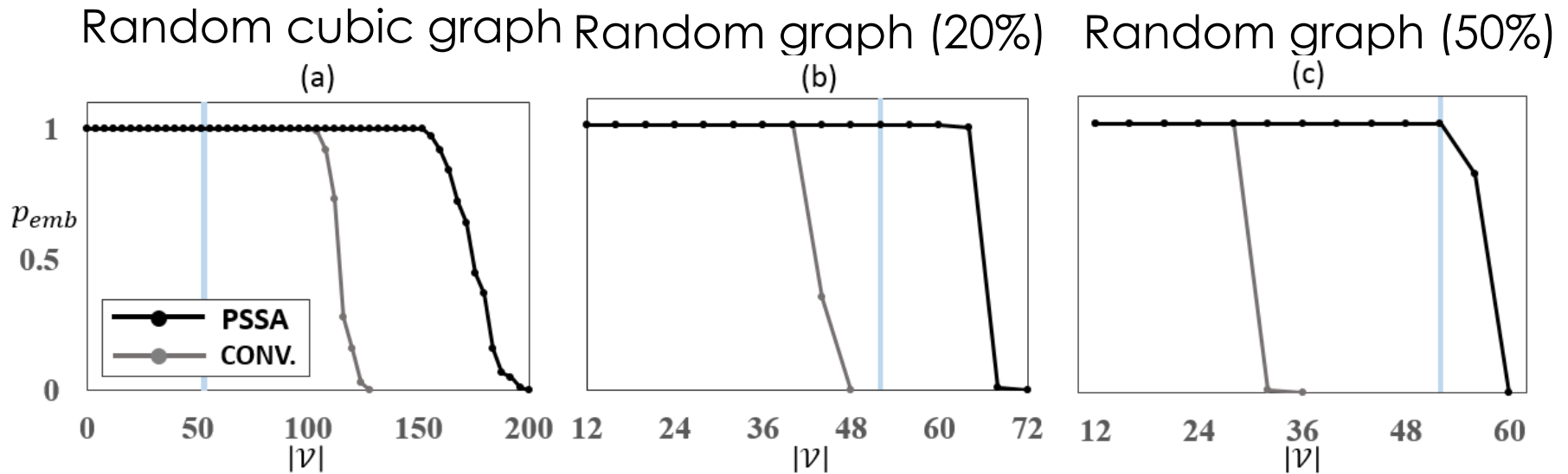
プログラミングコンテストにはこのような  
具体的な埋め込みを求める問題を出題した。

# プログラミングコンテスト 問題作成時に留意した点

- グラフマイナーの問題との関連
  - 情報科学的、アルゴリズム的楽しさ
- 完全な埋め込みを求める問題は難しすぎると判断し、埋め込みの条件を緩和し、条件を満たしたのものにはボーナスポイントを与えるという問題にした。
  - ゲームバランスの考慮
  - 参入障壁を下げる
  - 一方、実用上は完全な埋め込みが必要であり、この条件を緩和してしまうと我々の要求する仕様のアルゴリズムが得られないのではないかと危惧もしていた。
    - 結果として優勝者吉田雄紀氏のアルゴリズムをはじめとする素晴らしい成果を得ることができたが、実際プログラミングコンテストを開催し、結果をみるまでプロコンが成功するかどうか読めない部分はある。

# プログラミングコンテスト優勝者（吉田 雄紀氏）と開発したアルゴリズム(PSSA)

- King's graphへの埋め込みではPSSA (probabilistic-swap-shift-annealing)はD. Waveで標準的に使われているJ. Caiのアルゴリズムを上回る結果を出した。



Yuya Sugie, Yuki Yoshida, Normann Mertig, Takashi Takemoto, Hiroshi Teramoto, Atsuyoshi Nakamura, Ichigaku Takigawa, Shin-ichi Minato, Masanao Yamaoka, and Tamiki Komatsuzaki, Graph minors from simulated annealing for annealing machines with sparse connectivity. In: Theory and Practice of Natural Computing, Springer International Publishing, Cham, pp 111 – 123 (2018); soft computing, in preparation.

# 理論的にはどのぐらい大きなグラフを King's graph に埋め込めるのだろうか？

定理(T. Okuyama)

King $_{L,L}$

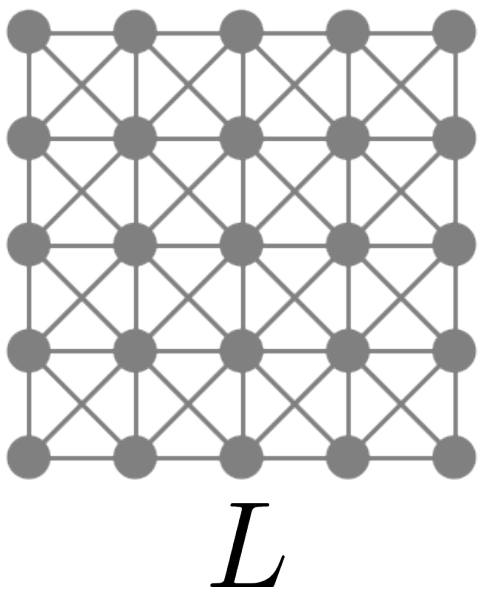
King $_{L,L}$  には、頂点数  $L + 1$  の完全グラフは埋め込める。

定理(H. T.)

