

特集：能動的・自律的な学びを支援する学習環境の設計・構築・実践

# タンジブル学習環境を利用した効果的な学習手順の検討

葛岡 英明\*, 木村 諒\*, 田代 祐己\*, 久保田 善彦\*\*, 鈴木 栄幸\*\*\*,  
加藤 浩\*\*\*\*, 山下 直美\*\*\*\*\*

## Thoughts on Effective Learning Procedure for Tangible Learning Environment

Hideaki KUZUOKA\*, Ryo KIMURA\*, Yuki TASHIRO\*, Yoshihiko KUBOTA\*\*,  
Hideyuki SUZUKI\*\*\*, Hiroshi KATO\*\*\*\*, Naomi YAMASHITA\*\*\*\*\*

Based on an observational study of astronomy education using a tangible earth system, this paper aims to elicit implications for effective learning procedure for tangible learning environments. By analyzing the experiment based on “embodied design” concept, we found that, when appropriate instruction is not provided, intuitive operability of tangible user interface at times rather disturbs learners’ thinking opportunities. We also found that by properly limiting the information to show learners, the system can make learners be more conscious of the meaning of manipulating tangible objects and result in better understanding of the learning content.

キーワード：天文学習，タンジブルユーザインタフェース，身体化デザイン，デザインベーストリサーチ

### 1. はじめに

科学の学習のなかでも、天文分野は特に難しい領域の一つである<sup>(1)</sup>。これは、地上で観察できる天文現象と宇宙を俯瞰した天文現象など、複数の視点から観察される現象を統合して理解する必要があるためである<sup>(2)~(4)</sup>。

これに対して筆者らはタンジブルユーザインタフェース(TUI)を利用した天文学習教材(タンジブル地球儀システム)を開発し、天文学習を支援することを試みている<sup>(5)</sup>。TUIとは、従来のマウス、キーボード、ディスプレイに限らず、触ることのできる多

様な人工物をコンピュータの入出力インタフェースとして利用しようとする考え方である。TUIを利用した学習環境(以後、タンジブル学習環境)はさまざまな科学学習に応用されており<sup>(6)(7)</sup>、その効果が期待されている。しかし、効果的なタンジブル学習環境をデザインするための有効な方法論についてはいまだに研究課題となっている<sup>(8)</sup>。

これに対して筆者らはデザインベーストリサーチ<sup>(9)</sup>に基づいた実験を実施することによって、天文学習教材であるタンジブル地球儀システムが学習に対してどのような効果や問題を与えているのかということを観察的に分析し、その結果に基づいて天文学習を

\* 筑波大学システム情報工学研究科 (Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba)

\*\* 宇都宮大学教育学研究科 (Graduate School of Education, Utsunomiya University)

\*\*\* 茨城大学人文学部 (The College of Humanities, Ibaraki University)

\*\*\*\* 放送大学教養学部 (Faculty of Liberal Arts, The Open University of Japan)

\*\*\*\*\* NTTコミュニケーション科学基礎研究所協創情報研究部 (Innovative Communication Laboratory, NTT Communication Science Laboratories)

受付日：2016年6月5日；再受付日：2016年10月7日；採録日：2016年12月27日

支援するタンジブル学習環境のデザイン原則を検討してきた<sup>(10)</sup>。そしてこうした研究を通して、システムの機能だけでなく、それを効果的に利用するための学習手順が重要であることも認識するようになった。

そこで本論文は、中学生を対象とした天文学習実験を観測的に分析することによって、タンジブル学習環境を有効に活用するための学習手順に関する知見を得ることを目的とする。

## 2. 研究の枠組み

### 2.1 デザインベーストリサーチ

デザインベーストリサーチ (Design-Based Research, 以下 DBR) は従来の実験の問題点を補うことを目的として開発された研究手法である<sup>(9)</sup>。DBR は実際の教育実践を研究対象とし、現場で何がどのように行われているのかということを理解するためにエスノグラフィによる観察的分析が行われる。DBR の目的は効果的な学習環境を構築することと、汎用的な学習理論を導出することである。この目的を効果的に達成するために、デザイン、実践、分析、そして再デザインというサイクルを継続的に繰り返す。

筆者らはこれまでにこのサイクルの 1 巡目を実施し、それに基づいたシステムの改善案を提案した<sup>(10)</sup>。そこで本論文では、DBR の 2 巡目として、改善したシステムを利用した学習実験を実践するとともにその結果を分析する。

### 2.2 身体化デザイン

Abrahamson らは、科学、技術、工学、数学の学習を支援する方法として、身体化デザインを提案している<sup>(11)</sup>。彼らによれば、われわれが物理的な道具を使ってある目的を達成しようとしたにもかかわらず望んだ効果が得られないとき、その理由を考えたり再調整したりしながら、その道具に対する動作 (使い方) を変更して望む効果を得ようとするが、これがまさに学習なのである。学習のための道具において重要なことは、学習者にその道具を操作の意味を考えずに無意識的に使わせるのではなく、自分が道具とどのようにインタラクションをしているのかということ进行分析し、具体的かつ定量的に理解させることである。これ

