

## 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

葛岡 英明  
筑波大学 システム情報系

鈴木 靖幸  
筑波大学 システム情報工学研究  
科

山下 直美  
NTT コミュニケーション科学基礎  
研究所

加藤 浩  
放送大学 ICT 活用・遠隔教育セ  
ンター

鈴木 栄幸  
茨城大学 人文学部

久保田 善彦  
宇都宮大学 教育学部

---

### Thoughts on Design Principles for Tangible Learning Environment for Astronomy Education

Hideaki KUZUOKA\*1, Yasuyuki SUZUKI\*1, Naomi YAMASHITA\*2, Hiroshi KATO\*3, Hideyuki SUZUKI\*4, Yoshihiko KUBOTA\*5

\*1University of Tsukuba

\*2NTT Communication Science Laboratories

\*3The Open University of Japan

\*4Ibaraki University

\*5Utsunomiya University

Astronomy education is particularly difficult because it requires learners to grasp multiple perspectives of celestial motion and reach a meta-level understanding by combining these perspectives. To enhance the understanding of various astronomy education perspectives, we developed a tangible learning environment called the tangible earth system. In this paper, we report on a case study in which we used our tangible earth system as an educational tool in a collaborative learning environment. Based on Price's (2008) assessment framework, we identified design problems that impede learners from collaboratively understanding celestial concepts. For example, the tangible interface's physical nature often hindered learners from grasping multiple perspectives and exchanging competent interpretations, misleading them into making incorrect judgments. Based on our analysis, we discussed design principles to alleviate the problems of location, dynamics, and correspondence parameters.

Keywords: astronomy education; educational technology; tangible user interface; tangible learning environment

---

#### I はじめに

天文分野の教育の中でも、太陽の日周・年周運動に関する領域は学習が難しく、小学校教師志望の大学生でさえも、十分に理解できていないという報告さえある (Atwood & Atwood, 1997). これは、天文学における概念を形成するためには非常に大きな縮尺を扱わなければならないとともに、複数の視点から観察した

結果を統合する必要があるためである (Young et al., 2012). 例えば、太陽の日周運動や年周運動を正確に理解するためには、太陽と地球の時間的・空間的な関係について、俯瞰的な視点と地上からの視点の統合が必要とされる (Morita & Setozaki, 2012; Shelton & Hedley, 2002).

このように困難な天文学習を支援するために、本研

究ではタンジブルユーザインタフェース (TUI) を利用する。すでに地球儀が天文学的な概念を学習するのに有効であることが示されており (Atwood & Atwood, 1997; Morita & Setozaki, 2012; Vosniadou et al., 2004), この地球儀の機能を拡張して, 複数視点の統合を支援できるようにすれば, 天文学に関する概念の形成を効果的に支援できると考えられる。TUI を教育に利用した学習環境は, 地震学 (Moher et al., 2005), 基礎的なプログラミング (Suzuki & Kato, 1995; Zuckerman et al., 2005), 職業訓練 (Schneider et al., 2011) などに利用され, 共同学習に対する効果も示されているが (Gokhale, 1995; Zakaria, 2009), 天文学に応用された例は少ない (Morita & Setozaki, 2012)。

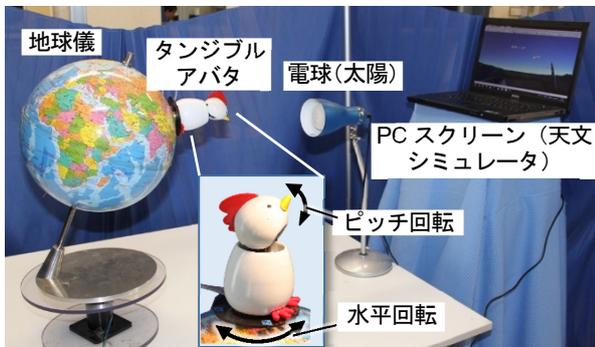


図 1. タンジブル地球儀システム

我々は TUI の考え方にに基づき, 学習者の太陽と地球の時間的・空間的な関係の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 (図 1)

(Yamashita et al., 2007). このシステムは, タンジブル地球儀, 人形 (以後, タンジブルアバタ), 太陽を模擬する電球, そして PC 画面から構成される。PC 画面には地上から見た天空映像の CG 画面を表示する。

