



ブライト・アセット株式会社

東芝が高速為替取引に参入か？

量子技術や独自のアルゴリズムを使い高速取引業参入か？

2019年11月25日の日本経済新聞に「東芝がヘッジファンドになる日 量子技術で高速取引」という記事が掲載されていました。東芝がどのようにして高速取引に参入するのかについてまとめてみました。本邦金融機関のフィンテックへの取り組みについては、外資系金融機関に比較して出遅れているといわれていますが、今後日本を代表するテクノロジー企業が金融市場に参入することで金融市場はますます自動化（機械化）されていくのかもしれない。

マーケティングセールス部

2019/11/25

金融商品取引業者：ブライト・アセット株式会社
登録番号：関東財務局長（金商）第3102号
加入協会：一般社団法人第二種金融商品取引業協会
一般社団法人金融先物取引業協会
一般社団法人日本投資顧問業協会
HP：www.brightasset.co.jp

当資料は、投資環境に関する参考情報の提供を目的としてブライト・アセット株式会社が作成した資料です。投資勧誘を目的としたものではありません。当資料は信頼できると考えられる情報に基づき作成されていますが、情報の正確性、完全性を保証するものではありません。ここに示された意見などは、当資料作成日現在の当社の見解であり、事前の連絡なしに変更されることがあります。投資に関する決定は、お客様ご自身で判断なさるようお願いいたします。

東芝が高速為替取引に参入か？

量子技術や独自のアルゴリズムを使い高速取引業参入か？

東芝のプレス・リリース

2019 年 9 月 11 日に、株式会社東芝は金融取引など超高速で良解を選び反応することが必要な分野に SB アルゴリズムを適用することができる専用大規模並列処理回路を開発したと報告がありました。

10 月 17 日には、「大規模で複雑な組合せ最適化問題の高精度な近似解（良解）を短時間で得る独自の「シミュレートド分岐アルゴリズム（Simulated Bifurcation アルゴリズム。以下、SB アルゴリズム）」を搭載した超高速な金融取引マシンのコンセプト実証機（Proof-of-Concept。以下 PoC 機）を開発しました。本 PoC 機により、刻々と変化する外国為替市場において膨大な通貨の組合せパターンの中から利益率が最大となる裁定取引の機会を 90%以上の高確率で発見し、売買注文の発行までをマイクロ（100 万分の 1）秒級の時間で完了することが可能となります。最良の裁定取引を瞬時に発見・実行する PoC 機の実証は世界初です。」と報告がありました。

http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1910_02.htm

為替の裁定取引に着目

（プレス・リリースより）

金融取引の最適化、産業用ロボットの動作の最適化、移動経路や送電経路の最適化など、社会・産業システムにイノベーションを起こすための課題の多くは、膨大な組合せパターンの中から最良のものを選び出す組合せ最適化によって解決することができます。組合せ最適化は、問題の規模が大きくなるにつれて組合せパターンの数が指数関数的に増大するため、既存の計算機で高速に解くことは困難です。このため、当社は独自の量子計算機「量子分岐マシン」（注 4）およびその理論を古典力学系へ展開した、世界最高速度・最大規模の最適化を可能にする「SB アルゴリズム」（注 5、6、7、8）を発表しました。さらに当社は、瞬時最適応答システムのコンセプトを提案し、その実現のために必要となる SB アルゴリズムの専用処理回路（注 9、10）を発表しました。

金融取引や産業ロボットなど高速リアルタイム応答システムでは、外部環境の検知、それに応じた対応アクションの決定、そのアクションの実行を含むトータルの応答時間を短縮することが求められます。従来、高速システムにおいては、過去の経験に基づく簡易な条件判定式などにより対応アクションが決定されていました。リアルタイム応答性と高速な組合せ最適化を両立させ、周囲の変化に応じて最も合理的な判断を瞬時に下す高速リアルタイムシステムはこれまでにない新しいコンセプトであり、社会実装するためには実証実験を重ねる必要があります。東芝は、高速リアルタイム応答が求められる場として金融取引に着目し、外国為替市場における多数通貨間裁定取引（注 11）を実行する PoC 機を開発しました。

