

DIGI-COMPIIを用いた 小学校低学年向け計算機科学教育の試み

渡邊 亮平¹ 松澤 芳昭^{1,a)}

概要：本研究の目的は小学校低学年の児童が、「DIGI-COMPII」を使うことで、コンピュータにおける情報表現や計算の仕組みを楽しみながら理解することはできるのかを明らかにすることである。「DIGI-COMPII」は、ビー玉を用いた物理的な動作で、コンピュータにおける四則演算を実行することができる木製のコンピュータ教育教材キットである。カリキュラムを開発し、小1から小4までの8名に「DIGI-COMPII」を使った加算や乗算の教育実践を行い、参与観察を行った。その結果、全員が約20分で、木製フリップフロップを用いた2進数表現を使いこなし、10進数で表現された計算問題を解くことができた。加えて、情報量(ビット)の概念に気づいたり、繰り返しの動作に興味を持ったりするなど、発展的な教育効果への示唆も得られた。

キーワード：DIGI-COMPII, 小学生, 計算機科学教育, 2進数表現, CS アンブラグド

1. はじめに

小学校の新学習指導要領にプログラミングが盛り込まれ、2020年よりプログラミング教育が必修化される [1]。これは、技術者だけでなく、一般国民に対しても情報を科学的に理解する教育を行わなければならない、という世界的な一般情報教育のコンセンサスに基づくものと考えられる。情報分野の理解は21世紀における基本教養であり、初等中等から学んでいく必要がある。

久野らは、初等中等における一般情報教育のカリキュラム体系を提案している [2]。情報を学ぶ上で必要となるものはコンピュータであり、わかりやすく楽しく学べるようなツールが多く提案されてきた [3,4]。しかし、コンピュータの操作には、マウスやキーボードの操作ができることが前提となっている。その前提の中で、主に小学生においては習熟度に大きな差があり、全員の学習レベルを考えた情報教育をすることは難しい。

コンピュータを使わずに、コンピュータを学ぶ方法として、コンピュータサイエンスアンブラグドがある [5]、カードやグループワークを通じてコンピュータを科学的に理解しようとする方法であり、小中高で多くの実践が行われている [6-8]。CS アンブラグドと scratch によるプログラミングを連携させる試みもある [9]。

コンピュータサイエンスアンブラグドの優れている点の一つは、教材に遊びが含まれていることである。児童は概念に直接触れて遊びながら、概念を学習することができる。「子供が遊びから多くを学んでいること」はモンテッソーリにより発見されており、子供の自然な力を活かす道具の開発が行われてきた [10]。モンテッソーリ教具は、子供が興味を持ち、集中して遊べ、その過程で発達段階を超えた深い学習ができるように設計されている。

本研究の目的は、コンピュータに関する知識のない児童が、教育教材として DIGI-COMPII を使うことで、コンピュータにおける情報表現や計算の仕組みを、楽しみながら理解することはできるのかを明らかにすることである。本研究では、カリキュラムと教材を開発し、小学生が DIGI-COMPII で遊びながら学ぶことで、コンピュータにおける情報表現や計算の仕組みを学ぶことのできる環境を構築することを試みる。

2. DIGI-COMPII

DIGI-COMPII(以下 DCII)とは、米国 Evil Mad Scientist 社^{*1}が開発・販売している木製の玩具である(図1)。木製フリップフロップによるデータの保持と書換が可能で、

¹ 青山学院大学 社会情報学部
School of Social Informatics, Aoyama Gakuin University
^{a)} matsuzawa@si.aoyama.ac.jp

^{*1} ホームページは、<https://shop.evilmadscientist.com/products/menu/375>。DIGI-COMPII は精密機械のため、米国外には郵送販売をしていない。本研究では国立情報学研究所名誉教授の三浦謙一先生に実機を航空搬送していただいたものを2台使用している。

