



Title	3Dプリンタによるタンジブルな歯車型基数変換ツールの試作とそれを用いた授業案の検討
Author(s)	布施, 泉
Citation	高等教育ジャーナル : 高等教育と生涯学習, 27, 57-63
Issue Date	2020-06-23
DOI	https://doi.org/10.14943/J.HighEdu.27.57
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78829
Type	departmental bulletin paper
File Information	HighEdu.27.57.pdf



Development of a Tangible Gear-type Radix Conversion Tool Using a 3D Printer and Study of Lesson Plans Using It

Izumi Fuse*

Information Initiative Center, Hokkaido University

Institute for the Advancement of Higher Education, Hokkaido University

3D プリンタによるタンジブルな歯車型基数変換ツールの 試作とそれを用いた授業案の検討

布施 泉**

北海道大学情報基盤センター

北海道大学高等教育推進機構研究員

Abstract — In this paper, we report on creating an original gear-type radix converter for the purpose of understanding the fundamentals of radix conversion, in addition to understanding binary notation, which is the basic form of expression of computers. We also propose three ways to use the radix converter in a general information education class for freshman of universities. In addition to understanding radix conversions of the simplest positive integers, we propose its use for the purpose of gaining an understanding of the complement, and its use in comparison with the gear calculator in computer history. According to its trial use in FY2018 and questionnaire results of learners, learners generally have a good impression of the radix converter. In addition, it was found that the converter was useful to understand radix conversion.

(Accepted on 9 January, 2020)

1. はじめに

情報化の進展により、私たちは身近にコンピュータを有した世界で生活をしている。しかしその一方で、コンピュータの仕組みについて深く知る機会が多いとは言えない。例えば、コンピュータでは、0

と1の二進法を用いた表現がなされる。この最も基本的な二進法についての学習は、現行の学習指導要領では、高等学校における共通教科「情報」、*「数学A」*における「整数の性質」の一部で出てくる他は、「数学活用」における「数学と人間とのかかわり」で少々出てくる程度である。

*) Correspondence: Information Initiative Center, Hokkaido University, Sapporo 060-0811, Japan
E-mail: ifuse@iic.hokudai.ac.jp

***) 連絡先：060-0811 札幌市北区北11条西5丁目 北海道大学情報基盤センター

ここで特に、高等学校の「数学 A」における「整数の性質の活用」の単位では、学習指導要領解説にある以下の説明の通り、整数の表現を、 n 進法として一般化して学ぶことが想定されている（文部科学省 2009）。

「ここでは、整数の性質を利用して、二進法などの仕組みや、分数が有限小数又は循環小数で表される仕組みを理解し、整数の性質を事象の考察に活用できるようにする。十進法の表記法を見直し、 n 進法の仕組みを考えさせる。」

しかし、「数学 A」は高等学校数学において必修科目ではない。さらに、「数学 A」の標準単位数は 2 単位であり、「(1) 場合の数と確率」、「(2) 整数の性質」及び「(3) 図形の性質」で構成される三つの内容を生徒の実態等に応じて適宜選択して履習させることになっている。よって、たとえ「数学 A」を履修したとしても「整数の性質」を学んだとは限らない状況である。

一方、共通教科「情報」では、データ量の単位としてのビット表現やデジタル表現において、二進法は扱われているはずではあるものの、学習指導要領上は、それを一般化した n 進法までを扱っているとは必ずしも限らない状況と思われる（文部科学省 2010）。

数の性質を、基数（進数）変換を含めて理解することは、コンピュータ内部での数の表現を深く理解することにつながると考える。上記の通り、高等学校までの学校教育において、学習者は十分に基数変換を学ぶ機会を有していない可能性が想定されるため、本稿では大学一般教育の枠組みで、基数変換を、原理的かつタンジブルに理解できる道具を、歯車を用いて制作することを試みた。本稿では、試作した歯車型の基数変換器を具体的に紹介するとともに、この道具をどのように授業として用いるかの検討を進め、学習者の反応についても報告することとする。

2. 歯車式の基数変換器の試作

歯車を用いた機械式の計算機は、17 世紀にシカルト、パスカル、ライプニッツらにより制作されていることが知られている。本稿では、歯車の機構を用

い、数をカウントする二進、十進、十六進変換器を独自設計にて創作することとした。

2.1. 原理

本機器の原理は、歯車を回すことで数をカウントするものである。桁上りの機構として、 n 個の歯を有する歯車と、1 歯の歯車を重ねることで、表現することとした。10 歯（10 進法）における桁上りの機構の模式図を図 1 に示す。