筆者らはいくつかの中学校の授業において, このシステムの有効性を確認するための実験をおこなってきた。筆者らの非公式な観察に基づけば, いずれの場合も, このシステムに対する生徒や教員の評判は非常に良かったが, 授業を観察していると, 必ずしもシステムが表現しようとしている現象が生徒達に正しく理解されない場面も見られた。しかしこれらの実験では, タンジブル地球儀システムを使用するグループと使用しないグループにおける学習効果の違いを, プレテストとポストテストの結果から定量的に比較することを目的としていたため (久保田ほか, 2010), 生徒たちが

システムで観察した結果をどのように理解していたのかということについて, 詳細な分析をしていなかった。

そこで, 本研究ではデザインベースドリサーチ (Design-Based Research, 以下 DBR) (Collins et al., 2004) に基づいた実験を実施し, タンジブル地球儀システムが学習者に対してどのような問題を与えているのかということを観察的に分析するとともに, 天文学を支援するタンジブル学習環境のデザイン原則に関して検討することを目的とした。ただし, このデザイン原則の正当性や, それに基づいたシステムの改良案の効果を検証するためには, 実際にシステムの改良, 実験, そして分析をすることが必要となるため, 本論文ではこれらは仮説として提示する。本稿では, まず本研究における分析の枠組を説明し, 次にタンジブル地球儀システムについて解説する。そして, 今回実施した観察的研究について述べ, 最後にその分析から得られた知見に基づいて, 天文学を支援するタンジブル学習環境のデザイン原則と, それに基づいたシステムの改良案を検討する。

## II 分析の枠組み

### 1 DBR

DBR は従来の実験室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。Collins ら (2004) によれば, 実験室実験は特定の変数が学習に与える効果を確認するには効果的であるが, 教育的介入が成功するための要因を詳細に理解するには適していない。この問題を補うために, 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おこな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ーが用いられる。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 (TDBRC, 2003)。この目的を効果的に達成するために, デザイン, 実践, 分析, そして再デザインを継続的に繰り返す (図 2)。

本研究では, この繰り返しの最初の 1 巡目を実施することによって, タンジブル地球儀システムが学習活動にどのように影響するのかということを明らかにするとともに, 天文学を支援するタンジブル学習環境のためのデザイン原則について検討することを試みる。このサイクルを繰り返して, デザイン原則の有効性と汎用性を徐々に高めることが, 将来的に汎用的な学習理論を導くことにつながると期待している。ここで,

本論文における「デザイン」とは、タンジブル学習環境の装置のデザインと、それを利用した学習の手順のデザインの両方を意味するものとする。

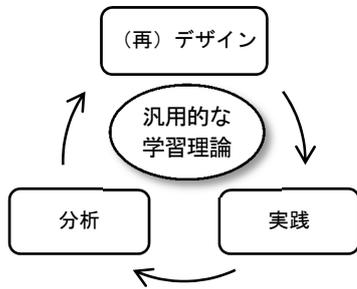


図 2. DBR における繰り返しサイクル (TDBRC (2003) に基づき著者らが作成)

## 2 分析のための視点

DBR を実施するためには、学習デザインの目的と、その目的を達成するための要因を研究者が認識することが重要である (Collins et al., 2004). そこで本節では、タンジブル地球儀システムの目的と、目的達成のための要因について考察する。

### a 学習デザインの目的

太陽の日周運動と年周運動は、日本では中学校で学習する単元である。中学校学習指導要領解説によれば、中学校における天文学習の目的は、天体の日周運動や年周運動の観察、およびその結果を図やモデルを使って解釈・説明させることによって、思考力や表現力を育成することである (文部科学省, 2011). さらに、それらの活動を通して時間概念や空間概念を形成し、天体の位置や運動を相対的なものとしてとらえることができる考え方を養うことである。そこで本研究においてもこの目的に従って学習をデザインした。

### b タンジブル学習環境の要件

教育工学の分野では、すでにいくつものタンジブル学習環境が開発されている (Cuendet & Dillenbourg, 2013; Schneider et al., 2011; Suzuki & Kato, 1995). このようにタンジブル学習環境が注目されるのは、物理的な実体を利用することによって、学習者が考える間違った仮説などを、物理的な実体の状態として外在化させることが可能となるからである (Schneider et al., 2011). さらに、システムが複数の観察対象 (実体とディスプレイなど) から構成されている場合には、複数の表現を統合して考えられるため、学習内容をよりよく理解することにつながることも期待できる。

