

令和元年度 共同利用研究報告書

令和元年 11月 8日

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所長 殿

所属・職名 信州大学・准教授

提案者 氏名 鈴木 章斗

下記の通り共同研究の報告をいたします。 記

		※整理番号	20190005	
1.研究計画題目	量子シミュレータとしての量子ウォークの数理			
2.種目 (○で囲む)	a. プロジェクト研究 b. 若手研究 ㉟ 一般研究			
3.種別 (○で囲む)	a. 研究集会 I b. 研究集会 II ㉟ 短期共同研究 d. 短期研究員			
4.研究代表者	氏名	鈴木 章斗		
	所属 部局名	信州大学学術研究院工学系	職名	准教授
	連絡先			
	e-mail		TEL	
5.研究実施期間	令和元年8月5日(月曜日)～令和元年8月7日(水曜日)			
6.キーワード (複数可)	量子ウォーク、量子シミュレータ、同位体分離			
7.参加者数	15 人 *1			

*1 短期研究員は九大の共同研究者も含める。
I, II, 短期共同研究は事務局から送った参加者データを元に記入。

8.本研究で得られた成果の概要 (成果報告書を別途要添付 枚数は次頁参照)

本研究では、量子シミュレータとしての量子ウォークの数理と実装に関するいくつかの講演を中心として、それらの数理に携わる研究者と実装や応用に携わる研究者間でたくさんの議論を行った。その中で、数学的な open problem が多数共有され、実装上の問題点も数多く指摘された。特に、量子ウォークは時間や空間の連続極限で、さまざまなモデルを近似できることが知られているが、数学的に厳密にできているものはまだ一部に限られていることも再認識された。一方、ある種の量子計算アルゴリズムは、量子ウォークとみなされ、イジングマシンを中心に実社会への応用が見いだされつつあることもわかった。また、主に数学者が研究している量子ウォークは、閉鎖系のユニタリなダイナミクスに関するものが中心であるが、応用上は開放系の非ユニタリなダイナミクスも重要な役割を果たしていることがわかった。そのため、量子ウォークの概念の数理的な再解釈や理論の整備が必要であることも認識された。

令和元年度 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 一般短期共同研究 報告書

信州大学・工学基礎教育部門 鈴木 章斗

研究題目：量子シミュレータとしての量子ウォークの数理

実施期間：令和元年8月5日～7日

研究組織	所属	氏名
代表者	信州大学	鈴木 章斗
組織委員	九州工業大学	大輪 拓也
	金沢工業大学	井手 勇介
	慶應義塾大学	鹿野 豊
	千葉大学	前田 昌也
	横浜国立大学	瀬川 悦生
	横浜国立大学	今野 紀雄
	日本原子力研究開発機構	横山 啓一

目次

1	はじめに	3
1.1	本研究の背景	3
1.2	これまでの共同研究との関連	3
2	実施状況	4
2.1	参加者	4
2.2	プログラム	4
3	共同研究の概要	6
3.1	Simulation by QW	7
3.2	Models of simulators	7
3.3	Boson sampling 入門	7
3.4	空間非一様な量子ウォークの固有値分布	8
3.5	An overview of Ising machine and its applications	8

3.6	Physical implementation of quantum simulation	8
3.7	On the continuous limit of QWs	8
3.8	Open quantum systems and quantum walks	9
4	まとめ	9

1 はじめに

量子シミュレータ [1] は、古典コンピュータでは困難な量子多体系などをシミュレートする制御可能な量子系である。近年進展の著しい量子コンピュータなどで実装することで、創薬や材料開発への応用が期待されるが、高精度なシミュレーションを実現するためには理論解析は重要な課題である。本共同研究では、量子シミュレータとしての量子ウォークの数理とその応用に関する考察を行った。

1.1 本研究の背景

量子ウォークは、誕生当初から、量子アルゴリズムへの応用などで関心を集めてきたが [2,3], 最近ではユニバーサルな量子シミュレータとしての役割も期待されている [4–6]. 実際、量子ウォークを用いて、有限次元の量子系 [7–10] やディラック粒子 [11–14] をシミュレートする方法が数多く提案されている。このような提案法が担保される根拠は、「シミュレートしたい量子系のダイナミクスを量子ウォークのダイナミクスで近似できる」ことにあり、数学的にはある種の極限定理と捉えることができる。この観点では、どのような意味で収束するかを明確にする必要があるが、それによって精密な誤差評価も得られる。ところが、既存研究では形式的な議論で済まされているケースが多く、収束の意味を明らかにするためには、数学的に厳密な研究が不可欠である。