によって、道具に対する動作は学習者のなかで徐々に内化し、実際に道具がなくてもそれに対する動作を模擬したり、頭のなかだけで動作をシミュレートしたりできるようになる。

ここで重要なのは、人工物に対する動作を試行錯誤させつつその意味を理解させ、徐々に内化させることができる学習教材をデザインすることである。さらには、その学習教材が効果を発揮するように、教師が適切に介入して足場かけをすることの重要性が指摘されている。

本論文ではこうした考え方にに基づき、筆者らが開発したタンジブルな天文学習システムを使って学習者が行なう動作が学習内容の理解に与える効果、そして学習の手順の違いがその効果に与える影響を明らかにし、これによってタンジブル学習環境を効果的に利用するための学習手順に関する知見を得ることを目指す。

## 3. 本研究の経緯

### 3.1 タンジブル地球儀システム

筆者らは TUI の考え方にに基づき、学習者の太陽と地球の時間的・空間的な関係に対する理解を支援するために、タンジブル地球儀システムを開発した<sup>(5)</sup>。タンジブル地球儀システムは、タンジブルアバタ (以後、アバタ)、タンジブル地球儀 (以後、地球儀)、電球、そして PC スクリーンから構成される (図 1)。ここで電球は太陽として利用し、地球儀と電球は地球と太陽の関係を俯瞰した視点を提供する。また、PC スクリーンには地上から天空を見た視点 (以後、地上視点) を表示し、天空における太陽の日周運動を確認するために用いられる。この地上視点のための天体シミュレータは、国立天文台が開発した Mitaka<sup>(12)</sup> を利用している。シミュレータ内の時刻は、地球儀の自転に同期して変化するように制御される。アバタは地球儀上にあらかじめ用意したいくつかの装着点 (日本、中米、オーストラリア) に差し込み、身体を水平方向に、頭を鉛直方向に回転させることが可能である。

人形を地球儀に差し込むと、天体シミュレータはアバタの緯度・経度に対応した場所から見た天空の映像を表示し (地上視点)、その視線の方向は人形の頭と

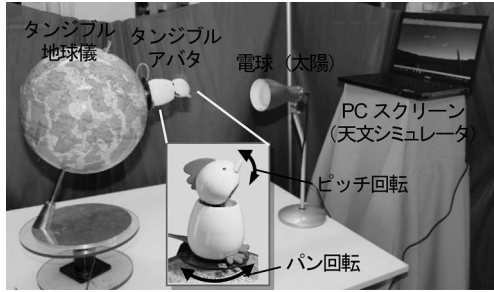


図1 タンジブル地球儀システム



図2 PC スクリーン上の方位と見上げ角の表示例（見やすさのため図中の文字の一部は上書きした）

身体の方きに対応するように制御される。このとき PC スクリーン上には、アバタの視線の方位と見上げ角が表示される（図2）。PC スクリーン内に太陽を表示するためには、アバタの顔の方きを太陽の方向に向ければよいことになる。太陽が画面の中央に表示されるように調整したときに画面に表示されている方位と見上げ角を読むことによって、太陽の方位と高度を計測することができる。この装置によって、学習者は地球の自転、アバタの姿勢、地球と太陽の相対的な位置関係、そして太陽の日周運動を関連付けて考えることができるようになることを期待している。

### 3.2 従来の問題点

筆者らは DBR に基づいてタンジブル地球儀システムが学習活動に与える影響を調べる実験を行ってきた。2012年につくば市内の中学2年生を対象として実施した学習では、学習者に太陽の日周運動の観察と記録を課題としたワークシートを渡し、2人1組または3人1組（合計7名）でタンジブル地球儀システムを操作しながら課題に取り組ませた。この課題で

は、地球儀とアバタを操作しながら PC スクリーンを観察することによって、日の出、正中、日の入りの時刻、方位、そして正中時の見上げ角度を調べさせた。このときの学習の様子を分析した結果、タンジブル地球儀システムに関するいくつかの問題点が明らかになった<sup>(10)</sup>。本節では、本論文に関連する二つの問題点のみを紹介する。

一つ目は「情報の提示位置の問題」である。この時の実験ではワークシートに解答する情報（時刻、方位など）をコンピュータディスプレイに表示していたため、学習者はディスプレイにのみ注目し、地球儀、アバタ、太陽の相対的な位置関係に注目しなかった。

二つ目は、「操作の問題」である。日の出や正中を観察するためには、PC 画面中央に太陽が見られるように、地球儀の回転とアバタの頭部の向きを調整しなければならない。しかし、学習者はこれらの対象物やそれら进行操作することの意味を考えようとせず、当てずっぽうに操作する様子が観察された。