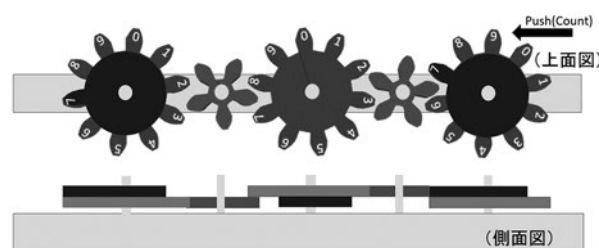


図 1. 歯車による桁上りの機構の模式図

数の増減は、歯車の回転によって表す。各桁を表す各 n 歯の回転の方向をそろえるために、 n 歯の歯車の間に歯車を 1 つ配置した。間の歯車は、図では 5 歯としているが、一般には任意であり、歯が噛み合うように各歯車の直径を調整する。桁上りに対応する 1 歯の歯車は、 n 歯の歯車と上下にぴったり合わせ、同時に回転するように設計する。それにより、一回転で、1 歯の歯車と連結している隣の歯車を 1 歯分だけ回すことができ、桁上りが表現できる。具体的には、間におく歯車の高さを上下交互に設置し、桁上りの歯車をそれと噛み合うように交互に配置する（図 1 下の側面図を参照）。最終的には、図 2 のように、横一連の歯車に対し、のぞき窓付きの箱をかぶせることで、数を表現する。

図 2 は、10 進歯車を用いた 10 進法による数の表現例を示したが、これに基数変換の機能を加えて表現するために、10 進歯車の機構セットを中心に、上下に回転伝搬用の任意の歯車を置き、一般の n 進の機構を持つ歯車セットを上下に装着可能とする「（一般化された） n 進歯車式変換器」を着想した。

これらの機構を有する変換器を、3D プリンタを用いて 2 進・16 進変換器として、具体的に開発することとした。

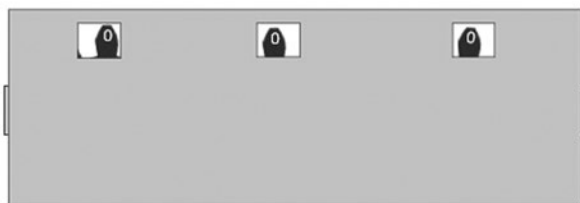


図 2. 歯車にのぞき窓をかぶせ、数を表示する。図は 0 (000) を示す。図では最大 999 まで表現可能。

2.2. 3D プリンタによる基数変換器の制作

本稿の基数変換器の制作にあたっては、家庭用として市販されている一般の 3D プリンタ（本稿の変換器では、QIDI TECH 社の X-ONE, X-Pro, FlashForge 社の Finder）を適宜用いた。歯車単体の制作に際しては、サイト <http://www.knowhave.com/gear/> を利用した。

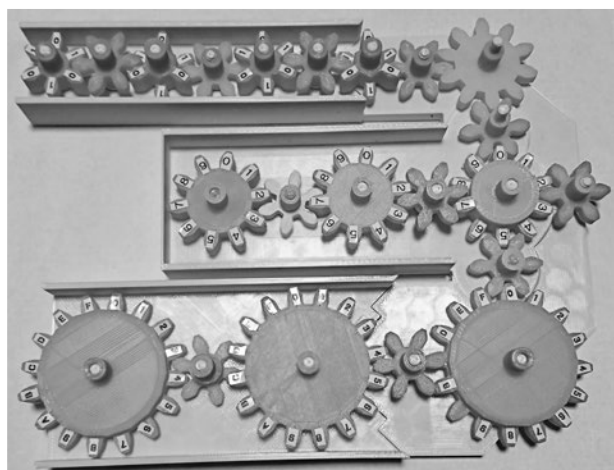


図 3. 3D プリンタを用いた歯車型基数変換器

前節の機構の原理を元に、実際に制作した 2 進・10 進・16 進変換器（のぞき窓無し）を図 3 に示す。各歯には、対応する数を張り付けている。

中央の 10 進を表現する 10 歯の歯車の右端にある 6 歯の歯車を時計回りに回すことで、一つずつ数が増えていく。その回転は、数が張り付けられている右の 10 歯（1 の位を表す）の歯車の上下に設置した 6 歯の歯車を通じて上下の 2 進、16 進機構に連結する歯車を同じ数だけ回転させる。図 4 に上下の 2 進・16 進の歯車部分にのぞき窓付きの蓋を被せた状態を示す。なお、2 進法の表現に際しては、2 歯のみとすると 180 度で 1 歯しか置けないため、桁を通じ