1.2 これまでの共同研究との関連

シミュレーションの対象となる量子系によって、様々な量子ウォークが量子シミュレータとしての役割を果たす。例えば、量子系のハミルトニアンが行列で表される場合は、離散時間量子ウォークの一種である Szegedy ウォーク [15] のスペクトル写像法を用いて、連続時間量子ウォークを近似する手法が有効である [7]. 瀬川と鈴木は、Szegedy ウォークを含む一般の量子ウォークにスペクトル写像法が適用できることを示した [16]. また、鈴木はスペクトル写像法と超対称性の関係を明らかにし [17], 1次元量子ウォークのウィッテン指数を計算した [18]. 量子ウォークの超対称性については、RIMS 共同研究（「量子ウォークと場の量子論における超対称性の数理」2018年）で包括的な議論を行った。

鹿野は離散時間量子ウォークと連続時間量子ウォークの関係を明らかにし [19], 量子ウォークを用いた量子化学計算の高速化を目指している。井手は連続時間量子ウォークの量子探索が量子アニーリングと同程度に高速であることを示した [20]. 大輪は IMI 共同

研究（「イジングモデルに対する Simulated Annealing の解析」2015 年）を主催，量子アニーリングによる最適化問題の研究も行っている。

前田と鈴木は離散時間量子ウォークでディラック粒子のダイナミクスを近似できることを時空間連続極限を用いて証明した [36]。この結果は，離散時間量子ウォークがディラック粒子をシミュレートする量子シミュレータとして機能し得ることの数学的な証明を与え，超対称的ディラック粒子のウィッテン指数と離散時間量子ウォークのそれ [18] との間のアナロジーをも示唆する。

本研究グループは，量子ウォークによって記述される同位体分離のダイナミクス [21] を，IMI 共同研究（「レーザー同位体分離の実用化における量子ウォークの数理」2017 年）などで継続的に議論してきた。今回の共同研究は，量子コンピュータへの応用を目指す研究者を新たに加え，さらなる発展と汎用的な応用を志向して行われた。

2 実施状況

本研究は，15 名が参加し，8 月 5 日から 7 日までの 3 日間の日程で行われた。初日から議論が白熱し，予定時間を押す結果となった。また，2 日目の 8 月 6 日，台風 8 号が九州に上陸したため，計画していたプログラム（別紙参照）を適宜変更して実施した。

2.1 参加者

本共同研究の組織委員は，代表者を含め 8 名であったが，都合により 1 名欠席で組織委員の出席は 7 名となった。その他の参加者として，非常勤講師 1 名，研究員 1 名，博士課程の学生 3 名，修士課程の学生 3 名の合計 15 名が参加した。詳しくは，別紙を参照されたい。

2.2 プログラム

本共同研究では，組織委員による 3 つのレクチャーを公開で行い，それ以外は非公開とした。

8 月 5 日（初日）

当初のプログラムでは，量子シミュレータの数理に関する入門として，鈴木が次の 2 つのレクチャー

Simulation by QW Models of simulators

を午前中に行う予定だったが、質問が多数出たことと参加者の関心が高かったことから、以下のように予定を変更した。まず、最初のレクチャーに午前中全部をあて、参加者とディスカッションを行いながら、何をもって量子ウォークと呼ぶかということと、量子ウォークでシミュレーションを行うということの数学的な意味を確認した。2つ目のレクチャーは、午後の最初に行い、具体的な模型を用いてシミュレーションの意味を考えた。その後は、鹿野が

Boson sampling 入門

と題して、量子ウォークを用いたパーマネントの計算法を解説した。最後に、小松が

空間非一様な量子ウォークの固有値分布

に関する話題を提供した。

8月6日(2日目)

台風の影響で午後からの開始となり、以下3つのレクチャーを公開で行った。

An overview of Ising machine and its applications (大輪)

Physical implementation of quantum simulation (鹿野)

On the continuous limit of QWs (前田)

8月7日(3日目)