これらの問題は相互に関連していた。情報の提示位置の問題により、学習者は本来注目すべき対象（地球儀、アバタ、太陽）をほとんど見なくなり、その結果として地球儀やアバタを、その意味を考えずに操作してしまうという操作の問題が発生したと考えることができる。このため、従来のタンジブル地球儀システムとそれを利用した学習手順は、身体化デザインの要件を満たしていなかったと考えられる。

これらの問題を改善する方法として、中高下らが提案した方法<sup>(13)</sup>を応用して、アバタの頭に小型カメラを内蔵させて、学習者がモニタを通して太陽の代替である電球を観察できるようにし、地球儀を回転させながら太陽の動きを観察させたり、太陽を画面の中心に捉えるようにアバタの姿勢を調整させたりする方法が考えられる。この場合、学習者に対して、電球が画面の中央に位置するようにアバタの姿勢を調整するように教示することによって、学習者が当てずっぽうにアバタや地球儀を操作しなくなる可能性がある。本研究ではこの方法の採用を検討したが、以下のことが懸念された。

- ・小型カメラを利用した方法では、モニタに表示される太陽の動きができるだけ実際の地上から見た太陽の動きに近くするために、地球儀と電球の距離

をなるべく離して設置する必要がある。装置を 1 台だけ使用して教師が演示をする場合にはそれが可能であるが、本研究では 2~4 人のグループ学習を目指しているため、1 教室に複数台の装置を設置しなければならない。そのため 1 台の実験用テーブルに装置一式を設置する必要がある。この場合、太陽と電球の距離が近すぎるため、太陽の動きが現実とは大きく異なるように見える可能性がある。

- 筆者らの以前の実践では、電球を太陽の代わりに使用した場合に、太陽光は地球に放射状に届いていると考えた学習者が多かった<sup>(10)</sup>。実際の電球の映像をカメラで撮影するシステムでは、こうした誤解がより強く発生する可能性がある。
- シミュレータを利用した場合は、天体運動の正確な表示が可能であるうえ、ソフトウェアの設定によって、表示する天体の見せ方の変更、太陽系俯瞰映像への切り替えなど、柔軟な変更が可能である。また、それらの異なる映像表現を相互に、時間的・空間的な整合性を保たせて正確に表示できる。

すなわち、小型カメラを内蔵する方法であっても、現在の問題点が改善されることは自明ではないと考えた。そこで基本的には現在のシステム構成を維持しつつ、身体化デザインの要件を満たすために、以下の 2 項目の改善を行ったうえで授業を実践することにより、知見を積み重ねることとした。

- アバタを改良することにより、アバタが地球上に立っている人の代理を果たしており、その視線方向が重要であることを意識できるようにする。
- 改良したシステムを利用した学習手順を新たにデザインすることによって、学習者がアバタの操作の意味を考えつつ操作できるようにする。

以下の 3.3 節ではシステムの改良について、3.4 節では学習手順の改善について説明する。

### 3.3 アバタの改良

アバタが人の代理であることとその視線方向を学習者が意識できるようにするために、

1. アバタの外観を変更する
2. 学習者の動作とアバタの動作を連動させる



図 3 改良したタンジブル地球儀システム

という二つの改良を行った。図 3 に改良したタンジブル地球儀システムの外観を示す。

一つ目の改良点として、ニワトリを模した外観から人を模した外観に変更し、視線方向がわかりやすいように、ピノッキオのような長い鼻を持たせた。また、アバタの下には 8 方位が記された円盤（方位盤）が取り付けられていたが、文字を大きくすることによって、地球儀にアバタを接続してアバタを回転させたときに、アバタがどちらの方位を向いているかがわかりやすくなるようにした。

二つ目の改良点として、アバタの首がチルト方向、身体全体がパン方向に回転するようにモータを組み込んだ。首の可動範囲は 0 度から 90 度で、身体のパン方向は無限に回転できるようにした。このアバタには、手で操作する手動操作モードと、学習者の動作と同期してモータ駆動される身体動作連動モードの 2 種類のモードを持たせた。身体動作連動モードにはタブレット端末（Microsoft Surface Pro 3）を利用した。この端末には天体シミュレータによる地上視点映像が表示されており、端末に内蔵されている地磁気センサと加速度センサを利用することによって、学習者が端末を持って上下に動かしたり左右に身体を水平回転させたりすると、それと連動して地上視点映像の方向とアバタの向きが制御されるようにした（図 4）。学習者の身体の（実際にはタブレット端末の）水平回転方向の検出にはタブレット端末の地磁気センサを使用しているため、実際の学習環境内において身体が向いている方位が、地球儀上ではどの方向であるのかということアバタの身体の向きから確認することが可能となる。



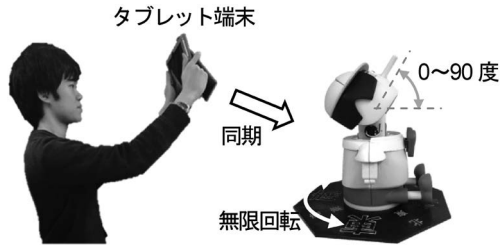


図4 改良したアバタ

手動操作と身体動作連動の2種類のモードの切り替えは、タブレット端末に表示されているボタンに学習者自身がタッチすることによって行えるようにした。手動操作モードの場合には、端末を机の上に置いて地上視点映像を観察させることとした。

