

気付きを導くインタラクティブ教材の活用

間辺 広樹¹ 兼宗 進²

概要: 高等学校に共通教科情報科が導入されて 15 年が経過した。その間、筆者は情報の科学的な理解を目的として、開発した複数のインタラクティブ教材を、Web サイト「海の近くの教室」で継続的に公開してきた。本研究では、これらの教材の学習効果を改めて検証すると共に、教材に共通する設計指針の明確化を通して、アクティブラーニング型の授業に有用な教材の要素を検討する。

キーワード: 共通教科「情報」、2 進数、コンピュータサイエンスアンプラグド

HIROKI MANABE¹ SUSUMU KANEMUNE²

Abstract: It has been spent fifteen years that the informatics, the compulsory subject, adopted to high school curriculum. During the term, we have been publishing some interactive educational materials for the understanding information science. In this paper, we report the learning effects of these materials. Moreover, we discuss the essentials of the educational materials for the active-style learning.

Keywords: Informatics, Binary numbers, Computer science unplugged

1. はじめに

平成 15 年 (2003 年) に高等学校に新設された情報科は、「情報活用の実践力」「情報の科学的な理解」「情報社会に参画する態度」を 3 つの柱とする。当初は「情報活用の実践力」を重視した情報 A、「情報の科学的な理解」を重視した情報 B、「情報社会に参画する態度」を重視した情報 C の 3 科目から 1 科目を選択して履修させる必修科目として始まった。その後、平成 22 年の学習指導要領改定の際に、情報 A は発展的に解消され、「情報の科学的な理解」を重視した「情報の科学」、「情報社会に参画する態度」を重視した「社会と情報」の 2 科目へと統合された。更に、平成 30 年に公示された新学習指導要領では、共通必修科目「情報 I」へと 1 本化されることとなった。「情報 I」ではプログラミングが必修となるなど「情報の科学的な理解」を身に付けさせることの重要性が増した。

その一方で「情報の科学的な理解」を重視した科目「情報 B」、科目「情報の科学」の選択率はいずれも 10 %程度と、他の科目に比べて低かった。これは、「情報の科学的な理解」の内容の難しさや教えるにくさが要因と考えられる。筆者らも「情報 B」や「情報の科学」を授業実践していく中で、生徒に内容を理解させることや動機付けに難しさを感じてきた。

そこで、授業の工夫として筆者らが行ってきたことが「気付きを導く教材づくり」である。同じ内容を学ぶにも、教師から教えられるより自ら発見することの方が学び喜びが大きく、知識の定着も期待できるのではないかと、という考えに基づいて、生徒自身で操作をしながら考えられるインタラクティブなアニメーション教材を作成した。また、教材は Web サイト「海の近くの情報教室」[1]にて公開し、自由に活用できる状況を作った。

その結果、日々一定数のアクセスがあり、公開から 15 年が経過した現在でも、授業で利用されている。アクセスログを見ると、時期や時間によってアクセス数に散らばりがあることや、期間によっては特定のドメインからのアクセスが集中していることなどから、授業にて利用されてい

¹ 神奈川県立柏陽高等学校, Hakuyo High School, Yokohama, Kanagawa, 247-0004, Japan

² 大阪電気通信大学, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa, Osaka, 572-8530, Japan

ることがわかる．そこで、改めてそれら教材の学習効果を検証し、今後のどのような教材や授業が望ましいかを検討する．

2. 研究の背景

デジタル教材は教育工学の分野で展開してきた．山内の著書「デジタル教材の教育学」[2]によれば、1970年代後半から1980年代前半にかけてパーソナルコンピュータの登場と共に発展してきたCAI(Computer Assisted Instruction)、1980年代後半から1990年代前半にかけてパーソナルコンピュータの性能向上に研究が進められたマルチメディア教材、1990年代後半から2000年代前半にかけてネットワークによる学習者同士のコミュニケーションが可能になったとここで実現したCSCL(Computer Supported Collaborative Learning)と変遷してきた．情報技術の進化と共に教材の形も多様化したが、「情報技術を教材に取り入れることは、教材の表現の幅を広げ、教材の効果を高めることにつながるかもしれない．しかし、そのためには、教材が学習者の状態、教材の利用場面などに即した形で設計されていることが必要である．」と山内は指摘する．