タンジブル学習環境の研究が増えるに従って (Moher et al., 2005; Morita & Setozaki, 2012; Zuckerman et al., 2005), そのデザインをガイドするための概念的な枠組みに関する議論もおこなわれるようになってきた (Marshall, 2007; Price, 2008). とくに Price (2008) の概念フレームワークは、タンジブル学習環境における外部表現 (external representation) の種類と、それらが学習に与える影響に関する視点を提供している。

天文教育の目的は、学習者が複数の視点からの観察結果を統合することによって、時空間的な概念を学習することである。そこで筆者らは、Price (2008) の概念フレームワークに従って、そのような学習を効果的に進められるタンジブル学習環境はどのようにデザインされるべきか、というデザイン原則を確立することを目指す。Morita (2012) らもタンジブル太陽系学習教材を用いた実験を通して、その効果について複数の研究成果を発表しているが、筆者らの知る限り、デザイン原則に関して検討することを主目的とした議論はおこなっていない。

Price (2008) の概念フレームワークでは、デジタル情報と物理的な実体の関連づけにおける様々な手法が、学習におけるインタラクションや認知に与える影響を体系的に調査することによって、実体の外部表現が学習に与える影響を議論している。このフレームワークでは、パラメータとして、「位置 (location)」、「動作 (dynamics)」、「対応 (correspondence)」、そして「モダリティ (modality)」を挙げている。以下に各パラメータについて簡単に解説する。

「位置」パラメータとは、物理的な実体とデジタル表現の位置関係に関する考え方である。タンジブルな実体とデジタルな出力が離れた位置関係にあれば、「分散 (discrete)」、隣り合っていれば「隣接 (co-located)」、デジタル表現がタンジブルな実体の中に埋め込まれていれば「組み込み (embedded)」と呼ぶ。

「動作」パラメータは実体とデジタル表現との関係性に関する考え方である。デジタル表現の変化を、実体に対する操作によって、意図的にコントロールすることができる場合から、あらかじめ定義された実体の動きや配置をトリガーとして、学習者にとって予測できない形態でデジタル表現が変化する場合までである。

「対応」パラメータは、実体の特徴がどの程度学習する概念に近い対応付けがなされているかという程度

に関する考え方である。実体が共通的な記号である場合は「記号的 (symbolic)」と分類する。たとえば単純な直方体を実体として使った場合、直方体は様々な概念を表現するために使用することができる汎用的な形状であるため、記号的であるということができる。これに対して、実体の特性が、それが表現する対象に近い場合には、「リテラル (literal)」に分類する。たとえばタンジブル地球儀システムにおける地球儀はリテラルな実体であるということができる。

「モダリティ」パラメータは視覚的な表現以外の、音声や触覚といった表現と、それらの教育に対する効果に関する議論である。

本研究では、DBRの端緒として、タンジブル地球儀システムにおいてこれらのパラメータに基づいた分析をおこなう。ただし、タンジブル地球儀システムでは視覚的表現しか用いていないため、本論文では「モダリティ」以外の3つのパラメータのみに注目する。

### III システムの概要

タンジブル地球儀システムは、タンジブルアバタ、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)を提供し、天空上の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(国立天文台, 2005)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。タンジブル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タンジブルアバタの緯度・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身体の向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、タンジブルアバタの視線の方位と見上げ角が表示される(図3)。PCスクリーン内に太陽を表示するためには、タンジブルアバタの顔の向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、タンジブルアバタの姿勢、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。

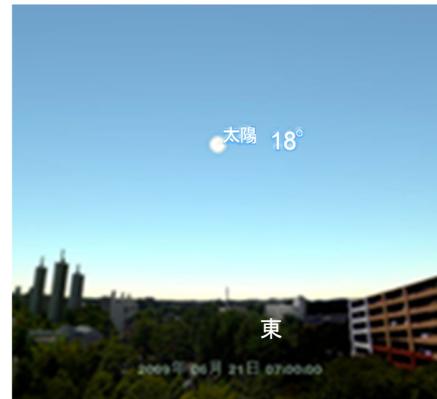


図3. PCスクリーン上の方位と見上げ角の表示例

本システムと同様に天文学習を支援するシステムに、Moritaら(2012)のタンジブル太陽系学習教材がある。これは月の満ち欠けや、惑星間の関係を学習するのに適しているのに対して、本システムは地球儀上のタンジブルアバタを採用することによって、太陽の日周運動を学習するのに適している点異なる。