以上のようにアバタの改良によって学習者の姿勢とアバタの姿勢が連動するようになったため、アバタの姿勢が地球上の人の姿勢を代理しているのだということ、アバタの視線は天空を見上げている自分の視線を表しているのだということを学習者が強く意識できるようになること、そしてそれによって、学習中に操作の問題が発生することが抑制されることを期待した。

### 3.4 学習手順

本節では、改良型のタンジブル地球儀システムを利用した学習手順を概説する。ただし、本研究はDBRの手法に従っているため、実験の過程で適宜学習手順を変更する。後述する実験では、同じ日の午前と午後2回実験を実施したが、2回目の実験では1回目とは学習手順を変更した。したがって、本節で説明する学習手順は、1回目だけに適用された。なお、学習手順の策定においては、中学校理科教員の経験がある共著者と、実験を実施した中学校の理科教員の指導を受けた。

#### 3.4.1 学習環境

理科実験用のテーブルの上に、タンジブル地球儀システムと太陽に見立てたライトを配置する。手動操作モードでは、地上視点映像を表示するタブレット端末は、テーブルの上の適当な位置に置く。身体動作連動モードでは、東西南北が記されたマット(方位マット)を、地球儀が置かれたテーブルのすぐ脇の床に、その実空間における東西南北の方向に合うように敷く。そ

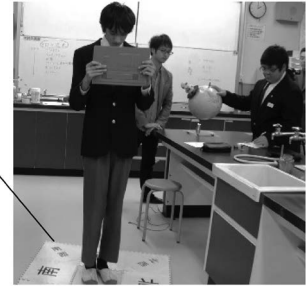


図5 身体動作連動モードと方位マット

して、学習者はその中心に立ってタブレット端末を空間にかざし、腕を上下に動かしたり身体を水平方向に回転させたりしながら、タブレット端末に表示される地上視点映像および自分に連動して動作するアバタを観察する(図5)。

方位マットは、こうした活動中にいつでも自分の実世界における方位を瞬時に確認できるようにするための補助として使用される。この環境において、地球儀を回転させて、日の出、正中、日の入りの順に時間を進めながら、太陽がタブレット端末の画面内に表示されるように学習者が姿勢を変えていけば、学習者は太陽のおおよその軌道を身体の動きとして体験できる。また、その際に実空間で自分が向いている方位や仰角と、地球儀上のアバタの姿勢が一致していることを確認すれば、学習者にアバタが自分の代理であることを強く意識させられることが期待される。

#### 3.4.2 プレテストとポストテスト

生徒たちの知識レベルを確認するために、プレテストとポストテストを実施する。プレテストでは、太陽の日周運動の軌道、地球の自転の向き、地球儀上の日の出と日の入りの位置、地球儀上の東西南北、日本における日の出と日の入り時の太陽の軌跡に関する問題を出题する。ポストテストはプレテストと全く同様の問題に加えて、オーストラリアでの日周運動の軌道を問う問題も出题する。

#### 3.4.3 学習の手順

本学習は中学2年生を対象としたため、太陽の日周運動に関する授業は受けていないことを前提としている。そこで、今回の学習に必要な最低限の知識を学習者に与えるために、最初に簡単な講義を行う。この講義では、地球儀を使いながら(この際、地球儀の電

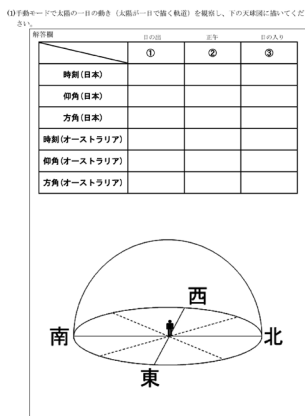


図6 ワークシート

子的な機能は使わない), 地球の自転方向, 地軸が傾いていること, 夏至における地球と太陽の相対位置, 地球儀における日の出と日の入りの位置, 地球儀上の16方位について解説する. 次に, タンジブル地球儀システムの使い方について解説する. 特に, 身体動作連動モードについては, 学習者にタブレットPCを持たせて連動動作を体験させつつ, 自身がタブレットPCを見上げている姿勢とアバタの姿勢が一致していることを確認させ, アバタが学習者の代理であることを理解させるように努める.

次に, 生徒たちは2人1組のグループとなり, システムを利用してワークシートに書かれた二つの課題に取り組む. ワークシートの一部を図6に示す. この課題では, 日本とオーストラリアの6月21日(夏至)における日の出, 正中時, 日の入りの時刻, 仰角, 方位を調べさせるとともに, 一つの天球図に日本とオーストラリアにおける太陽の軌道を描かせる. 生徒たちは, アバタを日本やオーストラリアに取り付け, 太陽との相対的な位置を考慮しながら地球儀を回転させて, アバタを日の出, 日の入り, 正中の位置に移動させる. そしてアバタを操作しつつ, 太陽の動きをタブレット端末画面上で観察し, 課題に回答する.