1990年代後半には個人でもWebにて情報発信することが一般化してきたが、情報科が新設されることも手伝って、高校で情報を担当する教員等による発信も目立つようになった．当時の情報科に関するWebサイトと言えば、柴田の「情報科.net」[3]、佐藤の「情報科の先生になります」[4]などが代表的な存在である．これらは情報科の黎明期において、運営者が自らの授業実践を通して授業内容や授業方法のノウハウを伝えるものとして注目された．

筆者らにおいては授業実践の公開ではなく、授業で活用した教材を公開するという立場を取った．教材は学習意欲があまり高くはない目の前の生徒に、学習内容の定着や動機付け効果を主なねらいとして作成したものであったため、同様の悩みを抱えている教員らに有益かも知れない、と考えたことが公開の理由である．すなわち山内らの言う「学習者の状態、教材の利用場面」に即して、現場の教員が設計したものであった．

公開した教材は、主に「アルゴリズム」と「情報のデジタル化」に関する教材で構成している．その中で「アルゴリズム」の教材に関してはすでに学習効果を検証を行って[5][6]いる．本研究では「情報のデジタル化」に関する教材を扱う．

高校生のスマートフォン所有率は90%を超え、生活にも大きな影響を与えている．しかし、「高校生がビットやバイトといった基本的な概念やコンピュータが内部で情報をどのように扱っているかという仕組みについて意識や理解せずに使っているのではないかと懸念される．そこで、改めてその授業法を検討することに意義があるのではないかと考えた．

「情報のデジタル化」を題材とした教育実践は数多く存在する．例えば、竹内ら[7]は2進数が創りだすモザイク模様・反復と再帰の模様パターンを用いて指導する手法を提案しているが、本研究で用いる教材のように動的な仕組みはなく、試行錯誤しながら考えるようにはなっていない．安岡ら[8]は動的WEB形式の教材を作っているが、大学生を対象としたものであり、本研究で用いる教材のようなゲーム性などが考慮されていないようである．次章にて教材の設計指針を示し、本研究で用いるアニメーション教材について詳細を示す．

3. 教材の設計指針

「海の近くの情報教室」の教材は、Adobe社のFlashを利用して作成した対話的な(インタラクティブな)教材である．

学習者が「ボタンを押す」「物体をドラッグして動かす」などの単純なマウス操作を繰り返すことで、教材の状態が変化する．学習者に自身で操作させながら、状態の変化の仕方から法則性や何らかの情報科学の概念に気付かせることがねらいである．以下に設計指針をまとめる．

- 単純な操作の繰り返しで状態を変化させる
- 状態の変化を通して情報科学の概念を考えられるようにする
- 前提とする知識を必要としない
- 動機付け効果のためにゲーム性を持たせる
- わかりやすさを重視した視覚的な表現を用いる
- Webブラウザで動作して、複数の生徒が一斉に操作できることで、生徒同士で教えあうことを可能にする

これらの指針に基づいて作成した、本研究で利用する教材について説明する．

図1に2進数を扱った教材1を示す．5本の指が自動で動くアニメーションにすることで、生徒が真似をしながら2進数の概念を獲得することができる．更に、指の変化と共に10進数を画面左下部に表示することで、2進数と10進数との対応に気付くことを期待した．また、指の動きを初級から超上級まで4段階の速さで切り替えることで、動作の規則性に気付いたり、生徒自身で動作練習することができる．