### IV 天文学習の実践

DBRにおける実践フェーズとして、中学生を対象とした実験を実施し、観察的な分析をおこなった。この実験はつくば市内の中学校で、理科クラブの活動として実施された。この学習では、北半球と南半球において太陽の日周運動が異なる理由を理解させることを目的とした。この学習において生徒たちは2~3名のグループを組み、タンジブル地球儀システムを使いながらワークシートの課題に取り組んだ。

#### 1 実験環境および実験参加者

筆者らはタンジブル地球儀システムを利用して数年間に渡って実験授業を実施しつつ(久保田ほか, 2010)、その経験に基づいて地球儀、電球、PCスクリーンの配置を調整してきた。その結果本実験では図1に示すように、地球儀、電球、PCスクリーンを直線状に並べる配置を採用した。これは、地球儀やタンジブルアバタを操作しつつ、PCスクリーンを見たときに、自然に電

球（太陽）が目に入るため、常にすべての要素に注意を向けつつ観察ができるようになることを期待したためである。

実験授業はつくば市内の中学校の理科教室において実施され、参加者はその中学校に通う 2 年生の生徒 7 名であった。生徒たちは 3 グループに分かれたが、グループ内の会話がしやすくなることに配慮し、グループ構成は生徒たちに自主的に決めさせた。その結果、各グループの構成は、男子 2 名、男子 3 名、女子 2 名となった。

## 2 実験方法と分析

生徒たちの知識レベルをある程度そろえるために、学習活動の最初に、天文学の基礎的な知識に関する講義を実施した。この講義で、地球儀上の東西南北の方向、地球の自転方向、地軸の傾きについて解説した。また、タンジブル地球儀システムの操作方法についても、この時点で生徒に教示した。

次に、生徒たちはワークシートを渡され、システムを利用して解答する 7 つの課題に取り組んだ。この課題では、①地球の自転方向の図示、②地球儀上の東西南北の方向の回答、③日本の 6 月 21 日（北半球における夏至）における日の出の方位の回答、④日本の 6 月 21 日における日の入りの方位の回答、⑤日本における太陽の正中方位と南中高度の回答、⑥日本の天球図における太陽の軌道の図示、⑦オーストラリアにおいて課題①～④と同様の観察をし、オーストラリアの天球図における太陽の軌道の図示、を求められた。生徒たちは、タンジブルアバタを日本やオーストラリアに取り付け、日の出、日の入り、正中を観察し、その結果に基づいて解答した。

学習中の生徒の活動は班ごとに 2 台のビデオカメラで撮影された。分析では、2 名の研究者が個別に録画データを観察し、Price (2008) の概念フレームワークの観点からビデオデータにコメントを付与した。その後、研究者同士でディスカッションをすることによって、システムの問題点や改善案をまとめた。

## V 分析結果

DBR の分析フェーズとして、ビデオ分析を実施した。その結果、生徒の 1 人が地球儀やタンジブルアバタを正しく操作できていないときに、もう 1 人の生徒がそれを修正する事例などが何度も観察され、タンジ

ブル学習環境の共同学習に対する有効性が確認できた。しかしそれ以上に、本システムが現象の観察を十分に支援できない場面や、誤った概念を提供してしまう場面などが多く観察された。本章では、Price (2008) による 3 つの観点から、これらの問題点を検討する。

### 1 位置に関する問題

本システムでは、ワークシートに解答するためのほとんどの情報（日の出、日の入り、そして太陽の正中時に関する、時刻、方位、および高度）は PC 画面上に表示されていたため、生徒達が PC スクリーンにばかり注目する傾向が見られた。

図 4 は、生徒たちはオーストラリアにおいて太陽が正中する方位を調べている様子である。P1 が地球儀を操作しており、P2 は PC スクリーンに表示された方位を確認していた（図 4a）。P2 が「北」と答えると、P1 は驚いて何度も本当に北であるかどうかを確認し、やがて P1 も PC 画面に近づいた（図 4b）。「北」という発話をさらに複数回繰り返したのち、P2 が「南半球だから？」と発言すると、P1 は「うーん、ま、とりあえず北？」と答え、理由を理解しないままその課題を終了したのである。



