

Vol. 163

## CONTENTS

- 【コラム】ソフトウェア開発経験者が見た大学教育の現場…大江 秀幸  
【解説】プログラミング体験ゲーム「アルゴジック」の新機能—新しいステージに向けて—…大山 裕  
【解説】量子人材 1,000 万人時代を目指した高校生向けの量子情報教育…福永 智渉



## COLUMN

### ソフトウェア開発経験者が見た大学教育の現場

筆者は大学卒業後、約 30 年間ソフトウェアの開発に従事し、最近、教える側として大学に戻った。ここでは企業での経験を踏まえた感想などについて書いてみたい。

まず授業がとにかく丁寧で驚いた。授業中に学生の理解度を何度も確認し、学生の席の間をくまなく周って質問がないかを問いかける。真面目な学生は、先生が近づくの待って小声で質問する。あまり真面目ではない学生はスマホをそっと脇に置き、教科書をめくるフリをする。上手い先生は絶妙な周回タイミングで、授業をコントロールしている。

ツール類も積極的に利用する。30 年前の先生は黒板に板書し、学生はそれをノートに書き写したが、今はプレゼンツールが主流である。座席近くにはモニターもあり「見えない」などのクレームはない。宿題・課題の説明時には、教室にシャッター音が響く。授業内容を動画に記録し、復習できるように配慮している先生もいる。ツールと言えば、対面のみ授業でオンラインツールから質問されて面食らったことがある。ツール利用の方が口頭より簡単ということだろうか。

30 年前の先生は、難解な内容であっても丁寧な説明はしなかった。理解不足は勉強の足りない学生の責任であると、学生側も思っていた。もちろん、授業のすべてを理解できたのではない。少なくとも筆者は残り単位数から「選択と集中」をし、自身の勉強の失敗を引き受けたのだが、現在、理解不足は先生の責任に変わっているようだ。

企業経験の長い私が、このような構造の変化を知らなかったことは、重要なポイントである。恐らくほとんどの企業人は、表面的な変化しか理解していないのではないだろうか。

懸念は「失敗しない」学生が多くなっていることだ。授業が理解できないのは、自身ではなく先生の失敗としておくことができる。このような学生が卒業し、失敗経験の少ないまま企業で活躍するのは困難である。企業では当然、「後で会議内容を動画で確認する」とか「誰かが理解度の確認をしてくれる」ことなどはない。受け身ではなく、ソフトウェア開発では設計意図など、適時自身の考えを発信し、失敗をリカバーすることが求められる。

学校と企業のギャップは、入社後に誰かが埋めることになる。そのとき、一番大きなギャップを埋めなければならないのは、新入社員ではないだろうか。失敗させないのではなく、学生の間ぐらい、伸び伸びと失敗できる環境があった方がよいように感じている。



大江秀幸 (大阪工業大学 / 羽衣国際大学) (正会員) [hideyuki.ooe@gmail.com](mailto:hideyuki.ooe@gmail.com)

1991 年から 2021 年まで一般企業にて、主に組み込みソフトウェア開発に従事。大阪工業大学、羽衣国際大学非常勤講師。博士 (情報科学) (大阪大学)、技術士 (情報工学部門)。

# プログラミング体験ゲーム「アルゴロジック」の新機能 —新しいステージに向けて—

大山 裕

## プログラミング体験ゲーム「アルゴロジック」

プログラミング体験ゲーム「アルゴロジック」は、(一社)電子情報技術産業協会(JEITA)が開発した、ゲーム感覚でプログラミングを体験する課題解決型ゲームソフトである。プログラミング経験のない人でも楽しみながらプログラミングをするための考え方(プログラミング的思考)を習得することに役立つ。2010年3月にFlash版アルゴロジックをJEITAのWebページで公開を開始し、2020年7月にHTML5版にリニューアルした。アルゴロジックは、パソコンやタブレット、スマホで使用可能であり、インターネット環境があれば、ユーザ登録やダウンロードが不要で、無料で使用できる(文献1, 文献2, 文献3)。

アルゴロジックは、コマンドブロックを並べることでロボットに動き方を指示して課題をクリアするブロックプログラミング型ゲームである。プログラムの3つの基本構造のうち、順次処理/反復処理を体験できるアルゴロジック1と、順次処理/反復処理/分岐処理すべてを体験できるアルゴロジック2がある。

アルゴロジック1では、ユーザは「前進」「右進」「左進」「回転」「くり返し始め/終わり」のコマンドブロックを使用して課題をクリアする。アルゴロジック1の課題には、問題画面(ステージ)にあるすべての旗を取る「フラッグパターン問題」とステージ上に書かれた線を外れないようになぞる「図形パターン問題」の2種類がある(図-1)。

アルゴロジック1は、旧学習指導要領における共通教科「社会と情報」を受講する高校生にもプログラ

ミングのさわりの部分を体験してもらいたい、との趣旨で開発した。公開当初より、入門から上級までさまざまな難易度の問題を提供していたが、「難易度を下げた問題を増やしてほしい」という要望があったことから、入門レベルの問題を集めた「ジュニア問題」をリリースし、それまでの問題を「チャレンジ問題」と再定義した。ジュニア問題のリリース以降、中学校や小学校高学年の児童を対象とした授業やプログラミング教室で使われることが多くなった。

