次世代研究

NEXT GENERATION STUDIES

No. 2

明治大学サービス創新研究所
Institute for Service Innovation Studies of Meiji University

ISSN 2432-750 6 (Online)
ISSN 2432-7492 (Print)

01 May 2020

『次世代研究』 / NEXT GENERATION STUDIES

『次世代研究』は次世代大学教育研究会の機関紙です。
本誌の目的は、教育や人材育成にかかわるテーマについて幅広く議論する機会を提供することです。扱われるテーマは、技術が可能にするアクティブ・ラーニング、ワークショップの方法論の授業への適用、学習と教育の戦略、高等教育のイノベーションなどです。

NEXT GENERATION STUDIES is the official Journal of the Meeting on Higher Education for the Next Generation.

The purpose of this journal is to open discussions on a wide variety of human-resource development or educational issues such as technology enabled active learning, application of workshop methodologies to a classroom, learning and educational strategies, how to innovate higher education.

所長 阪井和男 / 明治大学
Director: Kazuo SAKAI / Meiji University

編集委員長 下郡啓夫 / 函館工業高等専門学校
Chief Editor: Akio SHIMOGOORI / National Institute of Technology, Hakodate College

執筆要項については下記まで問い合わせください。
明治大学サービス創新研究所
〒168-8555
東京都杉並区永福1-9-1
明治大学和泉キャンパス研究棟
法学部阪井和男研究室内

E メール：secretariat@service-innovating.jp
Institute for Service Innovation Studies,
c/o Kazuo SAKAI Laboratory, School of Law,
Meiji University, Izumi Campus,
1-9-1 Eifuku, Suginami-ku, Tokyo 168-8555, Japan
For inquiries, please send e-mail to
secretariat@service-innovating.jp

目次

教員のセルフマネジメント力向上を目指して：
リフレクティブ・プラクティスの実践
関戸 冬彦 …… 2

基礎情報処理クラスにおけるアクティブ・ラーニングの取り組み：
MOS資格取得を目指した問題解決型小テスト
森下 浩平 …… 6

学習としての評価を考える：
日本語教育のライティング授業における参加型評価の取り組みから
佐野 香織 …… 12

シンガポールでのフィールドワークを通したグローバル人材育成の試み：
高等学校における教育実践
赤塚 祐哉 …… 18

インターネットを使った異文化国際交流における多様性教育の検証と考察：
アジアの国との交流を通じて日本の子どもたちの学習意欲は変わったのか
炭村 紀子 …… 28

ICT活用時代における多言語学習の一考察：
言語習得能力に着目した多言語連携学習とシステムプラン
湯山 トミ子 …… 34

アート思考はブームになったのか？：
デザイン思考とアート思考の社会的受容
秋山 ゆかり・阪井 和男 …… 42

Universality of a Gate-Type Quantum Computer Comprising Controlled-Z and Three Rotation Gates, and Its Quantum Advantage over Classical Computers
HAMMURA, Kiyotaka, YAMAGUCHI, Katsuhiko, and SAKAI, Kazuo …… 56

Table of Contents

Aim to Improve the Quality of Self-Management for Teachers:
A Case of Reflective Practice
SEKIDO, Fuyuhiko ····· 2

Active Learning in an Intro Computer Literacy Class for MOS Certification using Problem Solving Quizzes
MORISHITA, Kohei ····· 6

On Assessment as Learning: Participatory Assessment in Writing Classes in Japanese Language Education
SANO, Kaori ····· 12

An Attempt to Foster Global Citizens through Field Work in Singapore:
A Practice at Senior High School Level
AKATSUKA, Yuya ····· 18

Verification and Consideration of Diversity Education in Intercultural International Exchange Using the Internet,Through Exchange with Asian Countries:
Did Japanese Children's Willingness to Learn Change?
SUMIMURA, Noriko ····· 28

New Development of Multilingual Learning in the Age of ICT Utilization:
A Study on Multilingual Cooperative Learning Method and System Plan Focusing on Language Acquisition Ability
YUYAMA, Tomiko ····· 34

Does Art Thinking Become a Fad?:
Social Acceptance of Design Thinking and Art Thinking
AKIYAMA, Yukari Carrie and SAKAI, Kazuo ····· 42

Universality of a Gate-Type Quantum Computer Comprising Controlled-Z and Three Rotation Gates, and Its Quantum Advantage over Classical Computers
HAMMURA, Kiyotaka, YAMAGUCHI, Katsuhiko, and SAKAI, Kazuo ····· 56

本号は明治大学サービス創新研究所の組織改編を前に、研究員の方々から広く論文を募集いたしましたものです。その中で、多くの論文を寄稿いただけましたこと、御礼申し上げます。

2007 年、文部科学省は産学連携でサービス産業の革新を担う人材を育成する「サービス・イノベーション人材育成推進プログラムを開始しました。このプログラムは、サービス産業の伸長の中、大学でサービスを科学的にとらえる研究・調査を実施、これを通じて、次世代ニーズのサービス商品を開発・企画できる人材の育成を目指したものです。この実現には、心理学や経済学はもちろん、統計学などの知見を基に、学融合によるサービスの新たな知識の体系化が急務でした。さらに、その知識を教育に活かし、実践を通じて知識のアップデートが求められました。13 年経った今、そのことはどうなったか。そのことは変わらず眼前にありますし、むしろ一層望まれているものとなっているのではないでしょうか。

『次世代研究』は、積極的にさまざまな専門性をもつ研究員のみなさまの、日常研究を提起する場です。いいかえれば、論文投稿を通じた、開かれた社会への提言、問題提起の場であろうと思います。その意味で、『次世代研究』による情報発信が、新たな「サービス」学の構築、かつ次世代の課題へ向けて「サービス」の一層の深化を進展させることを願ってやみません。

上記「サービス」学の構築に向けて、『次世代研究』について新たな編集委員会を立ち上げ、年1回の発刊の恒常化を目指します。今後より一層のご協力をいただければ幸いです。

『次世代研究』編集委員長　下郡　啓夫

教員のセルフマネジメント力向上を目指して
―リフレクティブ・プラクティスの実践―

関戸 冬彦[1]

Aim to Improve the Quality of Self-Management for Teachers
-A Case of Reflective Practice-

SEKIDO, Fuyuhiko[1]

アブストラクト

本稿は経験主義学習に基づく「振り返り」に着目した、リフレクティブ・プラクティスに関する現時点での暫定的な実践報告である。まず、リフレクティブ・プラクティスとは何かを先行研究と共に簡潔に説明する。次に、実際に行っている実践がどのようなものであるのか具体的に報告する。そして最後に、今後の展望などについても言及する。

In this paper, the practice of “reflective practice” will be temporarily reported at the moment. First, the meaning of “reflective practice” will be explained with previous studies. Next, an actual case will be introduced with details. Finally, the future of this practice will be referred.

キーワード：リフレクティブ・プラクティス，経験主義学習，教師教育

1. はじめに

本稿は経験主義学習に基づく「振り返り」に着目した、リフレクティブ・プラクティスに関する実践報告である。まず、リフレクティブ・プラクティスとは何かを先行研究を引用しながら簡潔に説明する。基本的にこれは教員のセルフマネジメント力向上につながるものと執筆者は捉えている。次に、この考えに則って実際に行っている実践例を具体的に報告する。この活動を始めたのは 2019 年の９月末であり、つまり本稿執筆時にはまだ３か月ほどしか経過していないので手順ややり方などの方法的な部分は明記出来ても、本稿は現時点ではまだ中間報告なものにしかすぎず、効果検証など念入りな研究は今後に譲りたい旨を先んじてここに記しておく。そして最後に、このリフレクティブ・プラクティスの活動を研究対象としての一事例に留まらせず、どう今後この活動そのものを発展させていくか、などの展望についても少し言及しておきたい。

2. リフレクティブプ・ラクティスとは何か

リフレクティブ・プラクティスとは玉井、渡辺、浅岡（2019）[1]によると「実践者が自身と自身の実践経験を、リフレクションを通して内省し、自身の実践についての理解を深めることでより豊かな実践者へと成長していくための実践研究法」であるという。つまりそれは、自分の行った授業実践を客観的、あるいはメタ認知的に意識し、考察することで気づきを得て、次の行動へと促すサイクルであると言える。ここで重要なのが「リフレクション」であり、玉井 et al.(他)（2019）[2]はこれについて、教師教育のコンテクストにおいては「経験をふり返ることで新たな意味解釈を引き出し、自身と自身の実践について理解を深めることによって問題の解決や成長を志向するための実践研究法」としている。要は、自分の経験したこと、ないし経験した自分自身をよく知ることこそが次への一歩につながっていく、と換言出来るだろう。いわば、教師のための経験に基づいたメタ認知サイクルである。玉井 et al.(他)（2019）[3]ではその対象を主に中高の英語教員、教育実習生、などの英語教育での現場に例においているが、これを分野を問わずに実際に現職の教員、特に大学の教員、を対象に行ったらどのような効果や反応があるのだろうか。この問いに対し自ら試みたのが次の章での実践事例報告となる。

3. 実際の実践、活動事例

今回の実践は、先にも述べたように大学の教員に対して行った。執筆者も大学の教員であり、分野こそ異なれど、同じ大学教員という立場の者同士、合計５名でのグループでの振り返りである（なお、執筆者は大学の英語教員である)。この活動に参加を表明してくれた４名とはそれぞれEMS（エッセンシャルマネジメントスクール：西條剛央が主宰するメタ大学院）で知り合いになった。また、この振り返りという手法を強く推奨していたのは同じく EMS を通じて知り合いになった鈴木利和であり、鈴木が主宰する「ありえる楽考」[4]もこの活動に大きな影響を与えている。なお、５名はそれぞれ地理的には日本国内てんでばらばらな所に居住しているので、どこかある特定の場所に集まってというリアルな対面式ではなく、Zoom というオンライン会議システムを用いてオンライン上で行った。時間は毎週日曜午前８時半からと決めており、2019 年９月末から特殊な事情があった場合を除いて 12 月末まで必ず毎週日曜に定期的に開催した。

活動の流れとしては冒頭の数分を「チェックイン」と呼び、24 時間以内にあった感謝したいこと、ないしこの１週間で印象的だったこと、などを各自が手短に話す。これはウォームアップ的に場の空気感を作るためのものである。その後、５名のうちの誰かが主に自分が行った授業について、その週で気がかりだったことや迷いを感じたことなどを共有し、それに対し聞き手である４名が感じたことを話したり、時に質問などをしたりする。その際、振り返りのプロセスを可視化させるために先の「ありえる楽考」で用いている「ありえるシート」(図１)を転用することもある。このシートは最初の状態（左側）からどのようなことが起き（真ん中の→)、そして現在どうなったか（右側）を自分の言葉を用いながら書き込み、客観的に見られるようにするものである。また、最後には次へのアクションも記入するので行動変容も促される。加えて、これを他者に見せながら話すことで、自分をメタ認知的に理解出来るためのツールでもあるので、そういう意味ではリフレクティブ・プラクティスの意図にもうまく合致しているシートであると言える。

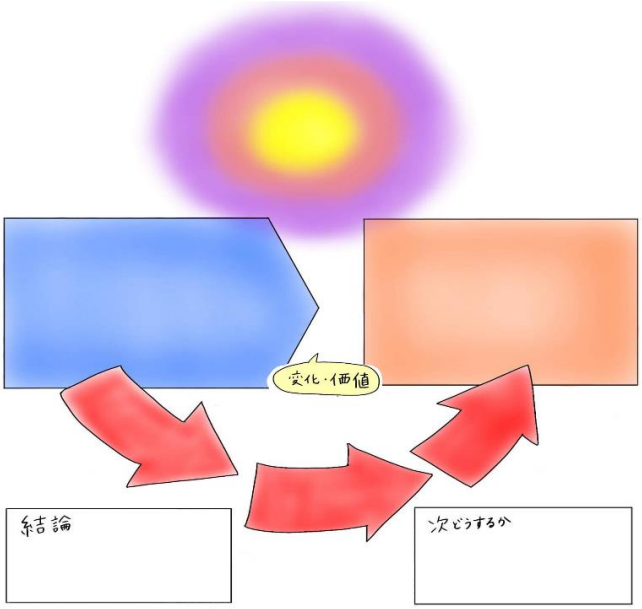


図１　ありえるシート

なお、５名はそれぞれ教員としての経験年数が違うので似たような事象でも捉え方が違っていたり、あるいは経験豊富な誰かがアドバイス的なコメントをすることもあるが、基本は身分的に上下関係なくフラットな関係性であるので、この５名内に序列のようなものは存在しない。おそらくここが、同じ職種でありながらも同じ職場ではないことの利点だろう。同じ職場内ではどうしても上下関係的な、もしくは役職的なことが意識されてしまうので、場合によっては自由に発言出来ない、などということも想定されうるが、この５名内においてはそういうことは起こりえない。

また、それに派生して大学内で組織として抱えている問題点や教員としての在り方などにも話題が及ぶこともあり、いわば教育をめぐるディスカッションのような様相になることもある。得てしてそうしたやりとりを続けるうちに、各自がその時々で響いたものを持ち帰り、また新たな１週間を過ごすので、徐々にそれが習慣化され、中には行動変容が起きていたりもする。具体的な参加者個々のことについては本稿内では省略するが、活動における役目としては執筆者がファシリテーター役を担っているので、あくまで主観としてではあるものの、それは認識出来ていると言える。というのも、日曜の朝に誰かに強制されたわけでもなく、個々が自発的に休むことなく参加し、かつ積極的な発信や意見交換というやりとりを続けていること自体がすでに損得や利害を超えた主体性の現れという行動変容そのものにほかならないからだ。

つまり、リフレクティブ・プラクティスを教員同士で行うことは教員の自己内省が促されるので、それはセルフマネジメント力の向上に寄与していると言えるだろう。ここでいうセルフマネジメント力とは、授業における自分自身の振る舞いをコントロール出来る力であるのと同時に、行った授業を俯瞰的に見て検証出来る力を指す。その際に有益な部分として特筆すべきなのが、それを個々で行うのではなく、グループで行うことでお互いの気づきや励まし合い、理解される

ことの肯定感などがあるのだが、そうした個々の事例、箇所の詳細な検討、また参加者の声やその客観的分析に関しては今後の研究課題としたい。

4. おわりに

本稿ではまずリフレクティブ・プラクティスとは何かを簡潔に説明した。それは、自分の行った授業実践を客観的、あるいはメタ認知的に意識し、考察することで気づきを得て、次の行動へと促すサイクルであった。次に、実際に行っている実践例を具体的に報告した。今回は Zoom というオンライン会議システムを用いて、週に 1 度日曜日の朝に 5 名のグループで行った。活動の詳細としては、チェックイン後に個々が振り返りの共有を行い、メンバーがそれぞれコメントをしあうことで自己理解と他者理解とを深めるというものであった。 3 の最後に記したように、本稿では参加者の変容に関する客観的な、特にデータ分析などは含めなかったのでその点は今後の研究課題である。また、このようなメンバー、大学教員やそれ以外の機関の教員も含めて、がさらに集まるのであれば、執筆者ないし適切な人物がファシリテーターとなり、複数のチームでも展開出来るだろう。もしそのように複数のチームが存在した場合、それぞれのチームでどう違うのか、あるいはファシリテーターになった場合とそうでない場合とでは何か違いがあるのか、などの詳細な研究テーマを別途設け、より踏み込んだ活動やそれに伴う分析も出来るだろう。そのような活動、研究を積み重ねていくことで、よりリフレクティブ・プラクティスの意義が明らかになっていくだろうし、それが結局はよりよい教育環境を創り出す一要因になるのではなかろうか。そのような期待と提言をもって、本稿の結びとしたい。

参考文献

[1] 玉井健、渡辺敦子、浅岡千利世. “リフレクティブ・プラクティス入門”. 初版, ひつじ書房, 2019 年, (p.1).

[2] 玉井健、渡辺敦子、浅岡千利世. “リフレクティブ・プラクティス入門”. 初版, ひつじ書房, 2019 年, (p.56).

[3] 玉井健、渡辺敦子、浅岡千利世. “リフレクティブ・プラクティス入門”. 初版, ひつじ書房, 2019 年, (p.109-p.163).

[4] 鈴木利和. “セルフマネジメントを目指したコーチング手法の考察 – ありえる楽考の取り組み”. アカデミック・コーチング研究. 2020 年, 創刊号(発刊準備中).

著者紹介

関戸 冬彦

1997 年 明治学院大学文学部卒. 2008 年 同大学大学院博士後期課程満期退学. 文学博士. 2019 年より, 白鷗大学准教授. 現在に至る. 文学と英語教育の研究に従事. アカデミック・コーチング学会理事, 日本アメリカ文学会, 日本英文学会学会, 大学英語教育学会各会員.

基礎情報処理クラスにおけるアクティブ・ラーニングの取り組み
―MOS 資格取得を目指した問題解決型小テスト―

森下 浩平

Active Learning in an Intro Computer Literacy Class for MOS Certification using Problem Solving Quizzes

MORISHITA, Kohei

アブストラクト

本稿では，基礎情報処理クラスにおいて実施した問題解決型小テストの効果について，MOS 資格（マイクロソフトが認定する Microsoft Office に関する国際資格）試験の結果をもとに考察する。

キーワード：問題解決型小テスト，アクティブ・ラーニング，基礎情報処理クラス

This paper discusses the effectiveness of problem solving quizzes in an intro computer literacy class based on the results of MOS certification (Microsoft Office Specialist) exams.

Key words: problem solving quizzes, active learning, intro computer literacy class

1. はじめに

昨今，さまざまな教育現場でアクティブ・ラーニングが導入されており，アクティブ・ラーニング型授業の実施は，学生の出席意欲に何らかの影響を与えている可能性があると考えられている [1]。森下 (2018) は，基礎情報処理クラスの受講を希望する学生 229 名を対象とした大規模なアンケート調査を行い，教師が一方的に説明をするだけになりがちで，アクティブ・ラーニングに向いていないように思われる基礎情報処理クラスにおいても，学生は少なからずアクティブ・ラーニングの必要性を感じているという結果が得られた [2]。

森下 (2019) では，アクティブ・ラーニングの一環として，基礎情報処理クラスの中で問題解決型小テストを実施した [3]。前期 3 クラスで，[2] の内容を一部修正したアクティブ・ラーニングに関するアンケートを行い，後期 4 クラスで，前期のアンケート結果を踏まえ，実践的な問題解決型小テストを実施し，最終授業で小テストに関するアンケートを行った。小テストを受け

た学生と受けていない学生の MOS 資格の合格率（89.8% vs. 83.9%）および平均点（828.0 点 vs. 788.6 点）を比較したところ，両者間に有意差はなかったものの，全体として前者のほうがいずれも高かった。

本稿では，[3] で調査した，小テスト受験の有無による MOS 資格の合格率および平均点に加え，学生による小テストの解答方法についても詳しく見ていく。模範的な解答をしている学生は合格率も高かったが，著者が想定していなかった解答方法で正答ないしは誤答している事例についても，いくつかの分析を試みる。

2. 調査

2.1 参加者

2019 年度の前期に，著者の基礎情報処理クラスを受講した大学生 60 名が参加した。経済学部，経営学部，法学部，国際学部の 1〜4 年生と幅広い専攻および学年の学生が対象であった。

2.2 授業内容

シラバスの内容は，以下の通りであった。

概　　要：この授業は，表計算ソフトの各種機能を効果的に活用し，さまざまな目的や状況に応じた数値データの扱い方を修得することを目的とする。そのために，複数のシートを含むブックの作成・編集，データの抽出や並べ替え，数式の作成，関数の使用，グラフを利用したデータの視覚的表現，印刷設定などについて学修する。

目　　標：ワークシートやブックの作成と管理，セルやセル範囲のデータの管理，テーブルの作成，数式や関数を使用した演算の実行，グラフやオブジェクトの作成などについて，MOS Excel 2016 スペシャリスト合格相当レベルの操作ができるようになること。

授業方法：PC 教室で一人一台の端末を用いて，実習を行う。テキストに沿って，まず，教員がモニターおよびホワイトボードを用いて説明を行う。次に，受講生もモニターを見ながら一緒に演習問題を解くことにより，知識の定着をはかる。提出課題は毎回課され，学期終盤にはテキスト付属の模擬問題を利用した確認テストを複数回実施する。期末テストとして，MOS Excel 試験を実施する。

2.3 小テスト

8 回目および 9 回目の授業において，著者によるオリジナルの小テストを実施した。2019 年度より学内の PC 環境が Office 2010 から Office 2016 に変更されたため，小テストの内容は [3] から一部変更した。MOS Excel 試験には，1 つの関数ではなく複数の関数を組み合わせるテクニック「ネスト（入れ子）」がしばしば出題されるが，Office 2016 に変更されてからは，使用する関数は出題文に明記されず，表やグラフから情報を読み取って解答する力を試される傾向が高まっている。学生の思考力を高め，実務レベルを意識させることを目的とし，小テストでは，テキストで解答方法が詳しく説明されていない（すなわち MOS Excel 試験に出ない）出題パターンを扱うこととした。

関数の問題では，テキストに載っているのは IF 関数と IF 関数のネストだけであるが，それ以外の組み合わせまたは 3 つ以上のネストの使用を取り上げた。書式設定の問題では，日付の表示形式以外の表示（曜日のみを表示して日付を除外するもの）を取り上げた。いずれもテキストで学習した範囲内の知識，スキルで解答が可能であることを伝え，MOS Excel 試験とは異なり，テキストの参照，インターネット検索，グループワークなどを許可した。提出方法は，学内の情報システムを利用することとし，提出期限は，翌週の授業前日の 23 時 30 分とした。

各問題については，テキストで学習した解答方法を使っていれば良いため，複数の解答パターンがあることを説明した。本稿では，8 回目に実施した関数問題について，計 3 問のうちの 1 問（関数を使用して「評価」に 30 点未満が 1 科目でもあった場合は「追試」と表示し，すべての教科が 30 点以上だった場合は何も表示しない；図 1）の分析および考察を行う。なお，正しく解答できた場合の完成イメージについても別シートに提示した（図 2）。

成績一覧表

受験番号	氏名（漢字）	英語	数学	日本史	情報	合計	評価
1001	阿部　一郎	64	84	76	72	296	
1002	安藤　雪子	64	68	88	68	288	
1003	遠藤　秀幸	72	76	88	84	320	
1004	布施　秋絵	80	52	76	56	264	
1005	後藤　正	60	52	64	40	216	
1006	長谷川　正	36	44	48	52	180	
1007	服部　伸子	76	88	100	100	364	
1008	本田　道子	72	40	100	80	292	
1009	本多　達也	24	32	36	56	148	
1010	井上　真紀	56	96	80	76	308	

図 1. 問題シート：関数についての問題に使用した成績一覧表（一部抜粋）

成績一覧表

受験番号	氏名（漢字）	英語	数学	日本史	情報	合計	評価
1001	阿部　一郎	64	84	76	72	296	
1002	安藤　雪子	64	68	88	68	288	
1003	遠藤　秀幸	72	76	88	84	320	
1004	布施　秋絵	80	52	76	56	264	
1005	後藤　正	60	52	64	40	216	
1006	長谷川　正	36	44	48	52	180	
1007	服部　伸子	76	88	100	100	364	
1008	本田　道子	72	40	100	80	292	
1009	本多　達也	24	32	36	56	148	追試
1010	井上　真紀	56	96	80	76	308	

図 2. 別シート：完成イメージ

3. 結果と考察

小テストの解答にあたっては，テキストで学習した関数を使用するように指示した。小テストの解答パターンは，以下の 8 つに区分した。

(1) IF 関数と MIN 関数のネスト
(2) IF 関数のみで構成されたネスト
(3) IF 関数と COUNTIF 関数のネスト
(4) IF 関数と AND 関数のネスト
(5) IF 関数と OR 関数のネスト
(6) その他（誤答）
(7) 未提出（挫折）
(8) 未提出（放棄）

想定していた解答方法は，(1) IF 関数と MIN 関数のネスト，または (2) IF 関数のみで構成されたネストであった。(1) は入力の手間を省くことができるため，構文ミスを抑えることができる解答方法である。(2) は数式が長くなるため，(1) に比べて入力の手間や構文ミスが発生しやすいデメリットがあるが，学習した内容の範囲内である。いずれの場合も，比較演算子や引数の真・偽の逆転は想定内であり，以下の数式はすべて正答としている。

例) =IF(MIN(D4:G4)<30),"追試","")
例) =IF(MIN(D4:G4)>=30),"","追試")
例) =IF(D4<30,"追試",IF(E4<30,"追試",IF(F4<30,"追試",IF(G4<30,"追試",""))))
例) =IF(D4<=29,"追試",IF(E4<=29,"追試",IF(F4<=29,"追試",IF(G4<=29,"追試",""))))

想定外であった解答方法として，(3) IF 関数と COUNTIF 関数のネストで解答した学生が 2 名いた。関数それぞれの特性をよく理解していないとこれらのネスト構成は考えられないため，思考力が高い学生であると推察できる。数式は以下のとおりである。

例) =IF(COUNTIF(D4:G4,"<30"),"追試","")

MOS Excel 試験では，テキストで学習した関数以外を使用すると誤答となるため，正答は (1)，(2)，(3) となり，(4) の AND 関数および (5) の OR 関数は誤答扱いとした。

表 1 に，小テストの解答パターン別 MOS Excel 試験の合格率および平均点の結果を示す。

表 1
小テストの解答パターン別合格率および平均点の結果

解答パターン	解答数	正誤	人数	受験者	合格者	不合格者	合格率	平均点
(1) IF と MIN	5	正	11	3	3	0	100.0%	889.7
(2) IF のみで構成	4			1	1	0	100.0%	862.0
(3) IF と COUNTIF	2			2	2	0	100.0%	954.0
(4) IF と AND	9	誤	40	7	6	1	85.7%	849.7
(5) IF と OR	19			9	9	0	100.0%	887.1
(6) その他（誤答）	2			2	1	1	50.0%	653.5
(7) 未提出（挫折）	10			5	4	1	80.0%	843.2
(8) 未提出（放棄）	9	−	9	0	0	0	−	−
合計	60	−	60	29	26	3	−	−

今回の小テストに関してインターネットで検索してみると，AND 関数や OR 関数は解答方法としてよく出てくるため，これらを使用した学生が多かったと推測できる。彼らは，(1)，(2)，(3) を思い付くことはできなかったため，誤答扱いになると分かっていても AND 関数や OR 関数での解答を提出することにした可能性がある。

(6) のその他は，そもそもネストを使用せずに関数単体での解答を試みており，完成イメージとも異なる誤答であった。(7) の未提出については，テキストを使用した通常の課題のみ提出し，小テストは未提出であったため，小テストの解答を「挫折」したと見なした。(8) の未提出については，(7) と異なり，通常の課題と小テストの両方が未提出であったため，授業自体を「放棄」したと見なした。

PC 関連の演習クラスは，操作研修になりがちであるためか，全体として，テキストに記載されている解答方法が唯一のものであると誤解している例が多く見受けられた。例えば，MIN 関数は「最小値を求める関数」と単体での使用についてのみ説明されているため，ネストでの使用を思いつかない傾向があった。

小テストを実施した翌週の授業内では，解答パターンの割合および正答例，誤答例とその理由について，提出されたデータをもとに詳しく解説した。

4. おわりに

本稿における小テストで，OR 関数を使用して誤答になった学生の MOS Excel 試験の合格率は，(1)，(2)，(3) の正答を出した学生と同様に高かった。小テスト後の解説を聞いたことで関数についての理解が深まり，合格につながった可能性が考えられる。

今回の小テストを実施した目的は，テキストに沿って手順通りに解答すれば正答を出せるため，それで完全に理解できたと思い込んでしまう傾向に警鐘を鳴らすことにあった。一方，すでに PC 関連の資格を取得していても,「(高校で) 習った気がするが, 使い方がよく分からない」,「実際に使えるか自信がない」などと話す学生も多い。そこで，今回の小テストで実務レベルの使用法を学習することで，理解を深めてもらいたいと考えた。

本稿で紹介したような問題解決型小テストを通じて「気づき」を得ることにより，単位や資格の取得のみを目的にするのではなく，知識やスキルを将来的にも活かしていくことを意識させることが重要であろう。

参考文献

[1] 坂本建成. “情報処理演習科目におけるアクティブラーニングの授業実践—やる気と出席率に着目して—”. 流通科学研究（中村学園大学）. 2017 年，16 巻，2 号，pp.39-44.

[2] 森下浩平. “基礎情報処理クラスにおけるアクティブ・ラーニングの可能性”. 日本認知科学会第 35 回大会発表論文集. 2018 年，pp.806-810.

[3] 森下浩平. “基礎情報処理クラスにおける問題解決型のアクティブ・ラーニング”. 日本認知科学会 第 36 回大会発表論文集. 2019 年，pp.268-274.

[4] 遠藤緑生ほか. “社会科学系大学における ICT リテラシー教育の再生─アクティブラーニング

と BYOD・クラウドの活用―". 情報処理学会デジタルプラクティス. 2015 年, 6 巻, 2 号, pp.129-138.

[5] 坂田隆文. "何故, アクティブラーニングがうまくいかないか". 大学ジャーナルオンライン. http://univ-journal.jp/column/20164103/, (2020/01/02).

著者紹介

森下 浩平

2001 年 神戸芸術工科大学芸術工学部卒. 2016 年 神戸大学大学院国際文化学研究科グローバル文化専攻博士前期課程修了. 修士(学術). 2017 年より, 大阪法科経済大学等で非常勤講師. 現在に至る. 日本認知科学会会員.