本 PoC 機は、SB アルゴリズムの専用処理回路、専用インターフェース回路、為替レートマトリックス管理回路、取引アルゴリズム処理回路からなる裁定取引システムを 1 つの再構成可能回路チップ（FPGA）（注 12）に実装した超低遅延のオールハードウェアソリューションです（図 1）。本 PoC 機は学術的に定式化された多数通貨間裁定取引モデル（注 11）を扱います。本 PoC 機に搭載された SB アルゴリズムの専用処理回路は、組合せ最適化問題の 1 つである重み付き有向グラフにおける最適経路問題（注 13）を高速に解くことで、利益率が最大となる裁定機会を瞬時に選びます。本実証では、8 通貨 15 ペア（8 ノード、30 エッジの有向グラフ）の実際の取引データ（注 14）を使用しました。

外国為替の裁定取引マシンの PoC 機概要

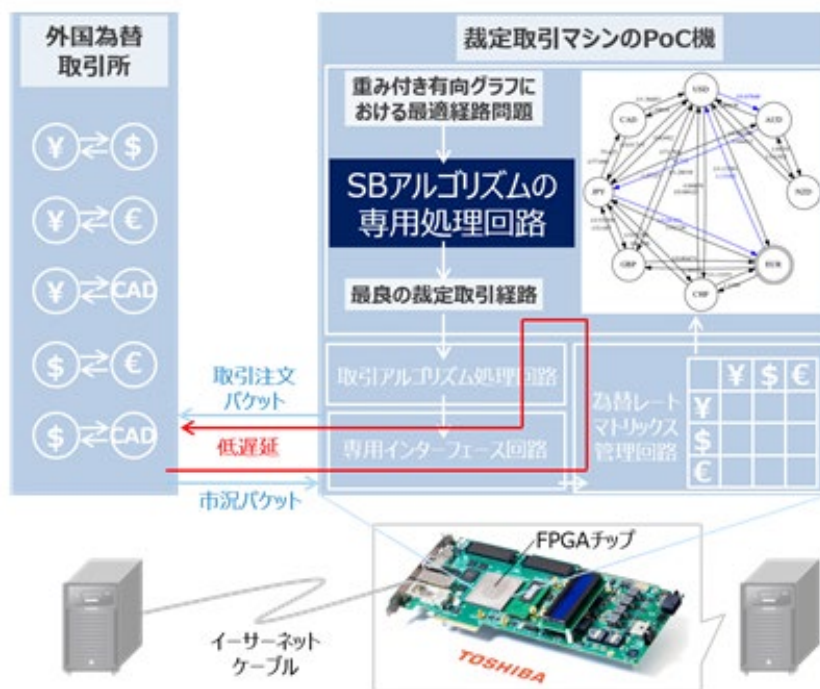
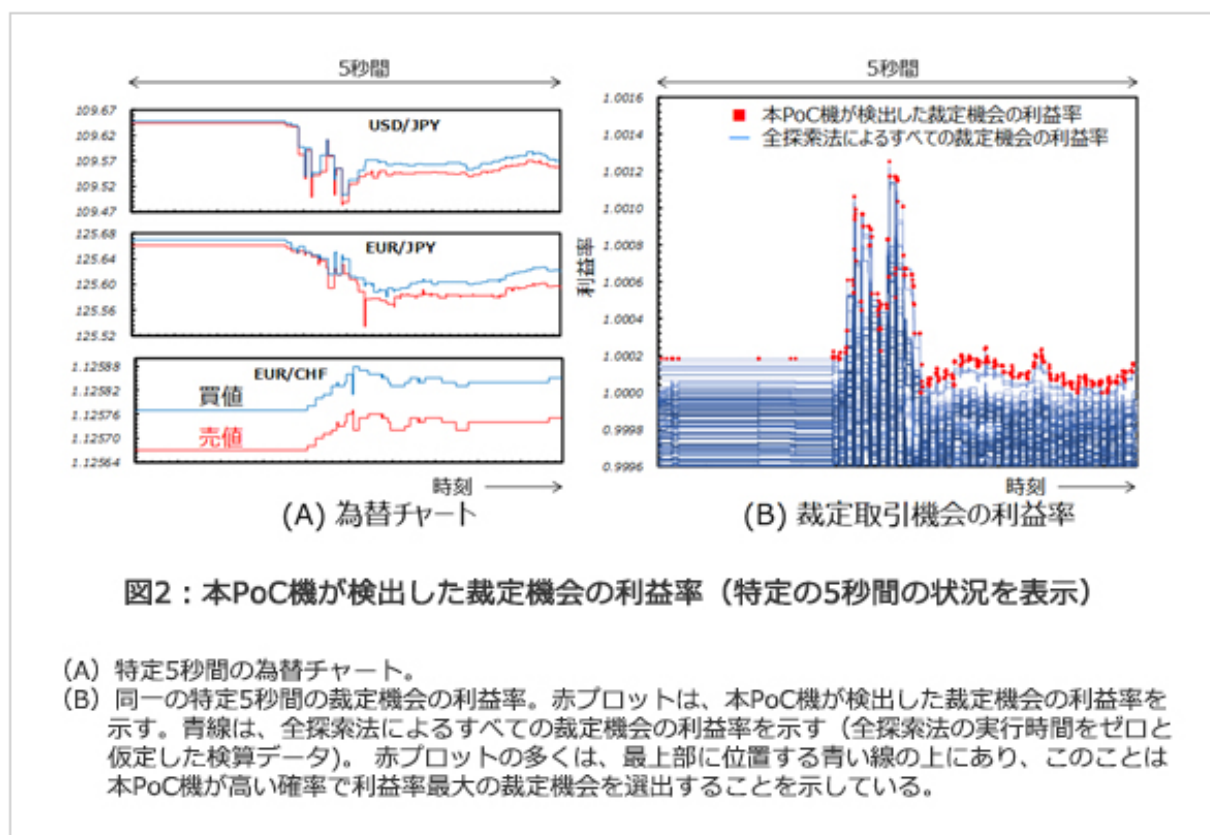