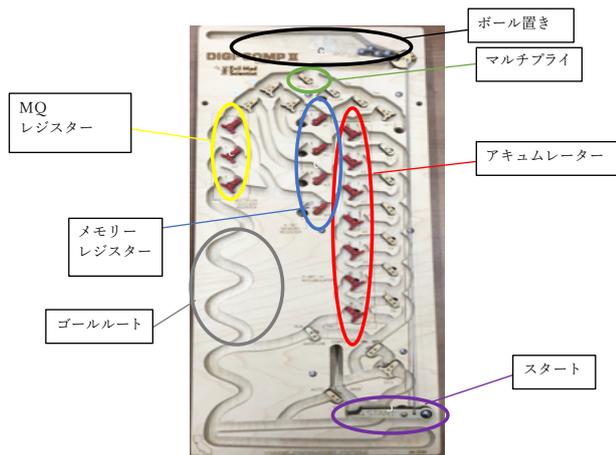


図 1 DIGI-COMP II と各部の名称

重力によるビー玉の落下によって加算，減算，乗算，除算を実行することができる，木製の計算機である．四則演算以外にも，木製のフリップフロップを操作することで，ビー玉の数を数えたり，リセットをしたりすることもできる．

DCIIを使った計算機科学教育の議論を進めるために，主要な機能の説明を行う．DCIIの中央右に，7bitのアキュムレータがある．1bitは木製の逆T字型フリップフロップで表現されており，指し示す方向が右の時1，左の時0を表現する．フリップフロップの上から玉が通過すると，その状態が反転する．DCIIの中央部に4bitのメモリレジスタがある．メモリレジスタの1bitはI型スイッチで表現されており，手で最初に設定された後は状態が変わらないROM(Read Only Memory)である．加算を行う場合は，アキュムレータとメモリレジスタそれぞれに数値を入力（手でスイッチを設定する）する．その結果は，アキュムレータに保持される．

計算は，ボール置きに設置された10～20個程度のビー玉を一つずつDCIIを通過させることで行う．スタートレバーを手動で引くことで，計算を始める．1つボールが通過すると，最後にボールがスタートレバーを押し下げられるように設計されており，次のボールがDCIIに落とされるようになっている．計算が終わるとビー玉はゴールルートを通過するようになっており，スタートレバーを押し下げずに落下することで，計算が終了する．

演算内容は，マルチプライとMQレジスタによって設定する．スイッチの組み合わせによって，加算，乗算，減算，除算を行うことができる．乗算に関しては，シフト演算ではなく，加算の繰り返しによって計算を行う．減算に関しては，アキュムレータのビット反転機能により補数を作成し，加算を行うことで実現する．

このように，DCIIでは，バイナリスイッチの組み合わせによる10進数の表現，およびその計算が直接学習者の目に見え，操作可能な環境を作り出すことをその特徴として

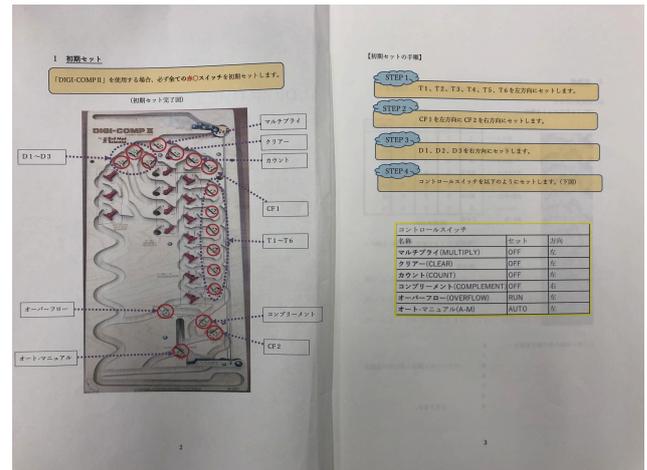


図 2 開発したマニュアル (1, 2 ページ目)

いる．この特徴から，我々は，子どもたちがDCIIを使って遊ぶことができれば，計算機の基本的なデータ表現，保持，および計算の仕組みの自然な理解を導くことができるのではないかと考えた．

3. カリキュラムの設計

3.1 教材

子どもたちがDCIIで遊びながら学ぶことのできるように，独自教材を開発した．DCII付属マニュアルの原本から理論の部分を割愛し，DCIIを使った計算方法のみを抽出した．図を多くすることで，視覚的に理解できる要素を多くした．英語の名称は無理に翻訳せず，あえて英単語のカタカナで表記し，名前から装置の特徴を推測させるのではなく，その装置を英語名でそのまま覚えてもらうように設計した（例：蓄積器ではなくアキュムレータ）．例として，マニュアルの1，2ページ目を図2に示す．1ページでは初期設定の方法が図解され，2ページではその解説がされている．

