

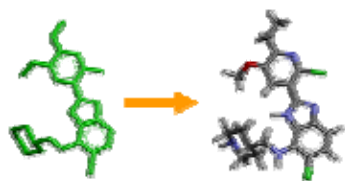
革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)
「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ
高度知識社会基盤の実現」
進捗状況報告について

プログラム・マネージャー
山本 喜久

研究開発プログラム構想

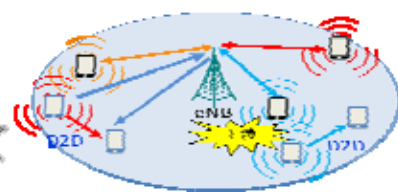
現代社会の様々な分野に現われる**組合せ最適化問題**を高速に解く**量子ニューラルネットワーク**のハードとソフトを開発する。

創薬



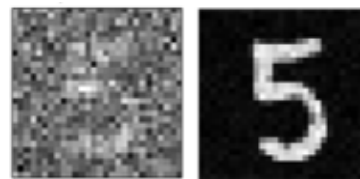
標的たんぱく質に安定に結合する化合物を少数個同定する**リード最適化**

無線通信



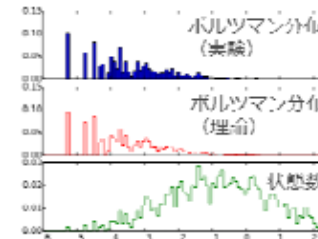