図1：SBアルゴリズムに基づく外国為替の裁定取引マシンのPoC機



右側グラフにおける青線が過去の実際のデータを基に全探索法で算出した検算データで、赤の点が PoC 機が見つけた裁定機会の利益率。おおむね最良の機会を見つけていることがわかる。

本 PoC 機は、0.001 秒程度と極めて短く、なおかつ不規則な時間間隔で発行される各通貨ペアの市況パケットを取り込み、膨大な選択肢の中から最も利益率が大きくなる最良の裁定機会（一連の通貨交換手続き）を見つけ出し（図 2）、その情報と取引アルゴリズムに基づき決定した注文パケットを市況パケット到着後 0.00003 秒（30 マイクロ秒）以内に発行します（図 3A）。この応答時間は、0.001 秒程度の為替の変動タイミング間隔を大きく下回ります。すべての可能性ある取引のうち利益率が最大となる裁定機会を検出する確率は 90.96%です。また、収益性が正（利益率が 1.0 より大きい）となる裁定機会（利益機会）が少なくとも 1 つ以上存在する場合に、その利益機会のいずれかを検出する確率は 97.96%に達します（図 3B）（注 14）。このように本 PoC 機は、市況の変化にその都度応答することが出来る高速な応答性を有し、なおかつ極めて高い確率で最大利益率の取引機会を検出します。