図2に2進数を扱った教材2を示す．教材2も教材1と同様に2進数を扱っているが、指ではなく電球を用い、電球の数を8個にして表現できるビットパターン数を増やして抽象度を高めた．10進数と対応させる位取り記数法の表記も同時に変化するようにしたことで、数学的な解釈ができるようになる．

図3に16進数を扱った教材3を示す．「一箱16個入りの饅頭が増えていく」状況を作り、16を一つの単位とすることの感覚を掴むことと、10進数との対応を考えられるようにした．

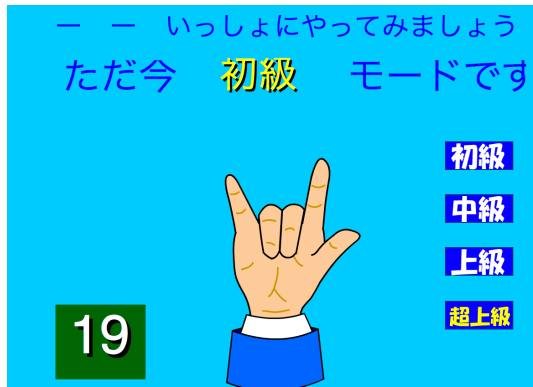


図 1 2進数の教材 1

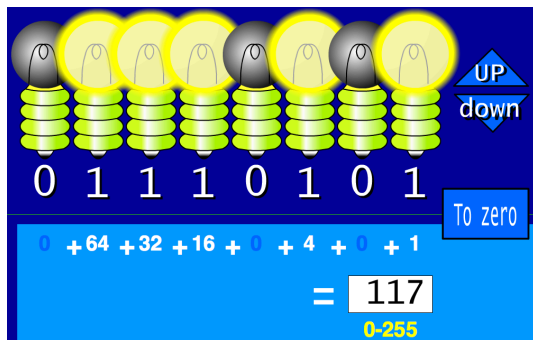


図 2 2進数の教材 2

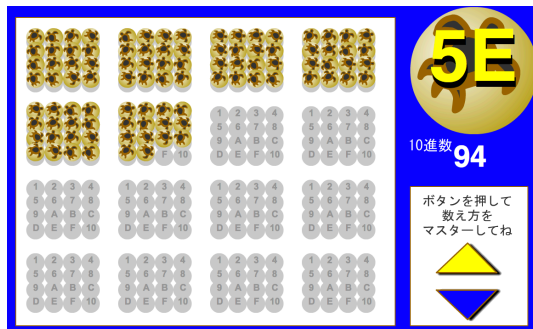


図 3 16進数の教材 3

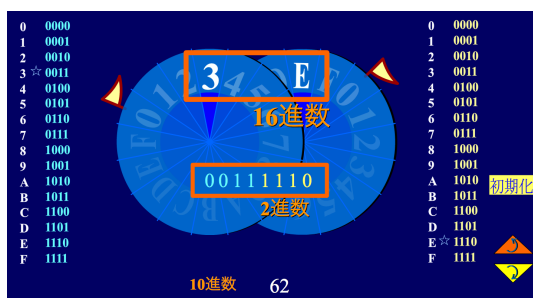


図 4 2進, 10進, 16進の教材 3

図 4 には 2 進数と 10 進数, 16 進数を扱う教材 4 を示す. 16 枚の歯車が 1 回転たらもう一枚の歯車が動く仕組みを作ることで, 16 を一つの単位とすることの感覚を掴むことができる. また, 2 進数と 10 進数も同時に変化させることで, これらの対応や変換を考えることが可能である.

表 1 授業計画 (65 分)

	教材	活動のねらい
	事前アンケート	知識の有無の調査
活動 1	教材 1・教材 2	自然数の 2 進表現の理解
活動 2	CS アンブラグド	ビット列と文字との対応でメッセージが作れることの理解
活動 3	メモ帳・教科書	1 文字が 2 バイト (16 ビット) であることの理解
活動 4	教材 3・教材 4	2 進・10 進・16 進の対応について理解
	事後アンケート	感想と理解度の調査

4. 実験授業

4.1 授業計画

実験として, ビット・バイトの概念や, 文字をデジタル化する考え方を学ばせる目的の授業を計画した. 授業は前章で示した教材 1 ~ 教材 4 を用いた活動, 並びに, コンピュータサイエンスアンブラグド [9](以下, CS アンブラグド)の活動, ならびに, テキストエディタを用いたパソコン上での活動で構成した.