学習としての評価を考える
―日本語教育のライティング授業における参加型評価の取り組みから―

佐野 香織[1]

On Assessment as Learning: Participatory Assessment in Writing Classes in Japanese Language Education

SANO, Kaori[1]

アブストラクト

本研究は，日本語教育のレポート授業における学習としての評価活動を考えるものである。学習者自身がレポートの内容評価項目を作成，相互自己評価する参加型評価の試みを取りあげる。本稿では，この試みに関する質問紙調査結果を考察する。私立 A 大学の中上級レベル学習者対象の日本語科目コース（2018 年春学期）において，「よいレポートの内容とは何か」について各クラスの学習者が対話し，内容に関する評価項目を作成，相互自己評価を行う活動を試みた。実践終了後，履修生（5 クラス 41 名）を対象に，レポートの評価に関する質問紙調査を行った。その結果，レポートの形式面の評価に学生が評価に関わることには否定的であるが，内容面に関しては肯定的であり，学びを実感することが分かった。この結果から，参加型評価活動そのものが学びとなる可能性が示唆された。

This study considers assessment as learning in academic writing classes in Japanese language education. Students create an evaluation item for the content of the report and take part in a participatory assessment in which the learner assesses each other. In this paper, we consider the result of a questionnaire survey on report assessment.
In a Japanese language course for middle- and advanced-level learners of private university A (spring semester, 2018), learners of each class consider “What is a good report” and create assessment items for the content of the report. After the semester, a questionnaire survey on the assessment of reports was conducted for the students (41 students in 5 classes). As a result, the student was positive about the assessment activity. This result suggests that the assessment activity itself could be as learning.

キーワード：学習としての評価，参加型評価，レポート授業，レポートの内容評価項目

1. はじめに

日本語教育におけるレポートやアカデミック・ライティング教育では、構成や表現等の形式面スキルの習得を重視していることが多い(佐藤，2006)[1]。しかし，形式面の「練習」であるという学習者の認識から，レポートの内容に関しては軽視されることが多く，学習者の剽窃，盗用が問題視されている。レポートの書き方やアカデミックな言語表現，論文の構造を知識として学ぶことが中心である中，レポートについて，なぜ，誰が，どのように書くのか，どのように内容の評価を行うのか，ということを考えていく必要性が問われているといえる。本研究は，こうした課題に対し，「いいレポートの内容とはなにか」という問いを通して，学習者が共に評価項目作に参加し，相互自己評価を行う参加型評価の試みを取りあげるものである。そして，この試みに参加した学生のレポート評価方法に関する質問紙調査の結果を考察することを目的とする。

2. 先行研究

参加型評価とは，多様な関係者が協働で評価を行うアプローチで，主にプログラム評価において用いられてきたものである。近年，日本語教育においても従来の伝統的評価に代わる代替アセスメントとして認識されている。日本語教育においては，細川（2002）[2]が教師，学習者が共に同意するような評価カテゴリーを対話によって作成し，これを用いた相互自己評価を学習過程の中に組み込む学習者参加型評価の重要性を主張している。

武，市嶋，キム，中山，古屋（2007）[3]では，「活動型日本語活動」の実践として，学習者同士が主体的にやりとりを行うことを通してレポート推敲を行い，レポートを作成する活動を実践している。そして，この活動授業の学習者は，学習者が活動の主体として評価に関わることを自然なことであるとして受け入れており，教師が行う評価については否定的であったことが報告されている。また，市嶋（2010）[4]では，評価基準や意義を学習参加者と共有する対話的アセスメント活動の実践の考察に基づき，学習としての評価を検討している。

これらの研究における「評価」とは，ある時点での結果を数値化した個人評価としての成績ではない。形成的，継続的に行われ，学習者，教員が関わる作業としての「アセスメント」として捉えられており，コメントや学習のプロセスをポートフォリオで表すこと等も含まれている。しかし，こうしたアプローチでの実践は多いとはいえない。また，実践事例の多くは，理念－活動－評価を一貫して共有できるコース担当者が行っているものである。1科目複数コースをコーディネーターが作り，多様な担当教員と共に行う授業においては，教員間で学びと評価，成績の考え方について実践を重ねながら長期的に議論をしていく必要があるといえる。

3. 実践の概要

こうした問題意識の下，本研究で取りあげる実践は，私立大学 A 校の総合科目群中上級レベル学習者対象「総合日本語」(2018 年春学期（4 月－7 月），90 分週 3 コマ）5 クラス（1 クラス 12 名前後）で行ったものである(1)。このコースでは，一つの教科書を主教材として使用しながら，社会問題を読み解き，ディスカッションを重ねながらすすめていく。そして，授業で扱ったトピックの中から学習者が問いをたてたテーマでレポート（2000 字程度）を執筆し，発表を行うもの

である。このコースにおける「レポート」とは,「ある問題についての自分の主張・見解・考察などを、客観的な根拠を示しながら、論理的に述べるもの」として学習者に示されている。コースのうち，教室総授業時間 45 時間中，レポート授業が占める割合は約 2 割（9 時間程度）である。レポートの執筆に関わるスケジュールを表 1 に示す。コース全体のシラバス，教材，評価方法はコーディネーターが作成，各クラス 2 名の教員がチームティーチングで担当している。レポートの評価は，評価者間の評価の公平性の担保，到達目標提示，学習者の自律的な取り組みをめざして，教員と学習者が共に参照可能で，相互自己評価できるルーブリック(2)を用いた評価活動を行っている。

ルーブリックとは,「ある課題について，できるようになってもらいたい特定の事柄を配置するための道具」であり，到達目標を教員にも学習者にも明示的に示すことが可能であるとされている（山同，高橋，伊藤，藤本，安田，2017）[5]。しかし，本研究におけるルーブリックの評価項目は教員が作成したものであり，評価指標の中心は構成，文法，表現等の形式である。指標にはない内容に関する評価はできないことが課題となっていた。また，主体的にレポート執筆を進めてきた学習者が内容評価に関わることがないことについても議論となっていた。

表 1

レポート執筆に関わるスケジュール

	レポート作成に関わるスケジュール（前後することもある）
1)	レポートの目的，めざすところ，テーマ選択・決定 ルーブリックの確認，ルーブリックを使ってサンプルレポートを評価してみる,「よいレポートとは何か」をめぐる話し合い
2)	レポートの構成，形式に関する学習
3)	序論を書く活動
4)	「よいレポートとは何か」内容評価項目作成活動
5)	アウトライン作成・相互評価
6)	第 1 稿　相互評価　（ルーブリック，内容評価項目）
7)	第 2 稿　相互自己評価　（ルーブリック，内容評価項目）

本研究では，表 1 の 4)「よいレポートの内容とは何か」について各クラスの学習者が対話を通してクラスごとにレポートの内容に関する評価項目を作成し，この内容評価項目を用いて，ルーブリックによるレポートの形式に関する評価とあわせ相互自己評価をする活動に注目する。内容評価項目作成活動の方法は，各クラス担当教員によって異なる。本稿では，1 クラスの方法を事例として取りあげる。

まず,「よいレポートとは何か」というテーマで，条件を各自三つ以上考えてくるように宿題とした。4)のスケジュールの時間に，考えてきた条件を付箋に書き，3〜4 人のグループで内容が似ているものをグルーピングし，内容を表すタイトルをつけた。各グループのグルーピングを全員で見てまわり，その中で類似のものをさらにまとめていった。その過程で,「なぜこの内容がよい条件なのか」について話し合いをグループ，全体で話し合いを行った。最終的に残った 4 つの項目は表 2 である。

表 2
あるクラスの内容評価項目

① そのテーマに知識があまりなくても，最後まで読みたくなるようなもの
② 簡単に探せるような内容ではなく，自分の視点から考えているもの
③ 内容に深さがあり，読み手の知識がより広まるもの
④ 読み手を深く考えさせ，新しい観点や問題を見つけられるもの

話し合いのプロセスでは当初,「オリジナリティがあり，面白い」というような条件が多く出されていた。しかし,「オリジナリティとは何か」「面白い，といってもその観点は人によって異なる」という意見が出され，さらに「オリジナリティとはなにか」「面白い，とはどのようなことか」というディスカッションを経て，このクラスの学習者は表 2 のような条件を考えだした。

学習者はこの内容評価項目を用いて，お互いのレポートの第 1 稿について，コメント評価をしあった。また，形式についてルーブリック評価をしあった。第 2 稿については，お互いに読みあってコメント評価を行った。教員も第 1 稿については，内容評価項目に対するコメント評価とルーブリック評価（数値化）を行った。第 2 稿については，内容評価項目，ルーブリック評価双方を数値化した。コース全体において，レポート執筆が占める成績評価の割合は 25%である。

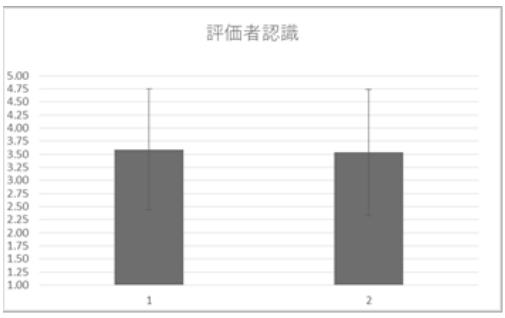
4. 調査の概要

学期終了後，当該コース履修生（5 クラス 41 名）を対象に，レポートの「評価」に関する質問紙調査を行った。質問紙の内容は，a）レポートの形式面（構成，表現，文法，引用など）の評価方法，b）レポートの内容面についての評価方法，c）評価者認識（誰が評価するのか），d）内容評価項目に関わる意識（誰が評価項目に関わり，評価項目を作るのか）についての質問 8 項目である。問いに対し,「強くそう思う」から「全くそう思わない」までの 5 件法で回答を求めた。本調査で取りあげた評価方法は,「アセスメント評価」（コメントなどで評価し，点数で数値化を行わない）と，数値化して表す「成績評価」である。また,「クラスでクラスメートと作成したレポートの内容評価項目活動はどうでしたか。自由に意見を書いてください」という自由記述項目も含めた。

5. 調査の結果と考察

質問紙調査で得られた質的データを単純集計し，分析した結果，次の 4 点が分かった。

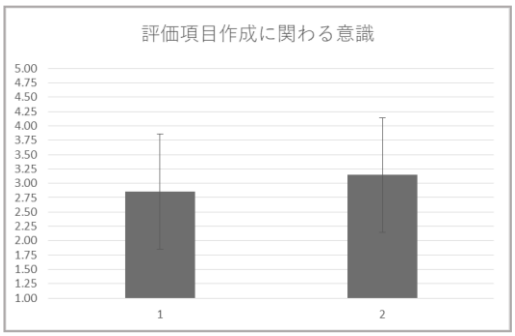
1)「誰が評価をするのか」という評価者認識に関する質問の回答では，レポートの構成等の形式面の評価においては，数値化する「成績評価」でも，コメントなどによる「アセスメント評価」でも，どちらかといえば教員のみによる評価を支持しつつも，教員のみに限定しない評価を考えている学生も存在していることが分かる（図 1 ）。



1. レポートの形式面の成績評価は教員だけがした方が良い
2. レポートの内容面の評価は教員だけがした方が良い

図 1. 評価者認識

2)「誰が評価項目に関わり，評価項目を作るのか」に関する質問の回答では，形式面と内容面の「評価」の比較においては，内容面について学生が「評価」に関わることに対しては比較的肯定的であることが分かった。回答の平均は内容面で 3.15（標準偏差 1.21），形式面では 2.86（標準偏差 1.09）であった。自由記述には,「今回クラスで内容について詳しく考えながら自分の中でレポートの内容についてきちんと考えられるようになりました」「クラスで他のクラスメートとお互いにレポートを読んで内容を評価するのは大変役立ちました」「役立ったと思います！レポートを書いている時、それらの点をかんがえながら書くから」という声があることからも，学生が「評価」に参加することに対しては慣れてはいないが肯定的に考えていることが窺われる（図 2)。



1. レポートの形式面の評価項目は学生も参加して作った方が良い
2. レポートの内容面の評価項目は学生も参加して作った方が良い

図 2. 評価項目作成に関わる意識

3)「形式面についてどのように評価するのか」という質問の回答では,「アセスメント評価」でも「成績評価」でもどちらも大きな差がなかった。

4)一方で,「内容面についてどのように評価するのか」という質問の回答では,「アセスメント評価」のほうがよいと考えている学生が多いことが分かった。

内容面に関しては，点数や数値で表す成績評価よりもコメントによる相互評価を好むこと，学生が「評価」に関わることに対しては肯定的であり，学びを実感する学生が多いことが分かった。

6. おわりに

参加型評価活動そのものが学びとなる可能性が示唆されたが，学習者に戸惑いも見られることも浮き彫りとなった。

ゲルモン，ホランド，ドリスコル，スプリング, ケリガン（2015）[6]は,「評価」をアセス

メントとして考えるならば,「評価」は学習者が何を学んだのかを自分自身で明らかにすること，その学んだことを他者に明らかにすること，さらに他者の学びに役に立つことを示していくものであるとしている。本研究は, 大学で行った実践である。交換留学による大学間単位互換もあり，広く共通理解可能な「成績」として内外に共有できる形で示していく必要があることも事実である。しかし，それだけではなく，学習者個人が学ぶこと・学んだことを実感すること，それが他者やコミュニティの学びにもつながるような「評価」を考えて行く必要もあると思われる。

謝辞

本研究は，2019 年度日本語教育学会春季大会におけるポスター発表内容に加筆・修正したものである。本研究にご協力くださった関係者のみなさまに心より感謝申し上げる。

注

（1）総合科目群についての詳細は，佐野，鄭，斉藤，吉田（2019）[7]を参照。

（2）本実践におけるルーブリックについての詳細は，山同ほか（2017）を参照。

参考文献

[1]佐藤勢紀子.”多様な専門分野のサンプル論文を用いたアカデミック・ライティングの指導法”. 専門日本語教育研究. 2006, 第 8 号, 39-44.

[2]細川英雄.”日本語教育は何をめざすか：言語文化活動の理論と実践”. 2002, 第 1 刷,明石書店

[3]武 一美,市嶋 典子,キム ヨンナム,中山 由佳,古屋 憲章. ”活動型日本語教育における評価のあり方について考える”. WEB 版日本語教育実践研究フォーラム報告. 2007, 2007 年度日本語教育実践研究フォーラム（2018 年 3 月 18 日アクセス）.

[4]市嶋典子. ”対話的アセスメントの実践研究”.アセスメントと日本語教育. 2010,くろしお出版, 125-152.

[5]山同 丹々子, 高橋 雅子, 伊藤 奈津美, 藤本 朋美, 安田 励子. “ルーブリック作成と評価観点の「ずれ」の分析 －上級前半レベルのレポート課題－”. 早稲田日本語教育実践研究. 2017, 第 5 号, 123-130.

[6]ゲルモン，S.,ホランド，B.A.,ドリスコル，A.,スプリング，ケリガン，S..”社会参画する大学と市民学習アセスメントの原理と技法”. 第 1 版, 2015, 山田一隆（監訳），学文社.

[7]佐野香織, 鄭在喜, 齋藤智美, 吉田好美. ”総合日本語 1・総合日本語 2 履修者実態調査報告”.早稲田日本語教育実践研究. 2015, 第 7 号, 7-14.

著者紹介

佐野 香織

2018 年 お茶の水女子大学大学院博士後期課程修了. 人文科学博士. 2016 年より, 早稲田大学講師. 現在に至る. 日本語教育，成人教育・学習に従事. 日本語教育学会，言語文化教育研究学会，異文化間教育研究学会各会員.

シンガポールでのフィールドワークを通したグローバル人材育成の試み
―高等学校における教育実践―

赤塚 祐哉[1]

An Attempt to Foster Global Citizens through Field Work in Singapore: A Practice at Senior High School Level

AKATSUKA Yuya

アブストラクト

本稿は，高校生を対象としたグローバル人材育成教育に関する実践報告である。国内の高等学校におけるグローバル人材育成の方法について一般化を図ることねらいとし，高校生５名を対象に，シンガポールにおいて海外フィールドワークを実施した。本研究の課題は，1)どのようなプログラム構成・学習方法が考えられるかを検討すること，2)生徒の意識変容がどの程度起こるのかを検証すること，の２点である。理論的バックボーンとして，地域・社会の中で偶発的に遭遇する状況に対処することで学びを深めることが有効であるとする「状況的学習」の手法を援用した。検証にあたり，事前・事後の意識変化について，生徒が書いた振り返り課題を基に質的テキスト分析を実施した。その結果，①英語力向上への意欲，②物事を多面的・論理的に捉える，いわゆる批判的思考態度の高まり，③自分の意見を主体的に発信していく重要性への気づき，の３点が確認された。

This is a practice report on fostering global citizens at senior high school level in Japan. An overseas fieldwork in Singapore was conducted among private senior high school students, aimed at establishing appropriate approaches to foster global citizens. The following were the two major research points: 1) considering an appropriate programme setting and teaching approaches for senior high school students, and 2) analysing students' global awareness before and after participating in an overseas programme. Practice activities were based on the 'situated learning' theory—learning from real-life situations and coping with a variety of randomly generated tasks. To measure the practice effects, a qualitative text analysis of students' reflective essays was conducted. The results indicated the following: 1) students' intrinsic motivation towards

[1] 本論文は、早稲田大学本庄高等学院（2020）「研究課題Ｂ－１世界のヤングリーダーとの友好を育むインバウンド観光プランの協働学習」、『スーパーグローバルハイスクール研究成果報告書（第５年次)』に加筆・修正を加えたものです。

improving their English proficiency skills increased, 2) their critical thinking attitudes improved, and 3) their awareness of the need to express own opinions and ideas was enhanced.

キーワード：グローバル人材育成, 海外フィールドワーク, 高等学校における教育実践, 状況的学習，21 世紀型スキル

1. はじめに

変化の移り変わりが激しく，予測の難しい 21 世紀を生き抜く若者の育成には，多文化が交わる状況でのコミュンケーションや異質な集団との交流が必要であると言われている（OECD, 2019）[1]。しかし，教育課程で定められた教科・科目を高等学校の教室内のみの学びで完結するだけでは，こうした若者の育成は難しい。多くの先行研究で，海外でのフィールドワークを通して，21 世紀を生き抜くために必要なスキルを有する若者を育成できる可能性を指摘しているが（山本，今野，岸，& 久保田，2012，篠原，2015 ら）[2][3]，どのような教育方法・手立てが有効であるのかについての実証研究・成果検証は十分であるとは言えない。Herrington and Oliver (2000)[4]や Meyers and Nulty (2009)[5]によれば，教室内外での真正な学び(Authentic learning)がこうした若者の育成に有効な手段であるとしている一方，Lave & Wenger (1991)[6]は地域・社会の中で偶発的に遭遇する状況に対処することで学びを深めることが有効であるとする，「状況的学習」を行うことが有効であるとしている。たしかに，海外フィールドワークでは，これまでに高校生が体験したことがない偶発的な状況が連続する。こうした状況下に短・中期的に身を置くことで，「状況的学習」が促進され，21 世紀を生き抜くためのスキルが身につくという説明も可能かもしれない。しかし，限られた期間の中で効果的にこうしたスキルを高校生が身につけるためには，どのような教育方法が適切なのだろうか。この問いについて，本稿では次の 2 点を研究課題とし，高校生の意識変化について生徒が書いた振り返り課題を基に分析し，国内の高等学校におけるグローバル人材育成の方法について一般化を図ることを狙いとする。 1 つめは，海外交流校と連携するうえで，どのようなプログラム構成・学習方法が考えられるかを検討する。 2 つめは研修プログラムに参加した生徒の意識変容がどの程度起こるのかを検証する。これら 2 点の課題に迫るため，研修プログラムに参加した生徒の振り返り課題を分析し，プログラム構成や学習方法の効果を捉え，意識変容の程度を捉える。

2. 調査対象者

本プロジェクトには，文部科学省のスーパーグローバルハイスクール（SGH）に指定されている関東地方の私立高校生 5 名の生徒（高校 1 年生 3 名（男子 1 名，女子 2 名），高校 3 年生 2 名（女子 2 名））が参加した。なお，本プロジェクトのプログラムの構築や指導は筆者が実施した。参加生徒の英語力は様々で，事前に実施した英語資格試験「GTEC」のスコアも欧州言語参照枠（CEFR）[注 1]で B1 レベル（自立した言語使用者）から C1 レベル（熟練した言語使用者）と幅が広い。また，5 名中 4 名は高校入学前までに，1 年以上の海外在住経験があり，1 名は日本国内

のみで過ごしてきた。本プロジェクトへの参加は任意であり，選抜にあたり公募制を採用した。15 名ほどの希望者がおり，第 1 次選考として英語による書類審査を実施した。具体的には，A 4 サイズ 1 枚の紙に英語で応募動機と研修プログラムで何をどのように貢献できるのか記述させた。第 2 次選考として英語による面接試問を実施し（ 1 人あたり 10 分程度で志望動機や研修プログラムで取り組みたいことの確認），最終的に 5 名に絞った。なお，それぞれの選考では日常の意思疎通に困らない程度の英語力は確認したものの，英語力の程度については選考の基準とはせず，物事を深く見るポテンシャルがあるかどうか，また 1 年間にわたり事前・事後学習への参加も継続して参加可能かどうか，という視点を選考基準に盛り込んだ。

3. 分析方法

高校生 5 名の生徒の振り返り課題を調査対象とした。振り返り課題は，海外フィールドワーク参加後， 1 週間以内に電子データ形式で提出することを求めた。回収率は 100%である。振り返り課題については，質的テキスト分析を実施し，研修プログラムに参加する事前・事後での意識変化を捉えた。

4. プロジェクトの内容

調査対象校と教育研究提携を締結しているシンガポール・ナショナルジュニアカレッジ（National Junior College， 以下 NJC）の生徒らと，本プロジェクトに参加した 5 名の生徒と共同調査・研究を行った。本プロジェクトでは，インバウンド観光に関する調査・研究を実施することとし，シンガポールまたは日本に短期滞在する外国人観光客が，Twitter， Instagram 及び Facebook といったソーシャルメディアによって，どの程度観光場所の選定に影響を与えたのかについて探究していくこととした。文献調査及びシンガポール・日本国内での街頭インタビューを学習の主軸とし，最終的にはポスター形式で研究をまとめ，研究会で成果発表を行った。具体的な流れと手立ては以下の通りである。

4.1 事前学習

本プロジェクトでは，現地におけるフィールド調査を通して，生徒が自律して学習活動ができるよう全 10 時間設け，以下の知識について事前に口頭で網羅的に指導した。

・APA 6th Edition に基づいた原稿作成の方法
・質的分析・量的分析の特徴と具体例
・半構造化インタビューの進め方
・リサーチクエスチョンの立て方
・文献調査の方法
・NJC の生徒と研究テーマの設定，リサーチクエスチョンの設定，文献読み込みの分担

なお，事前学習の期間は 2019 年 5 月下旬から 2019 年 7 月上旬までの期間で全 6 回（ 1 回あたり 60〜90 分）実施した。その内容は表 1 の通りである。

表 1
事前学習の内容

セッション	学習内容
第 1 回目	本プロジェクトの概要説明，予算説明，交流内容の説明，保護者同意書の配布，自己紹介
第 2 回目	文献調査の方法説明，質的分析・量的分析の特徴と具体例提示，リサーチクエスチョンの設定方法
第 3 回目	NJC 生徒と Skype による交流（自己紹介，学校紹介，研究テーマの設定，文献収集・読み込みの分担決め）
第 4 回目	Web of Science を活用して文献収集，読み込み，リサーチクエスチョン候補の絞込み
第 5 回目	NJC 生徒と Skype による交流（文献調査に関する情報共有，リサーチクエスチョン決定，フィールド調査内容に関する話し合い）
第 6 回目	APA 6th edition に基づいた原稿執筆方法，半構造化インタビューの進め方に関する説明

なお，生徒達はシンガポール現地での路上インタビュー実施に向けて，NJC の生徒とバディを組みながら半構造化インタビュー調査を行うこととし，事前に質問内容について考えた。

4.2 シンガポールにおける学習

シンガポールでの学習を 2019 年 7 月 16 日から 20 日までの計 5 日間実施した。現地では，NJC の生徒と共同で文献調査，街頭での半構造化インタビューの実施，研究の中間まとめを行った。参加生徒は期間中 NJC 生徒宅にホームステイを行い，シンガポールの現地での暮らしも体験した。

図 1. Google document を活用した共同論文作成の取り組みの様子

NJC では，文献調査の読み込みや討議を行い，生徒が各自で持参したノートパソコンを活用して，Google document を用いながら論文の執筆を全員が同時進行で行った。それぞれが異なる先行研究を読み込み，理解の内容を共有し，論文の先行研究調査の項目に落とし込む，という

流れで学習を実施した。

その後，シンガポールの観光地である統合型リゾート施設セントーサ島を訪問し，NJC の生徒と２人１組のバディを組んで街頭インタビューを３時間実施した。インタビューは半構造化インタビューの形式をとり，全 100 名程度のサンプルを収集した。対象者はランダムに抽出し，観光客であると判明した人に対して調査を行った。バディを組んだことで，英語がうまく聞き取れなかった際，NJC の生徒に支援を求めるなどして，互いに協力しながらインタビューを遂行していた。

図 2.　NJC での中間報告の様子

街頭でのインタビュー実施後は，NJC にて調査結果の取りまとめと中間報告会への準備を行った。なお，中間報告会の前に１時間程度の時間をとり，２名の教員（筆者および NJC 担当者）がプレゼンテーションに方法等について指導・助言を行った。

4.3　国内での学習―NJC の来訪

2019 年 10 月 28 日から 11 月 2 日の計 6 日間, NJC の生徒・教員が来訪し，協働による学習を実施した。東京・浅草にて街頭インタビュー調査の実施を実施し，その後に調査結果を取りまとめ，その成果を早稲田大学情報教育研究所・明治大学サービス創新研究所主催の「教育の国際化研究会」（2019 年 10 月 30 日実施）にて英語で口頭発表を実施した。なお，インタビュー調査の手法・質問項目はシンガポールで実施した内容と同様である。

研究会では 40 分間，スライドを用いた英語による報告を行った後，質疑応答を 15 分程度行った。やりとりはすべて英語で行われた。

図 3.　「教育の国際化研究会」での英語による口頭発表の様子

5.　結果と考察

本節では，本プロジェクトに参加した 5 名の生徒の振り返り課題を取り上げ，生徒達にどのような意識変化や学びへの気づきがあったのかについて考察していきたい。なお, 5 名の生徒は A, B, C といった記号で示す。以下は生徒 A の振り返りである（下線部は筆者による加筆）

私はこの研修に参加して以前よりも「研究」についての理解が深まったと感じた。・・・（中略）・・・今回の研修を通して，共同研究とはどのようなものなのか，どのようにテーマに対してアプローチをかけていけば良いのかを学ぶことができた。この学びはこれから卒業論文を執筆していく私にとってとても意味のあるものになった。

また，ホームステイやリーダーの経験を通して，英語を外国人の前で話すことに対しての抵抗が減ったように感じた。・・・（中略）・・・ある程度の簡単な会話ができればいいだろう，という安易な考え方が変わった。なぜならば，その程度の英語力だと，仲良くなれたとしても，簡単な話しかできずに会話が広がらず，つまらない関係になってしまうからだ。今回も自分の言いたいことが上手く伝わらず，悔しい思いをしたことが多々あったのでもっと語彙を増やしたいと感じた。・・・（中略）・・・現地ではアンケートに答えてもらいながら，旅行客の意見や考えを直接聞くこともできた。私は，今までに講義，文献調査しかしたことが無かったので貴重な経験になった。人に話しかけるのは苦手ではないものの，外国人観光客に話しかけるのは勇気が必要になったし，得意ではない英語を多用しながらのアンケートは大変だった。・・・（中略）・・・このプロジェクトに参加して自身の英語力の低さに気づき，意識改革ができたことを将来に活かすことができると感じている。・・・（中略）・・・異文化の中で生活し，同年代の人たちと同じテーマに対して，意見を交わすことができたのは私にとってとても有意義であったと感じている。また，外国人の中では何も発言しないと，それは賛成しているということがわかり，何か意見はある？という質問すらもされないことがわかった。その文化の中で，合っているにしろ，間違っているにしろ，自分の意見をはっきり言うことは大切だと思ったし，自身の中にある主体性は今後も大切にしようと思った。

生徒 A は本プロジェクトのリーダーとして 5 名を取りまとめる立場にいた者である。海外での滞在経験はなく，日本国内で義務教育を経験してきた。英語力についても，CEFR B1 レベルであり，英語が特段得意ではないものの，英語を使ってコミュニケーションを図ろうとする意欲が旺盛な生徒である。振り返り課題から，英語使用に対する抵抗感が減ったことと，英語の語彙を増やそうという意識が芽生えたことが確認できる。また，街頭インタビューで英語を用いる大変さを実感したものの，その困難を乗り越えている様子がうかがえる。加えて，異質な環境での学習体験を通して，自分の意見を相手に明確に伝える重要性についても実感していることが確認できる。続いて，生徒 B の振り返り課題である。