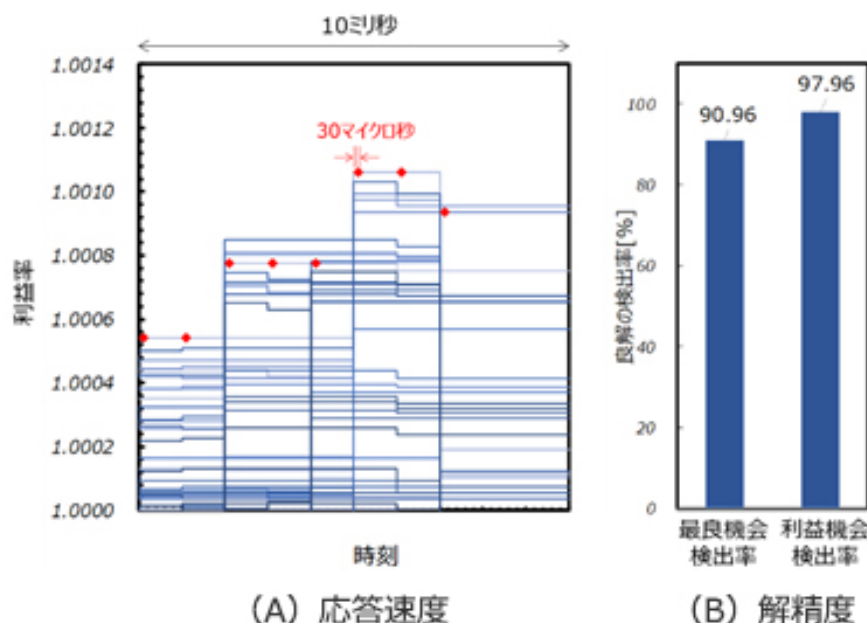


図3：本PoC機の応答速度（A）と解精度（B）

今後、当社は、組合せ最適化問題を高速・低遅延に解くことを核とする金融ソリューションの研究開発を進め、東芝デジタルソリューションズ株式会社と共同で、*Fintech* 分野において新規事業開発に取り組むとともにこれらの研究開発、新規事業開発を推進するため、金融工学分野のエキスパート人材を募集します。また、当社は、金融以外の応用分野においても革新的な瞬時最適応答システムを研究開発してまいります。

（注 4）H. Goto, "Bifurcation-based adiabatic quantum computation with a nonlinear oscillator network," Scientific Reports 6, 21686 (2016).

（注 5）世界最速・最大規模の組合せ最適化を可能にする画期的なアルゴリズムの開発について－物流・創薬など社会課題を短時間で解決するサービスプラットフォームの構築に向けて－ https://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1904_01.htm

（注 6）量子コンピューター研究から生まれた 組合せ最適化の新解法 <https://www.toshiba-clip.com/detail/7685>

（注 7）H. Goto, K. Tatsumura, A. R. Dixon, "Combinatorial optimization by simulating adiabatic bifurcations in nonlinear Hamiltonian systems," Sci. Adv. 5, eaav2372 (2019).
<https://advances.sciencemag.org/content/5/4/eaav2372>

（注 8）[東芝デジタルソリューションズ] 大規模組合せ最適化を高速に実行するソフトウェア「シミュレーテッド分岐マシン」を AWS Marketplace 上に公開 ～さまざまな分野での社会課題の解決に向けて実証実験を開始～ <https://www.toshiba-sol.co.jp/news/detail/20190717.htm>

（注 9）シミュレーテッド分岐アルゴリズムの専用大規模並列処理回路を開発－高速に変化する環境にリアルタイムで応答できる組合せ最適化ソリューションを提供し、金融、ロボティクス、物流、創薬などの社会課題を解決－ http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1909_03.htm

当資料は、投資環境に関する参考情報の提供を目的としてブライト・アセット株式会社が作成した資料です。投資勧誘を目的としたものではありません。当資料は信頼できると考えられる情報に基づき作成されていますが、情報の正確性、完全性を保証するものではありません。ここに示された意見などは、当資料作成日現在の当社の見解であり、事前の連絡なしに変更されることがあります。投資に関する決定は、お客様ご自身で判断なさるようお願いいたします。

