

量子コンピューターを用いた 工場内装置レイアウト最適化

玉井 秀明
谷川 兼一

前野 蔵人
石川 琢磨

労働人口減少や市場の製造コスト削減要求により、製造業はより一層の生産性向上を余儀なくされている。筆者らはこの課題を、近年注目を集めている量子コンピューターを活用して解決する手法を開発している。本稿では、開発した手法をOKIグループのプリンター事業会社であるOKIデータのLED統括工場の装置レイアウト最適化問題に適用した結果を述べる。

背景

国内の中長期的な労働人口減少に伴い、製造業の人手不足が大きな社会問題となっている。経済産業省が行った調査によると、人手不足は94%以上の大企業・中小企業で顕在化し、32%の企業はビジネスにも影響が出ていると回答している¹⁾。人手不足を抜本的かつ速やかに解消することは難しいため、当面は生産性を上げることで対処する他ない。また、市場のグローバル化により、大半の製造業者は厳しい国際競争にさらされている。コスト競争力のない製造業者は淘汰を余儀なくされる時代である。ここでも重要となるのが無駄を極限まで削減して製造コストを下げる努力、すなわち生産性の向上である。

モノづくりの現場の生産性向上とは、製造資源（働き手や生産設備、原料など）のスケジュールや配置、配合比などを最適化し、コストや時間を削減することに他ならない。一般に、さまざまな制約の下で多くの選択肢の中から、ある指標を最も良くする組合せを求めることを「組合せ最適化問題」という。モノづくりの現場には解くべき数多くの組合せ最適化問題が内在している。すなわち、これらの組合せ最適化問題を解くことで、生産性を向上が期待できる。しかし、実際の現場では組合わせるべき変数の数が非常に多く、それに伴って組合せ数も爆発的に増加する。そのため従来のノイマン型計算機では解くのが困難な問題が多かった。この課題を解決できると期待されているのが、量子コンピューターである。

量子コンピューターは量子力学を応用した超並列コンピューターである。従来のコンピューターに比べ圧倒的な計算能力を持つと期待され、世界中で活発に開発されて

いる。日本でも量子コンピューターを含む量子技術を重要な基盤技術として位置づけ、国をあげて研究開発を推進している²⁾。

量子コンピューターには大きく分けてゲート型とアニーリング型と呼ばれる2種類が存在する。ゲート型は汎用的な計算が可能であると期待されている。2019年、Googleはスーパーコンピューターを凌ぐ性能をもつ53量子ビットのゲート型量子コンピューターを開発したと発表し、世界を驚かせた³⁾。しかし実用に耐えられる性能を備えるには解決すべき技術課題が山積み、実用化にはしばらくの時間を要する見込みである。

一方、アニーリング型量子コンピューター（以下、量子アニーラ）は組合せ最適化問題の計算に特化した量子コンピューターである。ゲート型に比べるとシンプルに実現できるため、比較的多くの量子ビットを持つ量子アニーラが開発されている。2014年にカナダのD-Wave社⁴⁾が量子アニーラの商用リモートアクセスサービスを世界に先駆けて開始した。ユーザーは大型で高価なハードウェアを購入することなく量子アニーラを利用できるようになり、実用化への期待が一気に高まった。

このような中、筆者らは冒頭で述べた製造業の課題を含む、さまざまな社会課題を量子アニーラを使って解決することを目指して応用技術を開発している。その中で確立した基礎的な計算技術を社内事例に適用して検証するために、OKIグループのプリンター事業会社であるOKIデータのLED統括工場の装置レイアウト最適化問題に取り組んだ⁵⁾。次にその詳細を述べる。

工場レイアウト最適化問題

OKIデータのLED統括工場では、製造工程の異なる複数の製品を、数十～数百台におよぶ多種類の半導体製造装置を共用し、装置間を作業員が移動して製造している。生産性向上のためには、装置の配置を最適化し、作業員の移動距離（以下、動線）をできるだけ短くする必要がある。装置配置の組合せ数はおよそ 10^{76} 通りであり、そのすべてを評価するには、高性能なコンピューターを用いても

10⁵¹年程度要する計算規模である。以下、最初に解くべき問題設定を説明し、次に量子アニーラを用いて今回の問題を解く手順を説明し、最後に得られた結果を述べる。

(1) 問題設定

工場では作業員が同一の装置群を用いて部品を加工し、複数の製品を製造している。製造工程は製品ごとに異なるが、使用する装置は一部重複している。製造工程とは、製品を作る際の工程順と、各工程で用いる装置を記したものである。作業員は製造工程に従って部品を加工し、加工が終了したら次の工程で用いる装置へ移動し別の加工を施す。全製造工程を終えると、一つの製品が完成する。