スループットを最大にする**周波数、通信方式**の実時間最適割り当て

圧縮センシング



不十分なデータから情報源のスパース性を利用して元画像を再現する**スパース推定**

機械学習

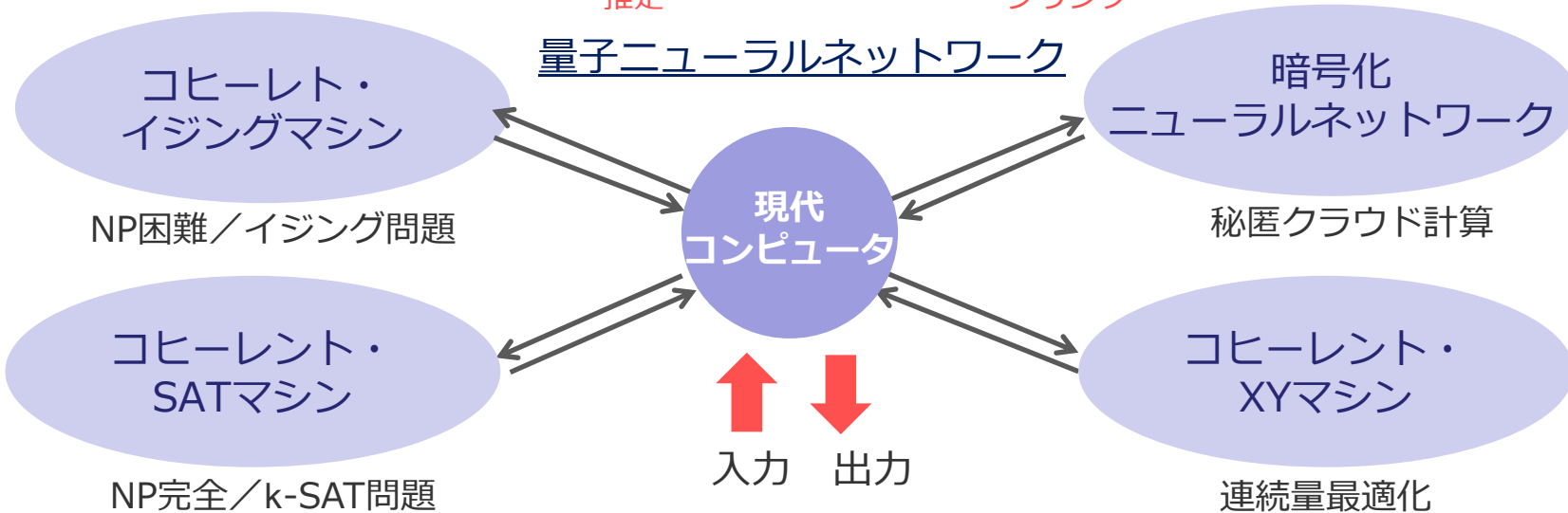


文字や画像情報の深層学習を高速に実行するための**ボルツマンサンプリング**

金融



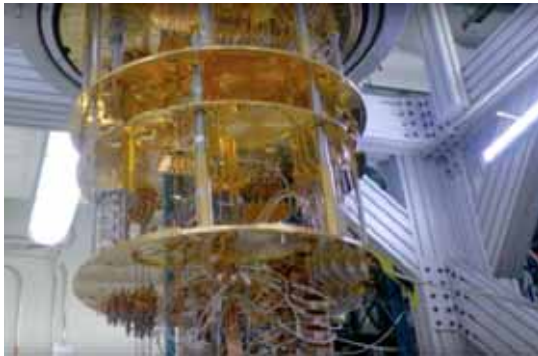
リスクと利益のトレードオフ問題を実時間で処理する**連続量最適化**



世界の有力企業・大学でコンピュータの将来技術の開発が加速

量子コンピュータ(ゲート型)

IBM, Google, Microsoft, Intel



脳型コンピュータ (ニューロチップ)

IBM, Stanford



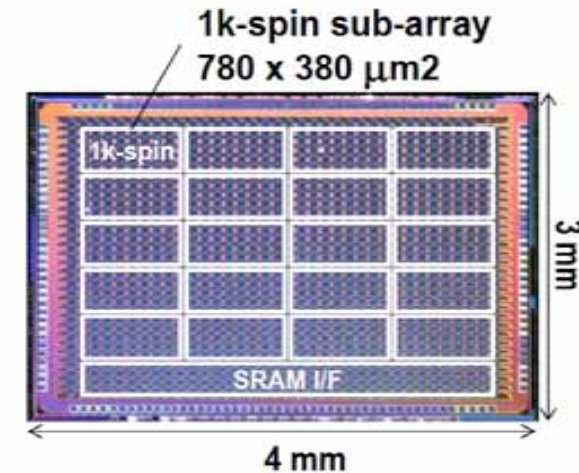
量子コンピュータ(アニール型)

D-Wave, MIT



イジングマシン (FPGAチップ)