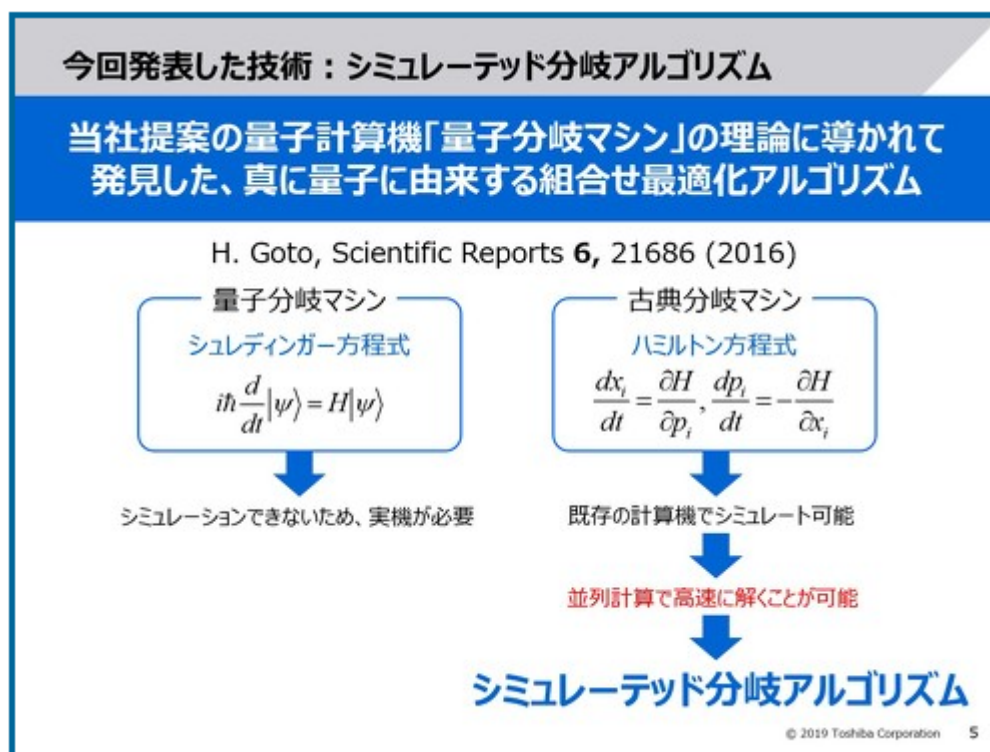
このように、東芝はフィンテック分野に参入することを宣言しています。

今回開発した実証機は、SB アルゴリズムおよびその専用処理回路が実現する瞬時最適応答システムという新しいコンセプトを、効果がダイレクトに見えやすくニーズもある金融分野において外国為替の通貨間の裁定取引に適用したものです。

実用化の時期は未定。「PoC 機は最善な取引機会を教える、把握できる段階。実際にはほかに制約条件が入ってくる可能性があり、約定を確定する際などの運用上の問題がある」（東芝研究開発センター コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー 主任研究員 辰村光介氏）などの理由のため、まだ時間がかかるとのこと。

東芝は、今回の PoC 機の開発をファーストマイルストーンとし、組合せ最適化問題を高速・低遅延に解くことを核とする金融ソリューションの研究開発を進めていくようです。新たに技術の応用を担う金融工学分野のエキスパート人材を募集し、東芝デジタルソリューションズと共同で Fintech 分野において新規事業開発に取り組むほか、金融以外の応用分野においても瞬時最適応答システムの適用を目指すようです。

「シミュレーテッド分岐アルゴリズム」開発秘話



理論の原型は、量子版のアルゴリズムとともに 2016 年に発表していた（スライドは東芝提供）

（注 10）K. Tatsumura, A. R. Dixon, H. Goto, "FPGA-based Simulated Bifurcation Machine," In proceedings of The International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL), pp.59-66 (2019)

（注 11）W. Soon, and H. Q. Ye. "Currency arbitrage detection using a binary integer programming model." International Journal of Mathematical Education in Science and Technology 42, pp. 369-376 (2011).

（注 12）Field-Programmable Gate Array の略称。演算処理集積回路の一種で、製造後にユーザーが用途に応じて機能を書き換えることが可能。20nm 世代の半導体プロセスで製造された Intel Arria10 GX1150 FPGA を使用した。

（注 13）辺に重み（コスト）が付いているグラフを、重み付きグラフと呼ぶ。通貨間裁定機会の検出問題は、通貨交換レートを重みとする重み付きグラフにおいて、重みの総乗（利益率）が最大となる経路を探索する問題として定式化することが出来る。

（注 14）Data source: Integral Development Corp. <https://www.truefx.com/?page=downloads> [Under the permission from Integral Dev. Corp.] 2019 年 1 月のデータを使用。検出確率は全期間に亘る平均値。

2016 年に、「量子分岐マシン」と名付けた量子コンピュータの理論を東芝の後藤隼人主任研究員が研究を発表した。これは量子アニーリングと同様に、組合せ最適化問題を表す「イジングモデル」を解くマシンだが、「汎用量子コンピュータ」の動作原理である量子ゲート計算にも応用できるという。しかし、この新型量子コンピュータには特殊な素子を用いなければならず、既存の量子ビットとも異なるためにまだ開発途上だ。