当初プログラムでは、初日にテーマを決めて、2日目と3日目でテーマ別のディスカッションを行い、最後にテーマごとのまとめを発表する予定だった。しかし、日程変更のため、前日までにテーマ別のディスカッションができなかったため、予定を変更し、前日のレクチャーで詳しく述べられなかったイジングマシンの応用の部分を大輪が解説した。また、参加者のリクエストに応え

Open quantum systems and quantum walks

と題して、量子シミュレータとしての実装や応用が期待できる、広い意味での量子ウォークの具体例を鈴木が紹介した。

3 共同研究の概要

量子ウォーク (QW) には、大きく分けて、連続時間量子ウォーク (CTQW) と離散時間量子ウォーク (DTQW) があると説明されることがある [22,23]. この文脈では、CTQW はグラフの隣接行列をハミルトニアンにもつ量子系とみるのが主流だが、広義には有限次元ヒルベルト空間に作用するエルミート行列 H をハミルトニアンにもつ量子系とみる向きもある [7]. この場合、CTQW の時間発展はユニタリ群 $\{e^{-itH} \mid t \in \mathbb{R}\}$ によって記述される. DTQW については、グラフの頂点 V をラベルにもつヒルベルト空間 $\ell^2(V)$ と、内部自由度に対応するヒルベルト空間 \mathbb{C}^m のテンソル $\mathcal{H} = \ell^2(V) \otimes \mathbb{C}^m$ 上のユニタリ作用素 U のべき乗 $\{U^t \mid t = 0, 1, 2, \dots\}$ で時間発展が記述されることが多い. もっとも典型的な coined モデルでは、内部自由度の変換を表すコイン行列 $C \in M(m, \mathbb{C})$ と \mathcal{H} 上のユニタリ作用素であるシフト作用素 S によって、 $U = S(I \otimes C)$ と定義される. この他にも、 $\ell^2(V)$ 上で定義される staggered モデルなど、さまざまなモデルがあるが、多くは coined QW と同一視される [24].

CTQW と DTQW の共通点として、これらを用いてユニバーサルな量子計算が可能となる点が挙げられる [4–6]. これは、任意のユニタリ変換が QW を用いて十分よい精度で近似できることを意味している. また、CTQW の時間発展を DTQW のそれで近似可能である [7]. 最近では、より抽象的な枠組みで定義されたユニタリな QW で、CTQW と DTQW の関係を探る動きもある [25].

本共同研究では、以下のような場合に QW を量子シミュレータとして捉える.

- (1) QW を用いてある模型の時間発展が近似できる場合や、モデル化できる場合. また、ある現象の中で QW が近似的に再現される場合.
- (2) QW を用いてシミュレーションやアルゴリズムが定義または実装される場合や、近似などによって QW とみなせる場合.

以下、各講演の概要と議論された事柄を述べる.

3.1 Simulation by QW

この講演では、上の (1) の意味で、QW が量子シミュレータとなりうる模型を概観した。実は、QW はさまざまな極限で、多様な模型の時間発展を近似できることが、多くの研究によって示唆されている [9–14]。ところが、これらの中には、数学における極限定理とは違い、収束の位相がはっきりとしないような形式的な議論が混在している場合も少なくない。見方を変えれば、そのような収束の位相を定めれば、数学的に厳密化できる可能性のある open problem が多数存在している、ということ他ならない。この講演を通じて、このような極限定理を紹介し、何がどこまで数学的にできているかを共有した。また、それによって、どんな模型が QW でシミュレートできるかが議論された。

3.2 Models of simulators

この講演では、CTQW を用いて DTQW を近似する Childs の理論 [7] を紹介した。Childs の理論は、作用素ノルムで近似誤差を評価した数学的に厳密な結果となっている。つまり、(1) の意味の量子シミュレータとして CTQW を捉えることができる。そこで、量子シミュレータとしての QW の数理の雛形として、Childs の近似理論の詳細な検討を行った。

また、量子アニーリングで用いられる横磁場イジング模型は、CTQW の一種とみなせることも紹介した [26]。より正確には、横磁場イジング模型のハミルトニアンは、hypercube 上の離散シュレーディンガー作用素となる。この場合のハミルトニアンは有限次元のエルミート行列となるので、CTQW の一種とみなせる。実際には、量子アニーリングをする場合には、ハイミルトニアンの時間依存性を考える必要があるが、そのような時間依存のものも CTQW と捉える。一方、井手 [27] のように、時間に依存しない CTQW を用いた量子探索アルゴリズムの提案もある。その他、多くの QW を用いた量子アルゴリズムが [28] で紹介されている。これらは、(2) の意味で QW を量子シミュレータとして捉えられることになる。