教師は, 活動で気付いたことをメモする「気付きメモ」というプリントを配布する. 活動を通してどのような「気付き」が得られるかを目的とした実践のため, 教師主体で授業を進行させるが, 学習内容についての説明は行わない. ただし, 用語の知識は必要なため「ビット」「バイト」「2 進数」「16 進数」という言葉だけは, 活動の中で説明した. 表 1 に 4 つの活動を含む授業計画を示す. また, 生徒同士で一緒に考えたり, 教え合いなどアクティブな活動を積極的に行うように勧める.

それぞれの活動で, 教師は生徒にどのような指示をしたのかを以下に示す.

4.1.1 事前アンケート

事前アンケートでは, 以下の情報関連の用語をどの程度知っているかについて, 調査した.

- (1) 「ビット」とは何か, 説明して下さい.
- (2) 「バイト (B)」とは何か, 説明して下さい.
- (3) 「パケット」とは何か, 説明して下さい.
- (4) 定額 5 ギガの「ギガ」とは何か, 説明して下さい.

4.1.2 活動 1

活動 1 では, 教材 1 と教材 2 を用いて, 自然数の 2 進表現を理解することをねらいとした. 指示内容は以下の通りである.

- 教材 1 を提示し, 同様の動きをさせる
- 教材 2 を配布し, ボタン操作させる
- 気付いたことをメモ書きさせる

4.1.3 活動 2

活動 2 では, CS アンブラグドの中から「2 進数 (Binary Numbers)」という教材を用いて, ビット列と文字との対応でメッセージが作れることの理解をねらいとした. これ

simple binary code, which he knows the woman across the street is sure to understand. Can you work it out?

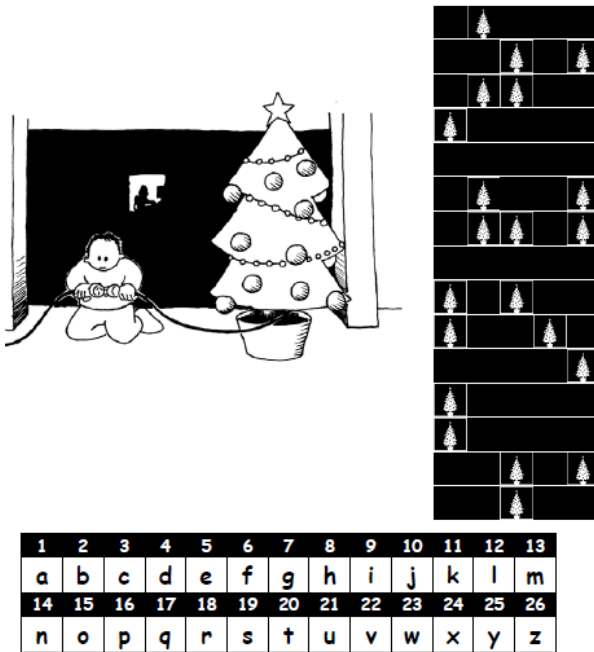


図 5 CS アンプラグドの 2 進数ワークシート

は、ビルに閉じ込められてしまった少年が、5本のクリスマスツリーを使い、その電源の ON/OFF を組合せて助けを求める物語仕立ての教材である(図 5)。

- 印刷した英語のワークシートを配布し、問題の答えを考えさせる
- 気付いたことをメモ書きさせる

4.1.4 活動 3

活動 3 では、日本語の 1 文字が 2 バイト (16 ビット) であることの理解をねらいとした。また、教科書のシフト JIS コード表を使い、16 進表記が用いられていることに気付くことをねらいとした。