量子分岐マシンの発表時、後藤さんは「古典分岐マシン」も論文内に記載していた。ミクロな世界を記述する量子力学をベースにする量子分岐マシンを、マクロな世界の古典力学、つまり量子性のない数式に書き直したものだ。

この古典分岐マシンの理論こそ、量子コンピュータより速いという「シミュレーテッド分岐アルゴリズム」の原型である。

NTT、国立情報学研究所、大阪大学などが共同で研究開発し、16 年末に「コヒーレント・イジングマシン」を発表した。

コヒーレント・イジングマシンは光と FPGA を用いて組合せ最適化問題を解くマシンで、日本向けのプレスリリースでは「量子ニューラルネットワーク」とも名付けられていたことから、「日本版量子コンピュータだ」と話題になった。

「『本当に量子性を用いて計算しているのか』という議論もあったが、従来のコンピュータの 10 倍以上の速度で問題が解けることは間違いなく、研究者間では高く評価されていた」と、後藤さんはコヒーレント・イジングマシンの活躍を見ていた。

「コヒーレント・イジングマシンは計算に『分岐現象』を利用している」と後藤さんは解説する。分岐とは、初めはある 1 か所のみ点に安定しているが、パラメータ（時間）の変化につれて安定する箇所が複数に分かれるという物理現象だ。分岐現象の計算への利用は、「+1 と -1 のような離散変数ではなく、連続する変数を離散に置き換える計算に都合がいい」と後藤さんはいう。

くしくも、量子分岐マシン・古典分岐マシンともに、この分岐現象を計算原理の一つにする理論だった。

古典か量子かわからないが、分岐現象を利用した計算マシンが活躍している——そんな状況を見て、「コヒーレント・イジングマシンが解いた問題を古典分岐マシンで解くとどうなるのか」と後藤さんが試してみたところ、「どうやら早く解けそうだと気付いた」（同）。

これをきっかけに、後藤さんは古典分岐マシンの研究を始めた。そして、古典分岐マシンを並列計算に適した形である「シミュレーテッド分岐アルゴリズム」（Simulated Bifurcation, SB）に仕上げた。

「SB は、従来技術の課題を克服している」と後藤さんはいう。

「従来技術」とは、量子アニーリングと、量子アニーリングをデジタル回路で模倣するシミュレーテッドアニーリング、そしてコヒーレント・イジングマシンを指す。

いずれのマシンも、組合せ最適化問題を表す「イジングモデル」を解くためのマシンだ。イジングモデルは、複数の（量子）ビット間に「相互作用」を設定する。設定された相互作用によって、ビット A とビット B が同じ方向を向きやすいか、違う方向を向きやすいかわかる。向きやすい方向にビットが落ち着く方が、モデル全体のエネルギーが低くなる。

例えば、ここにビット A とビット B があり、いずれも +1 もしくは -1 の値を取るとする。相互作用も +1 や -1 などの値を取る。エネルギーは（ビット A）×（ビット B）×（相互作用）という積になる。もし相互作用が +1 なら、A と B の組み合わせは +1 と -1、もしくは -1 と +1 を選べば、エネルギーが -1 となり小さくなる。この計算をビット数の分だけ行い、全て足し合わせたものが「モデル全体のエネルギー」になる（本来は局所磁場も考慮するがここでは割愛する）。

この「モデル全体のエネルギー」の最小値が組み合わせの最適解に当たるのだが、理論的には全てのビットについて総当たりの計算をしないと厳密な解は得られない。この計算量は、ビット数を N とするなら 2 の N 乗という指数関数で増えるため、例えば 100 ビットの総当たりなら 2 の 100 乗（1 兆×1 兆×100 万）回計算しなければならない、現実的に計算が終わらない。

この困難な問題に対し、一つのブレイクスルーを示したのが量子アニーリングだ。量子アニーリングはビットに量子ビットを用いる。「シュレディンガーの猫」で有名な量子の「重ね合わせ」状態から徐々に量子ビットの向きを確定させていくと、この過程で「量子トンネル効果」という量子特有の効果が働き、各ビットの方向がエネルギーの最小値を示す（と思われる）状態に自然に落ち着く。普通の計算機のような総当たり計算はせず、量子力学の物理現象に結果を任せるため、計算開始から終了までの時間は非常に短い。