当初，本マニュアルは自習教材として開発されたので，基本的な計算方法が一通り学べるようになっている．しかし，小学生を対象とした実験では，この1，2ページ目しか使用されなかった．他に10進数，2進数変換表も作成したが，学習には使われず，情報量(ビット)の大きさを視覚的に確認する程度にとどまった．

3.2 カリキュラム

我々は当初，DCIIを小学生が扱うには難易度が高く，小学生が主導でDCIIを使いこなす，遊ぶためには多くのヒントが必要であろうと考えていた．なぜなら，DCIIは対象年齢が子供向けに設定されておらず，大学生に対して行った予備実験において，操作の理解に苦しんだためである．子どもたちが操作の理解ができない場合は，飽きてしまうことが危惧されたので，指導者が丁寧に指導し，学習者に楽しんでもらえるよう，カリキュラムとマニュアルの整備

表 1 カリキュラム

項目	計算問題	ポイント	学習内容
デモ	2 + 3	-組み合わせを使って考える (3 を表現) -2 を入れた後に 3 を入れてもらう	-フリップフロップの組み合わせ (2 つ) -1, 2, 4 の位について
問題 1	5 + 3	-どちらの数字もスイッチを 2 つ使う -出力される 8 は新しい位 (8 の位)	-フリップフロップの組み合わせ (2 つ) -8 の位について
問題 2	17 + 4	-17 はメモリーレジスタの容量 (4 bit = 15) を超える。 -出力された 21 は 3 つのフリップフロップで表現される。 (16 の位)	-bit の大きさに関して -フリップフロップの組み合わせ (3 つ) -16 の位について
問題 3	自作問題	-問題を自分で作り、フリップフロップで表現し、最後に出力された数値を組み合わせを読み取り解釈する。	-今までの知識を確認する

を行う必要があると考えた。

そこで、小学生が楽しく学習できるように、加算の例を中心にスモールステップで学習することのできるカリキュラムを開発した。そのカリキュラムを表 1 に示す。

最初の課題はデモ (2 + 3) である。「木製フリップフロップの組み合わせを使用する」という概念について理解してもらおうのが出題意図である。DCII を使って計算をするにあたり、木製フリップフロップの組み合わせを用いた数値の表現は必須になるので最初にこれを学習してもらうように設計している。「2 を入れた後に 3 を入れてもらう」という問題設計の意図は、最初に指導者が 2 を入力した後、学習者に 3 を入力してもらうことで、フリップフロップの組み合わせの概念の使用を促進することである。

問題 1 は 5 + 3 である。5 も 3 もどちらも表現する際には木製フリップフロップを 2 つ以上組み合わせなければならない。このため学習者はデモで行った 2 つのフリップフロップを組み合わせで数値を表現するということを思い出す必要がある。答えで出力される 8 という数値は今までに出たことのない 8 の位が使用されるため、学習者に応用を促進する。

問題 2 は 17 + 4 である。17 という数値は、メモリーレジスタ (4 ビット) の容量を超えることから、メモリーレジスタに 17 を入れようとした際に、ビットの大きさについての発見を期待した。出力される数値 21 は 3 つのフリップフロップを使用し、新たな 16 の位が現れることから今までの 2 題よりも高難易度である。

問題 3 は自作問題である。自作問題とは、被験者自らが 10 進数の問題を作成し、表現、解釈するものである。自ら設定した 10 進数の問題を、DCII の木製フリップフロップを使って表現し、計算の結果出力された組み合わせを解釈し、10 進数として読み取る。これらの一連の流れを行うことで、今までの知識を確認することを目的としている。

表現

10 進数を木製フリップフロップの組み合わせによって表現すること。



解釈

出力された木製フリップフロップの組み合わせを 10 進数で解釈すること。

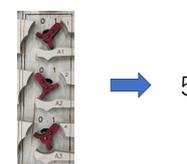


図 3 フリップフロップの表現と解釈

表 2 ヒントの種類

名称	定義	具体例 (実際のヒント)
強ヒント	具体的な指示	「3 は 1 と 2 を組み合わせで考えてみよう。」 「じゃあ次はここに 5 を入れてみようか。」 「スイッチは 1 と 4 と 16 の組み合わせだからいくつになったかな？」
弱ヒント	方針のみ	「5 を組み合わせで考えてみようか。」 「次は何をするか覚えている？」 「組み合わせを確認して答えがあるか確かめよう。」