> ･･･(前略)･･･研修に参加する以前は，研究というと，複雑で難しいイメージがありましたが，1 つひとつ段階を追って研究を進めることでわかりやすくなり研究に親しみをもつことができました。･･･(中略)･･･今までに一度も，現地に直接出向いてアンケート調査をし，データ収集をした経験が無かった私にとってとても新鮮な取り組みでした。また，英語を通して自分とは違う国の生徒と意見を交換することで今まで自分が持っていなかった視点から新たな問題を見つけることができ，新たな発見もできたため自分の視野を広げることができました。自分たちの話し合いだけでは気づくことができなかった問題点に気づいて改善することができ，より良い研究にすることもできました。･･･(中略)･･･今回の研修で英語の論文を読んだり，英語で意見交換をしたり，英語に親しむことができたため，研修前と比べて，より英語を好きになることができましたし，英語の力も向上させることができました。･･･(中略)･･･日頃から身の回りのものに広く目を向け，自分の興味があることから新たな事実を見つけていくために自分なりに研究していきたいです。研究する対象のものだけを見て深めていくのではなく，様々な方向から見て広く考えてられるように自分を高めていきたいです。

生徒 B は高等学校 1 年生に在籍する生徒であり，義務教育段階のうち数年間を英語圏で過ごした経験をもつ。生徒 B の振り返り課題では，研究に対する親しみを覚えたことに加え，「自分たちの話し合いだけでは気づくことができなかった問題点に気づいて改善することができ」という記述から，物事を多面的に捉える重要性についての認識が深まっていることが確認できる。「様々な方向から見て広く考えてられるように自分を高めていきたい」という記述からは，批判的思考態度の高まりが確認できる。続いて生徒 C の振り返り課題である。

> ･･･(前略)･･･事前研究では，CiNii article， web of science，や，Scopus を使い，オーバーツーリズム につて色々しらべましたが，少ししかヒットせず，資料の少ない中での研究となってしまいました。しかし，少ないながらその資料の中に有力な情報が載っていたりしたので，いくら少ない資料でも，いくら難しい英語の論文だろうと，まずは読んで見ることが大事だと実感しました。･･･(中略)･･･シンガポールでの研究では，バディを組み，バディ同士で一つの論文を読んだりして，お互いに論文の理解を深め，自分たちの研究内容に沿っている部分を見つけ出して，google document に，書き出して，バディだけでなくチーム全体に情報を共有できるようにしました。その結果，十一人がそれぞれのトピックにフォーカスしているので情報が効率的に集まり，短時間でありながら，情報が多く更に役立ちそうなものが集まったので，グループワークは，効率性に

> 富んだ方法だとわかりました。・・・(中略)・・・シンガポールに行く前までは，シンガポールは人が多くて，オーバーツーリズムが起きていると思っていたのですが，実際あまりオーバーツーリズムが日本より進んでないことがわかりました。

生徒 C の英語力は CEFR B2 レベルであり，義務教育段階で海外での教育経験がある生徒である。振り返り課題では，難しい論文の読解に挑戦する意欲の高まりやグループ研究のメリットについて見出していることが確認できる。加えて，現地での調査を通して，事前にもっていた認識との違いに気づき，現地調査の大切さについて実感している様子が読み取れる。続いて，生徒 D の振り返り課題である。

> ・・・(前略)・・・私たち日本サイドの意見を相手に伝えるのには，苦労した。私たちは，当初，インバウンド観光の中でも，オーバーツーリズムを研究テーマとして推していたのだが，シンガポールでは，オーバーツーリズムの事例がみられないなどの理由から，案自体が消えようとしていた。しかし，私たちも，事例がないなら，日本とシンガポールとの比較研究がしたいと考え，折衷案を提案したのだが，結局，オーバーツーリズムはサブテーマとしての扱いになってしまった。この経験を通して，自分の考えを貫き，それを相手に理解してもらう難しさを痛感した。それと同時に，相手に意見を主張されてから行動するのでは遅い，ということも身をもって実感した。事実，これまでの研究は，相手の積極性に圧倒され，言われたことをとりあえずやる，といった風に受動的になることが多かった。ときには，相手のスピードについていけず，認識に違いがでるということもあった。自分の意見を通すため，そして，研究がそれぞれ違った方向に行かないためにも，お互いがより主体的に話し合いに乗り出していかなければと思った。また，分からないことや確認したいことがあるときには，間を置かず質問するということを徹底していきたい。・・・(中略)・・・研修を通して，仲間と協力するという面白さと大変さを知った。自分とは違う視点を持った人とはたらくのは，同時に，新しい考え方を知ることができたり，お互いの足りない点を補ったりすることができる。もちろん，意見を擦りあう分，エネルギーも要する。しかし，そんな仲間と出会えたことは，自分にとって，非常に良い刺激となったと確信している。

生徒 D は高等学校 3 年生で，海外での生活体験をもつ。英語力も CEFR C1 レベルであるが，NJC 生徒との議論に参加する困難さを体験していることが確認できる。生徒 D は「お互いがより主体的に話し合いに乗り出していかなければと思った」と振り返っており，本プロジェクトを通して相手の意見を聞いたり，自分の意見を積極的に発信していく重要性について認識を深めていることが確認できる。加えて，「自分とは違う視点を持った人とはたらくのは，同時に，新しい考え方を知ることができたり，お互いの足りない点を補ったりすることができる」との記述から，異質な環境にいる生徒との交流を通して，物事を多面的に捉えることができる実感を伴っていることが確認できる。続いて，生徒 E による振り返り課題である。

> ・・・(前略)・・・シンガポールに行ってすぐ，NJC の生徒たちは，とてもフレンドリーにたくさん話しかけてくれたのだが，その会話のスピードについていけず，相づちを打つだ

> けで精一杯だった。・・・(中略)・・・同時に自分がいかに日本のことを知らないかを思い知った。NJC の生徒は，シンガポールについて，オススメの食べ物から教育制度にまで，詳しく私に教えてくれた。・・・(中略)・・・日本語を英語に直せないのではなく，日本のことを知らないから話せないのだ。・・・(中略)・・・筋道の通った論理的な文章は，まず，話したいことを要約することから始めたい。話す力を伸ばすには，書くことが効果的だと聞いたことがあるからだ。そこで，日記をつけてみようと思う。ただ出来事を書き連ねるだけでなく，自分の感情や意見を書くことで，トレーニングをしようと思う。私は，自分の考えを持つことや，それを人に説明することが苦手なので，話す力と同時に向上させられたら一石二鳥だと思う。

生徒 E は海外での生活経験があるが，非英語圏の日本人学校に通っていた生徒である。英語力は CEFR B2 レベルである。生徒 E の振り返り課題では，研究そのものについての意識変化・気づきよりも，自分のコミュニケーション能力に関する振り返りが中心となっている。生徒 E は「自分がいかに日本のことを知らないかを思い知った」と述べており，自国の知識をもち，それを相手に紹介することの大切さを認識していることが確認できる。また，「筋道の通った論理的な文章は，まず，話したいことを要約することから始めたい」と述べており，共同研究を通して，論理的思考力の大切さの気づきを得ていることが確認できる。

以上，5 名の生徒の振り返り課題をみることで，生徒の意識変化や学びの変化を捉えた。大まかに分けて，①英語力向上への意欲，②物事を多面的・論理的に捉える，いわゆる批判的思考態度の高まり，③自分の意見を主体的に発信していく重要性への気づき，の 3 点が確認された。

6. おわりに

シンガポール及び日本の生徒達が共同での研究を通して，学校内の学びだけでは得られない学習体験があったことが確認できた。変化の移り変わりが激しい今日に対応し，リーダーシップを発揮できる若者の育成に相応の効果があったと言える。これは，OECD（2019）が示している多文化が交わる状況でのコミュンケーション，そして異質な集団との交流を通してそうした若者が育成できる，とする内容にも通じるところがある。生徒達は，本プロジェクトでの学びを通して，これまでに自分が認識していなかった新たな気づきを得られ，今後の学習への意欲に相当程度結びついてることが確認された。閉ざされた教室内での学びとの比較についてまでは本報告では踏み込んでいないものの，振り返り課題を分析する限りでは，大きな学び・気づきにつながっていることが観察された。Lave and Wenger (1991)は状況的学習を通して，生徒の学びが深まるとしているが，本プロジェクトでもそのことが確認できたと言える。

参考文献

[1] OECD (2019). *6. PISA 2018 Global Competence Framework*. Retrieved from https://www.oecd-ilibrary.org/sites/043fc3b0-en/index.html?itemId=/content/component/043fc3b0-en (Accessed on August 19, 2019)

[2] 山本良太，今野貴之，岸磨貴子，久保田賢一. (2012). 海外フィールドワークにおける学習を促

す要因の検討 ： 協働する他者との関わりに注目して. *日本教育工学会論文誌*, *36*, pp. 213-216.

[3] 篠原收. (2015). グローバル人財・グローカル人財育成に向けた教養教育(2). 平和学メジャー海外フィールド・ワークの授業開発・実践・課題. *国際教養学部紀要*, No. 2, pp. 41-45.

[4] Herrington, J., & Oliver, R. (2000). An instructional design framework for authentic learning environments. *Etr & D-Educational Technology Research and Development*, Vol. 48, No. 3, pp. 23-48.

[5] Meyers, N. M., & Nulty, D. D. (2009). How to use (five) curriculum design principles to align authentic learning environments, assessment, students' approaches to thinking and learning outcomes. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, Vol. 34, No. 5, pp. 565-577.

[6] Lave, J. & Wenger E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation.* Cambridge: Cambridge University Press.

【注 1】

欧州言語参照枠（CEFR）の熟達度については, 文部科学省（2018）「各資格・検定試験と CEFR との対照表」

https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/30/03/__icsFiles/afieldfile/2019/01/15/1402610_1.pdf で閲覧可能である。

著者紹介

赤塚 祐哉

2013 年 オーストラリアンカトリック大学大学院教育リーダーシップ修士課程修了. 早稲田大学本庄高等学院教諭, 同大学情報教育研究所研究所員. NHK ラジオ高校講座「コミュニケーション英語 II」講師を勤める. 日本国際バカロレア教育学会理事.

インターネットを使った異文化国際交流における多様性教育の検証と考察
―アジアの国との交流を通じて
日本の子どもたちの学習意欲は変わったのか―

炭村 紀子

Verification and Consideration of Diversity Education in Intercultural International Exchange Using the Internet, Through Exchange with Asian Countries Did Japanese Children's Willingness to Learn Change?

SUMIMURA, Noriko

本稿は，2017 年度大阪府三島郡島本町第一小学校とインドネシアのジャカルタ SDN Mentang 01 小学校の 5 年生同士と同じ学校同士で別日に６年生同士，そして同じ年度に島本町立第四小学校と台湾台南市善化國民小學の５年生同士が Skype を用いた同時刻の国際交流授業を行った。それら授業の終了後日本の児童 71 名のアンケート結果から，本取り組みによって子どもたちが異文化への関心を示し，英語科としてだけでなく，文化などに関しても学習意欲につながるかを ICT 支援員の視座において検証し考察する。

インターネット：多様性教育，国際交流，異文化理解，外国語，伝統，双方向通信，ビデオ通話

1. はじめに

今回の大阪府三島郡にある小学校における国際交流は，沖縄県恩納村教育委員会および NPO 法人スプラタルカの仲介協力でアジア諸国の小学校と行うことができた。今という時間をビデオ通話によって，お互いが英語で会話することで得られる感動から，英語教育だけでなく相手のことを知ることでの異文化教育，自身の国のことを伝えるために事前に準備することで日本の伝統を学ぶ社会科教育にも意欲をもって意欲を持って取り組めたかをアンケ―トをとり検証した。

この取り組みは 2016 年から継続して行っており今後の課題などにおいても考察していく。

２．小学校での外国語教育の現状

小学校の英語教育は，2008 年度から始まり，2011 年度には５・６年生に必修化，2020 年度には３・４年生必修化，５年生からの教科化される。外国語活動では英語嫌いを生み出さないことを理念としている（文部科学省，2004 年）が，英語活動が必修化された５・６年生に英語嫌いの児童が相当数いることが明らかになっており（横石，2012），横石は英語活動に対して「低意欲･高

不安」になっている子どもが，５・６学年においてそれぞれ 38%存在していたと述べている。

また，吉田（2009）は中学校入学時に「英語が好き」であり，「中学校で英語を学ぶことが楽しみ」な生徒が 50%にも達していないことから，小学校時代の英語の学習内容が影響している可能性が高いと述べている。

３．研究の目的

本研究の第一目的は，英語教育だけにとどまらず，インターネットを使った国際交流を通じて，同時刻にお互いがビデオで会話し，英語を会話し通じあうことによって感動や喜びを伴った体験が，他国への関心度や興味付けを生み，異文化へ理解，自国のことを伝えるための伝統文化への学びなどにつながることに関心度が高まり，しいては英語や英会話への向学心や学ぶ意欲への向上へとつながるのではないかと検証を行った。

下記 NPO 法人 Supratarka（2017）の理念として下記の５つの方針を記載する。

3.1.1　ビデオ通話（Video Communication System）の可能性

高速インターネット通信・パソコン・プロジェクタなどの基本的 ICT 環境が整っていれば，ビデオ通話によるコミュニケーションが可能である。この仕組みを活用することで，地球上のどの地域に住む子供たちでも，特別の経費をかけることなく直接交流することがでる。

ビデオ通話は映像によるコミュニケーションなので，より現実に近い直観的な交流が可能であり，また，お互い現実の時間を共有するリアルタイムのコミュニケーションでもある。

3.1.2　同世代による相互理解

世界中の同世代の子供同士が，直接コミュニケーションをとることができる。お互いの文化や歴史や日常を紹介し，また意見交換することで，誤解や偏見の解消につながる。
次世代を担う子供たちが，お互いを理解することの価値は計り知れない。無用な誤解をなくし信頼を築くことで，将来のビジネスパートナーともなり得る。

3.1.3　対等なコミュニケーション

特別な経費がかからないので、いずれの国や地域の子供たちも対等な立場で参加することができる。

3.1.4　誰にでもチャンスがある

特別な経費がかからないので、選ばれた者に限らず誰にでも交流の機会を提供することができる。

3.1.5　学校をつなぐ信頼あるネットワークの構築

国や地域を超えた学校間で交流を行うには、お互いの信頼関係が前提となる。このような、学校同士が安心して交流を行えるためのネットワークの構築が使命である。

3.1.6　世界の平和に向けて

国や地域を超えた子供たちの相互理解が、世界の平和構築の新たな力となることが期待できる。

４．国際交流後の児童に対する質問紙調査の結果

4.1　小学５年生２クラス 71 名，無記名による調査

提出されたアンケート 71 本から得られた 355 件の中心発問を分析対象とした。「KH Coder」

を用いて前処理を実行した結果，342 の段落，379 の文が確認された。また，総抽出語数は 5,132 語，異なり語数（何種類の語が含まれていたかを示す数）は 531 語であった。さらに，助詞や助動詞など一般的な語が除外され，分析対象となる頻出語として 1,156 語が抽出された。これら頻出語のうち 5 項目の品詞各上位 10 語とその出現頻度を示したものが〈図 1〉である。中心発問における頻出語（5 項目の品詞各上位 10 位）である。「楽しい」（111 回），「英語」（86 回），「相手」（49 回），「交流」（43 回），「面白い」（39 回），「知る」（35 回），「話す」（31 回），「話せる」（26 回）と出現回数が突出しており，以下，「外国」（26 回），「違う」（20 回），「言葉」（19 回），「知れる」（19 回）など上位 20 位は 111～10 回の範囲で出現が確認された。

	名詞		サ変名詞		形容動詞		動詞		形容詞	
順位	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
1	英語	86	交流	43	いろいろ	11	思う	84	楽しい	111
2	相手	49	経験	10	元気	3	知る	35	面白い	39
3	外国	26	授業	8	好き	3	話す	31	良い	10
4	言葉	19	会話	6	ふしぎ	2	話せる	26	明るい	4
5	国際	15	給食	5	上手	2	違う	20	興味深い	3
6	自分	15	発音	5	不思議	2	知れる	19	広い	3
7	学校	11	話	5	あたりまえ	1	学ぶ	10	多い	2
8	興味	7	勉強	4	スムーズ	1	通じる	8	暗い	1
9	友達	7	ダンス	2	重要	1	言う	7	強い	1
	世界	6	学習	2	大事	1	学べる	6	上手い	1

図 1.　アンケート結果による頻出語（上位 10 位）

5．語の共起関係の探索と自由記述の要約

KH Coder の「共起ネットワーク」のコマンドを用い，

Q1:また国際交流をしたいですか（来年や，中学生になっても）

Q2:今回の国際交流授業を通して，もっと英語を学びたいと思いましたか

Q3:相手の国のことは，あなたにとって興味深いものでしたか

Q4:違う国の相手とつながることをあなたはどう感じますか

Q5：その他なんでも感想があればかいてください

の質問に対する自由記述それぞれの中で，出現パターンの似通った語（すなわち共起の程度が強い語）を線で結んだネットワークを描いた（図 1 及び 2)。なお，分析にあたっては，出現数による語の取捨選択に関しては最小出現数を 5 に設定し，描画する共起関係の絞り込みにおいては描画数を 60 に設定した。

5.1　Q1:また国際交流をしたいですか（来年や，中学生になっても）

図 3 及び図 4 は，Q1 の来年や，中学生になってもまた国際交流をしたいですかに対する，分析結果を示したものである。

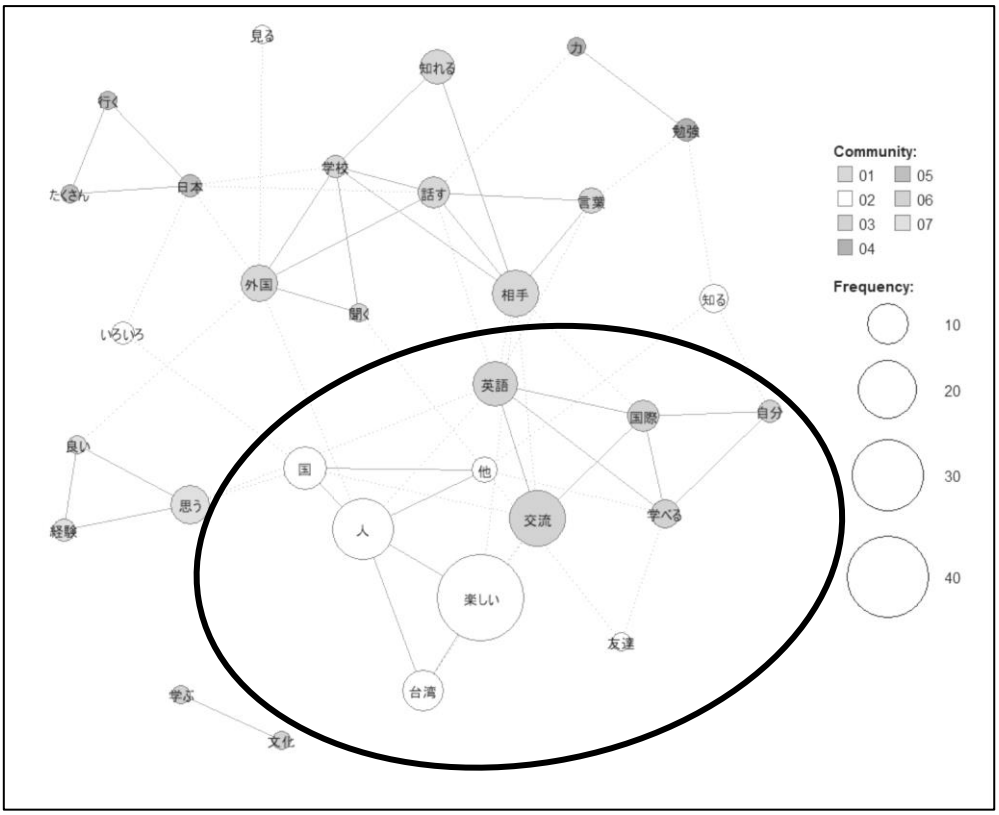


図 2.　共起ネットワーク（サブグラフ）

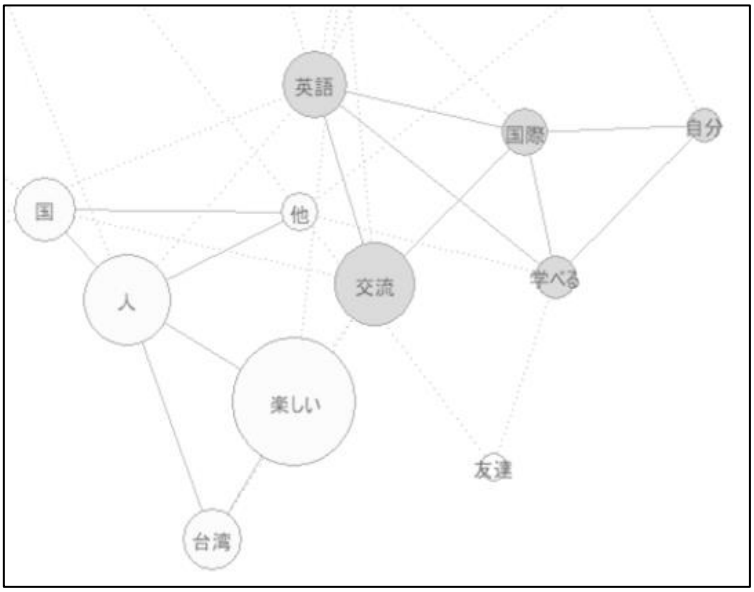


図 3.　共起ネットワーク（サブグラフ）拡大図

図 3 及び 4 では，強い共起関係ほど太い線で，出現数の多い語ほど大きい円で描画されている。また，語（node）の色分けは「媒介中心性」（それぞれの語がネットワーク構造の中でどの程度中心的な役割を果たしているかを示す）によるものであり，白から色の濃いものの順に中心性が高くなることを示す。以下では，図 2 及び図 3 に示した語の共起関係をもとに，分析者が特

徴的な記述のまとまりと判断したものを項目として立て, 子どもたちの実際の記述を“ ”内に原文のまま抜粋しつつ，書き方が違う，例えばおもしろいと面白いは漢字の方に統一した。分析結果から, 国際交流によって英語を学ぶことに興味関心が増えたという表記が多く,「台湾という国のことを知ることが出来て良かった」,「台湾の人と交流できて，実際にも会ってみたい」などという表記もあった。

5.2 Q1 から Q5 まですべての語を分析

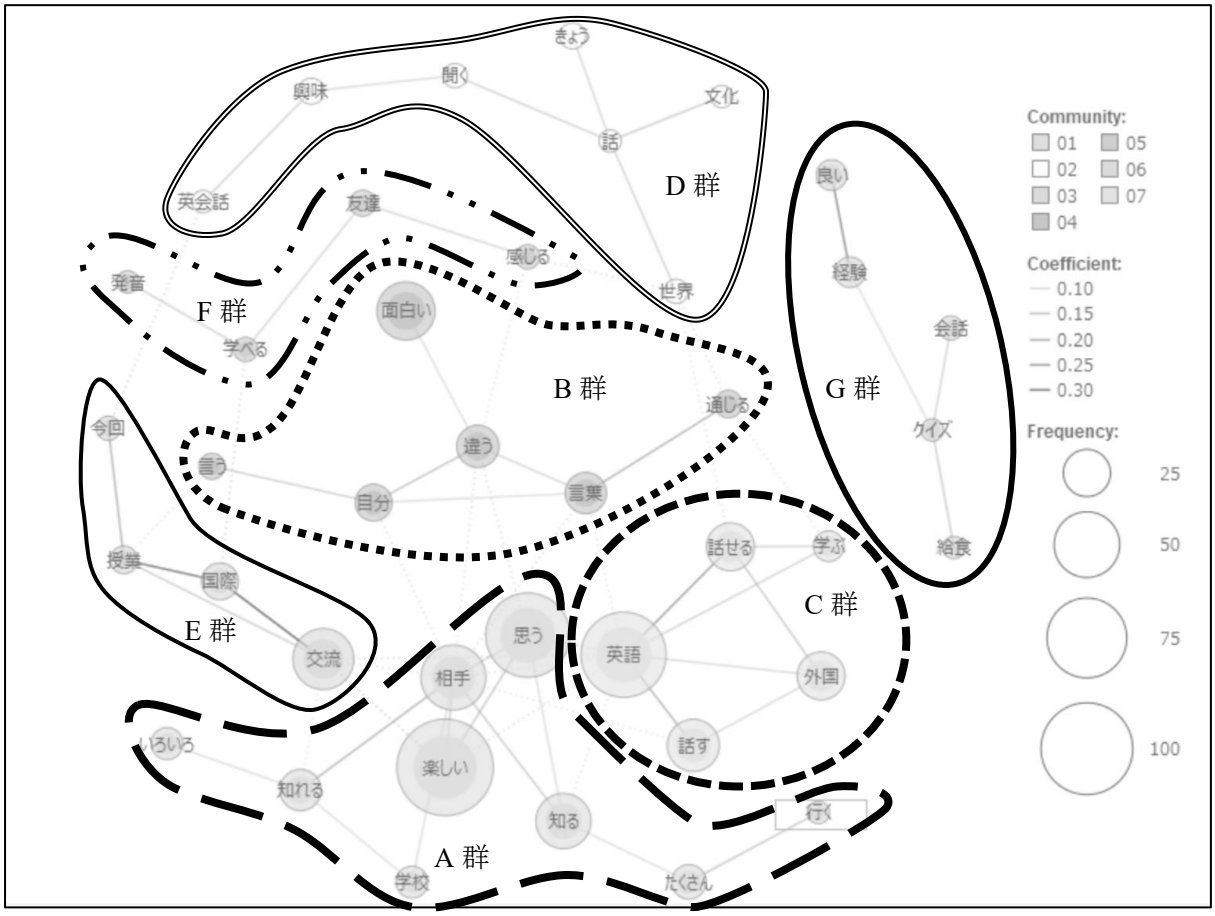


図 4. 共起ネットワーク（サブグラフ）拡大図

上記共起ネットワークの図 4 から，出現言語のまとまりを下記にまとめると，A 群が「楽しい・相手・思う・知る・知れる・学校・いろいろ」，B 群が「面白い・違う・言葉・自分・通じる・言う」，C 群が「英語・話せる・話す・外国・学ぶ」，D 群が「世界・話・文化・今日・聞く・興味・英会話」，E 群が「交流・授業・国際・今回」，F 群が「感じる・友達・学べる・発音」と出てきた。このことから，相手国のことを知ることが楽しく，英語を学ぶことで話すことが出来，英会話で聞くことにより世界の文化に興味を持ち，友だちが増え，違う言葉で通じ合うことが面白いと言った発話が出て生きていることが分かった。

6. 語句の頻出度と文章関連性との考察

テキストマイニングによる，単語前後の文章から見た関連性と文章分析から，国際交流授業を通じて外国語教育だけでなく，テキストマイニング分析により，子供たちの意識が外国語はも

とより外国の文化にも関心を持ち，多様性を持った学びに対し関心度が上がったということがわかった。

4. おわりに

今回行ったアンケートの内容が誘導的になっていないか，五件法でのアンケートを取っての解析がまだできていない。アンケートの数がまだ少ない。記述式のアンケート内容に短文が多い。などの改善点もあり，今後は次年度行うアンケート結果を比較し，子どもたちの感じ方に変化があるのかなどを引き続き調査・分析を行っていく。小学 6 年生で今回の交流を行った児童が，翌年度に中学校であった際に，一度の交流の機会だけだったにも関わらず，自ら筆者に話しかけてきてくれて，「国際交流はとても良かった。やったことで英語に関心が持てた，ずっとやり続けて欲しい」といった内容を話し出した。一度きりの機会ではあるが，2 カ月相手国とのやり取りの内容や英語での会話の練習を行い，当日の交流を迎えるのだが，限られた時間の中でも，このようにずっと心に残る授業ができたことは国際交流をやり続けている意義を感じる一面であった。

参考文献

[1] 越中 康治，高田 淑子，木下 英俊，安藤 明伸，高橋 潔,田幡 憲一,岡 正明,石澤 公明.（2015）“テキストマイニングによる授業評価アンケートの分析”―共起ネットワークによる自由記述の可視化の試み―．雑誌名宮城教育大学情報処理センター研究．P67-74.（2017 年 5 月 9 日）

[2] 横石和子.“小学校外国語活動における児童の不安が学習意欲に及ぼす作用に関する調査”―不安に関連する諸要因に着目して―．上越教育大学大学院提出修士論文

[3] 吉田研作.（2009）“『中学校英語に関する基本調査』から示唆されるもの--小中連携を中心に（第 1 回 中学校英語に関する基本調査報告書【教員調査・生徒調査】）”．福武書店教育研究所，ベネッセ教育研究所研究所報.

[4] NPO 法人 Supratarka. https://www.supratarka.org （2020 年 1 月 11 日アクセス）

著者紹介

炭村 紀子

2017 年　明治大学サービス創新研究所．客員研究員．2018 年 鳴門教育大学大学院学校教育研究科人間教育専攻修士課程在学．　2019 年より大阪成蹊大学非常勤講師．現在に至る．初等・中等教育における ICT 支援員に関する研究に従事．次世代大学教育研究会，日本教育工学会，情報コミュニケーション学会，日本教育メディア学会各会員.

