

シミュレーテッド分岐マシンの金融分野への応用

Application of Simulated Bifurcation Machines in Financial Field

日高 亮 HIDAKA Ryo 濱川 洋平 HAMAKAWA Yohei 辰村 光介 TATSUMURA Kosuke

組み合わせ最適化問題は、社会や産業の様々な場面で頻繁に現れる重要課題として広く知られているが、量子コンピューター由来の東芝独自アルゴリズムを搭載したシミュレーテッド分岐マシン (Simulated Bifurcation Machine, SBMと略記) は、組み合わせ最適化問題を高速に解くことが可能である。

東芝グループは、2019年から、SBMの金融分野への応用に取り組んで来た。SBMによって、これまでは現実的な時間内で解くことが困難とされていた複雑・高度な組み合わせ最適化問題に基づく取引・投資戦略を実現できる。今回、SBMの金融分野への応用例として、SBMを用いた株式ポートフォリオ運用戦略を開発し、運用シミュレーションにおいて、従来のソルバーよりも6,230倍高速で、95%以上の高い解精度が得られることが確認できた。

The Toshiba Group has developed a Simulated Bifurcation Machine (SBM) equipped with a proprietary algorithm acquired through development of quantum computers. The SBM makes it possible to quickly solve combinatorial optimization problems which frequently arise in social and industrial settings.

Since 2019, we have promoted the expanding SBM application in the financial field to implement trading and investment strategies by solving complex and sophisticated combination optimization problems that were considered difficult to solve within a realistic time frame. We have developed a method to optimize stock portfolio investment strategies as an SBM application to financial products. We have also conducted simulation tests using actual historic market data and confirmed the effectiveness of this method, showing that the computation speed is 6 230 times faster than a conventional solver while achieving over 95% accuracy.

1. まえがき

組み合わせ最適化問題は、多数の選択肢から最良の組み合わせを求めめる問題であり、エネルギー需給計画、物流経路の最適化など様々な場面に現れ、その重要性が広く知られている。一方で、組み合わせ最適化問題は、その離散的な性質から、問題規模が増えるにつれ、解の探索空間が指数関数的に広がってしまう“組み合わせ爆発”のため、扱うことが難しいとされてきた。

こうした背景の中で、D-Wave社の量子アニーラー⁽¹⁾の登場(2011年)は新たな展開をもたらした。これは、イジングモデルという形式の汎用性の高い組み合わせ最適化問題を、量子力学的な原理で高速に解く専用計算機で、イジングマシンとも呼ばれる。量子アニーラーの発表は業界内での新しいアイデアや競争を刺激し、その後、様々なイジングマシンが提案されている。従来の計算機では扱いきれない組み合わせ最適化問題を高性能なイジングマシンで解けることから、その応用先にも注目が集まっている。特に金融分野は、市場規模と投資力の大きさから最も期待される分野の一つである。

東芝グループが独自に開発したSBMは、量子コンピューターの研究から生まれたシミュレーテッド分岐 (SB) アルゴリズム⁽²⁾を搭載したイジングマシンであり、高い性能と実用性を兼ね備えている⁽³⁾。SBアルゴリズムは、その高い計算並列性を特長とし、FPGA (Field-Programmable Gate Array) やGPU (Graphics Processing Unit) といった市販の並列プロセッサに実装することで、巨大な冷却装置や光学装置を必要とするようなほかのイジングマシンよりも優れた計算高速性を発揮する。SBMを金融分野へ応用することで、これまでは現実的な時間で終わることが困難であった複雑・高度な分析に基づく取引・投資戦略が可能になることから、新しい金融アプリケーションとして期待できる。

ここでは、SBMの金融分野への応用として、FPGA版SBMを用いた株式ポートフォリオ運用戦略について述べる。

2. シミュレーテッド分岐マシンの金融分野への応用

高速取引 (HST: High-Speed Trading) は、FPGA版SBMと最も相性の良いアプリケーションの一つである。HSTとは、市場の瞬時の価格変動に反応し、コンピューターにプログラミングされたアルゴリズムに基づき、典型的には