工場のレイアウトを模式的に表した俯瞰図を図1に示す。工場はベイと呼ばれる小間が複数集まって形成されている。ベイの中には部品を加工する多種類の装置がある。装置を置く場所をここではスロットと呼ぶ。ベイ間及びベイ内の装置間は通路で結ばれ、作業員が自由に行き来できる。

このとき、装置配置を最適化して、一つの製品を完成させるまでの動線をできるだけ短くすることが本問題の目的である。複数製品を製造するので、評価の指標は各製品の動線の平均値とする。より多く製造する製品の動線を短縮したほうが全体の動線を短縮できるため、各製品の製造数比(ロット数比)で重みづけして算出する。

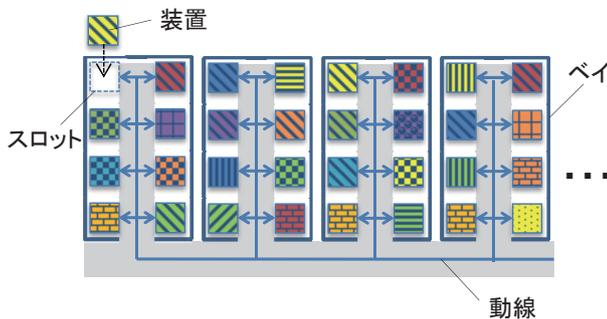


図1 工場レイアウト

(2) 問題解決手法

量子アニーラはイジングモデルと呼ばれる統計力学モデルに対し、そのエネルギーが最小となるスピン変数を実験的に求める装置である⁹⁾。従って、量子アニーラを用いて組合せ最適化問題を解くには、対象となる問題をイジングモデル、若しくはそれと等価のQUBO (quadratic unconstrained binary optimization)と呼ばれるモデルで定式化する必要がある。QUBOのエネルギー関数は次の(1)式で与えられる。

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{i < j} J_{ij} x_i x_j + \sum_i h_i x_i \quad (1)$$

QUBO変数 x_i は0または1の2値をとるバイナリ変数である。量子アニーラは J_{ij} と h_i を入力パラメータとするエネルギー関数 E を最小にする変数 x_i の値を求める装置、と換言できる。

最初にQUBO変数をどのように定義するかを考える。今回算出する対象は装置配置、すなわちどのスロットにどの装置を配置するか、である。算出対象をそのまま変数にすると、答えが直接求められるため都合がよい。従って、QUBO変数を次の(2)式で定義した。

$$x_{s,d} = \begin{cases} 1: \text{スロット } s \text{ に装置 } d \text{ を配置する} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases} \quad (2)$$

次に変数 $x_{s,d}$ を用いて目的関数(ここでは動線の距離)をQUBOモデルで表現する。そうすることで量子アニーラが算出する、エネルギー関数が最小となる変数値が、最短の動線を実現するレイアウト装置配置と一致ようになる。本問題のエネルギー関数を次の(3)式に示す。

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{u,t,s',s''} x_{s',d_u[t]} \cdot x_{s'',d_u[t+1]} \cdot L(s',s'') + \sum_s \left(\sum_d x_{s,d} - 1 \right)^2 \cdot p + \sum_a \left(\sum_s x_{s,d} - 1 \right)^2 \cdot p \quad (3)$$

ここで s',s'' はそれぞれ i 番目及び $i+1$ 番目の工程で使用する装置が配置されているスロット、 $L(s',s'')$ はスロット s',s'' 間の距離、 $d_u[t]$ は製品 u の t 番目の工程で用いる装置、 p はペナルティ係数である。(3)式の第1項は最小化したい目的関数、すなわち動線距離を表している。第2項及び第3項は制約条件を表している。ここでの制約条件とは、①一つのスロットには必ず一つの装置を配置する、及び②一つの装置は必ずどこか一つのスロットに配置されるという基本的な条件である。第2項及び第3項はそれぞれ制約条件①及び②に対応している。この制約条件の強さをパラメータ p で調整している。 p を大きくしすぎると制約は満たされるが、

短い動線を実現する良い解を得るのが困難になり、逆に p を小さくしすぎると制約を満たさない解を得る確率が高くなる。従って、適宜実験もしながら適切なパラメータ値を設定する必要がある。

最後に(3)式を展開してQUBOモデルの式(1)の形に変形し、量子アニーラに輸入する計算パラメータ J_{ij} と h_i を求める。得られた計算パラメータを量子アニーラに輸入し計算を実行する。今回の問題は変数の量が多く、量子アニーラで一度に計算できる規模を超えていたため、問題を分割して繰り返し計算を実行した。解がある程度収束するまでに要した時間は約30分であった。量子アニーラから出力された解(すなわち $x_{s,d}$ の値)が有効であるかを十分吟味し、有効と判断された解が、最終的に最適化された装置配置となる。