ICT 活用時代における多言語学習の一考察
ー 言語習得能力に着目した多言語連携学習とシステムプラン ー

湯山 トミ子

New Development of Multilingual Learning in the Age of ICT Utilization: A Study on Multilingual Cooperative Learning Method and System Plan Focusing on Language Acquisition Ability

YUYAMA, Tomiko

アブストラクト

グローバリゼーションの進行，ICT の発展，モバイル端末の普及による多言語環境の出現は，言語学習と多言語コミュニケーションに大きな変化をもたらしている。しかし，多様な言語メニューを備えた大規模システムから簡便なモバイルアプリまで，現行の多言語学習は，いずれも学習者が学習言語と 1 対 1 で結ばれる単言語型学習（モノリンガル学習）であり，学習者の言語能力は，対象言語ごとの到達度として認知され，統合された言語能力として認識されにくい。本稿は，学習を通じて発展する言語能力（言語に対する構造的理解力，音声認識力，言語運用力）に着目し，これを引き出し，育成し，より効果的，効率的で，文化間理解にまで至る深い多言語学習とこれを実現するためのシステムプランについて提起し，検討するものである。

Progress of globalization, ICT development, t
he spread of mobile terminals are greatly advance the multi-language learning. However, existing multilingual learning is a monolingual type (monolingual learning) where learners connect one-to-one with the target language, from large systems with many learning languages to simple mobile apps. As a result, the learner's linguistic abilities are recognized per language as the level of achievement of the target language, and are not recognized and utilized as comprehensive linguistic abilities. This research focuses on linguistic abilities (structural understanding, speech recognition, and language acquisition abilities) that are inherent in learners and evolve through learning. I will to recognize linguistic abilities that are recognized separately for each language as integrated linguistic abilities, and aim to realize a multilingual learning method that is more effective and efficient, and that can deepen understanding of different cultures. The aim of this paper is to propose and examine this learning method and the system plan to realize it.

キーワード：多言語学習，言語能力，多文化理解，異文化理解，語用論

1. はじめに

グローバリゼーションの進行，ICT の発展，モバイル端末の普及は，かつてない勢いで言語環境の多元化，多様化をもたらし，外国学習の在り方にも大きな影響を与えている。特に，モバイル端末によるコミュニケーションの隆盛は，言語環境の空間的制約を越えて，日常的に多様な言語に接触できる機会をもたらし，無料翻訳ソフト，外国語学習ツールを使えば，いつでも，だ

れでも世界の多様な言語を学び，レベルにかかわらず，一定のコミュニケーション活動を行いえる。しかし，現行の多言語学習システムは，簡便なモバイルアプリから大規模システムまで，基本的に学習者と学習言語が一対一で結ばれる単言語学習（モノリンガル）であり，学ばれる言語間に連携性はなく，学習成果も習得言語の到達度として個別に評価される。そのため，多言語を学ぶことによって育成され，蓄積されるはずの言語能力が，統合的に認知されにくく，他の言語学習に意識的，構造的に活用されにくい。本稿の目的は，学習者のもつ言語能力に着目し，その活用により，より効果的，効率的で，文化間理解にまで至る深い学習（deep Learning）を生み出せる多言語学習とこれを実現するためのシステムプランを提起し，検討することにある。

２． 先行する多言語学習と課題

２.1　第二外国語教育制度と多言語学習の動向

日本において，もっとも多くの多言語学習者を擁するのが大学教養課程の初修外国語教育制度（第二外国語教育制度）である。しかし，その貴重な役割にもかかわらず，制度成立以来の高い到達目標と少ない教育時間という構造的矛盾に加え，変転する教育方針と教育目標に応えるべく幾多の改善を試みながら，制度的には衰退，縮減の道をたどってきた。特に，近年のグローバリゼーションの進展による英語一言語主義，18歳人口の減少による経営戦略の下で，必修単位数の更なる縮減，必修から非必修科目への変更などにより，制度存廃にも直面している。しかし，見方を変えれば，制度的揺らぎは，戦後の高等教育における言語教育の仕組みである外国語教育制度，すなわち第一外国語と第二外国語（既習語と初修語）の二分法，短期間に少ない時間数で初修語の初中級を完了するという教育の縛りからの解放をも意味する。例えば，必修二年制から一年制による教育時間数の縮減は，一年次終了時点における一律的な到達目標の縛りをゆるめ，初年度学習の自由度を高める。これにより，従来，初級学習終了後，中級レベル段階で行われるものと考えられていた母語話者との遠隔交流，さまざまなプレゼンテーション活動を初年次初級段階で行い，学習者の関心，意欲を引き出す試みも実現している（初修初年度遠隔交流実践，篠塚2017）[1]。

また，制度の下で学ぶ学習者の側にも変化が生じている。従来，英語以外の外国語への接触機会が見られなかった日本国内でも，英語以外の外国語に対する接触機会が増え，外国語への距離感が縮まり，多文化，多言語への関心も高まっている。既習外国語(多くは英語)とその他の外国語の二分枠にこだわらず，自由選択科目，留学プログラムなどを利用して，選択した言語以外の他言語を少し体験する，学んでみる学習者も珍しくない。また，中国語で英語を学び直す，英語で中国語を学ぶなど，母語にとらわれず，多少とも学習体験のある言語を用いて言語力を高めようという意欲的な学習への関心も高い。従来の第二外国語教育制度の根底にあった英語以外の言語を選び，達成度の高さを求めるかつての言語観，価値観は，制度と学び手，内と外から変化しているのである。

2.2　多言語学習システムの現在―特徴と課題

2.2.1　現行の多言語学習システムの特徴

多言語学習システムには，一言語を多言語で学ぶ「多言語対応型」と多様な言語メニューから学習言語を選択する「多言語学習型」がある。本稿が対象とするのは後者である。現行の代表的な大規模多言語学習システムには，TUFS（東京外国語大学，20カ国語），高度外国語教育独習

コンテンツ（大阪大学，20カ国語），LiveMocha（37カ国語），米国務省外交官養成コース内公開サイトFSI Language Courses（45カ国語）などがある[2]。いずれも無料で，幅広い学習者に多彩な言語メニューを提供しているが，どれも学習者と習得目標の言語が１対１で対峙する縦割り型の単言語学習であり，学ばれる言語間に連携性はなく，学習成果は言語ごとの習得度として，認知，評価される。そのため多言語学習を重ねても学習体験と学習成果は言語単位に分断される。

言語ごとに分断される言語能力を他の言語学習に活用し，言語学習をより効果的，効率的に行いえる多言語学習を実現することはできないのであろうか？　多様な言語環境，ICTによる学習支援が可能な時代であればこそ，個別学習により得られる言語体験，言語能力を他の言語学習に活用し，より多くの言語を効果的，効率的に学ぶ力とし，コミュニケーションの喜びを増し，言語理解を深める多言語学習が創り出せるのではないか？　ここに，本稿が，ICT発展時代に呼応する新たな多言語学習法として，言語能力と比較対照学習に着目した連携型多言語学習を提起，検討する理由がある。

2.2.2　新たな多言語学習システムの特徴

個々の学習者に内在し，潜在化する言語能力を認知し，より効果的，効率的で，文化間理解までを深めうる連携型学習とはどのようなものか？　下図は，日本語，英語，中国語を例とする現行の単言語型(図１，２)と連携型多言語学習(図３)の比較図である。

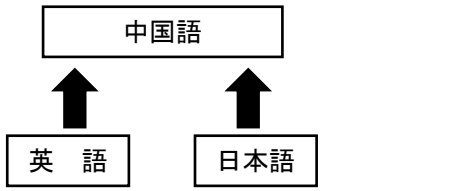


図１ 現行の単言語型（多言語対応型）

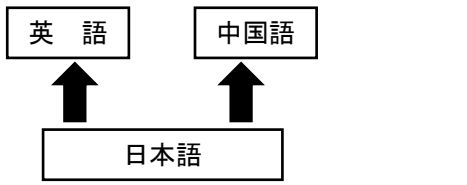


図２ 現行の単言語型（多言語学習）

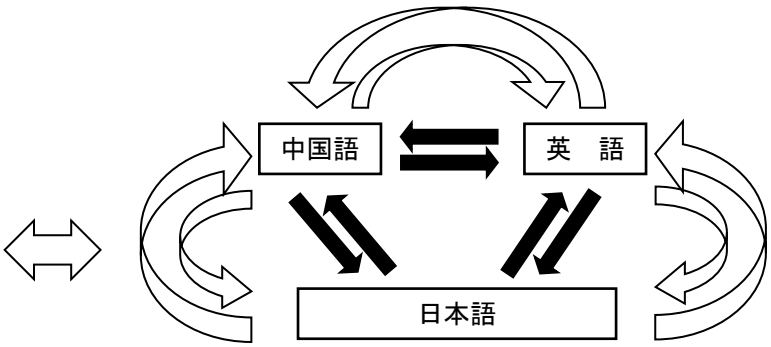


図３ 新たに提起する連携型多言語学習
（黒は学習，白は言語習得により獲得活用する能力）

本稿で述べる言語能力とは，言語種類，言語学習歴(母語＋外国語学習歴)，学習方法，到達レベル，学習環境などにより，学習者それぞれの内部に蓄積され，動的，多層的に形成されていく能力を示す。これを学習者のもつ言語力として，いかに認知し，評価し，目的意識的に発展させ，他の言語学習にも活用しうるか，まずは言語ごとの到達度とは異なる統合的な言語能力そのものの認知とこれへの働きかけが考察課題となる。

先行する言語教育領域において，学習者のもつ統合的言語能力に注目するものとして，複言語主義（母語＋複数言語を学ぶ）を唱えるCEFR（ヨーロッパ言語共通参照枠, Common European

Framework of Reference for Languages）の言語能力観がある。ただCEFRは，母語とそれ以外の複数の言語を学ぶことを提唱する言語政策を推進する基準であり，母語と他の言語との二分を基本枠組みとしている。これに対して，本稿の理解により近いものとして，CEFRの受容をめぐる論議を経て，日本から発信された言語能力観がある。それは，母語，第二言語，外国語などの言語区分を取り去り，個人のもつ言語能力の総体を重視しようとする「ことばの市民性」（自己発信と他者理解により社会を形成する個人の言語活動。細川2012．細川,尾辻，マリオッティ 2016）[3]の主張に見られる言語能力観である。

本稿で提起する連携型多言語学習では，母語，外国語を対峙させず，学習者の言語学習歴（母語＋外国語学習歴）に着目し，学習法を組み立てる。従来，個人差として認識されてきた言語学習の力を，学習者のもつ統合的な言語能力として認知し，さらに言語学習歴を構成する言語の組み合せにより，言語間の影響関係を考察し，より発展的な多言語学習の展開を追求する。

2.3 連携型多言語学習法＆システムに期待される特徴

従来の単言語型と比較して，連携型多言語学習法とシステムにより，どのような利点が生み出せるのであろうか？ 基本的なものとして，まず以下の点が挙げられる。

言語学習の面では，

①言語の枠組みに遮断されない言語能力の発展，展開により，効果的，効率的な多言語習得の可能性を促進できる。

②複数言語の連携学習により，個別の言語習得では得がたい言語表現の共通点，類似点(普遍性)，相違点(個別性，多様性)を学び，言語に対する構造的理解力を増進できる。

③従来，連携型比較学習法は，同族系列言語の枠内で検討されることが多い。本構想では，システムの活用により，同族非同族，言語類型などの言語系列に拘束されない言語比較が可能となる。特に，二言語では実現しにくい三言語，四言語の多言語比較対照学習も行える。例えば，漢字語を共有しながら相違点が煩雑なため，二言語対比に留まりがちな日本語，韓国語，中国語，ベトナム語（日韓中越）の三言語，四言語比較対照学習，これを推進するための言語研究などを推進できる。

システム開発の面では，

④言語に依存しない汎用性を持つデータベースの構築により，多様な言語メニュー，学習プランに対応でき，言語学習の発展に創造的な役割を果たせる。

⑤現行の単言語型に対して，新たな学習法と効果を期待できる連携型多言語学習システムの社会的利用に寄与できる。

3. 学習教材の構想

連携型多言語学習法＆システムの特徴，利点を発揮する上で，いかなる教材が有効かつ適切であろうか？ 以下，英語・日本語・中国語の三言語連携学習を例に，試作案を提示してみる。

3.1 学習教材と評価法

多言語連携型学習システムの教材は，まず基礎と応用の二層に分けられる。

3.1.1 基礎学習（基本発音・文法）

モジュール型教材を並置し，対照言語学に基く比較学習を行う。二言語に比べ，三言語間の相違点は多い上，それらが複雑に交錯し，混在する。紙媒体では煩雑な学習内容だが，システムの補助により，三言語を一画面で表示し，語彙，語順，構文の相違点，類似点を視覚的に対比し，構造的な理解を深めることができる（表1)。さらに各言語の特徴を三言語で示す解説を加えることにより，重層的な学習の実現を目指せる（表2)。

表1
三言語並置の文表示例

言語名	例文1	例文2
日本語	(あなたは)お子さんは*何人*いますか？	(あなたは)本を*何冊*おもちですか？
英　語	*How many* children do you have?	*How many* books do you have?
中国語	你有*几个*孩子?	你有*几本*书?

システムでは，カラー表示により，三言語の比較箇所（上図の下線部）を明示できる。すなわち，英語の"How"を指定⇒"How many"が赤字に変化し，中国語，日本語も指定された語と対応する語が自動的に赤字に変化する。

表2
構文の異相を示す解説例　学習使用言語に日本語を選択した場合の表示例

	ポイント	日英中
疑問詞の位置 使い分け	どこに置く？ 語順，意味は同じでも 語彙を使い分ける？	英語は文頭，日本語・中国語は聞きたいところに置く。英語，日本語は，聞く対象の数によらず同じ。中国語は、基本ルールは，10以下の数なら"几"，それ以上か数に関わりないとき"多少"を使い分ける（月，日をたずねるときは数に関わりなく"几"を使う。ex."几月几号？"）。
助数詞の変化	数える対象で変化？	英語は目的語に限らず同じ"How Many"。 中国語，日本語は数える対象で変わる（"几个"，"几本"，"何人"，"何冊"）。
経緯・敬語表現	有る無し？	中国語に敬語表現はないが敬意を示す語彙（あなた"你"と丁寧な表現"您"）があり，日本語は（"子ども"と"お子さん"，"もつ"と"お持ち）を区別する。"

【学習成果の評価と展開】

ユーザ登録機能により，演習問題，学習履歴，到達度判定テスト，質量分析機能(正解率と誤答分析)により学習成果をデータ化する。言語学習歴（母語＋外国語学習歴），学習に使用する言語により，言語習得能力の相違，特徴，到達度を記録し，さらに言語学習歴と言語間の影響関係について考察し，どのような言語能力の特性を，効果的に引き出せているかについて分析し，データ化する。これにより，学習者の個別性に応じて，学習記録と言語能力の認知，活用が実現される。例えば，漢語資源をもつ言語の学習歴は，他の漢語資源を共有する言語にどのような影響，習得効果をもつか，中国語，タイ語，ベトナム語など声調言語の学習歴は，他の声調言語学習に目的意識的に活用できているかなどを考察し，より効果的，効率的で，個人と類型性に呼応した学習法とシステムの進化をはかる。

3.1.2 語用論的文化間理解教材

外国語学習を求める学習者の関心の一つであり，多言語学習の重要な役割の一つが多文化理解である。多文化理解の方法は多様である。言語学習においては習得言語やその関連文化，社会事情などを主題とする教材により学習できる。また習得目標となる言語のもつ言語的特徴，言語を運用する社会規範などからも文化間理解の進展を促すことができる。

本稿が考案する連携型多言語学習では，文化間理解を深める教材として習俗・社会文化事情などを題材とするトピック作文と語用論的学習教材（ex 禁忌表現，褒貶表現，謝罪・感謝など石原・コーエン2015）[4]を作成し，自己発信力，他者理解力について，認知法，評価法を含めて検討し，言語学習歴の異なる学習者間の異相，特色を比較する。

基礎力を活かした自己発信と他者理解の育成を目指す「トピック作文」は，簡便な自己紹介，学習言語を対象とする社会，習俗紹介などを主題とする模範文に習い，模範言語と同一，もしくは異なる言語で類似文を作成し，言語表現と模範言語，選定言語のもつ文化背景について学習する。語用論的学習教材では，言語の相違による比較学習を行い，習得した基礎知識を発信力に展開する力（言語知識の再構築），文化理解力，言語学習への関心，意欲等への影響を検討して，効果的な教材を作成，提供する。

【語用論的教材の作成例】

文化的知識がない外国語学習者に分りにくい表現などを学ぶ。三言語それぞれに見られる誤答の多い問題事例を基礎に問題を作成し，三言語それぞれの文化的特徴を理解し，併せて他の未修言語の文化背景に対する理解力の育成を目指す。また，動画など視覚情報を用いたe-Learning教材を併用し，正誤判定と三言語の比較解説で理解を深める(表3，表4)。

表3
語用論的学習例（待遇表現）　非日本語母語話者への出題例（日本語による表示例）

状　況	先輩に後輩がプレンテーションを評価する時	
日本語	今日のプレゼンテーションはよくできましたね。	○×△
英　語	You made a good presentation today!	○×△
中国語	今天的报告很精彩	○×△

学習者が正しいものに○，正しくないものに×，あまりよくないと思えたものに△をつける。

表4
言語の表現の相違，特徴を示す解説例（日本語による表示例）

今日のプレゼンテーションはよくできましたね	
ポイント	自分と相手との関係で，語彙が変化する日本語の表現の特徴
解　説	日本語では，文法的に正しくても先輩に対して「よくできた」という表現は，エラー表現になります。英語，中国語では，相手が誰でも「よくできた」を意味する単語”good”，”很精彩”を使用できます。自分と相手との関係性で，語彙が変化する日本語の表現の特徴がポイントです。ただ中国語では，相手が目有家の場合、「あなた」を示す語彙として”你”より”您”を使うほうが敬意を示せ，丁寧で礼儀正しい表現となります。

【学習成果の評価と展開】

事前事後テスト，アンケート，ルーブリック，チェックリスト，学習者自身の類似課題の対話文作成(発信力)などにより学習成果をデータ化し，学習者にフィードバックし，ともに討議し，考察，分析し，教材作成に持続的に反映する。

3.2　評価システムの構築，及び連携型多言語学習法＆システムの成果検証

3.2.1 評価システムの構築

言語習得能力の認知，評価には，未習言語を用いて，言語習得能力の獲得，発展を認知する「多元的アプローチ」（大山2018）[5]を用いる。「多元的アプローチ」は，見知らぬ言語，未知の言語(未習語)を用いて，学習者に内在する言語に対する理解力，洞察力などを認知する方法論である。本システムでは，これを基盤に取り入れ，量的質的分析機能（正解率，誤答・正答傾向，言語履歴による特徴）をもつ評価システムを構築する。これにより，言語系統，言語類型の類似性，共通性，違いなど，言語間の相違に基づく影響関係を析出し，考察することができる。多元的アプローチに使用する未習語の選択は，被験者の言語学習歴，学習に使用する言語により，言語系統（同族・非同族），言語類型に基く類縁性の有無，近似性，相違性を区別し，個別的に選定する。学習者の言語学習歴(母語＋外国語学習歴)を基に，言語間の関係について考察することにより，多角的に言語能力を認知できる。

3.2.2 連携型多言語学習法＆システムの成果検証

連携型多言語学習とシステムの効果を検証するために，パイロット構築する試用システムを用いた実験学習を行い，その結果を考察分析する。実験学習は，言語学習歴の異なる学習者を被験者とし，言語学習歴(母語＋外国語学習歴）と学習に使用する言語の相違が，言語の到達度と言語間にどのような影響をもたらすか，言語習得能力にいかなる違いがあるかを考察する。具体的には，言語学習歴の異なる学習者を，学習に使用する言語と習得レベルに拠り組み分けし，学習対象とする言語ごとに，連携型と単言語型それぞれの到達度，学習効果を比較する。特に，単言語型と連携型学習法の成果については，筆者がすでに開発し，運用している単言語型中国語モバイルアプリ『Wave中国語“游”』（日中版)[6]と，試験開発する連携型学習システム(ex.日中英三言語比較学習》による学習者の中国語の到達度，言語能力を比較する。さらにいかなる検証法が効果的，効率的であるか，適正な検証法とはいかなるものかについても検討，考察する。

4. おわりに

言語はコミュニケーションの翼といわれる。しかし，言語の相違はコミュニケーションを阻害し，コミュニケーションの実現を妨げる障壁ともなる。ICT の発達，インターネットコミュニケーションの発展，普及は，言語によらない視覚情報の交流をも組み込んで，かつてないコミュニケーション活動の隆盛を生み出している。簡便な翻訳，学習システムは，習得レベルの縛りに阻まれないコミュニケーションを助ける。それゆえにこそ，母語，外国語の区分を越えて，人に内在し，育成，発展する言語能力を統合的に活かし，他者理解，文化間理解を深めて行くことが求められる。効果的，効率的な言語学習と多言語コミュニケーションの進化，発展を生み出しうる次世代型の言語学習として，連携型多言語学習法とこれを実現できるシステムの構築，開発を目指して，さらに研究を深めていきたい。

参考文献

[1] 篠塚麻衣子, 湯山トミ子, 謝恵貞. 「初級中国語における遠隔交流の試み」. 2017PCConference 論文集, 2017 年, pp91-94.

[2] ① 東京外国語大学. TUFS（東京外国語大学言語モジュール）.

http://www.coelang.tufs.ac.jp/mt/about_site.html，2020 年 1 月 16 日.
②大阪大学. 大阪大学高度外国語教育全国配信システムプロジェクト. 高度外国語教育独習コンテンツ. http://el.minoh.osaka-u.ac.jp/flc，2020 年 1 月 16 日.
③LiveMocha. https://www.livemocha.co，2020 年 1 月 16 日.
④米国務省. 外交官養成コース内公開サイト. FSI Language Courses. https://www6.fsi-language-courses.org, 2020 年 1 月 16 日.

[3] ①細川英雄,『ことばの市民になる—言語文教育学の思想と実践』. 初版, ココ出版社. pp. 241-245.
②細川英雄, 尾辻恵美, マルチェッラ・マリオッティ編.『市民形成とことばの教育—母語・第二言語・外国語を越えて』, 初版, くろしお出版, 2016 年, pp. 240-242.

[4] 石原紀子【編著】. アンドリュー・D・コーエン.『多文化理解の語学教育—語用論的指導への招待』. 初版, 研究社, 2015 年, pp. 1-11, 216-230.

[5] 大山万容.『言語への目覚め活動——複言語主義に基づく教授法』. 初版, くろしお出版社, 2019 年, pp. 19-51, 126-129.

[6] 湯山トミ子, 武田紀子, 篠塚麻衣子, Soryusha Inc. (soryu-developer), "Wave 中国語【游】". Google play, Apple store, 2020 年 1 月 16 日.

著者紹介

湯山 トミ子

1972 年成蹊大学法学部卒。1990 年東京都立大学大学院博士課程修了. 文学修士. 1990 年より愛媛大学教養部専任講師, 助教授, 1996 年より成蹊大学助教授, 教授, 2016 年退職, 現在東京都立大学客員教授, 明治大学サービス創新研究所客員研究員。ICT 活用による中国語教材開発に従事, CIEC 学会員, 日本中国学会会員。

アート思考はブームになったのか？
―デザイン思考とアート思考の社会的受容―

秋山 ゆかり[1]
阪井 和男[2]

Does Art Thinking Become a Fad?:
Social Acceptance of Design Thinking and Art Thinking

AKIYAMA, Yukari Carrie[1]
SAKAI, Kazuo[2]

アブストラクト

明治時代初期における西欧文化が咀嚼され浸透する過程で英語“art”の日本語化が進められた結果，芸術，美術，アートなどの言葉が併存するようになった歴史的経緯を振り返って，それぞれの言葉が持つ意味とニュアンスを明らかにして“art”概念の浸透と分化を論じ，現代日本のメディアにおけるデザイン思考とアート思考の興隆を一般新聞の見出しでの出現頻度によって実証する。さらに，一般新聞と書籍におけるデザイン思考の優位性のなかで勃興しつつあるアート思考の状況を検証し，さらに先行指標としてのネットにおけるインパクトを明らかにする。これによって，2019 年 8 月からアート思考がデザイン思考を凌駕しつつある現状を検証し，アート思考がネットを中心にブームを引き起こしていることを論証する。最後に，アート思考が一般新聞においてもブームを呼ぶ条件を検討し，芸術思考が回帰する可能性も示唆される。

キーワード：アート思考，デザイン思考，芸術思考，アート，芸術，美術

1. はじめに

米デザイン・コンサルティング会社 IDEO がイノベーションを生み出し続ける仕組みとしてデザイン思考を提唱し始めて以来，イノベーションの現場で，デザイン思考が使われるようになってきた。特に，2004 年[1]に独 SAP の共同創設者ハッソ・プラットナーが約 39 億円（35Million 米ドル）の私財を投じ，IDEO の創業者であるデビット・ケリー氏と共同で，スタンフォード大学に Hasso Plattner Institute of Design（通称 d.school）を設立し，デザイン思考の研究と普及に努めるようになり[2]，2005 年に Business Week 誌が“design thinking”の特集号を発行したことで，イノベ

ーション手法としてのデザイン思考は世界的に知られるようになった[3]。

しかし近年，デザイン思考の限界についてブログや論文等での議論が展開され[4]，デザイン思考を超えるイノベーション手法としてのアート思考に関する論文[5]を目にする。はたして，デザイン思考はすたれ，アート思考がブームになっているのだろうか。アート思考とデザイン思考について，メディアでの取り上げ方を比較し，アート思考がブームになっているのかを検証する。

本論文の構成は次の通りである。第 2 節は，日本における“art”概念の浸透と分化をまとめ，第 3 節は，「デザイン思考」と「アート思考」の広まりを論じる。最後の第 4 節は，まとめにあてる。

2. 日本における“art”概念の浸透と分化

2.1 近代日本における“art”の日本語化と芸術からアートへの分離

アート思考の分析の前に，「芸術」と「アート」の定義を確認しておこう。三省堂大辞林第三版[6]によると，芸術とは「① 特殊な素材・手段・形式により，技巧を駆使して美を創造・表現しようとする人間活動，およびその作品。建築・彫刻などの空間芸術，音楽・文学などの時間芸術，演劇・舞踊・映画などの総合芸術に分けられる。② 芸・技芸。わざ」とある。一方，「アート」は「芸術。美術。」である[6]。この定義は，以下に述べるように英語の“art”とほぼ同義である。

日本では，鎖国から開国した明治時代に，政府が欧化政策を取ったことから，さまざまな西洋文化が日本に入ってきて，西洋の思想，政治，経済用語などが漢語にして輸入された[7]。福田[7]は，「明治時代は，語彙の意味や解釈に加えて，またその意義を実行するということも，大切であった。それらの語彙を肉化し骨化することが要求されていた。自家薬篭中のものとするためには，翻訳こそが最短の道程だった（理解の過程であるといえる）」と指摘している。「芸術」もまたこうして明治時代に日本語に翻訳された言葉の 1 つなのである。

ここで，もとの英語の“art”の意味を振り返っておこう。Oxford Learner’s Dictionaries[8]によると，“the use of the imagination to express ideas or feelings, particularly in painting, drawing or sculpture”とあり，アイディアや感情を特に絵，図表，彫刻などで表現することとある。さらに，“an ability or a skill that you can develop with training and practice”とあり，練習や修練を積むことで習得できる能力やスキルを指す。複数形の“arts”になると，“art, music, theatre, literature, etc. when you think of them as a group lottery funding for the arts”と，視覚芸術以外の音楽，舞台，文学などを含むようになる。

それでは英語の“art”がどのように日本に導入されてきたかをみてみる。日本最初の英語で書かれた日本語辞典（和英辞典）『和英語林集成』[9]によると，英和の部で“art”は，初版（1867 年）では“Jutsz（ママ）”と記載されているのに対して，再版（1872 年）では“Jutsu”に加えて，“gei-jutsu”や"takumi"が追加され，三版（1886 年）ではさらに“Fine art, bijutsu”が付加されている。和英の部では，三版（1886 年）に“Geijutsu”として「藝術」が記載されており，“The arts; fine arts”と記されている。

さらに，「美術」という語が使用されたのは，柳田[10](p.121)によると，1872 年（明治 5 年）

という。この年の 1 月に布告された太政官布告第 7 号には［第 22 区「美術（西洋ニテ音楽画学像ヲ作ル術詩学等ヲ美術ト云フ）」］と記されている。そして，1873 年のウィーン万国博覧会[11]の出品物の分類としてドイツ語の“Kunstgewerbe”および“Bildende Kunst”の訳語として採用された[12]を初出とするものもある。1877 年の『内国勧業博覧会区分目録』には，「第三区　美術　但シ此区ハ，書画，写真，彫刻，其他総テ製品ノ精巧ニシテ其微妙ナル所ヲ示ス者トス」[13]とあり，「美術」は「ファインアートのうち視覚芸術に限定した概念となった。文芸，音楽，演劇などは上位概念の『芸術』が使われている」[14]と指摘されている。

「アート」が芸術全般をさして一般的に使われるようになってきたのは，大野左紀子によると 1980 年代以降のことであるという[15]。1970 年代までは圧倒的に芸術・芸術家という言葉が多かったが，1980 年代に入ると，「アート，アーティスト」というカタカナ表記が増えていった。その背景には，1980 年にパルコが「日本グラフィック展」を開催しはじめ，日比野克彦が大賞を受賞して以降，イラストレーター出身のアーティストが増えたことで，芸術よりアートという言葉が一般的になっていった。1970 年代までは，芸術大学等で学ぶ理論や専門性が求められ重要視されていたことから，美術，芸術という言葉が使われていたといえる。このことを大野は次のように述べている。

> イラストレーターやグラフィックデザイナーの仕事の基本は，クライアントの求めに応じることだ。本人のカラーがはっきりしていればしているほど，期待されるものも決まっている。でも，ピカソは自由に好き勝手にやっているな。自分も自由に好き勝手に絵を描きたいな。「ピカソに感動」とはそういうことだったのであろう。横尾忠則は作品を見ても文章を読んでも，素朴で直感的な人という印象を受ける。日比野克彦もタイプは違うがそうだろう。そういう人がデザインからアートのほうにきてアーティストになり注目されたというのは，非常に 80 年代的な現象であった。
>
> 論理的なものから感覚的なものへ。思想へのこだわりから趣味へのこだわりは。それは，別に美術に限らない 80 年代の特徴だったのかもしれない。それと，「アーティスト」という横文字の浸透が並行して起こっていた[15]。