アルゴロジック2は、アルゴロジック1をリリース後、「分岐処理についてもサポートしてほしい」という多くの声に応じて開発した。「前進」「右進」「くり返し始め/終わり」および「IF前に壁/ELSE/END」のコマンドブロックを使用してフラッグパターン問題をクリアする。アルゴロジック1ではすべてのコマンドブロックを実行した後にクリア判定を行っていたが、アルゴロジック2では画面上の旗をすべて取った時点で課題クリアと判定する。こうすることで、繰り返し処理で無限ループを使用できるようにした。分岐処理が入ることで難易度が上がったこともあり、アルゴロジック2は中学生以上

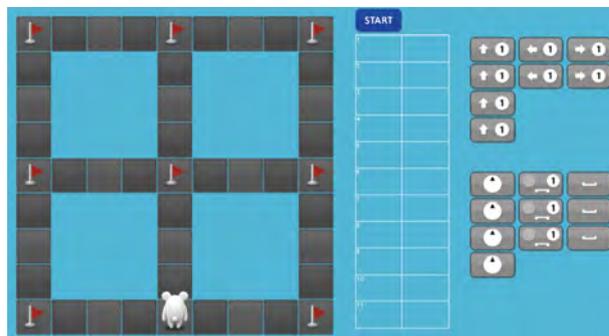


図-1 アルゴロジック1(問題21「田」)

を対象として授業やプログラミング教室で使用されることが多い(図-2)。

アルゴロジックの1つの特徴は、最善手順(◎)と次善手順(○)の概念を導入したことである。アルゴロジックでは問題をクリアする手順は1つとは限らない。アルゴロジックでは、より短い手順でクリアすることを目指すよう推奨している。あらかじめ設定した最短手順と同じ手順数でステージクリアした場合、「クリア! That's great!!」のメッセージが表示され、問題リスト上の問題名に◎が付与される。最短手順でないステージクリアの場合は、「クリア! Good job!」のメッセージが表示され、問題リスト上の問題名に○が付与される(図-3)。

2段階のクリア判定により、「まずは○の取得を目指し、可能であれば◎の取得を目指す」のスタンスで授業をすすめることで、進捗が早い児童・生徒にアルゴリズムを改良するモチベーションを与えつつ、授業中の児童・生徒間の進捗度差異を緩和することができる。

## アルゴロジックに内在する課題

アルゴロジックの公開開始から約15年経った。その間もさまざまな改良を加えてきているが、いくつかの課題が内在している。

### □課題1: レベルごとの問題数の不足

アルゴロジックは、プログラミングの初心者から

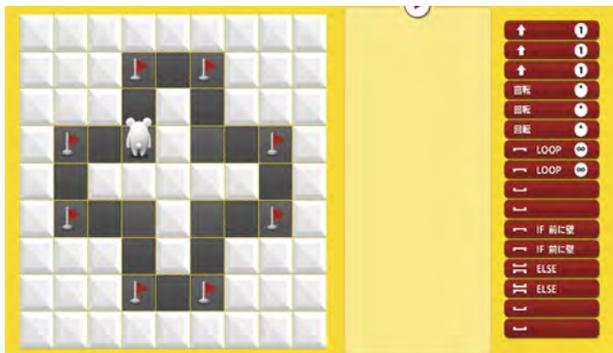


図-2 アルゴロジック2 (問題17「十字回廊2」)

上級者まで幅広いユーザーを対象としており、さまざまなレベルの問題を提供している。このため、レベルごとに提供される問題数には限りがある。教育現場からの要請でジュニア問題を追加したものの、同じレベルの問題をドリル的にたくさん解くには、問題数が十分とは言えない。

### □課題2: SNSの影響

アルゴロジックは、元々解答例を公開しない方針を取っていた。これは、どんなに時間がかかっても自分の力で解答を得ることが重要と考えたためである。ただし、先生が授業で使用するためには解答例を知っておくことが必要であろうとの判断により、アルゴロジック1のジュニア問題についてはWebページの「教育関係者の皆様へ」のページ<sup>☆1</sup>に解答例を掲載することとした。アルゴロジック1のチャレンジ問題とアルゴロジック2については現在も解答例を公開しておらず、先生から提供依頼があった場合に、都度解答を提供している。

しかし、最近ではSNS上に解答例が散見されるようになり、アルゴロジックの問題を出したときに、自分で考える代わりにSNSで解答例を調べてしまう児童や生徒が現れるようになった。

### □課題3: 新作問題のリクエスト

アルゴロジックの問題をすべて解いてしまったユーザーから、新作問題のリクエストが寄せられている。また、実際に授業でアルゴロジックを使用して

☆1 <https://algo.jeita.or.jp/educational.html>



図-3 問題リスト◎○表示(アルゴロジック1)