- テキストエディタのメモ帳に「こんにちは」と入力して保存させる
- ファイルサイズを調べさせる
- 教科書の資料にある「シフト JIS コード表」を見させる
- 1 文字 (例: 陽) を探させ、その位置を言葉 (例: 「97 と 7A」など) で言わせる
- 気付いたことをメモ書きさせる

4.1.5 活動 4

活動 4 では、2 進数・10 進数・16 進数の対応について理解することをねらいとした。

- 教材 3 と教材 4 を配布し、ボタン操作させる
- 気付いたことをメモ書きさせる

4.1.6 事後アンケート

事後アンケートでは、活動を通して理解して欲しかった以下の 6 項目について、「よく理解できた」「概ね理解できた」「あまりよく理解できなかった」「全く理解できなかった」の中からもっともよく当てはまるもの一つを選ば



図 6 教材 1 を用いた授業の様子

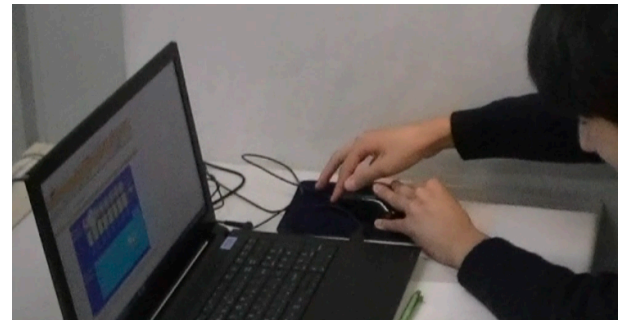


図 7 教材 2 を用いた授業の様子

せた。

- (1) 「ビット」は理解できましたか?
- (2) 「バイト」は理解できましたか?
- (3) 「2 進法」は理解できましたか?
- (4) 「16 進法」は理解できましたか?
- (5) 「2 進数・10 進数・16 進数の関係」は理解できましたか?
- (6) コンピュータ内部で文字がどのように扱われているか、理解できましたか?

4.2 授業実施

授業は H 高校の 1 年生 38 名を対象とした科目「情報の科学」(65 分) で、パソコン教室にて実施した。教師は生徒に、あらかじめ学習内容の説明はしないことを明言すると共に、それぞれの活動で気付いたことをメモ書きするための「気付キメモ」を配布した。インタラクティブ教材は、授業支援システムの「URL 転送」機能を使い、それぞれの活動の中で一斉に Web ブラウザ上で使える状況を作った。以下に活動の様子を示す。

活動 1 における教材 1 では、すべての生徒がアニメーションの動きを真似した。アニメーションに合わせて動かそうとする生徒の中には、「できない」「指が痛い」と言って指のストレッチをする生徒もいた。また、「超上級」のコミカルな動きを見て、授業の雰囲気や和らぐこともあった(図 6)。教材 2 では、ボタンを押す速さを競い合う生徒もいたが、多くの生徒が状態の変化を慎重に観察し、数との関係を考察していた(図 7)。

表 2 事前アンケートの結果)

用語	正答者数 (%)	誤答例
ビット	2名 (5.3%)	メガの1ランク下
バイト	4名 (10.6%)	ビットの略称
パケット	3名 (7.9%)	プランの種類, 使用できる容量
ギガ	12名 (31.8%)	月毎の使用料

活動2では、英語のワークシートを見て、すぐにメッセージを作れる生徒と、何をしたらいいかわからずに活動ができない生徒に分かれた。この活動の後、教師は用語を教授するために、指・電球・クリスマスツリーなど2つの状態を取るものを「ビット」ということと、8ビットをまとめて「バイト」ということを説明した。また、0と1だけで数を表す方法が「2進法」であり、表された数を「2進数」であることを説明した。