これらの観察では, まずアバタを手動操作した場合(手動操作モード)で一つの課題を行わせる(図6のワークシート). 次に身体動作に連動させた場合(身体動作連動モード)で, 二つ目の課題を行わせる. ワークシートは, 手動操作モード用の課題と身体動作連動モード用の課題で, 独立したページとする. 身体

動作連動モードは, 1人の学習者が方位マットの中心に立ってタブレットの操作を行い, もう1人の学習者は地球儀を操作する. 日本における観察とオーストラリアにおける観察では, タブレット端末の操作者を交代させ, 学習者全員が操作を体験できるようにする.

身体動作連動モードでは, 手動モードで行った観察をもう一度繰り返すことになる. これは, 手動操作モードの時に理解できない事象がある場合に, その後の身体動作連動モードでどのように改善されるかと言うことを観察的分析によって明らかにできるようにするためである.

### 3.4.4 過去の学習手順からの変更点

この学習手順が, 以前のタンブル地球儀システムを利用して実践した学習の手順と異なる点は, 身体動作連動モードに関連した学習を追加する点である. 具体的には, グループ学習の前の身体動作連動モードの体験と, グループ学習中の身体動作連動モードでの観察が追加される. 身体動作連動モードによって, 学習者の身体的動作とアバタの動作が一致することを観察させることによって, アバタは自分の代理であることを認識させ, これによって意味を考えずにアバタを操作するような事例が減少することを期待する.

## 4. 実験1

実験はつくば市内の中学校の理科教室において実施した. 実験期間は1日のみで, 午前と午後の2回実施した. 本論文では午前実施した実験を実験1と呼び, 午後実施した実験を実験2と呼ぶこととする. これらの実験では, 午前の実験1の様子を観察した結果, 問題点が明らかになったため, 午後の実験2では学習の手順を変更することとなった. そこで本論文では, まず本章で実験1について結果と考察を示し, 次章で実験2の結果と考察を示す.

なお, これらの実験は筑波大学システム情報系の研究倫理審査において承認されている.

### 4.1 実験参加者

実験日の実験参加者は, 実験を実施した中学校の理科部に所属する2年生の男子8名で, そのうちの4名が実験1に参加し, 残りの4名は実験2に参加した.

実験は2人1組のグループ学習とした。

#### 4.2 実験手順

参加者にはまずプレテストを受けさせ、すぐに採点をした。そして、できるだけ点数の近い2人でグループを構成するようにした。その後、3.4.3節に示した手順に従って学習活動を行わせた。学習活動中は、3名のインストラクター(大学教員2名, 大学院生1名)が常に巡回し、装置の操作の仕方、ワークシートの手順について助言を与えたり、参加者の思考過程について質問をしたりした。ただし、ワークシートの解答を直接教えることはしなかった。活動が終了した後は、ポストテストを受けさせた。

これらの実験の様子は1グループにつき2台のビデオカメラで撮影し、後の分析に利用した。

#### 4.3 実験結果と考察

本論文ではDBRの枠組みに従い、主に観察的な分析に基づいて考察をする。

プレテストとポストテストの平均正解率はそれぞれ54%と46%(標準偏差はそれぞれ6.9%と5.1%)であり、実験1の参加者においては、ポストテストの正解率のほうが低い結果となった。不正解だった問題は参加者によって異なるが、東西南北の位置関係、日周運動の方位、太陽と地球を俯瞰したときの日の出と日の入りの位置について、正しく解答できない傾向が見られた。実験参加者が少ないため統計的な議論はできないが、本学習活動の効果が高くなかったことがうかがえる。

実験1のビデオデータを分析すると、学習中に参加者たちがアバタに注目していない様子が多く観察された。図7は、グループ1の参加者が、タブレット端末の画面を見ながら地球儀を操作して、日の出を観察しようとしている場面である。このときP1が地球儀を操作し、P2はディスプレイを観察している。P1は最初、地球儀を回転させて日の出の3時間後付近にアバタを適当に移動させるが、すぐにタブレット端末に注目してしまい、アバタと太陽(電球)の位置関係についてよく考えないまま地球儀をゆっくり逆回転させており、望む結果を得るのに手間取っていた。このような傾向は、二つのグループに共通して見られた。



図7 両参加者がタブレット端末のみに注目してしまう場面



I1: 朝どの辺ですか?  
 P3: 朝こっち?  
 P4: 違う違う違う逆逆

図8 タブレット端末の情報に頼る場面

図8は身体動作連動モードにおいて、オーストラリアの日の出の観察をしようとしている場面である。インストラクターのI1が、朝の位置にアバタを移動するように要求したのに対してP3は地球儀を自転方向とは反対の方向に回転させて、日の入りの位置にアバタを動かし、P4にこの位置で合っているかを聞いていた。この場面においても、P3は地球の自転方向について考えずに、タブレット端末を持っているP4に頼っている様子であった。