いる現場の先生から、SNS では解答が得られないオリジナル問題が作りたいとの希望が寄せられている。

## アルゴロジック問題作成ソフト 「アルゴロジック EX」

JEITA は、前記の課題への対策として、「プログラミングを教える先生が自分でアルゴロジックの問題を作ることができる機能」の検討を開始し、2024 年 10 月にアルゴロジック問題作成ソフト「アルゴロジック EX」をリリースした。

アルゴロジック EX は、問題作成者(先生)がアルゴロジックの問題を自分で作成して問題解答者(生徒)に提供するためのツールである。アルゴロジック 1 の問題(フラッグパターン問題)を作成するためのアルゴロジック 1EX とアルゴロジック 2 の問題を作成するためのアルゴロジック 2EX がある。

問題解答者は、問題作成者から受け取った問題 URL をブラウザに入力することで、アルゴロジック EX を起動し問題を表示することができる。

アルゴロジック EX の問題は、アルゴロジック EX サイトの URL に問題データをパラメータとして付与した問題 URL として実現される(図-4)。

問題データに解答手順を付与することで、問題表示時に解答手順を表示することができる。作成中の問題の動作確認のための機能であるが、問題解答者にヒントを与えることにも使用できる。

アルゴロジック EX は問題リストを使用しないため、問題をクリアした際に◎と○に相当する画像メッセージをオーバーレイ表示することにした。これは、生徒が問題クリア画面をキャプチャして先生に提出するという使用シーンを想定している(図-5)。

従来のアルゴロジックと違い、アルゴロジック EX はどんな問題データが入力されるか事前予測ができない。このため、不正フォーマットが入力されてもソフトがストールすることがないように、エラーチェック機能を大幅に強化している。

## 問題作成支援ツール

問題 URL はテキストエディタでも作成することができるが、問題 URL 作成用に 2 種類のツール(Excel ソフト)を Web ページで無償公開している<sup>☆2</sup>。

### • アルゴロジック EX かんたん作成支援ツール

ステージサイズ 7×7, 9×9, 11×11 の問題を作成するのに適したツールである。Excel シート内のステージ領域に旗や障害物などを書き込むことで、問題 URL を生成することができる(図-6)。

### • アルゴロジック EX 問題作成支援ツール

任意のステージサイズの問題 URL を作成するためのツールである。別途用意されている「アルゴロジック EX 問題ワークシート」で問題レイアウトなどをデザインしてから使用する。

アルゴロジック EX の問題 URL  
= アルゴロジック EX の URL + 問題パラメータ  
問題パラメータ = ①問題データ + ②問題の名称  
+ ③解答手順

① 問題データ (必須) の構成要素

- \* ステージ(縦横)のサイズ
- \* 使用できる各コマンドブロックの数
- \* スタート時のキャラクターの向き
- \* 想定する最短手順数
- \* ステージレイアウト  
(障害物, 旗, ロボットの初期位置)

② 問題の名称 (任意)

③ 解答手順 (任意)

図-4 アルゴロジック EX 問題 URL



図-5 問題クリア画面(最善手順◎, 次善手順○)

<sup>☆2</sup> <https://algo.jeita.or.jp/release/index.html>

## 想定する使用シーン

アルゴロジック EX は、以下のような使用シーンを想定している。

- ▶ 生徒のレベルに合わせた問題を作成する。
- ▶ テストや宿題用に新作問題を作成する。
- ▶ 問題とともに誤った手順や次善手順を表示して、正しい手順や最善手順を考えさせる。
- ▶ 授業やクラブ活動の場で、オリジナル問題を作成し、みんなで解き合う。

## 新しいステージに向けて

アルゴロジック EX のリリースをもって、アルゴロジックの機能強化を一区切りとしている。今後は、情報発信やプログラミング講座などの活動を通じてアルゴロジック (EX を含む) をより広く知っていただくことで、微力ながら若年層のプログラミング教育のお役に立てればと考えている。

SNS などに問題と解答例を投稿し参照できる環境の作成は重要である。特に、授業で使用できる問題の共用ライブラリ化はぜひ実現したい。また、マニアックな難問などさまざまなタイプの問題を投稿する場やコミュニティができると、アルゴロジックの輪が広がるであろう。さらに、幼児や高齢者など幅広い利用者が、楽しみながら手と頭を使う道具として、アルゴロジックを生涯学習の場で活用することも有効であると考えている。

### 参考文献

- 1) 大山 裕：アルゴリズム体験ゲーム「アルゴロジック」、情報処理, Vol.53, No.3 (Mar. 2012).
- 2) 大山 裕：「アルゴリズム体験ゲーム」から「プログラム体験ゲーム」へ—アルゴロジック 10 年間の歩みと今後—, 情報処理, Vol.61, No.12 (Dec. 2020).
- 3) アルゴロジック Web ページ, <https://algo.jeita.or.jp/>

(2024 年 12 月 24 日受付)



大山 裕 ohyamayutaka@gmail.com

(一社) 電子情報技術産業協会 (JEITA) IT 人材育成 WG 主査就任時にアルゴロジックを開発。JEITA 定年退職後もプログラミング教室講師等で普及活動に参画している。本会初等中等教育委員会委員。

### 問題の作り方

① 旗、壁、ロボットをステージにおく  
旗は「P」、壁は「X」、ロボットは「A」

② 使えるコマンドブロックの数を、それぞれ書く

③ さいしよのロボットの向きを、8つから選んで書く  
(上、下、左、右、右上、右下、左上、左下)

④ クリアするのに必要最小な、コマンドの段数を書く

⑤ URLが表示されたら、クリックして問題を見る

LibreOfficeの場合はCtrlを押しながらクリックする

① 旗、壁、ロボットをおくのに、これをコピーして使うとカンタン!