活動3では、多くの生徒が「5文字・10バイト」「1文字が2バイト」であることをメモしていた。中には、文字サイズを増やしたり、スペースや改行を入れてファイルサイズの変化を観察する生徒もいた。教科書の「シフト JISコード表」を見て、生徒はページ全体に敷き詰められた文字の多さ・細かさに驚いた。その中から「陽」の字を探し出した生徒の中は「横の座標が97と縦の座標が7A」などと、16進表記された文字コードの位置を上手に伝える生徒もいた。

活動4では、教材3・教材4のどちらの教材でも、速さを競い合う生徒もいたが、多くの生徒は意味を考えながら慎重に学習を進めていた。

5. 結果


事前アンケート、気付きメモ、事後アンケートの集計結果を示す。

5.1 事前アンケート

事前アンケートでは、例えば「パケット」であれば「データ通信を分割した単位」のように一定の理解が認められるものを正答とした。これらの用語は、スマートフォンのCMなどを含め、生徒も日常的に聞いたり、使用しているのではないかと考えられるが、多くの生徒が、正確な理解を持っていなかった。表2に結果を誤答例と共に示す。

5.2 気付きメモ

活動に用いた「気付きメモ」の例を図8に示す。この例では、教材1で「奇数の時に親指が立つ」ことや、メモ帳を使った活動で「1文字が2バイトである」ことが記述されていた。また、感想として「コンピューターで普段私たちが入力した文字は0と1の2進法が様々な組み合わせで暗号のような文字列によってコンピューターに伝達されているということがわかり、とても面白いと感じました。」と記述されていた。

実習	イメージ	メモ
1		2進法が使われている。(010101...) 奇数の時に親指が立つ。
2		179目が01と数え終わったら279目が1になり、また179目の01が終わったら379目が1になるの繰り返し。
3		help im trapped! 0と1の2つの数字だけで何かを伝えることができる。(右から1,2,4,8)
4		こんにちはは10バイトだから、1文字が2バイトである。
5		1,2,3,4,5,6,7,8,9, A,B,C,D,E,F,10で成り立っており、それが全部そろつと、11,12,13...となり16ずつの暗号で数えられる。
6		161個数え終わったら179目と279目の数字321個を様々に組み合わせ、全て表し終わったら、次の379目にする。

重要語句
① : 情報の最小単位
② : 8ビットをまとめて...

実習全体の感想
コンピューターで普段私たちが入力している文字は0と1の2進法が様々な組み合わせで暗号のような文字列によってコンピューターに伝達されているということがわかり、とても面白いと感じました。

図 8 気付きメモの例

表 3 教材1での頻出ワード (N=38)

用語	出現数 (%)	使用例
親指	23名 (60.5%)	親指は開く・閉じるの繰り返し
2進数(2進法)	13名 (34.2%)	2進法の0と1でその数を数える
2通り(2つの状態)	12名 (31.6%)	指を開くか閉じるかで2通り
小指	11名 (28.9%)	17から31まで小指を立てる
0~31(32通り)	10名 (26.3%)	指5本で0~31を表している

表 4 教材2での頻出ワード (N=38)

用語	出現数 (%)	使用例
2進数(2進法)	12名 (31.6%)	電源をつける・つけない2進法
2のn乗	11名 (28.9%)	右から1,2,4,...の2の累乗
2倍ずつ	10名 (26.3%)	右の数を2倍した数が左になっている

表 5 活動2(CSアンブラグド)での頻出ワード (N=38)

用語	出現数 (%)	使用例
文字を表せる	16名 (42.1%)	1と0のみを使って文字を表してる
2進数(2進法)	11名 (28.9%)	これもまた2進法
Help I'm trapped	10名 (26.3%)	「Help I'm trapped!」
暗号	10名 (26.3%)	メールの暗号化ができそう