King $_{L,L}$  には、頂点数  $2L + 1$  以上の完全グラフは埋め込めない。

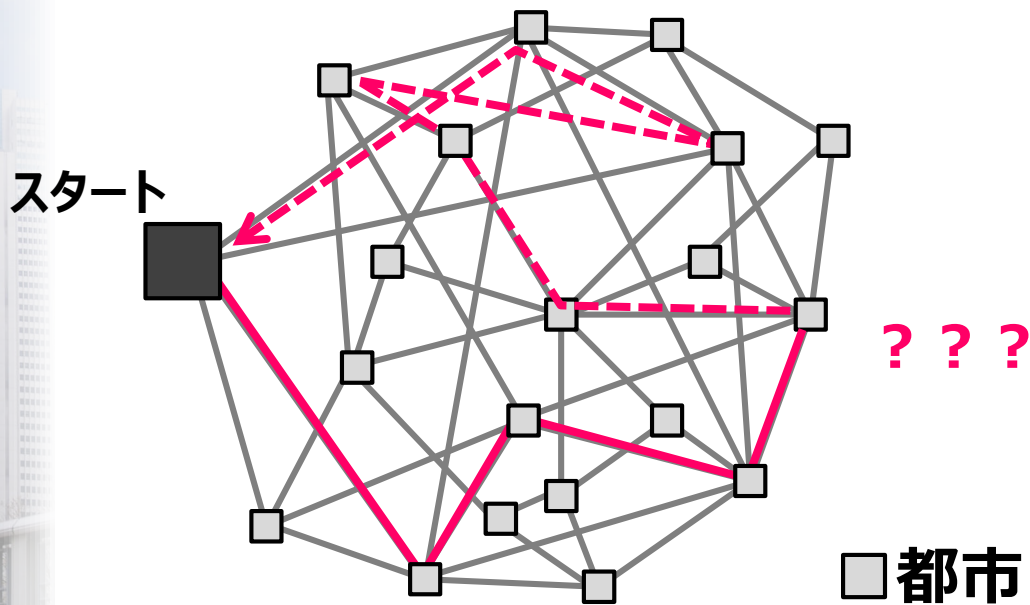
木幅を使って証明できる。具体的なグラフに対する評価は各論的な部分が多くまだ貢献の余地がありそうだ。

これらの評価を作ることで、与えられたハードウェアでどの程度大きな問題を解き得るのかがわかる。



# 他の組み合わせ最適化ではどのくらい大きな問題が解けるか？

## 組合せ最適化問題：（例）巡回セールスマン問題

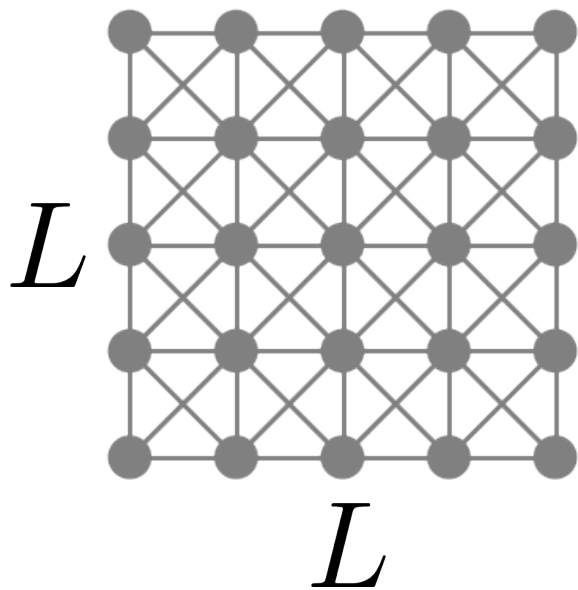


補足：巡回セールスマン問題に関してはすでに良いヒューリスティックが知られており、わざわざイジング計算機で解く必要はないが、組み合わせ最適化の例としてわかりやすいので出している。

# 巡回セールスマン問題の場合

King $_{L,L}$

定理(H. T.)



King $_{L,L}$ には、都市数  $\frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 16L}) \approx 2\sqrt{L}$  以上の巡回セールスマン問題\*)は埋め込めない。

\*) A. Lucas, Ising formulations of many NP problems  
Frontiers in Physics 2, 5 (2014) の巡回セールスマン  
問題のイジングモデルによる定式化を利用したと  
きに。

色々な組み合わせ最適化問題に対して、それを解くために最低限どの程度の大きさのハードウェアが必要かがわかる。

# まとめ

- AIMaPの事業は出会いの場を提供するという目的を大いに果たしている。
- プログラミングコンテストは有用な研究開発のための手段となりうる。
  - 主催側と参加者側のニーズのトレードオフを解決する必要がある。
- プログラミングコンテストの優勝者のアイデアをもとに開発したアルゴリズムは既存の標準的なアルゴリズムを上回る性能を示した。
- 具体的なクラスグラフに対し、どのぐらいの大きさのグラフが埋め込めるかは、各論的な部分が多い。
  - これがわかると与えられたハードウェアグラフでどの程度大きな問題を解き得るのかの試算が与えられる。