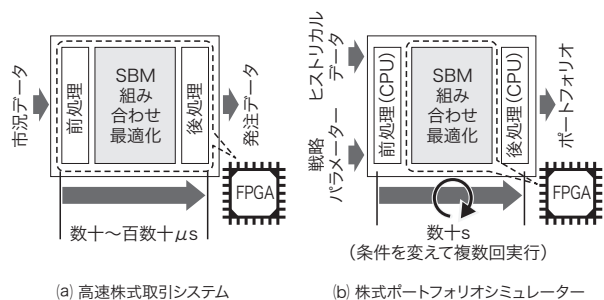


図1. SBMの金融分野への応用例

高速株式取引システムだけでなく、株式ポートフォリオシミュレーターでもSBMの高速性が活用できる。

SBM-based systems in financial field

数ms以下で取り引きする手法を指す。東芝グループが開発した高速株式取引システム⁽⁴⁾、⁽⁵⁾は、SBMだけでなく、市況データ受信から発注データ送信までの一連の処理を全て1チップのFPGAに収めることで数十から百数十μsでの取り引きを実現している(図1(a))。

一方、ポートフォリオ運用のような中長期的な投資戦略でもSBMの高速性は効果を発揮する。通常、投資戦略の開発で行われるヒストリカルデータ(過去データ)を用いたバックテスト(運用シミュレーション)では、異なるパラメーター設定でシミュレーションを繰り返し、戦略の改良を進めていく。4章で述べる株式ポートフォリオシミュレーターのように、計算困難な組み合わせ最適化をFPGA版SBMに任せれば、従来では1回10min程度掛かるシミュレーションを数十s程度で完了できる(図1(b))。

3. MISポートフォリオ戦略

SBMを用いた中長期的投資戦略の例として、市場グラフの最大独立集合(MIS: Maximum Independent Set)に基づき、相関の低い株式銘柄を組み合わせることで全体の共倒れを防ぐ“MISポートフォリオ戦略⁽⁶⁾”について述べる。

3.1 市場グラフの生成

市場グラフの生成方法を図2に示す。まず、銘柄*i*, *j*間の相関係数 C_{ij} を任意期間の値動きの類似性から計算する。次に、それらの C_{ij} を任意のしきい値 θ と比較し、 $C_{ij} \geq \theta$ であれば*i*, *j*間を接続し、そうでなければ切断する。このように生成した市場グラフは、株式銘柄間の相関の有無を表現しており、互いに接続がなく、ノード(銘柄)数が最大となる組み合わせ(MIS)でポートフォリオを構築すれば、個々の銘柄のリスク(株価の変動幅の大きさ)が相殺され、ポートフォリオ全体でのリスク低減が期待できる。