② コマンドブロックのリスト:

コマンドブロック	最大数
前進	4
右進	4
左進	4
回転	4
繰返し	3

③ コピー用 (ロボット) の向き:

上	下
右上	右下
右	左
右下	左上

④ コピー用 (コマンドブロック):

前進	回転
右進	繰返し短め
左進	繰返し終り

図-6 アルゴロジック EX かんたん作成支援ツール



# 量子人材 1,000 万人時代を目指した 高校生向けの量子情報教育

福永智渉

静岡県立大学

## 量子コンピュータとは

従来のコンピュータ（以下「古典コンピュータ」）では、解決に数万年、数億年単位の時間を要する問題があると予想されている。そのような問題の代表例として、充足可能性判定問題や最短経路探索問題、暗号解読などが挙げられる。

このような、古典コンピュータでは現実的な時間で解けない問題に対し、従来よりも高速に解くと期待されているのが、量子コンピュータである。量子コンピュータが実現されると、上記のような充足可能性判定問題や暗号解読などが、今よりも高速に実行できると考えられている。さらに、応用として量子力学のシミュレーションや物流の最適化、高度な機械学習についても高速に実行できると期待されている。

実用的な量子コンピュータはまだ実現できていない。そのため、量子コンピュータの物理的実現方法について、さまざまな研究が行われている。ここでは、代表的な方式を2つ紹介する。

1つ目の方式は、量子ゲート方式である。「量子コンピュータ」といわれた際には、こちらを指すことが多い。量子ゲート方式では、古典コンピュータで使用されている論理ゲートの代わりに「量子ゲート」とよばれる、量子ビットをほかの状態に移すような操作の組合せを用いて汎用的な計算を行う。

2つ目の方式は、量子アニーリング方式である。量子アニーリング方式はあとで述べる「イジングモデル」の基底状態探索問題の求解に特化した手法である。汎用性はないものの、比較的安定して大規模化することが可能である。量子ゲート方式と比べる

と、比較的大きなサイズの実機が実現している。

## 量子技術を扱う人材の育成への取組

現在、国内外で量子技術を活用する人材の育成が求められている。国内においては、内閣府の科学技術・イノベーション推進事務局が量子未来社会ビジョンを提唱しており、2030年までに量子技術の国内利用者1,000万人を目指すとしている<sup>1)</sup>。2030年の生産年齢人口（15～64歳）の出生中位（死亡中位）推計が約7,075万人であることを考えると、生産年齢人口の約7人に1人は量子技術に何らかの形で関与することとなる<sup>2)</sup>。つまり、さまざまなバックグラウンドを持つ人々を量子技術を扱う人材として育成することが求められる。

量子技術を扱う人材を育成するために、国内においてはさまざまな取組が行われている。本稿では、国内の代表的な取組として、NICT Quantum Camp（以下「NQC」）を紹介する<sup>☆1</sup>。NQCは情報通信研究機構が主催する量子ICT人材育成プログラムである。このプログラムでは、主に量子技術に興味を持つ初学者から、実際に量子技術にかかわる研究・実務を行っている人を対象として、公開セミナー、体験型人材育成プログラム、探索型人材育成プログラムを行っている。公開セミナーでは、量子技術の紹介や、日本の量子コンピュータ開発の取組などを発信している。このセミナーは、ほかのプログラムの導入に位置しており、これらのプログラムの修了生との交流の場も設けられている。体験型人材育成プ

☆1 <https://nqc.nict.go.jp/>（アクセス日 2025/01/14）

ログラムでは、対面やオンラインによる講義やグループワークなどが実施されている。講義では、量子コンピュータだけでなく、量子ICT、ネットワーク、社会実装など量子技術にかかわる幅広い内容を扱っている。また、講義だけでなく、量子コンピュータの実機見学やグループワークなど、講師や修了生、受講生同士の交流の場も提供している。体験型人材育成プログラムは申込時点で選考があるため、ある程度の量子技術に関する知見が必要となる。探索型人材育成プログラムでは、量子ICTにかかわる調査・開発・研究の実施に対して、予算の支援を行っている。また、大学や産業界において、量子ICTの研究開発にかかわっている人材と議論する機会や指導を受ける機会を得ることができる。

国内で行われている多くの取組は、情報科学や物理などを専門とする大学生以上を対象としており、量子コンピュータや量子技術の利用だけでなく、量子通信やハードウェアなど量子情報科学に関する内容全般を教えている。これは量子技術の研究者や開発者を育成することに対して有効である。しかし、線形代数のような理系大学の学部・学科でしか扱われない数学分野の知識が要求されるため、一般の高校生や文系出身の学生・社会人には難しい内容となっている。