- |      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| [1]  | P1: 方角見て。動かすから。                      |
| [2]  | P2: うん。(a)                           |
| [3]  | P1: 北、北。                             |
| [4]  | P2: 北？                               |
| [5]  | P1: 北。                               |
| [6]  | P2: 完璧北？                             |
| [7]  | P1: 北。(b)                            |
| [8]  | P2: でも、                              |
| [9]  | P1: うん。                              |
| [10] | P2: 北だよな。<br><途中略(約 10 秒間「北」を繰り返す)。> |
| [11] | P2: 南半球だから？                          |
| [12] | P1: うーん、ま、とりあえず北？                    |
| [13] | P2: うん、北。                            |

図 4. 生徒達が太陽の正中を観察している様子と発話（発話中のアルファベットは、対応する場面を示す。）

なぜオーストラリアでは太陽が北に正中するのかということを理解するためには、タンジブルアバタが太陽（電球）を見る姿勢をとったときに、タンジブルアバタが地球に対してどの方位を向いているかということを観察しなければならない。しかし図4からわかるように、生徒たちは完全にPCスクリーンに注目してしまい、タンジブルアバタを観察しようとはしなかった。すなわち、地上視点にのみ注目してしまい、俯瞰視点を観察した結果と複合的に考えようとはしなかったのである。

## 2 動作に関する問題

図5においてP1はタンジブルアバタと地球儀を操作しながら、日の出を観察しようとしていた。P1が地球儀を操作している間、P1もP2もPC画面を見続けていた。タンジブルアバタが正午付近の位置に来たとき、P1は地球儀の回転を止め、タンジブルアバタの身体と頭の向きを操作し始めた。P1はタンジブルアバタを北に向けたが、首の角度を天頂付近に向けたことによって太陽がPC画面内に入った。P1はそれを見て「あ、太陽見つけた。」と発話し（図5a）、次に日の出を探そうと、地球儀を西方向に回転させつつ、タンジブルアバタの身体を西に向け、頭を水平方向付近まで下げた（図5b）。このときタンジブルアバタの頭の向きは太陽（電球）の方向とは全く異なっていたため、太陽はPC画面内から外れてしまった。これを見たP1は、「太陽、太陽、太陽、太陽、太陽消えた。」と発話した。



- [1] P1: あ、太陽見つけた。(a), (b)  
 [2] P1: 太陽、太陽、太陽。太陽、太陽消えた。

図5. 地球儀を回転させつつ、太陽をPCスクリーン内に表示し続けようとしている場面と発話（発話中のアルファベットは、対応する場面を示す。）

太陽をPC画面内に捉え続けるためには、P1はタンジブルアバタの頭の向きを太陽の方向に向け続けなければならなかった。しかしP1はそうした位置関係を考慮せずに適当にタンジブルアバタを操作したために、意図したとおりに太陽を観察し続けることができなかったのである。今回の実験では、他のグループにおいても類似の例がいくつか見られた。

こうした事例が発生するのは、タンジブル地球儀のインタフェースがあまりにも容易に操作できることに起因する可能性がある。地球儀やタンジブルアバタの操作によってただちにPC画面上の変化が見えるため、生徒達は地球儀やタンジブルアバタの意味を意識せず、あたかもゲームコントローラを適当に扱うかのように操作してしまっていたと思われる。学習支援におけるTUIの問題点の1つであると考えられる。

## 3 対応の問題

学習活動の最後に、実験者の1人が男子2名のグループに対して、日本とオーストラリアで太陽が正中する方位が異なる理由を質問したところ、P4が赤道付近を手振りで示しながら（図6）次のように答えた。「太陽が、赤道のどこ、ここら辺にあるから、ここより上だと南に見えるけど、これより下だと北に見える。」このときの生徒の手振りも併せてこの発言を解釈すると、タンジブルアバタが赤道よりも北側にあると、電球を見るためには下側（南）を見なければならず（図7a-ii）、赤道よりも南側にあると、上側（北）を見なければならない（図7a-iii）と考えていたようである。



- [1] P4: 太陽が、赤道のどこ、ここら辺にあるから、ここより上だと南に見えるけど、これより下だと北に見える。

図6. オーストラリアで太陽が北に正中する理由を説明する場面と発話



図 7. 記号的な表現によってもたらされる誤解

今回使用したタンジブル地球儀システムでは、太陽は、地球儀の近くに置かれた小さな電球で表現されていたため、生徒達の目の前に与えられた物理的な環境においては、この解釈は決して間違いではない。しかし、実際の太陽と地球の関係で考えた場合にはこの解答は明らかに間違いである。実際には太陽はこのモデルよりは遙かに遠い地点に位置しているため、太陽光は地球に対してほぼ平行に到達しているのである (図 7b)。