日立, 富士通



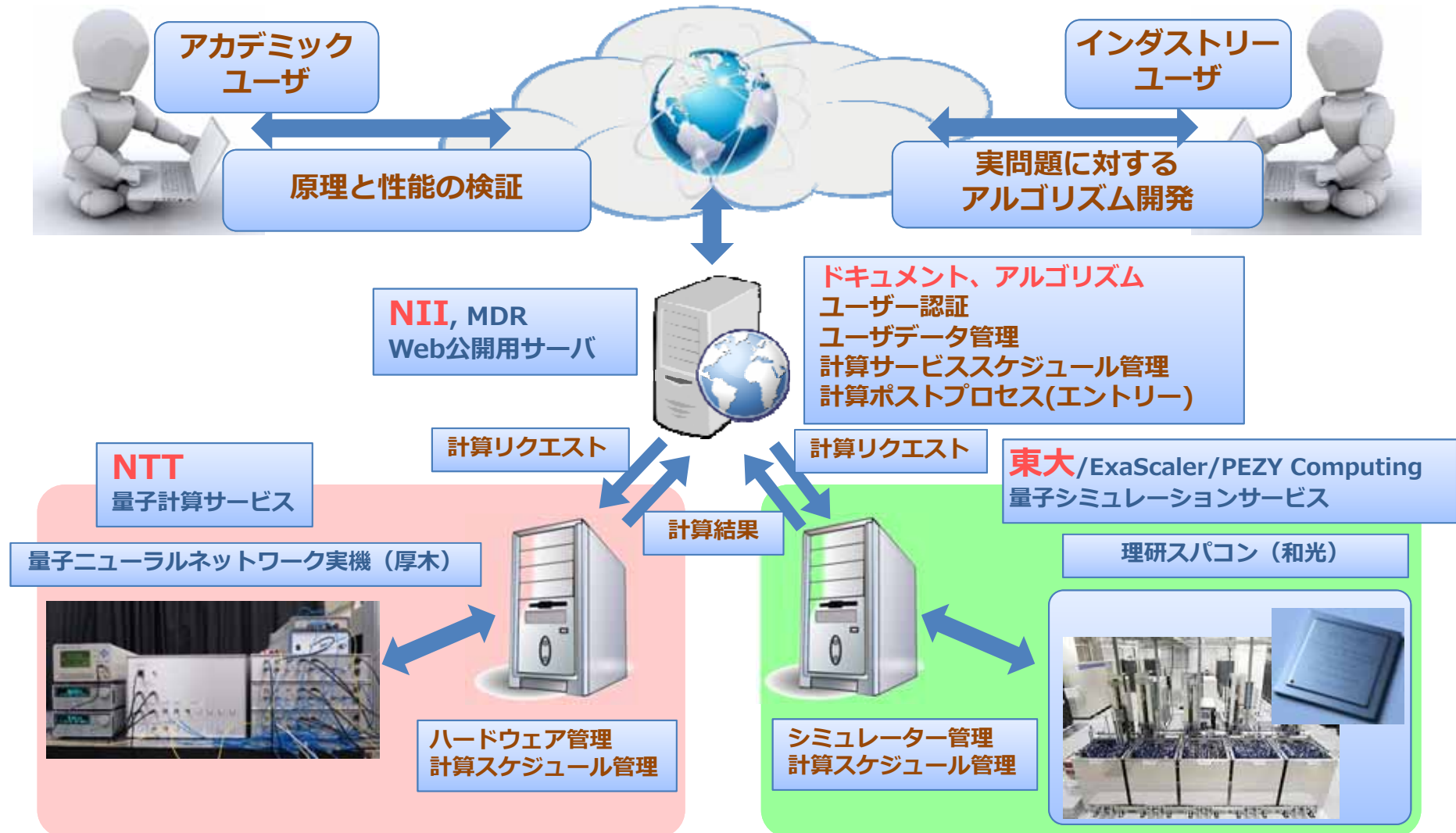
3つの量子コンピュータの比較

	ゲート型	アニール型	ネットワーク型
基本原理	量子干渉	量子トンネリング	量子相転移
開発機関	IBM/Google/ Intel/Microsoft	D-WAVE/MIT	NTT/Stanford
ビット数	9~15 ビット	2,000 ビット	2,000ビット
有効ビットの割合	—	95%	100%
結線数	—	6,000 (スパース結合)	4,000,000 (全結号)
解ける問題サイズ	—	$N \lesssim 40 \sim 50$	$N \lesssim 2,000$
動作温度 条件 物理系	極低温 (10mK) 超高真空 超伝導量子回路	極低温 (10mK) 超高真空 超伝導量子回路	室温 (300K) 常圧 光パラメトリック発振器 ネットワーク
量子性 $k_B T / \hbar \omega$	0.06	0.06	0.02
消費電力	—	25 kW	1 kW

クラウドサービスを実施する必要性

- 量子コンピュータを開発している各社は**実機を用いたクラウドサービスを開始してユーザグループの形成に乗り出そうとしている**。IBMは2016年にゲート型5ビットマシンをすでにクラウドサービスに供しており、D-WAVEは2017年7月にアニール型2000ビットマシンを、Googleは2018年4月にゲート型49ビットマシンを供する予定である。
- 量子技術分野での我が国の存在感を示すため、また**世界の量子コンピュータ・量子アルゴリズム開発の潮流（メインストリーム）**を従来のゲート型、アニール型から我が国の独自技術である**ニューラルネット型へ引き寄せるため**に、ImPACTプロジェクトでもクラウドサービスを早急に実施すべき、との結論に至った。
- ImPACTプロジェクト外の量子アルゴリズム開発機関が**量子ニューラルネットワークを自由に使える環境を提供**することにより、社会実装に至るまでの開発期間を短縮できる、と期待される。

量子ニューラルネットワーク・クラウドサービスシステム



クラウドサービスの内容と開始時期

第1次（2017年11月開始）

目標： 量子ニューラルネットワーク（QNN）の一つである**コヒーレント・イジングマシンの動作原理と性能**を理解し、**NP困難組合せ最適化問題への適用**に利用してもらう。