それぞれの教材での記述で、出現頻度の多い単語(及び同じ内容と判断できる言葉)とその使用例を表3から表7に示す。

教材1では「親指」が圧倒的に多かった。また、表4の教材2では「2の累乗」など数学的な表現が増えた。

表5の活動2では、「0と1で文字を表せる」といった内容と共に、隠れたメッセージをそのまま書いた「help im

表 6 活動 3(メモ帳と教科書)での頻出ワード (N=38)

用語	出現数 (%)	使用例
10 バイト	20 名 (52.6 %)	5 文字で 10 バイト
1 文字 2 バイト	18 名 (47.4 %)	全角文字 1 つで 2 バイトとなる
1 文字 16 ビット	10 名 (26.3 %)	1 文字が 16 ビットで成りたつ

表 7 活動 4(教材 3 と教材 4)での頻出ワード (N=38)

用語	出現数 (%)	使用例
16 の塊	12 名 (31.6 %)	5 文字で 10 バイト
関係性 (相性や融合など)	12 名 (31.6 %)	5 文字で 10 バイト
16 進数 (16 進法)	9 名 (23.7 %)	16 進数で 10 は 2 進数で 1000

trapped」が多く、それを「暗号」と表現する記述もあった。tabreffig:word05の活動 3 では、「5 文字で 10 バイト」や「1 文字が 2 バイト」という記述が多かった。

活動 4 の教材 3 では「16 の塊」という記述が多かった。教材 4 では「融合」「相性がいい」「16 進数が繰り上がると 2 進数も繰り上がる」など、2 進数と 16 進数の関係性に気付いた記述が多かった。

感想の中で肯定的なものでは「最初は何のことが全く分からなかったけど、進んでいくうちに、これが何を表しているのか、つかめるようになりました。」のように、徐々に理解できるようになってきたという内容を 12 名が記述した。また、「2 進法についてはある程度知っていたが、16 進法は初めてだったので少し混乱した。ただ、どちらも同じような仕組みで見ていて面白かった。」のように、事前に 2 進法を知っていたが、その理解が確かなものになったという内容を 6 名が記述した。一方で、否定的なものでは「全体で何か繋がりがあつたことをしている気はしたけど、それが何かはよくわからなかった」と関係性を見出すことができなかつたという内容を 11 名が記述した。

5.3 事後アンケート

事後アンケートの集計結果を図 9 に示す。生徒の主観的評価であるが、どの問に対しても「とてもよく理解できた」と「概ね理解できた」という答えが過半数を占めていた。特に、2 進数の理解と 16 進数の理解では、ほぼ全ての生徒が「理解できた」と回答した。一方、「ビットの概念」「バイトの概念」「ビット列と文字の対応」については、「あまりよく理解できなかった」という生徒が 3 割から 4 割を占めていた。

「気付きメモ」と照らし合わせると、「あまりよく理解できなかった」という生徒のメモには「現象の報告に終わる」という傾向が多くみられた。これは、例えば教材 1 では「親指がいつも動いている」、教材 3 では「1~9 と a~f が使われている」、アンプラグドでは「答えは help i'm trapped だった」という現象だけが書いてあつて、「何故そうなるか?」「その現象が意味することは何なのか?」という考察が書かれていないことが、「理解できた」という生徒

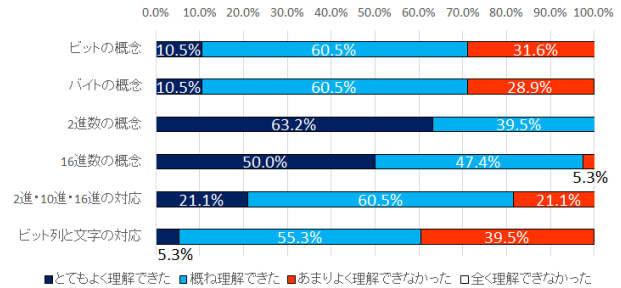


図 9 事後アンケートの集計結果 (N=38)