たスムーズな回転ができない。そのため、6 歯で 2 進を表現することとした。各 6 歯の歯車内では、順次、0 と 1 が交互に出現し、0 になるときに繰り上がりを行うように設計を行った。



図 4. 10 進歯車と 2 進・16 進歯車との連結部分の機構

本機器は、家庭用の 3D プリンタによる制作をしたことで作品の大きさにある程度の制限がある。そのため、台座を組み合わせて構成することとした。図 5 に、基本となる 10 進の歯車セットを示す。本稿では、これに 2 進・16 進の歯車を組み合わせているが、設計思想としては、前章でも述べたように他の任意の基数を有する歯車セットを、上下に連結し、組み合わせることができるとを想定している。

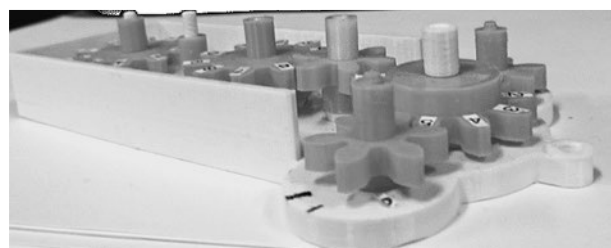


図 5. 基本の 10 の歯車セット（10 進 3 桁）

さらに台座で歯車を固定する部分が壊れた場合にその部分のみの交換ができるようにする対応や、歯車の動きがゆるくならないように固定する工夫（ネジ型の支柱と雌ネジによる固定）を行っている。2 進部分の台座とネジ型支柱と雌ネジの例を図 6 に示す。実際の 2 進に対応する歯車を台座に装着した状態を図 7 に示す。特に、側面図では、隣の桁の歯車の回転による桁上がりや、上下につながる歯車を通して行われることが確認できる。ネジ型支柱に歯車

を挿入後、雌ネジの調整により、各歯車が1歯毎に動くように調整している。

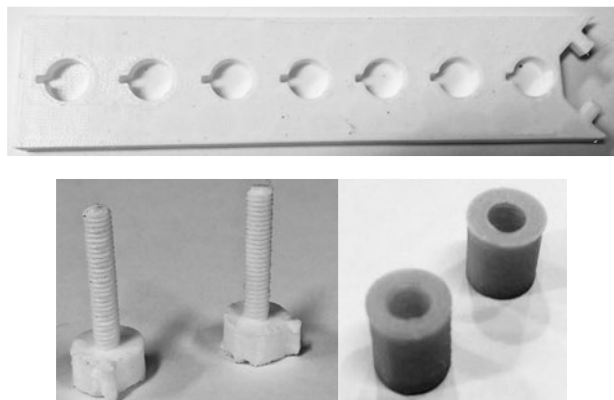


図6. 2進の歯車部分の台座(上)と台座に挿入するネジ型支柱と固定のための雌ネジ(下)

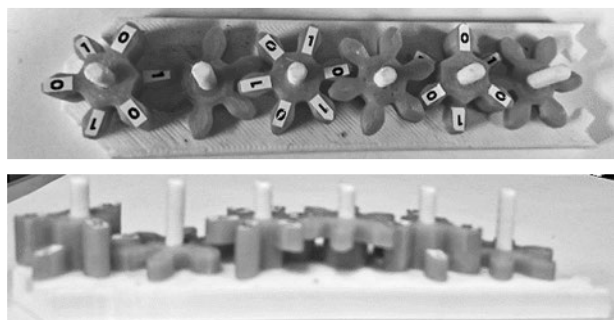


図7. 2進用台座にネジ型支柱と歯車を装着した状態(上:上から見た図, 下:側面から見た図)

最終的に、2進・10進・16進の歯車セットにのぞき窓を付した全体像を上から示したものを図8に示す。

ここまで示したように、本機器の開発に際しては、様々な工夫を行っているものの、現状で解決できていない欠点はまだいくつか残っている。第一に、同じ設計でプリントしても個体差が発生し、スムーズに動かない機器が発生すること。第二に、回しているうちに一部の歯車に負荷がかかり、浮いてしまったり、動かなくなったり、歯車が取れてしまう場合があること。第三に、本機器における歯のかみ合わせの都合で、16進表現の「のぞき窓」は、本来は垂直部分から少しだけ時計回りに回転した箇所に設定すべきところが微妙にずれているため、少々正確性に欠ける表現になる場合があることなどである。とはいえ、現状でこれ以上の精密な改善は難しいことから、まずはこの状態で実際の学習者に本機器を試