現在では，ネイルアートやアスキーアートなど，一般の生活に入り込んだアートが出てきており，アートとカタカナで表現することで，親近感，なじみやすさを表している。これらの関係を参考資料[16]の図に加筆して図 1 に示す。

ここで，“art”と「芸術」との「＝」は，1871 年（『和英語林集成』[9]の再版（英和））から 1886 年（同[9]三版（和英）），「美術」が使われだしたのは 1872 年（太政官布告第 7 号[10](p.121)）から 1886 年（『和英語林集成』[9]の三版（英和）），「芸術」から「アート」への分離は 1980 年代以降（[15]）である。

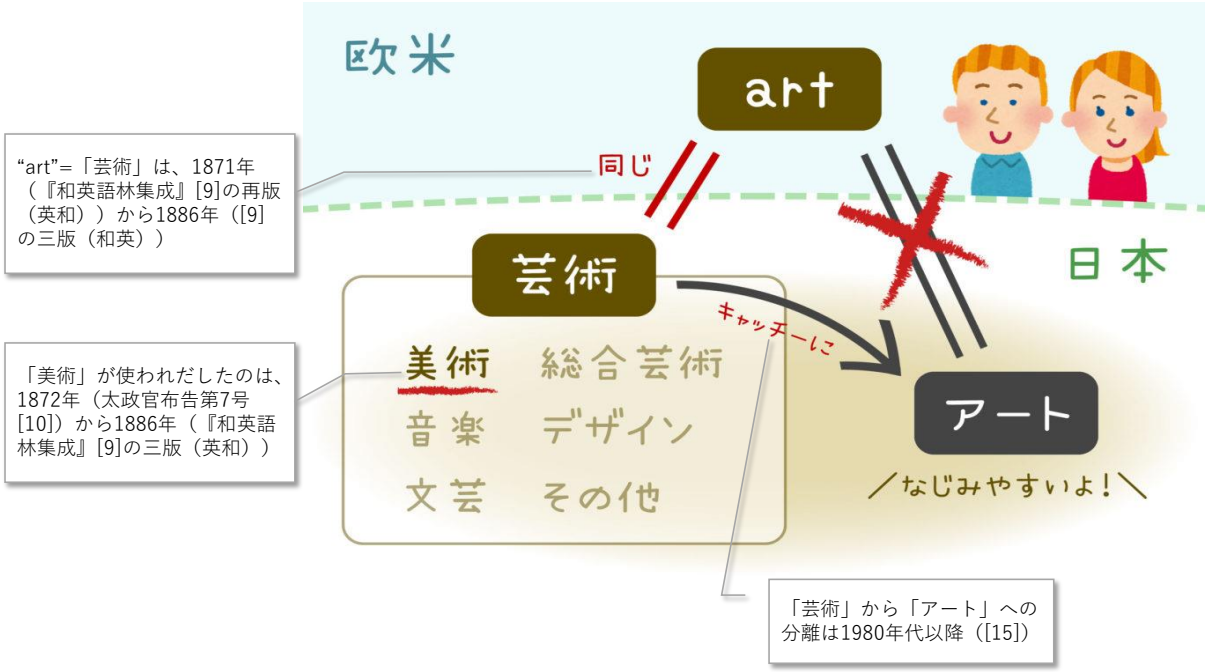


図 1．“art”と「芸術」「アート」「美術」の関係（[16]の図に加筆）

2.2 現代日本におけるメディアでの「アート」の興隆

2000 年以降のメディアでのアートと芸術の使われ方を比較しよう。図 1 に，大手新聞 3 社（読売新聞，朝日新聞，毎日新聞）の 2001 年から 2019 年までの見出しに使用された「芸術」「アート」の単語の出現頻度をもとに，新聞各社の発行部数で重み付けして合計したものを図 2 に示す。

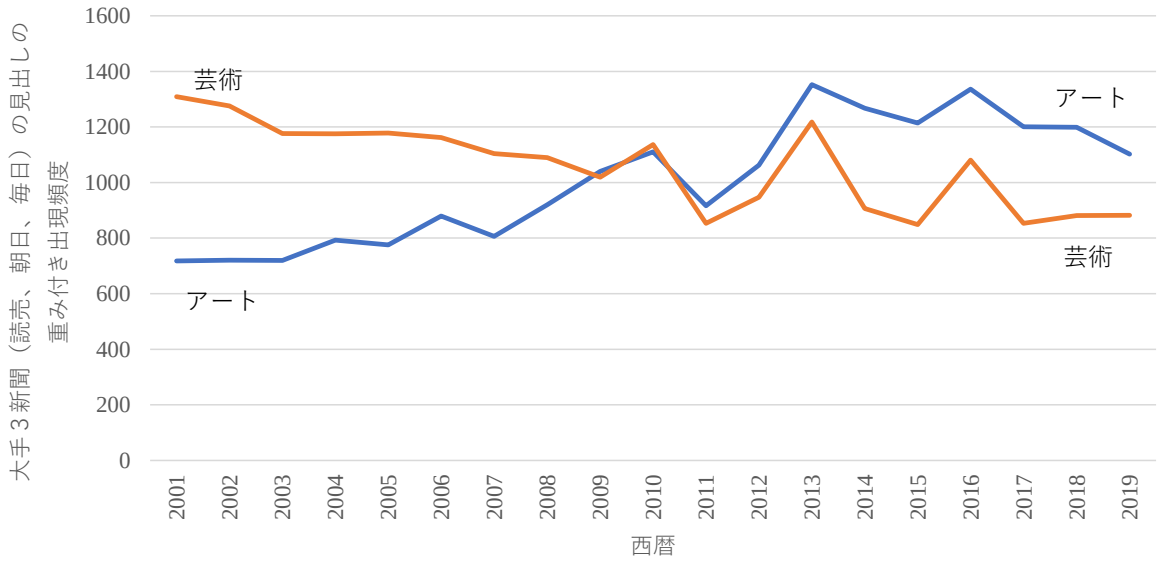


図 2．大手 3 新聞の見出しに出現する「芸術」と「アート」の重み付き出現頻度の推移

ここで，発行部数の重み付けは，読売新聞を 1 とし，朝日新聞を 0.8，毎日新聞を 0.4 とした。こ

れは社会へのインパクトを指標化したものに相当する。2008 年以前は,「芸術」のほうが多く使用されているが，2009 年〜2011 年を境に,「アート」の使用頻度が高まっていることがわかる。

2008 年には，米国の投資銀行リーマン・ブラザーズが経営破綻したことを機に，世界規模の金融危機が起き，日本もその影響を受けた。株価は大きく下落し，金融機関は不良債権が増加したことでの貸し渋りなどが生じた[17]。製造業を中心に派遣労働者の削減が進み，2008 年末に日比谷公園で年越し派遣村が開設され[18]非正規労働者の問題がクローズアップされた。さらに，2011 年には，東日本大震災による地震，津波，原子力発電所の事故などの災害で，多くの日本人が影響を受け，そして，日本人の意識が大きく変わったといわれている。自然エネルギーに期待を寄せる動きや，家族を持つ，家族や地域とより深い交流を求める動きが出てきている[19]。東日本大震災 1 か月後からは，癒しを求める傾向があると日経新聞[20]で報じられた。

このような社会変化のなか,「芸術」というプロフェッショナルで固い響きのある言葉から,「アート」というよりポップな言葉で癒しや創造性を求める動きが出ているのかもしれない。

3. 「デザイン思考」と「アート思考」の広まり

3.1 「デザイン思考」と「アート思考」の勃興

日本では,「デザイン思考」は 2000 年前半から，主に書籍などを中心に日本にそのコンセプトが導入されてきた。IDEO 社から出版されたさまざまな書籍，トム・ケリーとジョナサン・リットマンの『発想する会社！』(2002 年) [21],『イノベーションの達人！』(2006 年) [22]，ティム・ブラウンの『デザイン思考が世界を変える』(2014 年) [23]などがメディアに取り上げられることで，一般に広くデザイン思考の考え方が普及していった。

その後，2012 年 3 月に慶応義塾大学 SFC デザイン思考研究会[24]が設立され，その研究会メンバーを中心に 2013 年 7 月には一般社団法人デザイン思考研究所（現：アイリーニ・デザイン思考センター）が設立され，デザイン思考を活用したイノベーション・マネジメントの研修が提供されるようになった[24]。さらに，博報堂もデザイン思考を推進している。2003 年にデザインによるブランディングの専門会社 HAKUHODO DESIGN を立ち上げた。2006 年に設立された TBWA 博報堂では「人間を中心としたイノベーション事業」としてデザイン思考を推進している。

このようなデザイン思考の高まりから，経済産業省と特許庁が 2018 年 5 月に「デザイン経営宣言」[25]を発表した。そこでは，企業競争力の向上には,「ブランド構築に資するデザイン」と「イノベーションに資するデザイン」の両軸が不可欠とし，デザインを活用した経営手法を広めている。2018 年 11 月に株式会社ビビビットが発表した「『デザイン経営』『デザイン思考』に対する企業の意識調査」[26]によると，デザイン思考の認知率は 39.6%だった。認知率はそれほど高くないものの，デザイン経営・デザイン思考を導入した企業は，中小企業を中心に，売上・利益率の増加の効果が出ている。

日本でも，2012 年 10 月に阪井・有賀によって「芸術思考」が提唱[27]されている。しかし近年は，芸術思考よりもデザイン思考やアート思考のほうが高い認知度を持つ。その背景には，前述のように，芸術という理論的な専門性が求められる創造的思考よりも，親近感のあるデザインやアートなどカタカナの表現のほうが求められていることや，経済産業省・特許庁などのデザイン経営の推進などが影響していると考えられる。

一方，「アート思考」に関しては，2008 年にフランスのビジネススクール ESCP の Sylvain Bureau 氏が“Art Thinking Improbable Workshop”[28]を開催し，現在もビジネススクールのプログラムとして提供されている。このワークショップは，フランスの軍事学校である Ecole de Guerre や，起業支援プログラムとしても提供されており，フランスだけでなく，イギリス，ドイツ，スペイン，カナダ，米国など，欧米各地でも開催され世界中に広まっている[29]。日本では，2018 年に Bureau 氏のアート思考ワークショップが初めて開催され[30]，2019 年 6 月には，日本マイクロソフトが川崎重工業や資生堂など約 20 社に声をかけ，アート思考を養うワークショップ“Art Thinking Improbable Workshop for Flags!”[31]が開催され，企業への広まりをみせている[32]。

日本において「アート思考」が広く知られるようになったきっかけには，山口周が 2017 年に出版した『世界のエリートはなぜ「美意識」を鍛えるのか?』[33]がある。この本はベストセラーとなり，2018 年ビジネス書大賞準大賞を受賞した[34]。

3.2 メディアにおける「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」の取り上げられ方

「芸術思考」,「デザイン思考」,「アート思考」はどのようにマスメディアで取り上げられてきたのか。2001 年からの新聞大手 3 誌の「芸術思考」「アート思考」 2 つのキーワードの見出し使用件数を比較した。結果は，芸術思考が，2014 年に 1 件，アート思考が 2019 年に 2 件だった。日経新聞まで含めると，芸術思考が，2014 年に 1 件，アート思考は 2019 年に 4 件という結果になり，アート思考のほうが多く使われている。

朝日新聞における「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」の 3 つのキーワードのタイトル・本文の表示結果を図 3 に示す。

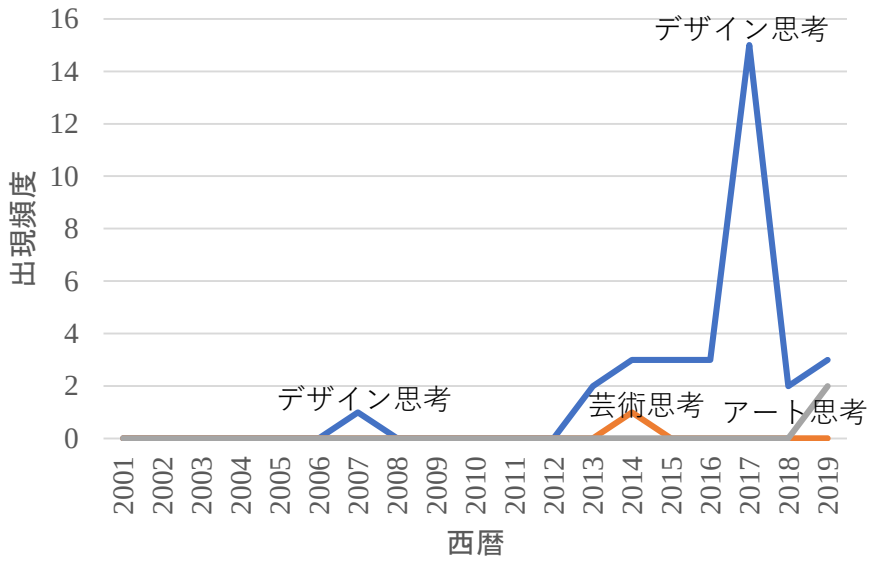


図 3. 朝日新聞におけるキーワードのタイトル・本文での表示件数の推移

一般社会への普及を評価するには，新聞だけでなく書籍の出版点数も参考になろう。2000 年～2019 年に出版された書籍の出版点数を「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」で比較し

たものを図 4 に示す。

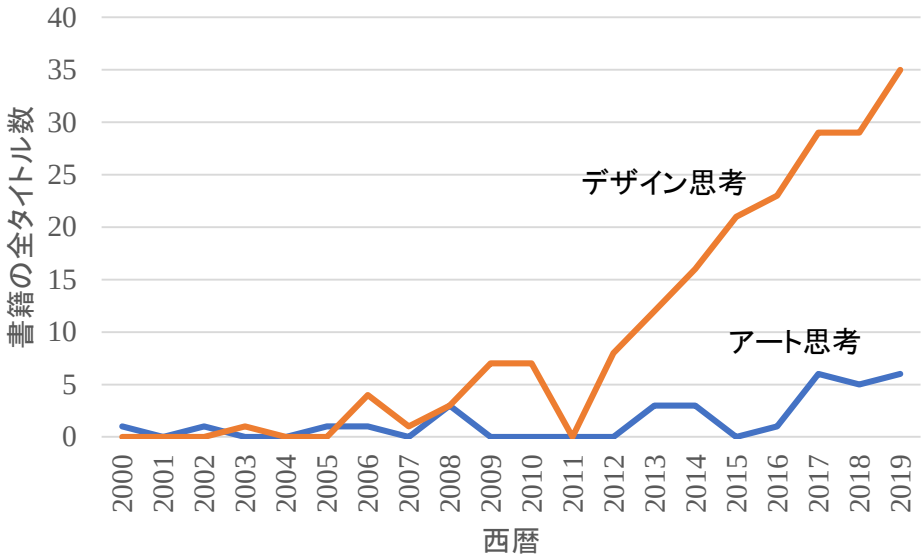


図 4. 書籍の全タイトル数の推移(Amazon.co.jp)

なお，紙媒体での経年比較をするために，分析からは自費出版で電子出版のみの出版物は除いた。

Amazon.co.jp を「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」で検索し，書籍の出版点数を調べたものを図 5 に示す。

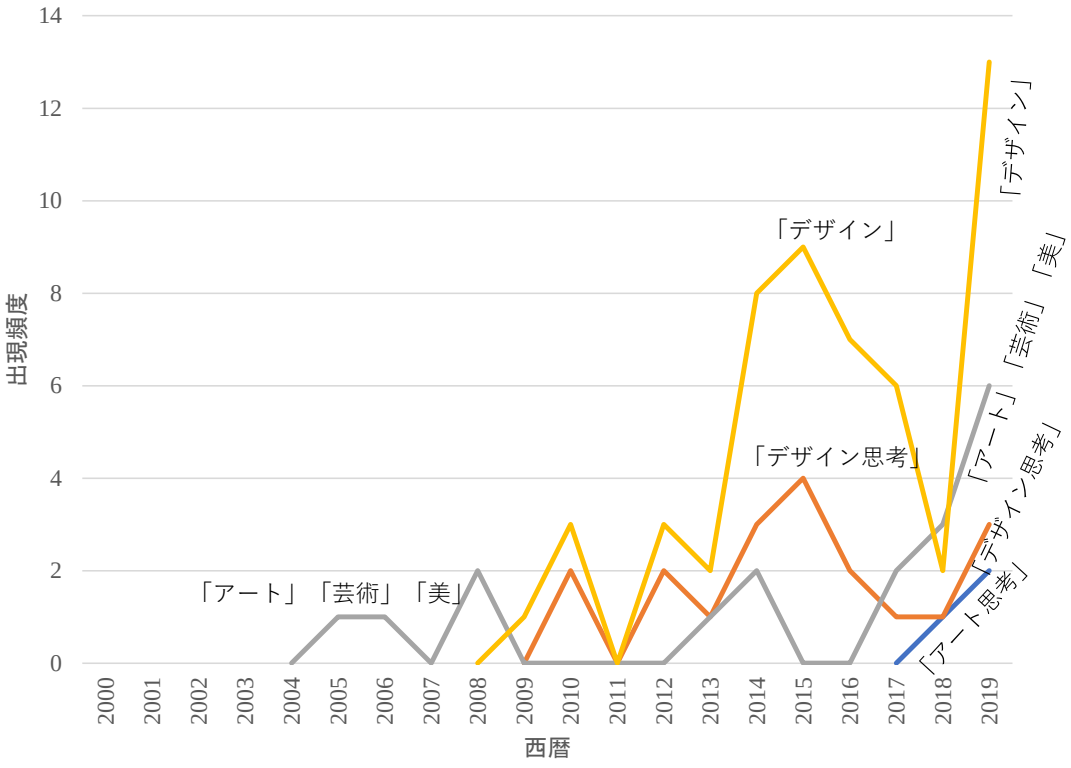


図 5. 書籍タイトルに含まれているキーワードの推移

デザイン思考に関する書籍は 2012 年から急増しており，2019 年には 35 タイトル出版されている。アート思考も 2017 年から増加しており 2017 年から毎年 5 タイトルが出版されている。芸術思考をタイトルに使用しているものはなかった。さらに，デザイン思考をテーマにした書籍で，「デザイン」がタイトルに入っているものと，アート思考をテーマにした書籍で，「アート」「芸術」「美」がタイトルに入っているものも比較した。デザインは 2014 年から急速に増えている。

3.3 ネットにおける「デザイン思考」「アート思考」のインパクト

紙のマスメディアは，インターネット普及前にはメディアとしての大きな地位を占めていたが，インターネットが普及したことで，ネット上にも多くの媒体が存在している。なか，検索と SNS は広くメディアとして普及している。そこで，「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」のインターネット上におけるインパクトを分析しよう。

Yahoo!検索による 2017 年 1 月～2019 年 12 月までの，「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」の 3 つのキーワード検索数を分析した結果を図 6 に示す。

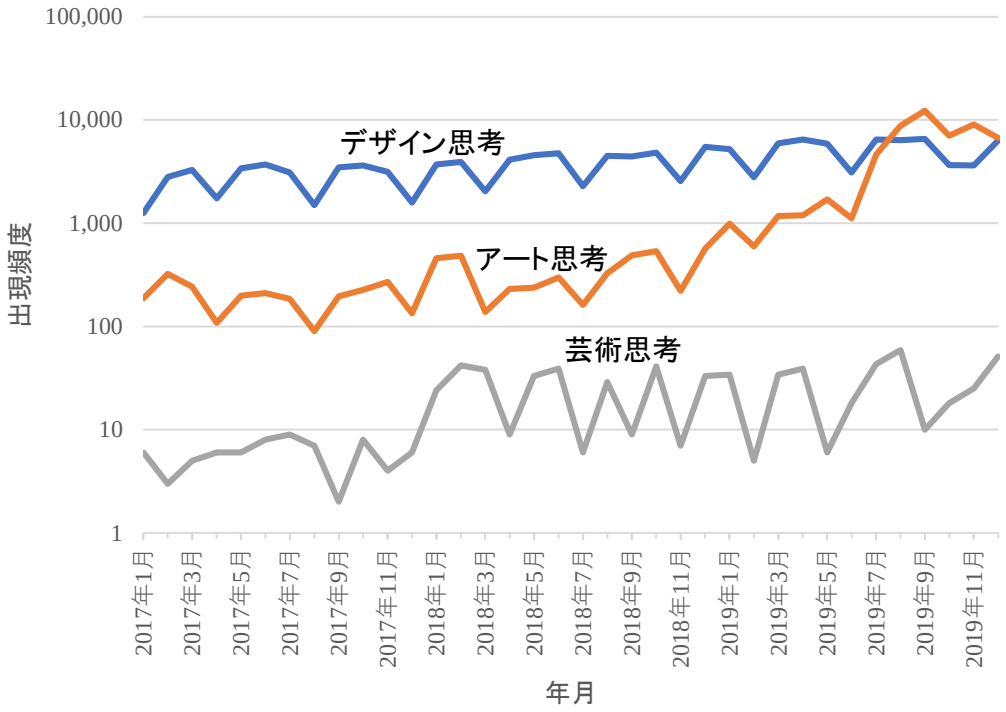


図 6. Yahoo!検索によるキーワードの出現頻度の推移

2019 年 1 か月の平均検索数は，デザイン思考が 5,198 件，アート思考 4,603 件，芸術思考 29 件であった。2019 年 8 月から，デザイン思考の検索数をアート思考の検索数が超えている。アート思考という言葉がこの時点から徐々に一般に広がりはじめたことがわかる。

さらに，SNS でのインパクトをみるために，Twitter での利用頻度を調査した。twimp[35]を

使用し，2019 年 12 月 31 日から 2020 年 1 月 8 日までの 9 日間の Twitter の表示回数，ツイート回数，ユニークユーザ数を分析した結果を表 1 に示す。

表 1

Twitter キーワード「芸術思考」「デザイン思考」「アート思考」の 2019 年 12 月 31 日～2020 年 1 月 8 日の 9 日間のツイート数・表示回数・ユニークユーザ数・フォロワ数

キーワード	ツイート数	表示回数（回）	ユニークユーザ数（人）	フォロワ数（人）
芸術思考	5	7,440	5	1,488
デザイン思考	260	373,622	209	1,788
アート思考	374	2,483,739	324	7,666

アート思考がこの期間では最も多くツイートされている。ここで，フォロワ数＝表示回数／ツイート数である。

ツイート数を比較すると，芸術思考のオーダー（位）が 1 桁なのにたいして，デザイン思考とアート思考は 3 桁となっている。表示回数でみると，芸術思考の位が 4 桁，デザイン思考が 6 桁にたいしてアート思考が 7 桁と，桁違いに多い。ところがフォロワ数でみると，3 つとも位は同じ 4 桁である。そこでファクタをみてみると，芸術思考とデザイン思考のファクタが 1,000 台でほぼ同数であるのにたいして，アート思考のファクタだけが 7,000 台となっていてフォロワ数が芸術思考の 5 倍以上になっている。

Twitter でつぶやかれているツイート文字列をみるため，テキストマイニングツール[36]を用いてワードクラウドによって可視化しよう。「デザイン思考」のキーワードを含むツイート内容のワードクラウドを図 7 に示す。なお，「芸術思考」については，ツイート数が少なく，データ内容が少ないため，分析結果からははずした。

図 7. キーワード「デザイン思考」を含む Twitter の投稿内容のテキストマイニング結果

図 7 から，「デザイン思考」はアイディア創出やイノベーションの方法論，マーケティング等と結びついていることがわかる。

次に，「アート思考」を含むツイート内容の分析結果を図 8 に示す。

図 8. キーワード「アート思考」を含む Twitter の投稿内容のテキストマイニング結果

ワードクラウドによる分析の結果，デザイン思考と並列に書かれていることがわかる。そして，日経新聞が運営する「意見を発信したいビジネス・経済の専門家と新たな視点や気付きを得たいビジネスパーソンが出会う場」である comemo[37]というプラットフォームやワークショップ，flier[38]という本の要約サイトについて語られていることがわかる。前述の書籍全タイトル

数分析からも，最近アート思考に関する本の出版が相次いでおり，flier で 2019 年 10 月 31 日に出版された秋元雄史の『アート思考　ビジネスと芸術で人々の幸福を高める方法』[39]が取り上げられたこと[40]が影響している。さらに，「アート・ワークショップコラム」を連載している臼井隆志も取り上げられていることがわかる。

Twitter のテキストマイニング結果から，デザイン思考は方法論として認識されているが，アート思考はワークショップとして認知されていることがみえた。インターネット上では，デザイン思考よりも，アート思考のほうが，Twitter のフォロワ数は 5 倍以上多く，Yahoo!検索でも，2019 年 8 月以降アート思考が多く検索されることから，インターネットの世界では確かにアート思考がブームになっているといえる。

4. おわりに

「アート思考はブームになっているのか？」を分析した結果，新聞や出版などの紙媒体においてはデザイン思考が優勢であるが，インターネットの世界では，2019 年後半からアート思考はブームを形成しつつあることがわかった。

デザイン思考はビジネスのイノベーションに結びついているが，アート思考は，自己啓発な使い方や，アート鑑賞，さらにはイノベーションなど，実にさまざま領域で使用されている。デザイン思考は，本がベストセラーとなり，出版や新聞などの紙媒体でのブームが起き，一般に広がっていったので，アート思考も，ベストセラーの本が出ることで，紙媒体での存在感が高まる可能性は十分にある。

芸術思考とアート思考を比較するとアート思考のほうが広く一般的に知られてきている。その背景には，(1)「芸術」という日本語訳の持つ言葉が「アート」というカタカナよりも固く，理論と実践に基づいたプロフェッショナルなものが求められる傾向にあること，(2)2008 年～2011 年のリーマンショックや東日本大震災などによって日本人の意識が変わるなかで「芸術」よりも「アート」のほうが広く受け入れられてきたこと――などのため，今後も引き続きアート思考という言葉での表現が優位になると推測される。

ただし，アート思考の急激な興隆は，同時にアート思考という言葉が猛烈な勢いで消費され陳腐化することを意味している。しかしながら，創造的な活動への回帰は必ず再燃すると考えられるため，ブームの終焉後にもう一度「芸術」に回帰して芸術思考の時代が到来する可能性もある。

参考文献

[1] Kathryn Roethel. “Stanford's design school promotes creativity”(November 26, 2010). STANFORD, https://www.sfgate.com/education/article/Stanford-s-design-school-promotes-creativity-3244664.php, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[2] 明石宗一郎. “イノベーションを生み出す「デザイン思考」とは”. MONOist, 2018 年 1 月 23 日, https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1801/23/news006_2.html, (2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[3] 黒川利明. “大学・大学院におけるデザイン思考(Design Thinking)教育”. 科学技術動向

2012 年 9・10 月号, pp.10-23.

[4] Jen, Natasha. “Design Thinking Is Bullsh*t”. 99U Conference 2017, https://99u.adobe.com/videos/55967/natasha-jen-design-thinking-is-bullshit, (2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[5] Nobeoka, Kentaro, Kimura, Megumi. “Art thinking beyong Design thinking MAZDA Design: Car as Art”. 2016 Proceedings of PICMET ’16: Technology Management for Social Innovation, pp. 2499-2514. http://www.picmet.org/db/member/proceedings/2016/data/polopoly_fs/1.3250933.1472156852!/fileserver/file/680672/filename/16A0048.pdf, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[6] 松村明. “大辞林”. 第 3 版, 三省堂, 2006 年 10 月 27 日.

[7] 福田眞人. “明治翻訳語のおもしろさ”.『言語文化研究叢書』, 2008 年 3 月 31 日, 第 7 巻, pp. 133-145.

[8] Oxford Learner's Dictionaries, Oxford University Press, 2020. https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/, (2020 年 1 月 18 日アクセス).

[9] 和英語林集成デジタルアーカイブス, 明治学院大学図書館デジタルアーカイブス, http://www.meijigakuin.ac.jp/mgda/waei/search/, (2020 年 1 月 18 日アクセス).

[10] 柳田さやか. “明治期の竜池会・日本美術協会における書の位置：六書協会・日本書道会設立の背景として”.『書学書道史研究』(書学書道史学会). 2015 年, 第 25 巻, pp. 109-123, 175. DOI https://doi.org/10.11166/shogakushodoshi.2015.109, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[11] “ウィーン万国博覧会”. https://www.ndl.go.jp/site_nippon/vienna/index.html, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[12] 山本五郎. “意匠説”(1890 年 4 月). 国会図書館デジタルコレクション, https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/854088, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[13] 内国勧業博覧会事務局. “明治十年内国勧業博覧会出品目録. 1”(1877 年). 国会図書館デジタルコレクション. https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/801848, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[14] 寺前秀一. “字句「美術」「芸術」「日本画」の誕生：観光資源の同じく新しい概念である。”. Shuichi Teramae Official Blog. 2018 年 6 月 3 日, https://jinryu.jp/blog/?p=9708, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[15] 大野左紀子.『アーティスト症候群』. 河出書房新社, 2011 年 7 月 4 日.

[16] ナナシロ, 「『芸術』と『アート』と『美術』の違いって？」, Artfans, 2019 年 10 月 9 日. https://artfans.jp/difference/, (2020 年 1 月 17 日アクセス).

[17] 内閣府.『経済財政白書平成 21 年度』, 2009 年, https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je09/09b02010.html, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[18] “「年越し派遣村」日比谷公園に 31 日開村　食と住居提供”. 朝日新聞 (2008 年 12 月 30 日), http://www.asahi.com/special/08016/TKY200812290186.html, (2020 年 1 月 14 日アクセス).