このように、実験1において参加者はタブレット端末に注目することが多く、アバタにあまり注目しないという「情報の提示位置の問題」が多く観察された。またこれに伴って、アバタをどの方位に向けるべきかということや、地球儀をどの方向にどの程度回転させるべきかと言うことを深く思考しないという「操作の問題」も生じていた。すなわち実験1における参加者には、身体化デザインで主張されているような、理由を考えたり再調整をしたりしながら、道具に対する

動作を変更して望む効果を得ようとするという様子がほとんど観察されなかった。

以上の考察から、ポストテストにおいて方位に関する問題の正解率が低かった理由は、タブレット端末に表示されている情報を安易に利用してしまったために、アバタの方位盤や、アバタ、地球儀、そして太陽の相対的な位置について思考する必要がなくなったため、方位、自転の方向、日の出と日の入りの位置に関する操作が内化しなかったからである可能性がある。

実験に参加していたインストラクターが実験1の最中にこうした問題点に気づいたため、実験2では学習手順を変更することとした。すなわちタブレット端末を安易に参加者に見せず、まず地球儀とアバタのみを操作して、どのようにすれば所望の位置に太陽が表示されるかを予想させることとした。

## 5. 実験2

### 5.1 学習手順の再デザイン

実験2では、手動操作モードで日の出、正中、日の入りを観察する際に、日本とオーストラリアについて以下の手順を行う。

1. タブレット PC を伏せることによって、画面が見えないようにする。
2. 日の出、正中、日の入り、それぞれに適切であると予想される姿勢になるように、参加者にアバタと地球儀を操作させる。
3. 正しい位置と向きにアバタを調整できたと参加者が判断したあとに、タブレット PC を起こして、シミュレータがおおよそ予想どおりの時刻を示し、太陽が予想どおりの位置にあること（例えば、日の出の場合には朝の時刻で、東の地平線近くに太陽があること）を確認させる。
4. 地球儀とアバタを微調整しながら太陽が所望の位置になるようにして、タブレット端末の画面から、時刻や方位をワークシート（課題1）に書き写させる。

次に、身体動作連動モードにおいて、以下の手順を日本とオーストラリアそれぞれについて行う。ただし、タブレット端末の操作者は、日本とオーストラリアで交代させる。

5. まず、手動操作モードに設定し、参加者に何も表示されていないタブレット端末を持たせ、方位マットの中心に立って、日本、オーストラリアそれぞれの太陽の1日の動きを自身の身体の動作で予想させる（太陽の日周運動の軌跡に沿ってタブレット端末を動かす）。
6. タブレット端末にシミュレータの画面を表示し、身体動作連動モードに設定してから、日の出、日の入り、正中を観察させ、ワークシート（課題2）に書き写させる。

### 5.2 実験結果と考察

実験2の参加者4名（2グループ）を対象として実験を行った。プレテストの正答率は平均50%で、ポストテストの正答率は平均82%（標準偏差はそれぞれ6.9%, 9.3%）となり、実験前と比較して基礎的な知識が定着した可能性がうかがえた。

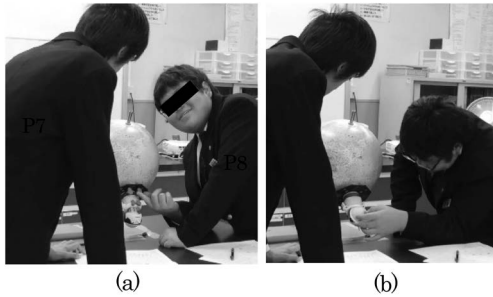
実験1とは異なり、実験2では参加者がアバタ、地球儀、そして太陽の関係を考えながら予想を立てている様子が観察された。図9は、オーストラリアにおける正中のときの、地球儀とアバタの姿勢を予想している場面である。P5とP6は2人同時にアバタに触れて操作をしたあと、P6がアバタの顔の位置から太陽を見ることによって、アバタの視線方向が太陽に向かっていることを確認していた。

図10は、別のグループがオーストラリアにおける正中を観察しようとしている場面である。まずP7は、アバタは南を向くはずであると考えて、「南」と言いながらアバタを操作して太陽が見える姿勢にした。このとき、P8も一緒にアバタに注目していたが、アバ



図9 アバタと太陽の関係に注目している場面





P8:北なの？ (a)  
 P7:北なの？ どういうことだ  
 P8:あのお・・・こっちじゃねーの。  
 P7:わお  
 P8:こっちの、こう・・・ (b)  
 P7:見えねー、絶対見てないでしょうこれ太陽。