4. 実験

4.1 目的

実験の目的は、小学生が DCII を用いて加算を学習することにより、2 進数や情報量 (ビット) の概念についての理解が得られるのかということ、および、楽しみながら学習ができるかどうかを明らかにすることである。

4.2 対象と学習環境

開発したカリキュラムを利用して、実際の小学生に教育を行った。分析対象は 2018 年 9 月 9 日に行われた子供向けのプログラミングワークショップ (WS) と 10 月 7 日に行われた学園祭 (SG) に訪れた、小 1 から小 4 の男女合計 8 名である。

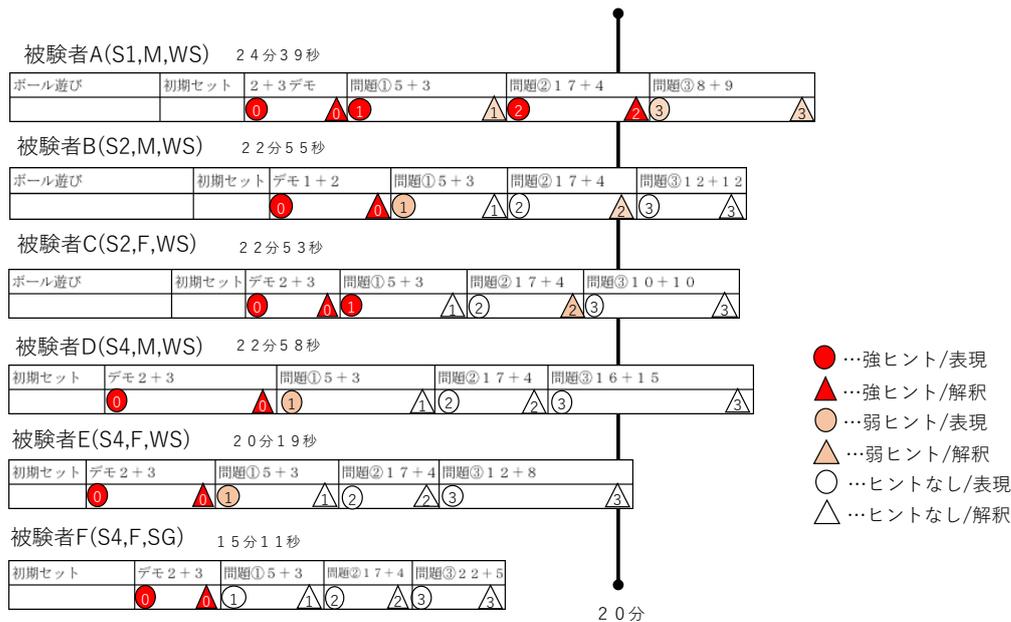


図 4 実験結果

学習者 1 名もしくは 2 名が 1 台の DCII を操作しながら、作成したカリキュラムを用いて指導を行った。1 台の DCII に 1 名の大学生が配置され、指導兼、参与観察を行った。デモは指導者が主導で進め、問題 1 から問題 3 にかけては学習者が主導で学習を進行した。学習に上手くいかなかったときや、学習者に対する問題の難易度が高いと感じたときなどに指導者からヒントを与えた。

4.3 分析方法

撮影されたビデオ動画を用い、筆頭筆者が学習過程の分析を行った。分析の観点は以下の 3 点である。

- (1) 数値の表現・解釈の学習効果
- (2) 学習態度
- (3) その他に観察された知見・発展的な学習効果

「数値の表現・解釈の学習効果」の分析方法に関しては 4.3.1 項にて詳説する。「学習態度」に関しては、意欲を持ち、集中して、楽しく学習する姿が見られるかどうかを分析者の主観で判断した。そのほか、ビデオ分析だけでなく、アクションリサーチの過程で得られた知見を「その他に観察された知見・発展的な学習効果」として分析した。

4.3.1 数値の表現・解釈の学習効果の分析方法

「数値の表現・解釈の学習効果」の分析の観点は以下の 2 点である。

1 点目は、木製フリッププロップを使い、組み合わせを使って数値を入力すること、そして出力された組み合わせから数値を読み取ることができたか、という観点からの分析である。前者を表現、後者を解釈と名付けた(図 3)。表現は「10 進数を木製フリッププロップの組み合わせによって表現すること」と定義した。解釈は「出力された木製フ