[19] 高橋幸市・政木みき. “東日本大震災で日本人はどう変わったか”.『放送研究と調査』,

2012 年 6 月，NHK，pp. 34-55. https://www.nhk.or.jp/bunken/summary/research/report/2012_06/20120603.pdf，（2020 年 1 月 14 日アクセス）.

[20] 藤代裕之．“ブログ調査でわかった震災後の消費者意識の変化”．日本経済新聞（2011 年 6 月 9 日），https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK0701R_X00C11A6000000/，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[21] トム・ケリー＆ジョナサン・リットマン．“発想する会社!：世界最高のデザイン・ファーム IDEO に学ぶイノベーションの技法”．鈴木主税・秀岡尚子（訳），早川書房，2002 年 7 月 25 日.

[22] トム・ケリー＆ジョナサン・リットマン．“イノベーションの達人!：発想する会社をつくる 10 の人材”．千葉敏生（訳），早川書房，2006 年 6 月 1 日.

[23] ティム・ブラウン．“デザイン思考が世界を変える”．千葉敏生（訳），早川書房（ハヤカワ・ノンフィクション文庫），2014 年 5 月 10 日.

[24] “アイリーニ・デザイン思考センター(旧 デザイン思考研究所)”．Eirene Management School，https://designthinking.eireneuniversity.org/index.php?about，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[25] 経済産業省・特許庁．“「デザイン経営」宣言”（2018 年 5 月 23 日）. https://www.meti.go.jp/press/2018/05/20180523002/20180523002-1.pdf，（2020 年 1 月 18 日アクセス）.

[26] 株式会社ビビビット．“「デザイン経営」「デザイン思考」に対する企業の意識調査”. https://vivivit.co.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/11/2018.11.15_%E5%A0%B1%E9%81%93%E7%94%A8PR.pdf，（2020 年 1 月 18 日アクセス）.

[27] 阪井和男・有賀三夏．“生きる力を育む芸術思考：知的能力の統合的な育成を目指して”．情報コミュニケーション学会研究報告，2012 年 10 月 6 日，Vol. 9，No. 2，pp. 14-19.

[28] “Open Programme Improbable: An Art Thinking Workshop”. ESCP Business School, https://www.escpeurope.eu/programmes/open-programmes/improbable-art-thinking-workshop，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[29] 西村真里子．“アジャイル型で作品を生み出す，アート思考ワークショップがいま必要な理由”（2019 年 6 月 11 日）．Forbes JAPAN, https://forbesjapan.com/articles/detail/27726，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[30] 中村直香．“今なぜ“アート”なのか：ゼロからイチを生む「Art Thinking Improbable Workshop」の全貌とは”（2019 年 8 月 2 日）．CreatorZine, https://creatorzine.jp/article/detail/126?p=2，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[31] 中村仁美．“デザイン思考ならぬ「アート思考」とは？：マイクロソフトも推進”（2019 年 10 月 3 日）．日経クロストレンド, https://xtrend.nikkei.com/atcl/contents/18/00097/00019/，（2020 年 1 月 19 日アクセス）.

[32] Japan News Center. “ゼロからイチを創る思考を学ぶ Art Thinking Workshop 開催” (2019 年 7 月 2 日). Microsoft, https://news.microsoft.com/ja-jp/2019/07/02/190702-art-thinking-workshop-hold/, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[33] 山口周. “世界のエリートはなぜ「美意識」を鍛えるのか? 経営における「アート」と「サイエンス」”.光文社, 2017 年 7 月 19 日.

[34] “ビジネス書大賞 2018”. http://biztai.jp/2018/prize.html, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[35] “ツインプ”. 株式会社ギガファイル, https://twimp.nu/twimp.php, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[36] “AI テキストマイニング”. User Local,Inc., https://textmining.userlocal.jp/, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[37] “書けば, つながる COMEMO”. NIKKEI, https://comemo.nikkei.com/, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[38] “本の要約サイト flier(フライヤー)”. Flier Inc., https://www.flierinc.com/, (2020 年 1 月 19 日アクセス).

[39] 秋元雄史. “アート思考：ビジネスと芸術で人々の幸福を高める方法”. プレジデント社, 2019 年 10 月 31 日.

[40] しいたに. レビュー「アート思考：ビジネスと芸術で人々の幸福を高める方法」. https://www.flierinc.com/summary/2134, (2020 年 1 月 18 日アクセス).

著者紹介

秋山 ゆかり

1995 年 イリノイ大学アーバナ・シャンペン校情報科学学部・統計学部卒. 1996 年 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了. 工学修士. 2012 年一橋大学大学院国際企業戦略研究科博士後期課程退学. 2012 年より戦略・事業開発コンサルティングの株式会社 Leonessa 代表取締役. 2015 年より, 明治大学サービス創新研究所客員研究員. 現在に至る. 戦略, 事業開発, イノベーションの研究に従事. 情報コミュニケーション学会会員.

阪井 和男

1977 年 東京理科大学理学部物理学科卒. 1985 年 同大学大学院博士後期課程退学 (6 年間在籍). 理学博士. 1990 年より, 明治大学法学部専任講師, 1998 年同法学部教授. 現在に至る. 人と組織の死生学の研究に従事. 明治大学サービス創新研究所所長, 情報コミュニケーション学会顧問, 電子通信情報学会思考と言語研究会顧問, ドラッカー学会代表理事, アカデミック・コーチング学会副会長, 日本ビジネス・コミュニケーション学会副会長, 学習分析学会理事, DPC マネジメント研究会理事, 組織学会, サービス学会各会員.

Universality of a gate-type quantum computer comprising Controlled-Z and three rotation gates, and its quantum advantage over classical computers

Kiyotaka Hammura[1] and Katsuhiko Yamaguchi[2]

Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University,

1 Kanayagawa, Fukushima 960-1296, Japan

Kazuo Sakai[3]

School of Law, Meiji University, 1-9-1 Eifuku, Suginami, Tokyo 168-8555, Japan

(Dated: September 9, 2019)

Abstract

This article deals with algorithmic investigation of a gate-type quantum computer that comprises the following quantum gates: Controlled-Z, $R_x(\phi)$, $R_y(\phi)$ and $R_z(\phi)$ for $\phi = \pm\pi/4, \pm\pi/2, \pi$ (hereinafter *our potential computer*). We investigate two topics. The first topic is to check whether our potential computer is a universal quantum computer or not by reviewing and following the procedures in Nielsen and Chuang[1]. We can confirm that our gate set is equivalent to the ultimate universal set of gates in quantum computing. The availability of the ultimate set makes it possible to construct an arbitrary unitary matrix, the key to implement a universal quantum computer; thus, our potential computer proves to be universal. The second topic is to review to what extent our potential quantum computer could be useful from a viewpoint of its availability to solve a real problem, in comparison to a classical one. We can also confirm that our potential computer can implement *the Deutsch-Jozsa algorithm*[2] (or *DJA* for short). DJA makes it possible to solve a certain problem in much less steps than classical computing; thus, our potential computer is confirmed to possess *quantum advantage*.

CONTENTS

I. INTRODUCTION 57
A. Problems 57
B. Questions/Aims 58
C. Questions/Objectives 58

II. RESULTS 59
A. Universality of our potential computer 59
1. Definition of the gate-type quantum information processing 59
2. A universal set of gates for quantum computation 60
3. Towards the ultimate universal set of gates 60
4. Examination of our potential computer's universality in quantum computing 81
B. Quantum advantage of our potential computer 83
1. Definition of the problem to solve 84
2. How the Deutsch-Jozsa algorithm enables us to solve it in less steps 85
3. Examination of the availability of DJA on our potential computer 88

III. SUMMARY and FUTURE ISSUES 88

A. Derivation of Eq.(77) 89

B. Derivation of Eq.(78) 89

C. Derivation of Eq.(82) 90

References 91

I. INTRODUCTION

A. Problems

The general concern of KH, the primary author of this article, is that if we plan to implement a gate-type quantum computer that is supposed to embody a certain set of operation

gates, it is important studying the computer from a viewpoint of quantum information processing (or *QIP* for short) algorithm at the same time as producing *tangible* things. Here, let us suppose the computer to embody the following quantum gates: Controlled-Z, $R_x(\phi)$, $R_y(\phi)$ and $R_z(\phi)$ for $\phi = \pm\pi/4, \pm\pi/2, \pi$. The definitions of these gates are detailed later, and hereinafter we call such computer *our potential computer*. In particular, the assessment of our potential computer's availability to solve a problem is, among other things, vital and should be done prior to any processing activities. This article focuses on the assessment. Other algorithmic investigations, e.g., the development of an efficient QIP code and the development of an error correction code, taking into account the physical characteristics of the computer, may follow the assessment study.

B. Questions/Aims

We have two aims for the assessment of our gate-type computer's potential availability to solve a problem.

The first aim is to confirm its universality. A gate-type quantum computer is said to possess universality if it is verified to be able to perform arbitrary unitary transformations on internal data. An arbitrary unitary transformation is made possible if a quantum computer embodies an arbitrary single-qubit gate and a CNOT gate as well[1]. In case that our quantum computer could not embody a full set of these gates, there still might be a possibility of it being able to solve some limited types of problems, though.

The second aim is to understand its practicality. Assuming that our potential computer will prove to be universal in the first half of this article, to what extent our potential quantum computer could be useful in a practical point of view, i.e., how good it is in comparison to a classical computer in terms of solving a real problem.

C. Questions/Objectives

We set two objectives corresponding to the two aims, respectively.

The first objective is concerning universality, and we examine whether our potential computer embodies "the $\pi/8$ gate", phase gate, Hadamard gate, and CNOT gate or not (to be mentioned in Section II A).

Organisation of II A is as follows: giving a simple definition of the gate-type quantum information processing in a bit conceptual manner, followed by introducing the concept of a universal set of operations or gates, then reviewing in detail how to obtain the ultimate universal set comprising "the $\pi/8$ gate", phase gate, Hadamard gate, and CNOT gate. Now, having had these fundamental concepts, we examine our potential computer's universality, to confirm it.

The second objective is concerning practicality, and we plan to verify that our potential computer can exhibit *quantum advantage*. To this end, we demonstrate that ours can implement the Deutsch-Jozsa algorithm[2] (or *DJA* for short). DJA is an algorithm that is introduced to solve a certain problem (to be mentioned in Section II B), and the algorithm can only be implemented using the theoretical framework of quantum information processing, i.e., a classical computer cannot implement it. Quantum advantage is the potential ability of a quantum computer to solve problems faster than a classical computer do[4] while quantum supremacy is the potential ability to solve those that cannot be done practically by a classical computer[5].

Organisation of II B is as follows: defining a problem to be tackled, followed by introducing DJA and reviewing how DJA makes it possible solve the problem in much less number of steps, then confirming that DJA can be implemented with our potential computer.

The successful implementation of DJA is understood as a successful demonstration of *a quantum advantage.* This advantage is among those characteristics that help to affirm that a quantum computer is superior to a classical counterpart. The implementation of DJA requires the Hadamard gate, which is also a centerpiece of the whole quantum information processing.

Throughout this article, terms *operation* and *gating*, and *operator* and *gate* are used interchangeably, respectively.

II. RESULTS

A. Universality of our potential computer

1. Definition of the gate-type quantum information processing

A gate-type quantum computer (of n-qubit) is defined as follows[1, 3]:

a. It has a register that holds $2n$ complex numbers, where each qubit has two complex numbers.

b. It changes the contents of the register (= n-qubit state) by carrying out unitary operations repeatedly on the original register using $2n \times 2n$ complex unitary matrices until the intended register is obtained.

c. It *measures* the contents of the intended register, to produce a real number and the intended register is projected onto one computational basis associated with the real number. This is represented by measurement of *a measurement operator* $M_m (\equiv |m\rangle\langle m|$, where $|m\rangle$ is one computational basis) with respect to the intended n-qubit state: We obtain the probability of the state being found in the specific state $|m\rangle$.

The proceeding chapters deal with the issues regarding (II A 1 b) above. The author follows the mathematical notations, e.g., tensor representation, in particular, found in the notable references [1, 6–9].

2. A universal set of gates for quantum computation

As mentioned above, QIP is basically a repetition of $2n \times 2n$ unitary operations on the original n-qubit state. A quantum computer might be appreciated well if it is specially built to solve some specific problem and embody all the necessary $2n \times 2n$ unitary operators or gates to solve it. We, however, tend to like to have the type of quantum computer that is available to solve any problems given. Otherwise, we will build different quantum computers for different problems one by one. Here the concept of a universal set of gates or a universal quantum computer came in. Details of the universal sets are described below.

3. Towards the ultimate universal set of gates

If a set of gates (referring to quantum gates in this writing) can be equivalent to an arbitrary gate, i.e., the set is capable to replace the arbitrary gate, the set is said to be universal for quantum computation. A quantum computer equipped with a universal set of gates is then called a universal quantum computer. In the following, three universal sets α, β and γ are explained. The three sets relate to others in that the set-α is decomposed to the set-β and the set-β is further decomposed to the set-γ. What should be noted is that

the set-γ is not exactly equivalent to the set-β. The set-β is approximated to the set-γ to *arbitrary accuracy*, instead. The set-γ is called the ultimate universal set of gates.

a. set-α : two-level unitary operations

The target is to verify that an arbitrary unitary matrix with an arbitrary size is decomposed to *two-level unitary matrices*.

Start with an arbitrary 3×3 unitary matrix $U^{(3)}$:

$$U^{(3)} \equiv \begin{pmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & j \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Our strategy is to find three unitary matrices $U_1^{(3)}, U_2^{(3)}, U_3^{(3)}$ such that

$$U_3^{(3)} U_2^{(3)} U_1^{(3)} U^{(3)} = \tilde{I}. \tag{2}$$

For if Eq.(2) holds, $U^{(3)}$ is then decomposed as

$$U^{(3)} = {U_1^{(3)}}^{-1} {U_2^{(3)}}^{-1} {U_2^{(3)}}^{-1} = {U_1^{(3)}}^{\dagger} {U_2^{(3)}}^{\dagger} {U_2^{(3)}}^{\dagger}. \tag{3}$$

Now we can explain that *the two-level unitary matrices* do this job. A two-level unitary matrix is one that acts non-trivially on two-or-fewer vector components. First, take a first two-level unitary matrix $U_1^{(3)}$ as

$$U_1^{(3)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{a^*}{A_3} & \frac{b^*}{A_3} & 0 \\ \frac{b}{A_3} & \frac{-a}{A_3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \ A_3 = \sqrt{|a|^2 + |b|^2} & (\text{for b} \neq 0) \\ \tilde{I}^{(3)} & (\text{for b} = 0). \end{cases} \tag{4}$$

Thus,

$$U_1^{(3)} U^{(3)} = \begin{pmatrix} A_3 & \frac{a^* d + b^* e}{A_3} & \frac{a^* g + b^* h}{A_3} \\ 0 & \frac{bd - ea}{A_3} & \frac{bg - ah}{A_3} \\ c & f & j \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\equiv \begin{pmatrix} a' & d' & g' \\ 0 & e' & h' \\ c' & f' & j' \end{pmatrix}. \tag{6}$$

While the deviations of Eq.(5) and Eq.(6) are done for $b \neq 0$, Eq(6) holds for $b = 0$, either. Next, take a second two-level unitary matrix $U_2^{(3)}$ as

$$U_2^{(3)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{a'^*}{A'_3} & 0 & \frac{c'^*}{A'_3} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{c'}{A'_3} & 0 & \frac{-a'}{A_3} \end{pmatrix}, \ A'_3 = \sqrt{|a'|^2 + |c'|^2} \quad (\text{for c}' \neq 0) \\ \tilde{I}^{(3)} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\text{for c}' = 0). \end{cases} \tag{7}$$

Thus,

$$U_2^{(3)} \left(U_1^{(3)} U^{(3)} \right) = \begin{pmatrix} \frac{a'^*}{A'_3} & 0 & \frac{c'^*}{A'_3} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{c'}{A'_3} & 0 & \frac{-a'}{A_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a' & d' & g' \\ 0 & e' & h' \\ c' & f' & j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_3 & \frac{a'^* d' + c'^* f'}{A'_3} & \frac{a'^* g' + c'^* j'}{A'_3} \\ 0 & e' & h' \\ 0 & \frac{c' d' - a' f'}{A'_3} & \frac{c' g' - a' j'}{A'_3} \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Here, by recalling the unitarity of $U_2^{(3)} \left(U_1^{(3)} U^{(3)} \right)$, the most RHS of Eq.(8) further reduces to

$$\Longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e' & h' \\ 0 & \frac{c' d' - a' f'}{A'_3} & \frac{c' g' - a' j'}{A'_3} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e'' & h'' \\ 0 & f'' & g'' \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Finally, if we take $U_3^{(3)}$ as

$$U_3^{(3)} \equiv \left(U_2^{(3)} \left(U_1^{(3)} U^{(3)} \right) \right)^\dagger = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e''^* & f''^* \\ 0 & h''^* & g''^* \end{pmatrix}, \tag{10}$$

clearly we have

$$U_3^{(3)} \left(U_2^{(3)} \left(U_1^{(3)} U^{(3)} \right) \right) = \tilde{I}. \tag{11}$$

$U_3^{(3)}$ is another two-level unitary matrix. We have just verified Eq.(3): An arbitrary 3×3 unitary matrix $U^{(3)}$ is decomposed to multiplications of three 3×3 two-level unitary matrices.

The next is regarding an arbitrary 4×4 unitary matrix $U^{(4)}$:

$$U^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} a & d & g & \varepsilon \\ b & e & h & \eta \\ c & f & j & \theta \\ \alpha & \beta & \gamma & \delta \end{pmatrix}. \tag{12}$$

We take the procedures similar to the case of $U^{(3)}$. First, take a first two-level unitary matrix $U_1^{(4)}$ as

$$U_1^{(4)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{a^*}{A_4} & \frac{b^*}{A_4} & 0 & 0 \\ \frac{b}{A_4} & \frac{-a}{A_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \ A_4 = \sqrt{|a|^2 + |b|^2} \ \ (\text{for b} \neq 0) \\ \tilde{I}^{(4)} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\text{for b} = 0). \end{cases} \tag{13}$$

Thus,

$$U_1^{(4)} U^{(4)} = \begin{pmatrix} A_4 & \frac{a^*d+b^*e}{A_4} & \frac{a^*g+b^*h}{A_4} & \frac{a^*\varepsilon+b^*\eta}{A_4} \\ 0 & \frac{bd-ea}{A_4} & \frac{bg-ah}{A_4} & \frac{b\varepsilon-a\eta}{A_4} \\ c & f & j & \theta \\ \alpha & \beta & \gamma & \delta \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\equiv \begin{pmatrix} a' & d' & g' & \varepsilon' \\ 0 & e' & h' & \eta' \\ c' & f' & j' & \theta' \\ \alpha' & \beta' & \gamma' & \delta' \end{pmatrix}. \tag{15}$$

A quick reminder: as in Eq.(5) and Eq.(6) regarding $U^{(3)}$, while the deviations of Eq.(14) and Eq.(15) are done for $b \neq 0$, Eq(15) holds for $b = 0$, either.

Next, take a second two-level unitary matrix $U_2^{(4)}$ as

$$U_2^{(4)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{a'^*}{A'_4} & 0 & \frac{c'^*}{A_4} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{c'}{A'_4} & 0 & \frac{-a'}{A'_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \ A'_4 = \sqrt{|a'|^2 + |c'|^2} \ \ (\text{for c}' \neq 0) \\ \tilde{I}^{(4)} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\text{for c}' = 0) \end{cases} \tag{16}$$

, to have

$$U_2^{(4)}\left(U_1^{(4)}U^{(4)}\right) = \begin{pmatrix} A'_4 & \frac{a'^* d' + c'^* f'}{A'_4} & \frac{a'^* g' + c'^* j'}{A'_4} & \frac{a'^* \varepsilon' + c'^* \theta'}{A'_4} \\ 0 & e' & h' & \eta' \\ c & \frac{c' d' - a' f'}{A'_4} & \frac{c' g' - a' j'}{A'_4} & \frac{c' \varepsilon' - a' \theta'}{A'_4} \\ \alpha' & \beta' & \gamma' & \delta' \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$\equiv \begin{pmatrix} a'' & d'' & g'' & \varepsilon'' \\ 0 & e'' & h'' & \eta'' \\ 0 & f'' & j'' & \theta'' \\ \alpha'' & \beta'' & \gamma'' & \delta'' \end{pmatrix}. \tag{18}$$

Further, take a third two-level unitary matrix $U_3^{(4)}$ as

$$U_3^{(4)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{a''^*}{A''_4} & 0 & 0 & \frac{\alpha''^*}{A''_4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\alpha''}{A''_4} & 0 & 0 & \frac{-a''}{A''_4} \end{pmatrix}, \ A''_4 = \sqrt{|a''|^2 + |\alpha''|^2} \ \ (\text{for } \alpha'' \neq 0) \\ \tilde{I}^{(4)} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\text{for } \alpha'' = 0) \end{cases} \tag{19}$$

, to have

$$U_3^{(4)}\left(U_2^{(4)}\left(U_1^{(4)}U^{(4)}\right)\right) = \begin{pmatrix} A_4'' & \frac{a''^*d''+\alpha''^*\beta''}{A_4''} & \frac{a''^*g''+\alpha''^*\gamma''}{A_4''} & \frac{a''^*\varepsilon''+\alpha''^*\delta''}{A_4''} \\ 0 & e'' & h'' & \eta'' \\ 0 & f'' & j''' & \theta'' \\ 0 & \frac{\alpha''d''-a''\beta''}{A_4''} & \frac{\alpha''g''-a''\gamma''}{A_4''} & \frac{\alpha''\varepsilon''-a''\delta''}{A_4''} \end{pmatrix} \tag{20}$$

$$= \begin{pmatrix} A_4'' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e'' & h'' & \eta'' \\ 0 & f'' & j''' & \theta'' \\ 0 & \frac{\alpha''d''-a''\beta''}{A_4''} & \frac{\alpha''g''-a''\gamma''}{A_4''} & \frac{\alpha''\varepsilon''-a''\delta''}{A_4''} \end{pmatrix} \tag{21}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e'' & h'' & \eta'' \\ 0 & f'' & j''' & \theta'' \\ 0 & \frac{\alpha''d''-a''\beta''}{A_4''} & \frac{\alpha''g''-a''\gamma''}{A_4''} & \frac{\alpha''\varepsilon''-a''\delta''}{A_4''} \end{pmatrix} \tag{22}$$

$$\equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e''' & h''' & \eta''' \\ 0 & f''' & j''' & \theta''' \\ 0 & \beta''' & \gamma''' & \delta''' \end{pmatrix}. \tag{23}$$

The last matrix form Eq.(23) implies that, by using three 4×4 two-level unitary matrices, an arbitrary 4×4 unitary matrix $U^{(4)}$ is deformed to one effectively of an arbitrary 3×3 unitary matrix, which has just been verified to be decomposed to multiples of three 3×3 two-level unitary matrices.

By repeating the procedures above, an arbitrary unitary matrix with an arbitrary size can be decomposed to multiplications of two-level unitary matrices.

We have verified that two-level unitary matrices form a universal set in quantum computing.

b. set-β : CNOT operation and single-qubit unitary operation

We will verify below that an arbitrary $2n \times 2n$ two-level unitary operator is decomposed to multiplications of CNOT operation(s) and single-qubit unitary operations.

Start with a case of $n = 1$, where an arbitrary 2×2 unitary matrix is supposed to operate on a single-qubit system or *a two-component spinor*, which is represented by a 1×2 column

matrix or vector. The corresponding two-level unitary operator to such vector is nothing but a single-qubit unitary operation. Now, the case is verified.

Next, for a case of n=2, where an 4×4 arbitrary unitary matrix operates on a two-qubit system represented by a 1×4 column matrix or vector. What should be noted first is that there exist such 6 types of two-level unitary matrices only as follows, with each matrix being accompanied by the two computational basis that the matrix acts non-trivially on:

$$\bar{U}_1^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} a & c & 0 & 0 \\ b & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad : \{|00\rangle, |01\rangle\}, \tag{24}$$

$$\bar{U}_2^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} a & 0 & c & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ b & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad : \{|00\rangle, |10\rangle\}, \tag{25}$$

$$\bar{U}_3^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} a & 0 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ b & 0 & 0 & d \end{pmatrix} \quad : \{|00\rangle, |11\rangle\}, \tag{26}$$

$$\bar{U}_4^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & c & 0 \\ 0 & b & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad : \{|01\rangle, |10\rangle\}, \tag{27}$$

$$\bar{U}_5^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & b & 0 & c \end{pmatrix} \quad : \{|01\rangle, |10\rangle\}, \tag{28}$$

$$\bar{U}_6^{(4)} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & c \\ 0 & 0 & b & d \end{pmatrix} \quad : \{|10\rangle, |11\rangle\}. \tag{29}$$

N.B.: $|vw\rangle$, $|v\rangle|w\rangle$ or $|v, w\rangle$ are the abbreviated notations for tenso product $|v\rangle \otimes |w\rangle$, where

$|v\rangle$ and $|w\rangle$ are vectors of inner product spaces V and W, respectively. We define U as

$$U \equiv \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}. \tag{30}$$

To decompose the two-level unitary matrices, we use the following five procedures:

1. Translate the two computational bases that the matrix acts non-trivially on, which are written next to the matrix above (Eq.(24) for instance), into two *Gray code* sequences. Hereinafter, such two computational bases may be called *the original* computational bases occasionally. Then, interpolate the two sequences with other Gray code sequences to make a series of the sequences, in a manner that the adjacent sequences differ in exactly one bit.

2. Translate back the resultant sequences into the computational bases or the two-qubit state. Now you might have new bases also that are originally not recognized as those that the matrix acts non-trivially on. Then, read the series to determine which of the two qubits to flip one by one to transform the basis from *the initial computational basis* to one step before *the final computational basis*. The initial and the final computational bases refer to the ones listed as the first and second terms of the original computational bases, respectively. For example, $|00\rangle$ and $|11\rangle$ are the initial and the final computation bases in case of $\bar{U}_3^{(4)}$ (Eq.(26)).

3. To execute transforming the computational basis from the initial one, carry out the controlled flipping operation (= Controlled-X) on the qubit that is to be flipped (= *target qubit*), conditional on the other qubit being in the state $|0\rangle$ (or $|1\rangle$) if this qubit (= *control qubit*) should remain in $|0\rangle$ (or $|1\rangle$) before and after the operation. Repeat this Controlled-X operation until the basis is transformed to one step before the final computational basis (as mentioned in 2).

4. We need to do one more flipping (of either qubit) to reach the final computational basis. To this end, carry out the controlled unitary (*Controlled-U* for short) operation, which executes U operation on the target qubit, conditional on the state of the control qubit.

5. To complete the deformation, we must carry out the same flipping operations again as have been done to reach the computational basis that will be executed with the Controlled-U operation.

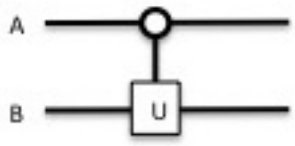


FIG. 1. A diagram equivalent to $\bar{U}_1^{(4)}$. A and B represent the first and the second qubit, respectively. Each line indicates a time-line on which time advances from left to right. At some point in time, B is acted on with U operations, conditional on A being in the state $|0\rangle$.

Now, look at $\bar{U}_1^{(4)}$. We follow the procedures above to interpret as a decomposition of the Controlled-X and the Controlled-U operations. The Gray code sequences corresponding to the original two bases are (00) and (01), and as the two sequences differ in one bit only they have already constituted the complete Gray code series, i.e., there is no need of flipping to do prior to the Controlled-U operation. Thus, $\bar{U}_1^{(4)}$ can be interpreted in terms of flipping and the Controlled-U as: Simply operate the Controlled-U operation on the two-qubit state $|00\rangle$, where do U operation on the second qubit, conditional on the first qubit being in the state $|0\rangle$, and reach $|01\rangle$, which is the final computational basis. Now, by following the procedures, we reach a diagram FIG. 1, which should be *equivalent* to $\bar{U}_1^{(4)}$. In the diagram, A and B represent the first and the second qubit, respectively, and each line indicates *a time-line*, on which time advances from left to right. The diagram indicates how the two qubits A and B correlate with each other in the course of time. FIG. 1 shows that at some point in time, U operation is acted on the qubit B, conditional on the qubit A being in $|0\rangle$. The whole circle on the time-line of the qubit A indicates that the condition imposed on the qubit A, which is linked with U, is $|0\rangle$. If the condition on the qubit A were $|1\rangle$, the circle would be painted in solid black. We can verify that the diagram FIG. 1 indeed represents

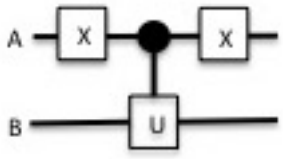


FIG. 2. A diagram equivalent to FIG. 1. The white circle in FIG. 1, representing that U will be done conditional on the qubit A being in $|0\rangle$, is replaced to a black circle that is sandwiched by two X operations. A black circle means that the condition on the qubit A in the Controlled-U is now the qubit A being in $|1\rangle$.