- CIMの動作原理を実験（量子計算サービス）と理論（量子シミュレーションサービス）の対応を通して理解する。
世界各国の大学で行なわれている量子力学・量子情報科学の講義のツールとして使われることを目指す。
- 代表的なMAX-CUT問題に対するCIM実機対バーチャルCIM（スーパーコンピュータ）、古典ニューラルネットワーク（Hopfield-Tank型）の性能比較（成功確率、計算精度、計算時間）を行なう。

第2次（2018年4月開始）

目標： もう一つの量子ニューラルネットワークである**コヒーレントSATマシンの動作原理と性能**を理解し、**NP完全組合せ最適化問題への適用**に利用してもらう。

- 充足可能性（k-SAT）問題に対するCSM実機対バーチャルCSM（スーパーコンピュータ）、現代アルゴリズム（minisat）の性能比較を行なう。

第3次（2018年11月開始）

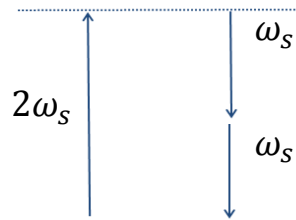
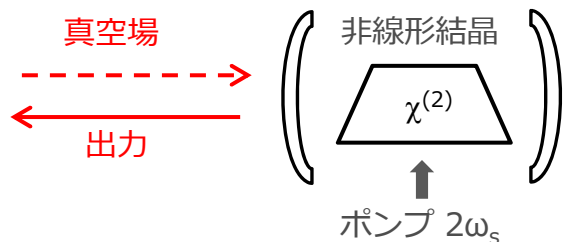
目標： **実問題に対するアルゴリズム開発者からなるユーザグループの形成**を目指して、プロジェクト内で開発された5つの代表的な問題に対するアルゴリズムを開示する。

- 創薬、無線通信、圧縮センシング、深層学習、金融

光パラメトリック発振器：量子ニューロン

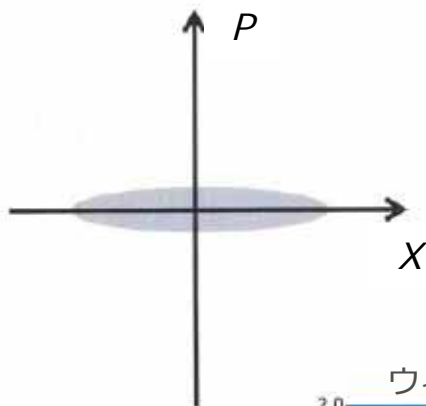
– スタンフォード大学、NTTで50年をかけて開発してきた技術 –

非縮退型発振器 APL 13, 109 (1968), 測定フィードバック発振器 PRA 38, 3556 (1988),
縮退型増幅器 Opt. Lett. 20, 1149 (1995), 縮退型発振器 Opt. Lett. 41, 4273 (2016)



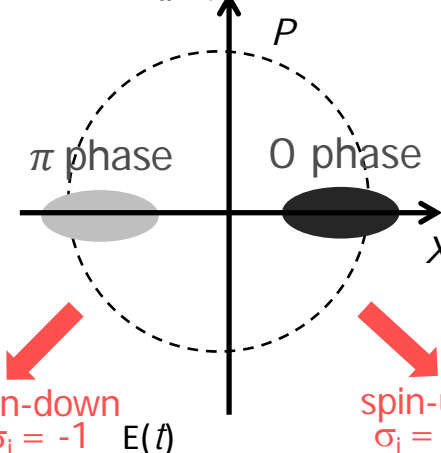
$$\mathcal{H} = \hbar\kappa(\hat{a}_s^{+2}\hat{a}_p + \hat{a}_s^2\hat{a}_p^+)$$