リッププロップの組み合わせを 10 進数で解釈すること」と定義した。

2 点目は指導者が学習者に与えたヒントのレベルによる分析である。具体的な指示を与えた強ヒント、方針のみを与えた弱ヒント、の 2 つのレベルを定義した(表 2)。ビデオ分析により表現と解釈をしている場面をイベントごとに分け、各場面でのどのレベルのヒントを与えているかをまとめ、与えたヒントのレベルの変化を分析した。

この 2 点の分析にあたって 8 人の被験者を、1 対 1 で学習を行った 6 人に絞った。分析対象から外した 2 名は小 1 と小 2 で、ペアで実験をした。ペアでの実験を分析対象から外した理由は、学習の速度に途中から差が出てしまい、表現と解釈について、理解しているレベルに差が出てしまい、正確なデータを抽出することが難しいと考えたからである。また、学習についても加算 1 題のみに止まり、ヒントレベルの変化を分析するには問題数が少ないと判断した。

5. 結果

5.1 数値の表現・解釈の学習効果

実験結果の概要を図 4 に示す。図 4 のタイムライン表現において、その長さは所要時間を表している。被験者 6 名の平均の時間は 21 分 29 秒であった。上から学年が低い順に並んでおり、小 1 が 1 名(S1)、小 2 が 2 名(S2)、小 4 が 3 名(S3)である。○が表現、△が解釈、赤色が強ヒント、オレンジ色が弱ヒント、無色がヒントなしである。被験者 D の例を用いて具体的に解釈方法を説明すると、「被験者 D は、デモは表現解釈ともに強ヒントが必要であったが、問題 1 の表現では弱ヒントで表現できた。その後、問題 1 の解釈ではヒントなし、問題 2、問題 3 と表現解釈と



図 5 楽しく問題に取り組む姿



図 6 集中して問題に取り組む姿

もにヒントなしでできた」ということになる。なお、書かれている番号は表現と解釈の順番を示している。

主要な3つの分析結果を述べる。1つ目は、デモは学年を問わず、全員強ヒントを必要としていたが、その後いくつかの問題を経て行くにつれて、与えるヒントのレベルが低下していることである。しかし、被験者Aにとっては問題2の $17 + 4$ は数値が大きく難しかったようで、問題2で表現解釈共に強ヒントが必要になっている。小2の被験者BとCの2人については問題2の解釈で21を読み取る際に、悩んでいる姿が見えたため「組み合わせを確認してみようか」という方針を与えると、2人とも悩みながらもフリップフロップの組み合わせの解釈をすることができている。被験者D,Eは共に4年生で、デモの後問題1で簡単な方針をたててあげるとその後はヒントなしで表現と解釈をすることができている。被験者Fはかかった時間が最も短く、デモの後にはヒントなし最後までできていた。

2つ目は、問題3では小1の被験者Aを除く全ての小学生が表現と解釈をヒントなしでできたことである。しかし、小1も「組み合わせを使ってゆっくり考えてみようか」という弱ヒントを与えて、方針を立ててあげたことで、自作した $9 + 8$ を表現と解釈することができている。

3つ目は、効果的なヒントとして「組み合わせ」という言葉が挙げられる。理由としては、ほぼ全てのヒントで組み合わせという言葉を使っており、「組み合わせを考えよう」というような方針の弱ヒントを与えると、ほとんどの人が自ら木製フリップフロップの組み合わせを考え、数値を表現解釈していた。

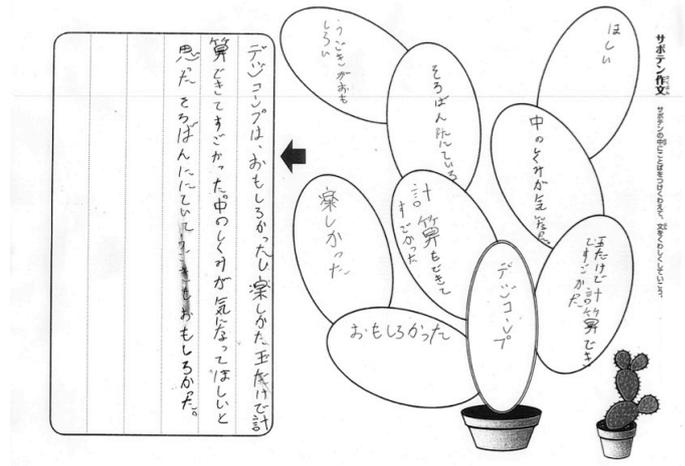


図 7 実験後の感想 (被験者 D)