$\bar{U}_1^{(4)}$ by reading the diagram with mathematical formulas as follows:

$$(|0\rangle\langle 0|)_A \otimes U_B + (|1\rangle\langle 1|)_B \otimes \tilde{I}_B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_A \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}_A \otimes U_B + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_A \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}_A \otimes \tilde{I}_B \quad (31)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A \otimes U_B + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_A \otimes \tilde{I}_B \quad (32)$$

$$= \begin{pmatrix} U_B & 0 \\ 0 & \tilde{I}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U & 0 \\ 0 & \tilde{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & c & 0 & 0 \\ b & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\equiv \bar{U}_1^{(4)}. \quad (34)$$

The next task is to try to decompose the two-qubit operation shown in the diagram into multiplications of CNOT and single-qubit operations. The diagram FIG. 1 indeed prompts us to re-draw it to the diagram in FIG. 2. The conditional part on the qubit A is replaced to one with $|1\rangle$, i.e., the conventional controlled operation, by flipping the qubit A using X operation just before the Controlled-U operation. The flipping is compensated by another X operation just after the Controlled-U operation. We can verify that the diagram in FIG. 2 also represents $\bar{U}_1^{(4)}$, i.e., equivalence between FIG. 1 and 2, as follows:

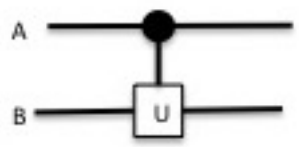


FIG. 3. A diagram for the Controlled-U, by which U will act on B, conditional on the qubit A being in $|1\rangle$.

$$\left(X_A \otimes \tilde{I}_B\right)\left(\left(|0\rangle\langle 0|\right)_A \otimes \tilde{I}_B + \left(|1\rangle\langle 1|\right)_A \otimes U_B\right)\left(X_A \otimes \tilde{I}_B\right) \tag{35}$$

$$= \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}_A \otimes \tilde{I}_B\right)\begin{pmatrix} \tilde{I}_B & 0 \\ 0 & U_B \end{pmatrix}\left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}_A \otimes \tilde{I}_B\right) \tag{36}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_B & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \tilde{I}_B & 0 \\ 0 & U_B \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_B & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_B & 0 \\ 0 & \tilde{I}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U & 0 \\ 0 & \tilde{I} \end{pmatrix} \equiv \bar{U}_1^{(4)}. \tag{37}$$

Now our final task here is to decompose the controlled-U operation shown in FIG. 3 (not FIG. 1) into single qubit operations and CNOT operation. A mathematical formula for the controlled-U (FIG. 3) is

$$\left(|0\rangle\langle 0|\right)_A \otimes \tilde{I}_B + \left(|1\rangle\langle 1|\right)_A \otimes U_B = \begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & U \end{pmatrix}. \tag{38}$$

Here, the Controlled-NOT or CNOT is regarded as a special case of the Controlled-U. It is defined as one that has X for U in the Controlled-U. The diagram of CNOT is shown in FIG. 4 and its mathematical formula is

$$\left(|0\rangle\langle 0|\right)_A \otimes \tilde{I}_B + \left(|1\rangle\langle 1|\right)_A \otimes X_B = \begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \tag{39}$$

The Controlled-U (FIG. 3) is widely know to be re-drawn as in FIG. 5 by using the fact that an arbitrary 2×2 unitary matrix U is decomposed as $U = e^{i\alpha}AXBXC$ with three single qubit operations A, B, and C such that $ABC = \tilde{I}$ and a physically insignificant global phase $e^{i\alpha}$. We can confirm that the RHS diagram in FIG. 5 represents the Controlled-U in

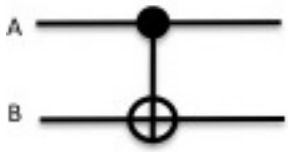


FIG. 4. A diagram for the Controlled-NOT or CNOT operation. It is defined as a special case of the Controlled-U in that U is specified as X.

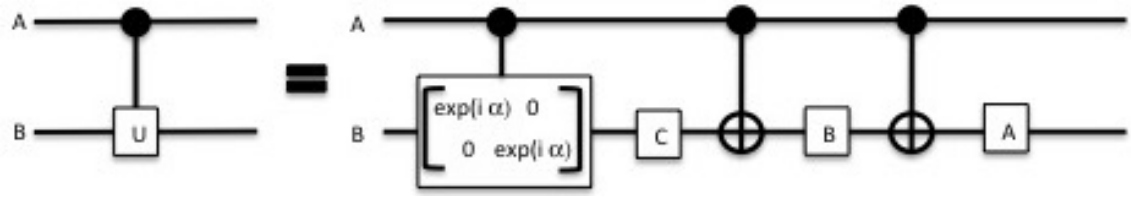


FIG. 5. Controlled-U (FIG. 3) can be decomposed as RHS.

FIG. 3 as follows:

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{I}_B & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{I}_B & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{I}_B & 0 \\ 0 & e^{i\alpha}\tilde{I}_B \end{pmatrix} \tag{40}$$

$$= \begin{pmatrix} ABC & 0 \\ 0 & e^{i\alpha}AXBXC \end{pmatrix} \tag{41}$$

$$= \begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & U \end{pmatrix}. \tag{42}$$

In Eq.(40), we pay attention to the order of the matrices so that it reflects the correct order in time (as designated in FIG. 5). For example, $\left(\begin{smallmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{smallmatrix}\right)$ is put in the left-most position in Eq.(40) because the operation comes at last in the course of time. Eq.(42) uses $U = e^{i\alpha}AXBXC$ and $ABC = \tilde{I}$[1]. FIG. 6 is an alternative diagram to represent the Controlled-U in FIG. 3. In FIG. 6 the phase operation is done on the qubit A at last in the course of time, while it is on the qubit B at first in FIG. 5. With the diagram in FIG. 6 taken, for example, and recalling the two X operations in FIG. 2, we finally conclude that $\bar{U}_1^{(4)}$ is decomposed to multiplications of single qubit operations and CNOT operation (FIG. 7).

Next, look at $\bar{U}_2^{(4)}$. The Gray code sequences corresponding to the original two computational bases $|00\rangle$ and $|10\rangle$ are (00) and (10); therefore, as is the case with $\bar{U}_1^{(4)}$, there is no need to inset other Gray code sequences between (00) and (10). Thus, the diagram that

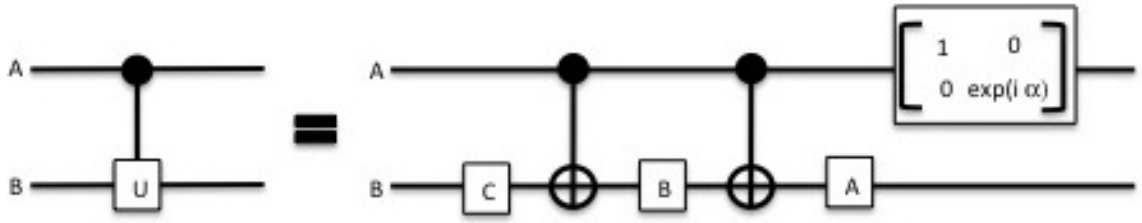


FIG. 6. An alternative diagram for the Controlled-U in FIG. 3. A position of the phase operation differs from FIG. 5.

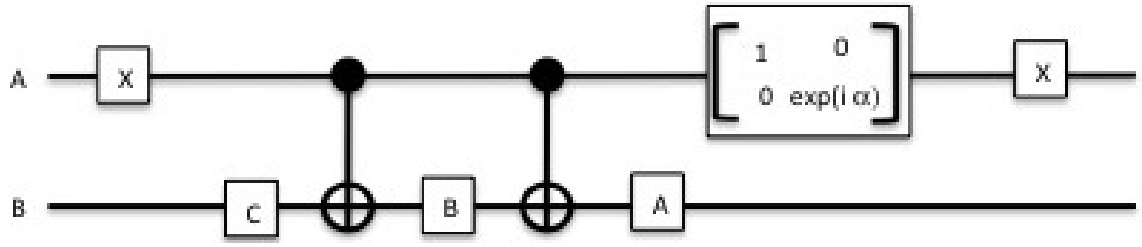


FIG. 7. The eventual diagram to represent $\bar{U}_1^{(4)}$. The two-qubit operation shown in FIG. 6 is sandwiched by two X operations to complete $\bar{U}_1^{(4)}$ and $ABC = \tilde{I}$.

corresponds to $\bar{U}_2^{(4)}$ is shown in FIG. 8, where Controlled-U operation is acted on the qubit A, conditional on the qubit B being in the state $|0\rangle$. The validity of the diagram is verified

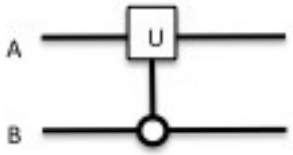


FIG. 8. A diagram to represent $\bar{U}_2^{(4)}$. Controlled-U operation is acted on the qubit A, conditional on the qubit B being in the state $|0\rangle$.

by

$$U_A \otimes (|0\rangle\langle 0|)_B + \tilde{I}_A \otimes (|1\rangle\langle 1|)_B \tag{43}$$

$$= \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}_A \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_B + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_A \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_B \tag{44}$$

$$= \begin{pmatrix} a & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 & c & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ b & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \bar{U}_2^{(4)}. \tag{45}$$

The basic strategy to further decompose the two-qubit operation in FIG. 8 is to deform it to have the Controlled-U operation such that it operates U on the qubit B, conditional on the qubit A being in $|1\rangle$. Once we extract such Controlled-U in FIG. 3, the section will be decomposed to the composite two-qubit operation in FIG. 5 or FIG. 6. Following the strategy, we deform the diagram in FIG. 8 to ones shown in FIG. 9. In the left-most diagram, a white circle has been replaced with a black one, to change the condition on the qubit B from $|0\rangle$ to $|1\rangle$, to become the *inverted* Controlled-U. In the middle diagram, the *inverted* Controlled-U has been inverted (= upside down) between the two qubits by using two swapping operations, to become the conventional controlled-U in FIG. 3. In the right-most diagram, each swapping operation is replaced with a composite of two CNOT gates and an *inverted* CNOT operation. The double oblique lines in the right-most diagram means that a mirrored structure excluding the Controlled-U should come beyond the lines. The decomposition of the swap gate is verified as

$$\begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \tag{46}$$

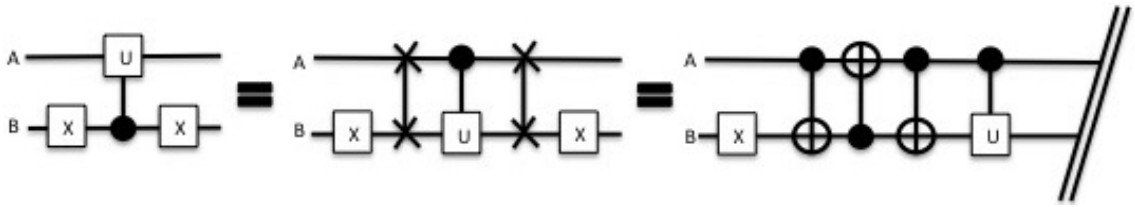


FIG. 9. $\bar{U}_2^{(4)}$ in FIG. 8 is deformed further step by step. The original $\bar{U}_2^{(4)}$ has been deformed in the left-most diagram using two X gates to replace a white circle to a black one. Then, the *inverted* Controlled-U has been deformed in the middle diagram using two swap gates to have the conventional Controlled-U. In the right-most diagram, each swap gate is replaced with a composite of two CNOT and one *inverted* CNOT. The double oblique lines means that a mirrored structure excluding the Controlled-U should come beyond the lines.

, where the middle matrix, the *inverted* CNOT, is obtained as

$$\tilde{I}_A \otimes (|0\rangle\langle 0|)_B + X_A \otimes (|1\rangle\langle 1|)_B \tag{47}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_A \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_B + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}_A \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_B \tag{48}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{49}$$

The *inverted* CNOT is replaced to a composite of four Hadamard gates and one CNOT (FIG. 10), and the validity is verified as

$$\left(\tilde{I}_A \otimes \tilde{H}_B\right)\left(\tilde{H}_A \otimes \tilde{I}_B\right)\begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix}\left(\tilde{H}_A \otimes \tilde{I}_B\right)\left(\tilde{I}_A \otimes \tilde{H}_B\right) \tag{50}$$

$$= \begin{pmatrix} \tilde{H}_B & 0 \\ 0 & \tilde{H}_B \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \tilde{I}_B & \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_B & -\tilde{I}_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{I} & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \tilde{I}_B & \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_B & -\tilde{I}_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{H}_B & 0 \\ 0 & \tilde{H}_B \end{pmatrix} \tag{51}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{52}$$

Thus, with the results in FIG. 9 and FIG. 10 and the decomposition of the Controlled-U

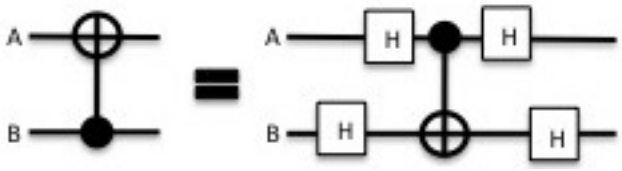


FIG. 10. The *inverted* CNOT gate is replaced to a composite of four Hadamard gates and one CNOT gate.

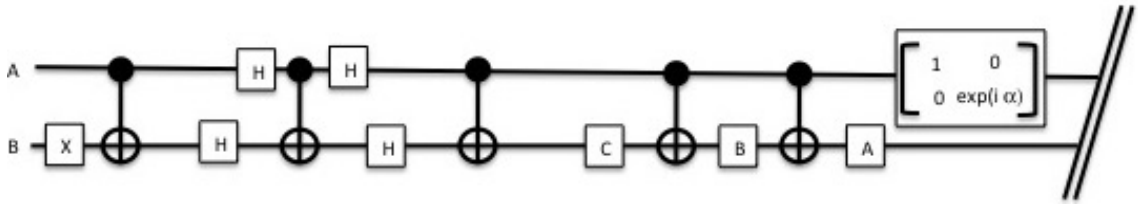


FIG. 11. $\bar{U}_2^{(4)}$ is decomposed to multiplications of single qubit gates –$X, \tilde{H}, A, B, C$, phase – and CNOT gates, where $ABC = \tilde{I}$.

(FIG. 6), we verify that $\bar{U}_2^{(4)}$ is decomposed to multiplications of single qubit operations – $X, \tilde{H}, A, B, C$, phase – and CNOT operations (FIG. 11). The double oblique lines in FIG. 11 means that a mirrored structure excluding a composite for the Controlled-U should come beyond the lines.

Next, look at $\bar{U}_3^{(4)}$. With (00) and (11) being the two Gray code sequences that correspond to the initial and final computational basis of the original bases, we must interpolate another Gray code sequence (01) between them. Using these three Gray code sequences, we can draw in FIG. 12 the diagram for $\bar{U}_3^{(4)}$. The left-most operation is the *white-circle* CNOT, defined in Eq. (53), by which the computational basis $|00\rangle$ is transformed to $|01\rangle$. The middle operation in FIG. 12 is the *inverted* Controlled-U, by which the qubit A is acted on with U, conditional on the qubit B being in the state $|1\rangle$. Finally, another *white-circle* CNOT is done on the two-qubit state to compensate the flipping that has been done at first.

$$(|0\rangle\langle 0|)_A \otimes X_B + (|1\rangle\langle 1|)_A \otimes \tilde{I}_B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{53}$$

By using the various replacements mentioned above, the diagram for $\bar{U}_3^{(4)}$ is further deformed

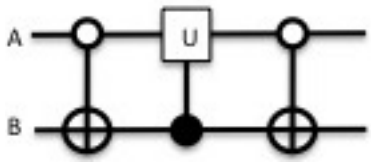


FIG. 12. A diagram to represent $\bar{U}_3^{(4)}$, according to the three Gray code sequences (00), (01), and (11). The last operation, the *white-circle* CNOT, following the *inverted* Controlled-U, is to compensate the flipping operation that has been done at first.

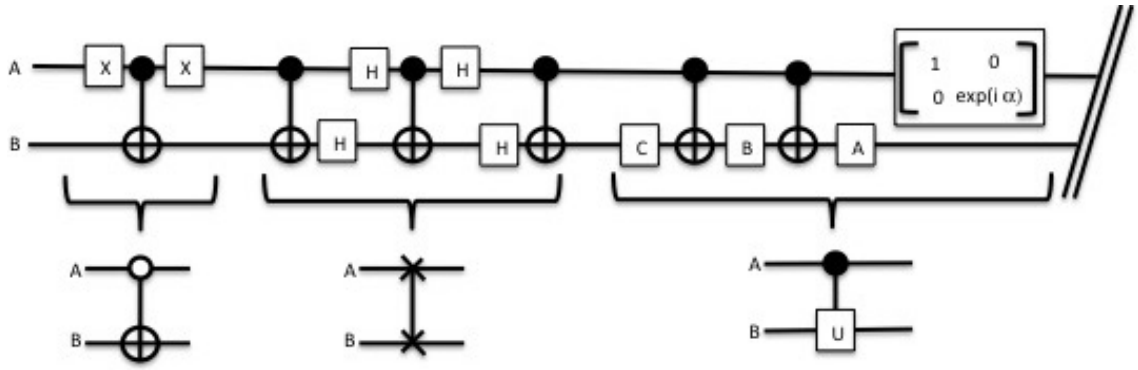


FIG. 13. The eventual diagram to represent $\bar{U}_3^{(4)}$. By using various equivalent deformations, it becomes made up of single qubit operations – $X, \tilde{H}, A, B, C$, and phase – and CNOT operations, where $ABC = \tilde{I}$.

so that it contains only single qubit operations and CNOT operations (FIG. 13). In FIG. 13, the *white-circle* CNOT has been deformed using two flipping operations on the qubit A, so that this section comprises the conventional CNOT. Then, a swapping between the qubit A and the qubit B is carried out, so that the *inverted* Controlled-U is converted to the conventional Controlled-U. And the swapping is decomposed following FIG. 10. The Controlled-U is decomposed following FIG. 6. The double oblique lines in FIG. 13 means that a mirrored structure excluding a composite for the Controlled-U should come beyond the lines.

For the rest of 2×2 two-level unitary matrices and all other two-level unitary matrices with larger size, we can verify that they are all decomposed to multiplications of single-qubit operations and CNOT operations by following exactly the similar procedures to those explained above.

Recalling that an arbitrary unitary matrix with arbitrary size is decomposed to two-

level unitary matrices, we have just shown that CNOT operator and single-qubit operator constitute a universal set of gates in quantum computing.

c. set-γ : CNOT operation, Hadamard operation, and "the $\pi/8$ operation"

It has just been verified that an arbitrary unitary operator with arbitrary size is decomposed to multiplications of CNOT operation and single-qubit operation. That is, these operators constitute a universal set of gates in quantum computing. Now that, what to do next is to try to further decompose the universal operators and reach the ultimate universal set by limiting the variety of the single-qubit operations. We will see that the single-qubit operations are actually limited to those that are called the "$\pi/8$ gate" (or *T gate* for short) regarding z-axis and the Hadamard gate $\tilde{H}$. More precisely, an arbitrary single-qubit operation is approximated using $\tilde{H}$ and the "$\pi/8$ gate" to arbitrary accuracy. Here, it should be noted that the "$\pi/8$ gate" is not coming from $\pi/8$ but $\pi/4$ rotation around z-axis.

It is useful to recall a notion of a quantum mechanical rotation following the notations in [1, 6]. An operator that rotates a 2-component spinor around a unit vector $\hat{l} = (l_x, l_y, l_z)$ by ϕ is written as:

$$R_{\hat{l}}(\phi) = exp\left(-i\frac{\vec{\sigma}\cdot\hat{l}}{2}\phi\right) = \tilde{I}\cos\frac{\phi}{2} - i\left(\vec{\sigma}\cdot\hat{l}\right)\sin\frac{\phi}{2} \tag{54}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\frac{\phi}{2} - i_z\sin\frac{\phi}{2} & (-il_x - l_y)\sin\frac{\phi}{2} \\ (-il_x + l_y)\sin\frac{\phi}{2} & \cos\frac{\phi}{2} + i_z\sin\frac{\phi}{2} \end{pmatrix}, \tag{55}$$

where $\vec{\sigma} \equiv (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. These three components $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ are called the Pauli matrices whose specific forms are

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \tag{56}$$

The σ_x, σ_y, and σ_z are designated as X, Y, and Z occasionally in this writing. The rotation operators around $x-, y-$, and $z-$axes become

$$R_x(\phi) = exp\left(-i\frac{\sigma_x}{2}\phi\right) = \begin{pmatrix} \cos\frac{\phi}{2} & -i\sin\frac{\phi}{2} \\ -i\sin\frac{\phi}{2} & \cos\frac{\phi}{2} \end{pmatrix}, \tag{57}$$

$$R_y(\phi) = exp\left(-i\frac{\sigma_y}{2}\phi\right) = \begin{pmatrix} \cos\frac{\phi}{2} & -\sin\frac{\phi}{2} \\ \sin\frac{\phi}{2} & \cos\frac{\phi}{2} \end{pmatrix}, \tag{58}$$

$$R_z(\phi) = exp\left(-i\frac{\sigma_z}{2}\phi\right) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{+i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix}. \tag{59}$$

Take U as the operator that you want to implement and V as the one that is actually implemented instead of U. That you want to approximate U to V to arbitrary accuracy means that the *error*, $E(U,V)$, that is defined in Eq.(60) becomes negligibly small [1, 10]:

$$E(U,V) \equiv \max_{\psi} || \left(U - V\right) |\psi\rangle || = \max_{\psi} \left(2 - \langle\psi| \left(V^{\dagger}U + U^{\dagger}V\right) |\psi\rangle\right), \tag{60}$$

where $\max_{\psi}$ means that we will use $|\psi\rangle$ such that the argument of $\max_{\psi}$ becomes maximum and $||\,|\Psi\rangle||$ is the norm of a vector $|\Psi\rangle$, i.e., $||\,|\Psi\rangle|| \equiv \sqrt{\langle\Psi|\Psi\rangle}$.

We derive two relations with respect to "$\pi/8$ operator" (or T operator for short), which are

$$e^{-i\frac{\pi}{8}}T \equiv e^{-i\frac{\pi}{8}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{8}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{8}} \end{pmatrix} = e^{-i\frac{Z}{2}\frac{\pi}{4}} = R_z\left(\frac{\pi}{4}\right), \tag{61}$$

$$e^{-i\frac{\pi}{8}}\tilde{H}T\tilde{H} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{8}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{8}} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = e^{-i\frac{X}{2}\frac{\pi}{4}} = R_x\left(\frac{\pi}{4}\right). \tag{62}$$

Multiply both formulae, to have

$$e^{-i\frac{\pi}{8}}Te^{-i\frac{\pi}{8}}\tilde{H}T\tilde{H} = R_z\left(\frac{\pi}{4}\right)R_x\left(\frac{\pi}{4}\right) = e^{-i\frac{Z}{2}\frac{\pi}{4}}e^{-i\frac{X}{2}\frac{\pi}{4}} \tag{63}$$

$$= \left(\tilde{I}\cos\frac{\pi}{8} - iZ\sin\frac{\pi}{8}\right)\left(\tilde{I}\cos\frac{\pi}{8} - iX\sin\frac{\pi}{8}\right) \tag{64}$$

$$= \tilde{I}\cos^2\frac{\pi}{8} + \sin\frac{\pi}{8}\left(-iZ\cos\frac{\pi}{8} - iX\cos\frac{\pi}{8} - ZX\sin\frac{\pi}{8}\right) \tag{65}$$

$$= \tilde{I}\cos^2\frac{\pi}{8} - i\left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}X + \frac{\sin\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}Y + \frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}Z\right)\sqrt{1-\cos^4\frac{\pi}{8}} \tag{66}$$

$$\equiv R_{\hat{n}}\left(\theta\right). \tag{67}$$

By comparing the expression Eq.(66) and Eq.(54), we understand that $e^{-i\frac{\pi}{8}}Te^{-i\frac{\pi}{8}}\tilde{H}T\tilde{H}$ is equivalent to a rotation (defined as $R_{\hat{n}}\left(\theta\right)$) around a certain unit vector $\hat{n}$ defined as

$$\hat{n} = \left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}, \frac{\sin\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}, \frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}\right), \tag{68}$$

and by a certain angle of θ such that

$$\cos\frac{\theta}{2} = \cos^2\frac{\pi}{8}. \tag{69}$$

Next, we detail how repeated iteration of $R_{\hat{n}}\left(\theta\right)$ can be used to approximate to arbitrary accuracy a rotation operator $R_{\hat{n}}\left(\alpha\right)$ that rotates a two-component spinor around the same

vector $\hat{n}$ as in $R_{\hat{n}}(\theta)$ by an arbitrary angle of α. Let $\delta > 0$ be the desired accuracy, and let N be an integer such that $N > 2\pi/\delta$. Define θ_k $(k = 1, 2, \ldots, N)$ so that $\theta_k \in [0, 2\pi\}$ and $\theta_k \equiv k\theta \mod 2\pi$. Then we can say that there are distinct j and k $(1, 2, \ldots, N)$ such that $|\theta_k - \theta_j| \leq 2\pi/N < \delta$. This derivation is due to *the pigeonhole principle* or *Dirichlet's box principle* [11, 12]. Imagine a circle of a radius of 1 and divide its circumference by N, so that we have now N *pigeonholes*, each of which has an arc of $2\pi/N$. Here, the principle states that *if n items are put into m containers, with $n > m$, then at least one container must contain more than one item*[12]. Under the principle, we can deduce that each arc $2\pi/N$ "contains" an angle θ_k one by one, or at least one arc must contain more than one angle. This proves that $|\theta_k - \theta_j| \leq 2\pi/N$ for distinct k and j. Without loss of generality, we can assume that $k > j$, and we can choose k and j such that $|\theta_{k-j}| \equiv |\theta_k - \theta_j| \mod 2\pi < \delta$. Since $k \neq j$, and θ is an irrational mulitiple of 2π ($\because \cos\frac{\theta}{2} = \cos^2\frac{\pi}{8}$), $\theta_{k-j} \neq 0$. It follows that the interaval $[0, 2\pi\}$ is filled up by $\theta_{l(k-j)}$ as l is varied. All the adjacent members of $\theta_{l(k-j)}$ are no more than δ apart.

A quick reminder: $R_{\hat{n}}(\alpha)$ is the target operator that rotates a two-component spinor in 3D space around a certain unit vector $\hat{n}$ by an arbitrary angle of α while $R_{\hat{n}}(\theta_{0\alpha})$ is the operator that we actually implement, aiming to approximate $R_{\hat{n}}(\alpha)$. $R_{\hat{n}}(\theta_{0\alpha})$ rotates a state around the same vector $\hat{n}$ but its rotation angle is a multiple of a certain angle of θ such that $\cos\frac{\theta}{2} = \cos^2\frac{\pi}{8}$. The angle $\theta_{0\alpha}$ is one that is carefully chosen with ε $(< \delta)$ as

$$\theta_{0\alpha} \equiv \theta_{l_{0\alpha}(k-j)} \equiv l_{0\alpha}(k-j)\theta \mod 2\pi \tag{70}$$

$$|\theta_{0\alpha} - \alpha| = \varepsilon < \delta. \tag{71}$$

Thus, the error $E\left(R_{\hat{n}}(\alpha), R_{\hat{n}}(\theta_{0\alpha})\right)$ is evaluated as

$$\max_\psi \left(2 - \langle\psi| R^\dagger_{\hat{n}}\left(\theta_{0\alpha}\right) R_{\hat{n}}\left(\alpha\right) + R^\dagger_{\hat{n}}\left(\alpha\right) R_{\hat{n}}\left(\theta_{0\alpha}\right) |\psi\rangle\right) \tag{72}$$

$$= \max_\psi \left(2 - \langle\psi|[e^{i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}(l_{0\alpha}(k-j)\theta)} e^{-i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}\alpha} + e^{i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}\alpha} e^{-i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}(l_{0\alpha}(k-j)\theta)}]|\psi\rangle\right) \tag{73}$$

$$= \max_\psi \left(2 - \langle\psi|[e^{i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}(l_{0\alpha}(k-j)\theta-\alpha)} + e^{-i\frac{\vec{\sigma}}{2}\cdot\hat{n}(l_{0\alpha}(k-j)\theta-\alpha)}]|\psi\rangle\right) \tag{74}$$

$$= \max_\psi \left(2 - \langle\psi|2\cos[\frac{\vec{\sigma}\cdot\hat{n}}{2}\left(l_{0\alpha}(k-j)\theta - \alpha\right)]|\psi\rangle\right) \tag{75}$$

$$= \max_\psi \left(2 - 2\langle\psi|\cos\frac{\vec{\sigma}\cdot\hat{n}}{2}\varepsilon|\psi\rangle\right) \tag{76}$$

$$= \max_\psi \left(2 - 2\langle\psi|\cos\frac{\varepsilon}{2}|\psi\rangle\right) \tag{77}$$

$$= 2(1 - \cos\frac{\varepsilon}{2}) \leq \varepsilon. \tag{78}$$

See appendices A and B for the derivations of Eq.(77) and Eq.(78). We have managed to approximate $R_{\hat{n}}\left(\alpha\right)$ to the operator having the common rotation vector $\hat{n}$ but a different rotation angle, to arbitrary accuracy. Next, in turn we will see that $R_{\hat{n}}\left(\alpha\right)$ is replaced, using Hadamard gate $\tilde{H}$, with another rotation operator $R_{\hat{m}}\left(\alpha\right)$ that has the common rotation angle α but a different rotation vector $\hat{m}$. With $\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}} \equiv P,\ \sqrt{1-\cos^4\frac{\pi}{8}} \equiv Q$,

$$\tilde{H} R_{\hat{n}}\left(\alpha\right) \tilde{H} \tag{79}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(X+Z)\left(\tilde{I}\cos^2\frac{\pi}{8} - i\left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{P}\left(X+Z\right) + \frac{\sin\frac{\pi}{8}}{P}Y\right)Q\right)\frac{1}{\sqrt{2}}(X+Z) \tag{80}$$

$$= \frac{1}{2}\left(2\hat{I}\cos^2\frac{\pi}{8} - i\left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{P}2\hat{I}(X+Z) + \frac{\sin\frac{\pi}{8}}{P}(X+Z)Y(X+Z)\right)Q\right) \tag{81}$$

$$= \hat{I}\cos^2\frac{\pi}{8} - i\left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}(X+Z) - \frac{\sin\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}Y\right)\sqrt{1-\cos^4\frac{\pi}{8}} \tag{82}$$

$$\equiv R_{\hat{m}}\left(\alpha\right) \tag{83}$$

The following identity equation for Pauli matrices is used to derive Eq.(82)(See appendix C):

$$(X+Z)Y(X+Z) = -2Y \tag{84}$$

Eq.(82) shows that $\tilde{H} R_{\hat{n}}\left(\alpha\right) \tilde{H}$ can be interpreted as a rotation operator $R_{\hat{m}}\left(\alpha\right)$ such that a two-component spinor is rotated by α around $\hat{m}$ defined as

$$\hat{m} = \left(\frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}, -\frac{\sin\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}, \frac{\cos\frac{\pi}{8}}{\sqrt{1+\cos^2\frac{\pi}{8}}}\right). \tag{85}$$

Since $\hat{n}$ and $\hat{m}$ are linearly independent, we can decompose an arbitrary single-qubit unitary operator U using $R_{\hat{n}}$ and $R_{\hat{m}}$ [1] as:

$$U = e^{i\tau} R_{\hat{n}}(\beta) R_{\hat{m}}(\gamma) R_{\hat{n}}(\eta), \tag{86}$$

using certain three angles β, γ, and η, and $e^{i\tau}$ is a physically insignificant global phase.