また、市場グラフの接続性は、 θ の値に敏感に反応し、

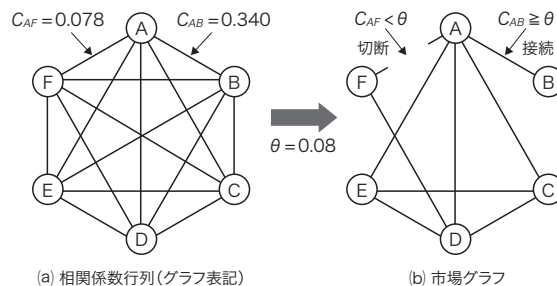


図2. 市場グラフの生成方法

C_{ij} を θ で2値化(接続か切断)し、市場グラフを生成する。

Market graph generation method

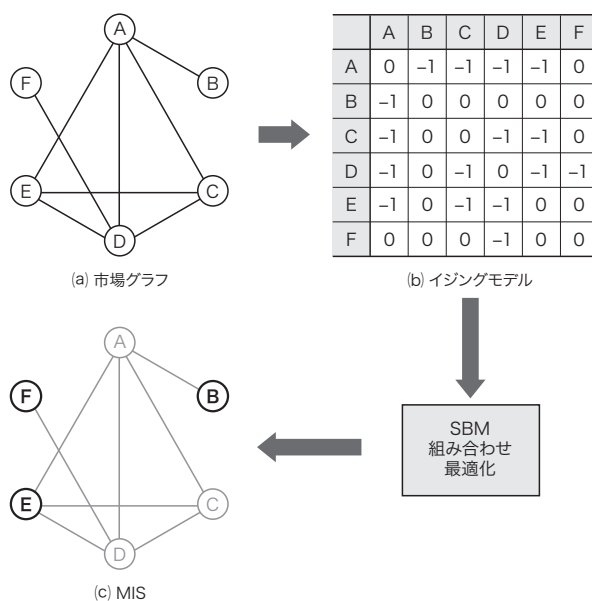


図3. 市場グラフからMISを得る方法

市場グラフをイジングモデルに変換し、SBMで解くことでMISが得られる。

Flow of processes to find maximum independent set (MIS) from market graph

ポートフォリオの運用成績にも強く影響する。 θ は、MISポートフォリオ戦略の重要な戦略パラメーターといえる。

3.2 シミュレーテッド分岐マシン-MISソルバーによるMISの探索

市場グラフの生成後、このグラフのMISを探索する。MISの探索(MIS問題)は、組み合わせ最適化問題であり、イジングマシンで解ける。図3に示すように、市場グラフをイジングモデルに変換し、SBMで解くことでMISが得られる。このSBMでMIS問題を解く構成を、SBM-MISソルバーと呼ぶ。

3.3 MISポートフォリオ構成比率の決定

SBM-MISソルバーによって得られたMISを、そのまま

ポートフォリオ構成銘柄として扱い、続いてポートフォリオ構成比率(各銘柄への資産配分方法)を決めていく。今回、ポートフォリオ構成銘柄に対して、(1)資産を均一に配分する等配分と、(2)ボラティリティー(価格変動の度合いを表す指標)の逆数に基づいて資産を配分する、逆ボラティリティー配分の2種類の配分方法を用いた。逆ボラティリティー配分は、価格変動の度合いが小さい銘柄を積極的に持つことでリスクの低減を狙う手法である。

4. MISポートフォリオシミュレーター

4.1 システム構成

MISポートフォリオシミュレーターは、CPUベースのサーバーとそれに接続されたFPGAカードによって構成される(図4)。SBMは、超並列回路としてFPGAに実装されており、シミュレーション全体で最も計算困難なMIS問題を担当する。ソフトウェアライブラリーは、FPGAに対する複雑な手続きを賄っており、ユーザーは、API(Application Programming Interface)関数を通じてSBMを扱える。

MIS問題以外の処理である、株式ヒストリカルデータからの市場グラフ生成、市場グラフのイジングモデルへの変換、SBMの解に基づくポートフォリオ構築はCPUで処理される。

MISポートフォリオシミュレーターのうち、市場グラフのCPUによるイジングモデルへの変換、ソフトウェアライブラリー、MIS問題のSBMによる求解がSBM-MISソルバーに該当する。

4.2 シミュレーテッド分岐マシン-MISソルバーの性能

SBM-MISソルバーの計算時間と解精度を評価するため、従来のMISソルバーであるNetworkXとOR-toolsとの比

較を行った。ここで、OR-toolsは、発見した解が最良であることを保証する厳密解ソルバー、SBM-MISソルバーとNetworkXは、最良解に近い解を高速に見つけ出すヒューリスティックソルバーに分類される。今回、東京証券取引所(東証)のヒストリカルデータから、ノード数が99, 222, 952, 2,026の市場グラフをそれぞれ10個生成し、ノード数別の計算時間、解精度の平均値を3種のソルバーで比較した(図5)。