(3) 計算結果

最適化前の装置配置(現状の装置配置)と計算結果を比較することで、その良否を評価した。

最適化前後での動線距離を算出した結果を表1に示す。

表1 動線距離計算結果

(a) ロット数比(製品1):(製品2)=1:4			
	最適化前	最適化後	増減率
製品1	1,510	1,284	-15%
製品2	2,876	2,036	-29%
平均	2,603	1,886	-28%

(b) ロット数比(製品1):(製品2)=1:1			
	最適化前	最適化後	増減率
製品1	1,510	961	-36%
製品2	2,876	2,307	-20%
平均	2,193	1,634	-21%

(c) ロット数比(製品1):(製品2)=4:1			
	最適化前	最適化後	増減率
製品1	1,510	832	-45%
製品2	2,876	2,484	-14%
平均	1,783	1,162	-24%

距離は規格化しているため、単位は任意である。製造する製品は二つ(製品1と製品2)、ロット数比を(a)1:4、(b)1:1、及び(c)4:1の3通りで計算した。製品1及び2ともに装置配置を最適化することで、いずれのロット数比でも動線距離

が短縮されていることがわかる。また、ロット数の多い製品の動線をより重点的に削減するようなレイアウトを算出していることがわかる。ロット数比で平均した結果を見ると、最適化によりいずれのロット数比でも20%以上の動線短縮を実現していることがわかる。

以上の結果より、①工場レイアウト最適化問題が式(3)で正しくQUBOモデルに定式化されていること、②量子アニーラがモデルのエネルギーを極力小さくする解を出力していること、そして③最適化することで有意な動線改善効果が得られることが確認できた。

まとめと今後の展望

量子アニーラを用いて実際の工場のレイアウト最適化問題に取り組んだ。実問題を算出可能な形式に定式化し、量子アニーラで解を求めた。その結果、動線を平均20%以上削減可能なレイアウトを算出することに成功した。しかし先述したとおり、今回の問題は変数の量が多く、量子アニーラで一度に計算できる規模を超えていたため、問題を分割して繰り返し計算を実行した。有限時間で計算を打ち切っているため、得られた解は真の最適解から乖離していると考えられる。今回より更に規模の大きい問題を解く際は、この傾向がより顕著になると予想される。量子アニーラのハードウェア性能の進展に期待しつつ、最適に近い解を効率的に得るための古典コンピューターとの処理分担方法や問題分割方法を検討する必要がある。以上が今回の試行を通して見えてきた技術課題である。

今後はこれらの技術課題に取り組み、労働力不足に対応した生産性向上などの社会課題の解決に貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省:製造業における人手不足の現状 および外国人材の活用について、2018年7月12日、
<https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180712005/20180712005-2.pdf>
- 2) 内閣官房イノベーション推進室:量子技術イノベーション戦略、2020年、
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>
- 3) Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al.:Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, Nature, 574, pp.505-510, 2019
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>
- 4) D-Wave Systems Inc.: <https://www.dwavesys.com/>

5) OKIプレスリリース:OKIとOKIデータ、製造現場の最適化実問題に量子コンピューターを適用、2019年9月5日、
<https://www.oki.com/jp/press/2019/09/z19038.html>

6) 田中宗、棚橋耕太郎、本橋智光、高柳慎一:量子アニーリングの基礎と応用事例の現状、低温工学、53巻、5号、pp.287-294,2018

● 筆者紹介

玉井秀明:Hideaki Tamai. イノベーション推進センター AI 技術研究開発部

前野蔵人:Kurato Maeno. イノベーション推進センター 企画室

谷川兼一:Ken-ichi Tanigawa. コンポーネント&プラットフォーム事業本部 開発本部

石川琢磨:Takuma Ishikawa. コンポーネント&プラットフォーム事業本部 開発本部

TiPo 【基本用語解説】

量子コンピューター

量子力学的な状態(0と1の重ね合わせ)を情報処理の単位(量子ビット)として利用するコンピューターの総称。汎用的な演算が可能なゲート型と、組合わせ最適化問題に特化したアニーリング型に分類できる。

量子アニーラ(アニーリング型量子コンピューター)

量子ビットの重ね合わせと量子ビット間の結合を利用し、最適な組合わせを導くことに特化したコンピューター。

イジングモデル

上向きまたは下向きの二つの状態をとるスピンから構成される、磁性体の性質を表す統計力学上のモデル。

*本文に記載されている会社名、商品名は一般に各社の商標または登録商標です。