5.2 学習態度

ビデオの観察により、小学生がDCIIを使って楽しみながら学習していたことが見て取れた。被験者全員が20分前後の時間飽きずに取り組んだことに加え、問題が解けて「おおー！」と喜んでいたり場面や、問題が解けるとすぐに次の問題に取り組もうとする姿勢が全ての被験者で確認できた。その一例を図5に示す。以下、3つのシーンのストーリーを記述しその様子を述べる。

5.2.1 シーン1：被験者C

被験者CはDCIIに取り組む前から、DCIIに興味を示していた。デモの $2 + 3$ をしているとき、最初は被験者Cは「これであってる?」「これでいいのかな?」と不安げなスタートであったが、ヒントをもらうことで、1つ1つ丁寧にフリップフロップの向きを確認し、やっとの思いですべてのセットを完了した。STARTのレバーを引いた後、しっかりと計算が行われているか見守っていた。ボールがゴールルートを通った瞬間は横で見守っていた被験者Dと一緒に「おおー！」と手を叩き喜んだ。

5.2.2 シーン2：被験者D

DCIIに取り組みながらしきりに「おもしろい!」「これはどういう仕組みなんだろう?」と発言している。全体を通して、集中して取り組んでいることが確認できる(図6)。DCIIに取り組んだ後記入してもらった感想シートを図7に示す。「欲しい」と書いてあること印象的である。被験者Dは問題3に取り組んでいるとき、1度フリップフロップの組み合わせを間違えてしまい、誤った答えを出してしまっていた。その後、再び初期セットからやり直し、全てのセットを完了した。計算終了後、指差し確認をして数値があっているか確認し、正解とわかると喜びを前面に出していた。

5.2.3 シーン3：被験者B

とても控えめな印象で、全体を通じて問題を淡々と進めていた。問題1に取り掛かっているとき、答えが出力され、

フリップフロップの組み合わせを確認すると、すぐに初期セットをはじめ次の問題に取り組もうとする姿が見えた。筆者が「答えは確認した?」と問うと「あってるよ」と言い、再び問題に取り組み始めた。控えめながらも次の問題に積極的に取り組んでいこうという姿勢が常にあった。

5.3 その他に観察された知見・発展的な学習効果

5.3.1 情報量(ビット)の概念の発見

被験者 F が掛け算に取り組んでいた際、自作問題で 8×8 に取り組もうとしていた。しかし、掛け算で使用するメモリは 3 ビット \times 4 ビットだったため、2 目目の 8 が入らないことに疑問を抱く場面があった。3 ビットの変換表を見せると、3 ビットは 7 までしか数値を表現することができないことに気づき、 7×8 に問題を変更し、解いていた。

5.3.2 繰り返しの概念の発見

被験者 D が足し算に取り組んでいた際に、繰り返しの回数を 2 にしてしまっただけでボールの数が多くなったことを発見した小学生がいた。1 つのルーティーンでボールの数は必ず 5 つであるのに対して、10 個になったことで「ボールの数が増えた」と指摘していた。

これに加えて、繰り返しの操作をするフリップフロップの箇所はどういった役割があるのか教えて欲しいという質問が被験者 B からされた。これに「繰り返しの回数を入れるんだよ」と答えると、「何に使うの?」とさらに疑問を持っていた。

5.3.3 CS アンプラグドの併用の試み

実験当初は、小学生が 2 進数を操作することは難しいと考えていたため、DCII に取り組む前に、CS アンプラグドの学習ツール「2 進数の点の数が書かれたカード」を併用して、木製フリップフロップの数値の表現と解釈を行うカリキュラムを施行していた。しかし、その教え方では「2 進数の点の数が書かれたカード」の説明に 20 分ほどかかる一方で、DCII だけで表現を行なっても 2 進数の表現には 10 秒しかかからないことがわかった。DCII を使用して学習をする際は、CS アンプラグドのカードを併用して数値を入力するよりも、DCII に備わっている自然とフリップフロップの組み合わせを考える要素を利用した方が、早く正確に数値を表現できることがわかった。