同様の解答は、男子生徒 3 名のグループでも見られた。中学生にとって、太陽光が平行であるということはほぼ常識であると考えられるにも関わらず、生徒達の思考は目の前にある物理的な実体から知覚される特性に支配されてしまったようである。

## VI デザイン原則の検討

本章では、DBR のサイクルにおける再デザインフェーズのために、前章の分析から得られた知見に基づいて、デザイン原則とシステムの改良案を検討する。ただし、本章に示すデザイン原則とシステム改良案の正当性を確認するためには、実際にシステムを改良し、実験を実施・分析する必要がある、今後の課題である。

### 1 位置の問題

天文学習を支援するタンジブル学習環境は、学習者が複数の視点 (本システムでは地上視点と、太陽と地球を俯瞰する視点) を統合しながら考えさせることが重要である。すなわち、複数の視点を交互に見比べながら考えるようにしむける必要がある。これに対して、タンジブル地球儀システムでは、過去の経験に基づいて各構成要素を注意深く配置したにもかかわらず、方位と見上げ角を PC スクリーンに表示したために、図 4 に示すように生徒の注意は PC スクリーンに大きく偏り、地球儀やタンジブルアバタにはあまり注意を向けなくなってしまった。このことから、「学習者が実体に基づいて考察しなくなる可能性があるため、安易に

PC ディスプレイに情報を表示してはいけない」というデザイン原則を提案する。タンジブル地球儀システムのように、実体とディスプレイが分離して設置されている例は、楠ら (2000) のセンシングボードや Morita ら (2012) のタンジブル太陽系教材など、比較的一般的な構成であるため、同様の構成を採用するタンジブル学習システムでは注意が必要である。

タンジブル地球儀システムにおいてこの問題を解決するためには、方位と見上げ角の表示をタンジブルアバタに隣接、あるいは埋め込むことによって、生徒の注意をタンジブルアバタにも向けさせる方法が考えられる。あるいは、補助的な情報提示によって、より明確に観察場所とその意味を意識させるために、拡張現実 (AR) 技術を利用する方法も考えられる。例えば、タブレット PC を地球儀にかざすと、タンジブルアバタの見上げ角と、それがどの部分の角度であるのかを示す補助情報を提示するようにして (図 8)、これを利用して課題に解答させるのである。



図 8. タブレット PC を用いた AR によって、補助情報を提示する例

### 2 動作の問題

図 5 に示したように、生徒達はタンジブル地球儀システムにおけるインタフェースを、それが何を意味しているのかをあまり考えずに、あたかもゲームコントローラのように無意識に使用していた。これは、他のタンジブル学習支援環境にも起こりえる問題であると考えられる。従来の研究においても、学習者が実体の操作に没頭することによって、学習内容について良く考えなくなってしまう問題が指摘されている

(Schneider et al., 2011)。そこで、「TUI は学習者の思考を阻害する可能性があるため、TUI に対する操作の意味を学習者に意識させるインタフェース設計や、教示をしなければならない」というデザイン原則を提

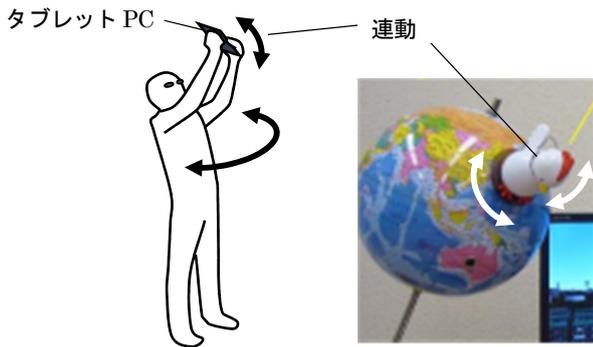


図9. タブレットPCの動作とタンジブルアバタの連動

案する。

タンジブル地球儀システムにこのデザイン原則を適用すると、地上視点を表示するデバイスとしてPCスクリーンではなく、タブレットPCを使用する方法が考えられる。タブレットPC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、シミュレータに表示する地上視点の方向が、タブレットPCの向きに応じて変更されるように制御することが考えられる(図9)。これによって、学習者はタブレットPCを手を持って上下に動かしたり、身体を左右に回転させたりすることで、地上視点の映像を操作することになる。さらに、タブレットPCの向きとタンジブルアバタの姿勢を連動させれば、学習者は自分自信の姿勢と、地球儀を俯瞰する視点におけるタンジブルアバタの姿勢を関連づけて考えられるようになると期待できる。