図 10 オーストラリアの正中について試行錯誤する場面

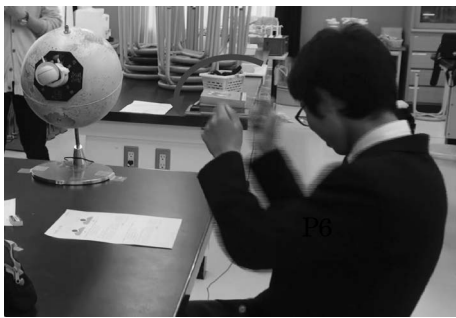


図 11 タブレット端末を動かす動作を模擬する場面

タの足下の方位盤を見ることによって2人同時にアバタが北を向いていることに気がついた。その後P8が方位盤を指さしながら、「北なの？」と改めてP7に問いかけた(図10(a))。その後、P8はアバタが南に向くように回転させ、首を持ち上げて太陽が見られるような姿勢にしようとしたが、アバタの首が90度で止まってしまったためアバタの視線を太陽の方向に向けることができなかった(図10(b))。このことにより、オーストラリアにおいてはアバタが南を向いたのでは太陽を見ることができず、太陽は北に正中することを理解したのである。

これらの例から、タブレット端末を見ずに、参加者がアバタと地球儀のみから予想をする段階を設けたことによって、グループの2人ともアバタや地球儀に

対して注目し、地球儀、アバタ、そして太陽との相対的な位置関係を意識し、これらに対してさまざまな動作を行うことによって、理解が促進されている様子がうかがえた。

図11はP6がポストテストに解答している最中に、日の出や日の入りのときの太陽の動きを思い出すために、身体動作連動モードのときにタブレット端末を持って行った身体の動きを再現している場面である。実験2では、参加者は何も表示されていないタブレット端末を持って、太陽の日周運動を予想しながら動作をするという経験をしている。こうした、試行錯誤による動作によって、ある程度動作が内化した可能性がある。

## 6. 考察

本章では、本論文の議論を総合的に考察することによって、タンジブル学習環境を利用した学習手順に関する知見をまとめる。

実験1と実験2で異なっていたのは、アバタや地球儀を操作している最中に、それらの位置や姿勢に基づいて思考をしているか否かであった。実験1では、タブレット端末の画面を常に参照できるようにしたことによって、単に画面内で答えを探すことが目的となり、アバタと地球儀は画面を操作するコントローラの役割しか果たさなくなっていたようである。少なくとも、地球儀の操作は時間を変化させ、アバタの操作は視線方向を変化させることは理解し、直感的に操作できていたと考えられるが、地球儀とアバタの操作の意味について理解しながら操作をするということができていなかった。これは、適切な学習手順が提供されない場合、タンジブルユーザインタフェースという直感的なユーザインタフェースが、かえって参加者の思考を阻害したとも考えられる。このことから本論文では「適切な学習手順が提供されない場合、タンジブルユーザインタフェースの直感的な操作性が、かえって学習者の思考を阻害する可能性がある」という知見が得られたと考える。

これに対して実験2では、まずタブレット端末を見せずに地球儀とアバタの操作のみで予想させたことによって、地球儀とアバタが太陽(電球)との位置関

係において、どのような姿勢を取るべきかということについて思考しながらアバタと地球儀を操作することができていたようである。また、図 10 の例にも見られるように、太陽は南に正中するという自分の予想とは異なる結果が生じた際に、アバタを南方向に向けて首を垂直まで回転させるという試行錯誤をすることによって、オーストラリアでは太陽は北に正中するという正しい理解へと結びつけることができていた。また、図 11 の例は、思考しながら動作をさせたことによって、その動作がある程度内化した可能性を示している。従って、実験 2 においては、動作をしながら思考、理解させることによって理解が促進され、動作が内化されるという身体化デザインの要件が支援できていた可能性が見られた。これらの考察から、タンジブル学習環境を利用した学習手順においては、「教師はまず学習者に提供する情報を制限し、注目させたい人工物を操作させながら試行錯誤し、結果を予測させることが効果的である」という知見が得られたと考える。こうすることによって、身体化デザインの考え方に適合した、効果的な学習手順をデザインできる可能性が高くなると考えられる。

## 7. 結論

本論文ではタンジブル地球儀システムを利用した天文学習の実験を分析することによって、タンジブル学習環境を効果的に利用する学習手順に関する知見を得ることを目的とした。身体化デザインの考え方に基づいて観察的な分析を行った結果、適切な学習手順が提供されない場合、タンジブルユーザインタフェースの直感的な操作性が、かえって学習者の思考を阻害する可能性があることがわかった。また、学習時にはまず学習者に提供する情報を制限し、注目させたい人工物を操作させながら試行錯誤させ、結果を予測させることが効果的である可能性が示された。今後はさらにさまざまな学習計画に基づいて実験を行い、情報を制限した状態から、どのように足場かけをすると効果的であるかを明らかにする必要がある。また、現在のタンジブル地球儀システムの仕組みに限らず、小型カメラを利用する方法など、多様な天文学習教材を利用して同様の実践を行い、相互に比較する必要がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費基盤研究(B)26282030 および基盤研究(B)26282045 の助成を受けて実施した。本研究を進めるにあたりご協力いただいた黒澤明良校長、および長田典子教諭に感謝する。