論文では、「分岐現象」「断熱過程」「エルゴード過程」という 3 つの古典力学の物理現象で SB を説明している。「これらを組み合わせアルゴリズムを考案したのではない。SB を説明する上で、これらが成り立つと仮定するとうまく説明できる」（同）

そもその研究対象である量子分岐マシンは、分岐現象と「量子断熱過程」という現象で原理を説明できるという。これを古典力学に変換したのが SB（の基である古典分岐マシン）で、分岐現象は古典力学にもある。そのため、SB の説明としてまず分岐現象は利用しているといえる。しかし、量子断熱過程の古典力学版である「断熱過程」は、実は証明が難しいという。

「定性的にはこれで説明できるが、厳密な証明は難しい。量子力学では『量子断熱定理』という定理が一般に成り立つが、古典力学の断熱過程は特殊な条件下でしか証明できない」（後藤さん）

「さらに、古典力学の断熱過程が成り立つ上でエルゴード過程も必要になる。エルゴード過程のキーワードは『カオス』で、数学的な証明が非常に難しい」（同）

後藤さんは、「断熱過程は半球の器の中にビー玉を入れて、速く動かすとビー玉が飛び出すが、ゆっくり動かすと底に留まり続けるようなもの。エルゴード過程はゆがんだビリヤード台やゆがんだ円の中をボールが反射し続けると全ての場所を通るようなもの」と、それぞれの物理現象の身近な例を説明する。

断熱過程とエルゴード過程の証明は難しいことから、論文でも「今後の課題」としている。

シミュレーテッド分岐アルゴリズムの動作イメージ

(1) まず、2 つの連続変数が初めはそれぞれ 0 の位置で安定している。これがパラメータの変化につれ、右上や左下に安定な場所が発生する（分岐現象）。

(2) パラメータの変化が「ゆっくり」であるために、変数は安定な底へ移動していく（断熱過程）。変化につれて他にも安定な場所ができるが、先に現れた安定点の方がエネルギーが低いため、変数は先に現れた安定点にとどまる。最終的に変数がとどまった座標が 0 より大きければ +1、小さければ -1 と見なし、イジングモデルへ戻す。

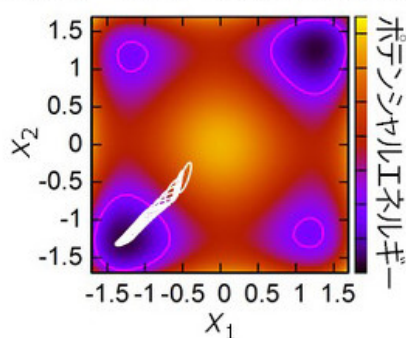
(3) この説明では変数の初期値が 0 だったが、0 でないところからでも変数は安定する場所を探す。これは変数が取りうる状態を満遍なく動き回り、エネルギーの低いところに確率的に長くとどまるから（エルゴード過程）。

(4) この図は 2 変数なので平面図に表されているが、3 変数なら 3 次元の立方図、N 変数なら N 次元の図になる。あるいは、変数自体は全て 1 次元なので、N 個の点が数直線上を行ったり来たりするという解釈でもいい。

こうした変数の挙動を表した数式が、シミュレーテッド分岐アルゴリズムということだ。

断熱過程

系のパラメータがゆっくりと変化するとき、エネルギーの低い状態に留まり続ける。



ポテンシャルの底を追いかける

Goto et al., Sci. Adv. 5, eaav2372 (2019)

シミュレーテッド分岐アルゴリズムによる解の探索

2000変数の問題において、解を探索する様子

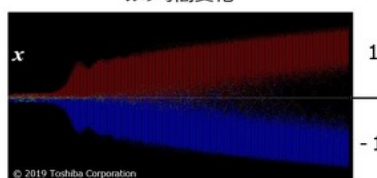
2000粒子の運動方程式

$$\text{位置: } \frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial y_i} = Dy_i$$

$$\text{運動量: } \frac{dy_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i} = -(D - p + x_i^2)x_i - c \alpha h_i + c \sum_{j=1}^N J_{ij} x_j$$