3.3 Boson sampling 入門

Boson sampling では、ユニバーサル量子計算はできないが、古典コンピュータでは困難な permanent などは計算できる [29, 30]。特に、boson として、光子を用いた boson sampling は、QW を用い実装されている [31]。すなわち、QW は (2) の意味で量子シ

ミュレータと捉えることができる。この講演では、そのようなシミュレータとしての QW と計算量の関係を考察した。

3.4 空間非一様な量子ウォークの固有値分布

QW をシミュレータとして利用するためには、QW 自身の時間発展に関する知見を深めることは重要である。また、グローバーの量子探索アルゴリズムは、グラフ上の空間非一様な QW とみなせるので、(2) の量子シミュレータとして考えられる。この講演では、1 次元の空間非一様な QW の時間発展を一般化固有関数の観点から分類する方法が紹介された。

3.5 An overview of Ising machine and its applications

この講演では、イジング模型を用いたシミュレーションのアイデアと、それを実装したさまざまなタイプのイジングマシンに関する最近の進展を俯瞰した。また、イジングマシンの応用事例や、ボルツマンマシンなどとの関係も紹介された。

3.6 Physical implementation of quantum simulation

この講演では、量子シミュレーションの実装法とその困難さについての紹介が行われた。特に、量子化学計算 [32] や量子アルゴリズムの進展 [33]、量子コンピュータの実機のエラーに関する最新の知見 [34] も紹介された。

3.7 On the continuous limit of QWs

最近、欠陥のある物質中の電子を (2 次元 Dirac 粒子) を 2 次元 QW の連続極限と考えることで、欠陥を探索する Grover の量子探索アルゴリズムが、自然界で発見されたという論文が発表された [35]。ここでは、2 次元 Dirac 粒子の量子シミュレータとして (1) の意味で 2 次元 QW を捉えているだけでなく、(2) の意味で 2 次元 QW がグローバーの量子探索アルゴリズムの量子シミュレータの役割をしている点が興味深い。

この講演では、1 次元非線形 Dirac 方程式が、時空間連続極限で 1 次元非線形 DTQW によって近似できるという結果 [36] の紹介が行われた。これは、非線形 QW によって、非線形 Dirac 方程式がシミュレート可能であることを示唆する結果である。もちろん、この結果は、線形の場合も含んでいるが、線形にするともう少し強い主張が成り立つと考え

られる。上述の2次元の例で考えられている連続極限は、形式的なものだが、この結果の拡張として数学的に厳密に証明可能であることが示唆される。

3.8 Open quantum systems and quantum walks

この節の冒頭で CTQW と DTQW の定義を述べたが、これは主に数学の中で採用されているものである。数学以外の分野では、より広い意味で QW という言葉が使われている。そして、そのような広義の QW に対して、この節の冒頭の量子シミュレータの捉え方 (1), (2) を適用すると、量子シミュレータとしての QW の数理とその応用が豊かになる。たとえば、狭義の QW の定義は時間依存性を許さないが、それを考慮に入れば、3.2 節でみた量子アニーリングのような量子断熱計算は時間依存 QW による量子シミュレーションとみなせる。同位体分離のダイナミクス [21] も、このような広義の QW を量子シミュレータとしてモデル化される。また、狭義の QW は時間発展は線形であるが、3.7 節で述べた非線形な QW もあり、非線形な量子探索アルゴリズムも提案されている [37]。さらに、非ユニタリな時間発展をする QW が量子シミュレータとして重要な役割を果たす場合がある。光合成のエネルギーの移動を記述する QW として提案されたモデルはそのようなものの典型例である [38]。このモデルは、開放量子系の時間発展である Lindblad 方程式によって記述される。

この講演では、開放量子系の非ユニタリな QW である光合成のモデル [38] やプラズモンを用いた実装法 [39] を紹介した。また、Attal らが定義した open quantum random walk [40] が開放系の非ユニタリな QW の離散時間版としてみれることを概説し、非ユニタリな QW の量子シミュレータとしての数理の現状と今後の発展について議論した。

4 まとめ

本研究では、量子シミュレータとしての QW の数理や実装に関する様々な問題点が指摘され、多くの open problem が共有された。また、数学以外の分野では、QW の概念がより広い対象へと拡大しており、QW の概念の数理的な再解釈や理論の整備が必要であることもわかった。

以下、今回の研究会では取り上げることができなかったが、量子シミュレータとしての QW の数理の今後の発展に寄与すると考えられるものを列挙する。

- QW で qudit state を実装する試み: T. Giordani et al., Experimental engineering of arbitrary qudit states with discrete-time quantum walks, *Phys. Rev. Lett.*

122 (2019) 020503.