との違いであった。

6. 考察

インタラクティブ教材を含め、授業全般の学習効果について考察する。まず、事前アンケートでは生徒は「バイト」などの情報関連の用語を日常的に利用しているが、その意味をほとんど理解していないことが明らかになった。情報技術の更なる進化から高校生の活用頻度は今後も高まっていくことが考えられるが、改めて「情報のデジタル化」を学ばせることが必要であることを確認した。

しかし、本実践を行った事後のアンケートでは、理解度に対する主観的評価は、どの項目も肯定的な回答が過半数を占めていて、学習の達成度は高かった。生徒の多くは活動を通して 2 進数、16 進数、ビット、バイトなどの概念を理解できたことを自覚した。これは、それらを理解する目的で設計したインタラクティブ教材や、CS アンプラグドの活動から得られた理解である。インタラクティブ教材については、操作が簡単であるために何をすればいいのか迷うことがなく、ボタンを押せば状態が変化する仕組みによって、「どうなるのかな?」や「どういうことか?」と興味を抱いたり、その疑問を解消しようと考えやすい仕組みになっていた。また、最初は何をしているかわからなかつた生徒が、徐々に知識や理解が深まっていく様子が確認できた。

「気付きメモ」には活動に応じて様々な言葉が書かれていたが、授業の問題点も明らかになった。まず、2 進数と 16 進数の理解は高いことに対して、ビットやバイト、ビット列と文字との対応についての理解度は低い。これは、数学的な内容の理解は得やすいが、情報科学の考え方が入ってくると理解が難しい、ということが考えられる。従って、情報科学の考え方を深めるような活動をすることや、そのような内容を理解させるための教材開発や授業法の開発が今後の課題である。

「理解できなかった」という生徒が「現象の報告に終わる」という傾向については、生徒「だけ」の活動にしたことの課題である。目の前の現象から、その背景にある理論や概念を、深く考えさせるような授業法の検討が必要である。

7. まとめ

開発したインタラクティブ教材について、改めて授業実践を通してその学習効果を検証した。単純な操作とそれに伴う状態の変化を繰り返すことで、情報のデジタル化の基礎概念を理解させることができた。今回は CS アンブラグドの活動の力を借りて、文字との対応を意識させる授業を行ったが、他にも使い次第で様々な授業実践が可能である。

インタラクティブ教材を作成した Flash は一部のスマートフォンでは使えなくなっている。開発環境の検討も含め、今後も教材開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] 間辺広樹: 海の近くの情報教室,
<http://www.info-study.net>
- [2] 山内祐平: デジタル教材の教育学, 東京大学出版会 (2010).
- [3] 柴田功: 情報科.net,
<http://www.johoka.net>
- [4] 佐藤義弘: 情報科の先生になります,
<http://www.hi-ho.ne.jp/yoshi-sato/joho/>
- [5] Hiroki Manabe, Susumu Kanemune, Mitaro Namiki, Yoshiaki Nakano: CS Unplugged Assisted by Digital Materials for Handicapped People at Schools, Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS, volume 7013), pp.82-93(2011).
- [6] 間辺広樹, 神藤健朗, 並木美太郎, 兼宗進: コンピュータ・アルゴリズムの「発見・記述・伝達」を導く授業の実践と評価, 情報処理学会論文誌教育とコンピュータ (TCE), 2(1), pp.10-24, 2188-4234(2016).
- [7] 竹内喜紀: 離散数学の考えに基づく 2 進法の教材化に関する研究 自然数の 2 進数表現に見られる図形的性質をとおして, 新潟大学教育人間科学部数学教室, 数学教育研究, 第 43 巻, 第 1 号, pp.10-34(2008).
- [8] 安岡広志, 佐藤健: 動的 Web 形式による 2 進数演算教育教材の開発, 東京情報大学研究論集第 16 巻, 第 1 号 (2012).
- [9] コンピュータサイエンスアンブラグド:
<https://csunplugged.org/en/>