ただしこの機能は、従来のタンジブル地球儀システムの、タンジブルアバタの操作によって地上視点を操作する機能とは両立しない(タンジブルアバタの操作によって、人の姿勢を変化させることができないため)。従って、タブレットPC操作モードと、タンジブルアバタ操作モードのモード切り替えが必要となる。このことによって生徒の理解に混乱が生じる可能性があるため、課題の出し方や学習者への教示の仕方を慎重に計画する必要があると考えられる。しかし、学習者に両方の操作モードを体験させることによって、タンジブルアバタの姿勢変化と学習者自身の姿勢変化を、より深く関連づけられる可能性もある。

### 3 対応の問題

対応の問題は天文学習だけではなく、理科学習を支援しようとする多くのタンジブル学習環境に発生し得

る問題である。なぜならば、自然科学における現象を理解の容易なモデルで表現しようとする、記号的に表現せざるを得ない要素が必然的に生じるからである。しかし、本研究の結果、そのように実際の対象と齟齬のあるモデルを見せられると、学習者は安易にモデルに基づいて思考してしまう傾向があることがわかった。

理科教育では、従来から類似の問題が指摘されてきた。例えば電気回路の水流モデルは、電池や電圧降下の概念をわかりやすく説明することができるが、抵抗による発熱や、回路を外しても電流が流れ出ないことなどが説明できない(内ノ倉, 2010)。この問題に対応するために、イギリスの教科書の中には、モデルの限界を明示的に生徒に教えている例がある(内ノ倉, 2010)。これを参考にして、本論文では「モデルにおいて実際とは異なる要因については、その限界について十分に教示するとともに、それを補正するような情報を提供する」というデザイン原則を提案する。

たとえばタンジブル地球儀システムにおいては、ペン入力式のPCを利用したデジタルワークシートを導入することが考えられる。デジタルワークシート上の図を利用することによって、物理的なモデルでは再現が困難な概念を柔軟に表現することができる場合がある。

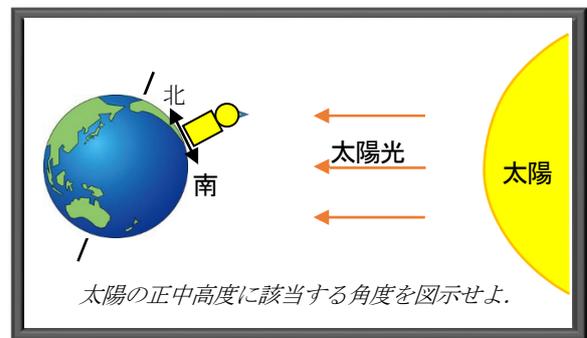


図10. デジタルワークシートの例

図10はタンジブル地球儀システムにデジタルワークシートを導入する例である。この図の地球とアバタは、タンジブル地球儀とタンジブルアバタの動きに連動するようにする。地球上の東西南北方向や、太陽の光の方向は補助的な情報として画面内に表示する。物理的な太陽(電球)と地球儀を利用した表現とは異なり、描画を利用したこの表現では、太陽光に関する概念を比較的正確に表現することができる。学習者はこのデジタルワークシートに直接解答を書き込みながら

学習を進められるようにすることによって、この2次元的な表現に対しても自然に注意を向けさせられると期待できる。

## VII おわりに

本研究では、天文教育に関する学習指導要領と、Price (2008) が提案した概念フレームワークに基づいて、タンジブル地球儀システムを分析するためのフレームワークを決定した。そして、中学校においてシステムを利用した実践をおこない、その分析に基づいて天文学習を支援するタンジブル学習支援環境のためのデザイン原則を提案した。

我々は、本論文で提案したデザイン原則は、タンジブル学習支援環境に広く適用できる可能性があると考えている。位置の問題は、デジタル情報の表示場所によって、学習者の観察領域を限定してしまう可能性を示している。動作の問題は、実体の操作の意味を学習者が意識しなくなってしまう可能性を示している。対応の問題は、自然科学を支援するタンジブル学習環境が本質的に内包する問題であり、学習者を誤った思考へと導いてしまう可能性を示している。

これらの問題を解決するために、本研究ではAR技術によって、補助的な情報を実体に重畳して表示させたり、新たな操作デバイスを導入したりすることを提案した。しかしながら、新たなデバイスの導入は学習者の混乱を招く可能性も指摘されており (Cuendet & Dillenbourg, 2013)、実践に基づいた注意深い分析が必要である。

今後は、本論文で検討したデザイン原則に基づいてシステムを改良し、より大規模な実験を実施し、その結果を分析することによって、タンジブル学習環境に関するより汎用的なデザイン原則と、学習理論を構築することを目指す。

## 引用文献

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* 8(1), 1-13, 1997.