- QW を計算に利用するもの : A. Lucas, Non-perturbative dynamics of the operator size distribution in the Sachdev-Ye-Kitaev model, arXiv:1910.09539.
- 電子伝達系に関するもの : M. Merkli et al., Quantum electron transport in degenerate donor-acceptor systems, arXiv:1911.06370.
- 非マルコフ的な開放系 : HS. Zenget al., Non-Markovian dynamics and quantum interference in open three-level quantum systems, *Quantum Inf. Process.* **18** (2019) 378.
- 量子マルコフ連鎖 : F. A. Grünbaum et al., Quantum Markov chains: recurrence, Schur functions and splitting rules, *Ann. Henri Poincaré* (2019) <https://doi.org/10.1007/s00023-019-00863-7>

参考文献

- [1] S. Lloyd, Universal quantum simulators, *Science* **273** (1996) 1073.
- [2] A. Ambainis, Quantum walks and their algorithmic applications, *Int. J. Quantum Inf.* **1** (2003) 507.
- [3] A. Ambainis, Quantum walk algorithm for element distinctness, *SIAM J. Comput.* **37** (2007) 210.
- [4] A. Childs, Universal computation by quantum walk, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 180501.
- [5] N. B. Lovett, S. Cooper, M. Everitt, M. Trevers, V. Kendon, Universal quantum computation using discrete-time quantum walk, *Phys. Rev. A* **81** (2010) 042330.
- [6] M. Underwood, D. Feder, Universal quantum computation by discontinuous quantum walk, *Phys. Rev. A* **82** (2010) 042304.
- [7] A. Childs, On the relationship between continuous- and discrete-time quantum walk, *Commun. Math. Phys.* **294** (2010) 581.
- [8] D. Berry, A. Childs, R. Kothari, Hamiltonian simulation with nearly optimal dependence on all parameters, *Proc. of the 56th Ann. IEEE Symp. Found.* (2015) 792.
- [9] D. Berry, L. Novo, Corrected quantum walk for optimal Hamiltonian simulation, *Quantum Inf. Comput.* **15-16** (2106) 1295.

- [10] G. Low, I. Chuang, Hamiltonian simulation by qubitization, *Quantum* **3** (2019) 163.
- [11] F. Strauch, Relativistic quantum walks *Phys. Rev. A* **73** (2006) 054302.
- [12] A. J. Bracken, D. Ellinas, I. Smyrnakis, Free-Dirac-particle evolution as a quantum random walk, *Phys. Rev. A* **75** (2007) 022322.
- [13] D. Molfetta, G. Brachet, M. Debbasch, Quantum walks in artificial electric and gravitational fields, *Physica A* **397** (2014) 157.
- [14] S. Succi, F. Fillion-Gourdeau, S. Palpacelli, Quantum lattice Boltzmann is a quantum walk, *EPJ Quantum Technol.* **2** (2015) 12.
- [15] M. Szegedy, Quantum speed-up of Markov Chain based algorithms, *Proc. of the 45th Ann. IEEE Symp. Found.* (2004) 32.
- [16] E. Segawa, A. Suzuki, Spectral mapping theorem of an abstract quantum walk, *Quantum Inf. Process.* **18** (2019) 333.
- [17] A. Suzuki, Supersymmetry for chiral symmetric quantum walks, *Quantum Inf. Process.* **18** (2019) 363.
- [18] A. Suzuki, Y. Tanaka, The Witten index for 1D supersymmetric quantum walks with anisotropic coins, *Quantum Inf. Process.* **18** (2019) 377.
- [19] Y. Shikano, From discrete time quantum walk to continuous time quantum walk in limit distribution, *J. Compt. Theor. Nanosci.* **10** (2013) 1558.
- [20] Y. Ide, Partition of graphs and quantum walk based search algorithms, *Nonlinear Theory and Its Applications* **2** (2019) 1101.
- [21] L. Matsuoka, E. Segawa, K. Yuki, N. Konno, N. Obata, Asymptotic behavior of a rotational population distribution in a molecular quantum-kicked rotor with ideal quantum resonance, *Phys. Lett. A* **381** (2017) 1773.
- [22] N. Konno, Quantum walks. In: Quantum potential theory, Lecture notes in mathematics, Vol.1954, 309–452, Springer-Verlag, 2008.
- [23] 今野紀雄, 量子ウォークの数理, 産業図書, 2008.
- [24] N. Konno, R. Portugal, I. Sato, E. Segawa, Partition-based discrete-time quantum walks, *Quantum Inf. Process.* **17** (2008) 100.
- [25] H. Sako, Intertwining operators between one-dimensional homogeneous quantum walks, arXiv:1902.02479.
- [26] A. Callison, N. Chancellor, F. Minter, V. Kendon, Finding spin glass ground states using quantum walks, *New J. Physics* (2019) doi:10.1088/1367-