諸外国においても、さまざまな取組が行われている。本稿では、国外の代表的な取組として、NationalQ-12 Education partnership（以下「Q-12」）を紹介する<sup>☆2</sup>。Q-12は、アメリカの国立科学財団と科学技術政策局によって設立された、中高生向けの量子情報教育に関するプログラムである。この取組では、数学やコンピュータサイエンス、物理、化学と量子情報を組み合わせたカリキュラム案や実験キットの提供を行っている。提供している教材の1つとして、Quantum Circuitsが存在する<sup>☆3</sup>。この教材では、日本における中学3年生～高校3年生を

対象としており、数学的な説明を使わず、ビットや論理ゲートが書かれたカードゲームなどを用いて論理回路や量子回路を教えている。Q-12以外の取組でも、Scratchやゲームを用いて、量子の概念や量子計算について学べる教材なども存在する<sup>☆4☆5</sup>。

諸外国では日本国内に比べ、一般の生徒を対象とする取組や公教育での実践が多くみられる。一方、国内で行われている取組は、前述のとおり、情報科学や物理などを専門とする大学生以上の人材を対象とするものが多い。また、現状では一般の高校生以下を対象とした人材育成の教材の開発や研究はほとんど行われていない。量子人材1,000万人育成を達成し、量子技術を扱うことが当たり前の社会を目指すには、現在の取組だけではなく、より広い方々を対象とした人材育成が必要である。たとえば、高度な数学の知識が無くても量子技術に触れることができ、中学校や高校などの公教育にも組み込めるようなカリキュラムを用意することが必要である。

## 量子アニーリングとパズル

「量子コンピュータとは」で言及したように、量子アニーリングはイジングモデルの基底状態探索問題に特化した手法である。イジングモデルの基底状態探索問題は、古典コンピュータでは現実的な時間で解くのが困難であると予想されている問題である。また、この問題が効率的に解ければ、暗号解読を始めとする、古典コンピュータにとって困難なほかの問題も従来よりも高速に解けることが知られている。

イジングモデルの基底状態探索問題とは、2次の項と1次の項からなる式1を最小化するような変数 $\sigma_i \in \{-1, 1\}$ を発見する問題である。

$$H(\sigma) = \sum_{i < j} J_{i,j} \sigma_i \sigma_j + \sum_{i=1}^N h_i \sigma_i \quad (1)$$

<sup>☆2</sup> <https://q12education.org/>（アクセス日 2025/02/07）

<sup>☆3</sup> <https://q12education.org/project/quantum-circuits>（アクセス日 2025/01/16）

<sup>☆4</sup> <https://quantumcomputing.ubc.ca/education/k-12-education>（アクセス日 2025/01/14）

<sup>☆5</sup> <https://scratch.mit.edu/studios/27046227/>（アクセス日 2025/01/14）



ここで、 $\sigma$ は変数の組 $\{\sigma_1, \dots, \sigma_N\}$ を表し、各変数はイジング変数とよばれる。 $J_{i,j}, h_i$ は問題によって定まる定数を表す。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ のイジング変数からなり、 $J_{1,2}=2, J_{1,3}=-1, J_{2,3}=-2, h_1=-1, h_2=-1, h_3=4$ となる例を式2に示す。

$$H(\sigma) = -\sigma_1 - \sigma_2 + 4\sigma_3 + 2\sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - 2\sigma_2\sigma_3 \quad (2)$$

また、イジングモデルは無向グラフで表すこともできる。図-1は式2を無向グラフとして表した例である。図-1において、各頂点はイジング変数を表す。各頂点 $\sigma_i$ には係数 $h_i$ が存在する。また、辺 $(\sigma_i, \sigma_j)$ には係数 $J_{i,j}$ が存在する。今回の例では、 $\sigma_1=1, \sigma_2=-1, \sigma_3=-1$ のときに式2は最小化され、そのときの $H(\sigma)$ は-7となる。

イジングモデルの基底状態探索問題以外の問題を解きたい場合には、その問題を式1のような2次の項と1次の項からなるイジングモデルの形で表現する必要がある。問題をイジングモデルとして表現する方法として、問題の構造に着目する方法がある。この方法では、問題の構造を分析し、細かい構造に分解する。これらの構造が、すでにイジングモデルの形で表現されているならば、その式を利用して問題解決を行うことができる。つまり、事前にさまざまな問題の構造をイジングモデルとして表現しておけば、ライブラリのようにその式を組み合わせることで未知の問題を解くことが可能である。

互いに共通する構造がある問題の例として、パズルが挙げられる。以下では、数独を例としてパズル

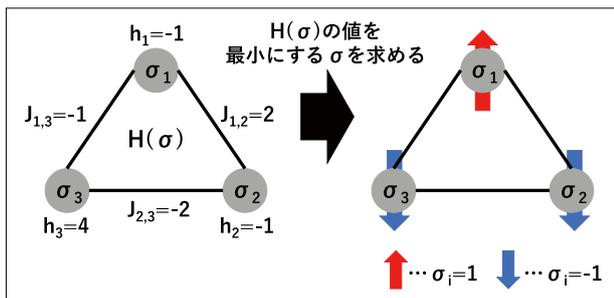


図-1 イジングモデルのイメージ

の構造をイジングモデルの形として表現する方法を説明する。数独のルールは以下ようになる。

### • 数独のルール

数独では、 $n^2 \times n^2$ のマス目状に仕切られた盤面が与えられる。さらに盤面は $n \times n$ の小ブロックに分割される。数独を解く際には、以下の条件を満たすように、各マスに $1 \sim n^2$ までの数字をいずれか1つ入れる。また、一般的な数独は、 $n=3$ となる。