6. 考察

本実験では、小学校低学年を含むすべての児童が約 20 分間問題に取り組む、徐々に指導者のヒントに頼らずに、DCII を使った数値の表現、解釈を行うことができるようになることが確認された。最終的には 6 名中 5 名の児童がヒントなしで木製フリップフロップを使って数値を表現・解釈できた。5 分ほどのデモをした後に、被験者全員が自然とフリップフロップを使って数値を表現しようと努力している様子を確認できた。この点から、DCII にはフリッ

プフロップの組み合わせを、自然と考えるようになる要素が組み込まれていることがわかった。しかし、その要素を引き出すためには子供の学習レベルに応じた問題、そして指導者のアプローチが必要であることもわかった。

学習態度に関しては、DCII に 20 分前後の時間飽きずに取り組んだという点や、問題が解けて手を叩き「おー!」と喜んでいた場面や、問題が解けるとすぐに次の問題に取り組もうとする姿勢から、子供達は楽しみながら学習していたと考えられる。感情を表に出す子やそうでない子もいたが、これらの場面は全ての被験者で確認することができた。これらのことから、DCII は児童が集中して楽しむことのできる教材であることがわかった。

総じて、被験者全員が、ヒントを頼りにすることで、実験前に想定していたよりも短い時間かつ正確に、木製フリップフロップを組み合わせ、自然と数値を表現し解釈することができた。またその中で楽しく学ぶ姿も確認することができた。約 20 分という時間で小学生は、木製フリップフロップを使って 10 進数を表現し、解釈できるようになることがわかった。

7. まとめ

DCII を使い、約 5 分のインストラクションをすることで、子供達は自らで考え学習していき、自然とフリップフロップを使った組み合わせで数値を表現できるようになることが今回の実験を通じてわかった。ビデオ分析から子供でも楽しむことのできる教材であることがわかった。これらのことから DCII は、小学生の児童が計算機科学を楽しみながら学ぶことができる教材であるということがわかった。

被験者の中には、ビットの概念に気づいたり、掛け算に取り組んだりした子もいた。自然とフリップフロップを使った組み合わせで数値を表現できるようになるだけでなく、乗算を使っただけのビットの概念の理解や、繰り返しの理解など、より発展的な教育効果も期待できる。今後の課題としては、情報量(ビット)の概念についての教育や、乗算の教育を行うことで、繰り返しについての理解を課題としたい。加えて、減算の計算の仕組みについて学ぶことで、補数を理解することについても課題である。

参考文献

- [1] 文部科学省：小学校学習指導要領解説(2008)。
- [2] 久野 靖, 和田 勉, 中山泰一：初等中等段階を通じた情報教育の必要性和カリキュラム体系の提案, 情報処理学会論文誌:教育とコンピュータ, Vol. 1, No. 3, pp. 48-61 (2015)。
- [3] 高橋参吉, 西野和典, 松永公廣, 下倉雅行, 金田忠裕：情報技術教育のための学習教材の開発, 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 11-26 (2005)。
- [4] Kordaki, M.: A computer card game for the learning of basic aspects of the binary system in primary education:

- Design and pilot evaluation, *Education and Information Technologies*, Vol. 16, pp. 395–421 (2011).
- [5] Bell, T., H.Witten, I. and Fellows, M.: コンピュータを使わない情報教育アンブラグドコンピュータサイエンス, イーテキスト研究所 (2007).
 - [6] 石塚丈晴, 兼宗 進, 堀田龍也: 小学生に対するアンブラグドコンピュータサイエンス指導プログラムの実践と評価, 情報処理学会論文誌教育とコンピュータ (TCE), Vol. 1, No. 2, pp. 19–27 (2015).
 - [7] 嘉田 勝: 情報科学の本質的理解を促す教育手法としてのコンピュータサイエンスアンブラグド, コンピュータと教育 CE-105, pp. 1–5 (2010).
 - [8] 間辺広樹, 兼宗 進, 並木美太郎: CS アンブラグドのアルゴリズム学習における教具による理解度への影響, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 1, pp. 14–23 (2013).
 - [9] 佐藤雄太, 伊藤一成: コンピュータサイエンスアンブラグドのピクトグラムと Scratch 利用による実装と評価, コンピュータと教育 CE-134, pp. 1–9 (2016).
 - [10] マリア・モンテッソーリ: 幼児の秘密 (新装版), 日本モンテッソーリ教育総合研究所 (2003).