2630/ab5ca2

- [27] Y. Ide, Partition of graphs and quantum based search algorithms, *Nonlinear Theor. Appl.* **10** (2019) 16.
- [28] R. Portugal, Quantum walks and search algorithms (2nd Ed.), *Quantum science and technology*, Springer (2018)
- [29] S. Aaronson, A. Arkhipov, The computational complexity of linear optics, *Theory of Computing* **9** (2013) 143252.
- [30] S. Scheel, Permanents in linear optical networks, arXiv:quant-ph/0406127 (2004); *Acta Phys. Slovaca.* **58** (2008) 675.
- [31] J. Carolan, J. Meinecke, P. Shadbolt et al., On the experimental verification of quantum complexity in linear optics, *Nat. Photonics* **8** (2014) 621.
- [32] M. Head-Gordon, E. Artacho, Chemistry on the computer, *Physics Today* **61** (2008) 58.
- [33] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, et al., A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, *Nat. Commun.* **5** (2014) 4213.
- [34] K. Tamura, Y. Shikano, Quantum random numbers generated by the cloud superconducting quantum computer, arXiv:1906.04410.
- [35] S. Guillet, M. Roget, P. Arrighi, G. D. Molfetta, The Grover search as a naturally occurring phenomenon, arXiv:1908.11213.
- [36] M. Maeda, A. Suzuki, Continuous limits of linear and nonlinear quantum walks, *Rev. Math. Phys.* (2019) <https://doi.org/10.1142/S0129055X20500087>.
- [37] D. Meyer, T. Wong, Nonlinear quantum search using the GrossPitaevskii equation, *New J. Phys.* **15** (2013) 063014.
- [38] M. Mohseni, P. Rebentrost, S. Lloyd, A. Aspuru-Guzik, Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer, *J. Chem. Phys.* **129** (2008) 174106.
- [39] J. Ren, T. Chen, X. Zhang, Long-lived quantum speedup based on plasmonic hot spot systems, *New J. Phys.* **21** (2019) 053034.
- [40] S. Attal, F. Pertuccione, C. Sabot, I. Sinayskiy, Open quantum random walks, *J. Stat. Phys.* **147** (2012) 832.

**IMI Joint Usage
(IMI共同利用)**

**Mathematics for Quantum walks and Quantum Simulators
(量子シミュレータとしての量子ウォークの数理)**

Date: Aug. 5-7, 2019

* Only on Aug. 6 the conference is open to the public.

(公開講演は8月6日のみ)

Venue: Lecture room C513, 5th floor West Zone 1 (Building C),
Ito Campus, Kyushu University

(九州大学 (伊都キャンパス) ウェスト1号館C棟5階 C513中講義室)

Program of Public Lectures on Aug. 6

10:00-10:50 Lecture 1

Speaker: Takuya Ohwa (Kyushu Institute of Technology)

Title: An overview of Ising machine and its applications

10:50-11:20 Discussion

11:30-12:20 Lecture 2

Speaker: Yutaka Shikano (Keio University)

Title: Physical Implementation of Quantum Simulation

12:20-12:40 Discussion

14:00-14:50 Lecture 3

Speaker: Masaya Maeda (Chiba University)

Title: On the continuous limit of QWs

14:50-15:20 Discussion