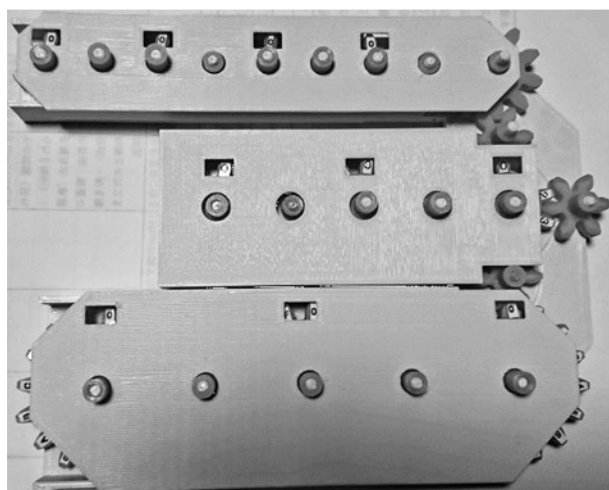


図8. 各基数部分にのぞき窓を付した変換器の全体像

作品として確認してもらうこととした。

3. 授業における基数変換器の利用案

本章では、前章で作成した歯車式基数変換器の授業での有効な利用案をいくつか検討する。

3.1. n進法の基本的な理解を目的にするもの

本機器の最もシンプルな利用案は、実際に数を増やす操作により、基数変換を体験的に理解するものである。

最初は、2進・10進・16進がすべて0に揃っている状態から、数を順次増やしていくことを試させる。途中で回転を逆にすることも含め、基本的に正の整数の表現と基数変換について学ぶことに焦点を当てる。

単に歯車を回していくだけであるが、以下の理解が可能であると考えられる。

- 2進法では、0と1だけで数が表現され、数が増えると桁がどんどん上がっていくことが体験的に理解できる。図9の上図では、10進法の2が2進法では「0010」となることがわかる。
- 一方で、16進法の歯車の回転はゆっくりであることが理解できる。10進法での15は、2進4桁で「1111」となるが、16進は一つの歯車のみ(F)で表現される(図9の下図)。つまり、2進の4桁が16進の1桁に対応することがわかる。

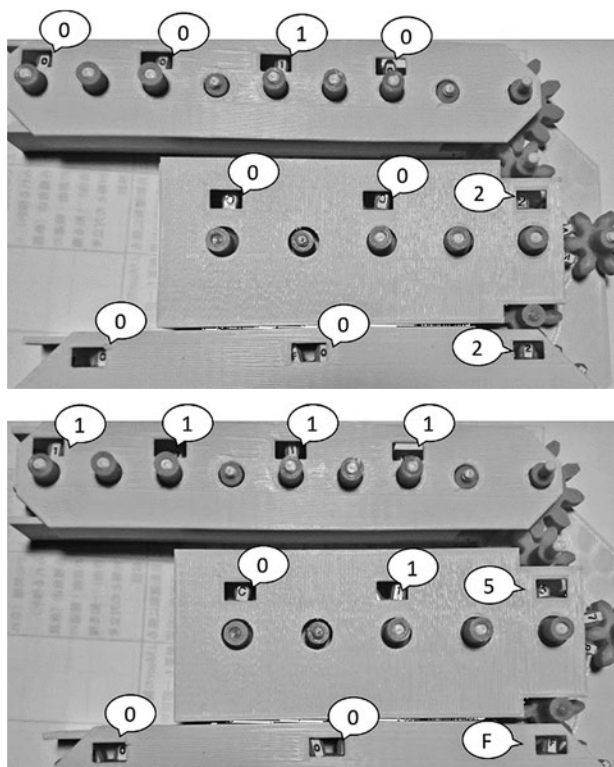


図9. 10進での2の表現(上)と15の表現(下)

- 10進法16では、2進法は4桁での表現では「0000」に戻る。つまり有限の世界での数の表現(桁あふれ)を理解する。

3.2. n進法における補数の理解を目指すもの

前節は、歯車を正回転させることで数を増やし、各基数表現における数の表現を確認させるものであった。本節では歯車を初期位置から逆向きに回転させることを考える。この場合、学習者は、有限桁におけるマイナスの表現についての理解を得ることができる。つまり補数表現についての理解である。