1. 各空白マスには、必ず1つ数字が入る。
2. 同じ行に同じ数字は出現しない。
3. 同じ列に同じ数字は出現しない。
4. 同じ小ブロックに同じ数字は出現しない。

図-2に、 $n=2$ のときの数独の例を示す。図-2の数独の問題において、ルール2をイジングモデルの形で表現することを考えてみる。1行目に同じ数字が出現しないことは、式3で表現することができる。

$$H_{row_1} = (\sigma_{(1,1)}^1 + \sigma_{(1,2)}^1 + \sigma_{(1,3)}^1 + \sigma_{(1,4)}^1 + 3)^2 + (\sigma_{(1,1)}^2 + \sigma_{(1,2)}^2 + \sigma_{(1,3)}^2 + \sigma_{(1,4)}^2 + 3)^2 + (\sigma_{(1,1)}^3 + \sigma_{(1,2)}^3 + \sigma_{(1,3)}^3 + \sigma_{(1,4)}^3 + 3)^2 + (\sigma_{(1,1)}^4 + \sigma_{(1,2)}^4 + \sigma_{(1,3)}^4 + \sigma_{(1,4)}^4 + 3)^2 \quad (3)$$

式3中の $\sigma_{(i,j)}^k$ は、数字 $k$ がマス $(i,j)$ に入ったときに $\sigma_{(i,j)}^k=1$ となり、入らないときに $\sigma_{(i,j)}^k=-1$ となるようなイジング変数である。また、二乗のカッコ部分については、その行に特定の数字が何個出現するかを表現している。カッコ内において、 $\sigma_{(i,j)}^k=1$ となる変数が1個以下だった場合、そのカッコは1となる。一方、カッコ内で2つ以上の変数が $\sigma_{(i,j)}^k=1$ となったとき、そのカッコは1よりも大きな値となる。1行目について、1となる変数は、 $\sigma_{(1,1)}^1, \sigma_{(1,2)}^3, \sigma_{(1,3)}^4, \sigma_{(1,4)}^2$ である。これを式3に代入すると、確かに各カッ

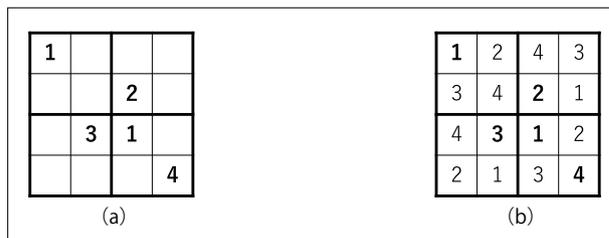


図-2 4×4の数独の例題(a)とその解答(b)

コ部分は最小値である1となることが分かる。よって、この式が最小値となれば、1行目に同じ数字が出現しないことになる。ほかの行についても同様に表現することができる。

上記のように、量子アニーリングでパズルを解く場合、問題をイジングモデルとして表現しなければならない。しかし、新しいパズルが与えられたときに、常に新たにイジングモデルを考える必要はない。すでにイジングモデルが示されているパズルと似た構造があれば、その構造を用いることで、イジングモデルとして表現することができる。

数独と似た構造を持つパズルとして、サムラインが存在する。サムラインのルールと例題を以下に示す。

### ● サムラインのルール

サムラインでは、黒マスと白マスからなる盤面が与えられる。さらに、行と列に関するヒントが与えられる。サムラインを解く際には、以下の条件を満たすように、各マスに1～9の数字をいずれか1つ入れる。

1. 各空白マスには、必ず1つ数字が入る。
2. 同じ行に同じ数字は出現しない。
3. 同じ列に同じ数字は出現しない。
4. 白マスがs個連続する部分はs桁の数字として考える。このとき、各行各列に入る数の合計が、その行または列に対応するヒントと一致する。

図-3に、サムラインの例を示す。

数独とサムラインでは、パズルを見てみると、与えられる問題という点では、どちらもマス目状に仕切られた盤面が与えられる。また、解答の仕方も、マスに数字を入れるという点が共通している。さらに、



図-3 サムラインの例題(a)とその解答(b)

数独のルール1, ルール2, ルール3とサムラインのルール1, ルール2, ルール3は同様となる。つまり、ルール2については、式3と同様のイジングモデルを使うことができる。ほかの共通するルールについても、数独と同様のイジングモデルで解くことができる。

このように、パズルは与えられる問題や解答方法、ルールに着目すると、似た構造が多く存在する。そのため、さまざまな構造をイジングモデルとして表現しておけば、新しいパズルに対して、既存のイジングモデルを組み合わせることで、問題を解くことができる。イジングモデルを組み合わせるイメージを図-4に示す。