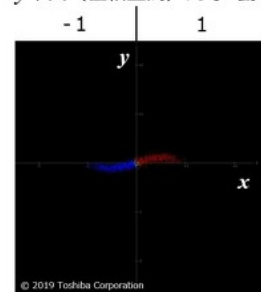
➡ 各xの最終値の符号±1が解

xの時間変化



弊社プレスリリースサイトで動画が見られます：
https://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1904_01.htm

xy平面（位相空間）内での動き



<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1907/30/news030.html> より

「量子コンピューター研究から生まれた 組合せ最適化の新解法」について東芝からも記事が出ています。

<https://www.toshiba-clip.com/detail/7685>

AWS 上で利用可能

東芝のこのシステムは、AWS 上で利用することが可能です。組み合わせ最適化計算に特化した既存の量子コンピュータよりも高速・大規模に問題を解ける「シミュレーテッド分岐アルゴリズム」を実装したマシンをクラウド上に公開しています。Amazon Web Services 上の仮想サーバ利用料金（1 時間あたり 3.06 ドル）のみで利用できるようです。

AWS 上のページ

<https://aws.amazon.com/marketplace/pp/Toshiba-Digital-Solutions-Corporation-Simulated-Bi/B07T8STKZR>

東芝の商品案内ページ

https://www.toshiba-sol.co.jp/pro/sbm/index_j.htm

理論についての解説論文のリンク

<https://aws.amazon.com/marketplace/pp/Toshiba-Digital-Solutions-Corporation-Simulated-Bi/B07T8STKZR>

実際に使ってみたというレポートが Qiita にありました。

https://qiita.com/navitime_tech/items/ce9b22a46a4d2e60bad4

東芝がヘッジファンドになる日 量子技術で高速取引

11 月 25 付の日本経済新聞では、為替分野で東芝自ら参入すると伝えられている。分かりやすい説明が以下のようにされています。（日本経済新聞 2019 年 11 月 25 日より抜粋）

日本円や米ドルなど主要 8 通貨の実際の値動きをもとに検証した。例えば、円とドルの間で大口の注文が入ると、需給によって円とユーロ、ドルとユーロなどの取引レートにわずかなゆがみが生じる。社内で「インテリジェント脊髄反射」と呼ぶ高速マシンは、30 マイクロ（マイクロは 100 万分の 1）秒で 8 通貨の組み合わせを分析し、裁定取引を実行する。その結果、利益率を最大にできる取引を 9 割以上の確率で発見できたという。

今後は短期の市場予測やリスク管理向けのシステム開発にも取り組む。東芝が量子マシンの概要を発表すると、金融機関からの問い合わせが相次いだ。

理論上は裁定の機会がある限り利益を出し続けられるが、「実際に約定させてみるにはまだハードルが残る」（辰村氏）。そこで東芝は自らが実験台となって、高速の外為取引を手掛ける検討を進めている。

こうした高速取引業者には、金融庁が 18 年に登録制を導入している。東芝は登録に向けた体制を整備するため、金融業界で「クオンツ」という計量分析の人材を採用する。今月半ばまでの募集には多くの応募があったといい、具体的な選考に入っている。

三井住友銀行で副頭取を務め、投資銀行や証券部門も担当した東芝の車谷暢昭最高経営責任者（CEO）は「今回の革新的な技術は新たなフィンテック領域を開拓できる」と指摘する。高速取引業者としての登録にはためらいはない。さらに、「物流やモビリティ、創薬などに広く展開し、社会に変革をもたらせる」という。

このほかにも「組み合わせ」能力を活用して、約 2000 銘柄で構成される東証株価指数（TOPIX）の値動きを、そのうちの 500 銘柄でほぼ再現する実験にも成功している。指数連動型のパッシブ運用が勢いを増すなか、より効率的に運用するニーズに対応できる可能性もある。ある大手資産運用会社の幹部は「東芝の研究成果のポテンシャルは計り知れない」と話す。

大量の研究者や技術者を抱える日本の大企業自らがヘッジファンド運用に乗り出すのは、過去に例がない。東芝が超高速マシンで業界の越境に成功すれば、「メーカーから金融業界へ」という、これまで一方通行だった人材の流れが変わる可能性もある。