Collins, A., Joseph, D., and Bielaczyc, K.: Design research: Theoretical and methodological issues, *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 15-42, 2004.

Cuendet, S. and Dillenbourg, P.: The Benefits and Limitations of Distributing a Tangible Interface in a Classroom, *Proc. of CSCL 2013*, 137-144, 2013.

Gokhale, A.: Collaborative learning enhances critical thinking, *Journal of Technology Education*, 7(1), 22-30, 1995.

国立天文台 : 4D2U Project Website, <http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/> (2014.3.3), 2005.

久保田善彦, 西川悟史, 増沢喜良, 山下淳, 葛岡英明: 中学校理科におけるタンジブル地球儀システムの利用, *日本科学教育学会年会論文集*, 34, 473-474, 2010.

楠房子, 杉本雅則, 橋爪宏達: 思考の外化を支援することによるグループ学習支援システム, *電子情報通信学会論文誌D-I, J83-D-I(6)*, 580-587, 2000.

Marshall, P.: Do tangible interfaces enhance learning?, *Proc. TEI 2007*, ACM Press, 163-170, 2007.

Moher, T., Hussain, S., Halter, T., and Kilb, D.: RoomQuake: Embedding dynamic phenomena within the physical space of an elementary school classroom, *Proc. CHI 2005*, 1655-1668, 2005.

文部科学省: 中学校学習指導要領解説理科編, [http://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/education/micro\\_detail/\\_icsFiles/afieldfile/2011/01/05/1234912\\_006.pdf](http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2011/01/05/1234912_006.pdf) (2014.3.3), 2011.

Morita, Y. and Setozaki, N.: Practical Evaluation of Tangible Learning System: Lunar Phase Class Case Study, *Proc. SITE 2012*, 3718-3722, 2012.

Price, S: A representation approach to conceptualizing tangible learning environments, *Proc. TEI 2008*, 151-157, 2008.

Shelton, B. E. and Hedley, N. R.: Using Augmented Reality for Teaching Earth-Sun Relationships to Undergraduate Geography Students, *Proc. ART02*, 8 pages, 2002.

Schneider, B., Jermann, P., Zufferey, G., and Dillenbourg, P.: Benefits of a Tangible Interface for Collaborative Learning and Interaction, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(3), 222-232, 2011.

Suzuki, H. and Kato, H.: Interaction-Level Support for Collaborative Learning: AlgoBlock-An Open Programming Language, *Proc. CSCL '95*, 349-355, 1995.

The Design-Based Research Collective (TDBRC): Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry, *Educational Researcher*, 32(1), 5–8, 2003.

内ノ倉真吾: アナロジーによる理科教授法の開発とその展開 : 構成主義的学習論の興隆以降に着目して, *理科教育学研究*, 50(3), 27–41, 2010.

Vosniadou, S., Skopeliti, I., and Ikospentaki, K.: Modes of knowing and ways of reasoning in elementary astronomy, *Cognitive Development*, 19(2), 203–222, 2004.

Yamashita, J. Kuzuoka, H., Fujimon, C., and Hirose, M.: Tangible avatar and tangible earth: a novel interface for astronomy education, *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2777–2782, 2007.

Young, T., Farnsworth, B., Grabe, C., and Guy, M.: 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, 4556–4567, 2012.

Zakaria, E: Promoting cooperative learning in science and mathematics education: A Malaysian perspective. *Colección Digital Eudoxus*, 3(1), 35–39, 2009.

Zuckerman, O., Arida, S., and Resnick, M.: Extending tangible interfaces for education: digital Montessori inspired manipulatives, *Proc. CHI 2005*, 859–868, 2005.

[問い合わせ先]

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1  
筑波大学システム情報系知能機能工学域  
葛岡 英明  
e-mail : kuzuoka@acm.org