### 量子アニーリングとパズルを活用した人材育成

量子人材を増やすには、まず量子技術を知ってもらい、興味を持ってもらうことが重要である。そのためにも、高度な知識がなくても量子技術に触れることができる教材が必要となる。

現在、量子コンピュータで題材となるのは、機械学習や最短経路探索問題などである。それらの問題

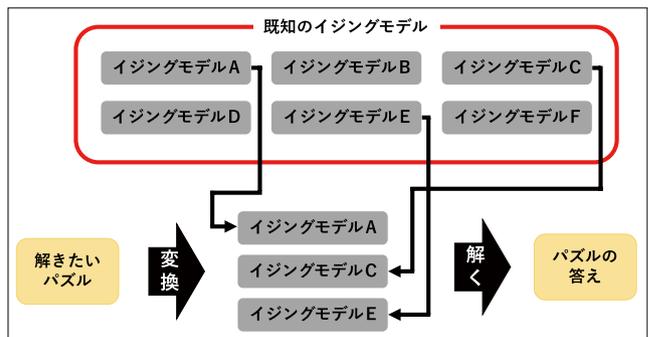


図-4 イジングモデルを組み合わせるイメージ



は、一般の生徒には身近ではなく、問題を理解するところから始める必要がある。また、量子ゲート方式の量子コンピュータは、古典情報処理の AND, OR, NOT とは異なる各ゲートの働きを理解するために、高度な数学の知識が必要となる。量子アニーリング方式の量子コンピュータについても、解きたい問題をイジングモデルとして表現するために、数学の知識が必要となる。

以上を踏まえて、本節では一般の高校生以下を対象とした量子情報教育を構想した教材を示す。教材は量子アニーリングとパズルを題材としており、高度な知識がなくても、量子アニーリングによる問題解決を体験できることを主眼においている。一部は文献<sup>3)</sup>で発表済みであるがそれも含めて述べる。また、本教材は現在はまだ構想の段階である。

題材とするパズルは、機械学習や最短経路探索問題に比べると高校生にとって身近な存在である。さらに、知らないパズルであっても、問題設定やルールをすぐに理解することができる。また、「量子アニーリングとパズル」で言及したように、似た構造が多く存在するため、解きたいパズルで使用する構造のイメージが付きやすい。量子アニーリングについては、実機やシミュレータが多く存在し、無料で使うことも可能である。さらに、量子ゲート方式よりも大規模な問題を扱うことができる。

量子アニーリングでは、解きたい問題をイジングモデルとして表現する部分について、数学的知識が要求される。よって、本教材では、各パズルに共通する構造を表す式1のイジングモデルを日本語として表現し、条件ブロックとする。これにより、ブロックを組み合わせるだけで、高度な知識なしに解きたい問題をイジングモデルとして表現することができる。そして、ブロックをそのまま入力として量子アニーリングで実行することで、量子アニーリングを用いて問題解決をする一連の流れを体験することができる。

本構想では、次のような流れで教えることを想定している。まず量子コンピュータや量子アニーリン

グの概要、応用例について説明する。触れる内容としては、以下が考えられる。

#### • 量子コンピュータのコンセプト

- 現在多く利用されている古典コンピュータでは、解決に数万年、数億年の時間がかかると予想されている問題がある。
- 上記の問題を、従来よりも高速に解くと考えられているものとして、量子コンピュータが存在する。
- 古典コンピュータは、0と1を用いてさまざまなことを計算・表現している。
- 量子コンピュータは、古典コンピュータのように0/1だけでなく、0と1の重ね合わせ状態を持つことができること。重ね合わせ状態があることで、逐次処理ではなく、さまざまな状態を重ね合わせで確率的に計算できる。

#### • 量子コンピュータの実現方法

- 実用的な量子コンピュータはまだ実現できておらず、研究段階の技術である。
- 量子ゲート方式は、論理ゲートの代わりに量子ゲートを用いる手法であり、小規模な実機が存在する。
- 量子アニーリング方式は、イジングモデルの基底状態探索問題を解く手法であり、量子ゲート方式よりも規模が大きい実機が存在する。

#### • 量子コンピュータが実現すると、何が起きるか。

- 配達経路の最適化や新薬の開発、パズルゲームなどへの応用が期待されている。
- 便利になる一方で、安全に通信するために使われている暗号を解読してしまうなどの危険性も存在している。

さらに、教材を用いて実際に量子コンピュータがどんな問題を得意とするのか、どのように問題を解くことができるかを体験してもらう。

実際の教材では、-5に示すように、生徒に対してパズルの問題とさまざまな条件ブロックが与えられる。この条件ブロックは、イジングモデルを日本語として表現したブロックである。そして、これらの条件ブロックを、パズルのルールに基づいて組

み合わせることで、生徒はパズルを解くことができる。実際に量子アニーリングで問題解決をする際には、数式を立てて、実機を使用するためのプログラミングが必須となる。しかし、この教材を使うことで、高度な数学の知識やプログラミングの技術なしで、イジングモデルを立てて量子アニーリングで問題解決を行うことを体験することができる。