## 参考文献

- (1) Atwood, R. K. and Atwood, V. A.: "Effects of Instruction on Preservice Elementary Teachers' Conceptions of the Causes of Night and Day and the Seasons", *Journal of Science Teacher Education*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-13 (1997)
- (2) Shelton, B. E. and Hedley, N. R.: "Using Augmented Reality for Teaching Earth-Sun Relationships to Undergraduate Geography Students", in *Proceedings of the First International Augmented Reality Toolkit Workshop*, 8 pages (2002)
- (3) Young, T., Farnsworth, B., Grabe, C. et al.: "Exploring New Technology Tools to Enhance Astronomy Teaching & Learning in Grades 3-8 Classrooms: Year One Implementation", in *Annual Meeting of the Association for Science Teacher Education*, pp. 4556-4567 (2012)
- (4) Morita, Y. and Setozaki, N.: "Practical Evaluation of Tangible Learning System: Lunar Phase Class Case Study", in *Proceedings of SITE 2012*, pp. 3718-3722 (2012)
- (5) Yamashita, J., Kuzuoka, H., Fujimon, C. et al.: "Tangible Avatar and Tangible Earth: A Novel Interface for Astronomy Education", in *CHI2007 Extended Abstract*, pp. 2777-2782 (2007)
- (6) Moher, T., Hussain, S., Halter, T. et al.: "RoomQuake: Embedding Dynamic Phenomena within the Physical Space of an Elementary School Classroom", in *Proceedings of CHI 2005*, pp. 1655-1668 (2005)
- (7) Suzuki, H. and Kato, H.: "Interaction-Level Support for Collaborative Learning: AlgoBlock—An Open Programming Language", in *Proceedings of CSCL '95*, pp. 349-355 (1995)
- (8) Price, S.: "A Representation Approach to Conceptualizing Tangible Learning Environments", in *Proceedings of TEI 2008*, pp. 151-157 (2008)
- (9) Collins, A., Joseph, D. and Bielaczyc, K.: "Design Research: Theoretical and Methodological Issues", *Journal of the Learning Sciences*, Vol. 13, No. 1, pp. 15-42 (2004)
- (10) 葛岡英明, 鈴木靖幸, 山下直美, 加藤 浩, 鈴木栄幸, 久保田善彦: "天文学習のためのタンジブル学習環境に"

関するデザイン原則の検討”, 日本科学教育学会「科学教育研究」, Vol. 38, No. 2, pp. 65-74 (2014)

- (11) Abrahamson, D. and Lindgren, R.: “Embodiment and Embodied Design”, in Sawyer, R. K. (Ed.), “The Cambridge Handbook of the Learning Sciences (2nd edition)”, Cambridge University Press, Cambridge (2014)
- (12) 国立天文台: “4D2U Project Website”, <http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/> (参照 2014.3.3)
- (13) 中高下 亨, 前原俊信, 永田邦生, 山手圭子: “天体運動に関する教材の開発と実践—小型 CCD カメラを搭載した地球儀—”, 日本理科教育学会全国大会要領, Vol. 49, p. 241 (1999)

### 著者紹介



**葛岡 英明**  
1992年東京大学大学院博士課程修了。工学博士。2006年より、筑波大学教授。現在に至る。CSCW, HCIの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本ロボット学会, 日本科学教育学会会員。



**木村 諒**  
2014年山形大学工学部卒。同年筑波大学大学院博士前期課程入学。



**田代 祐己**  
2016年筑波大学工学システム学類卒。同年同大学大学院博士前期課程入学。現在に至る。



**久保田 善彦**  
1989年東京学芸大学教育学部卒。2006年兵庫教育大学大学院連合学校教育学研究科博士課程修了。博士(学校教育学)。2013年より宇都宮大学教授。現在に至る。理科の授業改善の研究に従事。2015年日本教育工学会論文賞受賞。教育工学会, 科学教育学会, 理科教育学会各会員。



**鈴木 栄幸**  
1988年慶應義塾大学大学院社会学研究科修士課程修了。2009年総合研究大学院大学博士後期課程修了。博士(学術)。2007年より、茨城大学人文学部教授。現在に至る。協調学習システムの研究開発に従事。教育システム情報学会, 日本教育工学会, 科学教育学会他会員。



**加藤 浩**  
1983年慶應義塾大学大学院工学研究科修士課程修了。1996年東京工業大学博士後期課程修了。博士(工学)。2009年より、放送大学教授。現在に至る。協調学習システムの研究開発に従事。ヒューマンインタフェース学会, 日本教育工学会学会, ACM 他会員。



**山下 直美**  
1999年京都大学工学部情報工学科卒業。2001年京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年、日本電信電話(株)コミュニケーション科学基礎研究所入所。博士(情報学)。CSCW, HCIの研究に従事。