図10では、各基数表現が0で揃っている状態から、右の歯車を1つ逆回転した際のものである。この場合、2進法4桁における表現は「1111」となり、10進法3桁における表現は「999」となり、16進法3桁の表現は「FFF」となる。これはすなわち各基数における-1の表現に対応する補数表現である。ここで、3桁、4桁という具体的な桁数は、本機器の制作上の制約から発生するが、この具体的な表現から、学習者は表現可能な桁が増えた場合に、負の数を、最上位桁を踏まえどのように表現すべきかを原理的に理解できるものと考えている。有限桁において、

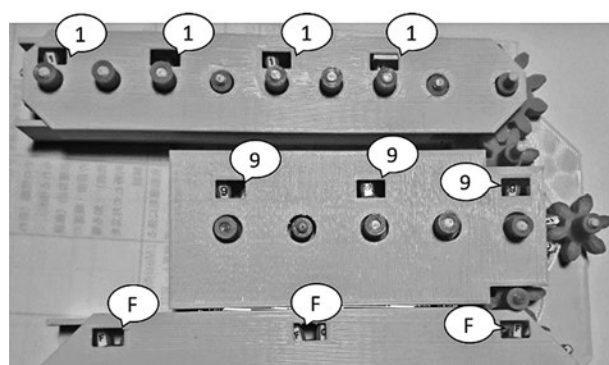


図10. 0から歯車を1つ逆回転する(「-1」の表現)

負数を補数で表現する長所、すなわち減算を加算で表現できることについての理解が深まるものと考えられる。

3.3. コンピュータの歴史における歯車の利用の理解

2章の始めで述べた通り、歯車を用いた計算器は17世紀から作られている。特に、パスカルの計算器(パスカリーヌ)は、10進法を用いており、多桁の繰り上がりに難点があったことが知られている。

本稿における基数変換器は、計算機ではなく、単なる基数変換のための道具であるものの、歯車を多数組みあわせる機構を用いていることから、パスカリーヌと同様の問題は生じ得る。コンピュータの歴史では、その後、バベッジによる階差機関・解析機関の研究が進められるとともに、並行して歯車式の計算器も進化してゆき、タイガー式計算器等が開発されてゆく。コンピュータの進展において、当時を生きる人たちが何を求め、どのような困難にぶつかり、最終的にどのように解決してゆくのか(解決できなかったか)を学ぶ際に、さまざまな興味深い話がある。

歯車式基数変換器の3つ目の授業での利用案としては、このようなコンピュータの歴史を学ぶ際に、本変換器を動かしてみる活動を組み込むことの検討である。手作りでは、場合によっては歯車が取れてしまう素朴な歯車式の機構を実際に動かしてみること、コンピュータの歴史としての機械式コンピュータに対する理解を、単なる話として学ぶだけではなく、実体験を通じて学習者の興味を引き出すことに役立つのではないかと考える。このようなコンピュータの歴史を学びながら、実際には3.1節、3.2

節にあるような n 進法についての理解をさらに深める学習構成について構想している。

4. 学習者の反応と改善策の検討

前章の検討を踏まえ、北海道大学の一般情報教育科目で著者が担当している「情報学Ⅱ」(一年生後期の選択科目: 2単位)の2018年度の最後の授業において、学習者に本機器を利用させた。文系1クラス(27名)、理系と文系の混合クラスが1クラス(51名)の2クラスで行った。

本稿の歯車式変換器を多数作成するのは時間を要するため、この時点で機器の台数は履修者の人数分はない状況であった。そのため、文系クラスで4名程度、理系・文系の混合クラスでは5-7名程度で1台を順次回して利用させた。利用時には、のぞき窓からの数の確認に加え、装着した蓋を自由に外す等、歯車機構の観察もさせた。

利用後、授業時間内に、「進数変換グッズについて、使い勝手、理解の向上度合いなどを自由に記入してください」という設問に自由記述で回答してもらった。なお、この回答は成績評価に関係しないことを言及した。

一部で機器がうまく動作していなかったようであるが、文系・理系を問わず、概ね好評であった。以下に主な意見を抜粋して表記する。

- 歯車で桁の繰上りが再現できるのは実際見ると面白かったし理解もしやすい。
- 2進数, 10進数, 16進数の数値の変移を一度に確認できるのは有用だと思った。それぞれの進数において対応する値を簡単に確認できるのが便利だった。理解が深まったと感じた。
- 実際に手を動かして進数変換を体験することで、16世紀ごろの計算機がこういうものだったのかと感心した。とともに、今のコンピュータ技術はとてもすごい発明なのだと感じた。また、このグッズが3Dプリンタで作られていると聞いて驚いた。とても便利な世の中になったと感じた。
- 硬かった。危うく壊しそうであった。だが!これはとても楽しい!後輩にもお勧めしたい。3Dプリンタはすごいな。。。