計算時間は、図5(a)から、SBMの優位性が明らかに見て取れる。SBMは、全てのノード数でほかのソルバーより短時間でMIS問題を解いており、2,026ノードではNetworkXより6,230倍高速という結果であった。また、OR-toolsは、952ノード以降、タイムアウトエラーで解が得られなかった。

解精度は、3種のソルバーの中で、要素数が最大のものを基準とした相対比率で評価した(図5(b))。厳密解ソルバーであるOR-toolsの値は、必然的に100%となる。一方、SBM-MISソルバーは95%以上の高い数値で、同じヒューリスティックソルバーのNetworkXと比較しても全てのノード数で上回っており、高い性能が確認できた。

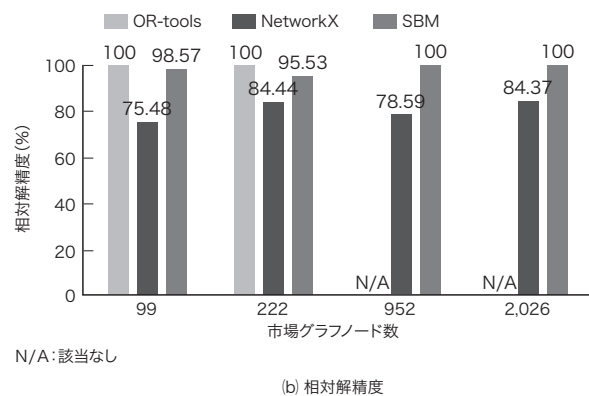
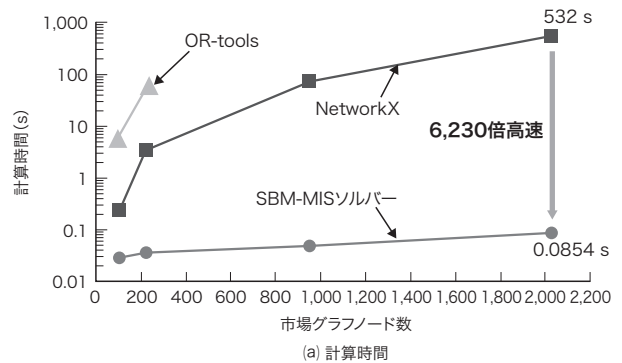


図5. 従来のMISソルバーとSBM-MISソルバーとの性能比較

SBM-MISソルバーは、2,026ノードのMIS問題ではNetworkXより6,230倍高速で、222ノード以下ではOR-toolsに近い解精度が得られている。