発振しきい値以下

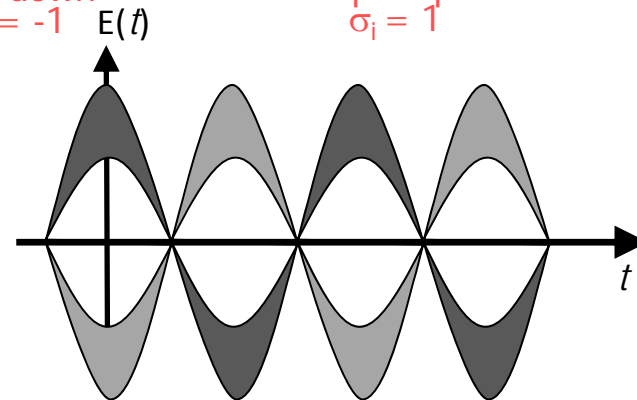
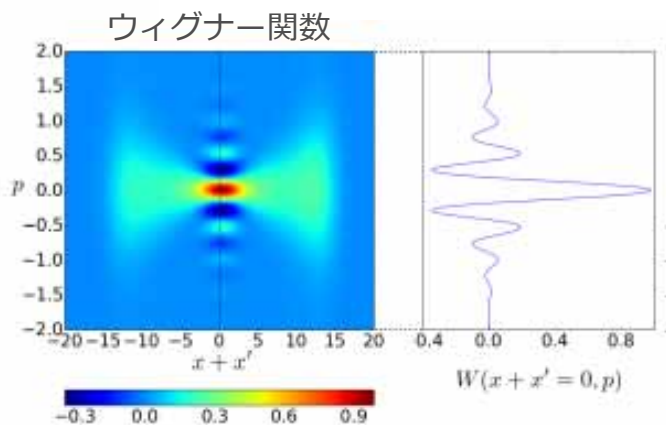


自発的対称性の破れ

発振しきい値以上



0相発振とπ相発振の
重ね合わせの検証

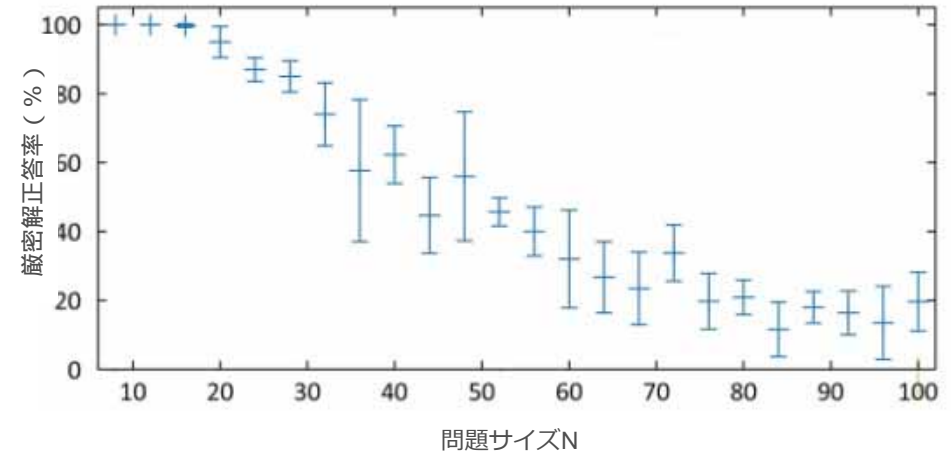


光パラメトリック発振器は、発振しきい値以下のポンプレートでは量子並列探索を行ない、
発振しきい値以上のポンプレートでは、得られた量子レベルの解を古典信号へ一挙に増幅する。 7