- 歯車なので、数字の出る位置が少しずれてしまうところが不便ではある。16進数の、A~Fであらわす部分は感覚で分かりにかかったので、グッズのような2進数や10進数で対応しているのは分かりやすかった。
- リセットできないことが使いづらいなと思った。
- 歯車というものは回転率やその速さも自由に変わられてすごいと思った。中学校などで中身を見せれば進数の理解にも役立つのではないかと思った。
- かみ合わせが悪くてきれいに回らなかった。理解しやすくはあるがもう少し滑らかに動いてほしい。

最終回の授業での実践時で利用したため、学習者は、その前での授業時に二進法やコンピュータの歴史を学んでいる。本実践は、3章で検討した授業での利用案として、3.1に類するが、学習者は二進法の基本的な事項を学んでいる点では想定とは異なる。

実際に試用してみたところ、個々の機器により動きが異なることに加え、学習者が使っていくうちに壊れる場合もあり、学習者の機器に対する印象は異なっている。しかし、楽しい、分かりやすいというコメントが全体として多く、学習者には総じて有用であると考えられた。また、ごく一部ではあるが、小学生や中学生のときに進数変換を行っており、その際に用いると有用であったと思うという意見があった。

歯車式変換器そのものに対しては、「リセット機能が欲しい」という要望に加え、「3Dプリンタで自身でも作ってみたい」という興味関心、歯車の機能の有用性についてなど、多岐にわたるコメントを受け取った。

5. まとめ

本稿では、大学の一般教育としての情報教育において、コンピュータの基本的な表現である二進法の理解に加え、基数変換の原理的な理解を目的に、独自の歯車型の基数変換器を創作した。実際の機器の

実現に際しては、家庭用として市販されている 3D プリンタを活用した。また、当該機器の現実の授業での利用法について検討を進め、2018 年度に大学生 80 名弱程度に対して利用させ、当該基数変換器に対する感想等を得た。

本稿で示した歯車式基数変換器は、設計思想としては任意の基数間での歯車セットを用意し、それらを取り換えることで任意の基数変換ができることを意識している。本稿では 2 進・10 進・16 進変換器として具体的に実装した。2 進・10 進・16 進の変換器とした場合、学習者に不慣れな 16 進の表記の理解を 2 進の理解と合わせて確認させることが可能である。但し、本稿での基数変換器を具体的に組み立てるに際しては、用いる歯車の数が多く、同じ 3D プリンタや歯車を使ったとしても機器には個体差が生じることがわかった。さまざまな工夫と調整の結果、基本的な動きをある程度達成できる変換器のレベルには達したと考えている。

基数変換器の利用法としては、単純な整数の表現の理解に加え、有限桁での数の表現についての理解が深まる可能性が考えられる。補数表現を含め、有効な授業での利用法について検討を進めた。特に、17 世紀に開発された歯車式の計算器と対比させ、コンピュータの歴史を学ぶ際に、本稿での歯車式基数変換器を利用する可能性について検討した。

2018 年度の大学の一般情報教育の授業にて、複数の学習者で共用することで、当該基数変換器を利用させ感想を求めたところ、概ね好評であった。学習者は 3D プリンタの可能性を含め、「数を数える」という身近で簡単な内容に関し、歯車を利用する着想は分かりやすいと感じたようである。二進数を含め

た学習には、学習者に依存しており、小学校や中学校で一部学んでいる学生もいるようであるが、いずれにせよ、このような実機で基数変換を確認できることは有用であると考ええる。

今後は、前述したコンピュータの歴史を学ぶ項目における歯車型の基数変換器の利用について検討を重ね、具体的な授業案の検討を進めていきたいと考える。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K12779 の助成を受けた。また、本歯車機器の制作（設計・調整・組み立て等）に際しては、技術補佐員の伊藤恵理さんの全面的な協力と寄与が非常に大きかった。ここに強い感謝の意を表する。

参考文献

- 文部科学省 (2009), 「高等学校学習指導要領解説 数学編」, https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2012/06/06/1282000_5.pdf (2019 年 12 月 30 日閲覧)
- 文部科学省 (2010), 「高等学校学習指導要領解説 情報編」, https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2012/01/26/1282000_11.pdf (2019 年 12 月 30 日閲覧)