生徒のレベルによっては、条件ブロックを日本語ではなくイジングモデルで表現することで、実際に量子アニーリングを用いて問題を解く状態に近づけることも考えられる。さらに、プログラミングの技術がある生徒であれば、実際にプログラミングを行って量子アニーリングの実機やシミュレータを使用することも可能である。

レベルが存在する。量子コンピュータが普及した場合、利用者のほとんどは古典コンピュータと同じく、事細かに理解する必要はないが、問題解決に用いることができるレベルとなるであろう。よって、量子人材1,000万人時代を目指すには、数理科学の知識を持たない人々や、高校生以下の生徒に対する取組やカリキュラムをさらに議論していく必要がある。

参考文献

- 1) 統合イノベーション戦略推進会議：量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～, [https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai\\_220422.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai_220422.pdf) (アクセス 2024 年 10 月 05 日) (2022).
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推定人口令和5年推計, [https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp2023\\_Report3.pdf](https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp2023_Report3.pdf) (アクセス 2024 年 10 月 05 日) (2023).
- 3) 福永智渉, 湯瀬裕昭, 大久保誠也：パズルを用いた高校生向けの量子人材育成教材の提案, 情報教育シンポジウム論文集, Vol.2024, pp.291-296 (2024).

(2024 年 12 月 23 日受付)

今後の展望

本稿では、量子人材育成の現状をまとめるとともに、量子技術を扱える人材を育成するために、公教育で使用できる量子情報教育の構想を示した。量子技術を扱える人材とひとことであっても、さまざまな



**福永智渉 (学生会員)** j24501@u-shizuoka-ken.ac.jp

2022 年静岡県立大学経営情報学部卒業。2024 年同大学大学院経営情報イノベーション研究科経営情報イノベーション専攻博士前期課程修了。同大学大学院経営情報イノベーション研究科経営情報イノベーション専攻博士後期課程在学中。量子アニーリングを用いたパズルの解法に関する研究に従事。

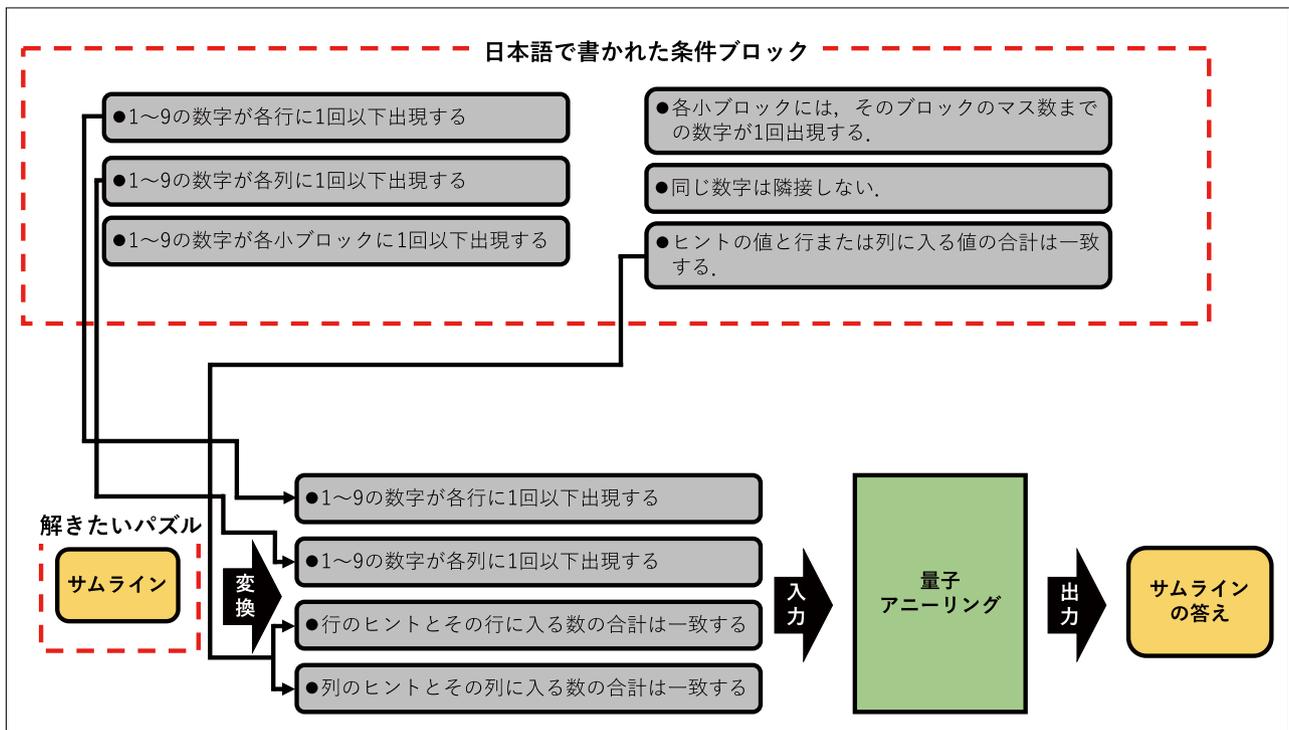


図-5 教材のイメージ