(NP困難) MAX-CUT問題に対する厳密解正答率の評価

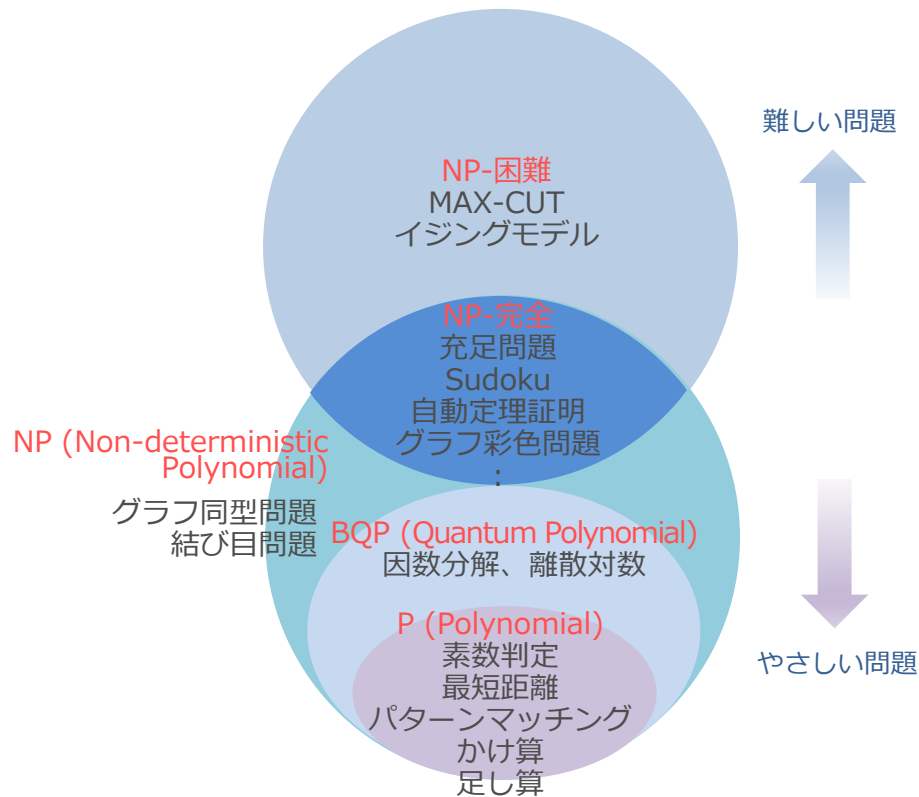
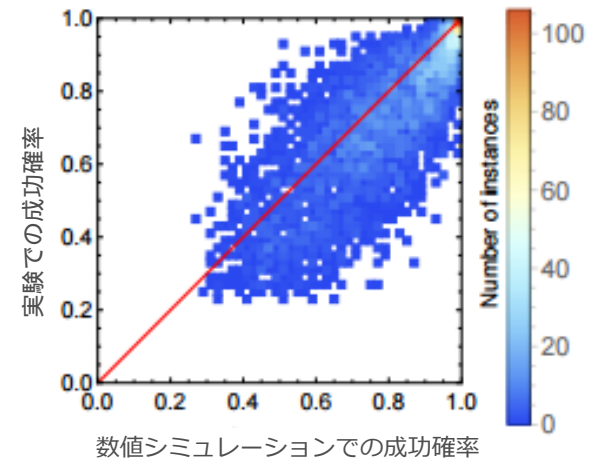
スタンフォードマシン : P. L. McMahon et al., Science, 354, 614 (2016)

Möbius-Ladderグラフ



問題サイズN=100において、 $2^N \approx 10^{30}$ ある解の候補の中から、最適解を21%の成功確率で出力することができる。

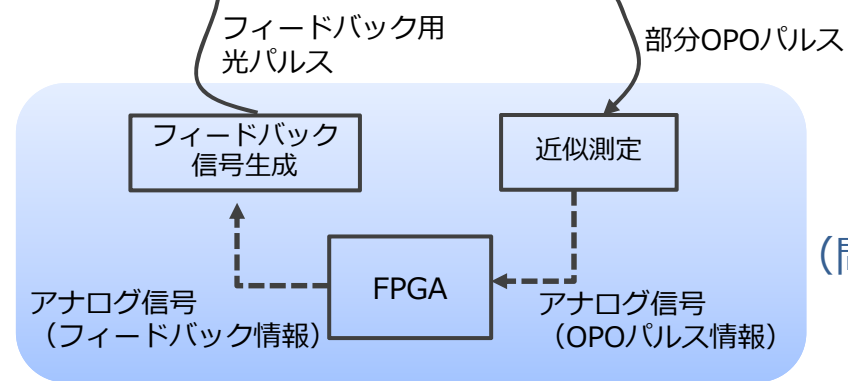
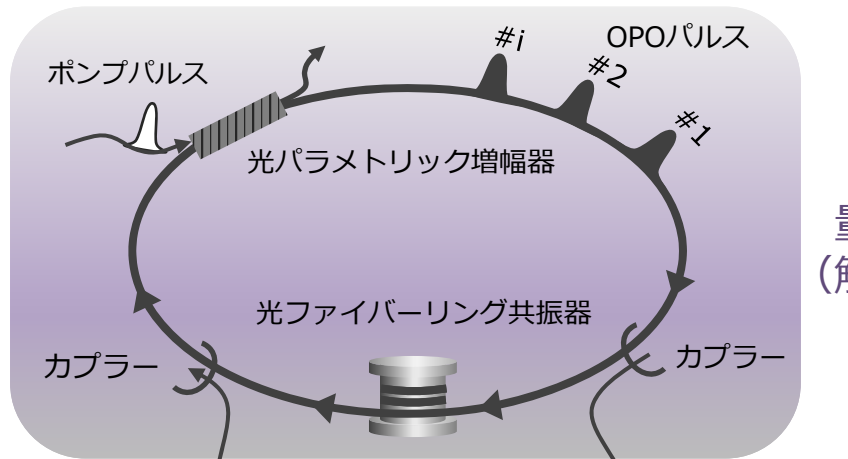
MAX-CUT-3問題の全グラフに対する正答率