Comparison of performance between conventional and SBM-based MIS solvers

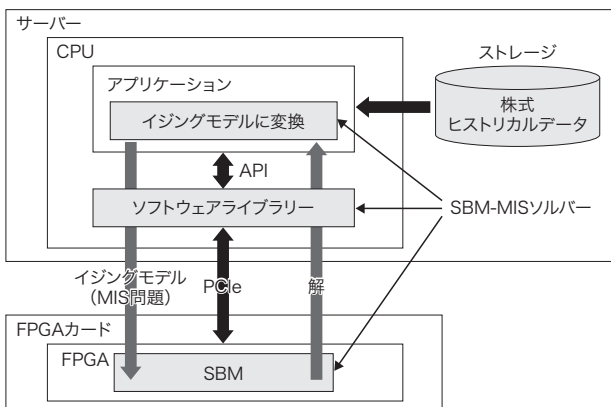


図4. MISポートフォリオシミュレーターの構成

シミュレーション中で最も計算困難なMIS問題をSBMで高速に解くことでシミュレーション全体の時間を短縮できる。

Configuration of MIS portfolio simulator

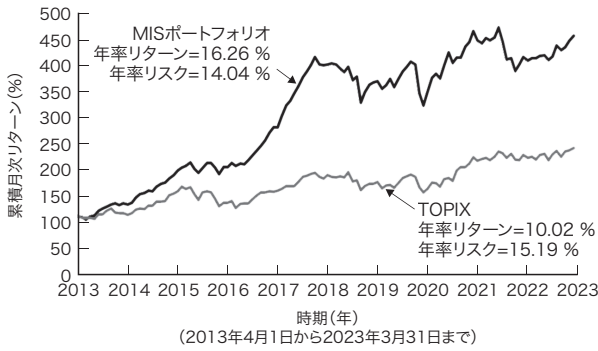


図6. MISポートフォリオ戦略のバックテスト結果

MISポートフォリオ戦略は、TOPIXよりも高い年率リターンと低い年率リスクを示している。

MIS portfolio strategy results compared with historic data at Tokyo Stock Exchange

4.3 MISポートフォリオ戦略のバックテスト結果

東証株価指数 (TOPIX) に基づく1,747銘柄を対象に、2013年4月1日から2023年3月31日の10年という長期間に及ぶMISポートフォリオのバックテストを行った。ポートフォリオのリバランス(構成銘柄の見直し)は、月に一度の頻度で、1テスト当たり120か月分の計算をすることになる。また、戦略パラメーター θ は、0.18から0.36まで0.01刻みで19パターン試行し、その中から代表パラメーターを選出した。つまり、120か月×19パターンで総計2,280個のMIS問題であり、NetworkXで2週間程度掛かる計算を、SBM-MISソルバーでは3 min強で解ける。

MISポートフォリオ戦略のバックテスト結果を図6に示す。今回、戦略パラメーター θ を0.23とし、資産配分方法は逆ボラティリティー配分の組み合わせを代表とした。MISポートフォリオ戦略での年率リターンはTOPIXを大きく上回り、累積月次リターンでもそれが表れている。更に、年率リスクも、MISポートフォリオはTOPIXを下回っており、相対的に高収益かつ低リスクなポートフォリオが構築できている。

5. あとがき

SBMの金融分野への応用例として、MISポートフォリオ戦略について述べた。この例は、SBMのMISソルバーとしての高い性能によって実現されたものであるが、着眼点や発想を変えることで、新しい戦略の開発が期待できる。

今後は、MISポートフォリオ戦略も含め東芝グループが取り組んで来た、SBMの金融分野への応用例をモデルケースとし、金融機関との連携も視野に入れながら、真に有益で社会的な価値のある金融戦略の共創に取り組んでいく。

文献

- (1) Johnson, M. W. et al. Quantum annealing with manufactured spins. *Nature*. 2011, **473**, p.194–198.
- (2) Goto, H. et al. Combinatorial optimization by simulating adiabatic bifurcations in nonlinear Hamiltonian systems. *Science Advances*. 2019, **5**, 4, eaav2372.
- (3) 東芝デジタルソリューションズ. “量子インスパイアード最適化ソリューション SQBM+™”. 東芝. <<https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/ai-iot/sbm.html>>, (参照 2023-12-25).
- (4) Tatsumura, K. et al. Pairs-trading system using quantum-inspired combinatorial optimization accelerator for optimal path search in market graphs. *IEEE Access*. 2023, **11**, p.104406–104416.
- (5) Tatsumura, K. et al. Real-time trading system based on selections of potentially profitable, uncorrelated, and balanced stocks by NP-hard combinatorial optimization. *IEEE Access*. 2023, **11**, p.120023–120033.
- (6) Hidaka, R. et al. Correlation-diversified portfolio construction by finding maximum independent set in large-scale market graph. *IEEE Access*. 2023, **11**, p.142979–142991.



日高 亮 HIDAKA Ryo

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
Computer and Network Systems Lab.



濱川 洋平 HAMAKAWA Yohei

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
Computer and Network Systems Lab.



辰村 光介 TATSUMURA Kosuke, Ph.D.

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
博士(工学) 米国電気電子学会(IEEE)会員
Computer and Network Systems Lab.