Finally, we can verify that U is approximated to arbitrary accuracy using "$\pi/8$ gate" (or *T gate* for short) and Hadamard gate $\tilde{H}$. U is the target operator which we want to implement and is specified with three angles β, γ, and η, and certain two unit vectors $\hat{n}$ and $\hat{m}$. On the other hand, we can actually implement $R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta}), R_{\hat{n}}(\theta_{0\gamma}), R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta})$, and $\tilde{H}$, and we construct a composite operator V as

$$V \equiv R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta}) \tilde{H} R_{\hat{n}}(\theta_{0\gamma}) \tilde{H} R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta}). \tag{87}$$

Now let us evaluate the error $E(U, V)$ with $e^{i\tau}$ in U being dropped:

$$E\left(R_{\hat{n}}(\beta) R_{\hat{m}}(\gamma) R_{\hat{n}}(\eta), R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta}) \tilde{H} R_{\hat{n}}(\theta_{0\gamma}) H R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta})\right) \tag{88}$$

$$= E\left(R_{\hat{n}}(\beta) R_{\hat{m}}(\gamma) R_{\hat{n}}(\eta), R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta}) R_{\hat{m}}(\theta_{0\gamma}) R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta})\right) \tag{89}$$

$$\leq E\left(R_{\hat{n}}(\beta), R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta})\right) + E\left(R_{\hat{n}}(\gamma), R_{\hat{n}}(\theta_{0\gamma})\right) + E\left(R_{\hat{n}}(\eta), R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta})\right) \tag{90}$$

$$\leq 3\varepsilon, \tag{91}$$

where a widely-known mathematical theorem [1] is used for the derivation from Eq.(89) to Eq.(90). Recalling that $R_{\hat{n}}(\theta_{0\beta}), R_{\hat{n}}(\theta_{0\gamma})$, and $R_{\hat{n}}(\theta_{0\eta})$ are all made up of "$\pi/8$ gate" and $\tilde{H}$, V is decomposed to multiplications of "$\pi/8$ gate" and $\tilde{H}$. Thus, an arbitrary single-qubit unitary operator U is approximated to arbitrary accuracy to decompositions of "$\pi/8$ gate" and $\tilde{H}$. Therefore, by combining the fact that an arbitrary unitary operator with arbitrary size is decomposed to multiplication of CNOT and single-qubit unitary operator (mentioned in II A 3 b), we verify that CNOT, $\tilde{H}$ and "$\pi/8$ gate around z-axis" constitute a universal set of gates in quantum computing. Also, through the discussions in II A 3 a, II A 3 b, and II A 3 c, it is fair to say that the universal set of gates comprising CNOT, $\tilde{H}$ and "$\pi/8$ gate around z-axis" is the ultimate universal set of gates in quantum computing.

4. Examination of our potential computer's universality in quantum computing

We examine to what extent our potential computer under construction could be "universal." To this end, we compare the ultimate universal set of gates and our gates under

construction. The ultimate set is taken here among other universal ones because it is constituted by most simplified, i.e., most universal, gates.

Our gates under construction are $R_x(\phi), R_y(\phi), R_z(\phi)$ [1, 6], and Controlled-Z (*CPHASE* or U_{CZ} for short) [13, 14] defined as:

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\frac{\phi}{2} & -i\sin\frac{\phi}{2} \\ -i\sin\frac{\phi}{2} & \cos\frac{\phi}{2} \end{pmatrix}, \tag{92}$$

$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\frac{\phi}{2} & -\sin\frac{\phi}{2} \\ \sin\frac{\phi}{2} & \cos\frac{\phi}{2} \end{pmatrix}, \tag{93}$$

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{+i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix}, \tag{94}$$

$$U_{CZ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \tag{95}$$

Our gate set above will be equivalent to the ultimate set of gates if $R_x(\phi), R_y(\phi)$, and $R_z(\phi)$ are available with $\phi = \pm\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \pi$. And in fact these rotation operators are available under precise experimental conditions. Thus, the author observes that ours constitute the universal set of gates in quantum computing. The details of how to replace (=construct) each member of the ultimate set of gates with ours are described as follows:

- For the Hadamard gate $\tilde{H}$

  $\tilde{H}$ is decomposed into various forms using rotation operators: $R_x(\phi), R_y(\phi)$, and $R_z(\phi)$.

$$\tilde{H} = R_x(\pi)e^{i\frac{3\pi}{4}}R_y(\frac{\pi}{2}) = e^{i\frac{\pi}{4}}R_y(-\frac{\pi}{2})R_x(\pi) = R_z(\pi)e^{i\frac{\pi}{4}}R_y(-\frac{\pi}{2}) \tag{96}$$

$$= e^{i\frac{3\pi}{4}}R_y(\frac{\pi}{2})R_z(\pi) = e^{-i\frac{\pi}{2}}R_x(-\frac{\pi}{2})R_z(-\frac{\pi}{2})R_x(-\frac{\pi}{2}) \tag{97}$$

$$= e^{i\frac{3\pi}{2}}R_y(\frac{\pi}{4})R_x(\pi)R_y(-\frac{\pi}{4})R_z(-\frac{\pi}{2})R_x(\pi)R_z(\frac{\pi}{2}) \tag{98}$$

- For "the $\pi/8$ gate" (or T gate for short)

  T can be prepared directly from $R_z\left(\frac{\pi}{4}\right)$.

$$e^{i\frac{\pi}{8}}R_z\left(\frac{\pi}{4}\right) \equiv T. \tag{99}$$

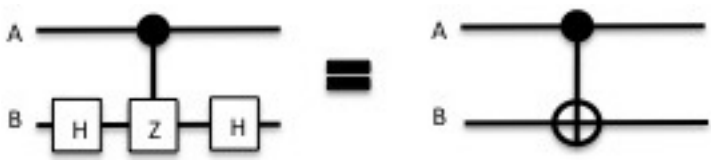


FIG. 14. The left diagram $\tilde{H}_B U_{CZ} \tilde{H}_B$ is equivalent to CNOT on the right. The proof is given in the text.

- For the CNOT gate (or U_{CN} for short)
  Using $\tilde{H}$ above, U_{CN} is decomposed to $\tilde{H}$ and U_{CZ} as follows:

$$\tilde{H}_B U_{CZ} \tilde{H}_B = \left(\tilde{I}_A \otimes \tilde{H}_B\right) U_{CZ} \left(\tilde{I}_A \otimes \tilde{H}_B\right) \tag{100}$$

$$= \begin{pmatrix} \tilde{H}_B & 0 \\ 0 & \tilde{H}_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{H}_B & 0 \\ 0 & \tilde{H}_B \end{pmatrix} \tag{101}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \tag{102}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \equiv U_{CN} \tag{103}$$

  This replacement may be drawn in FIG. 14.

B. Quantum advantage of our potential computer

The author attempts to assess to what extent our potential computer under construction could be useful from a viewpoint of its availability to solve a real problem. The problem given here is known as one that can be solved in much less steps than usual if the computer implements so-called *the Deutsch-Jozsa algorithm*[2]. To implement DJA, the multi-qubit, say n, Hadamard gate $\tilde{H}^{\otimes n}$ is required, where $\tilde{H}$ cannot be implemented unless it is a

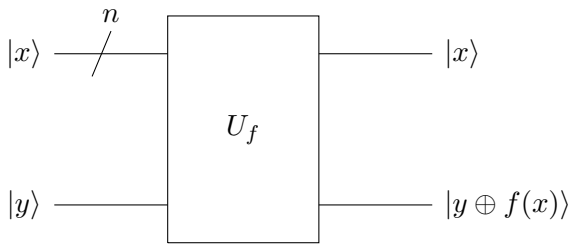


FIG. 15. A schematic diagram to represent the problem to solve. Through a black box (or *oracle*) U_f, the two inputs, $|x\rangle$ and $|y\rangle$, are processed to provide two outputs, $|x\rangle$ and $|y \oplus f(x)\rangle$, where $x \in \{0,1\}^n, y \in \{0,1\}$.

quantum computer. Thus, it is fair to claim that a quantum computer that $H^{(n)}$ can be implemented on is useful in that it is ready to exhibit so-called *quantum advantage* over classical computers. In the preceding, the author defines the problem to solve and explain how DJA works to help to accelerate problem-solving by following the procedures in [3, 15], and examines the availability of DJA on our potential computer.

1. Definition of the problem to solve

Let x be some n-bit sequence and let y be either 0 or 1, i.e., $x \in \{0,1\}^n, y \in \{0,1\}$. Now imagine a black box (or "an oracle" in a computer glossary) U_f such that

$$U_f|x, y\rangle = |x, y \oplus f(x)\rangle, \tag{104}$$

where $f(x)$ takes one of the following two characteristics:

1. $f(x)$ is a *constant* function: the value of $f(x)$ is either 0 or 1 for all arguments x's (=n-bit sequences).

2. $f(x)$ is a *balanced* function: the value of $f(x)$ is 0 for 50% of all the possible arguments x's or 1 for the rest (= 50%) of the possible arguments.

When U_f is given, decide which of the two characteristics has been given to $f(x)$. Here "When U_f is given" means that we are allowed to know of as many sets of $\{|x, y\rangle, |x, y \oplus f(x)\rangle\}$ as we want upon our request. The problem may be drawn in the diagram in FIG. 15.

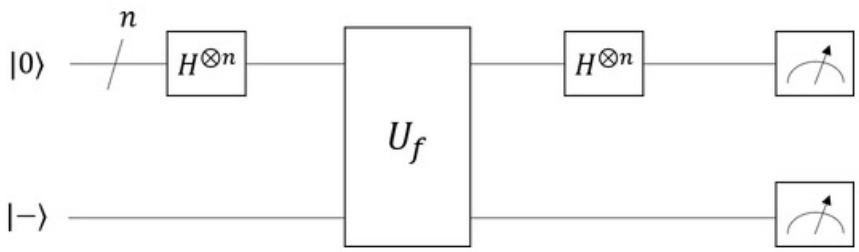


FIG. 16. A diagram to represent a solution to the problem using the Deutsch-Joza algorithm. We set an input state $|x\rangle$ as $|000\cdots0\rangle$, set another input state $|y\rangle$ as $|y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$, and measure the first n-qubit of the output state. This diagram is taken from [3].

2. How the Deutsch-Jozsa algorithm enables us to solve it in less steps

a. Classical approach to the problem Before introducing the Deutsch-Jozsa algorithm, let us take a look at how to solve it in a classical manner. How many trials are needed to decide the characteristics of $f(x)$? In other words, how many times do we need to carry out U_f operation? Consider it depending on the answer. In case that $f(x)$ has been set "balanced", the minimum number of necessary trial is 2 if we are lucky. For if the first output is different from the second one, this means that $f(x)$ is not "constant" and this implies that $f(x)$ is "balanced." On the other hand, the maximum number of necessary trial is $\frac{2^2}{2} + 1$. The total number of different sequences is 2^n, and we cannot be sure that $f(x)$ is "balanced" until we try half of the input arguments plus one extra trial. In case that $f(x)$ has been set "constant", the necessary number of trial of U_f is always $\frac{2^2}{2} + 1$. As is the case of "balanced", we cannot be sure that $f(x)$ is "constant" until we try half of the input arguments plus one extra trail.

Remind that even if the *ket* representation like $|x, y\rangle$ is used, this does not necessarily mean that the problem is being treated in quantum mechanically. In fact, we have just treated it completely classically.

b. The Deutsch-Jozsa algorithm The author will see how to handle the problem by exploiting the concepts in quantum mechanics. First, the quantum mechanical solution to it is represented in a form of diagram in FIG. 16, following which the solution is explained below.

For a n-qubit state $|a\rangle$;

$$|a\rangle \equiv |a_0\rangle \otimes |a_1\rangle \otimes |a_2\rangle \otimes |a_1\rangle \otimes \cdots \otimes |a_{n-1}\rangle, \tag{105}$$

we apply the n-qubit Hadamard gate $\tilde{H}^{\otimes n}$, i.e.,

$$\tilde{H}^{\otimes n} = \tilde{H}_0|a_0\rangle \otimes \tilde{H}_1|a_1\rangle \otimes \tilde{H}_2|a_2\rangle \otimes \cdots \otimes \tilde{H}_{n-1}|a_{n-1}\rangle, \tag{106}$$

where

$$\tilde{H}_s|a_s\rangle = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_s + |1\rangle_s\right) \ (\text{for } a_s = 0) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_s - |1\rangle_s\right) \ (\text{for } a_s = 1) \end{cases}. \tag{107}$$

A target is to deform RHS of Eq.(106) for a n-qubit state. In preparation for it, let us examine a case of a state comprising a smaller number of qubits, 4, for example, and $|a\rangle \equiv |1\rangle_0 \otimes |0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \otimes |1\rangle_3$. For this $|a\rangle$, $\tilde{H}^{\otimes 4}|a\rangle$ leads to,

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_0 - |1\rangle_0\right) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|1\rangle_1 + |1\rangle_1\right) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_2 - |1\rangle_2\right) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_3 - |1\rangle_3\right) \tag{108}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^4}}(|0\rangle_0|0\rangle_1|0\rangle_2|0\rangle_3 - |0\rangle_0|0\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 + |0\rangle_0|0\rangle_1|1\rangle_2|1\rangle_3 \cdots - |1\rangle_0|1\rangle_1|1\rangle_2|1\rangle_3), \tag{109}$$

where $|x\rangle_0 \otimes |x\rangle_1 \otimes |x\rangle_2 \otimes |x\rangle_3 \equiv |x\rangle_0|x\rangle_1|x\rangle_2|x\rangle_3 \equiv |x_0x_1x_2x_3\rangle$. Here, the sign of each term is determined as follows: $|x\rangle_0 = |0\rangle_0$ comes from either $|a_0\rangle = |0\rangle_0$ or $|1\rangle_0$. Recalling Eq.(107), whichever between $|0\rangle_0$ and $|1\rangle_0$ produces $|x\rangle_0$, $|x\rangle_0$ does not come with (-1). On the other hand, despite $|x\rangle_0 = |1\rangle_0$ comes from either $|a_0\rangle = |0\rangle_0$ or $|1\rangle_0$, $|x\rangle_0 = |1\rangle_0$ does actually come with (-1) when being produced from $|a_0\rangle = |1\rangle_1$. That is, $|x_k\rangle$ comes with (-1) if and only if $(a_k = 1)\&(x_k = 1)$. Therefore, for a term $|x_0x_1x_2x_3\rangle$, (-1) is put on top of it if and only if $\sum_{k=0}^{3} x_k a_k$ is odd. Using the observation above, the n-qubit Hadamard operation on $|a\rangle$ leads to

$$\tilde{H}^{\otimes n}|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x' \in \{0,1\}^n} (-1)^{\sum_{i=0}^{n} x_i a_i} |x'\rangle \tag{110}$$

In our case, following the FIG. 16, we take the input $|x\rangle$ such that

$$|a\rangle \equiv |000\cdots0\rangle \tag{111}$$

, to have

$$\tilde{H}^{\otimes n}|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x' \in \{0,1\}^n} |x'\rangle. \tag{112}$$

Also, take $|y\rangle$ as

$$|y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle - |1\rangle\right). \tag{113}$$

Thus, we have $U_f|x,y\rangle$ as

$$U_f|x,y\rangle = |x, y\oplus f(x)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}}|\sum_{x'\in\{0,1\}^n}|x'\rangle, \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)\oplus f(x')\rangle \tag{114}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(|x'\rangle\,(|0\oplus f(x')\rangle - |1\oplus f(x')\rangle)) \tag{115}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}\left((-1)^{f(x')}|x'\rangle\,(|0\rangle - |1\rangle)\right). \tag{116}$$

Here, the following relation was used:

$$|0\oplus f(x')\rangle - |1\oplus f(x')\rangle = \begin{cases} (|0\rangle - |1\rangle \ \ (\text{for } f(x')=0) \\ (|1\rangle - |0\rangle \ \ (\text{for } f(x')=1) \end{cases}. \tag{117}$$

Eq.116 surprises us that the information of $f(x)$, which is originally expected to affect y, appears as $(-1)^{f(x')}$. Thus, with Eq.116, we drop the $(n+1)th$ term and take the first n terms only, to obtain

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')}|x'\rangle. \tag{118}$$

We remind that this state in Eq.118 is the one that comes out from the black box U_f.

Then, let us apply $\tilde{H}^{\otimes n}$ again on the state in Eq.118 and we will obtain

$$\tilde{H}^{\otimes n}\left(\frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')}|x'\rangle\right) = \frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')}\tilde{H}^{\otimes n}|x'\rangle \tag{119}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}\left((-1)^{f(x')}\left(\frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{Z\in\{0,1\}^n}(-1)^{\sum_{i=0}^n x'_i Z_i}|Z\rangle\right)\right) \tag{120}$$

$$= \frac{1}{2^n}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}\sum_{Z\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')+\sum_{i=0}^n x'_i Z_i}|Z\rangle \tag{121}$$

$$= \frac{1}{2^n}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}\sum_{Z\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')\oplus Z\cdot x'}|Z\rangle. \tag{122}$$

The last form Eq.122 implies that the probability amplitude for some $|Z\rangle$ is

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')\oplus Z\cdot x'}. \tag{123}$$

Now, let us calculate the probability amplitude for $|Z\rangle = |000\cdots 0\rangle$. The square of the absolute value of the amplitude correspond to the probability of $|000\cdots 0\rangle$ being measured when we measure the output state. The probability amplitude is found out to be

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')\oplus Z\cdot x'} = \frac{1}{\sqrt{2^n}}\sum_{x'\in\{0,1\}^n}(-1)^{f(x')}. \tag{124}$$

This form means that the probability amplitude for $|Z\rangle = |000\cdots0\rangle$ is simply classified depending on the characteristics of $f(x)$ into,

$$\begin{cases} 1 & (\text{if } f(x) = 0) \\ -1 & (\text{if } f(x) = 1)\,. \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{125}$$

That is, if $f(x)$ is "constant", all time we measure the output, $|000\cdots0\rangle$ is measured, while if $f(x)$ is "balanced", we will never measure $|000\cdots0\rangle$. In brief, with DJA, we can solve the problem instantly by following the procedures in the diagram in FIG. 16, where we set an input state $|x\rangle$ as $|000\cdots0\rangle$, set another input state $|y\rangle$ as $|y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$, and measure the first n-qubit of the output state.

3. Examination of the availability of DJA on our potential computer

We examine the availability of DJA on our potential computer under construction. As seen above, the point is whether it implements the n-qubit Hadamard gate $\tilde{H}^{\otimes n}$ or not. As discussed in II A 4 above, the Hadamard gate $\tilde{H}$ is available on our potential computer under the circumstances where we can prepare $R_x(\phi), R_y(\phi)$, and $R_z(\phi)$ with $\phi = \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{\pi}{4}$, and π. Thus, our potential computer can implement the Deutsch-Jozsa algorithm that can be implemented on a universal quantum computer only. This implies that ours is ready to exhibit the quantum advantage that quantum computer has, in that DJA enables it to solve some certain problem in much less steps than classical computing. What should also be pointed out is the preparation of the multiple qubit version of $\tilde{H}$ is critical for the implementation of DJA.

III. SUMMARY AND FUTURE ISSUES

We can confirm that our gate set is equivalent to the ultimate universal set of gates in quantum computing in that each members of the ultimate set proves to be constructed using appropriate multiplications of the members of ours. The availability of the ultimate set makes it possible to construct an arbitrary unitary matrix, the key to implement a universal quantum computer; thus, our potential computer proves to be universal. The Hadamard gate $\tilde{H}$, the vital gate in quantum information processing, can be constructed using our

three single-qubit rotation operators $R_x(\phi), R_y(\phi)$, and $R_z(\phi)$ with the rotation angles of $\phi = \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{\pi}{4}$, and π. We can also confirm that our potential computer can implement the Deutsch-Jozsa algorithm using our computer's universality. DJA makes it possible to solve a certain problem in much less steps than classical computing; thus, our potential computer is confirmed to possess quantum advantage.

We must tackle plenty of outstanding issues in the frame work of mathematical physics, following the basic work in this article. From an aspect of a QIP algorithm, important and urgent issues include a discovery of a new problem that is soluble on a quantum computer, the development of an efficient QIP code for either a well-known problem or a new problem, and the development of an error correction code [16–18], with keeping the compatibility with the physical characteristics of the computer. From an aspect of materials physics, helping to design QIP physical implementation from a quantum dynamical approach is among the issues required. It might be a good idea to start it from analysing some specific structures that are aimed to work as single-qubit gates, i.e.,$R_x(\phi), R_y(\phi)$, and $R_z(\phi)$, and the two-qubit gate, i.e., the CPHASE gate, by numerically calculating the time evolution of the quantum states (See [19] for calculating a time evolution of quantum wave packet). How the states deform as times goes by will provide information about various limiting performances, including the maximum time limit for the structures to function appropriately as quantum gates. Apart from above, we might have to examine the predictions that distinct two-level quantum state can no longer be available in some extreme conditions[20–23].

Appendix A: Derivation of Eq.(77)

Pauli matrices $\vec{\sigma} \equiv (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ satisfy the following identity equation for an odd number m for an arbitrary unit vector $\hat{p}$ [6],

$$(\vec{\sigma} \cdot \hat{p})^m \equiv 1. \tag{A1}$$

Appendix B: Derivation of Eq.(78)

We derive $\sin^2 x \leq x$ using a concrete example. We compare two areas inside a circle of radius 1 with common angle x $(0 < x < \frac{\pi}{2})$ (FIG. 17). One is a sector S_1 of radius 1: $S_1 = \pi \cdot 1^2 \times \frac{x}{2\pi} = \frac{x}{2}$. The other is a triangle S_2 that has base 1 and height $\sin x$:

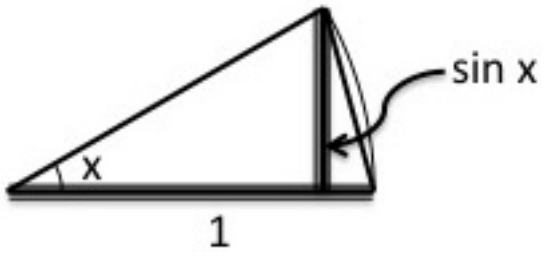


FIG. 17. A sector of a circle of radius 1 and angle x.

$S_2 = 1 \cdot \sin(x) \times \frac{1}{2} = \frac{\sin x}{2}$. By construction, $S_2 \leq S_1$, i.e.,

$$\frac{\sin x}{2} \leq \frac{x}{2}, \tag{B1}$$

thus

$$\sin x \leq x. \tag{B2}$$

Combining Eq.(B2) with

$$\sin x \leq 1, \tag{B3}$$

we have

$$2\sin^2 x \leq 2x. \tag{B4}$$

On the other hand, with $\varepsilon/2 \equiv 2x$,

$$1 - \cos\frac{\varepsilon}{2} = 1 - \cos 2x = 2\sin^2 x. \tag{B5}$$

Using Eq.(B4) and Eq.(B5), we reach

$$2\left(1 - \cos\frac{\varepsilon}{2}\right) \leq \varepsilon. \tag{B6}$$

Appendix C: Derivation of Eq.(82)

Using the commutation and anti-commutation relations among Pauli matrices $\sigma_x(\equiv X), \sigma_y(\equiv Y), \sigma_z(\equiv Z)$:

$$[X, Y] = 2iZ, \tag{C1}$$

$$\{X, Y\} = 0, \tag{C2}$$

we have

$$(X+Z)Y(X+Z) = XYX + ZYX + XYZ + ZYZ \tag{C3}$$

$$= (iZ)X + Z(-iZ) + (iZ)Z + Z(iX) \tag{C4}$$

$$= -ZX - iZ^2 + iZ^2 + iZX \tag{C5}$$

$$= 2iZX = 2i(iY) = -2Y. \tag{C6}$$

References

[1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2000).

[2] D. Deutsch and R. Jozsa, Proceedings of the Royal Society of London A **439**, 553 (1992).

[3] @tehishik, "Introduction to Quantum Computing through learning Quantum Katas $|4\rangle$: Deutsch-Jozsa Algorithm," https://qiita.com/tehishik/items/1e68c6e2ee0605b3cd16.

[4] A. Papageorgiou and J. F. Traub, Physical Review A **88**, 022316 (2013).

[5] J. Preskill, "Quantum computing and the entanglement frontier," (2012), arXiv:1203.5813 [quant-ph].

[6] J. J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics (Revised Edition)* (Addison-Wesley, MA, USA, 1994).

[7] K. Riley, M. Hobson, and S. Bence, *Mathematical Methods for Physics and Engineering (Third Edition)* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2006).

[8] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1958).

[9] G. B. Arfken and H. J. Weber, *Mathematical Methods for Physicists (Fifth Edition)* (Academic Press, CA, USA, 2001).

[10] @ground0state, "Comments on the universality of a universal quantum computer," https://qiita.com/ground0state/items/aaf924cce37f71fad149.

[11] P. G. L. Dirichlet, "Vorlesungen über zahlentheorie," (1834), (Lectures on Number Theory, prepared for publication by Dedekind, first edition 1863).

[12] I. N. Herstein, *Topics In Algebra* (Blaisdell Publishing Company, MA, USA, 1964).

[13] P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, Review of Modern Physics **79**, 135 (2007).

[14] D. J. Brod and J. Combesn, Physical Review Letters **117**, 080502 (2016).

[15] Microsoft Corporation, "QuantumKatas," https://github.com/Microsoft/QuantumKatas.

[16] C. D. Hill, E. Peretz, S. J. Hile, M. G. House, M. Fuechsle, S. Rogge, M. Y. Simmons, and L. C. L. Hollenberg, Science Advances **1**, e1500707 (2015).

[17] M. Veldhorst, H. G. J. Eenink, C. H. Yang, and A. S. Dzurak, Nature Communications **8**, 1 (2017).

[18] M. Veldhorst, C. H. Yang, J. C. C. Hwang, W. H. J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, S. Simmons, A. Lauxhit, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello, and A. S. Dzurak, Nature **526**, 410 (2015).

[19] T. Iitaka, Physical Review E **49**, 4648 (1994).

[20] B. Georgeot and D. L. Shepelyansky, Physical Review E **62**, 6366 (2000).

[21] B. Georgeot and D. L. Shepelyansky, Physical Review Letters **86**, 2890 (2001).

[22] B. Georgeot and D. L. Shepelyansky, Physical Review E **62**, 3504 (2000).

[23] B. Georgeot and D. L. Shepelyansky, "Quantum Computing of Classical Chaos: Smile of the Arnold-Schrödinger Cat," (2001), arXiv:quant-ph/0101004v1.

About the author

[1] Mr. Kiyotaka HAMMURA

Mr. Kiyotaka HAMMURA, DSc is a researcher at Meiji University in Tokyo, Japan and a researcher at Fukushima University, Japan. He teaches Physics and Mathematics. His research interests include studying novel computational algorithms by combining Machine Learning with Quantum Computing. Email: hammurak@gmail.com

[2] Mr. Katsuhiko YAMAGUCHI

Mr. Katsuhiko YAMAGUCHI, PhD is a professor at Fukushima University, Japan. He teaches Quantum Physics. His research interests include solid-state magnetism.

Email: yama@sss.fukushima-u.ac.jp

[3] Mr. Kazuo SAKAI

Mr. Kazuo SAKAI, DSc is a professor at Meiji University in Tokyo, Japan. He teaches Science. His research interests include innovation and educational effects. Email: sakai@meiji.ac.jp

次世代研究 No.2

2020年5月1日

発行人 阪井和男

発行日 2020年5月1日

発行所 明治大学サービス創新研究所

〒168-8555

東京都杉並区永福1-9-1 明治大学和泉キャンパス棟

法学部阪井和男研究室内

secretariat@ service-innovating.jp

http://www.service-innovating.jp/