(NP困難) MAX-CUT問題に対する近似解の計算時間

NTTマシン : T. Inagaki et al., Science 354, 603 (2016)

光パラメトリック発振(OPO)光パルス

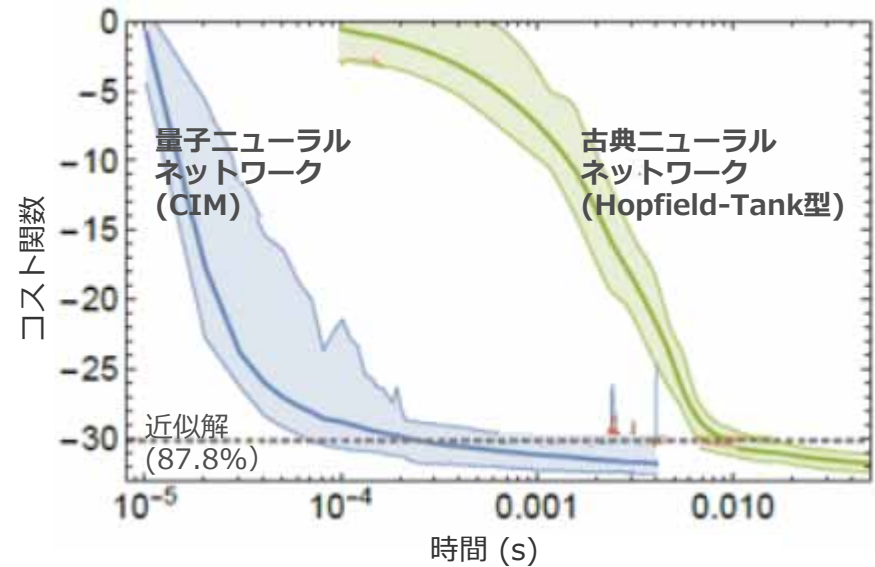


FPGA測定フィードバック回路

量子系
(解探索)

古典系
(問題設定)

完全グラフ (N=2000ノード
N²=400万シナプス) におけるMAX-CUT問題



	最短時間 (ms)	平均時間 (ms)	ハードウェア
CIM	0.071	0.264	Fiber DOPO + 2FPGAs
HTNN	7.04	9.67	スパコン (PEZY-SC)

ImPACTプロジェクトの発表論文件数

指標	雑誌名	Impact factor	論文数
最先端の研究分野で世界をリードする競争力を保持しているか	Nature Materials	38.891	1
	Nature	38.138	1
	Nature Nanotechnology	35.267	1
	Science	34.661	2
	Nature Photonics	31.167	2
	Nature Physics	18.791	1
学問を深化させ、将来の研究者・教育者の育成に貢献しているか	Physics Report	16.240	1
	Reports on Progress in Physics	12.933	1
	Nature Communications	11.329	11
	Phys. Rev. X	8.701	1
	Phys. Rev. Lett.	7.645	18
	Scientific Reports	5.228	11
	Phys. Rev. B	3.718	31
	New J. Phys.	3.570	12
	Optics Express	3.148	2
	Applied Physics Lett.	3.142	3
	Optics Letters	3.040	2
	Phys. Rev. A	2.765	35
	Phys. Rev. E	2.252	5
将来のブレークスルーの種となるアイデアを創出しているか	Entropy	1.743	2
	Science Advances	—	2